

# オペアンプ試験技術Null法の シミュレーション評価

群馬大学 理工学部 電子情報部門

○青木里穂 片山翔吾 佐々木優斗 町田恒介  
中谷隆之 王建龍 桑名杏奈 畠山一実 小林春夫

ローム(株)

佐藤賢央 石田嵩 岡本智之 市川保

# OUTLINE

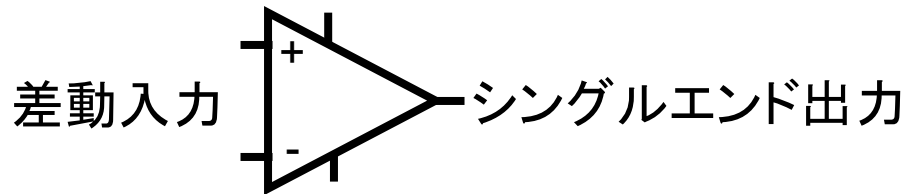
- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性(CMRR)
  - 電源除去特性(PSRR)
- まとめ

# OUTLINE

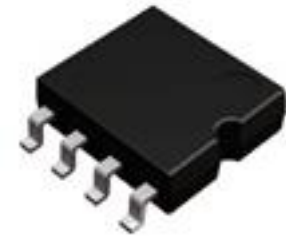
- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性 (CMRR)
  - 電源除去特性 (PSRR)
- まとめ

# 研究背景

## オペアンプ



非常に高利得、高精度



昔

アナログコンピュータに使用



現在

センサ・インターフェース・アナログ回路の  
キーコンポーネント

IoT(Internet of Things)技術の普及



センサ・インターフェースのアナログ回路として重要

# ファラデーの流速測定の実験



マイケル・ファラデー  
(1791 ~ 1867)  
イギリスの化学者・物理学者

電磁流量計の原理で  
ロンドンのテムズ川の流速を測定



実用化できず

原因

検出した微弱電気信号を  
増幅する電子回路がなかったため

オペアンプ等の  
アナログ電子回路は重要

# 研究目標

## オペアンプ

高精度アナログ回路で使用  正確な性能の測定が必要

## 問題

オープンループ利得が高い



周辺回路/環境の影響により微小電圧誤差が発生



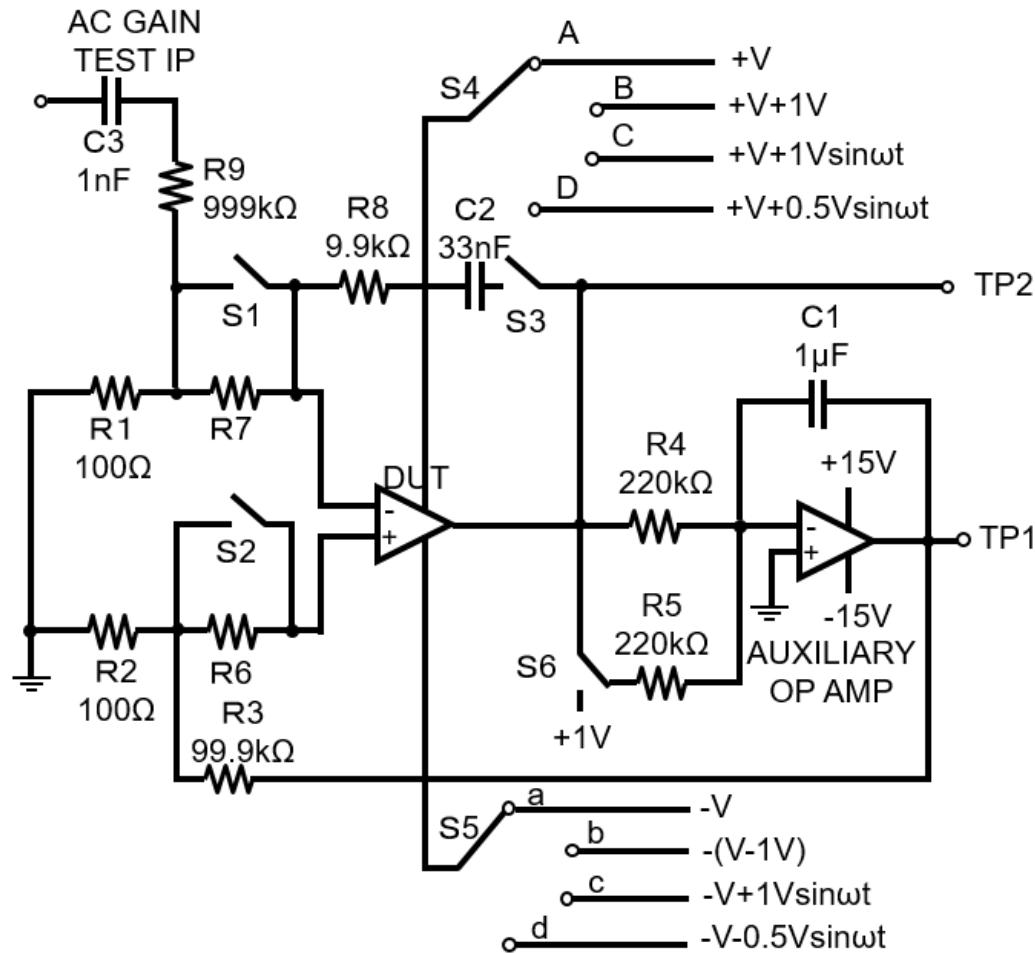
サーボループを用いて  
アンプ入力電圧を強制的にゼロ電位に

NULL法回路について検証

# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性 (CMRR)
  - 電源除去特性 (PSRR)
- まとめ

# 基本的なオペアンプの測定回路



S1~S6を切り替えて

- オフセット
- バイアス電流
- DCゲイン
- ACゲイン
- DCのCMRR
- DCのPSRR
- ACのCMRR
- ACのPSRR など

が正確に測定可能

Null法によるオペアンプ測定回路

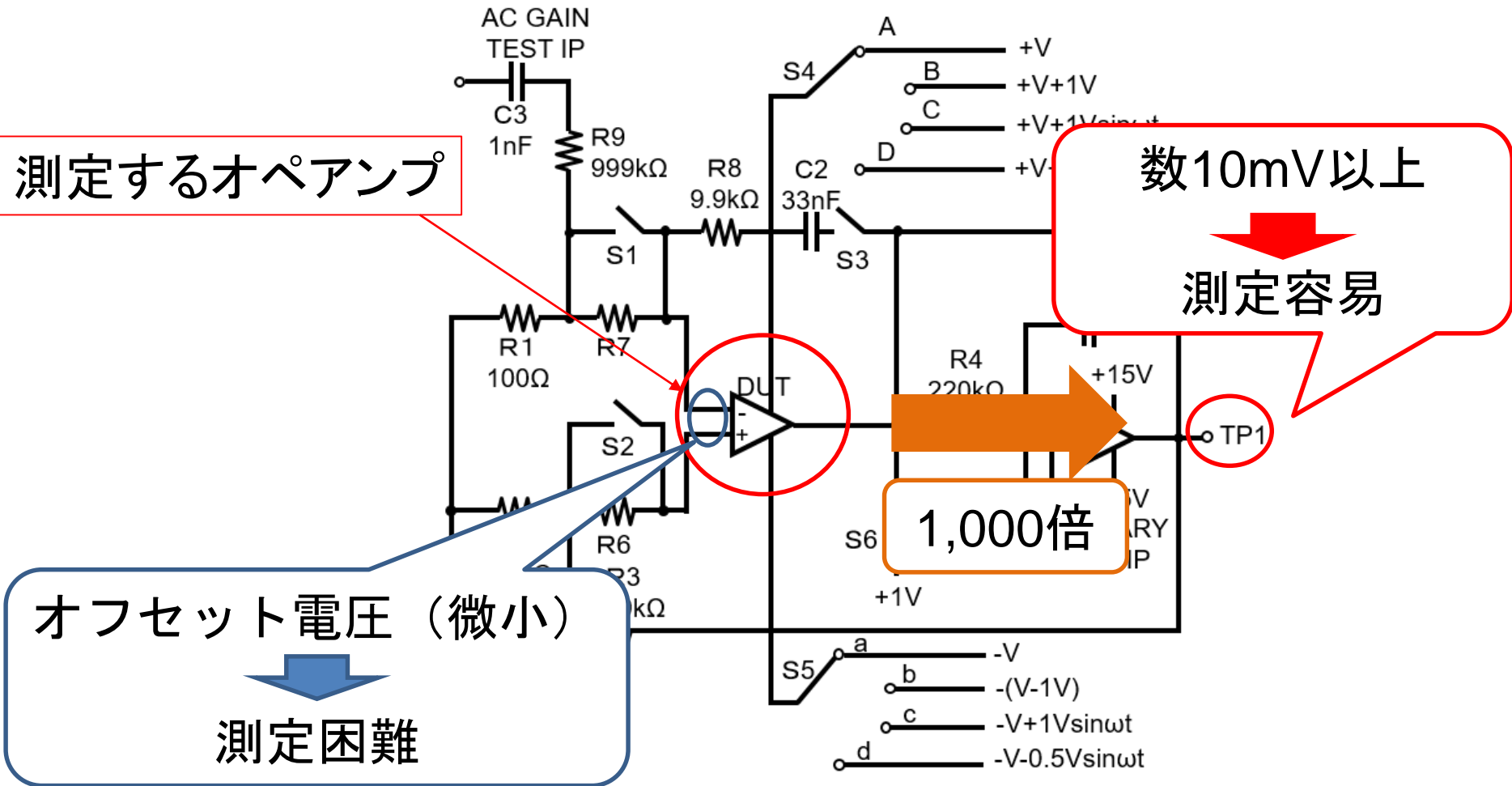


# オペアンプ測定項目

## スイッチ切り替えとオペアンプ測定項目

スイッチ	S1	S2	S3	S4	S5	S6
オフセット	on	on	off	A	a	off
オフセットと バイアス電流	on/ off	on/ off	off	A	a	off
DC利得	on	on	off	A	a	off/ on
AC利得	on	on	off	A	a	off
DCのCMRR	on	on	off	A/B	a/b	off
DCのPSRR	on	on	off	A/B	a/b	off
ACのCMRR	on	on	on	C	c	off
ACのPSRR	on	on	on	D	d	off

