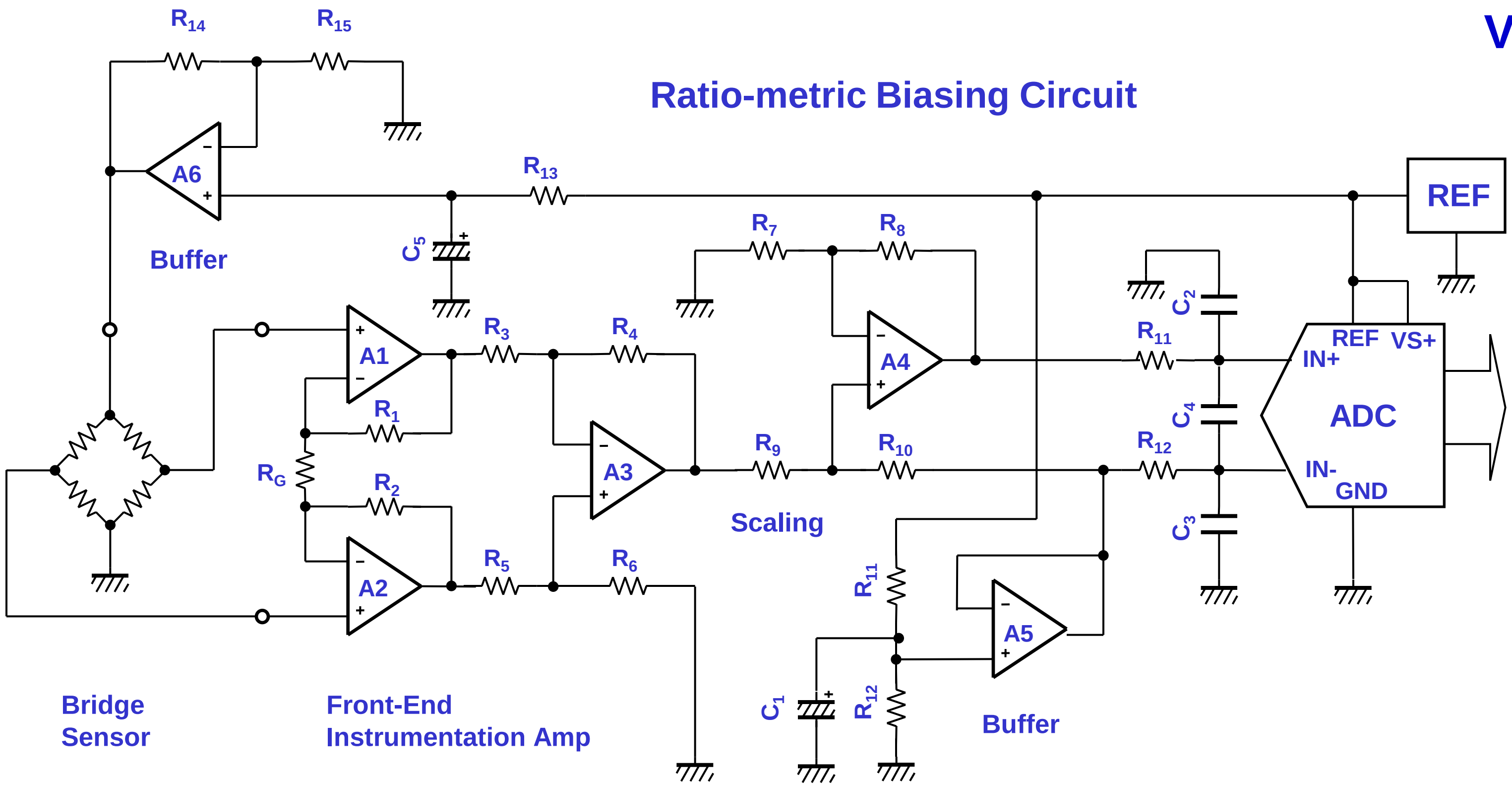
Let's learn Signal Chain

セッション1:オペアンプの動作原理

Ver.-2.1



セッション・インデックス

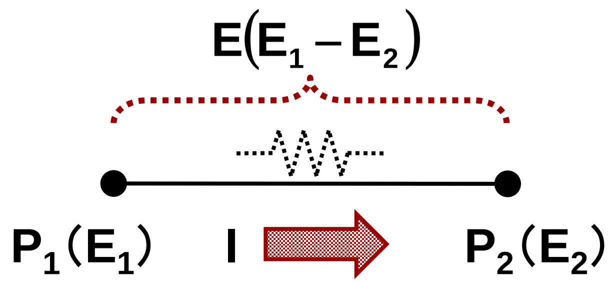
- **S1.1 予備知識**
  - (1)オームの法則と各等式
  - (2)複合抵抗の扱い
- **S1.2 オペアンプ**
  - (1)オペアンプの概要
  - (2)オペアンプの使い方
  - (3)オペアンプの動作
- **S1.3 オペアンプの基本応用回路**
  - (1)差動アンプ
  - (2)計測アンプ

- **S1.1 予備知識**
  - **(1)オームの法則と各等式**
  - **(2)複合抵抗の扱い**
- S1.2 オペアンプ
  - (1)オペアンプの概要
  - (2)オペアンプの使い方
  - (3)オペアンプの動作
- オペアンプの基本応用回路
  - (1)差動アンプ
  - (2)計測アンプ

オームの法則と各等式：オームの法則とは

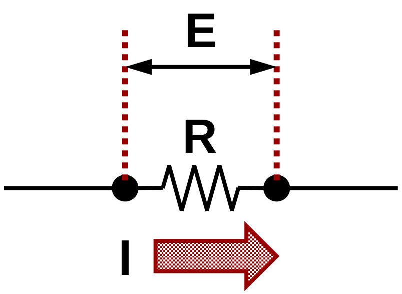
Georg S. Ohm氏

オーム氏いわく:
電流 I が流れている導体中の2点（P1, P2）間の電位差
E（E1－E2）は I に比例する. → E ∝ I



記事：後述する V＝I R , I＝V / R, R＝V / I などの式は, オームの法則を等式で表したもので,
式自体はオームの法則ではない. オーム氏の主張はあくまでも上の吹き出しの文章.

オームの法則と各等式:オームの第1公式



電圧 E は電流 I 比例する.

$E \propto I$

前出の比例式　　比例定数 R 加え等式を得る

$E = R \cdot I \,(V)$　　第1公式
式1-1

抵抗両端の電圧降下

● 比例定数を R とすれば E は I の関数...

ここで...

- E は電圧の量記号で単位は(V)→ボルト.
- I は電流の量記号で単位は(A)→アンペア.
- R は抵抗の(電流の流れ難さを表す)量記号で単位は(Ω)→オーム.

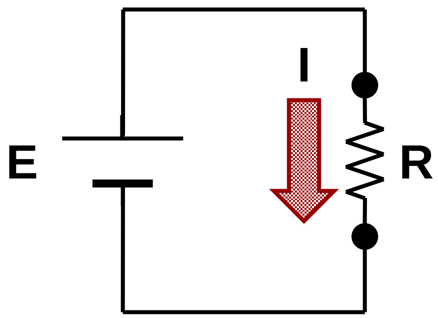
また, 式中の右辺は計算結果が電圧値であることから, 電圧項と呼ぶ.

$E = \boxed{R \cdot I}$ ← 電圧項

E＝I R , V＝I R の書き方が一般的

オームの法則と各等式：オームの第2公式

起電力 E が与えられた場合…



● 第1公式 V＝I R の逆関数を考えると…
電位差が E である2点間に流れる電流 I は E に比例する.

$$I \propto E$$

比例定数（Rの逆数） 1/R 加え等式を得る

$$I = \boxed{\frac{1}{R}} E \, (A)$$

第2公式
式1-2

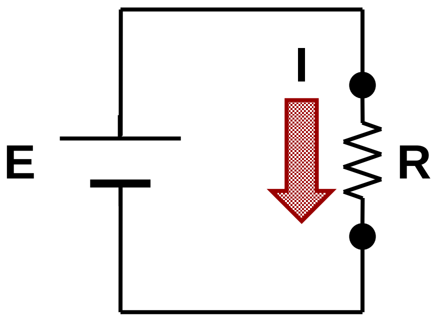
電流項

よって一般式… $I = \boxed{\frac{E}{R}} \, (A)$ を得る.

また，式中の右辺は計算結果が電流値であることから，電流項と呼ぶ.

オームの法則と各等式：オームの第3公式

起電力 E と回路電流 I が与えられた場合…



● 第2公式 I＝1/R×E の比例定数は抵抗の逆数 1/R であった.
これを量記号 g として式にすれば…

$$\boxed{g} = \frac{1}{R}(\mathrm{S})$$ 第3公式 式1-3　　同時に $$R = \frac{1}{g}$$ 式1-4

ここで…g をコンダクタンスと呼び電流の流れ易さを表す量.
単位はジーメンス（S）. また，量記号に大文字 G も使われる.

● E と I が既知なので，第2公式 $I = \frac{1}{R}E$ から比例定数 $\frac{1}{R} = \frac{I}{E}$ を求め

互いの逆数から $R = \frac{E}{I}$ 式1-5 を得る.

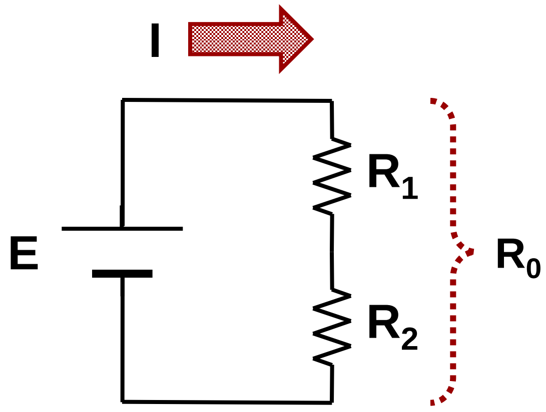
計算結果が抵抗値
なので抵抗項と呼ぶ

● または，第1公式 $E = R \cdot I$ からも比例定数 $R = \boxed{\frac{E}{I}}$ を得る.

記事：式を電流の流れ易さ g から導くか，流れ難さ R から導くかの違いで互いに裏返し.

複合抵抗の扱い：合成コンダクタンスと合成抵抗

● 直列接続の合成コンダクタンス g_0 は，各抵抗の和の逆数となる.

