

一歩すすんだ静電気試験

～ 静電気試験の再現性を向上させる方法 ～

1. はじめに

電気・電子機器などの誤動作や性能低下を起こす静電気放電は非常に身近な問題です。

この静電気放電を模擬した静電気試験は電気・電子機器などの影響（誤動作）を評価する他、電子部品への破壊耐性試験など、幾つかの試験規格が存在します。

ここでは、帯電した人体からの静電気放電が電子機器に与える影響を評価する、国際規格 IEC 61000-4-2 規格をもとにした試験の概要や試験方法、および試験器のメカニズムをご紹介します、また、実際に試験を行う際に試験結果の再現性を向上させるための注意すべき点などを解説します。

2. 静電気試験の概要

2.1 静電気試験の種類

静電気試験の主な試験方法・規格としては下記の表に記載する種類があります。

静電気試験の分類

対象	規格番号	評価	静電気帯電物
電子機器	IEC 61000-4-2	誤動作	人体
自動車 自動車部品	ISO 10605	誤動作 破壊	人体
電子部品	IEC 61340-3-1	破壊	人体
	IEC 61340-3-2	破壊	機械
半導体	IEC 60749-26	破壊	人体
	IEC 60749-27	破壊	機械

今回ご紹介する、IEC 61000-4-2 規格の他にも、自動車の電子機器や電子部品に対する評価を行う ISO 10605 規格や、電子部品・半導体などが製造される際に受ける静電気を模擬し、部品に対する耐性評価を行う IEC 61340-3-1/2 や IEC 60749-26/27 などの試験方法があります。

2.2 IEC 61000-4-2 の静電気試験概要

家電、医療、産業機器等を対象とした国際規格 IEC 61000-4-2 は静電気試験器およびその試験方法を規定した基本規格です。

その静電気試験の特徴を以下に記載します。

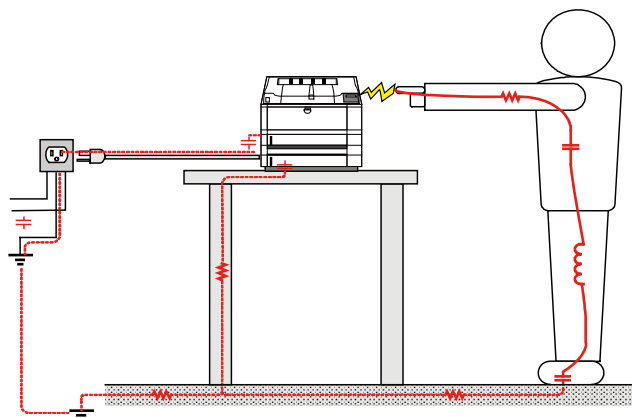
- 人体からの静電気放電を模擬し、電子機器のノイズ耐性を試験する
- 実際の静電気放電現象は気中放電のみであるが、再現性に乏しいことから、この規格では接触放電を主体としている（後述参照）

- 非常に高速な立ち上がり(1ns 以下)を持つ波形のため、数 GHz にもおよぶ高周波成分を含んでいる
- 耐電圧試験というよりも高周波電磁界への耐性試験であり、電子機器にとっては非常に厳しい試験となる

静電気は、帯電した人体による操作や機器に接触したときに放電する現象を模擬しています。

また、放電する部位は手を想定していますが、手の皮膚で触った場合の放電抵抗ではなく、鍵やドライバーなどの金属物を持った状態での放電を想定した、より厳しい条件（放電抵抗値が低い状態）での試験を模擬しています。

また、対象とする電子機器の近傍での静電気放電による影響を模擬する間接放電試験も要求しています。



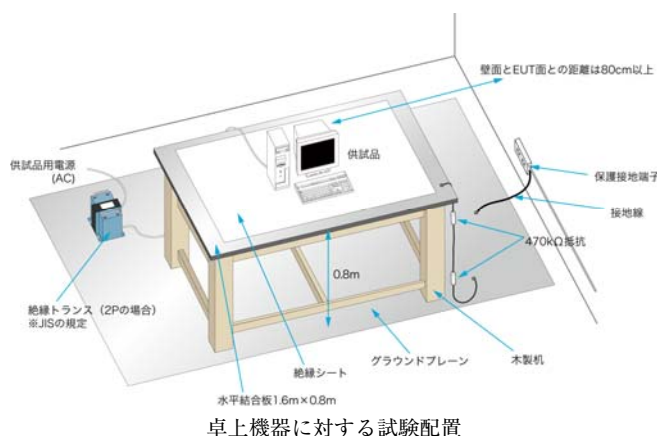
自然界で発生する静電気は、全て気中放電

■ 試験配置

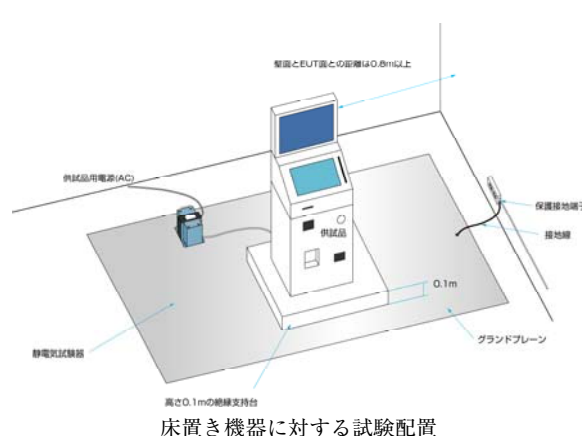
静電気試験はその静電気放電によるノイズが高周波成分を多く含むことにより、試験の再現性を得るのが難しい試験です。

このため、IEC 61000-4-2 では、その静電気試験を行う際の試験環境に対する規定が細かく記述されています。以下に特徴を記載します。

- EUT（供試装置）、ケーブル類は実際に使用する構成で配置する
- 基準グラウンド面からの高さは卓上機器の場合 0.8 m、床置き機器の場合 0.1m とする
- 試験室の壁など無用な金属物より 0.8 m 以上離れていること
- 水平結合板の大きさは 1.6 m×0.8 m で基準グラウンド面と同じ厚さで同じ材質の金属板
- 基準グラウンド面（グラウンドプレーン）は水平結合板の各辺より最低 0.5 m 以上大きいこと



卓上機器に対する試験配置

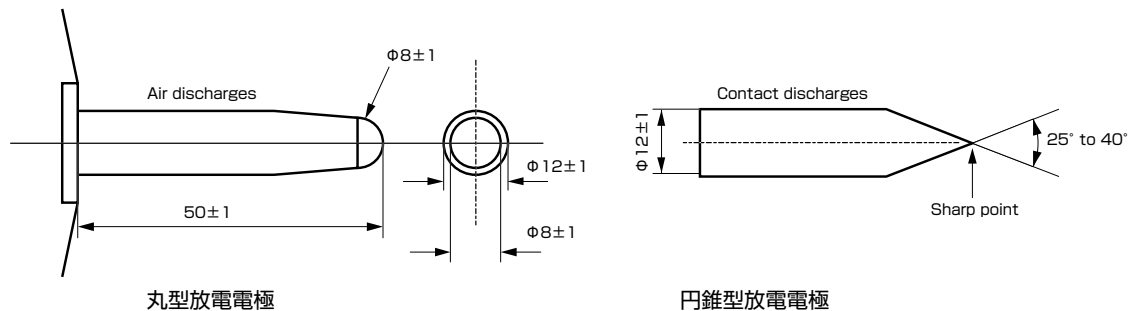


床置き機器に対する試験配置

■ 印加方法の分類

静電気の印加方法を下記に記載します。

		放電動作モード	
		接触放電	気中放電
印 加 方 法	直接放電	EUT の金属部に接触させて印加する (放電電極：円錐型)	EUT の絶縁部に近づけながら印加する (放電電極：丸型)
	間接放電	水平・垂直結合板に接触させて印加する (放電電極：円錐型)	



印加方法は、接触放電（EUT に放電電極を接触させて印加）、あるいは気中放電にて印加する直接放電と、水平・垂直結合板に接触させて印加する間接放電の 2 種類があります。

