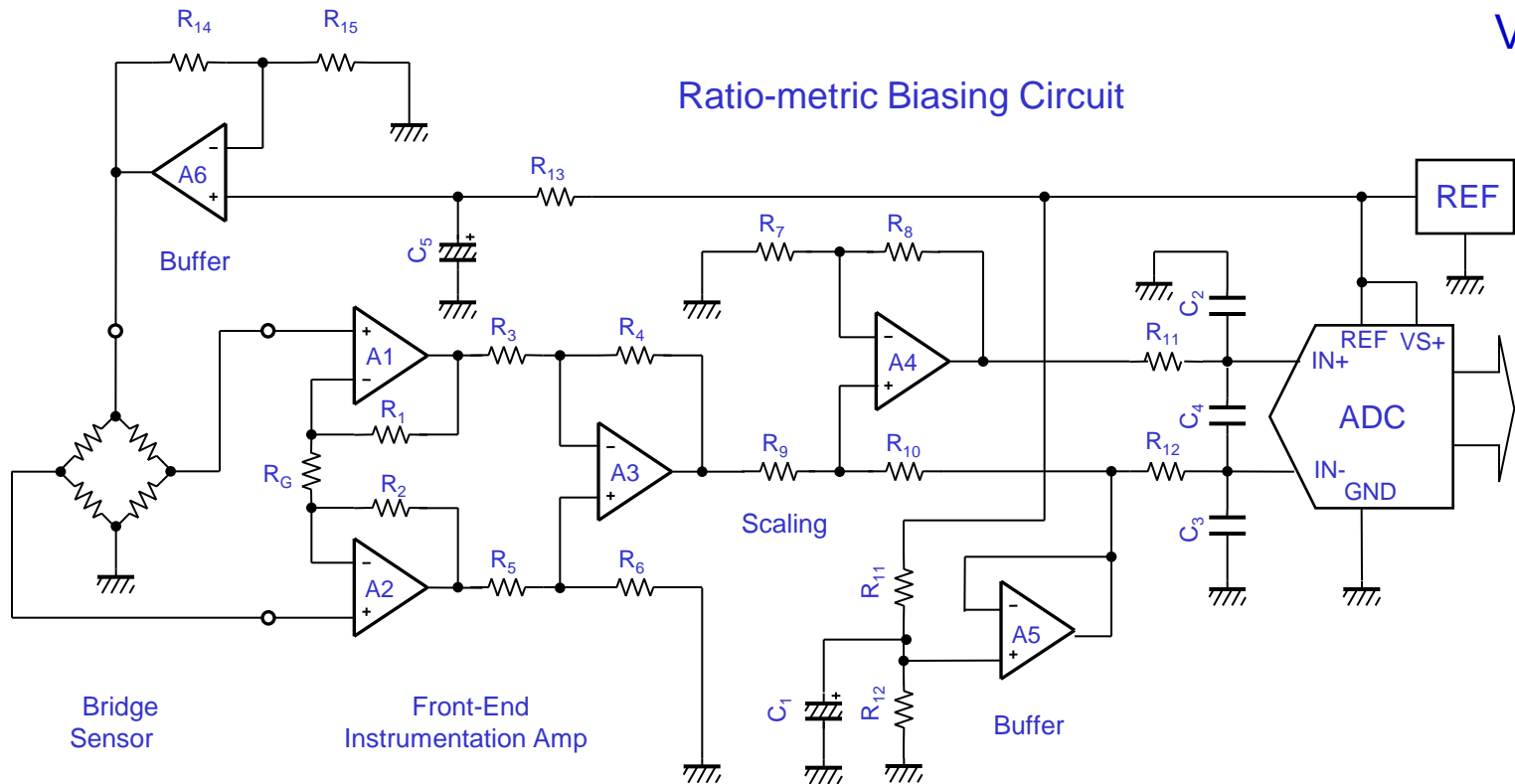


Signal Chain Training Text for Level 1

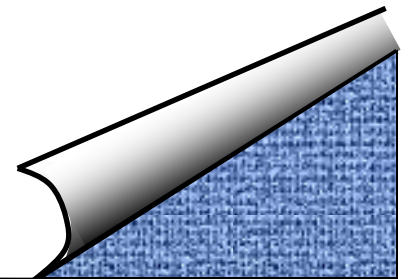
オペアンプその1

Ver.-2.0



セッション・インデックス

- ✦ いきなりですがオームの法則
- ✦ オペアンプとは？
- ✦ オペアンプの主なスペック
- ✦ 理想的なオペアンプ
- ✦ オペアンプの実験
- ✦ ボルテージ・フォロア



電流・電圧・抵抗

電流・電圧・抵抗を水にたとえると;

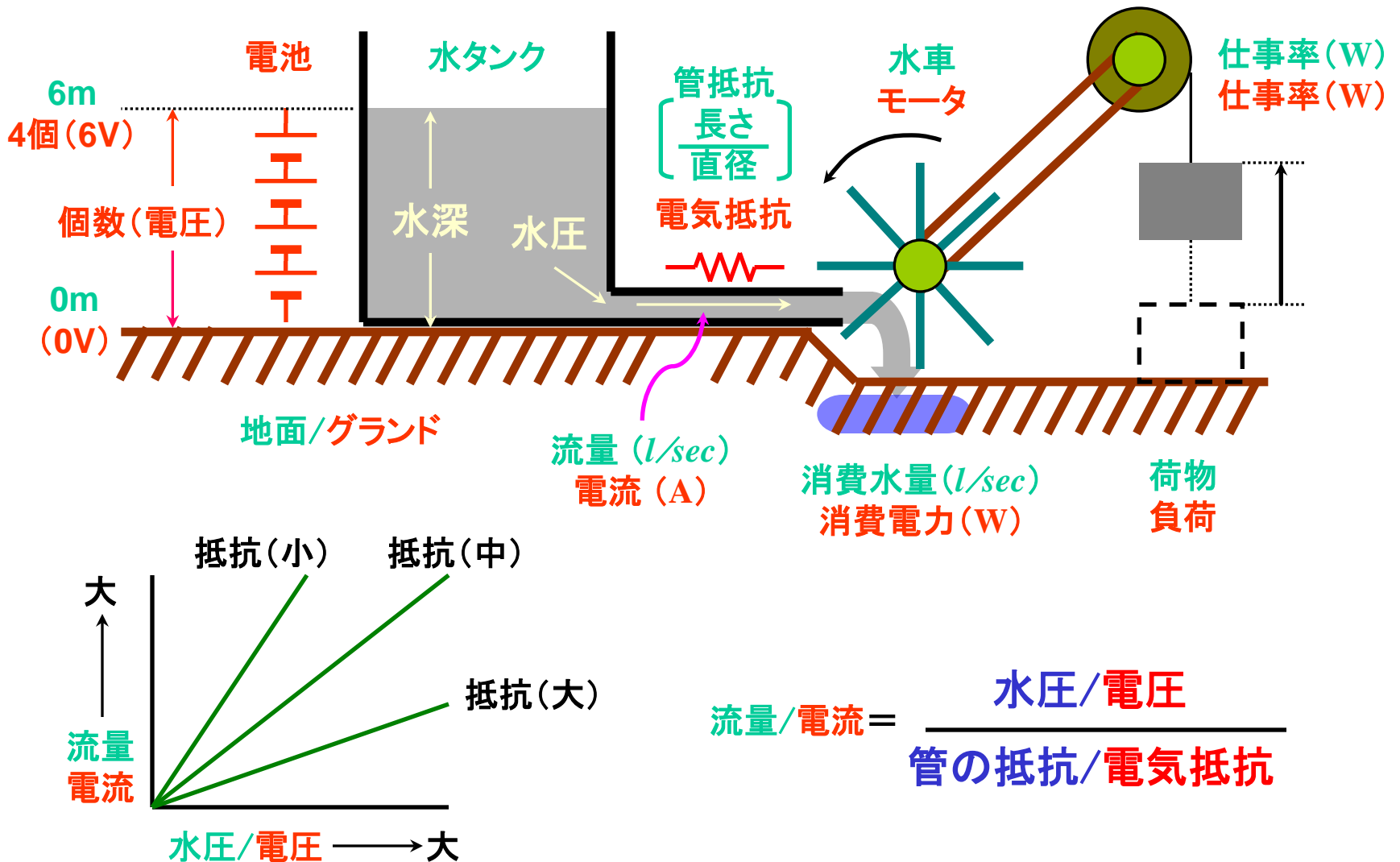
電流: 流れる水の量。

電圧: ダムやタンクなどの水圧。

抵抗: 水道管の直径と長さ。

となります。水道管の直径が決まれば、水の量も決まってきます。水と同じように電圧や抵抗が決まれば、電流が決まります。

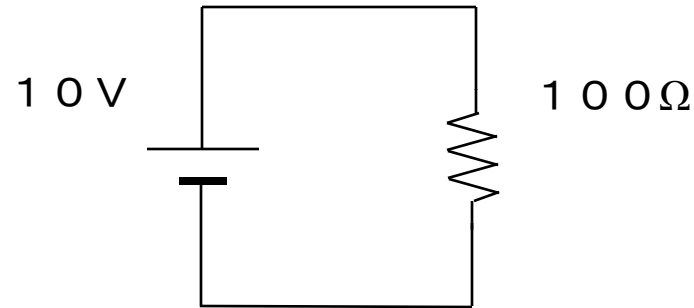
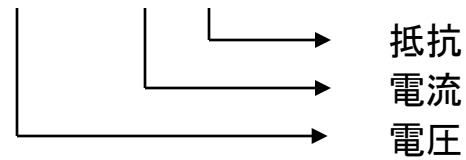
水流と比較できる電流の関係



オームの法則-1

オームの法則

$$V = I R$$



$$I =$$

$$R =$$

$$P = V \times I \quad \text{電力}$$

上の回路の

$$I = ?$$

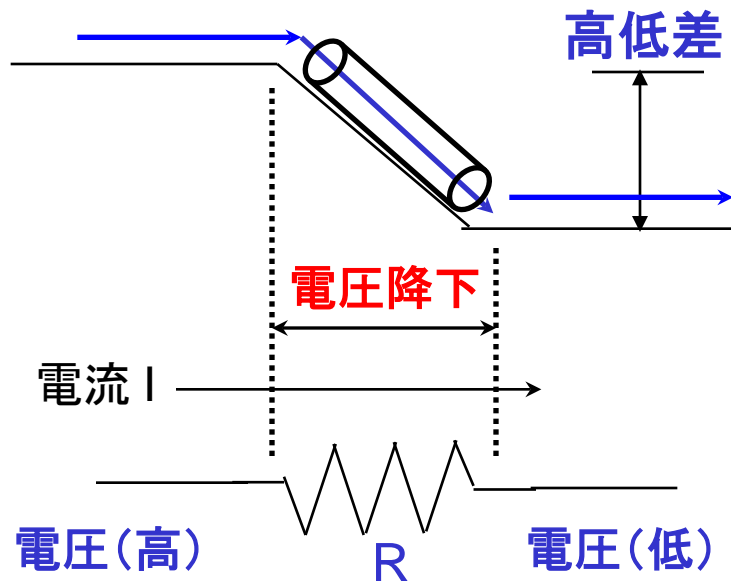
$$P = ?$$

オームの法則-2

一 電圧降下

電流は高いところから低いところへ流れます。電流が流れれば抵抗の両端に電圧が発生します。これを電圧降下と呼びます。

電圧降下のイメージ (水の流れ)



水は高い所から低い所へ流れ高さを失います。この高低差が抵抗 R の両端電位差、すなわち電圧降下と呼ばれるものです。逆に電圧降下(電位差)があるから電流が流れることができると、考えた方が分かりやすいでしょう。

オームの法則-3

一 抵抗の接続

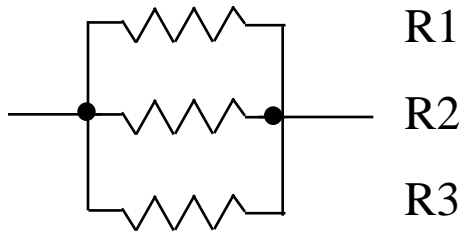
直列



R1 R2 R3

合成抵抗 $R=R1+R2+R3$

並列



R1

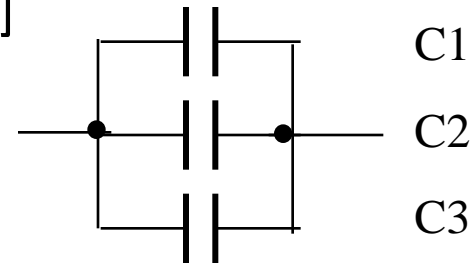
R2

R3

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}}$$

一 コンデンサの接続

並列



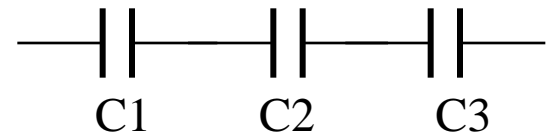
C1

C2

C3

合成容量 $C=C1+C2+C3$

直列



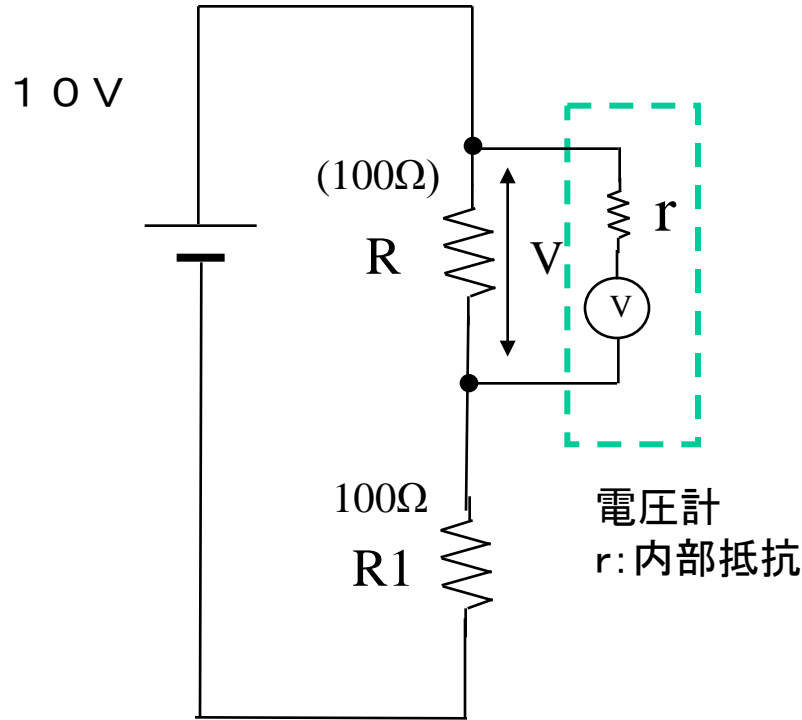
C1

C2

C3

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}}$$

電圧の測定



合成抵抗 ?

