

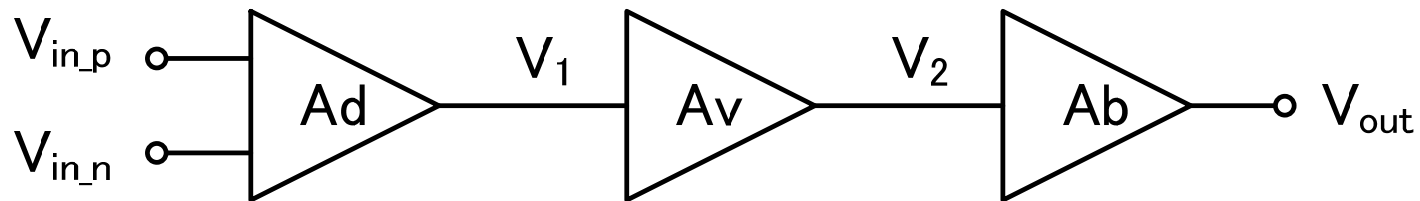
## 5.4 演算増幅器の構造と特性

# 演算増幅器(Operational Amplifier, OPA)の特長

- 直流増幅ができる
  - バイアスを意識しなくても使用できる
  - 積分演算を行うことができる
- 非線形性が殆どない
  - ただし、入力電圧の範囲は限定されている場合が多い
  - 近年、電源電圧の範囲なら、どのような電圧を入力しても動作する演算増幅器も普及している( Rail-to-Rail OPAと呼ばれる)
- 電圧利得が非常に大きい(100万倍ぐらい)
  - ネガティブフィードバックを使用することにより、高精度な信号処理や広帯域の増幅が可能

# 演算増幅器の全体構成

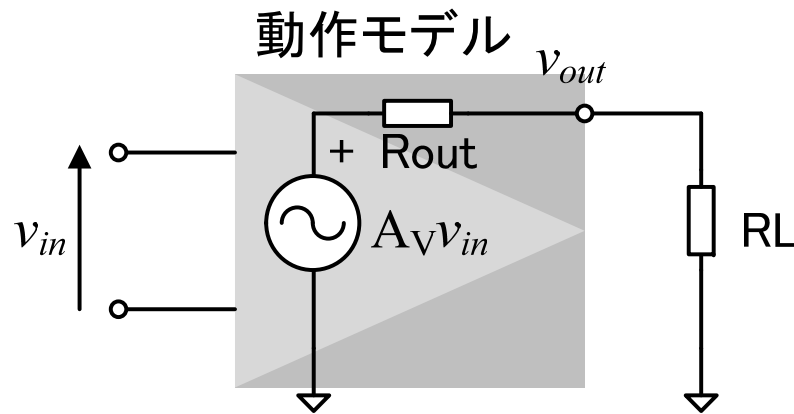
差動増幅回路      電圧増幅回路      インピーダンスバッファ  
(差の演算。)      (電圧利得の増大。)      (出力抵抗を下げる。)



