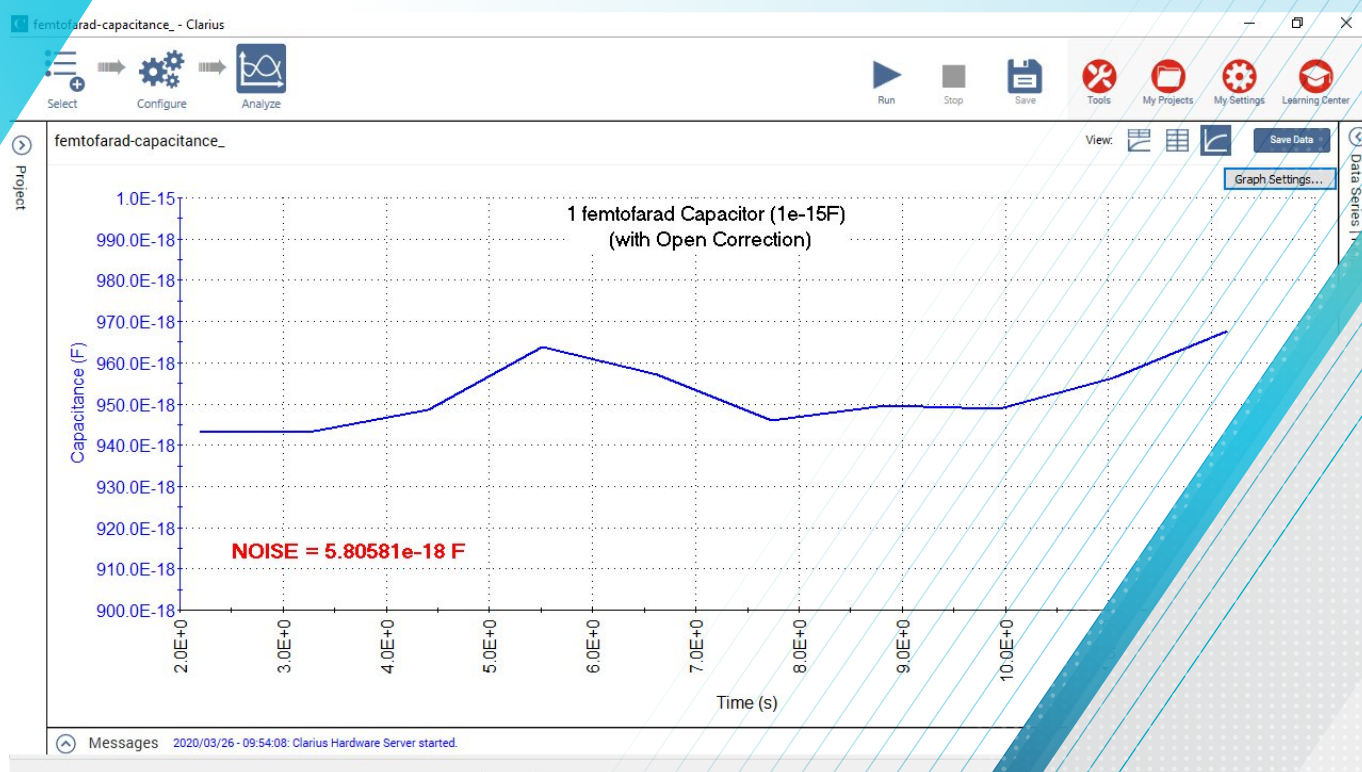


4215-CVU容量電圧測定ユニットによる フェムトファラド($1e-15F$)レベルの容量測定

アプリケーション・ノート



はじめに

一般的な半導体容量は、ピコファラド(pF)またはナノファラド(nF)レンジである。多くの市販のLCRまたはキャパシタンス・メータは、補正を含む適切な測定技術を用いてこれらの値を測定することができる。しかしながら、用途によっては、フェムトファラド(fF)、すなわち1e-15のレンジで非常に高感度な容量測定を必要とする。これらの用途には、金属間容量、ウェハ上の配線間容量、スイッチなどのMEMSデバイス、またはナノデバイスの端子間容量の測定が含まれる。これらの非常に小さな容量は、適切な測定機器および測定技術を使用せずに測定することは非常に困難である。

