

# 情報科学実験 (2021後期)

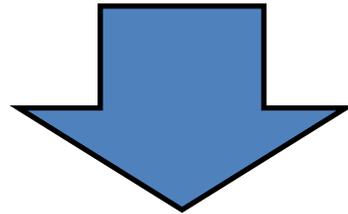
## —演算増幅器(OPアンプ)特性—

佐久間 史典  
(理化学研究所)

Ver. 20211101

# デジタル回路の基礎

(フリップフロップ)は、  
前半の「デジタル回路Ⅱ」実習  
で学びました。



# アナログ回路の基礎

を後半の「オペアンプ」実習  
を通して学びます。

# 課題

- オペアンプを実験で確かめながら理解する
  - オペアンプの基礎
  - フィードバックに関する基本的理解
  - アナログ回路に用いられるオペアンプの使用法
- 反転増幅器、非反転増幅器
  - **第1週目実験**
- 加算回路、アクティブ・バンドパス・フィルタ
  - **第2週目実験**

# レポート・注意事項

- レポート

- 実験をまとめて、レポートを提出してください

- 簡単な原理
    - 実験の簡単な説明
    - 表・グラフ・画像
    - (テキストにある)問1,2

- エクセルでデータをまとめる

- 注意事項

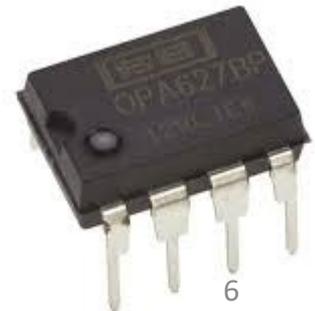
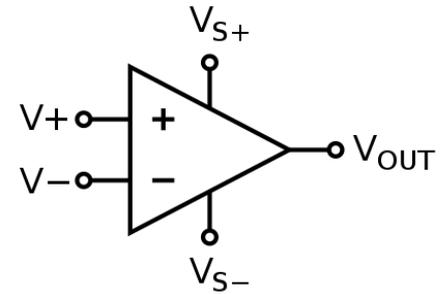
- 乱雑に回路を扱っていると壊れるので、注意!

# オペアンプ入門

- まずは、オペアンプがどのようなものなのか、その基礎を概観する。

# オペアンプとは

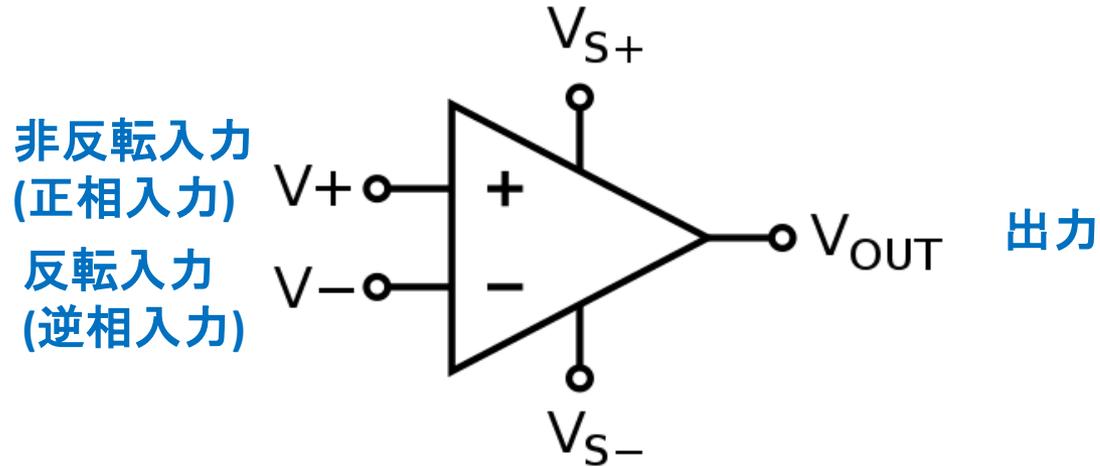
- オペアンプ = 演算増幅器
  - Op Amp = Operational Amplifier
- アナログ信号を扱う場面で、様々な形で利用
  - もともとアナログ式計算機の回路として設計
    - 1930年代: 真空管
    - 1950年代: トランジスタ
    - 1964年~: IC (Integrated Circuit)



アナログ信号を扱うので、デジタルほど集積化しない(c.f. パソコンのCPU)

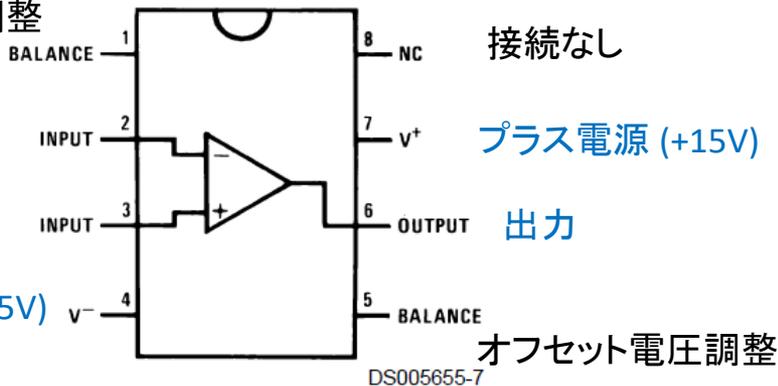
# オペアンプの記号

プラス電源 (+15V)

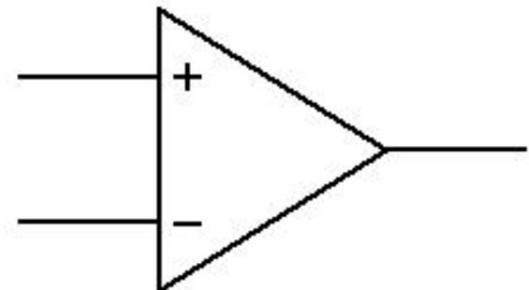


マイナス電源 (-15V)

オフセット電圧調整



簡略表記



# 使用例

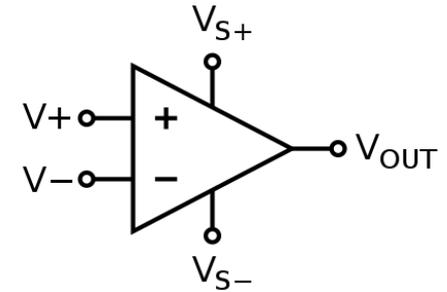
- **アナログ信号の増幅** ← 1週目実験
  - センサー類 (光/音/温度/湿度/等)
    - センサーが出力した微少な信号をオペアンプで増幅
  - オーディオアンプ
    - デジタルデータをアナログに変換後、我々が聞こえるように信号をオペアンプで増幅



# 使用例 (続)

- **加算回路・減算回路** ← 2週目実験
  - 電流の和や差を計算 (昔重要だった)
- 微分回路・積分回路
  - 信号の微分成分・積分成分を取り出す
- 発振回路
  - 任意の周波数の波形を生成
- **フィルタ回路** ← 2週目実験
  - 入力信号から必要な周波数成分を取り出す
- コンパレータ回路
  - 2つの信号の大小関係を判定
- 制御回路
  - 直流モーターの回転速度を制御
- 変換回路
  - 電流として表される信号を電圧で表される信号に変換

# 理想オペアンプ

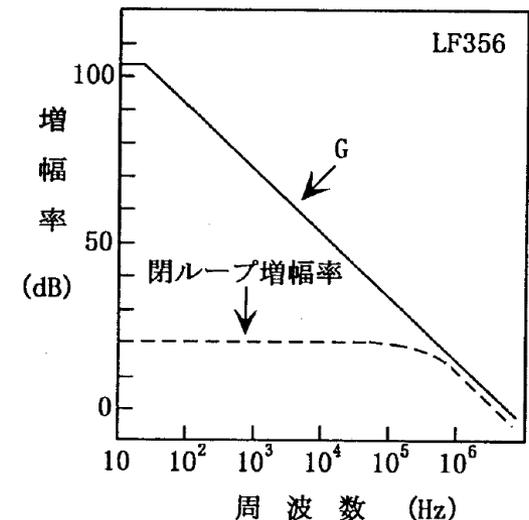


- オープンループゲイン(G)が無限大
  - $G \equiv \frac{V_{out}}{V^+ - V^-}$
- 入力インピーダンスが無限大
  - インピーダンス ( $Z=V/I$ ) :  
交流回路における抵抗
  - つまり、入力電流がゼロ
- 出力インピーダンスがゼロ
  - つまり、出力電流による出力電圧変化なし
- 周波数特性が無限大
  - つまり、周波数に依らない
- パルス立ち上がりや立下り時間がゼロ
  - スルーレートが無限大
- その他も理想的な振る舞い
  - 入力オフセット電圧がゼロ
  - 温度影響なし
  - 内部雑音ゼロ

RLC直列回路のインピーダンス

$$Z = R + i \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

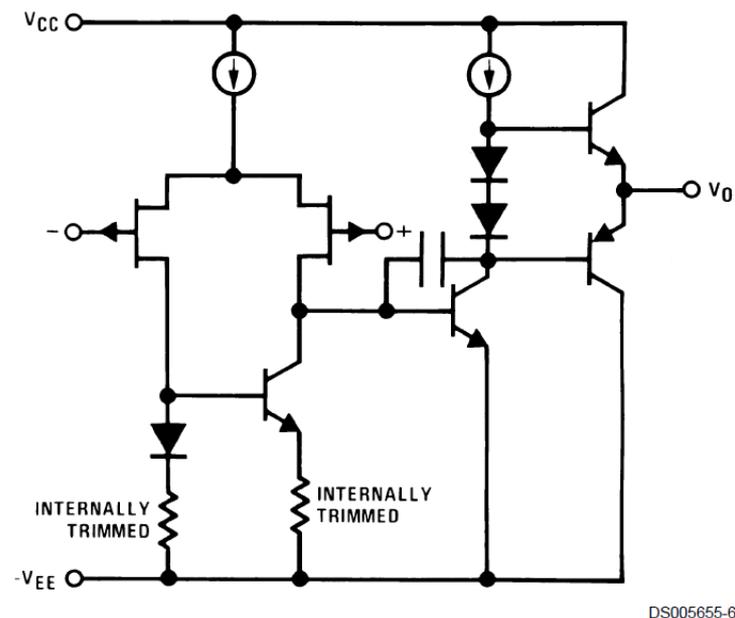
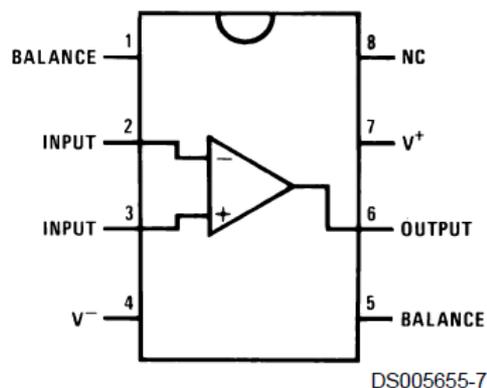
実際のオペアンプ周波数特性



