

**Circuits
from the Lab™**
Reference Circuits

Circuits from the Lab™ 実用回路は今日のアナログ・ミックスド・シグナル、RF 回路の設計上の課題の解決に役立つ迅速で容易なシステム統合を行うために作製、テストされました。詳しい情報と支援は <http://www.analog.com/CN0289> をご覧ください。

接続/参考にしたデバイス

AD8226	広い電源電圧範囲の レール to レール出力計装アンプ
ADR02	超小型、高精度 5.0V リファレンス電圧
ADA4091-2	高精度、マイクロパワー、過電圧保護、レール to レール入出力のデュアル・オペアンプ

**電圧または電流駆動の柔軟性のある、4 mA~20 mA、
ループ駆動圧力センサー・トランスミッタ**

評価と設計支援

回路評価基板

回路評価ボード (EVAL-CN0289-EB1Z)

設計と統合ファイル

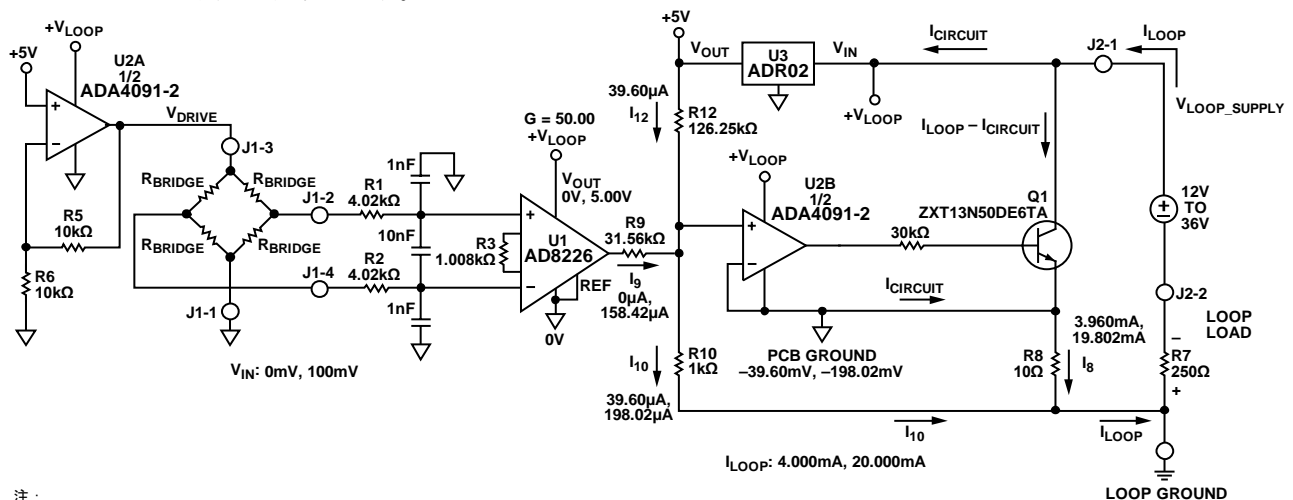
回路図、レイアウト・ファイル、部品表

回路の機能とその利点

図 1 に示す回路は堅牢で柔軟性のあるループ駆動電流トランスミッタで、圧力センサーの差動電圧出力を 4 mA~20 mA の電流出力に変換します。

ブリッジをベースにした多種の電圧または電流駆動の圧力センサー向けに設計が最適化されており、わずか 4 個のアクティブ・デバイスを使用し、全未調整誤差は 1% 未満です。12 V~36 V の範囲のループ電源電圧を使用できます。

回路の入力は ESD および電源レールを超える電圧に対して保護されており、工業用アプリケーションに最適です。



注：
1. R8、R10 は標準値 0.1%、R5、R6 は標準値 1%、R3、R9、R12 は計算値（本文参照）。
2. 電圧は PCB の GND を基準に測定。

図 1. 4 mA~20 mA 出力の堅牢なループ駆動圧力センサーの信号調整回路 (センサー電圧駆動モード)
簡略回路図：接続とデカップリングがすべて示されているわけではありません

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。
※日本語データシートは REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。
©2012-2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

