



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

アナログフロントエンドと センシング技術

アナログ・デバイス株式会社
笹岡 宏



アジェンダ

1. センサーの種類と特性

- センサーの種類
- センサー素子のアーキテクチャと特性

2. センサー素子とのインターフェース 信号処理回路の注意点

- 目的から考える要求性能とシステム上の制約
- 高集積アンプの利点・欠点と注意事項

3. オペアンプの選択と回路設計例

- オペアンプのスペック
- システム仕様からの制約事項
- オペアンプを選択する上での重要なポイント3つ
- オペアンプを使った電流センシング 高精度はかりの例



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

センサーの種類と特性

センサーの種類

電気的動作をするセンサー

Acoustic, sound, vibration

Geophone
Hydrophone
Lace Sensor (stringed musical instrument pickup)
Microphone (and interface circuitry)
Seismometer
加速度センサー・Accelerometer

Chemical

Breathalyzer
Carbon dioxide sensor
Carbon monoxide detector
Catalytic bead sensor
Chemical field-effect transistor
Electrochemical gas sensor
Electronic nose
Electrolyte-insulator-semiconductor
Hydrogen sensor
Hydrogen sulfide sensor
Infrared point sensor
Ion-selective electrode
質量分析器Mass spectrometer
Microwave chemistry sensor
Nitrogen oxide sensor
Olfactometer
Optode
Oxygen sensor
Pellistor
pH glass electrode
Potentiometric sensor
Redox electrode
煙探知機Smoke detector
Zinc oxide nanorod sensor

Electric current, electric potential, magnetic, radio

電流計・Ammeter
電流センサー・Current sensor
Galvanometer
ホール素子・Hall effect sensor

Leaf electroscope
Magnetic anomaly detector
Magnetometer
Metal detector
マルチメーターMultimeter
抵抗器計Ohmmeter
Radio direction finder
電圧計Voltmeter
電力計Watt-hour meter

Environment, weather, moisture, humidity

Dew warning
Fish counter
ガス検出器Gas detector
Hook gauge evaporimeter
Hygrometer
Leaf sensor
Pyranometer
Pyrgeometer
Psychrometer
Rain gauge
雨滴センサーRain sensor
Snow gauge
Soil moisture sensor
Stream gauge
Tide gauge

Flow, fluid velocity

Air flow meter
Anemometer
流量計Flow sensor
ガスメーターGas meter
質量流量計Mass flow sensor
水道メーターWater meter

Ionising radiation, subatomic particles

Bubble chamber
Cloud chamber
Geiger counter
Neutron detection

Particle detector
Scintillation counter
Wire chamber

Navigation instruments

Air speed indicator
Altimeter
Attitude indicator
Depth gauge
Fluxgate compass
ジャイロスコップ・Gyroscope
Inertial reference unit
Magnetic compass
MHD sensor
Ring laser gyroscope
Turn coordinator
Variometer
振動ジャイロスコップ・Vibrating structure gyroscope
ヨーレートセンサー・Yaw rate sensor

Position, angle, displacement, distance, speed, acceleration

加速度センサー・Accelerometer
容量位置センサー・Capacitive displacement sensor
自由落下センサー・Free fall sensor
重力計・Gravimeter
傾斜計・Inclinometer
Laser rangefinder
Linear encoder
差動変圧器・Linear variable differential transformer (LVDT)
容量傾斜計・Liquid capacitive inclinometers
Odometer
Piezoelectric accelerometer
位置センサーPosition sensor
ロータリーエンコーダーRotary encoder
差動変圧器(回転角)・Rotary variable differential transformer (RVDT)
セルシン (レゾルバ)・Selsyn
速度計Speedometer
Speed sensor
慣性センサー・Sudden Motion Sensor

チルトセンサー・Tilt sensor
タコメーターTachometer
Ultrasonic thickness gauge

Optical, light, imaging

Charge-coupled device
コリオリメーターColorimeter
Contact image sensor
Electro-optical sensor
Flame detector
Infra-red sensor
Nichols radiometer
Fiber optic sensors
Photodetector
Photodiode
Phototransistor
Photoelectric sensor
Photoionization detector
Photomultiplier
Photoresistor
Photoswitch
Phototube
Proximity sensor
Wavefront sensor

Pressure

Barograph
Barometer
Boost gauge
Bourdon gauge
Hot filament ionization gauge
Ionization gauge
McLeod gauge
Oscillating U-tube
Permanent Downhole Gauge
Pirani gauge
Pressure sensor
Tactile sensor
Time pressure gauge

Force, density, level

加速度センサー・Accelerometer (also measures inclination)
Hydrometer
Force gauge
Level sensor
ロードセル・Load cell
Magnetic level gauge
Nuclear density gauge
Piezoelectric sensor
ストレンゲージ・Strain gauge
Torque sensor
Viscometer

Thermal, heat, temperature

Bolometer
Calorimeter
Exhaust gas temperature gauge
Gardon gauge
Heat flux sensor
赤外線サーモグラフィInfrared thermometer
Microbolometer
Microwave radiometer
Net radiometer
測温抵抗体・Resistance temperature detector (RTD)
半導体温度センサー・Silicon temperature sensor
サーミスタ・Thermistor
熱電対・Thermocouple
Thermometer

Proximity, presence

Alarm sensor
Motion detector
Occupancy sensor
Passive infrared (PIR) sensor
Reed switch
Stud finder
Triangulation sensor
Touch switch
Wired glove



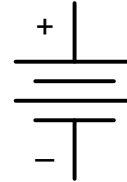
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

センサー素子のアーキテクチャと特性

センサー素子のタイプ

▶ 電圧出力

- 主に $\mu\text{V} \sim \text{mV}$
- 増幅の必要性がある（パッシブ）
- 出力インピーダンスが高い（パッシブ）



熱電対
ホール素子
化学センサー(pH, O_2)
温度センサー（電圧出力）
LVDTのようなコイルを利用したもの
など

▶ 抵抗値

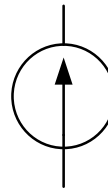
- 測定対象の変化による抵抗値変化
- $\text{m}\Omega \sim \text{k}\Omega$
- 電圧出力にするためにバイアス回路が必要



サーミスタ
RTD
ストレンゲージ
など

▶ 電流出力

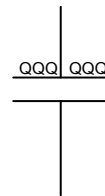
- 測定対象の変化に比例した電流値
- 主に $\text{pA} \sim \mu\text{A}$



ホトダイオード（スペクトル解析）
温度センサー（電流出力）
など

▶ 容量・キャパシタ

- 測定対象の変化に比例した容量値変化。
通常 pC （ピコクーロン）
- 高出力インピーダンス ($\text{G}\Omega$)
- 高出力キャパシタンス ($\text{pF} \sim \text{nF}$)



加速度センサーエレメント
湿度センサー
マイクロフォン（水中聴音器）
など

センサー素子のアーキテクチャと特性

熱電対の種類と規格

記号	+脚	-脚	特徴	使用温度範囲 (°C)	限度使用温度 (°C)
K	クロメル	アルメル	熱起電力の直線性良、工業用	-200～1000	1200
J	鉄	コンスタンタン	さびやすい、工業用	-200～600	750
T	銅	コンスタンタン	電気抵抗が小さい、低温精密	-200～300	350
E	クロメル	コンスタンタン	最も高い起電力特性	-200～700	800
N	ナイクロシル	ナイシル	起電力安定、低温～高温	-200～1200	1250
R	白金ロジウム(13%)	白金	精度良、劣化小、 ガス酸化雰囲気での使用	0～1400	1600
S	白金ロジウム(10%)	白金			
B	白金ロジウム(30%)	白金ロジウム(6%)	使用温度高	0～1500	1700

▶ 異種金属の接合で発生する熱起電力をゼーベック効果を利用

▶ 限度使用温度

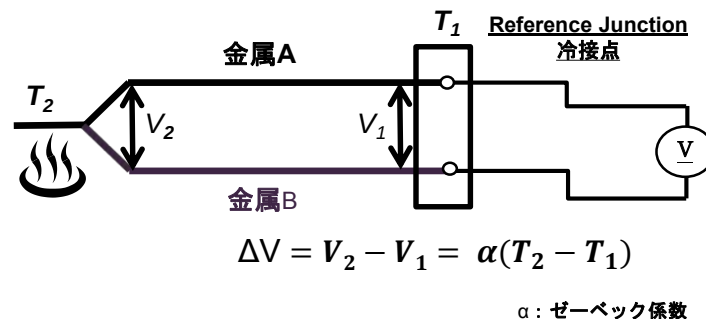
- 都合上やむを得ず、短時間のみ使用できる限界
- 貴金属 2000時間
- 卑金属 10000時間
- **限度 50～250時間で計測不能**

▶ 規格

JIS C 1602-1995 (ANSIとJISにほぼ相違なし)

ANSI MC 96.1 / ASTM E320

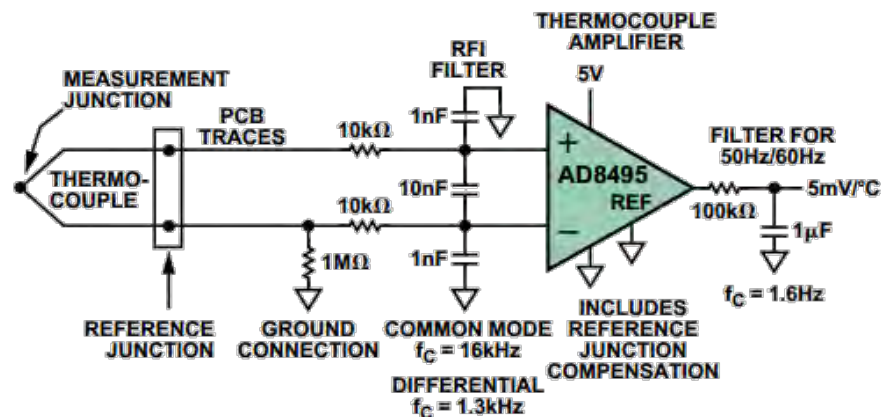
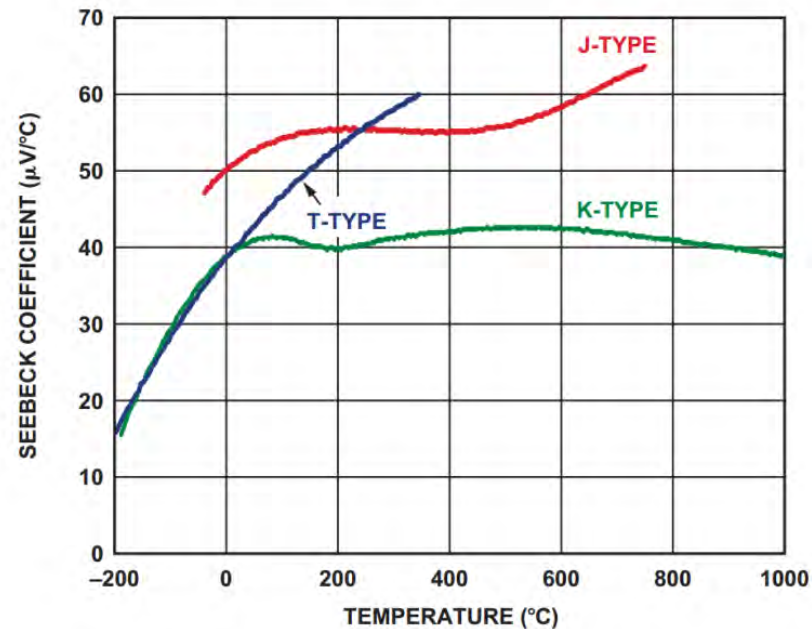
IEC584-3



センサー素子のアーキテクチャと特性

熱電対 実は難しい測定？

- ▶ 電圧信号が非線形
⇒温度係数が温度によって変化します。
- ▶ 非線形を補償する3つ方法
 - 比較的平坦な曲線の一部を選択して近似
⇒K、J型が一般的に普及している理由
 - 各電圧を各温度にマッチングさせるルックアップテーブルから、最も近い2点間で線形補間し、他の温度を求めます
 - 高次式を用いて熱電対の動作をモデル化することです
- ▶ 専用ICで取扱いが容易
(注：補正ではありません)



AD8494	J-Type	0-50 °C
AD8495	K-Type	0-50 °C
AD8496	J-Type	25-100 °C
AD8497	K-Type	25-100 °C

センサー素子のアーキテクチャと特性

半導体温度センサー

- ▶ 測定精度：通常 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度。 $\sim \pm 0.25^{\circ}\text{C}$ の高精度製品もある

- アナログ出力（電圧・電流）、デジタル出力

- ▶ 直線性に優れた出力

- ▶ 追加機能を持つ

- アラーム出力、温度制御など

- ▶ 動作原理

- 温度に比例するトランジスタ V_{BE} 特性を利用
- エミッタ電流も温度により変化 → 複数のトランジスタとの組合せでキャンセル
- 複数トランジスタの電流値のマッチングが取れていて、同じ温度環境にあると仮定すると以下の式が成り立ちます

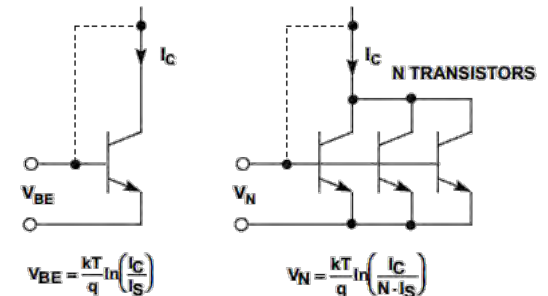
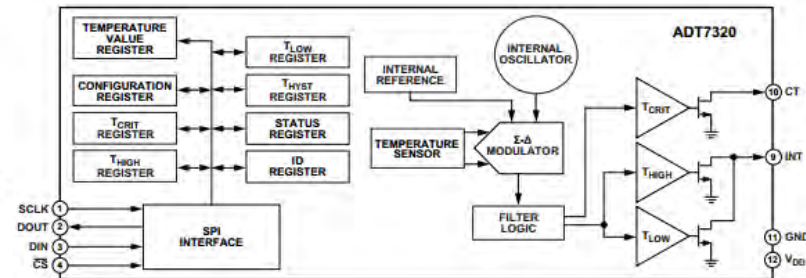
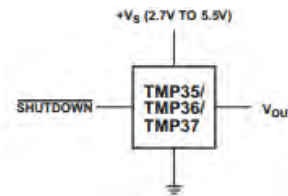
$$\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = \frac{kT}{q} \ln(N)$$

k : ボルツマン定数

T : 温度

q : 電荷

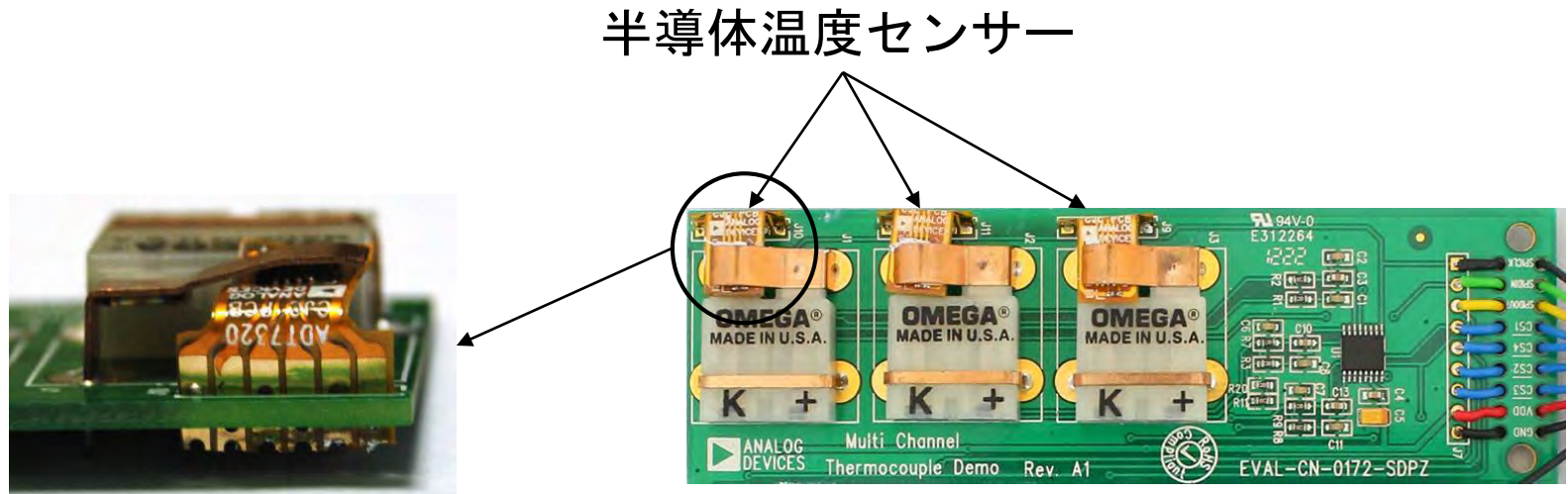
N : トランジスタ数



センサー素子のアーキテクチャと特性

半導体温度センサー 使用例

- ▶ 熱電対測定に使用する零接点補償

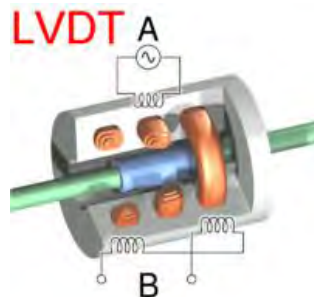


ADT7320を使用した弊社リファレンスデザインCN0172の例： $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 精度を実現

