

# バッファ付き計装アンプを使用したスイッチト・キャパシタ SAR ADC 駆動回路

Art Kay

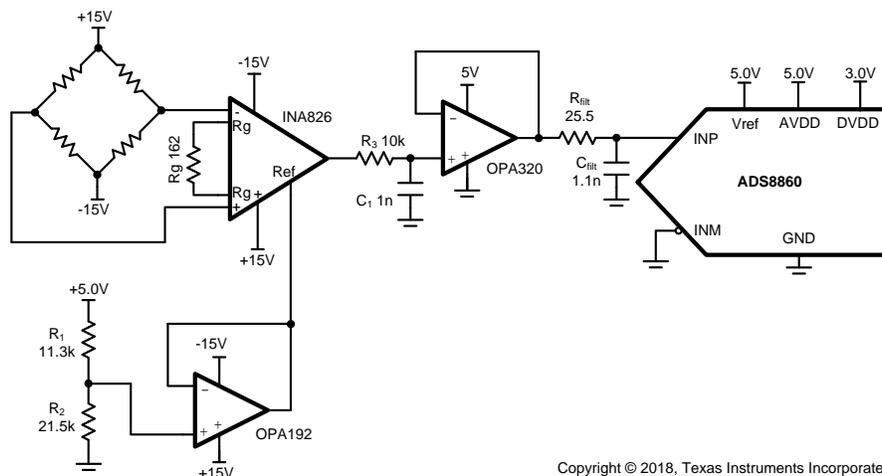
入力	ADC入力	デジタル出力ADS8860
-10mV	Out = 0.2V	0A3D <sub>H</sub> または2621 <sub>10</sub>
5mV	Out = 4.8V	F5C3 <sub>H</sub> または62915 <sub>10</sub>

電源					
AVDD	DVDD	V <sub>ref_INA</sub>	V <sub>ref</sub>	V <sub>cc</sub>	V <sub>ee</sub>
5.0V	3V	3.277V	5.0V	15V	-15V

## 設計の説明

計装アンプは、低レベルのセンサ出力を高レベル信号に変換してADCを駆動する一般的な方法です。通常、計装アンプは低ノイズ、低オフセット、低ドリフトに最適化されています。しかし、多くの計装アンプの帯域幅は最高サンプリング・レートでADCにおける電荷のキックバックを適切にセリングするのに十分ではありません。本書には、計装アンプとともに広帯域バッファを使用して、高いサンプリング・レートで適切なセリングを実現する方法を示します。さらに、多くの計装アンプは高電圧電源用に最適化されており、高電圧出力(すなわち±15V)を低電圧アンプ(5Vなど)に接続する必要があります。この設計では、電流制限抵抗を使用し、計装アンプがオペアンプの入力電圧範囲を逸脱した場合にアンプを電氣的オーバーストレスから保護する方法を示します。関連するクックブックには、広帯域バッファを使用しない簡易な手法を示しています(『計装アンプを使用したスイッチト・キャパシタSAR ADC 駆動回路』)。簡易な手法では、バッファ付きの設計に比べてサンプリング・レートが制限されます。なお、以下の回路はブリッジ・センサを示していますが、この方法は多種多様なセンサに利用できます。

この回路実装は、[アナログ入力モジュール](#)、[心電計\(ECG\)](#)、[パルス・オキシメータ\(血中酸素飽和度計\)](#)、[ラボ計測機器](#)、[鉄道輸送用制御ユニット](#)などの用途に適しています。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

## 仕様

仕様	計算結果	シミュレーション結果
サンプリング・レート	1Msps	1Msps, $-44\mu\text{V}$ にセトリング
オフセット(ADC入力)	$40\mu\text{V} \cdot 306.7 = 12.27\text{mV}$	16mV
オフセット・ドリフト	$(0.4\mu\text{V}/^\circ\text{C}) \cdot 306.7 = 123\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	N/A
ノイズ	978 $\mu\text{V}$	586 $\mu\text{V}_{\text{RMS}}$

