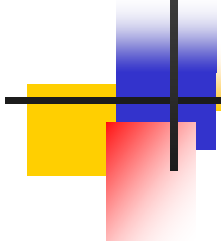


集積回路設計 第6回目 講義資料

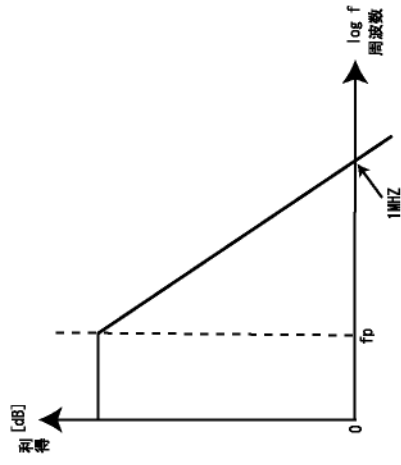
杉本 泰博



オペアンプのマクロモデル

仕様

| | | |
|-----------------|------|-----|
| オープンループゲイン (GV) | 200k | 倍 |
| 差動入力抵抗 | 2 | MΩ |
| 出力抵抗 | 75 | Ω |
| 利得・帯域幅積 (GBW) | 1 | MHZ |



$$f_p = \frac{GBW}{G_V} = 5 \text{ [Hz]} = \frac{1}{2\pi C_{DP} R_{DP}}$$

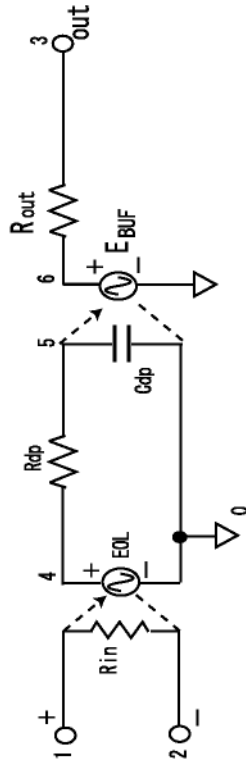
$R_{DP} = 10^6 [\Omega]$ とすれば

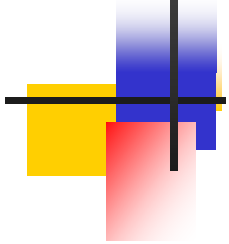
$$C_{DP} = 31.85 [nF]$$

```

RIN 1 2 2MEG
ROUT 6 3 75
EOL 4 0 POLY(1) 1 2 0 200k
RDP 4 5 1MEG
CDP 5 0 31.85NF
EBUF 6 0 POLY(1) 5 0 0 1

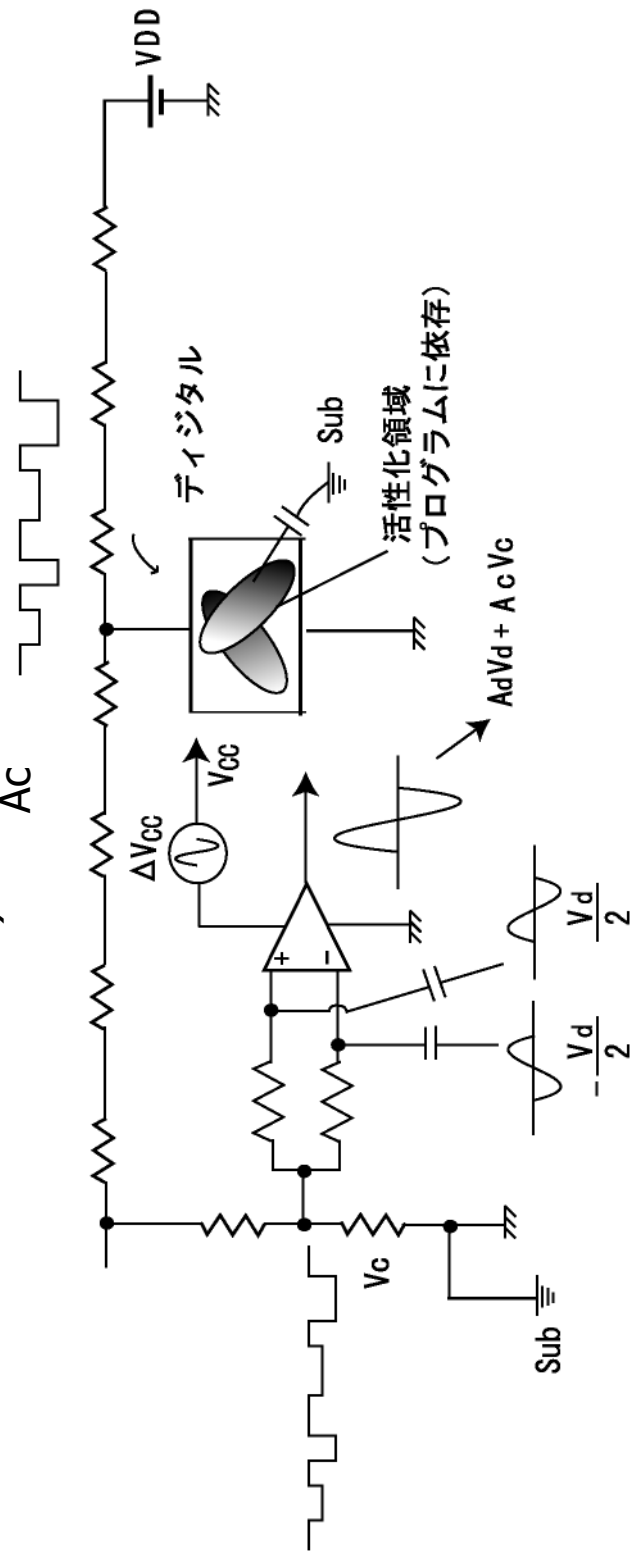
```



