



電子回路設計 — OPアンプ (1) —

小林春夫・桑名杏奈

Email: koba@gunma-u.ac.jp

Tel: 0277-30-1788

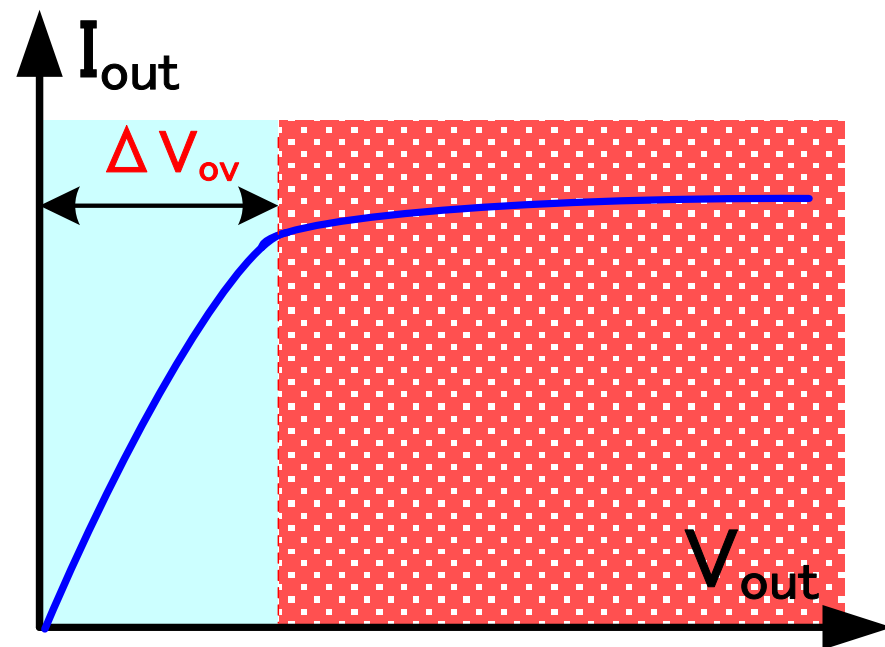
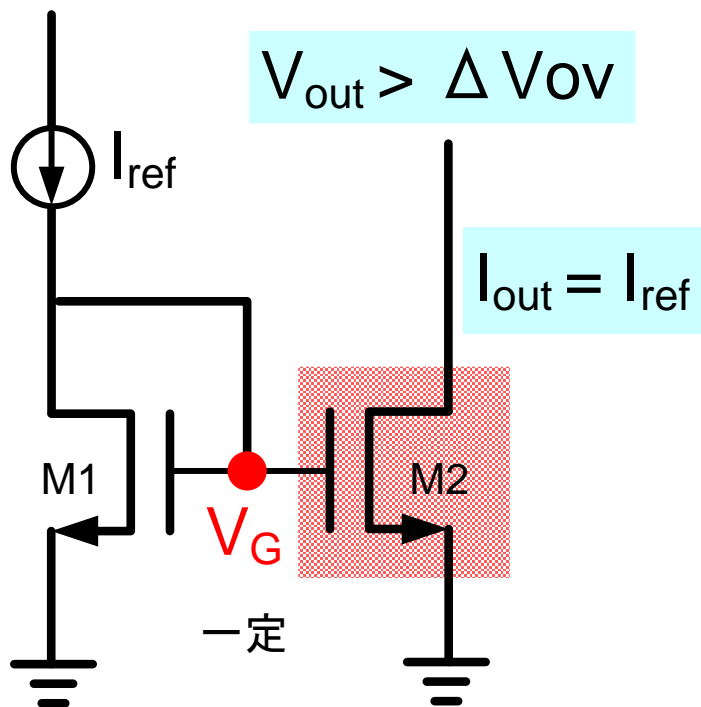
オフィスアワー: AM9:00～AM10:00(平日)

電気電子棟(3号館)4F 404室

授業の内容

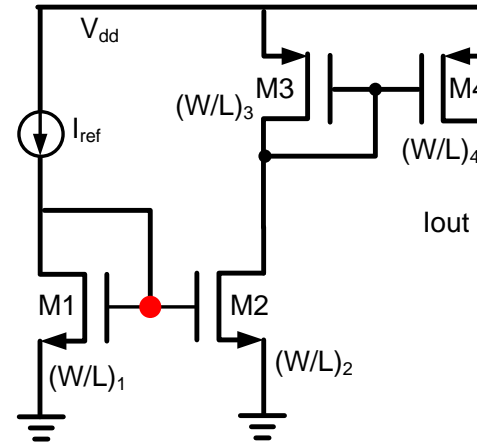
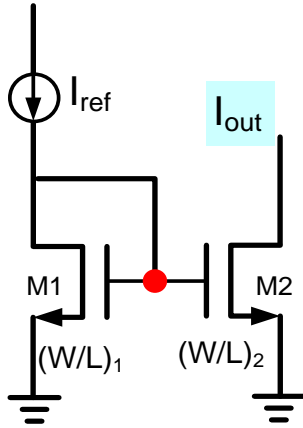
- 第1回 講義内容の説明と電子回路設計の基礎知識
- 第2回 キルヒホッフ則を用いた回路解析と演習
- 第3回 集積回路のデバイス・モデル
- 第4回 Bipolarトランジスタの基礎(1)
- 第5回 Bipolarトランジスタの基礎(2)
- 第6回 MOSTランジスタの基礎(1)
- 第7回 MOSTランジスタの基礎(2)
- 第8回 中間テスト
- 第9回 MOSTランジスタの基礎(3)
- 第10回 **OPアンプ(1)**
OPアンプ(2)
- 第11回 OPアンプ(3)
OPアンプ(4)
- 第12回 電源回路
- 第13回 高周波回路

カレントミラー回路(前回の復習)



M2のゲート電圧が固定,
飽和領域に動作,
M2とM1は同一寸法

基本カレントミラー(前回の復習)



$$I_{\text{ref}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{\text{ox}} \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2$$

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{\text{ox}} \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2$$

$$\therefore I_{\text{out}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{\text{ref}}$$

$$I_{\text{out}} = \alpha \beta I_{\text{REF}}$$

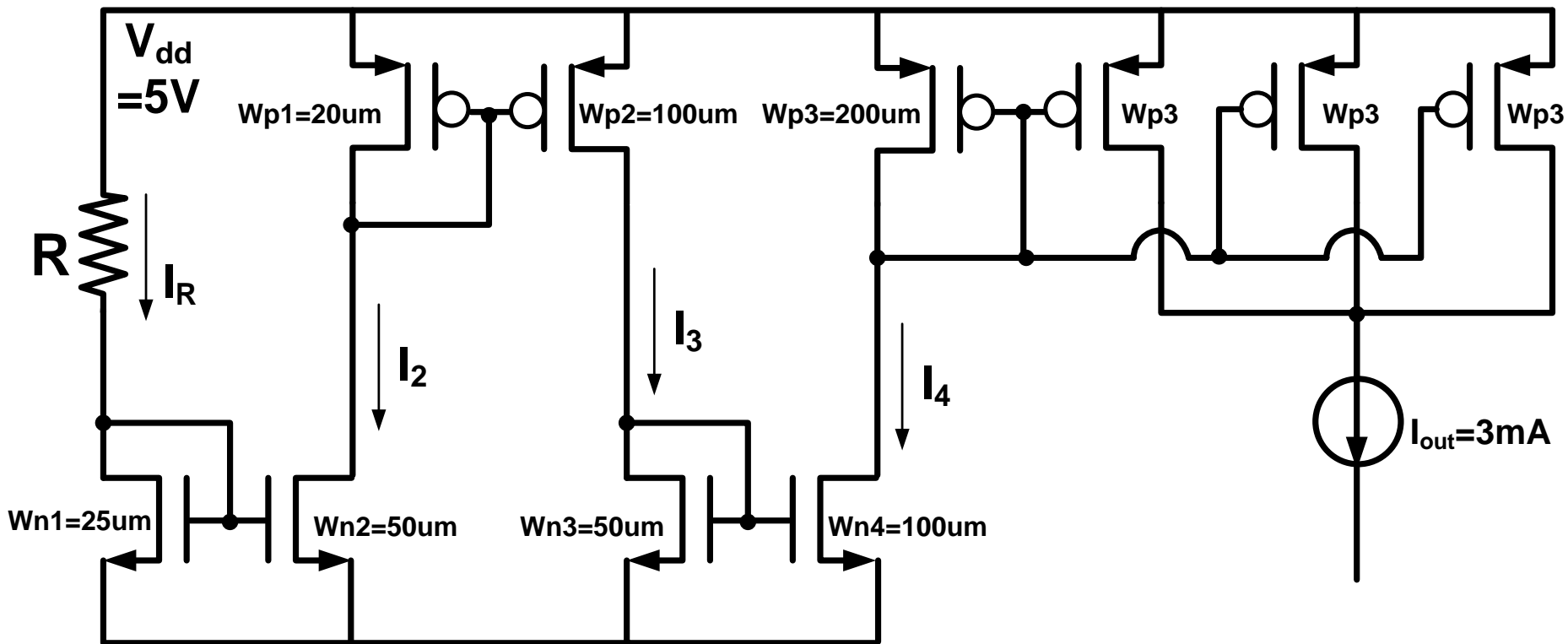
$$\alpha = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}, \quad \beta = \frac{(W/L)_4}{(W/L)_3}$$

I_{out}はミラー回路のMOSサイズ比で決まる

下記の回路において、すべてのMOSは飽和領域に動作し、 $L=10\mu\text{m}$ 。

(1) I_{out} を用いて、 I_R , I_2 , I_3 , I_4 の電流値を表示せよ。 $I_{\text{out}}=3\text{mA}$ の時、各電流値を求めよ。

