

シャント抵抗、高性能オペアンプ、ツェナーダイオード

## ローサイド電流センシング回路設計

自動車や産業機器の分野において、電流（電圧）制御、過電流制限、バッテリー残量検知等の機能にローサイド電流センシング回路が用いられています。シャント抵抗およびオペアンプと外付け部品で実現するローサイド電流センシング回路は、他の方式に比べて最も簡易に、ローコストで組み込みが可能です。このアプリケーションノートでは、ローサイド電流センシング回路における、部品選定や回路定数の決定指針を解説します。

### ローサイド電流センシング回路

一般的なローサイドセンシング回路を Figure 1 に示します。負荷 (LOAD) で発生した負荷電流 ( $I_{LOAD}$ ) がシャント抵抗 ( $R_{SHUNT}$ ) によって、 $\Delta V_{SHUNT}$  の電圧が発生します。この電圧をオペアンプ (OPAMP) で差動増幅し、後段の AD コンバータやマイクロコンピュータ等に接続し、電流値を計測し、システム制御に使用します。

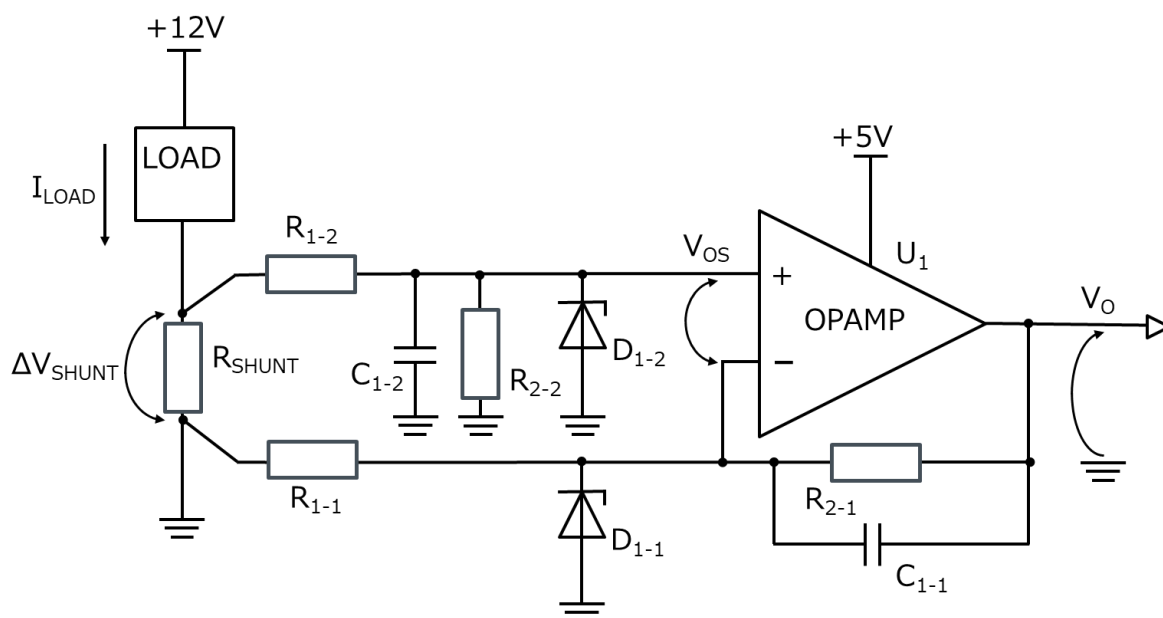


Figure 1. 一般的なローサイド電流センシング回路

Figure 1 の各記号は下記のとおりです。

OPAMP: オペアンプ

LOAD: 負荷

$I_{LOAD}$ : モニタリングする電流

$R_{SHUNT}$ : シャント抵抗

$V_{OS}$ : オペアンプの入力オフセット電圧

$\Delta V_{SHUNT}$ : シャント抵抗両端に発生する電圧

$R_{1-1}=R_{1-2}=R_1$ 、 $R_{2-1}=R_{2-2}=R_2$ : ゲイン設定用抵抗

$C_{1-1}=C_{1-2}=C_1$ : フィルタ用コンデンサ

$D_{1-1}$ 、 $D_{1-2}$ : オペアンプの入力保護用ツェナーダイオード

オペアンプの入力オフセット電圧が無い場合、Figure 1 の回路は以下の式で表せます。

$$V_O = I_{LOAD} \times R_{SHUNT} \times \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [\text{V}] \quad \cdots (1)$$

