

# 医用工学概論

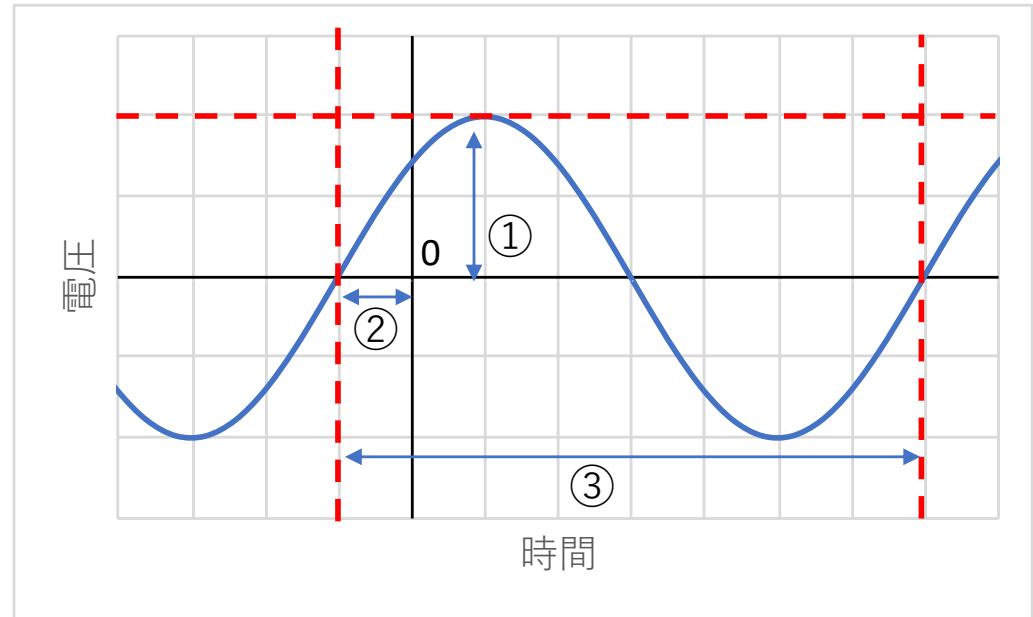
## 第7回 電子回路

# 前回の復習

## 交流電圧の式

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta) \quad (\omega = 2\pi f)$$

- $E_m$  : 振幅
- $\omega$  : 角周波数
- $\theta$  : 位相
- $f$  : 周波数
- $T = 1/f$  : 周期



- ①: 振幅      ②: 位相      ③: 周期

# 前回の復習

次のあとに続くのは「大きい」「小さい」のいずれか

1. 抵抗のインピーダンス $Z_R$ は  
抵抗 $R$ が大きいほど **大きくなる**
2. コンデンサのインピーダンス $Z_C$ は  
容量 $C$ が大きいほど **小さくなる**
3. コンデンサのインピーダンス $Z_C$ は  
**角周波数** $\omega$ が高いほど **小さくなる**
4. インダクタのインピーダンス $Z_L$ は  
**角周波数** $\omega$ が高いほど **大きくなる**

ヒント

$$\left( Z = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \right)$$

$$Z_R = R$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega C}$$

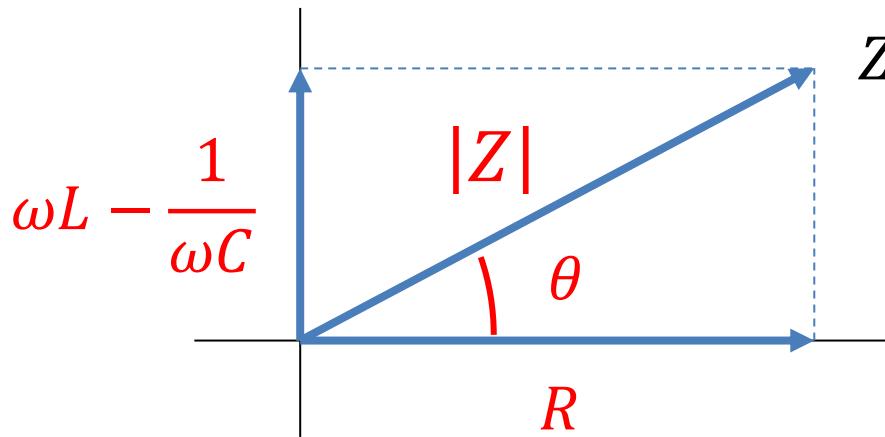
$$Z_L = \omega L$$

インピーダンスが大きいほど電流が **流れにくくなる**

# 前回の復習

## RLC直列回路に流れる電流

- フェーザ図を書いて合成インピーダンスを求める



$Z$   $|Z| = Z$ の長さ: 振幅の比  
→ 三平方の定理で求める  
 $|Z| = \sqrt{\text{縦}^2 + \text{横}^2}$

$\theta = Z$ の角度: 位相差  
→ 三角比を使って求める

- 電流を求める

$$i(t) = \frac{E_m}{|Z|} \sin(\omega t - \theta) \quad (\omega \text{は電圧と同じ})$$

# 交流回路 続き (電力)

# 交流回路の電力

## 交流回路の電流、電圧

- 時間によって変化する。 → 電力も同様

瞬間電力  $p(t) = v(t) \times i(t)$

ある時刻における瞬間的な電力(あまり意味はない)

## 平均電力

1周期分で平均した電力

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{V_m I_m}{2}$$

この時、 $P = V_e I_e$ (直流回路の電力と同じ形)で表した時の $V_e$ ,  $I_e$ をそれぞれ電流、電圧の **実効値** とよび、以下で表す。

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \quad I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (\text{正弦波の場合})$$

商用交流100Vは実効値を表す。  
振幅は約141Vになる。

# 交流回路の電力

## 交流回路の電力

$$S = V_e I_e \text{ [VA]}$$

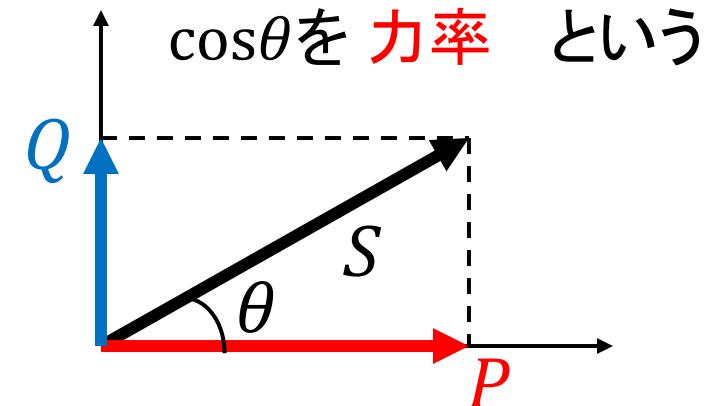
(ボルトアンペア)

$$P = V_e I_e \cos \theta \text{ [W]}$$

(ワット)

$$Q = V_e I_e \sin \theta \text{ [var]}$$

(バール)



$S$ : 皮相電力 ベクトル図における見かけ上の電力

$P$ : 有効電力 実際に負荷によって消費される電力

$Q$ : 無効電力 電源と負荷を往復するだけの電力

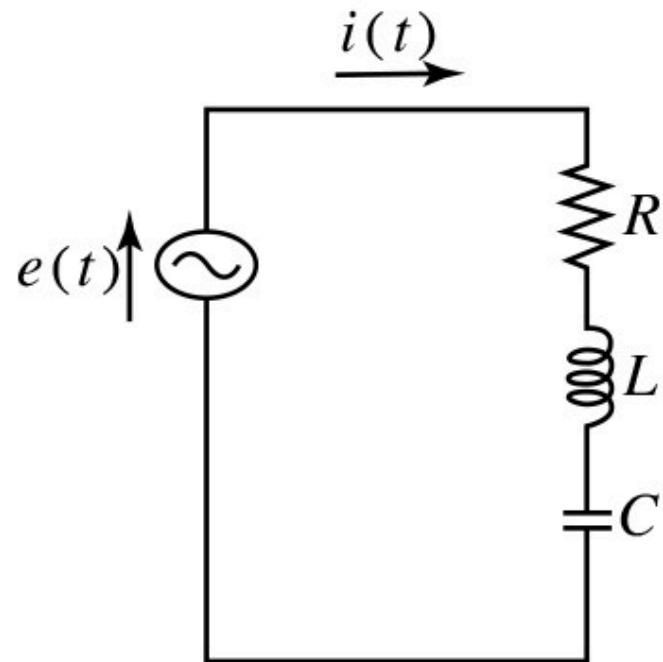
交流回路において単に消費電力という時は 有効電力 をさす

$\theta$ を 力率角 とよび、インピーダンスの位相角と同じである

# 例題3 交流回路の電力

交流電源の最大値を $16\sqrt{2}[\text{V}]$ を $1/2\pi [\text{Hz}]$ 、  
 $R=8[\Omega]$ 、 $L=15[\text{H}]$ 、 $C=1/7[\text{F}]$ とする。

- (1) インピーダンスを求めよ。
- (2) 電流の式を求めよ。
- (3) 有効電力を求めよ。



# 例題3 解答

(1) インピーダンス

$$\begin{aligned}|Z| &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \\&= \sqrt{8^2 + \left(1 \times 15 - \frac{1}{1 \times \frac{1}{7}}\right)^2} \\&= \sqrt{64 + (15 - 7)^2} \\&= \sqrt{64 + 64} \\&= 8\sqrt{2} [\Omega]\end{aligned}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{2\pi} = 1$$

$$\begin{aligned}\tan\theta &= \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) = \left(\frac{8}{8}\right) = \left(\frac{1}{1}\right) \\ \theta &= \frac{\pi}{4} [rad]\end{aligned}$$

