

非接地導体と接地導体間でバースト状に 発生する二次放電現象

和田 紗希*, 吉田 孝博*,¹

(2015年3月5日受付; 2015年7月29日受理)

A Study on Burst Secondary Discharge between Ungrounded Conductor and Grounded Conductor

Saki WADA* and Takahiro YOSHIDA*,¹

(Received March 5, 2015; Accepted July 29, 2015)

It is necessary to research the electrostatic discharge (ESD) stress for electronics with insulated enclosures. In our previous research, the burst secondary discharge phenomenon was found. This phenomenon is multiple and burst ESD at 0.5 mm gap between ungrounded conductor and 50 Ω grounded conductor on the print circuit board (PCB). This is caused when the IEC61000-4-2 ESD-gun with the sharp electrode only starts to apply +15 kV at the air near the PCB, even if the spark discharge between the ESD-gun and the PCB did not occurred.

In this study, we developed experimental apparatus which could reproduce the burst secondary discharge and measure the current waveform of corona discharge and the voltage waveform of secondary discharge. This apparatus consists of needle electrode ionizer for corona discharge generation and PCB with ungrounded and grounded conductor. We also researched the mechanism and characteristics of the phenomenon from measured results.

From results, it is found that appearances of pulse corona and the secondary discharge have a proportion in their frequency. The burst pulse corona caused the burst secondary discharge.

1. はじめに

帯電した人体や金属、絶縁物などの帯電物と電子機器との間の静電気放電 (ESD) で、電子機器やデバイスの誤動作や破壊等の ESD 障害が発生することがあるため、電子機器やデバイスの開発現場では、機器の試作後に IEC61000-4-2¹⁾ (以下、ESD ガン) などの静電気試験器にて ESD を印加して耐性試験を行い、対策を施すことで ESD 耐性を改善している。

しかし、規格に則った耐性試験法で試験を行い、誤動作や故障が生じなくても、実環境で障害が発生してしまうことがあるため、電子機器などの実使用環境で生ずる静電気放電現象の解明が必要であり、近年は各種プラスチック製の筐体 (以下、絶縁筐体) を持つ電子機器も多いことから、我々の先行研究²⁾ では、絶縁筐体を持つ電子機器が ESD に伴い受けうる電氣的ストレス (以下、ESD ストレス) の調査についての検討がなされた。この

検討の中で、プリント基板 (PCB) 上に存在する、50 Ω 終端のオシロスコープで接地される低インピーダンスの信号線路導体と非接地線路導体がギャップ 0.5 mm で近接するパターン近傍 (上方 2 cm) で、先端の鋭い接触放電用電極を取り付けた ESD ガンを印加電圧 +15 kV で ON にすると、ESD ガンと PCB との間で火花放電が発生しないにも係わらず、PCB 上の非接地導体と接地導体間のギャップにおいて放電光を伴う静電気放電 (以下、二次放電) が発生した。さらに、速い立ち上がりを持つインパルス的で振幅が大小様々な二次放電が、1~3 秒程度にわたり密に数十回~数百回バースト状に連続発生する現象 (以下、二次放電バースト) が観測された。このような二次放電バーストが実環境で生ずれば、電子機器の誤動作等のシビアな発生要因となる危険性がある。

なお、この二次放電バーストは、ESD ガンと PCB の間に絶縁板を挿入した状態や、PCB 全体が絶縁筐体に覆われている場合には発生しなかったが、たとえ PCB 上の接地線路導体が絶縁板で覆われていても、PCB 上の非接地導体部分が露出している状態では発生していた。このような非接地導体と接地導体が近接し、さらに非接地導体が絶縁筐体から露出した状況は、実際の電子機器においても、例えばプラスチックカバー上の装飾用金具や留め金、ビス・ナット、カード差込口の金属枠などが経時変化や変形、緩み、樹脂塗料の浸透などで、接地個所との間に

