

Research Report of the Research Institute of
Industrial Safety, RIIS-RR-86, 1986.
UDC 537.24 : 621.391.822

静電気放電に起因する静電ノイズの考察

田島泰幸* 富田 一*

Considerations for Electrostatic Noise Caused by Electrostatic Discharge

by Yasuyuki TABATA and Hajime TOMITA

Abstract ; It is well known that electrostatic discharge (ESD) and electromagnetic wave radiated with ESD cause various malfunctions of sophisticated electronic components and devices. For studies of electrical noises in respect of ESD, electromagnetic fields have been investigated to solve electromagnetic interference (EMI) problems for electronic systems. Electrostatic fields are, however, hardly considered.

Electrostatic field produced around a charged material varies generally and is incoherent when ESD occurs. As a result, it seems that the incoherent electrostatic field affects the signal level of the electronic circuit assembled by components with high impedance. Therefore, electrostatic noises caused by the incoherent electrostatic fields have been examined theoretically and experimentally in this paper.

First, the theoretical analyses have been developed, using a charged di-pole as an ESD model, both to identify the electrostatic noise caused by the induction of incoherent electrostatic field and to determine the optimum conditions of experiments. From these analyses, it has become clear that the maximum electrostatic noise generates at the moment ESD occurs and that it may cause the malfunctions of the electronic circuits with high impedance. These estimations about the electrostatics introduced from the analyses have been confirmed by experiments.

The results obtained from both the analyses and the experiments are as follows :

- (1) ESD generally produces the incoherent electrostatic as well as electromagnetic fields around the charged material.
- (2) A region of the incoherent electrostatic field extends to the fairly far distance, a few meters, when ESD occurs from the charged body with a large capacitance, such as a charged human body, table and wagon.
- (3) A level of the electrostatic noises caused by the incoherent electrostatic field is generally high, a few volts in voltage level and comparable to the signal level of the general electronic circuits.
- (4) Electrostatic noise in respect of ESD causes malfunctions of the electronic circuit with high impedance, located within a few meters from a position of ESD.

Keywords ; Static electricity, Electrostatic discharge, Electromagnetic interference, Noise.

* 電気研究部 Electrical Safety Research Division

1. はじめに

近年、製造工程には自動化による生産性の向上、省力化等の目的で、多くのコンピュータ支援機器、ME 機器（産業用ロボット、NC 工作機械等）が導入されている。これらの電子機器は益々コンパクトになり、その処理能力も向上の一途である。しかしその反面、機器を制御している電気信号の高密度化と、信号電圧の微小化から、電磁ノイズの影響（EMI）を極めて受けやすくなっている¹⁾。その結果、信号電圧のわずかな変化、揺らぎによっても誤作動が起り、製造ラインの停止、製品不良等が発生したり、時には労働災害に進展することもある。例えば、停止していた CNC 旋盤の制御回路へ電磁ノイズが侵入し、旋盤の主軸が不意に起動したため、作業員がこれに巻き込まれて死亡したと推察された労働災害が報告されている²⁾。

このような背景から、電子機器の EMI 対策が表面化し、これに関する多くの研究が活発に行なわれている³⁾。

それらの中には不連続放電の一つである静電気放電（ESD）に起因して生起する EMI に着眼した研究もあり⁴⁾、これらの成果に基づいて電子装置の静電気耐性試験法も既に提案されている⁵⁾。しかし、これらの研究は、いずれも空間を伝播して行くインコヒーレント放射電磁界をノイズとしたものであり、ESD に起因して生起する EMI の一部が解明されているに過ぎない。

電子機器の近傍で ESD が発生すると、電子機器は上述の放射電磁界のみならず、誘導電磁界及び静電界の影響も受けることは自明であり、それらが全て電子機器の EMI になると予想される。特に、最近は省電力と信号の高帯域化から、電子機器には C-MOS IC のような高入力インピダンス素子が多用されており、これらに対しては静電誘導の影響も無視することができない。換言すれば、ESD に伴う静電界の変化も高インピダンス素子では広い意味での EMI であり、これも誤作動を誘発する原因の一つになると予想される。

ここでは、ESD に伴う静電界の変化による EMI を静電界ノイズと定義し、これについて解析と実験の両面から考察した。具体的には、ESD 発生前後における ESD 発生源近傍に生起する静電界ノイズが最も大きいと予想されるため、これに着眼して考察し、静電界ノイズが電子機器の誤作動を誘発することを確認した。