# 例題3 解答

(2) 電流

$$\frac{E_m}{|Z|} \sin(t - \theta) = \frac{16\sqrt{2}}{8\sqrt{2}} \sin\left(t - \frac{\pi}{4}\right) = 2 \sin\left(t - \frac{\pi}{4}\right)$$

(3) 電力

$$\text{皮相電力 } P_a = \frac{I_m V_m}{2} = \frac{2 \times 16\sqrt{2}}{2} = 16\sqrt{2} [\text{VA}]$$

$$\text{有効電力 } P_e = P_a \cos(\phi) = 16\sqrt{2} \times \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 16\sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 16 [W]$$

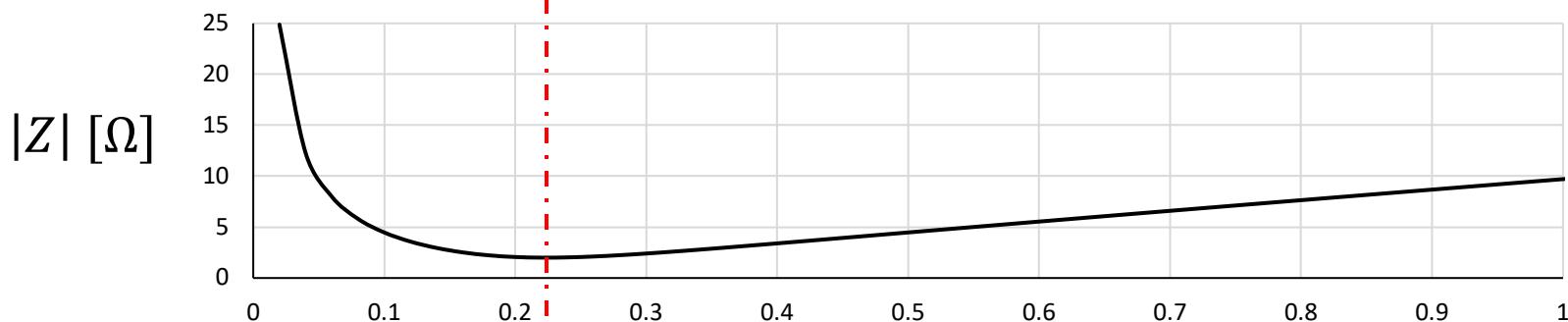
# 共振

RLC直列回路で、角周波数 $\omega$ を変化させていったとき、インピーダンスが最小となる瞬間がある。

この時の角周波数を **共振角周波数** 、  
周波数を **共振周波数** といい、それぞれ次の式で表す

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

共振周波数の時、交流回路の消費電力は **最大** になる



$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = 1/\sqrt{20} \approx 0.22$$

$$\omega [rad/s]$$

$R = 2, L = 10, C = 2$  の時の  $RLC$  直列回路のインピーダンス

# 共振周波数とインピーダンス

共振周波数の時、インピーダンスのLとCの成分が打ち消し合い、0になる

そのため、共振周波数の時のインピーダンスは抵抗Rの成分のみとなる

$$\begin{aligned} |Z| &= \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + \left( \frac{L}{\sqrt{LC}} - \frac{\sqrt{LC}}{C} \right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left( \frac{L}{\sqrt{LC}} \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{LC}} - \frac{\sqrt{LC}}{C} \frac{L}{L} \right)^2} = \sqrt{R^2 + \left( \frac{L\sqrt{LC}}{LC} - \frac{L\sqrt{LC}}{LC} \right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + 0^2} = \sqrt{R^2} = R \end{aligned}$$

また、位相差も

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \tan^{-1} \frac{0}{R} = 0 \text{ になる}$$

## 例題4 共振

RLC直列回路において、 $R = 10[\Omega]$ 、 $L = 5[H]$ 、 $C = 0.1[F]$ の時、次の問いに答えよ。

- ①消費電力が最大となる時の電源の周波数を答えよ
  
- ② ①の時のインピーダンスの大きさ $|Z|$ を答えよ

## 例題4 解答

RLC直列回路において、 $R = 10[\Omega]$ 、 $L = 5[H]$ 、 $C = 0.1[F]$ の時、次の問いに答えよ。

①消費電力が最大となる時の電源の周波数を答えよ  
消費電力が最大となる時の周波数とは共振周波数のことである。したがって、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8 \times 0.5}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4}} = \frac{1}{2\pi \times 2} = \frac{1}{4\pi} [\text{Hz}]$$

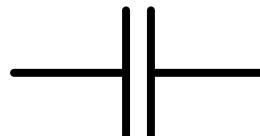
② ①の時のインピーダンスの大きさ $|Z|$ を答えよ

$$|Z| = R = 10 [\Omega]$$

# 電子回路

# 受動素子

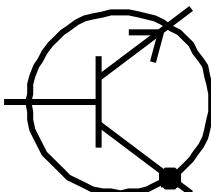
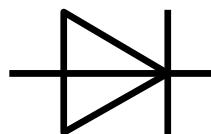
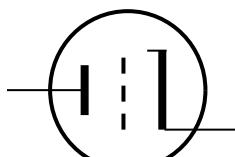
- 抵抗
- コンデンサ
- コイル



- 与えられた電力の大きさ、周波数に従い、電流を流す。
- **増幅、整流** は行わない。

# 能動素子

- 真空管 半導体
- ダイオード
- トランジスタ



- 小さな **電力** を大きく増幅したり、電流の流れを整えたりする働きを持つ素子。
- **増幅、整流** を行う。

電子回路では主に **能動素子** を扱う

# 真空管

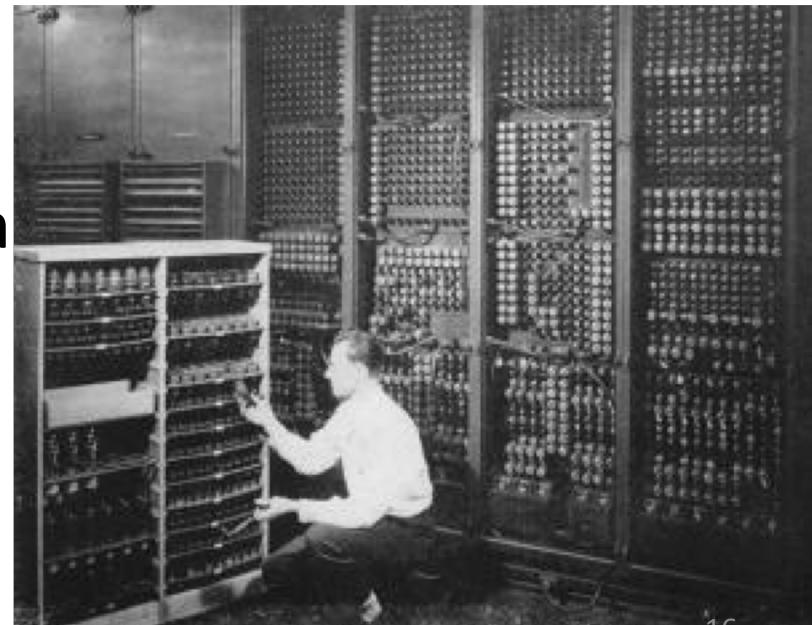
電球のフィラメントから電子が放出される現象(エジソン効果)を利用して電流の流れを制御する能動素子。

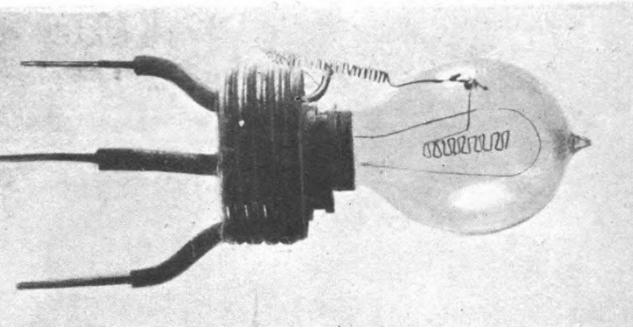
ENIAC(ニアック)

