



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 [www.analog.com/jp/CN0533](http://www.analog.com/jp/CN0533) をご覧ください。

接続または参考にしたデバイス

ADXL1002	高周波 MEMS 加速度センサー、 +/-50g、低ノイズ
AD5749	電流出力ドライバ、工業向け、単電源、 55V 最大電源電圧、プログラマブルな範囲
LT6654	電源電圧範囲が広く、出力駆動電流の大きい低ノイズ高精度リファレンス

状態基準保全アプリケーション用の 4mA~20mA 出力の  
10kHz MEMS 加速度センサー

評価と設計支援

回路評価用ボード

CN-0533 回路評価用ボード (EVAL-CN0533-EBZ)

アルミニウム・マウンティング・ブロック

(EVAL-XLMOUNT1)

設計および統合ファイル

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

状態基準保全 (CbM) とは、様々なセンサーを使用して装置の経時的な動作状態を評価する予防メンテナンスの形態の 1 つです。収集されたセンサー・データはベースラインの傾向を明らかにするのに使用されるほか、診断や故障の予測にも役立ちます。従来の定期的な予防メンテナンス・モデルとは異なり、CbM を利用することで必要に応じてメンテナンスが実施されるため、時間とコストの両方を削減できます。

一般的な CbM 計測として、振動モニタリングが挙げられます。多くの場合、振動トレンドの変化は、摩耗などの故障モードを示しています。振動データを計測するには、高帯域幅 (10kHz 以上)、超低ノイズ (100µg/√Hz 以下) の MEMS 加速度センサーが、コスト効果に優れた信頼性の高い選択肢となります。

アプリケーションによっては、サポート回路の近く (同一基板上または短いケーブルを使用した基板外) に加速度センサーを配置する場合がありますが、ある程度離れた所に加速度センサーを配置する必要があることもあり、この場合は接続オプションが制限されます。通常、MEMS 加速度センサーの出力はアナログ電圧やデジタル (通常はシリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI) または I<sup>2</sup>C) で、どちらも長いケーブルでの駆動には適していません。この出力は、USB、低電圧デジタル信号 (LVDS)、イーサネットなどの高速デジタル・インターフェースに変換できます。ただし、追加で必要になる電力、サイズ、およびコストは実用的ではありません。

これに対し、業界標準である 4mA~20mA などのアナログ電流ループ・データ伝送では、優れたノイズ耐性、電磁干渉 (EMI) の影響を受けやすい環境での堅牢性、高帯域幅、最大 20m のデータ転送といった性能をすべて実現しながら、回路基板上のデバイス数は少なく済みます。更に、4mA~20mA 信号標準は従来のほぼすべての産業用データ・アキュイジション (DAQ) システムでサポートされており、最新のインダストリー 4.0 スマート・センサー・ノードに簡単に適用できます。

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、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は 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。