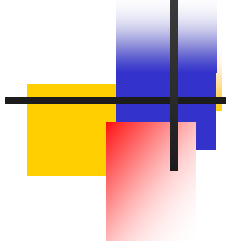


CMRR, PSRR

$$\text{同相信号除去比 (CMRR)} = \frac{A_d}{A_C}$$

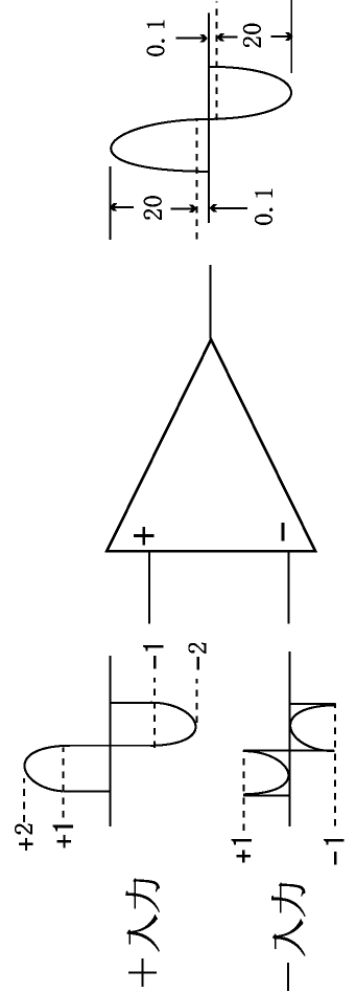
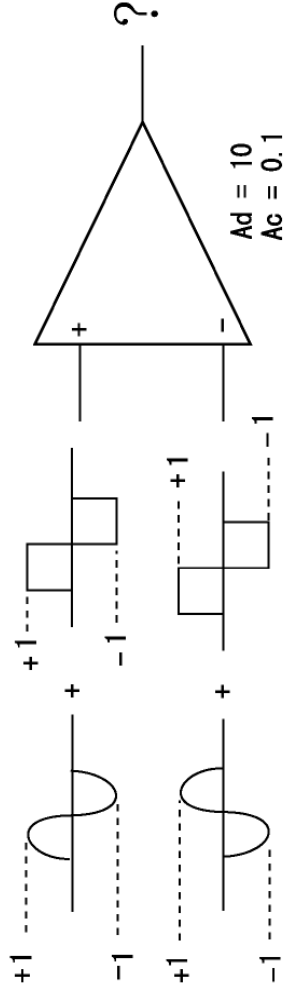


