電気電子回路
第7回：オペアンプ（１）
operational amplifier (op-amp)(1)

今週の目標

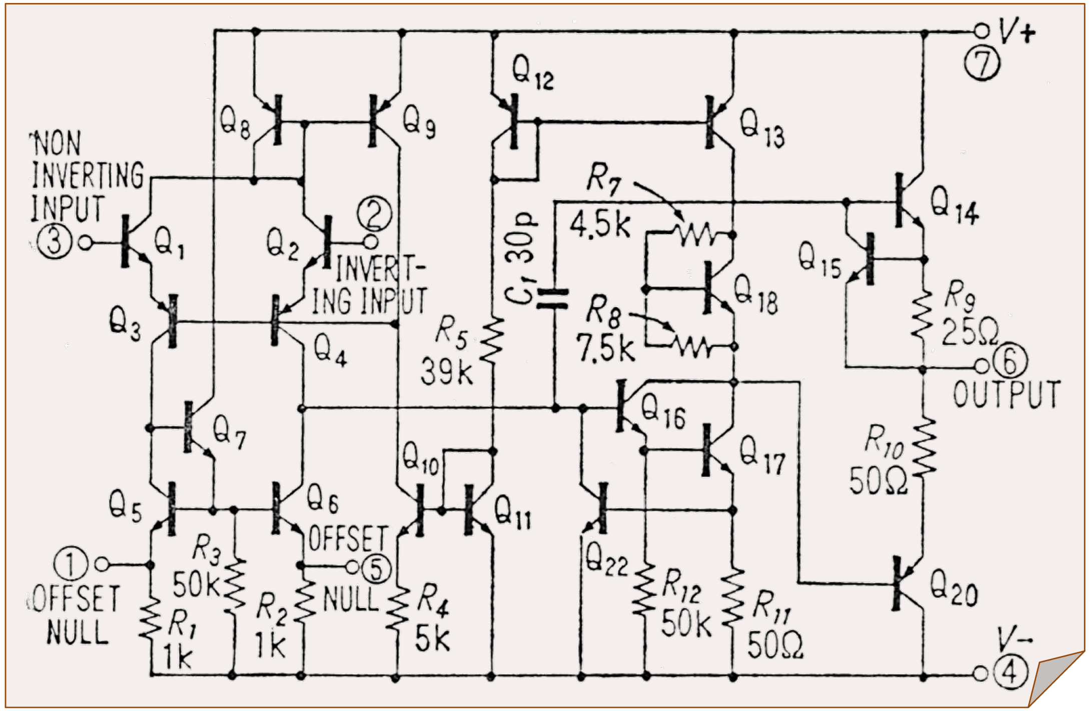
- アナログ集積回路の中でも非常に使い勝手がよく、様々な用途に応用できるオペアンプについて学ぶ
- まず、市販されているオペアンプがどのようなものであるのかを概観する
- 次に、最も基本的な使い方である反転増幅回路および非反転増幅回路を解析する
- これらを通じ、バーチャルショートが成立していることを確認すると共に、バーチャルショートを前提とした簡便な回路設計法を学ぶ

オペアンプとは？

- 歴史的には、アナログ信号電圧で加減算や乗算、微積分などを行うアナログコンピュータの演算素子として作られた
- 数10個のトランジスタからなる集積回路として量産されるようになってから、制御回路や信号処理回路などに応用が広がった
- 以下の特徴をもつ
  - 抵抗やコンデンサを数個外付けするだけで、様々な機能を持った回路が実現できる（応用範囲が広い）
  - 理想的な特性を持ち、回路設計がしやすい
  - 汎用品が量産され安く手に入る（通販で1個25円から）

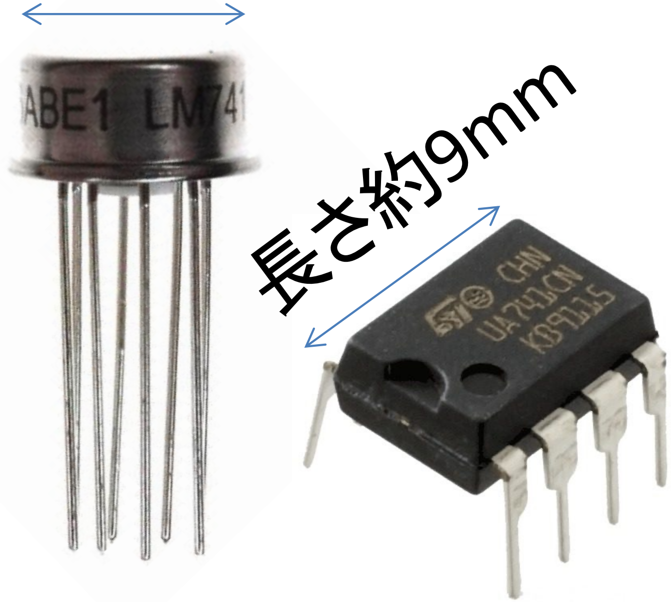
代表的なオペアンプ 741

- μA741の内部等価回路図と実物の写真



トランジスタ20個、抵抗11本
コンデンサ1本で出来ていた

直径
約8mm



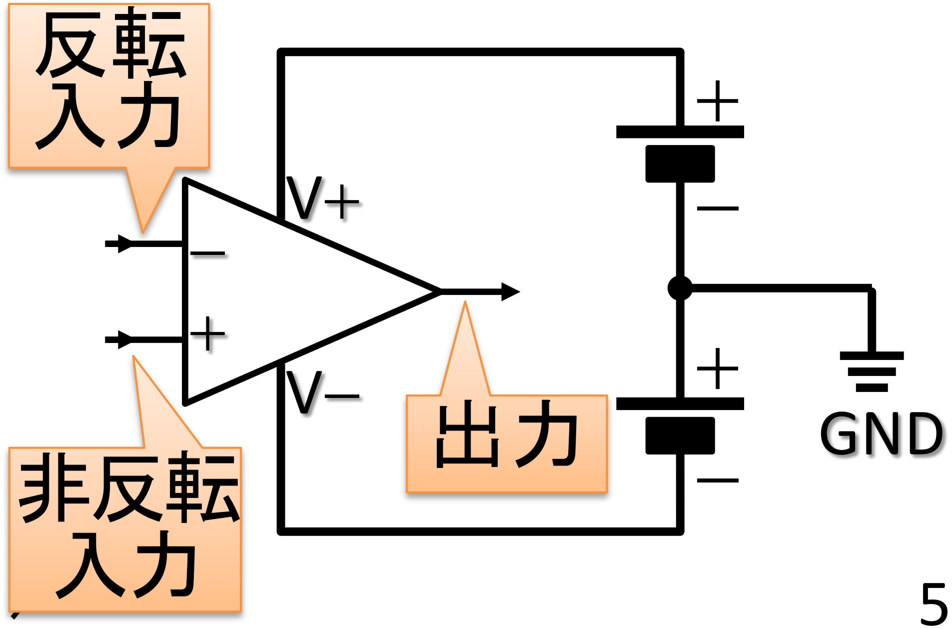
金属缶パッケージ(左)と
プラスチックパッケージ(右)

オペアンプの回路図記号と端子

- 多くのオペアンプは以下の5本の端子をもつ

V+ ：	電源の＋極	positive terminal of voltage supply
V– ：	電源の－極	negative terminal of voltage supply
OUT :	出力	output
+ ：	非反転 入力	non-inverting input
– ：	反転 入力	inverting input

- オペアンプには必ず電源が必要（但し図では略すことが多い）
  - 例えば 741型オペアンプでは、±15V の電源が必要
  - V+ と V– の中間の電位を信号電圧の基準にする（グランド (ground: GND)）



オペアンプの特性

- input impedance
  入力インピダンスは非常に 高い
  - 最近の汎用品は 1MΩ以上（通常設計では∞Ωとみなす）
  - つまり、反転入力や非反転入力端子に流れる電流は無視できる
- output impedance
  出力インピダンスは結構 低い
  - 最近の汎用品は 100Ω以下（通常設計では0Ωとみなす）
  - つまり、出力端子に接続する負荷抵抗の大きさによる出力電圧の変動は無視できる
  - 但し、電球やモーターを直接駆動するのは不可（壊れる！）
- gain
  増幅率は十分 大きい
  - 最近の汎用品で直流増幅率は 100000 以上

