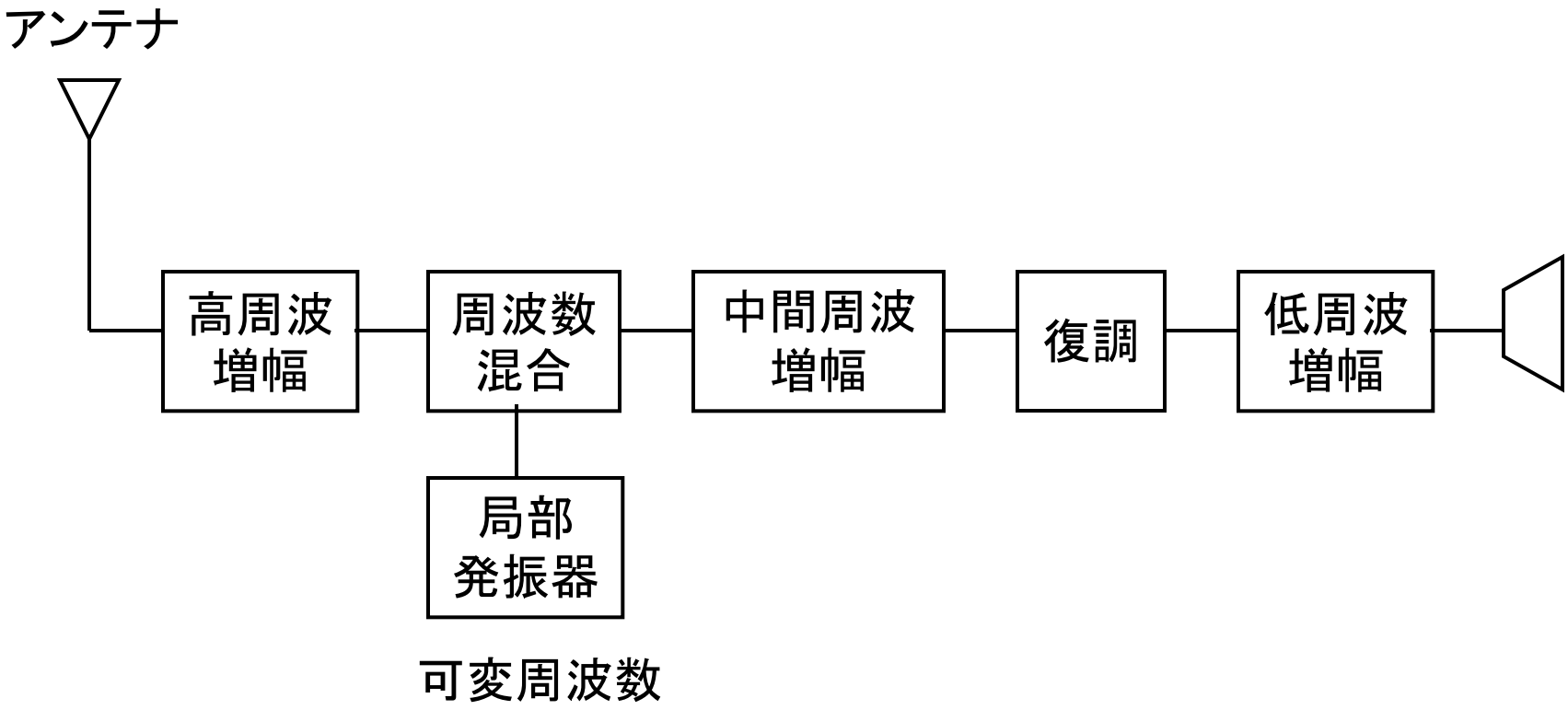
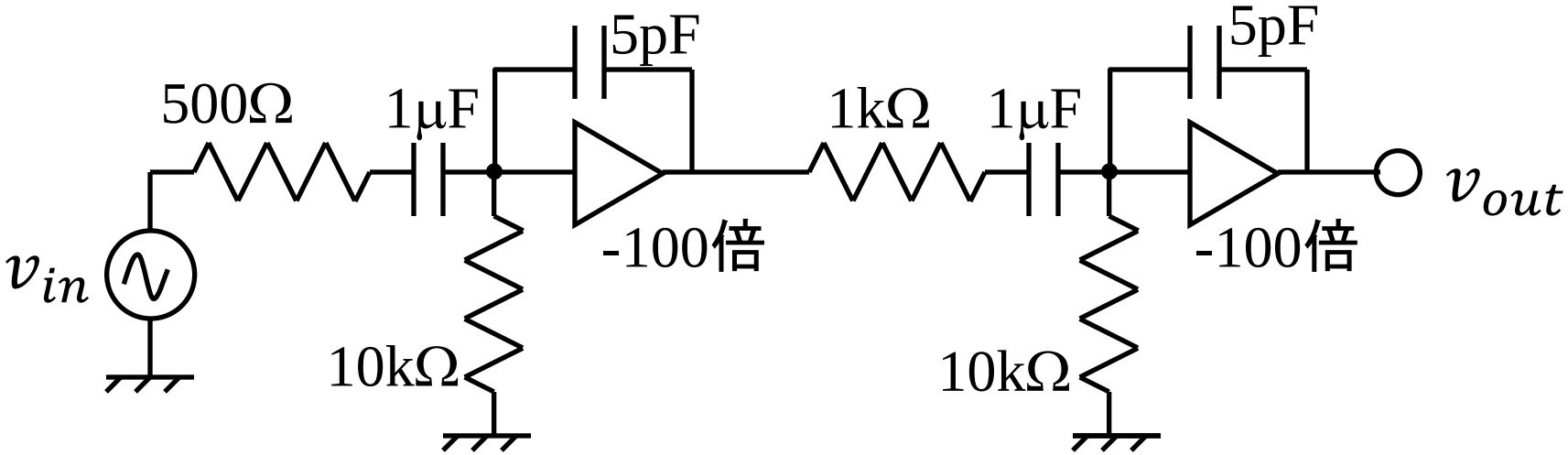
2.増幅器モデルと周波数応答

- 増幅器
  - 小信号増幅器
  - 電力増幅器
- 増幅デバイス
  - MOSFET
  - BJT
- 増幅器
  - 1段
  - 多段

ラジオ受信機



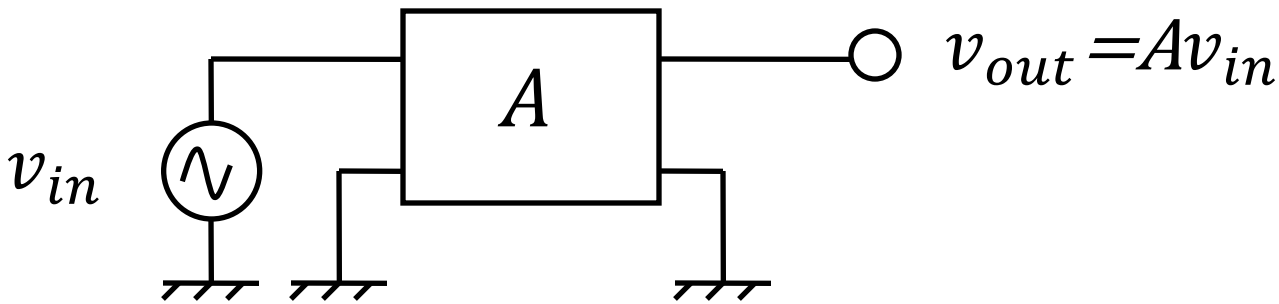
増幅器の例



- 学ぶこと
  - [　　]の効かない中域がある
  - 中域利得計算には[　　]を考慮する
  - 結合キャパシタは[　　]を低下させる
  - 入出力を結ぶキャパシタには[　　]を考慮
  - 低域および高域に複数のコーナー周波数

