

微小ギャップを伴う接触放電での静電気放電現象

1. はじめに

帯電した人体からの静電気放電（以下 ESD：ElectroStatic discharge）による電子機器の誤動作耐性試験は、国際規格 IEC 61000-4-2（自動車は、ISO 10605）により規定されています。本来、静電気放電は帯電人体のアプローチを伴う空気ギャップを介した不安定な気中放電となりますが、より安定した試験の再現性を得るために、これらの規格では、主に接触放電方式にて試験が行われています。この接触放電は、合理的な試験を実施するための規定ですが、実際の気中放電とはかなり異なる特性を示す場合があります。

ESD 試験は、GHz 帯の周波数成分を含む高速の過渡現象であり、電子機器にとって非常に厳しい試験であることは知られていますが、接触放電方式で起こりうる、特異な状況下では、更に厳しい放電現象が発生することが確認されています。

本稿では、この特異な現象とそのメカニズムを解説します。

2. ESD 試験と ESD 試験器

ESD 試験は、人体からの気中放電とは異なり、より安定した接触放電方式が主に用いられています。この接触放電は、図 1 に示す ESD 試験器（ガン）内部の高電圧リレーにより、予め供試体（以下 EUT：Equipment Under Test）に接触させた放電電極に、150 pF のエネルギー蓄積コンデンサの電荷を、330 Ω の放電抵抗を通して印加しています。

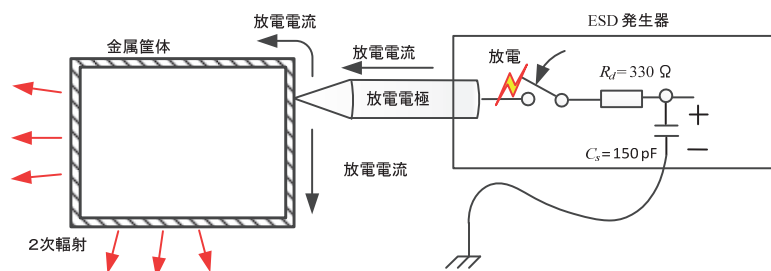
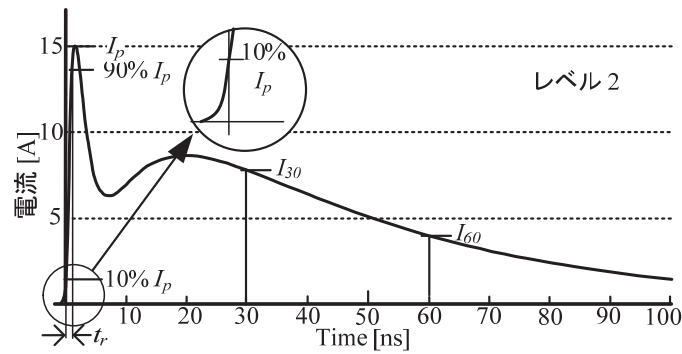


図 1 接触放電の動作

この接触放電は、空気中で火花放電する気中放電に比べ、高気圧の不活性ガスが充填された高電圧リレー内において高速で移動する接点間での通電となるため、非常に安定した放電となります（高電圧リレー内部でも接点間で微小な放電は発生しています）。

規格書では、この安定した放電となる接触放電における放電電流波形が規定されてい

ます (図 2)。この放電電流波形は、図 3 に示す 1.2m 角のファラデーケージのグラウンド面中央に取付けた 2 Ω の電流ターゲットにより、その電圧降下をオシロスコープで測定することにより得ることができます。放電電流波形は、0.8 ns という非常に高速の立ち上がりをもつ第一ピークと緩やかな第二ピークで形成されています。



レベル	印加電圧 kV	第一ピーク電流 ± 15 % A	立上り t_r ± 25 % ns	電流 at 30 ns I_{30} ± 30 % A	電流 at 60 ns I_{60} ± 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

