

目次

第 1 章	集合と空間	4
§1	集合・写像	5
1.1	集合	5
1.2	集合の演算	7
1.3	写像	9
1.4	集合の濃度	12
1.5	同値類	15
1.6	便利な記号	17
§2	距離空間と位相空間	18
2.1	距離空間	18
2.2	内部と閉包, 開集合と閉集合	19
2.3	収束列とコーシー列	23
2.4	距離空間の完備性	25
2.5	位相空間	26
2.6	位相空間の連続写像	27
2.7	コンパクト集合	27
§3	抽象代数学の基礎	28
3.1	群	28
3.2	環	28
3.3	体	29
3.4	複素数	30
第 2 章	ベクトル空間の線形代数	35
§4	行列	36
4.1	行列の定義	36
4.2	数ベクトル	38
4.3	置換	38

4.4	行列式	40
§5	ベクトル空間	41
5.1	3次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^3 の性質	41
5.2	ベクトル空間の定義	43
5.3	部分ベクトル空間	44
5.4	ベクトルの一次独立・一次従属	46
5.5	ベクトル空間の基底と次元	47
§6	内積空間とノルム空間	49
6.1	内積空間	49
6.2	ノルム空間	52
6.3	内積とノルムの関係	54
6.4	内積空間の基底	56
6.5	内積空間の直和	56
§7	線形写像	58
7.1	線形写像	58
7.2	同型写像	59
7.3	像と核	60
7.4	表現行列	61
7.5	固有値と固有ベクトル	63
§8	双対空間	64
8.1	双対空間	64
8.2	零化空間	65
8.3	双対写像	65
8.4	内積空間における線形汎関数	66
§9	商空間とテンソル積	67
9.1	商空間	67
9.2	テンソル積	67
	§9 テンソル積の構成	69
9.3	線形写像のテンソル積	70
第3章	解析学と関数解析	71
§10	級数	72
10.1	関数の列	72
§11	測度	74

11.1	ユークリッド空間における体積	74
11.2	有限加法族	74
11.3	外測度と可測集合	76
11.4	測度	79
§12	ルベーグ積分	82
12.1	可測関数	82
12.2	ルベーグ積分の定義	84
12.3	ルベーグ積分の性質	85
§13	関数解析	87
13.1	関数空間	87
13.2	関数空間のノルム	87
13.3	内積空間としての関数空間	88
13.4	L^2 -空間	89
13.5	局所可積分	90
§14	ヒルベルト空間	91
14.1	ヒルベルト空間とは何か	91
14.2	バナッハ空間論	92
14.3	ヒルベルト空間論	92
14.4	射影定理	94
14.5	ヒルベルト空間の基底	96
§15	演算子	99
15.1	演算子とは	99
15.2	線形演算子	100
15.3	ユニタリ演算子	101
15.4	演算子ノルム	101
15.5	エルミート演算子	102
第 4 章	量子力学へ	104
§16	ブラ・ケット記法	105
	Bibliography	106
	索引	108

第 1 章 集合と空間

数学において最も基本的な概念が集合である．すべての数学は，究極的には集合の言葉で記述される．そこまでいなくても，集合は数学を使うのに必要不可欠なツールであるし，集合のことばに慣れておくと，数学のみならず物理学でも非常に便利である．この章では「集合とは何か」といった公理には立ち入らず，素朴に集合を定義したうえで，集合にかかわる諸概念を導入し，性質を見ることにする．

集合に対して‘距離’を導入したものが「空間」である．距離を導入することで，「収束」や「開集合」「閉集合」といった重要な概念を定義できる．この意味で，空間とは線形代数や微分積分学など数学の諸分野の基礎となる，極めて重要な概念である．この章では抽象的な距離について定義するが，抽象的な定義を用いた証明よりも，具体的な空間（ユークリッド空間や関数空間）について成り立つ性質を理解するほうが（物理においては）有益である．

§1 集合・写像

1.1 集合

すべての数学の基礎となるのが「集合」である。この節では集合を扱ううえで必須である用語を素朴に導入する。

「集合」をきちんと定義するのは難しいが、ここでは以下のように考える。

ある特定の性質をもつモノの集まりを**集合** (set) という。集合とは単なるモノの集まりではなく、何が集まっているかを定められる集まりである [5]。

例 1.1 「正の実数の全体」「ひらがなの全体」「名大附属図書館の蔵書全体」には、それぞれ何が入っていて、何が入っていないのかを定められるので集合である¹⁾。一方で、「絶対値の小さな複素数の全体」「難しい漢字の全体」「偉大な物理学者の全体」には、何が入っていて何が入らないのかを客観的に定められないので、集合とは言わない²⁾。

X をある集合とする。 X を構成するモノのことを、 X の **元** (element) あるいは **要素** という。 a が X の元であるとき、「 a は X に属する」あるいは「 a は X に含まれる」といい、 $a \in X$ とかく。 a が X の元でなければ、 $a \notin X$ とかく。 X と a の位置を入れ替えて $X \ni a$ あるいは $X \not\ni a$ とかいてもよい [5]。

例 1.2 X を「愛知県にある市の全体」とすると、 X は集合である。このとき、名古屋市は X に属する（含まれる）ので、名古屋市 $\in X$ とかく。一方、四日市市は X に属さない（含まれない）ので、四日市市 $\notin X$ とかく。ほかにも

$$\text{豊田市} \in X, \quad \text{浜松市} \notin X, \quad \text{飛島村} \notin X$$

といったふうに、それぞれ X に含まれるか含まれないかを決定できる。

任意の集合 A と任意の x に対して、 $x \in A$ と $x \notin A$ のいずれか一方が必ず成り立つ。

集合を表すのには、いくつかの方法がある。まずは $\{1, 2, 4\}$ のように **波括弧** (brace) の中に元を書き並べる方法である。しかし、この書き方だと無限個の元を含む集合、たとえ

-
- 1) もちろん「ひらがなの全体」に変体仮名を含むのか、「名大附属図書館の蔵書全体」はいつの時点の蔵書を指すのかは決めておく必要がある。
 - 2) “偉大な物理学者”を「ノーベル物理学賞の受賞者」と定義すれば、「偉大な物理学者の全体」は集合になる。しかし、そうであればはじめてから「ノーベル物理学賞の受賞者の全体」といえばよいし、そもそも偉大な物理学者 \neq ノーベル物理学賞受賞者であるのは物理学を学んだ人ならよく理解していることだろう。

ば「自然数全体の集合 \mathbb{N} 」を表すことができない。そこで、

$$\mathbb{N} = \{x \mid x \text{ は自然数}\}$$

のように縦棒 $|$ を書き、その前に含むべき元、うしろに元が含まれる条件をかく。たとえば $\{x \in \mathbb{N} \mid x > 2^{10}\}$ とかけば、これは 2^{10} より大きい自然数の集合を表す。

集合の表記になれるため、また今後のための準備もかねて、数の集合をいくつか挙げておこう。

$$\text{自然数全体の集合 } \mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\} \quad (1.1a)$$

$$\text{整数全体の集合 } \mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\} \quad (1.1b)$$

$$\text{有理数全体の集合 } \mathbb{Q} = \left\{ \frac{p}{q} \mid p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{N} \right\} \quad (1.1c)$$

$$\text{実数全体の集合 } \mathbb{R} \quad (1.1d)$$

$$\text{複素数全体の集合 } \mathbb{C} = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{R}\} \quad (1.1e)$$

これに倣って、正の実数全体の集合は、 $\{x \in \mathbb{R} \mid x > 0\}$ とかける。

元をひとつも含まない集合 $\{\}$ を考えることもできる。このような集合を^{くうしゅうごう}空集合とよび、特別に記号 \emptyset を使ってあらわす³⁾。

集合の関係

いままで1つの集合について扱ってきたが、ここで2つの集合の関係についてみてみよう。集合 X と集合 Y について、 X のすべての元と Y のすべての元が一致するとき、 X と Y は**一致する**といい、 $X = Y$ とかく。集合 X と集合 Y について、 Y のすべての元が X の元であるとき、 Y は X に**含まれる**（あるいは X は Y を含む）といい、 $Y \subset X$ とかく。

「含まれる」ということばと反するが、定義から $X = Y$ のときも $X \subset Y$ が成り立つ。集合 X と Y が一致することを直接示すかわりに $X \subset Y$ かつ $X \supset Y$ を示すことで、 $X = Y$ といえる。

たとえば、 $X =$

X の元であるか Y の元であるものすべてを集めた集合を、^{わしゅうごう}**和集合**あるいは^{がつぺい}**合併**といい、 $X \cup Y$ とかく。 X の元であり、かつ Y の元でもあるものすべてを集めた集合を、^{きょうつうぶぶん}**共通部分**あるいは**交わり**といい、 $X \cap Y$ とかく。

特に X と Y の元がかぶっていないとき、和集合 $X \cup Y$ のことを $X \sqcup Y$ とかいて、^{ひこう}**非交和**あるいは^{ちよくわ}**直和**ということがある。

3) ギリシャ文字の ϕ を使う人もいる。

1.2 集合の演算

1.1 節で素朴に導入した集合を、もう少し形式的なところに注目して調べてみよう。

定義 1.1 元をひとつも持たない集合 $\{\}$ を^{くうしゅうごう}**空集合**といい、記号 \emptyset であらわす。／

数学において存在が保証されている唯一のものが空集合である。

定義 1.2 集合からなる集合を^{しゅうごうぞく}**集合族** (family of sets) という。／

たとえば、 $\{\{\}, \{1\}, \{1, 2\}, \{1, 2, 3\}\}$ は集合族である。

元が集合である集合に対して名前がついているのは、単にそのような集合をよく扱うからである。

定義 1.3 集合 A に対し、**写像** ^(定義 1.10) $\chi_A: A \rightarrow \{0, 1\}$ を

$$\chi_A(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A \\ 0 & \text{if } x \notin A \end{cases} \quad (1.2)$$

で定める。 χ_A を、集合 A の**定義関数**、**特性関数** (characteristic function)、あるいは**指示関数** (indicator function) という。／

集合の包含

集合 Y が集合 X を含むということは、次のように定式化される。

定義 1.4 2つの集合 X, Y の^{ほうがん}**包含関係**を、次のように定義する。

- (1) 任意の $x \in Y$ に対し、 $x \in X$ が成り立つとき、 **X は Y を含む**、あるいは **Y は X に含まれる**といい、 $X \supset Y$ または $Y \subset X$ とかく。
- (2) $X \subset Y$ かつ $Y \subset X$ のとき、 **X と Y は一致する**といい、 $X = Y$ とかく。
- (3) $X \subset Y$ かつ $X \neq Y$ のとき、特に $X \subsetneq Y$ とかく。

Y が X を含まないとき、 $Y \not\subset X$ または $Y \not\supset X$ とかく。／

以下は明らかである。

命題 1.3 集合 X, Y, Z について、 $X \subset Y$ かつ $Y \subset Z$ なら、 $X \subset Z$ が成り立つ。

定義 1.5 (最大・最小) 集合族 \mathfrak{C} の元 A (つまり A は集合) について, 任意の集合 $B \in \mathfrak{C}$ に対し, $A \supset B$ (または $A \subset B$) が成り立つとき, A は**最大** (または**最小**) であるという. /

定義 1.6 (極大・極小) 集合族 \mathfrak{C} の元 A (つまり A は集合) について, 任意の集合 $B \in \mathfrak{C}$ に対し, $A \subset B$ ($A \supset B$) なら $A = B$ であるとき, A は**極大** (または**極小**) であるという. /

集合 A が最大であるとは, すべての集合が A に含まれるということ, 集合 A が極大であるとは, A がほかの集合に含まないことを意味する. したがって, A が最大の集合なら, それは極大である.

集合の演算

定義 1.7 X, Y を集合とする. 2つの集合の $X \cup Y$ を,

$$X \cup Y := \{x \mid x \in X \text{ または } x \in Y\} \quad (1.3)$$

わしゅうごう **和集合 (union)**, あるいは がつぺい **合併** という. 2つの集合の $X \cap Y$ を

$$X \cap Y := \{x \mid x \in X \text{ かつ } x \in Y\} \quad (1.4)$$

きょうつうぶぶん **共通部分 (intersection)**, **交差**⁴⁾, あるいは**交わり** という. /

定義 1.8 (非交和) $X \cap Y = \emptyset$ であるとき, 和集合 $X \cup Y$ を特に ひこうわ **非交和 (disjoint union)** あるいは ちよくわ **直和 (direct sum)** といい, $X \sqcup Y$, $X \amalg Y$ などとかく. /

集合論ではある“普遍集合”の部分集合がよく登場する. 部分集合を扱う上で便利であるのが冪集合である.

定義 1.9 X を集合とする. X の部分集合すべてを元として含む集合を, X の べきしゅうごう **冪集合 (power set)** といい⁵⁾, $\mathcal{P}(X)$, $\mathfrak{P}(X)$, 2^X などとかく⁶⁾. /

たとえば, $X = \{a, b\}$ とすると, $\mathcal{P}(X) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}$ である.

部分集合 $A \subset X$ と **指示関数** χ_A が 1 対 1 に対応するので, N 個の元をもつ集合 X の冪集合は, 2^N 個の元をもつ. これが 2^X という表記の理由である.

4) 交叉とも書く. footnote 15)(page 32) を参照.

5) 略字で“巾集合”とかくことも多い.

6) \mathcal{P} , \mathfrak{P} はいずれもアルファベットの P である.

1.3 写像

ある集合の^{げん}元（要素）と別の集合の元を結びつける規則のことを写像という．数学の基礎を作る重要な概念である．特に^{けん ろん}圏論とよばれる数学の一分野では、集合ではなく写像（射）のほうが主役である．

物理学において写像をあらわに意識することはあまりないが、例えば量子状態を記述する‘関数’は写像の一種であるし、また、微分・積分というのは関数と関数を結びつける写像である．さらには § 15 で扱う^{えんざんし}演算子も、写像の一般化としてみることができる．

定義 1.10 (写像) X, Y を集合とする． $x \in X$ に対して、ある $y \in Y$ を対応付ける規則のことを、 X から Y への^{しゃぞう}写像 (map) という．

f が X から Y への写像であることを、 $f: X \rightarrow Y$ とあらわす．

X を f の^{ていぎいき}定義域 (domain), Y を f の^{しゅういき}終域 (codomain) という．／

例 1.4 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{a, b, c\}$ とする．次のように定義された f は X から Y への写像である．

$$f(1) = a, \quad f(2) = b, \quad f(3) = c. \quad (1.5a)$$

また、次のような g および h も X から Y への写像である．

$$g(1) = c, \quad g(2) = c, \quad g(3) = a. \quad (1.5b)$$

$$h(1) = a, \quad h(2) = a, \quad h(3) = a. \quad (1.5c)$$

例 1.5 $X = \mathbb{N}$, $Y = \mathbb{N}$ とする． $x \in X$ に対して、 $y \in Y$ を

$$y = f(x) = 3x$$

で定めたとき、 f は \mathbb{N} から \mathbb{N} への写像である．簡単のために

$$X \ni x \mapsto 3x \in Y$$

とかくこともある．

例 1.6 $X = \mathbb{R}$, $Y = \mathbb{R}$ とする． $x \in X$ に対して、 $y \in Y$ を

$$y = f(x) = x^2$$

で定めたとき、 f は \mathbb{R} から \mathbb{R} への写像である．

\mathbb{R} から \mathbb{R} への写像や \mathbb{C} から \mathbb{C} への写像を、特に^{かんすう}関数 (function) という．

定義 1.11 (像) $f: X \rightarrow Y$ を写像とする. 集合

$$\text{Im } f := \{f(x) \in Y \mid x \in X\} \quad (1.6)$$

を f の ^{ぞう}像 (image) という. /

f の像を ^{ちいき}値域 (range) ということもある. f の値域といった場合, f の終域を指すことも像を指すこともあり, 注意が必要である.

定義 1.12 (部分集合の像) $f: X \rightarrow Y$ を写像とする. 部分集合 $A \subset X$ に対し,

$$f[A] := \{f(x) \in Y \mid x \in A\} \quad (1.7)$$

を, A の f による像という. /

定義 1.13 (逆像) $f: X \rightarrow Y$ を写像とする. 部分集合 $A \subset Y$ に対して,

$$f^{-1}[B] := \{x \in X \mid f(x) \in A\} \quad (1.8)$$

で定められる集合を ^{ぎやくぞう}逆像 (inverse image) という. /

同じ記号 f^{-1} を使う逆写像 (定義 1.20) と逆像を取り違えないこと⁷⁾. 任意の写像 f に対し, 逆写像が存在するとは限らないが, 逆像は必ず存在する.

例 1.7 写像 f を, $f: \mathbb{R} \ni x \mapsto [x] \in \mathbb{R}$ (x を超えない最大の整数) で定義する. f の像は $f[\mathbb{R}] = \mathbb{Z}$ である. 部分集合の像はたとえば $f[\{x \in \mathbb{R} \mid |x| < 2\}] = \{-2, 1, 0, 1\}$ である. 逆像はたとえば $f^{-1}[\{1, 2, 3\}] = \{x \in \mathbb{R} \mid 1 \leq x < 4\}$ である. また, $f^{-1}[\{0.5\}] = \emptyset$ である.

次に特殊な写像を定義する.

定義 1.14 (恒等写像) 以下のような写像 $\text{id}_X: X \rightarrow X$ を ^{こうとうしゃぞう}恒等写像 (identity map) という.

$$X \ni x \mapsto x \in X$$

恒等写像とは, 任意の $x \in X$ を x 自身にうつす写像のことである. /

なお, 集合 X, Y について, $X = Y$ でなくとも $X \subset Y$ を満たせば写像 $\iota: X \ni x \mapsto x \in Y$ は定義できる. $X = Y$ のとき当然 ι は恒等写像であるが, $X \subsetneq Y$ なら ι は ^{ほうがんしゃぞう}包含写像 (inclusion map) であり恒等写像ではない.

例 1.8 \mathbb{N} から \mathbb{N} への写像 $f: x \mapsto x$ は恒等写像 $\text{id}_{\mathbb{N}}$ である. しかし, \mathbb{N} から \mathbb{Z} への写像 $g: x \mapsto x$ は包含写像であるが, 恒等写像ではない.

7) ここでは逆像を $f^{-1}[B]$ とかいたが, 逆写像と全く同じように $f^{-1}(B)$ と書く場合も多い.

定義 1.15 (単射) 写像 $f: X \rightarrow Y$ は、任意の $x, x' \in X$ に対して、 $f(x) = f(x')$ ならば $x = x'$ が成り立つとき、**単射** (injection) であるという。／

単射の定義は「 $x \neq x'$ ならば $f(x) \neq f(x')$ 」と言い換えることもできる。

定義 1.16 (全射) 写像 $f: X \rightarrow Y$ は、任意の $y \in Y$ に対して、 $x \in X$ が存在して、 $y = f(x)$ となるとき、**全射** (surjection) であるという。／

定義 1.17 (全単射) 写像 $f: X \rightarrow Y$ が単射かつ全射のとき、**全単射** (bijection) であるという。／

集合 X と Y のあいだに全単射が存在する場合、この 2 つを同じ集合とみなすことができる (ことがある)。

単射を $X \hookrightarrow Y$ 、全射を $X \twoheadrightarrow Y$ 、全単射を $X \xrightarrow{\sim} Y$ とかくこともある [1][2]。

例 1.9 包含写像 $X \hookrightarrow Y$ は単射である。

次に 2 つ以上の写像の関係についてみる。

定義 1.18 (写像の一致) 写像 $f: X \rightarrow Y$ と $g: X \rightarrow Y$ が等しいとは、任意の $x \in X$ に対して、 $f(x) = g(x)$ であることをいう。／

定義 1.19 (写像の合成) X, Y, Z を集合、 $f: X \rightarrow Y$ 、 $g: Y \rightarrow Z$ を写像とする。任意の $x \in X$ を $g(f(x)) \in Z$ にうつす写像を f と g の**合成写像**といい、 $g \circ f$ であらわす。／

定義 1.20 (逆写像) X, Y を集合、 $f: X \rightarrow Y$ を写像とする。写像 $g: Y \rightarrow X$ が

$$f \circ g = \text{id}_Y \quad \text{かつ} \quad g \circ f = \text{id}_X$$

をみたすとき、 g は f の**逆写像**であるといい、 f^{-1} とかく⁸⁾。／

定理 1.10 写像 $f: X \rightarrow Y$ に対して、逆写像 $f^{-1}: Y \rightarrow X$ が存在する必要十分条件は、 f が全単射であることである。

証明 必要 $g \circ f = \text{id}_X$ 、 $f \circ g = \text{id}_Y$ にそれぞれ命題 1.12 を適用すればただちに従う。

十分 f が全単射とする。 f は全射なので、任意の $y \in Y$ に対して $f(x) = y$ である $x_y \in X$ が存在する。さらに、 f は単射なので、 $f(x_y) = y$ をみたす $x_y \in X$ はただひとつである。そこで、対応 $f^{-1}: y \mapsto x_y$ を定めれば、これが f の逆写像になっている。□

写像の合成について、以下は基本的である。

8) $f \circ g = g \circ f = \text{id}$ と覚えている人がいるかもしれないが、誤り。 $f \circ g: Y \rightarrow Y$ と $g \circ f: X \rightarrow X$ は一般に異なる写像である。

命題 1.11 X, Y, Z, W を集合, $f: Z \rightarrow W, g: Y \rightarrow Z, h: X \rightarrow Y$ を写像とする. このとき $f \circ (g \circ h) = (f \circ g) \circ h$ である.

したがって, $f \circ g \circ h$ と書いてよい.

証明 任意の元 $x \in X$ に対して,

$$[f \circ (g \circ h)](x) = f([g \circ h](x)) = f(g(h(x)))$$

$$[(f \circ g) \circ h](x) = [f \circ g](h(x)) = f(g(h(x)))$$

より $[f \circ (g \circ h)](x) = [(f \circ g) \circ h](x)$ であることから従う. \square

命題 1.12 写像 $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow X$ について, $g \circ f = \text{id}_X$ とする. このとき,

(1) f は **単射**.

(2) g は **全射**.

証明 (1) $x, y \in X$ に対し,

$$f(x) = f(y) \implies g \circ f(x) = g \circ f(y) \implies x = y$$

(2) 任意の $x \in X$ に対し, $x = g(f(x))$ となる $f(x) \in Y$ が存在する. \square

命題 1.13 写像 $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow Z$ がともに **全単射** であれば, 合成写像 $g \circ f: X \rightarrow Z$ も全単射であり, その **逆写像** は

$$(g \circ f)^{-1} = f^{-1} \circ g^{-1}$$

証明 実際, 命題 1.11 を使えば

$$(f^{-1} \circ g^{-1}) \circ (g \circ f) = f^{-1} \circ (g^{-1} \circ g) \circ f = f^{-1} \circ f = \text{id}_X$$

であり, 同様に $(g \circ f) \circ (f^{-1} \circ g^{-1}) = \text{id}_Z$ も示せる. \square

定義 1.21 (写像の制限) X, Y を集合, $f: X \rightarrow Y$ を写像とする. 部分集合 $U \subset X$ に対し, 写像 $f|_U: U \rightarrow Y$ を

$$f|_U: U \ni x \mapsto f(x) \in Y$$

で定める. $f|_U$ を f の **制限** (restriction) という. \diagup

1.4 集合の濃度

この節では“集合の大きさ”である「濃度」を定義する.

定義 1.22 集合 X の“元のかず”を濃度^{のうど} (cardinality) という. X の濃度を $|X|$, $\#X$ などとあらわす. /

濃度とは, 集合がもつ‘元の数’を一般化した概念である. X が有限集合の場合, X の濃度は元の数そのものである. しかし, X が元を無限に持つときにも濃度 $\#X$ は定義できる. さらに, 次の定義からは, 無限大の濃度にも差があることがわかる.

定義 1.23 (濃度の大小) X, Y を集合とする. それぞれの濃度の関係を, 次のように定める.

- (1) 集合 X から Y の間に全単射 $f: X \rightarrow Y$ が存在するとき, X と Y の濃度は等しいと定め, $X \sim Y$ とかく.
- (2) 集合 X から Y への単射 $f: X \rightarrow Y$ が存在し, Y から X への単射 $g: Y \rightarrow X$ が存在しないとき, X の濃度は Y よりも小さいと定める.

/

ある濃度をもつ集合には, 特別な名前がついている.

定義 1.24 (有限集合) 集合 X の濃度が $0, 1, 2, \dots$ のとき (すなわち元を有限個だけもつとき), X を**有限集合** (finite set) という. 有限集合でない集合を**無限集合** (infinite set) という. /

定義 1.25 (可算^{かさん}集合) 集合 X の濃度が \mathbb{N} の濃度と等しいとき, X を**可算無限集合** (countably infinite set) あるいは**可算集合** (countable set) という. /

定義 1.26 (高々^{たかだか}可算集合) 可算無限集合と有限集合をあわせて**高々可算集合** (at most countable set) または**可算集合** (countable set) という.

高々可算でない集合を**非可算集合** (uncountable set) という. /

定義からわかるように, 「可算集合」という言葉は紛らわしいので使わないことにする.

「集合 X は高々可算」「可算無限個の元」などの言い方もする.

§ 11 では「可算無限個の集合 A_1, A_2, \dots 」という表現があるが, これは A_1 や A_2 が可算無限集合といっているのではなく, A_1, A_2, \dots の数が可算無限個あるということである⁹⁾.

命題 1.14 有理数全体の集合 \mathbb{Q} は**可算無限集合**である.

にわかには信じがたいが, 自然数の‘かず’と有理数の‘かず’は同じだと主張している.

9) 形式的には**集合族** $\{A_1, A_2, \dots\}$ が可算無限集合であるということ.

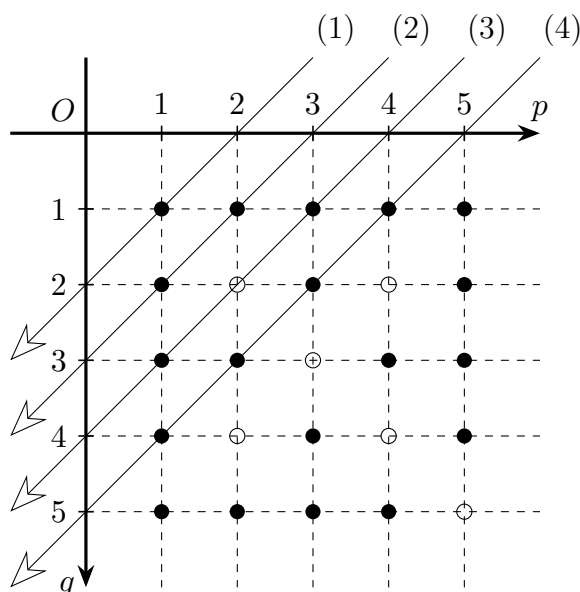


図 1.1: 正の有理数に番号をつける方法. まず図のように格子をかき, 正の有理数 p/q に対応する点を黒く塗る. 次に (1) のように線を引くと, 有理数 $1/1 = 1$ があるので, これを 1 番目の有理数とする. 続けて (2) の線を引くと, 有理数 2 と $1/2$ があるので, それぞれ順に 2 番目と 3 番目の有理数とする. これを (3), (4) と繰り返すと, 正の有理数すべてに番号がつけられる.

証明 まず, 正の自然数に図 1.1 の方法で番号をつけると,

$$1, 2, \frac{1}{2}, 3, \frac{1}{3}, 4, \frac{2}{3}, \frac{3}{2}, \frac{1}{4}, \dots$$

となる. これを正負交互に並べる. すると

$$\begin{matrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) \\ 0, & 1, & -1, & 2, & -2, & \frac{1}{2}, & -\frac{1}{2}, & 3, & -3, \dots \end{matrix}$$

となる. このようにして有理数と番号 (自然数) が 1 対 1 に結び付く. □

定理 1.15 実数全体の集合 \mathbb{R} は非可算無限集合である [5, §7].

証明 $(0, 1] \subset \mathbb{R}$ が非可算であることを示せば十分である. まず $(0, 1]$ は明らかに有限集合ではない. そこで, $(0, 1]$ が可算無限集合であると仮定する. $(0, 1]$ の元 (つまり 0 より大きく 1 以下の実数) が自然数で x_1, x_2, \dots とラベル付けされるので, それぞれ小数展開して

$$x_1 = 0.c_{11}c_{12}c_{13}c_{14}c_{15} \dots$$

$$x_2 = 0.c_{21}c_{22}c_{23}c_{24}c_{25} \dots$$

$$x_3 = 0.c_{31}c_{32}c_{33}c_{34}c_{35} \dots$$

\vdots

のように並べる¹⁰⁾。ここで

$$y := 0.a_1a_2a_3a_4a_5 \dots ; \quad a_i := \begin{cases} 1 & \text{if } c_{ii} = 0 \\ 0 & \text{if } c_{ii} \neq 0 \end{cases}$$

は明らかに $(0,1]$ の元であるが、どの x_i とも（小数点以下 i 桁目が）一致しない。したがって $(0,1]$ が可算であるという仮定が誤りである [5, §7]. \square

命題 1.16 任意の無限集合は、**可算無限**である部分集合を持つ。

証明 無限集合 X からある元 x_1 をとる。次に、 $X \setminus \{x_1\}$ から元 x_2 を適当に選んでとる。さらに、 $X \setminus \{x_1, x_2\}$ から元 x_3 をとる。 X は無限集合ゆえ、この操作を無限回繰り返すことができる¹¹⁾。このように構成された集合 $\{x_1, x_2, x_3, \dots\}$ は可算無限集合である。 \square

系 1.17 可算無限は、無限の中で最も小さい。

証明 命題 1.16 より、任意の無限集合が可算無限集合を含む、すなわち無限の大きさは可算無限以上であることから従う。 \square

命題 1.18 $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ は可算無限である。より一般に、 $\underbrace{\mathbb{N} \times \dots \times \mathbb{N}}_{\text{有限個}}$ は可算集合である。

証明 $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ が可算であることは、図 1.1 とまったく同じ手順で示される。 \square

この節で最も重要なのは、無限の中にもレベルがあるということである。すなわち、

- (1) 有限個
- (2) 可算無限個（たとえば \mathbb{N} , \mathbb{Q} , $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ ）
- (3) 非可算無限個（たとえば \mathbb{R} ）

可算であるか非可算であるかの区別は重要である。

1.5 同値類

有理数 $1/3$ と $2/6$ は、見た目こそ違うが同じ数である。このようなものを「同じ」として扱う方法が同値類^{どうちるい}である。

まず同値関係について見る。

10) このとき、有限小数 0.2 は $0.19999\dots$ のように無限小数になるように表記する。こうすることで、小数展開が一意になる [5, §7].

