

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-89, 1989
UDC 537.24:621.391.822

静電気放電に伴う電磁ノイズの電子装置に及ぼす影響

田 島 泰 幸* 富 田 一*

Nuisances on Electronic Device due to Electromagnetic Wave Radiated with Electrostatic Discharge

by Yasuyuki TABATA* and Hajime TOMITA*

Abstract; An electrostatic discharge "ESD" is known to cause various nuisances on sensitive electronic components and devices, such as electric overstresses, latent failures and malfunctions. An electromagnetic noise radiated with ESD also affects adversely electronic circuits, both analog and digital, using ICs and LSIs. The latter, an electromagnetic interference "EMI" of electronic circuits due to ESD, is increasing as electronic devices become more and more complex.

From the background described above, an electrostatic damage level and immunity test of the ICs and LSIs have been studied and the nuisances almost solved from a view point of product reliability of the electronic solid circuit in industry. However, characteristics of electromagnetic fields radiated with ESD, as a radio frequency noise "RFN" due to ESD, have hardly been investigated, since a transient phenomenon as ESD is difficult to measure accurately; as a result, the noise level induced by ESD in the electronic devices has not been covered quantitatively yet.

The purpose of this study is to provide a frame of the electromagnetic field and RFN due to ESD. The method of approach is simple; the discharge current waveform of the ESD occurring between a charged metallic sphere and grounded one is observed with a frequency-wide-band oscilloscope, and then the electromagnetic field strength around the ESD source and the RFN level induced in electronic devices are deduced from numerical analyses applying the discharge current waveform to the Maxwell Equation and Antenna Theorem, respectively, because the ESD occurring between conductors is the most generally accepted one for determining theoretically and experimentally the electromagnetic field strength and RFN level due to ESD.

This paper discusses the main factors of the ESD controlling the electromagnetic field strength and RFN level. The results obtained from the numerical analyses and experiments are summarized as follows:

- (1) The discharge current reaches immediately a peak value after the ESD occurs between metallic spheres, and its rise time, a few ns, is somewhat longer than a time constant of the discharge circuit used in the experiment.
- (2) The electromagnetic field radiated in free space depends on the discharge current, and the maximum values of the field strength deduced from the numerical analysis are about 10 V/m and 100 mA/m, respectively in the case that the on-set voltage of ESD is about 10 kV.
- (3) The ESD causes the EMI in an electronic circuit in the vicinity of the ESD source, and the radiated electromagnetic field controls primarily the RFN induced in the electronic circuit in the region more than about 1.0 m apart from the ESD source.
- (4) The RFN level due to ESD, the voltage induced in the electronic circuit, depends primarily on the high frequency elements of the discharge current and on-set voltage.

Keywords: Electromagnetic Noise, Electromagnetic Field, Electrostatic Discharge, Electromagnetic Interference, Static Electricity

1. まえがき

IC, LSI等の半導体素子から構成されるマイクロエレクトロニクス機器(以下, ME機器という)は, 多量の信号を高速で処理する。しかし, クロック周波数が数十MHz, 信号のレベルが数V以下という高周波, 広帯域の微小信号を処理するため, ME機器は電磁ノイズに脆弱である。例えば, 電磁ノイズによって信号レベルが揺らぐとか, 引いてはME機器が誤動作, 故障等を引き起こす等, 電磁ノイズは各種の電磁障害(以下, EMIという)の原因になっている¹⁾。また, 電磁ノイズによるME機器の誤動作等が一次原因となって労働災害が発生することもあり²⁾, EMIは工業化社会において大きな問題になっている。

このような背景から, ME機器の電磁ノイズ耐性がクローズアップし, 電磁リレー, モータ, デジタル機器等から発生する電磁ノイズ特性, ならびにそれらのME機器へ及ぼす影響等に関する多くの研究成果が発表されている³⁾。しかし, 静電気放電(以下, ESDという)に伴って発生する電磁ノイズは, 現在市販の測定器で精度のよい測定ができないため, その一部については研究されているものの⁴⁾, ESDによるEMIの問題はまだ十分に解明されていない。特に, ESDに伴って発生する放射電磁界ノイズ(以下, RFNという)は周波数スペクトルの帯域が広いため, ME機器に対するEMIもほとんど未解明である。

