

静電気放電(ESD)に伴うインパルス性電界の放射特性

著者	安倍 顕一郎, 川又 憲, 石上 忍, 嶺岸 茂樹, 藤原 修
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	53
号	1
ページ	25-29
発行年	2019-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024022/

静電気放電(ESD)に伴うインパルス性電界の放射特性

Radiation Characteristics of Impulsive Electric Field Caused by Electrostatic Discharge (ESD)

安倍 顕一郎*
Kenichiro ABE

川又 憲**
Ken KAWAMATA

石上 忍**
Shinobu ISHIGAMI

嶺岸 茂樹**
Shigeki MINEGISHI

藤原 修***
Osamu FUJIWARA

Abstract: A low-voltage electrostatic discharge (ESD) of less than 1 kV produces an impulsive electromagnetic noise with more than 12 GHz bandwidth. The ESD noise can cause malfunctioning of digital electrical equipment and systems. So far, many studies have been conducted on electromagnetic noise from ESDs from the viewpoint of electromagnetic compatibility. Our research group is focused on investigating the radiation mechanism of impulsive electromagnetic noise caused by the ESD. The radiation characteristics generated by an electric field are characterized by the optical electric field sensor system and are introduced in this report. Static electric field, inductive field, and radiation field waveforms are shown as well. It was confirmed that the mechanism of electromagnetic radiation caused by the ESD in spherical electrodes is similar to that in the dipole model.

Keywords: Electrostatic discharge (ESD), Electromagnetic compatibility (EMC), Electromagnetic noise, Spherical electrode, Dipole model

1. はじめに

静電気放電(ESD)によって発生する火花放電はガソリンなどの揮発油の発火を引き起こし、火災事故など重大な災害の原因となることはよく知られている。また、化学・工業プラントなどでは粒子材料や粉体材料の摩擦帯電によって ESD が発生し、着火あるいは粉体爆発事故の原因となった事例も報告されている。このように ESD は火災や爆発事故の原因となるため、障害発生源として古くから研究が行われ、その対策技術の検討がなされてきた [1]-[3]。

一方、環境電磁工学(EMC)の立場から電磁妨害波源としての ESD に関する研究も多く行われている。主には IEC(国際電気標準会議)の国際規

格によって規定される製品のイミュニティ試験(電磁雑音に対する耐性試験)に関連し、人体指先からの ESD 電流を模擬した ESD ガンによる注入電流特性の妥当性検証や、製品の ESD 耐性向上のためのシミュレーション手法の検討などが進められている[4],[5]。

また ESD 電磁妨害に関する最近のトピックとして、某国による核攻撃の懸念で一般に知られるようになった HEMP(高高度電磁波パルス)によるパルス電磁波攻撃の脅威が挙げられる[6]。HEMP は高いレベルのパルス電磁波を都市などの上空から広範囲に渡って意図的に印加するもので、通信ネットワークや電力ネットワークの断絶などデジタルハイテク機器で構成される社会インフラシステムに深刻な障害を与え、これにより都市機能の麻痺や破壊を生じさせるなど、その脅威が我々に大きな不安を与えたことは記憶に新しい。これらの対

* 東北学院大学・大学院・前期課程(現:(株)リーテック)

** 東北学院大学・工学部・情報基盤工学科・教授

*** 名古屋工業大学・名誉教授

策を講じるため IEC では HEMP による電磁妨害波特性について、最も高速な初期のパルス電磁波とされる Early-time HEMP (E1)を、ESD による過渡電磁波と同様の特性であると分類した[7]。

しかし、ESD によって発生する電磁波は瞬時的な放電現象に起因するため、その特性の把握が難しく、また電磁妨害の発生メカニズム等についても未だに不明な点が多く存在する。現段階の知見によれば、ESD に伴って発生する瞬時的な電磁妨害波の過渡時間は 1 ns (10^{-9} 秒) 以下の非常に短い時間間隔で、さらに振幅は瞬間的に数百～数千 V/m と非常に高いレベルに達することが最近の現象究明により明らかになってきた。このような瞬時的な電磁雑音波は、従来の電気・電子システムに入り込んでもシステム自体の電気信号の処理速度が比較的遅く、また、システム内の情報伝達信号の振幅も比較的に大きいため、電気回路の動作において妨害信号として認識されない場合が多かった。しかし、最近のデジタル電子機器では、システムの消費電力を低減させるため機器内部での情報伝達信号の低電圧化が進み、また、高速処理化のためにシステム動作クロック信号の高速化が図られ、さらには高機能を実現するために電子回路の超高密度実装が行われている。このため、最近のハイテクデジタル機器は、これまでに ESD による電磁妨害の影響を受けやすい傾向にあり、電子機器のイミュニティ確保が EMC 上の大きな課題となっている[8]-[14]。