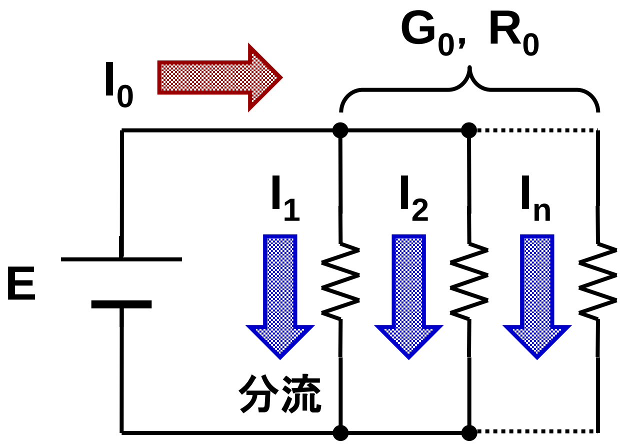


$$g_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1 + R_2} \qquad \text{式1-5}$$

よって前出の式1-4 “R＝1/g” に代入すれば…

$$R_0 = \frac{1}{g_0} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1 + R_2}} = R_1 + R_2 \qquad \text{式1-6}$$

● 並列接続の合成コンダクタンスは G_0 は，各コンダクタンスの和となる.



$$g_0 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_N} \qquad \text{式1-7}$$

よって前出 式1-4 に代入すれば…

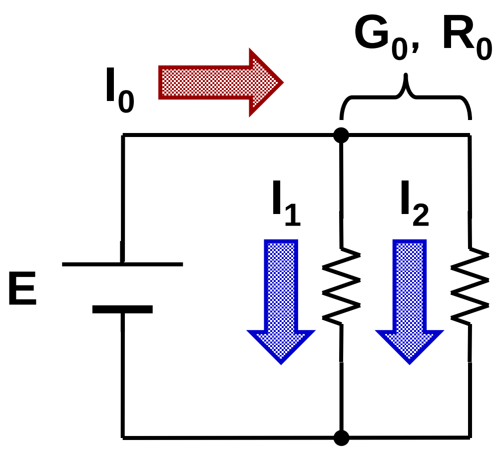
$$R_0 = \frac{1}{g_0} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \cdots + \dfrac{1}{R_N}} \qquad \text{式1-8}$$

複合抵抗の扱い：抵抗2個による並列接続

● 抵抗2の合成抵抗は $R_0 = \dfrac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ 式1-9 …と表せる．

これを証明するため，前出の式1-7を用いて…

抵抗2個の並列接続



$$g_0 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$ とする．

次に前出の式1-4 “R＝1/g” に代入すれば…

$$R_0 = \frac{1}{g_0} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}} = \frac{1}{\dfrac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2}}$$

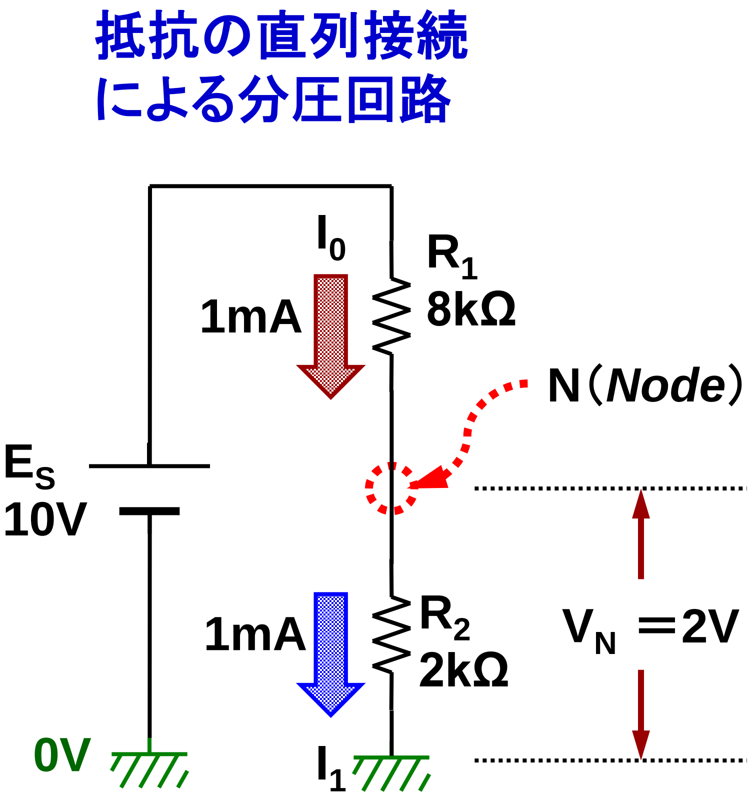
$$= \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

よって，式1-9を得る．

● 抵抗3個以上の並列合成抵抗を電卓で計算する場合は，並列の並列を求めながら順次計算すればよい．

$$R_{01} = \frac{R_0 \cdot R_3}{R_0 + R_3} \longrightarrow R_{02} = \frac{R_{01} \cdot R_4}{R_{01} + R_4}$$

複合抵抗の扱い：例題1（ノード電圧を求める）



記事：特記なきグランド電位は0V.
ここでは，起電力をE，ノード電圧をV_N
に統一する．単位はいずれも（V）.

① 電流I_O/I_1を求める.

$$I_0 = \boxed{\frac{E_s}{R_1 + R_2}} = \frac{10V}{8k\Omega + 2k\Omega} = 1(mA) \qquad \text{式1-10}$$

電流項

分流回路が無いので…

$$I_0 = I_1 \qquad \therefore I_1 = 1mA$$

② ノードNの電圧V_Nを求める.

$$V_N = \boxed{I_1 \cdot R_2} = 1mA \times 2k\Omega = 2(V) \qquad \text{式1-11}$$

電圧項
R_2両端の電圧降下

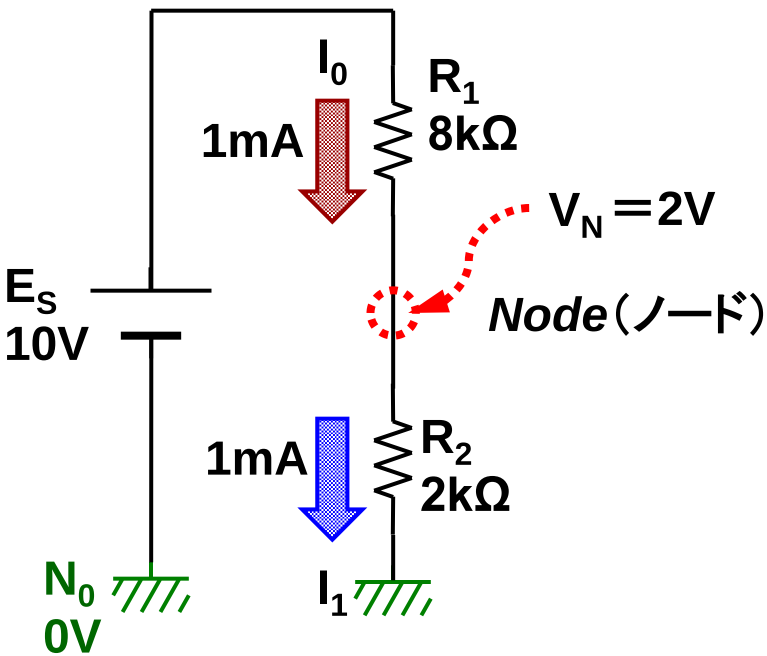
あるいは…

$$V_N = E_S - I_0 \cdot R_1$$
$$= 10V - 1mA \times 8k\Omega$$
$$= 10V - 8V = 2(V)$$

Texas Instruments

複合抵抗の扱い:例題2(分圧比を求める)

抵抗の直列接続
による分圧回路



① 前出の式1-11に式1-10を代入し式1-12Aを得る.

$$I_1 = \frac{E_s}{R_1 + R_2} = \frac{10V}{8k\Omega + 2k\Omega} = 1mA \quad \text{前出の式1-10}$$

$$V_N = I_1 \cdot R_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad \text{前出の式1-11}$$

$$V_N = I_1 \cdot R_2 = \frac{E_S}{R_1 + R_2} R_2 \quad \cdots\cdots\cdots \quad \text{式1-12A}$$

② 抵抗の量記号 R をまとめると分圧比が求まる.

$$V_N = \boxed{\frac{R_2}{R_1 + R_2}} E_S \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad \text{式1-12B}$$

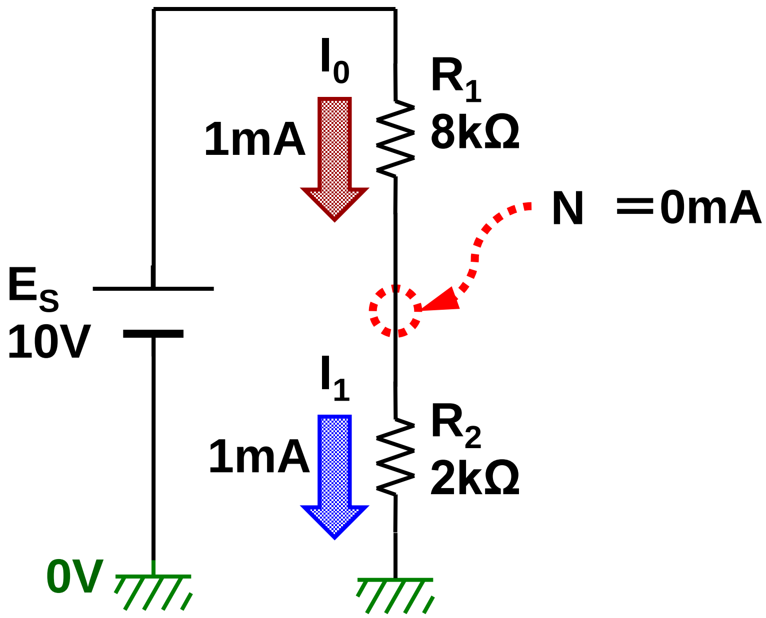
分圧比

$$= \frac{2k\Omega}{8k\Omega + 2k\Omega} \times 10V = \boxed{0.2} \times 10V = 2V$$

複合抵抗の扱い：例題3（ノード電流の和が0とは）

Point-1：分流回路のないノードNの電流の和は0

抵抗の直列接続
による分圧回路



電池E_Sから流れ出す電流

$I_0 = I_1$ 式1-13

ノードNにおける電流の和は…

$I_0 + I_1 = 0$ 式1-14

実際の回路電流は…

$1\text{mA} + (-1\text{mA}) = 0\text{mA}$

ここで…

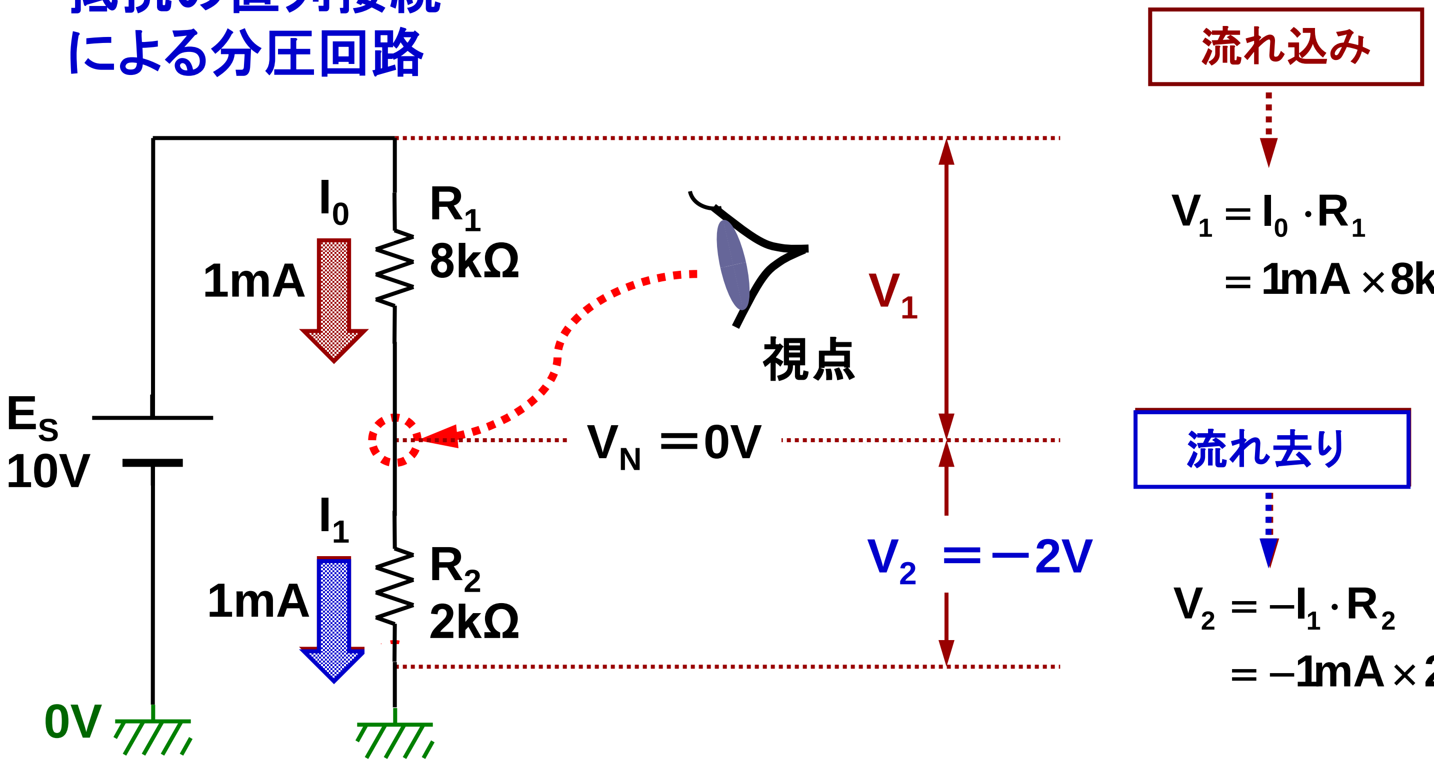
＋は流れ込みで，－は流れ出しを表す.