ここではESDに起因するEMI対策を体系的に確立することを目的として, ESDに伴うRFNのME機器への影響について研究した。具体的にはME機器を閉ループ回路に置換した等価回路モデルを用いて, RFNの影響に関する数値解析を試みた。その結果, RFNによってME機器に誘起されるノイズレベルが明らかとなり, これらの結果は過去に報告された実験成果⁵⁾を裏付けるものでもあった。また, この解析を通してME機器に誘起されるノイズレベルは主としてRFNの特性に依存することが判明した。以下, これらの結果について報告する。

2. 電磁ノイズの解析

ESDによる電磁ノイズもその骨格は電磁界によって与えられる。いま, 電磁ノイズの発生源における電流密度を \vec{j} , 電荷密度を ρ とすると, 発生源から \vec{r} 離れた位置における時間 t でのベクトルポテンシャル \vec{A} , スカラーポテンシャル ϕ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \int \frac{\vec{j}(\vec{r}_s, t_s)}{4\pi r} \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s) \quad (1)$$

$$\phi(\vec{r}, t) = \int \frac{\rho(\vec{r}_s, t_s)}{4\pi\epsilon_0 r} \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s) \quad (2)$$

$$t_s = t - r/c$$

c : light velocity

ここで

$$\vec{H} = \text{rot} \vec{A} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\text{grad} \phi - \mu_0 \partial \vec{A} / \partial t \quad (4)$$

なる関係を用いて, (1), (2)式から電磁界 \vec{E} , \vec{H} に関する一般式を導くと次式が得られる。

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int \left\{ \frac{\rho(\vec{r}_s, t_s)}{\epsilon_0 r^3} \cdot \vec{r} + \frac{\vec{r}}{\epsilon_0 c r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t_s} \rho(\vec{r}_s, t_s) - \frac{\mu_0}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial t_s} \vec{j}(\vec{r}_s, t_s) \right\} \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s) \quad (5)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int \left\{ \vec{j}(\vec{r}_s, t_s) \times \frac{\vec{r}}{r^3} + \frac{\partial}{\partial t_s} \vec{j}(\vec{r}_s, t_s) \times \frac{\vec{r}}{c r^2} \right\} \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s) \quad (6)$$

次に, ESDによって誘起される電磁界であるが, これはFig. 1に示すようにESDが放電間隔 $2l$ で相対向している2個の金属球M, M'の間で発生したとする。すなわち, 初期帯電電荷量 Q_0 に帯電していた金属球からESDが発生し, 金属球の間に放電電流 I が流れたと仮定する。

一般に帯電物体および放電の対向物体は金属球とは限らず, また, 帯電物体の形状, 固有抵抗率もさまざまである⁴⁾。しかし, ここでの目的は, ESDによる電磁ノイズ問題の骨格を把握することであるため, ESDをFig. 1に示すようにモデル化し, 上記のように仮定する。

ESDを以上のように単純化し, $r \gg 2l$ の条件の基に, \vec{j} の z 軸成分は一樣と見なすと, (5), (6)式の電流密度に関する体積積分は

$$\int \vec{j}(\vec{r}_s, t_s) \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s) \quad (7)$$

$$= 2l \int \vec{j}(0, t_s) \cdot d\vec{S}(0) = 2l \cdot I(t_s)$$

と表される。また、金属球の帯電電荷量 Q と I の間には

$$Q(t_s) = Q_0 - \int I(t_s) \cdot dt \quad (8)$$

なる関係があり、電荷 ρ についての体積積分は電気双極子 $2lQ$ とみて

$$\int \frac{\rho(0, t_s)}{r^3} \vec{r} \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s)$$

