



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 <https://www.analog.com/jp/CN0549> をご覧ください。

### 接続または参考にしたデバイス

CN-0540	シングル・チャンネル、24 ビット、IEPE 振動データ・アキュイジション・システム
CN-0532	10kHz、IEPE、MEM 振動センサー
XL MOUNT1	20kHz、MEM、振動解析用の加速度センサー・メカニカル・マウンティング・ブロック

## IEPE 対応の状態基準保全機械学習イネーブルメント・プラットフォーム

### 評価と設計支援

#### 回路評価用ボード

[CN-0540 リファレンス設計ボード \(EVAL-CN0540-ARDZ\)](#)

[CN-0532 リファレンス設計ボード \(EVAL-CN0532-EBZ\)](#)

[XL MOUNT1 メカニカル・マウンティング・ブロック](#)

(EVAL-XL MOUNT1)

#### 設計および統合ファイル

[回路図](#)、[PCB レイアウト](#)・[データ](#)、[部品表](#)、[ソフトウェア](#)、[MATLAB の例](#)、[Python の例](#)

#### 回路の機能とその利点

振動検出を使用する機械の状態基準保全 (CbM) が、工業用アプリケーションにおいて重要性を増しています。企業は機械類の寿命と性能の最適化、および総所有コストの削減に努めており、その一方で、このような情報に備えることを中心とした新たなビジネス・モデルの開発に関心を寄せる企業もあります。モニタリングを必要とする機械類の状態を正確に表すには、大量のデータセットを収集して、通常動作モードと故障状態の両方について、その装置の基準となる動作ポイントを決定する必要があります。一度このデータを収集すれば、その装置を正確に分析するためのアルゴリズムまたは閾値検出ルーチンを作成することができます。

CbM を行うには、時間領域と周波数領域の両方で、すべての高調波、エイリアス、その他の機械的相互作用を考慮できるように、全帯域幅におよぶデータを収集する必要があります。このデータ収集には、高性能のセンサーと、忠実度の高いリアルタイムのデータをデータ解析用のツールやアプリケーションに提供することのできるデータ・アキュイジション (DAQ) システムが必要です。

MATLAB®などの実績あるツールや、Tensorflow などのより新しい Python ベースのツールを使用すれば、スマート機能を利用した意思決定のためのデータ分析、機械プロファイリング、アルゴリズム作成が大幅に簡素化されます。

振動検出は、従来もほとんどの CbM アプリケーションの主流を占めていますが、これは様々なセンサーを利用できること、および分析の背景となる科学への理解が進んでいることによります。集積電子圧電 (IEPE) 標準は、今日の工業分野の主流となっているハイエンドの微小電気機械システム (MEMS) センサーや圧電センサー用として、広く使われているシグナリング・インターフェース標準です。

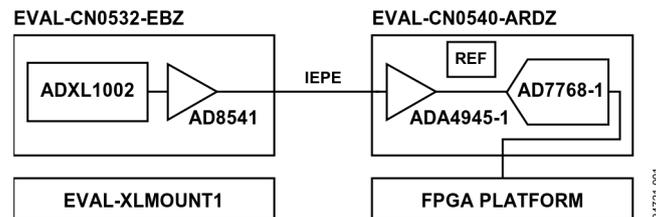


図 1. CN-0549 のシステム・ブロック図

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、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。

## 回路の説明

### 振動解析

振動検出は、従来もほとんどの CbM アプリケーションの主流を占めていますが、これは様々なセンサーを利用できること、および分析の背景となる科学への理解が進んでいることによります。しかし、新たな装置の分析が必要となったり、ある特定の使用事例が装置にどのように影響するのかをより深く理解する必要が生じたりした場合はどうでしょう。必要な見通しを立てるには、まず、最適条件下での動作や、故障を誘発するような条件下での動作において、その装置がどのような挙動を示すかを理解する必要があります。振動源のある状態で装置が動作した場合の周波数スペクトルの例を図 2 に示します。