回路の説明

このソリューションは圧力センサー測定用の 4 mA～20 mA トランスミッタです。回路全体の電源がループから供給されます。回路にはセンサー励起ドライブ、センサー出力アンプおよび電圧/電流コンバータの 3 つの重要なステージがあります。

表 1 に示されているように、回路に必要な合計電流は 1.82 mA (最大) です。したがって、利用可能な 4 mA の最大ループ電流を超えることなく、最大 2 mA のブリッジ駆動電流を必要とする圧力センサーを使用することができます。

表 1. 最大回路電流 @ 25°C

部品	電流 (mA)
ADR02	0.80
ADA4091-2	0.50
AD8226	0.43
R5, R6 @ 10 V	0.05
R12 @ 5 V	0.04
合計	1.82

センサー励起ドライブ

選択された圧力センサーに従って、電圧ドライブまたは電流ドライブのどちらかが必要です。回路には ADA4091-2 (U2A) のアンプの 1 つが使用され、S1 を切り替えて設定を選択し、どちらかのオプションをサポートします。S1 によりどちらかのドライブが選択されます。

励起：電圧ドライブの設定

電圧ドライブの設定を図 2 に示します。S1 は PCB 上の VOLTAGE DRIVE とラベル表示された位置にしています。(CN0289 設計サポートパッケージの回路レイアウトと回路図を参照してください。

<http://www.analog.com/CN0289-DesignSupport>。

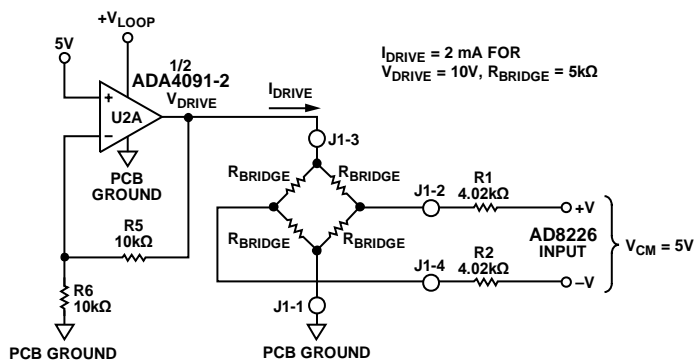


図 2. $R_{BRIDGE} = 5 \text{ k}\Omega$ 、 $V_{DRIVE} = 10 \text{ V}$ 時のセンサー電圧ドライブの設定

電流駆動モードでは、2 mA の最大許容ブリッジ駆動電流の制限を守る必要があります。回路は、 $R_4 = 2.49 \text{ k}\Omega$ 、および $I_{\text{DRIVE}} = 2 \text{ mA}$ に設定されています。次式を使って R_4 の値を選択することにより、 I_{DRIVE} の値を下げるすることができます。

$$R_4 = \frac{5 \text{ V}}{I_{\text{DRIVE}}}$$

それに伴う駆動電圧 V_{DRIVE} は次式を使って計算します。

$$V_{\text{DRIVE}} = 5 \text{ V} + I_{\text{DRIVE}} \times R_{\text{BRIDGE}}$$

U2A 電源には 0.2 V のヘッドルームが必要です。したがって次のようになります。

$$V_{\text{LOOP}} \geq V_{\text{DRIVE}} + 0.2 \text{ V}$$

図 3 に示されている値の場合、 $R_{\text{BRIDGE}} = 3 \text{ k}\Omega$ 、 $I_{\text{DRIVE}} = 2 \text{ mA}$ 、 $V_{\text{DRIVE}} = 11 \text{ V}$ 、 $V_{\text{LOOP}} \geq 11.2 \text{ V}$ となります。

回路には ADA4091-2 オペアンプが選択されています。この理由は、消費電流が低く (250 μA /アンプ)、オフセット電圧が小さく (250 μV)、入力と出力がレール to レールだからです。

ブリッジ出力の計装アンプと利得およびオフセット抵抗の選択

ブリッジの出力は、帯域幅が 39.6 kHz の同相フィルタ (4.02 $\text{k}\Omega$ 、1 nF) と、帯域幅が 2 kHz の差動モード・フィルタ (8.04 $\text{k}\Omega$ 、10 nF) によってフィルタされます。