閉ループ増幅率=フィードバック回路

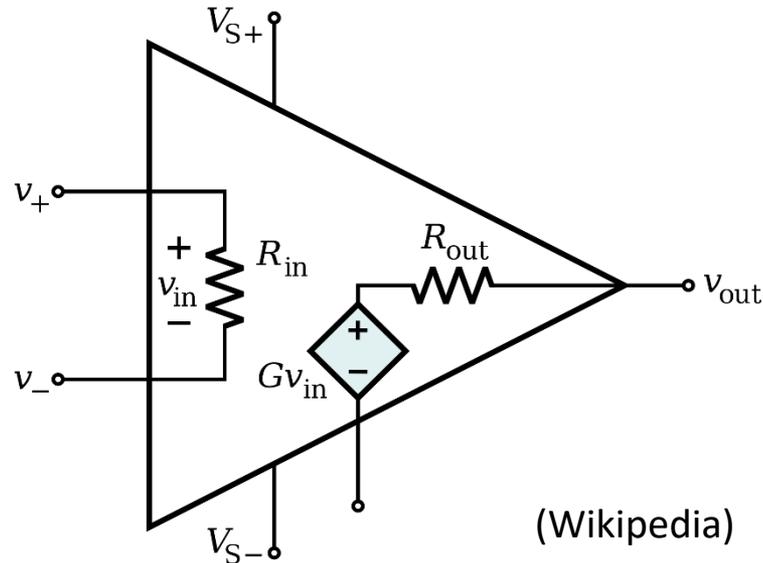
# 実際のオペアンプの中身

- ICの中身はトランジスタ/電界効果トランジスタ (FET)の集まり



LF411 data sheet より

# オペアンプの等価回路

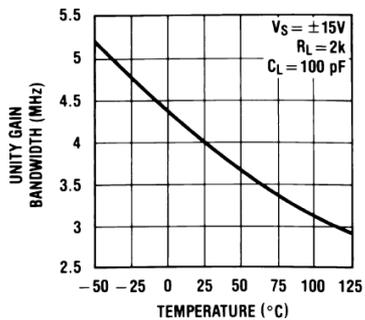


- 入力インピーダンスが高い ( $\sim\infty$ 、数 $100\text{k}\Omega < R_{in}$ )
  - 電流はオペアンプ内に(出力側に)流れ込まない
- 出力インピーダンスが低い ( $\sim 0$ 、 $R_{out} < \text{数}10\Omega$ )
  - オペアンプの出力は内部の電圧源から：  
電流は必要に応じていくらでも取り出せるし、電圧降下はしない
- オープンループゲインが大きい ( $\sim$ 数万倍)
- 広帯域での増幅が可能 (直流 & 数 $10\text{MHz}$ までの交流)

# オペアンプの特性

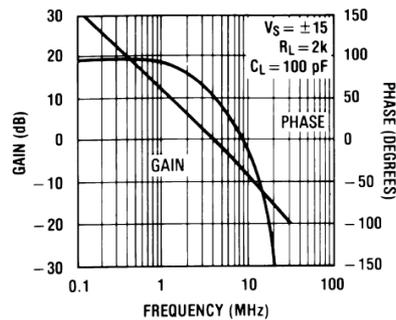
- 実際には周波数や温度に依存する
  - データシートに詳細あり
  - 一般的には高周波数領域、高温領域で性能が悪化

Gain Bandwidth



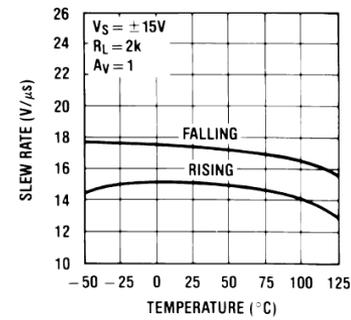
DS005655-20

Bode Plot



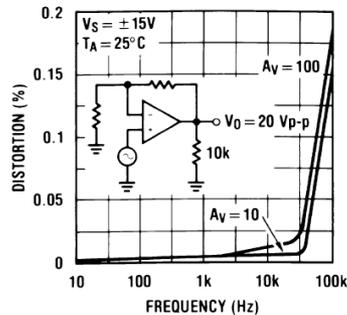
DS005655-21

Slew Rate



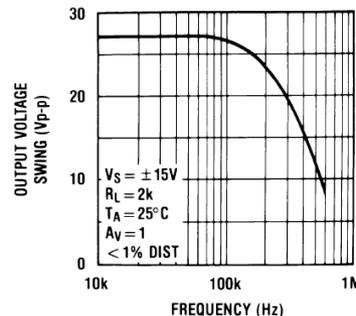
DS005655-22

Distortion vs Frequency



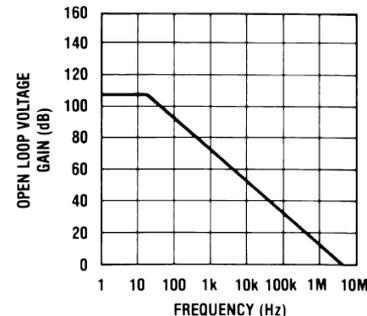
DS005655-23

Undistorted Output Voltage Swing



DS005655-24

Open Loop Frequency Response

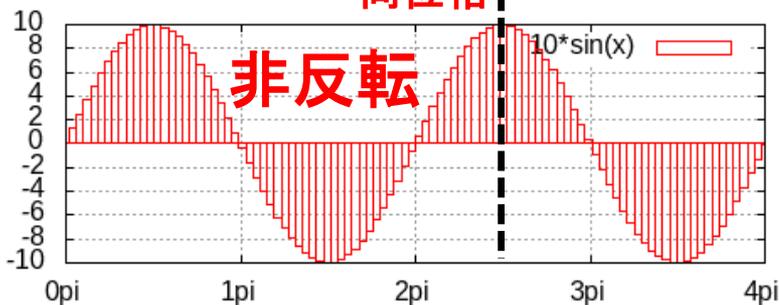
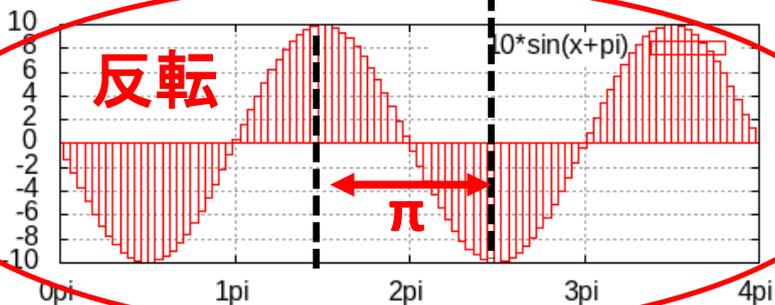
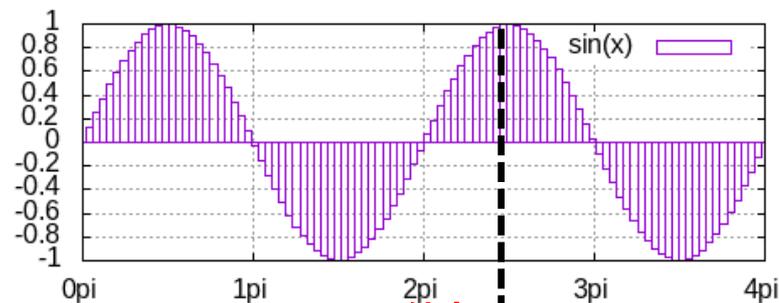
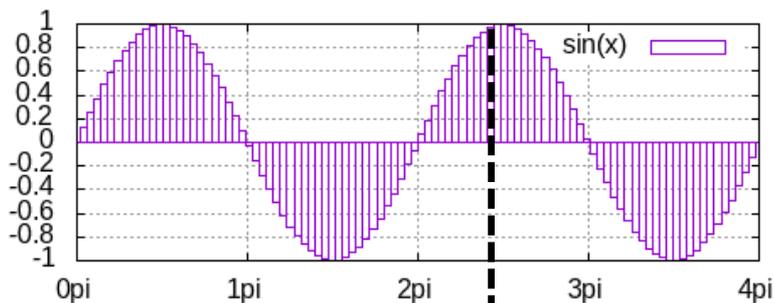
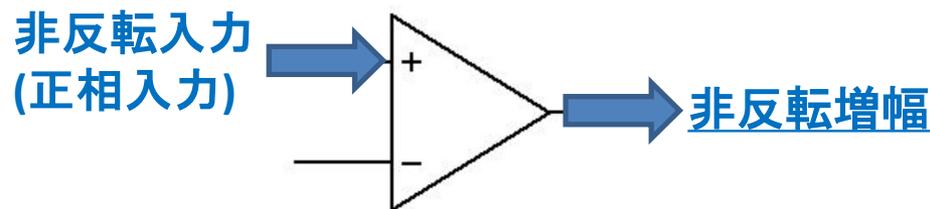
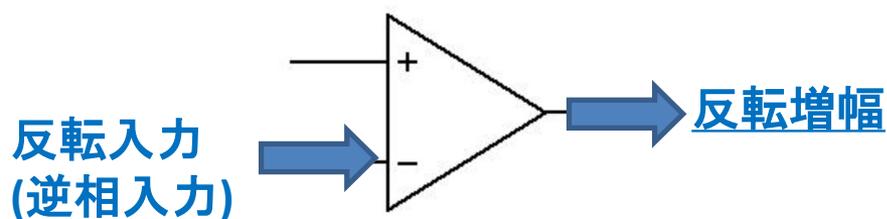