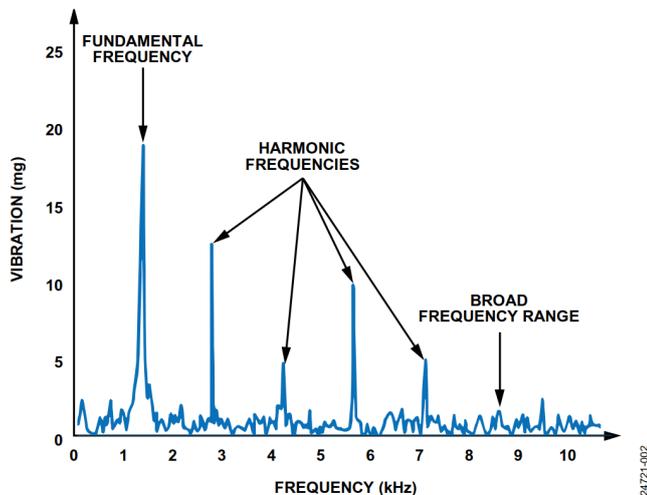


図 2. 振動源の周波数スペクトルの例

### 振動センサー - IEPE インターフェース

IEPE は、今日の工業分野の主流となっているハイエンドの圧電振動センサーに広く使われているインターフェース標準です。IEPE インターフェースは、信号とグラウンドだけで構成される 2 線式の信号規格の 1 つです。CN-0540 などの DAQ カードは、信号線を介し、通常 10V~30V の任意の電圧を持つ電流として、CN-0532 振動センサーに電源を供給します。信号線への電源供給は電流源によって行われるので、センサー・デバイスは電圧レール上の加速度データを変調することができます。したがって、1 本のワイヤを、センサーの電源と変調出力電圧の両方に使用できます。

### MEMS センサーと圧電センサー

圧電式加速度センサーは、周波数応答の範囲が広く振動入力に対する感度が良好なことから、今日の CbM 市場の主流を占めています。しかし、最近の MEM 技術の進歩によって、圧電式と MEM 式の加速度センサーの性能的ギャップはかつてほどではなくなっています。

CN-0532 IEPE MEM 振動センサーは、ADXL1002 がベースになっています。ADXL1002 のノイズと帯域幅は圧電式センサーに匹敵するもので、更に温度感度、DC から低周波数での応答性、位相応答（したがってグループ遅延も）、耐衝撃性、衝撃からの回復などの点でも優れた性能を発揮します。このセンサーは  $\pm 50g$  の直線的な測定範囲を備えています（フルスケール比 (FSR) で  $\pm 0.1\%$  以内）、これは幅広い振動アプリケーションに十分対応できる値です。ADXL1002 と、IEPE インターフェースでそれを使用する方法についての詳細は、CN-0532 のウェブ・ページを参照してください。

CN-0549 を使用すると、圧電センサーの性能と MEMS ベースのセンサー・ソリューションの性能を直接比較することができます。

### 機械的なセンサー取り付け

CbM アプリケーションの大きな課題は、アナログの世界とデジタルの世界を橋渡しすることです。信頼できるセンサー・データをモニタ対象の装置からプロセッサに取り込むことは、容易ではありません。最初に問題となり、かつ最も重要なのは、センサーとモニタ対象装置を確実に接続する必要があるということです。対象装置にセンサーを取り付けた際には、機械的な異常やセンサー取り付けの影響によって、振動スペクトルが変わってしまわないようにすることが重要です。

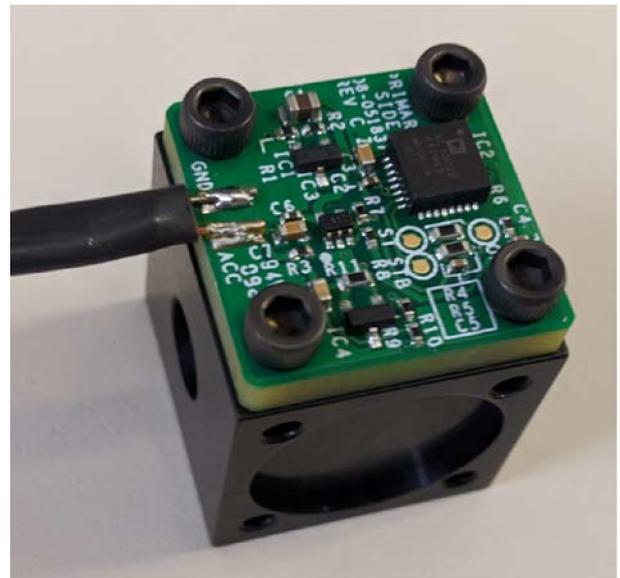


図 3. EVAL-CN0532-EBZ を取り付けした EVAL-XLMOUNT1

EVAL-XLMOUNT1 は 5 面を使用できる取り付け用の立方体で、データに関するセンサーの性能を低下させることなく、測定対象装置に CN-0532 を取り付けることができます。EVAL-XLMOUNT1 は、機械的取り付けによって生じる周波数 20kHz までのすべての誤差源を完全になくすることができるように設計され、テストされています。また、この取り付け用立方体には、アルミニウム表面に不導体層を形成して短絡を防止するために、陽極酸化処理も施されています。