$$= \frac{2l \cdot Q(t_s)}{r^3} (2 \cos\theta \cdot \vec{K}_r + \sin\theta \cdot \vec{K}_\theta)$$

$$- \frac{2lI(t_s)}{cr^2} \cos\theta \cdot \vec{K}_r \quad (9)$$

$$\int \frac{\vec{r}}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t_s} \rho(0, t_s) \cdot d\vec{V}(\vec{r}_s)$$

$$= - \frac{2lI(t_s)}{r^2} (\cos\theta \cdot \vec{K}_r + \sin\theta \cdot \vec{K}_\theta)$$

$$- \frac{2l}{cr} \cdot \frac{\partial}{\partial t_s} I(t_s) \cdot \cos\theta \cdot \vec{K}_r \quad (10)$$

となる。ここで \vec{K}_r , \vec{K}_θ , \vec{K}_ϕ は球座標系におけるそれぞれの単位ベクトルである。これらを(5), (6)式に代入すると、ESDによる点P (r, θ, ϕ) における電磁界は、次式のように求められる。

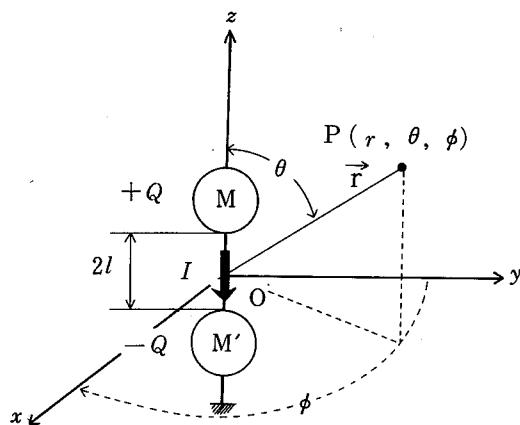


Fig. 1 A model for analyzing electromagnetic field.
電磁界の解析モデル

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{l}{2\pi} \left\{ \left[\frac{2Q(t_s)}{\epsilon_0 r^3} - \frac{2I(t_s)}{\epsilon_0 cr^2} \right] \cdot \cos\theta \cdot \vec{K}_r \right.$$

$$\left. + \left[\frac{Q(t_s)}{\epsilon_0 r^3} - \frac{I(t_s)}{\epsilon_0 cr^2} - \frac{\mu_0}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial t_s} I(t_s) \right] \cdot \sin\theta \cdot \vec{K}_\theta \right\} \quad (11)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = - \frac{l}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{I(t_s)}{r^2} + \frac{l}{cr} \cdot \frac{\partial}{\partial t_s} I(t_s) \right\} \cdot \sin\theta \cdot \vec{K}_\phi \quad (12)$$

これより、(11), (12)式によると、主としてESDによって発生する電磁界は放電電流 I に依存しており、中でも放射電磁界は $(\partial I / \partial t)$ に依存することが明かである。これは、ESDのように I の時間変化率が大きいと⁴⁾、放射電磁界がME機器に大きな影響を及ぼすことを示唆しており、注目すべき結果である。

3. 静電気放電による電磁界

ESDによって誘起される電磁界は、前節で導かれた(11), (12)式によると、主としてESD発生源からの距離 r , 放電電流 I およびその変化率 $\partial I / \partial t$ に依存する。ここでは電磁ノイズの根源である電磁界のレベル、特に半導体素子への影響が大きいと考えられるピーク値、変化率等⁶⁾を推定するために数値解析を試みた。

まず、数値解析のデータとなる放電電流 I を実験によって調べた。Fig. 2はESDを発生させるために用いた実験回路で、ESDは前節の解析条件を満たすように直径20mmの放電電極M, M'間で発生させた。具体的には、直流高電圧電源 V_0 により高耐電圧高抵抗 R_0 (50G Ω) を介してセラミックキャパシタ C_0 (100pF) と放電電極Mに静電荷を帯電させ、電極M'を固定された電極Mに近付けることによってESDを発生させた。また、ESDはできるだけピーク値、時間変化率の大きな放電電流を発生させるために、放電間隔 $2l$ は放電電極の直径よりも十分に小さい数mmに設定した。この実験で発生したESDを肉眼で観察すると火花放

