

帯電金属球の接近時に発生する静電気放電に伴う過渡電界の測定

富田 一*¹

メカトロニクス機器等の動作に影響を及ぼす可能性のある電磁波ノイズ源の一つである静電気放電について、帯電物体が接地体に接近しながら静電気放電が発生する場合の火花長、放電電流、過渡電界を測定した。接近速度が速くなると火花長が短くなる傾向を確認した。また火花長が短くなると、放電電流ピーク値は大きく、立ち上がり時間は短くなる傾向を確認した。静電気放電に伴って発生する過渡電界を測定し、火花長が短くなると電界の時間変化は急峻となり、振幅スペクトルは強くなる傾向となった。今回の実験での放電発生源から138 mm離れた箇所における電界時間微分の最大値は、放電電流ピーク値、放電電流の時間微分の最大値及び放電電流の時間二階微分の最大値と相関性が認められ、準静電界が優位と考えられた。

キーワード：静電気放電、火花長、放電電流、過渡電界、光電界センサ。

1 はじめに

過去にはメカトロニクス機器への電磁ノイズの影響によってメカトロニクス機器の誤動作に起因したと推定される労働災害が発生している¹⁾。メカトロニクス機器は高性能化、高機能化の一方で、電磁波ノイズの影響が懸念されているところである。2006～2016年におけるアメリカFDA (Food and Drug Administration) のMAUDE (Manufacturer and User Facility Device Experience) データベース²⁾を調査した結果、静電気放電 (ESD: Electrostatic discharge) に起因して、移動式のX線装置、MRI、CTに意図しない散発的な車輪の回転といった誤動作が発生しており³⁾、医療従事者の労働災害を引き起こす可能性がある。ESDに起因した医療機器の誤動作には、着用型自動除細動器による患者の死傷災害も報告されている³⁾。

静電気放電は主な電磁波ノイズ源の一つであり⁴⁾、静止帯電物体からのESDに比較して、帯電物体が接地体に接近を伴いながらESDが発生すると、コンピュータに対して電磁干渉が強くなることが指摘されている⁵⁾。

前述のESD現象に関しては、静電気放電試験器の充電電極を緩やかに接地体に接近させた場合のESDに比較して、充電電極を接地体に急速に接近させたESDでは、電磁界強度が強くなり⁶⁾、放電電流の立ち上がりが急峻となり、そのピーク値が大きくなる結果が報告されている^{7), 8), 9)}。

また、静電気放電試験器の充電された放電電極を接地体に接近させながらESDを発生させると、高周波領域における放電電流エネルギーが増加し、電磁波ノイズのレベルが上昇する可能性が指摘されている¹⁰⁾。TEM (Transverse Electromagnetic) ラインに取り付けられた電極を接地体に接近させた時に火花長が短くなる結果も報告されている¹¹⁾。

筆者は、帯電球電極が等速度で静止接地体に接近するESDでは、帯電球電極の接近速度が速くなると、平均火花長が短くなるとともに、放電電流の平均ピーク値が大きくなり、放電電流の平均立ち上がり時間が短くなる傾向を報告した¹²⁾。

ESDが発生する際に発生する過渡電界については、モノポールアンテナでの測定値に複素アンテナ係数を適用した方法¹³⁾、5 mm/sでの接近帯電球電極によるESDに伴って発生する過渡電界を光電界センサによって測定した結果¹⁴⁾が報告されている。しかし、帯電物体の接地体への接近速度を変化させたESDに伴う過渡電界については報告が少ない。本研究においては、0.1～50 mm/sまで帯電物体の接近速度を変化させて、ESDによる電界の時間変化を測定した。

具体的には、球電極及びACサーボモータで駆動されるz軸ステージを用いて、帯電球電極が静止接地体に接近する時に火花長、放電電流、過渡電界を測定した。

2 静電気放電の実験方法

1) 静電気放電の発生装置

図1には、先行研究^{12), 15)}にも使用した実験装置の回路図を示す。直流高電圧電源 (松定プレジジョン, HER-10P3) は抵抗 (5 MΩ) を介して、高電圧スイッチ (GIGAVAC, G62C, Switch) に接続されている。静電気放電回路は、コンデンサ (422 pF)、抵抗 (1 kΩ)、真鍮製球電極 ($D_{\text{brass}} = \phi 9.51 \text{ mm}$) (以下、球電極という) 及び放電電流測定用のカレントターゲット (ノイズ研究所, 06-00067 A, 以下、ターゲットという) より構成されている。球電極は、IEC61000-4-2¹⁶⁾ (以下、IEC規格という)

