

# 第5章 インピーダンスバッファ

入力インピーダンスと出力インピーダンス

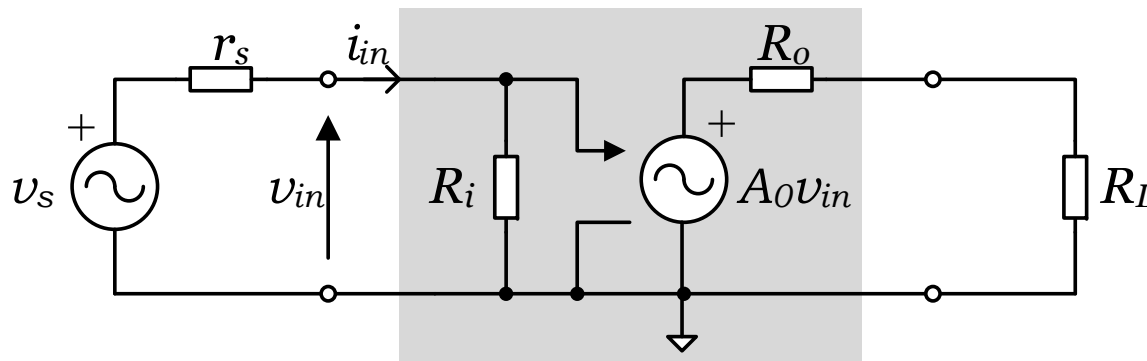
入カインピーダンス、出カインピーダンスの電圧利得への影響

## 5.1 入出カインピーダンス

# (復習) 入出力インピーダンスの 計算法

入力インピーダンス

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

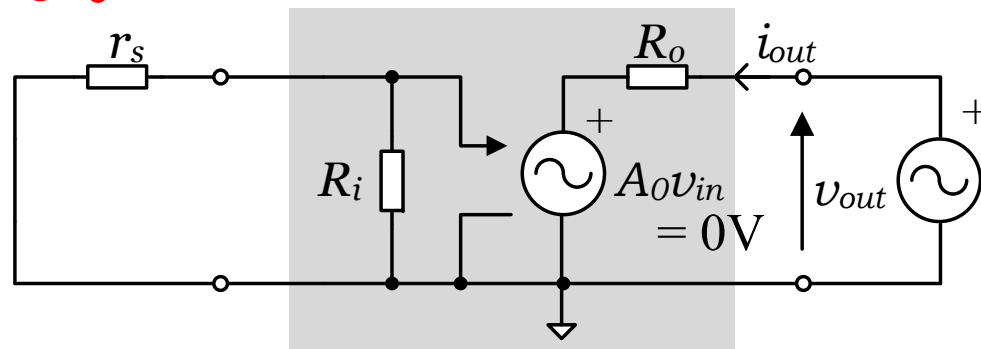


$R_L$ を付けた  
ままで計算  
する。

入力信号を0にして計  
算する。 $r_s$ はそのまま。

出力インピーダンス

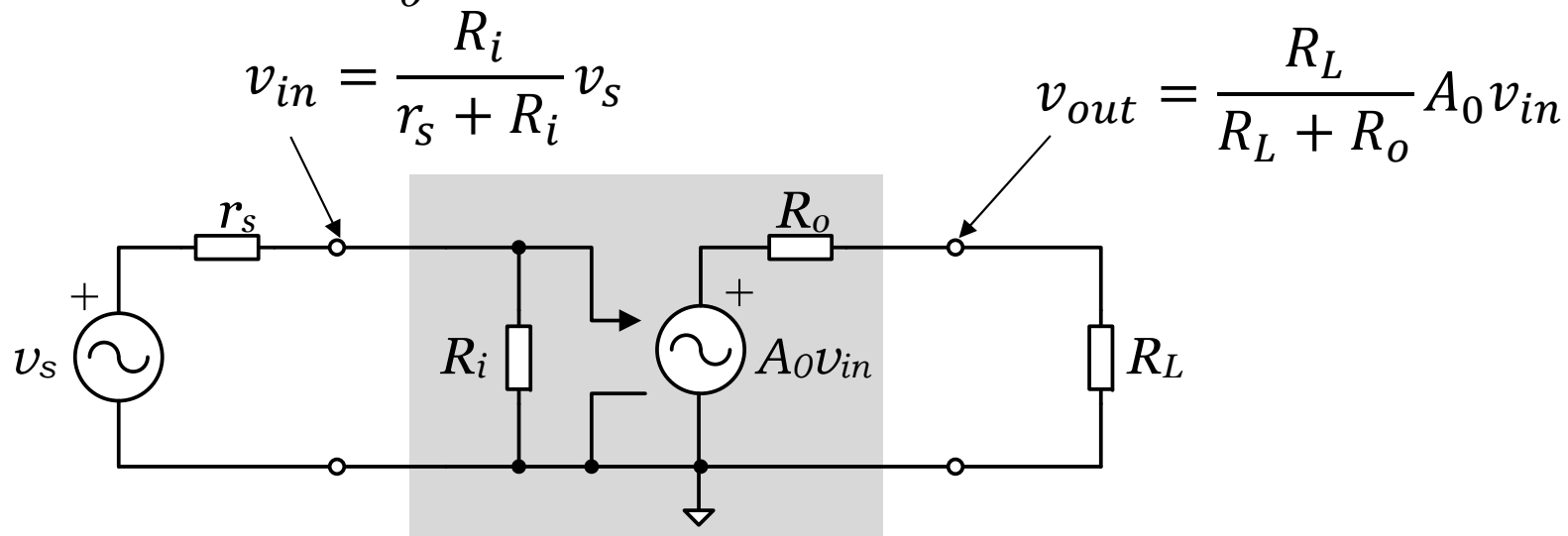
$$\rightarrow Z_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = R_o$$



測定用信号  
 $v_{out}$   $R_L$ は外す。

# 信号源内部抵抗および負荷の影響

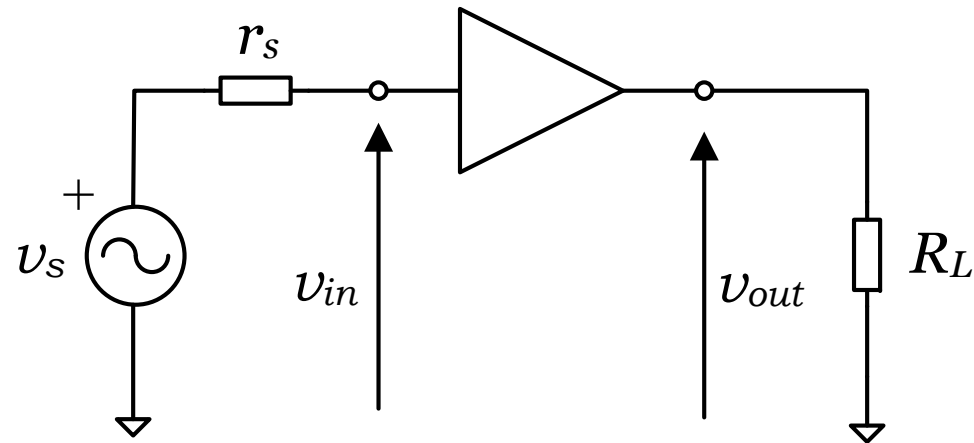
回路同士を接続するためには、回路の入カインピーダンス $R_i$ 、出カインピーダンス $R_o$ を考慮する必要がある。



$$r_s, R_L \text{ を考慮した利得 } Gain = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{R_i}{r_s + R_i} \frac{R_L}{R_L + R_o} A_0$$