キーワード: 静電気放電, 二次放電, 非接地導体, バースト状

* 東京理科大学工学部電気工学科

(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

¹ yoshida@ee.kagu.tus.ac.jp

数百 μm の狭ギャップ状態が生じることがあるといわれている^{3,4)} ことから、実環境でも二次放電バーストが発生しうる可能性がある。そのため、二次放電バースト現象の特性調査や発生メカニズムの解明が必要である。

そこで本研究では、ESD ガンの鋭い接触放電用電極と PCB 間で発生する何らかの変動が、PCB 上の二次放電や二次放電バーストの発生原因だと考え、接触放電用電極を装着した ESD ガンの代わりに針電極と高電圧電源を用いて、先行研究同様の二次放電バースト現象が再現でき、一次側となる針電極のコロナ電流と、PCB 上の二次放電の電圧波形が観測できる実験装置を開発した。そして、この装置を用いて一次側のコロナ放電と二次放電の発生傾向を調査することで二次放電バースト現象の発生メカニズムの検証と、当現象の特性調査を行った。

2. 二次放電バーストの観測方法

本研究で製作した、二次放電バースト現象の発生・観測装置の構造を、図 1 に示す。この装置は、曲率半径 0.18 mm の針電極によるコロナ放電源、50 Ω 終端のオシロスコープで接地される低インピーダンスの線路導体（接地導体）と非接地導体が近接するパターンの PCB、針電極と PCB 上の非接地導体間の距離を 0~100 mm に変化できる X 軸ステージ（中央精機製 LS-112S）から構成される。この装置は、940 k Ω （470 k Ω × 2 個）を介してアースに接続した水平結合板の上に設置した。

PCB は、FR-4（ガラスエポキシ、誘電率 4.3~4.8）、厚さ 1.6 mm の片面基板で、線路は図 2 の様にパターン幅 2.9 mm で長さ 39.5 mm の非接地導体と、長さ 50 mm の接地導体がギャップ 0.5 mm で配置されたパターンとした。なお、ギャップにおける両線路のエッジ部は、曲率半径 1.45 mm の半球状とした。

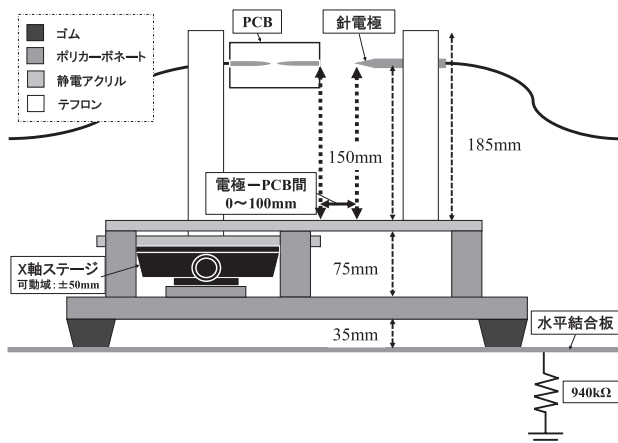


図 1 二次放電バーストの発生・観測装置の構造
Fig.1 Structure of the apparatus for generating and observing burst secondary discharge.

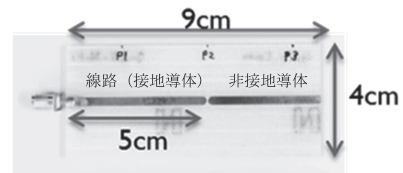


図 2 非接地導体と接地導体間の二次放電発生箇所を備える PCB（ギャップ長 0.5 mm）

Fig.2 PCB with secondary discharge occurrence gap between ungrounded conductor and grounded conductor. (Gap length: 0.5 mm)

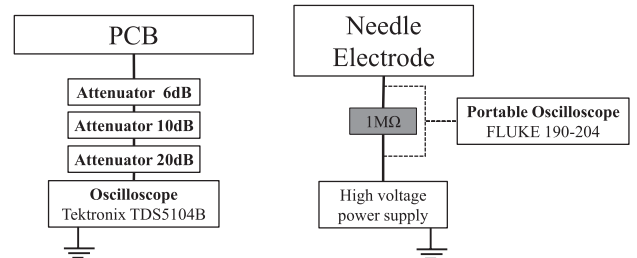


図 3 二次放電現象の測定系の機器構成

Fig.3 Diagram of measurement equipments for burst secondary discharge phenomenon.