4215-CVU容量電圧測定ユニット(CVU)を搭載したKeithley 4200A-SCSパラメータ・アナライザなどのツールを使用すると、1pF以下の非常に低い値の容量を含んだ広範囲の容量を測定できる。CVUは、ユニークな回路で設計され、Clarius+ソフトウェアによって制御され、最も正確な結果を保証する機能および診断ツールをサポートする。このCVUを適切な手法で使用することで、数10アトファラド(1e-18F)のノイズ・レベルで非常に低い容量の測定を実現することができる。

このアプリケーション・ノートでは、4215-CVU 容量電圧測定ユニットを使用したフェムトファラドの容量測定を行う方法について説明する。これには、適切な接続と、最良の結果を得るためのClariusソフトウェアでの適切なテスト設定の使用が含まれる。ケーブル配線と接続、タイミング設定、ガーディング、および補正を含む容量測定の詳細は、Keithley アプリケーション・ノート、「*Making Optical Capacitance and AC Impedance Measurements with the 4200A-SCS Parameter Analyzer*」に記載されている。

機器との接続

被測定デバイス(DUT)への適切な接続を行うことは、高感度な低容量測定を行う上で極めて重要である。

最良の結果を得るために、CVUからDUTへの接続用に供給された赤色のSMAケーブルのみを使用する。赤色のSMAケーブルの特性インピーダンスは100Ωである。並列接続された2本の100Ωケーブルは、50Ωの特性インピーダンスを持っている。これは、高周波信号の印加や測定アプリケーションに標準的なものである。供給された付属品は、BNCまたはSMA接続を用いて試験治具またはプローバに接続することができる。付属のトルクレンチを使用して、SMAケーブル接続部を締め付け、良好な接触を確保する。

2線式センシング用に構成されたCVUを図1に示す。HCUR 端子とHPOT 端子をBNC ティーに接続してCVH (HI)を形成し、LCUR 端子とLPOT 端子を接続してCVL (LO)を形成する。

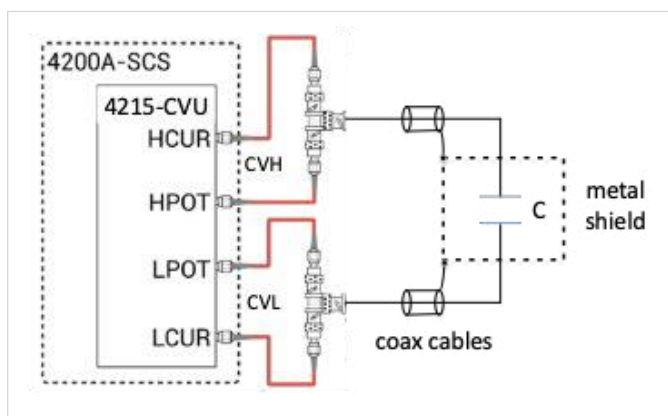


図1. 2線式センシング用のCVU 接続

DUT への4線式センシングの例を図2に示す。この場合、HCUR 端子とHPOT 端子はデバイスの一端に接続され、LPOT 端子とLCUR 端子はデバイスの他端に接続される。デバイスへの4線接続により、デバイスにできるだけ近い電圧を測定することで、高感度の測定が容易になる。

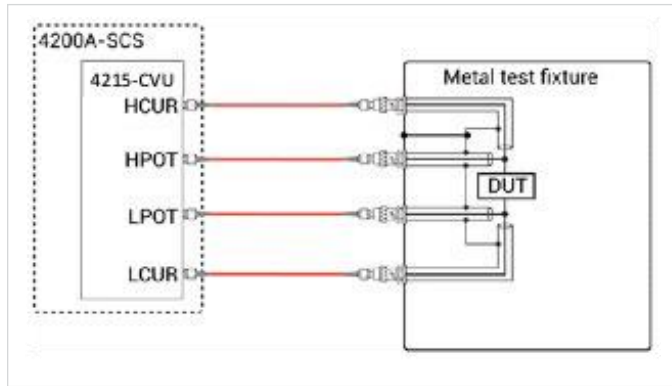


図2. 4線式センシング用のCVU 接続

2線式または4線式のいずれのセンシングの場合も、シールドのループ領域を最小限に抑えるために、同軸ケーブルの外部シールドをデバイスにできるだけ近づけて接続する必要がある。これにより、インダクタンスが減少し、1 MHz を超える周波数で負担になる可能性がある共振の影響を避けることに役立つ。