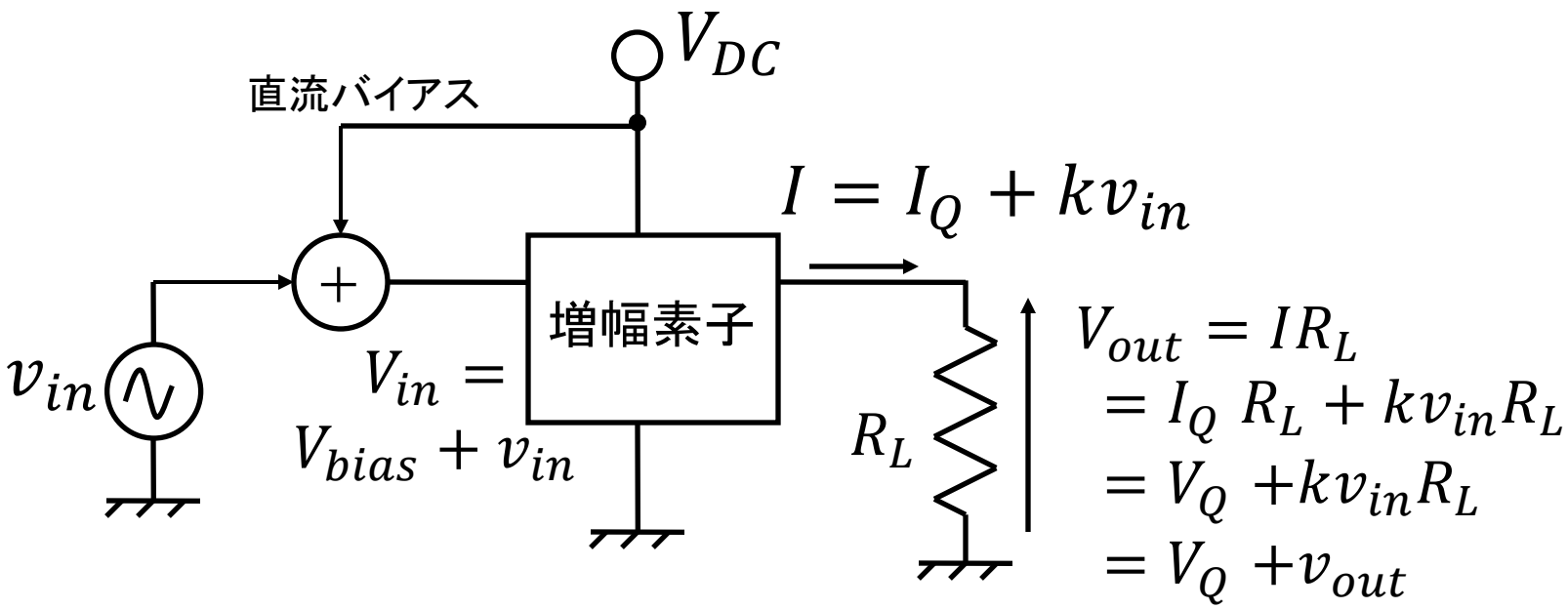
増幅素子の一般モデル

理想増幅器



- 入力は微小交流信号
- 出力はその正確にA倍

現実的な増幅素子



- 増幅素子は［　　］を必要とする
- v_{in}には［　　］が加わり、素子を能動領域に導く
- 直流バイアスは抵抗などを通して電源から供給される

動作点

入力信号が0のときの出力の直流電圧・電流

入力 $V_{in} = V_{bias} + v_{in}$

出力電流 $I = I_Q + kv_{in}$

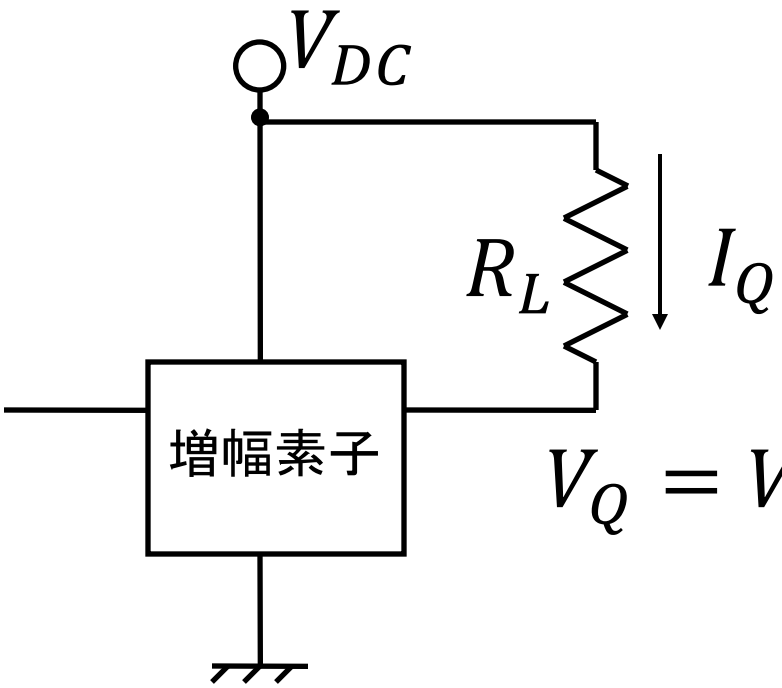
出力電圧

$$
\begin{aligned}
V_{out} &= IR_L \\
&= I_Q\ R_L + kv_{in}R_L \\
&= V_Q + kv_{in}R_L \\
&= V_Q + v_{out}
\end{aligned}
$$

