

# オペアンプAC特性の FFT法による高速試験

群馬大学 理工学部 電子情報部門

荻原岳, 片山翔吾, 青木里穂, 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

# 概要

- はじめに
- FFTベース法
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- 測定手法によるAC特性の比較
  - シミュレーション
  - 実機測定
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ

# 概要

- はじめに
- FFTベース法
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- 測定手法によるAC特性の比較
  - シミュレーション
  - 実機測定
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ

# 研究背景

IoT (Internet of Things)

車載用LSI

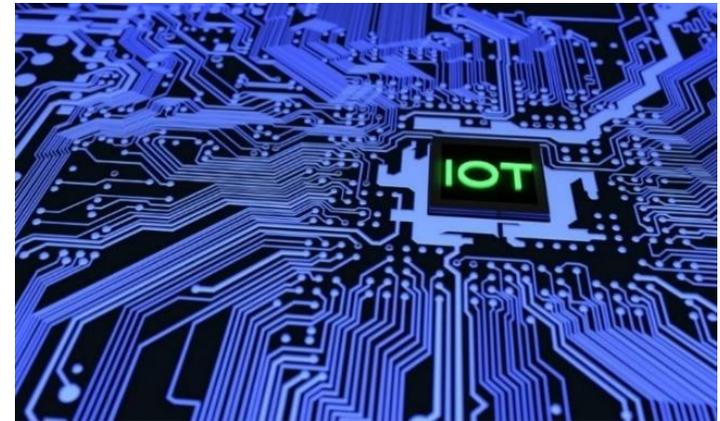


信頼性を要求



テストと評価の重要性

増



大量生産

必

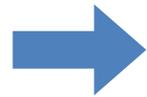
高品質かつ  
安価な試験手法

# 研究目的

## オペアンプ特性試験 NULL回路法



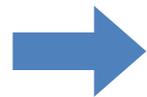
汎用性・正確性



基礎研究レベルのデバイス評価に最適



長い試験時間



量産試験には不向き

例:

1秒/デバイス(100円)



多くの場合、特性試験は省略される

✓ 高速な試験手法が必要

# 研究目標



NULL法の利点+

量産試験の時間的要求を満たす測定方法

汎用性 — 多種類のパラメータに対応

正確性 — NULL法と同程度の精度

試験時間 — NULL法より短い所要時間



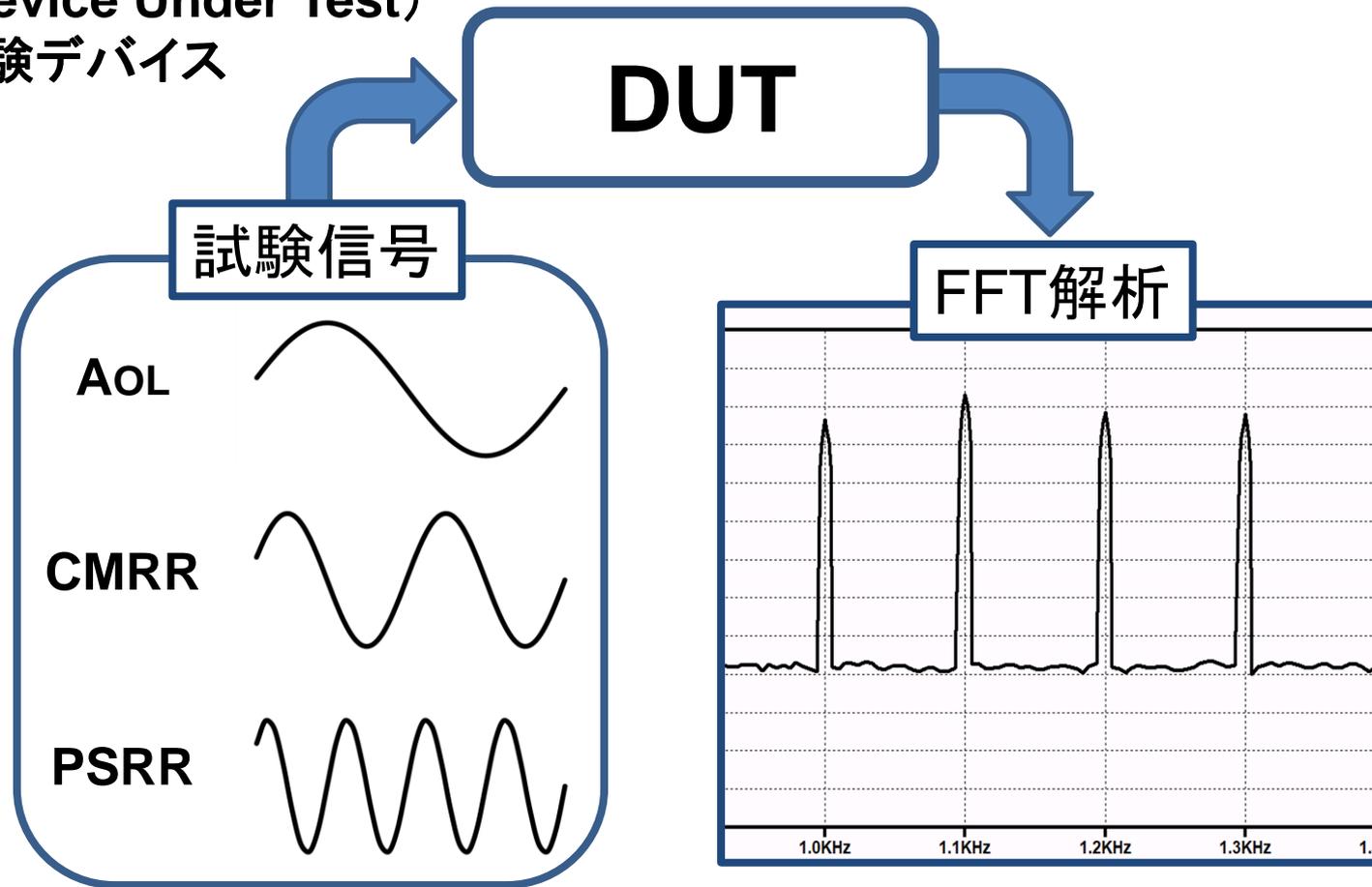
✓ 反転増幅回路構成とFFT技術を用いた高速試験

# 概要

- はじめに
- **FFTベース法**
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- 測定手法によるAC特性の比較
  - シミュレーション
  - 実機測定
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ

# FFTベースの測定

DUT (Device Under Test)  
: 被試験デバイス



➡ パラメータごとに周波数を割り当てることで測定を容易に

# 概要

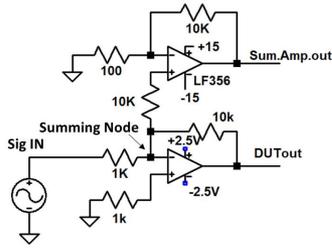
- はじめに
- FFTベース法
- **複数オペアンプの開ループゲイン同時測定**
- 測定手法によるAC特性の比較
  - シミュレーション
  - 実機測定
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ



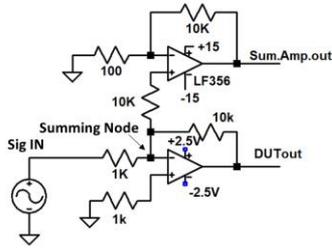
# 複数オペアンプのAOL測定

DUT番号

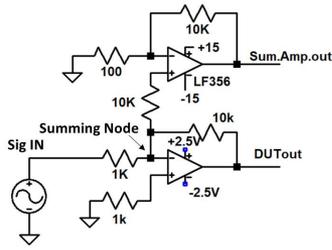
No. 4



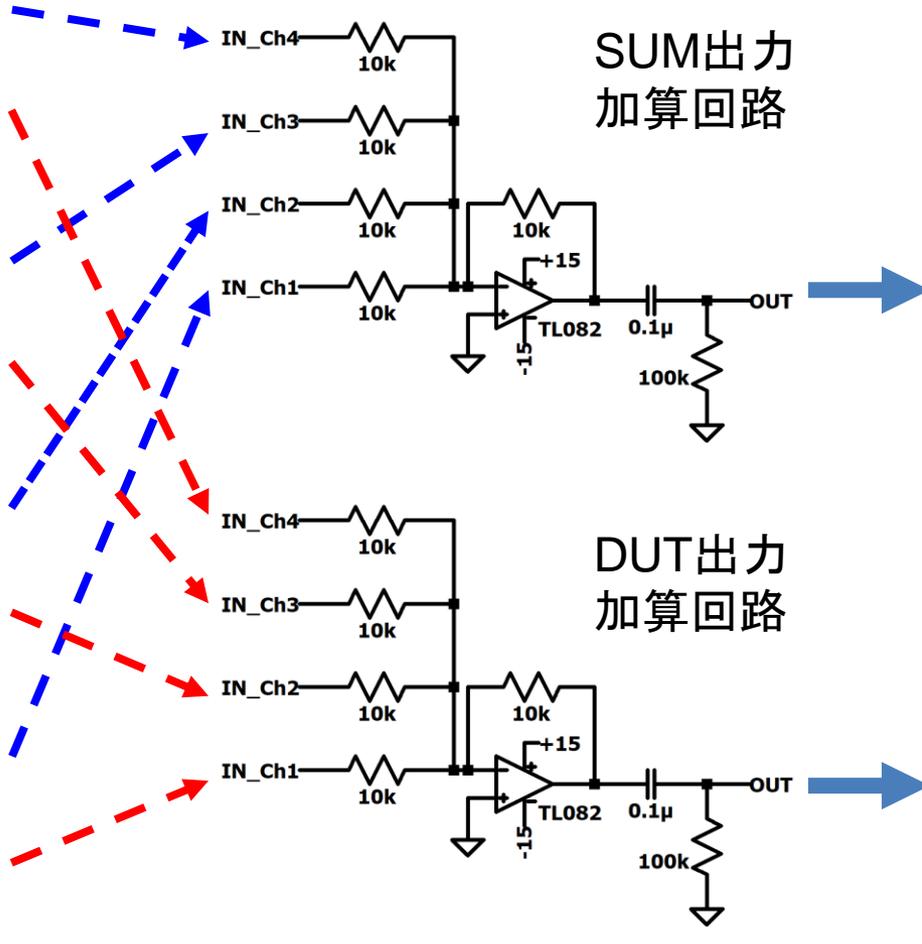
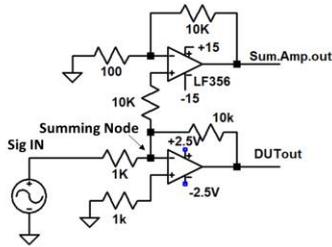
No. 3



No. 2



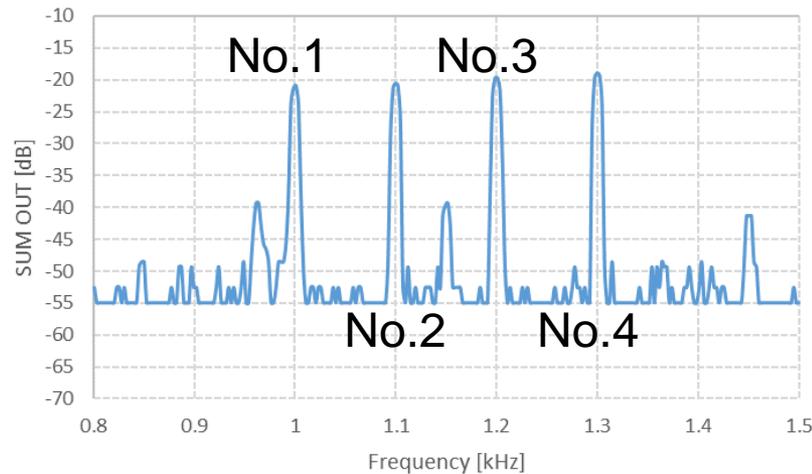
No. 1



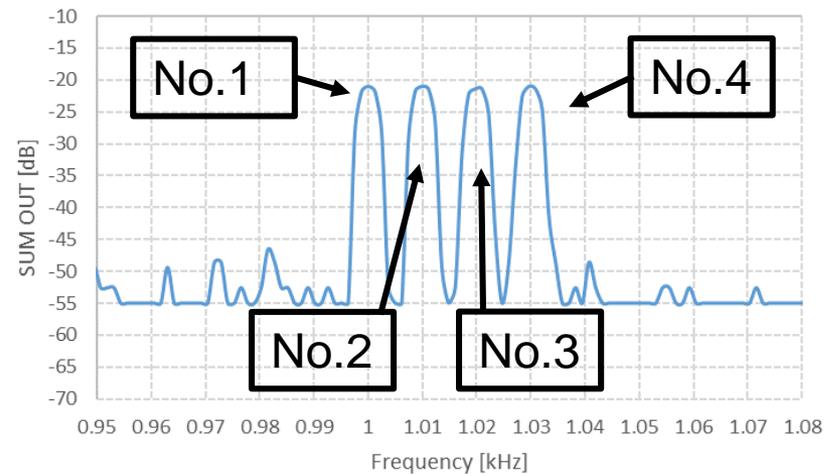
FFT

# 複数オペアンプのAOL測定結果

100Hz刻みの場合



10Hz刻みの場合



10Hzの狭い周波数間隔でもAOL測定可能



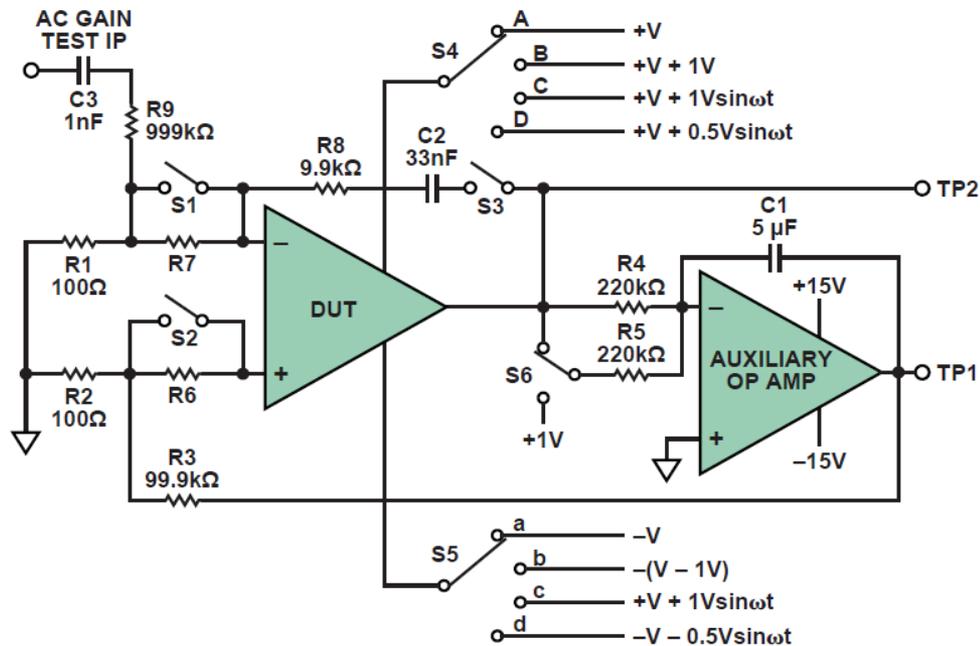
同時に多数チャンネルの試験可能

# 概要

- はじめに
- FFTベース法
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- **測定手法によるAC特性の比較**
  - シミュレーション
  - 実機測定
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ

# NULL法の回路構成

## NULL法によるオペアンプ特性測定回路



### スイッチポジション

パラメータ	S1	S2	S3	S4	S5	S6
オフセット電圧	on	on	off	A	a	off
オフセット電圧と バイアス電流	on/off	on/off	off	A	a	off
DCゲイン	on	on	off	A	a	off/on
ACゲイン	on	on	off	A	a	off
DC CMRR	on	on	off	A/B	a/b	off
DC PSRR	on	on	off	A/B	a/b	off
AC CMRR	on	on	on	C	c	off
AC PSRR	on	on	on	D	d	off

出典: Analog Dialogue Vol 45 Apr.2011 Analog Devices

# NULL回路の特徴

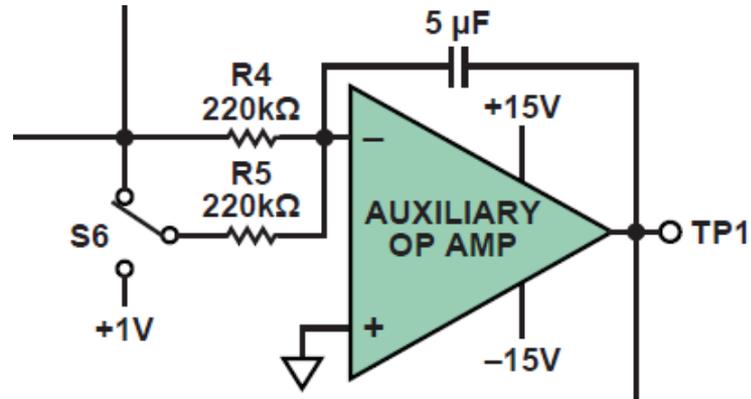
## 利点

- 多様なDC/ACパラメータに対応
- 正確な測定

パラメータ	S1	S2	S3	S4
オフセット電圧	on	on	off	A
オフセット電圧と バイアス電流	on/off	on/off	off	A
DCゲイン	on	on	off	A
ACゲイン	on	on	off	A
DC CMRR	on	on	off	A/B
DC PSRR	on	on	off	A/B
AC CMRR	on	on	on	C
AC PSRR	on	on	on	D

