**Lecturas Física I**

**Índice:**

1. Física -------------------------------------------------------------------------------------------------- **3**
2. Sistema de unidades -------------------------------------------------------------------------------- **3**
3. Notación Científica --------------------------------------------------------------------------------- **8**
4. Cifras significativas --------------------------------------------------------------------------------- **8**
5. Incertidumbre ---------------------------------------------------------------------------------------- **10**
6. Vector ------------------------------------------------------------------------------------------------- **11**
7. Teorema de Pitágoras ------------------------------------------------------------------------------- **11**
8. Suma -------------------------------------------------------------------------------------------------- **12**
9. Multiplicación --------------------------------------------------------------------------------------- **13**
10. Resta -------------------------------------------------------------------------------------------------- **13**
11. División ---------------------------------------------------------------------------------------------- **13**
12. Potenciación ----------------------------------------------------------------------------------------- **14**
13. Raíz cuadrada ---------------------------------------------------------------------------------------- **15**
14. Producto Punto -------------------------------------------------------------------------------------- **15**
15. Producto Cruz ---------------------------------------------------------------------------------------- **16**
16. Desplazamiento -------------------------------------------------------------------------------------- **17**
17. Velocidad --------------------------------------------------------------------------------------------- **18**
18. Derivada ---------------------------------------------------------------------------------------------- **19**
19. Integral ------------------------------------------------------------------------------------------------ **20**
20. Aceleración ------------------------------------------------------------------------------------------- **21**
21. Caída Libre ------------------------------------------------------------------------------------------- **22**
22. Coordenadas Cartesianas --------------------------------------------------------------------------- **23**
23. Coordenadas Polares --------------------------------------------------------------------------------  **24**
24. Sección Cónica -------------------------------------------------------------------------------------- **26**
25. Movimiento Circular -------------------------------------------------------------------------------- **28**
26. Función Lineal --------------------------------------------------------------------------------------- **30**
27. Función Cuadrática ---------------------------------------------------------------------------------- **32**
28. Función Cubica -------------------------------------------------------------------------------------- **33**
29. Leyes de Newton ------------------------------------------------------------------------------------ **34**
30. Fuerza de Fricción ---------------------------------------------------------------------------------- **35**
31. Trabajo ------------------------------------------------------------------------------------------------ **35**
32. Energía Cinética ------------------------------------------------------------------------------------- **38**
33. Potencia ----------------------------------------------------------------------------------------------- **49**
34. Energía Potencial ------------------------------------------------------------------------------------ **40**
35. Cantidad de Movimiento ---------------------------------------------------------------------------- **43**
36. Impulso ------------------------------------------------------------------------------------------------ **45**
37. Centro de Gravedad ---------------------------------------------------------------------------------- **45**
38. Rotación ----------------------------------------------------------------------------------------------- **46**
39. Velocidad Angular ----------------------------------------------------------------------------------- **48**
40. Aceleración Angular --------------------------------------------------------------------------------- **48**
41. Momento de Inercia ---------------------------------------------------------------------------------- **49**
42. Dinámica de un cuerpo rígido ---------------------------------------------------------------------- **51**
43. Torque -------------------------------------------------------------------------------------------------- **54**
44. Cantidad de Movimiento Angular ------------------------------------------------------------------ **55**
45. Conservación de la Cantidad de Movimiento Angular ------------------------------------------ **57**
46. Giroscopio --------------------------------------------------------------------------------------------- **58**
47. Ley de la gravitación Universal -------------------------------------------------------------------- **59**
48. Peso ----------------------------------------------------------------------------------------------------- **63**
49. Leyes de Kepler --------------------------------------------------------------------------------------- **63**
50. Rotación Terrestre ------------------------------------------------------------------------------------ **64**
51. Oscilación Simple ------------------------------------------------------------------------------------ **66**
52. Péndulo Simple --------------------------------------------------------------------------------------- **71**
53. Densidad ----------------------------------------------------------------------------------------------- **71**
54. Presión ------------------------------------------------------------------------------------------------- **72**
55. Principio de Arquímedes ---------------------------------------------------------------------------- **73**
56. Tensión Superficial ----------------------------------------------------------------------------------- **74**
57. Ecuación de la Continuidad ------------------------------------------------------------------------- **74**
58. Ecuación de Bernoulli ------------------------------------------------------------------------------- **76**
59. Viscosidad --------------------------------------------------------------------------------------------- **76**
60. Turbulencia ------------------------------------------------------------------------------------------- **77**
61. Onda --------------------------------------------------------------------------------------------------- **77**
62. Onda Transversal y Longitudinal ------------------------------------------------------------------ **78**
63. Longitud de Onda ------------------------------------------------------------------------------------ **78**
64. Función Periódica ------------------------------------------------------------------------------------ **79**
65. Interferencia ------------------------------------------------------------------------------------------ **79**
66. Onda Estacionaria ------------------------------------------------------------------------------------ **80**
67. Sonido ------------------------------------------------------------------------------------------------- **81**
68. Decibelio ---------------------------------------------------------------------------------------------- **82**
69. Acústica ----------------------------------------------------------------------------------------------- **82**
70. Efecto Doppler --------------------------------------------------------------------------------------- **83**
71. Onda de Choque -------------------------------------------------------------------------------------- **84**
72. Temperatura ------------------------------------------------------------------------------------------- **85**
73. Expansión Térmica ----------------------------------------------------------------------------------- **86**
74. Calor ---------------------------------------------------------------------------------------------------- **88**
75. Transmisión de Calor -------------------------------------------------------------------------------- **92**
76. Ecuaciones de Estado -------------------------------------------------------------------------------- **93**
77. Capacidad Calorífica --------------------------------------------------------------------------------- **93**
78. Termodinámica --------------------------------------------------------------------------------------- **93**
79. Ciclo de Carnot ---------------------------------------------------------------------------------------- **94**
80. Carga Eléctrica ---------------------------------------------------------------------------------------- **95**
81. Conductor ---------------------------------------------------------------------------------------------- **96**
82. Dieléctrico --------------------------------------------------------------------------------------------- **97**
83. Ley de Coulomb -------------------------------------------------------------------------------------- **97**
84. Campo Eléctrico -------------------------------------------------------------------------------------- **99**
85. Líneas de Campo Eléctrico -------------------------------------------------------------------------- **100**
86. Dipolo Eléctrico -------------------------------------------------------------------------------------- **101**
87. Ley de Gauss ----------------------------------------------------------------------------------------- **101**
88. Potencial Eléctrico ------------------------------------------------------------------------------------ **102**
89. Capacidad Eléctrica ----------------------------------------------------------------------------------- **104**
90. Condensador Eléctrico ------------------------------------------------------------------------------- **105**
91. Corriente Eléctrica ------------------------------------------------------------------------------------ **106**
92. Resistividad -------------------------------------------------------------------------------------------- **108**
93. Resistencia Eléctrica ---------------------------------------------------------------------------------- **109**
94. Ley de Ohm -------------------------------------------------------------------------------------------- **109**
95. Fuerza Electromotriz --------------------------------------------------------------------------------- **110**
96. Regla de Kirchhoff ------------------------------------------------------------------------------------ **111**
97. Galvanómetro ------------------------------------------------------------------------------------------ **112**
98. Amperímetro ------------------------------------------------------------------------------------------- **113**
99. Voltímetro ---------------------------------------------------------------------------------------------- **113**
100. Óhmetro ------------------------------------------------------------------------------------------------ **114**
101. Potenciómetro ----------------------------------------------------------------------------------------- **114**
102. Circuito RC -------------------------------------------------------------------------------------------- **115**
103. Magnetismo -------------------------------------------------------------------------------------------- **115**
104. Campo Magnético ------------------------------------------------------------------------------------ **117**
105. Fuerza de Lorentz ------------------------------------------------------------------------------------- **118**
106. Flujo Magnético --------------------------------------------------------------------------------------- **120**
107. Efecto Hall --------------------------------------------------------------------------------------------- **120**
108. Ley de Ampere ---------------------------------------------------------------------------------------- **121**
109. Inducción Electromagnética ------------------------------------------------------------------------- **122**
110. Ley de Faraday ---------------------------------------------------------------------------------------- **124**
111. Ley de Lenz ------------------------------------------------------------------------------------------- **124**
112. Leyes de Maxwell ------------------------------------------------------------------------------------ **125**
113. Inductividad -------------------------------------------------------------------------------------------- **126**
114. Circuito LC -------------------------------------------------------------------------------------------- **127**
115. Transformador ----------------------------------------------------------------------------------------- **128**
116. Corriente Alterna -------------------------------------------------------------------------------------- **129**
117. Fasor ---------------------------------------------------------------------------------------------------- **129**
118. Especto Electromagnético ---------------------------------------------------------------------------- **131**
119. Velocidad de la Luz -----------------------------------------------------------------------------------  **132**
120. Luz ------------------------------------------------------------------------------------------------------- **133**

Lecturas Física II -------------------------------------------------------------------------------------------- **135**

1. **Física:**

（ぶつりがく、**physics**）は、のzである。にられるには、のなにらないながあるとえ、のとそのを、とそのにくによってすること（）、およびをよりなにしてすること（）をとする。、、などほかのにべとのがにい。

の ( physis) にそのがあり、"physics"というも、はについてのなのをしており、からまでをむいだった。の、のみをする"physics"としてからしたをつようになったのは19からである。

のなは、の、と、、と、、、の（）である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6>

1. **Sistema de unidades:**

（こくさいたんいけい、: Le Système International d'Unités、: The International System of Units、：SI）は、をとしたもなである。SIはからきているが、これはーがのによるというによる。

（SI）は、ーにづきーのなかでくされていたMKS（さのにートル（m）、のに（kg）、のに（s）をい、この3つののみわせでいろいろなのをしていたもの）をしたもので、1954の10(CGPM)でされた。

では、のほとんどのでにでき、くのですることがづけられている。しかしなどのでは、それまでしていたのをすることもめられている。

は、1885（18）にーに、1891（24）のでとすることになり、1951（26）のでのをきーのがけられた。1991には(JIS)がにとなり、JIS Z 8203（(SI)及びそのい）がされた。

なお、（SI）はーがしたものであるが、ーののとして「（）」「CGS」などがあり、これらをするがある。

**SI**

は7つのをみわせてのをう。

は (s)、さ (m)、 (kg)、 (A)、 (K)、 (mol)、 (cd) である。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  |
|  |  |
|  |  | s | 133のの2つの(F=4,M=0およびF=3,M=0)のにするのの9 192 631 770の |
| **さ** | [**メートル**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB) | m | 1の1/299 792 458のにがをむ |
|  | [**キログラム**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0) | kg | （90%、10%からなるで・さともに39mmの）の |
|  | [**アンペア**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%82%A2) | A | にく、にさいをつ2のをに1ーのでにおいたとき、のさ1ーにつき2107ーのをぼしあうのそれぞれにれるのきさ |
|  | [**ケルビン**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3) | K | ののの1/273.16。もじ |
|  | [**モル**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A2%E3%83%AB) | mol | 0.012kgの12にまれるとしいのをむの。  をうときは、 (entités élémentaires) がされなければならないが、それは、、、、そののまたはこののののであってよい |
|  | [**カンデラ**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%A9) | cd | 5401012のをし、のが1/683 W・sr1であるのそのにおける |

**SI**

はSIをのこと。

SIのにつけていることがほとんどであるが、MN（ー）やhPa（）のようにSIにしてもいられる。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| SI | | | | |
| **10n** |  |  | （） |  |
| 1024 | [ヨタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%82%BF) (yotta) | Y |  | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1021 | [ゼタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BC%E3%82%BF) (zetta) | Z |  | 1 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1018 | [エクサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%82%AF%E3%82%B5) (exa) | E |  | 1 000 000 000 000 000 000 |
| 1015 | [ペタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9A%E3%82%BF) (peta) | P |  | 1 000 000 000 000 000 |
| 1012 | [テラ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%83%A9) (tera) | T |  | [1 000 000 000 000](http://ja.wikipedia.org/wiki/1000000000000) |
| 109 | [ギガ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%82%AC) (giga) | G | 十 | 1 000 000 000 |
| 106 | [メガ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%82%AC) (mega) | M |  | [1 000 000](http://ja.wikipedia.org/wiki/1000000) |
| 103 | [キロ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AD) (kilo) | k | [千](http://ja.wikipedia.org/wiki/1000) | [1 000](http://ja.wikipedia.org/wiki/1000) |
| 102 | [ヘクト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%82%AF%E3%83%88) (hecto) | h | [百](http://ja.wikipedia.org/wiki/100) | [100](http://ja.wikipedia.org/wiki/100) |
| 101 | [デカ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%AB) (deca, deka) | da | [十](http://ja.wikipedia.org/wiki/10) | [10](http://ja.wikipedia.org/wiki/10) |
| 100 | *なし* | *なし* | [一](http://ja.wikipedia.org/wiki/1) | [1](http://ja.wikipedia.org/wiki/1) |
| 10−1 | [デシ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%B7) (deci) | d | の一 / | [0.1](http://ja.wikipedia.org/wiki/1/10) |
| 10−2 | [センチ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%83%81) (centi) | c | の一 / | 0.01 |
| 10−3 | [ミリ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%AA) (milli) | m | の一 / | 0.001 |
| 10−6 | [マイクロ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD) (micro) | µ | の一 / | 0.000 001 |
| 10−9 | [ナノ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%8E) (nano) | n | の一 / | 0.000 000 001 |
| 10−12 | [ピコ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%94%E3%82%B3) (pico) | p | の一 / | 0.000 000 000 001 |
| 10−15 | [フェムト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%A0%E3%83%88) (femto) | f | の一 / | 0.000 000 000 000 001 |
| 10−18 | [アト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%88) (atto) | a | の一 / | 0.000 000 000 000 000 001 |
| 10−21 | [ゼプト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BC%E3%83%97%E3%83%88) (zepto) | z | の一 / | 0.000 000 000 000 000 000 001 |
| 10−24 | [ヨクト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%82%AF%E3%83%88) (yocto) | y | の一 / | 0.000 000 000 000 000 000 000 001 |

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB>

1. **Notación Científica:**

（しすうひょうき）は、のの1つ。ににきな、またにさなをするにわれる。

のを、のでする。（のはにをつける）

m \times R^e

R は、m および e の（10なら R = 10）であり、m は、e はである。m を

（mantissa）、e を（exponent）とぶ。

コンピュータにおいては、とのに"e"あるいは"E"をむもある。（：1.234×105 = 1.234e5）

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%87%E6%95%B0%E8%A1%A8%E8%A8%98>

1. **Cifras significativas:**

n の（ゆうこうすうじ）でめるとは、でのである。

n のでめるというは、に n にめるというだけではなく、なるーのをしてりうでよりなである。

というのは、ーでのにめるであるが、2であるがである。

**の()**

0ではないにまれた0はである。えば、

* 60.8 は3である。
* 39008 は5である。

0ではないよりに0がある、その0はではない。えば、

* 0.093827 は5である。
* 0.0008 は1である。
* 0.012 は2である。

よりにある0はである。えば、

* 35.00 は4である。
* 8 000.000000 は10である。

がないのにある0については、であるともでないともけれ、あいまいである。えば、1 000 のは 1から4のどれとでもけれる。このように、(がない)のでいている0をとるかどうかは、そのによってまちまちである。

このあいまいさはのにをくことでできる。えば、"1 000." とせば、4であることをする。[1]

また、がであるかをするためには、をいることもできる。

* 1103 や 1e3 はが1であることがされる。
* 1.000103 は4であることがされる。

なお、とみなさないというのはにである。えば、'1300' や '0.005' にいられている0はとはみなさないが、そのをすためにはいぜんとしてなものである。すべて0の（えば '0.000'）はをたない。なぜなら、かさそのものがの0よりもきいからである。

**めの**

* 0ではないでもにあるものからをえめる。えば、1 000 では '1' から、0.02 では '2' からえ始める。
* n のをつ。りないは0でめる。
* なでめる。えば 0.039 を1にめる、は 0.04 となる。めのにあるには、いくつかなったがある。しくは、をせよ。

2のにめる、

* 12 300 は 12 000 となる。
* 0.00123 は 0.0012 となる。
* は 0.10 となる（にく0は2にめたことをしている）。
* 0.02084 は 0.021 となる。
* 0.0125 は、では 0.013、へのめでは 0.012 である（のでいられ、5をめる、めたのをにすることでりげ・りてのきをにし、がかからないようにしている）。

n のにめるのは、n のがずしもとはらないである。これは、にある0（よりにある0）についてするである。ののでは、12 300 をめれば 12 000 になるのだが、めたの 12 000 だけをれば、は1から5までのいずれにもけれるため、のをめたのかとなる。

めのをするはをいれば、あいまいさをらすことができる。えば、ので 1.2 104 とすれば、は2であるとされるのである。

めのは、えば、"20 000 to 2 s.f."（significantfigures の）のようにが2であるとにすることもである。さほどでないではあるが、のにをく（"20000" など）というもある。

とはいえ、いかなるにもなーは、かさとさをわけてすることである。えば、 20 000 1% というきをすれば、のーをせずともなとできる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%89%E5%8A%B9%E6%95%B0%E5%AD%97>

1. **Incertidumbre:**

かさ（ふたしかさ、: Uncertainty）とは、のをすためのである。

これまで、ののとして「 (error)」「 (accuracy)」などというがいられてきた。しかし、やによって、そのするところやいられがなっていたため、 (CIPM) のでののやのがわれることとなった。その、1993、 (ISO) など7つののによる「におけるかさの」 (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, : GUM) がされ、こので「かさ (uncertainty)」というがいられた。

GUMでは、「かさ」を「のにした、ににびけられ

るのばらつきをづけるー」としている。すなわち、「」が「の」からののずれをすものであるのにし、「かさ」は、からどののばらつきのに「の」があるかをすものである。そもそも「」をにするのはであるので（「の」をしようとすればずがじるため）、にすることでしようとしたのが「かさ」である。

かさは、なかさのを、の（A）、もしくはーのなによる、にするきさの（B）のどちらかでし、それらをすることでめるとしている。「なかさの」には、がりるりのあらゆるをれるがある。かさのは、のにするや、にするさにされることになる。

1. **Vector:**

ベクトル（ドイツ語: Vektor, 語: vector。ラテン語: vector 「、ぶもの」より）は、きさときをったである。、ーともいう。でされるをとぶ。

えば、や、力はである。やの（）としてにイメージされる。ベクトルというはによってーなどのとともにされた。スカラーはベクトルとはのをつ。

このでは、ーの、とくに 3のものについてい、に・されたについてする。でにりくとぶときは、3ーのことをす。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB>

1. **Teorema de Pitágoras:**

ピタゴラスの（ピタゴラスのていり、語: Pythagorean theorem）は、の3のさのをすである。の（さんへいほうのていり）、の（こうこげんのていり）ともばれる。

においてののさを c とし、そのののさを a, b とした

a ^ 2 + b ^ 2 = c ^ 2\,

なるがするというである[1]。

「がのがきめられたをていて、このをいついた」などつかのがられているものの、このはがしたわけではない。2などでもこのやについてられていた。なぜのをすようになり、がとえられたのか、しいことはよくかっていない。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%94%E3%82%BF%E3%82%B4%E3%83%A9%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86>

1. **Suma:**

（かほう、addition, summation）とは、をわせることをするあるいはで、の1つ。し（たしざん）、せ（よせざん）、（かさん）ともばれる。また、のを（わ、sum）という。は「＋」。

においてはとはもののをえわせることであり、それはのにしたがってさらにいのにするをめる。

とはいにのにあり、またえば、のにおいてはののとしてがえられるなど、とのはい。これはにおいてのとしてされる。

のをえること（）についてはのをされるとよいだろう。

ののみにしてそのをげるとのようなものがある。

* （）: n + m = m + n

のをすときは、をれえてしてもはわらない（ただし、のをすはをれえてはならない）。

: 1 + 3 + 9 = 1 + 9 + 3 = 13

* （）: (n + m) + l = n + (m + l) = n + m + l

のをすためには、どこからえていってもはじである。これらはにおいては "" とぶべきもののたすべきなとなされる。にも

* あるに 0 をえてもしない。

4 + 0 =4

* あると、がじでのなるとのは 0 である。

(-4) + (+4) = 0

などがにするとしてげられる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%A0%E6%B3%95>

1. **Multiplicación:**

における（じょうほう、multiplication）は、りしをとることによりされる、あるいはのである。け（かけざん）、（じょうざん）ともばれる。

はのとばれるもののつで、のとしてをもつ。のを（せき）とぶが、しばしばのでそのものをす。

は、のにしたがって、あるいはのにされる。また、においては、にとはらないにして、それを、などとする（がであるはしばしば、などとぶ）。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%97%E6%B3%95>

1. **Resta:**

（げんぽう、subtraction）は、からとしてをりる（く）ことによりののをめるで、のとばれるものの 1 つ。することのをしてき（ひきざん）、（げんさん、げんざん）などとも言う。しばしば、のは（さ、difference）とばれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%9B%E6%B3%95>

1. **División:**

において（じょほう、、りと も、division）とは、あるいはのにされる （・・・）のひとつである。とはいにといってよいにある。

は、ののそのからとの 2 にされる。

あるが「となる」の「つ」にされるかをえるとき、「となる」をめるのが、「つ」になるかをめるのがである。

においては、をつについて「をけること」としてをえることができる。にはがであるとはらないため、も 2 り考えられる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%99%A4%E6%B3%95>

1. **Potenciación:**

（べきじょう）、または（るいじょう）は、あるつのをりしけわせるというのこと、あるいはそれによってられるのことである。に（べき）ともいう。

「」のはもともと「う、うもの」というのである。のはとして「」をいた1。・にまれなかったことから1950、などではきまたは「」へのきえがめられた。としてのではもっぱら「」がいられ、「」や「」というはされたが、で「べき」「べき」というようなのとしてはったままになっている。

**のと**

x が x−1 をもつならば、 n にし

x−n = (x−1)n

とし、また x0 をにするとすることによって、x をとするのをのまですることができる。

に、 m にし、x の m すなわち m して x になるような y がただ

つあるならば、その y を x1/m とし、または n にし

xn/m = (x1/m)n

とめることによって、x をとするのをのまですることができる。 このとき、とばれるのがりつ。

* xr+s = xr × xs
* xr×s = (xr)s

ここで、r と s は、ができるのである。つまり、x がをもたないなら、はもつがをもたないなら、m をもつがをもたないならば m をとするの、も m ももつならば m をとするである。また、x と y が についてならば

* (x × y)r = xr × yr

ががきちんとされるような r にしてりつ。これもとばれることがある。

なお、えているが、をもつ・がなをもつならば、その + について、が n であるような

* (x + y)n

はにう。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%AA%E4%B9%97>

1. **Raíz cuadrada:**

（へいほうこん、: square root）とは、あるがえられた、してもとのとなるようなたなのことをいう。には、えられたをとしてつを考えるとき、そののさはの（の一つ）をえるということでのひとつのづけができる。また、さとのさ x がえられたとき、さ x のはとをいてすることができる。（にじょうこん）、（じじょうこん）とも言う。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E6%96%B9%E6%A0%B9>

1. **Producto Punto:**

あるいはにおいて（ドットせき、dot product）あるいは（てんじょうせき）とは、ので、（のった）ー空間 R3（あるいは Rn）においてにされるのことである。

3 ー空間 R3 の（からのをりいたもの） a, b にして、 a · b を

\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}|\,|\mathbf{b}|\cos \theta

とめるとこれはつのをめる。ただし はをとなしたときに a, b のすであり、|·| はのきさ（するのさ）である。これはすなわち、 b を a へしたもののきさと a の

きさとのである。これを R3 におけるあるいはという。

またで、を a = (ax, ay, az), b = (bx, by, bz) のようにした、

（第二）をいることで

\mathbf{a}\cdot\mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z

がりつことがされる。ゆえにこちらをとすることもある。

**ノルム**

のとのの（の）

 ||\mathbf{a}|| :=  \sqrt{\mathbf{a}\cdot\mathbf{a}}

をベクトルのノルムという。にベクトルを a = (ax, ay, az) としてやれば

 ||\mathbf{a}|| = \sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}

と書くことができる。これはベクトル a の "大きさ" である。

ドットとをえば、2 つのベクトル a = (ax, ay, az), b = (bx, by, bz) のなすは

\cos\theta = \frac{\langle\mathbf{a}, \mathbf{b}\rangle}{||a||\,||b||}

からめることがである。にベクトルのなす角をこのですれば、その角はベクトルをとなしたのそれらのすそのものとする。

したがってドットは（ノルムを通して）、のユークリッド空間におけるさ、にするをなくめるものである。つまり、R3 でユークリッドのを考えることと、ドットをめることとがであることがわかる。

ドットについて

1. **a · a ≥ 0,**
2. **a · a = 0** となることと a のがすべてであることとがである。
3. **a · b = b · a**,
4. の k, l にし、(ka1 + la2) · b = k(a1 · b) + l(a2 · b)

なるがたされる。ゆえにドットはのであり、ベクトルのノルムはノルムの一である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%83%E3%83%88%E7%A9%8D>

1. **Producto Cruz:**

ベクトルにおいて、クロス（クロスせき、cross product）、ベクトル（ベクトルせき、vector product）とは、2 つの3ベクトル a と b にしてされる a × b である。

これは、の3でのケースである。

ベクトル a, b のはのによる大きさときをつベクトルである。 a, b のなす角を θ とするとき、の大きさ は、|\mathbf a\times\mathbf b|

|\mathbf a\times\mathbf b| = |\mathbf a||\mathbf b|\sin\theta

でえられる。これからわかるように、の大きさは、つのが作るのである。また、そのきは、の、a, b をむで a をそののりに ( だけ) させて b にねるとき、右ねじのむきである。

すなわち，右手のをa、しをbとしたときにがのきをす。

なお、の、b をそののりに ( だけ) させて a にねるとき、

右ねじのむきである。すなわち、のをa、しをbとしたときにがのきをす。

で書くと、\mathbf a = (a_x, a_y, a_z), \mathbf b = (b_x, b_y, b_z), のとき、

\mathbf a\times\mathbf b = (a_y b_z - a_z b_y, a_z b_x - a_x b_z, a_x b_y - a_y b_x)

エディントンのイプシロンをいると、

(\mathbf a\times\mathbf b)_i=\epsilon_{ijk} a_j b_k

をうとのようにも書ける。


 \mathbf a\times\mathbf b =
 \begin{vmatrix}
 a_x & a_y & a_z\\
 b_x & b_y & b_z\\
 \mathbf e_x & \mathbf e_y & \mathbf e_z
 \end{vmatrix} = 
 \left(
 \begin{vmatrix}a_y & a_z \\ b_y & b_z\end{vmatrix},
 \begin{vmatrix}a_z & a_x \\ b_z & b_x\end{vmatrix},
 \begin{vmatrix}a_x & a_y \\ b_x & b_y\end{vmatrix}
 \right)
 

ここで、ex, ey, ez はそれぞれ x , y , z ののきのベクトル、ex = (1, 0, 0),

ey = (0, 1, 0), ez = (0, 0, 1) である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%82%B9%E7%A9%8D>

1. **Desplazamiento:**

（へんい、: displacement）とは、元のからのずれのこと。のは、

力学でののの「ずれ」であったり、（、いはやそれにした原子、分子など）での原子の「ずれ」（原子）であったりする。は、位の大きさにする x, d のようなや、という点にする

Δr というがある。としてのはでうことがく、とばれる。

の位をするにはをうもある。どこかにをめるということではもあまりわないが、なをあらわすときにはとそこからのでしたほうがになることもある。とはのでできる。

\mathbf{x}=\mathbf{r}-\mathbf{r_0}

ここで x は、rとr0 はとの()である。

えばばねにつないだのでは、のはばねののをとしてであらわすのがだ。このときのーは、のようななでせる。

U=\frac{1}{2}kx^2

ここで x は、k はばねで、ーのはの

とした。ばねがどんなをいていても、またがかかっているときでもこのはするがない。にかかるは（とエネルギーの）をかすだけだからだ。このようにではをむがといえる

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E4%BD%8D>

1. **Velocidad:**

（そくど、：velocity）は、たりのののである。

**とさ**

としての（ー、speed）は、のあたりにむのことをす。これは でめることができ、、などのがいられる。

物理学のでは、なでのをさ（speed）とんで（velocity）とする。はをすであり、あるがするときの、あたりのをす。すなわち、のではさときとをせたものをというのであり、さは「のきさ」をすーとみなされる。は“大きさ” と“向き”をもつのでであり、それをするためにとぶことがある。

として、が”でのにり、1 で 60 km した、のは「東向きに時速 60 km」となり、のさは「 60 km」となる。またえば、が 40 km を 2 でった、そののさは 20 km/h、または 20 km とされる。

**と**

にべると、たりの、すなわち の によってめられるは（あるいは）と

ばれる。

えばのについて、ある\,t_1におけるのを\,\vec{x}_1, \,t_2のときののを\,\vec{x}_2とすると、このにおけるの \bar{\vec{v}} は、

\bar{\vec{v}} = {{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}\over{t_2 -t_1}}

でされる。また、こののきさをのさとよぶ。

をするに、 \,t_2 -t_1をさくし\,0にづけていくとき、におけるとみなせるものができ、これを\,tにおける

(instant velocity) とぶ。

\,t、ののをそれぞれ\Delta t\, , \Delta x\,とすると、は、

\vec{v}  = 
  \lim_{\Delta t \to 0}{\Delta\vec{x} \over \Delta t}
  \equiv {d\vec{x} \over dt}


とされる。はにしのさを 0 とするをとったものである。つまりのとは、そののを\,tの\,x(\,t) とみなしたとき、それを\,tについてしたものである。

は、のことをしてにとぶことがい。またえば、の（すなわちの）としてをえることが

できる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6>

1. **Derivada:**

数学、とくににおける（びぶんほう、differentiation, derivation）は、空間

やそのにされる・をのでえ、そのないをべることによって、それらのをするである。とんで、におけるなのうちのつとなっている。においては、のをにしてをっており、えているよりものについてのはりれずにちてしまうため、あるのはとなるにしてをし、ややにはえているののとしてえられる。からなをるには、りせやといったのをきちんとえるがある。

y = f (x) のある x = x1 でのは、x1 のくでののをす。このがxyに書かれているならば、 は、 y = f (x) の x = x1 におけるのきになり、のをめることができる。のきは、 x = x1 をめるごとにまるでなだが、あるいのにおけるをすると、のをることができる。ののがりや、

そのではがもきい（）のなどは、というなからることができるのである。

なをめると、なへがるのである。えば、のーをにっていれば、をめることができる。はがしたをえてもかるなのであまりありがたみはないかもしれない。これがえば、にれるのなどであれば、でれたてののをるわけにはいかない。このようにのわかりにくいものは、のれるをしけることで、にれるおよそのをできる。

をいたはとばれ、やのいろいろなでれる。力学やのようなはもとより、でもののをでし、のにったり、のをする。ではのをからし、ではなどのにもわれてきた。

このようにはのとして、いでするである。

このを、の（など）がていたとするがにるが、とうをたなかったのが、ーやがしたとのにしていたとするにしては、などがをえて

いる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E5%88%86%E6%B3%95>

1. **Integral:**

、とくににおいて（せきぶんほう、: Integration）は、

そのであるとんでなであり、とはにおけるなつのをえている。

の a, b でされる x の f の (definite integral)

\int_a^b f(x)\,dx

は、にえば f のと x、および x = a と x = b でまれる xyののとしてされる。

「」(integral) というは、すなわち、してえられた f となるようなの F のをすこともあり、そのとんで

F = \int f(x)\,dx

のように書く。

のは17にーとがにした。ののにより、それまでくにしていたとはくけられることになる。のは、f が a, b のならば、f の F がであるとき、そのの f のは

\int_a^b f(x)\,dx = F(b) - F(a)

でえられるというものである。こうしてとがのなと

なり、およびにおいてながされた。のたちは、をのをつのとえたが、になのをえたのはーである。そのは、でまれたをいにしてのをするなにづくものであった。19にってから、よりされたのがれめ、がえるやのがされていく。はやのにしてされ、 a, b をやのをぐあるのできえるものになっている。にはではなくのをえることでられる。また、のはなにおいてなをじる。これらののはもとはのからじたものであり、くの（にの）のになをたした。

これらをめ、なのはにする。もしているは、ルベーグのした、ーとばれるなで

あろう。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86%E6%B3%95>

1. **Aceleración :**

（かそくど、：acceleration）は、たりのの。がだから、もにとなる。はとしてのでやができるのはやのとであるが、、にされることがい。はきをえ、はさをえる。

を v とすれば、 a はの t についてので

\boldsymbol{a} =
  \lim_{\Delta t \to 0}{\Delta\vec{v} \over \Delta t}
  \equiv \frac{d\boldsymbol{v}}{dt}

とされる。

を(r,θ)でした、・はそれぞれ

\boldsymbol{a_r}=\frac{d^2 r}{dt^2} - r\!\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2

\boldsymbol{a_\theta}=\frac{d}{rdt}\!\left(r^2\frac{d\theta}{dt}\right)

となる。が（）のときのvはをv0とすると

\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v_0} +\boldsymbol{a}t

でめられる。

に「（げんそくど）」とわれるのは、（と）ののである。また、をえる（がる）のは、とはなるへのをけるというである。

のには m/s2（ー）がいられるほか、のれのには (Gal) というがされる (100 Gal = 1 m/s2)。

にがかかることと、がわることとはである。（の2）

ちなみにのたりのはとよばれる

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6>

1. **Caída Libre:**

（じゆうらっか、：free fall）とは、のがしないでののことである。や、などののがこれにあたる。ながくにおいてでをしたののことをにとび、をもってするなどとすることがある。

**での（の）**

のにいにあるは、そのにくのをけるとえることがる。このようなのは、きにのgでするとえることができる。

きにzをとり、をするをz = 0とする。をzxで、v0でげげた、びは、しくはのをした、

vx = v0cos θ

vz = − gt + v0sin θ

x = v0tcos θ

z=-\frac{1}{2}gt^2+v_0\sin\theta\cdot t

となる。こののはとなる。

をでかにさせたのは、このなとえる。に、をのと（の）のとするもなされる。これらのにするは「の」とばれることがある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%94%B1%E8%90%BD%E4%B8%8B>

1. **Coordenadas Cartesianas:**

における（ちょっこうざひょうけい）とは、いにしているをすることによってさだまるのことである。のではそれぞれのにしてにまる2つののによってのがされる。にしてのでは3つののによってがえられる。

1637年にされた2においてののをした・のをって (Cartesian coordinate system) ともぶ。

**の**

まずにを1く。このを x とぶことにする。x にしてにをいたのてのは、じ x のをとるとめる。にこの x にして、からにもう1をく。これを y とぶことにする。y も x とに y にしてにをいたのてのは、じ y のをとるとめる。

のきにはがあるが、yののきはxののきからりにしたき（）にとられる。また、xはにのをのきにしてかれるのがであり、そのときyはにのをのきとすることになる。

のそれぞれについての (a, b) がにまり、そのをってx の a においてxとにわると、 そのをってy に b でにわるを1のみくことがる。このときこののは (a, b) であるという。xとyがわるはとよばれ、のは (0, 0) になる。

x とy とがともにのをとるからなるはとよばれる。また、x がでy がのをとるからなるは、x とy とがともにのをとるからなるは、x がでy がのをとるからなるはとよばれる。

**の**

3のはでいにする3の x、

y、zをめることによってめられる。のとにして、のそれぞれのにしそのからへののをすたちの (a, b, c) によってがえられる。3つののきはのきにとられるのがである。また、xとyをむ（xy）がで、zのきはxyにしきとなるようにがされることがい。

では3のがをしており、いのはxが1であり、いのはyが 1、いのはzが1である。いのは (1, 1, 1) になる。

よりに、dの E にし、その (e1, ed) にするはとよばれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E4%BA%A4%E5%BA%A7%E6%A8%99%E7%B3%BB>

1. **Coordenadas Polares:**

(きょくざひょうけい、Polar coordinates system) とは、n ー Rn にされ、1 の r び n1 の θ1,θn1 からなるのことである。S = (0,0,x3,xn) をくは、になにできるが、S にしては が 0 となってしまうから、なはである。それは、 S にける

ができないことからもらかである。

**いろいろなとその**

**(Circular Polar Coordinates)**

2 ー R2 にける。1 の r と 1 の によってなり、もなである。r 、ともいう。は (r,) = (0,) ち、xyでの (x,y) = (0,0) である。2 にもできることから、 C にもできる。この、をとんだりもする。その、ーのをして z = とす。でをしなければ、これはxyでをく

{x \choose y} = {r\cos\theta \choose r\sin\theta}, \quad
{r \choose \theta} = {\sqrt{x^2+y^2} \choose \theta_{x, y}}

ただし、θx, yは

{x \choose y} = \sqrt{x^2+y^2}{\cos\theta_{x, y} \choose \sin\theta_{x, y}}, \quad 0 \leq \theta_{x, y} < 2\pi

なる

**(Cylindrical Polar Coordinates)**

で (0,0) をく xy のてのをできるから、これに z をえれば、xyz 空間ができる。これをとう。 ( ともいう) で、,z をしなければ、これは xyz でをく。 また、のは z のてのである。


\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}r\cos\theta\\r\sin\theta\\z\end{pmatrix}, \quad
\begin{pmatrix}r\\\theta\\z\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\sqrt{x^2+y^2}\\\theta_{x, y}\\z\end{pmatrix}

ただし、θx, yは

{x \choose y} = \sqrt{x^2+y^2}{\cos\theta_{x, y} \choose \sin\theta_{x, y}}, \quad 0 \leq \theta_{x, y} < 2\pi

なる

**(Spherical Polar Coordinates)**

3 ー R3 における。1 の r と 2 の , によってなる（を）。において、をし、2 のをかせば、xyz 空間上でをく。とののはのでえられる。

\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}r\sin\theta\cos\varphi\\r\sin\theta\sin\varphi\\r\cos\theta\end{pmatrix},\ 
\begin{pmatrix}r\\\theta\\\varphi\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\sqrt{x^2+y^2+z^2}\\\theta_{x, y, z}\\\varphi_{x, y}\end{pmatrix}

ただし、θx, y, z と φx, y はそれぞれ

\cos\theta_{x,y,z}=\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \ (0 \leq \theta_{x, y, z} \leq \pi),

\cos\varphi_{x,y}=\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}},\ \sin\varphi_{x,y}=\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\ (0 \leq \varphi_{x, y} < 2\pi)

をたす。z のはこののであって、がまらない。

C:\Documents and Settings\Almacen\Escritorio\e49714eb7ccef34b04c6dd88051cca7a.png

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%B5%E5%BA%A7%E6%A8%99%E7%B3%BB>

1. **Sección Cónica:**

円錐曲線（えんすいきょくせん、conic curve, conic section; ）とは、をのでしたときのとしてえられるのである。

は、xy R2 でされ、のによってえることがる。



また、の2 P(x,y) にし、P(x,y) = 0 がになることから、はともばれる。

のは、にすることによって、ののいずれかにすることができる（はの）。

* (てのとわり、になで)



* （てのとわり、にでないで）



* （になで）



* （にでないで）



* （をてむで）



、て p0 , q0 である。ののをのという。ただし、はしているとえ、にまないもい。また、ととはのとしてはしばしばをけない。によっては、をにまないこともある。

**による**

なのしかたとして、 に、 l と、そのにまれないような F をる。 l で H をかすとき、そので PF:PH = e:1 (e 0) をたすような P のはをく。 この時、PF と PH の e をといい、 l を、 F をという。

ここで、 F をとする (r, θ) をたにとれば、 P のは



というによってすことができる。r は PF の長さ、θ は PF が x となすである。このは、e と l という2つのをじて、・・の3のをにしているといえる。

e は、かれるのをのようにするである。

* 0 < e < 1：
* e = 1：
* e > 1：

、l はまたはとばれるで、焦 F から l までのに e をけたものである。

なお、このでをした、はれない。これがにをまないことがあるになっているのだが、でをえるは、 e = 0 であるときをくとされる（はとなる）。あるいは、とをにしたでになるとえる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E9%8C%90%E6%9B%B2%E7%B7%9A>

1. **Movimiento Circular:**

（えんうんどう）とは、ののきとはなにくによってきこされるである。に（にのをき、きさがのみにする）がくことによりきこされる。

とくにはののであり、ニコラウス・コペルニクスやヨハネス・ ケプラーののとなった。はでもしばしばされる。たとえばひもにおもりをつけてりすとをく。

**中心力とは何か**

をひもにつけてさせると、物体にはにの中心を向く力がく。のきさはひものにするので、、すなわちとののによってにまり、によらない。このように、がにのにき、そのきさがからの r のであるに、そのをという。

でなく、する2つののにはたらくについても、がをぶをき、そのきさがののであるとき、やはりという。どうしのはこのである。

**の**

1i のようにが xy で O をとする r のをうとする。

のようにを θ とすれば、の x、y は、

… (1-i)

となる。(1i) をtですると、

… (1-ii)

がられる。  のことをという。 がなをという。

このを ω とすれば、 から θ = ωt + α（ｔ についてしている。α はいわゆるで、でいうとであり、このは）といえる。(1i)、(1ii) より、

 … (1-iii)

 … (1-iv)

となり、(1iv) からのさ v は x 、y それぞれのを vx, vy とすると、

… (1-v)

とすことができ、 であるので、(1v) より、 がられる。したがって、v はのようにされる。

… (1-vi)

(1v) をさらに t ですると、

… (1-vii)

a は、 とされるので、a と r にはのがりつ。

 … (1-viii) 。

**の**

にく F は、をm、をaとすると、ニュートンののにより、F = ma とけるので、(1viii) からわかるように、には（ r）のにってきさ

*F* = *m*ω2*r*… (1-viii)

のがく。

**の**

がをするのにするを T といい、をωとするとT は

… (1-ix)

とあらわされる。また、たりにするを(あるいは) f といい、f は

… (1-x) 。

(1ix) より、 (1x) は

… (1-xi)

とあらわされる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E9%81%8B%E5%8B%95>

1. **Función Lineal:**

における（いちじかんすう、linear function）は、にはの (first-degree polynomial function of one variable)、つまり 1 のがめる (polynomial function of degree one)



である。ここで、a, b はであり、は x にして ax + b をさせるであることをする。のでうことがいが、にはやそののあるいはをつでえることもある。のでえると、のはである。

は（linear function の）、 (affine function) ともいい、のはともく。のは、ベクトルにベクトルをさせるにしたものであるとることができる。これはともばれるが、というとそのなをすことがい。

なお、



もにとばれるがある1。

のがえられたのにおいて、はつの a, b と x をいて ax + b でされ、



なるをめる。はかけの x にするであるが、に「」であることをするためにしばしば「a 0」が（あるいはの）としてえられる。

f(x) = ax + b の



は xy R2 においてをくため、は「の」（あるいはに「」）としてもられ、ので（それとそのとをとくにすることなくって） y = ax + b などともいう。

ax + b をけるふたつのについて、a がするとするの「き」がになったりやかになったりするので、a はこののき (slope, gradient) とばれ、b はすると yとののにするがゆえに y (yintercept) とばれる。き a がのはがであるため（なしで）はがりになり、のは であるためがりになる。いずれのも、a のがきくなるほどきが「」になる。y b がするとするはをに する。

なお、と xのである xは ax + b の、つまり ax + b = 0 をたす x の −b/a である。

**におけるとの**

**き・**

のすの y = ax + b は、きと yをえることによってにされる「き・（）」(slopeintercept form) であり、でをすとしてはに「・き（）」(pointslope form) である

y − y0 = a(x − x0)

（ (x0, y0) をる、ただつのき a の）や「」(general form)

Ax + By + C = 0

がげられる（におけるの）。 はのあらゆるをすだけのをち、これには xに（yに）な x = c などもまれるが、このののきはまらないためきをにするではせないし、どころかでさえない。また、xになき 0 のは、にしているのであり、 ax + b のに a 0 をするならば、これもではせないことになる。

のきはるがかればにできるので、はそれがるがまればただひとつにまる。 f(x) = ax + b が (x1, y1), (x2, y2) をるとき、[y の x の はのりにらずで、きにしく



がりつ。このは (x1, y1) をる（あるいは (x2, y2) をる）のだから・きとわせてえれば、がられ、このは



と書くことができる。

**のすのとき**

y = ax + b が xののきとすが であるとすると、こののきはをいて

a = tan(α)

と書くことができる。こので、き a はのをめるをえている。さらにの y = cx + d が xののきとすが であるとすれば、このつののす := | − | は



からまる。とくに | − | が /2 であるとき、このは



の形に書けるから、がすのを「きのが − 1 にしい」とべることもできる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E6%AC%A1%E9%96%A2%E6%95%B0>

1. **Función Cuadrática:**

二次関数（にじかんすう）とは、次数が2のによってあらわされる関数のことである。

二次関数とは

f(x) = ax^2 + bx + c \quad (a \ne 0)

の形でされる関数のことである。係数 a, b, c がので、x がをとるとすると、そのは xyにおいてをく。

これはとのをいて、

のなす R から R への

f: R → R; x → ax2 + bx + c

を考えたとき、そのグラフ {(x, y) ∈ R2 | y = f(x)} は R2 内のをく。

と言っても同じことである。

ではとしてのにして、でよくられたを記す。

次数が2のによってされる

f(x) = ax^2 + bx + c \quad (a \ne 0)

のことをxをとするという。にb = c =0のときは、「にする」ともう。

f(x) = ax2 + bx + c

の形にされたを（いっぱんけい、general form）という。によってにできるもとばれ、に

f(x) = a(x−p)2 + q

の形の二次関数を（ひょうじゅんけい、standard form）といい

f(x) = a(x−s)(x−t)

の形の二次関数を（いんすうぶんかいけい、factored form）もしくはにという。

で b=0 のときはでもあり、で q=0 のときはでもある。で s=t のときはでもあり、さらに s=t=0 のときはでもある。

やをすればがられ、をすればがられる。また、をすれば、が られる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E6%AC%A1%E9%96%A2%E6%95%B0>

1. **Función Cubica:**

三次関数（さんじかんすう）はy=ax^3 + bx^2 + cx + d(a \ne 0)によってされる関数である。

三次関数はを1つ持つ。三次関数ののは\left(-\frac{b}{3a},\frac{2b^3 - 9abc + 27a^2d}{27a^2}\right)である。

b2 − 3ac≦0のとき、三次関数はとをたない。

b2 − 3ac > 0のとき、三次関数はとをつ。このときのxは\frac{- b + \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a}、のxは\frac{- b - \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a}となる。

またがとをつとき、はとのとなる。と「におけるととの」、と、と、と「におけるととの」、のxのはそれぞれしい。と、と、「におけるととの」と、「におけるととの」と、のyのはそれぞれしい。

判別式はD = 18abcd -4b^3d + b^2c^2 - 4ac^3 - 27a^2d^2 \,である。

D>0のとき、xとのを3つつ。

D=0のとき、xとのを2つ（が1つ、が1つ）つと、xとのを1つ（が1つ）つがある。

D<0のとき、xとのを1つつ。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E6%AC%A1%E9%96%A2%E6%95%B0>

1. **Leyes de Newton:**

ニュートン力学（ニュートンりきがく、英語：Newtonian mechanics）は、アイザック・ニュートンがしたのをし、のとのをにとしてするのである。1687にのでされた。

**『の（プリンキピア）**

ニュートンによる力学のは『の （ Principia） にされている。、といえばーであり、では（においていられているではなく）すべてによるがなされている。

やけのではーがをするをした”といったように、ーをことさらするようにされていることもあるが、らのなでは、たち（や、・ー、ーなど）によりすでにに・されてきたや、のらがていたを、ーがをいてくにまとめあげたがきい、とされている。

**の**

ニュートン力学では、はすなわちをったなのまりとしてわれる。はのをけ、の3にってする、とする（ ニュートンの3 ）。

**1（の）**

がわらなければ、はその()をする。（をえられないは（）をう）

**2（ーの）**

の（）のは、それにかかるのきさにし、のにする。

{d\over dt} (m\vec{v}) = \vec{F}.

**3（・の）**

つの　1,2 のにくにはのにするだけでなく、へののがある。これらのはきさがしく、がである。

はにあるがにはこれからのである**。**

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E5%8A%9B%E5%AD%A6>

1. **Fuerza de Fricción:**

（まさつ）とは、にしている（なくともがであるをうことがい）にくである。 このをうをーという。

はのがかかわるで、のの、の、の、のなど、させるのいであるため、、などのがしいである。

のでは、になをつがあれば、にしていてもがしている。これをという。たちののひらがをむことができるのはによるいのおかげである。

にしている、のーはわれ、にしたーはにわる。これをといい、したをとぶ。のーがのきをめるのはのであり、をのいでこするとがつくのはのである。

におけるのりいについては、を。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%91%A9%E6%93%A6>

1. **Trabajo:**

物理学（力学、熱力学）において仕事（しごと）とは、物体にえた力と、それによる物体ののの（スカラー積）によってされるである。とに

エネルギーののつで、 MKSでのは N·m もしくはJである。

仕事はを持つスカラーであり、仕事を通じて物体 A から物体 B にエネルギーがした時、物体 A が物体 B に「仕事をする」、または物体 B が物体 A から「仕事をされた」、とする。のはをきやすいが、物体 A が正の仕事をした場合、物体 A のエネルギーはり、にの仕事をした場合、物体 A のエネルギーはえる。

**力学での仕事の**

えば、 のげるーを考えると、投はをえながらをり、ーにをえている。つまり、ボールはからのをされて、ーのー (ー) はえる。

**でのの**

さらに をえると、をし、によってしされるが、フライホイールをさせるでをみしている。つまり、フライホイールはからの仕事をされて、フライホイールのエネルギー (びそこからがるのエネルギー) はえる。ので、ーからをりすなどともう

**とはばない**

にとはばないをあげる。

**1**

A があるをえてのもめ、しているとする。A がをえているでは、しているのーはわらないため、は A からをされていないがかる。には、A のはのとつりあうきのをするためにーをしているが、これはには ー にわる。

**2**

(ーー) をにえる。はをすとするが、をしているでをしないようにをすると、のによってする (ー をする) 。この、にはがかかっているが、されてもしていないためこれもとはばない。

**3**

また、のがけるーをえる。この時、のがくかず、ーはでするとしよう。このはのであり、ーがにしたはである。つまり、したのーはえず、ーのーは、われてになる。には、いているーがするまでのに、ーのーはーやをませるためのーにわる (ーでしたをージしてほしい) 。こののーのは、ーがにしたとはばない。

**4**

も、でなによりのエネルギー (

ー) がするが、にできるではないため、のにはまれない。

**がするの**

**えられるがでありのがののとしている**

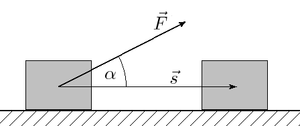
えられるとじにがするとき、 W はのきさをF、の()を s とすると

W = Fs

でし、Fがをしたという。このからわかるように、がしない(s = 0) にははである。また、のMKSでのが N·m であることもわかる。

としてあなたが m のをに h ちげる、W= m g h だけのをしたことになる。に、は m g h だけのをされて、のーはえる。

**えられるがであるがのとなる**



のように、えられるがであるがのがのきにして α[rad] だけいているとき、 W はのようにされる。

W = Fscos α

に、このにおいて = 0（すなわちcos = 1）となるのがの「えられるがでありのがのとしている」である。

また、を \vec{F}、のを \vec{s}としたはのようになになる。

W=\vec{F}\cdot\vec{s}

ここで、 ・ はのである。よってこのも W はーとなる。

**えられるがではない**

がでないは、のようにCのにおけるのとなる。

W=\int_C \vec{F}(\vec{s})\cdot d\vec{s}

ここで、\vec{F}(\vec{s})はの\vec{s}におけるをす。このも W はーとなる。

として、あなたが、をばすのをえる。のび s は 0 から x までし、そののあなたがにえるはのより F(s) = ks となる。（ここでをばすをとした。あなたがにえるはをばすにしていることにする。） そのときあなたがにしたは、

W=\int_0^x F(s) ds= \int_0^x k s  ds={1\over 2} k x^2

となる。に、は{1\over 2} k x^2 だけのをされて、のーはえる。

**がするの**

での Pの()がを Vi から Vf にさせるの W はのようにされる。

W=-\int_{V_i}^{V_f} P\,\mathrm{d}V

このも W はーとなる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)>

1. **Energía Cinética:**

ー（うんどうー、kinetic energy）は、しているがつー。しているのをさせるためになー（）である。

**のー**

ニュートン力学的（、）には、をするのー K は、 m とさ v の2にする。すなわち、

K = \frac{1}{2}mv^2

m のが、 で、が としたとすると、そのときににした

W は

W = \int_0^t \!\!dt\,\frac{d\mathbf{x}}{dt}\cdot\mathbf{F}

=\int_0^t \!\!dt\, \mathbf{v}\cdot m\frac{d\mathbf{v}}{dt}
\qquad\qquad\Bigl(\mathbf{F}=m\frac{d\mathbf{v}}{dt}\Bigr)

=\int_0^t \!\!dt\, \frac{d}{dt}\Bigl( \frac{1}{2}m|\mathbf{v}|^2 \Bigr)

=\frac{1}{2}m|\mathbf{v}_1|^2-\frac{1}{2}m|\mathbf{v}_0|^2

より、

K(v_1)=K(v_0)+W(v_0\to v_1)

つまり、のーのは、そのにえられたにしい。

また、このとき、が  \mathbf{x} \to \mathbf{x}+\Delta \mathbf{x}としたとすると、

\frac{1}{2}m\mathbf{v}_1^2 - \frac{1}{2}m\mathbf{v}_0^2
 = \mathbf{F}\cdot\Delta\mathbf{x}

これはーともばれる。

、のがなされる、によって、のりのにより、のをｖ、さをｈ、をｇ、とすることで、

2gh = v2

というがされていた。

**のー**

にをするのーは、ー I と の2にする。であるから

K = \frac{1}{2}I \omega^2

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC>

1. **Potencia:**

（しごとりつ）とは（こうりつ）やーともび、にどれだけのーがわれている（がわれている）かをすである。では、とばれることがい。

Pは、をW、をt としたとき、でされる。

 P = {dW \over {dt}} 

とのとして (Electric power) がある。は、のようにとのですことができる。

 P = I \times V 

このことからもわかるように、においてーーなどでがされると、それとのでのーがされる（がわれる）。これは、ーとーやーのはしないというーのによるものである。

とのとして (Radiant flux) もある。はがされたときのにおけるをさす。は Power spectrum density のとしてわれている。しかし、この Power はのことでありとないでもいられるが、からこうばれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B%E7%8E%87>

1. **Energía Potencial:**

ー（いちー）とは、が「ある」にあることでにたくわえられるーのこと。でのー（ー、：potential energy）とであり、にのでーのを「さ」や「のび」などとびけてするためにされるである。

ーがいほど、で、きそうとするをめているといえる。力とのやなについてはにし、このではなをげてする。

にくがーのとしてされることから、とそこからされたをるりにおいては、ーのとでののだけがなをもつ。したがって、なをーにあらかじめえておいてもわない。ただし、においては、とのから、ーはそのきさにしたをめてながらもうことがかっているから、にはーののにはがである。

**ーの**

例として、高さについての位置エネルギーを考える。ボールをある高さまで持ち上げ、ボールを持つ手をかにすとーはにちる。これはによってーにがはたらくからである。

このことをエネルギーので見てみる。ボールをある高さに持ち上げると、はーをることになる。ここで、たーのきさはーをちげるのにとしたーにしい。そしてボールをえるがれた、ーはーにしめる。エネルギーとは物体がいているときにつーである。ーがちていくにつれてーはし、わりにーがえていく。ー＋ー、つまりがつーのてのことをーという。

右の図はするのーのりわりをしている。h は物体のある高さ、t は時間、Epot はー、Ekin はー、Etot はーである。のにって、ー（い）はし、ー（い）はする。

ここでなのはーがしている、ーはにでわらないということである。物体がくときには、ーのはわるがそのはえたりったりしない。このをーのとぶ。これはー3からくことができる。

**重力による位置エネルギー**

において、が m のがから h だけいにあるとする。そのがつーは、を g とおくと

\left\lbrace f = -mg\right\rbrace \longrightarrow E = -\int_0^h (-mg) dh = mgh

でされる。

上式はによるーのでのである。 のーUは、のを M、を G とすると、のから r れた m のについて

\left\lbrace f(r) = -G\frac{Mm}{r^2}\right\rbrace \longrightarrow U(r) = -\int (-G\frac{Mm}{r^2})dr = -G\frac{Mm}{r} + C.

ただし、ーのは（Cとして）にめられるが、はがとなるをとする。

、から ｈ だけい m ののーをえる。のからまでのを R とすると、のからまでのは R+h となる。にすると、

U = -G\frac{Mm}{R+h}

となる。をにするために、でのーをくと、

E = -G\frac{Mm}{R+h} - (-G\frac{Mm}{R})

1をーし、2のはさいので0となしてすると

E = -G\frac{Mm}{R} + G\frac{Mm}{R^2}h - (-G\frac{Mm}{R})

となり、2の

G\frac{M}{R^2} = G\frac{Mm}{R^2}\frac{1}{m} = \frac{F}{m} = \frac{mg}{m}(Fはのにかかる)

はの g だからきえると、

\bold{}E = mgh

となる。

**による位置エネルギー**

ばねにがれているあるが、となる（は）から x だけずれたにあるとき、ばねを k として、がつー（ー)は

\left\lbrace f(x)=-k x\right\rbrace \longrightarrow E = -\int_{0}^{x}\left(-kx\right)dx =\frac{1}{2}kx^2

でされる（のも）。ここでをにするとはをめる。ただし、にはばねのびとのきさはにしているではないので、このはあくまで x がさいにのみりつ。

**電気的な位置エネルギー**

のりには V がする。に q' のをいたとき、

V=-\int_{\infty}^{r}\frac{q'}{4\pi\epsilon_0r^2}dr=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q'}{r}

となる。さらに原点から r だけれたに q ののをくと、そのはのようなーをつ。

U=qV=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{qq'}{r}

ここで\epsilon_0はのである。

この、になったがーとえれば、  \bold{}q をいて

\left\lbrace f(r)=\frac{q q'}{4\pi\epsilon_0r^2}\right\rbrace \longrightarrow U=-\int_{\infty}^{r}\frac{q q'}{4\pi\epsilon_0r^2}dr=\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q q'}{r}

とし、にV=\frac{U}{q} からがされる。

のそのものにをにめてをし、のによるのがでわるがかっている。はーがこのからじているとし、このをしたをという。ここからよりなのえがまれる。のもにをしている（）。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%BD%AE%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC>

1. **Cantidad de Movimiento:**

運動量（うんどうりょう、英語：momentum）とは、物体の運動のをあらわす物理的なで、には\,m と速度\vec{v}  のとしてされる。

\vec{p} = m \vec{v}

物理学では位置のであり、速度よりもな量として用いられる。ニュートンはこの量のとして物体の運動の仕組みをし、力はにしていないなど的にもなとしてわれている。日常生活においては、動いている物体の止めにくさとして体感される。つまり重くて速い（運動量が大きい）物体ほどさせるのに大きながになる。

外力がいていない、\,Nのを持つにおいて、次の事がりつ。

\sum_{i=1}^N\vec{p}_i=\mathrm{const.}

これは運動量のとばれる。運動量のは次のようにされる。 を\vec{r}_i、 を\,m_iとする\,i番目のの運動は、

m_i\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2}=\vec{F}_i+\sum_{i\neq j=1}^N\vec{F}_{ij}

ここで、内力にする和は、\,i=jの場合をく他のからのである。この場合の、すなわち\vec{r}_Gおよび全運動量\vec{P}をすると、

(M = m1 + m2 + ・・・ + mN)

\vec{r}_G\equiv \frac{m_1\vec{r}_1+m_2\vec{r}_2+\cdots +m_N\vec{r}_N}{m_1 + m_2 + \cdots m_N}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^Nm_i\vec{r}_i(M = m1 + m2 + ・・・ + mN)

\vec{P}=m_1\frac{d\vec{r}_1}{dt}+m_2\frac{d\vec{r}_2}{dt}+\cdots +m_N\frac{d\vec{r}_N}{dt}

{}=\vec{p}_1+\vec{p}_2+\cdots +\vec{p}_N

この重心の運動は、作用・反作用のより

M\frac{d^2\vec{r}_G}{dt^2}=\frac{d\vec{P}}{dt}=\sum_{i=1}^N\vec{F}_i

となる。外力がいていない、または外力のが\,0の系であれば、全運動量はし、重心は一定の速度で運動しているか、あるいはにある。

**モーメント**

運動量のモーメントを角運動量\vec{L}と呼ぶ。

\vec{L}\equiv \vec r\times \vec{p}

トルク\vec{N}と角運動量\vec{L}には次のような関係がある。

\frac{d\vec{L}}{dt}=\vec{N}

に、力が\vec r方向()と同じ向きにあるか、あるいは力が\,0に等しいときにはトルクは0に等しくなり、したがって角運動量は時間とともに変化しないことになる。

\vec{N}=0\leftrightarrow \vec{L}=const.

この関係式を角運動量の(角運動量の保存則)という。

* 中心力がいているとき角運動量は保存されている。
* 角運動量の保存則は速度一定とな関係がある。時間当たりにのくは次のように表される。

\frac{dS}{dt}\fallingdotseq \frac{1}{2m}L

したがって、のくを時間で分したが一定のとき、の角運動量も一定である。

\frac{dS}{dt}=h\leftrightarrow L=2mh

* 円運動している物体の角運動量は

\vec{L}=m\vec{r}\times (\vec{w}\times \vec{r})

ここで、\,\omegaは角速度である。角運動量の大きさは

\,L=mwr^2

の全角運動量\vec{L}の時間的変化のは、外力のモーメントのに等しくなり、内力のモーメントにはしない。

\frac{d\vec{L}}{dt}=\sum_{i}\vec{r}_i\times \vec{F}_i

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F>

1. **Impulso:**

（りきせき、：impulse）はのきさとがくをけあわせたもので、の体のをどれだけさせるかをあらわす。

mのをえると、tA, tB（はtA tBとむ）における、そのののとにくのは、

 \mathbf{I} = m \mathbf{v}_B - m \mathbf{v}_A = \int_{t_A}^{t_B} \mathbf{F} dt 

となる。ここで、Iをと言う。vAはtAでの質点の速度、vBはtBでの質点の速度、Fは質点にくである。したがって速度vに対する質点の運動量はmvとなる。 これは運動、

 m {d \mathbf{v} \over {dt} } = {d (m \mathbf{v}) \over {dt} } = \mathbf{F} 

において、を時間( t_A \to t_B )についてするとのがかれる。

は、やなどのをうにである。やでは、作用する力は大きいが、その力のく時間はい。これはtAとtBのがに短い場合のを意味し、これをに(Impulsive force)と言う。を打つときや、を使うのににこのの作用をしているのであるが、計算上も、小さな物でも大きな力を持つことが出来ることが分かる。このをしないなら、をすのにというを使わなくてはならなくなり、がになる。また、に高速度のをえることも出来ない。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E7%A9%8D>

1. **Centro de Gravedad:**

重心（じゅうしん、英語：center of gravity）とは、力学において、空間的広がりをもって質量がするようなにおいて、その質量に対して他の物体からく万有引力の合力の作用点。質量中心（しつりょうちゅうしん、Center of mass）ともいう（質量分布がであるときは Centroid とも）。

学的には、ある図形の、そのまわりでの一次モーメントが 0 であるような点のこと。数式を用いて書けば、図形 D に対して、点 g が D の重心であるとは次がりつことである：

\int_D (\boldsymbol{g - x})\,d\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0}.

