

**Circuits  
from the Lab™**  
Reference Circuits  
実用回路集

テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は <http://www.analog.com/jp/CN0295> をご覧ください。

使用したリファレンス・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 5.0 V リファレンス電圧
ADA4091-4	超小型高精度マイクロパワー、単電源レール to レール入出力のオペアンプ

柔軟に応用できる電圧/電流駆動の  
4mA~20mA 圧力センサー・トランスミッタ

評価および設計サポート環境  
回路評価ボード

CN0295 回路評価ボード (EVAL-CN0295-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に示す回路はフレキシブルな電流トランスミッタで、圧力センサーの差動電圧出力を 4mA~20mA の電流出力に変換します。

この回路はブリッジをベースにした多様な電圧駆動または電流駆動の圧力センサー向けに最適化されており、使われているアクティブ素子はわずか5個です。この回路の未調整での総合誤差は1%未満です。部品とセンサー・ドライバの設定に応じて、7V~36Vの電源電圧を使用できます。

回路の入力は ESD と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。

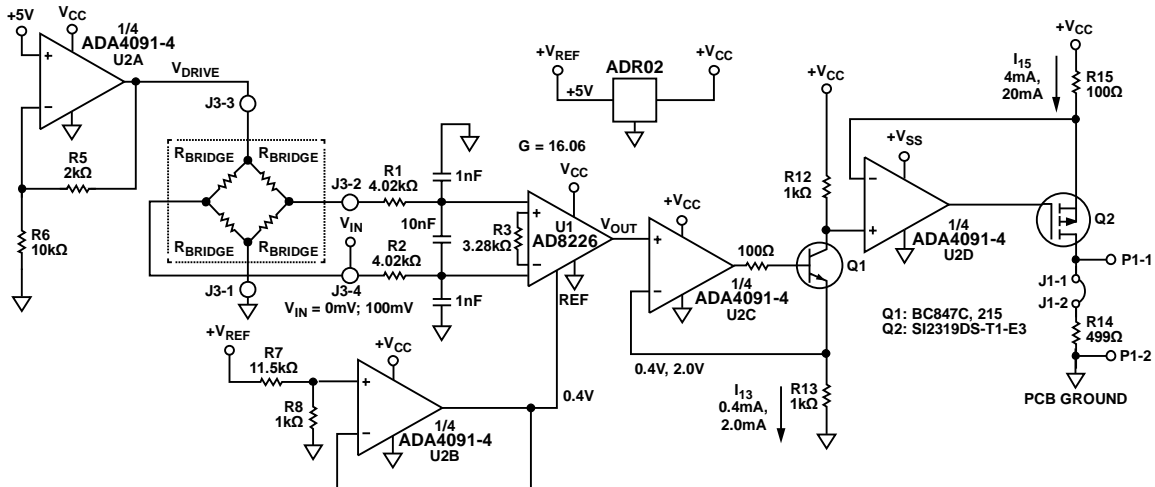


図 1. 4 mA~20 mA 出力の圧力センサー信号処理回路 (センサーは電圧駆動モード)  
(簡略回路図: 接続の一部およびデカップリングは省略されています。)

アナログ・デバイス社は、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・デバイス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。※日本語資料は 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。

## 回路説明

このソリューションは、圧力センサー計測用の 4 mA~20 mA トランスミッタです。この回路には、センサー励起駆動源、センサー出力アンプ、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 に示すように、（ブリッジ駆動電流と出力電流を除いて）回路に必要な合計電流は 5.23 mA（最大）です。

表 1. 最大回路電流 (25°C)

回路素子	消費電流 (mA)
ADR02	0.80
ADA4091-4	1.00
AD8226	0.43
R5, R6 at 6 V	0.60
R7, R8 at 5 V	0.40
R13 at 2 V	2.00
Total	5.23