11) ここで、無限集合から元をえらぶという操作を無限回行っている。この操作が可能であることは、実は選択公理によって保障される。選択公理は基底の存在定理の証明でも用いられる、数学で最も基本的な（そして最も議論をよんだ）公理のひとつである。

定義 1.27 (二項関係) X を集合とする. 規則 ρ が X 上の**二項関係** (binary relation) であるとは, 任意の $x, y \in X$ に対し, $x \rho y$ が満たされるか満たされないかを判別できるときをいう. /

例 1.19 不等号 $<$ は \mathbb{R} 上の二項関係である. 実際, 任意の $a, b \in \mathbb{R}$ に対し, $a < b$ が真であるか偽であるかを判別できる.

定義 1.28 (同値関係) X を集合とする. X 上の二項関係 \sim が**同値関係** (equivalence relation) であるとは, 以下をすべて満たすことをいう.

- (1) (**反射律** (reflexivity)) 任意の $x, y \in X$ に対し, $x \sim x$ である.
- (2) (**対称律** (symmetry)) 任意の $x, y \in X$ に対し, $x \sim y$ ならば $y \sim x$ である.
- (3) (**推移律** (transitivity)) 任意の $x, y, z \in X$ に対し, $x \sim y$ かつ $y \sim z$ ならば $x \sim z$ である.

/

例 1.20 任意の集合 X に対して, $=$ は X 上の自明な同値関係である.

例 1.21 \mathbb{C} 上の二項関係 \sim を

$$x \sim y \iff |x| = |y|$$

で定めると, \sim は同値関係である.

この同値関係を使って, 同値類というものを定義できる.

定義 1.29 (同値類) X を集合, \sim を X 上の同値関係とする. $x \in X$ に対し,

$$[x] := \{y \in X \mid x \sim y\} \subset X \quad (1.9)$$

を元 x の **同値類** (equivalence class) という. また, x のことを同値類 $[x]$ の **代表元** (representative) という. /

定義 1.30 (商集合) X を集合, \sim を X 上の同値関係とする. 同値類全体の集合

$$X/\sim := \{[x] \subset X \mid x \in X\} \quad (1.10)$$

を **商集合** (quotient set) という, /

例 1.22 \mathbb{Z} に対し、同値関係 \sim を

$$x \sim y \iff x - y \text{ が } 3 \text{ で割りきれ}$$

で定める。つまり、 x を 3 で割ったときの余りと y を 3 で割ったときの余りが同じであるとき、 $x \sim y$ とする。たとえば、 $0 \sim 3 \sim 6 \sim \dots$ であり、 $-1 \sim 2 \sim 5 \sim \dots$ である。したがって同値類は、

$$\begin{aligned} [0] &= \{\dots, -3, 0, 3, 6, 9, \dots\} & [1] &= \{\dots, -2, 1, 4, 7, 10, \dots\} \\ [2] &= \{\dots, -1, 2, 5, 8, 11, \dots\} \end{aligned}$$

であり、商集合 $\mathbb{Z}/\sim = \{[0], [1], [2]\}$ である¹²⁾。

また、 $[0] = [3] = [6] = \dots$ 。このことからわかるように、1 つの同値類に対する代表元の取り方は一般に一意ではない。

明らかに $\mathbb{Z} = [0] \sqcup [1] \sqcup [2]$ であり、同値類が互いに交わらずに \mathbb{Z} を分割している。

例で見た「同値類が互いに交わらずに集合を分割する」ことは、一般の集合においても成り立つ。

定理 1.23 同値関係 \sim が定義された集合 X は、同値類によって互いに交わらない部分集合に分割される。すなわち適当な $x_1, x_2, \dots \in X$ を用いて

$$X = \bigsqcup_{\lambda \in \Lambda} [x_\lambda] \quad (\text{非交和 (定義 1.8)})$$

証明 $X = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} [x_\lambda]$ は明らかなので、非交和であることを示す。 $[x] \cap [y] \neq \emptyset$ なら $[x] = [y]$ を示せばよい。

そこで $z \in [x] \cap [y]$ とする。 $z \in [x]$ より $x \sim z$ であり、 $z \in [y]$ なので $y \sim z$ である。 \sim の対称律と推移律を用いると、 $x \sim y$ がいえる。したがって $[x] = [y]$ である。 \square

1.6 便利な記号

この節では、数式を扱ううえで便利な記号を導入する。

定義 1.31 (クロネッカーのデルタ) 次のように定義される $\delta_{i,j}$ をクロネッカーのデルタという：

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j, \\ 0 & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (1.11)$$

12) この場合の商集合を特に $\mathbb{Z}/3$ とかくこともある

§2 距離空間と位相空間

2.1 距離空間

定義 2.1 (距離) X を集合とする. 写像 $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ が以下を満たすとき, これを**距離** (distance) あるいは**計量** (metric) という.

- 任意の $x, y, z \in X$ に対し,
 - (1) $d(x, y) \geq 0$ である. ただし, $d(x, y) = 0$ となるのは $x = y$ のときに限る.
 - (2) $d(x, y) = d(y, x)$ である.
 - (3) $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ である.

(X, d) を**距離空間** (metric space) という. /

例 2.1 $X = \mathbb{R}^n$ (実ユークリッド空間) とする. $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ に対して, $d_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2}$ と定めると, これは距離である.

特に, 実数全体の集合 \mathbb{R} は, 距離 $d(x, y) := |x - y|$ に対して距離空間になる.

ベクトル空間 V においてノルムが定義されているとする. 以下に示すように, ノルムは距離の一種である.

命題 2.2 V をノルム空間 (定義 6.5), $\|\bullet\|$ を V 上のノルムとする. $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$ に対し, $\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|$ は, V 上の距離である. すなわち, ノルム空間は距離空間である.

証明 ノルムの公理 (定義 6.5) から距離の公理が導かれることを示せばよい. □

距離空間を考える上では, 距離が定義されている**普遍集合**を世界のすべてと考えるほうが都合がよい. このような考えのもとで, 補集合という概念が定義される.

定義 2.2 (X, d) を距離空間, $A \subset X$ を部分集合とする. 集合

$$\{x \in X \mid x \notin A\}$$

を A の^{ほしゅうごう}**補集合**という. /

2.2 内部と閉包, 開集合と閉集合

この節では, ヒルベルト空間を扱ううえで必要となる開集合・閉集合という概念を定義する. なお, ヒルベルト空間において有用であるのは 2.4 節での閉集合の定義であるが, ややわかりづらいので, まずは ε -近傍を用いて直感にあった定義をする.

定義 2.3 (X, d) を距離空間, $\varepsilon > 0$ をある実数とする. ある点 $a \in X$ に対し, ε -近傍を

$$N(a; \varepsilon) := \{x \in X \mid d(x, a) < \varepsilon\} \quad (2.1)$$

で定める. /

(X, d) を距離空間, $A \subset X$ を部分集合とする.

定義 2.4 $a \in X$ が A の内点^{ないてん}であるとは, ある $\varepsilon > 0$ が存在して, $N(a; \varepsilon) \subset A$ となることをいう.

A の内点全体の集合を, A の内部^{ないぶ} (interior) といい, A° , $\text{int } A$, A^i などとあらわす. /

定義 2.5 $a \in X$ が A の触点^{しよくてん}であるとは, 任意の $\varepsilon > 0$ に対し, $N(a; \varepsilon) \cap A \neq \emptyset$ となることをいう.

A の触点全体の集合を, A の閉包^{へいほう} (closure) といい, \bar{A} , $\text{cl}(A)$, A^a などとあらわす. /

平たく言えば, A から境界をのぞいたものが内部 $\text{int } A$, A に境界を入れたものが閉包 $\text{cl } A$ である.

例えば, $X = \mathbb{R}$, $A = (a, b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}$ (ただし $-\infty < a < b < \infty$) とする. このとき, $\text{int } A = (a, b)$, $\text{cl } A = [a, b]$ である.

例 2.3 (X, d) を距離空間とすると, $\text{int } X = X$, $\text{int } \emptyset = \emptyset$, $\text{cl } X = X$, $\text{cl } \emptyset = \emptyset$ である.

命題 2.4 距離空間 (X, d) の部分集合 $A \subset X$ に対し, つねに $\text{int } A \subset A \subset \text{cl } A$ である.

証明 (1) まず $\text{int } A \subset A$ を示す. $a \in \text{int } A$ をとると, 内部の定義より, ある ε -近傍 $N(a; \varepsilon)$ が存在して,

$$N(a; \varepsilon) \subset A$$

である. ここで $a \in N(a; \varepsilon)$ であるから, $a \in A$ が示される.

(2) 次に $A \subset \text{cl } A$ を示す. $a \in A$ を任意にとる. このとき, 任意の $\varepsilon > 0$ に対して $a \in N(a; \varepsilon)$ だから,

$$N(a; \varepsilon) \cap A \neq \emptyset$$

である。よって $a \in \text{cl } A$ 。 □

命題 2.5 距離空間の部分集合 A, B について、 $A \subset B$ であるとき、以下が成り立つ。

- (1) $\text{int } A \subset \text{int } B$
- (2) $\text{cl } A \subset \text{cl } B$

証明 (1) $a \in \text{int } A$ とする。定義より、ある $\varepsilon > 0$ が存在して、

$$N(a; \varepsilon) \subset A \subset B$$

すなわち $a \in \text{int } B$ である。

- (2) $a \in \text{cl } A$ とする。定義より、任意の $\varepsilon > 0$ に対し、

$$\emptyset \neq N(a; \varepsilon) \cap A \subset N(a; \varepsilon) \cap B$$

だから $N(a; \varepsilon) \cap B \neq \emptyset$ 。よって $a \in \text{cl } B$ である。 □

内部と閉包は、次のような関係で結ばれる。

補題 2.6 距離空間の部分集合 A について、 $(\text{int } A)^c = \text{cl } (A^c)$ である。

証明 次のような同値変形によって示される。

$$\begin{aligned} x &\in (\text{int } A)^c \\ \Leftrightarrow x &\notin \text{int } A \\ \Leftrightarrow \text{任意の } \varepsilon > 0 \text{ に対し, } N(x; \varepsilon) &\not\subset A \\ \Leftrightarrow \text{任意の } \varepsilon > 0 \text{ に対し, } N(x; \varepsilon) \cap A^c &\neq \emptyset \\ \Leftrightarrow x &\in \text{cl } (A^c) \end{aligned}$$

□

補題 2.6 より、内部に関して成立する性質は、その補集合をとることで閉包に対する性質として書き換えられる。

定理 2.7 内部と閉包について、次の冪等性が成り立つ。

- (1) $\text{int } (\text{int } A) = \text{int } A$
- (2) $\text{cl } (\text{cl } A) = \text{cl } A$

証明 命題 2.4 より、 $\text{int } (\text{int } A) \supset \text{int } A$ および $\text{cl } (\text{cl } A) \subset \text{cl } A$ を示せば十分である。

- (1) すべての $a \in \text{int } A$ について、 $x \in \text{int } (\text{int } A)$ となること、つまり、ある $\varepsilon > 0$ が存在して、 $N(a; \varepsilon) \subset \text{int } A$ となることを示せばよい。そこで $a \in \text{int } A$ とすれば、内部の

定義より, ある $\varepsilon > 0$ が存在して, $N(a; \varepsilon) \subset A$ である. 内部をとる操作は包含を保ち (命題 2.5), また $\text{int } N(a; \varepsilon) = N(a; \varepsilon)$ なので,

$$A \supset \text{int } N(a; \varepsilon) = N(a; \varepsilon)$$

(2) 定理 2.7 を使うと,

$$\text{cl}(\text{cl } A) = (\text{int}((\text{cl } A)^c))^c = (\text{int}(((\text{int } A^c)^c)^c))^c = (\text{int}(\text{int } A^c))^c$$

である. ここで $\text{int}(\text{int}(A^c)) = \text{int}(A^c)$ だったから,

$$\text{cl}(\text{cl } A) = (\text{int}(\text{int } A^c))^c = (\text{int}(A^c))^c = \text{cl } A \quad \square$$

命題 2.8 A, B を距離空間の部分集合とする.

$$(1) \text{ int}(A \cap B) = \text{int } A \cap \text{int } B$$

$$(2) \text{ cl}(A \cup B) = \text{cl } A \cup \text{cl } B$$

なお, $\text{int}(A \cup B) = \text{int } A \cup \text{int } B$ や, $\text{cl}(A \cap B) = \text{cl } A \cap \text{cl } B$ は, 一般には成立しない. 例えば距離空間 \mathbb{R} の部分集合 $A = [a, b]$, $B = [b, c]$ とすれば, $A \cup B = [a, c]$ である. ところが,

$$\text{int}(A \cup B) = (a, c) \neq (a, b) \cup (b, c) = \text{int } A \cup \text{int } B$$

である. 左辺は $b \in \mathbb{R}$ を含むが, 右辺は含まない.

証明 (1) $\text{int}(A \cap B) \subset \text{int } A \cap \text{int } B$ について $A \cap B \subset A$ なので, $\text{int}(A \cap B) \subset \text{int } A$.

$A \cap B \subset B$ なので, $\text{int}(A \cap B) \subset \text{int } B$. よって, $\text{int}(A \cap B) \subset \text{int } A \cap \text{int } B$ である.

$\text{int}(A \cap B) \supset \text{int } A \cap \text{int } B$ について $x \in \text{int } A \cap \text{int } B$ とする. $x \in \text{int } A$ だから, ある $\varepsilon > 0$ が存在し, $N(x; \varepsilon) \subset A$. また, $x \in \text{int } B$ だから, ある $\varepsilon' > 0$ が存在し, $N(x; \varepsilon') \subset B$. そこで, ε と ε' のうち小さいほうを $\bar{\varepsilon}$ とすれば, $N(x; \bar{\varepsilon}) \subset A \cap B$ である. よって $x \in \text{int}(A \cap B)$ が示された.

(2) 補題 2.6 を使えば, int に帰着される.

$$\begin{aligned} \text{cl}(A \cup B) &= (\text{int}(A \cup B)^c)^c = (\text{int}(A^c \cap B^c))^c \\ &= \text{cl}((A^c \cap B^c)^c) = \text{cl}(A \cup B) \end{aligned} \quad \square$$

定義 2.6 (開集合と閉集合) (X, d) を距離空間とする.

(1) $A \subset X$ の内部 $\text{int } A$ が A 自身と一致するとき, A を^{かいしゅうごう}開集合 (open set) (あるいは開である) という.

(2) $A \subset X$ の閉包 $\text{cl } A$ が A 自身と一致するとき, A を^{へいしゅうごう}閉集合 (closed set) (あるいは閉である) という.

／

例 2.9 (自明な開集合・閉集合) (X, d) を距離空間とすると. 例 2.3 より, X と \emptyset はいずれも開集合かつ閉集合である.

系 2.10 距離空間の任意の部分集合 A について, その内部 $\text{int } A$ は開集合であり, 閉包 $\text{cl } A$ は閉集合である.

証明 定理 2.7 (冪等性) から直ちに従う. □

定理 2.11 開集合の補集合は閉集合である. 逆に, 閉集合の補集合は開集合である.

証明 補題 2.6 を使うと,

$$A \text{ が開集合} \iff \text{int } A = A$$

$$\iff (\text{int } A)^c = A^c$$

$$\iff \text{cl } (A^c) = A^c \iff A^c \text{ は閉集合}$$

□

定理 2.12 開集合について, 以下が成り立つ.

- (1) U_1, \dots, U_n が開集合であれば, $U_1 \cap \dots \cap U_n$ も開集合である.
- (2) U_λ ($\lambda \in \Lambda$: 添字) が開集合であれば, $\bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda$ は開集合である.

系 2.13 閉集合について, 以下が成り立つ.

- (1) A_1, \dots, A_n が閉集合であれば, $A_1 \cup \dots \cup A_n$ も閉集合である.
- (2) A_λ ($\lambda \in \Lambda$: 添字) が閉集合であれば, $\bigcap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$ は閉集合である.

定理 2.12 の証明 (1) $n = 2$ の場合に示せば十分である. U_1, U_2 を開集合, $U := U_1 \cap U_2$ とすれば, 命題 2.8 より,

$$\text{int } U = \text{int } U_1 \cap \text{int } U_2 = U_1 \cap U_2 = U$$

だから, U は開集合である.

- (2) $U := \bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda$ とする. $U \subset \text{int } U$ を示せばよい. そこで $x \in U$ とすると, 定義より, ある $\lambda_0 \in \Lambda$ が存在して, $x \in U_{\lambda_0}$ となる. U_{λ_0} は開集合なので, $x \in \text{int } U_{\lambda_0}$. よってある $\varepsilon > 0$ が存在し, $N(x; \varepsilon) \subset U_{\lambda_0}$ となる. したがって $N(x; \varepsilon) \subset U$ であるから, $x \in \text{int } U$ である. □

系 2.13 の証明 U が開集合であれば U^c が閉集合であることに加えて

$$(1) (U_1 \cap \dots \cap U_n)^c = U_1^c \cup \dots \cup U_n^c$$

$$(2) (\bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda)^c = \bigcap_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda^c$$

を使えば定理 2.12 に帰着される. □

命題 2.14 距離空間の部分集合 A について,

- (1) A の内部 $\text{int } A$ は, A に含まれる開集合すべての和集合に一致する.
- (2) A の閉包 $\text{cl } A$ は, A を含む閉集合すべての共通部分に一致する.

証明

□

系 2.15 距離空間の部分集合 A について,

- (1) A の内部 $\text{int } A$ は, A に含まれる開集合のうち最大である.
- (2) A の閉包 $\text{cl } A$ は, A を含む閉集合のうち最小である.

証明 命題 2.14 より明らかである.

□

定義 2.7 (稠密) (X, d) を距離空間とする. $A \subset B$ をみたす X の 2 つの部分集合について, $B \subset \text{cl } A$ であるとき, A は B において稠密 (dense) であるという [11].

特に $\text{cl } A = X$ であるとき, 単に A は稠密であるということがある. /

命題 2.16 距離空間の部分集合 A が B において稠密である必要十分条件は, 任意の $x \in B$ の任意の近傍が A と共通部分を持つことである [11].

証明 必要性 $x \in B$ の近傍を N とおく. x は N の内点であるから, $N(x; \varepsilon) \subset N$ となる $\varepsilon > 0$ が存在する. 一方, A が B において稠密という仮定から, 任意の $x \in B$ は A の閉包に含まれる. すなわち任意の $\varepsilon > 0$ に対して, $N(x; \varepsilon) \cap A \neq \emptyset$ である. したがって, $N \cap A \neq \emptyset$ がいえる.

十分性 任意の $x \in B$ に対して, その ε -近傍 $N(x; \varepsilon)$ を考えると, 仮定より任意の $\varepsilon > 0$ に対して $N(x; \varepsilon) \cap A \neq \emptyset$ だから, $x \in \text{cl } A$. □

定義 2.8 距離空間が稠密な高々可算集合をもつとき, 可分 (separable) であるという. /

2.3 収束列とコーシー列

ヒルベルト空間を扱ううえで避けて通れないのが, 「完備」^{かんび} という概念である. 完備性を定義するための準備として, ある値に収束する数列について議論する.

これから X の点列といった場合, 自然数で順序付けられた X の可算部分集合, つまり $(x_i)_{i \in \mathbb{N}} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots)$ であり, $i \in \mathbb{N}$, $x_i \in X$ であるものをいうことにする.

集合 X 上の点列を, 自然数全体から X への写像 $f: \mathbb{N} \rightarrow X$ ととらえることもできる. この立場からは, X 上の点列全体の集合を $X^{\mathbb{N}}$ とかく.

定義 2.9 (収束列) (X, d) を距離空間とする. X の点列 $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ が $x \in X$ に**収束する** (converge) とは, 任意の $\varepsilon > 0$ に対し, ある $N \in \mathbb{N}$ が存在して, 任意の $n > N$ に対し, $d(x_n, x) < \varepsilon$ となることをいう.

このときの x のことを**極限** (limit) という [5]. 収束先ということもある.

また, X の点列 $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ が**収束列** (convergent sequence) であるとは, この点列がある $x \in X$ に収束することをいう. /

記号 \lim を用いると, 点列 (x_i) が x に収束することを

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, x) = 0$$

とかける.

収束列の極限はただ一つに定まる. 実際, X の点列 (x_i) の極限が x と x' の2つあったとすると,

$$\begin{aligned} d(x, x') &\leq d(x, x_n) + d(x_n, x) \quad (\text{三角不等式}) \\ &= d(x_n, x) + d(x_n, x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

であるので, **距離の公理** より $x = x'$ である.

定義 2.10 (コーシー列) (X, d) を距離空間とする. X の点列 (x_1, x_2, \dots) が**コーシー列** (Cauchy sequence) であるとは, 任意の $\varepsilon > 0$ に対し, ある $N \in \mathbb{N}$ が存在して, 任意の $n, m > N$ に対し, $d(x_n, x_m) < \varepsilon$ となることをいう [5]. /

記号 \lim を用いると, コーシー列の定義は $\lim_{n, m \rightarrow \infty} d(x_n, x_m) = 0$ とかける.

収束列の定義とコーシー列の定義はよく似ているが, 前者は収束先 $x \in X$ の存在を要請しているのに対し, 後者はそうでない. 収束列とコーシー列には, 次のような関係がある.

定理 2.17 距離空間の収束列は常にコーシー列である.

証明 (x_i) を収束列, その極限を $x \in X$ とする. 定義より, 任意の $\delta > 0$ に対し, ある $N > \mathbb{N}$ が存在して, 任意の $n > N$ に対し, $d(x_n, x) < \delta$ である. すると, 任意の $m, n > N$ に対し,

$$\begin{aligned} d(x_m, x_n) &\leq d(x_m, x) + d(x, x_n) \quad (\text{三角不等式}) \\ &= d(x_m, x) + d(x_n, x) \\ &< 2\delta \end{aligned}$$

である. $\delta := \varepsilon/2$ とおけば, コーシー列の条件 (定義 2.10) が成立する. □

距離空間において、すべての収束列はコーシー列であるが、その逆は必ずしも成立しない。

たとえば、 \mathbb{Q} の点列 $(1, 1.4, 1.41, 1.414, \dots)$ は明らかにコーシー列である。しかし、この点列の収束先は $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$ であり、 \mathbb{Q} の収束列でない。

また、开区間 $(0, 1) \subset \mathbb{R}$ の点列 $(0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, \dots)$ は明らかにコーシー列である。しかし、この点列の収束先は $0 \notin (0, 1)$ であり、 $(0, 1)$ の収束列でない。

2.4 距離空間の完備性

定義 2.11 距離空間 (X, d) において、任意のコーシー列が収束列であるとき、**完備** (complete) であるという。このとき、 (X, d) のことを**完備距離空間** (complete metric space) という。／

命題 2.18 (実数の完備性) 実数全体の集合 \mathbb{R} は完備である。

証明 実数の連続性から従う。 □

系 2.19 複素数全体の集合 \mathbb{C} は完備である。

点列による開集合と閉集合の定義

2.2 節で扱った開集合・閉集合は、点列を使って定義することもできる。むしろ、ヒルベルト空間においては点列による定義のほうが有用である。そこで、まず点列の収束を用いて**閉包**を定義しよう。

定義 2.12 (点列による閉包の定義) (X, d) を距離空間、 $A \subset X$ を部分集合とする。 A に属するすべての収束列の極限からなる集合を A の**閉包** (closure) といい、 $\text{cl } A$ とかく。つまり

$$\text{cl } A := \{x \in X \mid \exists (x_i) \subset A \text{ s.t. } \lim_{n \rightarrow \infty} d(x_i, x) = 0\} \quad (2.2)$$

／

定義 2.5 で与えた閉包の定義と一致する。 A の閉包というのは、 A に適当な元を加えて**閉集合**にしたもの、あるいは A のコーシー列が収束するようにしたものと考えることができる。

すでに示したことだが、 A の閉包が A を含むことを、点列のことで証明しよう。

系 2.20 任意の $A \subset X$ の閉包 $\text{cl } A$ について、 $A \subset \text{cl } A$ である。

証明 $x \in A$ とすると、 A の点列 (x, x, x, \dots) は明らかに x に収束するので $x \in \text{cl } A$ である。 \square

2.5 位相空間

この節では、距離空間を一般化した概念である位相空間 (topological space) について述べる。集合に「位相を入れる」ことで、距離空間 (特に ε -近傍) で定義した開集合・閉集合といったものを、距離を使わずに定義できるようになる。

なお、ここで扱う位相空間 (topological space) は、物理学でよく扱う位相空間 (phase space) とは関係のない概念である。

まずは距離空間における位相について定義しておこう。位相の定義には同値なものはいくつかある。例えば、はじめに“**開集合**”を定義するか、あるいはその代わりに“**閉集合**”を定義することがよくある。ほかに“**内部**”，“**閉包**”，もしくは“**近傍系**”のいずれかを定義することによっても、まったく同じ位相が得られる。ここでは開集合を使って位相を定義することにする。

定義 2.13 (距離位相) 距離空間 (X, d) において、すべての開集合 $A \in \mathcal{P}(X)$ (つまり $A \subset_{\text{open}} X$) を集めた集合族を、(距離 d から導かれる) **位相** (topology) ^{いそう} といい、 \mathcal{O}_d であらわす。／

ここでの定義では、「位相＝開集合系」である。一般の位相は、距離空間の場合に調べた開集合の性質 (例 2.9, 定理 2.12) を抽象化することで定義される。

定義 2.14 (位相) X を集合とする。冪集合 $\mathcal{P}(X)$ の部分集合であって、以下の条件を満たす $\mathcal{O} \subset \mathcal{P}(X)$ を**位相** (topology) という。

- (1) $X, \emptyset \in \mathcal{O}$
- (2) $U_1, \dots, U_n \in \mathcal{O}$ なら、 $U_1 \cap \dots \cap U_n \in \mathcal{O}$
- (3) すべての添字 λ について $U_\lambda \in \mathcal{O}$ なら、 $\bigcup_\lambda U_\lambda \in \mathcal{O}$

このとき、 (X, \mathcal{O}) を**位相空間** ^{いそうくわん} (topological space) という。／

• 定義 2.14 より、

- (1) A が開集合であるとは、 $A \in \mathcal{O}$ であることと定める。

• 定理 2.11 より、

- (2) A が閉集合であるとは、 $A^c \in \mathcal{O}$ であることと定める。

- 命題 2.14 より,
 (3) A の内部 $\text{int } A$ を「 A に含まれる開集合すべての和集合」,
 (4) A の閉包 $\text{cl } A$ を「 A を含む閉集合すべての共通部分」と定める.

2.6 位相空間の連続写像

定義 2.15 位相空間とする. 点 $x \in X$ /

2.7 コンパクト集合

定義 2.16 距離空間 (X, d) において, 有界な閉集合 $A \subset X$ を**コンパクト集合** (compact set) という. /

§3 抽象代数学の基礎

3.1 群

定義 3.1 (群) G を集合, $\ast: G \times G \rightarrow G$ を二項演算とする. G の元が, 演算 \ast に対して以下を満たすとき, (G, \ast) は群 (group) であるという.

- (1) 任意の $a, b, c \in G$ に対し, $(a \ast b) \ast c = a \ast (b \ast c)$ である.
 - (2) ある $e \in G$ が存在して, 任意の $a \in G$ に対し, $a \ast e = e \ast a = a$ である.
 - (3) 任意の $a \in G$ に対し, ある $a^{-1} \in G$ が存在して, $a \ast a^{-1} = a^{-1} \ast a = e$ である.
- さらに以下を満たすとき, (G, \ast) をアーベル群 (Abelian group) であるという.
- (4) 任意の $a, b \in G$ に対し, $a \ast b = b \ast a$ である.

群 (G, \ast) のことを単に G とかくこともある. /

例 3.1

$$\mathrm{SO}(n, \mathbb{R}) := \{A: \text{実成分 } n\text{-次正方行列} \mid \det A = 1\}$$

とする. これは行列としての積に対して群をなす.

例 3.2 自然数全体の集合 \mathbb{N} は, 通常のと和 $+$ に対して群をなす.

例 3.3 実数全体の集合 \mathbb{R} は, 通常のと積 \times に対して群をなさない. なぜなら, $0 \in \mathbb{R}$ に対して, $0 \times x = 1$ となるような $x \in \mathbb{R}$ が存在しないため.

3.2 環

定義 3.2 (環) R を集合, $+$ と \ast を R 上の二項演算とする. 以下がみたされるとき, $(R, +, \ast)$ は環 (ring) であるという.

• 和について, $(R, +)$ はアーベル群である. すなわち

- (1) 任意の $a, b, c \in R$ に対し, $(a + b) + c = a + (b + c)$ である.
- (2) ある $0 \in R$ が存在して, 任意の $a \in R$ に対し, $a + 0 = 0 + a = a$ である.

- (3) 任意の $a \in R$ に対し, ある $-a \in R$ が存在して, $a + (-a) = (-a) + a = 0$ である.
- (4) 任意の $a, b \in R$ に対し, $a + b = b + a$ である.
- 積について,
 - (5) 任意の $a, b, c \in R$ に対し, $(a * b) * c = a * (b * c)$ である.
 - (6) ある $1 \in R$ が存在して, 任意の $a \in R$ に対し, $a * 1 = 1 * a = a$ である.
- 和と積の関係について,
 - (7) 任意の $a, b, c \in R$ に対し, $(a + b) * c = a * c + b * c$ であり, $a * (b + c) = a * b + a * c$ である.

さらに積について以下がみたされるとき, $(R, +, *)$ は**可換環** (commutative ring) であるという.

- (9) 任意の $a, b \in R$ に対し, $a * b = b * a$ である.

二項演算 $+$ のことを**和**あるいは**加法**, $*$ のことを**積**あるいは**乗法**という. /

例 3.4 n -次正方形行列全体の集合は, 行列の和 $+$ と積 $*$ に関して環であるが, $n = 1$ の場合をのぞき可換環でない.

