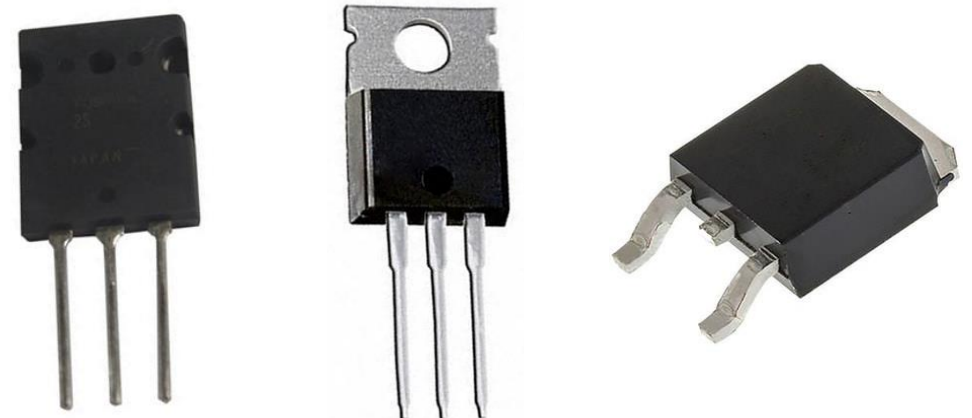


FET,マルチバイブレータ,オペアンプ 第11,12回

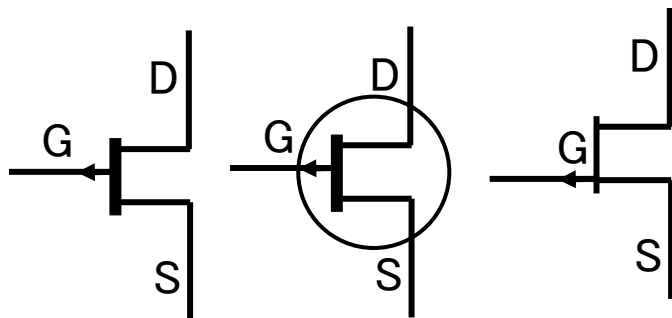
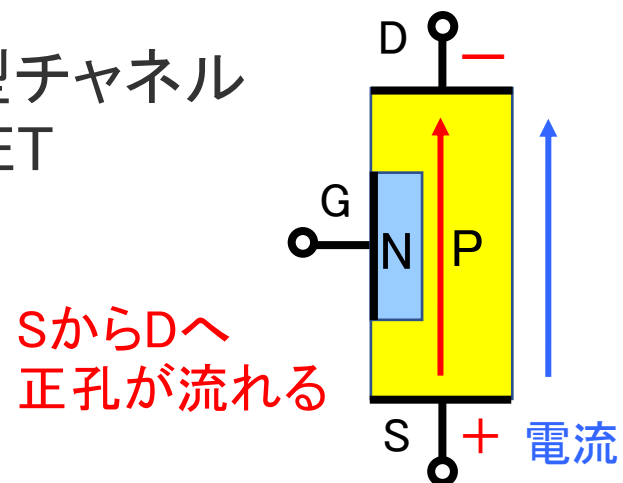
FET

- 電界効果トランジスタ(Field effect transistor, FET)もトランジスタだが、バイポーラトランジスタと異なり、電子か正孔の何れかをキャリアとして使用(バイポーラトランジスタは両方を使用)
- FETはゲートへの電圧駆動で動作する(バイポーラトランジスタはベースに対する電流駆動)
- 主に、JFET(Junction-gate FET, 接合型FET)とMOSFET(Metal-oxide-semiconductor FET)の2タイプ
- バイポーラトランジスタ同様に、P型とN型がある
- FETの型番は、JFET, MOSFETを問わず、P型は2SJ, N型は2SKで始まる(最近はメーカー独自の型番を付与するケースも多い)

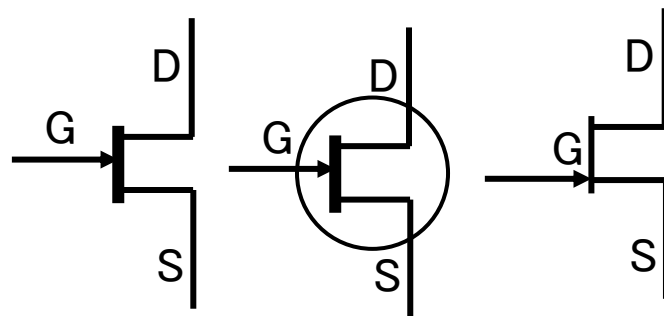
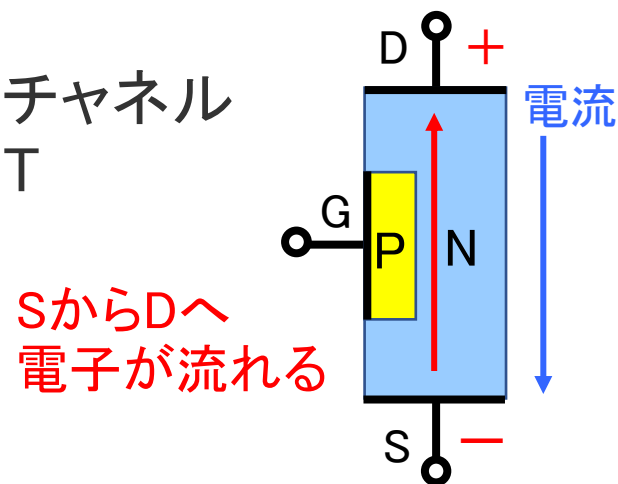


JFET

P型チャネル JFET



N型チャネル JFET



模式図

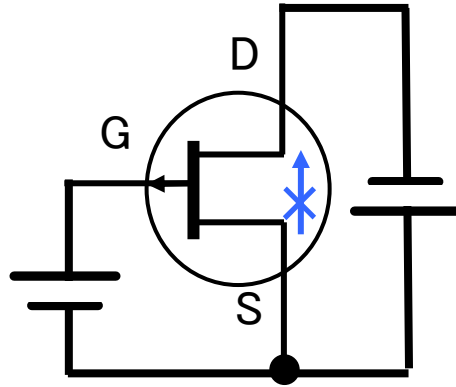
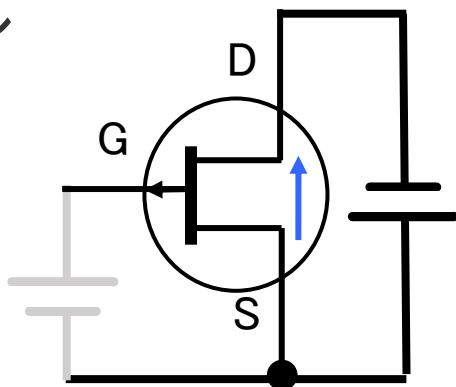
記号

D:ドレイン, G:ゲート, S:ソース

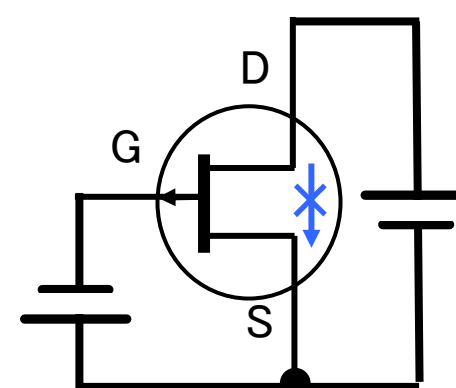
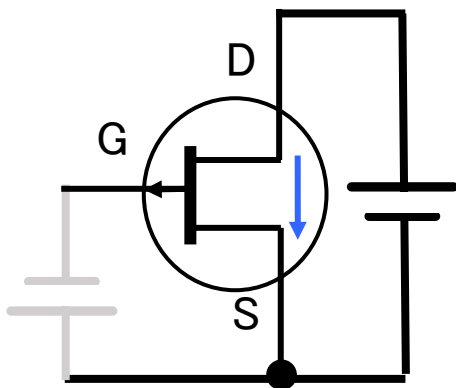
- 正孔, 電子を流す向きにより, ソースとドレインとしている
- P型チャネルは, 高電位側がソース, 低電位側がドレイン
- N型チャネルは, 高電位側がドレイン, 低電位側がソース

JFET

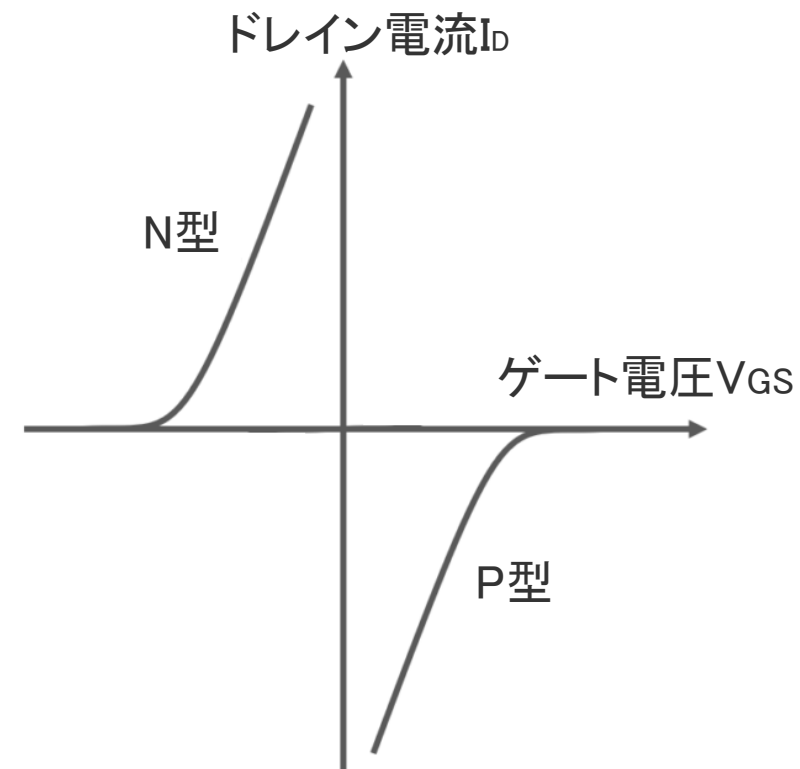
P型チャネル
JFET



N型チャネル
JFET

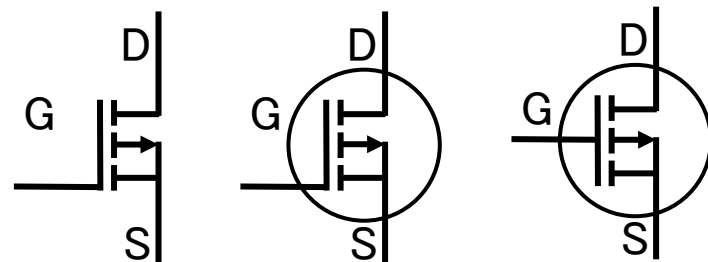
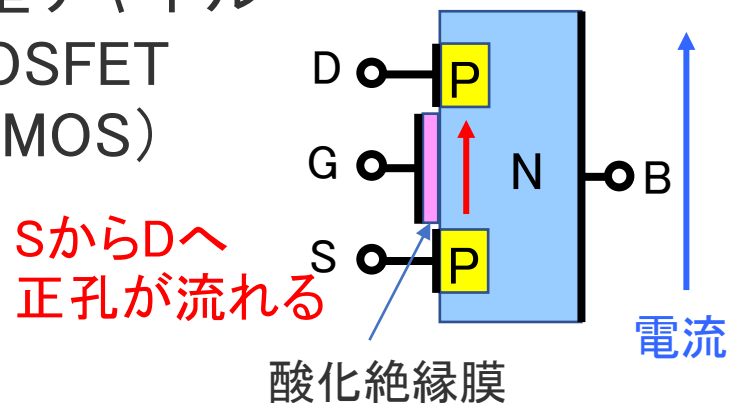