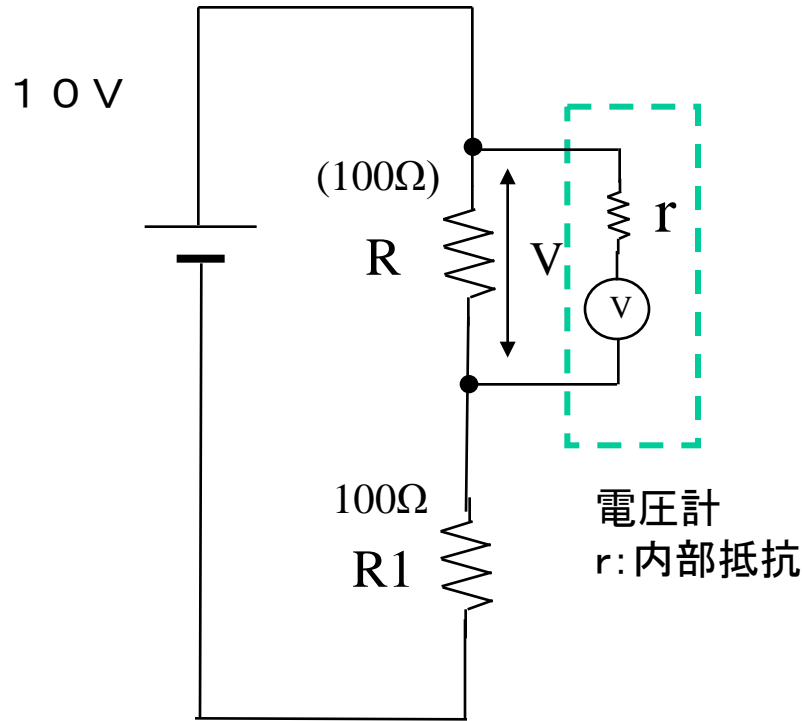
$$\begin{aligned}
 r &= 10 \Omega : \\
 &= 100 \\
 &= 10k \\
 &= 100k
 \end{aligned}$$

電圧 V

$$\begin{aligned}
 r &= 10 \Omega : \\
 &= 100 : \\
 &= 10k : \\
 &= 100k :
 \end{aligned}$$

電圧を測定するときにメータを使います。電圧を測るためにはメータに電流を流さなければなりません。rは何のためにありますか？

電圧の測定



Rと r の合成抵抗 ?

$$\begin{aligned} r = 10 \Omega & : 9.09 \\ & = 100 : 50 \\ & = 10k : 99.01 \\ & = 100k : 99.90 \end{aligned}$$

r を小さくすると合成抵抗が小さくなってしまい測定になりません。正しく測定するためには r を大きく取って、測定対象に影響が出ないようにしなければなりません。

Device Name**	Available Channels	Shutdown	VS (min) (V)	VS (max) (V)	IQ per Channel (max) (mA)	GBW (typ) (MHz)	Slew Rate (typ) (V/ μ s)	VIO (max) (mV)	Offset Drift (typ) (μ V/ $^{\circ}$ C)	IIB (max) (pA)	CMRR (min) (dB)	Vn @ 1 kHz (typ) (nV/ \sqrt Hz)	Single Supply	Rail-to-Rail	Package
Low Power (IQ (max) \leq 1 mA/ch) (Continued)															
TLC25LxA	2, 4	N	1.4	16	0.017	0.085	0.03	5	1.1	600	65	68	Y	N	PDIP,S01C,TSSOP

Available channels・・・1パッケージ内のOP-AMPの数

Shutdown・・・シャットダウンモードの有無

VS・・・電源電圧範囲の最低、最大(36Vとあるのは両電源で \pm 18Vで動作可能)

IQ per channel・・・1チャンネルあたりの消費電流(2chだと倍)

GBW・・・Gain Band Widthの略でゲイン1倍の時の帯域幅

Slew Rate・・・1 μ secあたりの出力信号の立ち上がりスピード

VIO・・・Voltage Input Offsetの略、入力オフセット電圧の事

Offset Drift・・・温度による入力オフセット電圧ドリフト(変動)の略

IIB・・・入力バイアス電流(入力端子からの漏れ電流)

CMRR・・・同相モード除去比(+,-入力端子に同じ電圧を入れてどれくらい出力がゼロになるか)

Vn@1KHz・・・1KHzのノイズ成分の電圧雑音レベル

Single Supply・・・単電源動作の可否

Rail to Rail・・・電源振幅のレールまで入・出力信号が振れるかどうか

実践的なOP-AMPの選択

プレジジョン編 ローノイズ

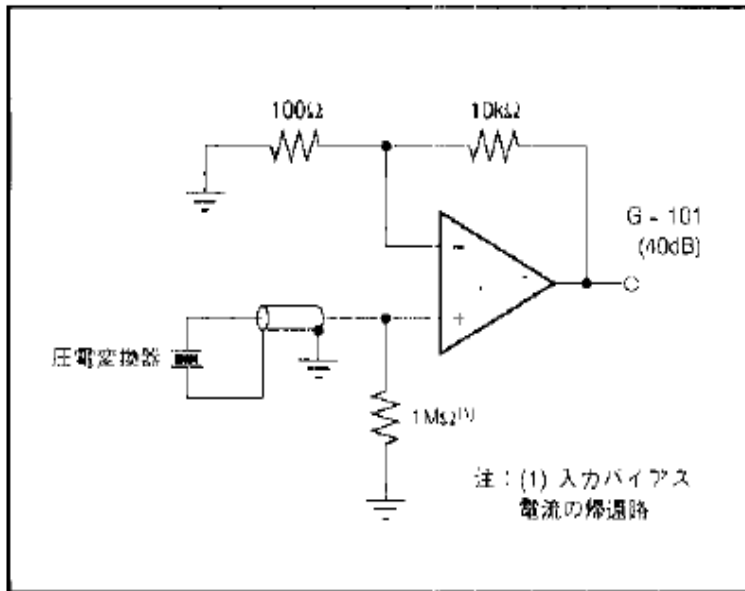


図7. 高インピーダンス・アンプ

- 条件
- 電源電圧・・・±15V
- ノイズ・・・5nV/√Hz以下
- GBW・・・10MHz以上
- バイアス電流・・・100nA以下
- オフセット電圧・・・1mV以下
- 1CHのみ使用

実践的なOP-AMPの選択

ローボルテージ編

- 条件
- 電源電圧...+5V
- GBW...10MHz以上
- スルーレート...5V/ μ s
- レールtoレール...入、出力対応

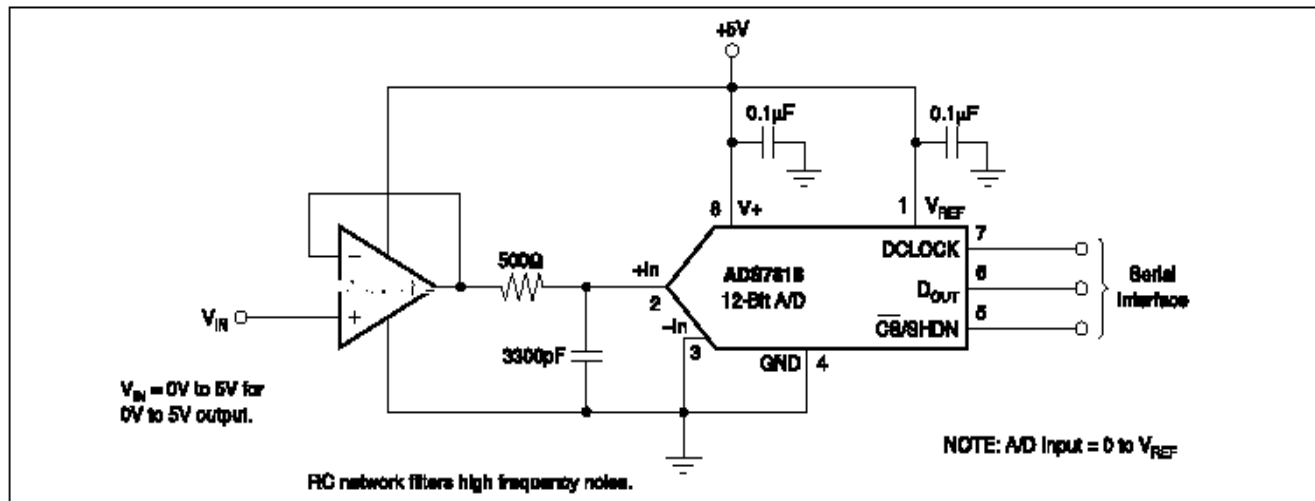
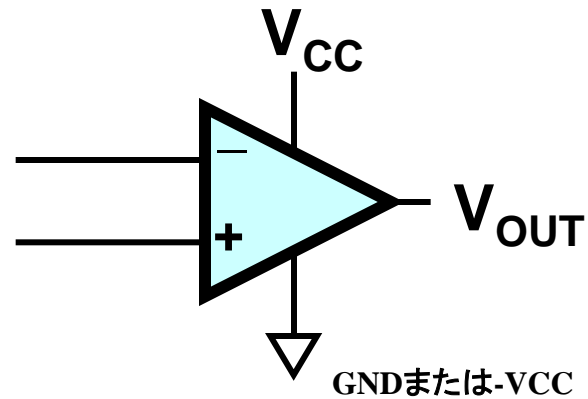


図5. 非反転構成のOPA340を使用してADS7816をドライブするアプリケーション回路

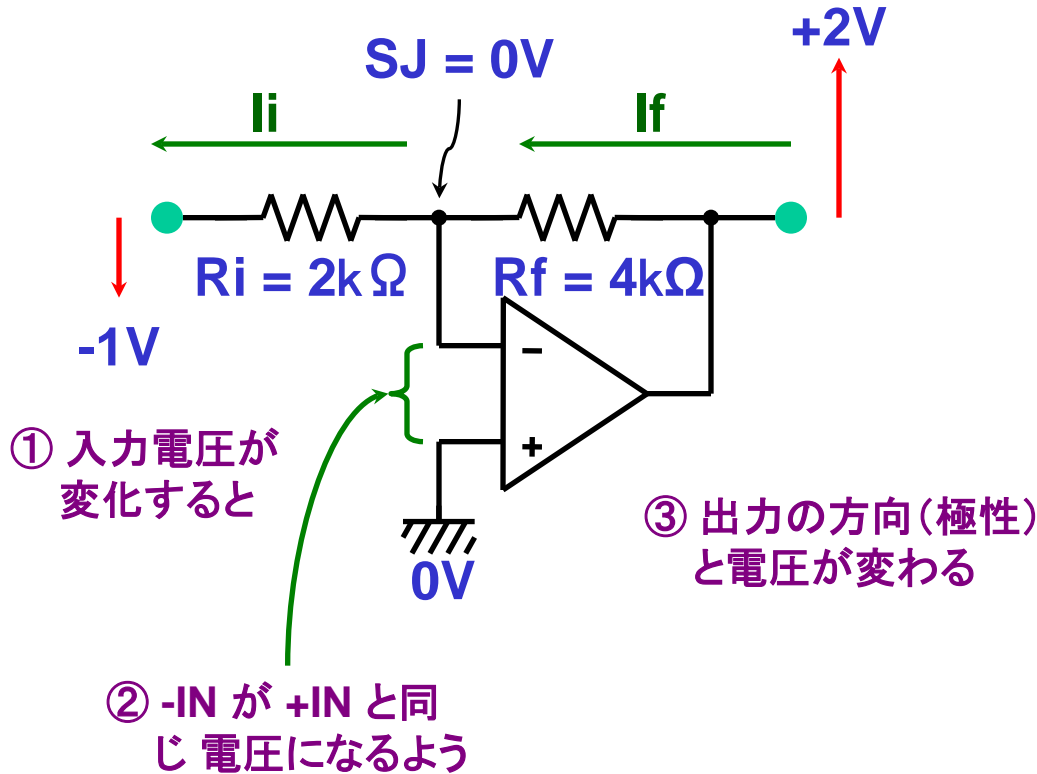
オペアンプとは何でしょう？

- オペアンプは図のように矢印で表記し、その矢印の方向は信号の流れの方向と一致します。



+/- 入力の差分を増幅します。

オペアンプの基本動作(反転アンプ)

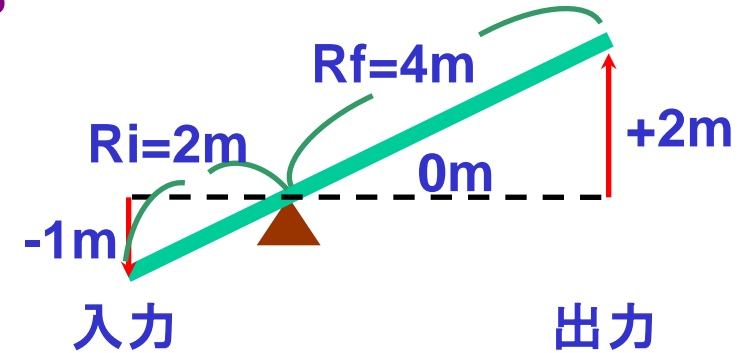


$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{1V}{2k\Omega} = 0.5(mA)$$

$$I_f = \frac{V_o}{R_f} = \frac{2V}{4k\Omega} = 0.5(mA)$$

$$I_i = I_f \quad \text{から} \quad \frac{V_i}{R_i} = \frac{V_o}{R_f}$$

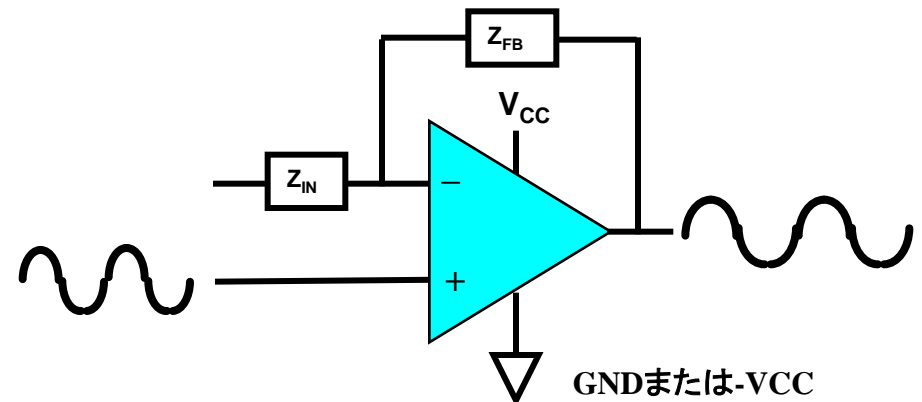
$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i \rightarrow \text{反転アンプのゲイン}$$