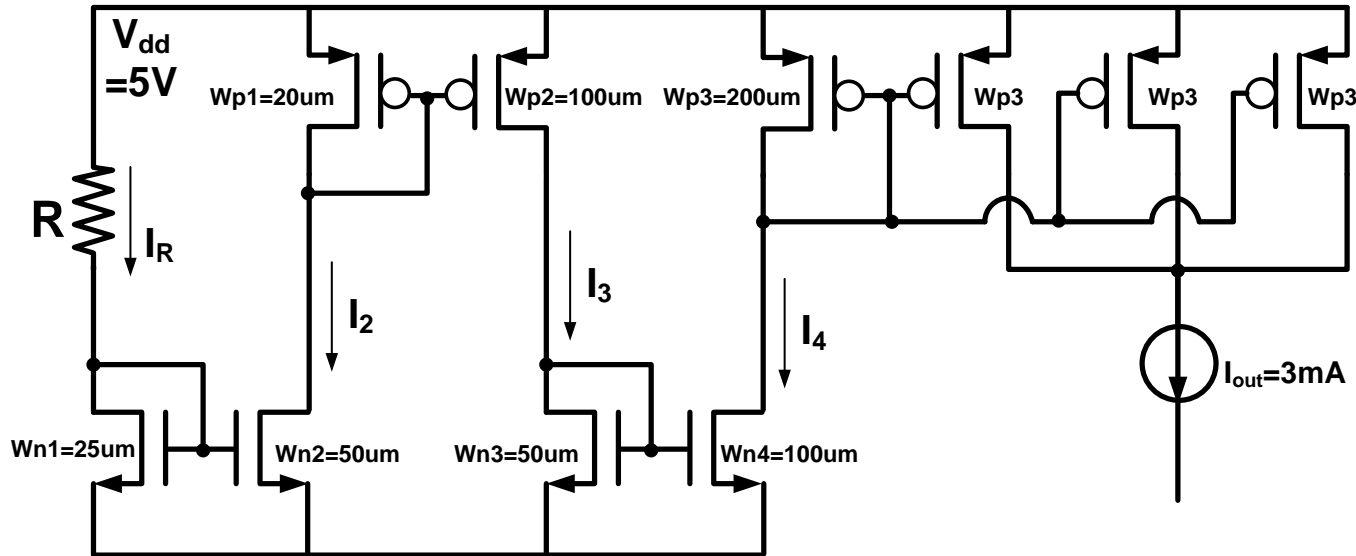
(2) $V_{\text{dd}}=5\text{V}$ 時、抵抗 R の値を求めよ。(NMOS: $V_{\text{th}}=1\text{V}$, $\mu_n C_{\text{ox}} = 20\mu\text{A}/\text{V}^2$, $\lambda=0$.)



下記の回路において、すべてのMOSは飽和領域に動作し、 $L=10\mu\text{m}$ 。

(1) I_{out} を用いて、 I_R , I_2 , I_3 , I_4 の電流値を表示せよ。 $I_{\text{out}}=3\text{mA}$ の時、各電流値を求めよ。

(2) $V_{\text{dd}}=5\text{V}$ 時、抵抗 R の値を求めよ。(NMOS: $V_{\text{th}}=1\text{V}$, $\mu_n C_{\text{ox}} = 20\mu\text{A}/\text{V}^2$, $\lambda=0$)



(1) $I_4 = I_{\text{out}}/3 = 1\text{mA}$

$I_3 = I_4/2 = I_{\text{out}}/6 = 0.5\text{mA}$

$I_2 = I_3/5 = I_{\text{out}}/30 = 0.1\text{mA}$

$I_R = I_2/2 = I_{\text{out}}/60 = 50\mu\text{A}$

(2)
$$I_d = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2$$

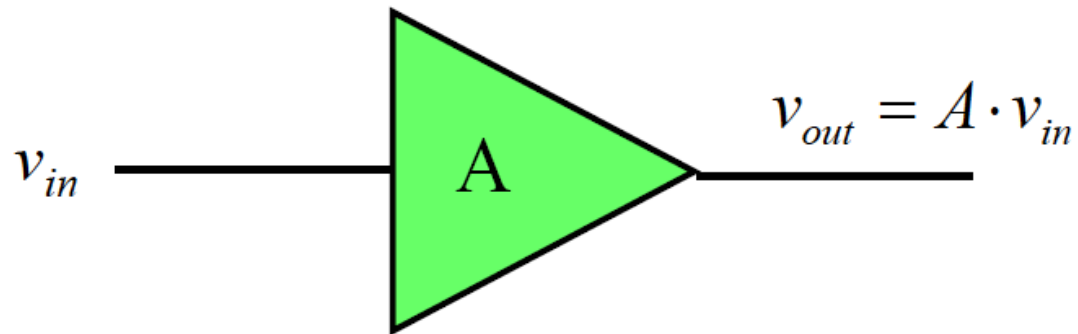
$$50 = \frac{1}{2} \times 20 \times 2.5 (V_{\text{GS}} - 1)^2$$

$$V_{\text{GS}} = 2.41[\text{V}], \quad V_g = 2.41[\text{V}]$$

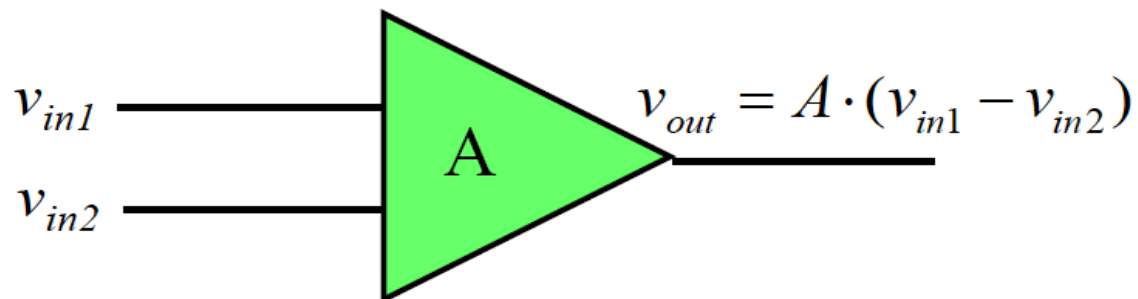
$$R = \frac{V_{\text{dd}} - V_g}{I_R} = \frac{5 - 2.41}{0.05\text{mA}} = 51.8[\text{k}\Omega]$$

増幅回路

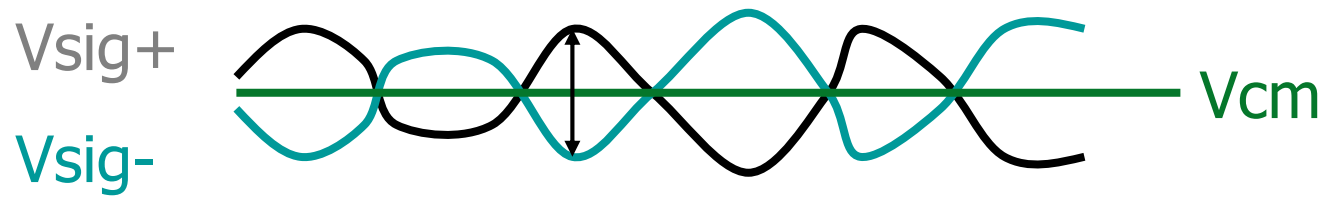
シングルエンド増幅回路



差動増幅回路



差動信号 (differential signal)



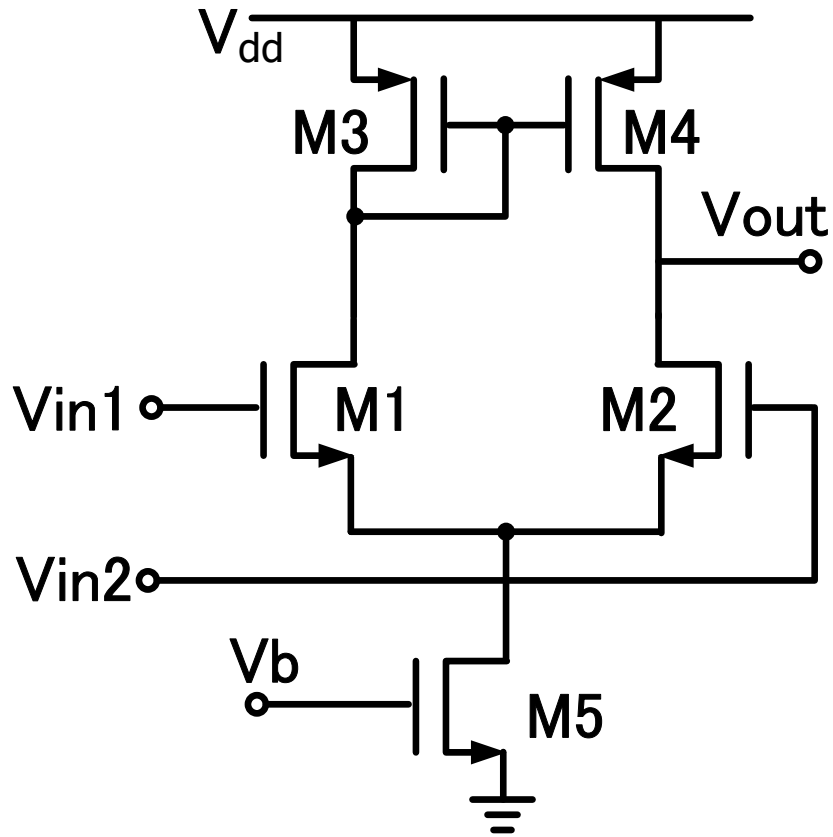
差動信号成分: $V_{sig} = V_{sig+} - V_{sig-}$

同相信号成分 (Common mode signal)

