

# スペクトラム・ アプローチによる ジッタ解析



## ▶ TDSJIT3ジッタ解析ソフトウェア

Rj/Dj分離機能を持ったリアルタイム・ジッタ解析ツールによるシステムのビット・エラー・レートの予測

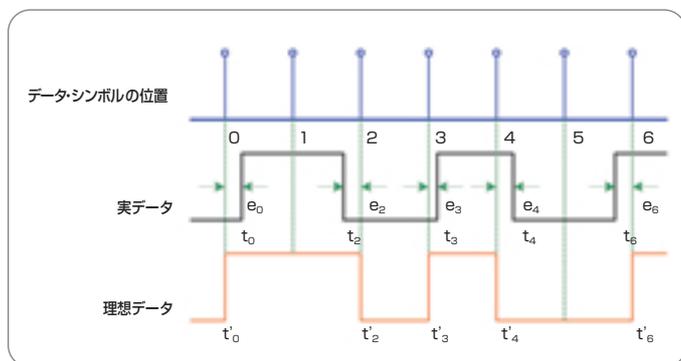
### はじめに

タイミング・マージンが厳しくなりクロック・レートが高速化する今日の高速回路設計では、ジッタはシステム・エラーの大きな原因になっています。ジッタ成分の特定や測定は、高速回路のデバッグに役立ち、またFibre Channel、SONET、SDH、Gigabit Ethernetなどの高速シリアル・データ通信規格で必要とされています。このアプリケーション・ノートでは、スペクトラム解析のアプローチにより、ジッタ成分の解析や測定を行う新しい方法について説明します。従来のBER（ビット・エラー・レート）解析装置で数分間あるいは数時間もかかるBER予測は、ジッタ解析結

果に基づいて行えばわずか数秒間で行えます。これには、当社のジッタ/タイミング解析ソフトウェアTDSJIT3を使用します。TDSJIT3ソフトウェアはTDS6000およびTDS7000シリーズ・オシロスコープに対応しています。ここでは、TDS6604型DSOでTDSJIT3を使用する方法について説明します。

また、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。

- ▶ ジッタとその成分
- ▶ スペクトラム・アプローチによるジッタ成分の分離
- ▶ ビット・エラー・レートの予測



▶ 図1. ジッタの定義

## ジッタとその成分

ジッタは、一連のデータ・ビットにおける各信号エッジの理想的な位置からの偏差です。図1に示すように、ジッタ ( $e_i$ ) はイベントが発生すると予想される時間 ( $t'_i$ ) とイベントが実際に発生した時間 ( $t_i$ ) との差です。デジタル通信リンクにおいては、ジッタは信号遷移の予想位置と実際の位置とのオフセットです。

シリアル・データ通信では、通常はデータとクロックは同時に伝送されないため、ジッタは重要な問題となる可能性があります。このため、送信側におけるデータ信号の過度のジッタは、受信側においてデータ・リカバリ・エラーの原因になります。エラー・レートが大きくなりすぎないように、送受信回路がジッタの見込み値、許容値内で動作するよう、通信規格でジッタ・マージンが定められています。ジッタを正確に測定することにより、デバイスがこうした見込み値内で確実に動作することを確認できます。この測定は、ジッタを定量化するだけでなく、ジッタの原因と発生源を調べ、ジッタの発生源を抑えたり取り除いたりするのに役立ちます。

ジッタは、ディターミニスティック・ジッタ ( $D_j$ ) とランダム・ジッタ ( $R_j$ ) の2種類に分けられます。2種類のジッタは、シリアル・データ通信プロセスで異なった累積になっています。 $R_j$ は周期性の無い成分とみなされ、通常ガウシアン分布に適合し、したがって統計学上の規則に適合します。 $D_j$ には周期性があり、ISI、DCD、 $P_j$ の成分により構成されます。

**$D_j$**  (ディターミニスティック・ジッタ) は、予測可能で一定しており、特定の原因があります。 $D_j$ はISI、DCD、 $P_j$ で構成され、常に周期性のある非ガウシアン振幅分布を持ちます。 $D_j$ はその周期成分のピーク・ピーク値により評価します。

**ISI** (シンボル間干渉) はデータ依存の確定的ジッタで、一般にチャンネル分散やフィルタリングに起因します。これはビット・シーケンス (シンボル) の信号エッジが、本来発生すべきタイミングとは異なる時間にレシーバの入力に達すると発生します。ISIは**DDJ** (データ依存ジッタ) とも言います。

