

# エレクトロニクス

## 講義資料

### 第1章：回路素子

鶴 剛 ([tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp))

# GND, 電源, 交差と接触

## 1.2.1 GND, COMMON, シャシー, アース

単に接地=GND という場合も, 実は幾つか意味がある.

- 地球大地の電位: 建物や地球大地の電位.
- シャシー GND: 回路機器の外壁.
- COMMON: 回路上で共通にとる 0V のこと.

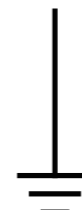


図 1.2: GND, COMMON の記号.

## 1.2.2 電源, 信号源, 定電流源

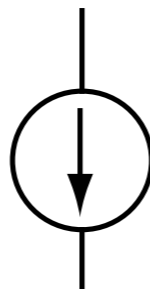
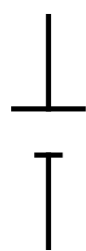


図 1.3: 左から, (1) 定電圧源, (2) 定電圧源, (3) 定電流源, (4) 交流電圧源. (4) は信号源として使う場合もある.

## 1.2.3 交差と接触

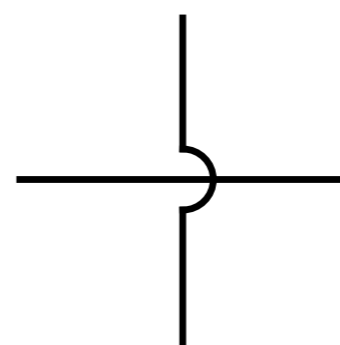
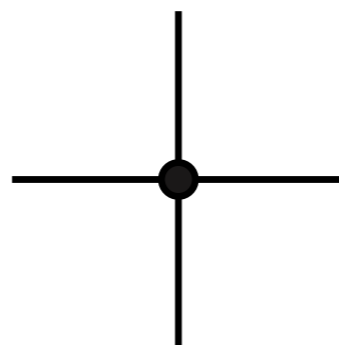
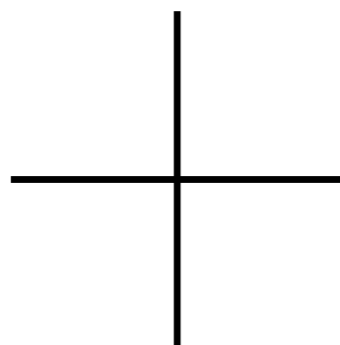
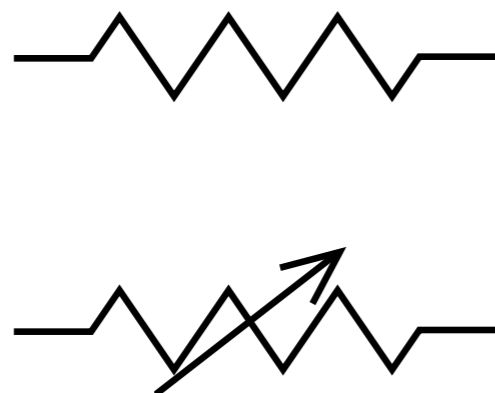


図 1.4: 左から, (1) 接触していない, (2) 接触している, (3) 接触していない.

# 抵抗

## 1.2.5 抵抗



$$V = R \cdot I$$

 $R$ 
 $R$ 

(理想的には) 周波数に依存せず一定値

 $\Omega$ (オーム)

図 1.5: 抵抗の記号. 上は固定抵抗, 下は可変抵抗.

通常見かける素子は,  $0.1\Omega \sim 1(10?)G\Omega$  である.

### 種類

下に色々な抵抗器を示す.

炭素皮膜抵抗器 円筒上のセラミックの上の炭素皮膜による抵抗. 安価で特別な特性を必要としない場合に使用する.  $1\Omega \sim 5.1M\Omega$ ,  $1/4 \sim 1/2W$ .

金属皮膜抵抗器 皮膜に Ni-Cr などの金属をつかったもの. 精度が必要な部分に使う. 温度係数が小さく, 低雑音.  $0.2\Omega \sim 10M\Omega$ ,  $1/8 \sim 1W$ .

金属酸化物皮膜抵抗器 皮膜に金属酸化物をつかったもの. 炭素皮膜抵抗よりも定格電力の大きいものが必要な場合に使用する.  $0.1\Omega \sim 100k\Omega$ ,  $1/2 \sim 5W$ .

セメント抵抗器 セラミックのケースに, 様々な抵抗器を入れてセメントで固めたものの総称. 不燃性で放熱性に優れる. 高耐電圧.  $0.01\Omega \sim 75k\Omega$ ,  $1 \sim 40W$ .

抵抗ネットワーク 抵抗器が一つのパッケージに複数個入ったもの.  $22\Omega \sim 10M\Omega$ ,  $1/10 \sim 1/2W$ . 4個, 8個など.

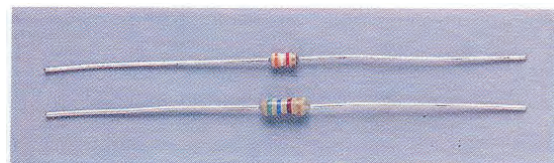
ハイメガオーム抵抗器  $M\Omega$  から  $G\Omega$  のもの. 放射線計測の半導体検出器でも使ったりする. 表面にリーク電流が流れないように注意が必要.  $100k\Omega \sim 1G\Omega$ ,  $1/4 \sim 2W$ . 4個, 8個など.

チップ抵抗器 表面実装用の小さな抵抗器.

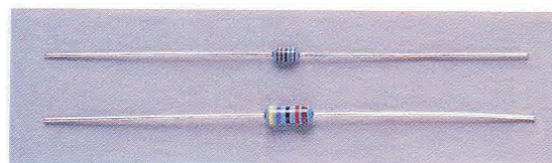
可変抵抗器 ボリューム, トリマ, ポテンショメーターとも言う. 精度, ノイズ, 使用方法により, 色々な種類がある.



# 抵抗



〈写真1〉カーボン抵抗(汎用)：もっとも安価で入手が容易な抵抗。ただし温度係数は明示されないのが普通。



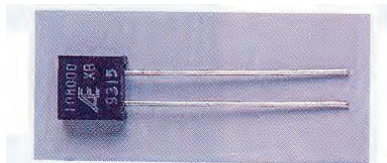
〈写真2〉厚膜金属皮膜抵抗(高精度)：安価で入手容易な焼結型の高精度抵抗。温度係数は±200 ppm程度。



〈写真3〉薄膜金属皮膜抵抗(高精度)：温度係数が±数十ppm以下と低い蒸着型抵抗。外見は厚膜型に類似。



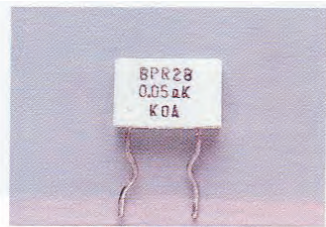
〈写真4〉巻き線抵抗(高精度)：金属線を使った、歴史のある高精度抵抗。ただしインダクタンスに注意。



〈写真5〉金属箔抵抗(高精度)：金属箔パターンを使った、もっとも温度係数の低い超高精度抵抗。



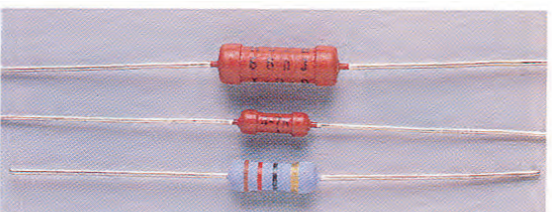
〈写真6〉ベア/集合抵抗(高精度)：互いにペア性の保証された複数の抵抗パック。



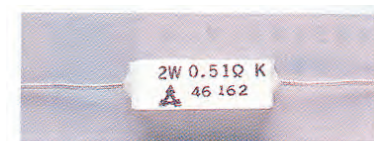
〈写真7〉金属板抵抗(低抵抗)：1Ω以下を得意と薄膜金属皮膜型が普通。リード線抵抗の扱いに工夫が必要。



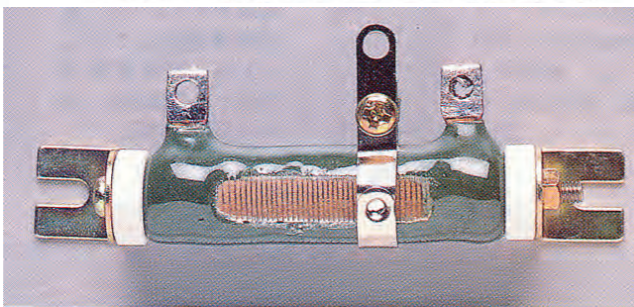
〈写真8〉メタル・グレース抵抗(高抵抗)：10MΩ以上の高抵抗領域用。超高抵抗では浮遊容量にも配慮が必要。