- ・最初のコンピュータ
- ・真空管17,468本。
- ・ダイオード7,200個。
- ・幅24m、高さ2.5m、奥行き0.9m
- ・総重量30トン

性能は現在の電卓以下。

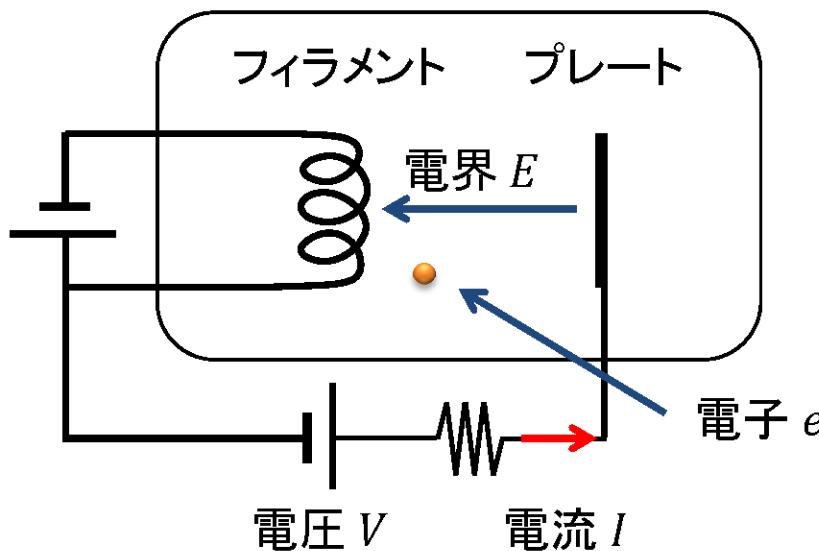
真空管が壊れるたびに手作業で交換 →





# 二極真空管

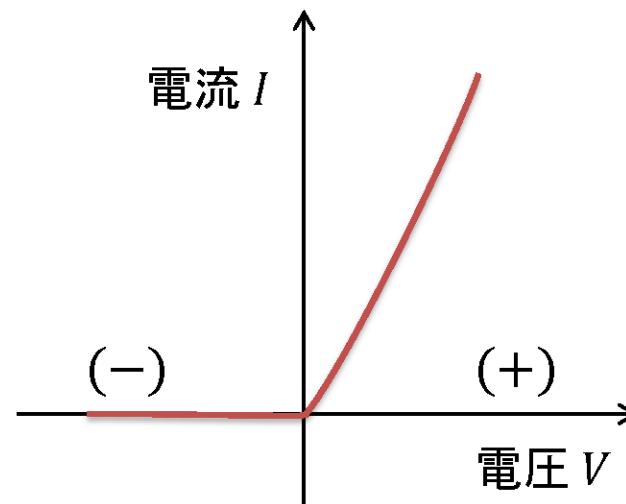
管内は真空に近い状態

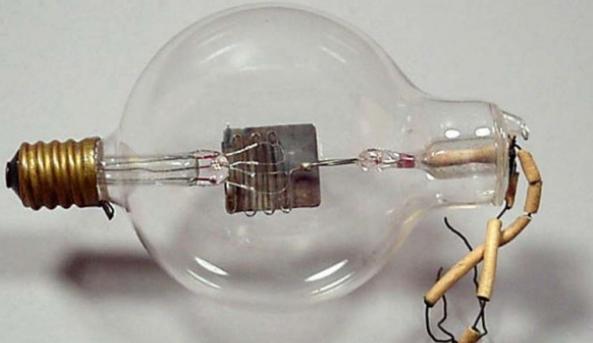


- 電流は電荷の流れ
- 電子は負の電荷

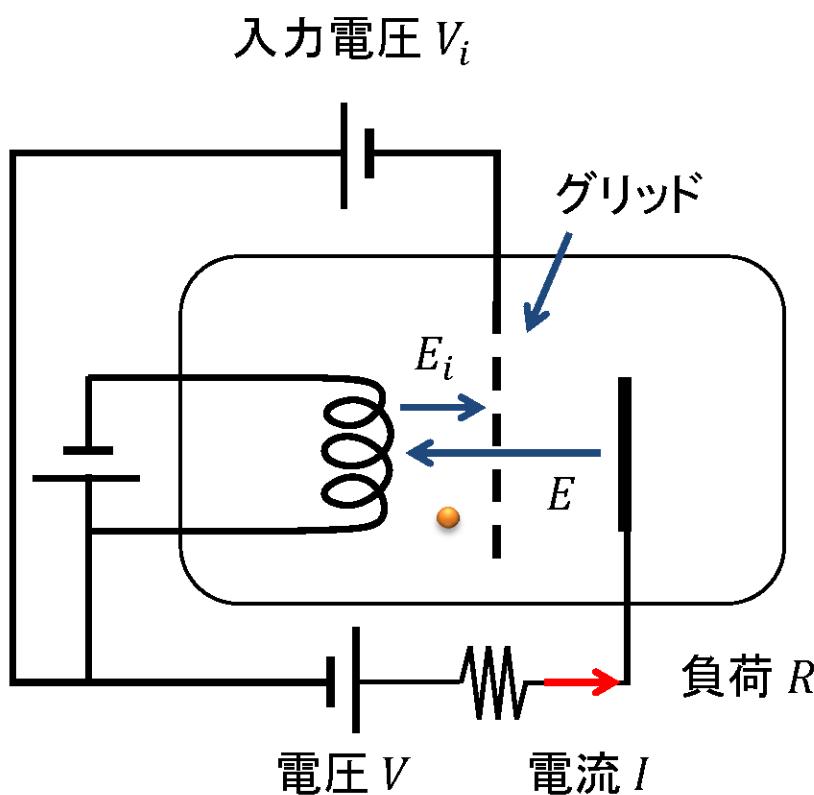
整流 作用を持つ

1. フィラメントに通電し、加熱
2. フィラメントから電子が放出（エジソン効果）
3. 電界と逆方向に電子が移動



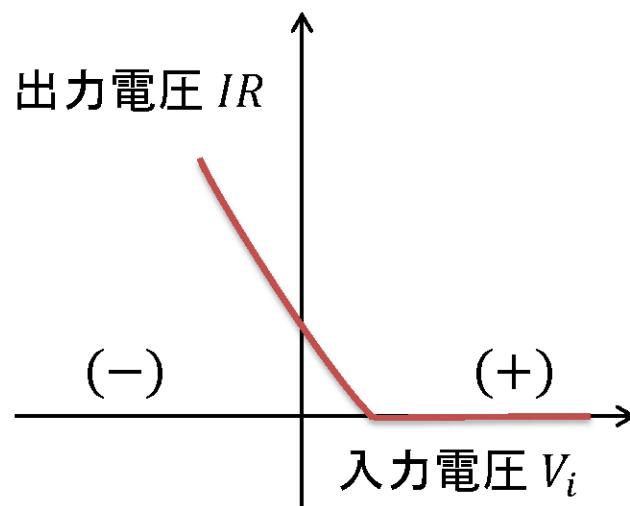


# 三極真空管



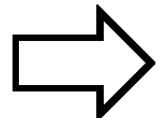
増幅 作用を持つ

1. グリッド、フィラメント間に電界  $E_i$  を発生
2. プレート、フィラメント間に電界  $E$  を発生
3.  $E_i$  のわずかな変化でプレート、フィラメント間の電流を調整できる。



# 真空管の特徴

真空中を電子が移動するので、電子の運動を妨げるものがなく、電子の移動度が高い。



高い周波数 に対する応答が良い。

例) ブラウン管として、表示器に使われる。

ガラス管などで構成されるため、 機械的振動 に弱い。

フィラメントの 加熱 に電力と時間をする。

大型。

# 半導体素子

- ・ダイオード・トランジスタ

半導体の性質を利用して電子の流れを制御する素子。原子レベルで電子の制御を行うため、真空管に比べて **小型化** が可能。

- ・世界最小のコンピュータ

IBMが開発した米粒よりも小さいコンピュータ。

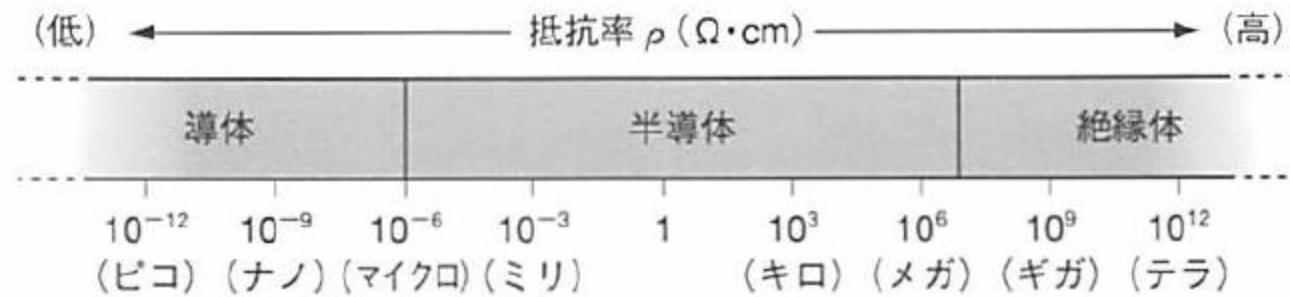
数万個のトランジスタが入っている。



# 導体・半導体・不導体(絶縁体)

銅などの金属

ガラス・ゴムなど



## 主な半導体

炭素(カーボン) C

ケイ素(シリコン) Si

ゲルマニウム Ge

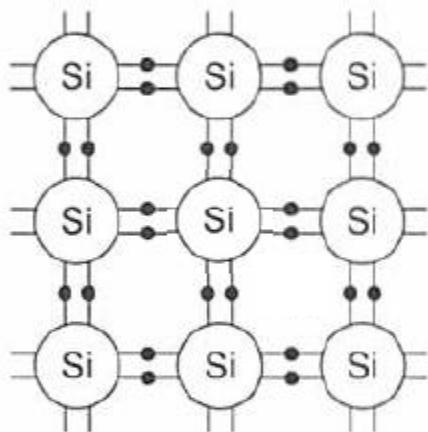
ガリウムアスベスト GaAs

							2 He
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	

# 半導体の結晶

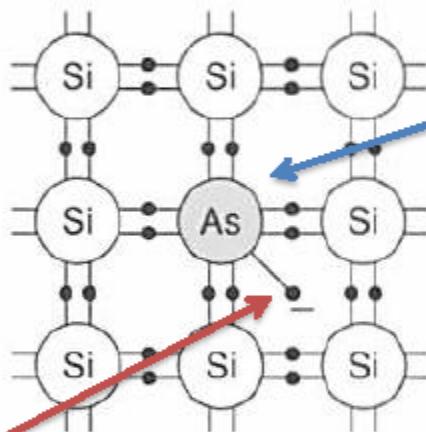
## 不純物半導体

### 真性半導体



### N型半導体

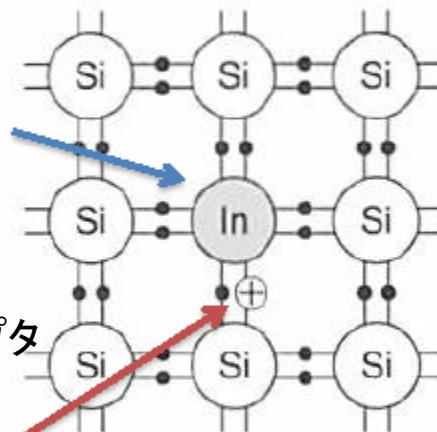
(Negative)