## 欠点

測定時間:長



積分器

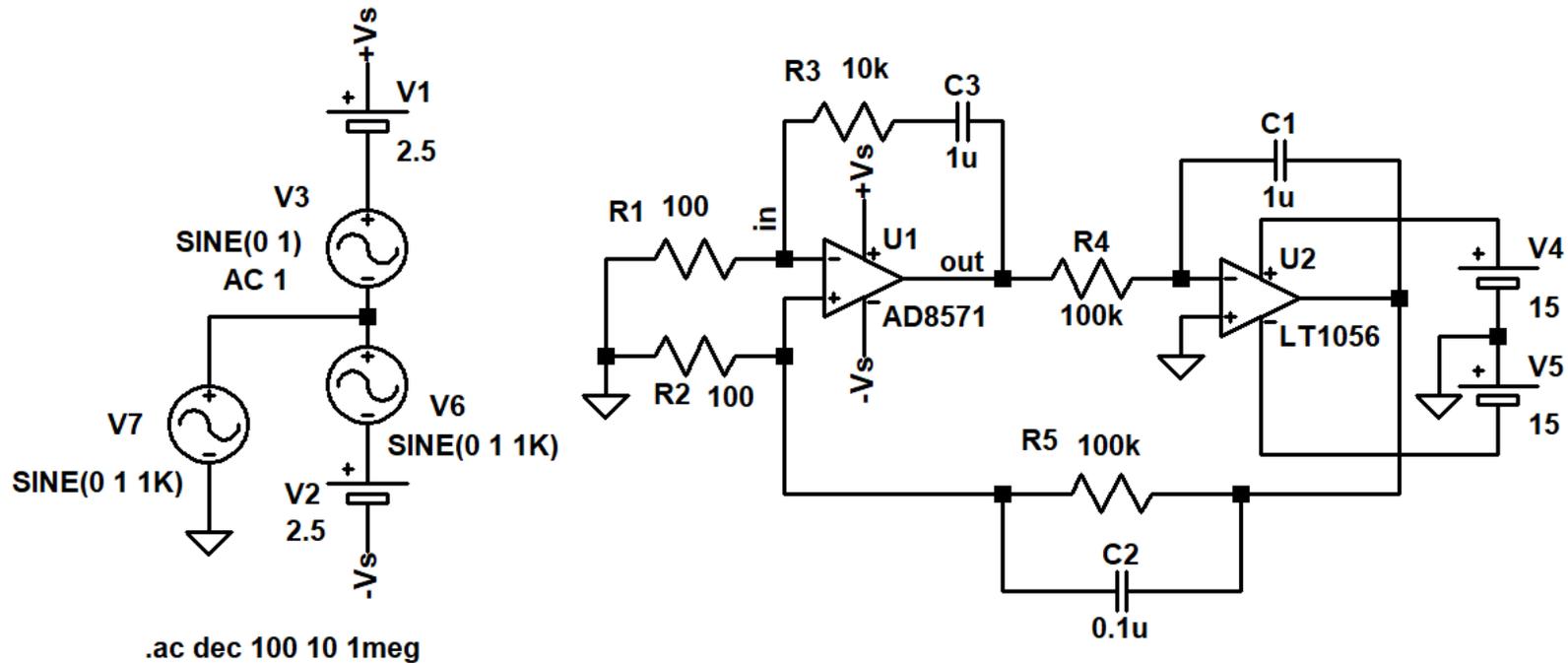
汎用性・正確性



測定時間

# NULL法 シミュレーション(1)

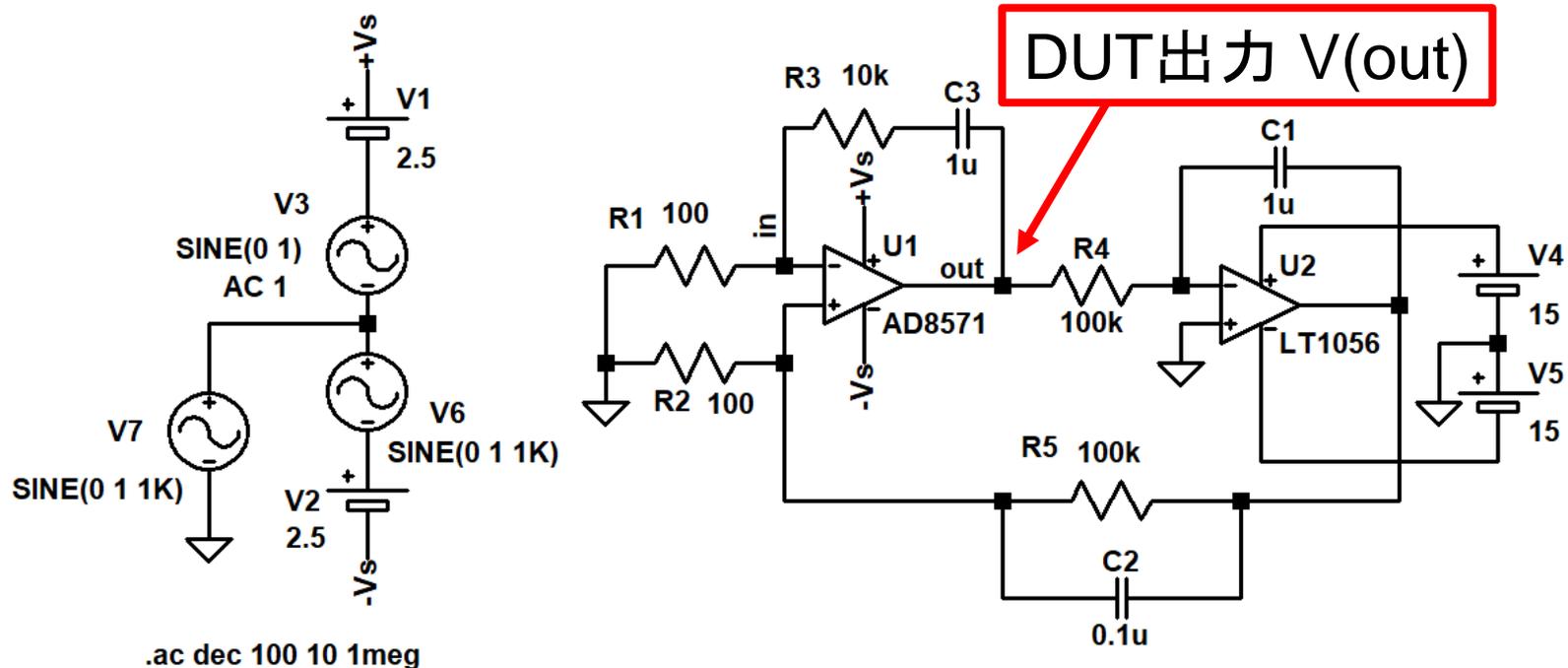
## PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(out)} + 40 \text{ [dB]}$$

# NULL法 シミュレーション(2)

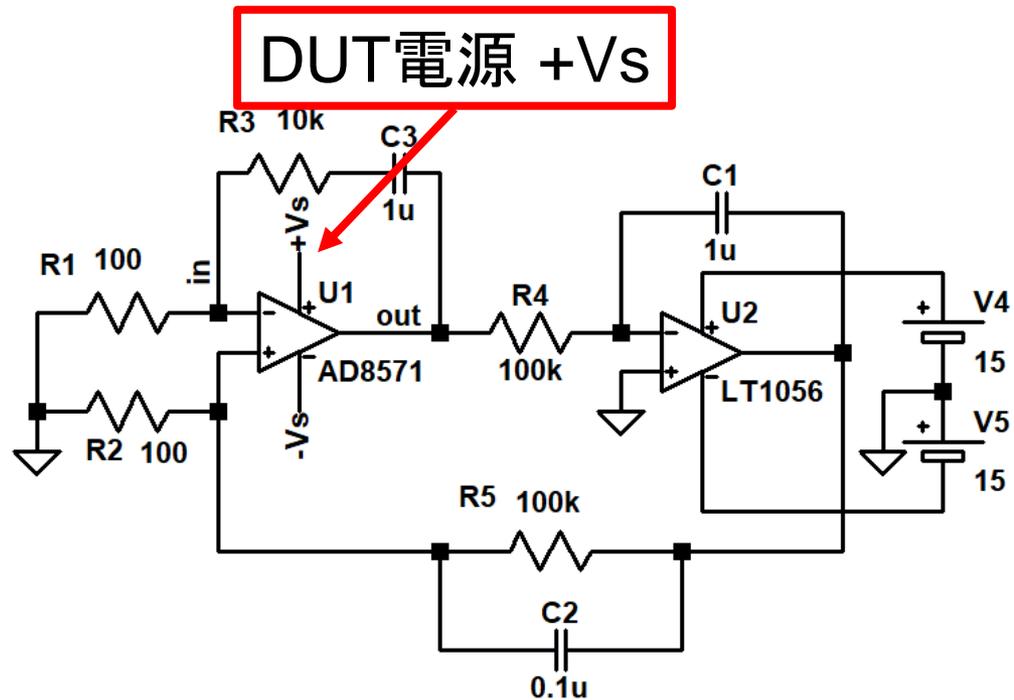
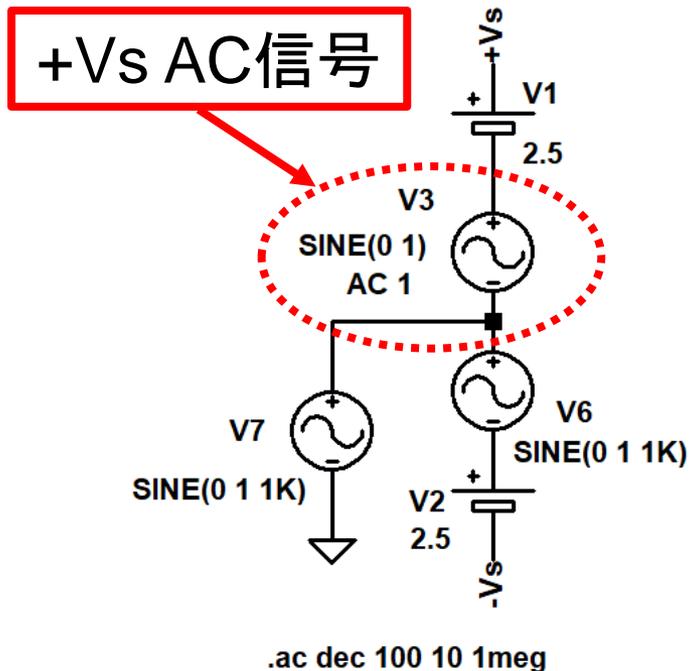
## PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(out)} + 40 \text{ [dB]}$$

# NULL法 シミュレーション(3)

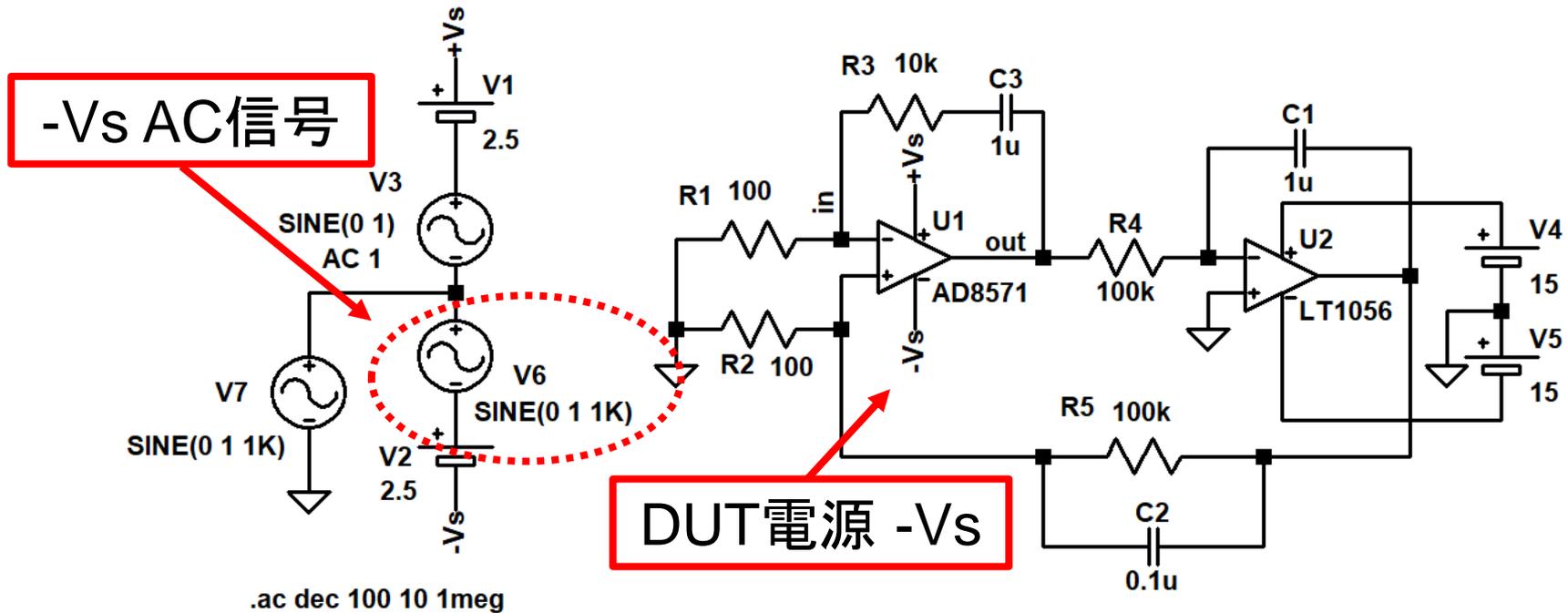
## PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(out)} + 40 \text{ [dB]}$$

# NULL法 シミュレーション(4)

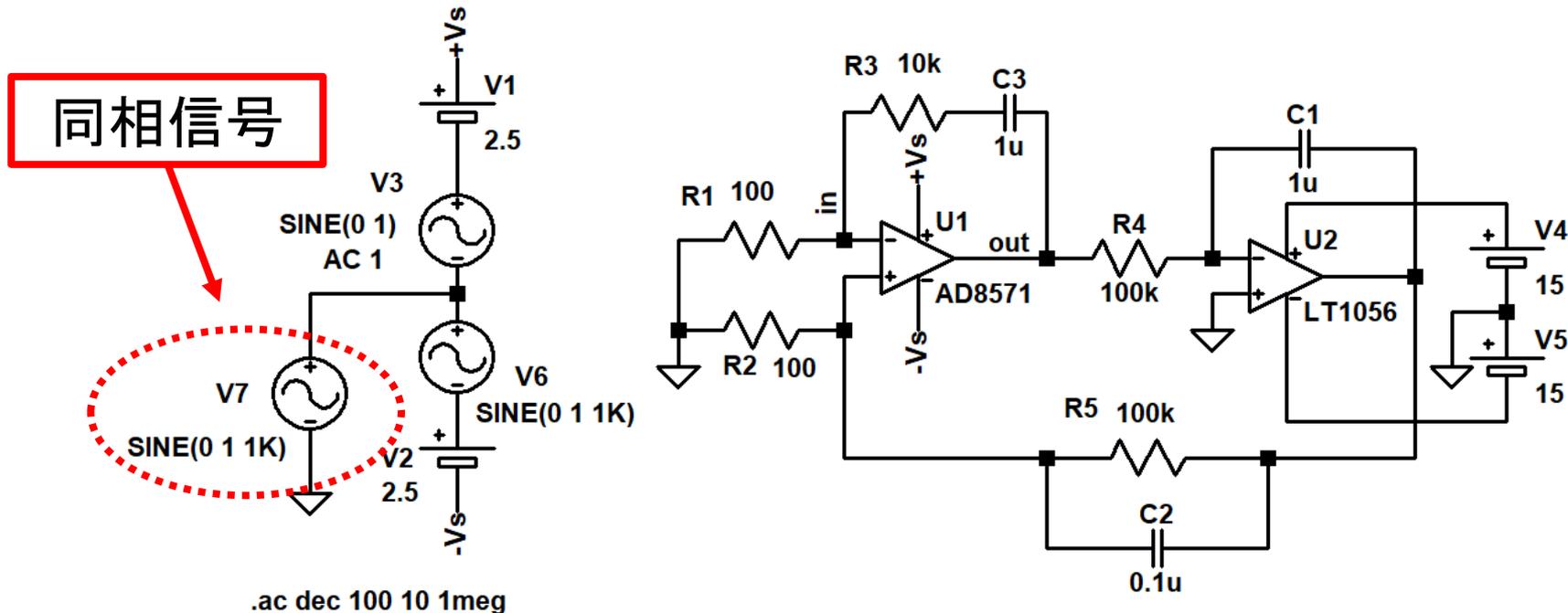
## PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(out)} + 40 \text{ [dB]}$$