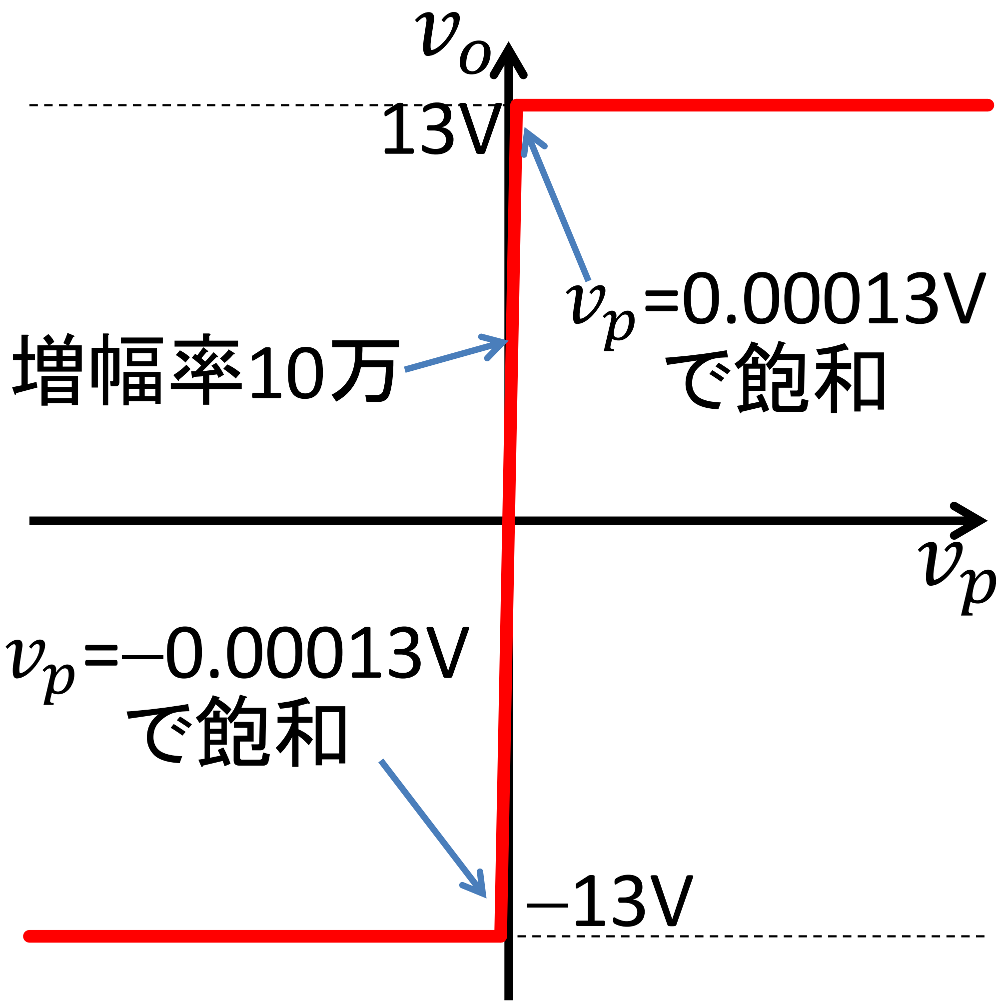
オペアンプの性質

- $v_o = A \cdot (v_p - v_m)$
  - v_o : 出力の電圧(voltage of output terminal)
  - v_p : 非反転入力の電圧(voltage of non-inverting input terminal)
  - v_m : 反転入力の電圧(voltage of inverting input terminal)
  - A : 電圧増幅度（開ループ利得 open-loop gain）
- 例１: A =100000、v_p=0.567890 V、v_m=0.567854 V のとき、$v_p - v_m$= 0.000036 V なので v_o= $\boxed{3.6}$ V になる
- 例２: A =100000、v_p=0.567 V、v_m=0.555 V のとき、$v_p - v_m$= 0.012 V なので、v_o= $\boxed{1200}$ V になる

供給されている電源電圧よりも大きな電圧は出力されません！

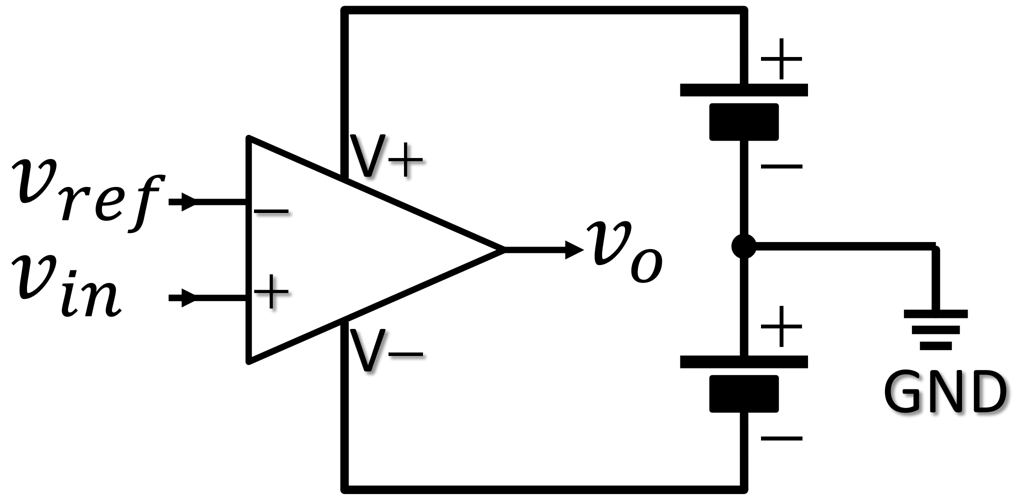
裸のオペアンプは暴れ馬

- 例えば 741型オペアンプに ±15V の電源を供給した場合、出力の最大振幅は ±13V 程度なので、A=100000 とし、v_m が 0V の時の v_p と v_o の関係を求めると右のようになる



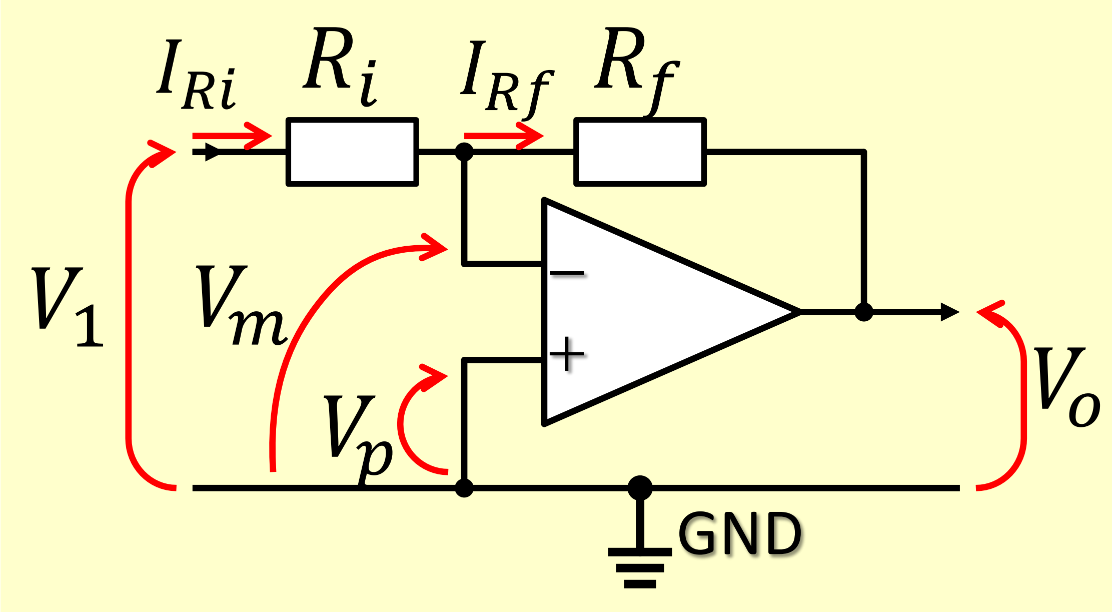
オペアンプ単体の唯一の使い道

- 電圧比較器
  - v_{in} の電圧がちょっとでも v_{ref} より高い時は、v_o=13Vとなり、それ以外の時は、v_o=−13V となる



- このように出力電圧をわざと飽和させる使い方（他にはシュミットトリガ回路、パルス発振回路など）も実用上役に立つことは多いが、この授業ではこれ以上深入りしない
- つまり、以降は出力を飽和させないアナログ回路を扱う