■ 直接放電

直接放電には、接触放電と気中放電の 2 種類の試験方法があります。

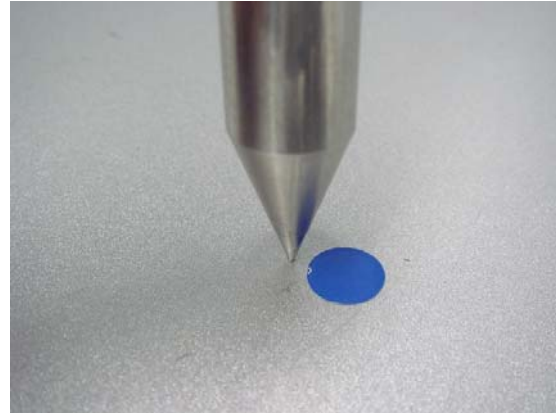
自然界で発生する静電気はすべて気中放電であり、帯電した人体からの静電気放電現象を模擬するのであれば、本来は気中放電による試験が主となります。

しかしながら、気中放電は温度や湿度、印加極性、電極の表面状態など様々な要因により、その放電現象が安定しません。また試験結果の相違などが生じやすく、試験の再現性に乏しいため、この規格では、より試験再現性の高い接触放電での試験が主体となっています。

なお、接触放電が行えない場合、例えば筐体が樹脂で出来ている場合などに関しては気中放電にて試験をおこないます。

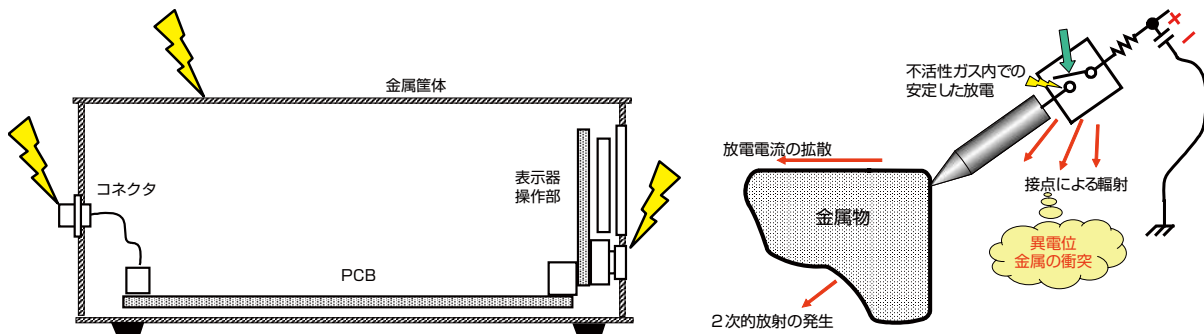
[直接放電①] 接触放電

- この試験の主体であり、気中放電よりも優先する方法です。
- 通常使用において人体が直接接触すると想定される金属部（金属筐体、金属のボタン、ネジ、コネクタ等）に適用します。
- 手のひら大の広さに 1 箇所程度を目安に印加点を設定します。（秒 20 回の放電による予備試験で、予め弱い部分を特定することができます。）



接触放電試験の現象

- 金属筐体、金属部分に印加します。
- 金属筐体に、電位変動と面電流を発生させます。
- 筐体内部への2次的放射、電磁誘導により回路に変動を与えます。



[直接放電②] 気中放電

気中放電は、接触放電ができない場合、例えば筐体が樹脂で出来ている場合などに行う試験方法です。

- 通常使用において人体が直接接触すると想定される絶縁部に適用します。

例) 表示部、操作部、外装の隙間など

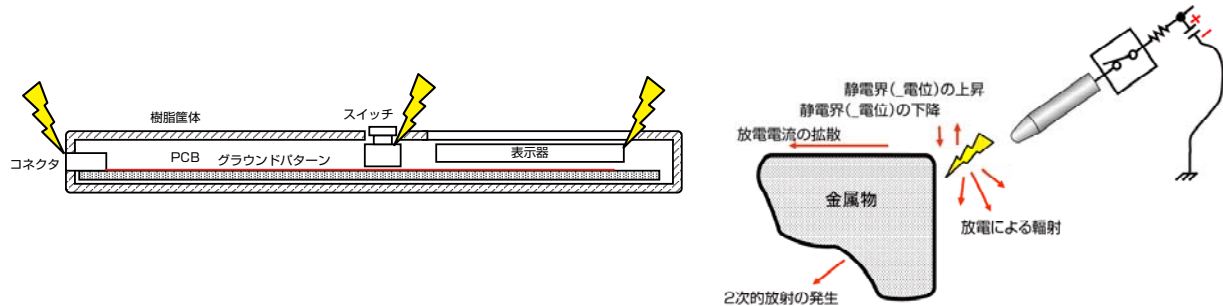


気中放電試験の現象

- 非金属部分（の隙間）に印加します。
- 金属部分があれば、接触放電を実施します。

NoiseKen Technical Report

- 内部の金属シャーシ、PCB のパターンなどに放電が発生することを想定しています。
- 放電しなくとも、電位（静電界）変動が発生します。



■ 間接放電

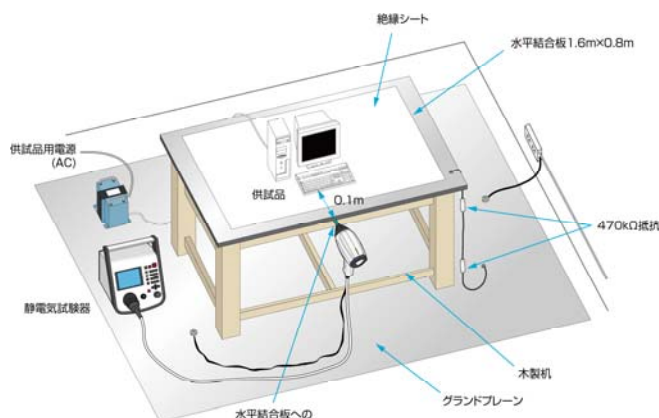
EUT が実際に使用される環境下では、その EUT の他にも様々な物（戸棚や机、電子機器、機械 etc...）が置かれています。

間接放電は、この EUT の近傍に置かれた金属体へ人体からの静電気が放電した事を想定し、その金属体の表面を流れる放電による電磁界の輻射が EUT に対してどのような影響を与えるかを模擬した試験方法です。

