

## 球電極ESDに伴う電磁波放射特性に関する一考察

川又 憲<sup>\*1</sup>, 嶺岸 茂樹<sup>\*\*</sup>, 藤原 修<sup>\*\*\*</sup>

(2013年1月29日受付: 2013年4月10日受理)

## A Study on Electromagnetic Radiation Due to ESD Between Spherical Electrodes

Ken KAWAMATA<sup>\*1</sup>, Shigeki MINEGISHI<sup>\*\*</sup>, Osamu FUJIWARA<sup>\*\*\*</sup>

(Received January 29, 2013; Accepted April 10, 2013)

Directivity and polarization of electromagnetic (EM) field radiation due to low voltage electrostatic discharges (ESDs) between two metal balls were examined experimentally. In addition, an antenna effect of the electromagnetic field radiation was investigated to clarify radiation factors due to ESDs at low voltages below 600 V. For those objectives, we constructed an experimental system, which consists of a pair of spherical electrodes, a 1-18 GHz horn antenna and 3 GHz digitizing oscilloscope. Results showed that the EM field radiation becomes large with increasing the discharge voltages and the size of the spherical electrodes. It should be noted, in particular, that the EM radiation levels increase in proportion to the sphere diameters. The ratio of the directivity between front value and side value was about 18 dB. Also, ratio of the polarization between arrangement with polarization plane and arrangement perpendicular to polarization plane was 18- 20dB. As a result, we found that the directivity and polarization of EM radiation look like radiation from a dipole antenna structure which makes the spark part of spherical electrodes a feeding point on the straight line passing through the two sphere centers.

## 1. はじめに

充電された物体との衝突や接触によって静電気放電 (ESD: electrostatic discharge) が発生し, 広い周波数帯域にわたる急峻な過渡電圧変動が生じる. 特に, 電気システム内において発生した放電によるインパルス性の過渡電圧波は系内を伝搬し, 電気・電子素子の直接的な破損や回路の誤動作を誘発し, システムの致命傷ともなり得る. 一方, 近年の電気電子システム内部では情報伝達信号のデジタル化, 低レベル化が進み, システムの高性能化, 低電力化を実現している. その反面で, 外来電磁雑音, 特にギャップ放電などのインパルス性の雑音波による影響を受

けやすい傾向にあり, 環境電磁工学 (EMC: electromagnetic compatibility) 上の重要な問題となっている<sup>1)</sup>.

このような中, ESD によって発生する電磁雑音特性について種々の検討がなされ, 現象の究明が進められつつある. 例えば, インパルス性の電磁雑音波が電子計算機に致命的な障害を与える懸念について早くから報告され, ESD に伴う電磁障害の危険性が指摘されている<sup>2-4)</sup>. また, ESD によって発生する電磁雑音特性の解明に向け, 発生電磁界の定量化および特異性について多角的に究明が進められている<sup>5,6)</sup>. さらに, ESD による電磁雑音特性を究明する上で, 時間領域による測定的重要性に着目し, 時間領域測定手法の提案がなされている<sup>7,8)</sup>. また, これら現象究明の取り組みと並行して, 数 kV オーダにおける静電気放電によって発生する放射電磁波の実測と解析を行った事例なども報告されている<sup>9,10)</sup>.

これまでの報告によれば, 比較的到低い充電電圧による ESD の方が電磁界の変動レベルが高い場合があり, また, 非常に高い周波数成分を含んでいることが示唆されている. しかし, 放電に伴う過渡変動は非常に急峻で高周波数帯域の現象であり, 過渡要因究明が難しい現状にあった. そこで筆者らは, 特に広帯域の電磁妨害波発生が懸念される 1 kV 以下におけるマイクロギャップ放電に着目し, 放電に伴う過渡電圧立ち上がり時間特性ならびに周波数スペクトル分布特性について検討を進めてきた<sup>11)</sup>. その結果, 放電開始時の電圧立ち上がり時間は 12 GHz 帯域測定において約 30 ps 程度あるいはそれ以下

本稿は, 平成 24 年度静電気学会全国大会におけるスペシャルセッションに関連して論文募集を行い, 査読審査を経て採択された論文である.