電子

### P型半導体

(Positive)



正孔（ホール）

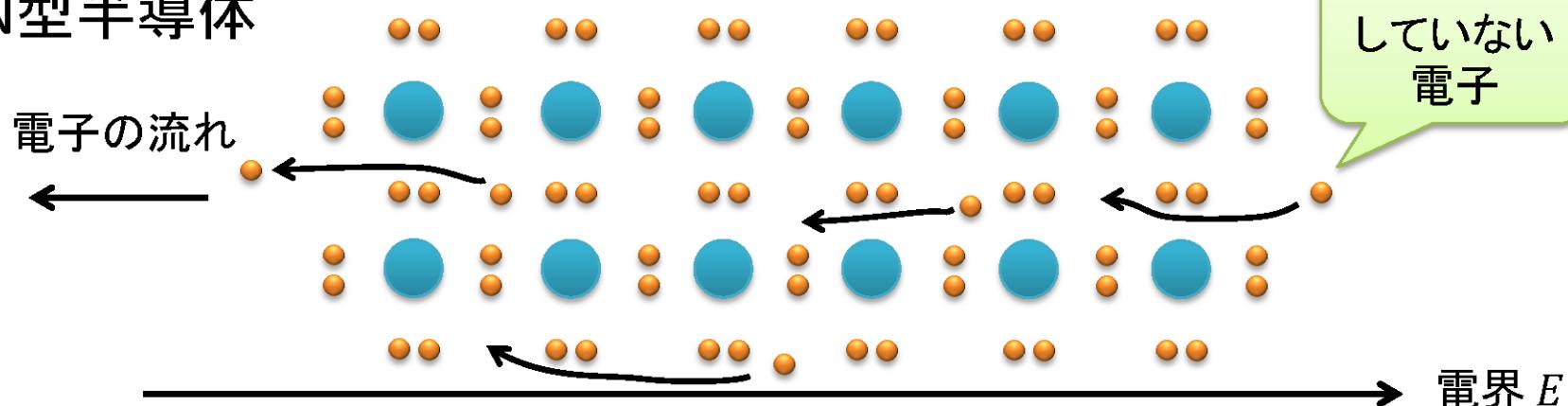
すべての電子が共有結合に使われているため、抵抗率が高い（絶縁体に近い）

5価の原子が含まれているため、共有結合されていない電子がある

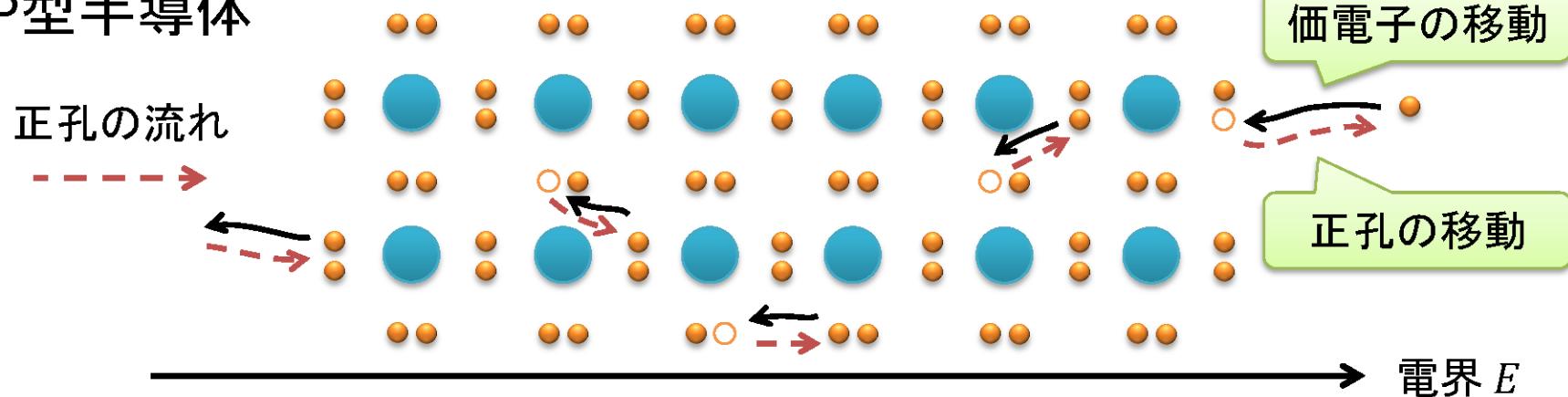
3価の原子が含まれているため、共有結合に電子が欠乏している

# 結晶中の電子の流れ

N型半導体



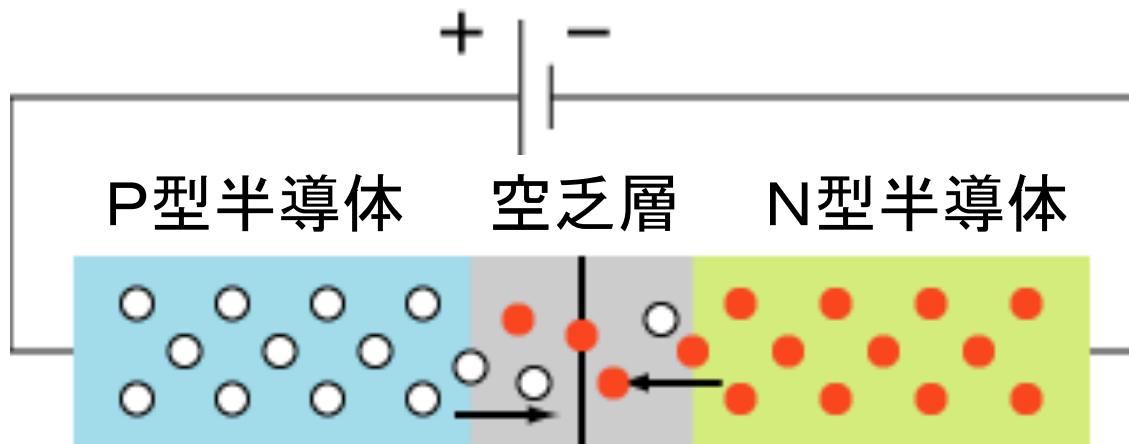
P型半導体



P型半導体での電流は、**正孔の動き** として考えることができる。  
自由電子、正孔は運び屋の役割をするので **キャリア** と呼ばれる。

# PN接合

正孔 電子



P型とN型を接合すると、接合面で正孔と電子が打ち消し合って空乏層が生まれる。

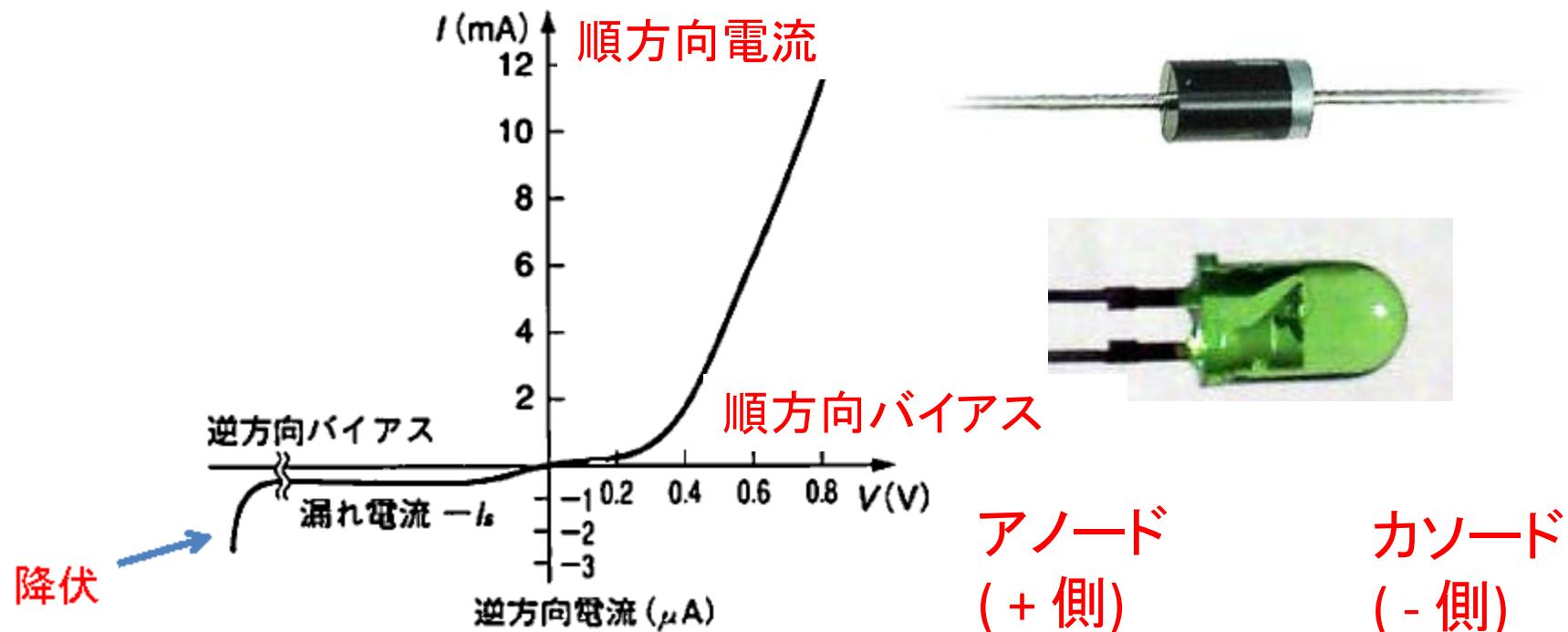
P側から電圧をかけると空乏層が狭まり電流が流れる。