AD8226 は利得誤差が小さく (0.1%、B グレード)、オフセットが小さく (58 μV @ $G = 50$ 、B グレード ; 112 μV @ $G = 50$ 、A グレード)、非直線性が優れており (75 ppm = 0.0075%)、レール to レール出力なので、最適な計装アンプです。

AD8226 計装アンプは、利得設定抵抗 $R_3 = 1.008 \text{ k}\Omega$ を使って、100 mV FS の信号を 50 倍の利得で 5 V に増幅します。利得 G と R_3 の関係は次式で与えられます。

$$R_3 = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

ここで、 $G = 50$ 、 $R_3 = 1008 \Omega$

出力ゼロ値のループ電流 $I_{\text{LO}} = 4 \text{ mA}$ の場合：

$$I_{\text{LO}} = I_8 + I_{10}$$

R_{10} と R_8 の比が 100:1 なので、

$$I_8 = 100 \times I_{10}$$

上の 2 つの式を組み合わせると、

$$I_{\text{LO}} = 101 \times I_{10}$$

$I_{\text{LO}} = 4 \text{ mA}$ のとき AD8226 の出力は 0 V なので、次式からオフセット抵抗 R_{12} を計算することができます。

$$R_{12} = \frac{V_{\text{REF}}}{I_{10}} = \frac{101 \times V_{\text{REF}}}{I_{\text{LO}}} = \frac{101 \times 5 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 126.25 \text{ k}\Omega$$

$V_{\text{OUT}} = 5.00 \text{ V}$ の場合、出力ループ電流は $I_{\text{LH}} = 20 \text{ mA}$ なので、以下ようになります。

$$I_{\text{LH}} = I_8 + I_{10} = 100 \times I_{10} + I_{10} = 101 \times I_{10}$$

$$I_{10} = \frac{I_{\text{LH}}}{101} = \frac{20 \text{ mA}}{101} = 198.02 \mu\text{A}$$

R_{12} を流れる電流は次式で与えられます。

$$I_{12} = \frac{V_{\text{REF}}}{R_{12}} = \frac{5 \text{ V}}{126.25 \text{ k}\Omega} = 39.60 \mu\text{A}$$

R_9 を流れる電流は次式で与えられます。

$$I_9 = I_{10} - I_{12} = 198.02 \mu\text{A} - 39.60 \mu\text{A} = 158.42 \mu\text{A}$$

したがって、 R_9 の値は次式で計算することができます。

$$R_9 = \frac{V_{\text{OUT}}}{I_9} = \frac{5 \text{ V}}{158.42 \mu\text{A}} = 31.56 \text{ k}\Omega$$

実際は、 R_3 、 R_9 、 R_{12} の計算値は入手可能な標準値ではないので、回路で使用される実際の値によって固定誤差が生じます。これらの誤差は以下のように計算することができます。

抵抗 R_3 、 R_9 、 R_{12} によって生じる、%FSR として測定された (ただし、FSR = 16 mA) 利得誤差、オフセット誤差、および全誤差：

利得誤差 (%FSR) =

$$\left[\left(\frac{1008 \Omega - R_3}{1008 \Omega} \right) + \left(\frac{31.56 \text{ k}\Omega - R_9}{31.56 \text{ k}\Omega} \right) \right] \times 100\%$$

オフセット誤差 (%FSR) =

$$0.25 \left(\frac{126.25 \text{ k}\Omega - R_{12}}{126.25 \text{ k}\Omega} \right) \times 100\%$$

ゼロ出力 (4 mA) での全誤差は利得誤差の影響を受けません。

ただし、フルスケール出力 (20 mA) での全誤差は次のようになります。

フルスケール誤差 = 利得誤差 + オフセット誤差

実際の回路では、最も近い EIA 規格の 0.1% 抵抗器の値を選択する必要がありますので、これまでの式で示したような固定利得誤差と固定オフセット誤差が生じます。2 つの 0.1% 値を組み合わせると計算値に近づけることは可能です。たとえば、0.1% 抵抗を以下のように直列に組み合わせると計算値に非常に近くなります。

- $R_3 = 1 \text{ k}\Omega + 8.06 \Omega = 1008.06 \Omega$ (計算値 = 1008 Ω)
- $R_9 = 30.9 \text{ k}\Omega + 655 \Omega = 31.555 \text{ k}\Omega$ (計算値 = 31.56 $\text{k}\Omega$)
- $R_{12} = 124 \text{ k}\Omega + 2.26 \text{ k}\Omega = 126.26 \text{ k}\Omega$ (計算値 = 126.25 Ω)