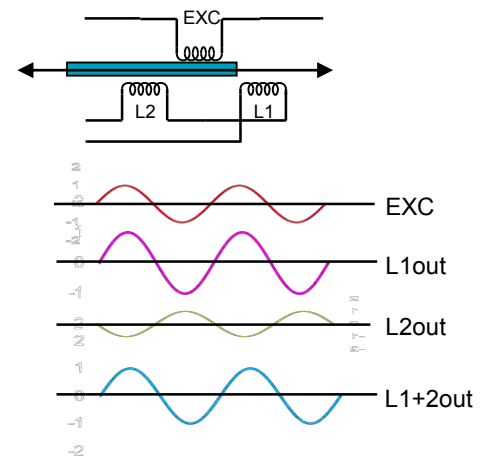
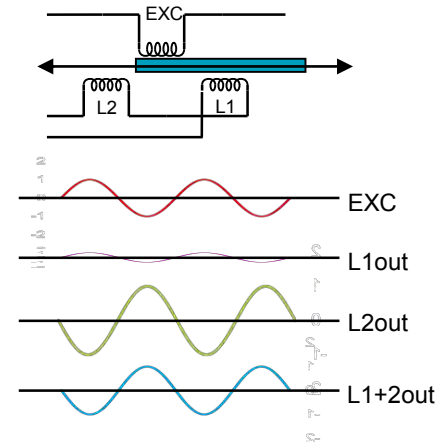
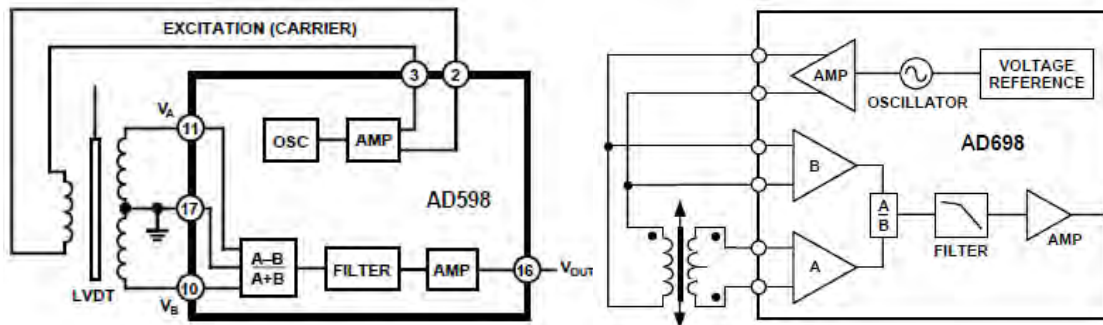
センサー素子のアーキテクチャと特性

LVDT & RVDT位置センサー

- ▶ LVDT: Linear Variable Differential Transformer
- ▶ RVDT: Rotary Variable Differential Transformer
- ▶ 差動変圧器・変位センサーLVDTは、2つの2次コイルを持ち、それぞれ位相が異なり、出力電圧が軸の移動量に合わせ変化します



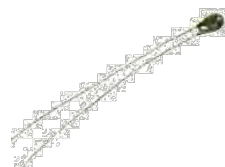
Wikipediaより



センサー素子のアーキテクチャと特性

サーミスタ

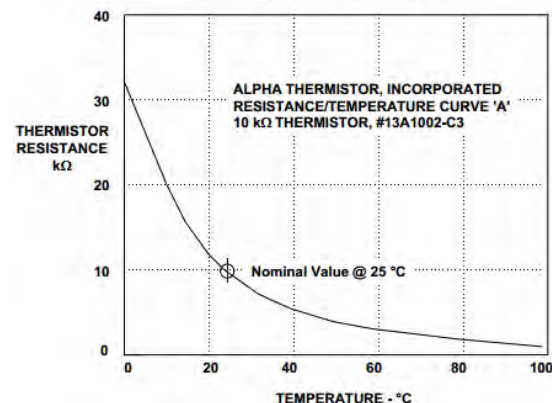
- ▶ 温度を検知し、抵抗値が変わる温度センサー
 - ほぼ大半は、負の温度係数(NTC)を持っています



- ▶ 直線性がない

- 狭い温度範囲であっても直線性を保持していません
- Look-up Tableを使うなどの方法により補正するか、単純なON/OFF制御として利用されます

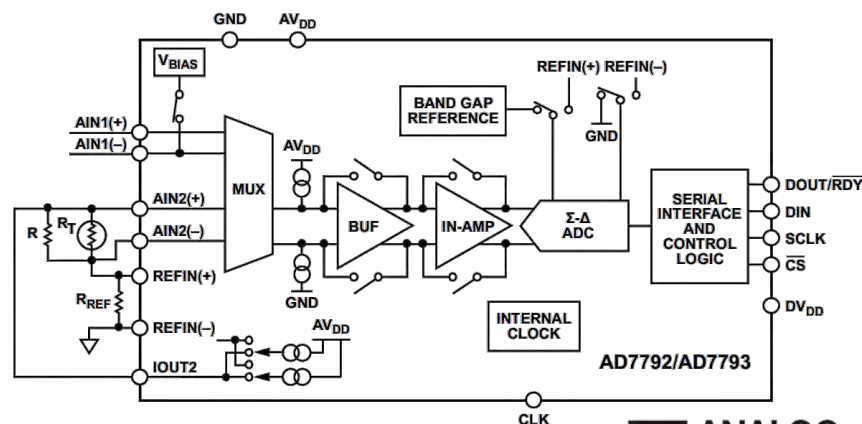
RESISTANCE CHARACTERISTICS OF A 10k Ω NTC THERMISTOR



ALPHA TECHNICS社より

- ▶ 小さな温度変化にも敏感に変化

- 抵抗値が大きく変化するため、リード線の抵抗値を気にしなくても良くなります



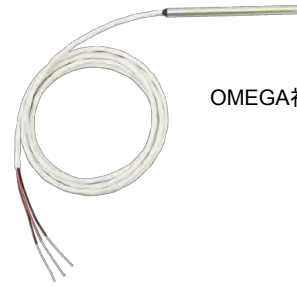
センサー素子のアーキテクチャと特性

測温抵抗体：Resistance Temperature Detectors (RTDs)

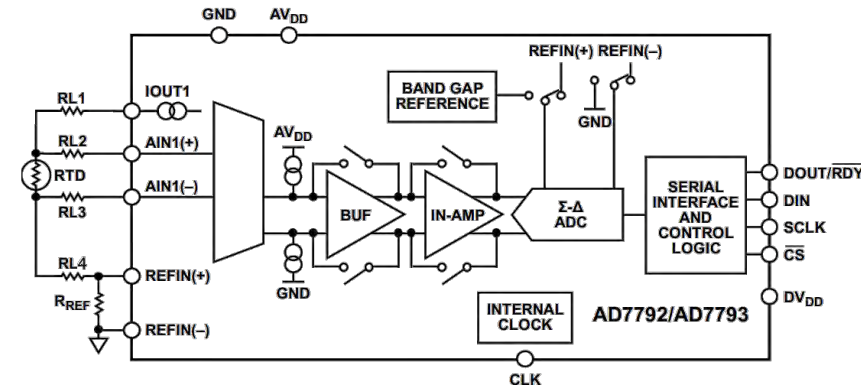
- ▶ 温度を検知し、抵抗値が変わる温度センサー
 - 温度と抵抗の関係が明確になっている金属物質を応用
- ▶ 最もポピュラーなセンサー 白金測温抵抗体Pt100とPt1000
 - プラチナを材料とし、0°Cにおいて抵抗値を100Ωもしくは1000Ωに調整

▶ 特長

- 抵抗体そのもの
- 銅線出力
- 温度応答性が熱電対に比べ遅い
- 測定値をそのまま利用可能
 - 零接点補償不要
- 熱電対より低温度に使われることが多い
- Ptの温度係数 (α) は、約 $0.00385 / ^\circ\text{C}$
 - IEC60751
 - 比較的直線性に優れています
 - 他にも異なる温度係数を持つPtも存在（稀）



OMEGA社 PR-20 series PT100 Probe (Note)



Note: © REPRODUCED WITH THE PERMISSION OF OMEGA ENGINEERING, INC., STAMFORD, CT 06907 USA www.omega.com

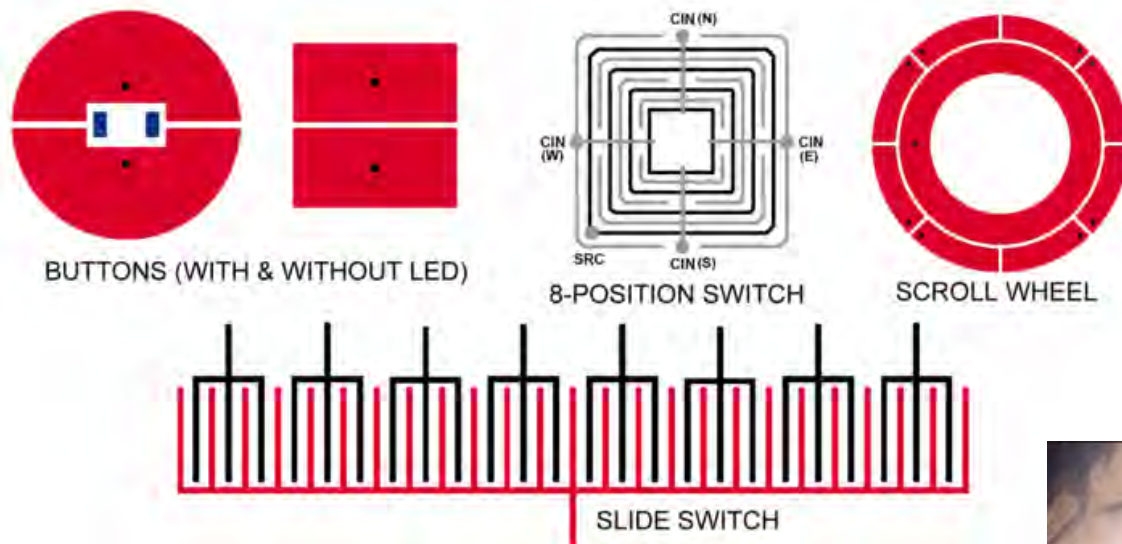
センサー素子のアーキテクチャと特性

ブリッジセンサー回路を設計する際に考慮すべき点

- ▶ センサーの構成 (1, 2, 4 ブリッジ内のセンサー数)
- ▶ 電圧励起／電流励起、安定性
 - AC電圧励起の場合、オフセットとドリフト除去に優位
- ▶ ブリッジの感度: 励起電圧 vs 出力 $1\text{mV} / \text{V} \sim 10\text{mV} / \text{V}$ Typical
- ▶ ブリッジのフルスケール出力: $10\text{mV} - 100\text{mV}$ Typical (多くは $10 \sim 20\text{mV}$)
- ▶ 高精度、低ノイズの増幅・信号処理回路技術が必要
- ▶ リニアライゼーション(直線補正)が必要な場合—温度センサーとの併用で校正
- ▶ リモートセンシング技術

センサー素子のアーキテクチャと特性

容量センサー



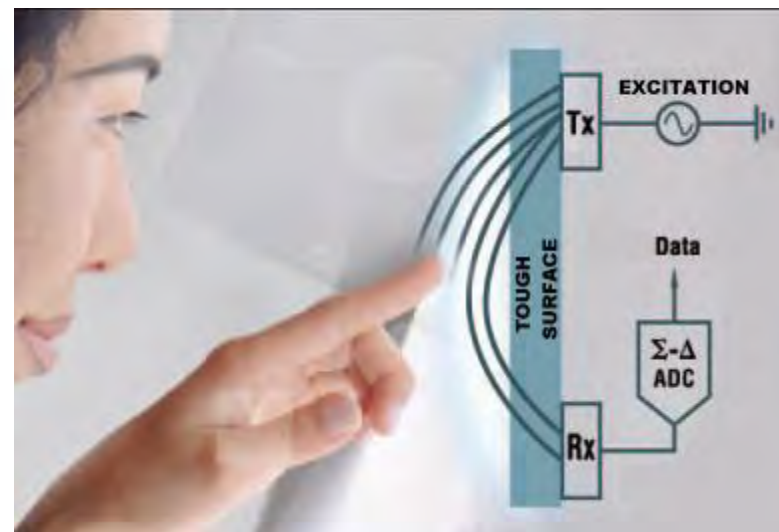
- ▶ 容量センサーの大きな利点は、外部からの影響が非常に小さく、湿度や腐食に強いことです
- ▶ 複数の端子を持つ容量センサーを使うことで、タッチパネルへの適用が可能

