



TOSHIBA

オペアンプの基礎と応用例

～エナジーハーベスティングとIoTセンシング向け回路のご紹介～

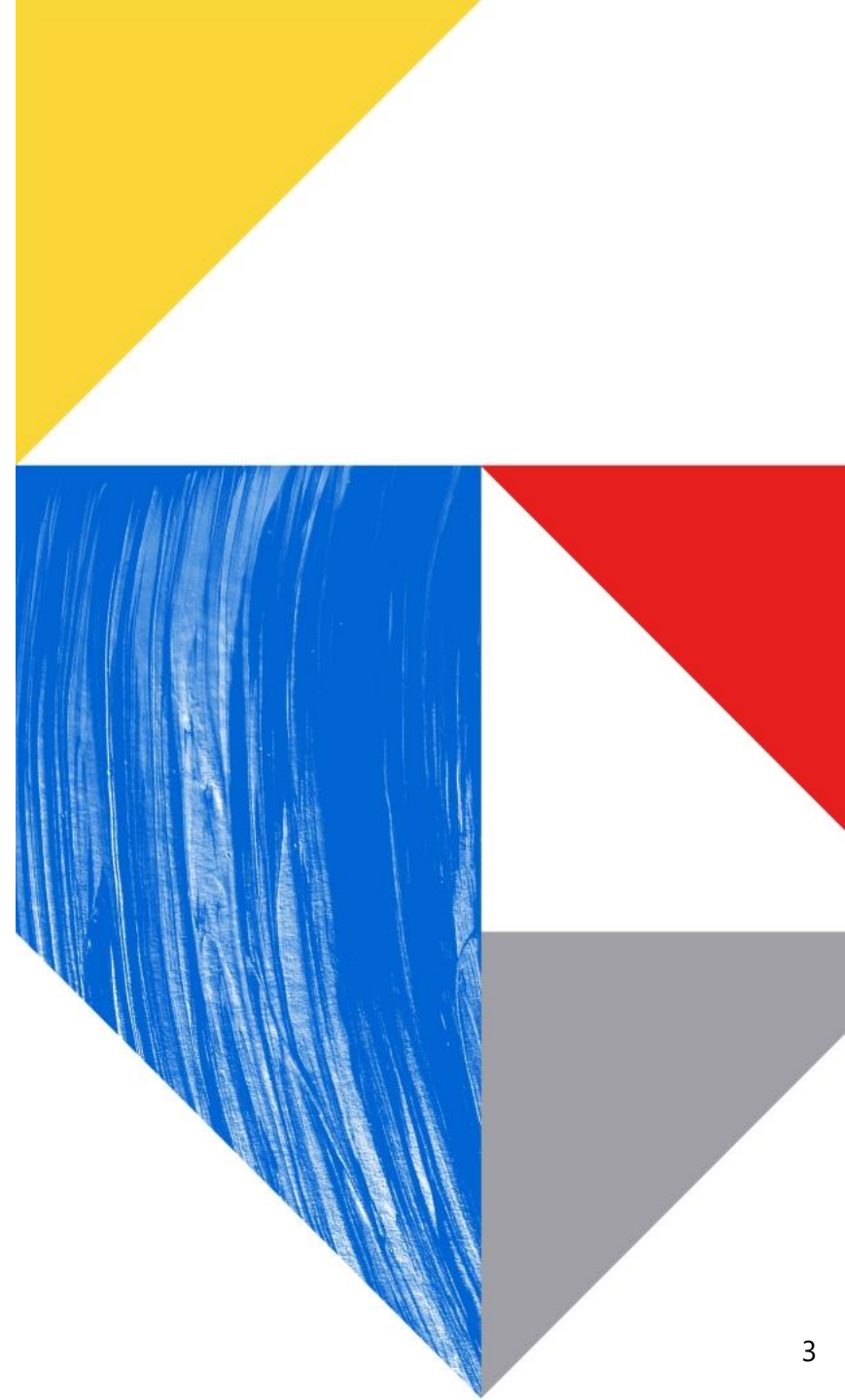
東芝デバイス&ストレージ株式会社
半導体応用技術センター
モバイル・マルチマーケット応用技術部

Contents

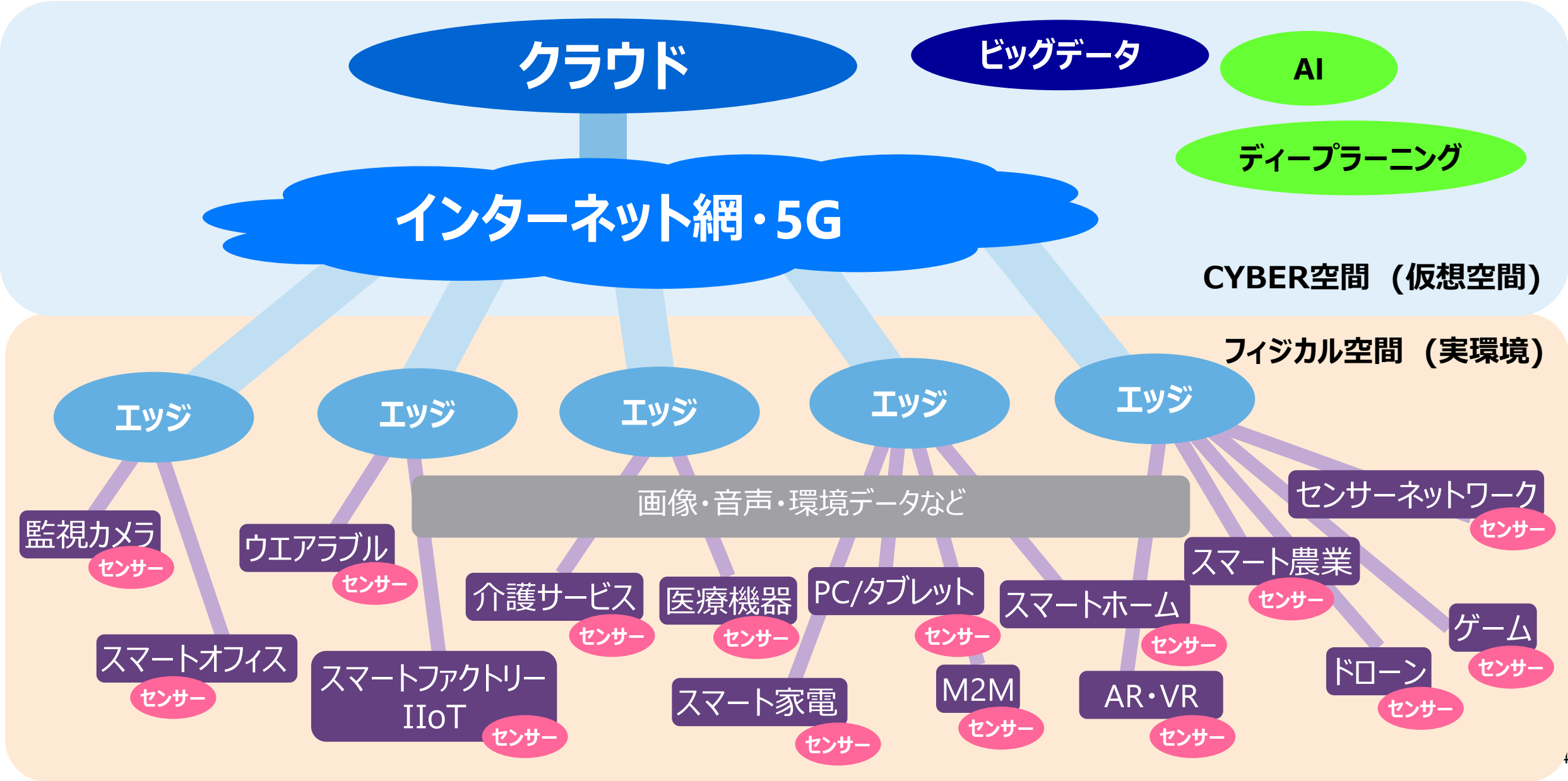
- 01 IoTセンシングの課題とオペアンプの重要性
- 02 オペアンプの基礎
- 03 低消費電力オペアンプを活用した、
エナジーハーベスティング・IoTセンシング回路の応用例
・リファレンス回路のご紹介
- 04 高速コンパレータ開発品のご紹介
- 05 各種サポートコンテンツのご紹介

01

IoTセンシングの課題とオペアンプの重要性

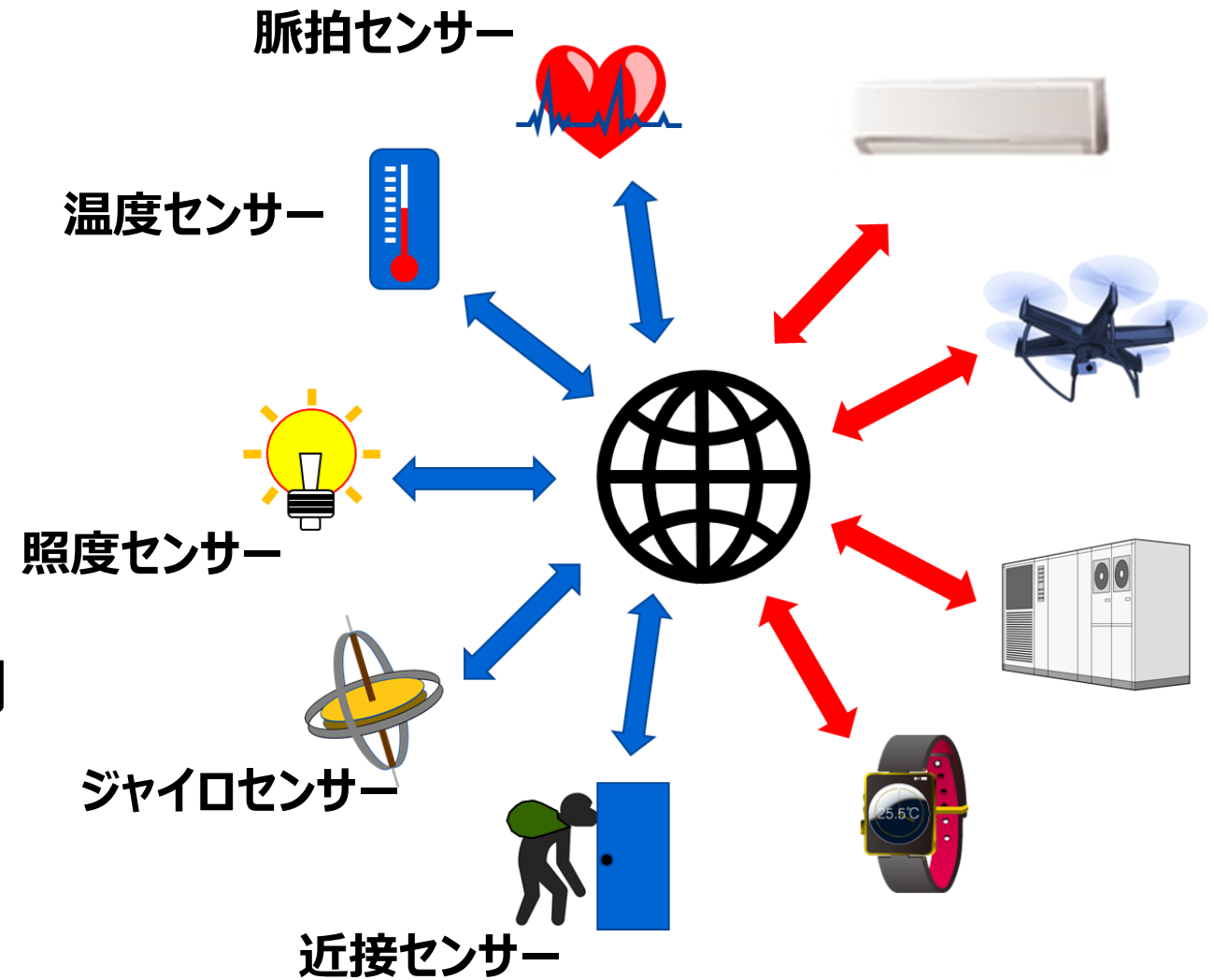


IoT(Internet of Things) - CPS(サイバーフィジカル) Society5.0



センサーと電子機器はIoTでつながる

- ・IoT市場の拡大
- ・携帯機器の多機能化
- ・センサーの情報を
多くのIoTデバイスから
インターネットで収集して
ビッグデータ・AI・ディープラーニングへ活用



IoT市場の拡大により、センサー需要も拡大

IoTに繋がる製品とセンサー

- ・スマートフォン、スマートウォッチ



使用されるセンサー

センサー	方式	センサーがとらえる物理量
照度センサー	フォトセンサー	電流
脈拍センサー	光電脈波法	光
角速度センサー	ジャイロ	容量（電荷）

IoTに繋がる製品とセンサー

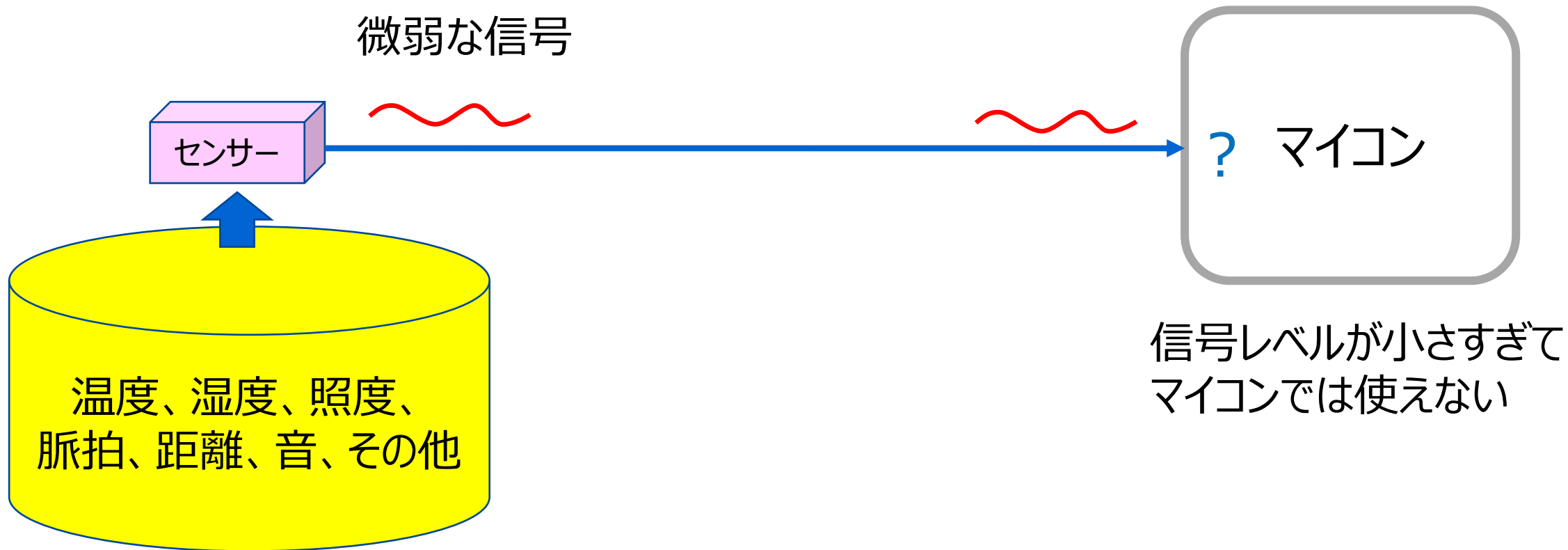
- ・エアコン、空調機器、空気清浄機



使用されるセンサー

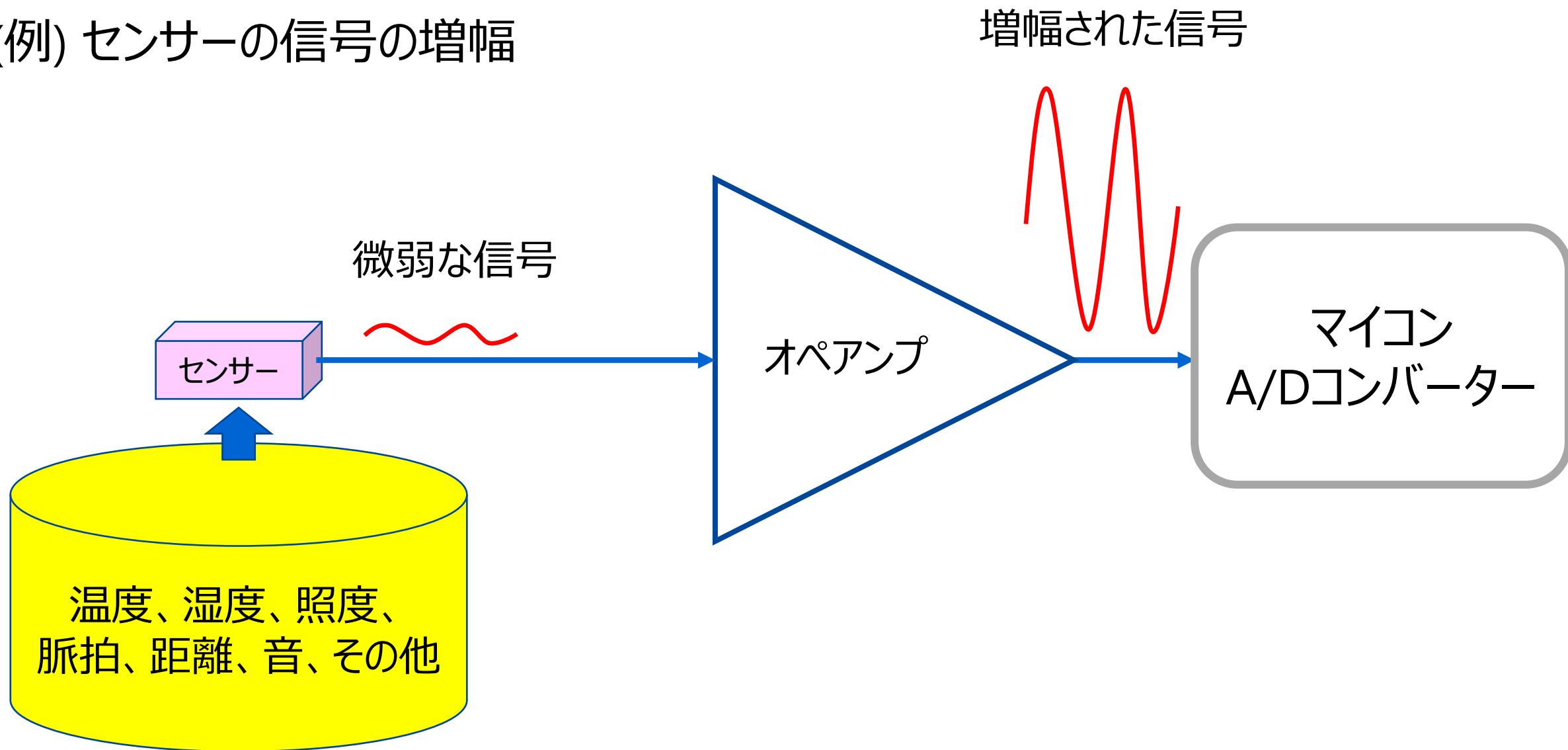
センサー	方式	センサーがとらえる物理量
温度センサー	サーミスター	抵抗
湿度センサー	静電容量 電気抵抗	容量 抵抗
ダストセンサー	フォトダイオード	光