また、PCB と針電極の周辺領域に PCB 以外の非接地導体が極力存在しない構造となるように、PCB と針電極の空間と金属製の X 軸ステージとの間に制電アクリルの平板を設置した。また、針電極と PCB を固定する支持棒にはテフロンを、装置全体を支えるベース板と支柱にはポリカーボネートを使用し、絶縁物同士の固定には、プラスチック製のねじや強力両面テープを使用した。

次に、二次放電現象の測定系の機器構成を図 3 に示す。一次側のコロナ放電の発生状態やパルス性のコロナ放電の発生頻度を計測するために、コロナ放電電流波形は、直流高電圧電源（AKT-015K3PNS）と針電極の間に挿入した 1 M Ω の高耐圧無誘導抵抗（Electrohm 製、GS2A）と、バッテリー駆動の絶縁型ポータブルオシロスコープ（FLUKE 製 190-204、帯域 200 MHz、2.5 GS/s）のレコーダモードで、掃引速度 4 ms/div で計 4.8 秒間のシャント電流測定を行った。なお、高電圧電源のグラウンドは、アースに接続されている二次放電測定系のグラウンドに接続した。

一方、二次放電によって PCB の信号線路に加わる ESD ストレスの電圧波形（以下、二次放電電圧波形）の測定は、PCB の信号線路は SMA コネクタの HOT 側に接続し、高周波同軸ケーブルと、減衰量 6 dB・10 dB・20 dB の同軸アッテネータ（RADIALL 社製、帯域 3 GHz）にて、デジタルオシロスコープ（Tektronix 製 TDS5104B、帯域 1 GHz、5 GS/s）へ $Z_0 = 50 \Omega$ で入力して行った。

なお、グラウンドは PCB に装着した SMA コネクタにて開放されている。ESD ストレスの印加に伴うアッテ

ネータの劣化は抵抗値の変化で判断し、5%の変化で新品に交換した。

後の3.1節で示す二次放電バースト中の二次放電の発生頻度算出のために、低速な掃引速度 10ms/div で1秒間分の二次放電電圧波形を測定した。この際、一次側の高電圧電源投入時の過渡状態で生じるノイズを除去するため、電源投入時のノイズでトリガをかけた上で、1秒間のディレイを用いてトリガ検出1秒後からの二次放電を測定している。また、3.2節で示す二次放電バースト内の各二次放電電圧波形として、オシロスコープの掃引速度 10 ns/div, First frame mode を用いて、連続20回分の各々の二次放電電圧波形を測定した。なお、PCBを接続せずにケーブル等を配置した状態で一次側のコロナ放電を発生させた場合や、PCBを接続しているが二次放電が発生しない場合には、本実験における二次放電電圧波形計測時のオシロスコープの振幅レンジでは波形が観測されないことや、本実験での二次放電電圧波形は、ギャップ間で発光を伴う火花放電による二次放電電圧波形であることを予備実験にて確認している。また、二次放電時の過渡電磁界による二次放電電圧波形観測に与える影響を低減するため、計測機器等のアースを接続すると共に、計測機器や電源ケーブルなどはPCBから約1m以上距離を置くこと等に留意している。

実験は、温度22~25℃、相対湿度50%~60%の環境で行った。なお、各測定後には装置やPCB、同軸ケーブル上にkVオーダーで帯電している場合があるため、測定ごとにウェットティッシュで装置や、PCB、ケーブルを拭くことで毎回除電を行い、さらに水分が残らないよう軽く乾拭きを行った。

3. 二次放電バーストの測定結果

本章では、二次放電バーストの発生・観測実験で得られた、一次側のコロナ放電と二次放電バーストとの関係、コロナ放電源とPCB上の非接地導体との距離による発生頻度の変化、二次放電電圧波形に関する測定結果を述べる。