これらの組み合わせを使って計算した誤差は以下のようになります。

- オフセット誤差 = -0.008% FSR
- 利得誤差 = +0.010% FSR
- フルスケール誤差 = +0.002% FSR

ただし、場合によっては、0.1% 抵抗の標準的な値であっても抵抗器メーカーから入手できないことがあり、替わりのものが必要になることがあります。

たとえば、EVAL-CN0289-EB1Z ボードで供給される抵抗は以下のとおりです。

- R3 = 1000 Ω (計算値 = 1008 Ω)
- R9 = 31.6 kΩ (計算値 = 31.56 kΩ)
- R12 = 124 kΩ (計算値 = 126.25 kΩ)

ボードで与えられている値を使うと、抵抗値による誤差は以下のようになります。

- オフセット誤差 = +0.45% FSR
- 利得誤差 = +0.66% FSR
- フルスケール誤差 = +1.11% FSR

電圧リファレンス

ブリッジの駆動電圧または駆動電流を設定し、4 mA のゼロ・オフセットを設定するのに ADR02 5 V リファレンスが使われています。その初期精度は 0.1% (A グレード)、0.06% (B グレード)、電圧ノイズは 10 μV p-p です。さらに、36V までの電源電圧で動作し、消費電流は最大 1 mA なので、ループ駆動アプリケーションに最適です。

電圧/電流変換

4 mA ~ 20 mA の出力は、信号成分 (I_9) とオフセット成分 (I_{12}) を合わせた電流を R10 に発生させます。電流 $I_{10} = I_9 + I_{12}$ が R10 の両端に発生させる電圧が、U2B と Q1 を介してセンス抵抗 R8 に印加されます。R8 を流れる電流は R10 の電流の 100 倍です。したがって、ループ電流 I_{LOOP} は次のようになります。

$$I_{LOOP} = I_8 + I_{10} = 100 \times I_{10} + I_{10} = 101 \times I_{10}$$

R8 (10 Ω) と R10 (1 kΩ) の値は、許容誤差が 0.1% のものを簡単に入手できるように選ばれています。

回路が正しく動作するには、回路電流 $I_{CIRCUIT}$ は最小ループ電流 4 mA を常に下回る必要があります。さらに、PCB のグラウンドはどんな方法であれループのグラウンドに接続してはならず、PCB のグラウンドとセンサーはループのグラウンドに対して独立していなければなりません。

U2B の出力によって制御されてループ電流を発生するバイポーラ NPN トランジスタは、直線性誤差を最小に抑えるため、利得が少なくとも 300 あるものにします。また、ブレイクダウン電圧が少なくとも 50 V あるものにします。

出力トランジスタ Q1 は、1.1 W @ 25°C を消費できる 50 V NPN パワー・トランジスタです。回路内のワーストケースの消費電力は、36 V の V_{CC} 電源で 0 Ω のループ負荷抵抗に 20 mA の出力電流が流れる場合です。これらの条件では、Q1 の消費電力は 0.68 W です。

回路ボードを駆動する電源電圧 V_{LOOP} は、ループ電源 V_{LOOP_SUPPLY} 、ループ負荷 R7、およびループ電流 I_{LOOP} に依存します。これらの値相互の関係は次式で表されます。

$$V_{LOOP} = V_{LOOP_SUPPLY} - R7 \times I_{LOOP}$$

回路が正しく動作するには、ADR02 電圧リファレンスに十分なヘッドルームを与えるために電源電圧 V_{LOOP} を 7 V より大きくする必要があります。

したがって、

$$V_{LOOP_SUPPLY} > 7 \text{ V} + R7 \times I_{LOOP}$$

最大ループ電流が 20 mA、R7 = 250 Ω の場合、

$$V_{LOOP_SUPPLY} > 7 \text{ V} + 250 \text{ Ω} \times 20 \text{ mA} = 12 \text{ V}$$