LF411 data sheet より

DS005655-25

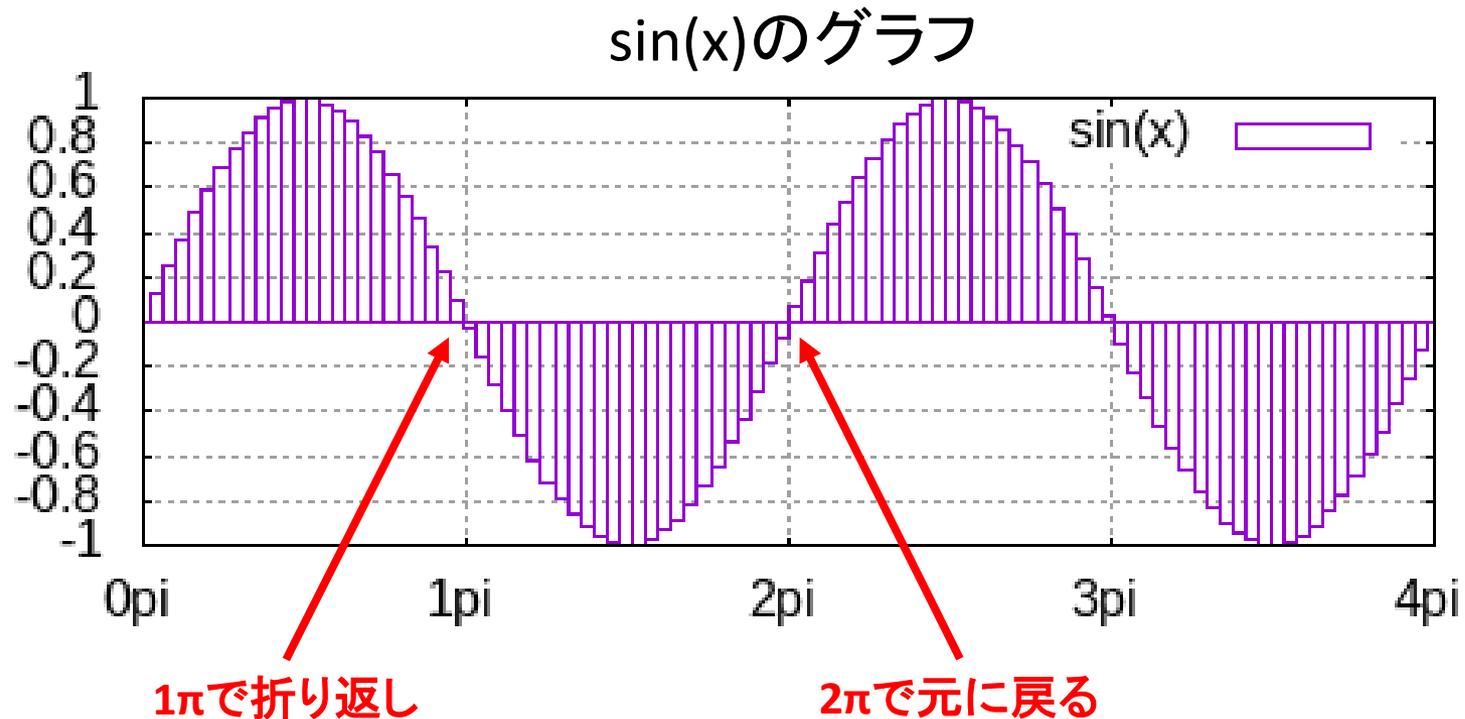
# オペアンプの基本動作

- 反転増幅回路と非反転増幅回路



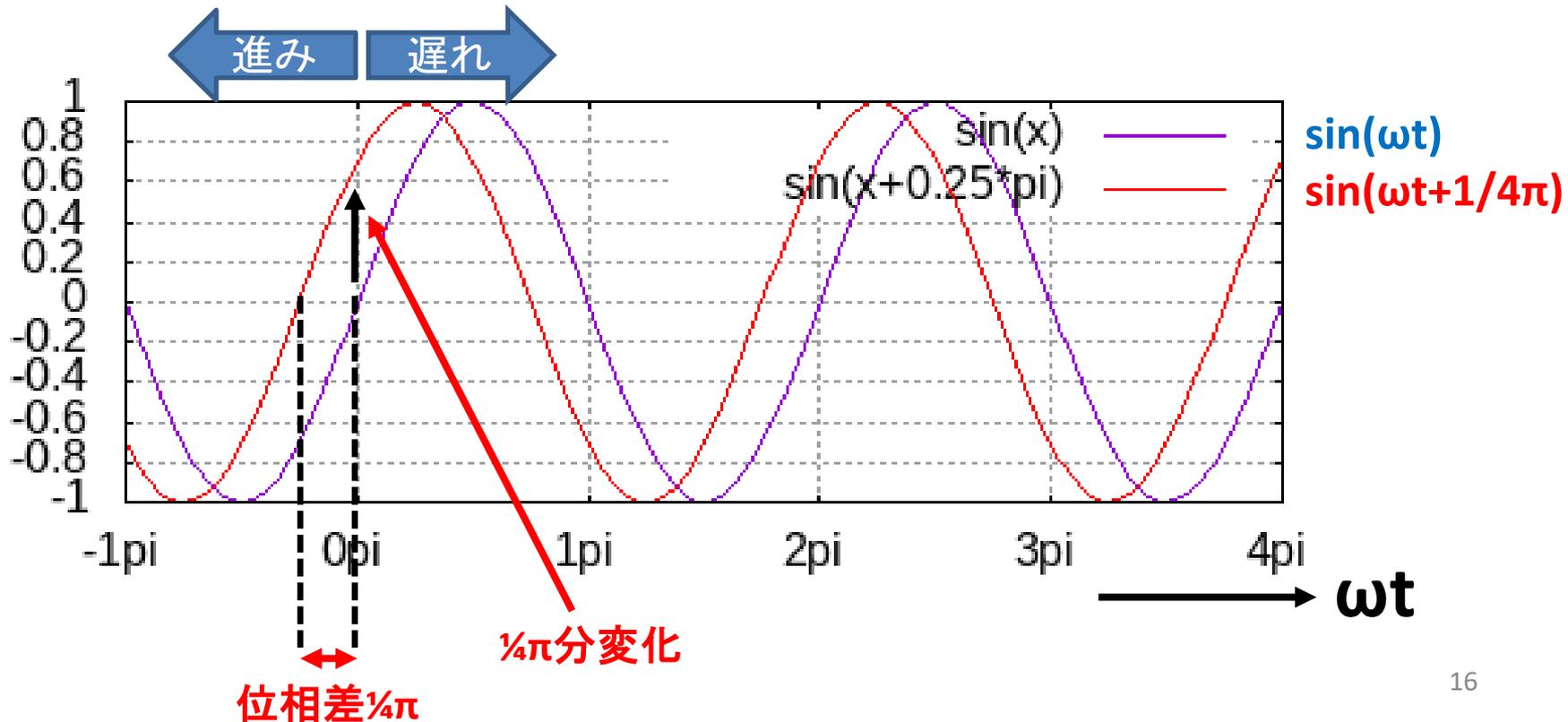
# 位相

- **位相(phase)**とは、周期的に変動する波の位置情報。



# 位相差

- $y=\sin(x)$ の $x$ を $\omega t$ とする  $\rightarrow y=\sin(\omega t)$ 
  - $\omega$ : 角速度[rad/s]
- $t=0 \rightarrow \frac{1}{4}\pi/\omega$  の時  $y=0 \rightarrow 0.7$



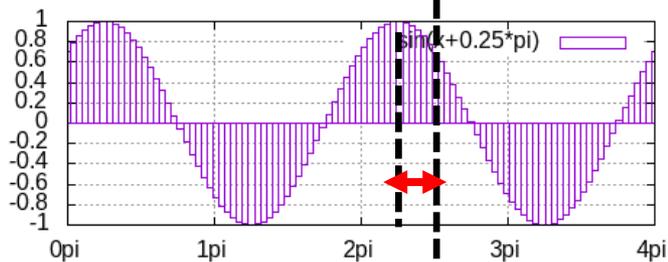
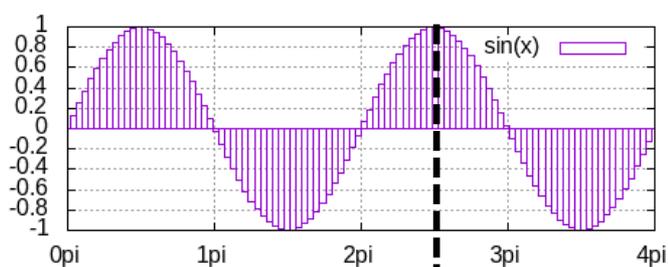
# 位相差の求め方

- 位相差 = 比較したい位相 - 基準の位相

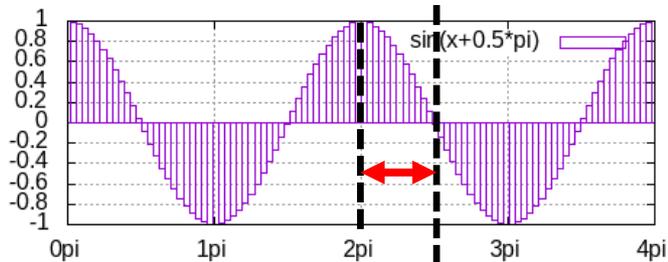
$$\Delta\phi = \Delta T[s] / (1/f [s]) * 360^\circ$$

- 実際に位相差を求めるときはピーク同士で比べると良い

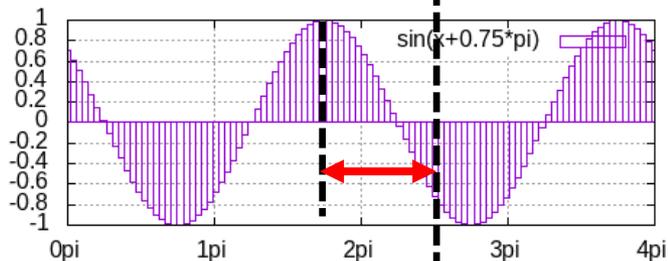
- 反転は位相差 $\pi$ と等しい



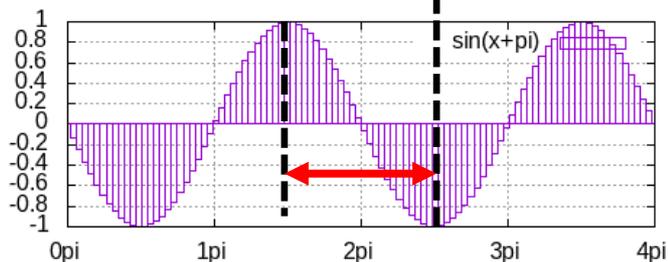
位相差 $1/4\pi$



位相差 $1/2\pi$



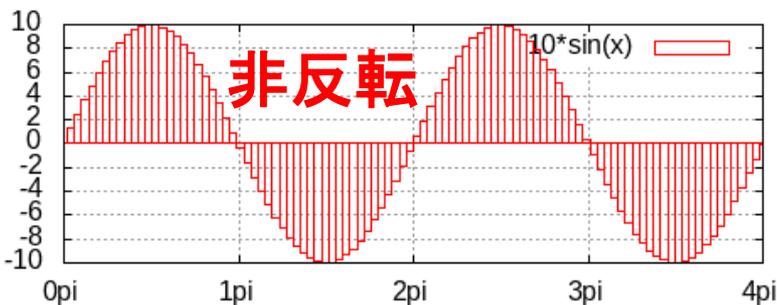
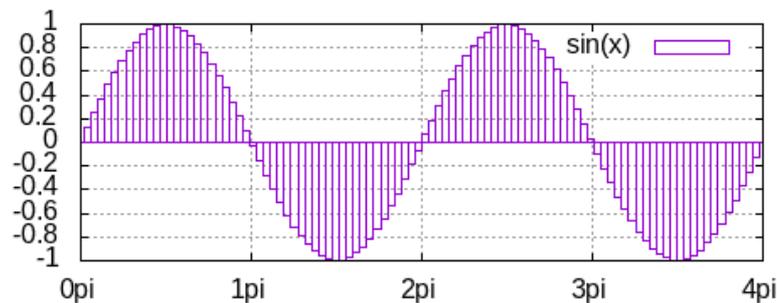
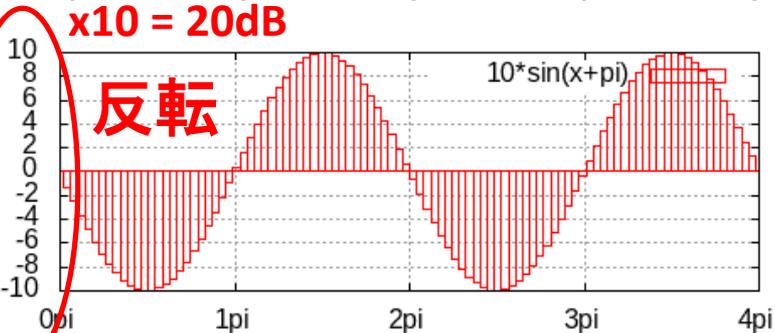
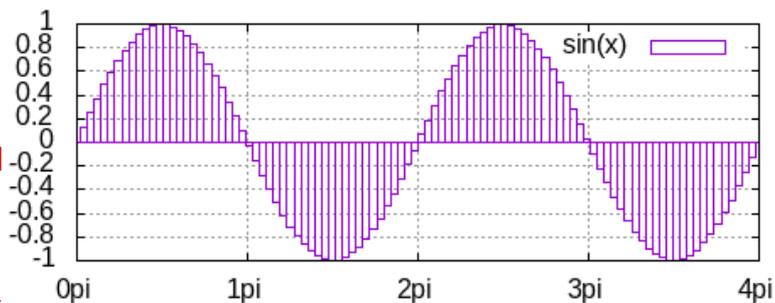
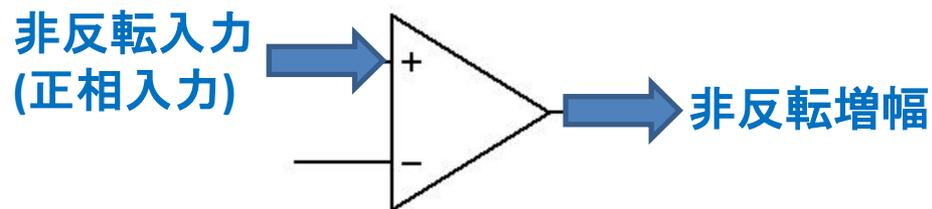
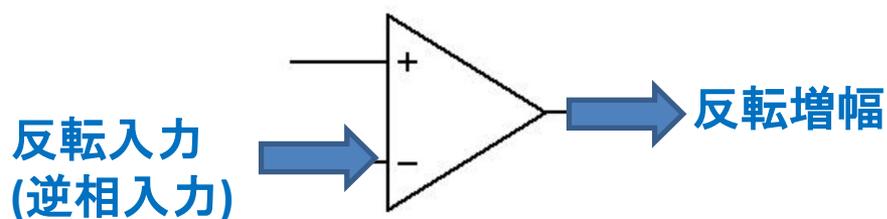
位相差 $3/4\pi$



