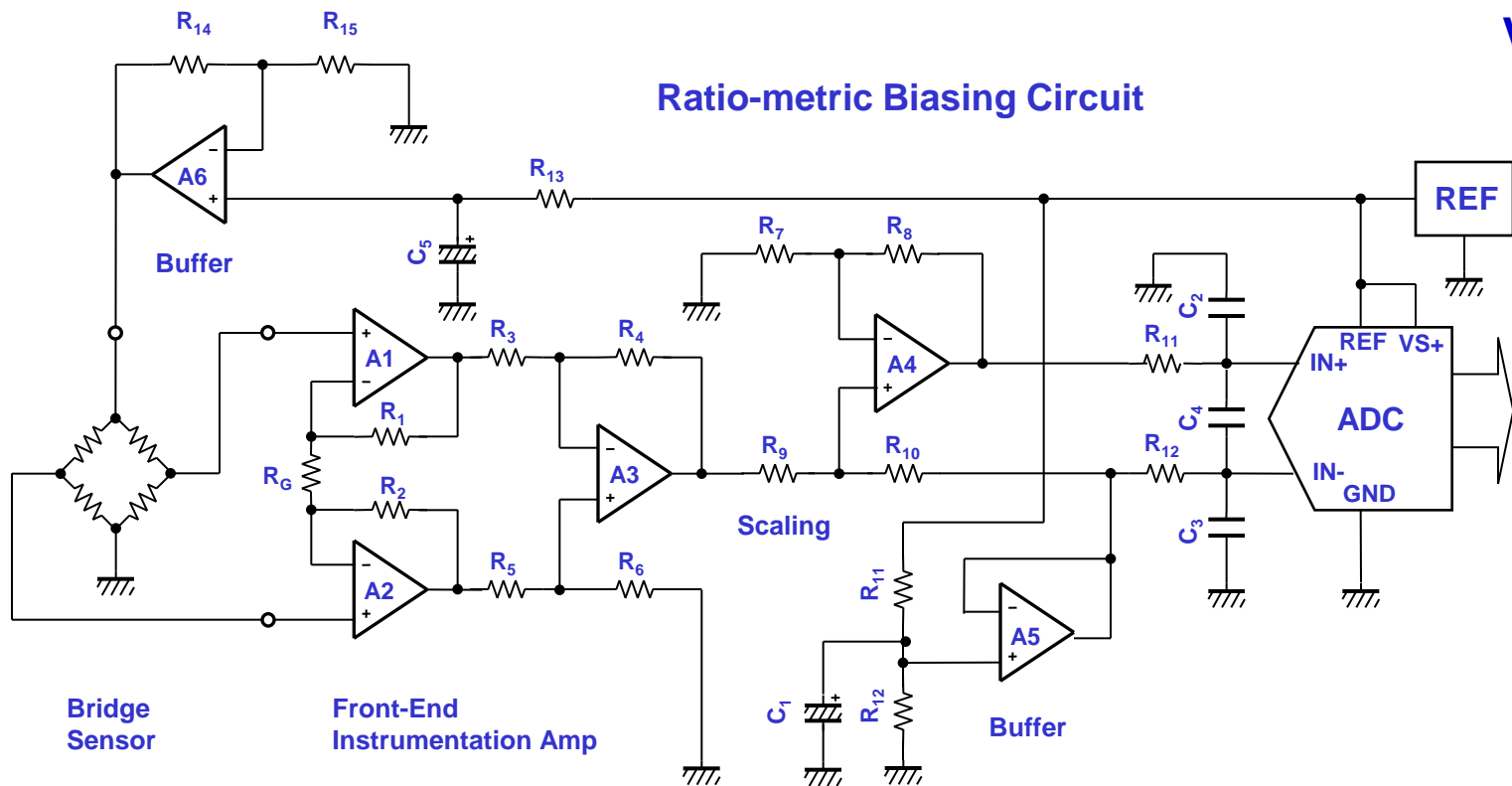


# Let's learn Signal Chain

## セッション4 : オペアンプ性能の理解(後半)

Ver.-2



# セッション・インデックス(後半)

## ✦ S4.1 出力段の性能

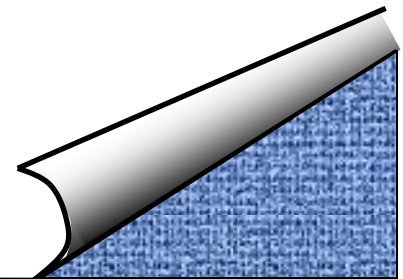
- (1) ステップ応答
- (2) スルーレートとセトリング時間
- (3) スルーレートと歪の関係

## ✦ S4.2 電圧帰還と電流帰還の違い

- (1) 電圧帰還型
- (2) 電流帰還型
- (3) 電圧帰還と電流帰還の比較

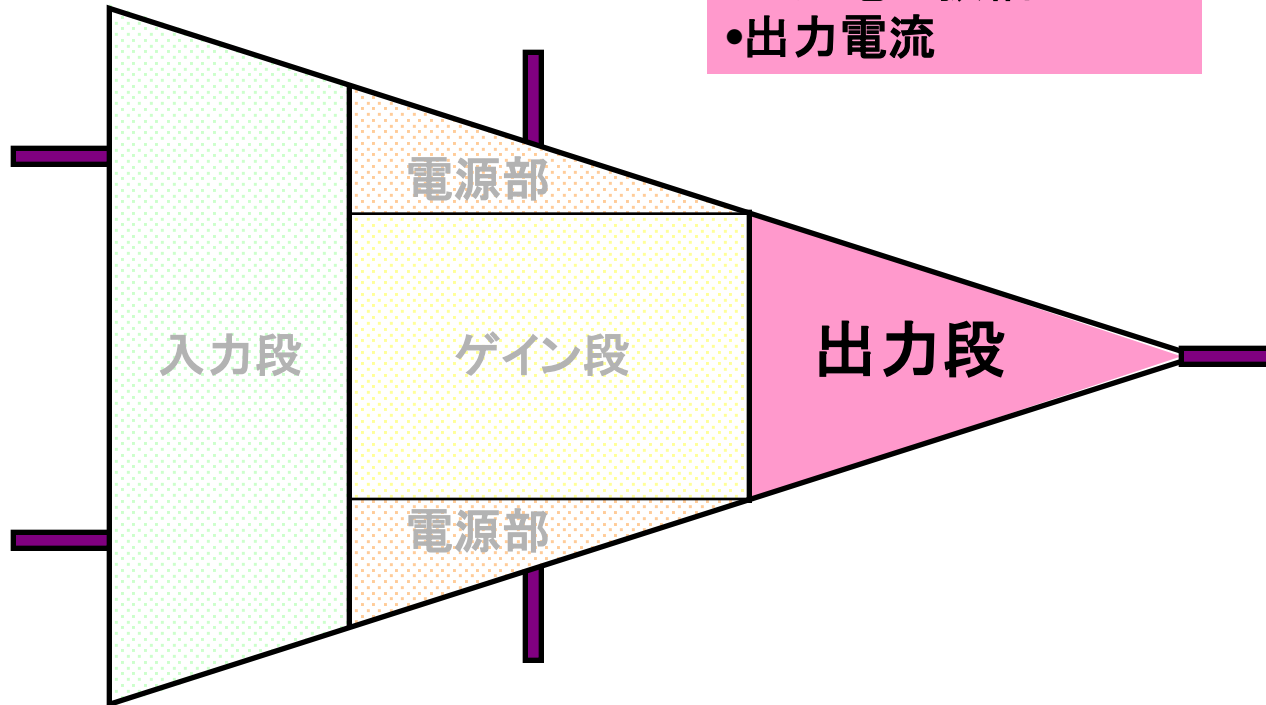
## ✦ S4.3 セトリング時間の実測

- (1) エッジシフト法による測定原理
- (2) 各種オペアンプの実測結果



# 出力段の主なスペック

- スルーレート
- セトリング時間
- 出カインピーダンス
- 出力電圧振幅
- 出力電流



## ✚ S4.1 出力段の性能

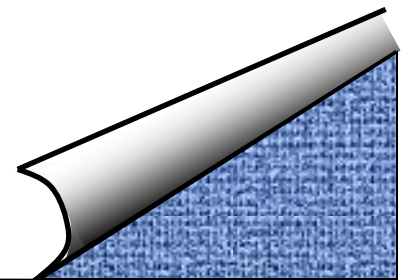
- (1) ステップ応答
- (2) スルーレートとセトリング時間
- (3) スルーレートと歪の関係

## ✚ S4.2 電圧帰還と電流帰還の違い

- (1) 電圧帰還型
- (2) 電流帰還型
- (3) 電圧帰還と電流帰還の比較

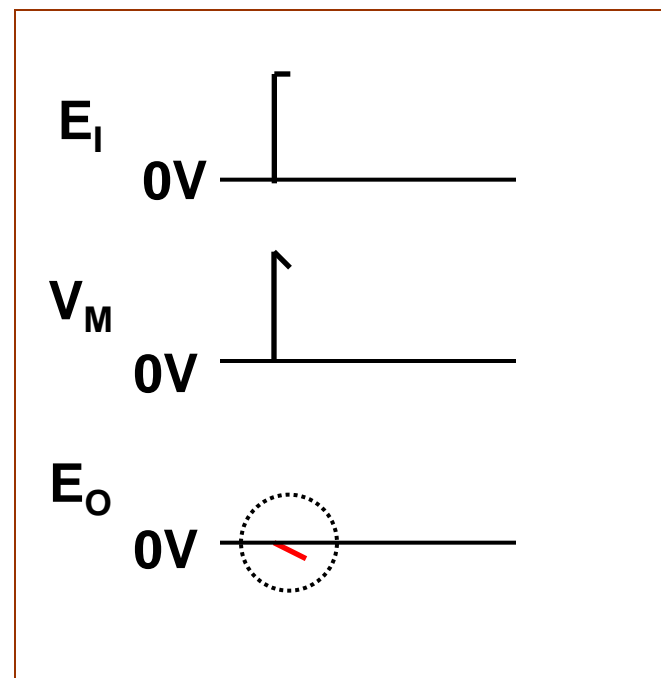
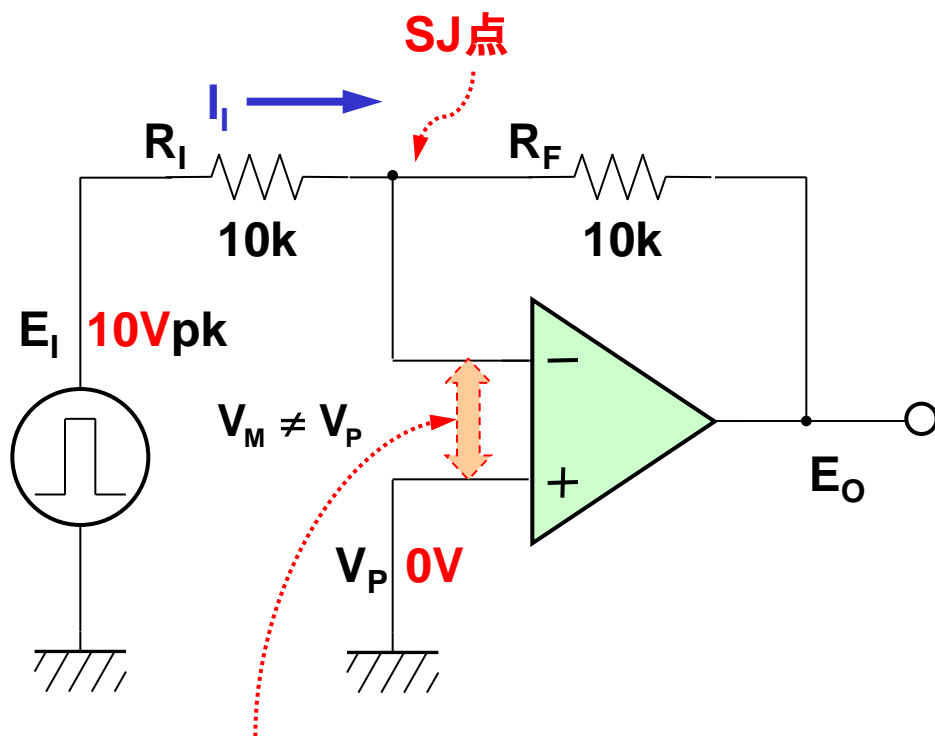
## ✚ S4.3 セトリング時間の実測

