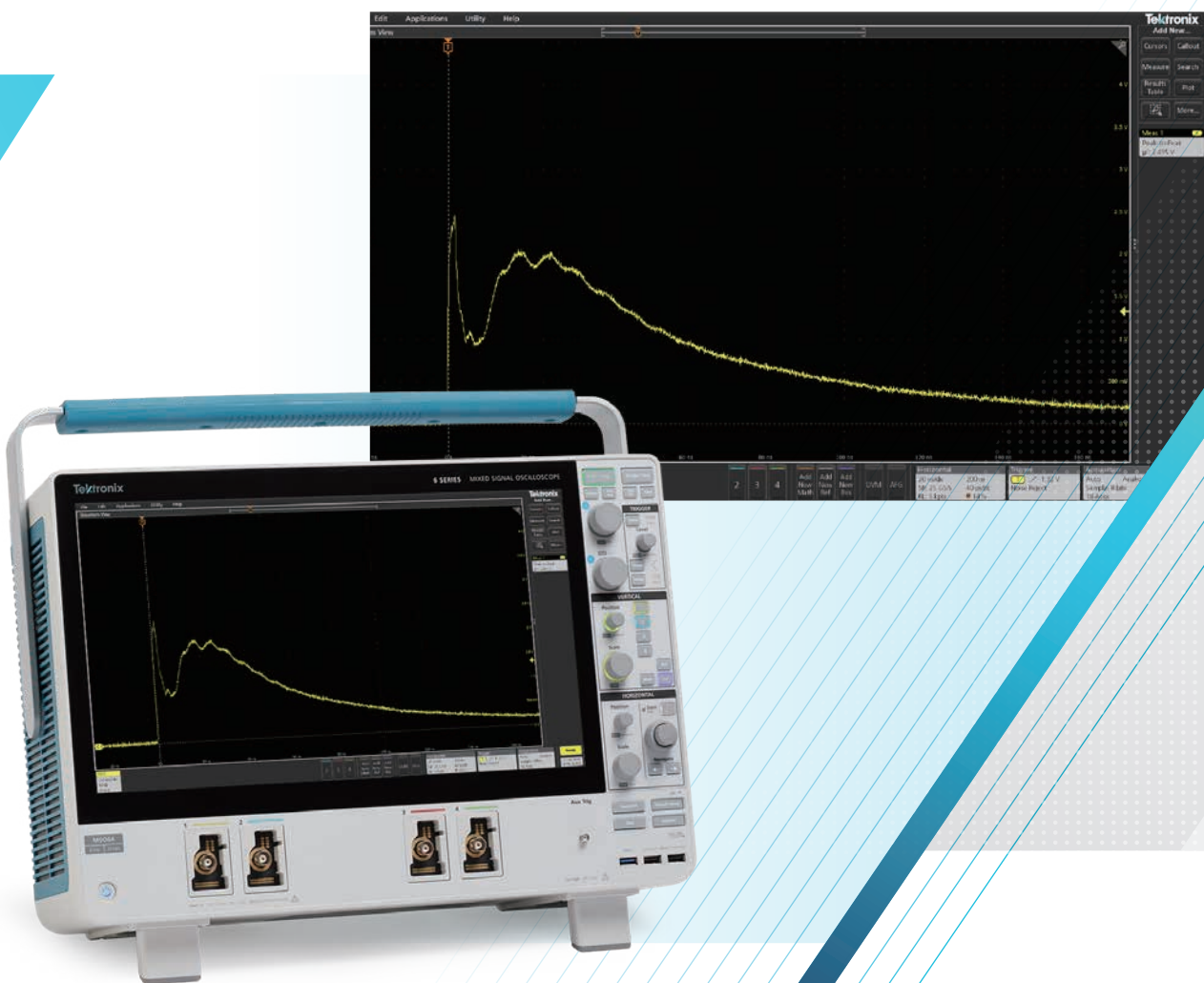


Tektronix®

オシロスコープを使用した ESDシミュレータの性能検証

アプリケーション・ノート



はじめに

静電気放電 (ESD) イミュニティ試験は、世界の電磁両立性 (EMC) 規格に適合した製品設計を行う上で非常に重要です。ほとんどの製品が参照している主な国際規格として、IEC 61000-4-2とU.S. ANSI C63.16があり、ESD試験のセットアップと実施方法を規定しています (出典1、2を参照)。正確で再現性のあるテスト・パルスの出力には、ESDシミュレータが必要です。