位相差 $\pi$

# オペアンプの基本動作

- 反転増幅回路と非反転増幅回路



# 倍率 = デシベル(dB)

- デシベル(dB)とは、ある特定の基準に対しての大きさ(相対値)を表す単位
  - 基準レベルが0dB ( $\log_{10}1=0$ )
  - “電圧や音圧(騒音)”の場合、20dB毎に10倍大きさが変わる

$$- L_V = 20 \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ [dB]}$$

基準値比(倍率)	x0.001	x0.01	x0.1	x1	x10	x100	x1000
デシベル(dB)	-60dB	-40dB	-20dB	0dB	20dB	40dB	60dB

\* (注意) “電力”の場合、10dB毎に10倍変わる  $\rightarrow L_p = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \text{ [dB]}$

# 騒音の感じ方の目安

音の大きさ(音圧)の倍率

騒音の感じ方の具体例

20 デシベル

10 倍



木の葉の触れ合う音、  
小さな寝息

静か

40 デシベル

100 倍



図書館内、  
閑静な住宅地の昼間

静か

60 デシベル

1,000 倍



デパート店内  
普通の会話程度

普通

80 デシベル

10,000 倍



パチンコ店内  
救急車のサイレン

うるさい

100 デシベル

100,000 倍

地下鉄の構内  
電車が通る時のガード下

極めて  
うるさい

120 デシベル

1,000,000 倍



飛行機のエンジン近く、  
近くの落雷、会話が不可能

聴力機能  
に障害



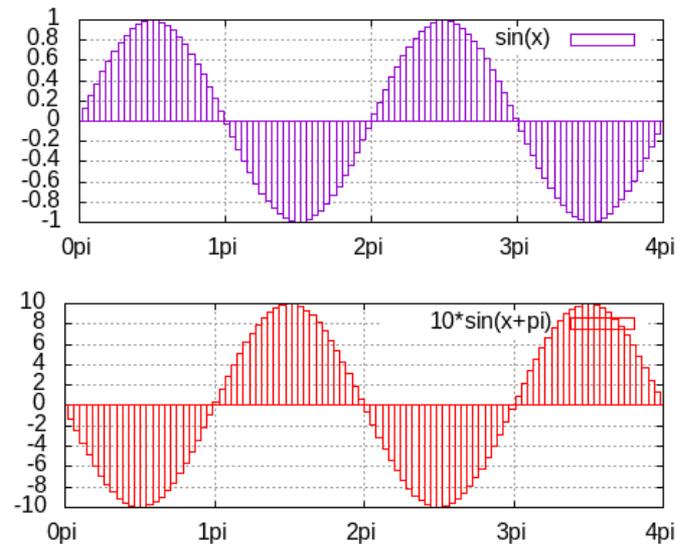
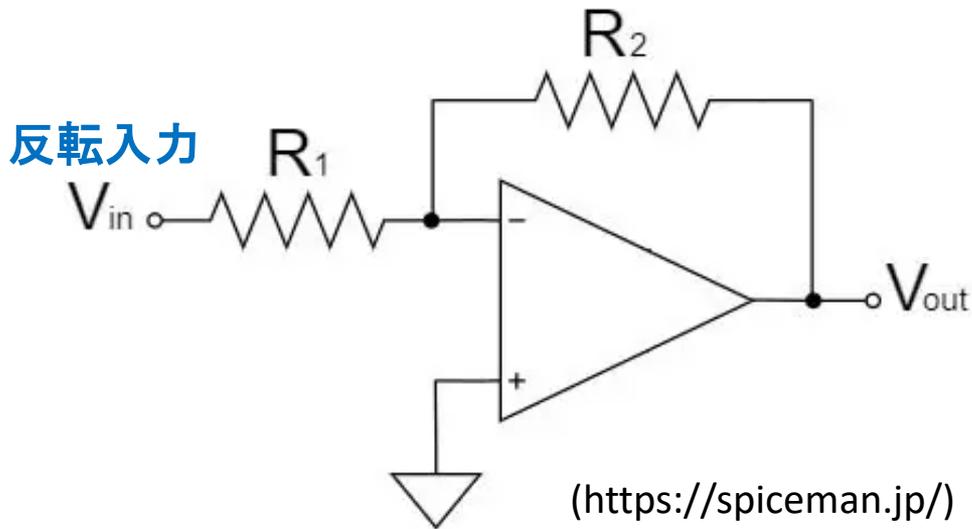
※あくまで目安であり、状況や条件などで感じ方は違うので参考としてご覧ください

※深谷市、環境省ホームページなど参照

# オペアンプを用いた増幅回路

- オペアンプを扱う上で、基礎的な回路の考え方を学ぶ。
  - 反転増幅回路
  - 非反転増幅回路

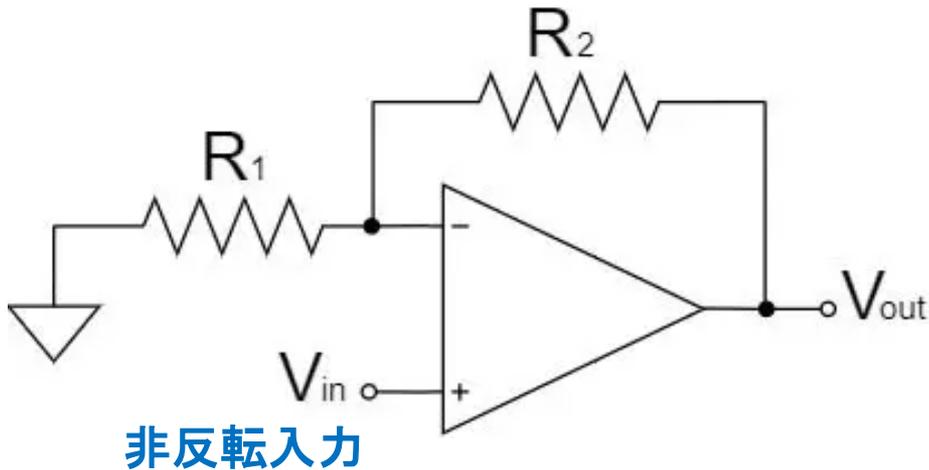
# 反転増幅回路



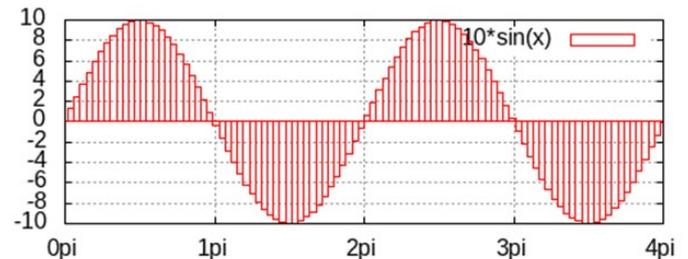
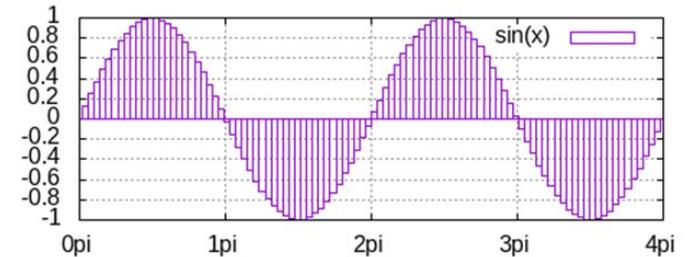
- 回路の増幅率は2つの抵抗によって決まる

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

# 非反転増幅回路



(<https://spiceman.jp/>)

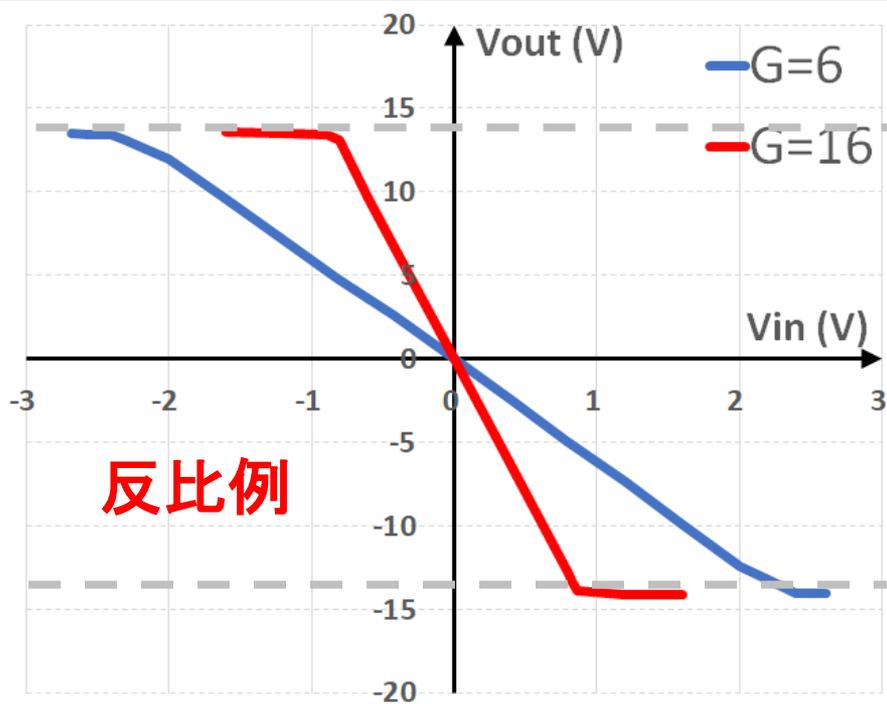
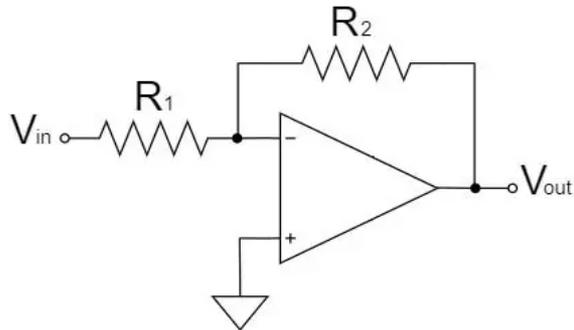


