

# 第4章 増幅器の動作モデル

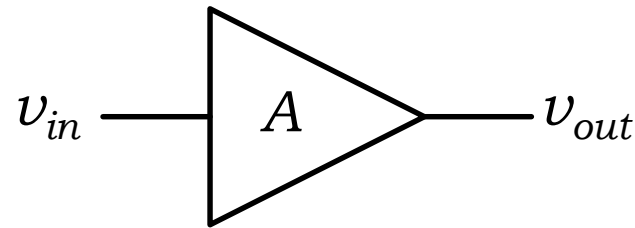
増幅回路の等価回路の作成

制御電源を用いた増幅器のモデル

## 4.1 理想的な増幅器のモデル

# 増幅器のシンボルと機能

## 増幅器(Amplifier)



$$v_{out} = Av_{in}$$

$A$ : 利得または増幅率(Gain)

- $A > 0$  の場合は、**非反転増幅器(Non-inverting amplifier)**または**逆相増幅器**と呼ばれる。
- $A < 0$  の場合は、**反転増幅器(Inverting amplifier)**または**逆相増幅器**と呼ばれる。この増幅器は、入力波形と出力波形の上下が逆になる。
- 増幅回路を回路部品と考える場合は増幅器と呼ぶ。増幅回路と同義と考えてよい。

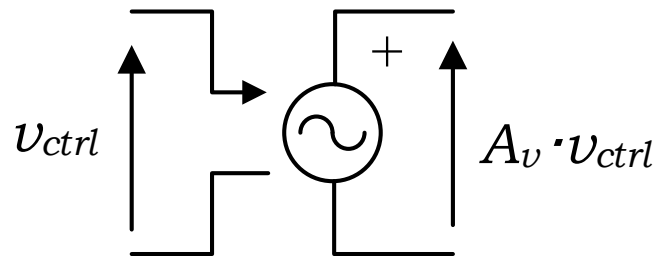
# 増幅器の動作量

| 動作量                             | 意味                    |
|---------------------------------|-----------------------|
| 電圧利得(Voltage gain)              | 出力電圧/入力電圧             |
| 電流利得(Current gain)              | 出力電流/入力電流             |
| 電力利得(Power gain)                | 電圧利得 × 電流利得           |
| 入力インピーダンス<br>(Input impedance)  | 入力電圧/入力電流(出力端子は負荷を接続) |
| 出力インピーダンス<br>(Output impedance) | 出力電圧/出力電流(入力信号はゼロにする) |

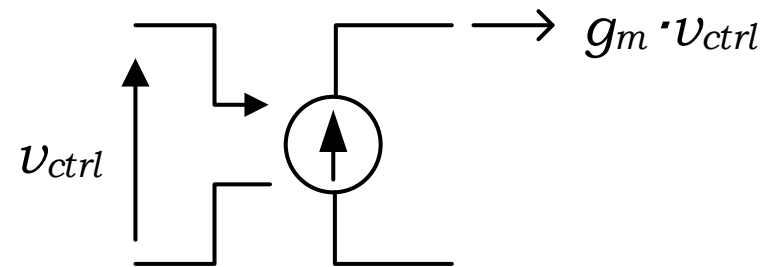
- 利得は、増幅器の伝達関数に相当する
- 理想的な増幅回路の利得は、 $\omega$ に依らない定数である
- 利得は、通常dBで表されるが、「倍」を使う場合もあるので注意
- 電圧利得または電流利得が1倍以下でも、電力利得が1倍以上であれば、増幅器として働く

# (準備) 電圧/電流制御電源

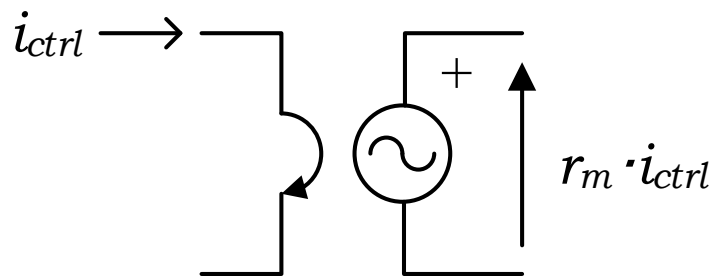
入力電圧または入力電流に比例した電圧または電流を出力する仮想的な部品



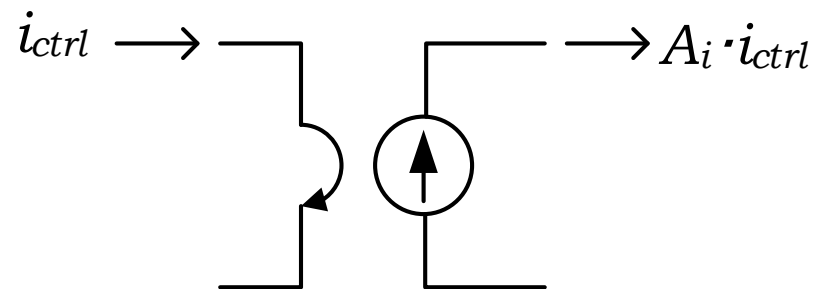
電圧制御電圧源(VCVS)



電圧制御電流源(VCCS)



電流制御電圧源(CCVS)

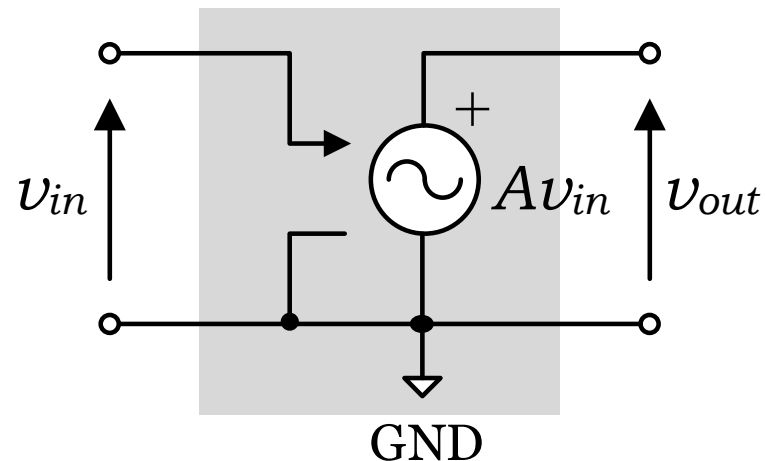


電流制御電流源(CCCS)

# 理想的な増幅器の動作モデル

増幅器は複数のトランジスタを含む複雑な回路構成となるため、電圧/電流制御電源を用いた等価回路に置き換えて解析を行う。回路の機能や特定の特性のみをモデル化した等価回路は、**動作モデル(Behavior model)**と呼ばれる。

## 理想的な増幅器の動作モデル

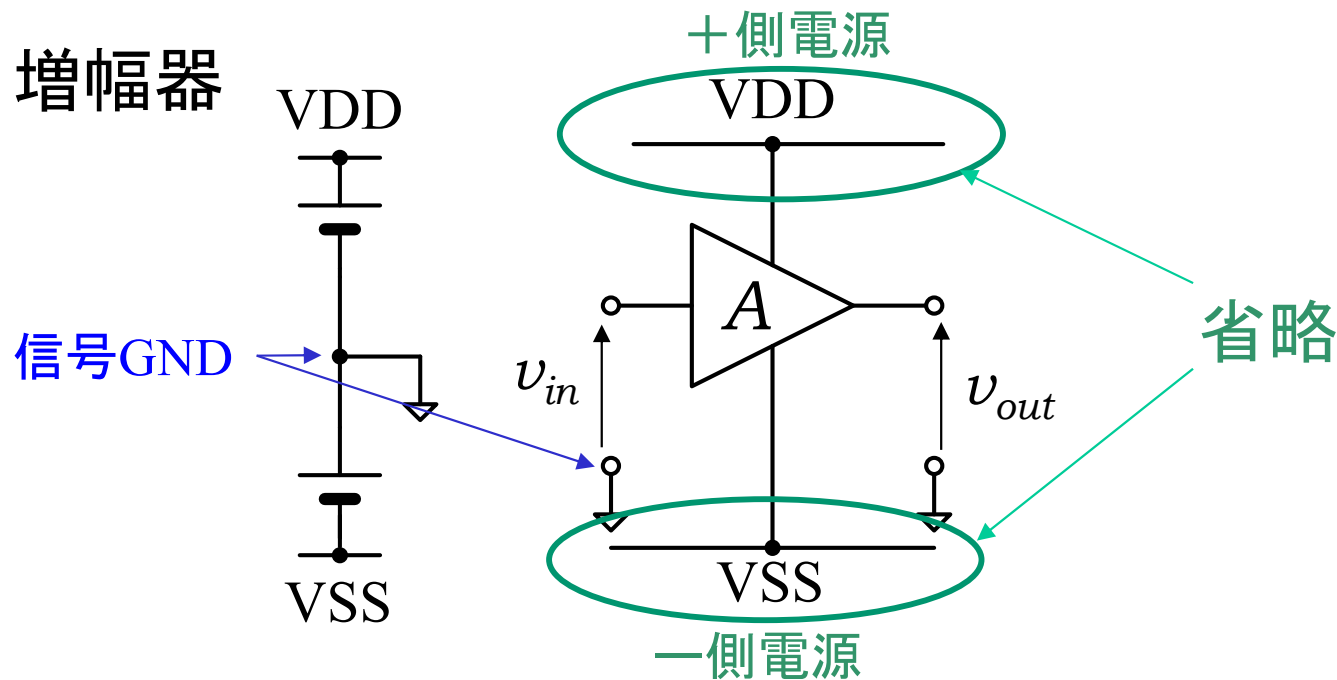


# 増幅器モデルの役割

- 増幅器を含む回路の特性を調べる際に、理想的な増幅器を使用した場合の動作を把握しておくことができる
  - 理想的な増幅器は、利得または差動利得のみが回路パラメータとなっており、これらが周波数に依存しない定数である
- 実際の回路は、多数の部品で構成されており、回路特性に影響を与えるパラメータが多く、どの素子が回路性能に影響しているのか特定することが難しいため、動作モデルを使用してパラメータ数を削減する
- 実際の増幅器を含む回路のシミュレーションでは、各トランジスタの特性から計算するため長い時間がかかる。動作モデルを使用することにより、シミュレーションの計算時間を大幅に短縮することができる