3.1 コロナ放電と二次放電バーストの関係

本節では、針電極からのパルス性のコロナ放電の発生傾向と二次放電の発生傾向の関係について述べる。

i) 波形による発生状況の比較

10 msの間に発生したパルス性のコロナ放電電流と二次放電電圧波形の代表的な例を、図4に示す。両者は、コロナ放電源の印加電圧+15 kV、針電極とPCB間の距離1.5 mで測定した波形である。なお、今回はピーク値50 V前後の二次放電電圧が観測されたが、静電容量が小さい非接地導体からの高速かつ電荷量の少ないESD

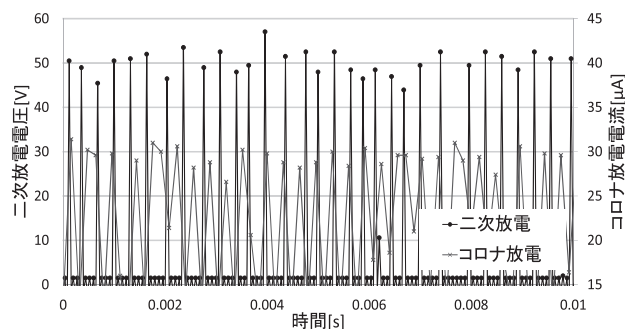


図4 パルス性のコロナ放電と二次放電の発生傾向の比較
Fig.4 Comparison of occurrence tendency between pulsed corona discharge and secondary discharge.

を帯域1GHzかつ50 Ω終端のオシロスコープで観測しているため、第1ピークが観測しきれておらず、本来の二次放電の第1ピーク電圧値はより高いと考えられる。

図4より、二次放電がバースト状に発生していると共に、一次側のコロナ放電のパルスと二次放電が同程度の頻度で発生していることが確認できる。なお、両者は異なるオシロスコープで計測したためトリガが同期しておらず、図4では放電開始から推定して同時期の波形を表示するように留意しているが、観測タイミングは厳密には一致していない。

また、放電開始直後は図4のような安定して密なバースト状の二次放電が発生するが、長時間コロナ放電を発生させ続けると、測定装置やPCBが帯電してしまい、徐々にコロナ放電や二次放電の発生頻度が低下したり、不安定で間欠的になる傾向があった。

ii) 発生頻度の相関性

続いて、コロナ放電と二次放電の発生頻度の関係を、横軸をコロナ放電の発生頻度、縦軸を二次放電の発生頻度として図5に示す。この発生頻度は、コロナ放電源の印加電圧+11 kV~+15 kV、針電極とPCB間の距離1.5 cm~10 cmに変化させた際の各10回、計350データのコロナ放電電流波形と二次放電電圧波形について、1秒間

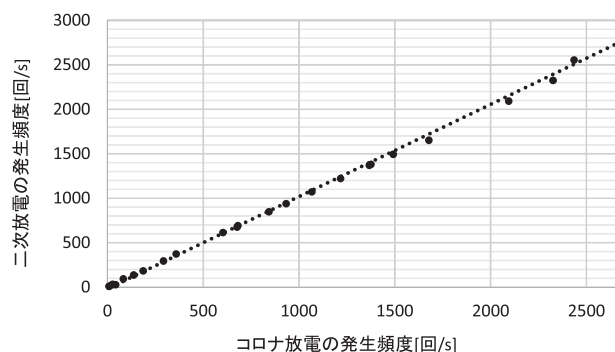


図5 パルス性コロナ放電と二次放電の発生頻度の関係
Fig.5 Relationship of occurrence frequency between pulsed corona discharge and secondary discharge.