3.3 体

これから実数・複素数のもつ性質を抽象化した「^{たい}体」を定義する. 量子力学において扱う体は基本的に複素数体であるので, わざわざ抽象化を行う動機が見えづらいかもしれない. しかし, 例えば量子情報の分野においては体として有限体を扱うことがあるので, ここで一般の体についての性質を議論しておく.

定義 3.3 (体) \mathbb{K} を集合, $+$ と $*$ を \mathbb{K} 上の二項演算とする. 以下がみたされるとき, $(\mathbb{K}, +, *)$ は^{たい}**体** (field) であるという.

- 和について, $(\mathbb{K}, +)$ はアーベル群である.
 - (1) 任意の $a, b, c \in \mathbb{K}$ に対し, $(a + b) + c = a + (b + c)$ である.
 - (2) ある $0 \in \mathbb{K}$ が存在して, 任意の $a \in \mathbb{K}$ に対し, $a + 0 = 0 + a = a$ である.
 - (3) 任意の $a \in \mathbb{K}$ に対し, ある $-a \in \mathbb{K}$ が存在して, $a + (-a) = (-a) + a = 0$ である.
 - (4) 任意の $a, b \in \mathbb{K}$ に対し, $a + b = b + a$ である.
- 積について, $(\mathbb{K} \setminus \{0\}, *)$ はアーベル群である.
 - (5) 任意の $a, b, c \in \mathbb{K}$ に対し, $(a * b) * c = a * (b * c)$ である.
 - (6) ある $1 \in \mathbb{K}$ が存在して, 任意の $a \in \mathbb{K}$ に対し, $a * 1 = 1 * a = a$ である.

- (7) 任意の $a \in \mathbb{K} \setminus \{0\}$ に対し, ある $a^{-1} \in \mathbb{K}$ が存在して, $a * a^{-1} = a^{-1} * a = 1$ である.
- (8) 任意の $a, b \in \mathbb{K}$ に対し, $a * b = b * a$ である.
- 和と積の関係について,
- (9) 任意の $a, b, c \in \mathbb{K}$ に対し, $(a+b)*c = (a*c)+(b*c)$ であり, $a*(b+c) = (a*b)+(a*c)$ である.

／

例 3.5 有理数全体の集合 \mathbb{Q} , 実数全体の集合 \mathbb{R} , 複素数全体の集合 \mathbb{C} は, それぞれ通常の和と積に関して体になる.

体をひとことでいえば, 「四則演算 (和・差・積・商) ができる集合」である. 実数や複素数は体の典型的なものである. 本稿で「体 \mathbb{K} 」と書いてある場合, 実数 \mathbb{R} もしくは複素数 \mathbb{C} と読み替えて差支えない.

3.4 複素数

複素数は物理学を扱ううえで必須のツールである. この節では, まず複素数はどのようにして定義されるのかを見たのちに, 複素数に関する用語を定義し, その性質を調べる.

複素数は次のように構成される¹³⁾. 集合 \mathbb{C} を

$$\mathbb{C} := \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\} \quad (3.1)$$

で定める. もちろん $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$ である. \mathbb{C} の元である順序対 $(a, b) \in \mathbb{R}$ に対し, 和と積を次のように定義する.

$$(a, b) +_{\mathbb{C}} (c, d) := (a + c, b + d) \quad (3.2)$$

$$(a, b) \times_{\mathbb{C}} (c, d) := (ac - bd, ad + bc) \quad (3.3)$$

すると, $(\mathbb{C}, +_{\mathbb{C}}, \times_{\mathbb{C}})$ は**体**になるので, これを**複素数体**と呼ぶ. \mathbb{C} の元を**複素数**^{ふくそすう}と呼び, 記号 i を用いて $(a, b) =: a + bi$ とかく.

証明 \mathbb{C} の元を $x = (a, b)$, $y = (c, d)$, $z = (e, f)$ とする. 積の記号 $\times_{\mathbb{C}}$ は一部省略する.

和について 和が可換かつ結合的であることは明らか. 零元は $0_{\mathbb{C}} := (0, 0) = 0 + 0i$ であり, x に対する和の逆元は $-x = (-a, -b)$ である.

13) 物理学を学ぶにあたっては, 具体的な複素数の計算に習熟しているほうが重要であり, 複素数の構成方法を理解する必要はない. ちなみに, 複素数の構成自体は有理数を構成するのよりもはるかに簡単である.

積について 積が可換であることは明らか. 単位元は $1_{\mathbb{C}} := (1, 0) = 1 + 0i$ であり, $x \neq 0_{\mathbb{C}}$ に対する積の逆元は $(a/\sqrt{a^2 + b^2}, -b/\sqrt{a^2 + b^2})$ である. 積が結合的であることは

$$\begin{aligned}(xy)z &= (ac - bd, bc + ad) \times_{\mathbb{C}} (e, f) \\ &= (a, b) \times_{\mathbb{C}} (ce - df, de + cf) \\ &= x(yz)\end{aligned}$$

分配法則

$$\begin{aligned}(x + y) \times_{\mathbb{C}} z &= (a + c, b + d) \times_{\mathbb{C}} (e, f) \\ &= (ae + ce - bf - df, af + cf + be + de) \\ &= (ae - bf, af + be) +_{\mathbb{C}} (ce - df, cf + de) \\ &= (x \times_{\mathbb{C}} z) +_{\mathbb{C}} (y \times_{\mathbb{C}} z)\end{aligned}$$

□

複素数の積を形式的に展開すると, $(ac + i^2bd) + i(bc + ad)$ となる. これと積の定義 (eq. (3.3)) を見比べると, $i^2 \equiv -1$ と解釈できる. これが虚数単位 i である.

実数 $a \in \mathbb{R}$ は, 複素数 $a = (a, 0)$ とみなすことで, 複素数に組み込むことができる ($\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$). 部分集合 $\mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ の元を^{きょすう}虚数¹⁴⁾という.

複素数 $z = a + bi$ (a, b は実数) に対し, $\operatorname{Re} z = a$ を z の^{じつぶ}実部, $\operatorname{Im} z = b$ を z の^{きょぶ}虚部という.

複素数の^{ぜったいち}絶対値 (absolute value) を

$$|z| = |a + bi| := \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.4)$$

で定める. $0 \leq |z| < \infty$ であり, $|z| = 0$ となるのは $a = b = 0$, つまり $z = 0$ のときに限る.

14) 虚数とは $a + ib$ ($a, b \in \mathbb{R}$, $b \neq 0$) とあらわせる数のことである. したがって, $3i$ のみならず $1 + 3i$ も虚数である. ib ($b \in \mathbb{R}$) とあらわされる数 (たとえば $3i, -2i$) を指す用語は^{じゅんじょすう}純虚数である.

複素共役

複素数 $a + ib$ に対する複素数 $a - ib$ のことを、^{きょうやくふくそすう}共役複素数あるいは^{ふくそきょうやく}複素共役という¹⁵⁾。
複素数 z の複素共役を、 \bar{z} や z^* と書く。

複素共役を用いると、 z の絶対値は

$$|z|^2 = z \cdot z^* \quad (3.5)$$

とかける。実際の計算でもよく使う、非常に有用な関係式である。

複素数についての性質

命題 3.6 $\frac{1}{i} \equiv i^{-1} = -i$ である。

証明 i^{-1} とは i の積に関する逆元であるから、 $i^{-1} \cdot i = 1$ でなければならない。ここで、 $(-i) \cdot i = 1$ であること、および逆元の一意性（**体**の公理）から、 $i^{-1} = -i$ である。 \square

命題 3.7 複素数 z_1, z_2 の絶対値について、以下が成り立つ。

- (1) $|z_1 z_2| = |z_1| |z_2|$
- (2) $|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$ (**三角不等式**)

証明 (1) $z_1 = a_1 + ib_1$, $z_2 = a_2 + ib_2$ とすると、

$$\begin{aligned} |z_1 z_2|^2 &= |a_1 a_2 + i a_1 b_2 + i a_2 b_1 - a_2 b_2|^2 \\ &= (a_1 a_2 - b_1 b_2)^2 + (a_1 b_2 + a_2 b_1)^2 \\ &= (a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2) = |z_1|^2 |z_2|^2 \end{aligned}$$

(2)

\square

命題 3.8 複素数 x, y について、以下の不等式が成り立つ。

$$|x + y|^2 \leq (|x| + |y|)^2 \leq 2(|x|^2 + |y|^2) \quad (3.6)$$

15) ^{きょうえき}共役は誤読。もともとは^{くびき}軛（牛車などを引く牛馬に取り付ける横向きの棒）という字を用いて^{きょうやく}共軛とかいていたが、1946年に定められた当用漢字、1981年の常用漢字への書き換えに伴い^{きょうやく}共役と書かれるようになった。同様の理由で、^{こうさ}交叉は^{かんさう}交差、^{かん}函は「箱」の意は^{かん}関数と書き換えられた。[4] (1963年)のよう古い書籍は「函数」表記を用いている。

常用漢字表に含まれる漢字は意外に少なく、^{くわん}楕円は表外字である。^{けん}汎関数、^{くわん}勾配は2010年の改訂でくわえられた。常用漢字への書き換えの例については、Wikipedia 日本語版の「^{どうおん}同音の漢字による書きかえ」に詳しい。

証明 まず,

$$\begin{aligned}|x+y|^2 &= |x|^2 + 2\operatorname{Re}(xy) + |y|^2 \\ &\leq |x|^2 + 2|x||y| + |y|^2 \\ &= (|x| + |y|)^2\end{aligned}$$

より左側の不等号が示される. 右側の不等号は, 相加相乗平均の関係 $2\sqrt{ab} \leq a+b$ ($a, b > 0$) より明らかである. \square

系 3.9 複素数 x, y について, 以下の不等式が成り立つ.

$$2|xy| = |x|^2 + |y|^2 \quad (3.7)$$

証明 $|x|^2 - 2|x||y| + |y|^2 = (|x| - |y|)^2 \geq 0$ より従う. \square

定理 3.10 (コーシー・シュワルツの不等式) $x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n \in \mathbb{C}$ に対し,

$$\left| \sum_{i=1}^n x_i^* y_i \right|^2 \leq \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n |y_i|^2 \right) \quad (3.8)$$

定理 3.10 は補題 6.11 の特殊な場合 (内積空間 \mathbb{C}^n に対して適用したもの) であるので, 証明はそちらで行う.

極形式

複素数 $z = a + bi$ ($a, b \in \mathbb{C}$) について, $r: |z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ とおく. $r \neq 0$ のとき (すなわち $z \neq 0$ のとき), $\tilde{z} := z/r$ とおけば, $\tilde{z} = \tilde{a} + \tilde{b}i$ ($\tilde{a} = a/r, \tilde{b} = b/r$) であり, さらに $\tilde{a}^2 + \tilde{b}^2 = 1$ である. そこで,

$$\tilde{a} = \cos \theta, \quad \tilde{b} = \sin \theta$$

となる $0 \leq \theta < 2\pi$ がとれる. このとき $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$ であるが, オイラーの公式をつかうと $z = re^{i\theta}$ とかける. そこで, 次のような定義ができる.

定義 3.4 複素数 $z \neq 0$ について,

$$z = re^{i\theta} = r(\cos \theta + i \sin \theta), \quad 0 < r, \quad 0 \leq \theta < 2\pi$$

とかいたとき, r を z の どうけい動径 (radius), θ を z の へんかく偏角 (argument) という¹⁶⁾. また, $e^{i\theta}$ のことを z の いそう位相 (phase) ということがある. /

この表記方法の利点は, 掛け算が容易になることである. 次にあげる性質は, 指数関数 e^x の性質を使えば明らかである.

16) $z = 0$ のとき偏角は定義できない.

命題 3.11 $z_1 = r_1 e^{i\theta_1}$, $z_2 = r_2 e^{i\theta_2}$ ($z_1, z_2 \neq 0$) に対し,

(1) $z_1 z_2 = r_1 r_2 e^{i(\theta_1 + \theta_2)}$

(2) $1/z_1 = (1/r_1) e^{-i\theta_1}$

定理 3.12 (ド・モアブルの定理) 複素数 $z = e^{i\theta}$ と整数 n に対し,

$$z^n = e^{in\theta} = \cos n\theta + i \sin n\theta$$

証明 命題 3.11 を繰り返し適用すればよい¹⁷⁾.

□

17) なお, 複素数 z, w について $(e^z)^w = e^{zw}$ は一般に成立しない.

第2章 ベクトル空間の線形代数

量子力学においては状態を「ベクトル」としてあらわすことは、量子力学を学んだばかりの学生でも知っている。しかし、状態がふつうの数ベクトルであらわされるわけではない。それではここでいう「ベクトル」とは何のことなのだろうか。

数ベクトルのもつ性質を抽出し、抽象的な「ベクトル」を定義する。さらにベクトルの内積、行列をも抽象化し、「線形写像」というものを定義する。線形写像は量子状態から観測可能な物理量を取り出す線形演算子の基礎となる考え方であり、それゆえ線形写像を理解せずに量子力学を理解することはできない。線形代数学とはこのベクトルと線形写像を扱う数学の分野であるが、量子力学とは線形代数であるという人もいるくらいである。

§4 行列

この章では行列の性質を述べる.

4.1 行列の定義

定義 4.1 (行列) \mathbb{K} を **体** (定義 3.3) とする. \mathbb{K} の元 (すなわち数字) を縦横に $m \times n$ 個ならべたものを **行列** (matrix) という.

$$A := \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad a_{ij} \in \mathbb{K} \quad (4.1)$$

縦が**列**, 横が**行**である.

eq. (4.1) において, 上から i 番目, 左から j 番目にある数字 a_{ij} のことを, A の (i, j) -成分という. これを $(A)_{ij}$ とかくこともある. /

eq. (4.1) の行列 A を, $(a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n}$ とあらわすこともある.

定義 4.2 \mathbb{K} -係数の $m \times n$ -行列全体の集合を $M_{mn}(\mathbb{K})$ とあらわす. /

名前がついている特別な行列がいくつかある.

定義 4.3 すべての成分が $0^{1)}$ である行列を**零行列**という.

$$O := \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

/

定義 4.4 (正方行列) 行と列の数が同じ行列, すなわち $n \times n$ -行列を**正方行列** (せいほうぎょうれつ) という. 特に大きさを明示する場合, n -次正方行列という. /

1) 0 とは **体** \mathbb{K} 上で定義された加法に関する単位元のこと.

定義 4.5 正方行列のなかで, (i, i) -成分が 1, それ以外が 0 である行列

$$I := \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

を^{たんいぎょうれつ}**単位行列**という. /

定義 4.6 A を n -次正方行列とする.

$$AA^{-1} = A^{-1}A = I \quad (4.4)$$

となるような n -次正方行列 A^{-1} が存在するとき, A^{-1} を A の**逆行列**という. /

定理 4.1 $n \times n$ -正方行列 A, B について, $AB = I$ ならば $BA = I$ である. したがって, A^{-1} が A の逆行列であることを確かめるには, $AA^{-1} = I$ または $A^{-1}A = I$ のどちらか片方を確認すればよい.

定義 4.7 行列の和・倍・積を以下のように定義する.

(1) 2 つの $m \times n$ 行列 $A = (a_{ij})$, $B = (b_{ij})$ の和は, それぞれの成分の和

$$A + B := (a_{ij} + b_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} \quad (4.5)$$

(2) 行列 $A = (a_{ij})$ の c ($\in \mathbb{K}$) 倍は, それぞれの成分の c 倍

$$c \cdot A := (c \cdot a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} \quad (4.6)$$

(3) $m \times n$ 行列 $A = (a_{ij})$, $n \times l$ 行列 $B = (b_{jk})$ の積は

$$A \cdot B := \left(\sum_{1 \leq j \leq n} a_{ij} \cdot b_{jk} \right)_{1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq l} \quad (4.7)$$

/

命題 4.2 行列の演算についての性質を挙げる. $m \times n$ -行列 O を零行列, $p \times p$ -行列 I , $q \times q$ -行列 I' を単位行列とする.

- $M_{mn}(\mathbb{K})$ は和について**アーベル群** (定義 3.1) をなす. すなわち, $m \times n$ 行列- A, B, C に対し,

(1) (結合律) $(A + B) + C = A + (B + C)$ であり,

(2) (単位元) $A + O = O + A = A$ であり,

- (3) (逆元) $A + (-A) = (-A) + A$ となる $-A$ が存在し,
- (4) (交換律) $A + B = B + A$ である.
- 行列は積について結合的であり, また単位元をもつ. すなわち, $p \times q$ -行列 A , $q \times r$ -行列 B , $r \times s$ -行列 C に対し,
 - (5) (結合律) $(AB)C = A(BC)$ であり,
 - (6) (単位元) $AI = IA = A$ である.
- さらに, $p \times q$ -行列 A, B , $q \times r$ -行列 C, D に対し,
 - (7) (分配律) $(A + B)C = AB + AC$, $A(C + D) = AC + AD$

4.2 数ベクトル

$m \times 1$ -行列のことを数ベクトルという. 数ベクトルの幾何的な意味については 5.1 節で扱うが, ここでは代数的な性質に重点をおく.

定義 4.8 \mathbb{K}^m の元のなかで, 第 i 行の成分のみが 1, ほかの成分が 0 であるもの

$$e_i := \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

をあつめたもの

$$\{e_1, \dots, e_m\}$$

を, \mathbb{K}^m の**標準基底** (canonical basis) という. /

$l \times m$ -行列 A と数ベクトル $\mathbf{x} \in \mathbb{K}^l$ の行列としての積を計算すると, $A\mathbf{x} \in \mathbb{K}^l$ である. したがって, $l \times m$ -行列は \mathbb{K}^m から \mathbb{K}^l への**写像**と見ることができる. これが § 7 で扱う線形写像の第一歩である.

合成写像のようなものを考えることもできる.

系 4.3 $\mathbf{x} \in \mathbb{K}^m$ とする. $k \times l$ -行列 A , $l \times m$ -行列 B に対し, $A(B\mathbf{x}) = (AB)\mathbf{x}$ である.

証明 命題 4.2 の (5) の特別な場合である. □

4.3 置換

定義 4.9 集合 $\{1, 2, \dots, n\}$ から自身への写像 (定義 1.10) のうち全単射であるものを, n -文字の置換^{ちかん}という. それぞれの元を $1 \mapsto \sigma(1), 2 \mapsto \sigma(2), \dots$ とうつすものを

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \cdots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

とかく. n -文字の置換 σ 全体がなす集合を \mathfrak{S}_n とかく. /

定義 4.10 置換 σ のうち恒等写像であるものを恒等置換という. /

定義 4.11 置換 σ の逆写像 σ^{-1} を逆置換という. /

任意の置換 $\sigma \in \mathfrak{S}_n$ は全単射であるから, 逆置換 $\sigma^{-1} \in \mathfrak{S}_n$ が必ず存在する.

定義 4.12 (置換の積) $\sigma, \tau \in \mathfrak{S}_n$ とする. 2つの置換の積 $\sigma\tau$ を, 写像の合成 $\sigma \circ \tau$ として定める. /

なお, 一般に置換の積は交換しない ($\sigma\tau \neq \tau\sigma$).

この記法を用いると, 任意の置換 $\sigma \in \mathfrak{S}_n$ とその逆置換 σ^{-1} について, $\sigma\sigma^{-1} = \sigma^{-1}\sigma =$ 恒等置換である.

命題 4.4 n -文字の置換全体の集合 \mathfrak{S}_n は, 定義 4.12 で定義される積に対して群をなす.

証明 結合律は写像の合成が結合的である (命題 1.11) ことよりいえる. 単位元は恒等置換, 逆元は逆置換である. \square

定義 4.13 置換 $\sigma \in \mathfrak{S}_n$ のうち, $\sigma(i) \neq i$ となる i が 2 つだけのもの, つまり 2 つの数字を入れ替えるだけの置換を互換^{ごかん} (transposition) という. /

命題 4.5 任意の置換は互換の積としてあらわされる.

置換に対し, 互換の積によるあらわしかたは一意ではない. しかし, 次のような事実が成立する.

命題 4.6 任意の置換を互換に分解したとき, 含まれる互換の数の偶奇は積のあらわしかたによらない.

証明は複雑なため省略するが, これによって次に示す sgn の定義を正当化される.

定義 4.14 置換 σ を互換による積であらわしたとき, 互換が奇数個なら $\text{sgn}(\sigma) = -1$, 偶数個なら $\text{sgn}(\sigma) = +1$ となるように $\text{sgn}: \mathfrak{S}_n \rightarrow \{+1, -1\}$ を定義する. これを置換の符号^{ふごう} (sign) という. /

$\text{sgn}(\sigma)$ のことを $(-1)^\sigma$ や $(-)^\sigma$ とかくこともある.

系 4.7 任意の置換 $\sigma, \tau \in \mathfrak{S}_n$ について, $\text{sgn}(\sigma\tau) = \text{sgn}\sigma \cdot \text{sgn}\tau$ である. 特に, $\text{sgn}(\sigma^{-1}) = \text{sgn}(\sigma)$ である.

証明 前半は σ, τ をそれぞれ互換の積であらわせれば明らか. 後半は $\text{sgn}(\sigma) \cdot \text{sgn}(\sigma^{-1}) = \text{sgn}(\sigma \cdot \sigma^{-1}) = \text{sgn}(\text{恒等置換}) = 1$ であることからわかる. \square

4.4 行列式

定義 4.15 n -次の正方行列 $A = (a_{ij})$ に対して,

$$\det A := \sum_{\sigma \in \mathfrak{S}_n} \text{sgn}(\sigma) a_{1,\sigma(1)} a_{2,\sigma(2)} \cdots a_{n,\sigma(n)} \quad (4.8)$$

で定義される写像 $\det: M_{nn}(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{K}$ を **行列式** (determinant) という. \nearrow

命題 4.8 A を n -次正方行列とする. 行列式について, 以下が成り立つ.

- (1) $\det A = \det {}^t A$
- (2) $\det(cA) = c^n \det A$

証明 (1) ${}^t A$ の行列式は

$$\det {}^t A = \sum_{\sigma \in \mathfrak{S}_n} \text{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1),1} a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n}$$

であるが, $\sigma(i)$ が連番になるように $a_{\sigma(i),i}$ の順番を入れ替えることで,

$$\det {}^t A = \sum_{\sigma^{-1} \in \mathfrak{S}_n} \text{sgn}(\sigma^{-1}) a_{1,\sigma^{-1}(1)} a_{2,\sigma^{-1}(2)} \cdots a_{n,\sigma^{-1}(n)}$$

と書き換えられ, 系 4.7 より $\text{sgn}(\sigma) = \text{sgn}(\sigma^{-1})$ であることから従う.

- (2) 行列式の定義より明らかである.

\square

定義 4.16 正方行列 A に対し, **逆行列** A^{-1} が存在するとき, A を **正則行列** (invertible matrix) という. \nearrow

命題 4.9 以下は同値.

- (1) A は正則行列.
- (2) A の行列式 $\det A \neq 0$.
- (3) $Ax = 0$ の解は自明な解 $x = 0$ のみである.

§5 ベクトル空間

量子力学において、系の状態は「ベクトル」を用いてであらわされる。しかし、通常の数ベクトルでは量子力学的状態をあらわせないことがわかる（ここでどこかを引用する）。そこで、数ベクトルの概念を一般化・抽象化する必要がある。この章ではベクトルの性質を抽象化し、ベクトル空間について定義する。

5.1 3次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^3 の性質

この節では、ユークリッド空間 \mathbb{R}^3 における数ベクトルの性質を確かめる。数ベクトルは4.2節でも扱ったが、ここではベクトルの幾何的な意味に焦点を当てる。

n 個の数字²⁾を縦に並べたものを「 n -次の列ベクトル」と呼び、横に並べたものを「 n -次の行ベクトル」と呼ぶ [3]。列ベクトルのことを「縦ベクトル」、行ベクトルを「横ベクトル」ということもある。

たとえば eq. (5.1) の \mathbf{x} は3次の列ベクトル、 \mathbf{y} は3次の行ベクトルである。

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix} \quad \text{where } a, b, c \in \mathbb{C} \quad (5.1)$$

ここで、 a, b, c はそれぞれある複素数である³⁾。 a, b, c のことをそれぞれ、ベクトルの成分^{せいぶん}という。

列ベクトルと行ベクトルは、「転置^{てんち} (transpose)」という操作によって移り変わる。つまり、

$${}^t \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix}, \quad {}^t \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

である。列ベクトルを、転置を用いて ${}^t(a \ b \ c)$ と表記することもある。

ベクトル ${}^t(a, b, c)$ は、ある点から x -軸方向へ a 、 y -軸方向へ b 、 z -軸方向へ c だけ動いた点を結ぶ矢印として考えることができる。

2) ここでは実数または複素数のこと。

3) \mathbb{C} は複素数全体の集合。eq. (1.1) を参照

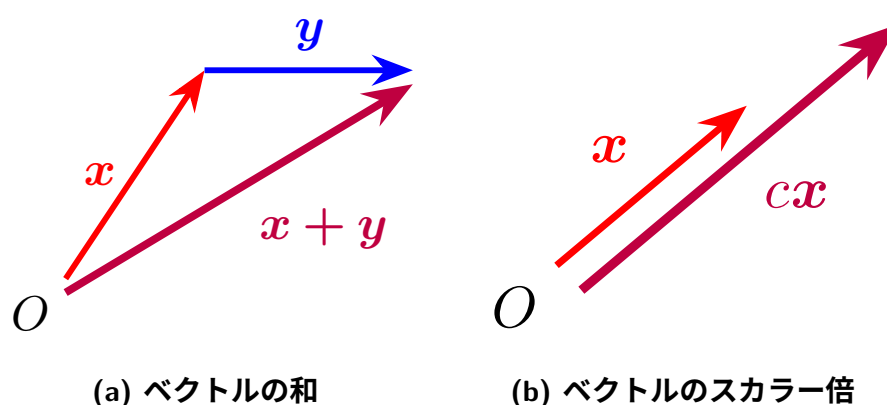


図 2.1: ベクトルの演算

ベクトルの演算

ベクトル同士の「和」(足し算)を

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a + a' \\ b + b' \\ c + c' \end{pmatrix}$$

のように、各成分の和として定義する。ベクトルの和は、2 つの矢印をつなげた見たときの矢印に相当する (図 2.1a)。

また、ベクトルの「スカラー倍」を、

$$\lambda \star \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda a \\ \lambda b \\ \lambda c \end{pmatrix}$$

で定義する。ベクトルのスカラー倍は、向きを保ったまま長さを λ 倍した矢印に対応する (図 2.1b)。

ベクトルの内積

\mathbf{a} と \mathbf{x} を列ベクトルとすると、それらの間の内積 (定義 6.1) は、以下のように定義できるのだった。

$$(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} = \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{x}\| \cos \theta$$

ここで、 $\|\mathbf{a}\|$ はベクトル \mathbf{a} の長さ (定義 6.5) であり、これは三平方の定理より

$$\|\mathbf{a}\| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

で与えられる．また， θ は $\|a\|$ と $\|x\|$ のなす角度である．

2つのベクトルが直交^(定義 6.2)する場合 ($\theta = \pi/2$)， $\cos \theta = 0$ となるから，内積は 0 になる．

5.2 ベクトル空間の定義

ユークリッド空間における数ベクトルがもつ性質を抽出しよう．

定義 5.1 (ベクトル空間) V を集合， $(\mathbb{K}, +, *)$ を体^(定義 3.3) とする． V 上の和 $+: V \times V \rightarrow V$ ，スカラー倍 $\star: \mathbb{K} \times V \rightarrow V$ が定義され，以下が満たされるとき， $(V, +, \star)$ を $(\mathbb{K}$ 上の) **ベクトル空間** (vector space) あるいは線形空間^{せんけいくうかん} (linear space) という．このとき V の元を**ベクトル** (vector)， \mathbb{K} の元を**スカラー** (scalar) という⁴⁾．

- (1) 任意の $u, v, w \in V$ に対して， $(u + v) + w = u + (v + w)$ である．
- (2) ある $0 \in V$ がただひとつ存在し，任意の $v \in V$ に対して， $v + 0 = 0 + v = v$ である．
- (3) 任意の $v \in V$ に対して，ある $-v$ がただひとつ存在して， $v + (-v) = (-v) + v = 0$ である．
- (4) 任意の $u, v \in V$ に対して， $u + v = v + u$ である．
- (5) 任意の $u, v \in V$ および任意の $c \in \mathbb{K}$ に対して， $c \star (u + v) = (c \star u) + (c \star v)$ である．
- (6) 任意の $v \in V$ および任意の a, b に対して， $(a + b) \star v = (a \star v) + (b \star v)$ である．
- (7) 任意の $v \in V$ および任意の a, b に対して， $(a \star b) \star v = a \star (b \star v)$ である．
- (8) 任意の $v \in V$ に対して， $1 \star v = v$ である．

ベクトル空間 $(V, +, \star)$ のことを単に V と書くこともある．／

定義に挙げなかった数ベクトルの性質の一部は，以下のように定義から直ちに導かれる．

命題 5.1 ベクトル空間 V は以下を満たす．

- 任意の $v \in V$ に対し，
 - (1) $0 \star v = 0$ である．
 - (2) $(-1) \star v = -v$ である．

証明 (1) $0 \star v = (0 + 0) \star v = 0 \star v + 0 \star v$ より従う．

(2) $v + (-1) \star v = 1 \star v + (-1) \star v = (1 + (-1)) \star v = 0 \star v = 0$ より従う．

□

4) (3) の $-v$ が一意であることは定義から省いてもよい．その場合も， $-v, -v'$ を v の逆元とすれば $-v = (-v) + v + (-v') = -v'$ であるから $-v$ は一意である．

差 $v - u := v + (-u)$ と定義できる.

5.3 部分ベクトル空間

定義 5.2 (部分ベクトル空間) V をベクトル空間, $W \subset V$ とする. W が V の和とスカラー倍に対してベクトル空間になるとき, W は V の **部分ベクトル空間** (vector subspace) あるいは単に **部分空間** (subspace) であるという. /

部分空間と部分集合を取り違えないように注意が必要である. ベクトル空間の部分集合のうち, ベクトル空間になるものが部分空間 (部分ベクトル空間) である.

ベクトル空間の部分集合 $W \subset V$ が部分ベクトル空間であることを示すには, 以下の定理を用いるのがよい.

定理 5.2 V をベクトル空間とする. $U \subset V$ が以下の条件を満たす場合, U は V の部分ベクトル空間になる.