また、図形 D （およびその）の x が f(x) を持つなら、その重心 g とは


\int_D (\boldsymbol{g - x})f(\boldsymbol{x})\,d\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0}


をたす点 g である（もちろん g が D 外の点であることもありる）。

が一定の場合、にって言うなら、のののをそののとして持つ点はそのの重心となる。として、三角形のそれぞれのとの中点を線分でんだときにできる交点は、その三角形の重心とする。 また物体のでり下げた場合にはり下げに重心が通るため、でるすことで重心位置をめることができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%BF%83>

1. **Rotación:**

回転（廻転、かいてん） とは、大きさを持たない点または大きさを持つ物体が、ある点を中心としてあるいは直線を軸として、あるいは別の物体のりを回る運動。この点を回転中心、 この直線を回転軸という。回転中心や回転軸が回転する物体の内部にある場合を特に自転というときもある。まさに運動しているを指す場合も、運動の始から終への変化やを指す場合もある。前者の意味を強調したい場合は回転運動ということもある。

転じて、などの・サービス業の客の出入りなどをこうする場合がある。

**物理的回転**

**点の回転**

物理的または数学的なでの回転とは、にらなくとも、回転中心や回転軸から回転する点へのが一定の運動、つまり円運動を指すことが多い。また、回転した点のが円の一部である(の曲線部)の場合を指すことも多い。これらの円やのを回転という。回転のである円弧の中心角、すなわち、回転中心から回転する点の始めにおける位置へ引いた直線と、終わりにおける位置へ引いた直線とのなす角を回転角という。時間当たりの回転角を、その回転運動の角速度という。回転と角速度が一定な回転運動を等速円運動という。にらなくとも、回転という言葉が等速円運動の意味に限定されていることも多い。

ひとつの平面内の等速円運動の回転の向きは2通りがであり、どちらかの向きの回転の角速度を正と定め他方を負と定めれば、な全ての回転(等速円運動)を正負の実数で定めた角速度、および正の実数をとる回転の長さ、および回転中心の位置で指定できる。

3次元空間内ではさらに回転 (等速円運動) のをむ平面を指定しなくてはならない。この平面を回転面または回転平面という。 3次元空間内の回転の角速度は、回転平面に垂直で平面内でした角速度の大きさにする大きさを持つベクトル量として表すことができる。このベクトルの向きは2通りがだが、通のでは、右ネジを回転方向に回した時にネジが進む方向を角速度ベクトルの向きとする。こうして3次元空間内でのな全ての回転 (等速円運動) は、3次元ベクトルとしてした角速度と回転と回転中心ので指定できる。

角速度や回転がするような回転運動は、的なの等速円運動のしたものとして表せる。これらの等速円運動の回転中心はそれぞれなるので、な点の回転のからの回転中心をすることはできない。糸にんだ小石の回転やの公転(一般には等速円運動ではない)のように中心と見なせる物体がする場合は、その中心物体の位置を回転の中心と見なすことが多い。

力学では物体の運動はその重心の運動でモデル化でき、物体の回転運動とは物体の重心の回転運動を指すことも多い。そのは円運動をのこと。

**物体の回転**

物理学で物体の回転をうときは、そのはしてう。つまり物体をとしてう。の運動は、その重心の運動と、重心を回転中心とした剛体の回転にすると取りいやすくなる。剛体が回転しているとき、剛体内の点は全て同じ角速度で回転しており、この角速度をこの剛体の回転の角速度と定義する。また、剛体内の各点の回転中心は1本の直線上にあり、この直線を剛体の回転の回転軸という。

剛体になんの力も働かなければ、その重心は運動を行い、重心を中心とした回転の角速度は変化しない。剛体の回転運動についてのさらなるは、オイラーの運動方式をのこと。

点や剛体の、始めのから一定の回転角だけ円運動した終わりのへのもに回転といい、数学的での回転はこの意味であることが多い。この意味の回転はのはしているので、円運動の向きとしては回りとなる、回転角θの回転と(θ-2π)の回転とはである。またに、nを正負の整数として回転角(θ+2nπ)の回転は全て同値である。

**数学的定義**

線型代数学において、回転とは、がされた実線型空間における線であって、その行列が直交行列かつ行列式が +1 であるものをいう。用上はユークリッド空間における回転がである。回転のをにするならば、回転中心とばれるから各点へのをえず、点同の相対的な、すなわちと向きをもえないであるということになる。回転中心を原点とするを考えると、これらのは同等である。、行列が直交行列であることが、2点間のを変えない、すなわち合同であることを意味し、行列式が +1 であることが、向きを変えないということを意味する。直交行列の行列式は +1 か -1 であるが、-1 であるものは向きを変えるのであり、そのような合同変換のとしてがげられる。

3次元ユークリッド空間における回転は、回転軸と呼ばれる固定直線からのおよび点の相対的な位を変えない変換と定義されることもある [1] 。しかし、ある一点からのを変えない変換はそのようなを持つことができるため、どちらで定義しても同じである。一般に、次元ユークリッド空間における回転は回転軸を持つ。

**回転運動**

回転の方向は、時計の方向をに時計回り (CW:Clockwise)、反時計回り (CCW:Counter Clockwise) あるいは、右回り、左回りなどとされる。 物理的な明は円運動を、分子運動については回転準位を。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E9%81%8B%E5%8B%95#.E7.89.A9.E7.90.86.E7.9A.84.E5.9B.9E.E8.BB.A2>

1. **Velocidad Angular:**

角速度(かくそくど) は、物体や質点の回転の速さを表す量であり、角度と時間の商で定義される。量記号\vec{\omega}は （ギリシャ文字の小文字のオメガ）。角速度は3次元空間ではベクトル量として定義でき、その大きさが角である。

\omega = |\vec{\omega}|

は通常ラジアン毎秒（rad/s）を用いる。

ベクトル量としての角速度の向きは右ねじの方向、つまり右ねじをその角速度が示す回転方向に回転させたときにそのねじが進む方向とする。 回転の中心からr\, の位置にある物体が速度v\, で運動しているとき、角速度\omega\,は次のように定義される。

\vec{\omega} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{r^2}

はベクトルのをあらわす。ベクトルの方向は、回転が上から見て時計回りなら上から下、反時計回りなら下から上の向き。

なお、2次元空間内での角速度は回転方向により正負のを持つスカラー量として定義できる。

角速度を1階時間微分した量は角速度とよばれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6>

1. **Aceleración Angular:**

角加速度 (かくかそくど、angular acceleration) は、角速度の変化を意味する。SIでは、ラジアン毎秒毎秒 (rad/s2) ので表され、数式中の記号はギリシア文字のαで表されることが多い。としては度毎秒毎秒 (deg/s2) が用いられることもある。

**数学的な**

角加速度は角速度とにベクトル量であり、その向きは右ねじの方向、大きさは角度の2階時間分または角速度の1階時間微分である。ち

\vec{\alpha} = \frac{d \vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2 \vec{\theta}}{dt^2}

または

\vec{\alpha} = \frac{\vec{a}_T}{r}

のいずれかでされる。ここで\vec{\omega}は角速度であり、\vec{a}_Tは加速度、\,rはである。

**運動方式**

回転運動では、ニュートンの運動の第2をしてトルクと角加速度の関係をすることができる。

\vec{\tau} = I \vec{\alpha}

ここでは物体に働く全トルクであり、\,Iは物体のモーメントである。

**定数の加速度**

トルク\vec{\tau}が定数である場合には、角加速度もまた定数となる。このな場合には、の方式はに定数係数の方式

\vec{\alpha} = \frac{\vec{\tau}}{I}

として書くことができる。

**非定数の加速度**

トルクが定数でない場合には、物体の角加速度は時間とともに変化する。方式は定数値のかわりに分方式となる。この分方式はの運動方式として知られ、物体の運動を完全にすることができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6>

1. **Momento de Inercia:**

**モーメント**（[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：moment of inertia）あるいは、**イナーシャ**とは、トルクの角加速度に対する定数である。

定義式：

 I = T \left/ \frac{d\omega}{dt} \right.

I：モーメント、T：加速トルク、ω：角速度、t：時間、 \frac{d\omega}{dt}：角加速度

いま、回転体のな**mi** が、回転のりの **ri** の位置で角加速度\frac{d\omega}{dt}を受ける場合の**fi** は、**ri**でのの速度vが **v＝riω**、ってそれを時間分した加速度が

\frac{dv}{dt} = r_i \frac{d\omega}{dt}

となり、

f_i=m_i r_i \frac{d\omega}{dt}

となる。トルクの定義により、これに**ri** を乗ずれば質点**mi**によるトルク**ti**を求めることが出来る。すなわち

t_i=m_i r_i^2 \frac{d\omega}{dt}

となる。回転体のての質点で発生するトルクのがトルク**T**だから、

T= \sum_i t_i
=\sum_i m_i r_i^2 \frac{d\omega}{dt}
\equiv I \frac{d\omega}{dt} = I {d^2\theta}{dt^2}

以上より加速トルク**T**の定数：イナーシャ**I**が物理定数として定義される  
トルク**T=**イナーシャ**I・**角加速度**\frac{d^2 \theta}{dt^2}**

T\left/\frac{d\omega}{dt}\right.\equiv I=\sum_i m_i r_i^2

一方mの全質量Mは、全質点の和、ΣiMiなので、イナーシャIをMでして、円板、などの何学形だけで決まる定数式を算出して表としておき、これに形状質量Mを乗じてイナーシャを算出することが多い。

一般に*N*個の[質点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9)からなる系の慣性モーメントは、

I = \sum_i m_i r_i^2

と定義される。*m*iはi番目の質点の質量、*r*iは中心からのである。

がであるときの慣性モーメントの定義は、

I = \int r^2 dm = \int \rho r^2 dV

となる。*r*は中心軸からの距離、*dm*は微小質量、*ρ*はである。

回転機器の古いで「**GD^2／4**」としているのは回転子の直径Dから、kgfなど常用単位でのイナーシャを求めているものである。

**イナーシャの算出例**

**中心が回転軸の円板**

円板半径**a**、半径**r**、**ρ**、全質量**M**とするとき、

\Delta M=2\pi r \rho \Delta r

だから

M=\int dM=\int_0^a 2\pi r \rho dr=\rho\pi[r^2]_0^a=\rho\pi a^2

\Delta I=2\pi r \rho r^2 \Delta r

だから

I=2\pi\rho\int_0^a r^3 dr=2\pi\rho[r^4 /4]_0^a=\frac{1}{2}\rho\pi a^4=\frac{1}{2}a^2 M

**リング円板**

上式からの分をいて、さらに質量もの分をいて算出すればいい。  
円板外径**a**、円板くりき内径**b**、半径**r**、**ρ**、全質量**M**とするとき、

I=\frac{1}{2}(a^2+b^2)M

となる。

イナーシャIりの回転運動式  
角速度\omega=\frac{d\theta}{dt} しθは角度  
等速回転運動 回転角\theta=\frac{d\theta}{dt}t\equiv\omega t=2\pi nt しnは毎秒回転数  
トルク()**T=rF** 回転軸と力点のr、力点でr方向に直角に加える力F

角運動量 L=I\omega=I\frac{d\theta}{dt}  
回転加速度運動 T=I\frac{d\omega}{dt}=I\frac{d^2\theta}{dt^2}  
回転エネルギー E=\frac{1}{2}I\omega^2  
時計のテンプの回転動 I \frac{d^2\theta}{dt^2}+k\theta=\Delta･････ (2階の動、kはトルク定義のバネ定数、2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}が 回転動となる）

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88>

1. **Dinámica de un Cuerpo Rígido:**

**体の力学**（[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：rigid body dynamics）とは、剛体の運動をう[力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E5%AD%A6)の一分野である。

**剛体**（ごうたい、rigid body）とは、[質点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9)系（質点の集まりとしての物体）のうちで質点の位置が変わらないもののことを言う。 言いえれば外部（内部）からの[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)に 対して変形しない物体のことである。これは理想的、なものであり、 する物体には完全な意味での剛体はしない。どんな物体でも力を加えられれば少なからず変形する。力学には、変形する具合によって物体をし、そ のカテゴリーの中でするの学問がある(→[体力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E4%BD%93%E5%8A%9B%E5%AD%A6))。たとえば、[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)や[体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B6%B2%E4%BD%93)は的自由に変形され、これを研究するのが[流体力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E4%BD%93%E5%8A%9B%E5%AD%A6)である。[固体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E4%BD%93)とか[結晶体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B5%90%E6%99%B6%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)とか呼ばれる物質には、[変形](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E6%80%A7%E5%A4%89%E5%BD%A2)を起こす[体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E6%80%A7%E4%BD%93)と[変形](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%A1%91%E6%80%A7%E5%A4%89%E5%BD%A2&action=edit&redlink=1)を起こす[塑性体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%A1%91%E6%80%A7%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)に大きくされる。これらとい、剛体はに理想化された物質であるが、強力な力を加えないり、の固体は剛体としてうことができる。 [こま](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8B%AC%E6%A5%BD)の運動などは剛体の力学で扱われるテーマの一つである。

剛体の[動き](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E5%AD%A6)は、剛体の代表点（重心や固定点）と、その点のまわりの回転でできる。

剛体の[動力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%A6)は、剛体の質量が[重心](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%BF%83)に集中したものとしたときの進運動に関する[ニュートンの運動方式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)と、重心のまわりの回転に関する[オイラーの運動方式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)でできる。

**進運動、回転運動**

剛体の[運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95)は[三次元空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E6%AC%A1%E5%85%83%E7%A9%BA%E9%96%93)では6[自由度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%94%B1%E5%BA%A6)であり、[重心](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%BF%83)等な代表点を決め、代表点の運動（）三次元とその代表点を中心とする回転運動（転向）三次元にしてう事が　　できる。

剛体はとして[分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86)形式を用いる事が多いが、ここでは、の[物体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E4%BD%93)が[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)でされているのとに、多数の質点のようなからるとしてする。

**進運動**

代表点の運動を剛体の**並進運動（進運動）**という。剛体の[質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E9%87%8F)を*M*、代表点の位置を\vec{s}、各部に働く[外力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%81%AE%E7%AC%AC3%E6%B3%95%E5%89%87)を\vec F_i、剛体に働く全外力を\vec{F}とすると、代表点についての[ニュートンの運動方式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)(**並進の運動方式**)は

 M \frac{d^2\vec s}{dt^2} = \vec{F} \,\,\,\,\, ( \vec{F} = \sum \vec F_i ) 

例を挙げると、投げられたの運動は、重心のが放物線をく(→[放物線#物理学的な出](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%94%BE%E7%89%A9%E7%B7%9A#.E7.89.A9.E7.90.86.E5.AD.A6.E7.9A.84.E3.81.AA.E5.B0.8E.E5.87.BA))。並進運動は重心といった代表点の運動なので記事[質点#質点系の力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9#.E8.B3.AA.E7.82.B9.E7.B3.BB.E3.81.AE.E5.8A.9B.E5.AD.A6)にしい。

[**回転運動**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E9%81%8B%E5%8B%95)

代表点を中心とした回転の[角運動量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)を\vec{L}、外力による[力のモーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E3%81%AE%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)のを\vec{N}とすると、剛体の回転運動の[オイラーの運動方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)(**回転の運動方程式**)は

 \frac{d\vec L}{dt} = \vec{N} \,\,\,\,\, ( \vec{N} = \sum(\vec{r}_i\times\vec{F}_i) ) 

例を挙げると、投げられた棒の運動は、重心の放物運動と、重心を中心にしての回転に分けられる。

剛体の運動は上の2つの運動方程式を満たす。[自転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E8%BB%A2)しながら[公転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E8%BB%A2)している場合等、並進運動が回転運動の場合もある。その場合は並進運動も回転運動用の式の方がしている。

剛体に働く力の合力が0で[力がつり合っている](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B#.E5.8A.9B.E3.81.AE.E9.87.A3.E3.82.8A.E5.90.88.E3.81.84)とき、並進と回転の2つの運動方程式のが0になり、剛体は等速回転しながら等速直線運動をしている。（それぞれをむ。）

下の表についてする。左半分は、並進運動と回転運動でわれる運動量についてしているが、同じにある物理量は相当すると考えるとりい。その例が表の右半分である。それぞれ、一方の関係式の記号に、する記号を代入するともう一方の関係式になることがる。

**剛体の運動エネルギー**

剛体の運動エネルギーは、並進運動と回転運動の、それぞれの運動エネルギー(並進運動エネルギーと回転運動エネルギー)の和である。

並進運動エネルギーは、 \frac{1}{2} M \left( \frac{d\vec s}{dt} \right) ^2 となる。

回転運動エネルギー*K*は各の運動エネルギーの和であるから、各粒子の質量を*mi*、代表点に対する速度を*vi*とすると、

 K = \frac{1}{2} \sum m_iv_i^2 = \frac{1}{2} \sum m_ir_i^2\omega^2 = \frac{1}{2} I \omega^2

である。このとき、*ω*は[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)、*I*は慣性モーメント（下記）である。

**剛体の慣性モーメント**

ここでは、剛体の並進運動をに上げ、重心を通る軸の周りの回転運動についてだけする。軸とz軸を重ね、軸にっての運動はないものと考える。この場合にになる物理量が**慣性モーメント**I(一般的な慣性モーメントについて→[慣性モーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88))である。慣性モーメントは、

I=\sum_{k} m_kr_k^2

が定義であり、剛体をする各粒子の、質量と軸からの距離の2乗の積であり、決して変形しない剛体にとって固有に定められた定数である。

一般に剛体では粒子がにしている(連続体)ので、慣性モーメントは次のような[積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86) として計算される。

I\longrightarrow \int_{V} r^2\, dm=\int_{V} r^2\rho (r)\, dV  
{}=\iiint_{V} r^2\rho (r)\, dx\,dy\,dz

ここで、積分のVは剛体の[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)を表す。

慣性モーメントは**慣性**とも呼ばれ、次のような重要性がある。

角運動量の大きさLと[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)ωは[比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B)するが、Iはこのときの[比例定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B#.E5.AE.9A.E7.BE.A9)である。また、[トルク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%AB%E3%82%AF) の大きさNは[角加速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6)\dot{\omega}と比例し、このときの定数もIである。

剛体の、質量が\mathrm{m_k}であるk番目の質点が軸から垂直方向に\mathrm{r_k}で外力によって質点が受ける運動量を\mathrm{p_k}とし、角速度ωをとすると、Lは

L=\sum_{k} r_kp_k=\sum_{k} r_km_kv_k=\sum_{k} m_kr_k^2\omega

したがって、

L=I\omega\cdots (1)

となる。

また、\tfrac{dL}{dt}=Nから、

N=I\frac{d\omega}{dt}

ところで、Iは、剛体の全質量をMとすると、

I=M\,k^2

と表すこともできる。このとき、kは**剛体の回転半径**という。この式の意味は、剛体の慣性モーメントは、考えている軸にkだけれた位置に全質量Mが集中している回転体として求めた量とみなすことができることである。

ここで慣性モーメント自体の力学的意義についてする。(1) から、トルクNを一定にしたとき、角加速度は慣性モーメントIに 反比例することがわかる。慣性モーメントを大きくしたとき、すなわち剛体の質量か回転半径を大きくしたとき、角加速度は小さくなる。すなわち回転の速度を 変えるのに時間がかることになり、これは例えば、その剛体が回転しにくいが、一度回り始めると止めにくいことを表す。慣性モーメントIとは、回転の慣性の大きさを表す量、すなわち回転の(あるいは回転の速度を変える)の目安を表している。ある回転の安定性、のとも言える。この理を利用して、安定した回転をつために、大きな[み車](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E3%81%BF%E8%BB%8A)が[発電機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E9%9B%BB%E6%A9%9F)やの[エンジン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%B3)に取り付けられている。

**慣性モーメントの計算法**

慣性モーメントは剛体の質量やにするが、ここでその計算方法をす。

**直交軸の定理**

直交軸の定理とは、*剛体がい平板の時、この平面での互いに直交する軸の周りの慣性モーメントの和は、2つの軸の交点で面に直交する軸の周りの慣性モーメントに等しくなるという*定理である。

ここで、平面内の２つの軸をx軸、y軸とすると、これらの軸の周りの慣性モーメントは次のようになる。ここでσは面密度であり、積分は剛体上の全平面をとる。

I_x=\int \rho y^2\, dx\,dy,I_y=\int \rho x^2\, dx\,dy\,\,\,\,\,(dm=\rho \,dx\,dy)

この和は、

I_x+I_y=\int \rho (x^2+y^2)\, dx\,dy=\int \rho r^2\, dx\,dy

となるが、rはz軸からの距離でありちょうどz軸の周りの慣性モーメントとなっている。

I_x+I_y\,=\,I_z

**平行軸の定理**

平行軸の定理あるいはスタイナーの定理とは、*質量がMの剛体の重心を通る任意の軸の周りの慣性モーメント*\mathrm{I}_\mathrm{G}*がであるとき、この軸と平行な軸の周りの慣性モーメント*\mathrm{I}*は、2軸間の距離を*\mathrm{h}*とすると、次のように表される*

I=I_G+M\,h^2

という定理である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%89%9B%E4%BD%93%E3%81%AE%E5%8A%9B%E5%AD%A6#.E5.B9.B3.E8.A1.8C.E8.BB.B8.E3.81.AE.E5.AE.9A.E7.90.86>

1. **Torque:**

トルク（[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：torque）は、ある固定された回転軸を中心にはたらく、[回転軸](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E8%BB%B8)のまわりの[力のモーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E3%81%AE%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)である。一般的には「ねじりの強さ」として表される。力矩、ねじりモーメントとも言う。

**概要**

トルクは、[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)と[距離](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)の[積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%97%E6%B3%95)（[外積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%82%B9%E7%A9%8D)）で表される量（[モーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)）である。力の単位はN（ニュートン）だが、トルクの単位はN・m（[ニュートンメートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)）である。トルクはおもに[工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%A5%E5%AD%A6)、とくに[エンジン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%B3)・[電動機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8B%95%E6%A9%9F)・[発電機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E9%9B%BB%E6%A9%9F)・[タービン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%83%93%E3%83%B3)などの[機械](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A9%9F%E6%A2%B0)・[機械工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A9%9F%E6%A2%B0%E5%B7%A5%E5%AD%A6)などで用いられることが 多い。

物体を[回転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2)させるために必要な力は、どこを押すかによって異なり、一般に回転軸（中心）からの距離に[反比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E6%AF%94%E4%BE%8B)する（[てこ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%A6%E3%81%93)参照）。一方、物体をある[角度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%BA%A6)だけ回転させるトルクは、力を作用させる点によらない量であり、一定である。

あるトルクは同じ軸のまわりの別の作用点に働くトルクで置き換えることができる。同じ軸を中心とするトルク同士を合成したり、またひとつのトルクを複数のトルクに分解することもできる。トルクを[平行](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E8%A1%8C)で同じ大きさをもち、反対向きの2つの力にわけたとき、その力をとくに[偶力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%81%B6%E5%8A%9B)とよぶ。

**定義**

[力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E5%AD%A6)では、トルクNは次のように定義される。

\boldsymbol{N}=\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}

ここでFは物体に加わる力、rは回転の軸からみた力の加わる点までの距離（ベクトル）を表す。トルクNは[ベクトル量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB%E9%87%8F)であり、Nの向きを進行方向とする右ねじ回りに物体を回転させる効果をもつ。Fが等しいとき、腕の長さrが長いほうが物体を回転させる効果 (N) が大きい。

トルクはFとrの[外積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%82%B9%E7%A9%8D)量であるため、同じく力と移動距離の積で表される[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB)の単位"Nm"に対しては、"N・m"と間に点を打って表記することによって区別する[[*要出典*](http://ja.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:%E3%80%8C%E8%A6%81%E5%87%BA%E5%85%B8%E3%80%8D%E3%82%92%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%81%95%E3%82%8C%E3%81%9F%E6%96%B9%E3%81%B8)]。なお、仕事の解説についても、仕事が力と移動距離の積であることを表すために"N・m"と表記されることがあるので注意が必要である。

物体の[慣性モーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)*I*、[角加速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6)α、トルクNの間には、ニュートンの[運動方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)とよく似た関係が成り立つ。

I\boldsymbol{\alpha}=\boldsymbol{N}

**回転運動と直線運動**

回転運動に関する量のあいだには、直線運動で成り立つ[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)に対応する類似の法則を見出すことができる。これは法則が似るように回転運動での量を定義したものだからである。トルクは「力」そのものではなく「力の[モーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)」であり、慣性モーメントは質量に距離の2乗をかけたものである。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%AB%E3%82%AF>

1. **Cantidad de Movimiento Angular:**

角運動量（かくうんどうりょう、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：angular momentum）とは、[**運動量**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)の[**モーメント**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)を表す[力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E5%AD%A6)のである。

位置 \vec{r}において、速度 \vec{v}で運動している質量 \,mの質点の、原点のまわりの角運動量 \vec{L}は、次式で定義される。

\vec{L} \equiv \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m \vec{v} = m \vec{r} \times \frac{d \vec{r}}{dt}

ここで、\,\timesは[外積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%82%B9%E7%A9%8D)を表す記号であり、\vec{p} = m \vec{v} は質点の[運動量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)である。方向は他のモーメント同様\vec{r}から\vec{p}に回転するとき、右ねじの進む方向である。外積であるので、角運動量の大きさ\,Lは次のように表される。

L=rp\,\sin \theta

ここで、\,\thetaは\vec{r}と\vec{p}のなす角をす。

角運動量の単位時間当たりの変化量 \tfrac{d\vec{L}}{dt}は[力のモーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E3%81%AE%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)\vec{N} \equiv \vec{r} \times \vec{F} に等しい。

\frac{d\vec{L}}{dt}=\frac{d(\vec{r}\times \vec{p})}{dt}=\frac{d\vec{r}}{dt}\times \vec{p}+\vec{r}\times \frac{d\vec{p}}{dt}=\vec{r}\times \vec{F}\equiv N

ここで次の関係を使った。

\frac{d\vec{r}}{dt}\times \vec{p}=\frac{d\vec{r}}{dt}\times (m\frac{d\vec{r}}{dt})=0
,\frac{d\vec{p}}{dt}=\vec{F}

このことから、力が動径方向(\vec{r}方向)にあるか、あるいは力が働いていないときは\vec{N}=0となり、したがって、このとき角運動量は時間とともに変化しなくなる。このことを角運動量保存の法則(角運動量の保存則)という。

保存則が成り立っている物体に加わっている力、すなわち動径方向(\vec{r}方向)と同じ向きにある力は、その大きさを\,f(r)とすると、次のように表すことができる。

\vec{F}=f(r)\vec{\hat{r}},\,\,\,\,\,\hat{r}\equiv \frac{\vec{r}}{r}

この力は中心力と呼ばれる。

間に働く万有引力は中心力であり、したがって、惑星の角運動量は保存される。保存則は、[ケプラーの第2法則「面積速度一定」](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)とな関わりがある。単位時間当たりに惑星のく面積は、次のように表され、

\frac{dS}{dt}\fallingdotseq \frac{1}{2}r\frac{ds}{dt}=\frac{1}{2}rv=\frac{1}{2m}L

したがって、かれる面積の時間による変化が一定ならば、角運動量も一定の値をとる。

\frac{dS}{dt}=h\Leftrightarrow L=2mh

[等速直線運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AD%89%E9%80%9F%E7%9B%B4%E7%B7%9A%E9%81%8B%E5%8B%95)においては[ベクトル量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB%E9%87%8F)である運動量 \vec{p}が時間によらず一定であるのに対し、[等速円運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AD%89%E9%80%9F%E5%86%86%E9%81%8B%E5%8B%95)においては、運動量の大きさは一定であるが、向きは時間により変化する。[外力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%81%AE%E7%AC%AC3%E6%B3%95%E5%89%87) \vec{F}が加わらないとき、力のモーメント \vec{N}は \,0であり、角運動量は等速直線運動でも等速円運動でも時間によらず一定のベクトル量となる。

**回転運動と角運動量**

[円運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E9%81%8B%E5%8B%95)している[質点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9)の速さ\vec{v}は次のように表される。

\vec{v}=\vec{r}\times \vec{\omega},\mid \vec{v}\mid =v=\mid \vec{\omega}\times \vec{r}\mid =\omega r

ここでωは[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)である。したがって、回転運動している質点の角運動量は

\vec{L}=\vec{r}\times \vec{p}=\vec{r}\times (m\vec{\omega }\times \vec{r})=m\vec{r}\times \vec{\omega }\times \vec{r}

最後の式の形は[ベクトル三重積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%82%B9%E7%A9%8D#.E3.81.8C.E9.81.BA.E8.B7.A1.E3.81.AE.E6.80.A7.E8.B3.AA)であり、よって、

\vec{L}=mr^2\vec{\omega}  
\,L=m\omega r^2

次に、多数の質点が混在する質点系の、力のモーメントと角運動量の関係をべる。質点系の角運動量の時間的変化率\tfrac{d\vec{L}}{dt}=\vec{N}は外力のモーメントに等しく、内力のモーメントにしない。これは次のようにされる。 \,i番目の質点の角運動量を\vec{l_i}とすると、その質点の力のモーメント\vec{N_i}は

\frac{d\vec{l_i}}{dt}=\vec{N_i}

また、\,i番目の質点に作用する力で表せば、

(1)\vec{N}_i=\vec{r}_i\times (\vec{F}_i+\sum_{j} \vec{F}_{ij})

となるが、内力の部分の力のモーメントについては、[運動の第3法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%81%AE%E7%AC%AC3%E6%B3%95%E5%89%87)\vec{F}_{ij}=-\vec{F}_{ji}により、

(2)\vec{r}_i\times \vec{F}_{ij}+\vec{r}_j\times \vec{F}_{ji}=(\vec{r}_i-\vec{r}_j)\times \vec{F}_{ij}

の関係が成り立つ。内力の向き\vec{F}_{ij}はちょうど\,i番目と\,j番目の質点間を結ぶベクトル(\vec{r}_i-\vec{r}_j)と同じ向きであることから、(2)は0となり、力のモーメント(1)の総和をとれば、質点系での内力のモーメントは

\sum_{i} \vec{r}_i\times \sum_{j} \vec{F}_{ij}=0\,\,\,\,\,(i\ne j)

となる。したがって、質点系での力のモーメントの総和\vec{N}は外力のモーメントでだけの和で与えられ、角運動量の総和を\vec{L}とすれば次式のようになる。

\vec{N}\equiv \sum_{i} \vec{N}_i=\sum_{i} \vec{r}_i\times \vec{F}_i=\sum_{i} \frac{d\vec{l}_i}{dt}=\frac{d\vec{L}}{dt},\,\,\,\,\,\sum_{i} \vec{l}_i\equiv \vec{L}

ゆえに、質点系の全角運動量\vec{L}の時間的変化のは、外力のモーメントの和に等しくなり、内力のモーメントにはしない。

**量子力学の角運動量**

[量子力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E5%AD%A6)では、角運動量は以下の交換関係をたす\hat{\mathbf{J}}として定義される。

[\hat{J_x},\hat{J_y}]=i\hat{J_z}

[\hat{J_y},\hat{J_z}]=i\hat{J_x}

[\hat{J_z},\hat{J_x}]=i\hat{J_y}

この角運動量のを調べると、\hat{\mathbf{J}}=\hat{\mathbf{r}}\times\hat{\mathbf{p}}のように位置と運動量で表すことができ\hbar \hat{\mathbf{J}}の固有値が整数のみにられる[**角運動量**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BB%8C%E9%81%93%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)と、\hbar \hat{\mathbf{J}}の固有値が整数に加えて半整数もされ、位置と運動量では表現することができない[**スピン角運動量**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)の２つにすることができる。しくはを参照。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F>

1. **Conservación de la Cantidad de Movimiento Angular:**

**角運動量保存の法則**（かくうんどうりょうほぞんのほうそく）は、[質点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9)に働くすべての[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)の[作用線](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%BD%9C%E7%94%A8%E7%B7%9A&action=edit&redlink=1)が、常にある一点で交わるときは、質点の[角運動量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)は常に一定であるという[保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)である。

例えば、[フィギュアスケート](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A3%E3%82%AE%E3%83%A5%E3%82%A2%E3%82%B9%E3%82%B1%E3%83%BC%E3%83%88)の選手が、前にき出したを体に引きつけることで高速スピンをしているのを見ることがある。 このとき腕の長さは短くなるが、かわりに回転が速くなるため角運動量は保存している。

回転する「[こま](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8B%AC%E6%A5%BD)」は、回転軸にそって、時計回りなら下向き、反時計回りなら上向きの角運動量を持っている。 [外力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E5%8A%9B)が働かなければ角運動量は保存される。外力が加わると「こま」はきをったまま大きく回転をはじめる（[歳差運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%B3%E5%B7%AE%E9%81%8B%E5%8B%95)）。 このときも「こま」の角運動量と歳差運動の角運動量を合成することで、角運動量保存の法則が成立する。

**角運動量保存の法則の**

角運動量 \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}の時間変化（[時間分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93%E5%BE%AE%E5%88%86)）は以下の式のようになる。

\frac{d \vec{L}}{dt} = \frac{d \vec{r}}{dt} \times \vec{p}+ \vec{r} \times \frac{d \vec{p}}{dt}(1)

ここで、\vec{r} は[質点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9)の[位置ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%BD%AE%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)、\vec{p}は[運動量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)、tは[時間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93)である。式(1) の右辺の第一項は、

\frac{d \vec{r}}{dt} \times \vec{p} = \vec{v} \times m \vec{v} = m \vec{v} \times \vec{v} = 0 (2)

すなわち、[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6) \vec{v}どうしの[外積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E7%A9%8D)なので0となる。よって、式(1)は次のようになる。

\frac{d \vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \frac{d \vec{p}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F}(3)

ここで、\vec{r} \times \vec{F} は、[外力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E5%8A%9B) \vec{F}による[力のモーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E3%81%AE%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)である。したがって、角運動量の時間変化は外力によるモーメントに等しい。これにより、以下のことが分かる。

もし外力がなければ、すなわち \vec{F} = 0ならば、当然 \vec{r} \times \vec{F} = 0であり、角運動量は保存される。

外力が[中心力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%BF%83%E5%8A%9B)のときは、力の向きが \vec{r}と平行になり、すなわち\vec{r} \times \vec{F} = 0 となって、角運動量は \vec{L} = \mbox{const.}（一定）となり、保存される。

よって、質点に外力がまったく働かないか、あるいは外力が中心力であるならば、その質点の角運動量は保存される（証明終わり）。

[ケプラーの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)の第二法則「面積速度一定の法則」は、「角運動量保存の法則」に他ならない。なぜなら、面積速度は

S=\frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{v}

と表すことができるが、これを 2m 倍すると角運動量 m\vec{r} \times \vec{v}に等しくなる。この法則は天体の間の引力が中心力であることをあらわしている。

、直観的にはであるが、プランク定数の単位が角運動量である事も、である。

**角運動量保存則と空間**

一般に[物理量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E9%87%8F)の[保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)はの住む[時空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E7%A9%BA)の[対](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%BE%E7%A7%B0%E6%80%A7)のれであり、角運動量保存則は[空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93)の[回転対称性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E5%AF%BE%E7%A7%B0%E6%80%A7)の現れである。空間については[運動量保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)から[並進対称性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%A6%E9%80%B2%E5%AF%BE%E7%A7%B0%E6%80%A7)を持つこととせて、自由なに対して対称であって、場所や方向によって物理法則が変わることはない。 ただし、[弱い相作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B1%E3%81%84%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)における[パリティ対称性のれ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%AA%E3%83%86%E3%82%A3%E5%AF%BE%E7%A7%B0%E6%80%A7%E3%81%AE%E7%A0%B4%E3%82%8C)から、空間が[対称性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8F%A1%E5%83%8F%E5%AF%BE%E7%A7%B0%E6%80%A7)を持たないこと、すなわち空間には本質的に[左右](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%A6%E5%8F%B3)の区別があることがっている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Giroscopio:**

ジャイロスコープ (gyroscope) とは、物体の[角度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%BA%A6)や[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)をする[計測器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%88%E6%B8%AC%E5%99%A8)。ジャイロとされることもある（ジャイロセンサと呼ばれることもある）。[船](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%88%B9)や[航空機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%88%AA%E7%A9%BA%E6%A9%9F)や[ロケット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88)の航法に使用される。最近では[カーナビゲーション](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%BC%E3%83%8A%E3%83%93%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3)システムや自動運転システム、[ロボット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88)、[デジタルカメラ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%B8%E3%82%BF%E3%83%AB%E3%82%AB%E3%83%A1%E3%83%A9)、無人察機などでも用いられている。ジャイロとはギリシャ語 gyros で、する日本語は「」である。

**歴史**

発明したのは1817年[ドイツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84%E5%B8%9D%E5%9B%BD)の[フォン・ボーネンベルガー](http://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Gottlieb_Friedrich_von_Bohnenberger)で、1831年にW. R. Johnsonが「ロタスコープ（rotascope）」と名付けた。1836年、[スコットランド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%B3%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%89)の数学者[エドワード・サング](http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Sang)が地球の自転の検出に使うことをした。その後、1852年にフランスの[レオン・フーコー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%BC%E3%82%B3%E3%83%BC)が 地球の自転をしようと実験したに呼んだ「ジャイロスコープ」の方が一般に広まったため、フーコーの発明品だとするもあるが、彼が発明したのはあ くまで「」である。地球の自転の検出の方はのでに終わった。ジャイロスコープが実用にったのは後の研究者によるもので、1865年 の実験器具カタログにが見られる。ジャイロスコープのメカニズムに加えて、ジャイロモーメントによって常に一定の方位を示すような仕組みのある[ジャイロコンパス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%82%A4%E3%83%AD%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%91%E3%82%B9)ができたのは1908年である。

**原理**

[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)を検出する方法は大きく2つにわけることができ、

力学的な慣性を利用する方法として、

* 回転[慣性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7)と[プリセッション](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%BB%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3)（回転型）
* [コリオリの力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%AA%E3%82%AA%E3%83%AA%E3%81%AE%E5%8A%9B)（振動型、ガス型）

光学的なを利用する方法として

* [サニャック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B5%E3%83%8B%E3%83%A3%E3%83%83%E3%82%AF%E5%8A%B9%E6%9E%9C)（光学式）

がある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%82%A4%E3%83%AD%E3%82%B9%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%83%97>

1. **Ley de la Gravitación Universal:**

**万有引力**（ばんゆういんりょく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): universal gravitation）もしくは**万有引力の法則**（ばんゆういんりょくのほうそく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): law of universal gravitation）とは、「地上において質点（物体）が地球に引きせられるだけではなく、この宇宙においてはどこでも全ての質点（物体）は互いに gravitation（=引き寄せる作用、[引力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%95%E5%8A%9B)、[重力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B)）をぼしあっている」とする考え方、[概念](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A6%82%E5%BF%B5)、[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)のことである。

**歴史**

前史

この万有引力という見方がどのようなものであるか、その正しい位置づけ・をするには、、この概念が生み出される以前に人々がこの世界をどのようにとらえていたのか、その考え方、世界の見え方（世界観）にりって理解し、そこからどのように変えていったのか、そののを理解する必要がある。

**アリストテレスの考え方**

石を手からはなせば自然に地面へと落ちる。古代ギリシャの哲学者[アリストテレス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%86%E3%83%AC%E3%82%B9)は、その原因は、石を構成する土元素（[四元素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9B%E5%85%83%E7%B4%A0)のうちのひとつ）が、本来の位置である地へ戻ろうとする性質にあると考えた [[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。土元素が多いものが重い、と考え、それが多いものほど速く落ちる、と考えた [[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

中世の考え方

中世ヨーロッパではアリストテレスの考え方が広く知られていたので、人々はそうした見方で世界を見ていた。以下のような考え方である。

我々人間は、それぞれの家に住んでいる。[人間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E9%96%93)は何かの理由で家から離れることがあっても、結局はその家に帰ろうとする。動物も同じだ。[地リス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%83%BC%E3%83%A2%E3%83%83%E3%83%88)は地面に巣穴を持っている。何かの理由があると、たとえば危険を感じると、穴から一時的に離れることはあるが、危険がさればやはりその巣穴に戻ろうとする。鳥もそうだ。[鳥](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%B3%A5)も何かの理由、例えば食べ物を探すために一時的に巣から飛び立つことがあるが、結局はその巣へ帰ってくる。[命](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%9F%E5%91%BD)あるものは全て、それぞれの性質に応じて本来の位置というものをもっていて、一時的にそこから離れることはあっても、結局はそこへ帰ろうとするものだ[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。

生き物がそれぞれ本来の位置というのを持っているように、物（無生物）も、それぞれの性質に応じて本来の位置を持っている。たとえば[小石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%B3)はその本来の位置を地に持っている。[焔](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%82%8E)はその本来の位置を天上に持っている[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。

例えば、小石を空中に投げれば、小石は本来の位置から離されることになり、小石は一旦は抵抗を示しながら上に上がるが、結局はできるだけすみやかに、その本来の位置である地に戻ってこようとする[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。

だが、無生物でも、その本来の位置を持たないと思われる存在がある。天に見える[天体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E4%BD%93)である。天体は永久に同じ運動を繰り返すばかりで、その本来の位置をもっていないように見える[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。そこで中世の人々は、地上の存在と天の存在は本質的に異なっていると考え、地上の存在はただの存在であり、それに対して天の世界に属する存在、永遠に運動を繰り返す天体は、いわば[霊](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9C%8A)的な存在である、と考えた[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。中世の人々は、天の世界は地上とは全く別の法則が働いている別世界なのだ、と考えていたのである。また、天の世界の、地上とは異なった性質を説明するために、地上は四元素でできているのに対して、天体は[第五元素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AC%AC%E4%BA%94%E5%85%83%E7%B4%A0)でできている、とも考えていた。

地上の範囲での、従来の自然学への疑念と改良

さて、アリストテレスの考え、「土元素が多いものが重い、それが多いものほど速く落ちる」については、[パドヴァ大学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%89%E3%83%B4%E3%82%A1%E5%A4%A7%E5%AD%A6)の[ベネデッティ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%83%8D%E3%83%87%E3%83%83%E3%83%86%E3%82%A3)（[Giambattista Benedetti](http://en.wikipedia.org/wiki/Giambattista_Benedetti)、1530-1590）が異論を唱えた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。またオランダの[ステヴィン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%B4%E3%82%A3%E3%83%B3)（[Simon Stevin](http://en.wikipedia.org/wiki/Simon_Stevin)、1548-1620）は、重さが10倍異なる二つの鉛玉を9メートルほど落下させ、ほとんど同時に落ちることを確かめて、このアリストテレスの理論に異議を唱えた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

[自然学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E5%AD%A6%E8%80%85)[ガリレオ・ガリレイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%A4)（1564-1642）も、上記の中世の考え方（の一部）にを投げかけた[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-yano-0)。（ところで、先行する14世紀の[自然学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E5%AD%A6%E8%80%85)[ビュリダン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%A5%E3%83%AA%E3%83%80%E3%83%B3)は[インペタス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%82%BF%E3%82%B9%E7%90%86%E8%AB%96)（いきおい理論）をし、その理論では、物体を投げると手からインペタスが物体の内部にることで飛び続け、空気や重さなどの抵抗により内部要因のインペタスが減り、落下にともなってインペタスが増加し、ますます速く落ちるようになる、と説明した。）ガリレイは、当初、このインペタス理論を採用していた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)が、やがてガリレイは物体の運動をモメント（重さ以外の、距離や速度などをひとまとめに呼ぶ、ガリレオによる概念）という考え方で理解しはじめ[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)、（内部要因の変化で説明する）インペタス理論は採らなくなった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。では落下速度はどのような理屈で増加するのか？　落下距離に比例するか？　落下時間に比例するか？　という点で、（経緯が詳しくは分かってはいないらしいが）1600年ごろガリレイは悩み悪戦苦闘したらしい[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)が、1604年には「落下速度は時間に比例する」という[仮説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%AE%E8%AA%AC)にたどり着いた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)、という。こうしてガリレイは[動力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%A6)に貢献した[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。ガリレイは斜面で球をころがす実験を多数行い、水平面では等速になることから、「加速・減速の外的原因が取り去られている限り、いったん運動体に与えられたどんな速度も不変に保たれる」という考え方をするようになった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。これは現代で言う慣性の法則に近いものではあるが、ただガリレイは、それは地上の物体にだけ通用する法則であって、天体には通用しないと考えていた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。ガリレイも古代ギリシャ以来の考え方をなぞり、天体は天体で別の性質を持っている、円運動をする性質を持っているのだ、と考えていたのである[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

**ニュートン、フック、ハリーらの活動**

ニュートンの発想 ～ガリレオ動力学の天体への適用～ [

一般には、[アイザック・ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)（1642-1727）が[1665年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1665%E5%B9%B4)に、地上の引力が月などに対しても同様に働いている可能性があることに気付いた、とされている。

[スタックレー](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%AC%E3%83%BC&action=edit&redlink=1)の著書『回想録』には、スタックレーが、ニュートンが死去する前年の4月15日にロンドン西方の彼の自宅を訪問した時、昼食をともにしたあと庭に出て数本のりんごの木陰でお茶を飲んでいたところ、話の合間にニュートンが「昔、万有引力の考えが心に浮かんだ時とそっくりだ。[瞑想](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9E%91%E6%83%B3)にふけっていると、たまたま[りんご](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%8A%E3%82%93%E3%81%94)が落ちて、はっと思いついたのだ」と語った、と書いてあるという[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。（ただし、りんごの逸話はしばしば[伝説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E8%AA%AC)ともされることもあり、内容の真偽のほどは確かではない。）

同時期の、フックによる引力に関する活動

[ロバート・フック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF)は1665年の『[顕微鏡図譜](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%A1%95%E5%BE%AE%E9%8F%A1%E5%9B%B3%E8%AD%9C)』で引力の法則を論じた。フックは1666年に王立協会において "On gravity"（引力について）と題して講演をし、移動する物体は何らかの力を受けない限りそのまま直進すること（[慣性の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)）および引力は距離が近いほど強くなる、という法則を追加した、とされる。またフックは、1666年に王立協会と交わした書簡において、世界のしくみについて次の3点を述べたと、ダガルド・スチュワート（[Dugald Stewart](http://en.wikipedia.org/wiki/Dugald_Stewart)）は自著 *Elements of the Philosophy of the Human Mind*において指摘している[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-2)。

全ての天体は引力(gravity）によってその各部分を中心に引きつけているだけでなく、[天体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E4%BD%93)間で相互に引き付けあって運動する。

外部から力が継続的に加わらない限り、天体は単純に直進し続ける。しかし、引力によって天体は[円軌道](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E8%BB%8C%E9%81%93)、[楕円軌道](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%95%E5%86%86%E8%BB%8C%E9%81%93)などの曲線を描く。

この引力は天体同士が近いほど強くなる。距離と引力の強さの関係がどうなっているか、今のところ私にも発見できていない。

1679年のこと、[アイザック・ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)（1642-1727）のもとに、[王立学会](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8E%8B%E7%AB%8B%E5%AD%A6%E4%BC%9A)の書記[ロバート・フック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF)（1635-1703）から、1679年11月24日づけの手紙が届いた。「惑星の運動に関する私の仮説について、あなたの意見を学会機関紙に投稿してほしい」というものだった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。ニュートンは当時、[光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6)の研究に忙しくて、フックがその5年前に[惑星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%83%91%E6%98%9F)の運動を説明するための仮説を学会に提出していたことも知らなかった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)という。当時、惑星の運動については、[ケプラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%83%8F%E3%83%8D%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC)が[観測値によって算出した3つの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)があることは、学者たちには知られていた。第一法則 － 惑星は太陽を焦点とした[楕円](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%95%E5%86%86)軌道を描く[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。第二法則 － 惑星は太陽に近い軌道では速く、遠いところではゆっくり動き、惑星と太陽とを結ぶ直線が等しい時間等しい面積を掃くように動く（[面積速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D%E9%80%9F%E5%BA%A6)一定の法則）[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。第3法則 － 惑星が太陽を一周する時間（周期）の2乗は、惑星と太陽との平均距離の3乗に比例する[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

では、なぜ惑星はこのような動き方をするのか？　当時の[自然哲学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E5%93%B2%E5%AD%A6%E8%80%85)たちは、ガリレイたちがつくりあげてきた地上の動力学を使おうと考えるようになっていた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)という。ガリレイは、外力が働かなければ地上の物体は等速直線運動をつづける、という考え方をしていた。ところが惑星が直線ではなく楕円を描くということは、太陽の方向に働く引力がある、ということになる[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)という。

フックが手紙でニュートンに意見を求めた点は、この楕円運動を作り出す、太陽に引き寄せる力、引力についてであり、この引力がどのような性質のものか？という点であった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)という。この手紙を見てニュートンは13年ほど前にウールソープ（ニュートンの家）で試してみた、地上の重力が[月](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%88)にまで及んでいると想定して行った計算、をやり直してみることにした[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)という。

それは例えばおよそ次のようなものであった。

まず、[月](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%88)に対して何の力も働かなければ、月はガリレオの慣性の考え方によれば直線方向にAからBまで1分間に37.4km進む、と計算される。（月を円軌道とし、地球一周に27日7時間43分かかることから算出）。だが、月はBではなくB´の位置にいる。つまり1分間にBB´だけ「落下する」と考えることができる。その長さは直角三角形AOBに[ピタゴラスの定理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%94%E3%82%BF%E3%82%B4%E3%83%A9%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86)を用い計算でき、毎分4.9mの落下、となる。毎秒ならば、その3600分の1、4.9/3600となる。ところで地上の落下は、ガリレイが見出した法則により、毎秒4.9mである。月の位置で働く引力は、地球上の3600分の1まで弱まっている、ということになる。月までの距離は地球半径の60倍だから、結局、この引力というのは距離の2乗に反比例しているということになる（逆2乗の法則）。[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)

ところで[ホイヘンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9)による振り子の研究は、1659年ころの[円運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E9%81%8B%E5%8B%95)の研究と結びつき、そこでの中心の引力というのは半径に比例し、周期の2乗に反比例する、ということが判り、これが1673年の『[振子時計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%AD%90%E6%99%82%E8%A8%88)』で公表されたので、これとケプラーの第三法則を結びつければ、引力は半径の2乗に反比例する、ということはたやすく算出できるようになっていた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

1684年1月のある水曜日[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)、ロンドンの[コーヒーハウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%8F%E3%82%A6%E3%82%B9)にあつまった[ロバート・フック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF)、天文学者[エドモンド・ハリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%89%E3%83%A2%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%8F%E3%83%AC%E3%83%BC)、王立学会会長兼建築家[クリストファー・レン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%83%B3)は、残る問題となった、逆2乗の引力をもとにして、いかにケプラーの第一、第二法則を導くことができるか、ということを話題にした[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。同年8月、ニュートンを大学で訪問したハリーは、ニュートンがすでに独自にこの問題を解決していたことを知り、11月に、それを出版することをすすめ、『[自然哲学の数学的諸原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E5%93%B2%E5%AD%A6%E3%81%AE%E6%95%B0%E5%AD%A6%E7%9A%84%E8%AB%B8%E5%8E%9F%E7%90%86)』の核心部分が出来てゆくことになった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

フックは、引力については自分がニュートンに教えたのだとし、二人の間で対立が生じることになった。

その後ハリーが資金面で貢献してくれたり、あるいは[フック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF)との先取権をめぐるいざこざの仲裁を行ってくれたお陰もあって、ニュートンはそれの刊行にこぎつけることができたのであった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)という。

**自然哲学の諸原理』における、万有引力という考え方の公表**

ニュートンは成果を『[自然哲学の数学的諸原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E5%93%B2%E5%AD%A6%E3%81%AE%E6%95%B0%E5%AD%A6%E7%9A%84%E8%AB%B8%E5%8E%9F%E7%90%86)』（プリンキピア）にまとめあげ、それは1687年に刊行された。同書は全三篇構成であるが、惑星の運動が主として扱われているのは第三篇の「世界体系について」である[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。例えば、「月は地球にむかって重力で引かれる」という、ニュートンがウールスソープ時代に思いついた命題は、第三篇の命題4において提示されており、逆2乗の引力が木星とその衛星、5つの惑星と太陽の間でも働くことを、ケプラーの第二・第三法則からこの引力を逆に導き出しつつ主張した[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。さらに命題7で、重力は物の量（質量）に比例することを述べ、それにより、**第三篇の命題8において、この宇宙ではどこでも、物質には互いに物質の量の**[**積**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D)**に比例する逆二乗の引力が働いている、と主張した**[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。つまり万有引力の法則があると主張したわけである[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B#cite_note-onuma-1)。

**ニュートン力学と重力**

ニュートンは『自然哲学の数学的諸原理』において自らの力学体系を開示したわけである。この力学体系を[ニュートン力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E5%8A%9B%E5%AD%A6)という。

ニュートン力学そのままの用語では、現代では理解しにくい点もあるので、以下では、[古典力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%A4%E5%85%B8%E5%8A%9B%E5%AD%A6)の現代版の用語や記述方式を用いつつ、万有引力を解説する。

[ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)は、太陽を公転する地球の運動や木星の衛星の運動を統一して説明することを試み、[ケプラーの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)に、[運動方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)を適用することで、万有引力の法則（[逆2乗の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%862%E4%B9%97%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)）が成立することを発見した。これは、『2つの物体の間には、物体の質量に比例し、2物体間の距離の2乗に反比例する引力が作用する』と見なす法則である。力そのものは、瞬時すなわち[無限大](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A1%E9%99%90%E5%A4%A7)の速度で伝わると考えた。式で表すと、万有引力の大きさFは、物体の質量を M,m 、物体間の[距離](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)を r として、

 F= G \frac{M m}{r^2} 

となる。Gは[万有引力定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B%E5%AE%9A%E6%95%B0)と呼ばれる比例定数で、

G = 6.67259 \times 10^{-11} \mbox{m}^3 \cdot \mbox{s}^{-2} \cdot \mbox{kg}^{-1}

である。（因みに「この式が全ての物体の間で成立する」と考えると「木から落ちるリンゴにも適用することができる」と考えることができるのである。）

[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)の質量を M 、リンゴの質量を m 、地球の半径を R とすれば、万有引力の大き

は、 F= G \frac{M m}{R^2} であり、リンゴの運動方程式は、加速度を g として、 mg= G \frac{M m}{R^2} となる。すなわち、地球重力による加速度（[重力加速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6)）は

 g=\frac{G M}{R^2} 

となり、すべての物質について同じ値になる。

地球表面では重力加速度は約9.8m/s2であり、地球の半径は約6400kmであるので、上記の式から地球の質量を

 M=\frac{g R^2}{G} \simeq 6 \times 10^{24} kg

のように求めることができる。同様に、他の惑星上での重力加速度も求めることができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B>

1. **Peso:**

**重さ**（おもさ）とは、その物体に働く[重力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B)の大きさ、および、[慣性力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E5%8A%9B)の大きさを言う。また、力から転じて（力の次元とは全く異なる）**重量**を表す意味でも用いられる。

**概要**

物を手に持った時に「重さ」を感じるのはその物が[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)の[引力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%95%E5%8A%9B)によって[手](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%89%8B)に[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)を及ぼすためである。また、吊るされた梵鐘などを手で揺らそうとする時に「重さ」を感じるのは慣性力が手に力を及ぼすためである。この場合どちも我々は「重い」と表現するが、これは古来から重力加速度による重力と加速による慣性力に密接な関係があることを経験上知っていたためである。地球上の場合、[質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E9%87%8F)が1[kg](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0)の物体にかかる重力は約9.8N（[ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)）となり、この力を1kgw（[キログラム重](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0%E9%87%8D)）または1kgfと表記する。

重力は重力加速度に比例して変化するため、同じ物体でも別の天体上では異なる重さ（重力）になり、また地球上でも場所によっては異なる重さ（重力）になる。そのため、重量を重力を使って量る簡便な[ばねばかり](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%B0%E3%81%AD%E3%81%B0%E3%81%8B%E3%82%8A)を使う場合は基準が設定されている。

*「*[*重力*](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B)*」も参照*

なお、古代から使われてきた[**天秤ばかり**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E7%A7%A4%E3%81%B0%E3%81%8B%E3%82%8A)**で量った重量**は重力加速度に依らず一定であり、この場合[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)の[等価原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AD%89%E4%BE%A1%E5%8E%9F%E7%90%86)によれば重量と質量は厳密に一致する。また、物質の**慣性力**を意味する「重さ」も重力加速度に依らず一定である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E3%81%95>

1. **Leyes de Kepler:**

**ケプラーの法則**（ケプラーのほうそく）は、[1619年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1619%E5%B9%B4)に[ヨハネス・ケプラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%83%8F%E3%83%8D%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC)によって発見された[惑星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%83%91%E6%98%9F)の運動に関する法則である。

**法則**

ケプラーは、[ティコ・ブラーエ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%82%A3%E3%82%B3%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%A8)の観測記録から、[太陽](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD)に対する[火星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%81%AB%E6%98%9F)の運動を推定し、以下のように定式化した。

**第1法則（楕円軌道の法則）**

惑星は、[太陽](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD)をひとつの[焦点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A6%E7%82%B9_(%E5%B9%BE%E4%BD%95%E5%AD%A6))とする[楕円軌道](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%95%E5%86%86%E8%BB%8C%E9%81%93)上を動く。

**第2法則（面積速度一定の法則）**

惑星と太陽とを結ぶ[線分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%88%86)が単位時間に描く面積は、一定である（面積速度一定）。

**第3法則（調和の法則）**

惑星の[公転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E8%BB%A2)周期の2乗は、軌道の[長半径](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%95%B7%E5%8D%8A%E5%BE%84)の3乗に[比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B)する。

先に、第1法則および第2法則が発見されて[1609年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1609%E5%B9%B4)に発表され、後に、第3法則が発見されて1619年に発表された。

**法則の意味するもの**

第1法則は、惑星の軌道が円ではなく楕円であることと、太陽の位置は楕円の中心ではなく焦点の1つであることを述べている（もう片方の焦点には何もない）。また、惑星の軌道が太陽を含む一平面上であることも暗に意味している。後のニュートン力学では、[中心力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%BF%83%E5%8A%9B)の作用する2体問題の解として、束縛運動であるならば楕円運動になることが示される。

楕円運動の発見のエピソードとして、当時、惑星の運動は円であると信じられていたが、それに従わない火星のデータを[ティコ・ブラーエ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%82%A3%E3%82%B3%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%A8)が困ってケプラーに担当させたため、との話がある。

第2法則は、太陽に近いところでは惑星は速度を増し、太陽から遠いところでは惑星は速度を落とすことを意味している。これは、惑星が軌道上を移動する際の面積速度が一定である事を意味し、「面積速度一定の法則」と呼ばれる事も有るが、面積速度とは、惑星の位置ベクトルと速度ベクトルの外積に他ならず、ニュートン力学における、[角運動量保存の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)に相当する。

第3法則は、公転周期の長さは楕円軌道の長半径のみに依存して決まることを意味する。楕円軌道の[離心率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%A2%E5%BF%83%E7%8E%87)に依存しないので、楕円軌道の長半径が同じであれば、円運動でも楕円運動でも周期は同じになる。この法則も後のニュートン力学で導くことができる。

また第3法則は[江戸時代](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B1%9F%E6%88%B8%E6%99%82%E4%BB%A3)の日本の天文学者、[麻田剛立](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%BA%BB%E7%94%B0%E5%89%9B%E7%AB%8B)（あさだごうりゅう：1734-1799）が独自に発見していた（出典 [麻田剛立](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%BA%BB%E7%94%B0%E5%89%9B%E7%AB%8B)『五星距地之奇法』および、[鹿毛敏夫](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%B9%BF%E6%AF%9B%E6%95%8F%E5%A4%AB&action=edit&redlink=1)文・[関屋敏隆](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%96%A2%E5%B1%8B%E6%95%8F%E9%9A%86&action=edit&redlink=1)画・[くもん出版](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%8F%E3%82%82%E3%82%93%E5%87%BA%E7%89%88)・2008年『[月のえくぼ（クレーター）を見た男 麻田剛立](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%9C%88%E3%81%AE%E3%81%88%E3%81%8F%E3%81%BC%EF%BC%88%E3%82%AF%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%83%BC%EF%BC%89%E3%82%92%E8%A6%8B%E3%81%9F%E7%94%B7_%E9%BA%BB%E7%94%B0%E5%89%9B%E7%AB%8B&action=edit&redlink=1)』194P）。しかし麻田は惑星の軌道を円と認識し、「惑星軌道の半径の3乗と公転周期の2乗が比例する」と言う趣旨の記述をしており、正確に同じ法則を発見していたとは言えない。また一部には麻田の法則性発見に疑問をもつ科学史家もいるが、麻田が惑星軌道を楕円と認識せず、円と考えたうえで上記の法則を記述していたという“事実誤認”は、逆に麻田剛立の発見が彼独自のものであった可能性を補強している。

ケプラーの法則に従う運動を**ケプラー運動**ともいう。

**科学史における意義**

ケプラーの法則は、天動説に対する地動説の優位を決定的なものにした。[コペルニクス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%82%B3%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%B3%E3%83%9A%E3%83%AB%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9)によって[地動説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E5%8B%95%E8%AA%AC)が唱えられて以降も、地動説に基づく惑星運動モデルは従来の[天動説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E5%8B%95%E8%AA%AC)モデルと比べ、実用上必ずしも優れたものではなかった。しかしケプラーの法則の登場により、地動説モデルは天動説モデルよりもはるかに正確に惑星の運動を記述することが可能になった。

また、惑星の軌道を楕円形であるとした第1法則は、天体は[真円](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86_(%E6%95%B0%E5%AD%A6))に基づく運動をするはずであるという古代ギリシア以来の常識を打ち破るものでもあった。

**万有引力の法則との関係**

[アイザック・ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)は、自分が発見した運動の法則と、このケプラーの法則などを元に[万有引力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B)の法則を導き出した。一方、ケプラーの法則は万有引力の法則を、惑星のポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの和が負である（すなわち、惑星が無限遠まで飛んでいかない）という条件の下、太陽の質量に比べ惑星の質量が十分小さい（すなわち、太陽は静止していると見なせ、惑星間の相互作用は無視できる）という近似を行って解くことによって導くことができる。ケプラーが[太陽系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E7%B3%BB)の惑星の運動について述べたことは、ある質点とその周囲を回るそれに比べて十分に質量の小さな質点という、2つの任意の質点間に対しても同様に成り立つことが分かる。

したがって、ケプラーの法則は、太陽と惑星の間だけでなく、惑星と[衛星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%9B%E6%98%9F)（あるいは[人工衛星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E8%A1%9B%E6%98%9F)）などの間でも成立する。

なお、第2、第3法則は二つの質点の質量が同程度でも成立する。このことから、第3法則と万有引力の法則を利用して[連星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E6%98%9F)系の主星と[伴星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%B4%E6%98%9F)、太陽と惑星、[二重惑星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E9%87%8D%E6%83%91%E6%98%9F)、惑星と衛星などの質量の和も求めることもできる。軌道長半径を *a*、[公転周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E8%BB%A2%E5%91%A8%E6%9C%9F)を*P*、主星の質量を*M* 、伴星の質量を*m*、[万有引力定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B%E5%AE%9A%E6%95%B0)をGとすれば、これらの関係は次のようになる。

\frac{a^3}{P^2}=\mathrm{G}\frac{M+m}{4\pi^2}

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Rotación Terrestre:**

**地球の自転**（ちきゅうのじてん、Earth's rotation）とは、[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)が自身の[地軸](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E8%BB%B8)の周りを回転することである。地球の自転は東向きであり、[北極星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%97%E6%A5%B5%E6%98%9F)からは反時計回りに見える。