反転増幅回路



オームの法則より

$$V_1 - V_m = I_{Ri} \cdot R_i$$

$$V_m - V_o = I_{Rf} \cdot R_f$$

オペアンプの入力には電流が流れないので

$$I_{Ri} = I_{Rf}$$

オペアンプの性質と $V_p = 0$ より

$$V_o = -AV_m$$

これらより下を得る

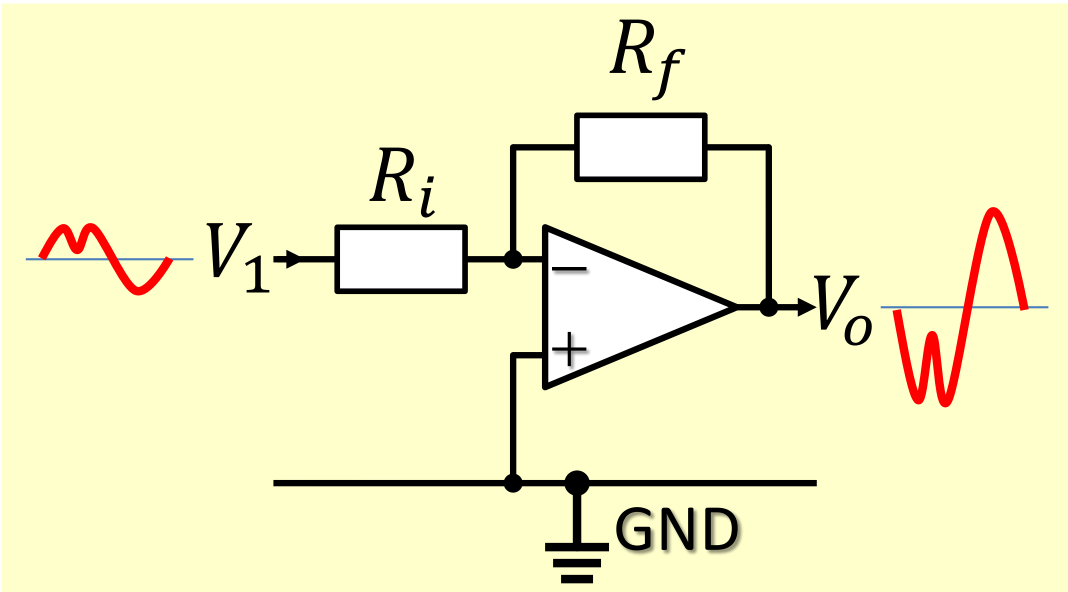
$$V_o = -\frac{1}{1+\frac{1}{A}\cdot\frac{R_f+R_i}{R_i}}\frac{R_f}{R_i}V_1$$

反転増幅回路の増幅度

$V_o = -\dfrac{1}{1+\frac{1}{A}\cdot\frac{R_f+R_i}{R_i}}\dfrac{R_f}{R_i}V_1$ より、$A_V = -\dfrac{1}{1+\frac{1}{A}\cdot\frac{R_f+R_i}{R_i}}\dfrac{R_f}{R_i}$ とおくと $V_o = A_V \cdot V_1$ と書ける

- $A_V < 0$ なので、V_o と V_1 は符号が逆（反転増幅）
- $A \gg \dfrac{R_f+R_i}{R_i}$ ならば $A_V = \boxed{-\dfrac{R_f}{R_i}}$ と近似できる

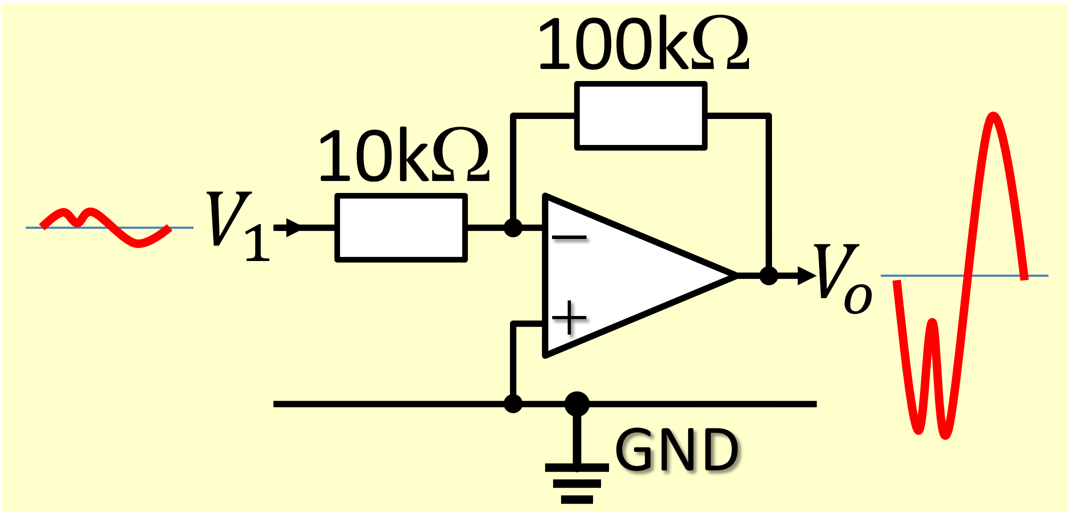
オペアンプ自体の開ループ利得 A とは無関係に、外付け抵抗 R_f と R_i の比で A_V を設定することができる



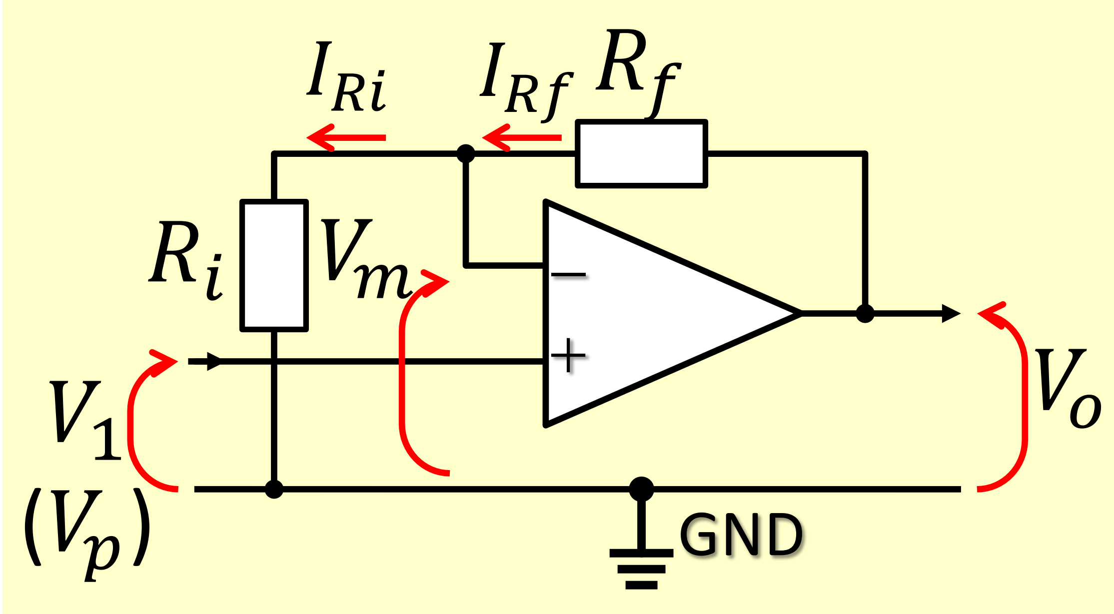
例:$\dfrac{R_f}{R_i}=10$ のときの A_V は?