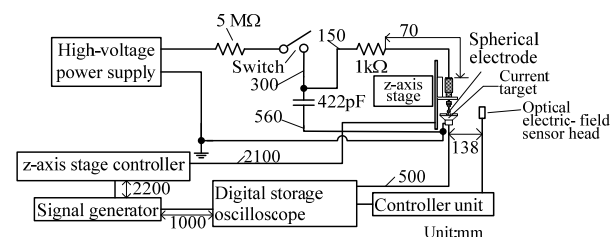


図1 静電気放電のための実験回路図

原稿受付 2020年8月3日 (Received date: August 3, 2020)
原稿受理 2020年11月9日 (Accepted date: November 9, 2020)
J-STAGE Advance published date: December 4, 2020

*1 労働安全衛生総合研究所研究推進・国際センター
連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6
労働安全衛生総合研究所研究推進・国際センター 富田 一
E-mail: tomita@s.jniosh.johas.go.jp
doi: 10.2486/josh.JOSH-2020-0017-GE

において気中放電の際に用いられる半球状放電電極の直径 (8 ± 1 mm) と同程度となるように、コンデンサ、抵抗は IEC 規格で用いられている静電容量 (150 pF), 抵抗値 (330Ω) とオーダが同様となるように選定した。

図2には先行研究^{12), 15)}にも使用したz軸ステージと放電電極部を示す。球電極が取り付けられたマイクロメータヘッドはアクリル板を介してz軸ステージ(コムス, SAFG-100ZTI-B)の可動テーブル(100 mm × 100 mm × 厚さ 10 mm)に取り付けられている。

最大 100 mm 下降できるテーブル上端が機械原点に位置するときには、金属板表面からの高さは 274 mm となる。

球電極に対向するターゲットは、IEC 規格において規定されたものであり、SMA (Sub-Miniature A) ケーブル(長さ 500 mm)を介してデジタルストレージオシロスコープ (Tektronix, DPO70404B, DSO, DC ~ 4 GHz, 25 GSa/s, 以下、オシロスコープという)に接続され、オシロスコープでの測定電圧を 10 倍すると電流に換算できる。

ESD 発生時の電界を測定する光電界センサ(精工技研, H-S2-002/CII-3GHz-011, 0.1 MHz ~ 3 GHz)は、放電発生部であるターゲット表面の中心を原点としたとき、水平に 138 mm 離れた箇所 (0 mm, -138 mm, 3 mm) に z 軸方向を向いた素子が接地アルミニウム板上に配置されている。光電界センサの位置は光電界センサの測定可能な電界強度を考慮したことによる。アルミニウム板は z 軸ステージ底面に配置されて金属板の底面に挿入されている。光電界センサは O/E 変換後に SMA ケーブルを介して先述のオシロスコープに接続されている。

光電界センサのアンテナファクタを図3に示す。0.1 MHz ~ 3 GHz でのアンテナファクタは 52.42 ~ 64.43 dB/m であるが、2 MHz ~ 3 GHz では 61.29 ~ 64.43 dB/m と周波数に対する依存性が少ないことが分かる。従って、2 MHz ~ 3 GHz の電界時間変動がほぼ測定可能となっている。但し、0.1 MHz 以下の周波数のアンテナファクタは大きいため¹⁴⁾、静電界など 0.1 MHz 以下の周波数に対しては過渡電界を正確に測定できていないと考えられる。

2) 静電気放電の発生および測定方法

(1) 実験準備

球電極がターゲットと衝突しないことを目的に、リミットスイッチが作動するときの球電極とターゲットとの間隙が 0.5 mm となるように、マイクロメータヘッドによって調整した。

(2) 静電気放電の発生と測定

静電気放電の発生と測定方法を述べる。各接近速度での ESD 実験の前に、球電極が等速度でターゲットに接近するときの速度 v_0 (以下、接近速度という) を設定する。本実験での接近速度 v_0 は、0.1 ~ 50 mm/s とした。