$$V_{cm} = (V_{sig+} + V_{sig-}) / 2$$

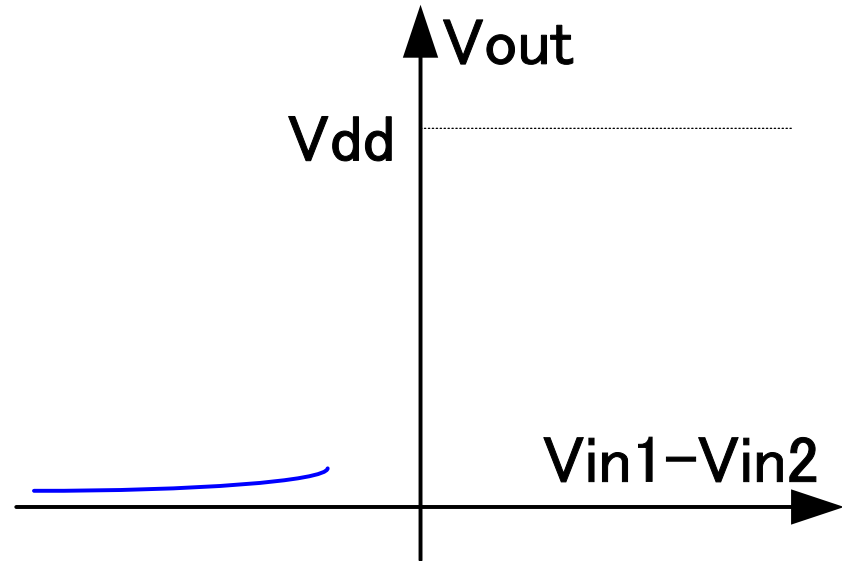
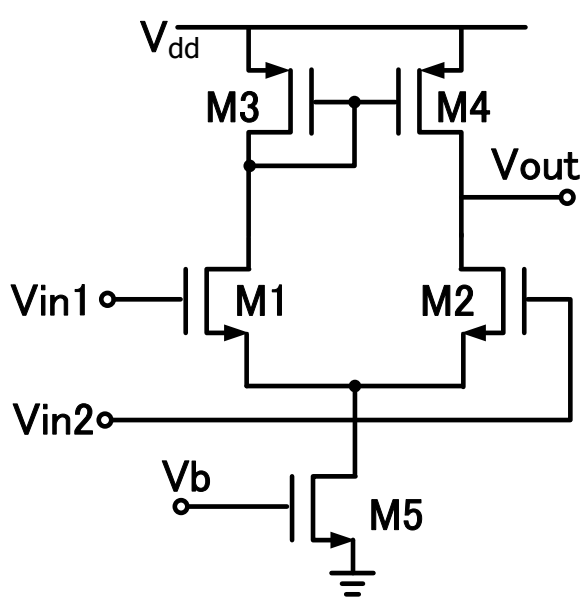
高速・高精度のアナログ回路の大部分は
差動信号を用いて設計されている。
(可能な限り差動信号・差動回路を用いること)

一般的なオペアンプの入力差動回路



標準的なオペアンプの初段として適用

一般的なオペアンプの入力差動回路



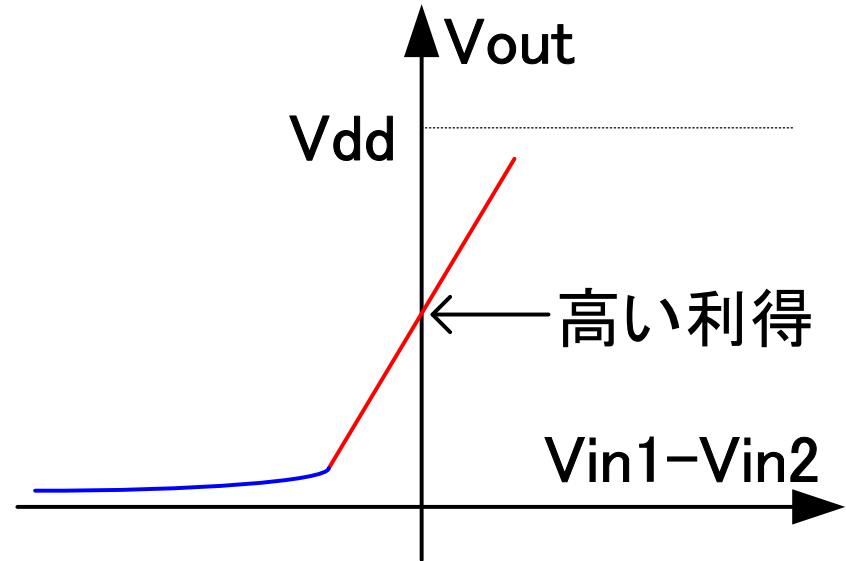
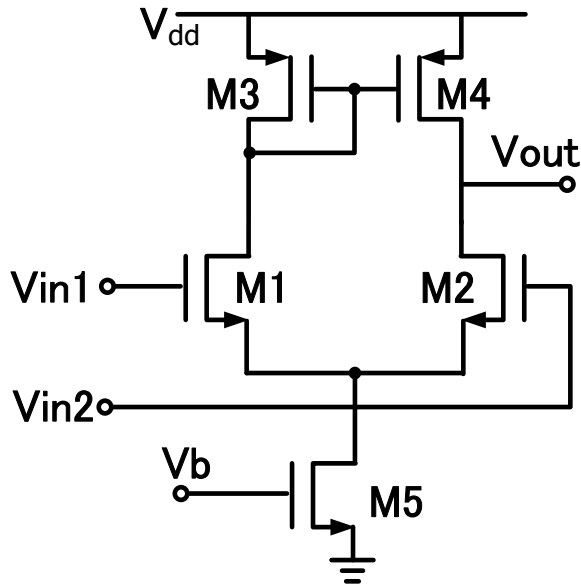
動作① $V_{in1} \ll V_{in2}$ の場合:

M1:off

⇒ I_{D3}, I_{D4} : 小

⇒ $V_{out}=0$

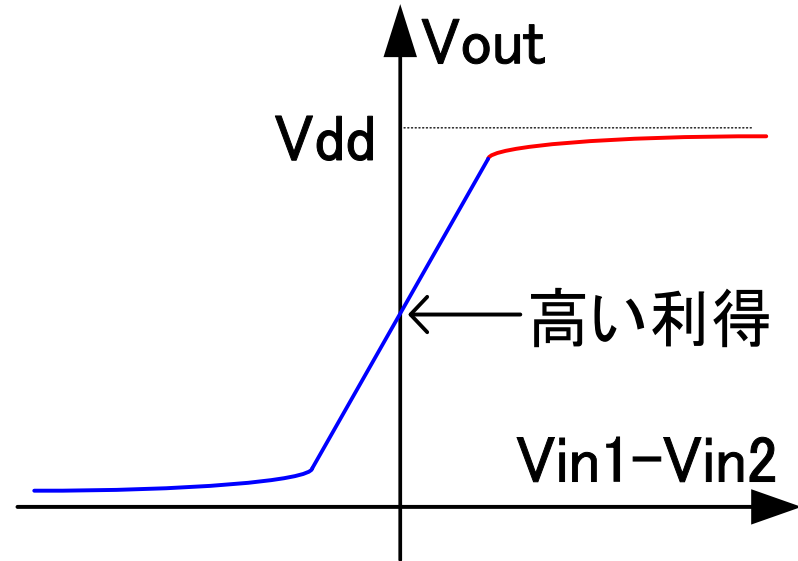
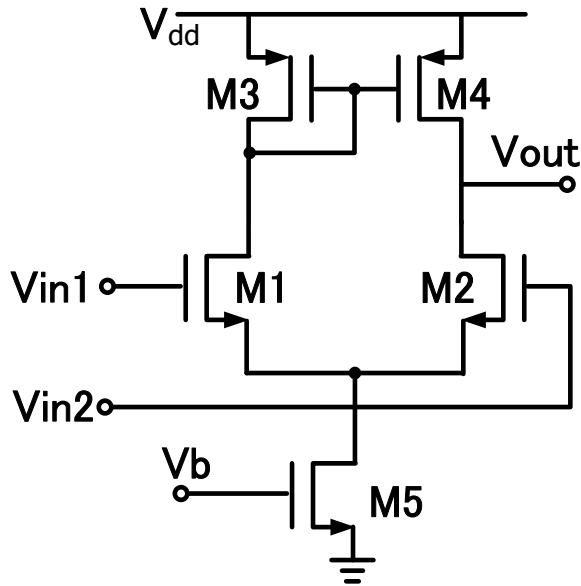
一般的なオペアンプの入力差動回路



動作② Vin1 ≒ Vin2 の場合:

