

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560356

研究課題名(和文) 移動帯電体の気中放電における放電ギャップ長の測定

研究課題名(英文) Measurement of Spark Length for Air Discharge due to Approaching Electrode

研究代表者

高 義礼 (Taka, Yoshinori)

釧路工業高等専門学校・電子工学科・准教授

研究者番号：80335091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では静電気放電試験器(ESDガン)に対する気中放電の特性を把握し、それをもとに新たな試験法の提案をおこなうことを目的としている。研究では、まずはじめに火花ギャップ長の電極速度依存性に対する実験的な解明を目指して開発した火花ギャップ長測定装置の精度検証をおこなった。その結果、距離測定の誤差はおよそ4%以下であること、衝突時刻の誤差は、およそ+1.2 msであることがわかった。また、測定された火花ギャップ長は、パッセン則に基づく実験式によく当てはまり、他の文献値や筆者らの以前の推定結果と傾向も概ね一致することがわかった。したがって火花長測定システムの構築という当初の目的は達成できた。

研究成果の概要(英文)：It has widely been accepted that the faster the approach speed of electrostatic discharge generators (ESD guns) is, the shorter the spark length becomes. In this study, to investigate this relation quantitatively, we developed a setup for electronically measuring a spark length in air discharges of ESD guns. As a result, we found that the measurement errors of movement distances were under 4% and the error of collision time was about +1.2ms. Moreover, it was also found that measured spark lengths agree well with those calculated by using an empirical formula derived from the Paschen's law and they have the same tendency with respect to approach speeds and charge voltages as other researcher's results and our previous studies. From above mentioned results, it was completed constructing the measurement system for spark length.

研究分野：電磁環境工学

キーワード：移動帯電体 気中放電 火花長 速度依存性

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの飛躍的な進歩により IC の高集積・低消費電力化が進み、電子機器は大幅に高性能化されてきた。しかしながら、電子機器の電磁雑音に対する耐性は逆に低下してきており、その雑音対策が製品開発の現場で大きなウエイトを占めるようになってきている。近未来に差し迫るユビキタス社会ではこの傾向が一層顕著になる可能性が高く、その対策が急務とされている。この主たる原因として帯電人体からの静電気放電 (ESD : Electrostatic discharge) が挙げられ ESD により直接機器に流入する電流や放電により発生する過渡電磁界が IC の破壊や機器の誤動作を引き起こすとされている。これに対し、国際電気標準会議 (IEC : International Electrotechnical Commission) では電子機器の静電気放電に対する耐性試験法 (IEC61000-4-2) を定め、電子機器はこれにもとづき市場に供給される以前に電磁雑音に対する耐性を検査されることになっている。この試験法では帯電人体からの ESD を模擬したとされる放電ガン (ESD ガン) の使用が定められており、これは人体の静電容量とみなされた集中コンデンサに蓄積された電荷が皮膚抵抗とみなされた集中抵抗および金属の先端電極を通して放電 (接触放電) をおこなう構造になっている。このように IEC の耐性試験法では ESD ガンは火花放電を介さない接触放電で使用するを基本とするが、実際の帯電人体からの放電は、体表面に広く分布した電荷が指先などを通して火花を介しておこなわれる気中放電となるので、両者は放電の状況が本質的に異なる。このような違いから耐性試験をパスしても実使用で誤動作が発生するという問題が後を絶たない。したがって、上述の問題を克服するためにはまず気中放電の諸特性を明らかにすることが必要であり、申請者はこれまで、その解明に努めてきた。これまでの研究で浮かび上がってきた気中放電における未解明問題のひとつとして、帯電体の移動速度の放電電流波形への影響がある。具体的には、帯電体の移動速度が速い場合は遅い場合に比べて放電ギャップ長 (火花長) が短くなる現象である。よって、本申請の研究内容は、気中放電における上記現象のメカニズム解明とし、将来の新たな国際的な静電気対策試験法の提案につなげていきたいと考えている。

2. 研究の目的

現在の電子機器の静電気対策試験は接触放電試験であり、これは帯電人体からの放電が気中放電である事実と異なるため、試験をパスした機器であっても誤動作が後を絶たないという問題がある。したがって、より現実に即した新たな静電気対策試験法を提案することが必要となることから、申請者はこれまで気中放電の諸特性について調べてき