すべてのケーブルを動かさないようにしっかりと取り付ける。オフセット測定と実際のDUT測定との間の時間に生じるいかなる変動も、ループ・インダクタンスをわずかに変化させ、補正データに影響を与える可能性がある。

非常に小さな容量を測定する場合、干渉による測定の不確かさを減らすために、DUT をシールドすることが重要になる。干渉の原因としては、交流信号や物理的な動きが考えられる。金属シールドでDUT を囲み、同軸ケーブルのアウター線と接続する必要がある。

低容量測定では、4 線式センシングを使用するのが最適である、ケーブルが短く、補正が実行されていれば2線式センシングでも最適な測定が達成できる。

フェムトファラド測定用のClarius+ ソフトウェアの設定

Clariusソフトウェアで測定値を設定するには、ライブラリでfemtofaradプロジェクトを選択し、test settingを行い、測定を実行する。

ライブラリでのfemtofarad-capacitanceプロジェクトの選択

非常に小さい容量測定を行うためのプロジェクトは、Clariusソフトウェアのプロジェクトライブラリに含まれている。Selectビューから、検索バーで“femtofarad”と入力する。図3に示すように、femtofarad-capacitanceプロジェクトが画面に表示される。プロジェクトツリーでプロジェクトを開くには“Create”を選択する。

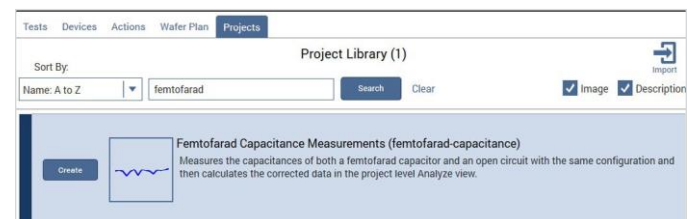


図3. ライブラリにおけるFemtofarad容量測定プロジェクト

テスト設定の構成

プロジェクトが作成されると、図4に示すように、femtofarad-capacitanceプロジェクトがプロジェクトツリーに表示される。

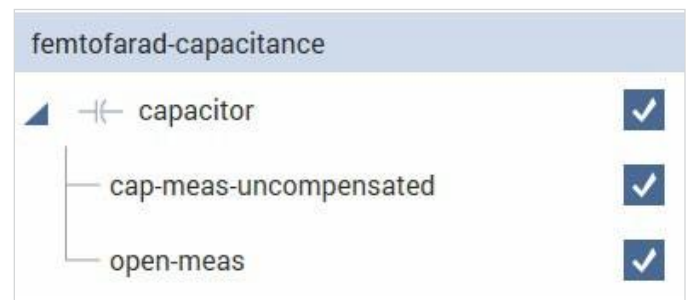


図4.femtofarad-capacitanceプロジェクトツリー

このプロジェクトには、1) 被測定物の容量測定に使用されるcap-measure-uncompensatedテスト、2) ケーブル配線および接続部の容量値取得に使用されるオープン測定テストの2つのテストがある。これらの容量測定の感度のため、オープン回路の測定は、DUTの測定と同じ設定で実施される。

次いで、オープン回路測定値は、DUTの容量測定値から減算される。
この方法により、極めて低い容量の良好な測定が可能になる。

低容量測定を成功させるためには、Configureビュー画面で測定およびタイミング設定を適切に調整することが重要である。以下に、最適な調整を行うためのいくつかの提案を示す：

Measure Settings: ユーザが制御できる設定は、電流測定レンジ、AC 駆動電圧、およびテスト周波数である。これらはデバイス容量を決定する式に関与するので、測定に重要である。CVU は、 I_{ac} 、 V_{ac} 、および次の式を使用してテスト周波数からデバイスの容量を計算する：

$$C = \frac{I_{ac}}{2\pi f V_{ac}}$$

ここで、 C = デバイスの容量(F)

I_{ac} = CVUで測定した交流電流(A rms)

f = テスト周波数(Hz)

V_{ac} = AC 駆動電圧(V rms)

これらの式の間接関係を見ると、電流測定レンジ、AC駆動電圧、およびテスト周波数に対する最適な設定を推定することができる。

CVUは、1 μ A、30 μ A、および1mAの3つの電流測定レンジを有する。ノイズが最も少ない最も低いキャパシタンス測定では、最も低い電流レンジである1 μ Aレンジを使用する。