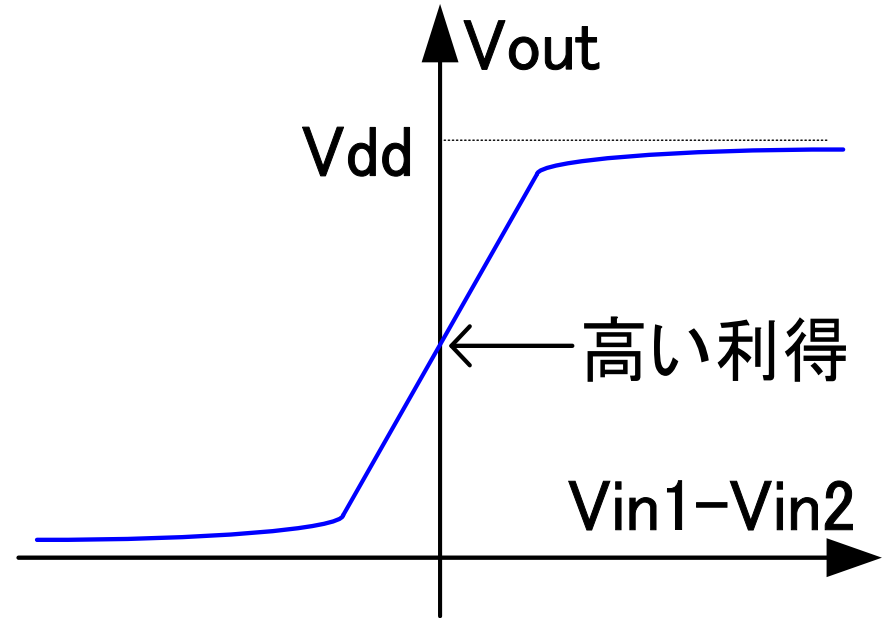
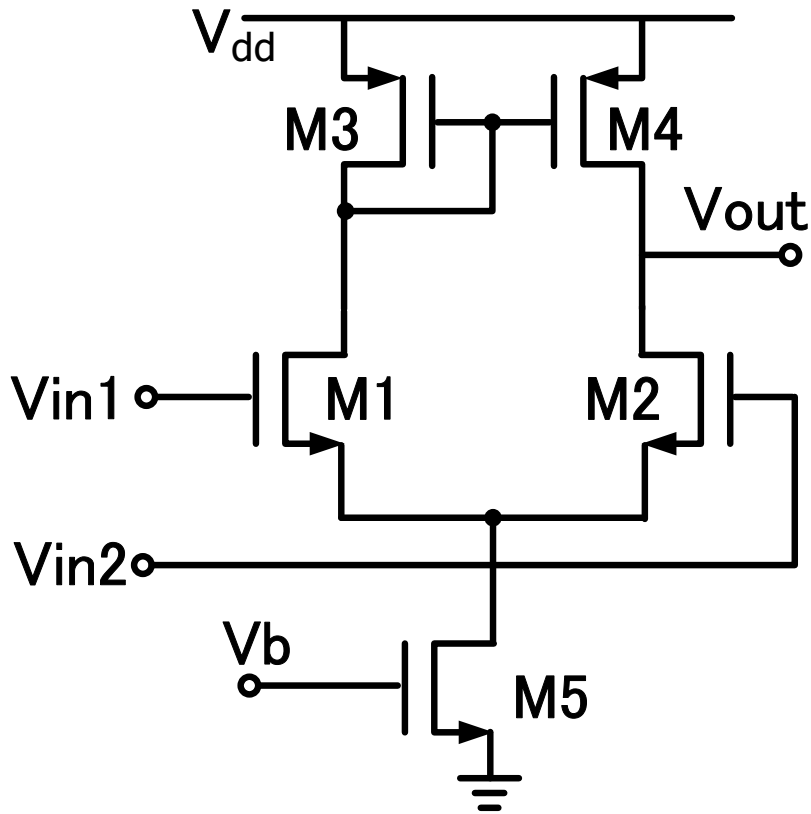
M1~M5は飽和領域
⇒ 高利得

一般的なオペアンプの入力差動回路



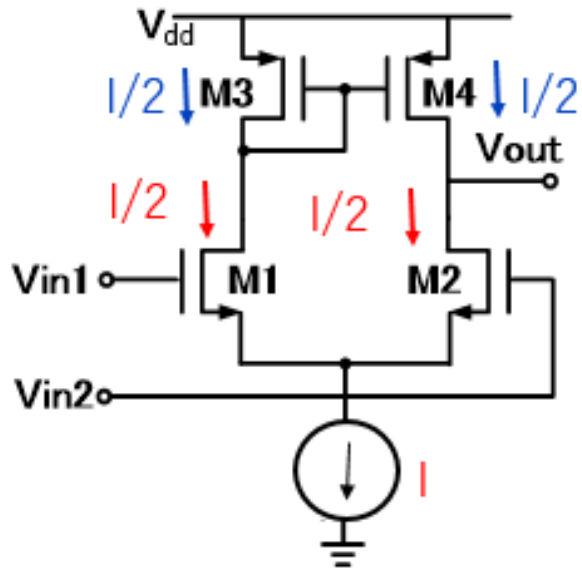
動作③ $V_{in1} \gg V_{in2}$ の場合:
ID1(= ID3)が増加 \Rightarrow ID4も増加。
 \Rightarrow Voutは上昇 \Rightarrow Vout=Vdd

一般的なオペアンプの入力差動回路



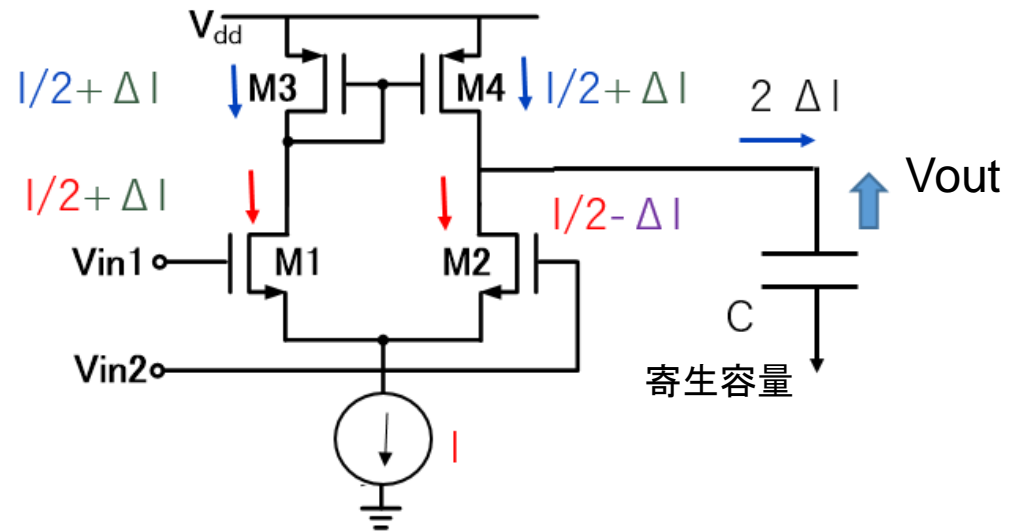
動作の直観的理解

$V_{in1} = V_{in2}$ のとき

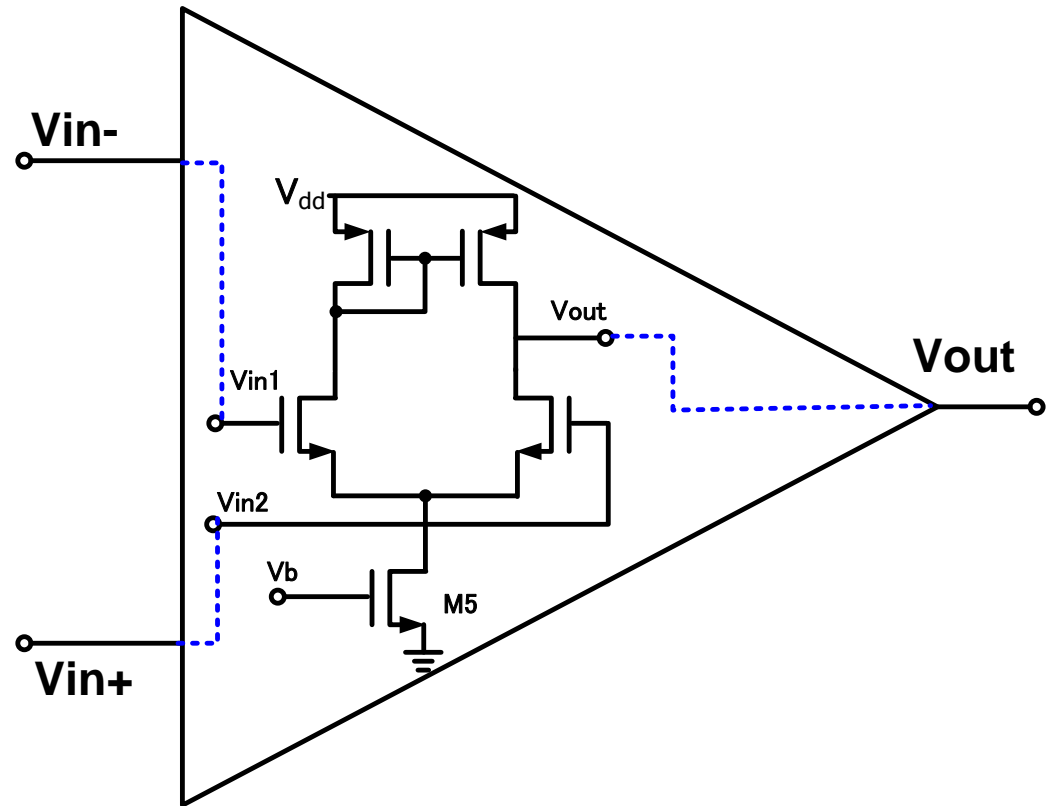
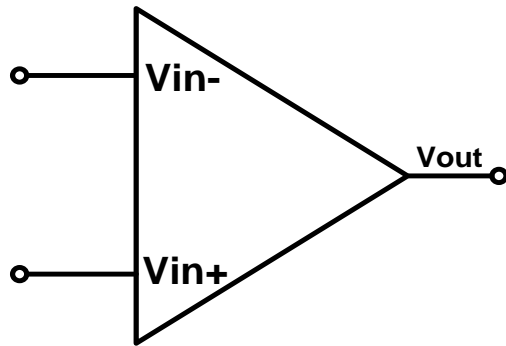


$V_{in1} > V_{in2}$ のとき

↓
 V_{out} は上昇



差動オペアンプのシンボル

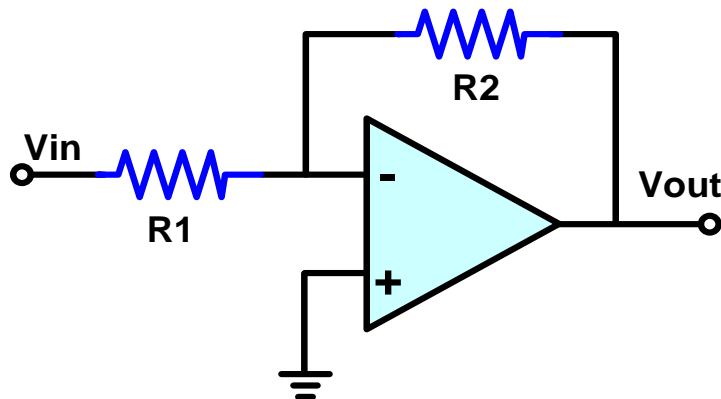


何故 オペアンプ? (1)