**自転周期**

[太陽](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD)に対する地球の[自転周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E8%BB%A2%E5%91%A8%E6%9C%9F)は86,400秒で、平均[太陽時](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E6%99%82)と一致する。地球の太陽時は、[潮汐力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%AE%E6%B1%90%E5%8A%9B)による加速によって、19世紀と比べてわずかに長くなっている。1750年から1892年の平均太陽秒が1895年に[サイモン・ニューカム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%83%A2%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%AB%E3%83%A0)によって*Tables of the Sun*としてまとめられた。この表は1900年から1983年まで[天体暦](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E4%BD%93%E6%9A%A6)を計算するのに用いられ、[暦表時](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9A%A6%E8%A1%A8%E6%99%82)として知られた。[SI単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/SI%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)の秒は1967年の暦表時をもとにしている[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-0) 。

[国際地球回転及び基準座標系事業](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%9C%B0%E7%90%83%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E5%8F%8A%E3%81%B3%E5%9F%BA%E6%BA%96%E5%BA%A7%E6%A8%99%E7%B3%BB%E4%BA%8B%E6%A5%AD&action=edit&redlink=1)（[英語版](http://en.wikipedia.org/wiki/International_Earth_Rotation_and_Reference_Systems_Service)） (IERS)によって定められている、恒星に対する地球の自転周期は、86164.098 903 691秒（23時間56分4.098 903 691秒）である[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-IERS-1)[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-2)。平均[春分点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%98%A5%E5%88%86%E7%82%B9)の移動、即ち[歳差運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%B3%E5%B7%AE%E9%81%8B%E5%8B%95)に対する自転周期は[恒星時](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%81%92%E6%98%9F%E6%99%82)と呼ばれ、86164.090 530 832 88秒（23時間56分4.090 530 832 88秒）である[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-IERS-1)。後者は前者よりも8.4ミリ秒程度短い[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-3)。SI単位系の秒で表した平均太陽時の長さは、1623年から2005年と1962年から2005年の期間について、IERSで入手できる。

近年（1999年から2005年）、平均太陽日で表した1日の長さは、86,400秒より0.3ミリ秒から1ミリ秒程度長くなっており、恒星時等をSI単位系の秒で表す場合にも加える必要がある。

[慣性空間](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%A9%BA%E9%96%93&action=edit&redlink=1)における地球の自転の[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)は、1秒当たり7.2921159×10-5[ラジアン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%82%B8%E3%82%A2%E3%83%B3)である[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-IERS-1)。（180°/πラジアン）×（86,400秒）を計算すると360.9856°/平均太陽日が得られ、地球は1太陽日当たり、恒星に対して360°以上回転していることを示している。地球の軌道はほぼ円であり、軸の周りを1回転して太陽が再び頭上に現れるまでの間に、恒星に対しては若干多く回転する[[n 1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-4)。地球の半径6,378,137mをかけると、赤道上でのスピードは1674.4km/hと求められる[[5]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-5)。赤道上での地球の自転速度は徐々に遅くなっており、1669.8km/hになっているという説もある[[6]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-6)。これは地球の赤道上の円周の長さを24時間で割ることで求めることができる。しかし、1つの円周だけを無意識に使うことは1つの慣性空間だけを回ることを意味する。1平均太陽日の恒星日をかけると1.002 737 909 350 795という値になり[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-IERS-1)、1平均太陽時当たりの赤道上での速度は上述の1,674.4km/hとなる。

地球の自転の永続的な観測には、[超長基線電波干渉法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E9%95%B7%E5%9F%BA%E7%B7%9A%E9%9B%BB%E6%B3%A2%E5%B9%B2%E6%B8%89%E6%B3%95)、[グローバル・ポジショニング・システム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%90%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%9D%E3%82%B8%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%8B%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%83%BB%E3%82%B7%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%A0)、[衛星レーザ測距](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A1%9B%E6%98%9F%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E6%B8%AC%E8%B7%9D&action=edit&redlink=1)やその他の人工衛星の技術を組み合わせて使う必要がある。これにより[世界時](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%96%E7%95%8C%E6%99%82)や[歳差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%B3%E5%B7%AE)、[章動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%A0%E5%8B%95)の決定のための絶対参照とすることができる[[7]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-7)。

100万年以上かけて、潮汐力と呼ばれる[月](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%88)との間の[重力相互作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)によって、地球の自転は徐々に遅くなってきた。しかし、2004年の[スマトラ島沖地震](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%9E%E3%83%88%E3%83%A9%E5%B3%B6%E6%B2%96%E5%9C%B0%E9%9C%87_(2004%E5%B9%B4))等の大規模な出来事によって、自転速度が約3マイクロ秒程度増加している[[8]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-8)。

**歳差**

地球の地軸は、慣性空間に対しての方向を維持するため、[ジャイロスコープ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%82%A4%E3%83%AD%E3%82%B9%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%83%97)の軸のように傾いている。太陽、月、惑星等から地球に働く外力によって、定まった方向から外れようとする。地軸の向きの周期的な大きな変化は歳差と呼ばれ、一方小さな変化は章動や[極運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%B5%E9%81%8B%E5%8B%95)と呼ばれる。

**自転の起源**

理論的には、地球は[太陽系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E7%B3%BB)の形成と同時に形成したとされている。塵、岩、ガス等からできた回転する巨大な[分子雲](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90%E9%9B%B2)から、徐々に太陽系が形成された。この雲は[ビッグバン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%83%E3%82%B0%E3%83%90%E3%83%B3)に由来する[水素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E7%B4%A0)と[ヘリウム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%AA%E3%82%A6%E3%83%A0)、及び[超新星爆発](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E6%96%B0%E6%98%9F%E7%88%86%E7%99%BA)で生成した[重元素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%85%83%E7%B4%A0)から構成されていた。ある理論によると、およそ46億年前に近傍の恒星が超新星爆発を起こし、[衝撃波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%9D%E6%92%83%E6%B3%A2)が太陽系に達して角速度が与えられた。回転する分子雲は押し潰され、ガスや塵の一部は重力によって凝集し始め、徐々に惑星を形成していった。最初の角速度が保存される必要があることから、集まった質量はより速く回転し始めた[[10]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-10)。現在の地球の自転速度は、この初期の回転と、潮汐摩擦や[ジャイアント・インパクト説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%82%A4%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%91%E3%82%AF%E3%83%88%E8%AA%AC)等のその他の要因の結果である。

**地球の自転の証拠**

地球の自転の系では、自由に動く物体は、固定系から見かけの経路に従っているように見える。この[コリオリ力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%AA%E3%82%AA%E3%83%AA%E5%8A%9B)のため、落下する物体は垂直よりも東方向に曲がって落ち、北半球では発射物は右に曲がって進む。北半球と南半球で[台風](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%B0%E9%A2%A8)の回転の方向が異なる等、[気象学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E8%B1%A1%E5%AD%A6)等の様々な分野でもコリオリ力は表れる。1679年に[アイザック・ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)からの提案を受け、[ロバート・フック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF)は8.2mの高さから落とした物体は東の方向に0.5mm曲がると予測したが、上手くいかなかった。しかし、18世紀末から19世紀初めにかけて、[ボローニャ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%8B%E3%83%A3)の[ジョヴァンニ・バッティスタ・グリエルミ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%83%B4%E3%82%A1%E3%83%B3%E3%83%8B%E3%83%BB%E3%83%90%E3%83%83%E3%83%86%E3%82%A3%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%BB%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%82%A8%E3%83%AB%E3%83%9F&action=edit&redlink=1)、[ハンブルク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8F%E3%83%B3%E3%83%96%E3%83%AB%E3%82%AF)の[ヨハン・ベンツェンベルク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%83%8F%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%99%E3%83%B3%E3%83%84%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%99%E3%83%AB%E3%82%AF)、[フライベルク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%99%E3%83%AB%E3%82%AF)の[フェルディナント・ライヒ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%8A%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%92&action=edit&redlink=1)らが高い塔から慎重に重りを落として確証的な証拠が得られた[[n 2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2#cite_note-11)。

**フーコーのふりこ**

地球の自転に関する最も有名な実験は、1851年に[レオン・フーコー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%BC%E3%82%B3%E3%83%BC)によって初めて行なわれた[フーコーのふりこ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%BC%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%81%AE%E3%81%B5%E3%82%8A%E3%81%93)の実験である。[パリ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%AA)の[パンテオン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%B3%E3%83%86%E3%82%AA%E3%83%B3_(%E3%83%91%E3%83%AA))の頂上から67mの糸に鉄の球を吊るして行なわれた。すると地球の自転により、ふりこの振動面は緯度に応じた速さで回転した。パリの緯度では、1時間に時計回りに11度という値が予測され、実際に観測された。フーコーのふりこは現在、世界中の博物館で振動し続けている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83%E3%81%AE%E8%87%AA%E8%BB%A2>

1. **Oscilación Libre:**

**自由振動**（じゆうしんどう、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): free oscillation、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): free vibration）とは、ある系がその[固有振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E6%9C%89%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)で[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)することである。[減衰](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B8%9B%E8%A1%B0&action=edit&redlink=1)のない自由振動では[強制振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B7%E5%88%B6%E6%8C%AF%E5%8B%95)とは異なり、系に外部から力が作用しなくても運動しつづける。

**単振動**

**フックの法則**

*詳細は「*[*フックの法則*](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)*」を参照*

多くの[弾性体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E6%80%A7)では変形の量が小さい限り復元力\mathrm{F}と変形量\mathrm{kx}の間に比例関係がある。

F=-k\,x … (1-1)

これをその発見者である17世紀の[イギリス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B9)の物理学者[ロバート・フック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF)の名にちなんで[**フックの法則**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%83%E3%82%AF%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)とよぶ。フックの法則は、板や棒の曲げのような、伸び縮みとは別種の変形でも同じように成り立つ。

**単振動という運動**

単振動とは、[等速円運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E9%81%8B%E5%8B%95)の[正射影](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%84%E5%BD%B1)の運動と同一である。等速円運動に光を当てると影ができる。この影の運動が単振動なのである。単振動している物体を**調和振動子**と呼ぶ。

単振動は等速円運動の正射影であるために、その性質が等速円運動と非常によく似ている。例えば、周期 **T** は等速円運動と同じように、

T={2\pi \over \omega} … (1-2)

であらわされ、当然、回転数（単振動では回転数のことを[振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)という。定義は[回転数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E9%81%8B%E5%8B%95#.E7.AD.89.E9.80.9F.E5.86.86.E9.81.8B.E5.8B.95)と同じ）*f* も等速円運動と同様、

f={\omega \over 2\pi} … (1-3)  
f={1 \over T} … (1-4)

とあらわされる。

**単振動の運動方程式**

バネの運動を考える。原点 *Ｏ* をバネの自然長にとり、右方向を *x* 軸正方向とする。このとき物体には、(1-1) の力が働く。ここで、[ニュートンの運動方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F) \mathrm{F = ma} より、

ma = m{dv \over dt}=m{d^2x \over dt^2}=-kx … (1-5)

両辺を*m*で割ると、

{d^2x \over dt^2} = -{k \over m}x … (1-6)

(1-6) 式の *x* を満たす関数としては、

x=-\sin \sqrt{k \over m} t … (1-7)

x=\cos \sqrt{k \over m} t … (1-8)

の二つの特殊解が考えられる。[線型微分方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%9E%8B%E5%BE%AE%E5%88%86%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の性質から、この 2 つの特殊解を線形結合させた

x=A\sin \sqrt{k \over m} t+B\cos \sqrt{k \over m}t … (1-9)

も、(1-6) の解であり、方程式が 2 階であることと (1-7),(1-8) の一次独立性から、これ以外の解はない。つまり (1-9) が (1-6) の一般解である。ここで、\omega = \sqrt\tfrac{k}{m}と定めると、(1-9) 式は、

x=A\,\sin \omega t+B\,\cos \omega t … (1-10)

ここで[三角関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E8%A7%92%E9%96%A2%E6%95%B0)の合成を利用すると、(1-10) 式は、

\cos\phi ={A\over \sqrt{A^2+B^2}},\  \sin\phi = {B\over \sqrt{A^2+B^2}}

を満たした φ を用いて、

x = \sqrt{A^2+B^2}\sin (\omega t+\phi) … (1-11)

とあらわされる。ここで、\sqrt{A^2+B^2} = C とすると、(1-11)は、

x = C\,\sin (\omega t+ \phi) … (1-12)

となる。ここで(1-12)の各数値はそれぞれ以下のような物理量である。

C；振幅 … 物体の最大の変位の絶対値

ω；[角振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)（固有振動数）

φ；[初期位相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)

よって、(1-12)であらわされる単振動の x-t グラフを描くと、図 1-5 のような正弦曲線を描く。 初期位相によって時刻 0 のときの物体の位置が決まる。このグラフの場合は以下の通り。

初期位相 -\tfrac{\pi}{2} … 時刻 0 のときの座標 -C

初期位相 {0} … 時刻 0 のときの座標 0

初期位相 \tfrac{\pi}{2} … 時刻 0 のときの座標 C

**調和振動子のエネルギー**

振動している物体の[運動エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)と[位置エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%BD%AE%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)について述べる。運動エネルギーは

K=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m\omega^2C^2\cos^2({\omega t+\phi}) … (1-13)

で与えられるが、位置エネルギーは力学の保存力の場合における力と[ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)の関係から、

U(x)=\frac{1}{2}kC^2\sin^2({\omega t+\phi}) … (1-14)

となる。したがって、\mathrm{m\omega ^2=k}であるから、全エネルギー\mathrm{E}は次式となり

E=K+U=\frac{1}{2}kC^2 … (1-15)

全エネルギーが振幅の２乗とばね定数に比例し、一定値を取ることになる。これは[力学的エネルギーの保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%9A%84%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)と矛盾しない。

**単振動の合成**

単振動を2つ以上加え合わせることを**単振動の合成**という。1つの[質点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E7%82%B9)に、平行な2つの単振動の合成を行うとき、この質点の運動は次のように扱うことができる。 始めに振動している質点の運動の解が

x_1=A\,\cos{\omega_1t+\alpha} … (1-16)

別の振動による質点の運動の解が

x_2=B\,\cos{\omega_2t+\beta} … (1-17)

これは具体的に、板の上で単振動している質点があり、さらにその板が地面に対して同じ方向に単振動している場合に当たる。この解は一般にかなりの複雑な運動を表すが、角振動数がある特別な整数比になる場合には、比較的簡単な扱いができる。例えば、初期位相が0で振幅と角振動数がいずれも2:3になる場合には、

x_1=2a\cos 2\omega t,\,x_2=3a\cos 3\omega t  
x=2a\,\cos 2\omega t +3a\,\cos 3\omega t

… (1-18)

2つの単振動の振幅が等しい場合には、(1-17)は

\mathrm{x=C{\cos{\omega_1t+\alpha}+\cos{\omega_2t+\beta}}}  
{}=2C\cos\left(\frac{\omega_1-\omega_2}{2}t+\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t+\frac{\alpha+\beta}{2}\right)

… (1-19)

のように書き換えられる。角振動数がほんのわずかだけ違っている場合には、

\frac{|\omega_1-\omega_2|}{2}=\triangle \omega,\,\,\,\,\,\,\,\,\,\,\,\frac{\omega_1+\omega_2}{2}\approx \omega_1… (1-20)

となり、因子Δωを含む振動項は非常にゆっくりと振動し、一方の振動項ははじめと同じ振動(\omega_1\approx \omega_2)を続けることとなる。したがって、ゆっくりと振動をする部分のために、[**うなり**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%86%E3%81%AA%E3%82%8A)という現象が生じる。ちょうど因子Δωを含む振動項の1周期Tの間に2度うなりを感ずるので、はじめの2つの単振動の振動数をそれぞれと\gamma_1,\,\gamma_2すると、この**うなりの振動数**fは次式となる。

f=\frac{2}{T}=2\left( \frac{|\omega_1-\omega_2|}{2}\frac{1}{2\pi} \right)=|\gamma_1-\gamma_2| … (1-21)

**自然界における単振動**

単振動は最も基本的な振動運動であり、自然界においてもよくみられる。特に、[ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)*U(x)*がある位置*x=x0*において最小値*U(x0)=U0*を持つような力学系の場合は、ポテンシャルの最小点*x=x0*付近での微小な運動は単振動として近似することができる。

このポテンシャル*U(x)*を*x=x0*で[テイラー展開](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%83%BC%E5%B1%95%E9%96%8B)すると

U(x)=\sum_{n=0}^\infty \frac{(x-x_0)^n}{n!}U^{(n)}(x_0)=U(x_0)+(x-x_0)U'(x_0)+\frac{(x-x_0)^2}{2!}U''(x_0)+\frac{(x-x_0)^3}{3!}U'''(x_0)+\cdots

となるが、運動を*x=x0*から微小な範囲に限定すると、*x-x0*は微小量となるため3次以上は無視できる。また、*x=x0*でポテンシャルU(x)が最小値をとることから、

U'(x_0)=0,\quad U''(x_0)>0

である。これらのことを考慮すると、

U(x)\approx U_0 + \frac{U''(x_0)}{2}(x-x_0)^2

となる。このポテンシャルによる力*F*は

F=-U'(x)

で与えられるので、*U''(x0)=k(>0)*とおくと、

F=-U'(x)=-k(x-x_0)

これは*x0*を中心とする単振動を表す方程式である。

このことから、[固体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E4%BD%93)[分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)・[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)の[熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1)振動のような微小な振動運動は、単振動であることがわかる。

**振り子**

[振り子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E3%82%8A%E5%AD%90)（[Pendulum](http://en.wikipedia.org/wiki/Pendulum)）は、定まった点または軸の周りを、一定周期で振動する物体。時計や地震計などに用いられる。

**単振子**

伸び縮みしない軽い糸の一端を固定し、他端に質点とみなせるほど小さくて重いおもりをつるし、重力の作用でひとつの鉛直面内を振動するようにした振り子（単振子：たんしんし）（振り子が一鉛直面内ではなく球面上を動く場合は球面振り子という）。振幅が小さければおもりの運動は単振動とみなすことができ、周期 *T* は、

T=2\pi \sqrt{l\over g} … (2-i)

とあらわされる。

**単振り子の運動方程式**

長さ l の糸の先に質量 m のおもりをつけ、糸の他端を固定してつり下げる（図 2-1）。

おもりを少し横に引いて手を放すと、おもりは糸の固定点の真下の振り子のつりあいの位置 *Ｏ* を中心として往復運動を始める。おもりは糸の上端の固定点を中心とした円周上を運動するから、振り子のつり合いの位置 *Ｏ* を原点として、円周に沿ってx 軸をとると、おもりの運動は x 軸上の一次元の運動と見ることができる。このとき、おもりの運動に関わる力はおもりに働く重力 mg の円周への接線方向だけである。ここで、重力 mg の円周への法線方向と糸の張力重力 T は、おもりの運動を円周上に拘束する役割をしている。糸の鉛直方向となす角が \theta のとき、おもりの x 軸上にかかわる力 F は、

F = -mg \sin\theta … (2-ii)

となる。おもりの座標 x と \theta は、

\theta ={x \over l} … (2-iii)

であるから、おもりについての運動方程式は、

F = -mg \sin{x \over l}  … (2-iv)  
ma = -mg \sin{x \over l}  … (2-v)  
{d^2x \over dt^2} = -g\sin {x \over l}  … (2-vi)

ここで、微小角 \theta について成り立つ近似

\sin\theta \approx \theta … (2-vii)

を用いて、(2-vi) 式を変形すると、

{d^2x \over dt^2} = -g{x \over l}  … (2-viii)

となる。(2-viii) は (1-vii) 式と同じ形であるから、運動は単振動となる。角振動数は、

\omega = \sqrt{g \over l}  … (2-ix)

したがって、周期は前節 (2-i) 式のようになる。周期が振幅によらず一定であることは、**振り子の等時性**として知られている。

**単振り子の等時性の破れ**

等時性の破れを主眼に置き、式の近似を用いない解法を考える。以下では \frac{d \theta }{dt}= \dot{\theta}と表記する。

角度の状態遷移を表す微分方程式が ml \ddot{\theta} + mg \sin \theta = 0であることは簡単に導出される。これにエネルギーを考慮するため、両辺にl \dot{\theta}をかけ、t=0において\theta=\theta _0 、\dot{\theta}=0 であったとしてtについて0からtまで積分すると

\frac{1}{2} m \left( l \dot{\theta} \right)^2 - mgl \cos \theta = -mgl \cos \theta _0．

ここで\omega = \sqrt {g/l}と置き上式を変形すると

 \dot{\theta} ^2 =2 \omega ^2 \left(\cos \theta - \cos \theta_0 \right)．

さらに\cos \theta = 1-2 \sin^2 \left( \theta /2 \right)を用い上式を変形すると

\dot \theta = \pm 2 \omega \sqrt{\sin^2(\theta_0 /2) - \sin^2(\theta / 2)}．

このとき右辺にtが陽に現れていないため、t=0に\theta=0となるように時間シフトを行うことができる。

上式を用い\theta = 0 から\theta = \theta _0となる時刻を計算すると

t=\frac{1}{2 \omega} \int _ {0} ^ {\theta _ 0} \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\theta_0 /2) - \sin^2(\theta / 2)}} d\theta．

この値の4倍にあたる4tが振り子の周期である。\sin(\theta_0 /2)=a、\sin(\theta /2)=a \sin \phiと置換すると結局周期は

T=\frac{4}{\omega} \int _ {0} ^ {\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - a^2 \sin^2 \phi}} d\phi．

上式の定積分は[完全楕円積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%95%E5%86%86%E7%A9%8D%E5%88%86#.E7.AC.AC.E4.B8.80.E7.A8.AE.E5.AE.8C.E5.85.A8.E6.A5.95.E5.86.86.E7.A9.8D.E5.88.86)であるため初等的に扱うことは困難であるので

\frac{1}{\sqrt{1 - a^2 \sin^2 \phi}} = 1 +\frac{1}{2}a^2 \sin^2\phi+\frac{1}{2}\frac{3}{4}a^4 \sin^4 \phi+\frac{1}{2}\frac{3}{4}\frac{5}{6} a^6 \sin^6 \phi+\cdots，

と[テーラー展開](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%83%BC%E5%B1%95%E9%96%8B)し各項を積分すると周期は

T= \frac{2 \pi}{\omega} \left[1+\left( \frac{1}{2} \right)^2 a^2 + \left( \frac{1}{2}\frac{3}{4} \right)^2 a^4 + \left( \frac{1}{2}\frac{3}{4}\frac{5}{6} \right)^2 a^6+ \cdots \right]．

Tは明らかにaの、つまり\theta _0の関数であるため、等時性は破れた。a\ll 1とすると、 T= \frac{2 \pi}{\omega} となり\sin \theta = \thetaと近似した時と一致する。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E9%81%8B%E5%8B%95>

1. **Péndulo Simple:**

**振り子**（ふりこ、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：pendulum）は一点で支えられた棒、ひもなどの先に重りを付けたもの。地上など[重力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B)のあるところで一回力を加えると揺れを繰り返す。 支点での[摩擦](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%91%A9%E6%93%A6)や[空気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)の無い理想の環境では永久に揺れ続ける。

振り子についての最初の研究記録は10世紀頃のアラビア人の天文学者[イブン・ユーヌス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%96%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A6%E3%83%BC%E3%83%8C%E3%82%B9)による。さらに 17世紀、[ガリレオ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%A4)にはじまる[物理学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85)らよる観測の結果、[等時性](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%8C%AF%E3%82%8A%E5%AD%90%E3%81%AE%E7%AD%89%E6%99%82%E6%80%A7&action=edit&redlink=1)が発見され時計に使用されるようになった。

なお、全く異なった構造のものとして[ばね振り子](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%81%B0%E3%81%AD%E6%8C%AF%E3%82%8A%E5%AD%90&action=edit&redlink=1)、[ねじれ振り子](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%81%AD%E3%81%98%E3%82%8C%E6%8C%AF%E3%82%8A%E5%AD%90&action=edit&redlink=1)などがある。

**基本原理**

振り子は、重りが左右いずれかの位置にあるとき[位置エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%BD%AE%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)を持つ。重力により下に引かれると加速し[運動エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)となり一番下で最高速になる。反対側に揺れるとき減速しながら再度位置エネルギーとして蓄積され一旦停止する。以後これを繰り返す。

揺れの幅が小さい場合、振り子の揺れの周期は重さや振幅に関係なく一定である。周期は「等価振り子の長さ」（これは支点から重心までの距離とは必ずしも一致しない）にのみ影響される。

振り子の周期**T**は左右の揺れ一往復の時間であり、次の式で表される。 ここで**l**は等価振り子の長さ、**g**は重力加速度である。

T = 2\pi \sqrt\frac{l}{g}

等価振り子の長さは、次式で表される:

l = \frac{I}{ML}

ここで**I**は支点まわりの慣性モーメント, **M**はおもりの全質量, **L**は支点から重心まで の距離である。

数学的な詳細説明については[振動運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E9%81%8B%E5%8B%95#.E6.8C.AF.E3.82.8A.E5.AD.90)を参照。

**応用**

**計時**

振り子の最も一般的な利用法は[振り子計時](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%8C%AF%E3%82%8A%E5%AD%90%E8%A8%88%E6%99%82&action=edit&redlink=1)である。今日では少なくなったが置き時計、柱時計などでの[調速機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%BF%E9%80%9F%E6%A9%9F)として利用されている。

**重力測定**

前述の式のように重力**g**の値により周期は変動する。そのことを利用し地上の各地の微妙な重力の違いを調べることが可能である。

**地震計**

棒が水平に置く形式の振り子はその重りの慣性により早い振動に対し位置を保とうとする。これを利用して初期の[地震計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E9%9C%87%E8%A8%88)として用いられた。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E3%82%8A%E5%AD%90>

1. **Densidad:**

**密度**（みつど）は、広義には、対象とする何かの混み合いの程度を示す。ただし、科学において、単に密度といえば、単位体積あたりの[質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E9%87%8F)である。

より厳密には、ある量（物理量など）が、空間（3 次元）あるいは面上（2 次元）、線上（1 次元）に分布していたとして、これら空間、面、線の微小部分上に存在する当該量と、それぞれ対応する体積、面積、長さに対する比のことを（それぞれ、体積密度、面密度、線密度と言う）言う。微小部分は通常、単位[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)、単位[面積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D)、単位[長さ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)当たりに相当する場合が多い。勿論、4 次元以上の仮想的な場合でも、この関係は成立し、密度を定義することができる。

その他の密度としては、[状態密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8A%B6%E6%85%8B%E5%AF%86%E5%BA%A6)、[電荷密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E5%AF%86%E5%BA%A6)、[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)、[電流密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%AF%86%E5%BA%A6)、[数密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%AF%86%E5%BA%A6)など様々な量（物理量）に対応する密度が存在する（あるいは定義できる）。物理量以外でも[人口密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E5%8F%A3%E5%AF%86%E5%BA%A6)や[確率密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A2%BA%E7%8E%87%E5%AF%86%E5%BA%A6)、などの値が様々なところで用いられている。[密度効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6%E5%8A%B9%E6%9E%9C)という語もある。

**密度の単位**

単位体積あたりの質量としての密度は[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB) (SI) では [キログラム毎立方メートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0%E6%AF%8E%E7%AB%8B%E6%96%B9%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)（[kg](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0)/[m3](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%8B%E6%96%B9%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)）を単位として使用する。他にも[g](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0)/[cm3](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%83%81%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB) = kg/[L](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AA%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%AB) などがある。g/cm3単位での密度は、水に対する[比重](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E9%87%8D)とほとんど同じである。ただし、[比重](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E9%87%8D)は無[次元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A1%E5%85%83)であることに注意。

1 kg/m3 = 1,000 g/1, 000,000 cm3 = 0.001 g/cm3 = 0.001 kg/L

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6>

1. **Presión:**

圧力（あつりょく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：pressure）は、単位[面積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D)当たりにかかる[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)である。[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)（SI）における圧力の[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)は、[パスカル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%AB)(Pa)である。

*P* = *F* / *S*、すなわち 1 Pa = 1 N / m2 である。

**圧力に関する現象**

圧力をかけたり変化させたりすることで、以下のような性質を示す物質がある。

[**沸点**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B2%B8%E7%82%B9)、[**融点**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%9E%8D%E7%82%B9)**の変化**

→ [相図](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%9B%B3)

[**結晶構造**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%90%E6%99%B6%E6%A7%8B%E9%80%A0)**の変化**

圧力によって物質の構造が変化する物質がある。→ [構造相転移](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A7%8B%E9%80%A0%E7%9B%B8%E8%BB%A2%E7%A7%BB)

[**電荷**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)**の発生**、[**電気抵抗**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)**の変化**

圧力を加えることで物体の表面に電荷が生じたり（[圧電効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E9%9B%BB%E5%8A%B9%E6%9E%9C)）、電気抵抗が変化したりする。[圧電素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%94%E3%82%A8%E3%82%BE%E7%B4%A0%E5%AD%90)はガスレンジの着火装置などに利用される。

[**磁化**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%8C%96)**の変化**

圧力によって磁化の強さが変化する。→ [ビラリ現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%A9%E3%83%AA%E7%8F%BE%E8%B1%A1)

**超高圧の実験**

超高圧実験装置にはプレス型とダイヤモンドアンビルを使ったものとに二分できる。

プレス型は、ピストンシリンダーなどを使って生じた圧力を油圧（直接加圧する場合もあり）で伝達して試料を押す。発生可能な圧力の大まかな目安は数万気圧（数GPa）である。比較的広い圧力発生空間を確保することができ、多彩な物性測定実験が可能となっている。

ダイヤモンドアンビルセル (Diamond Anvil Cell: DAC)は、天然または人工合成の[ダイヤモンド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%A4%E3%83%A2%E3%83%B3%E3%83%89)を使って超高圧を実現するもので、小型（手のひらサイズ）で、透明（光学的な観測が可能）であり、サブテラパスカル（数百万気圧、数百GPa）までの加圧が可能である。一方、ダイヤモンドそのものが大型化できないので、試料は大変小さなものにしなければならない。ダイヤモンド以外に、[サファイア](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B5%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%82%A2)、[炭化ケイ素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%82%AD%E5%8C%96%E3%82%B1%E3%82%A4%E7%B4%A0)を使ったアンビルセルもあるが、加圧できる圧力はダイヤモンドよりも劣る。

上記の高圧実験は通常、静水圧が前提であるが、動的に圧力を加える実験として衝撃圧縮実験がある。

他に非等方的な圧力実験の試みもある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B>

1. **Principio de Arquímedes:**

**アルキメデスの原理**（アルキメデスのげんり）は、[アルキメデス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%82%AD%E3%83%A1%E3%83%87%E3%82%B9)が発見した[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)。「[流体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E4%BD%93)中の[物体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E4%BD%93)は、その物体がおしのけた流体の[重さ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E3%81%95)（[重力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B)）と同じ大きさの[浮力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%AE%E5%8A%9B)を受ける」、というものである。

**概要**

物体を水の中に静かに入れると、物体は水の中に沈む。物体が沈むことによって押しのけられた（物体が存在する場所にあった）水も、重力によって物体の存在する場所へ移動しようとするが、物体の重力と押しのけられた水の[重量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E9%87%8F)に、押しのけられた水の重量が同じになった所で物体は沈むのをやめる。つまり、物体と同じ重量の水を押しのけたところでつりあうので、物体は沈むのをやめる。

これを[数式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%BC%8F)で表現すると、

F = -{\rho}Vg \,

F: [浮力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%AE%E5%8A%9B)[N]、ρ: 水の[密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6)[kg/m3]、V: 物体の水没している部分の[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)[m3]、g: [重力加速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6)[m/s2]

なお、この法則は、水だけでなく全ての流体について当てはまる（[熱気球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%B0%97%E7%90%83)など）。浮力の大きさは、流体中にある物体の密度には関係しないが、流体よりも物体の密度が小さい場合には、重力と浮力はつりあう。すなわち、

ρVg=mg　　m: 物体の質量[kg]

m=ρVであるため、流体の密度ρが既知であれば、Vを測定することで物体の質量を正確に知ることができる。

**氷が解けると水面は上昇するか？**

水に氷が浮いていてその氷が解けていく場合、解けた氷の質量を Δm とすると、水の体積は ΔV=Δm/ρ水 だけ増加する。一方、上の式から、水没している氷の部分の質量 Δm を考えると、Δm=ρ水ΔV 、ΔV=Δm/ρ水 となるため、水没している氷の部分の体積は Δm/ρ水 だけ減少する。よって、水の体積増加分と氷の水没体積減少分が等しくなり、氷が解けても水位は変化しない。

**補足**

氷の方が密度が小さく、ρ氷=0.92[g/cm3] で、水は、ρ水=1.0[g/cm3] 程度であり（[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)でも異なる）、かなりの差があることが分かっている。

**法則の発見**

当時、[ギリシア人](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%82%A2%E4%BA%BA)の[植民都市](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A4%8D%E6%B0%91%E9%83%BD%E5%B8%82)であった[シラクサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A9%E3%82%AF%E3%82%B5)の[僭主](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%83%AD%E4%B8%BB)[ヒエロン2世](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%92%E3%82%A8%E3%83%AD%E3%83%B32%E4%B8%96)が金細工師に[金](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91)を渡し、純金の[王冠](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8E%8B%E5%86%A0)を作らせた。ところが、金細工師は金に混ぜ物をし、王から預かった金の一部を盗んだ、といううわさが広まった。そこで、ヒエロンはアルキメデスに、王冠を壊さずに混ぜ物がしてあるかどうか調べるように命じた。アルキメデスは困り果てたが、ある日、[風呂](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%A2%A8%E5%91%82)に入ったところ、水が湯船からあふれるのを見て、その瞬間、アルキメデスの原理のヒントを発見したと言われる。このとき、浴場から飛び出たアルキメデスは「ヘウレーカ（[希](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%82%A2%E8%AA%9E): ΕΥΡΗΚΑ）、[Eureka](http://ja.wikipedia.org/wiki/Eureka)、ヘウレーカ」（分かったぞ）と叫びながら裸で走っていったという伝説も残っている（もっとも、この時代のギリシアでは、男性は裸で運動するのが普通で、裸で外を走っていても別に珍しくはなかった）。

アルキメデスは、金細工師に渡したのと同じ重量の金塊を用意し、これと王冠を[天秤棒](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E7%A7%A4%E6%A3%92)に吊るしてバランスを取り、水を張った容器に入れた。[空気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E6%B0%97)中では天秤棒は、[てこの原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%A6%E3%81%93%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86)によりバランスが保たれている。てこの原理は水中でも変わらないので、金塊と王冠を水中に沈めても、天秤棒のバランスは保たれるはずである。しかし、水中でのバランスが崩れたために、王冠と金塊の[比重](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E9%87%8D)が違うということが判明し、金細工師の不正が明らかになった[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%82%AD%E3%83%A1%E3%83%87%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86#cite_note-0)。これがアルキメデスの発見した浮力の原理である。金細工師の名は知られていないが、その後[死刑](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%BB%E5%88%91)になったと伝えられる。

アルキメデスとその後の学者たちは、この法則が[自然科学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E7%A7%91%E5%AD%A6)的な法則であるとは気付かず、[数学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%AD%A6)的な[原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E7%90%86)であると考えた。そのため、次の科学法則である[ケプラーの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)が発見されるまでは、1800年もの時間がかかった。

アルキメデスが発見した原理は浮力の原理なのだが、王冠のエピソードによって、物質による密度の違いを説明する際に引き合いに出される場合がある。

[欧州](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A7%E5%B7%9E)の学校では、アルキメデスの原理により、物体の体積を量る実験を行う時に、Eureka can（displacement can、ユリーカ缶）という、側面上部に斜め下向きの[排水管](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8E%92%E6%B0%B4%E7%AE%A1)がひとつ付いた[器具](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%99%A8%E5%85%B7)をよく使用する。排水管の位置以上に水を入れて流れ出るのを待ってから、排水管の下に[メスシリンダー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%82%B9%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%83%80%E3%83%BC)を設置して、排水量を測定する。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%82%AD%E3%83%A1%E3%83%87%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86>

1. **Tensión Superficial:**

**表面張力**（ひょうめんちょうりょく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：surface tension）は、表面を出来るだけ小さくしようとする傾向を持つ[液体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B6%B2%E4%BD%93)の性質、またその力のことで、[界面張力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%95%8C%E9%9D%A2%E5%BC%B5%E5%8A%9B)の一種である。

[分子間力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90%E9%96%93%E5%8A%9B)（液体の分子間に作用する[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)）により、[分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)がお互いを引き合って[凝縮](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%87%9D%E7%B8%AE)しようとする。その結果、液体は表面積が少ない[球形](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%83)になろうとする。[水滴](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E6%BB%B4)や[シャボン玉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%9C%E3%83%B3%E7%8E%89)が丸くなるのも、この原理によるものであると言える。

液体内の分子は周りから[引力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%95%E5%8A%9B)で引かれているのに対して、表面上にある分子は液体に触れていない部分だけ、液体分子の引力の影響を受けていない。その分だけ、表面上にある分子は余った[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)を持つことになり、これが表面張力の強さとなる。[水銀](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E9%8A%80)は特にこの値が高く、[水](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4)も多くの液体よりも高い部類に入る。単位は [dyn](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%B3)/[cm](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%83%81%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB) 、または、m[N](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)/[m](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)を用い、その長さ当りの力を表す。そしてこの値は、その面積当りの表面自由エネルギー(m[J](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB)/m2)と等しい。

表面張力は、[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)が上がれば低くなる。これは温度が上がることで、分子の運動が活発となり、分子間の斥力となるからである。また、不純物によっても影響を受ける。[界面活性剤](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%95%8C%E9%9D%A2%E6%B4%BB%E6%80%A7%E5%89%A4)などの表面を活性化させる物質によって、極端に表面張力を減らすことも可能である。

表面張力は測定器によって測定可能となっている、中でも滴下式は原理的に安定して計測することが出来る。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%A8%E9%9D%A2%E5%BC%B5%E5%8A%9B>

1. **Ecuación de la Continuidad:**

**連続の方程式**（れんぞくのほうていしき、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：equation of continuity、連続方程式、連続の式、連続式などとも言う）は[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)で一般的に適用できる方程式で、「原因もなく[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)が突然現れたり消えたりすることはない」という自然な考え方をあらわす。[保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)と密接に関わっている。

狭義には流体力学における質量保存則

 
{\partial \rho \over {\partial t}} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 


(\rho は[密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6)、\boldsymbol{v} は流れの[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)、t は時間である。\nabla は[ナブラ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%96%E3%83%A9)を参照。)

あるいは、この式を[非圧縮性流体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E5%9C%A7%E7%B8%AE%E6%80%A7%E6%B5%81%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)に適用した

 
\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 


を指す。

広義には、スカラー物理量 q についての[保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)


    {\partial\rho \over \partial t} + \nabla\cdot\boldsymbol{j} = 0


(\rho : q の密度、\boldsymbol{j} : q の[流束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E6%9D%9F))

を指し、 更に一般化して、q の[輸送方程式](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%BC%B8%E9%80%81%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F&action=edit&redlink=1)(一般の保存則)


    {\partial\rho \over \partial t} + \nabla\cdot\boldsymbol{j} = \sigma 


(\sigma : q の[湧き出し](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B9%A7%E3%81%8D%E5%87%BA%E3%81%97&action=edit&redlink=1)密度)

を指すこともある。

**流体における連続の式**

**質量保存則**

速度が \boldsymbol{v} で表される流れを考える。\rho を質量密度、\boldsymbol{j} を質量の流束とする。流れ、すなわち、[移流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A7%BB%E6%B5%81)あるいは[対流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%BE%E6%B5%81)は速度 \boldsymbol{v} での物質の移動であるので、流束は

![
\boldsymbol{j}=\rho\boldsymbol{v}
](data:image/png;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAADsAAAASBAMAAAAXqLt+AAAAMFBMVEX///9iYmJQUFC2trYwMDBAQECKiorm5uYEBAQiIiKenp50dHQWFhYMDAzMzMwAAAAPTNmgAAAAAXRSTlMAQObYZgAAAOlJREFUKBVjYGBg4LsDJHAD7j+45UAyC/BLUyL7csYGdO1MSgoMMW0M8QlAd9/j+AeSjjkDAhPAKg8zeLNs/8HwH8jjWVAPlgaLQwhWBQZNG+6/DPlAaTaG/AYkKRDz/QMGnzre3wxMCiBevAOIRAKyDAxXGd5/Z+A0AAne3wAikeyeysD3i0H+AEMtSJz9/wMQhQS+MTBNYNAPYAgDibH9QJIBMZl/M9gWMKyfwO0A4rF+AZFIgPGWoDoDA/edSWAxoBNRAWcAgs8yAehEVMCfgODbfz8PdjhChMG+AMHhvDsZwYGwMhECABNxPe8/Xfd3AAAAAElFTkSuQmCC)

となる[[出典 2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F#cite_note-.E5.B7.BD.E6.B5.81.E4.BD.93-1)。

質量保存則から連続の式は

{\partial\rho \over \partial t} + \nabla\cdot\left(\rho\boldsymbol{v}\right) = 0 

となる。

**輸送定理による導出**

速度が \boldsymbol{v} で表される流れにおける連続の方程式は、質量保存則と[レイノルズの輸送定理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%A4%E3%83%8E%E3%83%AB%E3%82%BA%E3%81%AE%E8%BC%B8%E9%80%81%E5%AE%9A%E7%90%86)を用いても導ける[[出典 1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F#cite_note-.E3.83.8F.E3.83.B3.E3.83.89.E3.83.96.E3.83.83.E3.82.AF-0)。


0= {\mathrm{d}\over\mathrm{d}t} \int_{\Omega(t)}  \rho\, dV 
= \int_{\Omega(t)} \left(
{D\rho \over Dt} + \rho\, \nabla\cdot\boldsymbol{v}
\right) dV


ここで、{D \over Dt} は[実質微分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9F%E8%B3%AA%E5%BE%AE%E5%88%86)であり、\Omega(t) は流れと共に移動する任意の積分領域とする。一番目の等式は質量保存則を、二番目の等式はレイノルズの輸送定理を表している。

これより、

{D\rho \over Dt} + \rho\, \nabla\cdot\boldsymbol{v} = 0

が成立する。

この式は、実質微分の定義


{D \over Dt}\equiv{\partial \over \partial t}+\boldsymbol{v}\cdot\nabla


と公式


\nabla\cdot\left(\rho\boldsymbol{v}\right)
=\rho\, \nabla\cdot\boldsymbol{v} 
+ \boldsymbol{v}\cdot\nabla \rho


を使って、

 
{\partial \rho \over {\partial t}} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 


と等価であることがわかる。

**非圧縮性流体についての連続の方程式**

連続の方程式

{D\rho \over Dt} + \rho\, \nabla\cdot\boldsymbol{v} = 0

に対して、[非圧縮性流体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E5%9C%A7%E7%B8%AE%E6%80%A7%E6%B5%81%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)の性質(密度が一定であること)を付加すると、非圧縮性流体における連続の式が導き出される。

密度が一定というのは、空間的に一様という意味ではなく、変形していく領域内で一定という意味である[[出典 2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F#cite_note-.E5.B7.BD.E6.B5.81.E4.BD.93-1)。

つまり、\frac{D \rho}{D t} = 0 となるので、\rho \ne 0 であることから、


\nabla\cdot\boldsymbol{v}
 = 0


を得る。この式を[非圧縮性条件](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E5%9C%A7%E7%B8%AE%E6%80%A7%E6%9D%A1%E4%BB%B6&action=edit&redlink=1)ともいう。

この条件を満たす流れにおいて、流れていく流体要素の体積は不変である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F>

1. **Ecuación de Bernoulli:**

**ベルヌーイの定理**（ベルヌーイのていり、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：Bernoulli's principle）または**ベルヌーイの法則**とは、[非粘性流体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E7%B2%98%E6%80%A7%E6%B5%81%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)([完全流体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%AE%8C%E5%85%A8%E6%B5%81%E4%BD%93&action=edit&redlink=1))のいくつかの特別な場合において、**ベルヌーイの式**と呼ばれる運動方程式の第ー積分が存在することを述べた定理である。 ベルヌーイの式は[流体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E4%BD%93)の速さと[圧力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B)と外力の[ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)の関係を記述する式で、[力学的エネルギー保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#.E5.8F.A4.E5.85.B8.E5.8A.9B.E5.AD.A6.E3.81.AB.E3.81.8A.E3.81.91.E3.82.8B.E5.8A.9B.E5.AD.A6.E7.9A.84.E3.82.A8.E3.83.8D.E3.83.AB.E3.82.AE.E3.83.BC.E4.BF.9D.E5.AD.98.E5.89.87.E3.81.A8.E9.81.8B.E5.8B.95.E9.87.8F.E4.BF.9D.E5.AD.98.E5.89.87)に相当する。この定理により流体の挙動を平易に表すことができる。 [ダニエル・ベルヌーイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%83%8B%E3%82%A8%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%8C%E3%83%BC%E3%82%A4)（Daniel Bernoulli 1700-1782）によって1738年に発表された。 なお、運動方程式からのベルヌーイの定理の完全な誘導はその後の1752年に[レオンハルト・オイラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%83%8F%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%AA%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%83%BC)により行われた。[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%8C%E3%83%BC%E3%82%A4%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86#cite_note-.E6.97.A5.E9.87.8E-0)

ベルヌーイの定理は適用する**非粘性流体**の分類に応じて様々なタイプに分かれるが、大きく2つのタイプに分類できる。 **外力が**[**保存力**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%8A%9B)**であること**、[**バロトロピック性**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%90%E3%83%AD%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%83%E3%82%AF%E6%80%A7)(密度が圧力のみの関数となる)という条件に加えて、

[定常流](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%AE%9A%E5%B8%B8%E6%B5%81&action=edit&redlink=1)という条件で成り立つ法則(I)

[渦なしの流れ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B8%A6%E3%81%AA%E3%81%97%E3%81%AE%E6%B5%81%E3%82%8C&action=edit&redlink=1)([en:Potential flow](http://en.wikipedia.org/wiki/Potential_flow))という条件で成り立つ法則(II)

である。(I)の法則は[流線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E7%B7%9A)上(正確にはベルヌーイ面上)でのみベルヌーイの式が成り立つという制限があるが、(II)の法則は**全空間**で式が成立する。

最も典型的な例である

外力のない非粘性・[非圧縮性流体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E5%9C%A7%E7%B8%AE%E6%80%A7%E6%B5%81%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)の定常な流れに対して


\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} = \mathrm{constant}


が流線上でなり立つ。ただし、v は流体の速さ、p は圧力、\rho は密度を表す。

は(I)のタイプに属する。

(II)を「一般化されたベルヌーイの定理」と呼ぶこともある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%8C%E3%83%BC%E3%82%A4%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86>

1. **Viscosidad:**

**粘度**（ねんど、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：viscosity）は、[流体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E4%BD%93)のねばりの度合である。**粘性率**、**粘性係数**とも呼ぶ。

粘性のある液体を間にはさんだ面積 *S* の2枚の平板を相対速度 *U* で平行に動かすと、動いている方向と反対方向に[剪断応力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%89%AA%E6%96%AD%E5%BF%9C%E5%8A%9B)(摩擦応力ともいう) τが発生する。平板の間隔を*h*、液体と板の間に発生する力を*F* と置くと

\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{U}{h}

と表現される。*μ*は(動粘度と区別するために) 絶対粘度という。量記号には*μ*のかわりに*η*を用いることもある。

これをもう少し一般化して記述する。剪断応力は単位時間当りの剪断変形率に比例する。面と垂直方向にy軸を取り、面の進行方向の速度流体の速度を*u*と置くと、

\tau=\mu {\partial u \over \partial y} 

と表現される。これを[ニュートンの流体摩擦法則](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B5%81%E4%BD%93%E6%91%A9%E6%93%A6%E6%B3%95%E5%89%87&action=edit&redlink=1)という。

また、粘度*μ*が一定の流体を[**ニュートン流体**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E6%B5%81%E4%BD%93)と呼ぶ。

[SI](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)単位はPa·s（[パスカル秒](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%AB%E7%A7%92)）である。[CGS単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/CGS%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)ではP（[ポアズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%82%A2%E3%82%BA)）が用いられた。

**動粘度**

粘度は、毛管粘度計など、細い管のなかを自重で通過する速度（時間）によって比較できるので、絶対粘度を密度で割った**動粘度**（**動粘性係数**ともいう）が指標として用いられる。

\nu = \frac{\mu}{\rho}

単位はSIでは m2/s であるが、cm2/s = 10−4m2/s = 1 St（[ストークス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%82%B9)）も使われる（即ち、1 mm2/s = 1 cSt（センチストークス））。工業的にはセイボルト秒も使われる。

[潤滑油](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%A4%E6%BB%91%E6%B2%B9)では、[粘度指数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%98%E5%BA%A6%E6%8C%87%E6%95%B0) (VI) で、高温・低温の粘度を規定している。

液体の粘度は温度が上昇すると低下する。[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)の粘度は温度が上昇すると上昇する。

[固体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E4%BD%93)から液体への[転移](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A7%8B%E9%80%A0%E7%9B%B8%E8%BB%A2%E7%A7%BB)粘度の急激な低下という見方もでき、[ガラス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%A9%E3%82%B9)のように、粘度で軟化温度などを定義することもある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%98%E5%BA%A6>

1. **Turbulencia:**

**乱流**（らんりゅう、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：turbulence）は、[流体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%81%E4%BD%93)の流れ場の状態の一種。乱流でない流れ場は[層流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%A4%E6%B5%81)と呼ばれる。

生活の中でのわかりやすい例としては水道の蛇口から流れる水がある。水道の水は流れが少ないときはまっすぐに落ちるが、少し多くひねると急に乱れ出す。このとき前者が層流、後者が乱流である。 生活の中で見られる空気や水の流れはほぼ全てが乱流であるだけでなく、[熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1)や物質を輸送し[拡散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8B%A1%E6%95%A3)する効果が非常に強いので工学的にも非常に重要である。 層流と乱流のおおよその区別は[レイノルズ数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%A4%E3%83%8E%E3%83%AB%E3%82%BA%E6%95%B0)によって判断され、レイノルズ数の値が大きいと乱流と判断される。また、層流が乱流に遷移するときのレイノルズ数を臨界レイノルズ数という。

乱流の確立した定義は現時点においてもないが、数学的には[ナヴィエ・ストークス方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%B4%E3%82%A3%E3%82%A8%E3%83%BB%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%82%B9%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の非定常解の集合であるということができる。

乱流の数値シミュレーションは、気象予報や自動車等の空力設計からノートパソコンの冷却まで工学的には非常に幅広く利用されている。しかも計算機性能を限りなく要求するため、[スパコン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%91%E3%82%B3%E3%83%B3)の重要な用途の一つになっている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%B1%E6%B5%81>

1. **Onda:**

波動（はどう、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：wave）とは、単に[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2)とも呼ばれ、（海や湖などの）波のような動き全般のことである。

[海](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%B7)や[湖](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B9%96)などの表面の波動に関しては[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2)を参照のこと。

現代の量子力学の[波動力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%A6)では、物質も波動である、とされている。

**物理学における波動**

物理学においては波動と言うと、何らかの[物理量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E9%87%8F)の周期的変化が[空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93)方向に[伝播](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E6%92%AD)する現象を指している。

波動には、[振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)、[周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%9C%9F)、[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)、[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)、[波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E6%95%B0)などの物理量が定義される。

同じ時刻に場の量が同じ値をとる点の集まりによってできる面を[波面](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B3%A2%E9%9D%A2&action=edit&redlink=1)という。波面が球面のものを[球面波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%83%E9%9D%A2%E6%B3%A2)という。波面が平面のものを[平面波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E9%9D%A2%E6%B3%A2)という。

[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)が進行方向に平行に[単振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E6%8C%AF%E5%8B%95)する波を[縦波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B8%A6%E6%B3%A2)、垂直に単振動する波を[横波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A8%AA%E6%B3%A2)という。

[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)や水面の波、あるいは[地震波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E9%9C%87%E6%B3%A2)のように[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)の[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)が[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)を通して[伝播](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E6%92%AD)する[現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E8%B1%A1)のほかに、[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)のように媒質がない空間を伝播するものもある。

古くは[古代ギリシャ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%A4%E4%BB%A3%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%83%A3)時代から、光は波なのか粒子なのかと疑問視されており両方の説が存在していた。1600年代になりオランダの数学者・天文学者・物理学者の[クリスティアーン・ホイヘンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%82%A2%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9)が[光の波動説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E3%81%AE%E6%B3%A2%E5%8B%95%E8%AA%AC)を近代風に基礎付けした。一方イギリスの[アイザック・ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)（1643年～1727年）は光は[粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90)であるとする説を『[光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%AD%A6_(%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)&action=edit&redlink=1)』において展開した。

媒質が無い状態での波動には、[ニュートンによる物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E5%8A%9B%E5%AD%A6)や[古典物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%A4%E5%85%B8%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)では説明出来ない現象もある。例えば電子や光を含む[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)は[波動性と粒子性を同時に有しており](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90%E3%81%A8%E6%B3%A2%E5%8B%95%E3%81%AE%E4%BA%8C%E9%87%8D%E6%80%A7)、これを[粒子と波動の二重性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90%E3%81%A8%E6%B3%A2%E5%8B%95%E3%81%AE%E4%BA%8C%E9%87%8D%E6%80%A7)と言う。これは[現代物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E4%BB%A3%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)によってようやく説明可能になった。

1924年、[ド・ブローイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%82%A4)は[物質波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA%E6%B3%A2)という考え方を発表した。その2年後には、この物質波の考え方を発展させてシュレーディンガーが[波動力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%A6)を構築した。[波動力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%AD%A6)では、「[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)というものはすべて波としての性質を併せ持っている」と説明する。この波動力学は、後になりハイゼンベルクの[マトリックス力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%83%88%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9%E5%8A%9B%E5%AD%A6)と実質的に同等のものであるということがやがて理解されるようになり、これらは[量子力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E5%AD%A6)として統一されることになった。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95>

1. **Onda Transversal y Longitudinal:**

[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)は[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)の振動が伝播する現象であるが、媒質の振動が波の進行方向に対して平行であるものを**縦波**（longitudinal wave）といい、垂直であるものを**横波**（transverse wave）という。 媒質の種類により縦波が伝播できるか、横波が伝播できるかが決まる。

空気を媒質とする[**音波**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)は、空気の密度の振動が伝播するもの (疎密波)であり、**縦波**である。

真空や透明な物体 (あるいは[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)) を媒質とする[**電磁波**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)([光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)を含む)は**横波**である。電磁波が横波であることは[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)から導かれる。

[弾性体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E6%80%A7%E4%BD%93)を媒質とする[弾性波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E6%80%A7%E6%B3%A2)（広義の[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)）には**縦波と横波の両方**が存在する。 実際、[地震波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E9%9C%87%E6%B3%A2)には縦波である[P波](http://ja.wikipedia.org/wiki/P%E6%B3%A2)と横波である[S波](http://ja.wikipedia.org/wiki/S%E6%B3%A2)が存在し、固体中ではその両方が伝播する。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B8%A6%E6%B3%A2%E3%81%A8%E6%A8%AA%E6%B3%A2>

1. **Longitud de Onda:**

波長（はちょう、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：wavelength）は、[空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93)を伝わる波（[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)）の持つ周期的な長さのこと。空間は3[次元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A1%E5%85%83)と限る必要はない。

[正弦波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%A3%E5%BC%A6%E6%B3%A2)を考えると（つまり波形が時間や、空間の位置によって変わらない状態）、波長λには、

 \lambda = {2 \pi \over k} = {2 \pi v \over \omega} = {v \over \nu} 

の関係がある。 \begin{matrix} k \end{matrix} は[波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E6%95%B0)、 \begin{matrix} \omega \end{matrix} は[角振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)、 \begin{matrix} v \end{matrix} は波の[位相速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8%E9%80%9F%E5%BA%A6)、 \begin{matrix} \nu \end{matrix} は[振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)（[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)）である。波数 \begin{matrix} k \end{matrix} は  k =\, {1/\lambda} と定義する場合もある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7>

1. **Función Periódica:**

**周期関数**（しゅうきかんすう、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：periodic function）とは、そのとる値が定期的に繰り返すような関数のことである。

周期関数の代表例として、[三角関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E8%A7%92%E9%96%A2%E6%95%B0)、[楕円関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%95%E5%86%86%E9%96%A2%E6%95%B0)などが挙げられる。日常的には、時刻や日付、あるいは月の満ち欠け、振り子の運動（[単振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E9%81%8B%E5%8B%95)）などの周期運動は周期関数によって表現される。

ある一定の[時間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93)ごとに[現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E8%B1%A1)などが反復されるときのその時間の長さを**周期**（しゅうき）という。[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)現象においては、波の周期*T*は[振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)（[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)）の逆数となり、周期と波の[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)*v*との積*vT*が[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)になる。[等速円運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AD%89%E9%80%9F%E5%86%86%E9%81%8B%E5%8B%95)においては、周期*T*と[角振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)ωの積は2πになり、周期*T*と[角速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%80%9F%E5%BA%A6)の積は[円周](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E5%91%A8)の長さになる。

**定義**

変数 *x* の関数 *f*(*x*) に対し 0 でない定数 ω が存在して、*x* の値に無関係に

*f*(*x*) = *f*(*x* + ω)

を満たすならば、関数 *f* は**周期的**である、あるいは**周期関数**であるという。また、このような定数 ω を関数 *f* の**周期**と呼ぶ。ゆえに、関数が周期的であるという代わりに、関数が周期を持つということもある。関数 *f* が周期 ω をもつならば、任意の整数 *n* に対して次が成り立つ：

*f*(*x*) = *f*(*x* + *n*ω)

関数が周期を持つとき、周期は一意的には定まらない。たとえば ω が周期であれば、その 0 でない整数 *k* 倍した *k*ω もやはり周期である。ω0が正の値で、全ての周期がある周期 ω0 の整数倍であらわされるならば、周期 ω0 を**基本周期**という（正確には、周期全体の成す[格子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A0%BC%E5%AD%90)を **Z** 上生成するような周期を基本周期という。楕円関数なら 2 つの基本周期が存在する。また、楕円関数の二つの基本周期が張る平行四辺形を**基本領域**と呼ぶ）。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%9C%9F%E9%96%A2%E6%95%B0>

1. **Interferencia:**

波における**干渉**（かんしょう、interference）とは、複数の波の[重ね合わせ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E3%81%AD%E5%90%88%E3%82%8F%E3%81%9B)によって新しい波形ができることである。互いに[コヒーレント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B9)な（[相関性](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%9B%B8%E9%96%A2%E6%80%A7&action=edit&redlink=1)が高い）波のとき干渉が顕著に現れる。このような波は、同じ波源から出た波や、同じもしくは近い[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)を持つ波である。

波の重ね合わせの原理とは、ある点に生じた波の[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)が、その点に影響するすべての波の振幅の和と一致することである。同じ点で波の山と山または谷と谷が干渉すると振幅の絶対値は大きくなり、山と谷が干渉すると振幅の絶対値は小さくなる。

波の干渉は、[トマス・ヤング](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%9E%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%83%A4%E3%83%B3%E3%82%B0)の複スリットを使った光の干渉の実験（[ヤングの実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A4%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93)）とも関係している。ヤングはこの実験で、2つのコヒーレントな光波が干渉しあって、干渉縞を形成することを示した。複スリットからの2つの光波は同じ波源から来たものであり、同じ波長分布を持つ。ヤングの干渉縞の中心では、この二つの波が、それぞれの波長において同じ位相をもつ。一般的にこの種の干渉は、1つの波源から発し、2つの異なる経路を通って伝播した波に起こりやすい。複数の波源からの波では、位相関係を調整できるときのみ干渉が起きる。これは位相関係が調整された波は、1つの波源から発したのと同じとみなせるからである（[ホイヘンスの原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86)を参照）。干渉縞には、波が強めあう「明るい」領域と、波が弱めあう「暗い」領域が形成されるが、[エネルギー保存の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)により、干渉縞にエネルギーの失われた暗い領域が形成されればその分明るい領域が形成される。

どんな光源でも干渉縞を作ることができる。例えば、[ニュートン環](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E7%92%B0)は太陽光でも観察することができる。しかし、白色光はあらゆる色のスペクトルが混ざっているためさまざまな幅の縞模様ができ、鮮明な干渉縞を得ることができない。一方、[ナトリウムランプ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%88%E3%83%AA%E3%82%A6%E3%83%A0%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%97)は単色光に近い光なので、鮮明な干渉縞を得ることができる。そして、最も鮮明な干渉縞が得られるのはほぼ完全な単色光を出すことができる[レーザー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC)である。

**干渉のしくみ**

2つの波が重なりあうとき、形成される波形は周波数（または波長）と[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)、そして位相関係に依存する。もし、2つの波の振幅が同じ *A* で波長も同じであるとき、2つの波の位相関係に応じて振幅が0と2の間の値をとる。

2つの波が同相（位相差が0）である場合、すなわち波の山と山、谷と谷が一致するとき、2つの振幅をそれぞれ *A*1 と *A*2 とすると、干渉後の光の振幅*A*は *A* = *A*1 + *A*2 となる。これを、**増加的干渉**もしくは**建設的干渉**、**干渉による強めあい**などと呼ぶ。

もし、2つの波が逆相（位相差が180°）である場合、波は互いに打ち消しあうことになる。そして干渉後の光の振幅*A*は*A* = |A1 − *A*2| となる。*A*1 = *A*2 ならば、振幅は0である。これは、**減殺的干渉**もしくは**相殺的干渉**、**干渉による弱めあい**などと呼ばれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)>

1. **Onda Estacionaria:**

**定常波**(ていじょうは、**standing wave**または**stationary wave**)とは、[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)・[周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%9C%9F)([振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0)または[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0))・[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)・速さ([速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)の[絶対値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E5%80%A4))が同じで進行方向が互いに逆向きの2つの波が重なり合うことによってできる、波形が進行せずその場に止まって[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)しているようにみえる[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)のことである。**定在波**(ていざいは)ともいう。

**特徴**

各点は同じ[位相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)・周期で振動する。そのため全ての点の変位が0になる時刻および全ての点の[変位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E4%BD%8D)が最大になる時刻が存在する。

[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)中の各点はそれぞれの位置に応じた振幅で振動する。

全く振動せず振幅が0になる点および振幅が最大になり変位が最も揺れ動く点が現れる。前者を**節**(*node*)、後者を**腹**(*anti-node*)という。重なり合う2つの波の波長を*λ*とすると、節および腹はそれぞれ*λ/2*ごとに現れる。

腹における振幅は元の波の2倍になる。

各点の振動の周期は元の波と同じである。

**正弦定常波**

波長・周期・振幅・速さが等しく互いに逆向きの2つの正弦波を考える。

y_1(x,t)=A\sin\left\{\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)+\delta_1\right\}=A\sin\left\{2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\delta_1\right\}=A\sin(\omega t-kx+\delta_1)

y_2(x,t)=A\sin\left\{\omega\left(t+\frac{x}{v}\right)+\delta_2\right\}=A\sin\left\{2\pi\left(\frac{t}{T}+\frac{x}{\lambda}\right)+\delta_2\right\}=A\sin(\omega t+kx+\delta_2)

ただし*A*は振幅、*ω*は[角周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)、*v*は伝播速度、*δ1*,*δ2*はそれぞれの初期位相で*T*は周期、*λ*は波長、*k*は[波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E6%95%B0)で*x*,*t*は媒質上の位置および時刻である。

この節では、これら2つの正弦波によってつくられる正弦定常波

y(x,t)=y_1+y_2

について述べる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9A%E5%B8%B8%E6%B3%A2>

1. **Sonido:**

**音**（おと）とは、物の響きや[人](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA)や鳥獣の[声](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A3%B0)[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-kojien-0)、物体の[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)が空気などの振動（[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)）として伝わって起す聴覚の内容[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-kojien-0)[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-daijirin-1)、またはそのもととなる音波[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-kojien-0)[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-daijirin-1)を指す。