- (1) 任意の $u, v \in U$ に対し, $u + v \in U$ である (U は和で閉じている).
- (2) 任意の $v \in U$ および任意の $c \in \mathbb{K}$ に対し, $c \star v \in U$ である (U はスカラー倍で閉じている).
- (3) $0 \in U$ である⁵⁾.

V をベクトル空間とすると, V 自身は部分ベクトル空間である. また, 零ベクトルのみを含む空間 $\{0\}$ も部分ベクトル空間である. 通常興味の対象となるのはこれらの **自明な部分ベクトル空間** ではなく, 非自明なものである.

部分ベクトル空間について, 以下のことがらなりたつ.

命題 5.3 V をベクトル空間, $W_1, W_2 \subset V$ を部分ベクトル空間とする. このとき共通部分 (定義 1.7) $W_1 \cap W_2$ は V の部分ベクトル空間である.

証明 定理 5.2 を確かめればよい. □

一方で, **和集合** (定義 1.7) $W_1 \cup W_2$ は一般に部分ベクトル空間にならない. 部分ベクトル空間になるような “和” として, 和空間というものを考える.

定義 5.3 (和空間) V をベクトル空間, $W_1, W_2 \subset V$ を部分ベクトル空間とする.

$$W_1 + W_2 := \{v_1 + v_2 \mid v_1 \in W_1, v_2 \in W_2\} \quad (5.2)$$

5) (3) は (2) で $c = 0$ とすれば自動的に満たされるように見える. この条件をわざわざ加えるのは, $U \neq \emptyset$ であることを保証するためである.

は V の部分ベクトル空間である。／

定義 5.4 (直和空間) 和空間 $W_1 + W_2$ で、特に $W_1 \cap W_2 = \{0\}$ であるとき、**直和** (direct sum) といい、 $W_1 \oplus W_2$ とかく。／

命題 5.4 ベクトル空間 V が $V = W_1 \oplus W_2$ と直和であらわせるとする。このとき、任意のベクトル $v \in V$ は、 $w_1 \in W_1$ と $w_2 \in W_2$ を用いて、 $v = w_1 + w_2$ とかける。しかも w_1 と w_2 は一意に定まる。

証明 $v \in V$ が W_1 の元と W_2 の元との和であらわせるのは和空間の定義から明らかなので、一意性を示す。 $v = w_1 + w_2 = w'_1 + w'_2$ と 2 とおりに分解できたとする。すると

$$w_1 - w'_1 = w_2 - w'_2$$

であるが、左辺は W_1 、右辺は W_2 のベクトルである。ところが、 W_1 と W_2 は直和なので、 $W_1 \cap W_2 = \{0\}$ 。よって $w_1 - w'_1 = w_2 - w'_2 = 0$ より、 $w_1 = w'_1$ 、 $w_2 = w'_2$ である。□

定義 5.5 $(V_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ を \mathbb{K} 上のベクトル空間の族 (定義 1.2) とする。以下で定義される $\prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ を、 $(V_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ の**直積** (direct product) という [8, §1.6]。

$$\prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda := \{(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \mid v_\lambda \in V_\lambda\} \quad (5.3)$$

／

命題 5.5 V_λ を \mathbb{K} 上のベクトル空間の族とする。直積 $V = \prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ は、以下で定義される和とスカラー倍について、 \mathbb{K} 上のベクトル空間になる [8, §1.6]。

• $x = (x_\lambda)$, $y = (y_\lambda) \in V$, $c \in \mathbb{K}$ について⁶⁾,

(1) 和は $x + y := (x_\lambda + y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$

(2) スカラー倍は $c \star x := (c \star_\lambda x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$

証明 定義 5.1 の公理を確認すればよい。□

抽象的な直和

直和には、定義 5.4 とは別の定義がある。

6) それぞれの右辺にある $+$ と \star は、ベクトル空間 V_λ 上の和とスカラー倍であるから、厳密には $+_\lambda$, \star_λ と書くべきものであるが、煩雑な上にかえってわかりづらいので添字 λ を省略している。

定義 5.6 $(V_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ をベクトル空間の族 (定義 1.2) とする. 直積 $\prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ の部分ベクトル空間を

$$\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda := \left\{ (v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \in \prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda \mid \text{有限個の } \lambda \in \Lambda \text{ を除いて } v_\lambda = \mathbf{0} \right\} \quad (5.4)$$

で定める. $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ の元 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について, 和とスカラー倍を, 各成分の和とスカラー倍

$$(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} + (y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} := (x_\lambda + y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}, \quad c \star (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} := (c \star x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \quad (5.5)$$

で定めると, $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ はベクトル空間をなす. このベクトル空間を, (抽象的な) **直和** という [8, §1.6]. /

直和というのはつまり, 足せないベクトルの和を扱うための手段である. たとえば, $V_1 = \mathbb{R}^2$, $V_2 = \mathbb{R}^3$ とする. 当然 $x \in \mathbb{R}^2$ と $y \in \mathbb{R}^3$ の和 $x + y$ をとることはできない. しかしこれを記号的に $v = x + y \in \mathbb{R}^2 \oplus \mathbb{R}^3$ と書いたとしよう. v と $v' = x' + y'$ ($x' \in \mathbb{R}^2$, $y' \in \mathbb{R}^3$) の和は, 記号 $+$ が結合的であってほしいので, $v + v' = (x + x') + (y + y')$ となるのが自然である. ここで, 第 1 項は \mathbb{R}^2 に, 第 2 項は \mathbb{R}^3 に属するから, $v + v' \in \mathbb{R}^2 \oplus \mathbb{R}^3$ である. またスカラー倍は, “和” に対して分配的であってほしいので, $cv = cx + cy$ となるのが自然である. 記号 $x^{(i)}, y^{(i)}$ だけに注目して式を眺めれば, あたかも $x \in \mathbb{R}^2$ と $y \in \mathbb{R}^3$ の和 $x + y$ がきちんと定義できているかのようにふるまっている. これが直和である.

5.4 ベクトルの一次独立・一次従属

ベクトルをスカラー倍したものや, ベクトル同士の和をとったものもベクトルである. この考え方を推し進めると, 線形結合という概念にいきつく.

記号の煩雑さを防ぐため, この節からスカラー倍の記号 \star を省略し, $c \star v =: cv$ とかく.

定義 5.7 (ベクトルの線形結合) V を \mathbb{K} 上のベクトル空間とする. ベクトルの組 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \in V$ に対して, 有限個を除いてゼロであるスカラー $(c_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \in \mathbb{K}$ を用いたベクトル $v = \sum_{\lambda \in \Lambda} c_\lambda v_\lambda$ のことを, $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ の^{せんけいけつごう}線形結合 (linear combination) あるいは^{いちじけつごう}一次結合という. /

たとえば, $V = \mathbb{R}^3$, $v_1 = (1, 0, 0)$, $v_2 = (0, 1, 0)$ とすれば, $v = (a, b, 0)$ は v_1, v_2 の線形結合としてかける ($v = av_1 + bv_2$) が, $v' = (0, b, 1)$ はかけない.

定義 5.7 において, c_i が有限個を除きゼロである, つまり $c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots$ が有限和であるという条件は重要である. 一般に, 無限和では $\sum_{\lambda \in \Lambda} c_\lambda v_\lambda \in V$ とは限らない. たとえば, 実関数 e^x は多項式ベクトル空間の元 $1, x, x^2, x^3, \dots \in \mathbb{R}[x]$ を使って

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \dots$$

と書けるが、明らかに $e^x \notin \mathbb{R}[x]$ である。

ベクトル空間は線形結合に対して閉じている。つまり、ベクトル v_1, \dots, v_n がベクトル空間 V に属するなら、それらの線形結合 $c_1 v_1 + \dots + c_n v_n$ も V に属する。そうすると、ベクトル空間 V を作るのにすべてのベクトルを使う必要はなく、種となるベクトルをいくつか列挙すれば、残りのベクトルはそれらの線形結合で自動的に作られるのではないかという発想が生まれる。

定義 5.8 (ベクトル空間の生成系) V を \mathbb{K} 上のベクトル空間、 $W \subset V$ を部分ベクトル空間とする。ベクトルの組 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ($v_\lambda \in V$) が W を**生成する** (generate) あるいは**張る** (span) とは、 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ から有限個のベクトル u_1, \dots, u_n を任意にとったときの線形結合の全体が W に一致する、すなわち

$$W = \left\{ \sum_{\lambda \in \Lambda} c_\lambda v_\lambda \in V \mid c_\lambda \in \mathbb{K}, c_\lambda \text{ は有限個を除きゼロ} \right\}$$

であることをいう。また、 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ が生成する部分ベクトル空間を

$$W = \langle\langle (v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \rangle\rangle \quad (5.6)$$

とかく。／

定義 5.9 (一次独立と一次従属) V を \mathbb{K} 上のベクトル空間とする。ベクトルの組 $(u_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ($u_\lambda \in V$) が**一次独立** (linearly independent) あるいは**線形独立**であるとは、有限個を除き 0 である $(c_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ($c_\lambda \in \mathbb{K}$) に対し、

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} c_\lambda u_\lambda = 0 \iff \text{任意の } \lambda \in \Lambda \text{ に対し } c_\lambda = 0$$

であることをいう。ベクトルの組 $(u_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ が一次独立でないとき、**一次従属** (linearly dependent) あるいは**線形従属**という。／

5.5 ベクトル空間の基底と次元

定義 5.10 (基底) V を \mathbb{K} 上のベクトル空間とする。 V に属するベクトルの組 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ が以下を満たすとき、これを**基底** (basis) という。

- (1) $(u_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は一次独立である。
- (2) $(u_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は V を生成する。すなわち、任意の $v \in V$ に対して、有限個を除き 0 の、ある $(c_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ($c_\lambda \in \mathbb{K}$) が存在し、 $v = \sum_{\lambda \in \Lambda} c_\lambda u_\lambda$ とかける。

／

例えば, $\{(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)\}$ は \mathbb{R}^3 の基底である. また, $\{(1, 1, 0), (1, -1, 0), (0, 0, 1)\}$ も \mathbb{R}^3 の基底である.

このように, 一般にベクトル空間 V が与えられたとき, その基底の取り方は一意ではない. しかし, 基底を構成するベクトルの数は, 基底の取り方によらない.

証明 なんかかく □

定義 5.11 (次元) V をベクトル空間とする. V の基底を構成するベクトルの数を **次元** (dimension) ^{じげん} といい, $\dim V$ とかく. /

例 5.6 多項式ベクトル空間 $\mathbb{R}[x]$ について, $\{1, x, x^2, \dots\}$ は一次独立であり, さらに基底をなす. このように, ベクトル空間 V の基底を構成するベクトルの数は無限個であるとき, V は **無限次元** (infinite dimensional) であるという.

例 5.7 複素数全体の集合 \mathbb{C} は, \mathbb{C} 上のベクトル空間と考えると $\dim_{\mathbb{C}} \mathbb{C} = 1$ (基底 1), \mathbb{R} 上のベクトル空間と考えると $\dim_{\mathbb{R}} \mathbb{C} = 2$ (基底 1, i) である.

系 5.8 (基底によるベクトルの展開) V をベクトル空間とする. 任意の $\mathbf{v} \in V$ は, V の基底 $(\mathbf{u}_{\lambda})_{\lambda \in \Lambda}$ のうち有限個を用いて $\mathbf{v} = c_1 \mathbf{u}_1 + \dots + c_n \mathbf{u}_n$ とかける. このとき, スカラーの組 $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{K}$ は一意に定まる.

証明 前半は **基底の定義** より明らかなので, 一意性を示す. $\mathbf{v} = a_1 \mathbf{u}_1 + \dots + a_n \mathbf{u}_n = b_1 \mathbf{u}_1 + \dots + b_n \mathbf{u}_n$ と 2 通りにかけたとすると,

$$(a_1 - b_1) \mathbf{u}_1 + \dots + (a_n - b_n) \mathbf{u}_n = \mathbf{0}$$

がいえるが, 基底は一次独立なので $a_1 - b_1 = \dots = a_n - b_n = 0$ である. □

任意のベクトル空間に基底が存在する

ここまでは, ベクトル空間に基底が存在すると仮定したうえで議論してきた. しかし, ベクトル空間に対して必ず基底をとれるのだろうか. それを保証するのが以下の定理である.

定理 5.9 任意のベクトル空間には基底が存在する.

証明は極めて抽象的であるので省略する.

§6 内積空間とノルム空間

§5 では、数ベクトルを一般化した概念であるベクトル空間について扱った。ベクトルの和とスカラー倍を定義することで、数ベクトルに似た様々な性質が演繹的に導かれるのであった。しかし、数ベクトルがもつ「長さ」、あるいは2つのベクトルのなす「角度」という概念はまだ定義していない。

§6 では、ベクトル空間の上に「内積^{ないせき}」および「ノルム」という演算を導入する。2つのベクトルが「直交」することは、内積によって代数的に表現できる。また、ベクトル空間上にある2点間の「距離」は、ノルムを用いて定義することができる。

なお、これまでの議論では一般の体 \mathbb{K} 上のベクトル空間を考えてきたが、内積やノルムを考える上では、体を \mathbb{R} もしくは \mathbb{C} に限る。したがって、これからは一般の体 \mathbb{K} のかわりに複素数体 \mathbb{C} を明示して書くことにする。以降の議論は \mathbb{C} 上で行うが、これを \mathbb{R} に置き換えて議論することもできる。

6.1 内積空間

まず、2つのベクトルから実数を得る演算である内積を定義する。

定義 6.1 (内積) V をベクトル空間とする。写像 $\langle \bullet, \bullet \rangle: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ は以下を満たすとき、内積^{ないせき} (inner product) であるという。

- 任意の $u, v, w \in V, c \in \mathbb{C}$ に対し,
 - (1) $\langle u, v + w \rangle = \langle u, v \rangle + \langle u, w \rangle$ である。
 - (2) $\langle u, cv \rangle = c\langle u, v \rangle$ である。
 - (3) $\langle u, v \rangle = \langle v, u \rangle^*$ である。
 - (4) $\langle v, v \rangle \geq 0$ である。また、 $\langle v, v \rangle = 0$ であるのは $v = 0$ であるときに限る。

内積をもつベクトル空間を内積空間 (inner product space) という。／

系 6.1 内積は以下を満たす。

- 任意の $u, v, w \in V, a, b \in \mathbb{C}$ に対し,
 - (1) (線形性 (linearity)) $\langle u, av + bw \rangle = a\langle u, v \rangle + b\langle u, w \rangle$
 - (2) (反線形性 (antilinearity) 反線形性 (linearity)) $\langle au + bv, w \rangle = a^*\langle u, w \rangle + b^*\langle v, w \rangle$

$$(3) \langle \mathbf{v}, \mathbf{0} \rangle = \langle \mathbf{0}, \mathbf{v} \rangle = 0$$

(1) と (2) をあわせて **半双線形** (sesqui-linear) であるという.

実ユークリッド空間 \mathbb{R}^n において,

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle_{\mathbb{R}} := \sum_{i=1}^n a_i b_i \quad (6.1)$$

は内積である. また, 複素ユークリッド空間 \mathbb{C}^n において,

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle_{\mathbb{C}} := \sum_{i=1}^n a_i^* b_i \quad (6.2)$$

は内積である. eqs. (6.1) と (6.2) を特に **標準内積** という.

定義 6.2 V を内積空間とする. ベクトル $\mathbf{v}, \mathbf{u} \in V \setminus \{\mathbf{0}\}$ は, $\langle \mathbf{v}, \mathbf{u} \rangle = 0$ であるとき, **直交する** (orthogonal) といい, $\mathbf{v} \perp \mathbf{u}$ とかく. また, $c \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ を用いて $\mathbf{v} = c\mathbf{u}$ とかけるとき, **平行である** (parallel) といい, $\mathbf{v} \parallel \mathbf{u}$ とかく. /

内積の連続性

命題 6.2 内積は連続である. つまり, $\mathbf{u}_n \rightarrow \mathbf{u}_*$, $\mathbf{v}_n \rightarrow \mathbf{v}_*$ であるベクトル列 (\mathbf{u}_n) , (\mathbf{v}_n) に対し,

$$\langle \mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n \rangle \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \langle \mathbf{u}_*, \mathbf{v}_* \rangle$$

証明 コーシー–シュワルツの不等式 (補題 6.11) より,

$$\begin{aligned} |\langle \mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n \rangle - \langle \mathbf{u}_*, \mathbf{v}_* \rangle| &= |\langle \mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n - \mathbf{v}_* \rangle + \langle \mathbf{u}_n - \mathbf{u}_*, \mathbf{v}_* \rangle| \\ &\leq \|\mathbf{u}_n\| \|\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_*\| + \|\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_*\| \|\mathbf{v}_*\| \\ &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \|\mathbf{u}_*\| \cdot 0 + 0 \cdot \|\mathbf{v}_*\| = 0 \end{aligned}$$

□

直交補空間

定義 6.3 (直交補空間) V をベクトル空間, $W \subset V$ を部分ベクトル空間とする. W のベクトルすべてと直交するようなベクトルの集合, つまり

$$W^\perp := \{\mathbf{v} \in V \mid \text{任意の } \mathbf{u} \in W \text{ に対して } \mathbf{v} \perp \mathbf{u}\} \quad (6.3)$$

を W の **直交補空間** (orthogonal compliment) という. /

命題 6.3 V をベクトル空間とする. $W \subset V$ の直交補空間 W^\perp は V の部分ベクトル空間である.

証明 部分ベクトル空間の条件 (定理 5.2) を確かめればよい. すなわち, 任意の $v \in W$ に対し,

- (1) $0 \in W^\perp$ であることは, $\langle v, 0 \rangle = 0$ から,
- (2) $x, y \in W^\perp$ ならば $x + y \in W^\perp$ であることは, $\langle x + y, v \rangle = \langle x, v \rangle + \langle y, v \rangle$ から,
- (3) $x \in W^\perp, c \in \mathbb{K}$ ならば $cx \in W^\perp$ であることは, $\langle cx, v \rangle = c^* \langle x, v \rangle$ からいえる.

□

補題 6.4 部分ベクトル空間 $W \subset V$ とその直交補空間 $W^\perp \subset V$ について,

$$W \cap W^\perp = \{0\}$$

証明 $x \in W \cap W^\perp$ をとる. $x \in W^\perp$ より, 任意の $v \in W$ に対し $\langle v, x \rangle = 0$ である. ここで, $v = x \in W$ ととることができるので, $\langle x, x \rangle = 0$. したがって $x = 0$ である. □

任意のベクトル $v \in V$ は, ある部分空間 W に属するベクトル x とその直交補空間に属するベクトル y とを用いて, $v = x + y$ と一意にあらわせそうである. 有限次元の場合はたしかに $V = W \oplus W^\perp$ と直和分解 (定義 5.4) できる. しかし, 無限次元の場合これは正しくない. これについては??で議論するが, 先に言葉を定義しておく.

定義 6.4 V を内積空間, $W \subset V$ を部分ベクトル空間, W^\perp をその直交補空間とする. $x \in V$ が

$$x = y + z, \quad \text{where } y \in W, z \in W^\perp \quad (6.4)$$

とかけるとき, y を x の W 上への正射影, 直交射影, あるいは単に射影という. /

補題 6.5 x に射影が存在するとき, つまり eq. (6.4) のようにかけたとき, $y \in W, z \in W^\perp$ は一意に定まる.

証明 $x = y + z = y' + z'$ と 2 通りに分解されたとする. すると

$$y - y' = z' - z$$

となる. 右辺は W の元, 左辺は W^\perp の元である. よって補題 6.4 より, $y - y' = z' - z = 0$. したがって $y = y', z = z'$. □

先に注意したとおり, 内積空間の任意のベクトル x に対して射影が存在するとは限らない. 上の証明はあくまで, x の射影が存在したと仮定した場合のものである.

6.2 ノルム空間

ベクトルの長さ、あるいは点の距離に対応するのがノルムという概念である。

定義 6.5 (ノルム) V をベクトル空間とする. 写像 $\|\bullet\|: V \rightarrow \mathbb{R}$ は以下を満たすとき, ノルム (norm) という.

- 任意の $u, v \in V$ および $c \in \mathbb{C}$ に対し,
 - (1) $\|v\| \geq 0$ である. また, $\|v\| = 0$ となるのは $v = 0$ のときに限る.
 - (2) $\|cv\| = |c|\|v\|$ である.
 - (3) (三角不等式 (triangle inequality)) $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$ である. また, 等号が成立するのは u と v が一次従属のときに限る.

ノルムが定義されたベクトル空間のことをノルム空間 (normed space) という. /

例 6.6 実ユークリッド空間のベクトル $v = (v_1, \dots, v_N) \in \mathbb{R}^N$ において, 以下はいずれもノルムである.

$$\|v\|_1 := \sum_{i=1}^N |v_i|, \quad \|v\|_2 := \sqrt{\sum_{i=1}^N |v_i|^2}, \quad \|v\|_\infty := \max_{1 \leq i \leq N} |v_i|. \quad (6.5)$$

ノルムは距離 (定義 2.1) とみなすことができる (命題 2.2). したがって, ノルム空間は距離空間であり, 2.1 節で導いたことがらが成り立つ. 特に, ノルムを用いると, ベクトルの点列の収束という概念が定義できる.

定義 6.6 ノルム空間 V のベクトル列 $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が $v_* \in V$ に収束するとは,

$$\|v_n - v_*\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

であることをいう. /

いくつか便利な式を導いておこう. まず, 三角不等式 $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$ から次のような不等式が導かれる.

補題 6.7 ノルム $\|\bullet\|$ に対し, 以下の不等式が成り立つ.

$$|\|u\| - \|v\|| \leq \|u - v\| \quad (6.6)$$

証明 三角不等式より

$$\|u\| \leq \|u - v\| + \|v\|, \quad \|v\| \leq \|v - u\| + \|u\|$$

であるから、それぞれ右辺の $\|v\|, \|u\|$ を左辺へ移せば

$$\|u\| - \|v\| \leq \|u - v\|, \quad \|v\| - \|u\| \leq \|v - u\| = \|u - v\|$$

である。この2式をあわせれば、eq. (6.6) が導かれる。 \square

補題 6.8 (u_n) がノルム空間のベクトル列で、 $u_n \rightarrow u_*$ と収束するなら、 $\|u_n\| \rightarrow \|u_*\|$ である [11, 補題 1.2].

証明 eq. (6.6) を使うと、

$$|\|u_n\| - \|u_*\|| \leq \|u_n - u_*\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

である。 \square

ノルムの連続性

命題 6.9 ノルムはベクトル空間から実数への写像 $\|\bullet\|: V \rightarrow \mathbb{R}$ として連続である [11, 定理 1.1].

証明 V の点列 $(u_n), (v_n)$ および \mathbb{C} の点列 (数列) (c_n) をとり、 $u_n \rightarrow u_*, v_n \rightarrow v_*, c_n \rightarrow c_*$ ($n \rightarrow \infty$) とする。

加法の連続性

$$\|u_n + v_n\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \|u_* + v_*\|$$

を示せばよい。三角不等式から

$$|\|u_n + v_n\| - \|u_* + v_*\|| \leq \|(u_n + v_n) - (u_* + v_*)\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

スカラー倍の連続性

$$\|c_n u_n\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \|c_* u_*\|$$

を示せばよい。これは、三角不等式を使って

$$\begin{aligned} |\|c_n u_n\| - \|c_* u_*\|| &\leq \|c_n u_n - c_* u_*\| \\ &= \|(c_n - c_*)u_n + c_*(u_n - u_*)\| \\ &\leq |c_n - c_*| \|u_n\| + |c_*| \|u_n - u_*\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \cdot \|u_*\| + |c_*| \cdot 0 = 0 \end{aligned}$$

と示される⁷⁾。 \square

7) 最後の極限では??を使った。

ノルム空間の部分ベクトル空間は、またノルム空間になる。より正確に述べると、以下の命題が成り立つ。

命題 6.10 $\|\bullet\|$ をもつノルム空間 V の部分ベクトル空間 W は、 $\|\bullet\|: V \rightarrow \mathbb{R}$ の定義域を W に制限 (定義 1.21) したものの $\|\bullet\|_W: W \rightarrow \mathbb{R}$ をノルムとして、ノルム空間になる。

6.3 内積とノルムの関係

6.1 節では内積を、6.2 節ではノルムを導入した。これらはそれぞれ独立に定義される概念であるが、実はノルム空間のうち特殊なものが内積空間であることがわかる。まずは内積からノルムを定義しよう。

定義 6.7 (内積から導かれるノルム) V を内積空間とする。写像 $\|\bullet\|: V \rightarrow \mathbb{R}$ を以下で定義すると、これはノルムである。

$$\|v\| := \sqrt{\langle v, v \rangle} \quad (6.7)$$

したがって、内積空間は eq. (6.7) で定義されたノルムに対してノルム空間になる。／

証明 eq. (6.7) が定義 6.5 を満たすことを示せばよい。(1) は内積の定義 (定義 6.1) から明らかなので、(3) を示す。そのために、まず次の補題を示す。

補題 6.11 (コーシー – シュワルツの不等式 (Cauchy–Schwarz inequality)) V を内積空間、 $\|\bullet\|$ を内積から導かれるノルムとする。このとき、任意の x, y について

$$|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \|y\| \quad (6.8)$$

が成り立つ [3]。

補題 6.11 の証明 $x = 0$ のときは、 $|\langle x, y \rangle| = \|x\| \|y\| = 0$ なので成り立つ。 $x \neq 0$ のときを考える。任意の $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$ について内積の正値性から $\|\lambda x + \mu y\| \geq 0$ がいえる。そこで $\lambda = -\langle x, y \rangle^*$, $\mu = \|x\|^2$ とおくと、

$$\begin{aligned} 0 &\leq \langle \lambda x + \mu y, \lambda x + \mu y \rangle \\ &= \lambda \lambda^* \langle x, x \rangle + \lambda \mu^* \langle x, y \rangle + \mu \lambda^* \langle y, x \rangle + \mu \mu^* \langle y, y \rangle \\ &= |\langle x, y \rangle|^2 \|x\|^2 - \langle x, y \rangle^* \|x\|^2 \langle x, y \rangle - \|x\|^2 \langle x, y \rangle \langle y, x \rangle + \|x\|^4 \langle y, y \rangle \\ &= \|x\|^2 \left[-|\langle x, y \rangle|^2 + \|x\|^2 \|y\|^2 \right] \end{aligned}$$

である。 $x \neq 0$ なので、内積の正値性より $\|x\| > 0$ 。そこで両辺を $\|x\|^2$ で割れば eq. (6.8) が示される。□

補題 6.11 を用いると,

$$\begin{aligned}\|x + y\|^2 &= \langle x + y, x + y \rangle \\ &= \|x\|^2 + 2 \operatorname{Re} \langle x, y \rangle + \|y\|^2 \\ &\leq \|x\|^2 + 2|\langle x, y \rangle| + \|y\|^2 \\ &= (\|x\| + \|y\|)^2\end{aligned}$$

と示される. □

補題 6.11 より, 任意の $x, y \in V$ に対し, $-1 \leq \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\|\|y\|} \leq 1$ であるから,

$$\cos \theta = \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\|\|y\|}$$

を満たすような $0 \leq \theta < 2\pi$ が存在する. θ を x と y のなす**角度** (angle) という.

一般のノルムについては成立しないが, 内積から導かれるノルムについてのみ成立するのが, 以下の中線定理である.

定理 6.12 (中線定理) V を内積空間, $\|\bullet\| = \langle \bullet, \bullet \rangle$ を内積から導かれるノルムとする.

$$\|v + u\|^2 + \|v - u\|^2 = 2(\|v\|^2 + \|u\|^2) \quad (6.9)$$

が成立する (ちゅうせんていり**中線定理** (parallelogram law)).

証明 ノルムを内積に直して計算すれば容易に示される. □

次に, 内積空間における内積から導かれるノルムについて成立する恒等式を見る.

定理 6.13 (偏極恒等式) V を内積空間, $\|\bullet\|$ を内積から導かれるノルムとする. 任意のベクトル $x, y \in V$ に対して, 以下の**偏極恒等式** (polarization identity) が成立する.

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2 - i\|x + iy\|^2 + i\|x - iy\|^2) \quad (6.10)$$

証明 ノルムを内積に戻して, 半双線形を用いて計算すれば示される. □

一般の内積空間においては, 定義 6.7 によるノルムが存在すること, そのノルムから内積を再構成できることが分かった. それでは, 一般のノルム空間においても定理 6.13 によって内積が定義できるのであろうか. そのことを示すのが次の定理である.

定理 6.14 ジョルダン – フォン・ノイマンの定理 (Jordan–von Neumann theorem) : V をノルム空間とする. V 上のノルムが**中線定理**を満たすならば, V は内積空間である.

証明は, 定義 6.7 により “内積” $\langle x, y \rangle$ を定義し, それが内積の公理を満たすことを示す.