図 2 IEC 61000-4-2 の放電電流波形規定

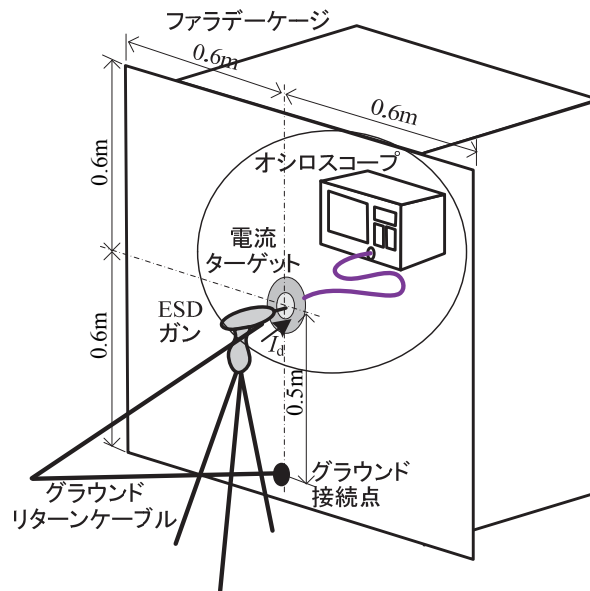


図 3 ファラデーケージによる放電電流校正

この第一ピークと第二ピークからなる放電電流の発生原理を図 4 で説明します。150 pF の蓄積コンデンサと 330 Ω の放電抵抗で構成する ESD ガンは、ファラデーケージの電流ター

ゲットに接触し、高電圧リレーのオンとともに電流が流れます。電流はファラデーケージの大きなグラウンド面を經由して、ESD ガンの 2 m のグラウンドリターンケーブルを經由してコンデンサに戻る②のルートを通ります。グラウンドリターンケーブルは、およそ $2\ \mu\text{H}$ のインダクタンスを持ち、この影響により立ち上がりは緩やかになり、この電流経路が図 4 の第二ピークの経路を作ります。一方、第一ピークは、ファラデーケージのグラウンド面と ESD ガンの全体との寄生容量である数 pF の目には見えないコンデンサにより発生します。この寄生容量の放電電流は、放電リレーと放電電極の短い①の電流ループとなり、インダクタンス成分が殆ど無いことにより $0.8\ \text{ns}$ と非常に立ち上がりの速い安定した波形となります。この接触放電は、印加電圧に比例した電流が流れますが、ESD ガンでの気中放電や実際に起こる帯電人体からの気中放電は、低い電圧では立ち上がり時間が速く、印加電圧の上昇に伴い立ち上がり時間は緩やかになり、放電電流は頭打ちとなる非線形な特性になります。