- ゲート電圧 (G-S間) を加えなくても電流が流れ (ノーマリーオン), 逆電圧を加えると電流が流れにくくなり, 大きくなると止まる (ディプレッション型)

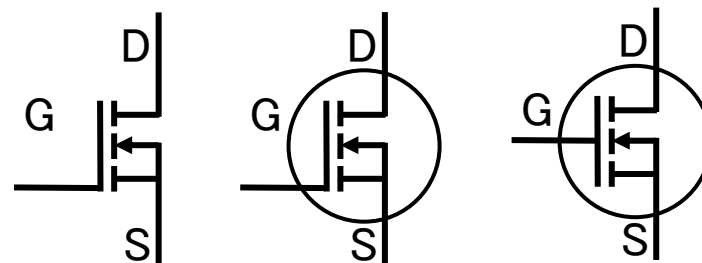
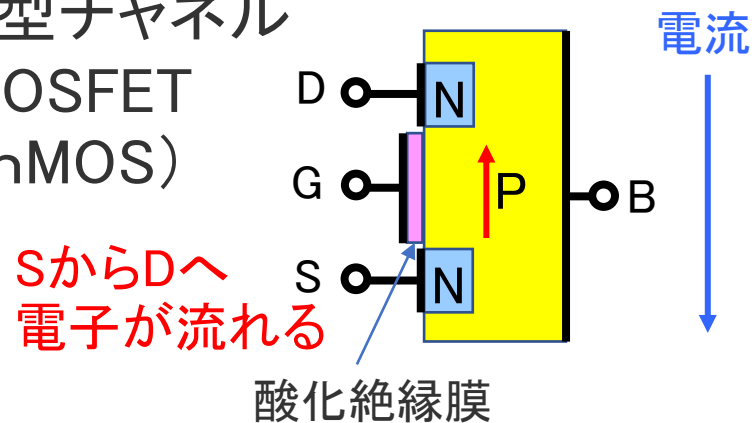


MOSFET

P型チャネル MOSFET (pMOS)



N型チャネル MOSFET (nMOS)



模式図

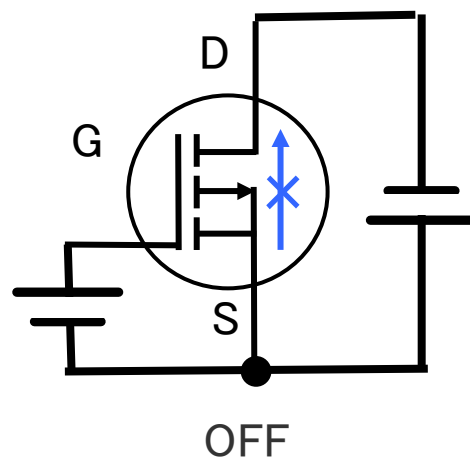
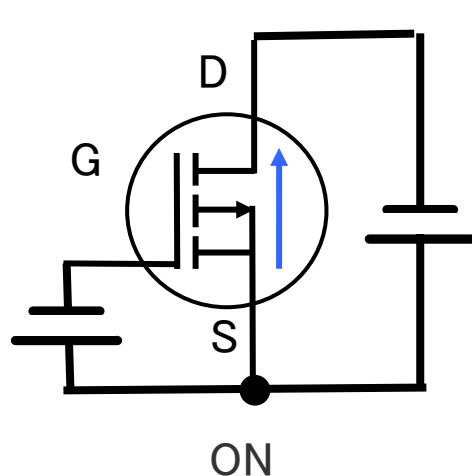
記号

D:ドレイン, G:ゲート, S:ソース, B:ボディ

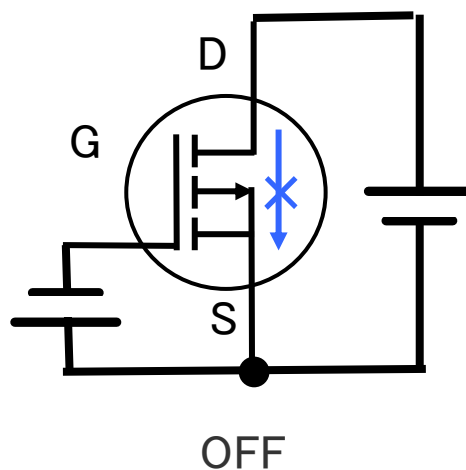
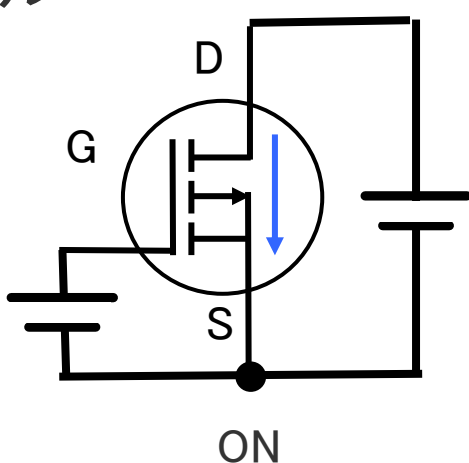
- 内部構造上は4端子構成だが、ボディとソースが内部接続されて供給されるので、一般的に供給されているものは3端子
- P型チャネルは、高電位側がソース、低電位側がドレイン
- N型チャネルは、高電位側がドレイン、低電位側がソース

MOSFET

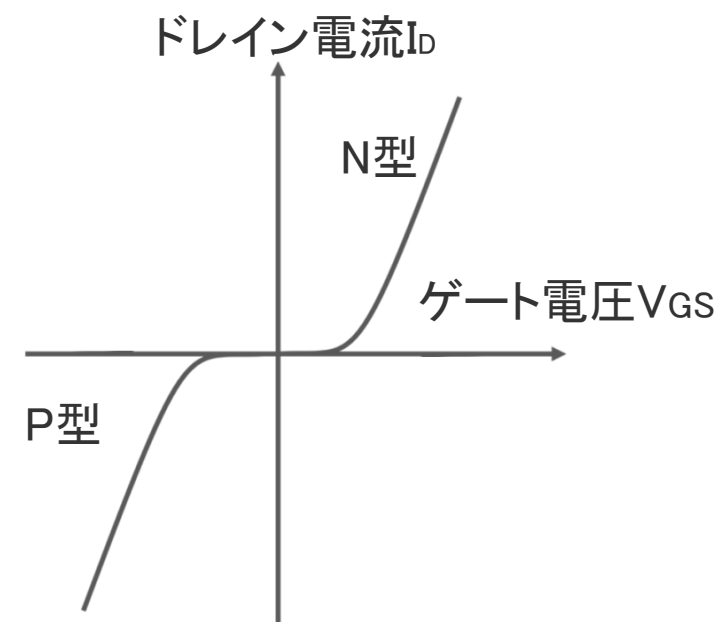
P型チャネル MOSFET (pMOS)



N型チャネル MOSFET (nMOS)

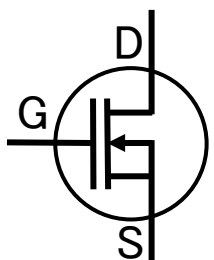
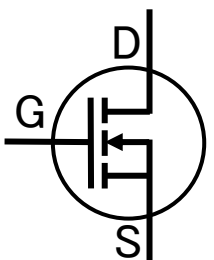
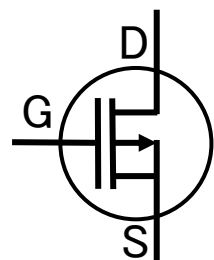
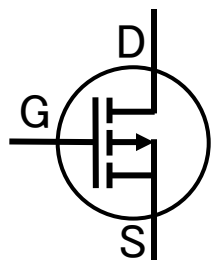


- ゲート電圧 (G-S間) を加えないと、電流が流れない (ノーマリーオフ, エンハンスメント型)



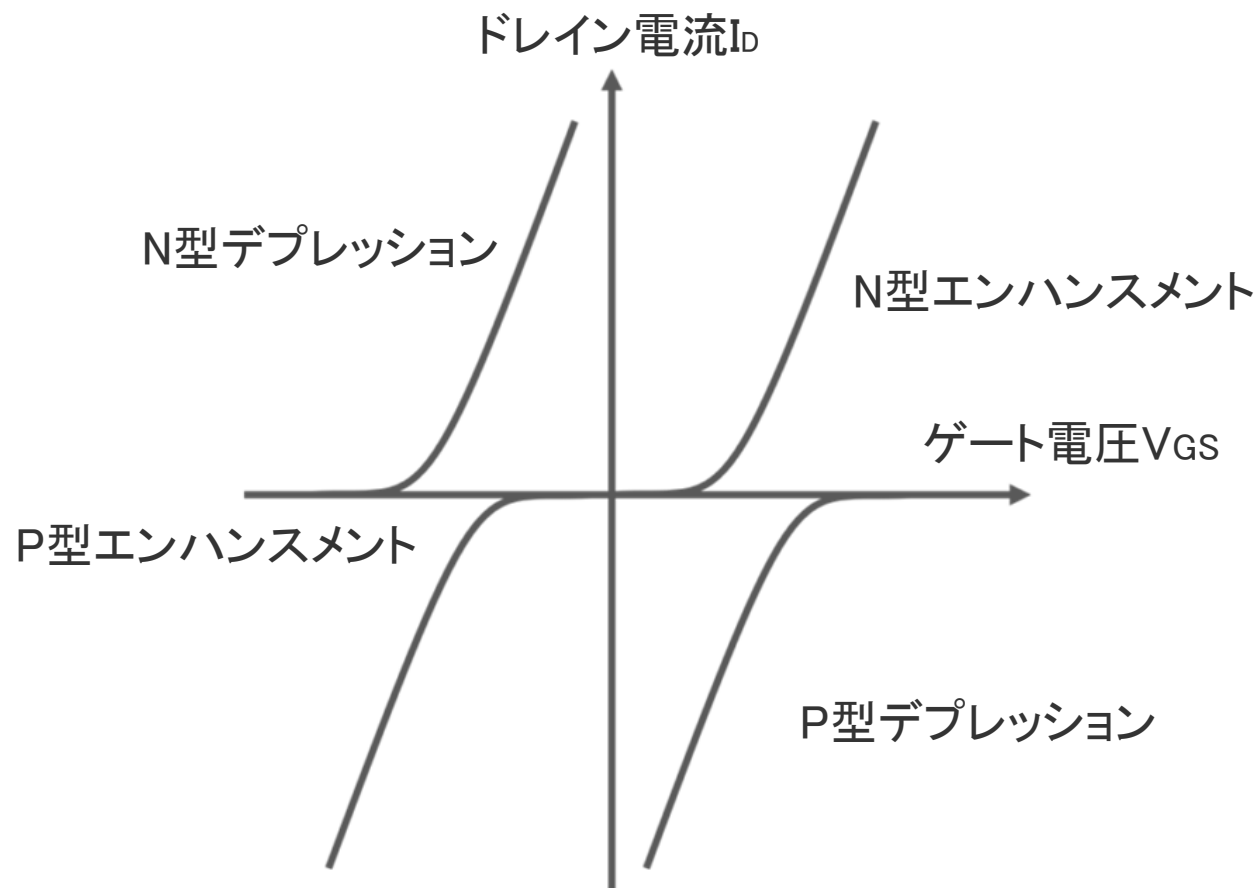
MOSFET

- MOSFETの多くは、エンハンスメント型であるが、デプレッション型もある
- エンハンスメント型は、ノーマリーオフなので、縦棒を区切って表現
- デプレッション型は、ノーマリーオンなので、縦棒を区切らず表現