6.4 内積空間の基底

一般のベクトル空間において基底 (定義 5.10) が存在するのであった。内積空間においては、よい性質をもつ基底をとることができる。

定義 6.8 (正規直交基底) V を有限次元の内積空間とする。 V の基底 $\{v_1, \dots, v_n\} \subset V$ が次の性質を満たすとき、**正規直交基底** (orthonormal basis) という。

$$\langle v_i, v_j \rangle = \delta_{i,j} \quad \text{Kronecker delta (定義 1.31)} \quad (6.11)$$

／

無限次元の場合も同様に定義できる。

有限次元の内積空間では、正規直交基底を具体的に構成することができる。

定理 6.15 グラム – シュミットの正規直交化 (Gram-Schmidt process) : $\{v_1, \dots, v_n\} \subset V$ を有限次元の内積空間 V の基底とする。このとき、 V の正規直交基底 $\{u_1, \dots, u_n\} \subset V$ をつくることができる。

証明 基底 v_1, \dots, v_n から具体的に u_1, \dots, u_n を構成する。

まず $u_1 := v_1 / \|v_1\|$ とおく。このとき、 $\langle u_1, u_1 \rangle = 1$ が成り立つ。

次に、 $u'_2 := v_2 - \langle u_1, v_2 \rangle u_1$ とし、 $u_2 := u'_2 / \|u'_2\|$ と定める。このとき $\langle u_1, u_2 \rangle = 0$ であり、 $\langle u_2, u_2 \rangle = 1$ である。

これを繰り返し、

$$u'_m := v_m - \sum_{i=1}^{m-1} \langle u_i, v_m \rangle u_i, \quad u_m := u'_m / \|u'_m\|$$

と定めれば、 u_1, \dots, u_n は eq. (6.11) を満たす。 \square

グラム – シュミットの方法が使えるのは基底が有限個、つまり有限次元の場合だけであり、無限次元の場合は一般に成り立たない⁸⁾。無限次元ヒルベルト空間の場合は定理 14.16 で議論する。

6.5 内積空間の直和

定義 5.6 ではベクトル空間の直和を定義した。内積空間の直和も定義できる。

8) 基底が可算無限個なら帰納的に示されるという考え方もあるだろうが、非可算無限個の場合はやはり成り立たない。

定義 6.9 $(V_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ を内積空間の族とする. 直積 $\prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ の部分ベクトル空間を

$$\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda := \left\{ (v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \in \prod_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda \left| \begin{array}{l} \text{有限個の } \lambda \in \Lambda \text{ を除いて } v_\lambda = \mathbf{0} \\ \text{かつ } \sum_{\lambda \in \Lambda} \langle x_\lambda, y_\lambda \rangle < \infty \end{array} \right. \right\} \quad (5.4')$$

で定める. $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ の元 $(v_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について, 和とスカラー倍を, 各成分の和とスカラー倍

$$(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} + (y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} := (x_\lambda + y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}, \quad c \star (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} := (c \star x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \quad (5.5)$$

で定めると, $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ はベクトル空間をなす. さらに $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}, (y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \in \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ の内積を

$$\langle (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}, (y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \rangle := \sum_{\lambda \in \Lambda} \langle x_\lambda, y_\lambda \rangle \quad (6.12)$$

で定めれば, $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ は内積空間になる. これを, (抽象的な) **直和** という. /

直和の直観的理解については定義 5.6 で議論した. ここでは直和の内積について考えてみよう. $x, x' \in V, y, y' \in W$ として, $v = x + y, v' = x' + y' \in V \oplus W$ という “和” を考える. 形式的に内積を計算すると,

$$\langle v, v' \rangle = \langle x, x' \rangle + \langle x, y' \rangle + \langle y, x' \rangle + \langle y, y' \rangle$$

である. 異なるベクトル空間に属するベクトルは **直交** (定義 6.2) するだろうから, $\langle x, y' \rangle = \langle y, x' \rangle = 0$ である. したがって

$$\langle v, v' \rangle = \langle x, x' \rangle + \langle y, y' \rangle$$

という eq. (6.12) が得られる.

内積空間の直和として有名なものがフォック空間である. これは, **ヒルベルト空間** (定義 14.3) の n -階 **テンソル積** (定義 9.2) $\mathcal{H}^{\otimes n}$ の無限直和

$$F_{+,-} = \bigoplus_{n=0}^{\infty} S_{+,-} \mathcal{H}^{\otimes n}$$

で定義される. $S_{+,-}$ はボソン・フェルミオンに対応する対称化・反対称化の演算子 S_+, S_- であるが, ここでは重要でない. $\mathcal{H}^{\otimes n}$ は, n 個の粒子がある状態 $|1, \dots, n\rangle$ が属する空間である. 本来 n -粒子状態 $|1, \dots, n\rangle$ と m -粒子状態 $|1', \dots, m'\rangle$ ($m \neq n$) は, 住んでいる空間が違うので, 足すことはできない. これを直和によって “足す” ことで, 異なる粒子数をもつ状態間の遷移を扱うことができる.

§7 線形写像

4.2 節では、行列による数ベクトルの変換を扱った。これを一般化したものが線形写像という概念である。

7.1 線形写像

ふたたびしばらく \mathbb{K} を一般の体 (定義 3.3) とする。

定義 7.1 (線形写像) V, W を体 \mathbb{K} 上のベクトル空間とする⁹⁾。写像 $f: V \rightarrow W$ が以下を満たすとき、せんけいしゃぞう線形写像 (linear map) あるいは じゅんどうけいしゃぞう準同型写像 (homomorphism) という [8, §2.1]。

- (1) 任意の $u, v \in V$ に対し、 $f(u + v) = f(u) + f(v)$ である。
- (2) 任意の $c \in \mathbb{K}$ および任意の $v \in V$ に対し、 $f(c \star v) = c \star f(v)$ である。

V から W への線形写像全体がなす集合を $\text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$ とかく [8, §4.4]。

特に、線形写像 $f: V \rightarrow V$ を **自己準同型写像** (endomorphism) といい、 f 全体がなす集合を $\text{End}_{\mathbb{K}}(V)$ とかく [8, §2.1, §4.4]。／

線形写像全体の集合 $\text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$ は、適切な和とスカラー倍の下でベクトル空間 (定義 5.1) をなす。

命題 7.1 $\text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$ は、以下で定義される和 $\hat{+}$ とスカラー倍 $\hat{\star}$ のもとで、体 \mathbb{K} 上のベクトル空間になる [8, §4.4]。

- $f, g \in \text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$, $c \in \mathbb{K}$ に対し、
 - (1) 和 $f \hat{+} g \in \text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$ を、任意の $v \in V$ に対して $(f \hat{+} g)(v) = f(v) + g(v)$ である写像と定める。
 - (2) スカラー倍 $c \hat{\star} f \in \text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$ を、任意の $v \in V$ に対して $(c \hat{\star} f)(v) = c \star f(v)$ である写像と定める。

ベクトル空間のときと同様、通常は和の記号として $+$ を使い、スカラー倍の記号は省略する。

9) ここでは V 上の和を $+$ 、スカラー倍を \star であらわし、 W 上の和を $\hat{+}$ 、スカラー倍を $\hat{\star}$ であらわす。また、体 \mathbb{K} 上の和を $+$ であらわす。

命題 7.2 U, V, W を \mathbb{K} 上のベクトル空間, $f, f': U \rightarrow V$, $g, g': V \rightarrow W$ を線形写像, $c \in \mathbb{K}$ をスカラーとする. 線形写像の合成 (定義 1.19) について, 以下が成り立つ.

- (1) $(f + f') \circ g = f \circ g + f' \circ g$
- (2) $f \circ (g + g') = f \circ g + f \circ g'$
- (3) $(cf) \circ g = f \circ (cg) = c(f \circ g)$

証明 定義 1.19 に従って計算すればよい. □

定義 7.2 (零写像) ベクトル空間 V から W への写像で, すべての $v \in V$ を零ベクトル $0 \in W$ にうつす写像を **零写像** (zero map) という. /

7.2 同型写像

定義 7.3 (同型写像) V, W を体 \mathbb{K} 上のベクトル空間とする. 線形写像 $f: V \rightarrow W$ が可逆である, つまり $f \circ f^{-1} = \text{id}_W$ かつ $f^{-1} \circ f = \text{id}_V$ (恒等写像) となるような $f^{-1}: W \rightarrow V$ が存在するとき, f を (\mathbb{K} 上の) **同型写像** (isomorphism) という.

とくに, 同型写像 $f: V \rightarrow V$ を **自己同型写像** (automorphism) しこうけいしやそう@
自己同型写像という [8, §2.1]. /

同型写像とは要するに, **全単射**である線形写像のことである.

ベクトル空間 U, V の間に同型写像が存在するとき, U と V を同一のベクトル空間と見做することができる.

定義 7.4 (同型) V, W を体 \mathbb{K} 上のベクトル空間とする. 同型写像 $f: V \rightarrow W$ が存在するとき, V と W は (\mathbb{K} 上に) **同型** (isomorphic) であるといい, $V \cong W$ とかく. /

命題 7.3 \mathbb{K} 上の n -次元ベクトル空間と \mathbb{K}^n は同型である [8].

証明 \mathbb{K} 上の n -次元ベクトル空間 V の基底 $\{u_1, \dots, u_n\}$ をひとつとる. 写像 $f: \mathbb{K}^n \rightarrow V$ を

$$f: \mathbb{K}^n \ni {}^t(c_1 \ \dots \ c_n) \mapsto c_1 u_1 + \dots + c_n u_n \in V$$

と定めると, これは同型写像である¹⁰⁾. 実際, $\{u_1, \dots, u_n\}$ は V を生成する (定義 5.8) から f は全射であり, 基底による展開係数は一意であるから f は単射である. f が線形であることも明らかである. □

10) この f を, 基底 $\{u_1, \dots, u_n\}$ が定める同型という [8, §2.2].

系 7.4 \mathbb{K} 上の 2 つの n -次元ベクトル空間 U, V は同型である.

証明 同型 $f: V \simeq \mathbb{K}$ と同型 $g: \mathbb{K} \simeq U$ の合成 $g \circ f: V \simeq U$ が同型であることから従う.

□

7.3 像と核

定義 7.5 (像) $f: V \rightarrow W$ を線形写像とする. W の部分集合

$$\text{Im } f := \{f(v) \in W \mid v \in V\} \quad (7.1)$$

を f の^{そう}像 (image) という.

$\text{Im } f$ の次元 $\text{rank } f := \dim \text{Im } f$ を, f の^{かいすう}階数 (rank) という [3]. /

定義 7.6 (核) $f: V \rightarrow W$ を線形写像とする. V の部分集合

$$\text{Ker } f := \{v \in V \mid f(v) = \mathbf{0}_W\} \quad (7.2)$$

を f の^{かく}核 (kernel) という.

$\text{Ker } f$ の次元 $\text{null } f := \dim \text{Ker } f$ を, f の^{たい か じ すう}退化次数 (nullity) という [3]. /

像 $\text{Im } f$ は一般の写像についても定義できた (定義 1.11) が, 核 $\text{Ker } f$ は線形写像特有の概念である.

命題 7.5 $f: V \rightarrow W$ を線形写像とする.

- (1) f の^{いろ}像 $\text{Im } f$ は, W の部分ベクトル空間である.
- (2) f の^{いろ}核 $\text{Ker } f$ は, V の部分ベクトル空間である.

証明 $\text{Im } f$ と $\text{Ker } f$ がそれぞれ, 部分ベクトル空間であることの必要十分条件 (定理 5.2) を満たすことを確認すればいい. □

定理 7.6 V, W を有限次元のベクトル空間とする. 線形写像 $f: V \rightarrow W$ の像と核について, $\dim \text{Im } f + \dim \text{Ker } f = \dim V$ が成り立つ [3, §5.1].

証明 $\text{Ker } f$ の基底を $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$ とし, $\mathbf{x}_{n+1}, \dots, \mathbf{x}_{n+m}$ を $f(\mathbf{x}_{n+1}) = \mathbf{y}_1, \dots, f(\mathbf{x}_{n+m}) = \mathbf{y}_m$ ($\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m$ は $\text{Im } f$ の基底) となるようにとる. このとき $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n+m}$ が V の基底になる.

まず, $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n+m}$ は一次独立であることを示す.

$$c_1 \mathbf{x}_1 + \dots + c_n \mathbf{x}_n + c_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} + \dots + c_{n+m} \mathbf{x}_{n+m} = \mathbf{0}$$

とおく．これに線形写像 f を施すと,

$$c_{n+1}\mathbf{y}_1 + \cdots + c_{n+m}\mathbf{y}_m = \mathbf{0}$$

となり, $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m$ は一次独立であるから $c_{n+1} = \cdots = c_{n+m} = 0$ である．したがって

$$c_1\mathbf{x}_1 + \cdots + c_n\mathbf{x}_n = \mathbf{0}$$

であるから $c_1 = \cdots = c_n = 0$ である．よって $c_1 = \cdots = c_{n+m} = 0$ がいえた．

次に $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n+m}$ は V を生成することを示す．任意の $\mathbf{x} \in V$ をとる． $f(\mathbf{x}) \in \text{Im } f$ であるので, $\text{Im } f$ の基底を用いて

$$f(\mathbf{x}) = c_{n+1}\mathbf{y}_1 + \cdots + c_{n+m}\mathbf{y}_m$$

とかける． $\mathbf{y}_i = f(\mathbf{x}_{n+i})$ を用いると

$$f(\mathbf{x} - c_{n+1}\mathbf{x}_{n+1} - \cdots - c_{n+m}\mathbf{x}_{n+m}) = \mathbf{0}$$

であるので, $\mathbf{x} - c_{n+1}\mathbf{x}_{n+1} - \cdots - c_{n+m}\mathbf{x}_{n+m} \in \text{Ker } f$ である．よって

$$\mathbf{x} - c_{n+1}\mathbf{x}_{n+1} - \cdots - c_{n+m}\mathbf{x}_{n+m} = c_1\mathbf{x}_1 + \cdots + c_n\mathbf{x}_n$$

とかける．この式を変形すれば, \mathbf{x} が $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n+m}$ の線形結合であらわされた． \square

命題 7.7 線形写像 f について, 以下は同値.

- (1) f は単射.
- (2) f の核はゼロベクトルのみ, つまり $\text{Ker } f = \{\mathbf{0}\}$

証明 線形写像を $f: V \rightarrow W$ とする.

必要 任意の線形写像 f に対して $f(\mathbf{0}_V) = \mathbf{0}_W$ である． f は単射であるから, f の核は $\mathbf{0}_V$ のみである．

十分 $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in V$ に対し, $f(\mathbf{v}) = f(\mathbf{w})$ であったとする． f は線形写像なので, $f(\mathbf{v} - \mathbf{w}) = \mathbf{0}_W$ ．したがって $\mathbf{v} - \mathbf{w} \in \text{Ker } f$ であるが, $\text{Ker } f = \{\mathbf{0}_V\}$ なので $\mathbf{v} - \mathbf{w} = \mathbf{0}_V$ ． \square

7.4 表現行列

V を \mathbb{K} 上の n -次元ベクトル空間, W を \mathbb{K} 上の m -次元ベクトル空間とする．任意のベクトル $\mathbf{v} \in V$ と $\mathbf{w} \in W$ は,

$$\mathbf{v} = x_1\mathbf{v}_1 + \cdots + x_n\mathbf{v}_n$$

$$\mathbf{w} = y_1\mathbf{w}_1 + \cdots + y_m\mathbf{w}_m$$

とかける．ここで、 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ は V の基底、 $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m$ は W の基底である．いま、線形写像 $f: V \rightarrow W$ により、

$$\mathbf{w} = f(\mathbf{v})$$

という関係を定める．

ところで、命題 7.3 より、 V と \mathbb{K}^n 、 W と \mathbb{K}^m はそれぞれ同型であるから、よって、全単射な線形写像 $\varphi: \mathbb{K}^n \rightarrow V$ 、 $\varphi': \mathbb{K}^m \rightarrow W$ が存在して、

$$\varphi: {}^t(x_1 \ \cdots \ x_n) = x_1 \mathbf{e}_1 + \cdots + x_n \mathbf{e}_n \mapsto x_1 \mathbf{v}_1 + \cdots + x_n \mathbf{v}_n,$$

$$\varphi': {}^t(y_1 \ \cdots \ y_m) = y_1 \mathbf{e}'_1 + \cdots + y_m \mathbf{e}'_m \mapsto y_1 \mathbf{w}_1 + \cdots + y_m \mathbf{w}_m$$

したがって、線形写像 $f: V \rightarrow W$ を考える代わりに、線形写像 $\hat{A}: \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^m$ を考えることができそうである．ここで、 \hat{A} は左から $m \times n$ -行列 A をかける写像とできる．なぜなら、 \mathbb{K}^n の標準基底 (定義 4.8) $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n$ に対する変換

$$\hat{A}(\mathbf{e}_j) = a_{1j} \mathbf{e}'_1 + \cdots + a_{mj} \mathbf{e}'_m \quad (j = 1, \dots, n)$$

(\mathbf{e}'_i は \mathbb{K}^m の標準基底) を調べて、行列 A を

$$A := \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

と定義すれば、一般の $\mathbf{x} = x_1 \mathbf{e}_1 + \cdots + x_n \mathbf{e}_n$ に対し、

$$\begin{aligned} \mathbf{y} = A\mathbf{x} &= x_1 A\mathbf{e}_1 + \cdots + x_n A\mathbf{e}_n \\ &= x_1 \hat{A}(\mathbf{e}_1) + \cdots + x_n \hat{A}(\mathbf{e}_n) = \hat{A}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

$\mathbf{y} = A\mathbf{x}$ をあらわにかくと、

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

形式的には、以下のように定義する．

定義 7.7 V, W を \mathbb{K} 上の有限次元ベクトル空間、 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ 、 $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m$ をそれぞれ V, W の基底とする． $\varphi: \mathbb{K}^n \rightarrow V$ 、 $\varphi': \mathbb{K}^m \rightarrow W$ を基底が定める同型、つまり

$$\varphi(\mathbf{e}_j) = \mathbf{v}_j, \quad \varphi'(\mathbf{e}'_i) = \mathbf{w}_i$$

$$\text{where } \mathbf{e}_j = {}^t(0 \ \cdots \ \overset{j}{1} \ \cdots \ \overset{n}{0}) \in \mathbb{K}^n, \quad \mathbf{e}'_i = {}^t(0 \ \cdots \ \overset{i}{1} \ \cdots \ \overset{m}{0}) \in \mathbb{K}^m$$

線形写像 $f: V \rightarrow W$ に対し, $\varphi'^{-1} \circ f \circ \varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ は $m \times n$ -行列 A を用いて

$$\varphi'^{-1} \circ f \circ \varphi(\mathbf{v}) = A\mathbf{v} \quad (7.3)$$

とかける. A を**表現行列** (representation matrix), あるいは行列表示という. /

よって, 線形写像 f の性質を調べるには, $\mathbf{w} = f(\mathbf{v})$ を直接扱う代わりに, 行列のかけ算 $\mathbf{y} = A\mathbf{x}$ について考察すればよい.

なお, 表現行列の形は V の基底と W の基底をどう取るか¹¹⁾に依存する. したがって, 表現行列を扱うときは, それがどの基底に対するものなのかを常に意識しなければならない. 特に, 基底の順序を変えただけでも表現行列が変わるので, 注意が必要である.

命題 7.8 f, g を \mathbb{K} 上の有限次元ベクトル空間 V から W への線形写像とし, $c \in \mathbb{K}$ をスカラーとする. V の基底と W の基底を固定し, その基底に対する f の表現行列を A , g の表現行列を B とする. このとき,

- (1) $f + g$ の表現行列は $A + B$ である.
- (2) cf の表現行列は cA である.

証明 eq. (7.3) と命題 7.2 を使えば容易に示される. □

定理 7.9 U, V, W をそれぞれ \mathbb{K} 上のベクトル空間とし, $f: U \rightarrow V$, $g: V \rightarrow W$ を線形写像とする. U, V, W の基底 B_U, B_V, B_W を固定し, B_U, B_V に対する f の表現行列を A , B_V, B_W に対する g の表現行列を B とする. このとき, 基底 B_U, B_W に対する $g \circ f$ の表現行列は BA である.

証明 $\varphi: \mathbb{K}^n \rightarrow U$, $\varphi': \mathbb{K}^m \rightarrow V$, $\varphi'': \mathbb{K}^l \rightarrow W$ をそれぞれ, 基底 B_U, B_V, B_W が定める同型とする. 線形写像 $g \circ f$ の基底 B_U, B_W に対する表現行列は, eq. (7.3) より

$$\begin{aligned} \varphi''^{-1} \circ (g \circ f) \circ \varphi(\mathbf{u}) &= \varphi''^{-1} \circ (g \circ \varphi' \circ \varphi'^{-1} \circ f) \circ \varphi(\mathbf{u}) \\ &= (\varphi''^{-1} \circ g \circ \varphi') \circ (\varphi'^{-1} \circ f \circ \varphi)(\mathbf{u}) \\ &= B(A\mathbf{u}) = (BA)\mathbf{u} \end{aligned}$$

最後の等号では系 4.3 を使った. □

扱うベクトル空間を有限次元に限ってしまえば, 線形写像はすべて単なる行列に化けてしまうのである. これが線形代数学が強力たるゆえんである.

7.5 固有値と固有ベクトル

11) つまり, 同型写像 φ, φ' の取り方.

§8 双対空間

8.1 双対空間

定義 8.1 (線形汎関数) V を \mathbb{K} 上のベクトル空間 (定義 5.1) とする. 線形写像 (定義 7.1) $f: V \rightarrow \mathbb{K}$ を **線形形式** (linear form) あるいは **線形汎関数** (linear functional) という. /

例 8.1 $V = \mathbb{R}^3$ (3次元ユークリッド空間) とする. \mathbb{R}^3 のベクトルをその第1成分にうつす写像 $f: \boldsymbol{v} \mapsto v_1 \in \mathbb{R}$ は V の線形汎関数である.

定義 8.2 (双対空間) V 上の線形汎関数全体の集合

$$V^* := \{f: V \rightarrow \mathbb{K} \mid f \text{ は線形汎関数}\} \quad (8.1)$$

を V の **双対空間** (dual space) という [8, §4.1]. /

命題 8.2 ベクトル空間 V の双対空間 V^* は, ベクトル空間をなす [8, §4.1].

証明 V^* の元が, 命題 7.1 で定義される和とスカラー倍について, 定義 5.1 の公理を満たすことを示せばよい. \square

定義 8.3 (双対基底) V を \mathbb{K} 上の有限次元ベクトル空間, $\boldsymbol{x}_1, \dots, \boldsymbol{x}_n$ を V の基底とすると, 各 $i = 1, \dots, n$ に対し

$$f_i(\boldsymbol{x}_j) = \delta_{i,j} \quad (\text{定義 1.31}) \quad (8.2)$$

を満たす線形汎関数 $f_i: V \rightarrow \mathbb{K}$ がただひとつ存在する. このとき, f_1, \dots, f_n は V^* の基底になる.

eq. (8.2) で定義される f_1, \dots, f_n を $\boldsymbol{x}_1, \dots, \boldsymbol{x}_n$ の **双対基底** (dual basis) という. /

このような定義が可能であることについては証明を要するが, ここでは省略する.

例 8.3 $V = \mathbb{R}^n$ とし, ある $\boldsymbol{a} \in V$ をとる. 線形汎関数 $f_{\boldsymbol{a}}: V \rightarrow \mathbb{R}$ を

$$f_{\boldsymbol{a}}: V \ni \boldsymbol{v} \mapsto {}^t\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{v} \in \mathbb{R}$$

で定める. \mathbb{R}^n の標準基底 $\boldsymbol{e}_1, \dots, \boldsymbol{e}_n$ に対する双対基底は, $f_{\boldsymbol{e}_1}, \dots, f_{\boldsymbol{e}_n}$ である. これは行ベクトル ${}^t\boldsymbol{e}_1, \dots, {}^t\boldsymbol{e}_n$ とみることができる..

8.2 零化空間

定義 8.4 (零化空間) V をベクトル空間, V^* をその双対空間とする. V の部分ベクトル空間 W に対し,

$$W^\perp := \{f \in V^* \mid f(W) = \{0\}\} \quad (8.3)$$

を W の れい か けう かん 零化空間 (annihilator) という [8, §4.2]. /

命題 8.4 部分ベクトル空間 $W \subset V$ の零化空間 W^\perp は, V^* の部分ベクトル空間である.

証明 写像 i^* を, 線形汎関数 $f: V \rightarrow \mathbb{K}$ を W に制限する写像と定める:

$$i^*: V^* \ni f \mapsto f|_W \in W^*$$

このとき, 任意の $f, g \in V^*$ および $c \in \mathbb{K}$ について $i^*(f+g) = i^*(f) + i^*(g)$ かつ $i^*(cf) = c \cdot i^*(f)$ であるので, i^* は線形写像である. すると $W^\perp = \text{Ker}(i^*: V^* \rightarrow W^*)$ (定義 7.6) とかけるので, W^\perp は V^* の部分ベクトル空間である. \square

8.3 双対写像

双対空間から双対空間への写像を定義する.

定義 8.5 V, W を \mathbb{K} 上のベクトル空間とし, $f: V \rightarrow W$ を線形写像とする. W の双対空間の元 $g \in W^*$ を V の線形形式 $g \circ f: V \rightarrow \mathbb{K}$ にうつす写像 $f^*: W^* \rightarrow V^*$ を, f の **双対写像** という [8, §4.3]. /

双対写像 f^* は線形写像である [8, §4.3].

命題 8.5 U, V, W をベクトル空間, $c \in \mathbb{K}$ を体, 線形写像 $f, g: U \rightarrow V$, $h: V \rightarrow W$ とする. 双対写像について, 以下が成り立つ [8, §4.3].

- (1) V 上の恒等写像の双対は, V^* 上の恒等写像である. すなわち $(\text{id}_V)^* = \text{id}_{V^*}$ が成り立つ.
- (2) $(\bullet)^*$ は線形的である. すなわち $(f+g)^* = f^* + g^*$ であり, $(cf)^* = cf^*$ である.
- (3) 合成写像の双対は, 順序を逆にする. すなわち $(f \circ h)^* = h^* \circ f^*$ である.

証明 任意の $j \in V^*$ あるいは $k \in W^*$ をとって証明する.

$$(1) (\text{id}_V)^*(j) = j \circ \text{id}_V = j \text{ である.}$$

$$(2) (f+g)^*(j) = j \circ (f+g) = j \circ f + j \circ g = f^*(j) + g^*(j) \text{ である. また, } (cf)^*(j) = j \circ (cf) = c \cdot (j \circ f) = cf^* \text{ である.}$$

$$(3) (f \circ g)^*(j) = j \circ (f \circ g) = (j \circ f) \circ g = f^* \circ g = h^*(f^*(j)) = (h^* \circ f^*)(j) \text{ である.}$$

□

8.4 内積空間における線形汎関数

6.1 節で扱った内積は、実は線形汎関数の一種である.

命題 8.6 \mathcal{V} を内積空間 (定義 6.1), $u \in V$ をあるベクトルとする. 任意のベクトル $v \in V$ に対して内積 $\langle u, v \rangle$ を与える写像

$$\langle u, \bullet \rangle: V \ni v \mapsto \langle u, v \rangle \in \mathbb{R} \quad (8.4)$$

は線形汎関数である.

証明 内積の線形性より $\langle u, \bullet \rangle$ が線形なのは明らかである. □

内積には連続性があった. 連続な線形汎関数というものを定義しよう.

命題 8.7 ノルム空間 V 上の線形汎関数 f について, f が有界であることと連続であることは同値である [11, §3.4].

内積が線形汎関数であることはほぼ明らかである. 真に驚くべきことは, すべての有界な線形汎関数が内積の形でかけることである.

定理 8.8 (リースの表現定理 (Riesz representation theorem)) V を内積空間とする. 任意の有界線形汎関数 $F: V \rightarrow \mathbb{R}$ は, あるベクトル $a \in V$ を用いて

$$F(v) := \langle a, v \rangle \quad (8.5)$$

とかける.