[心理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%83%E7%90%86%E5%AD%A6)的には聴覚的感覚を「音」と呼ぶため[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)が人間の[可聴域](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E8%81%B4%E5%9F%9F)にあるもののみを指すのに対し、[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)的には音波そのものを音と呼び[超音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E9%9F%B3%E6%B3%A2)や[低周波音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8E%E5%91%A8%E6%B3%A2%E9%9F%B3)も含める[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-ongaku-2)（[#聴覚](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#.E8.81.B4.E8.A6.9A)、[#音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#.E9.9F.B3.E6.B3.A2)の節をそれぞれ参照）。

音楽的には[楽音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A5%BD%E9%9F%B3)と[噪音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%99%AA%E9%9F%B3)にわけられる[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-3)（[#音楽に於ける音の種類](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#.E9.9F.B3.E6.A5.BD.E3.81.AB.E6.96.BC.E3.81.91.E3.82.8B.E9.9F.B3.E3.81.AE.E7.A8.AE.E9.A1.9E)の節を参照）。

**物理学における音：音波**

[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)においては、音とは[物体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E4%BD%93)を通して[縦波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B8%A6%E6%B3%A2)として伝わる[力学的エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%9A%84%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の変動のことであり、[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)としての特徴（[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)・[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)・[周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%9C%9F)・[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)・[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)など）を持つ**音波**として表せる。

音波を伝える物質は[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)と呼ばれる。音波は[圧力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B)変動の[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)として伝わり、ある点での[密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6)の変動を引き起こす。媒質中の粒子はこの波によって位置を変え、振動する。音について研究する物理学の分野は[音響学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%AD%A6)と呼ばれる。

媒質が流体（気体または液体）の場合は[ずれ応力](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%81%9A%E3%82%8C%E5%BF%9C%E5%8A%9B&action=edit&redlink=1)を保持できないため縦波しか伝搬できないが、固体中では縦波・横波・曲げ波・ねじり波などとして伝搬できる[[6]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3#cite_note-kiso-5)。それら縦波以外の波も広義の音波に含む場合がある。

**音速**

音波を伝える速さは物質によって異なり、しばしば物質の基本的な特性として示される。一般的に、音速は媒質の[弾性率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%BE%E6%80%A7%E7%8E%87)と密度との比の平方根に比例する。 これらの物理特性と音速とは周囲の状況によって変化する。例えば、大気などの気体中の音速は[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)に依存する。 大気中の音速はおよそ 344 m/s であり、水中では 1500 m/s、鋼鉄の棒では 5000 m/s である。 音速は振幅（音の大きさ）にも僅かに依存する。これは倍音の弱い成分や音色の混合など、非線型の伝達効果のためである（[en:parametric array](http://en.wikipedia.org/wiki/parametric_array)を参照のこと）。

**音圧**

**音圧**は、[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)によって引き起こされる周囲からの[圧力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B)のずれである。 空気中では[マイクロフォン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%B3)によって、水中では[ハイドロフォン](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%89%E3%83%AD%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%B3&action=edit&redlink=1)によって測定される。 [SI単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/SI%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)において、音圧の単位は[パスカル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%AB) (記号: Pa) である。 瞬間音圧は、ある点でのある瞬間の音圧である。 有効音圧は、ある時間内で瞬間音圧の[RMS](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E4%B9%97%E5%B9%B3%E5%9D%87%E5%B9%B3%E6%96%B9%E6%A0%B9)をとったものである。 音を波として記述したとき、音圧に相当するものは[粒子速度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B2%92%E5%AD%90%E9%80%9F%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)である。 振幅が小さいとき、音圧と粒子速度は線形の関係にあり、両者の比が[音響インピーダンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%BC%E3%83%80%E3%83%B3%E3%82%B9)である。 音響インピーダンスは波の特徴と媒質の両方に依存する。

瞬間音圧における音の強さは音圧と粒子速度に依るため、[ベクトル量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB%E9%87%8F)である。

**音圧レベル**

人間は非常に幅広い強度の音を感知できるため、音圧は[常用対数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B8%B8%E7%94%A8%E5%AF%BE%E6%95%B0)を用いた[デシベル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%B7%E3%83%99%E3%83%AB)で表されることが多い。

**音圧レベル** (sound pressure level, SPL) は *L*p と記され、以下のように定義される。


L_\mathrm{p}=10\, \log_{10}\left(\frac{{p}^2}{{p_0}^2}\right) =20\, \log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right)\mbox{ dB}


ここで *p* は音圧の[RMS](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E4%B9%97%E5%B9%B3%E5%9D%87%E5%B9%B3%E6%96%B9%E6%A0%B9)、*p*0 は基準となる音圧である（音圧レベルを示す際には、用いた基準音圧 (re) も表記することが重要である）。

一般的な基準音圧としては、[ANSI](http://ja.wikipedia.org/wiki/ANSI) S1.1-1994 では、 大気中で 20 µ[Pa](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%AB)、水中で 1 µPa と定められている。

人間の[耳](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%80%B3)は全ての周波数に対して感度が一定ではないので、音圧レベルは人間の感覚に合うように周波数で[重み付け](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%87%8D%E3%81%BF%E9%96%A2%E6%95%B0&action=edit&redlink=1)される事が多い。 [国際電気標準会議](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%A8%99%E6%BA%96%E4%BC%9A%E8%AD%B0) (IEC) はいくつかの重み付けの方法を定義している。 「A特性周波数重み付け ([en:A-weighting](http://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting)) 」は雑音に対する感度に一致し、それによって重み付けされた音圧レベルは dBA と表記される。 「C特性周波数重み付け」はピークレベルを測定するのに用いられる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3>

1. **Decibelio:**

**デシベル** (decibel, dB) は、[電気工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%B7%A5%E5%AD%A6)や[振動・音響工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%AD%A6)などの分野で使用される[無次元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A1%E6%AC%A1%E5%85%83%E6%95%B0)の単位。

**ベル**

ある物理量を基準となる量との比の対数によって表すとき（これを[レベル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%99%E3%83%AB)表現という）、[対数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%BE%E6%95%B0)として底が10である[常用対数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B8%B8%E7%94%A8%E5%AF%BE%E6%95%B0)を採る場合の単位がベル(bel, B)と定義される。 すなわち、ある基準量*A*に対する*B*の比が*x*ベルであるとき、

\frac{B}{A} = 10^x

x =  \log_{10}\frac{B}{A}

の関係がある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%B7%E3%83%99%E3%83%AB>

1. **Acústica:**

**音響学**（おんきょうがく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：acoustics）は、[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)と[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)を扱う[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の一分野である。しかし、単に物理的な現象だけではなく、音や振動に関して一般的な事柄を広く扱う。

**分野**

音響学は扱う範囲が広いため、分野により以下のような分類をする。

**音響生理**

[音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3)は[人間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E9%96%93)の生理的感覚([聴覚](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%81%B4%E8%A6%9A))に直結した物理現象であるため、[医学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%BB%E5%AD%A6)的、人体構造学的に研究が行われた。その範囲を[音響生理](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E7%94%9F%E7%90%86&action=edit&redlink=1)という。この分野は音に関して、医学的、生理学的分野が含まれる。詳細については[聴覚](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%81%B4%E8%A6%9A)を参照。

**音響心理**

[音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3)は人間の心理的感覚に直結した物理現象であるため、[心理学的](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%BF%83%E7%90%86%E5%AD%A6%E7%9A%84&action=edit&redlink=1)、[統計学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%AD%A6)的に研究が行われた。その範囲を[音響心理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%BF%83%E7%90%86%E5%AD%A6)という。この分野は音に関して、[心理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%83%E7%90%86%E5%AD%A6)的分野が含まれる。

**音響工学**

音を研究する際、測定基準や測定環境などの標準化を目的として研究された分野で、音響学との大きな相違はないが[音響生理](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E7%94%9F%E7%90%86&action=edit&redlink=1)はこの分野に含まれず。[音響心理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%BF%83%E7%90%86)についても、測定に主観的、心理的要素が含まれないよう研究された。そういった意味では音響学と違う意味合いをもっている。[建築音響工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BB%BA%E7%AF%89%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%B7%A5%E5%AD%A6)もこれに含まれる。また、初期の機械的な録音再生技術([蓄音機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%93%84%E9%9F%B3%E6%A9%9F))もこの分野の一端である。

**電気音響工学**

音響工学の中でも特に、電気に関連した分野を扱い、研究された分野を[電気音響工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%B7%A5%E5%AD%A6)という。変換理論、録音再生機器などはこの分野に含まれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%9F%BF%E5%AD%A6>

1. **Efecto Doppler:**

**ドップラー効果**（ドップラーこうか）とは、[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)（[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3)や[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)など）の発生源（音源・光源など）と観測者との相対的な[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)によって、波の[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)が異なって観測される現象のこと。発生源が近付く場合には波の振動が詰められて周波数が高くなり、逆に遠ざかる場合は振動が伸ばされて低くなる。

例えば、救急車などが通り過ぎる際、近付くときにはサイレンの音が高く聞こえ、遠ざかる時には低く聞こえるのはこの現象によるものである。

音についてのこの現象は古くから知られていたが、オーストリアの物理学者、[クリスチャン・ドップラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%81%E3%83%A3%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%89%E3%83%83%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC)が速度と周波数の間の数学的な関係式を[1842年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1842%E5%B9%B4)に見出し、オランダ人の化学者・気象学者である[クリストフ・ボイス・バロット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%9C%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%83%90%E3%83%AD%E3%83%83%E3%83%88)（[Christophorus Buys-Ballot](http://en.wikipedia.org/wiki/C.H.D._Buys_Ballot)、1817年10月10日-1890年2月3日）が、[1845年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1845%E5%B9%B4)[オランダ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%80)の[ユトレヒト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A6%E3%83%88%E3%83%AC%E3%83%92%E3%83%88)で、列車に乗った[トランペット奏者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%83%E3%83%88%E5%A5%8F%E8%80%85)が[G](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88_(%E9%9F%B3%E5%90%8D))の音を吹き続け、それを[絶対音感](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E9%9F%B3%E6%84%9F)を持った音楽家が聞いて[音程](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E7%A8%8B)が変化する事で証明した。

観測者も音源も同一直線上を動き、音源S(Source)から観測者O(Observer)に向かう向きを正とすると、観測者に聞こえる音波の振動数は、

f'=f\times{V-v_{\rm o}\over V-v_{\rm s}}

となる。ここで、f ： 音源の出す音波の振動数、V ： [音速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%80%9F)、v_{\rm o} ： 観測者の動く速度、v_{\rm s} ： 音源の動く速度

上記の f' を求める公式は右図の時空間モデルから導くことができる．図の○は波の山，●は波の谷であり，音源は時刻 0 に原点を通るとしている．速度 v_{\rm o} で原点から離れる観測者が聴く音の周期 T_{\rm o} は山と山の間隔の t 軸への射影であり，図の赤い二つの三角形は相似である．

**光のドップラー効果**

[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)の場合でも同様の効果が観測され、遠ざかる光源からの光は赤っぽく見え（[赤方偏移](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%A4%E6%96%B9%E5%81%8F%E7%A7%BB)）、近付く光源からの光は青っぽく見える（[青方偏移](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%92%E6%96%B9%E5%81%8F%E7%A7%BB)）。しかし、光の伝播は[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)に従うため、通常の波のドップラー効果とは違った現象を見せる。

そもそもドップラー効果の原因は、波源や観測者が波の[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)に対して速度を持つために波の山の間隔が変わる所にあるが、光は波源や観測者の速度によらず常に[光速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F) c で伝播するように観測されるので、山の間隔の変わり方が通常の波の場合とは異なってくる。また、光の場合、波源が運動していると、特殊相対論的な効果によって波源上での時間の進み方が遅れて観測される。これによって波源から出る光の振動数が小さく観測される効果が付け加わる。

以上の効果によって、光源Sが観測者Oから見て角度\thetaの方向に速さ Vで運動している場合、Oでの光の振動数 \nu' は、

\nu'=\nu\times{\sqrt{1-(V/c)^2} \over 1-(V/c) \cos \theta}

となる。ここで、\nu ： 光源の出す光の振動数、V： 観測者から見た光源の速さ、c ： 光速、\theta ： 観測者から見た光源の動く方向（\theta=0 ：観測者に向かってくる場合）

重要なのは、光の場合には光源が観測者の視線方向に対して垂直に運動していて、視線方向の速度を持っていない場合(\theta=90°)でも光の振動数が変化して見えることである。これを**横ドップラー効果**という。

実際の活用法としては、[恒星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%81%92%E6%98%9F)などの天体の可視光[スペクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)に見られる吸収線（[フラウンホーファー線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E7%B7%9A)）の波長の理論値とのズレ（ドップラー・シフト）から、地球とその天体との[相対速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E9%80%9F%E5%BA%A6)を算出する事が出来る。また同じ[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)におけるドップラー効果を利用したものとして[ドップラー・レーダー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%83%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%83%80%E3%83%BC)がある。

光のドップラー効果は[星虹（スターボウ）](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%99%B9#.E6.98.9F.E8.99.B9)として観測が可能であるという説がある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%83%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C>

1. **Onda de Choque:**

**衝撃波**（しょうげきは、*Shock Wave*）は、主に空気中を伝播する、圧力などの**不連続な**変化のことであり、[圧力波](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%9C%A7%E5%8A%9B%E6%B3%A2&action=edit&redlink=1)の一種である。

**詳細**

主に媒質中を超音速で移動する物体の周りに発生し、媒質中の音速よりも速い速度、すなわち[超音速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E9%9F%B3%E9%80%9F)で伝播、急速に減衰して最終的には[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)（[ソニックブーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BD%E3%83%8B%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%96%E3%83%BC%E3%83%A0)）となる。

また、波面後方で圧力・温度・密度の上昇する圧縮波であるが、自然界で発生するほとんどの衝撃波は近傍に[膨張波](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%86%A8%E5%BC%B5%E6%B3%A2&action=edit&redlink=1)を伴っている。

衝撃波の強さは、衝撃波前方と後方の圧力比・温度比・密度比・速度比などで示される。これらの比は衝撃波マッハ数（衝撃波伝播速度を衝撃波前方の音速で割った値）に対してそれぞれ1対1で対応するため、衝撃波マッハ数も衝撃波の強さを示す値として用いられる。なお、[理想気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E6%83%B3%E6%B0%97%E4%BD%93)中でのこのような比は[ランキン・ユゴニオの式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A6%E3%82%B4%E3%83%8B%E3%82%AA%E3%81%AE%E5%BC%8F)によって関係付けられる。

**分類**

**垂直衝撃波**

伝播方向に対して波面が垂直なものを指す。形状が単純であることから、各衝撃波の[空気力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E6%B0%97%E5%8A%9B%E5%AD%A6)的解析によく用いられる。

**斜め衝撃波**

伝播方向に対して波面が垂直でないものを指す。図のθがある値θmaxより小さい曲がり角に超音速の流れが進入する際に発生する。このθmaxはマッハ数とともに増加する。なお、θが負の時は[プラントル―マイヤー膨張扇](http://en.wikipedia.org/wiki/Prandtl-Meyer_expansion_fan)と呼ばれる無数に集まった[マッハ波](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%9E%E3%83%83%E3%83%8F%E6%B3%A2&action=edit&redlink=1)が発生する。

超音速で飛行する航空機に発生した円錐形の衝撃波（マッハコーン）も、斜め衝撃波である。このような場合、波面の角度βはマッハ角μと呼ばれる。

**離脱衝撃波**

θがθmaxより大きくなったときに、曲がり角の手前側に発生する衝撃波。

**発生例**

超音速飛行中の[戦闘機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%88%A6%E9%97%98%E6%A9%9F)[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%9D%E6%92%83%E6%B3%A2#cite_note-0)や[ロケット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88)、[隕石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9A%95%E7%9F%B3)や[大気圏再突入](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A7%E6%B0%97%E5%9C%8F%E5%86%8D%E7%AA%81%E5%85%A5)した[人工衛星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E8%A1%9B%E6%98%9F)などの周囲で発生する。地表に達すると窓ガラスを割るなどの被害を生じ、減衰しても[ソニックブーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BD%E3%83%8B%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%96%E3%83%BC%E3%83%A0)と呼ばれる大きな騒音になる。衝撃波を発生させるには大きな力が必要で、造波抵抗という抗力として作用するため、超音速飛行を実現するうえで大きな技術的課題となっている。

爆発によっても発生することがある。爆発の膨張速度が音速を超えると、表面に衝撃波が生じる。自然界の例としては[火山](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%81%AB%E5%B1%B1)噴火や[雷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%B7)などが挙げられる。人工的な爆発では、地表[核実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A0%B8%E5%AE%9F%E9%A8%93)などがあげられる。発生した衝撃波は伝播とともに急激に減衰して音波となり、「ドン」という、いわゆる爆発音になる。

ごく小規模なものとして、[鞭](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9E%AD)を振るったときに先端部が音速を超えて発生するものがある。パシッと鳴る音は、衝撃波が減衰したソニックブームによる。[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%9D%E6%92%83%E6%B3%A2#cite_note-1)

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%9D%E6%92%83%E6%B3%A2>

1. **Temperatura:**

**温度**（おんど）とは、寒暖の度合いを数量で表したもの。具体的には[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)を構成する[分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)運動のエネルギーの統計値。このため温度には下限が存在し、分子運動が止まっている状態が温度0K（[絶対零度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E9%9B%B6%E5%BA%A6)）である。ただし、分子運動が0となるのは古典的な極限としてであり、実際は、[量子力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E5%AD%A6)における[不確定性原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%8D%E7%A2%BA%E5%AE%9A%E6%80%A7%E5%8E%9F%E7%90%86)から、絶対零度であっても、分子運動は0にならない（止まっていない）。

温度はそれを構成する粒子の運動であるから、[化学反応](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%A6%E5%8F%8D%E5%BF%9C)に直結し、それを元にするあらゆる現象における強い影響力を持つ。[生物](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%9F%E7%89%A9)にはそれぞれ[至適温度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%87%B3%E9%81%A9%E6%B8%A9%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)があり、ごく狭い範囲の温度の元でしか生存できない。なお、日常では単に温度といった場合、往々にして[気温](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E6%B8%A9)のことを指す。

**定義**

歴史上様々な温度の定義があったが、現在の温度の定義は、[平衡状態](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%9A%84%E5%B9%B3%E8%A1%A1)における分子の運動エネルギーを、[エントロピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%BC)という統計値で微分したものである。しかし、真の意味での平衡状態は自然界では少ない。必要に迫られて[非平衡状態](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%9E%E5%B9%B3%E8%A1%A1%E7%8A%B6%E6%85%8B)、[計測](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%88%E6%B8%AC)上の便宜的な定義もなされている。現時点で、非平衡状態での温度の定義は、本来の意味で定義できないこともあり、途上段階である。

また温度は、非常に計りにくい物理量の一つである。これは、温度とは統計値であるため、分子数が少ない場合(低密度状態、または非常に狭い範囲を対象にする場合)には、統計的に値が安定せず、意味が無くなるという問題である。もう一つは、非常に大量の数の分子の運動状態を一個一個観測することは現在の技術では不可能であり、代わりに間接計測を行っていることに起因している。計測の方法として、計測対象となる物体から放射される電磁波を計測する方法や、長い時間をかけて計測プローブを計測対象となる物体に接触させ熱平衡状態にさせてから計る方法がある。どちらの方法も、何らかの計測上の問題を抱えている。

しかし、近年の高速温度測定装置では､対象物の大きさ数十ミクロン、測定時間は数ミリ秒程度で測定可能となっており、物理現象を捕らえる一つの手段としての有効性が向上してきている。

**温度の物理学史**

物体の寒暖の度合いを定量的に表そうという試みを初めて行ったのは[ガリレオ・ガリレイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%A4)と考えられている（異説もある）。 ガリレイは空気の熱膨張の性質を利用して物体の温度を計測できる装置を作成した。 すなわち[温度計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6%E8%A8%88)である。 ガリレイの作った温度計は気圧などの影響を受けてしまうために実際に温度を定量的に表すには及ばなかったが、このように物質の温度による性質の変化を利用して、寒暖の度合いを定量的に表そうという試みは以後も続けられた。 初めて目盛付き温度計により数値によって温度を表現しようとしたのは[オーレ・レーマー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%83%9E%E3%83%BC)である。 レーマーは水の沸点を60度、水の融点を7.5度とする温度目盛を作成した。 温度目盛を作成するにはこのように任意の2点の定義定点が必要となる。 多くの独自の温度目盛りが作成されたが、日常的には[アンデルス・セルシウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%BB%E3%83%AB%E3%82%B7%E3%82%A6%E3%82%B9)によって作成された[摂氏](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%91%82%E6%B0%8F)温度目盛、[ガブリエル・ファーレンハイト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%96%E3%83%AA%E3%82%A8%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%88)によって作成された[華氏](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8F%AF%E6%B0%8F)温度目盛が主に使用されている。

かつては温度と[熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1)というのはほとんど同じ概念を示していた。 温度と熱の違いにはじめて気が付いたのは[ジョゼフ・ブラック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%82%BC%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%A9%E3%83%83%E3%82%AF)と考えられている。 彼は氷が[融解](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%9E%8D%E8%A7%A3)している最中は熱を吸収しても温度が変化しないこと（[潜熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%9C%E7%86%B1)）を発見した。 また温度の違う同質量の水銀と水を混ぜる実験を行い、それぞれ水と水銀の温度変化にある定数を掛けた値が常に等しくなることを発見した。 すなわち[熱容量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%AE%B9%E9%87%8F)の概念を発見した。熱の移動量=熱容量×温度変化となる。 これらの実験により温度と熱が別物であることが確立した。

その後、19世紀に入ると効率の良い熱機関の開発の要請から熱力学の構築が進んでいった。 [ニコラ・レオナール・サディ・カルノー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%82%B3%E3%83%A9%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%8A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%82%B5%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%BB%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%8E%E3%83%BC)は熱機関の効率には熱源と冷媒の間の温度差によって決まる上限があることを発見した。 このことから[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)についての研究が進んでいった。 熱力学第二法則によれば外部から[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))がなされない限り、熱エネルギーは温度の高い物体から温度の低い物体にしか移動しない。 すなわち温度とは熱エネルギーが自然に移動していく方向を示す指標であるといえる。

[ウィリアム・トムソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%A0%E3%83%BB%E3%83%88%E3%83%A0%E3%82%BD%E3%83%B3)は[カルノーサイクル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AB)で熱源と冷媒に出入りする熱エネルギーから温度目盛が構築できることを示した。 これを[熱力学温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E6%B8%A9%E5%BA%A6)目盛という。 熱力学温度においては1つの定義定点はカルノーサイクルの効率が1となる温度であり、これは摂氏温度目盛で表せば-273.15℃である。 熱力学第二法則によれば、この温度に到達するには無限の仕事が必要となり、それより低い温度は存在しない。そのため、この温度を[絶対零度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E9%9B%B6%E5%BA%A6)ともいう。熱力学温度目盛ではこの絶対零度を原点(0 [K](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3))としている。 温度の下限の存在はトムソン以前に[シャルルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)から、あらゆる気体の体積が0となる温度として考えられていた。

原子、分子レベルにおける温度の意味については、[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)の気体分子運動論によって初めて明らかとなった。 気体分子の速度の分布は[マクスウェル分布](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E5%88%86%E5%B8%83)に従い、この分布関数の形状は**温度**に依存している。 特に気体分子の平均運動エネルギーは3/2 kT（k:[ボルツマン定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3%E5%AE%9A%E6%95%B0)、T:熱力学温度）となり、温度に比例する。 すなわち温度は分子運動の激しさを表す数値でもある。 このため[プラズマ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%BA%E3%83%9E)中のイオンや電子の持つ平均運動エネルギーを温度で表現することがある。 この時は通常平均運動エネルギー = kTとなる温度Tによって表現する。

[ルートヴィッヒ・ボルツマン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B4%E3%82%A3%E3%83%83%E3%83%92%E3%83%BB%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3)はこのマクスウェルの考え方を発展させ[統計熱力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B1%E8%A8%88%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6)を構築した。 統計熱力学では、あらゆる形態のエネルギーにこの考え方が拡張されている。 温度が高いほど高いエネルギーを持つ原子や分子の割合が大きくなり、原子や分子の持つ平均エネルギーの大きさも増加する。 このように統計熱力学において温度は[分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)のエネルギー分布の仕方を表す指標である。

[量子論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E8%AB%96)が確立してくると、古典的な統計熱力学は[量子統計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E7%B5%B1%E8%A8%88)の近似であることが明らかとなった。 古典論においては0 Kにおいてあらゆる粒子は運動を停止した最低エネルギー状態をとることになるが、量子論においては粒子は0 Kにおいても零点エネルギーを持ち静止状態とはならない。 また、[ボース粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%BC%E3%82%B9%E7%B2%92%E5%AD%90)のエネルギー分布は[ボース・アインシュタイン分布](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3%E5%88%86%E5%B8%83)、[フェルミ粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%83%9F%E7%B2%92%E5%AD%90)のエネルギー分布は[フェルミ・ディラック分布](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%83%9F%E3%83%BB%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%A9%E3%83%83%E3%82%AF%E5%88%86%E5%B8%83)となる。 フェルミ粒子においては[パウリの排他原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%82%A6%E3%83%AA%E3%81%AE%E6%8E%92%E4%BB%96%E5%8E%9F%E7%90%86)により、絶対零度においても古典論では数万 Kにも相当するような大きなエネルギーを持つ粒子が存在し、温度を古典論のように単純に粒子のエネルギーの大きさの目安とすることはできない。 しかし、温

度が[分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)のエネルギー分布の仕方を表す指標であることは古典統計と変わっていない。

**温度の単位と種類**

* 温度単位

[熱力学温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E6%B8%A9%E5%BA%A6)（絶対温度、開氏） - [ケルビン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3)

[セルシウス度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%AB%E3%82%B7%E3%82%A6%E3%82%B9%E5%BA%A6)（摂氏）

[ファーレンハイト度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%88%E5%BA%A6)（華氏）

[レオミュール度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%9F%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB%E5%BA%A6)（列氏）

[ランキン度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AD%E3%83%B3%E5%BA%A6)（蘭氏）

* [乾球温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%BE%E7%90%83%E6%B8%A9%E5%BA%A6)
* [湿球温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B9%BF%E7%90%83%E6%B8%A9%E5%BA%A6)
* [放射温度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%94%BE%E5%B0%84%E6%B8%A9%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)
* [グローブ温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%96%E6%B8%A9%E5%BA%A6)
* [露点温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9C%B2%E7%82%B9%E6%B8%A9%E5%BA%A6)

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6>

1. **Expansión Termica:**

**熱膨張率**（ねつぼうちょうりつ、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): coefficient of thermal expansion[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E8%86%A8%E5%BC%B5%E7%8E%87#cite_note-terms-0) 、**CTE**）は、[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)の上昇によって[物体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E4%BD%93)の[長さ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%95%B7%E3%81%95)・[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)が膨張する割合を、1[K](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3)（℃）当たりで示したものである。**熱膨張係数**（ねつぼうちょうけいすう）[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E8%86%A8%E5%BC%B5%E7%8E%87#cite_note-terms-0)ともいう。[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)は 1/K である。

**概要**

[列車](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%97%E8%BB%8A)の走行時にガタンゴトンと音がするのは、[分岐器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%B2%90%E5%99%A8)以外であれば、[鉄](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84)の線膨張による[レール](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BB%8C%E6%9D%A1)の歪みを防ぐ為にレール同士のつなぎ目に設けられた隙間に起因する。そのためこの音は[気温](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E6%B8%A9)の低い時の方がより大きくなる。

温度の上昇に対応して長さが変化する割合を**線膨張率**（線膨張係数）といい、体積の変化する割合を**体積膨張率**という。線膨張率をα、体積膨張率をβとすると β=3α の関係がある。

⊿L=α・L・⊿T（⊿L:伸び、L:長さ、⊿T：温度上昇）

[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)間の結合の強さで決まる[物性値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E6%80%A7%E5%80%A4)なので、材料の[融点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%9E%8D%E7%82%B9)と相関がある。

ある温度で体積変化を伴う[相転移](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E8%BB%A2%E7%A7%BB)を起こす性質を利用して、使用温度領域で、線膨張が小さくなっている[合金](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%90%88%E9%87%91)（アンバーまたは[インバー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%90%E3%83%BC)合金）もある。

なお、熱膨張率の異なる材料を組合せて使う場合、温度変化による熱膨張率の違いから、熱[応力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%9C%E5%8A%9B)が生じる。この熱応力により、材料に[クラック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%83%E3%82%AF)などが入って壊れることがあり、様々なものの[故障](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%85%E9%9A%9C)原因となっている。

[プルトニウム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%8B%E3%82%A6%E3%83%A0)や[タングステン酸ジルコニウム](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%B3%E9%85%B8%E3%82%B8%E3%83%AB%E3%82%B3%E3%83%8B%E3%82%A6%E3%83%A0&action=edit&redlink=1)などの一部の物質は、温度の上昇により収縮するという**負膨張**を起こす。身近なところでは、[水](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4)が0℃から3.98℃までの範囲で負膨張を起こす。近年では、[理化学研究所](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E5%8C%96%E5%AD%A6%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%89%80)が[2005年](http://ja.wikipedia.org/wiki/2005%E5%B9%B4)に、マンガン窒化物をベースとした負膨張率の高い新素材の開発に成功している[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E8%86%A8%E5%BC%B5%E7%8E%87#cite_note-1)。

**熱膨張率の詳細**

**固体の線膨張率**

[固体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E4%BD%93)の線膨張率 \alpha は、単位長さあたりにおける、温度による長さの変化率として定義されるので、物体の長さを l 、[セルシウス温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%AB%E3%82%B7%E3%82%A6%E3%82%B9%E6%B8%A9%E5%BA%A6)をtとすると、

\alpha=\frac{1}{l}\frac{dl}{dt}

と定義される。そして、固体の線膨張率はごく小さく、また、温度によらずほぼ一定とみなせるので、t ℃における物体の長さ lは次のように表せる。

l=l_0(1+\alpha t)

ここで l_0 は0℃における物体の長さである。

**固体の線膨張率と体積膨張率の関係**

固体の体積膨張率 \beta は、物体の体積 V を用いて次のように定義することができる。

\beta=\frac{1}{V}\frac{dV}{dt}

ここで V は l を用いて

V=l^3

と表されるので、

\beta=\frac{1}{V}\frac{dV}{dt}=\frac{1}{l^3}\frac{dV}{dl}\frac{dl}{dt}= \frac{1}{l^3}\cdot3l^2\frac{dl}{dt}= \frac{3}{l}\frac{dl}{dt}=3\alpha 

となる。つまり、

\beta=3\alpha

である。

**固体・液体の体積膨張率**

日常的な温度範囲では固体・[液体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B6%B2%E4%BD%93)の体積膨張率はごく小さく、温度によらずほぼ一定とみなせるため、固体・液体の体積 Vは次のように表せる。

V=V_0(1+\beta t)=V_0(1+3\alpha t)

ここで V_0 は0℃における物体の体積である。

**気体の体積膨張率**

[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)の場合は体積ではなく密度でその状態を表すことが多い。ここで気体の質量を m とすると、密度 \rho は、

\rho=\frac{m}{V}

となる。よって \beta は、

\beta=\frac{1}{V}\frac{dV}{dt}=\frac{\rho}{m}\frac{dV}{d\rho}\frac{d\rho}{dt}=\frac{\rho}{m}\cdot\left(-\frac{m}{\rho^2}\right)\frac{d\rho}{dt}=-\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}

と表せる。すなわち体積膨張率は密度の温度による変化率によっても表せる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E8%86%A8%E5%BC%B5%E7%8E%87>

1. **Calor:**

**熱**（ねつ、heat）とは、慣用的には、[肌](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%82%8C)で触れてわかる熱さや冷たさといった[感覚](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%84%9F%E8%A6%9A)である温度の元となる[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)という概念を指していると考えられているが、[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)では熱とエネルギーは明確に区別される概念である。本項目においては主に物理学的な「熱」の概念について述べる。

[熱力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6)における熱とは、1つの物体や[系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B3%BB_(%E8%87%AA%E7%84%B6%E7%A7%91%E5%AD%A6))から別の物体や系への[熱接触](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%86%B1%E6%8E%A5%E8%A7%A6&action=edit&redlink=1)による[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)伝達の過程であり、ある物体に熱力学的な仕事をすることでその物体に伝達されたエネルギーと定義される[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-Reif-0)。

関連する[内部エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)という用語は、物体の[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)を上げることで増加するエネルギーにほぼ相当する。熱は熱エネルギーともほぼ対応しているが、正確には物体から物体へ熱エネルギーが伝達する過程が「熱」として認識される。

物体間の熱によるエネルギー伝達は、[熱放射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%94%BE%E5%B0%84)、[熱伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E)、熱伝達（[対流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%BE%E6%B5%81)）に分類される。[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)とは内部エネルギーや[エンタルピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%BF%E3%83%AB%E3%83%94%E3%83%BC)の測定値であり、熱伝達を生じさせる基本的動きのレベルである。物体（あるいは物体のある部分）から他に熱によってエネルギーが伝達されるのは、それらの間に温度差がある場合だけである（[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)）。同じまたは高い温度の物体へ熱によってエネルギーを伝達するには、[ヒートポンプ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%9D%E3%83%B3%E3%83%97)のような機械力を使うか、鏡やレンズで放射を集中させてエネルギー密度を高めなければならない。

**概要**

熱は[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の移動形態の一つである。スコットランドの物理学者[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)は1871年、「熱」の現代的定義を初めて発表した。マックスウェルの熱の定義は4つの規定で概説される。1つ目は[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)によるもので、「（熱とは）ある物体から別の物体へ伝達される何か」だという規定である。2つ目は熱を数学的に扱うための「測定値」の規定である。3つ目は、熱が力学的[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))のような物質的でない何かに変換されることもあるため、「（熱を）物質として扱うことが出来ない」という規定である。最後は、「（熱は）[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の1つの形態である」という規定である。

物体間で[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))を通じて移動する**以外**のエネルギーの移動形態を**熱**という（[伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E)・[対流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%BE%E6%B5%81)・[輻射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BC%BB%E5%B0%84)）。「熱」という形態を通して移動したエネルギーの量を「熱量」という。人が感じることのできる「熱さ」「冷たさ」といったものは「温度」であり、日常会話の熱と十分区別する必要がある。なお、熱の移動に関係するエネルギーの出入りを扱う物理学を[熱力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6)といい、種々の基本法則によって支えられている。

熱は必ず高温の物体から低温の物体へと移動する。低温の物体から高温の物体へと自発的に熱が移動することはありえない（[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)と密接な関係がある事項である）。熱が移動した際に外部に熱が流出しなかったならば、高温の物体が失った熱量と、低温の物体が接触した物体から得た熱量は等しい（このことを「熱量保存則」と呼ぶことがある）。また、同じ温度ならばみかけ上熱の移動はなく、この状態を[熱平衡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%9A%84%E5%B9%B3%E8%A1%A1)という。

[熱力学第一法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E6%B3%95%E5%89%87)によれば、[孤立系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A4%E7%AB%8B%E7%B3%BB)のエネルギーは保存される。従って系の持つエネルギーを変化させるにはその系から外界に、あるいは外界からその系にエネルギーを伝達しなければならない。ある系にエネルギーを伝達する方法は、熱と仕事しかない。ある物体に仕事を行うということは定義上[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-Reif-0)、その系にエネルギーを伝達することに他ならず、それによってその物体の外部パラメータ（例えば、体積、磁化、重力場における重心の位置など）が変化する。熱はそれら以外の手段による物体へのエネルギー伝達である。

熱平衡に近い複数の物体の場合、温度という観念が定義できるなら、熱伝達は物体間の温度差に関連する。それは複数の物体が相互熱平衡状態に近づく不可逆過程である。

「熱い」や「冷たい」という形容詞は相対的な言葉であり、ある物体とその周囲との温度の差を一般に表している。

**定義**

現代の熱の定義をいくつか以下に示す。

高温の物体から低温の物体に移動するエネルギーを「熱」という[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-1)。

熱とは、熱伝導または熱放射によるエネルギー伝達の過程の間だけ定義されるものである[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-2)。

温度の異なる物体から物体への自発的なエネルギーの流れを「熱」と呼ぶ[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-Schroeder-3)。

運動エネルギーと熱の関係は次のように定義される。

物質の中のエネルギーは、分子や原子の運動エネルギーによるものである[[5]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-4)。運動エネルギーと熱は形式的には等しいかもしれないが、同一ではない。

熱力学的には、熱は物体内に蓄えられるものではない。仕事と同様、それはある物体から別の物体へ（熱力学用語では、系とその外界の間で）の「エネルギーの移動」としてのみ存在する。熱の形で系にエネルギーを加えると、その系内に蓄えられるエネルギーはもはや熱ではなく、系を構成する原子や分子の運動エネルギーまたは位置エネルギーの形をとる[[6]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-Smith-5)。

定義によっては、温度差がないところでも熱の移動がありうる。

2つの系の間で伝達されるエネルギーを熱と呼ぶ。しかし初期状態で安定熱平衡状態の2つの孤立系の間で相互作用したとしても仕事にはならず、単に（仕事でない）純粋な熱の相互作用が行われるだけである[[7]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-6)。

**記法と単位**

[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)の単位（すなわち[SI組立単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/SI%E7%B5%84%E7%AB%8B%E5%8D%98%E4%BD%8D)）は [**J** （**ジュール**）](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB)であるが、かつては [**cal** （**カロリー**）](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%AD%E3%83%AA%E3%83%BC)で扱われていた。アメリカでは今でもカロリーや[英熱量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E7%86%B1%E9%87%8F)が使われている。日本では1999年10月以降、[計量法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%88%E9%87%8F%E6%B3%95)により計量単位としてのcalの使用が禁止され、さらに2002年4月以降、中学校[学習指導要領](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A6%E7%BF%92%E6%8C%87%E5%B0%8E%E8%A6%81%E9%A0%98)で cal の単位が廃止されたことにより、現在では J で統一されている。しかし、今なお物理学の世界においても、慣習的に cal が用いられることがある[[8]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-7)。熱移動量の単位は[ワット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AF%E3%83%83%E3%83%88) (W = J/s) である。

熱伝達で移されるエネルギー総量は一般に *Q* で表される。その正負は、ある物体が外界に熱を放出する場合は *Q* < 0 (-)、ある物体が外界から熱を吸収する場合は *Q* > 0 (+) となる。単位時間当たりの熱流 (heat transfer rate) は次のように表される。

\dot{Q} = {dQ\over dt} \,\!

その単位は[ワット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AF%E3%83%83%E3%83%88) (W) となる。**熱流束** (heat flux) は単位面積の断面を通過する単位時間当たりの熱流と定義され、*q* と表記される。その単位は W/m2 となるが、若干異なる記法を用いることもある。

**内部エネルギー**

熱は系の内部エネルギー U とその系がなす仕事  W  とに関係し、[熱力学第一法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E6%B3%95%E5%89%87)によれば次のようになる。

\Delta U = Q - W \ 

すなわち、系の内部エネルギーは仕事によっても熱力学的系の境界を越えた熱流によっても変化する。より詳細に言えば、[内部エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)とは系内の微視的形態のエネルギーの総和である。それは分子の構造や分子の活動度と関連し、分子群の運動エネルギーと位置エネルギーの総和と見なすことができる。それは次のような種類のエネルギーで構成される[[9]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-8)。

|  |  |
| --- | --- |
| **種類** | [**内部エネルギー**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)**(U) の構成** |
| [**顕熱**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%A1%95%E7%86%B1) | 分子の運動エネルギー（分子の交換、回転、振動。電子の交換とスピン。原子のスピン）と対応する系の[内部エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の一部 |
| [**潜熱**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%9C%E7%86%B1) | 系の[相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8)と対応する内部エネルギー |
| [**化学エネルギー**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%A6%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6) | 分子内の[化学結合](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%A6%E7%B5%90%E5%90%88)と対応した内部エネルギー |
| [**原子エネルギー**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E5%8A%9B) | 原子核内の[核力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B7%E3%81%84%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)に伴う莫大な量のエネルギー |
| [**エネルギー相互作用**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8) | これらの種類のエネルギーは（[伝熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E7%86%B1)、質量移動、仕事など）系に蓄えられるものではないが、系の境界をまたいで作用するとき認識され、その過程で系の利得または損失の一部となる。 |
| [**熱エネルギー**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC) | 顕熱と潜熱の総和 |

粒子の[乱雑](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%B1%E9%9B%91)な並進・回転・振動などによる[運動エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の総量を熱運動のエネルギーと呼ぶ。このエネルギーを「熱エネルギー」と呼ぶこともあるが、「熱」と「熱エネルギー」という用語は混同しやすいので注意が必要である。 熱運動のエネルギーと、[粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90)間の相互作用によるエネルギーとの和を、物質の[内部エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)と呼ぶ。

定圧の理想気体に対して熱が移動すると、内部エネルギーが増大し、体積が制限されていなければ体積の変化（系の境界に対する仕事）が起きる。[第一法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E6%B3%95%E5%89%87)に立ち返り、仕事の項を「境界 (boundary) に対する仕事」と「その他 (other) の仕事」に分けると、次のようになる。

\Delta U + W_{boundary} = Q + W_{other}\ 

\Delta U + W_{boundary} は[エンタルピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%BF%E3%83%AB%E3%83%94%E3%83%BC) H であり、[熱力学ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)の1つである。エンタルピー  H  と内部エネルギー  U  は共に[状態関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8A%B6%E6%85%8B%E9%87%8F)である。[熱機関](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%A9%9F%E9%96%A2)のような循環過程では、1サイクルが完了すると状態関数が初期値に戻る。一方 Q  も  W  も系の属性でないとき、循環のステップ上で総和が0になるとは限らない。熱の無限小の表現 \delta Q  は、仕事に関する過程の[不完全微分](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%8D%E5%AE%8C%E5%85%A8%E5%BE%AE%E5%88%86&action=edit&redlink=1)を形成する。しかし、体積が変化しない過程などでは \delta Q  が[完全微分](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%AE%8C%E5%85%A8%E5%BE%AE%E5%88%86&action=edit&redlink=1)を形成する。同様に（熱の移動がない）断熱過程では、仕事の式は完全微分を形成するが、熱の移動を伴う過程では不完全微分となる。

**エンタルピーと内部エネルギー交換**

ある物体（系）の温度を1K上昇させるのに必要な熱量を[熱容量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%AE%B9%E9%87%8F)といい、また、ある物質1kgの温度を1K上昇させるのに必要な熱量を[比熱容量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E7%86%B1%E5%AE%B9%E9%87%8F)（「比熱」は学術用語として用いない）という。

**理想気体**

ピストン内の[理想気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E6%83%B3%E6%B0%97%E4%BD%93)のような単純な圧縮可能な系では、エンタルピーと内部エネルギーの変化はそれぞれ定圧熱容量と定積熱容量とに関連付けることができる。**定積**の条件下では、初期温度 *T*0 から最終的な温度 *Tf* に変化させるのに要する熱 Q は次の式で表される。

Q = \int_{T_0}^{T_f}C_v\,dT = \Delta U\,\!

一方**定圧**の条件下で体積が変化することを許すと、熱は次の式で表される。

Q = \int_{T_0}^{T_f}C_p\,dT = \Delta H\  = \Delta U + \int_{V_0}^{V_f}P\,dV\,\!

**圧縮できない物質**

[固体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E4%BD%93)や[液体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B6%B2%E4%BD%93)などの圧縮できない物質では、仕事がなされないので2種類の熱容量（すなわち、定圧に基づく C_p と定積に基づく C_v）の違いはなくなる。

**比熱**

比熱とは、単位[質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E9%87%8F)または[モル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A2%E3%83%AB)の物質の温度を1[度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BA%A6_(%E6%B8%A9%E5%BA%A6))変化させるのに要するエネルギー量と定義される。比熱は対象とする物質とその状態に依存する属性である。[燃料](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%87%83%E6%96%99)を燃焼すると、その分子はより内部エネルギーの低いものへと変換される。そのエネルギーの変化が熱となる。ある相から別の相へと変化するとき、純粋な物質は温度を変化させずに熱を解放または吸収する。相転移の際の熱伝達量を一般に[潜熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%9C%E7%86%B1)と呼び、それは主としてその物質の種類と状態に依存する。

1原子の分子からなる気体（ヘリウムなど）の比熱は温度によらずほぼ一定である。水素などの2原子分子の気体の比熱は温度に多少依存するようになり、3原子分子（例えば、二酸化炭素）はさらに依存が強くなる。

十分低温な液体では、量子効果が重要になる。例えば[ヘリウム4](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%AA%E3%82%A6%E3%83%A0%E3%81%AE%E5%90%8C%E4%BD%8D%E4%BD%93)のような[ボース粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%BC%E3%82%B9%E7%B2%92%E5%AD%90)の挙動がある。その場合、[ボース＝アインシュタイン凝縮](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%BC%E3%82%B9%EF%BC%9D%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3%E5%87%9D%E7%B8%AE)点を境として比熱は不連続に変化する。

固体の量子挙動は[デバイ模型](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%83%90%E3%82%A4%E6%A8%A1%E5%9E%8B)によって適正に表される。デバイ温度より十分低い温度の固体格子では、その比熱は絶対温度の3乗に比例する。低温の金属では、伝導電子の挙動を考慮した第二項として[フェルミ分布関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%83%9F%E5%88%86%E5%B8%83%E9%96%A2%E6%95%B0)などを必要とする。

**モル熱容量と比熱容量から熱容量を計算する**

モル熱容量と比熱容量は、体積や分子数といった[状態量](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A4%BA%E5%BC%B7%E7%8A%B6%E6%85%8B%E9%87%8F%E3%81%A8%E7%A4%BA%E9%87%8F%E7%8A%B6%E6%85%8B%E9%87%8F&action=edit&redlink=1)ではなく系の内部自由度に依存している。

一方、熱容量自体は[示量状態量](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A4%BA%E9%87%8F%E7%8A%B6%E6%85%8B%E9%87%8F&action=edit&redlink=1)であり、したがって系内の分子数に依存する。熱容量は質量 m と[比熱容量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E7%86%B1%E5%AE%B9%E9%87%8F) c_s \,\! の積で表される。

C_p = mc_s \,\!

あるいは、[モル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A2%E3%83%AB)数とモル熱容量 c_n \,\! から次のようにも表される。

C_p = nc_n \,\!

**エントロピー**

1856年、ドイツの物理学者[ルドルフ・クラウジウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AB%E3%83%89%E3%83%AB%E3%83%95%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%82%B8%E3%82%A6%E3%82%B9)が[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)を定義し、そこで熱 *Q* と温度 *T* から次のような値を考えた[[10]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-9)[[11]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1#cite_note-10)。

 {} \frac {Q}{T}

そして1865年、この比を[エントロピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%BC)と名付け、*S* と表記するようにした。

 \Delta S = \frac {Q}{T}

従って、熱の不完全微分 *δQ* は *TdS* という完全微分で定義されることになる。

 \delta Q = T dS \,

言い換えれば、エントロピー関数 *S* は熱力学的系の境界を通る熱流の定量化と測定を容易にする。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1>

1. **Transmisión de Calor:**

**伝熱**（でんねつ、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): heat transfer[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E7%86%B1#cite_note-0)）とは、[熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1)エネルギーが、空間のある場所から別の場所に移動する[現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E8%B1%A1)。**熱移動**ともいう。伝熱は、熱の[移動現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A7%BB%E5%8B%95%E7%8F%BE%E8%B1%A1)を扱う[工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%A5%E5%AD%A6)であり、[熱工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%B7%A5%E5%AD%A6)の一分野である。

**伝熱の形態**

[温度差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6%E5%B7%AE)や[温度勾配](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6%E5%8B%BE%E9%85%8D)を駆動力として熱移動が起きる現象は、[熱伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E)、[熱伝達](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%86%B1%E4%BC%9D%E9%81%94&action=edit&redlink=1)、[熱放射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%94%BE%E5%B0%84)に大きく分類される。

この他に、[相変化](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%A4%89%E5%8C%96)を伴う熱移動や、物質の濃度勾配と熱移動の関係を示す[ソーレー効果](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%BD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C&action=edit&redlink=1)や[デュフォー効果](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%87%E3%83%A5%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C&action=edit&redlink=1)など、[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)と熱移動の関係を表す[ペルチェ効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9A%E3%83%AB%E3%83%81%E3%82%A7%E5%8A%B9%E6%9E%9C)や[ゼーベック効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BC%E3%83%BC%E3%83%99%E3%83%83%E3%82%AF%E5%8A%B9%E6%9E%9C)、[トムソン効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%A0%E3%82%BD%E3%83%B3%E5%8A%B9%E6%9E%9C)などもこの伝熱現象となる。

**熱伝導**

[熱伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E)は、物体の移動なく物質内でその温度勾配に比例した[熱流束](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%86%B1%E6%B5%81%E6%9D%9F&action=edit&redlink=1)（単位時間に単位面積を横切るエネルギー量）を生じる現象であり、[フーリエの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%82%A8%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)として下記の式で表される。

q=-k\frac{dT}{dx}

q は熱流束 W/m2、k は[熱伝導率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E7%8E%87) W/mK、T は[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6) K、x は[位置](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%BD%AE) m。

**熱伝達**

[熱伝達](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%86%B1%E4%BC%9D%E9%81%94&action=edit&redlink=1)は、温度差に比例した熱移動を表すものであり、物質の流れや[凝縮](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%87%9D%E7%B8%AE)や[蒸発](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%92%B8%E7%99%BA)、濃度の変化など、他の物理現象を伴った熱流束を表す。

dq=h(T_f-T_s)

dq は単位時間に単位面積を横切って移動した[熱量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E9%87%8F) W/m2、h は熱伝達率、T_f は流体の温度、T_s は固体表面の温度。

**熱放射**

[熱放射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%94%BE%E5%B0%84)は、[プランクの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)に従って、固体表面から[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)として放出されるエネルギーであり、そのエネルギーの交換は[キルヒホッフの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AB%E3%83%92%E3%83%9B%E3%83%83%E3%83%95%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)などに従う。温度に関わる主なものとして[ステファン・ボルツマンの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)がある。

プランクの法則は、波長範囲 \lambda\sim\lambda+\Delta\lambda においての光のエネルギー W/m3は、

E(\lambda)=\frac{8\pi hc}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}

と表せる。ここで、h は[プランク定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF%E5%AE%9A%E6%95%B0)、\lambda は光の波長、k は[ボルツマン定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3%E5%AE%9A%E6%95%B0)。

この式を、光の全波長で[積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86)したものが、

E_B(T)=\int_0^\infty\frac{8\pi hc}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda = \sigma T^4

となる。この[黒体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%BB%92%E4%BD%93)の放射エネルギーが物体の温度の4乗に比例するという法則をステファン・ボルツマンの法則と言う。方向性のない熱放射は固体表面の[放射率](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%94%BE%E5%B0%84%E7%8E%87&action=edit&redlink=1) \varepsilon によって、\varepsilon\sigma T^4 となる。2つの固体間の放射熱交換は、それぞれの固体が相手を見る[立体角](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%8B%E4%BD%93%E8%A7%92)に関係する[形態係数](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%BD%A2%E6%85%8B%E4%BF%82%E6%95%B0&action=edit&redlink=1) F_{1\rightarrow 2} などを用いて計算される。

より詳細には、固体表面はその電気電子的性質によって、波長依存性を持つ[光吸収](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%90%B8%E5%8F%8E)、[光反射](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%8F%8D%E5%B0%84&action=edit&redlink=1)、放射、[光透過](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E9%80%8F%E9%81%8E&action=edit&redlink=1)などの現象の組み合わせという、複雑なエネルギー移動現象である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E7%86%B1>

1. **Ecuaciones de Estado:**

**状態方程式**（**じょうたいほうていしき**）とは、物理学や化学では物質の状態を表現する方程式のことをいう。

**気体の状態方程式**

**理想気体**

[理想気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E6%83%B3%E6%B0%97%E4%BD%93)の場合は、[圧力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B)を P 、[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)を V 、[物質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA%E9%87%8F)を n 、[気体定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93%E5%AE%9A%E6%95%B0)を R 、[熱力学温度（絶対温度）](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E6%B8%A9%E5%BA%A6)を T とおくと、[ボイル＝シャルルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%82%A4%E3%83%AB%EF%BC%9D%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)と[アボガドロの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%9C%E3%82%AC%E3%83%89%E3%83%AD%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)から、

 PV \,= nRT 

という関係式が得られる。R は[J/mol/K]などの単位で表され、したがって、P と V との積はエネルギーの次元を持つ。 これを[理想気体の状態方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E6%83%B3%E6%B0%97%E4%BD%93%E3%81%AE%E7%8A%B6%E6%85%8B%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)という。

また、この式は[統計力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%8A%9B%E5%AD%A6)からも導くことができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8A%B6%E6%85%8B%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F_(%E5%8C%96%E5%AD%A6)>

1. **Capacidad Calorifica:**

**熱容量**（ねつようりょう）とは、[系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B3%BB)に対して[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の出入りがあったとき、そのエネルギーの出入りが系の[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)をどのように変化させるかを示す[比例定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B%E5%AE%9A%E6%95%B0)。

熱容量はエネルギーの出入りがあった際に、系の（温度以外の）状態がどのように変化したかに依存して変化する値であって、エネルギーを出入りさせる前後で系の[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)が一定である場合を**定積熱容量**、系の圧力が一定である場合を**定圧熱容量**とよぶ。[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)は[ジュール毎ケルビン](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB%E6%AF%8E%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3&action=edit&redlink=1) (J/K)、[カロリー毎ケルビン](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%AB%E3%83%AD%E3%83%AA%E3%83%BC%E6%AF%8E%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3&action=edit&redlink=1) (cal/K)。

出入りしたエネルギーをQ、系の温度変化をT、熱容量をCとしたとき

Q=CT

とかける。

**熱容量に関する初等的理解**

ある物体の熱容量というものを考えるとしよう。熱容量とはその物体の温度を一度上昇させるのに必要な熱量のことである。

たとえばコップ一杯の水 (100g) があったとする。ここに何らかの方法で100calのエネルギーを与えることができたとしよう。この系からエネルギーが外に漏れないように注意して実験を行った結果、コップ一杯の水の温度は約1度上昇する。このとき、コップ一杯の水の熱容量は約100cal/Kである。

今度は水を2倍の量にしたとしよう。同じように100calのエネルギーを与えたとすると、今度は約0.5Kの温度上昇を観測することになる。水のようにエネルギーの出し入れの際、他の熱力学的状態の変化が無視しうるような系であれば熱容量は物質の量に比例すると考えてよい。

一般に、単位量あたりの物質を1K変化させるのに必要な熱量を[比熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E7%86%B1%E5%AE%B9%E9%87%8F)と呼んでいる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%AE%B9%E9%87%8F>

1. **Termodinamica**:

**熱力学**（ねつりきがく、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): thermodynamics）は、[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の一分野で、[熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1)現象を[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)の[巨視的](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%A8%E8%A6%96%E7%9A%84)性質から扱う[学問](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A6%E5%95%8F)。[アボガドロ定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%9C%E3%82%AC%E3%83%89%E3%83%AD%E5%AE%9A%E6%95%B0)個程度の分子から成る物質の巨視的な性質を巨視的な[物理量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E9%87%8F)（[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)、[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)、[エントロピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%BC)、[圧力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B)、[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)、[物質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA%E9%87%8F)または[分子数](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%88%86%E5%AD%90%E6%95%B0&action=edit&redlink=1)、[化学ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%A6%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)など）を用いて記述する。

**歴史**

18世紀後半から19世紀にかけて[蒸気機関](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%92%B8%E6%B0%97%E6%A9%9F%E9%96%A2)が発明・改良されたが、これらは学問的成果を応用したものでなく専ら経験的に進められたものであった。一方この頃[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)の性質が研究され、19世紀初めには[ボイル＝シャルルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%82%A4%E3%83%AB%EF%BC%9D%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)（[理想気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E6%83%B3%E6%B0%97%E4%BD%93)の性質）としてまとめられたが、まだ熱を物質と考える[熱素説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E7%B4%A0%E8%AA%AC)が有力であった。

1820年代になると、[カルノー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%82%B3%E3%83%A9%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%8A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%82%B5%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%BB%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%8E%E3%83%BC)が[熱機関](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%A9%9F%E9%96%A2)の科学的研究を目的として仮想熱機関（[カルノーサイクル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AB)）による研究を行い、ここに本格的な熱力学の研究が始まった。この研究結果は[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)とエントロピー概念の重要性を示唆するものであったが、カルノーは熱素説に捉われたまま早世し、重要性が認識されるにはさらに時間がかかった。

なお同じ頃[フーリエ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%82%BC%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%82%A8)が[熱伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E)の研究を発表したが、これは熱力学とは直接関係なく、むしろ[物理数学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E6%95%B0%E5%AD%A6)に顕著な成果（[フーリエ変換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%82%A8%E5%A4%89%E6%8F%9B)につながる）を残すこととなった。

熱をエネルギーの一形態と考え[エネルギー保存の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)（つまり[熱力学第一法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E6%B3%95%E5%89%87)）をはじめて提唱したのは[マイヤー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A6%E3%83%AA%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%83%AD%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%83%A4%E3%83%BC)である。彼は1842年にそれを発表したが全く注目されなかった。しかしほぼ同時期に[ジュール](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%83%97%E3%83%AC%E3%82%B9%E3%82%B3%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB)が行った同様の研究は[トムソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%A0%E3%83%BB%E3%83%88%E3%83%A0%E3%82%BD%E3%83%B3)（ケルヴィン卿）の知るところとなり、彼らの共同研究から第一法則が明らかにされた。

さらにトムソンはカルノーの研究を知り、[絶対温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E6%B8%A9%E5%BA%A6)の概念および熱力学第二法則に到達した。[クラウジウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AB%E3%83%89%E3%83%AB%E3%83%95%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%82%B8%E3%82%A6%E3%82%B9)も独立に第一および第二法則に到達し、カルノーサイクルの数学的解析からエントロピー概念の重要性を明らかにした（エントロピーの命名もクラウジウスによる）。こうして1850年代には両法則が確立された。

19世紀後半になると、[ヘルムホルツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%A0%E3%83%9B%E3%83%AB%E3%83%84)によって自由エネルギーが、また[ギブズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%BB%E3%82%AE%E3%83%96%E3%82%BA)によって化学ポテンシャルが導入され、[化学平衡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%A6%E5%B9%B3%E8%A1%A1)などを含む広い範囲の現象を熱力学で論じることが可能になった。

一方、[ボルツマン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B4%E3%82%A3%E3%83%83%E3%83%92%E3%83%BB%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3)や[マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)によって創始された[統計力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%8A%9B%E5%AD%A6)が発展し、熱力学的諸概念を分子論から具体的に解釈できるようになって、熱力学と統計力学は車の両輪のようにして発展していった。

[熱力学・統計力学の年表](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E3%83%BB%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E3%81%AE%E5%B9%B4%E8%A1%A8)

**熱力学の法則**

1. [熱力学第零法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E9%9B%B6%E6%B3%95%E5%89%87)  
   物体*A*と*B*、*B*と*C*がそれぞれ熱平衡ならば、*A*と*C*も熱平衡にある。
2. [熱力学第一法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E6%B3%95%E5%89%87)（[エネルギー保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)）  
   系（閉鎖系）の内部エネルギー*U*の変化*dU*は、外界から系に入った熱\delta{}Qと外界から系に対して行われた仕事\delta{}Wの和に等しい。  
   dU=\delta{}Q+\delta{}W  
   さらに一般に、外界と物質を交換しうる系（開放系）では、外界から系に物質が流入することによる系のエネルギーの増加量\delta{}Zも加わることになる。  
   dU=\delta{}Q+\delta{}W+\delta{}Z
3. [熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)
4. 熱を低温の物体から高温の物体へ移動させ、それ以外に何の変化も起こさないような過程は実現不可能である。（クラウジウスの原理）
5. 温度の一様な一つの物体から取った熱を全て仕事に変換し、それ以外に何の変化も起こさないような過程は実現不可能である。（トムソン（ケルヴィン）の原理）
6. [第二種永久機関](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B8%E4%B9%85%E6%A9%9F%E9%96%A2)は実現不可能である。（オストヴァルトの原理）
7. 厳密には第三法則（絶対零度の到達不可能）が必要。
8. 第二法則は第二種永久機関が実現するためには低温熱源が絶対零度である必要があると述べているだけで、第二種永久機関が実現不可能とまでは言っていない。
9. 断熱系で不可逆変化が起こるとき、エントロピーは必ず増加する。可逆的な変化ではエントロピーの増加はゼロとなる。（エントロピー増大の原理・クラウジウスの不等式）
10. [熱力学第三法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%B8%89%E6%B3%95%E5%89%87)  
    絶対零度でエントロピーはゼロになる。（ネルンスト・プランクの原理）  
    \lim_{T\to{}0} S = 0

第一法則及び第二法則は、[ルドルフ・クラウジウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AB%E3%83%89%E3%83%AB%E3%83%95%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%82%B8%E3%82%A6%E3%82%B9)によって定式化された。

**より百科事典的な説明**

第零法則は、温度が一意に定まることを示している。

第一法則は、閉鎖された空間では外部との物質や熱、仕事のやり取りがない限り、熱（そしてエネルギー）の総量に変化はないということを示している。

第二法則は、エネルギーを他の種類のエネルギーに変換する際、必ず一部分が熱エネルギーに変換されるということ、そして、熱エネルギーを完全に他の種類のエネルギーに変換することは不可能であるということを示している。つまり、どんな種類のエネルギーも最終的には熱エネルギーに変換され、どの種類のエネルギーにも変換できずに再利用が不可能になるということを示している。なお、エントロピーの意味は熱力学の枠内では理解しにくいが、微視的な**乱雑さ**の尺度であるということが[統計力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%8A%9B%E5%AD%A6)から明らかにされる。

第三法則は、絶対零度よりも低い温度はありえないことを示している。

**熱力学的系**

熱力学的系とは考えている[世界](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%96%E7%95%8C)の一部である。現実あるいは仮想の境界が系と残りの世界を。その残りの世界は外界と呼ばれる。熱力学的系は境界の特徴により分類される。

* 孤立系 - 外界から完全に独立した系。たとえば[宇宙](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%87%E5%AE%99)はその全体でひとつの孤立系である。
* [閉鎖系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%96%89%E9%8E%96%E7%B3%BB) - 系と外界との間で熱の移動は許されるが、物質の移動は許されない。[温室](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%AE%A4)がその例である。
* [開放系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%96%8B%E6%94%BE%E7%B3%BB) - 系と外界との間で熱と物質ともに移動が許される。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6>

1. **Ciclo de Carnot:**

**カルノーサイクル**（[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：Carnot cycle）は、[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6) T_H, T_L の間で動作する可逆[熱サイクル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%A9%9F%E9%96%A2%E3%81%AE%E7%90%86%E8%AB%96%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AB)の一種である。一般に、あらゆる可逆熱サイクルは同じ効率を持つ。可逆熱サイクルは最も効率のよいサイクルである。可逆サイクルよりも効率のよい熱サイクルは存在しない。

カルノーサイクルは実際には実現不可能だが、限りなく近いものを作ることは可能であり、[スターリングエンジン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%B3)はこれに近い。

[ニコラ・レオナール・サディ・カルノー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%82%B3%E3%83%A9%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%8A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%82%B5%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%BB%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%8E%E3%83%BC)が[熱機関](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%A9%9F%E9%96%A2)の研究のために[思考実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%80%9D%E8%80%83%E5%AE%9F%E9%A8%93)として[1820年代](http://ja.wikipedia.org/wiki/1820%E5%B9%B4%E4%BB%A3)に導入したものである。これによって本格的な[熱力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6)が始まり、[熱力学第二法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%9B%E5%AD%A6%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%B3%95%E5%89%87)、[エントロピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%BC)等の重要な概念が導き出されることになった。