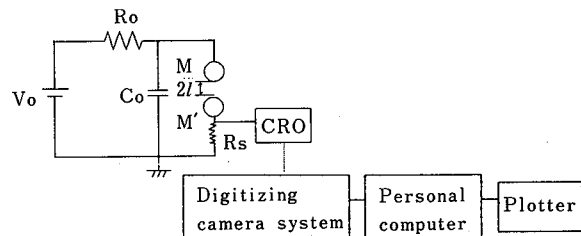


Fig. 2 Electrical setup for experiment.
実験装置の電気回路

電であり、本研究目的の条件は満たされていた。

なお、数値解析のデータとなる放電電流 I であるが、これは冒頭にも述べたとおり、過渡的に発生するとともにピーク値と時間変化率が大きく、測定が困難である。したがって、ここでは放電電流 I をできるだけ精度よく捕らえるために、Fig. 2 に示すように放電電流検出用の無誘導抵抗 R_s (0.1Ω) を用い、放電電流波形を帯域500MHzのオシロスコープ (Tek. 7934) の管面に記録した。その電流波形をディジタルカメラシステム (Tek. DCS01) によってA-D変換し、これを数値解析のデータに採用した。

Fig. 3 は上記の方法によって測定した放電電流波形の一例で、A-D変換した波形をプロッタで表示したものである。Fig. 3 によるとキャパシタの充電電圧が3.1および11kV 何れの場合も、放電電流は放電開始と同時に数 ns で立ち上がった後減衰振動をしている。立ち上がり時間は充電電圧が高いと遅くなる傾向で、これは放電間隔の影響と推定されるが、EMIは立ち上がり時間にも関係するという報告もあり⁵⁾、大変興味ある結果である。

次に、A-D変換された放電電流 I のデータと前節で得られた電磁界を表す(11)、(12)式から、ESDによって誘起される電磁界を数値解析によって求めた。ただし、ここでは I の測定に使用したオシロスコープの帯域から、 I の測定精度には限界があるためこれを考慮し、得られた I のデータを帯域相当時間の1/10の間隔である200psでサンプリングし、これをパーソナルコンピュータ (NIMBUS) に入力して、(11)、(12)式の数値解析を行った。

Fig. 4 は、上記の数値解析から得られた電磁界の一例で、キャパシタの充電電圧が3.1kV、放電発生源からの距離が1 mにおける電界と磁界をそれぞれ示したものである。この結果によると、ESDの発生と同時にピーク値の大きな電磁界が誘起されている。特に、放射電磁界のピーク値は、一般の放送電磁界の数十~百

倍である数V/m、数十mA/mという大きな値であるばかりではなく、時間変化率の大きい(立ち上がり時間の速い)スパイクが発生しており、放電開始時に大きな電界が観測されたという実験報告にも一致している⁷⁾。また、これら電磁界のピーク値は、静電界、誘導電磁界、放射電磁界の何れとも、放電開始前のキャパシタの充電電圧が増大すると、ほぼそれに比例して増大しており (Fig. 5)、帯電電圧が約10kVになると数十V/m、数百mA/mという極めて大きな電磁界が生じられることになる。

なお、電磁界の各成分の値は、それぞれの電磁界の特性のとおり、放電発生源からの距離に大きく依存している (Fig. 6)。例えば、キャパシタの充電電圧にもよるが、放電発生源から数十cm以内の距離では静電界が他の電界よりも大きく、それが約1 m以上になると放射電磁界が支配的になっている。従来、ESDによ