公園のシーソーと同じイメージ

オペアンプが正しく動作している限り、-INが+INと同じ電圧になるよう、出力が変化する。

オペアンプで何ができるの？



オペアンプ + 外部素子 = アナログ信号処理

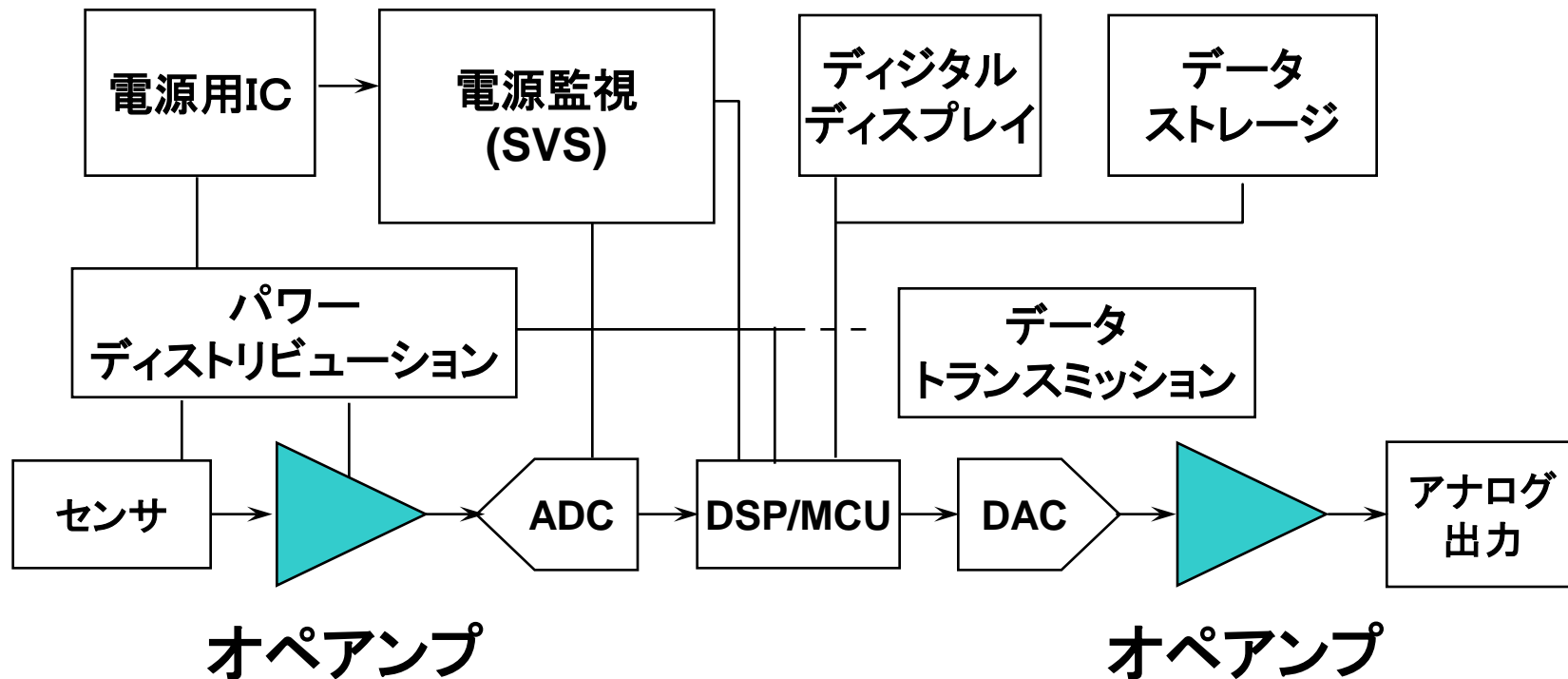
アンプ : 信号の増幅をするもの

バッファ : インピーダンス変換をするもの

フィルタ : ノイズなど不必要な信号成分を除去するもの

演算機能 : 積分器、微分器など

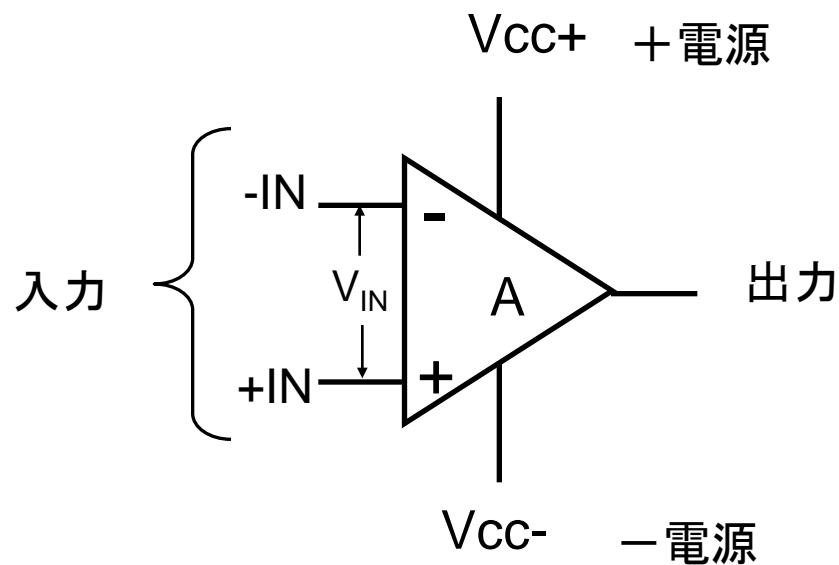
代表的なアナログ・システム



知っておきたい電気用語

- データシートやセレクションガイドに出てくる補助単位
- V=電圧の単位
- A=電流の単位
- Ω =抵抗の単位
- Hz=周波数の単位
- AC=交流
- DC=直流
- dB=対数の単位
- W=消費電力(電圧と電流を掛けたもの)
- オームの法則 電圧(V)=I * R, 電流(I)=V/R, 抵抗(R)=V/I
- 1倍=0dB、10倍=20dB、100倍=40dB、1000倍=60dB、10000倍=80dB・・・暗算としてゼロの数掛ける20がdB単位

電源電圧



オペアンプは+電源と-電源がある。

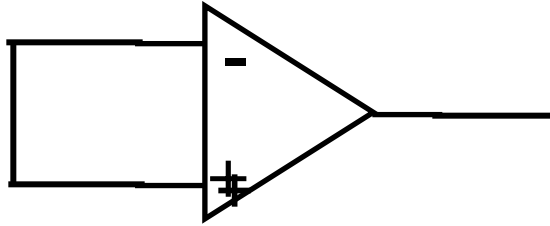
家庭の電源のように交流信号は+と-の電気量を持っているため、どちらの信号も扱えるように+/-の電源を持っている。

パラメータ	条件	最小	標準 ⁽¹⁾	最大
オフセット電圧 入力オフセット電圧 $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ 対温度 対電源 $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$	小さい方が良い V_{OS} dV_{OS}/dT PSRR		± 50 ± 100 ± 0.4 3	± 250 ± 400 30 30
入力バイアス電流 入力バイアス電流 ⁽²⁾ $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ 入力オフセット電流 $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$	小さい方が良い I_B I_{OS}		-4 ± 0.1	-20 ± 2 ± 2
ノイズ 入力電圧ノイズ、 $f = 0.1 \sim 10\text{kHz}$ 入力電圧ノイズ密度、 $f = 1\text{kHz}$ 電流ノイズ密度、 $f = 1\text{kHz}$	小さい方が良い e_n i_n		1 45 40	
入力電圧範囲 同相モード電圧範囲 同相モード除去比 $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$	広い方が良い V_{CM} CMRR		-0.2 80 80	$(V+) - 1$ 106
入力インピーダンス 差動 同相モード	大きい方が良い		$10^7 \parallel 2$ $10^9 \parallel 4$	
開ループ・ゲイン 開ループ電圧ゲイン $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$	大きい方が良い A_{OL}	$R_L = 100\text{k}\Omega$ 、 $V_O = (V-) + 100\text{mV} \sim (V+) - 100\text{mV}$ $R_L = 100\text{k}\Omega$ 、 $V_O = (V-) + 100\text{mV} \sim (V+) - 100\text{mV}$ $R_L = 10\text{k}\Omega$ 、 $V_O = (V-) + 200\text{mV} \sim (V+) - 200\text{mV}$ $R_L = 10\text{k}\Omega$ 、 $V_O = (V-) + 200\text{mV} \sim (V+) - 200\text{mV}$	100 100 100 100	120 120
周波数応答 ゲイン・バンド幅積 スルーレート 過負荷復帰時間	大きい方が良い GBW SR	$V_S = 5\text{V}$ 、 $G = 1$ $V_{OL} \cdot G = V_{OL}$	 35 0.01 60	

その他のOP-AMPのスペック

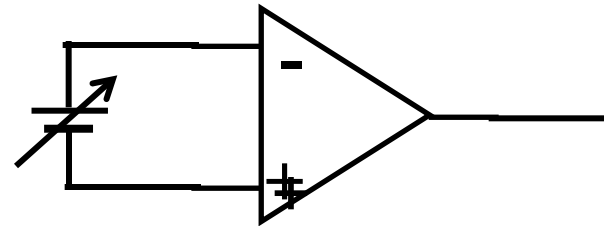
- 入力オフセット電圧対温度・・・温度変化に対するオフセットの変動
- 入力オフセット電圧対電源・・・電源電圧変化に対するオフセットの変動
- 同相モード除去比・・・+ / -の入力端子に同電圧が印加された時の出力の電圧レベル比
- 同相モード電圧範囲・・・+ / -入力端子へ入れられる同電圧範囲
- 入力インピーダンス・・・OP-AMPの入力端子の抵抗値
- 過負荷復帰時間・・・OP-AMPが飽和して正常に戻るまでの時間
- 短絡電流・・・出力を短絡(GNDにショート)させた時の流れる電流
- 熱抵抗・・・OP-AMPに1W消費させた時のパッケージの上昇温度

入力オフセット電圧

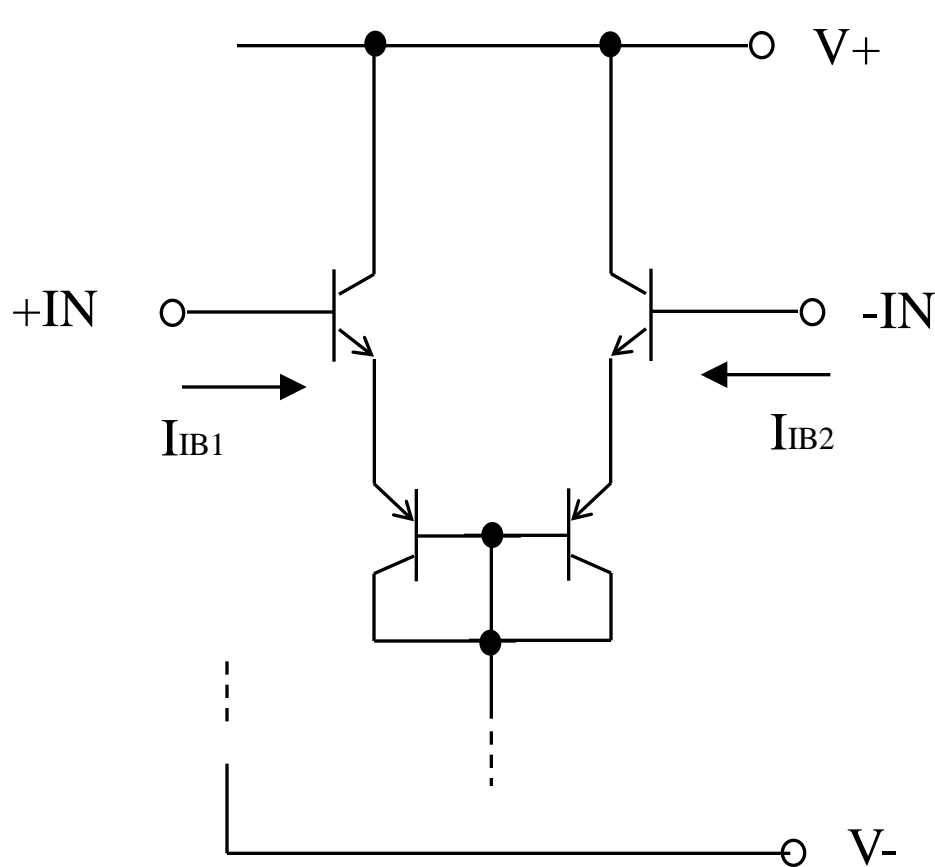


入力の差が0であれば出力は0ですが、内部回路のトランジスタのバラツキにより出力が0とならない。誤差電圧。

出力が0となるように入力に加える電圧の事を入力オフセット電圧と規定している。



入力バイアス電流



入力バイアス電流は入力端子に流れ込む電流。

$$I_{IB} = (I_{IB1} + I_{IB2}) / 2$$

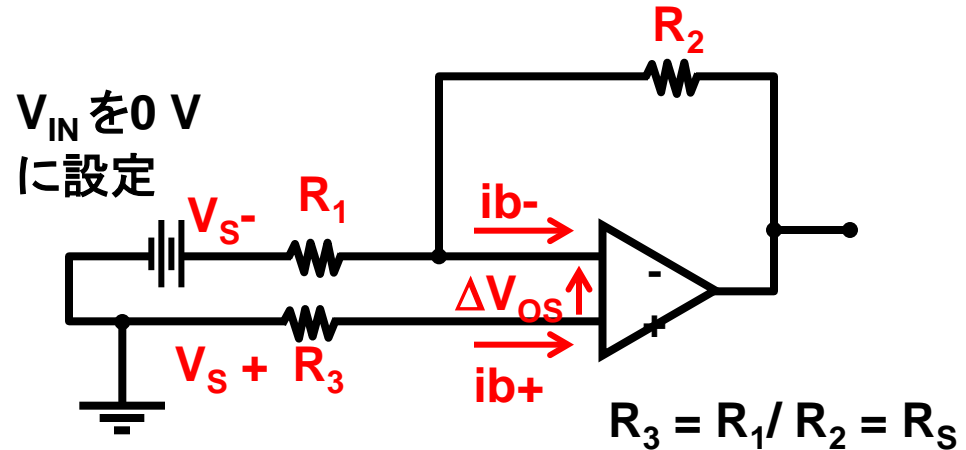
で規定されている。

I_{IB1}とI_{IB2}のバラツキを入力オフセット電流と言っている。

$$| I_{IB1} - I_{IB2} | = I_{IO}$$

入力オフセット電圧 & 入力バイアス電流

- これらの用語は、直流信号を入れた時に効いて来るのでDCパラメータと言います。
- 入力オフセット電圧 - 入力をゼロにした時に出力に出てしまう電圧。実際は内部素子が出力をゼロにする為に入力にアイドリング電流が流れその漏れが入力オフセット電圧となる
- 入力バイアス電流 - オペアンプの2つの入力端子に流れる電流。内部素子によって決定される。2つの入力端子に流れる電流の差を入力オフセット電流という。