N側から電圧をかけると空乏層が広がり電流が流れない。



# ダイオード

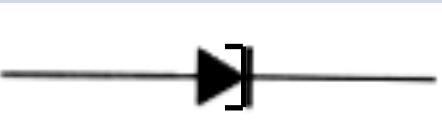
P形半導体とN形半導体を接合したもの。電流をアノード側からカソード側にしか流さない。( 整流作用 )



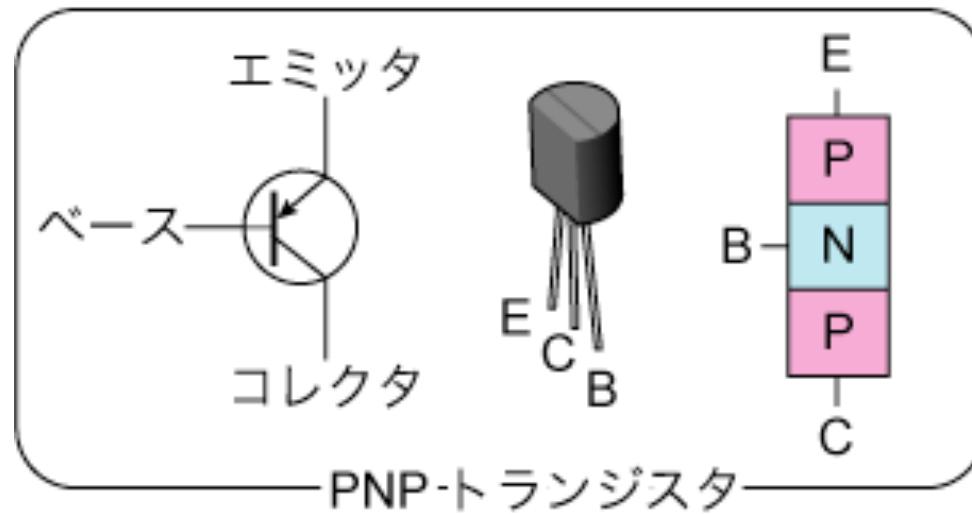
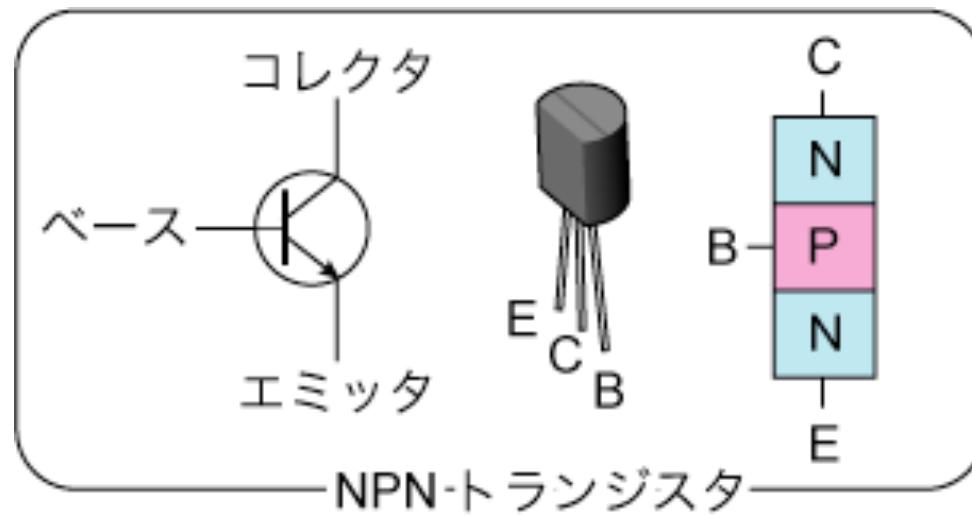
一定以上の逆電圧  
をかけると大電流  
が流れる。

第2章 p.56 図2-50  
第2章 p.57 図2-53

# ダイオードの種類

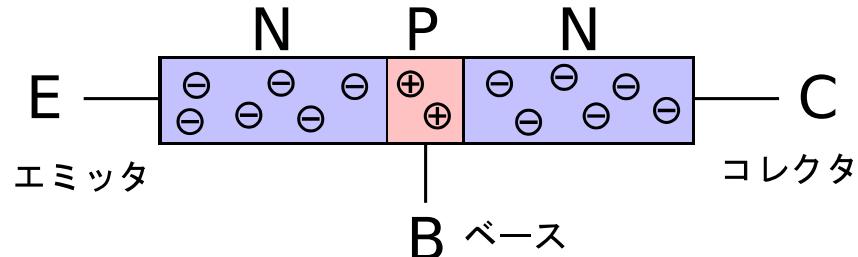
名称	記号	性質
(普通の)ダイオード		整流作用
発光ダイオード (LED)		順電流を流すと 発光する
フォトダイオード		受光すると電流を 流す
ゼナーダイオード (定電圧ダイオード)		一定以上の逆電圧 を加えると逆電流を 流す
トンネルダイオード (エサキダイオード)		負性抵抗、 増幅作用を持つ