14ch: AD7142

13ch: AD7147

2ch: AD7150, AD7152, AD7156, AD7746

1ch: AD7151, AD7153, AD7745, AD7747

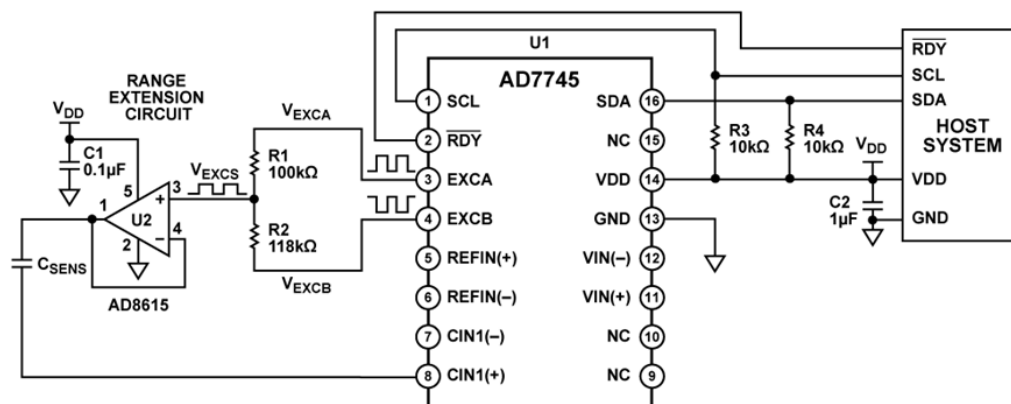
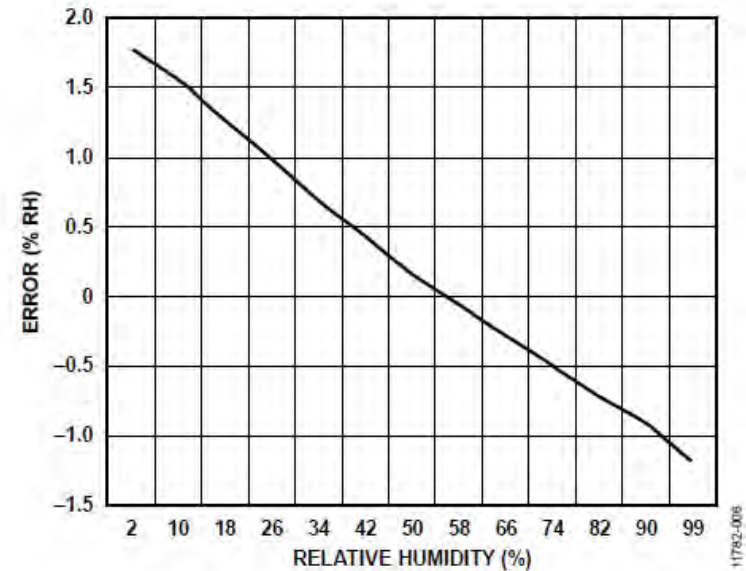


センサー素子のアーキテクチャと特性

容量性湿度センサー



CN0346



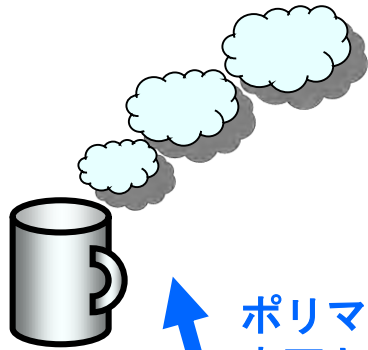
NOTES

1. NC = NO CONNECT.
2. V_{DD} = 2.7V TO 3.6V, OR 4.75V TO 5.25V.

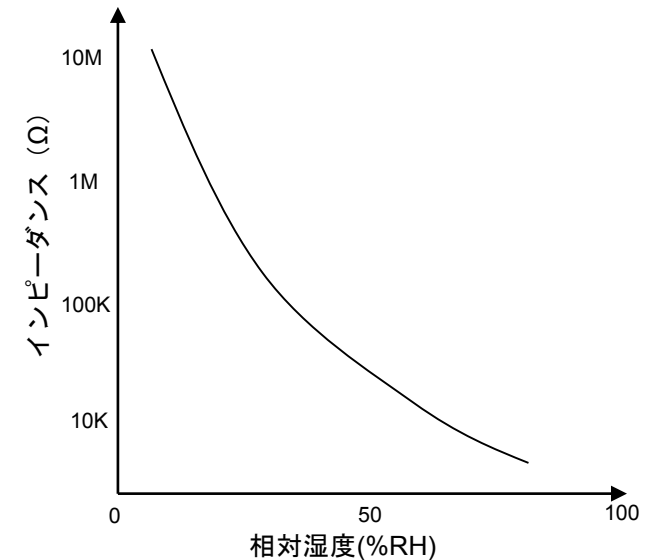
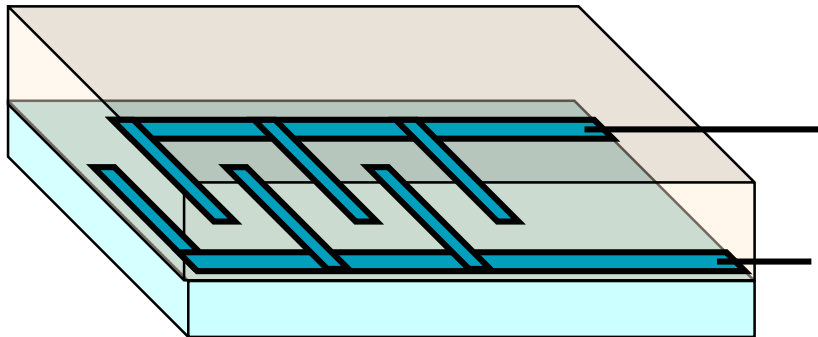
Analog Devices Proprietary Information ©

センサー素子のアーキテクチャと特性

抵抗性湿度センサー

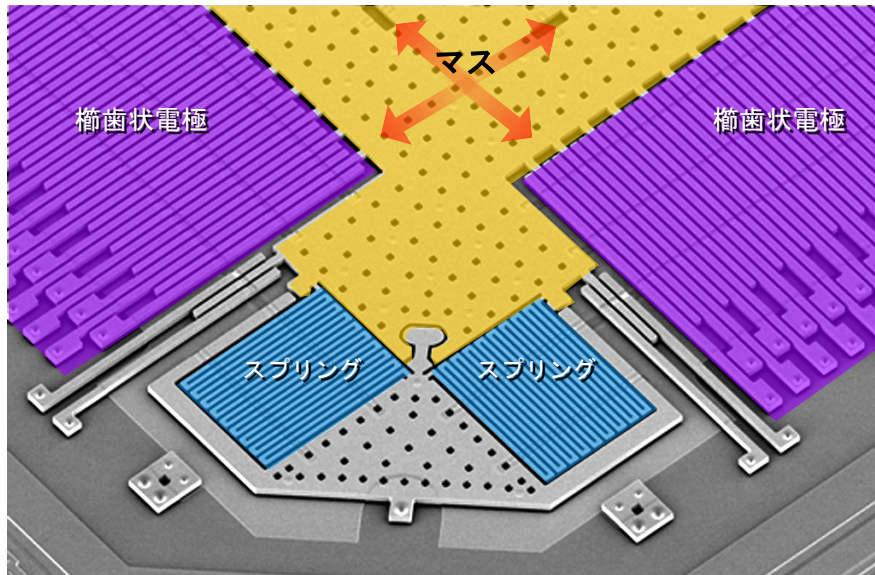


ポリマーコーティングされた
表面と空気中の水蒸気の変化
に沿って抵抗値が変化

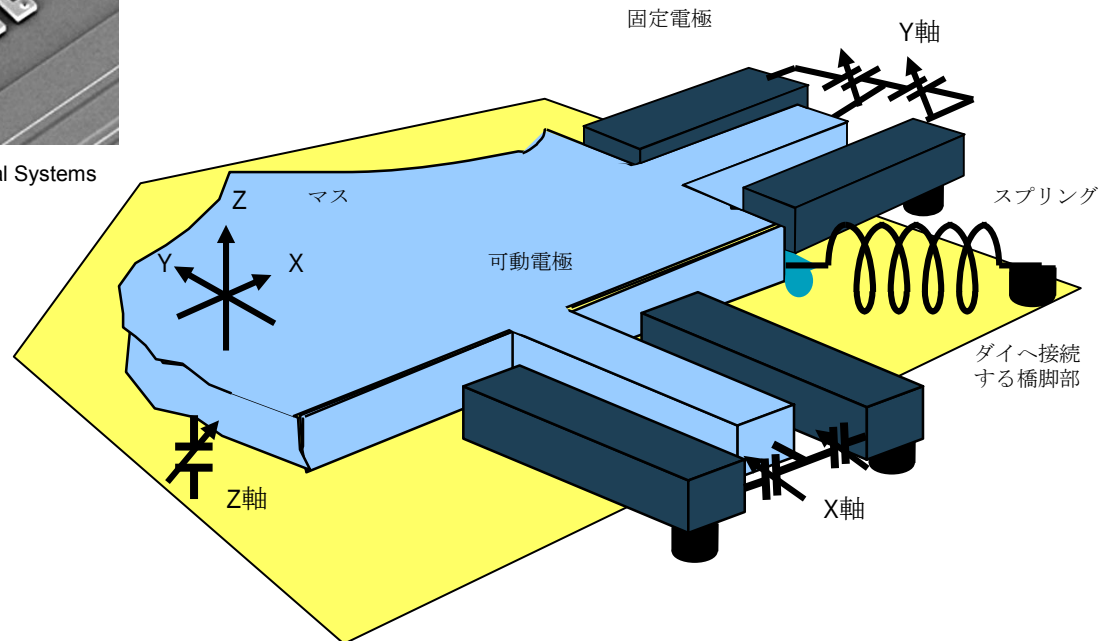


センサー素子のアーキテクチャと特性

加速度センサーのMEMS構造部と3軸加速度の検出方法



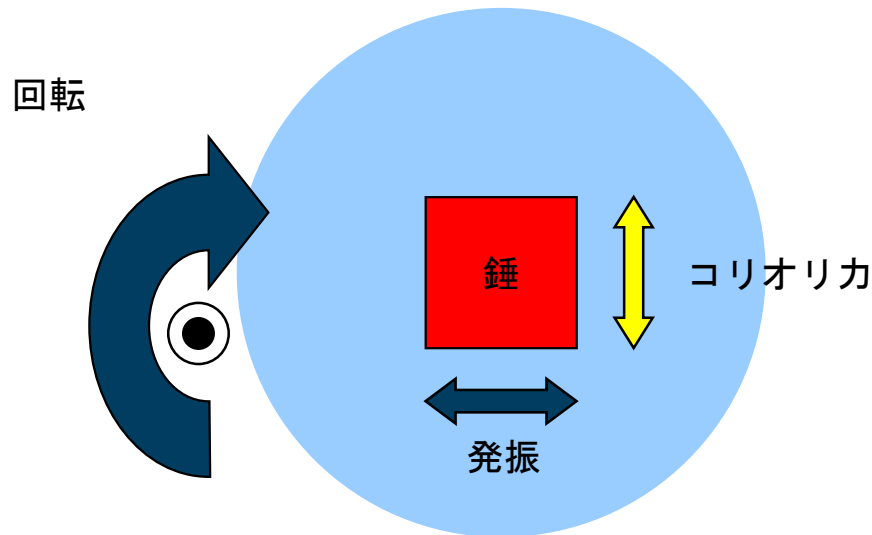
MEMS: Micro Electro Mechanical Systems



センサー素子のアーキテクチャと特性

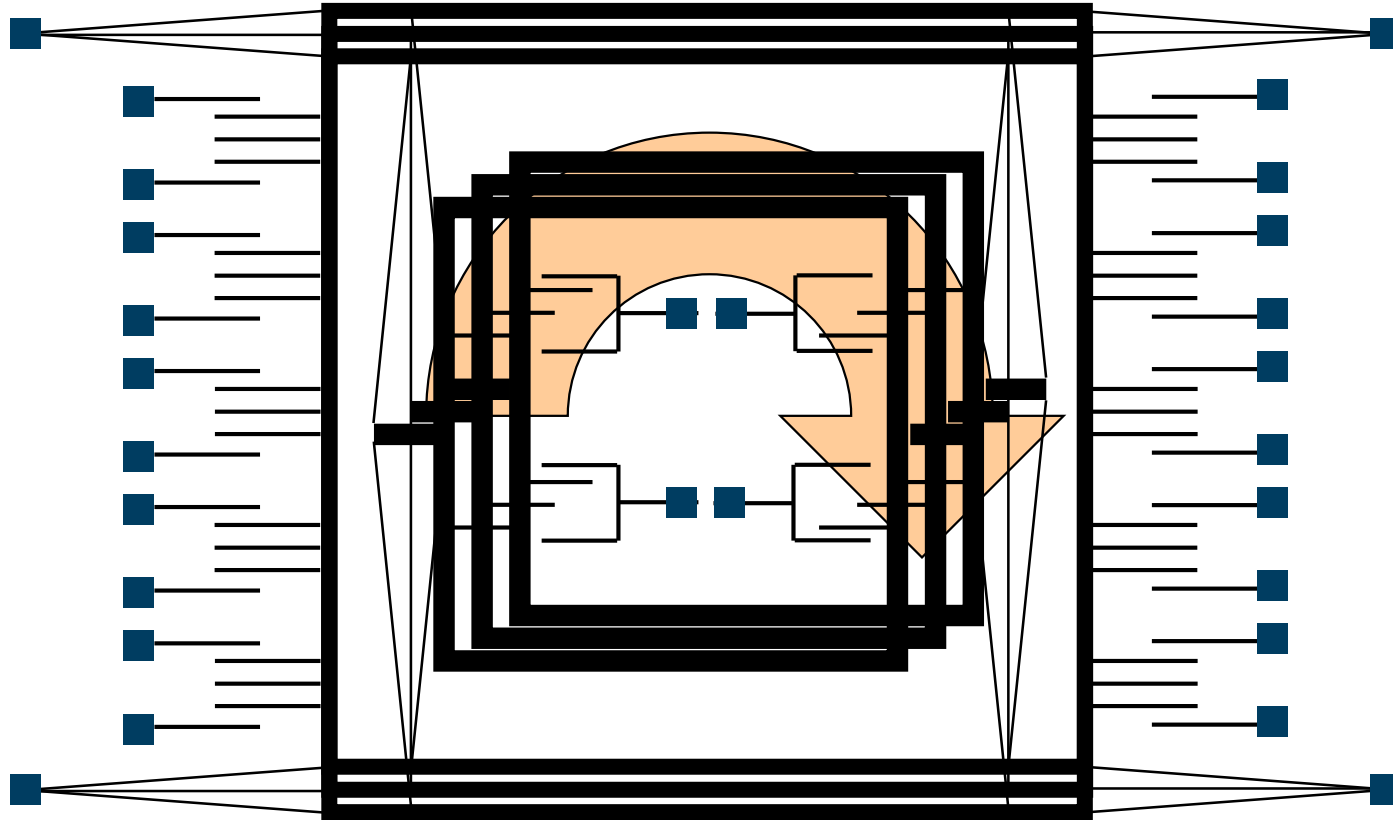
ジャイロセンサーの原理

- ▶ ジャイロセンサーも構造部はMEMSで、コリオリ力を利用して角速度を検出
- ▶ コリオリ力とは？
 - 周期的に動く物体(錘)の動きに、垂直な軸を回転軸とする回転を加えると、回転軸と錘の周期運動の軸に垂直な力が錘に加わる
- ▶ コリオリ力 = $2 * (\omega * \text{錘の周期運動の速さ})$
- ▶ ω : 角速度