このような背景に鑑み、筆者らは ESD によって発生する電磁妨害波の EMC 対策を図るため、内外の研究者らと共に ESD の EMC 問題解決に向けた各種研究テーマについて取り組みを進めている[15],[16]。本稿では、放電の規範モデルとして球電極対を用いて ESD によって発生する放射電磁波の電界成分について、光電界プローブを用いて測定および考察を行った結果について紹介する。なお、本稿の内容は既に文献[17],[18]として発表を行い、その後さらなる検討を加え、文献[19]および[20]などの論文として発表した内容である。今回、研究紹介として示す。

2. 広帯域ホーンアンテナによる放射電磁波の測定と受信電圧波形例

球電極 ESD による放射電磁波のホーンアンテナによる測定システムを図 1 に示す。このシステムは電圧可変直流高電圧電源、球電極対、受信用

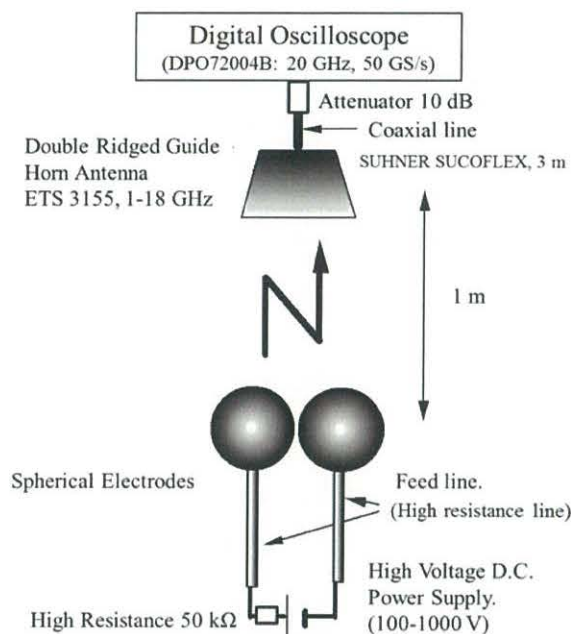
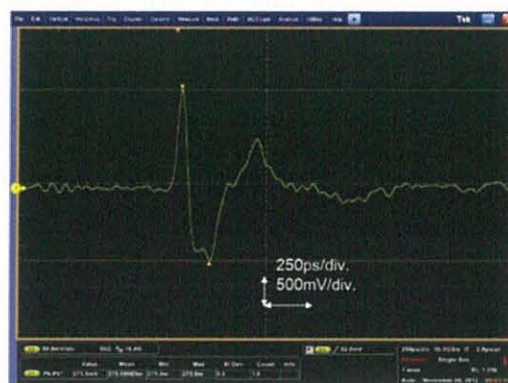
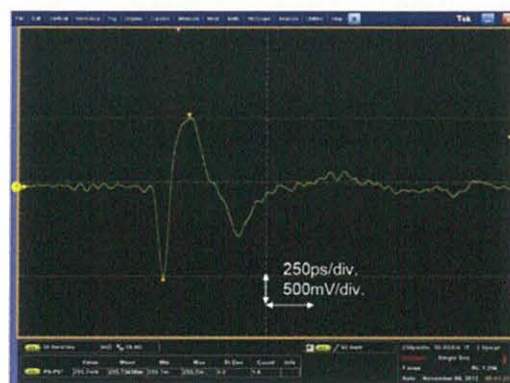


図 1 放射電磁波の測定システム



(a) 受信電圧波形例(正極)



(b) 受信電圧波形例(負極)

図 2 ホーンアンテナによる放射電磁波の受信電圧波形例

ホーンアンテナ(ETS3115, 1-18 GHz)およびデジタルオシロスコープ(Tek. DPO72004B, 20GHz, 50 GS/s)で構成している。使用した放電電極の直