実際の回路では、オペアンプの入力オフセット電圧、シャント抵抗の抵抗値公差、ゲイン設定用抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  の相対公差が、電流センシング精度に影響します。これらを加味した時の出力電圧  $V_O'$  は、以下の式で表せます。

$$V_O' = \left[ I_{LOAD} \times R_{SHUNT}' \times \left( \frac{R_2'}{R_1'} \right) \right] + \left[ V_{OS} \times \left( \frac{R_1' + R_2'}{R_1'} \right) \right] \quad [\text{V}] \quad \cdots (2)$$

ここで、 $R_{SHUNT}'$ 、 $R_1'$ 、 $R_2'$  は、それぞれ公差を含んだ値です。オペアンプの入力オフセット電圧  $V_{OS}$  は、計算の便宜上、+ 方向のみで表現しています。

また、この回路で実現できる電流センシング精度  $E_{rr}$  は、以下の式で表せます。

$$E_{rr} = \frac{V_O' - V_O}{V_O} \times 100 \quad [\%] \quad \cdots (3)$$

## 回路定数の決め方

これらの式から、部品選定と回路定数の決め方を説明します。まずは装置の要求仕様として、以下の項目を決めます。

電流センシング範囲： $I_{LOADmin} \sim I_{LOADmax}$  [A]

電流センシング精度： $E_{rr}$  [%]

電流センシング周波数： $f_{sense}$  [Hz]

電流センシング周波数は電流変化に対してどれだけの速さで測定可能かを表すものです。電流を検出する速度が遅い場合は、負荷電流変化に追従できず正しく測れません。一方で、電流を検出する速度が速すぎると、ノイズ等を計測してしまい、正しく測れません。測定したい電流の時間遷移にマッチしたセンシング周波数を設計する必要があります。

シャント抵抗両端に発生させる電圧の最大値： $\Delta V_{SHUNTmax}$  [V]

シャント抵抗  $R_{SHUNT}$  で発生する電圧値  $\Delta V_{SHUNT}$  は大きいほど電流センシング精度がよくなります(補足 1 参照)。

しかし、ローサイド電流センシング方式では、 $\Delta V_{SHUNT}$  が負荷とグランドの間に生じることから、グランド電圧が上昇したような状態となり、負荷回路動作が不安定になることがあります。

オペアンプの最大出力電圧： $V_{Omax}$  [V]

オペアンプが出力できる最大電圧と、後段の AD コンバータ等が入力できる電圧範囲との兼ね合いで仕様を決定します。

仕様を決めた後、次頁の手順で部品選択と定数を計算します。

## Step 1: シャント抵抗の選定

シャント抵抗値は、先に決めた装置の要求仕様から、(4)式で求めます。また、シャント抵抗には、大電流が流れるため、定格電力にも注意する必要があります。シャント抵抗自身の定格内使用は当然ですが、シャント抵抗発熱による周囲への影響も加味し、十分にマージンを持った定格電力容量を持つシャント抵抗を選定する事を推奨します。定格電力は(5)式で求めます。これらの条件を満たすシャント抵抗を選びます。

$$\text{シャント抵抗値} \quad R_{SHUNT} = \frac{\Delta V_{SHUNTmax}}{I_{LOADmax}} \quad [\Omega] \quad \cdots (4)$$

$$\text{シャント抵抗定格電力} \quad P_{SHUNT} \geq \Delta V_{SHUNT} \times I_{LOADmax} \quad [W] \quad \cdots (5)$$