たが、その中で気中放電においては帯電体の速度が放電電流波形の立ち上がりに影響することを指摘してきた。申請の研究では帯電体の速度と放電ギャップ長との関係を実験的に明らかにし、その結果をもとに現象発生のメカニズムを解明する。このような基礎データを蓄積し、新たな静電気耐性試験法を提案することが最終目標である。

3. 研究の方法

火花ギャップ長測定のための実験装置を図 1 に示す。気中放電用電極 (直径 8 mm, 長さ 50 mm, 先端は直径 8 mm の半球面) を取り付けた ESD ガン (NoiseKen ESS-B3011, GT30R) を固定し、この電極先端にグラウンドに接地された直径 50 mm のステンレス製円板電極を衝突・放電させる仕組みになっている。円板電極はモータに接続されたアクチュエータに取り付けられて直線的に移動し、その移動速度はレーザドップラ速度計 (Canon LV-20Z, S-100Z, P-20Z) で測定される。速度データは電圧データとしてデジタルオシロスコープ (帯域 40 MHz) の ch.2 で測定される。なお、速度と出力電圧は比例関係にあり、校正グラフが提供されている。円板の ESD ガンへの衝突時刻は、速度データが急激に零に落ち込み始める時刻とした。一方、放電により発生する過渡電界をオシロスコープの ch.1 に取り付けたモノポールアンテナで電圧波形として測定し、その電圧波形の立ち上がりでトリガをかけることによって放電発生時刻を特定した。したがって、放電発生時刻から衝突時刻までの速度データを取得し、これを時間積分することで火花ギャップ長が求められる。実験は、ESD ガンの充電電圧を +1kV から 1kV きざみで +8kV までとし、また、円板の放電発生時における移動速度を 20mm/s (Slow approach) と 100mm/s (Fast approach) の 2 種類として、各充電電圧で移動速度ごと

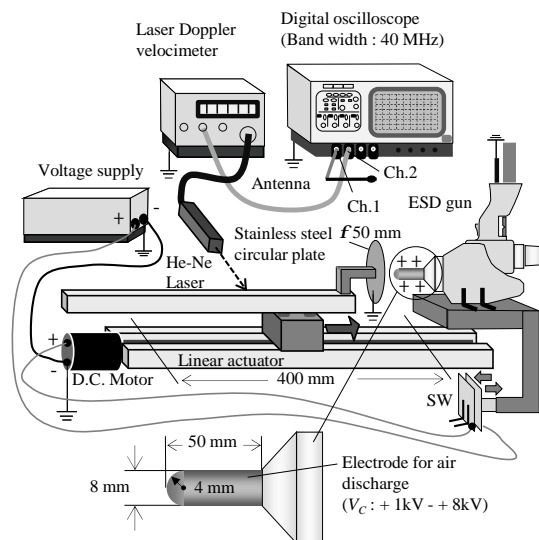


図 1 移動するグラウンド円板による衝突放電の際の火花ギャップ長を計測する実験装置図

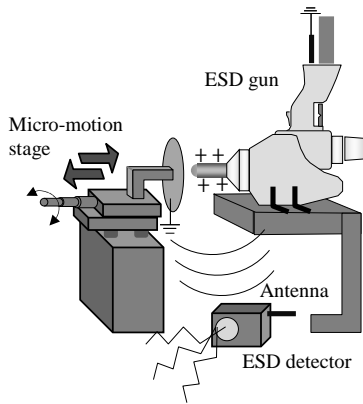


図2 固定電極における火花ギャップ長の計測

に10回ずつおこなった。
 上記実験に先立って、ステンレス円板を固定した場合（速度 0 mm/s に相当）の火花ギャップ長の計測をおこなった。この場合の実験配置を図2に示す。ステンレス円板は微動ステージ（KOHZU XM10A-C2）に固定し、ESDガンを充電した後に手でゆっくりと移動しながら火花放電を発生させた。放電の発生はESD検出器（SANKI ES-300V）のブザーの鳴動で確認した。次に、放電発生地点からESDガンの電極先端までの距離をステージに付帯のカリパーで読み取り火花ギャップ長とした。

図3は放電発生から衝突までの速度計の出力波形を示している。横軸は時間を、左右の縦軸は移動速度およびこれに対応する速度計の出力電圧を示す。黒の実線はステンレス円板の移動速度 $v(t)$ を、灰色の実線はオシロスコープ ch. 1 のモノポールアンテナに現れた電圧をそれぞれ示している。アンテナ出力が見られる時刻が火花放電発生時刻であり、

