



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

実験で学ぶOPアンプの基礎

ANALOG DEVICES K.K.

JUN KAKINUMA

Analog Devices Proprietary Information ©



50
ADI 1965
2015

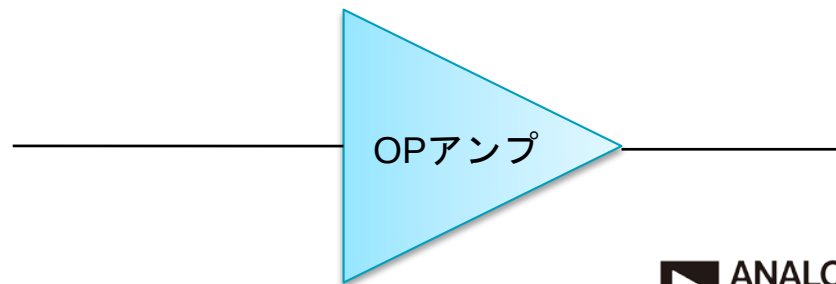
セミナーの概要と目標

▶ 概要

- アナログ回路の初学者やデジタル回路の設計者などを対象に、OPアンプの特性や回路設計の基礎を、実際にOPアンプを使用した実験やSPICEシミュレーション(ADISimPE)を用いて説明します。

▶ 目標

- OPアンプの基本的な動作のイメージをつかむ
- 基本的なOPアンプの仕様を理解する
 - 部品の選定、設計回路の改善、トラブルへの対処などへの応用
 - より高度なアナログ回路への興味を持っていただく



Agenda

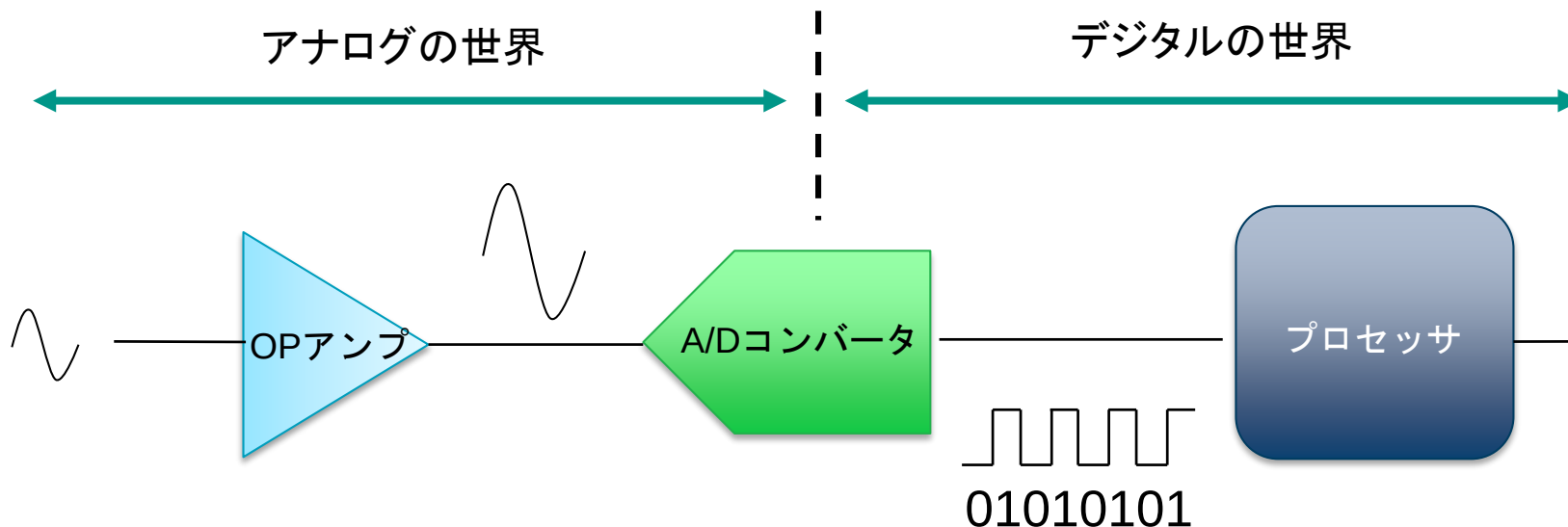
- ▶ OPアンプはなぜ必要か？
 - OPアンプはなぜ必要か？
 - OPアンプの増幅
 - インピーダンスについて
 - OPアンプの活用例
- ▶ OPアンプとは？
 - OPアンプとは？
 - OPアンプの基本回路構成
- ▶ OPアンプの仕様
 - オフセット電圧
 - バイアス電流
 - レール to レール・アンプ
 - スルーレート
 - 周波数特性
- ▶ 負帰還と位相補償
 - OPアンプ回路における安定特性
 - 負帰還(Negative Feedback)の基本
 - OPアンプの発振条件
 - 位相余裕と位相補償
 - 容量性負荷の影響
 - ADISimPEを使用したシミュレーション
 - 位相補償回路
 - 位相補償回路の実験
- ▶ OPアンプのノイズ
 - ノイズの影響
 - 電圧ノイズと電流ノイズ
 - $1/f$ ノイズ
 - ノイズ密度
 - 実効値とPeak to Peak
 - ノイズの特性比較
 - A/Dコンバータの特性に影響しないノイズの設計



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

OPアンプはなぜ必要か？

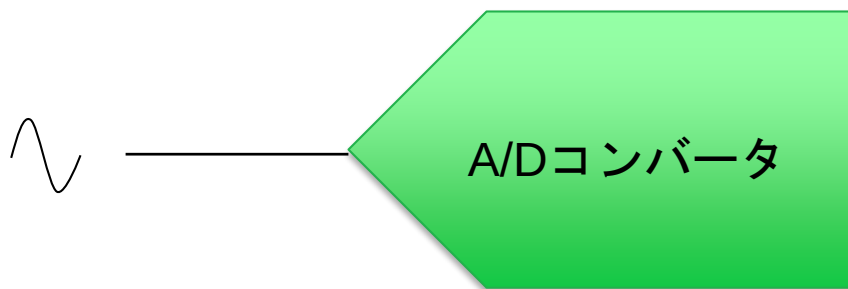
OPアンプはなぜ必要か？



- ▶ OPアンプは、センサーなどから発生した小さな「自然界」のアナログ信号を、A/Dコンバータの入力レンジに合った信号レベルに増幅したり、レベル変換をするために使われます。

OPアンプはなぜ必要か？

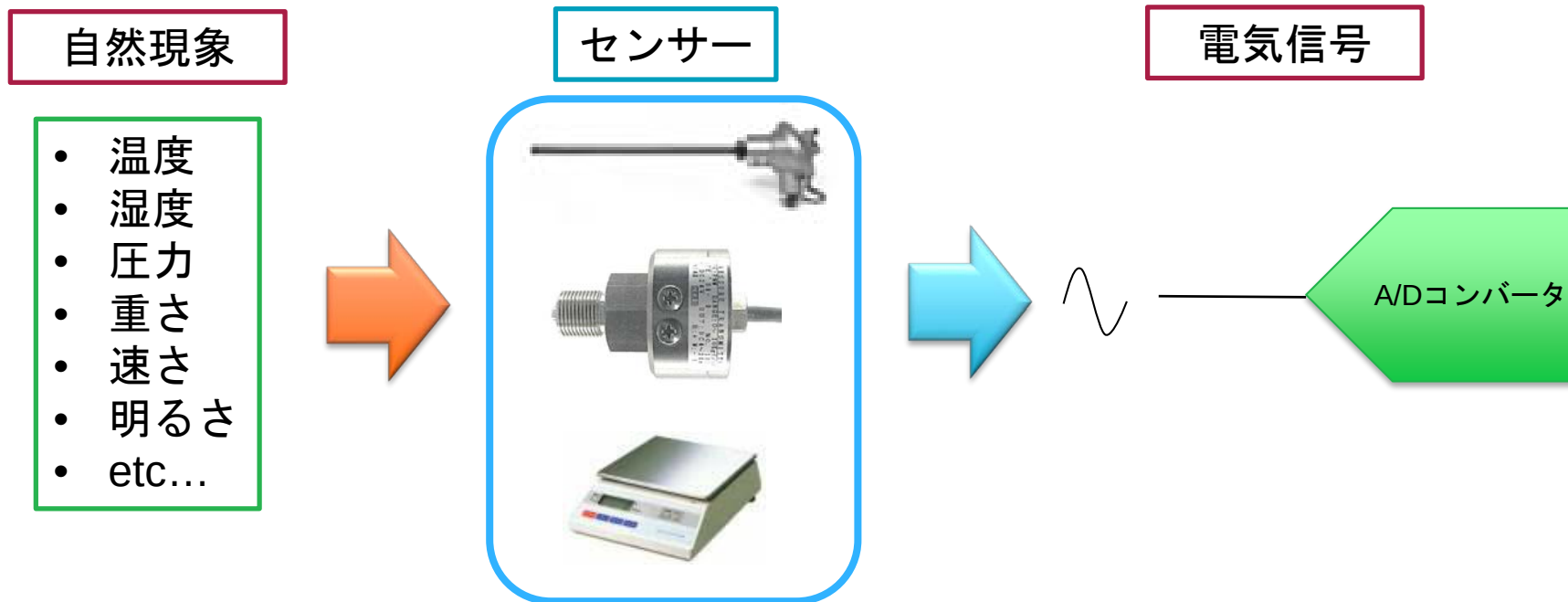
- ▶ なぜ、A/Dコンバータにそのまま入力してはいけないのでしょうか？



OPアンプはなぜ必要か？

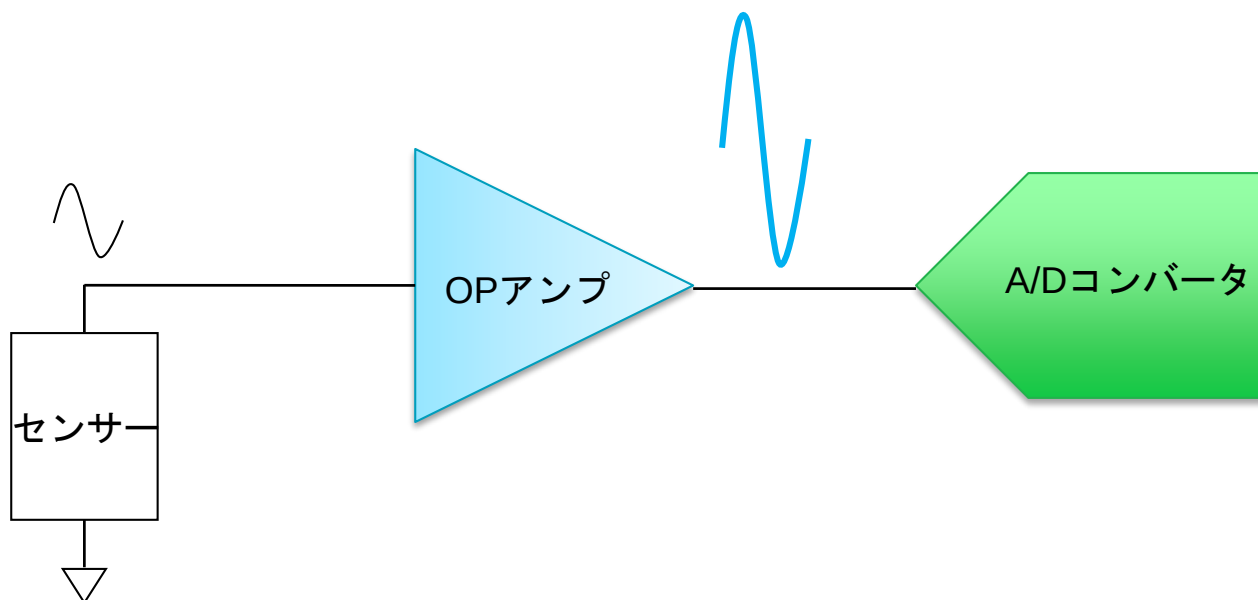
▶ センサー

- 温度、湿度、圧力、重さ、速さ、明るさなど様々な信号(情報)を電気信号に変換する素子です。



一般的にセンサーの電気信号出力は、小信号、高インピーダンス

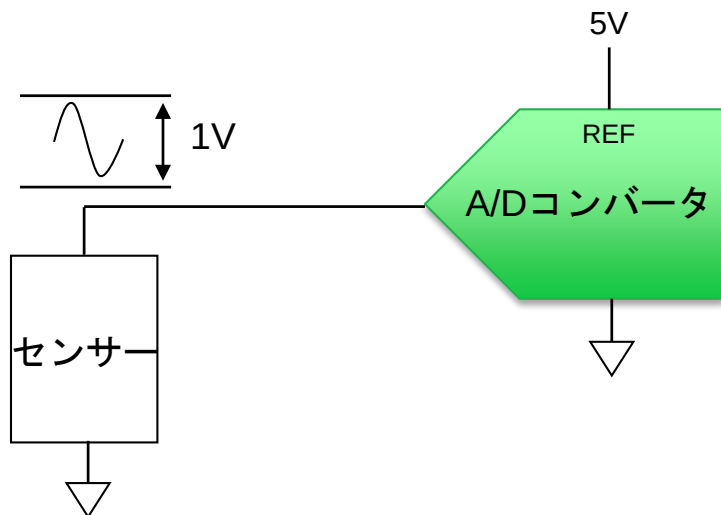
OPアンプの増幅



▶ 小信号の増幅

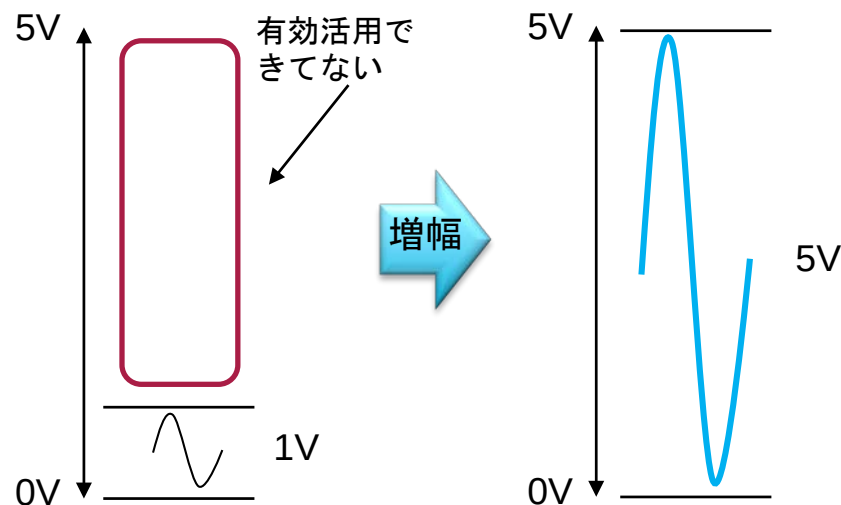
- OPアンプを増幅回路として使用することで、センサーなどからの小さな信号を適切な大きさに増幅し精度を向上させることが可能です。

OPアンプの増幅



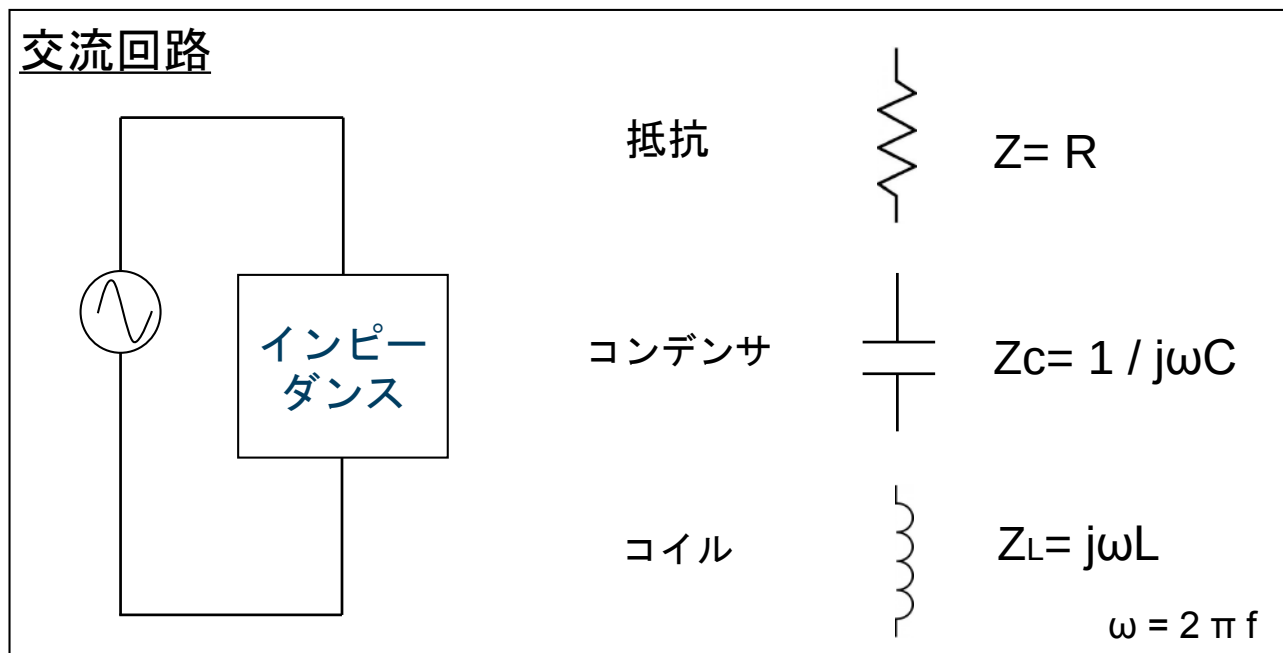
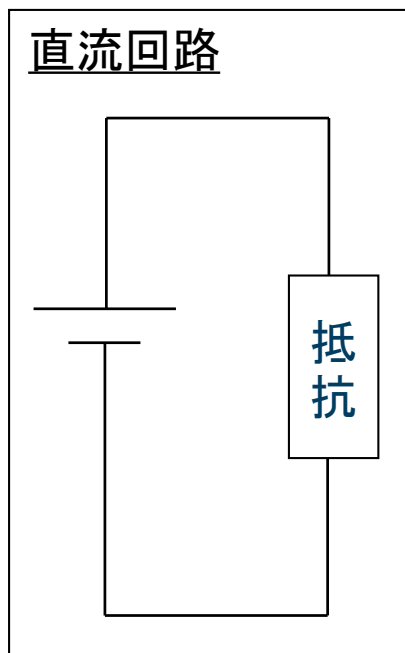
12bit 5Vフルスケールの場合

$12\text{bit}=2^{12}=4096$, $5\text{V} / 4096 = 1.22\text{mV}$ (1LSBあたり)



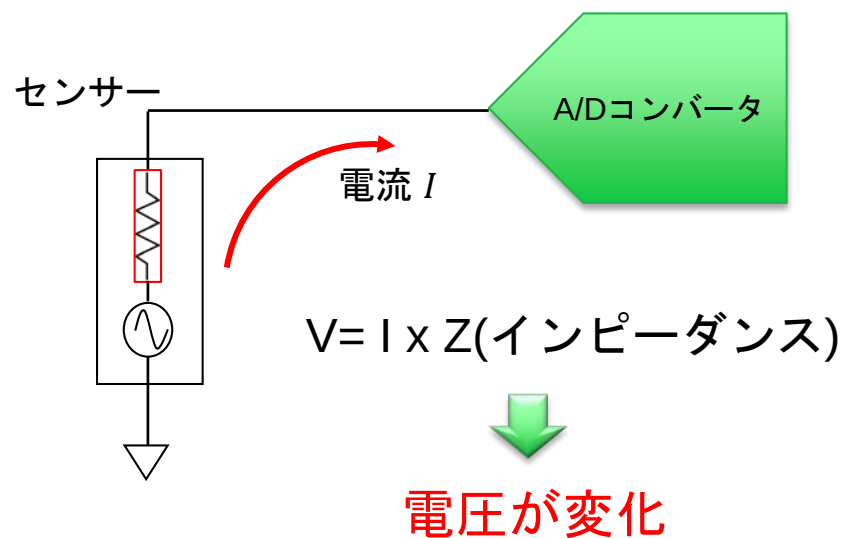
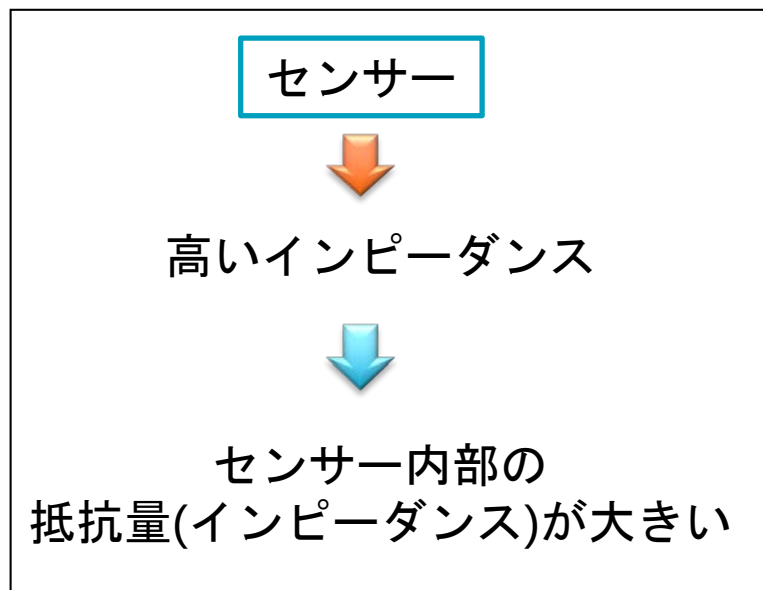
- ▶ センサーの出力信号が小さい場合、A/Dコンバータで高い精度で測定ができない場合があります。