# NULL法 シミュレーション(5)

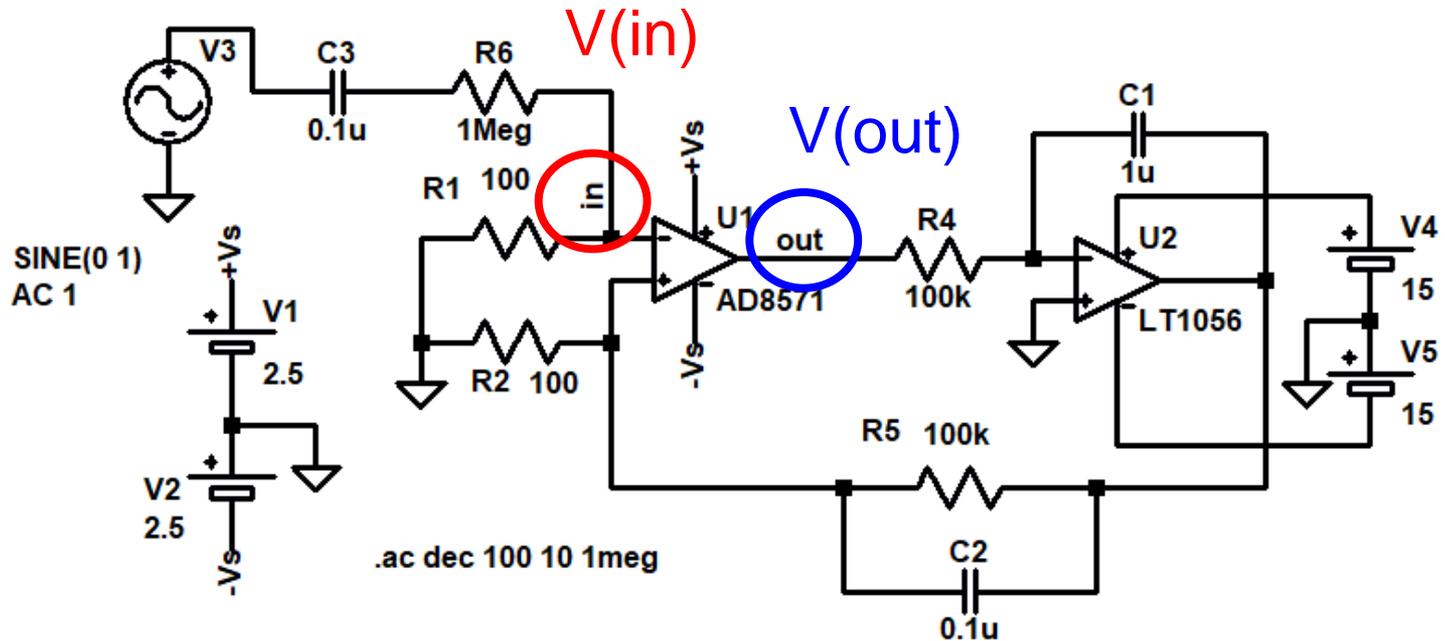
## PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(out)} + 40 \text{ [dB]}$$

# NULL法 シミュレーション(6)

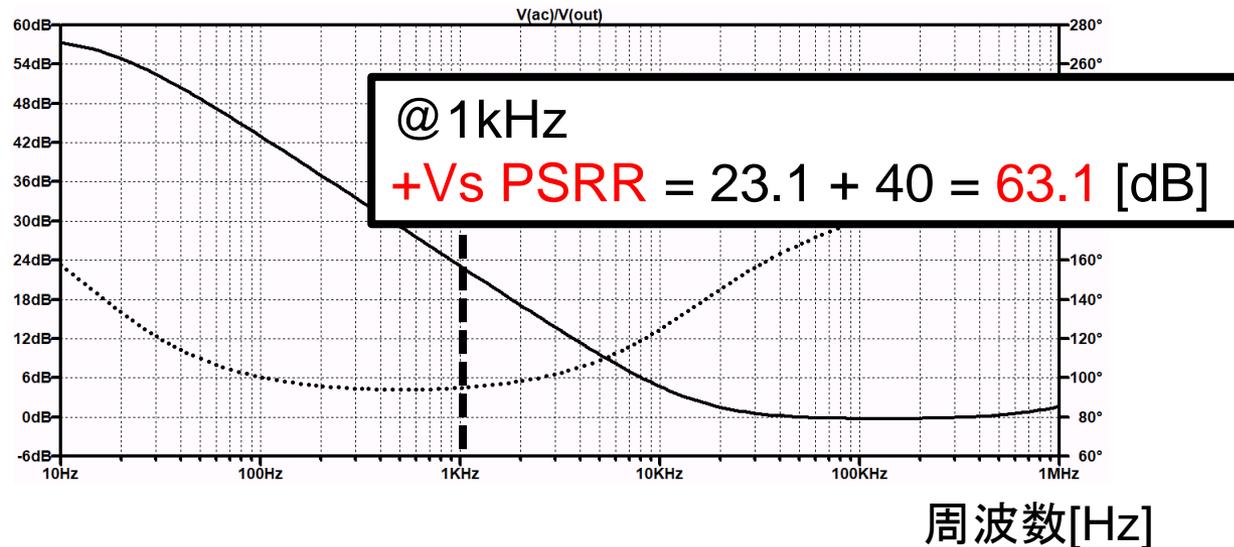
## AOL AC特性シミュレーション回路



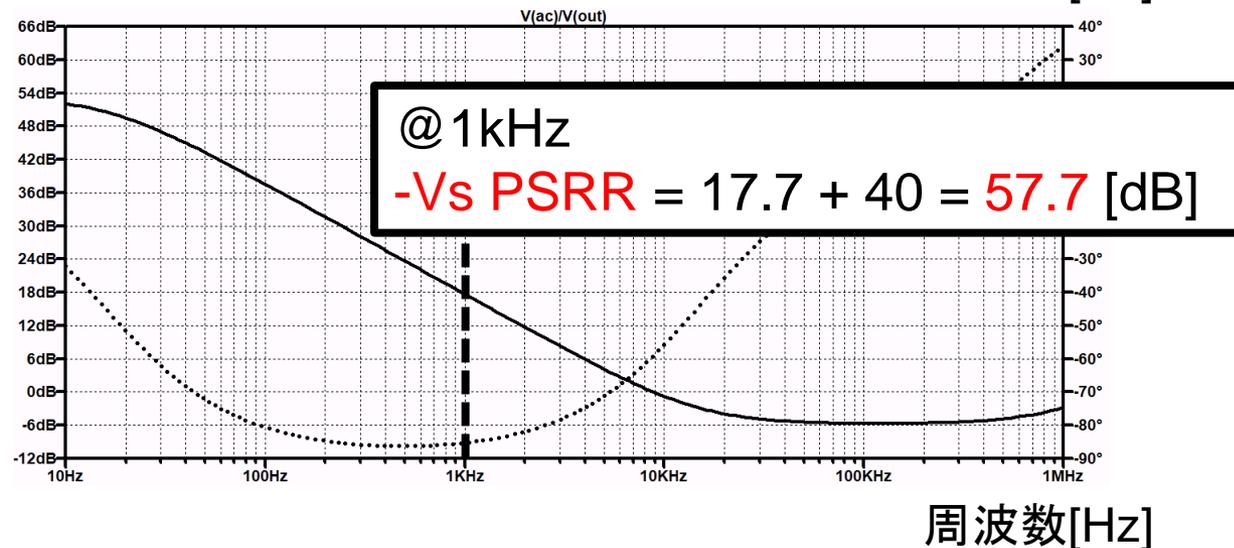
$$AOL = 20 \log_{10} \frac{V(out)}{V(in)} \text{ [dB]}$$

# NULL法 シミュレーション 結果(1)

NULL AC  
+Vs PSRR [dB]

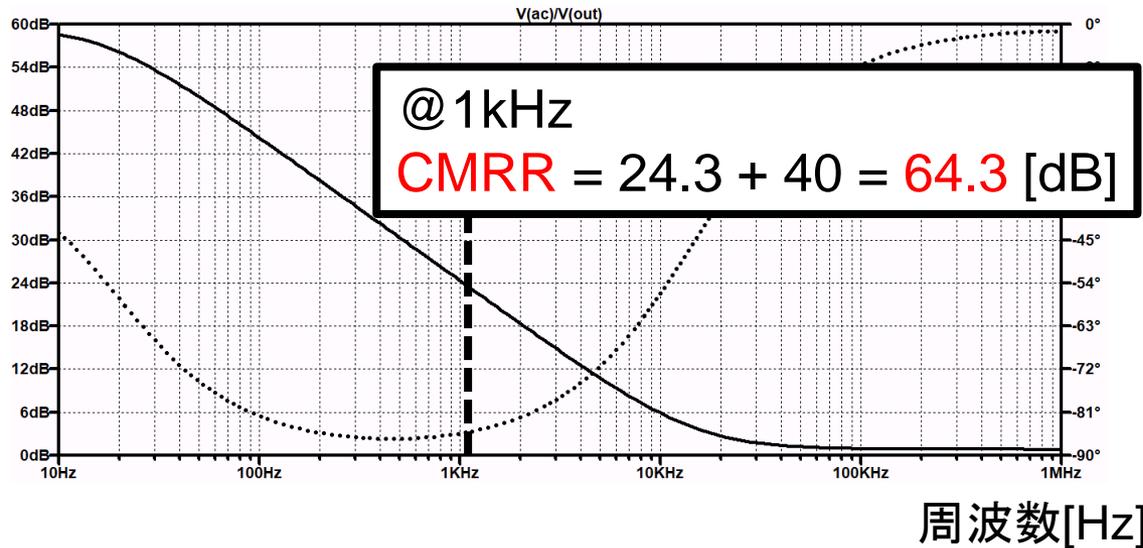


NULL AC  
-Vs PSRR [dB]

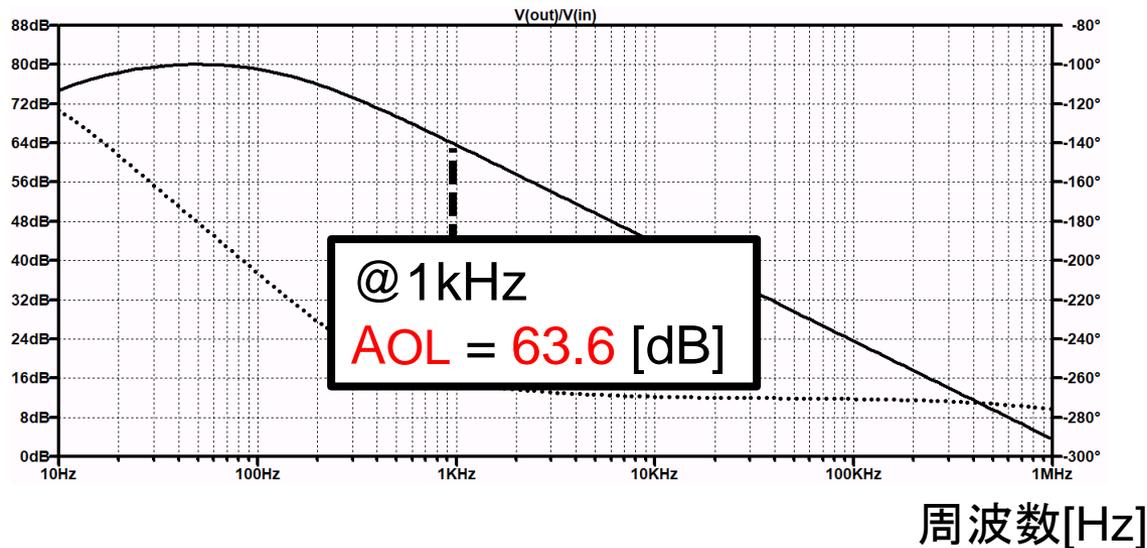


# NULL法 シミュレーション 結果(2)

NULL AC  
CMRR [dB]

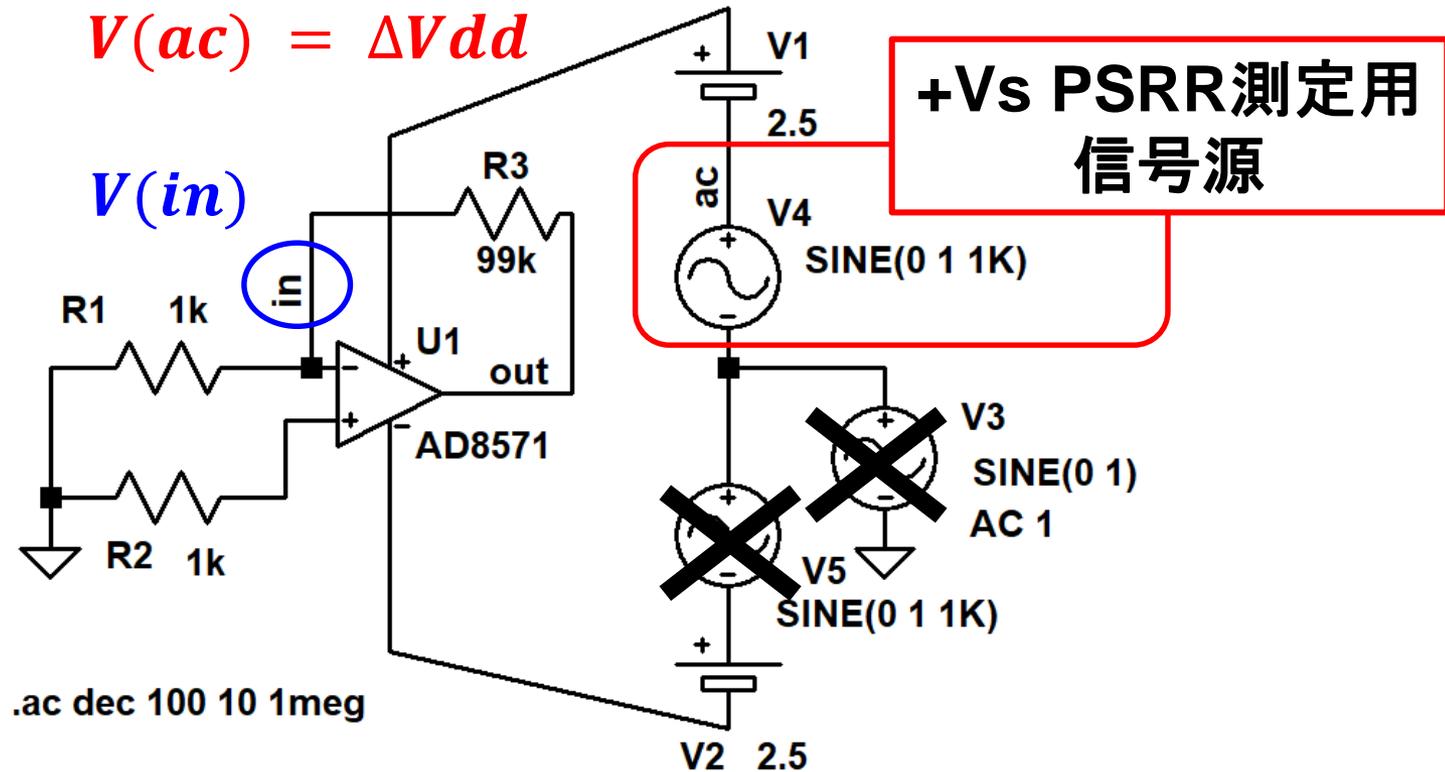


NULL AC  
AOL [dB]