センサーの信号はそのまま使えない

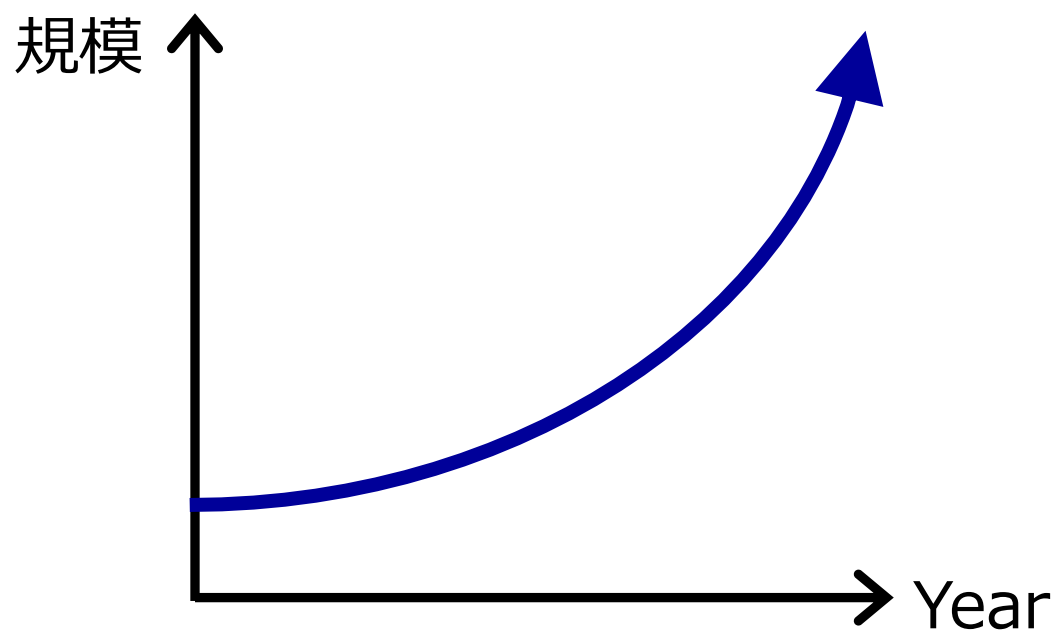


オペアンプで信号を増幅する必要がある

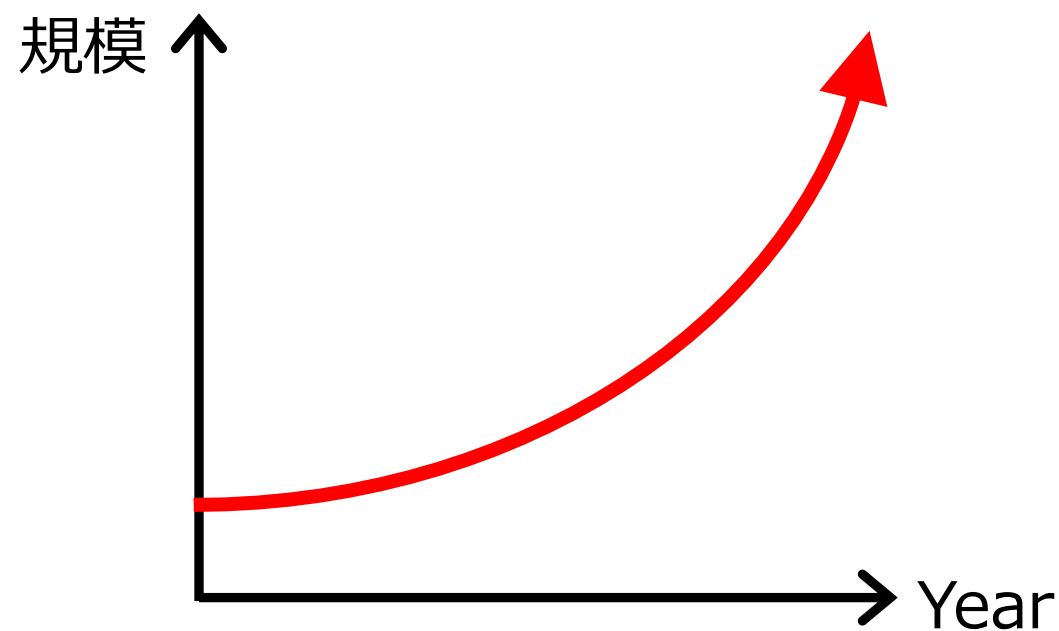
(例) センサーの信号の増幅



センサー需要



オペアンプ市場



センサー需要の拡大とともにオペアンプの市場は拡大

IoTセンサー信号の増幅時の問題点 と 解決方法

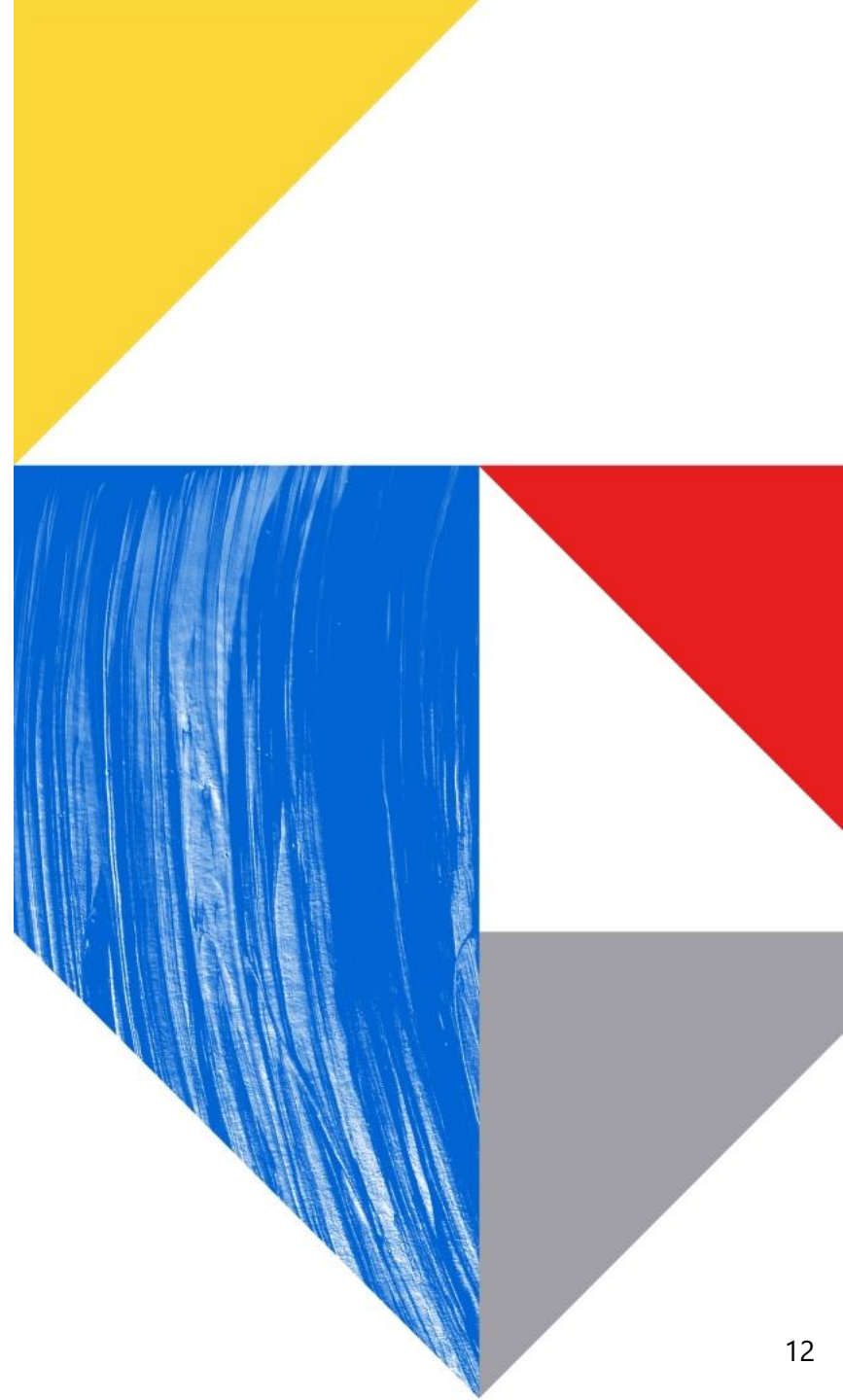
IoT向けのセンシング回路には、下記の問題点があります。

1. 微弱なセンサー信号を増幅したい。
2. センサーの信号を増幅する回路を簡単に設計したい。
3. できるだけ誤差無く、センサーの信号を増幅したい。

これらの問題を解決するのが、オペアンプです。

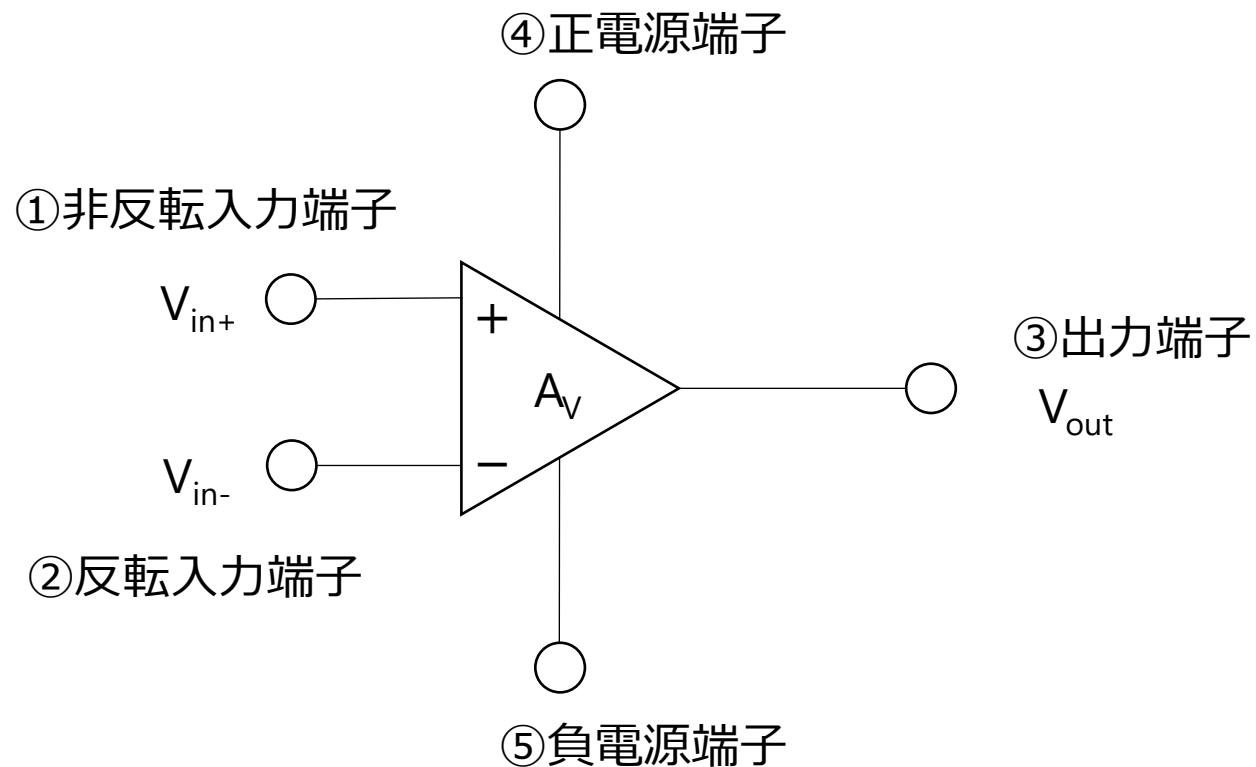
02

オペアンプの基礎



オペアンプの基礎（オペアンプとは）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

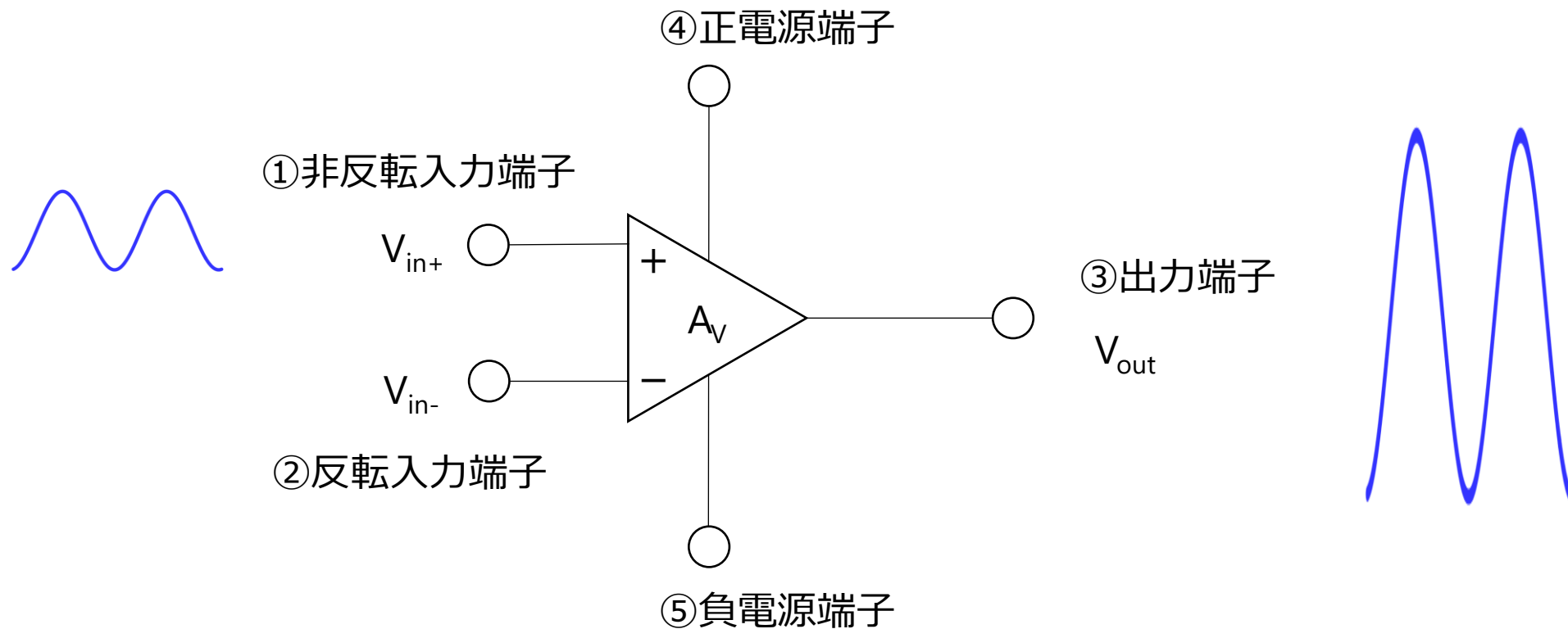


イメージ図

$$V_{out} = A_v \times \{ V_{in+} - V_{in-} \}$$

オペアンプの基礎（オペアンプとは）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

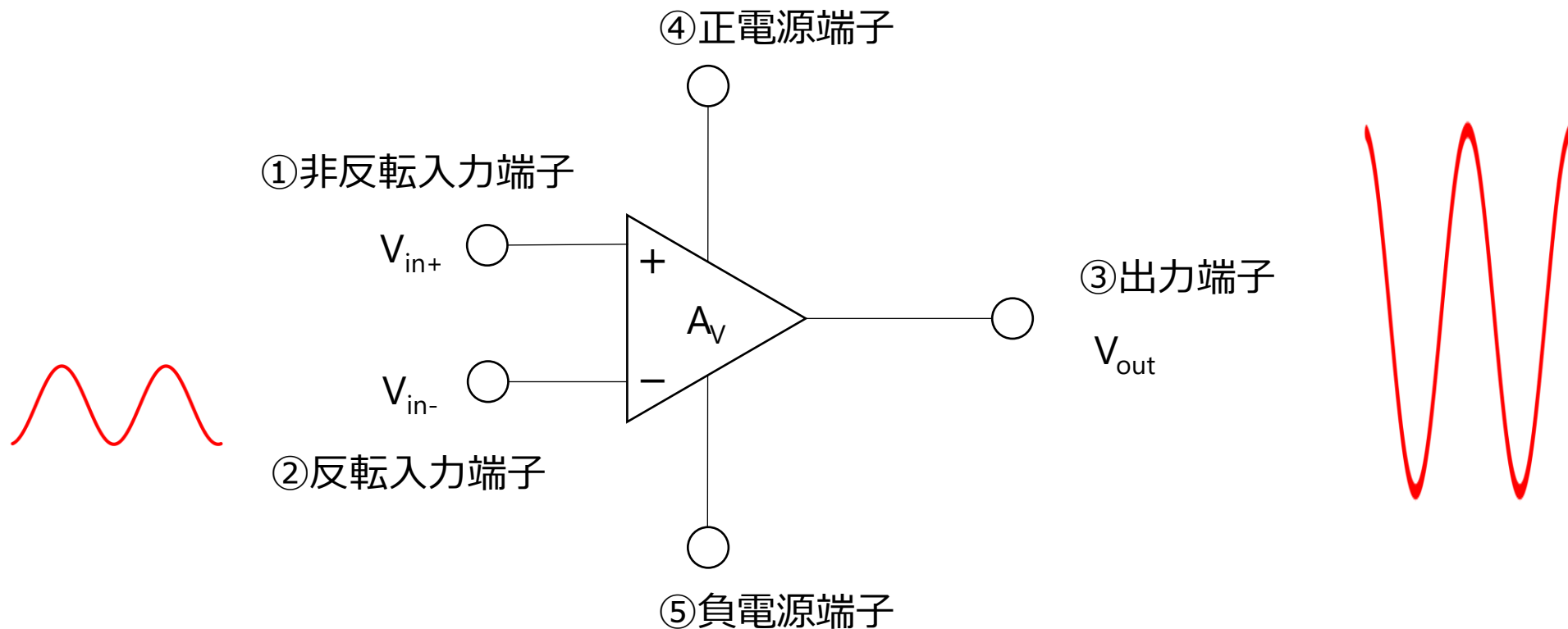


イメージ図

$$V_{out} = A_v \times \{ V_{in+} - V_{in-} \}$$

オペアンプの基礎（オペアンプとは）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

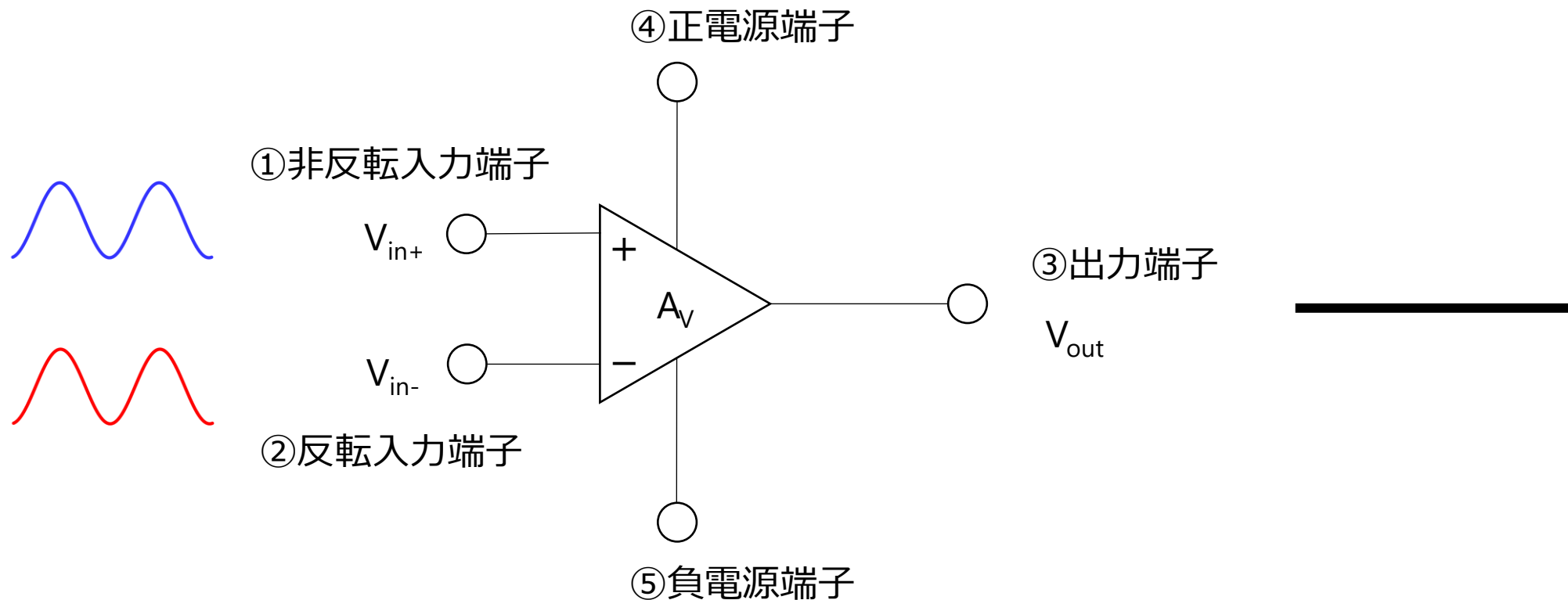


イメージ図

$$V_{out} = A_v \times \{ V_{in+} - V_{in-} \}$$

