

4/5/6 シリーズ MSO

## 垂直高分解能を実現した最新技術

ホワイト・ペーパー – Josh O'Brien & Brandon Gould

### はじめに

信号を詳細に測定するというニーズに応えるため、オシロスコープの設計エンジニアにとっては高分解能が長い間の目標でした。しかし、分解能を上げることは、オシロスコープのアナログ・デジタル (AD) コンバータのビット数を増やすということ以上の意味があります。4 シリーズ、5 シリーズ、6 シリーズのオシロスコープは、新しい 12 ビット AD コンバータと 2 つの新しい低ノイズ・アンプを搭載しており、理論的な分解能だけでなく、有効的な高分解能も実現しています。この革新的な製品はまた、高分解能を高解像度で、高速の更新レートで表示することを可能にしました。このホワイト・ペーパーでは、従来の高ビット・レート AD コンバータ実装よりも高い分解能を実現する、AD コンバータの分解能、デジタル信号処理、さらに低ノイズ・フロントエンドについて説明します。

このホワイト・ペーパーでは、テクトロニクス 4/5/6 シリーズ MSO の設計エンジニアが高分解能アキュイジションを実現するために用いた技術を中心に、詳細に説明します。また、有効ビット数 (ENOB、Effective Number of Bits) の仕様と、この重要なシステム性能の基準がどのように適用されているか、またその限界についても説明します。波形アベレージ、ENOB の詳細など、マルチアキュイジション技術の詳細については、末尾の参考文献をご参照ください。



図 1: 6 シリーズ MSO は、12 ビット AD コンバータ、信号処理、低ノイズ・フロントエンドによって優れた垂直分解能を実現している。

## 垂直分解能の追求

デジタル・オシロスコープが信号をサンプリングする場合、ADコンバータは信号を垂直ビン（デジタル化レベルまたは量子化レベル、またはLSB（Least Significant Bit）とも呼びます）に分割します。各ビンは分離された垂直電圧レベルを表しており、ビン数が多いほど高い分解能であることを意味します。ADコンバータにおけるデジタル化レベルは $2^N$ で表わされ、Nはビット数を示します。一般的な正弦波（図2a）は、垂直分解能を基にすると大きく異なったものに見えます。図2bは、2ビットのADコンバータでデジタル化したものであり、 $2^2 = 4$  デジタル化ビット・レベルになっています。データは、00、01、10、11の4つの垂直ビンで保存できます。4ビットのADコンバータでは16のデジタル化レベルがあり、4ビットのデータとして保存できます（図2c）。このように、デジタル化レベルが大きいほど分解能は高くなり、デジタル・オシロスコープでは元のアナログ信号に近くなります。



図 2a: アナログ信号

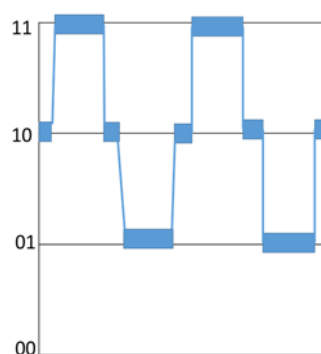


図 2b: 2 ビットのデジタイザ

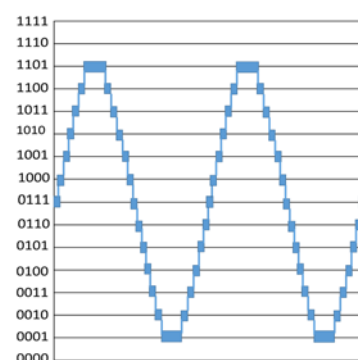


図 2c: 4 ビットのデジタイザ

垂直分解能が高いと、次のような重要な利点があります。

- 信号を拡大表示してもはっきりと、詳細に表示できる。
- 特に電源設計で重要となる、正確な電圧測定が可能。

従来のデジタル・オシロスコープは8ビットのADコンバータ技術が使われており、その多くの技術はサンプル・レートの高速化に注力されたため、時間分解能が向上してきました。8ビットADコンバータは、時間とともにサンプル・レート、ノイズ性能、低歪などが最適化されてきました。しかし、8ビットADコンバータが示す $2^8 = 256$ の垂直デジタル化レベルは、高い垂直分解能が求められる電源設計などのアプリケーションでは粗すぎる場合があります。