## Step 2: ゲイン設定用抵抗の設計

信号ゲインは、(6)式で表され、 $R_1$ 、 $R_2$  のどちらかを決めれば、もう一方の抵抗値が求められます。

$$\text{ゲイン} = \frac{V_{Omax}}{\Delta V_{SHUNTmax}} \quad [V/V] \quad \cdots (6)$$

$$= \frac{R_2}{R_1} \quad [V/V] \quad \cdots (7)$$

## Step 3: オペアンプの選定

オペアンプは以下の項目に注意して選択する必要があります。

- オフセット電圧。(1)式、(2)式、(3)式から、電流センシング精度  $E_{rr}$  を達成するために必要なオペアンプの入力オフセット電圧を求めます。
- オペアンプの入力電圧範囲が  $\Delta V_{SHUNT}$  に対して、マージンがあること。
- オペアンプの出力電圧範囲が、後段のシステム(AD コンバータやマイクロコンピュータ等)の入力電圧範囲にマッチする事。
- システムで生成可能な電源電圧で動作可能なこと。
- オペアンプの周波数特性が、 $f_{sense}$  に対して 10 倍程度以上であること。

## Step 4: 周波数特性の設計

周波数特性は、一般的に  $f_{sense}$  の 10 倍のマージンを確保します。差動増幅回路の周波数式より、 $C_1$  を設計します。

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \times f_{sense} \times 10 \times R_2} \quad [F] \quad \cdots (8)$$

## Step 5: その他の周辺回路

### ・保護回路

Figure 1 では、シャント抵抗のオープン故障を想定し、オペアンプの入力端子の過電圧を保護するためのツェナーダイオードを配置しています。シャント抵抗がオープンになった場合、オペアンプの入力端子には、負荷(LOAD)に印加されている電圧と同じ、最大+12V が印可される可能性があります。オペアンプの入力端子の定格電圧を超えないように保護素子を挿入する必要があります。

保護用回路は、どんな状態から何を保護したいかによって、挿入する保護回路、部品が異なりますので、十分に吟味してください。

以上で、Figure 1 の全ての部品が設計できました。

## 回路定数の決め方（設計例）

前の章で述べた部品選定、定数設定方法に従って、具体的な部品選定と回路定数を決めていきます。

[装置の要求仕様]

電流センシング範囲  $I_{LOADmin} \sim I_{LOADmax} = 30A \sim 50A$

電流センシング精度  $E_{rr} = 7\%$

電流センシング周波数  $f_{sense} = 1kHz$

シャント抵抗で発生させる電圧  $\Delta V_{SHUNTmax} = 50mV$

オペアンプの最大出力電圧  $V_{Omax} = 3.3V$

### Step 1: シャント抵抗の選定

前出の、(4)式、(5)式にそれぞれ値を代入すると、シャント抵抗に対する仕様が決まります。

$$\text{シャント抵抗値} \quad R_{SHUNT} = \frac{\Delta V_{SHUNTmax}}{I_{LOADmax}} = \frac{50m}{50} = 1 \quad [m\Omega]$$

$$\text{シャント抵抗定格電力} \quad P_{SHUNT} \geq \Delta V_{SHUNT} \times I_{LOADmax} = 50m \times 50 = 2.5 \quad [W]$$

この例では、ローム製シャント抵抗から、最も小型のものを選択しました。

PSR100 1mΩ、定格電力 4W（140℃時） サイズ 6.4mm x 3.2mm

### Step 2: ゲイン設定用抵抗の設計

前出の、(6)式、(7)式より、ゲインとゲイン設定用抵抗を決めます。 $R_1=2k\Omega$ と設定し、 $R_2$ を計算します。

$$\text{ゲイン} = \frac{V_{Omax}}{\Delta V_{SHUNTmax}} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_2 = R_1 \times \left( \frac{V_{Omax}}{\Delta V_{SHUNTmax}} \right) = 2k \times \frac{3.3}{50m} = 132k \quad [\Omega]$$

ゲイン設定を外付け抵抗で行う回路では、 $R_1$  と  $R_2$  の相対公差を考慮してゲインを決める必要があります。また、部品点数少なくするために、E24 系から 120kΩ を選択します。ローム製チップ抵抗器から、MCR01/MCR03/MCR10/MCR18 シリーズを選択します。これらの抵抗値公差は D 級±0.5%、温度特性は±50ppm/℃（100Ω～1MΩの時）です。