$R_o = 1\text{MEG}$ ,  $R_L = 1\text{k}$ ,  $r_s = R_i$  の場合、 $Gain \cong 0.0005A_0$  しかない。

# (注意) 信号源の内部インピーダンスを考慮した増幅器の利得



通常の電圧利得の定義  
(= 伝達関数)

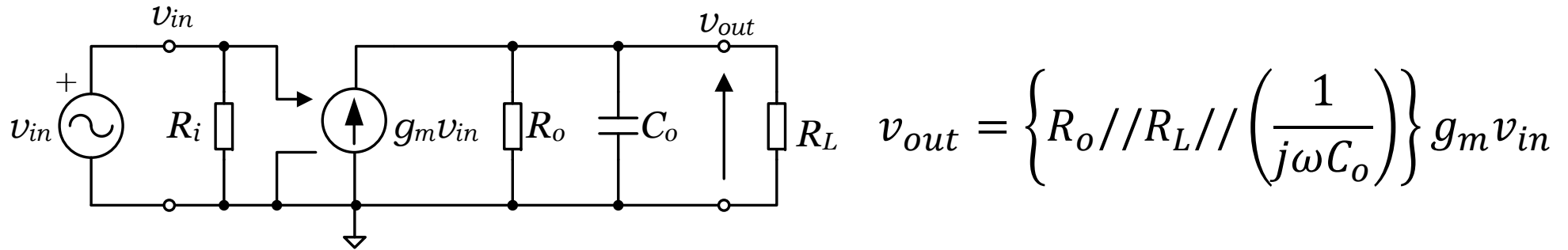
$$Gain = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

信号源の内部インピーダンス  
を考慮した電圧利得の定義

$$Gain = \frac{v_{out}}{v_s}$$

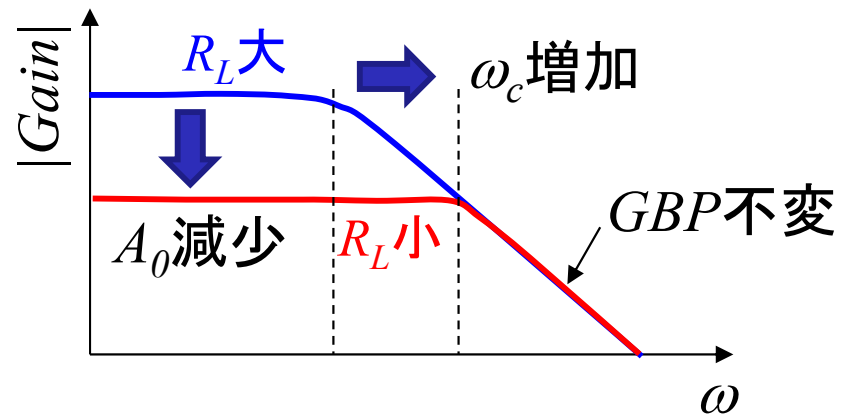
本来の利得ではなく、 $r_s$ を考慮した利得を求める場合があるので、注意すること。どちらの定義でも、負荷 $R_L$ の影響は考慮する必要がある。

# 負荷抵抗と周波数特性の関係

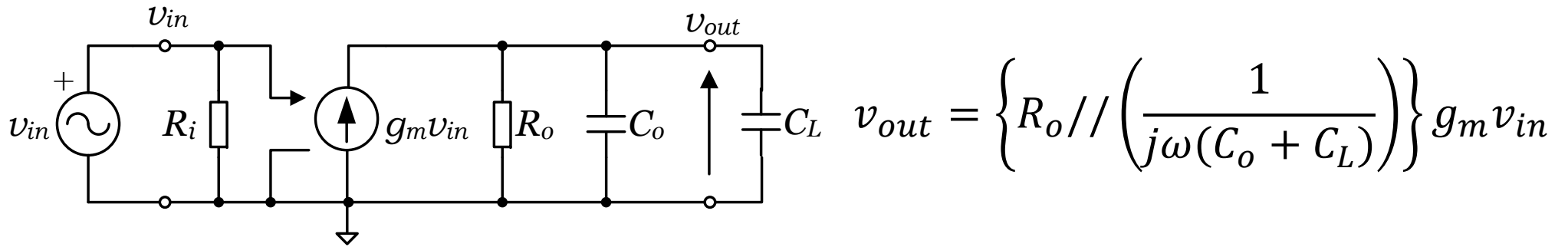


$$Gain = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \left\{ R_o // R_L // \left( \frac{1}{j\omega C_o} \right) \right\} g_m = \frac{g_m}{\frac{1}{R_o // R_L} + j\omega C_o} = \frac{g_m (R_o // R_L)}{1 + j\omega C_o (R_o // R_L)}$$

$$\left[ \begin{array}{l} A_0 = g_m (R_o // R_L) \\ \omega_c = \frac{1}{C_o (R_o // R_L)} \\ GBP = A_0 \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{C_o} \end{array} \right.$$

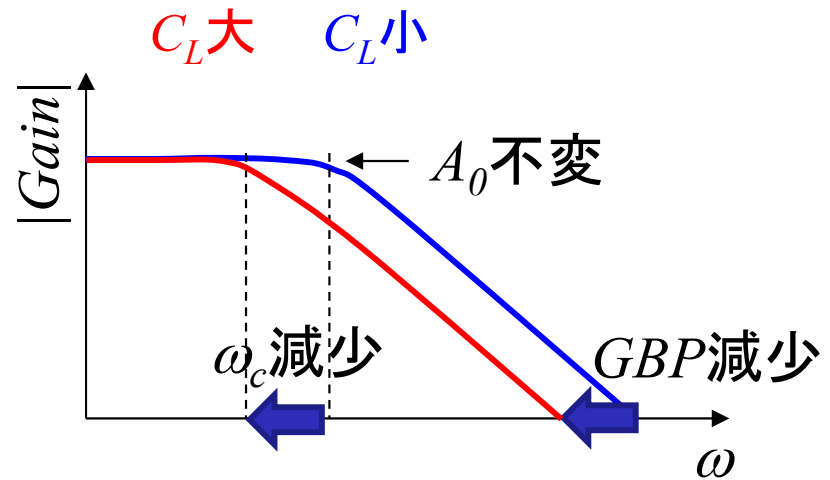


# 負荷容量と周波数特性の関係



$$Gain = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \left\{ R_o // \left( \frac{1}{j\omega(C_o + C_L)} \right) \right\} g_m = \frac{g_m}{\frac{1}{R_o} + j\omega(C_o + C_L)} = \frac{g_m R_o}{1 + j\omega(C_o + C_L)R_o}$$

$$\left[ \begin{array}{l} A_0 = g_m R_o \\ \omega_c = \frac{1}{(C_o + C_L)R_o} \\ GBP = A_0 \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{(C_o + C_L)} \end{array} \right.$$

