



# 高分解能オシロスコープの評価

## 8ビットのオシロスコープで より高い分解能を実現する方法

### Application Note

このアプリケーション・ノートでは、以下について説明します。

- オシロスコープのADCビット数と分解能ビット数の違い
- 垂直軸分解能とノイズの関係
- 高分解能モードの仕組みと用途
- アベレージング・モードの用途

この10年間で、オシロスコープのサンプリング・レート、帯域幅、メモリ長は大幅に進化しました。オシロスコープのもう1つの重要な仕様に、垂直軸分解能があります。垂直軸をより細密に表示する測定は、一般に広ダイナミック・レンジ測定と呼ばれています。

今日のオシロスコープには、8ビットより高い垂直軸分解能を持つものもあります。分解能を上げる方法には、標準の8ビットA/Dコンバータ(ADC)出力にデジタル信号処理(DSP)を適用する方法と、ビット数が8ビットよりも多いADCを使用する方法があります。また、ビット数が8ビットよりも多いADCとDSPを組み合わせ、さらに高い垂直軸分解能を達成しているオシロスコープもあります。



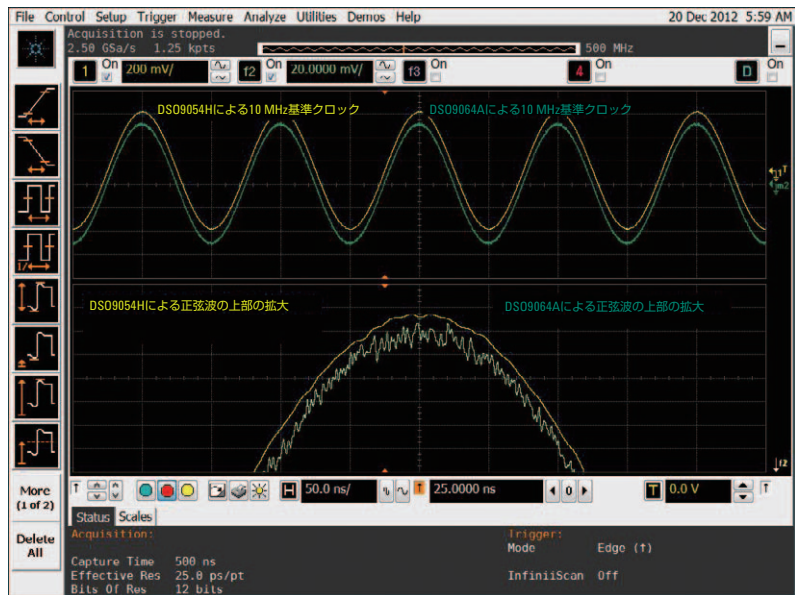


図1.

図1は、8ビットで収集した波形と、12ビット分解能のオシロスコープで収集した波形を比較したものです。どちらのオシロスコープも、低雑音10 MHz基準クロック信号に接続されています。捕捉した波形の上部を拡大してズーム表示しています。

### オシロスコープのADCは 垂直軸分解能にどのような 影響を与えるのか？

すべてのメーカーが、オシロスコープのADCビット数を仕様に記載しています。分解能は、そのオシロスコープのA/Dコンバータで判別できる最小の量子化レベルです。

ADCのビット数を $n$ とすると、デジタル・コードまたは量子化レベル(Qレベル)の数は $2^n$ となります。Qレベルの数は、8ビットのADCでは256、12ビットのADCでは4096です。各オシロスコープのADCは、オシロスコープの垂直軸のフルスケールで動作します。すなわち、Qレベルのステップ値は、オシロスコープの垂直軸のフルスケール設定値によって決まります。例えば、ユーザが垂直軸設定を100 mV/divに設定した場合のフルスケールは800 mV(8 div×100 mV/div)なので、Qレベルの分解能は3.125 mV/レベル(800 mV÷256レベル)になります。電流測定で垂直軸設定が10 mA/divの場合は、Qレベルの分解能は312.5 μA/レベル(80 mA÷256レベル)になります。

S/N比が十分に高ければ、ADCのビット数が多いほど、信号の細部を詳細に表示できます。分解能のビット数が増えても、通常、その一部はノイズによって使用できません(図2参照)。この例でLeCroy HRO66ZiはADCが12ビット、Agilent DSO9054HIは分解能が12ビットですが、利用可能な分解能はともに約10ビットです。垂直軸のすべての設定レンジで、分解能の下位2ビット分がフロントエンドのノイズによって消費されているためです。