電圧利得 $A_v = \dfrac{v_{out}}{v_{in}} = \dfrac{kv_{in}R_L}{v_{in}} = kR_L$

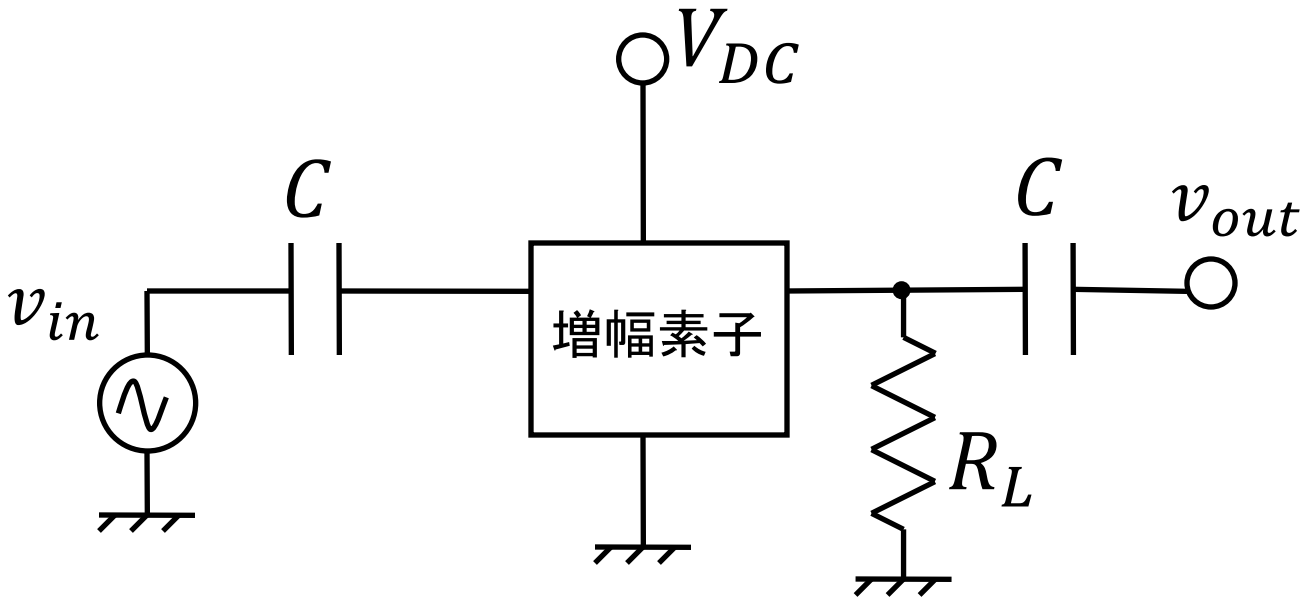
負荷抵抗の接続

しばしば R_L は直流電源に接続される



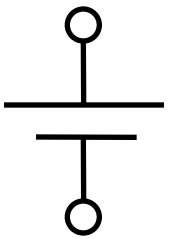
$$V_Q = V_{DC} - I_Q R_L$$

直流バイアス電流のブロック



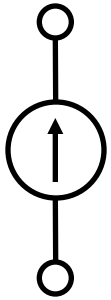
直流電源

直流電圧源



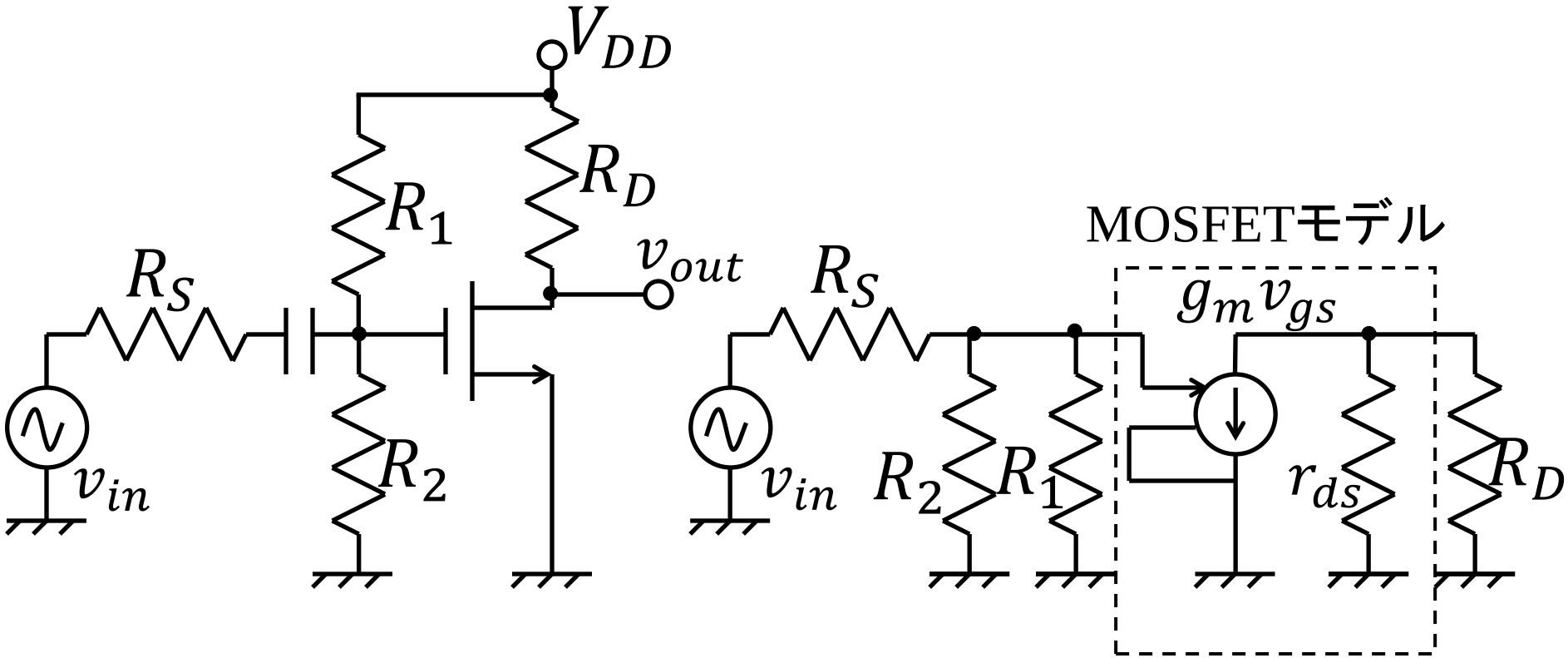
$$r_v = \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{0}{\Delta i} = 0\Omega$$ 変化分に対して

直流電流源



$$r_i = \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{\Delta v}{0} = \infty\Omega$$ 変化分に対して

