電子回路：第8回　オペアンプ#1

基礎工学部情報科学科

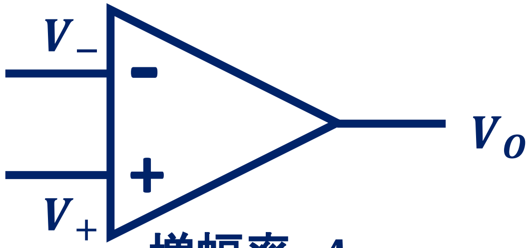
粟野 皓光

awano@ist.osaka-u.ac.jp

オペアンプとは

- 2つの入力端子間の電位差を増幅するための回路素子（集積回路）
- オペアンプに抵抗やコンデンサを付け加えることでフィルタや微積分回路を簡単に設計できる

回路記号



増幅率: A

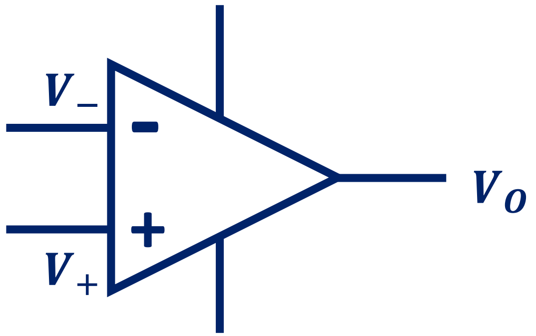
- ＋端子と－端子の電位差が増幅されて出力される

$$V_O = A(V_+ - V_-)$$

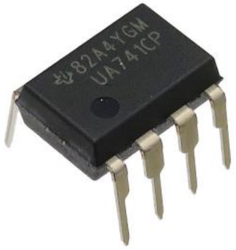
- 増幅率Aは100dB程度（10万倍）

両電源オペアンプの例

正電源（+15V）



負電源（-15V）



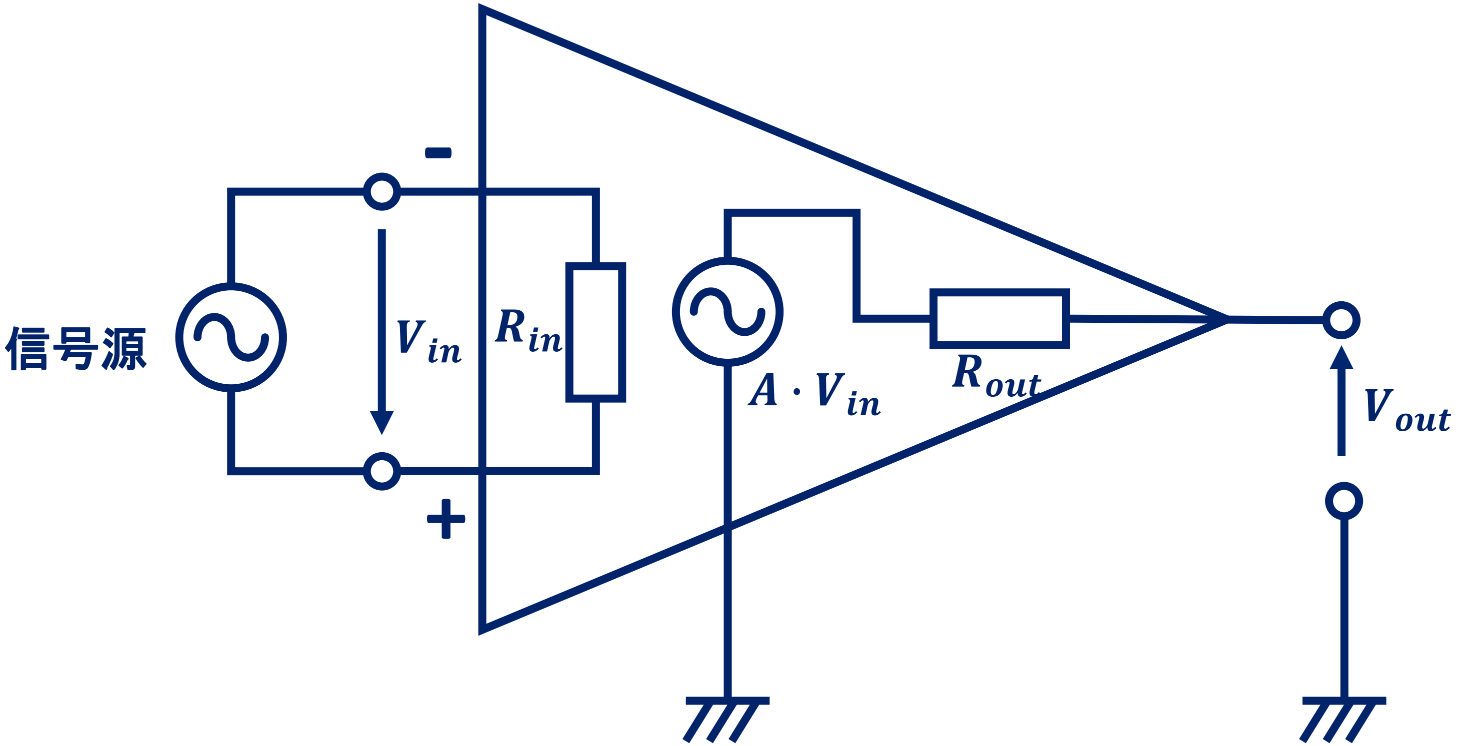
http://akizukidenshi.com/catalog/g/gI-12508/