$$V_1 = Ad(V_{in\_p} - V_{in\_n}) \quad V_2 = AvV_1 \quad V_{out} = AbV_2$$

$$V_{out} = AdAvAb(V_{in\_p} - V_{in\_n})$$

# インピーダンスバッファの役割



$$v_{out} = \frac{RL}{R_{out} + RL} A_V v_{in}$$

RLを接続したときの利得

$R_{out} \doteq 0$  のとき  $v_{out} = A_V v_{in}$

となるので、 $R_{out}$ を小さくしたい。

エミッタ接地増幅回路の場合

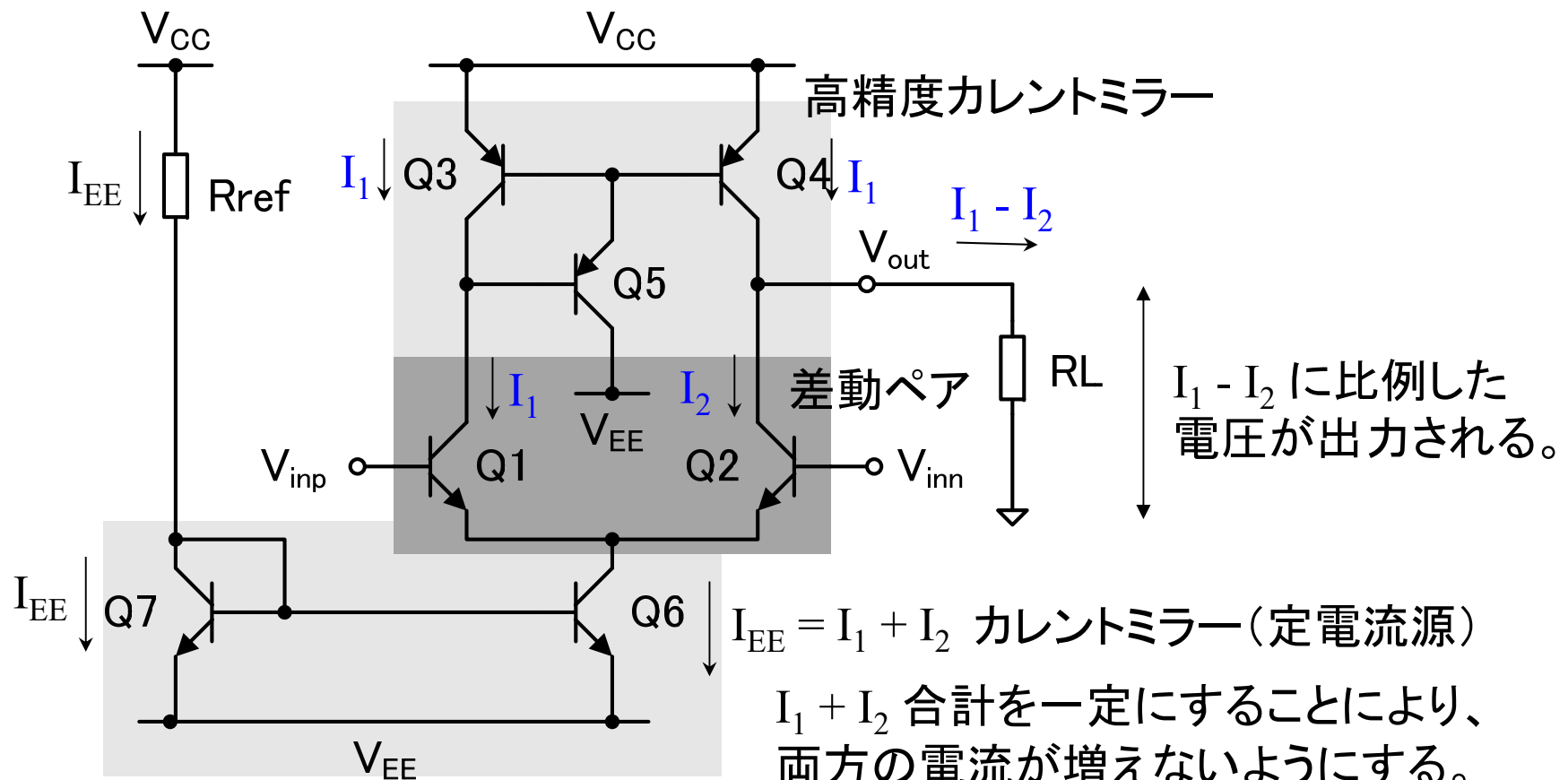
$$R_{out} = (1/h_{oe}) // RC$$

$$\text{Gain} = -(h_{fe}/h_{ie})RC$$

となるので、 $R_{out}$ を下げる = 電圧利得を下げることになる。

電圧増幅回路とは別に、 $R \doteq 0$  のインピーダンスバッファが必要。

# 差動増幅回路の動作原理



高精度カレントミラー

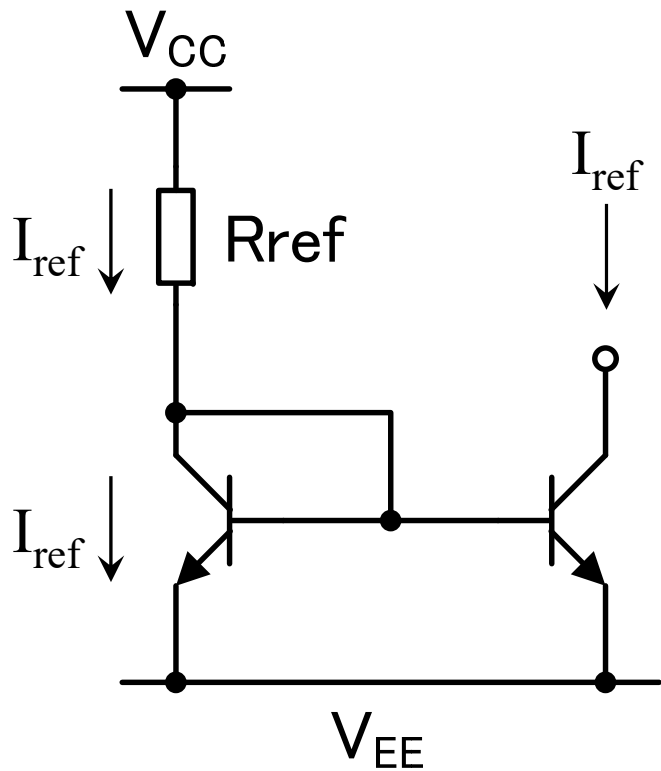
差動ペア

$I_1 - I_2$  に比例した  
電圧が出力される。