エンハンスメント型
普通はこれ

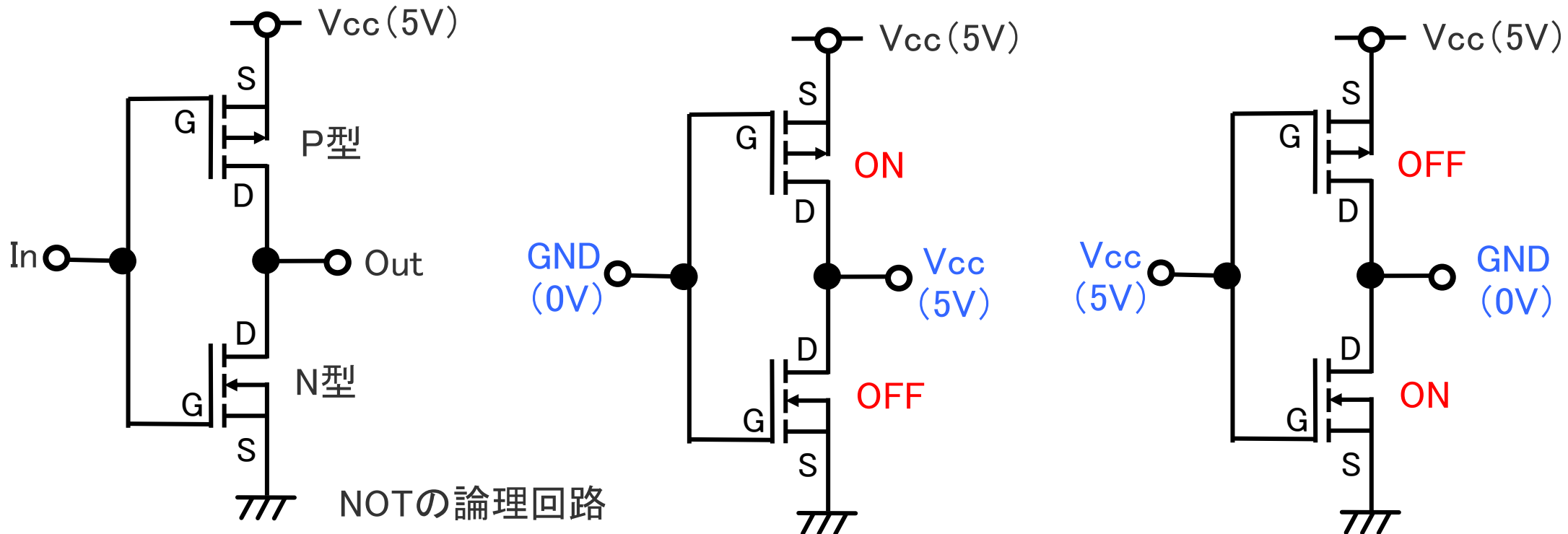
デプレッション型



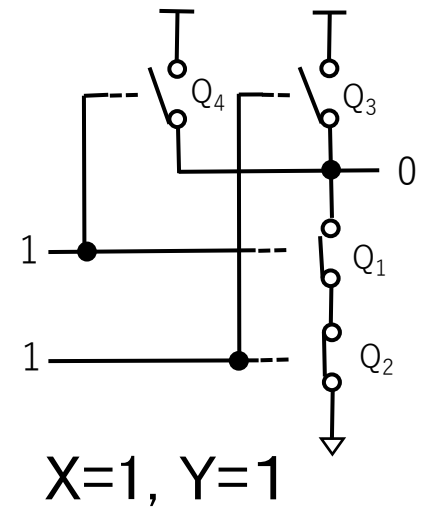
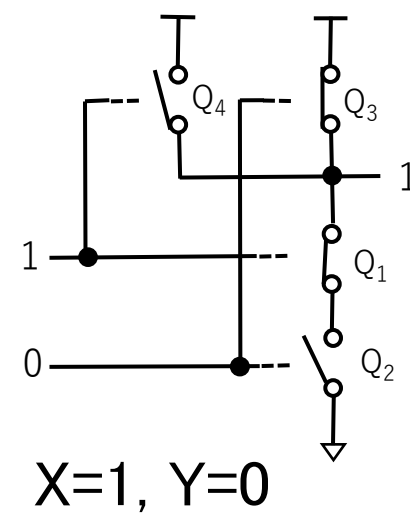
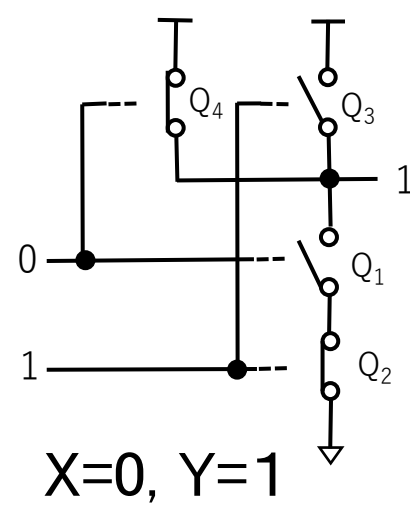
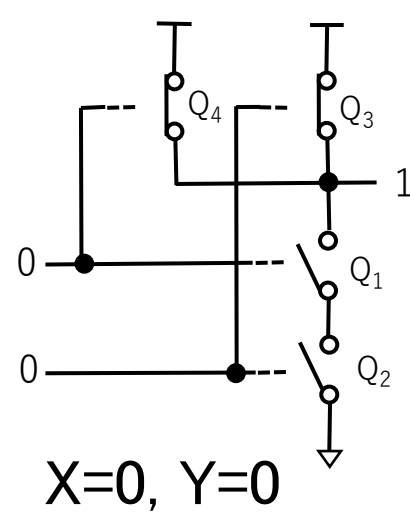
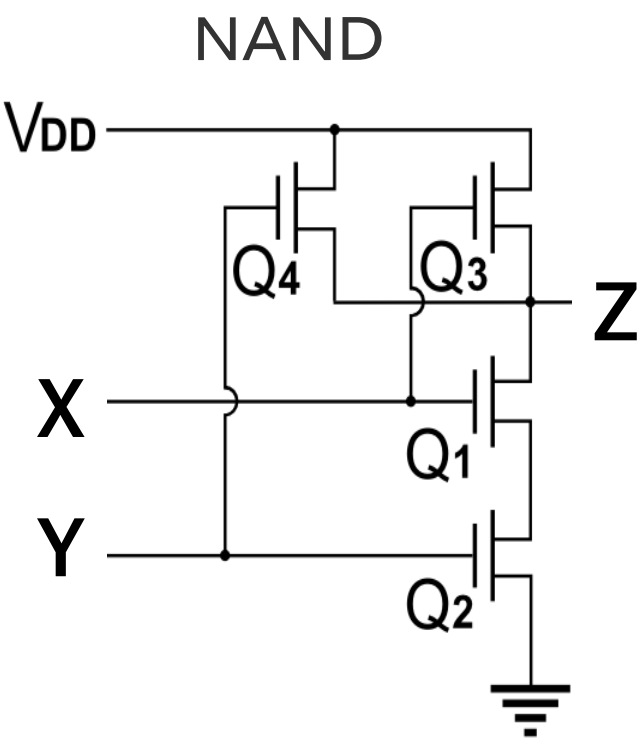
CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)

1112a

- P型とN型のMOSFETを相補的に利用する回路方式
- デジタル回路では一般的
- 低消費電力であることが特徴
- スイッチング時には大きな電流が流れるが、それ以外はほとんど電流が流れない
- CMOS素子は静電気で破壊されることがあるので取扱注意



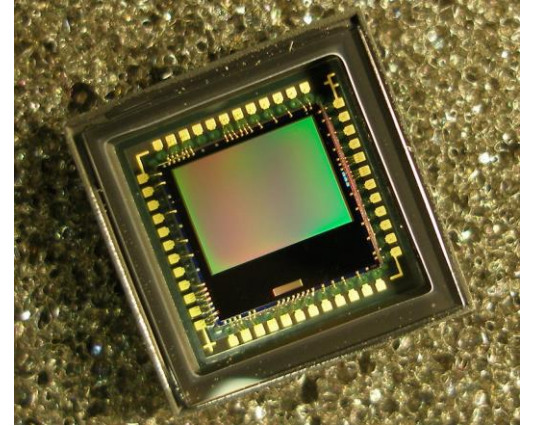
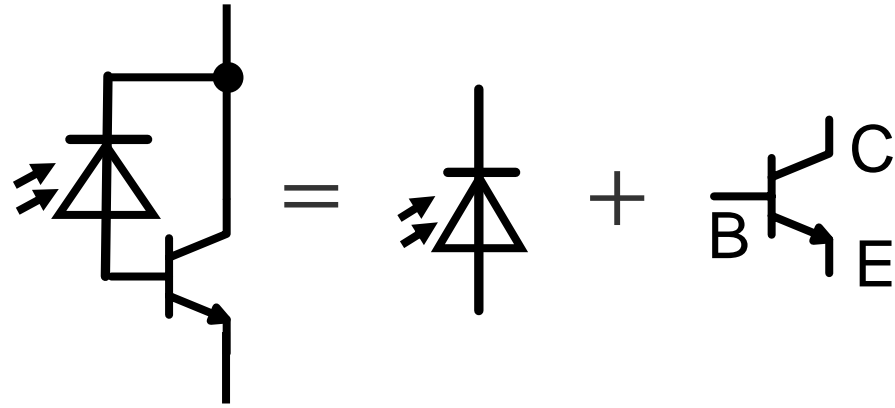
CMOSによるデジタル回路



| 入力 | | NMOS | | PMOS | | 出力 |
|----|---|-------|-------|-------|-------|----|
| X | Y | Q_1 | Q_2 | Q_3 | Q_4 | Z |
| 0 | 0 | OFF | OFF | ON | ON | 1 |
| 0 | 1 | OFF | ON | OFF | ON | 1 |
| 1 | 0 | ON | OFF | ON | OFF | 1 |
| 1 | 1 | ON | ON | OFF | OFF | 0 |

フォトトランジスタ

- フォトダイオードとトランジスタを組み合わせた構成で、フォトダイオードで受光して、トランジスタで増幅する



- イメージセンサとして主流のCMOSセンサは、構造は若干異なるが、多数のフォトトランジスタを平面的に配置して構成されている
- もう一つのイメージセンサとして、CCD (Charge coupled device) がある
- CMOSセンサは各画素ごとに増幅器が付属しているが、CCDセンサは全画素に対して1つの増幅器を用いる