## 励起源：電圧駆動の設定

選択された圧力センサーに応じて、電圧駆動または電流駆動のどちらかが必要です。この回路では ADA4091-4 の 4 つのアンプのうちの 1 つ (U2A) を使用して、S1 スイッチを切り替えることで設定を選択し、どちらかのオプションをサポートします。S1 の位置を識別マークに最も近い位置にした電圧駆

動の設定を図 2 に示します。（CN0295 設計支援パッケージの回路レイアウトと回路図を参照：

<http://www.analog.com/CN0295-DesignSupport>）。

電圧駆動は、通常、6 V のブリッジ駆動電圧（このステージのゲイン  $(1 + R5/R6)$  から得られる値）に設定されています。次式を使って抵抗比を適切に変更することにより、他の駆動電圧を得ることができます。

$$V_{DRIVE} = 5 \text{ V} \left( 1 + \frac{R5}{R6} \right)$$

ADA4091-4 の U2A に動作のための十分な余裕を与えるため、電源電圧  $V_{CC}$  はブリッジ駆動電圧より少なくとも 0.2 V 高くなるようにしてください。

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

図 2 に示されている値の場合、 $R5 = 2 \text{ k}\Omega$ 、 $R6 = 10 \text{ k}\Omega$ 、 $I_{DRIVE} = 2 \text{ mA}$ 、 $V_{DRIVE} = 6 \text{ V}$ 、 $V_{CC} \geq 6.2 \text{ V}$  となります。

ADA4091-4 オペアンプがこの回路に使用されているのは、消費電流が少なく ( $250 \mu\text{A}/\text{アンプ}$ )、オフセット電圧が低く ( $250 \mu\text{V}$ )、入力および出力がレール to レールであるためです。

5 V リファレンスとして ADR02 が使用されているのは、高精度 (A グレード: 0.1%、B グレード: 0.06%)、低消費電流 (0.8 mA) であるためです。

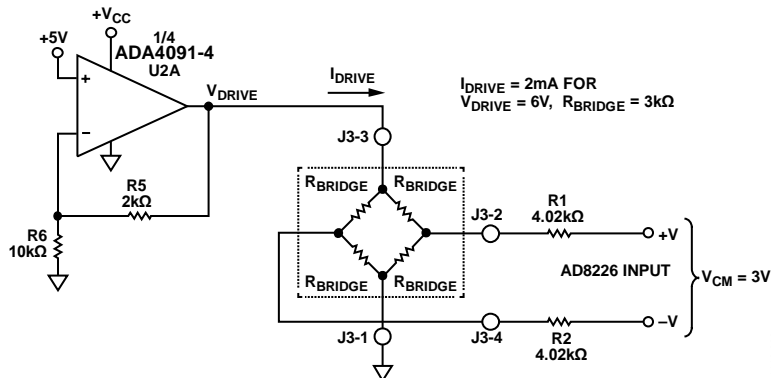


図 2. センサー電圧駆動の設定（簡略回路図：接続の一部およびデカップリングは省略されています。）

### 励起源：電流駆動の設定

S1 の位置を識別マークから最も遠い位置に移動させることにより、この回路を図 3 に示す電流駆動の設定に切り替えることができます。

電流駆動モードでは、回路は  $R4 = 2.5 \text{ k}\Omega$  を用いて  $I_{DRIVE} = 2 \text{ mA}$  に設定されています。次式を使って  $R4$  の値を変更することにより、 $I_{DRIVE}$  の値を可変させることができます。