- (1) エッジシフト法による測定原理
- (2) 各種オペアンプの実測結果



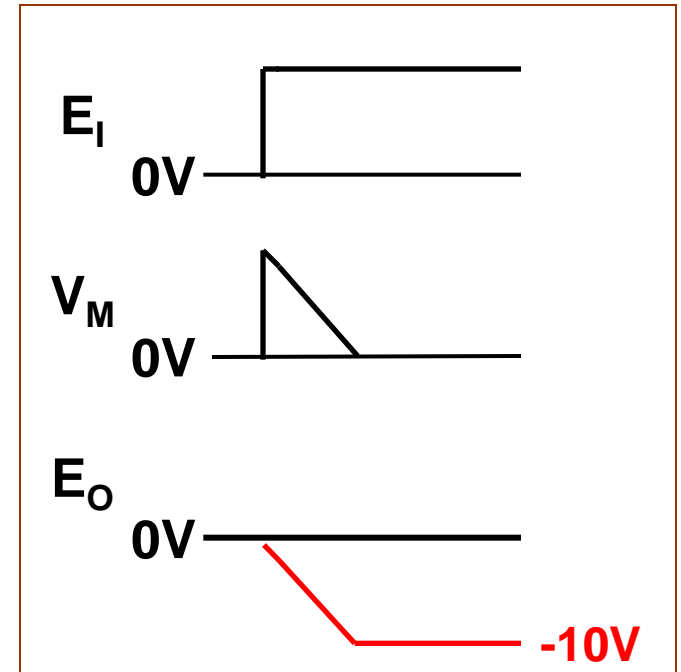
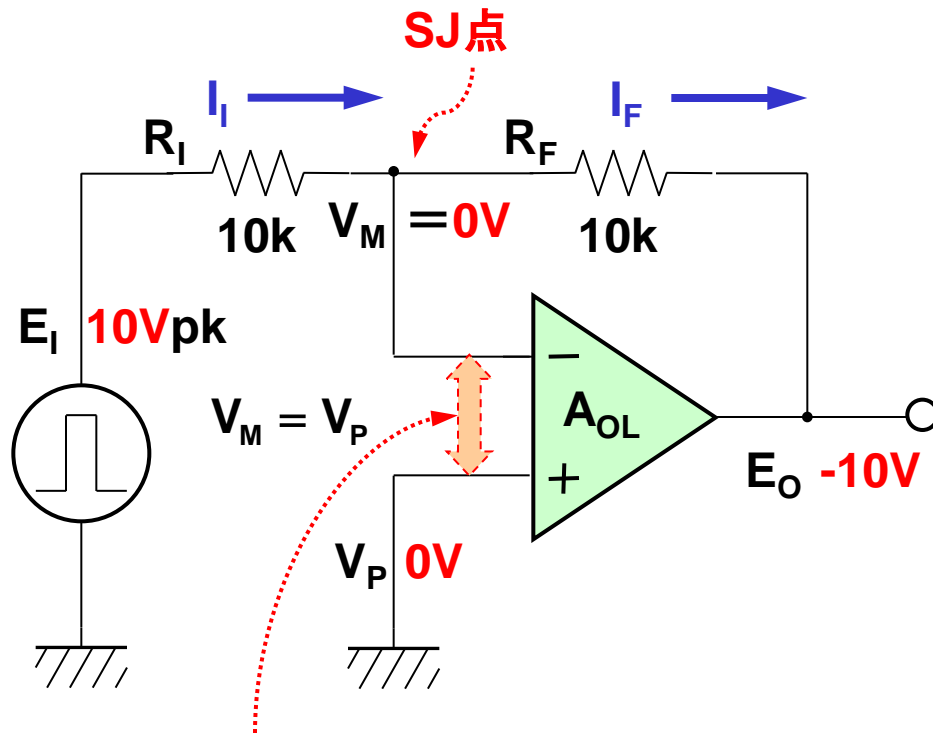
# 出力段: ステップ応答, アンプ出力の追従前

ステップ応答=パルス性信号に対する応答



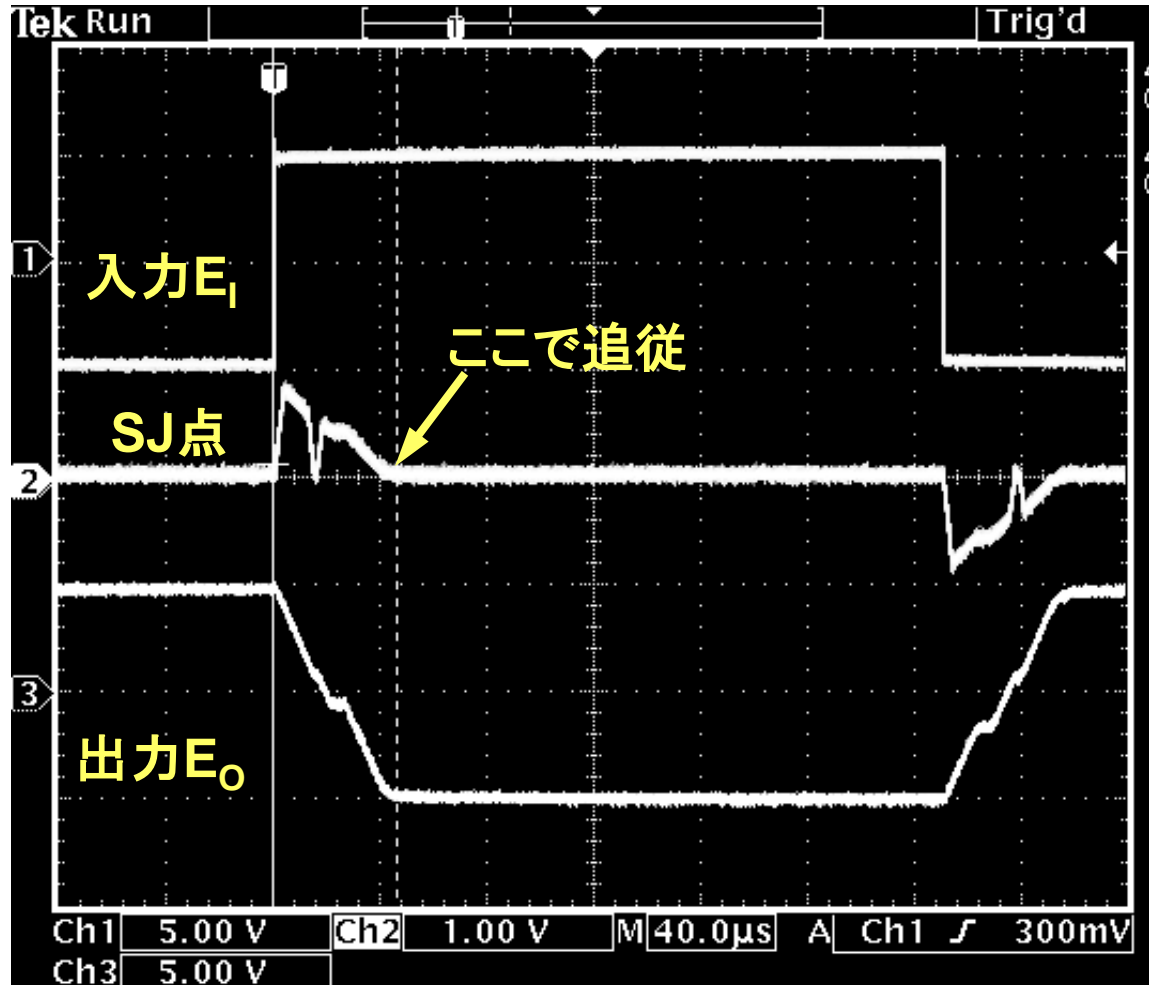
パルス  $E_I$  が加わると  $V_M$  が  $V_P$  より高くなり、  
アンプ出力  $E_O$  はマイナスの方向に変化を開始する。  
この状態ではバーチャル・ショートはブレーク。

## 出力段:ステップ応答, アンプ出力の追従後

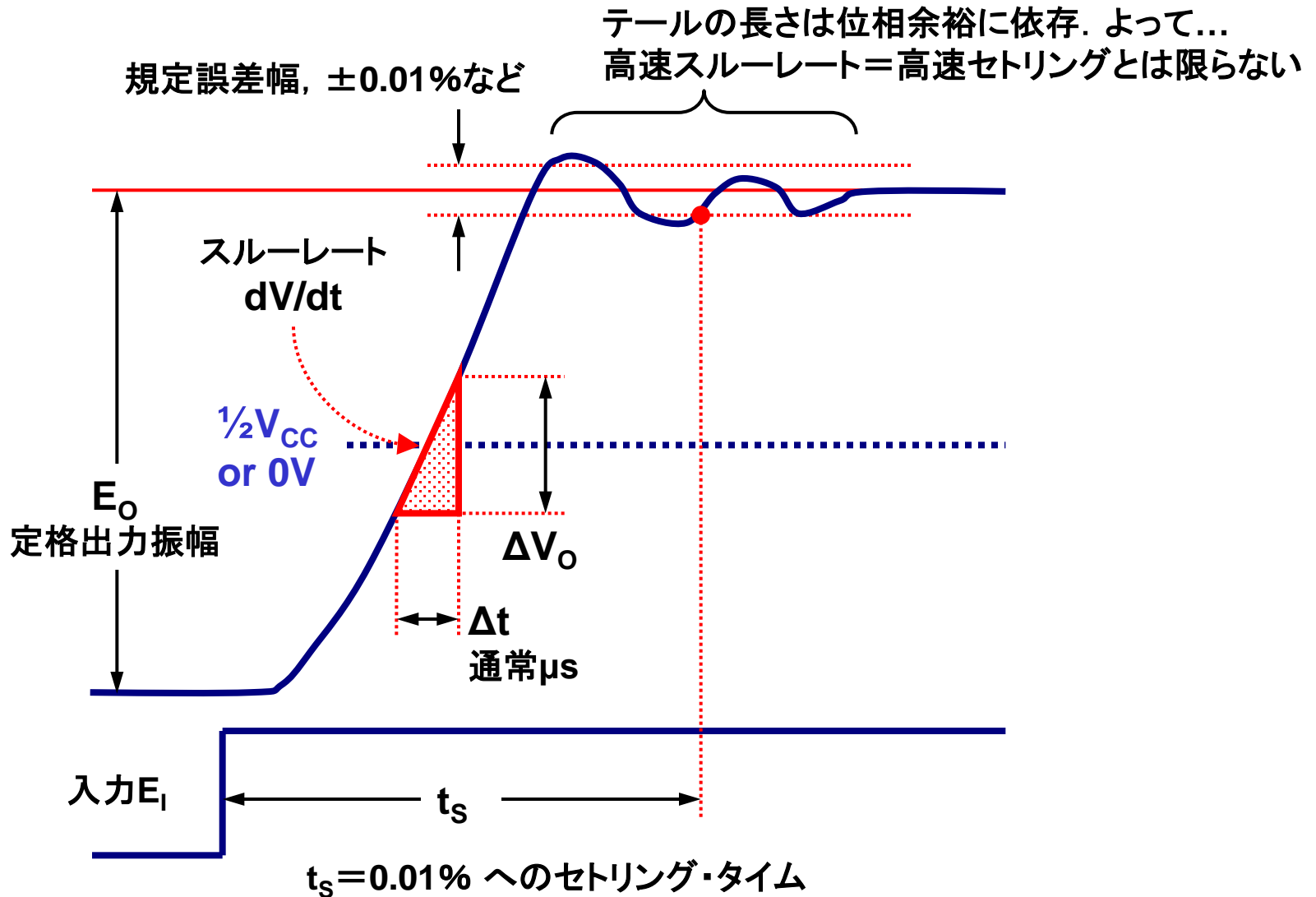


出力  $E_o$  が入力の変化に追いつくと、  
再び  $I_i = I_f$  となりバーチャル・ショート  
が成立し  $E_o$  は安定する。

# 出力段:ステップ応答の波形写真



# 出力段:スルーレートとセtring時間





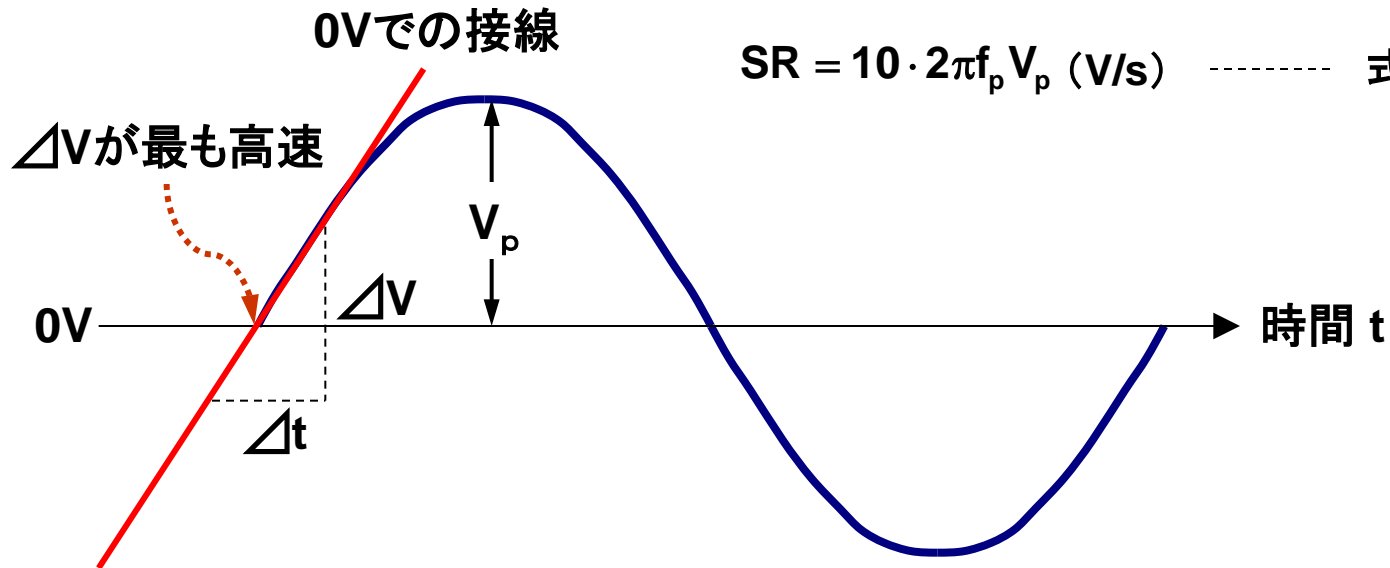
# 出力段:スルーレートと歪の関係

オペアンプのピーク出力振幅／周波数で決まる必要なスルーレート(SR)