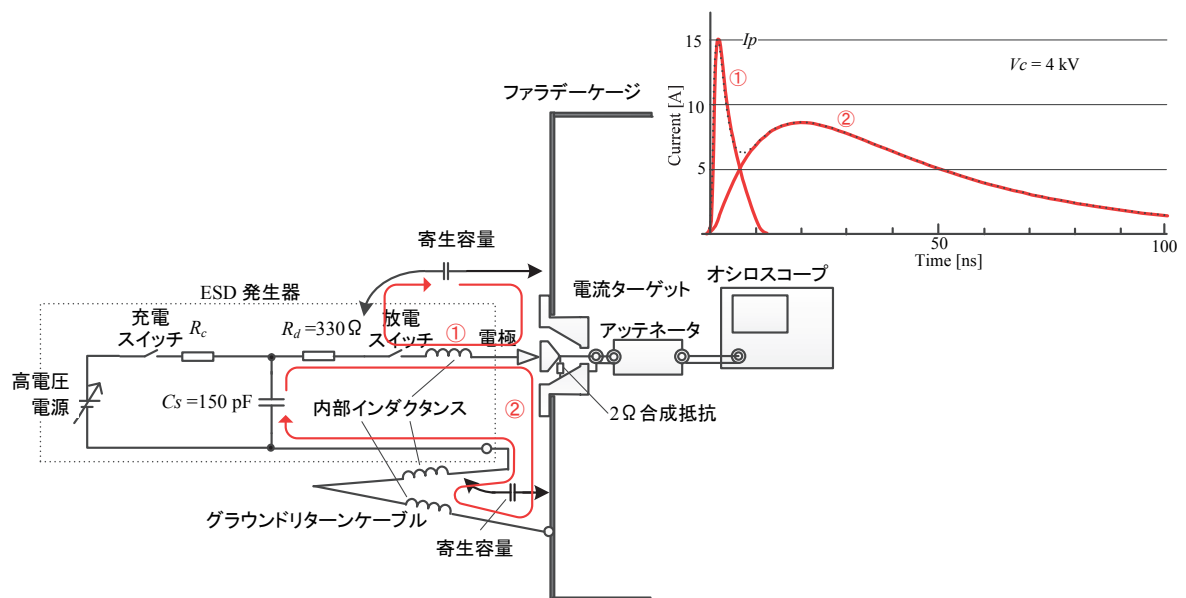


図 4 放電電流発生原理

3. 微小ギャップを伴う接触放電の現象の脅威

以下に説明する現象は、基本的にイレギュラーな状態下において発生します。本来 EUT に確実に放電電極を接触させる接触放電において僅かにギャップが生じた場合、通常の接触放電の放電電流よりおよそ 2 倍の電流ピークが発生し、また第一ピークの立ち上がり時間が 3~4 倍程度高速になります。この状態は、ESD ガンをスタンドなどで固定した場合の接触不良や、金属筐体の塗装面印加 (図 5)、更に塗装面のネジに印加する場合 (図 6) などの 2 次放電により意図せず発生する場合があります。

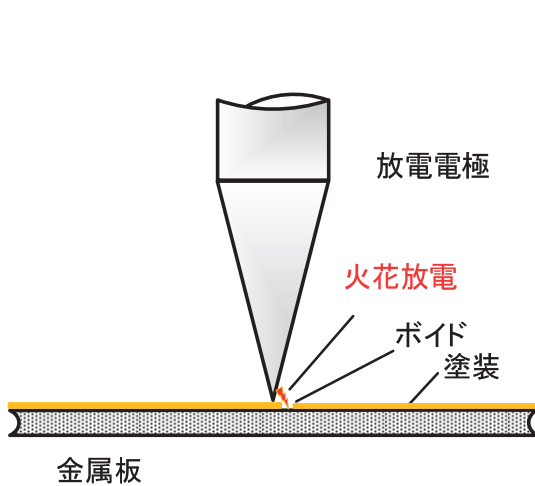


図5 塗装金属の接触不良放電の例

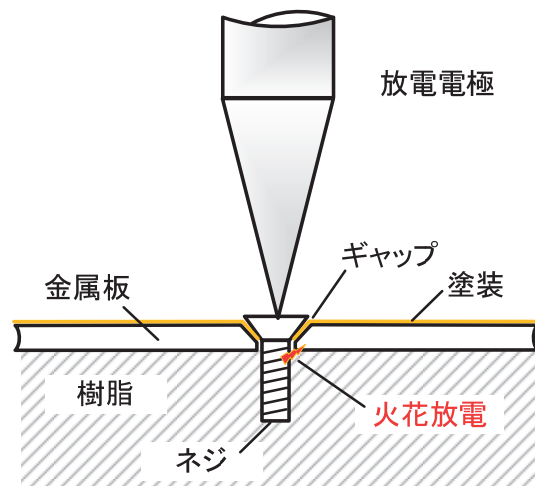


図6 塗装金属面のネジ部への印加の例

これらの状態および現象を確かめるため、次の実験をおこない検証をしました。ESD 試験器を校正するファラデーケージに取付けた電流ターゲットの、通常平面である電極形状を気中放電が安定する球状とし、隙間ゲージを用いて 30 μm (0.03 mm)、50 μm 、100 μm 、200 μm 、500 μm 、1000 μm のギャップを設けて 2 kV~8 kV での放電電流を測定しました (図7)。

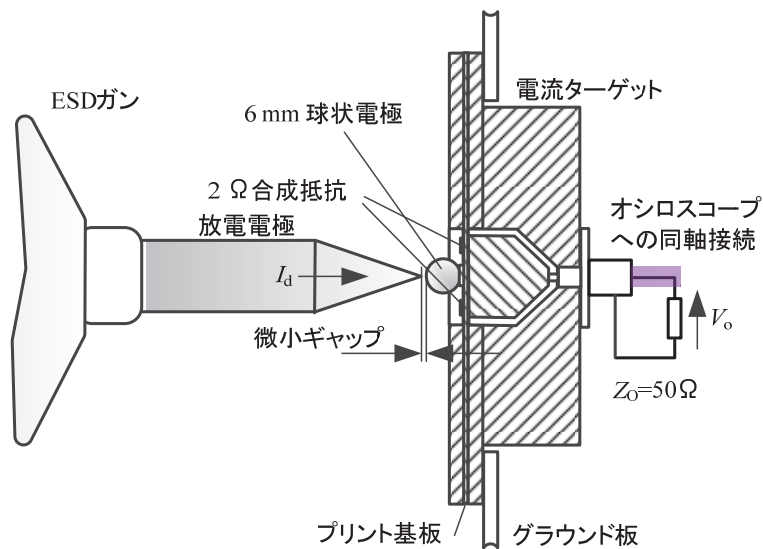


図7 微小ギャップ放電の測定構成

この各ギャップを設けた場合での放電電流の第一ピーク部分を図 8(a)~(e)に示します。ここに示す Contact は、規格で規定する接触放電の放電電流で、この接触放電の立ち上がり時間 0.8 ns に対して 3~4 倍高速かつ 2 段階の波形となり、最初の立ち上がりの方が、より高