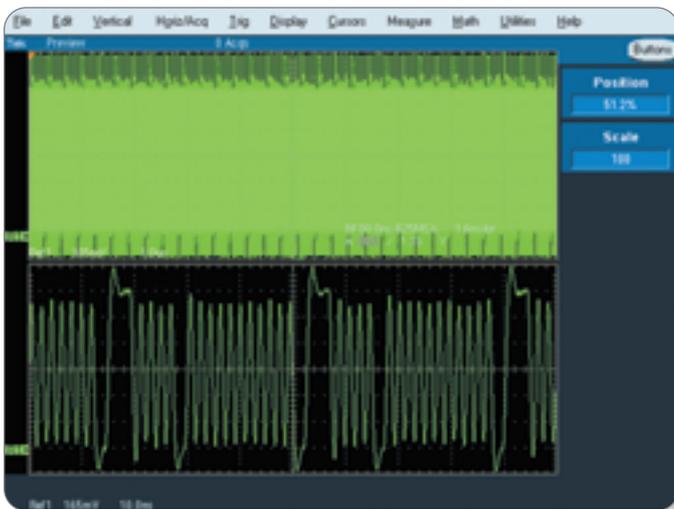
**DCD** (デューティ・サイクル歪み) は、クロックのようなビット・シーケンスにおける、正と負の平均パルス幅の差を言います。振幅オフセット・エラー、ターン・オン・ディレイ、アンプの飽和が原因になることがあります。

**$P_j$**  (周期ジッタ) は、データとは相関しない周期で繰り返されます。スイッチ電源などから影響を受けることが典型的な $P_j$ の原因です。 $P_j$ は、1つまたは複数の正弦波とその高調波によりモデリングすることができます。

**$R_j$**  (ランダム・ジッタ) は、理論的には振幅に境界がないガウシアン分布を示します。ガウシアン分布は、RMS (平方自乗平均) 値または標準偏差により評価します。ガウシアン確率変数が標準偏差の14倍のスパンを超えるのは、平均して $10^{12}$ 回にわずか1回程度であることを、簡単に示すことができます。このスパンを超えたことによりデータ通信システムにビット・エラーが発生する場合、 $10^{-12}$ のBER (ビット・エラー・レート) に相当します。 $R_j$ は、主に電気部品の熱雑音に起因します。

**$T_j$**  (トータル・ジッタ) は、 $D_j$ および $R_j$ により構成されます。 $10^{-12}$ のBERについては、ピーク・ピーク値は次のように計算します。

$$TJ = DJ + RJ \times 14$$



▶ 図2. 繰り返しパターンを持つデータ信号

## スペクトラム・アプローチを使用したジッタ解析

このアプローチでは、測定するシリアル・データ信号は周期的な繰り返しのパターンで構成され、その繰り返しパターンの長さは把握済みであると仮定します。たとえば、図2に示す信号は、K28.5-D21.4-D21.5-D21.5のFibre Channel IDLEシーケンスの繰り返しで構成されています。パターン長は40bitです。

スペクトラム・アプローチを用いて、次のようにジッタを測定します。

オシロスコープによるデータ信号の取り込みには、シングル・ショットまたはリアルタイム・アキュイジションを用います。ジッタを正確に取り込むためには、アキュイジション・システムが最高のタイミング精度、S/N比、有効ビット、信号精度を持つことが不可欠です。当社のTDS6604型オシロスコープとTekConnect™プローブを併用すると、最高の信号精度が得られます。

アキュイジションが完了すると、ソフトウェアによって波形レコードは解析され、各クロック・エッジにおけるTIE（タイム・インターバル・エラー）が求められます。ユーザのニーズに合わせて、最小二乗法またはGolden PLL（理想PLL）法を使用してリファレンス・クロック・リカバリを行い、TIEを検出することができます。TIEは取込んだデータ・エッジのジッタを表します。