$$R4 = \frac{5 \text{ V}}{I_{DRIVE}}$$

それに伴う駆動電圧  $V_{DRIVE}$  は次式で計算します。

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

$V_{CC}$  電源には  $0.2 \text{ V}$  のヘッドルームが必要であるため、アンプの電源の下限は次のようになります。

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

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

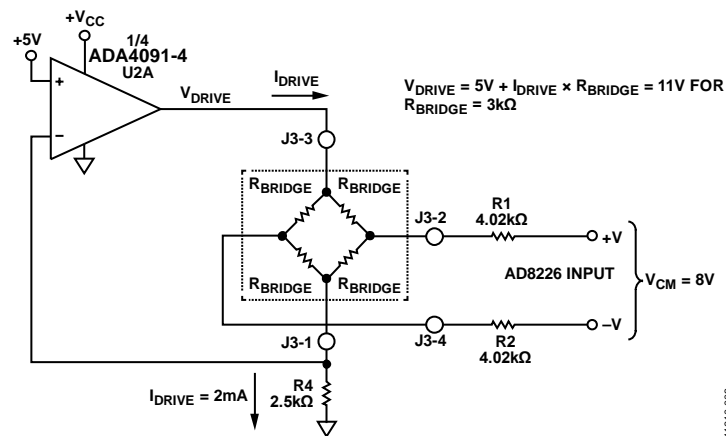


図 3. センサー電流駆動の設定（簡略回路図：接続の一部およびデカップリングは省略されています。）

## ブリッジ出力の計装アンプとオフセット回路

ブリッジの出力は帯域幅 39.6 kHz の同相フィルタ (4.02 k $\Omega$ 、1 nF) と、帯域幅 1.98 kHz の差動モード・フィルタ (8.04 k $\Omega$ 、10 nF) によってローパス・フィルタ処理されます。

AD8226 はゲイン誤差が少なく (0.1%、B グレード)、オフセットが小さく (G = 16、B グレードで 58  $\mu$ V、G = 16、A グレードで 112  $\mu$ V)、ゲイン非直線性に優れており (75 ppm = 0.0075%)、入力と出力がレート to レールなので、このような目的の計装アンプに最適です。

AD8226 計装アンプはゲイン設定抵抗 R3 = 3.28 k $\Omega$  を使って、100 mV FS の信号を 16 倍のゲインで 1.6 V に増幅します。ゲイン G と R3 の関係は次式で与えられます。

$$R3 = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

G = 16 の場合、R3 = 3.2933 k $\Omega$  です。R3 には最も近い 0.05% 誤差抵抗の標準値である 3.28 k $\Omega$  を選択すると、G = 16.06 となり、総合ゲイン誤差が +0.4% になります。

ブリッジの出力が 0 V の時、出力ループ電流を 4 mA にする必要があります。これは、図 1 に示すように AD8226 計装アンプの REF 入力に +0.4 V のオフセットを与えるだけで実現されます。+0.4 V は、抵抗デバイダ R7/R8 を使用し、U2B で電圧をバッファすることによって 5 V リファレンスである ADR02 から作り出します。

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

## 電圧/電流変換

AD8226 の入力が 0 V ~ 100 mV の場合、V<sub>OUT</sub> での出力振幅は 0.4 V ~ 2.0 V となります。バッファ U2C がこの電圧を R13 に印加し、それに流れる 0.4 mA ~ 2.0 mA の電流 I<sub>13</sub> が生成されます。次いで、トランジスタ Q1 が I<sub>13</sub> 電流を R12 にも流し、その結果得られる R12 の両端の電圧が R15 にも等しく印加されるので、最終的に 4mA ~ 20mA のループ電流が得られます。トランジスタ Q1 は、そのベース電流に起因する直線性誤差を最小に抑えるためにゲインが少なくとも 300 あるものにします。

出力トランジスタ Q2 は 25°C で 0.75W を消費できる 40 V の P チャネル MOSFET 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<sub>CC</sub> 電源で 0  $\Omega$  のループ負荷抵抗に 20 mA の出力電流が流れる場合です。このような条件では、Q2 の消費電力は 0.68 W です。しかし、V<sub>CC</sub> を最大ループ負荷電圧より少なくとも 3 V 高くなるように選択することにより、Q2 の電力を大幅に削減することができます。これにより、検出抵抗 R15 での電圧降下による十分なヘッドルームが保証されます。

## 電源電圧の要件

回路を正しく動作させるには、ADR02 電圧リファレンスに十分な電源電圧の余裕を与えるために電源電圧 V<sub>CC</sub> を 7 V より高くする必要があります。