高電圧スイッチによってコンデンサと 5 M Ω 抵抗とを電氣的に接続して静電気放電回路を充電する。

z 軸ステージのコントローラ (YASUKAWA SGDV-

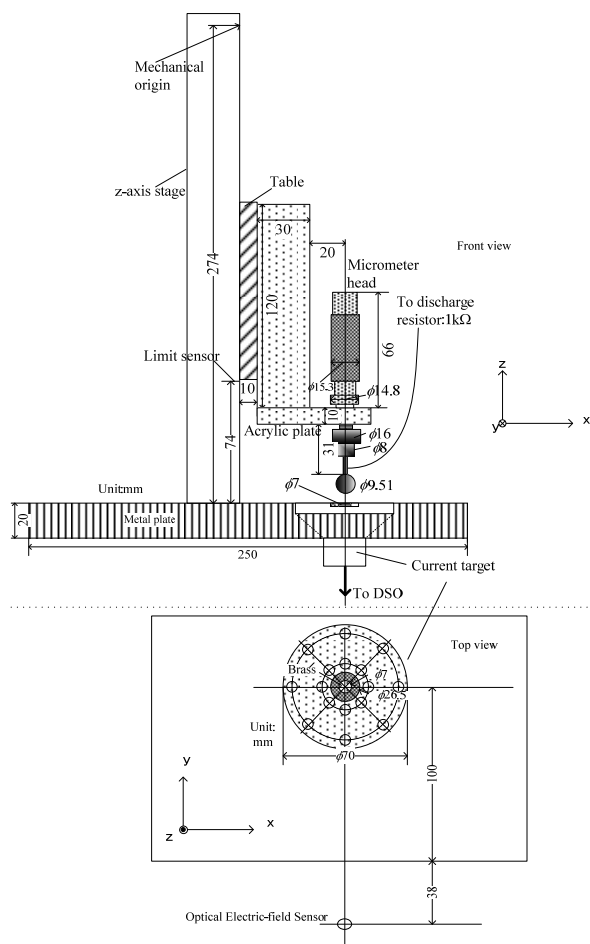


図2 z軸ステージと放電電極部

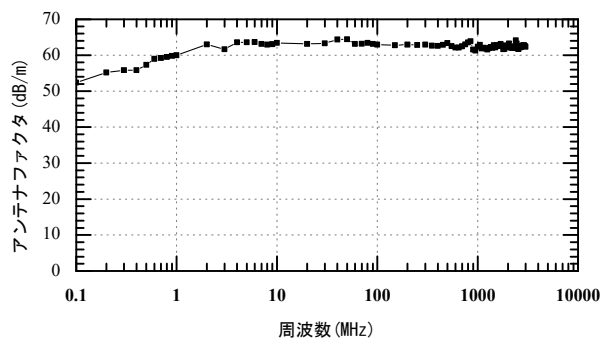


図3 光電界センサのアンテナファクタ

R90 F01 A, Keyence KV-3000, KV-MC20V, KV-MX1, 以下、コントローラという) のスタートスイッチを押すと、0.1 秒後に設定した接近速度で球電極がターゲットに接近する。球電極の接近中に静電気放電が発生するとターゲットによる放電電流及び光電界センサによる電界が測定されると同時に、オシロスコープから出力される立ち下がり信号が信号発生器 (HP 8116 A) に送信される。信号発生器からはテーブルを急停止させるためのパルス (5 V) がコントローラに送信され、テーブルが停止する。

信号発生器がオシロスコープから信号を受信してパルス信号出力に要する時間 (0.1 μ s), コントローラがパルス信号を認識するための所要時間 (30 μ s), 急停止命令を送信するに要する処理時間 (65 μ s) を合わせた 95.1 μ s

を補正して、火花長を算出している。

なおKV-3000とKV-MC20Vの通信には1 msを要し、急停止位置算出は1 msごとに行われるため、測定される放電位置には実際に放電が発生した時刻からの不確定な時間誤差(0~1 ms)に起因する火花長測定の誤差が含まれている。

直流高電圧電源の出力電圧 E_{out} は+6.5 kVとし、各接近速度での放電の前に、球電極及びターゲットを粒径0.2 μm のアルミナを含有する研磨剤で表面を研磨し清浄な布で研磨剤を拭き取った後に、連続して放電を行った。実験は、気温16.9~19.1 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度34~43%、気圧995~997 hPaの条件下で行った。

3 静電気放電の実験結果及び考察

1) 接近速度と火花長との関係

接近速度 v_0 が0.1 mm/sでは、ターゲットとの電極間隙(以下、 l_1 という)が約2mmの箇所を球電極の接近開始位置、 v_0 が1 mm/sでは l_1 が約10 mm、 v_0 が10 mm/s以上では機械原点を球電極の接近開始位置として、それぞれの接近速度で5回の静電気放電を行った。