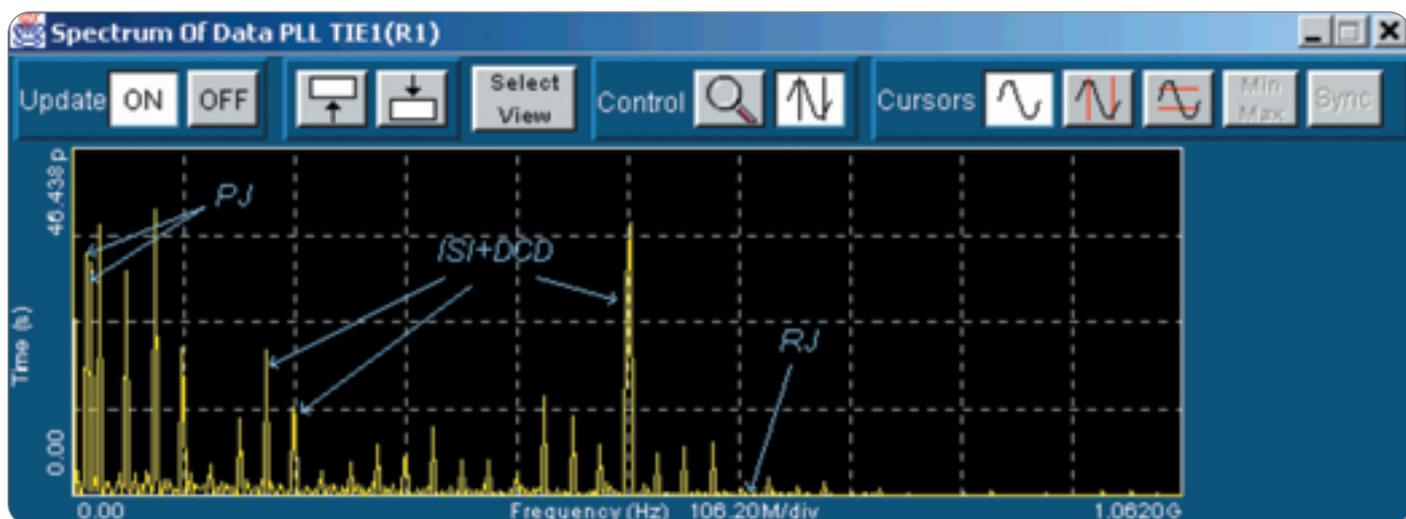
### Golden PLL

データ・レシーバがシリアル・データ・ストリームを処理する際、レシーバは最初にリファレンス・クロック・リカバリを行います。これには通常PLLを使用します。PLLのループ帯域内にあるジッタ成分は、PLLにより追跡（トラッキング）され、取り除かれます。しかしこのようなPLLで取り除かれないジッタのみを測定したい場合があります。Fiber Channel規格では、このようなクロック・リカバリを標準化できる「Golden PLL」というPLL設計のリファレンスが規定されています。TDSJIT3では、クロック・リカバリにより求められたクロックはリファレンス・クロックとみなされ、TIEの計算に使用します。

次に、TIE結果に対してFFTを実行し、TIEのスペクトラムを計算します。このスペクトラムは、取込信号のジッタのスペクトラムです。

スペクトラムを計算する前に、FFT結果の精度を確保するための重要なステップがあります。複数のシンボル間にデータ・エッジがないデータ・ストリーム、特に複数のシンボル周期間に対して同レベルを保つ可能性のあるNRZデータについては、シンボル・グループを補間することによりクロック・エッジを予測することができます。ジッタ値の配列は、実際に信号変化のあったエッジのジッタと区別できるように、これらのシンボル位置で「Interpolated（補間）」と示されます。