オペアンプの基礎（オペアンプとは）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

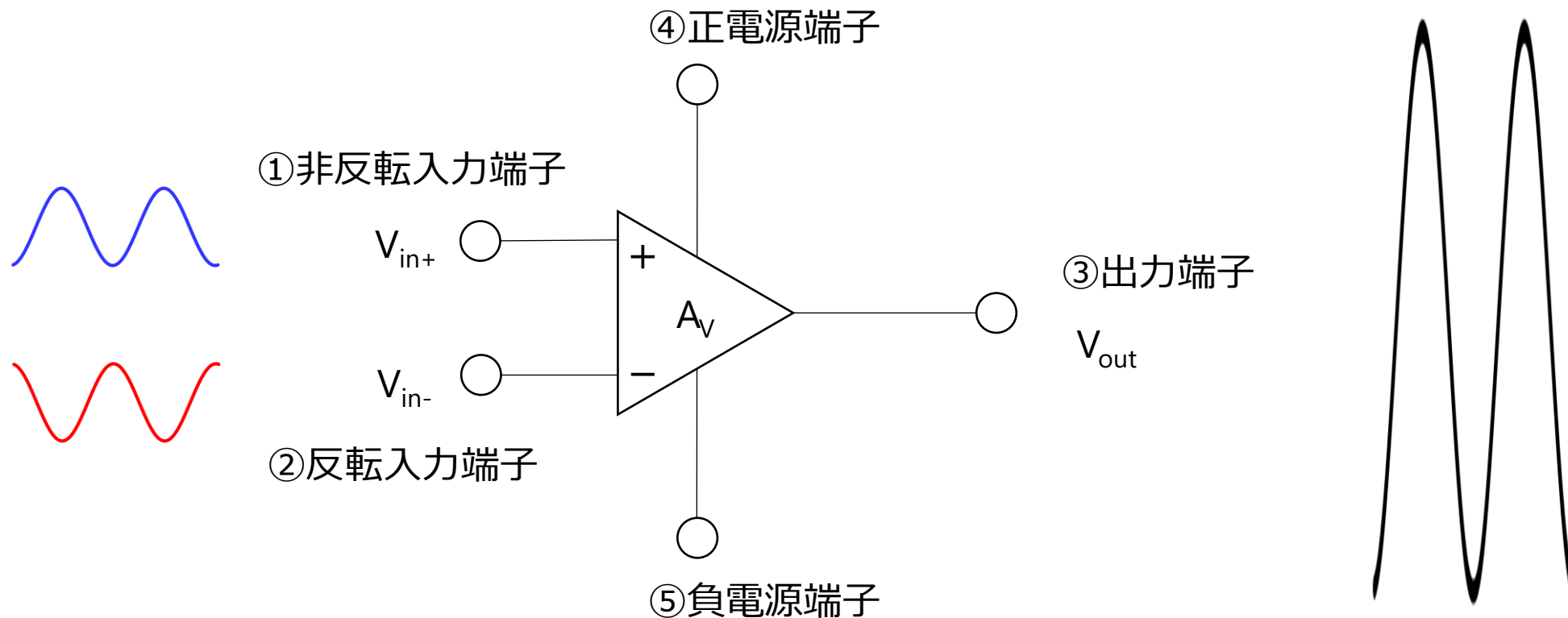


イメージ図

$$V_{out} = A_v \times \{ V_{in+} - V_{in-} \}$$

オペアンプの基礎（オペアンプとは）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

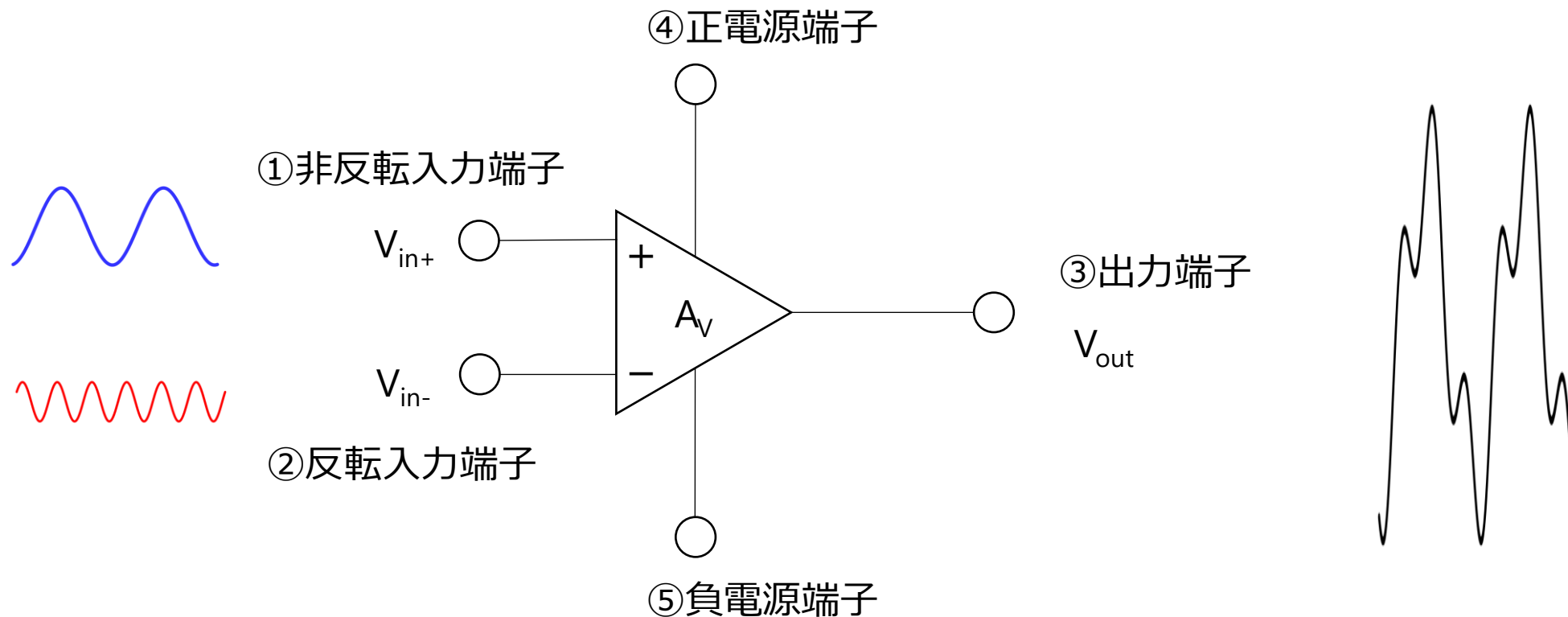


イメージ図

$$V_{out} = A_v \times \{ V_{in+} - V_{in-} \}$$

オペアンプの基礎（オペアンプとは）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器



イメージ図

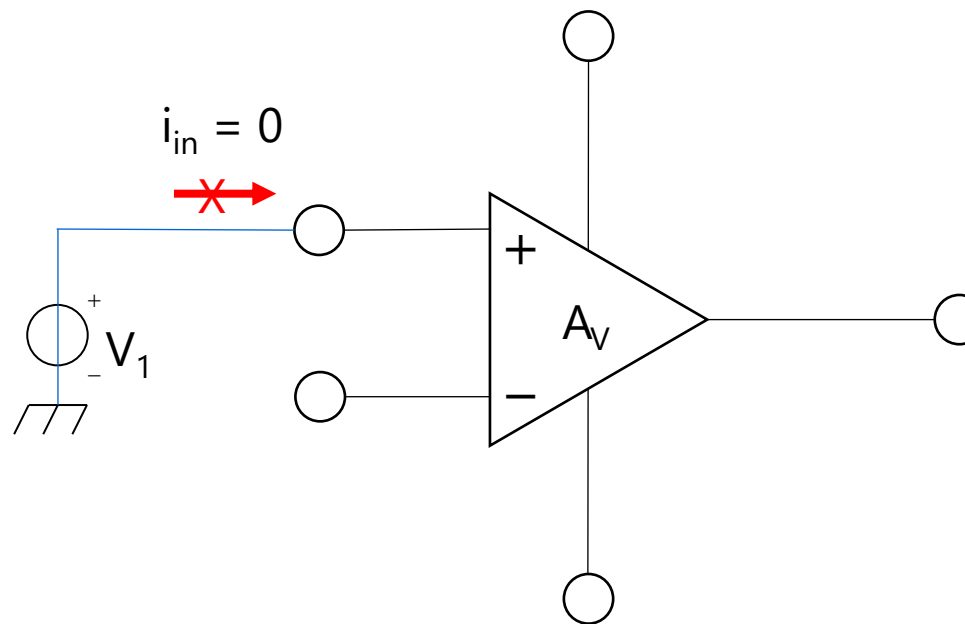
$$V_{out} = A_v \times \{ V_{in+} - V_{in-} \}$$

オペアンプの基礎（理想オペアンプ）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② 開ループ出力インピーダンスがゼロ
- ③ 開ループゲインが無限大
- ④ 周波数帯域が無限大
- ⑤ 入力オフセット電圧がゼロ
- ⑥ 内部雑音がゼロ



入力インピーダンス $\hat{=}$ “入力抵抗”

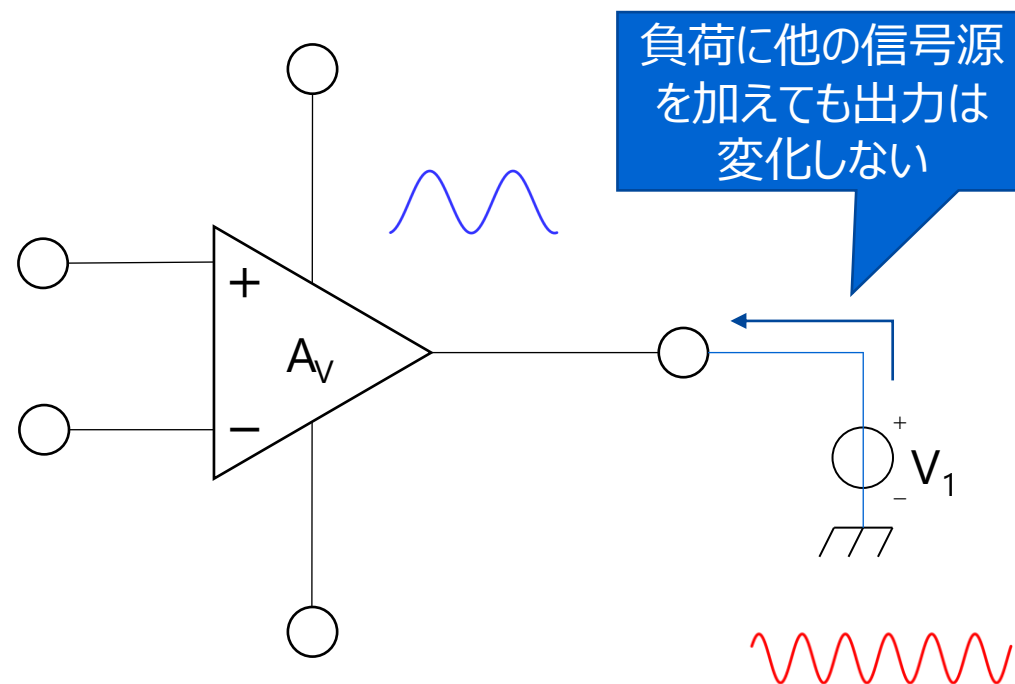
イメージ図

オペアンプの基礎（理想オペアンプ）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② **開ループ出力インピーダンスがゼロ**
- ③ 開ループゲインが無限大
- ④ 周波数帯域が無限大
- ⑤ 入力オフセット電圧がゼロ
- ⑥ 内部雑音がゼロ



出力インピーダンス $\hat{=}$ “出力抵抗”