### Step 3: オペアンプの選定

電流センシング精度  $E_{rr}$  7%以下を達成するために必要なオペアンプのオフセット電圧は、(1)式、(2)式、(3)式から導出します。(3)式に、(1)式、(2)式を代入し、 $V_{OS}$  が求まる式に変形します。 $R_1'$ 、 $R_2'$ 、 $R_{SHUNT}'$  には、抵抗値公差と抵抗値温度特性を含めて計算します。電流センシング精度  $E_{rr}$  が最大となるのは以下の条件であり、それらを代入して  $V_{OS}$  を求めます。

$$R_1' = (\text{公差}) \times (\text{温度特性}) \times R_1 = (-0.5\%) \times (-50ppm/^\circ C) \times R_1$$

$$R_2' = (\text{公差}) \times (\text{温度特性}) \times R_2 = (+0.5\%) \times (+50ppm/^\circ C) \times R_2$$

$$R_{SHUNT}' = (\text{公差}) \times (\text{温度特性}) \times R_{SHUNT} = (+1\%) \times (+100ppm/^\circ C) \times R_{SHUNT}$$

$$V_{OS} \leq 847\mu \quad (T_A=125^\circ C \text{時}) \quad [V]$$

オペアンプに要求されるその他の特性も鑑みローム製 LMR1802G-LB を選択します。

(LMR1802G-LB の電気的特性および、選択した理由は、補足 2 参照)。

## Step 4: 周波数特性の設計

(8)式から、フィルタ用コンデンサ  $C_1$  は以下で求め、E6 系列から 150pF を選択します

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \times f_{sense} \times 10 \times R_2} = \frac{1}{2\pi \times 1k \times 10 \times 120k} = 133 \quad [\text{pF}]$$

## Step 5: その他の周辺回路

選択したオペアンプ LM1802G-LB は、入力端子電圧の定格は 7V です。また、ツェナー電圧  $V_Z$  は、オペアンプの電源電圧である +5V にあわせれます。シャント抵抗がオープンになったと仮定した場合、ツェナーダイオードに流れる電流  $I_{ZD}$  は、以下で計算されます。

$$I_{ZD} = \frac{V_{in} - V_Z}{R_1} = \frac{12 - 5}{2k} = 3.5m \quad [\text{A}]$$

ツェナー電流 3.5mA 時にツェナー電圧 5V 付近である事を満足するものは、  
ローム製品では TDZV5.1/UDZV4.7B/EDZV4.7B/CDZV4.7B などが選択できます。  
瞬時挙動や諸特性を把握した上で、保護に最適な部品を選択してください。