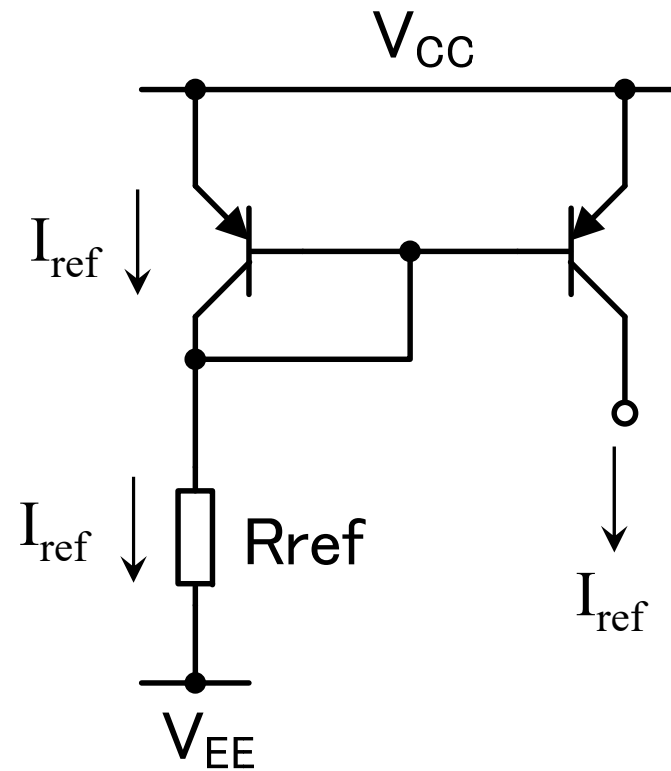
$I_{EE} = I_1 + I_2$  カレントミラー(定電流源)

$I_1 + I_2$  合計を一定にすることにより、  
両方の電流が増えないようにする。  
 $I_2 = I_1$  のとき、 $I_2 - I_1$  の誤差が一定  
に保たれる(同相利得を参照)。

# カレントミラー

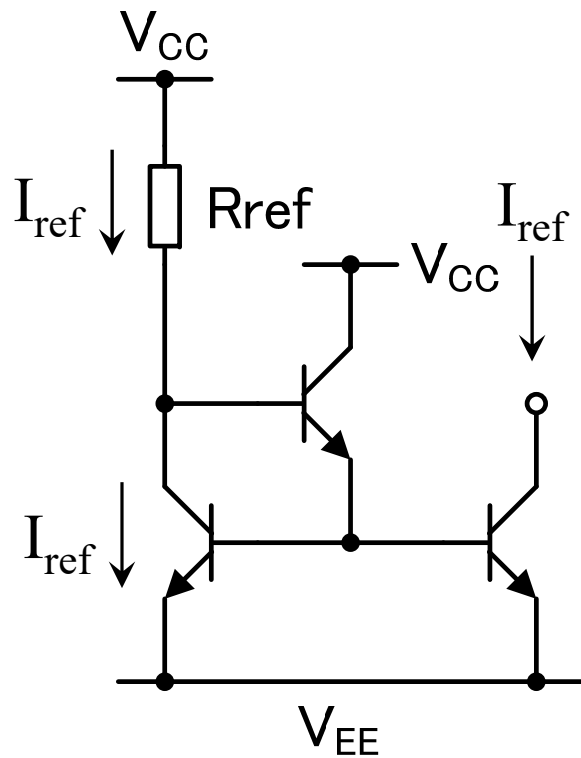


カレントシンク (npn, 4.4節参照)

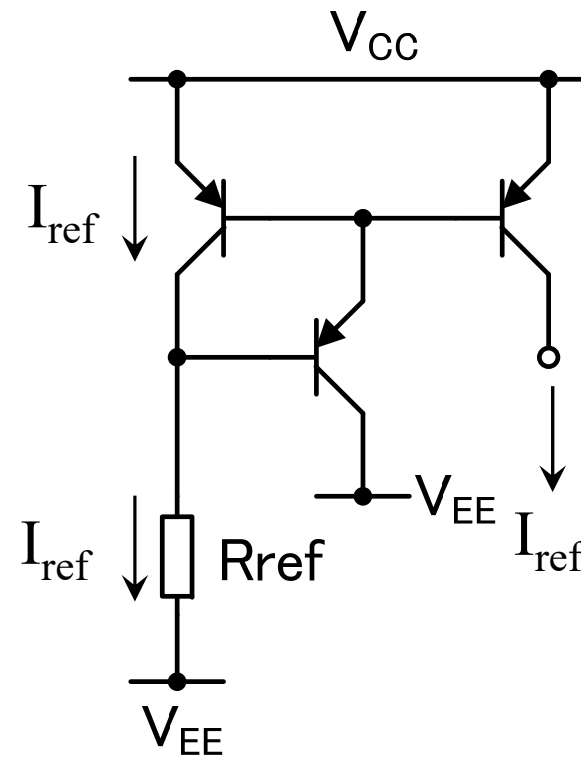


カレントソース (pnp)

# 高精度カレントミラー

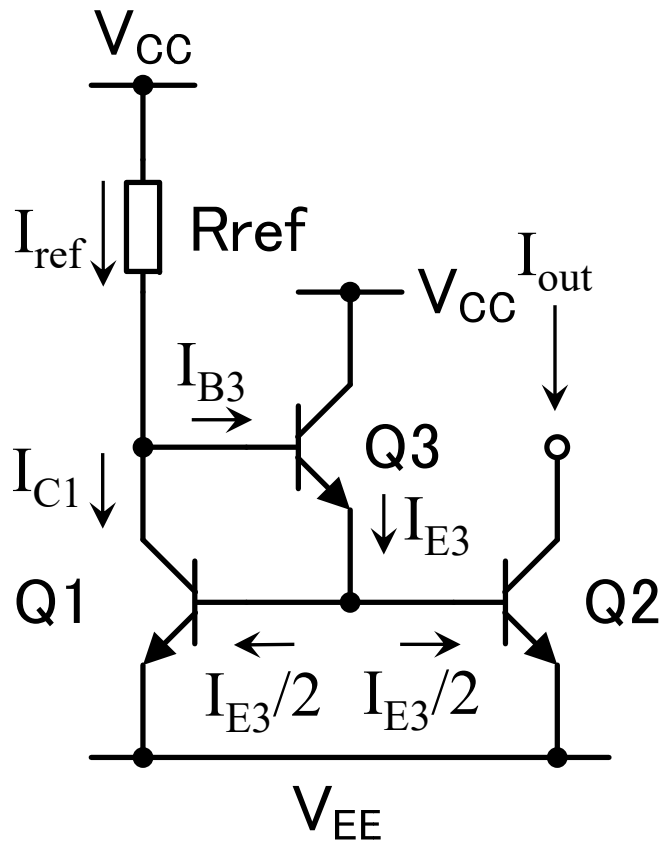


カレントシンク (nnp)



カレントソース (pnp)

# (参考) 高精度カレントミラーの解析



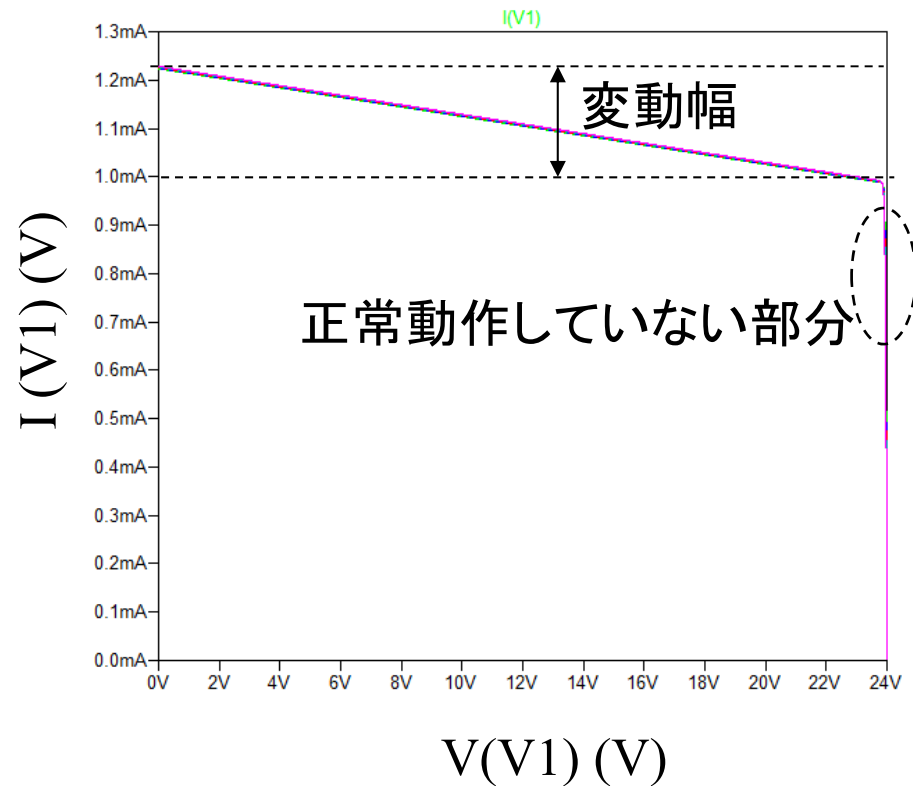
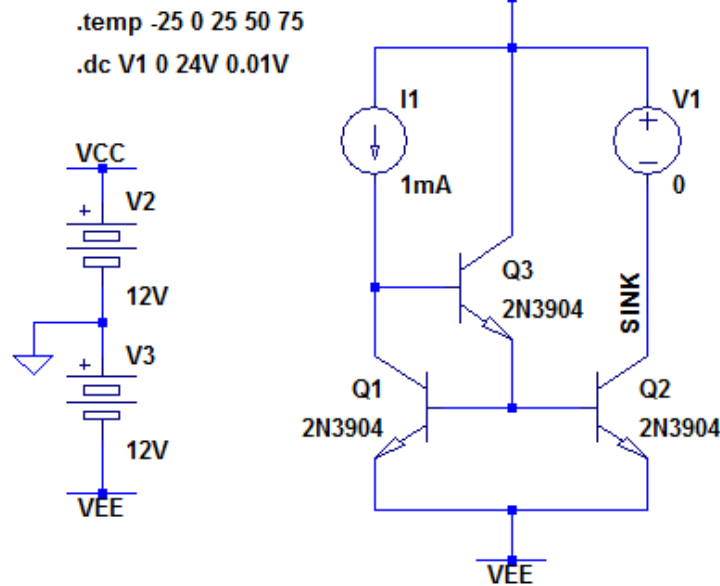
$$\begin{cases} I_{ref} = I_{C1} + I_{B3} \\ I_{E3} = (1 + h_{FE})I_{B3} \\ I_{C1} = h_{FE} \frac{I_{E3}}{2} \end{cases}$$