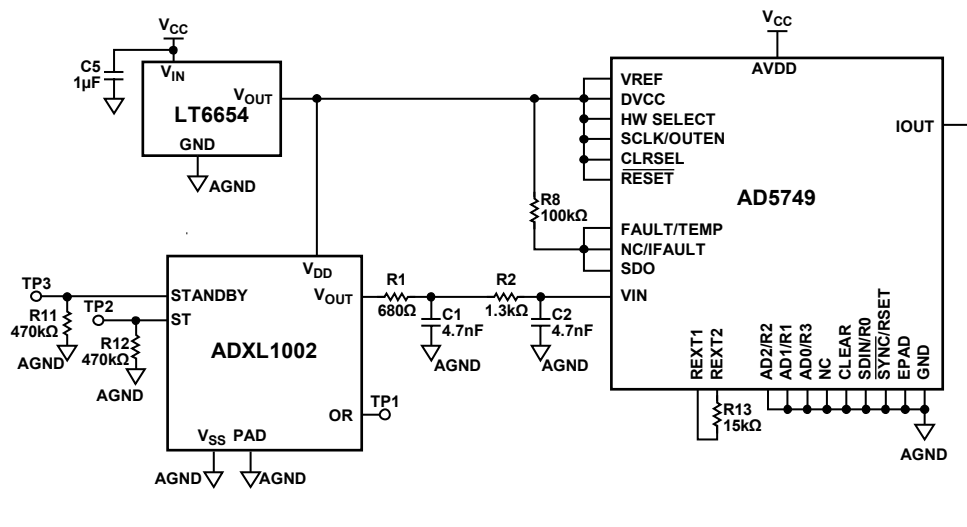


図 1. EVAL-CN0533-EBZ の簡略化した回路図

## 回路説明

図 1 に示す回路は、電圧出力が 4mA~20mA アナログ信号に変換された、MEMS 加速度センサー振動センシング・ソリューションの簡略化した回路図です。

### 4mA~20mA の電流ループとインターフェース

4mA~20mA の電流ループは、1950 年代から業界におけるアナログ信号の標準となっています。この信号標準の主な利点は、長いケーブル上でほとんど減衰がないことです。これにより、産業環境や工場環境など、EMI の影響を受けやすい環境での堅牢性が高まります。電圧出力を使用した場合は反対に、ケーブルが長い (10m 以上) とケーブル抵抗によって電圧降下が見られ、センサー・データが喪失したり、センサー指示値が不正確になったりします。

図 1 に示すリファレンス設計は、1 軸の ADXL1002 MEMS 加速度センサーで構成されており、そのアナログ電圧出力は AD5749 電圧/電流コンバータを使用して 4mA~20mA の信号標準に変換されています。AD5749 の入力 ( $V_{IN}$ ) は 0V~4.096V の間で変動し、ADXL1002 のアナログ出力電圧 ( $V_{OUT}$ ) は 0V~ $V_{DD}$  の間で変動するため、 $V_{DD}$  は 4.096V に設定する必要があります。そのため、-55°C~125°C の温度範囲で、10ppm/°C の温度安定性を実現しながら 4.096V を供給するのに LT6654AMPS6-4.096 が選択されています。-3dB 帯域幅が 36kHz の 2 極 RC ローパス・フィルタが、 $V_{OUT}$  と  $V_{IN}$  の間に配置されています。このフィルタによって広帯域ノイズが制限され、アプリケーションの DAQ 回路のサンプル・レートとフィルタリング特性に応じて、帯域内にエイリアスが生じる可能性のある、ADXL1002 の内部クロックの 200kHz のノイズ成分が減衰されます。

AD5749 では、プリント回路基板 (PCB) のフットプリントへの影響を最小限に抑えながら、ADXL1002 電圧出力信号が 4mA~20mA 電流出力に直接変換され、最大 50kHz の帯域幅と優れたノイズ耐性を実現します。

市場における多くの 4mA~20mA ドライバは、電流出力の D/A コンバータ (DAC) で構成されており、SPI または I<sup>2</sup>C 外付けコントローラが必要です。AD5749 4mA~20mA ドライバは、スタンバイ動作モード (ハードウェア・モード) という利点も備えています。

ハードウェア・モードでは、HW\_SELECT ピンをハイに設定します。R0~R3 および RSET ピンはすべてローに接続され、AD5749 出力範囲が 4mA~20mA に設定されるため、AD5749 出力範囲を構成するための外付けマイクロコントローラは不要です。温度に対する出力電流の安定性を向上させるには、REXT1 ピンと REXT2 ピンの間に外付け低ドリフト抵抗を接続します。

DAQ フロントエンド回路 (図示なし) には、電流/電圧 (I-V) 変換アンプが 1 つのみ必要です。トランスインピーダンス (I-V 抵抗) は、DAQ フロントエンド回路の入力範囲に応じて設定する必要があります。

図2には、手で振動を加えた場合の回路電流出力 ( $I_{OUT}$ ) の例 (黒線) を示しています。0g レベルは  $I_{OUT}$  ミッドレンジに対応しており、4mA~20mA 構成の場合は 12mA となります。参考のためにフルスケール・レンジ (FSR) を灰色の破線で強調表示しています。