に含まれる一定値以上のピークの個数をカウントすることで求めた、1秒間当たりの発生回数である。

この図より、パルス性のコロナ放電と二次放電の発生頻度は比例関係があり、両者の明確な相関性が現れている。故に、一次側のコロナ放電のバーストパルスの変動と二次放電バーストは、発生メカニズムとして強い関係があるといえる。

なお、二次放電は、PCB上の非接地導体の電位が上昇し、PCB上の非接地導体と接地導体間で電位差が発生することで、両導体間で二次的な火花放電が発生したと考えられる。この非接地導体の電位上昇の原因としては、一次側のコロナ放電のパルスに起因する電界変動による誘導の他に、コロナ放電による空間電荷が非接地導体に直接的に流入することによる帯電が考えられるが、現状では特定できておらず、今後の課題である。

また、予備実験において、PCB上の接地導体側を絶縁板で覆っても、非接地導体が露出している場合には、二次放電バーストが発生したが、PCBと針電極の間に絶縁板をはさんだ場合や、非接地導体まで絶縁板で覆った場合には、我々の先行研究の結果と同様、二次放電が発生しないと共に、一次側のコロナ放電にパルス状の放電電流変化が現れないことを確認している。そのため、二次放電がバースト状に発生する原因としては、針電極とPCBの間でバーストパルスコロナなど⁵⁾のバースト状のコロナ放電が発生したためであるのか、もしくは二次放電の発生による非接地導体の電位変化で一次側のコロナ放電が影響を受けてパルス性のコロナ放電となり、二次放電とそのコロナ放電への影響が相互に繰り返されることでバースト状になるのかも現時点では不明である。そのため今後は、原因を特定するための追実験を行い検討してゆきたい。

なお、本実験のPCBは非接地導体と接地導体がPCB上にあるため、PCBの絶縁板部の帯電などによる影響も考えられるが、この点に関しては、PCBの非接地導体と接地導体の線路以外の基板部分を削り、SMAコネクタと非接地・接地線路のみのPCBを使用した場合にも、同様に二次放電バーストが発生することを確認している。そのことから、現時点では、PCBの絶縁板部の帯電によるバースト状態への影響は限定的であると考えている。

3.2 コロナ放電源とPCB間の距離に対する二次放電の発生頻度

一次側のコロナ放電源の印加電圧を一定とした上で、針電極とPCB間の距離を1.5～10 cmの間で変化させた際の、放電源の各印加電圧（+11 kV～+15 kV）における、針電極・PCB間の距離と二次放電バースト発生頻度の

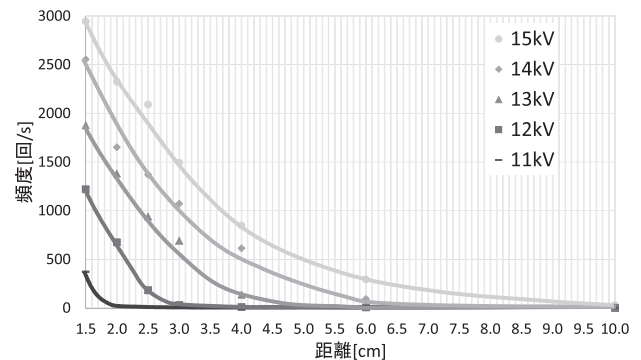


図6 コロナ放電源の各印加電圧における針電極とPCB間の距離と二次放電バースト発生頻度の関係

Fig.6 Relationship between needle electrode and PCB distance and occurrence frequency of burst secondary discharge at each applied voltage of corona discharge.

関係を図6に示す。なお、印加電圧が低く距離が長くなると、コロナ放電のバーストパルスと二次放電バーストの発生が両者共に同じタイミングで停止したり再開したり、断続的になることがあったため、そのような場合には、発生頻度は二次放電バーストが発生している区間の波形から算出した。

図6より、針電極・PCB間の距離が近いほど二次放電の発生頻度は高く、距離に逆比例して発生頻度は低くなることが分かる。また、放電源の印加電圧が高いほど、二次放電の発生頻度も高い。例えば、印加電圧+15 kV、距離1.5 cmの場合には、1秒間に3,000回程度の二次放電バーストが発生している。同様に、1 msの短い周期でバースト状に二次放電が繰り返される状況は、距離1.5 cmの場合には印加電圧+12 kV以上で出現し、印加電圧+15 kVの場合には距離3.5 cm程度でも出現する。