# 増幅器の電源

- 実際の増幅器を動作させるためには直流電源が必要であるが、増幅器のシンボルでは、通常、電源配線の表記を省略する
- 電源の+極の配線をVDD(またはVCC)、一極の配線をVSS(またはVEE)と表記することが多い
- VDD, VSSの電位は、レール(Rail)と呼ばれる





入出カインピーダンスと周波数特性

## 4.2 非理想的な増幅器のモデル

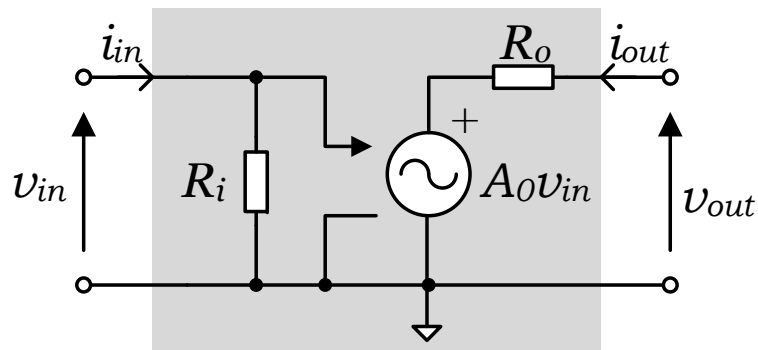
# テブナンの定理による増幅器の等価回路

記憶すること

入力インピーダンスの定義

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R_i$$

(出力端子には負荷を接続)



電圧制御電圧源 (VCVS) 表記  
電圧利得 =  $A_0$

記憶すること

出力インピーダンスの定義

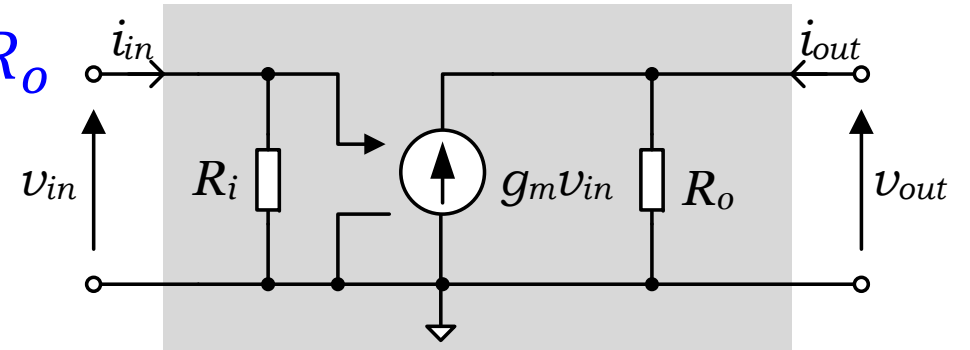
$$Z_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = R_o$$

(入力信号はゼロにする)

$$A_0 = g_m R_o$$



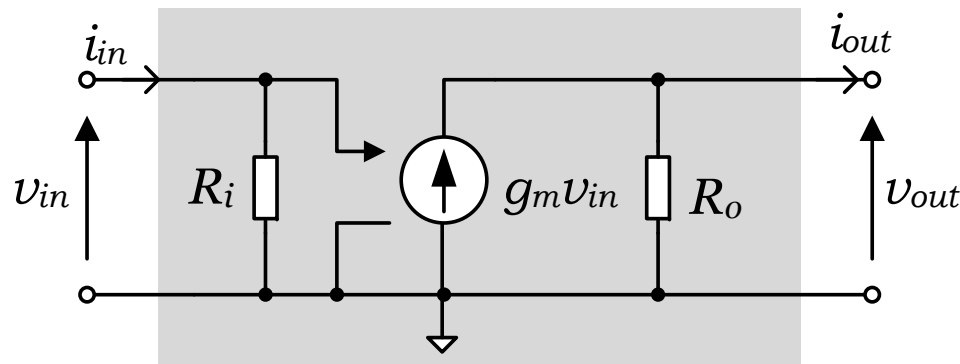
等価



電圧制御電流源 (VCCS) 表記  
トランスコンダクタンス =  $g_m$   
(Transconductance)

# 電圧利得と電流利得の関係

- 信号は電圧または電流のどちらかで表される
  - 電圧信号として扱う場合は、電圧増幅が必要
  - 電流信号として扱う場合は、電流増幅が必要
- 電圧利得と電流利得の値には、入力インピーダンスと出力インピーダンスが関係している



$$\begin{cases} v_{in} = R_i i_{in} \\ g_m v_{in} = \frac{v_{out}}{R_o} + i_{out} \end{cases}$$

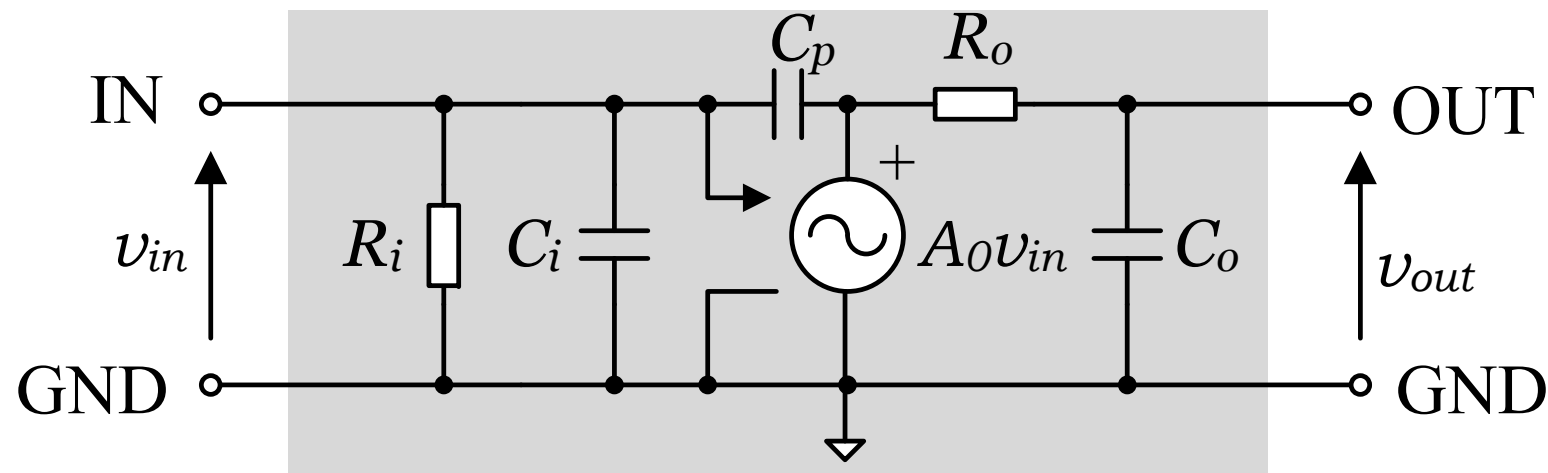
$$g_m = \frac{1}{R_o} \frac{v_{out}}{v_{in}} + \frac{i_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{R_o} \frac{v_{out}}{v_{in}} + \frac{1}{R_i} \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

電圧利得 $A_V$ 、電流利得 $A_i$ とすると、 $g_m = \frac{1}{R_o} A_V + \frac{1}{R_i} A_i$

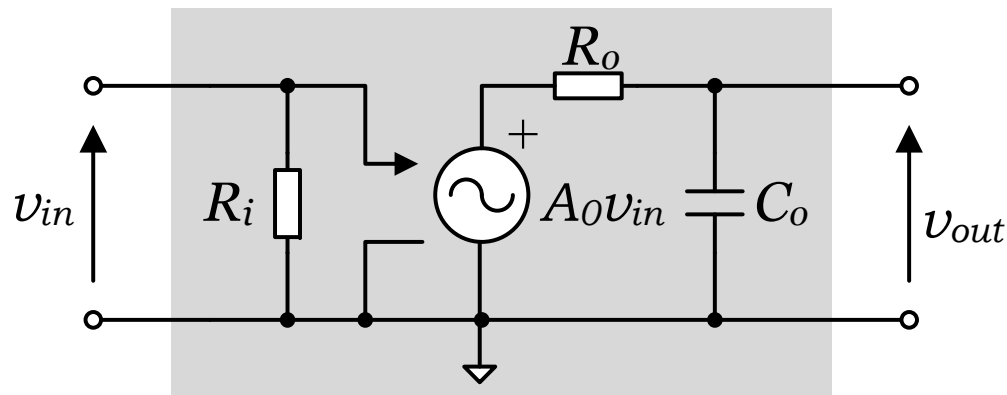
$g_m$ が定数のとき、 $R_o$ が大きい回路は電圧利得が大きく、 $R_i$ が大きい回路は電流利得が大きい。