## デザイン・ノート

1. 計装アンプの帯域幅は通常、高いデータ・レートでSARデータ・コンバータを駆動するには低すぎます(この例では305V/Vのゲインに対してINA826の帯域幅は10.4kHzです)。各変換サイクルにおいてSARのスイッチ・キャパシタ入力を充電しなければならないため、広い帯域幅が必要です。OPA320バッファを追加して、ADCが最高データ・レート(ADS8860 1Msps)で動作できるようにしました。
2. ADCの入力範囲にマッチした入力振幅を実現するようにゲインを選定します。計装アンプの基準ピンを使用して、入力範囲にマッチするように信号オフセットをシフトします。これについては「部品選定」で述べます。
3. オペアンプの入力電圧レベルがアンプの通常動作範囲内に収まるようにINA826のゲインを増減します。ただし、電源投入時やセンサ切断時には、出力がいずれかの電源レール( $\pm 15\text{V}$ )に達することがあります。電流を制限するために抵抗 $R_3$ を使用します。これについては、本書の「計装アンプ・オペアンプ間の過電圧保護フィルタ」で述べます。
4. 大半の計装アンプの入力基準電圧を駆動するには、分圧器の後にバッファ・アンプが必要です。高精度の抵抗と高精度の低オフセット・アンプをバッファとして選定します。この件の詳細については、『[Selecting the right op amp](#)』を参照してください。
5. 「計測アンプの入力同相範囲を計算」ソフトウェア・ツールを使用して、アンプの同相入力電圧範囲を確認します。
6. 歪みを最小限に抑えるために、 $C_1$ 、 $C_{\text{filt}}$ にCOGコンデンサを選定します。
7. ゲイン設定抵抗 $R_0$ には、0.1% 20ppm/ $^\circ\text{C}$ 以下の薄膜抵抗を使用します。この抵抗の誤差とドリフトがゲイン誤差とゲイン・ドリフトに直結します。
8. 『[TI Precision Labs – ADCs](#)』トレーニング・ビデオ・シリーズで、電荷バケツ回路の $R_{\text{filt}}$ と $C_{\text{filt}}$ の選定方法を説明しています。この件の詳細については、『[Introduction to SAR ADC Front-End Component Selection](#)』を参照してください。

部品選定

- 出力振幅を0.2V~4.8Vに設定する計装アンプのゲイン設定抵抗を求めます。

$$Gain = \frac{V_{out\_max} - V_{out\_min}}{V_{in\_max} - V_{in\_min}} = \frac{4.9V - 0.2V}{5mV - (-10mV)} = 306.7$$

$$Gain = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_g}$$

$$R_g = \frac{49.4k\Omega}{Gain - 1.0} = \frac{49.4k\Omega}{(306.7) - 1.0} = 151.6\Omega \text{ or } 162\Omega \text{ for standard 0.1\% resistor}$$

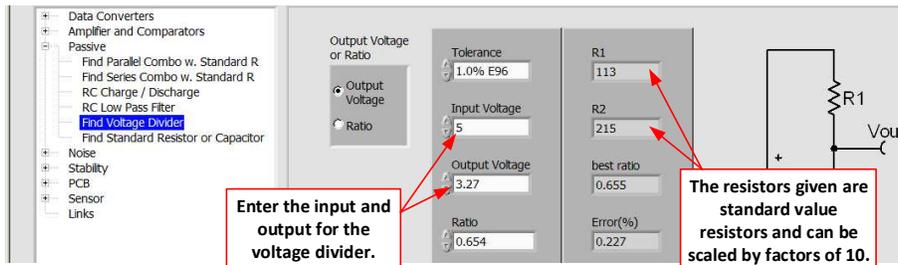
- 出力振幅を適切な電圧レベルにシフトするINA826の基準電圧(Vref)を求めます