- 電源電圧以上の電圧は出せない
  - V_-：0V，V_+：0.1mV→$V_O = 10^5(10^{-4} - 0) = 10\mathrm{V}$
  - V_-：0V，V_+：0.2mV→$V_O = 10^5(20^{-4} - 0) = 20\mathrm{V}$
    だが15VでClipされる

理想オペアンプ

理想オペアンプの特性

1. 入力インピーダンス（R_{in}）は無限大（入力端子に電流が流れ込まない）
2. 出力インピーダンス（R_{out}）は0
3. 増幅率（A）は無限大
4. オフセット電圧が0
5. 周波数帯域が無限に広い



フィードバック回路

オペアンプはそのままではゲインが大きすぎて役に立たない（微小な電圧差でも出力が飽和してしまう）
⇒ 一般的にフィードバック回路で使う

R_1, R_2を流れる電流を右図のように置くと，

① $V_{in} - V_{-} = R_1 I_1$
② $V_{out} = A(V_{+} - V_{-}) = -AV_{-}$
③ $V_{-} - V_{out} = R_2 I_2$

ここで，オペアンプの入力インピーダンスは無限大なのでI_1はオペアンプには流れ込まず，R_2に流れる．よって$I_1 = I_2$

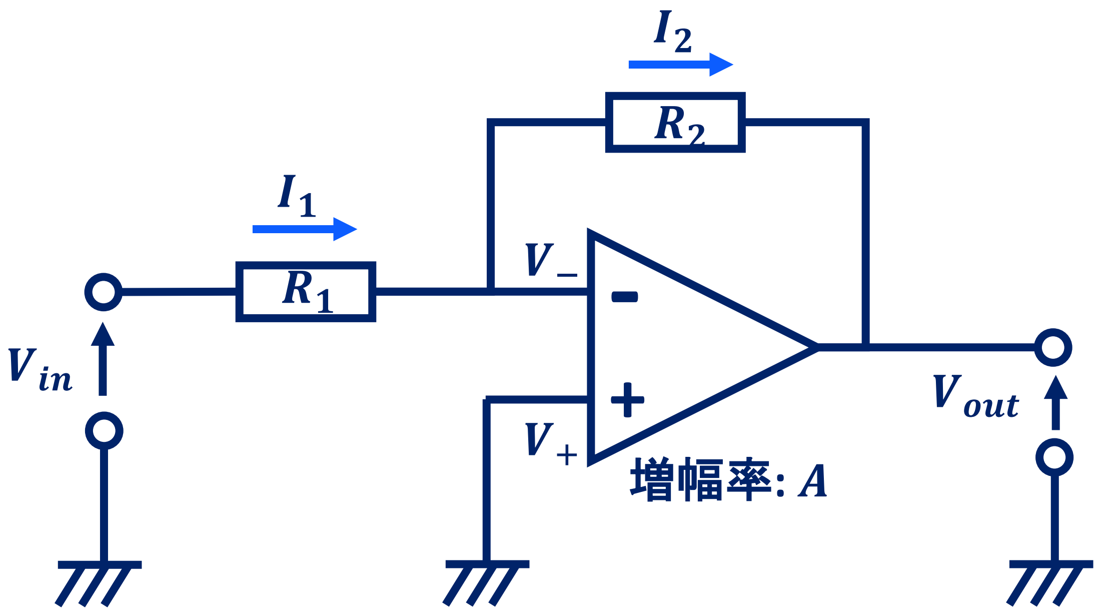
①と③からI_1, I_2を消すと

$$\frac{V_{in} - V_{-}}{R_1} = \frac{V_{-} - V_{out}}{R_2} \longrightarrow V_{-} = \frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}}{R_1 + R_2} \cdots ④$$

②に代入して $V_{out} = -A\dfrac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}}{R_1 + R_2}$