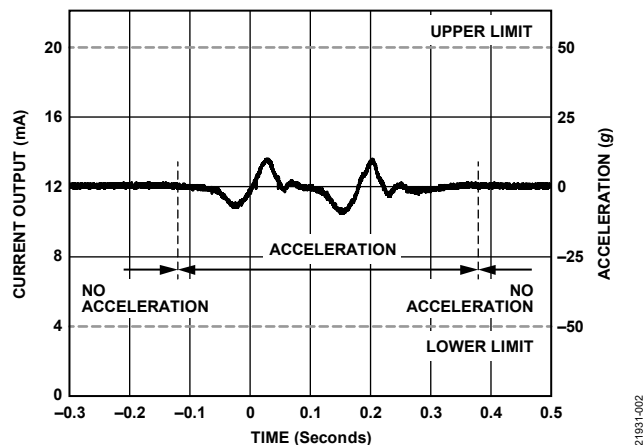


図2. 加速度入力に対応する電流出力と加速度

## MEMS 振動センサーの長所

ADXL1002 MEMS 加速度センサーは超低ノイズを特長とするほか、 $25\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  のノイズ・スペクトル密度、3dB 帯域幅が 1kHz の広帯域動作、およびセンサー共振周波数が 21kHz という特性を持っています。ADXL1002 は、温度感度、DC/低周波数応答、位相応答 (つまり群遅延)、耐衝撃性、および回復における優れた性能に加えて、圧電式センサーに匹敵するノイズ・レベルと帯域幅を実現できます。

センサーの直線 ( $\pm 0.1\%$  FSR 以内) 計測範囲は  $\pm 50\text{g}$  であり、これは広範な CbM アプリケーションに対応できる十分な大きさです。従来の圧電式センサーとは異なり、容易にハンダ付けできる LFCSF により、ADXL1002 や周囲の回路を簡単に組み込むことができます。

ADXL1002 は長期の優れた信頼性を実現する、CbM アプリケーション向けのロー・コストで高性能なセンシング・ソリューションとなります。このような特長により、この MEMS 振動センサーは CbM ソリューションのあらゆる場所で利用でき、インダストリー 4.0 に向けてスマート・テクノロジーの応用範囲を拡大しつつあります。

## バリエーション回路

アプリケーションの要件に応じて、CN0533 回路は [ADXL1001](#)、[ADXL1003](#)、[ADXL1004](#)、[ADXL1005](#) といった他の 1 軸電圧出力 MEMS 加速度センサーに対応できます。センサー共振周波数に基づいて、ローパス・フィルタのカットオフ周波数も選択できます。

ADXL1002 に対して 5V 電源を使用し、AD5749 の入力が行われる前に、高精度の分圧器で出力を 4.096V にスケールリングすることで、この回路で加速度センサーのデータシートに記載のスペクトル・ノイズ・レベルを実現できます。

## 回路の評価とテスト

以降のセクションでは、回路と機械的な取り付け部のセットアップ方法、出力の読み出し方、および予想される性能に関して簡単に説明します。

詳細については、CN0533 のユーザ・ガイドを参照してください。

### 必要な装置

以下の装置類が必要になります。

- 4mA~20mA のレシーバー (ナショナル・インストルメンツの NI-9203 など)。電流 DAQ の代わりに、高精度で温度安定性を備えた抵抗と電圧 DAQ システムを使用することもできます。抵抗値は DAQ の入力電圧範囲に応じて設定する必要があります
- 電源 (12V~24V)
- EVAL-CN0533-EBZ ボード
- EVAL-XLMOUNT1 アルミニウム・マウンティング・ブロック
- 振動台または振動源
- コネクタとケーブル

### テストの開始にあたって

以下に示すのは、テスト・セットアップを理解および再現するための基本的な手順です。

1. EVAL-CN0533-EBZ ボードの VCC、IOUT、および GND の各パッドに 3 本のワイヤをハンダ付けします。
2. EVAL-XLMOUNT1 をシェーカーまたは振動台にしっかりと取り付けます。
3. 感度方向に注意しながら、EVAL-CN0533-EBZ ボードを EVAL-XLMOUNT1 に取り付けます。
4. VCC と GND を電源に、IOUT と GND を 4mA~20mA レシーバー回路に接続します。
5. DAQ または振動計測装置の加速度感度を  $128\mu\text{A}/\text{g}$  に設定します (ADXL1002 の感度スケールは部品ごとに多少異なる場合がありますが、ADXL1002 は重力場や他のリファレンス・センサーで簡単に補正できます)。