**サイクル**

次の各過程が準静的（[可逆的](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E9%80%86)）に行われるものとする。

1-2 断熱圧縮

2-3 温度 T_H で Q_H の熱を等温吸熱、膨張

3-4 断熱膨張

4-1 温度 T_L で Q_L の熱を等温放熱、圧縮

**理論熱効率**

有効仕事 W は

 W = Q_H - Q_L \ 

[理想気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E6%83%B3%E6%B0%97%E4%BD%93)による等温膨張において、高温・低温部それぞれの体積変化による仕事量を計算し、その比を取ると、

 \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} 

が導かれ、理論[熱効率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%B9%E7%8E%87) \eta_{\mathrm{th}} は、

 \eta_{\mathrm{th}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1-\frac{Q_L}{Q_H} = 1-\frac{T_L}{T_H} 

となる。

[エントロピー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%94%E3%83%BC)変化は、

 \Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} 、 \Delta S_L = -\frac{Q_L}{T_L} 

であり、さきの[熱効率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%8A%B9%E7%8E%87)の関係式から全サイクルでは差し引き0となる。

ただし、Tは[絶対温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E6%B8%A9%E5%BA%A6)、Sは気体のエントロピー、Qは熱量、Pは気体の[圧力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%A7%E5%8A%9B)、Vは気体の[体積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%93%E7%A9%8D)である。

低温熱源が[絶対零度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E9%9B%B6%E5%BA%A6)ならば、[第二種永久機関](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B8%E4%B9%85%E6%A9%9F%E9%96%A2#.E7.AC.AC.E4.BA.8C.E7.A8.AE.E6.B0.B8.E4.B9.85.E6.A9.9F.E9.96.A2)を作れるように思えるが、実際は様々な理由に依り不可能であることが証明されている（断熱膨張を無限大まで行わねばならないこと、絶対零度に現実に到達することは不可能であること）。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%82%B5%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AB>

1. **Carga Eléctrica:**

**電荷**（でんか、電気量）は、[素粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%A0%E7%B2%92%E5%AD%90)が持つ性質の1つである。電荷の量を電荷量という。電荷量のことを単に電荷と呼ぶこともある。電荷を持つ粒子のことを単に電荷と呼ぶこともある。

**概要**

荷量は正または負の値を取りうる。電荷量が正である電荷を正電荷といい、電荷量が負である電荷を負電荷という。[陽子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%99%BD%E5%AD%90)は正電荷を持つ。[電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90)は負電荷を持つ。[中性子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E6%80%A7%E5%AD%90)は電荷を持たない。正電荷を持つ粒子のことを単に正電荷と呼んだり、負電荷を持つ粒子のことを単に負電荷と呼ぶこともある。その呼び方を使えば、陽子は正電荷であり、電子は負電荷である。

電子や陽子の持つ電荷量の[絶対値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E5%80%A4)を[電気素量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E7%B4%A0%E9%87%8F)という。

**物理**

**クーロンの法則**

正電荷（を持つ粒子）同士の間には斥力（互いに遠ざけようとする力）が生じる。負電荷（を持つ粒子）同士の間にも斥力が生じる。正電荷（を持つ粒子）と負電荷（を持つ粒子）の間には引力（互いに引き付けようとする力）が働く。これらの力は、各粒子の電荷量に[比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B)し、粒子同士の[距離](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)の2乗に反比例する。これを[クーロンの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)といい、この力を[クーロン力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E5%8A%9B)という。

**帯電**

物体や空間において、その中に電荷を持つ粒子が複数存在するとき, 各粒子の持つ電荷量の合計を、その物体や空間の「正味の電荷量」と呼ぶ。正電荷と負電荷が等量だけ存在するときは正味の電荷量はゼロである。この状態を[中性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E6%80%A7)という。正味の電荷量がゼロでないとき、つまり正電荷か負電荷のどちらかの方が多いとき、その物体や空間は[帯電](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B8%AF%E9%9B%BB)しているという。

帯電する現象を[静電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%99%E9%9B%BB%E6%B0%97)と呼ぶこともある。静電気現象は[放電](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%94%BE%E9%9B%BB)などを含むため、帯電は静電気現象の一部である。

**電流**

単位時間あたりにある場所（もしくは面）を通過する電荷量のことを[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)という。電流の[SI単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/SI%E5%8D%98%E4%BD%8D)はアンペア[A]である。これはSI基本単位である。電流の定義より明らかに, 電荷は電流を時間で積分したものである。従って, 電荷のSI組み立て単位はアンペア・秒[A s]である。この単位をクーロン[C]という。すなわち, 1[C]=1[A s]である。

**電荷素量**

電荷素量を記号eで表すと陽子は+e 、電子は-e 、中性子は0の電荷をそれぞれ持っている。[イオン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3)を表すMg2+やOH-などはそれぞれ+2eや-eだけ帯電していることを示す。[素粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%A0%E7%B2%92%E5%AD%90)である[クォーク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%82%A9%E3%83%BC%E3%82%AF)は(-1/3)eまたは(+2/3)eの電荷を持っている。なお[反粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E7%B2%92%E5%AD%90)はその対になる粒子と正負が逆で絶対値が等しい電荷を持つ。たとえば電子の反粒子である[陽電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%99%BD%E9%9B%BB%E5%AD%90)は+eの電荷を持ち、陽子の反粒子である[反陽子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E9%99%BD%E5%AD%90)は-eの電荷を持つ。

**電荷密度**

単位体積あたりの電荷を[電荷密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E5%AF%86%E5%BA%A6)という。

**電荷保存則**

電荷の総量は永遠に変わらないと言われている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7>

1. **Conductor:**

**電気伝導体**（でんきでんどうたい）は移動可能な[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)を含み[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)を通しやすい[材料](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9D%90%E6%96%99)、すなわち[電気伝導率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E7%8E%87)（導電率）の高い材料である。良導体、単に**導体**とも呼ぶ。

電気伝導率は、物質によってとる値の範囲が広い[物性値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E6%80%A7%E5%80%A4)で、[金属](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%9E)から[セラミック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%A9%E3%83%9F%E3%83%83%E3%82%AF)まで20桁ほど幅がある。一般には伝導率が[グラファイト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%88)（電気伝導率 106S/m）と同等以上のものが導体、10-6S/m以下のものを不導体（[絶縁体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E7%B8%81%E4%BD%93)）、その中間の値をとるものを[半導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93)と分類する。106S/mという電気伝導率は、1mm2の断面積で1mの導体の抵抗が1Ωになる電気の通りやすさである。

[銅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%85)や[アルミニウム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%9F%E3%83%8B%E3%82%A6%E3%83%A0)といった金属導体では、[電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90)が移動可能な荷電粒子となっている（[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)を参照）。移動可能な正の電荷としては、格子内の[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)で電子が抜けている部分という形態（[正孔](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%A3%E5%AD%94)）や[電池](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B1%A0)の[電解液](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A7%A3%E6%B6%B2)などに[イオン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3)の形で存在する場合がある。不導体が電流を通さないのは移動可能な電荷が少ないためである。

**概要**

全ての電気伝導体は、その材料の2つの異なる場所に[電位差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D%E5%B7%AE)（単位は[ボルト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D))）を印加したときに移動する[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)を含んでいる。この電荷の流れが[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)と称される（単位は[アンペア](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%82%A2)）。多くの材料において、温度が一定でその材料の形状や状態が変化しない限り、[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)電流の大きさは電圧と比例する（[オームの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)）。

電気伝導体として最もよく使われる物質は[金属](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%9E)である。銅は電気回路の配線によく使われている。[銀](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%80)は電気伝導体としては最も優れているが、高価であるため配線には使われない。腐食し難いことから、[金](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91)は高品質な接触型端子などで使われている。金属以外にも電気伝導体は様々なものがある。例えば、[グラファイト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%88)、[塩](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A1%A9_(%E5%8C%96%E5%AD%A6))の水溶液、あらゆる種類の[プラズマ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%BA%E3%83%9E)、[導電性高分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E6%80%A7%E9%AB%98%E5%88%86%E5%AD%90)材料などがある。

[超伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E4%BC%9D%E5%B0%8E)体以外の材料には[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)があり、電流を流すと熱を発生する。従って電気伝導体として物質を使用する場合は、損傷を受けずに長持ちする温度や電流の量を考慮しなければならない。電荷が移動すると電気伝導体の周囲で[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)が発生し、電気伝導体に放射状の力学的な力を及ぼす。この力に耐え、抵抗損失によって発生した熱を除去する限り、材質や体積（長さ×断面積）によらず電気伝導体に流せる電流の量に限界はない。これらが問題となるのは[プリント基板](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%83%88%E5%9F%BA%E6%9D%BF)の場合で、導体の配線が相対的に小さく密集していて何かで囲われていることが多いため、熱を適切に除去してやらないと配線が熱で溶けてしまうこともある。

[熱伝導率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E7%8E%87)と電気伝導率の傾向は一致していることが多い。実際、金属は熱伝導率も高く電気伝導率も高い。しかし中には電気伝導率は高いが熱伝導率が低い材料もある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93>

1. **Dieléctrico:**

**誘電体**（ゆうでんたい、dielectric）とは、導電性よりも誘電性が優位な物質である。広い[バンドギャップ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%90%E3%83%B3%E3%83%89%E3%82%AE%E3%83%A3%E3%83%83%E3%83%97)を有し､[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)電圧に対しては[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)を通さない[絶縁体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E7%B8%81%E4%BD%93)としてふるまう。身近に見られる誘電体の例として、多くの[プラスティック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%AF)、[セラミック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%A9%E3%83%9F%E3%83%83%E3%82%AF)、[雲母](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%B2%E6%AF%8D)（マイカ）、[油](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B2%B9)などがある。

誘電体は電子機器の絶縁材料､[コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)の電極間挿入材料､[半導体素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93%E7%B4%A0%E5%AD%90)のゲート絶縁膜などに用いられている。また、高い誘電率を有することは光学材料として極めて重要であり、[光ファイバー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%90%E3%83%BC)、[レンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)の光学コーティング､[非線形光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%9E%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E5%85%89%E5%AD%A6)[素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%A0%E5%AD%90)などに用いられている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E4%BD%93>

1. **Ley de Coulomb :**

**クーロンの法則**（クーロンのほうそく、英語:**Coulomb's law**）とは、[荷電粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8D%B7%E9%9B%BB%E7%B2%92%E5%AD%90)間に働く反発し、または引き合う[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)がそれぞれの[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)の[積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%97%E6%B3%95)に[比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B)し、[距離](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)の2乗に[反比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E6%AF%94%E4%BE%8B)することを示した[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)の基本法則。

[ヘンリー・キャヴェンディッシュ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%82%AD%E3%83%A3%E3%83%B4%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A5)により[1773年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1773%E5%B9%B4)に実験的に確かめられ、[シャルル・ド・クーロン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%89%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3)が[1785年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1785%E5%B9%B4)に法則として再発見した。[磁荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E8%8D%B7)に関しても同様の現象が成り立ち、これもクーロンの法則と呼ばれる。一般的にクーロンの法則と言えば、通常前者の荷電粒子間の相互作用を指す。

また、[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E4%BD%93)表面上の[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)はその場所の[電荷密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E5%AF%86%E5%BA%A6)に比例するという法則も「クーロンの法則」と呼ばれる。こちらは「クーロンの電荷分布の法則」といい区別する。

**概要**

クーロンの法則は1785年から89年にかけて発見されたが、それまでの電磁気学(確立していないがそれに関する研究)は、かなり曖昧で定性的なものであった。 電磁気学は、1600年に[ギルバート](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%A0%E3%83%BB%E3%82%AE%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85))は[コハク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%8F%E3%82%AF)が摩擦でものを引きつける現象から、物質を電気性物質、非電気性物質として区別したことに始まり、1640年には[ゲーリケ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%82%B1)によって[放電](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%94%BE%E9%9B%BB)が確認された。

18世紀に入った1729年に[グレイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%BC%E3%83%B4%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%82%B0%E3%83%AC%E3%82%A4)が金属が電気的性質を伝えることを発見し、その作用をおこす存在を[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)と名付けた。彼はギルバートの電気性物質の区別を、電気を導く物質として[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E4%BD%93)、電気を伝えない物質を[不導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%8D%E5%B0%8E%E4%BD%93)と分類した。1733年、[デュ・フェ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%BD%E3%83%AF%E3%83%BB%E3%83%87%E3%83%A5%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A7)が摩擦によって生じる電気には二つの性質があり、同種間では反発し、異種間では引き合うこと、そして異種の電気を有する物質どうしを接触させると中和して電気的作用を示さなくなることを発見した。1746年には[ライデン瓶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%87%E3%83%B3%E7%93%B6)が発明され、電気を蓄える技術を手に入れた。1750年には検電器が発明され、これらから[フランクリン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%83%B3)が電気にプラスとマイナスの区別をつけることでデュ・フェの現象を説明した。

フランクリンの手紙に示唆されて、[プリーストリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%82%BC%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%AA%E3%83%BC)は1766年に中空の金属容器を帯電させ、内部の空気中に電気力が働かないことを示し、重力との類推から電気力が距離の2乗に反比例すると予想した[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-aether1-0)[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-aether2-1)。1769年にジョン・ロビソン([John Robison](http://en.wikipedia.org/wiki/John_Robison_(physicist)))は実験により同種電荷の斥力は距離の2.06乗に反比例し、異種電荷の引力は距離の2以下のベキに反比例することを見いだした。しかしこの結果は1803年まで公表されなかった[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-shimoda-2)。1773年にイギリスの[キャヴェンディッシュ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%82%AD%E3%83%A3%E3%83%B4%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A5)は同心にした2個の金属球の外球を帯電させ、その二つを帯電させたときに内球に電気が移らないことから逆二乗の法則を導き出した。これはまさにクーロンの法則であり、クーロンよりも早く、しかも高い精度で求めていた。しかし、彼は研究資料を机にしまい込んで発表しなかったためにおよそ100年の間公表されなかった。

1785年にクーロンは[ねじり天秤](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%81%AD%E3%81%98%E3%82%8A%E5%A4%A9%E7%A7%A4&action=edit&redlink=1)を用いて、荷電粒子間にはたらく力が電荷量の二乗に比例し、距離の二乗に反比例するという法則、すなわち以下でしめされるクーロンの法則を導きだした。

F=k\frac{q_1q_2}{r^{2+\delta}}

ここで q_1, q_2 は荷電粒子の電荷量。r は粒子間の距離。k は比例定数。

F は q_1\cdot q_2>0 ならば[斥力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%96%A5%E5%8A%9B)を表し、q_1\cdot q_2<0 ならば[引力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%95%E5%8A%9B)を表す。 これは実験から見出したもので距離の指数 2+δ は物理量で有効数字をもち、現在もより精密な実験により更新されている。 キャヴェンディッシュによる実験では |δ|=1/50 であり、マクスウェルの実験では |δ|=1/21600 、現在の値では|δ|<2×10-9 であることが確かめられている。このため実用的には通常距離の二乗としている。 この実験の成果からこの法則を**クーロンの法則**と呼ぶ。また式中の定数 k を**クーロン定数**といい、この式で表される力 F を**クーロン力**（静電力、静電気力、静電引力）という。

クーロンの後にも電気力と距離の関係を求めようとした実験は少なくないが、必ずしも逆2乗則を支持するものではなかった [[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-shimoda-2)。クーロンのねじり天秤は非常に敏感な装置であり、現代に行われた再現実験 [[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-3)でも誤差が大きく、距離のベキが1～3乗程度になるという結論しか得られていない。クーロンの論文のデータの誤差は3、4％程度で、おそらく多くの測定の中から最も信頼できると思われるデータだけを報告したものと推察される [[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-shimoda-2)。再現実験を行ったヘーリングは、「おそらくクーロンは理論的考察から逆2乗則を信じるようになり、それを実証しようとして実験したのであって、実験から逆2乗則を発見したのではなかろう」と結論している [[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#cite_note-shimoda-2)。ただしこの時代には[最小二乗法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%80%E5%B0%8F%E4%BA%8C%E4%B9%97%E6%B3%95)などの誤差論が存在しなかったことにも留意する必要がある。

キャベンディッシュの研究資料は1870年に設立された[キャヴェンディッシュ研究所](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%A3%E3%83%B4%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A5%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%89%80)の初代所長[マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)によって公表された。マクスウェルはキャヴェンディッシュの方法を改良して追試をおこない、非常に高い精度でクーロンの法則を確かめている。

**電荷に関するクーロンの法則**

二つの[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)を帯びた粒子（[荷電粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8D%B7%E9%9B%BB%E7%B2%92%E5%AD%90)）間に働く力の大きさは、二つの粒子の電荷 (\ q_1と\ q_2)の積に比例し、粒子間の距離r の二乗に反比例する。同符号の電荷のあいだには[斥力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%96%A5%E5%8A%9B)、異なる符号の電荷のあいだには[引力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%95%E5%8A%9B)が働く。 この力のことを**クーロン力**（またはクーロン[相互作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)）と呼ぶ。

F=k\frac{q_1q_2}{r^2}

ただし*F* を[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)の大きさ、*q* を[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)の大きさ、*r* を2物体間の[距離](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)とする。*k* は比例定数である。

q1 = 1C, q2 = 1C (単位C: クーロン、1C=1A·s) として粒子間距離 r を 1m に設定し、力を測定すると比例定数が求められる。これによると k = 8.9876×109 N·m2·A-2·s-2 である。

ここで k=\frac{1}{4\pi \varepsilon_0} とおくと、 F = \frac{1}{4 \pi \varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2} と表せる。

[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)（SI）で記述すると比例定数ｋには（真空の）[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87) ε0 (= 8.854×10-12 A2·s2·N-1·m-2)があらわれる。

方向まで考慮すると、


\boldsymbol{\mathit{F}}=\frac{q_1q_2}{4 \pi \varepsilon_0}\frac{1}{r^2}\boldsymbol{\mathit{\hat{r}}}
\qquad :\boldsymbol{\mathit{\hat{r}}}=\frac{\boldsymbol{\mathit{r}}}{|\boldsymbol{\mathit{r}}|}=
\frac{\boldsymbol{\mathit{r}}}{r}


クーロン力は以下のようなクーロン[ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)から導くことができる。

V_1(\boldsymbol{\mathit{\hat{r}}}_1)=
\frac{q_1\cdot{}q_2}{r}\boldsymbol{\mathit{\hat{r}}}=
V_2(\boldsymbol{\mathit{\hat{r}}}_2)

クーロン力は位置のみに依存する[保存力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%8A%9B)であることがわかる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Campo Eléctrico:**

**電場**（でんば）または**電界**（でんかい）（英語:**Electric field**）は、電荷に力を及ぼす空間の性質のひとつ。***E*** の文字を使って表されることが多い。おもに理学系では「電場」、工学系では「電界」ということが多い。また、[電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)と明確に区別するために「電場の強さ」ともいう。時間によって変化しない電場を**静電場**（せいでんば）または**静電界**（せいでんかい）とよぶ。

**定義**

空間のある点に, 正の単位電荷量をもつ電荷（それを試験電荷という）を静止させて置いたとき、その電荷に生じるであろう電磁気的な力を、その点における電場と定義する。

電磁気的な力は電荷量に比例することが実験により知られている。従って, 位置 **r**に於いて電荷量 q の電荷に働く力を **F** とすると定義により以下の式が成り立つ。

\boldsymbol{F} = q \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})

なお、[電磁ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)を用いれば以下のように表す事ができる。

\boldsymbol{E}=-\mathrm{grad} \phi-\frac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}

（φ:[スカラーポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)、**A**:[ベクトルポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)）

電場の定義に用いる試験電荷は, 周囲の電荷を移動させないと考える。

巨視的な大きさをもち周囲の誘電体を押しのけるような荷電物体が受ける力は、誘電体内の電場ではなく[電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)によって決まる。

**電場の満たすべき方程式**

**クーロンの法則**

空間上の位置 **r**0 に[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7) Q を置く。さらに位置 **r** に 電荷 q を置いた時、電荷 q が電荷 Q から受ける力は,

\boldsymbol{F} = \frac{q Q}{4 \pi \varepsilon_0}
 \frac{\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0}{ | \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0 | ^3}


となる。これを[クーロンの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)という。ここで、\varepsilon_0は真空の[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87)である. これに電場の定義をあわせて考えると,

\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}) = \frac{Q}{4 \pi \varepsilon_0}
 \frac{\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0}{ | \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0 | ^3}


となる。これは電荷 Q が作る電場である。

**マクスウェル方程式**

電場はベクトル場であるので、場の[発散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%95%A3)と場の[回転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2_(%E6%95%B0%E5%AD%A6))によって決まる。

電場の発散は

\mathrm{div} \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}

となる。*ρ*は[電荷密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E5%AF%86%E5%BA%A6)である。これはマクスウェル方程式の一つである**ガウスの法則**である。

電場の回転は

\mathrm{rot} \boldsymbol{E} = -\frac{\part \boldsymbol{B}}{\part t}

これはマクスウェル方程式の一つである**ファラデーの法則**である。

**電場のエネルギー**

原点中心で球殻に電荷*q*を持つ半径*r*0の微小[球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%83)と、中心から無限遠まで延びる[円錐](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%86%E9%8C%90)を仮定し、この円錐を半径*r*の球面で切断した面積を*S*(*r*)とする。微小球と円錐が交わる微小面の面積を*S*0、微小球の電荷面密度を*σ*とすると、[ガウスの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)より

*εE*(*r*)*S*(*r*) = const = *σS*0

である。

ここで、この微小面上の電荷*σS*0を無限遠からこの微小球上に運ぶのに要する[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))は-\sigma S_0\int_{r_0}^{\infty}E(r)drであるが、先の結果より

-\sigma S_0\int_{r_0}^{\infty}E(r)dr=-\int_{r_0}^{\infty}\varepsilon\{E(r)\}^2S(r)dr=-\int\varepsilon\{E(r)\}^2dV

である。

これを全球面上で積分すれば、微小球上の電荷*q*を無限遠から微小球までに運ぶのに要する仕事、つまりこの微小球上の電荷によって生じる[ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)*U*=∫*εE*2*dV*を求めることができる。*u*=*εE*2とおくと、*U*=∫*udv*なので、これは電荷によって生じた電場が*u*=*εE*2の[エネルギー密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E5%AF%86%E5%BA%A6)で[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)を蓄えていると解釈できる。

これは実際に、蓄電した[キャパシタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)の二枚の導体間の体積と、キャパシタに蓄えられたエネルギーを比較することで検証することができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4>

1. **Líneas de Campo Eléctrico:**

**電気力線**（でんきりきせん、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): line of electric force、electrical flux line）とは、[マイケル・ファラデー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC)によって考え出された、[電気力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8A%9B)の様子を視覚的に表現するための仮想的な[線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A)をいう。

**概要**

電気力線は正の[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)から負の電荷へと向かう線として書く。

電荷のないところで途切れたり二つ以上の電気力線が交わったりすることはない。

ある閉曲面を通過する電気力線の本数はその[閉曲面](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%96%89%E6%9B%B2%E9%9D%A2&action=edit&redlink=1)の内側に含まれる電気量に比例する。

とする。よって電気力線の密度が、弱い電気力の働く場所では疎に、強い電気力が働く場所では密となるように電気力線は引かれる。上記の条件のうち3番目のものには注意が必要である。電気力線は方向を持つ曲線であるから、曲面を通過する場合内側に向かうものと外側に向かうものが有る。ここで問題にしているのは閉曲面内の電気量と比例するのは内から外へ向かう電気力線の本数から外から内へ向かう電気力線の本数をひいたものである。これがマイナスになる場合閉曲面内の電荷をは負である。閉曲面ただ貫くような電気力線は閉曲面内の電気量とは無関係である。

ここで、電気力線は一般的には電荷の有無とは無関係に存在する線であることに注意しなくてはならない。例えば[磁束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F)の変化があると、この電気力線が突然に出現するが、電荷は存在しない。もちろん上記の条件は守られるから磁束の変化によって生じた電気力線は閉曲線となる。

電気力線の集まりは[ファラデー管](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC%E7%AE%A1&action=edit&redlink=1)という。

**物理**

電気力線は1[C]の正電荷から、1/ε本発生する。

電気力線の本数=\frac{Q}{\varepsilon}

点電荷からr[m]離れた点の電界は、電気力線を半径rの球の表面積で割ったものになる。

電界 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2} 

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8A%9B%E7%B7%9A>

1. **Dipolo Eléctrico:**

**双極子**（そうきょくし、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): dipole[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E6%A5%B5%E5%AD%90#cite_note-terms-0)）とは、一対の正負の同じ大きさの荷（[チャージ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%83%A3%E3%83%BC%E3%82%B8_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))）からなる[要素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%81%E7%B4%A0)を指す。チャージが[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)である場合の双極子は[電気双極子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8F%8C%E6%A5%B5%E5%AD%90)、[磁荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E8%8D%B7)である場合の双極子は[磁気双極子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%8F%8C%E6%A5%B5%E5%AD%90)という。

双極子は、負のチャージから正のチャージへの方向[ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)とその大きさとの[積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D)で特徴づけられる。このベクトルを**双極子モーメント**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): dipole moment[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E6%A5%B5%E5%AD%90#cite_note-terms-0)）という。

[アマチュア無線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%9E%E3%83%81%E3%83%A5%E3%82%A2%E7%84%A1%E7%B7%9A)で用いられる[ダイポール・アンテナ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%86%E3%83%8A)、[気象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E8%B1%A1)における[ダイポールモード現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%89%E7%8F%BE%E8%B1%A1)、[原子核物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E6%A0%B8%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)における[ソフトダイポールモード](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BD%E3%83%95%E3%83%88%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%89)など、和訳せず用語として用いられることもある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E6%A5%B5%E5%AD%90>

1. **Ley de Gauss:**

**ガウスの法則**とは（-ほうそく、Gauss's law）とは[カール・フリードリヒ・ガウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%92%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9)が[1835年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1835%E5%B9%B4)に発見し[1867年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1867%E5%B9%B4)に発表した[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)と[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)の関係をあらわす[方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)である。この式は[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)により数学的に整備され[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の1つとなった。[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)における[アンペールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)とみなすこともできる。

ちなみに[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)の[ガウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9)は[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)の単位であり電場を扱うこの法則とは全く関係がない。

**積分形式**

一般に積分形式とよばれるガウスの法則は以下の形であらわされる。

\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho \, dV  = Q 

ここで、

|  |  |
| --- | --- |
| **D** | : [電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6) |
| *ρ* | : [電荷密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E5%AF%86%E5%BA%A6) |
| *Q* | : 積分領域 V の内部にある[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)の総和 |
| d**S** | : [面素ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D%E5%88%86) |
| *V* | : 体積 |

である。

この式は、ある領域内に電荷が存在すると、その領域から電荷と等しい大きさの[電束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F)という物理量が出入りするということを示している。

[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4) **E** (**D** =ε**E**)を用いて

\oint_S \varepsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = Q 

と表すこともできる。\varepsilonは[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87)であり、非線形素子においては行列となることもあるが、線形の場合はスカラー量である。

**微分形式**

**発散**

閉曲面Sにおいて、ガウスの法則（\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q ）において、体積Vの微小変化による電束（ガウスの法則、面積分）の変化率を[div](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%95%A3)***D*** で表す。

\mathrm{div} \mathbf{D} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_{\Delta S} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}

ここでΔSはΔVの表面である。

また

\mathrm{div} \mathbf{D} = \rho

|  |  |
| --- | --- |
| ρ | : 電荷密度 |

となる。

「div」は「[ダイバージェンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%90%E3%83%BC%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%82%B9)（divergence）」と言い、「[発散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%95%A3)」と言う意味である。

**直角座標における発散**

角座標においてdiv***D*** は、

\mathrm{div} \mathbf{D} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{1}{\Delta V}\oint_{\Delta S} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = 
\left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}\right)

となる。

微分形式と呼ばれるガウスの法則は以下の形であらわされる。この形は[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)により整備された。

\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho 

ここで、

|  |  |
| --- | --- |
| **D** | : [電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6) |

である。∇（ナブラ）は[微分演算子](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%BE%AE%E5%88%86%E6%BC%94%E7%AE%97%E5%AD%90&action=edit&redlink=1)である。

また、[E-B対応](http://ja.wikipedia.org/wiki/E-B%E5%AF%BE%E5%BF%9C) と呼ばれる形に改めると、

\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}

となる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Potencial Eléctrico:**

**電位**（でんい、electric potential）とは、[静電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%99%E9%9B%BB%E5%A0%B4)の中にある単位[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)がその点において持つ静電エネルギー（電気的な[位置エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%BD%AE%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)）のこと。[クーロン力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E5%8A%9B)による[ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)のことであり、**静電ポテンシャル**ともいう。[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)は一般に V （[ボルト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D))）を用いる。特に電位差のことを[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)という。電位差が[ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)量であるのに対して、電位は[スカラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%A9%E3%83%BC)量である。

一般に、電荷 Qを持つ点電荷から r だけ離れた地点の電位Vは V = Q/r である。 電位は V = W/Q によって求められる。ここで V は電位（単位は V）、Wは[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))（単位は [J](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB)）、Q は電荷（単位は [C](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3)）を表す。つまり電位の単位 V は J/C の[次元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A1%E5%85%83)を持つ。

**電磁気学において**

上に述べたように、電位とは[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)（[電界](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%95%8C)）の中にある単位電荷の持つエネルギーである。さて、ここで言う電場の意味だが、電場とは電気的な作用を物体に及ぼす空間のこととし、その定義は[クーロンの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)に根拠を求めて、空間中に単位静電荷を置いたときに空間が単位正電荷に加える力のこととする。従って、今、電場の大きさがE[V/m]の点Pに、q[C]の電荷を帯びた[物体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E4%BD%93)があるとすると、物体が電場から受ける[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)F[N]は、

F=qE

となる。（以後、とりあえず、[SI単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/SI%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)を用いる。）そうすると、電場E上にあるこの物体が持っている電気的[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)は、物体が点Pに至るまでに電場Eから与えられた[仕事](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%95%E4%BA%8B_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))の総和（W[J]とする）に等しいから、力学的仕事の定義より、

W = \int \mathbb{F}\cdot d\mathit{r} = \int q\mathbb{E}\cdot d\boldsymbol{r} 

となる。この事実より、ある電場Eの中のある点Pの電位V[V]（Pに単位正電荷q=+1[C]を置いたときにそれが持つエネルギー）は、次の式で与えられることが導かれる。

V = -W = -\int 1\cdot \mathbb{E}\cdot d\boldsymbol{r} = -\int \mathbb{E}\cdot d\boldsymbol{r}= -\int V_{s} dr 

V_{s}は電界Eのds成分である。エネルギーの基準を無限遠にとると、

V = -\int_{\infty}^{{\boldsymbol{r}}_P} \mathbb{E}\cdot d\boldsymbol{r} = -\int_{\infty}^{r_P} V_{s} dr 

が得られる。（{\boldsymbol{r}}_Pは点Pの位置ベクトル。）これが電磁気学における電位の定義式である。

実際に、[導体系](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%B0%8E%E4%BD%93%E7%B3%BB&action=edit&redlink=1)について、蓄えられる電荷や力などを解く場合には電場内の２点の電位の差が問題になることが多い。そこで、点Ａの電位をV_a、点Ｂの電位をV_bとしたとき、ＡＢ間の**電位差**V_{ab}を

V_{ab} = V_a-V_b

と定義する。[電気工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%B7%A5%E5%AD%A6)において、電位差はしばしば[**電圧**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)と呼ばれる。

**電気工学において**

先で電位の基準は無限遠点にとるとしたが、電気工学では普通このようにせず、回路上の１点を0Vと定めるのが一般的である。特に、[送電](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%81%E9%9B%BB)・[配電](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%85%8D%E9%9B%BB)など比較的高電圧の分野では、[地面](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%BC%E3%82%B9)の電位を基準に定めている。また、電気工学における電圧は[スカラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%A9%E3%83%BC)量として扱え、計算の中では殆どの場合そのようにする。（ただし、[交流回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)においては電圧を[複素数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E7%B4%A0%E6%95%B0)として扱うことが多く、複素数を図示するときにベクトルのように描くことはある。また、この複素数を[実数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9F%E6%95%B0)値の[２次元ベクトル](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%EF%BC%92%E6%AC%A1%E5%85%83%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB&action=edit&redlink=1)とみて、交流の電力の式を[複素電圧](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A4%87%E7%B4%A0%E9%9B%BB%E5%9C%A7&action=edit&redlink=1)と[複素電流](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A4%87%E7%B4%A0%E9%9B%BB%E6%B5%81&action=edit&redlink=1)の[内積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E7%A9%8D)として表すことも極稀にある。）

電気工学で回路を解析するときは、[オームの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)による近似が力を発揮する。[抵抗値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%B5%E6%8A%97)がR[Ω]の回路の両側の端子の電位がそれぞれV_a、V_bであり、Rにかかる電圧がV = V_a-V_bであるとき、回路を流れる[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)I[A]は、

I = \frac{V_a-V_b}{R} = \frac{V}{R}

で与えられる。

[電子回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E5%9B%9E%E8%B7%AF)では、ある端子の[インピーダンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%BC%E3%83%80%E3%83%B3%E3%82%B9)というと、その端子の電位を端子に流れ込む電流で割った値のことを表す。電圧ではなく電位を用いて、このような言い方ができるのは、電子回路では回路中の入力・出力などを全て電位（アースとの電位差）で与えているためである。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D>

1. **Capacidad Eléctrica:**

**静電容量**（せいでんようりょう、electrostatic capacity または capacitance）は、[コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)などの[絶縁](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E7%B8%81_(%E9%9B%BB%E6%B0%97))された[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E4%BD%93)において、どのくらい[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)が蓄えられるかを表す量である。**電気容量**（でんきようりょう）、または**キャパシタンス**とも呼ばれる。

**定義**

静電容量は単位[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)あたりの蓄えられた[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)として与えられる。量記号は **C** 、単位は[**ファラド**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%89) [F] を用いる。ある物体に 1 [ボルト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D))の電圧を与えたとき、1 [クーロン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3)の電荷を蓄えたならば、その物体の静電容量は 1 ファラドである。

1Fという静電容量は非常に大きなものである。 通常、我々の周囲で用いられる[電子部品](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E9%83%A8%E5%93%81)としてのコンデンサでは、1Fの100万分の1 (10-6) の**マイクロファラド** [μF] や、1兆分の1 (10-12) の**ピコファラド** [pF] が多く用いられる。

**孤立した導体の静電容量**

[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)的に孤立した[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93)の静電容量を *C* [F] 、導体に蓄えられている電荷を *Q* [C]、 無限遠点を基準とした電位を *V* [V] すると次の式で表される。

C = \frac{Q}{V}\,

**平行平板導体の静電容量**

[面積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D) *S* [m2] 、間隔 *d* [m] の2枚の平行導体の間に、[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87) *ε* の[誘電体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E4%BD%93)が均一に充てんされている物体がある。

平板の片方に *+Q* [C] 、もう一方に *-Q* [C] の電荷を与えたとき、平板間が平等[電界](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)となるのでそれを *E* [V/m] とすると、[ガウスの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%95%A3%E5%AE%9A%E7%90%86)より次のようになる。

E S = \frac{Q}{\epsilon}

E = \frac{Q}{\epsilon S}

また、平板導体間の電圧を *V* [V] とすると次のようになり、この物体の静電容量 *C* [F] が求められる。

V = E d = \frac{Q d}{\epsilon S}

C = \frac{Q}{V} =  \frac{\epsilon S}{d}

**静電容量の合成**

**静電容量の並列接続**

静電容量の並列接続を行った場合、その合成静電容量 *C* は、各静電容量 *Ci* [F] に対しそれぞれ等しい全電圧 *V* [V] がかかるため、そのときの電荷を *Q* [C] とすると、次のようになる。

C = \frac{Q}{V}  = \frac{V \sum_{i=1}^n C_i}{V} = \sum_{i=1}^n C_i

合成静電容量は、各静電容量の総和に等しい。

**静電容量の直列接続**

静電容量の直列接続を行った場合、全体に *V* [V] の電圧をかけ、そのときの各素子間に電荷が流れ込まないため電荷が等しくなるのでそれを *Q* [C] とする。 その合成静電容量 *C* [F] は、各静電容量 *Ci* [F] に電圧 *Vi* [V] がかかるとすると次のようになる。

V_i = \frac{Q}{C_i}

V=\sum_{i=1}^n V = Q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}

C=\frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}} =\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}

\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}

合成静電容量は、各静電容量の逆数の総和の逆数に等しい。

また、各静電容量の電圧分担は次のようになる。

V_i = \frac{Q}{C_i} = \frac{C}{C_i} V

**エラスタンス**

静電容量の逆数を**エラスタンス**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): [elastance](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_elastance)）という。 単位は**毎ファラド** (F-1)。

SIではないが、**ダラフ** ([daraf](http://en.wikipedia.org/wiki/Daraf)) という単位が用いられることもある。 これは静電容量の単位であるファラド (farad) を逆につづったもので、電気工学者の[アーサー・エドウィン・ケネリー](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%A2%E3%83%BC%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%82%A8%E3%83%89%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%82%B1%E3%83%8D%E3%83%AA%E3%83%BC&action=edit&redlink=1)が[1936年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1936%E5%B9%B4)に命名したものである。 1毎ファラドは1ダラフに等しい。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%99%E9%9B%BB%E5%AE%B9%E9%87%8F>

1. **Condensador Eléctrico:**

**コンデンサ**（**蓄電器**、[羅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%83%86%E3%83%B3%E8%AA%9E): condensare、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): capacitor）は、[静電容量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%99%E9%9B%BB%E5%AE%B9%E9%87%8F)（キャパシタンス）により[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)（[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)）を蓄えたり、放出したりする[受動素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%97%E5%8B%95%E7%B4%A0%E5%AD%90)である。

静電容量の単位は[F（ファラド）](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%89)が使われる。通常使われるコンデンサは数pF - 数万μF程度であるが、[電気二重層コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BA%8C%E9%87%8D%E5%B1%A4%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)などでは数千Fオーバーの大容量な物もある。両端の端子に印加できる電圧（耐圧）は、2.5[V](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D)) - 10kV程度までさまざまである。

なお、現代において、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)圏では、コンデンサと言った場合、[復水器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%A9%E6%B0%B4%E5%99%A8)などの[熱交換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E4%BA%A4%E6%8F%9B%E5%99%A8)により高温で気体になった物質を液体に戻す装置を指すことがもっぱらで、蓄電器を指しては**キャパシタ**の語が主として用いられている（コンデンサマイクなどコンデンサで定着してしまっているものもある）。

**物理学的説明**

まず、物理学（電磁気学）による理学的説明からはじめる。工学的（電気・電子工学）観点からの解説や応用は後述する。

コンデンサは、誘電体によって分離された2枚の電極もしくは電極板によって構成される。

**容量**

コンデンサの容量(*C*)は電荷(*Q*) の蓄積と電極間の電圧(*V*)で測定される。

C = {Q \over V}

[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB) (SI) では容量は[ファラド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%89)を単位とするが、ファラドは後述する[電気二重層コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5#.E9.9B.BB.E6.B0.97.E4.BA.8C.E9.87.8D.E5.B1.A4.E3.82.B3.E3.83.B3.E3.83.87.E3.83.B3.E3.82.B5)等を電源として利用する場合を除き通常は過大なので、[マイクロ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD)ファラド (µF)、または[ピコ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%94%E3%82%B3)ファラド (pF) を用いる場合が多い。[ナノ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%8E)ファラド (nF) を用いる場合もあるが、日本では稀である。

なお、使用する場合の[電力量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E9%87%8F)（*W*、単位[ジュール](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB)）は


W ={1 \over 2}\cdot C \cdot V^2


となる。つまり、容量1ファラドのコンデンサに10ボルトの電圧がかかっている場合、電力量は50ジュール（ワット秒）となる。したがって、この場合における定格出力50[W](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AF%E3%83%83%E3%83%88)の電気製品が1秒間動作することになる。（これは理論値であり、実際には電圧を安定させるための回路などが必要となるため、その分電力量が減ることとなる。）

**容量**は電極の面積に比例、電極間の距離に反比例する。同様に誘電体の誘電率にも比例する。

平行に配置された電極板のコンデンサの容量は

C \approx \frac{\varepsilon A}{d}; A \gg d^2[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5#cite_note-3)

である。ただし*A*は1つの電極板の面積、*d*は電極板間の距離、*ε*は電極板間の誘電体の誘電率を表している。

以下、工学的解説や応用を述べる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5>

1. **Corriente Eléctrica:**

**電流**（でんりゅう） は、[電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90)のような[荷電粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8D%B7%E9%9B%BB%E7%B2%92%E5%AD%90)[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-0)の移動に伴う[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)の流れ（[電気伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E)）、もしくはある面を単位時間に通過する電荷の[量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F)のことである[[出典 1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-learn-physics-today-1)。

この電荷の流れを運ぶのは、[電線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%B7%9A)などの[電気伝導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93)では移動する[電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90)であり、[電解液](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A7%A3%E6%B6%B2)では[イオン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3)であり、[プラズマ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%BA%E3%83%9E)では両方である[[出典 2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-2)。

電流の大きさは[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)の[**アンペア**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%82%A2)で表され、単位記号は**A**である[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-3)。また、1アンペアの電流で1秒間に運ばれる電荷が1[クーロン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3)となる。電流は[電流計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E8%A8%88)を使って測定する[[出典 1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-learn-physics-today-1)。数式中で電流量を表すときは **I** または **J** で表現される。

**概要**

狭義には、[電位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D)差によって引き起こされる荷電粒子の流れのことを言う。これには[電磁誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E)によって引き起こされる[誘導電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E6%B5%81)もある。[電子の流れ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9B%BB%E5%AD%90%E3%81%AE%E6%B5%81%E3%82%8C&action=edit&redlink=1)と逆向きが電流の向きと[定義](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9A%E7%BE%A9)される。

[時間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93)的に流れる向きが変化しない電流は[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)電流と呼ばれ、時間と共に流れの方向が変わる電流は[交流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)電流と呼ばれる[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-4)。交流の電流値を表す方法としては、通常[実効値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9F%E5%8A%B9%E5%80%A4)が使われる。

**物理**

**様々な媒体上の電流**

**金属**

[固体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E4%BD%93)の[電気伝導性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93)のある金属には、[伝導電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E5%AD%90)に由来する移動可能な[自由電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%94%B1%E9%9B%BB%E5%AD%90)がある。それらの電子は[金属格子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%9E#.E5.AE.9A.E7.BE.A9)に束縛されているが、個々の原子には束縛されていない。外部から[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)が適用されなくとも、それらの電子は[熱エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E9%83%A8%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)の作用で無作為に動いている。しかしそれらの動きを平均すると、単なる金属内の電流は全体としてはゼロになっている。電線を輪切りにするような方向のある面を想定したとき、その面の一方からもう一方へ移動する電子の個数（時間も任意）は平均すると逆方向に移動する電子の個数と同じになっている。[ジョージ・ガモフ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%83%BC%E3%82%B8%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%83%A2%E3%83%95)の科学啓蒙書『宇宙＝1、2、3…無限大』（1947年）には、次のように記されている。

金属は他の物質とは異なり、原子の外側の殻がやや緩やかに縛られているため、電子が1個自由となることが多い。そのため金属の中は、あてもなくさまよう難民のような結合していない電子で満たされている。電線の両端に電気力をかけると、それらの自由電子が電気力の方向に猛スピードで移動し、それが電流と呼ばれるものを形成する。

金属の電線の両端を[電池](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B1%A0)などの[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)[電圧源](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7%E6%BA%90)の2つの端子に接続すると、導体内に電場が形成される。接続された瞬間、導体内の[自由電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%94%B1%E9%9B%BB%E5%AD%90)は電場の影響を受け、正の端子に向かって強制的に移動させられる。したがって固体の導体における典型的な[電荷担体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E6%8B%85%E4%BD%93)は自由電子である。電流が1アンペアなら、電線を輪切りにする任意の面で毎[秒](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A7%92)1[クーロン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3)（[電気素量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E7%B4%A0%E9%87%8F)の約 6.242 × 1018 倍）の電荷が流れることになる。

定常的に流れる電流 *I*（アンペア）は次のように計算できる。

I = {Q \over t} \, 

ここで、*Q* は電荷（クーロン）、*t* は[時間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93)（秒）である。

より一般的に表すと、時間dtに流れる電荷量をdQとすると次のように表される。

I = \frac{dQ}{dt} \, 

**金属以外**

固体金属では、電流は電子の流れによって生じ、[電位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D)の高いほうから低いほうへと流れる。他の媒体では電子以外の荷電粒子の流れが電流を形成する。電荷担体の種類に依存しない電流の定義のため、一般に電流は正電荷と同じ方向に流れるものと定義される。金属では電荷担体（電子）が負であるため、電流の向きと電子の流れの向きは逆となる。電荷担体が正の媒体では、電流の向きと電荷担体の流れる方向は一致する。

[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)においては、イオンや電子のビームを形成できる。他の伝導性の媒体では、正の電荷と負の電荷を帯びた両方の粒子が流れを作り、電流を生じさせる。例えば[電解液](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A7%A3%E6%B6%B2)における電流は、電荷を帯びた原子（イオン）の流れであり、正のイオンと負のイオンの両方が存在している。[鉛蓄電池](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%9B%E8%93%84%E9%9B%BB%E6%B1%A0)のような[電気化学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8C%96%E5%AD%A6)的な電池では、正の水素イオン（陽子）が一方向に流れ、負の硫酸イオンが反対方向に流れることで電流が生じる。火花や[プラズマ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%BA%E3%83%9E)に生じる電流は、電子と同時に正および負のイオンも流れている。[半導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93)では、電流を[正孔](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%A3%E5%AD%94)の流れと見ることもできる。正孔は、半導体結晶内で[価電子帯](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BE%A1%E9%9B%BB%E5%AD%90%E5%B8%AF)の電子が不足した状態を表したものである。なお、これはp型半導体の場合である。

**電流密度**

[電流密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%AF%86%E5%BA%A6)とは電流の密度の測度であり、断面積あたりの電流を大きさとする[ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)として定義される。[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)では、電流密度は[平方メートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E6%96%B9%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)あたりのアンペア数 (A/m2) を単位とする。

I = \mathbf{J} \cdot \mathbf{A}

ここで、*I* は導体における電流、**J** は電流密度、**A** は断面積である。2つのベクトル量の[ドット積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%83%E3%83%88%E7%A9%8D)により、電流というスカラ値が得られる。

**伝播速度**

電流は導体中の電子などの流れによって生じるが、電流と電子の速度には大きな差がある。電流は基本的に光速度に近い速度で伝播するが、導体中の電子そのものは非常に遅い流れである。例えば断面が1mm2の銅線に1アンペアの電流を流した場合、電子は平均的に4.4mm/分の速度で流れる。電流は粒子である電子の動きそのものが伝播するのではなく、導体の内外を[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)の変化が[光速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F%E5%BA%A6)に近い速度で伝播することで電子のゆっくりした流れの先端部が高速で移動してゆくのである。この[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)は電子などの荷電粒子の動きで生じる[[出典 3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81#cite_note-5)。

導体内を移動する荷電粒子は、[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)の粒子のように常に無作為な方向に移動している。電荷が全体として流れを形成する場合、それら粒子は平均流速で同じ方向に移動していなければならない。[金属](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%9E)における電荷担体は電子であり、電子は原子から原子へと跳ね返りながら不定な経路を辿るが、全体として電場の方向へ流れていく。その流れの速度は次の式で表される。

I=nAvQ \, 

ここで、

I は電流

n 単位体積あたりの荷電粒子の個数（電荷担体密度）

A は導体の断面積

v は[流動速度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%B5%81%E5%8B%95%E9%80%9F%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)

Q は各粒子の電荷量

である。固体における電流は一般に非常にゆっくり流れる。例えば、[銅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%85)の電線の断面積を 0.5 mm2 とし、そこに 5 A の電流が流れるとしたとき、電子の流動速度はミリメートル毎秒単位にしかならない。別の例として、ほぼ真空の[ブラウン管](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%96%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E7%AE%A1)内で直線的に移動する電子は、[光速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)の約10分の1程度の速度となる。

電荷担体が加速され電流が変化すると、導体表面の外に向かって[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)が発生し非常に高速に伝わっていく。[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)から推測できるように、その速度は光速に近く、電子の流動速度より何倍も高速である。例えば[交流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)の[送電](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%81%E9%9B%BB)線では、電子は電線内のごく短い距離を行ったり来たりするだけだが、電磁波のエネルギーは送電元から送電先まで非常に高速に伝播する。

自由空間における光速に対する電磁波の速度の比率を速度係数 ([velocity factor](http://en.wikipedia.org/wiki/velocity_factor)) と呼び、導体の電磁的特性、周囲を囲んでいる絶縁素材の電磁的特性、形状や大きさに左右される。

これらの関係は気体と音波にたとえるとわかりやすい。電荷担体のゆっくりした流れは、大気の動き、すなわち風に相当する。電磁波は気体を媒体として伝播する[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)に相当する。荷電粒子の無作為な動きは気体分子が熱によって無作為に運動することに相当する。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81>

1. **Resistividad:**

**電気抵抗率**（でんきていこうりつ、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：electrical resistivity）は、どんな材料が[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)を通しにくいかを比較するために、用いられる[物性値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E6%80%A7%E5%80%A4)である。単に、**抵抗率**（resistivity）、**比抵抗**（specific electrical resistance）とも呼ばれる。単位は、[オームメートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)（Ω･m）である。慣例的に Ω･cm もよく使われる。

単にある[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E4%BD%93)の[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)というと、抵抗の大きさは断面積に[反比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E6%AF%94%E4%BE%8B)し、長さに[比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B)するので、寸法によらない指数として電気抵抗率という値を用いる。[樹脂](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A8%B9%E8%84%82)などの分野では**体積抵抗率**（volume resistivity）・**体積固有抵抗**ともいう。これは絶縁性能を議論する時、材料の内部の導通する電流に加えて表面を導通する電流の寄与が大きくなるので、表面抵抗率（[シート抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%BC%E3%83%88%E6%8A%B5%E6%8A%97)）と区分するために体積抵抗率という用語が用いられるのだと思われる。

電気抵抗 R [Ω]の値は、電気抵抗率を \rho(ロー)、導体の長さを L [m]、導体の断面積を A[m2] とすると次の式で示される。

R = \rho \frac{L}{A} [Ω]

すなわち、電気抵抗率 \rho の値は、次の式で表される。

\rho = \frac{RA}{L} [Ω･m]

電気抵抗率 \rho の逆数 \frac{1}{\rho} を[電気伝導率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E7%8E%87)（導電率）と呼ぶ。これらが材料によって決まる物性値である。

電気抵抗率は、[温度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A9%E5%BA%A6)で変わる他、材料の不純物の量、塑性ひずみの有無によっても変わる。 工業的には、導体の電気抵抗率は IACS: International Annealed Copper Standard （国際焼きなまし銅線標準）という名の "標準焼きなまし銅線" を 100% とした場合の導線が何%の導電性をもつかという比較値で表されることもある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97%E7%8E%87>

1. **Resistencia Eléctrica:**

**電気抵抗**（でんきていこう、レジスタンス、*resistance*）は、[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の流れにくさのことである。電気抵抗の大きさの単位としては[オーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0)（記号には[ギリシャ文字](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%83%A3%E6%96%87%E5%AD%97)のオメガ：Ω）が用いられる。また、その逆数は[コンダクタンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%80%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9)(conductance)と呼ばれ、電流の流れやすさを表す。その単位は[ジーメンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%82%B9)(S)である。

**概要**

断面積が一定の物体での抵抗値は、[電気抵抗率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97%E7%8E%87)と長さに比例し断面積に反比例する。[超伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E4%BC%9D%E5%B0%8E)体以外の全ての物質はなんらかの抵抗値を持つ。一般に、[金属](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%9E)は温度が高くなるほどに[電気抵抗率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97%E7%8E%87)が高くなり、[半導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93)は温度が高くなるほどに電気抵抗率が低くなり、[電解質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A7%A3%E8%B3%AA)は[イオン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3)濃度が大きく・イオン移動度が大きくなるほど抵抗値が低くなる（[電気伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E)を参照）。

物体の電気抵抗は、それに印加される電圧とそこを流れる電流の比で表される。

R = {V \over I}

多くの物質にとって、与えられた温度での電気抵抗 R は[一定](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9A%E6%95%B0)である。その物質を流れる電流や電位差（[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)）で抵抗値が変化することはない。そのような材料をオーム性材料 (Ohmic material) と呼ぶ。オーム性材料でできた物体の一定の抵抗値の定義を「[オームの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)」と呼ぶ。

（オームの法則に従わない）非線形の伝導体では、電流や電圧の変化にともなってその比が変化する。そのときの[I-V曲線](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=I-V%E6%9B%B2%E7%B7%9A&action=edit&redlink=1)を "chordal resistance" あるいは "static resistance" と呼ぶこともある[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97#cite_note-0)[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97#cite_note-1)。

電気抵抗の原因としては、第一に物質を構成する[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)の[熱振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%8C%AF%E5%8B%95)がある。ほかに[結晶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%90%E6%99%B6)の格子欠陥も抵抗の原因となる。

**導電率と抵抗率**

比例定数*σ*, その場所の電界を***E***, 電流密度を ***j*** とすると,

\boldsymbol{\mathit{j}}=\sigma\boldsymbol{\mathit{E}}

となる.σは物質定数でこれを**導電率**（どうでんりつ; conductivity）または[**電気伝導率**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E7%8E%87)（でんきでんどうりつ; electric conductivity）という。*σ* の逆数1/*σ* を**抵抗率**（ていこうりつ; resistivity）または**比抵抗**（ひていこう）といい*ρ*を用いることもある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97>

1. **Ley de Ohm:**

**オームの法則**（オームのほうそく、*Ohm's law*）とは、導電現象で[抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)に流れる[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)とそれによって発生する[電位差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D%E5%B7%AE)に関する[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)である。[クーロンの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%BC%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)とともに[電気工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%B7%A5%E5%AD%A6)で最も重要な関係式の一つである。

**歴史**

[1781年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1781%E5%B9%B4)に[ヘンリー・キャヴェンディッシュ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%82%AD%E3%83%A3%E3%83%B4%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A5)が発見したが、その業績は1879年に[マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)が『ヘンリー・キャヴェンディシュ電気学論文集』として出版するまで未公表であった。 ヘンリーの最初の発見後、[1826年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1826%E5%B9%B4)に[ドイツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84)の[物理学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85)である[ゲオルク・オーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B2%E3%82%AA%E3%83%AB%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0)によって再発見・公表されたため、その名を冠してオームの法則と呼ばれる。

**オームの法則**

**積分型表現**

**オームの法則**とは、

「**電流 I が流れている導体中の2点 P_1, P_2 間の電位差 E = E_1 - E_2 は I に比例する。**」

すなわち、電流が I ([アンペア](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%82%A2): A)、電位差が E ([ボルト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D)): V) であるとき，

E \propto I

であることを主張する法則である。ここで[比例定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B%E5%AE%9A%E6%95%B0)を R とすると E は I の関数、

E=\, RI

である。R は導体の形状、材質、温度、幾何学的寸法などによって定まる正の比例定数であり、[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97) (electric resistance) あるいは単に[抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%B5%E6%8A%97) (resistance) という。抵抗の[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)は[オーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0)(Ω) である。

一方、上式の逆関数を考えると、電位差が E である二点間に流れる電流 I は E に比例する、とも表現できる。

I \propto E

ここで[比例定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B%E5%AE%9A%E6%95%B0)を G=1/R とすると、

I=\, GE

である。この G を[電気伝導度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E5%BA%A6) ([コンダクタンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%80%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9)、conductance) といい、単位は[ジーメンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%82%B9) (S) である。

**微分型表現**

一様材質の導体の単位面積を単位時間に通過する電気量、すなわち[電流密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%AF%86%E5%BA%A6)  J\, (A/m2) を考える。このとき、その導体の[電界](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%95%8C)  E\, (V/m) が、

E \propto J

であり、このときの比例定数を \rho とすると、

E=\rho J \,

である。\rho\, (Ω・m) は導体の材質、温度によって定まり、[抵抗率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97%E7%8E%87) (resistivity) あるいは[固有抵抗](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%9B%BA%E6%9C%89%E6%8A%B5%E6%8A%97&action=edit&redlink=1) (specific resistance) という。 さらにその逆関数、

J=\sigma E \,

における比例定数 \sigma=1/\rho\, を[導電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E7%8E%87) (conductivity) といい、単位は S/m である。

これらの表現形式は材質中の微小区間におけるオームの法則を示しており、微分型表現といわれる。この微分型表現を実際の導体の形状寸法に合わせて[積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86)することによりその導体の電気抵抗が定まる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Fuerza Electromotriz:**

**起電力**（きでんりょく、electromotive force, EMF）とは、[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の駆動力のこと。 または、電流を生じさせる[電位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D)の差（[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)）のこと。単位は電圧と同じ[ボルト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D))(V)を用いる。 起電力を生み出す原因には、[電磁誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E)によるもの（[発電機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E9%9B%BB%E6%A9%9F)）、[熱電効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E9%9B%BB%E5%8A%B9%E6%9E%9C)（[ゼーベック効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BC%E3%83%BC%E3%83%99%E3%83%83%E3%82%AF%E5%8A%B9%E6%9E%9C)）によるもの（[熱電対](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E9%9B%BB%E5%AF%BE)）、 [光電効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%9B%BB%E5%8A%B9%E6%9E%9C)（[光起電力効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E8%B5%B7%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E5%8A%B9%E6%9E%9C)）によるもの（[太陽電池](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E9%9B%BB%E6%B1%A0)）、[化学反応](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8C%96%E5%AD%A6)によるもの（[化学電池](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B1%A0#.E5.8C.96.E5.AD.A6.E9.9B.BB.E6.B1.A0)）などがある。

これらのうち、本項では化学反応によるもの、すなわち化学電池の起電力についておもに記述する。

**起電力の定義**

次のような[電池図式](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9B%BB%E6%B1%A0%E5%9B%B3%E5%BC%8F&action=edit&redlink=1)で表される電池を考える。

\rm{T \mid M_1 \mid S \mid M_2 \mid T^\prime}

ここで、M1、M2は電気伝導体の電極を、Sは[イオン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3)伝導体（[電解質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%A7%A3%E8%B3%AA)）の溶液を、両端のT、T'は端子を表すとする。

この電池の内部において正電荷を左から右（T→T'の方向）へ移動させるときに、電極M1上では

\mathrm{R(M_1) \longrightarrow O(M_1) + }n\mathrm{e^-(T)}（[酸化](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%85%B8%E5%8C%96)反応）

電極M2上では

\mathrm{O^\prime(M_2)  + }n\mathrm{e^-(T^\prime) \longrightarrow R^\prime(M_2)}（[還元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%82%84%E5%85%83)反応）

すなわち、電池全体では、

\mathrm{R(M_1) + O^\prime(M_2)  + }n\mathrm{e^-(T^\prime) \longrightarrow O(M_1) + R^\prime(M_2) + }n\mathrm{e^-(T)}

の反応が進行すると約束する。（電池図式において**左側の電極は**[**アノード**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%83%89)、**右側の電極は**[**カソード**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%82%BD%E3%83%BC%E3%83%89)を表す。）

この反応が電気化学的平衡になっている時の、左側の端子Tに対する右側の端子T'の電位差が起電力である。

このときの起電力*E*は

E = -\frac{(\mu^\mathrm{T^{\prime}}_\mathrm{e^-} - \mu^\mathrm{T}_\mathrm{e^-})}{F} = -\frac{(\mu^\mathrm{M1}_\mathrm{O} +\mu^\mathrm{M2}_\mathrm{R^\prime})-(\mu^\mathrm{M1}_\mathrm{R} +\mu^\mathrm{M2}_\mathrm{O^\prime})}{nF}

で表すことができる。 ここで、*μ*xyは相xにおける反応種yの[電気化学ポテンシャル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8C%96%E5%AD%A6%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AB)、*n* は反応電子数、F は[ファラデー定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC%E5%AE%9A%E6%95%B0)を表す。

一般に、反応の[ギブスエネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%83%96%E3%82%B9%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)変化がΔ*G*で表されるとき、起電力*E*は、

E = \frac{-\Delta G}{n{\mathrm F}}

となる。

このように、起電力は形式的に決定される。普通、電池の場合は起電力の値が正となるように電池図式・化学反応式を記述する。 電池の反応式を逆に記述すれば起電力の符号も逆になる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%B7%E9%9B%BB%E5%8A%9B>

1. **Regla de Kirchhoff:**

**キルヒホッフの法則**（キルヒホッフのほうそく、Kirchhoffsches Strahlungsgesetz) は、[電気回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF)において任意の節点に流れ込む[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の総和、および任意の閉路の[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)の総和に関する法則である。線型回路、非線型回路を問わず成り立つ。[電気工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%B7%A5%E5%AD%A6)で広く用いられる。1845年物理学者[グスタフ・キルヒホフ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%95%E3%83%BB%E3%82%AD%E3%83%AB%E3%83%92%E3%83%9B%E3%83%95)が発見した。

キルヒホッフの法則には電流則と電圧則がある。両法則とも[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)から直接得ることはできるが、キルヒホッフはマクスウェルに先行して、代わりに[ゲオルク・オーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B2%E3%82%AA%E3%83%AB%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0)による研究を一般化した。

**電流則（キルヒホッフの第一法則）**

電気回路の任意の節点において、流れ込む向きを正（又は負）と統一するとき、各線の電流 Iiの[総和](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%8F%E5%92%8C)は0となる。

\sum_{i=1}^N I_i= 0

節点（ノード）法則、**KCL** (Kirchhoff's Current Law) ということもある。

「流れ込む電流と流れ出す電流の和は0である」と「流れ込む電流の和と流れ出る電流の和の大きさは等しい」は符号を統一するかしないかの違いであり両者は等価である。

**電圧則（キルヒホッフの第二法則）**

電気回路に任意の閉路をとり電圧の向きを一方向に取ったとき、閉路に沿った各素子の電圧 Viの総和は 0 である。

\sum_{i=1}^N V_i= 0

閉路（ループ）法則、**KVL** (Kirchhoff's Voltage Law) ということもある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83%AB%E3%83%92%E3%83%9B%E3%83%83%E3%83%95%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87_(%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF)>

1. **Galvanómetro:**

**検流計**（**けんりゅうけい**、ガルバノメータとも）は[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)を検出し、測定するための機器である。[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)を貫流する電流に応じて、指針（ポインター）が回転して偏向を作り出して円弧を通して測定量を示す電気機械変換器、[トランスデューサー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%83%87%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%B5%E3%83%BC)（[指示電気計器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%87%E7%A4%BA%E9%9B%BB%E6%B0%97%E8%A8%88%E5%99%A8)）のひとつである。

**概要**

最もよく知られ、使用されている検流計は、[メーター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%83%BC)型（可動コイル形指示計器）と呼ばれる[アナログ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%8A%E3%83%AD%E3%82%B0)の測定器（アナログ指示器）。それは[電気回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF)を通って直流（[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)の流れ）を測定するために使用される。そのような装置は[永久磁石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B8%E4%B9%85%E7%A3%81%E7%9F%B3)による[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)にワイヤーによる小さな回転する[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)（可動コイル）と組み立てられる。コイルは目盛り（スケール）の振られたスケールを横断する薄い指針に付けられる。小さな[ばね](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%B0%E3%81%AD)（つる巻きバネ）はゼロの位置にコイルと指針を引っ張る（制御力）。いくつかのメーターはばねと同じ効果を得るために、磁場は[鉄](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84)片に影響させる。（可動鉄片形アナログ指示計器）