# 周波数特性を考慮した増幅器の動作モデル

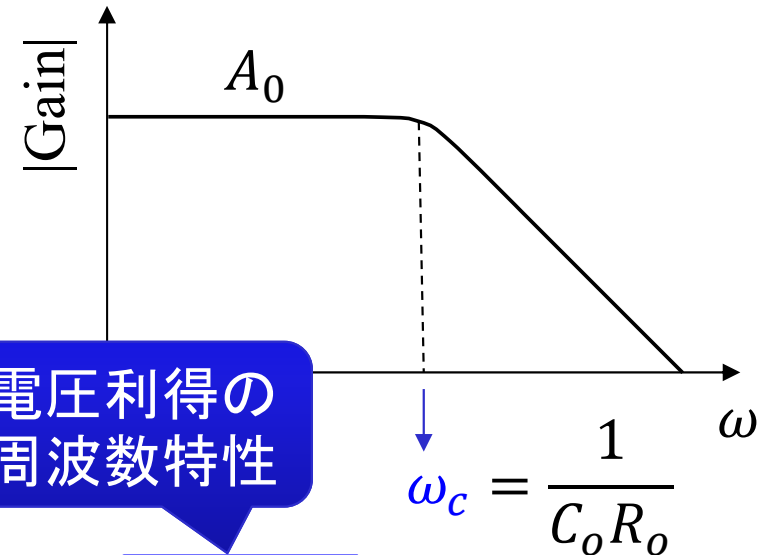
増幅器内部のキャパシタの影響により、増幅器は周波数特性を持つ。周波数特性を持つ増幅器の動作モデルとして、IN, OUT, GNDの各端子間にキャパシタを挿入した等価回路が使用される。下図では、 $C_i$ ,  $C_p$ ,  $C_o$ が挿入されている。



# 周波数特性を考慮した増幅器モデルの周波数特性



$C_i, C_p$ を省略したモデル



電圧利得の  
周波数特性

$$v_{out} = \frac{1}{R_o + \frac{1}{j\omega C_o}} A_0 v_{in} = \frac{A_0}{1 + j\omega C_o R_o} v_{in} = \frac{A_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} v_{in}$$

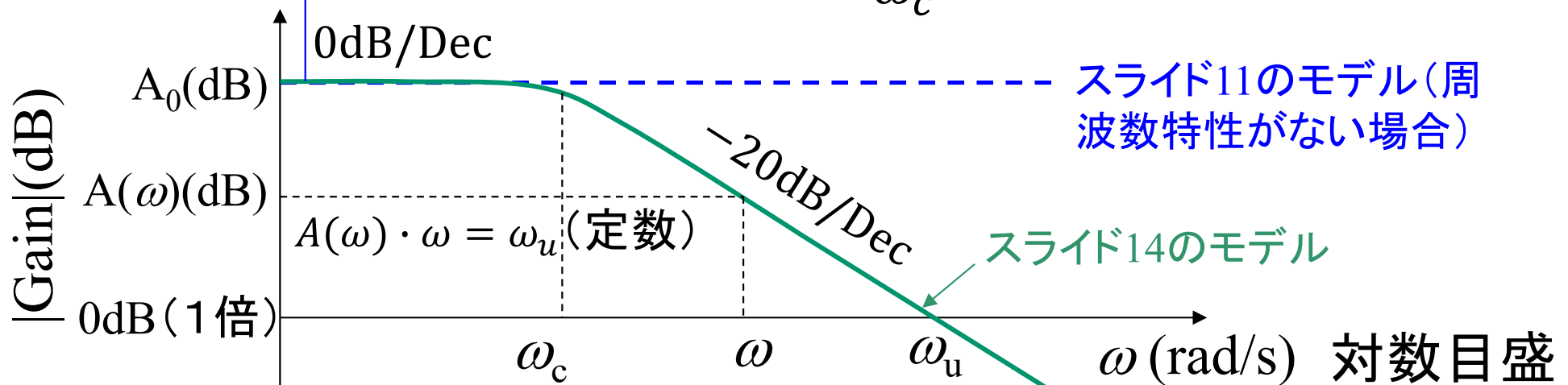
(参考) 実際には、 $C_i, C_p$ の影響も考慮する必要があるが、最も低周波のコーナが重要なので(後述)、1キャパシタのモデルを使用することが多い。

# 増幅器の利得の周波数特性 (Frequency response)

直流利得(倍またはdB)  
DC gain

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

式の形を記憶  
すること



遮断周波数(Hz)  
Cut-off frequency

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$$

ユニティゲイン周波数(Hz)  
Unity gain frequency

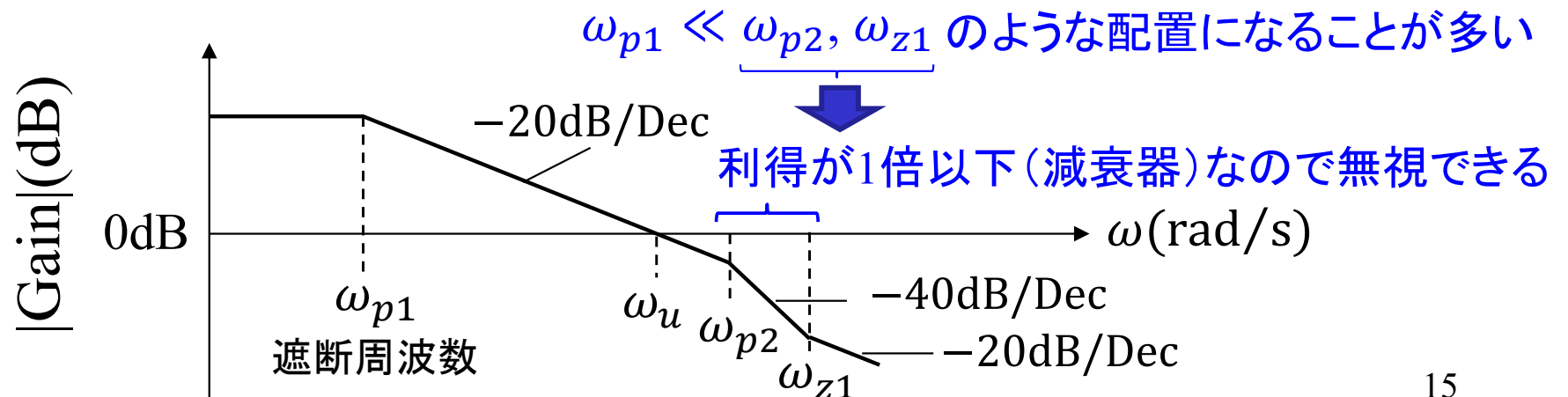
$$f_u = \frac{\omega_u}{2\pi}$$

# (参考) 実際の増幅器のコーナ

- 実際の増幅器の振幅特性には、複数のコーナが現れるが、最も低い周波数のコーナが回路の性能(処理精度と処理スピード)に影響する
- 最も低い周波数のコーナは、ファースト・ポール(first pole)またはドミナント・ポール(dominant pole)とも呼ばれる

$$A(\omega) = \frac{A_0 \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{z1}}\right)}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{p2}}\right)}$$

この特性の場合はコーナが3個現れる



# 増幅器の周波数特性と性能指標

| 性能指標                                      | 意味                       |
|---|--------------------------|
| 直流利得(DC gain)                             | 周波数が0Hzのときの利得(dB)        |
| 遮断周波数(Cut-off frequency)                  | 最も低周波のコーナ周波数(Hz)         |
| ユニティゲイン周波数(Unity gain frequency)          | 利得の絶対値が1倍(0dB)となる周波数(Hz) |
| 利得帯域幅積(Gain bandwidth product, GBPまたはGBW) | 直流利得(倍)・遮断周波数(Hz)        |

- 直流利得と遮断周波数の両方が高い増幅器が高性能  
(なぜ両方が必要なのかは後章で説明)
- 増幅回路の基本的な性能指標は利得帯域幅積である



# ユニティゲイン周波数と利得帯域幅積の関係

$$A(\omega) = \frac{A_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \quad (\text{コーナが1個と仮定})$$

$$\text{利得帯域幅積 } GBP = |A_0| \cdot f_c = |A_0| \frac{\omega_c}{2\pi}$$

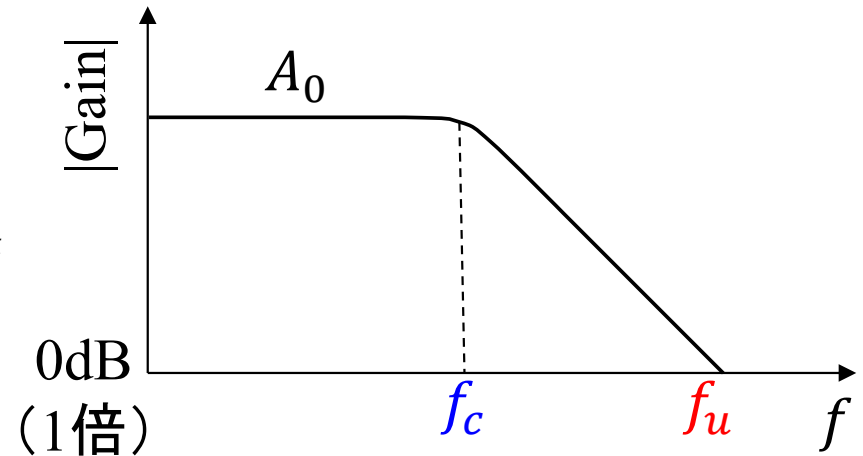
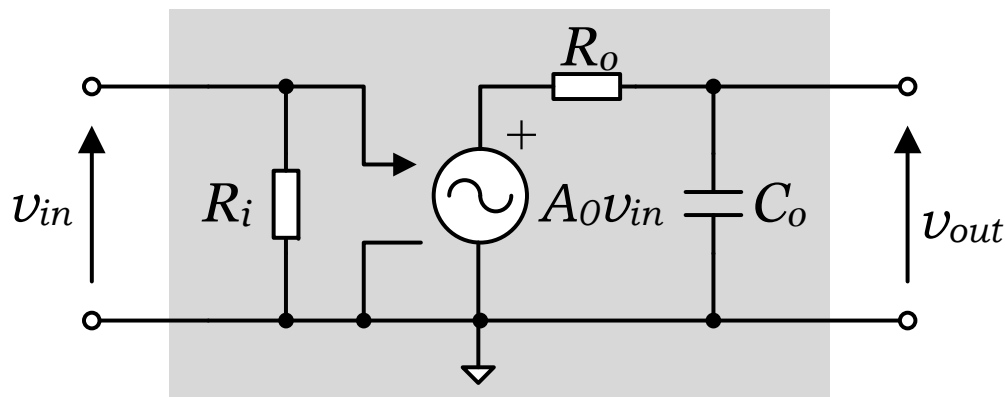
GBPを求めるときの $A_0$ はdB表記ではないので注意

$$|A(\omega_u)| = \left| \frac{A_0}{1 + j\frac{\omega_u}{\omega_c}} \right| = \frac{|A_0|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_u}{\omega_c}\right)^2}} = 1$$

$$\text{従って、} f_u = \frac{\omega_u}{2\pi} = \sqrt{A_0^2 - 1} \frac{\omega_c}{2\pi} \approx |A_0| f_c = GBP$$