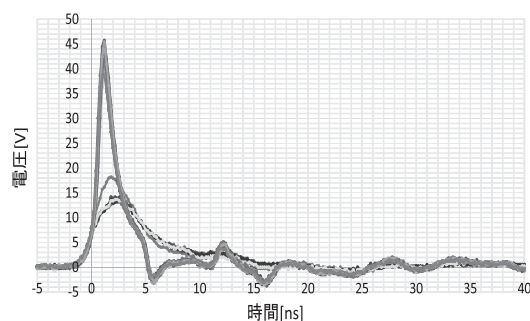
以上より、二次放電の発生頻度は、印加電圧と距離にも依存するといえる。なお、どの印加電圧および距離においても、コロナ放電のバーストパルスの発生状況と二次放電バーストの発生状況の間には相関がみられた。

3.3 二次放電電圧波形

PCB上の非接地導体から接地導体への二次放電で、接地導体に加わるESDストレスについて、強度のばらつき、距離依存性、印加電圧依存性の観点から結果を述べる。なお、本節の二次放電の電圧波形の電圧値も、前節同様、測定系の問題で本来の電圧値はより高いと考えられるため、二次放電現象の傾向を把握するために相対値として結果を考察した。

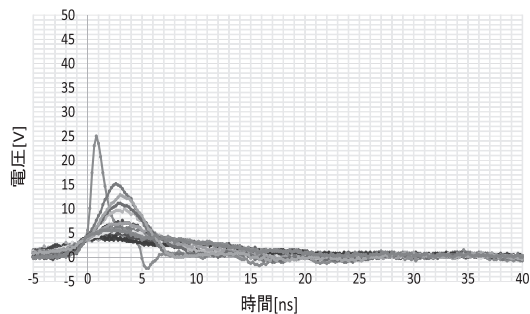
i) 二次放電の強度のばらつき

二次放電バースト中の各二次放電の強度はその都度変化する特性があるため、ここでは、1回の二次放電バースト中の連続20回分の二次放電の電圧波形を、オシロ



(a) 印加電圧 +15 kV

(a) Applied voltage: +15 kV, Distance: 1.5 cm

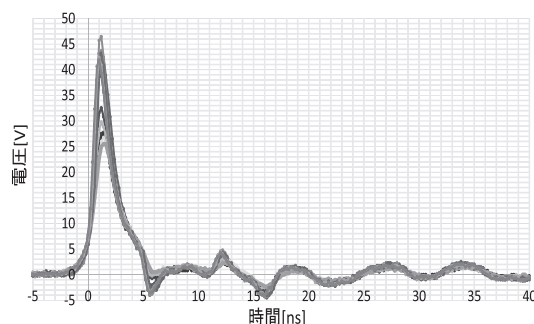


(b) 印加電圧 +11 kV

(b) Applied voltage: +11 kV, Distance: 1.5 cm

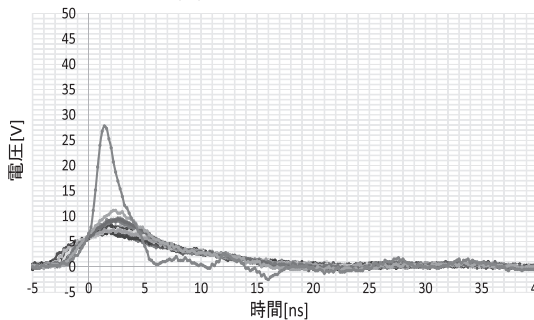
図7 二次放電バースト中の各二次放電電圧波形
(距離 1.5cm における比較)

Fig.7 Each secondary discharge voltage waveforms on a burst secondary discharge. (Comparison at 1.5 cm distance)



(a) 距離 1.5 cm

(a) Distance: 1.5 cm



(b) 距離 10 cm

(b) Distance: 10 cm

図8 二次放電バースト中の各二次放電電圧波形
(印加電圧 +13 kV における比較)

Fig.8 Each secondary discharge waveforms on a burst secondary discharge. (Comparison at +13 kV applied voltage)