[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)(DC)がコイルを通して流れるとき、コイルは磁場を発生させる。この磁場は、永久磁石とともに作用する。磁場はばねを押して、コイルが旋回し、指針が動く（駆動力）。指針は電流を示すスケールを指し示す。有用なメーターは、指針が滑らかに、余分な振動をせず（不足制動）に電流を追従する（臨界制動）ために、可動コイルおよび指針の機械共鳴を弱める為の準備を含んでいる（制動力）。（逆に振動を制動する力が大きすぎる状態を過制動という。可動コイル形電流計のステップ応答。）制動力を負荷する一例として電磁制動がある。

定格値よりも大きな電流を測定したい場合のために、その大きさの電流が読めるようなメーターの目盛りが複数ある。（測定可能範囲の変更）このように、より大きい電流を測定するために分流器（エアトン分流器や多レンジ方式の分流器などがある）と呼ばれる回路を使用する。メーターは直流の電圧計としてコイルの抵抗にフル・スケールの流れを発生させるために必要な電圧を計算（オームの法則）によってあらかじめ知っていれば、電圧計の目盛りを付けることができる。定格値以上の電圧を読むためには、回路に倍率器と呼ばれる抵抗を挿入することで可能となる。抵抗を多レンジで構成することにより、数種類のレンジが作れる。そして、測定に適したレンジを使用者が選択する。

メーターの指針は、メーターの目盛にある小さい間隔の間を指す場合もあり、このような場合、測定者は[視差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%96%E5%B7%AE)による誤差が生じることがある。これを解消するため、いくつかのメーターには目盛りに沿って鏡が設置されている。指針の頭部と[鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8F%A1)に映る指針の反射が一直線上に並ぶような場所で、目盛りを読む事で、視差による誤差の影響を最小限にすることができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A4%9C%E6%B5%81%E8%A8%88>

1. **Amperímetro:**

**電流計**（でんりゅうけい、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Ammeter）は、[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)を測るための[電気計器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E8%A8%88%E5%99%A8)である。

[自動車](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E5%8B%95%E8%BB%8A)や[オートバイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%90%E3%82%A4)に使用される電流計についても、この項目で説明する

**使用方法および接続の仕方**

内部電気抵抗の小さな測定器であり、測定箇所の回路を開いてその2点間に直列に接続する。実際には、回路に小さな抵抗（分流器）を挿入し、その抵抗の両端の電圧を測定することで電流値としている。

また、測定範囲の拡大のために、分流器や変流器が使用される（変流器は被測定回路と電流計を絶縁するためにも使用される）。

**内部構造**

[電圧計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7%E8%A8%88)と構成は同じであるが、内部抵抗を極力小さくするために太いコイルが巻かれる。右は可動コイル形、その下は可動鉄片形である。

**直流電流計**

直流においての電流を測定するのに使用される。構造は可動コイル型であり永久磁石およびコイルで構成される。電流計単体だけでは大きな電流を測れないので目的の電流にあわせて分流器を使用する。

**交流電流計**

商用周波数程度 (45 - 65Hz) の交流電流を測定するのに使用する。直流にも使用することは可能だが、電流が大きくなるにつれて誤差が大きくなるので実際には使用されない。

**電流力計型電流計**

構造的には電力計と同様だが内部配線が異なる。原理的には直流から商用周波数程度（DC - 1000Hzまで可能なものも）である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E8%A8%88>

1. **Voltímetro:**

**電圧計**（でんあつけい、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Voltmeter）は、ある2点間の[電位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E4%BD%8D)差を測る[電気計器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E8%A8%88%E5%99%A8)である。

[自動車](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E5%8B%95%E8%BB%8A)や[オートバイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%90%E3%82%A4)に搭載される電圧計も、この項目で説明する。

**使用方法および接続の仕方**

内部[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)の大きな測定器であり、測定する回路の2点間に[並列](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%A6%E5%88%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF)に接続する。

[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)の場合、電流制限用の大きな抵抗と[可動コイル形計器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%87%E7%A4%BA%E9%9B%BB%E6%B0%97%E8%A8%88%E5%99%A8)を接続し、流れる微小な[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)で[ムービング・コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A0%E3%83%BC%E3%83%93%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%83%BB%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)（[電磁石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E7%9F%B3)）を動かして[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)を測る。測定範囲の拡大のためには、[倍率器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%80%8D%E7%8E%87%E5%99%A8)が利用される。

[交流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)の場合は、測定範囲の拡大のために[計器用変圧器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%88%E5%99%A8%E7%94%A8%E5%A4%89%E5%9C%A7%E5%99%A8)が利用される。また、交流用計器や、[整流器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B4%E6%B5%81%E5%99%A8)と直流用計器を組み合わせたもので測定される。

**内部構造**

基本的な構造は電流計と同じであるが、回路上に[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)があるため定電流が流れると[オームの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)により求められた電圧を検針可能な構造となっている。右に可動コイル型の図を示す。構成部品は永久磁石、コイル、指針となっている。さらにその下の図は可動鉄片形で構成部品は可動鉄片、固定鉄片、指針となる。

**直流電圧計**

直流においての電圧を測定するのに使用される。構造は可動コイル型 (Moving-Coil Type) であり永久磁石およびコイルで構成される。また、振れ角は電流に比例するので目盛り平等目盛りとなる。

**交流電圧計**

構造は可動鉄片形 (Moving-iron Type) であり、非常に簡単、堅牢、安価で[商用電源](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%95%86%E7%94%A8%E9%9B%BB%E6%BA%90)周波数程度 (45 - 65Hz) の交流電圧を測定するのに広く使用されている。本来は実効値の2乗で針が振れるが固定鉄片の形を改良することにより、定格の10 - 20%以上はほぼ平等目盛りとすることができる（写真の目盛りの始まり付近のことである）。

**電流力計型電圧計**

構造的には電力計と同様だが内部配線が異なる。原理的には直流から商用周波数程度（DC - 1000Hzまで可能なものも）である。

**静電電圧計**

二つの金属板に加えられた電圧により力が生じることによって指示する。低電圧の場合金属板に生じる[トルク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%AB%E3%82%AF)が小さいので、もっぱら高電圧 (1 - 500kV) で使用される。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7%E8%A8%88>

1. **Óhmetro:**

**絶縁抵抗計**（ぜつえんていこうけい）は[電力回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E5%9B%9E%E8%B7%AF)の絶縁抵抗測定試験に使われる[保守点検用電気計測器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E5%AE%88%E7%82%B9%E6%A4%9C%E7%94%A8%E9%9B%BB%E6%B0%97%E8%A8%88%E6%B8%AC%E5%99%A8)であり、**メガー**とも呼ばれる、古くは手回し発電機を内蔵するものもあったが、現在では[電池](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B1%A0)で動作する電池式が一般的である。アナログのものとデジタルのものがある。

回路の対地間や線間の絶縁が保たれているかどうかを、25V～2000Vの[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)による[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)で測定する。また、回路に接続された機器の耐圧に応じた電圧で測定しないと機器の破損の原因となる[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E7%B8%81%E6%8A%B5%E6%8A%97%E8%A8%88#cite_note-0)。

回路の絶縁が悪い場合は漏電による火災や感電の原因となる。測定のための停電が許されない場合は、[漏れ電流計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9E%B6%E7%B7%9A%E9%9B%BB%E6%B5%81%E8%A8%88)による測定を行う。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E7%B8%81%E6%8A%B5%E6%8A%97%E8%A8%88>

1. **Potenciómetro:**

**ポテンショメータ**(potentiometer)とは、本来の意味では回転角や移動量を[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)に変換する機器・素子をいう。半固定[抵抗器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%B5%E6%8A%97%E5%99%A8)を表す言葉としても広く使われている。

**本来のポテンショメータ**

形状としては、回転角度を検出する**ロータリーポテンショメータ**と、直線上の位置を検出する**リニアポテンショメータ**がある。ロータリー型のものでは、単回転型と多回転型とがある。内部構造的には可変抵抗器の構造をしており、抵抗部には巻線抵抗を使用している物、導電性プラスチックを使用している物などがある。精度を保証するために、移動量に対する抵抗値変化がリニアになるように注意を払って作成されている。使用方法としては、二つの固定電極の両端に基準電圧を掛け、可動電極の電圧を測定することで、可動電極の位置を判定する。

**半固定抵抗器**

回路定数の調整等、抵抗値を一度変更したらそのままの値で使用するような用途に使う。単回転型と、微妙な調整を行う所に使用する多回転型とがある。安価な物では抵抗体に炭素皮膜や巻線型抵抗体が使われるが、通常は[サーメット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%83%E3%83%88)を使ったものが多い。回転角度に対する抵抗値変化の精度はそれほど必要とされないが、機械的バックラッシュの少ないことと、設定した抵抗値が変化しないことが求められる。 トリマポテンショメータとも呼ばれる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%82%BF>

1. **Circuito RC:**

**RC回路**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): resistor-capacitor circuit, RC circuit）は、[抵抗器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%B5%E6%8A%97%E5%99%A8)と[コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)で構成され、[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7%E6%BA%90)または[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E6%BA%90)で駆動される[電気回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF)。**RCフィルタ**、**RCネットワーク**とも。1つの抵抗器と1つのコンデンサから構成される一次RC回路は、最も単純なRC回路の例である。

**概要**

線形[アナログ回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%8A%E3%83%AD%E3%82%B0%E5%9B%9E%E8%B7%AF)部品には、[抵抗器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%B5%E6%8A%97%E5%99%A8)（R）、[コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)（C）、[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)（L）がある。これらの組み合わせとしては、RC回路のほかに[RL回路](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=RL%E5%9B%9E%E8%B7%AF&action=edit&redlink=1)、[LC回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/LC%E5%9B%9E%E8%B7%AF)、[RLC回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/RLC%E5%9B%9E%E8%B7%AF)が重要である（それぞれ、使っている部品の種類によって名前が付けられている）。多くの[アナログ回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%8A%E3%83%AD%E3%82%B0%E5%9B%9E%E8%B7%AF)の重要な基本的特性はこれらの回路で示される。特に、これらの回路は[パッシブフィルタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%96%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%AB%E3%82%BF)として機能する。本項目では、[直列](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E5%88%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF%E3%81%A8%E4%B8%A6%E5%88%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF#.E7.9B.B4.E5.88.97.E5.9B.9E.E8.B7.AF)型と[並列](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E5%88%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF%E3%81%A8%E4%B8%A6%E5%88%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF#.E4.B8.A6.E5.88.97.E5.9B.9E.E8.B7.AF)型のRC回路を扱う。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/RC%E5%9B%9E%E8%B7%AF>

1. **Magnetismo:**

[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)において、**磁性**（じせい、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：magnetism）とは、[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)が原子あるいは原子よりも小さいレベルで[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)に反応する性質であり、他の物質に対して[引力や斥力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%95%E5%8A%9B%E3%81%A8%E6%96%A5%E5%8A%9B)を及ぼす[性質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%80%A7%E8%B3%AA)の一つである。**磁気**（じき）とも言う。

**概要**

磁性は様々に分類がなされている。例えば、磁性の分類の中では[強磁性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B7%E7%A3%81%E6%80%A7)がよく知られているが、強磁性を持つ物質は自ら持続的な[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)を生み出し得る。また、電流などによっても磁場は発生する。ところで、あらゆる物質は程度の差こそあれ、磁場によって何らかの影響を受ける。磁場に引き付けられる物質もあれば（[常磁性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B8%B8%E7%A3%81%E6%80%A7)）、磁場に反発する物質もある（[反磁性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E7%A3%81%E6%80%A7)）。さらに、磁場と複雑な関係を有する物質もある。しかも、ある物質の磁性状態（または相）は、温度（あるいは圧力や周囲の磁場）に依存するため、1つの物質であっても温度などの条件によって様々な磁性を示すことがある。ただし、ほとんどの場合、磁場によって物質が受ける影響は、特別な装置を使わなければ検出できないほど小さい。中でも、磁場の影響が無視できる物質は非磁性 (non-magnetic) 物質と呼ばれ、これには例えば、[銅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%85)、[アルミニウム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%9F%E3%83%8B%E3%82%A6%E3%83%A0)、一般的な[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)、[合成樹脂](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%90%88%E6%88%90%E6%A8%B9%E8%84%82)などが含まれる。非磁性物質に対して、特別な装置など使わずとも容易に判るほど強い磁性を示す物質（強磁性物質）として、ある種の[鋼](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8B%BC)のような人工的な[鉄](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84)合金がよく知られている。また、[磁鉄鉱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E9%89%84%E9%89%B1)（天然磁石）や[磁硫鉄鉱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E7%A1%AB%E9%89%84%E9%89%B1)などといった[鉱物](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%B1%E7%89%A9)も強磁性物質であり、その名に「磁石」の「磁」が付いていることからも明らかなように、人間が手を加えるまでもなく、[磁力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%8A%9B)を持っていることが見て取れる磁石が天然に生成される場合もあることが知られている。

磁力は、[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)の運動によって引き起こされる基本的な[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)である。磁力を支配する源や場の振る舞いは[マクスウェル方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)で記述される（[ビオ・サバールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%B5%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)も参照のこと）。よって磁性は電荷を持つ[粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90)が[運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95)をすればいつでも現れる。磁性は[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の中の[電子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90)の運動によって発生して[電磁気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97)と呼ばれたり、電子の[量子力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E5%AD%A6)的な軌道運動や[スピン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)によって生じ、[永久磁石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B8%E4%B9%85%E7%A3%81%E7%9F%B3)の力の源となったりする（電子は[太陽](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD)を周る[惑星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%83%91%E6%98%9F)のような軌道運動を行なっているわけではないが、「実効的な電子の速度」は存在する）。

**歴史**

[アリストテレス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%86%E3%83%AC%E3%82%B9)によれば、世界最古の磁性に関する科学的議論をしたのは[タレス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BF%E3%83%AC%E3%82%B9)（紀元前625年-545年）だという[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-0)。同じころ古代[インド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%89)では[医師](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%BC%E3%83%A6%E3%83%AB%E3%83%B4%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%80)[ススルタ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%B9%E3%82%B9%E3%83%AB%E3%82%BF&action=edit&redlink=1)が磁石を手術に利用している[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-1)。

古代[中国](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%9B%BD)では、紀元前4世紀の『[鬼谷子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%AC%BC%E8%B0%B7%E5%AD%90)』に「磁石は鉄をひきつける」という磁性に関する記述がある[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-2)。紀元20年から100年の間に書かれた『[論衡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AB%96%E8%A1%A1)』には「磁石が針をひきつける」という記述がある[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-3)。11世紀[中国](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%9B%BD)の科学者[沈括](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B2%88%E6%8B%AC) (1031–1095) は『夢渓筆談』で[方位磁針](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%96%B9%E4%BD%8D%E7%A3%81%E9%87%9D)について記述している。

1187年、[アレクサンダー・ネッカム](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%A2%E3%83%AC%E3%82%AF%E3%82%B5%E3%83%B3%E3%83%80%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%83%8D%E3%83%83%E3%82%AB%E3%83%A0&action=edit&redlink=1)はヨーロッパで初めて方位磁針とその航海への応用を記述した。1269年、[ペトルス・ペレグリヌス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9A%E3%83%88%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%83%9A%E3%83%AC%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%83%8C%E3%82%B9)が書いた『磁気書簡』(*Epistola de magnete*) は、磁石の性質について記した現存する最古の論文である。1282年、イスラムの物理学者で天文学者、地理学者のアル＝アシュラフが磁石と方位磁針の性質について記述している[[5]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-4)。

1600年、[ウィリアム・ギルバート](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%A0%E3%83%BB%E3%82%AE%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85))が [*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*](http://en.wikipedia.org/wiki/De_Magnete)（磁石及び磁性体ならびに大磁石としての地球の生理）を出版。その中で地球をモデル化した [terrella](http://en.wikipedia.org/wiki/terrella) を使った様々な実験結果を示している。そういった実験により、彼は地球自体が磁性を持っていて、それによって[地磁気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%A3%81%E6%B0%97)が発生して方位磁針が北を指すのだと結論付けた。それまでヨーロッパでは、方位磁針を引き付けているのは北極星（[ポラリス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%A9%E3%83%AA%E3%82%B9_(%E6%81%92%E6%98%9F))）だという説や北極にある巨大な磁石でできた島だという説が信じられていた。

[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)と磁気の関係の解明は1819年、コペンハーゲン大学の教授だった[ハンス・クリスティアン・エルステッド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8F%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%82%A8%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%83%E3%83%89)が電流によって方位磁針が影響を受けることを発見したのが始まりである。その後、[アンドレ＝マリ・アンペール](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AC%EF%BC%9D%E3%83%9E%E3%83%AA%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%83%AB)、[カール・フリードリヒ・ガウス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%92%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9)、[マイケル・ファラデー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC)といった人々が実験を行い、電気と磁気の関係をさらに明らかにしていった。[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)はそれまでの知見を[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)にまとめ、電気と磁気と[光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6)を一分野にまとめた[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)を生み出すことになった。1905年、[アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)はそこから[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)を生み出した[[6]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-Moving-5)。

電磁気学は21世紀になっても発展し続け、より根本的な理論である[ゲージ理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B2%E3%83%BC%E3%82%B8%E7%90%86%E8%AB%96)、[量子電磁力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%8A%9B%E5%AD%A6)、[電弱相互作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%BC%B1%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)理論などに組み込まれ、最終的に[標準模型](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A8%99%E6%BA%96%E6%A8%A1%E5%9E%8B)を生み出した。

**磁性の源**

磁性と[角運動量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)には密接な関係があり、[微視的](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E8%A6%96%E7%9A%84)には「磁化による回転」を示す[アインシュタイン・ド＝ハース効果](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%89%EF%BC%9D%E3%83%8F%E3%83%BC%E3%82%B9%E5%8A%B9%E6%9E%9C&action=edit&redlink=1)と、その逆の「回転による磁化」を示す[バーネット効果](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%8D%E3%83%83%E3%83%88%E5%8A%B9%E6%9E%9C&action=edit&redlink=1)がある[[7]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7#cite_note-Graham-6)。

原子およびそれよりさらに小さいスケールでは、この関係は磁気モーメントと角運動量の比、すなわち[磁気回転比](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E6%AF%94)で表される。

磁性の源泉は2種類ある。

* [電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)または移動する[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)によって磁場が形成される（[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)）
* 多くの[素粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%A0%E7%B2%92%E5%AD%90)はゼロでない「真性」（または「スピン」）磁気モーメントを持つ。それぞれの粒子に[質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E9%87%8F)と[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)があるように、ゼロでない磁気モーメントを持つことがある。

物体が磁性を持つ物理的原因は、電流の場合とは異なり、[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)に生じる磁気双極子である。原子スケールでの磁気双極子、あるいは[磁気モーメント](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88)は、電子の2種類の運動によって生じる。1番目は[原子核](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E6%A0%B8)の周りを回る電子の軌道運動である。これは電流のループと見なすことができ、原子の軸方向に軌道磁気モーメントを生じる。2番目の、もっとずっと強い磁気モーメントの源は、[スピン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3%E8%A7%92%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)と呼ばれる量子力学的な性質である。これはスピン磁気モーメントと呼ばれる（ただし現代の量子力学の理論では、電子が実際に物理的に自転したり原子核の周りを軌道運動したりするとされているわけではない）。なお原子核にも磁気モーメントは存在するが、一般に電子のそれの数千分の1の強さしかなく、物質の磁性にはほとんど影響しない。しかし、例えば[核磁気共鳴](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A0%B8%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%85%B1%E9%B3%B4) (NMR) や[核磁気共鳴画像法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A0%B8%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%85%B1%E9%B3%B4%E7%94%BB%E5%83%8F%E6%B3%95) (MRI) は、その原子核の磁気モーメントを利用している。

原子の全体的な磁気モーメントは、個々の電子の磁気モーメントの総和になる。磁気双極子は互いに反発して正味のエネルギーを小さくしようとするため、軌道運動においてもスピン磁気モーメントにおいても、いくつかの電子のペアが持つ反対向きの磁気モーメントは互いに打ち消しあう。このため、[電子殻](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E6%AE%BB)や副殻が完全に満たされている原子では磁気モーメントは通常は完全に打ち消される。磁気モーメントを持つのは電子殻が部分的に満たされている原子だけであり、その強さは不対電子の数で決まる。

そのため、様々な[元素](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%83%E7%B4%A0)ごとの[電子配置](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E9%85%8D%E7%BD%AE)の違いが原子の磁気モーメントの性質や強さを決めており、また様々な物質の磁気的な特性の違いをも決めている。また、温度によっても磁気的特性は変化する（高温では無作為な[分子の運動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93%E5%88%86%E5%AD%90%E9%81%8B%E5%8B%95%E8%AB%96)によって電子が一定方向にそろって運動し続けるのが困難になる）。様々な物質で以下のようないくつかの形態の磁気的な振る舞いが見られる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%80%A7>

1. **Campo Magnético:**

**磁場**（じば、magnetic field）は、[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)的現象・[磁気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97)的現象を記述するための物理的概念である。 [工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%A5%E5%AD%A6)分野では、**磁界**（じかい）ということもある。 単に磁場と言った場合は[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6) **B**もしくは、「磁場の強さ」**H**のどちらかを指すものとして用いられるが、どちらを指しているのかは文脈により、また、どちらの解釈としても問題ない場合も多い。後述のとおり**B**と**H**は一定の関係にあるが、**B**と**H**の単位はSI単位系でそれぞれ[Wb](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%90)/[m²](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E6%96%B9%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB),[A](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%82%A2)/[m](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB) であり、次元も異なる独立した二つの物理量である。*H*の単位は[N](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)/[Wb](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%90)で表すこともある。なお、[CGS単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/CGS%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)における、磁場（の強さ）**H**の単位は、[Oe](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%83%E3%83%89)である。 この項では一般的な磁場の性質、及び‘ **H** ’を扱うこととする。

磁場は、空間の各点で向きと大きさを持つ[物理量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E9%87%8F)（[ベクトル場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB%E5%A0%B4)）であり、[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)の時間的変化または[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)によって形成される。 磁場の大きさは、+1のN極が受ける力の大きさで表される。 磁場を図示する場合、N極からS極向きに[磁力線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%8A%9B%E7%B7%9A)の矢印を描く。

[小学校](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8F%E5%AD%A6%E6%A0%A1)などの[理科](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E7%A7%91)の授業では、[砂鉄](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A0%82%E9%89%84)が[磁石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E7%9F%B3)の周りを囲むように引きつけられる[現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E8%B1%A1)をもって、磁場の存在を教える。 このことから、磁場の影響を受けるのは[鉄](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84)だけであると思われがちだが、強力な磁場の中では、様々な物質が影響を受ける。 最近では、磁場や電場（[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)、[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)）が生物に与える影響について関心が寄せられている。

**(磁場の強さの) 定義**

磁場の強さ **H** の定義にはいくつかの流儀がある。

最も簡単な定義は無限に長い棒磁石に作用する力によって定義される。

強さqmの[磁気量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97%E9%87%8F)をもつ棒磁石の[N極](http://ja.wikipedia.org/wiki/N%E6%A5%B5)が電磁気力 F を受けるとき、磁場の強さ H は次式で表される。

\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_m}

棒磁石は[S極](http://ja.wikipedia.org/wiki/S%E6%A5%B5)の影響を無視できるほど長く、さらに棒磁石内のミクロな磁気双極子が無視できるほどの太さを持つとする。

この定義は具体的な測定法に基づいているため分かりやすいが、S極を無視できる条件が自明でないため理論的には扱いにくい。

現在の最も広く用いられている定義は、[アンペールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)或いは[ビオ・サバールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%B5%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)による定義である。

空間中に電流 I が存在している場合その周囲に磁場が生じる。このとき、

\oint \boldsymbol{H}\cdot d\boldsymbol{l} = I 

という関係を満たす量として磁場の強さ **H** を定義するのである。

**磁場の強さの満たすべき関係式**

磁場の強さ **H** は[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)中では、


\mathrm{rot}\boldsymbol{H} - \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}
 = \boldsymbol{j}


として現れる。ここで **D** は[電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)、**j** は[電流密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%AF%86%E5%BA%A6)である。

左辺第二項の **D** の時間微分の項は[変位電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E4%BD%8D%E9%9B%BB%E6%B5%81)あるいは電束電流と呼ばれ、マクスウェルによって[電荷の保存則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E3%81%AE%E4%BF%9D%E5%AD%98%E5%89%87)([連続の方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F))を満たすように付け加えられた。この項から[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)の放射などが導かれる。

この項の表す意味は **D** の時間変動は電流と同様な働きをするということである。この意味でこの項を右辺に書く場合もある。前述の式は、左辺が[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)、右辺が物質場(荷電粒子の分布の様子)となるように書いた。

電磁場の時間変動が激しくない場合はこの項を無視できるので、


\mathrm{rot}\boldsymbol{H} = \boldsymbol{j}


の形となる。積分形で書くと、


\oint_{\partial S} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l}
 = \int_S \boldsymbol{j} \cdot d\boldsymbol{S} = I


これは[アンペールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)と呼ばれるものであり、前述の通り磁場の強さ **H** はこの方程式を満たす量として定義される。

[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6) **B** は磁場の強さ **H** よりもより基本的な量である(と一般に考えられている)ので 真空中における **B** = μ0**H** の関係式により、 (μÃ0は真空における[透磁率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E7%A3%81%E7%8E%87))


\oint_{\partial S} \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I


と書き換えられることが多い。 但し、近似的に **B** = μ**H** の関係が成り立つときを除きこの書き換えはできない。

**磁束密度と磁場の強さの関係**

磁場の強さ **H** は物質中での磁場の様子を記す際に重要となる。 磁束密度 **B** との関係は次のようになる。

\boldsymbol{H} = \frac{1}{\mu_0}\boldsymbol{B}-\boldsymbol{M}

ここで、

|  |  |
| --- | --- |
| \mu_0 | : 真空の[透磁率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E7%A3%81%E7%8E%87) |
| \boldsymbol{M} | : [磁化](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%8C%96) |

である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4>

1. **Fuerza de Lorentz:**

**ローレンツ力**（ローレンツりょく、Lorentz force）は、[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)中で運動する[荷電粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8D%B7%E9%9B%BB%E7%B2%92%E5%AD%90)が受ける[力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%9B)のことである。

**概要**

この力は

\boldsymbol{\mathit{F}} =
q(\boldsymbol{\mathit{E}}+\boldsymbol{\mathit{v}}\times\boldsymbol{\mathit{B}})

と表される。***F*** は荷電粒子が受ける力（これを**ローレンツ力**と言う）、***E*** と***B*** は荷電粒子が存在する位置における[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)と[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)（つまり[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)）である。*q* は荷電粒子の持つ[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)。***v*** は荷電粒子の[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)である。× は[外積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E7%A9%8D)である。

上式で右辺第一項は電場中で荷電粒子が受ける力であり、第二項は[ビオ＝サバールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%82%AA%EF%BC%9D%E3%82%B5%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)を一般化した形となっている。ここで荷電粒子が加速度運動している（ローレンツ力によっても加速度運動となっている）とすると、その荷電粒子自身による電磁場の効果が存在するが、その影響はごく小さい場合が多いので通常は無視されるか、ごく小さなものとして扱われる。すなわち、

\boldsymbol{\mathit{F}} = q(\boldsymbol{\mathit{v}}\times\boldsymbol{\mathit{B}})

と近似することができる。

荷電粒子の[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6) ***v*** と[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4) ***B*** の[外積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%96%E7%A9%8D) が**ローレンツ力** ***F*** であることは、[フレミング左手の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B0%E5%B7%A6%E6%89%8B%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)で向きを確認できる。

名前は[ヘンドリック・ローレンツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84)から。

**ローレンツ力と仕事**

ローレンツ力のする仕事は

dW = \boldsymbol{F} \cdot d\boldsymbol{r}

 = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{r}

ここで、磁場による力の項は、

dW_m = q (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{r}

 = q \boldsymbol{v} \cdot (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})dt = 0

であり、磁場は仕事をしない。ここで **v** = d**r**/dt を用いた。

電場による力の項は、

dW_e = q (\boldsymbol{E})\cdot d\boldsymbol{r}

 = q \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{E} dt 
= w dt

である。この電場による仕事量は、巨視的に見ると[ジュール熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB%E7%86%B1)に相当する。

磁場による力は速度と直交する方向に生じるので、運動の向きを変えるだけで粒子の運動エネルギーは変化しない。エネルギーの移動は電場により生じている。

**ローレンツ力と電磁力**

電荷 qi の時刻 t における位置を **x**i、速度を **v**iとすると、[電荷密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7%E5%AF%86%E5%BA%A6) ρ 、[電流密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%AF%86%E5%BA%A6) **j** は、

\rho(\boldsymbol{x},t) = \sum_i q_i \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_i)  
\boldsymbol{j}(\boldsymbol{x},t) = \sum_i q_i \boldsymbol{v}_i \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_i)

と表すことができる。δ(x)は[ディラックのデルタ関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%A9%E3%83%83%E3%82%AF%E3%81%AE%E3%83%87%E3%83%AB%E3%82%BF%E9%96%A2%E6%95%B0)である。

ローレンツ力は多数の粒子系に対しては

\boldsymbol{F} = \sum_i q_i(\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}_i,t) + \boldsymbol{v}_i \times \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}_i,t))

となる。ここで、

\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}_i,t) = \int \!\! d^3x \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_i) \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},t)  
\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}_i,t) = \int \!\! d^3x \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_i) \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x},t)

として、和と積分を入れ替えると、

\boldsymbol{F} = \int \!\! d^3x (\rho(\boldsymbol{x},t) \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},t) + \boldsymbol{j}(\boldsymbol{x},t) \times \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x},t))

このようにミクロな粒子に作用する力(ローレンツ力)から、マクロな粒子系に作用する力(クーロン力及びアンペール力)が導かれた。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E5%8A%9B>

1. **Flujo Magnético:**

**磁束**（じそく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)：magnetic flux、**磁気誘導束**とも言う）とは[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)中のある一定面積を通りぬける[磁束線](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A3%81%E6%9D%9F%E7%B7%9A&action=edit&redlink=1)の垂直成分を足し合わせたものである。

空間内に閉曲線 C があるとする。この閉曲線を縁とする任意の開曲面 S を考え、その開曲面上の微小な面積要素を dS とする。この面積要素dSに対する法線ベクトルを**n**とすると、磁束 Φ は次の式で表される。

 \Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS 

上式で、**B** は[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)であり、空間上のある点での**磁束**の密度の大きさと[磁束線](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%A3%81%E6%9D%9F%E7%B7%9A&action=edit&redlink=1)の方向をあらわす。

磁束線は途中で途切れたり、湧いたりすることはないという[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)（磁束保存の式）

 \mathrm{div} \mathbf{B} =  \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 

より、磁束 Φ は開曲面 S の取り方に依らず、閉曲線 C（その閉曲線内を通過する磁束線の数）によって決まることが保証される。（\nabla は[ナブラ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%96%E3%83%A9)を参照。）

なお、div は[発散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%95%A3)を示し、ベクトル関数 A(x, y, z) に対し、

 \mathrm{div} \mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{A}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{A}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial z}

で定義される。

磁束は閉曲線 C 内を通過する（貫く）磁束線の本数に比例する。磁束の[単位](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E4%BD%8D)は、Wb（[ウェーバ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%90)、SI単位）である。

回路に誘導される起電力は、その回路を貫く磁束の時間変化に比例する。これを[ファラデーの電磁誘導の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC%E3%81%AE%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)という。

**磁束の量子化**

リング状の[超伝導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E4%BC%9D%E5%B0%8E)体を考える。超伝導体そのものは[マイスナー効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%83%8A%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C)により内部に磁束が入ることは出来ないが、リングの穴の部分を通ることは可能である。しかし、この穴を通ることの出来る磁束は h/2e の整数倍（h は[プランク定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF%E5%AE%9A%E6%95%B0)、e は素電荷）のとびとびの値しか取ることが出来ない。これを「磁束の量子化」と呼び、超伝導を特徴づける重要な特性の一つに挙げられる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F>

1. **Efecto Hall:**

**ホール効果**（ホールこうか、Hall effect）とは、[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の流れているものに対し、電流に垂直に[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)をかけると、電流と磁場の両方に直交する方向に[起電力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%B7%E9%9B%BB%E5%8A%9B)が現れる現象。主に[半導体素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93%E7%B4%A0%E5%AD%90)で応用される。1879年、米国の物理学者エドウィン・ホール(Edwin Herbert Hall, 1855-1938)によって発見されたことから、このように呼ばれる。

**概要**

p型またはn型の[半導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93)試料において、x方向に[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)を流し、y方向に[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)をかける。この時試料を流れている荷電粒子（[キャリア](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93#.E3.82.AD.E3.83.A3.E3.83.AA.E3.82.A2)）は[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)による[ローレンツ力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E5%8A%9B)を受けてz方向に動く。これによって電流と磁場の両方に直交する方向に電場（**ホール電場**）が現れる。これがホール効果である。[ホール素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%AB%E7%B4%A0%E5%AD%90)などによる磁場の検出に用いられるほか、[半導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%B0%8E%E4%BD%93)の電気的特性の測定などに応用される。これは以下に示されているようにホール電圧がキャリア密度の逆数に比例するためである。ゆえにキャリア密度の大きい金属ではホール電圧が半導体に比較して微小な値となるため、この現象を利用した物性測定は半導体が主である。しかしながら、強磁性金属など磁化を帯びた物質中では、この磁化に起因するホール電圧が生じることもある。このような強磁性体の磁化に起因するホール効果を特に異常ホール効果と呼ぶ。また物質中のスピン軌道相互作用に起因してそれぞれ逆向きのスピンを有するキャリアが逆方向へと散乱されるスピンホール効果も近年注目を集めている。

**関係式**

簡単な古典論では、ホール電場をEH、電流密度をJ、磁場をBとして

E_H = R_H J B

の関係がある。比例係数RHを**ホール係数**と呼び、材質や温度などで決まる。 一般にキャリア密度をn、キャリアの電荷をeとして

|R_H| = \frac{\gamma_H}{ne}

の関係がある。ここでγHは散乱因子と呼ばれる。

電流方向の電場をEjとして、

\theta _H = E_H / E_j

を**ホール角**(Hall angle)と呼ぶ。

また、電気伝導度σとホール係数Rの積

\mu_H = |R_H| \sigma = \mu \gamma_H

を**ホール移動度**(Hall mobility) と呼ぶ。ここでμは[ドリフト移動度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%95%E3%83%88%E7%A7%BB%E5%8B%95%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%AB%E5%8A%B9%E6%9E%9C>

1. **Ley de Ampere:**

**アンペールの法則**（アンペールのほうそく）は[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)とそのまわりにできる[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)との関係をあらわす[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)である。[1820年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1820%E5%B9%B4)に[フランス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%B9)の物理学者[アンドレ＝マリ・アンペール](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AC%EF%BC%9D%E3%83%9E%E3%83%AA%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%83%AB)が発見した。現在一般に知られているアンペールの法則の記述は次のようなものである。閉じた経路にそって磁場の大きさを足し合わせる。すると、足し合わせた結果は閉じた経路を貫く電流の和に比例する。磁場の足し合わせは[線積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E7%A9%8D%E5%88%86)でおこなう。

アンペールは実験で2本の電流のあいだに働く力を観測し、そして実験結果をアンペールの法則にまとめ、それ以前に発見されていた電磁気の現象を説明することに成功した。 アンペールは、電流を流すと、電流の方向を右ネジの進む方向として、右ネジの回る向きに磁場が生じることを発見した。これを[**右ねじの法則**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%B3%E3%81%AD%E3%81%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)という。図のように右手の親指を立てて手を握ると、電流の方向を親指の向きとした時、残りの指の向きが磁界の向きと一致するため**右手の法則**と呼ばれることもある。

無限に長い直線導線に電流を流す。このとき電流の回りには同心円上で右ねじ方向の磁場が出来る。閉じた経路として半径 r の同心円をとるとその上で磁場の大きさは等しく、これを H とする。アンペールの法則によれば、

2 \pi r H  \, = I

という関係が成り立つ。ただし I は電流、r は電流との距離。これを変形すると次の直線電流の磁場の公式、

H = \frac{I}{2 \pi r}

が得られる。これは[ビオ・サバールの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%B5%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)を[積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86)したものと一致する。

**一般的な表現**

\oint_C \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \int_S \boldsymbol{j} \cdot d\mathbf{S} = I

ここで、

|  |  |
| --- | --- |
| **H** | : [磁場の強さ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4) |
| **j** | : [電流密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%AF%86%E5%BA%A6) |
| *I* | : 積分領域 S を貫く総電流 |
| d**l** | : [線素ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E7%A9%8D%E5%88%86) |
| d**S** | : [面素ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D%E5%88%86) |
| S | : 平曲線 C を境界にもつ面 |

である。

この式は、ある面 S 内を電流が貫くと、その電流と等しい磁場が面の境界 C で右ねじの法則に従った方向に生じるということを示している。

アンペールの法則は[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)により拡張と数学的整備を加えられて、[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の4つの方程式の1つになっている（アンペール-マクスウェルの式）。その正体は[磁気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97)における[ガウスの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)である。

**回転**

電流場のループCの微小変化による周回積分（\oint_C \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = I）の変化率をrot**H** を使い、次式で表す。

(\mathrm{rot} \boldsymbol{H})_n = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{1}{\Delta S}\oint_{\Delta C} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} 

ここでΔCはΔSの境界であり、(rot**H**)nとはΔSの[法線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E7%B7%9A)方向の成分と言う意味である。

これを使うとアンペールの法則は

 \mathrm{rot} \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j} 

と表すことができる。

rotはrotation（ローテーション）の略で「回転」の意味である。また[微分演算子](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%BE%AE%E5%88%86%E6%BC%94%E7%AE%97%E5%AD%90&action=edit&redlink=1)∇([ナブラ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8A%E3%83%96%E3%83%A9))を用いて、

 \nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j} 

と書くこともできる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Inducción Electromagnética:**

**電磁誘導**（でんじゆうどう、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): electromagnetic induction[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E#cite_note-0)）とは、[磁束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F)が変動する環境下に存在する[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E4%BD%93)に電位差（[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)）が生じる[現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E8%B1%A1)である。また、このとき発生した[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)を[誘導電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E6%B5%81)という。

**概要**

一般には、[マイケル・ファラデー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC)によって[1831年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1831%E5%B9%B4)に誘導現象が発見されたとされるが、先に[ジョセフ・ヘンリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%82%BB%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%BC)に発見されている。また、[フランセスコ・ツァンテデシ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%BB%E3%82%B9%E3%82%B3%E3%83%BB%E3%83%84%E3%82%A1%E3%83%B3%E3%83%86%E3%83%87%E3%82%B7&action=edit&redlink=1)（[英語版](http://en.wikipedia.org/wiki/Francesco_Zantedeschi)）が[1829年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1829%E5%B9%B4)に行った研究によって、既に予想されていたとも言われる。

ファラデーは、閉じた経路に発生する[起電力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%B7%E9%9B%BB%E5%8A%9B)が、その経路によって囲われた任意の面を通過する磁束の変化率に[比例](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E4%BE%8B)することを発見した。すなわち、これは導体によって囲われた面を通過する磁束が変化した時、すべての閉回路には電流が流れることを意味する。これは、磁束の強さそれ自体が変化した場合であっても導体が移動した場合であっても適用される。

電磁誘導は、[発電機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E9%9B%BB%E6%A9%9F)、[誘導電動機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E5%8B%95%E6%A9%9F)、[変圧器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E5%9C%A7%E5%99%A8)など多くの[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)機器の動作原理となっている。

**電磁誘導における起電力**

[ファラデーの電磁誘導の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC%E3%81%AE%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)は、次のように示される。

\mathcal{E} = -{{d\Phi_B} \over dt}

ここで、\mathcal{E}は起電力（[V](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9C%E3%83%AB%E3%83%88_(%E5%8D%98%E4%BD%8D))）、ΦB は磁束（[Wb](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%90)）とする。

同じ領域に*N*回巻かれたコイルが置かれた場合、ファラデーの電磁誘導の法則は、次のようになる。

\mathcal{E} = - N{{d\Phi_B} \over dt}

ここで、*N*は電線の巻数とする。

起電力は磁束の方向に向かって左回りに発生するが、[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の慣習では向かって右回りが正であるとされるため（右ねじ関係）、左ねじ関係であるファラデーの電磁誘導の式には[負号](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B2%A0%E5%8F%B7)がつく。つまり、ファラデーの電磁誘導の式は起電力の大きさだけでなく向きも示している（向きだけを示した[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)として、[レンツの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)と[フレミングの右手の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%81%AE%E5%8F%B3%E6%89%8B%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)がある）。

**マクスウェル方程式を用いた説明**

[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)***E***と[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)***B***との間には、\mathrm{rot}\boldsymbol{E} = -\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t} という関係式が成り立つ。これは[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の中の1つであるが、この式のことをファラデーの電磁誘導の法則と呼ぶこともある。

導体が移動せず、磁束密度***B***のみが変化する場合を考える。空間内にある面*S*を考え、その外周を*C*とする。上式の両辺を*S*上で[面積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%A2%E7%A9%8D%E5%88%86)すると、左辺は[ストークスの定理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%88%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86)を用いて、
  \int_S \mathrm{rot}\boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{S}
     =  \int_C \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{r}
     =  \mathcal{E}
 となる。一方、右辺は、
  \int_S \left( -\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t} \right) \cdot d\boldsymbol{S}
     =  -\frac{d}{dt} \int_S \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S}
     =  -\frac{d\Phi_B}{dt}
 となる。以上より、先に述べた \mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} が得られる。

**ローレンツ力を用いた説明**

磁束密度***B***が時間的に変化しないで、閉じた経路の形が変化する場合を考える。このとき電磁誘導の法則は、導体内の電子にはたらく[ローレンツ力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E5%8A%9B)で説明することができる。

経路*C*を考え、その経路上の点を位置ベクトル***r***で表すことにする。経路*C*の各点が速度***v***（***r***）で動いているものとする。すると*C*上の電子が受けるローレンツ力は、
  \boldsymbol{F}(\boldsymbol{r})
     =  -e \boldsymbol{v}(\boldsymbol{r}) \times \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r})
 となるが、これは*C*上に 
  \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})
     =  \boldsymbol{v}(\boldsymbol{r}) \times \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r})
で表される電場***E***が生じているのと等価だから、起電力は、
  \mathcal{E}
     =  \int_C \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{r}
     =  \int_C (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \cdot d\boldsymbol{r}
 となる。

一方、経路*C*が動くことによって*C*を貫く磁束が変化する。*C*上の点***r***とそこから微小な長さ*d****r***だけ反時計回りに進んだ*C*上の点***r***+*d****r***とをつなぐと、長さ*d****r***の線分ができる。この線分は、微小な時間*dt*の間に***v***（***r***）*dt*だけ動く。それによって、経路*C*を貫く磁束は、
  d^2\Phi_B
     =  (\boldsymbol{v}dt \times d\boldsymbol{r}) \cdot \boldsymbol{B}
     =  -(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \cdot d\boldsymbol{r} \, dt
 だけ変化する。これを*C*上で積分し、両辺を*dt*で割ると、
  \frac{d\Phi_B}{dt}
     =  -\int_C (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \cdot d\boldsymbol{r}
 となる。これより、\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} が得られる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E>

1. **Ley de Faraday:**

**ファラデーの電磁誘導の法則**(ファラデーのでんじゆうどうのほうそく,[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Faraday's law of induction)とは、[電磁誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E)において、1つの回路に生じる誘導起電力の大きさはその回路を貫く[磁界](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E7%95%8C)の変化の割合に比例するというもの。**ファラデーの誘導法則**ともよばれる。また、[ファラデーの電気分解の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC%E3%81%AE%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%88%86%E8%A7%A3%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)との混同のおそれのない場合は、単に**ファラデーの法則**と呼称されることもある。

ソレノイド（単線密巻）[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)を貫く磁界に変化があったときのコイルの誘導[起電力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%B7%E9%9B%BB%E5%8A%9B)*V*は

V=-N{\Delta \Phi \over \Delta t}

となる。ただし、*N*は巻数で、*ΔΦ/Δt*は微小時間*Δt*でのコイルを貫く[磁束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F)の変化である。またここで起電力の正の向きを磁束の向きに右ねじを進めるときのねじの回転方向としてあるので、右辺のマイナスは、磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が発生することを意味している([レンツの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87))。

この法則は、コイル等に関わらず任意のループ(閉曲線)に適用できる。閉ループ*S*内の領域を通る磁界の変化とループに沿って発生する電界は比例関係にあるが、これを式にすると：

\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -{d\Phi_B \over dt}

ただし、*E*は誘導電場で、*ds*はループ微小片で、*dΦB/dt*は磁束の変化である。またこの式の微分形式での表記は、[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)*B*を用いて表せる：

\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}} {\partial t}

この一般化された法則もファラデーの電磁誘導の法則と呼ぶが、[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の1つにもなっていることから、**ファラデー-マクスウェルの式**とも呼ぶ。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC%E3%81%AE%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Ley de Lenz:**

**レンツの法則**とは、[19世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/19%E4%B8%96%E7%B4%80)のロシアの[物理学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85)、[ハインリヒ・レンツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%92%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84)によって発見された[電磁誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E)に関する法則。

何らかの原因によって[誘導電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E5%B0%8E%E9%9B%BB%E6%B5%81)が発生する場合、電流の流れる方向は誘導電流の原因を妨げる方向と一致するというもの。例えば[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)に軸方向から棒磁石を近づけると誘導電流が流れる。[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)に電流が流れると磁場が生じるが、この磁場はレンツの法則が示唆する向き、すなわち棒磁石の接近を妨げる向きとなる。

E = - {d \over dt}\left(N\Phi\right)

**ブレーキへの応用**

[渦電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A6%E9%9B%BB%E6%B5%81)が発生すると、レンツの法則よりブレーキ力が発生する。

[渦電流式ディスクブレーキ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A6%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%BC%8F%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%B9%E3%82%AF%E3%83%96%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%AD)：非接触式のブレーキ

[渦電流式レールブレーキ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A6%E9%9B%BB%E6%B5%81%E5%BC%8F%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%96%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%AD)：レールに渦電流を発生させる非接触式のブレーキ

[電磁吸着ブレーキ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%90%B8%E7%9D%80%E3%83%96%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%AD)：レールに渦電流を発生させる接触式のブレーキ

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Leyes de Maxwell:**

**マクスウェルの方程式**（マクスウェルのほうていしき、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Maxwell's equations）は、[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)のふるまいを記述する古典[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)の[基礎方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9F%BA%E7%A4%8E%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)。[マイケル・ファラデー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%87%E3%83%BC)が幾何学的考察から見出した電磁力に関する法則から[1864年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1864%E5%B9%B4)に[ジェームズ・クラーク・マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)が数学的形式として整理し導いた[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F#cite_note-0)。**マクスウェル-ヘルツの電磁方程式**、**電磁方程式**などとも呼ばれ、マクスウェルはマックスウェルとも表記される。

なお、[電磁気学の単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6%E3%81%AE%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)は、[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)に発展したMKSA単位系のほか、[ガウス単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)などがあるが、 以下では原則として、国際単位系を用いることとする。

**定義**

[電場の強度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4) **E**(t,**x**)、[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6) **B**(t,**x**) とするとき、

\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 

\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{\partial\boldsymbol{B}} {\partial t} = \mathbf{0} 

\nabla \cdot \boldsymbol{D} = {\rho}

\nabla \times \boldsymbol{H} - \frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t} = \boldsymbol{j} 

の4つの式からなる方程式系を(微分形による)マクスウェルの方程式と言う。ここで **D** は[電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)、**H** は[磁場の強度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)であって、それぞれ **E** , **B** と

\boldsymbol{D} = \varepsilon\boldsymbol{E}

\boldsymbol{B} = \mu\boldsymbol{H}

の関係にある。ただしここで \epsilon はその媒質の[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87)、\mu は[透磁率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E7%A3%81%E7%8E%87)であって、真空中ではそれぞれ真空の誘電率\epsilon_0 および 透磁率 \mu_0 となる。また \rho は電荷密度、**j** は電流密度を表し、その間には[電気量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E9%87%8F)保存則（[連続の方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%B6%9A%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)）

\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{j} = 0 

が成り立つことが導かれる。

**歴史的経緯と解釈**

前述のマクスウェルの方程式は、次の2つの組に分類されることが多い。

第1の組は、

\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 : (1a)

\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t} = \mathbf{0} : (1b)

で、電磁場の拘束条件を与える式である。（[ビアンキ恒等式](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%93%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%82%AD%E6%81%92%E7%AD%89%E5%BC%8F&action=edit&redlink=1)）

第2の組は、

\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho : (2a)

\nabla \times \boldsymbol{H} - \frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t} = \boldsymbol{j}  : (2b)

で、電荷・電流が電磁場の源となっていることを表す式である。（電磁場の[運動方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)）

それぞれの解釈は次の通り。

(1a) : 磁束保存の式 … [磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)には源がない。

(1b) : ファラデー-マクスウェルの式 … [磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)の時間変化があるところには[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)が生じる（[電磁誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E)）。

(2a) : ガウス-マクスウェルの式 … [電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)の源は[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)である。

(2b) : アンペール-マクスウェル … [電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)の時間変化（[変位電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E4%BD%8D%E9%9B%BB%E6%B5%81)という）と[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)とで[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)が生じている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F>

1. **Inductancia:**

**インダクタンス**（inductance）は、[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)などにおいて[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の変化が誘導起電力となって現れる性質である。**誘導係数**、**誘導子**とも言う。インダクタンスを目的とするコイルを[インダクタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%80%E3%82%AF%E3%82%BF)といい、それに使用する導線を[巻線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%BB%E7%B7%9A)という。

誘導係数には[自己誘導](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%87%AA%E5%B7%B1%E8%AA%98%E5%B0%8E&action=edit&redlink=1)係数と[相互誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E4%BA%92%E8%AA%98%E5%B0%8E)係数の2種類がある。両者は観察者の立場による違いであり、全く別物であるわけではない。

**自己誘導と自己インダクタンス**

巻線を貫く[磁束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F)が変化すると、巻線[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)が磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が発生する。

その大きさは、次のようになる。

e=-N\frac{d\phi }{dt} [v]

*e* : 起電力の大きさ[v]　 *N* : 巻線の巻数　 *Φ* : 磁束[wb]

巻線に流れる電流が変化すると、巻線を貫く磁束が変化し、その磁束によって磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が発生する。  
その大きさは次のようになる。

e=-L\frac{dI}{dt} [v]

*L* :自己インダクタンス[H]　 *I* :巻線の電流[A]

自己インダクタンスは、自己誘導の起こしやすさを示すものであり、次の式で表される。

L=N\frac{d\phi }{dI} [H]

Lの単位はＨ（ヘンリー）を用いる。

**相互誘導と相互インダクタンス**

磁気的に結合された2つの巻線の一方の電流を変化させると、もう一方の巻線に誘導起電力を生じる。  
その大きさは、次のようになる。

e_2=-M\frac{dI_1}{dt} [v]

*M* : 相互インダクタンス[H] 　*e2* : 起電力の大きさ[v] *I1* : 巻線の電流[A]

相互インダクタンスは、次の式で表される。

M=k\sqrt{L_1L_2} [H]

*k* : [結合係数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%90%E5%90%88%E4%BF%82%E6%95%B0)　*L1, L2* : 自己インダクタンス[H]

相互インダクタンスや結合係数は2つの巻線の大きさ、形状、相互位置などの幾何学的な量、及びコイル周辺の物質の透磁率[H/m]によって定まる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%80%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9>

1. **Circuito LC:**

**LC回路**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): LC circuit）は、[**共振**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%B1%E6%8C%AF)**回路**の一種で、"L" で表される[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)と "C" で表される[コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)で構成される[電気回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%9B%9E%E8%B7%AF)である。コイルとコンデンサの間で、次の式で表されるその回路の[共振周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%B1%E6%8C%AF)で[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)が変化する。

\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}

ここで、**L** は[インダクタンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%80%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9)（単位は[ヘンリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%BC)）、**C** は[静電容量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%99%E9%9B%BB%E5%AE%B9%E9%87%8F)（単位は[ファラド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%A9%E3%83%89)）である。[角周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0) \omega\, の単位は[ラジアン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%82%B8%E3%82%A2%E3%83%B3)毎秒である。

LC回路は特定の周波数の信号を生成するのに使われたり、より複雑な信号から特定の周波数の信号だけを抽出するのに使われる。[発振回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%8C%AF%E5%9B%9E%E8%B7%AF)や[フィルタ回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%AB%E3%82%BF%E5%9B%9E%E8%B7%AF)、[チューナー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%8A%E3%83%BC)、周波数混合器などで利用する重要なコンポーネントである。LC回路は、[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)によるエネルギーの消散を無視した理想化したモデルである。抵抗も含めたモデルは[RLC回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/RLC%E5%9B%9E%E8%B7%AF)である。

**原理**

LC回路は、その共振周波数で振動する[電力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E9%87%8F)を蓄えることができる。コンデンサが電極板の間の[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)に蓄える電力は、そこにかかる[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)によって変化する。コイルが[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)に蓄える電力は、そこを流れる[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)によって変化する。電力を蓄えたコンデンサとコイルが連結されていると、電流がコイルに流れはじめ、そこに磁場が形成され、コンデンサにかかる電圧が低くなっていく。最終的にコンデンサに蓄積された電力は全て放出される。しかし、電流は流れ続ける。これはコイルが電流の変化を阻止するように働き、磁場からエネルギーを取り出して電流を一定に流れさせようとするためである。その電流はコンデンサに徐々に蓄積され、前とは逆の極性で電圧がかかるようになる。磁場が消え去ると電流は停止し、コンデンサに逆の極性で電圧がかかった状態になり、最初の状態に戻る。今度は逆方向に電流が流れ始める。

[電荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E8%8D%B7)はコイルを経由してコンデンサの電極間を行ったりきたりする。実際には内部[抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)があるため、外部からエネルギーが供給されない限り、コンデンサとコイルの間のエネルギーの振動は減衰していく。このような動作を数学的には[調和振動子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%BF%E5%92%8C%E6%8C%AF%E5%8B%95%E5%AD%90)と呼び、振り子が揺れるのと同様である。振り子と同様にエネルギーを蓄えるので、特にLC並列共振回路を**タンク回路** (tank circuit) とも呼ぶ。

**共振現象**

共振現象は、誘導性と容量性の[リアクタンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9)が等しいときに発生する。振り子がひとりでに振動しないように、LC回路が勝手に共振するわけではない。[共振](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%B1%E6%8C%AF)という言葉は、小さな揺れの供給が系全体に大きな効果を及ぼすような現象を意味する。LC回路にもAC電源や電波のような供給源がないと共振は発生しない。誘導性と容量性のリアクタンスが等しくなる周波数を、その回路の共振周波数という。LC回路の共振周波数（[ラジアン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%82%B8%E3%82%A2%E3%83%B3)/秒）は次の通り。

\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}

これを[ヘルツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%84)で表すと、次のようになる。

f = { \omega \over 2 \pi } = {1 \over {2 \pi \sqrt{LC}}} 

<http://ja.wikipedia.org/wiki/LC%E5%9B%9E%E8%B7%AF>

1. **Transformador:**

**変圧器**（へんあつき、[transformer](http://en.wikipedia.org/wiki/transformer)、[Voltage converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_converter)）は、[交流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)[電力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8A%9B)の[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)の高さを[電磁誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E8%AA%98%E5%B0%8E)を利用して変換する[電力機器](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E6%A9%9F%E5%99%A8)・[電子部品](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E9%83%A8%E5%93%81)である。**変成器**（へんせいき）、**トランス**とも呼ぶ。

[交流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)の変換（変圧）、[インピーダンス整合](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%BC%E3%83%80%E3%83%B3%E3%82%B9%E6%95%B4%E5%90%88)、[平衡系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E8%A1%A1%E7%B3%BB)-[不平衡系](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%8D%E5%B9%B3%E8%A1%A1%E7%B3%BB&action=edit&redlink=1)の変換に利用する。

**理論**

**原理**

変圧器は、磁気的に結合した（[相互誘導](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E4%BA%92%E8%AA%98%E5%B0%8E)）複数の[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)からなる。コイル内外に磁気回路をともなうものもある。コイルに使用する導線を[巻線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%BB%E7%B7%9A)という。

特に2個のコイルから成るものにおいて、入力側のコイルを一次コイル、出力側のコイルを二次コイルという。一次コイルに[交流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81)[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)を流し、変動[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)を発生させ、それを相互[インダクタンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%80%E3%82%AF%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9)で結合された二次コイルに伝え、再び電流に変換し、出力する。

変圧器によって電圧を変更することを**変圧**（へんあつ）といい、電圧を上昇させることを**昇圧**（しょうあつ）、逆に下降させることを**降圧**（こうあつ）という。

**変圧比**

一次電圧 *V1* と二次電圧 *V2* の比を**変圧比**（へんあつひ）という。また、一次巻数 *N1*と二次巻数 *N2* の比を**巻数比**（まきすうひ）または**変成比**（へんせいひ）という。理想的な変圧器の場合、変圧比と巻数比は等しい。

\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}

**変流比**

一次電流 *I1* と二次電流 *I2* の比を**変流比**（へんりゅうひ）という。変流比は、変圧比および巻数比の[逆数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%86%E6%95%B0)に等しい。

\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}

**励磁電流**

鉄心に[主磁束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BC%8F%E3%82%8C%E7%A3%81%E6%9D%9F#.E5.A4.89.E5.9C.A7.E5.99.A8.E3.81.AE.E7.A3.81.E6.9D.9F)を形成する電流が**励磁電流**（れいじでんりゅう）である。理想的な変圧器では、励磁電流の位相は一次電圧よりも90°遅れる。実際には鉄心の磁気飽和や[ヒステリシス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%92%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%82%B9)により励磁電流の波形は主に奇数次の高調波ひずみを含む。

電源周波数を高くすると励磁電流は減少する。[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E5%9C%A7%E5%99%A8#cite_note-0)

**損失**

[**無負荷損**](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%84%A1%E8%B2%A0%E8%8D%B7%E6%90%8D&action=edit&redlink=1)**（**[**鉄損**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84%E6%90%8D)**）**

通電（励磁）している場合、[負荷](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B2%A0%E8%8D%B7)の大きさに関係なく生じる損失。

[**負荷損**](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%B2%A0%E8%8D%B7%E6%90%8D&action=edit&redlink=1)

負荷電流の2乗にほぼ比例する損失である。

[**銅損**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%85%E6%90%8D)

巻線による[電気伝導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93)の[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)による[ジュール損](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB%E6%90%8D)。

**漂遊負荷損**

[漏れ磁束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BC%8F%E3%82%8C%E7%A3%81%E6%9D%9F)による変圧器各部に生ずる[渦電流損](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84%E6%90%8D#.E6.B8.A6.E9.9B.BB.E6.B5.81.E6.90.8D)。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%89%E5%9C%A7%E5%99%A8>

1. **Corriente Alterna:**

**交流**（こうりゅう、alternating current, **AC**）とは、[時間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93)とともに周期的に大きさと向きが変化する[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)（交流電流）のことである。交番電流の略。また、同様に時間とともに周期的に大きさとその正負が変化する[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)を交流電圧という。特に電流、電圧の区別をせずに交流または**交流信号**と呼ぶこともある。対義語は[直流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E6%B5%81)。

交流の代表的な[波形](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%BD%A2)は[正弦波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%A3%E5%BC%A6%E6%B3%A2)であり、狭義の交流は**正弦波交流**(sinusoidal alternating current) を指すが、広義には周期的に大きさと向きが変化するものであれば正弦波に限らない波形のものも含む。正弦波以外の交流は**非正弦波交流** (non-sinusoidal alternating current) といい矩形波交流や三角波交流などがある。

**交流理論**

平等磁界中においてコイルを一定速度で回転させると、[フレミング右手の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B0%E5%8F%B3%E6%89%8B%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)により導かれる方向に起電力を生じ、コイルの回転角に応じて円の周回のうち半周においては正の方向に、もう半周においては負の方向に正弦波の波形を持つ交流起電力を生じる。

**交流の三要素**

交流信号は以下に示す3つの要素を持ち、これらを特定することで任意の交流波形を得ることができる。

[**周波数**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)

周期的なパターンが1秒間に繰り返される回数。量記号はf、単位はヘルツ (Hz)。コイルの回転角により定まる。なお、周期T（単位s）は周波数の逆数となる。

**\mathit{T}=\frac{1}{f}**

**最大**[**振幅**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)

瞬時値の絶対値のうち最大のもの。

[**波形**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%BD%A2)

横軸を時間、縦軸を瞬時値とする直交座標に表したときの形

あらかじめ用意された数種類の波形から1つを選び、周波数と最大振幅を指定して交流信号を発生させることのできる機器を関数発生器 ([function generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Function_generator))、任意の波形をプログラミングし、周波数と最大振幅を指定して交流信号を発生させることのできる機器を任意波形発生器 ([arbitrary waveform generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Arbitrary_waveform_generator)) という。

以上の三要素に[**位相**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)（phase、1周期のうちの位置）を加えて四要素とすることもある。位相のずれを位相差 (phase difference) といい、二波の位相角のうち一波が大きくなるときを位相の進み、反対に小さくなるときを位相の遅れ、同じになるときを同相（同位相）という。正弦波または余弦波を除く交流では1周期のうちのどの位置をもって位相を0とする位置（初位相）は定められていない。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%A4%E6%B5%81>

1. **Fasor:**

正弦信号を[複素数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E7%B4%A0%E6%95%B0)で表現する表示方法をフェーザ(phasor)表示という。主に[線型回路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%9E%8B%E5%9B%9E%E8%B7%AF)の交流解析に使用される。 [線型](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%9E%8B)な電気回路において、本来は[微分方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E5%88%86%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の求解問題である定常的な振る舞いの解析を、フェーザ表示を利用することで[代数方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%A3%E6%95%B0%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)の求解問題に帰着させることができる。

**定義**

次の正弦信号s(t)を考える。

s(t)=A \sin(\omega t+\theta)

s(t)は、[オイラーの公式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%85%AC%E5%BC%8F)を使って、次のように書ける。

s(t)=\Im[S \exp(\mathrm{j}\omega t)]　　　　　　　　　　　(1)

ここで、\mathrm{j}は虚数単位、Sは 絶対値A 偏角\thetaの[複素数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E7%B4%A0%E6%95%B0)である。

* をs(t)のフェーザ表示またはフェーザという [[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%82%B6%E8%A1%A8%E7%A4%BA#cite_note-0) 。

**性質**

正弦信号v(t)の**フェーザ表示**がVであるとき、 \frac{dv(t)}{dt}のフェーザ表示は\mathrm{j} \omega Vである。 これは次のようにしてわかる。(1)式から

v(t)=\Im[V \exp(\mathrm{j}\omega t)]

これを時間微分すると

\frac{dv(t)}{dt}=\Im[\mathrm{j} \omega V \exp(\mathrm{j}\omega t)]

これと(1)式を見比べれば、\frac{dv(t)}{dt}のフェーザ表示は\mathrm{j} \omega Vであることがわかる。

以上から、次の対応関係があることがわかる。

\frac{d}{dt}\Leftrightarrow \mathrm{j} \omega

**応用**

簡単な応用例として、キャパシタ（[コンデンサ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%87%E3%83%B3%E3%82%B5)）とインダクタ（[コイル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%82%A4%E3%83%AB)）について、[電圧](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%9C%A7)と[電流](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B5%81)の関係をフェーザ表示を使って表してみる。

キャパシタの場合、電流i(t)と電圧v(t)の関係は

i(t)=C \frac{dv(t)}{dt}

電流と電圧のフェーザ表示をそれぞれI、Vとすると

I = \mathrm{j}\omega C V　　　　　　　　　　　　　(2)

インダクタの場合、電流i(t)と電圧v(t)の関係は

v(t)=L \frac{di(t)}{dt}

電流と電圧のフェーザ表示をそれぞれI、Vとすると

V=\mathrm{j}\omega L I　　　　　　　　　　　　　　(3)

式(2)(3)のように、フェーザ表示を利用することによって、 抵抗・キャパシタ・インダクタの電圧と電流の関係は簡単な一次方程式で書くことができる。

フェーザ表示を利用することにより、 連立[微分方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BE%AE%E5%88%86%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)を解く代わりに[連立一次方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%A3%E7%AB%8B%E4%B8%80%E6%AC%A1%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)を解くことで、 線型回路[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%82%B6%E8%A1%A8%E7%A4%BA#cite_note-1) の定常状態を調べることができる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%82%B6%E8%A1%A8%E7%A4%BA>

1. **Especto Electromagnético:**

**電磁スペクトル**（でんじすぺくとる、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): **Electromagnetic spectrum**）とは、存在し得る、すべての電磁波の[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)（または[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)）帯域のことである。

電磁スペクトルの周波数は、[超低周波](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%B6%85%E4%BD%8E%E5%91%A8%E6%B3%A2&action=edit&redlink=1)（長波長側）から[ガンマ線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%B3%E3%83%9E%E7%B7%9A)（短波長側）にわたって広がっており、その規模は数千km の長さから[原子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90)の幅をも下回る長さまで無限にわたっている。

[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7) λ における電磁波エネルギーは [周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0) ν における[光子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90)のエネルギーと関連している。故に、電磁スペクトルはこれらの等価な3種類の値によって表現される。これら3つの値は[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)中において以下のような関係にある。

\lambda = \frac{c}{\nu}  \,\!