$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ ----- 式4-1}$$

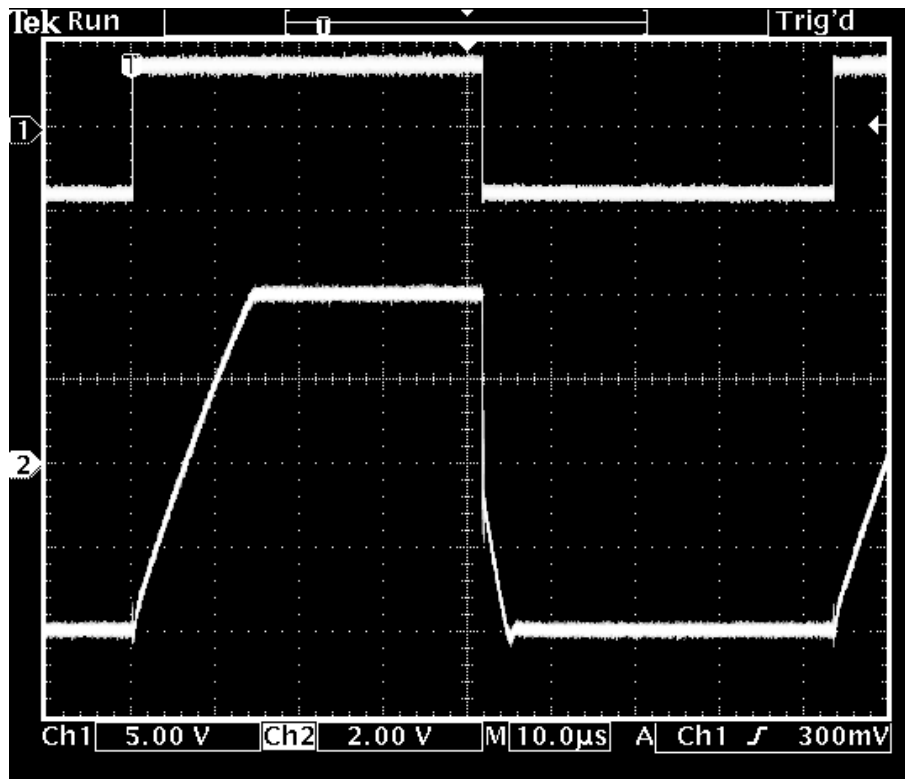
低歪を保障するためのスルーレートは(経験値)...

$$SR = 10 \cdot 2\pi f_p V_p \text{ (V/s) ----- 式4-2}$$

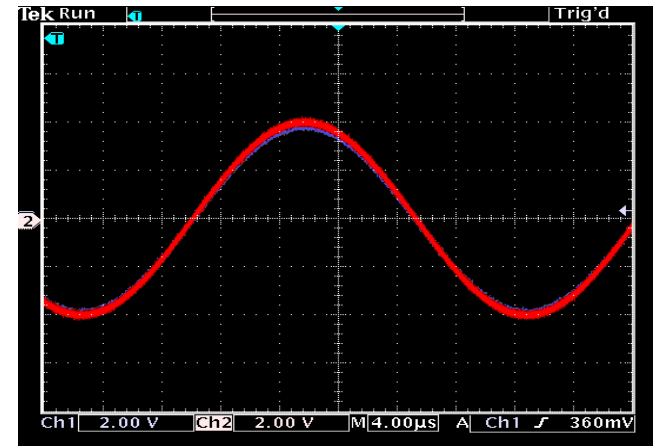


# 出力段:スルーレート不足による歪の波形写真

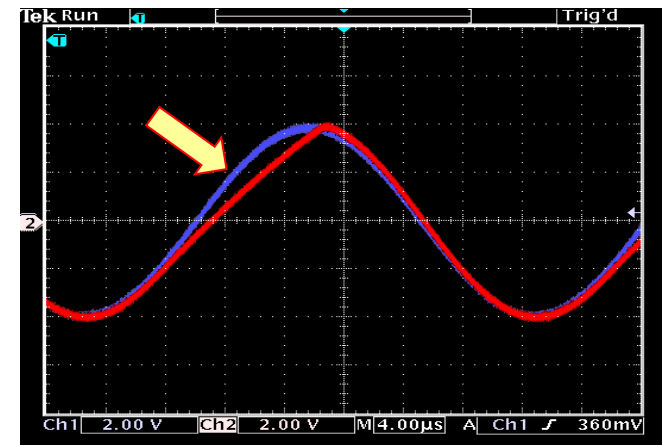
スルーレートが有限である実際の波形  
このアンプは昇りと下りの速さが異なる



低周波でのサイン波形



高周波での追従遅れ



## ✦ S4.1 出力段の性能

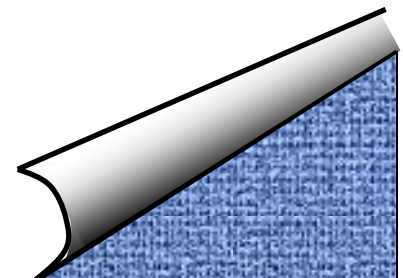
- (1) ステップ応答
- (2) スルーレートとセトリング時間
- (3) スルーレートと歪の関係

## ✦ S4.2 電圧帰還と電流帰還の違い

- (1) 電圧帰還型
- (2) 電流帰還型
- (3) 電圧帰還と電流帰還の比較

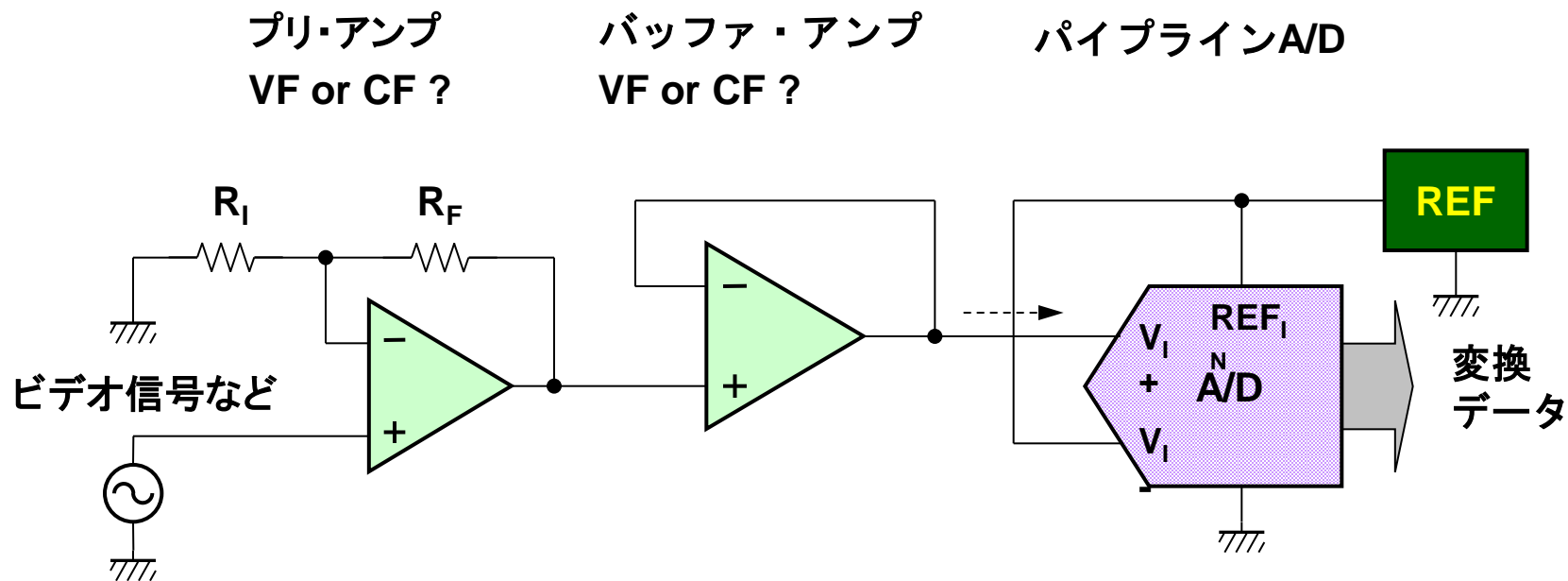
## ✦ 4.3 セトリング時間の実測

- (1) エッジシフト法による測定原理
- (2) 各種オペアンプの実測結果



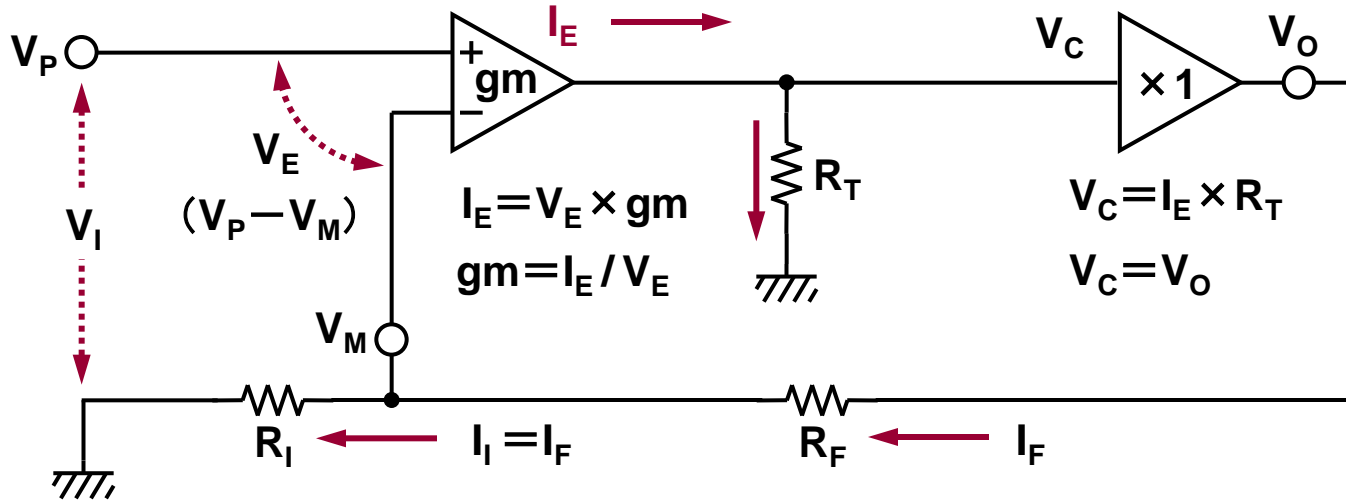
# 電圧帰還と電流帰還の違い

高速オペアンプ（50MHz以上）では  
電圧帰還型 “VF” と電流帰還型 “CF” の2種類がある。



# 電圧帰還型：信号増幅と帰還は電圧ベース

DC領域における開ループゲイン $A_{OL}(DC)$ と、閉ループゲイン $A_{CL}(DC)$ の考察。



$A_{OL}(DC)$ の構成.

$A_{CL}(DC)$ の構成

$A_{OL} = 1 \times 10^6$ ,  $R_F = 9k\Omega$ ,  $R_I = 1k\Omega$ なら,

$$V_O = V_E \cdot gm \cdot R_T$$

$$A_{CL}(DC) = \frac{A_{OL}(DC)}{1 + A_{OL}(DC) \cdot \beta}$$

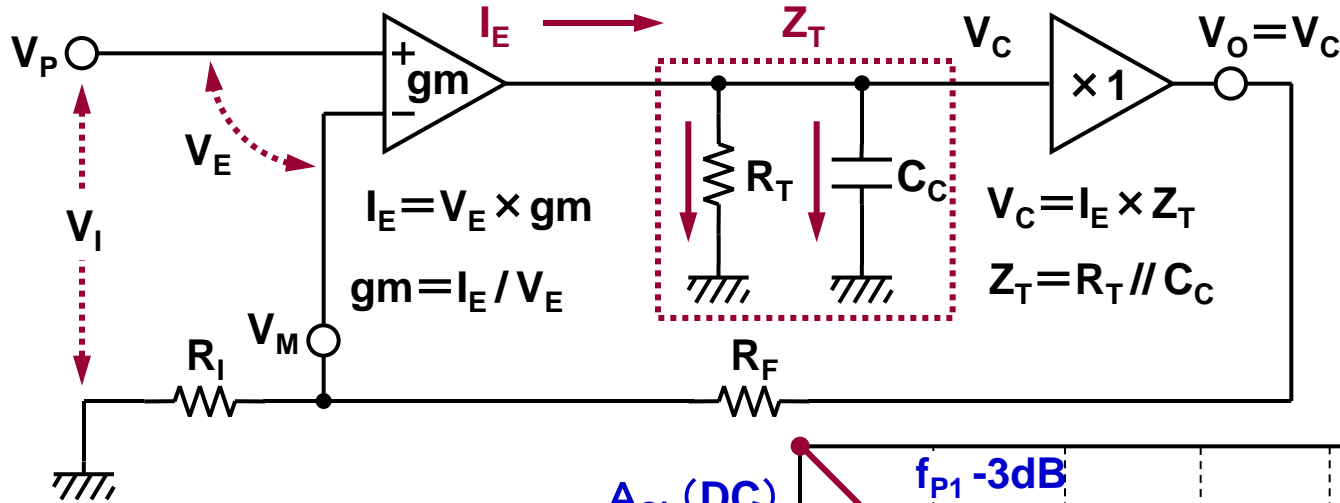
$$A_{CL}(DC) = \frac{1 \times 10^6}{1 + 1 \times 10^6 \times 0.1} = 9.999900001 \cong 10$$