* 本論文の目的は放電点から数十 cm の位置における電磁界の解析であり、一般に放電の発生する距離は数 mm であるから、 $r \gg 2l$ と仮定する。

本報告は、その結果についてまとめたものである。

2. 静電界ノイズの解析

一般に ESD は帯電物体と他の物体との間で発生する。例えば、帯電物体が人体であると、ESD は指のような人体の一部と接地された金属物体等との間で発生する。したがって、その特性は帯電物体の形状、抵抗率等の特性のみならず、他の物体の特性にも依存し、極めて複雑である^{6,7)}。静電界ノイズもこの ESD に起因して発生するので、その特性は当然 ESD の特性と同様に単純なものではない。しかし、ここでの目的は静電界ノイズの基本特性を解明することで、その詳細ではない。したがって、解析のモデルとしては単純化し、帯電物体から放電が発生する部分は球状導体であるとする。また、他の物体も同様であるとし、放電はこれらが Fig. 1 に示すように球の中心間が距離 $2l$ で相対向したときに発生するものとする。ただし、後者の球状導体は接地状態であるとする。

解析モデルを上述のように単純化すると、二つの球状導体間で ESD が発生したとき、ESD の発生源から点 $P(r, \theta, \varphi)$ における電磁界は、二つの球状導体の電荷をそれぞれ $+qe^{-\tau t}$ 、 $-qe^{-\tau t}$ とし、 $r \gg 2l$ と仮定すれば*、これは双極子による電磁界と見做せるので、

$$E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} pk^3 \cdot \cos\theta \left\{ \frac{1}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} \right\} e^{-(\tau t - kr)} \quad (1)$$

$$E_\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} pk^3 \cdot \sin\theta \left\{ \frac{1}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} - \frac{1}{kr} \right\} e^{-(\tau t - kr)} \quad (2)$$

$$E_\varphi = 0 \quad (3)$$

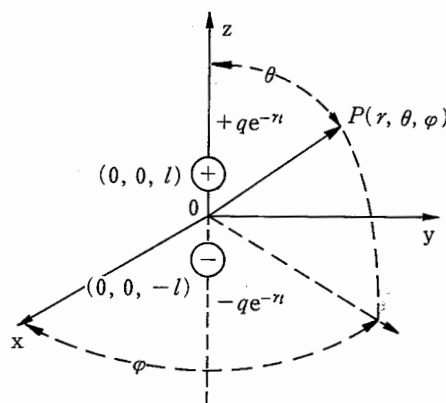


Fig. 1 A model for analyzing electromagnetic field caused by ESD.

電磁界の解析モデル

$$H_r = H_\theta = 0 \quad (4)$$

$$H_\phi = \frac{1}{4\pi} p\gamma k^2 \cdot \sin\theta \left\{ -\frac{1}{(kr)^2} - \frac{1}{kr} \right\} e^{-(\gamma t - kr)} \quad (5)$$

$$p = 2lq \quad (6)$$

$$k = \gamma/c \quad (7)$$

となる。ただし、 p は双極子モーメント、 k は波数、 c は光速である。

いま、式(2)に着眼すると、 r^3 に反比例する静電界の大きさは、ESDの発生源近傍は勿論、 $r < 1/k = r_0$ なる範囲まで、他の二つの電界よりも大きい。また、ESDの発生条件から r_0 を推算すると、 r_0 は必ずしも放電点の極く近傍とは限らず、条件によっては付録に示すように数 m にも達することがある。したがって、放電点の近傍に静電誘導を受けやすい高インピダンス電子機器、回路等があると、これらはその点における静電界の影響（静電界ノイズ）を避けることができない。換言すれば、高インピダンス機器は式(1)、(2)より誘導される次式の静電界、

$$E_{rs} = \frac{p}{2\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \cos\theta \cdot e^{-(\gamma t - kr)} \quad (8)$$

$$E_{\theta s} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sin\theta \cdot e^{-(\gamma t - kr)} \quad (9)$$

に比例した大きさの静電界ノイズを受けることになる。

ここで、式(8)、(9)は、式(6)と $q = CV$ なる関係を代入すると、さらに展開され、

$$E_{rs} = \frac{ICV}{\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \cos\theta \cdot e^{-(\gamma t - kr)} \quad (10)$$

$$E_{\theta s} = \frac{ICV}{2\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sin\theta \cdot e^{-(\gamma t - kr)} \quad (11)$$