# Null法の効果



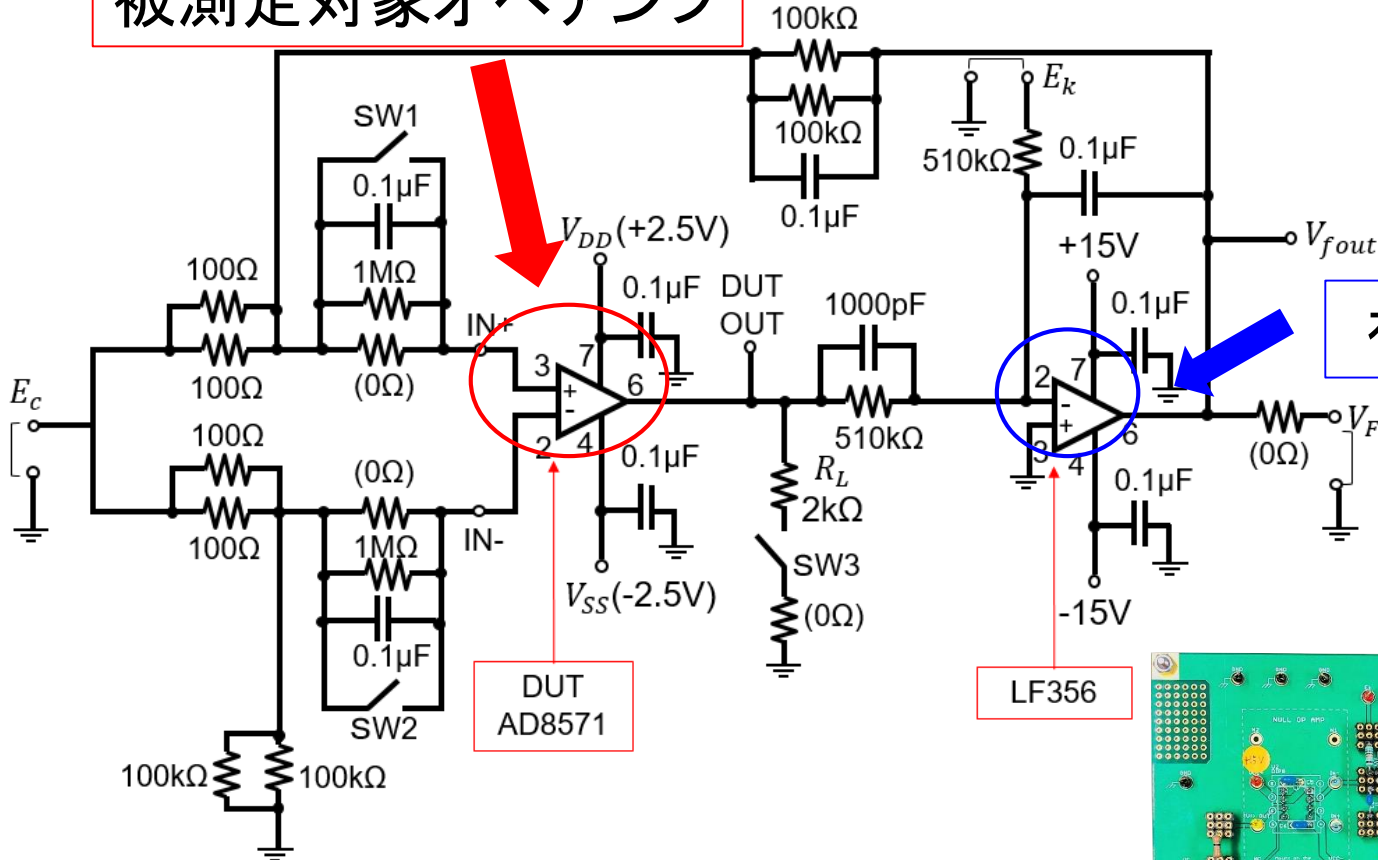
Null法によるオペアンプ測定回路

# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性 (CMRR)
  - 電源除去特性 (PSRR)
- まとめ

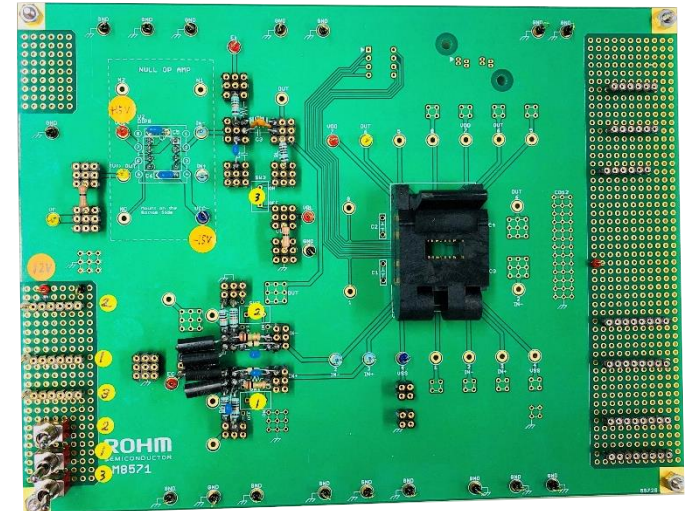
# 製作したNULL回路

被測定対象オペアンプ



作成したNull法による  
オペアンプ実験回路図

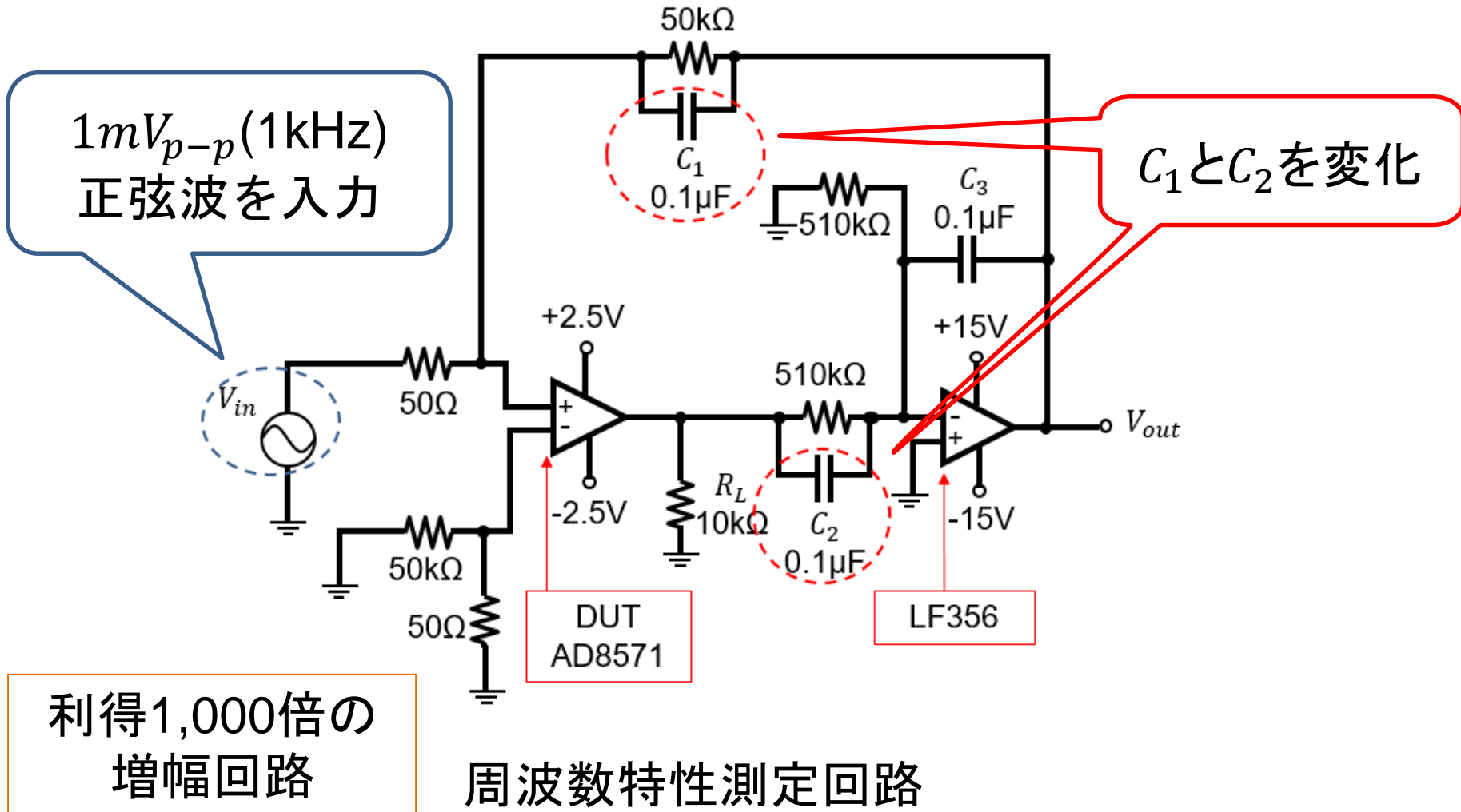
作成回路の写真



# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性 (CMRR)
  - 電源除去特性 (PSRR)
- まとめ