# FFT法 シミュレーション(1)

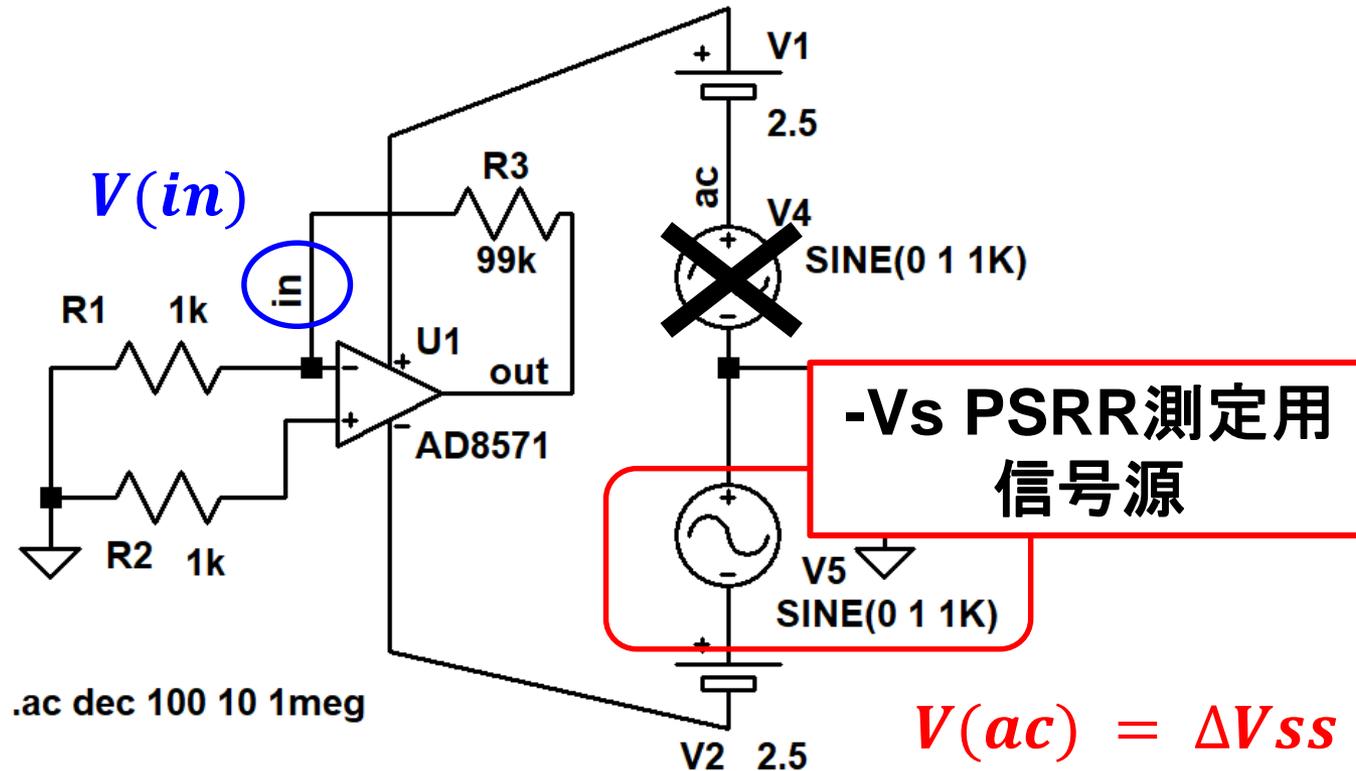
PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(in)} \text{ [dB]}$$

# FFT法 シミュレーション(2)

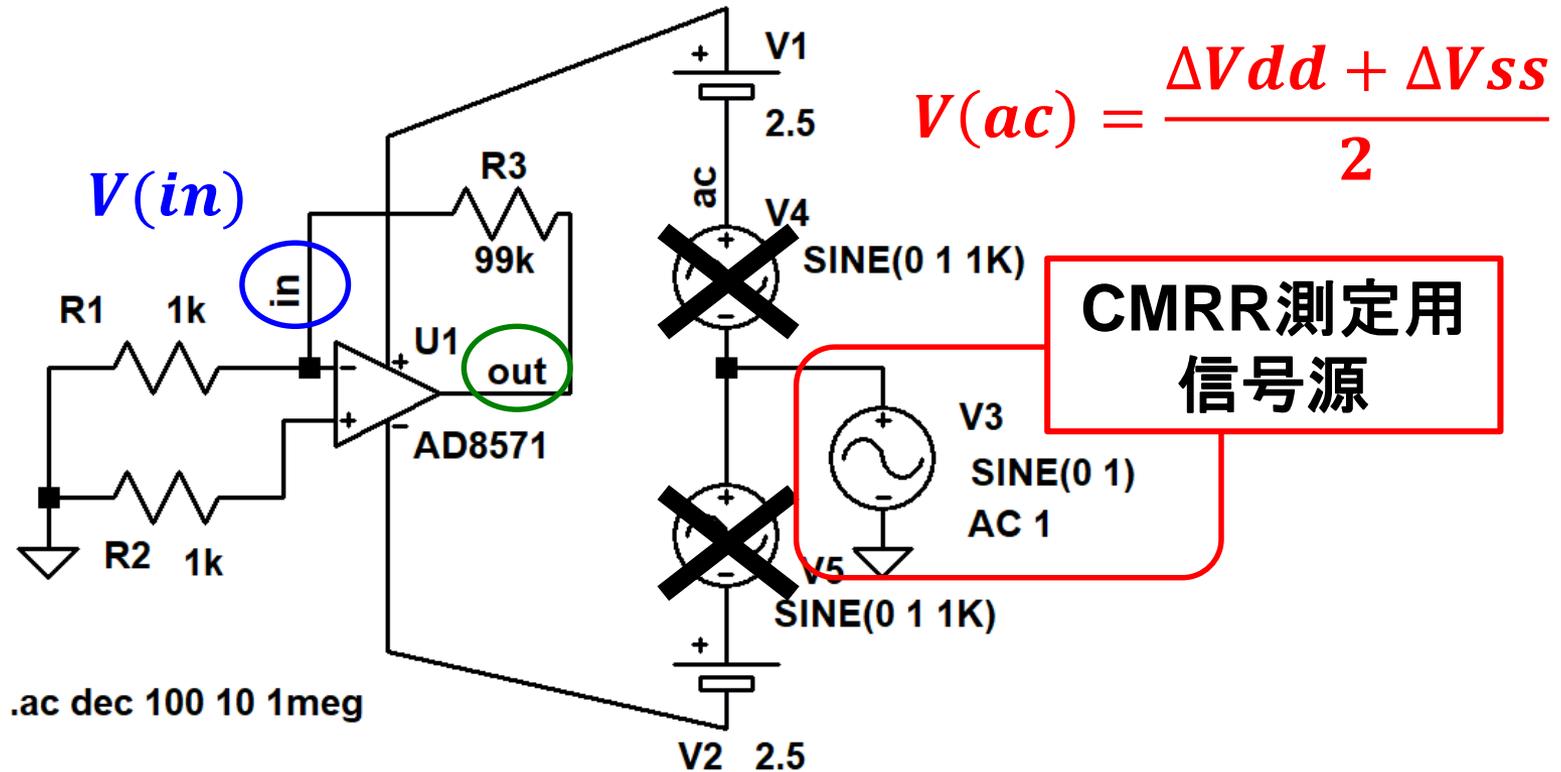
PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



$$PSRR, CMRR = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(in)} \text{ [dB]}$$

# FFT法 シミュレーション(3)

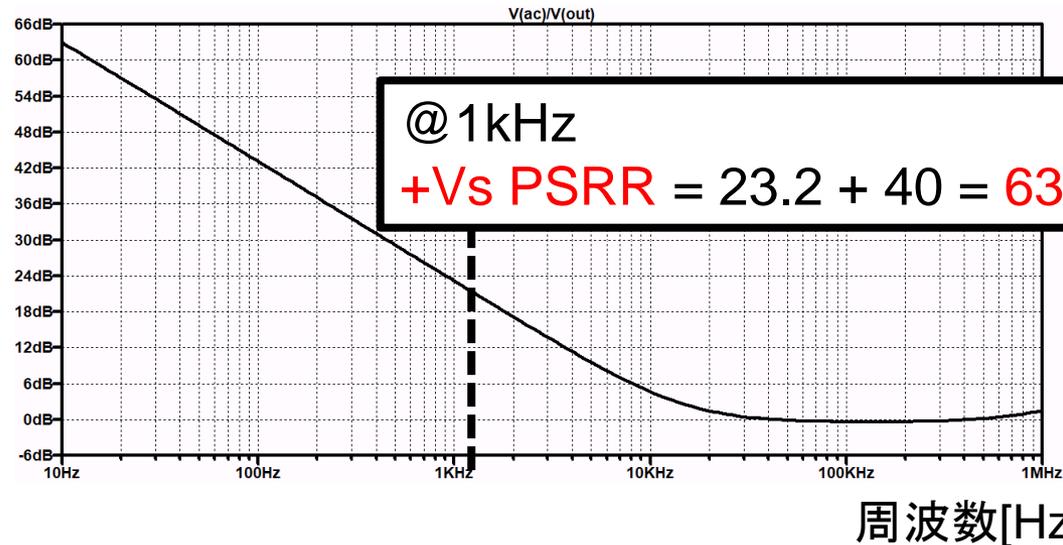
PSRR, CMRR AC特性シミュレーション回路



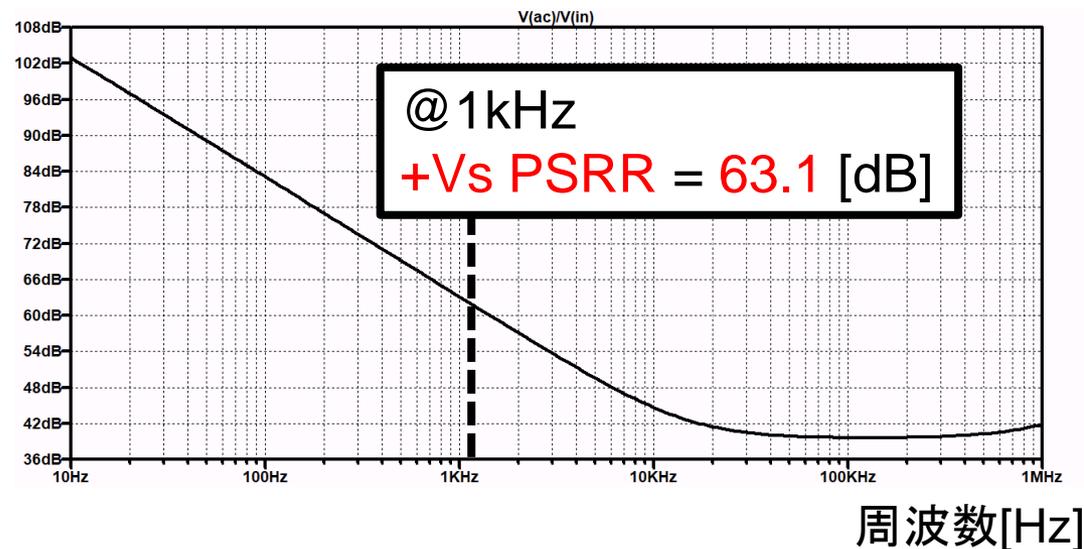
$$\text{PSRR, CMRR} = 20 \log_{10} \frac{V(ac)}{V(in)} \text{ [dB]}$$

# FFT法 シミュレーション 結果(1)

DUT出力観測  
+Vs PSRR [dB]

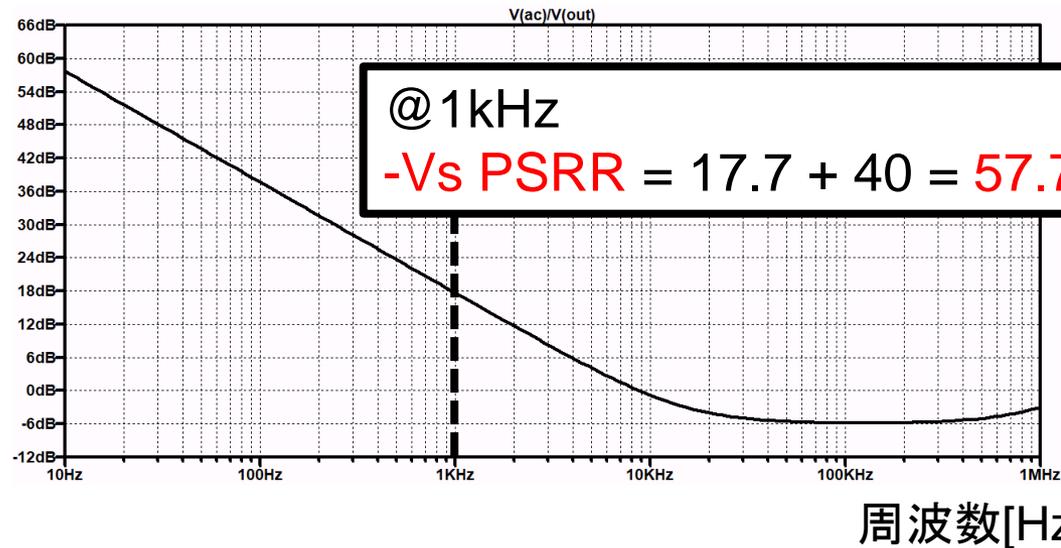


DUT入力観測  
(Summing Node)  
+Vs PSRR [dB]

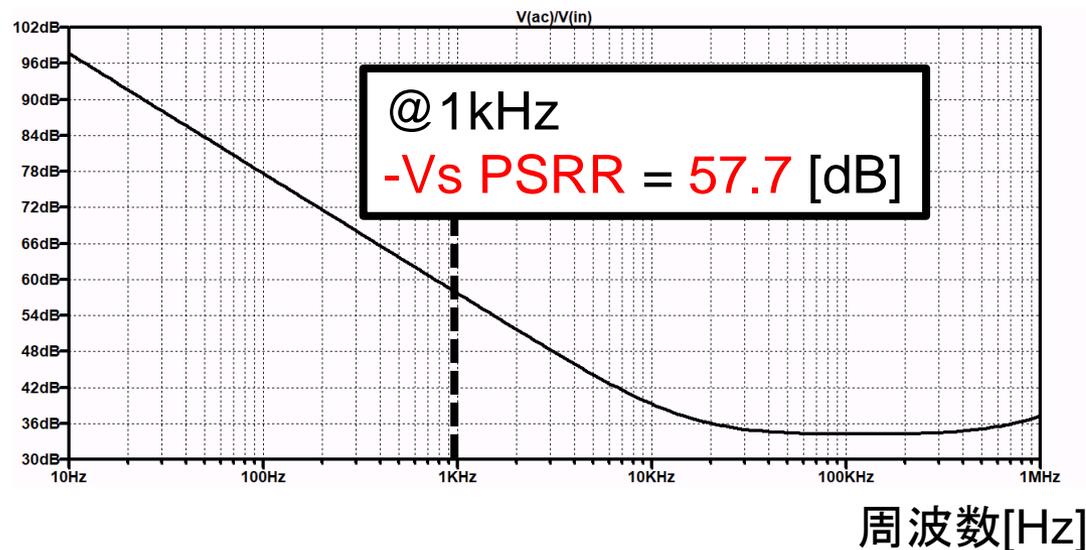


# FFT法 シミュレーション 結果(2)

DUT出力観測  
-Vs PSRR [dB]

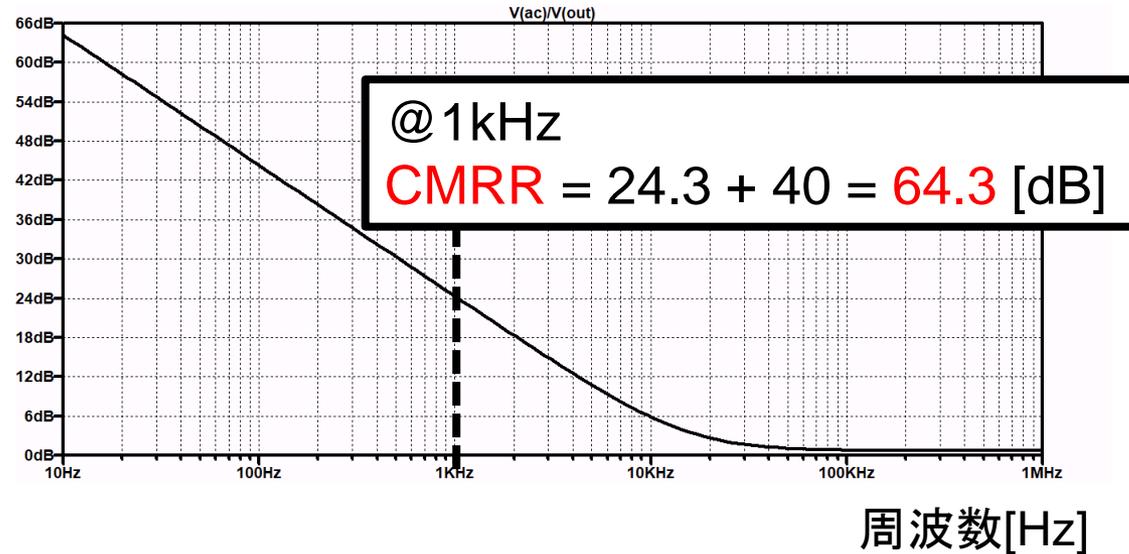


DUT入力観測  
(Summing Node)  
-Vs PSRR [dB]