これで、全ての部品と定数が決まり、以下の回路が設計できました。

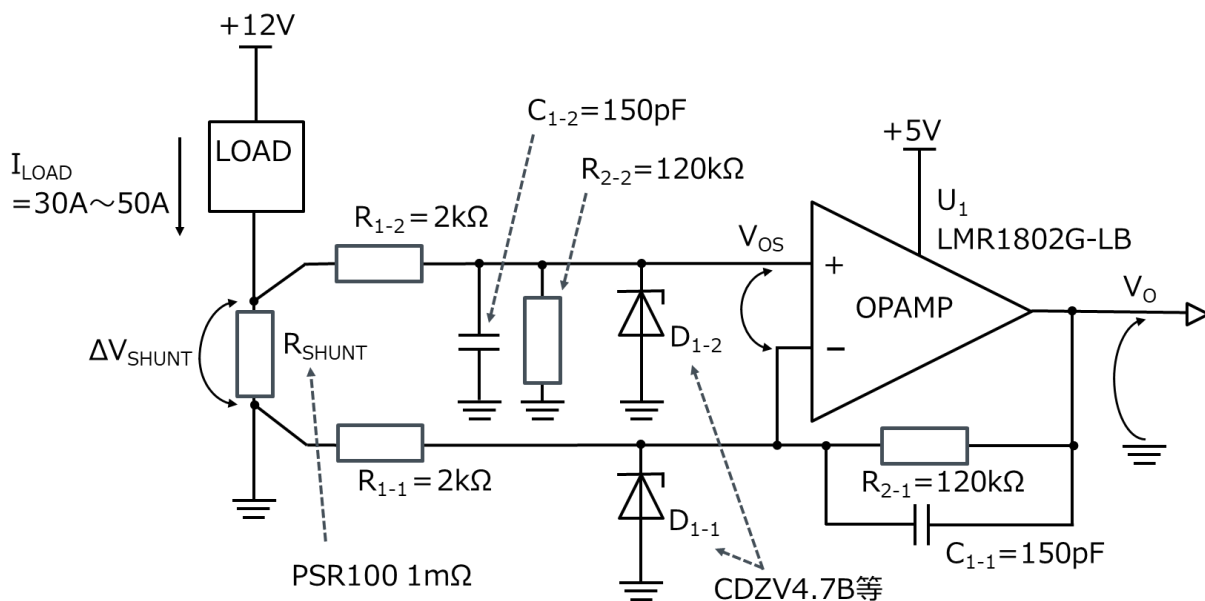


Figure 2. 装置の要求仕様を満足する回路

## 設計した回路の部品表

記号	部品	製品品番
U1	オペアンプ	<a href="#">LMR1802G-LB</a>
$R_{SHUNT}$	電流検出用シャント抵抗	<a href="#">PSR100 1mΩ</a>
$D_{1-1}, D_{1-2}$	オペアンプ入力端子保護用ツェナーダイオード	<a href="#">TDZV5.1</a> / <a href="#">UDZV4.7B</a> / <a href="#">EDZV4.7B</a> / <a href="#">CDZV4.7B</a> など
$R_{1-1}, R_{1-2}$	ゲイン設定用抵抗	<a href="#">MCR01/03/10/18 シリーズ</a> 2kΩ D 級(±0.5%)
$R_{2-1}, R_{2-2}$	ゲイン設定用抵抗	<a href="#">MCR01/03/10/18 シリーズ</a> 120kΩ D 級(±0.5%)
$C_{1-1}, C_{1-2}$	周波数特性用コンデンサ	150pF

\* 各部品の詳細仕様は、ホームページ上のデータシートを参照してください。

Table 1. 設計した回路の部品表

# 設計した回路の電流検出精度とその他の特性

電流検出精度について検証します。入力オフセット電圧および、各部品の公差を考慮し、電流検出精度  $E_{rr}$  の要求仕様であった 7%を満たす事を確認します。オペアンプの入力オフセット電圧、抵抗値公差、温度特性について Table 2 の条件で、電流検出精度  $E_{rr}$  を確認します。

条件	入力オフセット電圧 $V_{OS}$ (LMR1802G-LB)	シャント抵抗値 $R_{SHUNT}$ (PSR100)	ゲイン設定用抵抗 $R_1, R_2$
(1)Typ 条件	Typ = 5 $\mu$ V	Typ 値	Typ 値
(2)オフセット電圧のみ最大 ( $T_A=25^{\circ}\text{C}$ )	最大 450 $\mu$ V ( $T_A=25^{\circ}\text{C}$ )	Typ 値	Typ 値
(3)オフセット電圧最大・抵抗値公差込み( $T_A=25^{\circ}\text{C}$ )	最大 450 $\mu$ V ( $T_A=25^{\circ}\text{C}$ )	F 級( $\pm 1\%$ )	D 級( $\pm 0.5\%$ )
(4)オフセット電圧最大・抵抗値公差込み( $T_A=125^{\circ}\text{C}$ )	最大 500 $\mu$ V ( $T_A=125^{\circ}\text{C}$ )	F 級( $\pm 1\%$ ) +100ppm/ $^{\circ}\text{C}$	D 級( $\pm 0.5\%$ ) $\pm 50\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$