$$I_{ref} = \left( \frac{1}{1 + h_{FE}} + \frac{h_{FE}}{2} \right) I_{E3}$$

$$I_{out} = \frac{h_{FE} I_{E3}}{2} = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{2}{(1 + h_{FE})h_{FE}}} \cong I_{ref}$$



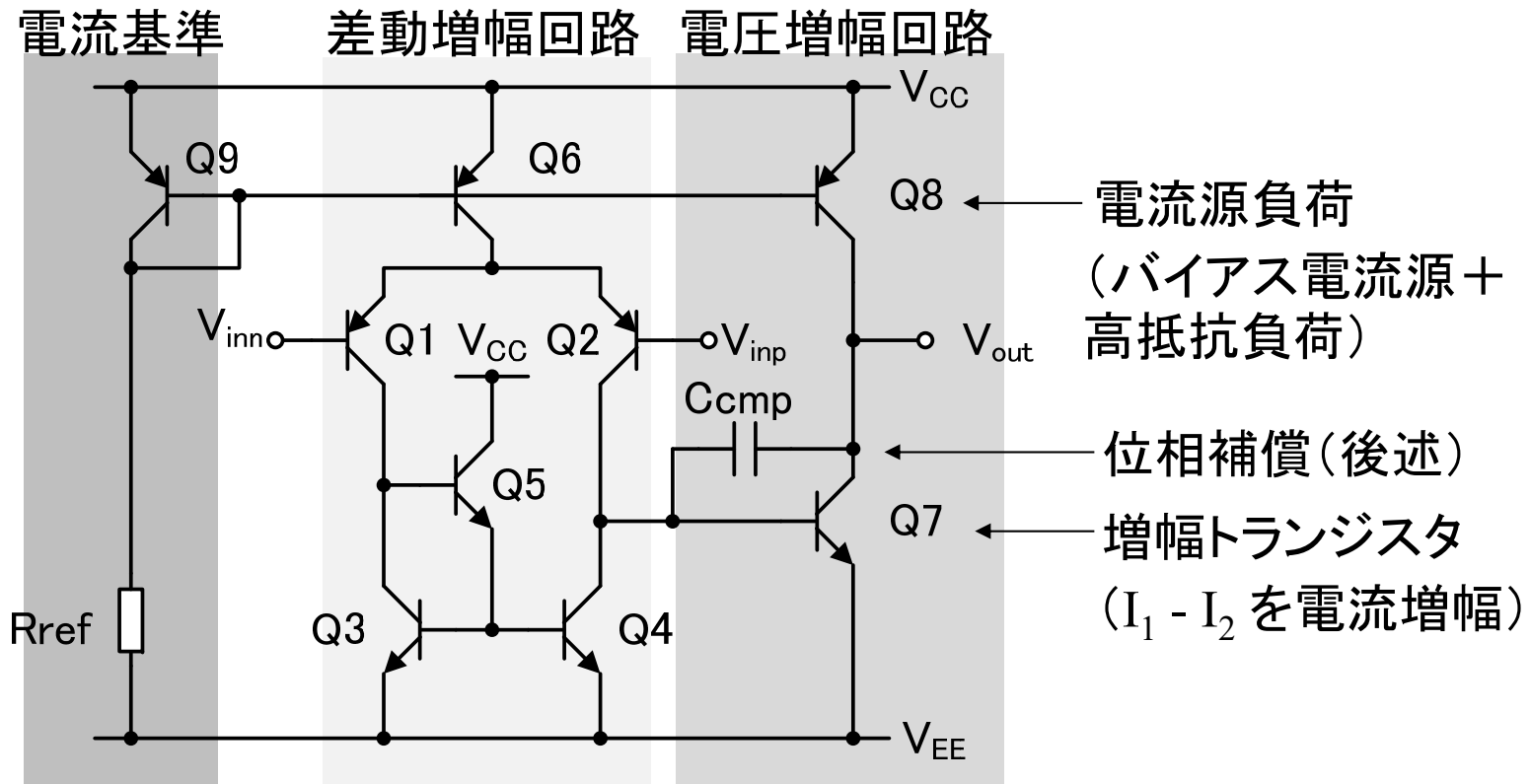
# カレントミラーの評価



V1は、接続する回路の代用。  
V1の電圧が変化してもV1に流れる電流が一定なら理想的。

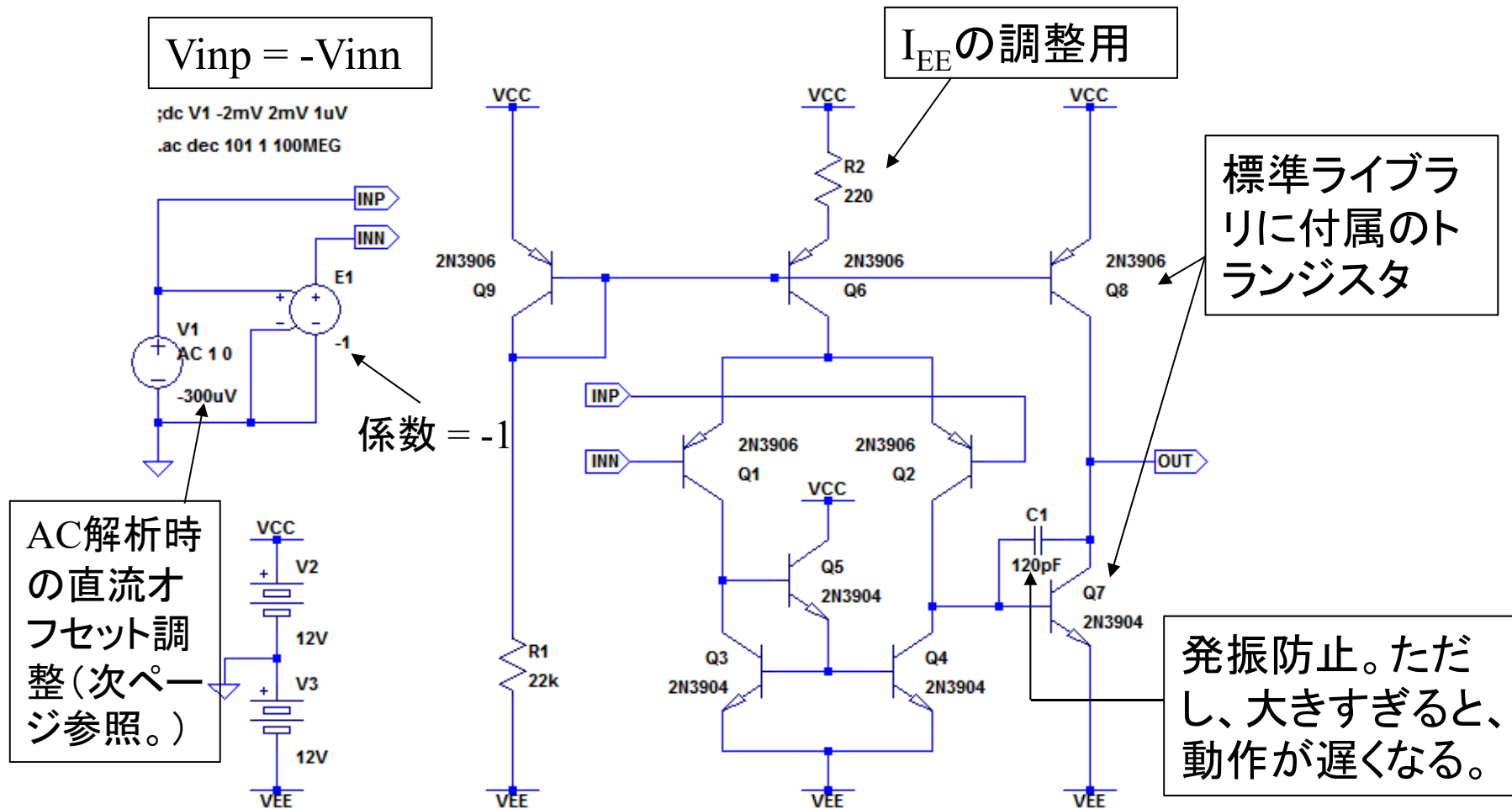
V1 = 24V 付近では、回路が正常動作していない。温度依存性は無視できる。

# 超簡易バージョン演算増幅器

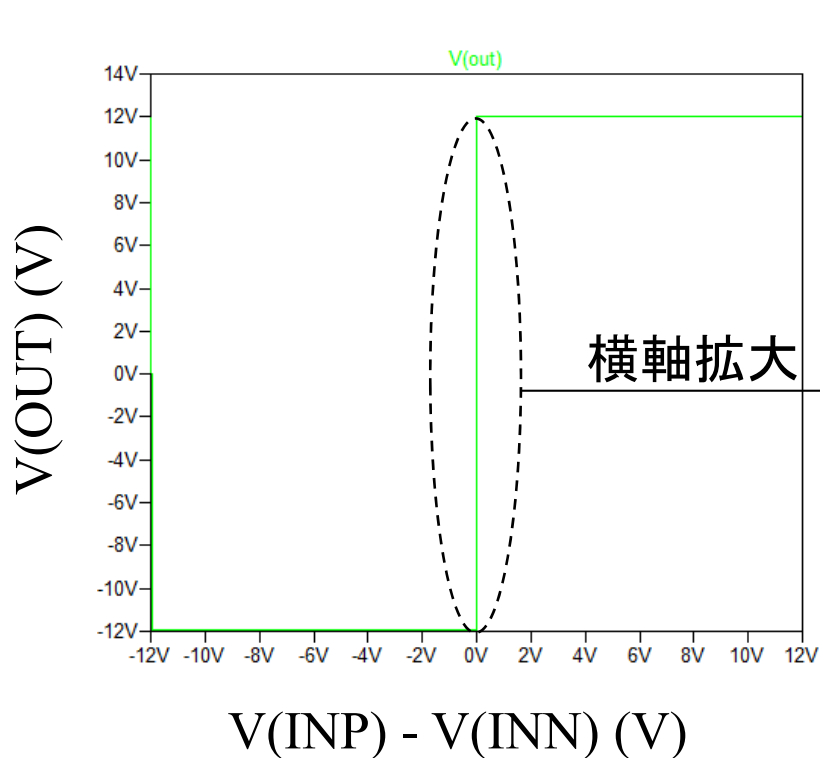


(参考) この回路例では、インピーダンスバッファが省略されているため、出カインピーダンスが非常に高い。電流帰還により出カインピーダンスを下げるため、低い抵抗で負帰還をかけて使用すること。

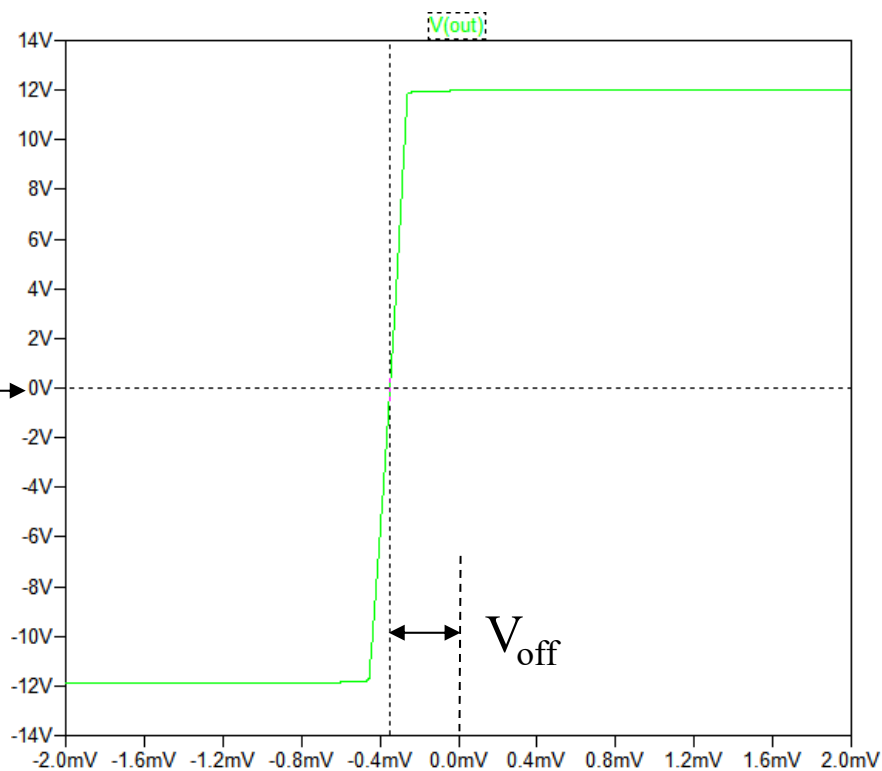
# 演算増幅器のシミュレーション



# 演算増幅器のDC解析

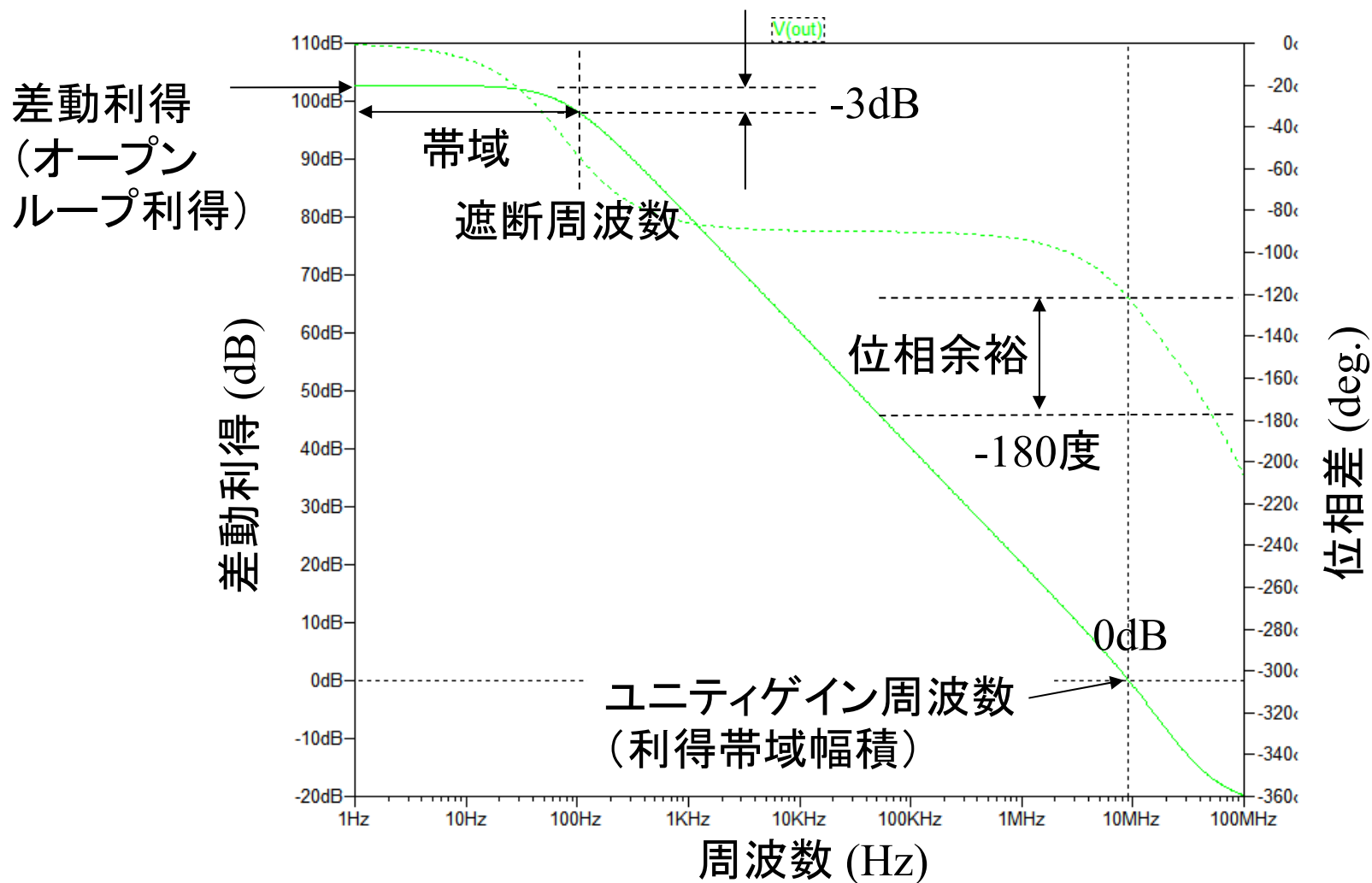


増幅している部分。利得が非常に大きいので垂直に変化しているように見える。



$V(\text{INP}) - V(\text{INN})$  (mV)  
オフセット電圧  $V_{\text{off}} \sim -300\mu\text{V}$   
( $V_{\text{off}} = 0\text{V}$  が理想。)