実際の試験では、EUT の近傍に金属の結合板を設置し、その結合板に静電気試験器の電極を接触させ、結合板に放電させる試験をおこないます。

[間接放電①] 水平結合板

- 卓上機器のみ適用
- 水平結合板の縁に対して印加します。
- EUT は水平結合板の前端より 0.1 m 離して配置します。



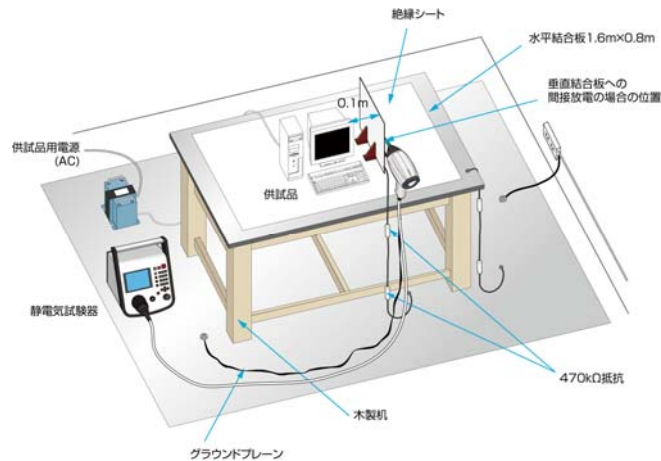
卓上機器への水平結合板を使用した間接放電



水平結合板への放電

[間接放電②] 垂直結合板

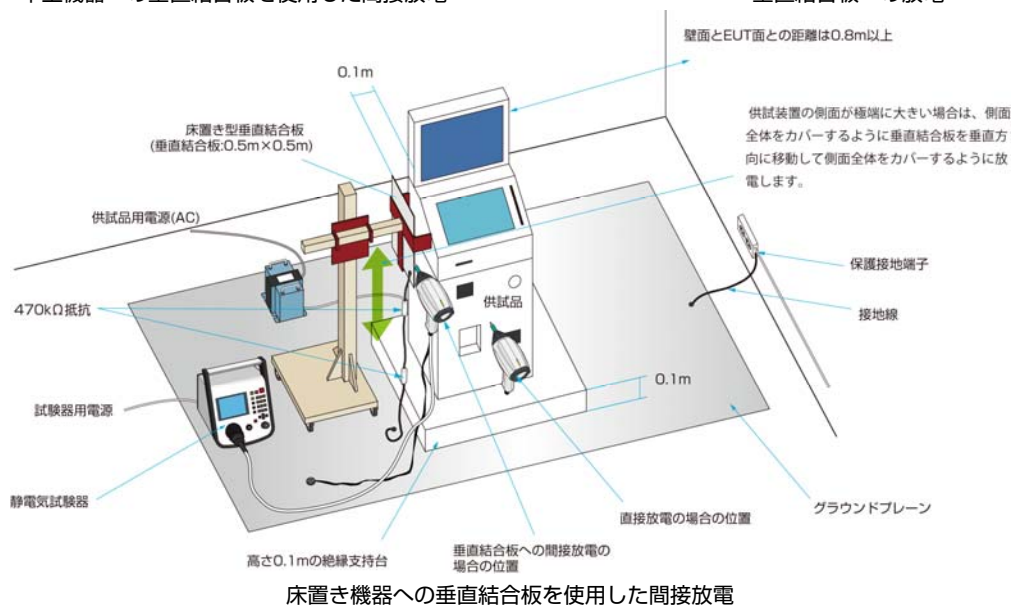
- 垂直結合板の縁に対して印加します。
- EUT は垂直結合板より 0.1m 離して配置します。
- EUT の各面に対して印加します。（通常は 4 面、ポータブル機器などは 6 面）



卓上機器への垂直結合板を使用した間接放電



垂直結合板への放電



床置き機器への垂直結合板を使用した間接放電

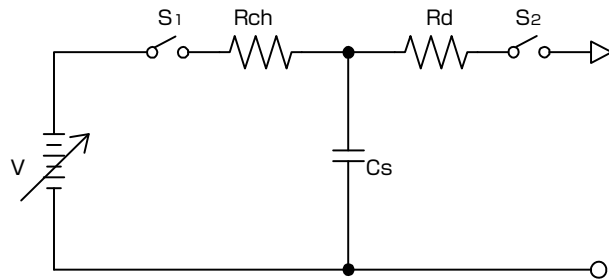
2.3 静電気試験器のメカニズム

静電気試験器の基本構成を下図に示します。

回路構成は、高圧電源 V 、充電スイッチ $S1$ 、充電抵抗 R_c の充電回路と、エネルギー蓄積コンデンサ C_s 、放電抵抗 R_d 、放電スイッチ $S2$ 、放電電極、グラウンドケーブルからなる放電回路により構成され、放電スイッチは放電電極の直前に配置する必要があります。

接触放電の尖った電極は、塗装を突き破って金属部に接触するためであり、半球状の気中放電電極は、電極に帯電した電荷を空气中に放出しにくくするためであり、球状にすることで、表面の電荷密度の集中を避けています。

IEC 61000-4-2 で規定している気中放電電極の形状と大きさ (直径 8 mm) は、気中放電の試験レベル 4 の 15kV 程度までの帯電は保持されますが、それ以上の電圧では、保持が難しくなってきます。



コンデンサ容量 C_s 150pF
放電抵抗 R_d 330Ω

放電抵抗とコンデンサ

- [放電抵抗(R_d)] 330Ω・・・人体が金属物を持って接触
- [コンデンサ(C_s)] 150pF・・・人体の静電容量

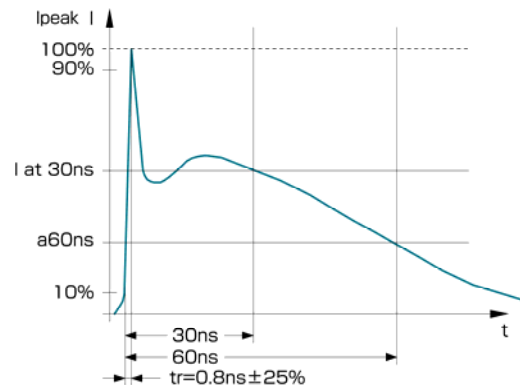
■ 放電電流波形と観測方法

右図は理想的な静電気放電電流波形です。

この波形は、数値演算による基準ですが実際の測定波形は、リングングなどの乱れが含まれます。

測定は、中心より 0.6 m 以上の大きさの金属板に取付けた電流ターゲットに印加して観測します。

下表に各設定電圧による電流規定値と許容差を示します。



レベル	表示電圧 kV	最初の放電ピーク電流 (±15%) A	立ち上がり時間 (±25%) ns	30ns での電流 (±30%) A	60ns での電流 (±30%) A
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

波形の立ち上がり時間は、0.8 ns と高速であり、非常に広帯域な高周波成分が含まれるパルスとなります。

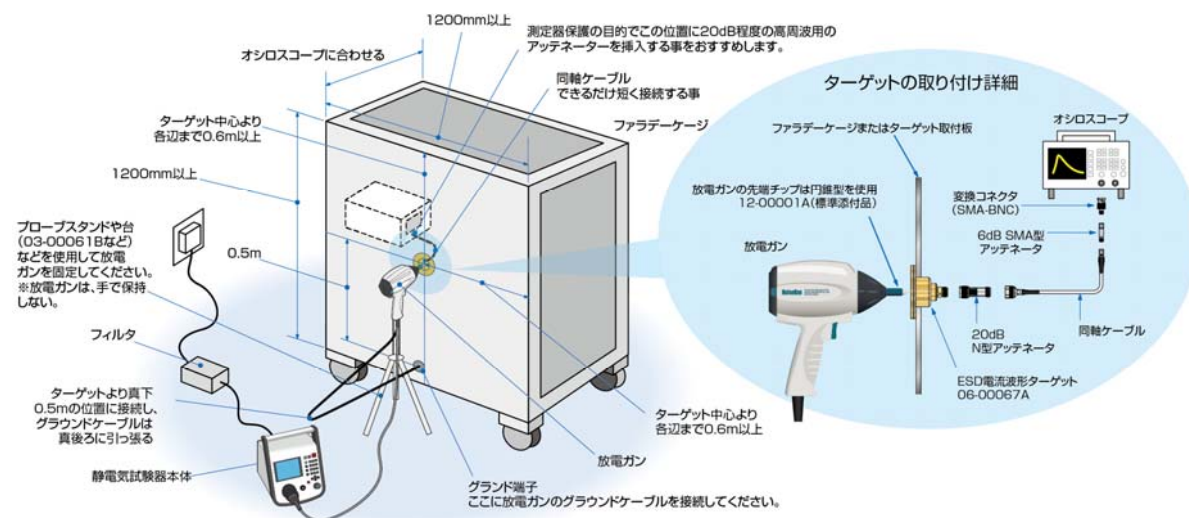
下図に静電気試験器とファラデーケージに取付けたターゲット及び測定するオシロスコープの実際の配置とその回路構成を示します。

電流ターゲットは、2Ωの抵抗がグラウンドに接続されており、静電気を印加した際に、この抵抗に発生する電圧をオシロスコープで観測し、この波形を電流値として規定しています。

放電電流波形は、第一ピークと第二ピークの2つの山で構成されます。

この波形は、人体から発生する放電電流波形を模擬したものです。静電気試験器を構成する 150pF のエネルギー蓄積コンデンサから発生する電流は、第二ピークの部分であり、第一ピークは静電気試験器の放電ガンと、ファラデーケージとの寄生容量により発生します。

このピーク電流は、グラウンド経路も寄生容量により結合してリターンする電流であり、2μH 程度のインダクタンスを持つグラウンドケーブルを経由する電流ではありません。