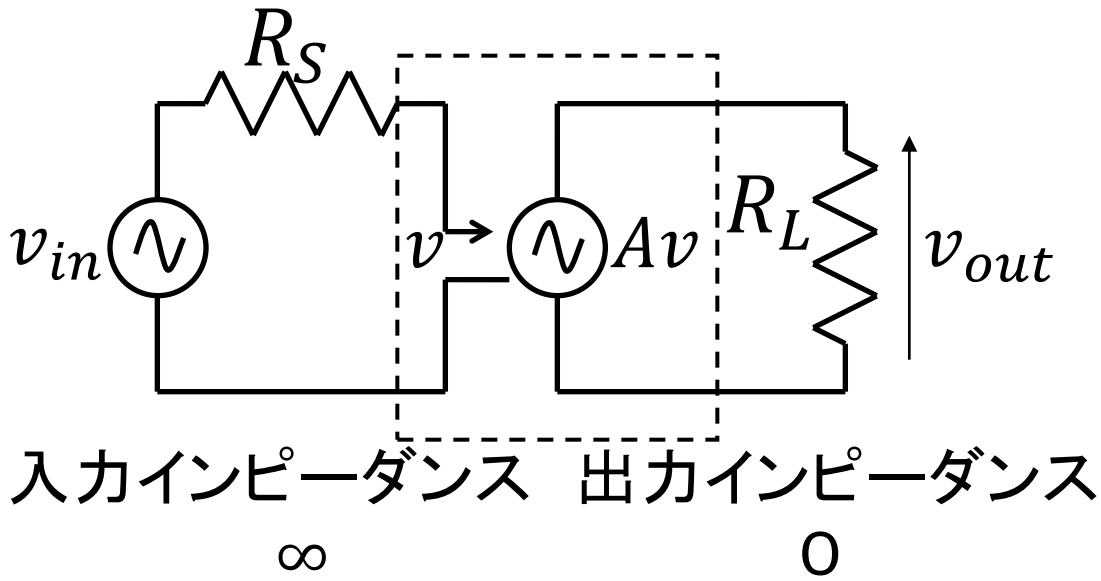
小信号等価回路



- 直流電圧源は
- 直流電流源は
- MOSFETは　　モデルで置換
- 結合用キャパシタは

（信号周波数で十分低インピーダンスと仮定）

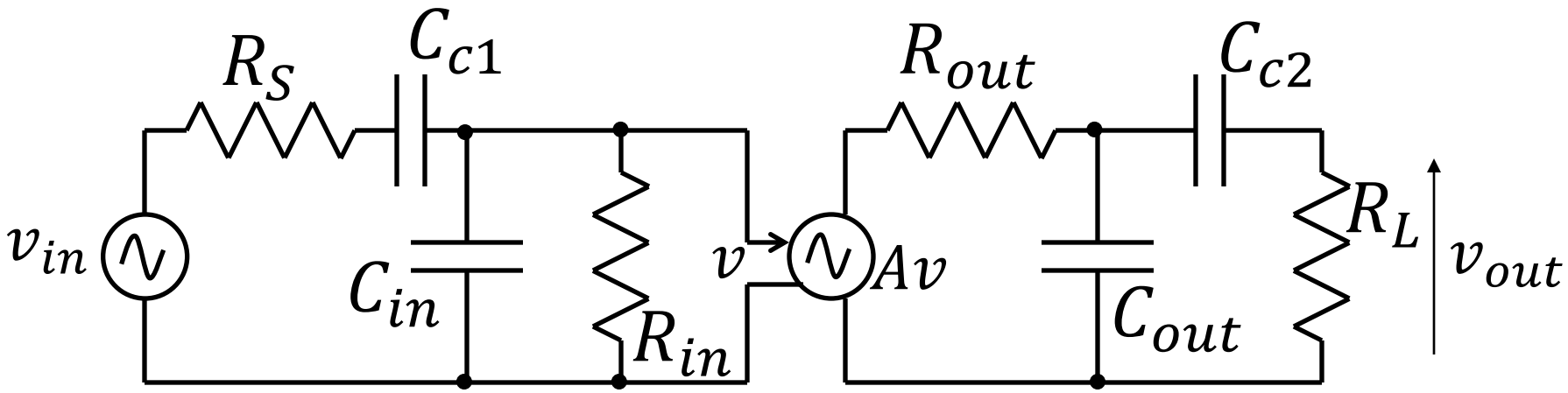
理想増幅素子(電圧制御電圧源)



$$v = v_{in}, \qquad v_{out} = Av$$

$$\therefore \quad \frac{v_{out}}{v_{in}} = A$$

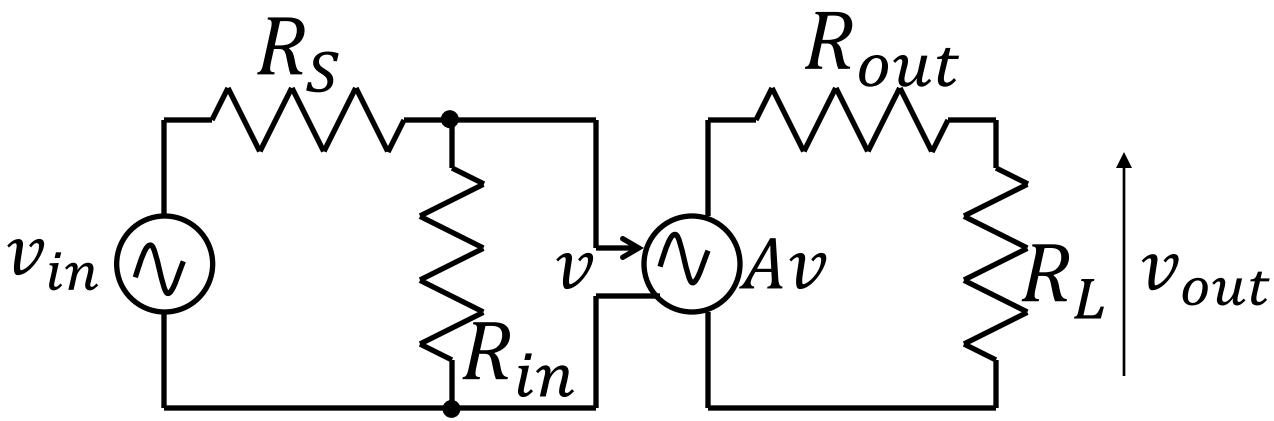
実際の増幅素子



C_{c1}, C_{c2} : 結合キャパシタ	大きい μF
C_{in}, C_{out} : 寄生キャパシタ	小さい pF
R_{in} : 入力抵抗	BJTでkΩ、MOSFETで百MΩ
R_{out} : 出力抵抗	Ω～百kΩ

中域利得

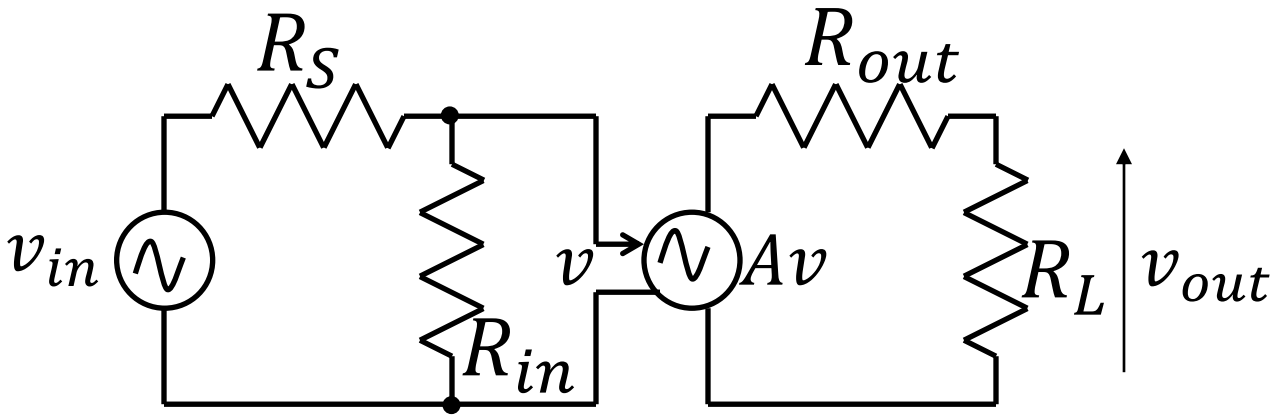
中域
- 結合キャパシタのインピーダンスは十分
- 寄生キャパシタのインピーダンスは十分



$$A_{MB} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_{in}}{R_S + R_{in}} A \frac{R_L}{R_{out} + R_L}$$