V_{out}について解くと $V_{out} = -\dfrac{AR_2}{(1+A)R_1 + R_2} V_{in} = -\dfrac{R_2}{\left(\frac{1}{A} + 1\right) R_1 + \frac{R_2}{A}} V_{in} \rightarrow -\dfrac{R_2}{R_1} V_{in} (A \rightarrow \infty) \cdots ⑤$

また，この時のV_{-}は④と⑤から $V_{-} = \dfrac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}}{R_1 + R_2} \rightarrow 0 (A \rightarrow \infty)$ バーチャル・ショート（⇒8ページ目）



反転増幅器

フィードバック回路の安定性

V_{out}に微小なノイズが重畳し，電圧がΔVだけ変動した場合を考える

□ 出力電圧が上がった場合

出力電圧は $V_{out} = -\dfrac{R_2}{R_1}V_{in} + \underline{\Delta V}$ ･･･⑥ と書ける

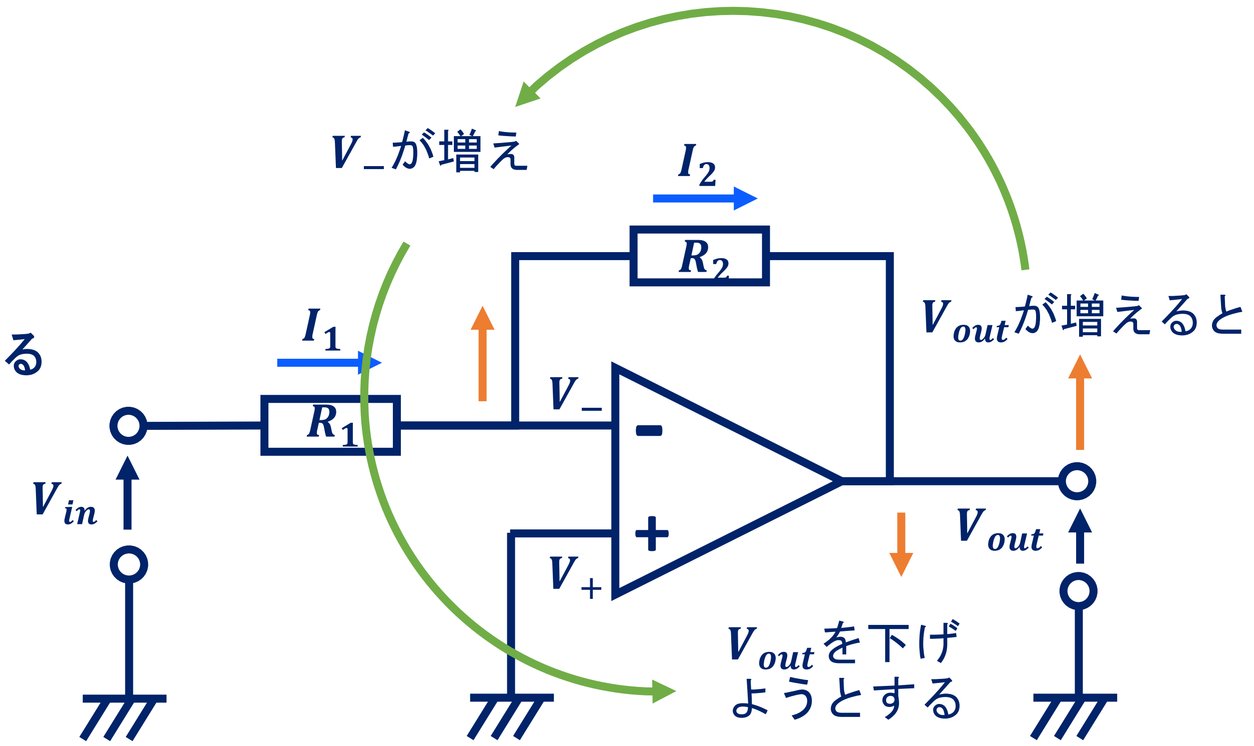
ノイズ

この時，V_-の電圧は⑥を④に代入して以下の様に求まる

$$V_- = \frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \Delta V}{R_1 + R_2} > 0$$

従って，②からV_{out}は下がる方向に変化する

⇒出力の変化を打ち消すような作用が働く



□ 出力電圧が下がった場合も同様

プラス端子にフィードバックした場合

4ページのV_{out}の式 $\boxed{V_{out} = -\frac{AR_2}{(1+A)R_1 + R_2} V_{in}}$ でAを$-A$に置き換えれば良い

$$V_{out} = \frac{AR_2}{(1-A)R_1 + R_2} V_{in} = \frac{R_2}{\left(\frac{1}{A} - 1\right) R_1 + \frac{R_2}{A}} V_{in} \to -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \ (A \to \infty)$$