# 演算増幅器のAC解析

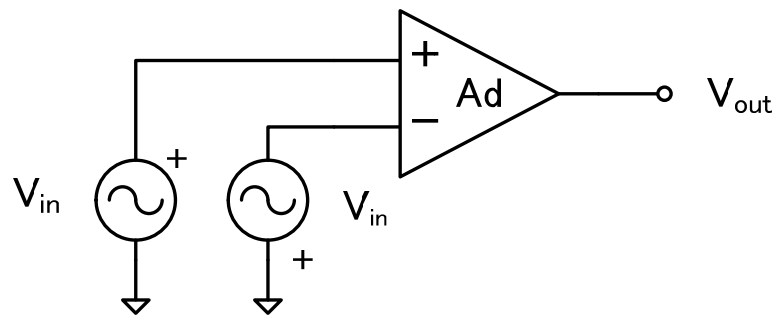


# 同相利得と差動利得

$$V_{out} = Ad(V_{inp} - V_{inn}) + Ac(V_{inp} + V_{inn})/2$$

Acは減算誤差の大きさに相当するため  $Ac = 0$  であることが理想。

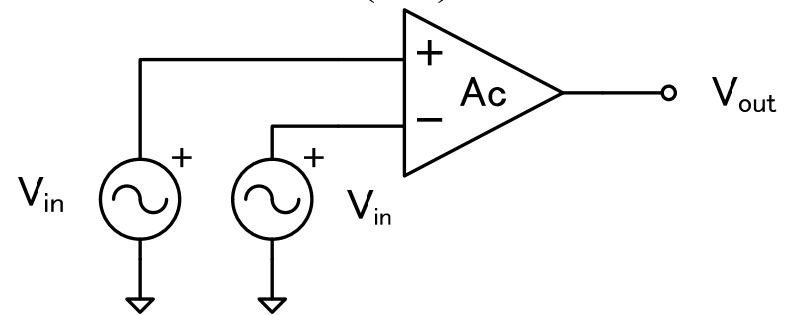
差動利得(Ad)測定回路



$$V_{inp} = -V_{inn} = V_{in}$$

$$V_{out} = 2AdV_{in}$$

同相利得(Ac)測定回路



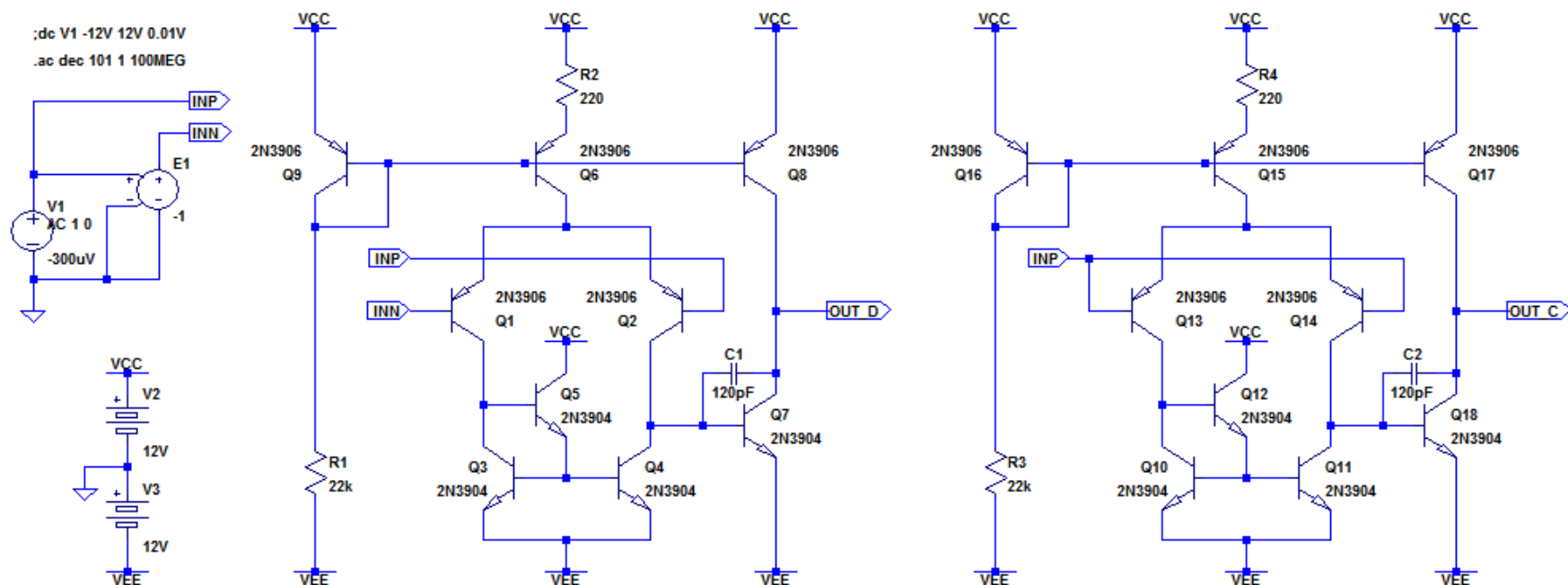
$$V_{inp} = V_{inn} = V_{in}$$

$$V_{out} = AcV_{in}$$

# CMRRのシミュレーション

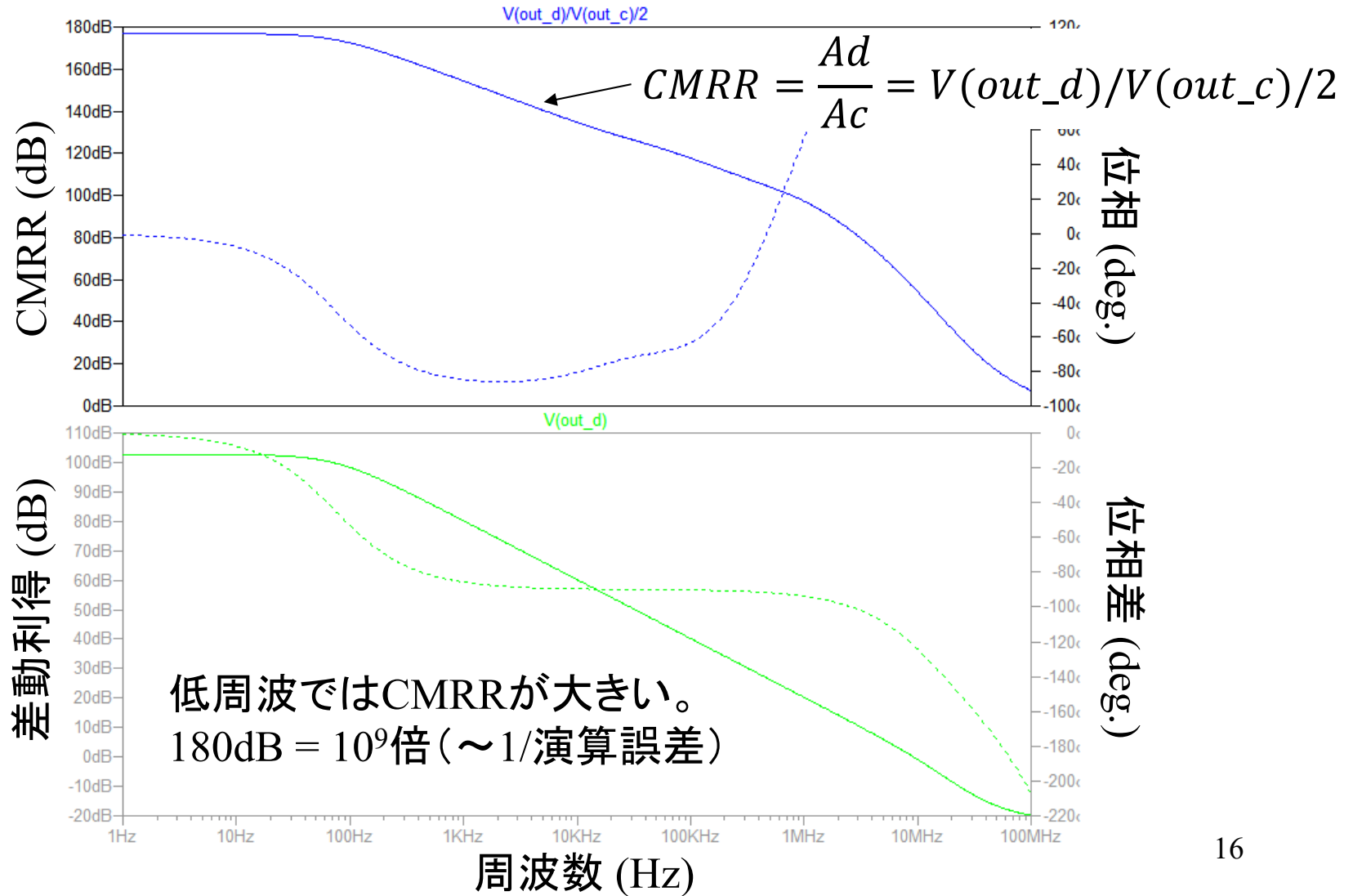
同相除去比 (Common Mode Rejection Ratio, CMRR)

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} \quad (\text{CMRRが大きい演算増幅器を用いれば、高精度な回路が作れる。})$$