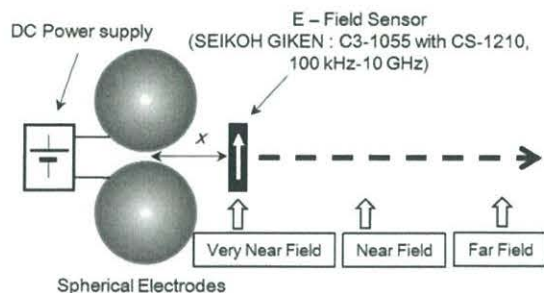
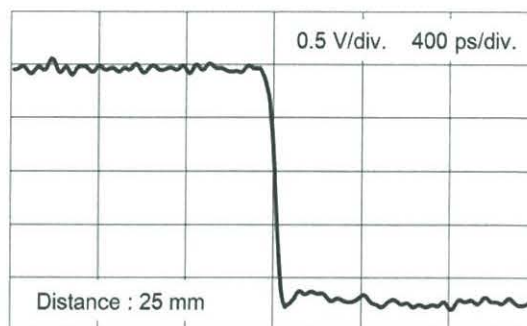


図3 光電界プローブによる電界波形の距離特性測定

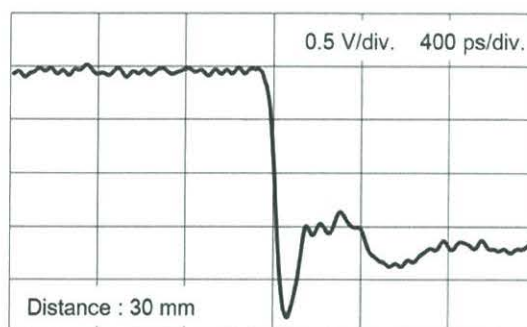
径は 30 mm であり、発泡スチロール製の台座に配置し高抵抗線と集中高抵抗を介して高電圧電源に接続した。受信用アンテナは、放電部から約 1 m の距離に配置した。実験は電極間に 400 V の一定電圧を印加（電極に充電）した上で、5.0 mm/s の速度で電極を接近させ、放電が発生した瞬間の受信電圧をオシロスコープで観測した。図 2 に、この実験システムで観測される放射電磁波の受信波形例を示す。波形は、立ち上がり時間が急峻でかつ半値幅の非常に短い正（あるいは負）のインパルス的な過渡変化と、比較的立ち上がり時間が遅く、半値幅の大きい負（あるいは正）の過渡変化として観測されている。これらは、電極球間の放電により充電された電荷が緩和作用により移動する際に生じるインパルス的な電流変化により励振された遠方界による受信波形と推察できる。しかし、最初のインパルス的な過渡変化に続く負極（あるいは正極）の過渡変化以降は、不確定な変動要素が入り込むため、過渡プロセスの解明には無誘導でかつ侵襲性の少ない電磁界測定手法が必要である。

3. 光電界プローブによる電界波形の距離特性

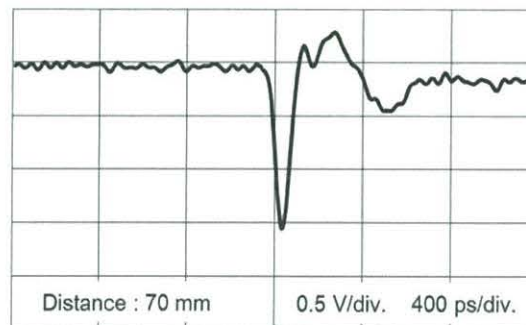
ESD に伴う放射電磁波の特異性については藤原氏が ESD 界の表現式を（例えば）文献[21]、[22]にて示している。これによれば、ESD による放電路を微小ダイポール波源と仮定して、励振波源の極近傍の距離で優勢となる静電界成分、また、近傍にて優勢となる誘導界成分、さらには遠方にて優勢となる放射界成分について、それぞれのピーク値とその距離特性を示している。一般的なダイポールモデルを正弦波で励振した場合は、エレメント長で決まる共振周波数と、その波長により、放射の距離特性を決定できるが、インパルス的な放



