

電子機器の信号伝送線路に及ぼす静電気放電ノイズの
影響に関する基礎研究

富田 一*, 田島泰幸*

Study on Influence of Electromagnetic Noise Radiated by Electrostatic
Discharge on Signal Transmission Lines of Electronic Equipments

by Hajime TOMITA* and Yasuyuki TABATA*

Abstract; Electronic equipments driven by microcomputer, which are commonly used for factory automation (FA) and computer integrated manufacturing (CIM), are susceptible to electromagnetic interference (EMI) due to electromagnetic noise, because their signal level is relatively low. Malfunctions of an electronic equipment induced by electromagnetic noise sometimes bring about industrial accidents and electrostatic discharge (ESD) is one of the main noise sources in industry. For example, ESD from a charged worker gives malfunctions of an electronic equipment in the vicinity. To prevent such accidents due to ESD, transient change of electric field, influence of discharging gap length on noise spectrum and electromagnetic energy of noise radiated by ESD have been studied by focusing mainly on ESD from a human body. On the other hand, typical capacitance of a conductive charged matter in industry ranges from several to a few hundred pF. Few are studied on the influence of capacitance of a charged matter on electromagnetic noise radiated by ESD.

In this paper, the influence of capacitance of a conductive charged matter on the noise induced by ESD was studied experimentally with special reference to the effect on signal transmission lines of electronic equipments. A capacitive spark circuit was used as a model of ESD generation and a loop antenna for magnetic field detection was used as a model of a signal transmission line. The principal results obtained by this study are as follows;

- (1) The rate of change of discharge current was maximum for the capacitance of less than 3pF and the gap length of less or equal 0.5 mm.
- (2) The peak-to-peak voltage of noise induced in the loop antenna located 10 cm away from an ESD source increased in proportion to the capacitance up to 1000 pF for the gap length of 0.5 and 2 mm.
- (3) The peak-to-peak voltage induced in the loop antenna located 2m away from an ESD source was maximum for the gap length of 0.3 mm and the capacitance of about 3 pF. This result approximately coincided with that for the effect of the rate of change of discharge current.
- (4) The dependence of the peak-to-peak voltage induced in the loop antenna located 2m away from an ESD source on capacitance was small for the capacitance ranging from about 3 to 1000 pF.

(5) The peak was observed on the spectrum of magnetic field measured at 2m away from an ESD source, and the frequency which gave maximum magnetic field intensity decreased with the square root of capacitance.

Keywords; Static electricity, Electrostatic discharge, Electromagnetic noise, Electromagnetic interference, Electromagnetic field

1. ま え が き

近年、マイクロエレクトロニクス革命によって、電子機器・システムには生産性の向上・自動化等を目的としてマイクロコンピュータの導入が一般化し、その結果、工場のFA化、統合FAシステムとしてのCIM（生産に関連する全ての情報等の一元的な管理を行って最適な生産を図るシステム）も進展している。マイクロコンピュータにはIC、LSI等の高集積半導体素子が数多く使用されているが、これらの伝送信号は僅か数ボルトでクロック周波数が数十MHzと高速であるため、外来の不要な電磁波（電磁ノイズ）の影響を受けやすい。そのため、電磁ノイズが電子機器のマイクロコンピュータに電磁干渉してデジタル回路のビットを反転させ、結果として電子機器のシステムダウンや誤作動によって労働災害が発生している。たとえば、CNC工作機械がクレーンからの火花放電（一種の電磁ノイズ）によって誤作動した結果、作業者が死亡した事故¹⁾や、列車の非常無線にマイクロコンピュータからの電磁ノイズが電磁干渉して使用不能となるという、大事故につながりかねない障害も発生している。

電磁ノイズ源には、雷放電によって発生する電磁ノイズ（空電）のような自然現象によるもののほか、アーク溶接機等の放電加工機、高周波加熱装置等の高周波利用設備、サイリスタを用いた電力設備、製品の搬送中の摩擦等によって発生する静電気の放電といった人工的なものと多岐にわたっている。これらの電磁ノイズ源の一つとして静電気放電（ESD）があり、ESDによる電磁ノイズ（以下、ESDノイズと略記することがある。）が原因となった製造工程のシステムダウン²⁾も発生している。

静電気は生産現場で作業する作業者にも発生、帯電し、作業者からのESDはマイクロコンピュータによって制御されている工作機械、電子装置等の電子機器きょう体へ直接あるいは機器近傍で発生することも多く、産業現場に大きな影響を及ぼしている。ま

た、帯電物体が電子機器に接続された非接地の金属片等の導体近傍に存在すると、静電誘導によって、導体が帯電したと等価となり、これと接地物体との間でESDが発生し、電子機器に大きな影響を及ぼすこともある。

ESDノイズについては、電子機器の誤作動防止を目的として静電界の影響³⁾、帯電電位と発生する電磁ノイズとの関係^{4)~6)}、放電時に帯電物体が接地体に接近する場合の電磁ノイズ⁷⁾等について研究されている。しかし、これらの研究は主に人体からのESDを対象としており、生産現場における様々な静電容量を有する帯電物体を対象とした研究は少ない。本研究では、主に帯電物体の静電容量とESDによって発生する電磁ノイズが電子機器の信号伝送線路に及ぼす影響を解明するため、ESDをモデル化した容量性放電回路を用いて、放電条件（帯電物体の静電容量、放電電極間隔、帯電極性、放電電極）と、信号伝送線路の一例として、低インピーダンスの伝送線路にESDノイズが及ぼす影響について基礎的な検討を行った。また、電磁ノイズの周波数スペクトルに及ぼすESDノイズの影響についても実験的検討を行った。その結果、帯電物体の静電容量が数pFから300pF程度までについては、放射電磁界が支配的である領域に置かれた低インピーダンス信号伝送線路に誘導するノイズレベルは、帯電電位が2~3.5kVで最大となること、また、帯電物体の静電容量が増加するとESDノイズの周波数スペクトルに現れるピークが低周波側に移行することなど、ESDノイズに関する知見が得られた。

2. 実験方法

ESDを模擬する容量性放電回路（以下、放電回路という）は、金属が帯電した場合を対象としており、金属帯電物体の静電容量を模擬したコンデンサ（以下、コンデンサという）、放電電極（直径0.8mmの金属細線及び直径6, 20, 25mmのSUS球の4種類）及び接地電極（直径20mmのSUS製球）より構成