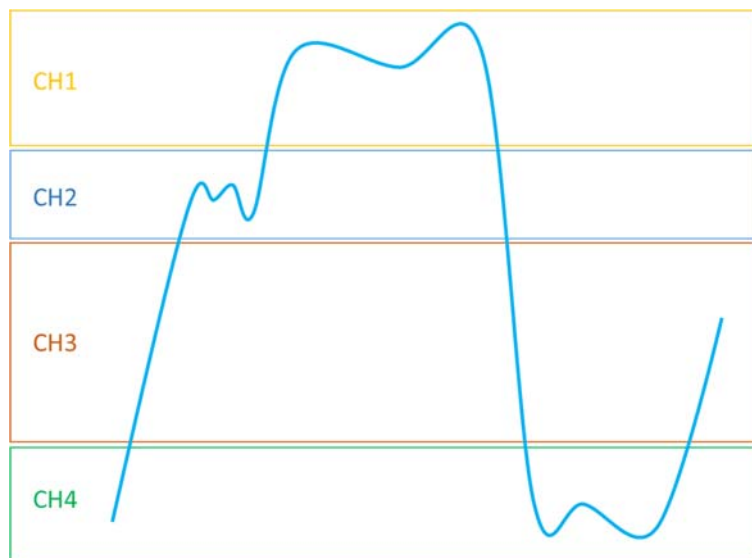


図 3: オシロスコープの各チャンネルをつなげて再生した信号。

## 垂直高分解能を実現した最新技術

テクトロニクス ホワイト・ペーパー

8ビット AD コンバータで電圧を詳細に観測する一般的な方法に、複数のチャンネルのオーバードライブがあります。この方法では、複数のチャンネルを同じ信号に接続し、オシロスコープ入力がオーバードライブするよう、意図的に電圧スケールを設定します。信号のそれぞれのパーツが観測できるよう、各チャンネルの垂直ポジションを調整します。最後に、信号をつなぎ合わせて垂直分解能を上げます。このような方法では（図 3）、8ビット・オシロスコープ入力アンプで歪みが生ずることがあり、オーバードライブからの復帰が難しくなります。このようなオシロスコープの使用方法では、テスト結果は保証されません。

### オシロスコープの新しい ASIC によって実現される垂直分解能



図 4a: テクトロニクスの新しい 12 ビット ASIC (TEK049)



図 4b: テクトロニクスの新しいアナログ・アンプ ASIC (TEK061)



図 4c: テクトロニクスの新しいフロントエンド ASIC (TEK026D)

オシロスコープのアクイジション・システム技術の進歩により、今までの 8 ビット AD コンバータによるアクイジション・システムよりも高い垂直分解能が可能になりました。これは、綿密に設計された ASIC をオシロスコープに実装したことで実現されました。このホワイト・ペーパーでは、新しい ASIC によって実現された高分解能によってもたらされる、以下のような性能向上について説明します。

- 高性能の AD コンバータ（12 ビット）
- HD（高解像度）表示処理技術
- 低ノイズ、高ゲイン・アナログ・フロントエンドの性能向上
- ハードウェア・フィルタによる固有ノイズの除去
- 高分解能トリガの実現

### 高性能の AD コンバータ（12 ビット）

例えば、テクトロニクスの 4/5/6 シリーズ MSO には、重要な役割を果たす、いくつかの新しい ASIC が搭載されています。その一つが、アナログ・デジタル（AD）コンバータです。

まったく新しい ASIC（TEK049）であり、4 つの 12 ビット逐次比較型 AD コンバータからなります（図 4a）。TEK049 の AD コンバータは 25GS/s で動作し、4 シリーズ、5 シリーズ、6 シリーズ MSO ではチャンネル数により、1 つまたは 2 つの ASIC が搭載されています。

TEK049 ASIC に搭載されている AD コンバータは 12 ビットであり、垂直デジタル化レベルは 4,096 になります。8 ビット AD コンバータに比べて 16 倍の垂直分解能があります。4 シリーズ、5 シリーズ MSO は、3.125GS/s の速度、12 ビットでサンプリングします。6.25GS/s では、データは 12 ビット AD コンバータに取込まれますが、ASIC とメモリ間における最高伝送速度により 8 ビットのストレージ・メモリに保存されます。6 シリーズ MSO は、12.5GS/s の速度、12 ビットでサンプリングします。25GS/s では、データは 12 ビット AD コンバータに取込まれますが、ASIC とメモリ間における最高伝送速度により 8 ビットのストレージ・メモリに保存されます。

## HD（高解像度）表示処理技術による波形表示機能の強化

TEK049 ASIC は表示処理用ハードウェアも搭載しており、大画面 HD（高解像度）ディスプレイを装備した 4/5/6 シリーズ MSO において、優れた画面更新レートを実現しています。1920×1080 ピクセルの解像度は高分解能の ADC の利点を損なうことなく、詳細な信号観測が可能です。他のオシロスコープの表示システムでは、AD コンバータのコードを、利用可能な垂直ピクセル数に圧縮します。この方法では、AD コンバータが実際に取込んだ信号の細部を画面に表示できません。TEK049 はさらに、非常に高速な更新レート、16 ビットのカラー深度を可能にしています。高速更新レートとグレースケールにより波形の特長が把握でき、強化された表示機能により詳細な信号観測のニーズに応えます。数多くの機能を 1 つの ASIC に搭載したことにより、信号をプリント基板上で伝送することなく信号処理が行えるため、低ノイズ・システムが可能になりました。図 5 は、新しい TEK049 と同じ機能を搭載した、従来のオシロスコープのチップセットを示しています。