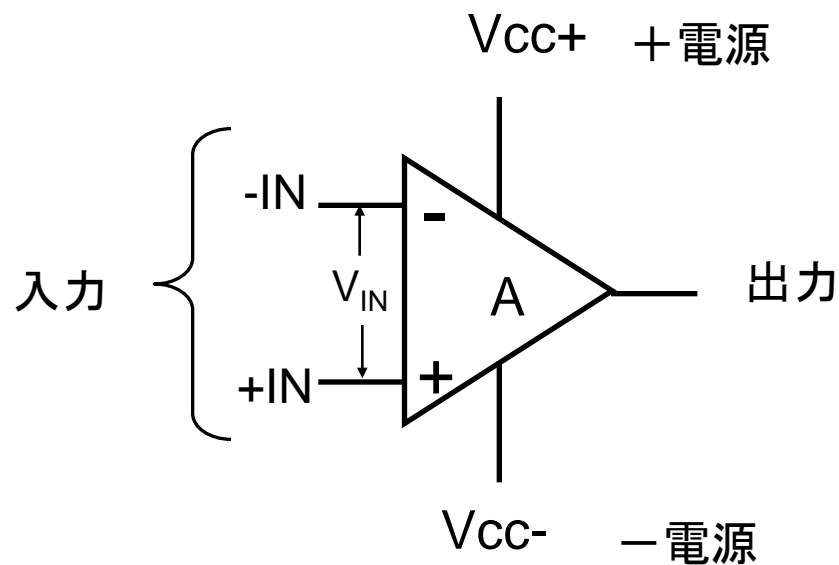


$$V_{S+} = i_{b+} \times R_S$$

$$V_{S-} = (i_{b-} + I_{OS}) \times R_S$$

$$\Delta V_{OS} = I_{OS} \times R_S$$

オペアンプの動作



オペアンプは+INと-INの差の電圧を増幅します。

A:増幅度

V1:+INの入力電圧

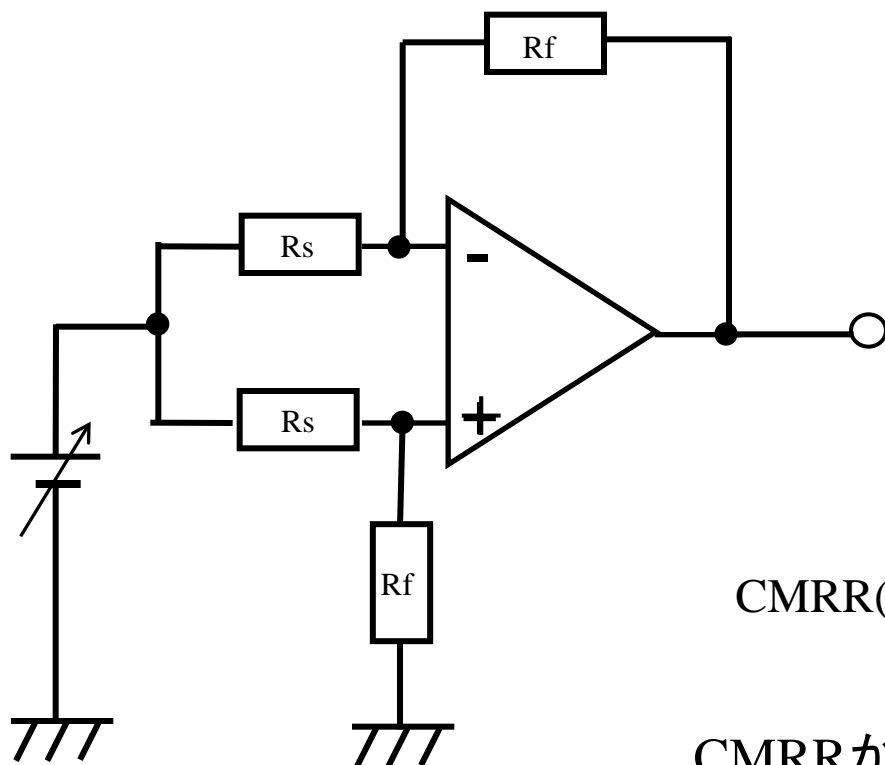
V2:-INの入力電圧

Vout:出力電圧

$$V_{out} = (V1 - V2) \times A$$

となります。

同相信号除去比



アンプの入力に同じ電圧を加えても出力はゼロが理想です。

実際のおペアンプの入力に同じ電圧を加えた時に出力に現れる誤差電圧を定義したものを同相信号除去比と言います。下記の式で表します。

$$\text{CMRR(dB)} = 20 \log \frac{\text{同相モード入力電圧の変化}}{\text{出力電圧(誤差)} \div \text{増幅率}}$$

CMRRが80dB、増幅率が千倍ならば、1Vの同相入力電圧の変化に対して100mVの誤差電圧が発生します。

帯域幅

帯域幅GBW(Gain Band Width)

オペアンプの帯域幅とは入力信号を入れ、どれくらいの周波数まで通せるかの目安です。基準としてゲイン=1倍(0dB)の周波数を指します。

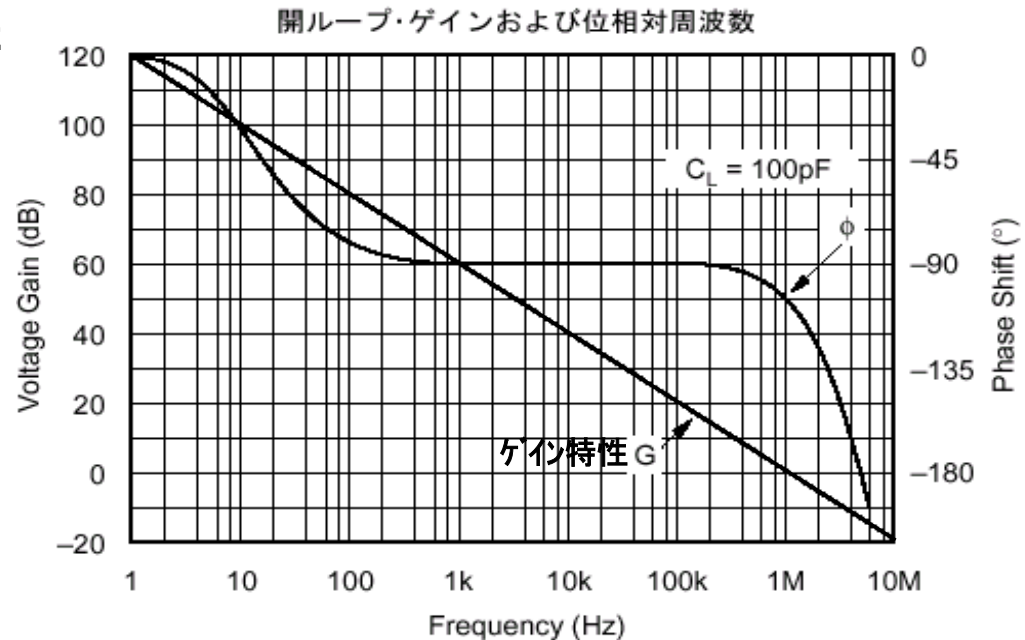
右の特性ではG=1倍の帯域は1MHz

G=10倍(20dB)で100KHz

G=100倍(40dB)で10KHz

G=10000倍(80dB)で100Hz

ゲインを10倍増やすごとにオペアンプの帯域は1/10ずつ減る
これはどのオペアンプでも同じ特性



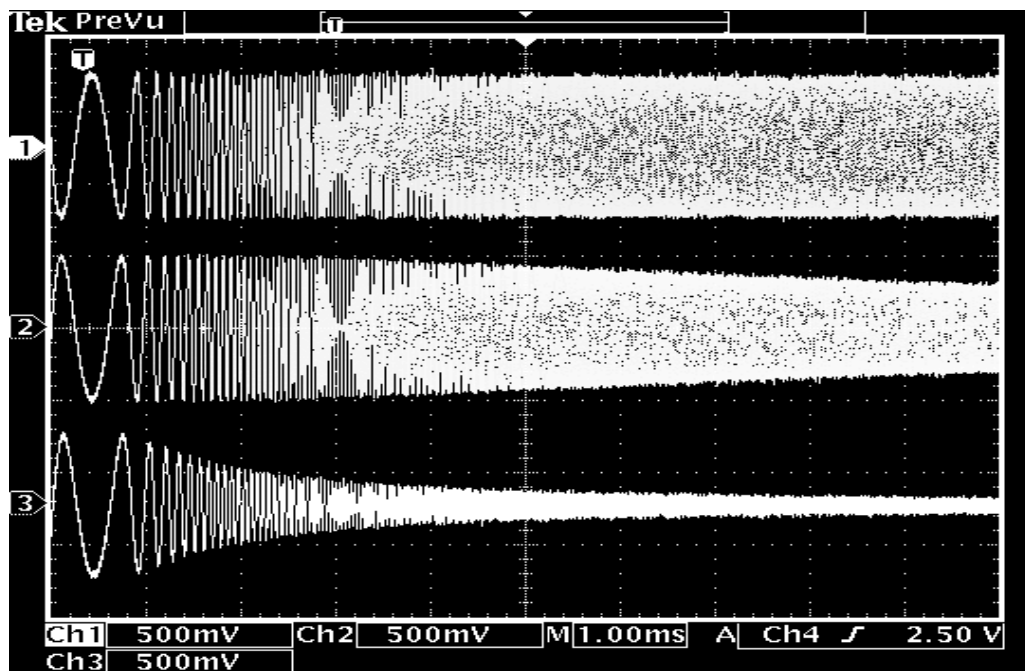
周波数に追従できない波形

入力周波数を徐々に高くした波形

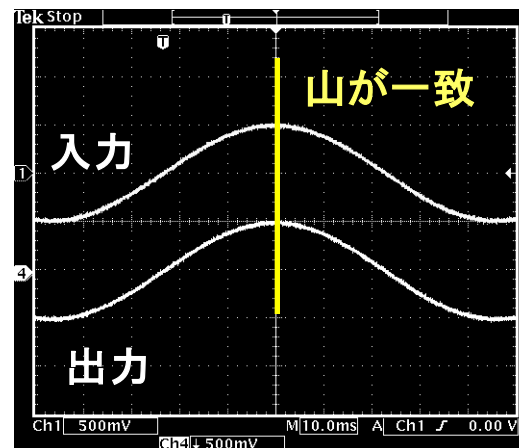
Ch1: ゲイン = +1 (非反転)

Ch2: ゲイン = -10 (反転)