$A_0^2 \gg 1$ の増幅器では、 $f_u$ とGBPは同じである

# 動作モデルによるGBPの計算



$$v_{out} = \frac{1}{R_o + \frac{1}{j\omega C_o}} A_0 v_{in} = \frac{A_0}{1 + j\omega C_o R_o} v_{in} = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} v_{in}$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{C_o R_o} \quad f_u \approx GBP = |A_0| f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{|A_0|}{C_o R_o}$$

# クイズ

1. 電圧制御電流源を用いて、周波数特性を考慮した増幅器モデルの回路図を示せ。電圧制御電流源のトランスコンダクタンスを $G_m$ 、入力インピーダンスを $R_i$ 、出力インピーダンスを $R_o // (1/j\omega C_o)$ とする。
2. 作成した増幅器モデルについて角周波数 $\omega$ の関数として電圧利得を求めよ。ただし、負荷を $R_L$ 、信号源の内部インピーダンスを $0\Omega$ とする。
3. 2で求めた電圧利得から、直流利得、遮断周波数、GBPを求めよ。

# 答え合わせ

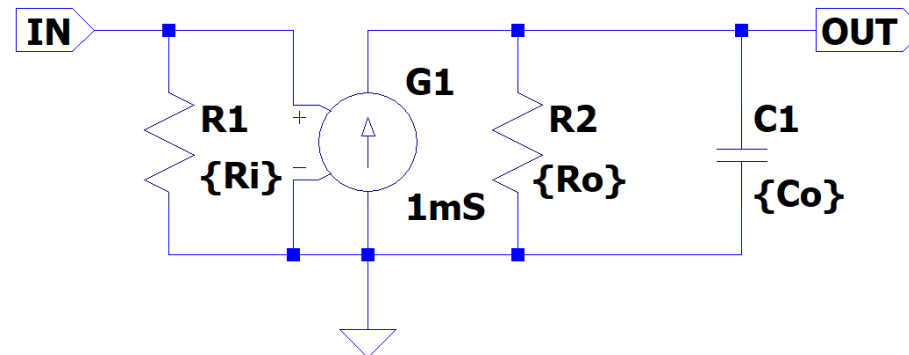
# 課題4. 1

1. 次頁以降の手順に従い、増幅器の負荷抵抗を $RL = 250\text{k}\Omega$ ,  $1\text{MEG}\Omega$ ,  $1\text{G}\Omega$ とした場合について、周波数特性を回路シミュレーションし、電圧利得の振幅特性と位相特性をグラフに示せ。
  - 回路図と結果のグラフを示すこと。
  - ネットリストを提出すること(レポートに貼り付けても、別ファイルでもよい)。
2. シミュレーション結果から、負荷抵抗 $RL = 250\text{k}\Omega$ ,  $1\text{MEG}\Omega$ ,  $1\text{G}\Omega$ の各場合について、直流利得、遮断周波数、GBPを求めよ。
3. 2で求めた直流利得、遮断周波数、GBPのシミュレーション結果と理論値(クイズ参照)の相対誤差を求めよ。

# シミュレーションの手順1

回路図エディタを用いて、下記の増幅器(動作モデル)を入力する。

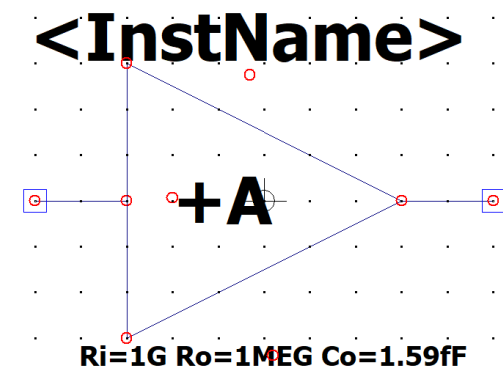
1. 電圧制御電流源は、ComponentボタンでSelect Component Symbolフォームを開き、部品リストからgを選ぶ
2. G1のトランスコンダクタンスは、定数とする(トランスコンダクタンスはトランジスタの特性により決まる)
3. R1, R2, C1の値 $R_i$ ,  $R_o$ ,  $C_o$ は変数とする(  $\{ \}$  で囲む)
4. 完成したら、File – Save As...で保存(ファイル名の例 amp.asc)



# シミュレーションの手順2

増幅器モデルのシンボル作成する。

1. 増幅器の動作モデルの回路図を表示した状態で、メニューより、Hierarchy – Open this Sheet’s Symbolを選ぶ
2. シンボルエディタが起動するので、右のような増幅器シンボルを作成する
  - 必要ない線ははさみアイコンで削除する
  - 線は、メニューのDraw - Lineで作成
  - 非反転増幅器であることが分かるように、+Aの文字を、メニューのDraw – Textで作成
  - 端子IN, OUTは適当に移動させて(手のアイコン)、右クリックし、Pin/Port Propertiesフォームで、NONE(Not Visible)を選択し、表示しないようにしておく(表示してもよいが、回路図が読みにくい)
  - シンボルエディタは、開いたまま次ページに進む



# シミュレーションの手順3

増幅器モデルのパラメータ(変数)を設定する。

1. シンボルエディタのメニューより、Edit – Attributes – Edit Attributesを選択
2. Symbol Attributes EditorフォームのSpiceLineのvalue列(Value行ではない)に次の代入文を記入する(=の前後にスペースを入れないこと)

$$R_i=1G \quad R_o=1MEG \quad C_o=1.59fF$$

3. シンボルエディタのメニューより、Edit – Attributes – Attributes Windowを選択
4. Attribute Window to Addフォームで、SpiceLineを選んでOKボタンをクリックし、シンボルの周辺をクリックして設定内容を配置
5. File – Save As...で回路図と同じ場所に保存

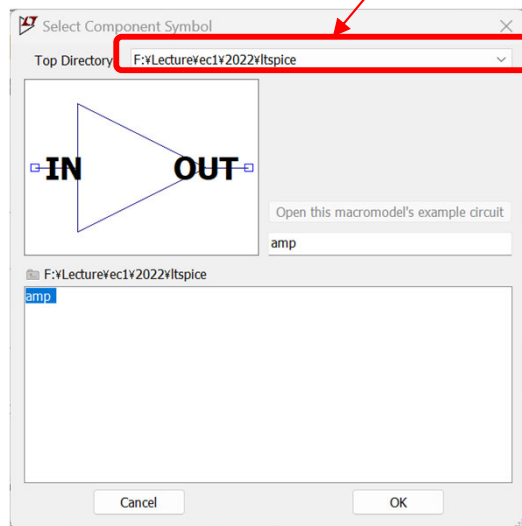
**[注意] ファイル名は、勝手に変更しないこと。**



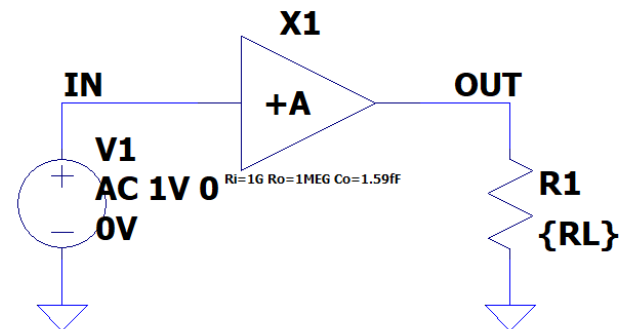
# シミュレーションの手順4

回路図エディタで、下記の増幅器の周波数特性測定回路を作成する。

1. Componentボタンより、Select Component Symbolを起動し、Top Directory欄で、増幅器のシンボルを保存した場所を選ぶ
2. シンボルの名前(ampなど)を選んで、増幅器のシンボルを呼び出す



```
.step param RL list 250k 1MEG 1G  
.ac dec 100 100k 10G
```

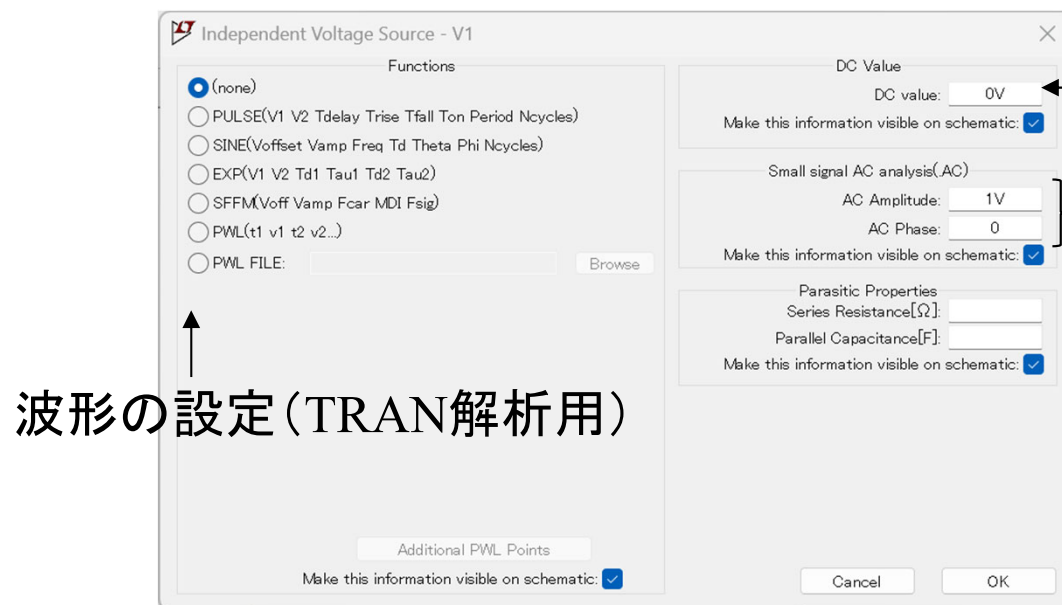


```
.options meascplxfmt=cartesian  
.options measdgt=12  
.meas ac A0 max mag(V(OUT))  
.meas ac fc when mag(V(OUT))=A0/sqrt(2)  
.meas ac GBP param A0*fc
```