## データ・アキュイジション - IEPE

一般的なデータ・アキュイジションでは、電圧と電流を直接取り込んでデジタル・コードに変換します。しかし、IEPE インターフェースが異なるので、より特殊な DAQ ボードが必要です。DAQ ボードは、適切な電流と励起電圧レベルでセンサーに電源を供給できなければならない、更にセンサーが収集したデータをリードバックできなければなりません。このデータは、その同じ励起電圧で変調されます。

CN-0540 は 24 ビットのシングル・チャンネル DAQ システムで、IEPE センサーとインターフェースを取るために最適化されています (図 4 を参照)。この DAQ システムは、約 26V の最大励起電圧をセンサーに供給できます。AD7768-1 ADC は、256KSPS でサンプリングを行います。これは、6.144Mbps のデータがプロセッサに送られることを意味します。使用するデータ・アキュイジションについての詳細は、CN-0540 のウェブ・ページを参照してください。

## フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) ホスト

CN-0540 のハードウェアは標準的な Arduino® フォーム・ファクタなので、Arduino フォーム・ファクタに必要なデータ・レート、電氣的ピン配置、および機械的フォーム・ファクタをサポートできるすべての処理システムを使用することができます。2 つの大手 FPGA メーカーが提供する開発システム、Intel DE10-Nano システム・オン・チップ (SoC) プラットフォームと、Xilinx Cora Z7-07S SoC プラットフォームがサポートされており、必要な機能をすべて備えたリファレンス設計も提供されています。また、ハードウェア記述言語 (HDL) のリファレンス設計が、オープン・ソース・ソフトウェアとして提供されています。したがって、これらの設計は好みに応じて容易に他のプラットフォームへ移植することができます。HDL ファイルと関連文書の詳細については、CN0540 HDL ユーザ・ガイドのページを参照してください。

FPGA ベースの SoC は、CN-0540 が生成する大量の高精度データを扱うために特別に選ばれたものです。固定処理は、ロジックを使うことで、CPU 処理よりもはるかに少ない消費電力で効率的に行うことができます。FPGA は、このような固定処理の負荷を軽減し、組込み ARM® を解放して他のタスクを行えるようにするために使用できます。

## ソフトウェア・アーキテクチャとインフラストラクチャ

DE10-Nano および Cora Z7-07S SoC プラットフォームは、共に Linux を実行して CN-0540 とインターフェースを取り、その制御を行います。Linux は、アナログ・デバイゼスの Kuiper Linux ディストリビューションで提供されます。これは Raspbian をベースにしたものです。このディストリビューションには、標準コンパイラと Python のようなインタープリタを含む、組込み開発とデバッグ用の標準ソフトウェア・ツールが含まれています。このディストリビューションによって提供されるカーネルには、CN-0540 の様々な部品を制御するために必要なドライバが含まれています。

CN-0540 のドライバは、工業用入出力 (Industrial Input Output: IIO) フレームワークと呼ばれる標準カーネル・ドライバ・フレームワークで提供されます。IIO フレームワークは、アナログ・デバイゼスや他の多くのベンダが製造するコンバータ、アンプ、センサーなどの製品や、その他いくつかの部品をサポートしています。

CN-0540 ソフトウェア・ファイルと、ソフトウェア・イメージを使用するための準備方法の詳細については、[アナログ・デバイゼスの Kuiper Linux](#) のウェブ・ページを参照してください。