図4は接近速度に対する火花長(以下、 l という)の分布を示している。接近速度が1 mm/s以下では火花長のばらつきが小さいものの、10 mm/s以上では火花長のばらつきが大きくなっている。接近速度が10 mm/s以上で火花長のばらつきが大きくなる要因については今後検討することとしている。

図5は図4に示す結果を統計処理した接近速度と火花長との関係図であって、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。

既に報告した結果と同様¹²⁾に、接近速度が速くなると、火花長の平均値は短くなる傾向となっている。接近速度が0.1, 1 mm/sでの火花長の標準偏差は小さいが、接近速度が10 mm/s以上での標準偏差は大きく、接近速度と火花長との相関関係は低くなっている。

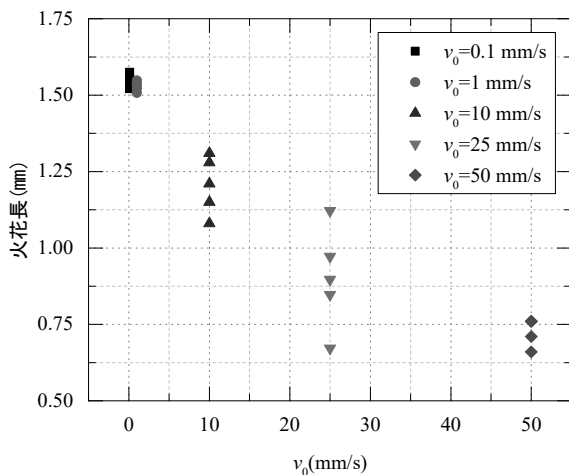


図4 接近速度と火花長との関係

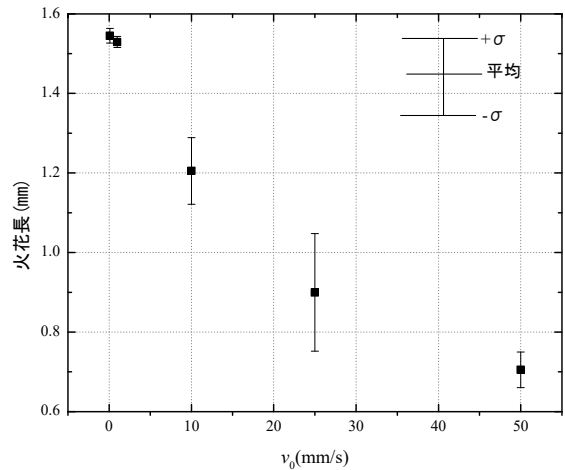


図5 接近速度と火花長との統計結果

2) 火花長と放電電流との関係

各接近速度における平均的な放電電流波形の例を図6に示す。同図のピークは主にマイクロメータヘッドと球電極に帯電した電荷によるもので、本研究ではこの放電電流に着目して検討する。

既報と同様¹²⁾に火花長が短くなると、放電電流のピーク値は大きくなるとともに、その立ち上がり時間(10-90%)は短くなる傾向となっている。Rompe-Weizel¹⁷⁾によれば、火花長 δ が短くなると式(1)に示す火花抵抗 $r(t)$ が小さくなるために放電電流のピーク値が大きくなる。

$$r(t) = \frac{\delta}{\sqrt{\frac{2\alpha}{p} \int_{-\infty}^t i(t')^2 dt'}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $i(t)$:放電電流、 p :気圧、 α :常数である。立ち上がり時間が短くなる要因については、今後検討することとしている。

図7, 8には火花長に対する放電電流ピーク値と立ち上がり時間の分布をそれぞれ示す。既報と同様^(6), 7), 8)に、静止した電極間での火花長と同程度である約1.5 mmから火花長が短くなると、放電電流のピーク値は大きくなり、その立ち上がり時間は短くなる傾向となっている。