〈写真9〉酸化金属皮膜抵抗(電力用)：10W以内では特性もよく一般的。ディレーティングを考慮すること。



〈写真10〉セメント抵抗(電力用)：おもに巻き線抵抗体を難燃性ケースに収めたもの。安全性/実装性とも良好。



〈写真11〉ほうろう抵抗(電力用)：空冷抵抗としてはもっとも大電力。リボン・タイプやスライダ付きなどがある。

図 1.6: 抵抗色々。

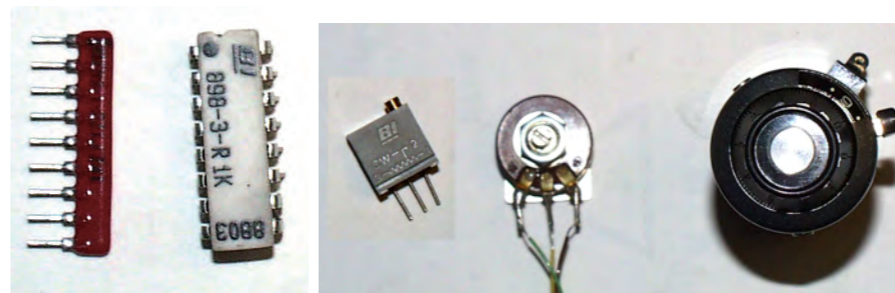


図 1.7: 左: ネットワーク抵抗(集合抵抗), 右: 可変抵抗器。

色名	数字	10のべき数	抵抗値許容差		抵抗温度係数	
			[%]	記号	[ppm/°C]	記号
銀	-	10 <sup>-2</sup>	±10	K	-	-
金	-	10 <sup>-1</sup>	±5	J	-	-
黒	0	1	-	-	±250	K
茶	1	10	±1	F	±100	H
赤	2	10 <sup>2</sup>	±2	G	±50	G
黄赤	3	10 <sup>3</sup>	-	-	±15	D
黄	4	10 <sup>4</sup>	-	-	±25	F
緑	5	10 <sup>5</sup>	±0.5	D	±20	E
青	6	10 <sup>6</sup>	±0.25	C	±10	C
紫	7	10 <sup>7</sup>	±0.1	B	±5	B
灰	8	10 <sup>8</sup>	-	-	±1	A
白	9	10 <sup>9</sup>	-	-	-	-
無色	-	-	±20	M	-	-

• 有効数字2桁の抵抗の色表示

第1色帯(有効数字の1桁目の数字)  
 第2色帯(有効数字の2桁目の数字)  
 第3色帯(有効数字に乘じる10のべき数)  
 第4色帯(抵抗値許容差)

• 写真の抵抗の仕様は以下のとおり。

黄赤 黄赤 茶 金  
 3 3 × 10<sup>1</sup> = 330Ω, 許容差: ±5%

• 有効数字3桁の抵抗の色表示

第1色帯(第1数字)  
 第2色帯(第2数字)  
 第3色帯(第3数字)  
 第4色帯(有効数字に乘じる10のべき数)  
 第5色帯(抵抗値許容差)  
 第6色帯(抵抗温度係数)

• 写真の抵抗の仕様は以下のとおり。

黄 白 白 茶 茶 赤  
 4 9 9 × 10<sup>1</sup> = 4.99kΩ, 許容差: ±1%, 温度係数: ±50ppm/°C

図 1.8: 抵抗のカラーコードと記号。



# コンデンサー

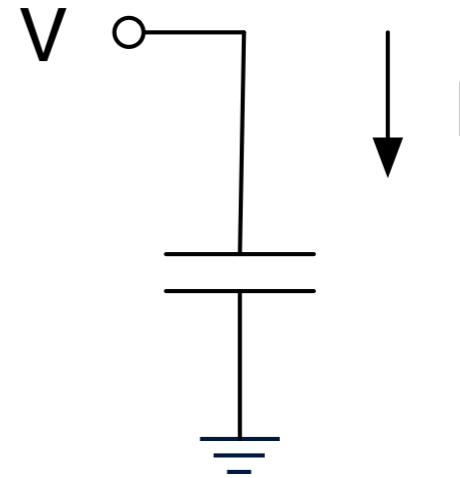
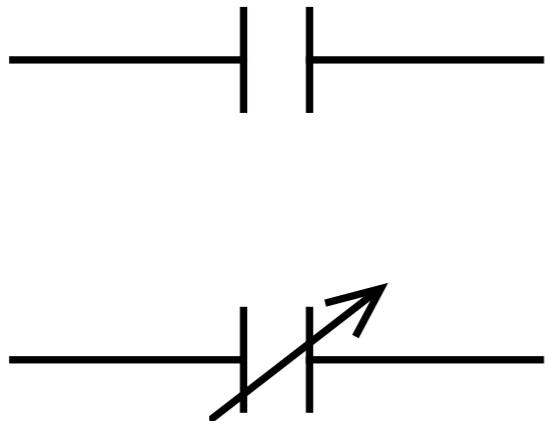


図 1.10: コンデンサーにかかる電圧と、流れ込む電流.

$$Q = C \cdot V$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

コンデンサーに電圧  $V$  を掛けた場合、電流はコンデンサーに掛ける電圧の時間微分に比例し、その比例定数がコンデンサーの容量  $C$  である、と理解できる。

電圧が角周波数  $\omega$  で  $\cos$  的な時間変化をする場合、

$$V = V_0 \cos(\omega t)$$

$$I = C \frac{dV}{dt} = -C\omega V_0 \sin(\omega t) = -I_0 \sin(\omega t)$$

となる。位相は忘れて振幅だけを考えたと

$$V_0 = I_0 \frac{1}{\omega C}$$

と書ける。抵抗の場合の電圧と電流の関係を一般化したものをインピーダンス  $Z$  と呼ぶが、その場合

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

と書けることになる。

# コンデンサー

高誘電率セラミック・コンデンサー 高誘電率系セラミックを誘電体に使ったもの。高周波回路で使用する。無極性で大容量だが、温度特性、電圧ひずみ特性(加える電圧によって容量が変わる)は良くない。1000pF ~ 0.1 $\mu$ F。

温度補償セラミック・コンデンサー 共振回路など、温度によって容量が変化してもらおうと困るものに使う。高周波回路で使用する。高誘電率セラミック・コンデンサーに比べて高く、同じサイズなら容量が小さい。

積層セラミック・コンデンサー 高誘電率セラミック・コンデンサーを積層にし、小型化したもの。0.01 $\mu$ F ~ 1 $\mu$ F。

フィルム・コンデンサー 誘電体にポリエステル、ポリプロピレン、ポリスチレン、マイラなどを使用する。他のコンデンサーに比べて、絶縁率が高く低損失であり、周波数や温度に対する容量の安定性の特性が優れている。セラミックに比べ、2 ~ 3倍体積が大きくなるので、良い特性が必要な場所に使用する。一般的には安価なPETフィルム・コンデンサーが良く使われる。0.001 $\mu$ F ~ 10 $\mu$ F。

積層フィルムコンデンサー フィルムコンデンサーの積層版。1000pF ~ 1 $\mu$ F。

アルミ電解コンデンサー 静電容量が大きく、安価。極性がある。寿命が有限であり、損失が大きい。周波数による特性変化が大きい。インダクタンスを持ち、高周波ではインピーダンスが大きくなる。0.1 $\mu$ F ~ 47000 $\mu$ F。

OS-CON (有機半導体アルミ固体電解コンデンサー) 電解コンデンサーの一種で、電解質に電子伝導度の高い導電性高分子や有機半導体を用いている。フィルムコンデンサー並に周波数特性が優れている。壊れた時には導通ではなく絶縁する。有機半導体型は製造を終了しており、全ての点で優れる導電性高分子に切り替わっている。1 $\mu$ F ~ 2200 $\mu$ F。

タンタル電解コンデンサー アルミ電解コンデンサーに比べ、 $\tan \delta$ が小さく、 $\tan \delta$ の温度特性、周波数特性が優れており、使用温度範囲も大きい。しかし、過電圧、ラッシュ電流に弱い。0.1 $\mu$ F ~ 100 $\mu$ F。

電気二重層コンデンサー 外部電界を印加することで活性炭と電解液の界面に発生する電気二重層を動作原理としたコンデンサー。小型でファラド単位の静電容量が得られる。アルミ電解コンデンサーに比べて、内部抵抗が大きいので、交流回路には適さない。

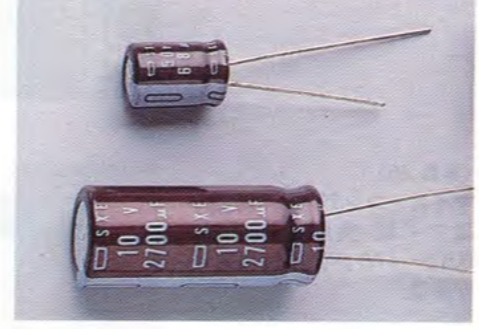
可変容量コンデンサー バリコンとも呼ぶ。機械的に並行平板を回して、重なる領域の面積を変化させる。今もある？可変容量ダイオード。電圧を変化させることで空乏層厚みを変化させる。

高圧コンデンサー 高電圧に耐えるコンデンサーで、例えば、高電圧のパソコンや、比例計数管の高圧のDCを切って信号を取り出す時に使う。良く見るのが耐圧1kV ~ 10kVで、例えば500 ~ 5000pF程度。

# コンデンサー



〈写真 12〉  
アルミ電解コンデンサ：誘電体は酸化アルミニウム。実用容量範囲は  $0.1 \mu\text{F}$  ~  $47000 \mu\text{F}$ 。汎用、小型、大容量で種類は多数ある。



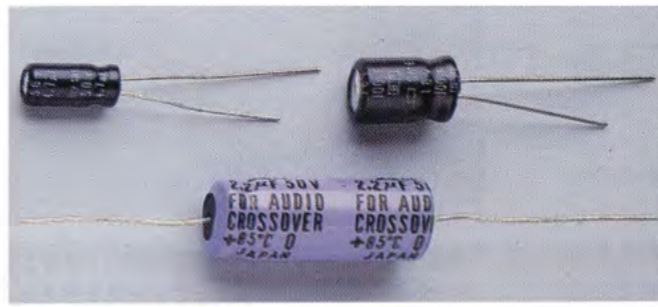
〈写真 13〉 高リプル電解コンデンサ：誘電体は酸化アルミニウム。実用容量範囲は  $10 \mu\text{F}$  ~  $4700 \mu\text{F}$ 。高域インピーダンス低減品。おもにスイッチング電源用。



〈写真 14〉  
有機高分子電解コンデンサ：誘電体は酸化アルミニウム。実用容量範囲は  $1 \mu\text{F}$  ~  $470 \mu\text{F}$ 。電解液がなく特性も良い。



〈写真 15〉 タンタル電解コンデンサ：誘電体は酸化タンタル。実用容量範囲は  $0.1 \mu\text{F}$  ~  $100 \mu\text{F}$ 。もっとも小型だが、制限事項が多い。