- 回路の増幅率は2つの抵抗によって決まる

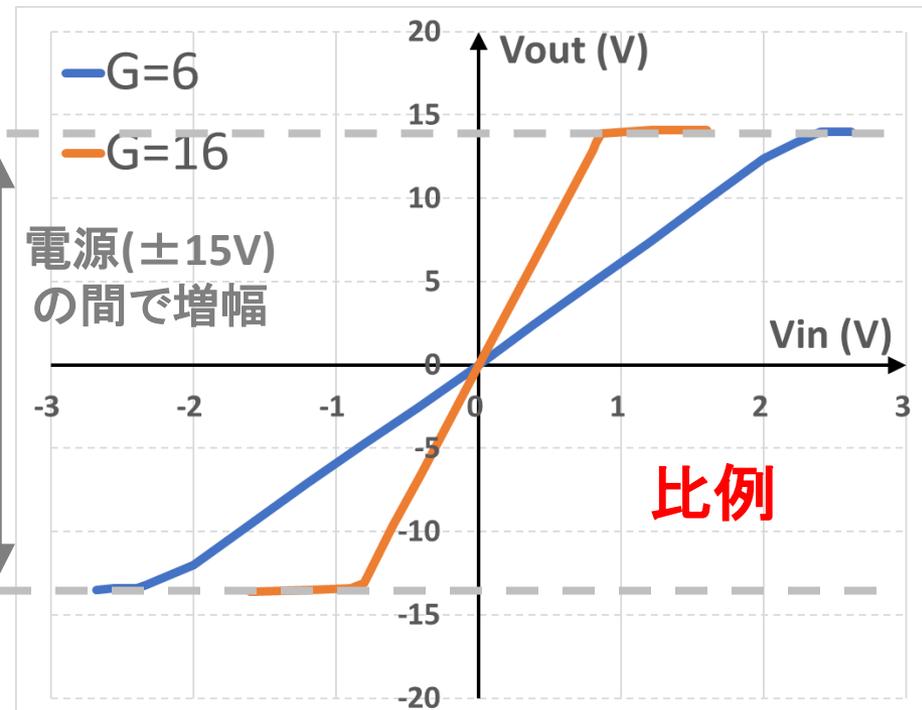
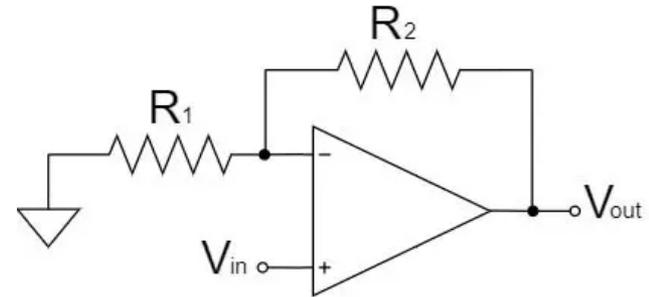
- $$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

# 直流入出力特性

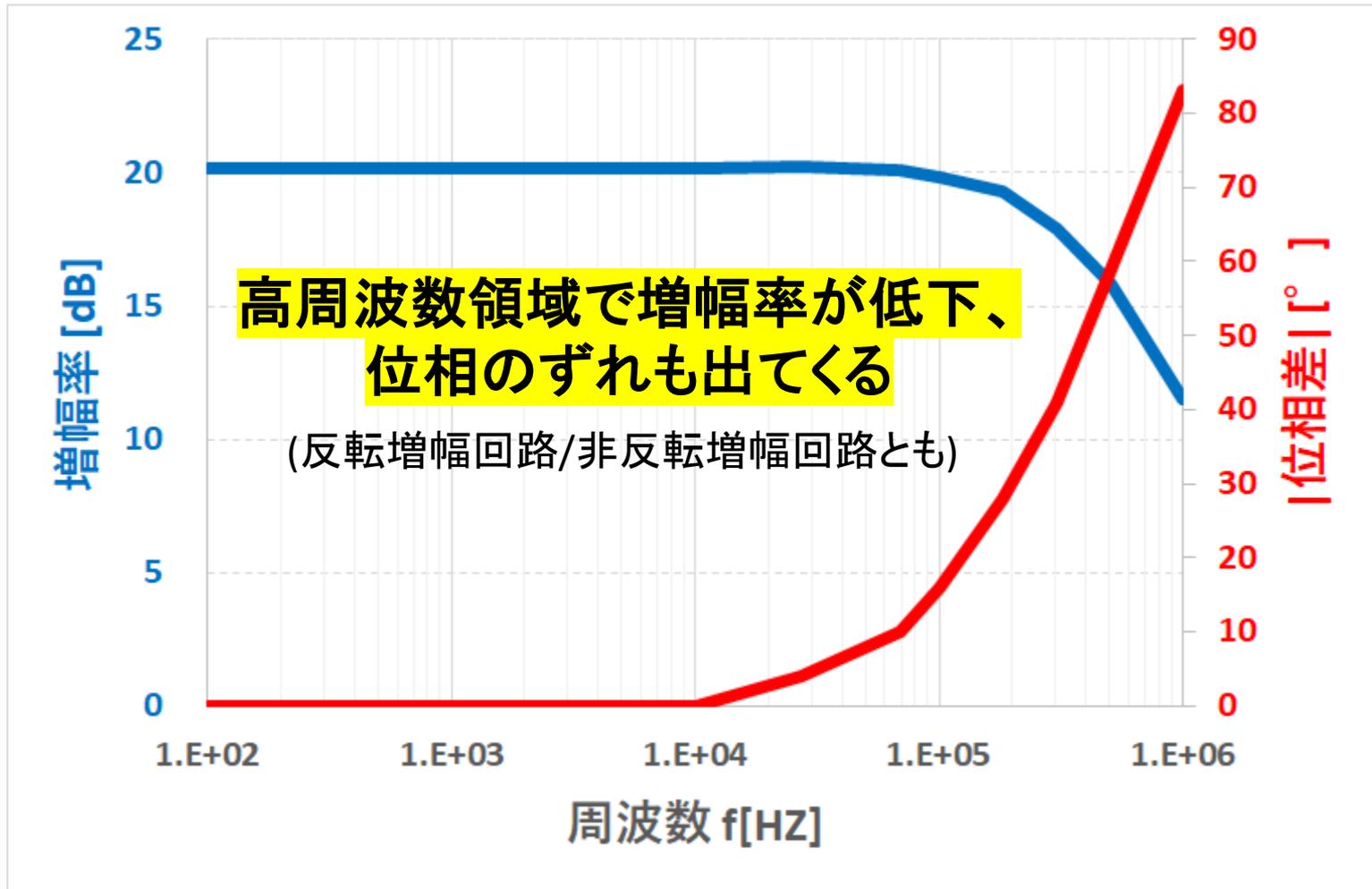
## 反転増幅回路



## 非反転増幅回路

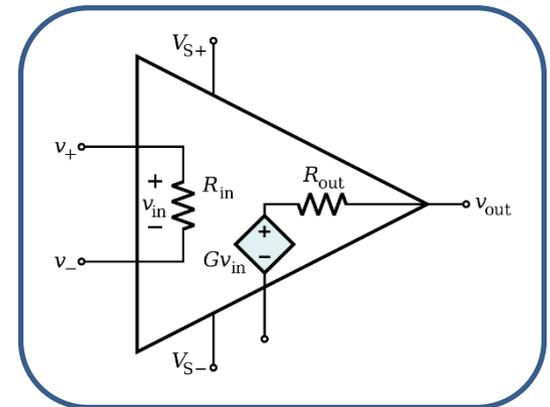
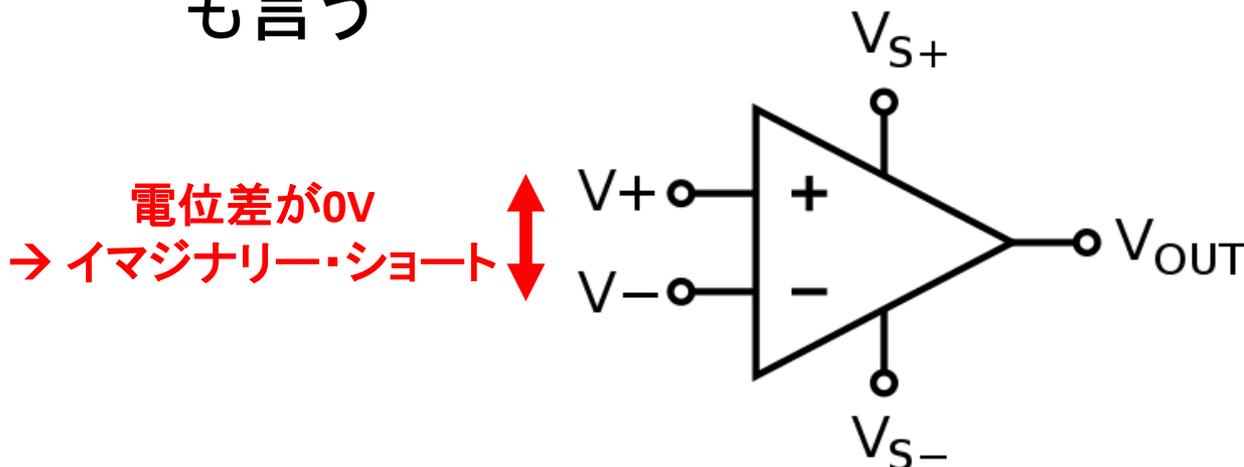


# 周波数特性



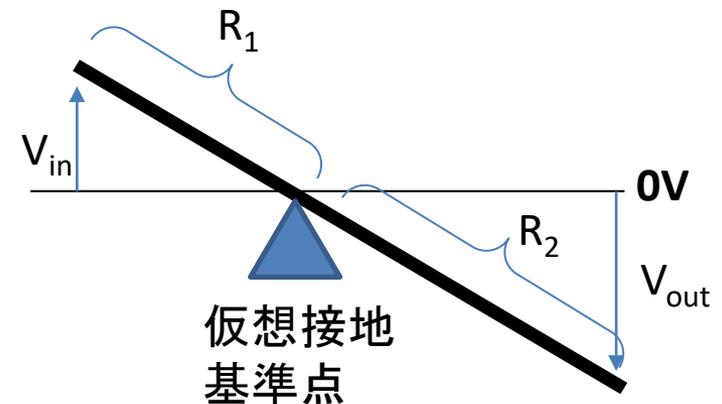
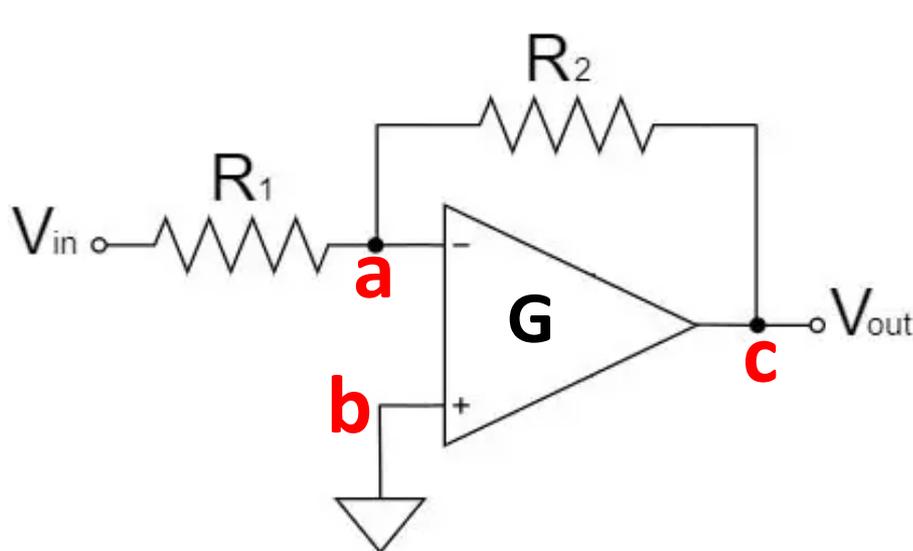
# イマジナリー・ショート (imaginary short)