- 下の表より、実現したい増幅度 A_V よりも十分大きい開ループ利得 A をもつオペアンプを採用すれば$A_V=-\dfrac{R_f}{R_i}$となる(A の正確な値はどうでもよい)

開ループ利得 A	10	100	1000	10000	100000
閉ループ利得 A_V	4.76	9.01	9.89	9.99	10.00



非反転増幅回路



オームの法則より

$V_m = I_{Ri} \cdot R_i$

$V_o - V_m = I_{Rf} \cdot R_f$

オペアンプの入力には電流が流れないので

$I_{Ri} = I_{Rf}$

オペアンプの性質と $V_p = V_1$ より

$V_o = A(V_1 - V_m)$

これらより下を得る

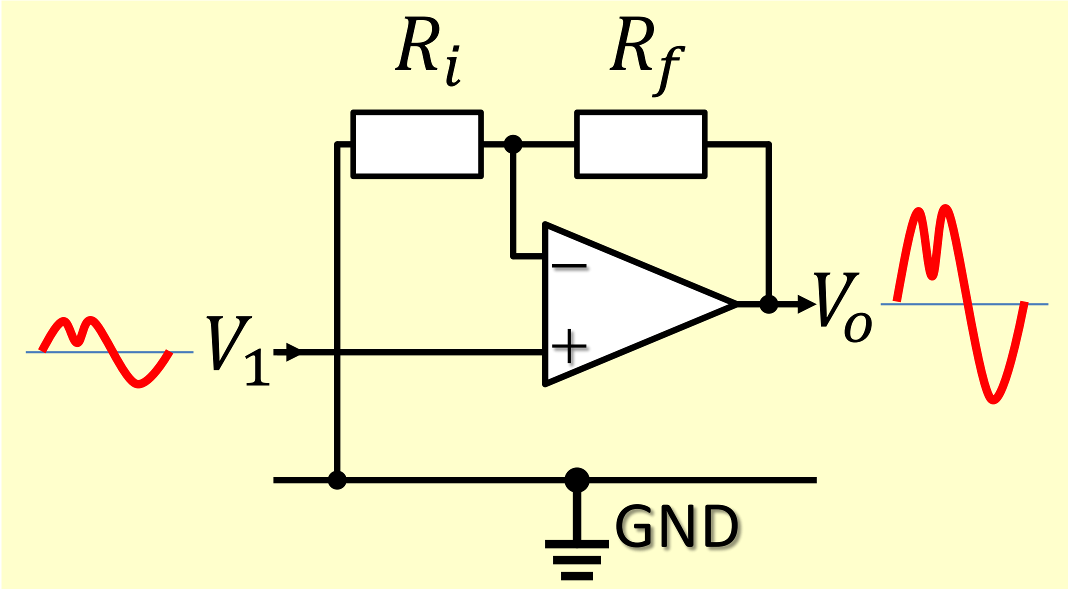
$$V_o = \frac{1}{1+\frac{1}{A}\cdot\frac{R_f+R_i}{R_i}} \frac{R_f+R_i}{R_i} V_1$$

非反転増幅回路の増幅度

$V_o = \dfrac{1}{1+\frac{1}{A}\cdot\frac{R_f+R_i}{R_i}} \dfrac{R_f+R_i}{R_i} V_1$ より、$A_V = \dfrac{1}{1+\frac{1}{A}\cdot\frac{R_f+R_i}{R_i}} \dfrac{R_f+R_i}{R_i}$ とおくと $V_o = A_V \cdot V_1$ と書ける

- $A_V > 0$ なので、V_o と V_1 は同符号（非反転増幅）
- $A \gg \dfrac{R_f+R_i}{R_i}$ ならば $A_V = \boxed{\dfrac{R_f+R_i}{R_i}}$ と近似できる

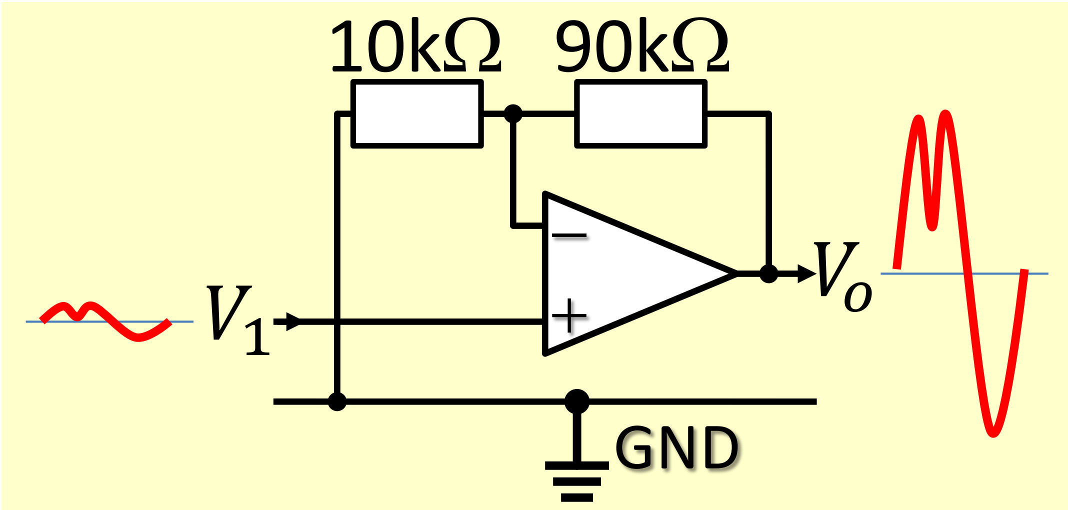
オペアンプ自体の開ループ利得 A とは無関係に、外付け抵抗 R_f と R_i の比で A_V を設定することができる



例:$\dfrac{R_f+R_i}{R_i}=10$ のときの A_V は？

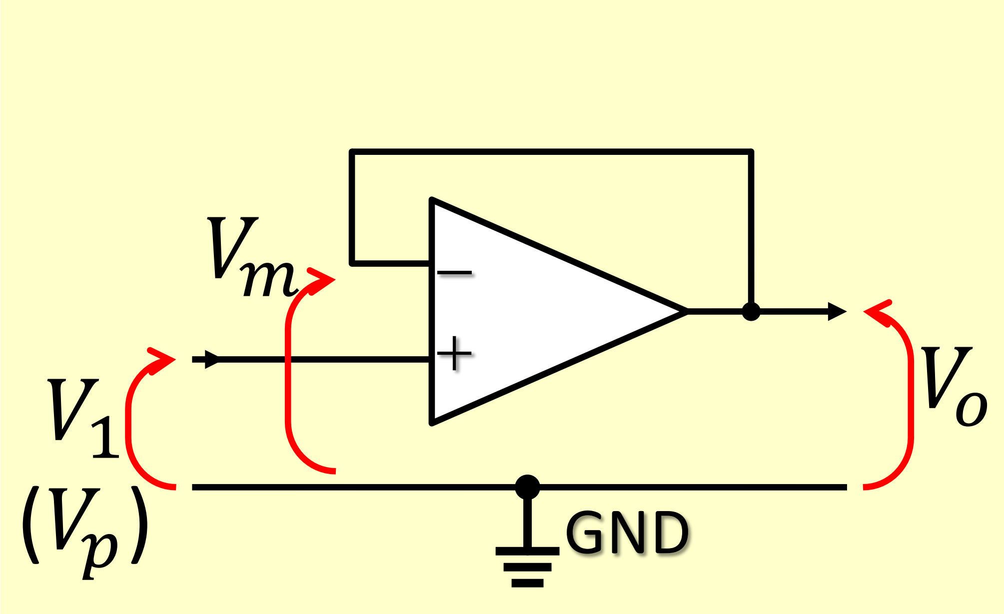
- 下の表より、実現したい増幅度 A_V よりも十分大きい開ループ利得 A をもつオペアンプを採用すれば$A_V=\dfrac{R_f+R_i}{R_i}$となる（A の正確な値はどうでもよい）