センサー素子アーキテクチャと特性

ジャイロセンサーの原理



回転が加わった状態

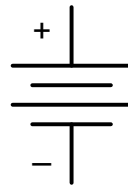
センサー素子とのインターフェース 信号処理回路の注意点

目的から考える要求性能とシステム上の制約

センサー素子タイプのおさらい

▶ 電圧出力

- 主に $\mu\text{V} \sim \text{mV}$
- 増幅の必要性がある（パッシブ）
- 出力インピーダンスが高い（パッシブ）



熱電対
ホール素子
化学センサー(pH, O_2)
温度センサー（電圧出力）
LVDTのようなコイルを利用したもの
など

▶ 抵抗値

- 測定対象の変化による抵抗値変化
- $\text{m}\Omega \sim \text{k}\Omega$
- 電圧出力にする



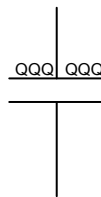
サーミスタ
RTD
ストレンゲージ

▶ 電流出力

- 測定対象の変
- 主に $\text{pA} \sim \mu\text{A}$

▶ 容量・キャパシタ

- 測定対象の変化に比例した容量値変化。通常 pC （ピコクーロン）
- 高出力インピーダンス ($\text{G}\Omega$)
- 高出力キャパシタンス ($\text{pF} \sim \text{nF}$)



加速度センサーエレメント
湿度センサー
マイクロフォン（水中聴音器）
など

出力インピーダンスが高い
微小電圧出力

目的から考える要求性能とシステム上の制約

高精度測定が必要なケース

温度測定



or



0.001°C分解能
0.01°C精度

株式会社チノー
高精度温度計CAB F201

重量測定



or



圧力測定



or



80~125mmHg
=0.1気圧~0.16気圧
静脈 20mmHg=0.03気圧
(1気圧=101.3kPa)

タイヤ 220kPa
静脈 3kPa

目的から考える要求性能とシステム上の制約

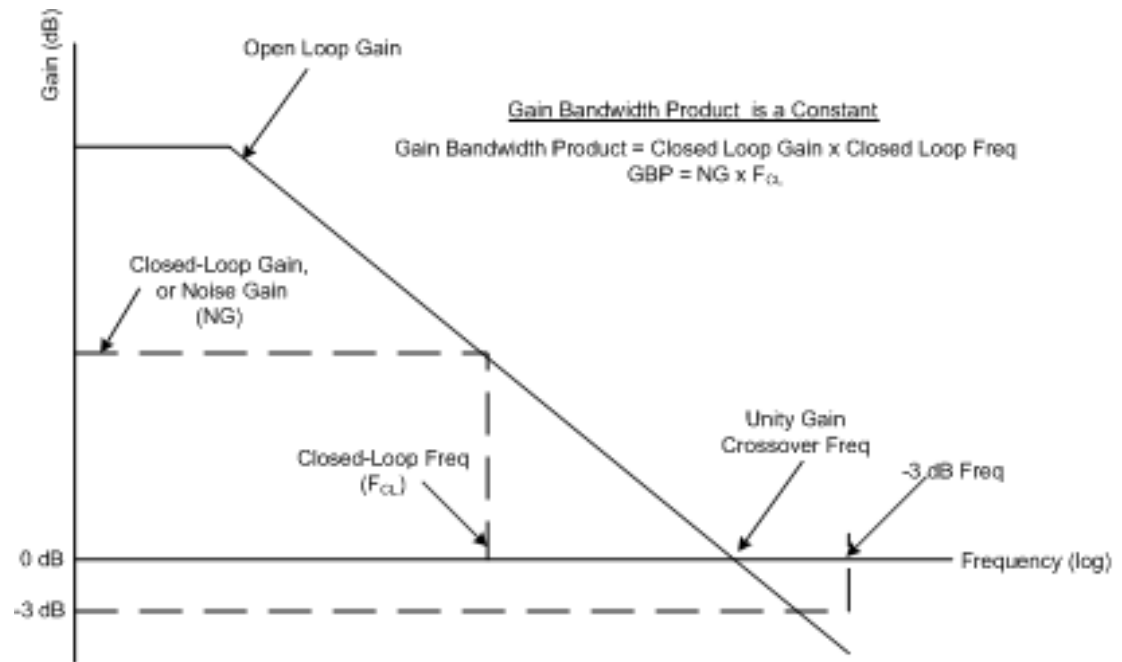
センサー信号処理

- ▶ AD変換するためのシグナル・コンディショニング
 - 1つの要素から電圧出力に変換する (I to V, Q → V)
 - センサー信号の増幅・減衰
 - 同相電圧レベル調整
 - インピーダンス変換
 - センサー出力は一般的にインピーダンスの影響を受けやすく、アンプなどによるバッファが必要
 - ノイズレベルとS/N比
 - フィルタ定数の設定に必要
 - シングルエンド？ or 差動？
 - 周波数特性の改善
 - ノイズ除去
 - 群遅延の位相合わせ

目的から考える要求性能とシステム上の制約

信号周波数帯域

- ▶ オペアンプ選定において1番最初に検討すべき内容
- ▶ 高精度アンプでは、ゲイン帯域幅（GBP）が規定
 - 主に-3dB減衰した時点で規定
 - アンプの場合、ロールオフが始まる周波数以上は精度が低下する状況
- ▶ 推奨：安定性を確保するには、閉ループゲイン内において信号周波数の10倍以上のGBPを持ったアンプを選択する必要があります



Reference: [Linear Circuit Design Handbook](#),
edited by Hank Zumbahlen (Newnes, 2008)

高集積アンプの利点・欠点と注意事項

シグナルコンディショニングに向けた選定

▶ オペアンプ

- 基本構成
- 入力可能電圧範囲であればどこでも利用される

▶ ディファレンスアンプ（差電圧アンプ）

- 入力差電圧を高精度に変換し、シングルエンドで出力
- 広い同相電圧レンジで入力電圧の減衰・増幅を行う

▶ インストルメンテーションアンプ、計装アンプ

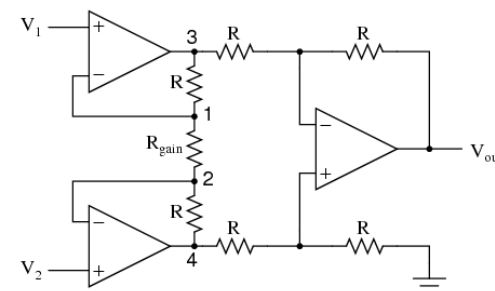
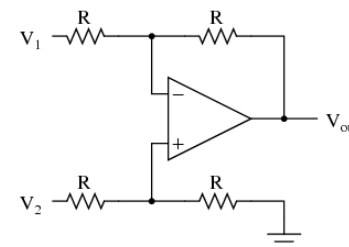
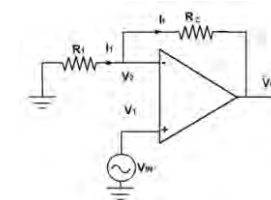
- モノリシックICの上で製造されたマッチングの取れた抵抗を使用するため、同相電圧除去（CMR）が非常に高い
- ディファレンスアンプに比べ、高い入力抵抗値

▶ 電流センスアンプ

- 電源電圧範囲をはるかに超えた同相電圧での測定が可能

▶ アイソレーションアンプ

- 入出力間を絶縁することで、非常に高い同相電圧が取扱える



高集積アンプの利点・欠点と注意事項

差電圧アンプの基本形とその動作

▶ Advantages:

シンプル

オペアンプひとつで構成

高い同相電圧が取扱える

高いCMRR

▶ Disadvantages

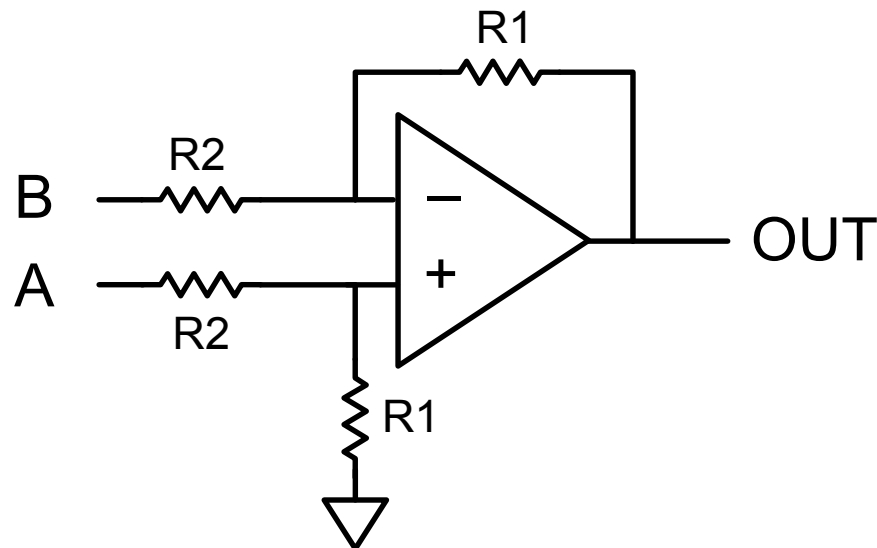
入力インピーダンスのアンバランス

- A入力から見ると: $R2+R1$

- B入力から見ると: $R2$

ノイズがやや多い

ゲイン変更が容易でない



$$R1/R2 = R1'/R2'$$

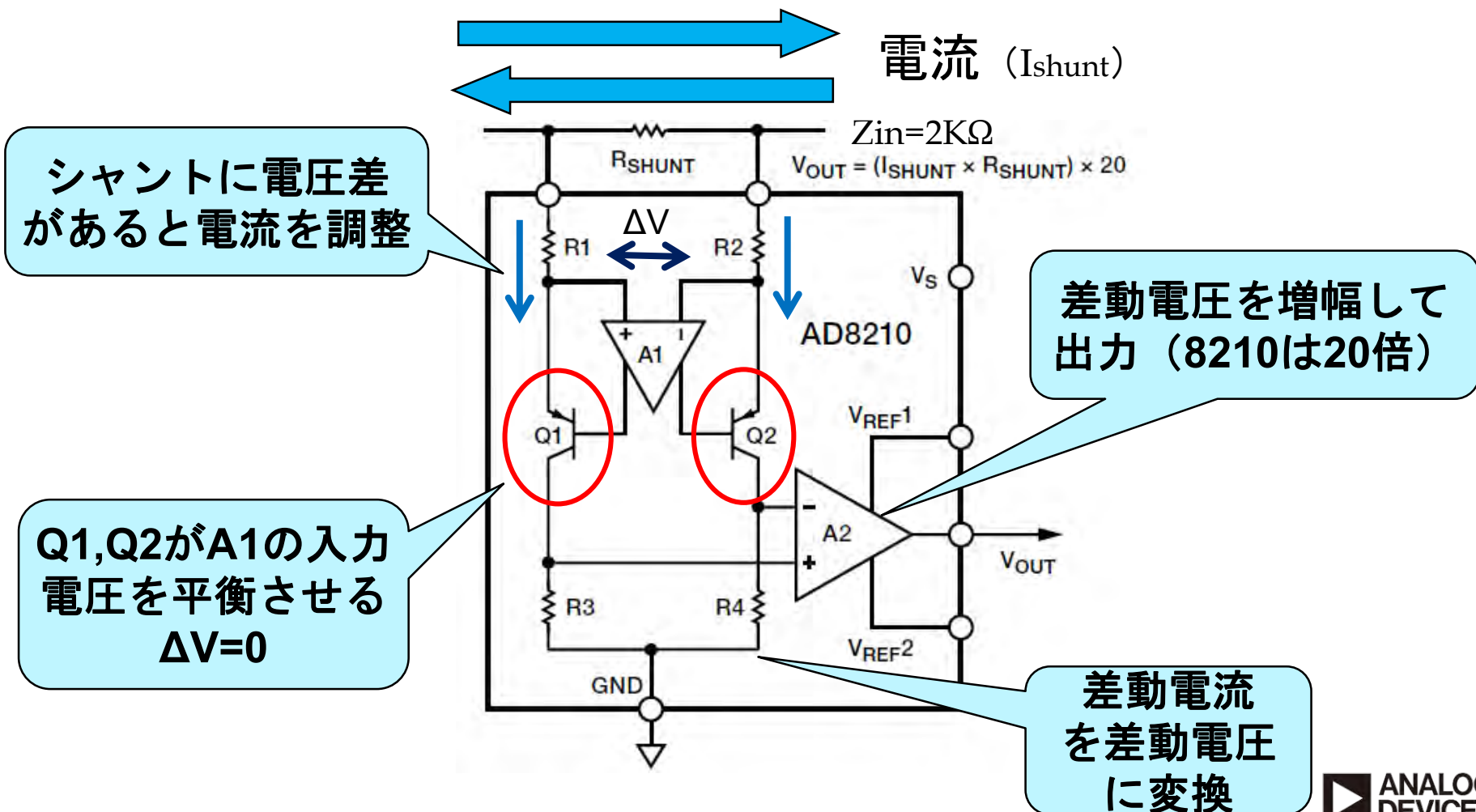
$$CMRR = 20 \log \frac{1+R1/R2}{K_r}$$

K_r は抵抗のマッチング誤差

高集積アンプの利点・欠点と注意事項

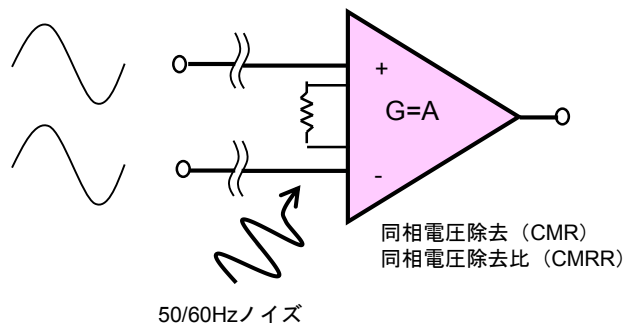
電流センスアンプ シャント電流測定に特化

高同相電圧下の電流計測に特化しています（例 AD8210 CMV=65V）

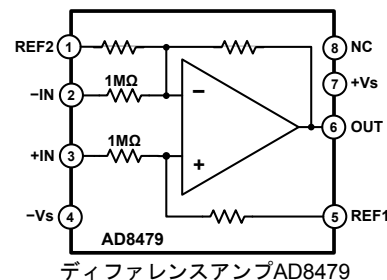
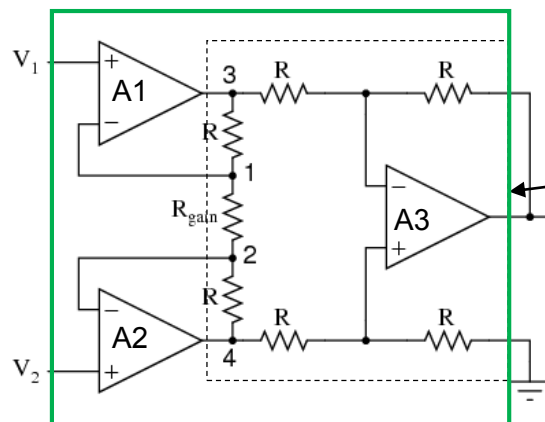


高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプの構造



計装アンプ

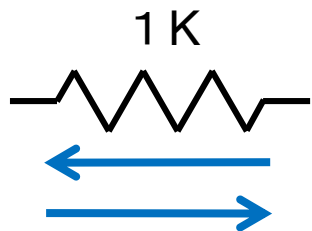


- ▶ モノリシック設計の最も一般的なバージョンです。アンプA1とA2がこの計装アンプ全体のゲイン帯域幅積を決定します
- ▶ 高同相電圧下での微小信号の測定
- ▶ 誘導や容量性のカップリングによるノイズの除去 (例50/60Hz)
- ▶ 高いCMRRを得るために抵抗のトリミングが可能。抵抗の温度係数もマッチングが取れています
- ▶ GBWが1MHz以下が多いが、中には10MHz品(AD8421)があります

高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 入力保護回路の例 (AD8222)