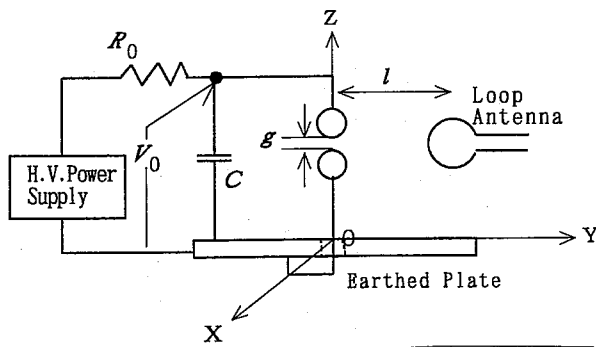


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.
実験装置の概要

されている (Fig. 1)。放電回路の電気的接続には、インダクタンス成分を可能な限り小さくする目的で金属ロッド (直径 10 mm) と銅製テープを使用し、金属ロッドと銅製テープのインダクタンスは LCR メータ (ヒューレットパッカド, 4332A 型) で測定したところ $0.2 \mu\text{H}$ であった。先端に接地電極の接続された可動金属ロッド (直径 10 mm, 長さ 8 cm) は、正方形銅板 (50 cm \times 50 cm \times 3 mm) の中心に開けられた円形開口部分 (直径 25 mm) にアクリルによって保持され、放電電極間隔が 0 mm のとき、接地電極の最上部は銅板表面より 20 mm 上方に位置する。コンデンサへの静電エネルギーの供給には、充電抵抗 R_0 (1000M Ω) を介して接続された直流高電圧電源を使用した。コンデンサに蓄積された静電エネルギーは放電電極—接地電極間に放電によって放出され、放電は主に充電抵抗 R_0 とコンデンサの静電容量 C によって定まる時定数 CR_0 に依存して間欠的に繰り返される。放電電流の検出には接地電極と正方形銅板間に接続された 2 種類のカレント・トランス・フォーマ CT-1 (テクトロニクス, 周波数帯域: 25 kHz~1 GHz) 及び CT-2 (テクトロニクス, 周波数帯域: 1.2 kHz~200 MHz) を使用し、放電電流波形の観測にはデジタル・ストレージ・オシロスコープ (ヒューレットパッカド, HP54510A 型, 周波数帯域: DC~250 MHz) を使用した。電磁ノイズ測定には、ノイズの周波数スペクトル分析を目的として、磁界測定専用の EMI プロブ (アンリツ, MA2601B 型, 周波数帯域: 5~1000 MHz) 及び電界測定用のアクティブ・ダイポール・アンテナ (アドバンテスト, TR17203 型, 周波数帯域: 25~230 MHz) を使用し、周波数スペクト

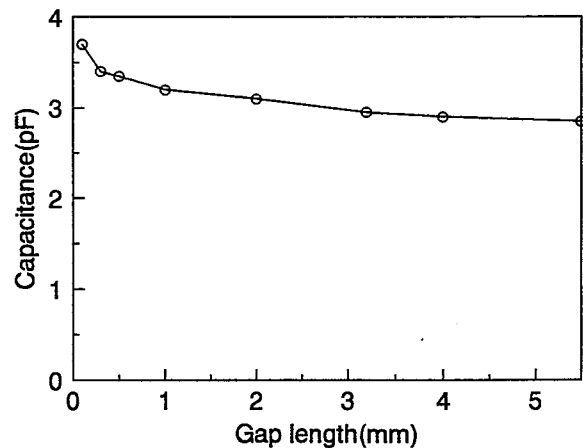


Fig. 2 Dependence of capacitance between discharging and earthed electrodes on gap length (Diameter: 20 mm).
静電容量の放電電極間隔依存性 ($D = 20 \text{ mm}$)

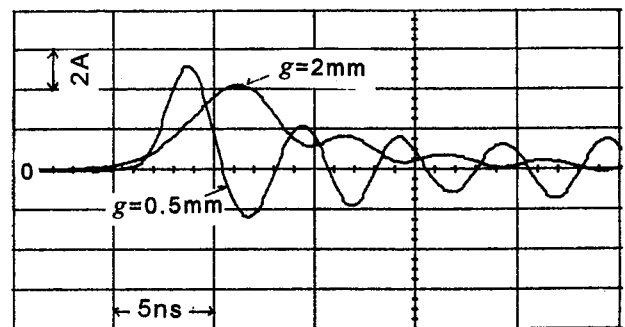


Fig. 3 Example of discharge current wave form.
放電電流波形の例

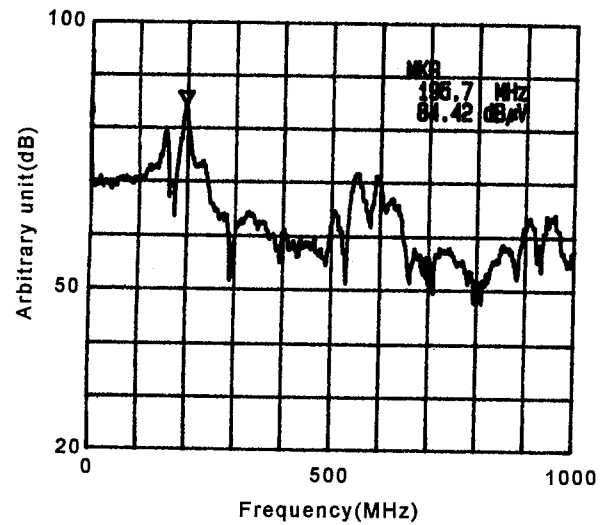
ルの分析にはスペクトラム・アナライザ (アドバンテスト, R3361A 型, 周波数帯域: 9 kHz~2.6 GHz) を使用した。また, ESD が信号伝送線路へ及ぼす影響を測定するモデルとして, 50 Ω で終端された EMI プロブを使用し, 電磁シールドの効果を調べる目的で, シールドのない 50 Ω で終端された正方形 (22 mm \times 22 mm) の線路 (以下, 低インピーダンス線路という) も使用した。これらは, 電子機器のマイクロコンピュータにおいて半導体素子間を接続する信号伝送線路 (以下, 信号伝送線路という) によって形成される, インピーダンスの低い閉回路をモデル化したものである。測定は電波暗室 (TDK, 電磁界遮蔽率: 90 dB 以上 (150 kHz~1 GHz)) の中で行った。