差動利得が大きすぎるため、この方法は計測器による実測には向かない。

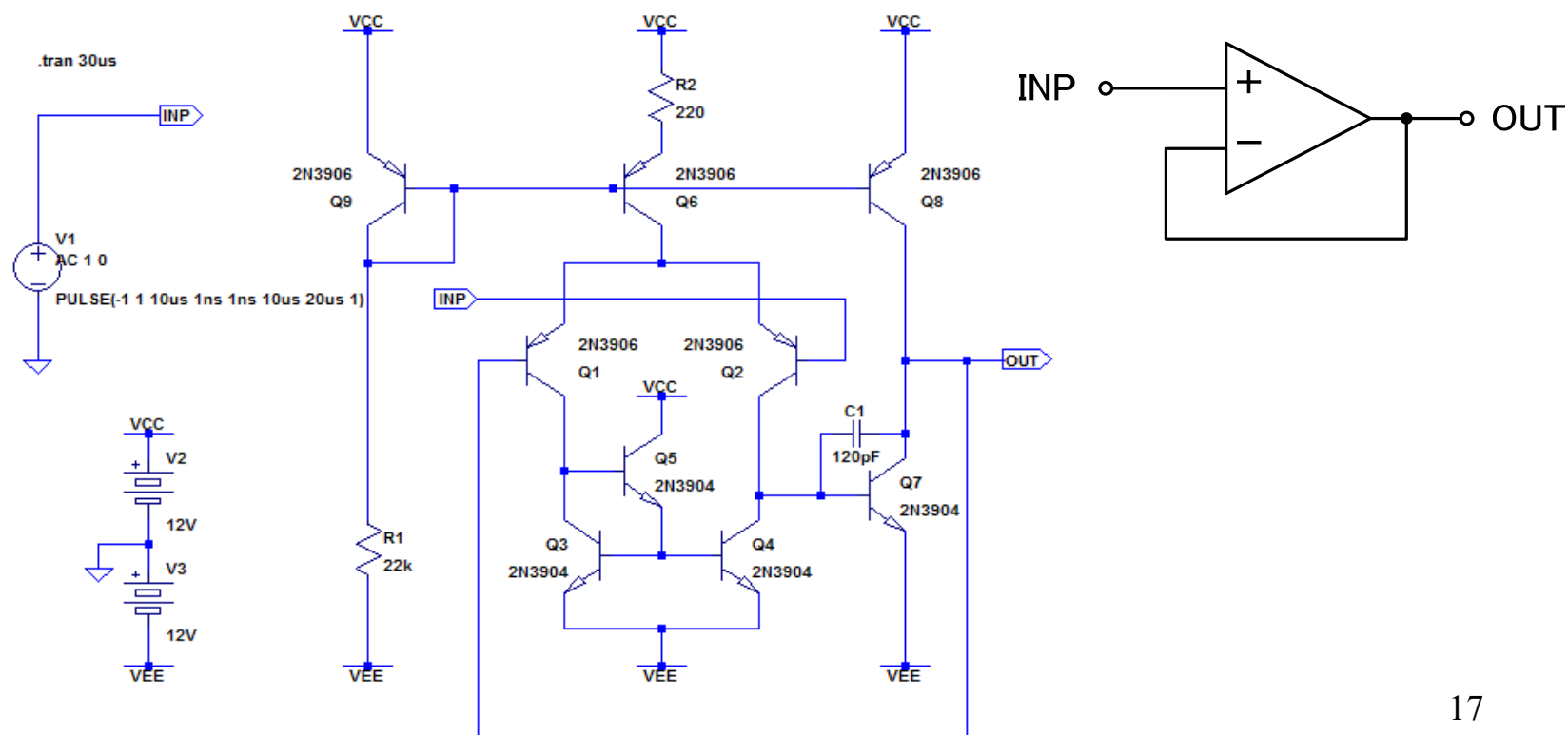
# CMRRの解析



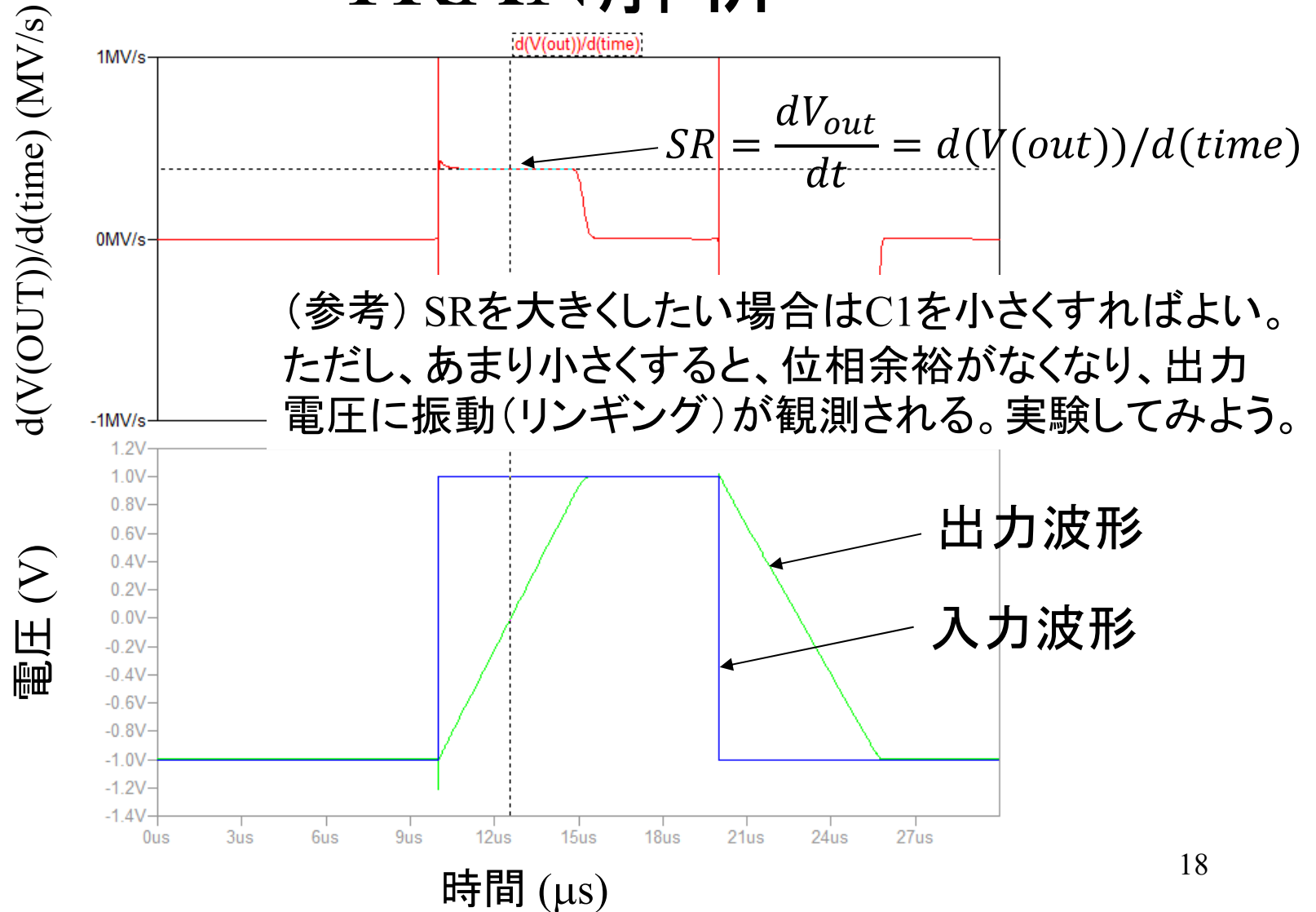


# スルーレートのシミュレーション

演算増幅回路の出力電圧の最大変化速度を表す指標としてSR (Slew Rate) が用いられる。SRを超える速度で出力電圧が変化することはできないため、高周波の矩形波や正弦波が、三角波に歪む。



# TRAN解析



# 課題5.4.1(1)

演算増幅器(超簡易バージョン)の各種シミュレーションを行い、下記の仕様書を完成させよ。

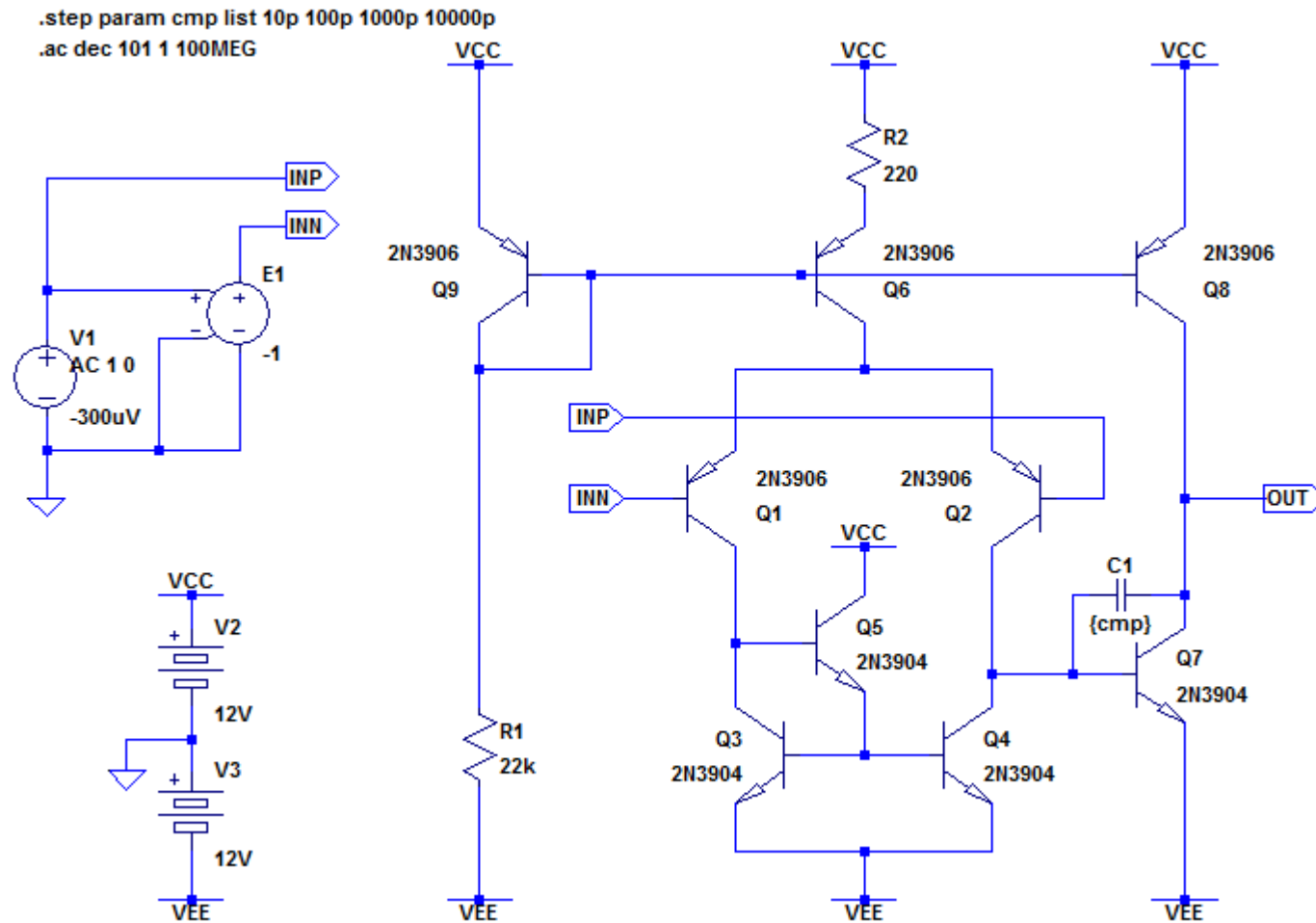
| パラメータ              | 値 | 測定条件                       |
|--------------------|---|----------------------------|
| 差動利得(dB)           |   | @1Hz, $RL = \infty$        |
| CMRR(dB)           |   | @1Hz, $RL = \infty$        |
| ユニティゲイン周波数(Hz)     |   | $RL = \infty$ (負荷抵抗なし)     |
| 位相余裕(deg.)         |   | $RL = \infty$              |
| スルーレート(V/ $\mu$ s) |   | Gain = 1(倍), $RL = \infty$ |