インピーダンスについて



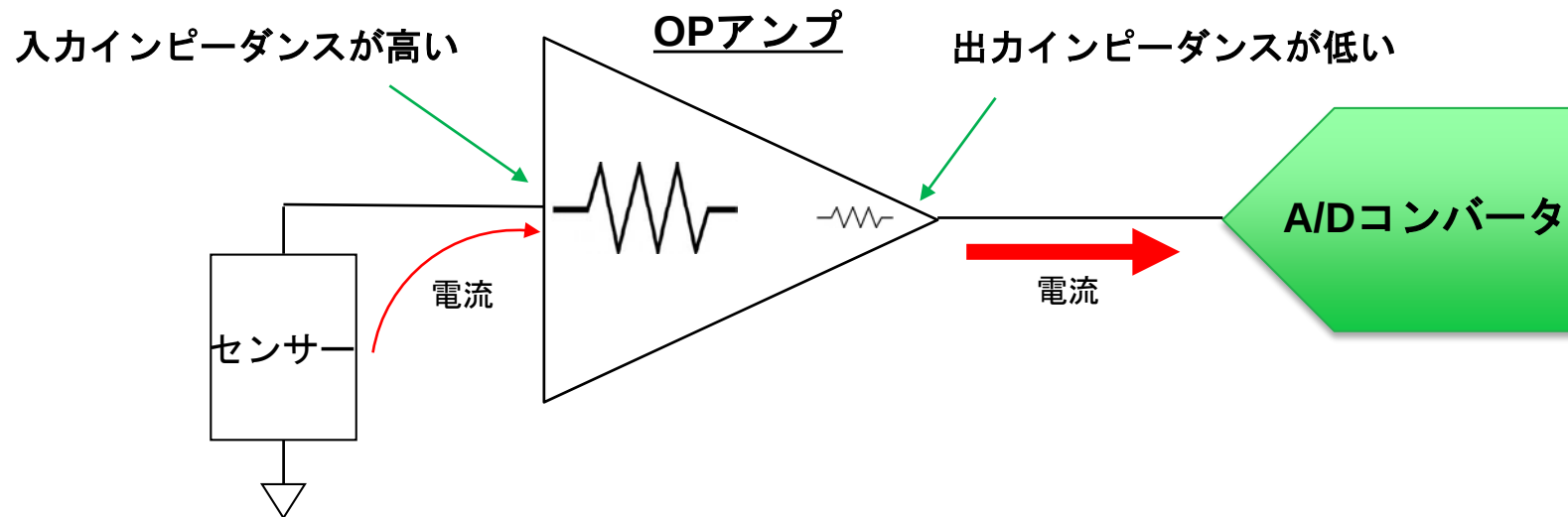
- ▶ インピーダンスとは、
交流回路における **抵抗量** (抵抗+コンデンサ+コイルの成分)
- ▶ コンデンサ、コイルは周波数特性を持ちます。

インピーダンスについて



- ▶ センサが高いインピーダンスを持つ場合、内部インピーダンスによって出力電圧が変化する可能性があります。
(ADCの入カインピーダンスは、数百 Ω ～数十k Ω 程度)

インピーダンスについて



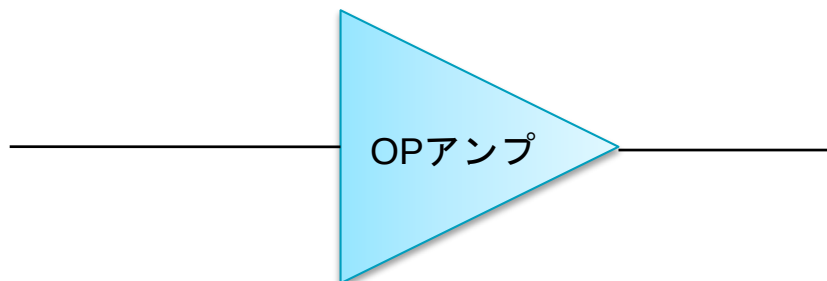
- ▶ OPアンプは、入力インピーダンスが高く、出力インピーダンスが低い
 - 入力インピーダンスが高い → 電流が流れにくい (数GΩ～数百GΩ)
 - 出力インピーダンスが低い → 電流を流しやすい (数Ω～数十Ω)

OPアンプは、インピーダンスを変換することができる

- ▶ センサーへの影響を小さくすることが可能

OPアンプの活用例

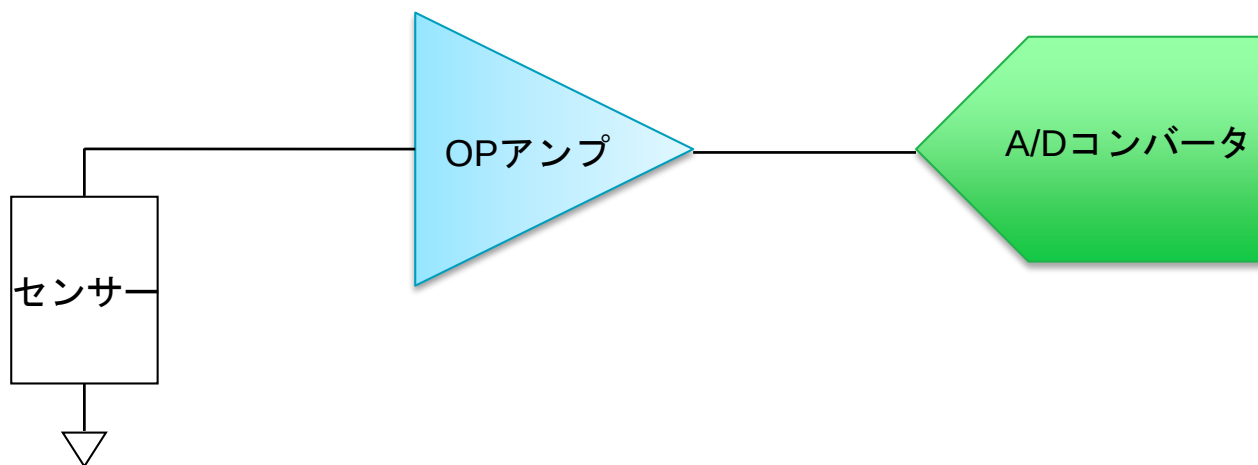
- ▶ DC(直流)、もしくはAC(交流)信号の増幅
- ▶ 高い入力インピーダンスから低い出力インピーダンスへの変換
- ▶ ユニティ・ゲイン・バッファ
 - Gain=1
- ▶ 信号の反転
- ▶ 2種類以上の信号の加算(足し算)
- ▶ 信号の差
- ▶ 電流→電圧変換
- ▶ 積分
- ▶ 微分



クイズ【1】

- ▶ OPアンプを使用するメリットとして、正しいものを1つ選んでください。

- 1, アナログ信号をデジタル信号に変換できる。
- 2, コストが上がり、メリットは無い。
- 3, インピーダンス変換ができる。微小入力信号を増幅できる。

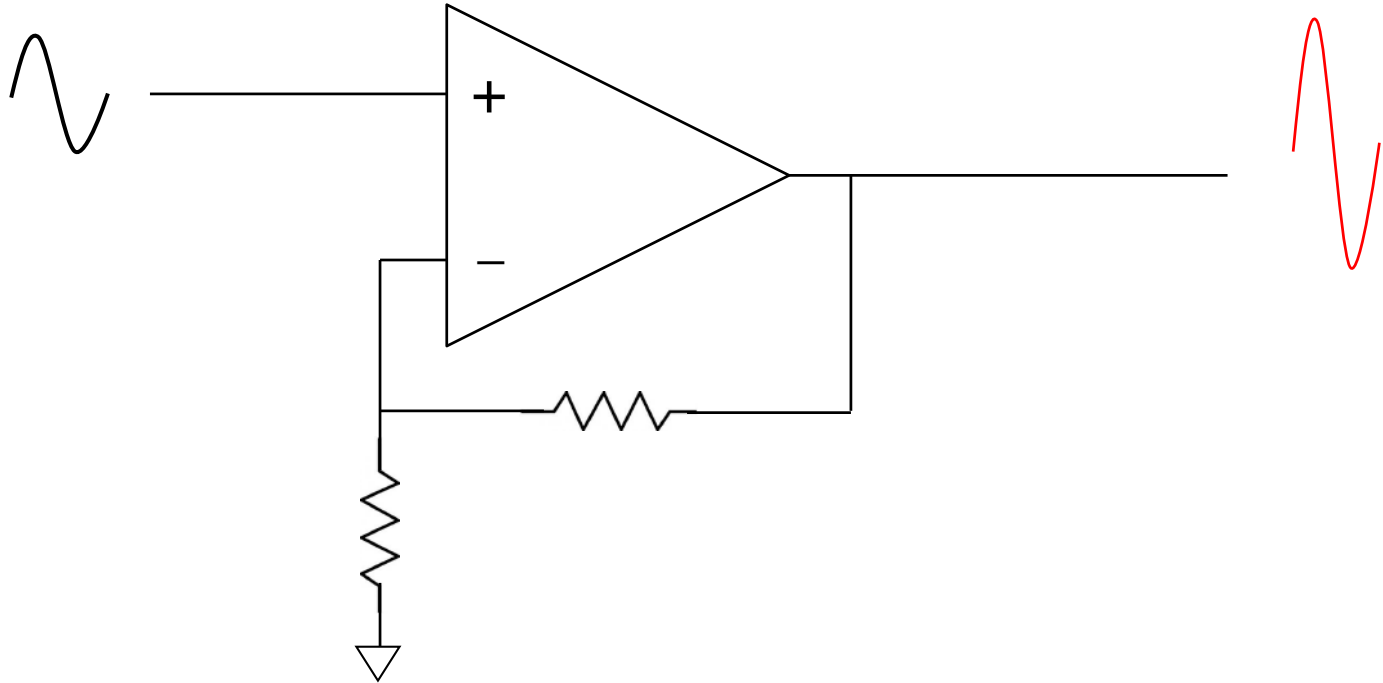




想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

OPアンプとは？

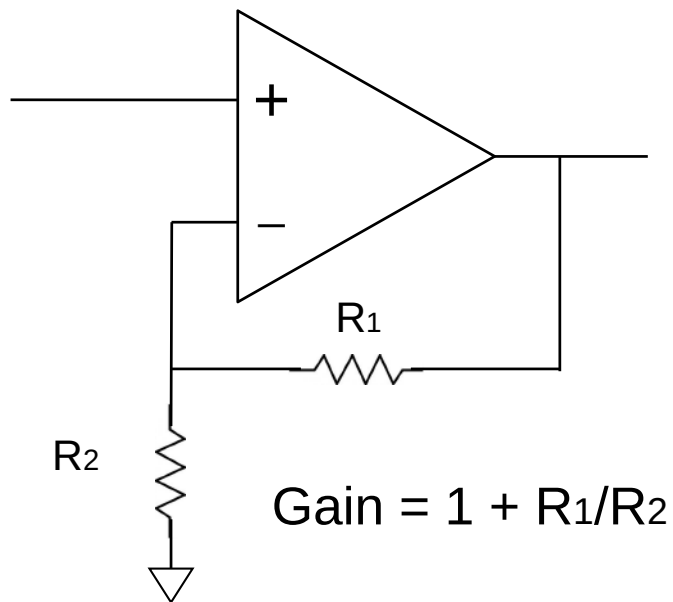
OPアンプとは?



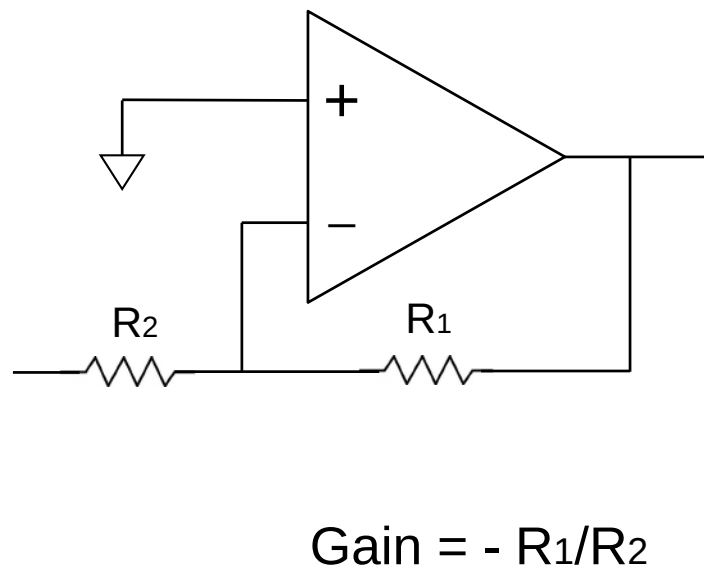
- ▶ OPアンプとは、入力端子は差動で、出力はシングルエンド形態をしています。
- ▶ OPアンプは一般的に ネガティブ・フィードバック(負帰還) をかけて、ゲインを設定して使用します。

OPアンプの基本回路構成

非反転回路構成(Non-Inverting)

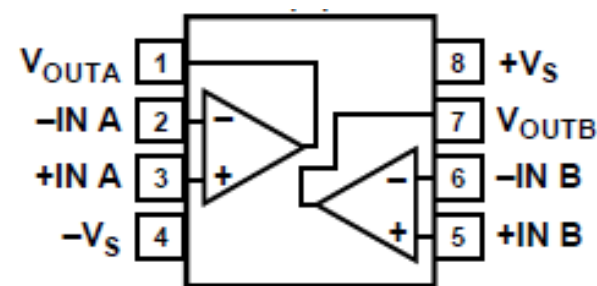
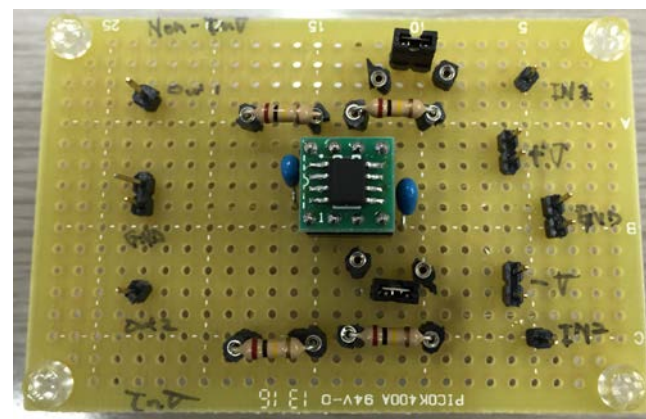
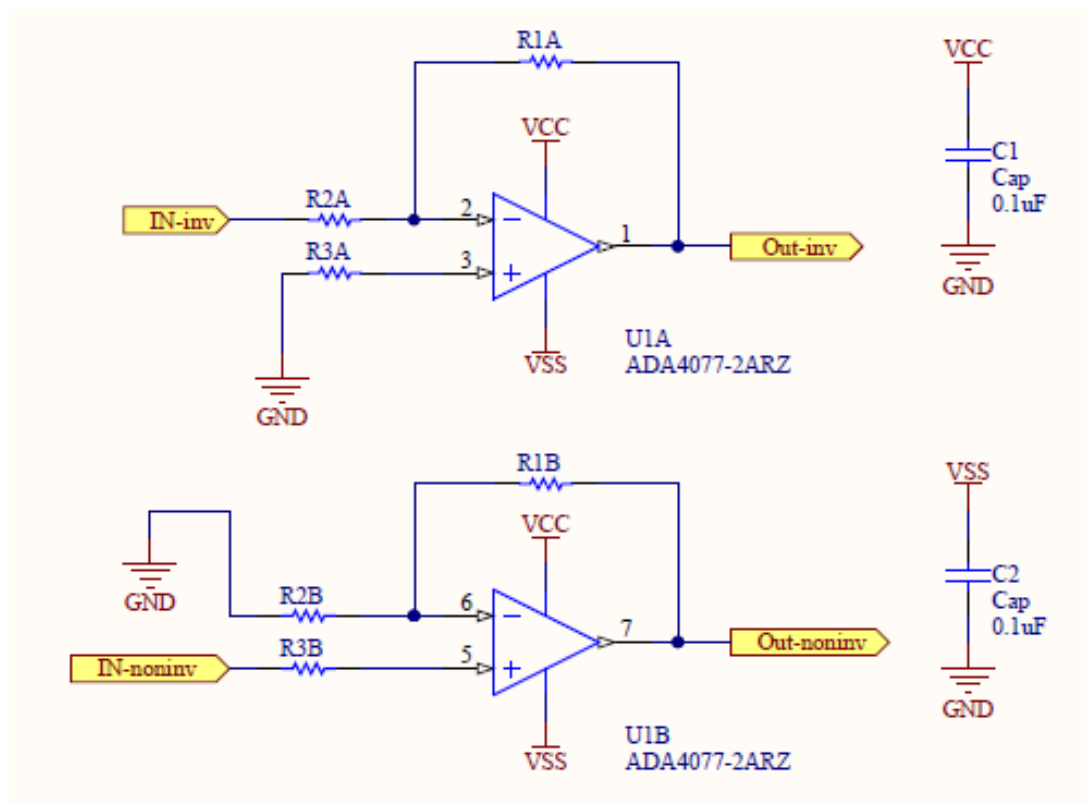


反転回路構成(Inverting)



- ▶ OPアンプの回路では、ネガティブフィードバック(負帰還)をかけて使用します。
 - 非反転回路と反転回路の構成がある
 - 非反転回路構成の方が入力インピーダンスを高くできる

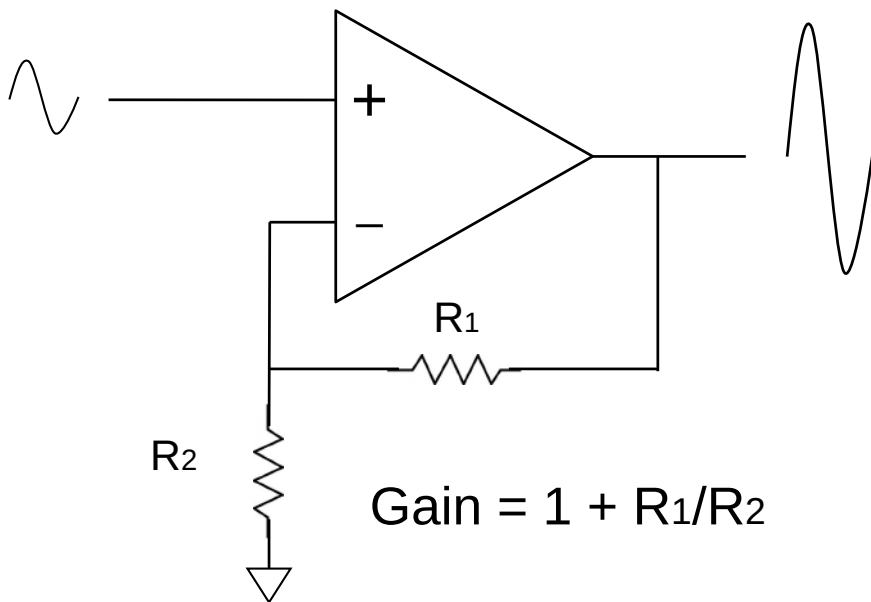
実験回路



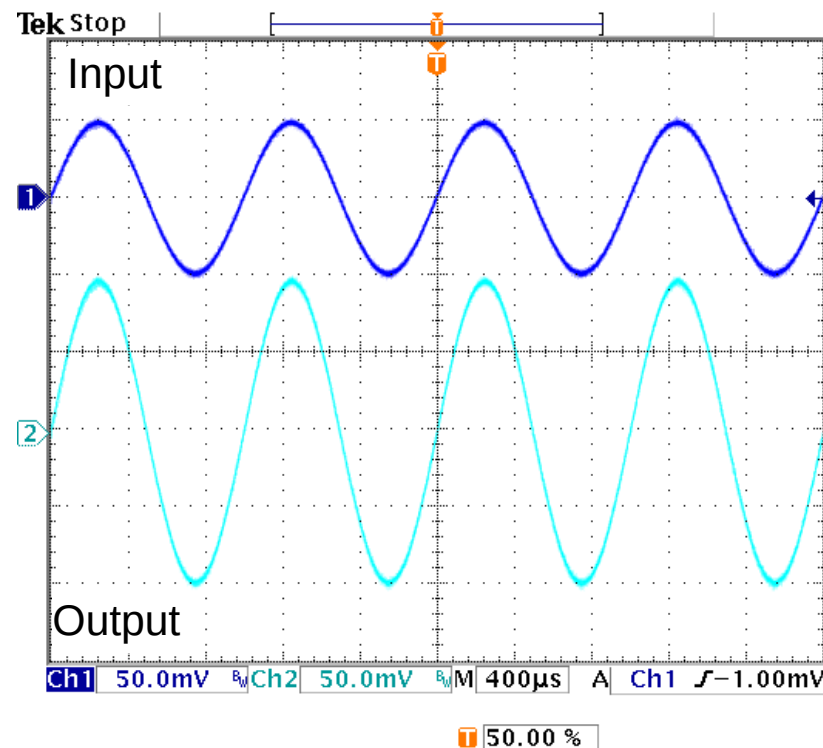
- ▶ OPアンプ(2回路入り)を使用した、手作り評価ボードで実験をします。
 - OPアンプは、入手しやすい汎用アンプと、高精度OPアンプADA4077を使用

OPアンプの基本回路構成

非反転回路構成(Non-Inverting)



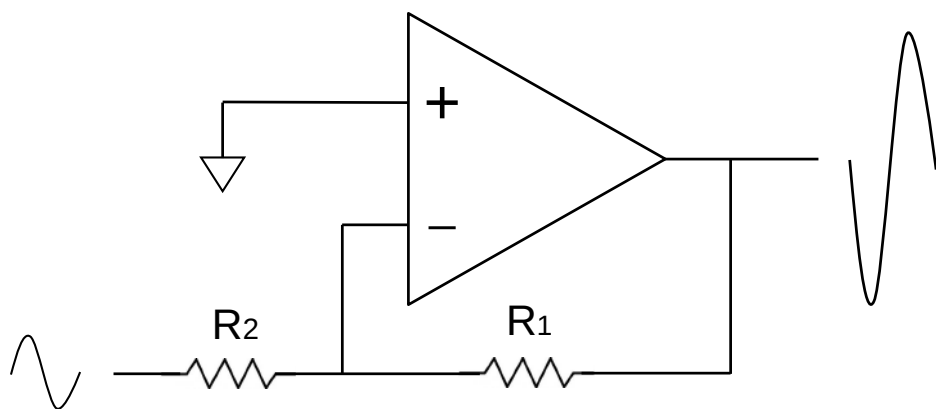
- ▶ 入力と出力が同位相で出力する
 - 非反転出力



- ▶ $R_1=1\text{k}\Omega$
- ▶ $R_2=1\text{k}\Omega$
- ▶ $V_{IN}=100\text{mV}_{pp}$, 1kHz