\* 温度特性には、自己発熱による温度上昇を加味しておりません。実機で部品が発熱する場合は、注意が必要です。

Table 2. Figure 3 のグラフの計算条件

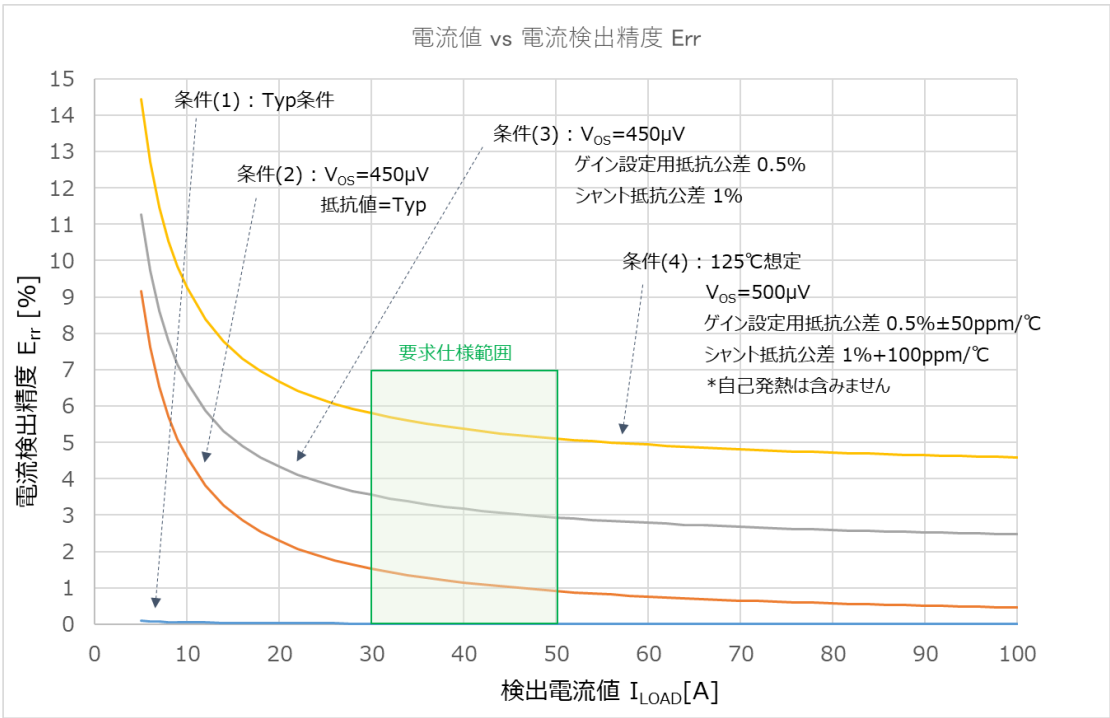


Figure 3. 設計した回路の 電流検出精度 vs 検出電流値

仕様として設定した、 $I_{LOAD}=30\text{A}\sim 50\text{A}$  で、電流検出精度は 7%に収まっています。

その他の特性は以下で計算され、回路設計が要求仕様を満たしている事がわかります。

出力最大電圧  $V_{Omax} = 3.153\text{V}$  (条件(4)の時)  $\leq 3.3\text{V}$

周波数特性  $f_{sense} = 8.85\text{kHz}$  (実使用周波数 1kHz に対して、8.85 倍確保できている。)

## まとめ

シャント抵抗およびオペアンプと外付け部品を使ったローサイド電流センシング回路について、回路定数の決め方、部品の選び方を解説しました。ロームは、シャント抵抗、高性能オペアンプともに製品化しており、様々なアプリケーションの要求仕様に対応できます。このアプリケーションノートで挙げている製品や製品ラインナップ、関連アプリケーションノートは以下をご確認ください。

本アプリケーションノートにおける、電流検出精度の算出には、オペアンプのノイズ特性や CMRR 特性による誤差を含んでおりません。より正確な精度の算出が必要な場合は、それらを加味してください。

### [参考文献]

[シャント抵抗記者発表：ハイパワーアプリケーションの小型化に貢献する、高電力シャント抵抗器のラインナップを拡充](#)  
[アプリケーションノート : オペアンプ、コンパレータの基礎 \(Tutorial\)](#)

### [関連アプリケーションノート]

[PCB 設計が抵抗温度係数に与える影響](#)  
[シャント抵抗器の表面温度上昇を抑制する方法](#)

### [関連製品]

シャント抵抗	<a href="#">シャント抵抗のラインナップ</a>
高精能オペアンプ	<a href="#">高精能オペアンプのラインナップ</a>
ダイオード	<a href="#">ツェナーダイオードのラインナップ</a>

# 補足 1

シャント抵抗  $R_{SHUNT}$  で発生する電圧値  $\Delta V_{SHUNT}$  が大きいほど電流センシング精度が良くなる理由

(2)式からもわかるように、シャント抵抗に発生させる電圧  $\Delta V_{SHUNT}$  とオペアンプの入力オフセット電圧  $V_{OS}$  によって、電流検出精度は変化します。オペアンプの入力オフセット電圧の小さいものを選択する事で検出精度を良くする事はできますが、コストや特性とのバランスを考えて設計します。