AC 駆動電圧のレベルは、測定のSN比に影響を与える。ACノイズ・レベルは比較的一定のまま、より高いACドライブ電圧を使用すると、より大きなAC電流が生成されるため、SN比が向上する。したがって、できるだけ高いAC駆動電圧を使用することが最良である。このプロジェクトでは、1VのAC駆動電圧が使用された。

非常に低い容量の測定には、約1MHz のテスト周波数を使用するのが理想的である。1MHzよりはるかに高い試験周波数では、伝送線路効果により測定が難しくなる。低いテスト周波数では、テスト周波数と電流が比例するため、測定値は分解能が低くなり、よりノイズの大きい測定結果になる。

Timing Settings(タイミング設定): Test Settings(テスト設定)画面でタイミング設定が調整できる。速度モードの設定により、ユーザは Measurement Windowを調整することができる。非常に低い容量測定では、Custom Speed(カスタム速度)モードを使用して測定時間を設定し、目的の確度とノイズ・レベルを達成する。基本的に、測定時間又は範囲が長ければ長いほど、測定のノイズは少なくなる。ノイズは、次の式に示すように、測定時間の平方根に反比例する：

$$Noise = \frac{1}{\sqrt{MeasTime}}$$

ノイズは、容量測定の標準偏差を計算することによって得ることができる。この計算は、ClariusソフトウェアのFormulatorを使用して自動的に実行できる。cap-meas-uncompensatedテストは、自動的にノイズを計算し、その値をシートに戻す。

Measurement Windowは、**図5**に示すTest Settings画面の Custom Speedモードを使用して調整できる。

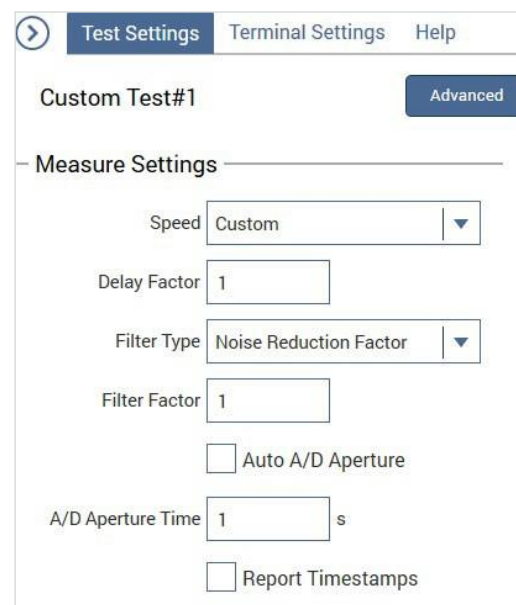


図5. Test Settings画面のCustom Speedモード

Measurement Windowの時間は、以下のように計算することができます：

$$Measurement\ Window = (A/D\ Aperture\ Time) * (FilterFactor\ または\ Filter\ Count)$$

表1は、CVUの端子に2線式で接続された1fFコンデンサで生成された Measure Windowの関数としてのCVUノイズである。ノイズは、0 V DC、1MHz、および1 V AC 駆動電圧の設定で測定した15 個の読み値の標準偏差を取ることによって計算されている。

このデータは、測定時間が長くなるとノイズが減少することが検証されている。1秒以上の測定時間は、アトファラド、すなわち1E-18Fレンジのノイズを有することに注意されたい。試験のための最適な測定時間を決定するために、各試験環境において実験が必要となる。

測定時間(s)	ノイズ(rms)
0.001	1.18E-16
0.002	9.90E-17
0.005	9.17E-17
0.01	7.43E-17
0.02	6.84E-17
0.05	2.98E-17
0.1	2.24E-17
0.2	1.49E-17
0.5	1.15E-17
1	6.13E-18
2	5.00E-18
5	3.99E-18
10	2.77E-18

表1:1fF コンデンサの測定時間vs ノイズ

測定の実行

ハードウェアとソフトウェアを設定し測定を実行する。理想的には、4200A-SCS型は、測定を行う前に少なくとも1時間ウォームアップされるべきである。

これらの4つのステップに従い、補正された測定と結果取得を繰り返す。

- 1. デバイスの容量を測定する。**プロジェクトツリーでcap-meas-uncompensatedテストを選択する。Configure ビューで、デバイスとアプリケーションに基づいてテスト設定を調整する。テストを実行する。
- 2. Open回路補正データを測定する。**プロジェクトツリーでopen-measテストを選択する。データ点数、電圧ステップ数を含め、cap-meas-uncompensatedテストの設定と全く同じになるように設定を調整する。CVH (HCUR および HPOT) ケーブルのみを外す。終端されていないケーブルが遮蔽されていることを確認する。オープンテストを実行する。
- 3. 結果を解析する。**プロジェクトツリーでfemtofarad-capacitanceプロジェクトを選択し、Analyzeビューを選択する。補正された1fF測定値を表示する画面キャプチャが図6に示されている。