負荷効果
- 入力ループ
- 出力ループ

効果的な電圧伝達



$$R_{in} \gg R_S$$
$$R_{out} \ll R_L$$

左辺
計算可能

右辺
一般には制御不可能

周波数特性

入力信号は一般に多くの周波数成分を持つ

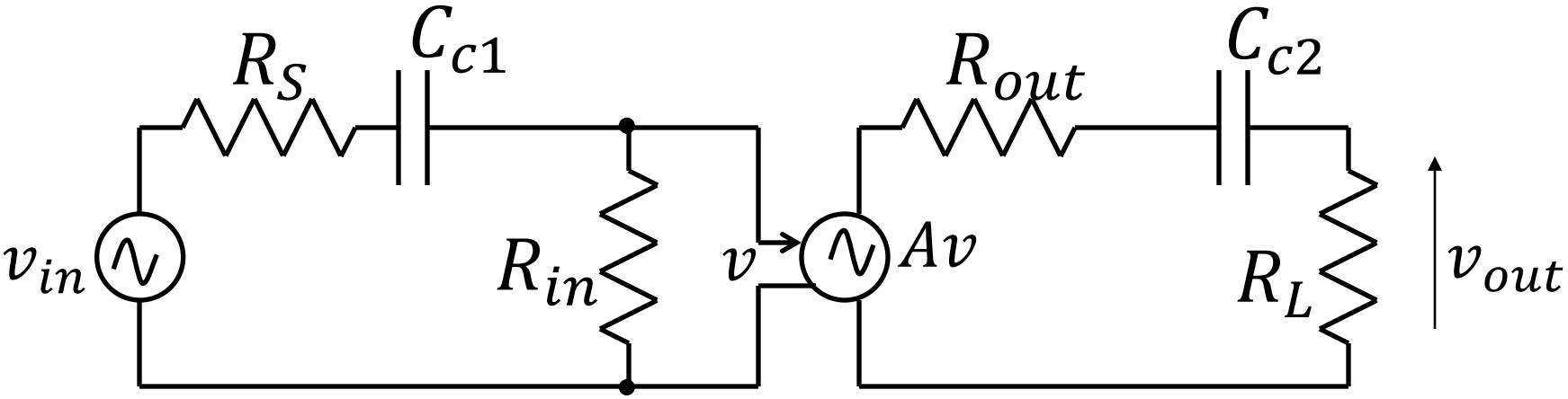
線形回路 —— 重ね合わせ

⇩

単一周波数のみを考慮

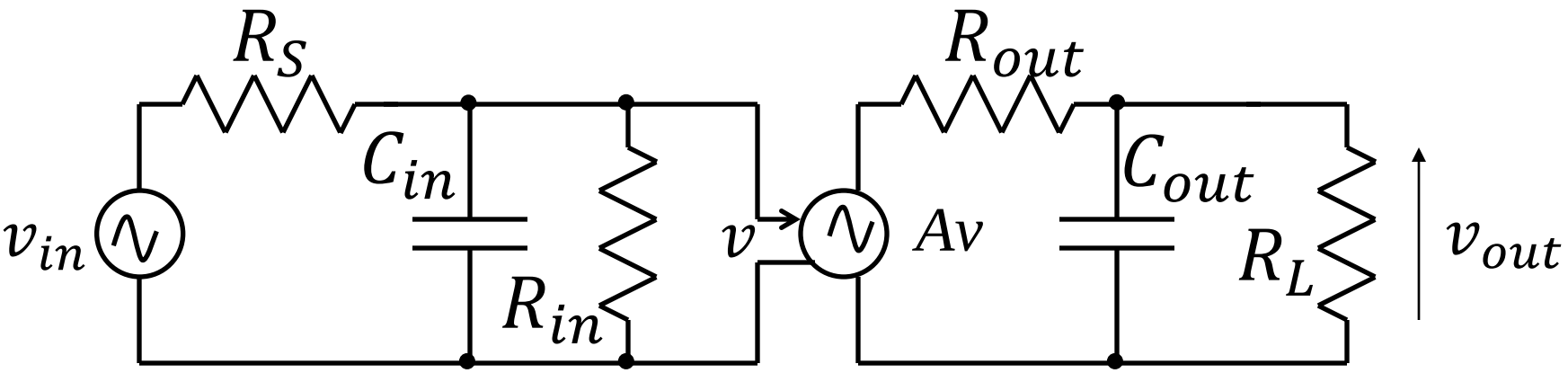
低周波モデル

低周波では　　キャパシタが無視できなくなる
（短絡とはみなせない）



高周波モデル

高周波では　　キャパシタが無視できなくなる
（開放とはみなせない）



dB表示

中域利得

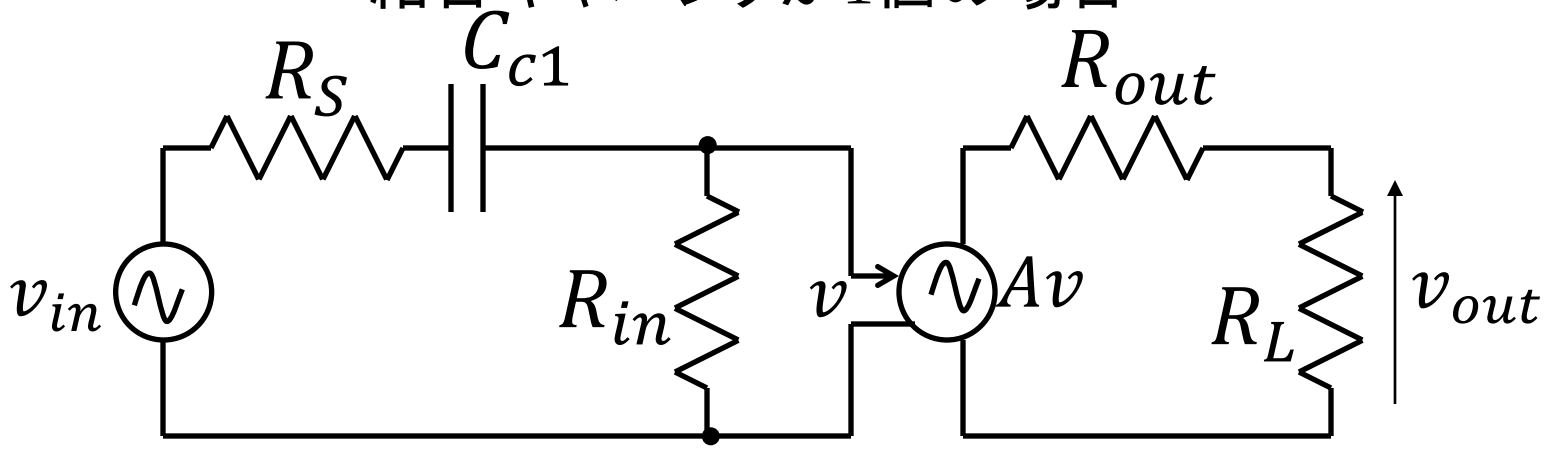
$$A_{dB} = 20\log_{10}|A_{MB}|$$

典型的な周波数特性

$$A(f) = \frac{A_{MB}}{\left(1+\frac{f_1}{jf}\right)\left(1+\frac{jf}{f_2}\right)}$$