- 2つの入力端子間はあたかもショートしているように見えること(電位差が0V)
  - 入力インピーダンス(2つの入力端子間の抵抗)が非常に大きい( $\sim\infty$ )にもかかわらず、そのように見える
  - 仮想短絡、バーチャル・ショート(virtual short)、等とも言う



# イマジナリー・ショート (imaginary short)

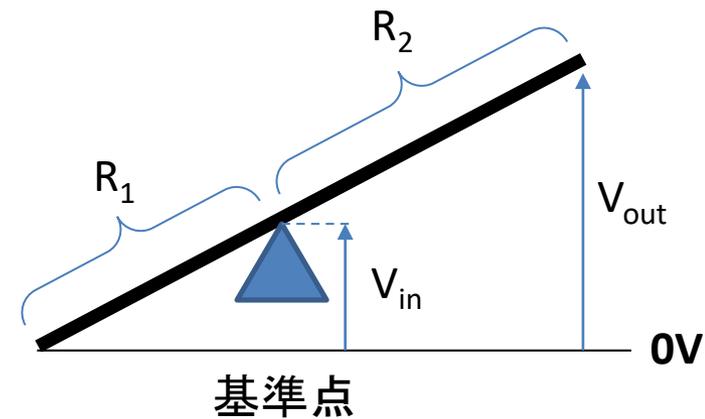
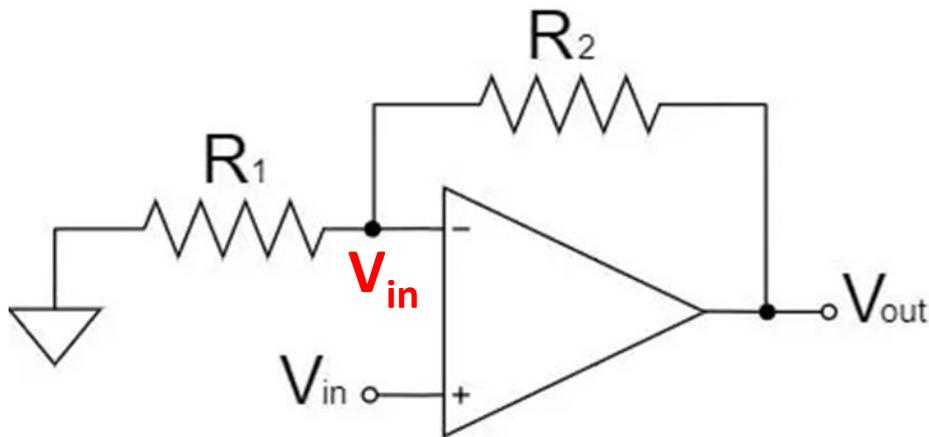
- 反転増幅回路を考える
  - 帰還( $R_2$ )が無い場合は、 $V_{out} = -1 * G * V_{in}$  (反転)
  - $R_2$ による帰還があるために、**c**からの負電圧が**a**に加わり、**a**での電圧は下がる
  - これが連続して、**a**での電圧がマイナスになると**c**がプラスになり、今度は**a**の電圧が上がる
  - これが繰り返され、時間が経つと(実際には一瞬)、**a**は電圧ゼロとなる
  - つまり、**a**と**b**の電圧差が無くなり、**a**と**b**はショートしているように見える



シーソーと同じ考え方

# イマジナリー・ショート (imaginary short)

- 非反転増幅回路でも同様
  - 基準点が $V_{in}$ となる
    - 0Vは基準点 $V_{in}$ に対してはマイナス
    - $V_{out}$ にその反転を出力する



基準点を接地点から浮かせたシーソー

# イマジナリー・ショートを用いた増幅度導出

- イマジナリー・ショートの間接的な考え方を用いると、増幅度は非常に簡単に導出可能

*\* 真面目に導出するにはルビホッフの法則を用いる*

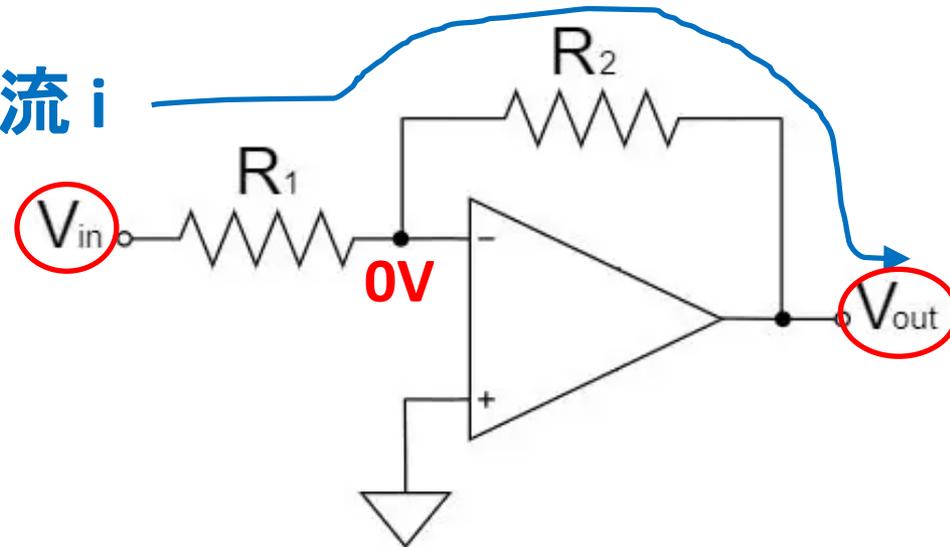
## 反転増幅回路

$$V_{in} - 0 = i * R_1$$

$$0 - V_{out} = i * R_2$$

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

電流  $i$



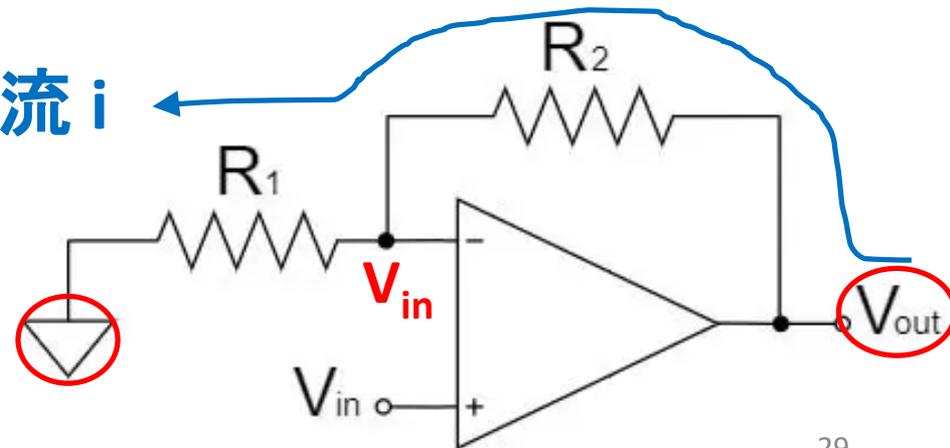
## 非反転増幅回路

$$V_{out} - V_{in} = i * R_2$$

$$V_{in} - 0 = i * R_1$$

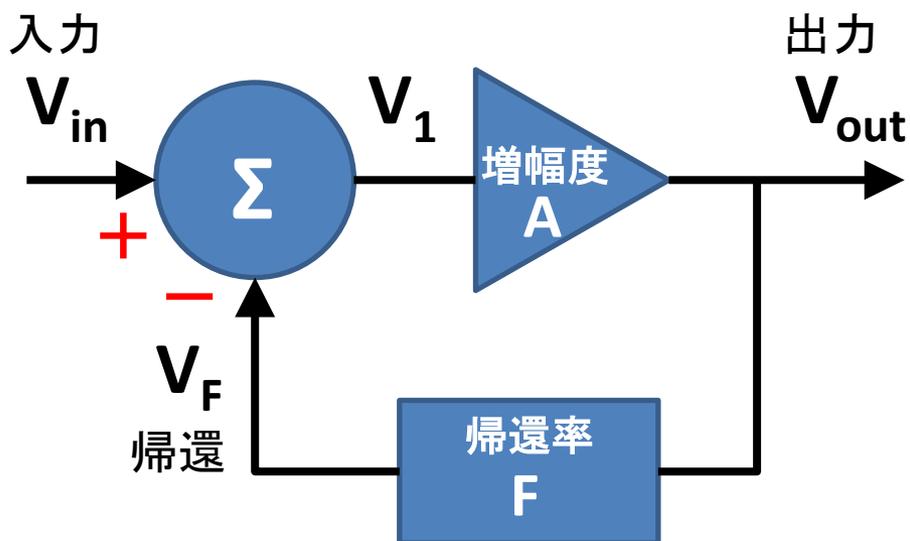
$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

電流  $i$



# 負帰還 (ネガティブ・フィードバック)

- 増幅度Aの増幅器出力から帰還率F(<1)を介した信号を逆位相(反転)にして入力に戻すこと
  - 増幅度Aが十分に大きいと、回路のゲインはFにより決まる



$$\begin{aligned} V_1 &= V_{in} - V_F \\ &= V_{in} - FV_{out} \end{aligned}$$

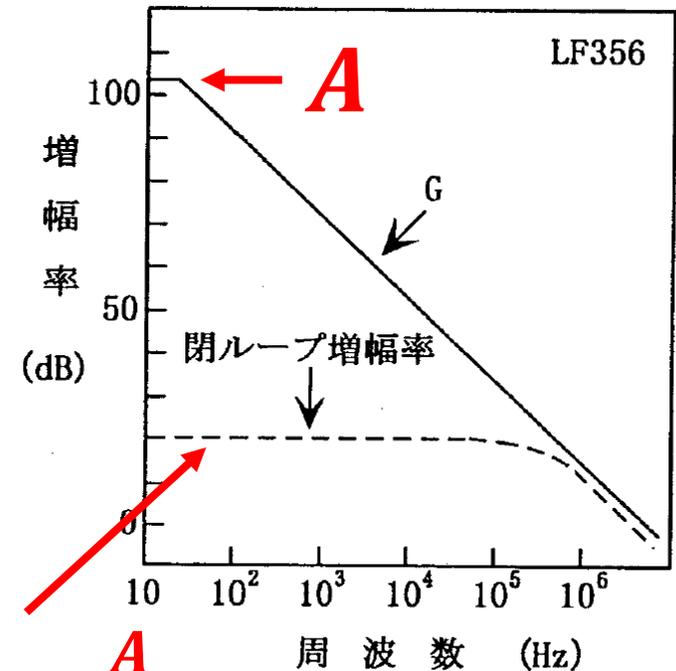
$$\begin{aligned} V_{out} &= AV_1 \\ \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{A}{1 + AF} \end{aligned}$$

Aが十分大きい時( $1 \ll A$ )