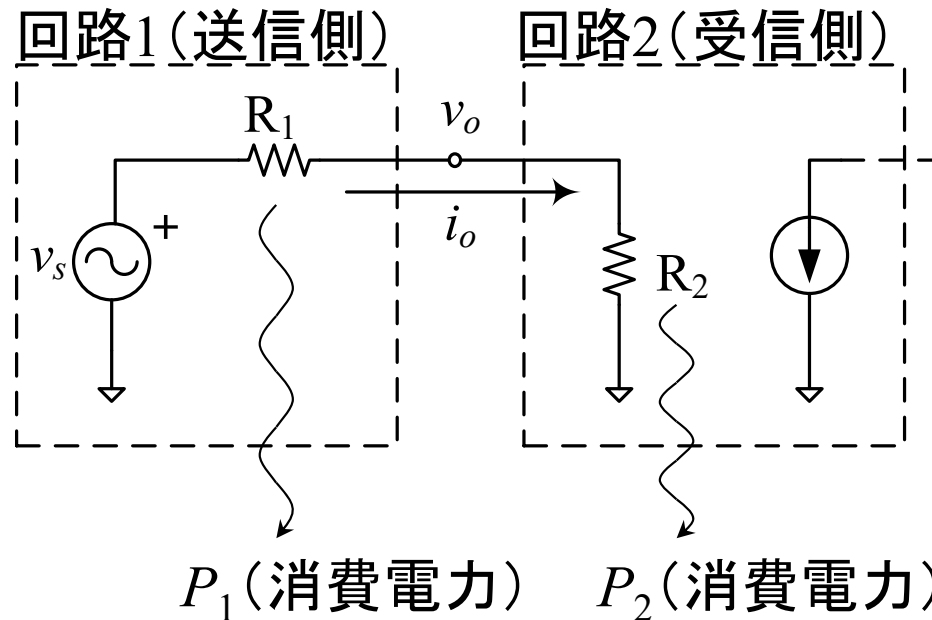


電力伝送効率の最適化

## 5.2 インピーダンスマッチング



# インピーダンスマッチングの条件



$$\begin{cases} v_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_s \\ i_o = \frac{1}{R_1 + R_2} v_s \end{cases}$$

回路2内での消費電力

$$P_2 = v_o \cdot i_o = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} v_s^2$$

変数 $R_2$ に対する $P_2$ の最大条件

$$\frac{\partial P_2}{\partial R_2} = \frac{R_1 - R_2}{(R_1 + R_2)^3} v_s^2 = 0$$

インピーダンスマッチング条件下で、全消費電力の1/2が、受信側の回路に伝達できる。

$$\begin{cases} P_2 = \frac{1}{4R_2} v_s^2 \\ P_1 = \frac{1}{4R_1} v_s^2 \end{cases}$$

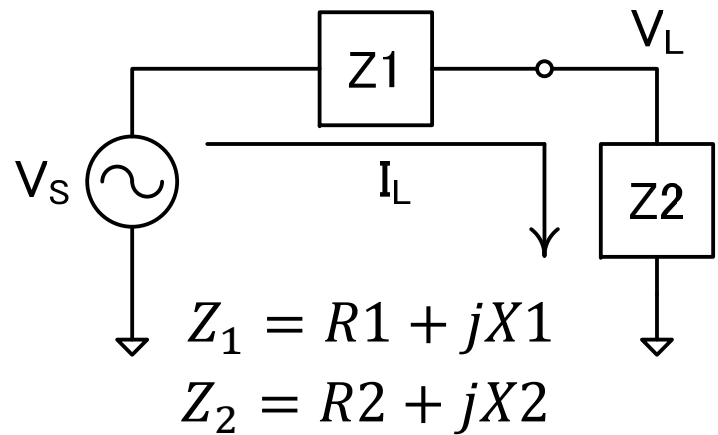
$R_1 = R_2$  のとき  $P_2$  は最大となる。

Impedance matching という。

# クイズ

一般的に電子回路の入出力インピーダンスはRLCの成分を含んでおり、複素数で表される。信号源のインピーダンス $Z_1$ 、出力インピーダンス $Z_2$ が複素数の場合、インピーダンスマッチングの条件(信号電力の伝送が最大となる条件)を求めよ。