オシロスコープのADCは垂直軸分解能にどのような影響を与えるのか？(続き)

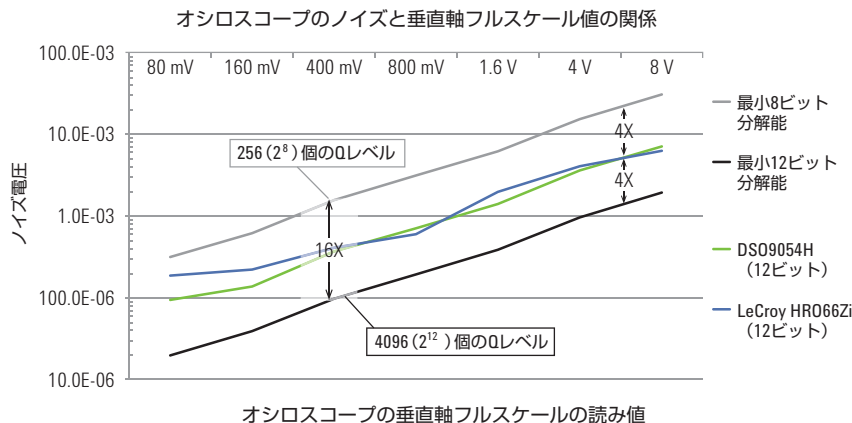


図2.

「ビット数」仕様の本当の意味とは？

「分解能のビット数」とは、オシロスコープが収集サンプルをマッピングできる垂直軸のレベル数を表します。このような表現を用いているオシロスコープ・ファミリは、通常、8ビットのADCとDSPによって、8ビットより高い分解能を実現しています。オシロスコープを「高分解能」モードに設定すると、オシロスコープはオーバーサンプリングを行い、ADC出力をデジタル・フィルタに通して、分解能のビット数を増やします。

Agilent Infiniiumオシロスコープは、ビット数を増やすために、Nタップのボックスカー・アベレージング・フィルタというDSP手法を採用しています。アベレージング回数が2倍になると分解能が1ビット増えます。式(1)は、分解能のビット数rを求める一般式です。

$$\text{分解能のビット数 } r = n + \log_2(N) \tag{1}$$

例えば、16タップのボックスカー・アベレージング・フィルタを8ビットADCのデータに適用すると、12ビットの分解能が得られます。

一部のメーカーは、「拡張ビット数」という仕様を記載しています。拡張ビットとは、S/N比に関連付けられる理想的なADCビットと等価です。拡張ビットの仕様値がmビットの場合のS/N比は、理想的なmビットのADCから得られる理想S/N比と同じです。nビットADCの出力にボックスカー・アベレージング・フィルタを適用した場合、拡張ビット数mは式(2)で求められます。

$$\text{拡張ビット数 } m = n + \log_4(N) \tag{2}$$

例えば、64タップのボックスカー・アベレージング・フィルタを8ビットADCのデータに適用すると、12拡張ビットの分解能が得られます。

## ENOBは分解能のビット数およびADCのビット数とどのような関連があるのか？

もう1つ、一般的に使用される仕様に、「有効ビット数」(ENOB)があります。ENOBは、デジタル化された信号のS/N比の指標です。S/N比(dB)は式(3)で定義されます。式(4)は実効値電圧( $V_{RMS}$ )で表す定義方法です。この定義は、オシロスコープのS/N比を計算する場合に便利です。式(5)に、ENOBとS/N比の関係を示します。

$$S/N比_{dB} = 10 \log_{10}(\text{信号パワー} / \text{ノイズ・パワー}) \quad (3)$$

$$S/N比_{dB} = 20 \log_{10}(\text{信号}V_{RMS} / \text{ノイズ}V_{RMS}) \quad (4)$$

$$ENOB = (S/N比_{dB} - 1.761) / 6.02 \quad (5)$$

有効ビット数が1ビット増えるごとに、S/N比は6.02 dB改善されます。理想的な8ビットADCのENOBは8、S/N比は50 dBです。理想的なADCからのノイズは、すべて量子化効果に起因します。理想的なADCでは、ビット数が多いほど量子化ノイズが小さくなり、ENOBが向上します。ENOBは周波数によって変化するため、通常は特定の周波数における仕様が記述されます。