キーワード: 電磁妨害波, 電磁波, 放射, 放電, EMC, ESD

\* 東北学院大学工学部電子工学科  
(〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目 13-1)  
Tohoku Gakuin University, 1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

\*\* 東北学院大学工学部電気情報工学科  
(〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目 13-1)  
Tohoku Gakuin University, 1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

\*\*\* 名古屋工業大学総合工学プロジェクト研究所  
(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)  
Nagoya Institute of Technology, Gokishiyo-machi, Nagoya, 466-8555, Japan

<sup>1</sup> kawamata@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

と非常に急峻であることを確認した<sup>12)</sup>。また、放電電圧と電極外部に放射される電磁波強度の関係について実験的に検討し、約 900 V 以下では放電電圧に反比例して放射電磁波強度が高くなることを確認した<sup>13)</sup>。さらに、低電圧 ESD に伴う放射電磁波強度は、電極表面状態の影響を大きく受けることを確認した<sup>14)</sup>。さらに、これらの結果を受け、球状電極およびホーンアンテナを用いて 1-3 GHz の広い周波数範囲の放射電磁波成分の強度特性について検討を行った結果、放電電圧すなわち電極の充電電圧と電極の大きさが電磁波放射特性に関係していることを実験的に確認した<sup>15)</sup>。

本論文では、球電極放電によって発生する電磁波の放射特性を明らかにするため、電極サイズと放射強度、放射の指向特性、さらには偏波面特性について実験的に検討を行った。また、得られた結果を基に放電に伴う電磁波の放射要素について考察した。

## 2. 球電極を用いた電磁波放射強度の実験システム

### 2.1 実験システムの構成

球状電極による放射電磁波強度の実験システムを図 1 に示す。システムは放電電極による電磁波放射部とアンテナによる受信部からなっている。放射電磁波の受信部はアンテナとしてダブルリジッドガイドホーンアンテナ (ETS3115, 1-18 GHz) およびデジタルオシロスコープ (Tek. TDS694C, 3 GHz, 10 GS/s) にて構成した。受信用ホーンアンテナは、放射される電磁波の波長に対して十分な遠方電磁界となるよう、放電電極部から約 1 m の距離に配置した。同軸ケーブル (5D2W) および 10 dB の抵抗減衰器 (SUHNER, DC-12.4 GHz) を介してデジタルオシロスコープに接続した。なお、今回使用したダブルリジッドガイドホーンアンテナのアンテナ係数は 1 GHz から 3 GHz の帯域で約 5 dB 程度の変化であり、アンテナ係数による補正等を行っていない。また、アンテナの偏波面は球電極対の配置に合わせて整合させている。

放電発生側は、出力高抵抗を有した高電圧直流電源、球状放電電極さらには給電用フィーダー線として高抵抗線で構成している。球状電極は真鍮製の導体球を用い、同じ大きさの真鍮球を対向させ放電電極とした。球電極は発砲スチロール製の台座に配置し、高抵抗線および集中素子の高抵抗を介して高電圧直流電源に接続した。今回使用した放電電極の直径、表面積さらには Type (a) を基準とした表面積の比率を表 1 に示す。電極のサイズは 4 種類とし、直径は Type (a) が 12.8 mm, (b) が 19.0 mm, (c) が 25.5 mm, さらに (d) が 30.0 mm である。また、電極の表面は液状の金属研磨剤 (研磨剤:

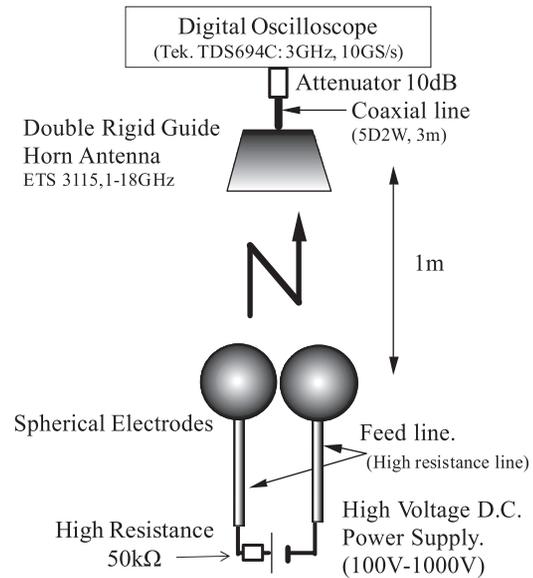


図 1 球電極 ESD に伴う電磁波強度の測定システム  
Fig.1 Experimental system of electromagnetic radiation due to ESDs between two spherical electrodes.