となる。ただし、 C は球状導体間の静電容量であり、 V は電位差である。上式(10)、(11)で注目すべきことは、静電界ノイズは V にも独立ではないことである。すなわち、式(10)、(11)は V が変動すると、その変化量に比例して静電界も変化し、これも静電界ノイズになることを示唆している。この典型例は ESD の発生

* 放電が発生すると、球状導体間の電荷は CV_b から CV_a へと不連続に変化するため、電位が不連続になる。しかし、このとき $C(V_b - V_a)$ なる電荷は放電電流となって球状導体間に流れるのであり、基本法則である電荷保存則、連続則は成立している。

前後であり、この場合は通常、球状導体間の電位差が放電発生前の絶縁破壊電圧 V_b から、その直後は放電の維持電圧 V_a へと不連続に変化する*。この電圧変化に伴う静電界の変化量 ΔE は、放電発生前後の条件を式(10)、(11)に代入すれば導かれる。すなわち、放電発生前に対しては、純然たる静電界ということで $\gamma = 0$ 、 $V = V_b$ を、発生直後の $t = +0$ に対しては、発生源から r 離れた点までの時間遅れを考慮しなければならないので $t = kr/\gamma$ 、 $V = V_a$ をそれぞれ式(10)、(11)に代入し、それらの差から ΔE は、

$$\Delta E_r = \frac{IC(V_b - V_a)}{\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \cos\theta \quad (12)$$

$$\Delta E_\theta = \frac{IC(V_b - V_a)}{2\pi\epsilon_0 r^3} \cdot \sin\theta \quad (13)$$

と求まる。すなわち、ESDが発生したときには、静電界に上式で示される変化が起こるのでこれに比例した静電界ノイズが生起される。

以上のように、静電界ノイズの定義に基づいて、静電界の時間的変化を解析すると、ESDの発生に伴っては、その発生後に式(10)、(11)で、発生時には式(12)、(13)で示される大きさに比例した静電界ノイズが生起される。しかし、それらの大きさを比較すると、式(10)、(11)では $V = V_a$ 、式(12)、(13)では一般的に $V_b \gg V_a$ であるため⁹⁾、静電界ノイズとしては後者の方が圧倒的に大きいと推論される。

3. 実験方法

3.1 実験装置

ESDによる静電界ノイズの基本特性を解析するため、前節ではモデルに球状導体を選び、双極子間で発生する ESD を考えた。したがって、使用した実験装置も解析モデルに準じて、直径 $D = 20$ mm の二つの金属球がある一定の空隙を置いて相対向している。ただし、一方の金属球は高電位に上昇する模擬帯電物体に接続されており、他方の金属球は零電位に保持するために、接地されている。

Photo.1の中央部に見える二つの金属球が本実験装置の ESD 発生部で、ESD は模擬帯電物体の電位が上昇すると、これら二つの金属球間で発生する。金属球間の距離は 0~20 mm まで変化でき、前節の V_b が任意に設定できるようになっている。また、Photo.1の上部にみえる帯状の金属板が、金属球と模擬帯電物体で



Photo.1 Spherical metal electrodes for causing ESD.
ESD 発生部分

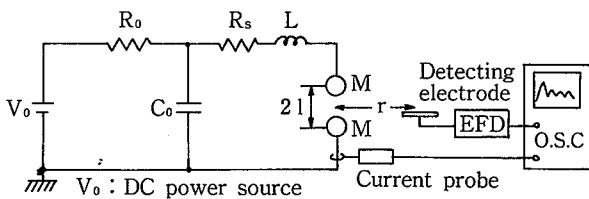


Fig.2 Electrical setup of experiment.
実験装置の電気回路

あるセラミックコンデンサを接続する導線で、これにはインダクタンスをできるだけ小さくするために、幅 15 mm、厚さ 3 mm の銅板が使用されている。

Fig.2 は実験装置の電気回路図と次項で述べる静電界ノイズの検出部である。ここで、 C_0 は模擬帯電物体のセラミックコンデンサで、これに帯電している電荷が金属球間 (M-M) で放電し、ESD が模擬される。また、 R_s 、 R_0 は無誘導型の高耐電圧ソリッド抵抗で、前者は帯電物体の抵抗に依存する放電形態を模擬するために、後者は模擬帯電物体への電荷供給を制御するために用いられている。使用した実験装置では $R_0=10^{10} \Omega$ 、 $R_0 \gg R_s$ となっており、ESD は間欠的に発生する。 L は実験装置の等価インダクタンスで、これを出来るだけ小さくするために銅板で構成したが、実測したところ $2.5 \mu\text{H}$ であった。