V<sub>CC</sub> 電源電圧の最小値は、ブリッジの駆動回路の設定にも依存します。V<sub>DRIVE</sub> = 6 V の電圧駆動モードでは、U2A に十分なヘッドルームを保つため、電源電圧 V<sub>CC</sub> を 6.2 V より高くしなければなりません (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<sub>CC</sub> を 11.2 V より高くしなければなりません (図 3 参照)。

V<sub>CC</sub> 電源電圧は最大 36 V に制限されます。

## アクティブ部品の誤差解析

AD8226 と ADR02 の A グレードと B グレードでの、システム内のアクティブ部品に起因する最大誤差と rss 誤差 (root sum square: 二乗和の平方根) を表 2 と表 3 に示します。ADA4091-2 オペアンプのグレードは 1 つしかない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)

Error Component	Error	Error Value	Error %FSR
AD8226-A	Offset	112 $\mu$ V	0.11%
ADR02-A	Offset	0.10%	0.02%
ADA4091-4 (U2B)	Offset	250 $\mu$ V	0.02%
ADA4091-4 (U2C)	Offset	250 $\mu$ V	0.02%
ADA4091-4 (U2D)	Offset	250 $\mu$ V	0.02%
AD8226-A	Gain	0.15%	0.15%
RSS Offset			0.12%
RSS Gain			0.15%
RSS FS Error			0.27%
Max Offset			0.19%
Max Gain			0.15%
Max FS Error			0.34%

表 3. アクティブ部品に起因する誤差 (B グレード)

Error Component	Error	Error Value	Error %FSR
AD8226-B	Offset	58 $\mu$ V	0.06%
ADR02-B	Offset	0.06%	0.01%
ADA4091-4 (U2B)	Offset	250 $\mu$ V	0.02%
ADA4091-4 (U2C)	Offset	250 $\mu$ V	0.02%
ADA4091-4 (U2D)	Offset	250 $\mu$ V	0.02%
AD8226-B	Gain	0.10%	0.10%
RSS Offset			0.07%
RSS Gain			0.10%
RSS FS Error			0.17%
Max Offset			0.13%
Max Gain			0.10%
Max FS Error			0.23%

## 回路全体の精度

抵抗の許容誤差に起因する総合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総合誤差に等しく影響を与えると想定します。クリティカルな6つの抵抗は、R3、R7、R8、R12、R13、R15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を求めると、総合抵抗誤差は最大0.6%になります。rssによる誤差とすると、総合 rss 誤差は  $0.1\sqrt{6} = 0.245\%$  になります。

抵抗のワーストケースの許容誤差0.6%を、前に求めたアクティブ部品（Aグレード）に起因するワーストケースの誤差に加算すると、以下のようになります。

- オフセット誤差 =  $0.19\% + 0.6\% = 0.79\%$
- ゲイン誤差 =  $0.15\% + 0.6\% = 0.75\%$
- フルスケール誤差 =  $0.34\% + 0.6\% = 0.94\%$

これらの誤差は、計算された抵抗値が選択され、誤差はその許容誤差のみに起因すると仮定しています。

回路の総合誤差を1%以下にすることは可能ですが、さらに精度を上げる必要があれば、オフセットとゲイン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出力の場合、R7またはR8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入力に対してR3を変化させて調整することができます。オフセットを最初に較正すれば、2つの調整は独立して行うことができます。

実際の回路の誤差データ（ $V_{CC} = 25\text{ V}$ 時）を図4に示します。出力電流の総合誤差（%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、その結果に100を掛けて計算されています。