ENOBは、オシロスコープのテクノロジーを比較する際に便利な指標の1つです。ENOBは、オシロスコープ内のすべてのノイズ源と誤差要因によって悪化します。例えば、ADCの量子化ノイズ、ADCの微分非直線性、ADCの積分非直線性、熱雑音、ショット・ノイズ、入力増幅器の歪みなどです。このようなノイズ源や誤差要因があるため、通常、ENOBの仕様値はビット数の仕様値よりもはるかに小さくなります。例えば、12ビットの高分解能デジタル・オシロスコープの場合、高周波におけるENOBは8～9ビットで、これは、約50～56 dBのS/N比に相当します。

## 高分解能波形の例

図3は、高分解能収集モードをサポートするデジタル・オシロスコープで捕捉した3つの波形です。入力信号は、デジタル・カウンタでD/Aコンバータ(DAC)をドライブして生成した階段状のランプ信号です。上のグリッドには、3つの波形が標準のスケールで表示されています。下のグリッドでは、垂直軸で細部を表示するために、3つの波形すべてを10倍に拡大し、重ねて表示しています。一番上の波形は、高分解能収集モードをオフにして2.5 Gサンプル/sで捕捉したものです。

## 高分解能波形の場合(続き)

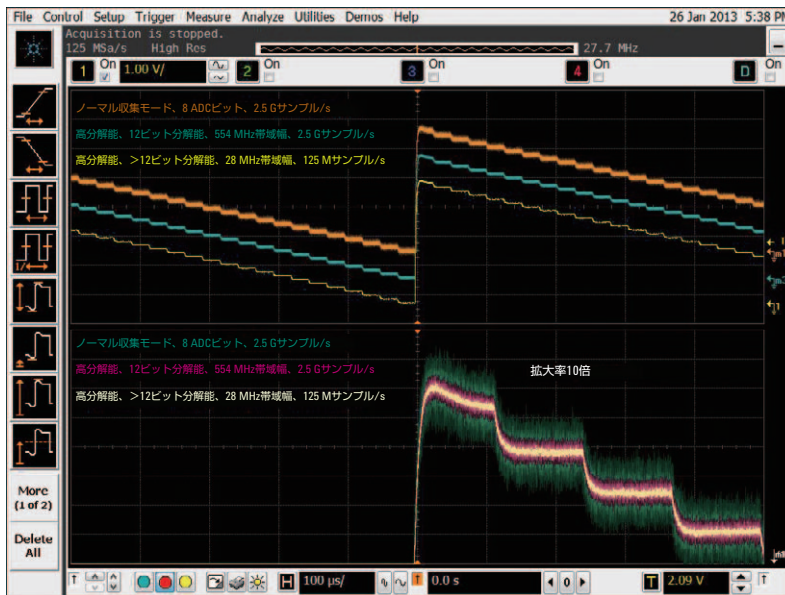


図3. 高分解能信号トレースの例

信号にノイズが載っているために細部が見えないことに注目してください。10倍に拡大した波形には、ノイズがさらにはっきりと表示されています。この例では、表示を改善するために波形に垂直ディザを施しているため、量子化レベルは確認できません。真ん中の波形は、高分解能収集モードをオンにし、12ビットの分解能を設定して、2.5 Gサンプル/sで捕捉したものです。この例の帯域幅は554 MHzです。ノイズが大幅に減り、垂直軸の細部が見やすくなっています。一番下の波形は、12ビットを超える分解能で捕捉したものです。サンプリング・レートを125 Mサンプル/sに設定することで垂直軸分解能を12ビットより高くしていますが、帯域幅が28 MHzに減少します。この信号に対しては28 MHzの帯域幅で十分なので、この場合にS/N比が最も高くなり、垂直軸の細部が最も見やすくなります。

図3の信号トレースは、8ビットのADCとボックスカー・アベレージングによる高分解能収集モードで捕捉されたものです。式(6)に、ボックスカー・アベレージング・フィルタ帯域幅の近似式を示します。

$$\text{ボックスカー帯域幅} \approx 0.4428 F_s / N \quad (6)$$

図3の真ん中のトレースの帯域幅は、次のように計算できます。ボックスカー・アベレージング・フィルタへの入力のサンプリング・レート $F_s$ は20 Gサンプル/sで、分解能のビット数は12ビットです。式(2)より、タップ数は $2^{(12-8)}$ すなわち16タップです。帯域幅は $0.4428 \times 20 \text{ G} / 16$ より554 MHzになります。ほとんどの高分解能オシロスコープでは、帯域幅が自動的に計算されて表示されます。