すなわち，Nにおける電流0mAとは，
流入と流出が等しい状態を意味する.

複合抵抗の扱い：例題4（ノードから見た電圧降下）

Point-2：視点を変えると電圧・電流の符号が変わる.

抵抗の直列接続
による分圧回路



$$V_1 = I_0 \cdot R_1$$
$$= 1\text{mA} \times 8\text{k}\Omega = 8\text{V}$$

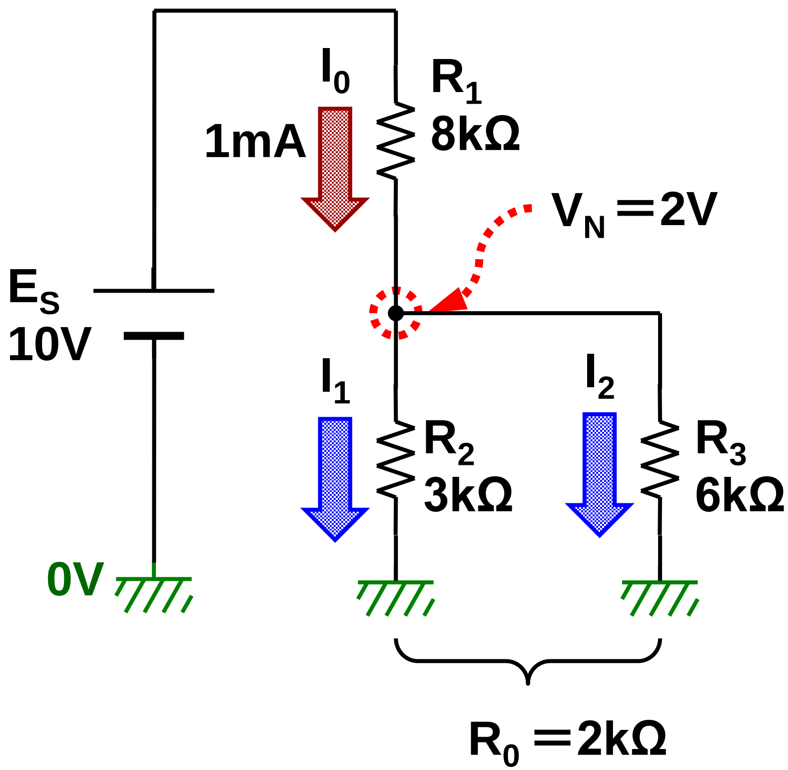
$$V_2 = -I_1 \cdot R_2$$
$$= -1\text{mA} \times 2\text{k}\Omega = -2\text{V}$$

記事：ノードNを中心に回路の動作を解析する場合は，電圧・電流の極性も読み替える.

TEXAS INSTRUMENTS

複合抵抗の扱い：例題5，（抵抗の直・並列接続）

抵抗の直・並列接続による分圧回路



① 合成抵抗R_Oを求める

$$R_0 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{3k\Omega \times 6k\Omega}{3k\Omega + 6k\Omega} = 2k\Omega$$

② 全電流I_Oを求める

$$I_0 = \frac{E_S}{R_1 + R_0} = \frac{10V}{8k\Omega + 2k\Omega} = 1mA$$

③ ノードNの電圧V_Nを求める

$$V_N = E_S - I_1 \cdot R_1 = 10V - 8V = 2V$$

④ 電流I_1を求める

$$I_1 = \frac{V_N}{R_2} = \frac{2V}{3k\Omega} = 0.6667mA$$

⑤ 電流I_2を求める

$$I_2 = \frac{V_N}{R_3} = \frac{2V}{6k\Omega} = 0.3333mA$$

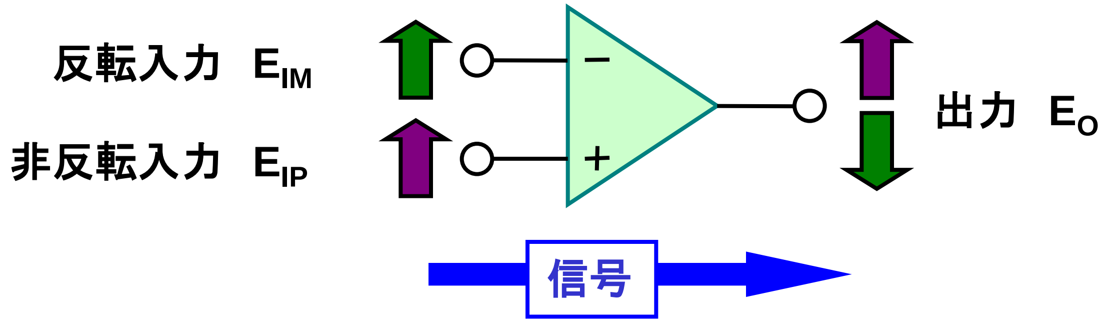
合計 1mA

- S1.1 予備知識
  - (1)オームの法則と各等式
  - (2)複合抵抗の扱い
- **S1.2 オペアンプ**
  - **(1)オペアンプの概要**
  - **(2)オペアンプの使い方**
  - **(3)オペアンプの動作**
- オペアンプの基本応用回路
  - (1)差動アンプ
  - (2)計測アンプ

オペアンプの概要：オペアンプとは（その1）

オペレーショナル・アンプリファイア（オペアンプ）とは，

2つの入力と，　1つの出力を持ったアンプ



●記号“－”は反転入力，　記号“＋”は非反転入力．

と呼ばれ，入力信号に対する出力信号の極性の関係を表す．

●反転入力に正の電圧を入れると出力は負に振れる．

●非反転入力に正の電圧を入れると出力は正に振れる．

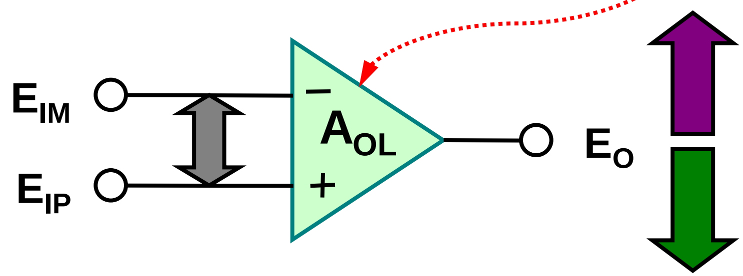
記事：原則として，アナログ回路では信号の流れが左から右になるように図面を書く．

TEXAS INSTRUMENTS

オペアンプの概要：オペアンプとは（その2）

Point-1：オペアンプは，2つの入力の差電圧を増幅する.

A_{OL}の範囲 60dB～140dB（1×10^3～1×10^7倍）



$E_{IP} - E_{IM}$　　$\times A_{OL}$　　$= E_O$

式に直すと　$E_O = (E_{IP} - E_{IM})A_{OL}$ ………………………… 式1-15

ここで，A_{OL} はオペアンプの持つオープン（開）ループ・ゲイン

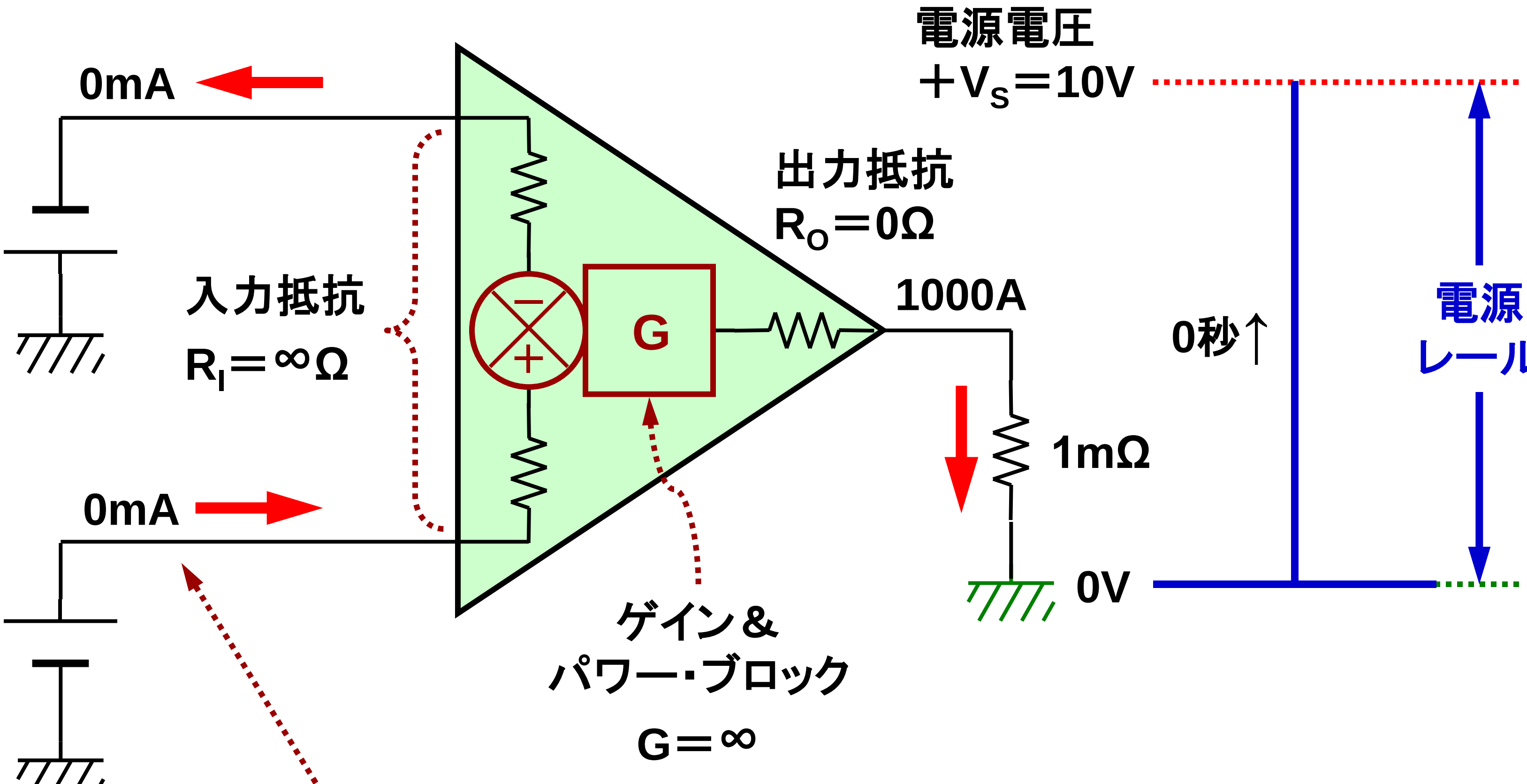
俗語で，裸のゲインと呼ぶこともある.