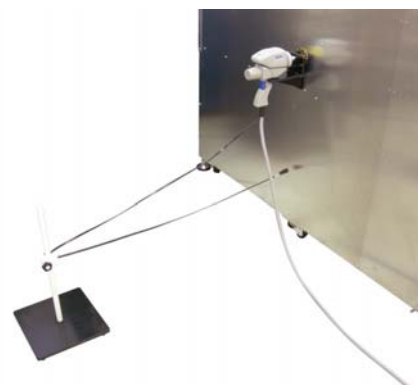
波形の検証方法



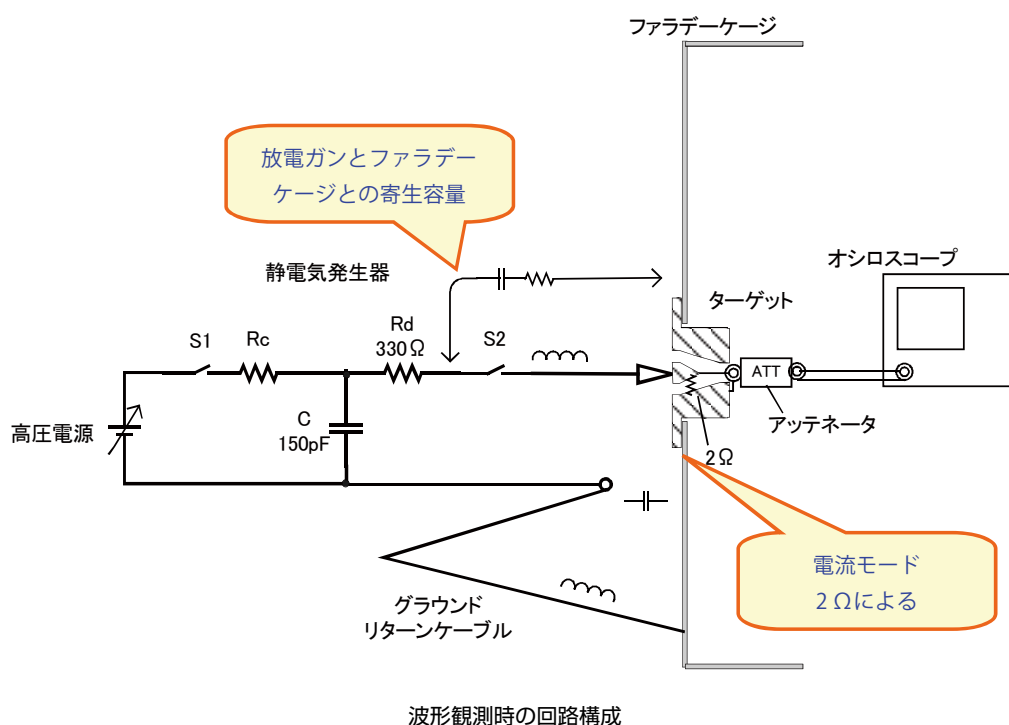
ターゲット



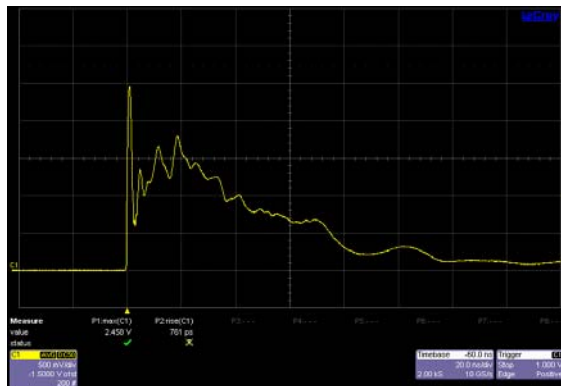
ファラデーケージ



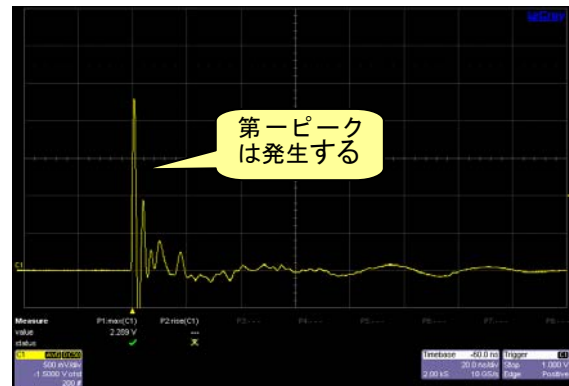
グラウンドケーブルの取り扱い



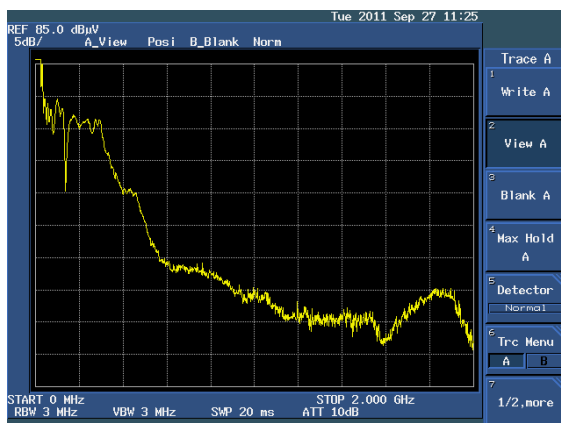
エネルギー蓄積コンデンサ、放電抵抗、グラウンドケーブルだけでなく、放電リレー及びグラウンドケーブルをバイパスするファラデーケージのグラウンド面との寄生容量が、第一ピークを形成しています。実際の EUT への印加では、EUT のインピーダンス及び EUT との間に形成する寄生容量はファラデーケージでの測定条件とは異なるため、放電電流波形は大きく変化します。また放電電流波形を観測する場合、グラウンドケーブルの配置によっても波形は変化するため、観測時には床に配置せず、後ろに引っ張って保持します。実際の静電気試験でも、グラウンドケーブルの配置による影響は大きいため、手での直接保持や、水平結合板に触れない留意が必要です。