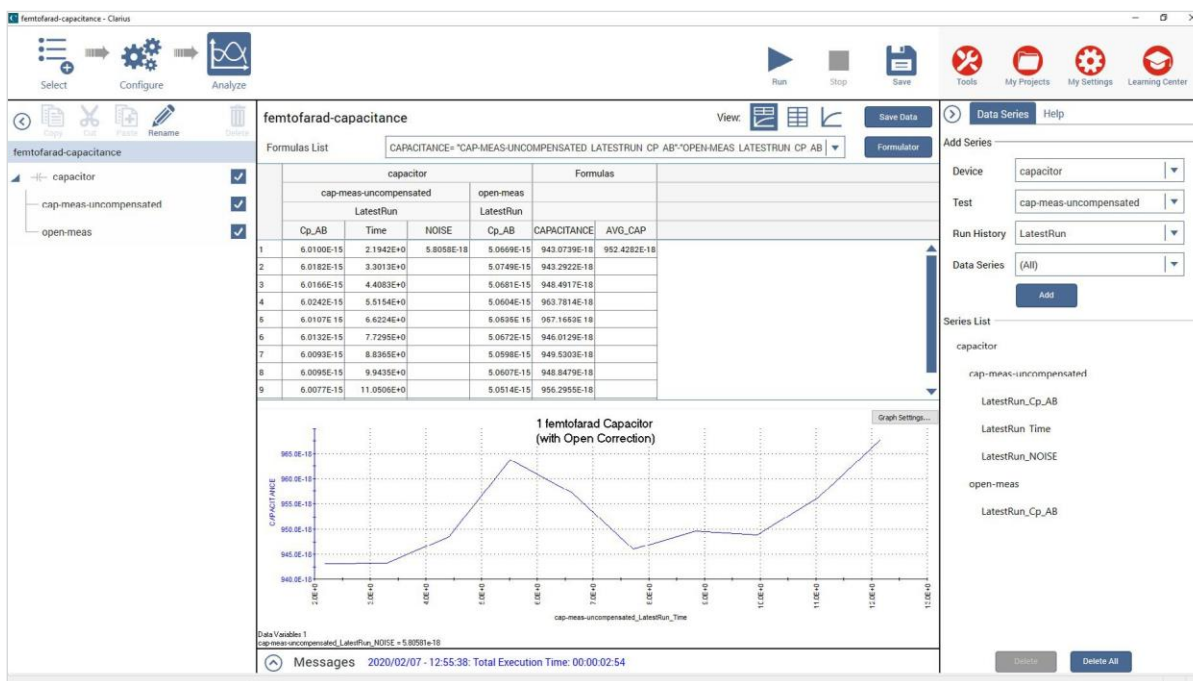


図6. 1fFの測定結果を示すAnalyzeビューSheetおよびGraphの画面キャプチャ

最新の容量およびオープン補正測定値が、ノイズの計算と共にシートに表示される。プロジェクトツリー内のすべてのテストからのデータシリーズが画面の右側に表示される。図7に示すように、*cap-meas-uncompensated* および *open-meas* テストからの最新の測定値の系列リストが選択される。つまり、テストが実行されるたびに、最新のデータがシートに入力される。

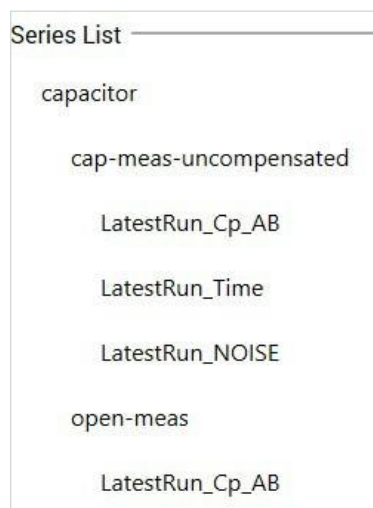


図7.テストからのデータ系列

Project level Analyze viewシートのcap-meas-uncompensated テストデータからopen-measテストデータを差し引くことによって、補正された容量測定値を自動的に計算する式がFormulatorに設定されている。グラフは、補正された容量を時間の関数として表示する。シートのCAPACITANCE列には、すべての読み取り値の平均容量とともに、補正された測定値がリストされる。図8に、容量測定(Cp_AB)、時間、ノイズ、オープン測定、補正測定(CAPACITANCE)、および平均容量(AVG_CAP)を含む最新のシートデータを示す。