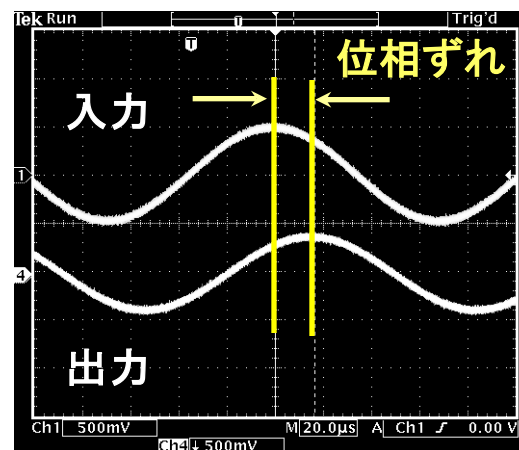
Ch3: ゲイン = -100倍



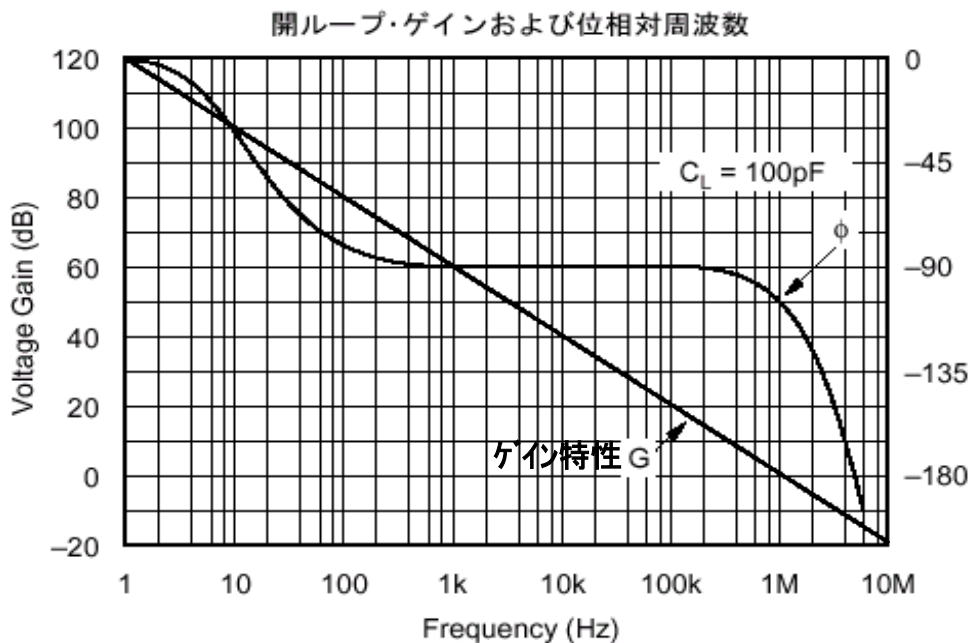
低周波での入出力波形



低周波での入出力波形



GB積



-20dB/dec (decade = 10倍) 1 デイケードごとに20dB下がります。

左の特性では

G=1倍の帯域は1MHz

G=10倍 (20dB) で100KHz

G=100倍 (40dB) で10KHz

・

G=10000倍 (80dB) で100Hz

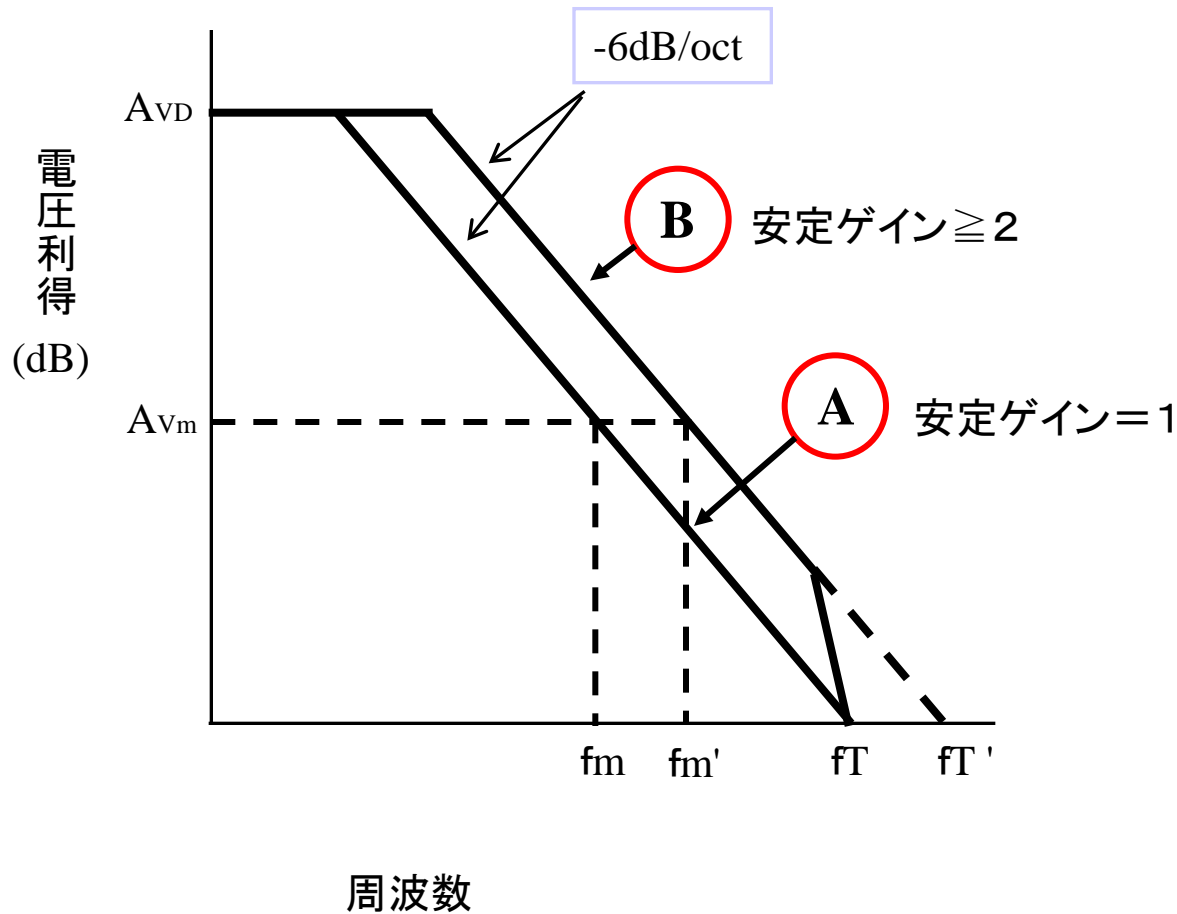
ゲインを10倍増やすごとにオペアンプ

の帯域は1/10ずつ減る

これはどのオペアンプでも同じ特性

このことから、ゲイン(増幅率)とバンド(周波数帯域幅)の乗算したものは常に同じとなります。

GB積(2)追加

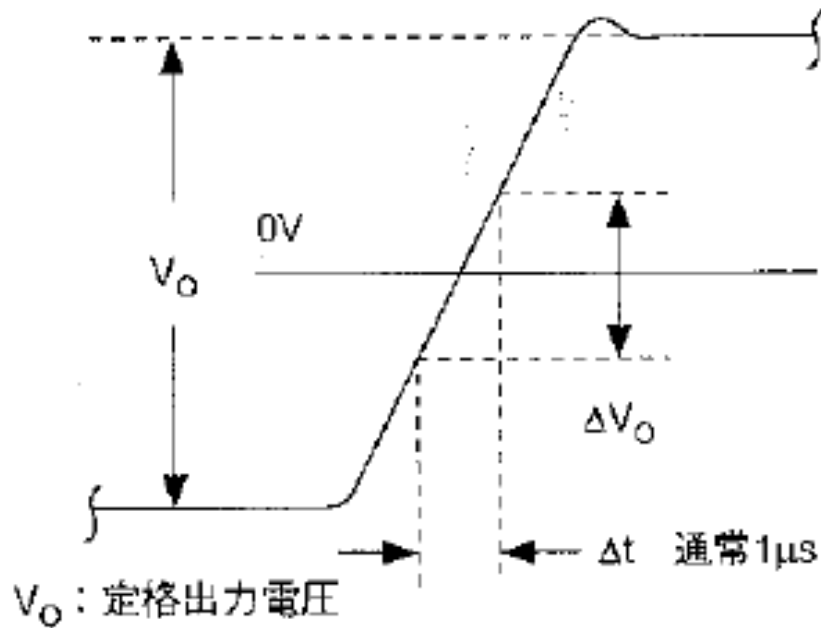


AとBの特性をもったオペアンプがある。

GB積で表すのは
-6dB/octの区間

スルー・レート

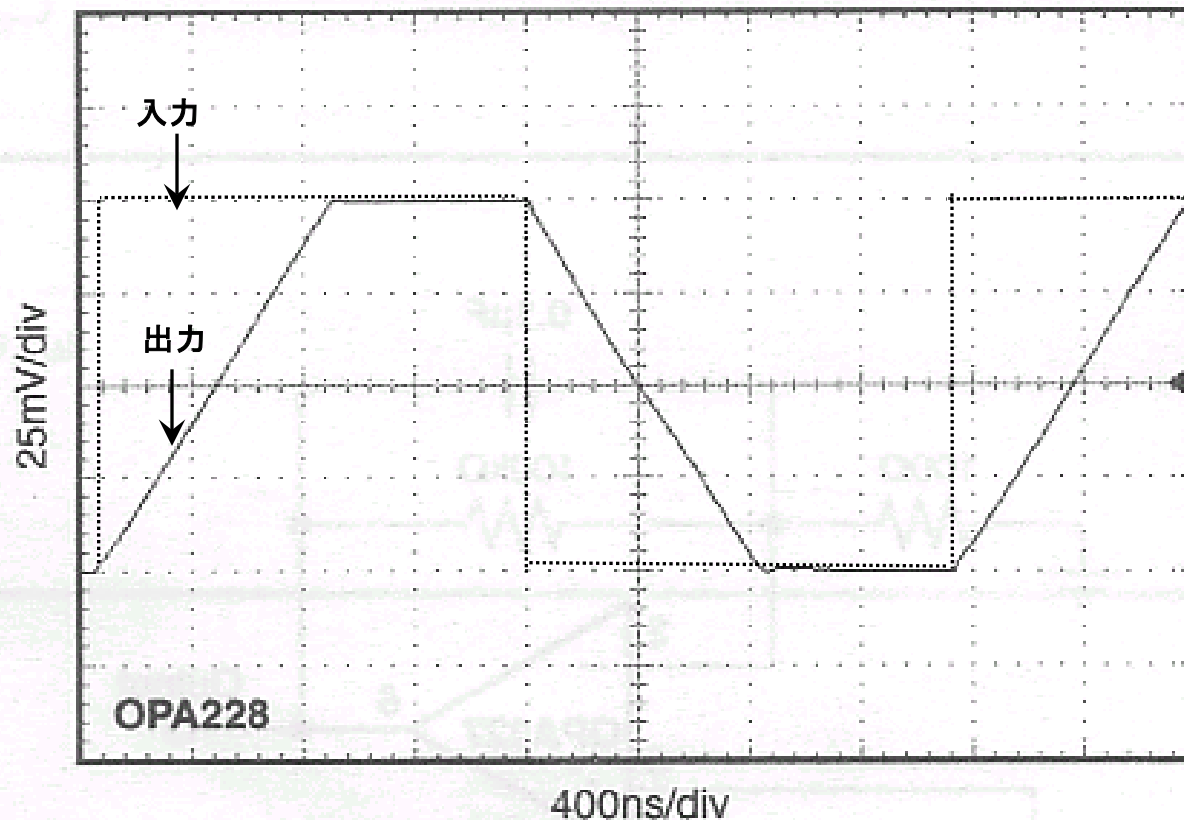
- OP-AMPの出力が精一杯速く立ち上がった勾配を時間あたり何V立ち上がるかの規定 (単位は何V/ μsec)