## 高分解能収集のアーキテクチャ

図4は、高分解能収集システムの実装に一般的に用いられているアーキテクチャです。アナログ入力信号が帯域制限フィルタを通過する際に、ナイキスト周波数より上の信号成分が除去されます。ナイキスト周波数は、サンプリング周波数 $F_s$ の半分で定義されています。ナイキスト周波数より上の信号成分が残っていると通過帯域に折り返され、不要なエリアジングが生じます。

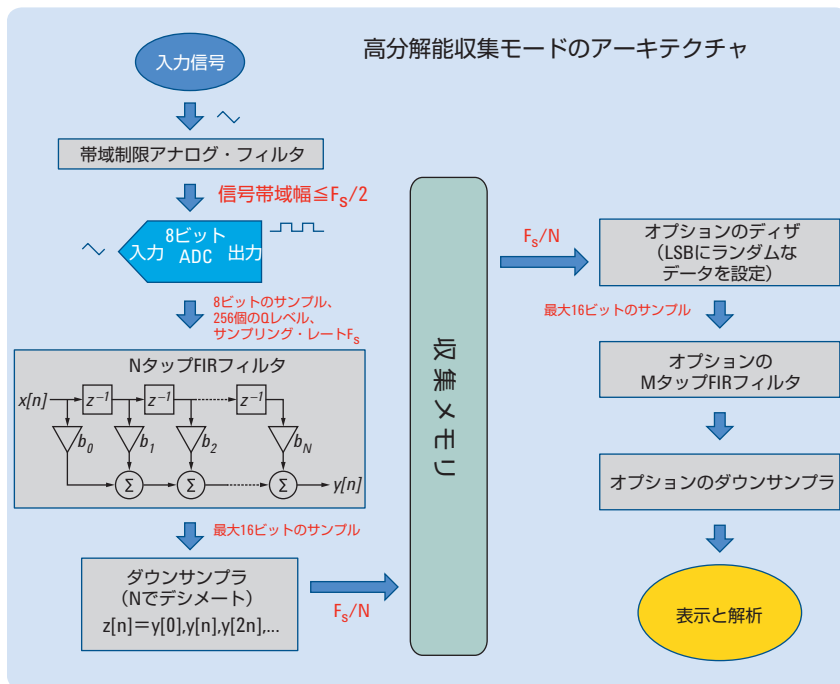


図4. 高分解能収集のアーキテクチャ

Agilent 9000 Hシリーズ・オシロスコープで採用されているサンプリング・プロセスは、「ハイパーサンプリング」と呼ばれています。エリアジングを防ぐために必要な最小サンプリング周波数は、帯域制限されたアナログ信号の帯域幅の2倍です。ハイパーサンプリングでは、これよりはるかに高いサンプリング・レートを使用します。ハイパーサンプリングは、垂直軸分解能を高め、ノイズ・フロアを下げるために有効な手法です。

標準的な広帯域幅オシロスコープが低いサンプリング・レートで動作する場合は、エリアジングが問題になります。帯域制限フィルタのコーナ周波数は最大帯域幅の仕様値よりわずかに高い値に設定されていて通常はこれを変更できず、低いサンプリング・レートに対応できないためです。高分解能アーキテクチャでは、ダウンサンプリングを行う前に、NタップのローパスFIRフィルタを使用するため、エリアジングが大幅に減少します。このフィルタにより、ダウンサンプリング後に通過帯域に折り返される信号成分が減衰します。高分解能専用のオシロスコープの場合は、エリアジングはそれほど問題になりません。もともと最大帯域幅の仕様値が小さく、それに基づいて帯域制限フィルタのコーナ周波数が設定されているためです。例えば、4 GHzのオシロスコープを高分解能モードで動作させて、500 MHzの帯域幅で12ビットの分解能を実現する場合、コーナ周波数は最大帯域幅に対応するために4 GHzより上に設定さ



## 高分解能収集のアーキテクチャ (続き)

れています。これに対して、高分解能専用の500 MHzオシロスコープの場合は、コーナ周波数が500 MHzより少し上に設定されているため、エリアジングはまったく生じません。

タップの重みが一律なフィルタは、ボックスカー・アベレージング・フィルタと呼ばれます。ボックスカー・アベレージング・フィルタは実装が容易で、きわめて高い入力サンプリング・レートと多くのタップ数を実現できます。ただし、ボックスカー・フィルタの時間応答が方形なので、周波数ドメインで $\text{Sin}(x)/x$  応答が生じます(図5を参照)。