$$V_{out} = Gain \cdot V_{in} + V_{ref\_INA}$$

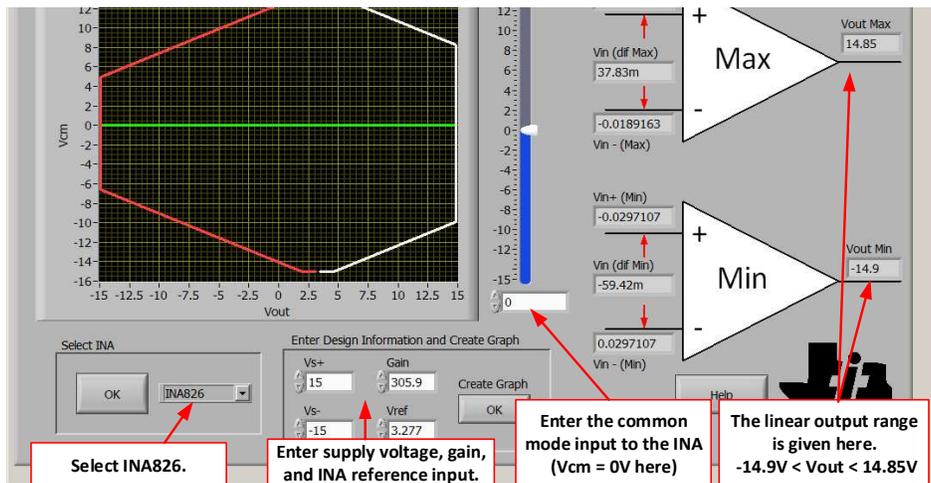
$$V_{ref\_INA} = V_{out} - Gain \cdot V_{in} = 4.8V - \left(1 + \frac{49.4k\Omega}{162\Omega}\right) \cdot (5mV) = 3.27V$$

- INA826の基準電圧(V<sub>ref\_INA</sub>=3.27V)を設定する標準値抵抗を選定します。「アナログ技術者向けカリキュラタ」(「PassiveFind Voltage Divider」)を使用して、分圧器の標準値を求めます。

$$V_{ref\_INA} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in\_div} = \frac{21.5k\Omega}{11.3k\Omega + 21.5k\Omega} \cdot (5V) = 3.277V$$