§9 商空間とテンソル積

この節では、複数の量子状態を扱ううえで必須であるテンソル積を取り扱う¹²⁾。

9.1 商空間

ベクトル空間の商集合 (定義 1.30) に対応する。

定義 9.1 V を \mathbb{K} 上のベクトル空間、 W を V の部分ベクトル空間 (定義 5.2) とする。 V 上の同値関係 \sim を

$$\mathbf{x} \sim \mathbf{y} \iff \mathbf{x} - \mathbf{y} \in W \quad (9.1)$$

と定義し、 \sim による同値類を $[\mathbf{x}]$ とかくことにする。商集合を V/W とかき、商空間とよぶ。／

命題 9.1 商空間 V/W は次のような和とスカラー倍のもとでベクトル空間をなす。

$$[\mathbf{x}] \bar{+} [\mathbf{y}] := [\mathbf{x} + \mathbf{y}] \quad (9.2a)$$

$$c \bar{*} [\mathbf{x}] := [c\mathbf{x}] \quad (9.2b)$$

証明 $\bar{+}$ と $\bar{*}$ が well-defined であることを示せば十分だろう。

まず $\mathbf{x} \sim \mathbf{x}'$, $\mathbf{y} \sim \mathbf{y}'$ とする。このとき $\mathbf{w} := \mathbf{x} + \mathbf{y} \in W$, $\mathbf{w}' := \mathbf{x}' + \mathbf{y}' \in W$ であるから、 $\mathbf{w} - \mathbf{w}' \in W$ である。つまり $(\mathbf{x} + \mathbf{y}) - (\mathbf{x}' + \mathbf{y}') \in W$, だから $\mathbf{x} + \mathbf{y} \sim \mathbf{x}' + \mathbf{y}'$ である。

次に、 $\mathbf{x} - \mathbf{x}' \in W$ だから、 $c\mathbf{x} - c\mathbf{x}' = c(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \in W$. よって、 $c\mathbf{x} \sim c\mathbf{x}'$ である。□

9.2 テンソル積

V, W を \mathbb{K} 上のベクトル空間とする。 $\mathbf{x}, \mathbf{x}' \in V$, $\mathbf{y}, \mathbf{y}' \in W$, $c \in \mathbb{K}$ について、

$$(\mathbf{x} + \mathbf{x}', \mathbf{y}) = (\mathbf{x}, \mathbf{y}) + (\mathbf{x}', \mathbf{y}) \quad (c\mathbf{x}, \mathbf{y}) = c(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (9.3a)$$

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y} + \mathbf{y}') = (\mathbf{x}, \mathbf{y}) + (\mathbf{x}, \mathbf{y}') \quad (\mathbf{x}, c\mathbf{y}) = c(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (9.3b)$$

12) どういうわけか、 $\psi(x, y) = \varphi_1(x)\varphi_2(y)$ に対して φ_1 のみに作用する演算子 $D = D(x)$ を作用させると $D(x)\psi(x, y) = (D\varphi_1(x))\varphi_2(y)$ となることから類推して、 $|\psi\rangle = |\varphi_1\rangle|\varphi_2\rangle$ に対して φ_1 のみに作用する演算子 \hat{D}_1 を作用させると $\hat{D}_1|\psi\rangle = (\hat{D}_1|\varphi_1\rangle)|\varphi_2\rangle$ であるという定義が罷り通っているようである。しかし、 $|\varphi_1\rangle, |\varphi_2\rangle$ をベクトルと考えたとき、ベクトルを横に並べた $|\varphi_1\rangle|\varphi_2\rangle$ とはどのようなものなのか、さらに左側のベクトルにだけ作用する演算子＝行列とはどのようなものなのか、これではまったく意味不明である。

が成り立つような (\mathbf{x}, \mathbf{y}) を**テンソル積**という。 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) の全体もまた、ベクトル空間をなすので、この空間を $V \otimes W$ とかく。 また $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) =: \mathbf{x} \otimes \mathbf{y}$ とかく。

なお、eq. (9.3) のような条件を満たす写像 (\bullet, \bullet) を**双線形写像**という。

定義を見てもわかりづらいので、具体例でみてみよう。 $V = V' = W = W' = \mathbb{R}^2$ とする。 2つのベクトルのテンソル積は

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \\ b \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ac \\ ad \\ bc \\ bd \end{pmatrix} \quad (9.4)$$

とかける。 もちろん $\mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2$ の次元は $2 \times 2 = 4$ であり、その基底は

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9.5)$$

である。 すなわち、 $\mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2 = \mathbb{R}^4$ と考えられる。

eq. (9.5) の線形結合でかけるベクトルはすべて $\mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2$ に属する。 ところが、そのようなベクトルが eq. (9.4) の形で書けるとは限らない。 例えば ${}^t(1\ 0) \otimes {}^t(1\ 0) + {}^t(0\ 1) \otimes {}^t(0\ 1) = {}^t(1\ 0\ 0\ 1) \in \mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2$ は2つのベクトルのテンソル積としてかけない¹³⁾。 この事実が量子エンタングル状態を引き起こす。

一方、 $V = V' = W = W' = 2 \times 2$ -行列全体の集合 とする。 このとき、テンソル積は

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} & b \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \\ c \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} & d \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a\alpha & a\beta & b\alpha & b\beta \\ a\gamma & a\delta & b\gamma & b\delta \\ c\alpha & c\beta & d\alpha & d\beta \\ c\gamma & c\delta & d\gamma & d\delta \end{pmatrix} \quad (9.6)$$

とかける。 このような定義の下で、行列 A, B とベクトル \mathbf{x}, \mathbf{y} について

$$(A \otimes B)(\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}) = (A\mathbf{x}) \otimes (B\mathbf{y})$$

13) ${}^t(1\ 0\ 0\ 1)$ が eq. (9.4) で表せたとする。 第2成分より $ad = 0$ だから、 $a = 0$ または $d = 0$ 。 $a = 0$ であれば、第1成分 ($ac = 1$) と矛盾。 $d = 0$ とすると、第4成分 ($bd = 1$) と矛盾。

が成り立つことも容易に示される (9.3 節も参照)。

3 つ以上のテンソル積についても、帰納的に定義される。すなわち、 $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathbb{R}^2$ のテンソル積は、

$$\mathbf{x} \otimes \mathbf{y} \otimes \mathbf{z} := \mathbf{x} \otimes (\mathbf{y} \otimes \mathbf{z})$$

である。 $\mathbf{x} \otimes (\mathbf{y} \otimes \mathbf{z}) = (\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}) \otimes \mathbf{z}$ であることは容易に示される。 $\mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2 = \mathbb{R}^8$ であり、これを $(\mathbb{R}^2)^{\otimes 3}$ とも書く。

命題 9.2 V, W を \mathbb{K} 上のベクトル空間、 $\mathbf{x}, \mathbf{x}' \in V$, $\mathbf{y}, \mathbf{y}' \in W$, $c \in \mathbb{K}$ について、以下が成り立つ。

- (1) $(\mathbf{x} + \mathbf{x}') \otimes \mathbf{y} = (\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}) + (\mathbf{x}' \otimes \mathbf{y})$
- (2) $\mathbf{x} \otimes (\mathbf{y} + \mathbf{y}') = (\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}) + (\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}')$
- (3) $(c\mathbf{x}) \otimes \mathbf{y} = c(\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}) = \mathbf{x} \otimes (c\mathbf{y})$

むしろ、命題 9.2 が成り立つようにテンソル積を定めたのであった。

テンソル積の構成

定義 9.2 線形汎関数 $h: V \times W \rightarrow \mathbb{K}$ の中で、 $h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \neq 0$ となる $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in V \times W$ の数が有限個であるものの全体の集合を L と書くことにする。 L の元であって、

$$e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}}(\mathbf{x}', \mathbf{y}') = \begin{cases} 1 & \text{if } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{x}', \mathbf{y}') \\ 0 & \text{if } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \neq (\mathbf{x}', \mathbf{y}') \end{cases}$$

となるものを考えよう。 $(e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}})_{\mathbf{x} \in V, \mathbf{y} \in W}$ は L の基底になっている¹⁴⁾。 L の部分ベクトル空間を

$$R_1 := \langle e_{\mathbf{x}+\mathbf{x}', \mathbf{y}} - e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} - e_{\mathbf{x}', \mathbf{y}} \mid \mathbf{x}, \mathbf{x}' \in V, \mathbf{y} \in W \rangle$$

$$R_2 := \langle e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}+\mathbf{y}'} - e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} - e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}'} \mid \mathbf{x} \in V, \mathbf{y}, \mathbf{y}' \in W \rangle$$

$$R_3 := \langle e_{a\mathbf{x}, \mathbf{y}} - ae_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \mid \mathbf{x} \in V, \mathbf{y} \in W \rangle$$

$$R_4 := \langle e_{\mathbf{x}, a\mathbf{y}} - ae_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \mid \mathbf{x} \in V, \mathbf{y} \in W \rangle$$

とし、これらの和空間を $R := R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ とおく。このとき、商集合 L/R のことを $V \otimes W$ と書き、**テンソル積**と呼ぶ。同値類 $[e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}}]$ のことを $\mathbf{x} \otimes \mathbf{y}$ と書き、やはりテンソル積という。／

14) L の定義から $h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \neq 0$ となる (\mathbf{x}, \mathbf{y}) を列挙できるので、これらの行き先を $h(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1) = c_1, \dots, h(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n) = c_n$ とすれば、 $h = c_1 e_{\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1} + \dots + c_n e_{\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n}$ とかける。したがって $(e_{\mathbf{x}, \mathbf{y}})_{\mathbf{x} \in V, \mathbf{y} \in W}$ は L を生成する。一次独立性は明らかである。

(x, y) をテンソル積 $x \otimes y$ へうつす写像 $\otimes: V \times W \rightarrow V \otimes W$ を、**普遍双線形写像** (universal bilinear map) という。定義からはわかりづらいが、**普遍双線形写像は全射でない**。つまり、 $V \times W$ の元が $x \otimes y$ という形で書けるとは限らない。

定理 9.3 V, W を \mathbb{K} 上のベクトル空間、 $V \otimes W$ をテンソル積とする。任意の \mathbb{K} 上ベクトル空間 V' について、 $V \otimes W$ から V' への線形写像 f を、 $V \times W$ から V' への双線形写像 b_f にうつす写像は全単射である。

$$\{\text{線形写像: } V \otimes W \rightarrow V'\} \rightarrow \{\text{双線形写像: } V \times W \rightarrow V'\}$$

つまり、 $f(x \otimes y) = b_f(x, y)$ が成り立つ。図式で示すと以下のようなになる。

$$\begin{array}{ccc} V \times W & & \\ \downarrow \otimes & \searrow b_f & \\ V \otimes W & \xrightarrow{f} & V' \end{array}$$

(A commutative diagram showing the relationship between the tensor product map \otimes , the bilinear map b_f , and the linear map f . The diagram is a triangle with $V \times W$ at the top, $V \otimes W$ at the bottom left, and V' at the bottom right. Arrows are: $\otimes: V \times W \rightarrow V \otimes W$ (vertical down), $b_f: V \times W \rightarrow V'$ (diagonal down-right), and $f: V \otimes W \rightarrow V'$ (horizontal right). A small circle with a dot is in the center of the triangle, indicating commutativity.)

定理 9.3 の証明には多くの予備知識が必要であるので省略する。

9.3 線形写像のテンソル積

V, V', W, W' をベクトル空間、 $f: V \rightarrow V'$, $g: W \rightarrow W'$ を線形写像とする。線形写像 $f \otimes g: V \otimes W \rightarrow V' \otimes W'$ を

$$(f \otimes g)(x \otimes y) = f(x) \otimes g(y) \quad (9.7)$$

で定めたものを、 f と g の**テンソル積**という¹⁵⁾。

15) eq. (9.7) にある 3 つの \otimes はそれぞれ別の演算である。ひとつめは $\otimes: \text{hom}(V, V') \times \text{hom}(W, W') \rightarrow \text{hom}(V \otimes W, V' \otimes W')$ 、ふたつめは $\otimes: V \times W \rightarrow V \otimes W$ 、みつめめは $\otimes: V' \times W' \rightarrow V' \otimes W'$ である。

第 3 章 解析学と関数解析

量子力学の根底をなす「ヒルベルト空間」は，chapter 2 で扱ったベクトル空間の一種である．しかし，ヒルベルト空間を構成する要素は単なる数ベクトルではなく関数，しかも無限次元である．それゆえ，有限次元では自明であるかのように思える定理のいくつかが破綻する．このような無限次元ベクトル空間を扱う数学の分野が関数解析である．

§10 級数

10.1 関数の列

わかりやすくするために、実数から実数への関数を考える。

定義 10.1 関数の列 $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が関数 f に かくてんしゅうそく **各点収束** するとは、任意の $x \in \mathbb{R}$ について、任意の $\varepsilon > 0$ に対し、ある $N \in \mathbb{N}$ が存在して、 $n > N$ なら $|f(x) - f_n(x)| < \varepsilon$ となることをいう。／

各点収束の定義は、「任意の $x \in \mathbb{R}$ に対し、 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ 」とかける。

定義 10.2 関数の列 $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が関数 f に いちようしゅうそく **一様収束** するとは、任意の $\varepsilon > 0$ に対し、ある $N \in \mathbb{N}$ が存在して、任意の $x \in \mathbb{R}$ に対し、 $n > N$ なら $|f(x) - f_n(x)| < \varepsilon$ となることをいう。／

2つの定義はよく似ているが、「任意の $x \in \mathbb{R}$ 」の位置が違う。 ε を固定したとき、各点収束では N が x に依存する数 $N_{\varepsilon, x}$ でよい。しかし、一様収束では N が x に依存しない (ε のみに依存する) 定数 N_ε でなくてはならない。

例 10.1 自然数 n に対し、関数 f_n を $f_n(x) := x^n$ ($0 \leq x \leq 1$) で定義する (図 3.1)。 f_n は $n \rightarrow \infty$ で

$$f(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < 1) \\ 1 & (x = 1) \end{cases}$$

に各点収束する。しかし、一様収束はしない。実際、ある $0 < \varepsilon < 1$ を定めたとき、 $N \in \mathbb{N}$ をどう取っても、 $x = \varepsilon^{1/N}$ において $x^n > \varepsilon$ ($n > N$) であるから、一様収束の条件を満たさない。

定義から、以下が成り立つ。

命題 10.2 一様収束する関数列は各点収束する。

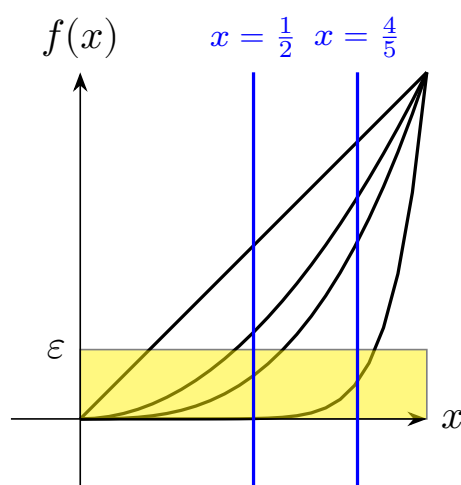


図 3.1: $f_n(x) = x^n$ のグラフ. n が大きくなるほど右側のグラフになる. $0 < x < 1$ で $f_n(x) \rightarrow 0$ なので, グラフは $n \rightarrow \infty$ で $f(x) < \varepsilon$ の領域に収まるはず. しかし, 左から 2 番目のグラフだと $x \geq 1/2$ でグラフが下側に収まらない. n を大きくして 3 番目のグラフにしても, $x \geq 4/5$ ではグラフが収まらない. さらに n を大きくして 4 番目のグラフにしても, $x = 4/5$ は収まるものの $x \geq 7/8$ あたりでやはりグラフがはみ出る.

§11 測度

実ユークリッド空間 \mathbb{R}^n の適当な部分集合においては，“体積”が定義できる．この体積という概念を一般化したものが^{そくど}測度である．

この節の議論は伊藤『ルベーグ積分入門』による．同書において集合の和 $A+B$ とかかっているのは，直和 $A \sqcup B$ の意味である．測度について $m(A \overset{\text{直和}}{+} B) = m(A) + m(B)$ であることを考えれば合理的な表記ともいえるが，本稿ではベクトル空間の和空間（定義 5.3）とまぎらわしいので用いない．

11.1 ユークリッド空間における体積

測度の定義をする前に，通常のユークリッド空間における「体積」とは何かについて考える．

$X = \mathbb{R}$ を実数の空間とする． \mathbb{R} の部分集合であって，

$$(a, b] := \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}, \quad -\infty \leq a < b < \infty \quad (11.1)$$

とあらわされるものを^{くかん}区間という [4]．

$X = \mathbb{R}^n$ を実ユークリッド空間とする．ユークリッド空間の“領域”を，直積

$$I := (a_1, b_1] \times \cdots \times (a_n, b_n], \quad -\infty \leq a_i < b_i < \infty \quad (11.2)$$

で定める． I は， n -次元の直方体（長方形）領域である．

さらに，有限個の区間 I_i ($i = 1, 2, \dots, N$) の直和（非交和）（定義 1.8）

$$I_1 \sqcup I_2 \sqcup \cdots \sqcup I_N \quad (11.3)$$

を区間塊という．いくつかの直方体が組み合わさっている領域が区間塊である．直和であるから，直方体同士はくっついていても離れていてもよいが，重なってはいけない．

N -次元ユークリッド空間における区間全体の集合を \mathfrak{I}_N ，区間塊全体の集合を \mathfrak{F}_N とかく [4]．

11.2 有限加法族

定義 11.1 空間 X の部分集合の族 (定義 1.2) (つまり X の部分集合からなる集合) \mathfrak{F} が以下の3つを満たすとき, \mathfrak{F} を**有限加法族**という.

- (1) $X, \emptyset \in \mathfrak{F}$ である.
- (2) $A \in \mathfrak{F}$ なら $A^c \in \mathfrak{F}$ (ただし補集合 $A^c = X \setminus A$).
- (3) $A, B \in \mathfrak{F}$ ならば, $A \cup B \in \mathfrak{F}$, $A \cap B \in \mathfrak{F}$, $A \setminus B \in \mathfrak{F}$ が成り立つ.

／

実は, (1) は X か空集合 \emptyset どちらか片方だけで十分であるし, (3) の3条件はどれかひとつで十分である.

任意の空間 X について, その**部分集合全体の集合** (定義 1.9) $\mathfrak{F}_{\max} := \mathcal{P}(X)$ は最大の有限加法族である. また, $\mathfrak{F}_{\min} := \{X, \emptyset\}$ は最小の有限加法族である.

例 11.1 n -次元ユークリッド空間における区間塊全体の集合 \mathfrak{F}_n は有限加法族である [4, §4].

定義 11.2 X を空間, \mathfrak{F} を有限加法族とする. \mathfrak{F} の元 (つまり X の部分集合) A を実数にうつす関数 m が以下の条件を満たすとき, m を**有限加法的測度**という.

- (1) 任意の $A \in \mathfrak{F}$ に対し, $0 \leq m(A) \leq +\infty$ である. 特に, $m(\emptyset) = 0$ である.
- (2) (**有限加法性**) $A, B \in \mathfrak{F}$ かつ $A \cap B = \emptyset$ (交わらない) なら, $m(A \sqcup B) = m(A) + m(B)$ である.

より一般に, $A_1, \dots, A_n \in \mathfrak{F}$ が $A_i \cap A_j = \emptyset$ ($i \neq j$), つまり互いに交わらないなら,

$$m\left(\bigsqcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n m(A_i)$$

以下の性質は定義からただちに導かれるが, 重要なので定義として加えておく.

- (3) (**単調性**) $A \subset B$ ($\in \mathfrak{F}$) なら $m(A) \leq m(B)$ である.
- (4) $A \subset B$ ($\in \mathfrak{F}$) なら $m(A \setminus B) = m(A) - m(B)$ である.
- (5) (**有限劣加法性**) $A_1, \dots, A_n \in \mathfrak{F}$ なら,

$$m\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \leq \sum_{i=1}^n m(A_i)$$

これらに加えて, さらに以下が成り立つとき (必ず成り立つとは限らない), m は**完全加法的**であるという.

- (6) **高々可算個** (定義 1.26) の集合 A_1, A_2, \dots が $A_i \cap A_j = \emptyset$ ($i \neq j$) を満たし, $A := \bigsqcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathfrak{F}$ であるなら,

$$m(A) = \sum_{n=1}^{\infty} m(A_n)$$

／

(2) より, 2つの領域 A, B が全く重なっていなければ, 2つを合わせた領域 $A \cup B$ の体積は, A の体積と B の体積の和になるはずである. また, A と B が一部重なっている場合, $A \cup B$ の体積は単純な和よりもすこし小さくなるはずであるということを (5) は主張している.

(3) より, 領域 A が完全に B に含まれているのなら, A の体積が B の体積を超えることはない.

命題 11.2 N -次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^N における区間塊 $E = I_1 + \cdots + I_n$ ($E \in \mathfrak{F}_N$, $I_i \in \mathfrak{I}$) に対し,

$$\begin{aligned} m^*(E) &:= \prod_{\nu} (b_{\nu} - a_{\nu}) \\ &= (b_1 - a_1) \times \cdots \times (b_N - a_N) \quad \text{ただし} \quad I_{\nu} = (a_{\nu}, b_{\nu}] \end{aligned} \quad (11.4)$$

は \mathfrak{F}_N 上の有限加法的測度である (eq. (11.1) を参照). さらに m^* は完全加法的である.

11.3 外測度と可測集合

定義 11.3 (外測度) X を集合, Γ を X の部分集合から実数への関数とする. 任意の部分集合 A, B について,

- (1) (非負性) $0 \leq \Gamma(A) \leq +\infty$ であり, さらに $\Gamma(\emptyset) = 0$ である.
- (2) (単調性) $A \subset B$ なら $\Gamma(A) \leq \Gamma(B)$ である.
- (3) (劣加法性) $\Gamma(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma(A_n)$

の3つが満たされるとき, Γ を**カラテオドリの外測度** (Carathéodory outer measure)[6], あるいは単に^{がいそくど}**外測度** (outer measure) という [4]¹⁾. /

11.2 節で議論したように, ある空間 X と有限加法族 \mathfrak{F} が与えられたとき, 集合 $A \in \mathfrak{F}$ に対して**有限加法的測度** $m(A)$ が定義できたのであった. 次の定理を用いると, X の部分集合すべてに対して m が定義できるように拡張することができる.

定理 11.3 空間 X を考え, \mathfrak{F} を有限加法族, m を \mathfrak{F} 上の有限加法的測度とする. \mathfrak{F} に属する集合 E の測度は $m(E)$ と定義できる. これを X の任意の集合 A ($A \in \mathfrak{F}$ とは限らない) に対して拡張しよう.

$A \subset X$ を集合とする. 高々可算個の \mathfrak{F} の集合の組 $\{E_n\}$ で A を覆う²⁾. このような覆い

1) Constantin Carathéodory (1873–1950). ドイツの数学者. 熱力学第二法則の定式化でも知られる. [10]

2) つまり, $A \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ となるような集合の組 $\{E_n\}$ (ただし $E_k \in \mathfrak{F}$) であり, E_1, E_2, \dots と数えると可算無限個 (ないしは有限個) である. E_k は可算集合でなくてもよい.

かたは必ず存在し³⁾，またそれぞれの覆いかた $\{E_n\}$ について $\sum_{n=1}^{\infty} m(E_n)$ を計算することができる．

このような A の覆いかたすべてを考え，そのうえで

$$\Gamma(A) := \inf_{\{E_n\}} \sum_{n=1}^{\infty} m(E_n)$$

と定めると， Γ は外測度である．

証明 定義 11.3 の条件を確認すればよい． □

応用上重要なのは，次のルベーク外測度である．

定義 11.4 命題 11.2 で定義した m^* を定理 11.3 の方法によって拡張した μ^* を，**ルベーク外測度 (Lebesgue outer measure)** という．／

定義より，外測度 Γ は空間 X に含まれるすべての集合に対して定義できるが，すべての集合に対して Γ が良い“体積”になるとは限らない．例えば $\mathfrak{F} := \{X, \emptyset\}$ として， $m(X) = 1$ ， $m(\emptyset) = 0$ となるように有限加法的測度 m を定める⁴⁾．そうすれば外測度 Γ は

$$\Gamma(A) = \begin{cases} 1 & \text{when } A \neq \emptyset \\ 0 & \text{when } A = \emptyset \end{cases}, \quad A \subset X$$

である．したがって，任意の $A, B \subset X$ ($A, B \neq \emptyset$) に対して， $\Gamma(A) = \Gamma(B) = \Gamma(A \cup B) = 1$ であるが，これは直感的な体積の性質に反する．では， $\Gamma(E)$ が“良い”体積になる，具体的には

- (1) 任意の集合 $E \subset X$ に対し， $0 \leq \Gamma(E) \leq \infty$ であり，
- (2) 高々可算個の集合 E_1, E_2, \dots に対し， $\Gamma(E_1 \sqcup E_2 \sqcup \dots) = \Gamma(E_1) + \Gamma(E_2) + \dots$ が成り立つような集合 E の条件とは何だろうか．

定義 11.5 Γ を空間 X で定義された外測度とする．集合 $E \subset X$ が Γ -可測，あるいは単に可測 (measurable) であるとは，任意の集合 $A \subset X$ に対し，

$$\Gamma(A) = \Gamma(A \cap E) + \Gamma(A \cap E^c) \tag{11.5}$$

が成り立つことをいう．あるいは，任意の $B \subset E$ ， $C \subset E^c$ に対し，

$$\Gamma(B \sqcup C) = \Gamma(B) + \Gamma(C) \tag{11.6}$$

が成り立つことをいう．／

3) たとえば 1 個の集合 X で A を覆うことができる．

4) もちろんこの定義が well-defined であるのは $X \neq \emptyset$ のときのみである．

eq. (11.5) と eq. (11.6) は, $B = A \cap E$, $C = A \cap E^c$ と置きなおすことで移り変わる, 同値な定義である.

次に, どのような集合が可測になるかを見る. まず定理を列挙し, 証明はあとでまとめて行う.

命題 11.4 Γ -可測な集合 E の補集合 E^c は Γ -可測である.

命題 11.5 $\Gamma(E) = 0$ なら E は可測である.

命題 11.6 Γ -可測な集合系 E_n ($n = 1, 2, \dots$) が互いに交わらない (つまり $i \neq j$ なら $E_i \cap E_j = \emptyset$ である) とき, $S = \bigsqcup_{n=1}^{\infty} E_n$ は Γ -可測であり, さらに $\Gamma(S) = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma(E_n)$ である [4, 定理 5.3].

命題 11.7 E_i ($i = 1, 2, \dots$) が Γ -可測なら, $\bigcap_{i=1}^n E_i$, $\bigcup_{i=1}^n E_i$ は可測である.

系 11.8 E, F が Γ -可測なら, $E \setminus F$ は Γ -可測である.

命題 11.4 の証明 Γ -可測の定義 (定義 11.5) より明らかである. □

命題 11.5 の証明 任意の $A \subset X$ に対して, Γ の単調性より $\Gamma(A \cap E) \leq \Gamma(E) = 0$ であることに注意すると,

$$\Gamma(A \cap E) + \Gamma(A \cap E^c) \leq \Gamma(A \cap E^c) \leq \Gamma(A)$$

である. \geq は Γ の劣加法性から明らかであるので, $\Gamma(A \cap E) + \Gamma(A \cap E^c) = \Gamma(A)$. よって E は可測である. □

命題 11.6 の証明は技術的に面倒なので省略する.

命題 11.7 を示す前に, 以下の補題を示す.

補題 11.9 集合 $E, F \subset X$ が Γ -可測なら, $E \cap F$ も Γ -可測である.

補題 11.9 の証明 $A \subset (E \cap F)$, $B \subset (E \cap F)^c = E^c \cup F^c$ を任意にとる. $B = B_1 + B_2$,

$B_1 = B \cap F$, $B_2 = B \cap F^c$ と分割すると, Γ の劣加法性より

$$\Gamma(A) + \Gamma(B) \leq \Gamma(A) + \Gamma(B_1) + \Gamma(B_2)$$

E は可測で, $A \subset E$, $B_1 \subset E^c$ であるから,

$$= \Gamma(A \sqcup B_1) + \Gamma(B_2)$$

F は可測で, $A, B_1 \subset F$, $B_2 \subset F^c$ だから,

$$= \Gamma(A \sqcup B_1 \sqcup B_2)$$

$$= \Gamma(A \sqcup B)$$

逆向きの不等号 \geq は Γ の劣加法性より明らかであるから, $\Gamma(A) + \Gamma(B) = \Gamma(A \sqcup B)$. \square

命題 11.7 の証明 \cap については, 補題 11.9 を繰り返し用いればよい. \cup は,

$$\bigcup_{i=1}^n E_i = \left(\bigcap_{i=1}^n E_i^c \right)^c$$

および可測集合の補集合が可測である (命題 11.4) ことから従う. \square

系 11.8 の証明 $E \setminus F = E \cap F^c$ と書けるので, 命題 11.4 と補題 11.9 より示される. \square

11.4 測度

定義 11.6 X を空間とする. 集合族 Σ が以下の条件を満たすとき, σ -**加法族** という⁵⁾.

- (1) $X, \emptyset \in \Sigma$ である.
- (2) $A \in \Sigma$ なら $A^c \in \Sigma$ である.
- (3) Σ に属する可算個の集合 $A_1, A_2, \dots \in \Sigma$ に対し, $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \Sigma$.

より一般に, Σ に属する集合の**和・差・重なり** (定義 1.7) を可算無限回とってできた集合は Σ に属する. \diagup

σ -加法族は**有限加法族**である.

定義 11.7 Σ を σ -加法族とする. 以下の条件を満たす μ を**測度** (measure) という.

- (1) 任意の $A \in \Sigma$ に対し, $0 \leq \mu(A) \leq \infty$ である.
- (2) **高々可算個**の集合⁶⁾ $A_1, A_2, \dots \in \Sigma$ が互いに交わらないとき ($i \neq j$ なら $A_i \cap A_j = \emptyset$),

$$\mu\left(\bigsqcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \quad (11.7)$$

これらより,

5) **完全加法族**という場合や, 単に**加法族**ということもある.

6) A_i が可算集合といっているのではない.

(3) (単調性) $A, B \in \Sigma$ が $A \subset B$ であるなら $\mu(A) \leq \mu(B)$ である.

(4) $\mu(A \setminus B) = \mu(A) - \mu(B)$ である.

(5) (劣加法性) $A_1, A_2, \dots \in \mathfrak{F}$ (高々可算個) なら,

$$\mu\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \mu(A_i)$$

(X, Σ, μ) を測度空間という. /

命題 11.10 空間 X 上の外測度 Γ に対して,

(1) Γ -可測である集合全体 \mathfrak{M}_Γ は σ -加法族をなす.

(2) Γ は \mathfrak{M}_Γ 上の測度である.

証明 (1) まず, 任意の $A \subset X$ に対して $\Gamma(A) = \Gamma(\emptyset) + \Gamma(A \cap X) = \Gamma(A \cap \emptyset) + \Gamma(A \cap \emptyset^c)$ であるから, \emptyset は可測, つまり $\emptyset \in \mathfrak{M}_\Gamma$. 次に, $E \subset X$ が可測なら E^c が可測であるのは eq. (11.5) より明らかである. 最後に, $E_1, E_2, \dots \subset X$ が可測であるとする, $E := \bigcup_n E_n \in \mathfrak{M}_\Gamma$ というのは, 命題 11.6 の主張そのもの⁷⁾.

(2) 外測度の公理および命題 11.6 よりいえる.

□

定義 11.8 ルベーク外測度 μ^* の定義域を \mathfrak{M}_{μ^*} に制限したもの μ を, ルベーク測度 (Lebesgue measure) という. /

ルベーク測度がゼロである領域は考慮しなくてよい.

定義 11.9 $E \subset X$ で点 $\mathbf{x} \in E$ を実数 (または複素数) にうつす関数 f がほとんどいたるところ (almost everywhere) ゼロであるとは, ルベーク測度 0 の集合 E_0 を除いた各点でゼロになることをいう. すなわち

$$f(\mathbf{x}) = 0, \text{ for } \mathbf{x} \in E \setminus E_0 \text{ where } \mu(E_0) = 0$$

このとき,

$$f(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{a.e. } \mathbf{x} \in E \qquad f(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{a.e.}$$

などと書く. /

位相的性質を入れる.

7) より正確に言えば, $F_1 := E_1$, $F_2 := E_2 \setminus F_1$, $F_3 := E_3 \setminus (F_1 \cup F_2)$, \dots と F_n を定義すると, F_n は可測であり (なぜなら A, B が可測なら $A \setminus B$), $E = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n = \bigcup_{n=1}^{\infty} F_n$ であるから, 命題 11.6 より E は可測.

命題 11.11 (X, Σ, μ) を測度空間とする. X の任意の部分集合 E に対し, E を含む最小の σ -加法族 (定義 11.6) Σ が存在する.

証明 E を含む σ -加法族は少なくともひとつ存在する (たとえば $\mathcal{P}(X)$). そこで, E を含む σ -加法族の族 $(\Sigma_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ をとって

$$\Sigma := \bigcap_{\lambda \in \Lambda} \Sigma_\lambda$$

とすれば, これは E を含む最小の σ -加法族である. □

定義 11.10 N -次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^N に命題 11.11 を適用すると, \mathbb{R}^N の開集合 $U \in \mathcal{O}$ すべてを含む σ -加法族 (定義 11.6) \mathfrak{B} をとることができる. この \mathfrak{B} に属する集合をボレル集合 (Borel set) という. /

σ -加法族の定義から, 定義 11.10 の Σ は \mathbb{R}^N の閉集合 (開集合の補集合) すべてを含む.