最小ループ電源電圧は、ブリッジ駆動回路の設定にも依存します。電圧駆動モードで $V_{DRIVE} = 10 \text{ V}$ のとき、U2A に十分なヘッドルームを保つため、電源電圧 V_{LOOP} を 10.2 V より大きくする必要があります(図 2 参照)。

電流駆動モードでは、U2A に十分なヘッドルームを保つため、電源電圧 V_{LOOP} を 11.2 V より大きくする必要があります(図 3 参照)。

ループ電源電圧は最大 36 V に制限されています。

アクティブ部品の誤差解析

AD8226 と ADR02 の A グレードと B グレードの場合の、システム内のアクティブ部品による最大誤差および rss 誤差を表 2 と表 3 に示します。ADA4091-2 オペアンプは 1 つのグレード・レベルでだけ供給されることに注意してください。

表 2. アクティブ部品に起因する誤差(A グレード)

誤差成分	誤差	誤差の値	誤差 %FSR
AD8226-A	Offset	112 μV	0.11%
ADR02-A	Offset	0.10%	0.02%
ADA4091-2	Offset	250 μV	0.16%
AD8226-A	Gain	0.15%	0.15%
RSS Offset			0.20%
RSS Gain			0.15%
RSS FS Error			0.35%
Max Offset			0.29%
Max Gain			0.15%
Max FS Error			0.44%

表 3. アクティブ部品に起因する誤差(B グレード)

誤差成分	誤差	誤差の値	誤差 %FSR
AD8226-B	Offset	58 μV	0.06%
ADR02-B	Offset	0.06%	0.01%
ADA4091-2	Offset	250 μV	0.16%
AD8226-B	Gain	0.10%	0.10%
RSS Gain			0.10%
RSS Offset			0.17%
RSS FS Error			0.27%
Max Offset			0.23%
Max Gain			0.10%
Max FS Error			0.33%

回路全体の精度

抵抗の許容誤差に起因する全誤差の妥当な近似値を得るには、クリティカルな各抵抗が全誤差に等しく影響を与えると仮定します。クリティカルな5つの抵抗は、R3、R8、R9、R10、R12です。0.1%抵抗で構成したときのワーストケースの許容誤差により、最大0.5%の全抵抗誤差が生じます。rss誤差を仮定すると、全rss誤差は $0.1\sqrt{5} = 0.224\%$ となります。

抵抗のワーストケースの許容誤差0.5%を、前に求めたアクティブ部品(Aグレード)によるワーストケースの誤差に加算すると以下ようになります。

- オフセット誤差 = $0.29\% + 0.5\% = 0.79\%$
- 利得誤差 = $0.15\% + 0.5\% = 0.65\%$
- フルスケール誤差 = $0.44\% + 0.5\% = 0.94\%$

これらの誤差は、理想的抵抗が選択され、誤差はそれらの許容誤差だけによると仮定しています。

回路の全誤差は1%以下ですが、さらに誤差を減らす必要があれば、オフセットや利得の調整機能を回路に追加します。オフセットは、ゼロ入力で4 mAの場合、R12を調整することによって較正することができます。次に、フルスケールは、フルスケール100 mVの入力に対してR9を変化させて調整することができます。オフセットの方を最初に較正すれば、2つの調整は独立におこなうことができます。

回路の実際の誤差データを図4に示します。全出力誤差(%FSR)は、理想的な出力電流と測定された出力電流の差をFSR(16 mA)で割り、それに100を掛けて計算されています。

0 mVと1 mVの入力の誤差はAD8226の出力段の飽和電圧によるもので、回路の負荷条件のにより20 mV~100 mVの範囲で変化しうることに注意してください。すべてのレール to レール出力段は、飽和電圧(バイポーラ出力)またはオン抵抗(CMOS出力)のどちらかにより、電源レールに近づく能力が制限されます。

出力飽和電圧によって生じる誤差が問題であれば、適当な抵抗を+5 Vリファレンスからブリッジの出力の片側に接続することにより、ブリッジからの入力信号にオフセットを与えることができます。