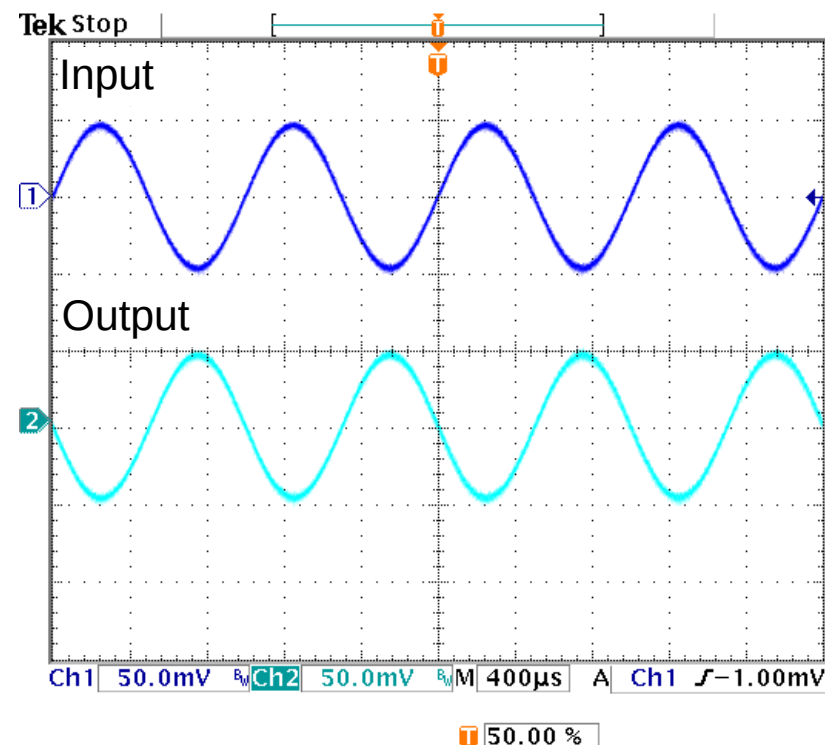
OPアンプの基本回路構成

反転回路構成(Inverting)



$$\text{Gain} = - R_1/R_2$$

- ▶ 入力と出力が逆位相で出力する
 - 反転出力



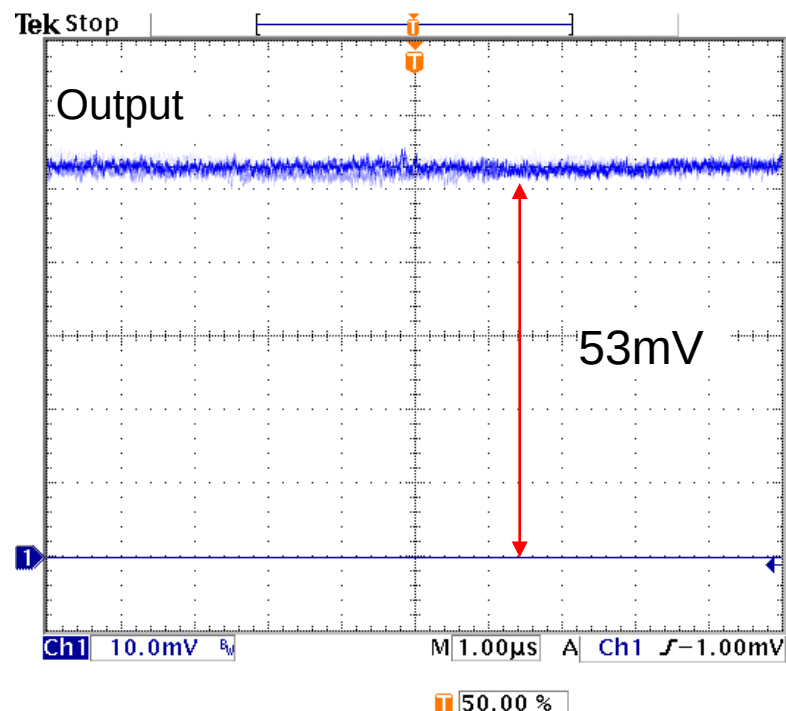
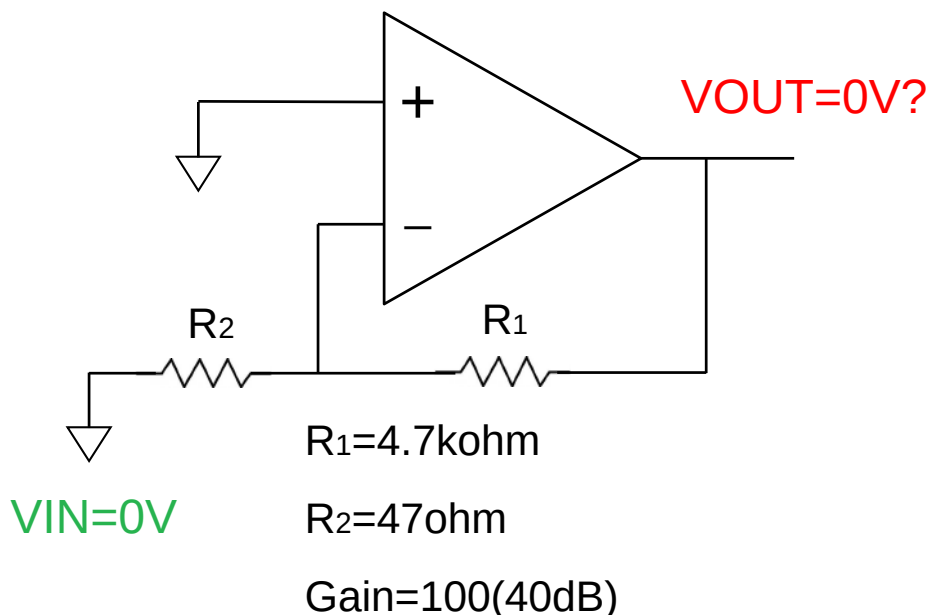
- ▶ R1=1kohm
- ▶ R2=1kohm
- ▶ VIN=100mVpp, 1kHz



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

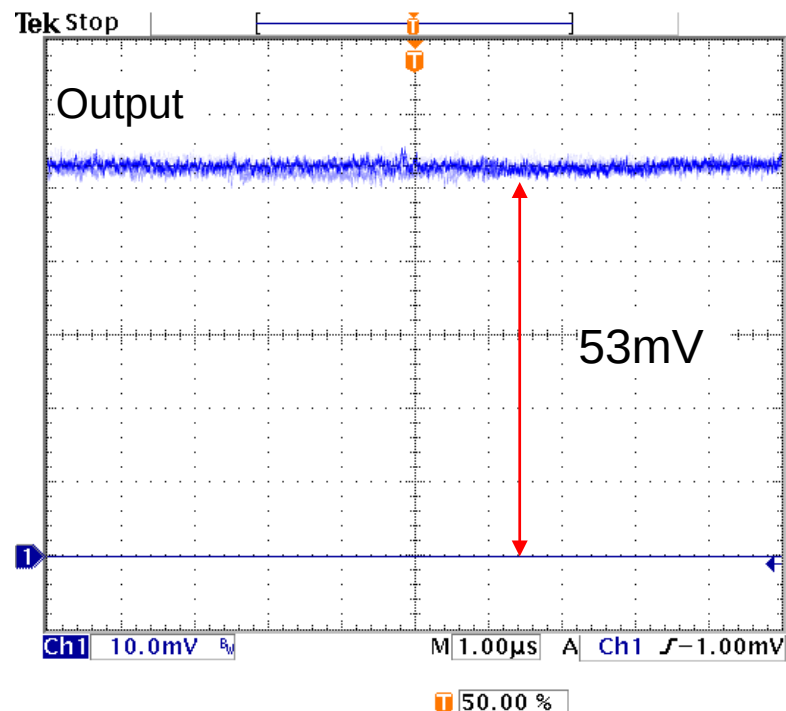
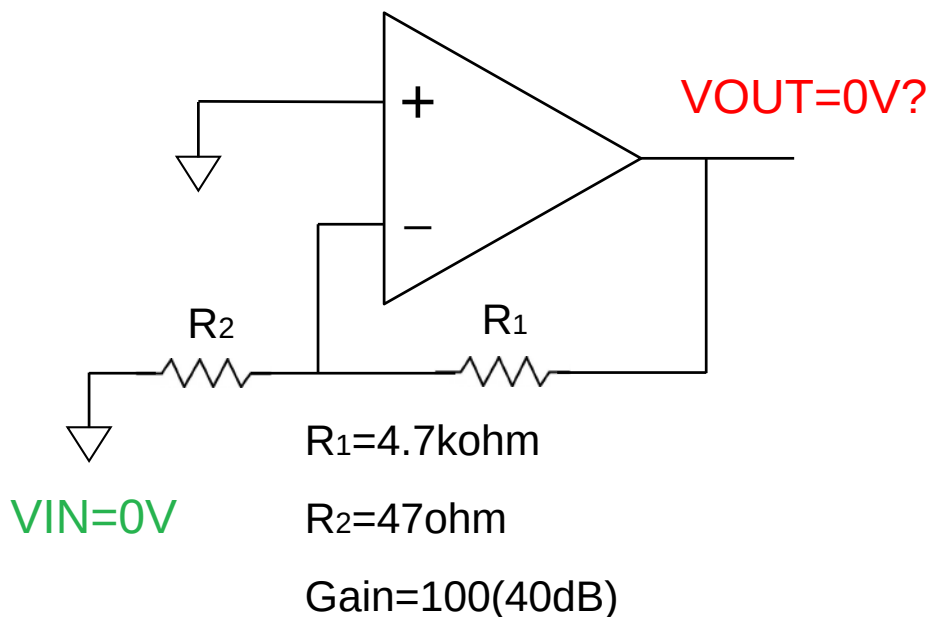
OPアンプの仕様

オフセット電圧



- ▶ OPアンプの入力に0Vを入れると、理想的には出力電圧は0Vとなりますが、実際には数uV～数mVの電圧が出力されています。
- ▶ この出力された電圧を0にするための小さな電圧を、**入力オフセット電圧**と呼びます。
- ▶ オフセット電圧は、設定したGainで変化するため、入力換算で表示し計算を容易にします。

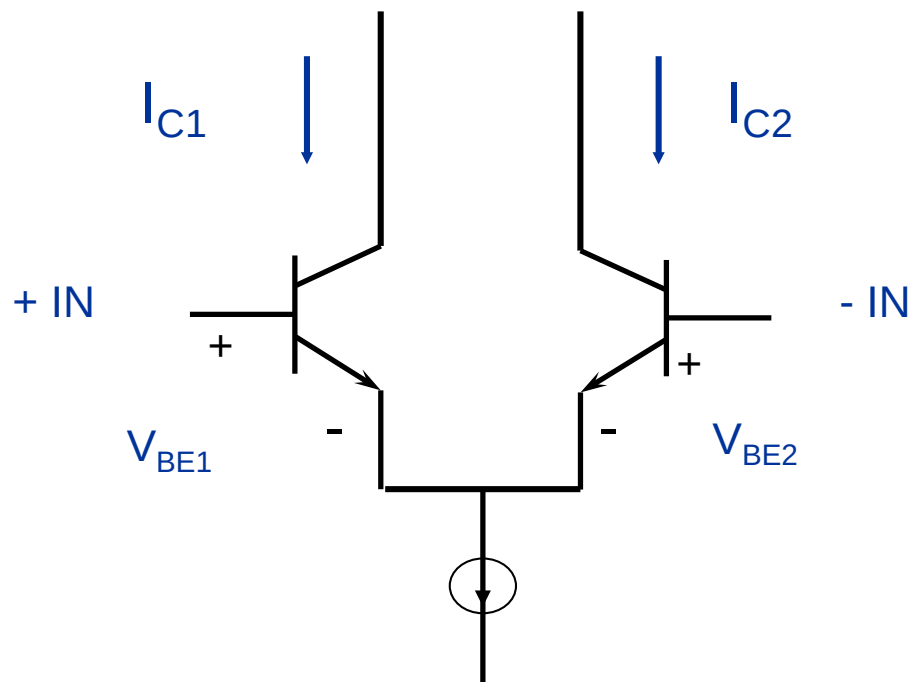
オフセット電圧



入力オフセット電圧(出力電圧÷Gain) : $53mV \div 100 = 0.53mV$

データシート上の入力オフセット電圧 : $0.5mV(\text{typ})$

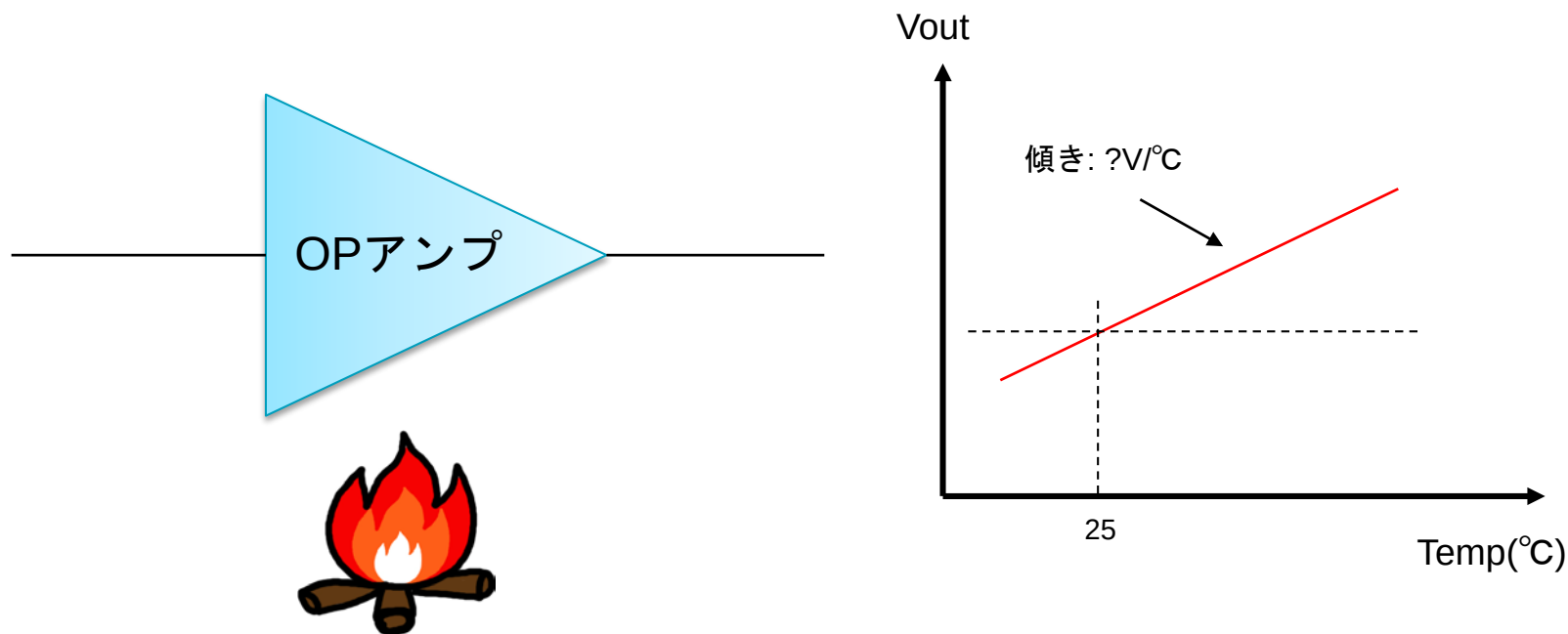
オフセット電圧の原因



OPアンプの入力段

- ▶ OPアンプの入力段内部では、入力電圧(V_{BE})の変化によってコレクタ電流(I_C)を変化させる構成となっています。
- ▶ 製造に依存する入力段のペアトランジスタのミスマッチによって、コレクタ電流の差が生じ、オフセット電圧が発生します。

オフセットドリフト



- ▶ 温度の変化によって、オフセット電圧が変化する傾きを**オフセット温度ドリフト**と呼びます。
- ▶ 温度によって、内部トランジスタの特性の変化が原因

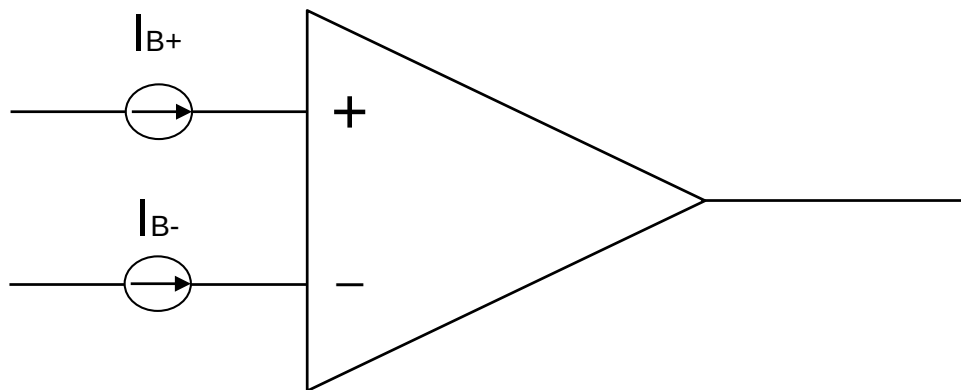
OPアンプの種類別、オフセット電圧の代表的なレンジ

OPアンプのタイプ	オフセット電圧	オフセットドリフト電圧
ゼロドリフトOPアンプ	<1uV	◎
高精度OPアンプ	10uV~25uV	○
汎用OPアンプ	50uV~500uV	△
FET OPアンプ	50uV~1000uV	×

注: 一般的な値です。

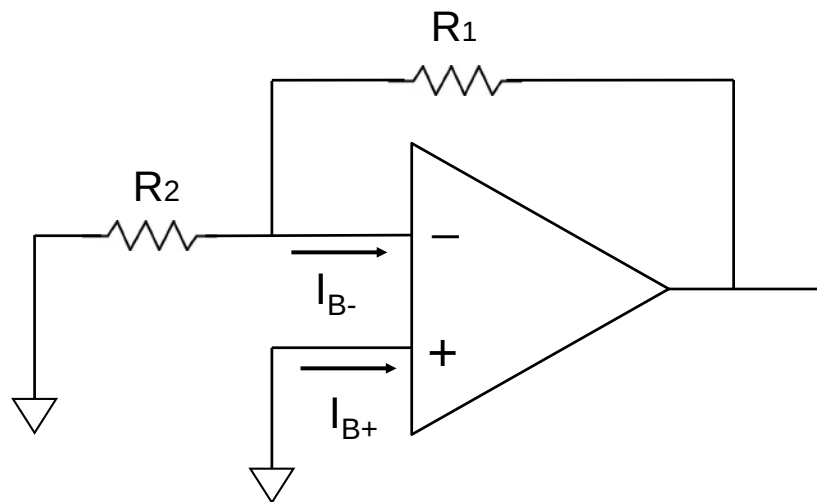
- ▶ オフセット電圧は、温度や重量計などのDC電圧の精度が求められる製品において重要な仕様となります。
- ▶ オフセット電圧は、製造時にレーザートリミングが施されます。
- ▶ 製品出荷時にも調整をする場合があります。

バイアス電流

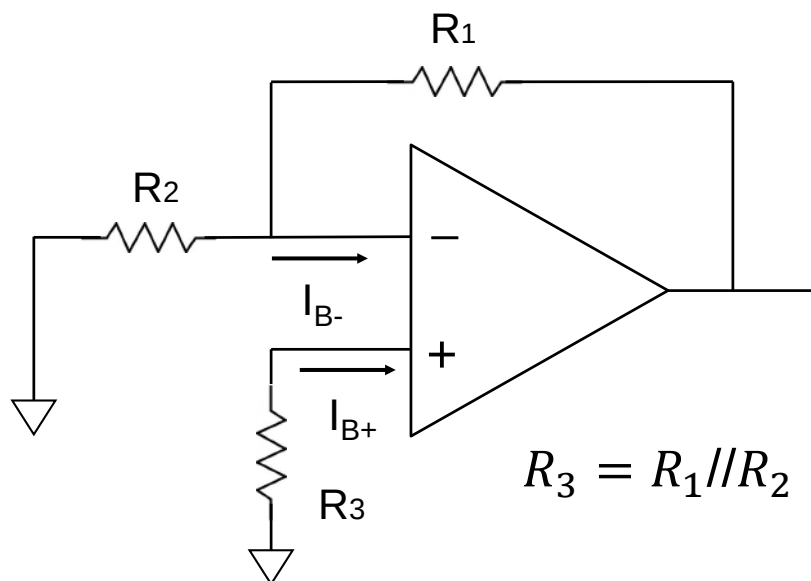


- ▶ 入力ピンには、微小な入力電流が流れます。これをバイアス電流と呼びます。
 - バイアス電流の差($I_{B+} - I_{B-}$)はオフセット電流と呼びます。
 - 電流の流れる向きはOPアンプの入力段に依存します。

バイアス電流の影響



$$\Delta V_{OUT} = -(I_{B-} \times R_1)$$



$$R_3 = R_1 // R_2$$

$$R_1 // R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{(R_1 + R_2)}$$

- ▶ バイアス電流と帰還抵抗(R1とR2)は、オフセット電圧を発生させる原因となります。
- ▶ バイアス電流による、オフセット電圧をキャンセルするには、 $R_3 = R_1 // R_2$ となるような値を選びます。

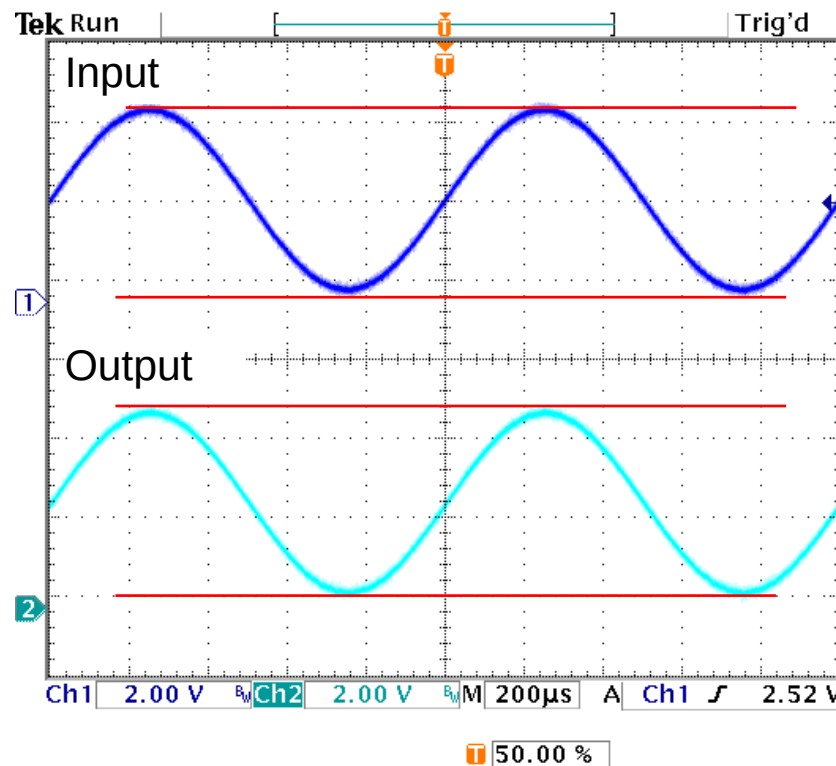
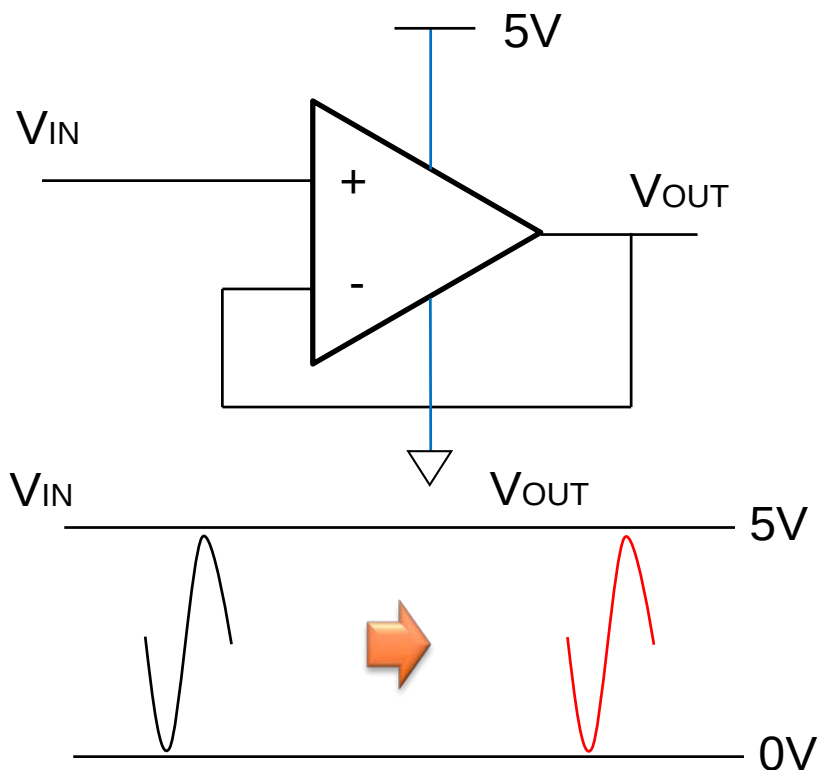
バイアス電流