§12 ルベグ積分

12.1 可測関数

たとえば、以下のような関数だったらどうだろうか。

定義 12.1 (X, Σ, μ) を可測空間とする。 $E \in \Sigma$ をとり、さらに $E = E_1 \sqcup \cdots \sqcup E_n$ と有限個の可測な直和 (定義 1.8) に分解できるとする。 E 上の点で定義された関数 f が単関数 (simple function) であるとは、

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \chi_{E_i}(\mathbf{x}) \quad (12.1)$$

とかけることをいう。ここで、 $\chi_A(\mathbf{x})$ は集合の指示関数、すなわち

$$\chi_A(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{x} \in A \\ 0 & \mathbf{x} \notin A \end{cases}$$

である。／

f は E_1 上で α_1 、 E_2 上で α_2 の値をとるという単純な関数である。

単関数 f の積分は、以下のように考えることができる。話を分かりやすくするために、 $E \subset \mathbb{R}^2$ 、 $f(\mathbf{x}) \geq 0$ としよう。まず E_1 上での体積は、底面積 $\mu(E_1)$ × 高さ α_1 である。 E_2 における体積は、やはり底面積 $\mu(E_2)$ × 高さ α_2 である。結果、 E 全体での体積は、

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \mu(E_i) \quad (12.2)$$

とかけるはずである。

可測関数を定義するために、まず次の記法を導入する。 E 上で定義された関数 f に対し、

$$E\{f > a\} := \{\mathbf{x} \in E \mid f(\mathbf{x}) > a\} \quad (12.3)$$

と定義する。 $E\{f < a\}$ 、 $E\{f \leq a\}$ など同様に定義する。

定義 12.2 X を可測空間、 Σ を σ -加法族とする。 f が Σ -可測、あるいは単に可測 (measurable) であるとは、任意の実数 a に対して、

$$E\{f > a\} \in \Sigma \quad (12.4a)$$

であることをいう。／

定義 12.2 と σ -加法族の性質から、まず

$$E\{f \leq a\} = E \setminus E\{f > a\} \in \Sigma \quad (12.4b)$$

$$E\{f \geq a\} = \bigcap_{n=1}^{\infty} E\left\{f > a - \frac{1}{n}\right\} \in \Sigma \quad (12.4c)$$

がいえる。これらを用いると、

$$E\{f < a\} = E \setminus E\{f \geq a\} \in \Sigma \quad (12.4d)$$

$$E\{f = a\} = E\{f \leq a\} \cap E\{f \geq a\} \in \Sigma \quad (12.4e)$$

がいえる。同様にして、

$$E\{f > -\infty\} = \bigcup_{n=1}^{\infty} E\{f > -n\} \in \Sigma \quad (12.4f)$$

$$E\{f < +\infty\} = \bigcup_{n=1}^{\infty} E\{f < +n\} \in \Sigma \quad (12.4g)$$

であり、ここから

$$E\{f = +\infty\} = E \setminus E\{f < +\infty\} \in \Sigma \quad (12.4h)$$

$$E\{f = -\infty\} = E \setminus E\{f > -\infty\} \in \Sigma \quad (12.4i)$$

もいえる。

なお, eqs. (12.4a)–(12.4d) のうち、どれを可測関数の定義としても、残りの 3 つはそこから導き出せる。

また、関数 f が Σ -可測であることを示すとき、任意の実数 a に対して $E\{f > a\}$ を示さなくても、任意の有理数 p に対して $E\{f > p\}$ であることを示せば十分である。実際、 a に収束する単調増加の有理数列 (p_n) をとれば⁸⁾,

$$E\{f > a\} = \bigcup_{n=1}^{\infty} E\{f > p_n\}$$

とかける。

eq. (12.1) のような単関数においては、 $E_i = E\{f = \alpha_i\}$ とかける。eq. (12.4e) を使えば、すべての i に対し $E_i \in \Sigma$ であるとき、またその時に限り、eq. (12.1) は可測である。

単関数の積分は、eq. (12.2) によって定義できそうである。一般の可測関数に対する積分も、単関数の形に帰着させることで定義することができる。そのための準備として、以下を示す。

定理 12.1 測度空間を (X, Σ, μ) とする。 $E \subset X$ 上で Σ -可測な関数 f が非負ならば、 E 上で Σ -可測であり f に各点収束する単調増加の単関数列 (f_n) が存在する [4, 定理 10.1].

8) 有理数は \mathbb{R} において稠密 (定義 2.7) であるから、このような数列をとることができる。

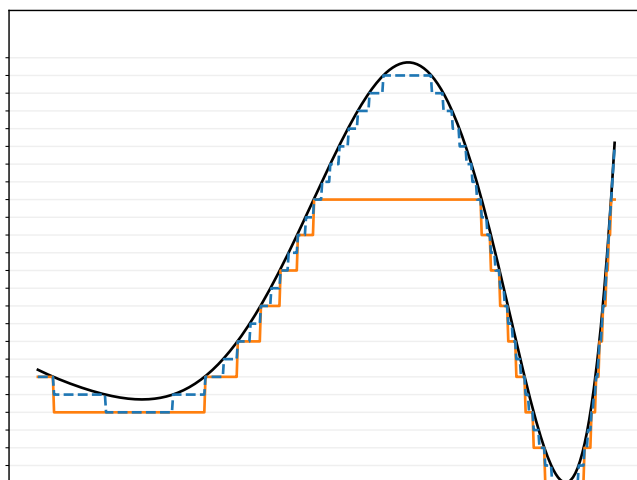


図 3.2: 定理 12.1 における単調増加の単関数列の構成方法．赤色の実線が f_2 である．まず $0 \leq f(x) \leq 2$ の領域を $2^2 \times 2$ 等分する横線を引き，最も近い横線へと $f(x)$ を切り下げる． f_3 （青色の破線）の場合，最初に $0 \leq f(x) \leq 3$ の領域を $2^3 \times 3$ 等分する．

証明

$$f_n(x) := \begin{cases} \frac{k-1}{2^n} & \text{when } \frac{k-1}{2^n} \leq f(x) < \frac{k}{2^n}, \text{ where } k = 1, 2, 3, \dots, 2^n n \\ n & \text{when } n \leq f(x) \end{cases}$$

と定義すれば，これが求めるべき単関数列である（図 3.2）．構成よりこれが単調増加であることは明らかである．また， f が可測であるから， f_n も可測である⁹⁾．最後に f_n が f に各点収束することを示す．まず $f(x) = \infty$ となる点 x については，任意の自然数 n に対して $f_n(x) = n$ であるから， $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \infty$ ．そうでなくて， $f(x) < \infty$ であれば，十分大きな n に対して $f(x) < n$ となるので，そのような n に対して $|f_n(x) - f(x)| \leq 1/2^n \rightarrow 0$ であることからいえる． \square

12.2 ルベグ積分の定義

12.1 節で見た可測関数に関して，ルベグ積分は次のように定義できる．

定義 12.3 (X, Σ, μ) を可測空間， $E \in \Sigma$ を可測集合とする．

9) f が可測だから，すべての k に対し $E_k = E\{f = (k-1)/2^n\} \in \Sigma$ (eq. (12.4e)) である．

- (1) $E = \bigsqcup_{i=1}^n E_i$ で定義された単関数 $f = \sum_{i=1}^n \alpha_i \chi_{E_i}$ の積分を,

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) := \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu(E_i) \quad (12.5)$$

で定義する.

- (2) E で定義された非負関数 f の積分は, f に収束するような単関数の単調増加列 $(f_n)^{10)}$ の積分 (eq. (12.5)) の極限

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) := \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) \quad (12.6)$$

と定義する.

- (3) E で定義された実関数 f の積分は, 2 つの非負関数

$$f^+(\mathbf{x}) = \max\{f(\mathbf{x}), 0\}, \quad f^-(\mathbf{x}) = \min\{-f(\mathbf{x}), 0\}$$

の eq. (12.7) による積分の差

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) := \int_E f^+(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) - \int_E f^-(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) \quad (12.7)$$

が定義できるとき¹¹⁾, 定積分をもつという. さらに eq. (12.7) の値が有限のとき, f は E 上で, 測度 μ について**可積分**あるいは**積分可能**であるという.

- (4) E で定義された複素関数 f の積分は, $f(\mathbf{x})$ の実部 $\operatorname{Re} f(\mathbf{x})$ と虚部 $\operatorname{Im} f(\mathbf{x})$ がともに E 上で可積分であるとき

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) := \int_E \operatorname{Re} f(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) + i \int_E \operatorname{Im} f(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) \quad (12.8)$$

と定義する.

/

12.3 ルベーク積分の性質

リーマン積分の場合と同様に, 次のような事柄が成り立つ.

命題 12.2 f, g を E 上で定義された関数とする. $A, B \subset E$ とし, $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ とする. この

10) このような単関数列は, たとえば定理 12.1 によって構成できる.

11) $\int_E f^+(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) = \int_E f^-(\mathbf{x}) \, d\mu(\mathbf{x}) = \infty$ のときを除き, eq. (12.7) は定義できる.

とき,

$$\int_E |f| d\mu \leq \left| \int_E f d\mu \right| \quad (12.9)$$

$$\int_E (\alpha f + \beta g) d\mu = \alpha \int_E f d\mu + \beta \int_E g d\mu \quad (12.10)$$

$$\int_{A \sqcup B} f d\mu = \int_A f d\mu + \int_B f d\mu \quad (12.11)$$

である.

リーマン積分と異なる性質として, 次があげられる.

命題 12.3 f を E 上で可積分な関数とする. g が E 上で f と **ほとんど至るところ** 一致する関数であれば, g も E 上で可積分であり,

$$\int_E f d\mu = \int_E g d\mu$$

このことは, $f \neq g$ であるような領域 $E_0 \subset E$ のルベグ測度がゼロであることから明らかである.

命題 12.4 (ルベグの優収束定理 (Lebesgue's dominated convergence theorem)) E 上で Σ -可測な関数の列 (f_n) に対して, E 上で可積分である関数 $\varphi \geq 0$ が存在して $|f_n(x)| \leq \varphi(x)$ であり, さらに (f_n) が f に **各点収束** (定義 10.1) するならば,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n(x) d\mu(x) = \int_E f(x) d\mu(x) \quad (12.12)$$

証明 ファトゥーの補題 (Fatou's lemma) を用いて証明する. □

定義 12.4 ある関数 $f \in C(\Omega)$ に対し, $f(x) \neq 0$ であるような $x \in \Omega$ の集合の **閉包** (定義 2.5)

$$\text{supp } f := \text{cl} \{x \in \Omega \mid f(x) \neq 0\} \quad (12.13)$$

を u の ^{だい}台 (support) という. /

§13 関数解析

この節では関数をベクトル空間の^{げん}元として扱う．ベクトル空間の係数体 \mathbb{K} は \mathbb{R} もしくは \mathbb{C} に限る．

13.1 関数空間

関数 $\psi(x_1, x_2, \dots)$ のようなものを考えよう．

定義 13.1 $\Omega \subset \mathbb{R}$ を N 次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^N の開集合 (定義 2.6) とする． Ω における連続関数全体の集合を $C^0(\Omega)$ でかく．／

命題 13.1 $C^0(\Omega)$ は以下のように定義される和とスカラー倍に関して、ベクトル空間をなしている．

- $f, g \in C^0(\Omega)$, $c \in \mathbb{K}$ に対して,
 - (1) 関数の和 $f \hat{+} g$ は、任意の $\mathbf{x} \in \Omega$ に対して $(f \hat{+} g) = f + g$ である関数と定める．
 - (2) 関数のスカラー倍 $c \hat{*} f$ は、任意の $\mathbf{x} \in \Omega$ に対して $(c \hat{*} g) = c \cdot f$ である関数と定める．

証明

□

定義 13.2 複素関数 f が C^k -級関数 (class C^k -function) であるとは、 $f(x)$ が \mathbb{C} 上で k 回微分可能かつ k 次導関数が連続であることをいう． $f(x)$ が無限回微分可能であるとき C^∞ -級関数であるという．

C^k -級関数全体の集合を C^k とかく．特に連続関数全体の集合は C^0 である．／

例 13.2 $e^x, \sin x, \cos x$ は C^∞ -級関数である．

例 13.3 $C^0 \subsetneq C^1 \subsetneq C^2 \subsetneq \dots$ であり、 $\bigcap_{k \in \mathbb{N}} C^k = C^\infty$ である．

13.2 関数空間のノルム

ここでは関数空間上にノルムが定義できる場合について考える．

関数空間においてもっとも一般的なノルムは“最大値ノルム”である。

しかし、量子力学において重要なのは、以下の2乗可積分関数空間である。

定義 13.3 $\Omega \subset \mathbb{R}^N$ から \mathbb{C} への **2乗可積分関数空間** (square integrable function space) L^2 を

$$L^2(\Omega) := \left\{ f: \Omega \rightarrow \mathbb{C} \mid \int_{\Omega} |f(x)|^2 d\mu(x) < \infty \right\}$$

で定義する。ただし $\int_{\Omega} d\mu(x)$ はルベーグ積分である。／

命題 13.4 **2乗可積分関数空間** $L^2(\Omega)$ は、以下で定義されるノルムに対して**ノルム空間** (定義 6.5) になる。

$$\|f\|_{L^2} := \sqrt{\int_{\Omega} |f(x)|^2 d\mu(x)} \quad (13.1)$$

証明 定義 6.5 の条件を確かめればよい。(2) は、スカラー倍 cf の定義 $((cf) = c \cdot f)$ より、 $\int_{\Omega} |(cf)|^2 d\mu = |c|^2 \int_{\Omega} |f|^2 d\mu$ だからいえる。三角不等式 (3) は、和 $f + g$ の定義 $((f + g) = f + g)$ より、

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} |(f + g)|^2 d\mu &= \int_{\Omega} |f + g|^2 d\mu \\ &= \int_{\Omega} |f|^2 + 2 \int_{\Omega} \operatorname{Re}(f^* g) d\mu + \int_{\Omega} |g|^2 d\mu \\ &\leq \int_{\Omega} |f|^2 d\mu + 2 \sqrt{\int_{\Omega} |f|^2 d\mu} \sqrt{\int_{\Omega} |g|^2 d\mu} + \int_{\Omega} |g|^2 d\mu \\ &= \left(\sqrt{\int_{\Omega} |f|^2 d\mu} + \sqrt{\int_{\Omega} |g|^2 d\mu} \right)^2 \end{aligned}$$

だからいえる (途中コーシー・シュワルツの不等式より

$$\int_{\Omega} |f^* g| d\mu \leq \left| \int_{\Omega} f^* g d\mu \right| \leq \sqrt{\int_{\Omega} |f|^2 d\mu} \sqrt{\int_{\Omega} |g|^2 d\mu}$$

を用いた)。(1) の $\|f\|_{L^2} \geq 0$ は定義より明らかである。しかし、 $\|f\|_{L^2} = 0$ ならば $f = 0$ は、実はいえない。 f が Ω 上で恒等的にゼロでなくても、 Ω の**ほとんどいたるところ** (定義 11.9) ゼロであれば、 $\int_{\Omega} f d\mu = 0$ となるからである。そこで、関数としての0を、(ルベーグ測度ゼロの点を除いて) ほとんどいたるところゼロである関数と再定義する。これにより $\|\bullet\|_{L^2}$ はノルムの条件を満たす。□

13.3 内積空間としての関数空間

関数空間に内積が定義できる場合。

命題 13.5 2乗可積分関数空間 $L^2(\Omega)$ は、以下で定義される内積 (\bullet, \bullet) に対して内積空間 (定義 6.1) になる.

$$\langle f, g \rangle_{L^2} := \int_{\Omega} f^* g d\mu(\mathbf{x}) \quad (13.2)$$

この内積から導かれるノルムは eq. (13.1) である.

証明 eq. (13.2) が内積の公理を満たすのは明らかであるから, $\langle f, g \rangle_{L^2}$ が well-defined であることを示す. コーシー・シュワルツの不等式より

$$|\langle f, g \rangle|^2 = \left| \int_{\Omega} f^* g d\mu(\mathbf{x}) \right|^2 \leq \int_{\Omega} |f|^2 d\mu(\mathbf{x}) \int_{\Omega} |g|^2 d\mu(\mathbf{x}) \leq \|f\|_{L^2}^2 \|g\|_{L^2}^2 < +\infty$$

□

同値類による L^2 -空間

「関数としての 0 を, (ルベグ測度ゼロの点を除いて) ほとんどいたるところゼロである関数と再定義する」という行為は, 同値類を用いて正当化される.

L^2 上の同値関係 (定義 1.28) \sim を

$$f \sim g \iff f = g \quad (\text{a.e. } \mathbf{x} \in \Omega)$$

と定義する. \sim が同値関係になるのは明らかである. 商集合 (定義 1.30) L^2/\sim 上の和とスカラー倍を, 代表元を用いて

$$[f] + [g] := [f + g] \quad c \cdot [f] := [c \cdot f] \quad (13.3)$$

と定める¹²⁾ と, L^2/\sim はベクトル空間をなす. また, L^2/\sim 上の内積を, 代表元の内積

$$\langle [f], [g] \rangle_{L^2/\sim} := \int_{\Omega} f^* g d\mu(\mathbf{x}) \quad (13.4)$$

で定めれば¹³⁾, L^2/\sim は内積空間になる.

このように定義された内積空間 L^2/\sim のことを, L^2 と書いているのである.

13.4 L^2 -空間

内積空間である 2乗可積分関数空間 $L^2(\Omega)$ について, 詳しく見ていこう.

12) $+$ と \cdot は well-defined である (すなわち代表元のとりかたによらない). なぜなら, $f \sim f'$ ($\mu(\mathcal{F}) = 0$ である集合 \mathcal{F} の点を除き一致), $g \sim g'$ ($\mu(\mathcal{G}) = 0$ である集合 \mathcal{G} の点を除き一致) に対し, $f + g \sim f' + g'$ (ルベグ測度 0 の集合 $\mathcal{F} \cup \mathcal{G}$ を除き一致) だからである.

13) (\bullet, \bullet) は well-defined である. なぜなら, ルベグ測度 0 の集合 $\mathcal{F} \cup \mathcal{G}$ の点における $f^* g$ の値は, 積分 $\int_{\Omega} f^* g d\mu(\mathbf{x})$ に寄与しないからである.

連続関数全体の集合 $C^0(\Omega)$ に属する関数が 2 乗可積分とは限らないので、 $C^0(\Omega) \not\subset L^2(\Omega)$ である。 $C^0(\Omega)$ は内積空間（ノルム空間）にするには大きすぎるので、これに制限を加えて L^2 ノルムを持つようにする。

定義 13.4 連続関数 $f \in C^0(\Omega)$ の中で、**台** (定義 12.4) $\text{supp } f$ が **コンパクト** (定義 2.16) 14) であるものの全体の集合を $C_0^0(\Omega)$ とかく。同様に、 k 回微分可能な関数 $f \in C^k(\Omega)$ の中で、 $\text{supp } f$ がコンパクトであるものの全体の集合を $C_0^m(\Omega)$ とかく。／

C_0^m は、 C^m に属する関数のうち、ゼロにならない範囲が有界であるものである。

命題 13.6 $C_0^m(\Omega)$ は $L^2(\Omega)$ のベクトル空間である。

したがって、 $C_0^0 \subset C_0^1 \subset \dots \subset C_0^\infty \subset L^2$ という関係にある。

13.5 局所可積分

u を $\Omega \subset_{\text{open}} \mathbb{R}^n$ で定義された関数とする。 u が Ω で局所可積分であるとは、任意の **コンパクト集合** (定義 2.16) $K \subset \Omega$ に対し

$$\int_K |u(x)| \, d\mu(\mathbf{x}) < \infty$$

であることをいう。連続関数 $C^0(\Omega)$ は局所可積分である。

14) 台の定義より $\text{supp } f$ は閉集合なので、これは台が有界であることを要請している。

§14 ヒルベルト空間

ユークリッド空間 $\mathbb{R}^N, \mathbb{C}^N$ では、任意のベクトル列 (\boldsymbol{v}_n) が $\|\boldsymbol{v}_m - \boldsymbol{v}_n\| \rightarrow 0$ ($n, m \rightarrow \infty$) を満たすとき、この列はあるベクトル $\boldsymbol{v}_* \in \mathbb{R}^N$ or \mathbb{C}^N に収束 (定義 6.6) する。自明のように思われるかもしれないが、一般のベクトル空間（ノルム空間、内積空間）ではこの事実が成り立たない。

14.1 ヒルベルト空間とは何か

この節では、ベクトル空間における完備性について考えてみよう。

V をノルム空間とする。 $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y} \in V$ の距離 (定義 2.1) は、 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) := \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}\|$ で定義できるのであった (命題 2.2)。距離空間で定義したように、 V の収束列とコーシー列は、以下のよう

に定義できる。

- V の点列 (\boldsymbol{v}_n) が収束列であるとは、 (\boldsymbol{v}_n) がある $\boldsymbol{v}_* \in V$ に収束する、つまり $\lim_{n \rightarrow \infty} \boldsymbol{v}_n = \boldsymbol{v}_* \in V$ となることをいう。
- V の点列 (\boldsymbol{v}_n) がコーシー列であるとは、 $\lim_{m, n \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{v}_m - \boldsymbol{v}_n\| = 0$ であることをいう。

これらを用いて、ノルム空間の完備性を定義することができる。

定義 14.1 ノルム空間 V が完備であるとは、 V のコーシー列が収束列であることをいう。／

定義 14.2 (バナッハ空間) 完備なノルム空間を**バナッハ空間** (Banach space) と言う¹⁵⁾。／

内積空間 (定義 6.1) では、内積から導かれるノルムが存在するのであった。このノルムを用いれば、完備な内積空間というものを定義することができる。

定義 14.3 (ヒルベルト空間) 完備な内積空間を**ヒルベルト空間** (Hilbert space) と言う¹⁶⁾。／

15) Stefan Banach (1892–1945). ポーランドの数学者。関数解析学の創始者のひとり。[10]

16) David Hilbert (1862–1943). ドイツの数学者。数学基礎論、代数学、幾何学、解析学、さらには理論物理学まで広い分野で功績を残し、20 世紀前半でもっとも偉大な数学者のひとりとされる。ヒルベルト 23 の問題でも有名。[10][7]

命題 14.1 実ユークリッド空間 \mathbb{R}^n および複素ユークリッド空間 \mathbb{C}^n はヒルベルト空間である。

定理 14.2 ノルム空間の有限次元部分空間は完備である [11, 定理 1.2 の系]。特に、有限次元ノルム空間は完備である。

証明 概略だけ述べる。 \mathbb{C} 上のノルム空間 V の部分空間を W とし、次元 $n := \dim W$ とおく。

W のコーシー列を $(\boldsymbol{v}^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ とおくと、任意の k に対して $\boldsymbol{v}^{(k)} \in W$ であるから、 W の基底 $\boldsymbol{u}_1, \dots, \boldsymbol{u}_n$ を用いて

$$\boldsymbol{v}^{(k)} = c_1^{(k)} \boldsymbol{u}_1^{(k)} + \dots + c_n^{(k)} \boldsymbol{u}_n^{(k)}$$

とかける。 $(\boldsymbol{v}^{(k)})_k$ がコーシー列であることを使うと、各 i に対して $(c_i^{(k)})_k$ がコーシー列であることを示すことができる¹⁷⁾。すると、 \mathbb{C} の完備性^(??) からこれは、 $c_i^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} c_i^* \in \mathbb{C}$ に収束する。そこで $\boldsymbol{v}_* := c_1^* \boldsymbol{u}_1 + \dots + c_n^* \boldsymbol{u}_n \in W$ とおくと、

$$\|\boldsymbol{v}^{(k)} - \boldsymbol{v}_*\| = \left\| \sum_{i=1}^n (c_i^{(k)} - c_i^*) \boldsymbol{u}_i \right\| \leq \sum_{i=1}^n |c_i^{(k)} - c_i^*| \|\boldsymbol{u}_i\| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

より、 $\boldsymbol{v}^{(k)} \rightarrow \boldsymbol{v}_* \in W$ である。 □

したがって、有限次元のノルム空間では、完備性について検討する必要はない。

14.2 バナッハ空間論

命題 14.3 バナッハ空間の閉部分ベクトル空間は、またバナッハ空間である。

証明 ノルム空間の部分ベクトル空間がノルム空間であることは命題 6.10 からいえる。完備性は、部分ベクトル空間が閉であることの定義 (定義 2.12) から明らかである。 □

14.3 ヒルベルト空間論

バナッハ空間のときの命題 14.3 と同様に、以下が示される。

系 14.4 ヒルベルト空間の閉部分ベクトル空間は、またヒルベルト空間である。

内積の連続性から、以下がいえる。

17) ここでは、 W がノルム空間の有限次元部分空間であるときに、 W 上のノルムがすべて同値であることを使う [11, 定理 1.2]。

補題 14.5 \mathcal{F} をヒルベルト空間 \mathcal{H} の部分集合とする． \mathcal{H} のベクトル \boldsymbol{v} が，任意のベクトル $\boldsymbol{x} \in \mathcal{F}$ に対して $\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x} \rangle = 0$ を満たすなら，任意のベクトル $\boldsymbol{x}_* \in \text{cl } \mathcal{F}$ に対しても $\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}_* \rangle = 0$ が成り立つ．

証明 \boldsymbol{x}_* は \mathcal{F} の閉包に属するベクトルだから， \mathcal{F} の点列 $(\boldsymbol{x}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が存在して， $\boldsymbol{x}_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \boldsymbol{x}_*$ となる．このことと **内積の連続性** (命題 6.2) から，

$$\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}_* \rangle = \langle \boldsymbol{v}, \lim_{n \rightarrow \infty} \boldsymbol{x}_n \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}_n \rangle = 0$$

である． □

命題 14.6 ヒルベルト空間 \mathcal{H} の部分集合¹⁸⁾ \mathcal{F} について，その **直交補空間** (定義 6.3) \mathcal{F}^\perp は閉部分ベクトル空間である．

証明 \mathcal{F} が部分ベクトル空間になること 定理 5.2 の条件を満たすことは，内積の線形性から示される．実際， $\boldsymbol{v} \in \mathcal{F}$ を任意のベクトルとし，これは， $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y} \in \mathcal{F}^\perp$ ， $c \in \mathbb{C}$ をとると，

$$\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{0} \rangle = 0$$

$$\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x} + \boldsymbol{y} \rangle = \langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x} \rangle + \langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{y} \rangle = 0$$

$$\langle \boldsymbol{v}, c\boldsymbol{x} \rangle = c\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x} \rangle = 0$$

であるから， $\boldsymbol{0} \in \mathcal{F}^\perp$ ， $\boldsymbol{x} + \boldsymbol{y} \in \mathcal{F}^\perp$ ，かつ $c\boldsymbol{x} \in \mathcal{F}^\perp$ である．

\mathcal{F} が閉集合であること \mathcal{F} の点列 $(\boldsymbol{x}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が $\boldsymbol{x}_* \in \mathcal{F}$ に収束することは，**内積の連続性** (命題 6.2) からわかる．つまり，任意の $\boldsymbol{v} \in \mathcal{F}$ に対して

$$\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}_* \rangle = \langle \boldsymbol{v}, \lim_{n \rightarrow \infty} \boldsymbol{x}_n \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x}_n \rangle = 0$$

だから， $\boldsymbol{x}_* = \lim_{n \rightarrow \infty} \boldsymbol{x}_n \in \mathcal{F}^\perp$ である． □

補題 14.7 ヒルベルト空間の部分集合 \mathcal{F}, \mathcal{G} について， $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$ ならば $\mathcal{G}^\perp \subset \mathcal{F}^\perp$ である．

証明 **直交補空間** の定義から， $\boldsymbol{x} \in \mathcal{G}^\perp$ ならば $\boldsymbol{x} \in \mathcal{F}^\perp$ が示される． □

系 14.8 ヒルベルト空間の部分集合 \mathcal{F} について， $(\text{cl } \mathcal{F})^\perp = \mathcal{F}^\perp$ ．

証明 閉包の性質から $\mathcal{F} \subset \text{cl } \mathcal{F}$ なので，補題 14.7 より $(\text{cl } \mathcal{F})^\perp \subset \mathcal{F}^\perp$ がいえる．逆の包含を示す． $\boldsymbol{x} \in \mathcal{F}^\perp$ とすると，任意の $\boldsymbol{v} \in \mathcal{F}$ に対し， $\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{x} \rangle = 0$ である．よって，補題 14.5 より， $\boldsymbol{v}_* \in \text{cl } \mathcal{F}$ に対しても $\langle \boldsymbol{v}_*, \boldsymbol{x} \rangle = 0$ であるから， $\boldsymbol{x} \in (\text{cl } \mathcal{F})^\perp$ がいえる． □

18) \mathcal{F} が部分ベクトル空間である必要はない．

命題 14.9 ヒルベルト空間 \mathcal{H} の部分ベクトル空間 \mathcal{F} について, $(\mathcal{F}^\perp)^\perp = \text{cl } \mathcal{F}$ である.

証明 $\text{cl } \mathcal{F}$ は閉部分ベクトル空間であるから, 任意の $\mathbf{z} \in \mathcal{H}$ は**正射影定理** (定理 14.13) より,

$$\mathbf{z} = \mathbf{x} + \mathbf{y}, \quad \text{where } \mathbf{x} \in \text{cl } \mathcal{F}, \mathbf{y} \in (\text{cl } \mathcal{F})^\perp = \mathcal{F}^\perp$$

と一意に書ける (途中, 系 14.8 を使った.). そこで $\mathbf{z} = \mathbf{v} \in (\mathcal{F}^\perp)^\perp$ とすれば, $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ でなければならないので,

$$\mathbf{v} = \mathbf{x} \in \text{cl } \mathcal{F}$$

である. したがって $(\mathcal{F}^\perp)^\perp \subset \text{cl } \mathcal{F}$ がいえる. 一方, 閉包 $\text{cl } \mathcal{F}$ は \mathcal{F} を含む閉集合のうち最小のものであるから, $\text{cl } \mathcal{F} \subset (\mathcal{F}^\perp)^\perp$ である. \square

稠密であることを判定するために有用な命題を挙げる.

命題 14.10 ヒルベルト空間 \mathcal{H} の部分ベクトル空間 \mathcal{F} が**稠密** (定義 2.7) である必要十分条件は, $\mathcal{F}^\perp = \{\mathbf{0}\}$ となることである [9, 命題 1.24].