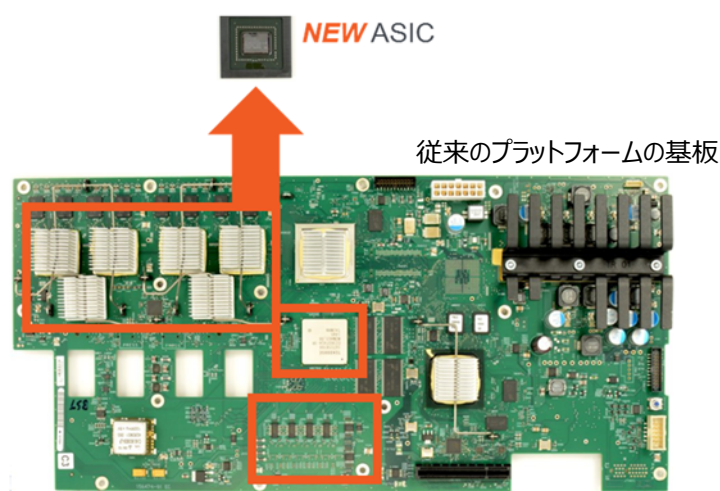


図 5: TEK049 ASIC は、従来のオシロスコープの複数のチップセットによる機能を統合している。

## 低ノイズ、広帯域、高感度設定を実現

新しい ASIC のもう一つの重要な役割が、オシロスコープ・ディスプレイのフル・スケールの高レンジ化です。4/5/6 シリーズ MSO では、フロントエンドのアンプとアッテネータ・システムは AD コンバータのフル・スケールを利用するよう、常にゲインを調整します。高分解能の AD コンバータの利点を生かし、オシロスコープを広帯域で使用し、電圧の高感度設定を可能にするためにも、アンプのノイズは極力低ノイズにする必要があります。6 シリーズ MSO に搭載されている TEK061 ASIC (図 4b) には、業界トップクラスの広帯域、高感度スケール性能があります。4/5/6 シリーズ MSO に搭載されている、新しい TEK026D ASIC (図 4c) は超低ノイズを実現しており、プローブのアンプのノイズが加わることなく、1GHz の正確なプロービングが行えます。図 6 にブロック図を示します。

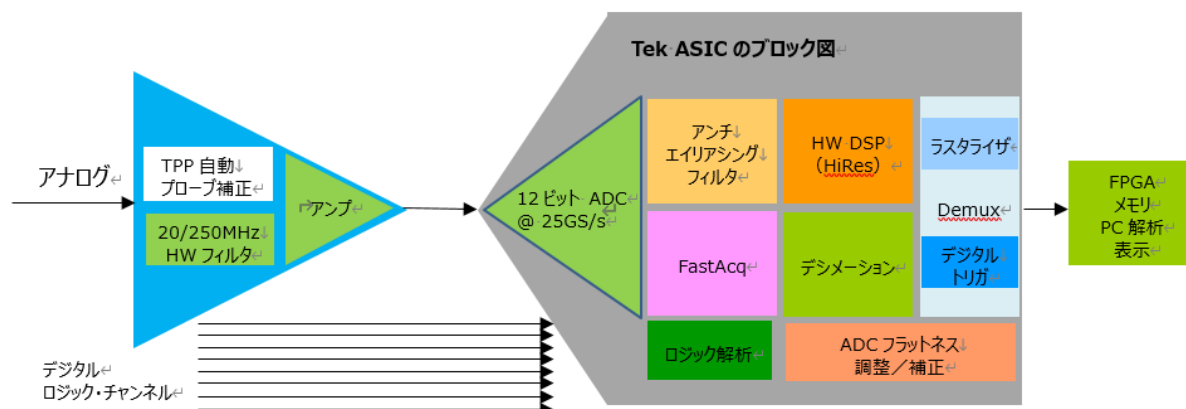


図 6: 4/5/6 シリーズ MSO における、1 つのチャンネルの信号経路

## 垂直分解能向上のためのハードウェア・フィルタ技術

テクトロニクスは長年に渡り、8ビット AD コンバータを搭載したオシロスコープの、8ビット以上の垂直分解能を達成するためのノイズ低減技術、垂直分解能強化を実現してきました。詳細については、「[オシロスコープによる測定分解能を11ビット以上に改善するツール](#)」の資料をご参照ください。この技術資料では、波形アベレージまたは等価時間サンプリングでない、単発取込みで使用できる技術について説明しています。