表 1 電極のサイズ  
Table 1 Size of spherical electrodes.

Type	Diameter [mm]	Surface Area [m <sup>2</sup> ]	Ratio of Surface Area
(a)	12.8	$0.515 \times 10^{-3}$	1.0
(b)	19.0	$1.134 \times 10^{-3}$	2.2
(c)	25.5	$2.043 \times 10^{-3}$	4.0
(d)	30.0	$2.827 \times 10^{-3}$	5.5

アルミナ, 平均粒径約 3  $\mu\text{m}$ , #4000 番相当) で研磨しアルコールにて洗浄した。

### 2.2 実験および放射強度の測定方法

実験は電極間に一定電圧を印加し電極を充電した上で、電極の間隔を徐々に接近させ、放電が発生した瞬間のホーンアンテナによる受信電圧波形をオシロスコープにより時間領域にて観測した。なお、電極の移動は手動で行い約 1 cm/s 程度のゆっくりとしたスピードで電極間隔を接近させた。また、今回の放電電圧 (電極充電電圧) 範囲は 300 V から 600 V とし 50 V 間隔で実験を行った。各電圧において 100 回以上の測定を行い、その平均値により放射電磁波強度を求めた。また、複数回の測定により放電箇所が集中しないよう、数回ごとに電極の対向面を変化させ測定を行った。なお今回の電圧範囲 300 V から 600 V における放電時のギャップ長は文献<sup>12)</sup>より推察すると、約 4  $\mu\text{m}$  から約 35  $\mu\text{m}$  と考えられる。このため、放電路からの電磁波の直接放射は非常に小さいものと考えられる。また、今回の実験は電波暗室および恒温室等を用いず、一般的な実験室環境で行った。こ

のため温度、湿度、気圧等の制御は行っていないが、極短ギャップの球電極対であるため平等な電界分布となりコロナ放電を経ないで火花放電が発生するものと考えられる。このため、湿度変動の影響は比較的小さいものと考えている。さらに、今回取り扱う放射電磁波の過渡的な変動時間は1 ns以下であり、実験システム周辺の壁面、床面および什器等からの反射波の影響は、時間的に十分に分離できる範囲である。また、本実験における電磁波の放射強度は、デジタルオシロスコープで観測された受信電圧波形の振幅値 (peak to peak 値) を用いて定義した。このため、本論文で用いる電磁波の放射強度は相対値である。

### 3. 電極サイズと電磁波放射強度の関係

2章で示した実験システムを用い、放電電圧に対する電磁波の放射強度の関係について電極サイズをパラメータとして示した結果を図2に、さらにこの結果から電極直径と電磁波放射強度の関係を抽出した結果を図3にそれぞれ示す。これらは先行研究の文献15)にて示した結果であるが、電磁波放射の主たるパラメータとして電極直径と電極表面積との関係を詳細に検討するため改めて示した。

まず図2は電極への印加電圧すなわち充電電圧と電磁波の放射強度を表す受信電圧の関係である。図中の◆はType (d)の電極直径30.0 mmの場合であり、■は(c)25.4 mm、▲は(b)19.0 mm、さらには●は(a)の12.8 mmにおける受信電圧の変化である。各プロットは100回以上の実験における平均値で表しており、電極のサイズをパラメータとしている。これを見ると、放射強度は充電電圧に概ね比例している傾向が確認できる。ただし、今回の実験条件においては、文献15)にて示す通り、640 V以上の電圧で受信電圧のばらつきが発生し、放射強度の低下がみられた<sup>15)</sup>。このため、放電に伴う電磁波の放射強度は必ずしも電圧に比例しない部分があることを示唆するものとする。今回の議論は充電電圧と受信電圧が概ね比例する600 V以下の範囲で検討を行った。次に図3および図4に、電極の大きさと受信電圧の関係を示す。両図とも各プロットは100回以上の実験による平均値である。まず、図3の電極直径と受信電圧の関係は、直線の一次関数で近似可能であり比例の関係にあることがわかる。これに対して、図4の電極表面積と受信電圧の関係は、今回の電極サイズと充電電圧範囲では、電極表面積の増加に従って受信電圧は上昇するものの、電極表面積と電磁波の放射強度の関係は飽和する傾向にあることがわかる。一般的には、電極の充電荷量