# 課題5.4.1(2)

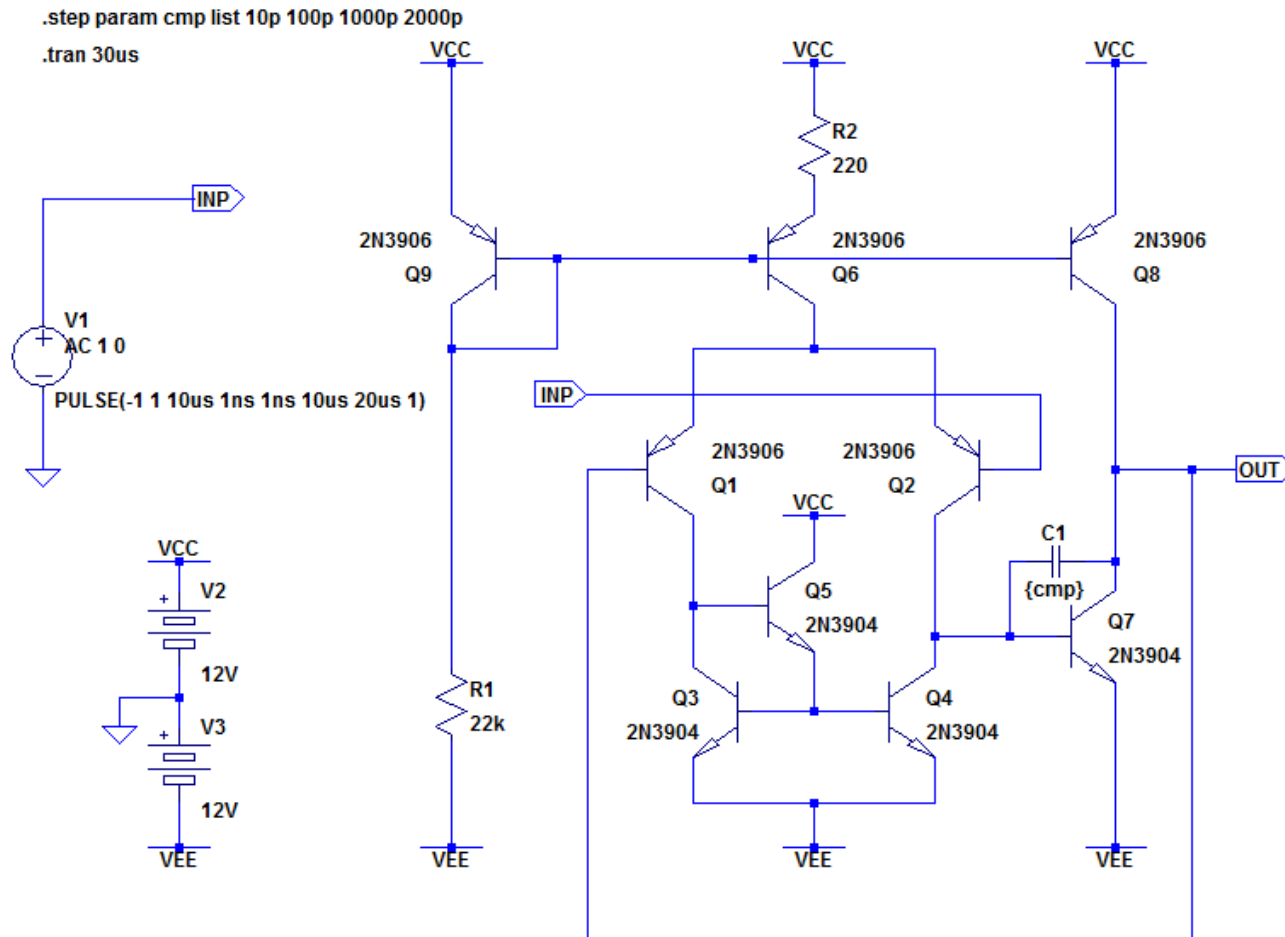
- C1の容量を変えたときに、ユニティゲイン周波数、位相余裕、スルーレートがどのように変化するか調べ、下記の表を完成させよ
  - C1は位相補償(Phase compensation)キャパシタと呼ばれ、位相余裕を調整するために必要。位相余裕が小さいと回路が不安定になり、大きいとユニティゲイン周波数が小さくなる
- 容量をどれぐらいの値にすると発振(連続的な振動)やリングング(一時的な振動)が観測されるか
  - 発振や、リングングを起こさないようにC1を調整する必要がある

| パラメータ              | 値 | 測定条件                       |
|--------------------|---|----------------------------|
| ユニティゲイン周波数(Hz)     |   | RL = $\infty$ (負荷抵抗なし)     |
| 位相余裕(deg.)         |   | RL = $\infty$              |
| スルーレート(V/ $\mu$ s) |   | Gain = 1(倍), RL = $\infty$ |