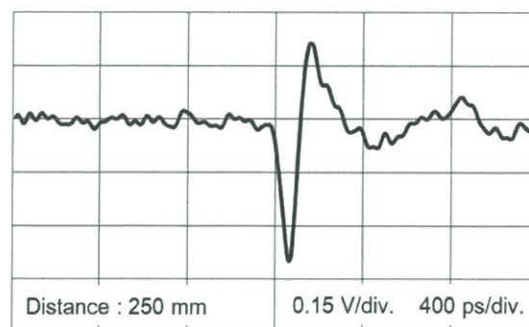
(a) 距離 $x = 25$ mm における電界波形（準静電界）



(b) 距離 $x = 30$ mm における電界波形



(c) 距離 $x = 70$ mm における電界波形（誘導界）



(d) 距離 $x = 250$ mm における電界波形（放射界）

図4 光電界プローブによる過渡電界波形

電電流による励振の場合、これらを特定することはできない。このため本文献では、ESD にて発生する火花電流の実効的な継続時間 τ と光速 c の積にて距離特性の定義を行っている。なお、火花電

流の継続時間は今のところ明確に定義は出来ないが、電極の大きさによって決まる充電電荷量と放電による電荷の移動範囲、すなわち放電によって励振に寄与する電流のパス長に関係すると考えられる[23],[24]。

本節では、上述の過渡電磁界の距離特性を検証するため、放電電極極近傍から遠方までの電界波形について測定を行った。測定では、近傍界測定においても放電現象に影響を極力与えないよう、無誘導でかつ侵襲性の少ない光電界プローブシステム(SEIKOH GIKEN : C3-1055 with CS-1210, 100 kHz-10 GHz)を用いて測定を行った。過渡電界波形の測定システムを図 3 に示す。システムはこれまでの図 1 に示す測定システムの受信用ホーンアンテナを光電界プローブシステムに置き換えたものである。今回の実験条件は、球電極の直径を 30 mm、電源の印加電圧(充電電圧)を 500 V、電極の接近スピードを 5 mm/s とした。また、電界プローブの設置距離は電極対の中心軸上からの距離とし、30 mm の電極に対して極近傍の 25mm から十分な遠方と考えられる 250 mm まで測定を行った。

球電極の放電に伴う過渡電界波形の測定結果を図 4 に示す。図(a)が電極中心軸からの距離 $x = 25$ mm, (b)が $x = 30$ mm, (c)が $x = 70$ mm, (d)が $x = 250$ mm の場合である。時間軸はいずれの図も 400 ps/div. であり、電圧軸は振幅値に応じて調整している。今回用いた光電界プローブのアンテナファクタは約 30 kHz から 10 GHz の周波数帯域において約 66 dB/m で概ね一定の値を示している。これを用いて測定電圧を電界強度に換算すると、電界強度のピーク値は、それぞれおよそ、(a)が 4.5 kV/m, (b)も同様に 4.5 kV/m, (c)が 3.5 kV/m, さらに(d)が 1.2 kV/m 程度であることが推察できる。

電界波形の距離特性を見てみると、(a)の電極の極近傍では準静電界成分が支配的となり、約 4.5 kV/m 程度のステップ的な過渡電界波形が観測されている。さらに、電極から 30 mm 程離れた電極近傍(b)では、ステップ的な変化から立ち下がり部分が観測される様になり、さらに距離が増加するに従い、徐々にインパルス的な過渡電界波形へと変化する。(c)は単一のインパルス波形となり、誘導界が支配的となり観測されたものである。このインパルス波形は、先の静電界波形を一回微分した成分、すなわち電流の過渡変化分を表している。

さらに(d)の距離は十分に遠方と考えられ、波形変化は(c)の誘導界波形による電流変化分をさらに微分した放射電界波形を示していることがわかる。これらの距離特性は、これまでの主張通り、インパルス過渡電磁界のダイポールモデルからの放射機構を裏付けるものであると考えられる。

4. まとめ

ESD に伴うインパルス性過渡電磁界の放射特性を確認するため、無誘導性の光電界プローブを用いて、ESD 放電電極近傍における過渡電界波形の距離特性について測定を行った。

これらの結果から ESD に伴う過渡電界の距離特性は、電極の極近傍においてステップ的な準静電界波形を示し、また、近傍においてはインパルスの誘導界波形を示した。さらに電極から距離をおいた遠方界領域では放射界波形となり、距離による優勢な電磁界成分の変化が確認された。このことから球電極 ESD による電磁波の放射は、球電極対間に構成されるダイポールエレメントを放電電流が励振した放射機構を裏付ける結果となった。しかし、過渡電界の振幅レベルは、これまでの計算値や想定をやや上回る結果となった。この要因として、放電路によるダイポールエレメントに付随する電極導体のエンハンス効果が影響していると考えられ、今後、ダイポールモデルによる放射機構の詳細な検証が必要である。