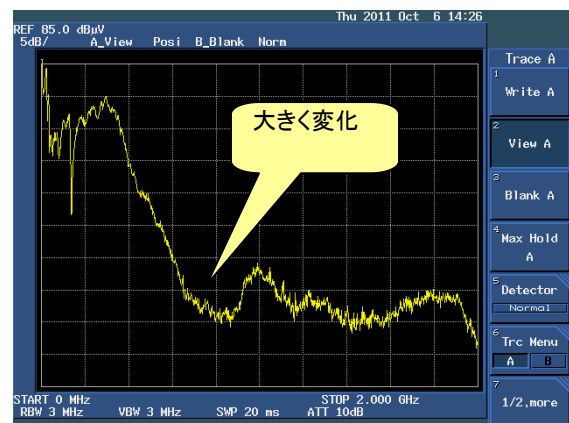
標準放電ガンの波形



CR ユニット無しの放電ガンの波形



標準放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

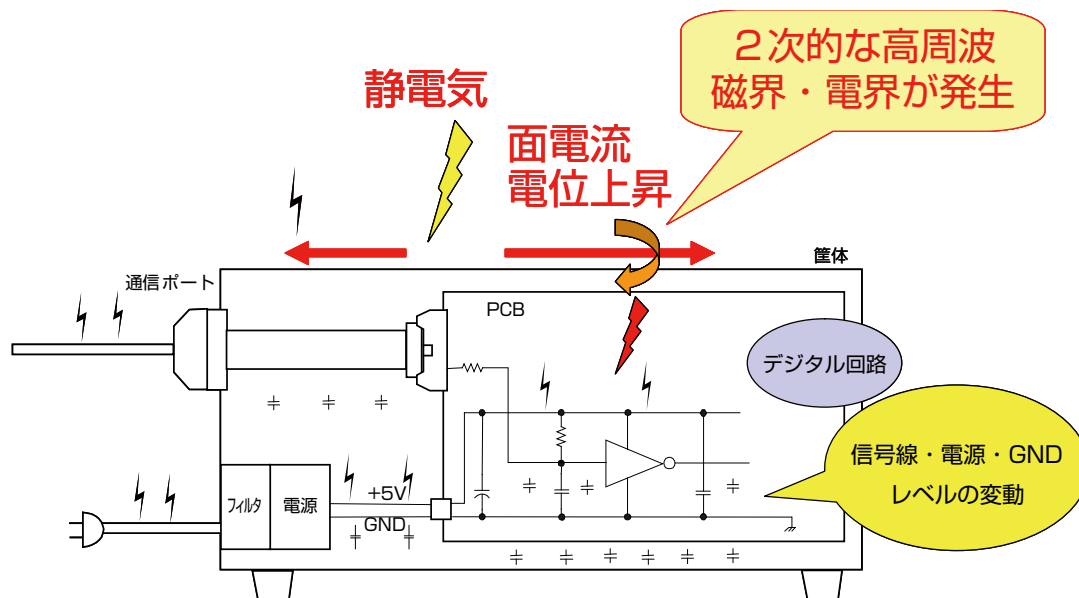


CR ユニット無しの放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

3. 試験の再現性を向上させる工夫

3.1 静電気が電子機器に与える影響

静電気を金属筐体や金属部分に印加をすると、金属筐体などに電位変動と面電流が発生し、これが、筐体内部への二次的な高周波磁界・電界となり回路に結合することで、信号線や電源・GND の電圧レベルを変動させます。また、気中放電ではその放電現象により高周波の電磁界が輻射したり、実際に放電現象が起こらない場合でも、電位（静電界）変動が発生します。



このように静電気試験は、放電自体の高周波電圧・電流の変動により、ノイズの進入経路が特定しづらく、再現性を得るのが非常に難しい試験です。

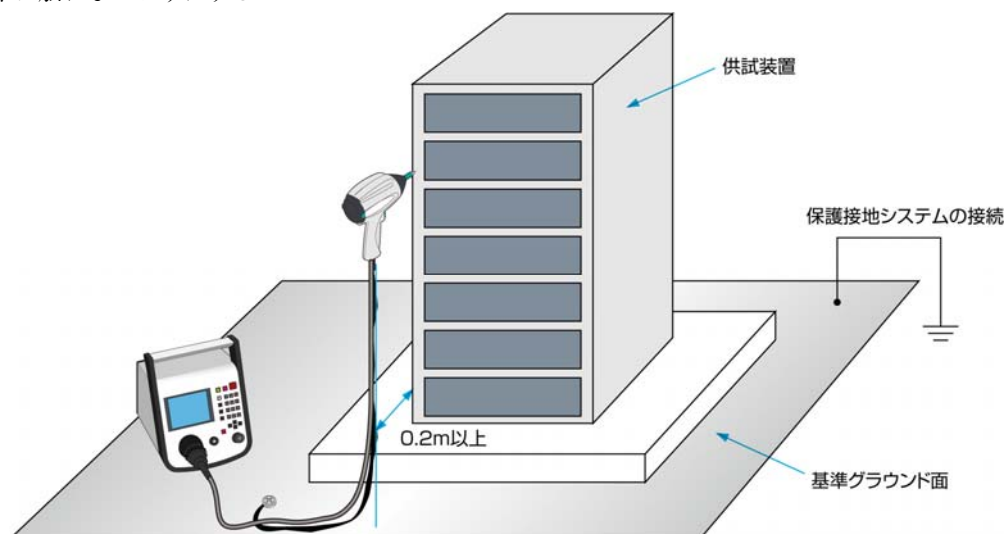
このため、高周波パルスの特性を理解して、出来るだけ試験時の操作方法・試験方法などを最適化することが、試験の再現性の向上につながります。

そこで、今回はこの静電気試験を実施するにあたり、注意すべき8個のポイントを挙げ解説します。

【ポイント1】 グラウンドケーブルの取り扱い

グラウンドケーブルは、できるだけ他の導電部より離し、またケーブルは触れないように試験します。グラウンドケーブルに導体が近づいたり、人が握ったり触ったりすると、グラウンドケーブルとその人体や導体間に別の帰還経路が発生し、静電気波形が乱れる原因となり、試験結果の差異が生まれる要因となります。

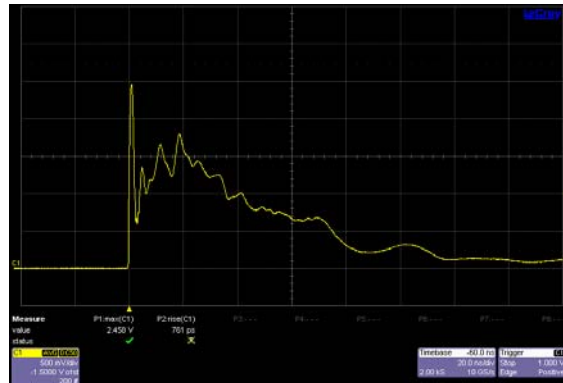
- 基準グラウンド面に低インピーダンスに接続する
- 基準グラウンド面以外の導電部より 0.2m 以上離す
- 試験中は触れないようにする



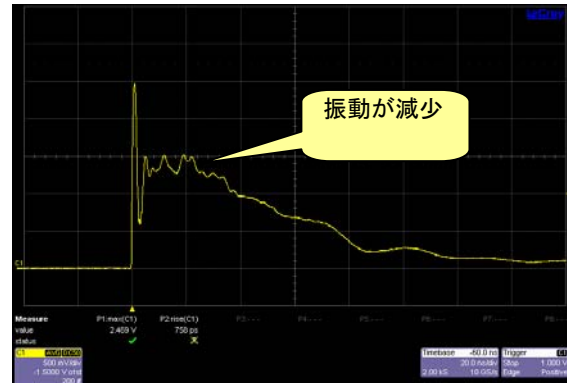
NoiseKen Technical Report

下記図はファラデーケージにて静電気試験器の波形を観測した際の、標準的な波形と、放電ガンのグラウンドケーブルを手に持ちファラデーケージに近づいた状態（本来、グラウンドケーブルはファラデーケージより真っ直ぐ後ろに引っ張った状態にします）で観測した波形の比較です。

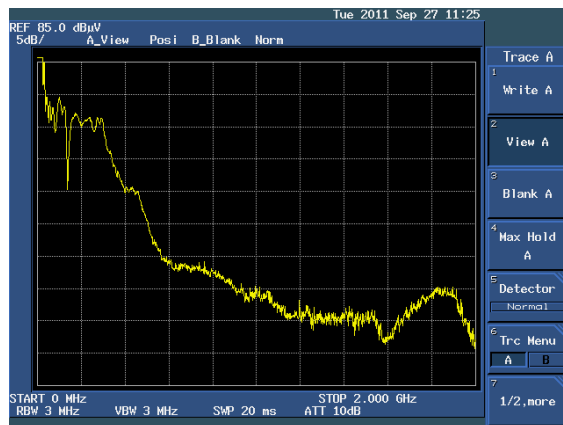
【実際の波形】



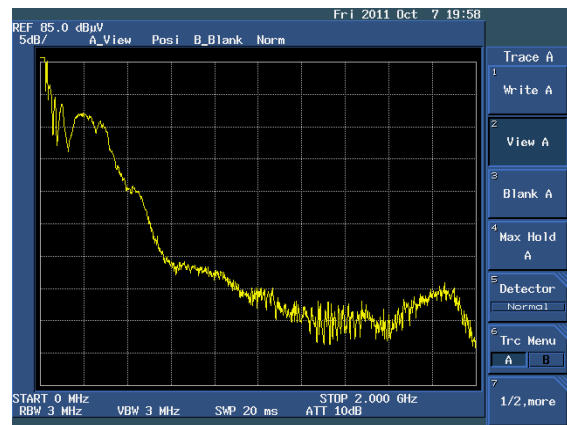
標準波形



グラウンドケーブルを手で持った波形



標準放電ガンのスペクトラム 0-2GHz



上記放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

【ポイント2】 EUT の接地接続

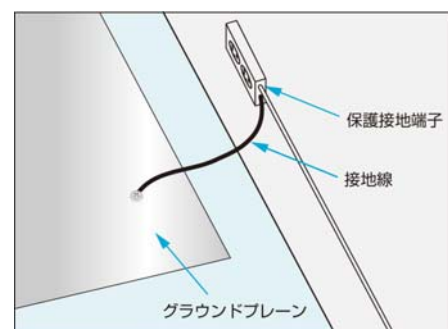
EUT に接地端子がある場合は、実際に使用する接地配線にて基準グラウンド面に接続します。