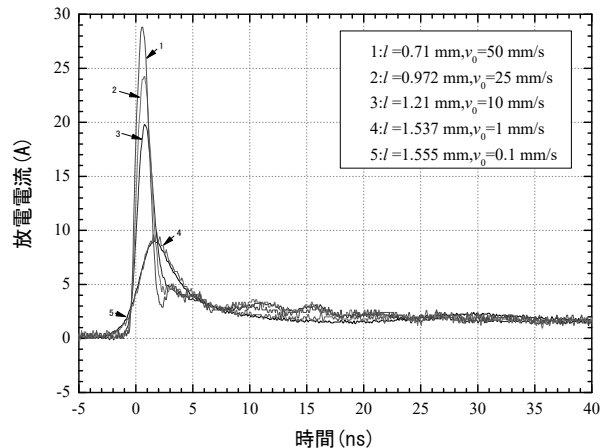


図6 放電電流波形の例

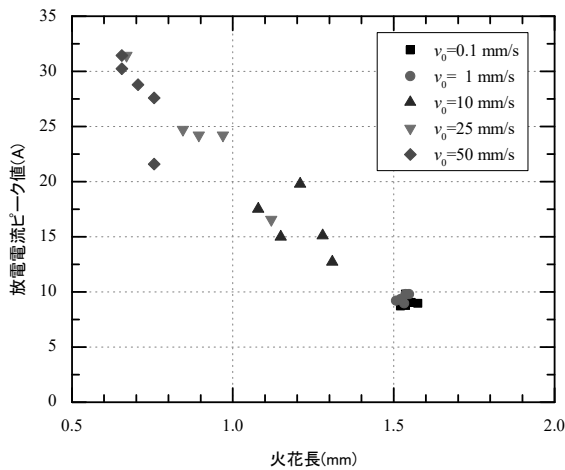


図7 火花長と放電電流ピーク値との関係

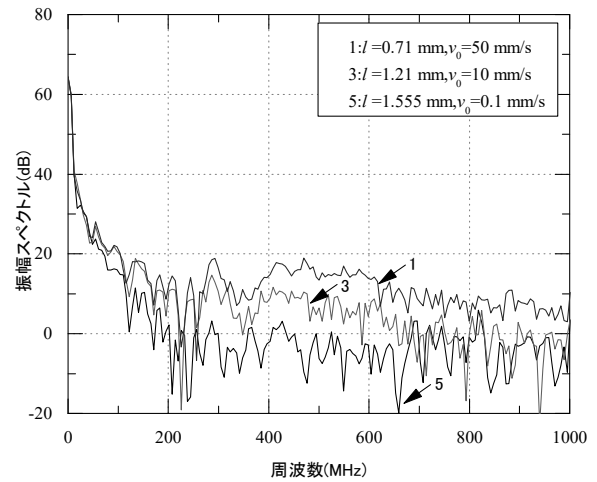


図10 図9の電界波形の周波数スペクトル

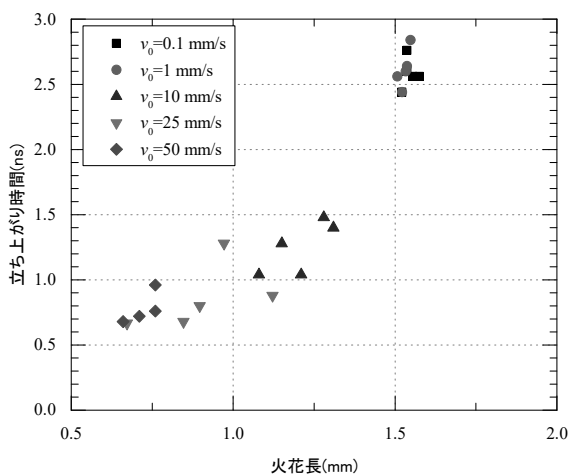


図8 火花長と放電電流立ち上がり時間との関係

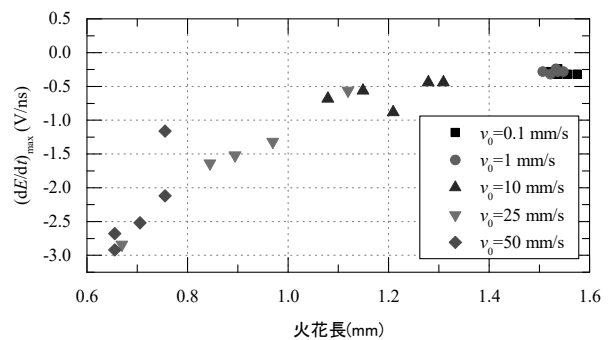


図11 火花長と電界時間微分最大値との関係

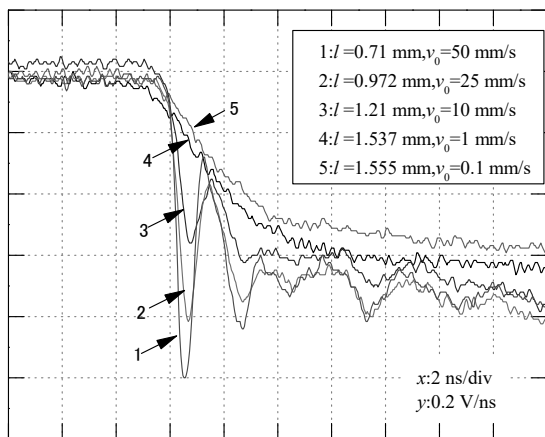


図9 図6の放電電流波形に対応する電界波形

3) 火花長と電界との関係

図6の放電電流が得られた場合の電界波形*を図9に示す。接近速度が速くなり、火花長が短くなると、電界の立ち下がりが速くなる傾向を示している。図9に示す5, 3, 1の場合の電界変化はアンテナファクタとして63 dB/