また、この規格では、被試験装置 (EUT) に入力する電流パルスの形状、タイミングも規定しています。イミュニティ試験を行う前に、使用するESDシミュレータが適切な形状、立上り時間を持った電流パルスを生成することを確認する必要があります。校正済みのESDターゲットと広帯域オシロスコープを使用すれば、シミュレータの性能を確認することができます。テクトロニクスの4/5/6シリーズMSOは、この検証測定に最適なオシロスコープです。

人が筐体またはケーブルに触れることで発生するESDは、電子機器の回路を損傷させることがあります。金属製の物体に人の指が近づくと、人体特有なESD現象が起こり、物体内に高電流放電が発生します。これによって生ずる電流パルスは、1ns未満の立上り時間を持つ、非常にエッジの鋭い、数アンペア・レベルのものになります (図1)。

理想的なESD波形を図1に示します。

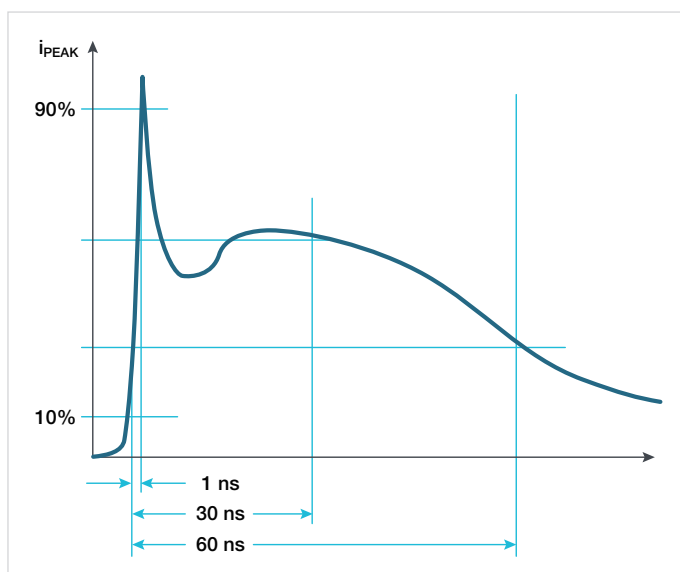


図1. ESDの電流の立上り時間は1ns未満

本アプリケーション・ノートの概要

- コンプライアンス・テストまたはプリコンプライアンス・テスト前の、ESDシミュレータの電流パルスの形状の検証に役立ちます
- ESDの基礎知識を説明します
- オシロスコープを使用した、ESDシミュレータの基本的なテスト・システムを説明します
- 接触放電試験と気中放電試験のパルスの検証方法を説明します

このアプリケーション・ノートでは、ESDトラブルシュートを説明するのに、6シリーズMSOオシロスコープを使用しています。4シリーズ、5シリーズMSOも、6シリーズと同じ操作であるため、セットアップ、測定は同じ操作方法になります。適切な性能、特に立上り時間の性能を持ったオシロスコープであれば、ここで説明する同じ方法で対応できます。

人体は、単純な直列RCネットワークとしてモデル化することができます (図2)。電荷が蓄積されると、コンデンサは数kVまで充電されます。スイッチ (シミュレータのトリガ) が切替ると、この電荷は急速にEUTに放電されます。この人体モデルに非常に近い電流波形を再現するシミュレータが、いくつかの製造メーカーから販売されています。このシミュレータが生成する波形形状は、国際規格のIEC 61000-4-2で規定されています。

IEC 61000-4-2では、EUTを試験する前に、ESDシミュレータのチップ電圧を確認することを義務付けています。また、電流ピーク、30nsでの電流値の読み取り、60nsでの電流値の読み取りなど、電流波形のいくつかの特性検証が必要です。