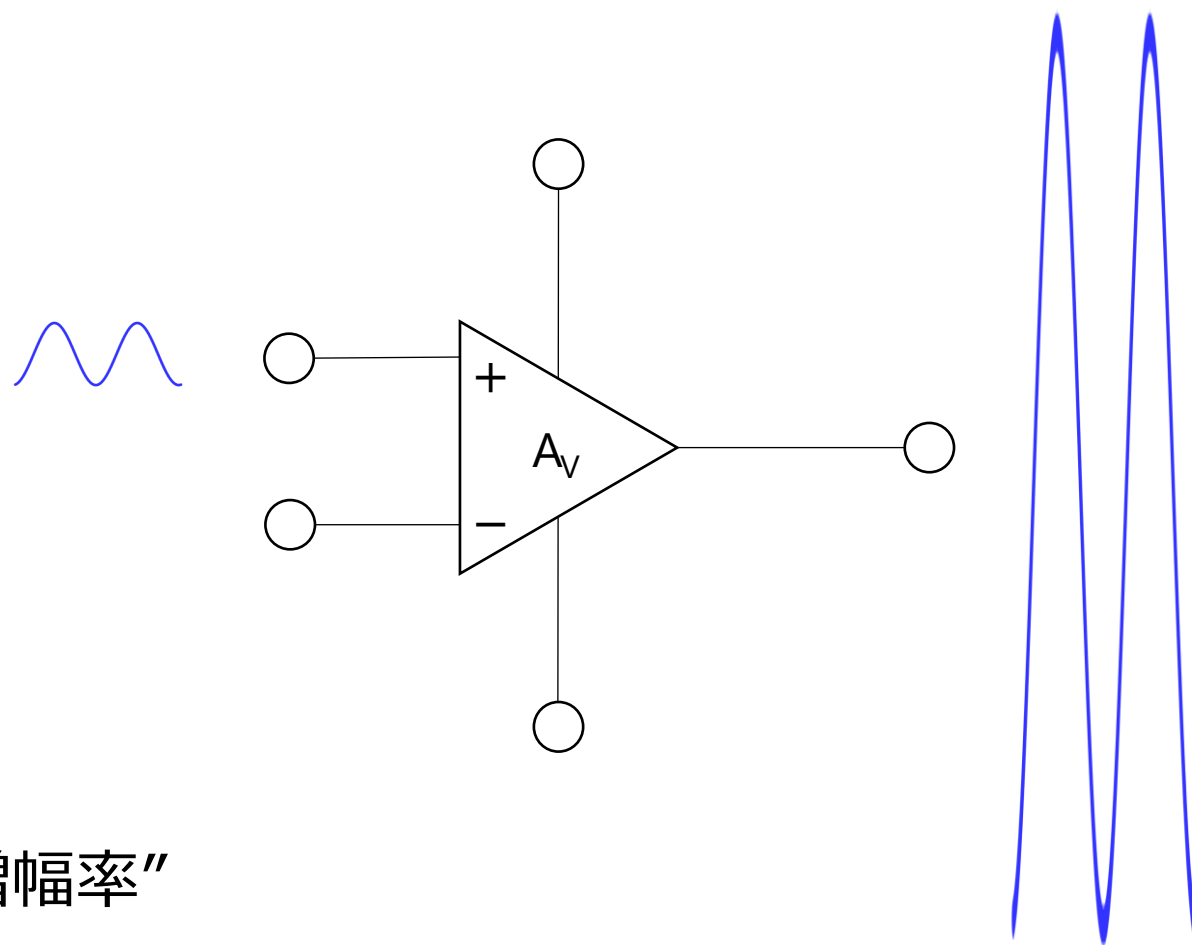
イメージ図

オペアンプの基礎（理想オペアンプ）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② 開ループ出力インピーダンスがゼロ
- ③ 開ループゲインが無限大**
- ④ 周波数帯域が無限大
- ⑤ 入力オフセット電圧がゼロ
- ⑥ 内部雑音がゼロ



開ループゲイン $\hat{=}$ “増幅率”

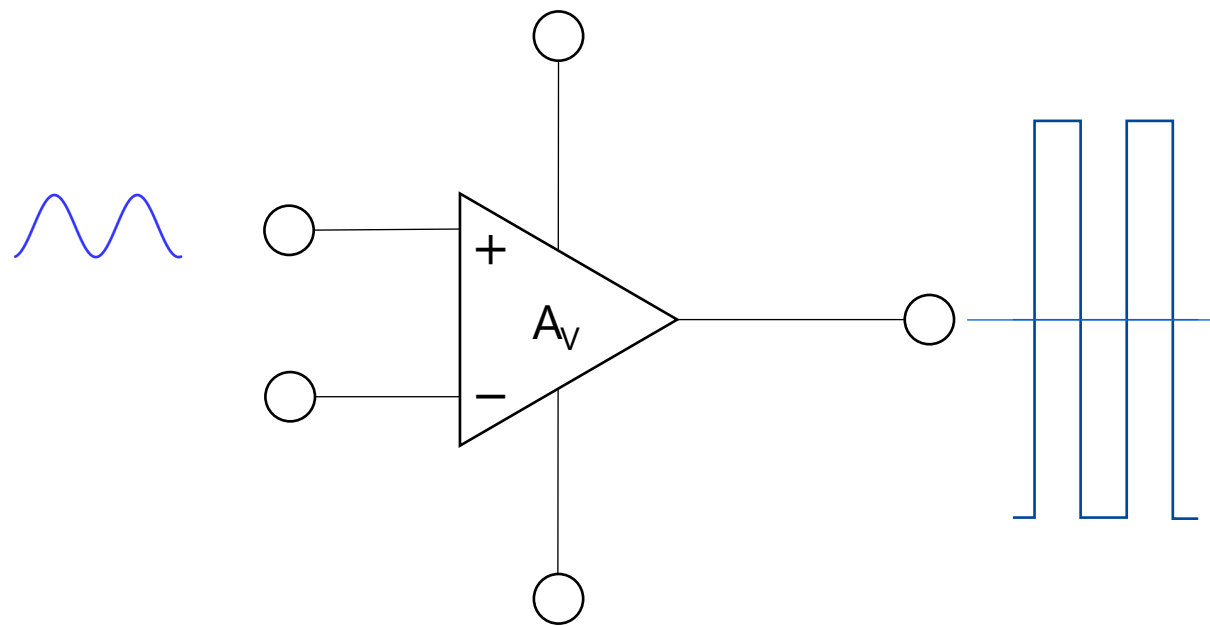
イメージ図

オペアンプの基礎（理想オペアンプ）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② 開ループ出力インピーダンスがゼロ
- ③ 開ループゲインが無限大**
- ④ 周波数帯域が無限大
- ⑤ 入力オフセット電圧がゼロ
- ⑥ 内部雑音がゼロ



開ループゲイン \equiv “増幅率”

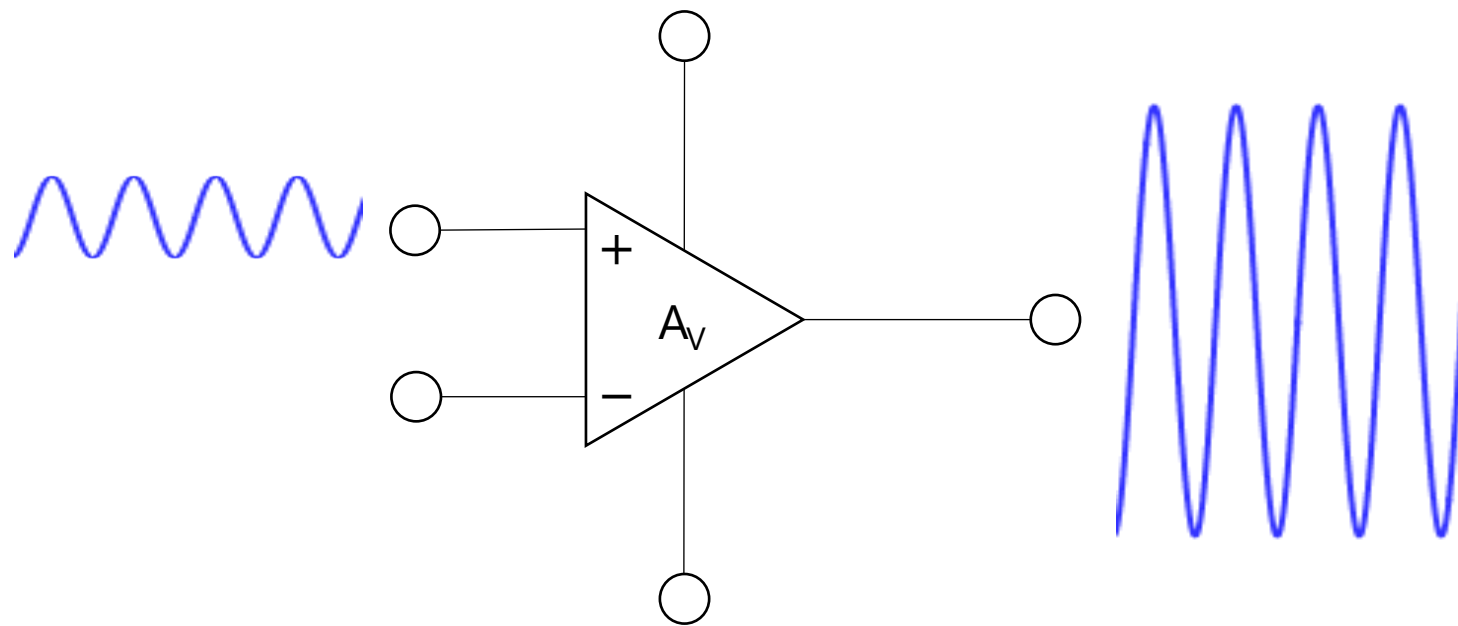
イメージ図

オペアンプの基礎（理想オペアンプ）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の2つの入力端子間の差電圧をゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② 開ループ出力インピーダンスがゼロ
- ③ 開ループゲインが無限大
- ④ 周波数帯域が無限大**
- ⑤ 入力オフセット電圧がゼロ
- ⑥ 内部雑音がゼロ



何Hzの周波数の信号まで増幅できるか？

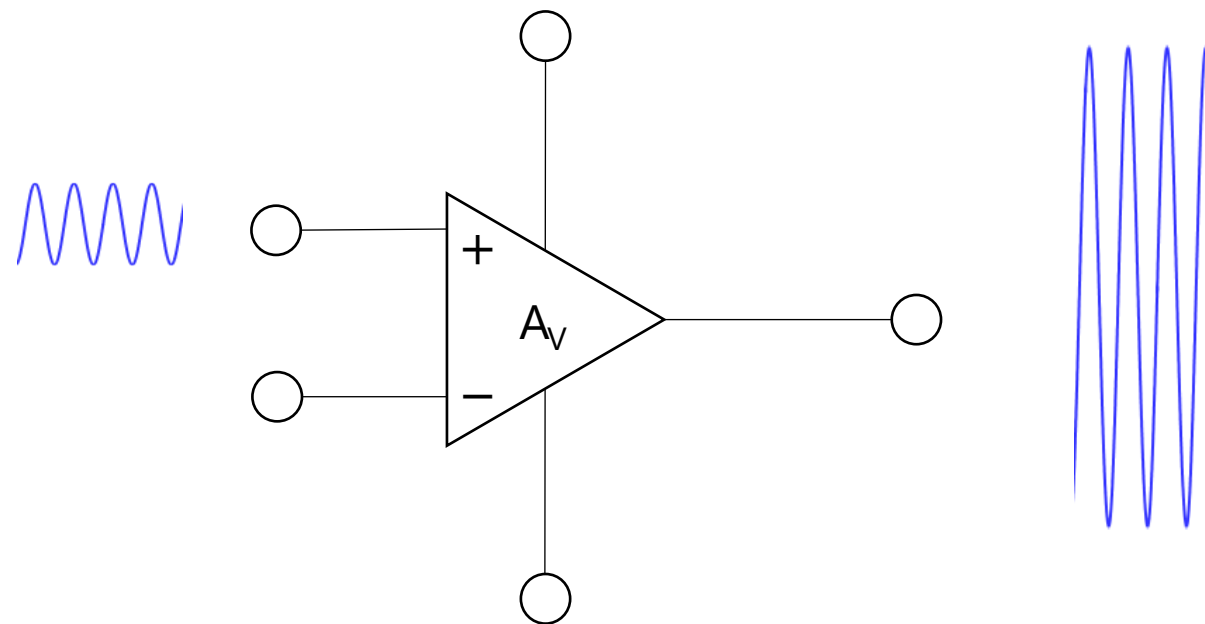
イメージ図

オペアンプの基礎（理想オペアンプ）

非反転入力端子 V_{in+} と反転入力端子 V_{in-} の 2 つの入力端子間の差電圧を ゲイン A_v 倍して出力する差動増幅器

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② 開ループ出力インピーダンスがゼロ
- ③ 開ループゲインが無限大
- ④ **周波数帯域が無限大**
- ⑤ **入力オフセット電圧がゼロ**
- ⑥ **内部雑音がゼロ**



何Hzの周波数の信号まで増幅できるか？

イメージ図

理想オペアンプ

- ① 入力インピーダンスが無限大
- ② 開ループ出力インピーダンスがゼロ
- ③ 開ループゲインが無限大
- ④ 周波数帯域が無限大
- ⑤ 入力オフセット電圧がゼロ
- ⑥ 内部雑音がゼロ



実際のオペアンプ

- ① 非常に高いが有限
- ② 数十 Ω オーダー
- ③ $A_V = 10^4$ から 10^5 オーダー
- ④ $f_T =$ 数100kHzから数10MHzオーダー
- ⑤ $V_{IO} =$ 数mVオーダー
- ⑥ $V_{NI} =$ 数nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ から数10nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ オーダー
(熱雑音領域)

オペアンプの基礎（実際のオペアンプ・ゲインと周波数特性）

["開ループゲイン" と "周波数特性"]

実際のオペアンプで、まず気を付けなければならないのが、以下の2点です。

③開ループゲイン

DC 特性 (VDD = 2.5 V, VSS = GND, Ta = 25°C)

項 目	記 号	測定回路	測 定 条 件	最小	標準	最大	単位
電 圧 利 得 (開 ル ー プ)	Gv	-	-	80	100	-	dB

(注)当社製品TC75S67TUのデータシートに基づく

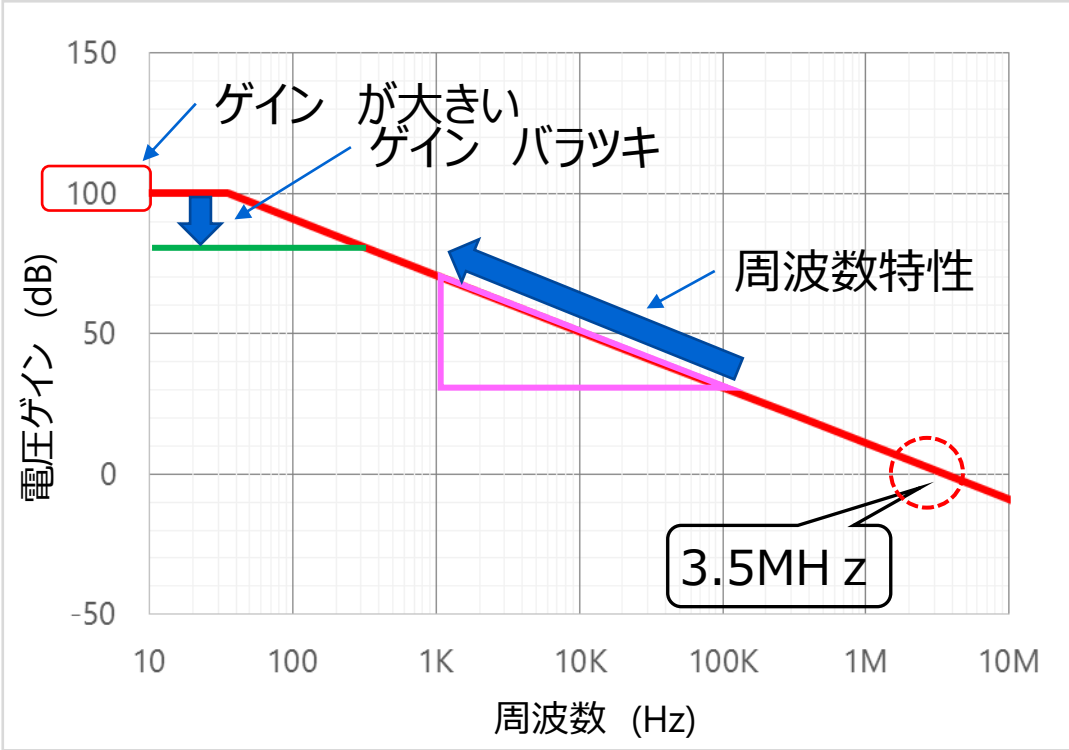
10,000倍 100,000倍

④周波数帯域

AC 特性 (VDD = 2.5 V, VSS = GND, Ta = 25°C)

項 目	記 号	測定回路	測 定 条 件	最小	標準	最大	単位
し や 断 周 波 数	fT	9	-	3.0	3.5	-	MHz

(注)当社製品TC75S67TUのデータシートに基づく

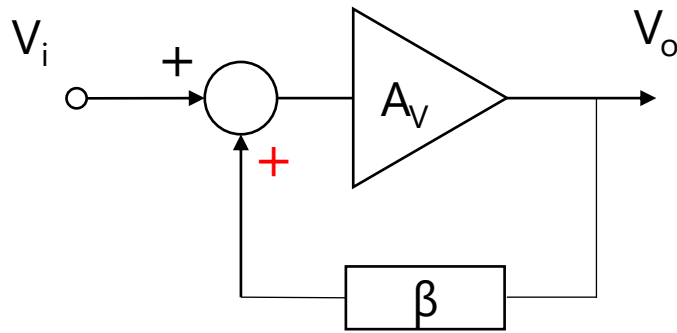


周波数特性の傾き・・・

-20dB/dec(周波数が10倍で利得が1/10)
⇒同じ意味：-6db/oct(周波数が2倍で利得が1/2)