数式上は反転増幅だが，実際の回路では正しく動作しない

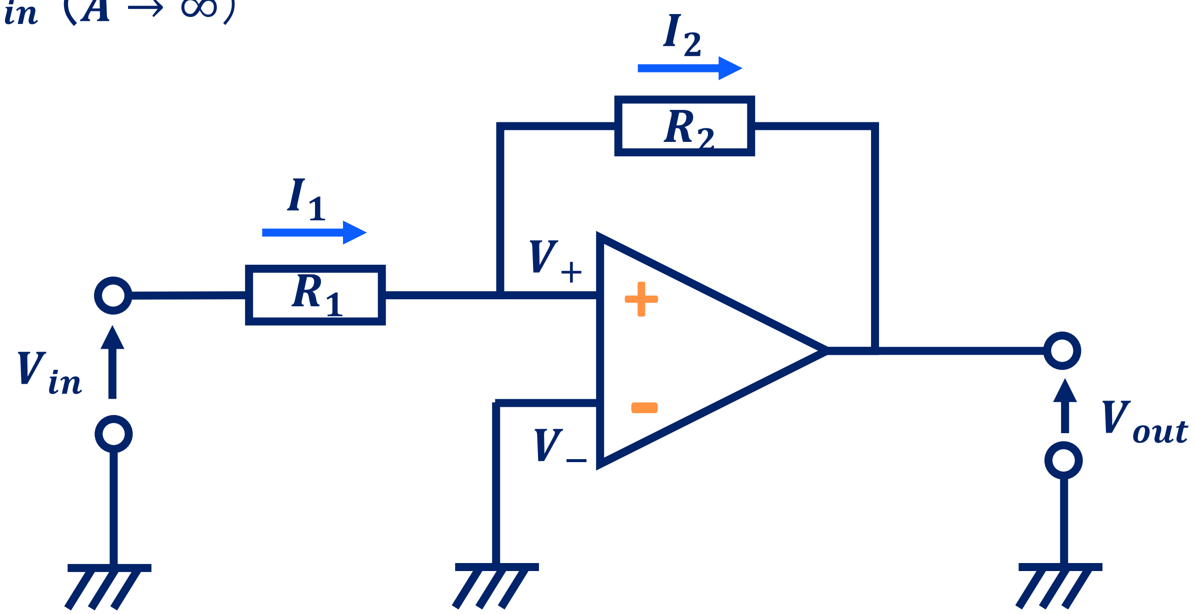
- $V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$ のとき

$$V_+ = V_{in} - \frac{V_{in} - V_{out}}{R_1 + R_2} R_1 = 0$$

- $V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \pm \Delta V$ のとき

$$V_+ = V_{in} - \frac{V_{in} - V_{out}}{R_1 + R_2} R_1 = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Delta V \gtrless V_-$$

V_{out}の変化を増長するようにフィードバックが働く⇒不安定



反転増幅器？

非反転増幅回路

R_1, R_2を流れる電流を右図のように置くと，

① $V_{out} = A(V_+ - V_-) = A(V_{in} - V_-)$
② $0 - V_- = R_1 I_1$
③ $V_- - V_{out} = R_2 I_2$

オペアンプの入力インピーダンスは無限大
⇒I_1はオペアンプには流れ込まずR_2に流れる（$I_1 = I_2$）

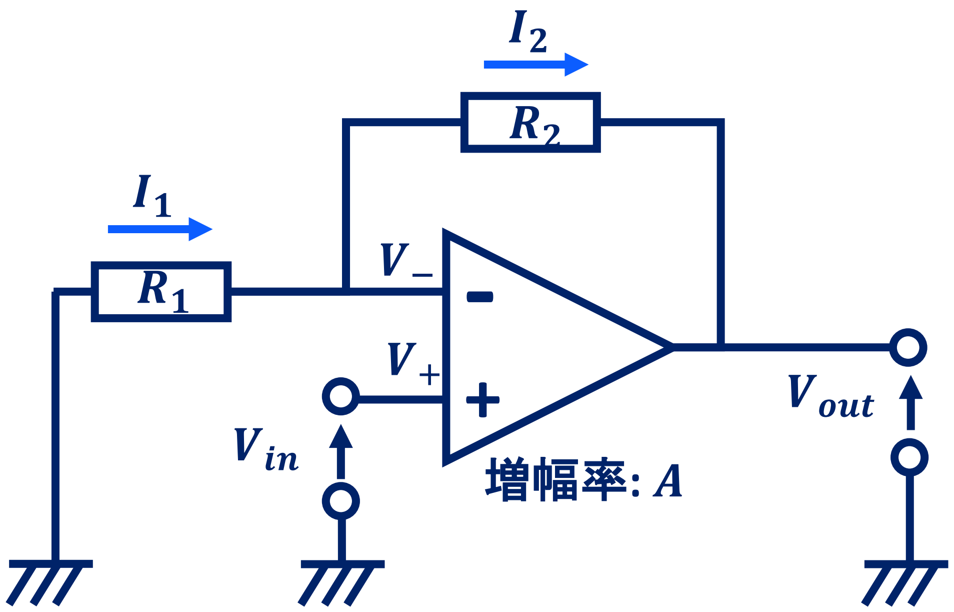
②と③から $-\dfrac{V_-}{R_1} = \dfrac{V_- - V_{out}}{R_2}$ ➡ $V_- = \dfrac{R_1 V_{out}}{R_1 + R_2} \cdots$④