# 周波数特性測定回路



周波数特性測定回路

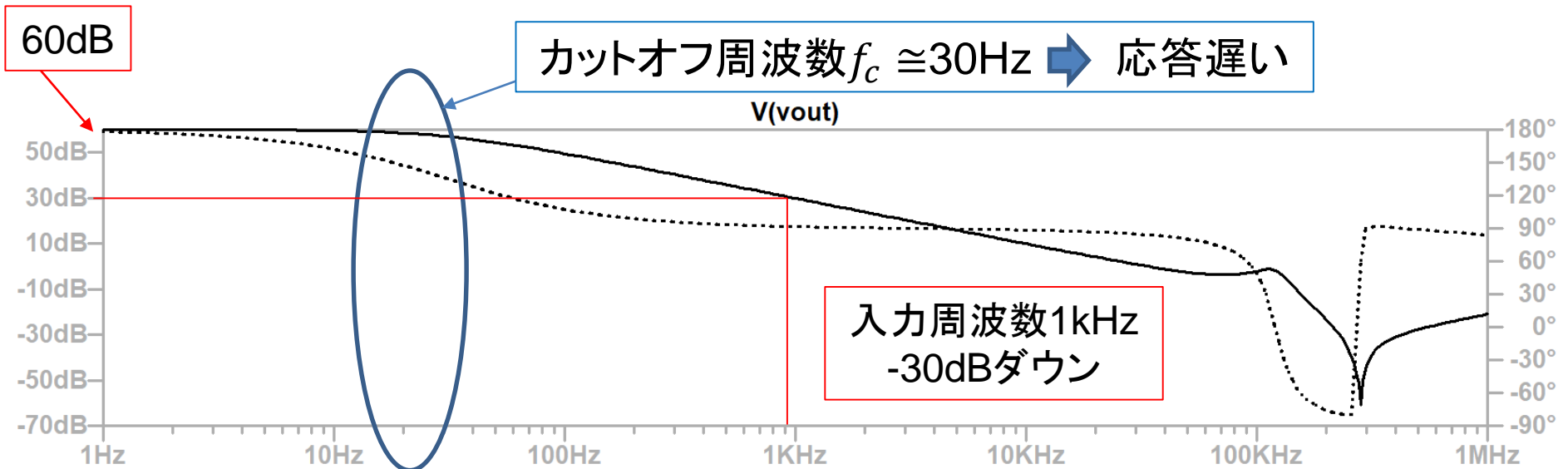
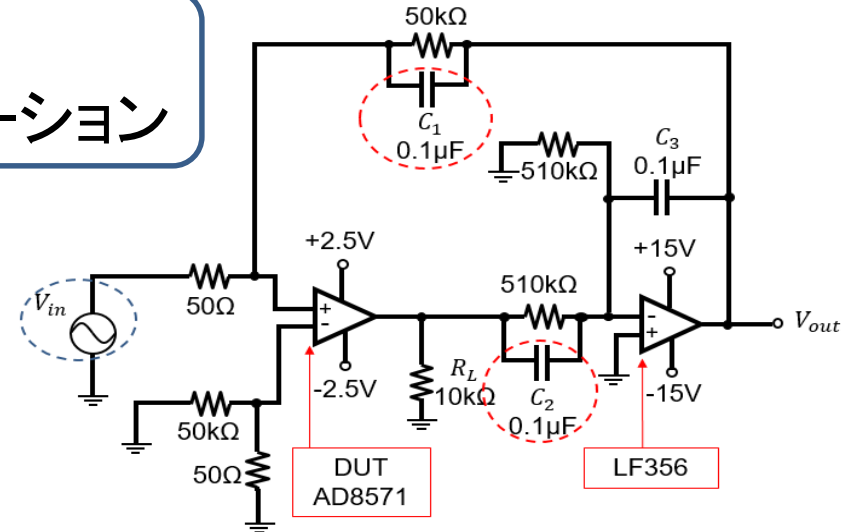
# 周波数特性 ( $C_1, C_2 = 0.1\mu F$ )

NULL回路の応答特性  
(周波数特性、過渡応答)をシミュレーション

× 1,000の増幅器

$$\text{ゲイン} = 20 \log 1000 = 60 \text{dB}$$

ピークなし ⇒ 安定



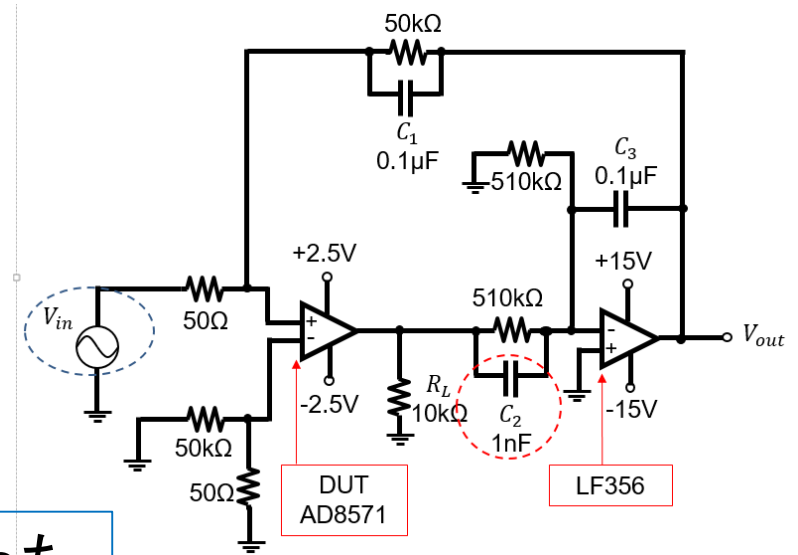
$C_1 = 0.1\mu F, C_2 = 0.1\mu F$ の時の周波数特性

# 周波数特性 ( $C_1 = 0.1\mu F, C_2 = 1nF$ )

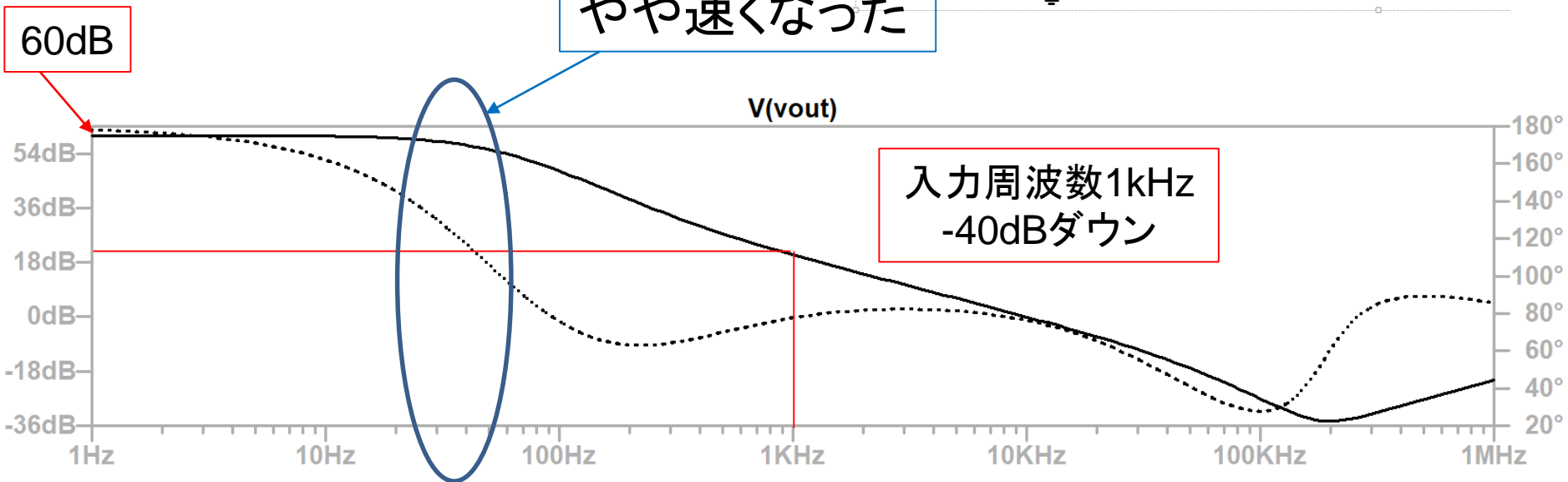
$C_1 \rightarrow 0.1\mu F$ で固定  
 $C_2 \rightarrow$ 小