### 電源構成

回路電源電圧範囲は 12V~55V であり、最大電流消費量は 24mA (代表値) です。

### テスト

振動計測アプリケーションの回路の性能を確認するために、アナログ・デバイセズの振動ラボで回路のテストを行いました。振動 DAQ システムの入力はすべて電圧入力であるため、電流ループを閉じるのに、温度安定性を備えた高精度の  $50\Omega$  の抵抗を使用し、回路の出力を抵抗での電圧降下として間接的に計測しました。この回路では、その周波数応答、ノイズ・スペクトル密度、衝撃、および群遅延に対する特性評価が行われています。各テストの詳細と結果を以下に示します。

## 周波数応答の計測

図3に示すように、EVAL-CN0533-EBZはアルミニウム・ブロック取り付けインターフェース (EVAL-XLMOUNT1) に取り付けられた後、振動台に取り付けられます。振動台では 100Hz～30kHz の制御された機械振動が、2g の固定加速度振幅で生成されます。その後、回路出力と振動基準 (この場合は、レーザ・ドップラー振動計) が記録されます。図4にプロットされた周波数応答を示しています。この周波数応答は、ADXL1002 の伝達関数と整合性があります。

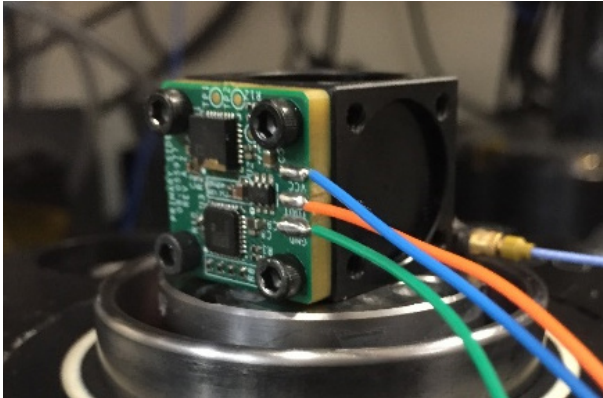


図3. EVAL-XLMOUNT1 を使用して振動台に取り付けられている EVAL-CN0533-EBZ

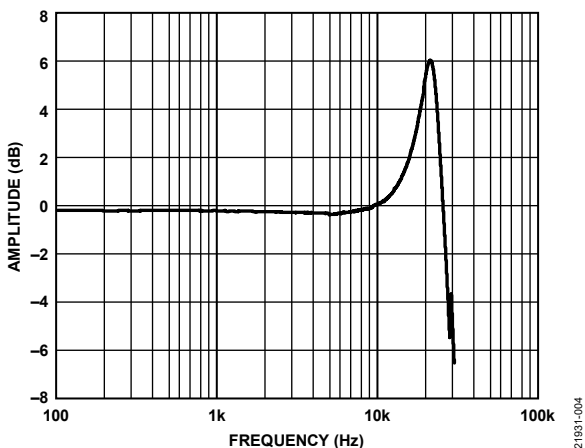


図4. 周波数応答

このテスト、および高周波数での他の振動テストでは、機械信号パスの完全性が重要となります。つまり、信号源からセンサーまでの間に振動信号に (ダンピングによる) 減衰または (共振による) 増幅が発生してはいけません。例えばこの例では、アルミニウム・ブロック (EVAL-XLMOUNT1)、4つのスクリュー・マウント、および厚い PCB によって、目的の周波数範囲に対する平坦な機械的応答を確保しています。

## ノイズ・スペクトル密度

図5に、異なる温度レベル (-40°C～+105°C) におけるセンサーのノイズ密度特性評価を示しています。この結果は、温度範囲に対するノイズ密度の変動が ADXL1002 センサーIC よりもわずかに大きいことを示しています。ノイズ密度が上昇した理由は、ADXL1002 の電源電圧が 5V ではなく、4.096V であるためです。この電源の低減によってスペクトル・ノイズ密度が約 20% 増加します。ADS749 の電圧リファレンス (VREF) と ADXL1002 の出力電圧 (V<sub>OUT</sub>) の共通電圧源として 4.096V の電源を選択しています。これにより、2つの電圧レベル間の不一致が原因となる変換誤差が発生しません。