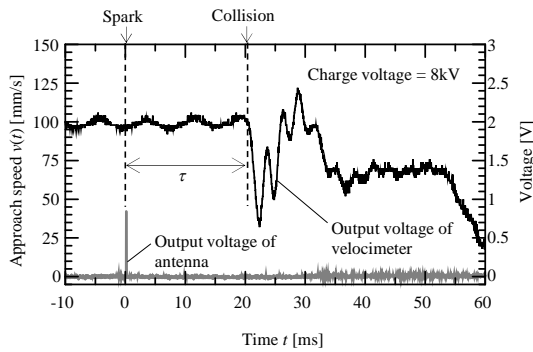


図3 レーザドップラ速度計から出力される速度データ

速度データが急激に落ち込み始める時刻が衝突時刻である。時刻 t の電極の移動速度を $v(t)$ 、火花ギャップ長を δ とし、 $t=0$ で放電が発生し、 $t=\tau$ で衝突したとすれば、そのときの火花ギャップ長 δ は、

$$\delta = \int_0^{\tau} v(t) dt \quad (1)$$

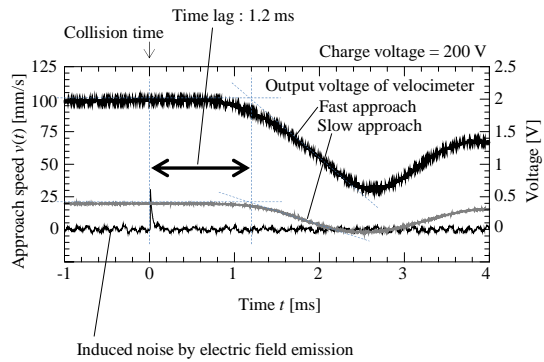


図4 衝突から速度データが下降し始めるまでのタイムラグの測定結果

で与えられる。
 むろん、本装置においても、速度計の内部処理時間による速度データの出力遅れや周波数特性による衝突時の速度データ立下りにおけるなまり、ESDガン等の固定の緩みに起因する衝突時刻のずれの影響を受ける。このため筆者らは実際に衝突した時刻と衝突により速度計の波形が低下し始める時刻との時間差を計測した。結果を図4に示す。横軸および縦軸は図3に同じである。衝突時刻は以下のように特定した。ESDガンの充電電圧を設定可能な最小値である200Vにして円板を衝突させる。この際、Paschen則によれば大気中ではおよそ350V以下では火花放電がおこらないと言われていることから、円板が限りなく衝突に近づいた際のパッシェンミニマム以下の距離（10 μm 以下）で生ずる電界放出の時点をも衝突とみなすことができる。この電界放出に伴う過渡電界をアンテナで計測し、アンテナ出力電圧の立ち上がりでトリガをかけることにより衝突時刻を特定した。なお、実際には数 μm 程度の距離で電界放出が起きるが、この影響は100 μm 以上の火花ギャップ長を計測対象とすれば十分小さいので無視できるものとした。図4を見ると、高速接近、低速接近ともに衝突時刻からおよそ1.2ms遅れて速度波形が低下し始めていることがわかる。したがって、以降の実験データは速度データの電圧が下降し始める時点より1.2ms手前を実際の衝突時刻として取得した。