応答やや速くなる



やや速くなった



$C_1 = 0.1\mu F, C_2 = 1nF$ の時の周波数特性

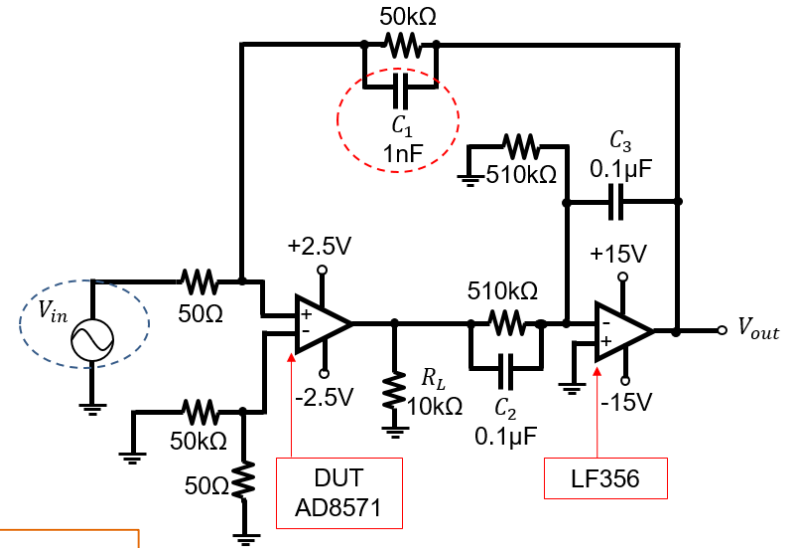


# 周波数特性 ( $C_1 = 1nF, C_2 = 0.1\mu F$ )

$C_1 \rightarrow$  小  
 $C_2 \rightarrow 0.1\mu F$  で固定



$C_1, C_2 = 0.1\mu F$  の時 ( $f_c \cong 30Hz$ ) の  
**約30倍高速**

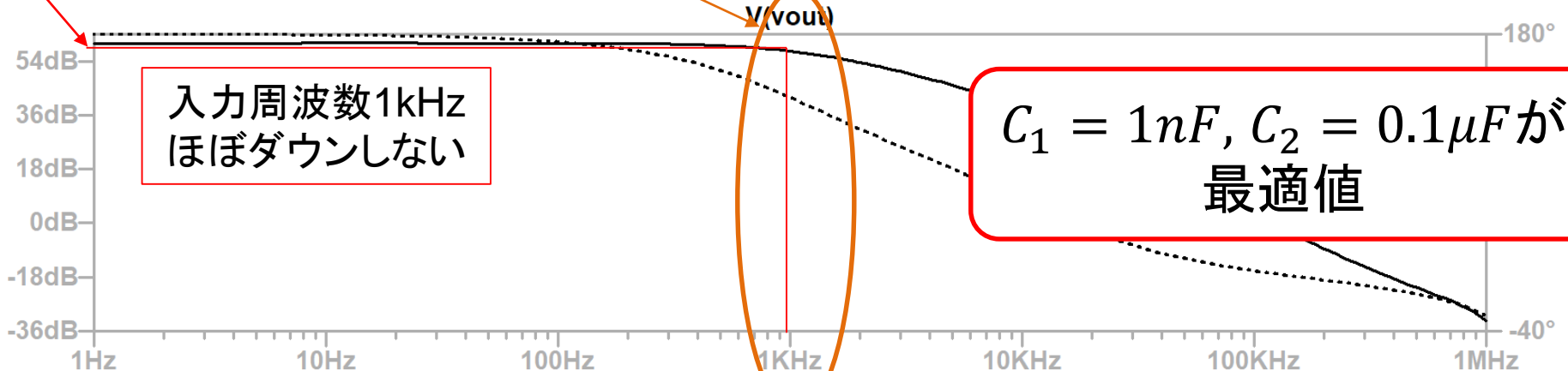


カットオフ周波数  $f_c \cong 1kHz$   $\rightarrow$  応答速い

60dB

入力周波数1kHz  
 ほぼダウンしない

$C_1 = 1nF, C_2 = 0.1\mu F$  が  
 最適値



$C_1 = 1nF, C_2 = 0.1\mu F$  の時の周波数特性

# トランジエント特性(正弦波入力)(1)

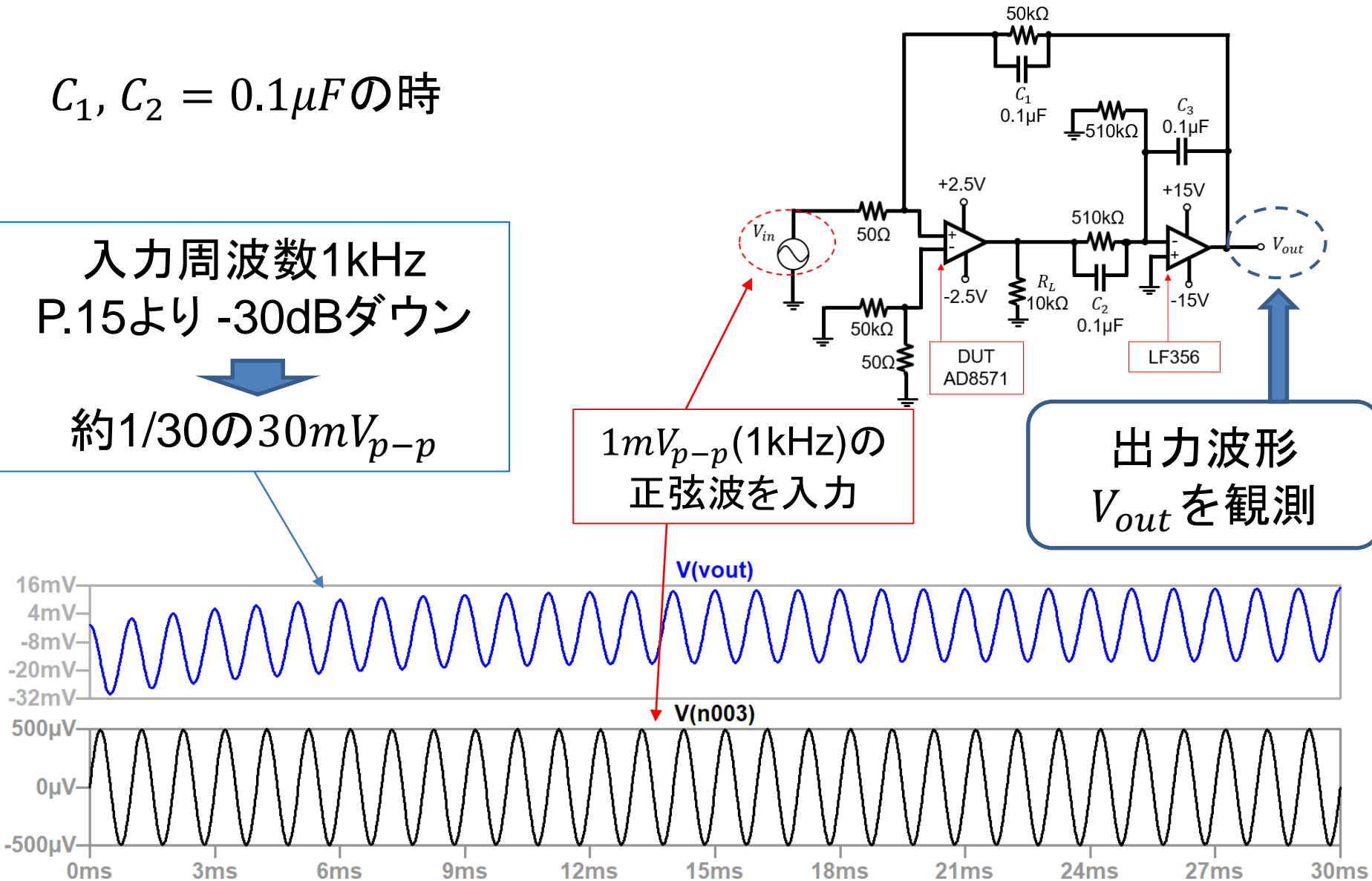
$C_1, C_2 = 0.1\mu F$ の時

入力周波数1kHz  
P.15より -30dBダウン

約1/30の $30mV_{p-p}$

$1mV_{p-p}$  (1kHz)の  
正弦波を入力

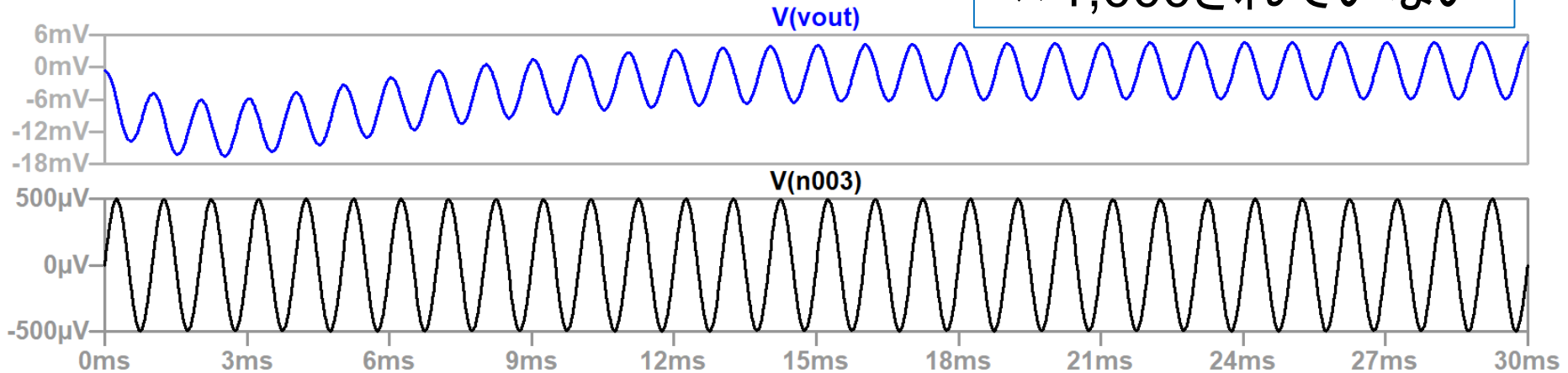
出力波形  
 $V_{out}$ を観測



# トランジエント特性(正弦波入力)(2)

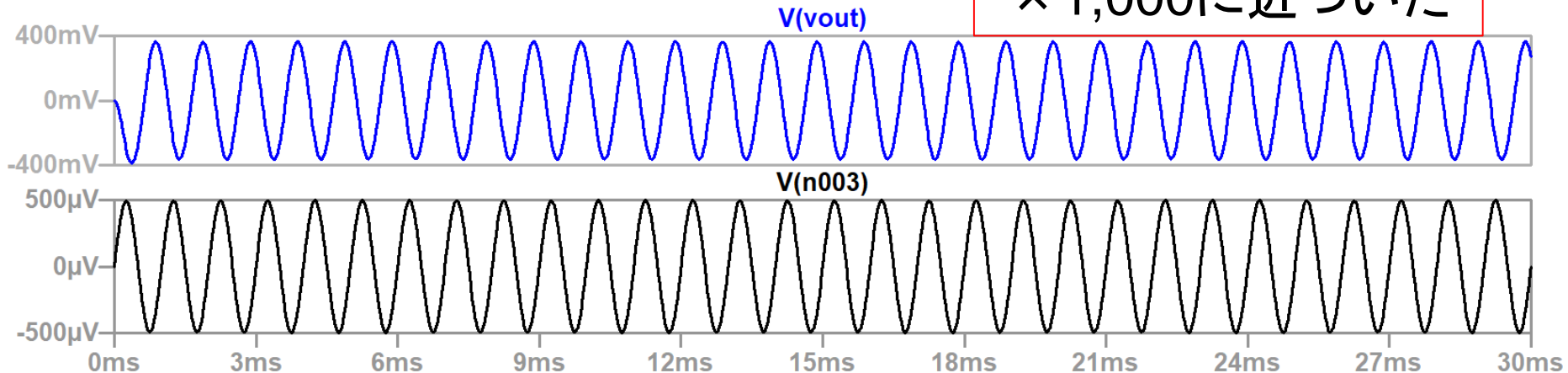
$C_1 = 0.1\mu F, C_2 = 1nF$ の時

$10mV_{p-p}$   
× 1,000されていない



$C_1 = 1nF, C_2 = 0.1\mu F$ の時(最適値)