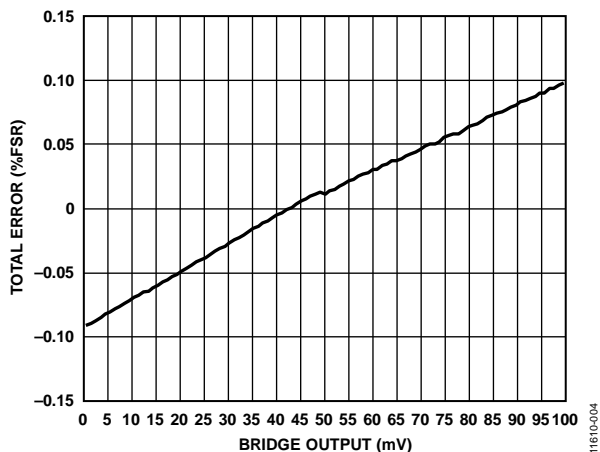


図4.  $V_{CC} = 25\text{ V}$ でのブリッジ電圧対出力電流の総合誤差（%FSR）

## バリエーション回路

この回路は、図に示された部品の値を使うことで、優れた安定性と高精度を提供します。また他のアナログ・デバイセズ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。

また、デュアル・チャンネル、低価格、広電源電圧範囲の計装アンプ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、低消費電力、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用にADR02の代わりに使うことができます。

## 回路の評価とテスト

### 必要な装置

- EVAL-CN0295-EB1Z 評価用ボード
- Agilent 36311A 高精度 DC 電源
- Yokogawa2000 高精度 DC 電源
- Agilent3458A 高精度マルチメータ

評価用ボードの電流出力での直線性誤差は、図5に示すセットアップで測定されました。

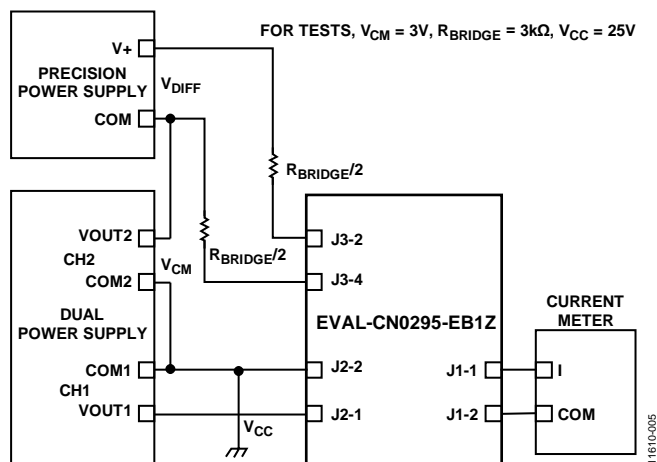


図5. テスト・セットアップのブロック図

### テスト方法

Agilent E3631A と Yokogawa 高精度電圧源を使って評価用ボードの電源を投入し、センサー出力をシミュレーションしました。Agilent E3631A のCH2を25 Vに設定し、ボードの電源として使用しました。また、もう1つのチャンネルCH1を2.5 Vに設定し、同相電圧を発生させました。チャンネルCH2は、図5に示すようにYokogawa 2000と直列に接続しました。Yokogawa 2000は計装アンプの入力で0 mV ~ 100 mVの差動入力電圧を発生させ、次いでセンサー出力をシミュレーションします。

Agilent 3458Aを使って評価用ボードの実際の電流出力を測定しました。Agilent 3458AはJ1と直列に接続されています。

## さらに詳しい資料

CN-0295 Design Support Package :

<http://www.analog.com/CN0295-DesignSupport>

MT-035 Tutorial : [Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues.](#)

MT-051 Tutorial : [Current Feedback Op Amp Noise Considerations](#)

MT-065 Tutorial : [In-Amp Noise](#)

MT-066 Tutorial : [In-Amp Bridge Circuit Error Budget Analysis](#)

MT-087 Tutorial : [Voltage References](#)

MT-031 Tutorial : [Grounding Data Converters and Solving the Mystery of AGND and DGND.](#) Analog Devices.

MT-101 Tutorial : [Decoupling Techniques.](#)

[Voltage Reference Wizard Design Tool.](#)

## データシートと評価ボード

[AD8226 データシート](#)

[ADA4091-4 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に作られており、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。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、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。

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。