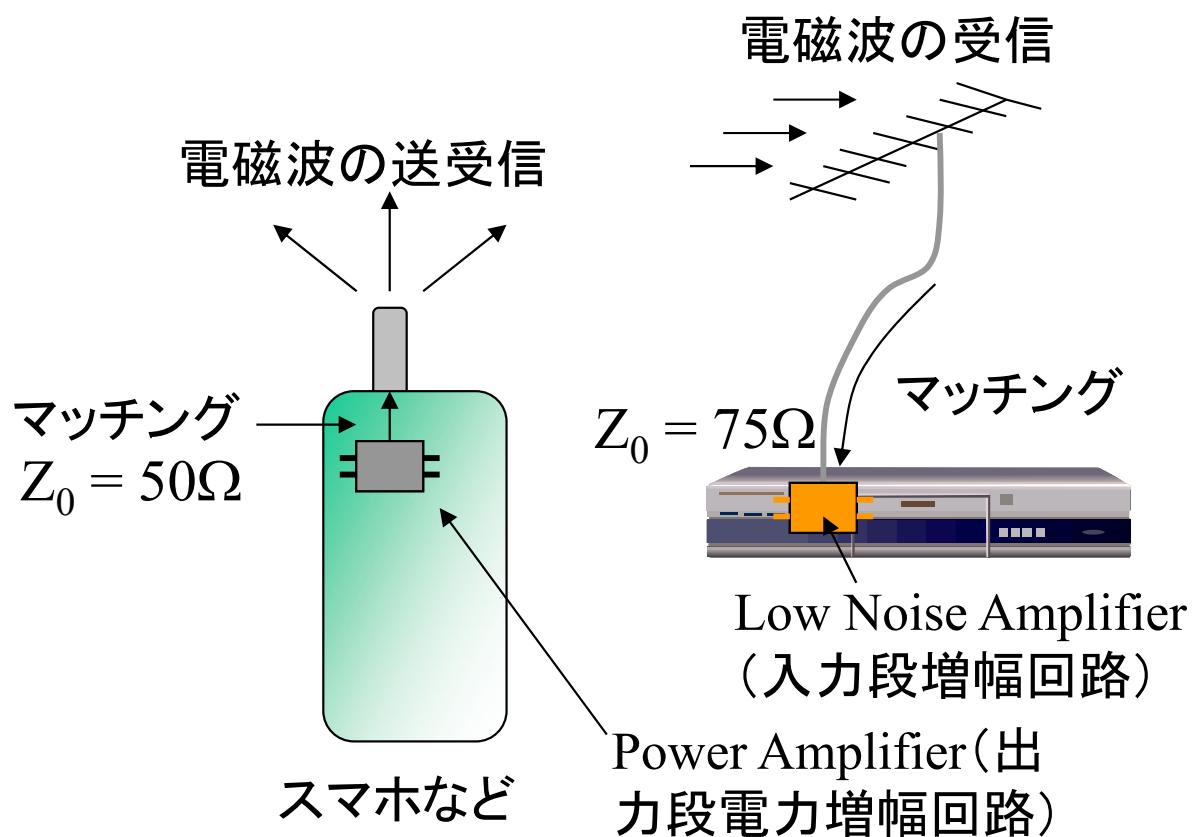
# クイズの解答



$$\left[ \begin{array}{l} V_L = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_S \\ I_L = \frac{1}{Z_1 + Z_2} V_S \end{array} \right.$$

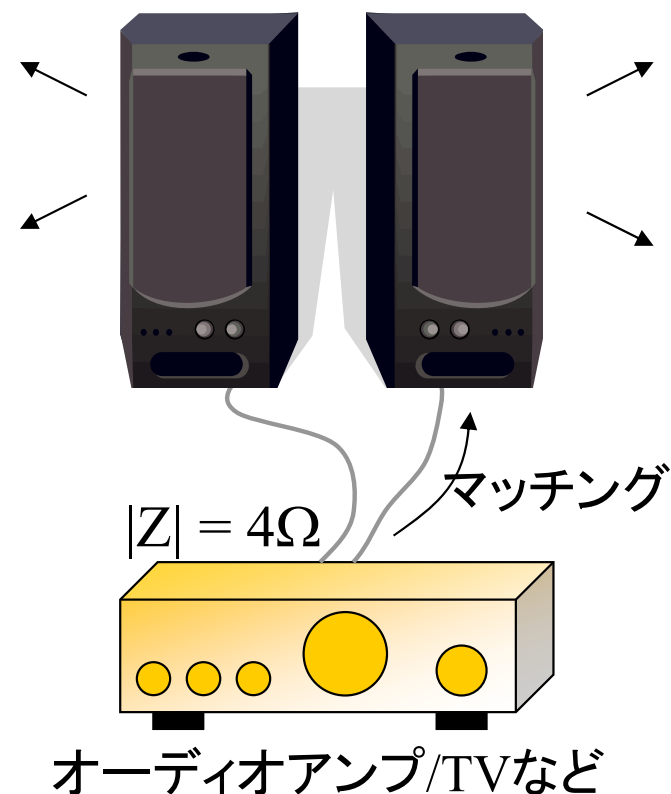
# インピーダンスマッチングの例

## アンテナ



## スピーカ/イヤホン/マイク

音(機械的エネルギー)の放射



(注)  $Z_0$ は線路やアンテナの特性インピーダンスと呼ばれ、正確にはインピーダンスではない。次ページを参照。

# (参考) インピーダンスマッチングの必要性

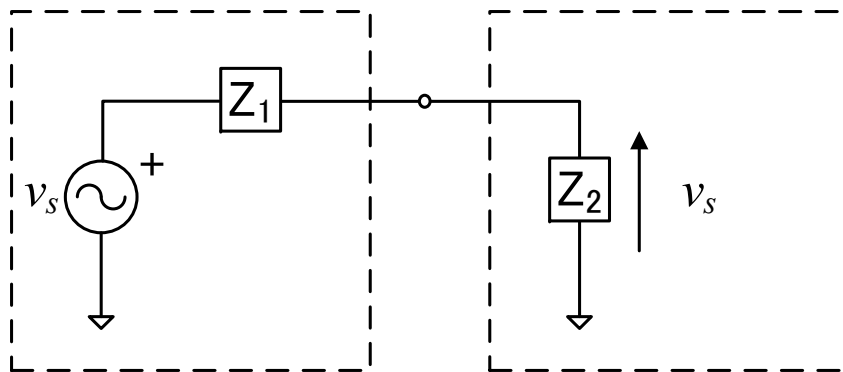
- インピーダンスマッチングが必要なケース
  - 電力の伝送が必要な場合 (スピーカ/マイク、無線送電など)
  - 信号を波動として扱う必要がある場合 (無線通信などの高周波信号)
- 高周波信号でインピーダンスマッチングが必要となる理由
  - 高周波信号は波長が短く、配線やアンテナを波動として伝わる
  - インピーダンスマッチング条件を満たしているとき信号波の反射係数が0となる (満たしていなければ反射波が発生し信号が伝送されない)
    - 回路間のインピーダンスマッチングだけではなく、ケーブルや配線もインピーダンスマッチングしなければならない
    - 高周波ケーブル、高周波対応プリント基板、コネクタなどの伝送線路には、特性インピーダンス ( $Z_0$  と表記される) があり、接続した回路やデバイスのインピーダンスをマッチングさせる必要がある (規格品の高周波ケーブル、コネクタ等は  $Z_0 = 50\Omega$  となるように設計されているが、 $Z_0$  によりジュール熱が発生するわけではない)
    - 特性インピーダンスの定義や性質は、無線工学などで別途学ぼう

信号の伝送効率を高める回路

## 5.3 インピーダンスバッファ

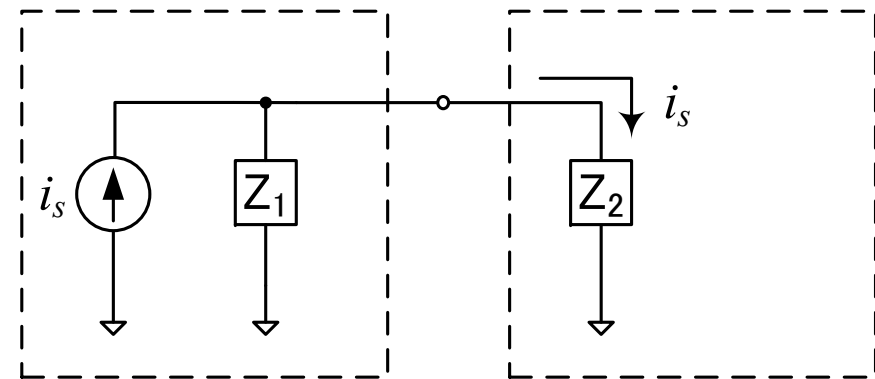
# 情報伝送のための条件

- 広い周波数帯域でインピーダンスマッチングを行う整合回路を設計することは難しい(特定周波数なら可能)
- **情報の伝送**を行えばよい場合は、電力を伝送しなくても、電圧信号か電流信号のどちらか一方を伝送すればよい