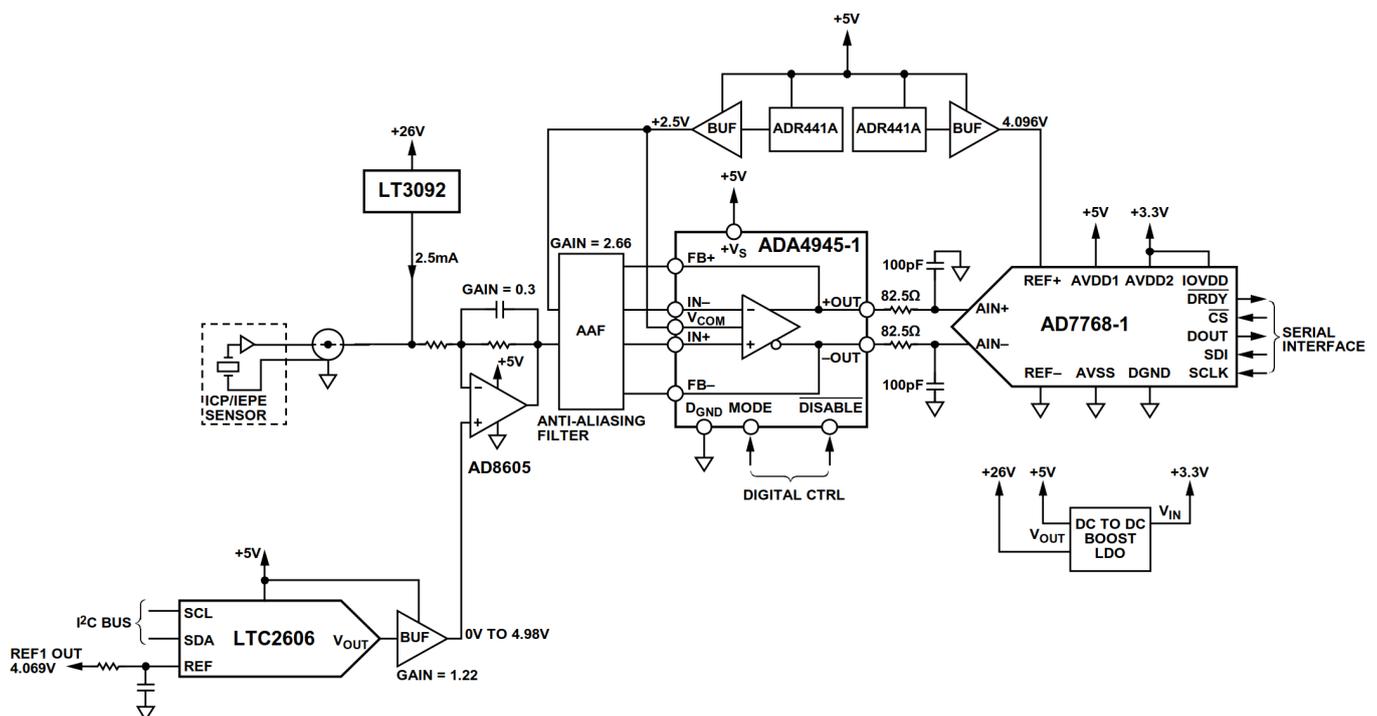


図 4. CN-0540 の簡略ブロック図

## 低レベル制御

IIO ドライバは、CN-0540 の制御と、データまたはバッファ収集の両方の側面を扱います。レジスタ・アクセスを含め、最も低いレベルでドライバとのインターフェースを取る場合は、IIO ライブラリ (libIIO) を使用することができます。libIIO は、実行コードによって、それ自身がドライバと通信できます。通信は SoC ボード上で直接行うか、あるいはホスト PC からリモートで行います。IIO デバイスのデバッグ用として、標準グラフィカル・インターフェース (IIO-Oscilloscope) が提供されています。このツールには、移動高速フーリエ変換 (FFT) 機能が標準で付属しています。これにより、センサーの帯域内で発生するあらゆる異常振動を可視化することができるので、外部 PC を接続しなくても、基本的なデバッグと分析が可能です。

IIO-Oscilloscope は、特定のドライバ群との連携を容易にするために、カスタマイズ可能なプラグインをサポートしています。CN-0540 は、IEPE バイアス誤差の補正を容易にして回路のアンプ・ゲインをできるだけ大きくするために、特別なプラグインを備えています。この補正は一般に IIO-Oscilloscope を通じて行うことができますが、プラグインを使用すれば、補正プロセスがより簡単なものになります。

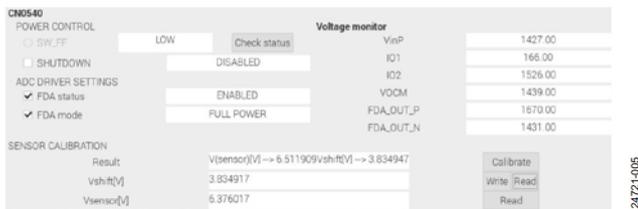


図 5. CN-0540 IIO-Oscilloscope プラグインのグラフィカル・ユーザ・インターフェース

## アルゴリズム開発 - MATLAB と Python

IIO-Oscilloscope を使用して、システムが意図したとおりに動作するかどうかの検証と妥当性確認が完了したら、異なる言語を使用する他のインターフェースや、データ分析用に設計された他のツールへ移行することができます。CN-0540 へのインターフェースには C/C++を使用することができます。しかし、基本的なツールの組込みは、Python や MATLAB によって行います。これらの言語は、Python 側に立脚した Tensorflow や PyTorch のようなフレームワーク、あるいは MATLAB 用の様々なツールボックスヘデータを取り込むためのワークフローを簡素化します。