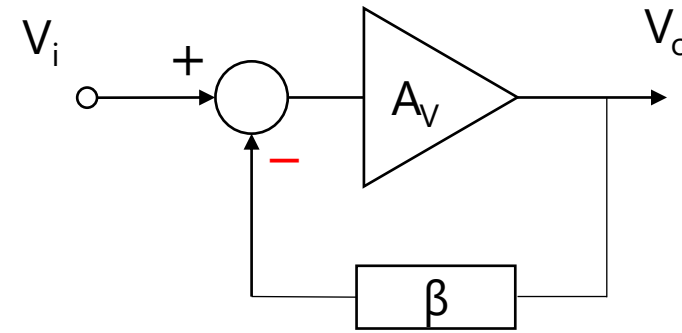
オペアンプの基礎（正帰還 と 負帰還）

“正帰還”と“負帰還”のブロック図



正帰還

$$V_o / V_i = A_V / (1 - A_V \times \beta)$$

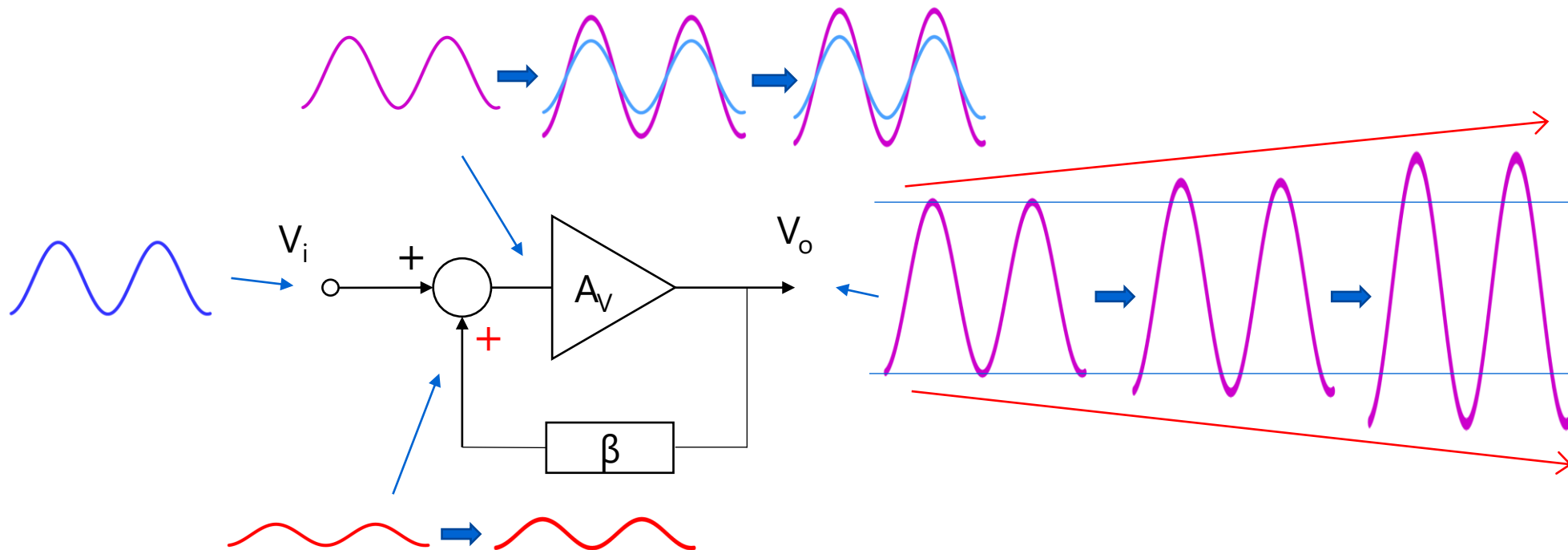


負帰還

$$V_o / V_i = A_V / (1 + A_V \times \beta)$$

オペアンプの基礎（正帰還）

正帰還の動作

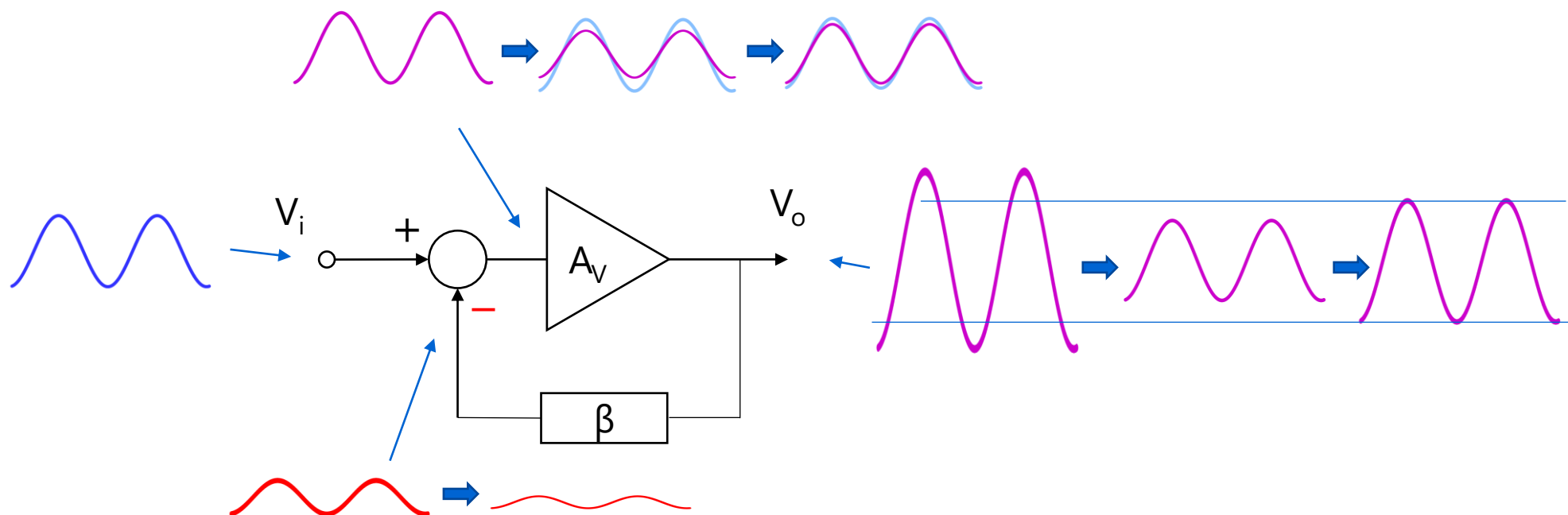


正帰還

$$V_o / V_i = A_v / (1 - A_v \times \beta)$$

オペアンプの基礎（負帰還）

負帰還の動作



負帰還

$$V_o / V_i = A_V / (1 + A_V \times \beta) \div 1 / \beta \quad (\text{ただし、} A_V \gg \beta \text{とする})$$

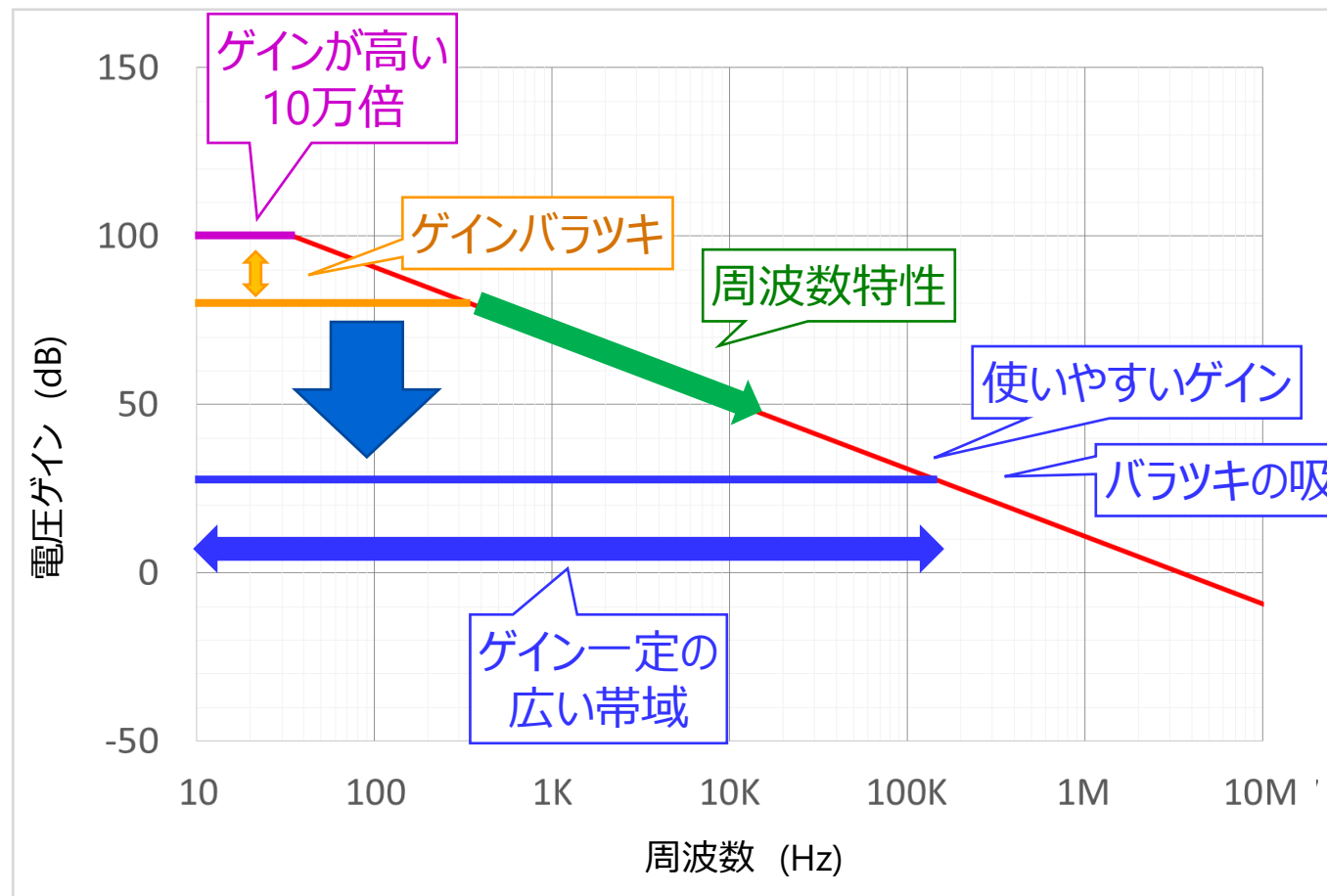
オペアンプの基礎 (負帰還のメリット)

オペアンプの回路で 負帰還をかけるメリット

周波数特性の傾き・・・

-20dB/dec(周波数が10倍で利得が1/10)

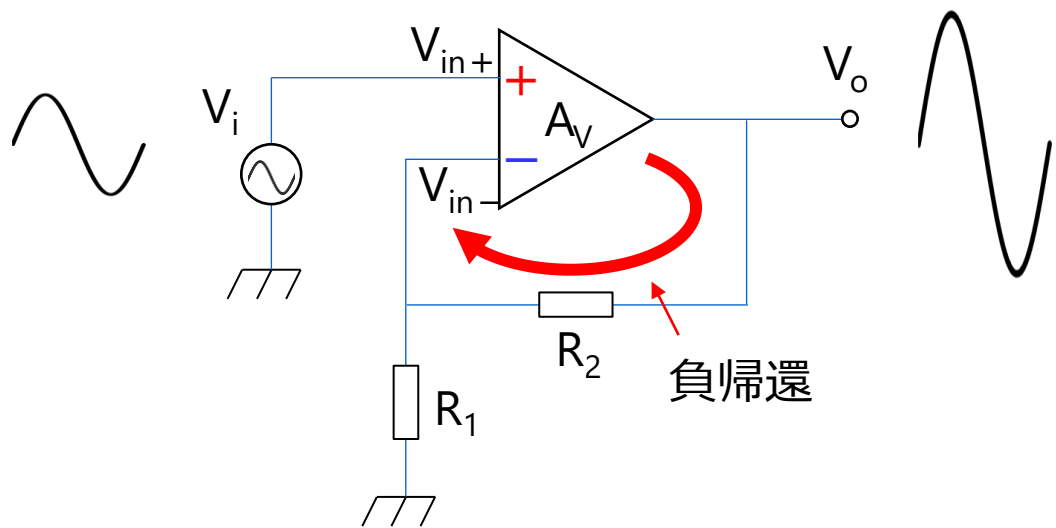
⇒同じ意味：-6db/oct(周波数が2倍で利得が1/2)



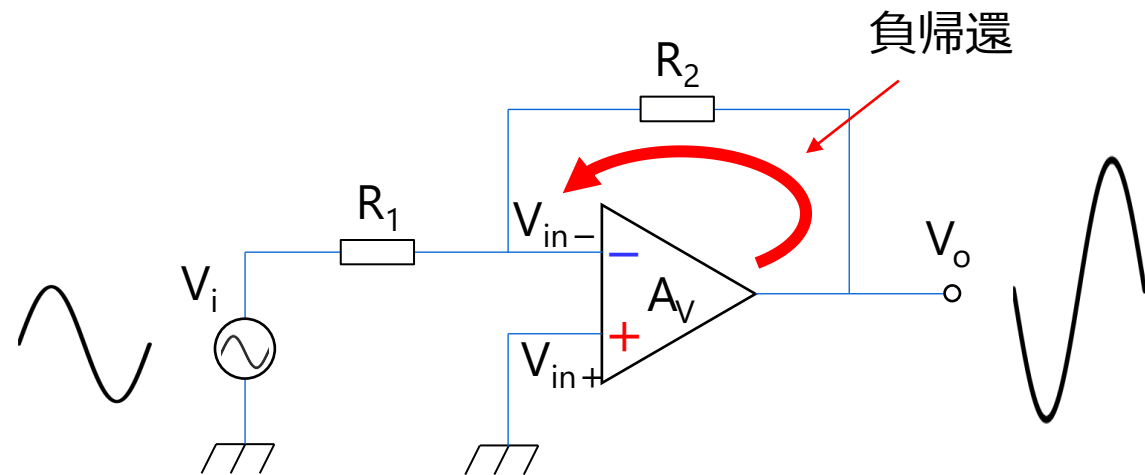
(注)当社製品TC75S67TUのデータシートに基づく

オペアンプの基礎（負帰還回路の3つの例）

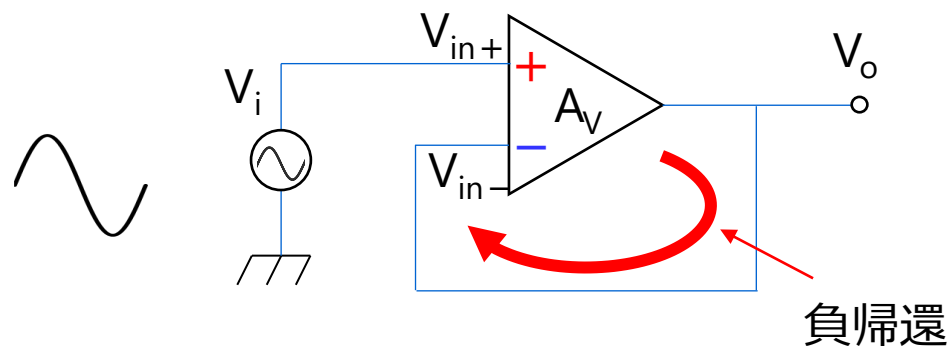
オペアンプでの負帰還回路例



①非反転増幅回路



②反転増幅回路

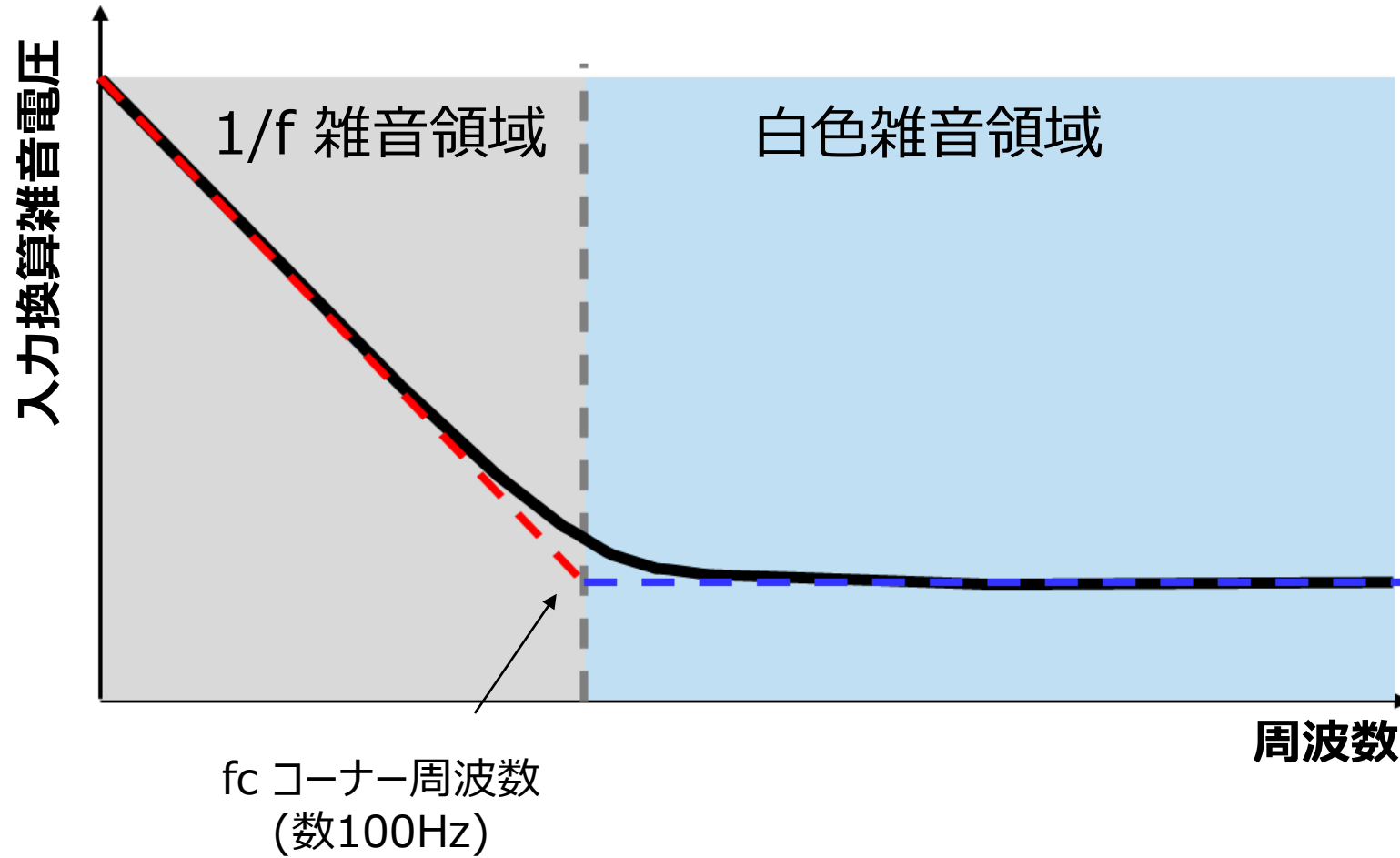


③ボルテージフォロワー

オペアンプを使うと、簡単に回路設計をすることができます。

*バイアス設定など回路定数の考慮が必要なケースもあります。

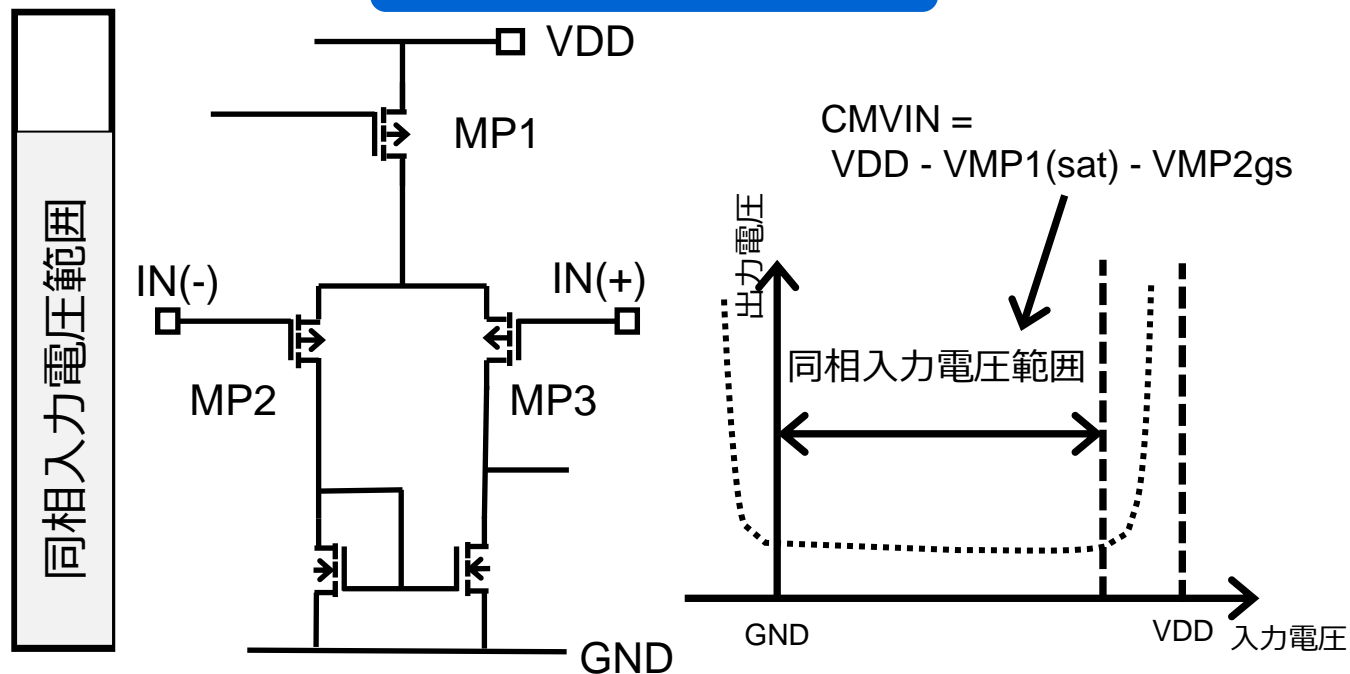
オペアンプのノイズ



入出力フルレンジ (入出力 Rail to Rail)