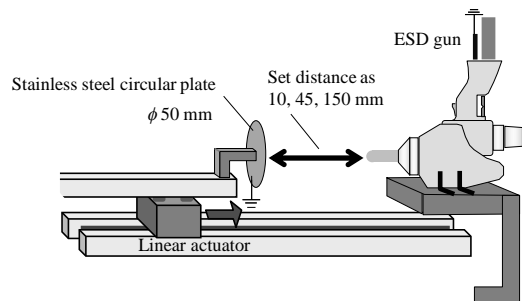


図5 移動距離における測定精度の検証実験

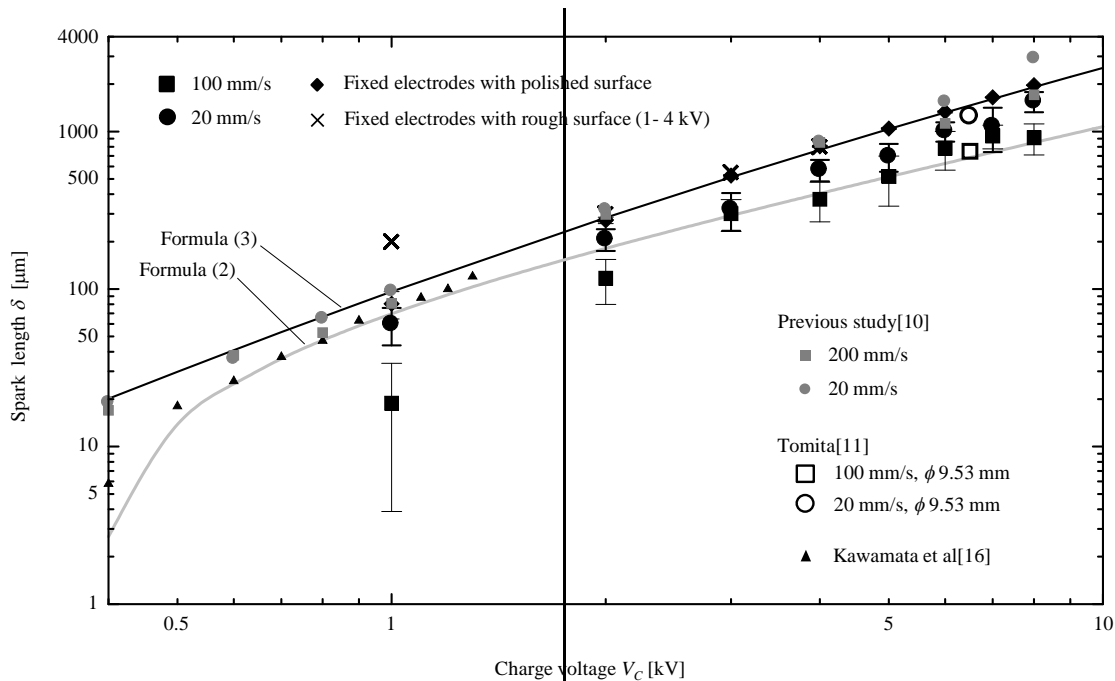


図6 +1kVから+8kVの充電電圧に対する火花ギャップ長の測定結果

次に、距離測定が正確におこなわれているかどうかを確かめるために、無充電のESDガンと移動電極とした円板との距離をあらかじめ設定し、この間隔と円板を移動させて測定される距離とを比較した。この測定の様子を図5に示す。円板とESDガン先端電極との間隔は10 mm, 45 mm, 150 mmとし、これらは長さの決まっている市販のアルミ板を挟んで設定した。円板を移動して測定した距離は5回平均でそれぞれ 9.66 ± 0.13 mm, 44.04 ± 0.65 mm, 148.72 ± 0.37 mm となり、計測誤差は1 - 4%であった。なお、いずれも設定した間隔よりも短くなった原因は、アルミ板が若干斜めに挿入されたためと考える。

4. 研究成果

火花ギャップ長の測定結果を検証するために、Paschen 則から導かれた火花ギャップ長の2種類の実験式を用いた。これらの実験式は、およそ20の気圧下における平等電界とみなせる平行平板電極間の電界中で適用され、

$$\delta [\mu\text{m}] = \frac{V_s [\text{kV}] - 0.376}{0.1179 \times 760} \times 10^4 \quad (2)$$

$$\delta [\mu\text{m}] = \frac{1}{4} \left[\sqrt{0.329^2 + \frac{4V_s [\text{kV}]}{23.85}} - 0.329 \right]^2 \times 10^4 \quad (3)$$

という計算式で与えられる。ここで、 V_s は電極間の火花電圧であり、単位は[kV]である。

なお、全速度データの平均値は、低速接近で (20 mm/s \pm 20%)、高速接近では (100 mm/s \pm 10%) であった。

図6に各充電電圧および速度における10回分のデータの平均値を示す。横軸は充電電圧、縦軸は火花ギャップ長を示す。同図の黒または灰色の実線は式(2)および式(3)から計算された結果である。図中の黒または灰色の丸は表面が磨かれている固定電極の場合、すなわち速度0 mm/sの測定結果を示している。図の結果から、固定電極の火花ギャップ長は式(3)に概ね一致することがわかる。一方、 \times は表面が磨かれておらず衝突によってできた電極表面の小さな凹凸がある状態での固定電極の場合の測定結果である。なお、電圧が上昇するとその影響が小さくなるため、+4kV以下の電圧で測定した結果を示すが、+1kVのときを除いて磨かれた固定電極の場合とほぼ一致している。この結果は低い充電電圧においては電極表面の粗さが電極間の電界に影響することを示唆している。川又氏らが曲率半径0.5 mmの針電極と直径20 mmの平板電極を用い、針電極をゆっくり動かして測定した結果である。結果は式(2)によく一致している。つぎに、 \square と \circ はステンレス円板をESDガンに100 mm/s (高速接近) または20 mm/s (低速接近) の速度で接近させた時の結果である。エラーバーは標準偏差を示す。いずれの電圧においても火花ギャップ長は固定電極の場合に比べて短くなっていること、さらに、高速接近の方が低速接近のときよりも短くなること、などがわかった。これらの結果に対し、富田氏の測定データを比較してみると、電極の球半径 (直径9.53mm) が筆者らとは違うものの速度の影響は同様の傾向があることがわかる。一方、 \square と \circ は筆者らの以前の論文において推定した結果であり、電極の移動速度はそれぞれ200 mm/sおよび20 mm/sの場合である。実験条件が本報告と