〈写真 16〉  
無極性電解コンデンサ：誘電体は酸化アルミニウム。実用容量範囲は  $0.1 \mu\text{F}$  ~  $100 \mu\text{F}$ 。両極に酸化膜を付けたもの。

〈写真 17〉  
高誘電率セラミック・コンデンサ：誘電体は高誘電率系セラミック。実用容量範囲は  $1000 \text{p}$  ~  $0.1 \mu\text{F}$ 。無極性で大容量。特性は良くない。



〈写真 18〉  
積層セラミック・コンデンサ：誘電体は高誘電率系セラミック。実用容量範囲は  $0.01 \mu\text{F}$  ~  $1 \mu\text{F}$ 。高誘電率セラミックの積層版。おもにパソコン用。



〈写真 19〉 メタライズド・フィルム・コンデンサ：誘電体はポリエステルなど。実用容量範囲は  $1000 \text{p}$  ~  $1 \mu\text{F}$ 。比較的小型。

〈写真 20〉  
積層フィルム・コンデンサ：誘電体はポリエステルなど。実用容量範囲は  $1000 \text{p}$  ~  $1 \mu\text{F}$ 。メタライズド・フィルムの積層版。



〈写真 22〉  
ポリプロピレン(PP)コンデンサ：誘電体はポリプロピレン。実用容量範囲は  $100 \text{p}$  ~  $0.47 \mu\text{F}$ 。誘電体吸収が小さいが、かさばる。



〈写真 24〉  
スチロール・コンデンサ：誘電体はポリスチロール。実用容量範囲は  $1 \text{p}$  ~  $4700 \text{pF}$ 。特性良好だが熱や溶剤に弱い。



〈写真 21〉 マイラ・コンデンサ：誘電体はポリエステル。実用容量範囲は  $470 \text{p}$  ~  $0.47 \mu\text{F}$ 。巻きインダクタンスに注意。

〈写真 23〉  
低誘電率セラミック・コンデンサ：誘電体は低誘電率系セラミック。実用容量範囲は  $0.5 \text{p}$  ~  $1000 \text{pF}$ 。品種多数。温度特性に注意。



〈写真 25〉  
マイカ・コンデンサ：誘電体はマイカ。実用容量範囲は  $0.5 \text{p}$  ~  $470 \text{pF}$ 。特性良好だが高価。



図 1.11: コンデンサー色々。



図 1.12: 高圧コンデンサー。

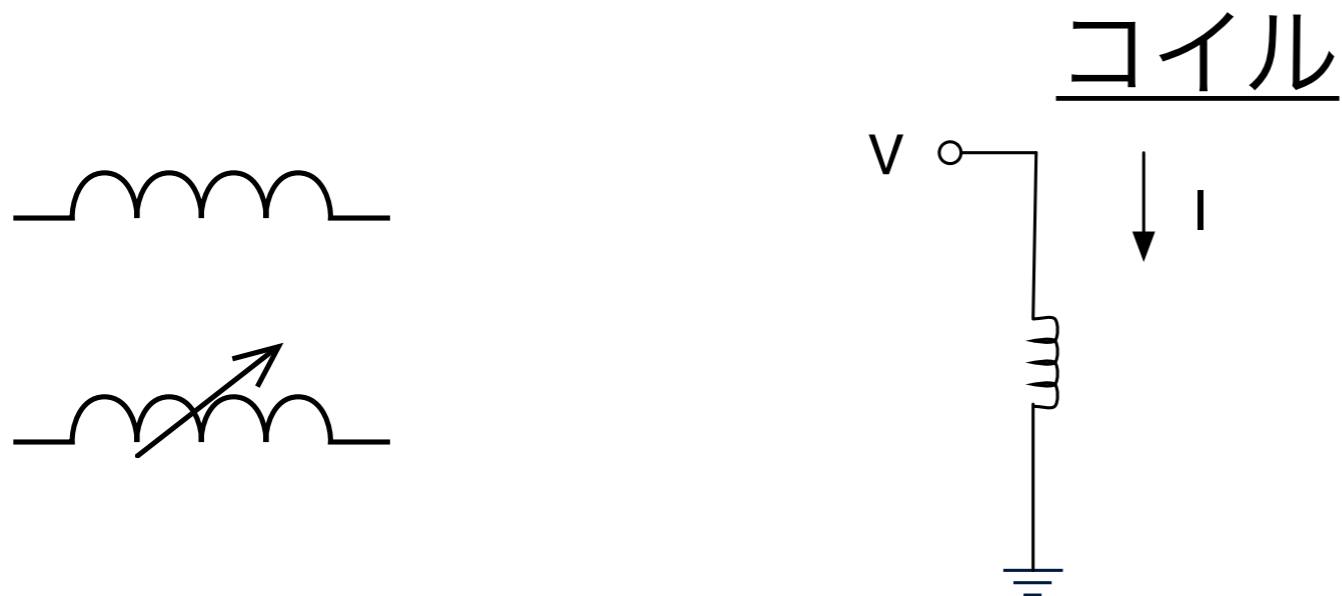


図 1.14: コイルにかかる電圧と，流れ込む電流.

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

$$I = I_0 \cos \omega t$$

$$V = -\omega L I_0 \sin \omega t = V_0 \sin \omega t$$

$$V_0 = \omega L I_0$$

$$Z = \omega L$$

周波数が高くなるとインピーダンスが上がる.

直列の場合，低周波成分ほど良く通すことになる.

コンデンサーとは逆である.

コンデンサーと同様に複素インピーダンス:

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

$$V = i\omega L \cdot I$$

$$i\omega L$$

H(ヘンリー)

通常見かける素子は， $1\mu\text{H} \sim 100\mu\text{H}$  である.



# コイル

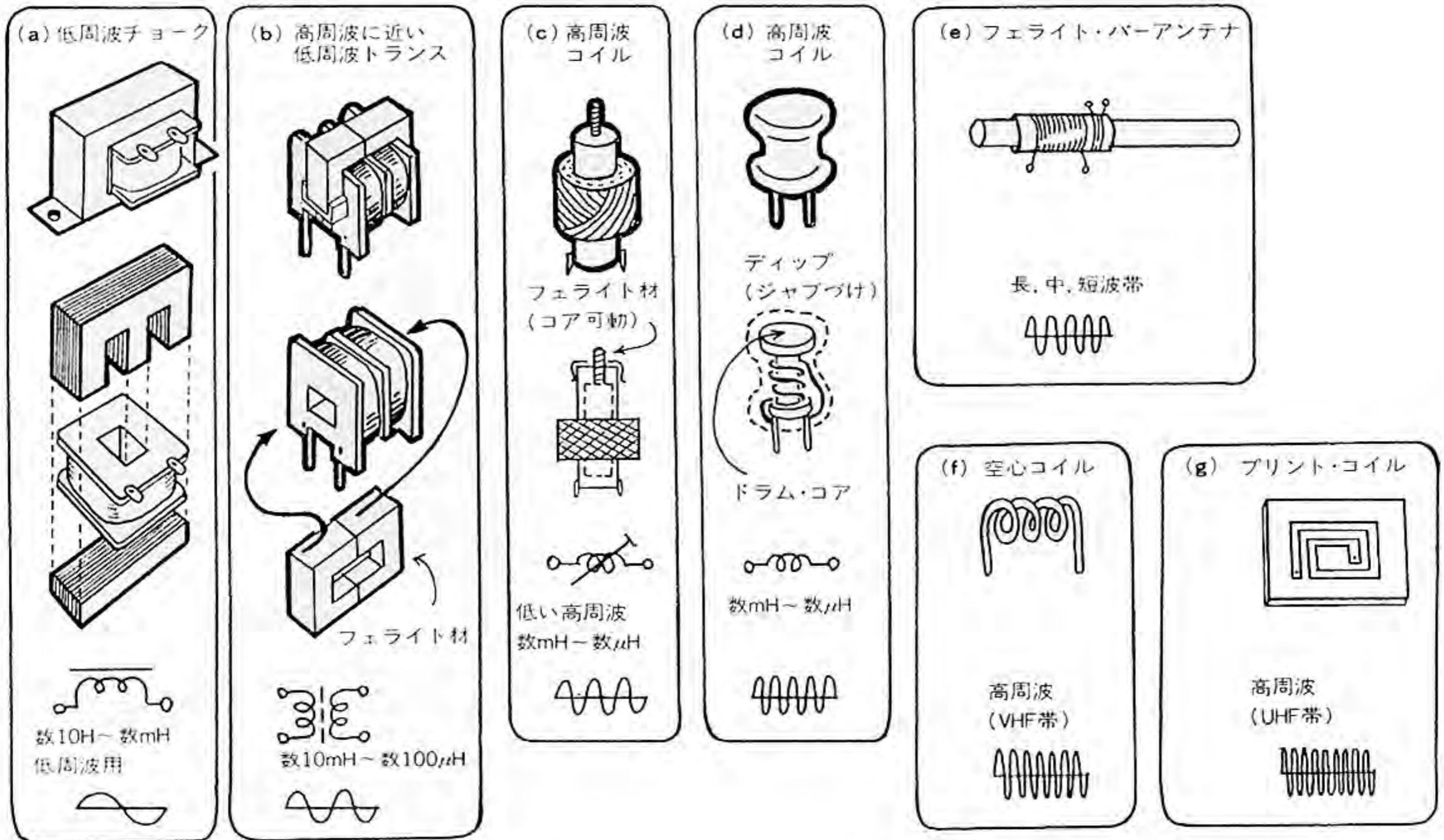


図 1.15: コイル色々.