$$\text{電源電圧変動除去比 (PSRR)} = \frac{\Delta V_{CC}}{\Delta V_{out}} \times A_d$$

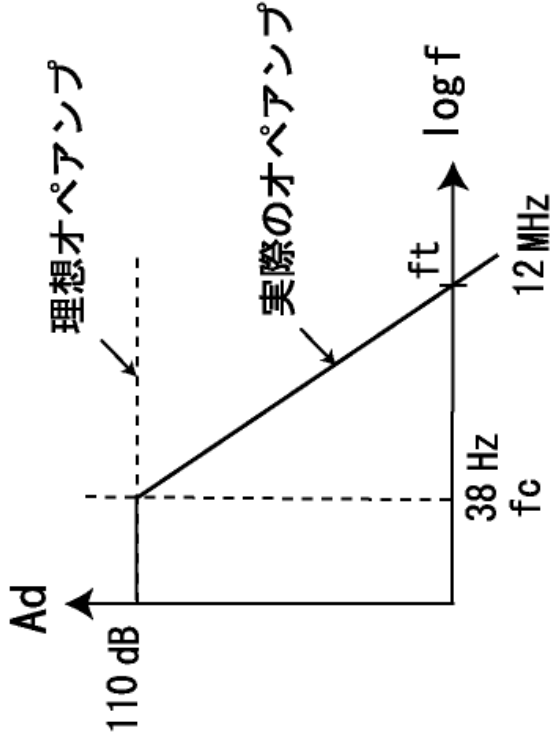


差動増幅とは

±1の大きさを持つ差動信号と同相信号を、図のようにオペアンプに加えた。オペアンプの+（正相）および-（逆相）入力に加わる合成波形を描きなさい。また、出力の波形を描きなさい。ただし、 $Ad=10$ 、 $Ac=0.1$ とする。



演習6.1 (差動利得の周波数特性と立ち上がり時間)