$$A_{OL}(DC) = \frac{V_O}{V_E} = gm \cdot R_T$$

ここで  $\beta = \frac{R_I}{R_I + R_F}$

..... 開ループゲイン

# 電圧帰還型: $f_{p1}$ の位置は内部位相補償回路により最適化



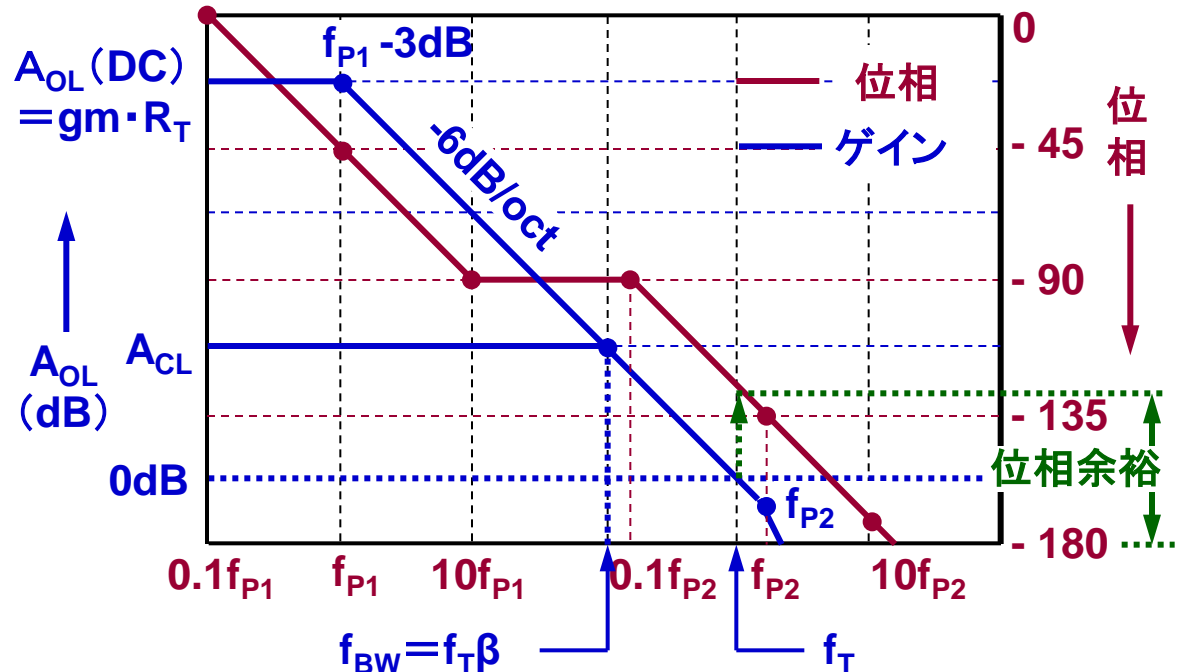
(-180° 基準)

$f_{p1}$  以降

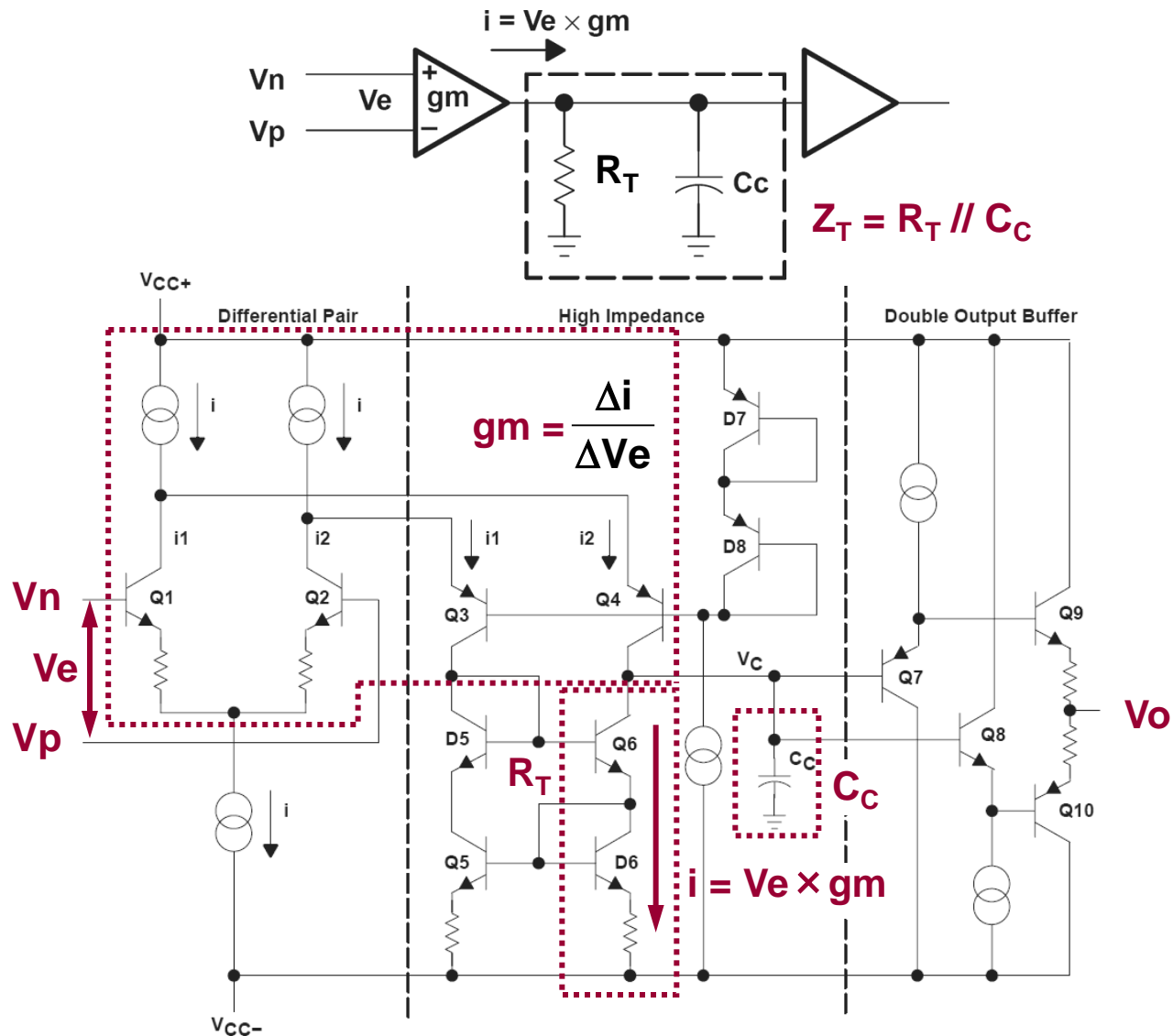
$$A_{OL}(AC) = gm \frac{R_T}{1 + 2\pi f R_T C_C}$$

$$f_{p1} = \beta \frac{gm}{2\pi C_C} \quad \text{ここで} \quad \beta = \frac{R_I}{R_I + R_F}$$

$$A_{CL}(AC) \cong \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + \beta \frac{2\pi f C_C}{gm}}$$

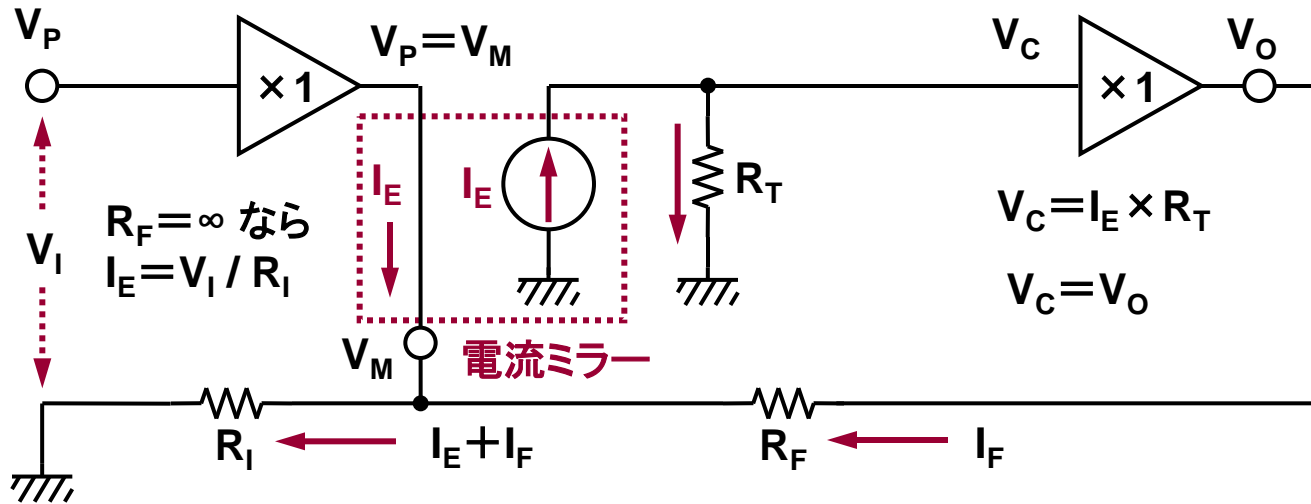


# 電圧帰還型：等価回路と実際の回路



# 電流還型：信号増幅は抵抗比で帰還は電流ベース

DC領域における開ループゲイン $A_{OL}(DC)$ と、閉ループゲイン $A_{CL}(DC)$ の考察。



$A_{OL}(DC)$ の構成.

$A_{CL}(DC)$ の構成

$R_T = 1 \times 10^6$ ,  $R_F = 900\Omega$ ,  $R_I = 100\Omega$ なら,

$$V_O = I_E \cdot R_T$$

$$A_{CL}(DC) = \frac{1}{\beta} \times \frac{R_T}{R_T + R_F}$$

$$A_{CL}(DC) = 10 \cdot \frac{1 \times 10^6}{1 \times 10^6 + 900}$$

$$A_{OL}(DC) = \frac{V_O}{I_E} = R_T$$

ここで  $\beta = \frac{R_I}{R_I + R_F}$

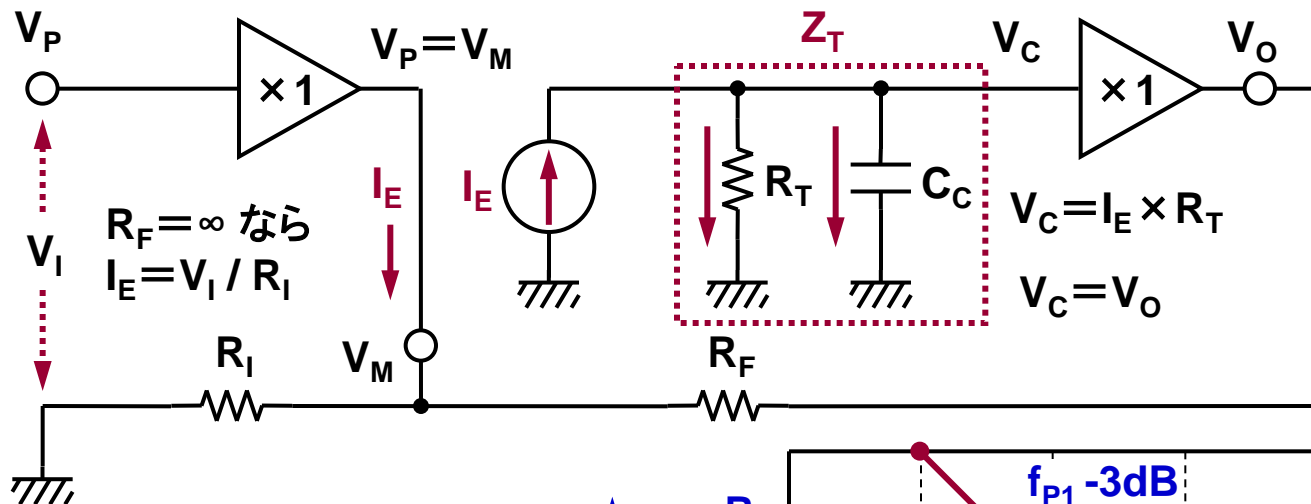
$$= 9.99100809$$

$$\cong 10$$

..... 開ループ・インピーダンス(DC)



# 電流帰還型: $f_p$ $R_F$ の位置を帰還抵抗 $R_F$ により決定する



(-180° 基準)

$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi R_T C_C}$$

$$A_{OL}(AC) = Z_T = \frac{R_T}{1 + 2\pi f R_T C_C}$$

$$f_{P_{RF}} = \frac{1}{2\pi R_F C_C}$$

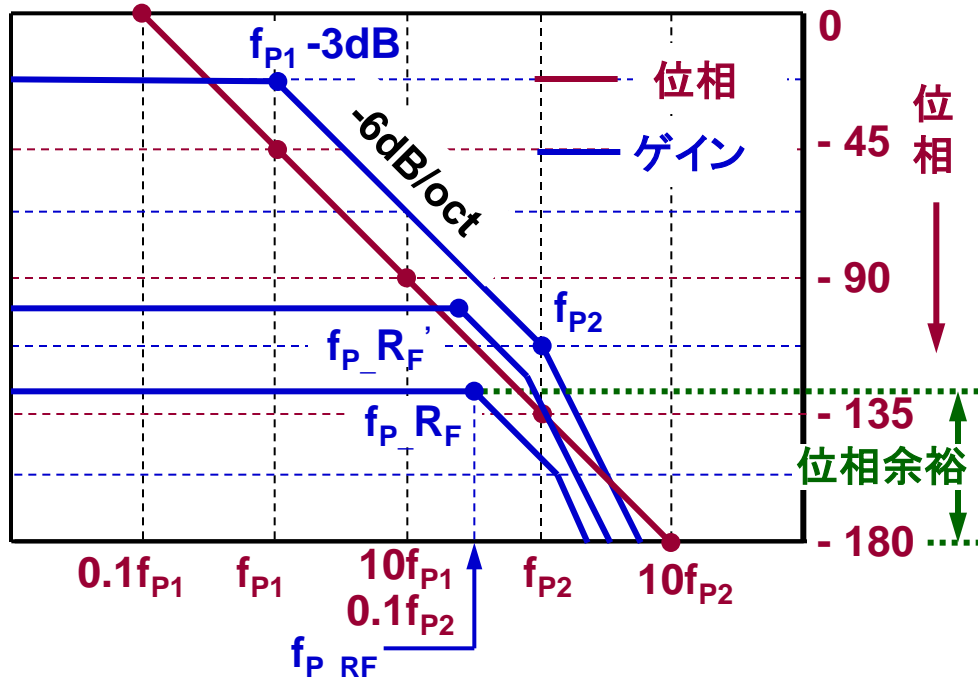
$f_{P_{RF}}$  以降

$$A_{CL}(AC) \cong \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + 2\pi f R_T C_C}$$