低域特性

結合キャパシタが1個の場合



$$\frac{v}{v_{in}} = \frac{R_{in}}{R_S + \frac{1}{j\omega C_{c1}} + R_{in}}$$ より

$$A(f) = \frac{A_{MB}}{1 + \frac{f_1}{jf}}, \qquad f_1 = \frac{1}{2\pi C_{c1}(R_{in} + R_S)}$$

低域遮断周波数

低域特性(2)

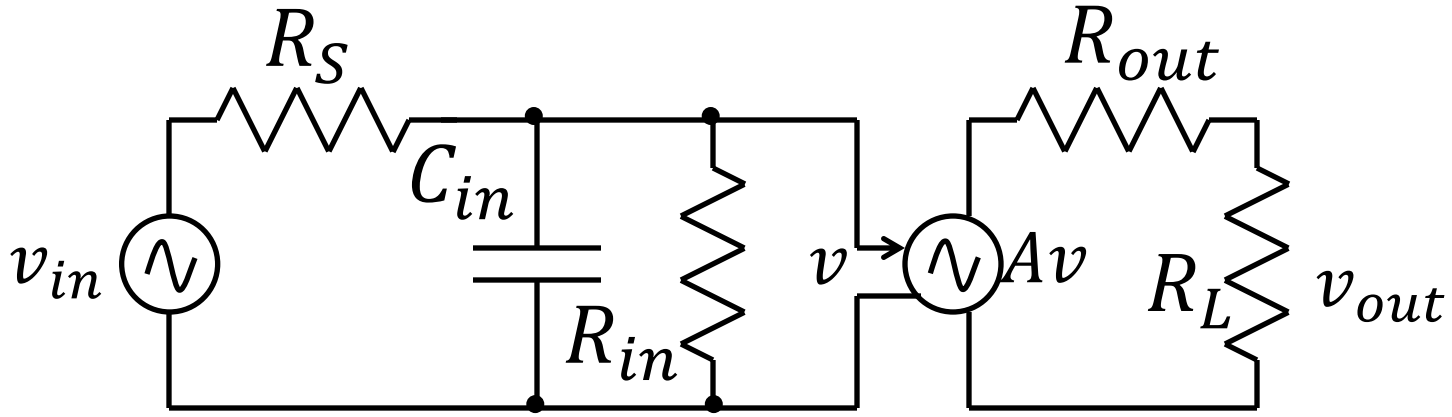
$\frac{1}{1+\frac{f_1}{jf}}$の効果

$f \gg f_1$ のとき $\frac{1}{1+\frac{f_1}{jf}} \approx 1$

$f \ll f_1$ のとき $\dfrac{1}{1+\dfrac{f_1}{jf}} \approx \dfrac{jf}{f_1}$

高域特性

寄生キャパシタが1個の場合



$$\frac{v}{v_{in}} = \frac{\frac{1}{j\omega C_{in}} \| R_{in}}{R_S + \frac{1}{j\omega C_{in}} \| R_{in}}$$ より

$$A(f) = \frac{A_{MB}}{1 + \frac{jf}{f_2}}, \qquad f_2 = \frac{1}{2\pi C_{in}\left(\frac{R_{in}R_S}{R_{in} + R_S}\right)}$$

高域遮断周波数

高域特性(2)

$\frac{1}{1+\frac{jf}{f_2}}$の効果

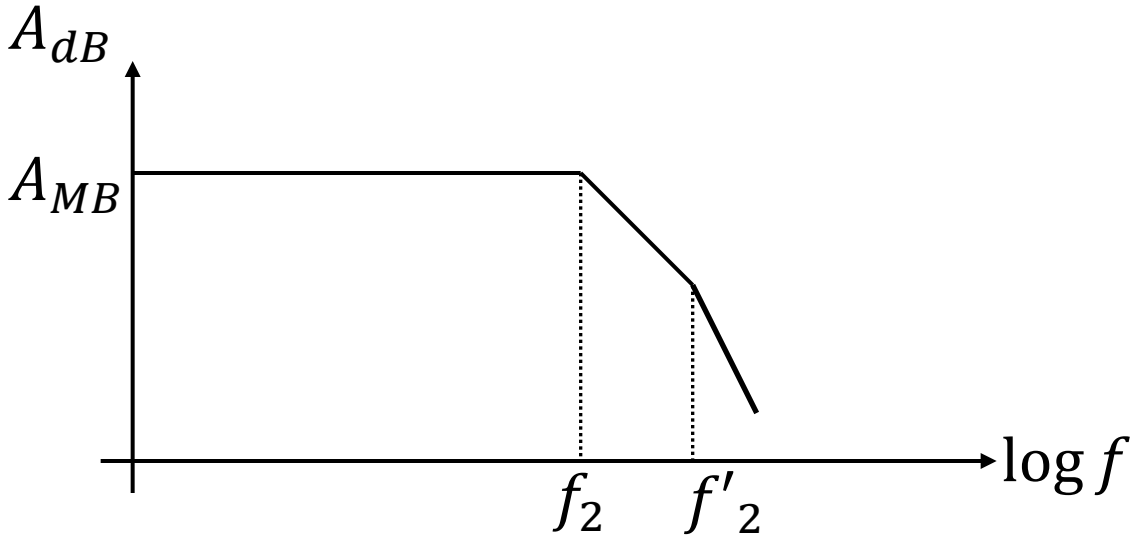
$f \ll f_2$ のとき $\frac{1}{1+\frac{jf}{f_2}} \approx 1$

$f \gg f_2$ のとき $\frac{1}{1+\frac{jf}{f_2}} \approx \frac{f_2}{jf}$

高域特性(3)