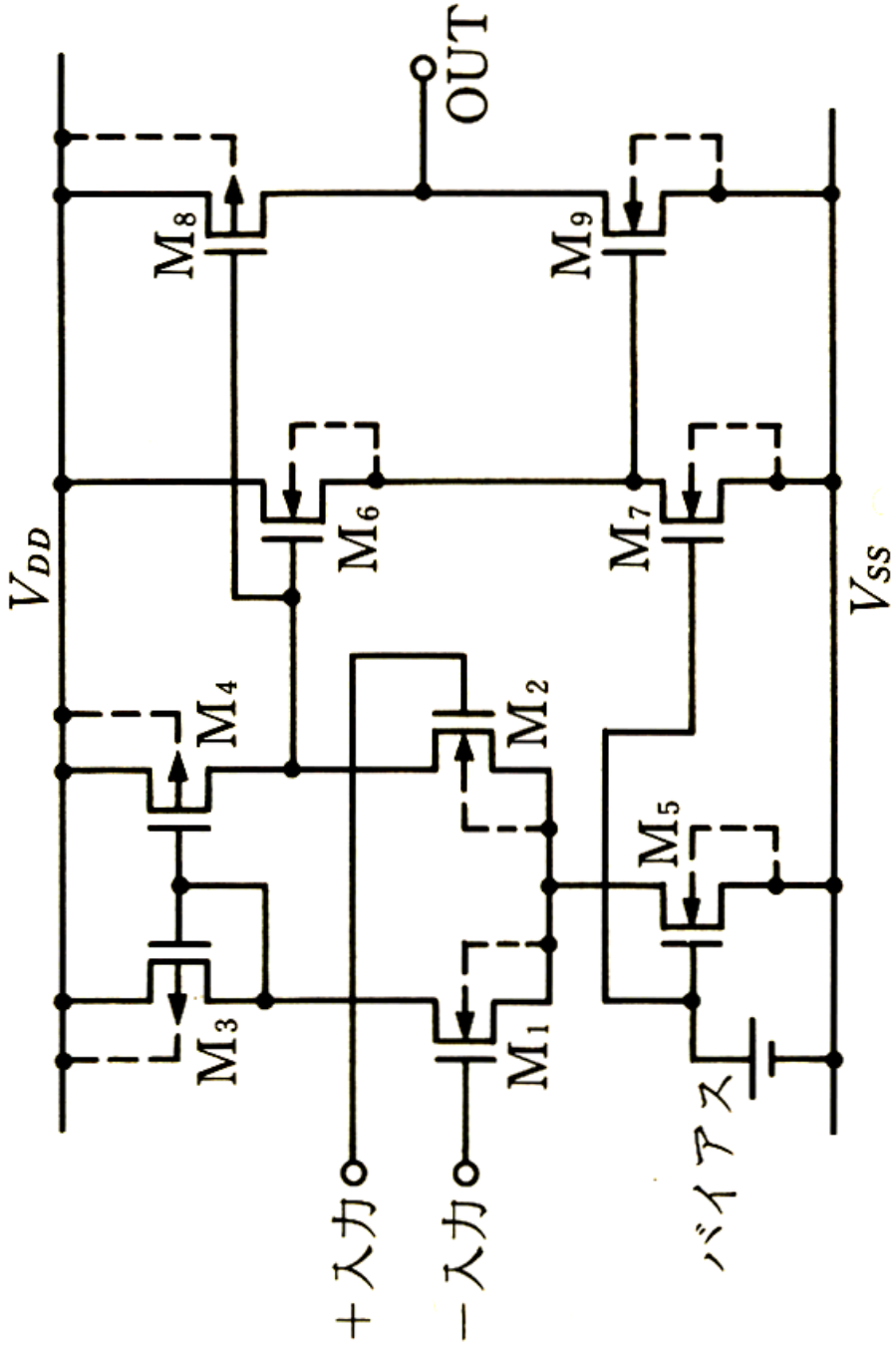
アンプの周波数特性を次式で表わす。
ステップ波形を入力した時の、
 $V_{out}(t)$ をラプラス変換により計算しな
さい。

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{A_{op}(0)}{1 + \frac{s}{\omega_{op}}}$$