スペクトラム・アプローチでは、2つのステップで全ジッタのさまざまな成分を特定します。最初のステップでRjとDjを分離し、2番目のステップでDj成分を分離します。



▶ 図3. 全ジッタのスペクトラム

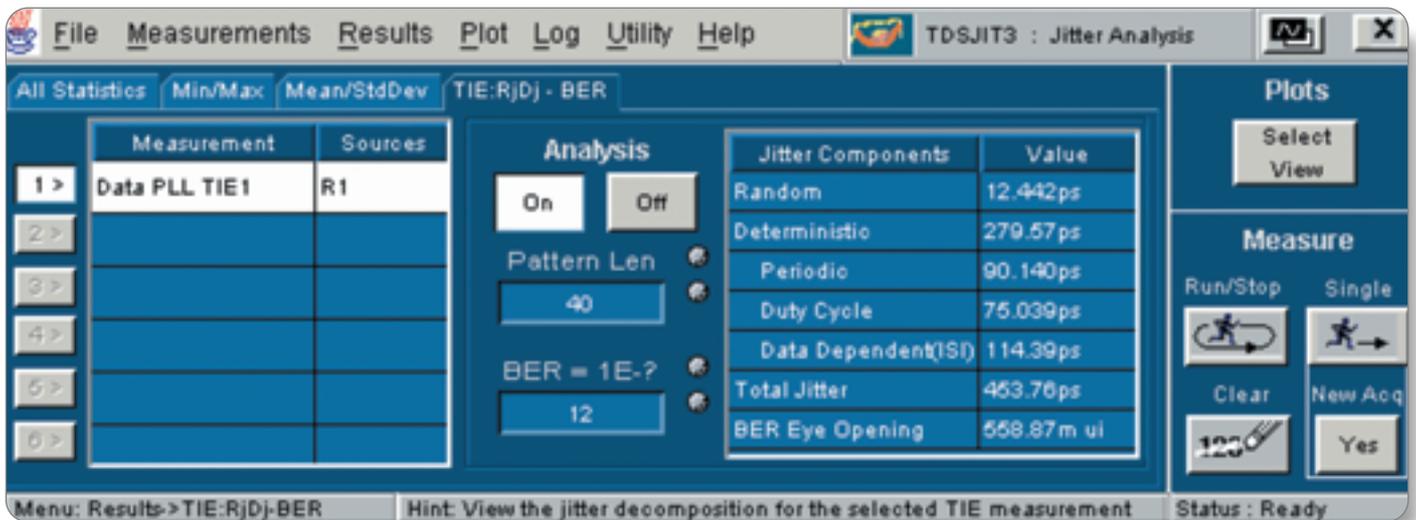
### Rj/Dj解析

スペクトラム・アプローチでは、次の観察に基づき全ジッタをDjとRjの2種類に分けます。

- ▶ Rjは、ガウシアンと仮定します。そのスペクトラムは幅広く平らです。
- ▶ Djは、シリアル・データ信号が周期的に繰り返されるデータ・パターンで構成されると仮定するため、タイム・ドメインでは周期的に現れます。Djはインパルス的なスペクトラムを持ちます。

図3は、図2のデータ信号の全ジッタ・スペクトラムを示します。DjとRjのプロパティが異なっているのは明らかです。「ノイズ・フロア」からインパルスを分離するためにさまざまなアプローチを採ることができますが、FFT分解能、周波数拡散、ウィンドウ等に起因するFFTのばらつきを吸収しなければなりません。Rjの標準偏差パラメータは、周波数領域のノイズ・フロアのRMS値を計算することにより得られます。

Djのみのスペクトラムは、Rjに起因するTjスペクトラムのすべてのビン数をゼロに設定してリカバーします。Djのタイム・ドメイン・レコードは、このDjスペクトラムに対して逆FFTを行うことにより得られます。Djの対象となるパラメータであるピーク・ピーク・ジッタ値は、このタイム・ドメイン波形から直接検出します。「Interpolated (補間)」と示された位置は、ピーク・ピーク値の計算に含まれないことに注意してください。



▶ 図4. ジッタ成分の測定

## Dj成分の解析

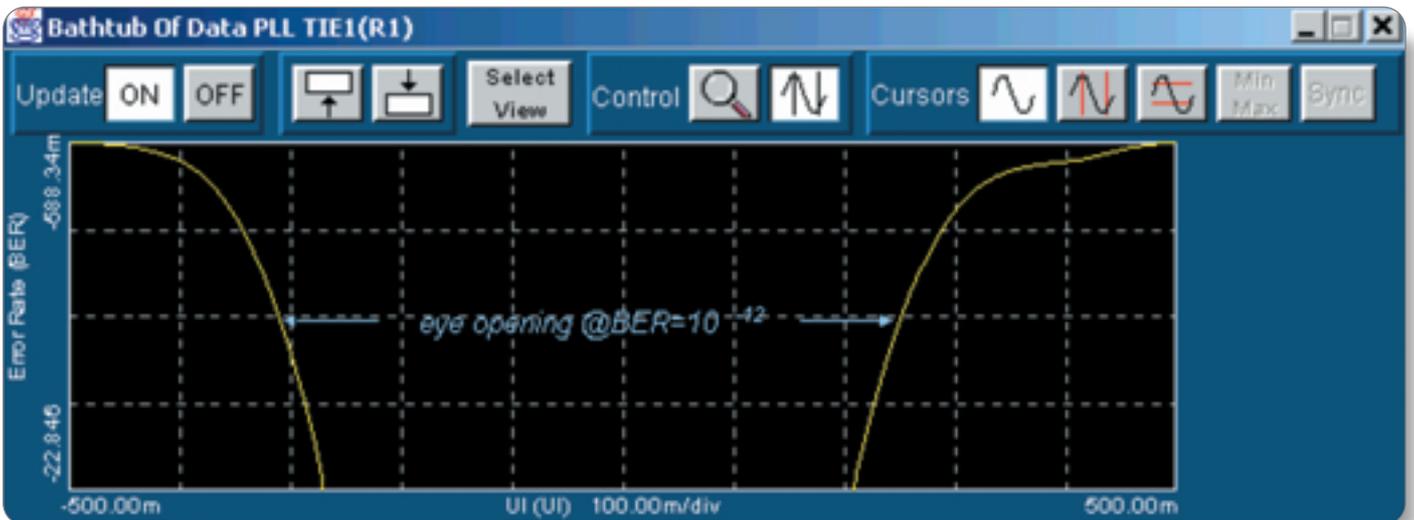
前のステップでDjのスペクトラムを求めると、Djの3つの成分であるISI、DCD、Pjが得られます。ここでもDjはインパルスのみで構成されます。ISI+DCDのジッタ成分は、次の観察に基づいて、Pj成分から分離することができます。