ここに 1 K Ω の抵抗を付けると



過電圧による電流 i

- ◆ 抵抗による電流制限 (6mA max)

$$6\text{mA} \times 1.4\text{K}\Omega = 8.4\text{V}$$

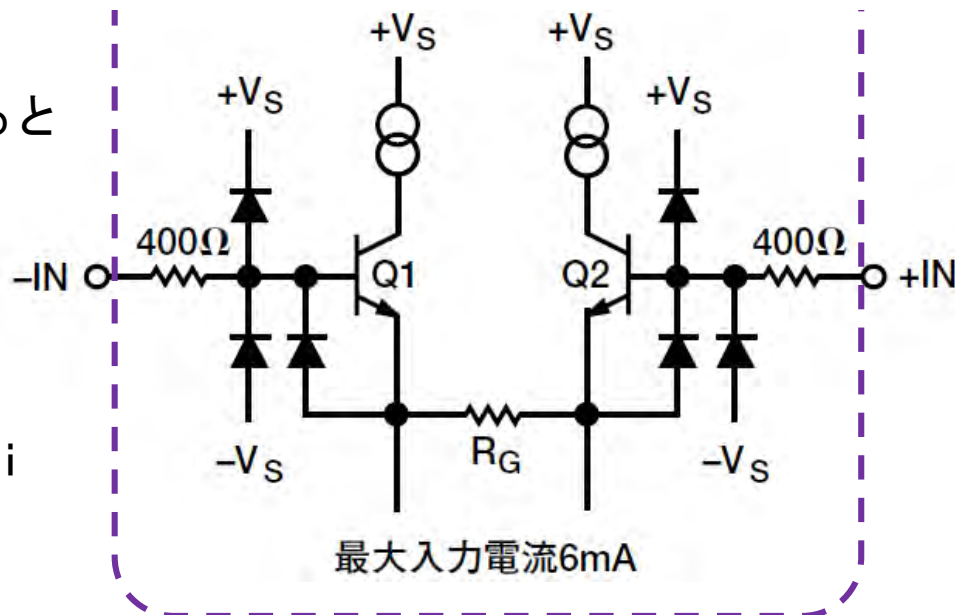
- ◆ 外付け抵抗によるノイズの増加

$$\sqrt{4KRT} \approx 4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad @25^\circ\text{C}$$

AD8222の入力ノイズは、 $8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ です。この抵抗が2本(＋と－入力)付くので、トータルではおよそ $5.7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ のノイズが増えます

$$\sqrt{4^2 + 4^2} = 5.65$$

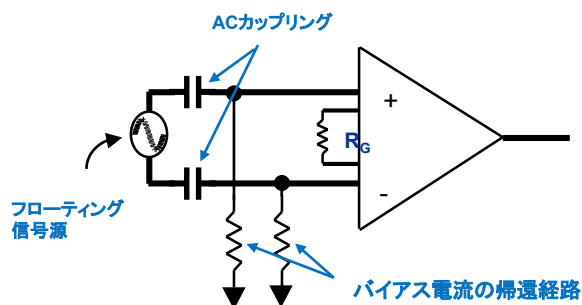
AD8222/8225の入力回路



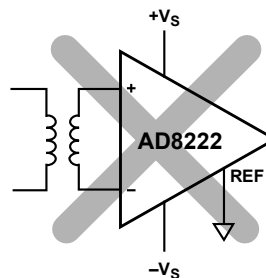
高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意事項 入力端子処理

- ▶ アンプのバイアス電流の帰還経路を設ける
 - 高抵抗負荷で設置

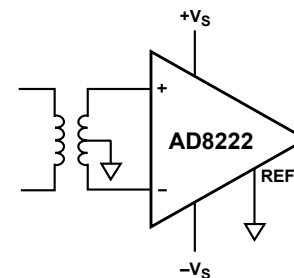


間違い

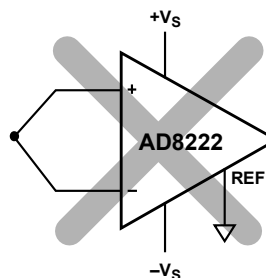


TRANSFORMER

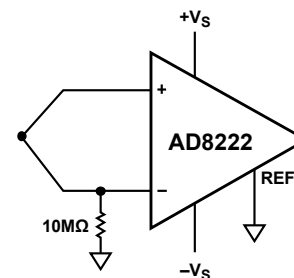
正解



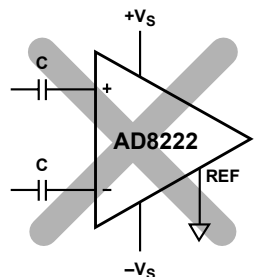
TRANSFORMER



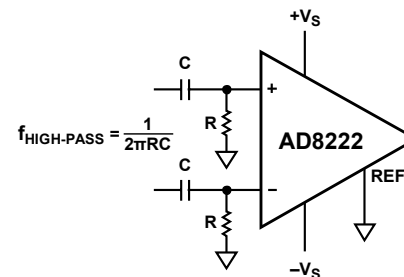
THERMOCOUPLE



THERMOCOUPLE



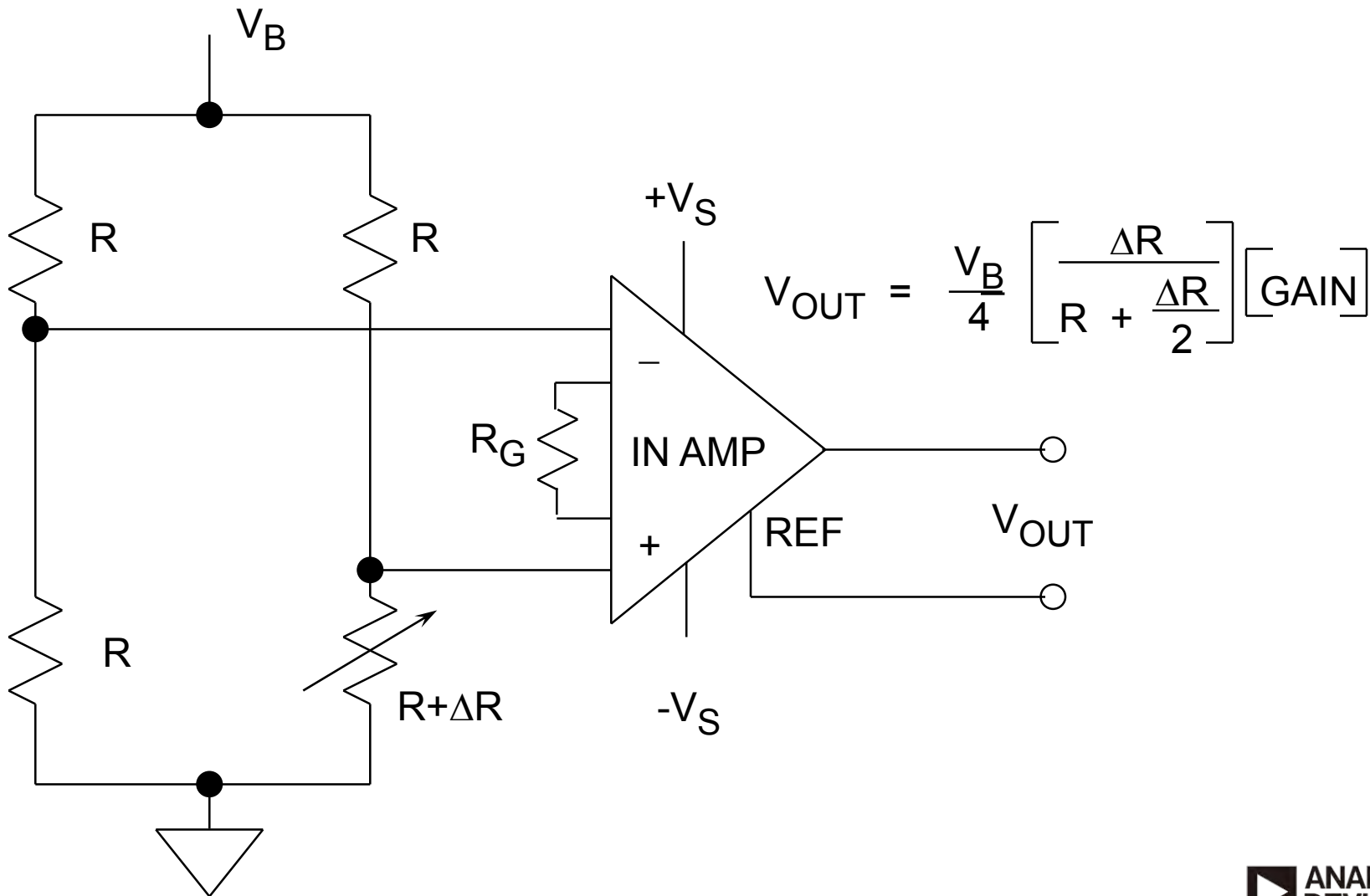
CAPACITIVELY COUPLED



CAPACITIVELY COUPLED

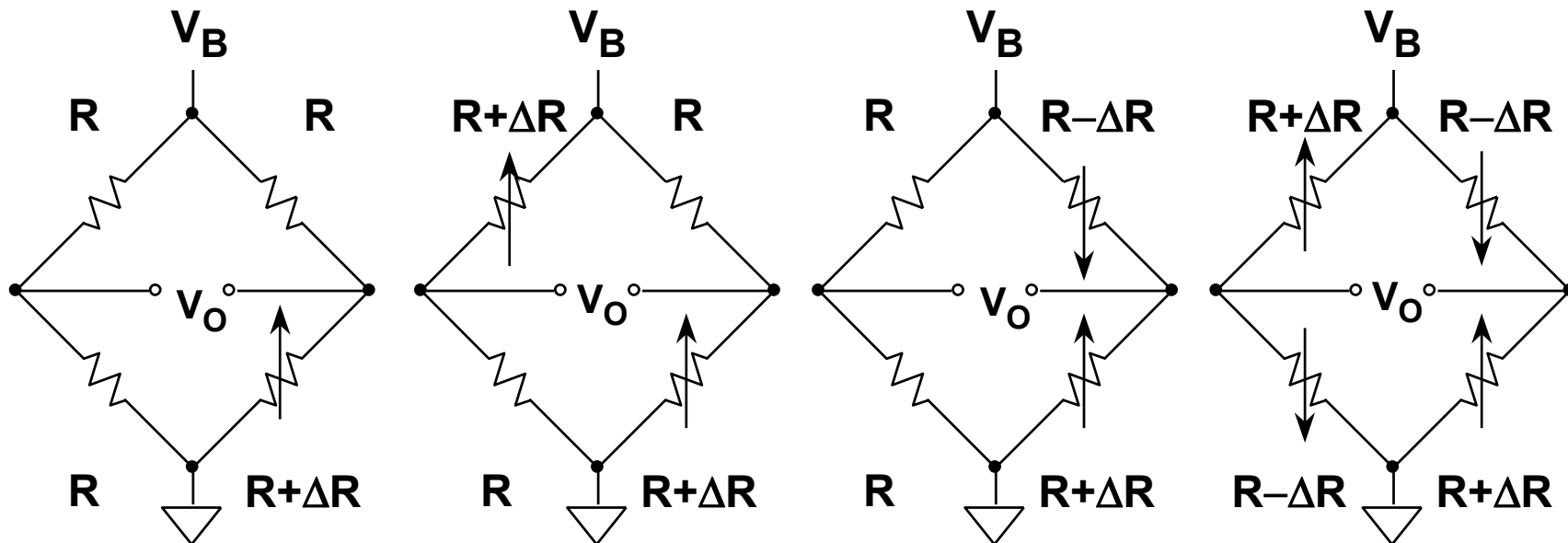
高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意 1ゲージ法ブリッジ回路



高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意 直線性改善案 1



$$V_O: \frac{V_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$$

$$\frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$$

$$\frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$$

$$V_B \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$$

直線性

0.5%/%

0.5%/%

0

0

(A) 1ゲージ法

(B) 2ゲージ法1

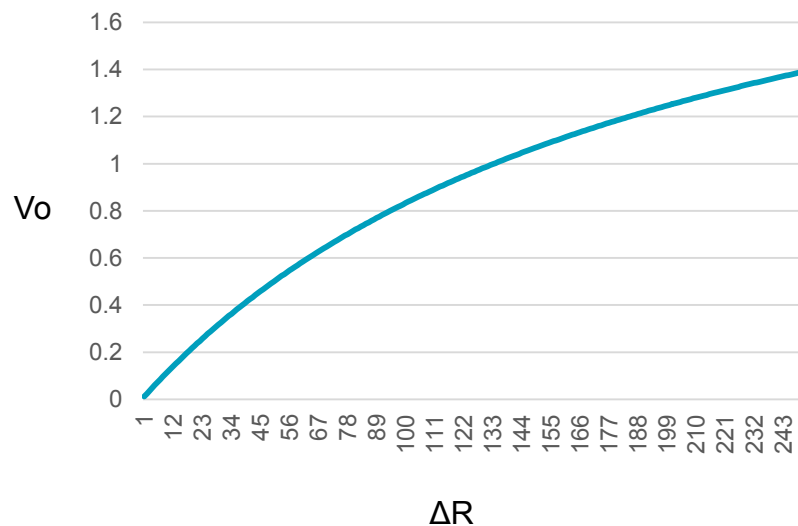
(C) 2ゲージ法2

(D) 4ゲージ法

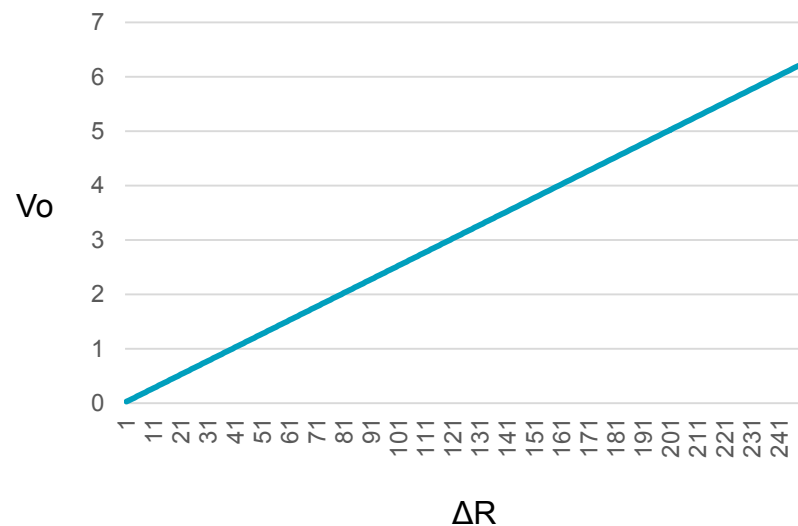
高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意 直線性改善案1 グラフ