# シミュレーションの手順5

入力信号の設定を行う。

1. 電圧源V1のシンボルを右クリックしVoltage Sourceの設定フォームでAdvancedボタンをクリック(値の入力は不要)
2. Independent Voltage Sourceフォームで、下図のように設定する



← DC電圧の設定(全ての解析で必要)

← AC電圧と位相の設定 (AC解析用)

入力電圧振幅を1V、位相を0度に設定すると、出力電圧を測定することにより、利得の周波数特性が求められる

# シミュレーションの手順6

負荷抵抗RLの設定とAC解析の設定を行う。

1. Spice Directive (.op)ボタンで、前ページの.stepディレクティブを入力する
  - RLの値をlist以降に記載の値にしてシミュレーションを繰り返している
2. 増幅器のパラメータが、増幅器シンボルの周囲に表示されている
  - デフォルト値を右クリックして、書き換えることができる(ここでは、デフォルト値を使用)
3. Spice Directiveボタンで、前々ページの.measディレクティブを入力する(.measの入力を省略してグラフから値を読み取ってもよい)
  - .meas ac A0 max mag(V(OUT)) → OUTの電圧V(OUT)の振幅の最大値を求める
  - .meas ac fc when mag(V(OUT))=A0/sqrt(2) → A0/sqrt(2)倍となる周波数を求める
  - .meas ac GBP param A0\*fc → 上で求めたA0, fcの積を計算して変数GBPに保存

# (参考) 値の表示形式

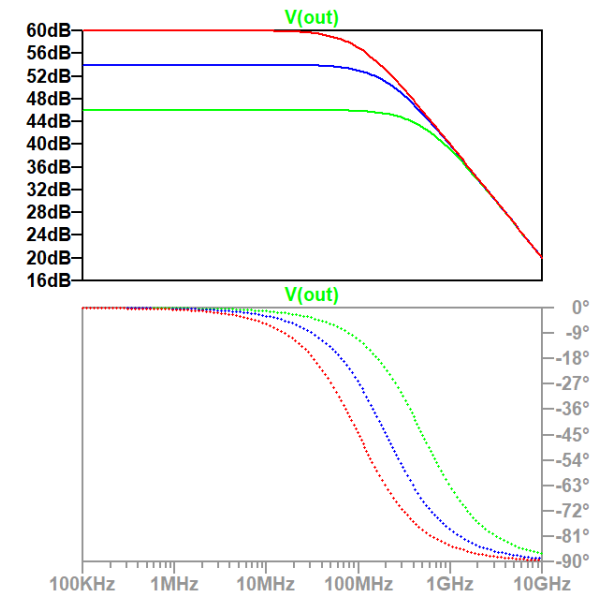
.optionsディレクティブを使用して、LTspiceの設定を変更できる。以下の設定はよく使用する。課題4. 1では、GBPがdBではなく絶対値で表されるように、.options meascplxfmt=cartesian を指定。

1. .options meascplxfmt=[bode|polar|cartesian]
  - 複素数の表記法を指定する。
  - bode: (dB, 度)形式(デフォルト)
  - polar: (絶対値, 位相角)形式
  - cartesian (実数, 虚数)形式
2. .options measdgt=12
  - .measディレクティブで求める数値の桁数(デフォルトは6)
3. .options plotwinsize=0
  - 一つのグラフに表示するポイントの圧縮率(デフォルトは1024)
  - plotwinsize=0を指定すると全てのデータ点を使用される(正確な測定値が欲しいときに指定する)

# シミュレーションの手順7

ボーデ線図を作成する。

1. シミュレーションを実行し、グラフウィンドウ上で右クリックし、メニューより、Add Plot Paneを選びグラフを2枚にする
2. 上のグラフと下のグラフそれぞれにV(OUT)を表示させる(グラフを左クリックした後、回路図のOUTの配線をクリック)
3. 上側グラフの右軸の数値を右クリックし、Right Vertical Axisフォームで、Don't plot phaseボタンをクリック
4. 下側グラフの左軸の数値を右クリックし、Right Vertical Axisフォームで、Don't plot the magnitudeボタンをクリック

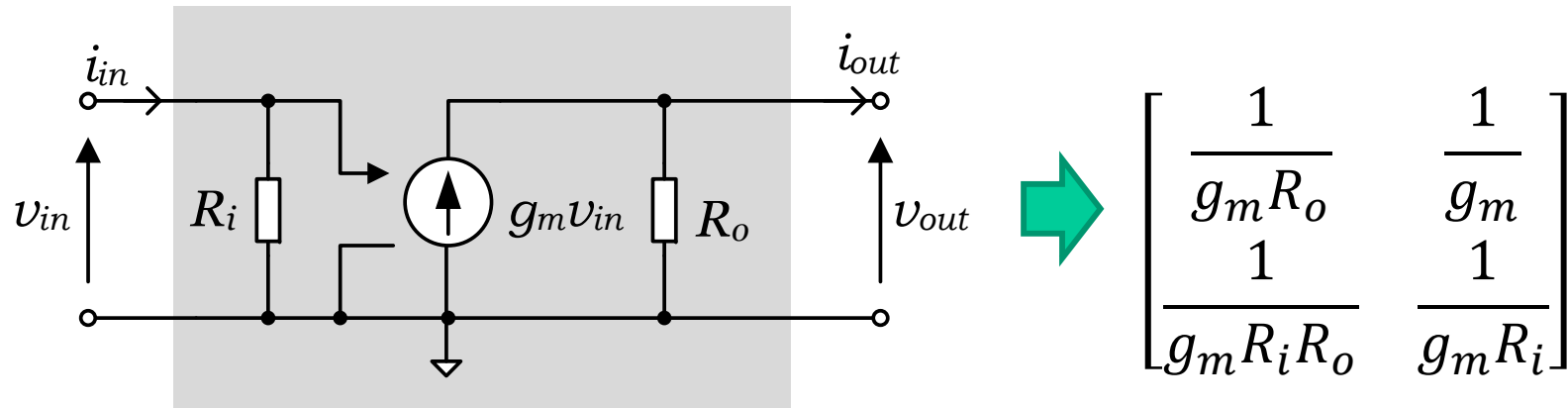


表示例

増幅器の2端子対回路パラメータによる表現

## 4.3 増幅器の2端子対回路パラメータ

# 増幅回路のF行列



$$A = \left. \frac{v_{in}}{v_{out}} \right|_{i_{out}=0} = \frac{v_{in}}{g_m v_{in} R_o} = \frac{1}{g_m R_o}$$

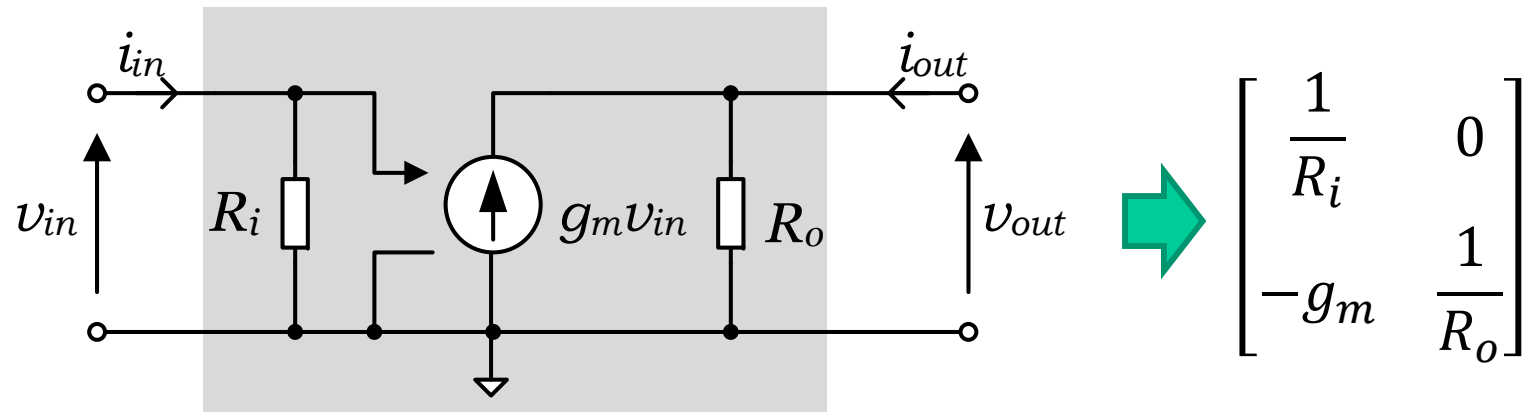
$$B = \left. \frac{v_{in}}{i_{out}} \right|_{v_{out}=0} = \frac{v_{in}}{g_m v_{in}} = \frac{1}{g_m}$$

$$C = \left. \frac{i_{in}}{v_{out}} \right|_{i_{out}=0} = \frac{\frac{1}{R_i} v_{in}}{g_m v_{in} R_o} = \frac{1}{g_m R_i R_o}$$

$$D = \left. \frac{i_{in}}{i_{out}} \right|_{v_{out}=0} = \frac{\frac{1}{R_i} v_{in}}{g_m v_{in}} = \frac{1}{g_m R_i}$$