3. 実験結果及び考察

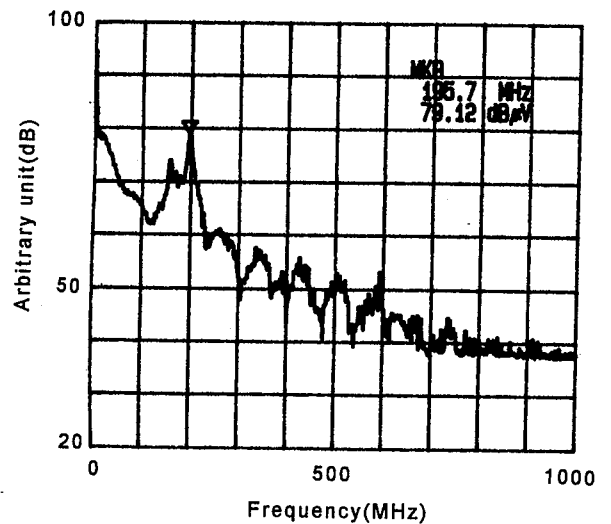
3.1 放電電極間隔と放電電流

ESD ノイズの特性は、基本的に放電電流に依存する⁴⁾ことから、まず、放電電流波形について調べた。実験は帯電物体として直径 (D) 20 mm の放電電極を使用し、放電電流の検出にはカレント・トランス・フォーマ (CT-2) を使用した。なお、この放電電極自体の静電容量は約 3 pF である (Fig. 2)。Fig. 3 は放電電極間隔を変えたときの放電電流波形の例であり、放電電極間隔が 0.5 mm ではピーク値が 5A の正負に振動をともなう減衰波形となり、放電電極間隔が 2 mm ではピーク値が 4A の正極性のみ小さな振動をともなう指数関数的減衰波形となっている。放電電極間隔が 0.5 mm では放電電極間の放電時の等価的な抵抗 R 、インダクタンス L と帯電物体の静電容量 C との間に $R^2 < 4L/C$ の関係が成立するために、放電電流が正負に振動しながら減衰する波形となる。一方、放電電極間隔が 2 mm では等価抵抗 R が大きくなって $R^2 > 4L/C$ の関係が成立するために、正極性のみ小さな振動を伴いながら指数関数的に減衰する波形となることを示している。

Fig. 3 のような放電電流波形の周波数スペクトルを分析するため、Fig. 2 の放電系についてカレント・トランス・フォーマ (CT-1) で放電電流を検出し、スペクトラム・アナライザによって分析した。Fig. 4 は放電を繰り返し発生させながら求めた周波数スペクトルで、単発の現象の周波数スペクトルではない。しかし、放電電流波形の観測からは再現性がみられているため、Fig. 4 は単発現象のスペクトル分布をほぼ示していると考えられる。同図において、周波数が 1 GHz 以下の帯域での周波数スペクトルには、195.7 MHz にピーク (図中の▽印) があらわれ、これは金属電極の静電容量 (約 3 pF) と放電回路のインダクタンス (0.2 μ H) との共振周波数 (約 200 MHz) と考えられる。また、放電電極間隔が 0.5 mm では 25 kHz から 1 GHz の広帯域わたって周波数スペクトルが分布しているのに対し、放電電極間隔が 2 mm では周波数スペクトル分布のレベルが周波数の増大とともに減少し、900 MHz 程度でスペクトラム・アナライザの検出限界に達している。さらに、50 MHz 以下の周波数帯域では、放電電極間隔が 2 mm の場合の方が 0.5 mm の場合に比較してレベルが全般に高



(a) $g=0.5$ mm

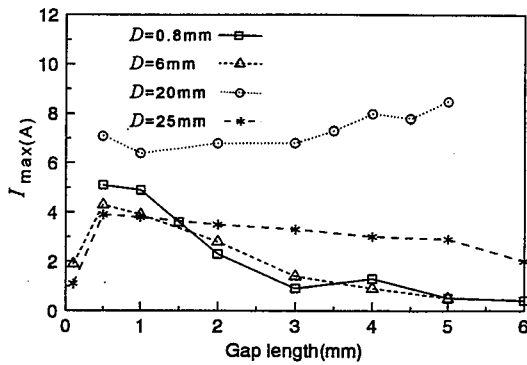


(b) $g=2$ mm

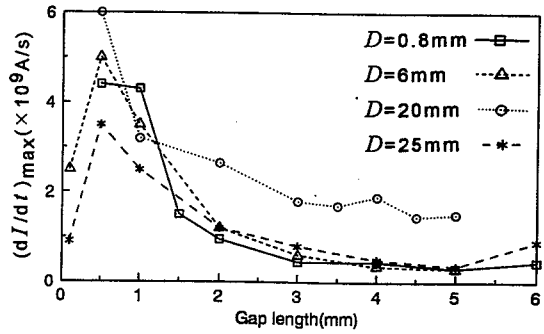
Fig. 4 Spectrum of discharge current wave form.
放電電流波形の周波数スペクトル

く、50 MHz 以上の周波数帯域では、逆に放電電極間隔が 2 mm の場合の方が 0.5 mm の場合に比較してレベルが全般に低い。この結果は、放電電流波形において、放電電極間隔が 0.5 mm に比較して放電電極間隔が 2 mm では放電電流の時間的な変化が緩やかとなり、放電電流の低周波成分のレベルが増加して高周波成分が相対的に減少した測定結果に一致している。

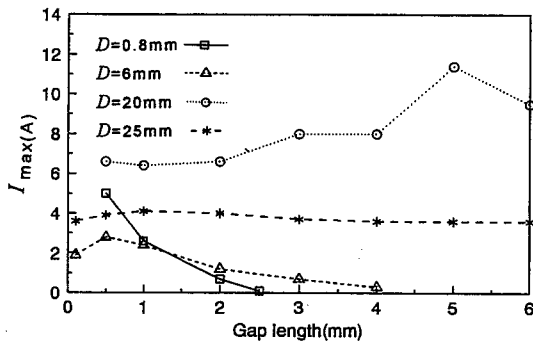
次に、Fig. 3 で示した放電電流のピーク値は誘導電磁界の最大振幅レベルを支配することから⁴⁾、放電電流のピーク値の放電電極間隔に対する依存性を



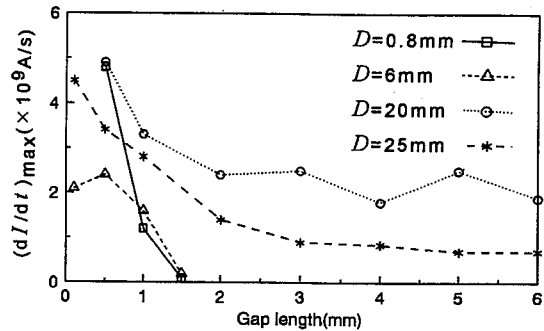
(a) Charging polarity: positive potential



(a) Charging polarity: positive potential



(b) Charging polarity: negative potential



(b) Charging polarity: negative potential

Fig. 5 Dependence of maximum discharge current on gap length.