一般に、オシロスコープの AD コンバータは設定に関係なく、常に最高速度で動作しています。低速のサンプル・レートに設定した場合、サンプル・レートは間引きされ、設定されたレコード長とサンプル・レートの組合せで保存します。このモード、すなわち余分なサンプルが間引きされたモードが「サンプル・モード」です。テクトロニクスは、この余剰サンプルを有効利用して、HiRes（ハイレゾ）モードと呼ばれる高分解能モードを従来から提供しています。サンプルは平均化され、「ボックスカー・アベレージ」と呼ばれるプロセスで必要とされるサンプル・レートを生成します。各ポイントには多くの情報が含まれており、優れた確度、効果的な高分解能を実現しています。サンプル・モードと HiRes（ボックスカー・アベレージ）モードの違いを図 7 に示します。この技術は、現在では広く使用されています。

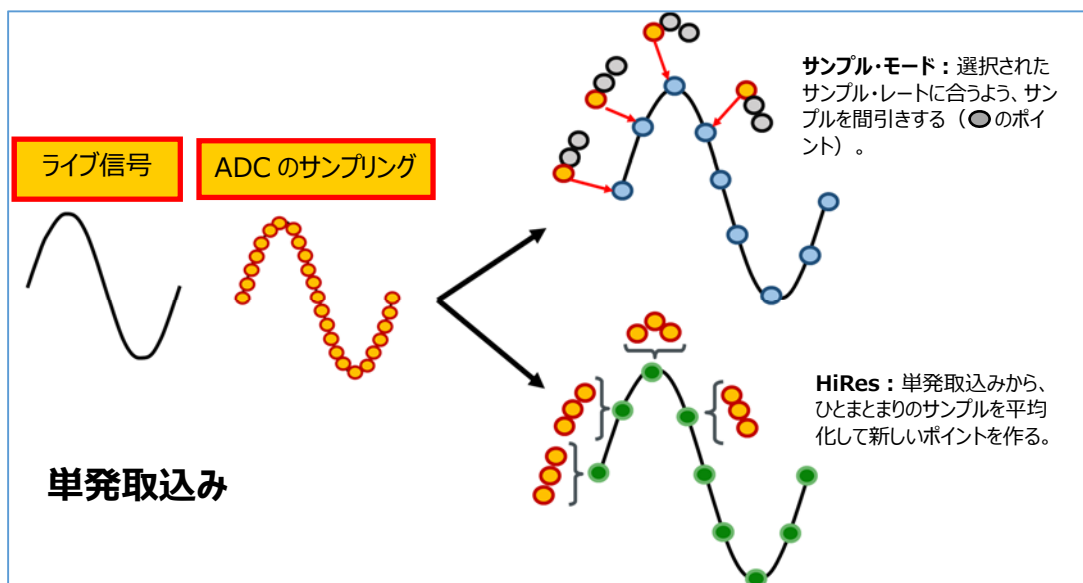


図 7: サンプル・モードと HiRes（ボックスカー・アベレージ）モード。

ボックスカー・アベレージを使用すると、垂直分解能は以下のように上がります。

$$0.5 \log D$$

ここで、D は間引き比率、または最高サンプル・レート ÷ 実際のサンプル・レートです。

垂直分解能の性能は、システム内のノイズによって影響を受けることが予想されます。例えば、大きなノイズ・フロアがあるアンプ／アッテネータを通った後に、AD コンバータでサンプルを取込むと、ボックスカー・アベレージまたは従来の HiRes モードによる分解能向上に比べて測定確度は低下します。高分解能モードは、アナログの信号調整と AD コンバータのサンプリングが協調して信号の振る舞いを最適化して初めて効果的になります。

4/5/6 シリーズ MSO は、ボックスカー・アベレージまたは HiRes よりも性能を向上させています。従来の方法では、高周波ノイズは、比較的高い周波数のアンチエイリアシング・フィルタで抑えられます。

新しい高分解能モード（ダブル HiRes）は TEK049 AISC のハードウェアを使用し、アベレージを実行するだけでなく、アンチエイリアシング・フィルタと独自設計の FIR（有限インパルス応答）フィルタを実装することで、サンプル・レートごとに、測定する元信号がベストな高分解能になるようにしています。

## 垂直高分解能を実現した最新技術

テクトロニクス ホワイト・ペーパー

FIR フィルタは、選択されたサンプル・レートで最高の周波数帯域を維持する一方、使用可能な周波数帯域以上においてエイリアシングを防ぎ、ノイズ・エネルギーを除去します。図 8 は、フィルタの違いを図示しています。