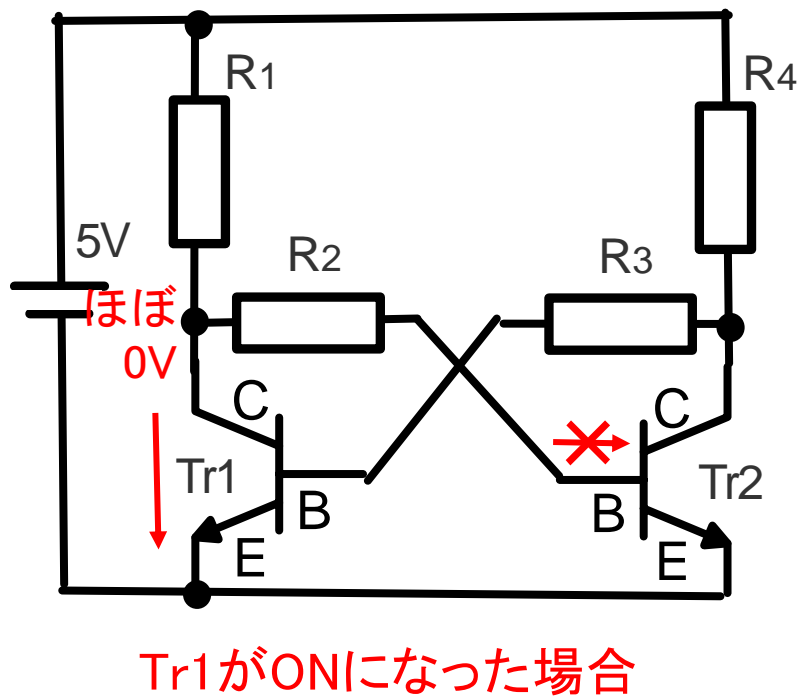
マルチバイブレータ

- 2つの状態を実装するのに使われる電子回路
- マルチバイブレータには、以下の3種
 - 非安定マルチバイブレータ(無安定マルチバイブレータ)
 - ・ 安定しない回路であり、2状態を常に行ったり来たりする
 - ・ 発振回路などに使用される
 - 単安定マルチバイブレータ(ワンショットマルチバイブレータ)
 - ・ 一方の状態は安定しているが、もう一方は安定しない
 - ・ 安定しない状態になっても、時間経過すると安定状態に戻る.
 - ・ 一定時間経過後にトリガーを発するようなタイマーなどに使用される
 - 双安定マルチバイブレータ
 - ・ どちらの状態も安定している
 - ・ 外部のトリガーによって、一方の状態に切り替わる
 - ・ フリップフロップ、レジスタなどの記録装置に使用される

双安定マルチバイブレータ

1112b

- Tr1, Tr2の一方がONで, もう一方がOFFになる
- どちらがONになるかは不定であるが, いったん決まると変化しない

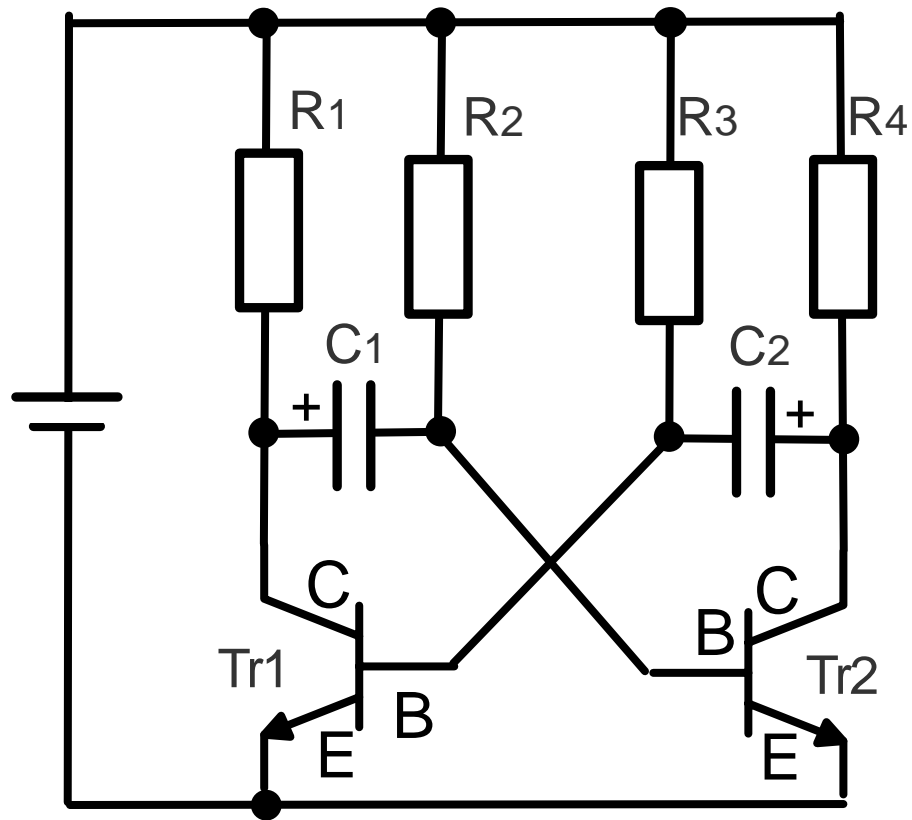


- 電源投入した際に, たまたまTr1が先にONになったとする
 - ① Tr1は導通状態になるので, コレクタ電位は, ほぼ0Vになる
 - ② Tr2のベースには電流が流れ込まないので, Tr2はOFFになる
 - ③ この状態が維持される
- 電源投入した際に, たまたまTr2が先にONになったとすると, 上記と逆になり, Tr1はOFFのままで維持される

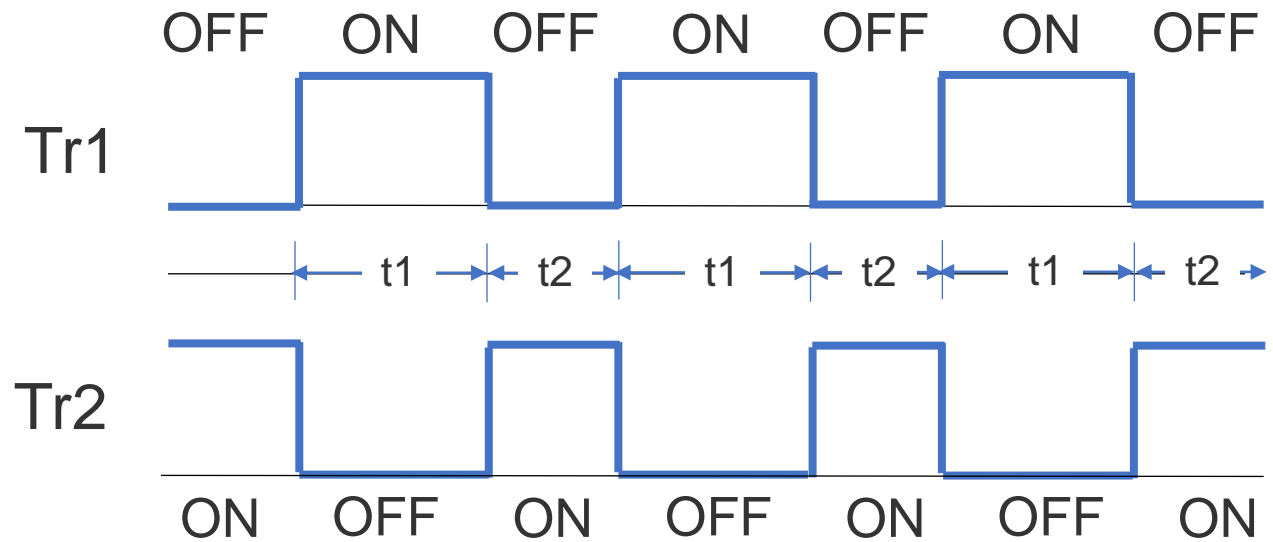
非安定マルチバイブレータ

1112c

- Tr1, Tr2が交互にON/OFFを繰り返す



$$R1, R4 < R2, R3$$



$$T = t_1 + t_2 = \ln(2) R_2 C_1 + \ln(2) R_3 C_2$$

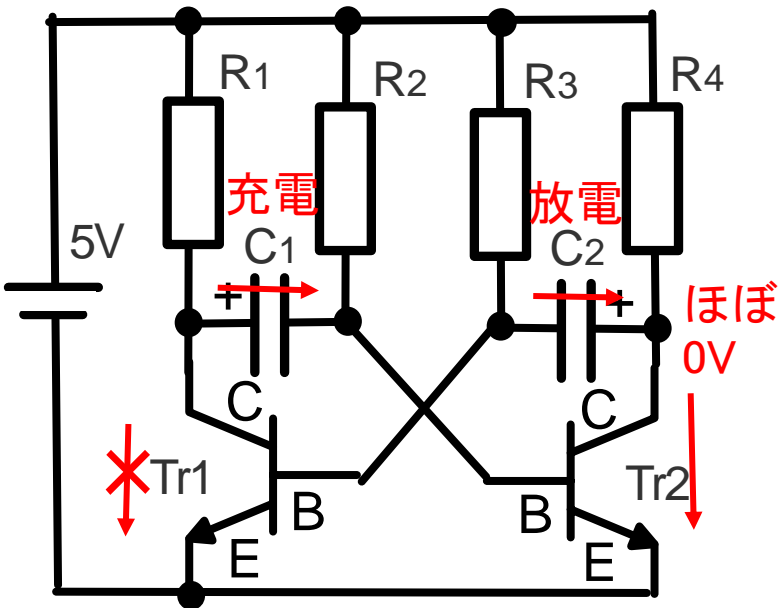
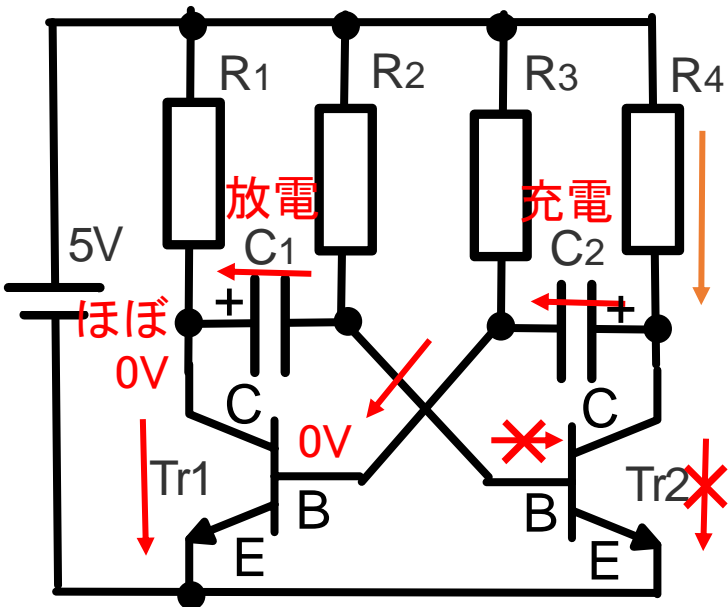
$$f = 1 / T \quad (\ln \text{ は自然対数で, } \ln(2) = 0.69315)$$