接地を含めたコモンラインは ESD のような過渡的放電で問題になる電位変動を小さくするために、 $500 \times 500 \text{ mm}^2$ の銅板から成っている。Photo.1 に示した ESD の発生部である金属球は、そのほぼ中央部に配置され、 C_0 、 R_s 等の電子部品は銅板に直接取り付けられている。

3.2 静電界ノイズの検出方法

ESD が発生したときの静電界ノイズの検出は、ここでは実験仕様を満たす検出器がないため、以下に示す

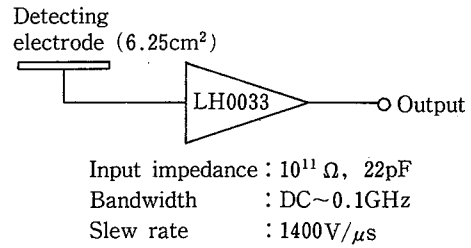


Fig.3 Electrostatic field detector.
静電界検出器

検出器を試作し、これを用いて実験した。

試作した検出器は、2. の解析結果に従って設計、製作されたものである。その概要は Fig.3 に示すように、面積 6.25 cm^2 の検出電極とバッファアンプから構成されている。すなわち、この検出器は、静電界ノイズが静電界の時間変化に比例することから、機能的には静電界の時間変化を検出する高入力インピダンスのバッファアンプである。

静電界ノイズの検出にあたっては、試作した検出器を Fig.2 に示すように ESD の発生源である金属球間の中心点より r (m) 離れた位置に設置し、ESD 発生に伴うその位置における静電界ノイズを検出した。ただし、試作した検出器は静電界の検出機能だけであるため、これに Fig.2 に示すようにオシロスコープ (テクトロニクス製 7633) を接続し、検出器の出力はオシロスコープによって読み取った。また、ESD 発生後の EMI は放電電流に依存するため、参考までに電流プローブ (テストロニクス製 A 6302, A 6303) を用いて、放電電流を測定した (Fig.2 参照)。

なお、試作した検出器の検出特性は計算で求まる平行平板電界中にこれを設置して調べたところ、出力特

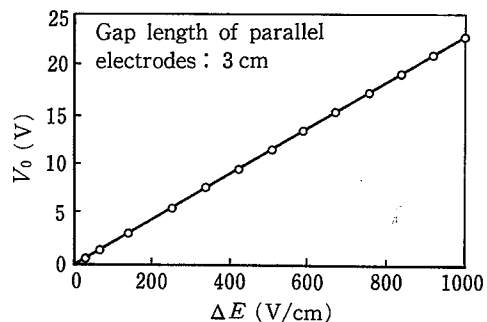


Fig.4 Output characteristics of electrostatic field detector.
静電界検出器の出力特性

性は Fig. 4 に示すように静電界の変化 ΔE に対して出力 V_0 が線形となる理想に近い結果が得られ、応答性についても約十 ns の静電界の変化まで応答することが確認された。

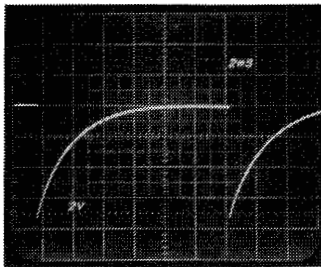
4. 実験結果と考察

4.1 静電界ノイズの測定

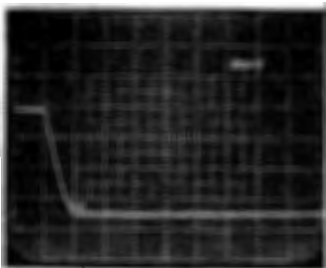
2. の解析結果によると、静電界ノイズは ESD が発生したときに生じられるものが最も大きいと予想される。したがって、実験でもこれを確認するために、試作し