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{F}$$

# 負帰還の効果

- 周波数特性の改善
  - 負帰還を掛けることにより、増幅率は下がるが帯域幅は広がる
- 増幅率の自由な調整
  - 増幅率を2つの抵抗によって決められる
- 信号の歪み、ノイズ耐性の改善
  - 増幅率を下げることにより精度・歪みの改善
  - ただし、S/N比は変わらない
- デメリット
  - 増幅率の低下
  - 回路が発振しやすくなる



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 + AF}$$

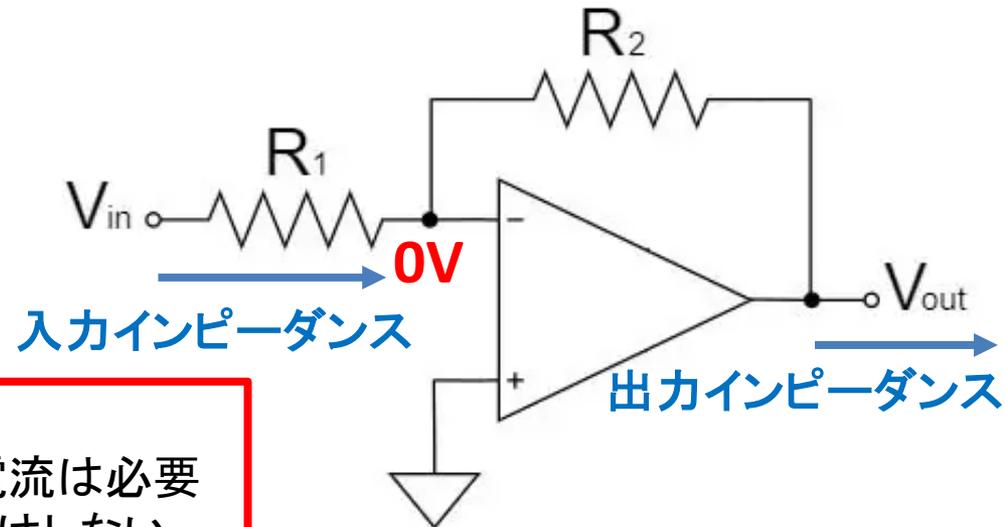
# 入力・出力インピーダンス

- ポイント: オペアンプ内部に電流は流れ込まない & イマジナリー・ショート

*\* 真面目に導出するにはルビホッフの法則を用いる*

## 反転増幅回路

入力インピーダンス:  $R_1$   
出力インピーダンス:  $\sim 0$

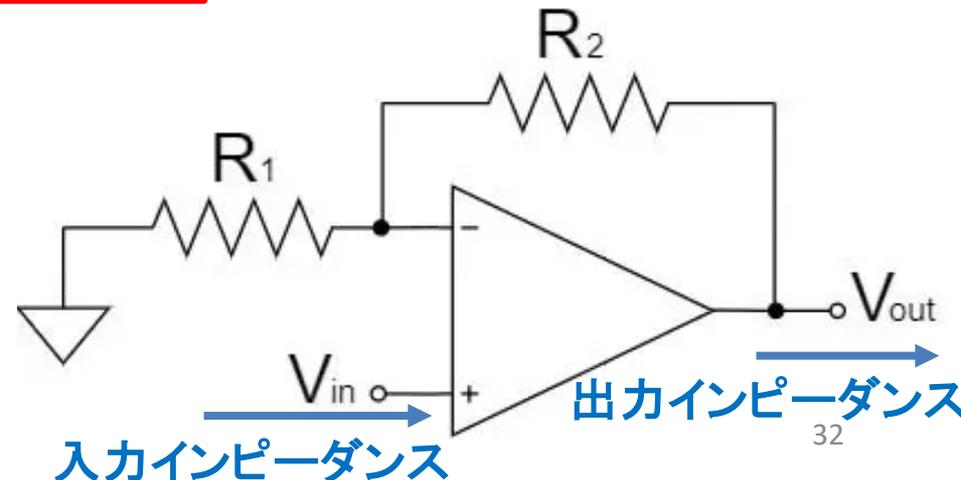


出力インピーダンスについて:

負帰還の働きで  $V_{out}$  は一定、つまり、電流は必要に応じていくらでも取り出せ、電圧降下はしない

## 非反転増幅回路

入力インピーダンス:  $\sim \infty$   
出力インピーダンス:  $\sim 0$



# インピーダンス

- インピーダンス ~ 抵抗 ~ 導線の太さ ~ 川の水の量

- ロー(低)・インピーダンス: 太い川

- ・ 電流流れやすい、ノイズの影響小

- ハイ(高)・インピーダンス: 細い川

- ・ 電流流れにくい、ノイズの影響大



- 基本的には“ロー出しハイ受け”

- ロー出し(太)→ハイ受け(細): 電流を余裕を持って取り出せる

- ハイ出し(細)→ロー受け(太): 取り出しすぎて枯渇させてしまう

- インピーダンスは可能な限りマッチングした方が良い

- 高周波では信号の反射など様々な問題が出る

- オペアンプを用いた回路(ハイ入力インピーダンス/ロー出力インピーダンス)は、非常に使いやすい回路

# 以降、実験の進め方のヒント

- **まずはテキストをよく読むこと**
  - 特に、実験の手順はしっかり従う

# 実験機器

発振器

オシロスコープ

演算増幅回路実習装置

マルチメータ



# 演算増幅回路実習装置

こちら側を使用

オペアンプ/電源等は組み込まれているので、以下の部品を用いて配線をする

- 配線はなるべく短く
- 数も最小で

接続ケーブル

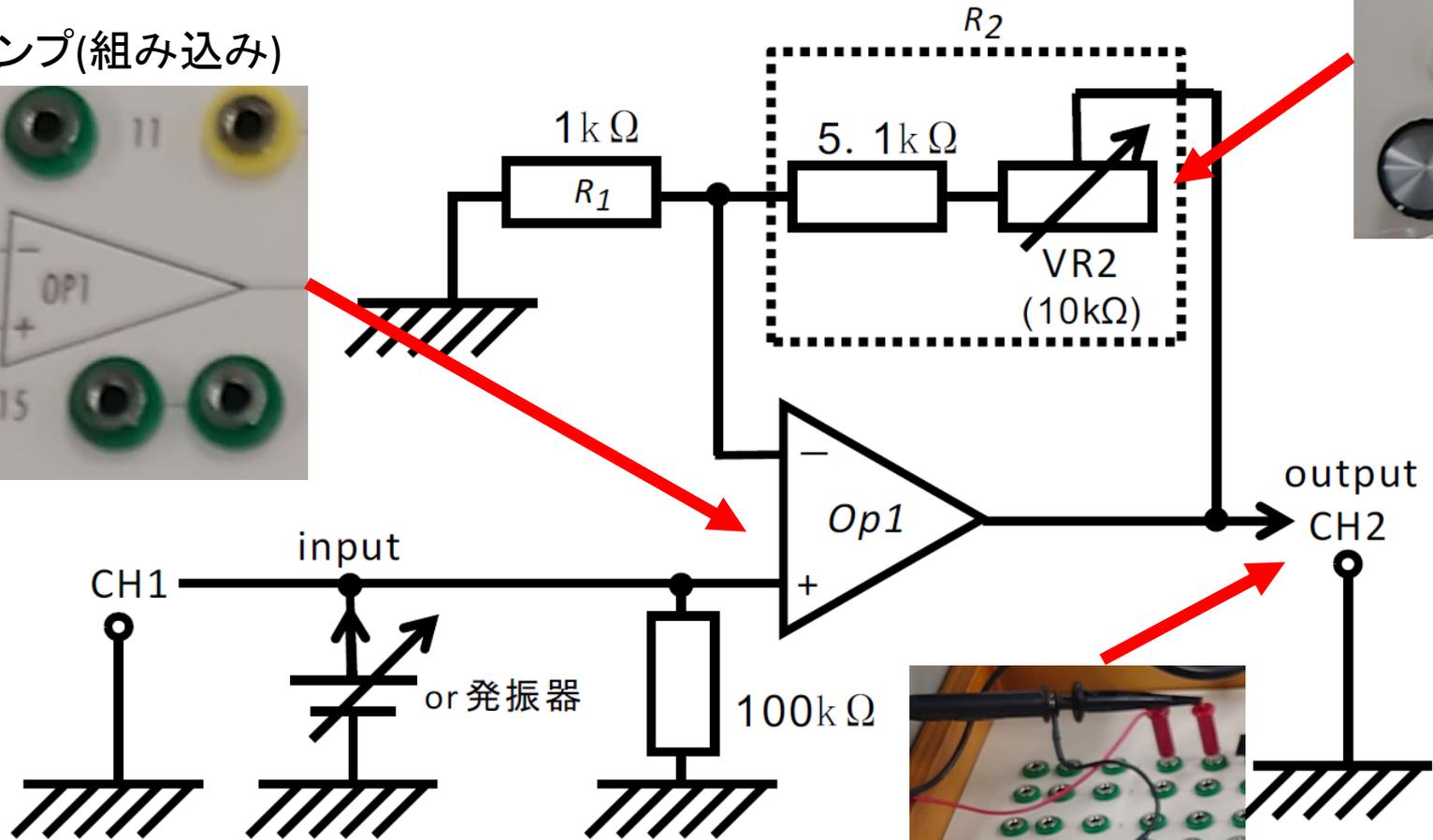
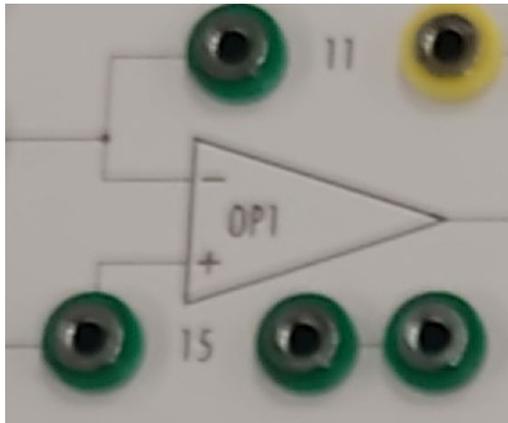
抵抗

コンデンサー

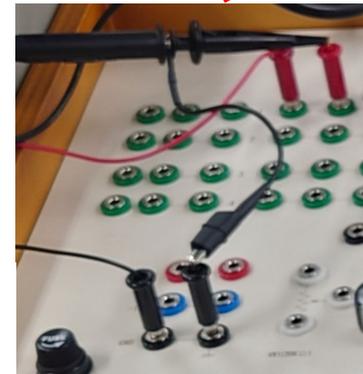
# 4.1.2 非反転増幅器

可変抵抗

オペアンプ(組み込み)