$$SR = \frac{\Delta V_O}{\Delta t}$$

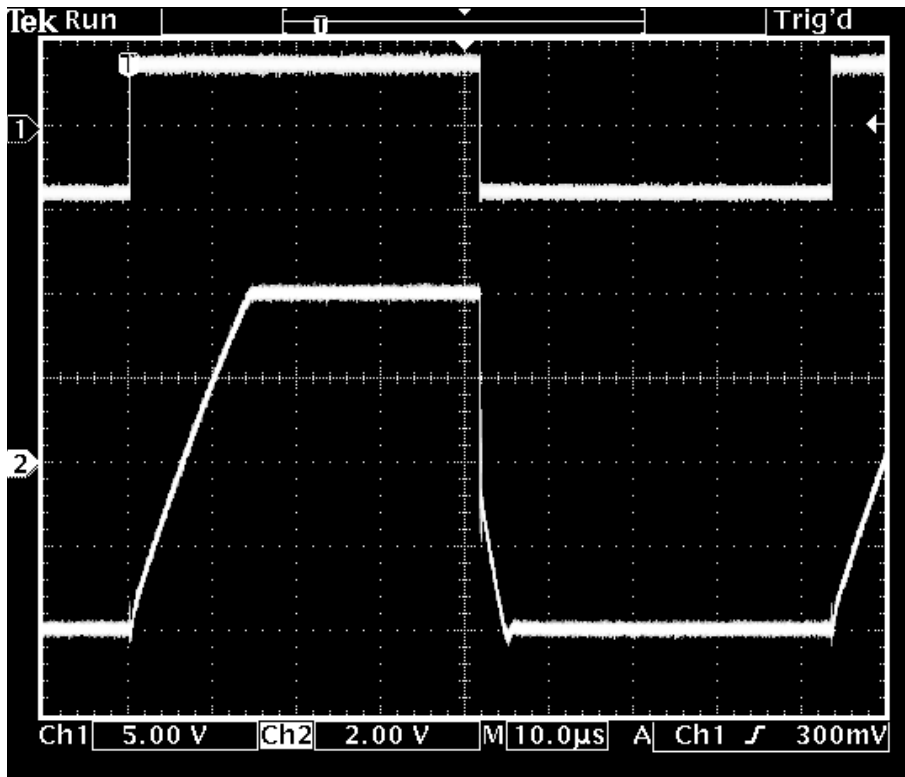
OP-AMPの出力波形例

- OP-AMPの**スルーレート**が低いと
入ってきた信号に追従できず鈍ってしまう。

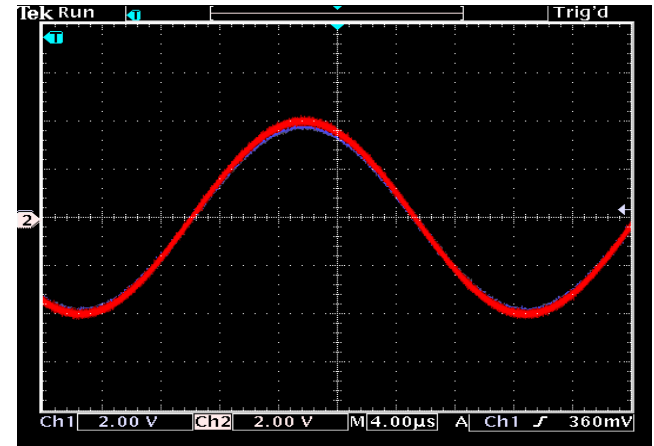


スルーレートと波形歪の関係

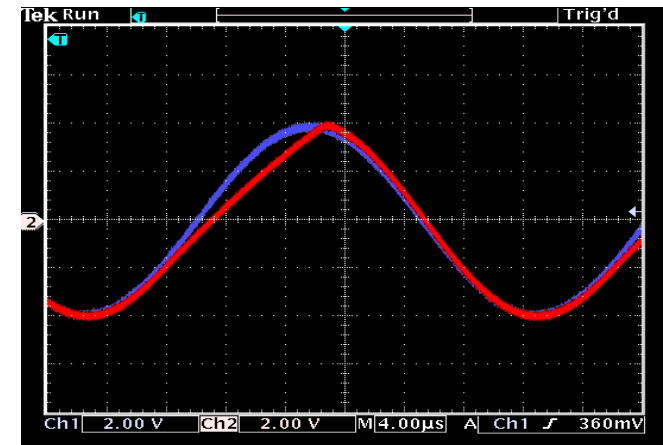
スルーレートが有限である波形
このアンプは昇りと下りの速さが異なる



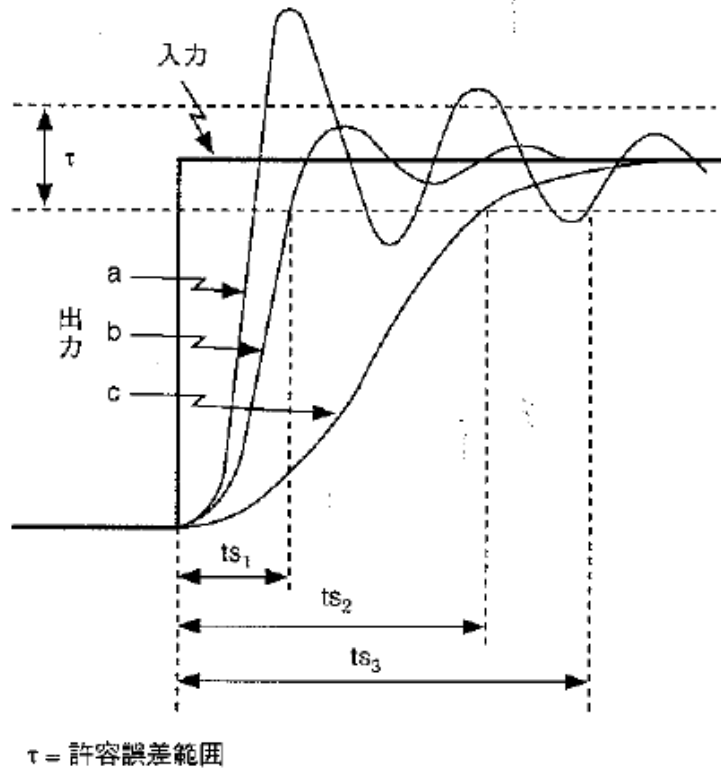
低周波でのサイン波形



高周波での追従遅れ

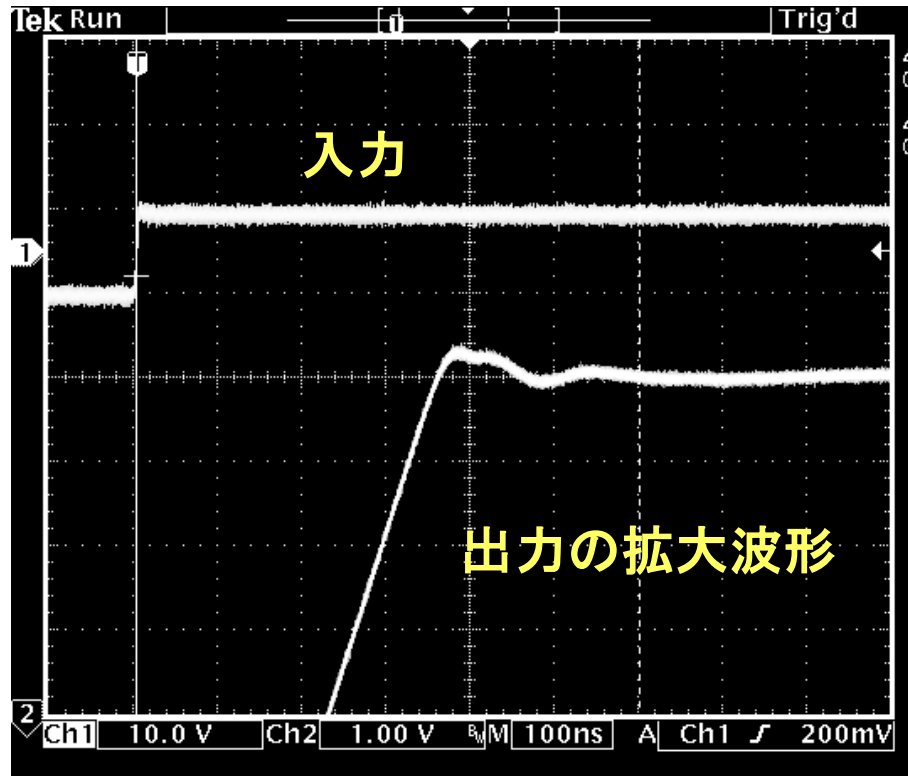


セtring・タイム



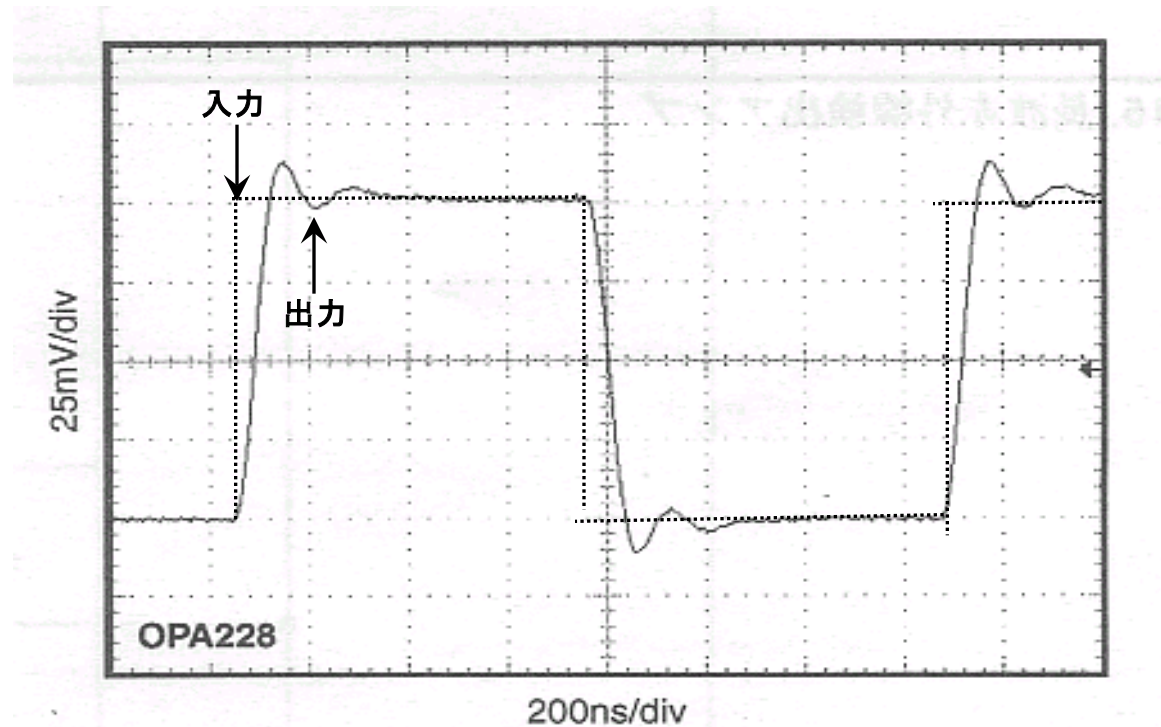
過渡的な入力に対して出力が一定の誤差範囲に落ち着くまでの時間(通常は0.1か0.01%)

セトリング波形



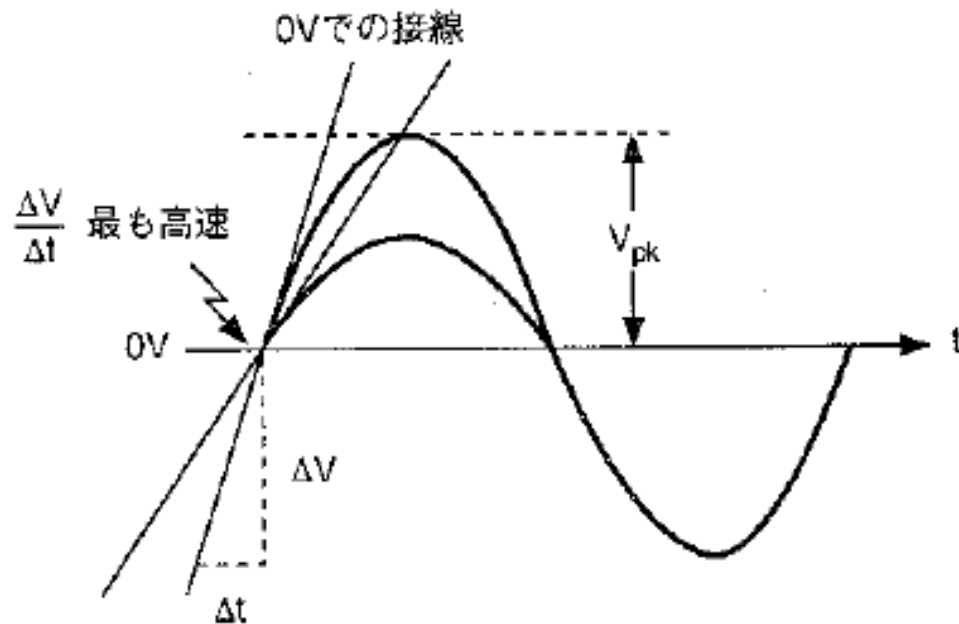
OP-AMPの出力波形

- 追従はできるがオーバーシュート、アンダーシュートが出てしまい**セトリングタイム**がかかってしまう。



フルパワー周波数応答/大信号帯域幅

- ✦ 信号が大きく歪まないで取り出せる最大の正弦波周波数(フルパワー周波数応答)



$$f_p = \frac{SR}{2 \pi V_{pk}}$$

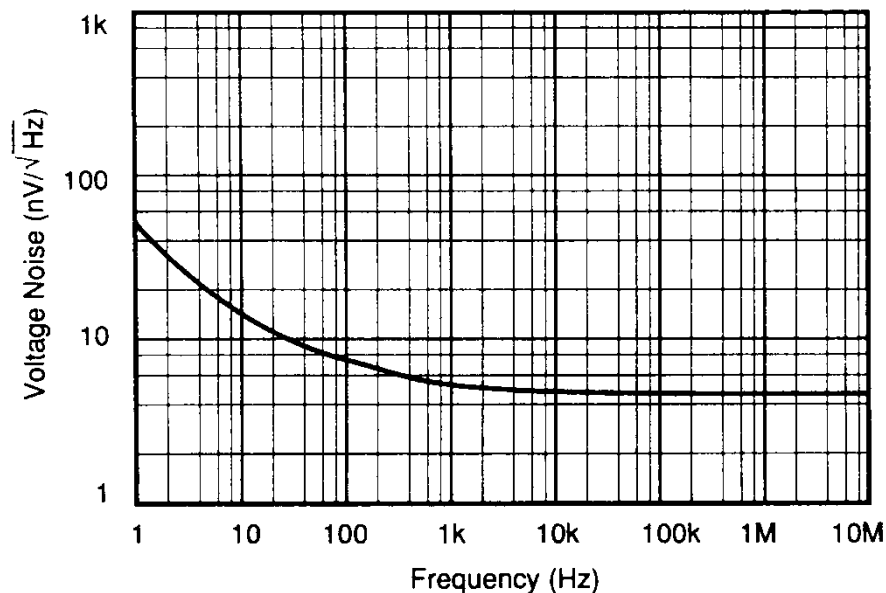
入力雑音電圧の種類

✦ 1/f雑音/フリッカ雑音

✦ ショット雑音(白色雑音)

右の特性図では雑音の電圧レベルを周波数成分に分けた図です。

ノイズは低い周波数ほど大きく
1KHzを境にフラットになります。
セレクションガイドの規定では
1KHzのノイズを著わす事が
多いですnV/ $\sqrt{\text{Hz}}$



実践的なOP-AMPの選択

ローバイアス編

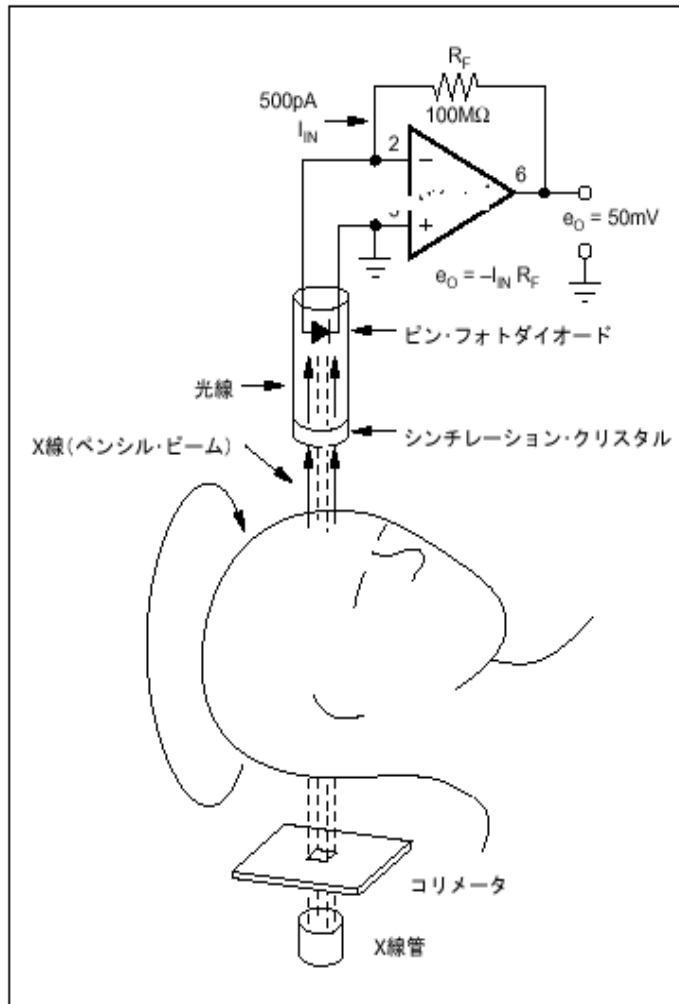


図8. CATスキャナ用アンプ

条件

電源電圧... $\pm 15\text{V}$

GBW... 5MHz 以上

ノイズ... $10\text{nv}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下

バイアス電流... 10pA 以下

オフセット電圧... 1mV 以下

1CHのみ必要

実践的なOP-AMPの選択

ハイスピード アンプ編 画像信号用 Voltage Feedbackから選 択

- 条件
- 電源電圧... $\pm 5V$
- BW...500MHz以上
- スルーレート...1000V/ μs 以上
- オフセット電圧...5mV以下
- I_o (出力電流)...100mA以上

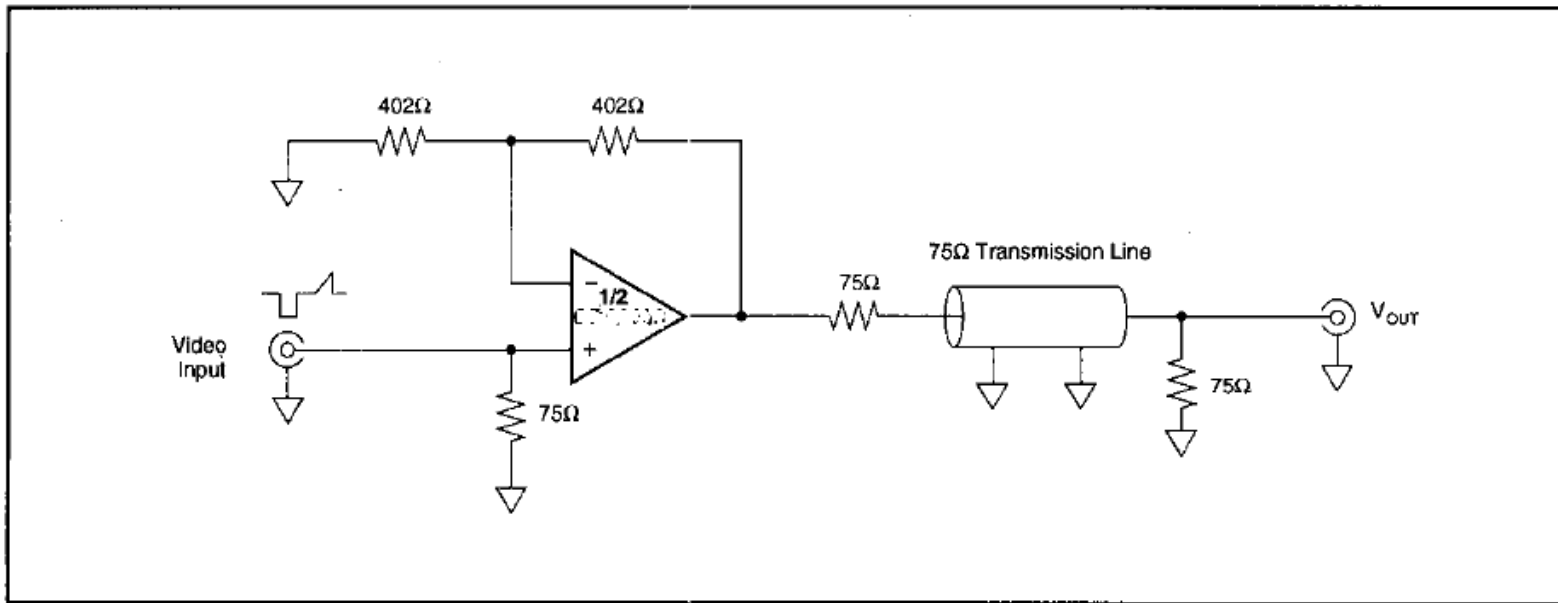
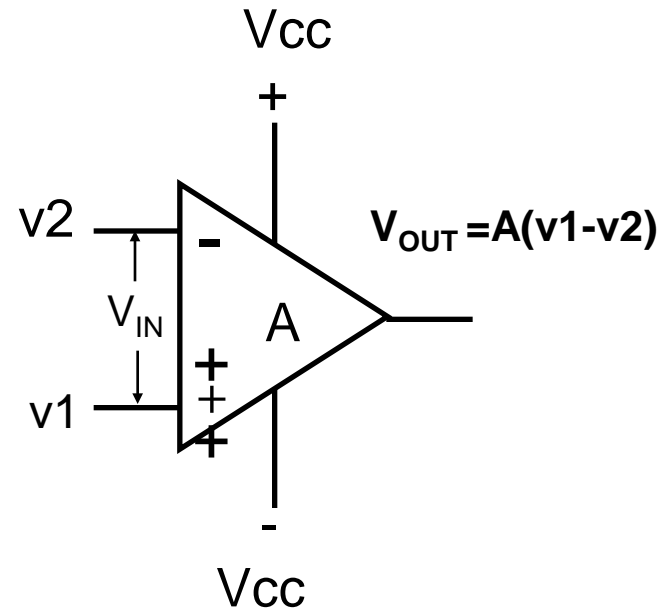