# ダイオード

ダイオードは、電流を一方向のみに流す素子で、普通 pn 型の半導体ダイオードが良く使われる。ツェナーダイオードは、逆電圧を掛けた時に電流が急激に流れ出すツェナー電圧を利用して、定電圧を作るために良く使われる素子。

ダイオードは p 型半導体と n 型半導体を接合したものである。電流を運ぶものをキャリア (carrier) と言い、p 型は正 (positive) の carrier を持ち、n 型は負 (negative) の carrier を持つ。実体はそれぞれホールと電子である。

n 型半導体は高純度シリコンに、砒素 (As) やリン (P) などの 5 価元素を不純物としてごく微量加えることで作る。p 型は不純物として硼素 (B) などの 3 価元素を使用する。

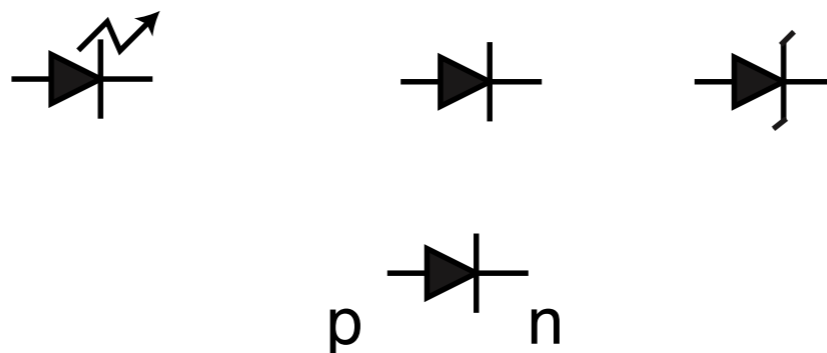


図 1.16: ダイオードの記号。左は発光ダイオード、中は普通のダイオード。右はツェナーダイオード。

多くのダイオードでは順電圧約 1V 以下、逆電圧 2 ~ 5V までの特性は

$$I = I_s \left[ \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

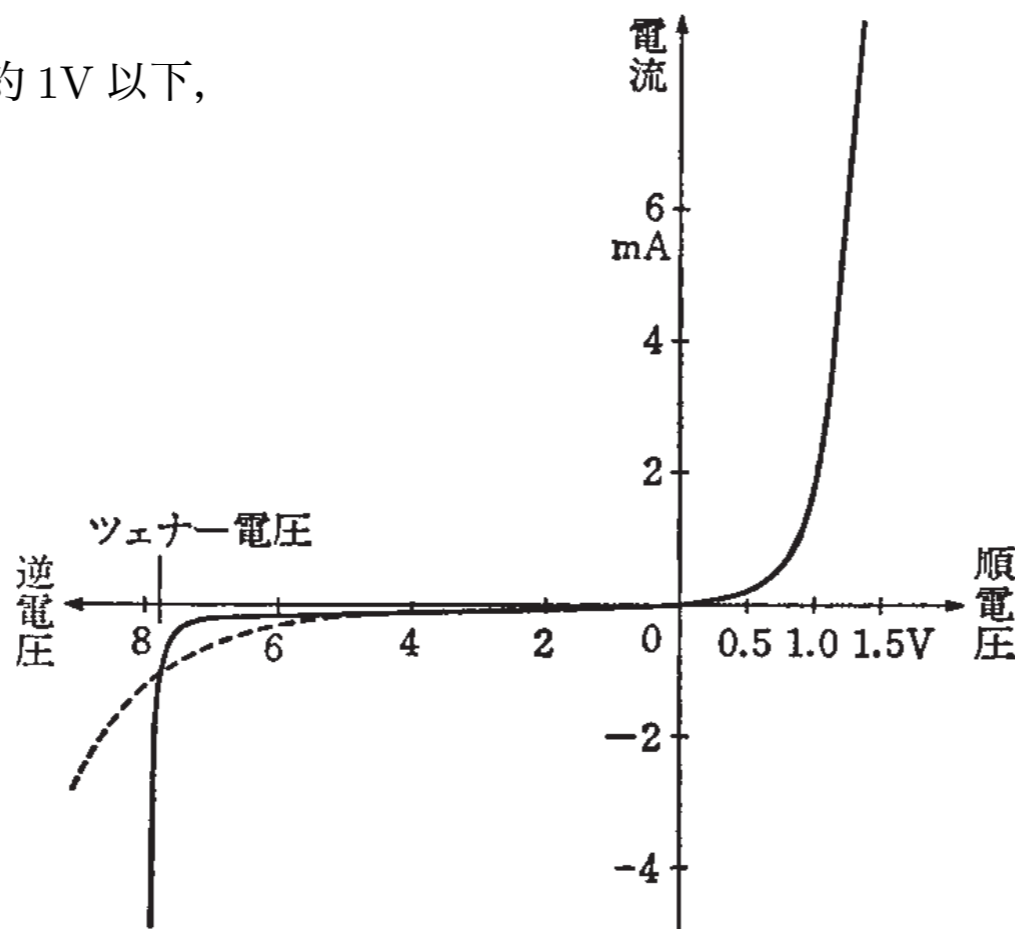


図 1.19: pn 型半導体ダイオード (左) とツェナーダイオードの電流電圧特性。

# ダイオード

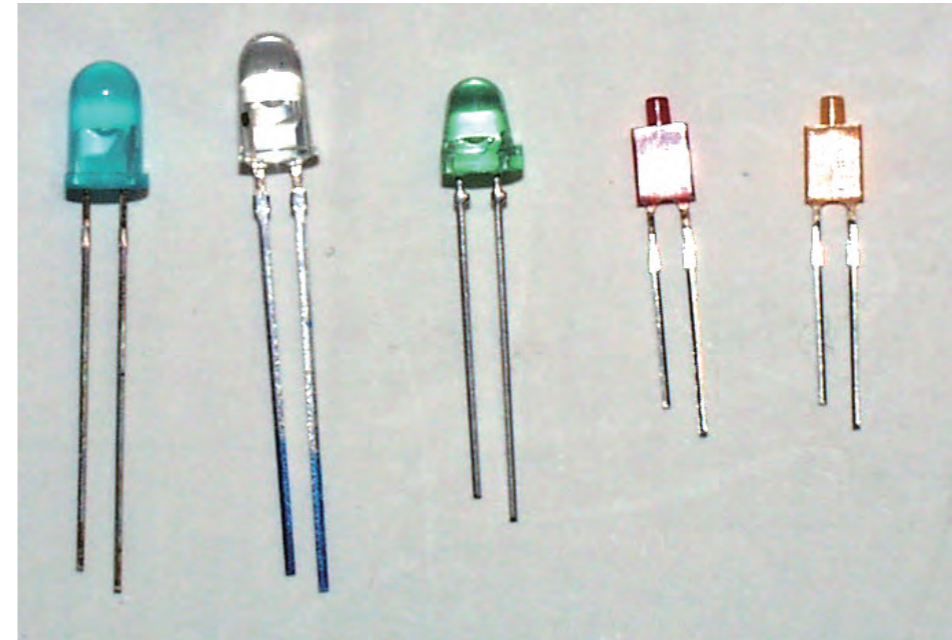
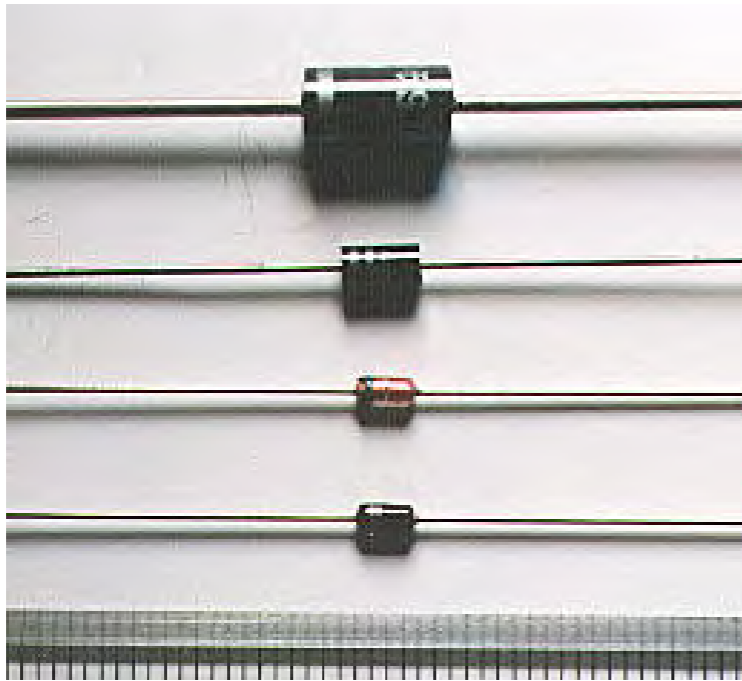


図 1.18: 発光ダイオード.

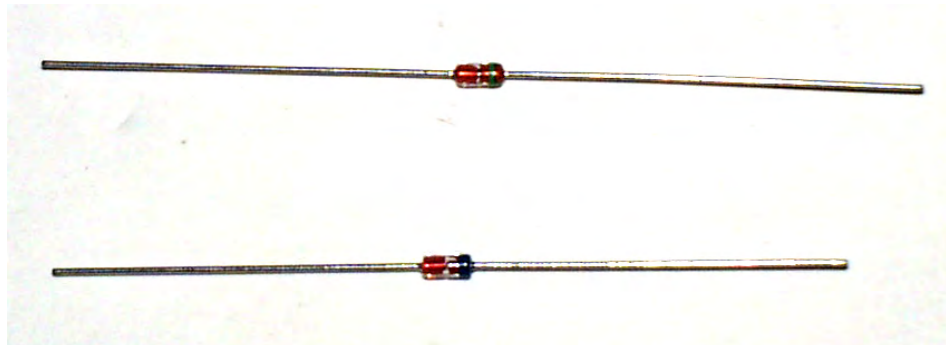


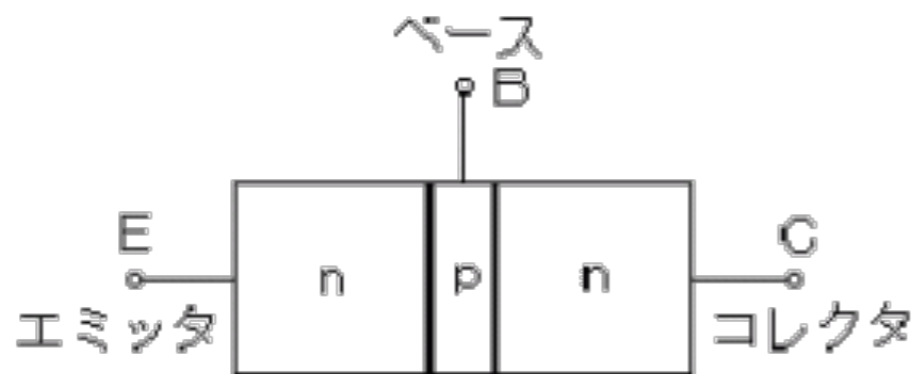
図 1.17: 普通の pn 型半導体ダイオード. ツェナーダイオードもほぼ同じ. 線が描いて無い方から描いてある方向へ電流がながれる (順方向).