オシロスコープのプローブを見たい場所へ、プローブのグランド線をGNDへ接地



# 4.1.2.1 非反転増幅器

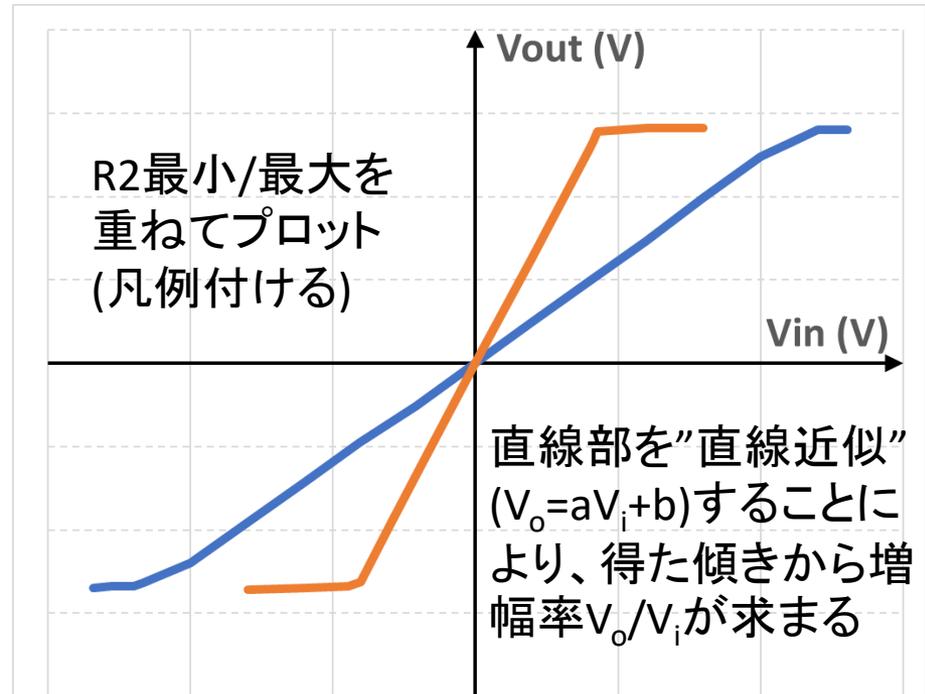
- $R_2$ の最小値/最大値の時の入力電圧 $V_i$ と出力電圧 $V_o$ の関係を測定し、**表1**と**グラフ1**を作成
  - グラフ1から得た増幅率が、非反転増幅回路の増幅率  $A=1+R_2/R_1$ と一致することを確認する

**表1: 入力電圧 $V_i$ と出力電圧 $V_o$ の関係**

R2最小 (... $\Omega$ )		R2最大(... $\Omega$ )	
$V_i$ [V]	$V_o$ [V]	$V_i$ [V]	$V_o$ [V]
0.0		0.0	
0.4		0.4	
0.8		0.8	
...		...	

\* マルチメータの値を記入

**グラフ1: 入力電圧 $V_i$ と出力電圧 $V_o$ の関係**



## 4.1.2.2 非反転増幅器

- $R_2$ の最小値/最大値の時の入力電圧 $V_i$ と出力電圧 $V_o$ の関係を測定し、**表2**を作成
  - 得た増幅率が、非反転増幅回路の増幅率 $A=1+R_2/R_1$ と一致することを確認する
  - 入力波形と出力波形の位相差が0度であることを確認する (USBメモリに保存、**画像1**)

**表2: 正弦波信号による増幅率の測定 (非反転増幅)**

	入力電圧 $V_i$ [V]	出力電圧 $V_o$ [V]	増幅率 $V_o/V_i$	$R_1$ [k $\Omega$ ]	$R_2$ [k $\Omega$ ]	増幅率 $A=1+R_2/R_1$
R2最大						
R2最小						

## 4.1.2.3 非反転増幅器

- 増幅率の周波数依存を測定し、**表3**と**グラフ2**を作成

- エクセルで片対数グラフにプロットしながら測定する

「位相差の求め方」参照

- 各点において位相差も測定する

**表3: 周波数に対する増幅率および位相差 (非反転増幅)**

周波数 f[Hz]	入力電圧 Vi [V]	出力電圧 Vo [V]	増幅率 A=Vo/Vi	20logA [dB]	位相差 φ [° ]
1.0x10 <sup>6</sup>					
...					
1.0x10 <sup>2</sup>					

## 4.1.2.3 非反転増幅器

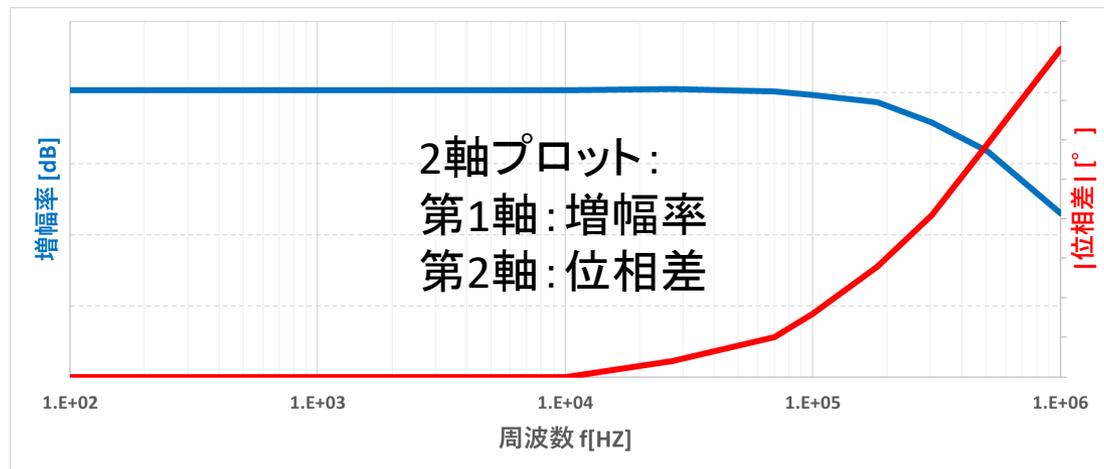
- 増幅率の周波数依存を測定し、**表3**と**グラフ2**を作成

- エクセルで片対数グラフにプロットしながら測定する

「位相差の求め方」参照

- 各点において位相差も測定する

**グラフ2: 周波数に対する増幅率および位相差**



- ・増幅率
  - ・位相差
- 重ねてプロット  
(凡例付ける)

## 4.1.3 反轉增幅器

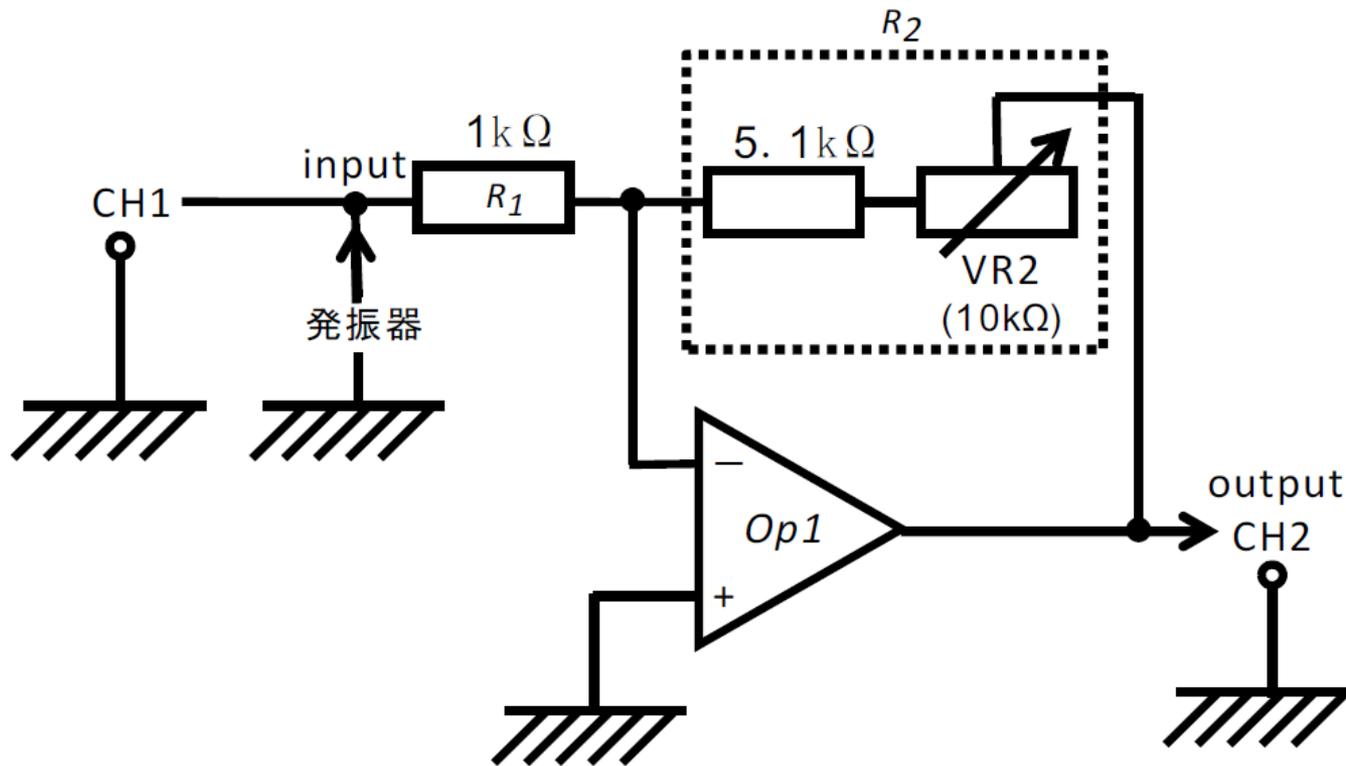


図 13: 反轉增幅器

# 4.1.3.1 反転増幅器

- $R_2$ の最小値/最大値の時の入力電圧 $V_i$ と出力電圧 $V_o$ の関係を測定し、**表4**を作成
  - 得た増幅率が、非反転増幅回路の増幅率 $A=-R_2/R_1$ と一致することを確認する
  - 入力波形と出力波形の位相差が180度であることを確認する (USBメモリに保存、**画像2**)

**表4: 正弦波信号による増幅率の測定 (反転増幅)**

	入力電圧 $V_i$ [V]	出力電圧 $V_o$ [V]	増幅率 $V_o/V_i$	$R_1$ [k $\Omega$ ]	$R_2$ [k $\Omega$ ]	増幅率 $A=-R_2/R_1$
R2最大						
R2最小						

# 4.1.3.2 反転増幅器

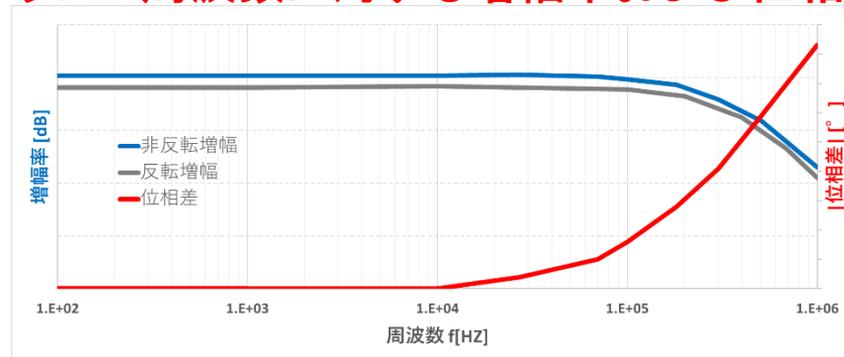
- 増幅率の周波数依存を測定し、**表5とグラフ(グラフ2に重ねる)**を作成

表5: 周波数に対する増幅率および位相差 (反転増幅)

周波数 f[Hz]	入力電圧 Vi [V]	出力電圧 Vo [V]	増幅率 A=Vo/Vi	20logA [dB]
1.0x10 <sup>6</sup>				
...				
1.0x10 <sup>2</sup>				

グラフ2: 周波数に対する増幅率および位相差

- ・非反転増幅
  - ・反転増幅
- 重ねてプロット  
(凡例付ける)



2軸プロット:  
第1軸: 増幅率  
第2軸: 位相差