記事：　$A_{OL} = 20\mathrm{Log}_{10}\left(\dfrac{E_O}{E_{IP} - E_{IM}}\right)(\mathrm{dB}) \longrightarrow A_{OL} = 10^{\frac{\mathrm{dB}}{20}}$（倍）

TEXAS INSTRUMENTS

オペアンプの概要：理想オペアンプの性能

Point-2：全ての性能・動作において誤差要因や制限がない.

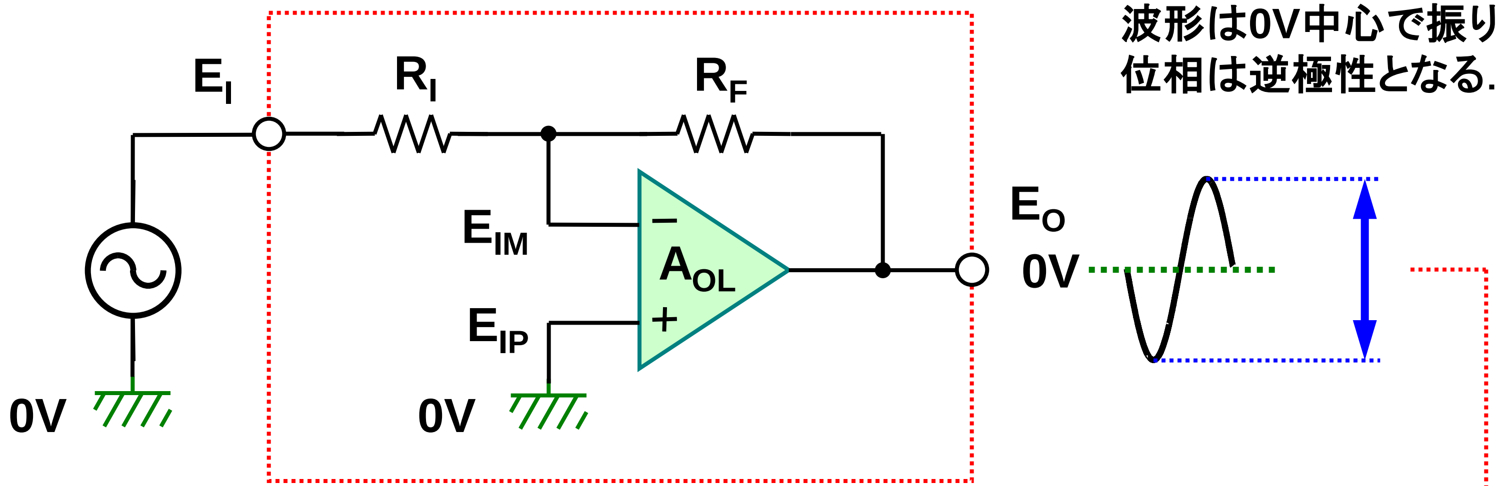


記事：オペアンプの入力へ流入・流出する電流を入力バイアス電流 と呼ぶ（記号＝I_B）.

オペアンプの使い方：反転アンプ

Point-3：オペアンプは，2つの抵抗の比 R_F/R_I でゲインを設定して使う.

反転アンプの例



●入力 E_I に対する　E_O の関係

$$E_O = -A_{CL} \cdot E_I = -\frac{R_F}{R_I} E_I \qquad \text{式1-16}$$

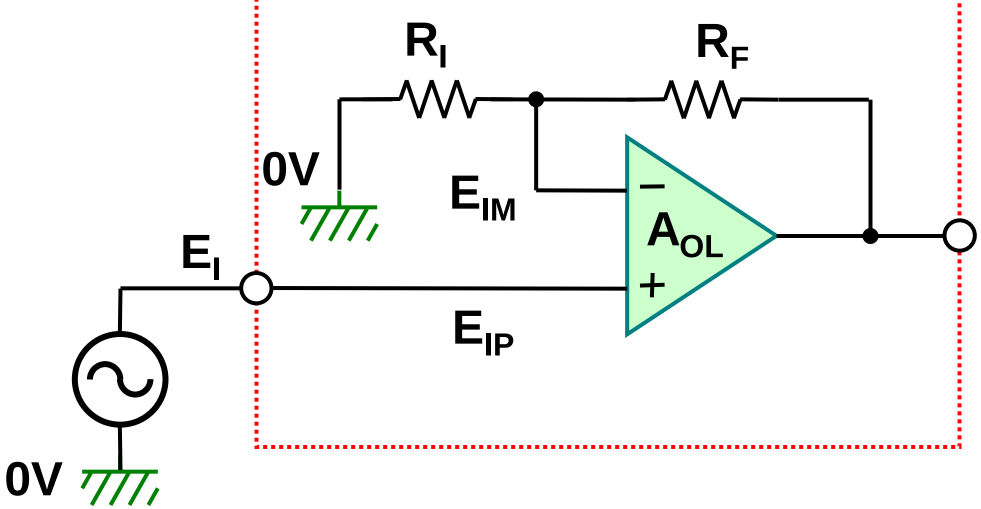
ここで，A_{CL} は R_F/R_I で定まるクローズド（閉）ループ・ゲイン

記事：式1-16のように，入力 E_I に対する出力 E_0 の関係を表す式を伝達式と呼ぶ.

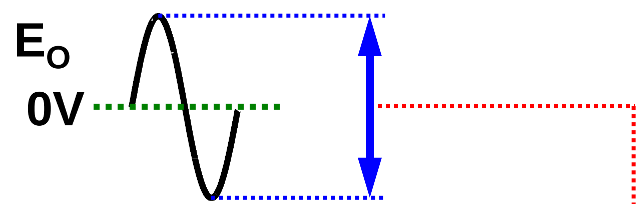
オペアンプの使い方:非反転アンプ

Point-4: 入力 E_I と出力 E_O を同極性とするには非反転入力を使う.

非反転アンプの例



$E_I = E_{IP}$ なので, 位相は同極性となる.
振幅は反転ゲインR_F/R_I にプラスして
R_I/R_I (=1)分だけ大きくなる.

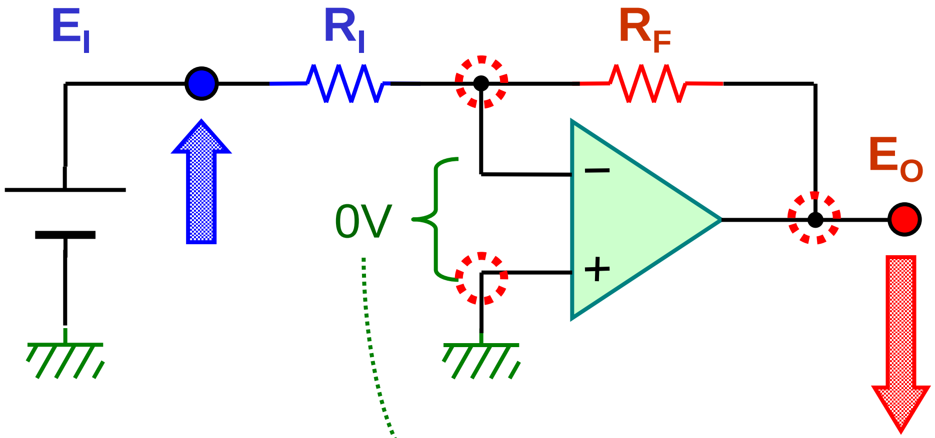


●入力 E_I に対する　E_O の関係　$E_O = A_{CL} \cdot E_I = \dfrac{R_I + R_F}{R_I} E_I = \left(1 + \dfrac{R_F}{R_I}\right) E_I$　式1-17

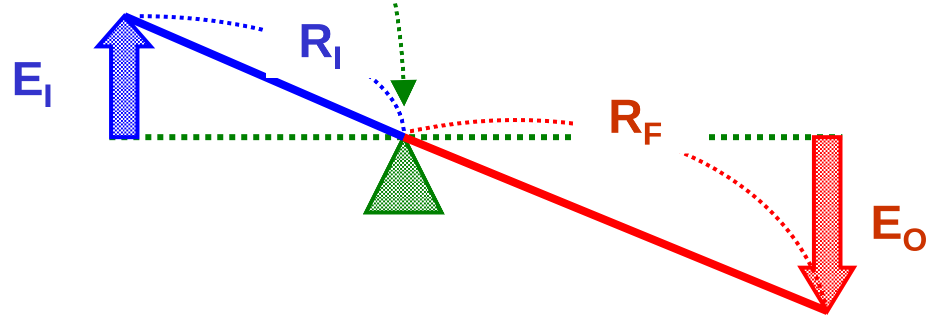
オペアンプの動作：反転アンプの振る舞い

オペアンプ出力E_Oは　−INが　＋INと電圧が等しくなる方向に振れる.

● 実際の回路

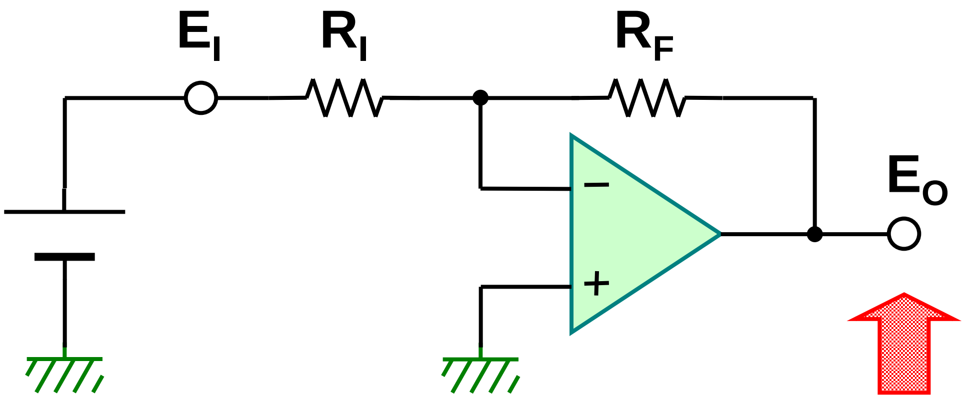


● シーソー・モデル



$$E_O = -\frac{R_F}{R_I}E_I$$

オペアンプの動作：反転アンプの伝達式



反転アンプの伝達式は，なぜ $E_O = -\dfrac{R_F}{R_I}E_I$ になるのか？

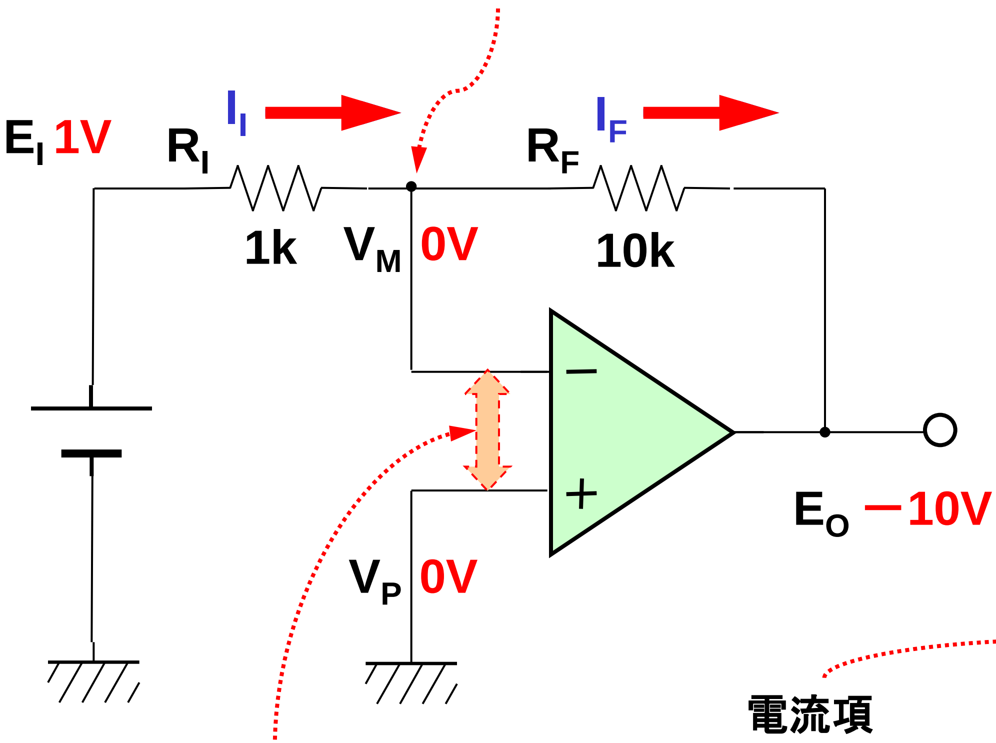
ちなみに，
E_OとE_Iを除去したものを
ゲイン式と呼ぶ．

$$G = -\frac{R_F}{R_I} \quad \text{式1-18}$$

記事：本トレーニングでは，コンダクタンスの量記号を"g"としゲインの量記号を"G"とする．

オペアンプの動作：反転アンプの伝達式を導く

電流加算点 SJ点（Summing Junction）



オペアンプの動作が正常なら

$V_M = V_P$（バーチャル・ショート）

となるようE_Oが変化

V_M=0V が成立するにはSJ点の電流は0mAでなければならない

$$I_I + \left(-I_F\right) = 0(\mathrm{mA}) \qquad \text{式1-19}$$

$$I_I = \frac{E_I}{R_I} \qquad \text{式1-20}$$

$$I_F = \frac{-E_O}{R_F} \qquad \text{式1-21}$$

式1-15～式1-21の関係より

$$\frac{E_I}{R_I} + \left(-\left(\frac{-E_O}{R_F}\right)\right) = 0(\mathrm{mA}) \qquad \text{式1-22}$$