これを①に代入して $V_{out} = A\left(V_{in} - \dfrac{R_1 V_{out}}{R_1 + R_2}\right)$

V_{out}について整理して$A \to \infty$の極限を取ると

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} V_{in} \to \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{in} \ (A \to \infty) \cdots ⑤$$

この時，V_-は⑤を④に代入すると $V_- = \dfrac{R_1 V_{out}}{R_1 + R_2} \to V_{in} \ (A \to \infty)$



非反転増幅器

p5の時と同様に V_-とV_+の電位は（ほぼ）等しい

バーチャル・ショート

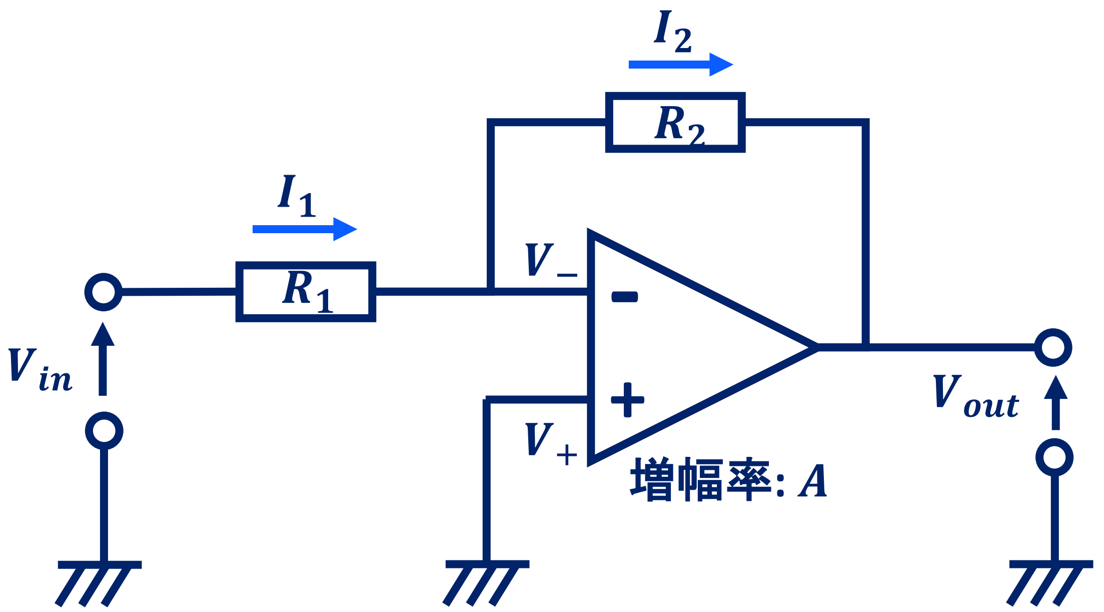
- 負帰還が掛かったオペアンプ回路において出力が飽和していない場合入力電圧の差$V_+ - V_-$は非常に小さいはず
  - V_+とV_-の電位が等しくなるように振る舞う
  - 電流は流れないがショートされているのと等価
  - バーチャル・ショートと呼ぶ

- バーチャル・ショートを使うと簡単にオペアンプ回路が解析できる

  右図の回路でバーチャル・ショートから$V_- = 0$なので

$$I_1 = I_2 = \frac{V_{in}}{R_1}$$

  よってV_{out}は $V_{out} = 0 - R_2 I_2 = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$