$$Z_1 = 0 \text{ または } Z_2 = \infty$$

電圧信号  $v_s$  が100%伝送される条件



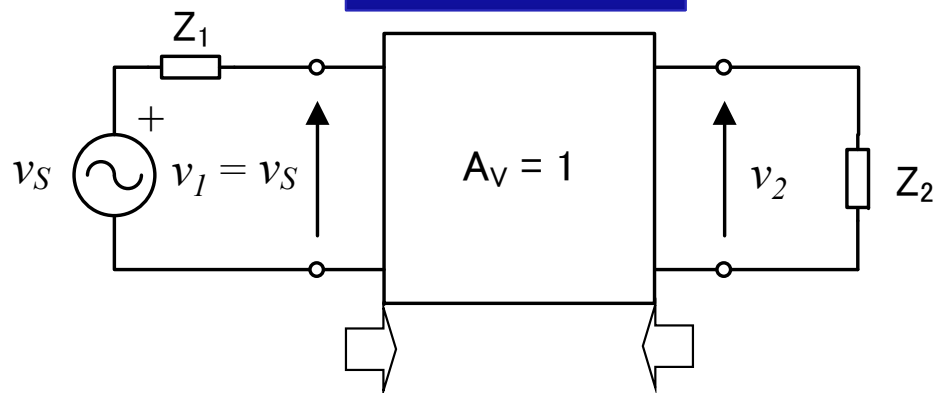
$$Z_1 = \infty \text{ または } Z_2 = 0$$

電流信号  $i_s$  が100%伝送される条件

# 理想的なインピーダンスバッファ

- 入力と出力のインピーダンスが大きく異なる増幅回路をインピーダンスバッファ (Impedance buffer) という
- 利得は必要ないが (1倍でよい)、動作周波数帯域が広いことが必要
- インピーダンスバッファは、電圧信号または電流信号を100%伝送するために使用される (インピーダンス整合はしない)

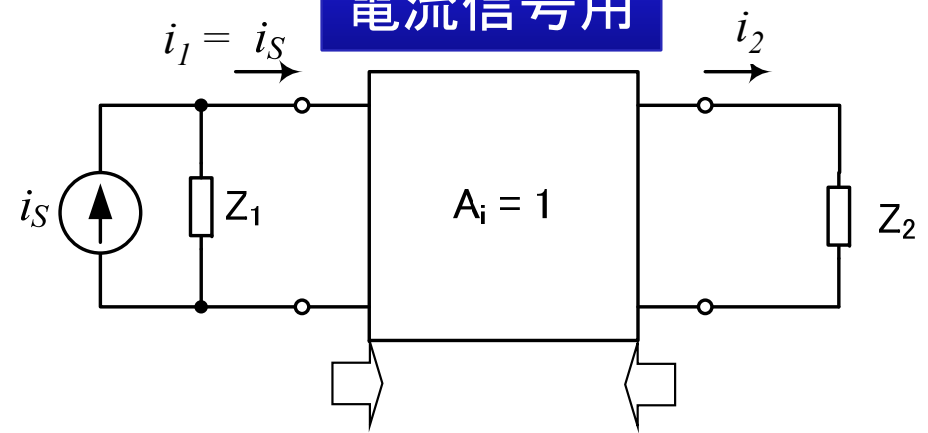
電圧信号用



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

$Z_1, Z_2$  に関係なく常に  $v_2 = v_S$

電流信号用



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

$Z_1, Z_2$  に関係なく常に  $i_2 = i_S$

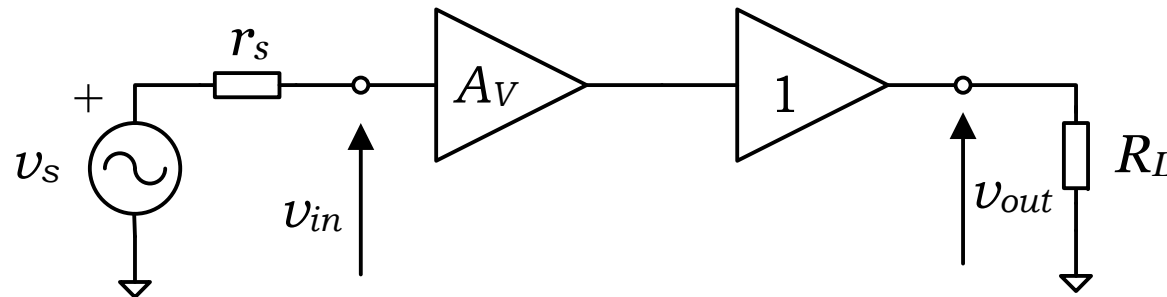


# インピーダンスバッファ付き増幅器

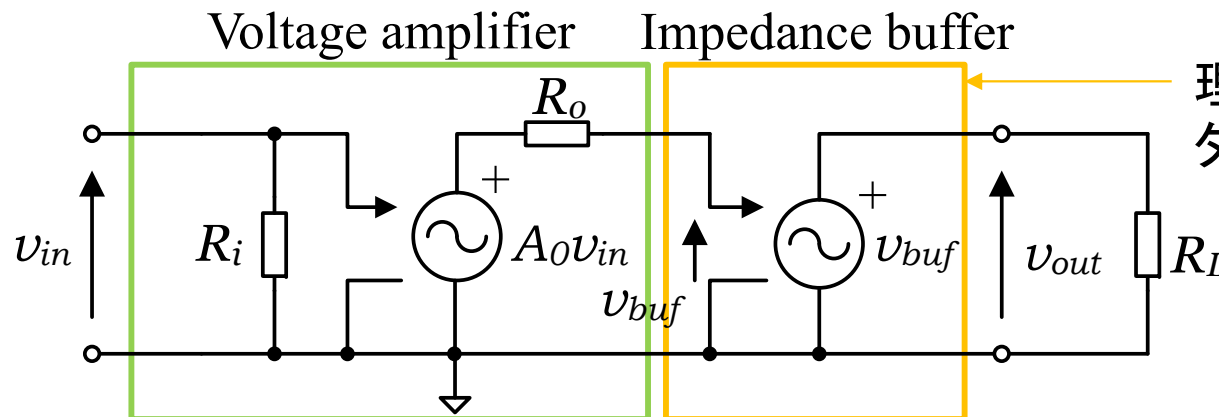
高電圧利得と低出力インピーダンス(負荷 $R_L$ の影響を受けない)を両立させる場合は、インピーダンスバッファを用いて2段構成にする。

電圧増幅器

インピーダンスバッファ



$$Gain = \frac{v_{out}}{v_{in}} = A_V$$



理想的インピーダンスバッファ

$$Gain = \frac{v_{buf}}{v_{in}} \frac{v_{out}}{v_{buf}} = A_0$$

$R_L$ の影響を受けない。

$R_o$ に電流が流れないため  $v_{out} = v_{buf} = A_0 v_{in}$

# 実際のインピーダンスバッファ

出力インピーダンスの低い増幅器がインピーダンスバッファとして使用される。しかし、増幅器の電圧利得は、 $A_0 = g_m(R_o // R_L)$ で表されるため、出力インピーダンス $R_o = 0$ にすると、 $g_m = \infty$ にしない限り、 $A_0 = 0$ になる。このため、理想的な電圧信号用のインピーダンスバッファを実現することができない。