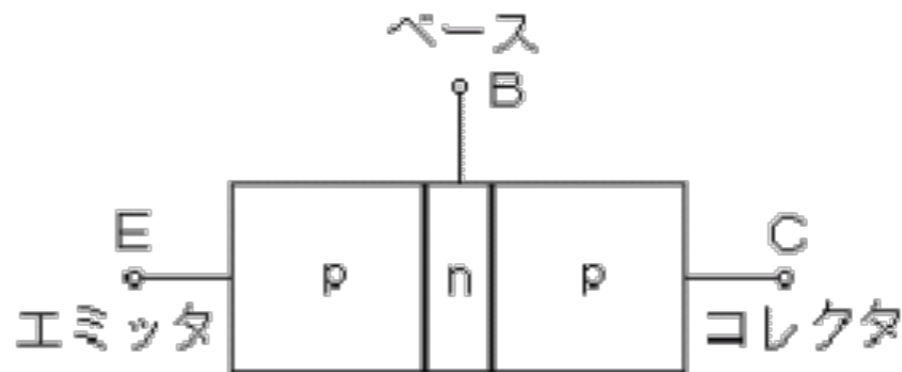
# バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタは pnp または npn 接合で構成された素子である. pnp 型では, 中央に比較的薄い n 型半導体があり, これをベースと呼ぶ. NPN 型の場合, 回路記号で矢印がある側の n 型をエミッターと呼び, 高い濃度の不純物を含む (n+). もう片方の n 型はコレクタと呼び, 不純物濃度が低い.

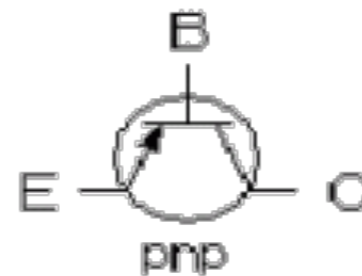
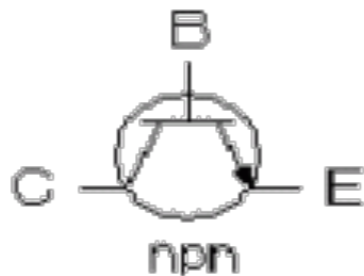
《npnトランジスタ》



《pnpトランジスタ》



a. 内部構造



b. 回路記号

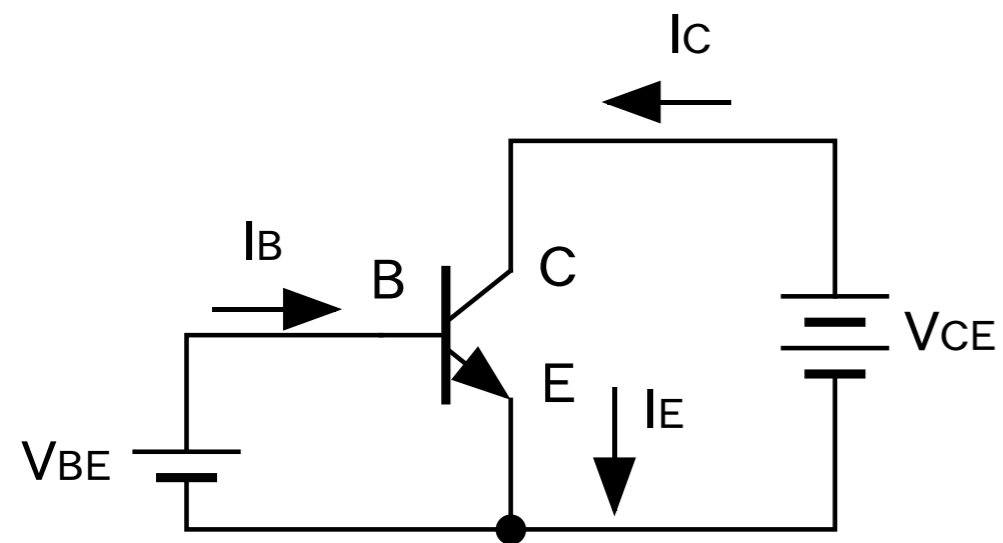
# バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタは、エミッタ-コレクタ電圧に関わらず、ベース電流でコレクタ電流を制御する素子。ON状態では、

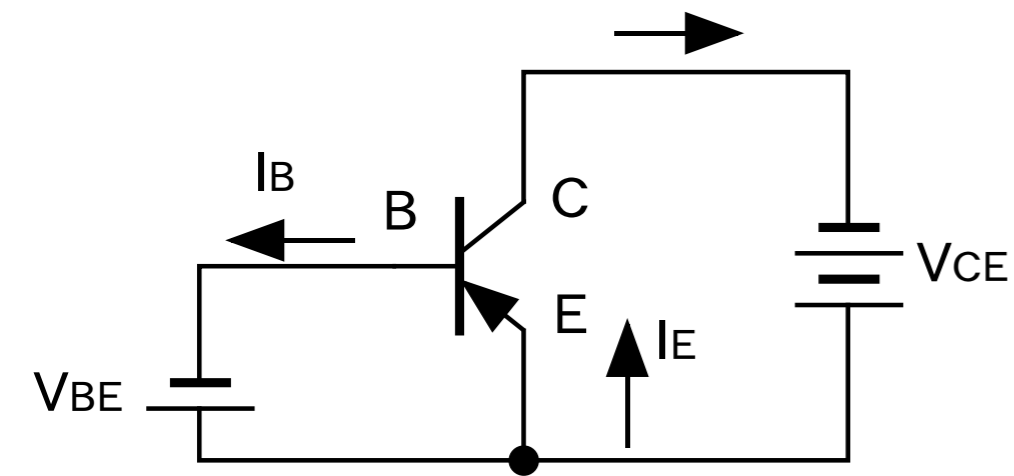
$$I_C = \beta I_B$$

$$\beta = 100 \sim 500$$

という関係がある。βは  $h_{FE}$  と書くこともある。



NPN型バイポーラトランジスタ



PNP型バイポーラトランジスタ

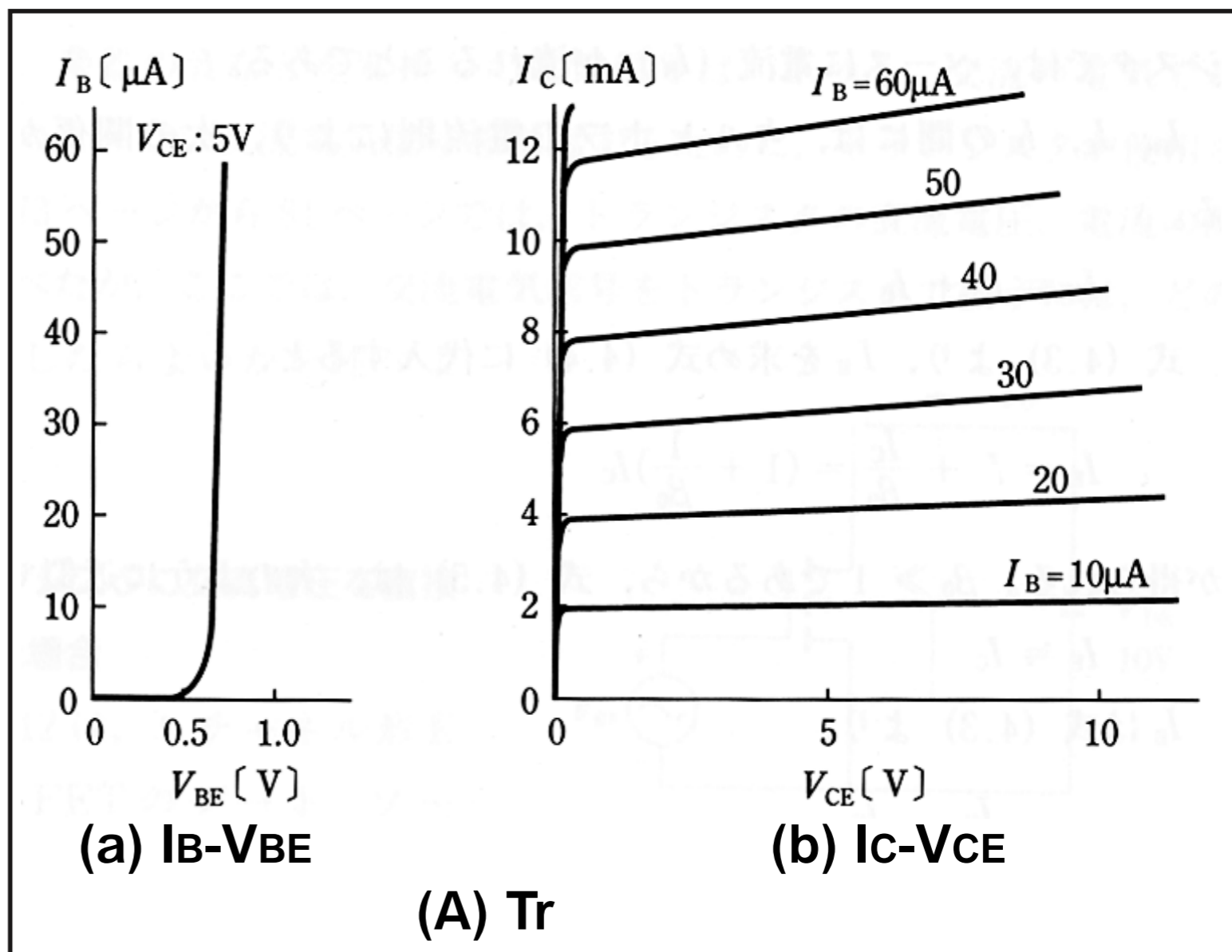


図 1.23: バイポーラトランジスタの特性.