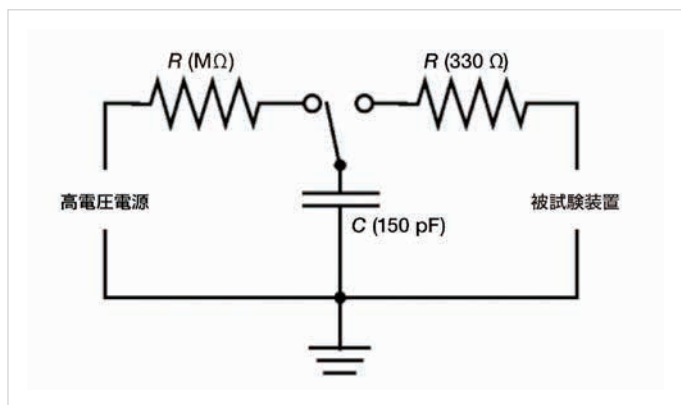


図2. 人の指によるESDをシミュレーションしたRC回路網

シミュレータのチップ電圧は、エレクトロメータまたはギガオーム・メータで測定できます（出典3を参照）。しかし、簡単なプリコンプライアンス検証試験であれば、ハイインピーダンス、高電圧の抵抗分圧器（1MΩに直列に100MΩのもの）とデジタル・ボルトメータを使用すればよいという意見がほとんどです。抵抗の耐電圧は、最大25kVであることを確認する必要があります。

IECやANSIの規格では、立上り時間よりも測定再現性の方を厳しく要求しています。ESDの取込みでは、オシロスコープをシングルショット・モードに設定する必要があります。オシロスコープが立上り時間を繰り返し測定し、異なる測定値を返すようであれば、たとえ多くの測定の平均値が正確であっても、その時々正確な立上り時間の測定値は信頼できません。内部ノイズが小さいほどシングルショットの再現性は良くなるため、ESD試験用のオシロスコープを評価する場合は、ノイズの仕様を比較してください。この例で使用されている6シリーズMSOのノイズは非常に小さいため、このような試験での使用に適しています。

シャントの使用 - ESDシミュレータの出力をチェックするには、グラウンドに接続した低インピーダンス、高周波抵抗シャントの電流波形を測定する必要があります。このシャント（ESDターゲット）は、機器の筐体など、大きな金属製の物体への放電を模したものです（図3）。

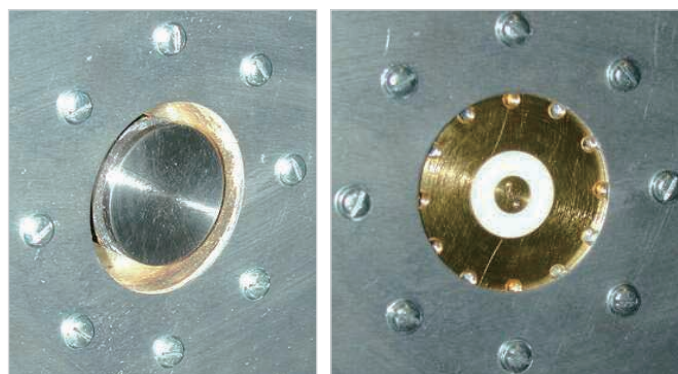


図3. 2種類のESDターゲット：旧来のスタイル（左）と新しいスタイル（右）。新しいスタイルは広帯域の4GHzに対応しており、IEC 61000-4-2の将来の改定で規定される可能性がある

IECとANSIの規格では、現時点でシャントのインピーダンスを2.1Ω未満と規定していますが、将来の改定では変更されます。ESDシミュレータの性能をより正確に検証できるよう、規格案ではより広帯域で低インピーダンスの校正済み（新型）ESDターゲットが規定されています。新しいターゲットのインピーダンスは約1Ωです。現在、IEC、ANSI規格では1GHz帯域のターゲットを規定しています。規格案では、4GHz帯域のターゲットを規定しています。

テストのセットアップでは、1.2m²のグラウンド面の中央にターゲットを置く必要があります。ANSI C63.16のターゲット仕様では、反射係数が0.1未満（1.22未満のVSWRと等価）、挿入損失が0.3dB未満（4GHzまで）となっています。このようなターゲットは、市販のものを購入することもできます。