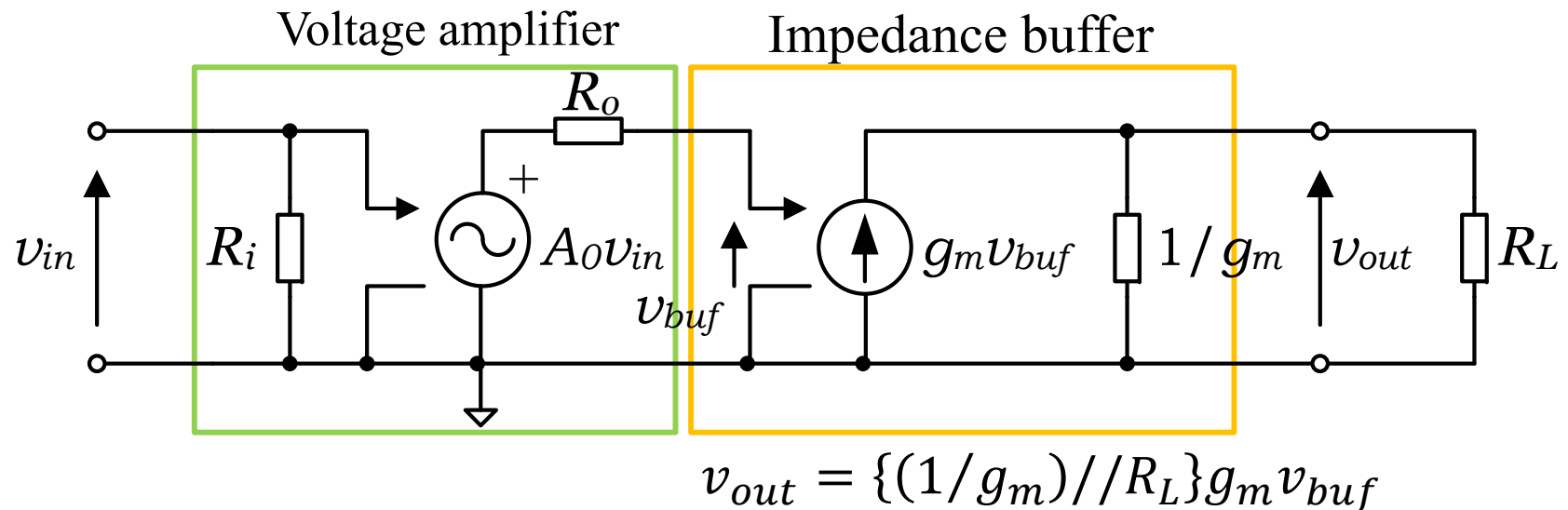
$A_0 = 1$  (0dB)まで電圧利得を下げた増幅器がインピーダンスバッファとして代用される(ただし、出力インピーダンスは0ではない)。

負荷 $R_L = \infty$ (出力端子開放)のとき、 $A_0 = g_m R_o = 1$ より、

$$R_o = \frac{1}{g_m} \quad (\text{実際のインピーダンスバッファの出力インピーダンス})$$

(参考)  $g_m$ は、トランジスタにより調整することができる。 $R_i$ の調整も容易。

# 実際のインピーダンスバッファの動作モデル

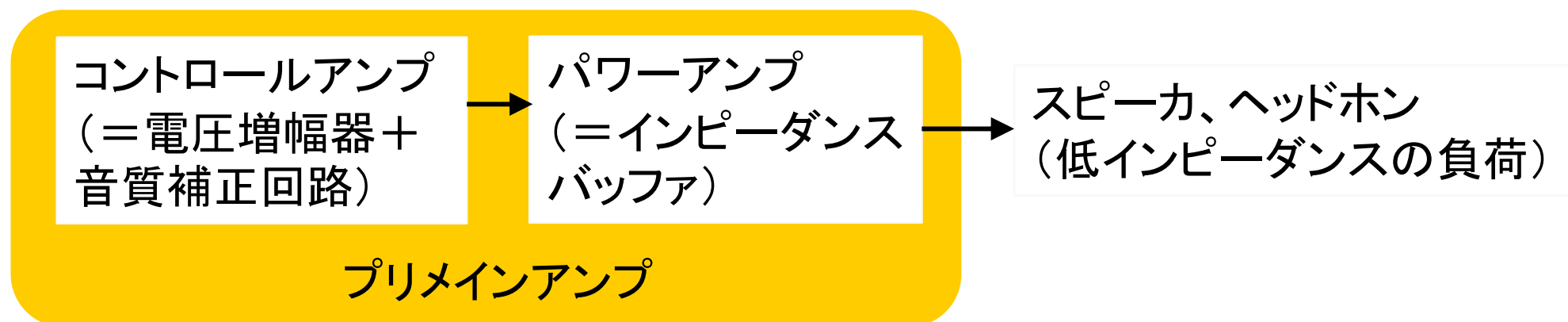


インピーダンスバッファの利得

$$Gain = \frac{v_{out}}{v_{buf}} = \{(1/g_m) // R_L\} g_m = \frac{g_m}{g_m + \frac{1}{R_L}} = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L} \cong 0.5 \text{ or } 1$$

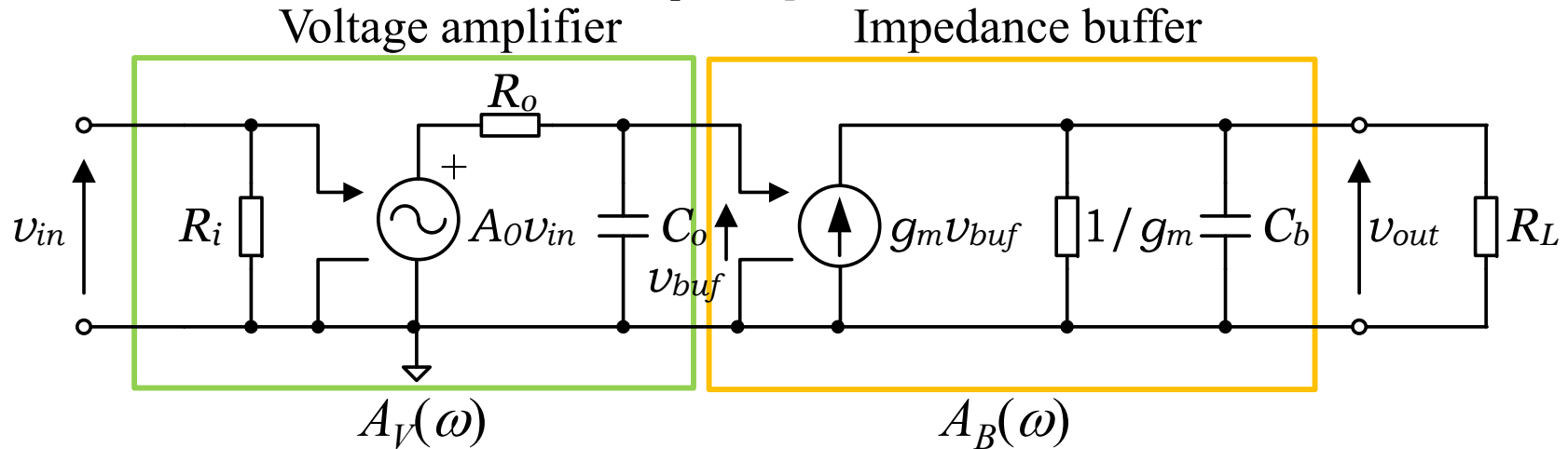
通常は  $g_m R_L \gg 1$  が成り立つため、利得は1となる。また、 $g_m R_L = 1$  とすることにより、インピーダンスマッチングを行う。 $g_m$  の値は、トランジスタにより調整できる。