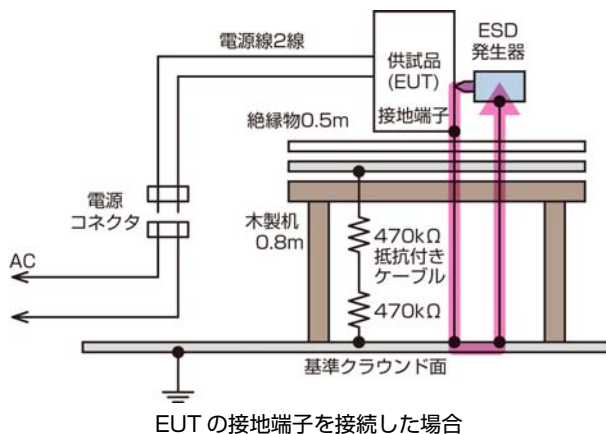
EUT の接地によってその試験結果に大きな違いが出る場合があります。これは、EUT の接地端子を使用して接地した場合は、印加した静電気の電流帰路は、直ぐに基準グラウンドに落ちるのに対し、EUT の接地端子を使用していない場合は、電源線を経由した大きなループ帰路が発生する為です。

このため、接地端子があるにも関わらず、多くの場合接地を行って

いないような機器（例えば、テレビのような機器）のケースには、接地をした場合と、接地をしていない場合の両方にて試験を行うことが考えられます。

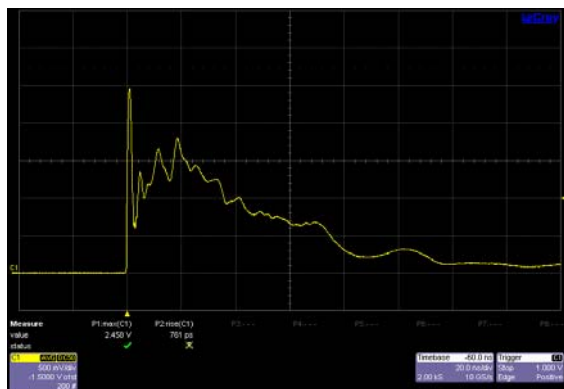
次図に示すモデルでは、接地経路による違いを示しており、この違いによる放電電流の変化は発生します。しかし静電気放電の場合は、直流的な電流ルートだけでなく、高周波ゆえの大地、テーブルに対する寄生容量による空間の電流（電荷移動）があることを忘れてはなりません。



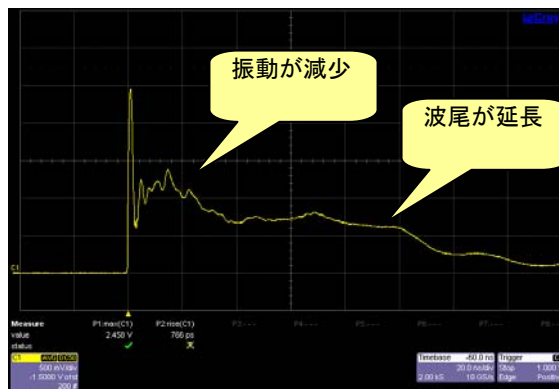


この一例として、ファラデーケージにて静電気試験器の波形を観測した際に、標準的な波形の場合と放電ガンのグラウンドケーブルを延長し帰路を伸ばして（インピーダンスが高くなる）観測した場合の比較です。