### オシロスコープの高分解能信号処理技術の比較

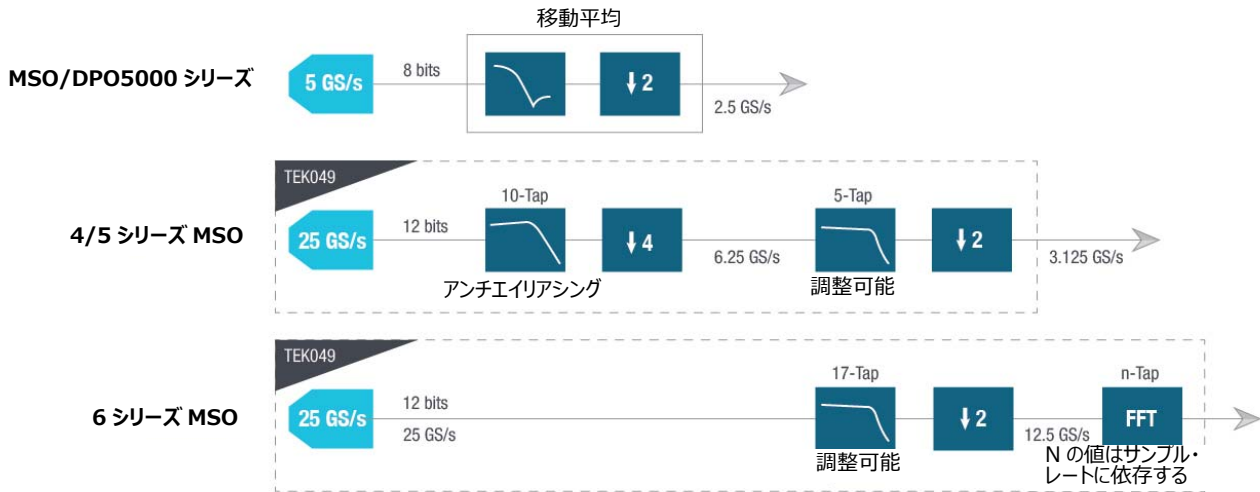


図 8: MSO5000 シリーズに比べると、4/5/6 シリーズ MSO のフィルタの機能向上は明らか。オシロスコープの設定によって調整可能な 5 タップまたは 17 タップのフィルタが内蔵されており、6 シリーズでは FFT (ポストトリガ) を使用して実施されるプローブ補正によって優れた測定システム確度を実現している。

4/5/6 シリーズ MSO では、フィルタごとのローパス・フィルタの応答は、ノイズ除去とトランジェント・ステップ応答でバランスがとれるように設計されています。ブリックウォール・フィルタには優れたノイズ除去がありますが、トランジェント応答が最適とは言えません。ブリックウォール・フィルタなど、周波数応答の大きな不連続点の影響によるギブス現象により、図 9 に示すように、ステップ応答にリングングやオーバーシュート、アンダーシュートが発生します。したがって、不適切なステップ応答を発生させることなくノイズを制限するような、バランスのとれたアプローチが必要になります。バランスがとれていないと、オシロスコープは低ノイズ・フロアであっても正確に波形を表示できません。