電流項

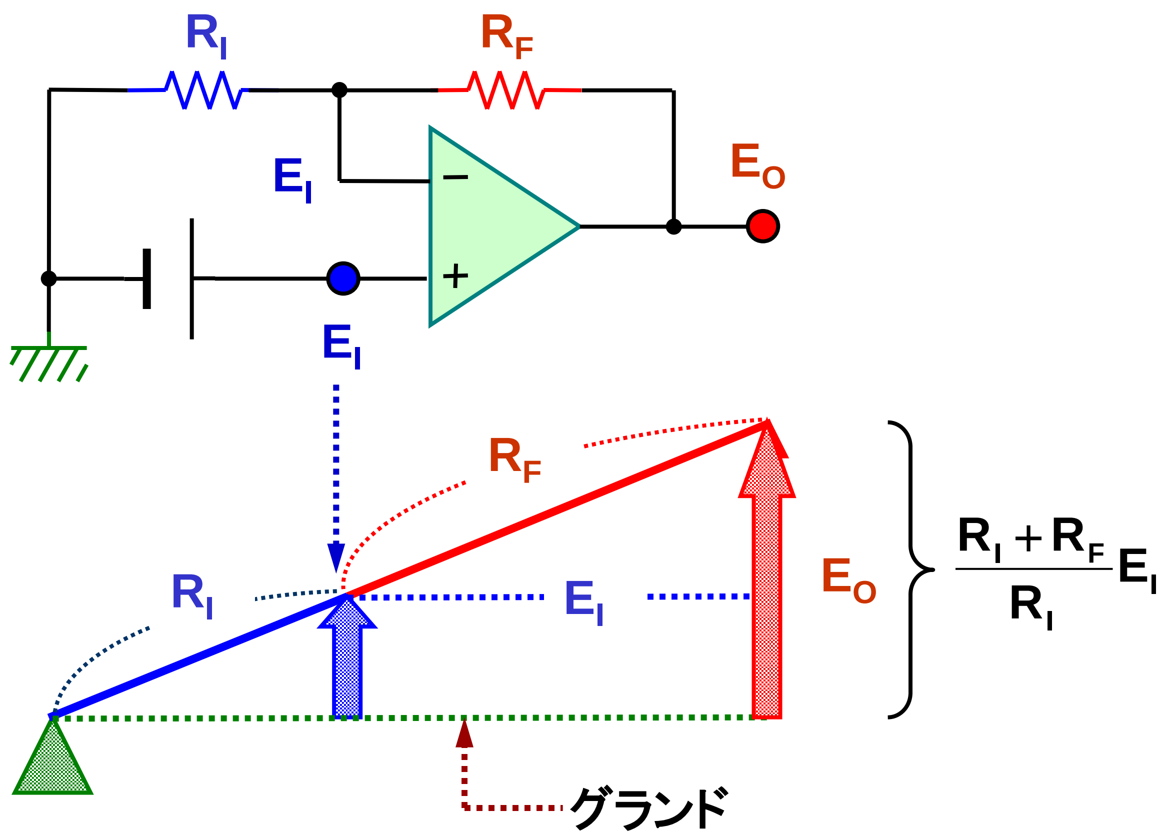
よって反転アンプの伝達式は

$$E_O = -\frac{R_F}{R_I}E_I \qquad \text{式1-23}$$

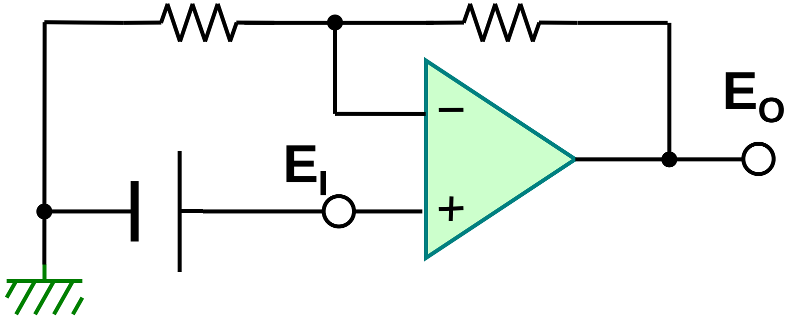
$$= -\frac{10\mathrm{k}\Omega}{1\mathrm{k}\Omega}1\mathrm{V} = -10(\mathrm{V})$$

オペアンプの動作：非反転アンプの振る舞い

オペアンプ出力E_Oは－INが＋INと電圧が等しくなる方向に振る.



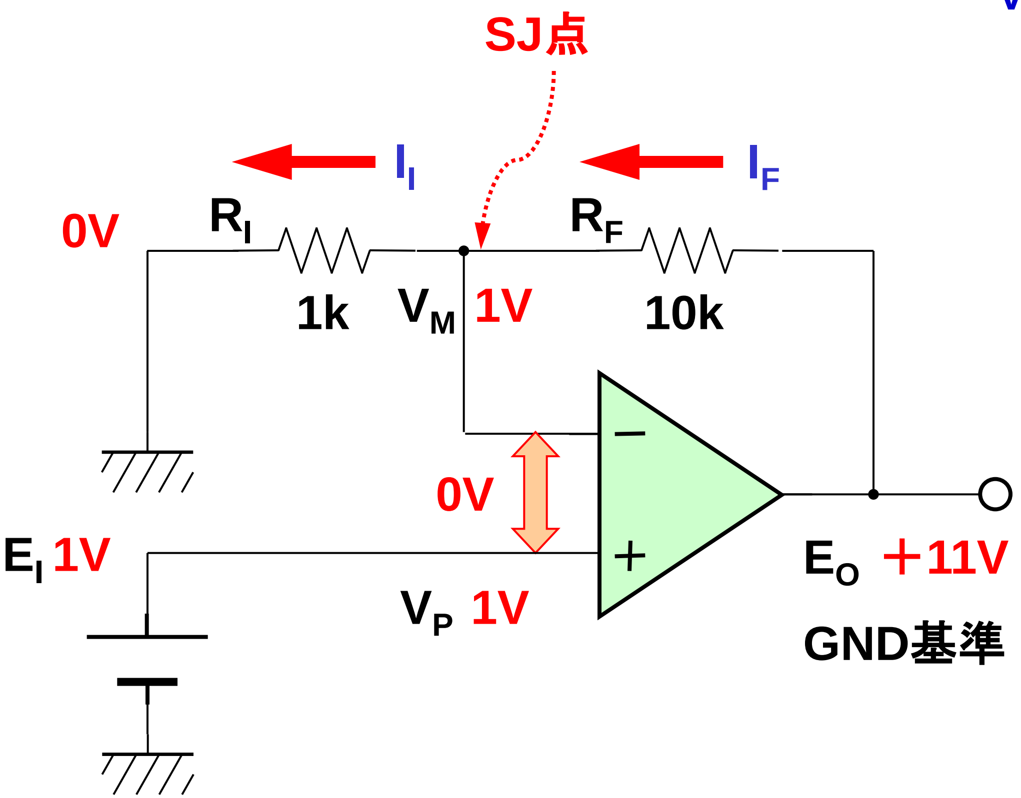
オペアンプの動作：非反転アンプの伝達式



非反転アンプの伝達式は，なぜ $E_O = \frac{R_F + R_I}{R_I} E_I$ になるのか？

ゲイン式 ⇒ $$G = \frac{R_F + R_I}{R_I} = 1 + \frac{R_F}{R_I}$$ 式1-24

オペアンプの動作：非反転アンプの伝達式を導く



$V_P - V_M = 0V$ が成立するにはSJ点＝0mA

$$\left(-I_I\right)+I_F=0\left(\mathrm{mA}\right) \qquad \text{式1-25}$$

$$I_I=\frac{E_I}{R_I} \qquad \text{式1-26}$$

$$I_F=\frac{E_O-E_I}{R_F} \qquad \text{式1-27}$$

式1-25～式1-27の関係より

$$\left(-\left(\frac{E_1}{R_1}\right)\right)+\frac{E_O-E_I}{R_F}=0\left(\mathrm{mA}\right) \qquad \text{式1-28}$$

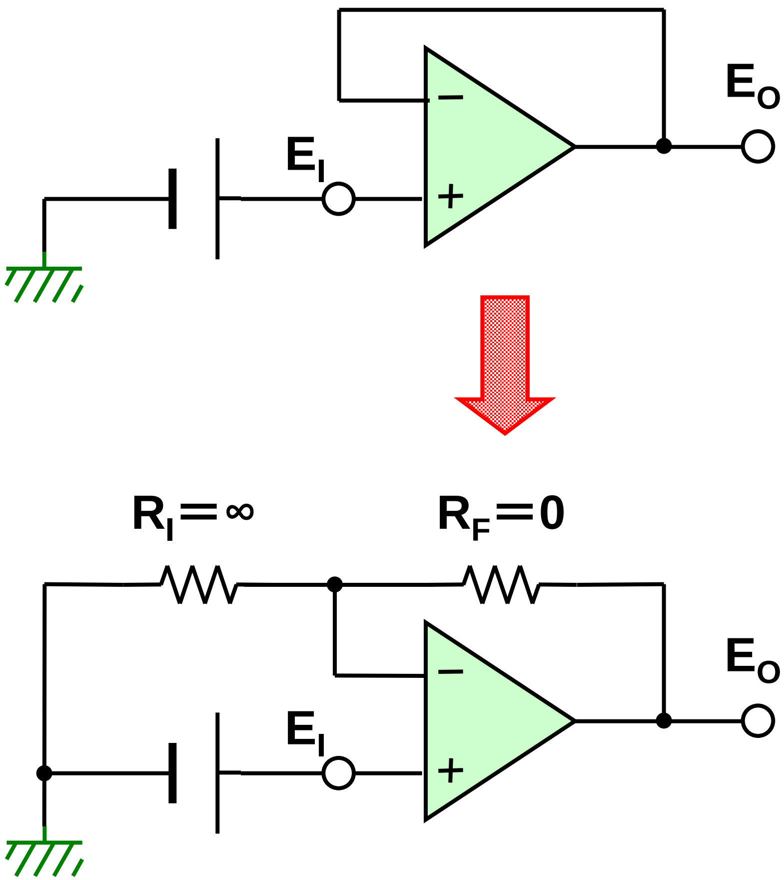
よって非反転アンプの伝達式は

$$E_O=\frac{R_FE_I+R_IE_I}{R_I}=\frac{R_F+R_I}{R_I}E_I \qquad \text{式1-29}$$

$$=\frac{10\mathrm{k}\Omega+1\mathrm{k}\Omega}{1\mathrm{k}\Omega}1\mathrm{V}=11\left(\mathrm{V}\right)$$

オペアンプの動作：ボルテージ・フォロアの場合

ボルテージ・フォロアのゲイン（非反転）を求める.