CN-0540 は、pyadiiio モジュールを通じて Python をサポートしています。このモジュールは、データ・サイエンティストやアルゴリズム開発者向けに開発された、使い易いアプリケーション・プログラミング・インターフェース (API) を提供します。Kuiper Linux にプレインストールされていますが、Python Package Index (PyPI) を通じて入手することもできます。ADXL1002 を取り付けた CN-0540 に接続して、データを取り出す場合の簡単な例を図 6 に示します。

```
import adi # Import module
xl = adi.adxl1002("ip:192.168.2.1") # create object
xl.sample_rate = 1024 # Set sample rate
data = xl.rx() # Collect data
```

図 6. CN-0540 の Python の例

CN-0540 は、アナログ・デバイゼスのセンサー・ツールボックスを通じて MATLAB をサポートします。これは自己完結型のツールボックスで、例 (サンプル)、インターフェース・クラス、およびセンサーのようなハードウェアを対象としたインフラストラクチャが含まれています。Python クラスに似た MATLAB インターフェース・クラスは一般的な API に従ったもので、MathWorks が提供していた API がベースになっています。Python 同様、このインターフェース・クラスは、データ・サイエンティストやアルゴリズム開発者向けに開発された使い易い API を備えています。ADXL1002 を取り付けた CN-0540 に接続して、データを取り出す場合の簡単な例を図 7 に示します。

```
%% Accel
xl = adi.ADXL1002; % Create object
xl.SampleRate = 1024; % Set sample rate
xl.uri = 'ip:192.168.2.1'; % set URI
acceldata = xl(); % Collect data
```

図 7. CN-0540 の MATLAB の例

このツールボックスは、MATLAB の Addon Explorer から直接インストールするか、GitHub のインストーラを通じてインストールすることができます。

## バリエーション回路

センサーを追加するには、使用できる DAQ チャンネルを増やす必要があります。入力チャンネルを増やすために、AD7768-4 は最大 4 個、AD7768 は最大 8 個の入力チャンネルを備えています。

異なる帯域幅または G 範囲を必要とする MEM 振動センサーには、ADXL1003、ADXL1004、および ADXL1005 MEM 加速度センサーを使用することができます。

## 回路の評価とテスト

CN0549 は IEPE に対応した高速の CbM 開発プラットフォームで、アナログ・デバイスと認定代理店の両方から容易に入手できるボードとハードウェアを組み合わせて実装されています。これをオープン・ソースのソフトウェアとともに使用すれば接続や可視化が容易になり、データ分析ツールとも容易にインターフェースを取ることができます。

## 必要な装置

以下の装置類が必要になります。

- EVAL-CN0532-EBZ
- EVAL-CN0540-ARDZ
- EVAL-XLMOUNT1
- FPGA 開発ボード (DE10-Nano または Cora Z7-07s)
  - FPGA 開発ボードは販売パートナーを通じて入手可能
- サブミニチュア A (SMA) ケーブル
- 高精細マルチメディア・インターフェース (HDMI) ケーブル
- Kuiper Linux イメージがインストールされた 16GB microSD カード
- USB On-The-Go (OTG) アダプタ
- USB ドングルの付いたワイヤレス・キーボードおよびマウス

## システム・セットアップ

システム・セットアップについては図 8 を参照してください。



図 8. CN-0532 センサーを取り付けた DE10-Nano に接続した CN-0540

## 開始にあたって

システムをテストして動作させるために必要な基本的ステップを以下に示します。

1. アナログ・デバイセス Kuiper Linux のウェブ・ページにある最新のソフトウェア・イメージを使用して、microSD カードを作成します（このステップは図 9 には示されていません）。
2. Arduino ピン・コネクタを使って、CN-0540 DAQ ボードと DE10-Nano FPGA プラットフォームを接続します。
3. SMA コネクタを使って、CN-0532 を CN-0540 に接続します。ただし、CN-0532 には SMA コネクタがないので、ケーブルを切断してコネクタを直接ハンダ付けする必要があります。
4. マウンティング・ブロックに付属しているネジを使って、EVAL-XLMOUNT1 の面の 1 つに CN-0532 を取り付けます。
5. DE10-Nano に microSD カードを挿入し、USB OTG アダプタを接続してモニタの HDMI ケーブルを挿入します。
6. DE10-Nano 評価用キットに付属している 5V DC 用 AC アダプタを使い、DE10-Nano に電源を供給します。