開ループ利得 A	10	100	1000	10000	100000
閉ループ利得 A_V	5.00	9.09	9.90	9.99	10.00



voltage follower

ボルテージフォロワ



オペアンプの性質より

$$V_o = A(V_p - V_m)$$

図で $V_p = V_1, V_m = V_o$ より

$$V_o = A(V_1 - V_o)$$

これらより下を得る

$$V_o = \frac{A}{A+1} V_1$$

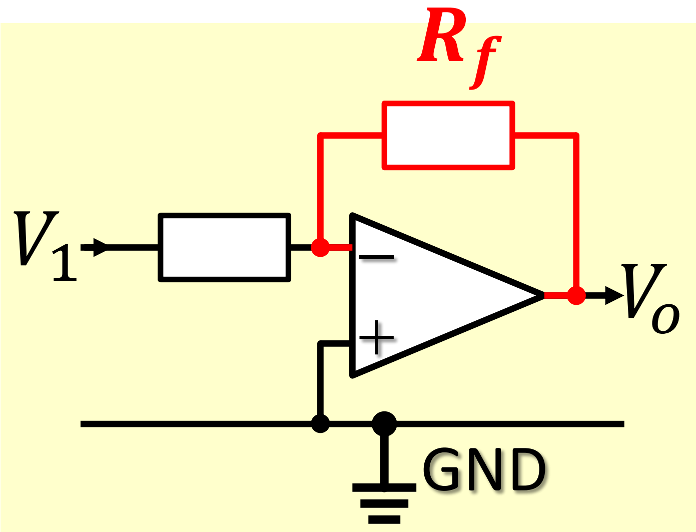
$A \gg 1$ のとき

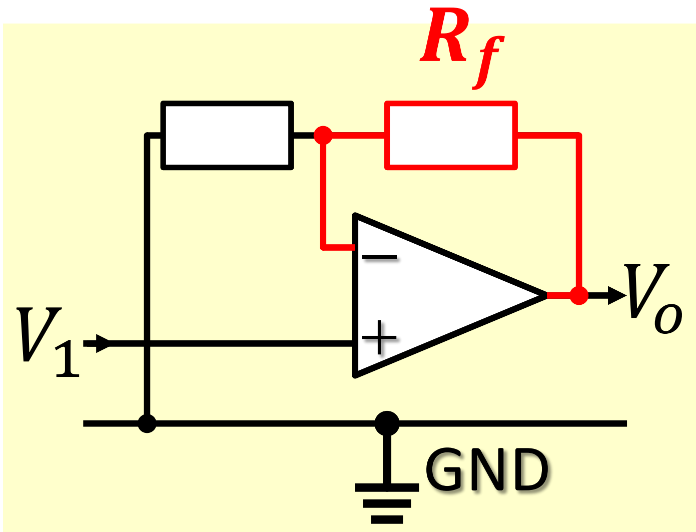
$$V_o = \boxed{V_1}$$

例えば計測器の入力段などで有用
（オペアンプの入力はインピダンスが高く電流が流れないので、被測定回路に影響を与えずに、電圧を測定することができる）

帰還（feedback）

- 帰還：増幅器の出力信号の一部を入力に戻すこと
  - 正帰還（positive feedback）
    - 帰還した信号と出力信号の符号が同じ（同位相）の場合
    - 増幅器の動作が不安定になる（発振する）
  - 負帰還（negative feedback, NFB）
    - 帰還した信号と出力信号の符号が逆（逆位相）の場合
    - 増幅度は抑えられるが、動作が安定する





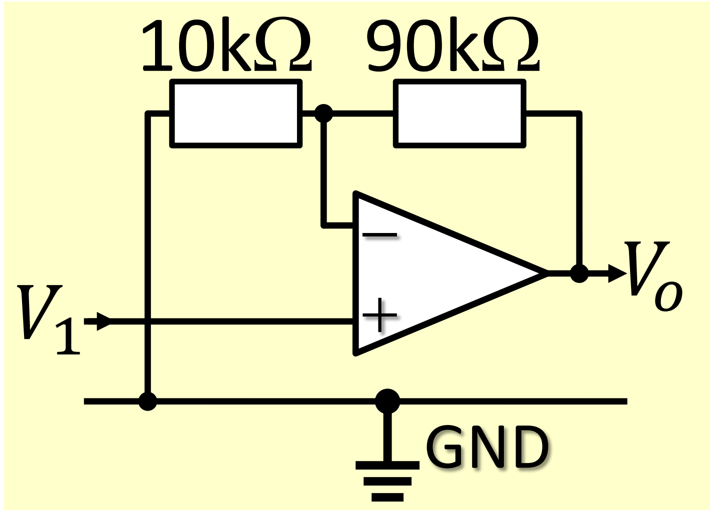
負帰還の例：
抵抗 R_f により
出力信号を反
転入力に帰還
している

バーチャルショート（仮想短絡：virtual short）

- 開ループ利得 A が非常に大きいオペアンプの出力電圧が有限値である（飽和していない）とき、つまり $V_o = A(V_p - V_m)$ が有限値かつ $A \to \infty$ のとき、

  $\boldsymbol{V_p - V_m \approx 0}$ の筈である

  - 例えば右の非反転増幅回路で $A = 100000$, $V_1 = 1.0000$[V]のとき、$V_o = 9.999$[V], $V_m = 0.9999$[V], $V_p - V_m = 0.0001$[V] である。



- このように、出力電圧が飽和していないオペアンプの入力電位が $\boldsymbol{V_p - V_m \approx 0}$ であるという性質を 仮想短絡 という

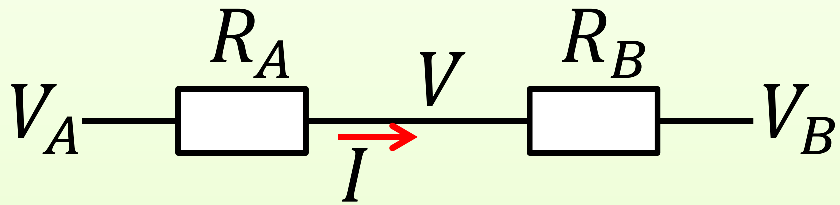
「回路的にショート（短絡）していないのに、あたかもショートしているかのように電圧が追随する」

理想オペアンプ

- 試験問題などで**「但し、オペアンプは理想的なものとする」**と書かれていたら、以下の3つを仮定する
  - 入力インピダンスは十分大きい（**入力電流はゼロ**）
  - 出力インピダンスは十分小さい（**出力電圧は負荷電流の影響を受けない**）
  - 電圧増幅度は十分大きい（出力が飽和しない範囲で使用している時に**バーチャルショートが成立する**）

〔便利〕分圧回路の公式

オームの法則より



$$V_A - V = \boxed{IR_A}$$

$$V - V_B = \boxed{IR_B}$$

これらから I を消去すると

$$\frac{V_A - V}{R_A} = \frac{V - V_B}{R_B}$$

これを V について解くと

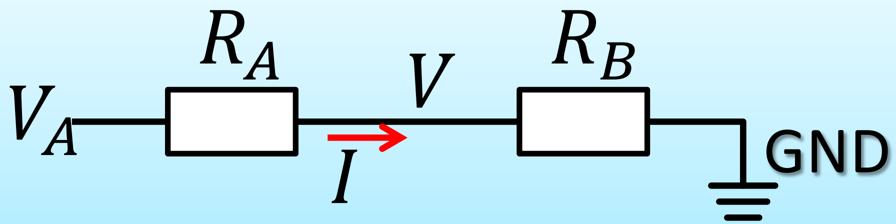
$$V = \boxed{\frac{R_B V_A + R_A V_B}{R_A + R_B}}$$