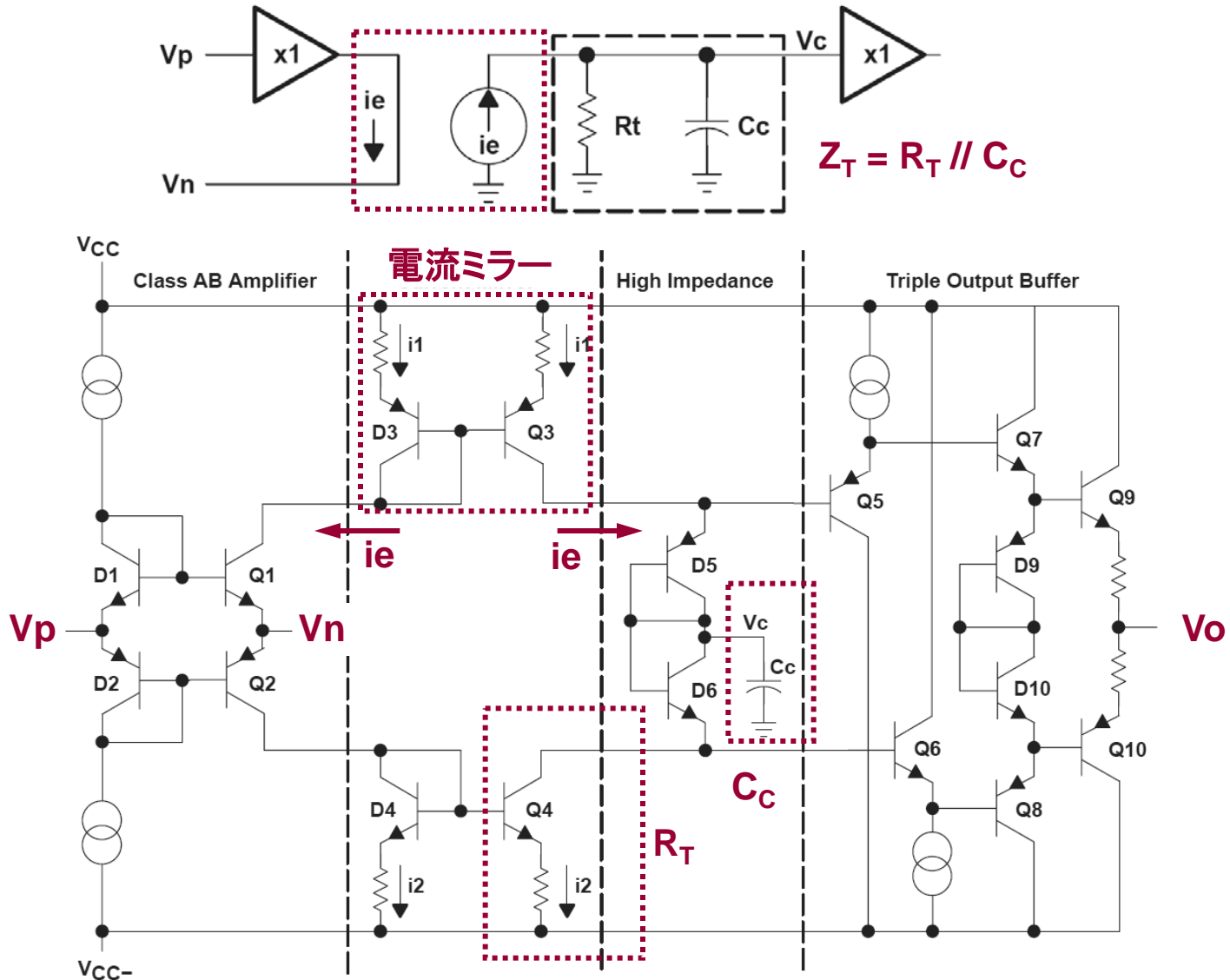
$$\beta = \frac{R_I}{R_I + R_F}$$

$Z_{OL}$  (dBΩ)

$A_{CL}$   
 $R_F$  (0dB)



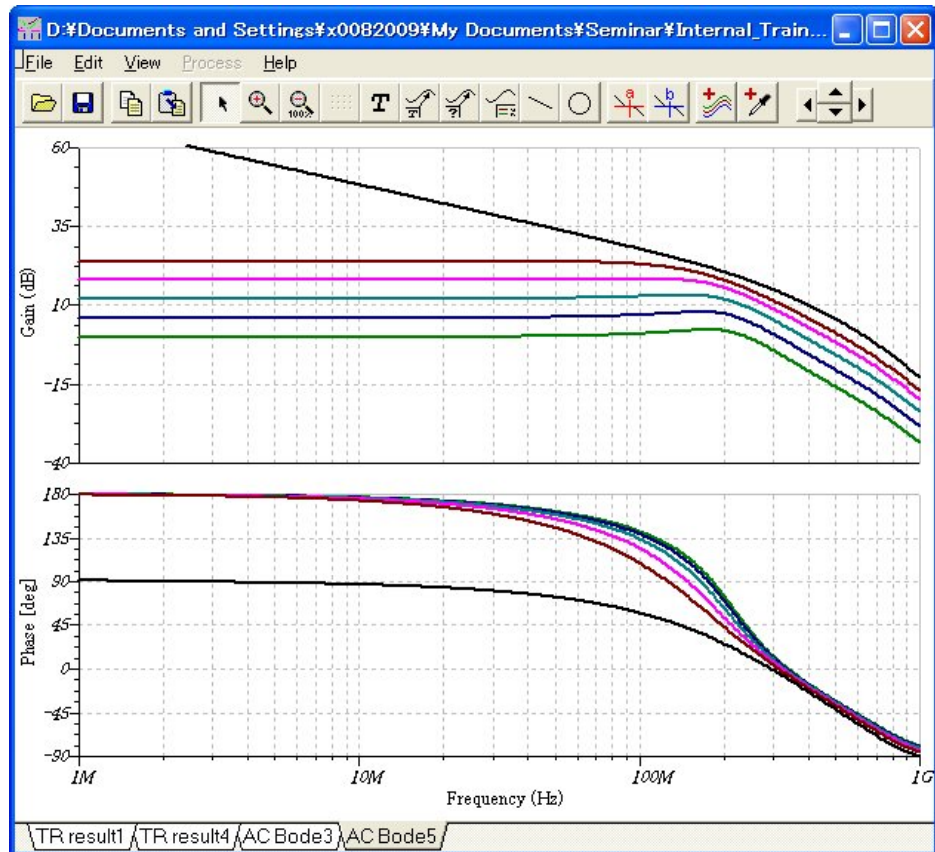
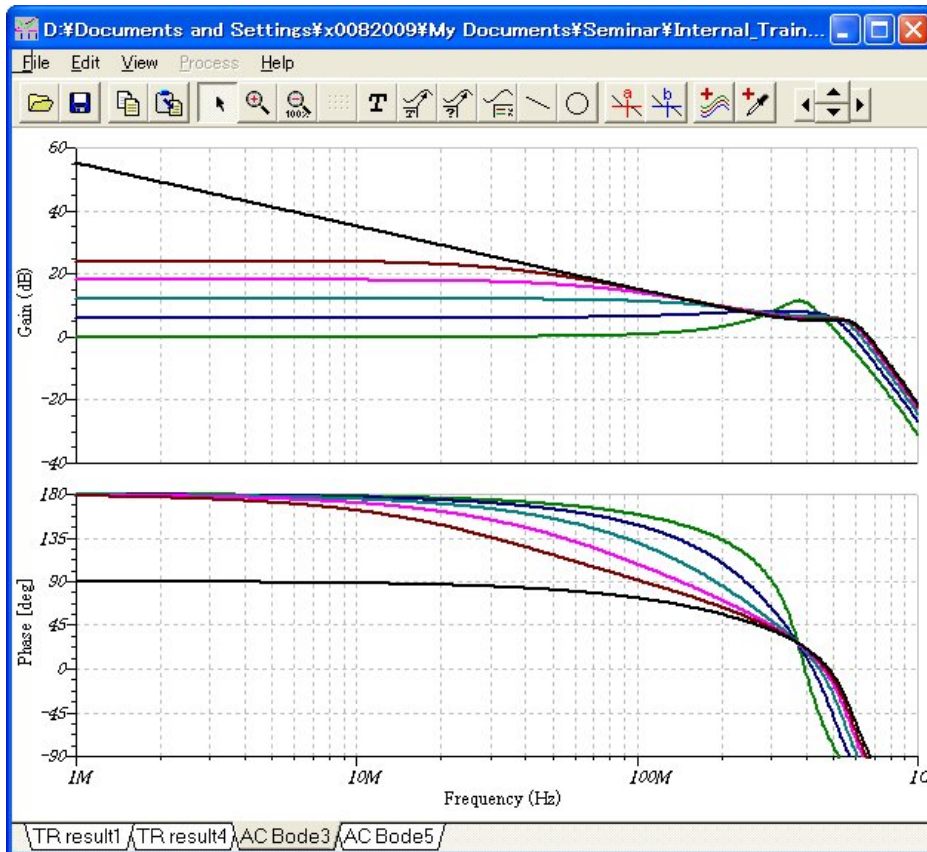
# 電流帰還型：等価回路と実際の回路



# 電圧帰還と電流帰還の比較:ボード線図

## 電圧帰還型

## 電流帰還型



# 電圧帰還と電流帰還の比較:スルーレート, 風説

電流帰還は一般にスルーレート SR が電圧帰還より早いとされるが

ビデオ信号バッファに見られる  $G=2$  の回路

電源  $\pm 5V$ ,  $G=5$ における比較

THS3001: 電流帰還型 (CF)

スルーレート:  $1300V/\mu s$ , 4V Step

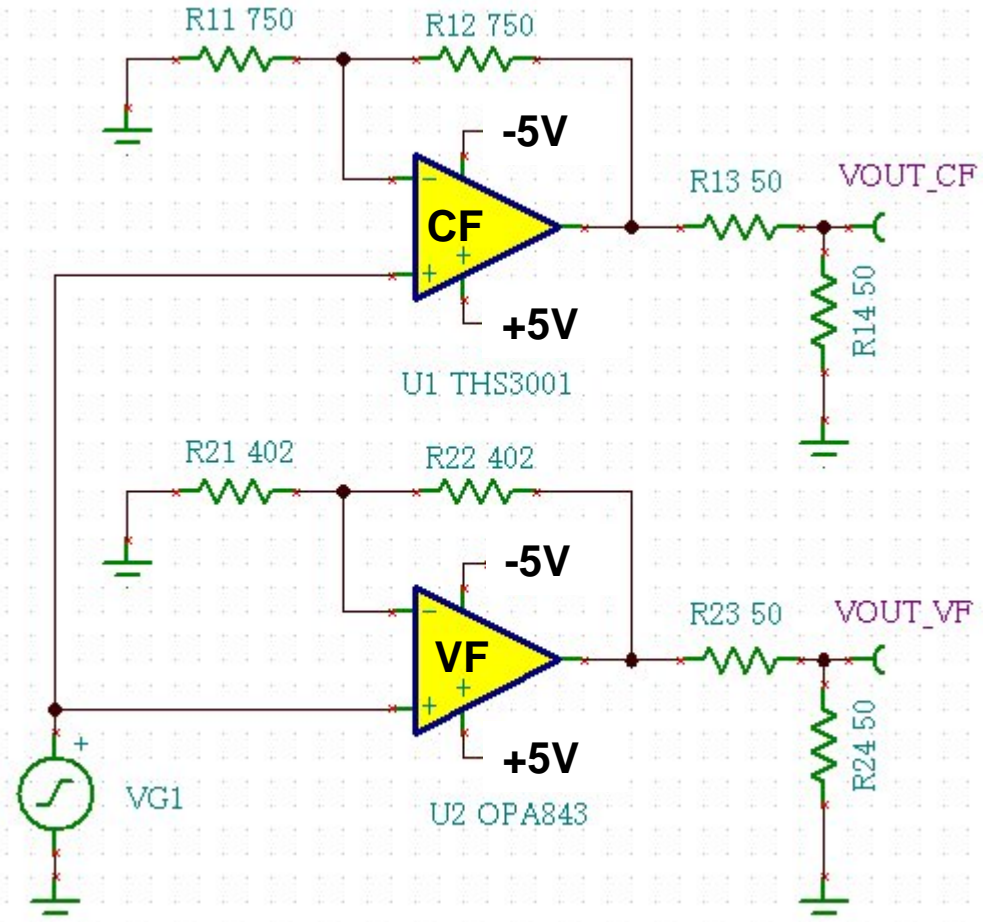
帯域幅: 350MHz, at -3dB

OPA843: 電圧帰還型 (VF)