# (参考) パワーアンプ



1. オーディオアンプ、楽器用アンプ等は、電圧増幅器とインピーダンスバッファの2段構成となっており、**低インピーダンスのスピーカやヘッドホンを駆動(Drive)するインピーダンスバッファをパワーアンプ(Power amplifier)と呼んでいる。**
2. 無線通信回路では、アンテナのインピーダンスとインピーダンスマッチングした送信用の増幅器をパワーアンプと呼んでいる。

# インピーダンスバッファの周波数特性



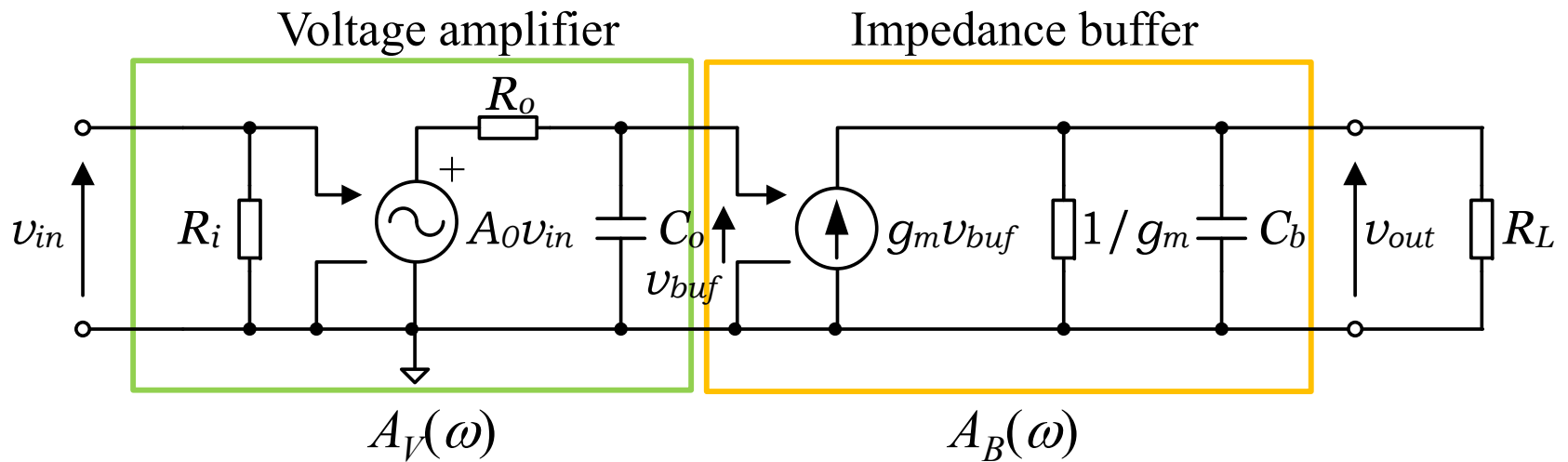
$$A_B(\omega) = \frac{v_{out}}{v_{buf}} = \left\{ \left( \frac{1}{j\omega C_b} \right) // \left( \frac{1}{g_m} \right) // R_L \right\} g_m = \frac{g_m}{j\omega C_b + g_m + \frac{1}{R_L}} = \frac{\frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L}}{1 + j\omega C_b \frac{R_L}{1 + g_m R_L}} = \frac{A_{B0}}{1 + j\omega/\omega_b}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_v = \frac{1}{C_o R_o} \quad (A_V(\omega) \text{の遮断角周波数}) \\ \omega_b = \frac{1}{C_b} \frac{1 + g_m R_L}{R_L} \cong \frac{g_m}{C_b} \quad (\text{通常、} g_m R_L \gg 1) \\ A_{B0} = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L} \cong 1 \quad (\text{通常、} g_m R_L \gg 1) \end{array} \right.$$

結果として、 $\omega_v \ll \omega_b$  ( $C_o \cong C_b, R_o \gg 1/g_m$ )

インピーダンスバッファは、電圧増幅器に比べて遮断周波数が非常に高いため、周波数特性は無視できる。

# インピーダンスバッファ付き増幅器の周波数特性



$$A_V(\omega) = \frac{v_{buf}}{v_{in}} = \frac{1}{R_o + \frac{1}{j\omega C_o}} A_0 = \frac{A_{V0}}{1 + j\omega C_o R_o} = \frac{A_{V0}}{1 + j\omega/\omega_v} \quad A_B(\omega) = \frac{A_{B0}}{1 + j\omega/\omega_b}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_v = \frac{1}{C_o R_o} \quad (A_V(\omega) \text{の遮断角周波数}) \\ \omega_b \cong \frac{g_m}{C_b} \quad (A_B(\omega) \text{の遮断角周波数}) \end{array} \right.$$

全体の利得

$$A_V(\omega) \cdot A_B(\omega) = \frac{A_{V0}}{1 + j\omega C_o R_o} \frac{1}{1 + j\omega \frac{C_b}{g_m}}$$