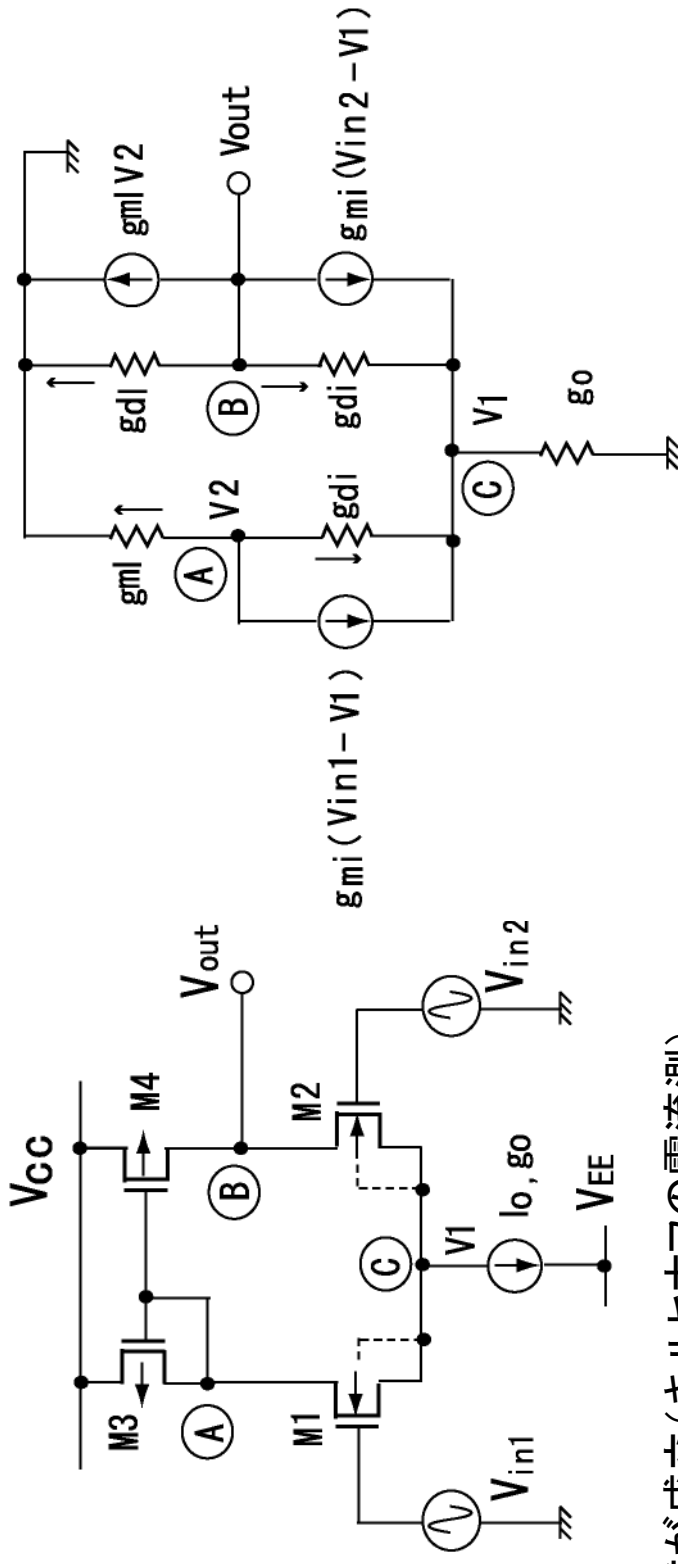
(ある f) × (f での利得) = 一定

= 利得帯域幅 = f_t

位相補償していないオペアンプの 全体回路



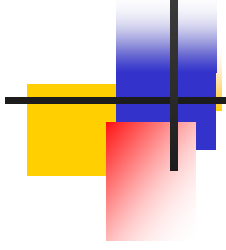
差動利得 & CMRRの算出



次式が成立(キルヒホフの電流測)

- Ⓐ : $g_{mi}(v_{in1} - v_1) + g_{di}(v_2 - v_1) + g_{ml}v_2 = 0$
- Ⓑ : $g_{ml}v_2 + g_{dl}v_{out} + g_{di}(v_{out} - v_1) + g_{mi}(v_{in2} - v_1) = 0$
- Ⓒ : $g_{mi}(v_{in1} - v_1) + g_{di}(v_2 - v_1) + g_{di}(v_{out} - v_1) + g_{mi}(v_{in2} - v_1) = g_0v_1$

より V_{out} を求めなさい。

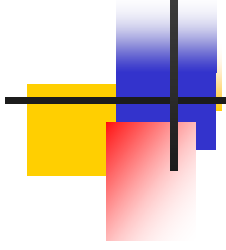


④、⑤、⑥ 式を書き直すと、

$$\begin{aligned}
 &-(g_{mi} + g_{di})v_1 + (g_{m1} + g_{d1})v_2 + 0 \cdot v_{out} = -g_{mi}v_{in1} \\
 &-(g_{mi} + g_{di})v_1 + g_{m1}v_2 + (g_{d1} + g_{dl})v_{out} = -g_{mi}v_{in2} \\
 &-(2g_{mi} + 2g_{di} + g_0)v_1 + g_{d1}v_2 + g_{d1}v_{out} = -g_{mi}(v_{in1} + v_{in2})
 \end{aligned}$$