スルーレート:  $1000V/\mu s$ , 2V Step

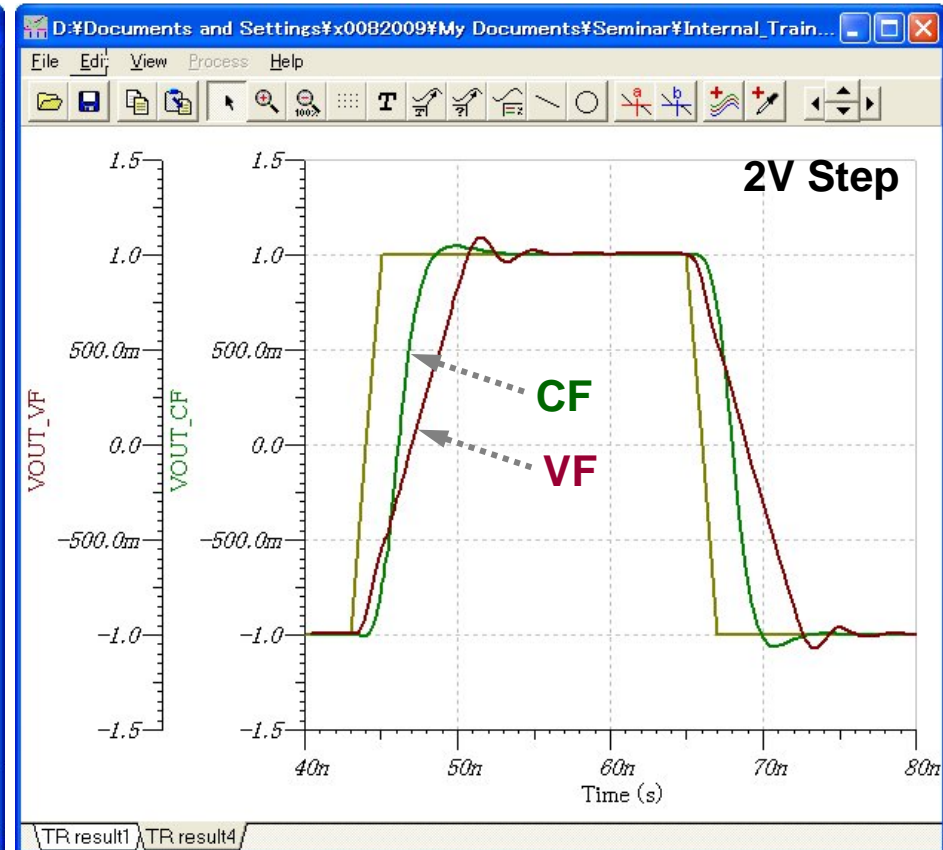
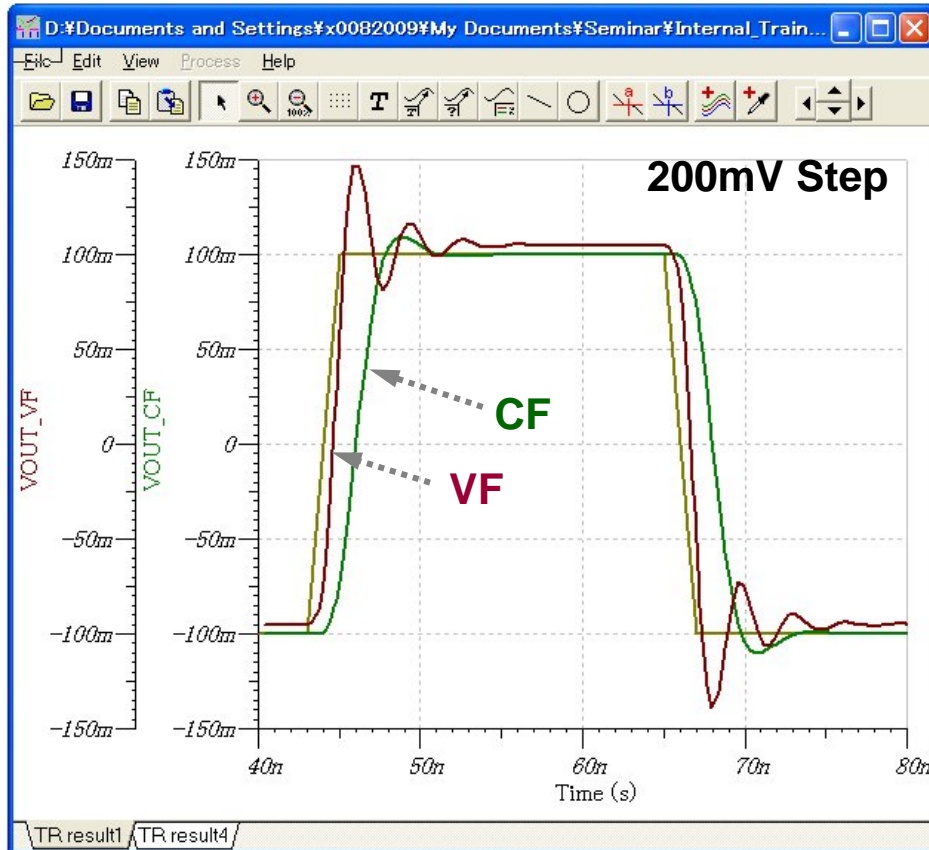
帯域幅: 260MHz, at -3dB

代表的スペックで見るとSRは  
THS3001 (CF) に対し  
OPA843 (VF) の方が  
遅いように思える.



# 電圧帰還と電流帰還の比較:スルーレート, 実際

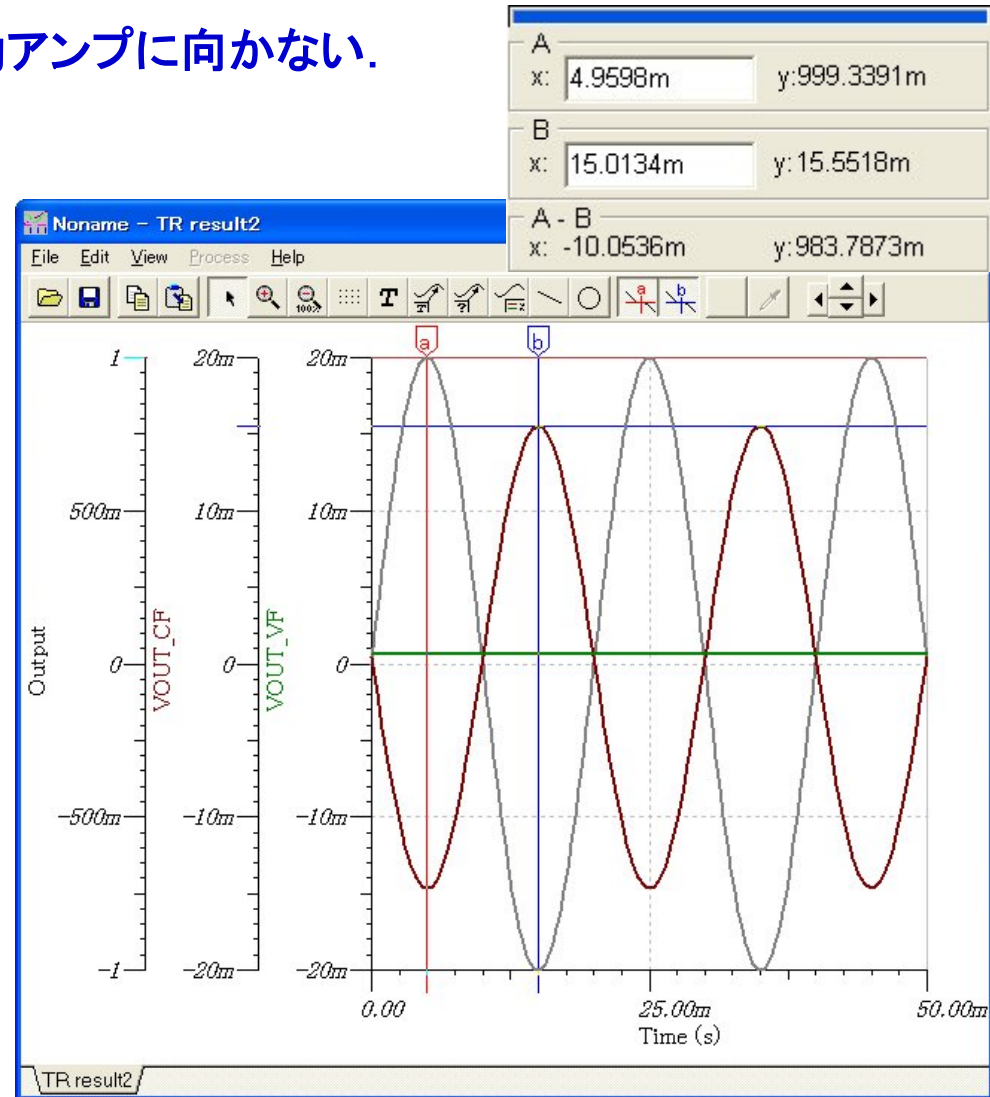
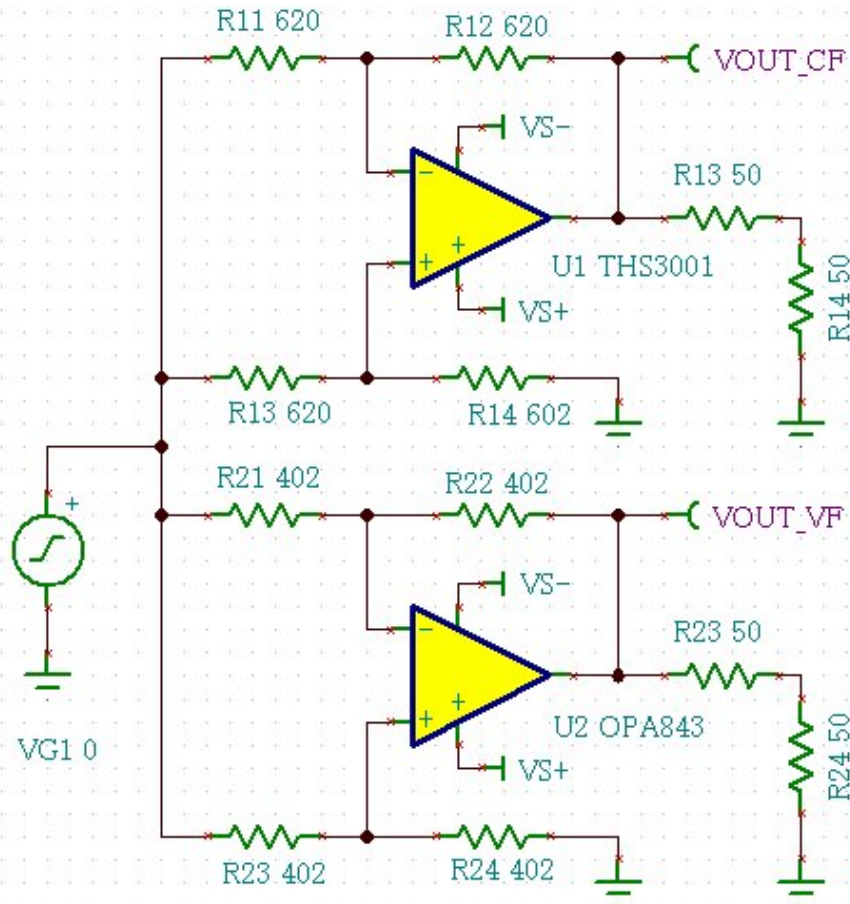
電流帰還型のスルーレートは, 出力振幅に依存.





# 電圧帰還と電流帰還の比較: 差動アンプなどの応用面

電流帰還型は入力部が非対称なので差動アンプに向かない。



## ✚ S4.1 出力段の性能

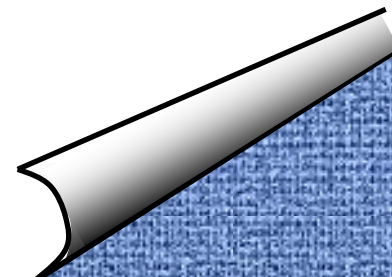
- (1) ステップ応答
- (2) スルーレートとセトリング時間
- (3) スルーレートと歪の関係