(A) 1ゲージ法の場合



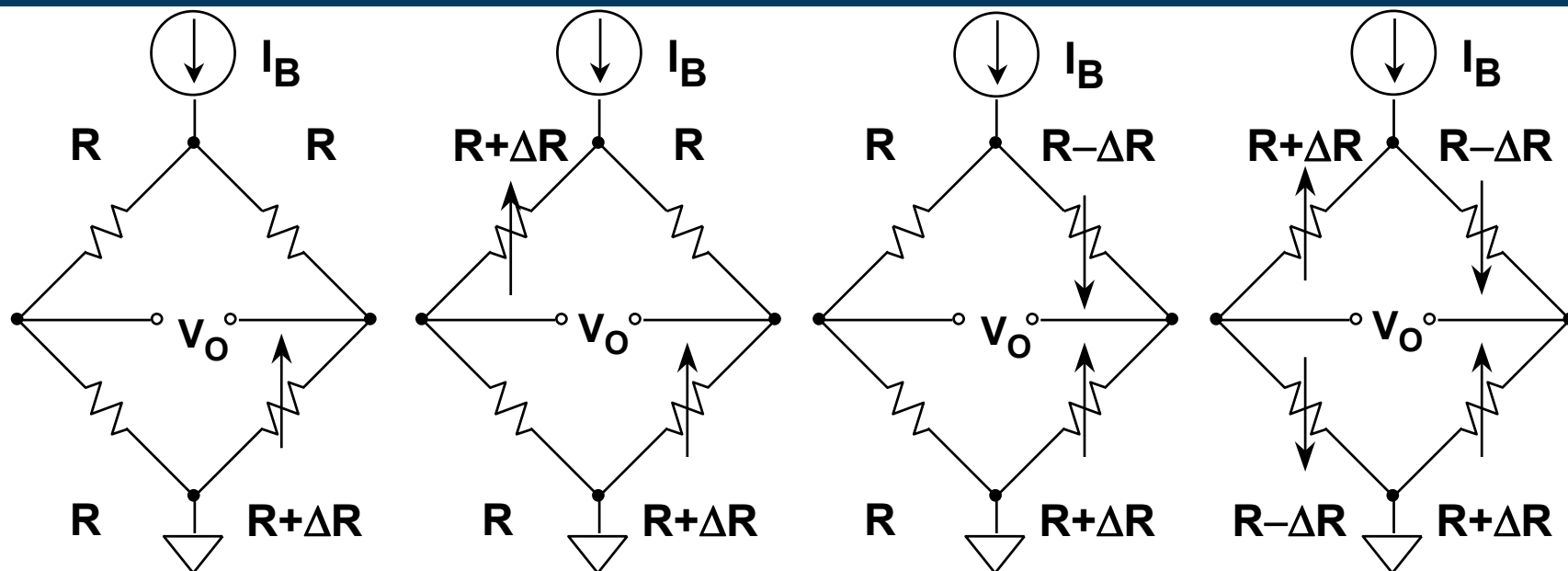
(C) 2ゲージ法の場合



$V_B=5V$, $R=100\Omega$ で計算

高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意 直線性改善案2



$$V_O: \frac{I_B R}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}} \right]$$

$$\frac{I_B}{2} [\Delta R]$$

$$\frac{I_B}{2} [\Delta R]$$

$$I_B [\Delta R]$$

直線性 0.25%/%

0

0

0

(A) 1ゲージ法

(B) 2ゲージ法1

(C) 2ゲージ法2

(D) 4ゲージ法

高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意 誤差要因

▶ DC誤差要因

- オフセット誤差 (RTI、RTO)
- バイアス電流、オフセット電流による誤差 (抵抗により電圧誤差)
- ゲイン・エラー
- ゲイン非直線性

▶ ノイズによる誤差

- 電圧性ノイズ、ノイズ密度 (RTI、RTO)
- 電流性ノイズ (抵抗により電圧ノイズ)

▶ CMRによる誤差

- 入力同相電圧による誤差

▶ 取扱えない電圧範囲に注意

- ダイヤモンドプロットで電圧範囲を確認

Web : 設計支援/アンプ設計・リニアデザインツール/アンプ用ダイヤモンドプロットツール

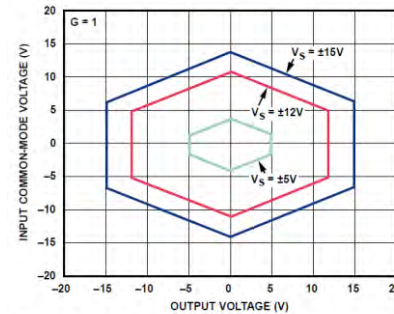
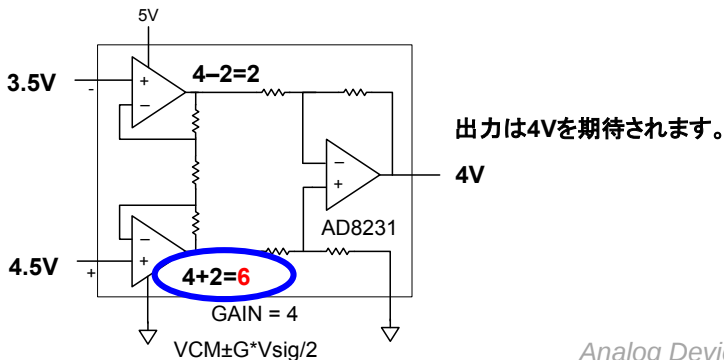


Figure 10. Input Common-Mode Voltage vs. Output Voltage (G = 1), $V_S = \pm 15V$, $V_S = \pm 12V$, $V_S = \pm 5V$

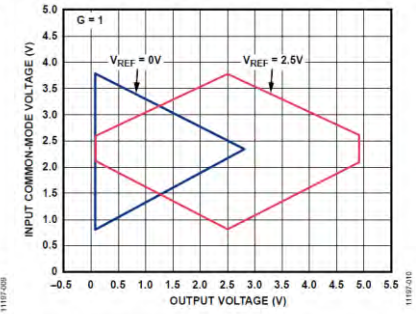
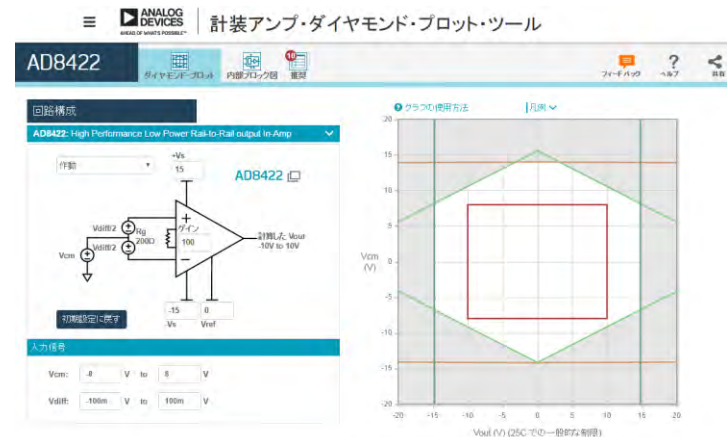
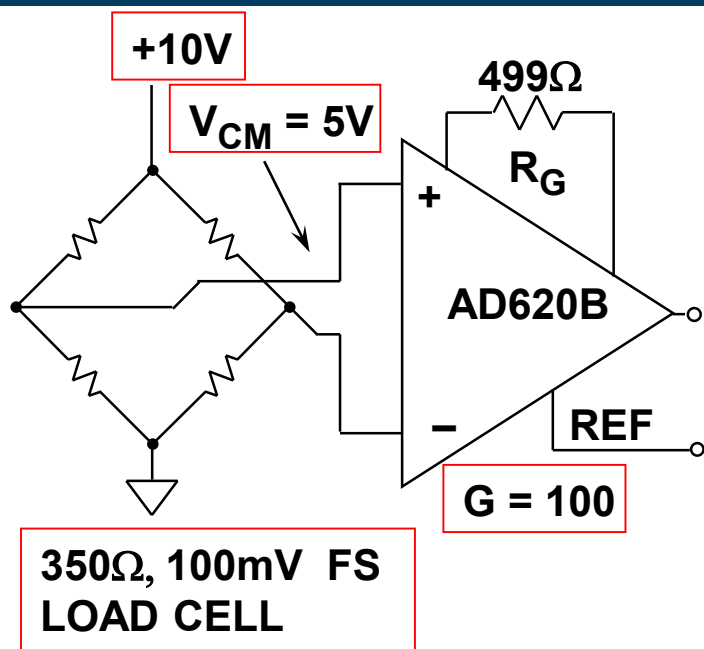


Figure 11. Input Common-Mode Voltage vs. Output Voltage (G = 1), Single-Supply, $V_S = 5V$



高集積アンプの利点・欠点と注意事項

計装アンプ 使用上の注意 ブリッジ回路誤差見積り例



入力換算 誤差見積りのワーストケース, @+25°C
 FULLSCALE: $V_{IN} = 100mV$, $V_{OUT} = 10V$

オフセット電圧 V_{OS}	$55\mu V \div 100mV$	550ppm
オフセット電流 I_{OS}	$350\Omega \times 0.5nA \div 100mV$	1.8ppm
ゲインエラー	0.15%	1500ppm
ゲイン非直線性	40ppm	40ppm
同相除去エラー	120dB $1ppm \times 5V \div 100mV$	50ppm
0.1Hz to 10Hz 1/f ノイズ	$400nV \div 100mV$	4ppm
無調整時誤差	» 9 Bits Accurate	2146ppm
信号分解能	» 14 Bits Accurate	44ppm

AD620B データシートより

@ +25°C $\pm 15V$, $R_L: >10K\Omega$

$V_{OSI} + V_{OSO}/G = 55\mu V \text{ max}$

$I_{OS} = 0.5nA \text{ max}$

ゲインエラー = 0.15%

ゲイン非直線性 = 40ppm

0.1Hz to 10Hz ノイズ = 400nVp-p

CMR = 120dB @ 60Hz



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

オペアンプの選択と回路設計

オペアンプのスペック

主なパラメータ

- ▶ システム精度に影響を与えるパラメータは沢山ありますが、その誤差の影響は使用用途に依存します
- ▶ センサーインターフェースで重要なスペック
 - オフセット電圧
 - オフセットドリフト
 - $1/f$ 電圧ノイズ
 - 広帯域電圧ノイズ
 - 入力バイアス電流
 - 電流ノイズ
 - ゲイン帯域幅
 - 非直線性／歪み
 - スルーレート
 - 出力安定性
 - 消費電流

オペアンプのスペック

1/f ノイズ

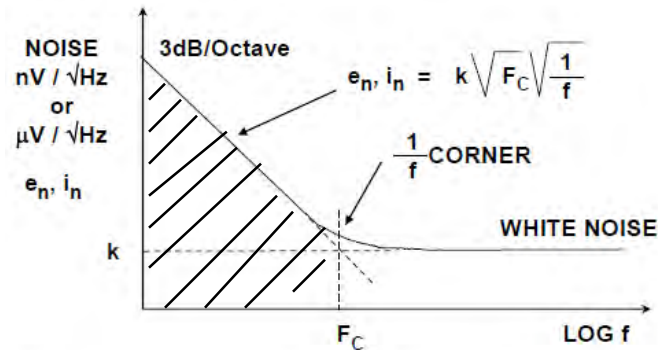


Figure 1: Frequency Characteristic of Op Amp Noise

CMOS Amp (ADA4661)

Peak-to-Peak Noise	e_n p-p	$f = 0.1 \text{ Hz to } 10 \text{ Hz}$	3	$\mu\text{V p-p}$
Voltage Noise Density	e_n	$f = 1 \text{ kHz}$	18	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f = 10 \text{ kHz}$	14	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

Bipolar/JFET Amp (ADA4610)

NOISE PERFORMANCE				
Voltage Noise	e_n p-p	0.1 Hz to 10 Hz	0.45	$\mu\text{V p-p}$
Voltage Noise Density	e_n	$f = 10 \text{ Hz}$	14	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f = 100 \text{ Hz}$	8.2	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

- ▶ 低周波のノイズ規定は、通常 0.1 to 10Hz
- ▶ 特にCMOSアンプでは大きくなります
- ▶ スペックの単位は、一般的に V_{P-P}

オペアンプのスペック

電圧ノイズ密度と帯域

ADA4661	NOISE PERFORMANCE			
	Total Harmonic Distortion Plus Noise	THD + N	$A_V = 1, V_{IN} = 5.4 \text{ V rms at } 1 \text{ kHz}$	
	Bandwidth = 80 kHz		0.0004	%
	Bandwidth = 500 kHz		0.0008	%
	Peak-to-Peak Noise	$e_n \text{ p-p}$	3	$\mu\text{V p-p}$
	Voltage Noise Density	e_n	18	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
			14	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
	Current Noise Density	i_n	360	$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$

- ▶ 信号帯域と共にトータルノイズは増加します（帯域の平方根に比例）
 - ゲイン35倍で1kHzの信号帯域の場合、システムに与える影響は以下の計算で算出できます

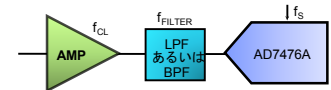
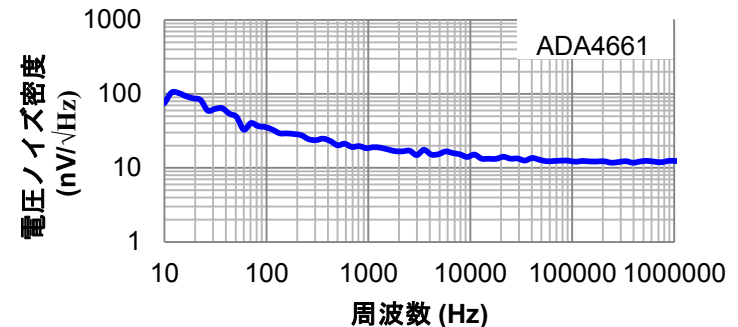
- $\sqrt{1000} * 18 \frac{\text{nVrms}}{\sqrt{\text{Hz}}} = 589 \text{ nVrms}$
- $\text{Vrms} * \text{Crest Factor} = V_{pp} \rightarrow 589 \text{ nVrms} * 6.6 = 3.89 \mu\text{Vpp}$
- $3.89 \mu\text{Vpp} \times 35 = \underline{136 \mu\text{Vpp}}$

- 信号帯域100kHzの場合（10kHz以上フラットと仮定）

- $\sqrt{100,000} * 14 \frac{\text{nVrms}}{\sqrt{\text{Hz}}} = 4427 \text{ nVrms}$
- $\text{Vrms} * \text{Crest Factor} = V_{pp} \rightarrow 4427 \text{ nVrms} * 6.6 = 29.2 \mu\text{Vpp}$
- $29.2 \mu\text{Vpp} \times 35 = \mu\text{Vpp} = \underline{1.02 \text{ mVpp}}$

- ▶ 通常フィルタとADCを使って計測しますので、その場合の計算式は以下となります（フィルタが6dB/octであると仮定）

- $\text{Vrms} = \text{アンプの電圧ノイズ密度} \times \text{ゲイン} \times \sqrt{[\text{フィルタ帯域}] \times [1.57]}$
 - AD7476A（ADC）を使った場合、帯域が13.5MHzあるのでトータルノイズ量は15mVp-pにまで増加してしまいます。必要な帯域にするLPF（100kHz）を挿入すると、帯域制限により1.28mVにまで下げられます