放電電流の最大値の放電電極間隔依存性

4種類の放電電極を用いて測定した。これらの電極の静電容量は、 $D = 20 \text{ mm}$ は約 3 pF 、 $D = 25 \text{ mm}$ は約 2 pF 、 $D = 0.8$ 及び 6 mm はいずれも約 1.5 pF である。Fig. 5はその結果で、静電容量が数 pF と小さい場合においては、放電電流のピーク値の放電電極間隔に対する依存性が小さい場合 ($D = 25 \text{ mm}$) と、間隔の増大によって放電電流のピーク値が減少する場合 ($D = 0.8$ 及び 6 mm) のあることが示されている。これは、たとえば放電電流が指数関数的な減衰を示す場合、放電電極間隔の増大につれて放電時の放電部の等価的な抵抗 R が大きくなると同時に、放電電極—接地電極間の静電容量が減少することによって、放電電流を減少させる作用が働く一方、放電電極間隔の増大によって放電開始電圧（帯電電位）が上昇して放電電流を増加させる作用があるためとみられ、これらの作用が平衡したときが $D = 25 \text{ mm}$ 程度の場合で、前者が後者に比較して支配的となったときが $D = 0.8$ 及び 6 mm の場合と考えられる。

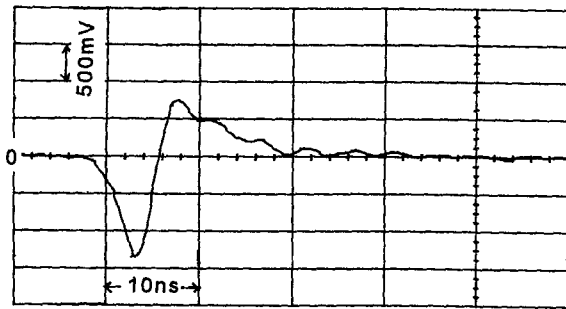
Fig. 6 Dependence of maximum changing rate of discharge current on gap length.

放電電流時間微分値の最大値の放電電極間隔依存性

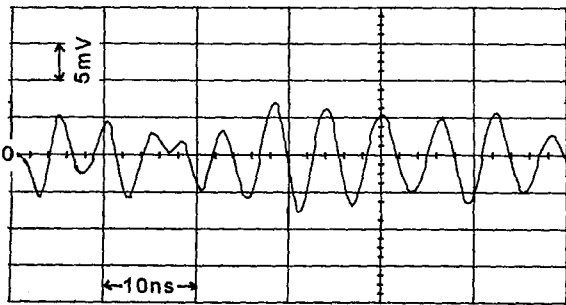
一方、放電電流の時間微分値は電磁ノイズの放射電磁界の特性を支配することから⁴⁾、放電電極間隔と放電電流の時間微分値との関係を4種の放電電極について実験した。Fig. 6はその結果であるが、帯電物体の静電容量が本実験のように数 pF と小さい場合においては、帯電極性にかかわらず、放電電極間隔が 0.5 mm 以下で放電電流の時間微分値が最大となった。このことは、ESDノイズの放射電磁界が支配的な領域で、電子機器の信号伝送線路への影響は、放電電極間隔が 0.5 mm （この時の帯電電位は 3 kV であった。）あるいはそれ以下で、ESDが最も大きくなることを示唆している。帯電電位が 3 kV の場合に電磁エネルギーが最大となることが、帯電物体の静電容量が 100 pF の場合について既に報告されており⁵⁾、静電容量が数 pF と小さな場合にも同様の現象が発生していることが示唆される。

3.2 誘導ノイズの距離依存性

ESDノイズと信号伝送線路との電磁干渉によって



Vert. scale:500mV/div., Horiz. scale:10ns/div.
(a) $l=5\text{cm}$



Vert. scale:5mV/div., Horiz. scale:10ns/div.
(b) $l=2\text{m}$

Fig. 7 Relation between noise wave form induced in the loop antenna due to ESD and distance (l) between ESD source and the loop antenna ($g = 2\text{ mm}$).
EMIプローブに誘導するノイズ波形の離隔距離依存性 ($g = 2\text{ mm}$)

誘起（以下、誘導という）されるノイズの距離依存性を、低インピーダンスの信号伝送線路に相当するEMIプローブによって測定した。使用したEMIプローブは約50MHz以上の周波数帯ではほぼ一定のアンテナファクタを有する（磁界強度/測定電圧変換係数：8~15dB）。しかし、約50MHz以下の帯域での感度は低く、周波数の低下とともに感度も低下する。測定時には、放電電極—接地電極間の中心を地上から92cmに固定し、EMIプローブのループアンテナの中心部分も地上から92cmに固定するとともに、ループアンテナの受信面をY-Z平面に一致させた。

なお、EMIプローブを用いた以下の誘導ノイズの測定においても、放電発生部（放電電極—接地電極）とEMIプローブとの空間的な配置は、放電発生部とEMIプローブのループアンテナ部分の中心との離隔距離（以下、離隔距離という）を除いて本節の冒頭で述べた実験条件と同一である。また、誘導ノイズの

観測には前述のデジタル・ストレージ・オシロスコープを使用した。

Fig. 7は、静電容量がFig. 2の特性を有する放電系を用い、放電電極間隔を2mm、帯電極性を正とした場合に、ESDによってEMIプローブに誘導するノイズ波形の例を示す。離隔距離が5cmでは、放電開始時に20ns程度持続する振幅の大きなノイズの発生がみられた(Fig. 7(a))。この離隔距離では次の理由により放射磁界に比較して誘導磁界が支配的（近接界）と考えられる。

ESDノイズは電気双極子からの放射とモデル化できることから⁴⁾、発生する電磁ノイズの磁界成分（誘導磁界、放射磁界）の振幅が同程度になる距離 r_0 は、発生する磁界の主な周波数を f とすると、 $r_0 = c/2\pi f$ （ここで、 c :光速）となる。離隔距離5cmが r_0 となる周波数は約1GHzで、放電電流の周波数スペクトルは低周波から高周波に移行するに従いレベルが低下する傾向があり(Fig. 4)、電磁ノイズの磁界も1GHz以下の周波数成分が支配的となることから、離隔距離が5cmは近接界と考えられる。