非反転アンプの伝達式において

下段の図のように…

$R_F = 0\Omega$（ショート）

$R_I = \infty\Omega$（オープン）

…と考えれば

$$E_0 = \frac{R_F + R_I}{R_I} E_I$$

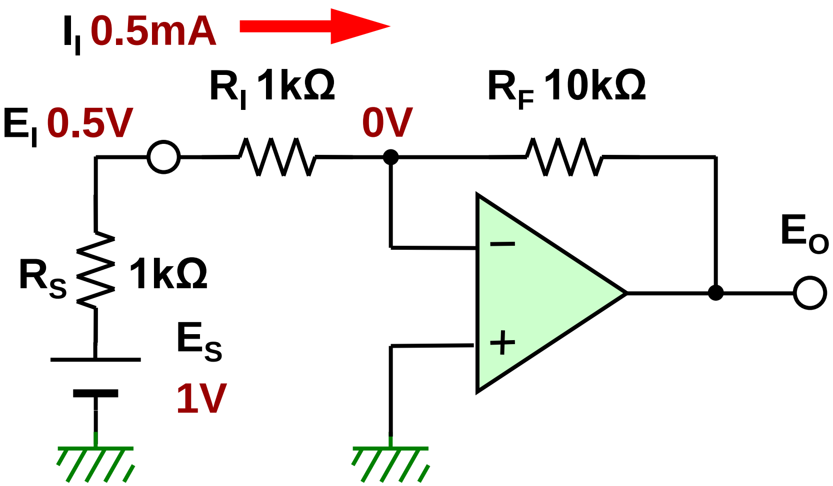
$$= \frac{0\Omega + \infty\Omega}{\infty\Omega} E_1$$

$$= E_I$$

従って…

$$G = +1$$

オペアンプの動作:ボルテージ・フォロアの効用



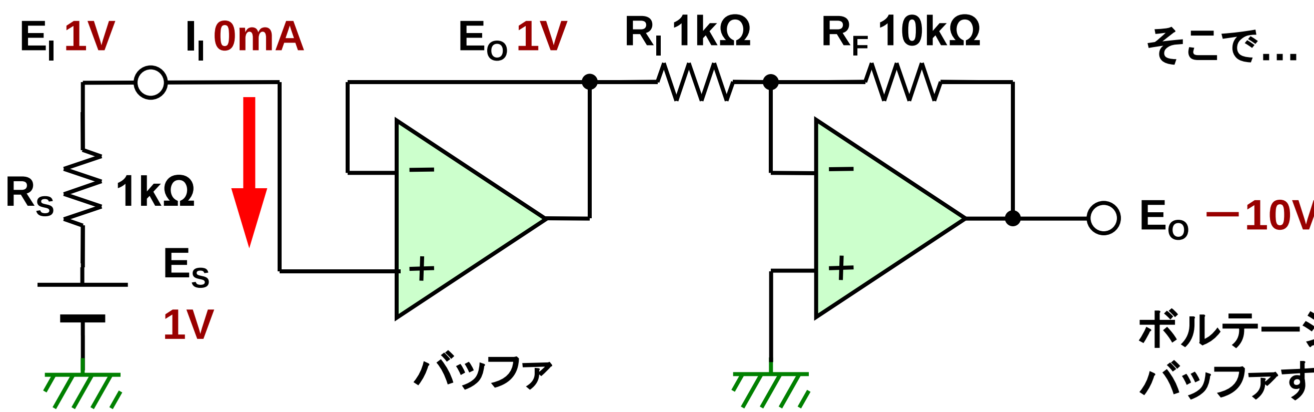
左図のアンプ回路の入力抵抗は1kΩ.
信号に出力抵抗 R_S があると…

$$E_I = E_S - I_I \cdot R_S = E_S - \frac{R_S \cdot E_S}{R_S + R_I} = 0.5V$$

よって, 出力電圧 E_O は…

$$E_0 = -\frac{R_F}{R_I} E_I = -5V$$

…のように, 期待値の－10Vにはならない.



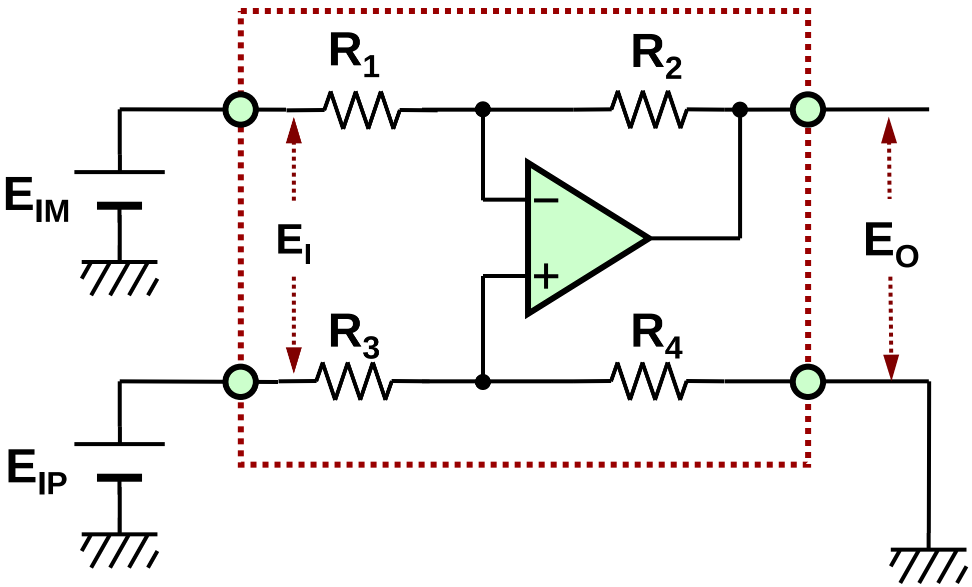
そこで…

ボルテージ・フォロアで
バッファすると期待値が得られる.

- S1.1 予備知識
  - (1)オームの法則と各等式
  - (2)複合抵抗の扱い
- S1.2 オペアンプ
  - (1)オペアンプの概要
  - (2)オペアンプの使い方
  - (3)オペアンプの動作
- **オペアンプの基本応用回路**
  - **(1)差動アンプ**
  - **(2)計測アンプ**

差動アンプ：書籍に見られる簡易伝達式

差動アンプは，2つ電圧入力の差電圧を求める回路.



もし　$R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$ なら
差動アンプの伝達式は…

$$E_O = \frac{R_2}{R_1}\left(E_{IP} - E_{IM}\right) = \frac{R_2}{R_1}E_I \qquad \text{式1-30}$$

回路のゲイン式は…

$$G = \frac{R_2}{R_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad \text{式1-31}$$

もしくは

$$G = \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_3} \qquad \text{式1-32}$$

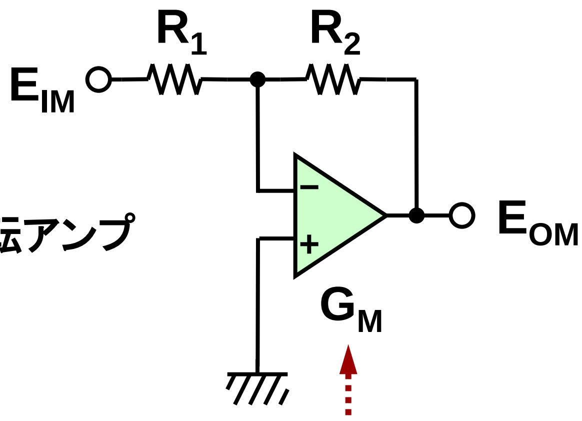
式1-29，式1-30は書籍に見られる簡易式．こうした式を，吟味しないで利用する習慣をつけると …

回路の動作概念が理解できない．＝　問題が起きたとき何が悪いのか判定できない．

差動アンプ：式による分析（その1）

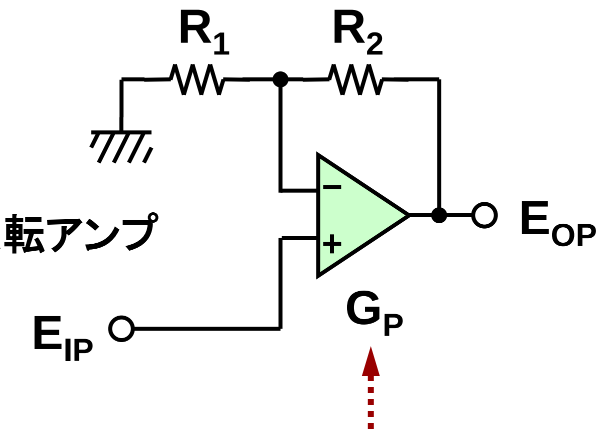
単に反転ゲインと非反転ゲインを合成すると，$E_{IP}=E_{IM}$でも出力がゼロにならない．

反転アンプ



E_{IM}, E_{OM} 間のゲイン

非反転アンプ



E_{IP}, E_{OP} 間のゲイン

$$E_{OM}=-\frac{R_2}{R_1}E_{IM}$$ 式1-30

$$E_{OP}=\frac{R_1+R_2}{R_1}E_{IP}=1+\frac{R_2}{R_1}E_{IP}$$ 式1-33

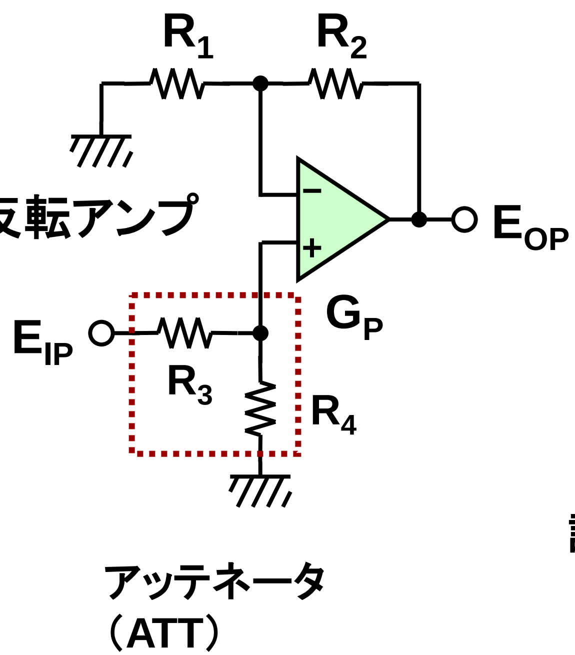
$$G_M=-\frac{R_2}{R_1}$$ 式1-32

$$G_P=\frac{R_1+R_2}{R_1}=1+\frac{R_2}{R_1}$$ 式1-34

このように，ゲイン項の絶対値が等しくない

差動アンプ：式による分析（その2）

差動アンプは E_{IP} 側に分圧器（ATT）を入れてトータル・ゲインを調整している.