謝辞

光電界プローブ一式をご貸与いただいた株式会社精工技研の大沢隆二氏に、この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1]他島泰幸：“静電気放電による可燃性混合気への着火”，応用物理, Vol.45, No.6, p.579 (1976)
- [2]児玉勉：“静電気による爆発とその防止対策”，電気設備学会誌, Vol.29, No.8, pp.624-627 (2009)
- [3]静電気学会編：“コンパクト版・静電気ハンドブック”，オーム社, (2006)
- [4]川又憲：“放電の EMC 問題に関する最近の研究動向と ESD 電磁雑音の特異性”，電気学会論文誌 A, Vol. 138, No. 6, pp.271-279 (2018)
- [5]IEC61000-4-2, <https://www.iec.ch/> (例えば:

<http://www.noiseken.co.jp/uploads/photos1/143.pdf>

[6] 鬼塚隆志: “高高度電磁パルス(HEMP)攻撃の脅威—喫緊の課題として対応が必要—”, CISTEC Journal, Vol.166, pp.130-140(2016)

[7] 丸山雅人, 岡本健, 奥側雄一郎, 加藤潤: “高高度核爆発電磁パルス(HEMP)への対策検討の取り組み”, NTT 技術ジャーナル 2018.3, pp.50-51(2018)

[8] 荒木庸夫: “電磁妨害と防止対策”, 東京電気大学出版局 (1977)

[9] 本阿彌忠彦: “静電気災害・障害/第 III 講/静電気放電と電磁環境障害”, 静電気学会誌, Vol.12, No.3, pp.216-222(1988)

[10] 赤尾保男: “環境電磁工学の基礎”, 電子情報通信学会 (1991)

[11] 仁田周一他: “環境電磁ノイズハンドブック”, 朝倉書店 (1999)

[12] 関康雄: “EOS/ESD ハンドブック”, トリケップス (1999)

[13] 佐藤利三郎他: “電磁環境学ハンドブック”, 三松出版 (2009)

[14] 井上浩監修: “電子システムの電磁ノイズ—評価と対策—”, 電子情報通信学会編 (2012)

[15] 電気学会論文誌特集: 「静電気放電(ESD)の EMC 技術」, 電学論 A, Vol.132, No.5 (2012)

[16] 放電に伴う電磁ノイズ特性調査専門委員会編: 「放電に伴う電磁ノイズ特性と EMC 問題」, 電気学会技術報告, 第 1355 号 (2015)

[17] 安倍顕一郎, 石上忍, 川又憲, 嶺岸茂樹, 藤原修: “球電極マイクロギャップ ESD に伴うインパルス性放射電磁波の電界波形測定”, 電気学会研究会資料, EMC-16-47, pp 11-14 (2016)

[18] K. Kawamata, S. Ishigami, S. Minegishi, O. Fujiwara : “Distance Characteristic of Electric Field Waveform and Field Peak Value Caused by Micro Gap ESD in a Pair of Spherical Electrodes”, Proc. of Int'l Symposium on EMC Europe, O_Th_B4 (2017)

[19] 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”, 電気学会論文誌A, Vol. 138, No. 6, pp.295-301 (2018)

[20] 高 義礼, 川又 憲, 石上忍, 嶺岸茂樹, 藤原修: “マイクロギャップの火花放電に伴う過渡電界の光電界プローブを用いた測定波形の検証”, 電気学会論文誌A, Vol. 138, No. 10, pp.482-489 (2018)

[21] 藤原修: “静電気放電(ESD)に伴う過渡電磁界と特異特性”, 静電気学会誌, 39, 2, pp.48-53 (2015)

[22] 藤原修, 高義礼, 川又憲: “静電気放電による放射電磁界の特異性とレベル限界”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 通信(1), 依頼シンポジウム, BI-1-2 (2015)

[23] K. Kawamata and S. Minegishi: “Measurements of Characteristics of Electromagnetic Radiation Caused by Electrostatic Discharges in Metal Sphere Gap at Voltages Less than 1 kV”, China Communications, Vol. 10, Issue (7), pp.29-35 (2013)

[24] 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, Vol.135, no.5, pp.265-270 (2015)