OPアンプのタイプ	バイアス電流
バイポーラOPアンプ	1nA ~ 1uA
FET OPアンプ	1pA以下 ~ 100pA

注: 一般的な値です。

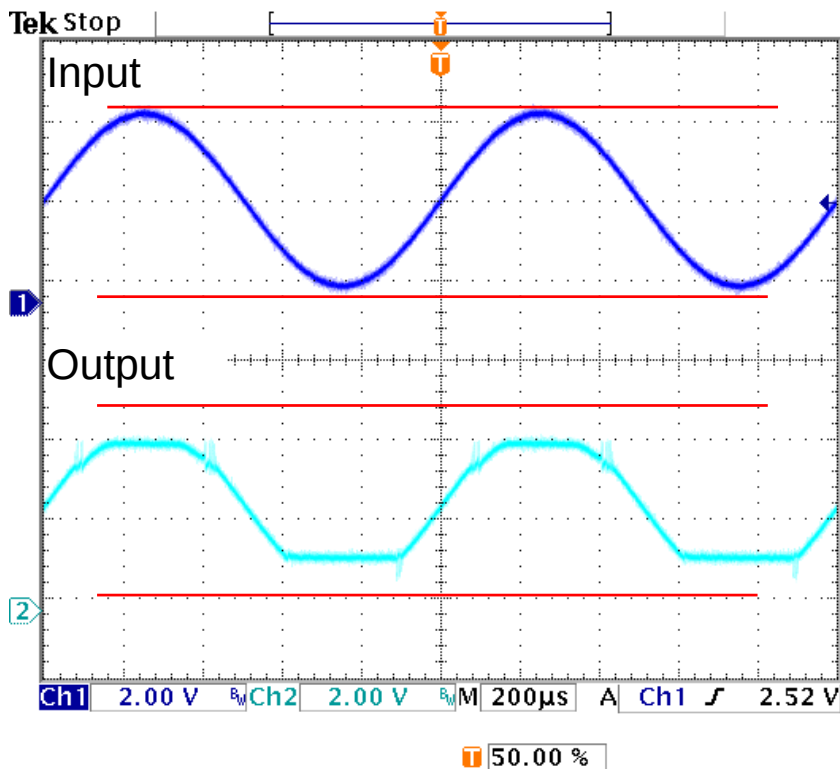
- ▶ バイアス電流は、フォトダイオードなどインピーダンスの高いセンサーを使用する製品において重要な仕様となります。
- ▶ バイポーラOPアンプのバイアス電流は、低いもので1nA程度以上
- ▶ FET OPアンプのバイアス電流は、1pA以下 ~ 100pA程度
- ▶ 温度依存性があります。

レールtoレール・アンプ

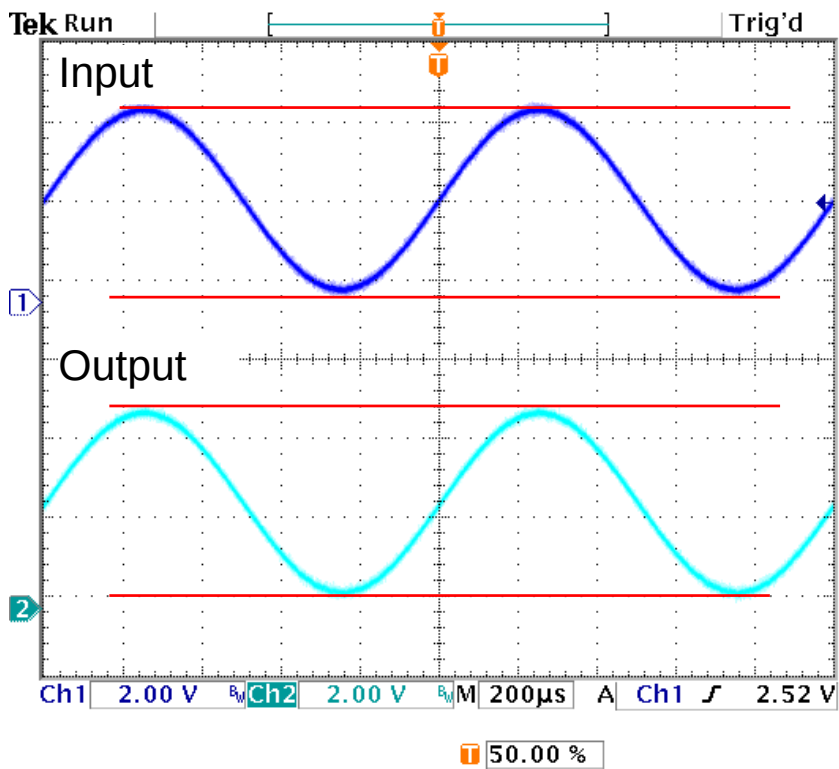


- ▶ 供給電源(レール)の数mV以内または、供給電源まで、入力、出力、もしくは入出力できるOPアンプをレールtoレール・アンプと呼びます。
- ▶ 単電源動作(+3Vや+5V)などの環境下でも、最大のダイナミックレンジでの使用が可能となります。

レールtoレール・アンプ



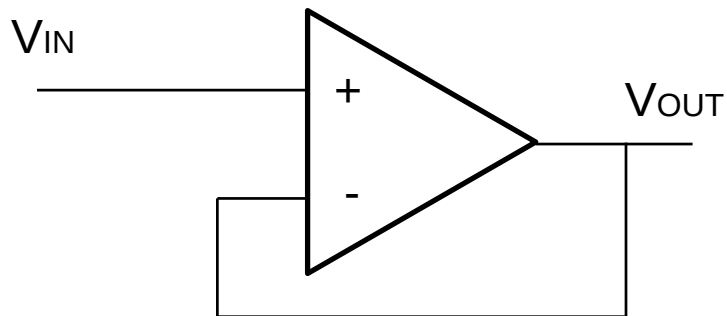
非レール to レール・アンプ



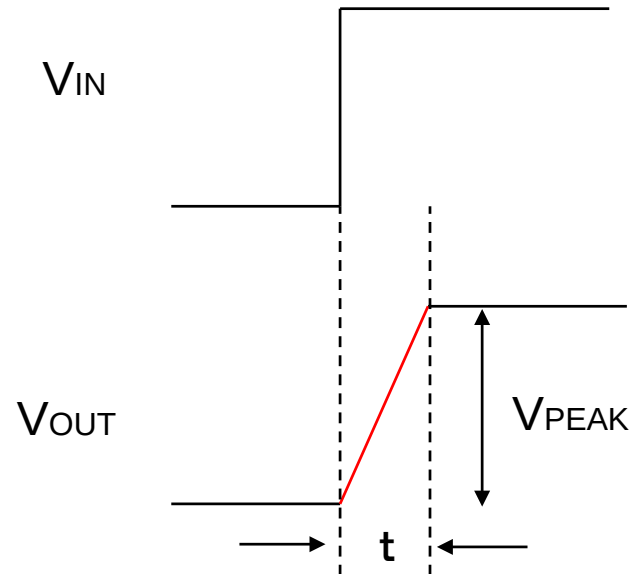
入出力レール to レール・アンプ

- ▶ 非レール to レール・アンプは、出力が歪んでしまっている。

スルーレート



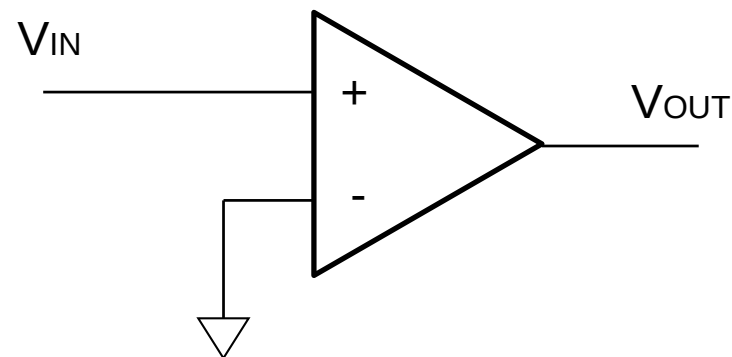
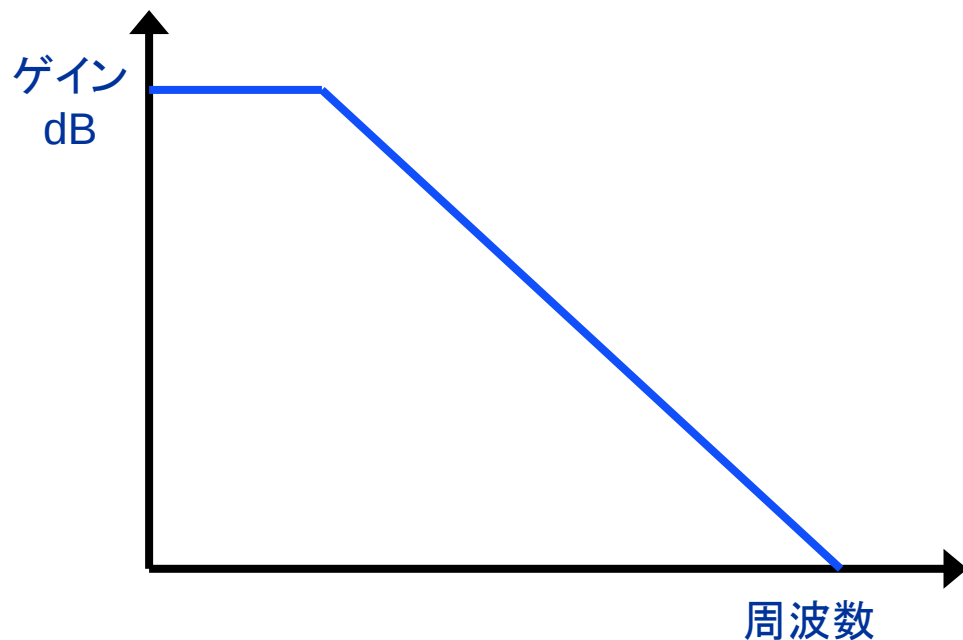
Gain=1(ユニティゲイン)



スルーレート = $V/\text{時間}$ [V/us]

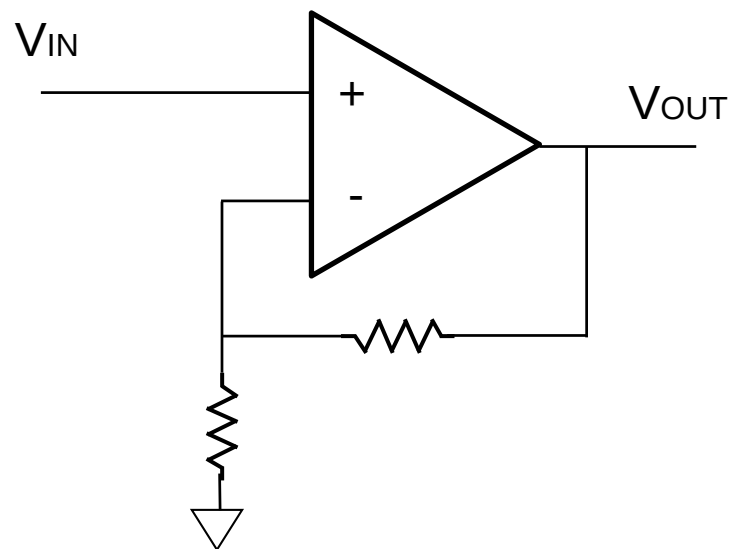
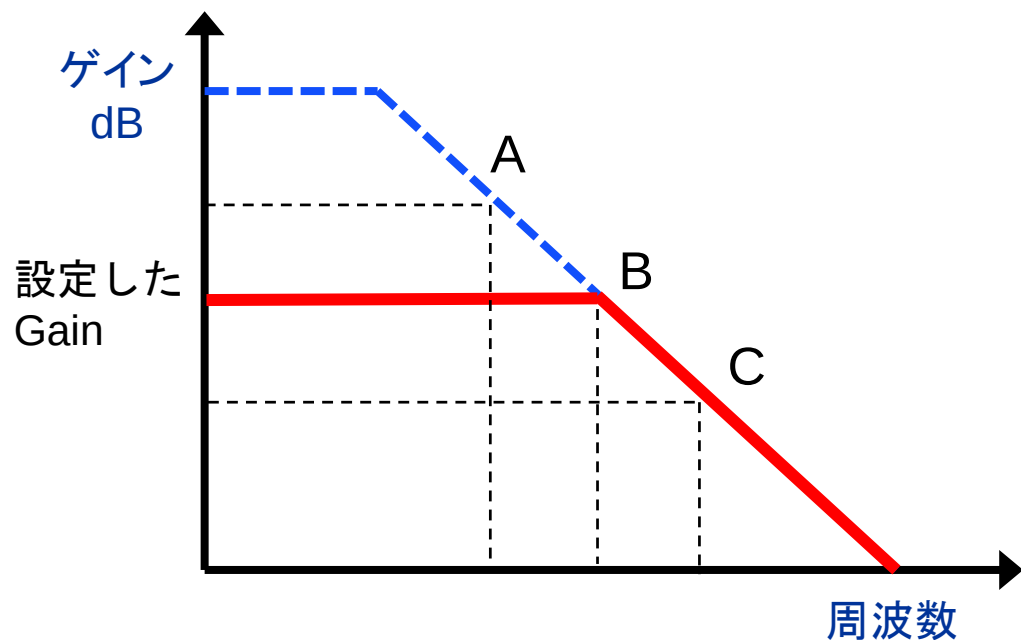
- ▶ 入力の変化に対応する応答を表す仕様(最大のスピード)をスルーレートと呼びます。
- ▶ 1usに出力が何V変化できるかで定義されます。
- ▶ 例 : $V_{PEAK}=10V$, $t = 2\mu s$ の場合
 - スルーレート(Slew rate) = $10/2 = 5$ [V/us]

周波数特性 – オープンループ



- ▶ OPアンプに入力する周波数を高くするにつれて、出力される利得(Gain)が徐々に小さくなります。この特性をOPアンプの周波数特性と言います。
- ▶ OPアンプがオープンループ(負帰還が無い)の際の利得をオープンループゲインと呼び、利得は1万倍～10万倍(80dB～100dB)となります。

周波数特性 – クローズドループとGB積



- ▶ OPアンプはクローズドループ(負帰還がある)で使用し、その際に利得(Gain)を決定します。
- ▶ 利得(Gain)と周波数の積をGB積と呼びます。
- ▶ OPアンプのGB積は一定です。(A, B, Cの利得×周波数が一定)
- ▶ これは、電圧帰還型OPアンプのみに適応します。

周波数特性

ADA4077-x (高精度)の周波数特性グラフ

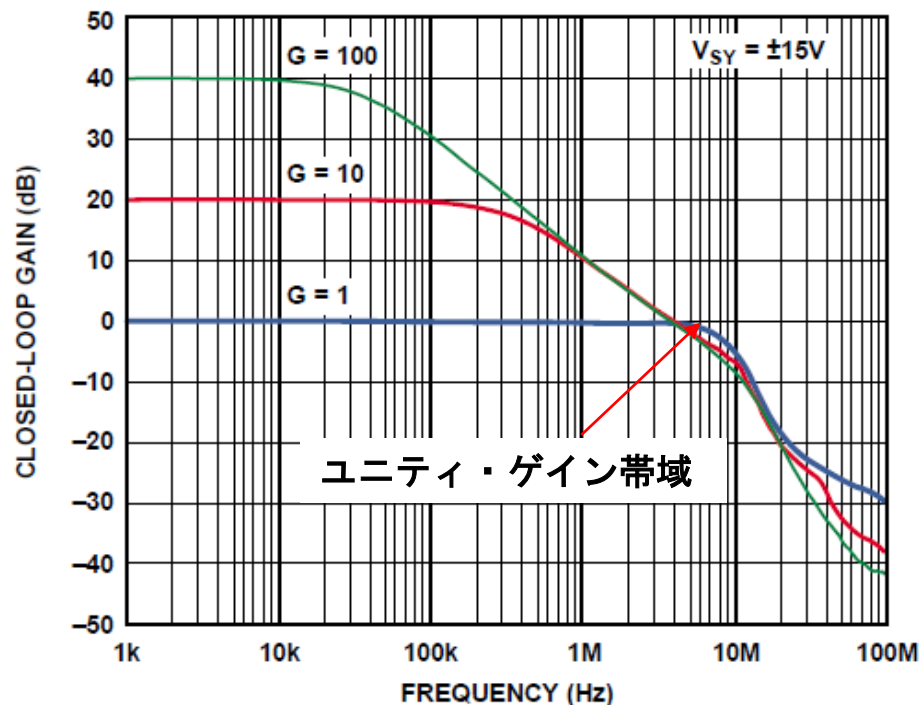
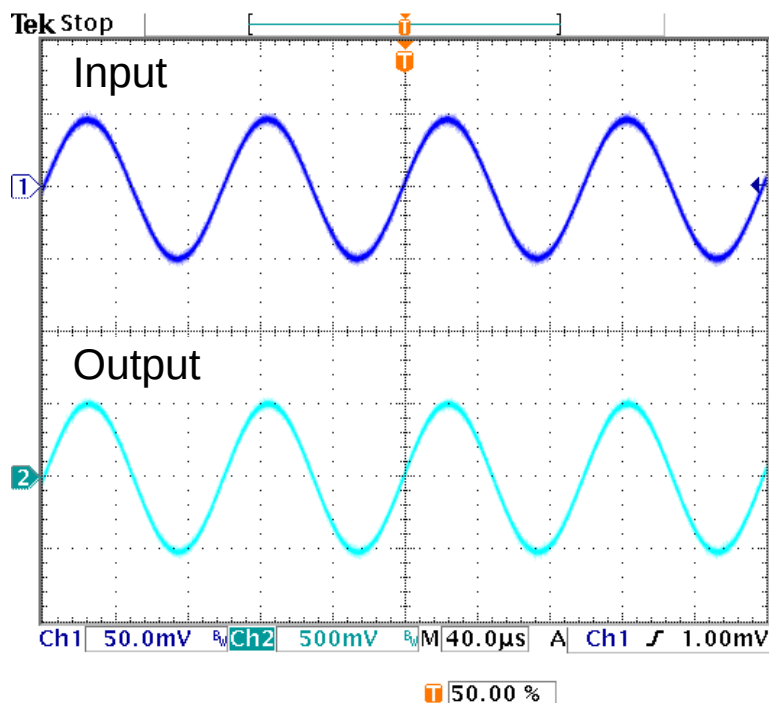


Figure 44. Closed-Loop Gain vs. Frequency, $V_{SY} = \pm 15V$

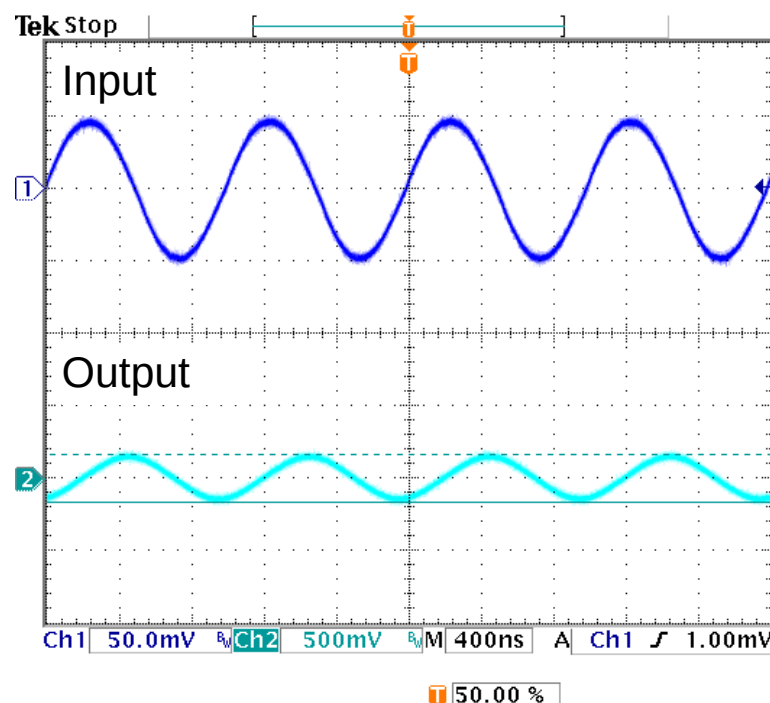
- ▶ 周波数が10倍高くなると、利得が1/10になる(20dB/dec)
- ▶ Gain=1の状態をユニティ・ゲイン
- ▶ Gain=1になる周波数をユニティゲイン帯域と呼ぶ
- ▶ ユニティ・ゲイン帯域 = GB積
- ▶ GB積がわかれば、OPアンプの周波数特性を20dB/decから導くことが可能

周波数特性



Vin=100mV, 10kHz

$$20 \times \log_{10} \left(\frac{1V}{100mV} \right) = 20dB$$



Vin=100mV, 1MHz

$$20 \times \log_{10} \left(\frac{300mV}{100mV} \right) = 9.54 \approx 10dB$$

- ▶ ADA4077を使用し、Gain=20dBの設定で周波数特性を評価

$$20 \times \log_{10} \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) = Gain[dB]$$