電子回路と線形性・非線形性

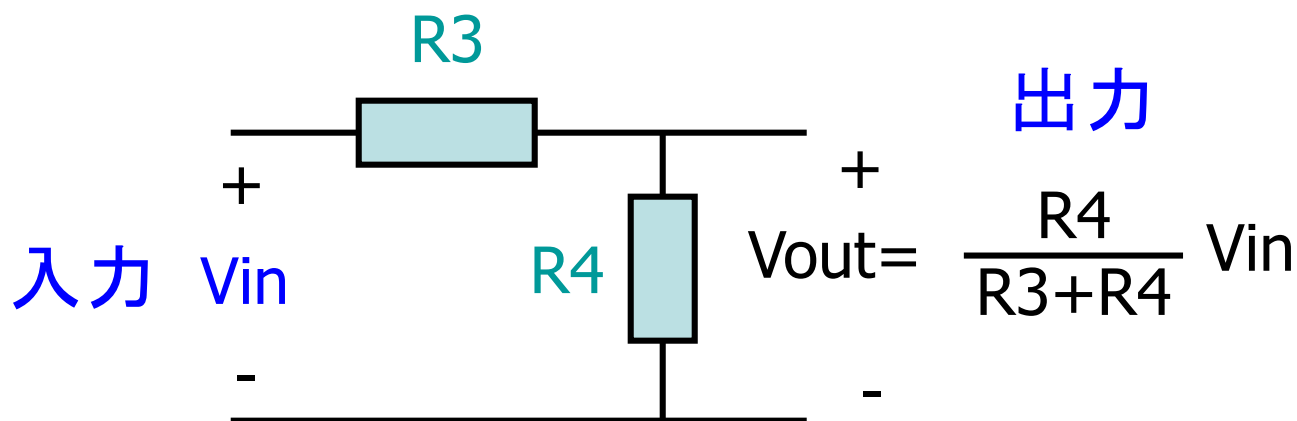
トランジスタ: 信号を増幅、非線形特性
多くのアナログ電子回路: 線形特性

電子回路設計は、
「非線形素子(トランジスタ)を組み合わせて
線形なシステム(電子回路)を設計すること」
という解釈も可能。



$$V_{out} = -\frac{R2}{R1} V_{in}$$

抵抗だけでは信号を増幅できない。



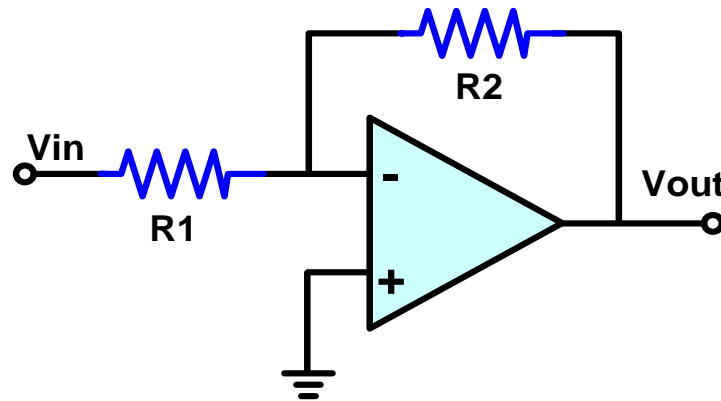
常に $\frac{R4}{R3+R4} < 1$



出力信号は
入力信号より小さい

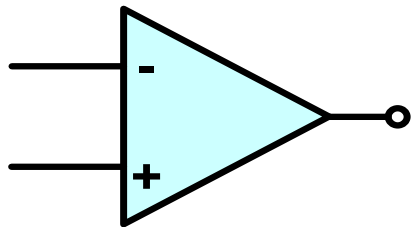
線形であるが信号を増幅できない。

信号増幅・線形電子回路の例



$$V_{out} = -\frac{R2}{R1} V_{in}$$

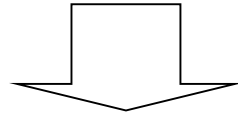
$R2 > R1$ にすれば $\frac{R2}{R1} > 1$ \rightarrow 信号増幅



オペアンプ: トランジスタ, R, C
から構成する。

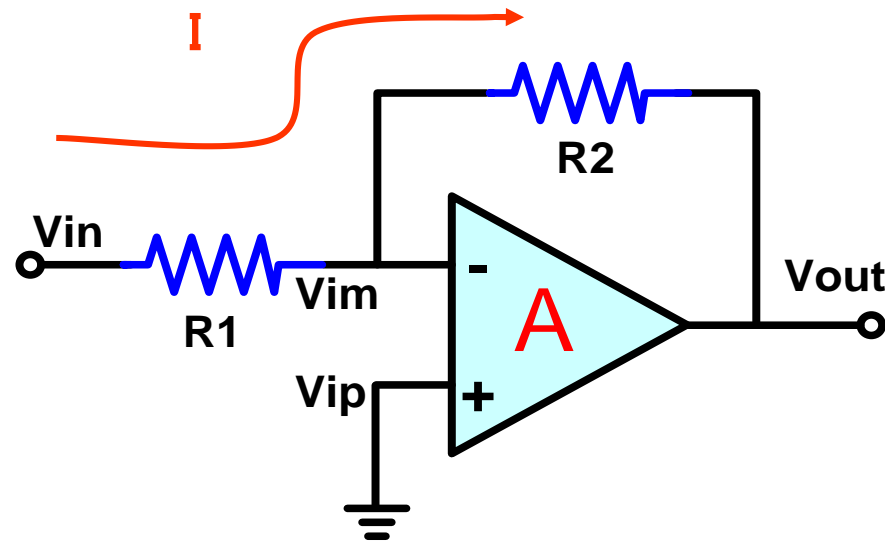
何故 オペアンプ?(2)

ネガティブフィードバック(負帰還)効果



- ◆ 任意の伝達関数を高精度に作成
- ◆ アンプ自身の非線形性の低減
- ◆ アンプ自身のゲインばらつき等の鈍感化
- ◆ 電源変動、温度変動、プロセスばらつきの影響低減

オペアンプの使用法(1)反転増幅器



$$I = \frac{V_{in} - V_{im}}{R1} = \frac{V_{im} - V_{out}}{R2}$$

$$V_{out} = A (0 - V_{im}) = -A V_{im}$$

オペアンプの使用法(1)反転増幅器

抵抗の比 ($R2/R1$) でゲインがきまる。

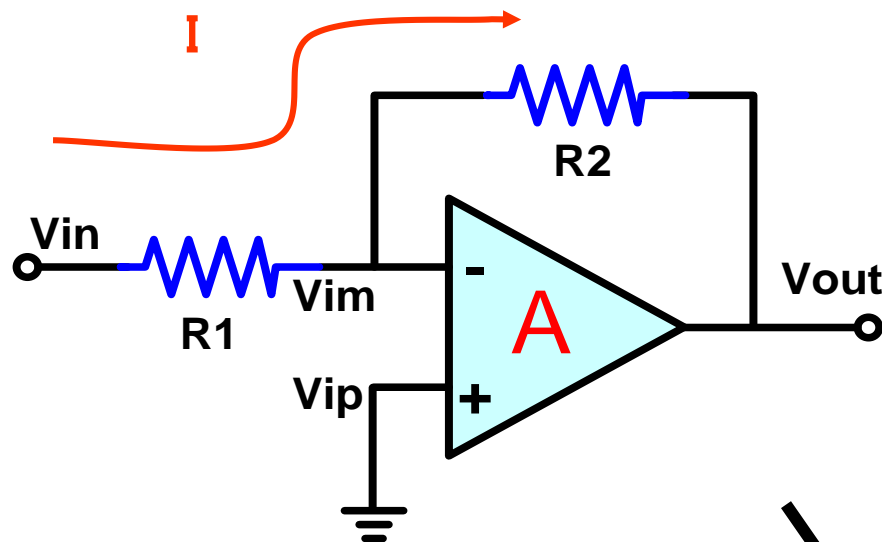
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R2}{\frac{R1 + R2}{A} + R1} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} \frac{-R2}{R1}$$

仮想接地 (Virtual Ground)

$$V_m = \frac{R2 V_{in}}{(R1+R2) + A R1} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} 0$$

オペアンプのゲインAは大きければよい。

オペアンプの使用法(1)反転増幅器

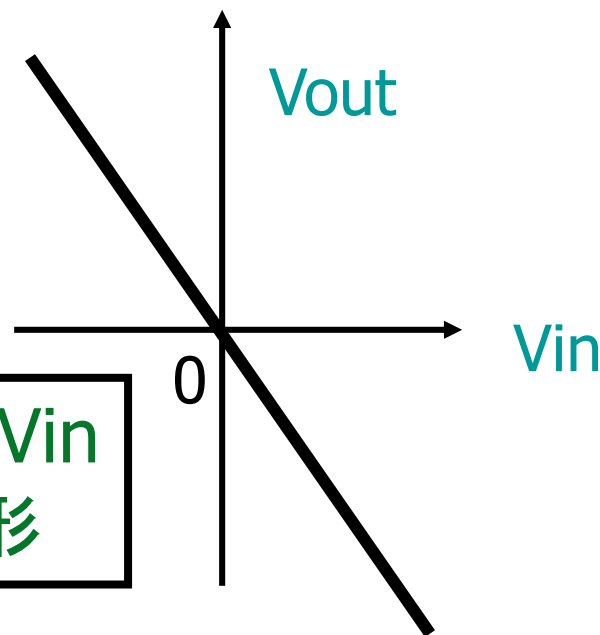


$$V_{out} \doteq -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

$$V_{im} \doteq 0$$

$$I \doteq \frac{V_{in}}{R_1}$$

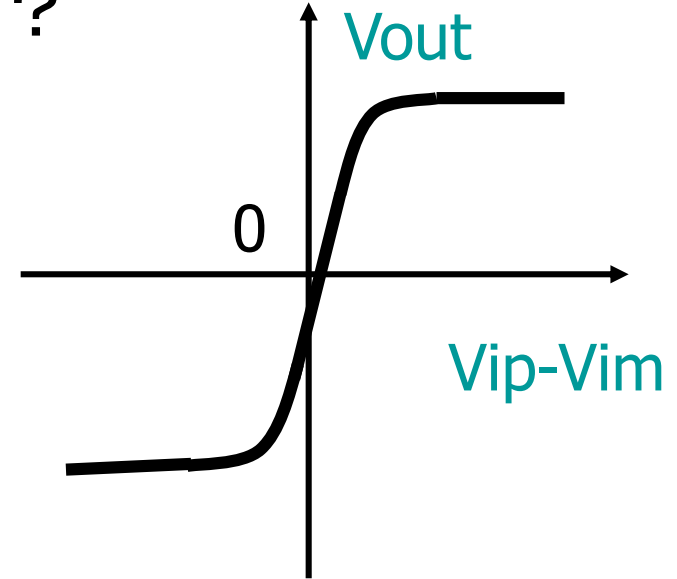
広い入力範囲 V_{in}
にわたって線形



オペアンプの使用法(1)反転増幅器

オペアンプのゲイン $A=10,000$ のとき
入力 $V_{ip} - V_{im} = 1[V]$ のとき
出力 $V_{out} = 10,000[V]$ か？