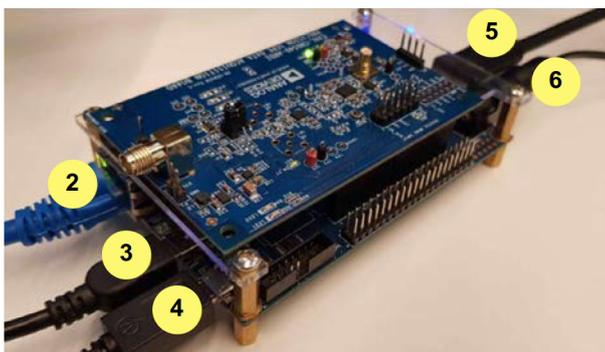


図 9. パリフェラルを取り付けた DE10-Nano に接続した CN-0540

DE10-Nano、またはサポートされているその他のプラットフォームを使用してシステムを動作させるためのステップ・バイ・ステップの詳しい説明については、CN0549 ユーザ・ガイドを参照してください。

## テスト結果

システムのテストは以下の手順で行います。

1. EVAL-XLMOUNT1 を使って、プログラム可能な振動源に CN-0532 を取り付けます。振動台または同等の装置を使用するのが最も望ましい方法です。
2. CN-0540 IIO-Oscilloscope プラグインを開いてセンサーのオフセットを補正し、補正ルーチンを使ってシフト電圧を記述します。
3. 振動源を起動して、2kHz の振動音を発生させます。
4. IIO-Oscilloscope のキャプチャ・ウィンドウへ移動し、16,384 個のサンプルと 3 個ずつの平均で周波数領域のプロットを設定します。
5. [Capture] (キャプチャ) ウィンドウの [Play] (プレイ) ボタンをクリックします（最上部左側を参照）。
6. 2kHz の振動音が、想定通り周波数スペクトルに現れていることを確認します。振動源や機械的取り付け状態の問題が原因となって、プロットには他にもいくつかの周波数スペリアスが現れることがあります。

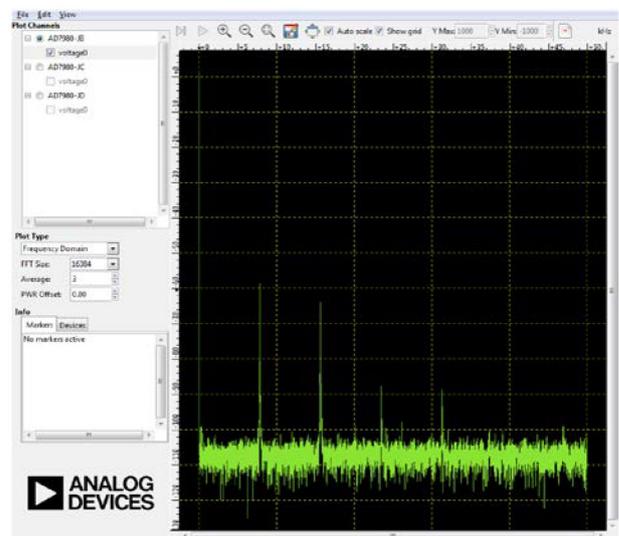


図 10. CN-0532 と CN-0540 を使用した IIO-Oscilloscope のキャプチャ

DE10-Nano、またはサポートされているその他のプラットフォームを使用してシステムを動作させるためのステップ・バイ・ステップの詳しい説明については、CN0549 ユーザ・ガイドを参照してください。

## 更に詳しい資料

CN0549 設計支援パッケージ

<https://www.analog.com/jp/CN0549-DesignSupport>

回路ノート、CN0540

回路ノート、CN0532

Thomas Brand. “Demands on Sensors for Future Servicing: Smart Sensors for Condition Monitoring.” 技術記事、アナログ・デバイセズ

## データシートと評価用ボード

CN-0540 リファレンス設計ボード (EVAL-CN0540-ARDZ)

CN-0532 リファレンス設計ボード (EVAL-CN0532-EBZ)

MEM メカニカル・マウンティング・ブロック (EVAL-XLMOUNT1)

DE10-Nano FPGA 開発ボード

## 改訂履歴

10/2020—Revision 0: Initial Version

I<sup>2</sup>C 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。

©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。