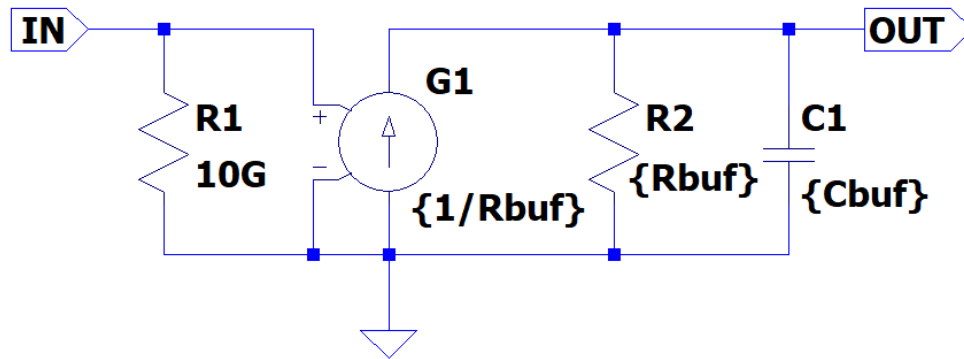
➡  $R_L$ の影響を受けない

# 課題5.1

1. インピーダンスバッファの効果を確認するため、次ページ以降の回路のシミュレーションを実施し、上側と下側の各回路について、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、上下各回路において、 $CL = 1\text{fF} \sim 1000\text{fF}$ まで10倍ずつ変更した場合の、直流利得、遮断周波数、GBPを求めよ。
3. インピーダンスバッファが理想的であれば、 $CL$ を変更しても周波数特性が変わらないはずであるが、シミュレーションでは、完全には $CL$ 依存性を取り除けない。
  - どの部分がどのように変わったか。
  - なぜ、インピーダンスバッファを付けても $CL$ の影響を受けたのか。理由について具体的に考察せよ。(インピーダンスバッファが理想的ではなかったというのは×)

# シミュレーション手順1

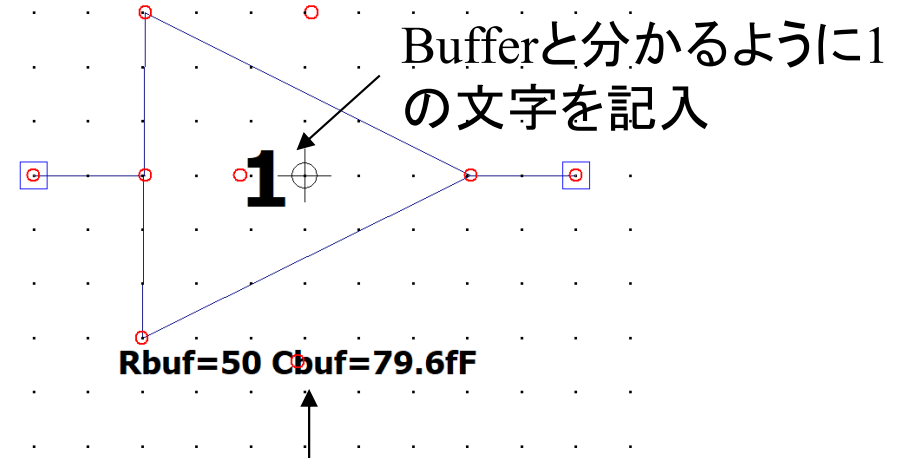
インピーダンスバッ  
ファのモデルの作成



ファイル名の例: ibuf.asc

インピーダンスバッ  
ファのシンボルの作成

**<InstName>**



メニューのEdit - Attributes - Edit Attributes  
で、SpiceLineの行に設定

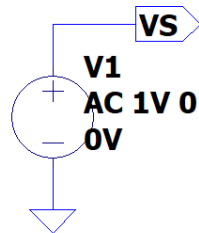
ファイル名の例: ibuf.asy



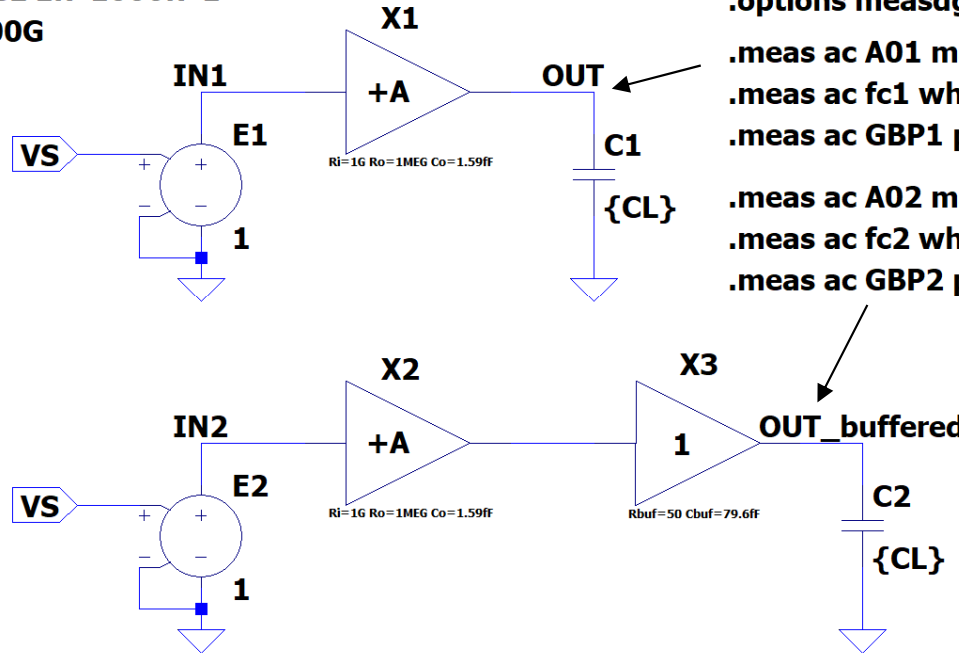
# シミュレーション手順2

## シミュレーション用回路図の作成

```
.step dec param CL 1fF 1000fF 1  
.ac dec 100 1k 100G
```



信号源



信号源を分配

```
.options meascplxfmt=cartesian  
.options measdgt=12
```

```
.meas ac A01 max mag(V(OUT))  
.meas ac fc1 when mag(V(OUT))=A01/sqrt(2)  
.meas ac GBP1 param A01*fc1
```

```
.meas ac A02 max mag(V(OUT_buffered))  
.meas ac fc2 when mag(V(OUT_buffered))=A02/sqrt(2)  
.meas ac GBP2 param A02*fc2
```

(参考)2つの回路の入力端子を直接接続してしまうと2つ回路の特性が相互干渉するため、比例係数1倍のE1, E2の入力を信号源で駆動し、E1, E2の出力をそれぞれの回路に接続する。2種類の回路を比較するときの常套手段なので覚えておこう。

# 第5章のまとめ

- インピーダンスマッチング
  - 送信側の出力インピーダンスと受信側の入力インピーダンスが共役複素数の時、電力の伝送が最大(50%)となる
  - 電力を伝送する場合や高周波信号の伝送で、インピーダンスマッチングが必要
- インピーダンスバッファ
  - 電圧信号または電流信号の一方を伝送する場合は、インピーダンスバッファが使用される
  - 理想的なインピーダンスバッファの信号伝送効率は100%
  - 増幅回路をインピーダンスバッファとして用いる場合は、電圧利得 = 1 (このとき  $Z_{out} = 1/g_m$ ) となるように回路を調整する
  - インピーダンスバッファを用いることにより、増幅器の周波数特性(直流利得、遮断周波数、GBP)が負荷の影響を受けなくなる