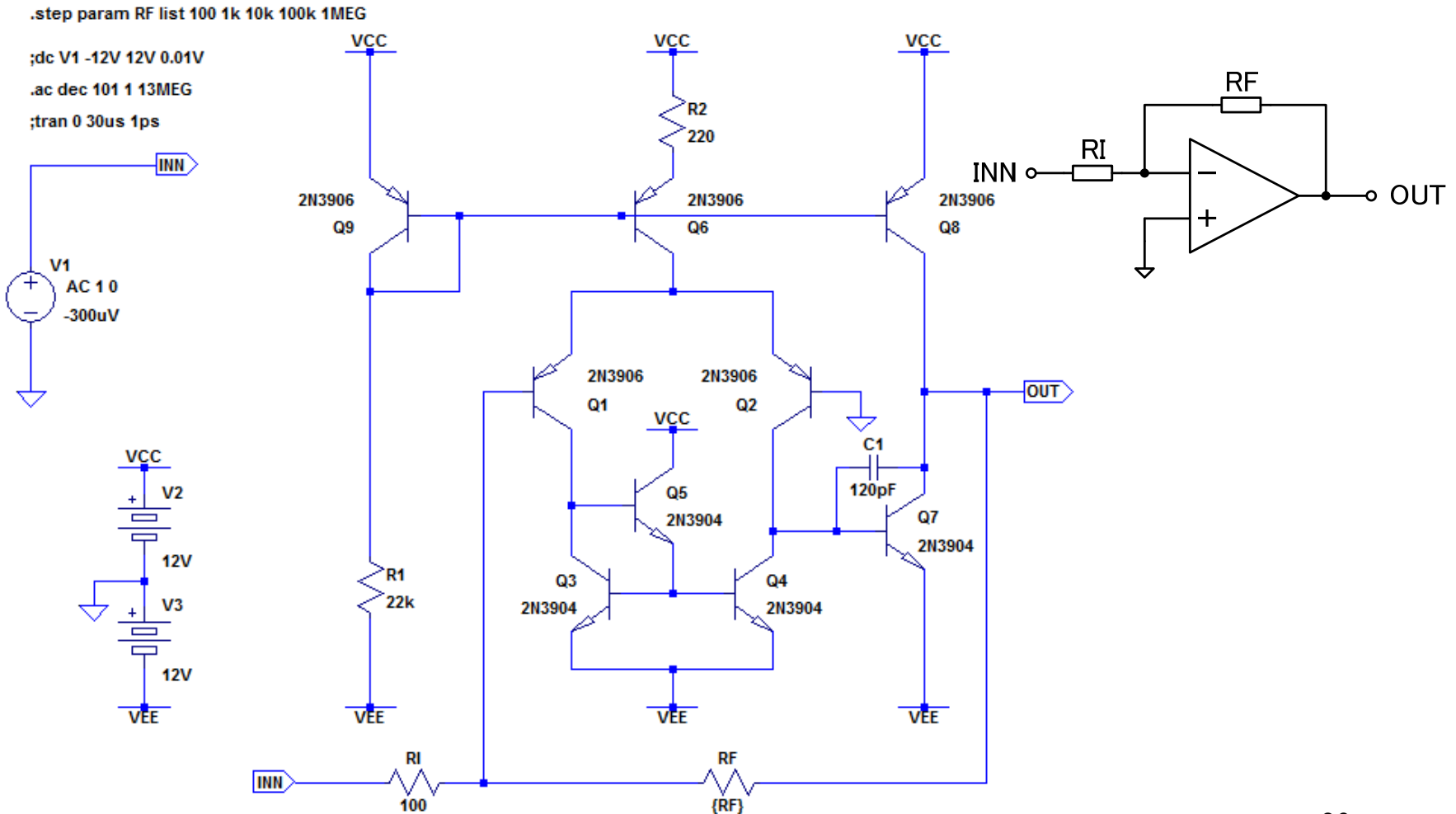
# (参考) 課題5. 4. 1 (2) のAC解析



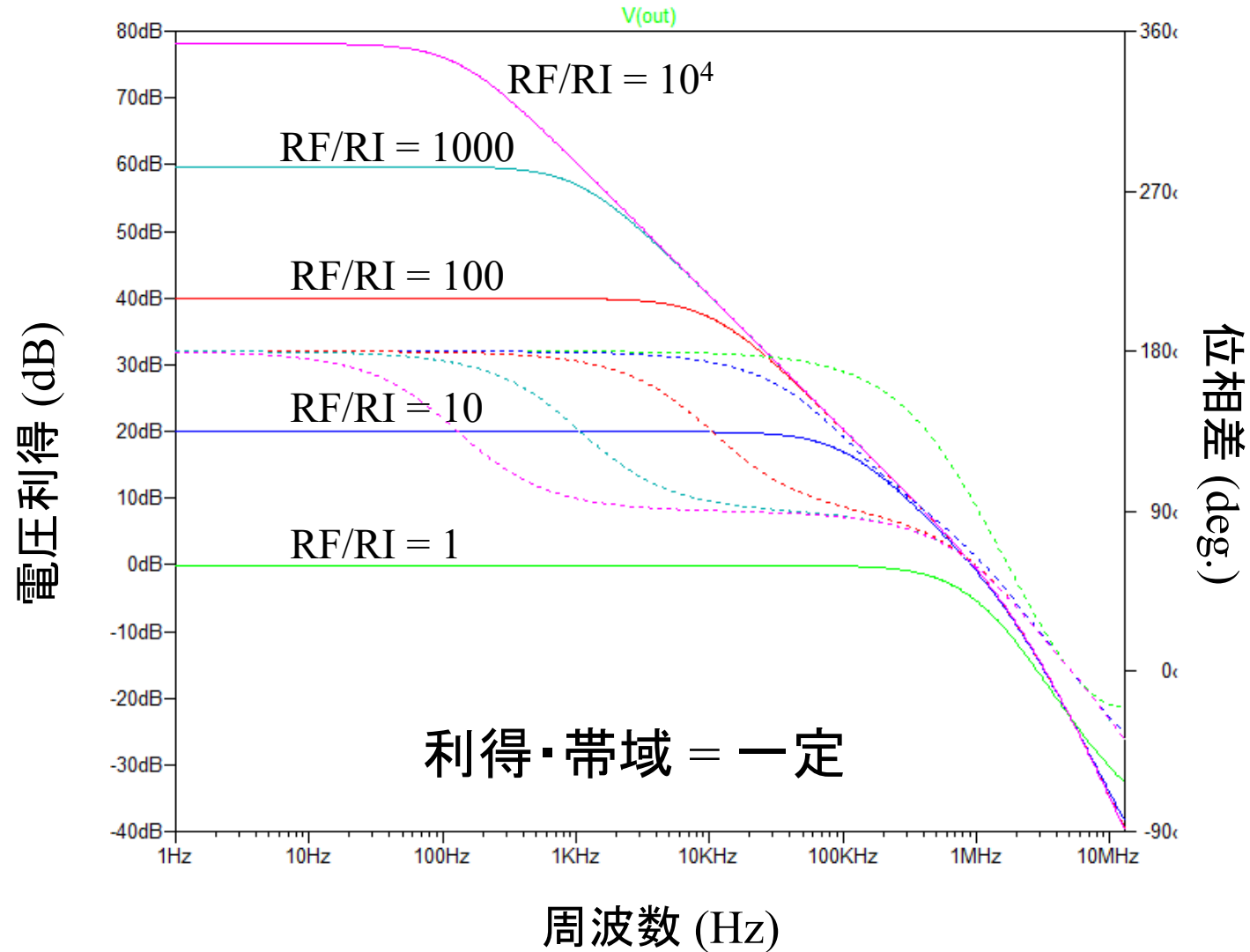
# (参考) 課題5.4.1(2)の TRAN解析



# 反転増幅回路の周波数特性



# シミュレーション結果



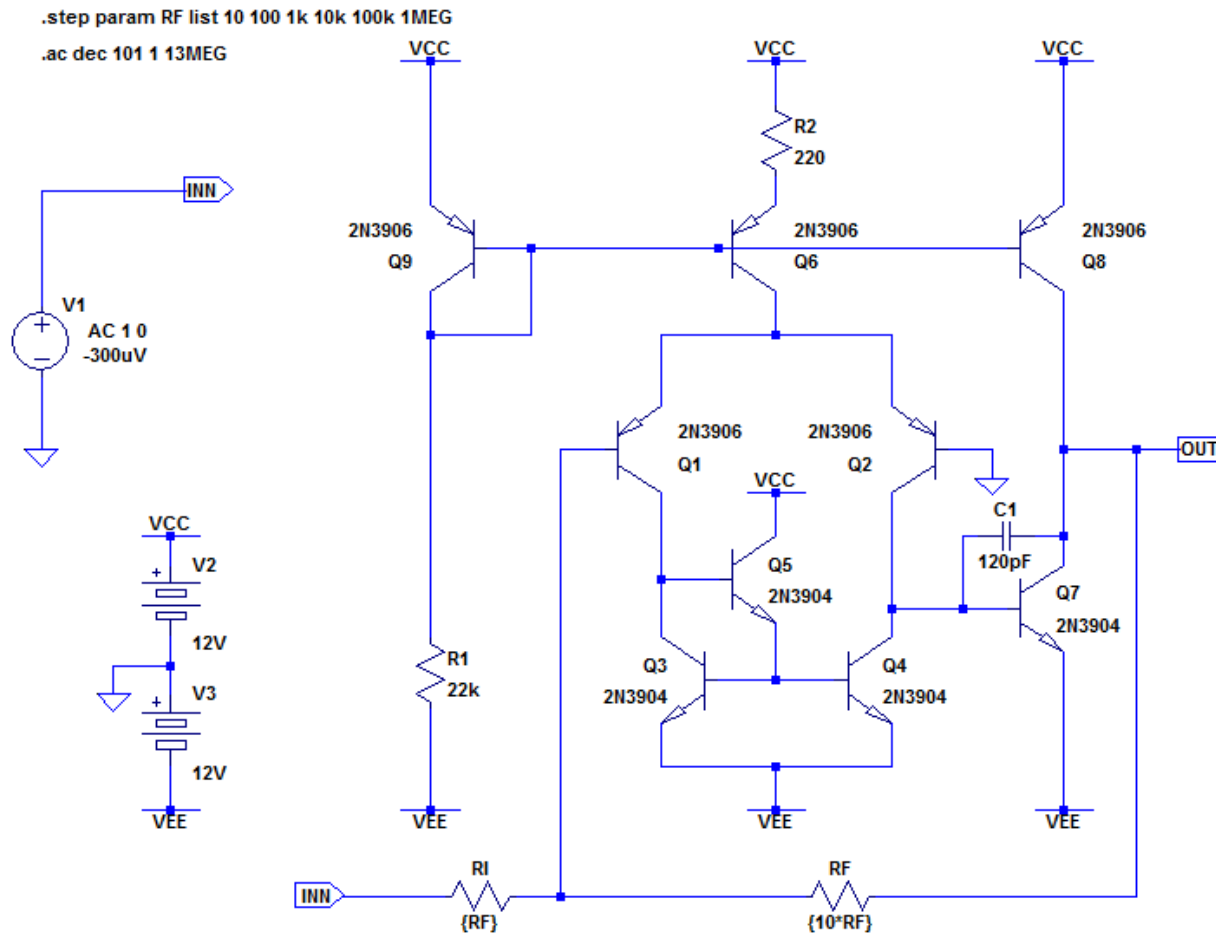


## 課題5.4.2

- 次ページに示すような $-10$ 倍の反転増幅回路について、フィードバック抵抗の値は、どれぐらいが適当かシミュレーションにより調べよ
  - AC解析結果のグラフを貼り付けること
  - 何オームぐらいの値になるとうまく動作しなくなるか

(参考) 演算増幅器を用いた反転増幅回路の電圧利得は、 $-R_F/R_I$ なので、比率が $10$ 倍であれば、 $R_F, R_I$ の値は自由に選べるはずであるが、実際には、演算増幅器の入出力インピーダンスの影響が現れ、あまり高抵抗を使用するとうまく動作しない。 $R_F$ に流れる電流を調べてみよう。

# フィードバック抵抗の影響評価回路



## 5.4節のまとめ

- 演算増幅器(Operational Amplifier)
  - 差動増幅回路を使用して直流を増幅できるようにしている
  - 差動増幅回路、電圧増幅回路、インピーダンスバッファから構成される
  - 負荷に電流源(カレントミラー)を使用して大きな利得を達成
  - 主な性能指標
    - 差動利得
    - 同相利得
    - CMRR
    - ユニティゲイン周波数(利得帯域幅積)
    - 位相余裕
    - SR
    - PSRR (Power supply rejection ratio)・・・省略
    - 同相入力電圧範囲・・・省略
    - オフセット電圧