一方、離隔距離が2mでは、Fig. 7(a)とは異なり、高周波のノイズ（誘導ノイズの最初の部分は約160MHz）が80ns程度持続する振動ノイズであった(Fig. 7(b))。この領域では誘導磁界に比較して放射磁界が支配的（少なくとも準近接界）であると、次の理由により考えられる。まず、離隔距離2mが r_0 に相当する周波数を求めると、23.8MHzとなる。実験結果では、放電電流の周波数スペクトルが約900MHzにまで及んでおり(Fig. 4)、電磁ノイズの磁界の周波数成分は23.8MHz以上の成分である放射磁界が誘導磁界よりも支配的であるため、少なくとも準近接界領域と考えられる。なお、誘導ノイズ波形においても、Fig. 7(b)ではFig. 7(a)に比較して高周波の誘導ノイズになっており、誘導ノイズ波形を支配する磁界の周波数が高いこと、すなわち、Fig. 7(b)では放電電流の時間微分に支配される放射磁界の影響が支配的であると考えられる。ただし、EMIプローブは50MHz以下の磁界成分に対して感度が低いため、その影響もあって誘導磁界に比較して放射磁界による影響が一層顕在化したと考えられる。実際の信号伝送線路も、閉回路を形成する面積は異なるが基本的にはEMIプローブと同様に低周波に対して感度が低くなることから、離隔距離2mの観測点では

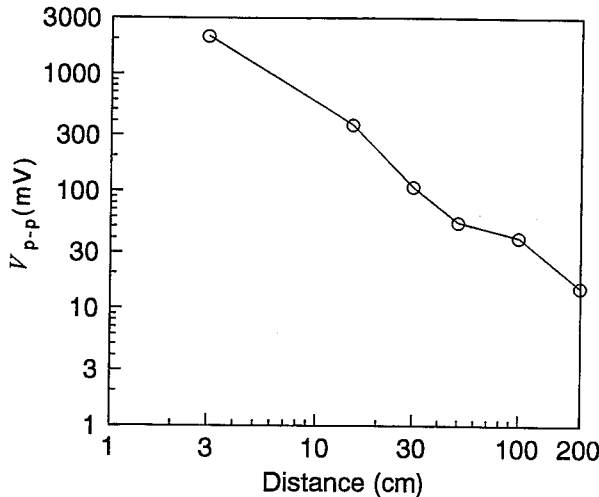


Fig. 8 Relation between peak-to-peak voltage of noise induced in the loop antenna due to ESD and distance (l).

EMIプローブへの誘導ノイズの離隔距離依存性

誘導磁界に比較して放射磁界の影響が支配的と考えられる。

Fig. 7と同様の測定を離隔距離を変化させて行い Fig. 8の結果が得られた。基本的には、離隔距離が広がるに従い誘導するノイズにおいて peak-to-peak 値も減少する傾向となった。同図の離隔距離が 50 cm 以内では、誘導するノイズレベルが離隔距離の約 1.7 乗に反比例しており、誘導磁界が距離の 2 乗に反比例する現象とほぼ一致している*1。すなわち、EMI プローブへの影響は、離隔距離が約 50 cm 以内では ESD ノイズの誘導磁界が、また離隔距離が 2m の観測点では放射磁界が支配的になることが確認された。

以上のことから、静電容量が約 3 pF、放電電極間隔が 2 mm の場合、ESD ノイズが EMI プローブに及ぼす影響は、誘導磁界が支配的になる領域と放射磁界が支配的になる領域が存在することがほぼ明らかとなった。したがって、これらの領域を指標として、以下の節では ESD ノイズが EMI プローブに及ぼす影響等について、生産現場等で発生している一般的な帯電した金属からの ESD について検討する。すなわち、静電容量が数 pF から 300 pF 程度、帯電電位が最大 10 kV 程度である場合の ESD ノイズについて検討する。

*1 EMI プローブは磁界成分のみの影響を受けるため、ESD によって発生する電磁ノイズの誘導磁界と放射磁界のみを検討の対象としている。

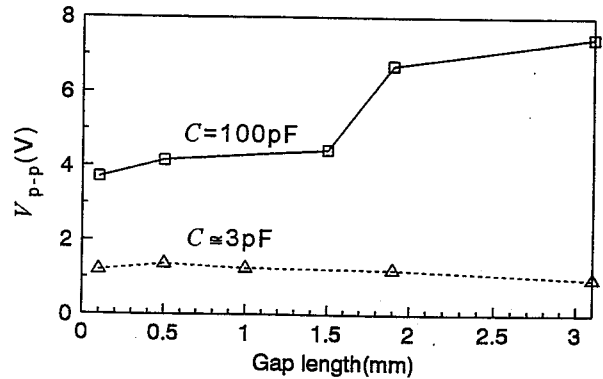


Fig. 9 Relation between peak-to-peak voltage of noise induced in the loop antenna due to ESD and gap length.

EMIプローブへの誘導ノイズの放電電極間隔依存性

3.3 ESD 発生源近傍での ESD ノイズの影響

前節の検討から、離隔距離 10 cm は Fig. 8 の場合に近接界領域となることから、離隔距離を 10 cm とし、静電容量が Fig. 2 の特性を有する放電系で、帯電極性が正の場合について、まず、低インピーダンスの信号伝送線路に相当する EMI プローブに誘導するノイズ (peak-to-peak 値) の放電電極間隔依存性を測定した。Fig. 9 はその結果で、放電電極間隔に対してノイズレベルの依存性が殆どみられなかった。誘導磁界の特性を支配する放電電流のピーク値も、Fig. 5 から分かるように、(帯電極性が正負何れの場合も) 放電電極間隔に対する依存性がみられず、Fig. 9 の結果と一致している。

一方、静電容量 100 pF のコンデンサを Fig. 2 の放電系に接続した場合に EMI プローブに誘導するノイズレベルを測定したところ、放電電極間隔の増加につれて誘導されるノイズレベルも増大する傾向がみられた (Fig. 9)。これは、静電容量が 100 pF と大きいときには放電電極間隔の増大にともなう放電開始電圧 (帯電電位) の上昇による放電電流の増加効果が支配的になり、逆に静電容量が約 3 pF と小さいときには、抵抗 R の増加及び静電容量の減少による放電電流の減少効果と放電開始電圧の上昇による放電電流の減少効果が相殺し合った状態であったことに起因していると考えられる。