速な特性を示しています。また第一ピークの電流は2倍以上となっています。この傾向は、30~200 μm をピークに500 μm 、1000 μm になると立ち上がりは緩やかに、電流ピークは、接触放電と同等になっていきます。これらの特徴は、第一ピーク部分だけで、第二ピーク部分は、どの条件でもほぼ一定となっています（図9）。

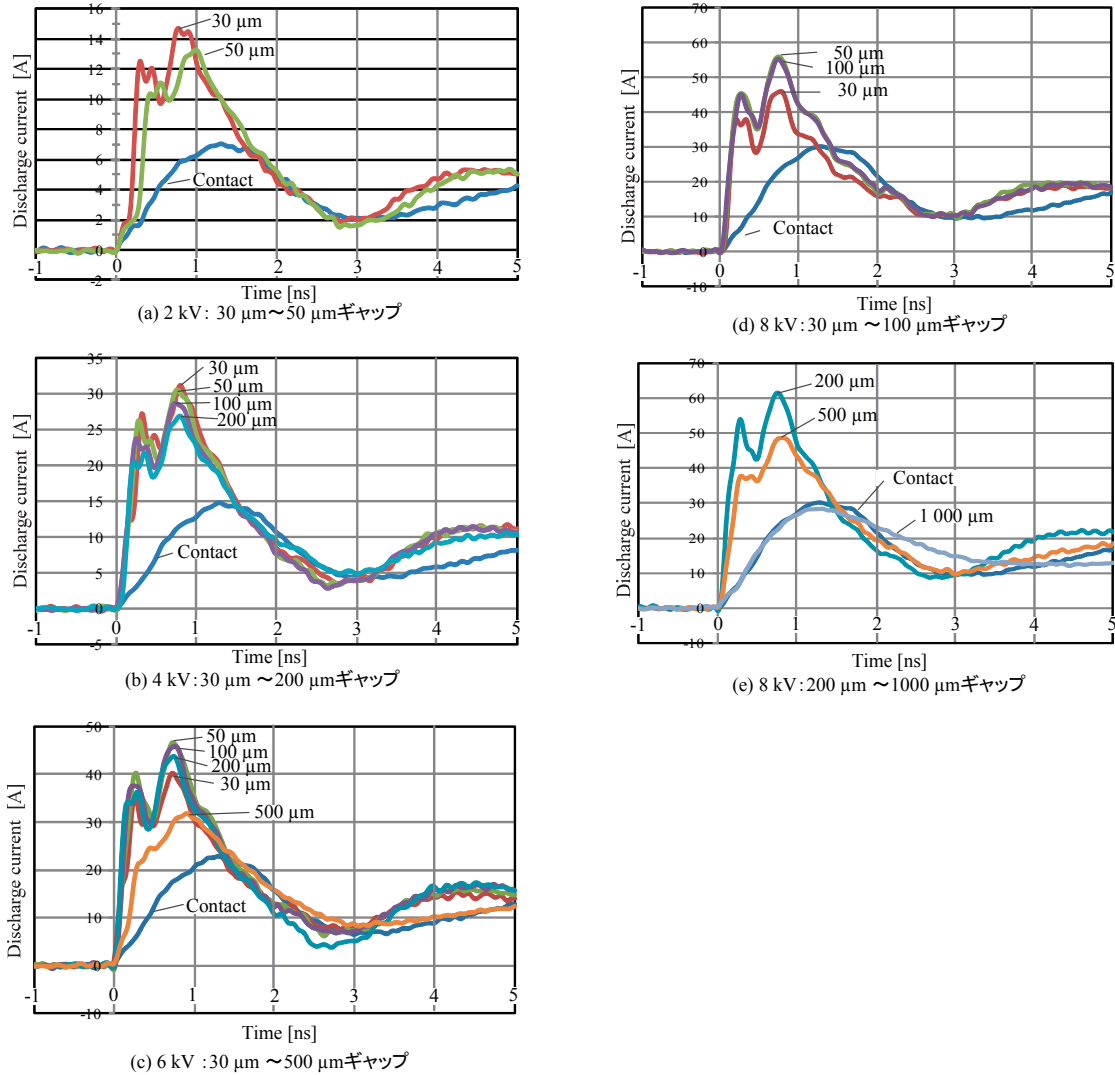


図8 2 kV~8 kV の各ギャップ距離での第一ピーク波形

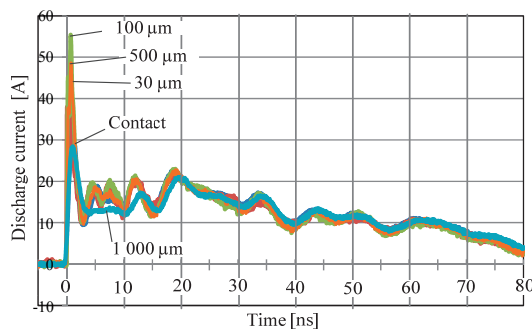


図9 8 kVでの放電電流波形（全体）

これらの特性から、横軸を印加電圧、縦軸を第一ピークの放電電流としたグラフを図10に示します。30 μm ~200 μm は接触放電より2倍以上の電流を示しています。しかし500 μm では、1.5倍程度となり1000 μm では、接触放電とほぼ同一の電流特性となります。ここで低い電圧のプロットが無い点は、印加電圧と放電距離（ギャップ）の関係で放電しなかったことを示します。