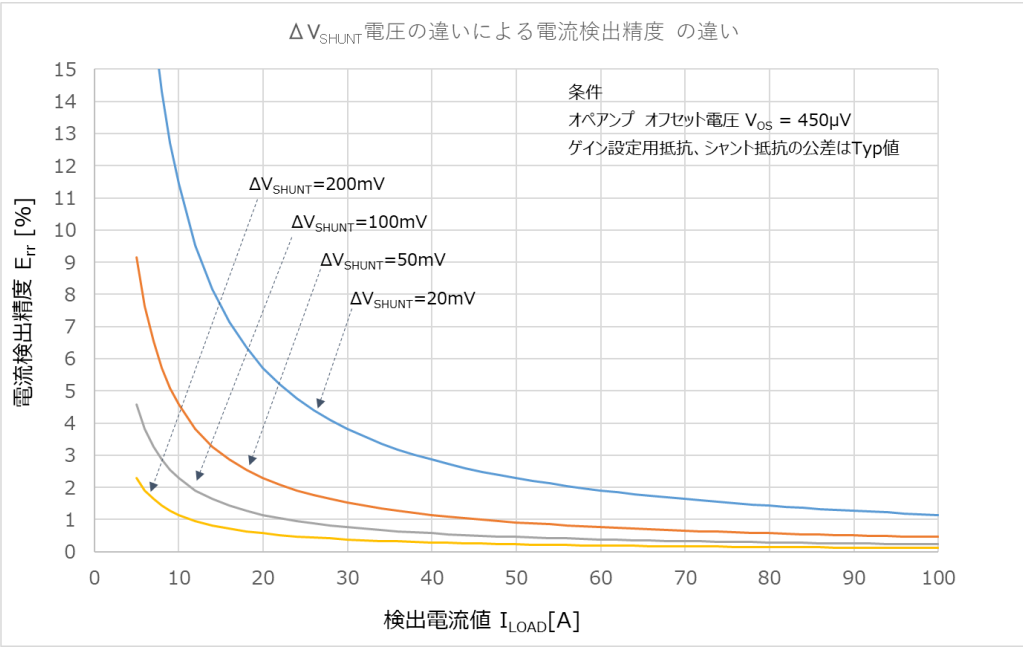


Figure 4.  $\Delta V_{SHUNT}$  電圧の違いが電流検出精度に与える影響

# 補足 2

オペアンプ LMR1802G-LB の電氣的特性および、本製品を選択した理由

LMR1802G-LB の主要特性と要求仕様に対する検討結果を以下に示します。

主な項目	仕様	検討結果
電源電圧範囲	2.5V ~ 5.5V	3.3V 系、5V 系で使用可能。
出力電圧範囲	V <sub>OH</sub> = V <sub>DD</sub> - V <sub>OUT</sub> 最大 50mV V <sub>OL</sub> 最大 50mV	次段 AD コンバータ等の入力電圧範囲を 4V 程度に設定し、5V 系で使用すれば、V <sub>O</sub> < 4V に回路設計が可能。
入力電圧範囲	同相入力電圧範囲が V <sub>SS</sub> ~ V <sub>DD</sub> - 1.0V	通常動作時、ΔV <sub>SHUNT</sub> レベルまでしか入力電圧が上がらないので問題なし。
入力オフセット電圧	T <sub>A</sub> = 25℃ Typ = 5μV 全温度範囲の最大で 500μV	オペアンプとして必要なオフセット電圧仕様を満たしている。

\*LMR1802G-LB の詳細仕様は、データシートを参照してください。

Table 3. オペアンプ LMR1802G-LB の概要と検討結果

入力オフセット電圧の要求仕様が全温度範囲で満たしている事は自明ですが、オフセット電圧の温度ドリフトが小さい事(0.4μV/℃)も選択の理由です。パワー系アプリケーションでは、シャント抵抗で発熱するだけでなく、周辺回路(スイッチングトランジスタ等)でも発熱している可能性があり、周辺の温度環境が良くない事が想定されるためです。また、ゲイン設定が比較的大きい場合、入力換算雑音電圧も誤差として現れてきます。LMR1802G-LB は業界トップクラスの低ノイズを実現しており、使いやすい製品です。

## ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。  
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方方を説明するものです。  
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。  
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。  
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものです。万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上でご使用ください。  
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。  
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。  
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

## ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>