## ✚ S4.2 電圧帰還と電流帰還の違い

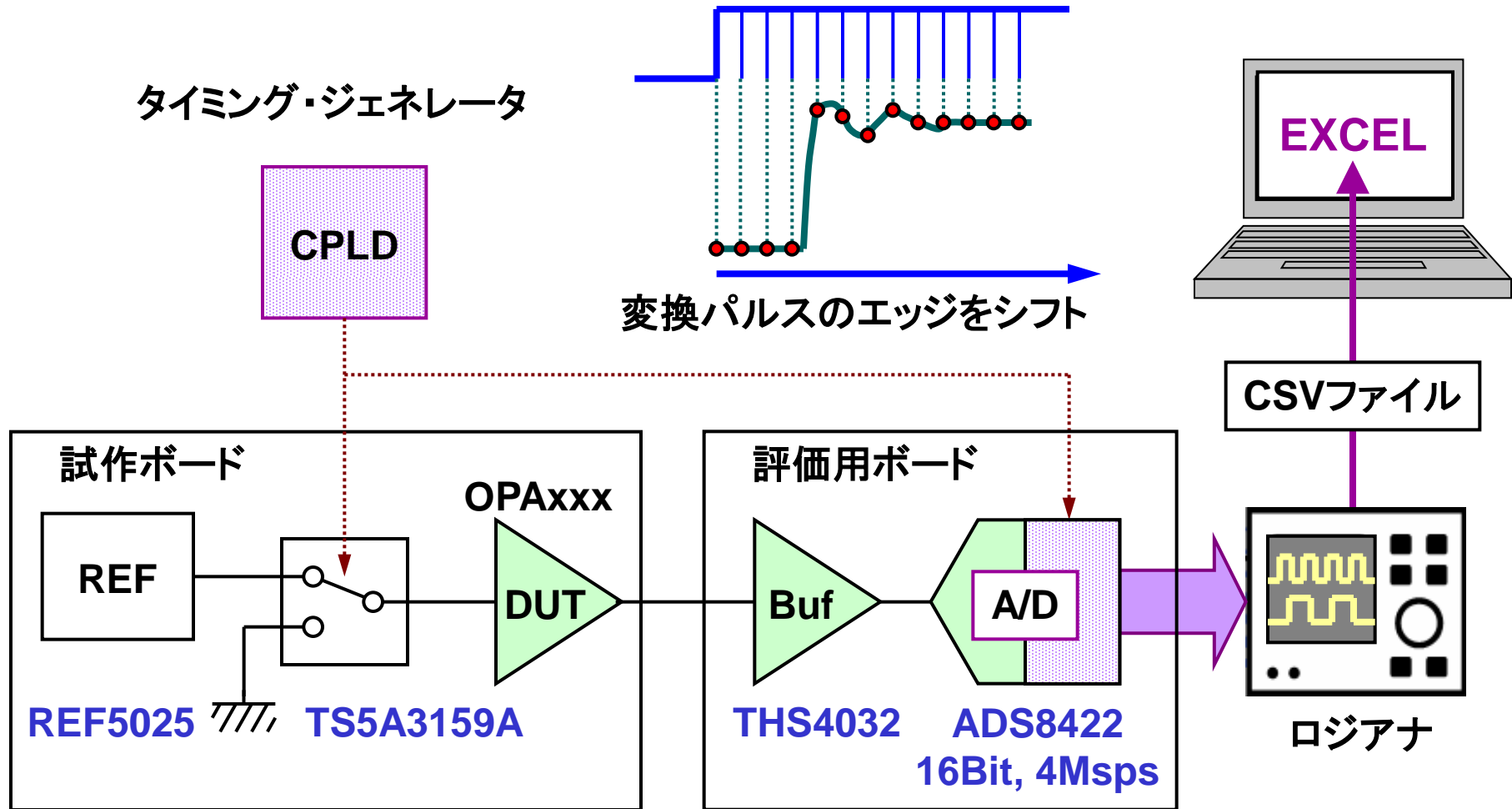
- (1) 電圧帰還型
- (2) 電流帰還型
- (3) 電圧帰還と電流帰還の比較

## ✚ S4.3 セトリング時間の実測

- (1) エッジシフト法による測定原理
- (2) 各種オペアンプの実測結果

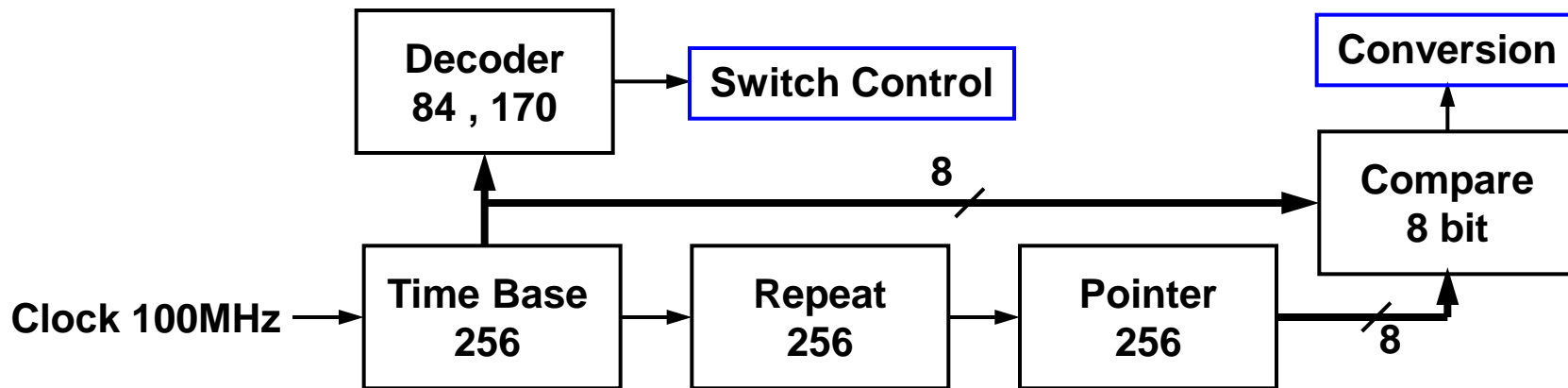
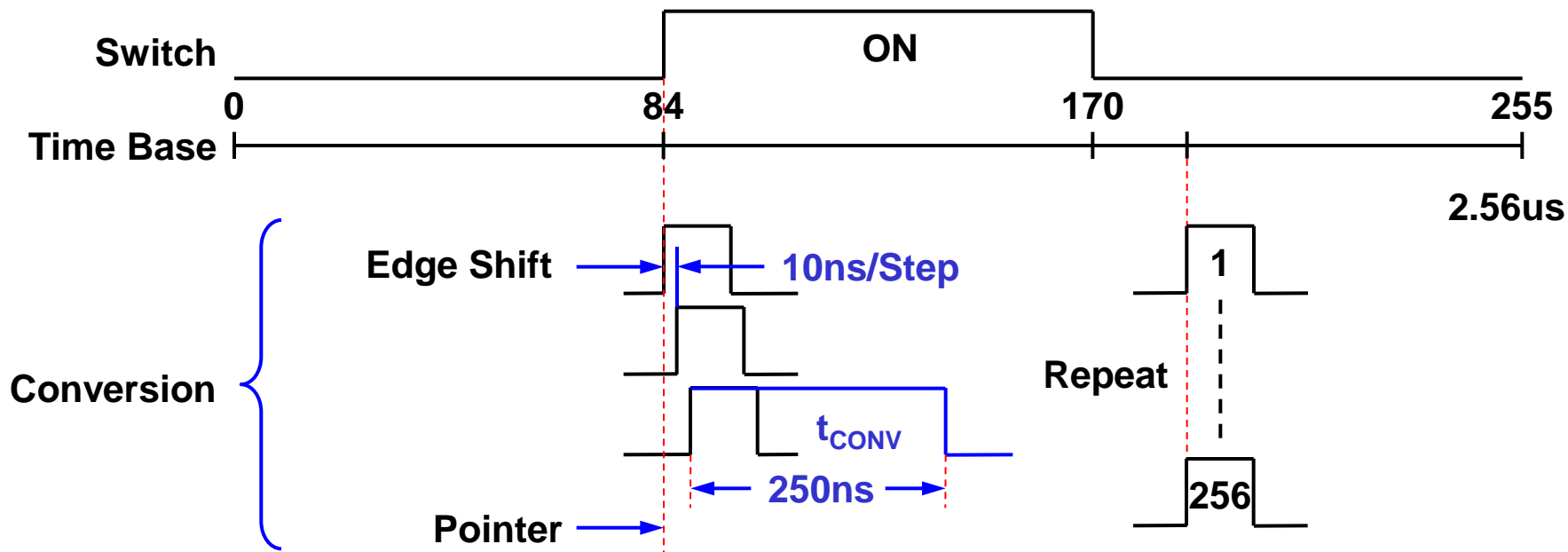