# バイポーラトランジスタ

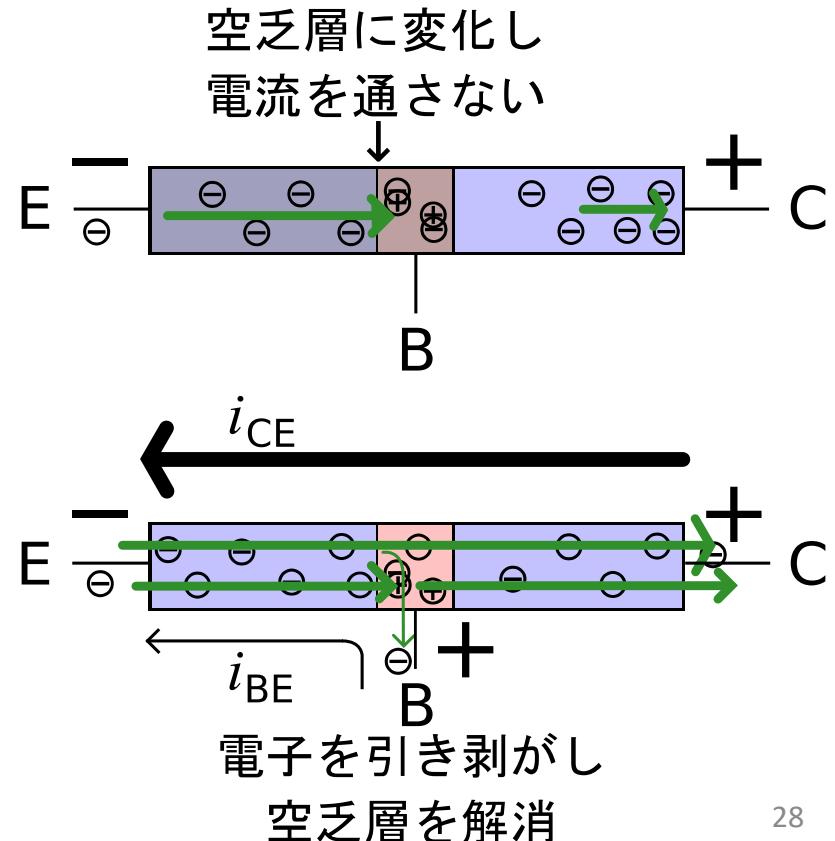


# (NPN型)バイポーラトランジスタ

E-C間に電圧をかけても  
電流は流れない。

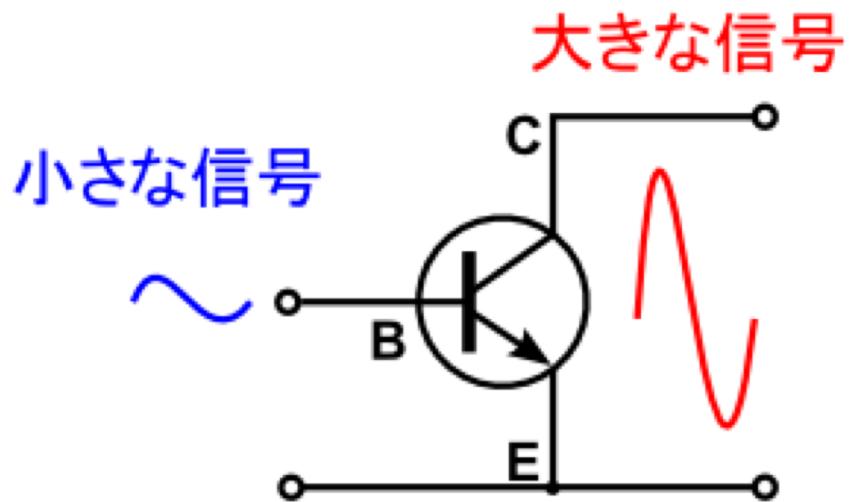


E-B間にすこし電流を  
流すと、  
E-C間に大電流を  
流せるようになる。



# バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタは、**増幅作用**を持つ



- 增幅作用とは

小さな電力 によって、**大きな電力** を制御すること

- トランジスタの用途

信号増幅、電力増幅、スイッチングに利用される

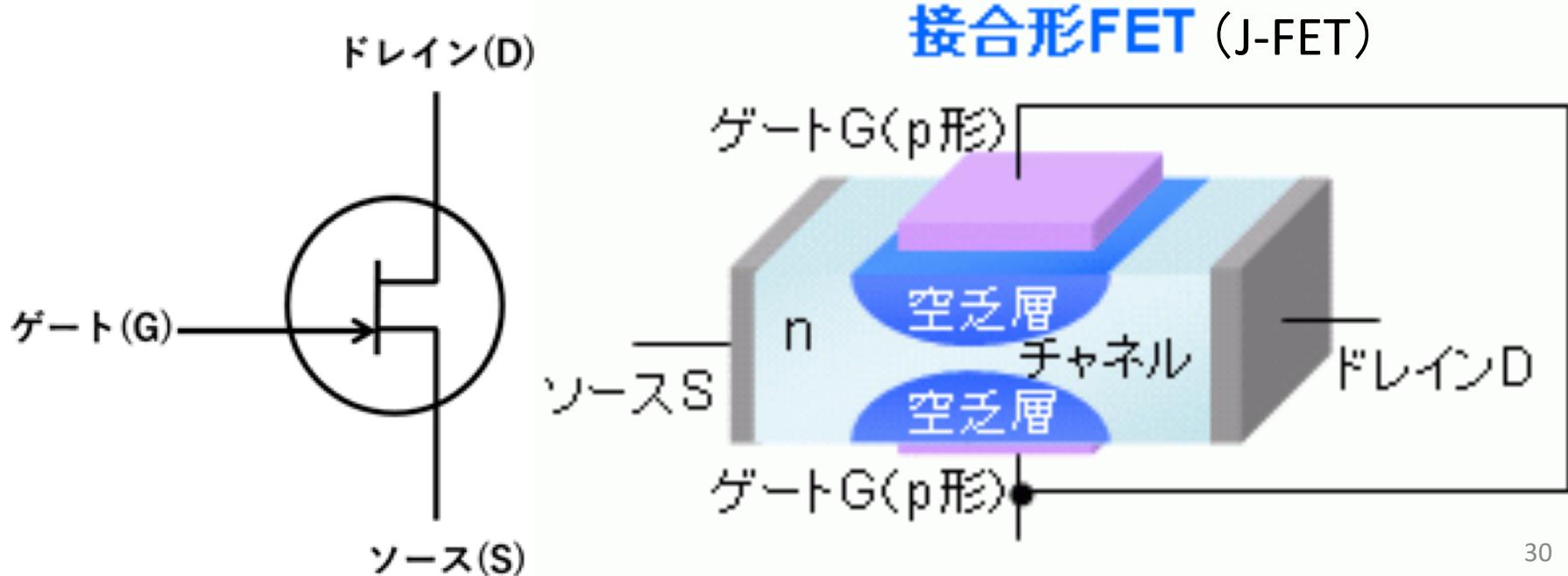
小さい電流( $I_B$ )変化で  
大きい電流( $I_C$ )を制御  
することができる。



# FET(電界効果トランジスタ)

## Field Effect Transistor

ゲートに逆電圧(電界)をかけ空乏層の厚さを変えると、キャリアの通り道(チャネル)の幅が変わるので、ソース・ドレイン間を流れる電流を制御できる。



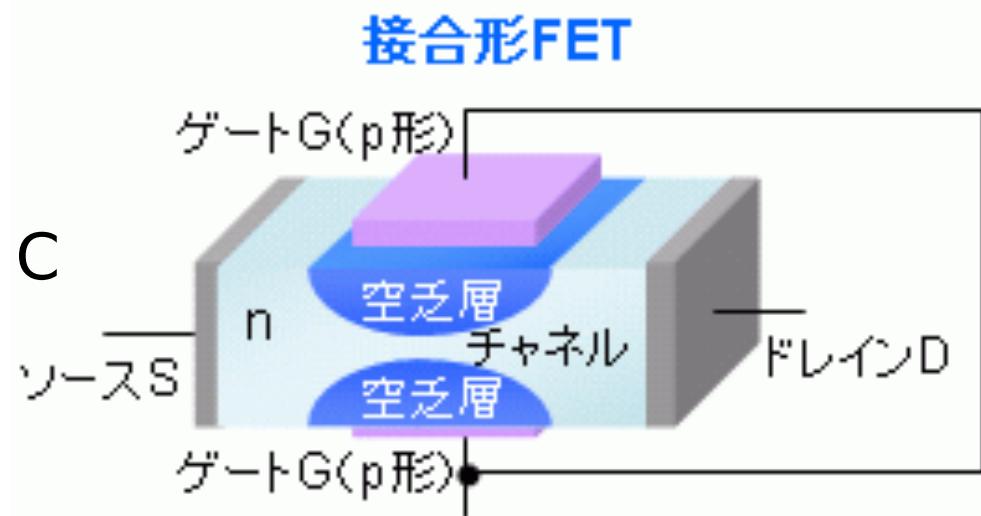
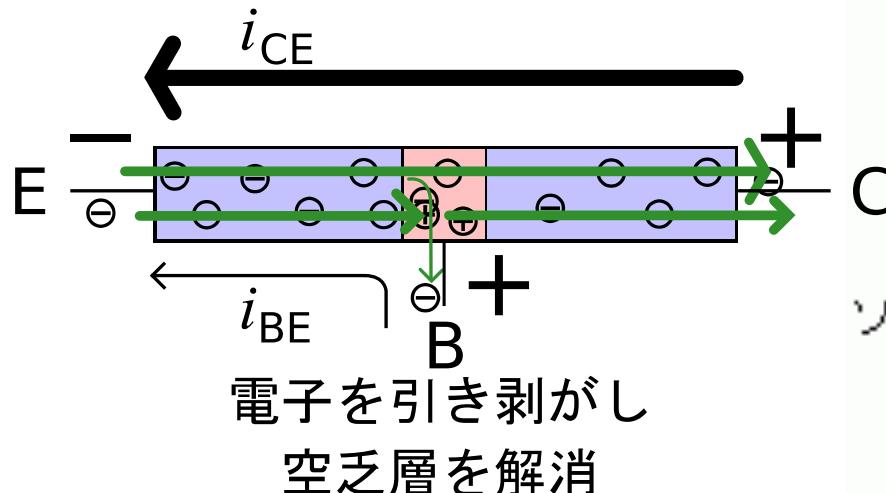
# バイポーラ型 vs 電界効果型

電流 で電流を制御

低い 入力インピーダンス

電圧 で電流を制御

高い 入力インピーダンス



# 能動素子

# まとめ

- **整流** 作用: 片方向にしか電流を流さない
- **増幅** 作用: 小さな電力で大きな電力を制御する

## ダイオード

- n型半導体とp型半導体を接合(np接合)
- **整流** 作用を持つ (ダイオードの種類は表を参照)

## トランジスタ

- **増幅** 作用を持つ
- バイポーラトランジスタ(トランジスタ)
  - **電流** で電流を制御。 **低い** 入力インピーダンス
  - **NPN** 型と **PNP** 型
- 電界効果トランジスタ(FET)
  - **電圧** で電流を制御。 **高い** 入力インピーダンス
  - **Nチャネル** 型と **Pチャネル** 型

# 練習問題

# 練習問題1

(1) FETについて誤っているのはどれか？

1. P型とN型半導体からできている
2. 電源の極性が反対で特性は同じ素子がある
3. 周囲温度の影響を受ける
4. 電流制御形である
5. 真空管と同様、高入力抵抗である

(2) 増幅作用を持つのはどれか

1. コンデンサ
2. 変圧器
3. トランジスタ
4. インダクタ
5. ツェナーダイオード

# 練習問題2

(3) ダイオードについて次の説明の中から正しいものを全て選べ

1. ダイオードは一般に整流器、検流器に利用される
2. トンネルダイオードには増幅作用がある
3. シリコンやガラスは半導体である
4. 発光ダイオードは光を当てる明るさに応じて流れる電流が変化する
5. 定電圧ダイオードは安定化直流電源の基準電圧をつくる時に利用される

# 電気回路 補足

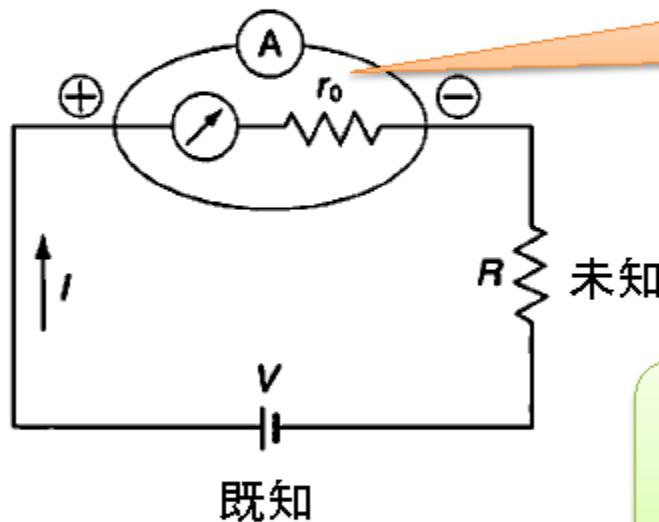
## (電圧計と電流計の使い方)