Fig. 9 をみると、放電電極間隔が同一であっても、静電容量が 100 pF の場合の方が約 3 pF の場合に比較して、EMI プローブに誘導するノイズレベルが大

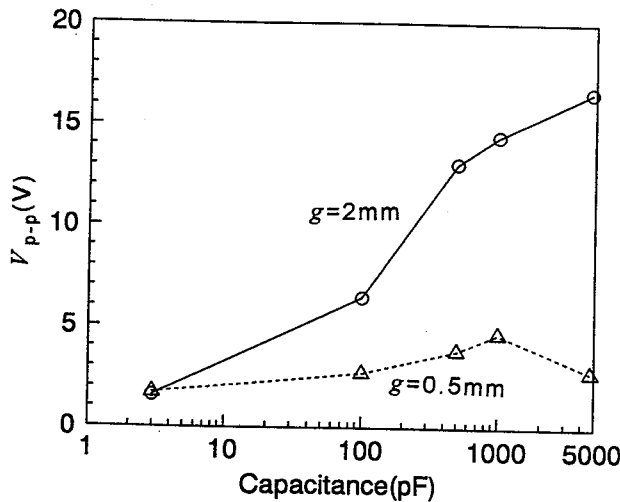


Fig. 10 Relation between peak-to-peak voltage of noise induced in the loop antenna due to ESD and capacitance of charged matter.
EMIプローブに誘導するノイズの静電容量依存性

きくなっている。そこで、Fig. 2の放電系で、放電電極間隔を0.5 mmに固定して、帯電物体の静電容量がEMIプローブに誘導する電磁ノイズレベルに及ぼす影響を調べた。Fig. 10はその結果で、静電容量に対して誘導するノイズレベルの増加がみられたが、静電容量が1000 pFを越えると誘導するノイズレベルが逆に低下する傾向となった。同様に、放電間隔を2 mmとした実験の結果 (Fig. 10)でも、静電容量が1000 pFを越えるとノイズレベルの飽和する傾向がみられた。

これらのことから、帯電物体の静電容量が数pF以上であると、放電電極間隔の増大によって帯電物体の放電開始電圧（帯電電位）が上昇して放電電流を増加させるとともに、放電電極間隔が同一であると放電部の放電時の等価的な抵抗 R は同程度であるため、静電容量の増加とともに放電電流のピーク値が増加する効果もあり、結果的に誘導するノイズレベルが増加すると考えられる。ただし、Fig. 10において1000 pF程度での誘導ノイズの飽和傾向は、次に理由によって発生したと考えられる。たとえば静電容量が100 pF以上であって、放電電極間隔が0.5 mmの場合のように $R^2 < 4L/C$ が満足されていると、放電回路の共振周波数

$$f = 1/2\pi\sqrt{1/LC - R^2/4L^2} \quad (1)$$

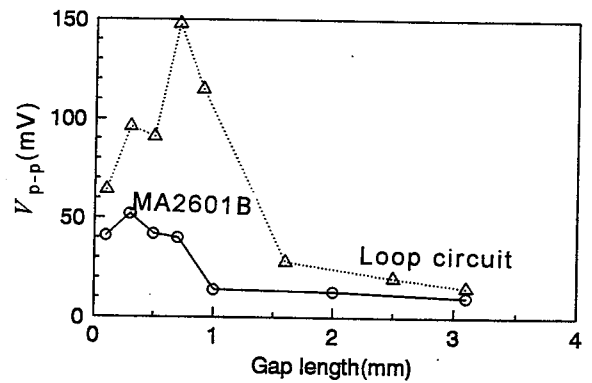


Fig. 11 Dependence of peak-to-peak voltage of noise due to ESD on gap length ($l = 2$ mm, $C \approx 3$ pF).
誘導ノイズの放電電極間隔依存性 ($l = 2$ mm, $C \approx 3$ pF)

が静電容量の増加とともに低下し、放電電流の周波数スペクトルが主に数十 MHz 以下の周波数領域に分布することになる。EMIプローブが50 MHz以下の周波数領域に感度が低いことを考慮すると、放電電流の増加の効果と放電回路の共振周波数の低周波領域への移行現象及びEMIプローブの周波数特性との関係から、1000 pF程度の静電容量において誘導するノイズレベルが最大となったと考えられる。

以上のことから、ESD発生源の近傍（たとえばESD発生源から10 cmの距離）では、今回使用したと同様のインピーダンスを有する信号伝送線路に対するESDノイズの影響は、生産現場での帯電物体の帯電電位が同一であると、静電容量の増加とともに誘導するノイズのレベルも増加すると考えられる。

3.4 ESD発生源より遠方での電磁ノイズの影響

離隔距離を、Fig. 8の実験の検討によって準近接界領域となった2mとして、低インピーダンスの信号伝送線路へESDによって誘導するノイズの静電容量、放電電極間隔、帯電極性に対する依存性を測定した。

Fig. 11は、Fig. 2の放電系において帯電極性を正とした場合に、低インピーダンスの信号伝送線路に相当するEMIプローブに誘導するノイズのpeak-to-peak値を示したものである。放電電極間隔が0.3 mmまでは、放電電極間隔の増大とともにノイズレベルも大きくなるものの、放電電極間隔が0.3 mmより大きくなると、再びノイズレベルの減少する傾向がみられた。これは、放射磁界の特性を支配する

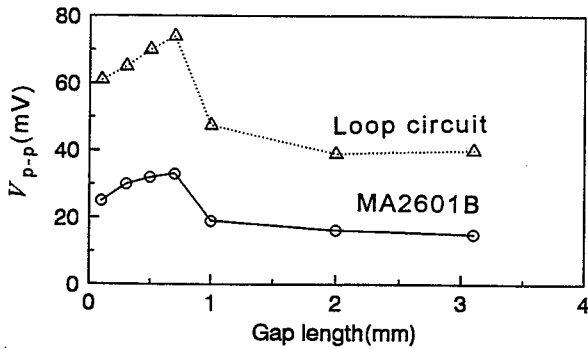


Fig. 12 Dependence of peak-to-peak voltage of noise due to ESD on gap length ($l = 2m, C = 100$ pF).
誘導ノイズの放電電極間隔依存性 ($l = 2m, C = 100$ pF)