m一定で算出すると、それぞれ約940, 1180, 1400 V/mとなっている。

図9に示す電界波形の4096ポイントを用い窓関数としてHanning窓を適用してFFTを行い、振幅スペクトルを算出した結果を図10に示すが、図9に示した2, 4の場合のスペクトルの表示を省略した。接近速度が速くなり火花長が短くなると、電界 (E) の振幅スペクトルは100~1000 MHzの間で概略大きくなっている。

火花長と電界時間微分の最大値 (dE/dt)_{max} との関係を図11に示す。火花長が短くなると電界時間微分の最大値の絶対値は大きくなる傾向となっている。

火花長と電界変化値 (図9で電界が立ち下がってから約15 nsまでの変化値) の関係を図12に示す。ここで電界立ち下がり開始から約15 nsとしたのは、静電気放電の最初のインパルス的な放電電流の持続時間が15 ns程度となっていることに因る。火花長が短くなると電界変化値も大きくなる傾向となっている。

図2に示す座標系で原点にある微小なダイポールからz軸のマイナス方向に放電電流が流れると、ダイポールの中心からy (m) 離れた箇所での自由空間における電界 $E_c(t)$ (V/m) は式 (2) で与えられる¹⁴⁾。

$$E_c(t) = -\frac{\mu_0 d_s}{4\pi} \left\{ \frac{c^2}{y^3} \int_{t_0}^t i_c(t_x) dt + \frac{c}{y^2} i_c(t_x) + \frac{1}{y} \frac{\partial i_c(t_x)}{\partial t} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