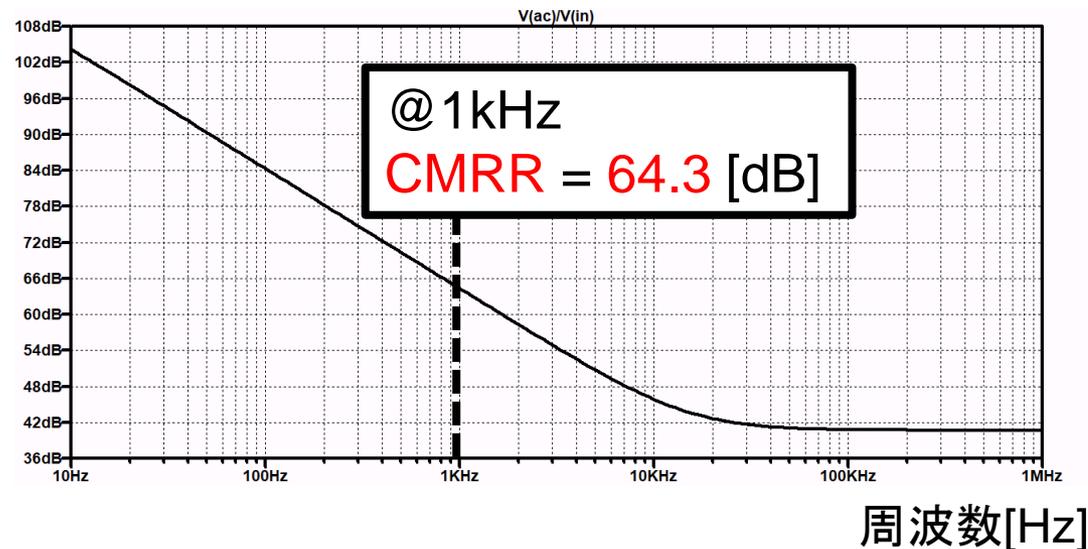


# FFT法 シミュレーション 結果 (3)

DUT出力観測  
CMRR [dB]



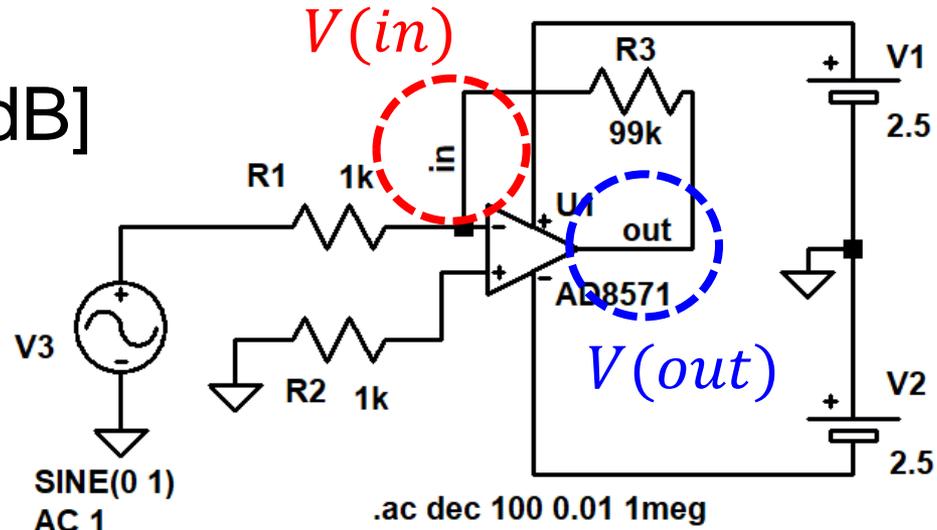
DUT入力観測  
(Summing Node)  
CMRR [dB]



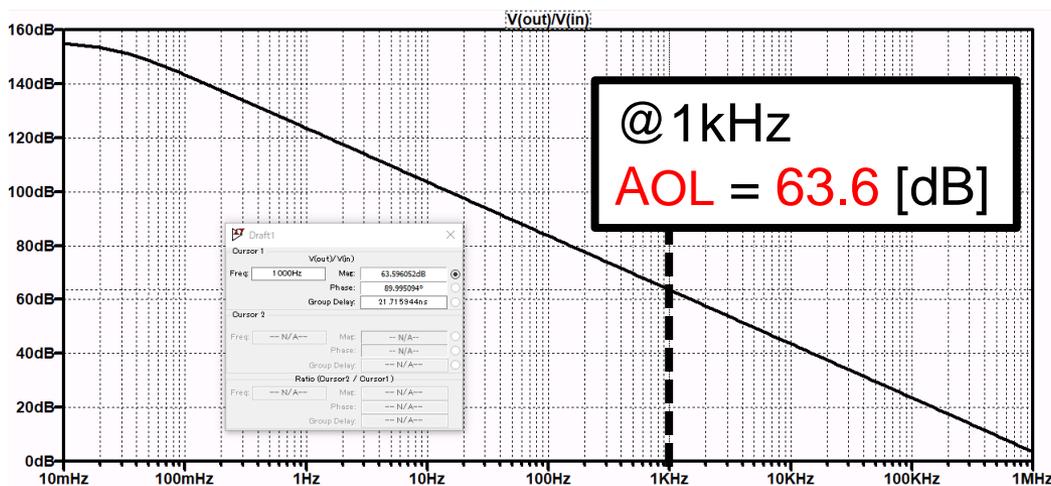
# FFT法 シミュレーション 結果(4)

## AOL AC特性シミュレーション回路

$$AOL = 20 \log_{10} \frac{V(out)}{V(in)} \text{ [dB]}$$



AOL [dB]



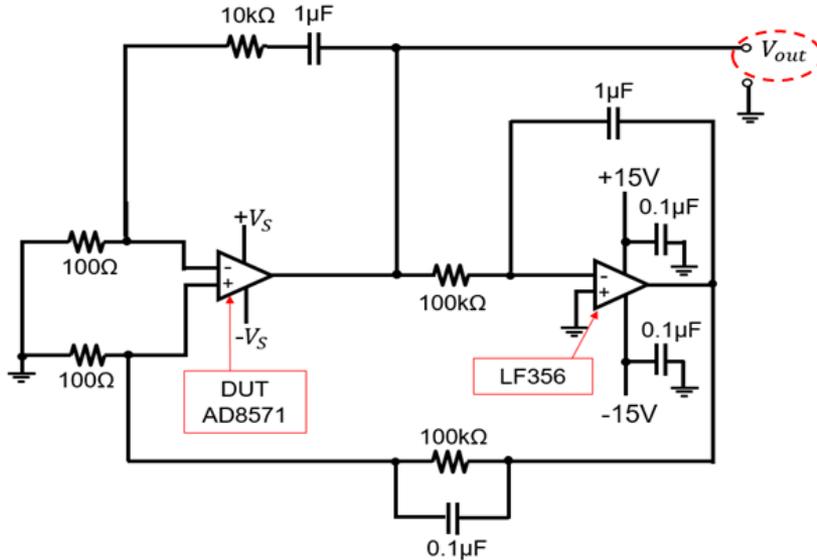
周波数[Hz]

# 概要

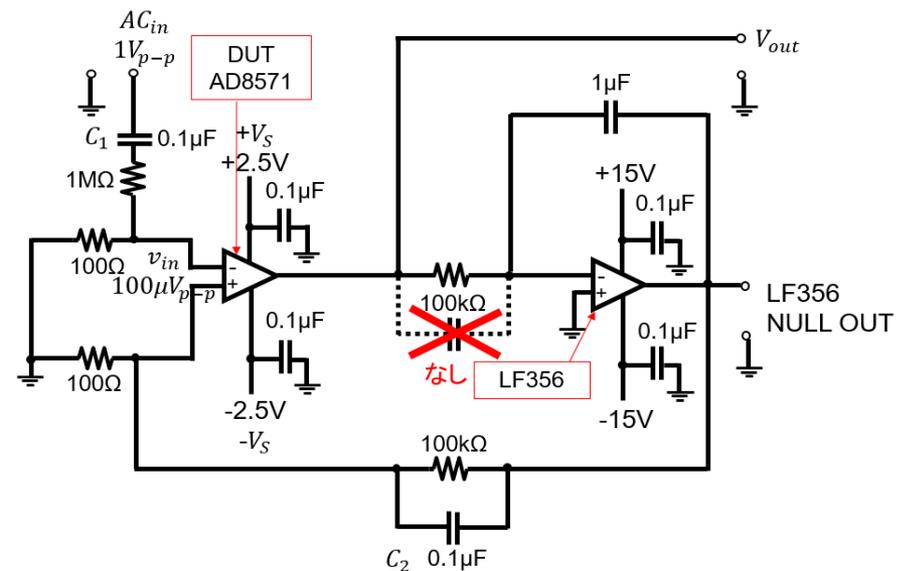
- はじめに
- FFTベース法
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- **測定手法によるAC特性の比較**
  - シミュレーション
  - **実機測定**
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ

# NULL法 実機測定

## PSRR, CMRR 測定回路

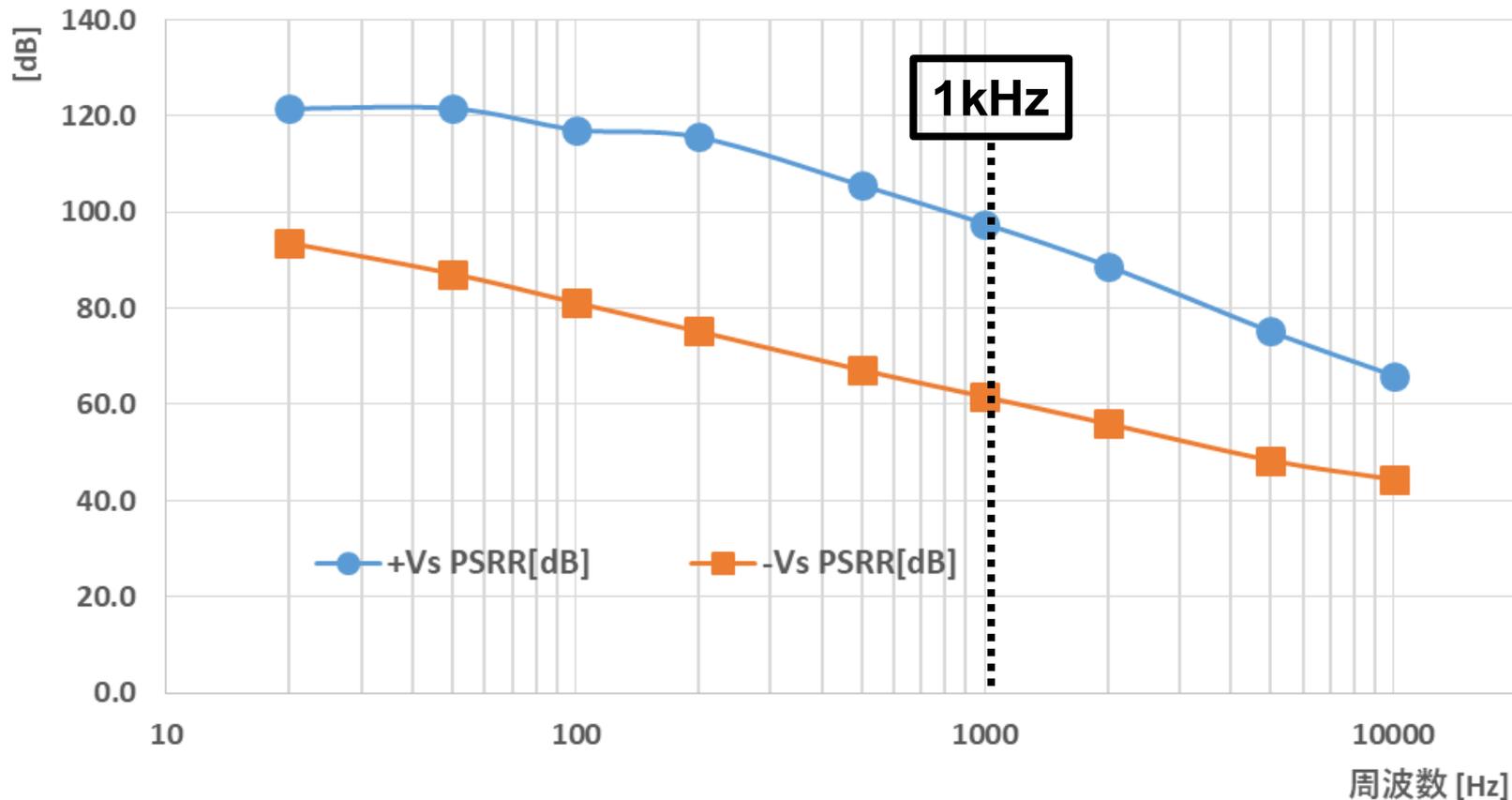


## AOL 測定回路



$$V(in) = 100\mu V_{p-p}$$

# NULL法 実機測定 結果(1)

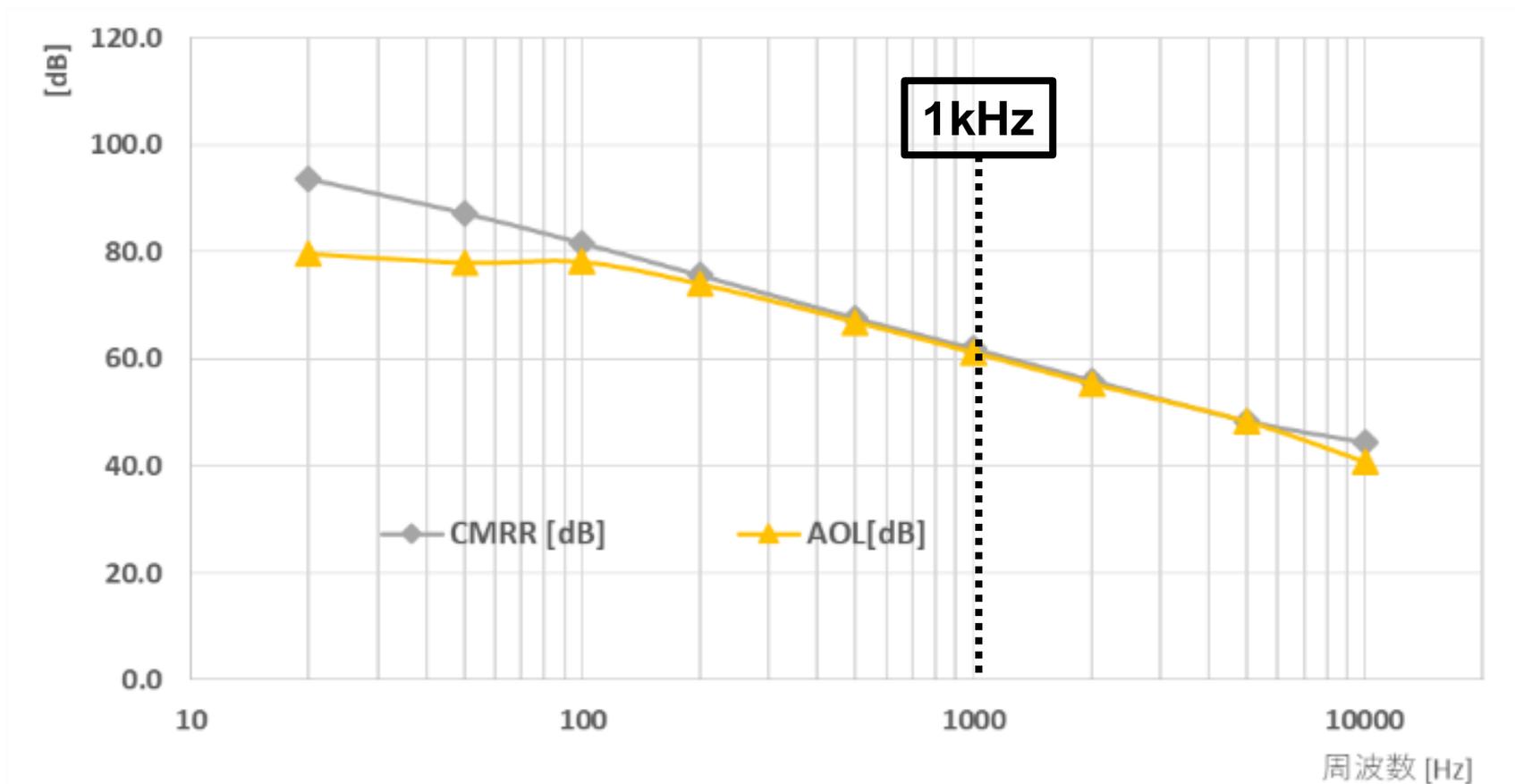


+Vs PSRR : 97.6 [dB]

-Vs PSRR : 61.6 [dB]

(1kHz)

# NULL法 実機測定 結果(2)



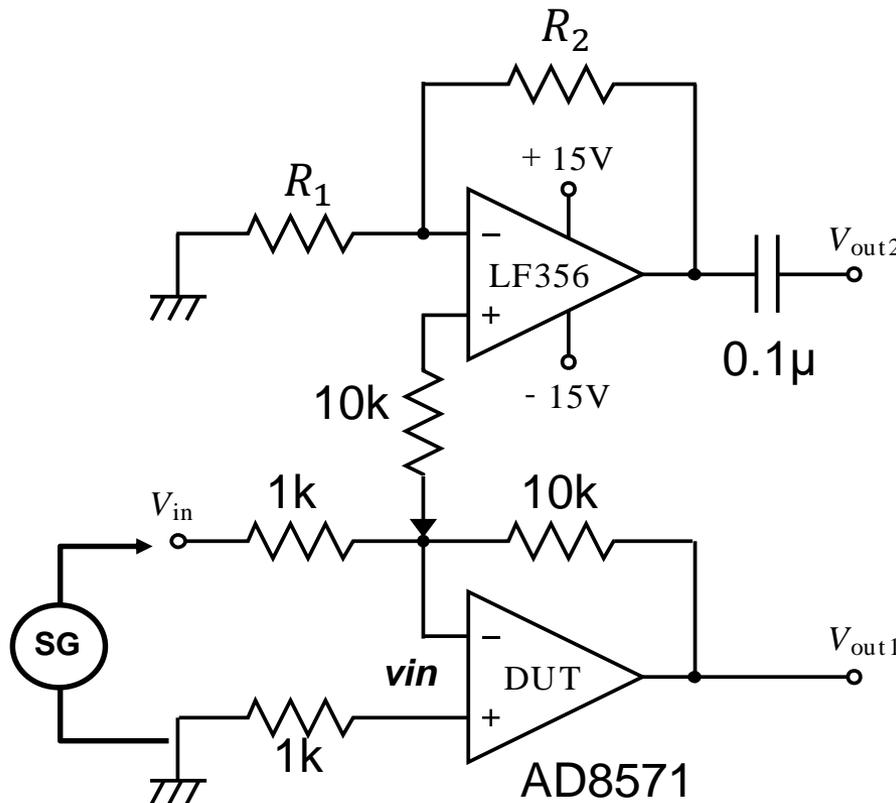
CMRR : 61.9 [dB]