テスト・セットアップには、ケーブル、アッテネータ、オシロスコープが必要になります。ターゲット、アッテネータ、オシロスコープを接続するケーブルは、高品質、低損失ものを使用します。IEC、ANSI規格に適合するためには、合計のケーブル長が1m未満になるようにします。ANSI C63.16では、信号からのリークが測定に影響しないよう、ダブルシールドのケーブルの使用を求めています。また、RG-400/Uケーブルも推奨されていますが、直径が2倍のRG-214/Uのケーブルは損失が半分になります。GHz帯域の同軸ケーブルを使用することもできます。

また、IEC 61000-4-2では、オシロスコープをファラデー・ケージ内に置き、ESDによる放射エミッションからシールドすることも規定されています。規格が制定された1990年代初期、多くのエンジニアはアナログ・ストレージ・オシロスコープでこれを測定していました。規格では、アナログ・オシロスコープに表示される波形が歪まないようにシールドを規定しました。シールドは、放電によって放射される電界が原因の、間違ったトリガを防ぐこともできます。

4/5/6シリーズMSOなど、今日のほとんどの高速デジタル・オシロスコープでは内部の回路は十分にシールドされているため、実際にはファラデー・ケージは必要としません。通常は、1.2m²のアルミニウム板の中心にESDのターゲットを置くだけで、デジタル・オシロスコープの不要なトリガを防ぐことができます。

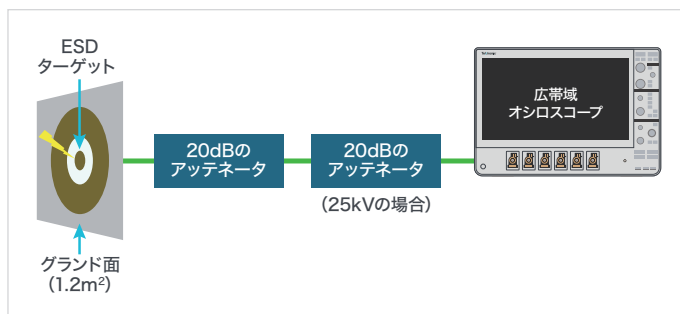


図4. ESDターゲットとオシロスコープ間のアッテネータは、オシロスコープの入力アンプを保護する

テスト・セットアップのブロック図を図4に示します。ESDターゲットは50V以上の電圧になることがあるため、アッテネータでオシロスコープの入力アンプを保護する必要があります。20dBのアッテネータは10：1の減衰になり、測定電圧に10を掛けることでシャントの実際の電圧を求めることができ、その電圧から電流を計算することができます。アッテネータは最大50Vのスパイクに、その帯域幅は4GHzまでの周波数に対応する必要があります。

オシロスコープの選定 - オシロスコープを選定する場合は、その周波数帯域、立ち上がり時間、ノイズに十分注意する必要があります。サンプリングの誤差なしに、正確に信号を測定するためには、オシロスコープは十分な周波数帯域を持っていることが必要です。ガウシアン応答の特性を持ったオシロスコープの場合、オシロスコープのサンプル・レートは周波数帯域の6倍は必要かもしれませんが、4倍がより一般的です。

デジタル・オシロスコープの場合、サンプル・レートにも注意する必要があります。デジタル・オシロスコープは有効帯域においてフラットな特性を持っており、-3dB周波数より上では急峻なロールオフ特性になっています。このため、エイリアシングによるエラーを防ぐためにも、サンプル・レートはオシロスコープの周波数帯域の2.5倍は必要になります。

オシロスコープでESDパルスの立ち上がり時間を正確に表示するためには、十分な周波数帯域と立ち上がり時間の性能が必要です。オシロスコープの仕様が適切か否かは、オシロスコープがアナログかデジタルかによって異なります(出典4)。

アナログ・オシロスコープの場合の一般的な立ち上がり時間と周波数帯域の基準を以下に示します。

- 周波数帯域=0.35÷立ち上がり時間、または、立ち上がり時間=0.35÷周波数帯域
 - 立ち上がり時間を5%以下の誤差で測定するには、オシロスコープの立ち上がり時間は、入力信号の立ち上がり時間の1/3未満であることが必要
- デジタル・オシロスコープでは、以下のように計算します。

- 周波数帯域≧0.43÷立ち上がり時間
- 立ち上がり時間を数%の確度で測定するには、オシロスコープの立ち上がり時間は、信号の立ち上がり時間の0.7倍程度が必要