* 本稿では出力電圧(V)を電界としているため、通常の電界強度値とはなっていない。

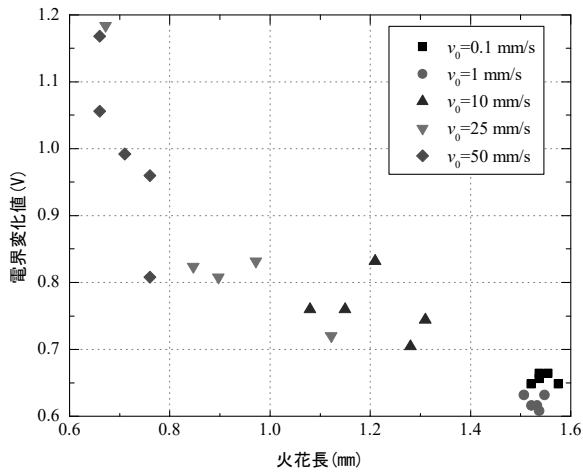


図12 火花長と電界変化値との関係

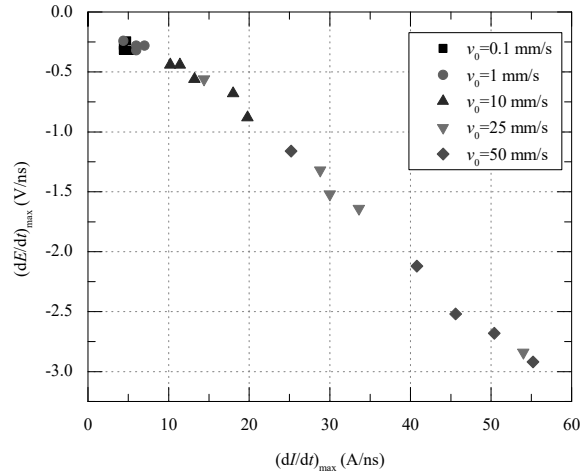


図14 放電電流時間微分値の最大値に対する電界時間微分最大値の分布

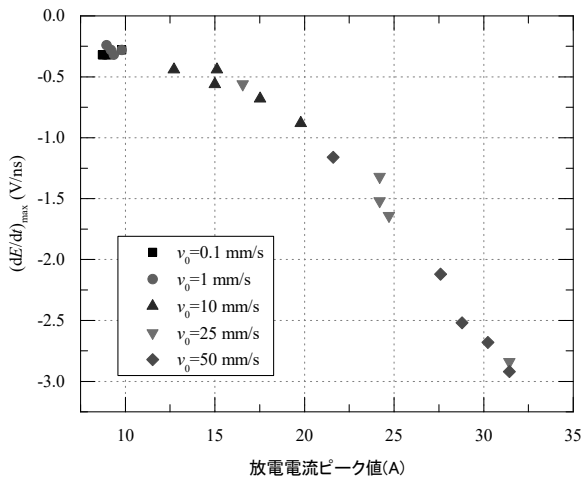


図13 放電電流ピーク値に対する電界時間微分最大値の分布

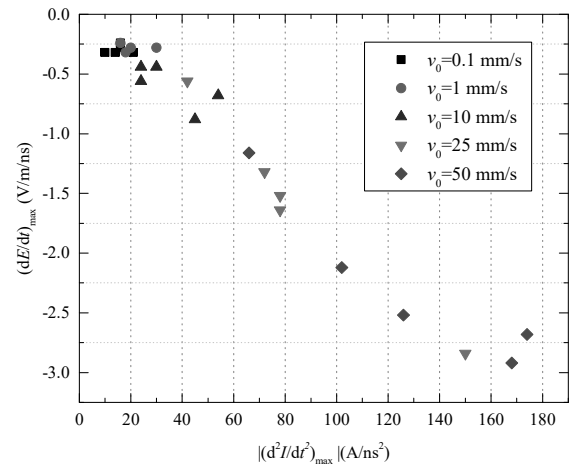


図15 放電電流時間二階微分値の最大値に対する電界時間微分最大値の分布

$$t_x = t - \frac{y}{c}$$

$i_c(t) = i(t - y/c)$ は放電電流, ds はダイポールモデルによるダイポール長 (m), c は光速 (m/s), μ_0 は真空の透磁率 (H/m), t_0 は観測開始時間 (s) である。

電界の時間変化は式 (2) 右辺の3つの成分に依存し, 第一項は準静電界, 第二項は誘導電界, 第三項は放射電界によるもので, 静電気放電が発生したときの電界時間微分の最大値はそれぞれ放電電流のピーク値, 放電電流時間微分の最大値, 放電電流二回時間微分の最大値に比例することとなる。

本研究でのESDによる過渡電界は, 式 (2) のダイポールモデルの放電電流を合成したものと考えられることから, 放電電流と過渡電界との関係を検討する。放電電流ピーク値と電界時間微分値 $(dE/dt)_{max}$ との関係を図13に示す。放電電流ピーク値が大きくなると電界時間微分の最大値の絶対値は大きくなる傾向となっている。

図14, 15には, 放電電流時間微分の最大値 $(dI/dt)_{max}$ と電界時間微分の最大値との関係, 放電電流時間二階微分の最大値 $(d^2I/dt^2)_{max}$ と電界時間微分の最大値との関係をそれぞれ示す。いずれの間にも相関性が認められる。

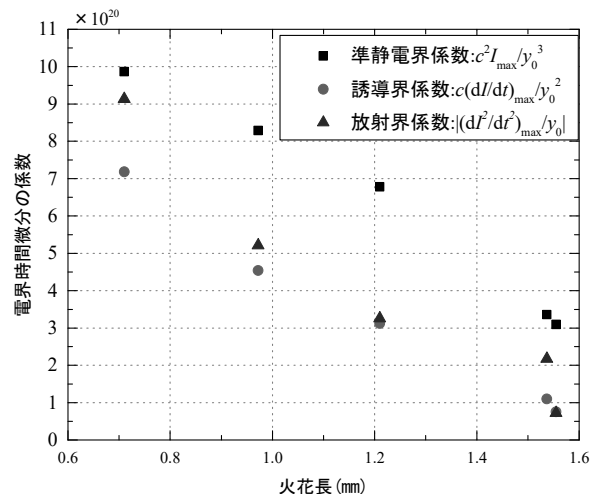


図16 電界時間微分成分の火花長依存性

図6, 9の場合について, 式 (2) を時間微分した右辺の中括弧内の各成分が最大値となり, 距離 $y=y_0=138$ mm とした時に算出した結果を図16に示す。準静電界が優位となっていると考えられる。

4 むすび

充電されたコンデンサに接続された球電極を接地体に等速度で接近中に静電気放電を発生させて、火花長、放電電流及び過渡電界を測定した。その結果、放電電流のピーク値、立ち上がり時間は、火花長と相関関係がみられた。火花長が短くなると、放電電流ピーク値は大きくなり、立ち上がり時間は短くなる傾向になることを確認した。