# 増幅回路のY行列

電圧制御電流源のみでは、2端子対回路網パラメータを求めることができないので、増幅回路全体で2端子対回路網パラメータを求める。



$$y_{11} = \left. \frac{i_{in}}{v_{in}} \right|_{v_{out}=0} = \frac{\frac{1}{R_i} v_{in}}{v_{in}} = \frac{1}{R_i}$$

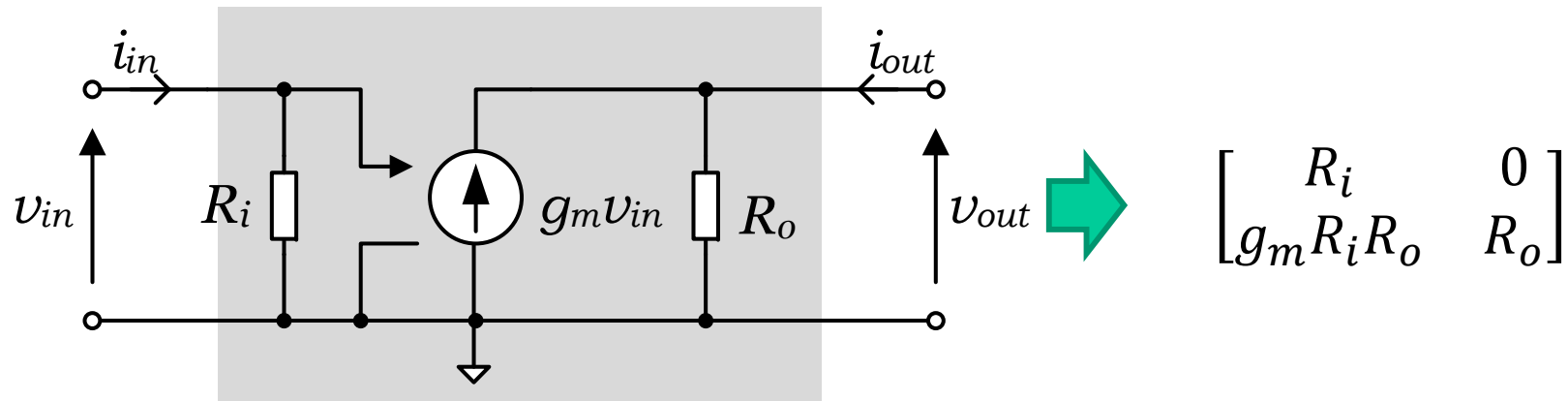
$$y_{12} = \left. \frac{i_{in}}{v_{out}} \right|_{v_{in}=0} = \frac{0}{v_{out}} = 0$$

$$y_{21} = \left. \frac{i_{out}}{v_{in}} \right|_{v_{out}=0} = \frac{-g_m v_{in}}{v_{in}} = -g_m$$

$$y_{22} = \left. \frac{i_{out}}{v_{out}} \right|_{v_{in}=0} = \frac{\frac{1}{R_o} v_{out}}{v_{out}} = \frac{1}{R_o}$$



# 増幅回路のZ行列



$$\begin{bmatrix} R_i & 0 \\ g_m R_i R_o & R_o \end{bmatrix}$$

$$z_{11} = \left. \frac{v_{in}}{i_{in}} \right|_{i_{out}=0} = \frac{R_i i_{in}}{i_{in}} = R_i$$

$$z_{12} = \left. \frac{v_{in}}{i_{out}} \right|_{i_{in}=0} = \frac{0}{i_{out}} = 0$$

$$z_{21} = \left. \frac{v_{out}}{i_{in}} \right|_{i_{out}=0} = \frac{g_m (R_i i_{in}) R_o}{i_{in}} = g_m R_i R_o$$

$$z_{22} = \left. \frac{v_{out}}{i_{out}} \right|_{i_{in}=0} = \frac{R_o i_{out}}{i_{out}} = R_o$$

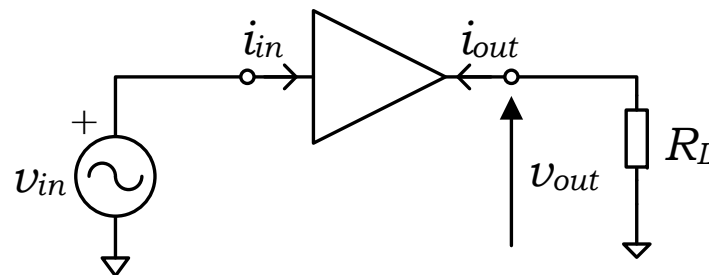
# 課題4. 2

1. 増幅回路のH行列が下記のように与えられるとき、電圧制御電流源を用いた等価回路で表せ。

$$\begin{bmatrix} v_{in} \\ i_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j\omega C_1} & 0 \\ \frac{g_m}{j\omega C_1} & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ v_{out} \end{bmatrix}$$

2. 増幅器のY行列の要素 $y_{11}$ ,  $y_{12}$ ,  $y_{21}$ ,  $y_{22}$ を用いて、下記の増幅器の電圧利得を表せ。

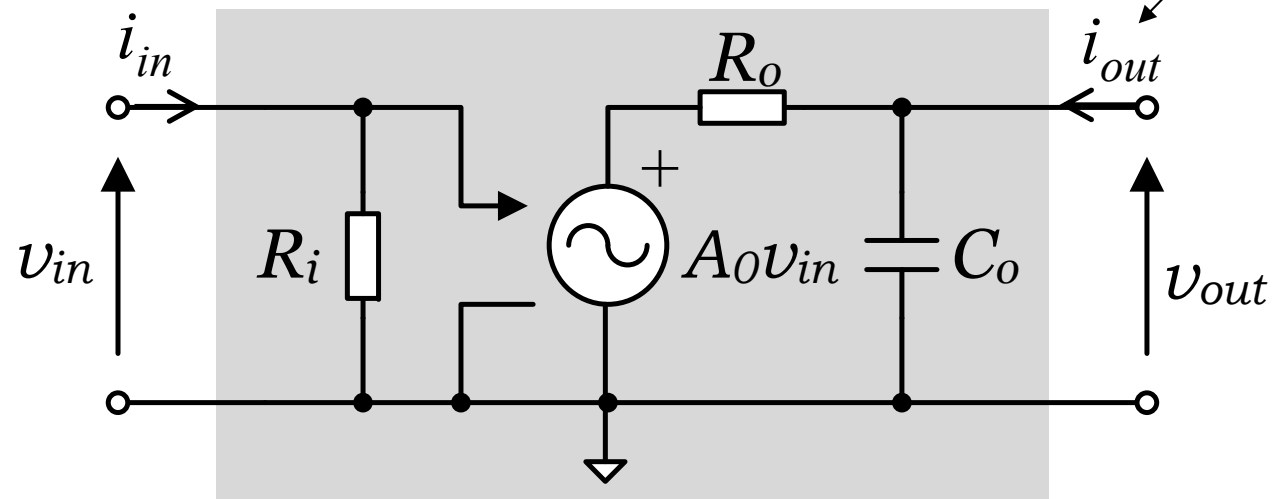
$$\begin{bmatrix} i_{in} \\ i_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in} \\ v_{out} \end{bmatrix}$$