注意！

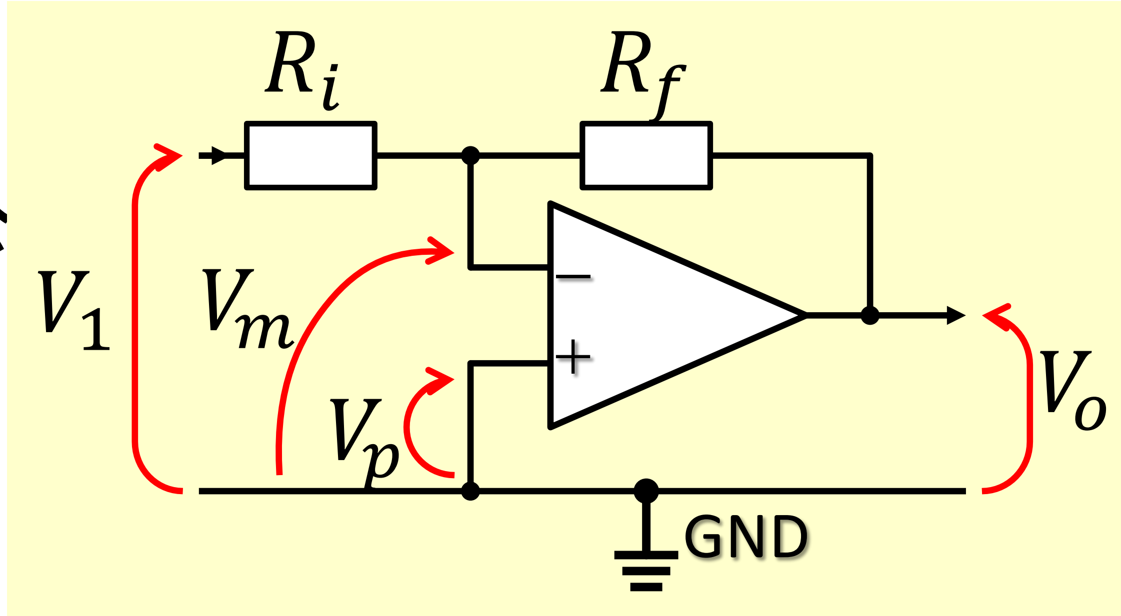
これらの「公式」が適用できるのは、R_Aを流れる電流とR_Bを流れる電流が同じとき（電流が枝分かれしないとき）に限られます。

特に、$V_B = 0$ のとき

$$V = \boxed{\frac{R_B V_A}{R_A + R_B}}$$



仮想短絡を用いた反転増幅回路の解析



オペアンプの入力電流をゼロとみなせば、分圧の公式から

$$V_m = \boxed{\frac{R_i V_o + R_f V_1}{R_i + R_f}}$$

回路図から、

$$V_p = \boxed{0}$$

仮想短絡が成立するとして

$$V_m = \boxed{V_p}$$

以上から、

$$V_o = \boxed{-\frac{R_f}{R_i} V_1}$$

公式の丸暗記だけで解くのは危険です！
回路の意味を理解した上で公式を使いましょう。

仮想短絡を用いた非反転増幅回路の解析

オペアンプの入力電流をゼロとみなせば、分圧の公式から

$$V_m = \boxed{\frac{R_i V_o}{R_i + R_f}}$$

回路図から、

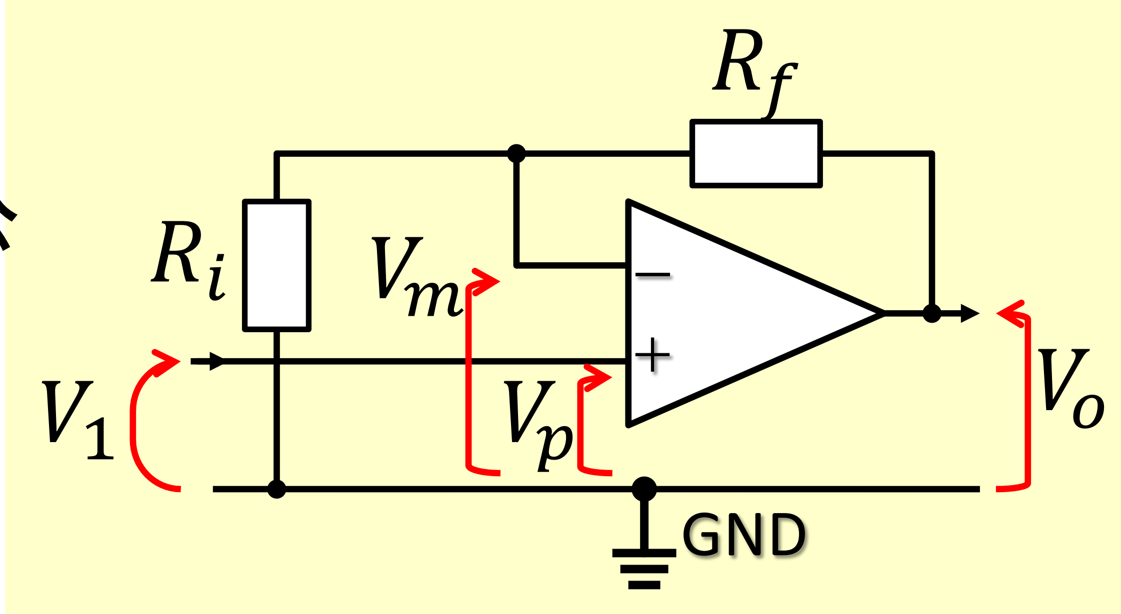
$$V_p = \boxed{V_1}$$

仮想短絡が成立するとして

$$V_m = \boxed{V_p}$$

以上から、

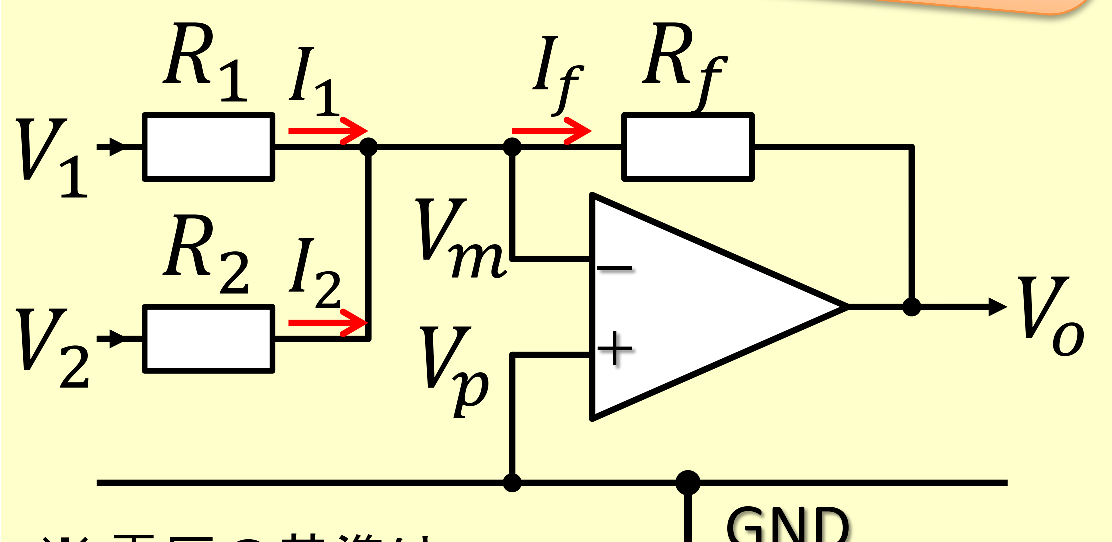
$$V_o = \boxed{\frac{R_i + R_f}{R_i} V_1}$$



公式の丸暗記だけで解くのは危険です！
回路の意味を理解した上で公式を使いましょう。

加算回路(教科書 図9.4)

自分でやってみよう!



※ 電圧の基準は GND

オームの法則より

$V_1 - V_m = \boxed{I_1 R_1}$ (1)

$V_2 - V_m = \boxed{I_2 R_2}$ (2)

$V_m - V_o = \boxed{I_f R_f}$ (3)