同相入力電圧範囲

Pch入力差動増幅回路



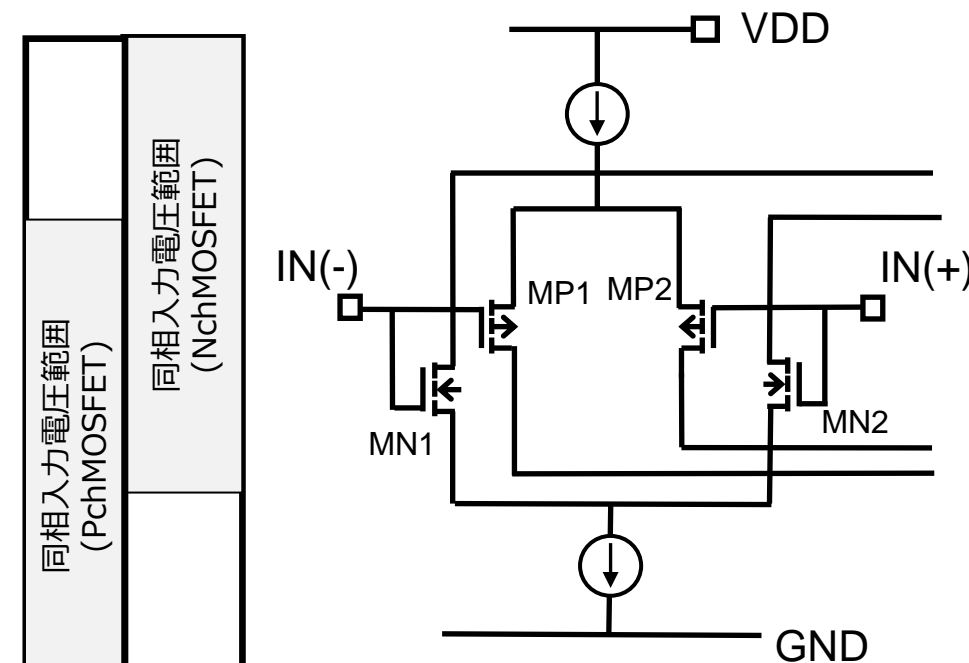
同相入力電圧範囲: $CMVIN$

$$CMVIN = VDD - VMP1(sat) - VMP2gs$$

$VMP1(sat)$...PchMOSFET MP1の飽和電圧

$VMP2gs$...PchMOSFET MP2のVGS(ON)電圧

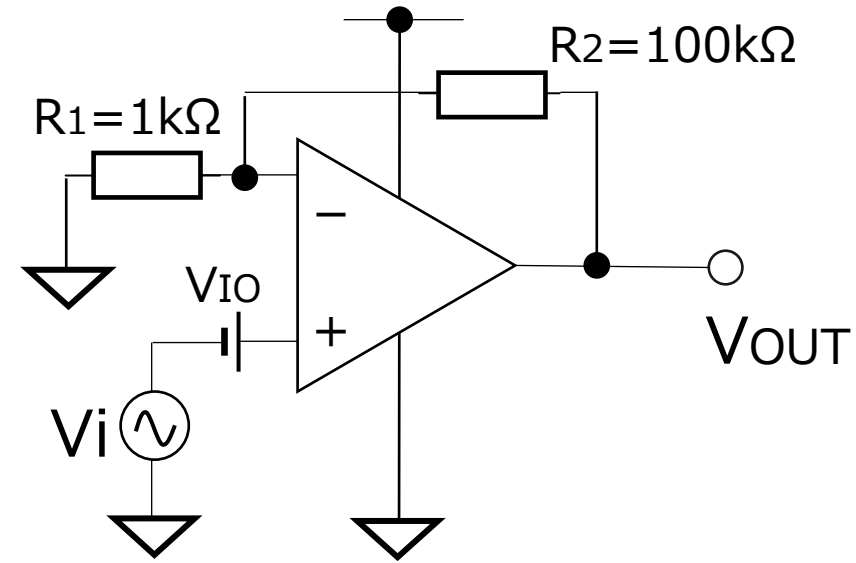
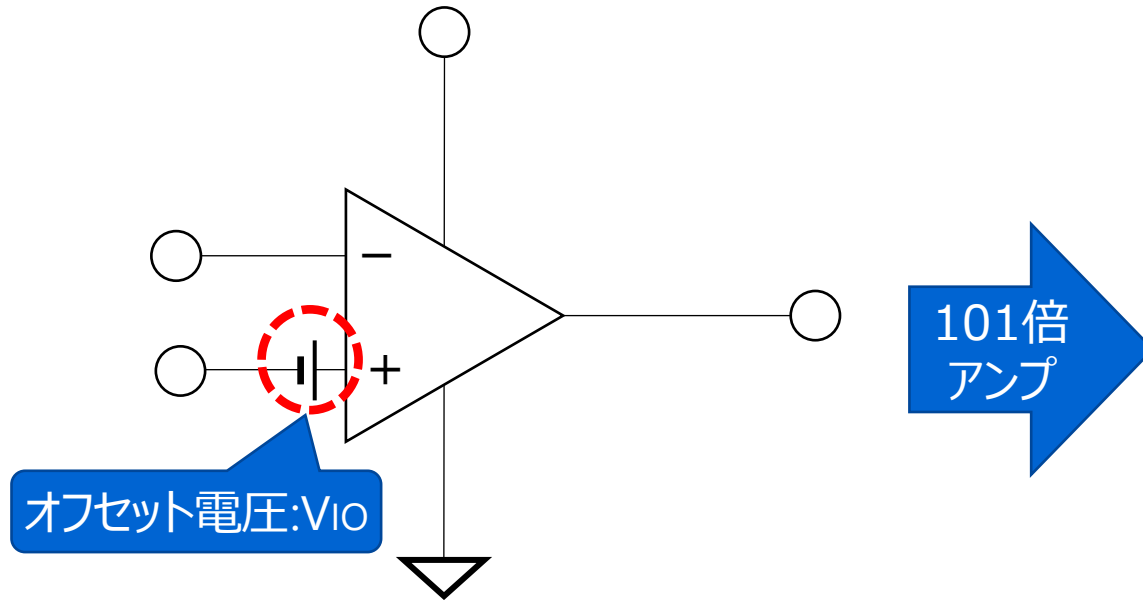
入力Rail to Railタイプ差動増幅回路



PchMOSFETの入力差動段 と
NchMOSFETの入力差動段 を組み合わせて、
GNDからVDDまで 入力電圧範囲を広げる

入力オフセット電圧

オペアンプの 2つの入力端子、
“非反転入力端子 V_{in+} ” と “反転入力端子 V_{in-} ” が持つ、誤差電圧のこと(“ズレ”)。

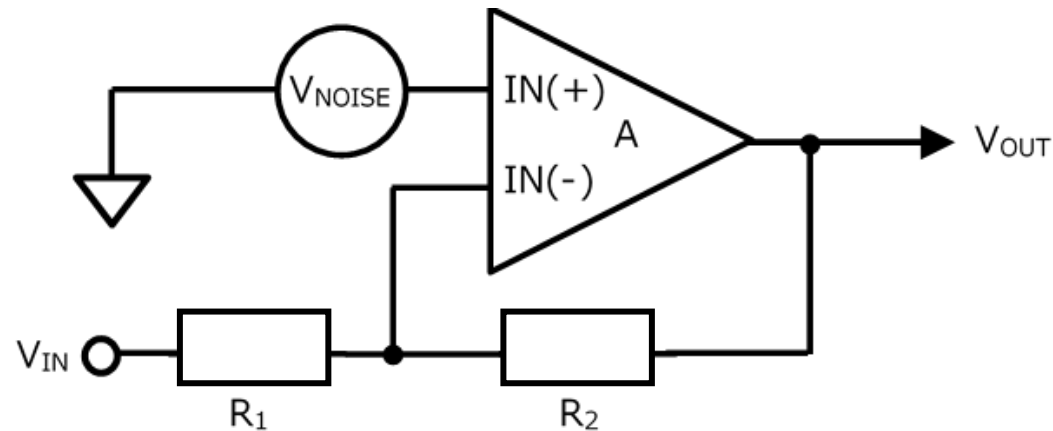


$$V_{OUT} = \{1 + (100\text{k}\Omega / 1\text{k}\Omega)\} \times (V_i + V_{IO})$$
$$= 101\text{倍} \times (V_i + \textcolor{red}{V_{IO}})$$

オフセット電圧を101倍した、誤差が含まれてしまう

イメージ図

ノイズゲインと信号ゲイン



• 反転増幅回路

信号ゲイン : $V_{OUT} = - (R_2/R_1) \times V_{IN} \cdots (1)$

よって、 $V_{OUT} / V_{IN} = - (R_2/R_1) \cdots$ 信号ゲイン

ノイズゲイン : $V_{OUT} = (1 + R_2/R_1) \times V_{NOISE} \cdots (2)$

よって、 $V_{OUT} / V_{NOISE} = 1 + R_2/R_1 \cdots$ ノイズゲイン

と示すことができます。反転増幅回路でも入力換算雑音は非反転入力端子に有るとモデル化します。

信号は反転入力端子側から入るため、ノイズゲインNGは信号ゲインと異なる増幅率になります。

良いオペアンプとは？

1. 低ノイズ

センサーからの信号電圧が微小なため、正確に増幅できる

2. 入出力フルレンジ (入出力 Rail to Rail)