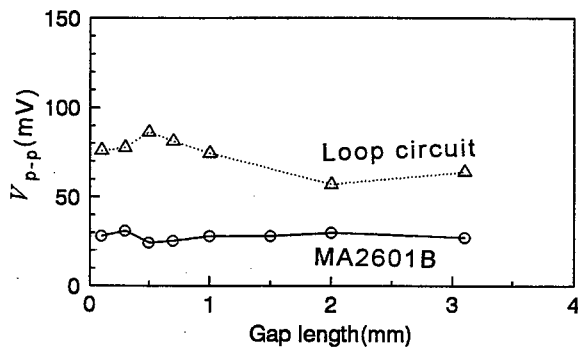


Fig. 13 Dependence of peak-to-peak voltage of noise due to ESD on gap length ($l = 2m, C = 1000$ pF).
誘導ノイズの放電電極間隔依存性 ($l = 2m, C = 1000$ pF)

放電電流の時間微分値が放電電極間隔が 0.5 mm 程度で最大となった Fig. 6 の結果ともほぼ一致している。一方、断面積が EMI プローブと同一の低インピーダンス線路を EMI プローブと同一の位置に固定し、これに誘導するノイズレベルを測定したところ、EMI プローブと同様の傾向がみられた (Fig. 11 の△印)。すなわち、放電電極間隔が 0.7 mm でノイズレベルが最大となるとともに、EMI プローブの場合と比較して 3 倍程度大きなレベルのノイズがみられた。これは主として、EMI プローブが電磁ノイズの磁界成分のみの影響を受けるのに対して、低インピーダンス線路は電磁ノイズの磁界成分に加えて電界成分の影響も受けることに起因している。

Fig. 2 の放電系にコンデンサを接続して同様の測

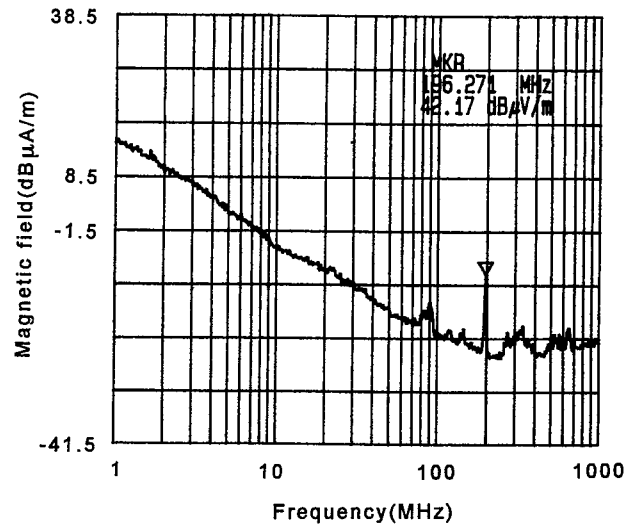


Fig. 14 Magnetic field spectrum due to ESD ($l = 2m, C \approx 3$ pF, $g = 0.5$ mm).
ESD ノイズの磁界周波数スペクトル ($l = 2m, C \approx 3$ pF, $g = 0.5$ mm)

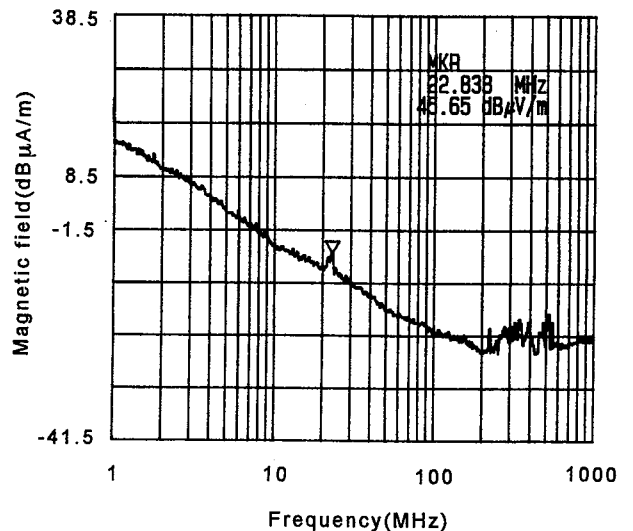


Fig. 15 Magnetic field spectrum due to ESD ($l = 2m, C = 100$ pF, $g = 0.5$ mm).
ESD ノイズの磁界周波数スペクトル ($l = 2m, C = 100$ pF, $g = 0.5$ mm)

定を行い、Fig. 12 及び 13 の結果が得られた。100 pF のコンデンサを付加した場合には、ノイズレベルは放電電極間隔が 0.7 mm 程度で最大となるのに対し、1000 pF のコンデンサを付加した場合には誘導ノイズに明確なピークがみられなかったが、これも静電容量の増加によって共振周波数が EMI プローブの感度の低い周波数領域に移行したことに起因してい

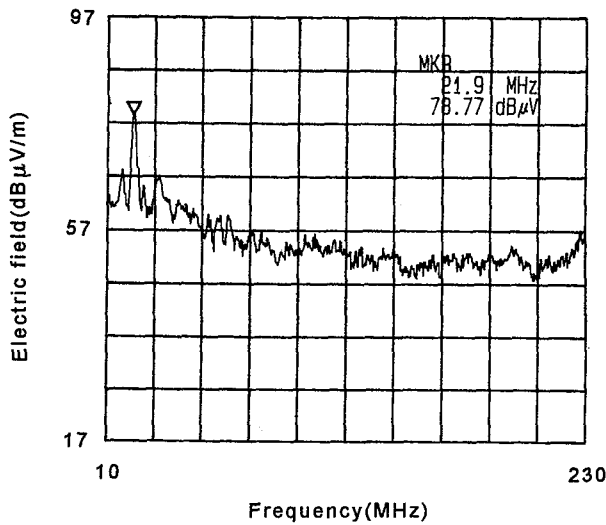


Fig. 16 Electric field spectrum due to ESD
 ($l = 2\text{m}$, $C = 100\text{ pF}$, $g = 0.5\text{ mm}$).
 ESD ノイズの電界周波数スペクトル
 ($l = 2\text{m}$, $C = 100\text{ pF}$, $g = 0.5\text{ mm}$)