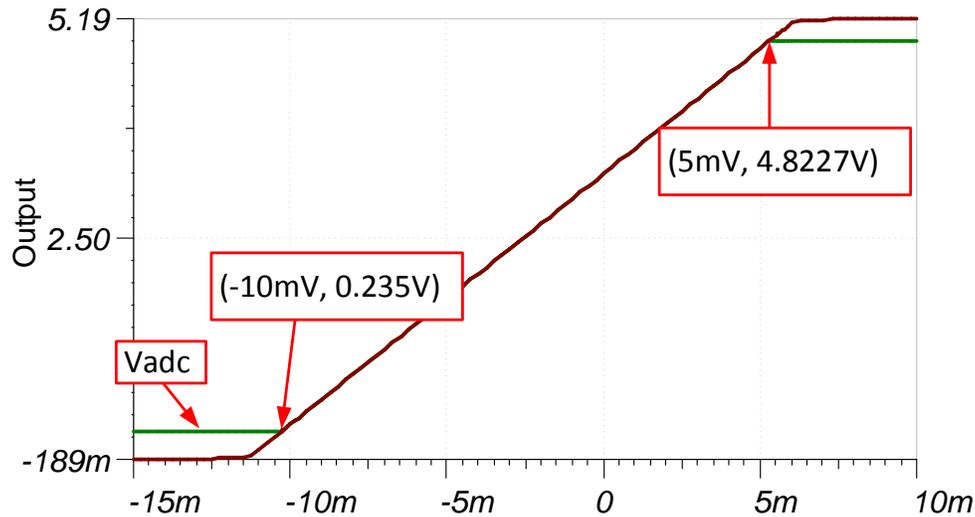


- 「計測アンプの入力同相範囲を計算」を使用して、INA826が同相入力電圧範囲を逸脱しているかどうかを確認します。



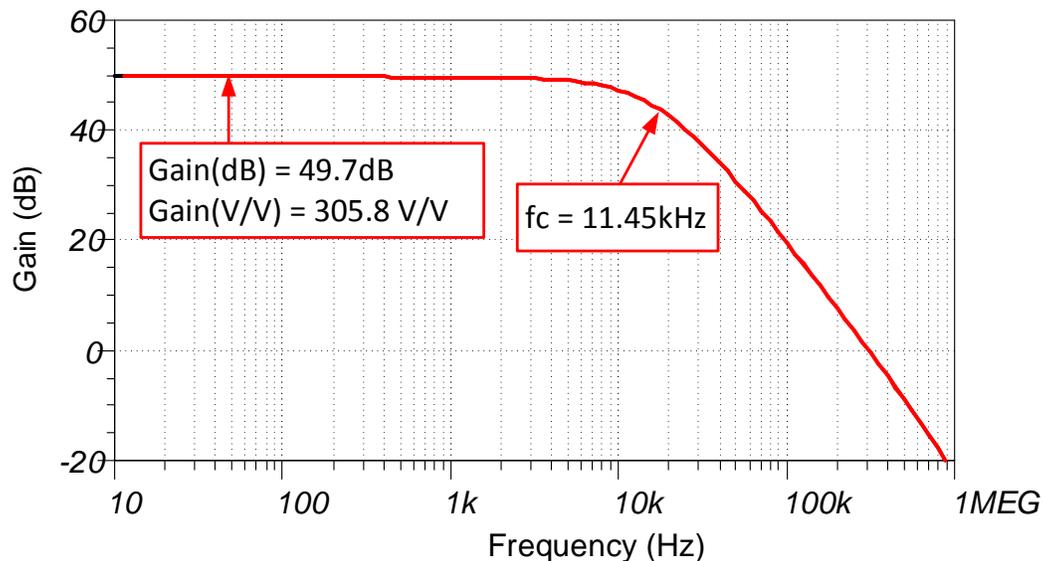
### DC伝達特性

以下のグラフは、 $-5\text{mV}$ ～ $+15\text{mV}$ の入力に対する線形出力応答を示しています。この件の詳しい理論については、『[Determining a SAR ADC's Linear Range when using Instrumentation Amplifiers](#)』を参照してください。INA826の出力がオペアンプの入力電圧範囲を超えた場合には、ESDダイオードがオンになり、入力を制限します。抵抗R3が入力電流を制限してアンプを損傷から守ります(「計装アンプ-オペアンプ間の過電圧保護フィルタ」を参照)。オペアンプの出力はADS8860の絶対最大定格の範囲内に収まっています( $-0.3\text{V} < V_{\text{IN}} < \text{REF} + 0.3\text{V}$ )。



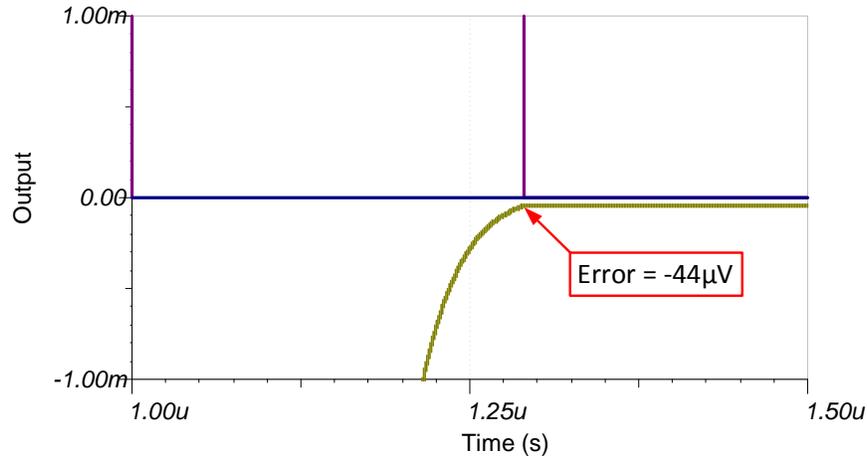
### AC伝達特性

この構成での帯域幅のシミュレーション結果は $11.45\text{kHz}$ です。この帯域幅では、SARコンバータを最高速度で駆動できません。この件の詳細については、TI Precision Labsのビデオ・シリーズ『[Op Amps: Bandwidth 1](#)』をご覧ください。



**ADC過渡入力電圧セトリング・シミュレーション**

OPA320バッファ(20MHz)を使用する理由は、ADC8860における電荷のキックバックによる急激な過渡事象に応答する能力があるからです。このようなシミュレーションは、サンプル/ホールド・キックバック回路が適正に選定されていることを示します。この件の詳しい理論については、『[Introduction to SAR ADC Front-End Component Selection](#)』を参照してください。