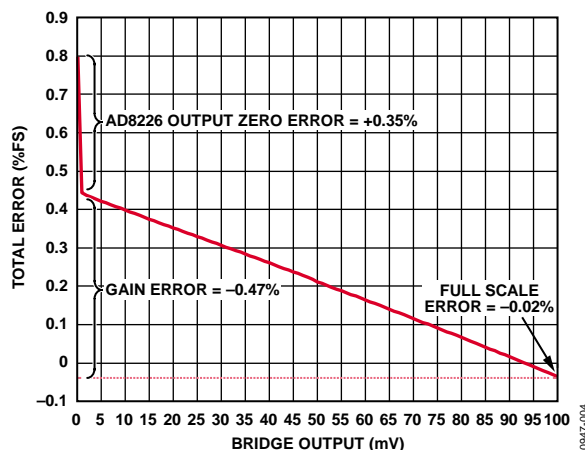


図4. 3 kΩブリッジ、24 Vループ電源の場合のブリッジ出力 vs 出力電流の全誤差(%FSR)

バリエーション回路

この回路は示されている部品の値を使って、安定して正確に動作することが実証されています。他の電圧リファレンス、高精度オペアンプおよび計装アンプをこの設定で使用して、4 mA~20 mAのアナログ電流出力や、この回路の他の種々のアプリケーションを開発することができます。

ADA4091-4はクワッド・バージョンです。追加の高精度オペアンプが必要であれば、デュアル・チャンネルのADA4091-2の代替品として使うことができます。

低コストで電源電圧範囲の広いデュアル・チャンネルの計装アンプAD8426も、入力チャンネルが複数あるアプリケーションに使うことができます。

高精度、低電力、低ノイズ電圧のリファレンスADR4550は、低電圧電源アプリケーションでADR02と置き換えて使うことができます。

回路の評価とテスト

必要な装置

- EVAL-CN0289-EB1Z 評価用ボード
- Agilent E36311A デュアル DC 電源または相当品
- Agilent 3458A マルチメータまたは相当品

電流出力の測定

評価ボードの電流出力は図5に示す設定を使って測定されました。テスト条件は以下のとおりです。

- ループ電源：24 V
- ループ負荷：250 Ω
- $R_{\text{BRIDGE}} = 3 \text{ k}\Omega$
- $V_{\text{DRIVE}} = 5 \text{ V}$
- $V_{\text{CM}} = 2.5 \text{ V}$

ブリッジ抵抗は計装アンプの両方の入力端子に接続され、センサー出力をシミュレーションします。

テスト・セットアップの設定とテスト

回路は図 5 のテスト・セットアップを使ってテストされました。

Agilent E36311A デュアル電源を使って 2.5 V の同相電圧と 0 mV~100 mV の差動入力電圧を発生させました。

Agilent 3458A を使って評価ボードの実際のループ電流出力を測定しました。

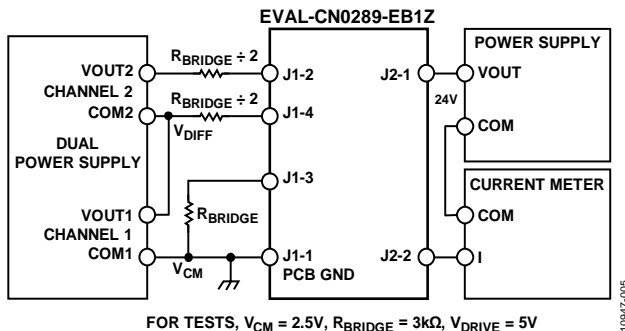


図 5. テスト・セットアップの機能ブロック図

さらに詳しくは

CN-0289 Design Support Package:

<http://www.analog.com/CN0289-DesignSupport>.

MT-031 Tutorial, *Grounding Data Converters and Solving the Mystery of AGND and DGND*. Analog Devices.

MT-035 Tutorial, *Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues*. Analog Devices.

MT-065 Tutorial, *In-Amp Noise*. Analog Devices.

MT-066 Tutorial, *In-Amp Bridge Circuit Error Budget Analysis*. Analog Devices.

MT-087 Tutorial, *Voltage References*. Analog Devices.

MT-101 Tutorial, *Decoupling Techniques*. Analog Devices.

Voltage Reference Wizard Design Tool.

データシートと評価用ボード

CN-0289 回路評価用ボード (EVAL-CN0289-EB1Z)

AD8226 データシート

ADA4091-2 データシート

ADR02 データシート

改訂履歴

5/13—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客様は製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできませんが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。