周波数特性

ADA4077-x (高精度)の周波数特性グラフ

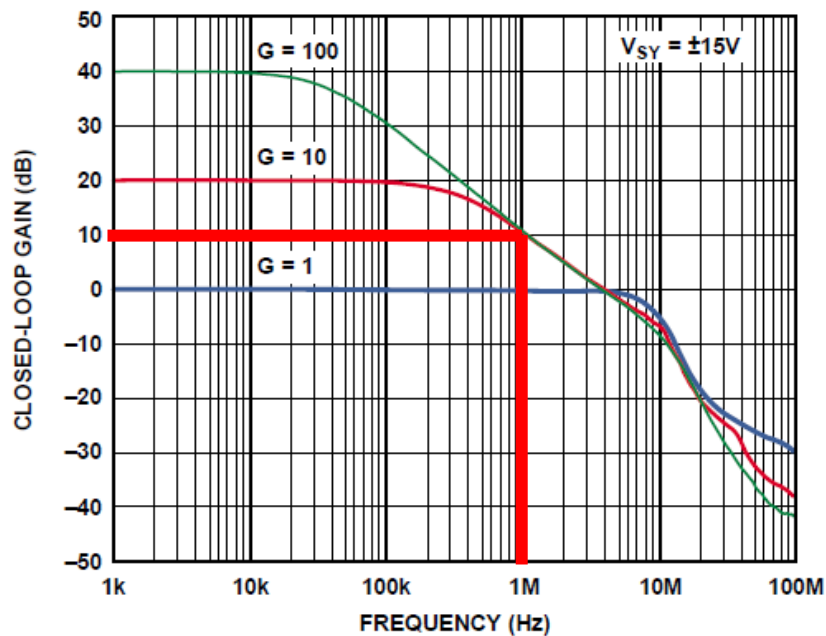
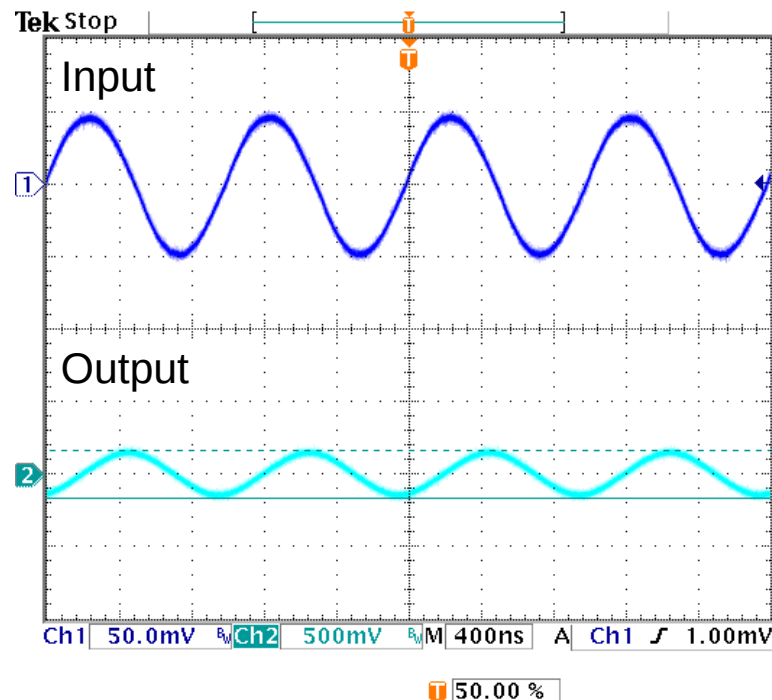


Figure 44. Closed-Loop Gain vs. Frequency, $V_{SY} = \pm 15V$

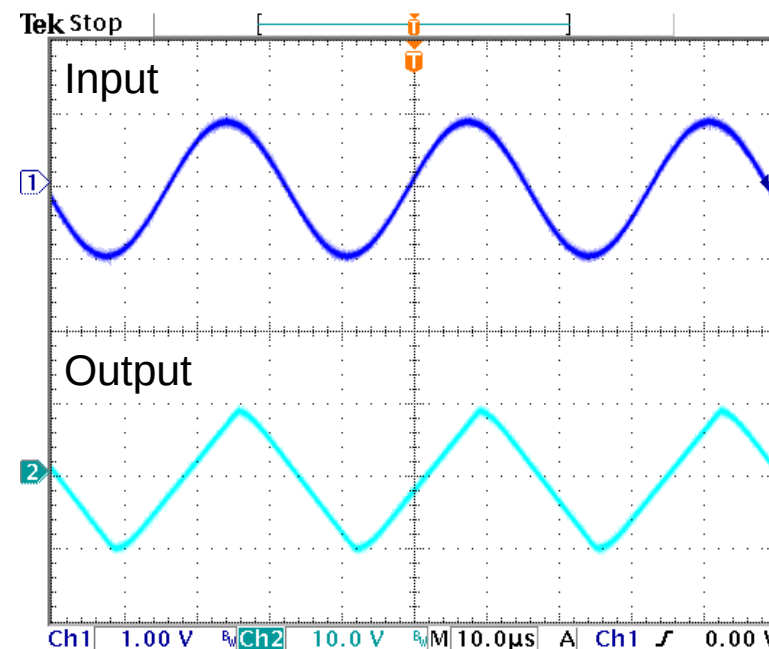
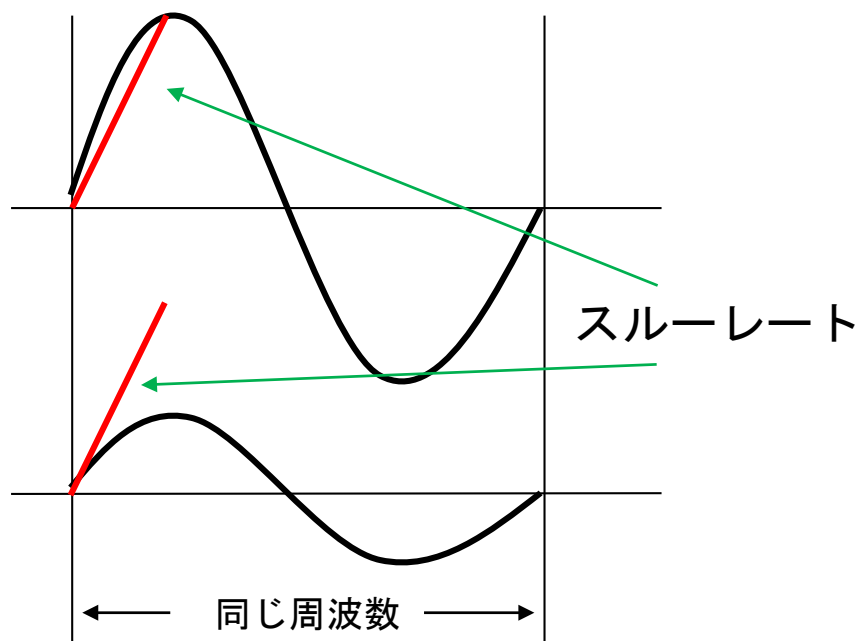
- ▶ 周波数が1MHzの際には、Gainが10dB程度に落ちている。



$V_{in}=100mV, 1MHz$

$$20 \times \log_{10} \left(\frac{300mV}{100mV} \right) = 9.54 \approx 10dB$$

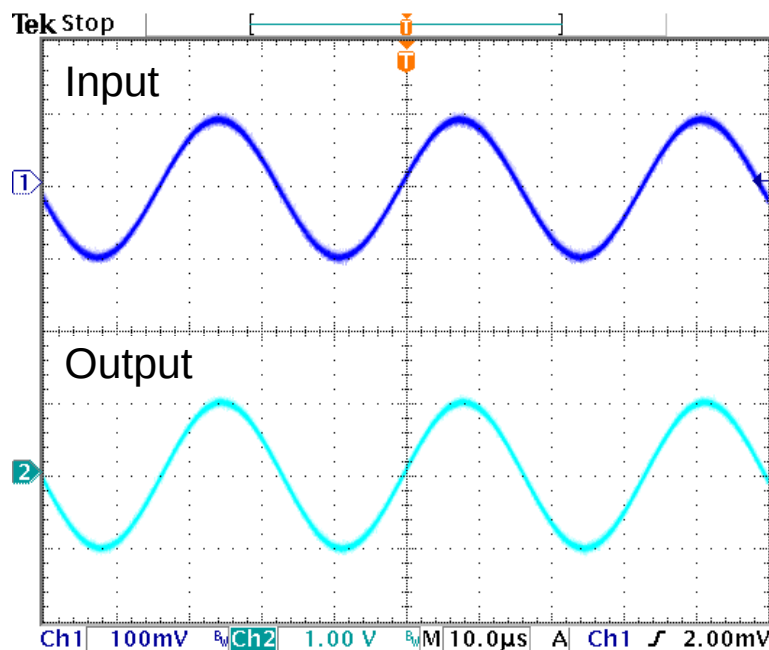
スルーレートと周波数特性の注意点



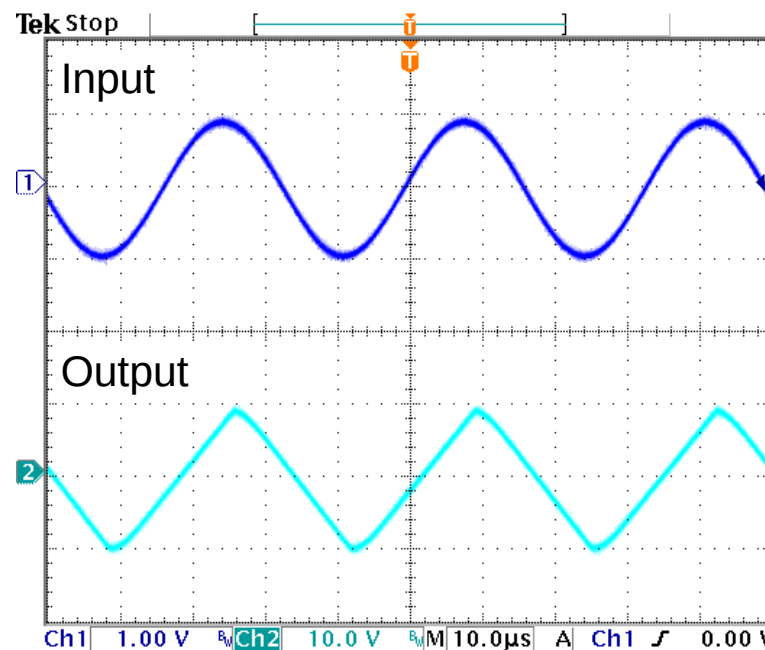
$V_{in}=2V$, 30kHz

- ▶ 上限周波数を満たしていても、スルーレートが足りないと高域周波数で最大出力振幅が得られないケースがあります。
- ▶ 振幅が大きいとスルーレートを超えてしまう可能性があり、振幅が小さい方がスルーレートの影響を受けにくくなります。

スルーレートと周波数特性の注意点



$V_{in}=200\text{mV}$, 30kHz



$V_{in}=2\text{V}$, 30kHz

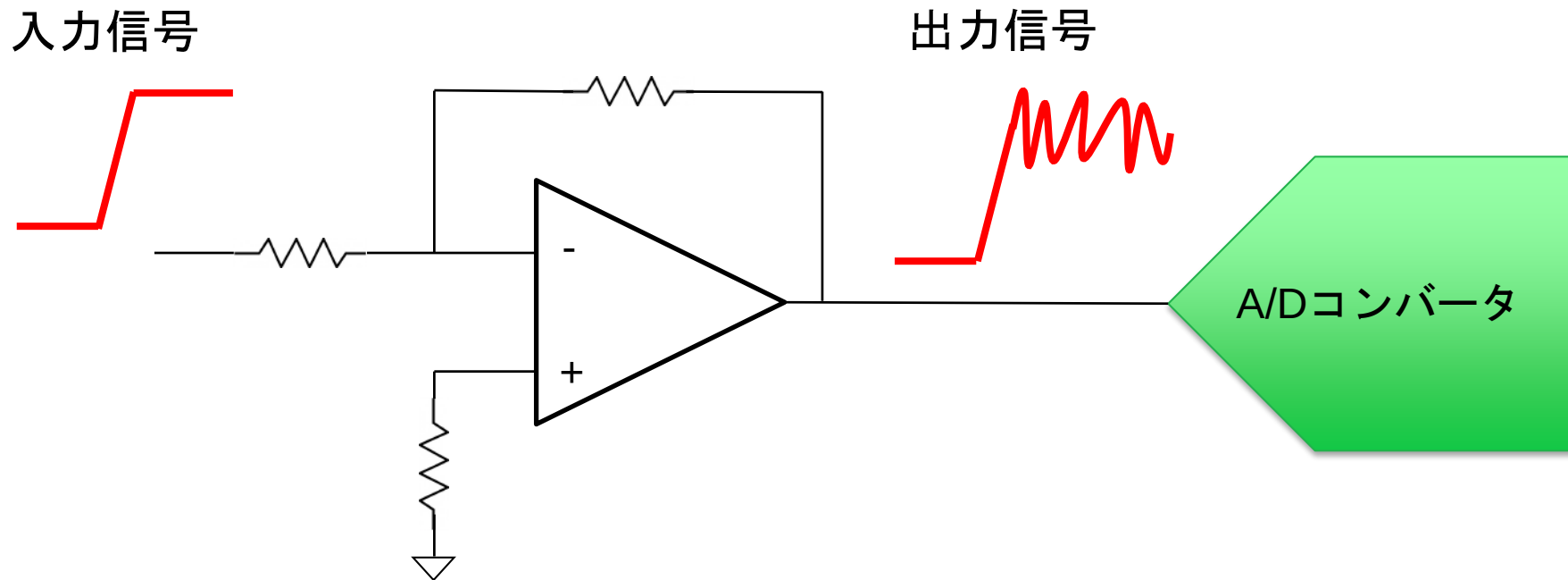
- ▶ 同じGain設定において、同じ周波数の信号を入力した場合、入力振幅が大きい方が、出力に歪みが生じ、スルーレートの影響を受けていることがわかります。



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

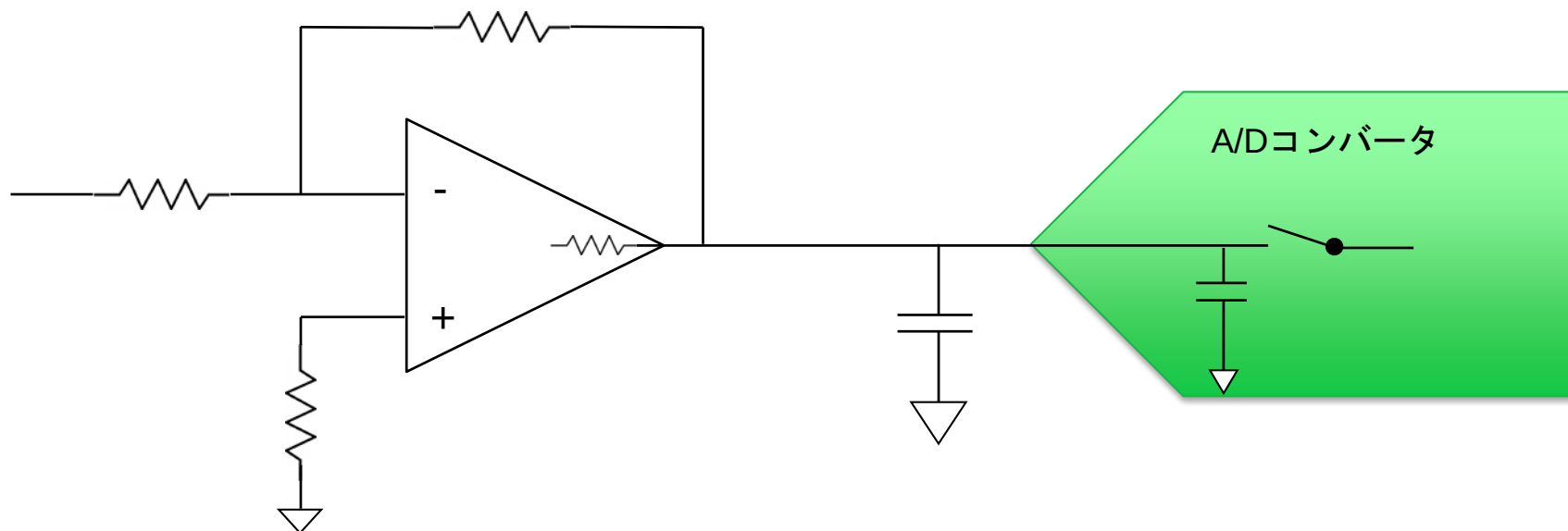
負帰還と位相補償

OPアンプ回路における安定特性



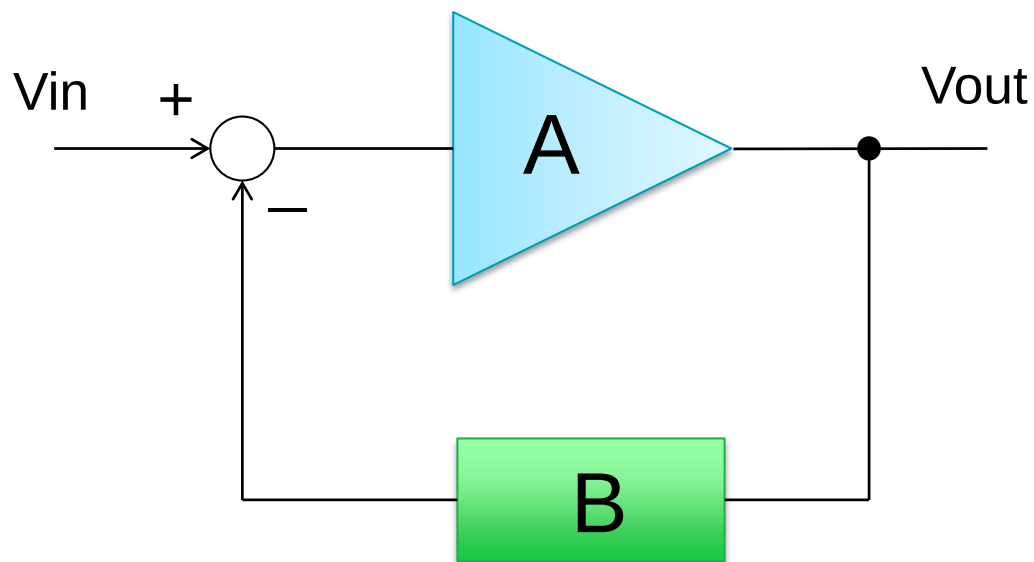
- ▶ OPアンプ単体では問題無いが、A/Dコンバータやケーブルを接続すると、発振するというケースが少なくありません。

OPアンプ回路における安定特性



- ▶ OPアンプを実際に使用する際、ローパスフィルタで使用するコンデンサや、A/Dコンバータやケーブル内部の寄生容量などがあり、OPアンプからは容量性の負荷として見えます。
- ▶ また、OPアンプの出カインピーダンスも回路に影響を及ぼします。
- ▶ 特に、コンデンサやコイルとなる成分は時定数を持っており、信号の位相のずれを引き起こす原因となります。

負帰還(Negative feedback)の基本



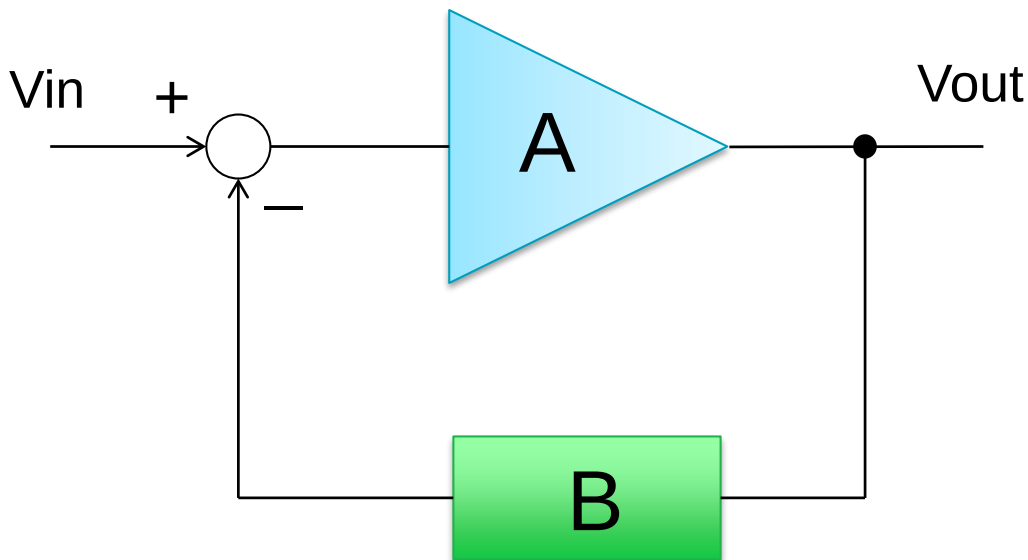
$$V_{out} = V_{in} \times \frac{A}{1 + AB}$$

$AB \gg 1$ のとき

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{1}{B}$$

- ▶ OPアンプのGain= A は、非常に大きい値なので出力(V_{out})は、入力(V_{in})の $1/B$ 倍となります。

OPアンプの発振条件



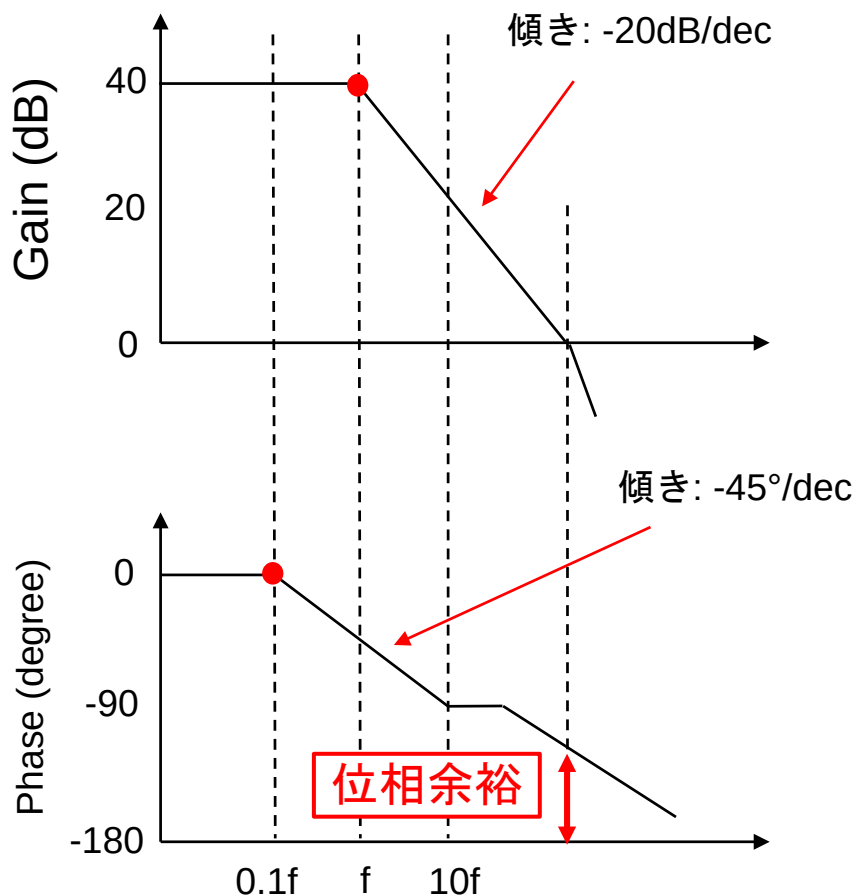
OPアンプの発振条件

Gain=1以上(増幅している)

負帰還回路の位相が 360° ずれる

- ▶ 負帰還(Negative Feedback)をかけているので、位相はすでに 180° ずれています。
- ▶ A及びBの回路によって、さらに位相が 180° ずれる(回る)と帰還信号が反転して正帰還(Positive feedback)となる。 → 発振(動作が不安定な状態)
- ▶ 正帰還(180° 位相が回らない)にならないように設計する必要があります。