# バイポーラトランジスタ

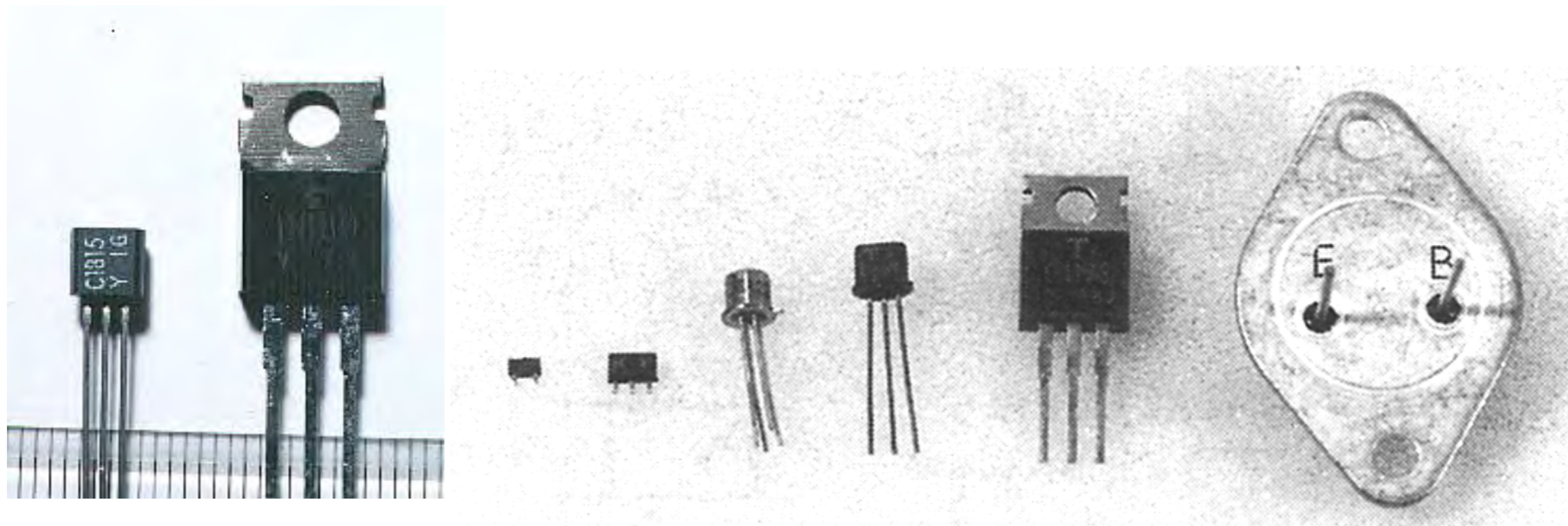


図 1.21: 色々なバイポーラトランジスタ.

トランジスタの型番は，日本製のは 2SAxxxx, 2SBxxxx, 2SCxxxx, 2SDxxxx 徴を持つ (アメリカ製は 2Nxxxx).

2SAxxxx PNP 型，高周波用

2SBxxxx PNP 型，低周波用

2SCxxxx NPN 型，高周波用

2SDxxxx NPN 型，低周波用

例えば，トランジスタ技術などでは以下を紹介している.

2SA1048/2SC2458(東芝) 汎用低周波小信号回路. 有名な 2SA1015/2SC1815 と同じ規格.

2SA1428/2SC3668(東芝) 低周波回路で電流を多めに流す場合に使用 ( $I_C < 2(A)$ ).

2SC3113(東芝)  $h_{FE} = \beta = 600 \sim 3600$  と大きい.

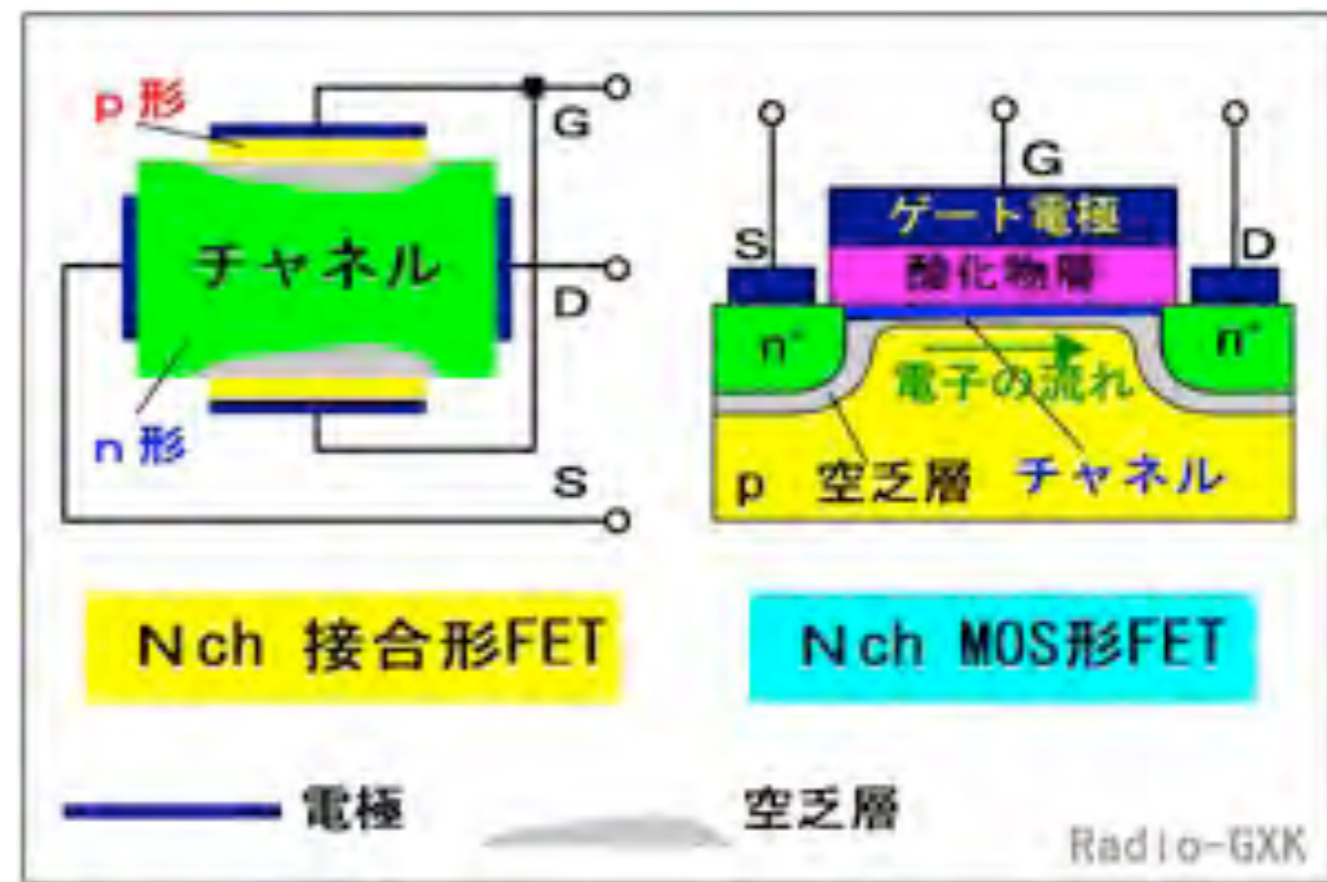
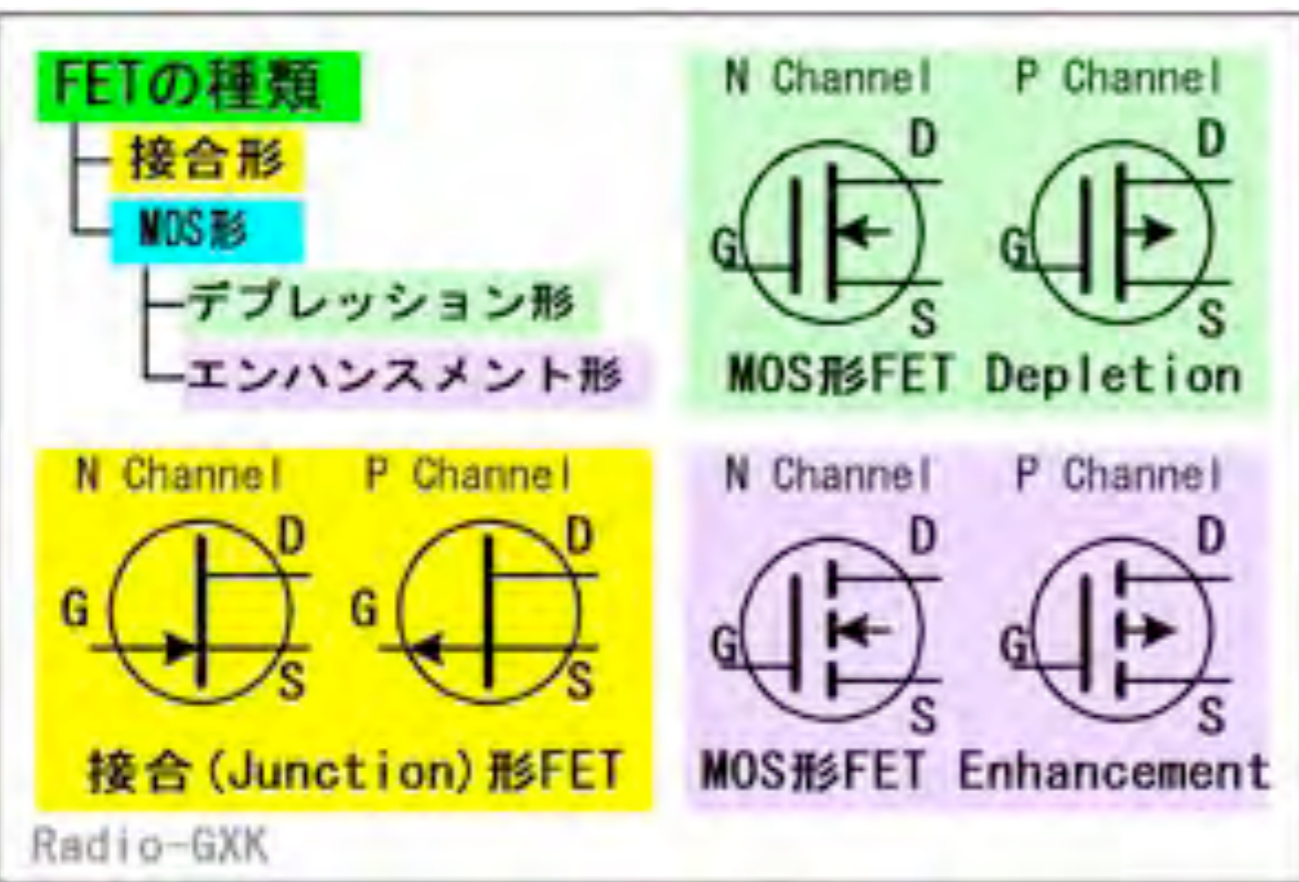
2SC2668(東芝) 100MHz 程度までの高周波増幅用.