ゲインの連立は積 → アンプゲイン × ATTゲイン

精密式

$$E_{OP} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} E_{IP}$$

$$= \frac{R_4 (R_1 + R_2)}{R_1 (R_3 + R_4)} E_{IP} \qquad \text{式1-35}$$

$R_3 = R_1$, $R_4 = R_2$ に選べば…

評価式（簡易式）

$$E_{OP} = \frac{R_2 (R_1 + R_2)}{R_1 (R_1 + R_2)} E_{IP}$$

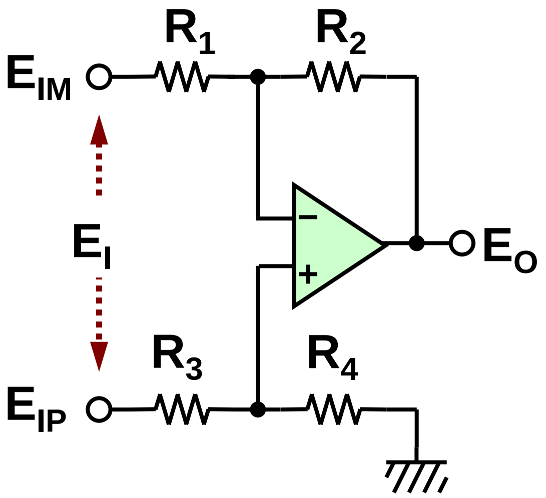
$$= \frac{R_2}{R_1} E_{IP} \qquad \text{式1-36}$$

ゲインの絶対値は反転と等しくなる

記事：簡易式は式のエッセンス．ゲインなどの比較には役立つが，基本あっての評価式である．

差動アンプ：式による分析（その3）

反転と非反転のゲインを合成する．



精密式 $$E_O = G_P E_{IP} + G_M E_{IM}$$

$$= \frac{R_4(R_1+R_2)}{R_1(R_3+R_4)}E_{IP} + \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)E_{IM}$$

$$= \frac{R_4(R_1+R_2)E_{IP} - R_2(R_3+R_4)E_{IM}}{R_1(R_3+R_4)} \quad \text{式1-36}$$

$R_3 = R_1$, $R_4 = R_2$ に選べば…

評価式 $$E_O = \frac{R_2(R_1+R_2)E_{IP} - R_2(R_1+R_2)E_{IM}}{R_1(R_1+R_2)}$$

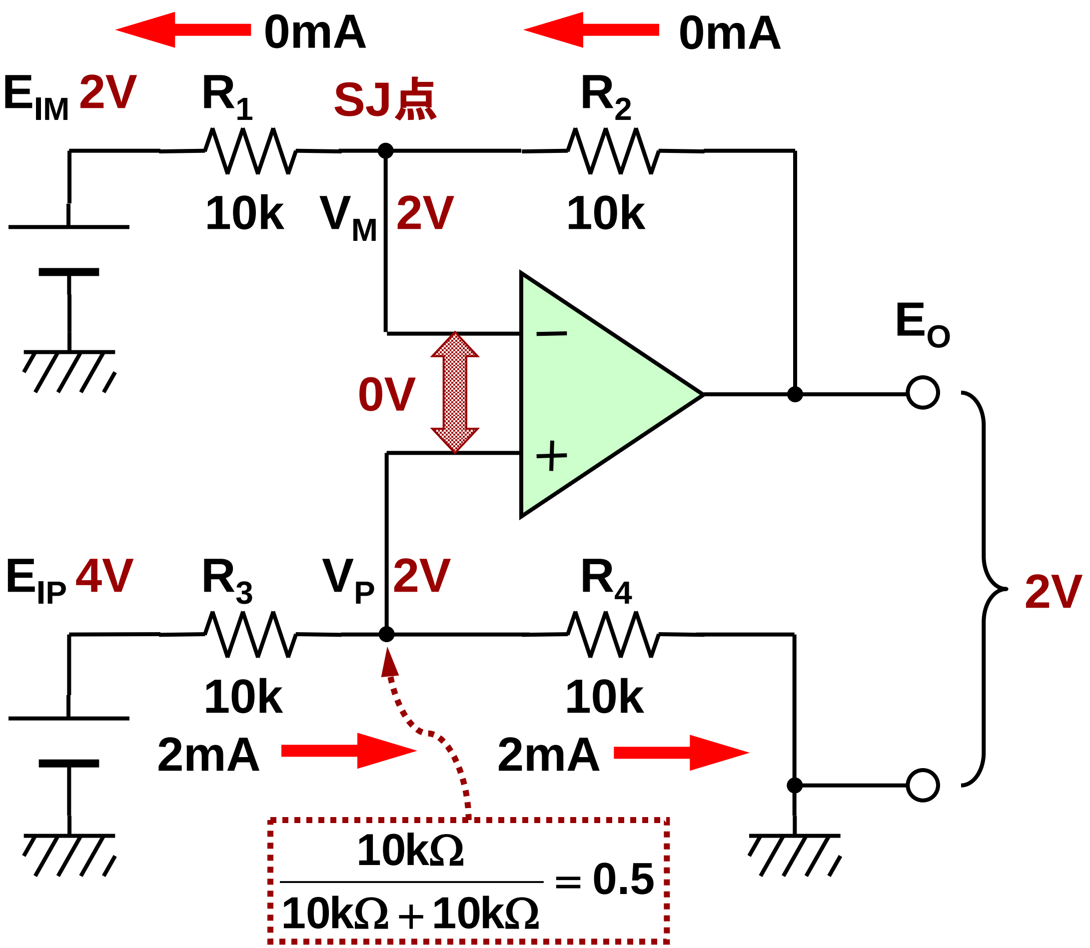
$$= \frac{R_2(R_1+R_2)(E_{IP}-E_{IM})}{R_1(R_1+R_2)} = \frac{R_2}{R_1}E_I$$

抵抗比の観点から，同時に…　$$E_O = \frac{R_2+R_4}{R_1+R_3}E_I \quad \text{式1-37}$$

式1-29と式1-30と同じ簡易式が得られ，式が自分のものとなる

TEXAS INSTRUMENTS

差動アンプ，ノード電圧から動作を確認



前出の式1-28から…

$$E_0=\frac{R_2}{R_1}\left(E_{IP}-E_{IM}\right)$$
$$=\frac{10k\Omega}{10k\Omega}\left(4V-2V\right)$$
$$=2\left(V\right)$$

…となるかを調べる.

入力の平均値を Vc とすれば…

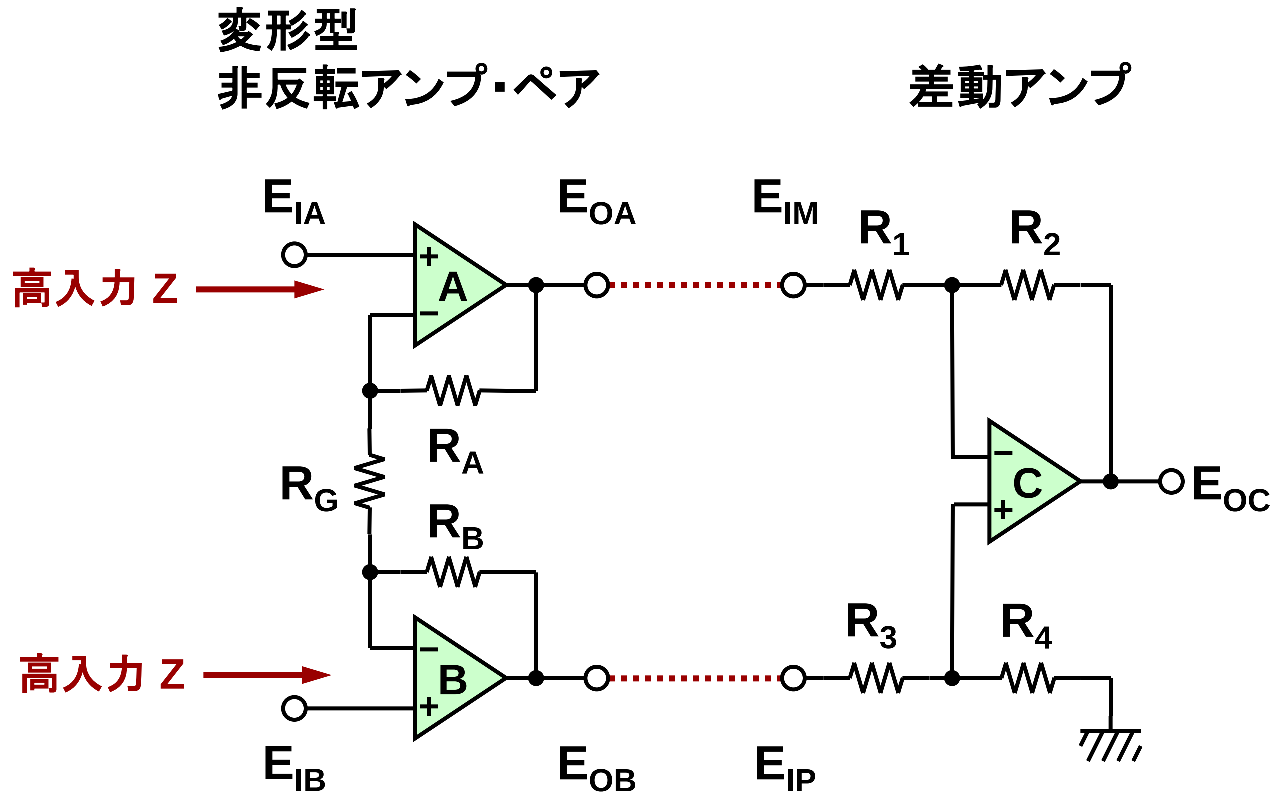
$$V_C=\frac{E_{IP}+E_{IM}}{2}$$
$$=\frac{4V+2V}{2}=3\left(V\right)$$

記事：平均値 V_C を同相モード電圧と呼び，差動アンプはこの V_C 成分を除去する.

TEXAS INSTRUMENTS

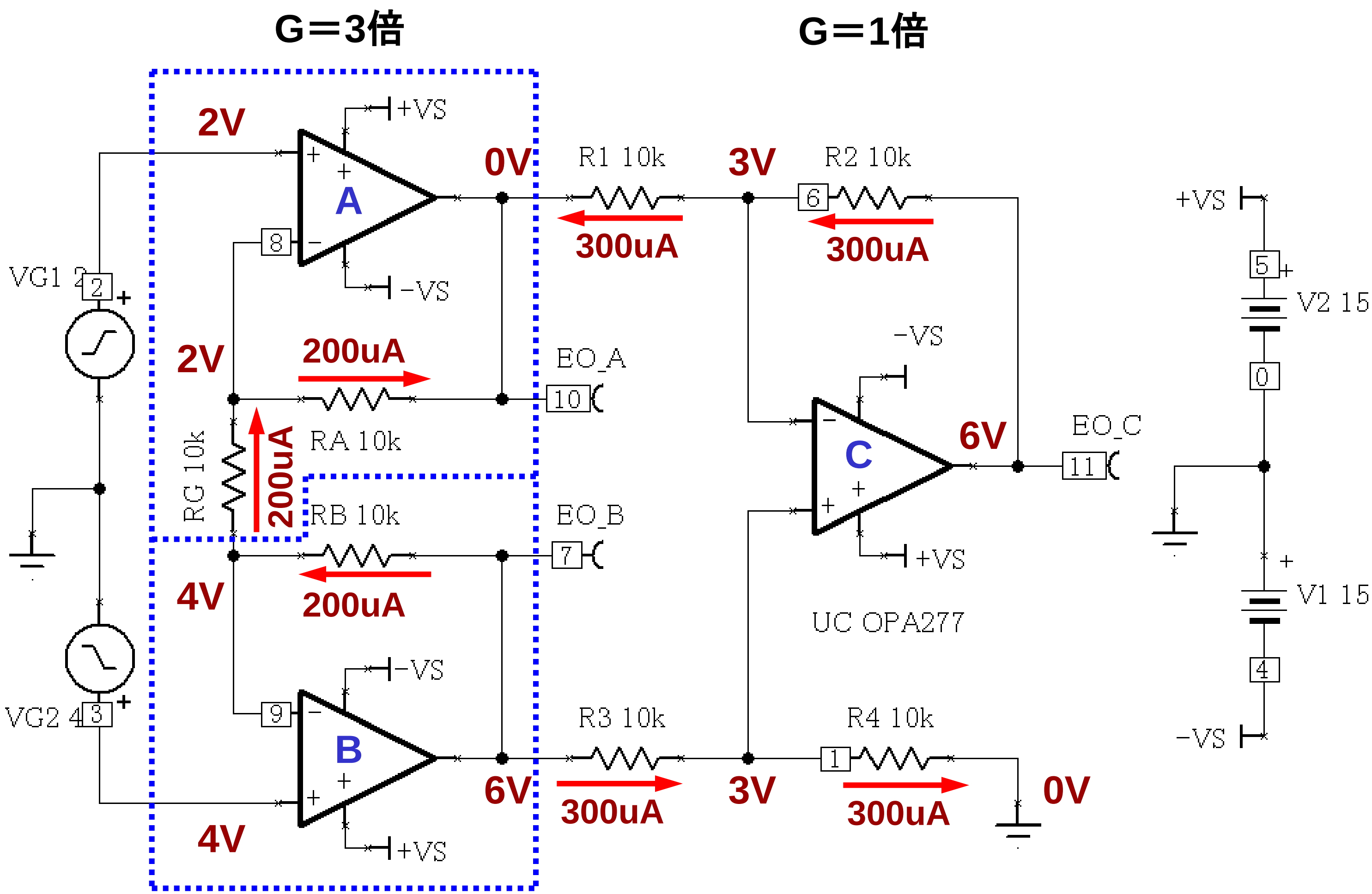
計測アンプ:前段バッファと差動アンプの2段構成

計測アンプとは...
非反転アンプで差動アンプをバッファしたアンプ構成を指す.