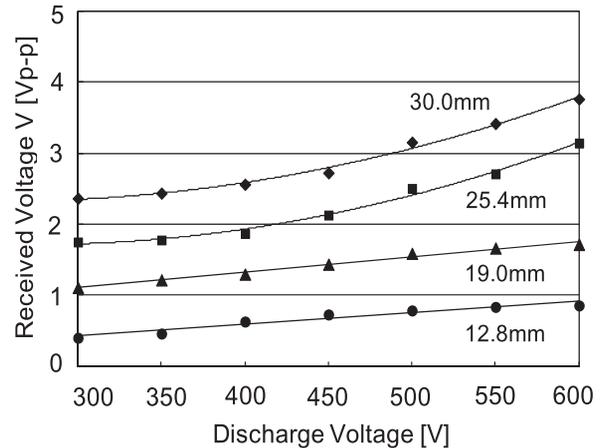


図2 放電電圧と受信電圧 (電磁波放射強度) の関係  
Fig.2 Relationship between discharge voltages and received voltages.

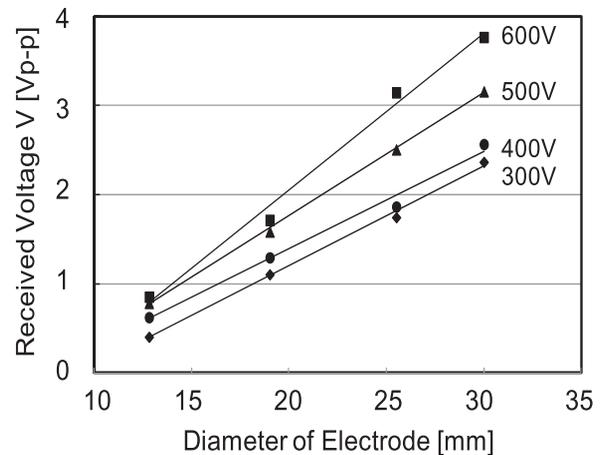


図3 電極直径と受信電圧 (電磁波放射強度) の関係  
Fig.3 Relationship between sphere diameters and received voltages.

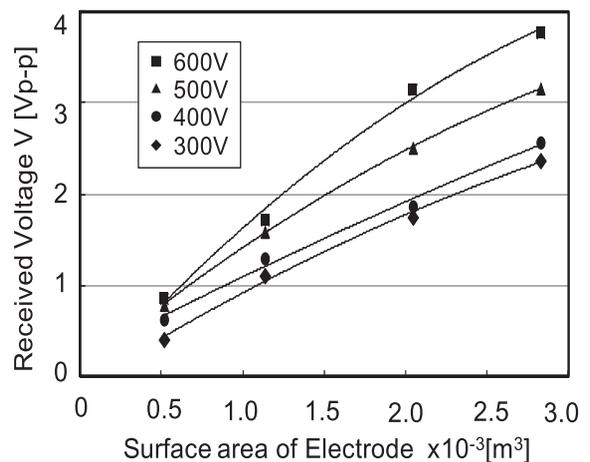


図4 電極表面積と受信電圧 (電磁波放射強度) の関係  
Fig.4 Relationship between sphere surface areas and received voltage.

$Q_E$  は電極間の静電容量  $C_E$  および充電電圧  $V_s$  の積で決定される。これらから、電磁波放射の励振ソースとなる電極間の初期エネルギー  $W_i$  は次式で示される。

$$W_i = (1/2) Q_E \cdot V_s \dots\dots\dots (1)$$

但し  $Q_E = C_E \cdot V_s$

式 (1) の関係から、励振エネルギーの決定パラメータの一つとして電荷量  $Q_E$  が位置づけられる。また、電荷量  $Q_E$  を決定する電極間の静電容量  $C_E$  は対向する電極の表面積に比例すると考えられる。しかし、放射強度と表面積の関係が必ずしも比例の関係にないことから、電磁波放射要素としてより強く影響を与える放射要素が複合して関係していると考えられる。

4. 電磁波放射の指向特性と偏波面特性

球電極間の放電に伴う電磁波放射パラメータの一つとして、充電電圧および充電電荷量で決まる静電的なエネルギーが関係していることを確認した。本章では、さらに放射要素となる球電極の配置の効果を確認するため、電磁波放射の指向特性ならびに放射特性について検討を行った。