ほとんどのデジタル・オシロスコープの周波数特性はフラットであるため、-3dBポイントより手前の周波数における減衰は、アナログ・オシロスコープよりも少なくなります。このため、デジタル・オシロスコープではより正確な測定が可能になります。また、デジタル・オシロスコープのロールオフは急峻であるため、エイリアシングによるエラーが少なくなります。

一般に、人体のESDパルスの立ち上がり時間は200ps未満になることがあります。この立ち上がり時間を正確に表示するために必要な周波数帯域は、0.43÷200psとなり、約2.15GHzとなります。ESDシミュレータによっては50psの立ち上がり時間を発生するものもあり、必要なオシロスコープの周波数帯域は8.6GHzになります。

ターゲット、アッテネータ、ケーブルの接続により、信号振幅にある程度の損失が生じます。テスト・セットアップ間の損失のバラツキは、DC~1GHzで±0.3dB、1GHz~4GHzで±0.8dBでなければなりません。表1に示すように、1dB未満のシステム確度の変動が、測定確度に大きく影響することがわかります。

確度変動 (dB)	パーセント (%)
0.1	1.16
0.3	3.51
0.5	5.93
0.7	8.39
0.9	10.92

表1. システムの確度変動によるパーセント測定誤差

オシロスコープの周波数帯域が高いほど、ESDパルスの立上りエッジを正確に取込むことが可能になります。表2は、オシロスコープの立上り時間特性が、ESDパルスの測定立上り時間に直接影響する様子を示しています。立上り時間が700psのパルスの場合、1%未満の

誤差で測定するには、最低でもオシロスコープの周波数帯域は4GHzが必要になります。立上り時間の測定では、システム誤差の他に、この誤差も加えて考える必要があります。

パルスの立上り時間 (ps)	オシロスコープの周波数帯域 (GHz)	オシロスコープの立上り時間 (ps)	観測される立上り時間 (ps)	差分 (ps)	誤差 (%)
700	1	350	783	83	11.8
700	1.5	233	738	38	5.4
700	2	175	722	22	3.1
700	3	177	710	10	1.4
700	4	88	705	5	0.8
700	6	58	702	2	0.3

表2. オシロスコープの周波数帯域による、真の立上り時間と観測される立上り時間の関係

ESDパルスを測定するには、オシロスコープをシングルショット・モードにし、正極性のエッジ・トリガにします。トリガ・レベルは0より少し上に設定します。波形全体を取込むには、トリガ・レベルを微調整する必要があるかもしれません。垂直軸感度は200mV/divまたは400mV/divに設定し（選択したシミュレータの電圧によります）、時間軸を20ns/divに設定します。測定する信号が三角波と仮定すると（計算の便宜上）、800psの立上り時間を測定するには10GS/sのサンプル・レートが必要であり、これはサンプルあたり100ps、または立上りエッジで8ポイントあることを意味し、正確な波形再現では十分なものになります。

接触放電の検証

ほとんどのESD規格では、ほとんどの製品の接触放電のテスト・レベルを±4kVに規定していますが、これはアプリケーションまたは使用環境によって異なることがあります。図5は、+4kVの接触放電パルスを取込んでいる様子を示しています。シミュレータのグランド線は、グランド・プレーンに接続する必要があります。接触放電試験では、シミュレータをトリガする前に、ターゲットにチップを接触させます。

実際の検証試験では、シミュレータのグランド線をオシロスコープの同軸ケーブルから離すようにし、ケーブル同士によるカップリングを防ぎます。規格では、グランド線の途中をつかんで、グランド・プレーンから離すことを推奨しています。放電チップは、ターゲットに中心に接触させるようにします（図6）。