た検出器を用いて、静電界の時間変化を測定した。

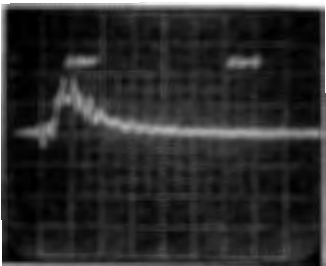
Photo. 2, 3 はいずれも金属球間 $g=2\text{ mm}$ ($g=2l-D$) で ESD が発生したとき、 $r=10\text{ cm}$, $\theta=90^\circ$ で測定した実験結果の一例である。両者とも (a) は静電界の変化、(b) はそれを ESD の発生前後について拡大したもの、(c) は放電電流波形の測定結果である。ただし、Photo. 2 は ESD の発生とともに、帯電物体の電荷がほぼ指数関数的に減衰する放電電流となって減少する場合で、Fig. 2 に示す C_0 , R_0 はそれぞれ 100 pF , $470\ \Omega$ で、帯電した人体からの ESD が模擬されている。また、Photo. 3 は電荷が振動しながら指数関数的に減衰する



X : 4 ms/div, Y : 4 V/div
(a) Electrostatic field
ESD による静電界の変化

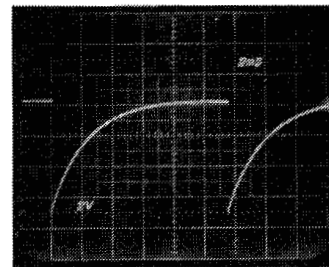


X : 40 ns/div, Y : 4 V/div
(b) Expanded sweep of electrostatic field
同上拡大

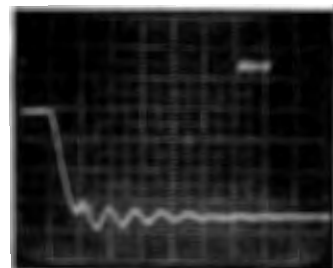


X : 40 ns/div, Y : 10 A/div
(c) Current waveform of ESD
放電電流波形

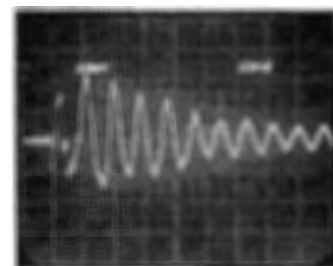
Photo. 2 Electrostatic field and discharge current caused by ESD (part 1).
ESD による静電界と放電電流 (その 1)



X : 4 ms/div, Y : 4 V/div
(a) Electrostatic field
ESD による静電界の変化



X : 40 ns/div, Y : 4 V/div
(b) Expanded sweep of electrostatic field
同上拡大



X : 40 ns/div, Y : 100 A/div
(c) Current waveform of ESD
放電電流波形

Photo. 3 Electrostatic field and discharge current caused by ESD (part 2).
ESD による静電界と放電電流 (その 2)

放電電流となって減少する場合で、 C_0 はPhoto.2と同じ100 pFであるが、 $R_s=0 \Omega$ で、金属のような導体からのESDが模擬されている。

これらの実験結果によると、放電電流波形には大きな差異が認められるものの (Photo.2,3の(c)参照)、静電界はいずれの場合もESDの発生と同時に約40 nsでほぼ零に減少している (Photo.2,3(b)参照)。すなわち、ESDの発生前は金属球間の電位が絶縁破壊電圧に近い高電位となり、電位の時間的変動も小さいことから、帯電物体によって通常形成される大きな静電界である。しかし、ESDの発生と同時に金属球間の電位は放電の維持電圧に減少するため、極めて小さい静電界へと変化している。このようにPhoto.2,3は、ESDが発生した瞬間に大きな静電界ノイズが生起されるという2.の解析結果を裏付けている。したがって、以下の実験はこの静電界の変化に着眼して実施した。具体的には、Photo.2の実験と同じ条件で、Fig.1の $x-y$ 平面に相当する任意の点 $P(r, 90^\circ, \varphi)$ における、ESD発生時の静電界の変化量 ΔE_θ を測定した。

Fig.5は金属球間の距離 $g(2l-D)$ をパラメータとして実験した測定結果で、静電界ノイズに相当する縦軸の ΔE_θ は、Fig.2に示すオシロスコープの出力をFig.4によって変換した値である。これによると、 ΔE_θ は金属球間の距離の増大とともに絶縁破壊電圧も増大するため、ほぼ後者に比例して大きくなっている。また、Fig.5に示す実験結果は、 ΔE_θ が距離 r のほぼ3乗に反比例しており、これらの実験結果も、定性的で

はあるが、2.の解析結果を裏付けている。

以上のように、最も大きな静電界ノイズは主としてESDの発生時に生起されることが実験によって確認され、定性的にもほぼ妥当な結果が得られた。したがって、ここでは実験結果 Fig.5について考察する。