2SC3605(東芝) 1GHz 程度で使える安価な高周波増幅用素子.



# 電界効果トランジスタ (FET)

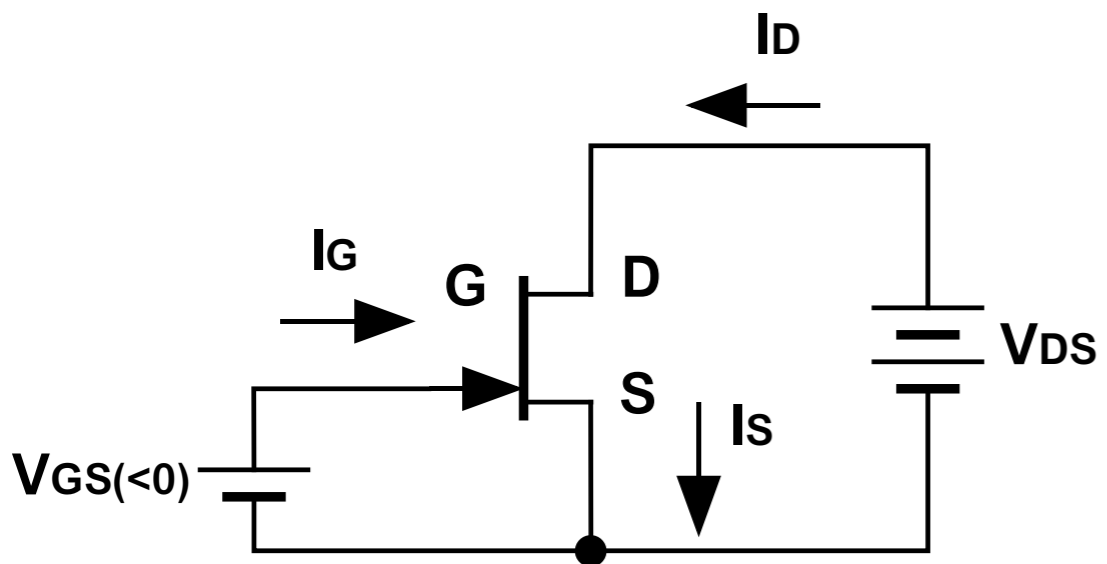
ドレイン電流にはドレイン-ソース電圧に関わらず，FET はゲート電圧でドレイン電流を制御する素子。



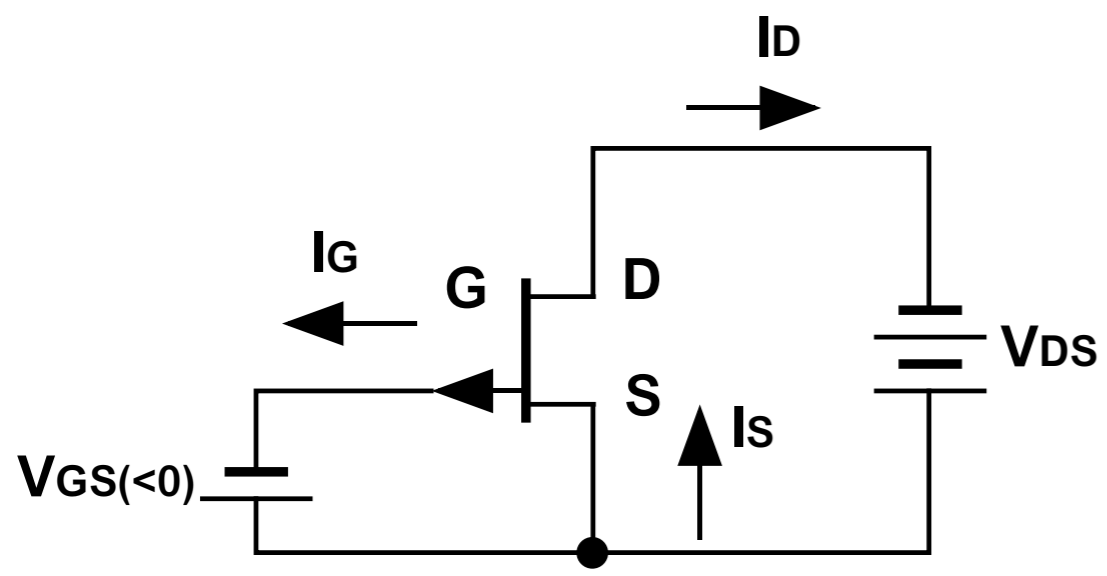
[http://www.gxk.jp/elec/musen/lama/H13/html/H1304B02\\_.html](http://www.gxk.jp/elec/musen/lama/H13/html/H1304B02_.html)