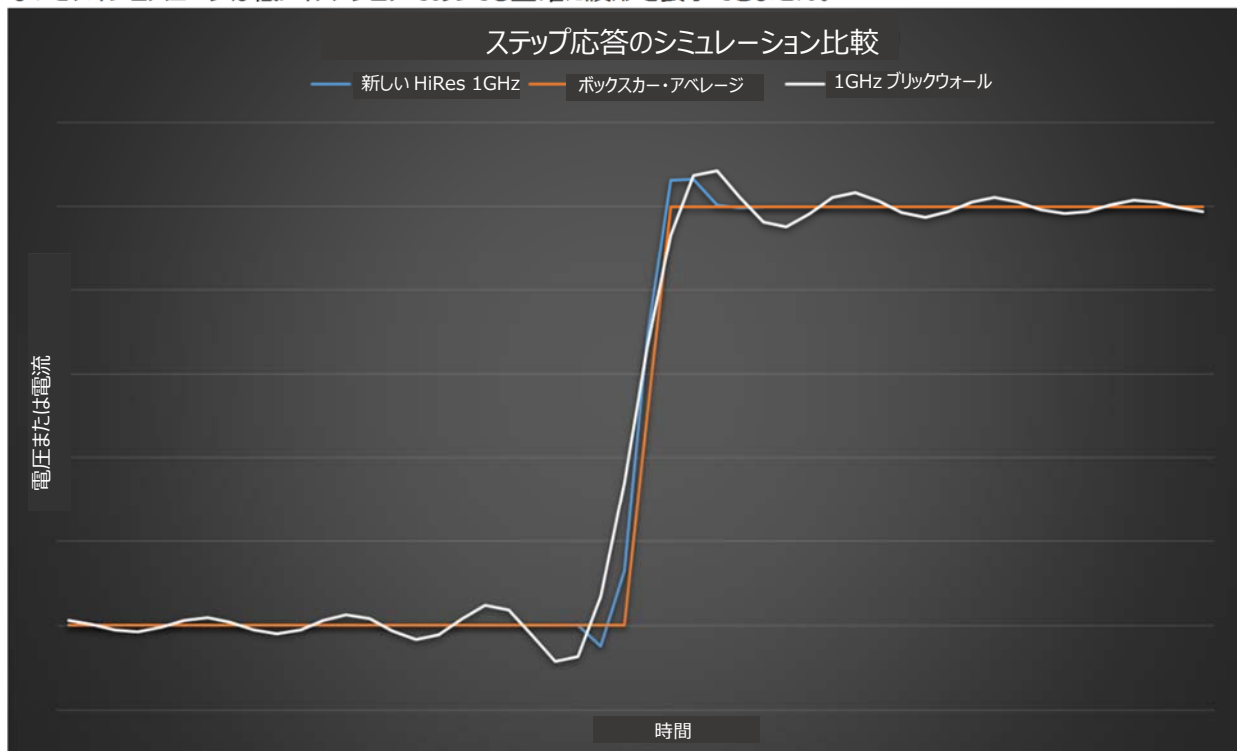


図 9: HiRes、ボックスカー、ブリックウォール信号の比較

## 垂直高分解能を実現した最新技術

テクトロニクス ホワイト・ペーパー

4/5/6 シリーズ MSO の HiRes モードでは、垂直分解能は常に最低でも 12 ビットであり、125MS/s 以下のサンプル・レートでは最大で 16 ビットになります。

### ASIC で実現される高分解能サンプルのトリガと高速表示

高分解能信号を観測するだけでなく、確実にイベントを取込む必要もあります。このため、オシロスコープのトリガ・システムは、高分解能で取込み、安定して表示できなければなりません。TEK049 ASIC は、トリガ・システムより前でハードウェア・ブロックを使用して DSP フィルタをリアルタイムに適用するため、トリガは処理された高分解能サンプルをベースに実行します。一方、従来の HiRes (ボックスカー・アベレージ) では、保存されたサンプルには適用されますが、トリガ信号には適用されません。このため、高周波トランジェントやスパイクにより、画面には表示されないような間違ったトリガが発生することがあります。

新しく改良された HiRes アベレージとフィルタ、それにトリガをしっかりと統合したことにより、FastAcq<sup>®</sup> 波形取込みなどの表示モードも機能強化されました。FastAcq モードは、1 秒間に 500,000 回以上の波形を取込むことができます。この機能と HiRes を組み合わせることにより、電源回路の検証など、性能で重要となる信号細部の表示性能が向上します。図 10 の左はノイズの多い正弦波を FastAcq モードで測定した例で、間違って両エッジでトリガがかかっています。一方、右の波形は HiRes をオンにした FastAcq の信号です。右の波形は、フィルタリングされた立上りエッジでトリガしています。

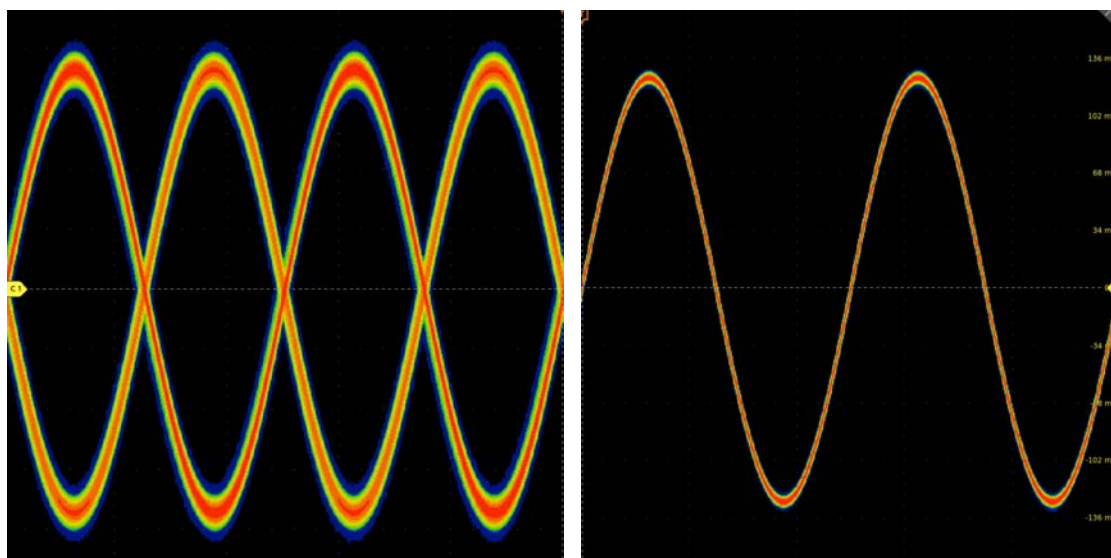


図 10: ボックスカー・アベレージによる FastAcq は、トリガ・システムには関係なく適用されるため、間違ったトリガになる (左)。新しい HiRes と FastAcq によるトリガ (右)。