反転増幅器

- バーチャル・ショートが成り立たない例
  - 正帰還回路
  - オペアンプの利得（A）が小さい場合

加算回路

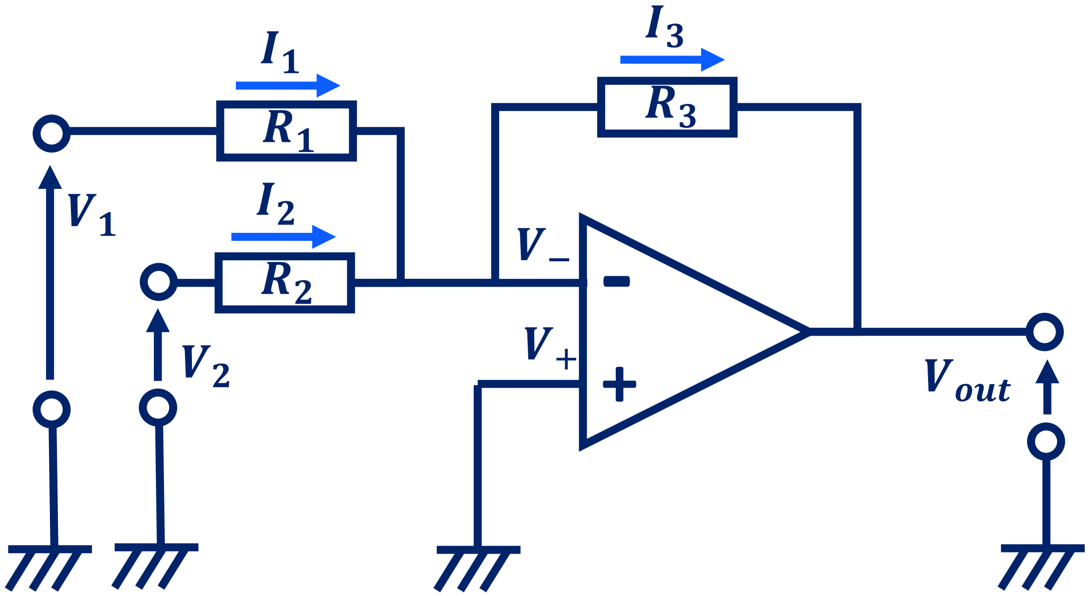
バーチャル・ショートを使って解いてみる

$V_- = V_+ = 0$であることとオペアンプの入力端子に電流が流れ込まないことを利用すると以下の関係を得る

- $V_1 = R_1 I_1$
- $V_2 = R_2 I_2$
- $0 - V_{out} = R_3 I_3$
- $I_1 + I_2 = I_3$

第1式から3式を第4式に代入しI_1, I_2, I_3を消去すると

$$V_{out} = -R_3 \underbrace{\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right)}_{\text{重み付き加算}}$$



加算回路

減算回路

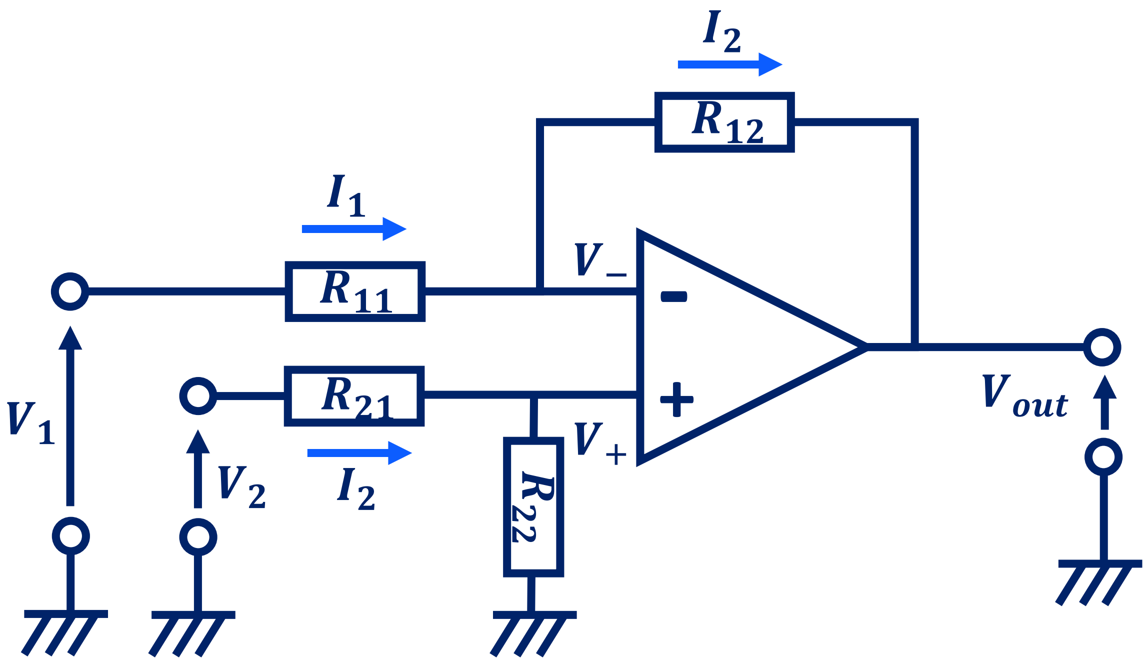
出力V_{out}と入力電圧V_1, V_2の関係は以下の様になる

$$V_{out} = \frac{R_{11} + R_{12}}{R_{11}} \left(\frac{R_{22}}{R_{21} + R_{22}} V_2 - \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} V_1 \right)$$