設計の自由度を上げられる。電源電圧側(ハイサイド)の電流測定を行える。

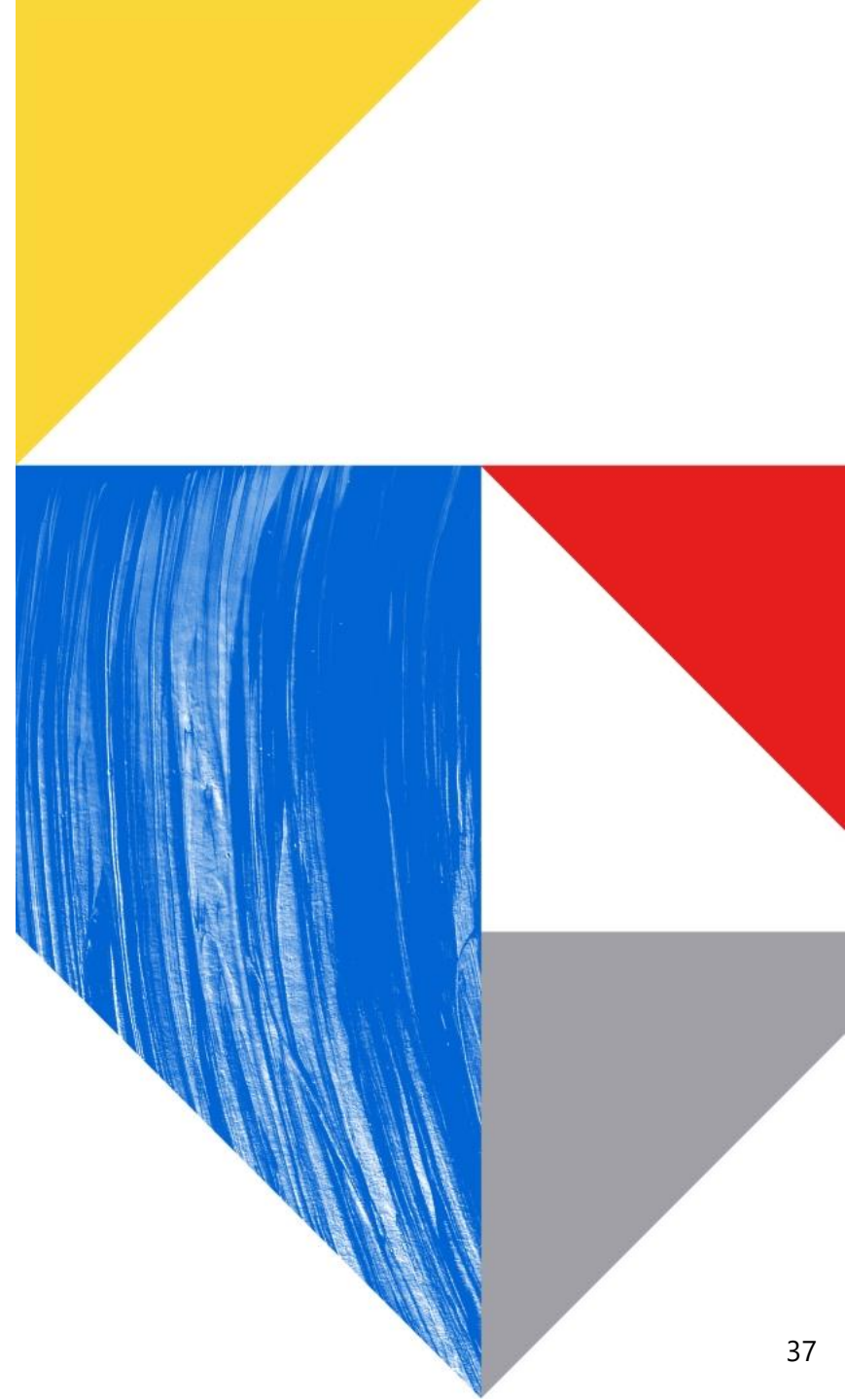
3. 低入力オフセット電圧

オペアンプからの誤差を小さくしたい。高精度に測定を行いたい。

4. 消費電流が少ない

電池で動作する機器を、長い時間、駆動・使用することができる。

東芝オペアンプのご紹介



東芝オペアンプのご紹介（ラインアップ）

コンシューマー機器

TC75S54シリーズ
Vopr:1.8V~7.0V
IDD:80μA

TC75S51シリーズ
Vopr:1.5V~7.0V
IDD:50μA

TC75S103 シリーズ
Vopr:1.8V~5.5V
IDD:100μA, VIO:1.5mV
入出力Rail-to-Rail

TC75S55シリーズ
Vopr:1.8V~7.0V
IDD:8μA

モバイル・バッテリー駆動機器

TC75S102シリーズ
Vopr:1.5V~5.5V
IDD:0.27μA, VIO:1.3mV
入出力Rail-to-Rail

本日もご紹介

TA75S01シリーズ
Vopr:3.0V~12V
IDD:0.4mA

TA75S558シリーズ
Vopr:±4V~±18V
IDD:2.5mA

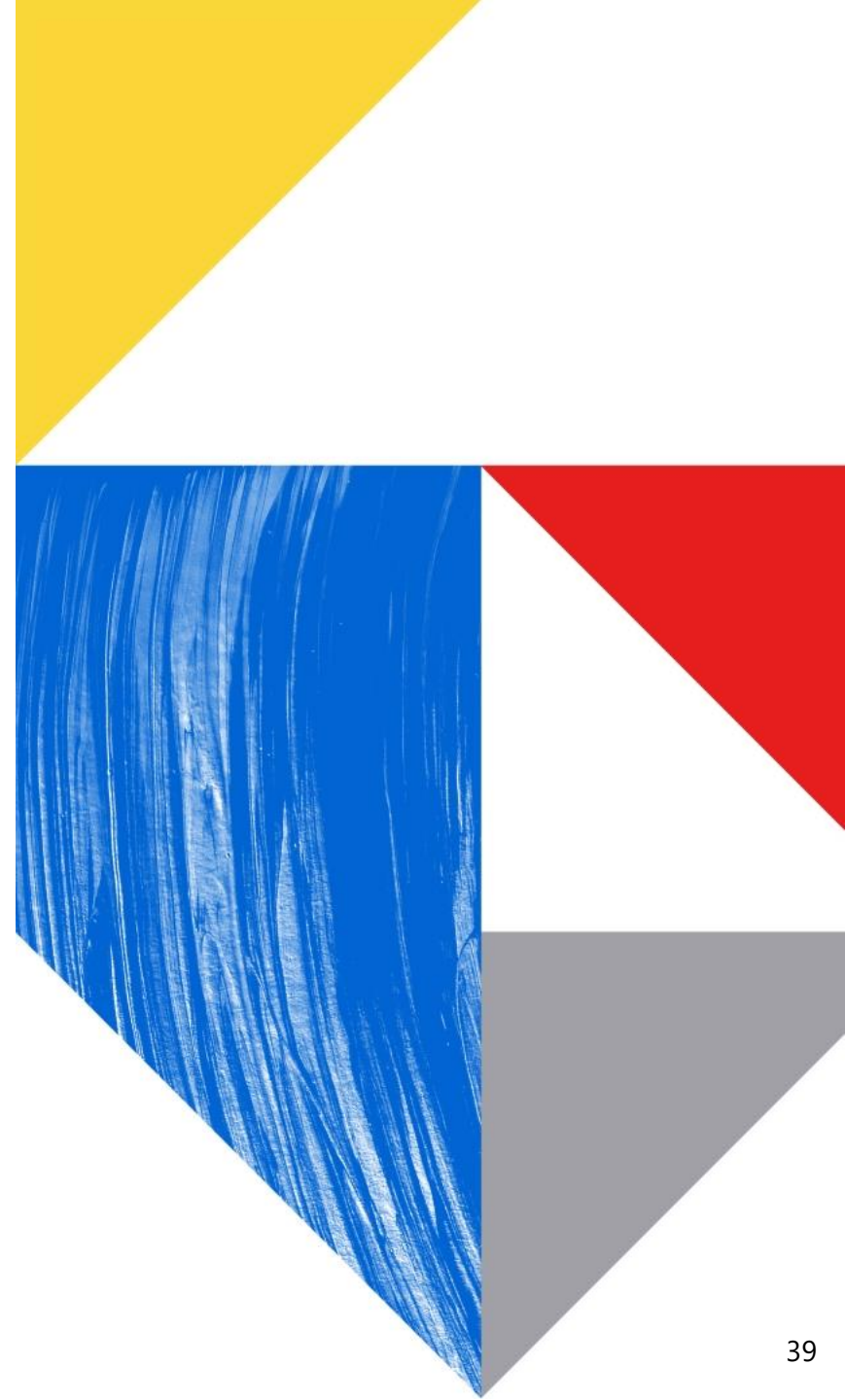
産業機器

TC75S67シリーズ
Vopr:2.2V~5.5V
IDD:430μA
LowNoise:6nV/√Hz

TC75S63シリーズ
Vopr:2.2V~5.5V
IDD:500μA
LowNoise:7.8nV/√Hz

03

低消費電力オペアンプを活用した、
エナジーハーベスティング、IoTセンシング回路の
応用例とリファレンス回路のご紹介



TC75S102F（入出力Rail to Rail）

超低消費電流タイプ

◆特徴

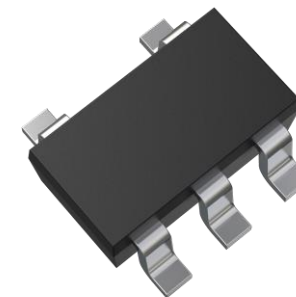
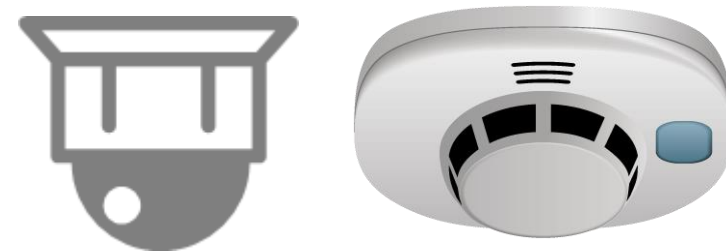
バッテリー駆動機器の増幅に最適

超低消費電流オペアンプ・入出力Rail to Rail

◆製品のポイント

- **超低消費電流：270nA(標準) @VDD=1.5V**
- 入出力Rail to Rail タイプ
- CMOSプロセスのため微小センサー信号増幅に最適
- SOT-25パッケージ (2.8x2.9x1.1mm)

バッテリー駆動のセンサーなど

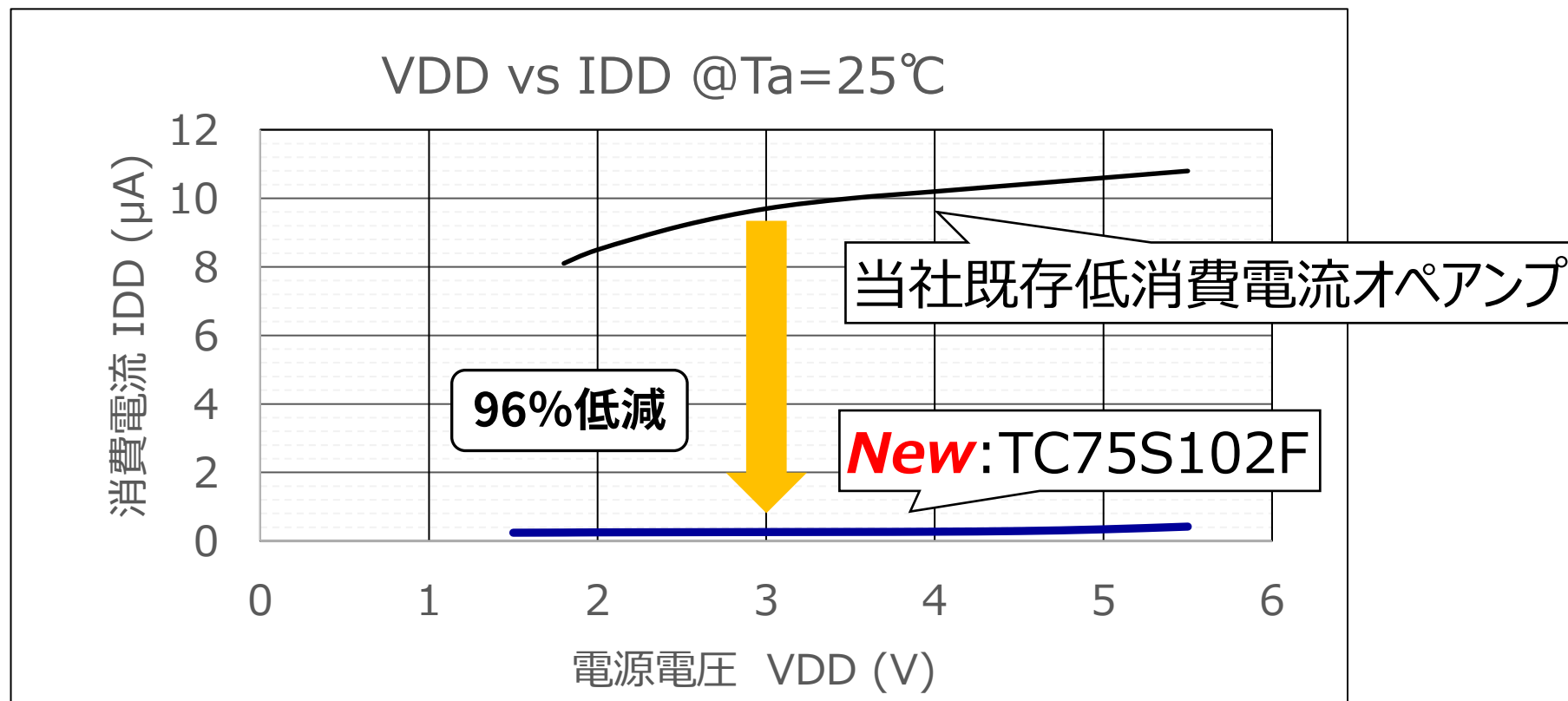


SOT-25パッケージ
2.8x2.9x1.1mmサイズ

TC75S102F（入出力Rail to Rail）

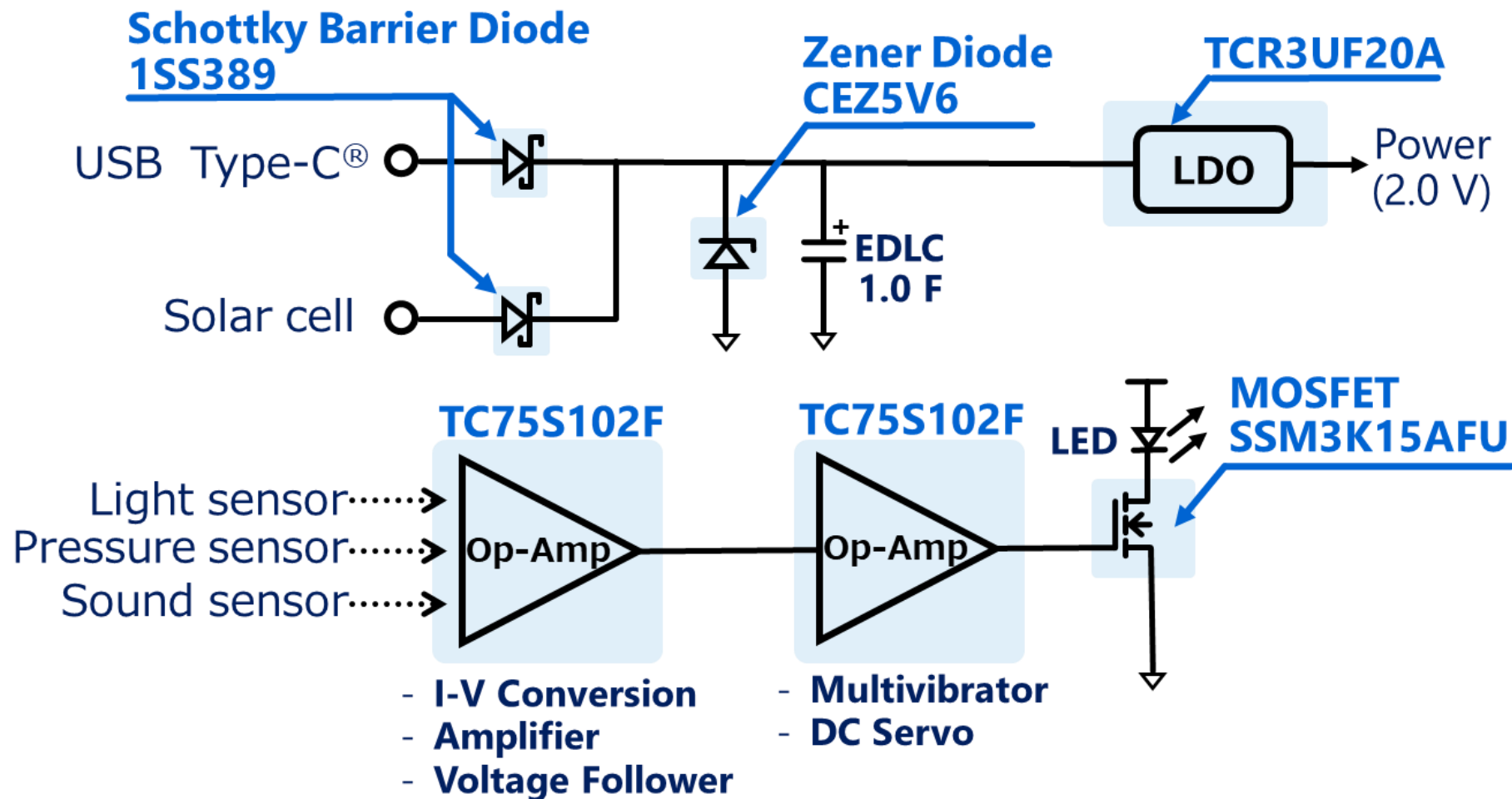
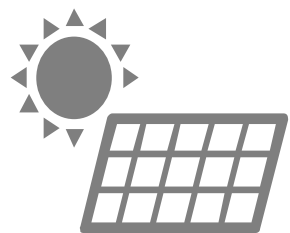
超低消費電流タイプ

TC75S102Fの消費電流特性（標準カーブ）



当社低消費電流オペアンプと比較し約96%消費電流を低減しました。

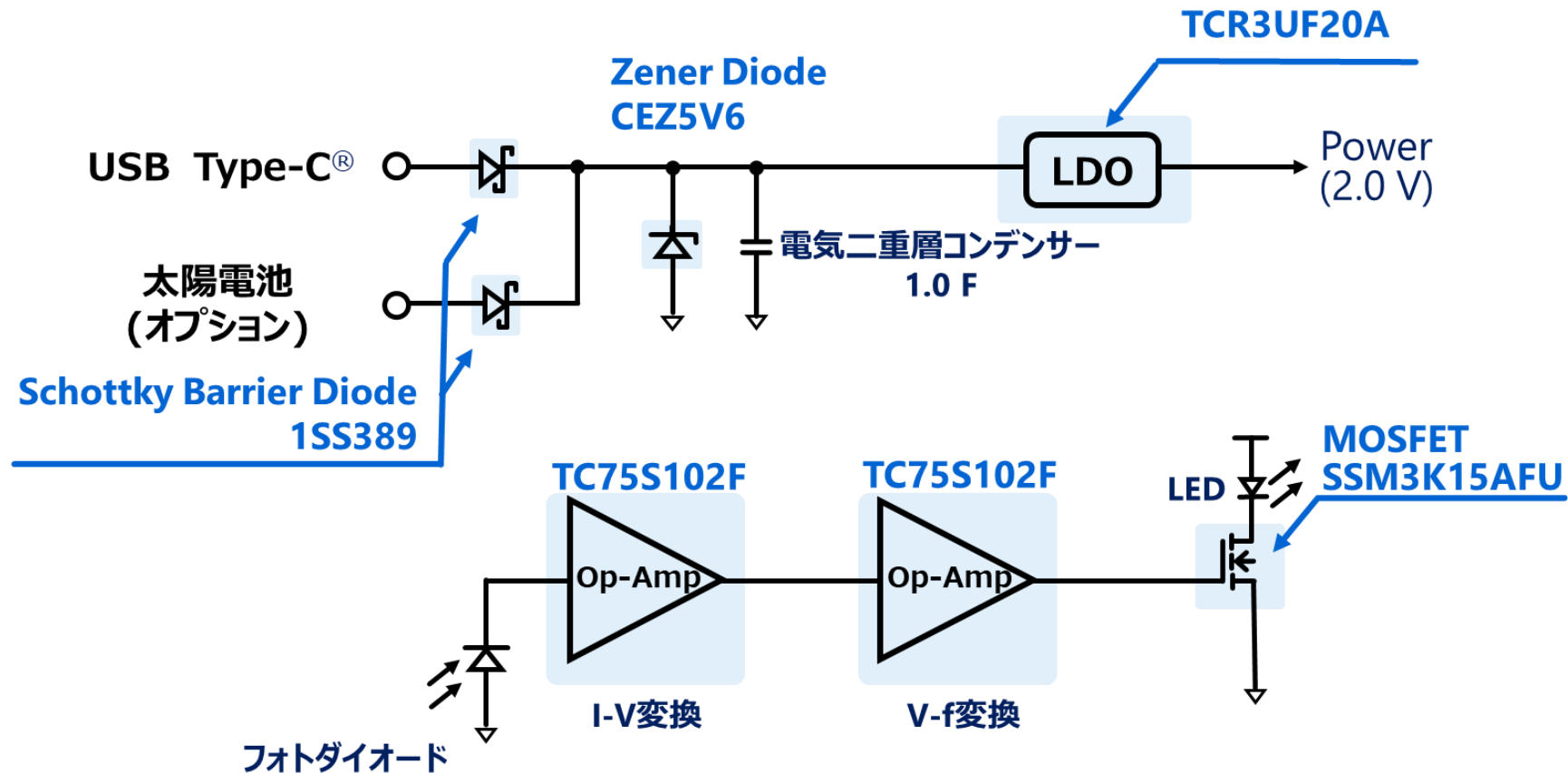
低消費電力オペアンプTC75S102F 応用回路リファレンスデザイン



エネルギーハーベスティング ⇒ 環境発電
IoTセンシング

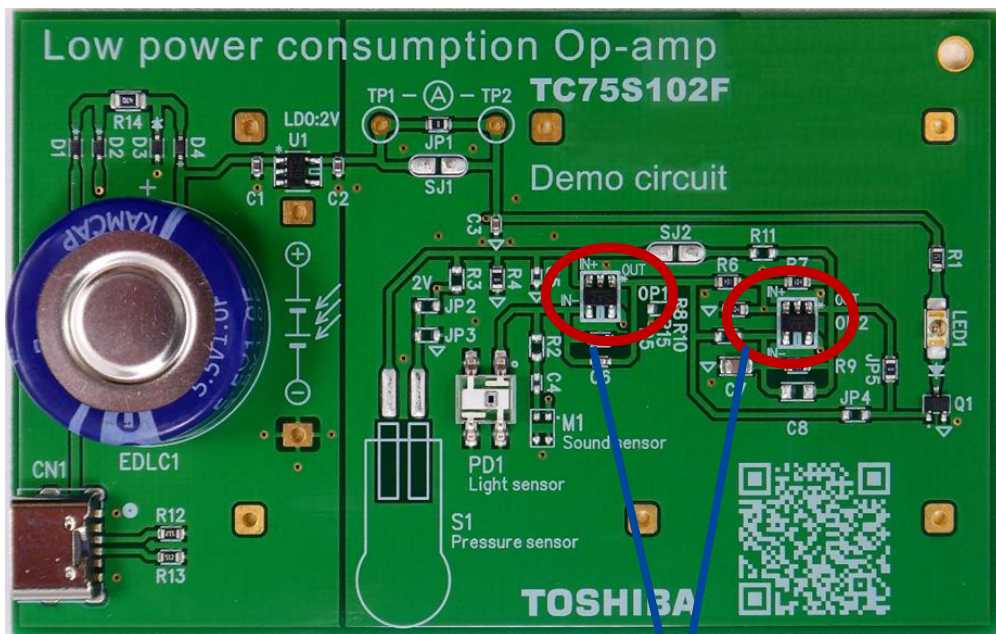
低消費電力オペアンプTC75S102F 応用回路リファレンスデザイン

- ・回路が長時間駆動！
- ・USB Type-C® または太陽電池で供給 ⇒ 二重層コンデンサーに充電



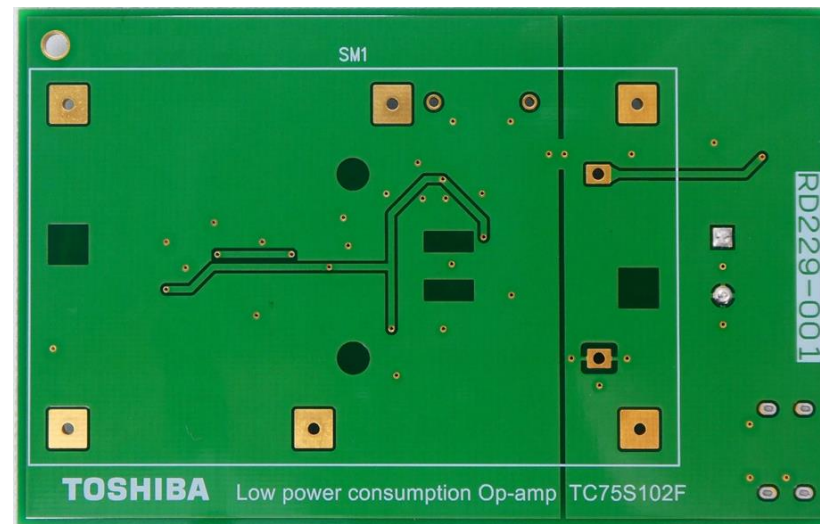
光 ⇒ フォトダイオード ⇒ オペアンプ TC75S102F (I-V変換・V-F変換) ⇒ LED点滅