# 課題4. 3

1. 下記の増幅回路について、F行列、Y行列、Z行列を求めよ。

F行列を求めるときはY行列、Z行列と電流の向きが逆になることに注意。

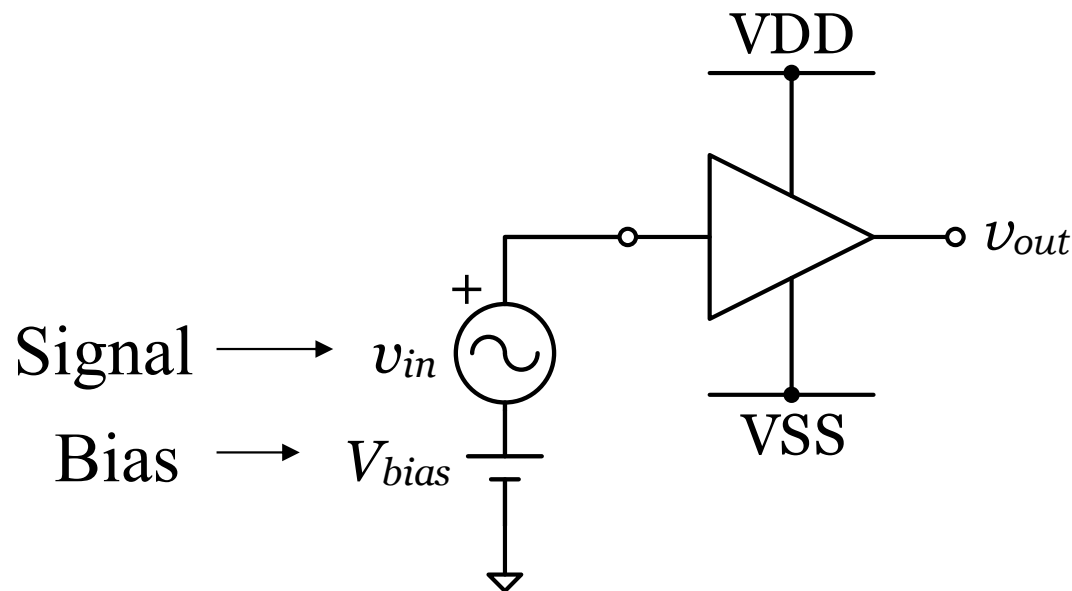


入力が2つある増幅器

## 4.4 差動増幅器

# 増幅器のバイアス電圧

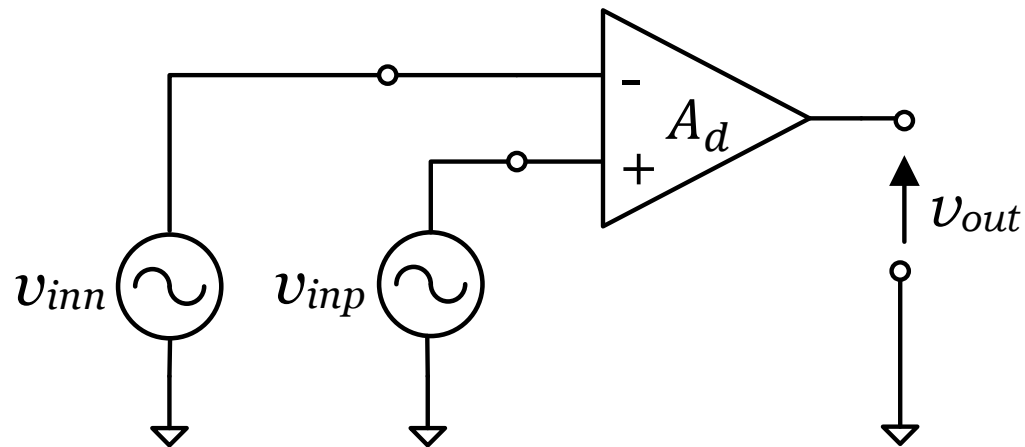
増幅器の動作モデルでは無視したが、実際の増幅器では、トランジスタを適切に動作させるために、入力端子に直流電圧を加える必要がある。この直流電圧は**バイアス電圧(Bias voltage)**または**直流バイアス電圧(DC bias voltage)**と呼ばれる。差動増幅器を使用すると、この問題を回避できる。



$V_{bias}$  が適切な電圧でないと増幅器は動作しない。

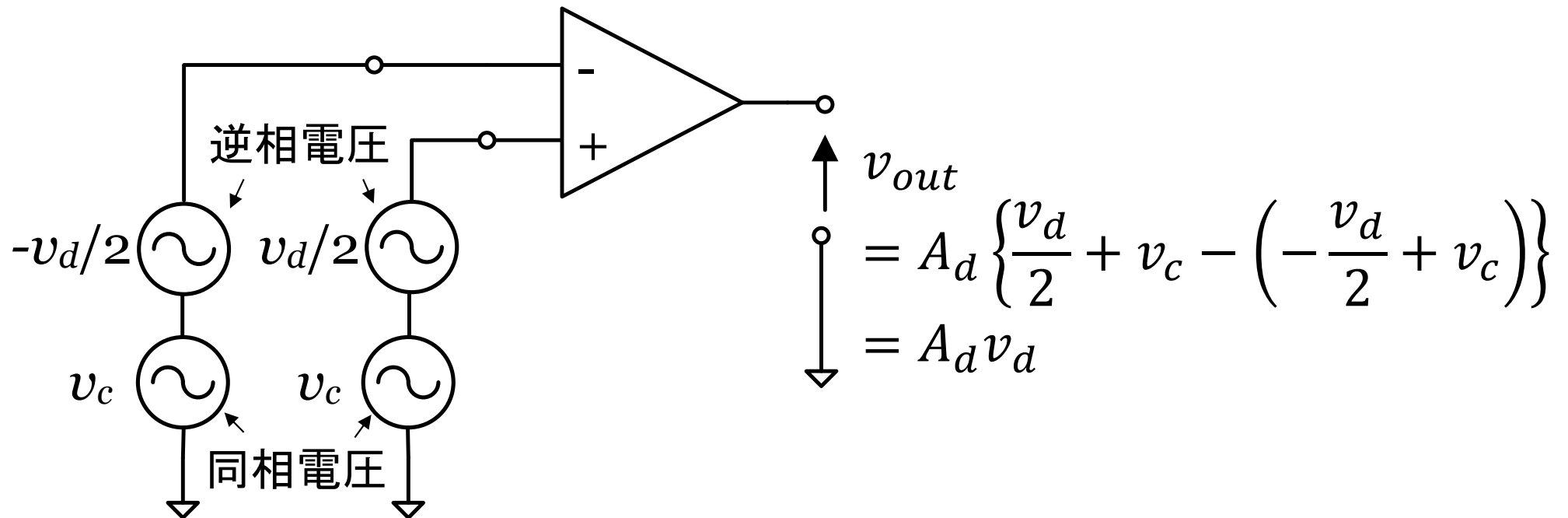
# 差動増幅器(Differential amplifier) の機能

$$v_{out} = A_d(v_{inp} - v_{inn})$$



2つの入力電圧の差を取ってから増幅する。 $A_d$ は、**差動利得(Differential gain)**と呼ばれる。

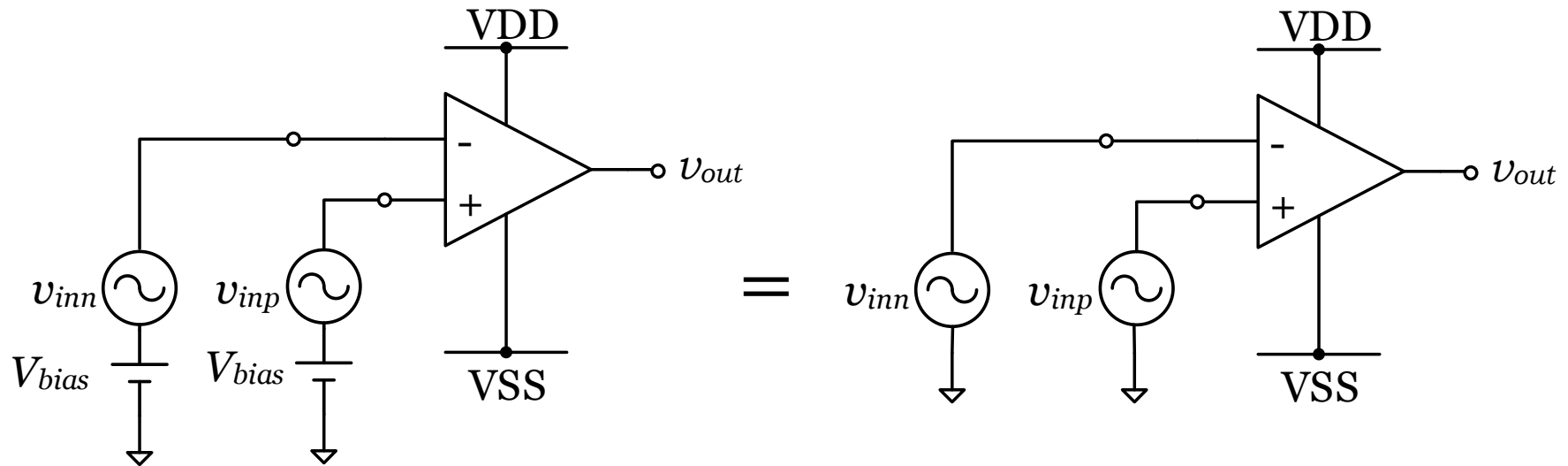
# 同相信号と差動信号



- 2つの電圧の位相が逆である $v_d$  (または $-v_d$ )は、**逆相電圧(Differential voltage)**と呼ばれる
- 2つの電圧の位相が同じである $v_c$ は、**同相電圧(Common mode voltage)**と呼ばれる
- 差動増幅器は、逆相電圧成分のみを増幅し、同相電圧成分は除去する

# 差動増幅器の利点1

差動増幅器の2つの入力端子に加えられたバイアス電圧は、同相電圧として除去されるため加えなくてもよい。

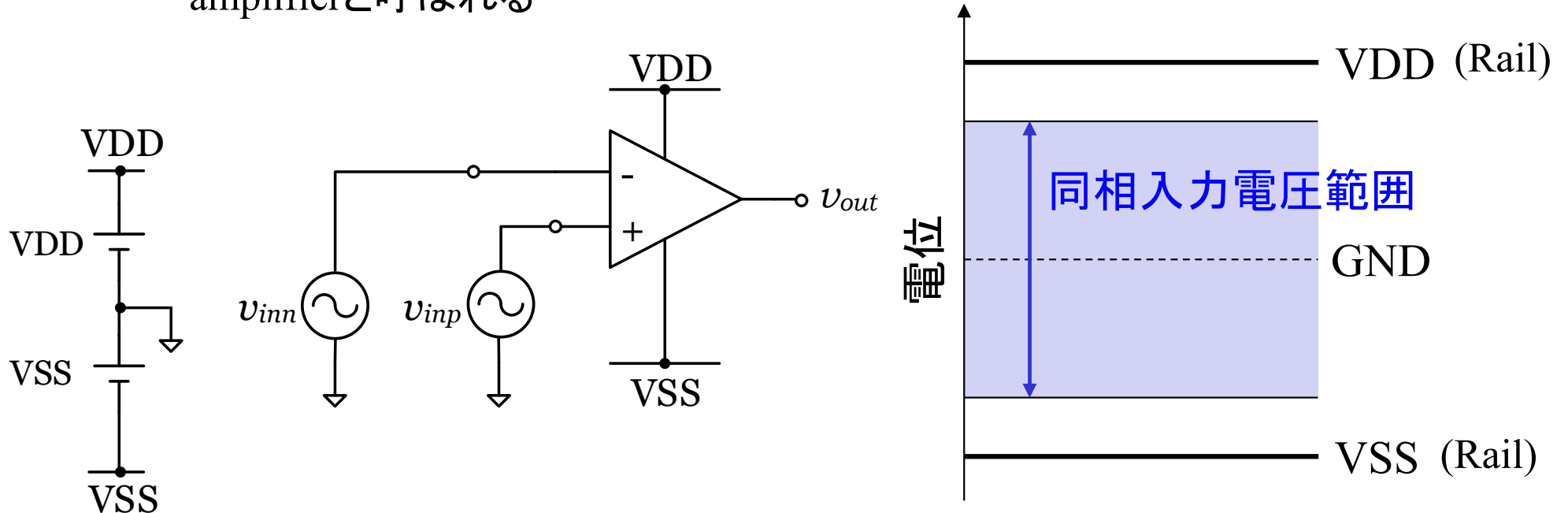


$$v_{out} = A_d \{ v_{inp} + V_{bias} - (v_{inn} + V_{bias}) \} = A_d (v_{inp} - v_{inn})$$