特に$R_{11} = R_{21} = R_i$,　$R_{12} = R_{22} = R_f$であれば

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} (V_2 - V_1)$$

となりアナログ減算を計算していることになる



減算回路

積分回路

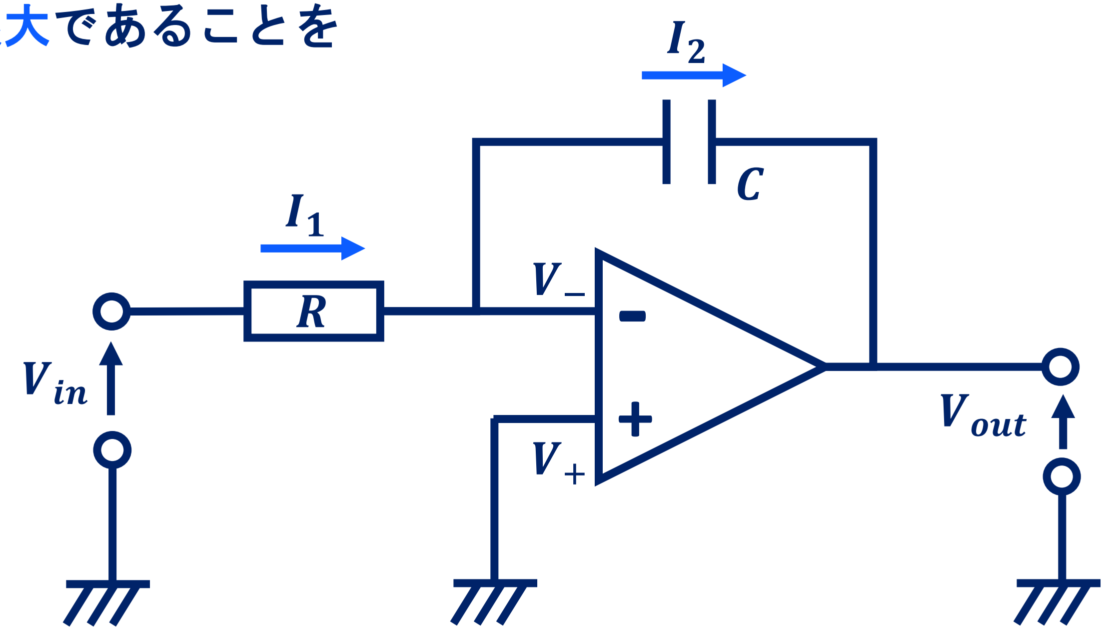
バーチャル・ショートとオペアンプの入力インピーダンスが無限大であることを利用すると以下の関係を得る

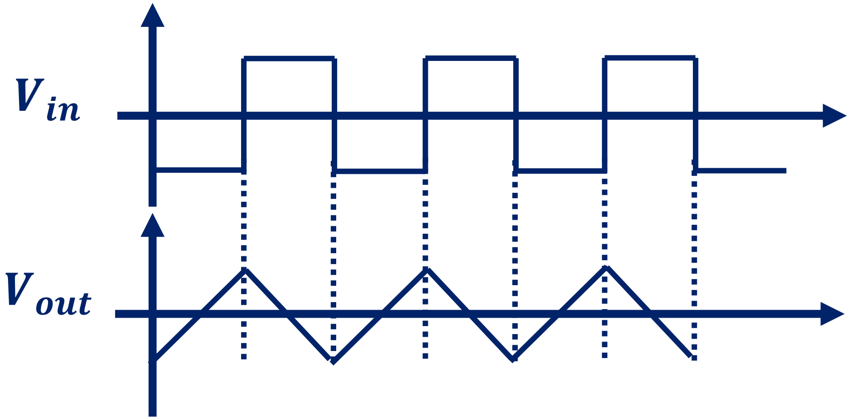
- $V_+ = V_- = 0$
- $V_{in} - V_- = RI_1$
- $V_- - V_{out} = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C}\int I_2 dt = \frac{1}{C}\int I_1 dt$