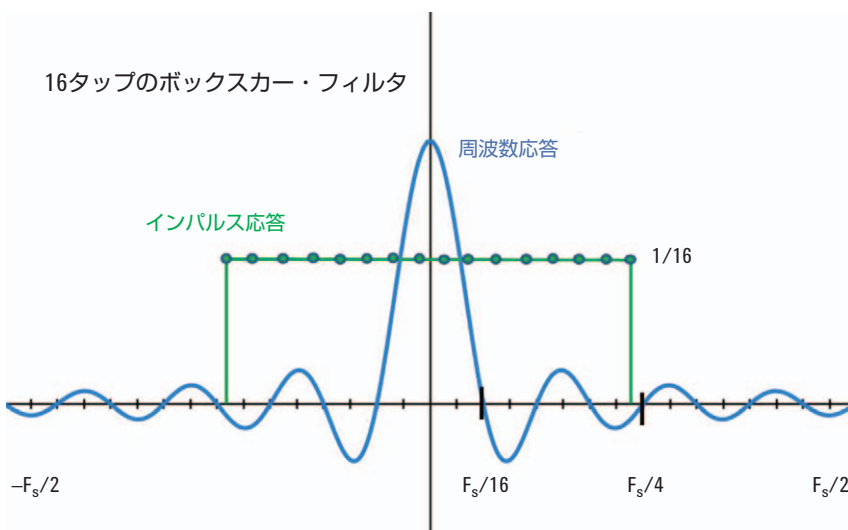


図5. 16タップのボックスカー・アベレージング・フィルタのインパルス応答と周波数応答

阻止帯域のサイドローブにより、帯域外の信号成分の一部が通過帯域に折り返され、ノイズ、エリアジング、歪みが生じることがあります。これを防ぐために、Agilentをはじめとする一部のメーカーのオシロスコープでは、タップに重み付けすることで、より適切な周波数応答を実現しています。

収集メモリを節約して長期間の捕捉を可能にするために、FIRフィルタの後段にダウンサンプラが必要です。ほとんどのオシロスコープで、Nタップのフィルタとダウンサンプラは1つのブロックに統合されていて、N個ごとに1個のサンプルだけを出力します。ダウンサンプリングの影響で、間引きされた周波数  $F_s/N$  の整数倍を中心とした周波数応答をもつ複数のイメージが発生します。また、ナイキスト周波数が  $F_s/(2N)$  に低下するため、FIRフィルタの阻止帯域で  $F_s/(2N)$  より高い周波数の信号成分が、通過帯域に折り返され、ノイズ、エリアジング、歪みが生じます。これを防ぐために、一部のオシロスコープでは、収集メモリの出力側にもMタップのFIRフィルタが実装されています。高分解能アベレージングを実現するためのフィルタ処理をMタップ・フィルタとNタップ・フィルタで分担できるため、Nタップ・フィルタを短くでき、与えられた帯域幅に対するサンプリング・レートをより高くできます。

## アベレーシングを使用した 垂直軸分解能の向上

オシロスコープのノイズを減らし、垂直軸分解能を向上する方法の1つに、アベレーシング・モードがあります。アベレーシングをオンにすると、オシロスコープは、捕捉した波形の垂直軸の値を、後続波形の垂直軸の同じサンプル値と平均します。平均する波形の数は、ユーザが指定できます。高分解能アーキテクチャと異なり、収集アベレーシングでは帯域幅は減少しません。ただし、対象は繰り返し信号だけです。

アベレーシングは、以下の場合に使用します。

- 広いオシロスコープ帯域幅が必要な場合
- 対象が周期信号の場合
- 大容量メモリが必要ない場合
- アベレーシング回数を変更したい場合

高分解能モードは、以下の場合に使用します。

- 広いオシロスコープ帯域幅は必要ない場合、または、帯域幅に対してオシロスコープのサンプリング・レートが非常に高い場合
- 対象がシングル・トリガでしか捕捉できない信号の場合
- 長時間捕捉する大容量メモリが必要な場合

すべてのオシロスコープ・メーカーで可能なわけではありませんが、**Agilent Infiniium**オシロスコープの場合は、アベレーシングと高分解能モードを同時に使用できます。これにより、ユーザは帯域幅とスループットのトレードオフを調整できます。