次に横軸をギャップ距離としたグラフを図11に示します。ギャップ距離0は、接触放電での第一ピークの電流を示しています。特徴的なのは、ある程度のギャップ距離までは放電電流は上昇し、それ以上の距離になると低下することです。

この結果により、500 μm 以下のギャップを介した接触放電は、立ち上がり時間が高速化し、ピーク電流が増大することで、EUTにとって非常に厳しい試験となるということがわかります。

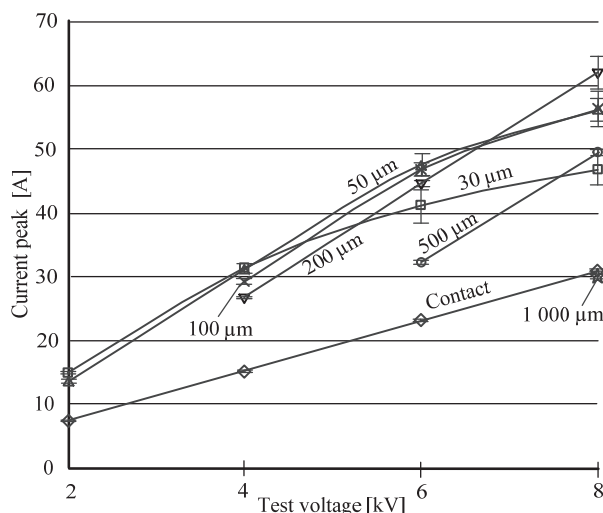


図10 印加電圧に対する
各ギャップ距離でのピーク電流

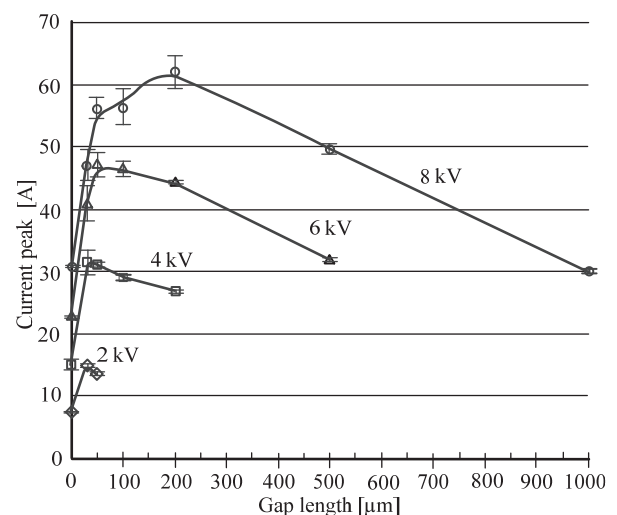


図11 ギャップ距離に対する
各印加電圧でのピーク電流

ここまでの特異現象を整理してみます。

- 30 μm ~200 μm の距離でのギャップ放電は、第一ピークの放電電流が接触放電に比べ、2倍以上になる。
- そのピーク電流は印加電圧に依存し、30 μm ~200 μm のギャップ距離で最大となる。
- 1000 μm のギャップ距離では、接触放電とほぼ同等の特性になる。
- 立ち上がり時間も接触放電の立ち上がり時間 0.8 ns に対して 3~4 倍高速になり、ギャップ距離が 1000 μm に近づくと鈍化する。