Fig.5は、実験条件より $x-y$ 平面 ($\theta=90^\circ$) におけるESD発生前後の静電界の変化量 ΔE_θ である。この条件を式(10)、(11)に代入し、Photo.2,3の実験結果は $V_b \gg V_a$ であることを考慮すると ΔE_θ は近似的に

$$\Delta E_\theta = \frac{1C(V_b - V_a)}{2\pi\epsilon_0 r^3} \approx \frac{1CV_b}{2\pi\epsilon_0 r^3} \quad (14)$$

となる。ここで、上式の静電容量 C 、絶縁破壊電圧 V_b の値は、解析解に誤差が大きいため、 $2l=22 \text{ mm}$ ($g=2 \text{ mm}$) の場合について実施した別の実験から得られた値である 2.0 pF 、 7.5 kV をそれぞれ用いると、式(14)は

$$\Delta E_\theta = (3.0 \times 10^4) \frac{1}{r^3} \quad (\text{V/cm}) \quad (15)$$

となる。

これより、式(15)から ΔE_θ を算出したところ、 $2l=22 \text{ mm}$ の一例ではあるが、これから求まる計算値と実験によって得られた Fig.5の実験値とは、Table 1に示すように一致しなかった。しかし、後者は前者の約10~30倍で、 r^3 に反比例する静電界としては距離に対する依存性が小さい。したがって、これに着眼してこの不一致の原因を検討したところ、原因は、Photo.1に示す実験装置の高電圧側金属球に接続されている銅板の影響であることが判明した。実験装置についてはこれらの影響を前もって考慮に入れ、Fig.2に示す電子部

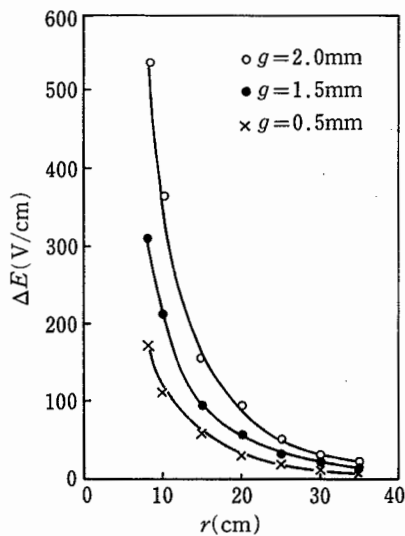


Fig.5 Variations of electrostatic field with ESD.
ESD発生に伴う静電界の変化

Table 1 Calculated and experimental values of electrostatic field.
静電界の計算値と実験値

r (cm)	$\Delta E(\text{V/cm})$		B/A
	Calculated A	Experimental B	
8	58	538	9.3
10	29.7	365	12
15	8.8	154	18
20	3.7	85	23
25	1.9	50	26
30	1.1	33	30
35	0.69	23	33

品 C_0 , R_s , R_0 及びこれらの間を接続する銅板は接地金属平板に可能な限り近く取り付けられた。しかし, R_s と金属球 M を接続する導線である帯状銅板は止むを得ないために接地金属平板から離れた空間に設けた。また, 帯状銅板はインダクタンスを小さくするために使用したが, この程度の大きさのものでも, これが近傍空間に作る静電界の影響を受けて実験値が数十倍大きくなる事が判明した。

この影響は, 実際の帯電物体から ESD が発生する場合も同様であると推察される。通常, 実際の帯電物体から発生する ESD も, 本実験装置のように帯電物体の一部から発生する。しかし, 近傍空間への静電界の形成には, ESD の発生部分の電荷のみならず, 帯電物体の他の電荷も寄与する。したがって, 上述の考察結果は, 後者の静電界へ及ぼす影響を, 導体の帯電物体から ESD が発生する場合には, 特に考慮しなければならないことを示唆している。帯電物体が絶縁物の場合は, ESD によって一部の電荷が放電するだけで, 放電しなかった電荷は ESD 発生後の静電界の形成に寄与する。したがって, 絶縁物ではその分だけ静電界の変化量も小さい。すなわち, 生起される静電界ノイズも小さいと予想される。

4.2 静電界ノイズによる電子回路の誤作動

前項の実験から明らかなように, ESD が発生したときには, その近傍空間の静電界が数百 V/cm 変化する。この変化量が ME 機器等の電子回路の信号レベルを乱すと推察される。特に高インピダンスの電子素子, 伝送路等は, その影響を大きく受け, 誤作動が発生すると考えられる。しかし, これに関する研究は全く行われていない。ここでは, 静電界ノイズによる誤作動を調べる目的で, 以下の実験を試みた。