AOL : 61.2 [dB]

(1kHz)

# FFT法 実機測定(1)

DUT反転入力(Summing Node)電圧とDUT出力をFFTして伝達特性から算出



~10kHz:  $R_1 = 100, R_2 = 10k$

20kHz~:  $R_1$  Open,  $R_2 = 0$

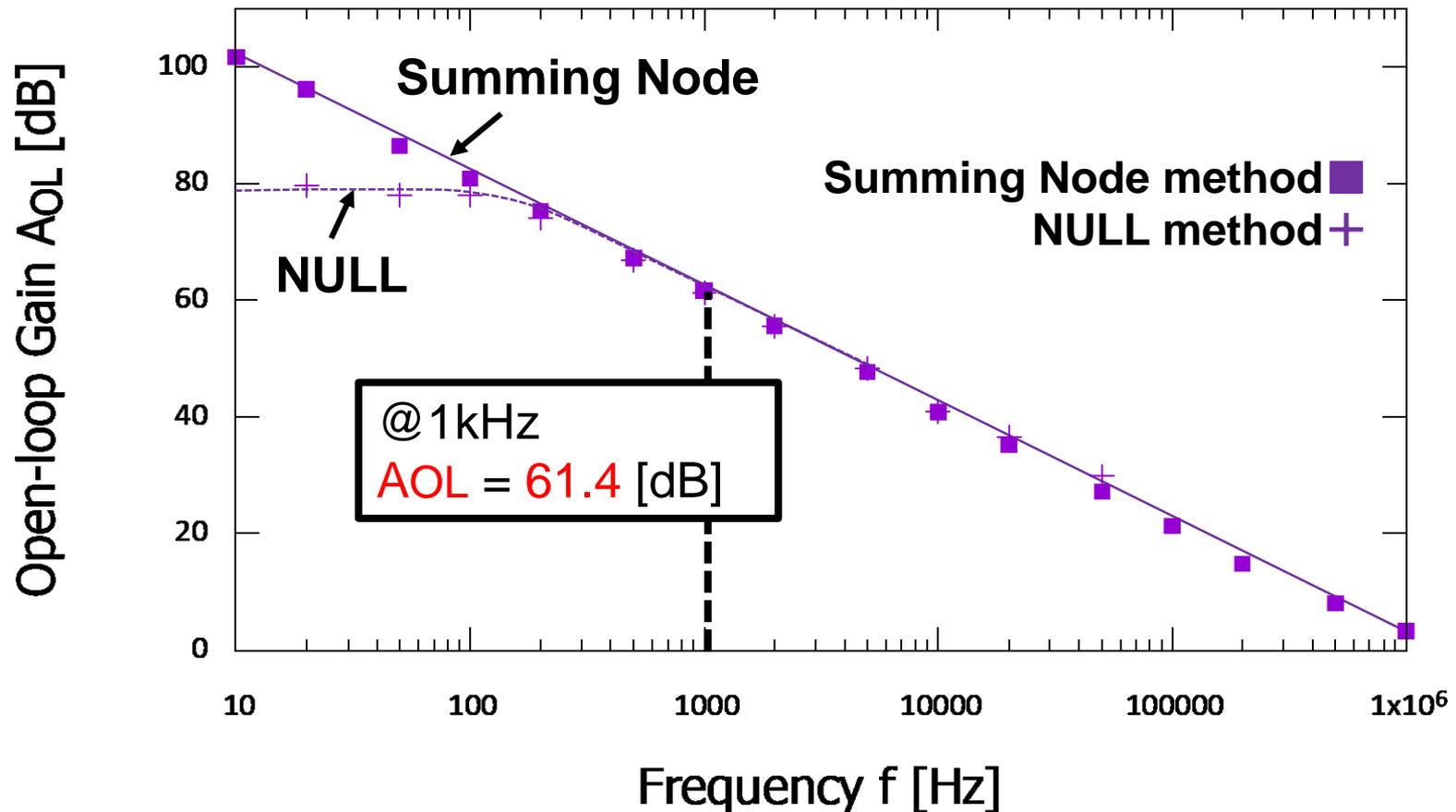
オシロスコープFFT機能  
伝達特性測定

- $V_{in}$ : 0.1Vp-p入力
- Summing Node  
レベル測定

Summing Node法測定回路

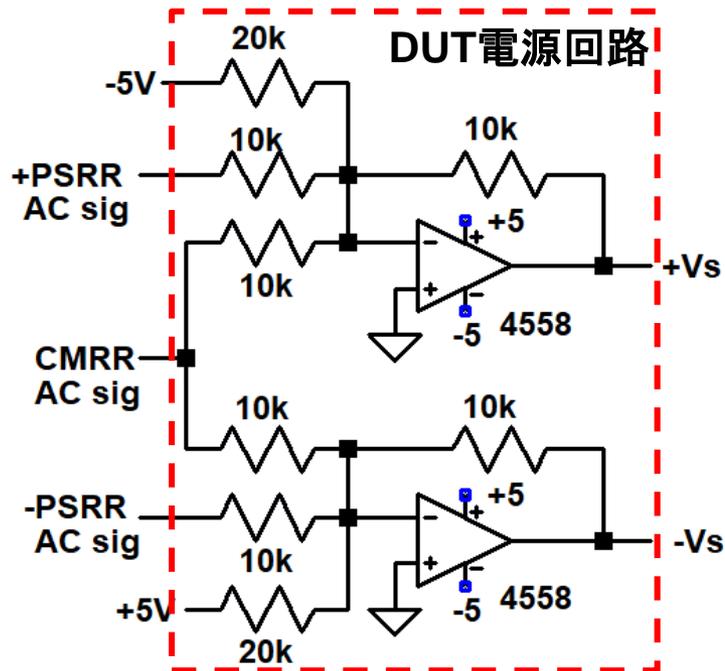
# FFT法 実機測定(2)

## AOL AC特性測定結果

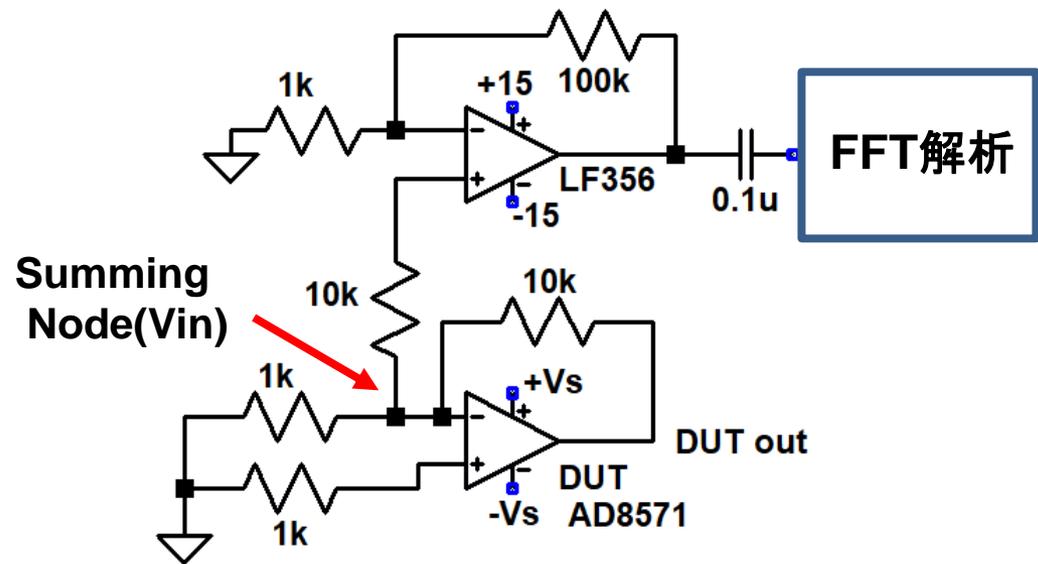


# FFT法 実機測定(3)

## PSRR, CMRR AC特性



Vac信号 0.1Vrms(=-20dBV)



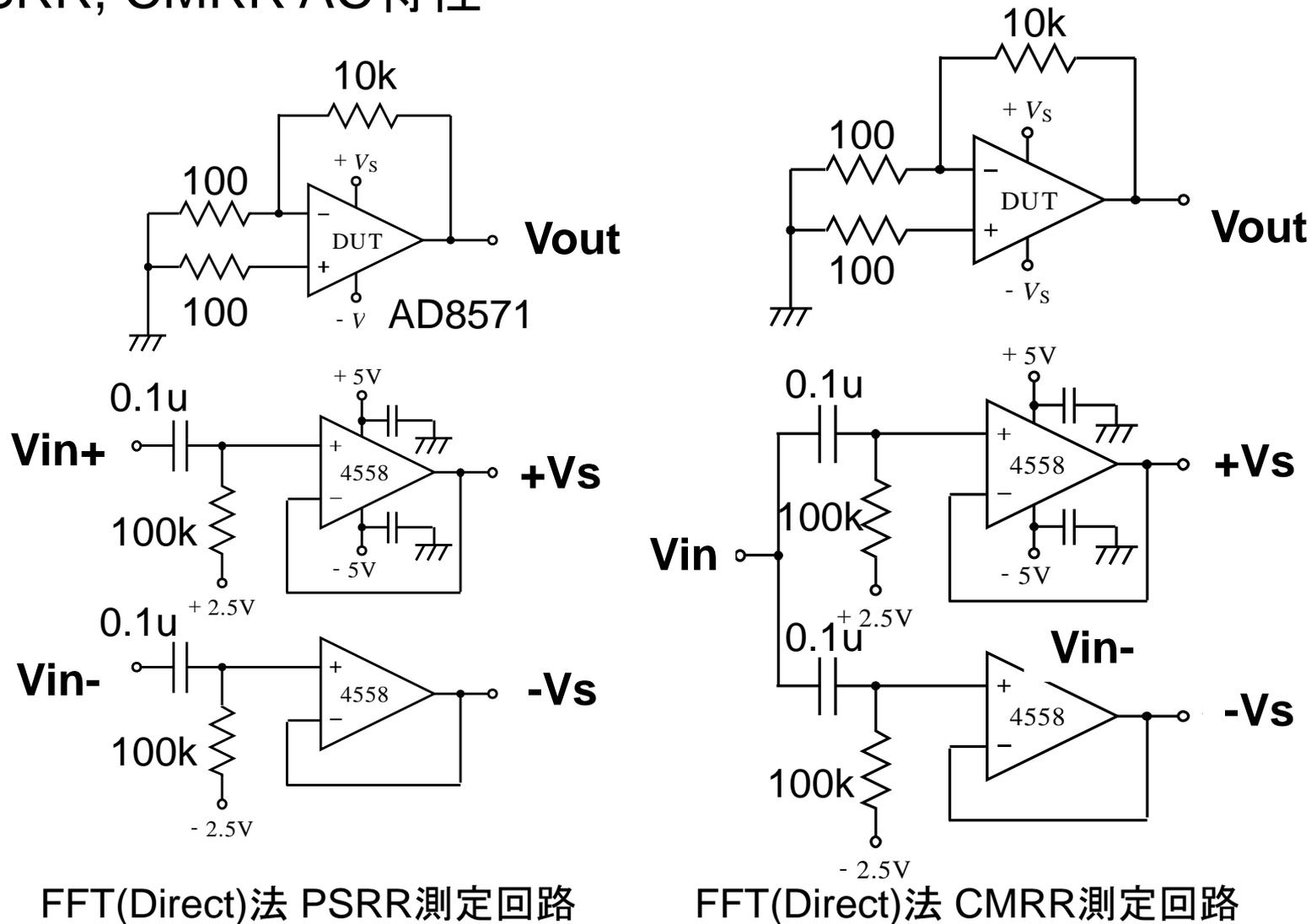
**+Vs PSRR = 98.5 [dB]**

**-Vs PSRR = 61.0 [dB] (1kHz)**

**CMRR = 61.3 [dB]**

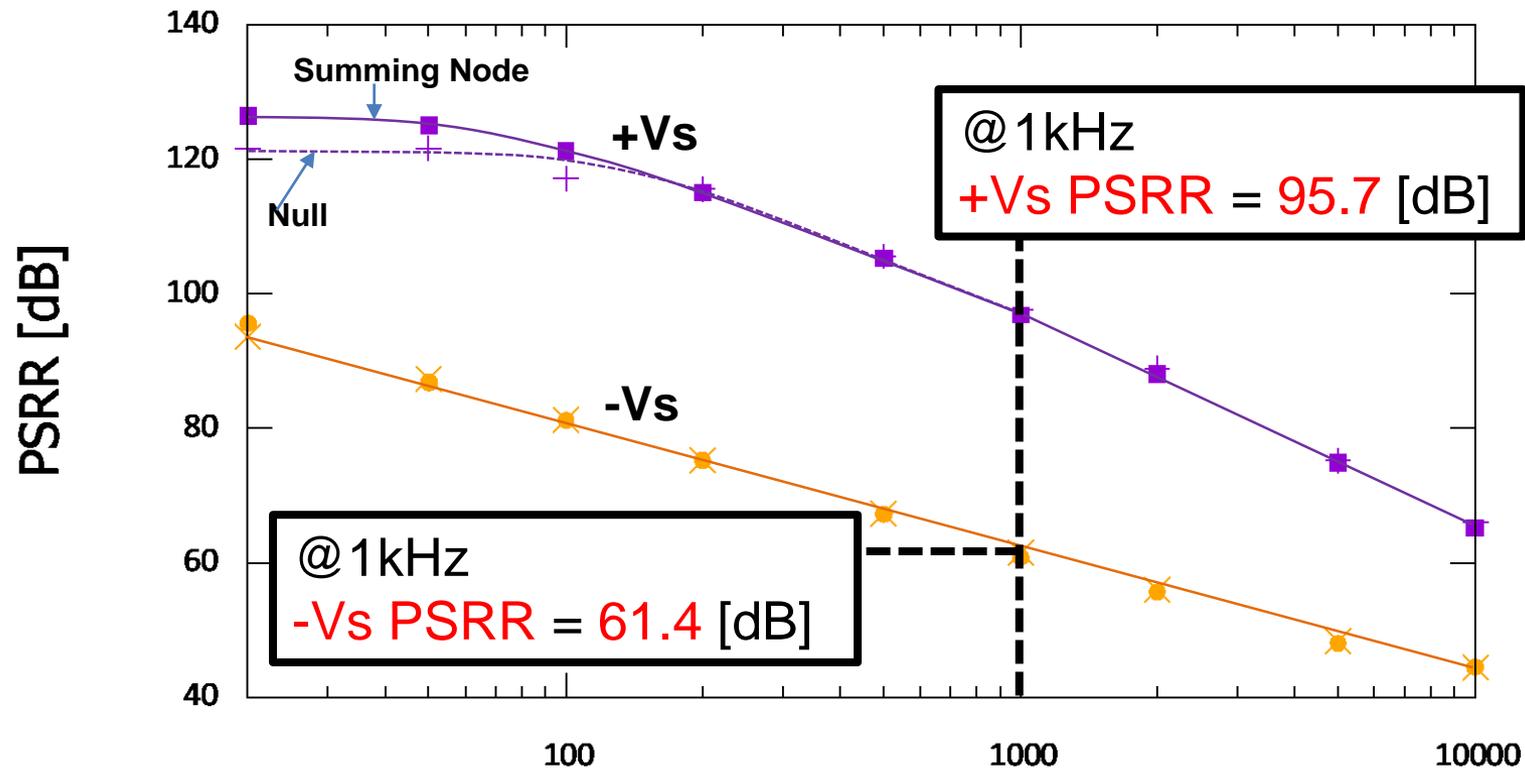
# FFT(Direct)法 実機測定(1)