$C_1 = C_2 (= C)$, $R_2 = R_3 (= R)$ の時は

$$T = \ln(2) 2RC = 1.3863 RC$$

$$f = 1 / T = 0.7213 / RC$$

非安定マルチバイブレータの動作原理



今, Tr1がON状態で, Tr2がOFF状態と仮定する

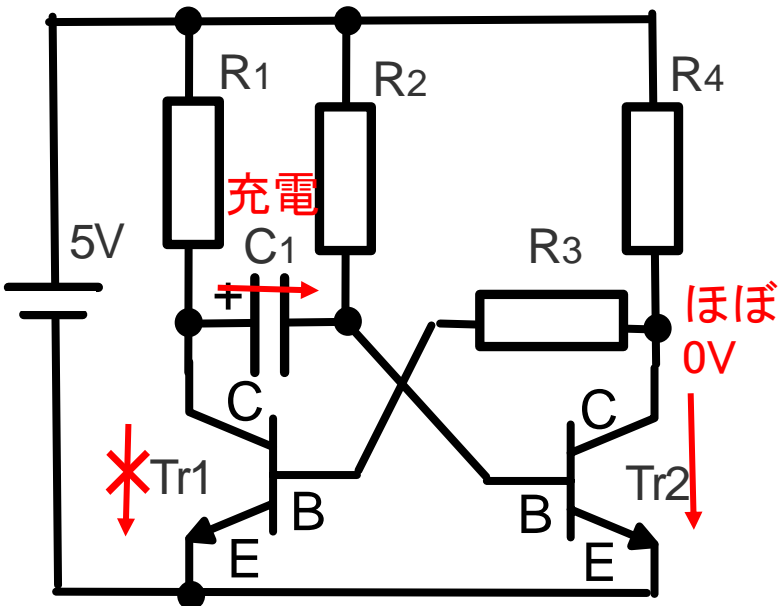
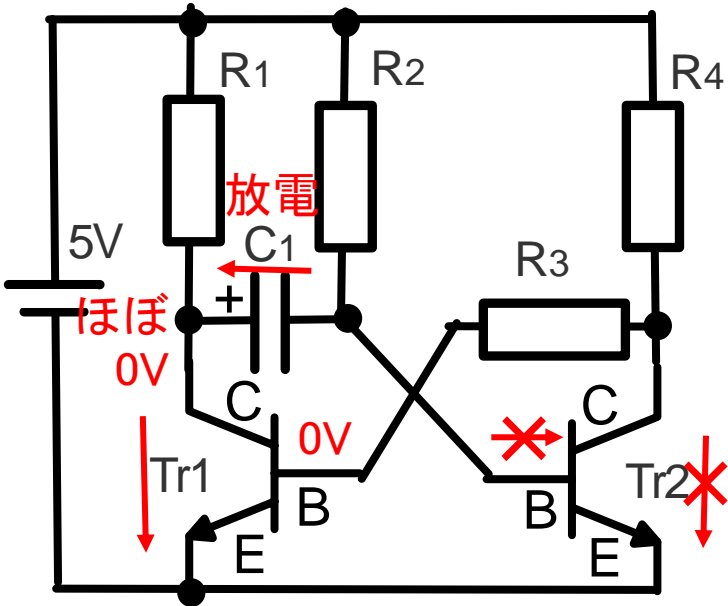
- ① Tr1は導通状態になるので, Tr1のコレクタ電位は, ほぼ0Vになる
- ② C1が放電状態なので, Tr2のベースには電流が流れ込まないので, Tr2はOFFになる
- ③ Tr2がOFFなので, Tr2には電流は流れず, C2に充電される
- ④ C1の放電が終わると, R2を通過してTr2のベースに電流が流れ込み, Tr2がONとなる($R4 < R2$ なので, C1の放電の方がC2の充電より先に終わる)

- ⑤ Tr2が導通状態になるので, Tr2のコレクタ電位は, ほぼ0Vになる
- ⑥ C2が放電状態になり, Tr1のベースには電流が流れ込まないので, Tr1はOFFになる
- ⑦ Tr1がOFFなので, Tr1には電流は流れず, C1の充電が進む
- ⑧ C2の放電が終わると, R3を通過してTr1のベースに電流が流れ込み, Tr1がONとなる($R1 < R3$ なので, C2の放電の方がC1の充電より先に終わる)

これが繰り返される

単安定マルチバイブレータ

1112d



- Tr1がONになっても、時間が経過するとOFFになり, Tr2がONになり, その状態が維持される

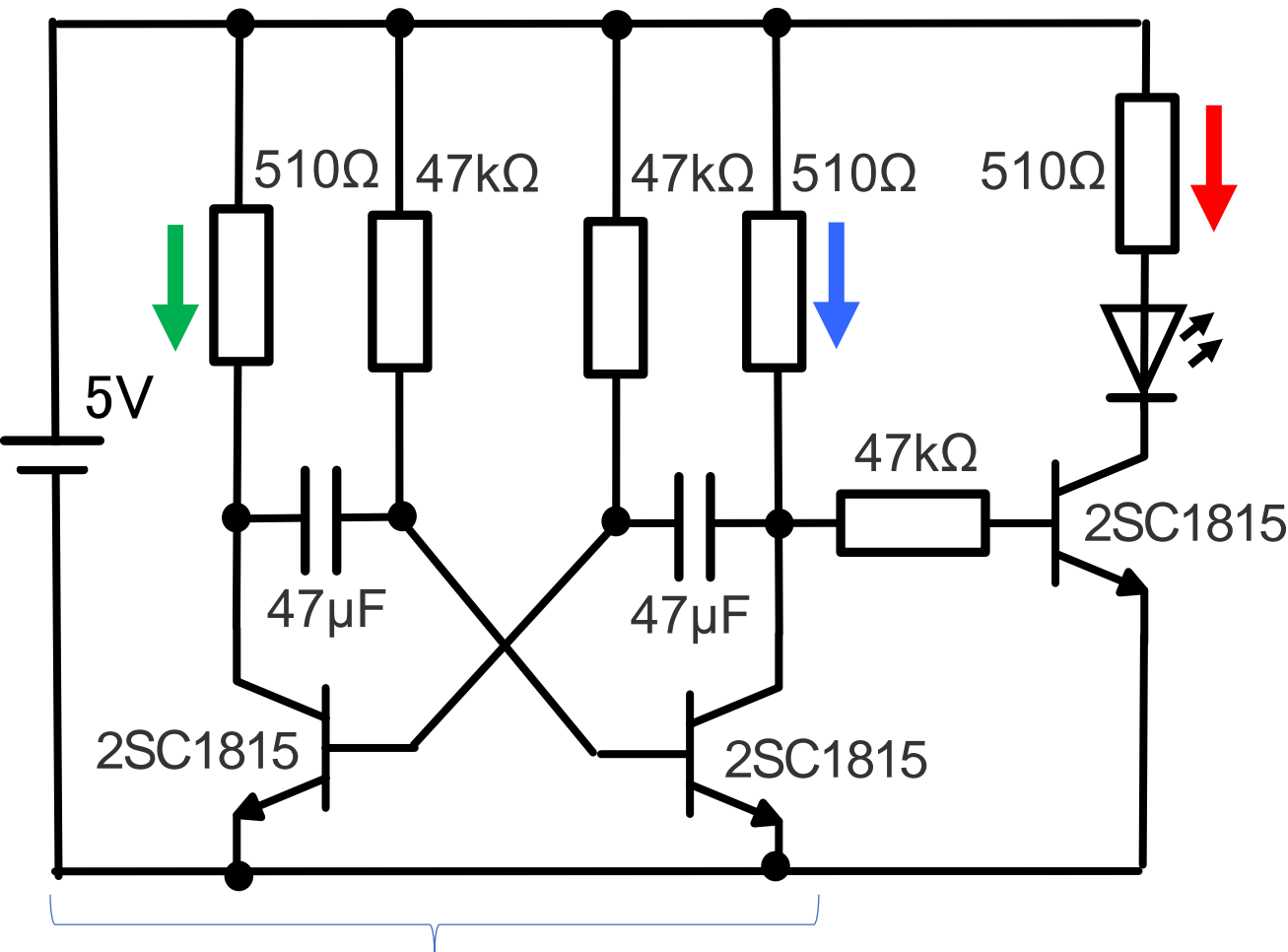
今, Tr1がON状態で, Tr2がOFF状態と仮定する

- ① Tr1は導通状態になるので, Tr1のコレクタ電位は, ほぼ0Vになる
- ② C1が放電状態なので, Tr2のベースには電流が流れ込まないので, Tr2はOFFになる
- ③ Tr2がOFFなので, Tr2には電流は流れない
- ④ C1の放電が終わると, R2を通過してTr2のベースに電流が流れ込み, Tr2がONとなる
- ⑤ Tr2が導通状態になるので, Tr2のコレクタ電位は, ほぼ0Vになる
- ⑥ Tr1のベースには電流が流れ込まないので, Tr1はOFFになる
- ⑦ この状態が維持される