4.1 電磁波放射の指向特性

図5に指向特性の測定システム図を示す。これまでと同様の図1のシステムを用いてホーンアンテナの位置を0度（電極対正面）から90度（電極対側面）まで変化させ、球電極間の放電に伴う電磁波の放射強度を測定した。なお、電極直径はType (d) の30.0 mmであり、放電電圧は文献15)の結果において放射が最大付近となった620 Vで測定を行った。

図6に指向特性の測定結果を示す。受信電圧値は10回以上の測定による平均値である。結果をみると、電極正面において約4.2 Vp-p程度の受信電圧が観測されているが、電極側方では放射強度が低下し受信レベルが低下する傾向が見られた。電極の側方90度では受信電圧は約0.5 Vp-p程度となり、Front/Side比は約18 dB程度であることがわかった。この結果から推察すると、電極間の放電に伴って発生する電磁波放射の指向特性は、球体中心間を結ぶ直線上で放電部を給電点とするダイポールアンテナを配置した場合の放射パターンに類似していることが確認できる。このことから電磁波の放射要素として、球電極対の配置による系のアンテナ効果が放射強度に大きく関係していることがわかる。

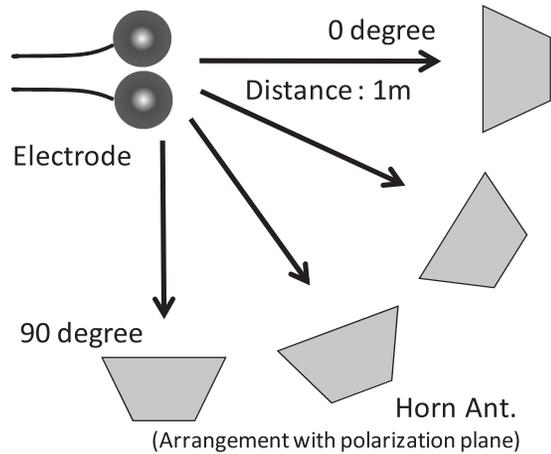


図5 電磁波放射の指向特性測定システム  
Fig.5 Experimental setup for directivity of electromagnetic radiation.

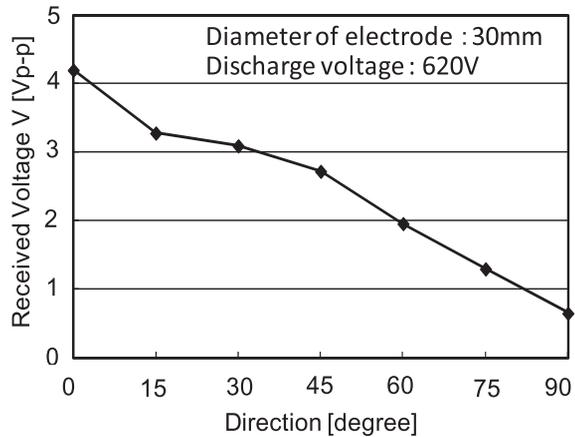
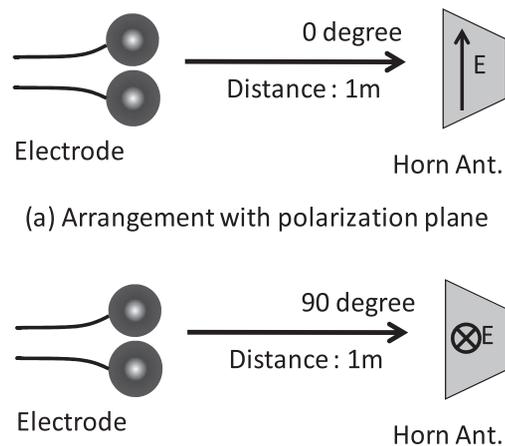


図6 球電極対からの電磁波放射の指向特性  
Fig.6 Directivity of electromagnetic radiation.



(a) Arrangement with polarization plane  
(b) Arrangement perpendicular to polarization plane

図7 電磁波放射の偏波面特性の測定  
Fig.7 Experimental setup for characteristics of polarization plane.