実験に使用した電子回路は Fig.6 に示す NOT 回路である。この回路は Fig.6 に示すように IC-4011 B で構成される簡単なもので, この回路は静電界の変化で入力端子に 4 V 相当のパルスが侵入すると誤作動が発

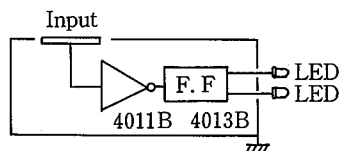


Fig.6 NOT circuit used for testing malfunction of electronic devices.

誤作動実験に用いた NOT 回路

生し, LED が点灯するように調整されている。また, 入力端子はハイインピダンスの信号線路を模擬して, 入力容量が約 10 pF である面積 6.2 cm^2 の金属板からできており, これを除いては EMI を受けないように, $120 \times 80 \times 30 \text{ mm}$ のアルミニウム製の箱でシールドされている。

実験は前項の実験と同様に, この電子回路を ESD 発生源から距離 r ($P(r, 90^\circ, \varphi)$) の位置に置き, 誤作動の発生確率を調べた。その結果, 電子回路は ESD が発生すると誤作動を起こし, その原因がここでの目的としている静電界ノイズであることが確認された*。

Fig.7 は, その誤作動の発生する範囲を ESD の発生する放電間隔 g ($g=2l-D$) に対して調べた実験結果である。ここで, r_m は誤作動が発生する ESD 発生源からの距離で, 電子回路の入力端子がこの範囲にあると, 100% の確率で誤作動が発生した。勿論この結果, Fig.7 は, 電子回路に 4 V 相当の静電界ノイズが侵入したときに起こる誤作動の発生領域であり, 電子回路の耐ノイズレベルによって, 誤作動の発生領域は大きくも小さくもなる。

以上のように, 電子回路は ESD の発生に伴う誘導電磁界, 放射電磁界, いわゆる EMI のみならず, 静電界ノイズの影響も受け, これによっても誤作動の発生することが確認された。また, 誤作動の発生領域は電子回路の耐ノイズレベルに依存するため, 静電界の大きさのみでは定まらないが, 静電界ノイズは数 V とい

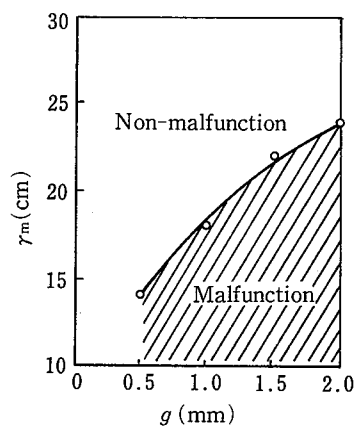


Fig.7 Region causing malfunction of NOT circuit.
NOT 回路の誤作動発生領域

* 実験に用いた電子回路は, 誘導電磁界, 放射電磁界では誤作動が発生しないように設計され, 実験によってもこれら二つの電磁界では誤作動が発生しないことが前もって確認されている。

う大きな値であり、通常の信号レベルと同程度であることも確認された。

ここでの実験結果は、ESD が二つの金属球間で発生するという単純な実験装置によるもので、ESD によって生じられる静電界ノイズによる誤作動の発生領域も、その発生の有無という簡単な条件で明確に定められた。換言すれば、通常は確率的に発生する ESD ではあるが、これを金属球間で発生させたために、ESD に再現性があり、誤作動の発生領域も明確に定まった。しかし、一般の帯電物体から発生する ESD は再現性に欠け、たとえ放電間隔が一定でも絶縁破壊電圧にはばらつきがある。したがって、結果的には静電界ノイズのばらつきとなり、これによる誤作動であるから、実際の誤作動は確率的に発生していると推察される。

5. まとめ

本研究では ESD に伴って静電界ノイズが発生するという予測のもとに、これについて解析し、実験を試みた。また、それが高入力インピーダンス回路の誤作動を誘発するノイズになるかどうかについて検討した。

その結果、単純なモデルによる解析から、静電界ノイズは主に ESD の発生したときに生じられることが導かれ、これは実験によっても確認された。また、この静電界ノイズが電子機器等の誤作動の原因になることも確認された。以下、この研究で得られた結果をまとめると次のようである。