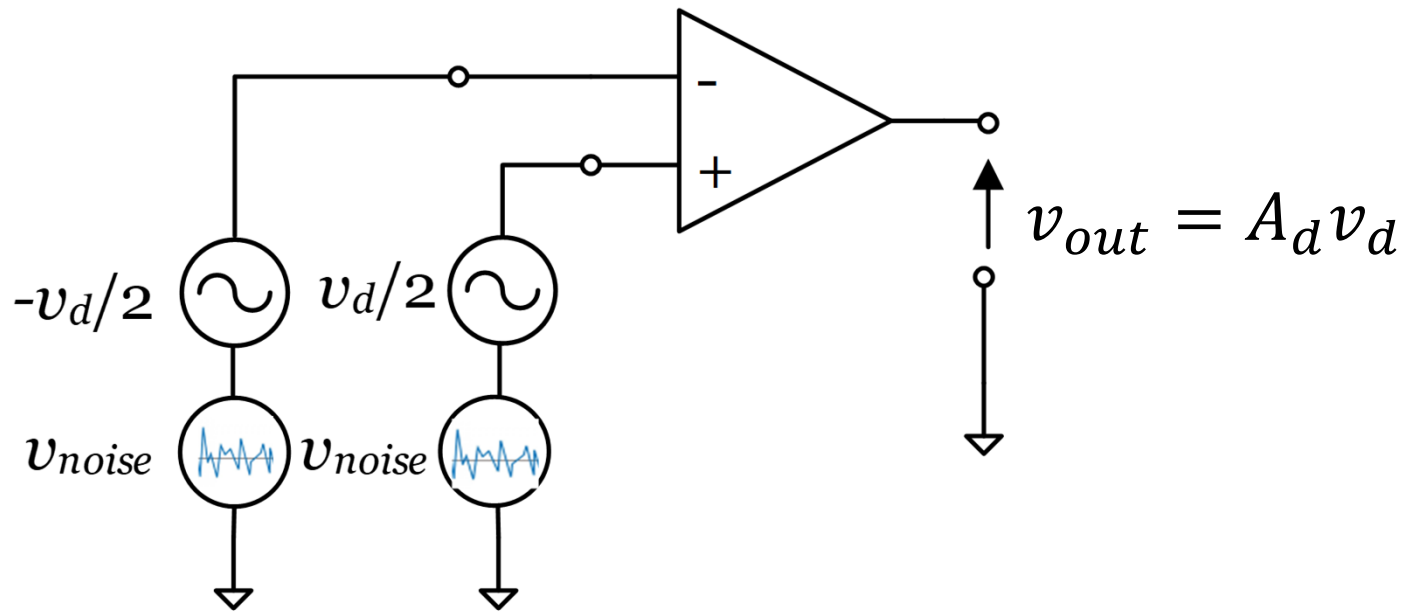
# 同相入力電圧範囲

- 差動増幅器は、バイアス電圧が必要ないため(2つの入力にバイアスを加えると除去される)、GND電位を、同相入力電圧範囲(Input common-mode voltage range)内で自由に設定できる
  - 同相入力電圧範囲は、差動増幅器の回路方式に依存する
  - 同相入力電圧範囲がVSS~VDDより広い差動増幅器は、Rail-to-Rail amplifierと呼ばれる



# 差動増幅器の利点2

同相雑音(Common-mode noise)は、差動増幅を行うと除去され、差動電圧信号のみが増幅される。同様に、偶数次の歪みも除去される。



# 演算増幅器

- アナログ信号処理では、**演算増幅器(Operational amplifier, OPA)**と呼ばれる高性能差動増幅器が多用される
- OPAは差動増幅器の一種だが、下記の特長を持つ
  - 入力インピーダンスが高い( $10\text{G}\Omega \sim 1\text{T}\Omega$ )
  - 出力インピーダンスが低い( $10\text{m}\Omega \sim 10\Omega$ )
  - 直流利得が非常に大きい( $120\text{dB} \sim 160\text{dB}$ )
  - 利得帯域幅積GBPが外部回路によって変わらない

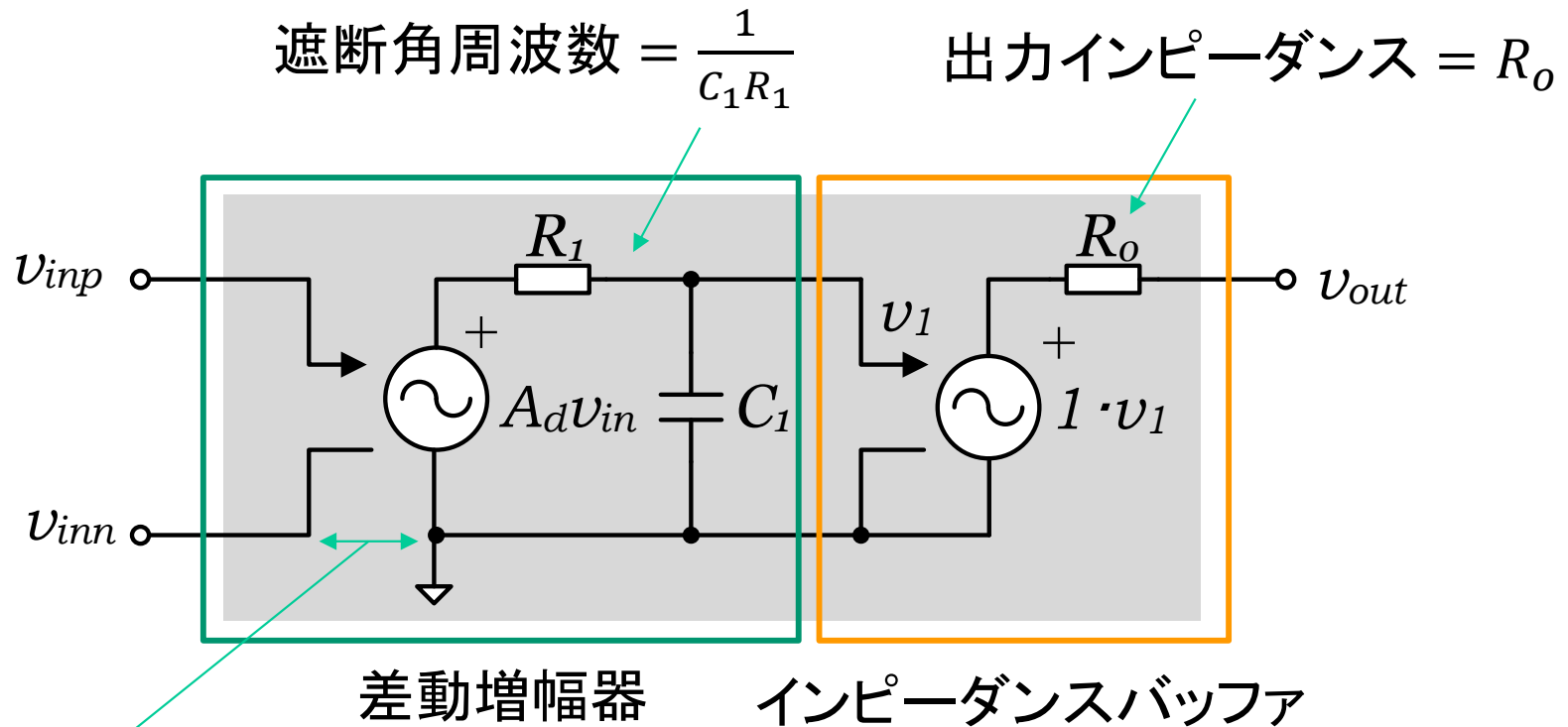
演算増幅器の応用回路は、電子回路及び演習C, Dで扱う。



市販の単体OPA

単体でも広く使用されているが、特に集積回路の中で、要素回路(部品)として多用される

# 演算増幅器の動作モデル



接続されていないことに注意

インピーダンスバッファがあるため、負荷としてキャパシタを使用しても、GBPが変化しない。

# 第4章のまとめ

- 増幅器の動作モデル
  - 増幅器は電圧または電流制御電源を用いた等価回路で表すことができる
  - 動作モデルにより、理想的増幅器や特定の特性だけ考慮した等価回路を作成することができるため、増幅器を含んだ回路の解析で用いられることが多い
- 増幅器の特性
  - 増幅器の動作量には、電圧利得、電流利得、電力利得、入力インピーダンス、出力インピーダンスがある
  - 増幅回路の周波数特性は、直流利得、遮断周波数、利得帯域幅積(またはユニティゲイン周波数)で表される
  - 増幅器の性能は、利得帯域幅積(またはユニティゲイン周波数)により表される
  - 増幅器の特性は、増幅器に接続したインピーダンスによって変わる
- 増幅器の2端子回路パラメータ
  - 増幅器の特性は、2端子対回路パラメータを用いて表すことができる(ただし、理想的な増幅器の特性は表せない)
  - 利得(伝達関数)は、ポートに接続したインピーダンスによって変わるが、2端子対回路パラメータは、ポートに接続したインピーダンスの影響を受けない
- 差動増幅器
  - アナログ信号処理では、バイアス電圧が不要で、コモンモード雑音除去能力のある差動増幅器が多用される