# 電流計

測りたい電流が流れる区間に **直列** に接続する。

メータの示す電流値

$$I_A = \frac{1}{r_0 + R} V$$

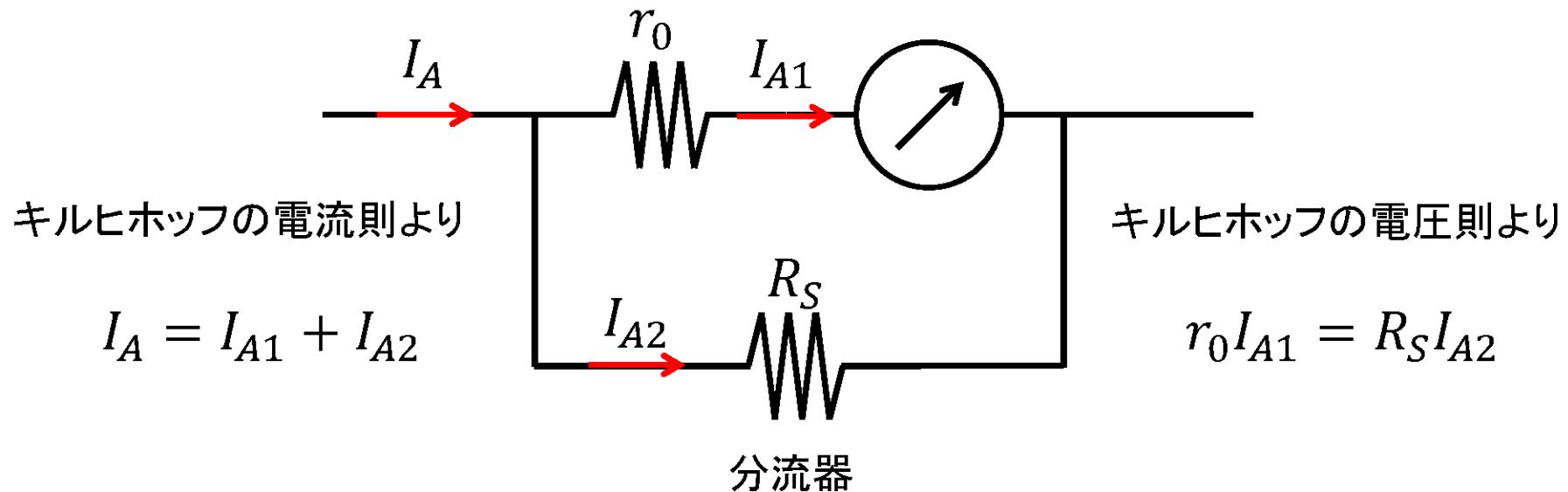


例) 電圧が既知の場合、電流が分かれば抵抗も分かる。

電流を正しく測るために  $r_0 \ll R$  であることが必要。  
(=動作を邪魔しない)

# 分流器

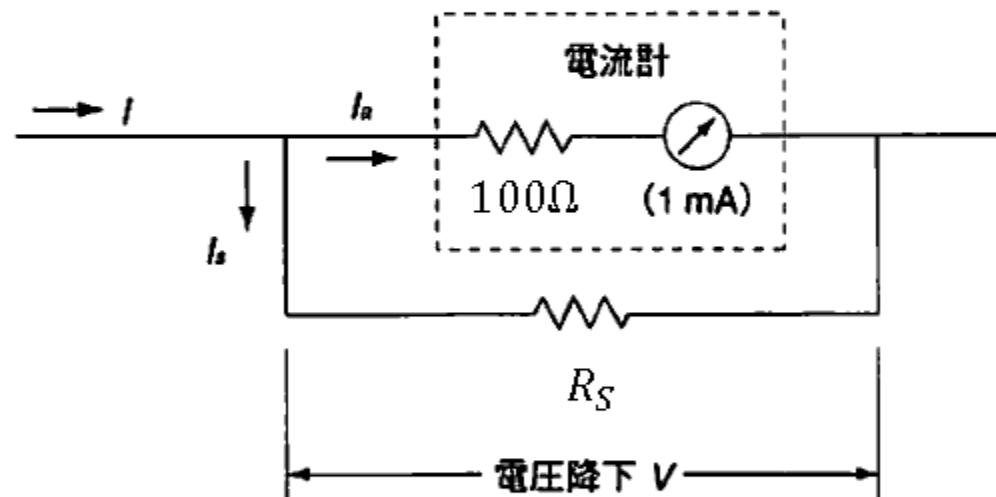
電流計 の測定範囲を広げるために用いる抵抗器



$$(\text{倍率}) = \frac{I_A}{I_{A1}} = \frac{I_{A1} + I_{A2}}{I_{A1}} = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

# (計算例)

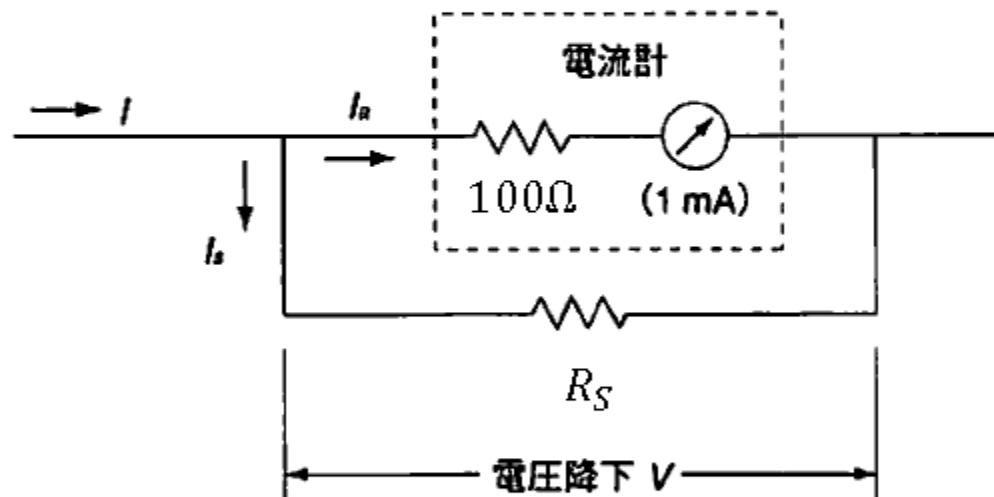
100mAの電流まで測れるようにする分流器は何Ωか.



$$\text{倍率} = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

# (計算例)

100mAの電流まで測れるようにする分流器は何Ωか.



$$\text{倍率} = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

$$(100 - 1)R_S = r_0$$

$$100[\text{mA}]/1[\text{mA}] = 100 = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