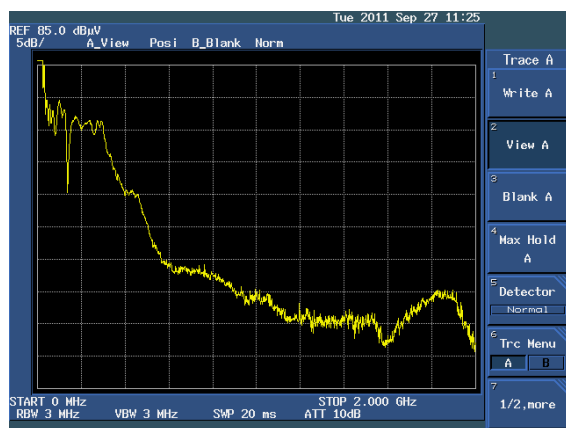
【実際の波形】



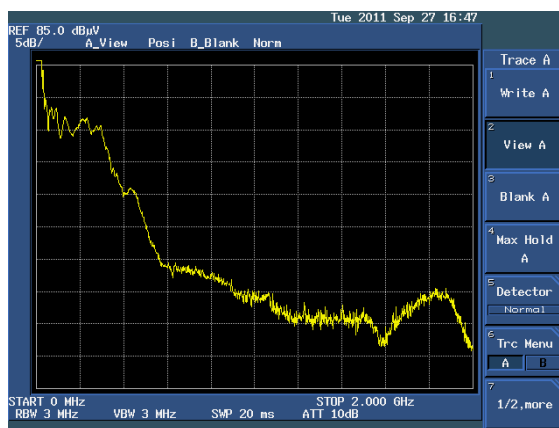
標準波形



グラウンドケーブルを延長した波形



標準放電ガンのスペクトラム 0-2GHz



上記放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

【ポイント3】 印加部に対する放電ガンの角度

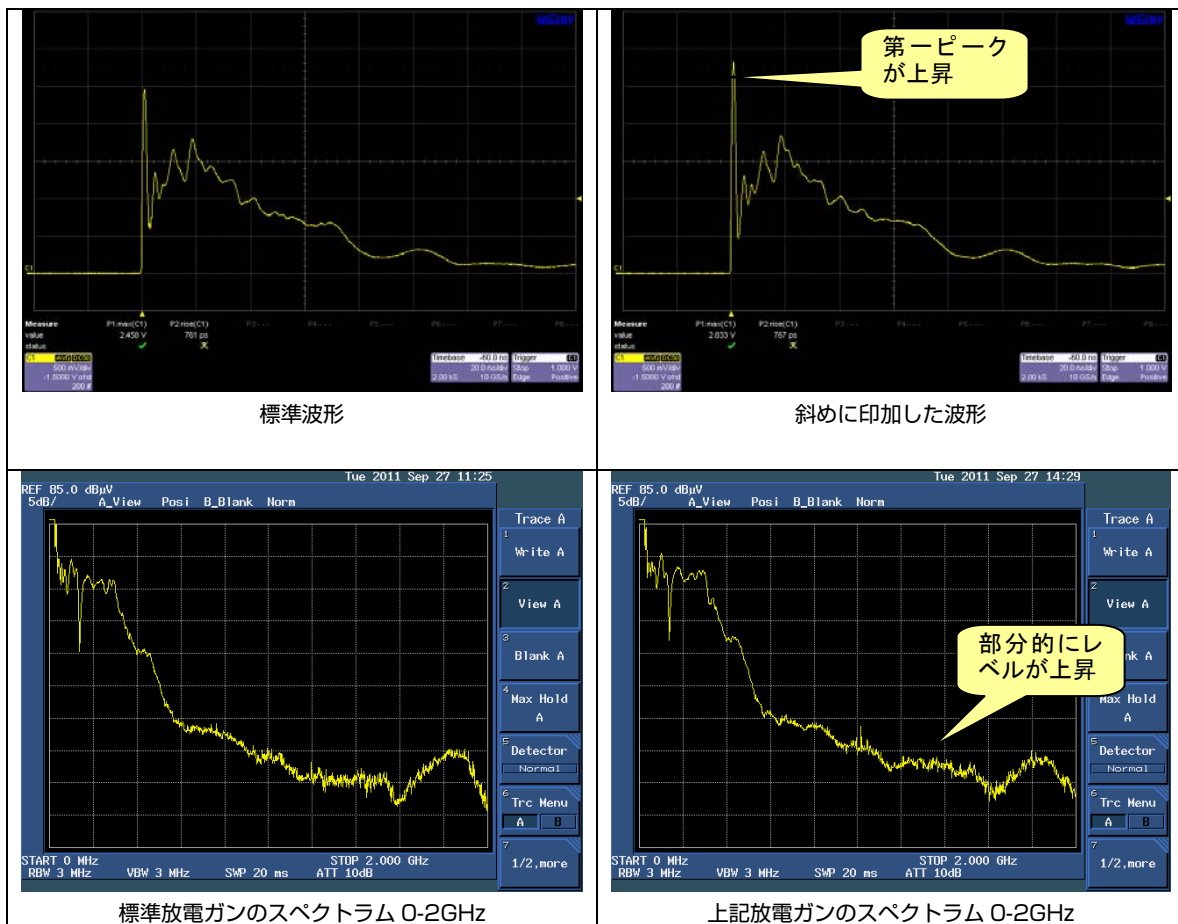
放電ガンは印加表面に対して垂直に当てます。

静電気試験の際に放電ガンを EUT に対して垂直に当てて試験をした場合と、斜めからの場合とでも試験結果に差異が現れることがあります。



下図はファラデーケージにて静電気試験器の波形を観測した際に、標準的な波形の場合と放電ガンを斜めに接続して観測した場合の比較です。

【実際の波形】



【ポイント4】 放電ガンの握り方

放電ガンを持ち試験をする際には以下の事を注意します。

- 放電ガンのグリップは片手で握る
- グリップ以外の部分を触らない

放電ガンを両手で握ったり、別の場所を触ると人体が放電回路に寄生容量を形成するため放電波形に影響を

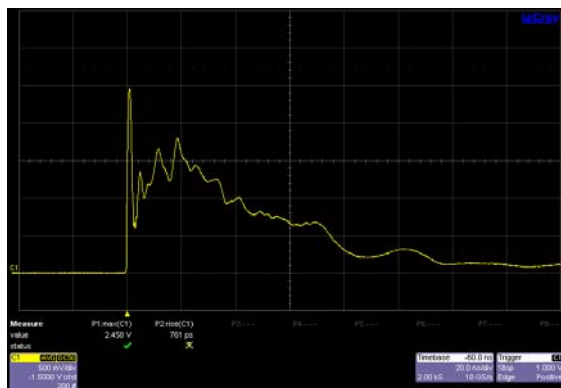
NoiseKen Technical Report

与え、試験結果に差異が生じる要因となります。

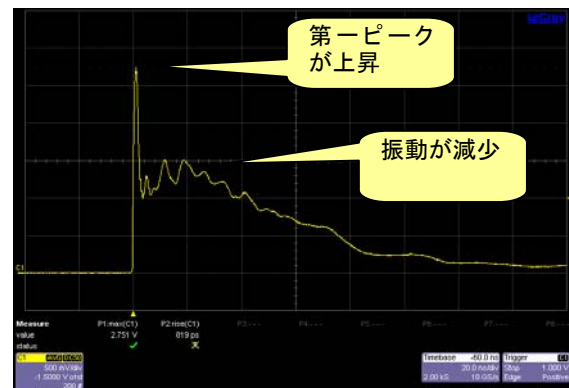


下記図はファラデーケージにて静電気試験器の波形を観測した際に、標準的な波形の場合と放電ガンの上に手を置いて観測した場合の比較です。

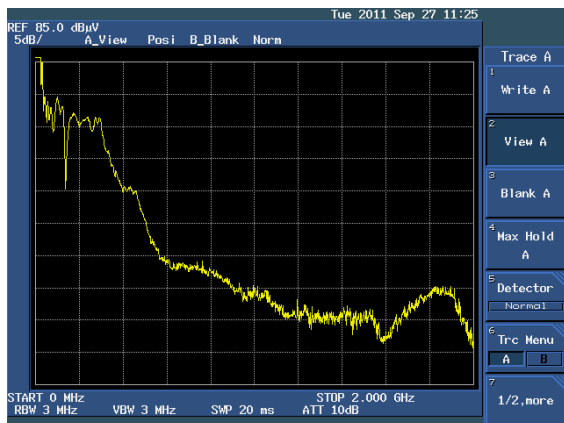
【実際の波形】



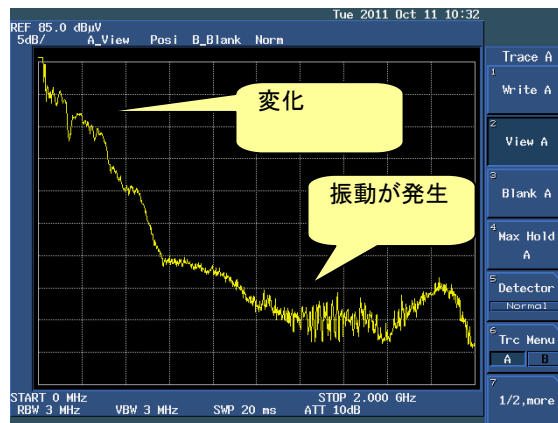
標準波形



上部に手を当てた波形



標準放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

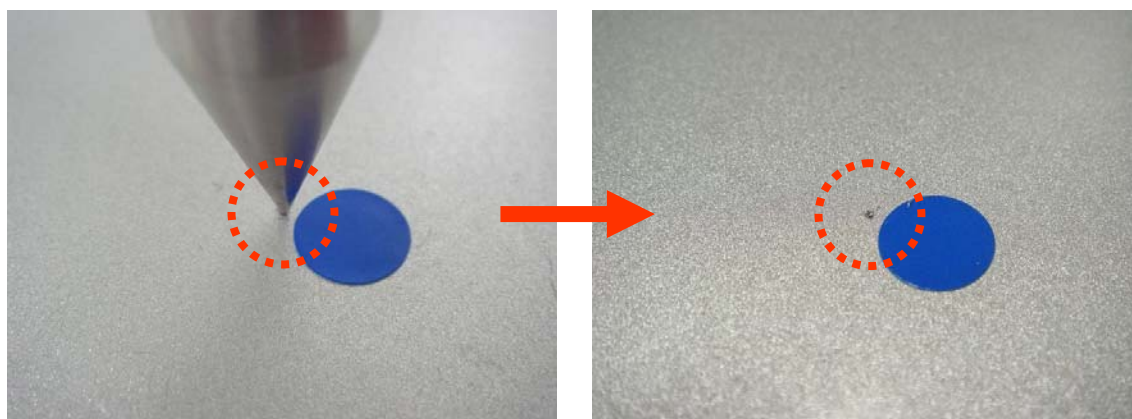


上記放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

【ポイント5】 塗装面への接触放電

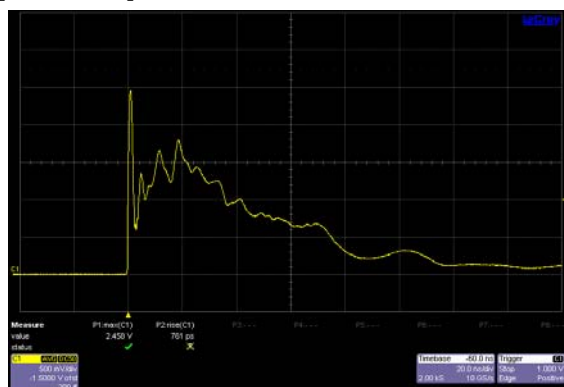
- 塗装面に印加する場合は、塗装を突き破り金属に接触させます。

塗装面への静電気印加の際には、必ず塗装皮膜を突き破り、直接静電気が金属に印加されるようにします。塗装面をきちんと突き破らずに静電気を印加すると、放電電極と EUT 間に微小なギャップ（この場合は塗装）に発生する放電現象によって放電波形が変化します。