位相余裕と位相補償



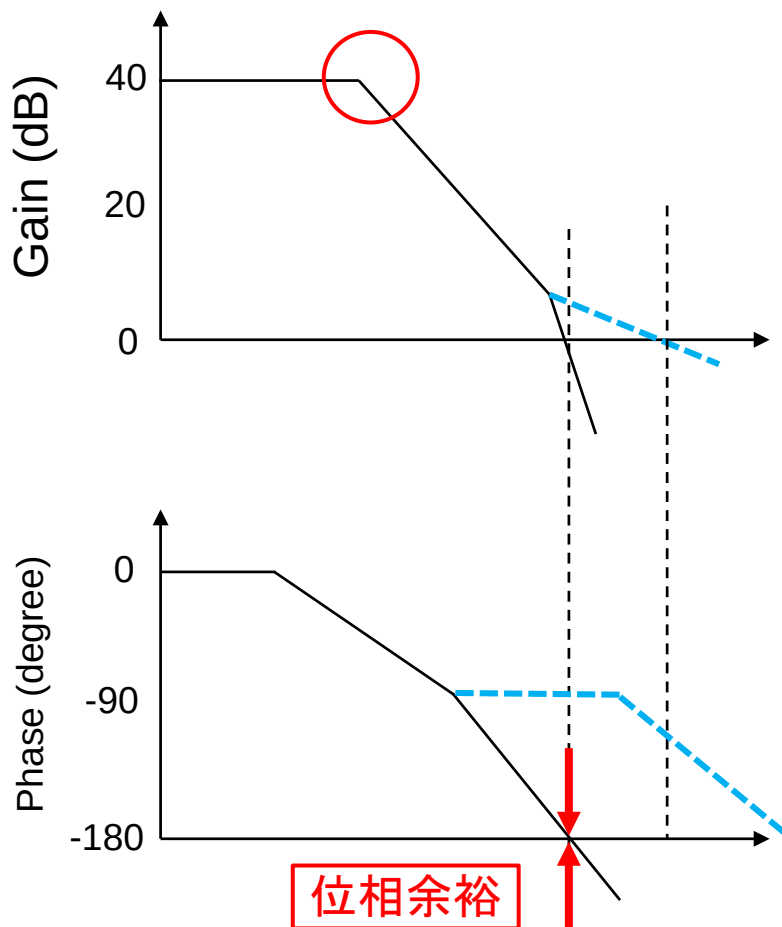
▶ 位相余裕

- 発振条件まで位相のずれがどれくらい余裕があるかの指標となります。
- ボーデ線図(ボード線図)を使用して、Gainと位相の関係を図示することができます。

▶ ボーデ線図の例

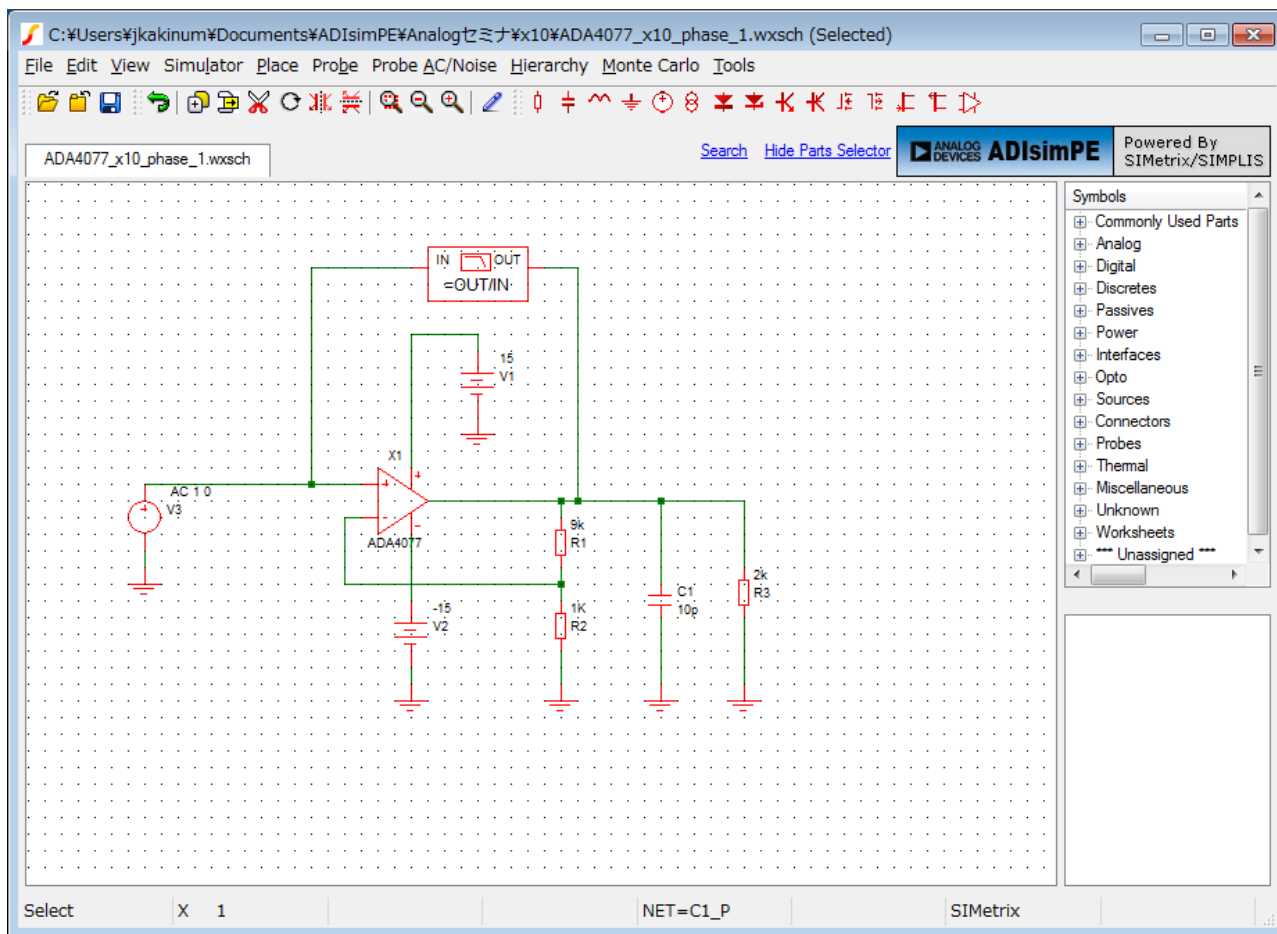
- Gainが変化する周波数" f "から1/10の周波数の地点から位相がずれ(回り)はじめ、" f "から10倍の周波数の地点でそのままになります。(ポール/極)
 - Gainの傾きは、 -20dB/dec
 - 位相の傾きは、 $-45^\circ/\text{dec}$
- ▶ Gain=1(0dB)の時の位相のずれを -180° から見た値を位相余裕と呼びます。
- 左図の場合、位相余裕は 60° 程度

位相余裕と位相補償



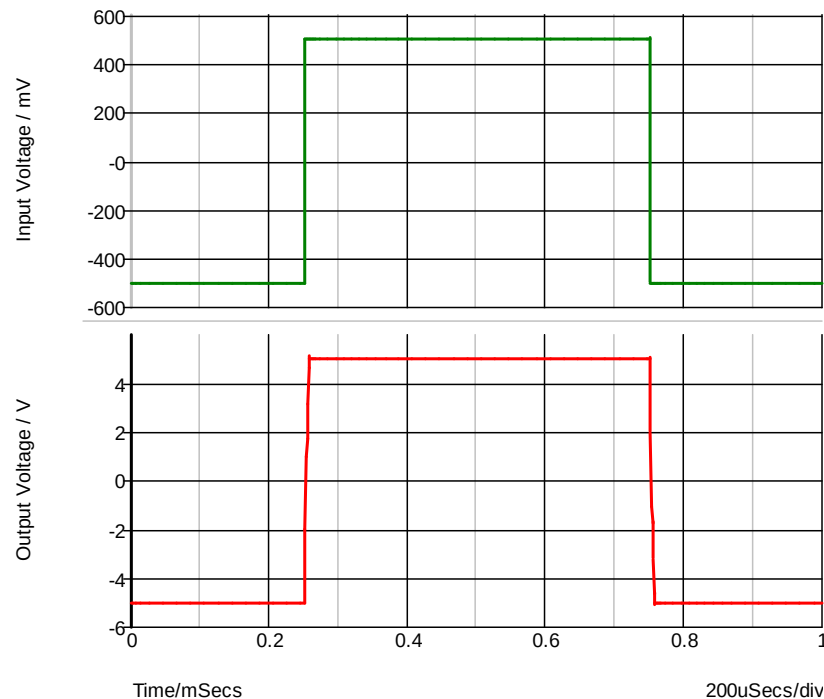
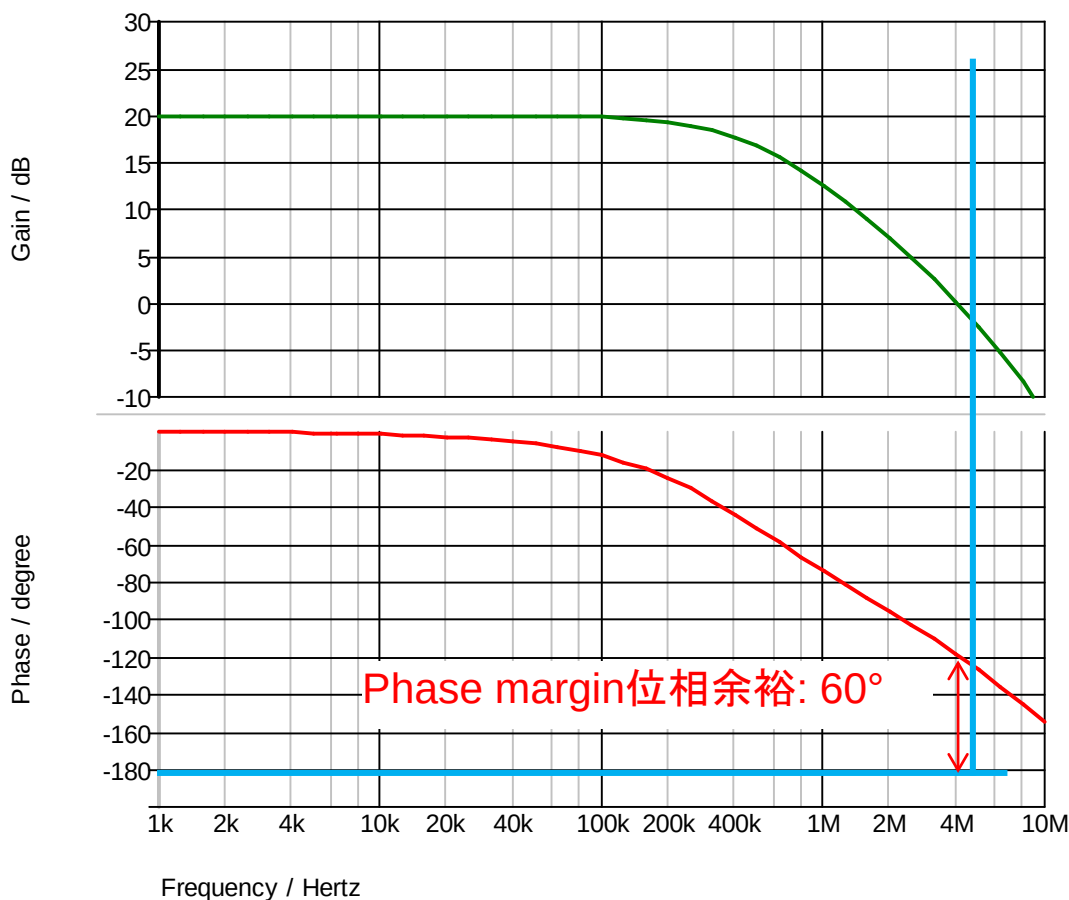
- ▶ 発振条件を満たした(不安定な)ボーデ線図の例
 - Gain=1(0dB)の時、位相が 180° 以上ずれて(回って)います。
 - また、Gainの変化点でピーク(Gainの上昇)が発生する場合があります。
- ▶ 位相補償
 - 位相余裕を確保するため、回路を調整(補償)すること
 - -180° から見て $30^\circ \sim 45^\circ$ 以上が目安(アプリケーションによる)
- ▶ シミュレーションと測定
 - 一般的には、ネットワークアナライザを使用して測定をしたり、ステップ応答などを入力して応答特性の観測で判断します。
 - また、シミュレーションを活用することで検証が可能です。

容量性負荷の影響 – ADISimPEを使用したシミュレーション



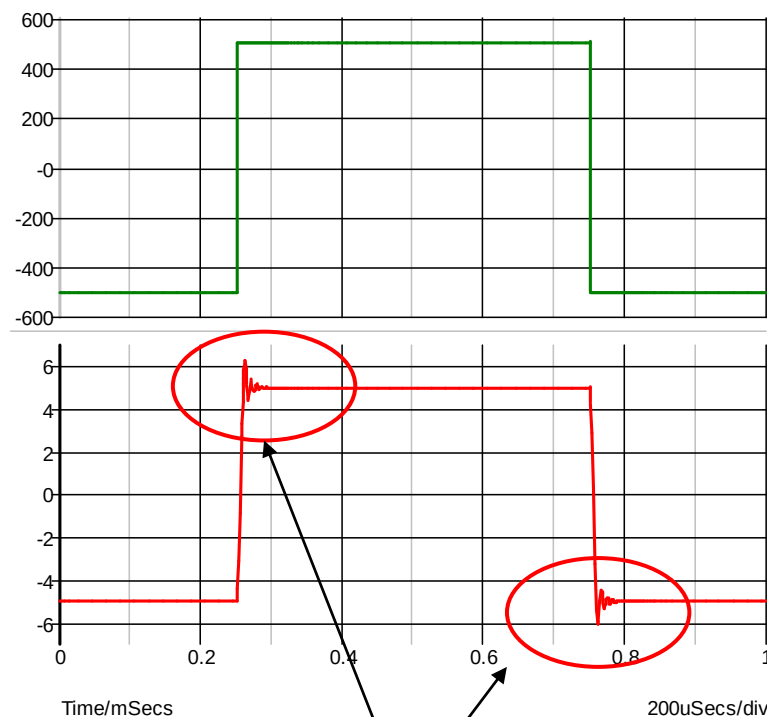
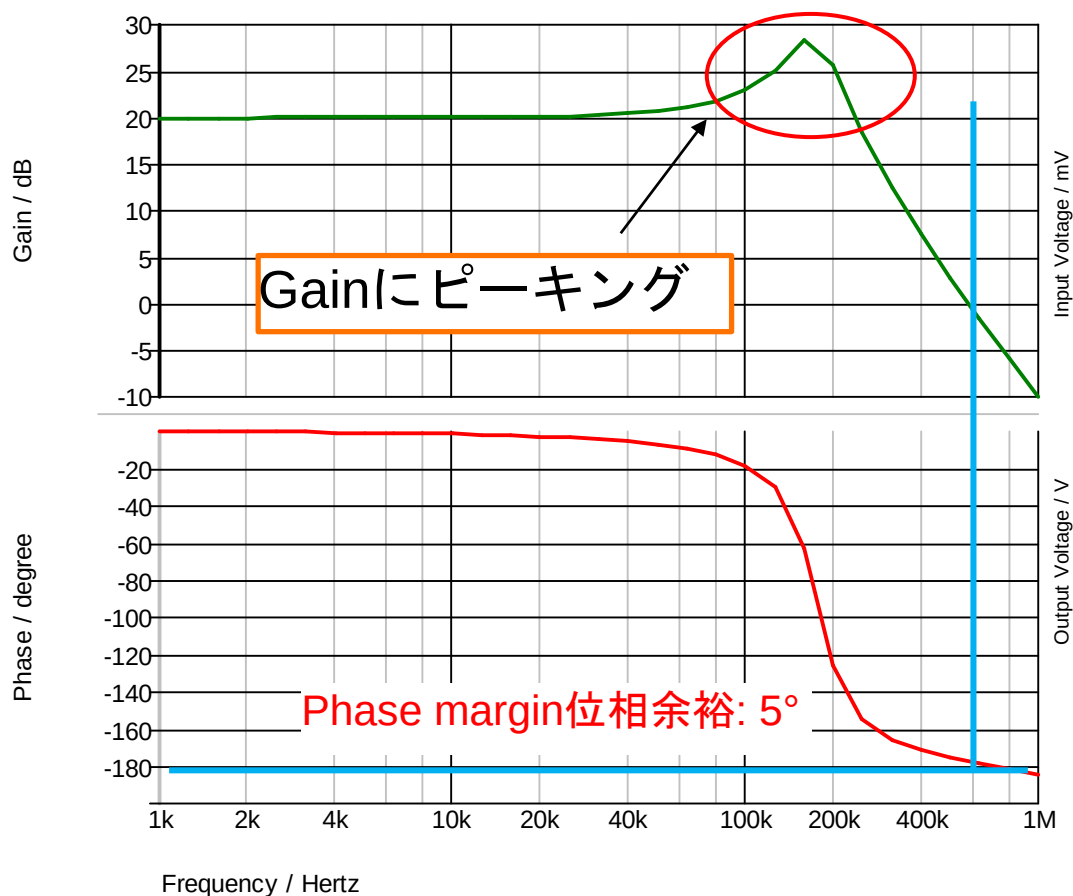
- ▶ ADIのSPICE Simulator, 「ADISimPE」を使用して、ADA4077の周波数特性を検証します。

容量性負荷の影響 – ADISimPEを使用したシミュレーション



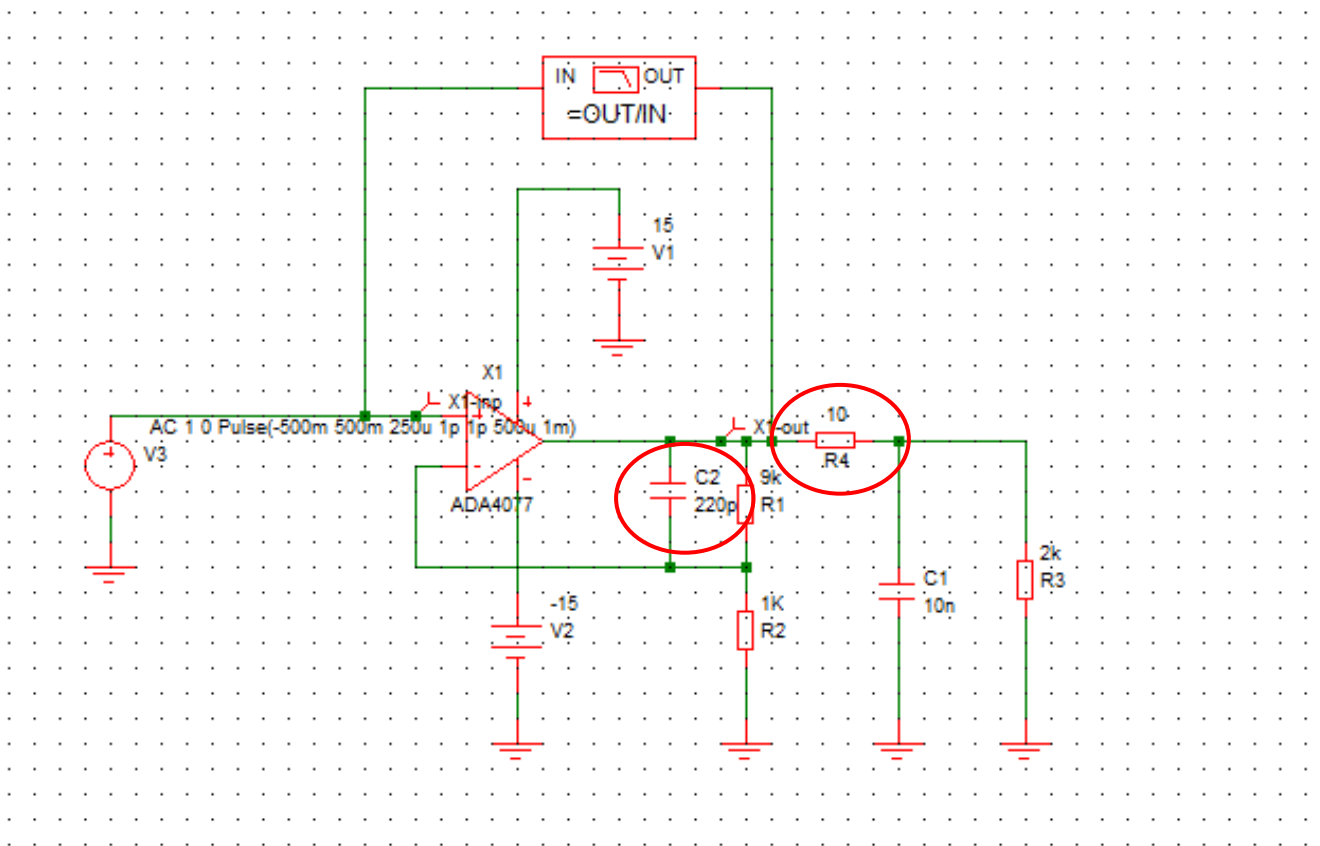
- ▶ Gain=10, $R_L=2k$, $C_L=10pF$
- ▶ 位相余裕(Phase margin)が 60° あり、ステップ応答も安定しています。