クラメールの公式より、

$$v_{out} = \frac{
 \begin{vmatrix}
 -(g_{mi} + g_{di}) & (g_{m1} + g_{d1}) & -g_{mi}v_{in1} \\
 -(g_{mi} + g_{di}) & g_{m1} & -g_{mi}v_{in2} \\
 -(2g_{mi} + 2g_{di} + g_0) & g_{d1} & -g_{mi}(v_{in1} + v_{in2})
 \end{vmatrix}
 }{
 \begin{vmatrix}
 -(g_{mi} + g_{di}) & (g_{m1} + g_{d1}) & 0 \\
 -(g_{mi} + g_{d1}) & g_{m1} & (g_{d1} + g_{dl}) \\
 -(2g_{mi} + 2g_{di} + g_0) & g_{d1} & g_{d1}
 \end{vmatrix}
 }$$



CMRRを良くするには？

上式を解くと、

$$v_{out} = \frac{g_{mi}g_{ml}}{D} \left[2(g_{di} + g_{mi})(v_{in1} - v_{in2}) + g_0 \left\{ v_{in1} - \left(\frac{g_{di}}{g_{ml}} + 1 \right) v_{in2} \right\} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{但し、} D &= (g_{di} + g_{mi})\{g_{dl}g_{di} + 2g_{ml}(g_{dl} + g_{di})\} + g_0(g_{di} + g_{ml})(g_{dl} + g_{di}) \\ &\cong 2g_{mi}g_{ml}(g_{dl} + g_{di}) \end{aligned}$$

$$\text{上式を } v_{out} = A_{dm}v_{in,d} + A_{cm}v_{in,c}$$

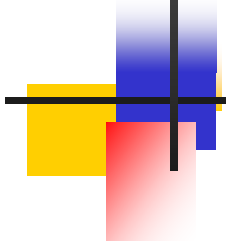
$$\text{但し、} v_{in,d} = v_{in1} - v_{in2}, \quad v_{in,c} = \frac{v_{in1} + v_{in2}}{2}$$

の形にすると、

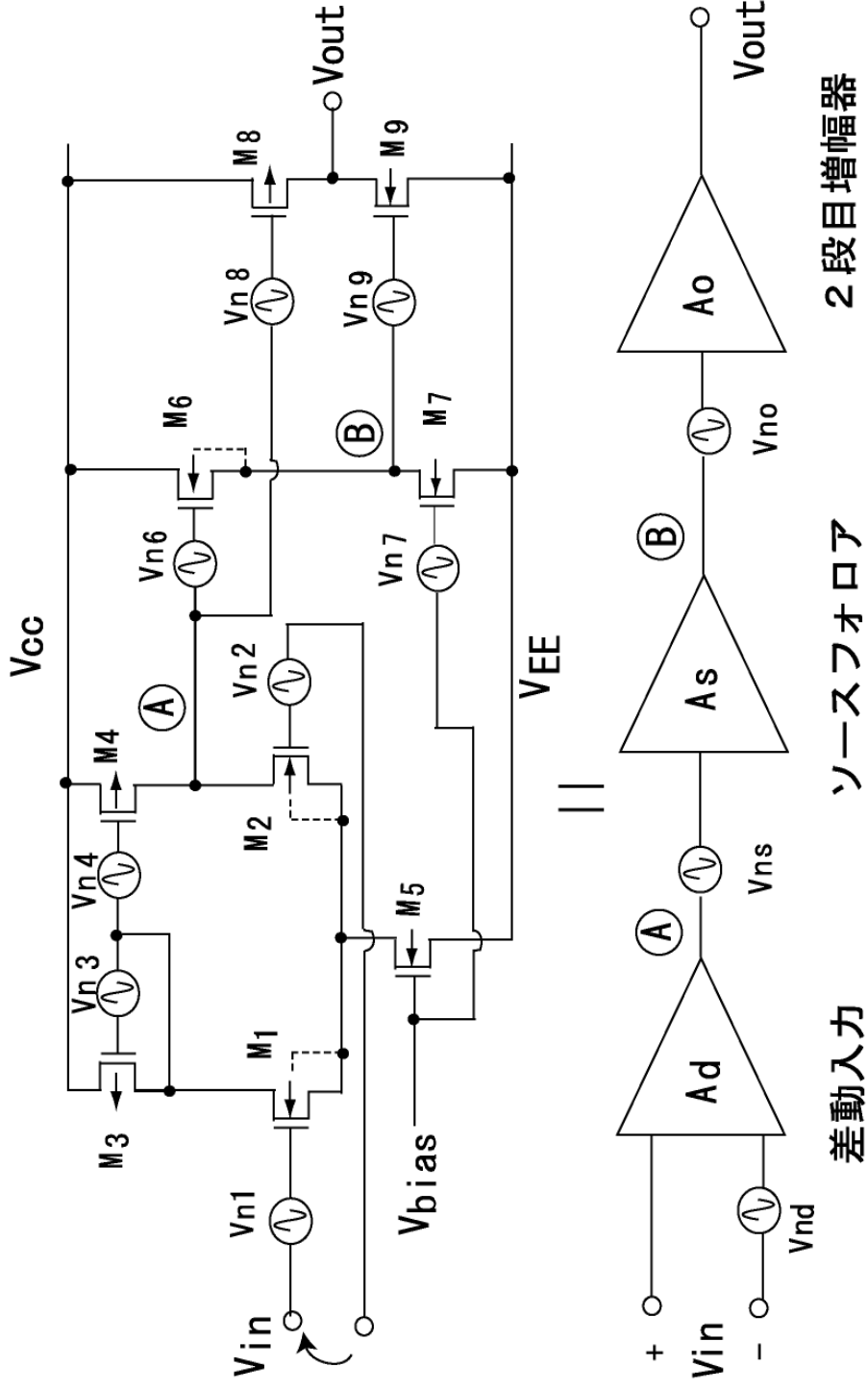
$$A_{dm} = \frac{g_{mi}g_{ml}}{D} \left\{ 2(g_{di} + g_{mi}) + g_0 \left(1 + \frac{g_{di}}{2g_{ml}} \right) \right\} \cong \frac{g_{mi}}{g_{dl} + g_{di}}$$