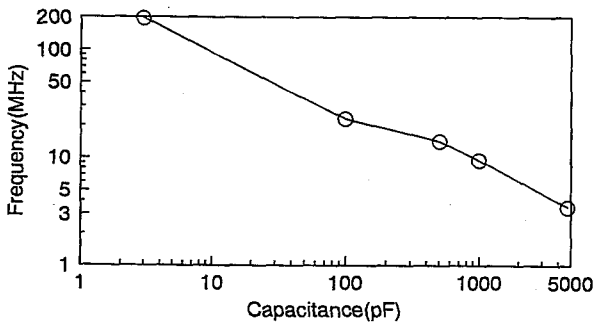


Fig. 17 Relation between capacitance and frequency
 which gave maximum magnetic field intensity.
 帯電物体の静電容量と磁界ノイズのピーク周波
 数との関係

と考えられる。ただし、生産現場等で対象となる帯電物体の静電容量は最大 300 pF 程度と考えられることから、ESD ノイズの放射電磁界が支配的な領域においては、金属等の帯電物体から ESD による低インピーダンス信号伝送線路への影響は、放電電極間隔が 0.3~0.7 mm 程度、すなわち帯電電位が 2~3 kV で最も影響が大きくなると考えられる。また、Fig. 11, 12 及び 13 の結果から、金属のような帯電物体の場合には、帯電物体の静電容量が数 pF であっても、EMI プローブ、低インピーダンス線路のいずれに対しても、静電容量が数百 pF の場合と同程度、

場合によってはそれ以上に影響することを示唆している。したがって、もし機器類に接続された非接地の金属小片があると、その帯電電位が数 kV と低くても、それからの ESD が電子機器の思わぬ誤作動を誘発する可能性がある。

以上の結果は、「必ずしも帯電電位の高い帯電物体からの ESD が電子機器に及ぼす影響が大きいとは限らない」という報告⁸⁾に一致している。既に報告されている結果は帯電物体の静電容量が 100 pF 程度 (人体) の場合であるが、本実験の結果から、静電容量が数 pF 程度の帯電物体にまで同様な傾向のあることが判明した。

一方、帯電物体の静電容量が ESD ノイズの周波数スペクトルに及ぼす影響を、放電電極間隔が 0.5 mm、帯電極性が正極性の場合について、EMI プローブを磁界測定用アンテナとして測定すると、Fig. 14 及び 15 の結果が得られた。いずれの場合も周波数スペクトルは少なくとも 1 MHz から 700 MHz 程度までの範囲に及び、周波数スペクトルに明らかなピーク (図の▽印) がみられ、電界にも同様のピークがみられた (Fig. 16 (図の▽印))。これらのピークが現れる周波数をみると、静電容量が約 3 pF では 200 MHz 付近に現れるのに対し、静電容量が 100 pF に増加するとそのピーク値が数十 MHz 以下の低周波数領域に移行している。これは、静電容量の増加とともに、放電回路の静電容量 C 、抵抗 R 、インダクタンス L で構成される放電回路の共振周波数 f が低下することに起因している。静電容量と 1 MHz~200 MHz の周波数領域での電磁ノイズの磁界成分のピーク周波数との間には、Fig. 17 の関係が得られ、ピーク周波数が静電容量の平方根にほぼ反比例し、式 (1) の関係が成立していると考えられる。

4. むすび

静電気放電 (ESD) による電磁ノイズが電子機器の信号伝送線路に及ぼす影響の基礎的な現象の解明を目的として、金属物体からの ESD によって発生する電磁ノイズが低インピーダンスの信号伝送線路に及ぼす影響及び電磁ノイズの電磁界特性について、帯電物体の静電容量、放電電極間隔、帯電極性の影響を実験的に調べ、次の結果が得られた。

- (1) ESD ノイズの放射電磁界の特性を支配する放電電流の時間微分について、帯電物体の静電容量が 3 pF 以下の場合、放電電流の時間微分の最

も大きな放電電流の開始時をみると、放電電極間隔が 0.5 mm (帯電電位: 3 kV) 程度で最大となる。

- (2) ESD 発生源から 10 cm 離隔した地点では、ESD によって低インピーダンスの信号伝送線路に誘導するノイズレベルは、放電電極間隔が同一である場合には、帯電物体の静電容量が 1000 pF 程度までは、帯電物体の静電容量の増加とともに大きくなる。また、低インピーダンスの信号伝送線路に誘導するノイズレベルは、静電容量が 3 pF 程度では放電電極間隔に対する依存性がみられないが、静電容量が 100 pF では、放電電極間隔の増大とともに増加する傾向がみられる。
- (3) ESD 発生源から 2m 離隔した地点では、ESD によって低インピーダンスの信号伝送線路に誘導するノイズレベルは、静電容量が 3~100 pF 程度では、放電電極間隔が 0.3~0.7 mm (帯電電位: 2~3.5 kV) 程度で最大となる。放電電極間隔がこれより増大すると、再びノイズレベルは低下する。これは、放射電磁界の特性を支配する放電電流の時間微分値の放電電極間隔依存性の結果とほぼ一致している。また、低インピーダンスの信号伝送線路に誘導するノイズレベルは、帯電物体の静電容量が 3~1000 pF の範囲では、静電容量に対する依存性が小さい。
- (4) ESD ノイズの周波数スペクトルは少なくとも 1 MHz から 700 MHz 程度に及び、300 MHz 以下の周波数領域にピークが現れる。ピークの現

れる周波数は帯電物体の静電容量に依存し、静電容量の増加とともに静電容量の平方根にほぼ反比例して低周波側に移行する。

(平成 6 年 4 月 28 日受理)

参考文献

- 1) 桑川壮一, 安全, 37-4 (1986), 10~15.
- 2) 「ノイズ対策最新技術」編集委員会, ノイズ対策最新技術, (1986), 341~342, 総合技術出版.
- 3) 田嶋泰幸・富田一, ESD ノイズの考察, 労働省産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-86 (1986), 159~167.
- 4) Wilson P.F. and Ma M.T., Fields radiated by Electrostatic Discharges, IEEE Trans. on Electromagn. Compat., 33-1 (1991), 10~18.
- 5) 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測定と解析, 信学論 (B-II), J75-B-II-9 (1992), 647~654.
- 6) 馬杉正男・小林隆一・桑原伸夫・徳田正満, ESD に伴う電磁パルスの光変調器型電界センサによる測定, 信学論 (B-II), J76-B-II-6 (1993), 530~537.
- 7) 馬杉正男, 衝突電極から放射される電界の過度応答解析, 信学技報, EMCJ-93-13 (1993), 31~36.
- 8) 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, EMCJ-83-86 (1984), 13~17.