容量性負荷の影響 – ADISimPEを使用したシミュレーション



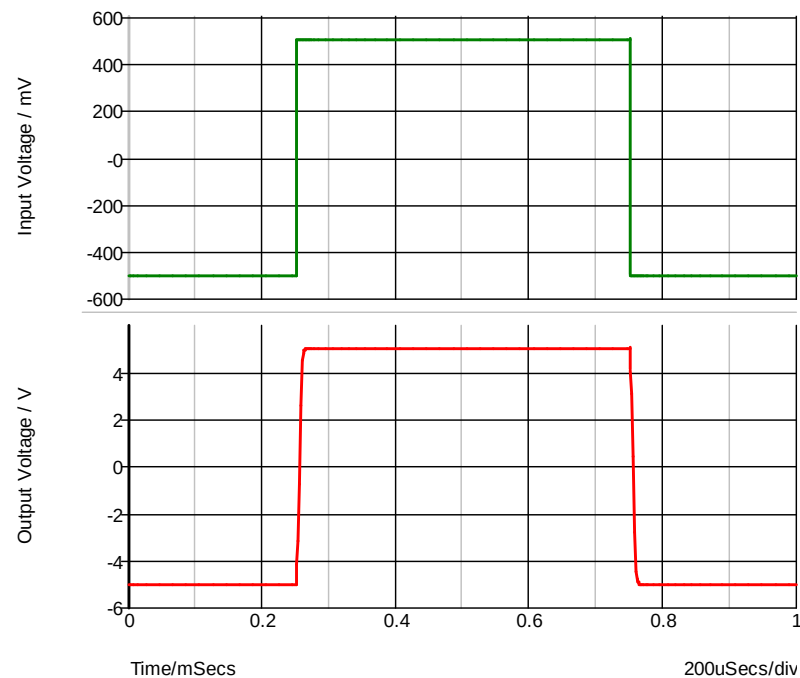
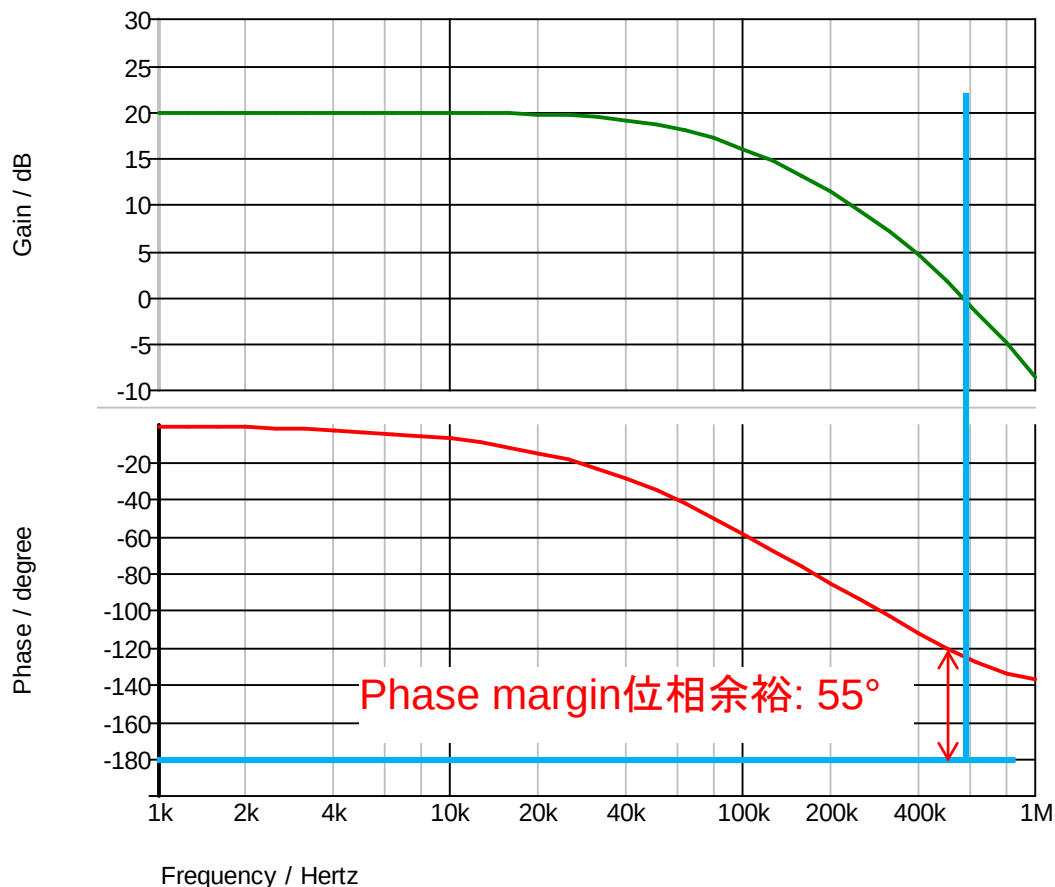
- ▶ Gain=10, $R_L=2k$, $C_L=10nF$
- ▶ 位相余裕(Phase margin)が 5° と位相余裕が小さく、ステップ応答特性にリンギング(発振)が確認できます。また、Gainにピークが確認できます。

位相補償回路



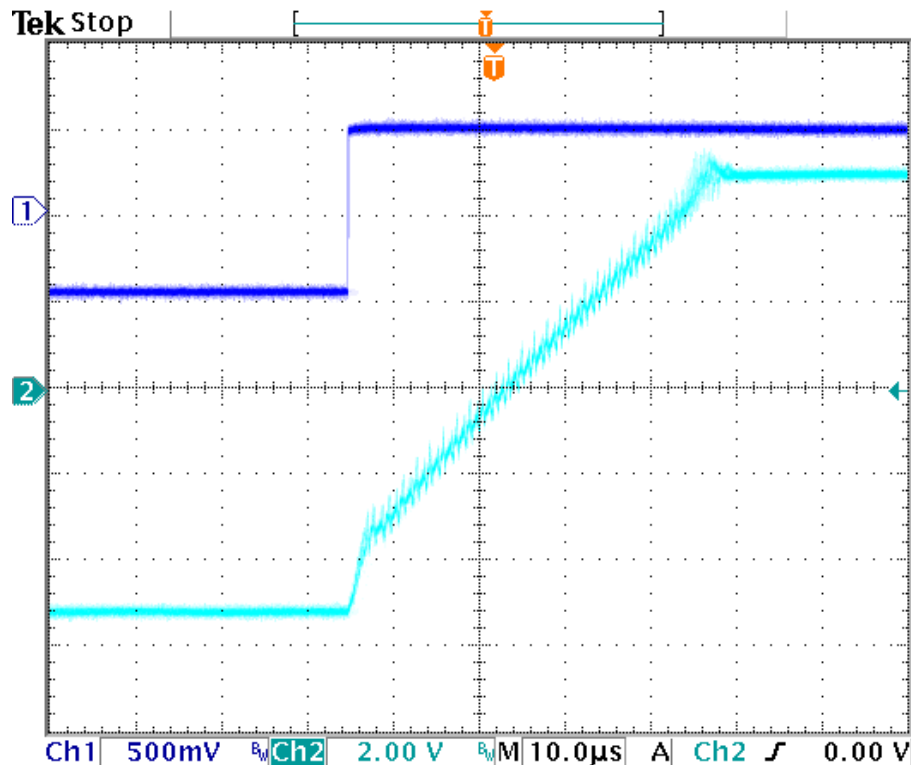
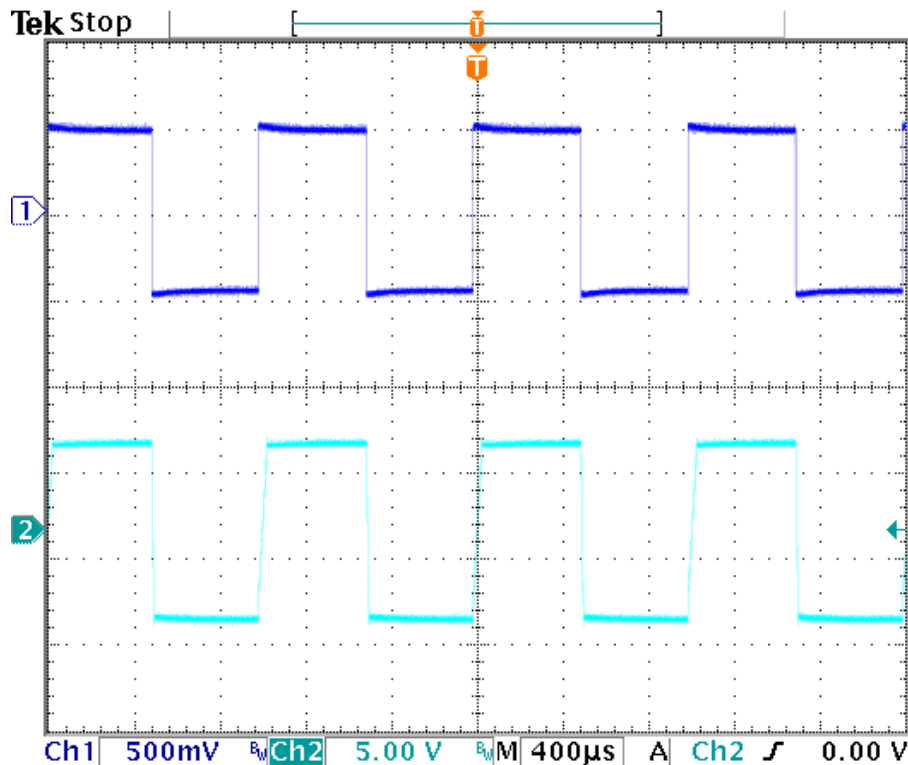
- ▶ 発振を抑える(位相補償の)為、位相補償用コンデンサと抵抗を挿入し、位相余裕を調整します。

位相補償回路



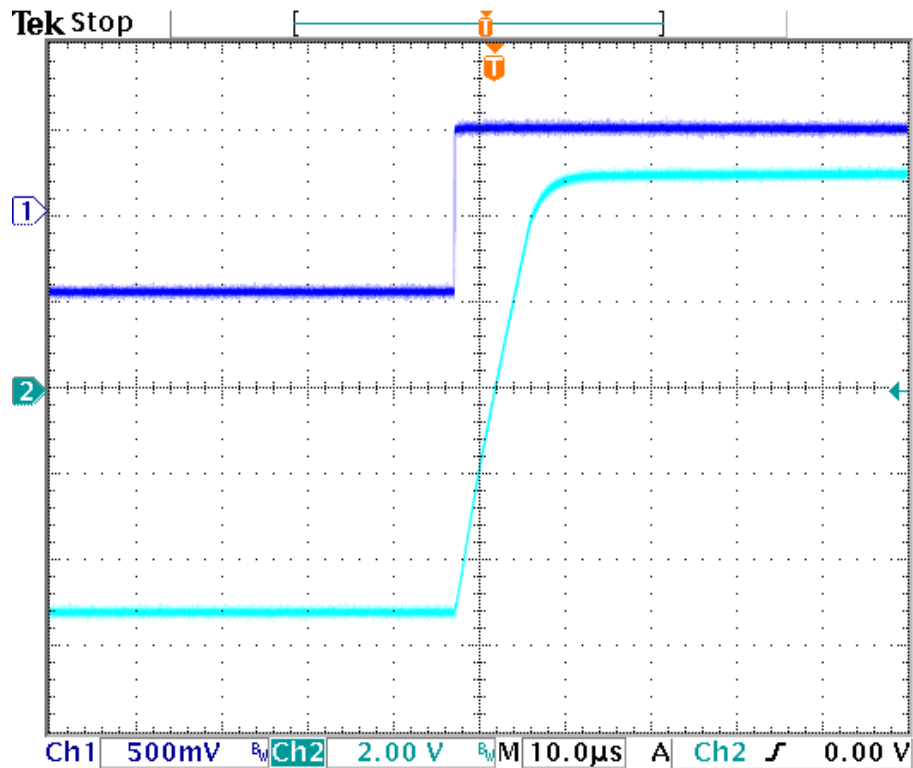
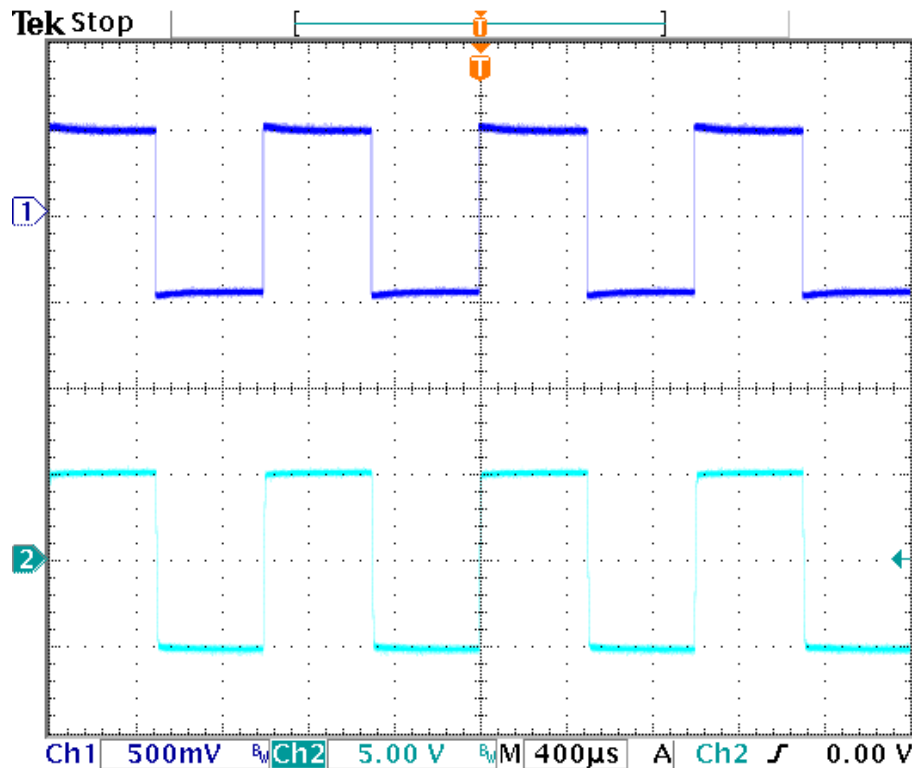
- ▶ 位相余裕は55°となり、Gainのピークやステップ応答特性のリングングも消えました。
- ▶ この補償回路により、帯域が低くなり、応答特性が犠牲になるトレードオフが発生しています。

位相補償回路の実験



- ▶ ADA4077の実験ボードで実験。
- ▶ 負荷となる抵抗とコンデンサを接続
 - 2.2k + 22nF(セラミックコンデンサ)
- ▶ 発振は発生していないように見えるが、Zoomすると出力電圧に微小な発振、リングングが確認されました。

位相補償回路の実験



- ▶ 発振を抑える為、位相補償回路を挿入。
 - 180pF(R1に並列接続), 47ohm(負荷に直列接続)
- ▶ 微小な発振が無くなり、応答特性も改善！

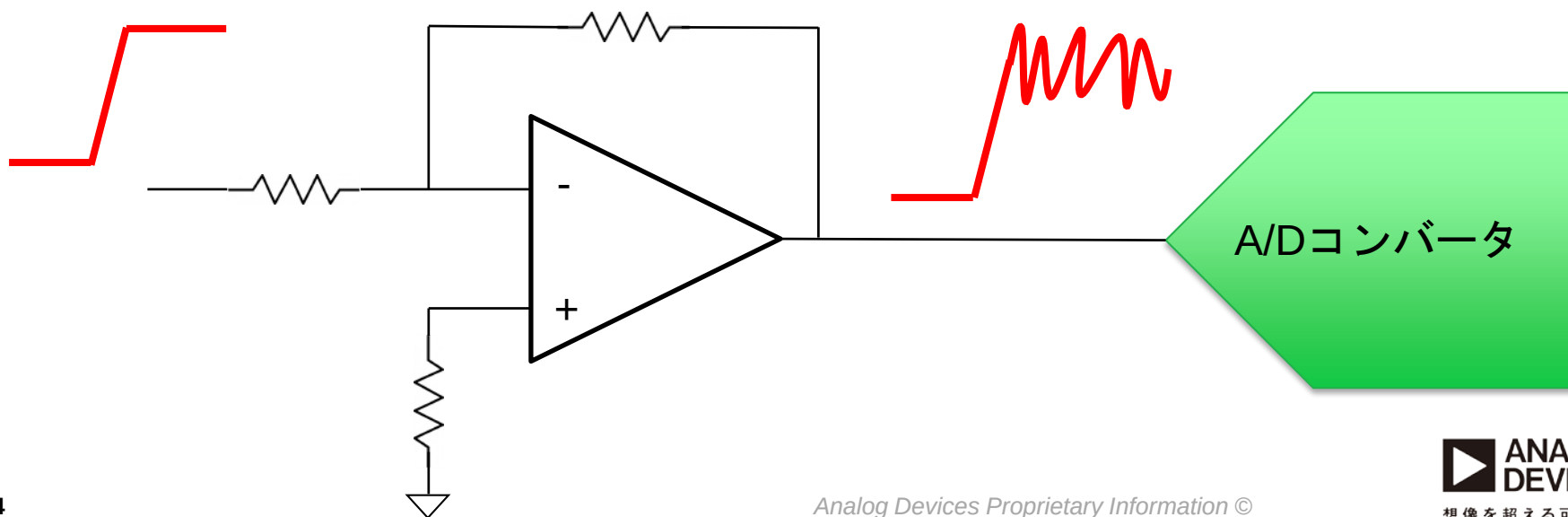
クイズ【2】

- ▶ OPアンプが発振するのを防止する方法として、正しいものを1つ選んでください。

- 1, 位相補償回路(部品)を挿入する。
- 2, 発振を防止する方法は特にはない。
- 3, OPアンプの電源電圧を変える。

入力信号

出力信号



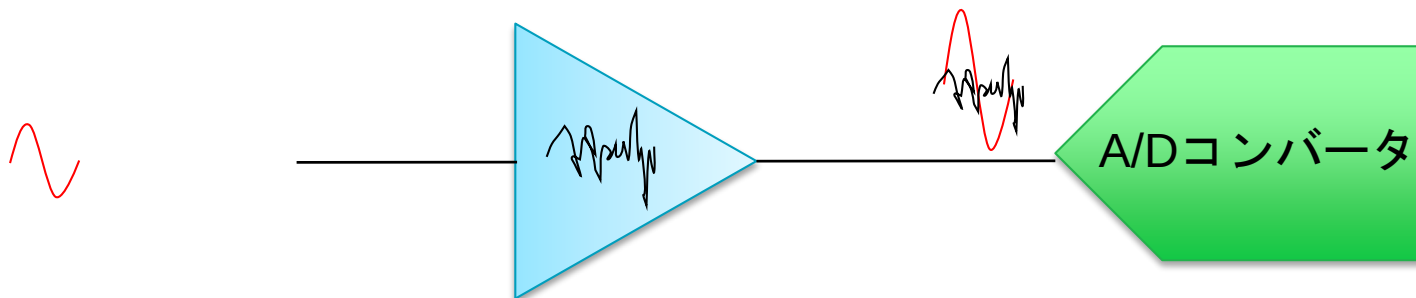


想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

OPアンプのノイズ

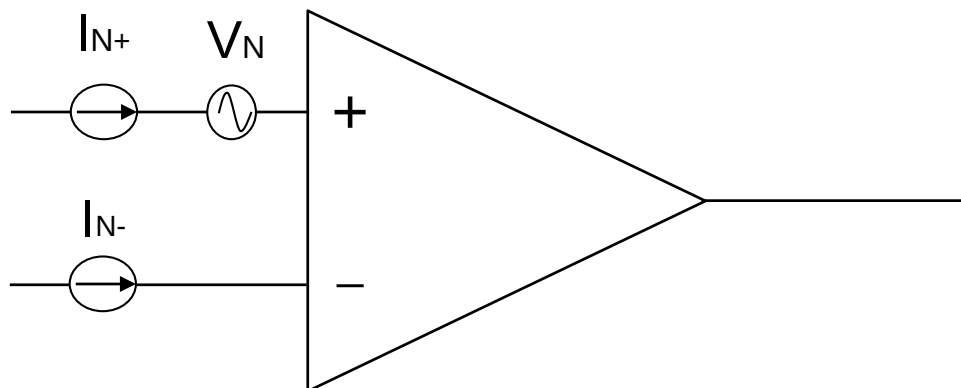
OPアンプのノイズはどのような影響を及ぼすのか？

微小な入力信号 + OPアンプのノイズ = 計測品質の低下



- ▶ ノイズはA/Dコンバータの有効ダイナミック・レンジを減少させ、非常に小さなAC信号の計測を困難にします。

電圧ノイズ (V_N)と 電流ノイズ (I_N)



- ▶ OPアンプ内部には、ノイズ源があります。
 - 電圧ノイズ
 - 反転入力での電流ノイズ
 - 非反転入力での電流ノイズ
- ▶ 電圧ノイズは、 $1/f$ ノイズと呼ばれ、低周波領域のノイズ成分を持っています。

電圧ノイズ(熱雑音 – Thermal Noise)

$$V_{noise} = \sqrt{4kTRB}$$

V_{noise} (V_{rms})

K: ボルツマン定数(1.38×10^{-23} J/K)

T: 絶対温度 = 273(K)

R: 抵抗値(Ω)

B: 帯域(Hz)

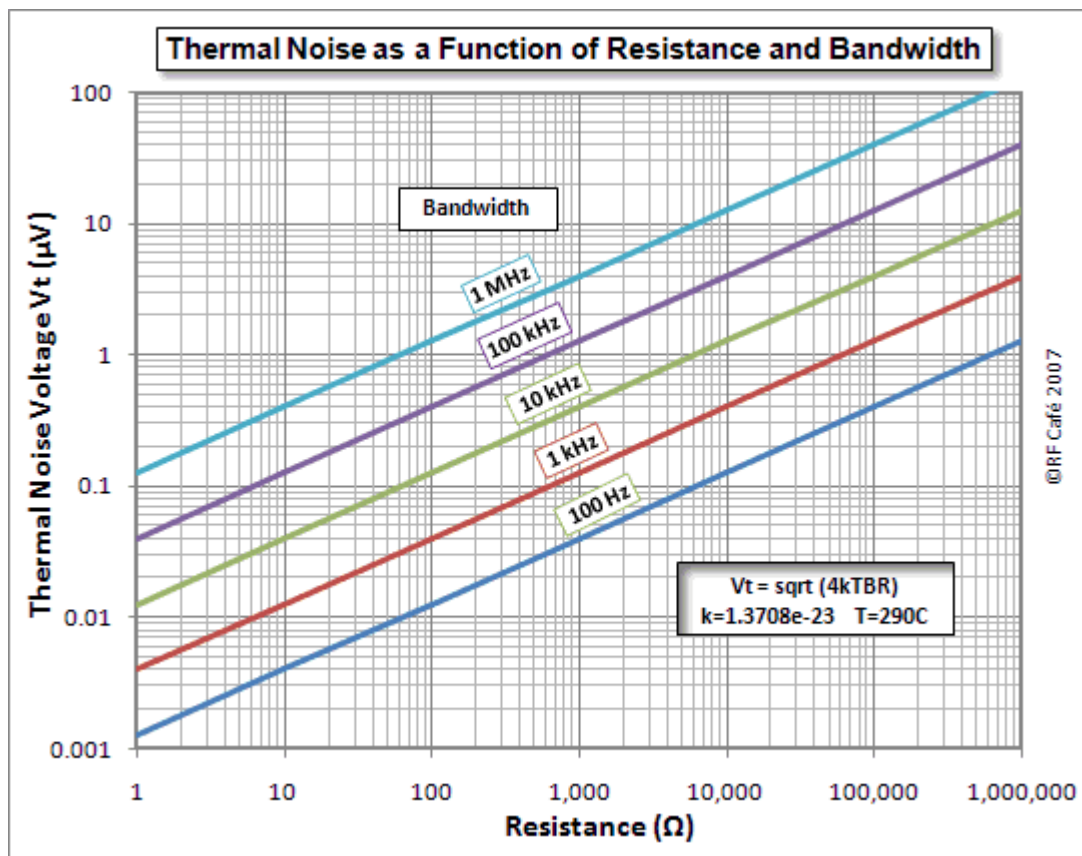
▶ 電圧ノイズ

- 抵抗器に起因する熱雑音(ジョンソンノイズ)がOPアンプの電圧ノイズです。
- 抵抗値、周波数の帯域、温度に依存します。

▶ 例 (27degC, 1kohm, 100Hz帯域)

- $V_{noise} = \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 1k \times 100} = 40.7nV_{rms}$

電圧ノイズ(熱雑音 – Thermal Noise)