$700mV_{p-p}$   
× 1,000に近づいた



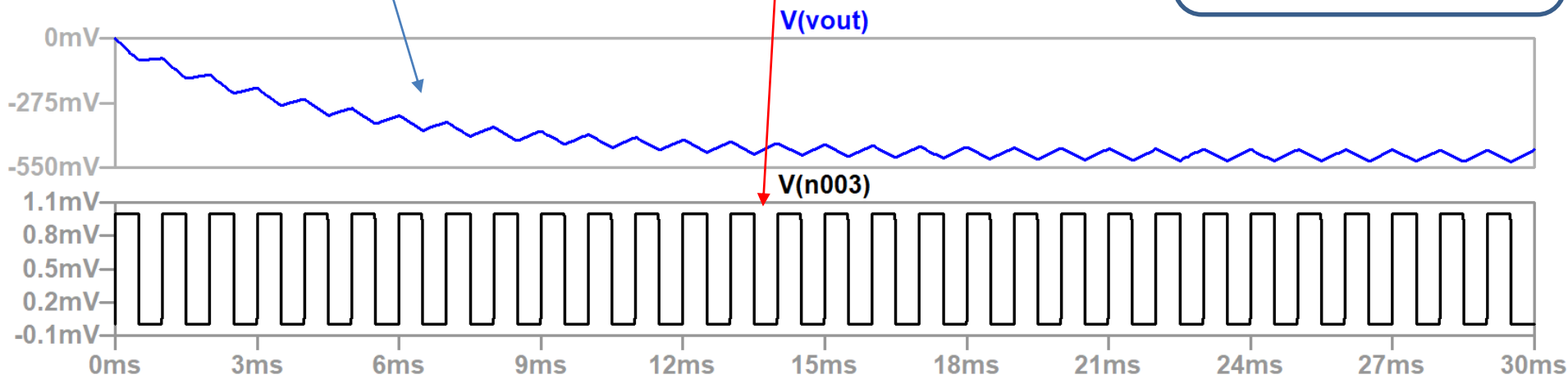
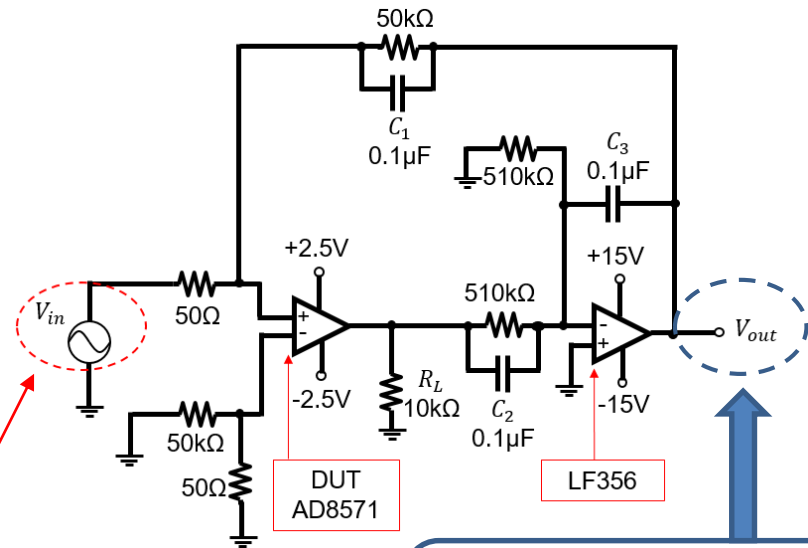
# トランジエント特性(方形波入力)(1)

$C_1, C_2 = 0.1\mu F$ の時

$50mV_{p-p}$   
 $\times 1,000$ されていない

$1mV_{p-p}$  (1kHz)の  
方形波を入力

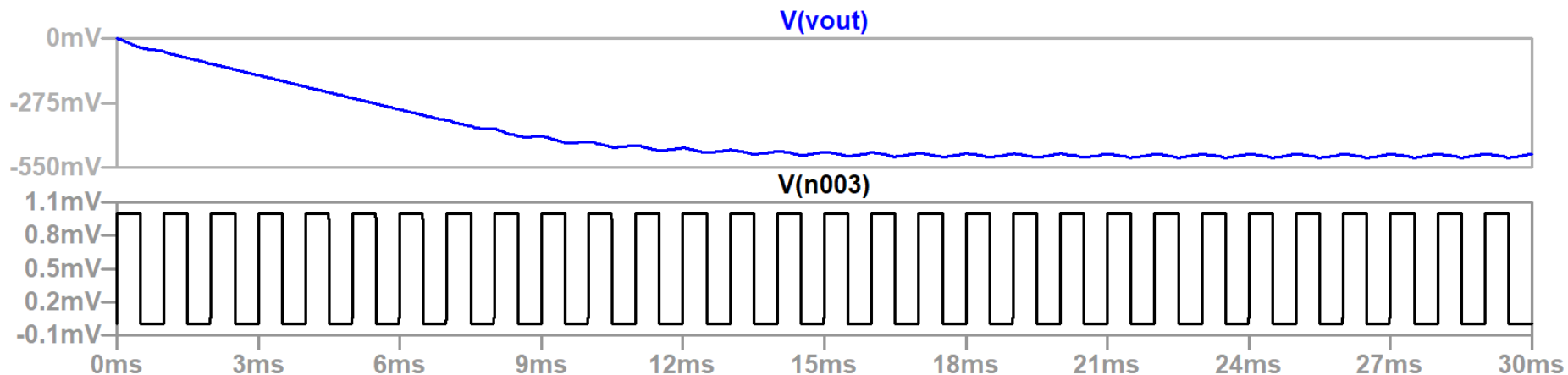
出力波形  
 $V_{out}$ を観測



# トランジエント特性(方形波入力)(2)

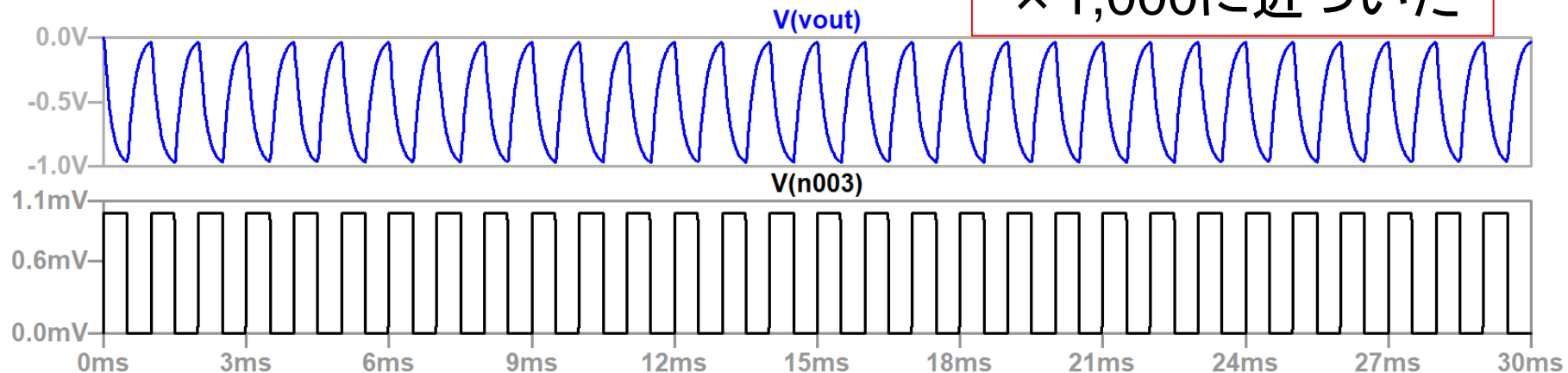
$C_1 = 0.1\mu F, C_2 = 1nF$ の時

$17mV_{p-p}$   
× 1,000されていない



$C_1 = 1nF, C_2 = 0.1\mu F$ の時(最適値)

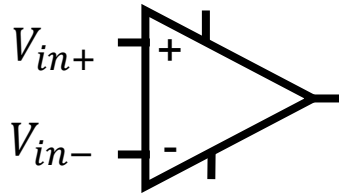
$950mV_{p-p}$   
× 1,000に近づいた



# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性(CMRR)
  - 電源除去特性(PSRR)
- まとめ