$$R_S = \frac{r_0}{100 - 1} = \frac{100}{99}$$

$$100 - 1 = \frac{r_0}{R_S}$$

答え  $R_S = \frac{100}{99} \Omega$

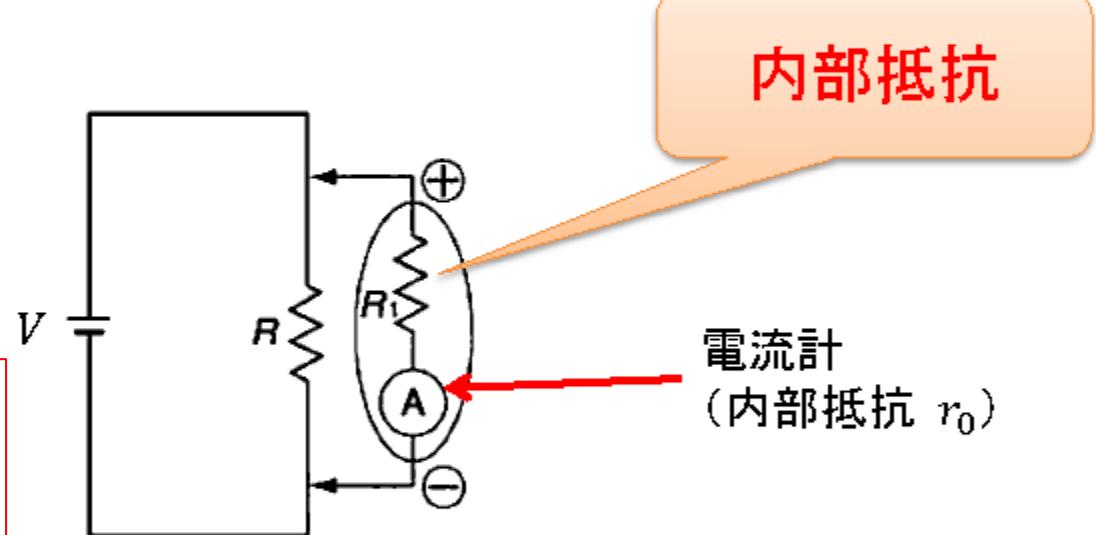
# 電圧計

測りたい電圧が加わる区間に **並列** に接続する。

メータの示す電圧値

$$V_A = (R_1 + r_0)I_A$$

メーターに流れる電流は  
できる限り **小さい**  
方が良い。

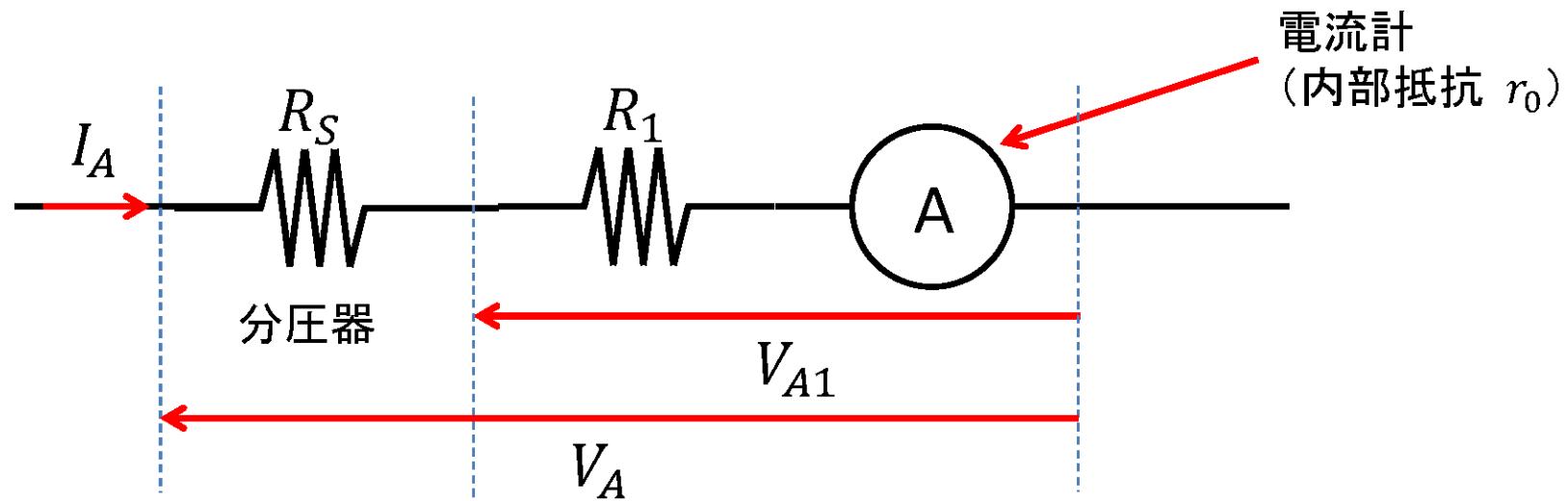


電圧を正しく測るためにには,  $R_1 \gg r_0$  であることが必要。

動作を邪魔しないためにには,  $R_1 \gg R$  であることが必要。

# 分圧器

電圧計 の測定範囲を広げるために用いる抵抗器



$$(\text{倍率}) = \frac{V_A}{V_{A1}} = 1 + \frac{R_S}{R_1 + r_0}$$

## (計算例)

10Vまで計測可能な電圧計を用いて50Vまで電圧を計測するためには、何Ωの抵抗を分圧器として使用すれば良いか。ただし、電圧計の内部抵抗を100kΩ、電圧計を構成する電流計の内部抵抗を10Ωとする。

$$\text{倍率} = 1 + \frac{R_S}{R_1 + r_0}$$

# (計算例)

10Vまで計測可能な電圧計を用いて50Vまで電圧を計測するためには、何Ωの抵抗を分圧器として使用すれば良いか。ただし、電圧計の内部抵抗を100kΩ、電圧計を構成する電流計の内部抵抗を10Ωとする。

$$\text{倍率} = 1 + \frac{R_S}{R_1 + r_0}$$

$$\frac{50[\text{V}]}{10[\text{V}]} = 5 = 1 + \frac{R_S}{100000 + 10}$$

$$5 - 1 = \frac{R_S}{100010}$$

$$4 \times 100010 = R_S$$

$$R_S = 400,040[\Omega]$$



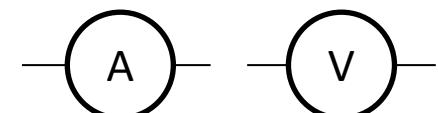
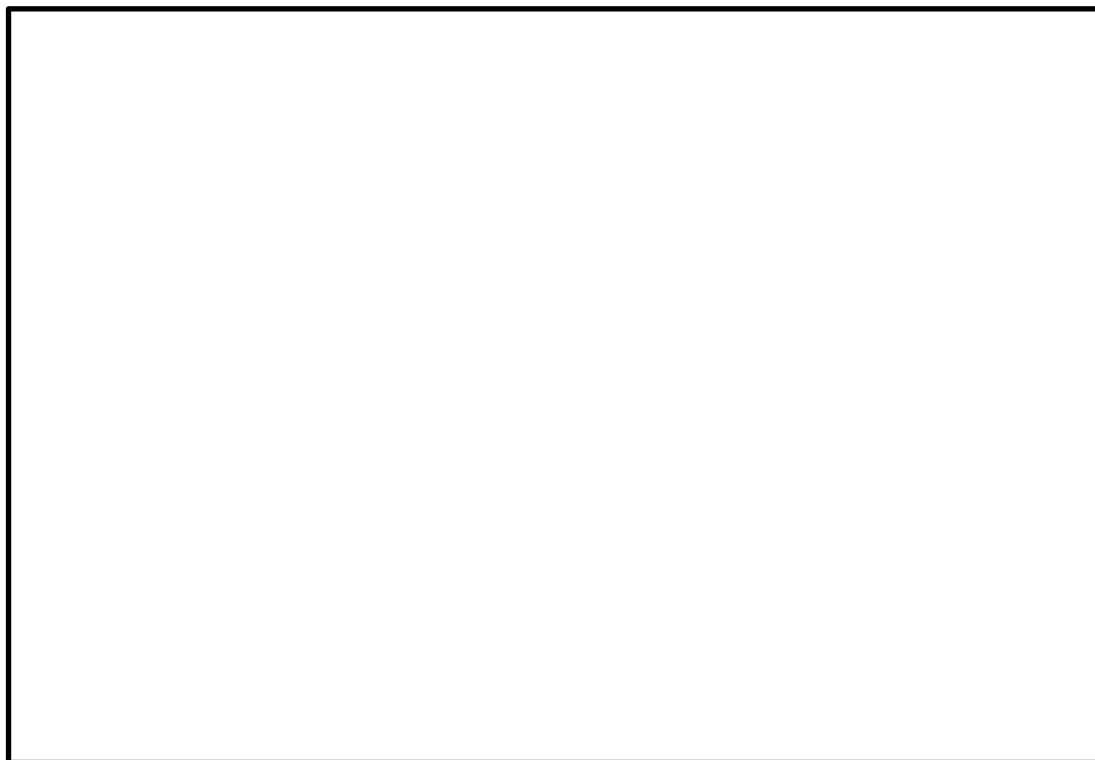
100kΩの抵抗 × 4個



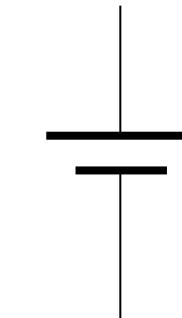
10Ωの抵抗 × 4個

# 練習問題2

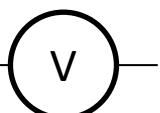
1つの抵抗にかかる電圧、流れる電流を測る時、電圧計、電流計をそれぞれどのように接続すれば良いか。



電流計



電源



電圧計

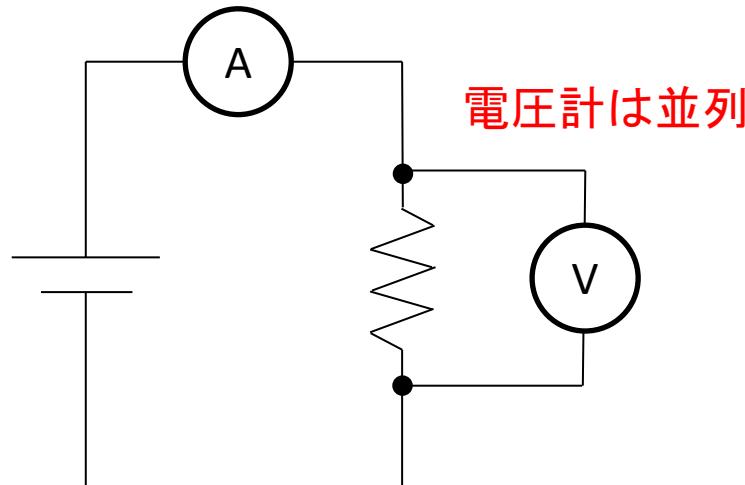


抵抗

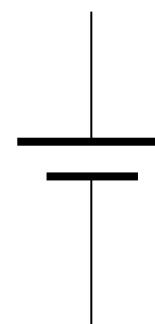
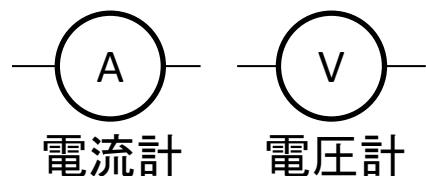
# 練習問題2 解答

1つの抵抗にかかる電圧、流れる電流を測る時、電圧計、電流計をそれぞれどのように接続すれば良いか。

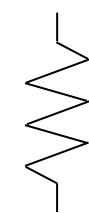
電流計は直列



電圧計は並列



電源



抵抗