## 収集アベレーシングを使用した 垂直軸分解能の向上(続き)

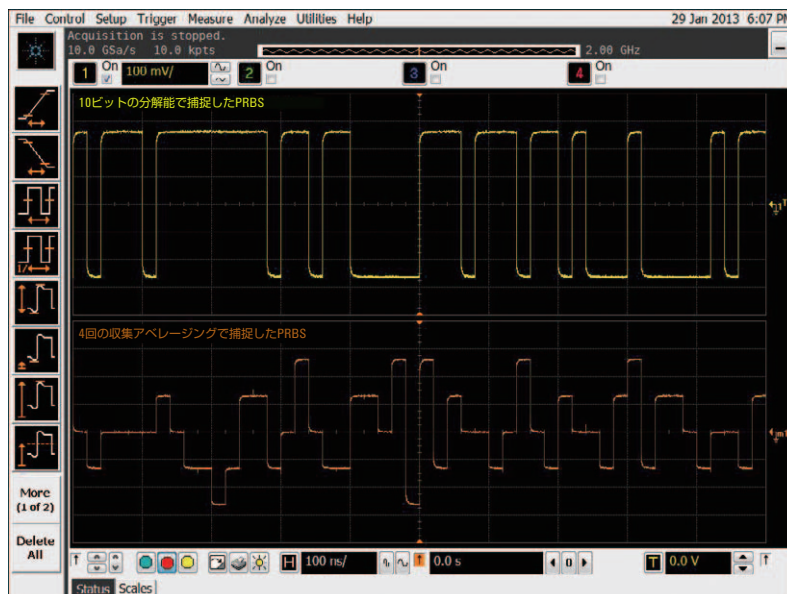


図6. 低雑音PRBS信号の捕捉には高分解能モードが適しています。アベレーシング・モードは向いていません。

図6は、高分解能オシロスコープの分解能を10ビット、帯域幅を2 GHzに設定して捕捉したPRBS信号です。下の画面に、アベレーシング(4回のアベレーシング)をオンにして捕捉したPRBSも表示されています。この例では、収集アベレーシングの表示は役に立ちません。PRBS信号は捕捉時間範囲内で周期的ではないからです。

## 高分解能専用のオシロスコープ が必要な理由

さらに高い垂直軸分解能と中程度の帯域幅が必要な測定アプリケーションの場合は、Agilent 9000 Hシリーズなどの高分解能専用のオシロスコープが最適です。高分解能オシロスコープは、最新のADCおよびDSPテクノロジーを使用して、優れた分解能と低雑音性能を実現しています。フロントエンドに内蔵されているハードウェアによって高周波信号が減衰するので、エリアジングもより適切に制御できます。高分解能で動作させるための特別なモードやセットアップは必要ないので、オシロスコープの操作も容易です。ビット数と帯域幅は、ドキュメント作成用に自動的に表示されます。



<http://www.agilent.co.jp/find/myAgilent>

お客様がお求めの情報はアジレントがお届けします。myAgilentに登録すれば、ご使用製品の管理に必要な様々な情報を即座に手に入れることができます。



[www.axiestandard.org](http://www.axiestandard.org)

AXIe (AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test) は、AdvancedTCA®を汎用テストおよび半導体テスト向けに拡張したオープン規格です。Agilentは、AXIeコンソーシアムの設立メンバーです。



[www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXIは、Webへのアクセスを可能にするイーサネット・ベースのテスト・システム用インタフェースです。Agilentは、LXIコンソーシアムの設立メンバーです。



<http://www.pxisa.org>

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) モジュール測定システムは、PCベースの堅牢な高性能測定/自動化システムを実現します。

## 契約販売店

[www.agilent.co.jp/find/channelpartners](http://www.agilent.co.jp/find/channelpartners)

アジレント契約販売店からご購入頂けます。お気軽にお問い合わせください。



## Agilent Advantage Services

[www.agilent.co.jp/find/AdvantageServices](http://www.agilent.co.jp/find/AdvantageServices)

アジレント・アドバンテージ・サービス、それはお客様の満足を第一に考えているアジレントの修理・校正サービスの総称です。



[www.agilent.co.jp/quality](http://www.agilent.co.jp/quality)

## アジレント・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町 9-1

## 計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00(土・日・祭日を除く)

TEL ■■ 0120-421-345  
(042-656-7832)

FAX ■■ 0120-421-678  
(042-656-7840)

Email [contact\\_japan@agilent.com](mailto:contact_japan@agilent.com)

電子計測ホームページ  
[www.agilent.co.jp](http://www.agilent.co.jp)

- 記載事項は変更になる場合があります。ご発注の際はご確認ください。

© Agilent Technologies, Inc. 2013

Published in Japan, October 24, 2013

5991-1617JAJP

0000-00DEP



Agilent Technologies