証明 必要 \mathcal{F} が稠密であるとする. つまり $\text{cl } \mathcal{F} = \mathcal{H}$ である. このとき, $\mathbf{v} \in \mathcal{F}^\perp$ を任意にとると, すべての $\mathbf{x} \in \mathcal{F}$ に対して $\langle \mathbf{v}, \mathbf{x} \rangle = 0$ である. ここで補題 14.5 を使うと, 任意の $\mathbf{x}_* \in \mathcal{H} = \text{cl } \mathcal{F}$ に対して $\langle \mathbf{x}_*, \mathbf{v} \rangle$ とわかる. したがって $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ がいえた.

十分 \mathcal{F}^\perp は閉部分ベクトル空間である (命題 14.6) から, **正射影定理** (定理 14.13) より, 任意の $\mathbf{z} \in \mathcal{H}$ は

$$\mathbf{z} = \mathbf{x} + \mathbf{y}, \quad \text{where } \mathbf{x} \in \mathcal{F}^\perp, \mathbf{y} \in (\mathcal{F}^\perp)^\perp$$

とかける. 仮定より $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ であり, また命題 14.9 より $(\mathcal{F}^\perp)^\perp = \text{cl } \mathcal{F}$ であるので,

$$\mathbf{z} = \mathbf{y}, \quad \text{where } \mathbf{y} \in \text{cl } \mathcal{F}$$

すなわち $\mathbf{z} \in \text{cl } \mathcal{F}$ だから, $\mathcal{H} \subset \text{cl } \mathcal{F}$ である. \square

命題 14.11 ヒルベルト空間 \mathcal{H} の部分集合 \mathcal{F}, \mathcal{G} について, $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$ であり, \mathcal{F} が \mathcal{G} で稠密, \mathcal{G} が \mathcal{H} で稠密なら, \mathcal{F} は \mathcal{H} で稠密である.

14.4 射影定理

距離 (定義 2.1) $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| = \sqrt{\langle \mathbf{x} - \mathbf{y}, \mathbf{x} - \mathbf{y} \rangle}$ である.

補題 14.12 ヒルベルト空間 \mathcal{H} とその閉部分ベクトル空間 \mathcal{L} について、ベクトル $\mathbf{v} \in \mathcal{H}$ と \mathcal{L} の距離を

$$\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L}) := \inf_{\mathbf{w} \in \mathcal{L}} d(\mathbf{v}, \mathbf{w}) = \inf_{\mathbf{w} \in \mathcal{L}} \|\mathbf{v} - \mathbf{w}\|$$

で定める。このとき、 $\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L}) = d(\mathbf{v}, \mathbf{w})$ となるような $\mathbf{w} \in \mathcal{L}$ がただひとつ存在する。

証明 $\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L})$ の定義より、 $d(\mathbf{v} - \mathbf{w}_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L})$ となるような \mathcal{L} の点列 $(\mathbf{w}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ がとれる。すると、

$$\begin{aligned} d^2(\mathbf{w}_m, \mathbf{w}_n) &= \|(\mathbf{w}_m - \mathbf{v}) + (\mathbf{v} - \mathbf{w}_n)\|^2 \\ &= 2(\|\mathbf{w}_m - \mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{v} - \mathbf{w}_n\|^2) - \|(\mathbf{w}_m - \mathbf{v}) - (\mathbf{v} - \mathbf{w}_n)\|^2 \quad (\text{中線定理 (定理 6.12)}) \\ &= 2(\|\mathbf{v} - \mathbf{w}_m\|^2 + \|\mathbf{v} - \mathbf{w}_n\|^2) - 4\left\|\frac{\mathbf{w}_m + \mathbf{w}_n}{2} - \mathbf{v}\right\|^2 \\ &\leq 2(\|\mathbf{v} - \mathbf{w}_m\|^2 + \|\mathbf{v} - \mathbf{w}_n\|^2) - 4\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L}) \\ &\xrightarrow{m, n \rightarrow \infty} 2(\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L}) + \mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L})) - 4\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L}) = 0 \end{aligned}$$

最後の不等号では、 $(\mathbf{w}_m + \mathbf{w}_n)/2 \in \mathcal{L}$ であること、および $\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L})$ の最小性を使った。

これにより、 $(\mathbf{w}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ はコーシー列 (定義 2.10) であり、ヒルベルト空間の完備性からこれはある $\mathbf{w} \in \mathcal{L}$ に収束する。

一意性を示す。 $\mathbf{w}, \mathbf{w}' \in \mathcal{L}$ がともに $\mathcal{d}(\mathbf{v}, \mathcal{L}) = d(\mathbf{v}, \mathbf{w}^{(i)})$ を満たすとして、 $d^2(\mathbf{w}, \mathbf{w}')$ を上の方法で計算すると、これは 0 になるので、 $\mathbf{w} = \mathbf{w}'$ である。□

定理 14.13 (射影定理) ヒルベルト空間 \mathcal{H} に対し、閉部分ベクトル空間 $\mathcal{L} \subset \mathcal{H}$ とその直交補空間 (定義 6.3) \mathcal{L}^\perp をとる。このとき、任意のベクトル $\mathbf{z} \in \mathcal{H}$ に対し、 $\mathbf{x} \in \mathcal{L}$ と $\mathbf{y} \in \mathcal{L}^\perp$ がそれぞれただひとつ存在し、 $\mathbf{z} = \mathbf{x} + \mathbf{y}$ とかける。すなわち $\mathcal{H} = \mathcal{L} \oplus \mathcal{L}^\perp$ と直和分解 (定義 5.4) できる。

証明 $\mathbf{z} \in \mathcal{H}$ とする。補題 14.12 の方法で $\mathbf{x} \in \mathcal{L}$ をとる。このとき $\mathbf{y} := \mathbf{z} - \mathbf{x} \in \mathcal{L}^\perp$ を示せばよい。任意の $\lambda \in \mathbb{R}$ および $\mathbf{a} \in \mathcal{L}$ に対し、

$$\begin{aligned} 0 &\leq \|\mathbf{y}\|^2 = \|\mathbf{z} - \mathbf{x}\|^2 \\ &\leq \|\mathbf{z} - (\mathbf{x} - \lambda \mathbf{a})\|^2 \quad (\mathbf{x} - \lambda \mathbf{a} \in \mathcal{L}, \|\mathbf{z} - \mathbf{x}\| \text{ の最小性}) \\ &= \|\mathbf{y} + \lambda \mathbf{a}\|^2 \\ &= \|\mathbf{y}\|^2 + 2\lambda \operatorname{Re}\langle \mathbf{y}, \mathbf{a} \rangle + \lambda^2 \|\mathbf{a}\|^2 \end{aligned}$$

したがって、 $2\lambda \operatorname{Re}\langle \mathbf{y}, \mathbf{a} \rangle + \lambda^2 \|\mathbf{a}\|^2 \geq 0$ であるが、 $\lambda \in \mathbb{R}$ は任意なので、 $\operatorname{Re}\langle \mathbf{y}, \mathbf{a} \rangle = 0$ 。また、 $\lambda \rightarrow i\lambda$ として同様に考えると、 $\operatorname{Im}\langle \mathbf{y}, \mathbf{a} \rangle = 0$ 。よって $\langle \mathbf{y}, \mathbf{a} \rangle = 0$ である。 $\mathbf{a} \in \mathcal{L}$ は任意だったので、 $\mathbf{y} \in \mathcal{L}^\perp$ が示された。□

14.5 ヒルベルト空間の基底

一般のベクトル空間には定理 5.9 より基底が存在する。また，有限次元の内積空間では，定理 6.15 によって**正規直交基底** (定義 6.8) を構成できる。

無限次元のヒルベルト空間においては，正規直交基底の概念を拡張した“完全正規直交系”を考える。

それを考えるためには，まずベクトルの無限級数を定義しよう。定義 6.6 で与えたベクトルの点列に対する収束より，次のように定義できる。

定義 14.4 (ベクトルの無限級数) ヒルベルト空間 \mathcal{H} に属する可算無限個のベクトルの列 $(\mathbf{u}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ とスカラー列 $(c_n)_{n \in \mathbb{N}}$ をとる。

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left\| \mathbf{v} - \sum_{n=1}^N c_n \mathbf{u}_n \right\| = 0$$

となるような $\mathbf{v} \in \mathcal{H}$ が存在するとき，級数 $\sum_{n=1}^{\infty} c_n \mathbf{u}_n$ は \mathbf{v} に収束するといい，

$$\sum_{n=1}^{\infty} c_n \mathbf{u}_n = \mathbf{v}$$

とかく [9, §1.5]. /

定義 14.5 (正規直交系) **高々可算個** (定義 1.26) のベクトルの組 $(\boldsymbol{\varphi}_n)_n$ が

$$\langle \boldsymbol{\varphi}_m, \boldsymbol{\varphi}_n \rangle = \delta_{mn} \quad (14.1)$$

を満たすとき，これを**正規直交系**という。/

正規直交系の無限級数が収束する十分条件は，その係数の和が絶対収束することである。

補題 14.14 ヒルベルト空間 \mathcal{H} の正規直交系 $(\boldsymbol{\varphi}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ について， $\sum_{n=1}^{\infty} |c_n| < \infty$ であれば，無限級数

$$\sum_{n=1}^{\infty} c_n \boldsymbol{\varphi}_n$$

はあるベクトル $\mathbf{v} \in \mathcal{H}$ に収束する。さらにこのとき，

$$\|\mathbf{v}\| = \sum_{n=1}^{\infty} |c_n|$$

証明 部分和 $\mathbf{v}_N := \sum_{n=1}^N c_n \boldsymbol{\varphi}_n$ について，三角不等式より

$$\|\mathbf{v}_M - \mathbf{v}_N\|^2 = \left\| \sum_{n=N+1}^M c_n \boldsymbol{\varphi}_n \right\|^2 \leq \sum_{n=N+1}^M |c_n|^2 \|\boldsymbol{\varphi}_n\|^2 = \sum_{n=N+1}^M |c_n|^2 \xrightarrow{M, N \rightarrow \infty} 0$$

(ただし $M > N$) であるから, 点列 (\boldsymbol{v}_N) はコーシー列をなす. したがって \mathcal{H} の完備性から, これは $\boldsymbol{v}_N \rightarrow \boldsymbol{v} \in \mathcal{H}$ と収束する. 一方, **内積の連続性** (命題 6.2) および $(\boldsymbol{\varphi}_n)$ が正規直交系であることから,

$$\|\boldsymbol{v}\| = \lim_{N \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{v}_N\| = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\| \sum_{n=1}^N c_n \boldsymbol{\varphi}_n \right\| = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N |c_n|$$

がいえる. □

定義 14.6 \mathcal{H} をヒルベルト空間とする. \mathcal{H} に属する **可算無限個** (定義 1.25) のベクトルの組 $(\boldsymbol{\varphi}_n)_{n=1}^\infty$ が, 任意のベクトル $\boldsymbol{v} \in \mathcal{H}$ を

$$\boldsymbol{v} = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \boldsymbol{\varphi}_n, \quad c_n \in \mathbb{C} \quad (14.2)$$

とあらわせるとき, $(\boldsymbol{\varphi}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を **完全正規直交系** (complete orthonormal system) という. /

$(\boldsymbol{u}_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ がベクトル空間 V の **基底** であるとは, 任意の $\boldsymbol{v} \in V$ が **有限個を除きゼロである** スカラーの組 $(c_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ($c_\lambda \in \mathbb{K}$) を用いて

$$\boldsymbol{v} = \sum_{\lambda \in \Lambda} c_\lambda \boldsymbol{u}_\lambda$$

と有限和でかけることだった. しかし, 完全正規直交系の場合は無限和 (高々可算個のベクトルの線形結合) も許される.

なお, \mathcal{H} が有限次元であるときは, 正規直交基底を指して完全正規直交系という.

命題 14.15 ヒルベルト空間 \mathcal{H} の正規直交系を $\{\boldsymbol{\varphi}_n\}$ とする. 以下は同値 [11, §3.5 c)].

- (1) $\{\boldsymbol{\varphi}_n\}$ は完全正規直交系である.
- (2) 任意のベクトル $\boldsymbol{v} \in \mathcal{H}$ に対し,

$$\boldsymbol{v} = \sum_n \langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{\varphi}_n \rangle \boldsymbol{\varphi}_n$$

- (3) 任意のベクトル $\boldsymbol{v} \in \mathcal{H}$ に対し,

$$\|\boldsymbol{v}\|^2 = \sum_n |\langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{\varphi}_n \rangle|^2 \quad (14.3a)$$

- (4) 任意のベクトル $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v} \in \mathcal{H}$ に対し,

$$\langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{v} \rangle = \sum_n \langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{\varphi}_n \rangle^* \langle \boldsymbol{v}, \boldsymbol{\varphi}_n \rangle \quad (14.3b)$$

- (5) 任意の n に対し, $\langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{\varphi}_n \rangle = 0$ なら $\boldsymbol{u} = \mathbf{0}$ である.

なお, eq. (14.3a) または eq. (14.3b) を, **パーセヴァルの等式** (Parseval's identity) という.

証明 $(1) \Rightarrow (2)$

$(2) \Rightarrow (4)$

$(4) \Rightarrow (3) \Rightarrow (5)$ これは明らかである.

$(5) \Rightarrow (1)$

□

定理 14.16 可分^(定義 2.8) なヒルベルト空間は完全正規直交系をもつ.

§15 演算子

15.1 演算子とは

1.3 節で扱ったように、集合 X の元を集合 Y の元につす規則のことを写像というのであった。 $f: X \rightarrow Y$ が写像であるとき、任意の $x \in X$ に対して $f(x) \in Y$ が存在しなければならない。この条件を少し弱めてみよう。

定義 15.1 (演算子) \mathcal{H}, \mathcal{K} を \mathbb{C} 上のヒルベルト空間とする。部分ベクトル空間 \mathcal{A} から \mathcal{H}' への写像 (定義 1.10)

$$\hat{A}: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{K}$$

のことを、 \mathcal{H} から \mathcal{K} への演算子 (operator) または作用素という。

特に $\mathcal{H} = \mathcal{K}$ のとき、 \hat{A} を \mathcal{H} 上の演算子という。／

定義 15.2 (演算子の定義域) \mathcal{A} のことを \hat{A} の定義域 (domain) といい、 $\text{Dom}(\hat{A})$, $D(\hat{A})$ などとかく。／

\mathcal{H} から \mathcal{K} への写像 f の定義域は \mathcal{H} 全体である。それに対して、 \mathcal{H} から \mathcal{K} への演算子 \hat{A} は、任意の $x \in \mathcal{H}$ に対して $\hat{A}(x)$ が定義されている必要はなく、部分ベクトル空間 $\text{Dom}(\hat{A})$ の元に対して定義されていれば十分である。

定義 15.3 (演算子の一致) $\hat{A}, \hat{B}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{K}$ を演算子とする。 $\text{Dom}(\hat{A}) = \text{Dom}(\hat{B})$ かつ任意の $x \in \text{Dom}(\hat{A})$ に対し $\hat{A}(x) = \hat{B}(x)$ であるとき、演算子 \hat{A} と \hat{B} は一致するという。／

2 つの写像 f, g において、定義域 (もしくは終域) が一致しない場合、異なる写像とみなすのであった。同様に、2 つの演算子 \hat{A}, \hat{B} の定義域 $\text{Dom}(\hat{A}), \text{Dom}(\hat{B})$ が一致しない場合、違う演算子とみなす。

集合 X から X 自身への写像においては、すべての元を自身へうつす恒等写像 (定義 1.14) が存在した。それと同様に、任意の $x \in \mathcal{H}$ をそれ自身へうつす演算子 $\hat{I}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ を恒等演算子 (identity operator) という: $\hat{I}(x) = x$ 。

逆写像 (定義 1.20) に対応する概念も定義できる。 $\hat{A}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ を $\text{Dom}(\hat{A})$ で定義された演算子とする。任意の $x \in \text{Dom}(\hat{A})$ に対し、 $\hat{A}^{-1}(\hat{A}(x)) = \hat{A}(\hat{A}^{-1}(x))$ をみたす演算子 $\hat{A}^{-1}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ が存在するとき、これを \hat{A} の逆演算子 (inverse operator) という。

写像 $f: X \rightarrow Y$ の定義域を $A \subset X$ に制限 (定義 1.21) した写像 $f|_A: A \rightarrow Y$ を考えることができた. 同様に, 演算子 $\hat{A}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{K}$ の定義域を $\text{Dom}(\hat{B}) \subset \text{Dom}(\hat{A})$ に制限した演算子 $\hat{B}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{K}$ を考えることができる. 写像のときと同様に, \hat{B} を \hat{A} の制限 (restriction) という.

15.2 線形演算子

§ 7 では, ベクトル空間上の線形写像を扱った. 同じように, ベクトル空間上の線形な演算子を考えることができる.

定義 15.4 (線形演算子) \mathbb{C} 上のヒルベルト空間 \mathcal{H} から \mathcal{H}' への演算子 \hat{A} は, 次の性質を満たすとき, **線形演算子** (linear operator) という.

- 任意の $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{H}$, 任意の $a, b \in \mathbb{C}$ に対し,
(1) (線形性) $\hat{A}(a\mathbf{x} + b\mathbf{y}) = a\hat{A}(\mathbf{x}) + b\hat{A}(\mathbf{y})$ である.

／

量子力学において, 演算子が線形であることは本質的である.

例 15.1 関数 f に導関数 f' を対応させる $C[a, b]$ 上の演算子 \hat{D} を考える. \hat{D} を $C[a, b]$ 全域で定義することはできないので, 定義域 $\text{Dom}(\hat{D}) = C^1[a, b]$ に限ると,

$$\hat{D}(f) = f', \quad \text{Dom}(\hat{D}) = C^1[a, b]$$

とでき, \hat{D} は $C[a, b]$ から $C[a, b]$ への演算子になっている [12, §2.1].

線形写像における零写像と同じように, **零演算子** (zero operator) を定義できる. すなわち, 任意の $\mathbf{x} \in \mathcal{H}$ をゼロベクトル $\mathbf{0} \in \mathcal{K}$ にうつす演算子 $\hat{0}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{K}$ を零演算子という: $\hat{0}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$.

線形演算子全体もまたベクトル空間をなす.

定義 15.5 $\hat{A}, \hat{B}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}'$ を $\text{Dom}(\hat{A})$ で定義された演算子, $c \in \mathbb{K}$ をスカラーとする. 演算子の和・スカラー倍を, 以下のように定義する.

- (1) 演算子の和 $\hat{A} + \hat{B}$ を, 任意の $\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{A})$ に対し, $(\hat{A} + \hat{B})(\mathbf{x}) = \hat{A}(\mathbf{x}) + \hat{B}(\mathbf{x})$ であるような演算子と定める.
- (2) 演算子のスカラー倍 $c\hat{A}$ を, 任意の $\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{A})$ に対し, $(c\hat{A})(\mathbf{x}) = c \cdot \hat{A}(\mathbf{x})$ であるような演算子と定める.

また, $\hat{E}: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}', \hat{F}: \mathcal{H}' \rightarrow \mathcal{H}''$ を演算子とすると, 演算子の積は次のように定義する.

(3) 演算子の積 $\hat{E}\hat{F}$ を、定義域を

$$\text{Dom}(\hat{E}\hat{F}) := \{\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{E}) \mid \hat{E}(\mathbf{x}) \in \text{Dom}(\hat{F})\}$$

とし、任意の $\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{E}\hat{F})$ に対し、 $\hat{E}\hat{F}(\mathbf{x}) = \hat{E}(\hat{F}(\mathbf{x}))$ であるような演算子と定める。

／

よく $\hat{T}(\mathbf{x}) = \hat{T}\mathbf{x}$ と書く。

15.3 ユニタリ演算子

定義 15.6 ヒルベルト空間 \mathcal{H} から \mathcal{K} への演算子 \hat{U} が以下を満たすとき、**ユニタリ演算子** (unitary operator) という。

- (1) \hat{U} の定義域は \mathcal{H} 全体である。すなわち $\text{Dom}(\hat{U}) = \mathcal{H}$ 。
- (2) \hat{U} は全射である。すなわち $\text{Ran}(\hat{U}) = \mathcal{K}$ 。
- (3) \hat{U} は内積を保つ。すなわち、任意の $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{H}$ に対し、

$$\langle \hat{U}\mathbf{x}, \hat{U}\mathbf{y} \rangle_{\mathcal{K}} = \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle_{\mathcal{H}}$$

特に、ユニタリ演算子は**等長** (isometric) である：

$$\|\hat{U}\mathbf{x}\|_{\mathcal{K}} = \|\mathbf{x}\|_{\mathcal{H}}$$

／

ユニタリ演算子は**単射**である。なぜなら、 $\hat{U}\mathbf{x} = \hat{U}\mathbf{y}$ とすると、線形性より $\hat{U}(\mathbf{x}-\mathbf{y}) = \mathbf{0}$ 。等長性より $\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|_{\mathcal{H}} = \|\mathbf{0}\|_{\mathcal{K}} = 0$ であるから、 $\mathbf{x} = \mathbf{y}$ がいえる。

定義 15.7 (ヒルベルト空間の同型) ヒルベルト空間 \mathcal{H} から \mathcal{K} へのユニタリ演算子が存在するとき、 \mathcal{H} と \mathcal{K} は**同型** (isomorphic) であるという。／

2 つのベクトル空間のあいだに、線形構造を変えない全単射が存在するとき、これらは**同型** (定義 7.4) であるといった。ヒルベルト空間においては、これに加えて内積 (ノルム) 構造を変えないことも要求する。

15.4 演算子ノルム

定義 15.8 (有界な演算子) ヒルベルト空間 \mathcal{H} から \mathcal{K} への線形演算子 \hat{T} が**有界** (bounded) であるとは、ある定数 $C > 0$ が存在して、任意の $\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{T})$ に対し、

$$\|\hat{T}\mathbf{x}\|_{\mathcal{K}} \leq C\|\mathbf{x}\|_{\mathcal{H}}$$

となることをいう。有界でない演算子は、**非有界** (unbounded) であるという。／

定義 15.9 (演算子ノルム) 有界な線形演算子 \hat{T} に対し、

$$\|\hat{T}\| := \sup_{\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{T})} \frac{\|\hat{T}\mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x}\|} \quad (15.1)$$

を演算子 \hat{T} の**ノルム** (norm) という。／

例えば、**ユニタリ演算子** \hat{U} のノルムは、等長性より $\|\hat{U}\| = 1$ である。

演算子の有界性を議論するうえで有用な命題を述べる。

命題 15.2 線形演算子 \hat{T} が非有界である必要十分条件は、点列 $(\mathbf{x}_n) \subset \text{Dom}(\hat{T})$ が存在して、 $n \rightarrow \infty$ で $\hat{T}\mathbf{x}_n \rightarrow \infty$ となることである。

このことはほぼ自明であるから、証明は省略する。

命題 15.3 定義域を $C_0^1(\mathbb{R})$ とする $L^2(\mathbb{R}^N)$ 上の微分演算子 \hat{D} は、 $L^2(\mathbb{R}^N)$ の位相の下で (つまりノルム $\|\bullet\|_{L^2(\mathbb{R}^N)}$ を用いて) 有界でない。

補題 15.4 有界な線形演算子 \hat{T} について、任意の $\mathbf{x} \in \hat{T}$ に対し、

$$\|\hat{T}\mathbf{x}\| \leq \|\hat{T}\| \|\mathbf{x}\|$$

証明 **演算子ノルムの定義** より明らかである。 □

命題 15.5 有界な線形演算子 \hat{S}, \hat{T} について、

$$\|\hat{S}\hat{T}\| \leq \|\hat{S}\| \|\hat{T}\|$$

証明 補題 15.4 より、任意の $\mathbf{x} \in \text{Dom}(\hat{S}\hat{T})$ に対し、

$$\|(\hat{S}\hat{T})\mathbf{x}\| = \|\hat{S}(\hat{T}\mathbf{x})\| \leq \|\hat{S}\| \|\hat{T}\mathbf{x}\| \leq \|\hat{S}\| \|\hat{T}\| \|\mathbf{x}\|$$

であることから従う。 □

15.5 エルミート演算子

定義 15.10 (エルミート共役) \mathcal{H}, \mathcal{K} をヒルベルト空間、 \hat{T} を \mathcal{H} から \mathcal{K} への線形演算子とする。任意の $\mathbf{x} \in \mathcal{H}, \mathbf{y} \in \mathcal{K}$ に対し、

$$\langle \mathbf{y}, \hat{T}\mathbf{x} \rangle_{\mathcal{K}} = \langle \hat{T}^\dagger \mathbf{y}, \mathbf{x} \rangle_{\mathcal{H}} \quad (15.2)$$

となるような演算子 $\hat{T}^\dagger: \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{H}$ が存在するとき、この \hat{T}^\dagger を、 \hat{T} の**エルミート共役** (Hermitian adjoint) という。／

エルミート共役 \hat{T}^\dagger が存在する条件について考えてみよう． \hat{T} が有界な演算子であるとするば， \mathbf{y} を固定した時の関数

$$f_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) := \langle \mathbf{y}, \hat{T}\mathbf{x} \rangle_{\mathcal{K}}$$

は \mathcal{K} から \mathbb{K} への線形汎関数であるから，リースの表現定理 (定理 8.8) より，あるベクトル $\mathbf{h} \in \mathcal{K}$ が存在して，

$$\langle \mathbf{y}, \hat{T}\mathbf{x} \rangle_{\mathcal{K}} = f_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{h}, \mathbf{x} \rangle_{\mathcal{H}}$$

が成り立つ．したがって，任意の $\mathbf{y} \in \mathcal{K}$ に対し， $\hat{T}^\dagger \mathbf{y} = \mathbf{h}$ となるよう演算子 \hat{T}^\dagger を定めればよい． \hat{T}^\dagger が線形であることは容易に示される．

第 4 章 量子力学へ

§16 ブラ・ケット記法

ブラ $\langle\psi|$, ケット $|\psi\rangle$, 内積 $\langle\psi|\varphi\rangle$, 期待値 $\langle\psi|\hat{A}|\psi\rangle$

参考文献

集合論

- [5]内田伏一『集合と位相: SET THEORY & GENERAL TOPOLOGY』(増補新装版)〈数学シリーズ〉裳華房 (2020).

線形代数

- [3]三宅敏恒『線形代数学: 初歩からジョルダン標準形へ』培風館 (2008).
[8]斎藤毅『線形代数の世界: 抽象数学の入り口』〈大学数学の入門・7〉東京大学出版会 (2007).

解析学・微分積分学

- [4]伊藤清三『ルベーグ積分入門』〈数学選書・4〉裳華房 (1963).

関数解析

- [9]新井朝雄『ヒルベルト空間と量子力学』〈共立講座 21 世紀の数学・16〉共立出版株式会社 (1997).
[11]藤田宏, 黒田成俊, 伊藤清三『関数解析』〈岩波基礎数学選書〉岩波書店 (1991).
[12]黒田成俊『量子物理の数理』岩波書店 (2007).

その他

- [1]The Unicode Consortium 『Arrows: Range: 2190–21FF』 version 16.02024URL: <https://www.unicode.org/charts/PDF/U2190.pdf>.
- [2]The Unicode Consortium 『Supplemental Arrows-B: Range: 2900–297F』 version 16.02024URL: <https://www.unicode.org/charts/PDF/U2900.pdf>.
- [6]小田稔, 上村洸, 野田春彦, 山口嘉夫 (編) 『理化学英和辞典』 JapanKnowledge より研究社 (1998).
- [7]『岩波 数学辞典』 (第 4 版) JapanKnowledge より岩波書店 (2007).
- [10]『日本大百科全書』 JapanKnowledge より小学館 (1994).

索引

———— Symbols ————

2 乗可積分関数空間, 88

———— C ————

C^k -級関数, 87

———— E ————

ε -近傍, 19

———— S ————

σ -加法族, 79

———— あ ————

アーベル群, 28

位相, 26

一様収束, 72

エルミート

共役, 102

演算子, 99

———— か ————

開集合, 21

階数, 60

外測度, 76

カラテオドリの——, 76

ルベーグ——, 77

可換環, 29

核, 60

各点収束, 72

角度, 55

可算

——集合, 13

——無限集合, 13

可測, 77

合併, 8

可分, 23

加法族, 79

カラテオドリの外測度, 外測度を見よ
環, 28

完全加法族, 79

完全加法的, 75

完全正規直交系, 97

逆演算子, 99

逆像, 10

共通部分, 8

行列, 36

行列式, 40

行列表示, 63

極限, 24

虚数, 31

距離, 52

——空間, 18

空集合, 7

区間, 74

グラム – シュミットの正規直交化, 56
群, 28

恒等演算子, 99

恒等写像, 10

コーシー – シュワルツの不等式, 54

コーシー列, 24

互換, 39

コンパクト集合, 27

さ

作用素, 99

三角不等式, 32, 52

自己準同型写像, 58

自明な

——部分ベクトル空間, 44

射影, 51

集合族, 7

収束列, 24

シュワルツの不等式, コーシー – シュワルツの不等式を見よ

ジョルダン – フォン・ノイマンの定理, 55

正規直交基底, 56

制限, 12, 100

正射影, 51

正則行列, 40

絶対値, 31

零 (ゼロ), 零 (れい) を見よ

線形演算子, 100

線形形式, 64

準同型写像, 58

線形写像, 58

線形性, 49

線形汎関数, 64

全射, 11

全単射, 11

像, 60

双対基底, 64

双対空間, 64

双対写像, 65

測度, 79

ルベグ——, 80

た

体, 29

台, 86

退化次数, 60

高々可算集合, 13

単射, 11

置換, 39

中線定理, 55

稠密, 23

直和, 8

抽象的な, 46, 57

部分空間としての——, 45

直交射影, 51

直交補空間, 50

定義域, 99

テンソル積, 68–70

同型, 59, 101

——写像, 59

等長, 101

な

内積, 49

標準——, 50

内積空間, 49

内点, 19

内部, 19

濃度, 13

ノルム, 52, 102

——空間, 52

は

パーセヴァルの等式, 97

バナッハ空間, 91

反線形性, 49

半双線形, 50

非交和, 8

非有界, 102

表現行列, 63

標準内積, 内積を見よ

含む, 7

符号, 39

普遍集合, 18

普遍双線形写像, 70

閉集合, 21

閉包, 19

冪集合, 8

冪等, 20

包含写像, 10

補集合, 18

——や——

有界, 101

ユニタリ

——演算子, 101

——ら——

ルベーク

測度, 測度を見よ

——外測度, 外測度を見よ

零

——演算子, 100

——写像, 59

零化空間, 65

——わ——

和集合, 8