スコープの First frame mode を用いて測定し、1 枚のグラフに重ねて描画することで、二次放電の強度のばらつきについて検討した。

放電源と PCB 間の距離 1.5 cm とした際の、放電源の印加電圧 +15 kV と +11 kV における二次放電バースト中の各二次放電電圧波形を、図 7 に示す。

また、印加電圧 +13 kV とした際の、距離 1.5 cm と 10 cm における各二次放電電圧波形を、図 8 に示す。

図 7 と図 8 より、二次放電の電圧波形は、同じ印加電圧、距離にもかかわらず、その時々で変化し、波形形状やピーク電圧値が大きくばらつくことが分かった。第 1 ピークの波形形状は、ピーク電圧値が高く、鋭い立ち上がり・立ち下がりを持つ形状と、ピーク電圧値は低く、立ち上がり・立ち下がり共に緩やかではあるが、第 1 ピークの時定数が長くなる形状が出現した。この第 1 ピークの波形形状は、印加電圧が高く、距離が短い場合に、前者の鋭い第 1 ピークが頻出する傾向があった。一方、印加電圧が低く、距離が長い場合に、後者の緩やかな第 1 ピークが頻出する傾向があった。

この様に二次放電の波形形状や強度がばらつく原因として、一次側のコロナ放電のパルスの発生状況や強度の変化も一因として考えられるため、今後は、パルスコロ

ナのピーク電流値と二次放電のピーク電圧との関係を調査する予定である。

ii) 距離に対する二次放電の強度

距離 1.5~10 cm の各距離における二次放電電圧の 20 回分の測定波形から求めた平均波形について、印加電圧 +11 kV と +15 kV の結果を図 9 に示す。

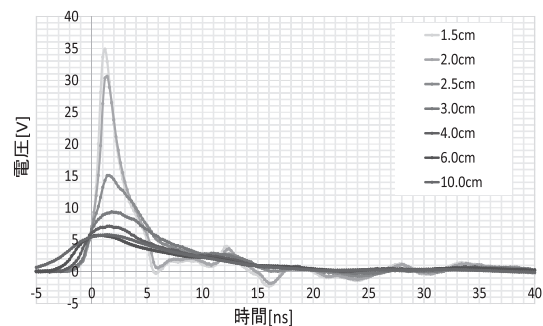
どちらの印加電圧においても、針電極との距離が近いほど PCB 線路ギャップに加わる ESD ストレスは大きくなり、最大 30V 前後の電圧が 50 Ω の線路に印加されることが確認できた。

印加電圧が +11 kV 以下になると、5 cm 以上の距離では二次放電バーストは生じず、単発の二次放電が間欠的に発生する場合もあった。

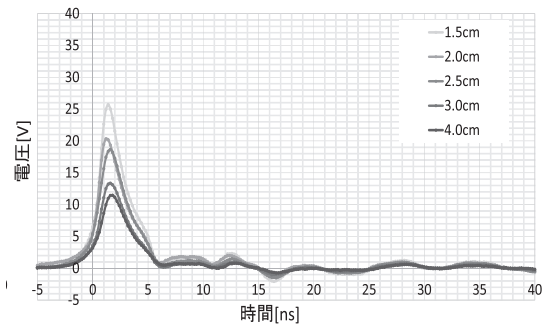
iii) 放電源の印加電圧に対する二次放電の強度

各印加電圧における二次放電電圧の 20 回分の測定波形から求めた平均波形について、距離 1.5cm と 4cm の結果を図 10 に示す。

針電極・PCB 間の距離が一定である場合、放電源の印加電圧が高いほど、二次放電の平均電圧波形も大きくなった。この特性は、距離が長い 4 cm の結果 (図 10(b)) よりも、距離が短い 1.5 cm の結果 (図 10(a)) に顕著に現れた。