### 確度の伴わない分解能は無意味である

オシロスコープのフロントエンドのノイズが大きかったり、歪が生じたり、あるいはサンプル・レートが時間間隔誤差によって影響を受けるようでは、高分解能の意味がありません。**意味のある**分解能を定量化するためには、AD コンバータのビット数だけでなく、ノイズ、歪、ジッタも考慮する必要があります。この問題に対応するため、電気業界は ENOB (Effective Number of Bits、有効ビット数) という概念を開発し、ノイズ、歪、インターリーブ誤差、サンプリング・ジッタによる誤差を考慮することにしました。

### 有効ビット数 (ENOB)

ENOB はデジタイザまたはオシロスコープによる有効なビット数であり、機器のノイズ、高調波歪、直線性、サンプリング・ジッタを考慮に入れています。非常に高品質な信号を入力し、デジタイザの出力をその入力と比較することで求めます。テクトロニクスは、IEEE 規格 1057 の Digitizing Waveform Recorders の手法にしたがっています。ENOB は、前述したノイズと歪のために、AD コンバータのビット数よりも常に小さくなります。高品質な 8 ビット AD コンバータを搭載したオシロスコープの場合、周波数帯域、選択した垂直軸スケールによりますが、ENOB は一般的に 4~6 ビットになります。10 ビットまたは 12 ビットの AD コンバータを搭載した高分解能オシロスコープでは、ENOB は一般に 7~9 ビットになります。ENOB は、AD コンバータの理論的な分解能以外も考慮に入れるため、デジタイジング・システム分解能の有効的な指標になります。

ENOB はデジタイジング・システムの確度において重要な要素ではありますが、測定品質を比較する場合の最重要項目ではありません。ENOB は、DC オフセット、ゲイン、位相、周波数の誤差を含んでいません。この誤差は、別途考慮に入れます。例えば、周波数性能の確度に影響を及ぼす測定では、EVM (Error Vector Magnitude、エラー・ベクトル振幅) が良い性能指数になります。オシロスコープにおいて、周波数応答またはフラットネスによる信号劣化は ENOB には表れません。

高い ENOB を実現するため、4/5/6 シリーズ MSO では、ここまで説明した機能強化を行っています。

- 高性能の AD コンバータ (12 ビット)
- HD (高解像度) 表示処理技術
- 低ノイズ、高ゲイン・アナログ・フロントエンドの性能向上
- ハードウェア・フィルタによる固有ノイズの除去
- 高分解能トリガの実現

図 11 は 1.5V DDR3 電源を示しており、ENOB の差を比較しています。左側は、6 ビットの ENOB を持つ、従来の 8 ビット・オシロスコープで取込んだ DDR3 電源の波形です。大きなノイズ、周期的な電圧スパイクがあるようです。右側は、同じ電源を低ノイズ、7 ビット以上の ENOB を持つ、高分解能オシロスコープで取込んでいます。左側の測定に比べ、ベースライン・ノイズが大きく減っていることがわかります。周期的な電圧スパイクも、振幅が揃っています。高い ENOB を持つオシロスコープを使用することで、問題をすばやく、簡単に特定できます。この例では、1.5V バック・レギュレータからの 1MHz スイッチング・ノイズが問題となっています。