静電気放電が発生するときの過渡電界は、接近速度が速くなると電界の立ち下がりも速くなるとともに、振幅スペクトルは大きくなる傾向であった。火花長が短くなると電界時間微分の最大値は大きくなり、今回測定した箇所では火花長と放電電流最大値、放電電流の時間微分の最大値及び放電電流の時間二階微分の最大値と相関性が認められ、準静電界が優位となっていると考えられた。

今後の課題として、過渡電界測定位置の放電発生源からの距離依存性の解明がある。

文 献

- 1) 糸川壯一. 電磁ノイズ障害の実態と対策. 生産と電気. 1988; 40: 3: 32-37.
- 2) <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cf-maude/search.cfm>
- 3) Mehdi Kohani, Michael Pecht. Malfunctions of Medical Devices Due to Electrostatic Occurrences. IEEE Access. 2018; 6:5805-5811.
- 4) 本田昌実. 金属物体で発生する静電気放電(ESD)の脅威. 信学誌. 1995; 78: 9: 849-850.
- 5) 本田昌実. ESDに起因するEMI問題の変遷. 第13回RCJ信頼性シンポジウム発表論文集. 2003; 183-186.
- 6) 馬杉正男. 衝突電極から放射される電界の過渡応答解析. 信学技法. 1993; 93: 68 (EMCJ93 8-17): 31-36.
- 7) P.Richman. Classification of ESD hand/metal current waves versus approach speed, voltage, electrode geometry and humidity. IEEE Int. Symp. on EMC. 1986; 451-460.
- 8) D.Liu, A.Nandy, F.Zhou, W.Huang, J.Xiao, B.Seol, J.Lee, J.Fan and D.Pommerenke. Full-wave simulation of an electrostatic discharge generator discharging in air-discharge mode into a product. IEEE Trans. on EMC. 2011; 53: 1: 28-37.
- 9) 森育子, 高義礼, 藤原修, 石上忍. ESDガンのIECイミュニティ試験法に対する放電電流の特性比較. 信学論; 2005: J88-B: 12: 2401-2403.
- 10) M.Masugi. Multiresolution Analysis of Electrostatic Discharge Current From Electromagnetic Interference Aspects. IEEE Trans. on EMC. 2003; 45: 2: 393-403.
- 11) D.Pommerenke. ESD:transient fields, arc simulation and rise time limit. Journal of Electrostatics; 1995: 36: 1: 31-54.
- 12) 富田一. 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). 2012; 132: 9: 753-759.
- 13) 石上忍. 静電気放電による過渡電磁界及び伝送線路との結合に関する研究. 1997; 電気通信大学博士論文.
- 14) 石上忍, 川又憲, 嶺岸茂樹, 藤原修. 光電界センサを用いた球電極マイクロギャップESDからの過渡電界測定. 電学論 (A). 2018; 138: 6: 295-301.
- 15) 富田一. 帯電球の大きさが接近する帯電球からの静電気放電に及ぼす影響. 電学論 (A), 2013; 133: 12: 622-629.
- 16) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test. IEC 61000-4-2 Ed. 2.0. 2008.
- 17) R.Rompe, W.Weizel. Uber das Toeplersche Funkengesetz. Z.Phys.. 1944; 122: 636.

Measurement of transient electric field at the occurrence of electrostatic discharge when a charged metallic sphere approaches a grounded object

by

Hajime TOMITA *¹

Electrostatic discharge (ESD) is one of the electromagnetic wave noise sources which affect the function of mechatronics equipment. Spark lengths, discharge currents and electric fields at the occurrence of ESD were measured when a charged object approached a grounded object. It was confirmed that the spark lengths tended to shorten when approach speeds of the charged object increased. It was also confirmed that peak discharge currents tended to increase and rise times of the discharge current tended to shorten when the spark lengths shortened. Time change rates of electric field tended to become faster and amplitude spectra of the electric field tended to increase when the spark lengths shortened. Maximum values of time change rate of the electric field at 138 mm away from the point where ESD occurred correlated with the peak discharge current, maximum values of the time change rate of the discharge current, and maximum second order differential values of the discharge current; quasi electric field was dominant among components of the electric field measured in this experiment.

Key Words: electrostatic discharge, spark length, discharge current, transient electric field, optical electric-field sensor

*¹ Center for Research promotion and International Affairs, National Institute of Occupational Safety and Health