### 4.2 電磁波放射の偏波面特性

前節の結果から、放電に伴う電磁波の放射要素の一つとして球電極対の配置による系のアンテナ効果が大きく関係することがわかった。本節では、電極のアンテナ効果の関連を検証するため、電極配置が関係する偏波面特性について考察を行った。図7に球電極対から放射される電磁波の偏波面特性を確認するための実験システムを示す。システムはこれまでの図1を基本として、球電極対のダイポールエレメントにより作られる電界面に対して、受信のダブルリジットガイドホーンアンテナの偏波面を揃えた場合、あるいは90度直交させた場合について測定を行った。図(a)が偏波面を揃えた場合であり、図(b)が90度直交させた場合である。

偏波面特性の結果を図8に示す。結果は、電極 Type (d) の直径 30.0 mm の場合である。図において、横軸が放電電圧、縦軸が受信電圧すなわち電磁波の放射強度を表している。また、◆のプロットが偏波面を揃えた場合であり、■のプロットが偏波面を90度直交させた場合である。偏波面を揃えた場合、放電電圧 500 V から 600 V における電磁波の受信電圧は約 3.4 V から 4.1 V 程度を示した。これに対して、偏波面を90度直交させた場合の受信電圧は約 0.4 V 程度であった。この結果から、ホーンアンテナの偏波面を揃えた配置と直交させた配置による受信電圧の変化は、4.1節にて確認した指向特性と同様の 18 dB から 20 dB 程度の差であることが確認できた。このことから、偏波面特性もダイポールアンテナからの放射特性と類似しており、球電極 ESD に伴う電磁波の放射要素として、電極配置による系のアンテナ効果の影響が関わることを確認した。

### 5. 電磁波の放射要素に関する考察

以上の検討から、球電極放電に伴う電磁波の放射要素としては、電極の静電容量と充電電圧で決まる電極間の静電エネルギーが放射の初期エネルギーとなり、さらに電極の大きさや配置による放射エレメントとしてのアンテナ効果との相乗によって放射が成立するものと考えられる。電磁波放射の初期エネルギーとなる静電エネルギー  $W_i$  は式(1)で示したとおり、電極間の静電容量  $C_e$  すなわち表面積に比例する。しかし、今回の検討では、図3および図4の結果から、電磁波の放射強度は電極の表面積よりも電極の直径に強い関係が確認できた。電極の直径は、放電に伴って移動する電荷が作る電流の経路長、すなわち放射回路の励振パス長  $l$  に比例する。このことから、放電による電磁波の放射には電極に付随する回路の励振パス長などのアンテナ効果が強く関

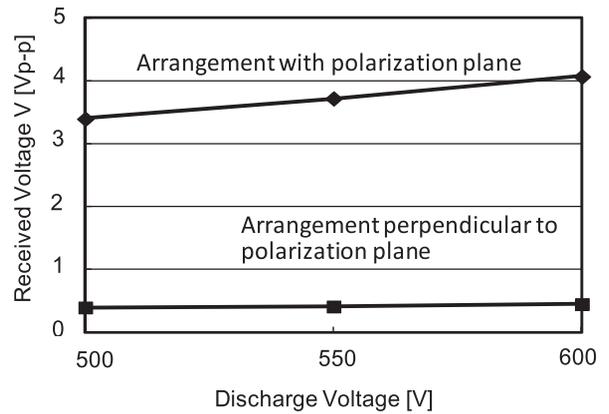


図8 電磁波放射の偏波面特性 (電極 type (d))  
Fig.8 Experimental result of the plane of polarization due to electromagnetic radiation in sphere gap.

係していると考察できる。

また、放射メカニズムとしては、励振ソースの初期エネルギーとなる静電エネルギーにより、充電電荷  $Q_e$  の一部  $q$  が時間的にある割合で移動し放電電流  $i$  を形成する。一方、微小ダイポールによる放射電磁界は電流波形の時間微分に比例することが知られている<sup>6, 16, 17)</sup>。したがって、電磁波放射の励振強度  $R_{EM}$  は、上述の放射回路の励振パス長  $l$  および励振パスに流れる電流の時間変化  $di/dt$  によって決定されると考えられる。これらの関係から放電に伴う電磁波放射の励振強度は次式(2)で関係付けることができる。

$$R_{EM} \propto l (di/dt) \dots\dots\dots (2)$$

但し、 $i = dq/dt$

しかし、電極の充電電荷量  $Q_e$  と放電によって移動する電荷量  $dq$  の割合およびその時間変化は、ブレイクダウン時の電極間の電位傾度や絶縁破壊の進展に伴う火花抵抗の変化など複雑に影響を受ける<sup>16, 17)</sup>。このため定量的な解明に至っていないのが現状である。今後、現象の抜本的な究明に向け検討を進める予定である。