	capacitor				Formulas	
	cap-meas-uncompensated			open-meas		
	LatestRun			LatestRun		
	Cp_AB	Time	NOISE	Cp_AB	CAPACITANCE	AVG_CAP
1	6.0100E-15	2.1942E+0	5.8058E-18	5.0669E-15	943.0739E-18	952.4282E-18
2	6.0182E-15	3.3013E+0		5.0749E-15	943.2922E-18	
3	6.0166E-15	4.4083E+0		5.0681E-15	948.4917E-18	
4	6.0242E-15	5.5154E+0		5.0604E-15	963.7814E-18	
5	6.0107E-15	6.6224E+0		5.0535E-15	957.1653E-18	
6	6.0132E-15	7.7295E+0		5.0672E-15	946.0129E-18	
7	6.0093E-15	8.8365E+0		5.0598E-15	949.5303E-18	
8	6.0095E-15	9.9435E+0		5.0607E-15	948.8479E-18	
9	6.0077E-15	11.0506E+0		5.0514E-15	956.2955E-18	
10	6.0222E-15	12.1576E+0		5.0544E-15	967.7908E-18	

図8. Analyze viewシートに示されているテストデータ。

- 測定を繰り返す。Runを選択することによって、プロジェクトレベルから測定を繰り返すことができる。補正された読み取り値は自動的に計算される。ただし、図9に示すように、open-measテストはチェックを外さなければならず、データが予期せず移動しているように見える場合は、取得したオープン測定を定期的に繰り返す必要がある。これは、温度の変動またはケーブルの動きによる変動の影響を考慮している。

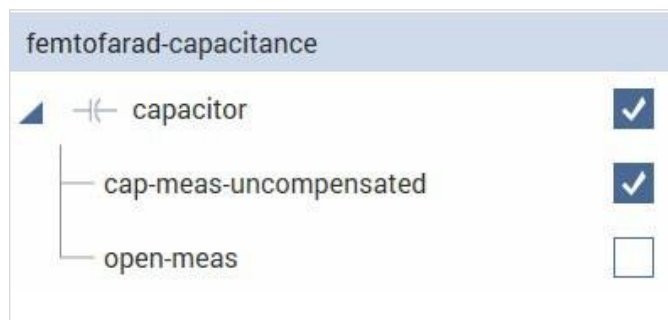


図9.プロジェクトレベルAnalyzeビューから測定を繰り返すには、open-measテストのチェックを外す

まとめ

フェムトファラドレベルの容量は、ライブラリ・プロジェクト、適切な接続、および適切な測定手法および設定を使用して、4215-CVUを用いて測定することができます。適切な測定ウィンドウを有する4215-CVUを使用することにより、数十アトファラド以下のレンジのノイズ・レベルでの測定を可能にする。

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストラリア 00800 2255 4835
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777
ベルギー 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3759 7627
カナダ 1 800 833 9200
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパ／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 00800 2255 4835
ドイツ 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
イタリア 00800 2255 4835
日本 81 (3) 6714 3086
ルクセンブルク +41 52 675 3777
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
中国 400 820 5835
フィリピン 1 800 1601 0077
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
韓国 +82 2 6917 5000
ロシア +7 (495) 6647564
シンガポール 800 6011 473
南アフリカ +41 52 675 3777
スペイン 00800 2255 4835
スウェーデン 00800 2255 4835
スイス 00800 2255 4835
台湾 886 (2) 2656 6688
タイ 1 800 011 931
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835
アメリカ 1 800 833 9200
ベトナム 12060128

2017年4月現在



jp.tek.com

テクトロニクス／ケースレーインストルメンツ

お客様コールセンター：技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡

TEL: 0120-441-046 営業時間／9:00～12:00・13:00～18:00
(土日祝日および当社休日を除く)

サービス・コールセンター：修理・校正の依頼

TEL: 0120-741-046 営業時間／9:00～12:00・13:00～17:00
(土日祝日および当社休日を除く)

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © 2020, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。
記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

2020年6月 1KZ-61666-0