E=h\nu \,\!

ここで

*c* は真空中の[光速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)であり 299,792,458 m/s である。(c \approx 3 \cdot 10^8 \ \mbox{ m}/\mbox{s} = 300,000 \ \mbox{km}/\mbox{s}).

*h* は[プランク定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF%E5%AE%9A%E6%95%B0)である。 (h \approx 6.626069 \cdot 10^{-34} \ \mbox{J} \cdot \mbox{s} \approx 4.13567 \ \mathrm{\mu} \mbox{eV}/\mbox{GHz}).

**物体のスペクトル特性**

この世界にあるすべて物体は[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)を[放射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%94%BE%E5%B0%84)、[反射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%B0%84)、[伝播](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E6%92%AD)している。この光の電磁スペクトル分布（物体のスペクトル特性と呼ばれる）は物体の組成によって決まる。スペクトルの型は物体からの放射の性質によって区別することができる。

* もし、スペクトルが主として物体の[熱放射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E6%94%BE%E5%B0%84)（熱輻射）によるものであれば、[放射スペクトル](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%94%BE%E5%B0%84%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB&action=edit&redlink=1)（または[輝線スペクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BC%9D%E7%B7%9A%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)）が発生する。
* 黒体スペクトルより多い光の放射であることもあれば少ない光の放射であることもある。
* スペクトルが背景から構成されたものであれば、光が伝播する物体によって電磁波が吸収され[吸収スペクトル](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%90%B8%E5%8F%8E%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB&action=edit&redlink=1)ができる。

[分光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%85%89%E5%AD%A6)は物理学の一分野で物質のスペクトル特性を扱う分野である。

**分類**

電磁スペクトルの分類の体系は正確であるが、電磁エネルギーの近隣との分類が重複していることがよくある。例えば、60Hz の低周波電波 (SLF) は天文学者によって研究されているが、これは[電力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%8A%9B)供給の周波数（注：日本では西日本）にもなる。また、低エネルギーガンマ線は高エネルギー X線を含んでいる。これは、ガンマ線が原子核の崩壊などの核反応によってできるものを指すのに対し、X線が高エネルギー内部電子に伴って遷移する電子によってできたものを指すからである。それ故、ガンマ線とX線は波長ではなく放射源によって分類される。一般的に、核遷移は電子遷移よりも高エネルギーであり、通常ガンマ線はX線よりも高エネルギーである。しかしながら、ガンマ線を出す低エネルギー核遷移（例えば Fe 57の核遷移は 14.4 keV ）は高エネルギーX線よりも弱いことがある。

また、電波の分類は国や学会などによりさまざまな分類が存在する。

**電気エネルギー**

電気エネルギーは電磁スペクトルの低周波、長波長の終端に相当する。放射は2線式、もしくは3線式の伝送線にそって伝送され、[アンテナ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%86%E3%83%8A)などのさまざまな装置によって送信される。周波数 0 のエネルギーは直流電源によって放出される。50 Hz や 60 Hz においては一般的な発電所の交流発電機で生成される。20 Hz から 30 kHz までの電磁エネルギーは電話や拡声器、音響機器などから放出される。これらの周波数において[テレビ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%83%AC%E3%83%93)の[同軸ケーブル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%90%8C%E8%BB%B8%E3%82%B1%E3%83%BC%E3%83%96%E3%83%AB)を通る [超短波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B6%85%E7%9F%AD%E6%B3%A2)(VHF)と電球に送られる 60 Hz の電気との間には機能上の差異はまったく無い。どちらもアンテナにつなげれば、空間に放出される。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB>

1. **Velocidad de la Luz:**

**光速**（こうそく）、**光速度**（こうそくど）は、[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)が伝播する[速さ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E3%81%95)のことである。[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)中における光速の値は 299 792 458 m/s（≒30万キロメートル毎秒）と定義されている。つまり、太陽から地球まで約8分20秒、月から地球は、2秒もかからない。俗に「1秒間に[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)を7回半回る速さ」[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F#cite_note-0)とも表現される。

光速は一般に記号cで表される。これは[ラテン語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%83%86%E3%83%B3%E8%AA%9E)で速さを意味する celeritasまたは[定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9A%E6%95%B0)を意味するconstant (Weber's constant[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%B4%E3%82%A3%E3%83%AB%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%A0%E3%83%BB%E3%83%B4%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%90%E3%83%BC)) に由来する[[2]](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/c.html)。

現代の[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)では長さの単位[メートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)が光速と時間により定義されている。光速度は電磁場の伝播速度でもあり、[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)で[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)を[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)にすると光速が一定となるということが[相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)の根本原理になっている。

[重力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%87%E6%9C%89%E5%BC%95%E5%8A%9B)作用も光速で伝播することが相対性理論で予言され、[2002年](http://ja.wikipedia.org/wiki/2002%E5%B9%B4)に観測により確認された[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F#cite_note-1)。

**光速度の測定**

* [ガリレオ・ガリレイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%BB%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%A4)は、遠く離れた2か所に置いたランプの合図を用いて光速度を測定する方法を提案した。この方法では光速があまりに速いために有意な結果を得られなかった。
* [1676年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1676%E5%B9%B4)に[デンマーク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%83%B3%E3%83%9E%E3%83%BC%E3%82%AF)の[数学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%AD%A6%E8%80%85)[オーレ・レーマー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%83%9E%E3%83%BC)は[木星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%A8%E6%98%9F)の[衛星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A1%9B%E6%98%9F)が木星に隠れる[周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%9C%9F)の変化と木星までの[距離](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%9D%E9%9B%A2)から光速を計算し約22万 km/s という値を得た。
* [1729年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1729%E5%B9%B4)に[ブラッドリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%A9%E3%83%83%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%BC)は[季節](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A3%E7%AF%80)による星の[光行差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E8%A1%8C%E5%B7%AE)から光速を求めた。
* [1849年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1849%E5%B9%B4)に[フィゾー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A3%E3%82%BE%E3%83%BC)は地上で 8.6 km の距離を光が往復する時間を回転歯車を使って測定し、そこから光速を求めて31万3000 km/s という値を得た。
* [1850年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1850%E5%B9%B4)に[フーコー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%BC%E3%82%B3%E3%83%BC)は回転ミラーを使った光速の測定を行った。
* [1873年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1873%E5%B9%B4)から[マイケルソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3)はフーコーの方法を改良して光速の測定を続けた。

その後[マイクロ波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD%E6%B3%A2)を使う方法、[レーザー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC)の使用などにより測定の精度が高まった[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F#cite_note-2)。

[1983年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1983%E5%B9%B4)には、[国際度量衡総会](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%BA%A6%E9%87%8F%E8%A1%A1%E7%B7%8F%E4%BC%9A)により、[メートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)を光速によって定義することとなった。これにより、真空中の光速が299 792 458 m/sと定義されたことになる。

**電磁場の伝播と光速度**

[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)によれば、[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)の伝播速度は次の関係で与えられる。

c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} （c は一定）

ここで、ε0 は真空の[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87)、μ0 は真空の[透磁率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E7%A3%81%E7%8E%87)である。定数 c が光速に一致するという事実により、[マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)は「光が[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)の一種である」ことを予言し、後に[ヘルツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%92%E3%83%BB%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%84)によって実証された。

**物質中の光速**

光速は、[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)中では[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)中よりも遅くなる。[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)という現象がおきるのは、光速が[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)によって異なるためである。また、物質中の光速よりも速い速度で[荷電粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8D%B7%E9%9B%BB%E7%B2%92%E5%AD%90)が運動することが可能であり、このとき[チェレンコフ放射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%82%A7%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B3%E3%83%95%E6%94%BE%E5%B0%84)が発生する。

物質の絶対[屈折率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87)は、真空中の光速をその物質中の光速で割った値で定義されている。たとえば[水](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4)の[屈折率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87)は可視光領域波長で約1.33、真空中の光速度は約30万km/sであるから、水中での光速度は約22.5万km/sとなる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F>

1. **Luz:**

**光**（ひかり）とは、基本的には、人間の[目](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%AE)（[視覚](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%96%E8%A6%9A)）を刺激して明るさを感じさせるもの（こと）のこと[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89#cite_note-0)である。なお、光が、人間の目に入る直線経路は複数とりうることを２穴のピンホールを用いた実験によってシャイネルが確認している。（出典の表現を若干変更している）。 (シャイネル試験）[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89#cite_note-1) 　現代の自然科学の分野では、光を「[可視光線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E8%A6%96%E5%85%89%E7%B7%9A)」と、異なった名称で呼ぶことも行われている。つまり「光」は[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)の一種と位置付けつつ説明されており、同分野では「光」という言葉で[赤外線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%A4%E5%A4%96%E7%B7%9A)・[紫外線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%AB%E5%A4%96%E7%B7%9A)まで含めて指していることも多い。

光は[宗教](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%97%E6%95%99)や、[哲学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%93%B2%E5%AD%A6)、[自然科学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E7%A7%91%E5%AD%A6)、[物理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86)などの考察の対象とされている。

**自然科学での説明**

光は[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)と[粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90)の二重性を持つとされ、波動であることを強調する場合は「[光波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%B3%A2)」、粒子であることを強調する場合は「[光子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90)」と呼ばれる。[光源](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%BA%90)や観測者の[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)にかかわらず「[相対速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E9%80%9F%E5%BA%A6)が変化しない」という特徴を持つ。

**光の波動性**

波動としての光を光波と呼び、[反射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%B0%84)・[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)・[回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98)などの現象を起こす。[ヤングの実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A4%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93)（1805年)により[光の波動説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E3%81%AE%E6%B3%A2%E5%8B%95%E8%AA%AC)として証明され、その後[マクスウェル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB)らにより光波は[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)であることが示された。厳密には[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)で記述される[ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)波であり[偏光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%81%8F%E5%85%89)を持つが、[波動光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95%E5%85%89%E5%AD%A6)では簡略化のために[スカラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%A9%E3%83%BC)波として扱うことが多い。

* 光のエネルギーは[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)の[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)の2乗に比例する
* 光の運動量は[ポインティング・ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%83%BB%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)に比例する

**光の粒子性**

粒子（[量子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90)）としての光を[光子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90)（光量子）という。光子は[電磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%A0%B4)の[量子化](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8C%96)によって現れる量子の1つで、[電磁相互作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)を媒介する。[ニュートン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%82%B6%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3)の光の[粒子説](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90%E8%AA%AC)によって唱えられた。現在の[光子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90)の概念は[アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)によって提唱された。

* E = h \nu - 光のエネルギーは[振動数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E6%95%B0) \nu に比例する
* p = \frac{h}{\lambda} - 光の[運動量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%8B%E5%8B%95%E9%87%8F)は[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7) \lambda に反比例する

このため波長の小さい[X線](http://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A)などにおいて、光の粒子性は特に顕著となる。

**粒子説と波動説**

「光は粒子か波か?」

この問題は、かつてよく議論された。何故なら、光が波でなければ説明がつかない現象（たとえば光の[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))、[分光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%85%89)など）と、光が粒子でなければ説明のつかない現象（[光電効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%9B%BB%E5%8A%B9%E6%9E%9C)など）が、どちらも明確に確認できたからである。

この問題は、[20世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/20%E4%B8%96%E7%B4%80)前半から後半にかけて「[量子力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E5%AD%A6)」という学問分野が確立していく中で、「光は[粒子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B2%92%E5%AD%90)でもあり[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)でもある。粒子と波の両方の性質を併せ持つ、[量子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90)というものである」という事が確かめられ、決着がついた。この量子の持つ特異な性質のことを指して、「光は〈粒子性〉と〈波動性〉を併せ持つ」と表現することがある。

現在では呼び方として、光の粒子性に重点を置く場合は「光子」、波動性に重点を置く場合には「光波」、光が粒子と波の二面性を持った量子である、という点に重点をおく場合は[光量子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%87%8F%E5%AD%90)と言う。

**光の性質**

性質としては上記の通り粒子性と波動性があり屈折・（全）反射・干渉（ホログラフィ）・回折・偏光 (LPL・CPL) などの

* 光は、通常、直進する。（エウクレイデスの光の直進の法則）
* 凸凹の無い平面鏡に当たった光は、鏡に当たったときと同じ角度で反射する。　（エウクレイデスの光の反射の法則）
* 屈折率の異なる物質の境界面で光の速度が変化する。その結果、境界面への入射角が直角でない場合には、光の進路が変化する。（[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)）
* 光の屈折の際は、[スネルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)が成立する。
* 光の強さは、光源からの距離の2乗に反比例する。（ケプラーの光の[逆2乗の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%862%E4%B9%97%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)）
* 光速は、光源の運動状態に関わらず、不変である。 - [光速度不変の原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96#.E7.9B.B8.E5.AF.BE.E6.80.A7.E3.81.A8.E5.85.89.E9.80.9F.E5.BA.A6.E3.81.AE.E4.B8.8D.E5.A4.89)
* 光は[質量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B3%AA%E9%87%8F)がゼロである。従って[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)ではない。

主な物質との関係ではフォトニクスと呼ばれ大別して*Photo*（**光化学**、**光物理**などの分子場理論）と*Opto*（**光学**などの放射場理論）と呼び方が異なる。

光物理機能としては

* 励起エネルギー移動
* 化学発光
* 電界発光 (EL)

光化学機能としては

* フォトレジスト
* 光触媒
* 光エネルギー変換

光波機能としては

* 光ファイバー
* 近接場光学
* コヒーレント分光

などがある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89#.E5.85.89.E3.81.AE.E6.80.A7.E8.B3.AA>

**Lecturas Física II**

**Índice:**

1. Reflexión ------------------------------------------------------------------------------------------------------- **136**
2. Reflexión ------------------------------------------------------------------------------------------------------- **137**
3. Ley de Snell ---------------------------------------------------------------------------------------------------- **137**
4. Indice de Refracción ------------------------------------------------------------------------------------------ **139**
5. Dispersión ------------------------------------------------------------------------------------------------------ **139**
6. Poralización ---------------------------------------------------------------------------------------------------- **140**
7. Fotoelasticidad ------------------------------------------------------------------------------------------------- **141**
8. Principio de Huygens ----------------------------------------------------------------------------------------- **142**
9. Optica ----------------------------------------------------------------------------------------------------------- **143**
10. Lente ------------------------------------------------------------------------------------------------------------ **144**
11. Anillos de Newton -------------------------------------------------------------------------------------------- **147**
12. Interferómetro de Michelson -------------------------------------------------------------------------------- **148**
13. Experimento de Michelson y Morley -----------------------------------------------------------------------**148**
14. Difracción ------------------------------------------------------------------------------------------------------ **151**
15. Rejilla de Difracción ------------------------------------------------------------------------------------------**151**
16. Holografía ------------------------------------------------------------------------------------------------------ **153**
17. Relatividad ----------------------------------------------------------------------------------------------------- **155**
18. Teoría de la Relatividad Especial --------------------------------------------------------------------------- **156**
19. Dilatación del Tiempo ---------------------------------------------------------------------------------------- **158**
20. Paradoja de los Gemelos ------------------------------------------------------------------------------------- **158**
21. Transformaciones de Lorentz ------------------------------------------------------------------------------- **159**
22. **Reflexión:**

**反射**（はんしゃ、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): reflection）は、[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)や[音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3)などの[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)がある面で跳ね返る[反応](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%BF%9C)のことである。

**弦の振動の反射**

[ひも](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%B2%E3%82%82)や[弦](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%A6)などを[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)させると、その波は周囲に伝わっていく。その時[終端](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%82%E7%AB%AF)において反射が起きる。反射は終端によって2種類に分けられる。

**固定端反射**

終端を固定したときに起きる反射。[振幅](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%B9%85)が反転した波が反射される。

**自由端反射**

終端を固定せず自由に動ける状態にしたときに起きる反射。同じ振幅の波が反射される。

**電流の反射**

[電気](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97)の[通信路](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9A%E4%BF%A1%E8%B7%AF)でも反射は起きる（[同軸ケーブル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%90%8C%E8%BB%B8%E3%82%B1%E3%83%BC%E3%83%96%E3%83%AB)など）。

電気の[パルス波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%AB%E3%82%B9%E6%B3%A2)を[金属](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%91%E5%B1%9E)の通信路にいれると、通信路の終端において、パルス波が反射する。

終端が[短絡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%AD%E7%B5%A1)されていれば、（弦の反射における固定端反射のように）**振幅が反転したパルス波が反射**される。

終端が開放されていれば、（弦の反射における自由端反射のように）**パルス波がそのまま反射**される。

この時、最適な[電気抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E6%8A%B5%E6%8A%97)を終端に入れることにより、反射を防ぐことができ、最適な通信が可能となる（[終端抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%82%E7%AB%AF%E6%8A%B5%E6%8A%97)、ターミネータ）。

**光の反射**

光などの[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)は、屈折率が異なる物質間の境界面で、入射光の一部または全部が反射される。ここで、反射する光の入射角と反射角は等しいという、**反射の法則**が成り立つ。入射角と反射角は、それぞれの光の進行方向と境界面の[垂線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9E%82%E7%B7%9A)との間の[角度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A7%92%E5%BA%A6)として定義される。説明図における左の α が入射角、右の α が反射角である。なお、歴史的な事情から[電気工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%B7%A5%E5%AD%A6)から発展した[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)においては、この入射角と反射角が反射面に対する角度として定義されることがある。ただ、いずれにしても入射角と反射角が等しいということに変わりはない。

完全に滑らかな面では一定の方向から入射した光は一定の方向に反射するが、現実の物体では必ずしもそうなっていない。完全に滑らかではない物体における反射を表すモデルとして、[光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6)分野や[コンピュータグラフィックス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%BF%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9)では、[双方向散乱面反射率分布関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E6%96%B9%E5%90%91%E6%95%A3%E4%B9%B1%E9%9D%A2%E5%8F%8D%E5%B0%84%E7%8E%87%E5%88%86%E5%B8%83%E9%96%A2%E6%95%B0)や[双方向反射率分布関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E6%96%B9%E5%90%91%E5%8F%8D%E5%B0%84%E7%8E%87%E5%88%86%E5%B8%83%E9%96%A2%E6%95%B0)など、さまざまな反射モデルが利用されている。

**光の反射の原理**

[屈折率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87)が異なる[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)間の境界面に光が入射したときには、一定の条件を満たすように、反射光と透過光（屈折光）が生じる。この「一定の条件」とは、「波動ベクトルのの境界面に平行な成分は、各光において等しい」「電界（[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)）・磁界（[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)）の境界面に平行な成分は、境界面の両側で等しい」「[電束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)・[磁束密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%9D%9F%E5%AF%86%E5%BA%A6)の境界面に垂直な成分は、境界面の両側で等しい」である。反射角・屈折角に関する法則（[スネルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)）や、反射率・透過率に関する法則（[フレネルの式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E5%BC%8F)）は、この原理から導出される。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%B0%84>

1. **Refraccción:**

**屈折**（くっせつ、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): refraction[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98#cite_note-0)）とは、[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)や[音波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)などの波（[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)）が異なる[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)の境界で進行方向を変えることである。波の進む[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)が媒質によって異なるためと説明される。

**概要**

媒質Aと媒質Bがあり、互いにA、Bは異なった媒質とする。また、媒質A、媒質Bはある平坦な境界面で接しているとする。この時、波が、A→Bへと境界面を通過する場合、その境界面で波の進行方向が変わる。

[等方的](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AD%89%E6%96%B9%E7%9A%84)な媒質から[異方的](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%95%B0%E6%96%B9%E7%9A%84)な媒質へ波が進む場合は、[複屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E5%B1%88%E6%8A%98)を起こす。

[入射角](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A5%E5%B0%84%E8%A7%92)と[屈折角](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%B1%88%E6%8A%98%E8%A7%92&action=edit&redlink=1)の間には[スネルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)が成り立つ。

**屈折に関連した自然現象**

**光の屈折による自然現象**

[虹](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%99%B9)、[蜃気楼](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%9C%83%E6%B0%97%E6%A5%BC)、[幻日](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%BB%E6%97%A5)、[逃げ水](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%83%E3%81%92%E6%B0%B4)のほか、[日没](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E6%B2%A1)や[日の出](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E3%81%AE%E5%87%BA)の時刻が[天文学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E6%96%87%E5%AD%A6)上の[計算](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%88%E7%AE%97)からずれるという形で現れる。

**音波の屈折による自然現象**

特定の[天候](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E5%80%99)に限って遠方の[鉄道](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84%E9%81%93)などの音がはっきり聞こえるというものがある。これは上空に[逆転層](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%86%E8%BB%A2%E5%B1%A4)が生じ、低温の空気では[音速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E9%80%9F)が下がるため、いったん上空に向かって進んだ音波が屈折し、再び地上に戻ってくることで説明できる。

**屈折を応用した機器**

光の屈折を応用した光学機器には、[レンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)（[顕微鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%A1%95%E5%BE%AE%E9%8F%A1)、[望遠鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%9B%E9%81%A0%E9%8F%A1)、[眼鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%BC%E9%8F%A1)など）、[プリズム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%BA%E3%83%A0)、[屈折糖度計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A7%E7%B3%96%E6%BF%83%E5%BA%A6)などがある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98>

1. **Ley de Snell:**

**スネルの法則**（スネルのほうそく）とは[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)一般の[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)現象における二つの媒質中の[進行波](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%80%B2%E8%A1%8C%E6%B3%A2&action=edit&redlink=1)の伝播速度と入射角・屈折角の関係を表した[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)のことである。**屈折の法則**（くっせつのほうそく）とも呼ばれる。この法則は[ホイヘンスの原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86)によって説明することができる。

**定義**

媒質Aにおける波の速度をv_A、媒質Bにおける波の速度をv_B、媒質Aから媒質Bへの入射角（またはBからAへの屈折角）を\theta_A、媒質Bから媒質Aへの入射角（またはAからBへの屈折角）を\theta_Bとすると、以下の関係が成立する。

 { \sin \theta_A \over {\sin \theta_B} } = {v_A \over {v_B} }

ここで、 {v_A \over {v_B} }の値を**媒質Aに対する媒質Bの相対屈折率**と定義し、これをn_{AB}（またはn_{A\rightarrow B}）で表す。以上のことをまとめると

{ \sin \theta_A \over {\sin \theta_B} } = {v_A \over {v_B} } = n_{AB}

となる。

**発展**

[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)が変化しても同一波の[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)は変化しないので、上の[法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%95%E5%89%87)をさらに発展させると、次のようになる。

 { \sin \theta_A \over {\sin \theta_B} } = {\lambda_A \over {\lambda_B} } = {v_A \over {v_B} } = n_{AB} 

\lambda_A：媒質Aでの[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2)の[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)

：媒質Bでの[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2)の[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)



**光波への発展**

[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)波は真空中も伝わる波なので、光波においては真空に対する物質固有の相対屈折率を**絶対屈折率**と定義する。ここで媒質Aの絶対屈折率をn_A、媒質Bの絶対屈折率をn_B、と表すと

{n_B \over n_A} = n_{AB} 

よって以上のことをまとめて

 { \sin \theta_A \over {\sin \theta_B} } = {\lambda_A \over {\lambda_B} } = {v_A \over {v_B} } = {n_B \over n_A} = n_{AB} 

という関係が成り立つ。

また、平行多重層における屈折については、媒質Xの絶対屈折率をn_Xと表すと、

 {n_A \sin \theta_A} = {n_B \sin \theta_B} = {n_C \sin \theta_C} = ... = 一定

という関係が成り立ち、これは2媒質間に他媒質があった場合でもそれを無視してこの法則を用いることができることを示す。

ここで注意しておきたいのは、**絶対屈折率は光波についてのみの概念**であるということである。（電磁波以外の波は真空中には存在しない。） また、複屈折に於ける

 { \sin \theta_A \over {\sin \theta_B} } 　は、常光線では角度によらない一定値であるが異常光線の方は角度に依存する。

狭義の定義ではスネルの法則とは屈折率 n は一定なのであるが、屈折率が角度の関数 n(\theta) である場合も（広義の）スネルの法則という。

**全反射**

以上の公式により、[臨界角](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%A8%E7%95%8C%E8%A7%92) (屈折が起こる最大の[入射角](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A5%E5%B0%84%E8%A7%92)) の大きさが屈折率によって定まることが分かる。 n_B > n_Aで光が媒質Bから媒質Aに入射するとき、

 \sin \theta_m = {\sin \theta_m\over {\sin 90^\circ}} = {1\over {n_{AB}} }={n_A\over{n_B}}

\theta_m: 臨界角(媒質Bから媒質Aへの入射角)

媒質BからAへの入射角を\theta_Bとすると

\theta_B > \theta_m

が全反射の起こる条件である。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87>

1. **Indice de Refracción:**

**屈折率**（くっせつりつ、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): refractive index[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87#cite_note-0)）とは、[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)中の[光速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)を[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)中の光速（より正確には[位相速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8%E9%80%9F%E5%BA%A6)）で割った値であり、物質中での[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)の進み方を記述する上での[指標](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%87%E6%A8%99)である。真空を1とした物質固有の値を**絶対屈折率**、2つの物質の絶対屈折率の比を**相対屈折率**と呼んで区別する場合もある。´

**概要**

光速は物質によって異なるため、屈折率も物質によって異なる。光がある物質から別の物質に進むときに境界で進行方向を変える現象（[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)）は、[スネルの法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)により屈折率と結び付けられている。

物質内においては[光速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F#.E7.89.A9.E8.B3.AA.E4.B8.AD.E3.81.AE.E5.85.89.E9.80.9F)が真空中より遅くなり、境界においては[入射角](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A5%E5%B0%84%E8%A7%92)によって速度に勾配が生じるために、進行方向が曲げられることになる。これは、[レース](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B9)中の[車](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BB%8A)が[路肩](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B7%AF%E8%82%A9)にはみ出した時に、[舗装](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%88%97%E8%A3%85)部分と未舗装部分との[路面抵抗](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%91%A9%E6%93%A6)の違いにより、外側に進行方向を曲げられて大きく[コースアウト](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%82%A2%E3%82%A6%E3%83%88&action=edit&redlink=1)や[スピン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%94%E3%83%B3)してしまうのと同じ理屈である。このため、境界に対して[垂直](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9E%82%E7%9B%B4)に入射すれば屈折は起こらない。

同じ物質であっても、屈折率は[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)によって異なる。この性質は[分散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E6%95%A3_(%E5%85%89%E5%AD%A6))と言われる。そこで、特に断らないときには、光学[材料](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9D%90%E6%96%99)の屈折率は波長589.3nmの光（[ナトリウムのD線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E7%B7%9A)）について示すのが慣習となっている。[可視光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E8%A6%96%E5%85%89)領域では、波長が短いほど屈折率が大きくなることが多い。これを[正常分散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%A3%E5%B8%B8%E5%88%86%E6%95%A3)という。これに対し、波長が短いほど屈折率が小さくなっている場合、これを[異常分散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%95%B0%E5%B8%B8%E5%88%86%E6%95%A3)という。また波長が可視光よりもずっと短い[軟X線](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%BB%9FX%E7%B7%9A&action=edit&redlink=1)・[X線](http://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A)領域では、物質の屈折率が1に近くなるため、扱うには専用の光学[部品](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%83%A8%E5%93%81)が必要になる。

分散を実際に観察するには、[プリズム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%BA%E3%83%A0)がよく用いられる。[白色光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BD%E8%89%B2%E5%85%89)を入射させると虹色に[分光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%85%89)されるのはこの分散という性質により引き起こされる。[吸収](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%90%B8%E5%85%89)のある物質の場合には、吸収率を[虚数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%99%9A%E6%95%B0)部に加えて[複素屈折率](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%A4%87%E7%B4%A0%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87&action=edit&redlink=1)で表すのが便利である。また、[異方性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%95%B0%E6%96%B9%E6%80%A7)のある物質の場合には屈折率は[偏光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%81%8F%E5%85%89)の向きによって異なり、[複屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E5%B1%88%E6%8A%98)が起こる。

**屈折率の値**

[MKSA単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/MKSA%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)あるいは[国際単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)（SI）では、**屈折率** : n は、真空中の[光速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F%E5%BA%A6) (c) を媒質中の光速度 (v)（より正確には位相速度）で割った値であらわす。

n=\frac{c}{v}=\sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}}

ここでμ、εは材質の[透磁率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E7%A3%81%E7%8E%87)、[誘電率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E7%8E%87)

μ0、ε0は真空の透磁率、誘電率

であらわされる。

吸収のある物質内では、複素屈折率の[実数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9F%E6%95%B0)部が1より小さくなり、位相速度が真空中の光速度よりも大きくなる場合があるが、[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)や[情報](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%83%85%E5%A0%B1)が位相速度で伝わるわけではないので、[相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)とは矛盾しない。近年、[フォトニック結晶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%88%E3%83%8B%E3%83%83%E3%82%AF%E7%B5%90%E6%99%B6)などが作成されて、特定の[周波数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%B3%A2%E6%95%B0)に対しては屈折率が負になる現象も観察されている。また、[フェムト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A7%E3%83%A0%E3%83%88)秒[パルスレーザー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%AB%E3%82%B9%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC)などの非常に強い[レーザー光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC%E5%85%89)を用いると[非線形光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%9E%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E5%85%89%E5%AD%A6)現象が起こり、屈折率が[光強度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%BC%B7%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)に依存するような現象も知られている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87>

1. **Dispersión:**

[光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6)において**分散**（ぶんさん、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): dispersion[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E6%95%A3_(%E5%85%89%E5%AD%A6)#cite_note-0)）とは、入射した[光線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%B7%9A)が[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)ごとに別々に分離される[現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E8%B1%A1)、またはその度合いのことをさす。[媒体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E4%BD%93)の[屈折率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87)が波長によって異なることによって発生する。

**透明な物質の分散**

一般に、[透明](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%8F%E6%98%8E)な媒体は絶縁体（[誘電体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%98%E9%9B%BB%E4%BD%93)）である（[導体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8E%E4%BD%93)だと[エネルギー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC)が[ジュール熱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%AB%E7%86%B1)として吸収されてしまう）。このとき、[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)中の[分子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%AD%90)が[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)の[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)によって[分極](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E6%A5%B5)するという[電気双極子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%8F%8C%E6%A5%B5%E5%AD%90)モデルで[近似](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BF%91%E4%BC%BC)できるが、[共鳴波長](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%B1%E9%B3%B4%E6%B3%A2%E9%95%B7&action=edit&redlink=1)が[紫外線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%AB%E5%A4%96%E7%B7%9A)域にあるため、[気体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%97%E4%BD%93)のような[密度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%86%E5%BA%A6)の低い媒質（屈折率 n \approx 1）では、[可視光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E8%A6%96%E5%85%89)域では以下の式で近似できることが知られている（[オーギュスタン＝ルイ・コーシー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%82%AE%E3%83%A5%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%B3%EF%BC%9D%E3%83%AB%E3%82%A4%E3%83%BB%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%82%B7%E3%83%BC)により求められたので**コーシーの分散公式**という）。以下で A, B, Cなどは[測定](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%AC%E5%AE%9A)によって決まる[定数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9A%E6%95%B0)である。


n - 1 = A \left( 1 + {B \over \lambda^2}\right)


密度の高い媒質では、[赤外](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%A4%E5%A4%96)域にある[イオン共鳴波長](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3%E5%85%B1%E9%B3%B4%E6%B3%A2%E9%95%B7&action=edit&redlink=1)を考慮した以下の近似式となる（**セルマイヤーの分散公式**）。


n^2 = n_\infty^2 + {A' \over \lambda^2 - \lambda_r^2} + {B' \over \lambda^2 - {\lambda_r'}^2}


または、\lambdaに関して[級数展開](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B4%9A%E6%95%B0%E5%B1%95%E9%96%8B&action=edit&redlink=1)した以下の式：


n^2 = A + {B\over \lambda^2} + {C\over \lambda^4} + \cdots - B' \lambda^2 - C' \lambda^4 - \cdots


いずれにせよ、可視光域では通常は波長が短くなるほど屈折率が大きくなり、これを**正常分散**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): normal dispersion）という。これに対して、共鳴波長付近では逆に屈折率が小さくなり、**異常分散**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): anomalous dispersion）という。

**光学ガラス**

基準となる2つの波長（たとえば[フラウンホーファー線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E7%B7%9A)のF'線（青）とC'線（赤））での屈折率の差を**平均分散**あるいは**主分散**と言い、他の2つの波長の屈折率の差は**部分分散**と呼ぶ。部分分散を主分散で割った値は**部分分散比**という。通常の光学ガラスは[アッベ数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%83%E3%83%99%E6%95%B0)を横軸に、部分分散比を縦軸にとった[グラフ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95)で、ある[直線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B4%E7%B7%9A)上に乗る性質があり、**正常部分分散**という。これに対して直線上に乗らないものを**異常部分分散**という（**異常分散性**あるいは**異常分散**とも言う）。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E6%95%A3_(%E5%85%89%E5%AD%A6)>

1. **Poralización:**

**偏光**（へんこう、polarization）は、[電場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%A0%B4)および[磁場](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E5%A0%B4)が特定の（振動方向が規則的な）方向にのみ[振動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%AF%E5%8B%95)する[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)のこと。[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)の場合は**偏波**（へんぱ）と呼ぶ。光波の偏光に規則性がなく、直交している電界成分の位相関係がでたらめな場合を非偏光あるいは[自然光](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%87%AA%E7%84%B6%E5%85%89&action=edit&redlink=1)と呼ぶ。 光電界の振幅は直交する2方向の振動成分に分解できることが分かっている。普通の[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)は、あらゆる方向に振動している光が混合しており、偏光と自然光の中間の状態（部分偏光）にある。このような光は一部の[結晶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%90%E6%99%B6)や[光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6)フィルターを通すことによって偏光を得ることができる。

**物理現象としての偏光**

光は[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)であり、電磁場は進行方向と垂直に振動する[横波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A8%AA%E6%B3%A2)である。このことは[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)を解くことにより得られる。偏光は一般に楕円偏光であるが、直線偏光、円偏光もある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%81%8F%E5%85%89>

1. **Fotoelasticidad:**

**光弾性**（こうだんせい、**Photoelasticity**）とは、外力を受けた弾性体が複屈折を起こす性質[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%BC%BE%E6%80%A7#cite_note-0)。光弾性の性質を持つ物体を光弾性体という。

光弾性は、材料の[応力](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%9C%E5%8A%9B)分布を解析する実験法としてよく使われる。単純な計算で求めた応力分布と比較して、かなり正確な分布が得られる。材料の臨界応力を求めるのに重要な手法であり、複雑な形状の物体のどこに応力が集中するかを確かめるためにもよく使われる。

**歴史**

光弾性を発見したのは[1816年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1816%E5%B9%B4)、イギリスの[ブリュースター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%87%E3%82%A3%E3%83%B4%E3%82%A3%E3%83%83%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%AA%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%BC)であり、光弾性体にガラスを用いたものであった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%BC%BE%E6%80%A7#cite_note-musashi-1)。光弾性の本格的な研究は、20世紀初頭、[ロンドン大学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%B3%E5%A4%A7%E5%AD%A6)のコーカー(E.G.Coker)とファイロン(L.N.G Filon)が発展させた。コーカーは[セルロイド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BB%E3%83%AB%E3%83%AD%E3%82%A4%E3%83%89)を使用することで、光弾性の発現を大きく向上させた[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%BC%BE%E6%80%A7#cite_note-musashi-1)。コーカーの研究は1930年、ケンブリッジ大学出版([en](http://en.wikipedia.org/wiki/Cambridge_University_Press))から『光弾性論』（*Treatise on Photoelasticity*）として出版され、この分野における標準教科書となった。その後10年の間にロシア語、ドイツ語、フランス語に翻訳された。

この手法はさまざまな分野に応用された。技術も進歩し、簡便な測定器も開発され、3次元の応力分布を求める測定器も開発された。応力研究には欠かせない手法となり、光弾性を専門とする研究所は教育、産業の分野に大きく貢献した。

[LED](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E5%85%89%E3%83%80%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%83%89)を利用したデジタル偏光器の出現により、加重と共に刻々と変わっていく応力の変化も測定可能となり、動的光弾性の研究も進んだ。動的光弾性は材料の複雑な破壊現象の研究に貢献した。

**原理**

光弾性体とは、外力を加えると、歪の大きさと向きに応じて、[複屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%87%E5%B1%88%E6%8A%98)の大きさと向きが変化する物質である。そのため、外力を加えた光弾性体に[直線偏光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%81%8F%E5%85%89)を当てて偏光器で観察すると、歪の大小によって複屈折した偏光に[位相差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)が生じ、[干渉縞](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))となって現れる。

厚さ t の光弾性体にさまざまな方向から外力が加えられ、その力が主応力 \sigma_{11}と \sigma_{22} で表せるとする。その時、分かれた2つの偏光の[位相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)差 R は、次の式で表すことができる。

R = Ct( \sigma_{11} - \sigma_{22})\ 

この定数Cを**光弾性定数**という。このように理論化したのは[フレネル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%82%AE%E3%83%A5%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB)であった[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%BC%BE%E6%80%A7#cite_note-musashi-1)。通過後の偏光の度合いを偏光器で測定することにより、光弾性体に加わった応力の分布が分かる。

複屈折の性質を示す物質はいくつかあるが、光弾性の測定に使えるのは、複屈折の程度が応力で大きく変化するものに限られる。そのため、光弾性の研究には、それが発現しやすい材料を探すことがまず重要となる。

同じく重要なのが、模型の設計である。光弾性による応力測定の実験は、光弾性体でしか行えないため、必ず模型を作って測定することになる。その際、作った模型と実際の構造物との応力分布が同じになるよう考慮しなければ、実験する意味が無くなってしまう。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%BC%BE%E6%80%A7>

1. **Principio de Huygens:**

**ホイヘンス＝フレネルの原理**（ホイヘンス＝フレネルのげんり、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E):Huygens–Fresnel principle）[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9%EF%BC%9D%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86#cite_note-0)、または単に**ホイヘンスの原理**（ホイヘンスのげんり、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Huygens' principle）は[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)の伝播問題（[遠方場の極限](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC%E5%9B%9E%E6%8A%98)や[近傍場の回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%E5%9B%9E%E6%8A%98)や）を解析する手法である。ホイヘンス＝フレネルの原理によると、前進波の波面の各点が二次波とよばれる新しい波の波源となり、全体としての前進波は（既に伝播した媒質から生じる）全ての二次波を重ね合わせたものとなる。この波の伝播の考え方は[回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98)のような様々な波動現象の理解を助ける。

例えば、2つの部屋が開いた出入口のみで繋がっており、一方の離れた部屋の角で音が鳴ったとする。するともう一方の部屋にいる人には出入口の所で音が鳴ったように聞こえる。2つ目の部屋のみを考えると、出入口の地点での振動する空気は音源である。障害物の端を通る光にも同じことがいえるが、可視光は波長が短いために観測が難しい。

ホイヘンス＝フレネルの原理は1678年に[オランダ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%80)の[物理学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85)[クリスティアーン・ホイヘンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%82%A2%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9)が元となるホイヘンスの原理を発見し、1690年に著書"*Traite de la lumiere*"に記した[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9%EF%BC%9D%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86#cite_note-1)。オリジナルのホイヘンスの原理では後進波が存在しないことを説明できなかったが、[フランス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%B9)の物理学者[オーギュスタン・ジャン・フレネル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%BC%E3%82%AE%E3%83%A5%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%82%B8%E3%83%A3%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB)が1836年に修正を加えてこの問題点を解決した。その後1882年に[グスタフ・キルヒホフ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B0%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%95%E3%83%BB%E3%82%AD%E3%83%AB%E3%83%92%E3%83%9B%E3%83%95)が[ヘルムホルツ方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%A0%E3%83%9B%E3%83%AB%E3%83%84%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)を基礎とした[フレネル＝キルヒホフの回折理論](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%EF%BC%9D%E3%82%AD%E3%83%AB%E3%83%92%E3%83%9B%E3%83%95%E3%81%AE%E5%9B%9E%E6%8A%98%E7%90%86%E8%AB%96&action=edit&redlink=1)にて理論的な説明を与えた。

**ホイヘンスの原理**

オリジナルのホイヘンスの原理では、伝播する[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)の次の瞬間の波面の形状を考える時、波面のそれぞれの点から球面状の二次波（素元波）が出ていると考える。この二次波の[包絡面](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%85%E7%B5%A1%E9%9D%A2)が次の瞬間の新たな波面となる。

ホイヘンスの原理は直感的に[回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98)の現象をうまく説明できる。しかし、厳密な回折の計算を行う時、[フレネル回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%E5%9B%9E%E6%8A%98)の式から回折現象は干渉の一部であるとみなされるようになった。またあくまで直感的なものであったので、「波の進行方向の後ろの素元波の包絡線に、なぜ次の波面（後進波）ができないのか?」などのホイヘンス自身にも説明できない問題点があった。

この問題点は後にオーギュスタン・ジャン・フレネルが二次波の干渉（重ね合わせ）を考慮することで解決した。現在では単に「ホイヘンスの原理」というと、この問題点を解決したホイヘンス＝フレネルの原理を指すことが多い。

**単スリット回折**

ホイヘンスの原理の一般的な応用は、[平面波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E9%9D%A2%E6%B3%A2)（光、ラジオ波、X線や電子線など）が任意の[絞り](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%9E%E3%82%8A_(%E5%85%89%E5%AD%A6))を通過する場合である。ホイヘンスの原理によれば、穴のそれぞれの点が[点源](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%82%B9%E6%BA%90&action=edit&redlink=1)として働き、点源からは全ての方向に球面状に光が広がる。絞り上の全ての点源からの波の和が積分モデルや数値モデルで計算される。

単スリット回折を考える。単スリットを通して離れたスクリーンへ光を照射する。ここでスクリーン上のどの地点に暗い縞が現れるかを計算しよう。次にこの幅広いスリットをより多くの狭いスリット（サブスリット）で置き換え、それぞれのスリットによって生成される波を加える。2つの小さなスリットの場合には光路が\lambda/2だけ異なる場合に（位相が180°異なり）干渉して弱め合う。3つのスリットによる3つの波の場合についても[位相ベクトル](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%BD%8D%E7%9B%B8%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB&action=edit&redlink=1)やそれに似た波の重ね合わせの計算により、位相が120°だけ異なるときに打ち消し合い、よってスクリーン上の点とスリットの光路差は\lambda/3だけ異ならなければならない。4つのスリットの場合も同様である。1つの幅広いスリットを無限のサブスリットで近似する極限では、スリットの端からの光路差が正確に\lambdaだけ異なる場合に干渉して完全に打ち消し合う（よってスクリーンには暗い縞が現れる）。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%82%A4%E3%83%98%E3%83%B3%E3%82%B9%EF%BC%9D%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86>

1. **Optica:**

**光学**（こうがく、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): optics[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6#cite_note-0)）は、[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)の振舞いと性質および光と[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)の[相互作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E4%BA%92%E4%BD%9C%E7%94%A8)について[研究](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A0%94%E7%A9%B6)する、[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)のひとつの部門。[光学現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6%E7%8F%BE%E8%B1%A1)を説明し、またそれによって裏付けられる。

光学で通常扱うのは、[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)のうち光と呼ばれる[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)域（[可視光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%AF%E8%A6%96%E5%85%89)、あるいはより広く[赤外線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%B5%A4%E5%A4%96%E7%B7%9A)から[紫外線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%AB%E5%A4%96%E7%B7%9A)まで）である。光は電磁波の一種であるため、光学は[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)の一部門でもあり、[電波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E6%B3%A2)や[X線](http://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A)・[マイクロ波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD%E6%B3%A2)などと類似の現象がみられる。光の[量子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90)的性質による光学現象もあり、[量子力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E5%AD%A6)に関連するそのような分野は[量子光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%85%89%E5%AD%A6)と呼ばれる。

**光学の分野**

光学の分野は、独自の[学会](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AD%A6%E4%BC%9A)を持っており、また独自の学術集会を開催している。

純粋科学としての光学は**光科学**または**光物理**（[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): photophysics[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6#cite_note-1)）と呼ばれる。応用指向の光学は**応用光学**または**光工学**と呼ばれ、特に[照明](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%85%A7%E6%98%8E)に関する応用は[**照明工学**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%85%A7%E6%98%8E%E5%B7%A5%E5%AD%A6)と呼ばれる。それぞれの分野は、その応用・[技術](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%80%E8%A1%93)・[指向性](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%87%E5%90%91%E6%80%A7)などが異なりがちである。光工学における、近年進展が著しい分野には、**フォトニクス**あるいは[**光エレクトロニクス**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E3%82%A8%E3%83%AC%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AD%E3%83%8B%E3%82%AF%E3%82%B9)（オプトエレクトロニクス）と分類される分野もある。 これらの分野と「光学」との間の境界はしばしば不明瞭であり、[地域](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E5%9F%9F)や[産業](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%A3%E6%A5%AD)分野によって異なった使われ方をする。

光の実世界への応用は幅広いため、光学は他の[科学技術](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A7%91%E5%AD%A6%E6%8A%80%E8%A1%93)の分野と相互に関連しあう傾向がある。このため、[電子技術](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E6%8A%80%E8%A1%93)・物理学・[心理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%83%E7%90%86%E5%AD%A6)・[薬学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%96%AC%E5%AD%A6)などいろいろな分野の一部として光学に出会うことがある。

**幾何光学**

**幾何光学**は、光の[伝播](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BC%9D%E6%92%AD)を[光線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E7%B7%9A)に基づいて記述する。光線は異なる[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)の接合面で折れ曲がり、また媒質の[屈折率](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98%E7%8E%87)の位置による変化によって曲がる。

* [幾何光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%BE%E4%BD%95%E5%85%89%E5%AD%A6)
* [直進](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%9B%B4%E9%80%B2&action=edit&redlink=1) - [反射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%B0%84) - [屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)
* [ガウス光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%AC%E3%82%A6%E3%82%B9%E5%85%89%E5%AD%A6&action=edit&redlink=1)
* [色収差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2%E5%8F%8E%E5%B7%AE)
* [ザイデル収差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B6%E3%82%A4%E3%83%87%E3%83%AB%E5%8F%8E%E5%B7%AE)
* [収差論](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8F%8E%E5%B7%AE%E8%AB%96&action=edit&redlink=1)
* 応用分野
* [レンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)
* [鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8F%A1)
* [プリズム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%BA%E3%83%A0)

**波動光学**

**波動光学**は、光を[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)として扱い、諸現象を説明する。幾何光学の光線は[物理光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%85%89%E5%AD%A6)の波面に[垂直](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9E%82%E7%9B%B4)である。とくに、光は波動の中でも電磁波であるということを重視し、[マクスウェル方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)に基づいて光の性質を論ずる光学を[電磁光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E5%85%89%E5%AD%A6)という。電磁光学は波動光学の一部とみなされることもあるし、波動光学よりも一歩進んだ光学とみなされることもある。

* [波動光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95%E5%85%89%E5%AD%A6)
* [回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98)
* [干渉 (物理学)](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))
* [分散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E6%95%A3)
* [偏光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%81%8F%E5%85%89)
* [コヒーレンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B9)
* [散乱](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%A3%E4%B9%B1)
* [フーリエ光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%95%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%82%A8%E5%85%89%E5%AD%A6&action=edit&redlink=1)
* [回折光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%9B%9E%E6%8A%98%E5%85%89%E5%AD%A6&action=edit&redlink=1)
* 応用分野
* [光学レンズ設計](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%AD%A6%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA%E8%A8%AD%E8%A8%88&action=edit&redlink=1)

**現代光学**

**現代光学**とは、[20世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/20%E4%B8%96%E7%B4%80)に広まった光の科学と技術の領域を指す。これらの光科学の領域は、光の電磁気学的および量子力学的性質に関連する。

* [量子光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E5%85%89%E5%AD%A6)
* [光子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%90)
* [ジョーンズ計算](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%82%BA%E8%A8%88%E7%AE%97&action=edit&redlink=1)
* [レーザー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC)
* [結晶光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B5%90%E6%99%B6%E5%85%89%E5%AD%A6&action=edit&redlink=1)
* [非線形光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%9E%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E5%85%89%E5%AD%A6)
* [統計光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%85%89%E5%AD%A6&action=edit&redlink=1)
* [ホログラフィー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%BC)
* [フォトニック結晶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%88%E3%83%8B%E3%83%83%E3%82%AF%E7%B5%90%E6%99%B6)
* [非結像光学](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9D%9E%E7%B5%90%E5%83%8F%E5%85%89%E5%AD%A6&action=edit&redlink=1)
* [薄膜光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%96%84%E8%86%9C%E5%85%89%E5%AD%A6)
* [光学パターン認識](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%AD%A6%E3%83%91%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%83%B3%E8%AA%8D%E8%AD%98&action=edit&redlink=1)

**他の光学分野**

* [色](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2)
* [照明工学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%85%A7%E6%98%8E%E5%B7%A5%E5%AD%A6)
* [パターン認識](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%83%B3%E8%AA%8D%E8%AD%98)

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6>

1. **Lente:**

**レンズ**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): lens）とは、[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)を[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)させて[発散](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E6%95%A3)または[集束](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%9B%86%E6%9D%9F&action=edit&redlink=1)させるための[光学素子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6%E7%B4%A0%E5%AD%90)である。通常は、両側面を[球面](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%83%E9%9D%A2)と球面または球面と[平面](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E9%9D%A2)とした[透明体](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%80%8F%E6%98%8E%E4%BD%93&action=edit&redlink=1)である。用途によっては、片面または両面を球面ではなくした[非球面レンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%9E%E7%90%83%E9%9D%A2%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)も利用される。

実用上の多くのレンズは1つの軸（[光軸](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E8%BB%B8)）のまわりに[回転対称](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2%E5%AF%BE%E7%A7%B0)な面でできていて、以下の説明では主にこの場合を扱う。回転対称でない例として[乱視](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B9%B1%E8%A6%96)用めがねレンズ（[トーリックレンズ](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%88%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA&action=edit&redlink=1)）、棒状の半円柱形ルーペなどがある。入射した平行[光束](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%9D%9F)を収束させる働きを持つものを[**凸レンズ**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%87%B8%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)、発散させるものを[**凹レンズ**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%87%B9%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)という。通常、レンズ中央部は凸レンズでは厚く、凹レンズでは薄い。

[素材](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B4%A0%E6%9D%90)としては[ガラス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%A9%E3%82%B9)、[プラスチック](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%B9%E3%83%81%E3%83%83%E3%82%AF)、[蛍石](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%9B%8D%E7%9F%B3)などが用いられる。

[顕微鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%A1%95%E5%BE%AE%E9%8F%A1)として微細な世界とそこに潜む微細な[生命](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%9F%E5%91%BD)を発見させたり、[望遠鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%9B%E9%81%A0%E9%8F%A1)として[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)外の世界を見せるなど、レンズは[科学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A7%91%E5%AD%A6)の発展に大きく関与している。

[写真撮影用のレンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%99%E7%9C%9F%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)を単にレンズと言うことも多い。また、[眼](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%BC)の[水晶体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E6%99%B6%E4%BD%93)もレンズと呼ばれる。

レンズの[語源](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%9E%E6%BA%90)は[レンズ豆](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA%E3%83%9E%E3%83%A1)（ヒラマメ、[ラテン語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%83%86%E3%83%B3%E8%AA%9E): *lens*）である。当初作成されたレンズは凸レンズであり、その形状がレンズ豆に似ていたことからこの名前が付いた。なお、第二次世界大戦中は英語の使用を避けるため、漢字の透鏡が使われた。現在、日本でレンズのことを透鏡と呼ぶことはないが、眼鏡、拡大鏡、顕微鏡、望遠鏡のように、レンズで作られた道具に鏡という漢字が使われることが多い

**凸レンズ**

**基本的性質**

光がガラスなど透明な[物質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA)に入るときに[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)し、また出るときにも屈折する。回転対称なガラスで軸から離れるほど内側に屈折するように傾けた形状（ふちより中央が厚い形状）にすれば、光が集まるようにすることができる。これを**凸レンズ**（とつレンズ、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E):convex lens）という。

一枚のレンズについては、その回転対称軸を[**光軸**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E8%BB%B8)と呼ぶ。以下ではレンズに入射する光束が光軸付近の十分細い領域を通る（[近軸近似](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BF%91%E8%BB%B8%E8%BF%91%E4%BC%BC)が成り立つ）とする。光軸に平行な光線は凸レンズを通過したのち一点に集まる。この点を[**焦点**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A6%E7%82%B9_(%E5%85%89%E5%AD%A6))と呼ぶ。また、レンズに入る前の光線とレンズから出て焦点を通る光線とが交わる点から光軸上に下ろした垂線の足を[**主点**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%BB%E7%82%B9)と呼ぶ。主点から焦点までの距離を[**焦点距離**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A6%E7%82%B9%E8%B7%9D%E9%9B%A2)と呼ぶ。平行光をレンズの前後どちら側から入れるかに対応して二つの焦点が存在することになり、主点も二つ存在する。ただし、焦点距離は前後どちらも等しい。また、レンズの厚みが無視できる程度に薄いと仮定（[薄レンズ近似](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%96%84%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA%E8%BF%91%E4%BC%BC)）した場合、二つの主点は一致する。

凸レンズには主に以下のような性質がある（図1-1）。

* + 1. 光軸に平行な光線は凸レンズを通ったのち焦点を通る
    2. 焦点から出た光線は凸レンズを通ったのち光軸に平行な光線となる
    3. レンズの[節点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AF%80%E7%82%B9)を通る光は角度を変えずに進む

**実像と虚像**

物側焦点より遠い物体上の点（[物点](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%89%A9%E7%82%B9&action=edit&redlink=1)）から出た光（図1-2）について考えると、

* + 1. 物から軸に平行にレンズに向かう光は、屈折されたあと像側焦点を通る光になる
    2. 物側焦点を通ってレンズへ向かう光は、屈折されたあと軸に平行な光になる

結果として物点から出てレンズへ向かう光はレンズの反対側の一点（[像点](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%83%8F%E7%82%B9&action=edit&redlink=1)）を通る。軸からの物点の高さと像点の高さとの比は一定となる。像面に[スクリーン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%82%AF%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%B3)を置けば物体が逆さまに拡大・縮小された像が投影されることになる。このように物点からの光が像点で交わってできる像を[**実像**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%9F%E5%83%8F)と呼ぶ。

また、物側焦点より近い物体上の点から出た光（図1-3）について考えると、

1. 物体から軸に平行にレンズに向かう光は、屈折されたあと像側焦点を通る光になる
2. 節点を通る光は、レンズを通る前後で角度が変わらない（薄レンズ近似では主点と節点が一致するため、ただ直進する）

結果として、実際には物点から出てレンズへ向かった光をレンズの反対側から見ると、あたかも物点より遠くの一点から出たかのように進む。このように物点からの光が像点で交わらずにできる像を[**虚像**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%99%9A%E5%83%8F)と呼ぶ。虚像は、[ルーペ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%9A)のようにレンズを覗き込むことで[観察](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%B3%E5%AF%9F)できる。虚像の場合にも軸からの物点の高さと像点の高さとの比は一定となる。実像の場合と違い、光が実際に1点に集まるわけではないので、スクリーンを置いても像を投影することはできない。レンズを覗いて虚像を観察できるのは、[目](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%AE)が[網膜](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B6%B2%E8%86%9C)上に実像を結像させるからである。

**レンズの公式**

焦点距離 *f* のレンズ（*f* は凸レンズでは正、凹レンズでは負とする）について、 主点を原点とした光軸方向の座標を *s*1 (通常は負)、像の光軸方向の座標を *s*2 とすると

1/*s*2 = 1/*f* + 1/*s*1

という関係（[レンズの公式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA%E3%81%AE%E5%85%AC%E5%BC%8F)）が成り立つ[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-Smith_MOE-0)。より広く知られた形の式

1/*a* + 1/*b* = 1/*f*

は、*s1, s2* の[絶対値](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%B6%E5%AF%BE%E5%80%A4)をそれぞれ*a*, *b* とおいた（距離として表した）ものである。

物体が物側焦点より外側にある（つまり |*s1*| > *f*）ならば倒立実像がレンズに関し物体と反対側 (''*s2* > 0) にでき、物側焦点より内側にある（|*s1*| < *f*）ならば正立虚像が物体と同じ側 (*s2* < 0) にできる。像と物の大きさの比（横倍率） *m* は

*m* = *s2*/*s1*

で表される（*m* は実像では負、虚像で正である）[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-Smith_MOE-0)。

また、上記レンズの公式の別の表現として、前側焦点と物との座標差を *z* 、後側焦点と像との座標差を *z'* とおくと以下のニュートン形式の式が成り立つ[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-Smith_MOE-0)。

*-zz'* = *f* 2  
*m* = -*z'* /*f* = *f*/*z*

**ルーペ**

**ルーペ**（虫眼鏡、[独](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84%E8%AA%9E): Lupe）は、凸レンズでできる拡大された虚像を目視観察する[道具](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%81%93%E5%85%B7)である。ルーペの[倍率](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%80%8D%E7%8E%87&action=edit&redlink=1)は、ルーペ無しで距離 *L* のところから物体を見たときと、ルーペを通して見たときの虚像の見かけの大きさ（[視角](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A6%96%E8%A7%92)）の比であらわす。すなわち、ルーペ無し・有りのときの見込み角度をそれぞれ α、β とすると、倍率 *M* は M = \tan \beta / \tan \alpha と定義される。ただし、[近軸近似](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BF%91%E8%BB%B8%E8%BF%91%E4%BC%BC)の成り立つ範囲では *M* ≈ β/αとなる。距離 *L* としては、[明視距離](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%98%8E%E8%A6%96%E8%B7%9D%E9%9B%A2&action=edit&redlink=1)（慣習的に 250 [mm](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%AA%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB) とされる）が用いられる[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-1)。

倍率は物体とレンズと目の位置関係により変化する。レンズの焦点距離 *f*、前側焦点から物体までの距離を *x*、後側焦点から目までの距離を *z* とすると、倍率 *M* は

 M = {L \over f}\cdot {1 \over {1 + (xz / f^2)}} 

となる[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-2)[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-tsuruta1988-3)。

手持ち式のルーペの場合、主に以下のような使い方がある[[5]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-4)。

* 物体をレンズの前側焦点に置く（*x* = 0）。このときレンズを通した光は平行光になるので、目の位置に関わらず虚像は無限遠にあり倍率は一定で、*M* = *L*/*f* となる。
* 目をできるかぎりレンズに近づけ（*z* = -*f*）、かつ虚像の見かけの位置が目から *L*= 250 mm となるように物体を置く。このとき *M* = (*L*/*f*) + 1 となる。さらに物体をレンズに近づければ倍率は上がるが、実際は目の焦点があわせられる範囲で制約される。
* 目を後側焦点に置く（*z* = 0）。このとき倍率は一定で *M* = *L*/*f* となり物体の位置によらない。

商品としてのルーペには *M*0 = 250/*f* を倍率として表示している場合[[6]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-5)と、 *M* = (250/*f*) + 1 = *M*0 + 1 を表示している場合[[7]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-6)、あるいはそのいずれでもない場合（目と物体の間の距離を 250 mm としてレンズをその中間に置いたときの倍率[[8]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-7)、など）がある。

読書用ルーペなどで片面が平らな平凸レンズをもちいたものでは、倍率は表裏どちらでも同じだが、凸側を物体に向けたほうが[非点収差など](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B6%E3%82%A4%E3%83%87%E3%83%AB%E5%8F%8E%E5%B7%AE)が小さく、見やすくなる[[9]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-8)。倍率が大きいルーペ（*M*0 > 1）で両眼で観察できるほど視野を広くするには非球面レンズが必要となる[[10]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA#cite_note-9)。

頭に装着して用いるルーペは**ヘッドルーペ**と呼ばれ、両手を用いた細かい作業などに用いられる。

**凹レンズ**

**基本的性質**

凸レンズと逆に光を発散させるレンズは**凹レンズ**（おうレンズ、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): concave lens）と言う。レンズの両面の形により、両凹、平凹、凸凹 （[メニスカス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%8B%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%82%B9)凹）の各種がある。

凹レンズを通る光（図2-1）には主に以下のような性質がある。

軸に平行な光線は凹レンズを通った後、入射側にある軸上の一点（[焦点](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%84%A6%E7%82%B9_(%E5%85%89%E5%AD%A6))）から出たかのように広がって進む（発散）

レンズの後方の焦点に向かう光線は凹レンズを通過した後は軸に平行に進む

節点を通る光線は凸レンズ同様に角度を変えずに進む

凹レンズでできる像は常に正立[虚像](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%99%9A%E5%83%8F)で、物体と同じ側にある。焦点距離を負の数値であらわす（*f* < 0）と、凸レンズの場合と同じレンズの公式が成り立つ。

**凹凸レンズ**

おうとつレンズ(英:meniscus lens)は、英語名のまま、メニスカスレンズとも呼ばれる。レンズの片面が凸、もう片面が凹になったレンズで、二つの面の相対的な曲率の違いに応じて中央が周囲より厚い場合は凸レンズとして、逆の場合は凹レンズとして働く。眼鏡の場合は単体で、また光学機器で他のレンズと組み合わせて使用される。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA>

1. **Anillos de Newton:**

**ニュートン環**（ニュートンかん、Newton's rings）は接触させた2つの[凸レンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%87%B8%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)もしくは凸レンズと透明な板に光を当てたときに観察される同心円状のリングである。**ニュートン・リング**ともいう。これらが作る隙間の両面で反射される[光波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%B3%A2)の[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))によって起こるとして説明できる。

**概要**

ニュートン環は接触点を中心とした同心円状の多数のリングとして表れ、その幅は内側は広く外側ほど狭くなる。凸レンズは湾曲が少ない（[曲率半径](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9B%B2%E7%8E%87%E5%8D%8A%E5%BE%84)が大きい）ものの方がリングが大きくなり観察しやすい。反射光を観察した場合、中心は必ず暗い領域となる。太陽光のような白色光だとリングは虹のように色づいて見え、中心に近いところでは明るいリングの内側が青、外側が赤っぽくなる。ただしこの並びは周辺では不明瞭となる。光が単色光の場合にははっきりした明暗のリングが見え、波長の長い赤い光では大きく、短い青い光では小さくなる。