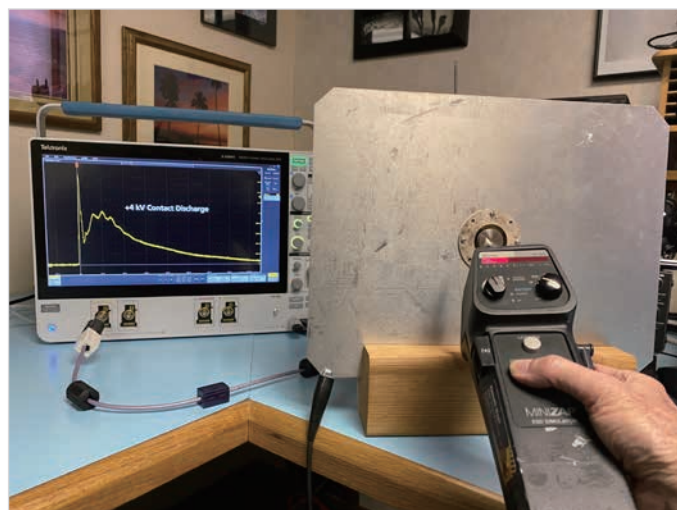


図5. ターゲットへの+4kV接触放電における、ESDシミュレータ検証の原理を示すテスト・セットアップの例。実際の検証では、1.2m²のアルミニウムのグランド・プレーンが必要。デモ用のプレーンを小型化したため、同軸ケーブルによる反射が観測され、その結果、取込んだ波形にリップルが発生している。この反射はフェライト・チョークで軽減できる。

気中放電の検証

ほとんどのESD規格では、ほとんどの製品の気中放電のテスト・レベルを±8kVに規定していますが、これはアプリケーションまたは使用環境によって異なることがあります。図8は、+8kVの接触放電パルスを取込んでいる様子を示しています。

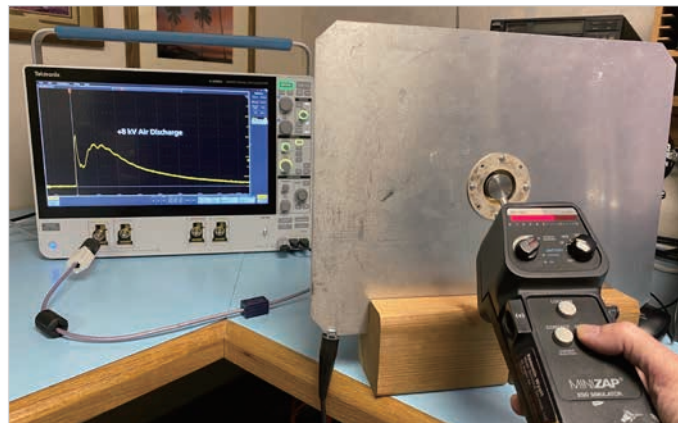


図8. ターゲットへの+8kV 気中放電における、ESDシミュレータ検証の原理を示すテスト・セットアップの例。実際の検証では、1.2m²のアルミニウムのグラウンド・プレーンが必要。デモ用のプレーンを小型化したため、同軸ケーブルによる反射が観測され、その結果、取込んだ波形にリップルが発生している。この反射はフェライト・チョークで軽減できる。



図9. 気中放電試験では、ターゲットの中心に対して90°の角度で向ける。新しいスタイルのターゲットでは、正確に向けることがさらに難しくなっている。



図6. 接触放電チップは、パルスを出力する前にターゲットの中心に当てる。

4/5/6シリーズMSOでESDパルスを取込む場合、垂直軸スケールは200mV/div、または400mV/divに設定し（シミュレータの電圧設定による）、水平軸スケールは20ns/divに設定することで、スクリーン上に波形全体を表示させることができます。トリガ・モードは「マニュアル」に設定し、正極性パルスを検証する場合はトリガ・レベルを0Vのベースラインより上に、負極性パルスの場合は0Vのベースラインより下に設定します（図7）。

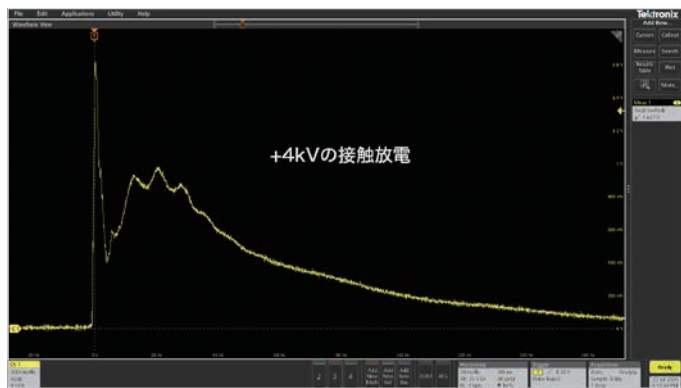


図7. デモ用のESDターゲットを使用した、代表的な+4kVの接触放電波形の取込み例。ピーク電圧は16V（20dBのアッテネータを使用しているので1.6V×10）。2.1ΩのターゲットにおけるピークのESD電流は7.6Aであることを意味する