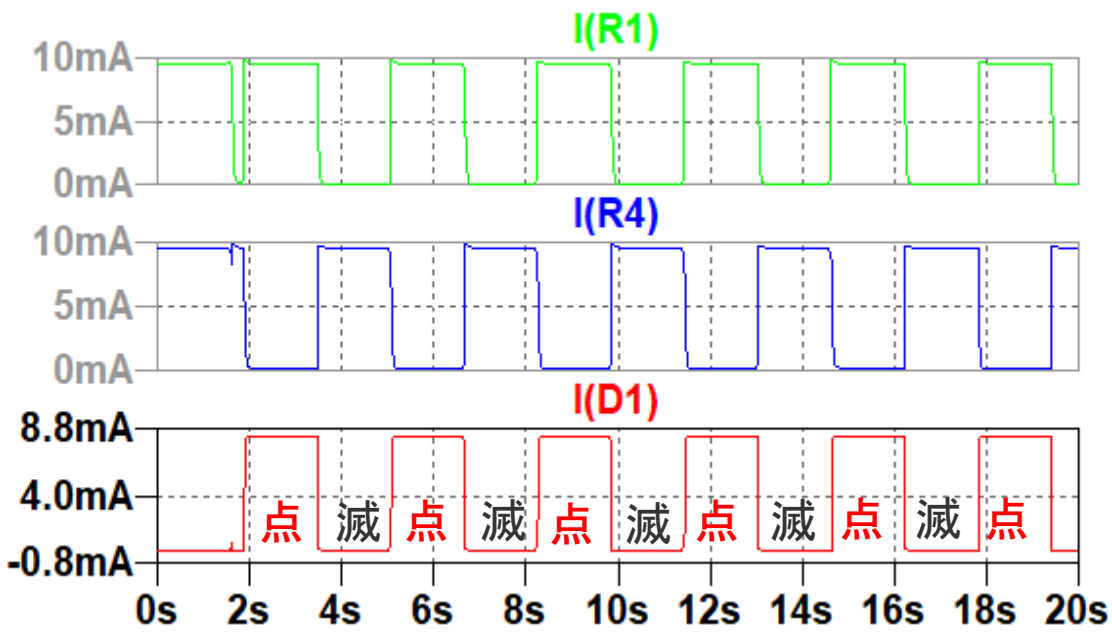
ホタル点滅回路

1112e

- 非安定マルチバイブレータを応用した回路

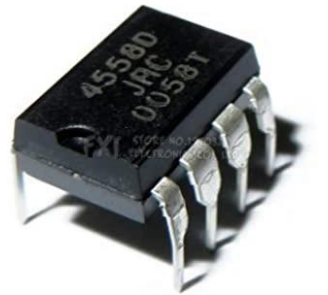
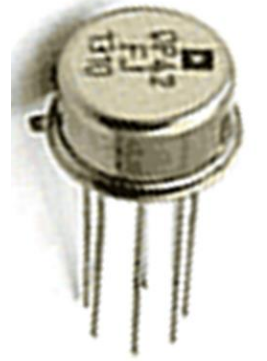
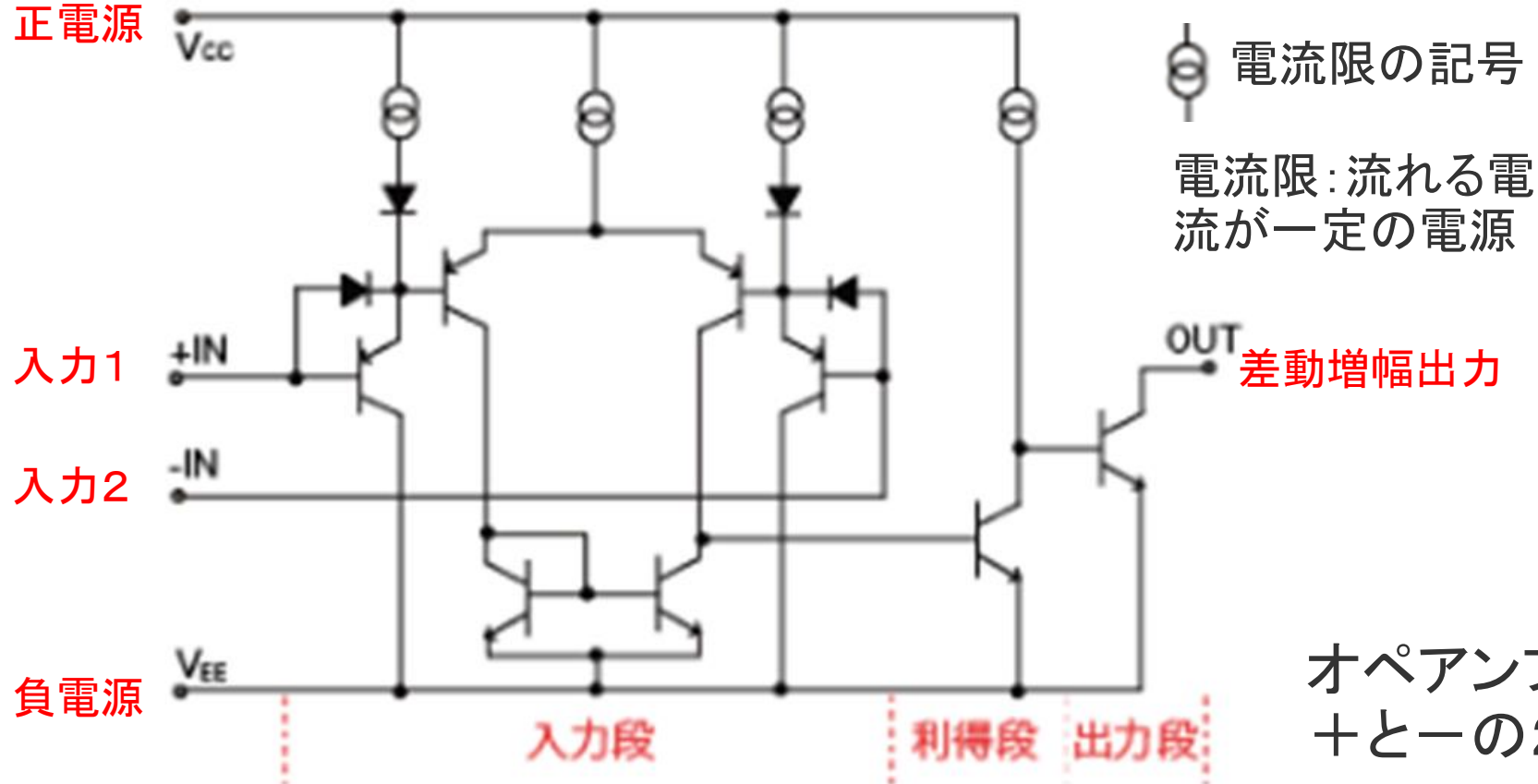


非安定マルチバイブレータ



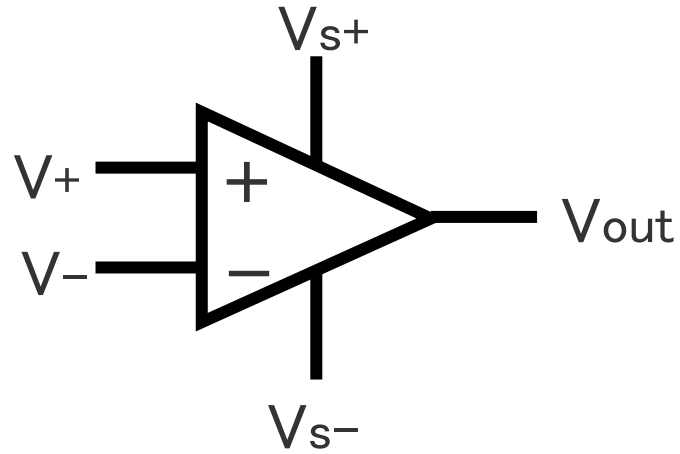
オペアンプ

- オペアンプ(OPアンプ)は, Operational Amplifier(Op amp, 演算増幅器)の日本における通称
- トランジスタの応用回路で, 2つの入力間の電位差によって動作する差動増幅回路



オペアンプの使用には,
+と-の2電源が必要

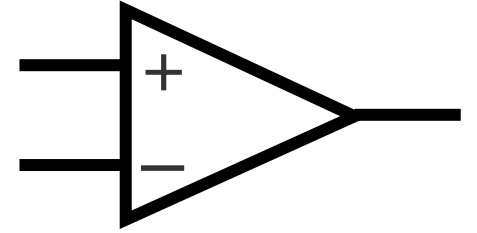
オペアンプ



オペアンプの出力電圧 V_{out} は

$$V_{out} = A (V_+ - V_-)$$

A は、開ループ増幅利得 (増幅率)



電源を省略した記号も使用される

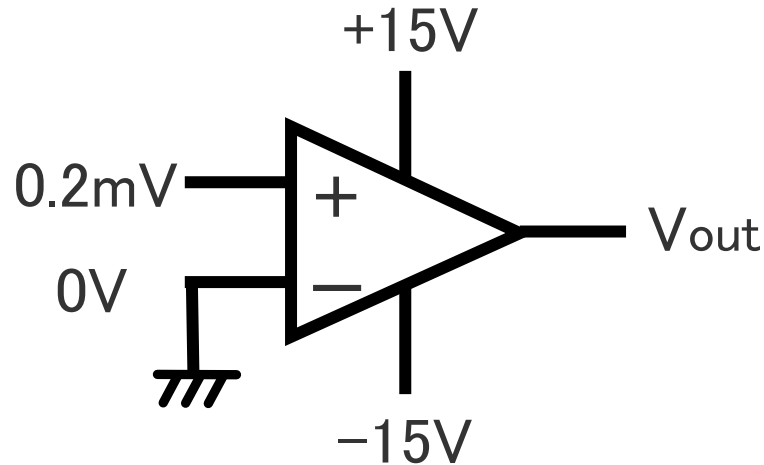
V_+ : 非反転入力

V_- : 反転入力

V_{out} : 出力

V_{S+} : 正電源

V_{S-} : 負電源



$A = 100,000$ とすると

$$V_{out} = 100000 (0.0002 - 0) = 20\text{V}$$

でも、 V_{out} は 20V にはならない

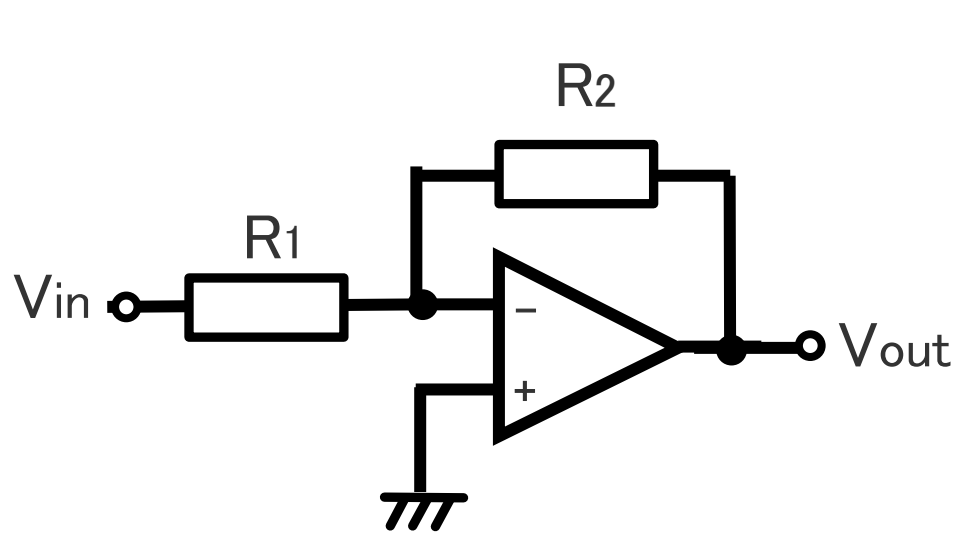
電源電圧を超えて出力できない

実際は、このような使い方はしない

オペアンプの特徴

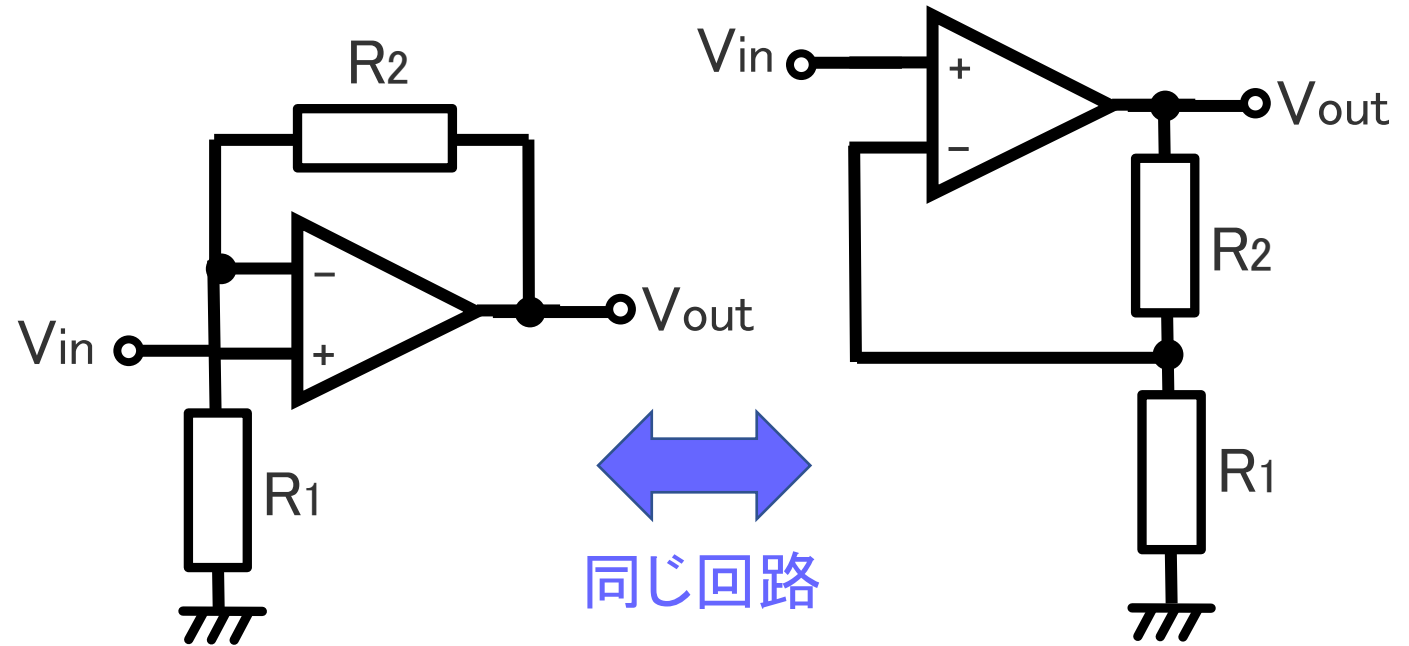
- 入力インピーダンスが大きい \Rightarrow オペアンプに電流が流れ込まない
- 出力インピーダンスが小さい \Rightarrow 電圧降下が起きにくく、計算通りの電圧が得られる
- 開ループゲインが高い \Rightarrow 増幅度が高く、計算通りの電圧が得られる
- 入力端子間の電位差がほとんどない \Rightarrow 見かけ上短絡, これを**仮想短絡**(**イマジナリショート, バーチャルショート**)と呼ぶ
- 周波数特性が良い \Rightarrow 直流や低周波でも増幅できる
- 安定していて扱いやすい