電流ノイズ(ショット雑音)

$$I_{noise} = \sqrt{2qI_B B}$$

I_{noise} (Arms)

q : 電子の電荷 = 1.6×10^{-19} クーロン

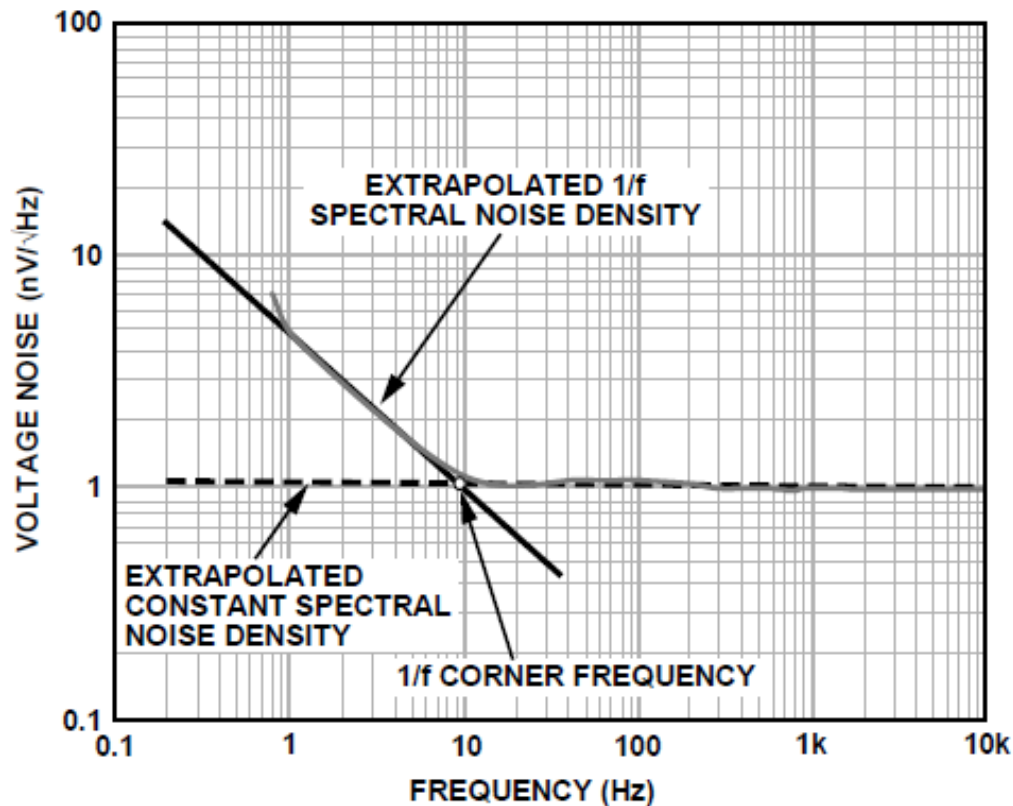
I_B : バイアス電流 (A)

B : 帯域(Hz)

▶ 電流ノイズ

- DCバイアス電流に起因するショット雑音(ショットキーノイズ)がOPアンプの電流ノイズ源となります。
- ジャンクションを通り抜けるキャリアのランダムな拡散によって生じます。

1/f (フリッカー) ノイズ



- ▶ アンプ内部の低周波領域でノイズが上昇します。これを1/fノイズ、またはフリッカーノイズと呼びます。(周波数が低下するほど大きくなる為)

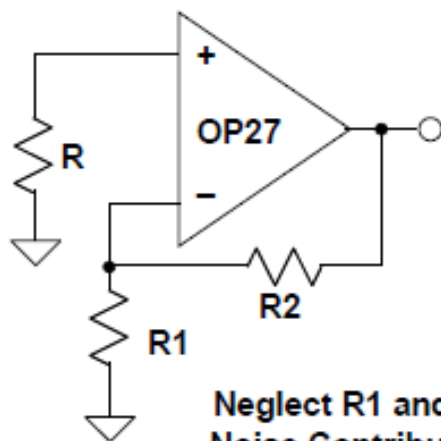
入力抵抗値変化によるノイズの変化

EXAMPLE: OP27

Voltage Noise = $3\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$

Current Noise = $1\text{pA} / \sqrt{\text{Hz}}$

T = 25°C



CONTRIBUTION FROM	VALUES OF R		
	0	3kΩ	300kΩ
AMPLIFIER VOLTAGE NOISE	3	3	3
AMPLIFIER CURRENT NOISE FLOWING IN R	0	3	300
JOHNSON NOISE OF R	0	7	70

RTI NOISE ($\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$)

Dominant Noise Source is Highlighted

- ▶ 入力抵抗が低い場合は、OPアンプのノイズが支配的になります。
- ▶ 入力抵抗が高い場合は、抵抗を流れる電流ノイズの影響が支配的になります。
 - FETアンプなどの電流ノイズが低いものを選定します。

ノイズ密度

- ▶ 熱雑音は、発生量が周波数帯域の平方根に比例するため、雑音の大きさを表す単位には、ノイズ(雑音)密度 $V/\sqrt{Hz}$ (電流の場合は、 $A/\sqrt{Hz}$)が使用されます。
- ▶ データシートの入力電圧ノイズ密度を使って計算が可能です。
- ▶ 例：入力電圧ノイズ密度= $10nV/\sqrt{Hz}$ 、Gain=100、周波数=1kHzで使用

$$V_{outnoise} = \text{雑音密度} \left(\frac{V}{\sqrt{Hz}} \right) \times \text{Noise Gain} \times \sqrt{\text{周波数(Hz)} \times \underline{1.57}}$$

雑音帯域幅係数

$$V_{outnoise} = 10nV \times 100 \times \sqrt{1kHz \times 1.57} = 39.6\mu V_{rms}$$

実効値とPeak to Peak

ADA4077-x (高精度)

NOISE PERFORMANCE

Voltage Noise

Voltage Noise Density

Current Noise Density

e_n p-p

e_n

i_n

0.1 Hz to 10 Hz

$f = 1$ Hz

$f = 100$ Hz

$f = 1000$ Hz

$f = 1$ kHz

0.25

13

7

6.9

0.2

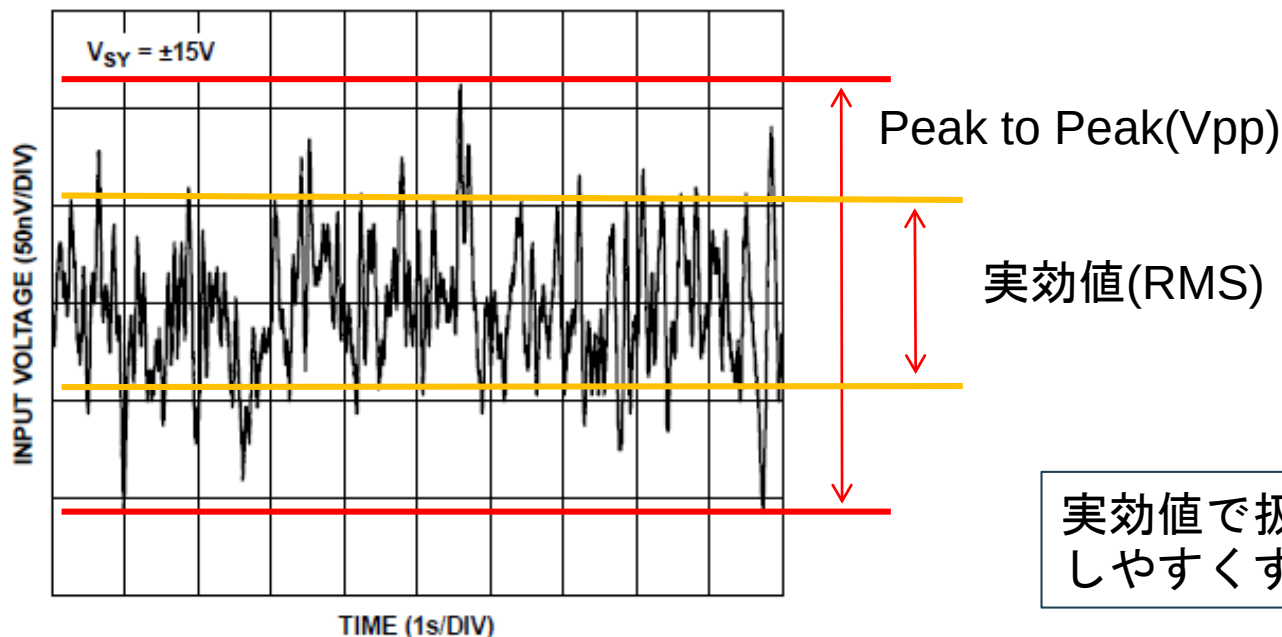
μV p-p

nV/ $\sqrt{Hz}$

nV/ $\sqrt{Hz}$

nV/ $\sqrt{Hz}$

pA/ $\sqrt{Hz}$



実効値で扱うことで、計算を
しやすくすることができます。

実効値とPeak to Peak

ガウス分布

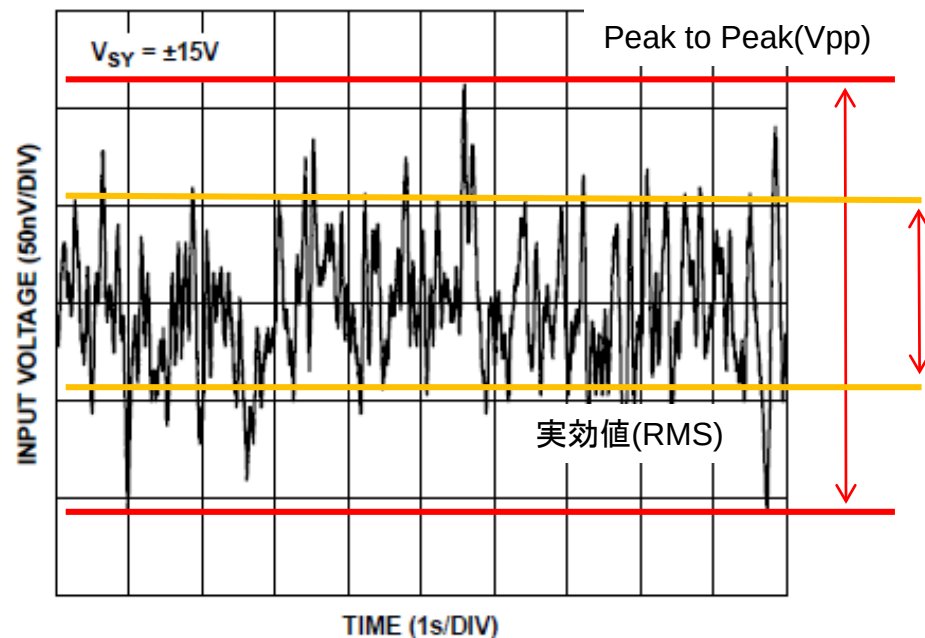
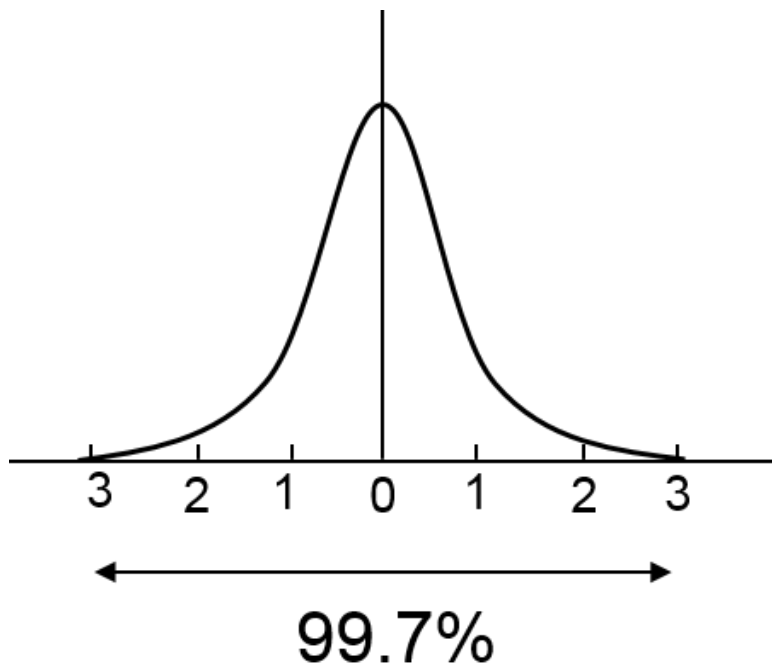
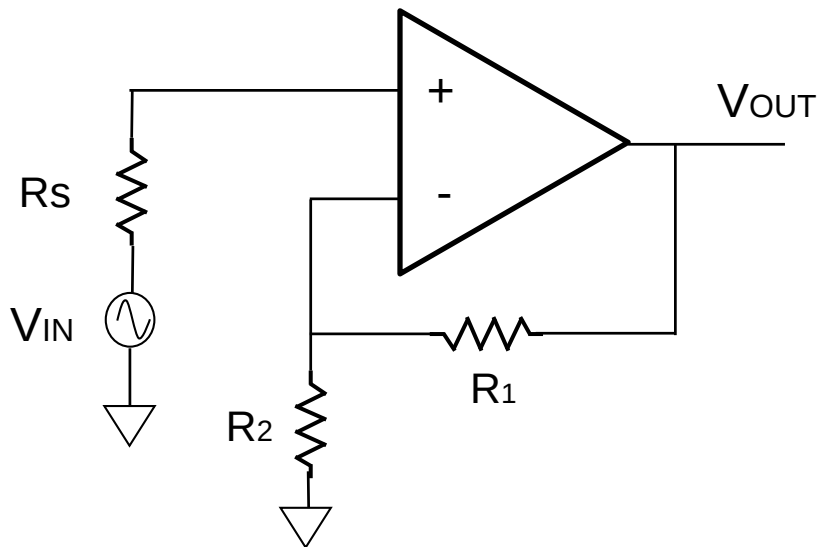


Figure 64. 0.1 Hz to 10 Hz Noise, $V_{SY} = \pm 15 V$

- ▶ 熱雑音はガウス分布となっているので、実効値(rms)の値を6.6倍(6倍)することで、Peak to Peakに換算することができます。

A/Dコンバータの特性に影響しないノイズの設計



$$V_{noise\ OUT} = G_{noise} \times V_{noise\ IN} \times BW$$

$$G_{noise}: \text{ノイズゲイン} \quad 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

$$BW: \text{雑音帯域幅} \quad (GBW \div Gain) \times \underline{1.57}$$

雑音帯域幅係数

$$V_{noise\ IN} = \sqrt{(V_{noise})^2 + (R_S \times I_{noise})^2 + (4kTR_S)^2 + (4kT(R_1//R_2))^2 + (I_{noise} \times (R_1//R_2))^2}$$

- ▶ V_{noise} : 電圧ノイズ
- ▶ $R_S \times I_{noise}$: 入力抵抗(R_S)と電流ノイズで発生するノイズ
- ▶ $4kTR_S$: 入力抵抗(R_S)のノイズ
- ▶ $4kT(R_1//R_2)$: 帰還抵抗 R_1 と R_2 のノイズ
- ▶ $I_{noise} \times (R_1//R_2)$: 帰還抵抗 R_1 と R_2 と電流ノイズで発生するノイズ

A/Dコンバータの特性に影響しないノイズの設計

$$\begin{aligned} V_{noise\ IN} &= \sqrt{(V_{noise})^2 + (R_s \times I_{noise})^2 + (4kTR_s)^2 + (4kT(R_1//R_2))^2 + (I_{noise} \times (R_1//R_2))^2} \\ &= \sqrt{(3nV)^2 + (1nV)^2 + (0.1nV)^2 + (0.2nV)^2 + (0.1nV)^2} \\ &= 3.17nV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{noise\ OUT} &= G_{noise} \times V_{noise\ IN} \times BW \\ &= 101 \times 3.17nV \times \sqrt{47.1kHz} \\ &= 69.5\mu V_{rms} \quad = 458.7\mu V_{pp} \end{aligned}$$

V_{noise}	:3nV
$R_s \times I_{noise}$	:1nV
$4kTR_s$	:0.1nV
$4kT(R_1//R_2)$	:0.2nV
$I_{noise} \times (R_1//R_2)$	:0.1nV
G_{noise}	: 101
BW	: 47.1kHz

- ▶ 12bit の1LSB(5V FS) : 1.22mV
- ▶ 13bitの1LSB(5V FS) : 610.4uV
- ▶ 14bitの1LSB(5V FS) : 305.1uV
- ▶ このOPアンプの回路のノイズは、13bit以上の有効分解能があるADCに対して、特性に影響があることが計算できます。

参考文献

- ▶ トランジスタ技術SPECIAL NO.41 宮崎仁著 : CQ出版社
- ▶ 計測の為のアナログ回路設計 遠坂俊明著 : CQ出版社
- ▶ 定本 OPアンプ回路の設計 岡村廸夫著 : CQ出版社
- ▶ トランジスタの料理法 柴田肇著 : CQ出版社
- ▶ 合点!電子回路超入門 石井聡著 : CQ出版社
- ▶ トランジスタ技術2014年8月(P94～) 小川一郎著 : CQ出版社
- ▶ Op Amp Application Handbook Walt Jung : Analog Devices Inc.
- ▶ The art of electronics Horowitz and Hill : CAMBRIDGE

- ▶ Analog Devices Application note
 - AN-940 Paul LeeLow Noise Amplifier Selection Guide for Optimal Noise Performance
- ▶ ADA4077 - Datasheet



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Appendix

OPアンプのカテゴリーと特長

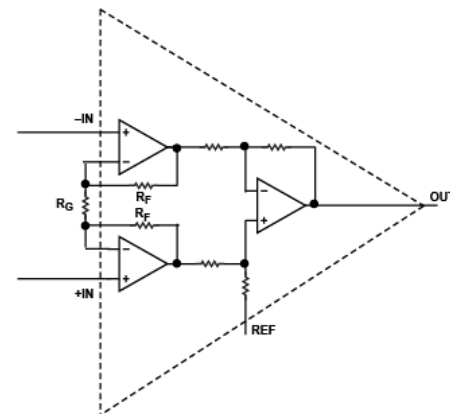
カテゴリー	特長	主なアプリケーション	製品例
高精度	- 低オフセット - 低オフセットドリフト	温度、圧力、電圧、電流計測	ADA4077
低バイアス電流	- 低バイアス - 高入力インピーダンス	光、高インピーダンスセンサー	ADA4627/37
低ノイズ	- 低ノイズ - 低ひずみ	オーディオ、微小信号	ADA4004
高速	- 高GBW - 高スルーレート	ビデオ、通信、高速動作	ADA4817
単一電源	- 低消費電流 - レールtoレール - 低価格	電池駆動、携帯機器	ADA4692

注: 一般的な例です。

特殊なOPアンプ – 計装アンプ(In-amp)

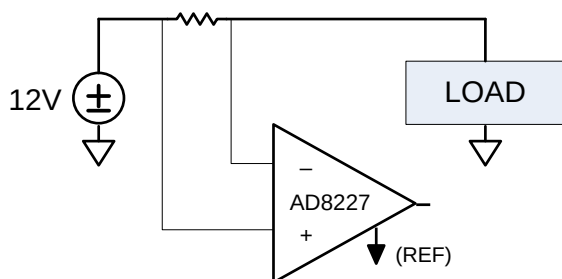
▶ 計装アンプ

- 微小な差動信号を高インピーダンスで受けるOPアンプ
- 差動信号ラインに乗る不要な同相ノイズを除去
 - 高入力インピーダンス
 - 高Gain
 - 高CMRR(コモンモードノイズ除去比)

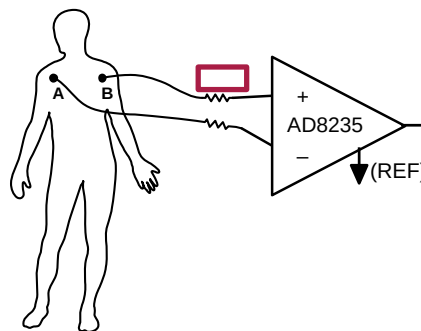


計装アンプの内部構成例

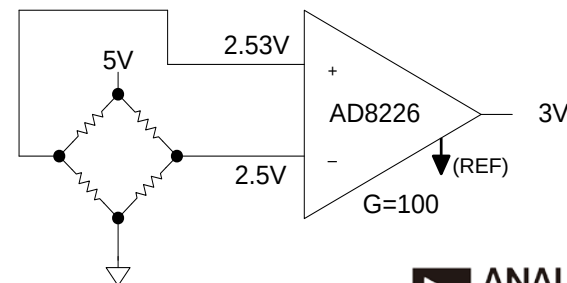
電流の計測



生体信号の計測



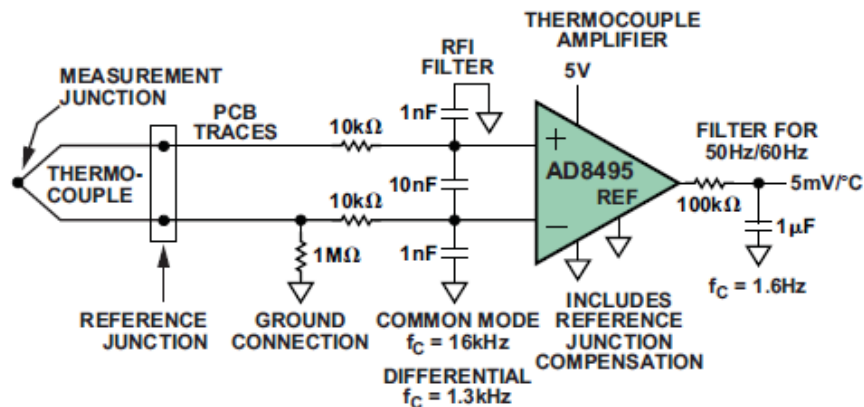
重量、圧力などの計測



特殊なOPアンプ – その他

▶ 熱電対アンプ

▶ 熱電対専用の計装アンプ



▶ ADCドライバアンプ

- ▶ 高精度、高速ADCをドライブする専用アンプ
- ▶ 低ノイズ、低歪み

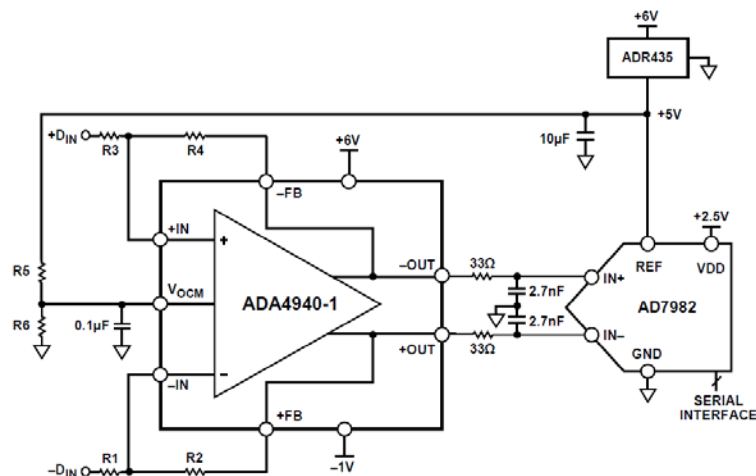


Figure 73. ADA4940-1 (LFCSP) Driving the AD7982 ADC

▶ 電流センスアンプ

- ▶ 電流検出専用の差動アンプ
- ▶ 高いCMRR、高い耐圧