(1) 静電界ノイズは ESD の発生によって生じられるものの、放電電流の大きさ、波形等、放電電流にはほとんど依存しない。

(2) 静電界ノイズの大きさは、必ずしも絶縁破壊電圧によって定まるのではなく、静電界は幾何学的条件にも依存するため、帯電物体の大きさ、形状等によっても変化する。

(3) 帯電電位数 kV という通常の帯電物体から ESD が発生すると、その近傍には静電界ノイズとなる数百 V/cm の変動静電界が生じられる。

(4) 数百 V/cm の変動静電界は、高入力インピーダンスの電子機器にとって、数 V の静電界ノイズを受けたことに相当する。

以上のように、従来は全く着眼されていなかった静電界ノイズであるが、本研究によってそのアウトラインが明らかになった。電子回路は今後も消費エネルギーとパルス信号の高速伝送から、ますます高インピーダンス素子で形成されるであろう。これらの条件を考慮

して、本研究は静電界ノイズ対策も含めてさらに詳細な解明を進める計画である。

最後に、本研究の実施にあたり種々討論いただいた児玉勉主任研究官に謝意を表す。

(昭和 62 年 3 月 9 日受理)

参考文献

- 1) たとえば、仁田周一：静電気学会誌，10(6)536，1986
- 2) 桑川壮一：安全，37(4)10(1986)
- 3) たとえば、M.Honda *et al.*：EOS/ESD Symposium Proceedings, 124, IIT Research Institute (1984)
- 4) たとえば、G.Priestman *et al.*：EOS/ESD Symposium Proceedings, 15, IIT Research Institute (1985)
- 5) ㈱ノイズ研究所編：ノイズ規格集，㈱ノイズ研究所 (1984)
- 6) W.D.Greaseon：Conference Record of 1986 IEEE/IAS, 1375, IEEE (1986)
- 7) Y.Tabata *et al.*：IEEE Trans., IA-20(5) 1206(1984)
- 8) 静電気学会編：静電気ハンドブック，209，オーム社 (1980)

付 録

静電界が他の電磁界より大きくなる領域

ESD が発生すると、そのとき流れる放電電流は通常時間とともに変化する。すなわち、本文の式(2)において、 $\gamma \neq 0$ であるから、ESD によって空間に電界が生じられる。その電界は式(2)から明らかなように、 r^3 に反比例する静電界、 r^2 に反比例する誘導電界、 r に反比例する放射電界の三つである。これらの三つの電界の大きさは、式(2)に着眼すると ESD の発生源より距離 $r_0 = 1/k$ で等しく、 $r < r_0$ では静電界が最も大きい。

これより、仮りに磁界の影響を受けず、電界のみの影響を受ける電子機器が ESD の発生源より $r < r_0$ なる位置にあると、それは静電界ノイズの影響を最も大きく受ける。したがって、ここではその範囲を推定する意味で、 r_0 について検討した。

例えば、帯電した人体から ESD が発生すると、この ESD は本文 Fig.2 における電気回路の各定数を、 $C_0 =$

100 pF, $R_s=500 \Omega$, $L=0 \mu\text{H}$ と置くことによってほぼ模擬できる。ただし, R_s は ESD 発生部分の放電抵抗も含めた電気抵抗とする。この回路定数のもとに, Fig.2 の電気回路を解くと, 本文式(2)の γ が求まり, $\gamma \doteq 1/C_0 R_s = 2 \times 10^7 \text{s}^{-1}$ となり, $r_0 = 1/k = c/\gamma \doteq 15 \text{m}$ となる。この結果は $L=0$ としたが, ESD が発生すると電流が流れるために $L \neq 0$ ではない。しかし, これを数 μH として同様に解析しても, r_0 は数 m になる。

一方, ESD が金属のような電気抵抗の小さい帯電物

体から発生した場合でも, Fig.2 に示した電気等価回路の各定数に, それぞれ $C_0=100 \text{pF}$, $R_s=10 \Omega$, $L=2.5 \mu\text{H}$ を代入して γ を求めると, この場合は振動電流が流れ, $\gamma \doteq 1.5 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ となり, $r_0 \doteq 2.0 \text{m}$ となる。

以上のように, 代表的な二つの例について r_0 を求めると, いずれもそれは数 m となり, 静電界の影響を考慮しなければならないことが明らかである。すなわち, ESD 発生源からこの範囲にある電子機器等は, 誘導電界と放射電界のみならず静電界の影響を大きく受ける。