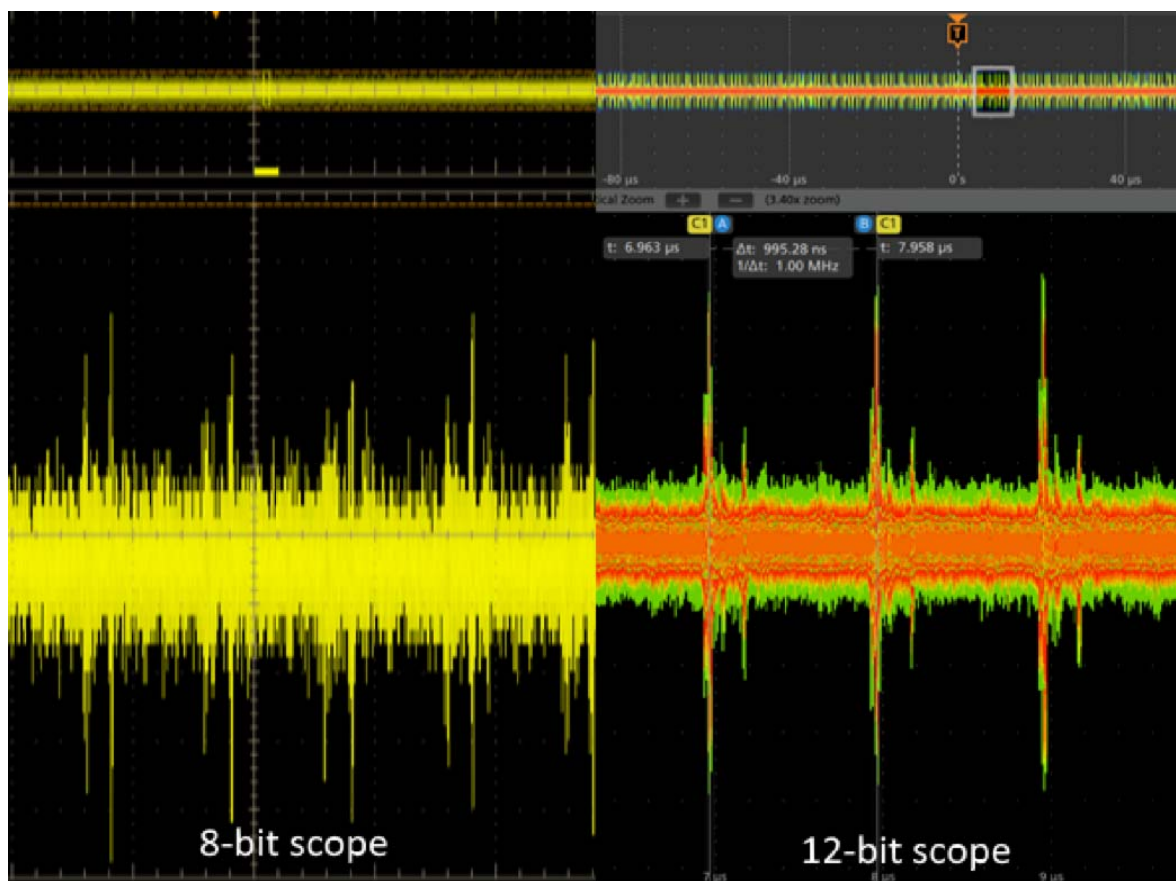


図 11: 8ビット（左）と12ビット（右）のオシロスコープによるDDR3電源波形の比較

# 垂直高分解能を実現した最新技術

テクトロニクス ホワイト・ペーパー

## まとめ

高分解能のオシロスコープは、重要な信号の細部まで観測できます。しかし、高分解能のオシロスコープとは、AD コンバータのビット数を増やせばよいということだけでは済みません。4/5/6 シリーズ MSO は、AD コンバータの分解能が高いだけでなく、デジタル信号処理、トリガ・システムの統合、高い ENOB、低ノイズ・アナログ・フロントエンドを組み合わせることで、有効的な分解能向上を実現しています。

## 4/5/6 シリーズ MSO と、従来のオシロスコープとの比較表

	6 シリーズ MSO	5 シリーズ MSO	4 シリーズ MSO	MSO/DPO5000B シリーズ
AD コンバータの分解能	12 ビット	12 ビット	12 ビット	8 ビット
システムの ENOB	8.8 ビット	8.2 ビット	8.2 ビット	6.0 ビット
チャンネルあたりの サンプル・レート	25GS/s	6.25GS/s	6.25GS/s	5GS/s
高分解能 トリガ・システム	○	○	○	-
拡張フィルタ	ハードウェア DSP フィルタ (HiRes)	ハードウェア DSP フィルタ (HiRes)	ハードウェア DSP フィルタ (HiRes)	ボックスカー・アベレージ (HiRes)
プローブ+オシロスコープの自動フィルタリング	○	○	○	-
AD コンバータのフラットネス調整	○	○	-	-

## 参考文献

[「オシロスコープによる測定分解能を 11 ビット以上に改善するツール」アプリケーション・ノート \(英文\)](#)、Tektronix, 2017

[「有効ビット数」アプリケーション・ノート \(英文\)](#)、Tektronix, 2008

[「4 シリーズ MSO」データ・シート](#)、Tektronix, 2019

[「5 シリーズ MSO」データ・シート](#)、Tektronix, 2017

[「6 シリーズ MSO」データ・シート](#)、Tektronix, 2019

Copyright © 2020, Tektronix. All rights reserved. Tektronix 製品は、米国およびその他の国の特許（出願中を含む）により保護されています。本文書は過去に公開されたすべての文書に優先します。仕様および価格は予告なしに変更することがあります。TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。参照されているその他のすべての商品名は、該当する各会社が保有するサービス・マーク、商標、または登録商標です。  
1/20 482-61648-0