仮想短絡より $\boxed{V_m = V_p}$

回路図より $V_p = 0$

KCLおよびオペアンプの入力電流がゼロであることより

$\boxed{I_1 + I_2 = I_f}$

よって(1)より $V_1 = I_1 R_1$, (2)より $V_2 = I_2 R_2$,

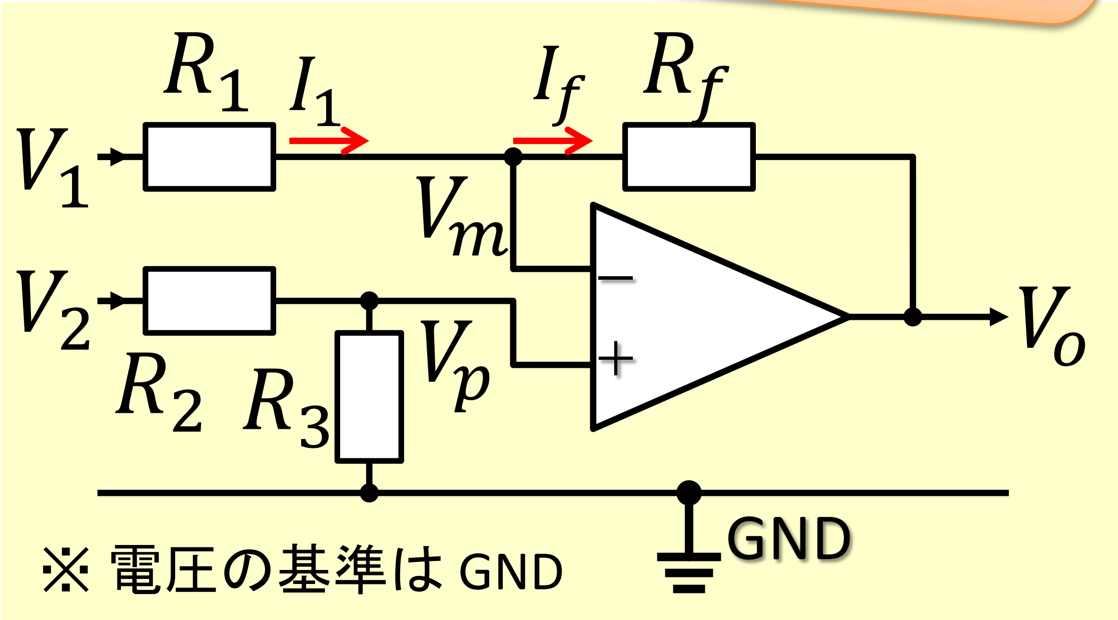
(3)より $-V_o = I_f R_f$

これらから I_1, I_2, I_f を消去すると $V_o = -(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2)$

特に $R_f = R_1 = R_2$ のとき、$V_o = -(V_1 + V_2)$

減算回路(教科書 図9.5)

自分でやってみよう!



オペアンプの非反転入力端子の電流はゼロなので、V_p に関して R_2 と R_3 が分圧回路となるから

$$V_p = \boxed{\frac{R_3}{R_2+R_3}V_2}$$

オペアンプの反転入力端子の電流もゼロなので、V_m についても R_1 と R_f が分圧回路となるから

$$V_m = \boxed{\frac{R_1V_o+R_fV_1}{R_f+R_1}}$$

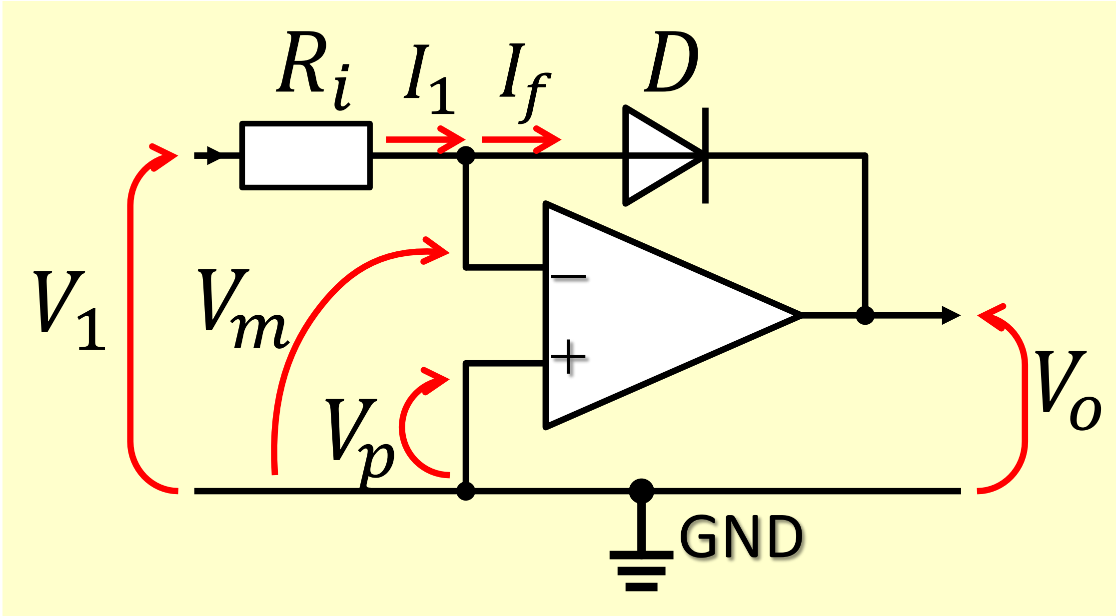
これと仮想短絡 $\boxed{V_p = V_m}$ から $\frac{R_3}{R_2+R_3}V_2 = \frac{R_1V_o+R_fV_1}{R_f+R_1}$

$\therefore V_o = \frac{R_f+R_1}{R_1}\frac{R_3}{R_2+R_3}V_2 - \frac{R_f}{R_1}V_1$　特に $R_f = R_1 = R_2 = R_3$ のとき、$V_o = V_2 - V_1$

問題1：この回路は何する回路か？

ダイオードについては、
- 飽和電流を I_S
- 熱温度 $\frac{kt}{q}$ を V_t

とおく



- オームの法則より　$V_1 - V_m = \boxed{I_1 R_i}$
- ダイオードの性質より $I_f = I_S\left(e^{\frac{V_m - V_o}{V_t}} - 1\right)$
- 仮想短絡より $\boxed{V_m = V_p}$、回路図より $V_p = 0$
- KCLおよびオペアンプの入力電流=0より $I_1 = I_f$

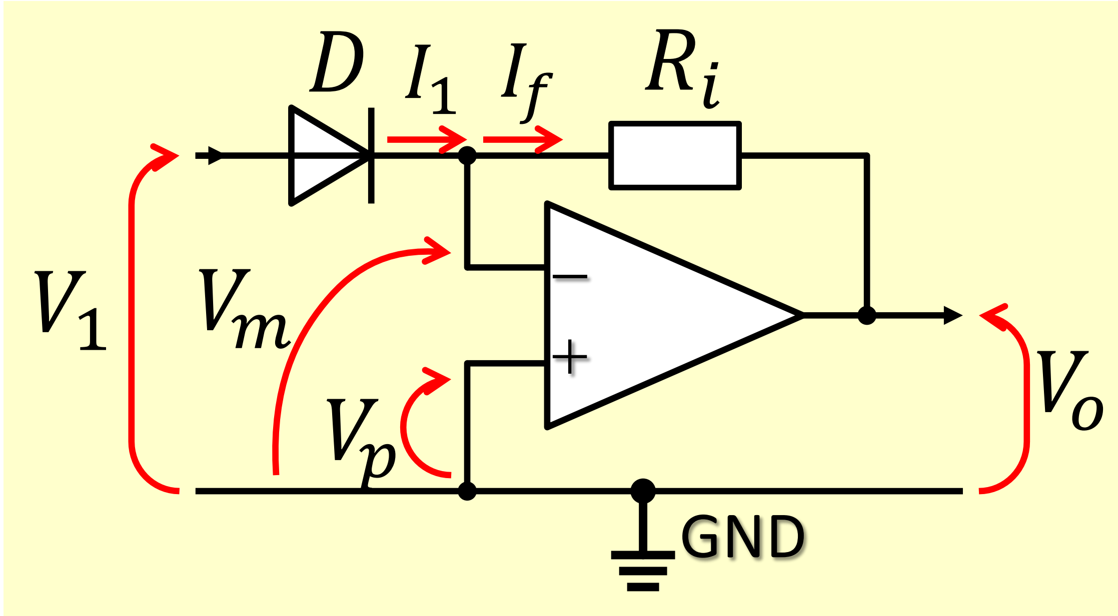
実はV_1の $\boxed{対数}$ を求める回路だった

- I_fを消去して整理すると、$e^{\frac{-V_o}{V_t}} = \frac{V_1}{R_i I_S} + 1$
- ここで$\frac{V_1}{R_i I_S} \gg 1$と仮定すると、$e^{\frac{-V_o}{V_t}} = \frac{V_1}{R_i I_S}$
- よって、$-\frac{V_o}{V_t} = \log_e \frac{V_1}{R_i I_S}$
- ゆえに、$V_o = -V_t \log_e \frac{V_1}{R_i I_S}$