# オフセット電圧測定回路



理想  $V_{in+} = V_{in-}$   
 現実  $V_{in+} \neq V_{in-}$

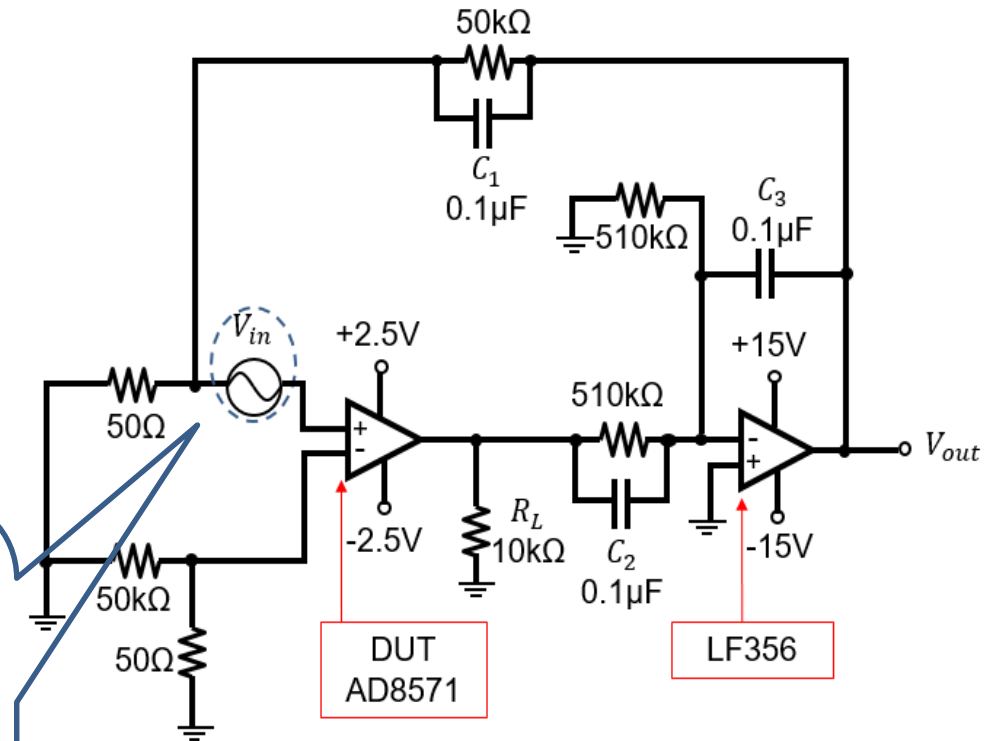


微小入力オフセット電圧を測定

$1\mu V_{p-p}$  (1Hz) の  
 方形波を入力

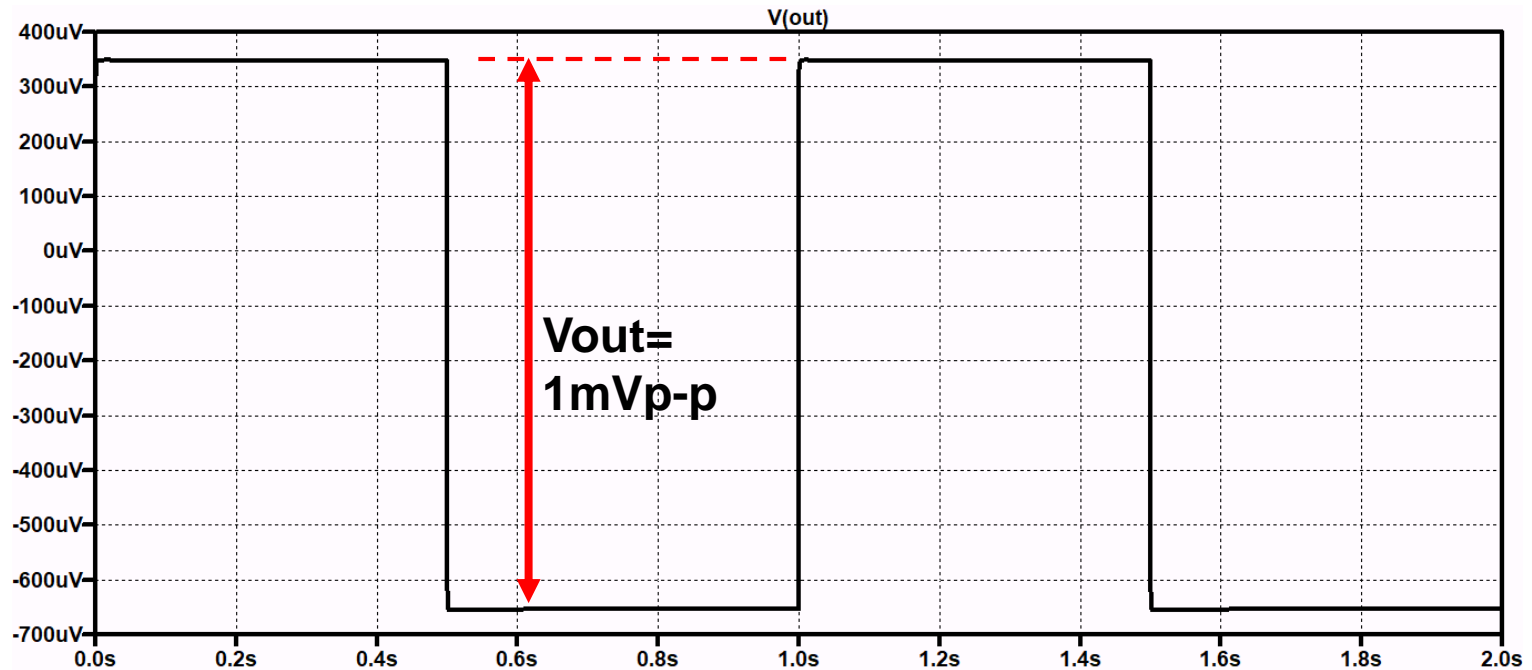


等価的に  
 DCオフセット電圧を印加



オフセット電圧測定回路

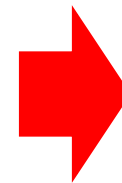
# オフセット電圧測定結果



## オフセット電圧測定結果

$1\mu V_{p-p}$    $1mV_{p-p}$

微小誤差が1,000倍された



測定が容易に



# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性 (CMRR)
  - 電源除去特性 (PSRR)
- まとめ

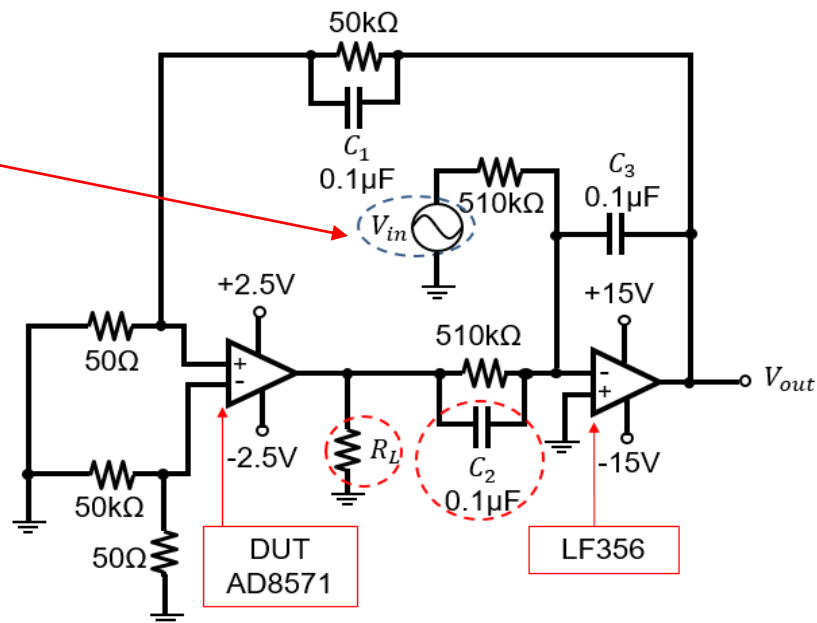
# オープンループ( $A_{OL}$ )シミュレーション(1)