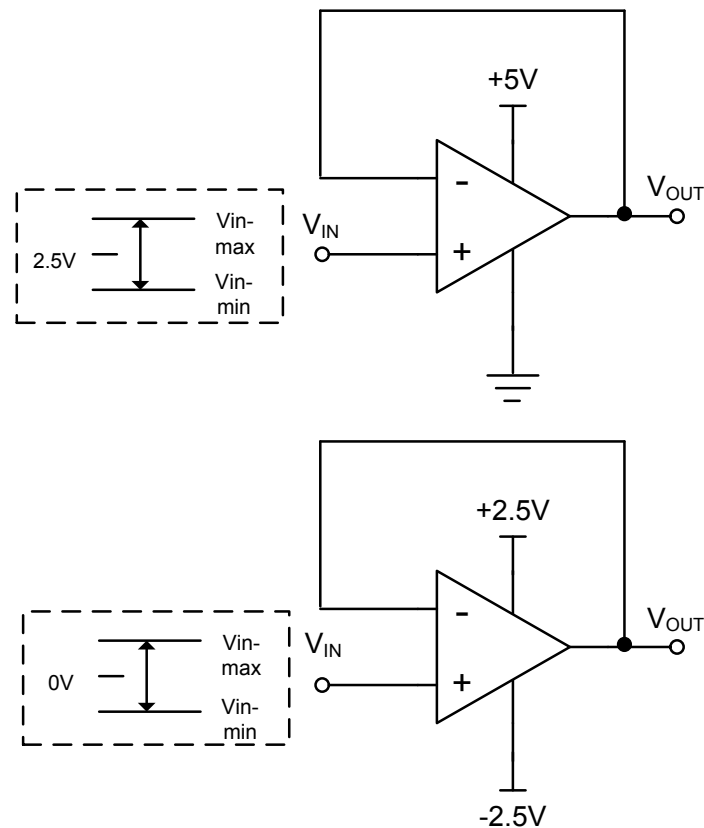
システム仕様からの制約事項

- ▶ 電源電圧
 - 両電源？ 単電源？
 - 取扱う入出力の電圧範囲
- ▶ 動作温度範囲
 - 温度範囲が広がると温度係数が影響し、誤差が大きくなります
- ▶ 消費電流：静的・動的
 - バッテリ使用時間（電池駆動の場合）
 - システム全体の発熱量
- ▶ 負荷電流
 - 負荷が重くなると出力電圧範囲が狭くなります
- ▶ 物理的なサイズ－パッケージサイズと発熱量
- ▶ 入力ch数
 - 例：マルチプレクサ使用？ 1ch入力？

システム仕様からの制約事項

電源

- ▶ オペアンプの電源電圧は、システムで利用出来るアナログ電源の電圧範囲となります
- ▶ 電源電圧が低くなることは、使用されるプロセスも限定的になります
例：CMOSプロセスを使用したオペアンプなど
- ▶ 単電源動作の場合、多くはグランドを中心に設計されますが、この場合グランド＝基準点となることにご注意下さい
 - － オペアンプにはグランド端子はありませんので、マイナス電源がアンプが出力する基準となっています
 - － グラウンドラインにノイズなどにより電位差が発生してしまうと誤差に繋がります



オペアンプ自身は、正負電源の値はいくつであるかは無関係で、電源間の電圧で動作が可能です。

システム仕様からの制約事項

レイルtoレイル入力の必要性

Input Voltage Range					
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = -12.5\text{ V to } +12.5\text{ V}$	-12.5	+12.5	V
ADA4610 with +/- 15V supplies		$-40^{\circ}\text{C} < T_A < +125^{\circ}\text{C}$	100	115	dB
			96		dB

- 電源電圧範囲内であっても入力電圧範囲を超えての入力は、よくある間違いの1つで、システム設計上見落としがちな注意事項です
- 入力電圧範囲を超えた場合、オフセット電圧が大きく振れてしまう可能性があります（レイルtoレイル除く）

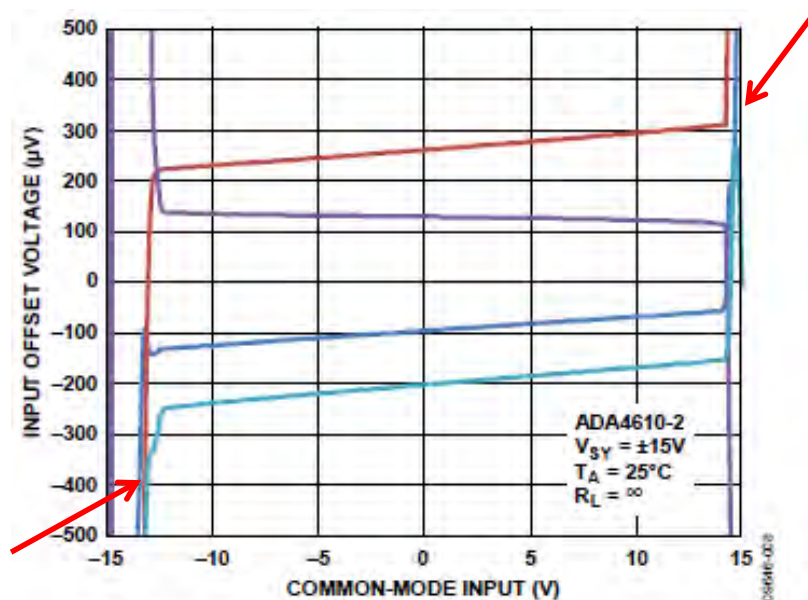


Figure 8. Input Offset Voltage vs. Common-Mode Input Voltage

システム仕様からの制限事項

レイルtoレイル入力オペアンプであっても、入力電圧によりDCオフセットエラーを作る

OUTPUT CHARACTERISTICS

Output Voltage High

V_{OH}

$R_L = 10\text{ k}\Omega$ to V_{CM}
 $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$

2.98 2.99
 2.98

V
 V

- ▶ 例：入力電圧がクロスオーバー領域にあるとき、オフセット誤差が約 $125\mu\text{V}$ 増加します（クロスオーバー歪み）
- ▶ 正電源電圧より約 1.2V 上昇する必要があります

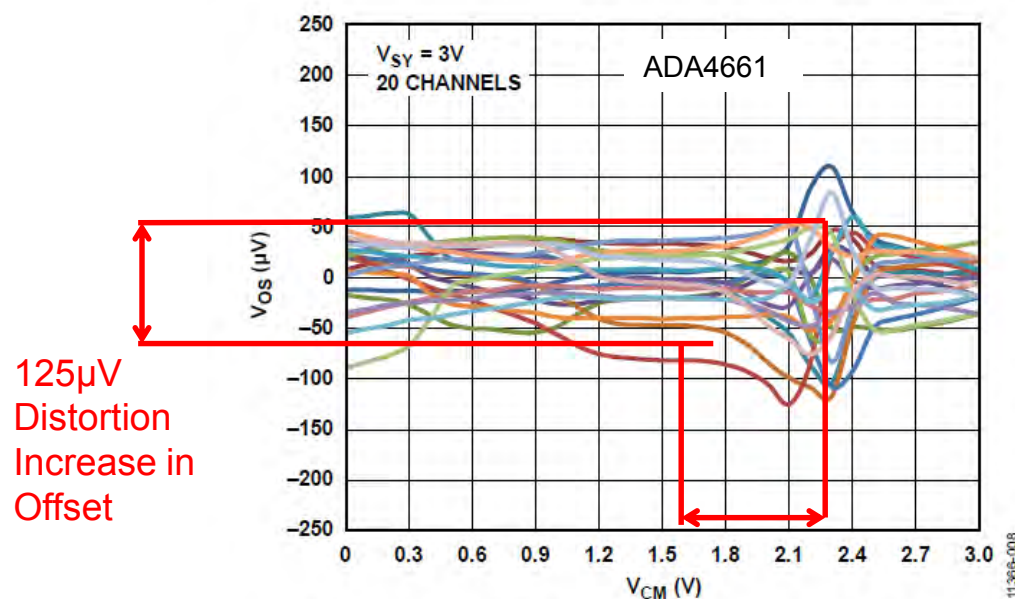
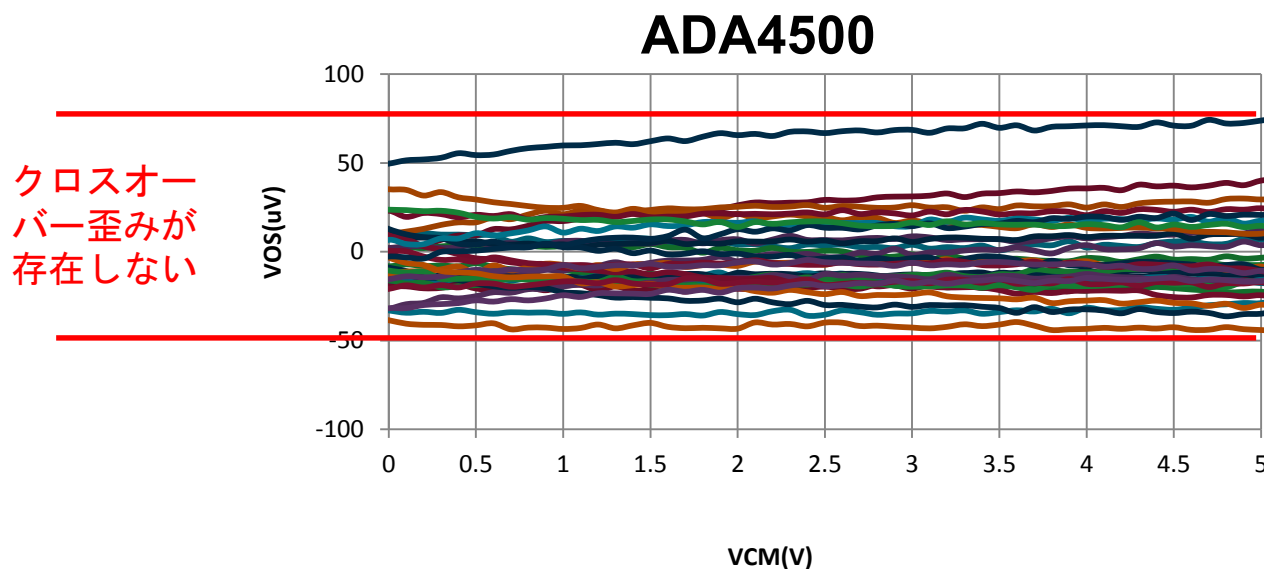


Figure 8. Input Offset Voltage vs. Common-Mode Voltage

システム仕様からの制約事項

入力電圧範囲：歪の無いレイルtoレイル入力

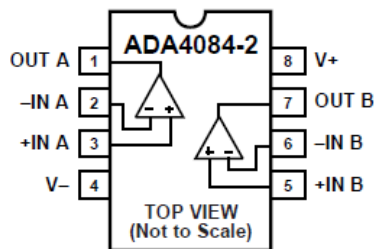
Input Voltage Range	IVR	$-40^{\circ}\text{C} < T_A < +125^{\circ}\text{C}$	V-		V+	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = V- \text{ to } V+$	95	115		dB
ADA4500		$-40^{\circ}\text{C} < T_A < +125^{\circ}\text{C}$	95			dB



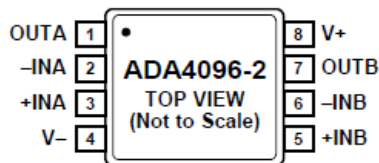
- ▶ 入力段にチャージポンプ回路を持つことでクロスオーバー歪みを回避
- ▶ 電源電圧までフルに動作可能としCMRRも改善。高精度計測を可能にします
- ▶ 消費電力（チャージポンプ動作による）が多少増加

システム仕様からの制約事項

低消費電力



POWER SUPPLY					
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{SY} = \pm 2 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$ $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +125^{\circ}\text{C}$	110	120	dB
Supply Current per Amplifier	I_{SY}	$I_{OUT} = 0 \text{ mA}$ $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +125^{\circ}\text{C}$	105	0.595	0.700 1.00
DYNAMIC PERFORMANCE					
Slew Rate	SR	$R_L = 2 \text{ k}\Omega \text{ to } V_{CM}$	2.4	3.7	V/ μs
Gain Bandwidth Product	GBP	$V_{IN} = 5 \text{ mV p-p}, R_L = 10 \text{ k}\Omega, A_V = 100$		15.9	MHz
Unity-Gain Crossover	UGC	$V_{IN} = 5 \text{ mV p-p}, R_L = 10 \text{ k}\Omega, A_V = 1$		9.6	MHz
Phase Margin	Φ_M			85	Degrees
-3 dB Closed-Loop Bandwidth	-3 dB	$A_V = 1, V_{IN} = 5 \text{ mV p-p}$		13.9	MHz
Settling Time	t_S	$A_V = 10, V_{IN} = 8 \text{ V p-p}, 0.1\%$		4	μs
Total Harmonic Distortion Plus Noise	THD + N	$V_{IN} = 2 \text{ V rms}, R_L = 2 \text{ k}\Omega, f = 1 \text{ kHz}$		0.003	%
NOISE PERFORMANCE					
Voltage Noise	$e_n \text{ p-p}$	0.1 Hz to 10 Hz		0.14	$\mu\text{V p-p}$
Voltage Noise Density	e_n	$f = 1 \text{ kHz}$		3.9	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Current Noise Density	i_n	$f = 1 \text{ kHz}$		0.55	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$



POWER SUPPLY					
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{SY} = 3 \text{ V to } 36 \text{ V}$ $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +125^{\circ}\text{C}$	100		dB
Supply Current per Amplifier	I_{SY}	$V_O = V_{SY}/2$ $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +125^{\circ}\text{C}$	90	47	55 75
DYNAMIC PERFORMANCE					
Slew Rate	SR	$R_L = 100 \text{ k}\Omega, C_L = 30 \text{ pF}$		0.3	V/ μs
Gain Bandwidth Product	GBP	$V_{IN} = 5 \text{ mV p-p}, R_L = 10 \text{ k}\Omega, A_V = 100$		595	kHz
Unity-Gain Crossover	UGC	$V_{IN} = 5 \text{ mV p-p}, R_L = 10 \text{ k}\Omega, A_V = 1$		550	kHz
Phase Margin	Φ_M			52	Degrees
-3 dB Closed-Loop Bandwidth	$f_{-3 \text{ dB}}$	$A_V = 1, V_{IN} = 5 \text{ mV p-p}$		1140	kHz
NOISE PERFORMANCE					
Voltage Noise	$e_n \text{ p-p}$	0.1 Hz to 10 Hz		0.7	$\mu\text{V p-p}$
Voltage Noise Density	e_n	$f = 1 \text{ kHz}$		27	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Current Noise Density	i_n	$f = 1 \text{ kHz}$		0.2	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

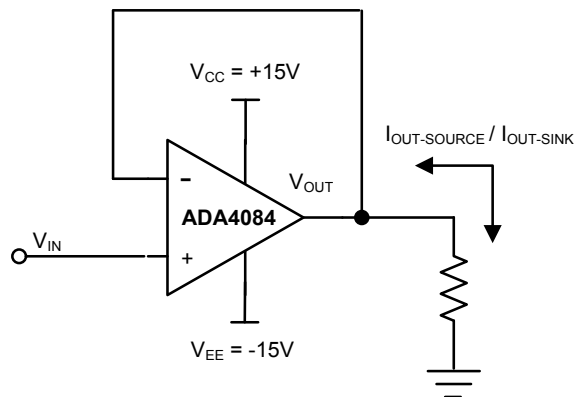
低消費電力によるトレードオフ

- 周波数帯域が狭くなります
 - スルーレートが低くなります
- ノイズが増加します

* 両デバイス共にバイポーラプロセス
両デバイス共に $V_S = \pm 5 \text{ V}$ 時

システム仕様からの制約事項

負荷電流とレールtoレール出力



OUTPUT CHARACTERISTICS

Output Voltage High

V_{OH}

$R_L = 10\text{ k}\Omega$ to V_{CM}
 $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$

Output Voltage Low

V_{OL}

$R_L = 2\text{ k}\Omega$ to V_{CM}
 $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$
 $R_L = 10\text{ k}\Omega$ to V_{CM}
 $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$
 $R_L = 2\text{ k}\Omega$ to V_{CM}