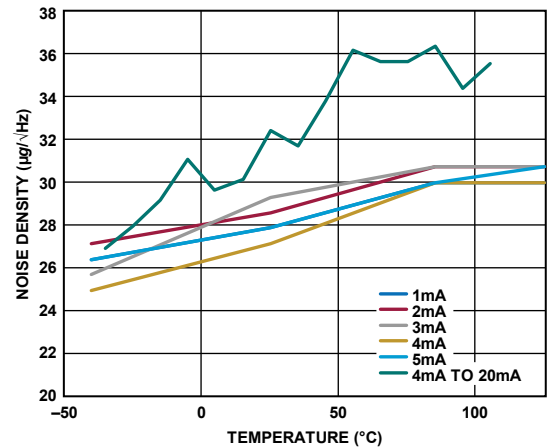


図5. 1kHz でのノイズ密度と温度の関係

## 正弦波振動に対する応答

図6は、EVAL-CN0533-EBZ で取得したデータのサンプル・セットを示しています。ここで、EVAL-CN0533-EBZ は 10kHz の正弦振動と 10g の振幅 (赤色のデータ) で駆動されています。このテストで示しているリファレンス・センサー (図6に示す青色のデータ) は、レーザ・ドップラー振動計による加速度計測のものです。EVAL-CN0533-EBZ は、振動計に対して約 20µs の遅延を示しています。

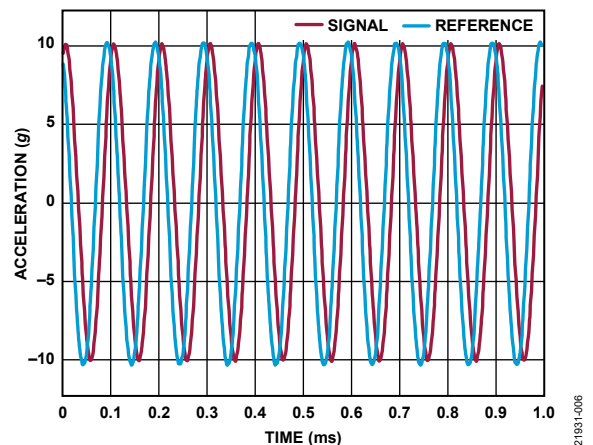


図6. 10g 加速度正弦波励起信号に対するデバイスの応答

## 衝撃テスト

この回路では衝撃プロファイルを加えるテストも行いました（図7を参照）。衝撃ピーク加速度は10g、幅は500 $\mu$ s、形状は方形波です。ADXL1002 MEMS センサーは不足減衰の2次系を使用してモデリングできるため、出力のリングングが想定されます。

この場合のリファレンス・センサーは、共振周波数と4 $\mu$ sの特性評価済み群遅延を持つ圧電式センサー（モデル353C23）です。ここで、リファレンス・センサーの出力とADXL1002の出力に25 $\mu$ s以下の位相差があることに注意してください。そのため、回路全体の群遅延は約21 $\mu$ sになります。

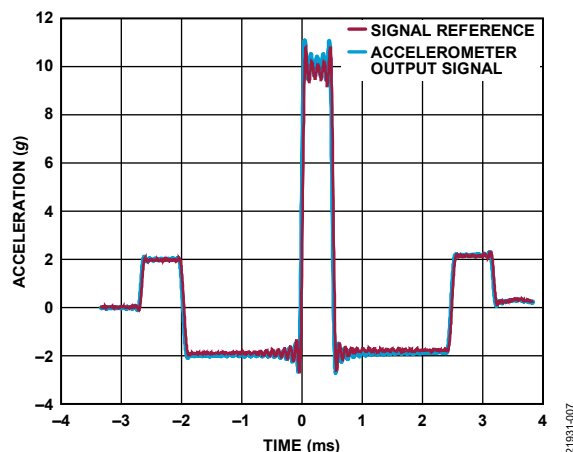


図7. 10gでの衝撃プロファイル

## 更に詳しい資料

CN0533 設計サポート・パッケージ：  
[www.analog.com/jp/CN0533-DesignSupport](http://www.analog.com/jp/CN0533-DesignSupport)

## データシートと評価用ボード

CN-0533 回路評価用ボード (EVAL-CN0533-EBZ)

ADXL1002 データシート

ADXL1002 評価用ボード

AD5749 データシート

LT6654 データシート

## 改訂履歴

9/2020—Revision 0: Initial Version

PC は、Philips Semiconductors 社（現在の NXP Semiconductors 社）が独自に開発した通信プロトコルです。

「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。

©2020 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。