$1V_{p-p}$ (1Hz)の方形波を入力

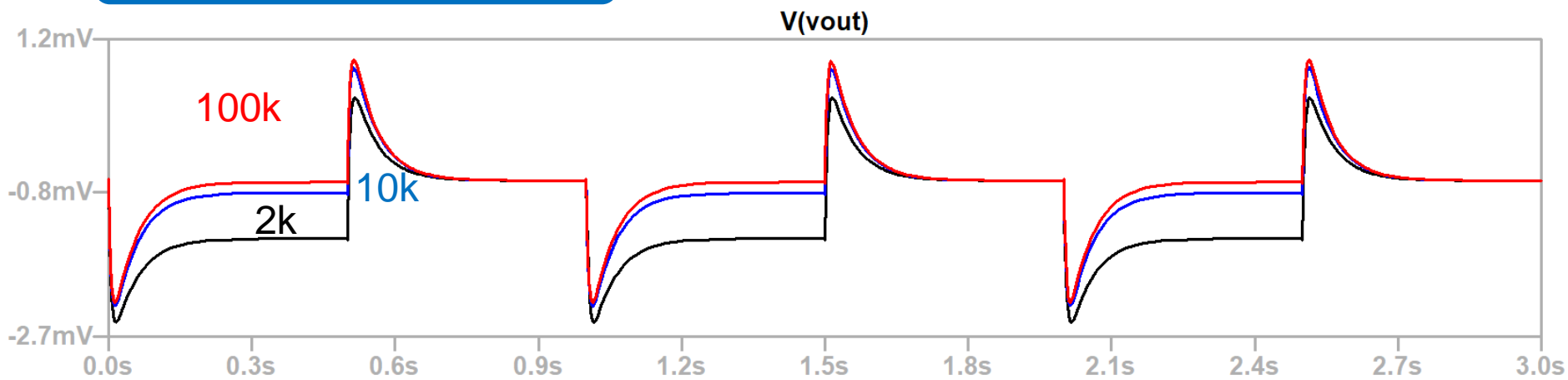
オープンループ利得特性  
シミュレーション結果

$R_L$	$A_{OL}$
2k	122dB
10k	136dB
100k	154dB

$R_L \rightarrow$ 大  $\rightarrow$   $A_{OL} \rightarrow$ 大

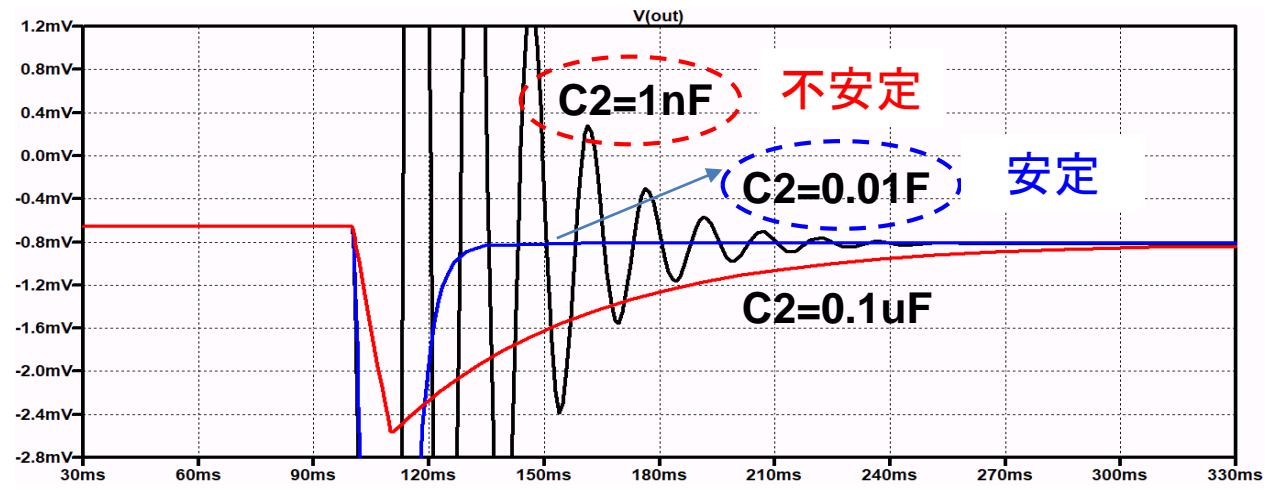


オープンループ利得測定回路



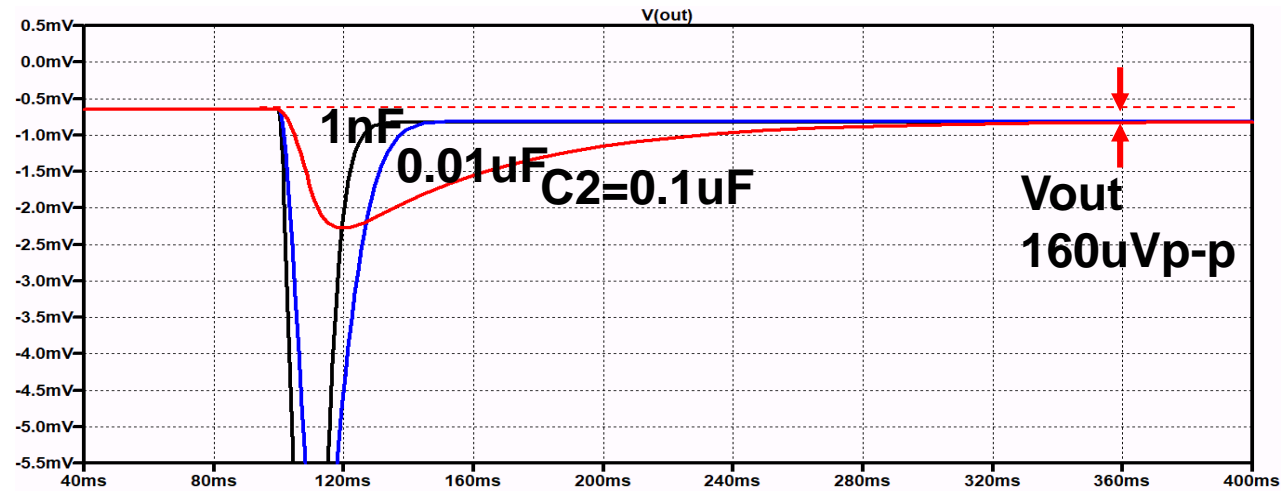
# オープンループ( $A_{OL}$ )シミュレーション(2)

セトリング時間  
約30ms



$C_1 = 1nF, C_2$  可変の時のオープンループ利得

セトリング時間  
約200ms



$C_1 = 0.1\mu F, C_2$  可変の時のオープンループ利得

# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性(CMRR)
  - 電源除去特性(PSRR)
- まとめ

# 同相信号除去特性(CMRR)(1)

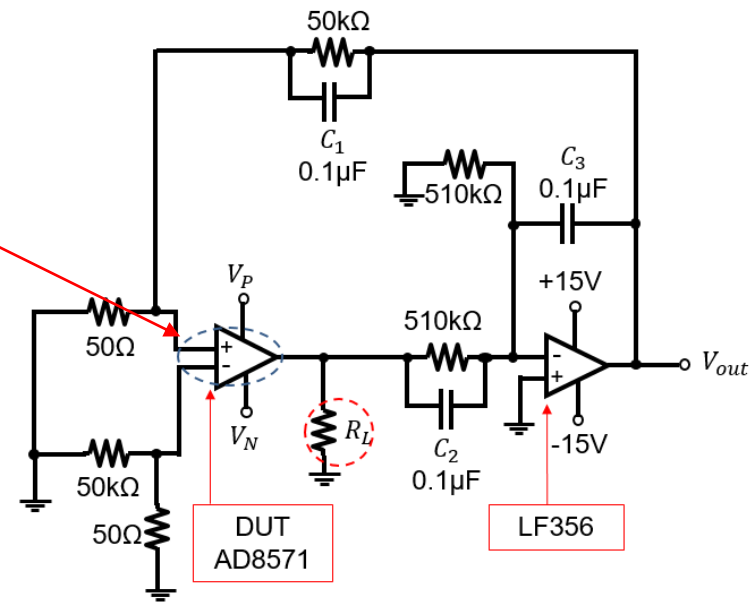
電源をシフトして  
等価的にCMRRを求める

$$V_P \dots +2.5V \rightarrow +3.0V$$

$$V_N \dots -2.5V \rightarrow -2.0V$$

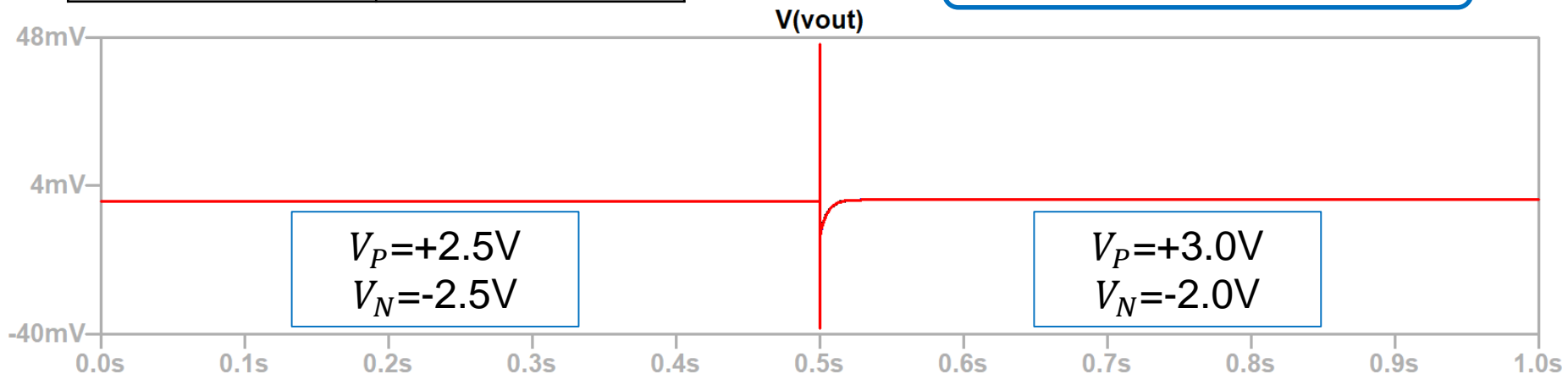
CMRRシミュレーション結果

$R_L$	CMRR
2k	126dB
10k	126dB
100k	126dB



CMRR測定回路

$R_L$ の影響なし

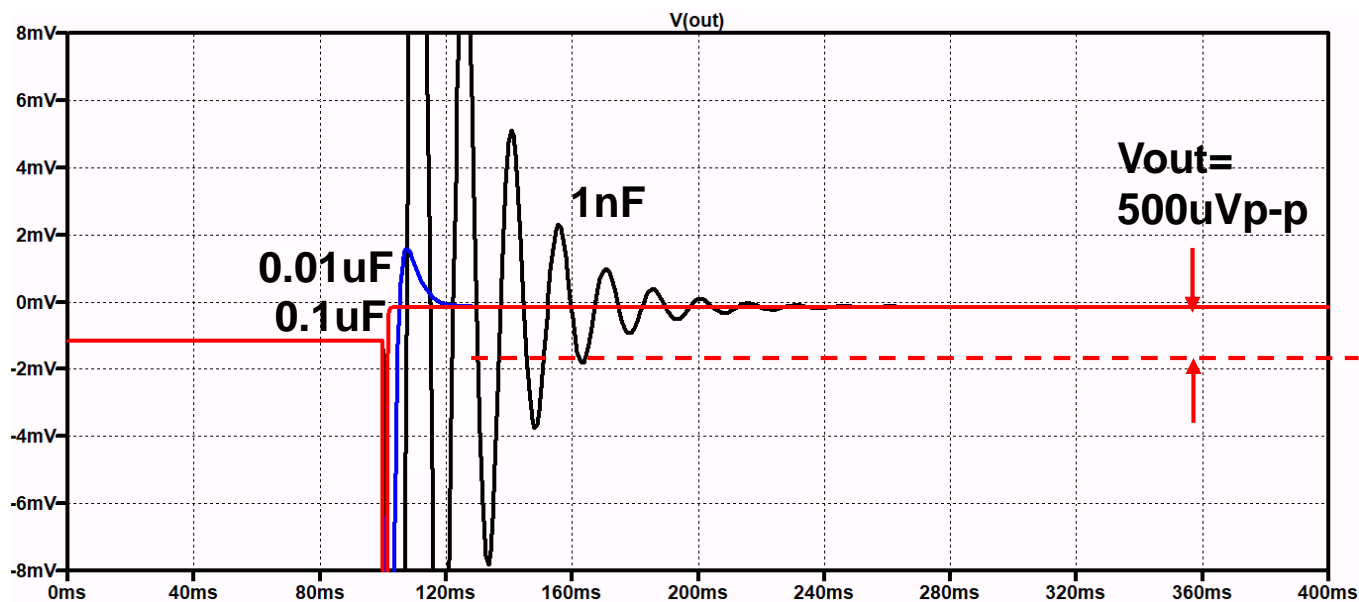
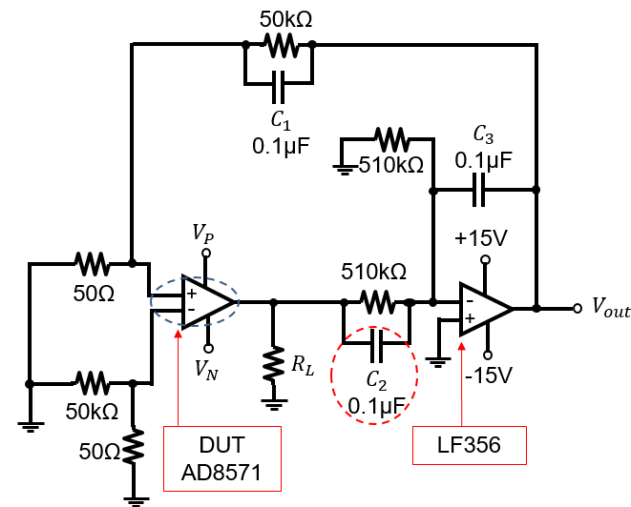