- ・ 高速の立ち上り波形は、2段階に立ち上り、最初の立ち上がり部分が特に急峻となる。
- ・ 第二ピーク部分の放電電流は、各条件でも接触放電の放電電流との差は殆どない。

4. 微小ギャップを介した特異現象の発生原理解析

ここでは、微小ギャップを介した放電電流の特異現象の発生原理を解説します。図 12 に、ESD ガンと微小ギャップによる波形観測の概念モデルを示します。

ESD ガンの放電電極をファラデーケージに取付けた電流ターゲットの球状電極に接触させていない状態では、グラウンド面と ESD ガンの放電電極、ガン内部の導電部との間に寄生容量が形成されます。また放電電極及び ESD ガンの内部配線である導電部には、非常に小さい値ですが、寄生インダクタを伴います。長さ 50 mm の放電電極ではおよそ 50 nH 程度のインダクタンスとなります。この様に、150 pF と 330 Ω の蓄積コンデンサ、放電抵抗以外に微小ではありますが、複雑な LC 回路の組み合わせとなっています。

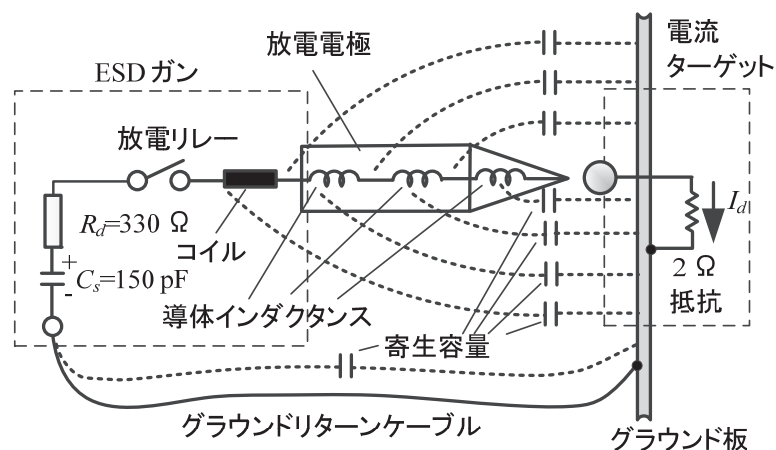


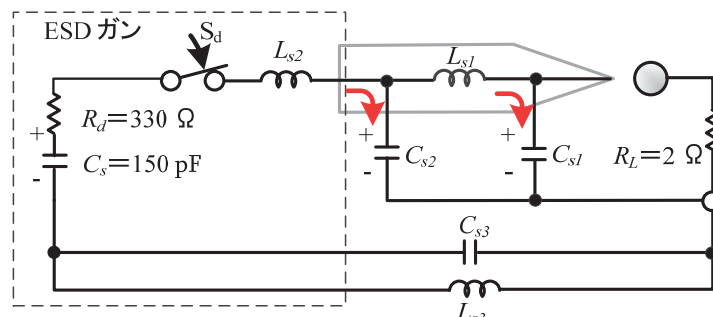
図 12 微小ギャップを伴う放電電流測定概念図

図 12 の LC 回路の寄生コンデンサ、寄生インダクタを代表的な LC 回路に置き換えた簡易等価モデルを図 13 に示します。

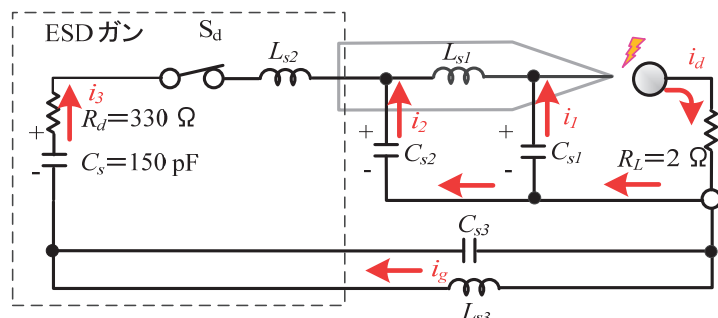
放電電極のインダクタンスを L_{S1} とし、ESD ガン内部の導体のインダクタンスを L_{S2} に代表しています。またグラウンド面に対する放電電極先端部の寄生容量を C_{S1} 、また放電電極より ESD ガンの内部側の寄生容量を C_{S2} としています。