慎重なアプローチ - 気中放電の検証は、アプローチ速度、アプローチ角度、湿度によって大きく変化することがあります。気中放電試験を実行する場合、ESDシミュレータを、ターゲットに対して90°の角度で、一定のスピードでアプローチします（図9）。実際にターゲットに触れることなく、チップとターゲット間でアーク放電するようにします。再現性は高くなりますが、波形やピーク電圧に大きなばら

つきが出るのが予想されます。このデモにおける湿度は45%であったため、ピーク電圧の測定値が通常よりも低くなる傾向があります。湿度はESD試験の結果に大きく影響する可能性があるため、気中放電試験では湿度を記録しておくといでしょう。このばらつきが、接触放電試験が必要とされる理由の一つであり、接触放電試験では本質的に立上り時間やパルス形状は安定しています。図10は、8kVの気中放電による取込みを示しています。

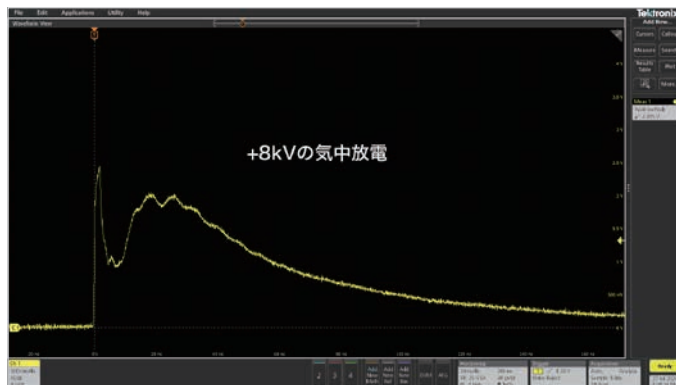


図10. デモ用のESDターゲットを使用した、代表的な+8kVの接触放電波形の取込み例。ピーク電圧は25V (20dBのアッテネータを使用しているので $25V \times 10$)。2.1ΩのターゲットにおけるピークのESD電流は11.9Aであることを意味する

まとめ - プリコンプライアンス・テスト、またはコンプライアンス・テストの前に、必ず検証試験を実施し、文書化することでシミュレータの適切な動作を確認します。検証試験が完了すれば、ESDシミュレータが正常に動作していることを確認でき、調査試験や認定試験を受けることができます。

テクトロニクスの4/5/6シリーズMSOには、優れた周波数帯域性能、非常に小さな内部ノイズ性能があり、この検証測定に最適な計測器です。

出典：

1. IEC 61000-4-2, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2001, www.iec.ch.
2. ANSI C63.16-1993, "American National Standard Guide for Electrostatic Discharge Test Methodologies and Criteria for Electronic Equipment," American National Standards Institute, New York, NY. www.ansi.org.
3. Senko and Wyatt, "ESD Simulator Verification," IEEE EMC Society, 2003, www.ewh.ieee.org.
4. Weller, Dennis, "Relating wideband DSO rise time to bandwidth: Lose the 0.35!" EDN, December 12, 2002, p. 89. www.edn.com.
5. <https://www.tek.com/ja/products/oscilloscopes/4-series-mso>
6. <https://www.tek.com/ja/products/oscilloscopes/5-series-mso>
7. <https://www.tek.com/ja/products/oscilloscopes/6-series-mso>

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア 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) 3530 8901
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) 88 69 35 25
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 2 565 1455
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
2022年2月現在



www.tek.com/ja

テクトロニクス／ケースレイインスツルメンツ

各種お問い合わせ先：<https://www.tek.com/ja/contact-tek>

技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡、修理・校正依頼
〒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 © 2022, 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。

2022年9月 48Z-73760-1