図10. 低歪ビデオ・アンプ

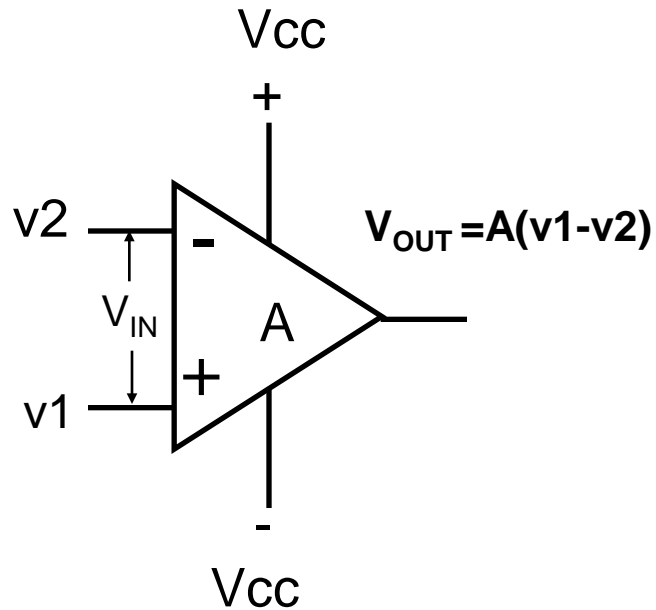
理想オペアンプ

◇ 理想オペアンプ

1. 差動電圧利得 = ∞
2. 同相電圧利得 = 0
3. 周波数帯域幅 = ∞
4. 入力インピーダンス = ∞
5. 出力インピーダンス = 0



オペアンプの動作



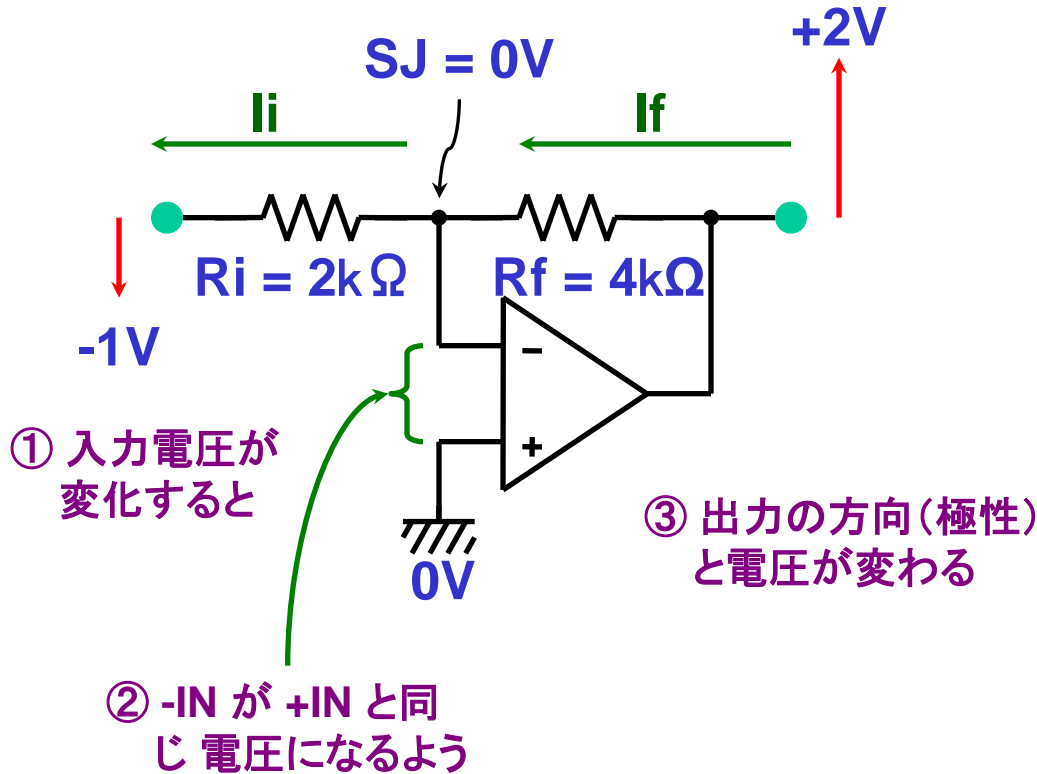
$$\text{出力} = A(V_1 - V_2)$$

入力電圧の差によって出力電圧が決まる。

V_1 が大きければ + 側になる。

V_2 が大きければ - 側になる。

オペアンプの基本動作(反転アンプ)

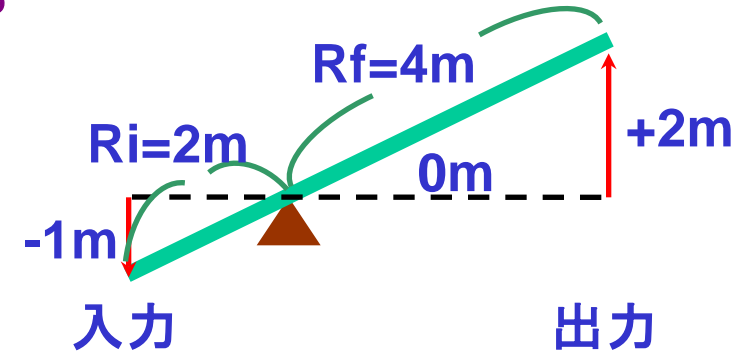


$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{1V}{2k\Omega} = 0.5(mA)$$

$$I_f = \frac{V_o}{R_f} = \frac{2V}{4k\Omega} = 0.5(mA)$$

$$I_i = I_f \quad \text{から} \quad \frac{V_i}{R_i} = \frac{V_o}{R_f}$$

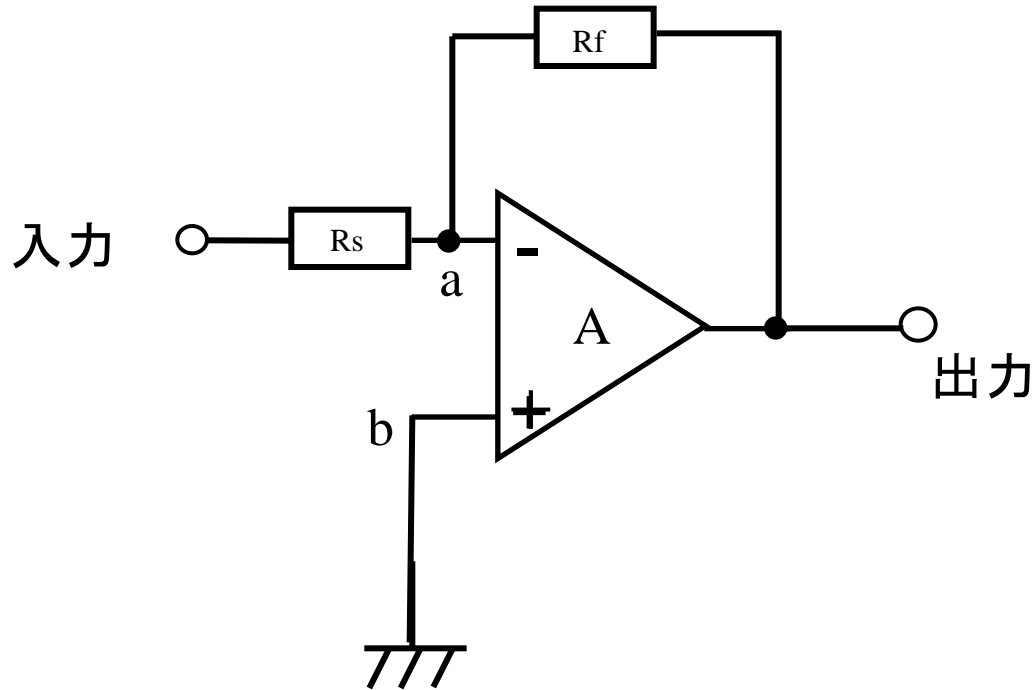
$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i \rightarrow \text{反転アンプのゲイン}$$



公園のシーソーと同じイメージ

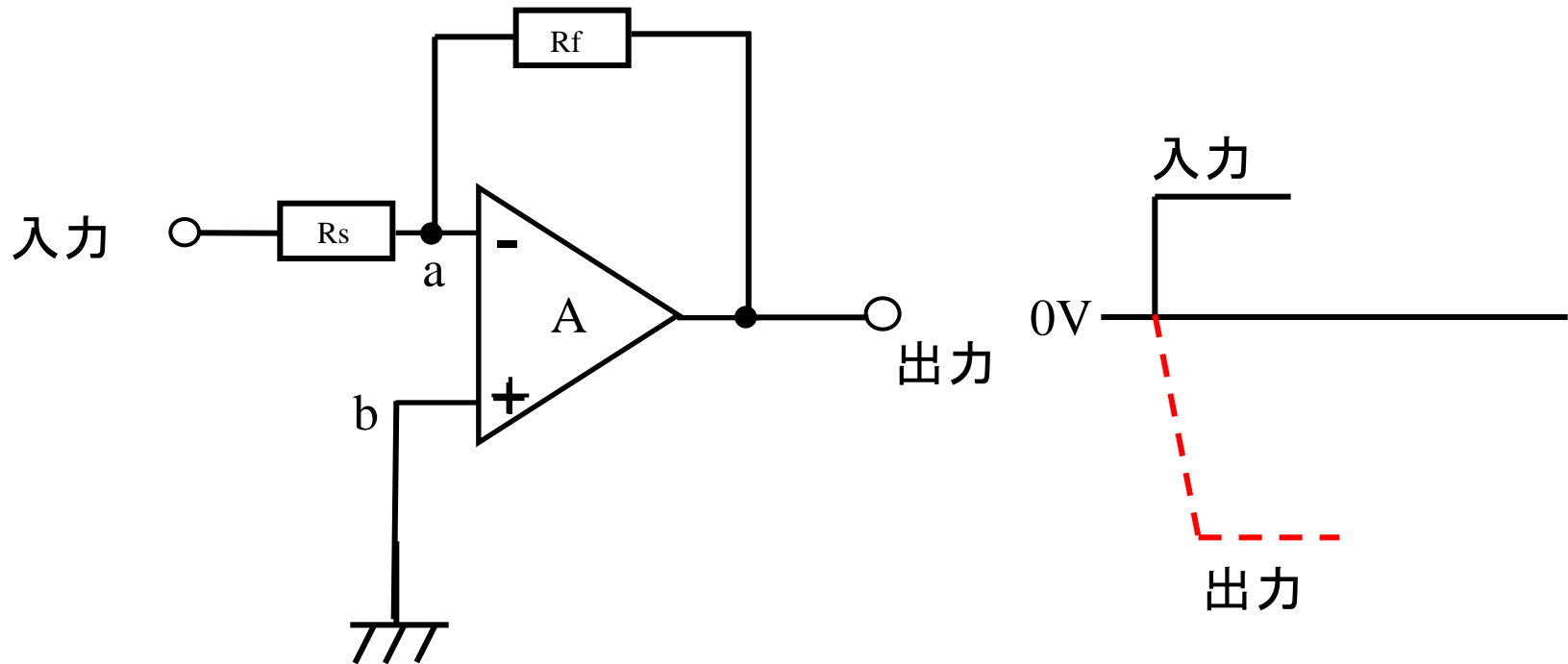
オペアンプが正しく動作している限り、-INが+INと同じ電圧になるよう、出力が変化する。

オペアンプの実験(1)



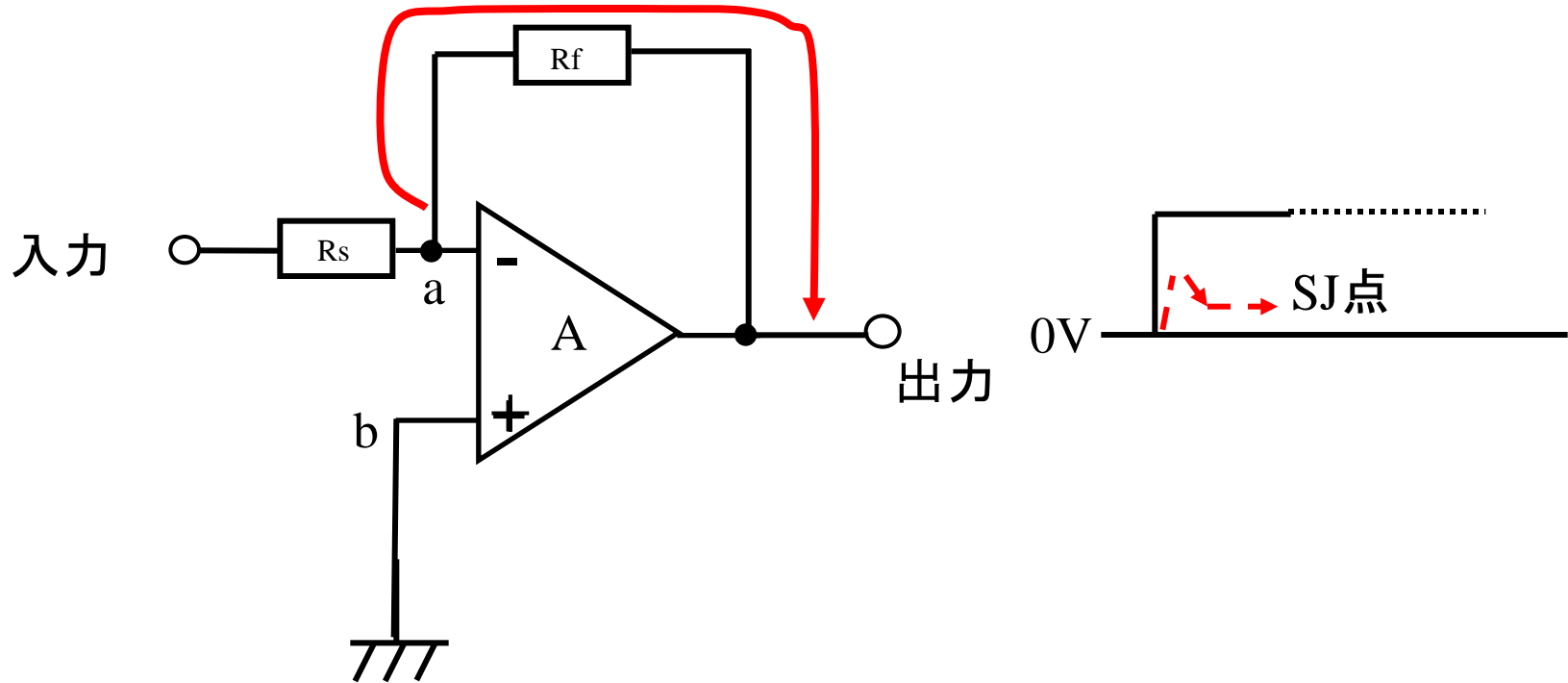
左図のような回路を構成した場合、オペアンプの動作はどうなるでしょうか？

オペアンプの実験(2)