問題2:この回路は何する回路か？

ダイオードについては、
- 飽和電流を I_S
- 熱温度 $\frac{kt}{q}$ を V_t

とおく

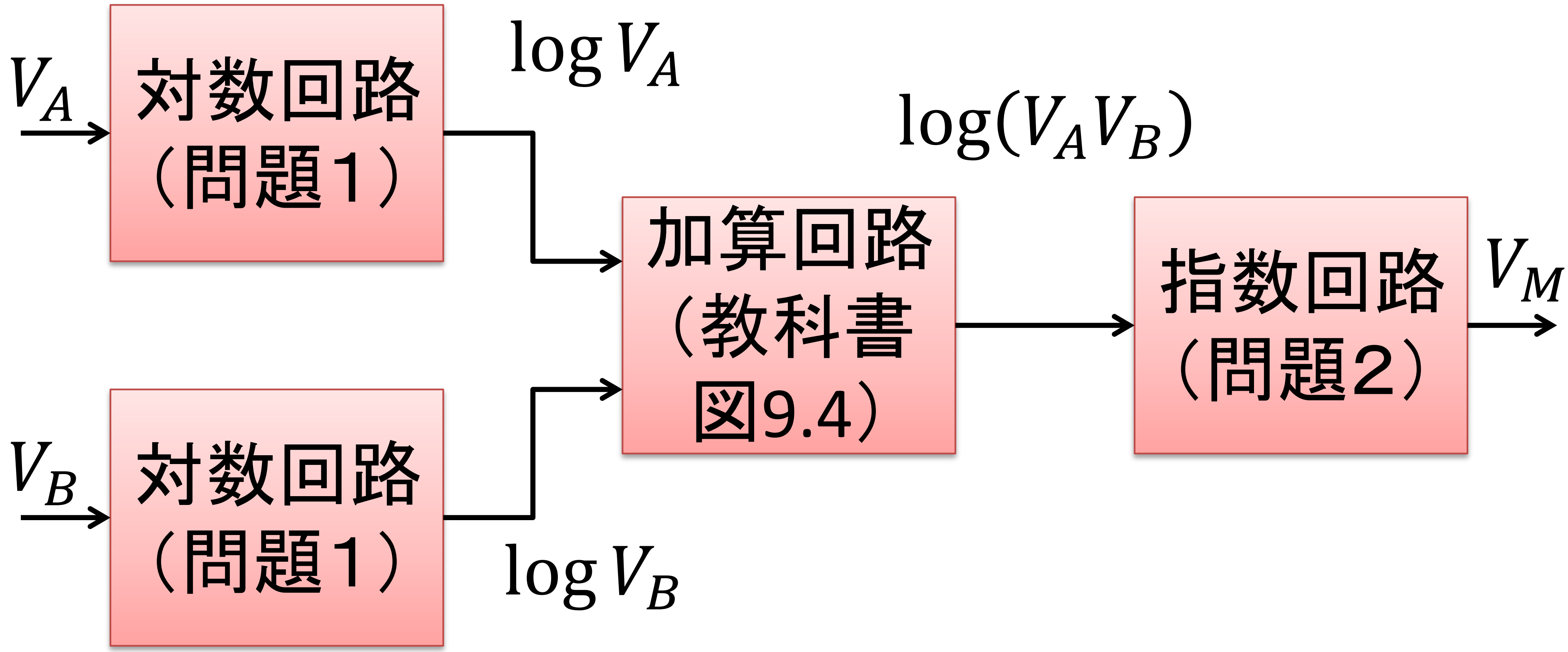


- オームの法則より　$V_m - V_o = \boxed{I_f R_i}$
- ダイオードの性質より　$I_1 = I_S\left(e^{\frac{V_1 - V_m}{V_t}} - 1\right)$
- 仮想短絡より $\boxed{V_m = V_p}$、回路図より $V_p = 0$
- KCLおよびオペアンプの入力電流=0より $I_1 = I_f$

実は V_1 の $\boxed{\text{指数}}$ を求める回路だった

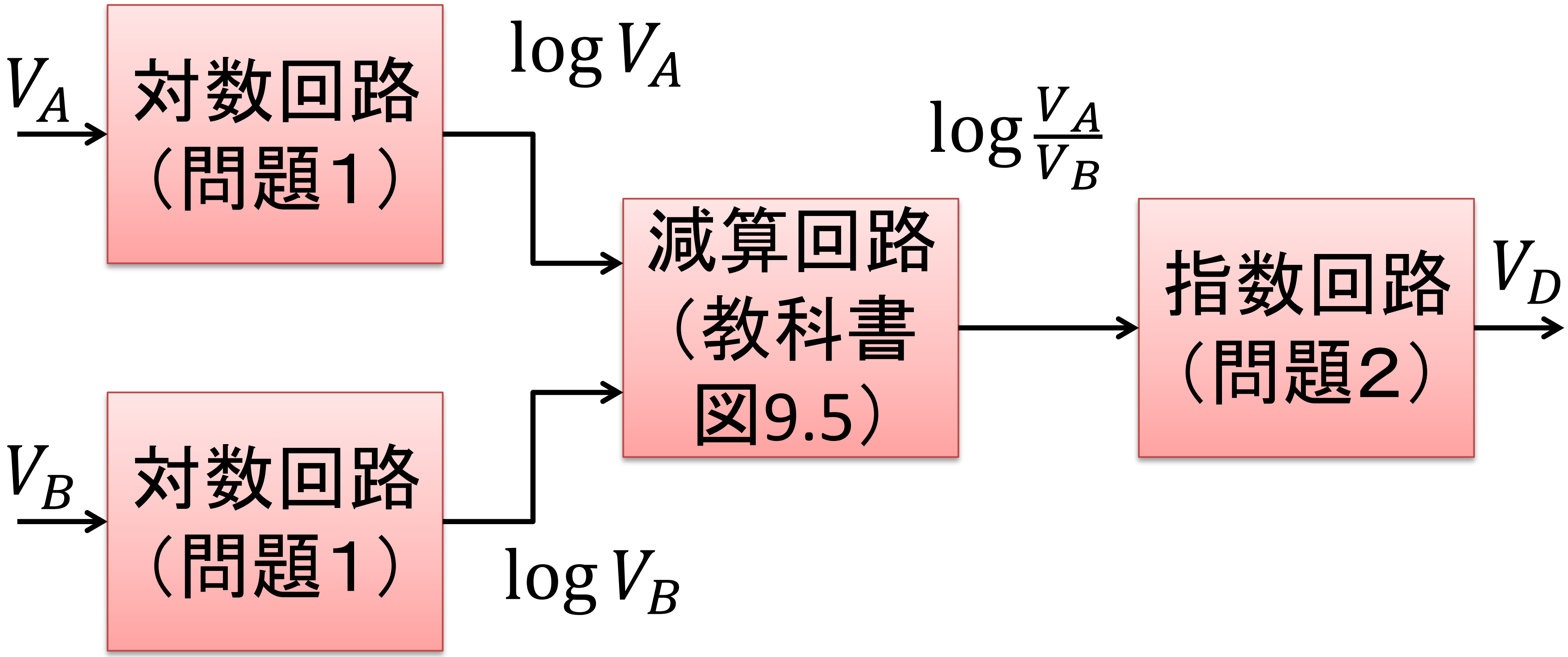
- I_f を消去して整理すると、$V_o = -I_S R_i (e^{\frac{V_1}{V_t}} - 1)$
- ここで$e^{\frac{V_1}{V_t}} \gg 1$ と仮定すると、$V_o = -I_S R_i e^{\frac{V_1}{V_t}}$

問題3:この回路は何する回路か？



乗算回路（V_A と V_B の積に比例する電圧を出力する回路）

問題4：この回路は何する回路か？



除算回路（$V_A \div V_B$ に比例する電圧を出力する回路）

今週のまとめ

- オペアンプの基礎を学んだ
  - ２つの入力(差動入力)
  - 高い増幅度
  - 高い入力インピダンス
  - 低い出力インピダンス
- 出力が飽和していないオペアンプ回路を解析する場合の強力な道具を手に入れた
  - 仮想短絡
- いろいろなアナログ回路の実現例を見てきた
  - 加算、減算、対数、指数、乗算、除算
  - もっと強力な「微分回路」「積分回路」「アクティブフィルタ」は、あとで扱います

電気電子回路（第7回）講義は
これで終わりです

質問：support_eecra@sl.is.ritsumei.ac.jp

直接返信する場合と、まとめてmanaba+に掲示する場合があります。ご了承ください。