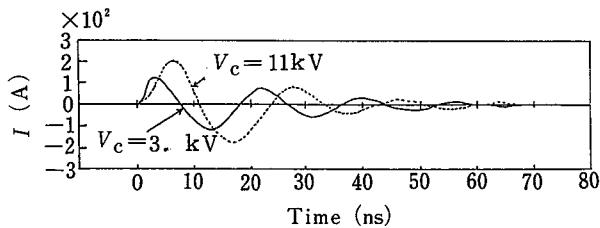
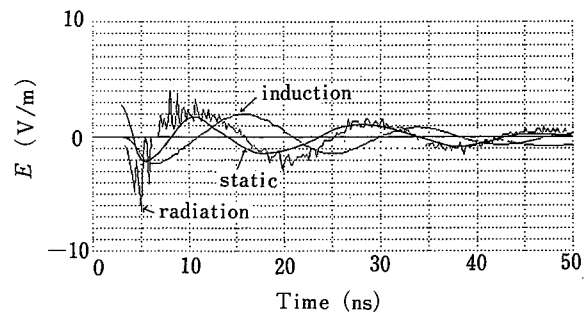
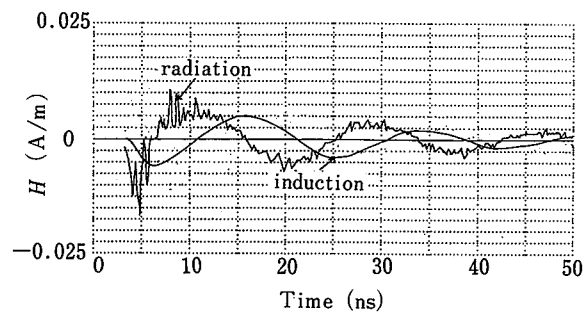


Fig. 3 Current wave forms of ESD.
ESDによる放電電流波形



(a) Electric field
電界



(b) Magnetic field
磁界

Fig. 4 Electromagnetic field due to ESD.
($V_c=3.1kV, r=1m$).
ESDによる電磁ノイズの時間変化
($V_c=3.1kV, r=1m$)

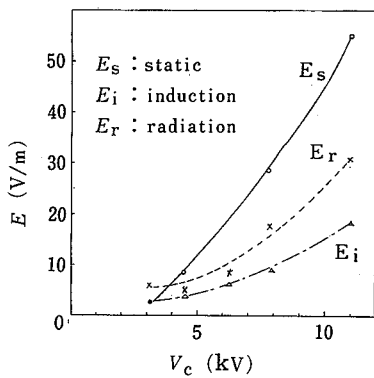
る電磁界は曖昧であったが、以上の数値解析から電磁界の骨格と定量的なレベルがほぼ明らかにされた。

4. マイクロエレクトロニクス機器へ誘起される電磁ノイズ

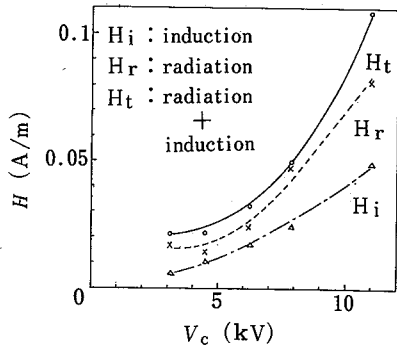
ME 機器に限らず、電子回路は電磁結合によって電磁界の影響を受け、起電力が誘起される。ここでは ESD によって発生した電磁界の誘起する起電力を電磁ノイズと定義し、これについて検討した。具体的には、ME 機器を一つの閉ループを持った電子回路と見なし、これに ESD の放射電磁界によって誘起される