### 6. まとめ

球電極の放電によって発生する電磁波の放射特性を明らかにするため、電極サイズと放射強度、放射の指向特性、さらには偏波面特性について実験的に検討を行った。また、得られた結果を基に、放電に伴う電磁波の放射要素について考察した。

その結果、電磁波の放射強度は球電極の大きさによって変化し、特に電極の直径に比例することを確認した。

さらに指向特性ならびに偏波面特性の測定結果から、両特性はダイポールアンテナからの放射特性に類似しており、放射要素として電極を構成する回路系のアンテナ効果が放射要素に大きく関係していることを確認した。

これらを整理すると、球電極放電に伴う電磁波の放射要素としては、(1) 電極の静電容量と充電電圧で決まる電極間の静電エネルギーが放電の初期エネルギーとなり、(2) 放電の発生によって電極に流れる電流の時間変化  $di/dt$  が放射回路を励振するソースとなる。さらに、この励振ソースと (3) 電極の大きさや配置による放射エレメントとしての回路のアンテナ効果が相乗的に関係して放射メカニズムを構成していると考えられる。なお、各放電パラメータとこれらの放射要素・メカニズムの相互の関係について今後より詳細に検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 例えば, 高木 相: EMC/EMI 関連測定とその測定技術に関する我が国の研究開発. 信学論, **J79-B-II**[11] (1996) 718-726
- 2) 本田昌實, 川村雄克: ESD の特徴と計算機に対する影響 (その1), 信学技報, EMCJ83-75, pp.25-30 (1983)
- 3) 川村雄克, 本田昌實: ESD の特徴と計算機に対する影響 (その2), 信学技報, EMCJ83-87, pp.13-17 (1984)
- 4) 本田昌實: 金属物体で発生する静電気放電 (ESD) 現象の脅威. 信学誌, **78** [9] (1995) 849-850
- 5) 藤原 修: ESD のソースモデルと発生電磁界, 第31回東北大学電気通信研究所シンポジウム「放電と EMC」, pp.95-100 (1994)
- 6) 藤原 修: ESD 現象をとらえるソースモデルと界特性. 信学誌, **78** [9] (1995) 851-852
- 7) 石上 忍, 横島一郎, 五木田良一, 西山良文: 微小ギャップ電極間放電による過渡磁界の測定, 信学技報, EMCJ93-43, pp.13-18 (1993)
- 8) 岩崎俊一, 石上 忍: ESD のタイムドメイン計測, 第31回東北大学電気通信研究所シンポジウム「放電と EMC」, pp.87-94 (1994)
- 9) 馬杉正男, 村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄: 間接 ESD に伴う電磁パルスの計測と解析. 信学論, **J75-B-II** [9] (1992) 647-654
- 10) 馬杉正男: 電気ダイポールによる静電気放電の過渡応答解析. 信学論, **J75-B-II** [12] (1992) 981-988
- 11) K.Kawamata, S.Minegishi and A.Haga: Wideband measurement of transition duration and frequency spectra due to small gap discharge as low voltage ESD, Journal of ELECTROSTATICS, **62** (2004) 185-193
- 12) 川又 憲, 嶺岸茂樹, 芳賀 昭, 藤原 修: マイクロギャップ放電に伴う過渡電圧・電流立ち上がり波形の 12GHz 帯域測定と電極間電界強度特性. 信学論, **J90-B** [11] (2007) 1143-1148
- 13) 川又 憲, 嶺岸茂樹, 芳賀 昭, 藤原 修: 1kV 以下のマイクロギャップ放電に伴う放射電磁波強度の一測定. 信学論, **J92-B** [2] (2009) 506-508
- 14) 川又 憲, 嶺岸茂樹, 藤原 修: マイクロギャップ放電に伴う放射電磁波強度と電極表面状態の影響に関する一考察. 電学論 A, **130** [5] (2010) 445-450
- 15) 川又 憲, 嶺岸茂樹, 藤原 修: 球電極間放電に伴う低電圧 ESD による 1-3GHz 帯域放射電磁波の一測定. 電学論 A, **132** [5] (2012) 368-372
- 16) 藤原 修: 静電気放電の基礎. エレクトロニクス実装学会誌, **14** [4] (2011) 248-253
- 17) 藤原 修: 静電気放電の発生電磁界と FDTD シミュレーション. 信学論, **J94-B** [11] (2011) 1452-1460