計測アンプ：動作のシミュレーション結果

アンプ A を中心に見ると，アンプ B はボルテージ・フォロワと見なせる．

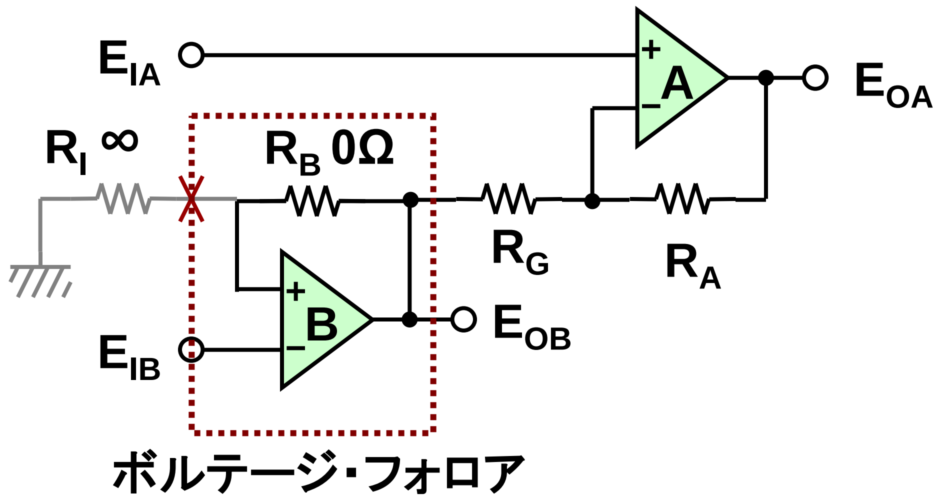


Nodes	Values
EO_A	0V → 15.595033uV
EO_B	6.000015V
EO_C	6.000022V
I_R1[10,6]	-300.000088uA
I_R2[6,11]	-300.000585uA
I_R3[7,1]	300.00087uA
I_R4[1,0]	300.000627uA
I_RA[8,10]	199.999483uA
I_RB[9,7]	-200.000477uA
I_RG[9,8]	199.999977uA
I_RP[5,4]	705.699701uA
I_VG1[2,0]	-240.535319pA
I_VG2[3,0]	-245.053726pA
VP_1	3.000006V
VP_2	2V
VP_3	4V
VP_4	-15V
VP_5	15V
VP_6	3.000016V
VP_7	6.000015V
VP_8	2.00001V
VP_9	4.00001V
VP_11	6.000022V
VP_10	15.595033uV

TEXAS INSTRUMENTS

計測アンプ：変形型 非反転アンプ・ペアの解析

分かりやすくするため，右のように回路を変形.



$$E_{OB} = \left(1 + \frac{R_B}{R_I}\right) E_{IB} \qquad \text{式1-38}$$

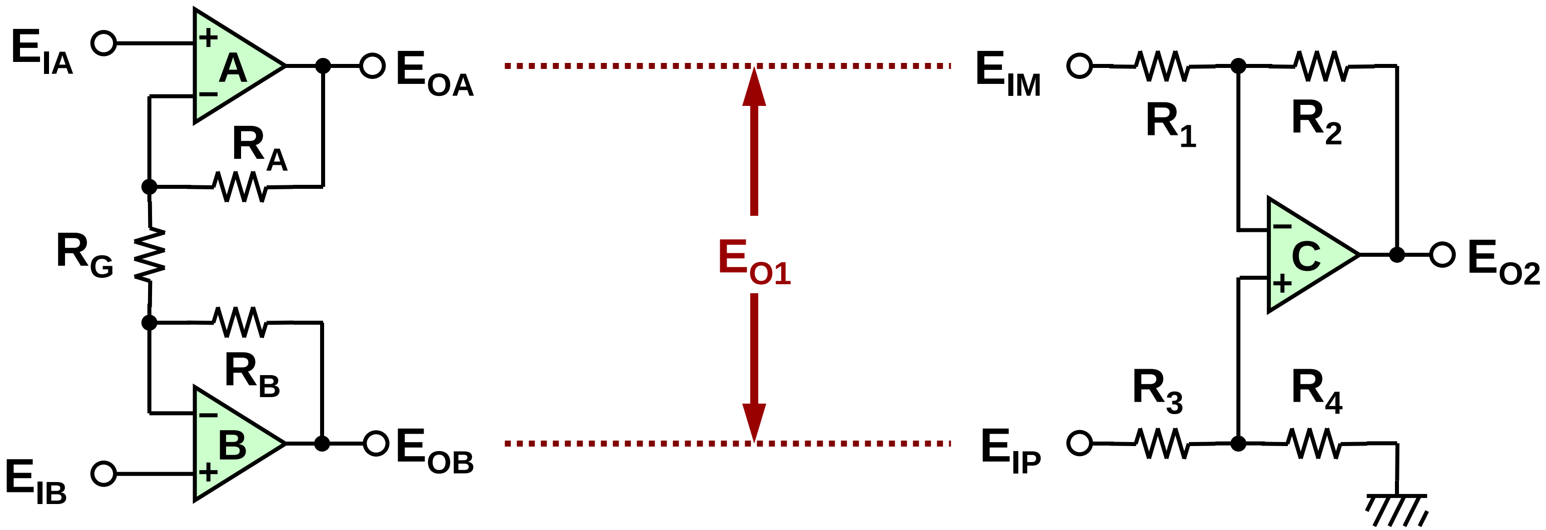
$$= \left(1 + \frac{0}{\infty}\right) E_{IB}$$

$$\boxed{= E_{IB}}$$

よって，アンプAを中心に見れば

$$E_{OA} = \left(1 + \frac{R_A}{R_G}\right) E_{IA} - \frac{R_A}{R_G} E_{IB} \qquad \text{式1-38}$$

計測アンプ：非反転アンプ･ペアの伝達式



それぞれのアンプを中心とした式

$$E_{OA}=\left(1+\frac{R_A}{R_G}\right)E_{IA}-\frac{R_A}{R_G}E_{IB} \quad \text{式1-40}$$

$$E_{OB}=\left(1+\frac{R_B}{R_G}\right)E_{IB}-\frac{R_B}{R_G}E_{IA} \quad \text{式1-41}$$

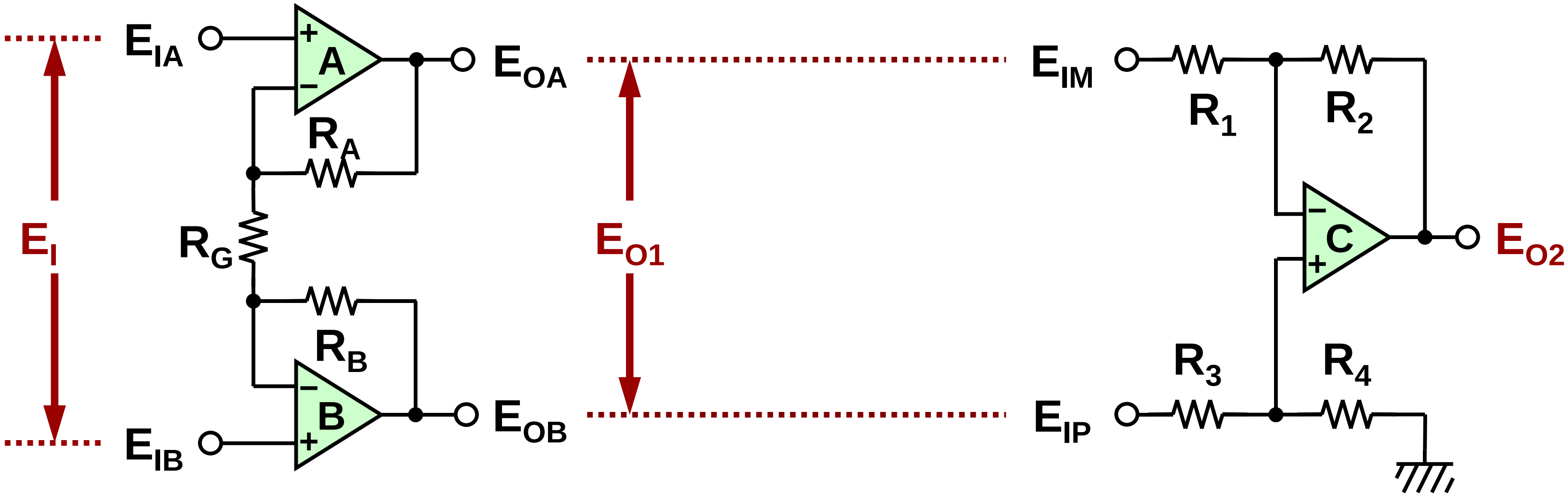
式1-40と式1-41の合成式が非反転アンプ･ペアの伝達式

$$E_{O1}=E_{OA}-E_{OB}$$

$$=\frac{(R_A+R_B+R_G)E_{IB}-(R_A+R_B+R_G)E_{IA}}{R_G}$$

$$=\left(1+\frac{R_A+R_B}{R_G}\right)(E_{IB}-E_{IA}) \quad \text{式1-42}$$

計測アンプ：総合伝達式



$$E_{O1} = E_I\left(1 + \frac{R_A + R_B}{R_G}\right) \qquad E_{O2} = \left(E_{OB} - E_{OA}\right)\frac{R_4\left(R_1 + R_2\right) - R_2\left(R_3 + R_4\right)}{R_1\left(R_3 + R_4\right)}$$

ここで，$R_1 = R_3 = R_I$，$R_2 = R_4 = R_F$ とすれば…

$$E_{O2} = \frac{R_F\left(R_I + R_F\right)\left(E_{IP} - E_{IM}\right)}{R_I\left(R_I + R_F\right)} = E_{O1}\frac{R_F}{R_I}$$

よって総合伝達式は $E_{O2} = E_I\left(1 + \frac{R_A + R_B}{R_G}\right)\left(\frac{R_F}{R_I}\right)$ 式1-43

抵抗誤差はCMRRに関与しない

多くの 計測アンプIC は $R_F/R_I = 1$

セッション1　終わり

お疲れ様でした.