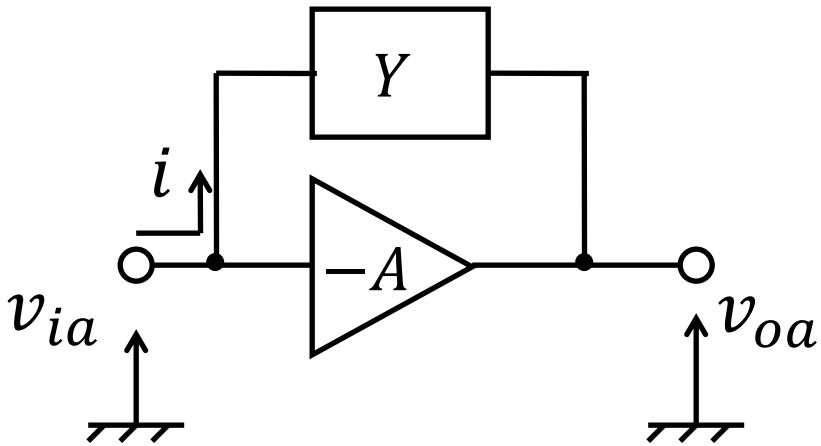
寄生キャパシタが2個の場合

$$A(f) = \frac{A_{MB}}{\left(1 + \frac{jf}{f_2}\right)\left(1 + \frac{jf}{f'_2}\right)}$$

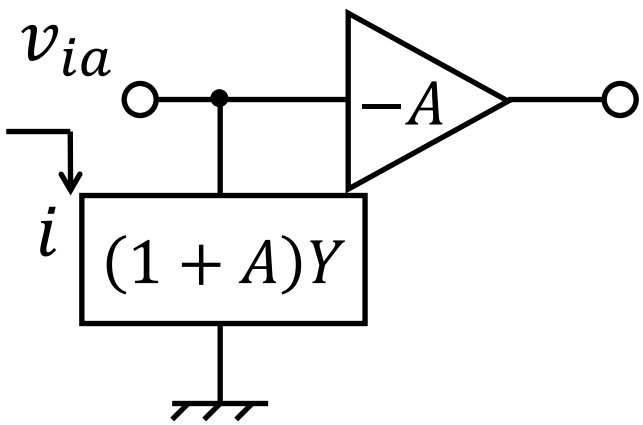


3db周波数 f_{ch} $\left[1 + \left(\frac{f_{ch}}{f_2}\right)^2\right]\left[1 + \left(\frac{f_{ch}}{f'_2}\right)^2\right] = 2$

Miller効果



$$v_{oa} = -Av_{ia}$$



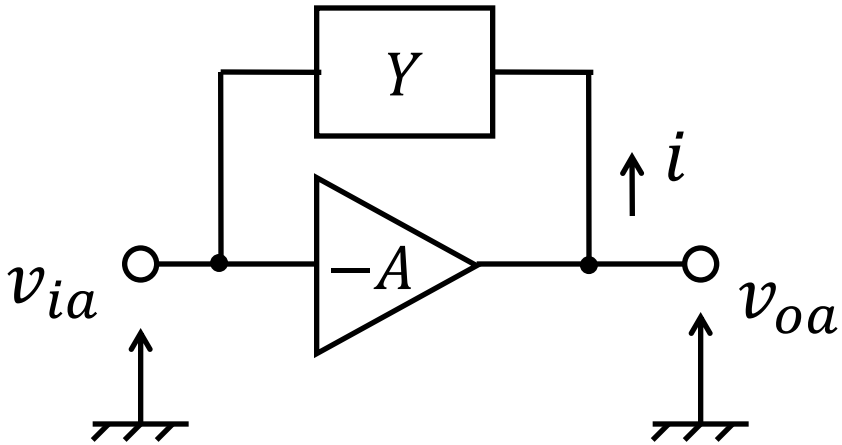
入力インピーダンス

$$Z_{in} = \frac{v_{ia}}{i} = \frac{v_{ia}}{Y(v_{ia} - v_{oa})}$$

$$= \frac{1}{Y(1+A)}$$

John M. Miller, “The dependence of the input impedance of a three-electrode vacuum tube upon the load in the plate circuit”, Journal of the Franklin Institute, 1919

Miller効果の出力側等価回路

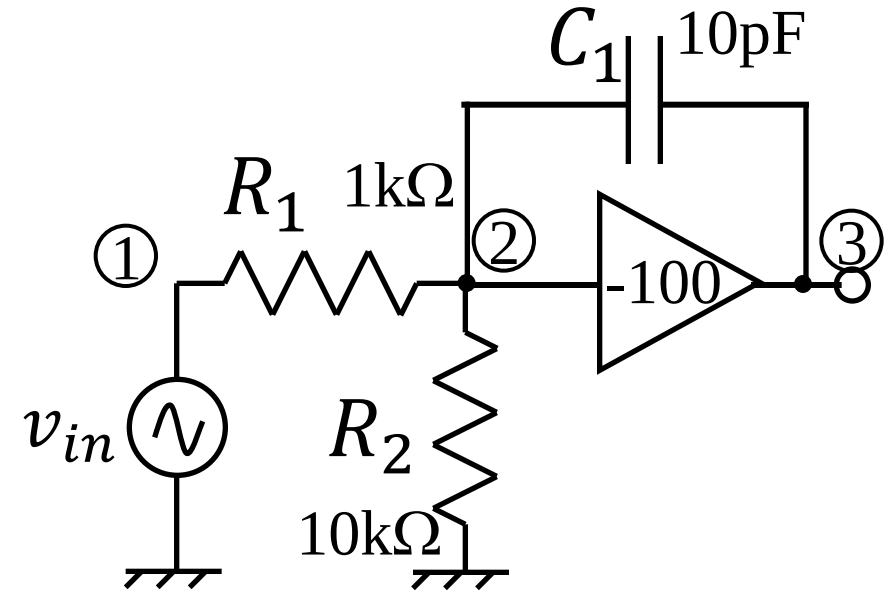


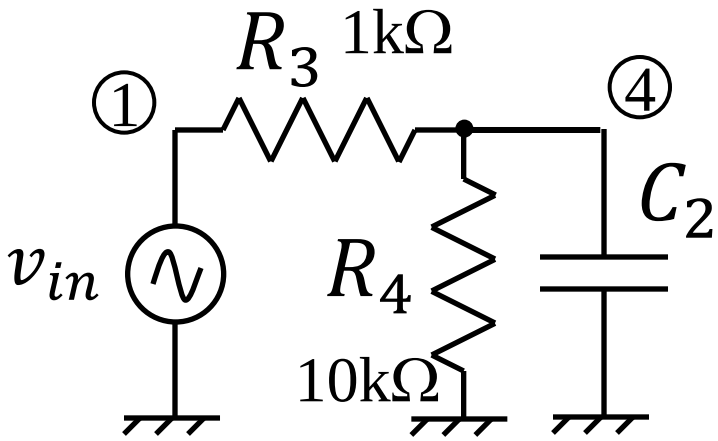
出力インピーダンス

$$Z_{in} = \frac{v_{oa}}{i} = \frac{v_{oa}}{Y(v_{oa} - v_{ia})} = \frac{v_{oa}}{Y\left(v_{oa} + \frac{v_{oa}}{A}\right)}$$