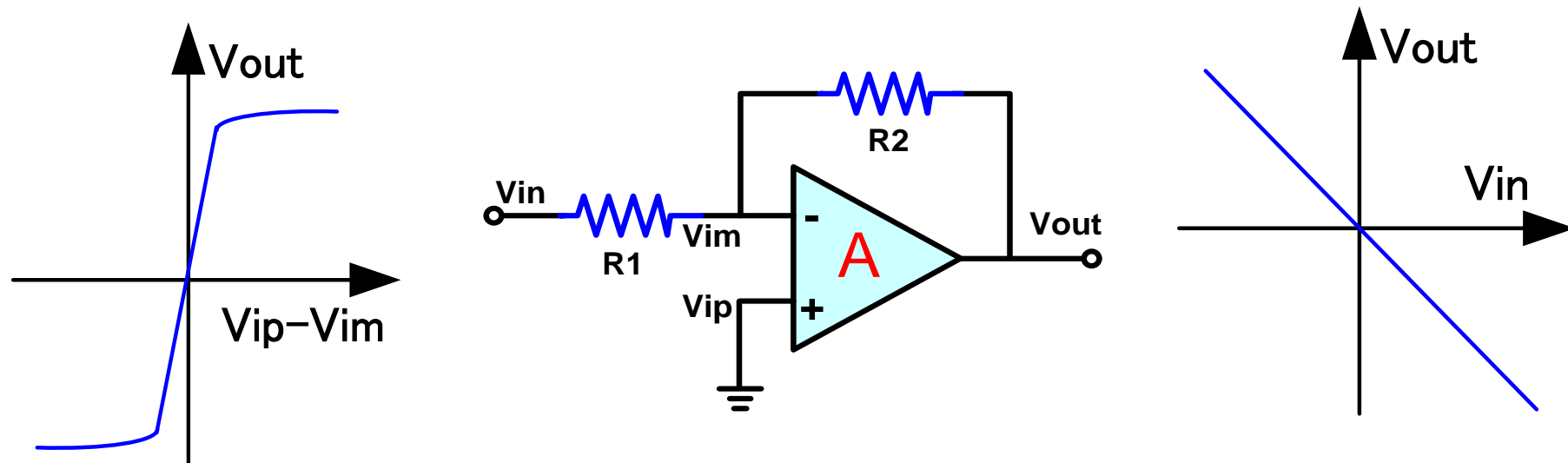
答えは **No !**



オペアンプの特性

$V_{ip} - V_{im} \doteq 0$ (仮想接地)
であることに注意。
 $V_{ip} - V_{im} = 0$ 近辺でのみ
ゲインが高い(傾きが10,000)

オペアンプの使用法(1)反転増幅器



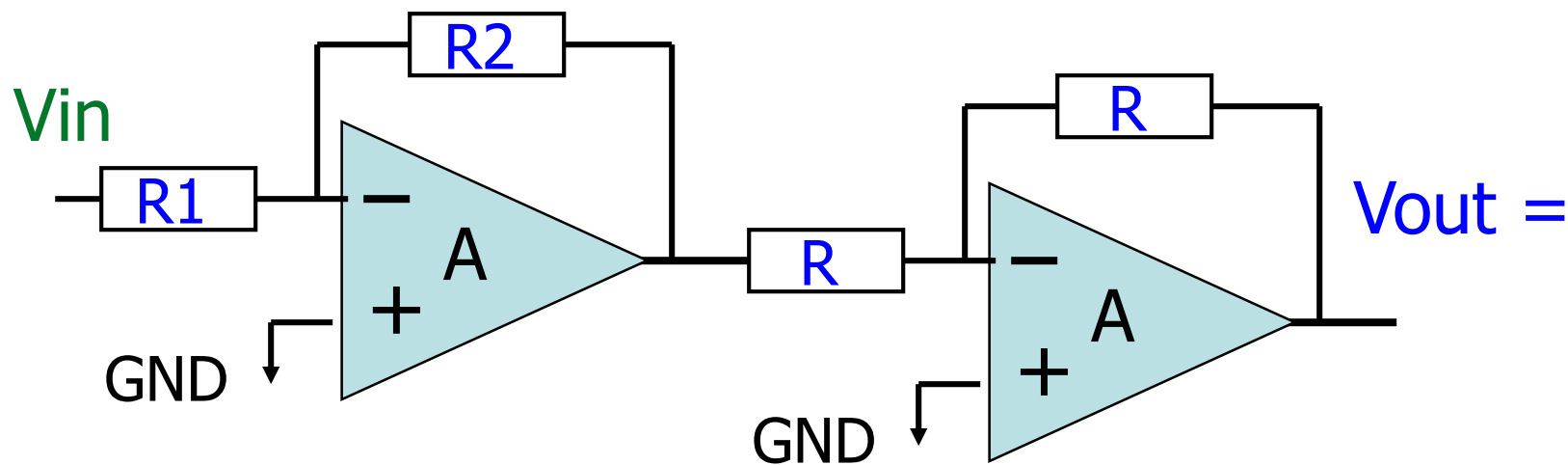
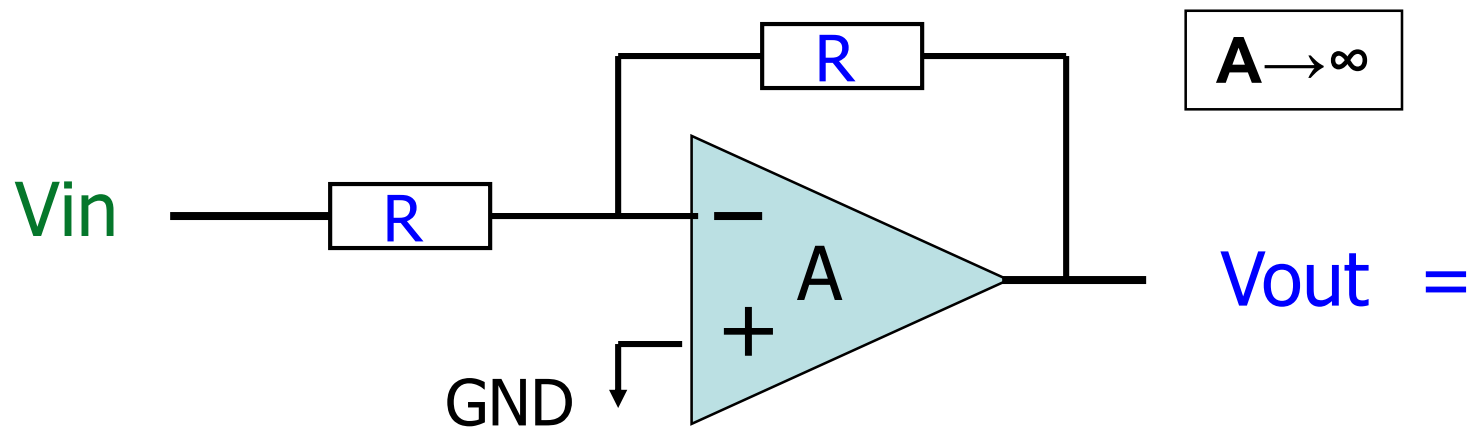
オペアンプの特性