こうしたいわゆる**干渉縞**は材質にはよらず、単に2つの透明な物質の間に光の波長に比較しうる程度の細い隙間があれば日常的に観察できる。隙間とは逆に極めて薄い膜でも本質的には同様で、ニュートンは上述のニュートン環の色の並びが、箱の中にそっと置いた[石鹸の泡](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%9C%E3%83%B3%E7%8E%89)の表面で観察される虹色と正確に同じ順序をもつことに気づいていた[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E7%92%B0#cite_note-0)。類似した干渉縞は、はりあわせたプラスチックの隙間や、水面に薄く広がった油膜、薄いラップフィルムなどでも観察できる。ニュートン環はこうした波の性質をもつ光の干渉の効果を簡単な道具で端的に示すことができるものであるため、教育上も有用であり干渉や[イリデッセンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%AA%E3%83%87%E3%83%83%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%82%B9)の典型例としてよく取り上げられる。

**リングの位置**

ニュートン環の明暗のリングが接触点からの距離に関してどのように現れるかを考えてみる。平板なガラスの上に凸レンズを置き、上方から光が差す場合、問題となる反射光の干渉は、わずかな隙間を作る凸レンズの下面とガラスの上面とで反射した光によって起きる。光が真上から差し、同時に反射光を真上から観察する簡単な場合には、屈折の効果を無視すれば観察される干渉光の振幅は差し込む光の波長 λ とレンズとガラスとの垂直方向の間隔 *d* とから決まることになる。

下側のガラス上面からの反射では光の波の[位相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)が反転すると考えられているので、接触点、すなわち *d* = 0 では（両者の材質が同じならば）両者の波は打ち消しあい反射光は現れない。すなわち中心には常に暗い領域ができる。この中心から遠ざかって光が強めあい強い反射光が最初に現れるのは、光は隙間を往復するため隙間が *d* = λ / 4 のときとなる。その倍の *d* = λ / 2 となれば再び波は打ち消しあい、これは最初の暗いリングに相当する。このようにして、隙間の幅 *d* = *m* λ / 4 （*m* は[自然数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E6%95%B0)）において *m* が偶数 (0, 2, 4, ...) なら暗いリングに、奇数 (1, 3, 5, ...) なら明るいリングに対応することになる。

球面をなす一般的な凸レンズの表面は接触点からの距離 *r* の4次以上の項を無視すれば、近似的に[パラボラ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%A9%E3%83%9C%E3%83%A9)面とみなせる。これは一般に凸レンズの面の[曲率半径](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9B%B2%E7%8E%87%E5%8D%8A%E5%BE%84)を *R* とするなら、*d* ≈ *r*2/2*R* と表せる[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E7%92%B0#cite_note-1)。よって、

r \approx \sqrt{\frac{m \lambda R}{2}}

であり、ここで *m* が奇数のときの *r* に明るいリングが、偶数のときの *r* に暗いリングが現れる。

例えば、光の波長を λ = 570 nm とし、レンズの曲率半径を *R* = 30 m とすると、一番内側の明るいリング (*m* = 1) の半径はおよそ 2.9 mm となる。ニュートンは逆に、こうした各リングの位置 *r* を精密に測定しその2乗が（レンズを押さえつけすぎて変形していなければ）等差数列となっていることを見出して、隙間の幅に関して周期的に反射と透過を行っていることに気づいている[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E7%92%B0#cite_note-2)。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E7%92%B0>

1. **Interferometro de Michelson:**

**マイケルソン干渉計**は[アルバート・マイケルソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3)が発明した最も一般的な[干渉法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89%E6%B3%95)用光学機器である。[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)のビームを2つの経路に分割し、反射させて再び合流させることで[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))縞を生み出す。2つの経路の長さを変えたり、経路上の物質を変えたりすることで、様々な干渉縞を検出器上に生成する。マイケルソンと[エドワード・モーリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%89%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC)は、この干渉計を使って有名な[マイケルソン・モーリーの実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93) (1887) を実施した。この実験によって様々な[慣性系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB)において[光速](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)が一定であることが示され、[エーテル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%83%86%E3%83%AB_(%E7%89%A9%E7%90%86))説が否定されることになった。

**構成**

マイケルソン干渉計には精密に磨かれた2つの鏡がある。光源から単色光を発し、それが光線に対して斜めに置かれた[ビームスプリッター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%B9%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%BF%E3%83%BC)にあたる。ビームスプリッターはいわゆるハーフミラーになっていて、光線の一部はそのまま透過して一方の反射鏡に向かい、別の一部は反射されてもう一方の反射鏡に向かう。それぞれの反射鏡で反射された光線はビームスプリッターに戻って合流し、一部は光源とは異なる方向へ進む。そこに検出器を置いておくと干渉縞が観測できる。

光源から検出器までの経路は2つある。一方は[ビームスプリッター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%B9%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%BF%E3%83%BC)で反射されて図の上の方の鏡に向かい、[反射](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8D%E5%B0%84)されてビームスプリッターを透過して検出器に向かう。もう一方はビームスプリッターを透過して右端の鏡に向かい、反射された後ビームスプリッターで反射されて検出器に向かう。単色光源から発せられた並行は光線がビームスプリッターに当たったとき、反射する光線と透過する光線は同じ強さになることが基本である。どちらの光線も[可干渉光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B9)である。つまり、マイケルソン干渉計は1つの光源からの光を分割することで可干渉光を生み出している。

2つの経路の長さが[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)の整数倍（0を含む）の場合、2つの光線は互いに強め合うように[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))し、検出器は強い信号を検出する。経路長の差が波長の整数倍と2分の1の場合（例えば、0.5波長、1.5波長、2.5波長など）、2つの光線は互いに弱め合うように干渉し、検出器は弱い信号を検出する。これは一見すると[エネルギー保存の法則](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E4%BF%9D%E5%AD%98%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87)に反しているように思われる。しかし実際にはビームスプリッターにおいて弱められた部分のエネルギーが強められた部分に再分配されており、エネルギーは保存されている。干渉の効果により、検出器に向かう反射光と光源の方向に戻る光の配分が変化する。

1800年代末には、干渉縞を得るために放電灯、フィルター、細いスリットや針穴を使っていた。マイケルソン・モーリーの実験では、光源として星明かりを使ったこともある。星明りは時間的[コヒーレンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B9)がない光だが、点光源であるため空間的コヒーレンスがあり、干渉縞を生成できる。

**用途**

マイケルソン干渉計のよく知られている応用としてマイケルソン・モーリーの実験があり、[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)の証拠を提供することになった。しかし、他にも用途がある。

マイケルソン干渉計は調整可能な狭帯域フィルターとして、あるいは[フーリエ変換分光](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%95%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%82%A8%E5%A4%89%E6%8F%9B%E5%88%86%E5%85%89&action=edit&redlink=1)の中核として利用され、[重力波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B%E6%B3%A2_(%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E8%AB%96))の検出などに使われてきた。また恒星の近くに存在する惑星を検出するために使うといった興味深い用途もある。しかし、多くの用途で[マッハツェンダー干渉計](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%9E%E3%83%83%E3%83%8F%E3%83%84%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%80%E3%83%BC%E5%B9%B2%E6%B8%89%E8%A8%88&action=edit&redlink=1)の方が扱いやすい。

[DWDM](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E6%B3%A2%E9%95%B7%E5%A4%9A%E9%87%8D%E9%80%9A%E4%BF%A1)ネットワークで位相変調から振幅変調への変換に使われる[遅延線干渉計](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%81%85%E5%BB%B6%E7%B7%9A%E5%B9%B2%E6%B8%89%E8%A8%88&action=edit&redlink=1)の原理としても使われている

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E5%B9%B2%E6%B8%89%E8%A8%88>

1. **Experimento de Michelson y Morley:**

**マイケルソン・モーリーの実験**（マイケルソン・モーリーのじっけん、英 Michelson-Morley experiment）は、[1887年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1887%E5%B9%B4)に[アルバート・マイケルソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3)と[エドワード・モーリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%89%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC)によって行なわれた実験である。ニュートン力学では、運動する物体の見かけ上の速度は、観測者の運動の速度に依存する。例えば、同じ速さで同じ方向に進む二台の自動車は、互いに止まっているように見える。このことは光の運動にも適用できると考えられた。そこで、見かけ上の光の速さは光の向きに依存する、ということを確かめることがこの実験の目的であった。しかし結果として、光の速さは進行方向に依存しないことが確認された。

この実験は現在の[ケース・ウェスタン・リザーブ大学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B1%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%AA%E3%82%B6%E3%83%BC%E3%83%96%E5%A4%A7%E5%AD%A6)で行われ、[物理学史](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E5%8F%B2)において重要な役割を果たした。この実験は、[エーテル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%83%86%E3%83%AB_(%E7%89%A9%E7%90%86))理論を初めて否定したものとして知られている。同時に、「[第二次科学革命](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E6%AC%A1%E7%A7%91%E5%AD%A6%E9%9D%A9%E5%91%BD&action=edit&redlink=1)の理論面の端緒」ともされている[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93#cite_note-0)。マイケルソンは、この業績により1907年に[ノーベル賞](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%83%99%E3%83%AB%E8%B3%9E)を受賞した。

**エーテルの測定**

[19世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/19%E4%B8%96%E7%B4%80)後期の[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の理論では、光の波動が伝播するための[媒質](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E8%B3%AA)として「[エーテル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%83%86%E3%83%AB_(%E7%89%A9%E7%90%86))」が存在すると考えられていた。水面を[波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2)が伝わるには水が、[音](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E6%B3%A2)が伝わるためには空気などが、それぞれ媒質として必要であること、および光は[真空](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)であっても伝播することから、真空中でも光を伝える媒質の存在が予想されたのである。[光は極めて速い](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)ため、エーテルの存在や性質を調べる実験には高い精度が要求された。

[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)は[太陽](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD)の周りを[公転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%AC%E8%BB%A2)しており、その速さは、およそ秒速30kmである。太陽自体も[銀河系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%8A%80%E6%B2%B3%E7%B3%BB)の中で地球の公転より速く運動しているし、銀河系自体も高速で運動しているが、ここでは太陽と地球の相対的な運動のみに着目する。地球はエーテルの中を動いているのだから、地球上の我々から見れば「エーテルの風」が吹いているはずである。これは、水中を歩くと水の抵抗を感じるのと同様である。もちろん、地球の運動とエーテルの流れがたまたま一致して無風状態になることもあり得る。しかし地球の位置が変われば、つまり季節が変われば、再びエーテルの風が吹くであろう。エーテルが常に地球と同じ方向に動いているとは考えにくいからである。

地球上のどの場所であっても、エーテルの風の向きや強さは、季節や時刻と共に変化するはずである。光はエーテルに乗って伝播するのだから、順風の時に速く、逆風の時に遅く伝わるはずである。従って、異なる方向や時刻について光の速さを調べることで、地球のエーテルに対する相対運動を知ることができると考えられた。

期待された光の速さの変化は、最大でも、光速に対する地球の公転速度の比、すなわち一万分の一程度であった。19世紀には、多くの物理学者たちがこの種の実験を試みた。しかし、実験装置の精度が不充分であったために、光の速さの微小な変化を捉えることはできなかった。たとえば、[フィゾー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A3%E3%82%BE%E3%83%BC)＝[フーコー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%BC%E3%82%B3%E3%83%BC)の装置は 5 % の精度で光の速さを測ることができたが、エーテルの風を測定するには不充分であった。

**実験**

マイケルソンはエーテルの流れを検出するに十分な精度を得られる実験方法を考案した。これは今日[干渉計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89%E8%A8%88)と呼ばれる装置である。まず、光源から出た白色光線は[ハーフミラー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%BC%E3%83%A0%E3%82%B9%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%BF%E3%83%BC)を通り、二つの互いに垂直な光線に分割される。それぞれの光線は、しばらく進んだ後に鏡で反射され、中央に戻ってくる。そして検出器の上に重ね合わせると、それぞれの光線が光源を出てから検出器に到達するまでに費した時間に応じて、[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))が起こる。光線が費した時間が僅かでも変化すると、干渉縞の位置が動くはずである。

もしエーテルの風が地球の自転にのみ由来するのであれば、風向きは12時間ごとに反転する。また、一年を通しても、半年ごとに風向きが変化しなければならない。この風向きの変化は、[干渉縞の移動](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%B9%B2%E6%B8%89%E7%B8%9E%E3%81%AE%E7%A7%BB%E5%8B%95&action=edit&redlink=1)として検出されるはずである。これは、川を行く船の例で考えることができよう。船はスクリューにより時速50 kmの速さを得ることができ、川は時速5 kmで流れているとする。このとき、川を横切るように10 kmの距離を往復するならば、少し下流に流されることを気にしなければ、0.4時間で帰ってくることができる。しかし、上流から下流10 kmの地点までを往復するならば、行きは0.182時間、帰りは0.222時間要するので、合計で0.404時間かかる。同様に考えて、エーテルの風に対し垂直に進む光線に比べ、平行に進む光線は、往復に僅かばかり長い時間を要する。すなわち、エーテルの風向きによって干渉縞が移動するのである。実験は、エーテルの流れが太陽から見て止まっていると仮定し、地球の運動により引き起こされる干渉縞の移動の測定を目的として行われた。

マイケルソンは1881年にいくつかの実験を行った。予想された干渉縞の移動が、縞の間隔を1として0.04であったのに対し、検出されたのは最大で0.02であった。しかし、彼の実験装置は試作品であり、実験誤差が大きかったために、エーテルの風について結論を出すことはできなかった。エーテルの風を測定するためには、さらに高精度な実験を行う必要があった。とはいえ、この試作品は、実験手法の有効性を示すには十分であった。

そしてマイケルソンはモーリーと共に改良型の装置を作成し、干渉縞の移動を検出するのに十分な精度を得ることに成功した。彼らの実験では、光は何度も反射されてから検出器に到達するため、光が移動する長さは11 mに及んだ。このため、予想される干渉縞の移動は0.4であった。検出を容易にするため、この装置は石造りの建物の地下室に配置され、熱や振動の影響は最小に抑えられた。振動を抑えるための工夫として、装置は大理石の巨大なブロックの上に置かれ、そのブロックは水銀のプールに浮かべられた。彼らの計算によれば、振動による影響は、期待される干渉縞の移動の100分の1以下であった。水銀のプールには別の利点もあった。すなわち、装置の向きを容易に変えることができたのである。向きを変えながら実験を繰り返すことにより、エーテルの「風向き」を検出することができたのである。

**失敗したことで有名な実験**

これらの緻密な考察と工夫にも関わらず失敗したことで、彼らの実験は有名になった。エーテルの性質を明らかにすることが目的であったが、'the American Journal of Science'に掲載されたマイケルソンとモーリーの[1887年の論文](http://www.aip.org/history/exhibits/gap/PDF/michelson.pdf)では、検出された干渉縞のずれは期待されたものの40分の1程度であったこと、およびずれは速度の二乗に比例することから、測定された風速は地球の公転速度の約6分の1であり、「大きくとも4分の1」であると結論された。このような「風速」が測定されたとはいえ、この値はエーテルの存在の証拠としては小さすぎ、後には実験誤差の範囲であり実際の「風速」は0であると考えられるようになった。

マイケルソンとモーリーの1887年の論文の後も、さらに工夫を凝らした実験が続けられた。ケネディとイリングワースは、鏡に半波長の「段差」を設けることで装置内で発生する干渉を軽減した。イリングワースは300分の1、ケネディは1500分の1の干渉縞のずれを、それぞれ検出した。ミラーは[ビラリ現象](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%A9%E3%83%AA%E7%8F%BE%E8%B1%A1)を防ぐために磁性体を用いない装置を作成し、マイケルソンは[不変鋼](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%90%E3%83%BC)を用いて熱の影響をさらに小さくした。その他にも、外乱を防ぐ様々な工夫がなされた。

モーリーは自らの実験結果に納得せず、[デイトン・ミラー](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%87%E3%82%A4%E3%83%88%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%9F%E3%83%A9%E3%83%BC&action=edit&redlink=1)と共に、さらなる実験を行った。ミラーは、光線が32 mもの距離を移動する巨大な装置を[ウィルソン山天文台](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E5%B1%B1%E5%A4%A9%E6%96%87%E5%8F%B0) で建設した。エーテルの風が建物の厚い壁に乱される可能性を懸念し、彼は、布で作られた小屋を建てた。彼は装置の角度や[恒星時](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%81%92%E6%98%9F%E6%99%82)によって生じる様々な、小さなばらつきを一年ごとに測定した。彼の測定では、エーテルの風速は最大でも10 km/sであると結論された。ミラーは、この風速が地球の公転よりも遅いのは、エーテルが地球の公転に「引きずられる」からであると考えた。

後年、ケネディもウィルソン山において実験を行った。その結果、干渉縞のずれはミラーによって測定されたものに比べて10分の1しか確認されず、また、季節ごとの変動も見られなかった。これに基づくマイケルソンや[ローレンツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84)らによる議論が1928年に報告され、そこではミラーの実験結果を確認するための追試が必要であると結論された[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93#cite_note-1)。ローレンツは、原因が何であれ、実験結果が彼と[アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)の[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)と矛盾すると考えていた。この議論にアインシュタインは参加していなかったが、彼は、干渉縞のずれは[実験誤差](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%AA%A4%E5%B7%AE)であると考えた[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93#cite_note-2)。現在にいたるまで、ミラーの実験結果の再現には成功していない。

今日では、[レーザー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC)や[メーザー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC)を用いることにより、光線の移動距離をキロメートルの規模にした実験が行われている。この種の実験を初めて行ったのは、メーザーの開発者の一人である[チャールズ・タウンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%83%A3%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%82%BA%E3%83%BB%E3%82%BF%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%82%BA)らである。彼らの1958年の実験では、考えられるあらゆる実験誤差を含めても、エーテルの風速が30 m/s以下であることが結論され、1974年にはこれが0.025 m/sにまで狭められた。1979年のブリエとホールの実験では、風速は全ての方向について30 m/s以下であり、かつ、二次元に限れば0.000001 m/s以下であると結論された。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93>

1. **Difracción:**

**回折**（かいせつ、**Diffraction**）とは媒質中を伝わる波（または[波動](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E5%8B%95)）に対し障害物が存在する時、波がその障害物の背後など、つまり一見すると幾何学的には到達できない領域に回り込んで伝わっていく現象のことを言う。1665年にイタリアの数学者・物理学者であった[フランチェスコ・マリア・グリマルディ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%81%E3%82%A7%E3%82%B9%E3%82%B3%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%BB%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%83%9E%E3%83%AB%E3%83%87%E3%82%A3)により初めて報告された。 障害物に対して波長が大きいほど回折角（障害物の背後に回り込む角度）は大きい。

回折は音波、水の波、電磁波(可視光やX線など)を含むあらゆる波について起こる。

単色[光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89)を十分に狭いスリットに通しスクリーンに当てると回折によって光のあたる範囲が広がり、[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))によって縞模様ができる。

この現象は、量子性が顕著となる粒子の[ビーム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%93%E3%83%BC%E3%83%A0_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))（例：[電子線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E7%B7%9A)、[中性子線](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E6%80%A7%E5%AD%90%E7%B7%9A)など）でも起こる（参照：[物質波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%96%E3%83%AD%E3%82%A4%E6%B3%A2)）。電子線や中性子線などを[結晶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%90%E6%99%B6)などに当てて得られる回折図形から結晶構造の解析を行うことができる。これは電磁波である[X線](http://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A)でも同様な結晶構造の解析を行うことができる。それぞれ[電子回折法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E5%9B%9E%E6%8A%98)、[中性子回折法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E6%80%A7%E5%AD%90%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%B3%95)、[X線回折法](http://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A%E5%9B%9E%E6%8A%98)として結晶構造の解析手法が確立されている。

[写真](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%99%E7%9C%9F)撮影においても、絞りを小さく絞ると光の回折現象により画像の鮮明さが低下する。この現象については[小絞りボケ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8F%E7%B5%9E%E3%82%8A%E3%83%9C%E3%82%B1)の項を参照されたい。

**レーザーの伝播**

レーザーは伝播する際に、回折によりその変化の仕方が決まる。レーザーの出力ミラーが開口部になっており、その開口部によって光線の形は決定される。それ故に、出力の光線が小さいほど光線は早く分岐することになる。ダイオードのレーザーがHe-Neレーザーよりも大きく分かれるのはこれが原因である。 しかし逆に、このレーザーの放散は抑えることができる。まずレーザーを、凸レンズを用いて拡張させる。次に二つ目の凸レンズでレーザーを平行になおす。このとき焦点は一つ目のレンズに合うようにする。この結果、レーザーの開口部が大きくなるので、光線の放散は抑えられる。

**回折格子**

回折格子は、標準的な回折の可視的要素である。格子により回折が起こった光の形は、格子の成分の構造と数によって決まるが、すべての縞には限界強度が存在し、角度\theta _\mathrm{m}のとき以下の方程式により与えられる。

d\left(\sin{\theta_\mathrm{m}} - \sin{\theta_\mathrm{0}}\right) = m \lambda

このとき\theta_\mathrm{0}は光の入射角、dは格子成分の同士の距離、そしてmは正負の整数を表す。 回折が起こった光は、回折格子の各成分により回折が起こった光が合わさることで観察され、本質的には回折と干渉パターンの畳み込みである。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98>

1. **Rejilla de Difracción:**

**回折格子**（かいせつこうし）とは、格子状のパターンによる[回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98)を利用して[干渉縞](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))を作るために使用される[光学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E5%AD%A6)素子の総称。**グレーティング**(grating)とも呼ばれる。格子パターンは直線状の凹凸が[マイクロメートル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%AB)サイズの[周期](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%91%A8%E6%9C%9F)で平行に並んで構成されていることが多い。ただしその周期、材質やパターン厚（凹凸の差厚）などは用途や使用する[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)域によって適宜異なる。主に[物理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86)・[化学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%96%E5%AD%A6)分野で[分光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%85%89)素子として用いられるものの用途は一概には言えない。 回折格子による干渉縞が見られる身近な例としては、[CD](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%91%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%B9%E3%82%AF)が挙げられる。(後述）（ただしCDは、構造的に回折格子になっているものの、回折を利用しているわけではない）

**概要**

初めて史実に登場する回折格子は[18世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/18%E4%B8%96%E7%B4%80)のアメリカの[自然科学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E7%84%B6%E7%A7%91%E5%AD%A6)者デビッド・リッテンハウス([David Rittenhouse](http://en.wikipedia.org/wiki/David_Rittenhouse))によって作られたもので、板の間に止めた2本の[ネジ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8D%E3%82%B8)の間に髪の毛を40本/cm間隔で平行になるように張り、その髪の毛がパターンの役割を果たすというものだった。その後、これと同じ構造の回折格子が[19世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/19%E4%B8%96%E7%B4%80)の物理学者[ヨゼフ・フォン・フラウンホーファー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%82%BC%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%95%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%95%E3%82%A1%E3%83%BC)によって金属細線を用いて製作され、多色光（[単色光](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%98%E8%89%B2%E5%85%89)の対義語）がどのような波長の光から構成されているかを定量的に調べるための道具として紹介された [[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-0)。

回折格子を用いて得られる効果としてわかりやすいものは、CDの読み取り面に太陽光や室内光を当てたときに虹色に輝いて見える現象である。これは[プリズム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%BA%E3%83%A0)に光を通したときに見られる現象と似てはいるが、プリズムでは光の[屈折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%88%E6%8A%98)によって色が分離する（[スペクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)が表れる）のに対し、回折格子では光の回折と[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))によってスペクトルが見えている。また、単一方向から光を入射しスクリーンにスペクトルを投影してみると、プリズムで観察されるスペクトルのパターンは単に光の波長の順に並んだものであろうが、回折格子で観察されるものはそれを周期的にくり返したような形になるはずである[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-1)。この分光能力により理化学機器の[スペクトロメーター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%85%89%E5%99%A8)や光学用の[モノクロメーター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%88%86%E5%85%89%E5%99%A8#.E3.83.A2.E3.83.8E.E3.82.AF.E3.83.AD.E3.83.A1.E3.83.BC.E3.82.BF.E3.83.BC)の構成要素として回折格子が使われることが多い。

回折格子というと線が平行に走った単純な格子状のものを連想しやすく、以上の説明もそのようなものを想定して行ってきたが、パターンの形、周期、断面形状は様々であり、材質や製造法も場合によって異なる。また、回折の起こし方にも数種類ある。分光素子としてではなく、[イメージング](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A4%E3%83%A1%E3%83%BC%E3%82%B8%E3%83%B3%E3%82%B0)分野で光の[位相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)分布を画像化するために用いられることもあり、同様の分野で使用されている回折格子と類似の構造を持つ光学素子として[ホログラム](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0)や[ゾーンプレート](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BE%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%83%97%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%83%88)（[X線顕微鏡](http://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A%E9%A1%95%E5%BE%AE%E9%8F%A1)で使用される[回折レンズ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%BA)の一種）などがある[[3]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-2)。また、加速された[中性子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E6%80%A7%E5%AD%90)のような波動性を持つ粒子（[物質波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E8%B3%AA%E6%B3%A2)）のための特殊な回折格子もある。

**原理**

分光をする場合の入射光は多色光だが、それを構成する異なる波長どうしの光は互いに干渉し合うことはない。よって単一波長の光（単色光）の回折と干渉現象だけ考えれば、多色光の場合はその重ね合わせで説明することができる[[4]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-3)。

ここでは光が周期的に並んだ格子の開口部を透過して回折する場合について考える。波面が平行な単色光を回折格子に入射し、そこから十分離れた場所にスクリーン等を置いて格子から出てくる光を観測してみると、周期的な干渉縞が現れる[[5]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-4)。この縞のパターン形や周期は格子のそれに対応したものになっており、直線の並んだ１次元パターンの格子を用いた場合はやはり直線が並んだ1次元の干渉縞となる[[6]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-5)。干渉縞を入射光の中心軸に近い方から0次、±1次、±2次...と順序づけていく（縞は[対称](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%BE%E7%A7%B0%E6%80%A7)なので[マイナス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%97%E3%83%A9%E3%82%B9%E8%A8%98%E5%8F%B7%E3%81%A8%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%83%8A%E3%82%B9%E8%A8%98%E5%8F%B7)符号も用いる）と、この各次数の干渉縞はその縞ができている方向に回折してきた光の干渉によって生じている。つまり、干渉縞ができるポイントでは各開口部から出てきた光が強め合いの条件（等位相の波の重ね合い）を満たしている。この条件が満たされるためには、各開口部から出てきた光が波長の整数倍の行路差を持っていなければならない。そこで格子周期をd、波長をλ、入射角をα、出射角をβとすると整数nを用いて

 d \sin \alpha + d \sin \beta = n \lambda 

と強め合いの条件を表すことができ、nは次数に対応している。d、α、nが決まっている場合[[7]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-6)、この式より干渉縞が生じている方向への出射角βを求めると

\beta = \arcsin \Bigl( \frac {n \lambda - d \sin \alpha}{d} \Bigl) 

となり、波長λに依存していることがわかる。これが分光の起こる理由である。 また、格子-スクリーン間の距離をL、干渉縞の周期をDとし、格子周期dに対しLが十分大きいとして近似を用いると

 D = \frac{\lambda L}{d} 

と表せ、干渉縞の周期Dが格子周期dの逆数と格子-スクリーン間距離Lに比例することがわかる。よってL(>>d)の位置（フラウンホーファー回折領域）にできる干渉縞周期は、格子周期が小さく、観察場所が格子から離れているほど大きくなる傾向がある。

一方、Lがそれほど大きくない位置（フレネル回折領域）でも干渉縞は生じているのだが、その干渉条件は以上の場合とは異なる。フレネル回折領域では異なる次数の光どうしが干渉し合っており、Lを変えると干渉縞のパターンは変化する。干渉縞の形自体は周期的なのだが、その周期はフラウンホーファー回折領域の干渉縞とは異なり格子周期dとほぼ同程度のサイズになる[[8]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90#cite_note-7)。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90>

1. **Holografía:**

**ホログラフィー**（[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Holography, [ギリシア語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%82%A2%E8%AA%9E)の *Όλος* (全体の) + *γραφή* (記録) から）は、3[次元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A1%E5%85%83)[像](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F)を記録した[写真](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%99%E7%9C%9F)（**ホログラム**）の製造技術のことである。ホログラフィーは情報の記録にも利用することができる。

**ホログラフィーの原理**

白黒の写真は[光強度](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%85%89%E5%BC%B7%E5%BA%A6&action=edit&redlink=1)（単位面積あたりの光のエネルギー）が記録された点の集まりで、どの点も光強度という1つの情報しかない。カラー写真は（実際は[光の三原色](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E3%81%AE%E4%B8%89%E5%8E%9F%E8%89%B2)に相当する3つの波長のみであるが）さらに光の[波長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B3%A2%E9%95%B7)の情報が加わる。しかし、ホログラムでは光の電場の振幅や波長の情報だけでなくそれに[位相](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BD%8D%E7%9B%B8)の情報が加わる。写真では位相の情報は失われるが、ホログラムにおいては（通常は単一波長であるがカラーも可能である）光の電場の振幅と位相が記録される。像が再生される時にできる放射光は完全な3次元像となる。ホログラフィーと写真の違いはここにある。また、写真と違い像を反射率の違いで再生できるだけでなく、記録したホログラムを漂白することで屈折率の違いでも像を再現できる。

**ホログラムの製造**

それぞれの点において光波の位相を記録するために、ホログラフィーは**参照光**を利用する。この**参照光**は記録の対象となる物体を照らす**物体照明光**と同じ光源から来ている。これは、物体光と参照光との間にコヒーレンス（可干渉性）を持たせるためである。参照光と物体光の[重ね合わせ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E3%81%AD%E5%90%88%E3%82%8F%E3%81%9B%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86)による光の[干渉](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B2%E6%B8%89_(%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6))によって干渉縞ができる。これは普通の写真フィルムと同じ撮影技術であるが干渉縞の微細な像を記録する必要があるため専用のフィルムを使うことと除震台を使うことが一般的である。（ただし、パルスレーザーを光源とする場合は除震台は必須ではない）これらの干渉縞はフィルム上に[回折格子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90)を形成する。

ホログラムの大量生産法としてスタンパを使用した方法が用いられる。金属板上に塗布された光硬化樹脂に干渉縞を露光して離型用に硝酸銀の還元反応により銀メッキを施してから表面を無電解ニッケルメッキ[カニゼンメッキ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%83%8B%E3%82%BC%E3%83%B3%E3%83%A1%E3%83%83%E3%82%AD)を施すことによって耐久性をもたせてから裏面を銅の[電鋳](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E9%8B%B3)によって裏打ちする。完成したスタンパで樹脂に転写する。

**ホログラムの再生**

一度フィルムが[現像](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%8F%BE%E5%83%8F)されると、参照光が再度照射されたときにフィルム上の干渉縞によって[回折](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98)が起き、光強度と位相が再現された物体光ができる。光強度と位相が再現されているため像は3次元となる。観察者が動くと映し出された像は回転しているように見える。

ホログラフィーは物体光と参照光の干渉が必要となるため、記録・再生にはレーザーが使われるのは[コヒーレンス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B9)な光波が必要だからである。ただ、レーザーが発明されるより前のホログラムは、[水銀灯](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E9%8A%80%E7%81%AF)のような不便なコヒーレント光源を利用していた。

光の[コヒーレンス長](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%92%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B9%E9%95%B7)によって像の最大の深さが決まる。レーザーは通常数十センチメートルから数メートルのコヒーレンス長を持ち深い像を作ることができる。[レーザーポインター](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC%E3%83%9D%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%BF%E3%83%BC)はホログラフィーに利用するにはコヒーレンス長が短すぎるとされてきたが、小さなホログラムであれば作ることができる。大きなアナログホログラムはレーザーの電力が低すぎてレーザーポインターでは作ることができない。デジタルホログラフィーを利用すればこの問題に悩まされることはない。

**ホログラフィーの応用**

ホログラフィーは像を記録する以外にもさまざまな応用がなされている。

**計測**

現在、ホログラフィー顕微鏡などホログラフィーを利用した計測機器が次々と作られている。ホログラフィー顕微鏡はホログラフィーを利用することにより、微小な物体の立体像を得るものである。これをコンピュータ処理することにより、3次元情報を得ることが可能でさまざまな応用が期待されている。

**光コンピュータ**

演算素子として利用することができる。例えば、1枚のホログラムに2つのホログラムの実像を写せば、2つの3次元像の和をとることができる。また、フーリエ変換面にホログラムフィルタをはさみこむことにより、微分演算を行うこともできる。他にも、さまざまな画像処理がホログラフィーで可能である。一般的に、半導体コンピュータが画素ごとしらみつぶしに計算しなければならない計算をホログラムは一瞬で計算することができる。光を情報キャリアに使ったコンピュータ一般に関しては、[光コンピューティング](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%82%B0)を参照。

**ホログラフィックメモリ**

ホログラフィックメモリは[結晶](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B5%90%E6%99%B6)やフォトポリマーの中に高密度の情報を記録するものである。現在一般的な記録媒体（メモリ）である DVD は面上に記録するため[回折限界](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%9B%9E%E6%8A%98%E9%99%90%E7%95%8C&action=edit&redlink=1)の制約を受ける。DVDはほぼこの上限に達しておりこれ以上容量を増やすことができない。しかし、メディアの容積全体に記録できるホログラフィックメモリは次世代記憶素子としての可能性を秘めている。

空間光変調を使えば 1024×1024 ビットの解像度の異なった画像1000枚を1秒で再生できる。メディアによっては、1ギガビット毎秒という速度で書き込むことができ、読み込み速度は1テラビット毎秒に達すると考えられている。

[2004年](http://ja.wikipedia.org/wiki/2004%E5%B9%B4)、[NTT](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E6%9C%AC%E9%9B%BB%E4%BF%A1%E9%9B%BB%E8%A9%B1)はプラスチック製の切手サイズで1GBの記憶ができるInfo-MICA（インフォ・マイカ）を発表、[2005年](http://ja.wikipedia.org/wiki/2005%E5%B9%B4)、[オプトウェア](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%97%E3%83%88%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%82%A2_(%E6%A8%AA%E6%B5%9C%E5%B8%82))は、記憶容量1 TB、直径120 mm のホログラフィック・バーサタイル・ディスク([HVD](http://ja.wikipedia.org/wiki/HVD))を製造した。しかし、共に開発に難航しているのか製品化までのアナウンスは聞こえてこない。

[2009年](http://ja.wikipedia.org/wiki/2009%E5%B9%B4)[4月27日](http://ja.wikipedia.org/wiki/4%E6%9C%8827%E6%97%A5)、[アメリカ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%A1%E3%83%AA%E3%82%AB%E5%90%88%E8%A1%86%E5%9B%BD)の[GE社](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BC%E3%83%8D%E3%83%A9%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%82%A8%E3%83%AC%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF)が標準サイズのディスク一枚に、500GBの容量を持つディスクについて発表[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%BC#cite_note-0)[[2]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%BC#cite_note-1)。将来的には、1TB(テラバイト)以上まで拡大も可能だという。[フォーマット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%BC%E3%83%9E%E3%83%83%E3%83%88)などは現行のDVD・ブルーレイディスクと似ており、互換性に優れているという。

**芸術**

ホログラフィは芸術にも利用されている。[ホログラフィック・ディスプレイ研究会](http://www.hodic.org/index.html) では、毎年大学ホログラフィー展を開いており、芸術的なホログラムを誰でも無料で見ることができる。フルカラーのホログラムや手前に大きく飛び出るホログラムなどもあり、芸術の手法として確立されつつある。代表的な作家では、石井勢津子、[中村郁夫](http://www.hololab.com/)、[ヒロ・ヤマガタ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%92%E3%83%AD%E3%83%BB%E3%83%A4%E3%83%9E%E3%82%AC%E3%82%BF)等が活躍している。

**光学素子**

[HUD](http://ja.wikipedia.org/wiki/HUD)（[ヘッドアップディスプレイ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%83%E3%83%89%E3%82%A2%E3%83%83%E3%83%97%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%B9%E3%83%97%E3%83%AC%E3%82%A4)）の表示素子にも使用されつつある。複雑な光学素子でも[ホログラフィック光学素子](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%9B%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%83%E3%82%AF%E5%85%89%E5%AD%A6%E7%B4%A0%E5%AD%90&action=edit&redlink=1)を使用すれば軽量にできる。分光器の[回折格子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E6%8A%98%E6%A0%BC%E5%AD%90)等も製造される。

**偽造防止**

紙幣、有価証券、商品券等の偽造防止等に用いられる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9B%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%BC>

1. **Relatividad:**

**相対性理論**（そうたいせいりろん, [独](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84%E8%AA%9E): Relativitätstheorie）または**相対論**（[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): theory of relativity）は、[1905年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1905%E5%B9%B4)に発表された[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)と[1916年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1916%E5%B9%B4)に発表された[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)のことである。

両者はいずれも[アルベルト・アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)の創始した[理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E8%AB%96)で、互いに、等速運動する[座標系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB)の間では[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の法則が不変な形を保つという[原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E7%90%86)([相対性原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E5%8E%9F%E7%90%86))と、[光速度不変の原理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F%E5%BA%A6%E4%B8%8D%E5%A4%89%E3%81%AE%E5%8E%9F%E7%90%86)を仮定したときの物体の運動を記述する。前者は[慣性系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB)についてのみ記述し、後者は加速運動する系や重力場の効果を含めて一般化した理論である。

**命名**

[1908年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1908%E5%B9%B4)（明治41年）にドイツの[理論物理学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E8%AB%96%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E8%80%85)の[マックス・プランク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%83%97%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%AF)は、相対性理論という語を作り、どのように特殊相対性理論（のちに一般相対性理論も）相対性原理を適用するのかを説明した。

**日本での名称**

[大正](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A7%E6%AD%A3)年間に相対性理論が日本語に[翻訳](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%BF%BB%E8%A8%B3)された時に、「相対（あいたい）」が男女の仲を意味し（「相対死に」は[心中](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%83%E4%B8%AD)の意味）、かつ“性”の字がついていたため、世間の誤解を招いた。例えば、[京都大学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%AC%E9%83%BD%E5%A4%A7%E5%AD%A6)の教授が行なった講演会に対して社会的非難をあびせられたという。そのため当時は「相対原理」と訳した学者が多かった。

相対性理論は、当時アインシュタインが最初に提唱した論文*"Zur Elektrodynamik bewegter Körper"*に対して使われたもので、後の[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)の発表により、[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)に名称が変更された。[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)

それにより相対性理論は、書籍などでは、特に[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)を指して使われる場合が多い。逆に[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)の場合は、相対性理論の前に、「一般」が付けられる場合がほとんどであり、一般相対性理論の意味で相対性理論と呼ばれることはまずない。[[1]](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96#cite_note-0)

**反『相対性理論』**

相対性理論は、その意味することが正しく理解されたかということを別論として、物理学を初めとする自然科学の分野のみならず、社会的現象として広く受け入れられた。その反面として、その結論に同意できない立場などが、科学的反論ではなく、反-相対性理論とでも言うべき一種の社会的運動となった。特に、これはアインシュタインが[ユダヤ系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A6%E3%83%80%E3%83%A4%E4%BA%BA)であり平和主義者であるということが、国家主義者に嫌悪され、第一次世界大戦にドイツが敗戦した後には、パウル・ヴァイラント（Paul Weyland）による、反相対性理論キャンペーンがはられたりもした。

物理学者の世界においても、[ユダヤ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A6%E3%83%80%E3%83%A4)的であるという理由でアインシュタインの業績を認めない、[フィリップ・レーナルト](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%AA%E3%83%83%E3%83%97%E3%83%BB%E3%83%AC%E3%83%BC%E3%83%8A%E3%83%AB%E3%83%88)や[ヨハネス・シュタルク](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A8%E3%83%8F%E3%83%8D%E3%82%B9%E3%83%BB%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%83%AB%E3%82%AF)らの一派があった。彼らは、相対性理論の結果は認めるがそれをアインシュタインの成果としないという立場のゆえに、[**E=mc²**](http://ja.wikipedia.org/wiki/E%3Dmc%C2%B2)の発見は[フリードリヒ・ハーゼノール](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%92%E3%83%BB%E3%83%8F%E3%83%BC%E3%82%BC%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%83%AB)に帰せられるなどの主張を行い、アインシュタインを攻撃した。これらの一派は、[ナチス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E5%AE%B6%E7%A4%BE%E4%BC%9A%E4%B8%BB%E7%BE%A9%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84%E5%8A%B4%E5%83%8D%E8%80%85%E5%85%9A)政権が成立するとそれに同調し、政権崩壊とともに勢力を失った。

現在においても、反『相対性理論』という主張は世界的に見られる。その主張は誤解、理解不足、不可知論的な根拠によっており、学問的な考慮に値しない。一般的には[疑似科学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%96%91%E4%BC%BC%E7%A7%91%E5%AD%A6)として受け止められている。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96>

1. **Teoria de la relatividad especial:**

**特殊相対性理論**（とくしゅそうたいせいりろん、[ドイツ語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84%E8%AA%9E) Spezielle Relativitätstheorie、[英語](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E)Special relativity）は、[アルベルト・アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)が[1905年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1905%E5%B9%B4)に発表した[物理学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6)の[理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%90%86%E8%AB%96)である。**光速度不変の原理**（こうそくどふへんのげんり）「真空中の光の速さは、光源の運動状態に影響されない一定値ｃである。」と、**特殊相対性原理**（とくしゅそうたいせいげんり）「お互いに等速度で運動しているすべての慣性系において、すべての基本的物理法則は、まったく同じ形で表される。それらの慣性系のなかから、なにか特別なものを選び出すことはできない。」の二つを[指導原理](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%8C%87%E5%B0%8E%E5%8E%9F%E7%90%86&action=edit&redlink=1)とする理論である。[ニュートン力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E5%8A%9B%E5%AD%A6)で仮定されていなかった光速度不変の原理を導入する妥当性については本節で述べる。**特殊相対論**または**特殊相対性原理**とも呼ばれる。

この理論を提唱した最初の論文は [*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*](http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_891-921.pdf) （動いている物体の電気力学）で、1905年に[ドイツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%82%A4%E3%83%84)の学術誌・[*Annalen der Physik*](http://ja.wikipedia.org/wiki/Annalen_der_Physik) 第17巻 pp.891～921 に掲載された。特殊相対性理論自体は、これを含めた数編の論文からなる。この理論を「特殊」と呼ぶのは、相対性理論で[慣性系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB)にのみ言及していることによる。また、発表から10年後にアインシュタインは、一般座標系を含む理論である「[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)」を発表した。

**特殊相対性理論の誕生**

[20世紀](http://ja.wikipedia.org/wiki/20%E4%B8%96%E7%B4%80)初頭の物理学では、力学の理論的な帰結である[ニュートン力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E5%8A%9B%E5%AD%A6)と、[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)の理論的な帰結である[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)が矛盾することが理論面での大きな障害となっていた。

**ガリレイ変換とローレンツ変換の矛盾**

ここでは、どのように、物体の振る舞いと電磁波の振る舞いが異なるのかを説明する。ニュートン力学によると、一定速度 *V* で動いている電車を座標系 *R* とし、地上を座標系 *S*とすると、電車の中で静止している人を、電車の中からみた人の速度 *VR* は 0、地上からみた人の速度 *VS*は *V* で運動しているように見える。すなわち、

V_S = V_R + V \ 

の関係が成り立つ。この関係を[ガリレイ変換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%A4%E5%A4%89%E6%8F%9B)とよぶ。

電車の中の座標系 *R* でも、地上の座標系 *S* でも、同じ力学の法則が成り立つことから、「ニュートン力学から導かれる力学の法則はガリレイ変換に対して不変である」（ガリレイ不変）こと、すなわち**どのような二つの慣性座標系でもそれらの見かけの速度が違うだけで、それ以外の力学法則は不変であること**が知られていた。

これに対しマクスウェルの方程式では、[**真空**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA)**中の電磁波（光）の速度（**[**光速**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)**）が、座標系の採り方によらず一定であること**が示されていた。 上記の人の代わりに電磁波（光）を使うとすると、マクスウェルの方程式からは、真空中の乗り物の中からみた光の速度 *VR* と、真空中の乗り物外部から見た光の速度 *VS* は等しい。つまり、*VS* = *VR* でなければならない。 これをもとに[ヘンドリック・ローレンツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84)は[1900年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1900%E5%B9%B4)に「マクスウェルの方程式から導かれる電磁気学の法則は[ローレンツ変換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E5%A4%89%E6%8F%9B)に対して不変である」（ローレンツ不変）ことを発見した。

力学の法則はガリレイ不変であるが、電磁気学の法則はローレンツ不変であるという矛盾に対し、[数学者](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%95%B0%E5%AD%A6%E8%80%85)の[アンリ・ポアンカレ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%AA%E3%83%BB%E3%83%9D%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%82%AB%E3%83%AC)はローレンツ変換に対して不変とした力学の法則を提示した。この力学では、光速に近い速度では物体の長さが減少するという「ローレンツ収縮」が導入されているなど、後の特殊相対性理論の萌芽的なものだったが、統一的な理論を創りあげるまでには至らなかった。

**相対性原理の導入**

当時、[エーテル](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%83%86%E3%83%AB_(%E7%89%A9%E7%90%86))という仮想の物質が空間に充満しており、[電磁波](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B3%A2)はエーテルを[媒体](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AA%92%E4%BD%93)にして空間を伝播すると考えられていた。しかし、エーテルに対する地球の相対速度を検出すべく[1881年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1881%E5%B9%B4)に行われた[マイケルソン・モーリーの実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93)では、そのような相対速度は検出されなかった。この結果は、地球が宇宙に対して絶対的に静止しているか、そもそも絶対静止空間という考え自体が間違っていることを意味していた。このような背景のもと、アインシュタインは、次の二つの仮定（公理）**のみ**をもとに[思考実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%80%9D%E8%80%83%E5%AE%9F%E9%A8%93)をするとどのような結論が得られるかをまとめた。

1. 力学法則はどの慣性系においても同じ形で成立する（**相対性原理**）。
2. 真空中の光の速さは光源の運動状態に無関係に一定である（**光速不変の原理**）。

これらの仮定を満たすためには、それまで暗黙のうちに一様で変化しないとみなされていた空間と時間を変えるという方法を用いる。

「光の速度に近い、加速していない宇宙船から、光の速度が *c* に見えるようにするためには、どうすればよいか。」

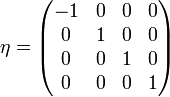
アインシュタインの答えは、「宇宙船の時間が真空の星の上と同じように進むとすると、宇宙船からは光の速度が遅く見えてしまい、不自然である。宇宙船の中の**時間の進み方が遅くなる**とすれば、宇宙船の中から見ても光速度（距離÷時間）は変わらないだろう。」 というものだった（静止していない慣性系での光速度不変については[アルバート・マイケルソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%BB%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3)と[エドワード・モーリー](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A8%E3%83%89%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC)の厳密な光速度測定において考えられていた）。

このように考えると、確かに、宇宙船からも光の速度が真空中の星の上と同じ *c* に見えるが、代わりに時間の速さや空間における物体の長さが変化することになる。この考え方は、それ以前の考え方とまったく相容れなかったので大論争を引き起こした。

**特殊相対性理論から導かれる帰結**

相対性理論においては、観測者S系に対して[速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%80%9F%E5%BA%A6)*v*で動くS'系において（簡単のため動く方向は*x*軸方向とする）、\beta=\frac{v}{c}　と　\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}　という2つの量が相対論的効果の現れ方を示し、重要である（古典力学への近似*v*→0では*β*=0, *γ*=1である）。これらは[双曲線関数](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E6%9B%B2%E7%B7%9A%E9%96%A2%E6%95%B0)を用い、\beta=\tanh\zetaと表すこともある。また、相対性理論においては[時間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93)の概念と[空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E9%96%93)の概念は[**時空**](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E7%A9%BA)として一つにまとめられ、位置と時間は[ミンコフスキー空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B3%E3%83%95%E3%82%B9%E3%82%AD%E3%83%BC%E7%A9%BA%E9%96%93)内の[反変ベクトル](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8F%8D%E5%A4%89%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB&action=edit&redlink=1)の1点として、まとめて[**世界点**](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%96%E7%95%8C%E7%82%B9&action=edit&redlink=1)として表される。物体が時空に存在するとき、その運動はこの空間内の曲線として表される。このベクトルは[次元](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A1%E5%85%83#.E7.89.A9.E7.90.86.E9.87.8F.E3.81.AE.E6.AC.A1.E5.85.83)を揃えて、(ct,x,y,z)=(x^0,x^1,x^2,x^3)とすると極めて見通しがよい。この時(x^0,x^1,x^2,x^3)と(x'^0,x'^1,x'^2,x'^3)の[内積](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%85%E7%A9%8D)は

x^\mu\eta_{\mu\nu}x^\nu=-x^0x'^0+x^1x'^1+x^2x'^2+x^3x'^3

として表される（[アインシュタインの縮約記法](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%81%AE%E7%B8%AE%E7%B4%84%E8%A8%98%E6%B3%95)を用い、[計量](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A8%88%E9%87%8F%E3%83%86%E3%83%B3%E3%82%BD%E3%83%AB)はにとった）。慣習に従い、[ラテン文字](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A9%E3%83%86%E3%83%B3%E6%96%87%E5%AD%97)は *i*,*j*, *k*, ... = 1, 2, 3 、[ギリシア文字](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AE%E3%83%AA%E3%82%B7%E3%82%A2%E6%96%87%E5%AD%97)は *μ*, *ν*, *ρ*, ... = 0, 1, 2, 3 の添え字を取るものとする。以下この記法を用いて記述する。

なお、記法には様々な流儀がある。代表的なものを挙げれば、ここでは時間成分を第0成分に取ったが、第4成分に取り(x,y,z,ct)=(x^1,x^2,x^3,x^4)と表す流儀、ここでは計量を(-1,1,1,1)に取ったが、(1,-1,-1,-1)と取る流儀などが存在する。また、相対論的電磁気学においては[ウィキペディアのガイドライン](http://ja.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:%E8%A1%A8%E8%A8%98%E3%82%AC%E3%82%A4%E3%83%89#.E5.8D.98.E4.BD.8D)に則り[SI単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)に基づき記述したが、記述の簡潔さから[CGS単位系](http://ja.wikipedia.org/wiki/CGS%E5%8D%98%E4%BD%8D%E7%B3%BB)を用いる教科書もある。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96>

1. **Dilatación del Tiempo:**

**時間の遅れ**（じかんのおくれ、time dilation）は、[物理](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%A9%E7%90%86)学の[相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)が予言する現象で、運動している状態によって時計（時間座標）の進み方が異なることを指す。[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)では、ある速度で動いている観測者の時計の進み方は、それより遅い速度か静止している観測者の時計よりも進み方が遅くなることが予言され、実験的に確認されている。[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)では、強い重力場にいる観測者は、それより弱い重力場にいる観測者よりも時計の進み方が遅い。いずれも静止している観測者や重力源から無限遠方の観測者を基準とするので、時計の進み方が「遅い」と表現される。

**特殊相対性理論における時間の遅れ**

[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)では、物体が高速で移動するほど、その系における時間の流れが遅くなる。速度の上限は光速なので、光速に近い速さで運動する物体はほとんど時間の進みがないことになる。静止している観測者の時間の刻み幅を\Delta t とすると、運動体の時間の刻み \Delta t' は、光速をc_{}^{}、運動体の速さをv_{}^{} として、

\Delta t' = {\sqrt{1-(v/c)^2}}\Delta t

となる。これは、時間と空間を合わせて座標変換をしないと、電磁気学の法則に現れる光速 c の意味が説明できない、という理論的な要請から導かれた[ローレンツ変換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E5%A4%89%E6%8F%9B)による帰結である。 この事実は、宇宙から飛来する素粒子（宇宙線）の寿命が地上のものより長いことなどから確認されており、現代の素粒子論や場の理論は、特殊相対性理論を基礎に構築されている。

例えば、宇宙船が光速の90%の速度で航行しているとしよう。単純化するため加速・減速は考えない。ずっと等速直線運動であると仮定する。静止している観測者が1年間を測定する時間は、宇宙船の中では上式より\Delta t'=0.436_{}^{}\Delta t  となり、宇宙船の時計の刻み幅は静止系の約0.44倍である。つまり宇宙船内の時計では、まだ0.44年しか経過していない。この現象を利用すると、光速に近い宇宙船で宇宙を駆けめぐり、何年か後、出発地点に戻ってきたような場合、出発地点にいた人は年を取り、宇宙船にいた人は年を取らないという現象が生じ、宇宙船は未来への一方通行の[タイムマシン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%A0%E3%83%9E%E3%82%B7%E3%83%B3)の役目を果たす事になる（宇宙船から静止系を見ると、静止系は相対的に運動していることになるが、時間の遅れが生じるのは宇宙船側である。詳しくは[双子のパラドックス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E5%AD%90%E3%81%AE%E3%83%91%E3%83%A9%E3%83%89%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9)の項を参照のこと）。

この状態が、日本のお伽噺である『[浦島太郎](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B5%A6%E5%B3%B6%E5%A4%AA%E9%83%8E)』において、主人公の浦島太郎が[竜宮城](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%BE%8D%E5%AE%AE)に行って過ごした数日間に、地上では何百年という時間が過ぎていたという話にそっくりであるため、日本のSF作品などでは**ウラシマ効果**とも呼ばれる（SF同人誌「[宇宙塵](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%87%E5%AE%99%E5%A1%B5_(%E5%90%8C%E4%BA%BA%E8%AA%8C))」主宰者の[柴野拓美](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9F%B4%E9%87%8E%E6%8B%93%E7%BE%8E)が命名者と言われる）。

なお、この現象は何も光速に近い速度でなくとも発生する。現に[航空機](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%88%AA%E7%A9%BA%E6%A9%9F)に載せた[原子時計](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E6%99%82%E8%A8%88)の進みがごく僅かに遅れる事が実験によって確認されている。ただし[宇宙船](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%AE%87%E5%AE%99%E8%88%B9)や[人工衛星](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E8%A1%9B%E6%98%9F)の場合は、後述の重力場の有無による影響も生じる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%99%82%E9%96%93%E3%81%AE%E9%81%85%E3%82%8C>

1. **Paradoja de los Gemelos:**

**双子のパラドックス**（ふたごのパラドックス）とは、[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)（1905年）による運動系の時間の遅れに関して提案された[パラドックス](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%91%E3%83%A9%E3%83%89%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9)である。初めは、相対性理論に内部矛盾があるかどうかについて、[アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)本人が**時計のパラドックス**として出した問題であるが、[1911年](http://ja.wikipedia.org/wiki/1911%E5%B9%B4)に[ポール・ランジュバン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%A5%E3%83%90%E3%83%B3)が双子をモデルしたパラドックスに仕立てたため、双子のパラドックスとして有名になった。

なお、アインシュタインは26歳のときに出した、特殊相対性理論の論文「動いている物体の電気力学」において、「同じ時刻を刻む2つの時計がA点に置かれているとき、そのうちのひとつを、A点を通る任意の閉曲線にそって一定の速さv で動かし、t秒後に再びA点に戻ったとき、この時計は動かさなかった時計よりt (v/c)^2/2 秒だけ遅れている。」と書いている。

**双子のパラドックスのストーリー**

双子のパラドックスのストーリーは次のようになる。[双子](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E5%8D%B5%E6%80%A7%E5%8F%8C%E7%94%9F%E5%85%90)の兄弟がいて、弟は[地球](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%B0%E7%90%83)に残り、兄は光速に近い速度で飛ぶことができる[ロケット](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88)に乗って、宇宙の遠くまで旅行したのちに地球に戻ってくるものとする。このとき、**弟から見れば兄の方が動いているため**、特殊相対性理論が示すように兄の時間が遅れるはずである。すなわち、ロケットが地球に戻ってきたときは、**兄の方が弟よりも若くなっている**。一方、運動が相対的であると考えるならば、**兄から見れば弟の方が動いているため**、特殊相対性理論が示すように弟の時間が遅れるはずである。すなわち、ロケットが地球に戻ってきたときは、**弟の方が兄よりも若くなっている**。これは前の結果と逆になっており、パラドックスである。

このパラドックスは、双子の兄弟の運動が対称ではないことから解決される。弟は地球（[慣性系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB)と仮定してよい）にいるのに対し、ロケットに乗った兄は、出発するときおよび、Uターンするときに加速されるため、少なくとも[加速系](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8A%A0%E9%80%9F%E7%B3%BB&action=edit&redlink=1)に一時期いることになる。すなわち、ずっと慣性系にいる弟とは条件が異なるのである。

兄弟それぞれの年齢は固有時を[積分](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%8D%E5%88%86)することで算出できる。

**誤解**

以下の相対論に関わるパラドックスは、ときに「双子のパラドックス」として誤って紹介される事がある。これらは双子のパラドックスとは別物である。

* ロケットに乗っている兄の方が歳を取りにくくなる（[ウラシマ効果](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A6%E3%83%A9%E3%82%B7%E3%83%9E%E5%8A%B9%E6%9E%9C)）。
* 兄の乗ったロケットが慣性運動（等速直線運動）をしているとき、相対性により、弟から見ると兄のほうが歳を取りにくく見え、兄のほうから見ると弟のほうが歳を取りにくく見える。

なお、双子のパラドックスは、**光速に近い速度**で動いた兄が、再び弟のところに戻ってきたときに起こる現象の事であるとされるが、これは**光速に近い速度でなければ双子のパラドックスが起こらない**ものと誤解されやすい。先に述べたとおり、兄が弟よりも速く動いていさえすれば、兄の方が弟よりも若くなる。ただし、兄を光速度にほど遠い低速なロケットに乗せるならば、時間の遅れは微々たるものであって、ストーリーとして面白みに欠ける。これが光速に近い速度のロケットに兄を乗せねばならない理由である。また、[加速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8A%A0%E9%80%9F%E5%BA%A6)を扱うのだから特殊相対性理論では扱えないとするのは誤りである。[一般相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%80%E8%88%AC%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)で使われている公式を利用するのはかまわない。一般相対性理論では、加速度も相対的であるが、Uターンをすることによって、宇宙船に乗っている側は一貫した加速系にいないことになるため矛盾は生じない。地球上と同じ重力加速度gで宇宙船で加速航行していたとしてもUターンによって+gと-gという符号が逆の加速系が生じるため、地球上で受ける重力加速度+gとは条件が異なることになる。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%8C%E5%AD%90%E3%81%AE%E3%83%91%E3%83%A9%E3%83%89%E3%83%83%E3%82%AF%E3%82%B9>

1. **Transformaciones de Lorentz:**

**ローレンツ変換**（ローレンツへんかん、[英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Lorentz transformation）は、2 つの[慣性系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB)の間の座標（時間座標と空間座標）を結びつける[線形変換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E5%A4%89%E6%8F%9B)で、[電磁気学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AD%A6)と[古典力学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%8F%A4%E5%85%B8%E5%8A%9B%E5%AD%A6)間の矛盾を回避するために、[アイルランド](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%AB%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%89)の[ジョセフ・ラーモア](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B8%E3%83%A7%E3%82%BB%E3%83%95%E3%83%BB%E3%83%A9%E3%83%BC%E3%83%A2%E3%82%A2)（1897年）と[オランダ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AA%E3%83%A9%E3%83%B3%E3%83%80)の[ヘンドリック・ローレンツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84)（1899年、1904年）により提案された。[アルベルト・アインシュタイン](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%A2%E3%83%AB%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%83%BB%E3%82%A2%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%B3)が[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)（1905年）を構築したときには、慣性系間に許される変換公式として、理論の基礎を形成した。

[幾何学](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%BE%E4%BD%95%E5%AD%A6)的には、[ミンコフスキー空間](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B3%E3%83%95%E3%82%B9%E3%82%AD%E3%83%BC%E7%A9%BA%E9%96%93)における 2 点間の[世界間隔](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BA%E6%9C%89%E6%99%82)を不変に保つような、原点を中心にした回転変換を表す。

**概要**

ローレンツ変換は、[マイケルソン・モーリーの実験](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%82%BD%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%A2%E3%83%BC%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%81%AE%E5%AE%9F%E9%A8%93)結果を矛盾なく説明する手段として提案された。[ローレンツ](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%AF%E3%83%BB%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84)は、時間の流れや[光速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F)はすべての基準座標系において同一と考えたため、「大きな速度で動く座標系では、2 点間の距離（物体の長さ）は縮む」というローレンツ収縮を結論した。しかし、ローレンツ収縮は実験結果と矛盾した。後に、アインシュタインは、光速度の不変性と物理法則の相対性（「物理法則はあらゆる慣性系間で同一である」）の 2 つを原理として、[特殊相対性理論](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%89%B9%E6%AE%8A%E7%9B%B8%E5%AF%BE%E6%80%A7%E7%90%86%E8%AB%96)を築いた。そこでは、ローレンツ変換から帰結される事実として、時間の進み方が観測者によって異なることを結論した。

ローレンツ変換において、慣性系の動く速度 *v* が、光速度 *c* に比べて十分小さい場合（*v*/*c* → 0 と見なせる場合）を考えると、ローレンツ変換は[ガリレイ変換](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AC%E3%83%AA%E3%83%AC%E3%82%A4%E5%A4%89%E6%8F%9B)を再現する。したがって、非相対論的な極限でガリレイ不変性が成立しているという事実もローレンツ変換で説明できる（ガリレイ変換は、等速運動をする慣性系間の座標変換であり、[ニュートンの運動方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%81%8B%E5%8B%95%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)では満足されるが、[マクスウェルの方程式](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%AB%E3%81%AE%E6%96%B9%E7%A8%8B%E5%BC%8F)では満足されない古典的な座標変換である）。

ローレンツ変換のうち、空間と時間が関与する方向への変換を**ローレンツブースト** ([英](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%8B%B1%E8%AA%9E): Lorentz boost) と呼ぶ。特殊相対論が導く、我々の直感に反する事柄のほとんどは、このローレンツブーストからの帰結である。一方で、空間同士が関与する変換はただの[空間回転](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9E%E8%BB%A2#.E6.95.B0.E5.AD.A6.E7.9A.84.E5.AE.9A.E7.BE.A9)である。

**物理的導入**

ローレンツ変換は、ある[慣性系](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%85%A3%E6%80%A7%E7%B3%BB) S における空間および時間座標（あるいは任意の [4元ベクトル](http://ja.wikipedia.org/wiki/4%E5%85%83%E3%83%99%E3%82%AF%E3%83%88%E3%83%AB)）を、*x*-軸に沿った S に対する相対速度 *v* で移動する別の慣性系 S' へ変換する際に使用される[群作用](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%BE%A4%E4%BD%9C%E7%94%A8)である。原点 (0, 0, 0, 0) を共有する、S における[時空座標](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%99%82%E7%A9%BA%E5%BA%A7%E6%A8%99&action=edit&redlink=1) (*t*, *x*, *y*, *z*) と S' における[時空座標](http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%99%82%E7%A9%BA%E5%BA%A7%E6%A8%99&action=edit&redlink=1) (*t'*, *x'*, *y'*, *z'*) で記述される事象の座標系は、以下のローレンツ変換によって関連づけられる。

t' = \gamma \left(t - \frac{v x}{c^{2}} \right)  
x' = \gamma (x - v t)\,  
y' = y\,  
z' = z\,

上式で

\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}

はローレンツ因子と呼ばれ、*c* は真空中の[光速度](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F%E5%BA%A6)を表す。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%83%84%E5%A4%89%E6%8F%9B>

**-終わり-**