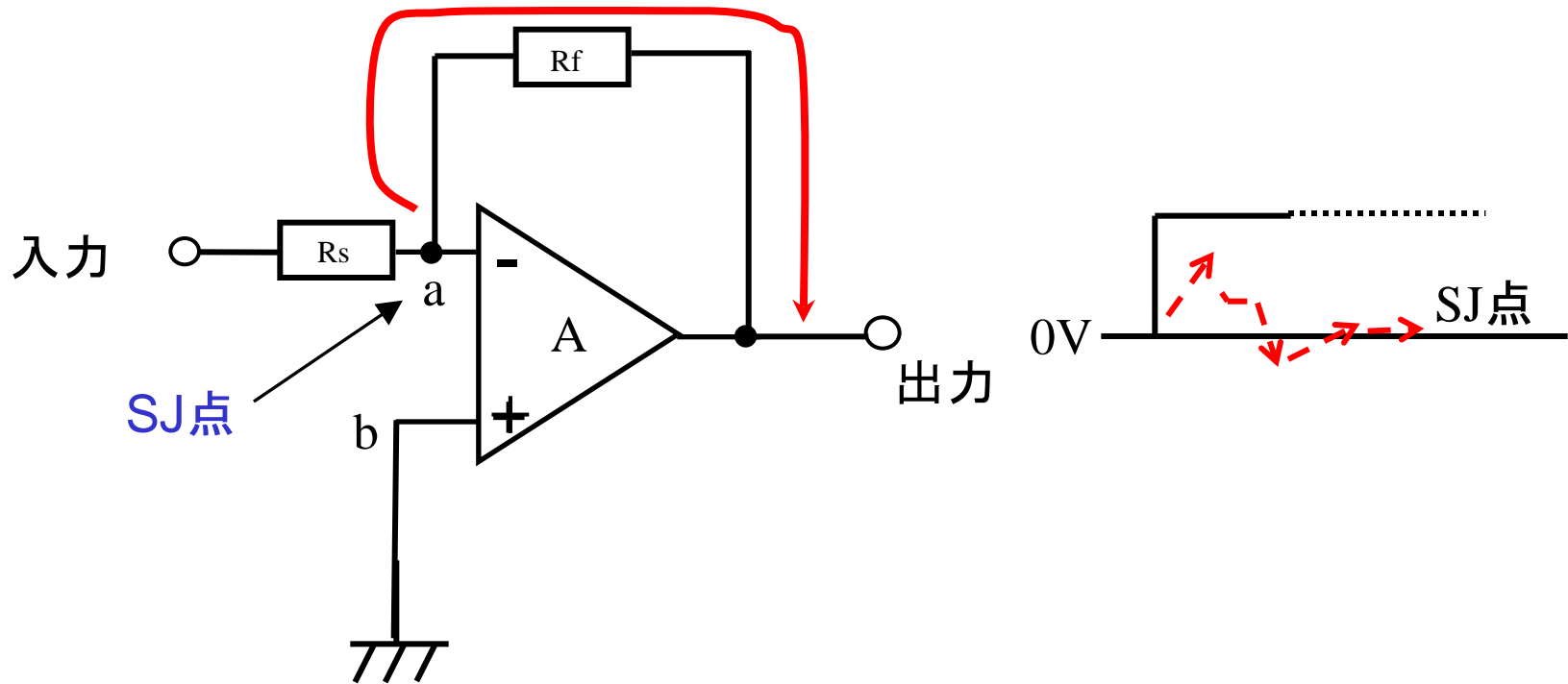
入りに1Vを加えた場合、a点の電圧がb点より高くなるため、出力には $(V_b - V_a)$ の差の電圧が出ます。つまり、マイナス側の電圧が大きく出ます。

オペアンプの実験(3)



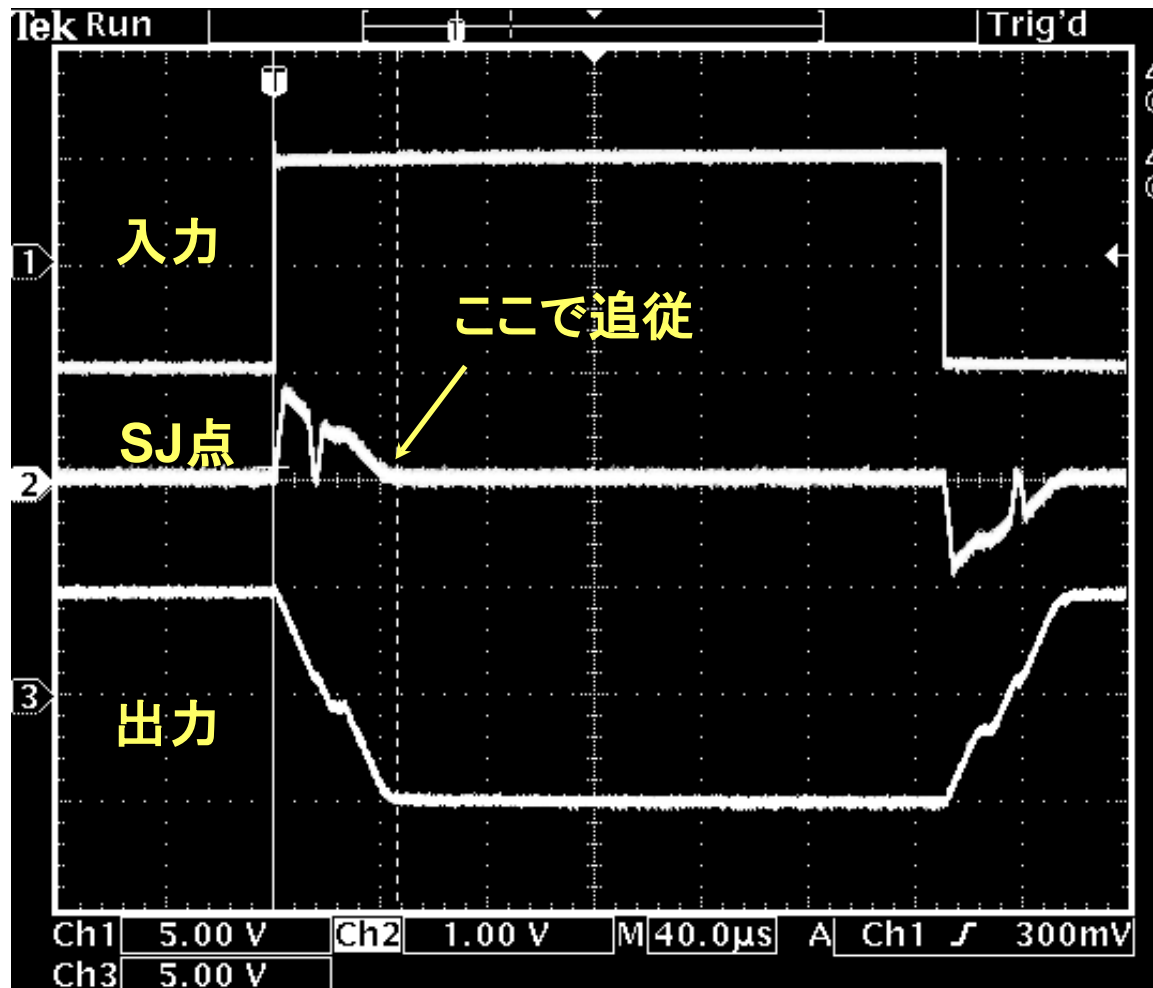
しかし、入力のa点(SJ点)には抵抗 R_f を通して出力の電圧がかかってきます。出力の信号が入力に戻ってくる事をフィードバックがかけると言います。

オペアンプの実験(4)

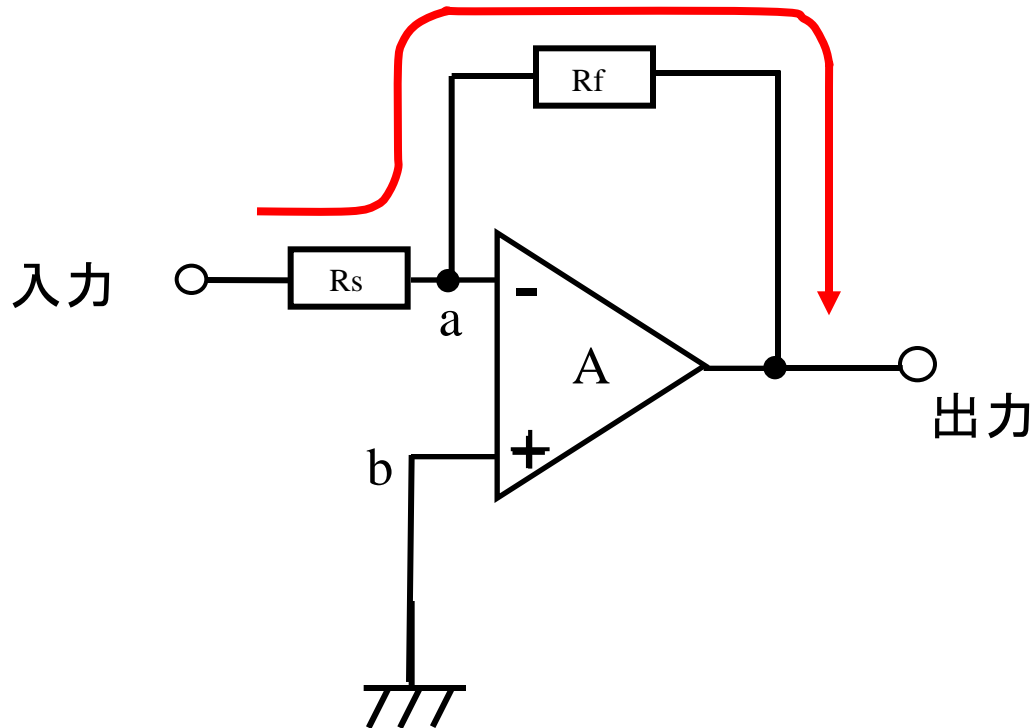


いままでの動作を繰り返すと最終的にa点の電圧とb点の電圧は同じとなります(SJ点)。A=b=0V となります。

出力が入力の変化に間に合わないとき



オペアンプの実験(5)



電流の流れる道は赤い矢印になります。

$R_f=20\text{k}\Omega$

$R_s=10\text{k}\Omega$

入力電圧=1Vとすると、
電流=0.1mA、
出力電圧=-2V
となります。

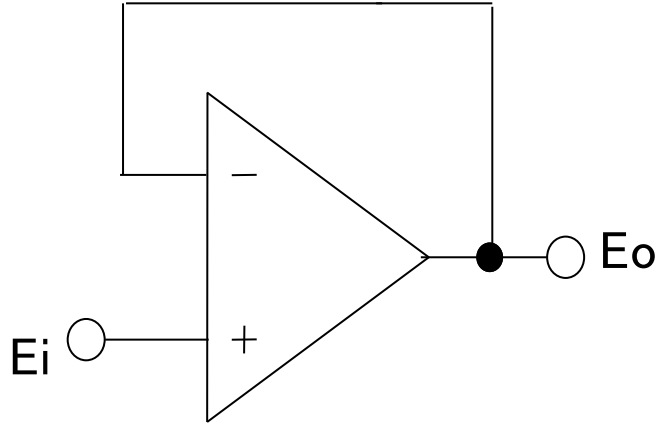
増幅率を計算すると

出力電圧÷入力電圧=2V÷1V=-2倍

$(R_f \times \text{電流}) \div (R_s \times \text{電流}) = R_f / R_s$

となり外付けの抵抗で決まります。

ボルテージ・フォロア

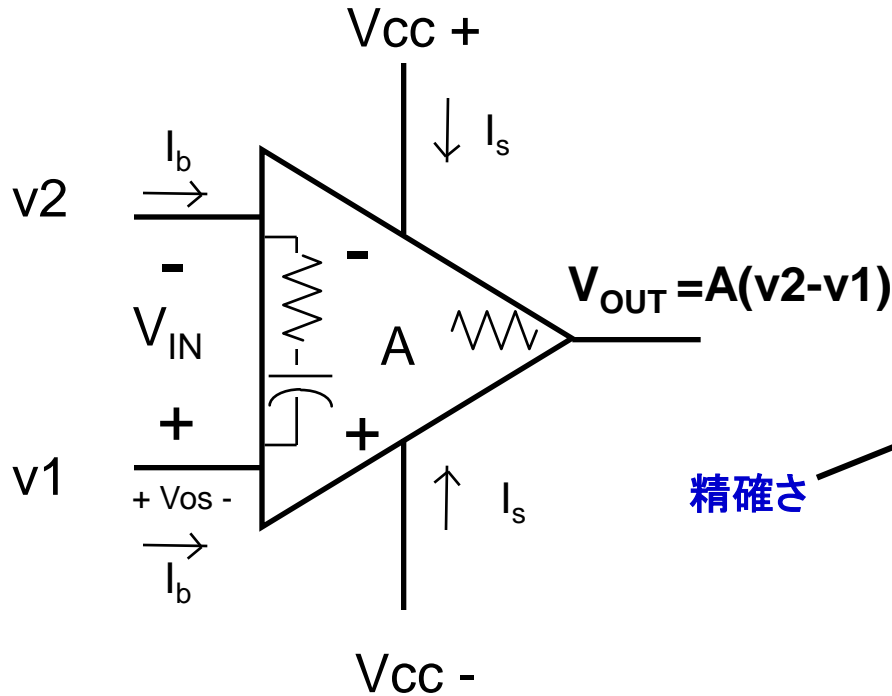


この回路は入力電圧と同じ電圧が出力されます。

$$E_o = E_i$$

用途：電圧バッファ、インピーダンス変換

実際のおペアンプ



速度

- 増幅度 = 25,000 to 167 dB
- 帯域幅 = 1 kHz ~ 1 GHz
- スルーレート = 0.1-800 V/ μ s
- 出力インピーダンス = 1-1k Ω
- 入力インピーダンス = 10^6 - 10^{12} Ω
- 入力容量 = 2-20pF
- 等価入力雑音電圧 = 1-1000 nV/ \sqrt Hz

精確さ

- 入力オフセット電圧 = 0.5 mV
- 入力オフセット電流 = 30 pA-50nA
- 入力バイアス電流 = 10 fA-250nA
- 消費電流 = 10 μ A-10mA
- 出力電圧振幅 = V_{CC+} - V_{CC-}
- 出力電力 = 0.1-500W
- 同相信号除去比 = 50-130 dB
- 電源変動除去比 = 50-145 dB

セッション4 終わり

お疲れ様でした.