$$A_{cm} = -\frac{g_{mi}g_{di}g_0}{D} \cong \frac{-g_0g_{di}}{2g_{ml}(g_{dl} + g_{di})}$$

$$CMRR = \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right| = \frac{g_{ml}}{g_{di}g_0} \{ 2(g_{di} + g_{mi}) + g_0 \} + \frac{1}{2} \cong \frac{2g_{mi}g_{ml}}{g_0g_{di}}$$



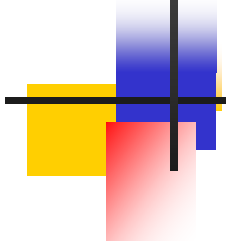
素子雑音の影響



2 段目増幅器

ソースフォロア

差動入力



$$A_d = \frac{v_A}{v_{n1}} = \frac{v_A}{v_{n2}} = \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}}, \quad A_v = \frac{v_A}{v_{n3}} = \frac{v_A}{v_{n4}} = \frac{g_{m3}}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

$$\therefore v_A^2 = A_d^2 (v_{n1}^2 + v_{n2}^2) + A_v^2 (v_{n3}^2 + v_{n4}^2)$$

等価入力雑音電圧 $v_{nd} = \frac{v_A}{A_d}$ である。

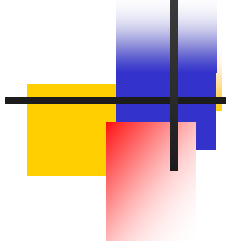
$$\overline{v_{nd}^2} = \overline{v_{n1}^2} + \overline{v_{n2}^2} + \left(\frac{g_{m4}}{g_{m1}} \right)^2 (\overline{v_{n3}^2} + \overline{v_{n4}^2}) \quad (g_{m3} = g_{m4})$$