- ▶ ISI+DCD成分に起因するすべてのインパルスは、BitRate/Nの倍数で発生します。Nはデータ・パターン長で、データ・シーケンスの繰返しの中にあるシンボル数（理想クロックのbit数）です。
- ▶ 残りのインパルスは、Pjに起因します（図3参照）。

このようにPjを分離し、逆FFTを実行してタイム・ドメインのPjをリカバーします。Pjの対象となるパラメータは、タイム・ドメイン・レコードのピーク・ツー・ピーク値です。次に、Djスペクトラムの中でISI+DCDに起因する部分のみを使用して逆FFTを行い、タイム・ドメインのISI+DCDをリカバーします。ここで、このタイム・ドメイン・レコードは、立上りエッジのみを含むレコードと立下りエッジのみを含むレコードの2種類に分けることができます。これらそれぞれに対してヒストグラムを計算します。この2つのヒストグラムは、データ信号の交互にばらつきがある場合、同じような形状をとることがあります。以下の特性をもとに、DCD成分とISI成分を区別します。

- ▶ 2つのヒストグラムの平均値の差がDCDです。
- ▶ ヒストグラムのピーク・ピーク値の平均がISIです。

図4に示すように、このスペクトラム・アプローチを用いてTDSJIT3はジッタ成分を測定します。



▶ 図5. バスタブ曲線

### ビット・エラー・レートの予測

DjとRjを別々に評価すると、BERが予測できます。Dj/Rjの分離から、Djのタイム・レコードが求められます。ここで、「Interpolated (補間)」と示された位置を含めずに、Djのタイム・ドメイン・ヒストグラムを計算します。Rjのタイム・ドメイン・ヒストグラムは、Dj/Rj分離中に得た標準偏差を用いて、そのガウシアン・モデルに基づいて合成されます。次に、DjおよびRjのヒストグラムを重畳し、リカバーした全ジッタのヒストグラムを得ます。このリカバーしたTjヒストグラムは、適切に正規化された場合には、TjのPDF (確率分布関数) とみなすことができます。

最後に、このPDFからバスタブ曲線 (図5に示すようなBER曲線) を求めます。詳細は、Fibre Channel MJSドキュメントに説明されています。対象となっているBERがゼロにきわめて近いレベルであるため、バスタブ曲線は垂直軸の対数スケールを使用して描かれています。決定エラー・レートは、決定時間が「バスタブ内の」どこかから選択される限り、常に指定したビット・エラー・レートより低くなります。これは、データ・サンプル・ポイントを必ずオシロスコープのアイ・ダイアグラムの中心に置くのと似ています。BERのバスタブ曲線に基づき、所定のビット・エラー・レートに対してアイ・オープニングを推定することができます。

## 結論

クロック・レートが高速化し、タイミングの許容値が減少するにつれて、タイミング評価は一層重要になっています。今日の回路設計においては、ジッタの評価だけでなく、ジッタを正確に測定することでジッタの原因を突き止め、システムの安定度を予測することも重要です。また、適切な測定器を使用することで、トータルとしてのコストを最小限に抑えることも必要です。オシロスコープのような多目的ツールでスペクトラム解析のアプローチを用い、ジッタ解析が可能になります。これにより、これまで以上に商品化を早めることができ、高速環境での確実な動作を実現しながら、エンジニアリング・ツールへの投資を最小限に抑える回路設計が実現できます。