RFN を前節の結果を用いてさらに数値解析した。

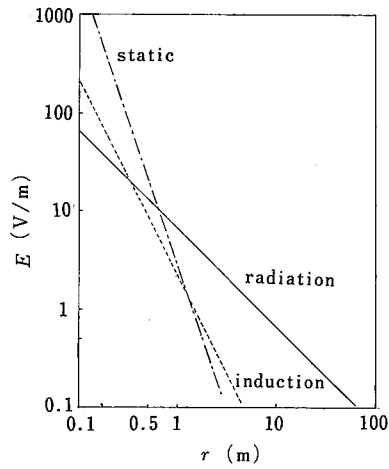
上記のように、ME 機器を一つの閉ループ回路にモデル化すると、これには大別して二つの閉ループ回路がある。一つは信号回路に MOS-FET が使用されているような高インピーダンスの閉ループ回路、他の一つは多点接地回路のような低インピーダンスの閉ループ回路である。前者については放射電界、後者については放射電磁界が電磁ノイズ源になることは明かである。しかし、閉ループ回路とノイズ源がそれぞれ異なるものの、ここでの閉ループ回路は放射電磁界の受信アン



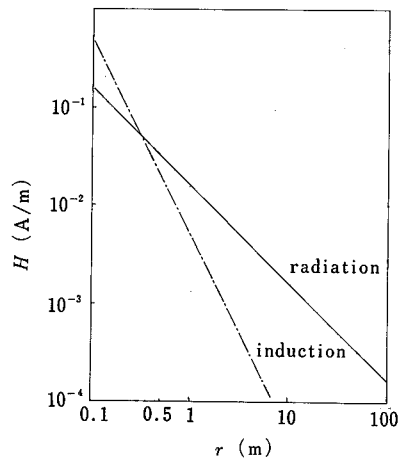
(a) Electric field
電界



(b) Magnetic field
磁界



(a) Electric field
電界



(b) Magnetic field
磁界

Fig. 5 Relation between maximum electromagnetic field due to ESD and charging voltage of capacitor ($r=1\text{m}$).

ESD による電磁ノイズの最大値とキャパシタの充電電圧との関係 ($r=1\text{m}$)

Fig. 6 Distance dependency of maximum electromagnetic field due to ESD at $V_c=3.1\text{kV}$.

ESD による最大発生電磁ノイズの距離依存性 ($V_c=3.1\text{kV}$)

テナであるため、アンテナ理論によると何れの閉ループ回路に誘起される最大起電力も結果的に同じになる⁸⁾。したがって、以下は、放射磁界によって閉ループ回路に誘起されるノイズレベル（電圧） V_r に着眼すると、それは次式で与えられる。

$$V_r(t) = \frac{\mu_0 l S}{2\pi cr} \cdot \frac{\partial^2 I(t_s)}{\partial t^2} \quad (13)$$

ただし、閉ループ回路は実際のME機器の場合種々の大きさ、形状をしているが、ここでは断面積 S の円形とした。また、閉ループ回路はESD発生源から r 離れた位置 $P(r, \pi/2, \phi)$ にあり、放射磁界の波面とは直角に位置しているとした。

これより前節で得られた放電電流 I のデータを用いて(13)式の数値解析を行った。Fig. 7は、キャパシタの充電電圧が3.1および11kVそれぞれの場合について、放電発生源より1m離れた位置に在る面積100cm²の閉ループ回路に誘起されるRFNの数値計算結果である。この結果によると、ノイズのレベルは現在のデジタル機器の信号レベルと同程度であり、そのレベルはESD発生源からの距離に反比例するというものの、ESDの影響が大きいことは明かである。また、この数値解析から従来曖昧であった電磁界の骨格と定量的データが明かにされるとともに、この結果は、ESD発生源から数m以内の距離であると、たとえME機器に向かって直接ESDが発生しなくてもトラブルが起こるといふ最近の間接ESDの問題を裏付けている。

このようにESDの影響が大きいことは示されたが、さらに(13)式の放電間隔 $2l$ に着眼すると、これは一般に放電開始電圧 V_s と絶縁破壊電界 E_b の関数 $f(V_s/E_b)$ であるため、この関係を導入すると(13)式は次式のように表される。