# エッジシフト法による測定原理:測定システムの概要

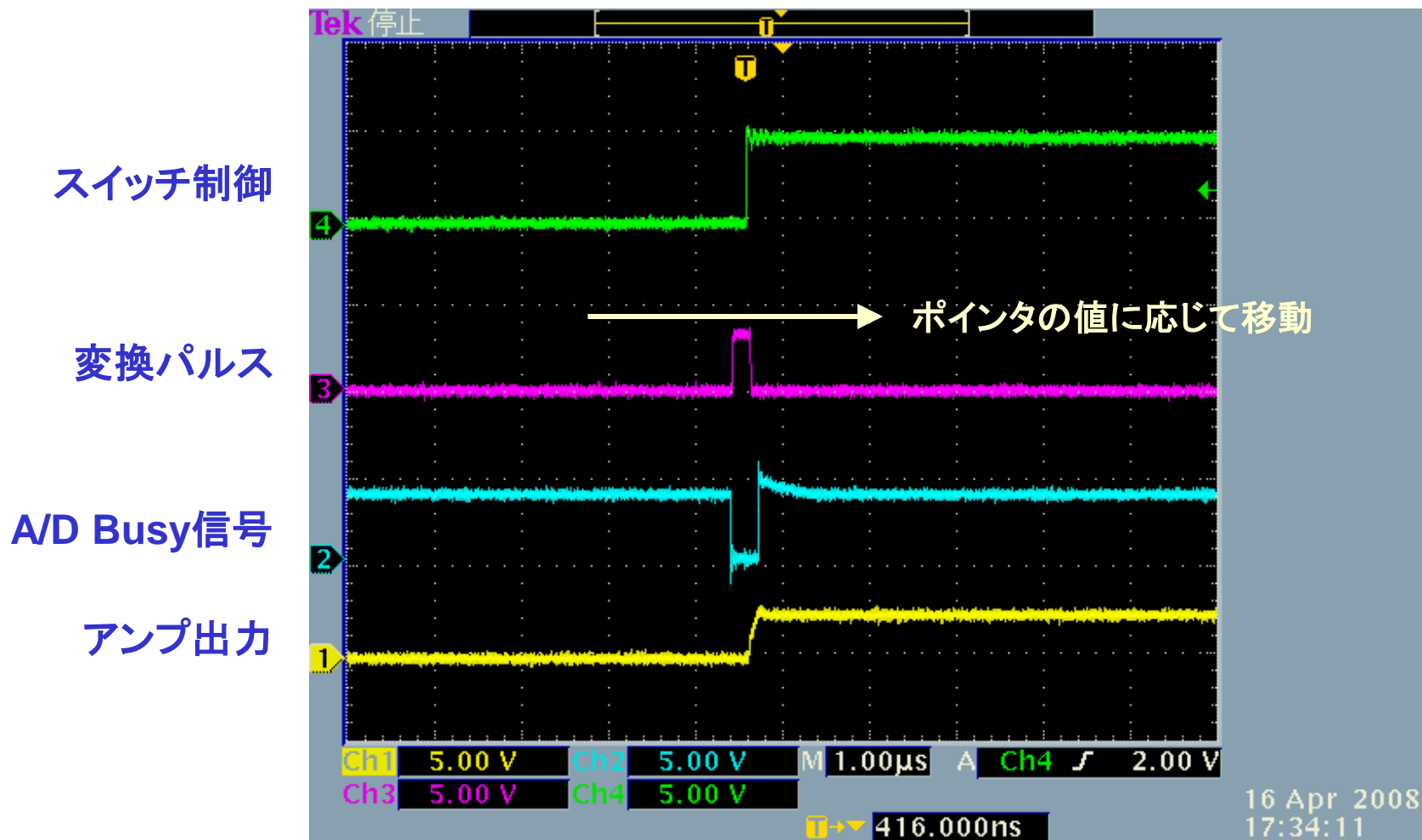




# エッジシフト法による測定原理: シフトのタイミング



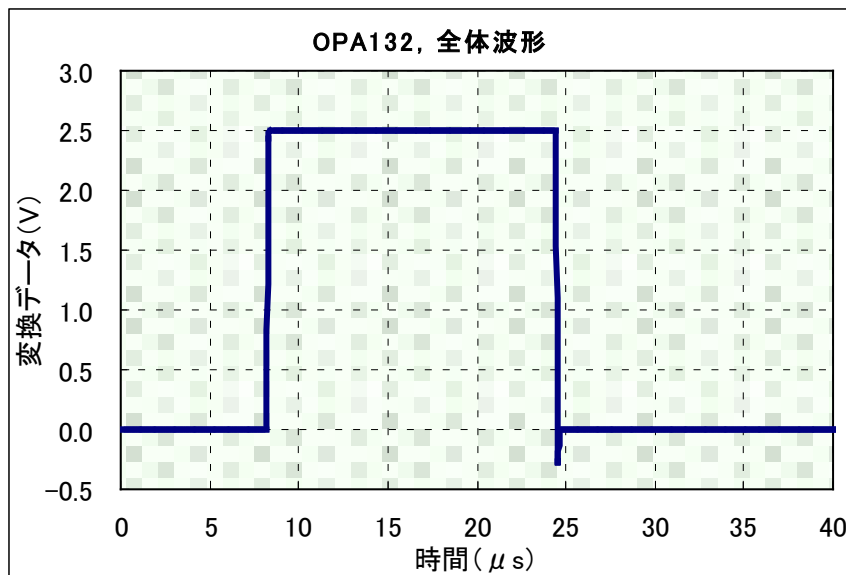
# エッジシフト法による測定原理: エッジ・シフトの実波形



# 各種オペアンプの実測結果:セトリング・タイムの分析-1

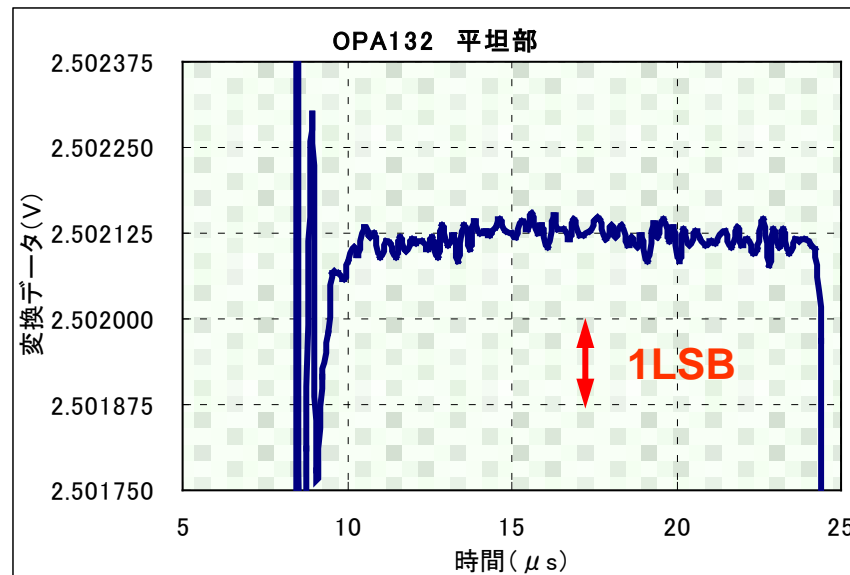
## ステップ1

全体波形からフラット領域を確認



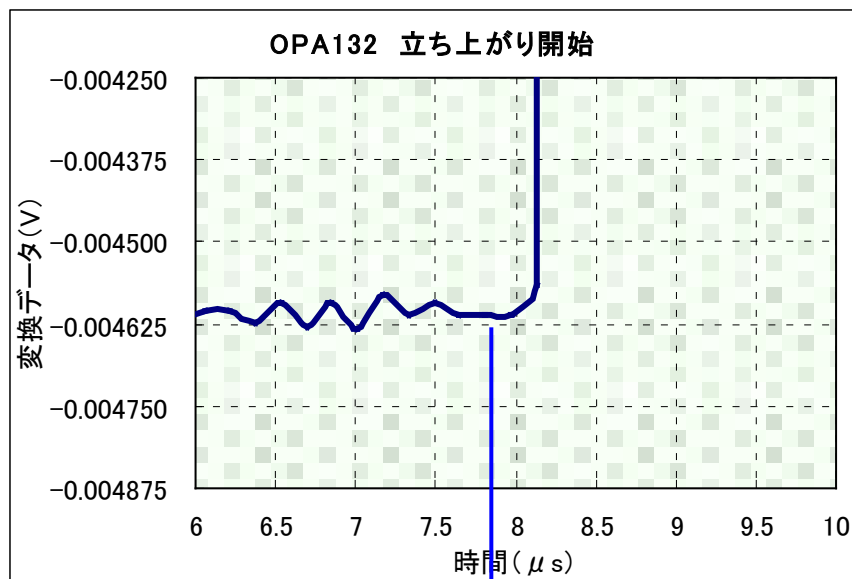
## ステップ2

徐々に拡大し, 数LSB分の大きさに調整

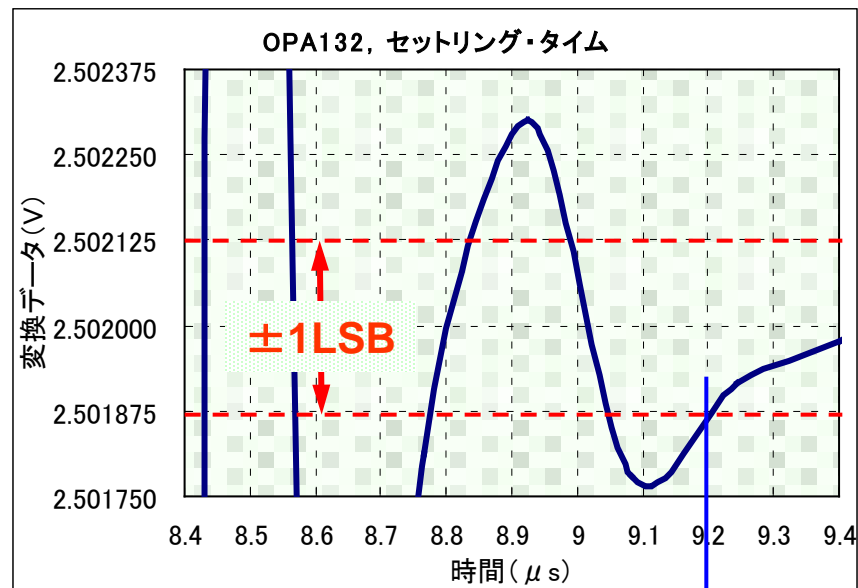


# 各種オペアンプの実測結果:セトリング・タイムの分析-2

ステップ3  
立ち上がり時間(始点)を確認



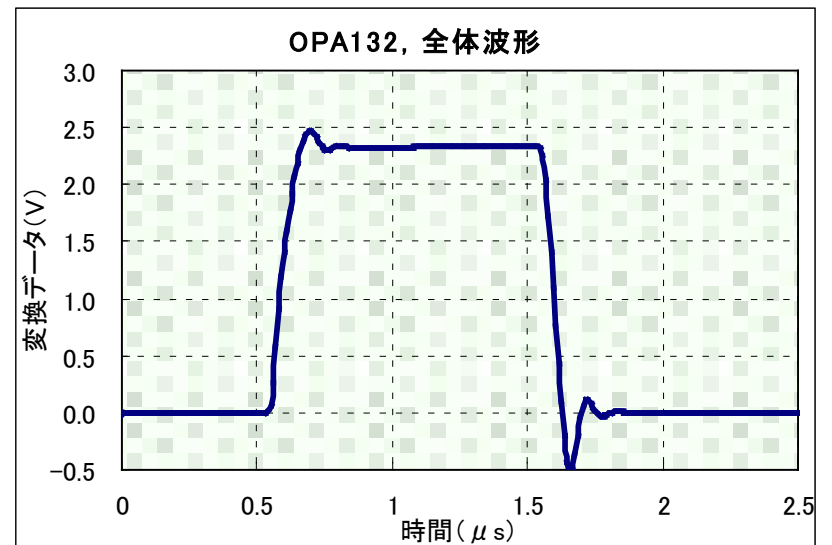
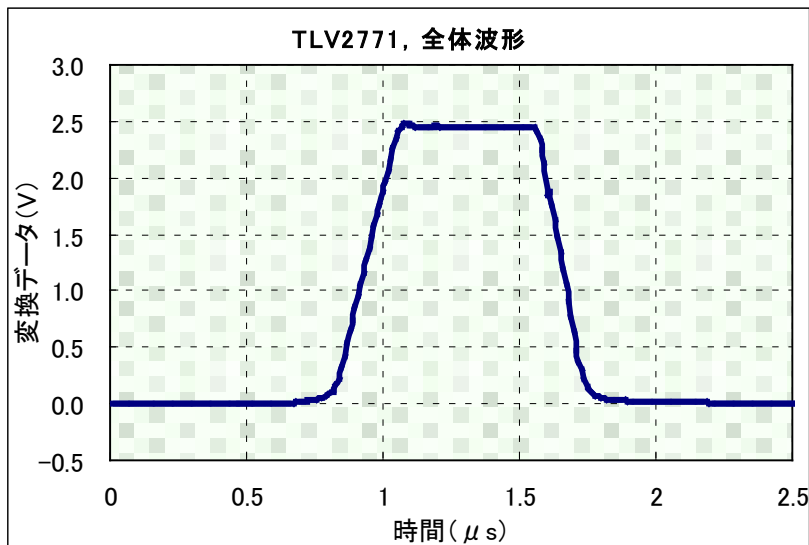
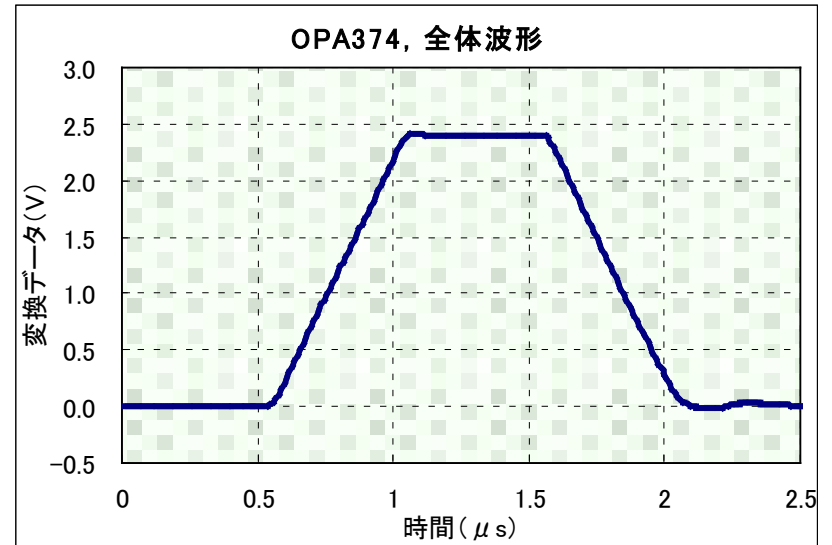
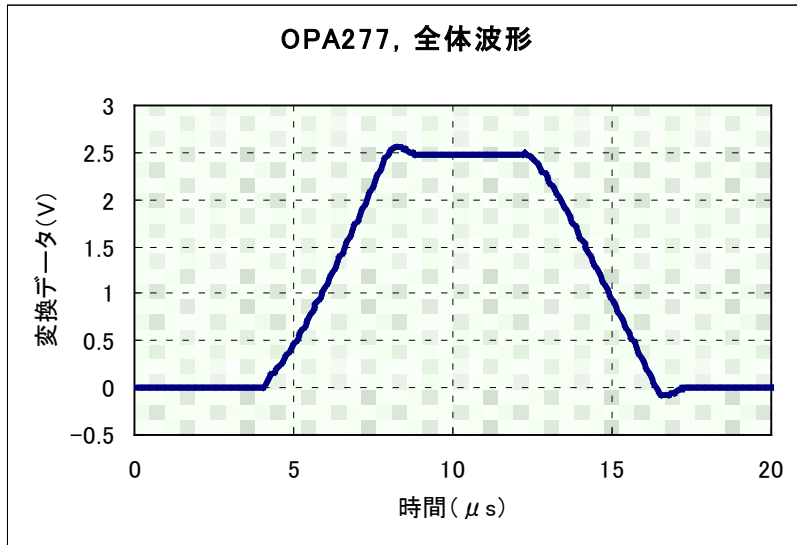
ステップ4  
平坦部分を始点付近で拡大



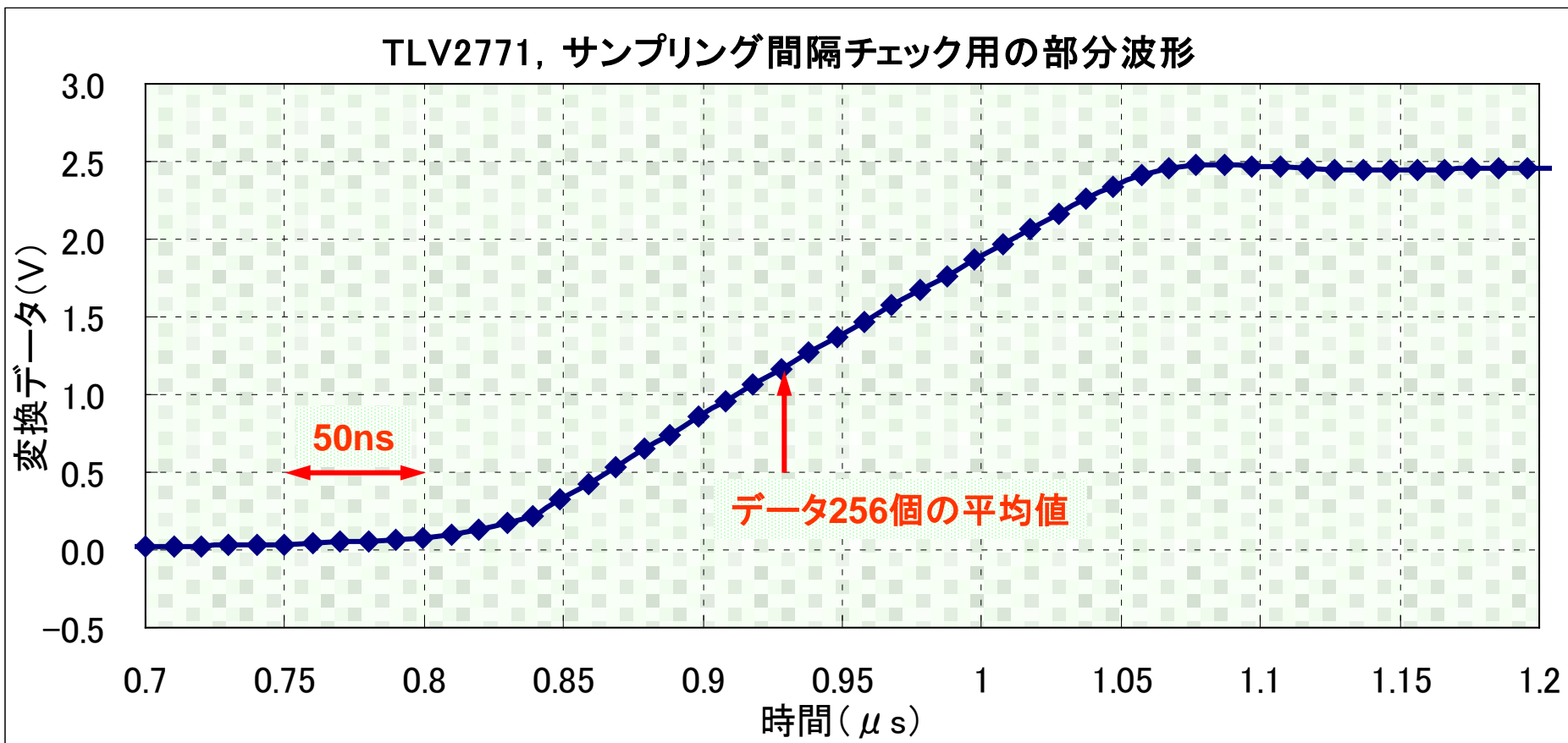
1.4 $\mu$ s

\* コツとして、1目盛りが1LSBのサイズになるよう拡大すると分析しやすい

# 各種オペアンプの実測結果: ステップ応答の比較



# 各種オペアンプの実測結果: 製作した測定システムの時間分解能



# セッション4 終わり

お疲れ様でした.