# 電界効果トランジスタ (FET)

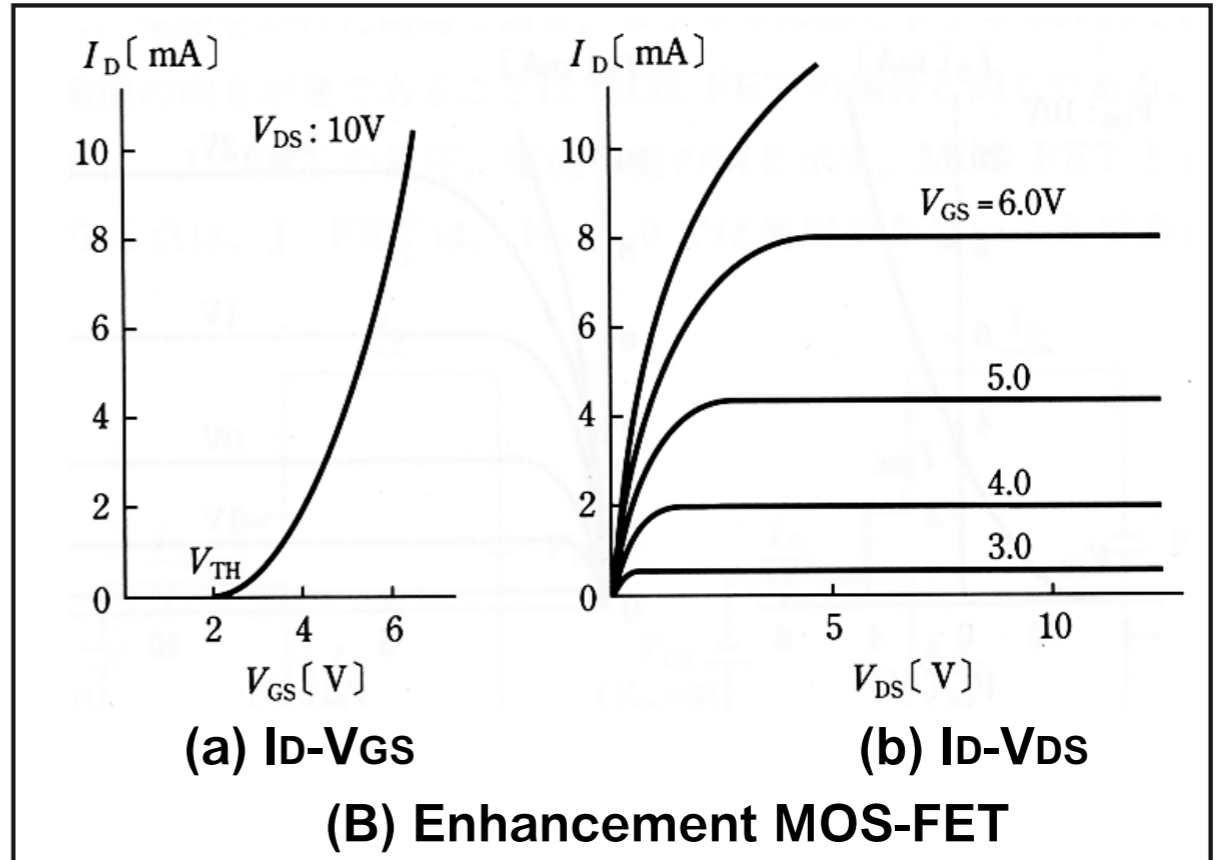
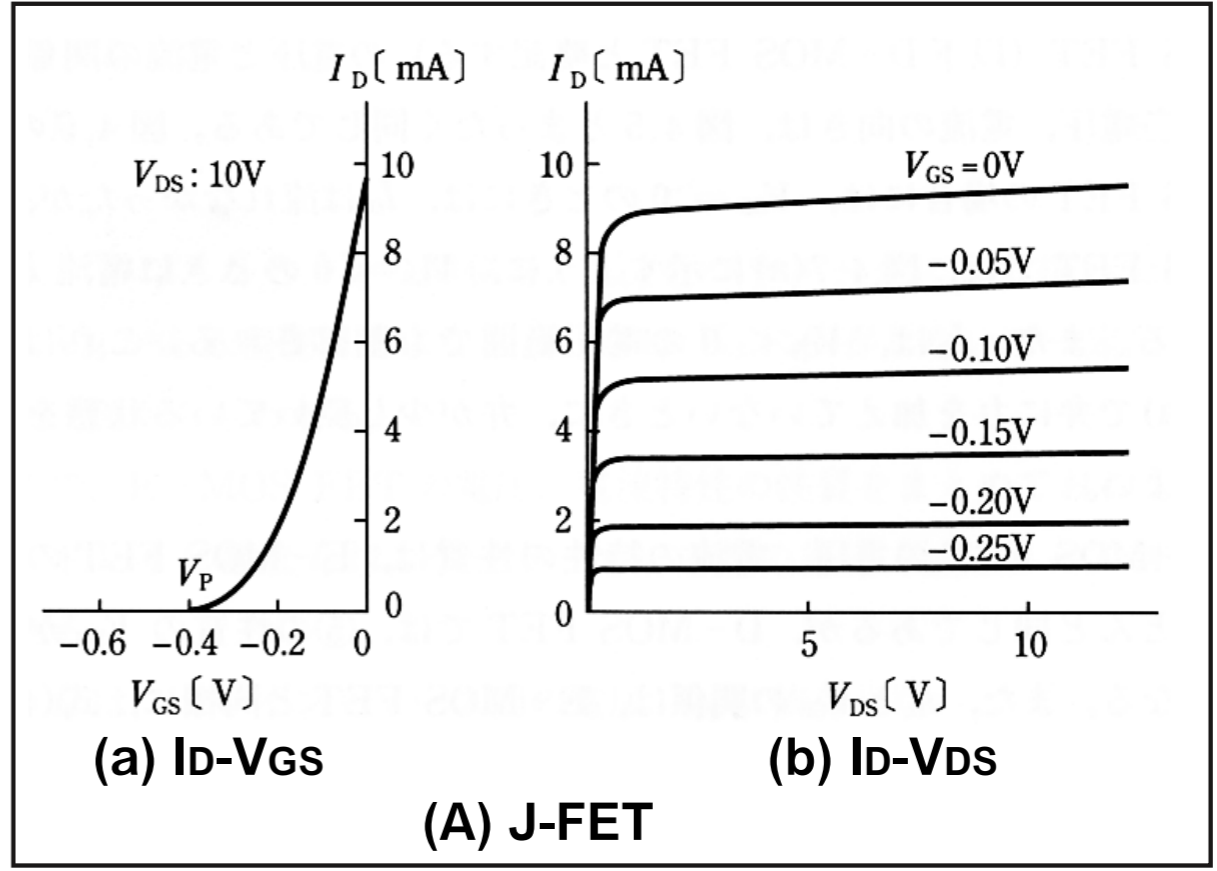
ドレイン電流にはドレイン-ソース電圧に関わらず，FET はゲート電圧でドレイン電流を制御する素子。



NチャネルJ-FET



PチャネルJ-FET



# オペアンプ

オペアンプは、プラス入力とマイナス入力の電圧差を、非常に大きな増幅率で増幅し (理想的には無限大)、出力電圧 (と GND との電圧差) とする素子である。

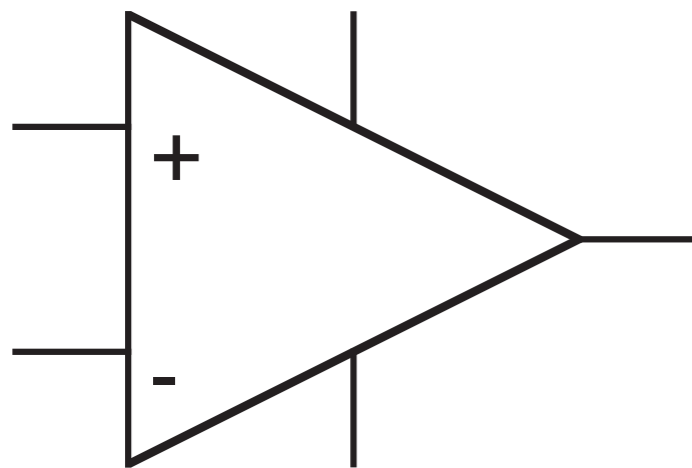
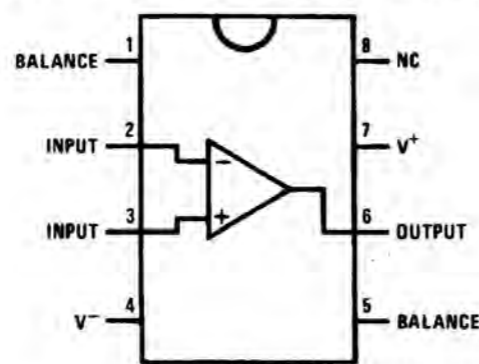


図 1.27: オペアンプの記号.



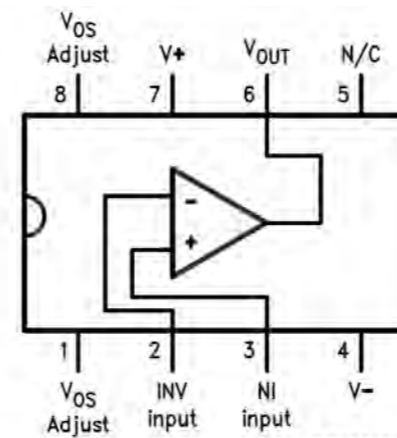
図 1.26: 色々なオペアンプ.

### Dual-In-Line Package (M and N)



DS005646-29

Order Number LF356M, LF356MX, LF355N, or LF356N  
See NS Package Number M08A or N08E



DS009152-8

Order Number LM6165J/883  
See NS Package Number J08A  
Order Number LM6365M  
See NS Package Number M08A  
Order Number LM6265N or LM6365N  
See NS Package Number N08E

図 1.28: オペアンプのピン配置.



# 電源・測定装置・入力・出力インピーダンス

## 100V AC

実は片方は GND. 壁などのコンセント (メス) に対して真中のアース端子を下に見ると, 左が少し長く, 右が短い. 左側の長い方がアースに接地されている (はず).

## トランジスタ電源

フローティングタイプの 2 出力電源の場合, +V, -V 以外に, COM と GND がある. COM は, +V, -V に対する Reference. GND はシャーシ. GND と COM, +V, -V をどう接続するかは任意. フローティングタイプなので, 他の電源の +V, -V と COM を接続することも可能.

## オシロスコープ

波形をディスプレイに表示して可視化する装置. シンクロスコープとも呼ぶ (プロっぽい人). トリガに同期して波形を掃引する. トリガは, 入力された信号がある閾値を跨った場合にかける, ハム (商用 100V 電源) に同期外から入れるなどが, 基本. アナログオシロスコープは, 繰り返し波形しか読みとるのは難しいが, デジタルオシロスコープは過渡現象をとらえることができる. 最近では, デジタルスコープが主流で, アナログオシロスコープはあまり売っていない. 帯域は 500MHz 程度が主流で, GHz を越えるものもある.

また, デジタルオシロスコープの機能の充実はすぎましい. 例えば FFT などは当たり前で, スペクトルアナライザという分野の測定装置を吸収しつつある.

## ファンクションジェネレーター

0.001Hz ~ 500MHz 程度の範囲で (もちろん色々ある), sin 波, 方形波, 三角波, のこぎり波を発振する装置.

## パルスジェネレーター

パルス波を出力する装置で, 放射線計測学で良く使う. 普通パルス幅は 1ns ~ 1sec 程度 (もちろん色々ある) で, 繰り返し周波数も変化可能. ランダムの間隔で出力するパルスジェネレーターもある.

## デジタルマルチメーター

デジボルと言ってみたりもする. 基本的には電圧 (AC, DC), 電流 (AC, DC), 抵抗値 (500Ω ~ 50MΩ) の測定が可能. さらに高級品では熱電対や白金抵抗をつけて温度を測定したり, コンデンサの容量を測定できるものもある.

## 入力, 出力インピーダンス

測定器の類は必ず, 入力, 出力インピーダンスが表示されている. 実験する場合には, その入出力インピーダンスを考慮に入れて測定する必要がある.

# 電源・測定装置・入力・出力インピーダンス

LED を光らせて見よう。電流制限抵抗を必ず入れる。

デジボルで抵抗値，容量を測定してみる。

デジボルで 100V 電圧を測定してみる。

オシロスコープで 100V 電源を見してみる。

ファンクションジェネレーターからの出力を直接オシロスコープに入れて表示させてみる。

ファンクションジェネレーターからの出力に  $50\Omega$  抵抗を直列に挟み，オシロスコープに入れて表示させてみる。その際，オシロスコープの入力インピーダンスを切替えてみる。

デジタルオシロスコープで波形を止めてみる。