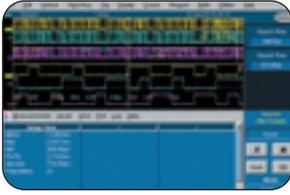
### リアルタイム・オシロスコープを使用したRj/Dj解析

当社のWindowsベースのリアルタイム・オシロスコープにTDSJIT3などの解析ツールが加わり、オシロスコープの機能がさらに拡張し、複雑で正確な信号解析が可能になりました。

当社は創立以来、忠実な信号再現性と信号解析を追求してまいりました。業界初の機器内部測定、高度なトリガ、機器内部アプリケーション、オープン・プラットフォームに続き、今回初めてRj/Dj解析を実現しました。オシロスコープをベースにした信号解析のトップ・メーカーとして、常に業界をリードし、他社に先んじるベンチマークを提供しています。

## ジッタ解析

▶ アプリケーション・ノート



### TDSJIT3ジッタ解析ソフトウェア

TDSJIT3は、新発売のジッタ解析ソフトウェア・パッケージです。クロック信号およびデータ信号のRj/Dj解析を可能にするTDSJIT3は、最も精度の高いジッタ測定が可能になります。広範囲にわたるジッタ解析アルゴリズムにより、TDSJIT3は今日の高速デジタル回路、通信、システム設計におけるジッタとその発生源を容易に検出します。



### TDS6604型デジタル・ストレージ・オシロスコープ

世界初の6GHzオシロスコープTDS6604型は、最も要求の厳しい信号測定に必要とされる機能を備えています。信号品質の検証に必要な機能および設計プロセスを簡単、迅速に行えるツールで、次世代のデジタル回路設計のためのさらなる高水準なシングル・インテグリティに対応します。周波数帯域6GHz、サンプル・レート20GS/s (2チャンネル同時) のTDS6604型は、他に類を見ないシングル・インテグリティ測定を可能にしました。



### 高性能プローブ・ソリューション

当社のプローブは、世界トップ・レベルの信号精度と性能を備えています。P7260型は世界最速のアクティブ・プローブです。P7260型、P7240型FETプローブおよびP7330型差動プローブは、低回路負荷、低ノイズにより、高速回路設計で正確なプロービング・ソリューションを提供します。

## Tektronix お問い合わせ先:

東南アジア諸国/オーストラリア (65) 6356 3900

オーストリア +41 52 675 3777

バルカン半島/イスラエル/アフリカ南部諸国およびSSE諸国  
+41 52 675 3777

ベルギー 07 81 60166

ブラジルおよび南米 55 (11) 3741-8360

カナダ 1 (800) 661-5625

中東ヨーロッパ/ウクライナおよびバルト海諸国 +41 52 675 3777

中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777

デンマーク +45 80 88 1401

フィンランド +41 52 675 3777

フランス +33 (0) 1 69 86 81 81

ドイツ +49 (221) 94 77 400

香港 (852) 2585-6688

インド (91) 80-22275577

イタリア +39 (02) 25086 1

日本 81 (3) 6714-3010

ルクセンブルグ +44 (0) 1344 392400

メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 5424700

中東アジア/北アフリカ +41 52 675 3777

オランダ 090 02 021797

ノルウェー 800 16098

中華人民共和国 86 (10) 6235 1230

ポーランド +41 52 675 3777

ポルトガル 80 08 12370

大韓民国 82 (2) 528-5299

ロシアおよびCIS諸国 +7 (495) 7484900

南アフリカ +27 11 254 8360

スペイン (+34) 901 988 054

スウェーデン 020 08 80371

スイス +41 52 675 3777

台湾 886 (2) 2722-9622

イギリスおよびアイルランド +44 (0) 1344 392400

アメリカ 1 (800) 426-2200

その他の地域からのお問い合わせ 1 (503) 627-7111

Updated 12 May 2006

### 詳細について

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、資料を用意しています。当社ホームページ([www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp))または[www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)をご参照ください。



Copyright © 2006, Tektronix. All rights reserved. Tektronix製品は、米国およびその他の国の取得済みおよび出願中の特許により保護されています。本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。その他本書に記載されている商品名は、各社のサービスマーク、商標または登録商標です。

7/06 region/WOW

552-15631-1

8 [www.tektronix.co.jp/oscilloscopes](http://www.tektronix.co.jp/oscilloscopes)

**Tektronix**

Enabling Innovation

## 日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階 〒108-6106  
製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

**TEL 03-6714-3010 FAX 0120-046-011**

電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00 月曜~金曜(祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 [www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)  
お客様コールセンター [ccc.jp@tektronix.com](mailto:ccc.jp@tektronix.com)