は異なるものの、今回の実験同様、概ね高速接近の方が低速接近に比べて火花ギャップ長が短くなること、その割合は充電電圧が上昇するほど顕著になることがわかる。以上のことから、筆者らの測定データはほぼ妥当なものであると結論付けられた。

上記のことから、火花長を測定可能な装置を開発し、火花長の速度依存性についてデータ取得をおこなえたことは当初の研究目標をほぼ達成できたものとする。今後は火花長の速度依存性のメカニズム解明が課題となる。

<引用文献>

河村 達雄, 河野 照哉, 柳父 悟:「電気学会大学講座 高電圧工学」, pp.20-21, 電気学会 2003

電気学会放電ハンドブック出版委員会編:「改訂新版 放電ハンドブック」, 電気学会, pp.199-201 (1995-04)

静電気学会編:「静電気ハンドブック」, オーム社, p.221 (1994-12)

川又 憲, 嶺岸 茂樹, 芳賀 明 「マイクロギャップ放電に伴う過渡電圧変動の周波数スペクトル分布」, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ2004, no.12, pp.41-45, 2004.

富田 一:「帯電金属球電極の移動速度が静電気放電に及ぼす影響」, 電学論 A, Vol.132, No.9, pp.753-759 (2012-9)

高 義礼, 藤原 修:「帯電した人体からのESDにおける絶縁破壊電界の帯電電圧依存性」, 電学論 C, Vol.133, No.12, pp.2149-2154 (2013-12)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

高 義礼, 加川 義久, 藤原 修, 帯電した人体からのESDにおける絶縁破壊電界の帯電電圧依存性、電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門) 査読有、133 巻、No. 12、2013、2149-2154

DOI: 10.1541/ieejieiss.133.2149

高 義礼, 川又 憲, 藤原 修, ESD ガンの気中放電に対する火花長の測定と検証、電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門) 査読有、135 巻、No. 5、2015、259-264

DOI: 10.1541/ieejfms.135.259

川又 憲, 高 義礼, 嶺岸 茂樹, 藤原 修, 球電極の低電圧 ESD に伴うインパルス性放射電磁波の過渡特性と周波数スペクトル、電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門) 査読有、135 巻、No. 5、2015、265-270

DOI: 10.1541/ieejfms.135.265

高 義礼, 加川 義久, 森 育子, 藤原 修, 帯電人体の指先接触に伴う放電バーストの

特性測定、電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門) 査読有、135 巻、No. 5、2015、253-258

DOI: 10.1541/ieejfms.135.253

[学会発表](計 3 件)

Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara, Measurement of Spark Length for Air Discharges of Electrostatic Discharge Generators, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 12-16, 2014, Tokyo Hitotsubashi Hall, Chiyoda, Tokyo, Japan

Yoshihisa Kagawa, Ikuko Mori, Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara, Statistical Measurement of Burst Discharge Currents through Fingertip from Charged Human, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 12-16, 2014, Tokyo Hitotsubashi Hall, Chiyoda, Tokyo, Japan

高 義礼, 川又 憲, 藤原 修, ESD ガンを用いた静電気放電における火花ギャップ長計測装置の開発と測定精度検、電子情報通信学会 EMCJ 研究会、2014 年 9 月、北見工大

Yoshinori Taka, Ken Kawamata, Osamu Fujiwara, Dependence of Grounded Metal-Plate's Approach Speed on Spark Length for Air Discharges of Electrostatic Discharge Generator, APEMC 2015, May 25-29, 2015, The Grand Hotel, Taipei/Taiwan

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高 義礼 (TAKA Yoshinori)
釧路工業高等専門学校・電子工学科・准教授
研究者番号：80335091

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：