## PSRR, CMRR AC特性



# FFT (Direct) 法 実機測定 (2)

## PSRR AC特性測定結果

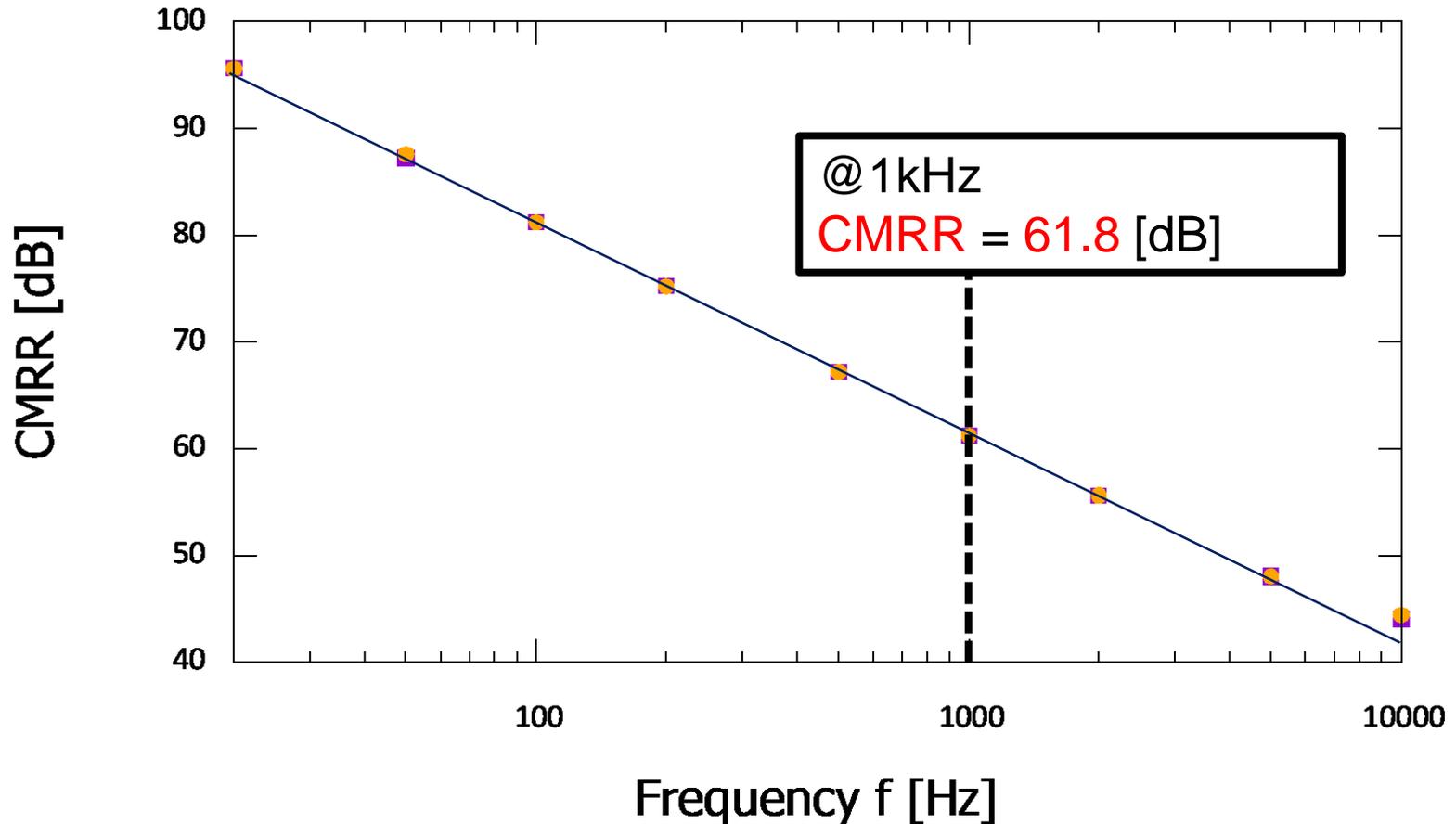


- +Vs FFT(Direct)法 ■
- +Vs NULL法 +
- Vs FFT(Direct)法 ●
- Vs NULL法 ×

Frequency f [Hz]

# FFT (Direct) 法 実機測定 (3)

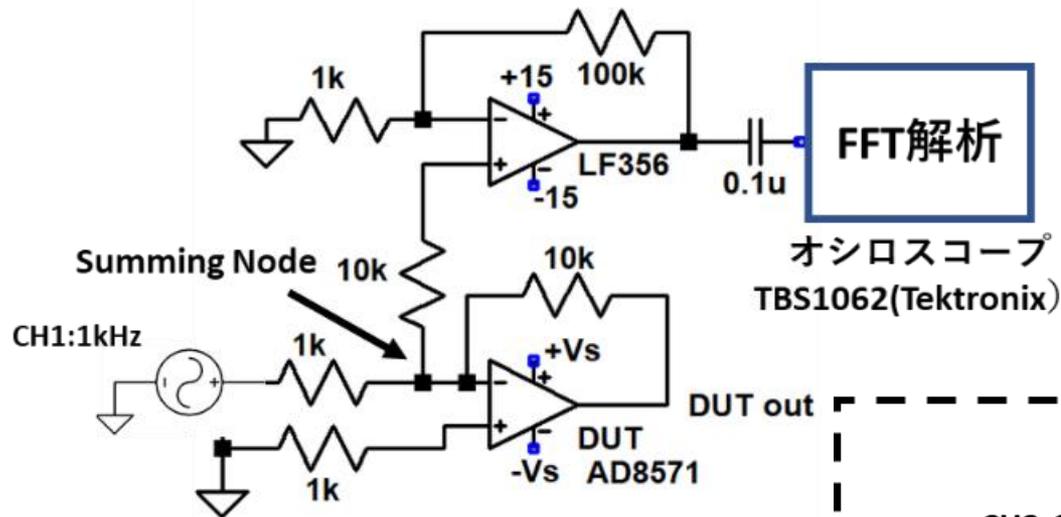
## CMRR AC特性測定結果



# 概要

- はじめに
- FFTベース法
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- 測定手法によるAC特性の比較
  - シミュレーション
  - 実機測定
- **オペアンプ複数AC特性同時測定**
- まとめ

# 複数AC特性同時測定



AC信号印加レベル

PSRR, CMRR : 100mVrms

AOL : 10mVrms

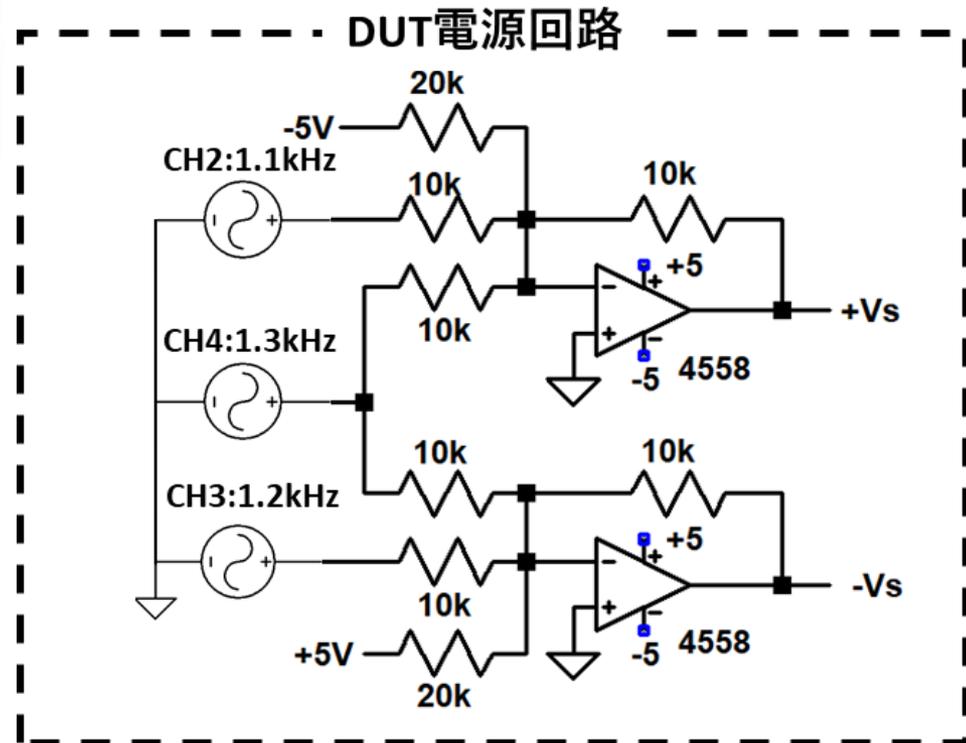
入力信号CH1~4同時印加

CH1(1.0kHz) : AOL

CH2(1.1kHz) : +Vs PSRR

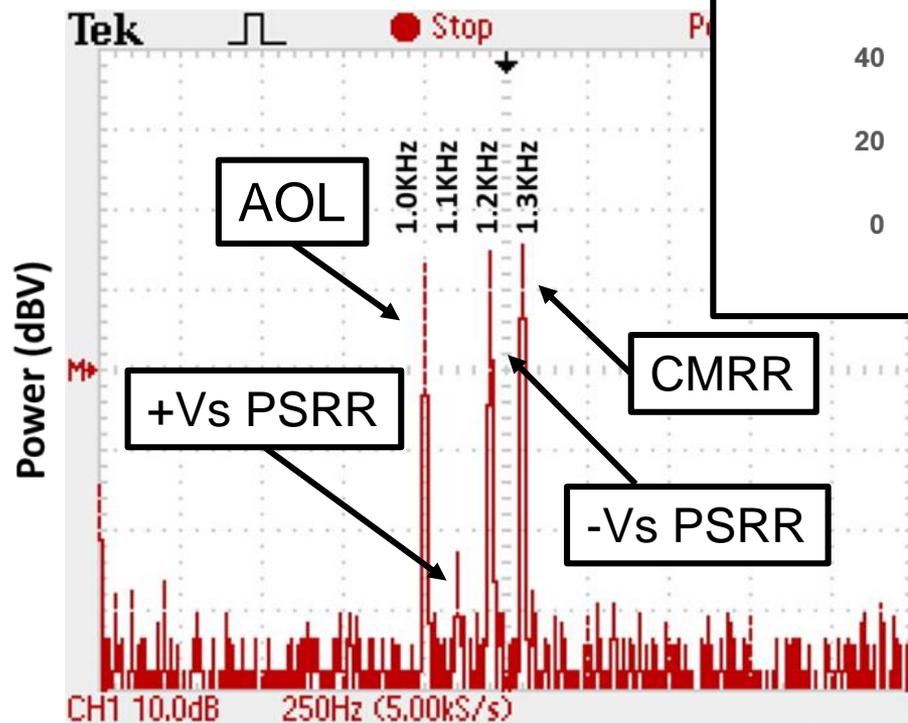
CH3(1.2kHz) : -Vs PSRR

CH4(1.3kHz) : CMRR

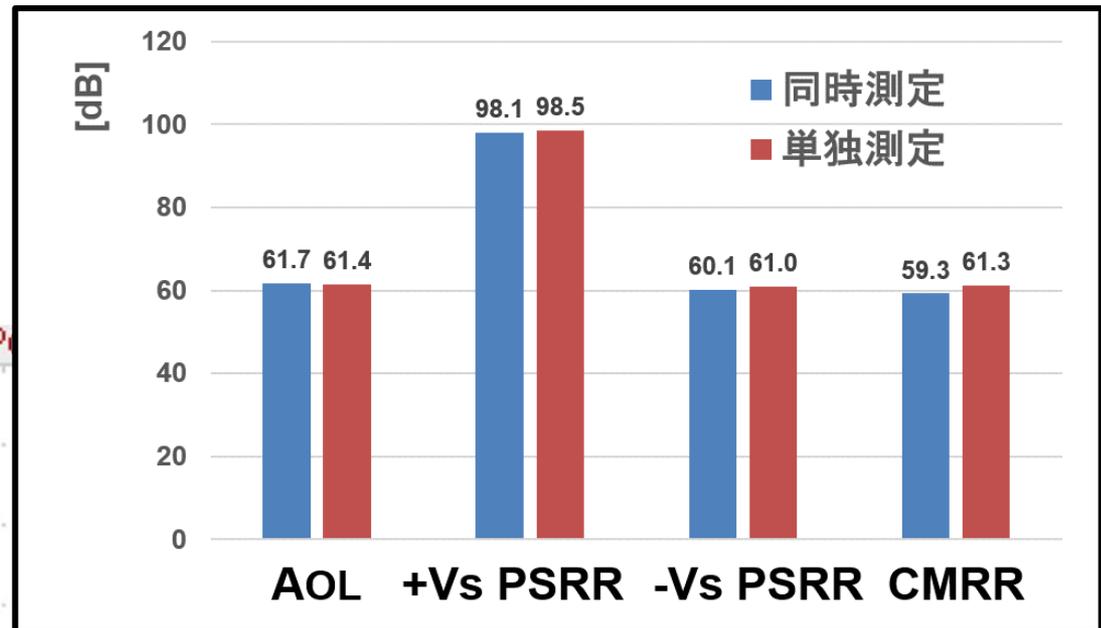


# 複数AC特性同時測定 結果

AOL : -41.7dBV  
 +Vs PSRR : -78.1dBV  
 -Vs PSRR : -40.1dBV  
 CMRR : -39.3dBV



## 単独測定時との比較



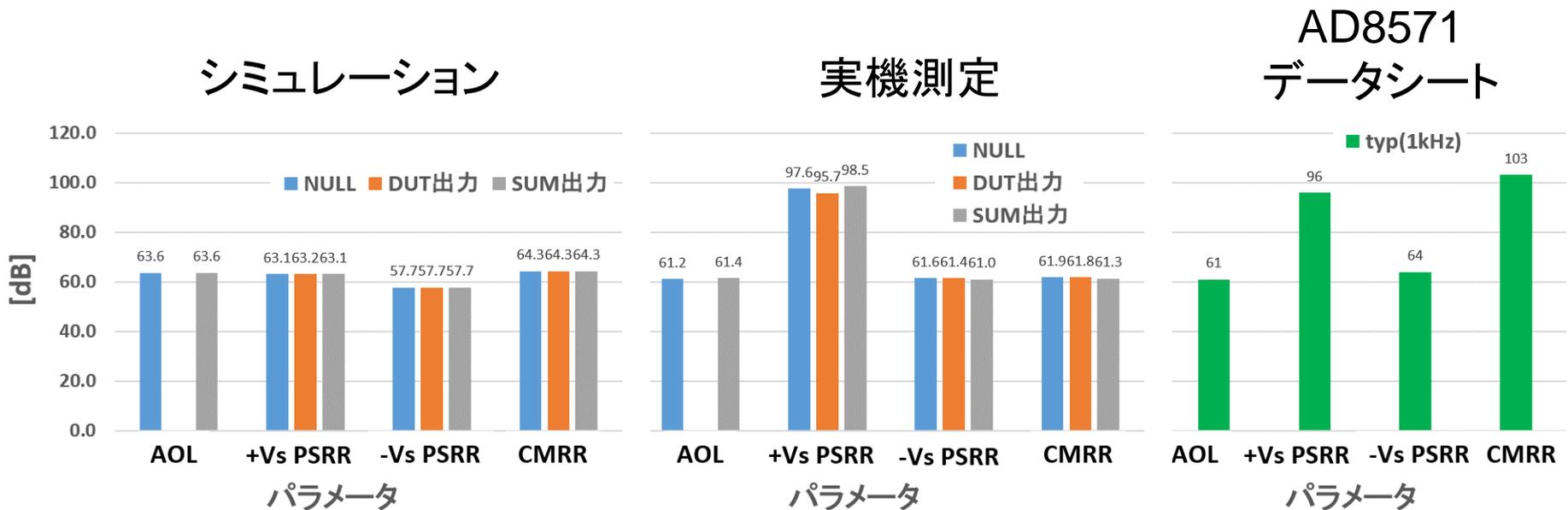
結果

単独実験との差異は1dB程度

# 概要

- はじめに
- FFTベース法
- 複数オペアンプの開ループゲイン同時測定
- 測定手法によるAC特性の比較
  - シミュレーション
  - 実機測定
- オペアンプ複数AC特性同時測定
- まとめ