# 同相信号除去特性(CMRR)(2)

$R_L \rightarrow 10\text{k}\Omega, C_1 \rightarrow 1\text{nF}$ で固定



$C_2 \rightarrow$ 大で高速応答



$C_1 = 1\text{nF}, C_2$ 可変とした時のCMRRシミュレーション結果

# OUTLINE

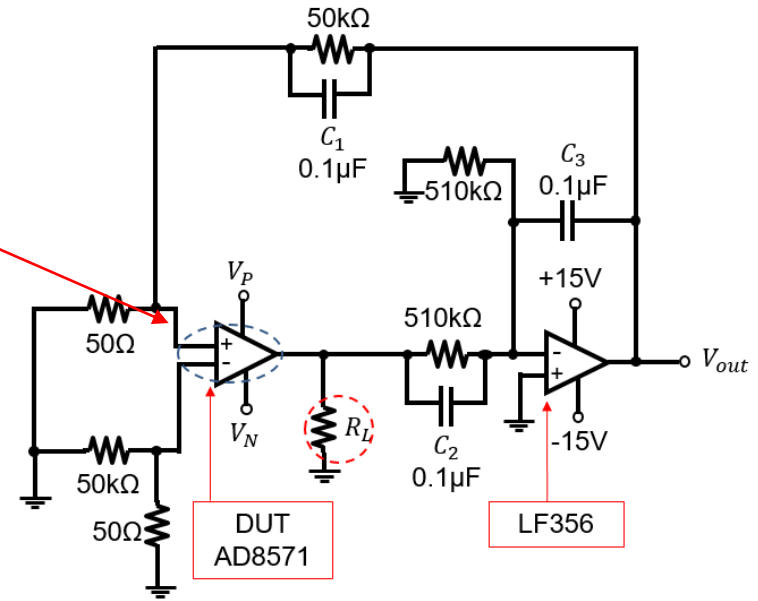
- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性(CMRR)
  - 電源除去特性(PSRR)
- まとめ

# 電源除去特性(PSRR)(1)

CMRRと同じ構成  
 $V_P \dots +2.0V \rightarrow +2.5V$   
 $V_N \dots -2.0V \rightarrow -2.5V$

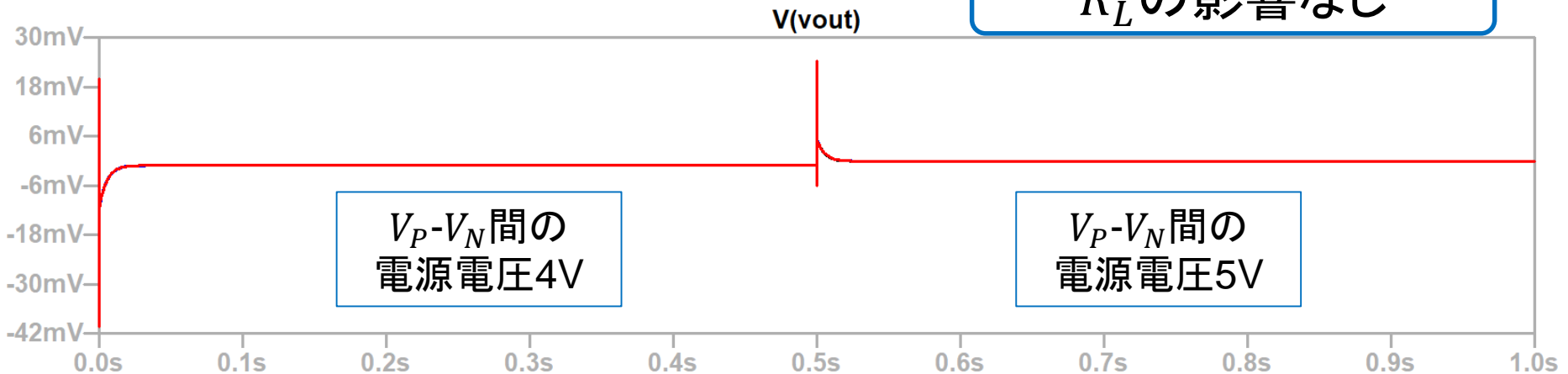
PSRRシミュレーション結果

$R_L$	PSRR
2k	120dB
10k	120dB
100k	120dB



CMRR測定回路と同様

$R_L$ の影響なし



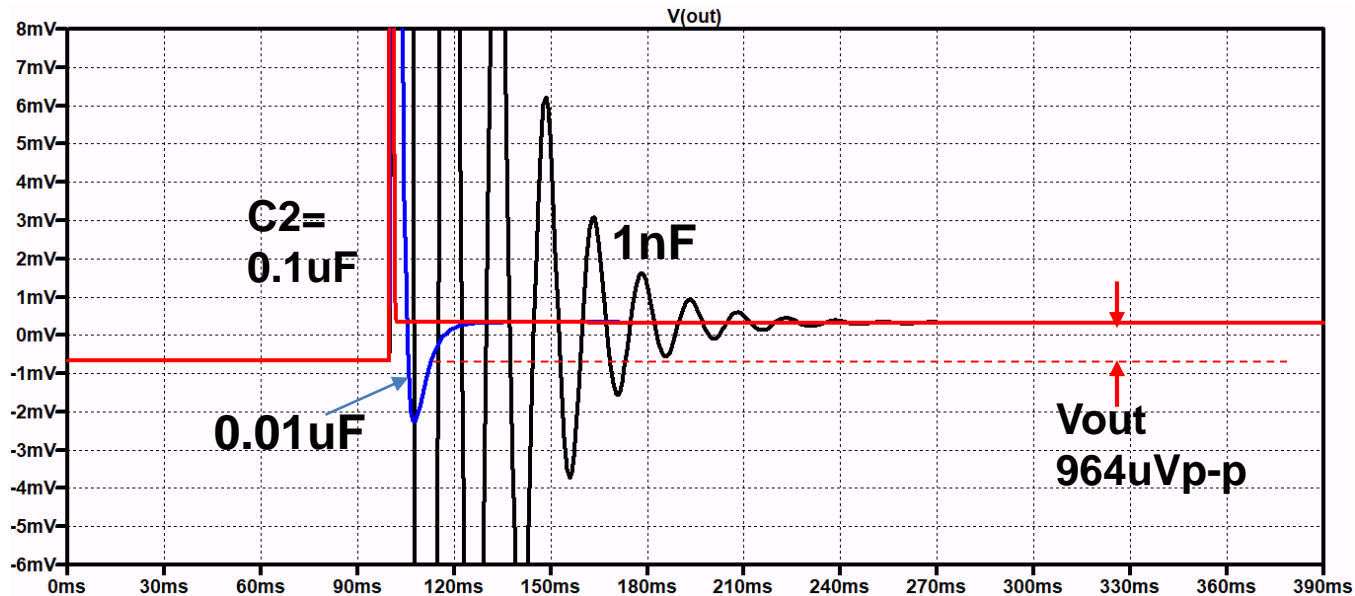
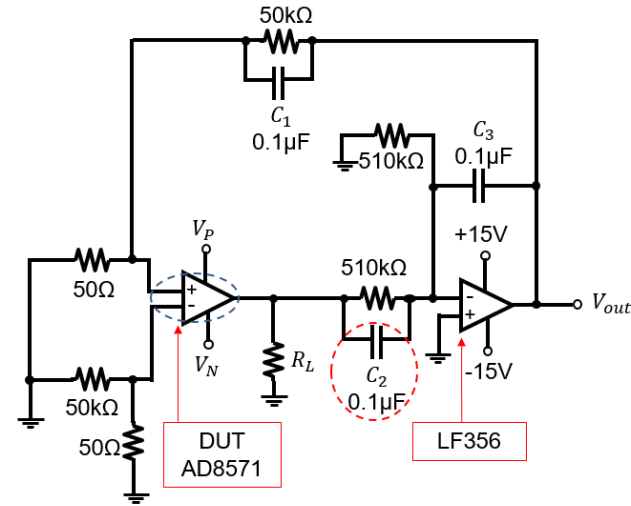


# 電源除去特性(PSRR)(2)

$R_L \rightarrow 10\text{k}\Omega, C_1 \rightarrow 1\text{nF}$ で固定



$C_2 \rightarrow$ 大で高速応答  
(CMRRと同様)



$C_1 = 1\text{nF}, C_2$ 可変とした時のPSRRシミュレーション結果

# OUTLINE

- 研究背景
- 基本的なオペアンプの測定回路
- 製作したNULL回路
- シミュレーション検証
  - 周波数特性
  - オフセット電圧
  - オープンループ ( $A_{OL}$ )
  - 同相信号除去特性(CMRR)
  - 電源除去特性(PSRR)
- まとめ

# まとめ

- オペアンプのパラメータをNULL回路で測定、検証した
- NULL回路の最適動作(安定かつ高速)には位相補償定数( $C_1, C_2$ )の最適化が重要  
最適値は $C_1 = 1nF, C_2 = 0.1\mu F$
- NULL回路:測定項目に応じて信号印加箇所が変化

信号入力部が変化 (位相補償定数は固定)



各入出力の応答特性が異なることを確認

- 測定項目により位相補償定数を切り替え



待ち時間を1/10程度に短縮可能

以下 補足資料

# 研究背景

IoT(Internet of Things)時代



SoC(System On Chip)

高精度オペアンプ、高分解能ADC/DACなど集積

半導体試験装置(ATE)で量産試験  
高性能だがデバイス単価が安い → 短時間での試験が重要

従来: NULL回路  
短時間での測定に問題

# 今後の研究

## NULL法の問題点を検証

NULL法: DUTオペアンプ+積分回路  
高精度デジタル電圧計の測定時間が必要  
(1データ測定に数10ms~100ms)

### 今後の課題

さらなる理論検討(負帰還設計)と  
シミュレーションが必要

# 発表後Q&A(1)

Q. Cの最適値は今回用いたオペアンプの最適値か？

A. そうです。オペアンプによって最適値は異なると考えております。

Q. 一般的なNULL回路と今回提案したNULL回路の違いは？

A. ここでは企業から提供された回路の特徴を調査しているだけなので、違いについては把握しておりません。

Q. 回路中に何ヶ所かスイッチが見えるが、スイッチの切り替えはどのように行っているのか？

A. スイッチがONとOFFの時とで、別の回路を用いてシミュレーションを行っています。

# 発表後Q&A(2)

Q. 試験時間が短縮できるのはなぜか？

A. 測定したいパラメータに応じて $C_1$ と $C_2$ を最適な値(安定かつ高速)に変えたからです。

Q.  $C_1$ と $C_2$ の最適値はどうやって求めたのか？ある程度計算で求めたのか？シミュレーションなどで試行錯誤したのか？

A. 元々与えられていた $0.1\mu F$ という値を少しずつ変化させ、シミュレーションすることで最適値を求めました。