- 非線形
- 入力ゼロ近辺でのみゲインAが大きい

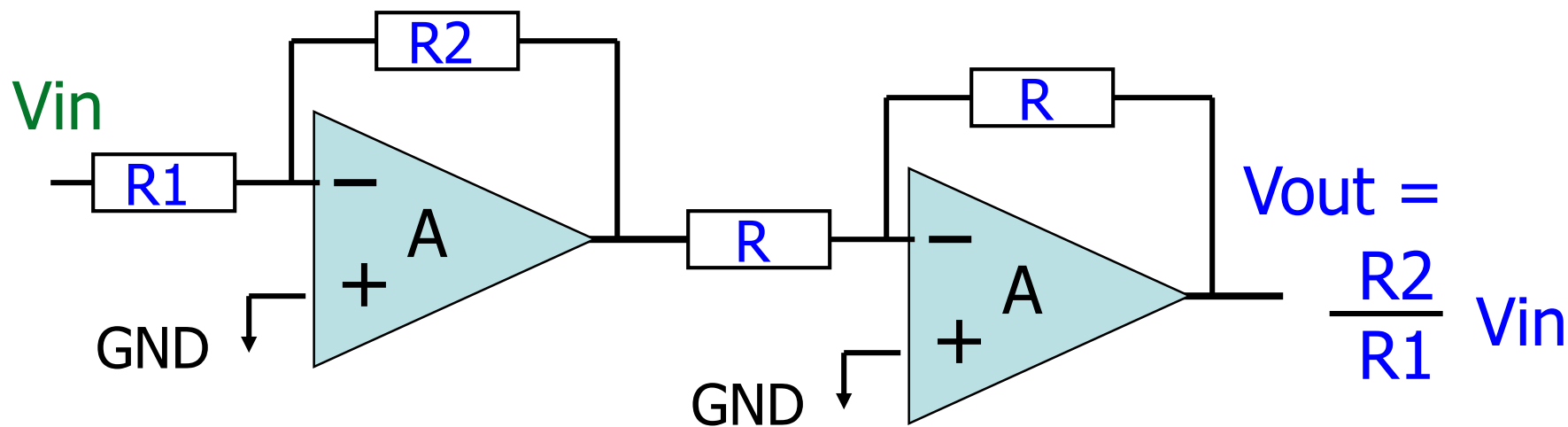
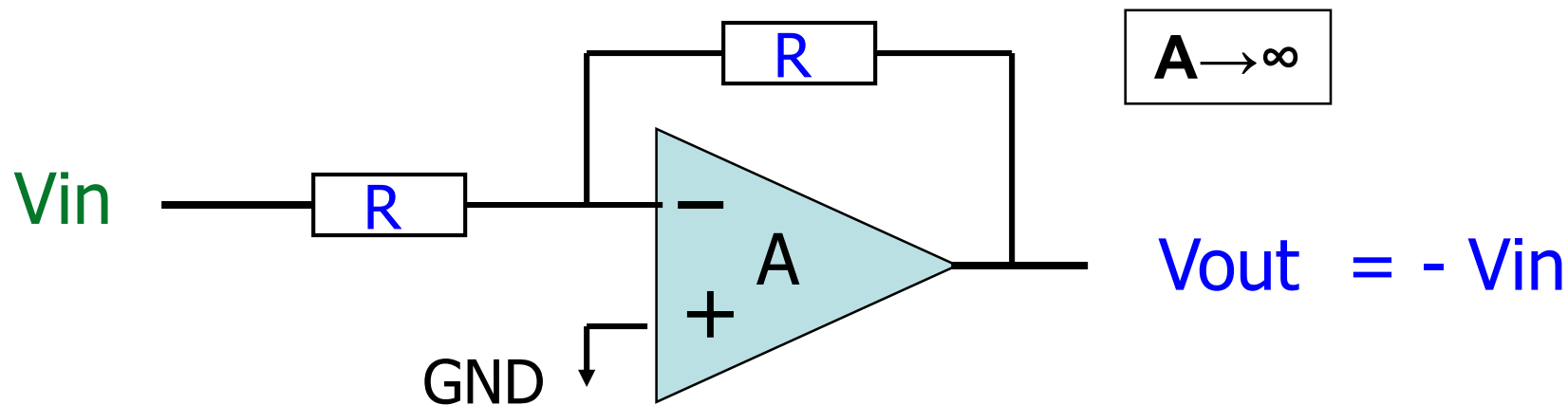
オペアンプを用いた回路

- 広い入力範囲にわたって一定ゲイン、線形

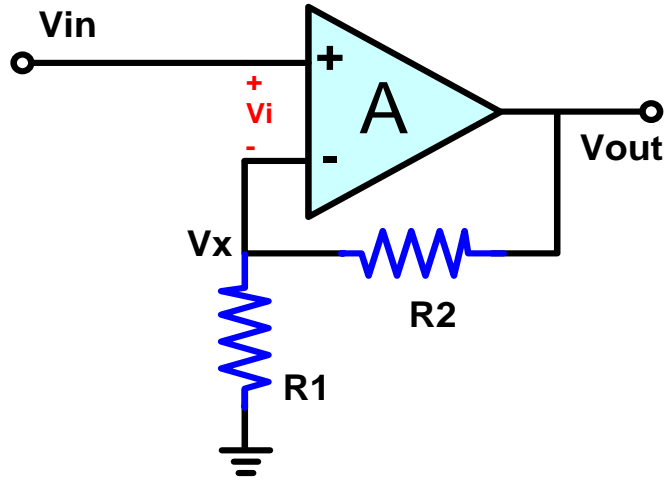
オペアンプの使用法(2)入力信号の反転



オペアンプの使用法(2)入力信号の反転



オペアンプの使用法(3)非反転増幅器

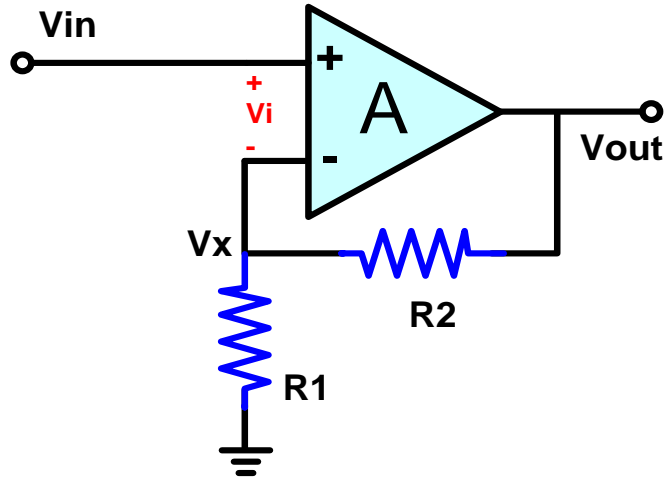


$$V_i = \frac{V_{out}}{A}$$

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

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} =$$

オペアンプの使用法(3)非反転増幅器



$$V_i = \frac{V_{out}}{A}$$

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

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

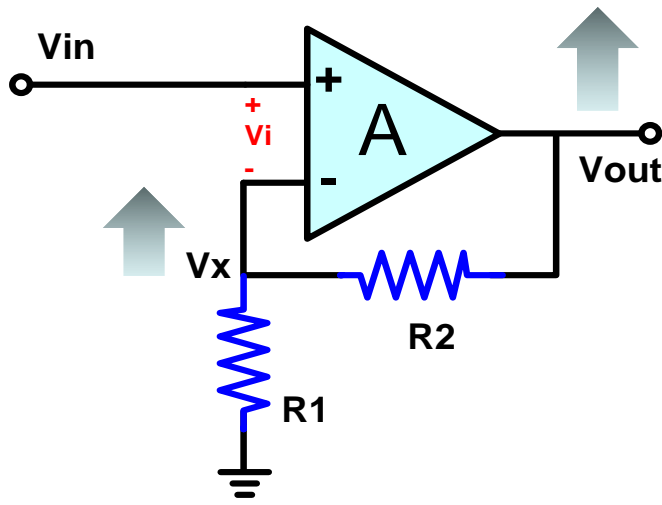
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{\frac{AR_1}{R_1 + R_2}}{1 + \frac{AR_1}{R_1 + R_2}} \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (\mathbf{A} \rightarrow \infty)$$

負帰還の動作 ($V_x = V_{in}$ になる説明)

$V_x < V_{in}$ のとき

$$V_{out} = A (V_{in} - V_x) \quad \uparrow$$

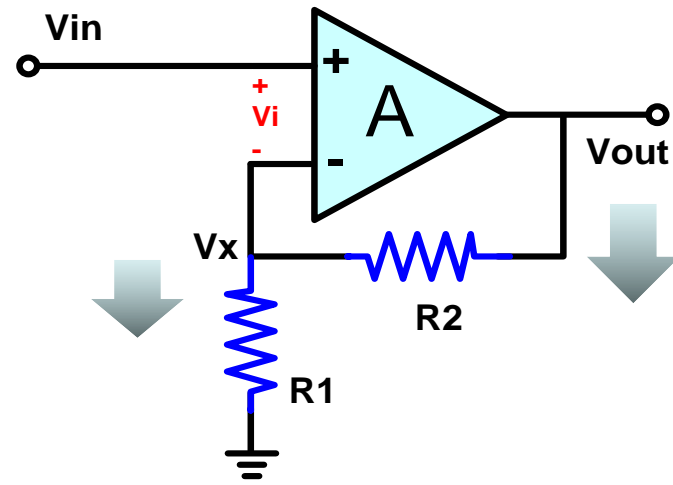
$V_x \quad \uparrow$



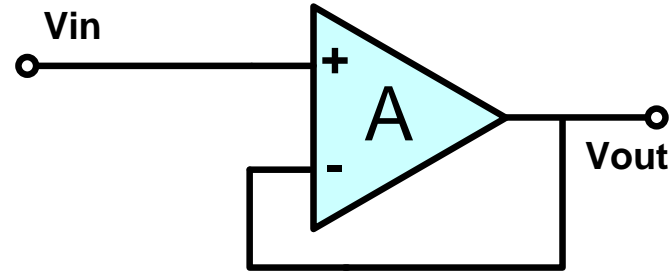
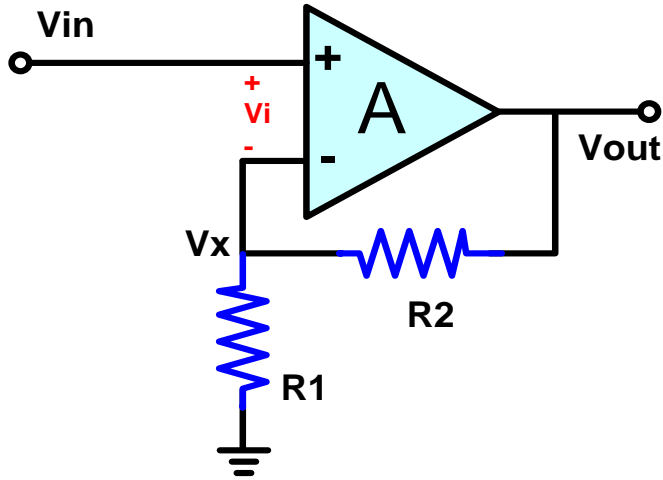
$V_x > V_{in}$ のとき