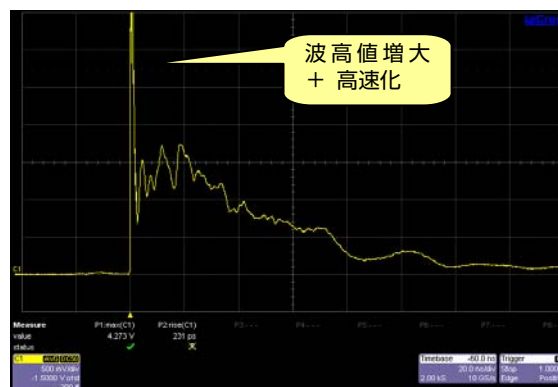


下記図はファラデーケージにて静電気試験器の波形を観測した際に、標準的な波形の場合と放電ガン先端チップとファラデーケージのターゲット間に微小ギャップを持たせて観測した場合の比較です。

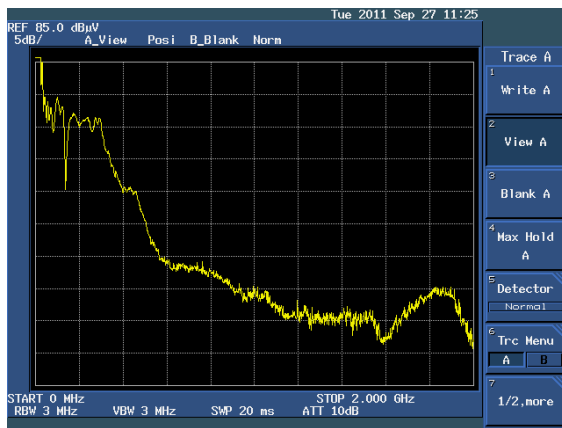
【実際の波形】



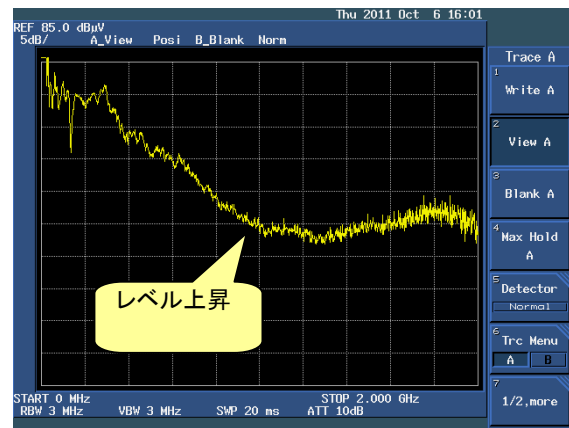
標準波形



ギャップをもたせた波形



標準放電ガンのスペクトラム 0-2GHz



上記放電ガンのスペクトラム 0-2GHz

【ポイント6】 気中放電による印加方法

○ 丸型チップを使用する

丸型チップを使用する理由は、帯電した電荷を空气中に放出しにくくするためで、球状にすることで表面の電荷密度の集中を避けています。

円錐型チップを使用すると、電荷密度の集中によりチップ先端にコロナ放電が起こり帯電した電荷が空气中に逃げてしまい、帯電電圧が低下します。

○ EUT から離れた位置でトリガを引き、印加点に接触するまでできるだけ早く近づけ、再び EUT から離してトリガを戻す

EUT から離れた位置でトリガを引く理由は、放電ガンの充電回路の切換え時に発生する輻射ノイズの影響を減らすためです。

また、実際の静電気放電を想定し、帯電した人体が指の先から対象に接触して放電され、その後に離れるまでを想定しています。(例：帯電した指が、機器のスイッチを押して離すまで)

○ 接触する前に放電しても、印加点まで接触させます。



○ 最小の試験レベルから印加を実施します。

この理由は、気中放電は、印加電圧と放電距離により、

- ① 放電距離により電流の立ち上がり時間が変化する。

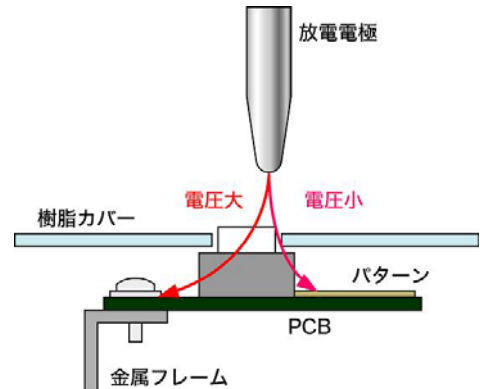
- ② 電流に含まれる周波数成分が変化する。という特性があります。

放電距離が遠くなると、実際に印加される静電気試験器からのパルス波形は立上り時間が鈍くなります。これによりパルスに含まれる高周波成分が減ることになり、結果として試験結果に違いが発生する場合があります。

また、低い電圧の静電気印加と高い電圧の静電気印加では、放電する箇所が異なる場合があります。放電は必ずしも一番近い金属体に放電されるとは限りません。

電圧が高くなると、遠くてもよりインピーダンスの低い金属フレームなどに放電します。

これは気中放電に限らず、接触放電時でも筐体内部の導体間で二次放電による、同様の現象が発生し放電経路が異なる場合があります。



【ポイント7】 除電の必要性

- 非接地の EUT やアース経路がない EUT など、帯電が伴う場合には除電する必要がある

EUT が接地されていない場合、静電気を印加し続けることで帯電が発生します。

帯電が発生すると電荷が飽和状態となり、静電気を印加しても差が小さいため、この結果電位・電流の変動が少なく、試験結果の大きな差異がでる場合があります。

供試品の除電方法は下記の3種類の方法があります。

- ① 自然放電 (印加間隔を延長)
- ② 放電抵抗ケーブルを接続する (金属部が多い筐体の場合)
- ③ カーボンブラシで拭き取る

※ イオナイザは使用禁止

※ 帯電部の電荷が初期値の 10%未満に減衰した場合、EUT は放電したものとみなします。

規格で定める放電時間間隔を 1 秒以上と定めているのは、この時間内に、帯電した電荷が自然に抜けることを意図しています。

実際に、EUT が樹脂で内部に金属体がある場合などは内部に電荷が残ったままとなることがあります。

この場合、規格上では自然放電が推奨されていますが、除電に非常に時間が掛かり現実的ではありません。規格上ではイオナイザの使用は禁止されていますが、一時的な除電を目的とする場合には有効な手段の一つではあります。ただしイオナイザを使用すると、静電気試験器の気中放電時の放電ガンに帯電した電荷そのものも除電してしまう恐れがありますので、印加中には使用できません。

【ポイント8】 気象条件等の管理

- 気中放電が湿度の影響を受けるため、湿度の変化には特に注意する

静電気試験を行う際に、特に注意すべき要素のひとつが気象条件です。

IEC の規格上では温度・湿度・気圧等の規定がありますが、その中でも特に試験結果に大きな影響を与えるのが湿度です。

周囲温度	15℃ ～ 35℃	⇒ エアコンにより調整
相対湿度	30% ～ 60%	⇒ 加湿器・除湿器により調整
気圧	86kPa (860mbar) ～ 106kPa (1060mbar)	⇒ 調整困難だが、あまり問題ない
電磁環境	試験結果に影響を与えないレベル	⇒ シールドルーム等を利用

その他

- 放電ガンの移動速度に注意 する(気中放電)
- 放電ガンと EUT との距離を固定した状態で気中放電を実施しない
- 放電ガンからの輻射ノイズ
- 補助機器の配置方法
- 水平結合板の影響 (放電ガン・EUT ケーブル等)
- 金属構造物に対する容量結合
- …etc.

4. おわりに

静電気試験は、非常に広帯域な高周波成分を含むパルスが発生させる試験のために、そのパルス波形をいかに乱さずに定量的に試験が行えるかが最大のポイントとなります。

上記以外にも、あらゆる条件が再現性(定量性)を左右する要因となり得るため、常に試験環境やその操作方法など、様々な事に細かな配慮を心がける必要があります。

参考文献

IEC 61000-4-2 規格書