まず図 13(a)は、微小ギャップ間で放電する前の状態です。150 pF の蓄積コンデンサ C_S に規定の電圧が充電された状態より、放電リレー S_d がオンになることで、 C_S に蓄えられた電荷は放電電極に流れ、 C_{S2} 及び C_{S1} を充電し、この電位が上昇します。この電位上昇とギャップ距離の関係によりギャップ間で火花放電が発生します。

図 13(b)は、火花放電が生じた状態です。放電は、 C_{S1} 、 C_{S2} の電位上昇によりギャップ間の電圧が空気の絶縁破壊を超えた状態の時に発生します。火花放電が発生すると、まず C_{S1} の電荷が電流ターゲットの R_L に流れます。この電流は、殆どインダクタンスを含まない、非常に高速の立ち上がり時間となります。続いて C_{S2} の電荷が、放電電極のインダクタンス L_{S1} を通して流れます。この電流も L_{S2} を経由しないため接触放電より高速になりますが、 C_{S1} による電流よりは、 L_{S1} のインダクタンスにより少し立ち上がりが緩やかになります。これがギャップ放電の現象である接触放電より、立ち上がりが速く 2 段階となる理由です。また火花放電は、時間とともに変化する抵抗でもあり、ギャップ距離が大きくなると火花長が大きくなり火花抵抗も大きくなります。微小ギャップを伴う火花放電の電流値が 200 μm 以下で最大になることから、この距離での火花抵抗が、電流ターゲットの 2 Ω に対して大きく影響しない値となることがわかります。しかし、ギャップ距離が大きくなると、火花抵抗値の増大により、電流値が低下し、時定数が大きくなるとことで立ち上がり時間の鈍化に繋がります。ギャップ距離が小さすぎても、 C_{S1} に電荷が充電され電位が上昇する段階で低い電圧で火花放電が開始するため、ピーク電流値は低くなります。この関係が図 11 のグラフで説明できます。



(a) 放電直前の等価回路



(b) 放電後の等価回路

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| C_s : 蓄積コンデンサ | R_L : 電流ターゲット抵抗 |
| R_d : 放電抵抗 | C_{S1} : 電極寄生容量 |
| S_d : 放電リレー | C_{S2} : 内部寄生容量 |
| L_{S1} : 内部導体インダクタンス | C_{S3} : グラウンド寄生容量 |
| L_{S2} : 電極インダクタンス | L_{S3} : グラウンドケーブルインダクタンス |

図 13 微小ギャップを伴う放電電流測定の簡易等価回路

まとめ

帯電した人体から発生する気中放電では、アプローチを伴う動作のため、長い火花（ギャップ）長で放電が発生し火花抵抗が大きくなるので、ここで示した特異現象は発生しません。しかし気中放電の場合、数 kV の低い電圧では、火花長が短くなり接触放電よりピーク電流が増大し、立ち上がり時間が高速化する傾向があります。但しこの気中放電の現象は、電圧が低いためエネルギー量は小さいものとなります。ESD ガンから発生する接触放電での微小ギャップ放電は、高い電圧でも放電リレーの動作により短いギャップでの火花放電が発生し、大きいエネルギーかつ高速なピーク電流の ESD 発生が可能となります。基本的に特殊な例ですが、接触不良など冒頭で説明した条件で発生する可能性はあります。また内部での 2 次放電において微小ギャップが形成されていた場合には、同様の現象が発生する場合があります。

参考文献

- (1)IEC (International Electrotechnical Commission), "IEC 61000-4-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test", Edition 2.0, December 2008.
- (2) 石田武志, 肖鳳超, 上芳夫, 藤原修, 仁田周一, “静電気放電耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象考察,” 電気学会論文誌 A, Vol.135, No.5, pp.287-293, 2015.

A large area of the page is filled with horizontal dashed lines, serving as a template for writing or drawing.

A large area of the page is filled with horizontal dashed lines, serving as a template for technical report content.

A large area of the page is filled with horizontal dashed lines, serving as a template for technical content.