オペアンプの使い方



反転増幅回路

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

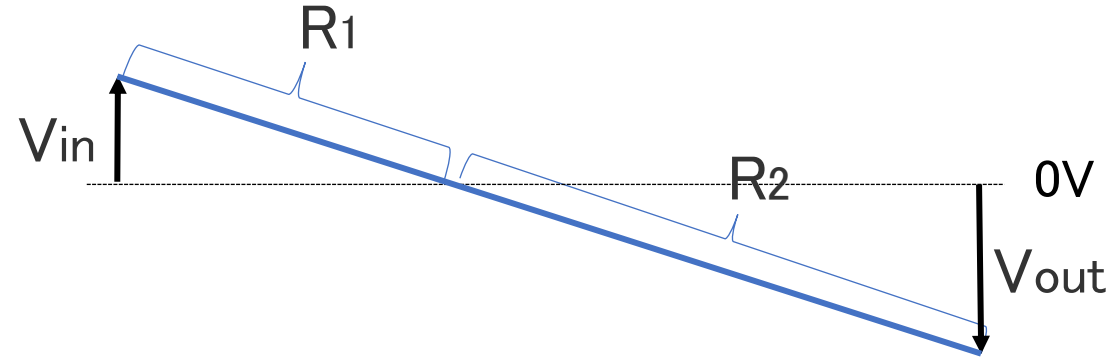
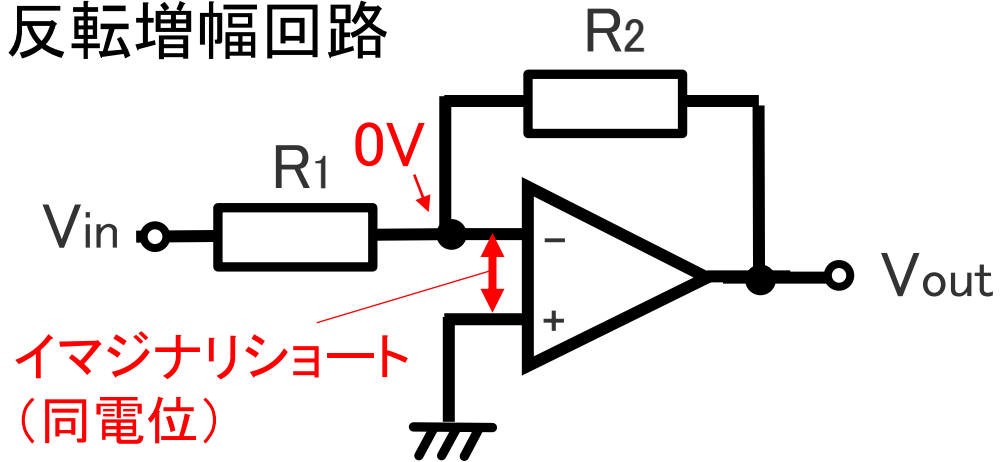


非反転増幅回路

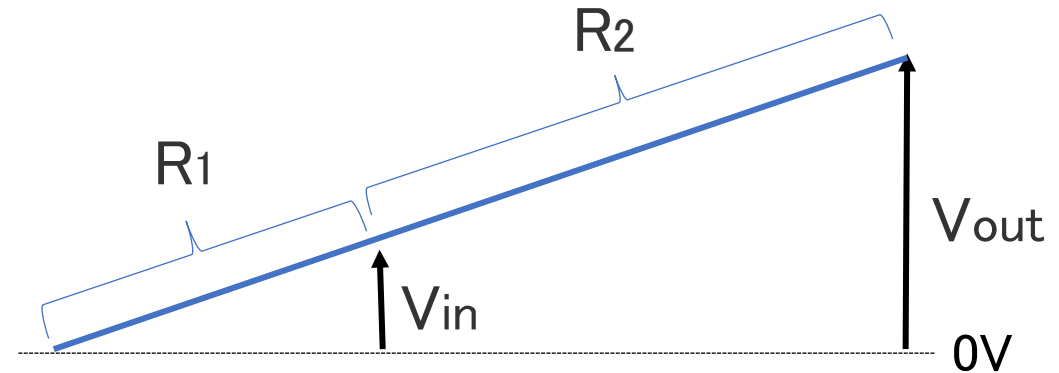
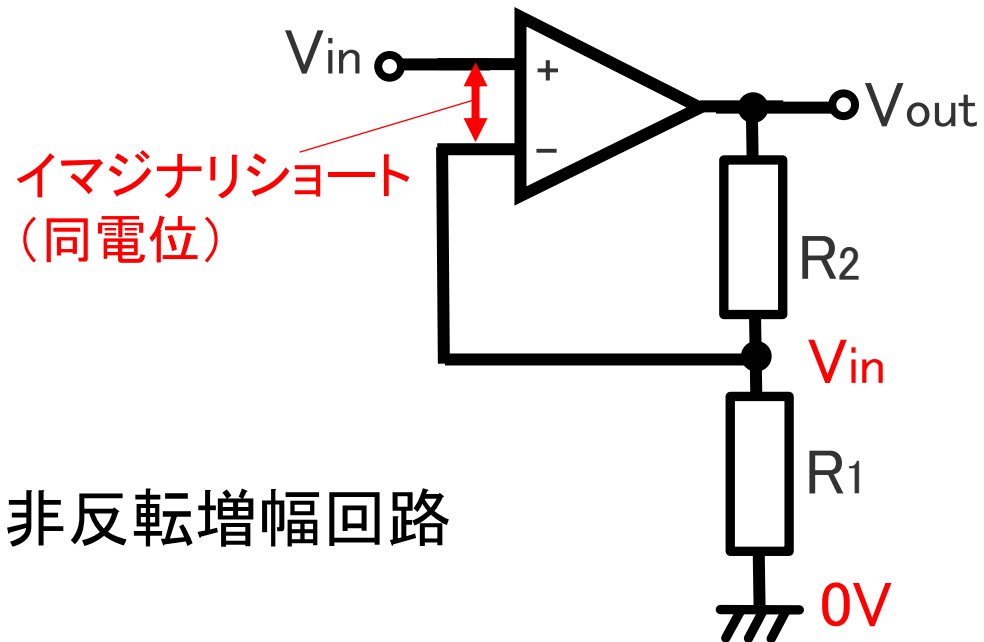
$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}$$

オペアンプの使い方

反転増幅回路



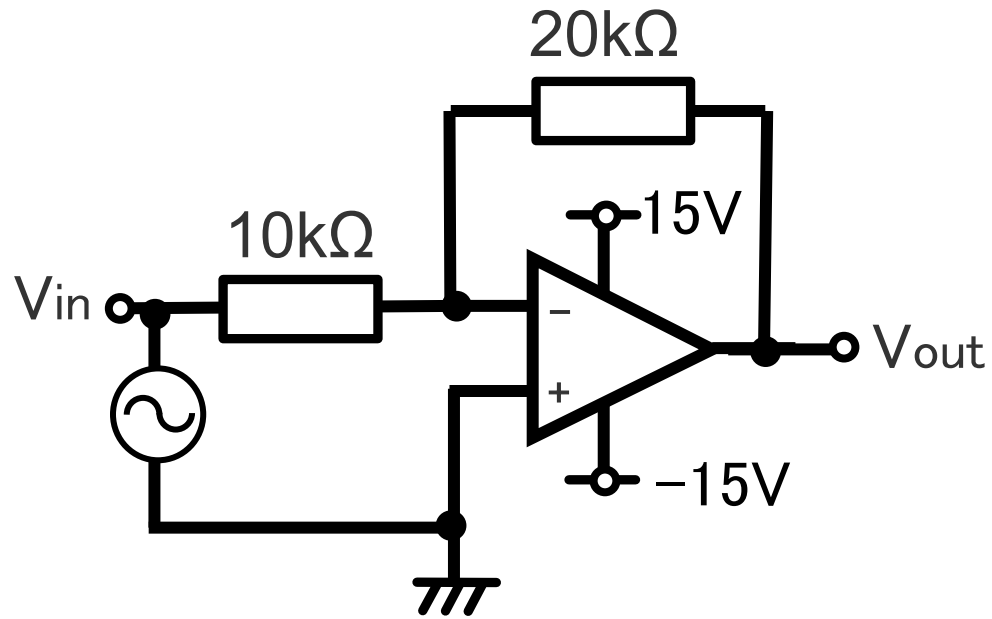
$$V_{in} : V_{out} = R_1 : R_2 \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$



$$V_{in} : V_{out} = R_1 : (R_1 + R_2) \Rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}$$