第2式から $I_1 = \frac{V_{in}}{R}$ なので，第3式に代入すると

$$V_{out} = -\frac{1}{C}\int I_1 dt = -\frac{1}{RC}\int V_{in} dt$$

を得る．よって入力電圧の時間積分が出力される．





微分回路

抵抗とコンデンサを入れ替えると微分回路になる
前ページと同様に電流・電圧の関係は以下のようになる

- $V_+ = V_- = 0$
- $V_{in} - V_- = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C}\int I_1 dt$
- $V_- - V_{out} = RI_2 = RI_1$

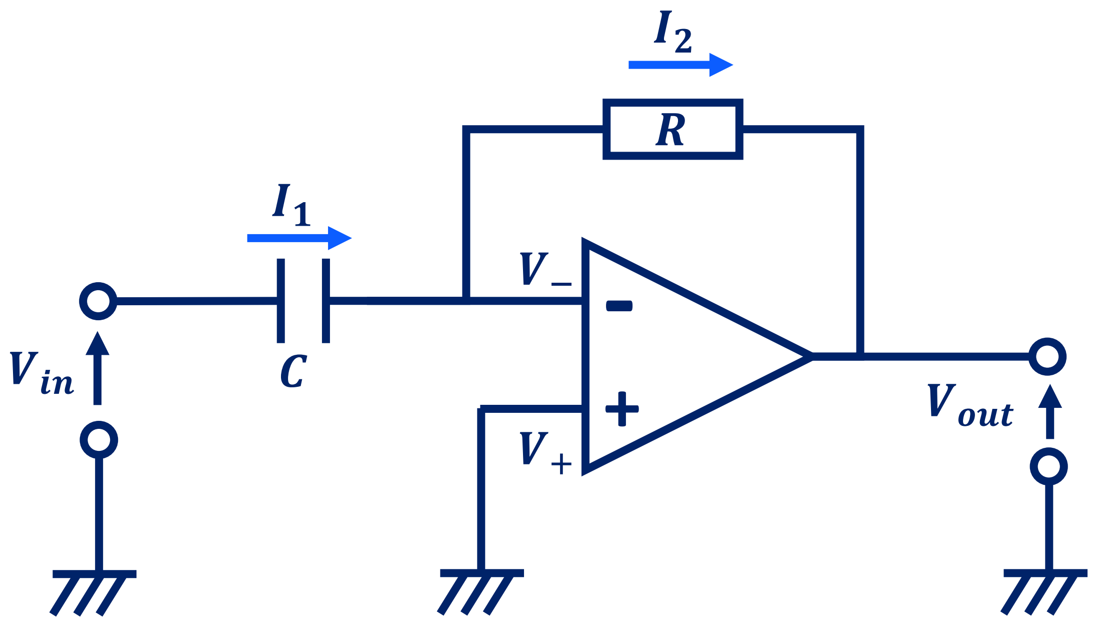
第3式から $I_1 = -\frac{V_{out}}{R}$ なので，第2式に代入すると

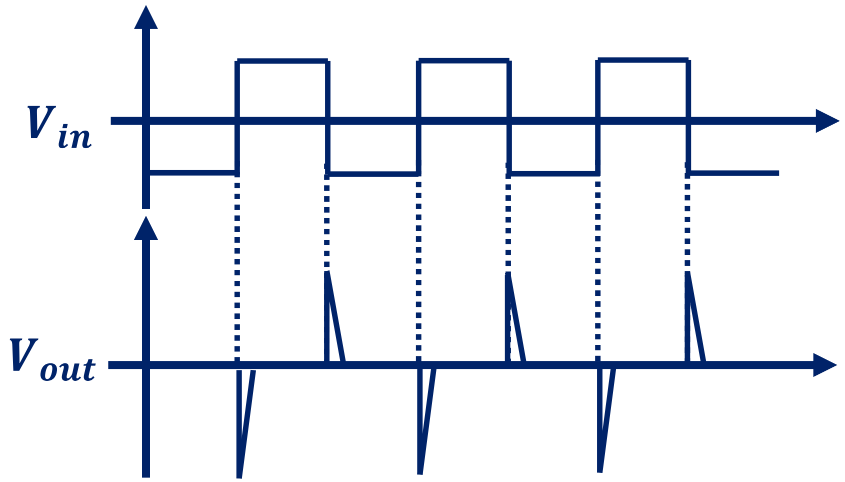
$$V_{in} = \frac{1}{C}\int I_1 dt = -\frac{1}{RC}\int V_{out} dt$$

を得る．両辺に$-RC$を掛けて微分すると

$$V_{out} = -RC\frac{dV_{in}}{dt}$$

となり，入力電圧の時間微分が出力されることが分かる





理想的にはインパルス
実際にはなまった波形が観測される