低消費電力オペアンプTC75S102F 応用回路リファレンスデザイン

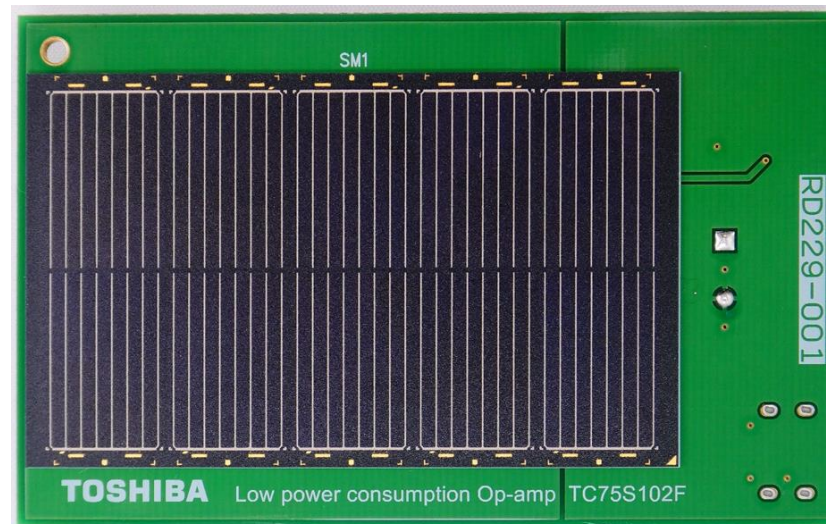


基板表面

オペアンプ
TC75S102F



基板裏面
(太陽電池無し)



基板裏面
(太陽電池有り)

光 ⇒ フォトダイオード ⇒ オペアンプ TC75S102F (I-V変換・V-F変換) ⇒ LED点滅

動作時間（回路A1の場合）

電源

電気二重層コンデンサー(電圧:5V、容量:1F) フル充電時から動作

主要素子の消費電流

オペアンプ(TC75S102F)	0.27 μ A
LDO(TCR3UF20A)	0.4 μ A
LED	100 μ A (100%点灯時)

センサーオン検知時間 = LED点灯時間が 1時間のうち5秒間の場合

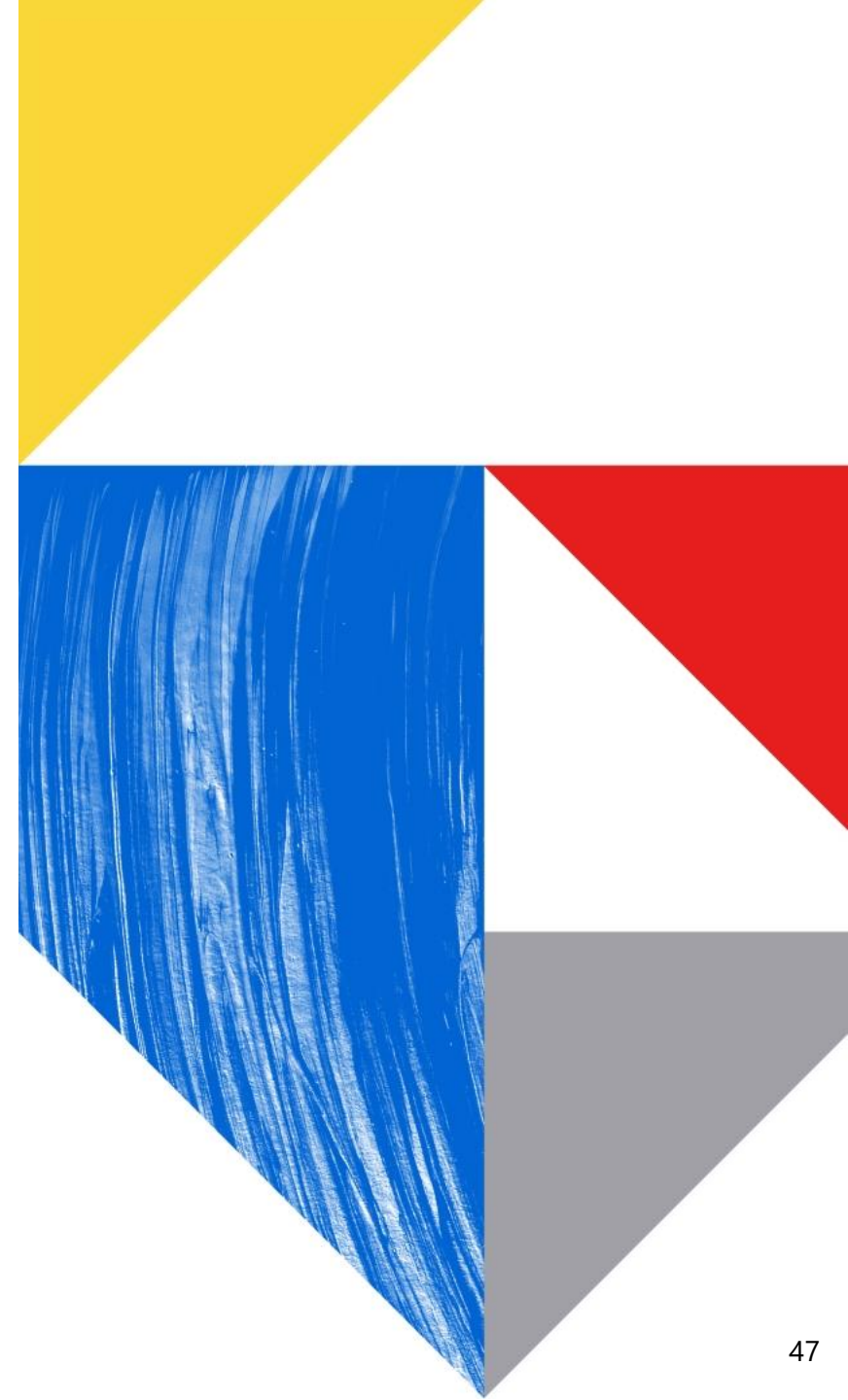
計算上は約42.9日間、本回路は動作します

低消費電力オペアンプTC75S102F 応用回路リファレンスデザイン アクセス先QRコード



04

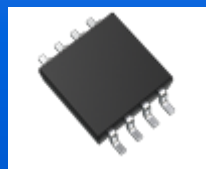
高速コンパレーター 開発品のご紹介



TC75W71FU

Low Power
Input/Output full range

SM8
(4.0x2.9x1.1mm)



特性

電源電圧 絶対最大定格	6.0 V
電源電圧 動作範囲	1.8 V to 5.5 V
消費電流 @ VDD = 3.3 V	300 μ A (typ.)
入力オフセット電圧	± 15 mV (typ.)
伝搬遅延時間	45 ns (Max)
動作周波数	300 kHz

特長

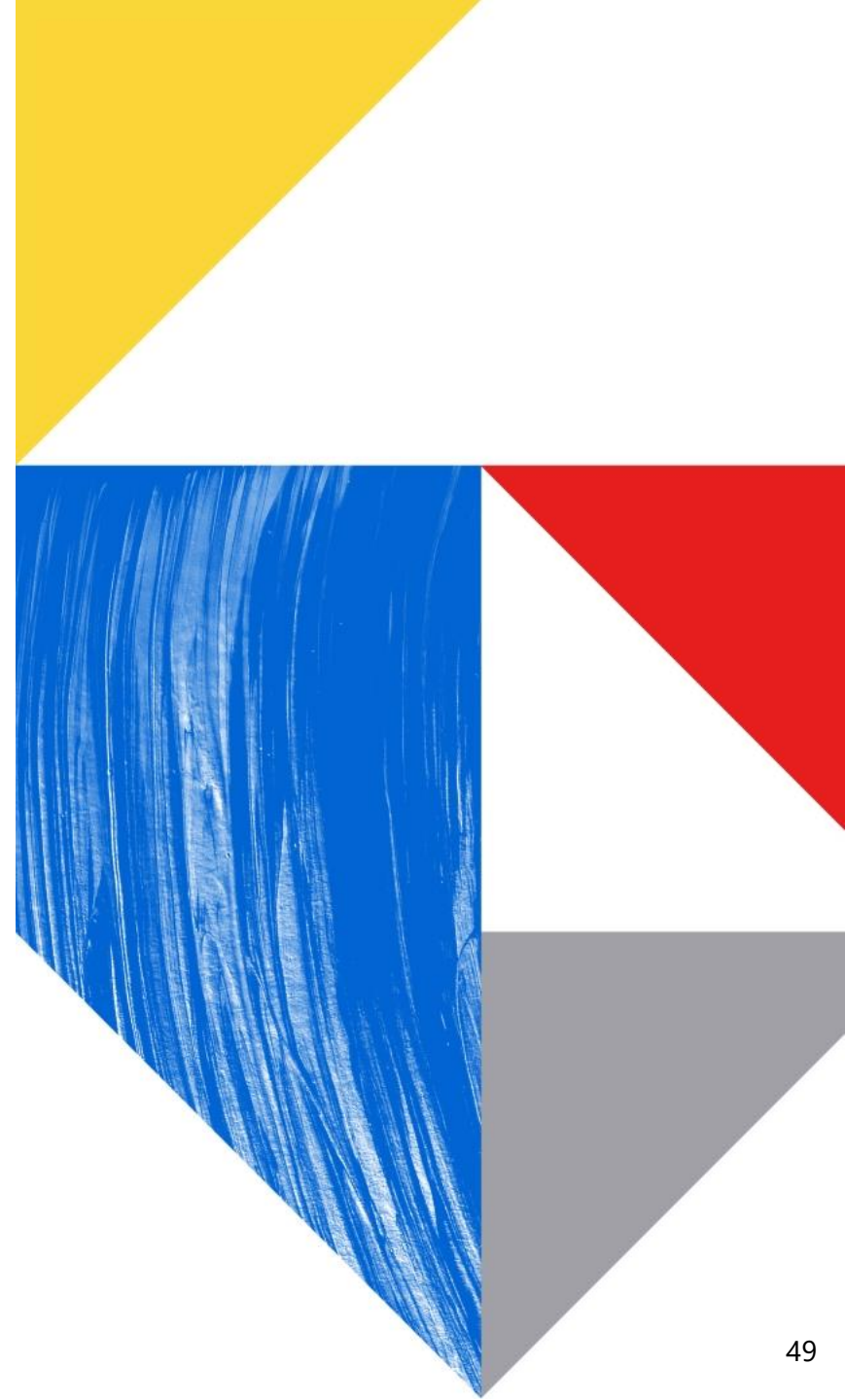
- ・2in1品
- ・入出力フルレンジ
- ・単一電源動作可能
- ・プッシュプル／オープンドレインタイプ

用途例

- ・DC-DCコンバータの過電流検出
- ・産業向け異常検知 など

05

各種サポートコンテンツのご紹介



技術資料

アプリケーションノート

FAQ

39製品

データシート

ランドパターン

信頼性レポート

オペアンプ

- オペアンプとは何ですか？
- オペアンプにはどんな種類がありますか？
- オペアンプを使った基本増幅回路にはどんなものがありますか？
- オペアンプでフィードバックが使用されるのはなぜですか？
- オペアンプの開ループゲイン/閉ループゲインとは？
- オペアンプはどんな用途に使用されますか？
- 差動アンプを使うのはなぜですか？（同相信号除去比 CMRR）
- 理想オペアンプとは？
- オペアンプの入力オフセット電圧とは？
- オペアンプの仮想接地とは？
- オペアンプはどの周波数まで使用できますか？
- オペアンプの電源電圧端子にバイパスコンデンサは必要ですか？
- GND付近の信号を増幅したいがどうすれば良いのでしょうか？
- オペアンプのノイズとはどんなものなのでしょうか？
- 電源電圧が低いとき、オペアンプのダイナミックレンジを広くとる為には

脈拍センサー向け応用例

デザインガイド

回路図

PCBレイヤー図

リファレンスガイド

3.2. アンプ部基板パターン例 (リジッド基板)

本基板も表と裏の両面基板で構成します。図 3.3 に基板表面パターン (部品実装面) を示します。吹き出し記載内容の一部は 3.3 項にて詳細に説明していますので、あわせて参照し

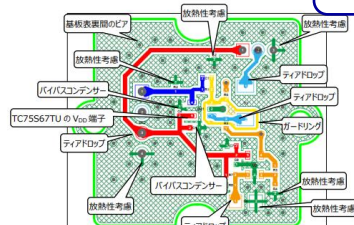
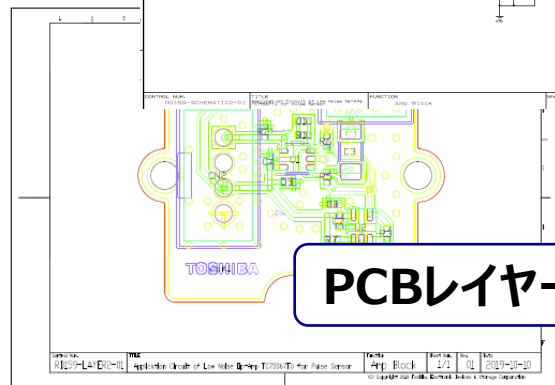
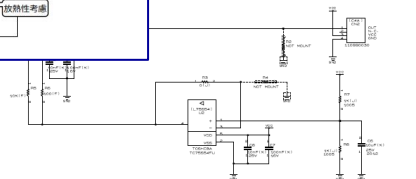


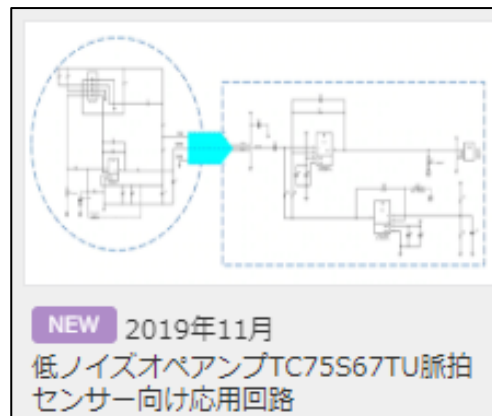
図 3.3 基板表面パターン



低ノイズオペアンプ TC75S67TU
脈拍センサー向け応用回路

リファレンスガイド

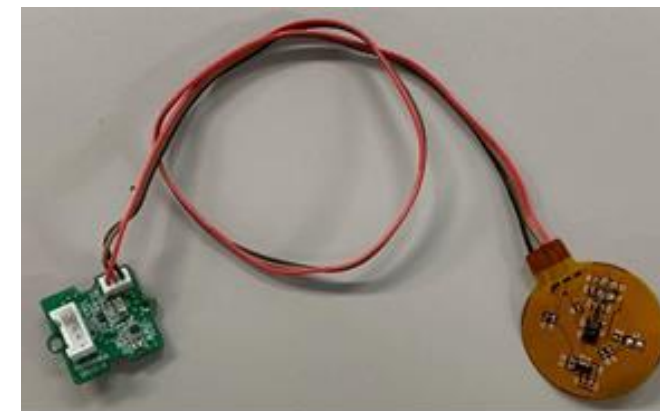
RD159-RGUI



NEW

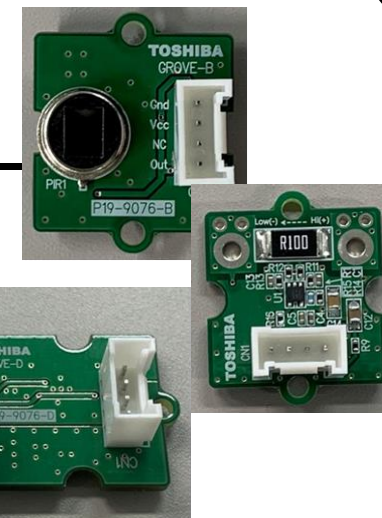
2019年11月

低ノイズオペアンプTC75S67TU脈拍
センサー向け応用回路



公開中

1. 焦電型赤外線人感センサー
2. 電流センサー
3. 超音波距離センサー
4. 脈拍センサー



ご清聴ありがとうございました。
オペアンプご検討の際には、
東芝オペアンプをご用命頂けますよう
宜しくお願い申し上げます。

※ USB Type-C®、USB-C®は、USB Implementers Forumの登録商標です。

※ その他の社名・商品名・サービス名などは、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。