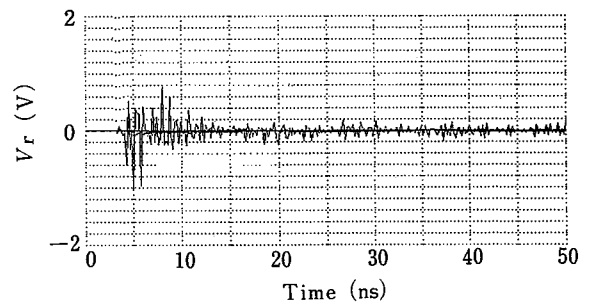
$$V_r(t) = \frac{\mu_0 S}{2\pi cr} f\left(\frac{V_s}{E_b}\right) \cdot \frac{\partial^2 I(t_s)}{\partial t^2} \quad (14)$$

換言すれば、(14)式は放射電磁界によるノイズレベルが静電気放電の開始電圧、放電電流の2階微分に比例することを示している。これは通常帯電物体が導体であると放電電流の時間変化率が大きい、絶縁物ではそれが小さいため、ノイズレベルは帯電物体の電気抵抗率にも依存するというので、今後、ノイズ対策を体系的に進める場合の基礎的知見を与えるものである。

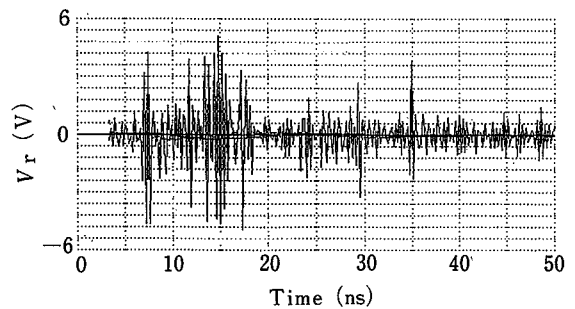
5. あとがき

ESDに起因するEMIは定性的な解明が多く、そのために静電気耐性の基準、試験方法等に問題点があると指摘されている。ここではそれらの問題を定量的に解明する第一歩として、ESDによる電磁ノイズがME機器に及ぼすEMIについて数値解析を試みた。その結果、次のようなことが明らかにされた。

- (1) EMIの根源である電磁界はESDが発生した直後に最も大きく、帯電電位が10kV程度であると、ESD発生源より1m以上離れた位置においても電界強度で数十V/mに達することがある。
- (2) ESDは容量性放電であることから、それによって誘起される電磁界の時間的な変化率が大きく、いわゆる広帯域の周波数成分を持った電磁ノイズである。



(a) $V_c=3.1\text{kV}, r=1\text{m}$



(b) $V_c=11\text{kV}, r=1\text{m}$

Fig. 7 Induced voltage to model electronic circuit due to ESD.

モデル化した電子回路にESDに起因して誘導する電磁ノイズの時間変化

(3) ESDによって発生する放射電磁界のノイズレベルは放電発生源より数mの範囲までデジタル機器の信号レベルと同程度の数Vの大きさであり, ESDがたとえこれらの機器に直接発生しなくてもトラブルの原因となる。

(4) ESDによって発生する放射電磁界がME機器に誘起する起電力は放電開始電圧, 放電電流の2階微分に依存する。

最後に, 本研究の実施にあたり助言を頂いた児玉勉主任研究官に謝意を表する。

(平成2年4月9日 受理)

参考文献

1) EMC NEWS 編集室: EMC NEWS Sanki Report, 9 (1988)

2) 桑川壯一: 安全, 37(4)10 (1986)

3) W.D. Greason: Conf. Rec. of 1986 IEEE/IAS, p. 1375, IEEE (1986)

4) Y. Tabata and H. Tomita: J. of Electrostatics, 24, p. 155 (1990)

5) M. Honda: Conf. Rec. IEEE/IAS Annual meeting, p. 1674 (1987)

6) G.W. Allen and G. Segall: IEEE/PES Conf. Rec., C-74, p. 199 (1974)

7) T.W. Lee, G.P. Thome and T.T. Guthrie: EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-10, p. 119 (1988)

8) K.F. Lee: Principles of antenna theory, p. 232, John Wiley & Sons, (1984)