v_{n3}, v_{n4} の影響をなくすには、 $g_{m4} < g_{m1}$ とすれば良い。

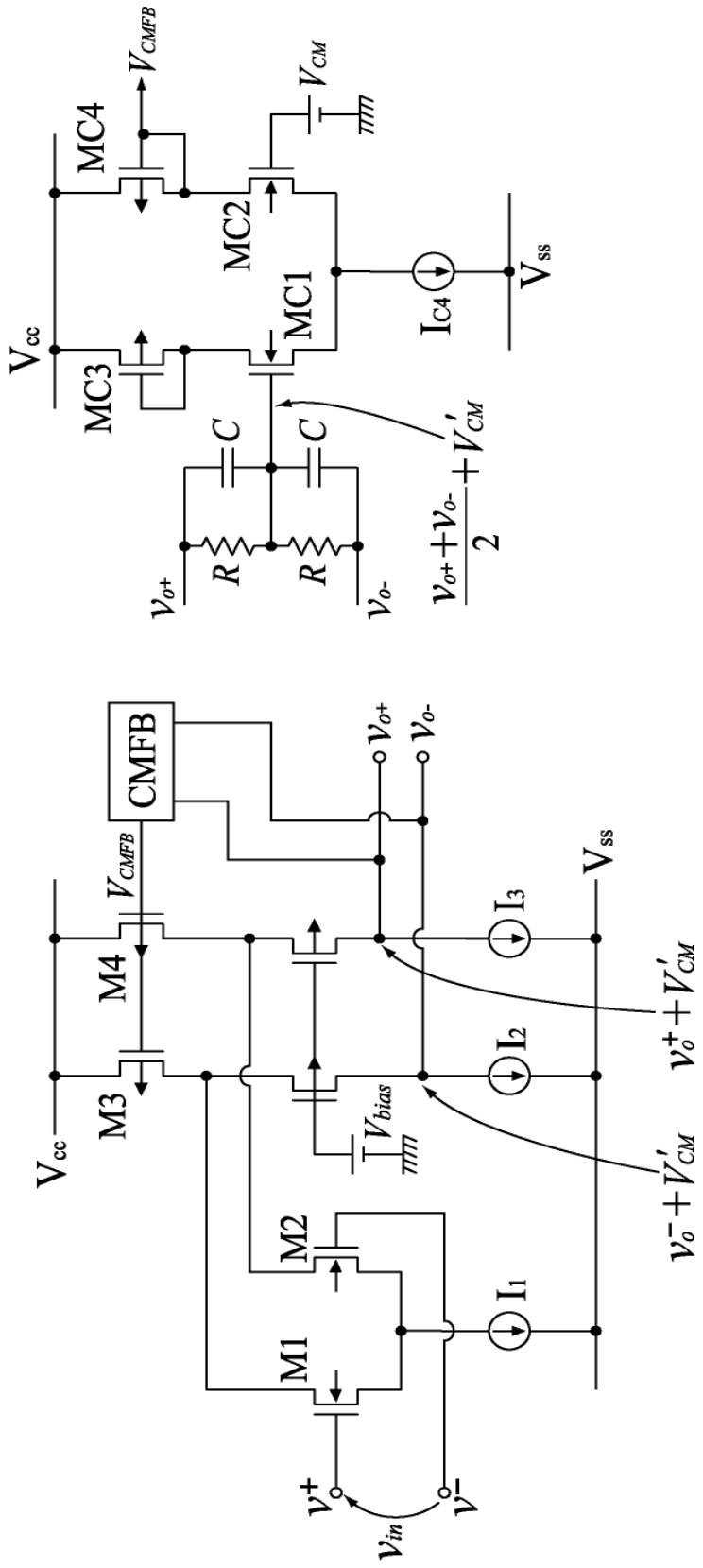
$$\text{同様に } \overline{v_{ns}^2} = \overline{v_{n6}^2} + \left(\frac{g_{m7}}{g_{m6}} \right)^2 \overline{v_{n7}^2} \quad (v_{n6} \text{ はソースフォロアでほぼ1倍、} v_{n7} \text{ は } \frac{g_{m7}}{g_{m6}} \text{ 倍})$$

通常、 v_{n8}, v_{n9} の影響は殆んど見られない(M8, M9のgmは大)のでこれを無視する。

トータルの入力換算雑音 v_n は、 $\overline{v_n^2} \cong \overline{v_{nd}^2} + \frac{v_{ns}^2}{A_d^2}$ である。



コモンモード・フィードバック



はこのままでは定まらない。
CMFB 回路が必要