# 測定結果の比較

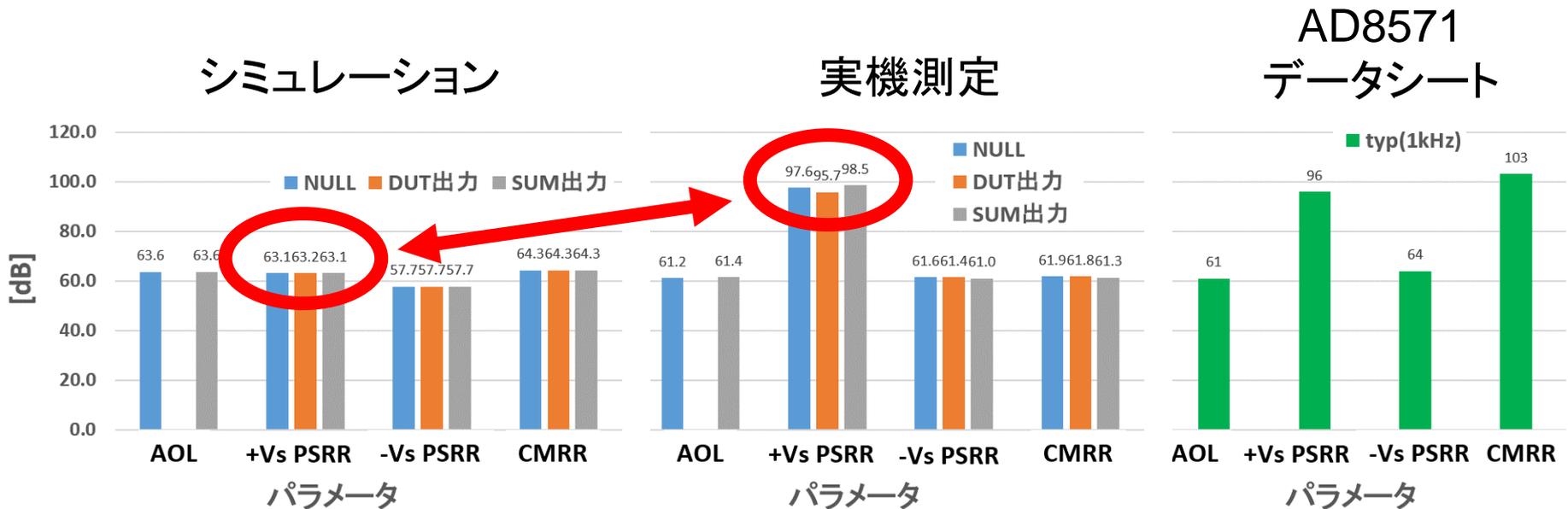


## Summing Node FFT解析

1. 精度 **NULL法  $\approx$  FFT法**
2. AOL, PSRR, CMRR **同時試験可能**

➡ FFT法によるAC特性解析は**簡易的かつ正確**

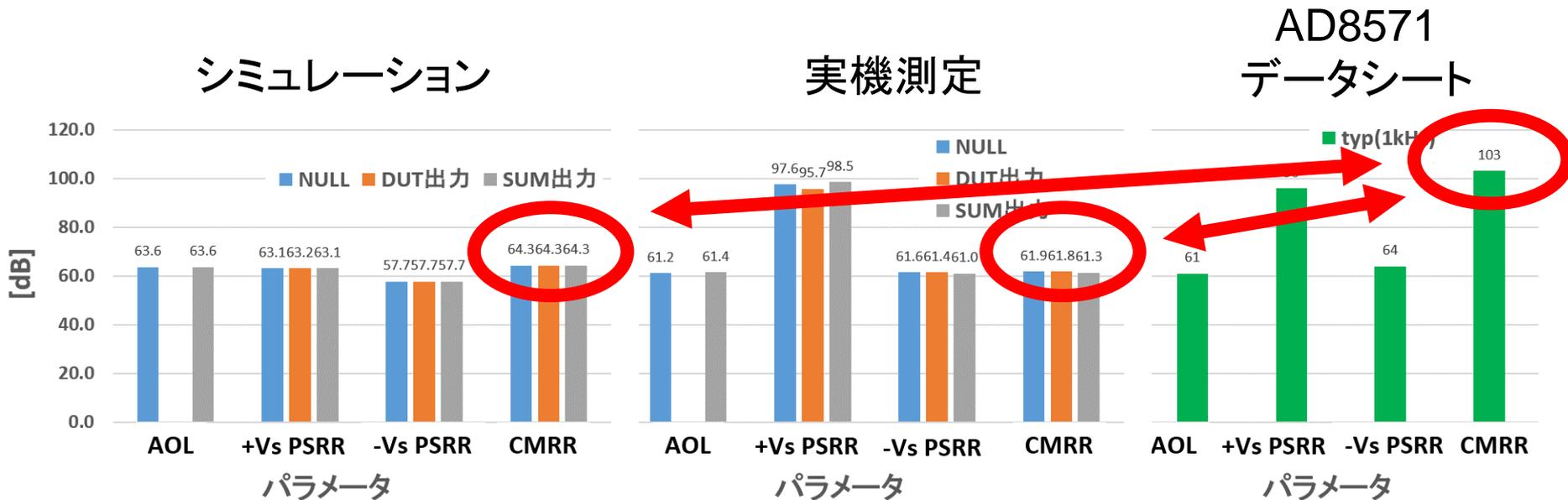
# 今後の課題



## 課題

- +Vs PSRR におけるシミュレーションと実測の違い
- CMRR におけるデータシートとの違い
- Summing Node にて PSRR, CMRR を観測できる  
理論考察とオペアンプデバイスモデルを用いたシミュレーション

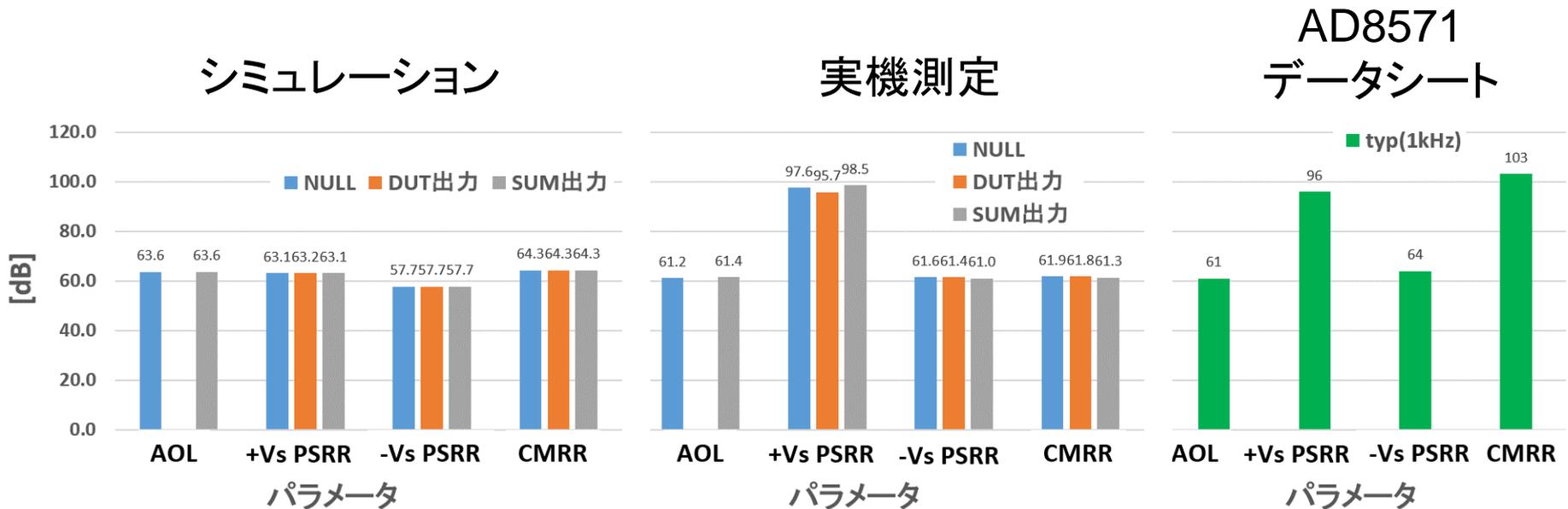
# 今後の課題



## 課題

- +Vs PSRR におけるシミュレーションと実測の違い
- **CMRR におけるデータシートとの違い**
- Summing Node にて PSRR, CMRR を観測できる  
理論考察とオペアンプデバイスモデルを用いたシミュレーション

# 今後の課題



## 課題

- +Vs PSRR におけるシミュレーションと実測の違い
  - CMRR におけるデータシートとの違い
  - Summing Node にて PSRR, CMRR を観測できる
- 理論考察とオペアンプデバイスモデルを用いたシミュレーション**

# まとめ

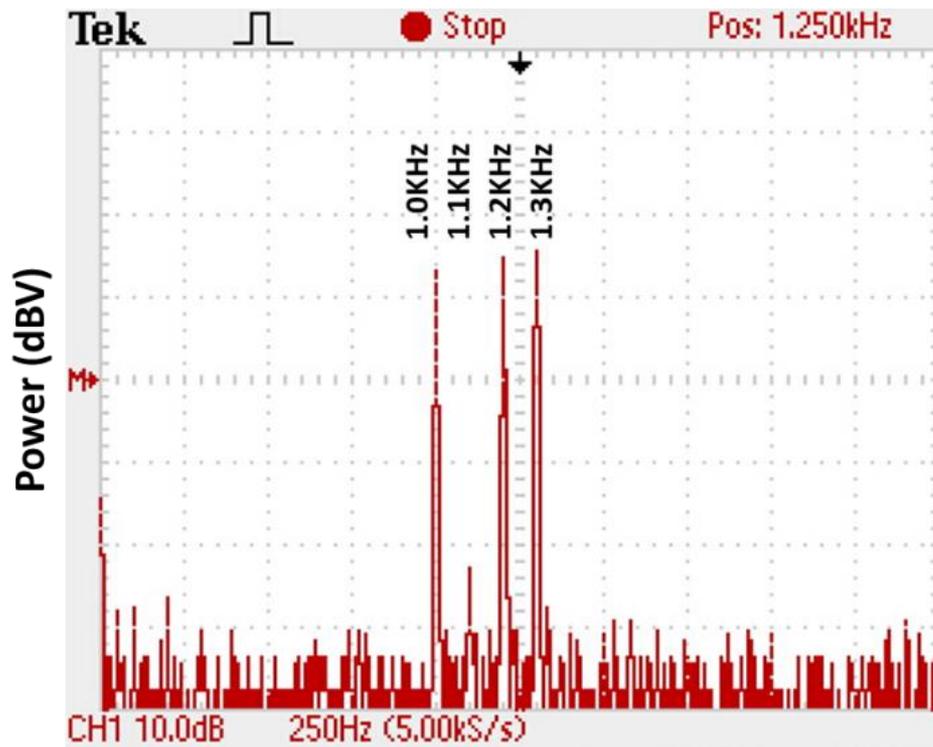
## Summing Node FFT法

- 😊 汎用性 — AOL, PSRR, CMRR(AC)対応
- 😊 正確性 — NULL法  $\simeq$  FFT法
- 😊 試験時間 — NULL法  $>$  FFT法

- 汎用性・正確性ともにNULL法と同程度の性能を持つ
- 同時測定が可能
- 等価的に試験時間の短縮が可能

# 参考資料

項目	周波数 (kHz)	同時測定 (dB)	単独測定 (dB)	備考 信号印加レベル	DUTゲイン (dB)
AoI	1.0	61.7	61.4	反転入力10mVms	20
+Vs PSRR	1.1	98.1	98.5	100mVms(=-20dBV)	20
-Vs PSRR	1.2	60.1	61.0	100mVms(=-20dBV)	20
CMRR	1.3	59.3	61.3	100mVms(=-20dBV)	20



左から

AOL : -41.7dBV

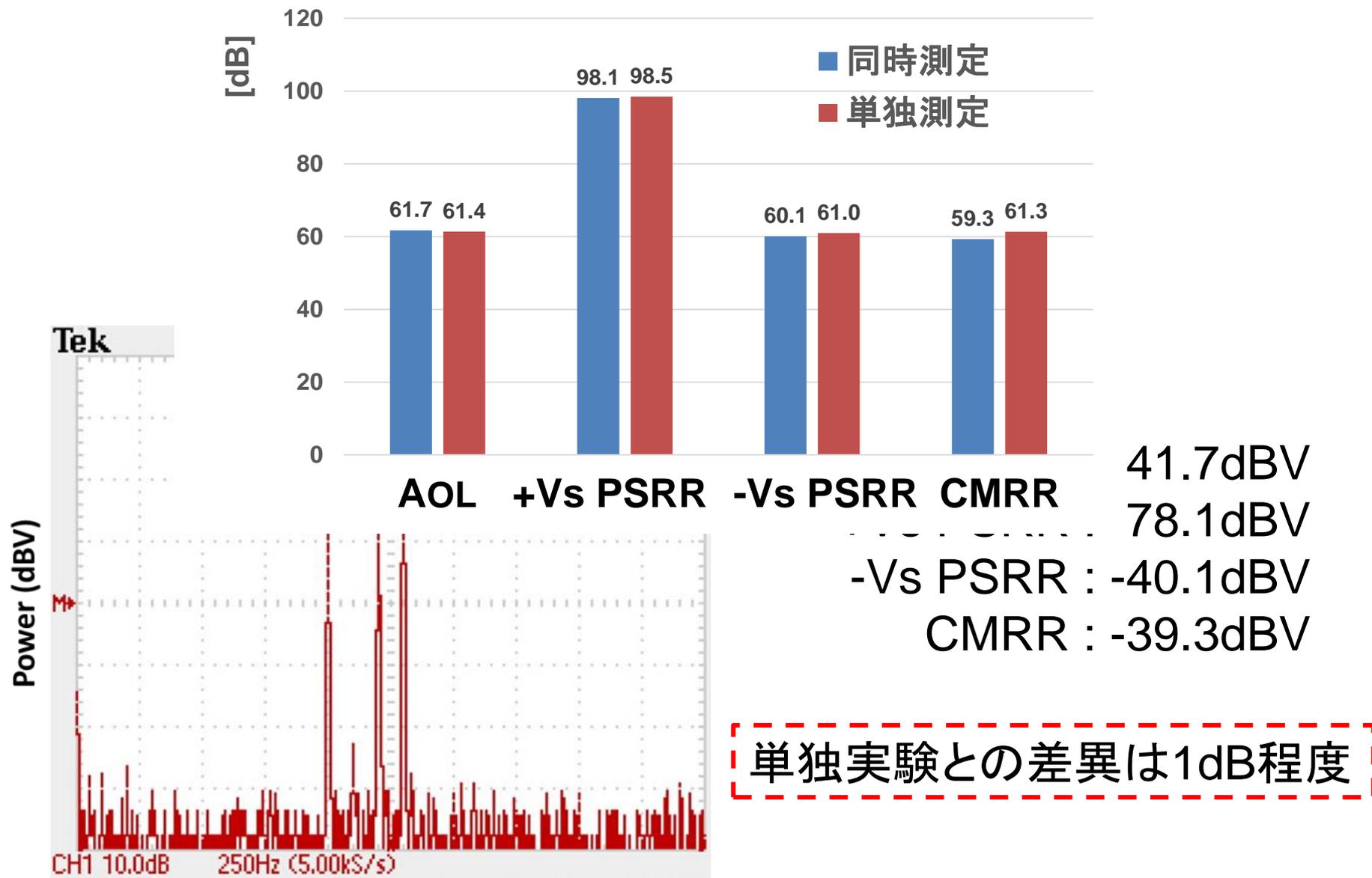
+Vs PSRR : -78.1dBV

-Vs PSRR : -40.1dBV

CMRR : -39.3dBV

単独実験との差異は1dB程度

# 参考資料



# 結果

## ● 測定手法による測定結果の違い

項目	シミュレーション(1kHz)			実測(1kHz)			AD8571 Datasheet	
	NULL	DUT出力	SUM出力	NULL	DUT出力	SUM出力	typ(1kHz)	typ(DC)
AOL(dB)	63.6		63.6	61.2		61.4	61	145
+PSRR(dB)	63.1	63.2	63.1	97.6	95.7	98.5	96	130
-PSRR(dB)	57.7	57.7	57.7	61.6	61.4	61.0	64	130
CMRR(dB)	64.3	64.3	64.3	61.9	61.8	61.3	103	140

## Summing Node FFT解析

1. 精度 **NULL法  $\approx$  FFT法**
2. AOL, PSRR, CMRR **同時試験可能**

 FFT法によるAC特性解析は**簡易的かつ正確**

# Q&A(1)

- Q. FFTにかかる時間(1kHzの信号をサンプルするのに10ms以上+計算時間)やFFTに用いる機材のコストを考慮するとコストダウンは可能なのか。**
- A. FFTに使用した機材は、サミングノード出力とDUT出力の2箇所のみであり、機材のコストは問題ではないと考える。また、本FFTベース法は各特性の線形領域となる周波数帯を試験信号に使用できるため、仮に1kHzに渡る線形領域があるとするれば、10Hz刻みの試験信号を用いた場合、単純計算で100個のAC特性を同時に試験できると考えられる。**

## Q&A(2)

**Q. NULL法の測定速度に問題をきたす積分器の容量を小さい数値に変えればNULL法でも速度問題を解消できるのではないか。**

**A. 同研究室所属の青木氏はNULL回路中の容量の数値を変更し、位相補償定数の最適値を研究されているのでそちらを参照いただければと思います。**

**Q. 本FFTベース法のメリットを端的に述べると？**

**A. NULL法では各特性ごとにスイッチと信号入力点を変更する手間があるが、本FFT法では複数のAC特性を複数のオペアンプに渡って一発で試験が可能という点で優れていると考える。**

## Q&A(3)

- Q. 本FFTベース法を用いれば具体的にどれ程の高速化が見込めるか。**
- A. FFTと反転増幅器回路構成を用いることでNULL法と同程度の精度そのままに、FFTによって複数の試験信号を同時に処理できる点で等価的に高速化が可能であると現時点では結論づけている。  
高速化の具体的な目安については実際に試験時間を考慮に入れた実験が必要と考える。**