$$= \frac{1}{Y\left(1 + \frac{1}{A}\right)} \approx \frac{1}{Y}$$

Miller効果のSPICEシミュレーション

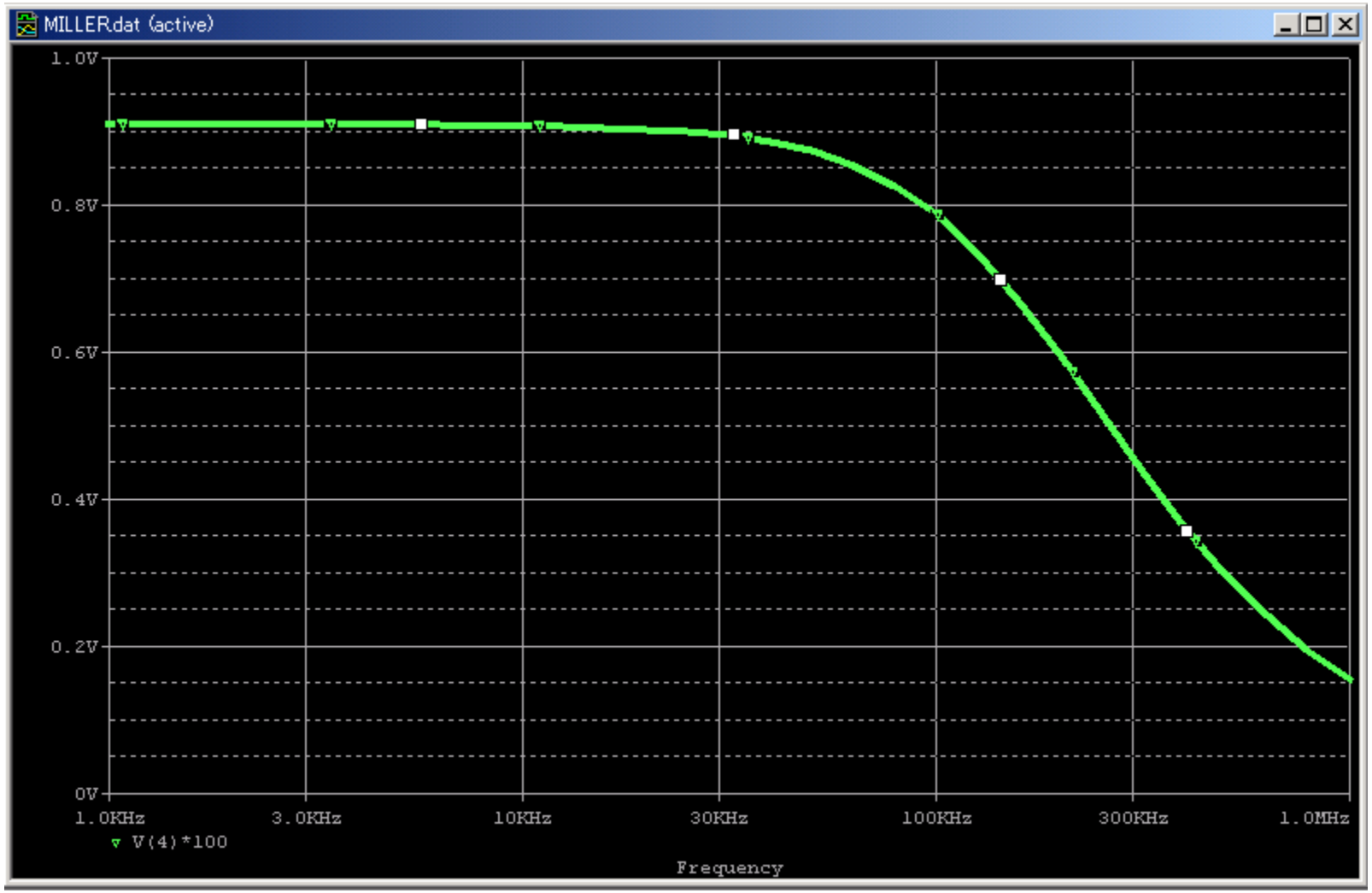




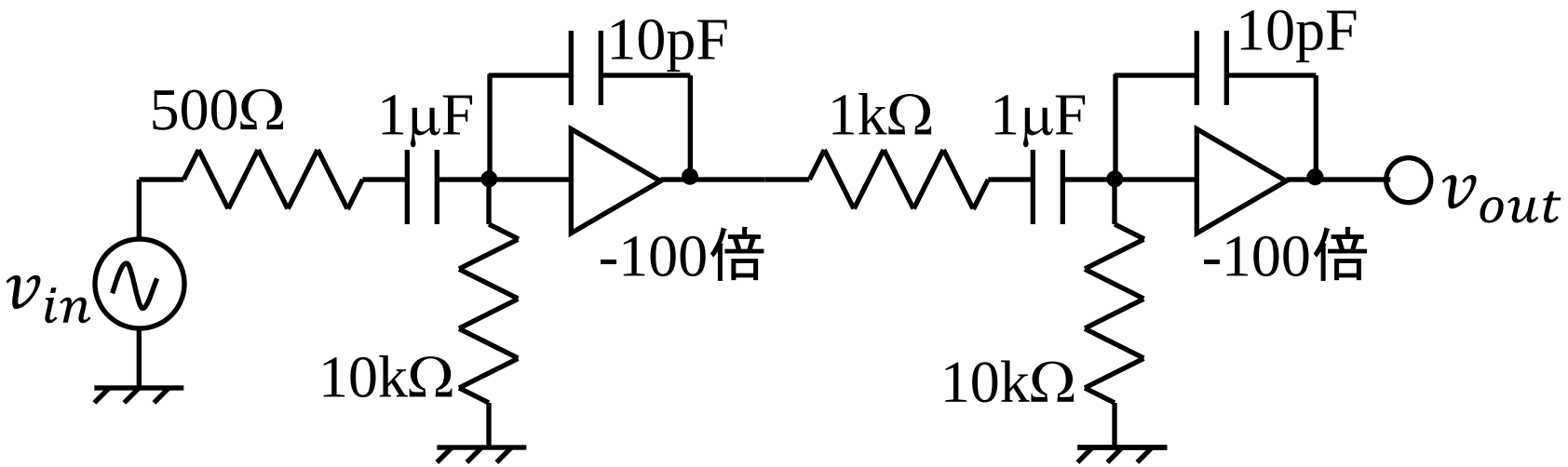

```
MILLER.CIR
R1 1 2 1K
R2 2 0 10K
C1 2 3 10P
VIN 1 0 AC 0.01
EAMP 3 0 2 0 -100
*EQUIVALENT CIRCUIT
R3 1 4 1K
R4 4 0 10K
C2 4 0 1010P
.AC DEC 10 1K 1MEG
.PROBE
.END
```

SPICE出力

V(4)*100



宿題2



図の増幅回路の

1. 中域利得を求めよ
2. 低域遮断周波数を求めよ
3. 高域遮断周波数を求めよ

ただし-100倍の増幅器は理想的な電圧制御電圧源とする