$$V_{out} = A (V_{in} - V_x) \quad \downarrow$$

$V_x \quad \downarrow$



オペアンプの使用法(4)ボルテージ・フォロワ



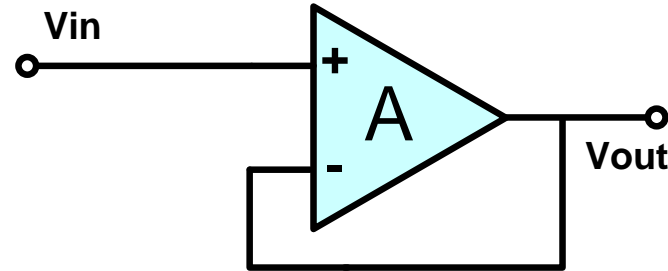
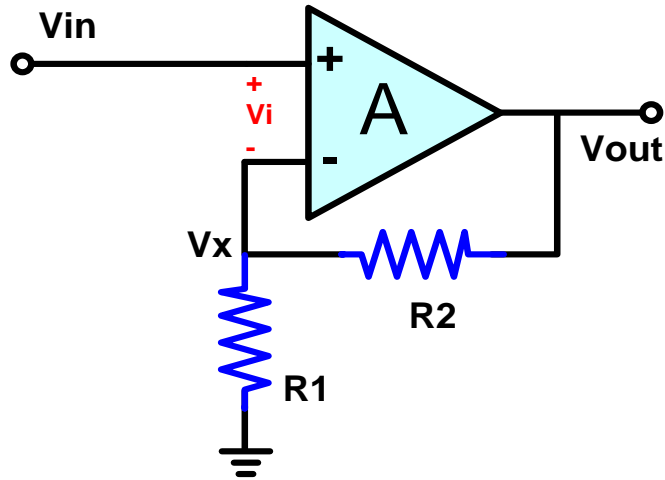
非反転増幅回路の応用: 電圧フォロワ回路

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_1 \rightarrow \infty, R_2 = 0 \quad A \gg 1$$



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx$$

オペアンプの使用法(4)ボルテージ・フォロワ



非反転増幅回路の応用: 電圧フォロワ回路

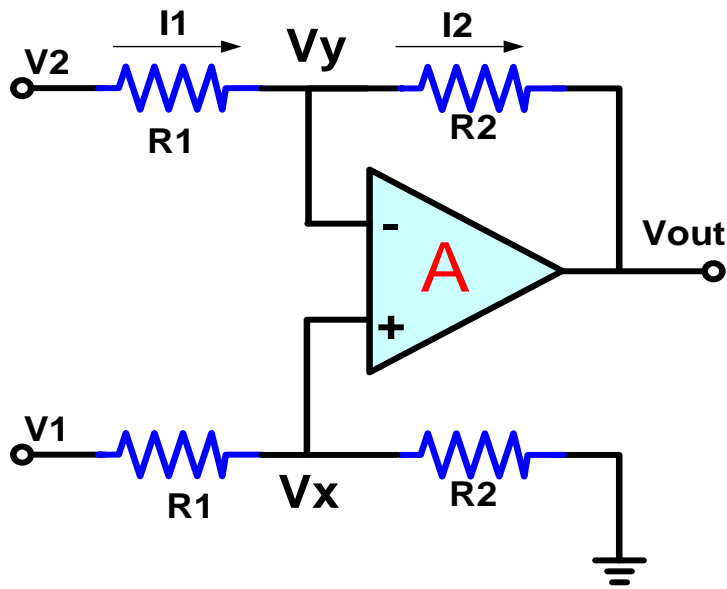
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_1 \rightarrow \infty, R_2 = 0 \quad A \gg 1$$



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

電力を提供するバッファ回路として、よく使われる。(電圧フォロワ)

オペアンプの使用法(5)差動増幅器



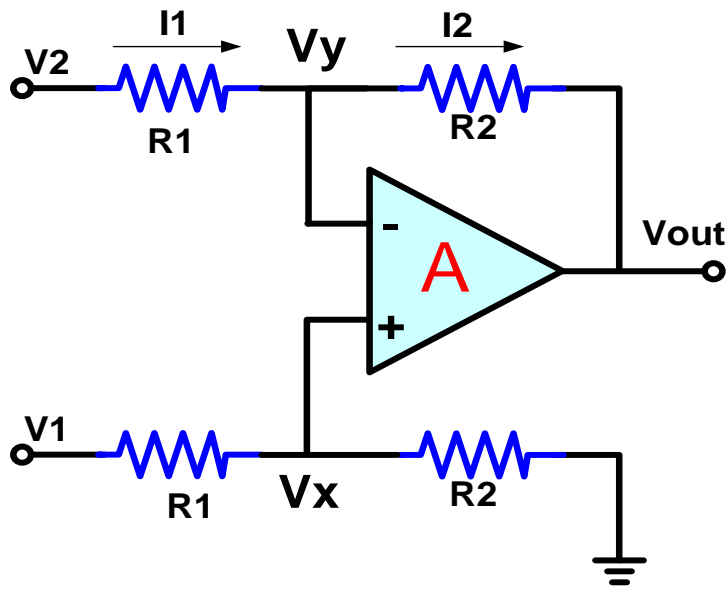
$$\frac{V2 - Vy}{R1} = \frac{Vy - Vout}{R2}$$

$$Vx = Vy = V1(\quad)$$

$$A \rightarrow \infty$$

$$Vout =$$

オペアンプの使用法(5)差動増幅器



$$\frac{V2 - Vy}{R1} = \frac{Vy - Vout}{R2}$$

$$Vx = Vy = V1 \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right)$$

$$A \rightarrow \infty$$

$$Vout = \frac{R2}{R1} (V1 - V2)$$

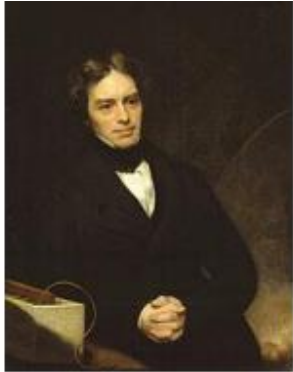
まとめ

- OP-AMPの基礎
- 演算回路

※講義資料:

<https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/lecture/lecture.html>

IoT時代のアナログ回路： センサインターフェース



マイケル
ファラデー
1771-1867
英国
化学者
物理学者

英国ロンドンのテムズ川の流速を電磁流量計の原理で
測定を試みる。(磁界は地磁気を利用)

出力電気信号が非常に小

フィルタリング・増幅する電子回路がない



測定不可

自動車に
多数の
センサ

電磁流量計の動作原理

- ファラデーの法則
起電力 \propto 流速

$$E = D \cdot \bar{V} \cdot B$$

E : 起電力(V)
 D : 管内径(m)
 \bar{V} : 平均流速(m/s)
 B : 磁束密度(T)



- フレミングの右手の法則



Michael Faraday /
Bonaventura Thurlmann 1941

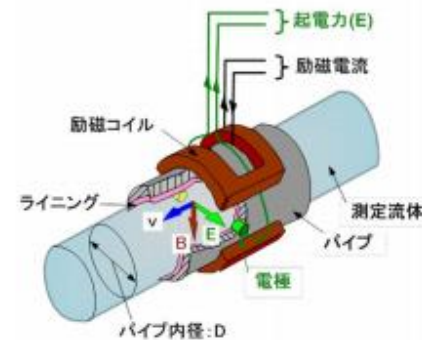
電磁流量計の動作原理

- 起電力 $E(V)$
 $E = D \cdot \bar{V} \cdot B$
- 体積流量 $Q(m^3/s)$

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot V$$

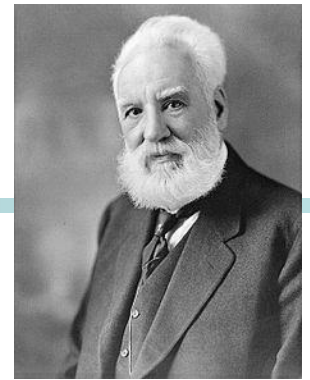
- 起電力と体積流量の関係

$$E = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{B}{D} \cdot Q$$



アレクサンダー・グラハム・ベル

Alexander Graham Bell 1847-1922



- スコットランド(エジンバラ) 生まれ
- 科学者、発明家、工学者
- 実用的電話の発明
- 光無線通信、水中翼船、航空工学等の分野で業績
- 1877年 ベル電話会社を設立

「ベルが電話を発明したとき、市場調査などしたか。」
(Steve Jobs, Apple社)



ハロルド・ブラック 1898-1983

- 電話産業ウエスタン・エレクトリックに在籍
(※ウエスタン・エレクトリックは
ベル研究所で有名なAT&T社の製造部門)
- 生涯特許は347件

1927年8月2日のこと、突然、ブラックに負帰還のアイデアがひらめいた。ニュージャージーからニューヨークへ通勤するフェリーボートの中で、増幅器の出力を入力に、逆相でもどし、出力から歪みをキャンセルする方法を思いつく。

負帰還増幅

- 数年後にはナイキスト (H. Nyquist)が負帰還増幅器の安定・不安定を判別する手法を考案(ナイキスト安定判別法)
- ボード(H. Bode)が負帰還増幅器のシステムの設計解析手法を編み出した。(ボード線図、位相余裕、利得余裕)
- ベル研所長のKelly
「負帰還はあらゆる目的につかわれる増幅器に採用されるだろう」は現実のものになっていく。

Operation Amplifier



Operational amplifier の用語は
米国コロンビア大学の
ジョン・ラガツィーニ (John Ragazzini) 教授により
1947 年に公表された論文で初めて使用される。
複数の入力電圧にて、数学的な演算 (Operation)
が可能である増幅器 (Amplifier) を
Operational amplifier と定義。

(J. Ragazzini は

R. E. Kalman, E. I. Jury, L. A. Zadeh 等の師)

オペアンプはアナログの μ P

半導体ユーザ :

マイクロプロセッサ : プログラムの変更で
様々なデジタル処理が可能

オペアンプ : 周辺回路の変更で
様々なアナログ処理が可能

半導体メーカー :

マイクロプロセッサ、オペアンプを大量生産

「多品種少量生産」を避けられる