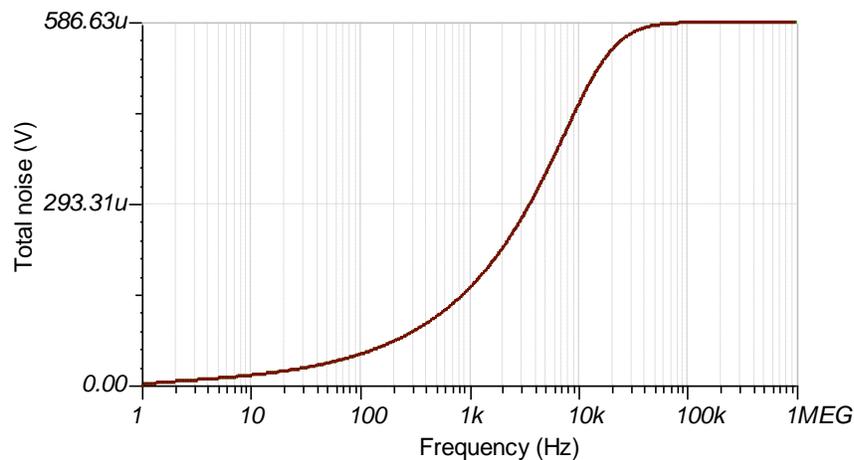
**ノイズ・シミュレーション**

簡易なノイズ計算を用いて概算します。計装アンプが高ゲインであることから、そのノイズが支配的になるため、OPA192のノイズは無視します。

$$E_n = Gain \cdot \sqrt{e_{NI}^2 + \left(\frac{e_{NO}}{Gain}\right)^2} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c}$$

$$E_n = (305.8) \cdot \sqrt{\left(18nV / \sqrt{Hz}\right)^2 + \left(\frac{110nV / \sqrt{Hz}}{305.8}\right)^2} \cdot \sqrt{1.57 \cdot (11.45kHz)} = 738\mu V / \sqrt{Hz}$$

計算結果とシミュレーション結果はよく一致しています。アンプ・ノイズ計算の詳しい理論については『[TI Precision Labs - Op Amps: Noise 4](#)』を、データ・コンバータのノイズについては『[Calculating the Total Noise for ADC Systems](#)』を参照してください。

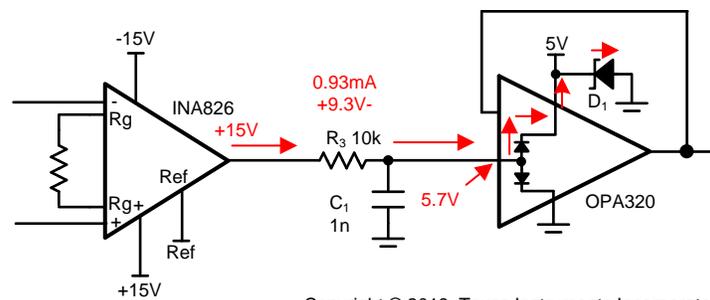


### 計装アンプ-オペアンプ間の過電圧保護フィルタ

INA826とOPA320の間のフィルタは2つの目的を果たします。1つはOPA320を過電圧から保護すること、もう1つはノイズまたはアンチエイリアシング・フィルタとして動作することです。INA826のゲインは、通常状態で出力がOPA320の範囲内(すなわち0V~5V)に収まるように増減する必要があります。このため、通常、OPA320の入力に印加される過電圧信号は確認されません。ただし、電源投入時やセンサ切断時には、INA826の出力がいずれかの電源レール(すなわち±15V)に達することがあります。過電圧の場合には、抵抗(R3)がOPA320に流れ込む電流を制限して保護します。過電圧事象に際してはOPA320に内蔵されているESDダイオードがオンになり、過電圧信号を正/負電源に送ります。以下の例では、過電圧信号が正電源に送られ、過渡電圧サプレッサ(D<sub>1</sub>、SMAJ5.0A)がオンになって電流をシンクしています。抵抗値を増やして、OPA320の絶対最大入力電流(10mA)まで電流を制限しています。この件の詳しい理論については、『[TI Precision Labs - Op Amps: Electrical Overstress \(EOS\)](#)』を参照してください。

$$R_3 > \frac{V_{INA} - V_{OpaSupply} - 0.7V}{I_{ABS\_MAX\_OPA}} = \frac{15V - 5.0V - 0.7V}{10mA} = 9.3k\Omega \text{ choose } 10k\Omega \text{ for margin.}$$

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot f_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (10k\Omega) \cdot (15kHz)} = 1.06nF \text{ or } 1nF \text{ standard value}$$