レールtoレール
出力(RRO)

14.85	14.9	V
14.8		V
14.5	14.6	V
14.0		V
	-14.95	-14.9
		-14.8
	-14.9	-14.80
		V

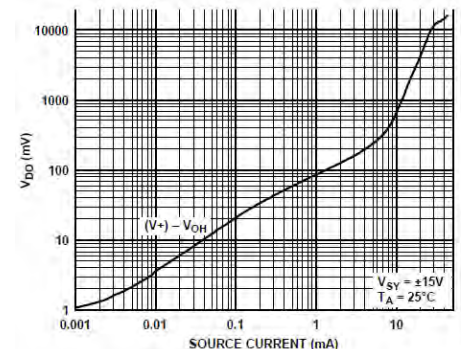


Figure 70. Dropout Voltage vs. Source Current

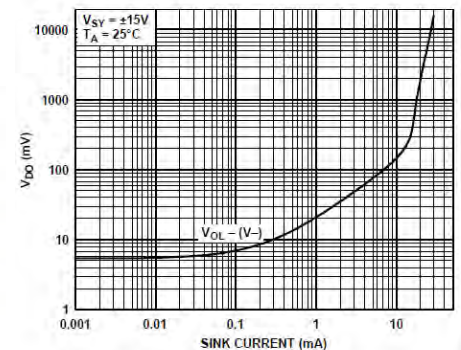


Figure 71. Dropout Voltage vs. Sink Current

- ▶ 負荷が重くなると出力電圧範囲が狭くなります
 - 負荷電流の増加に伴い、電源－出力間の「ドロップアウト電圧 (V_{DO})」も増加します

オペアンプを選択する上での重要なポイント3つ

センサーの特性

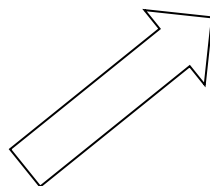
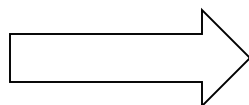
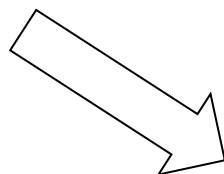
- 出力タイプ（抵抗、電圧、電流、電荷）
- インピーダンス

信号の特性

- 帯域
- 振幅
- ノイズ
- ダイナミックレンジ

システム上の制約

- 電源電圧範囲
- 動作温度範囲
- パッケージサイズ
- 他

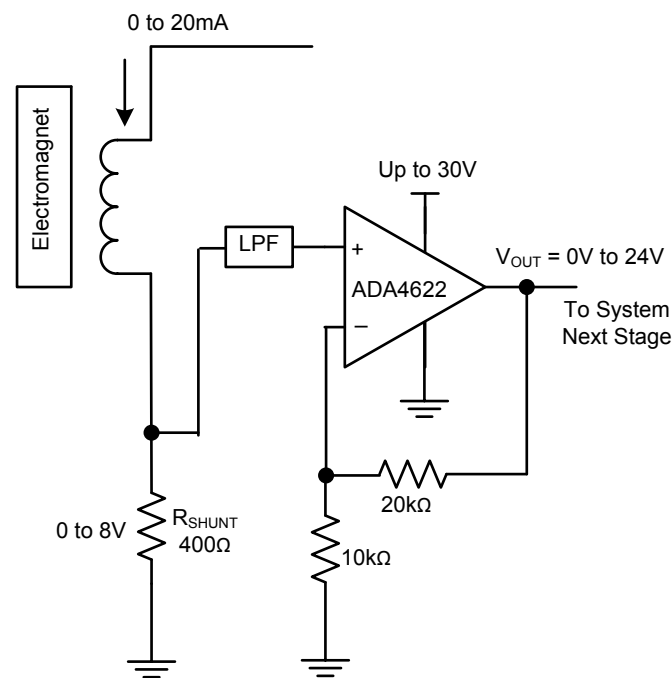


オペアンプのパラメータ

- オフセット電圧
- オフセットドリフト
- 入力バイアス電流 など

オペアンプを使った電流センシング 高精度はかりの例

- ▶ マイクログラムを測定する
- ▶ センサー：
 - 高分解能が求められる
 - 200万ステップの分解能が欲しい (~21 bits)
- ▶ システム感度：
 - $20\text{mA}/2\text{M} = 10\text{nA} / \text{LSB}$
- ▶ システム動作温度範囲
 - $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$
- ▶ 信号：
 - フルスケール = 20mA
 - 比較的大きめのシャント抵抗を使用すると仮定（熱によるノイズは無視）
 - $4\mu\text{V}/\text{LSB}$ とするには 400Ω が必要
 - フルスケール電圧 = 8V
- ▶ 期待する誤差： $< 1 \text{ LSB}$

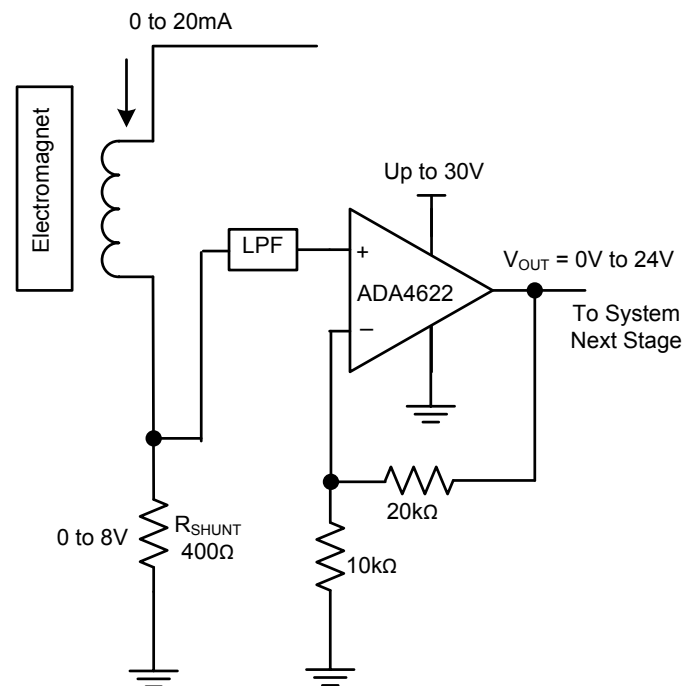


オペアンプを使った電流センシング 高精度はかりの例

- ▶ オペアンプのキースペック
 - ノイズ
 - オフセット
- ▶ ADA4622
 - 低ノイズ, 低温度ドリフト
 - 入力がグランド（もしくはそれ以下）レベルであっても取扱える
- ▶ トータルエラー = $302\ \mu\text{V} = 75\ \text{LSB}$
- ▶ エラーの大半はオフセットドリフト
 - ゼロドリフトアンプを検討する

パラメータ	ADA4622 B-Grade	システム誤差
オフセット電圧	$350\ \mu\text{V}$	0 (校正済み)
オフセットドリフト	$5\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	$300\ \mu\text{V}$
1/f ノイズ	$0.75\ \mu\text{Vpp}$	$2.25\ \mu\text{V}$
トータル		$302\ \mu\text{V}$

75 LSB

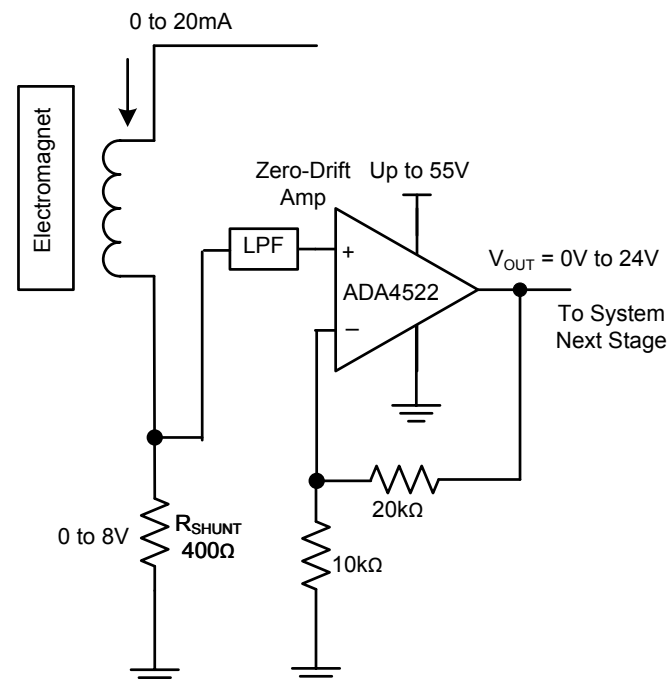


オペアンプを使った電流センシング 高精度はかりの例

- システムとしては8Vの入力電圧が
取扱える必要がある
 - ADA4528は除外 (入力範囲5.5Vのため)
 - ADA4522は、広い電源電圧が適用可能
(53.5V IVR)
- トータルエラー : $1.6\mu\text{V} = 0.4 \text{ LSB!}$

パラメータ	ADA4522	システム誤差
オフセット電圧	5 μV	0 (校正済み)
オフセットドリフト	22nV/°C	1.3 μV
1/f ノイズ	117nVpp	351nV
トータル		1.6 μV

0.4 LSB





想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Appendix

推奨製品

推奨製品一覧

オペアンプ

PART	FEATURES
ADA4077 / ADA4177	両電源、高精度バイポーラ オペアンプ オフセットとドリフト性能が高いので、産業分野におけるアナログ入力段に最適。ADA4177には、過大入力電圧保護とEMIフィルタが内蔵されています
ADA4084	高速、低ノイズ、高精度、レイルtoレイル入出力、3~30V動作、バイポーラ オペアンプ 多用途で優れた性能を発揮します
ADA4661	16V、低バイアス電流(3pA)、レイルtoレイル入出力、CMOS高精度 オペアンプ 容量性負荷に強く、広い入力範囲に亘ってフラットなCMRRを提供します
ADA4528	超低ノイズ、2.2~5V動作、レイルtoレイル入出力、ゼロドリフト オペアンプ オフセットと温度ドリフトを大幅に抑えられています。
ADA4522	超低ノイズ、5~55V動作、低消費電力、レイルtoレイル出力、ゼロドリフト オペアンプ 1/fノイズが高い周波数までフラット、EMIノイズフィルタ内蔵
ADA4530	超低バイアス電流20fA オペアンプ
ADA4610	低ノイズ、低バイアス(25pA)、レイルtoレイル出力、JFET オペアンプ AD8512ファミリーの次世代品
ADA4622	単電源、低バイアス電流(10pA)、JFET オペアンプ AD822の次世代品

推奨製品一覧

計装アンプ

PART	FEATURES
AD8422	高精度 計装アンプ (AD620, AD8221 次世代品)
AD8421	低ノイズ、高速、低消費電力
AD8429	超低ノイズ、高速
AD8237	低消費電力、ゼロドリフト、単電源動作可能
AD8420	超低消費電力、単電源動作可能
AD8428	高速、低ノイズ、高精度 計装アンプ

電流センスアンプ

PART	FEATURES
AD8418	高精度、最高性能
AD8210	AC特性において最高性能

推奨製品一覧

ディファレンスアンプ

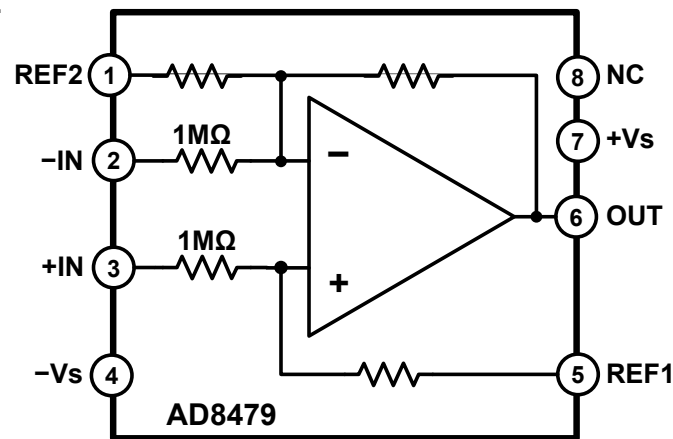
PART	FEATURES
AD8270	高精度、高速2チャンネル内蔵
AD8274	高精度、高速、超低歪み
AD8275	ADCドライバーに最適。16ビットADC対応。ゲイン=0.2、レベル変換可能
AD8475	ADCドライバーに最適。減衰アンプ、完全差動、高精度、ゲイン選択可能
AD8479	600Vと高入力コモンモード電圧、電源 $\pm 2.5 \sim \pm 18V$ 、低消費電流 $550\mu A$ 、レイルtoレイル出力、低オフセット、低ドリフト、高精度 ディファレンスアンプ

高集積アンプの利点・欠点と注意事項

AD8479: $\pm 600\text{V}$ CMV $G=1$ ディファレンスアンプ

■ キースペック

- 同相電圧 : $\pm 600\text{V}$ @ $\pm 15\text{Vcc}$; $\pm 240\text{V}$ @ $\pm 5\text{Vcc}$
- 入力インピーダンス : コモン $500\text{k}\Omega$, 差動 $2\text{M}\Omega$
- ゲイン : 1 固定
- ゲインエラー : $0.01\%\text{max}$ B-grade
- ゲインドリフト : $5\text{ ppm}/^\circ\text{C max}$
- オフセット電圧 : 1 mV max B-grade
- オフセットドリフト : $10\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C max}$
- 同相電圧除去比 : 90dB min B-grade
- 帯域 : 130 kHz
- スルーレート : $7.5\text{ V}/\mu\text{s}$
- ノイズ : $1.6\text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ RTI @ 1 kHz
- 電源電圧範囲 : $5\text{V to } 36\text{V}$
- 消費電流 : 0.55mA typ , 0.65mA max



センサー素子のアーキテクチャと特性

代表的なトランスジューサの特性

トランスジューサの種類	対象	出力のタイプ	出力インピーダンス
サーミスタ	温度	温度による抵抗の変化 (−TC) 4%/°C (@+25°C) 非直線性出力	50Ω〜1MΩ (@25°C)
熱電対	温度	低インピーダンス信号源 (+TC) 10〜100μV/°C mV出力レベル (@+25°C)	20Ω〜20kΩ
測温抵抗体 (RTD)	温度	温度に対して低インピーダンス信号源 (+TC) 0.1〜0.66%/°C	20Ω〜20kΩ
ロードセル (ストレンゲージ)	ねじれ 重量	可変抵抗 2mV/V励起 0.1%標準フルスケール変化	120Ω〜1kΩ
シャント	電流	低抵抗値出力	1Ω以下
ECGモニター	心電図	高インピーダンス電圧出力 50μV〜2mV出力	1KΩ〜100kΩ
フォトダイオード	光	光強度に応じて電流が増加 10pA〜1mA出力	GΩ
ホール・センサー	磁界	磁界強度に応じて抵抗値変化 (素子) 数mV/mT出力	1Ω〜5kΩ (素子)

センサー素子のアーキテクチャと特性

ブリッジ回路に使われる抵抗型センサーの一般的なレンジ

- ▶ スtren・ゲージ 120Ω , 350Ω , 3500Ω
- ▶ 秤量計 ロードセル 350Ω - 3500Ω
- ▶ 圧力センサー 350Ω - 3500Ω
- ▶ 湿度センサー $100k\Omega$ - $10M\Omega$
- ▶ 抵抗温度センサー
 - RTD 100Ω , 1000Ω
 - サーミスタ 100Ω - $10M\Omega$