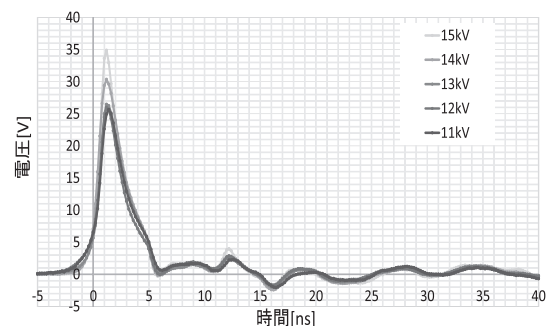


(a) 印加電圧 +15 kV
(a) Applied voltage: +15 kV

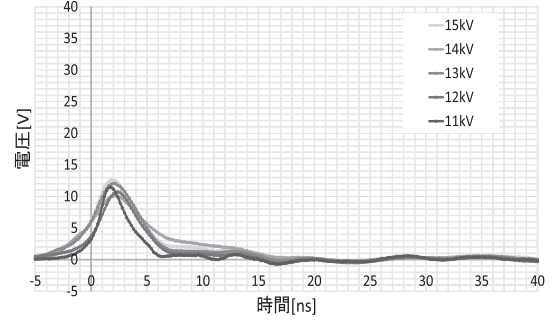


(b) 印加電圧 +11 kV
(b) Applied voltage: +11 kV

図9 各距離における二次放電の平均電圧波形
Fig.9 Averaged voltage waveforms of a burst secondary discharge at each distance. (Comparison of +13kV applied voltage)



(a) 距離 1.5 cm
(a) Distance: 1.5 cm



(b) 距離 4 cm
(b) Distance: 4 cm

図10 各印加電圧における二次放電の平均電圧波形
Fig.10 Averaged secondary discharge voltage waveforms at each applied voltage.

4. まとめ

本研究では、PCB上の非接地導体と接地導体間に発生する二次放電バースト現象の特性調査のため、一次側のコロナ電流と二次放電の電圧波形が観測できる実験装置を開発し、コロナ放電と二次放電バーストの測定を行った。その結果、以下のことが判明した。

- (1) パルス性のコロナ放電と二次放電の発生頻度は比例関係があり、両者の明確な相関性が現れている。故に、一次側のコロナ放電のバーストパルス的な変動と二次放電バーストは、発生メカニズムとして強い関係があることを確認した。
- (2) 二次放電バースト中の二次放電の発生頻度は、印加電圧と距離にも依存し、放電源とPCB間の距離が近く、放電源の印加電圧が高い程、二次放電の発生頻度も高い。
- (3) 二次放電バーストにおける二次放電の電圧波形は、同じ印加電圧、距離であってもその時々で変化し、波形形状やピーク電圧値が大きくばらつく。
- (4) 放電源の印加電圧が高く、距離が短い場合に、ピーク電圧値が高く、鋭い立ち上がり・立ち下がりを持つ第1ピークが頻出する。一方、印加電圧が低く、距離が長い場合に、ピーク電圧値は低く、緩やかな

立ち上がり・立ち下がりとなり、時定数が長くなる第1ピークが頻出する。

今後は、負極性のコロナ放電で同様の実験を行うと共に、パルスコロナ電流値と二次放電電圧値との関係を調査する予定である。さらに、発生メカニズムを特定するため、PCBの非接地導体や絶縁材料部の形状、接地導体のインピーダンス等を変化させて二次放電バースト現象をより詳細に調査する予定である。

参考文献

- 1) IEC: IEC 61000 Ed. 1.2: Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-2 Electrostatic discharge immunity test (2001)
- 2) 吉田孝博：絶縁筐体へのESD印加時にプリント基板が受けるストレスの検討，第24回RCJ信頼性シンポジウム，24E-14，pp.92-97 (2014)
- 3) 本田昌實：先端電子システムにおけるESD感受性について。静電気学会誌，**36** [5] (2012) 268-271
- 4) 本田昌實：帯電人体の運動による狭ギャップESD事象について，第24回RCJ信頼性シンポジウム，24E-04，pp.17-22 (2014)
- 5) 静電気学会，静電気ハンドブック，pp.1137-1139，オーム社 (1998)