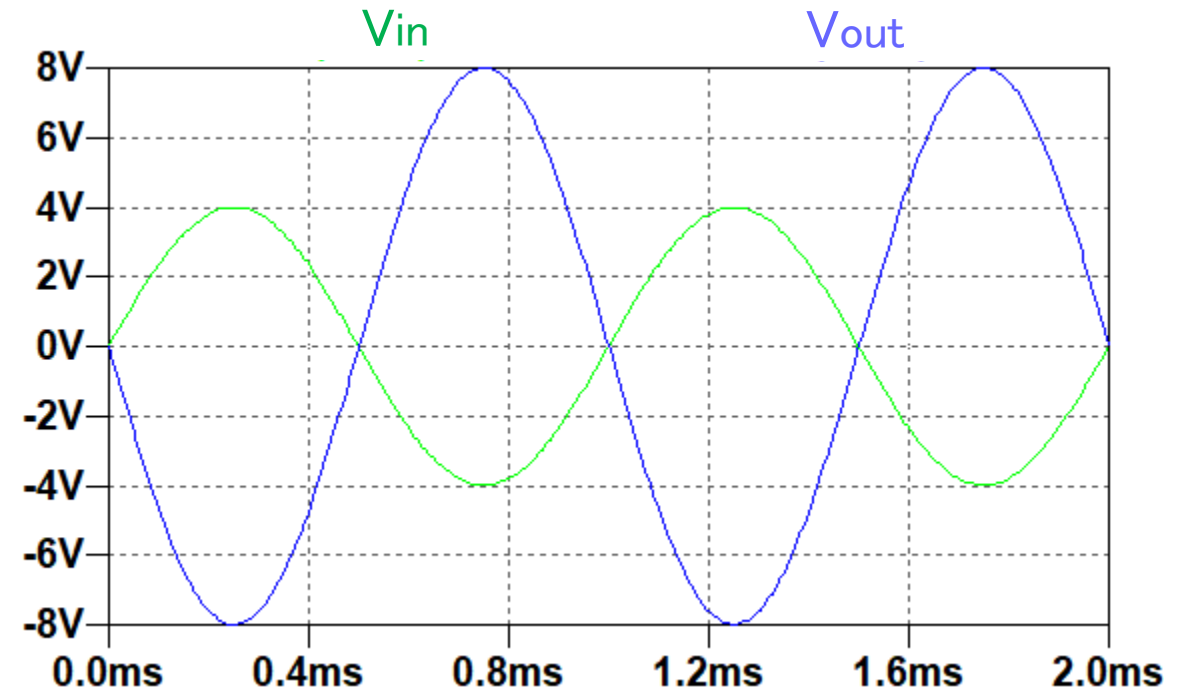
オペアンプ回路例1

1112f



反転増幅回路

$$V_{out} = -\frac{20k}{10k} V_{in} = -2V_{in}$$

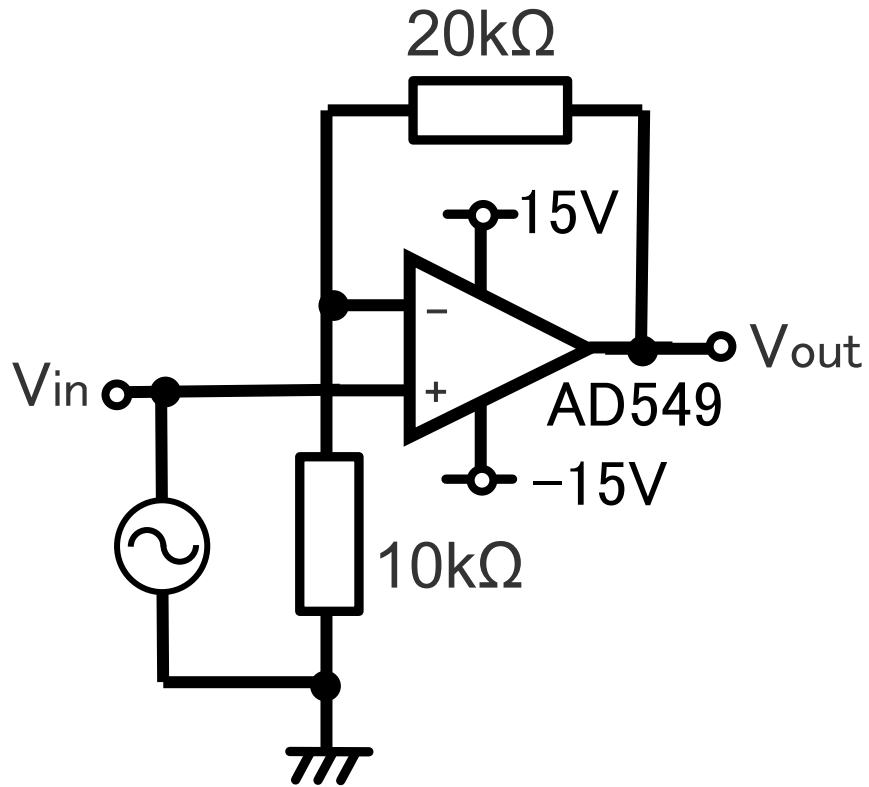


1112b

設計通り2倍の反転増幅

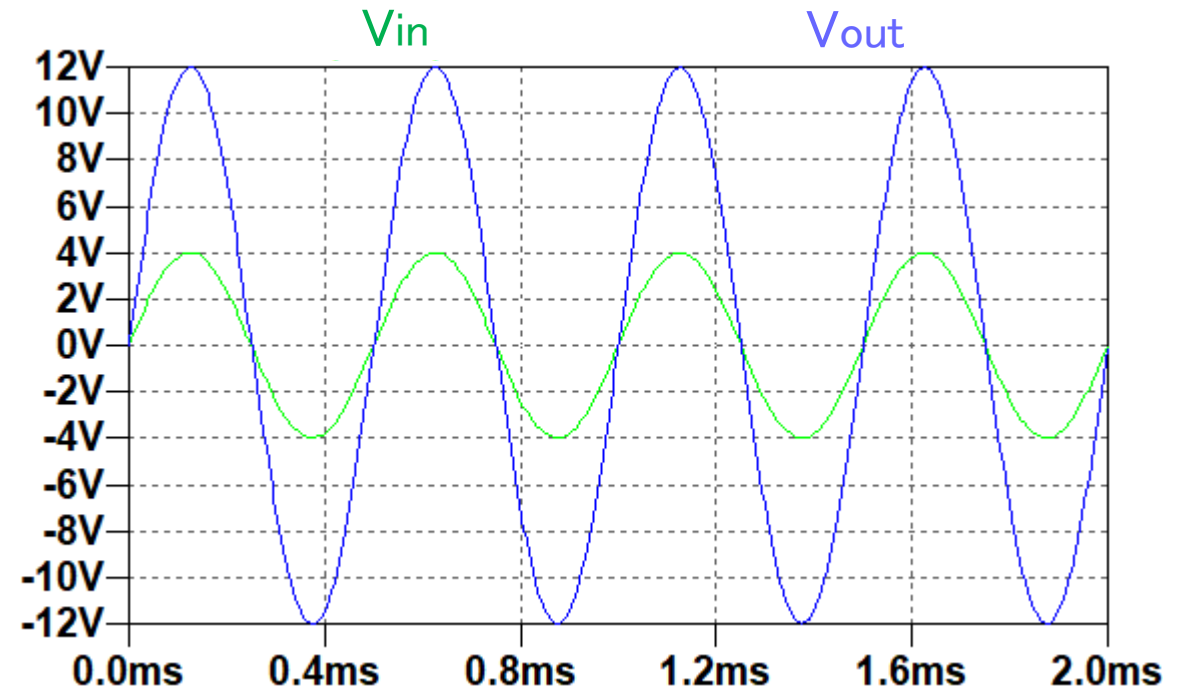
オペアンプ回路例2

1112g



非反転増幅回路


$$V_{out} = \left(1 + \frac{20k}{10k}\right) V_{in} = 3V_{in}$$

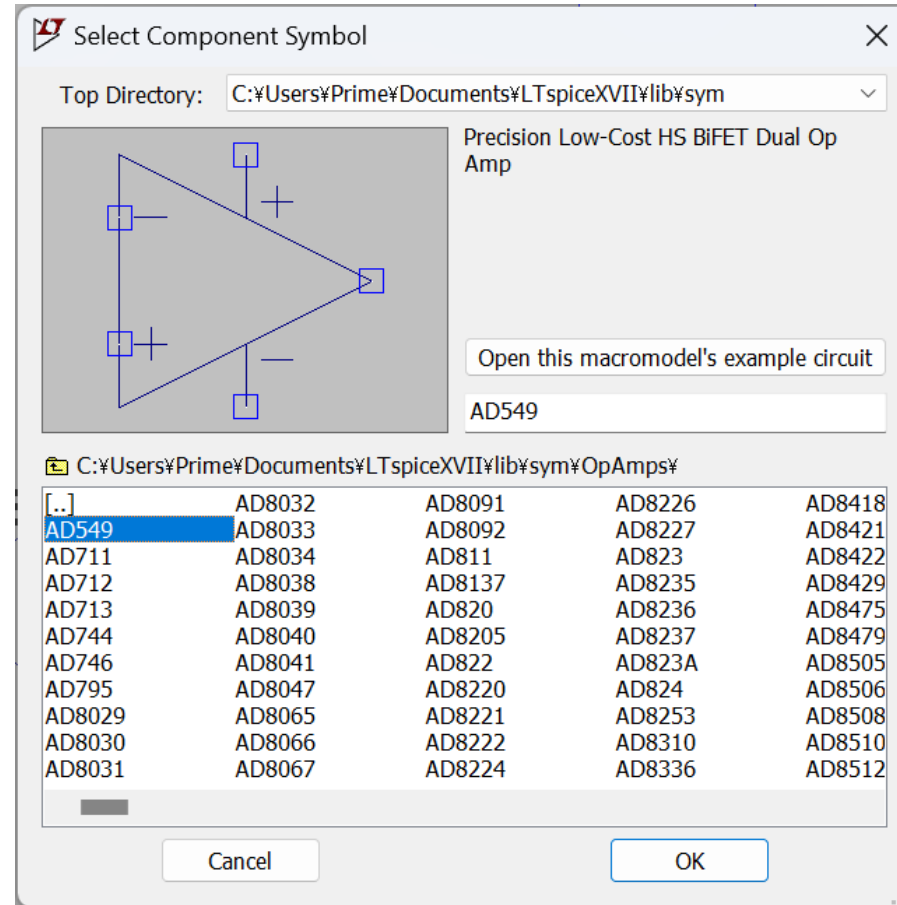
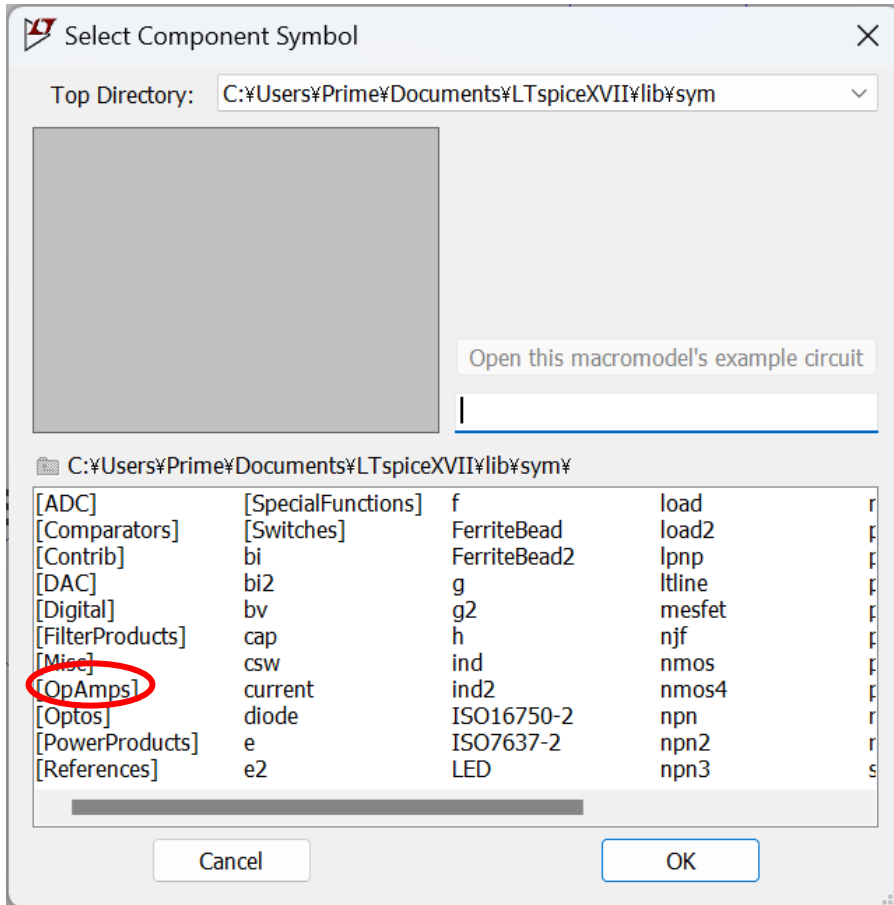


1112c

設計通り3倍の非反転増幅

LTspiceにおけるオペアンプの選択法

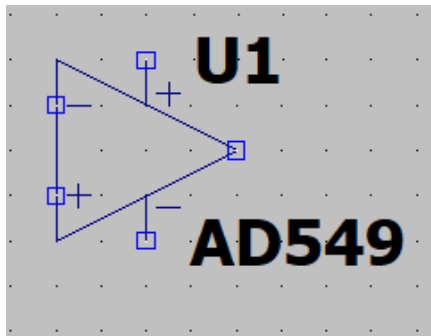
- ツールバーの  を左クリック(あるいは,「Edit」メニューの「Component」を選択)し, 表示されたダイアログ中のリストから, [OpAmps] を左クリック
- 表示されたダイアログで, 所望のオペアンプの型番を選択して「OK」を左クリック



AD549を選択した例

LTspiceにおけるオペアンプの選択法

- 図面上に、選択したオペアンプが表示されるので、カーソルを良い位置に移動させ、左クリックして置く
- 素子の配置を終了したい場合は、「ESCキー」を押す（あるいは、右クリックする）



AD549を選択した例