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

### オプションの入力フィルタ

以下の図は、よく使用されている計装アンプの入力フィルタを示しています。差動ノイズは $C_{dif}$ でフィルタ処理され、同相ノイズは $C_{cm1}$ および $C_{cm2}$ でフィルタ処理されます。なお、 $C_{dif} \geq 10C_{cm}$ とすることを推奨します。これにより、部品の許容差が原因で同相ノイズが差動ノイズに変換されるのを防止できます。以下のフィルタは、15kHzの差動カットオフ周波数用に設計されています。

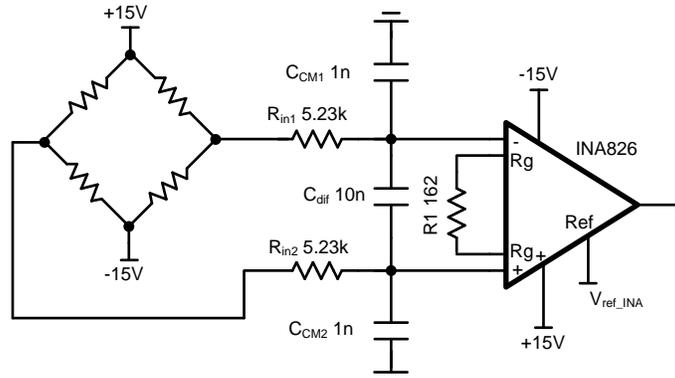
$$\text{Let } C_{dif} = 1nF \text{ and } f_{dif} = 15kHz$$

$$R_{in} < \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_{dif} \cdot C_{dif}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot (15kHz) \cdot (1nF)} = 5.305k\Omega \text{ or } 5.23k\Omega \text{ for 1\% standard value}$$

$$C_{cm} = \frac{1}{10} \cdot C_{dif} = 100pF$$

$$f_{cm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{in} \cdot C_{cm}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (5.23k\Omega) \cdot (100pF)} = 304kHz$$

$$f_{dif} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R_{in} \cdot \left( C_{dif} + \frac{1}{2} C_{cm} \right)} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot (5.23k\Omega) \cdot \left( 1nF + \frac{1}{2} \cdot 100pF \right)} = 14.5kHz$$



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

## 使用デバイス

デバイス	主な特長	リンク	類似デバイス
<a href="#">ADS8860</a>	分解能: 16ビット、SPI、サンプル・レート: 1Msps、シングルエンド入力、Vref入力電圧範囲: 2.5V ~ 5.0V	<a href="http://www.ti.com/product/ADS8860">www.ti.com/product/ADS8860</a>	<a href="http://www.ti.com/adcs">www.ti.com/adcs</a>
<a href="#">OPA192</a>	帯域幅: 8kHz、レール・ツー・レール出力、消費電流: 450nA、ユニティ・ゲイン安定	<a href="http://www.ti.com/product/OPA192">www.ti.com/product/OPA192</a>	<a href="http://www.ti.com/opamp">www.ti.com/opamp</a>
<a href="#">INA826</a>	帯域幅: 1MHz (G = 1)、低ノイズ: 18nV/rtHz、低オフセット: $\pm 40\mu\text{V}$ 、低オフセット・ドリフト: $\pm 0.4\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、低ゲイン・ドリフト: 0.1ppm/°C (標準値)	<a href="http://www.ti.com/product/INA826">www.ti.com/product/INA826</a>	<a href="http://www.ti.com/inas">www.ti.com/inas</a>

## 設計の参照資料

TIの総合的な回路ライブラリについては、「[アナログ・エンジニア向け回路クックブック](#)」を参照してください。

### 主要なファイルへのリンク

この回路のソース・ファイル – <http://www.ti.com/lit/zip/SBAC184>

## 改訂履歴

改訂内容	日付	変更
A	2019年3月	タイトルを大文字から普通の表記にし、タイトルのロールを「データ・コンバータ」に変更。回路クックブックのランディング・ページへのリンクを追加。

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションが適用される各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、またはその他の要件を満たしていることを確実にする責任を、お客様のみが単独で負うものとします。上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、TI の販売約款 (<https://www.tij.co.jp/ja-jp/legal/terms-of-sale.html>)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ合同会社  
Copyright © 2021, Texas Instruments Incorporated