ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対する 放電電流の特性測定

非会員 森 育子* 正員 藤原 修*
正員 石上 忍** 正員 山中 幸雄**

Characteristic Measurement of Discharge Current Injected by the Air Discharge of an ESD-gun onto a Ground

Ikuko Mori*, Non-member, Osamu Fujiwara*, Member,
Shinobu Ishigami**, Member, Yukio Yamanaka**, Member

An immunity testing method for electrostatic discharge (ESD) is being specified in IEC 61000-4-2, in which the contact discharge of an ESD-gun is being normally specified. Air discharge testing is known to be a severe immunity test compared to the contact discharge testing, while the discharge current injected is not well reproduced. Grasping the behavior of the current injected by the air discharge would be helpful in establishing the worst-case ESD immunity testing. We thus previously measured the discharge currents for air discharge testing onto the IEC recommended current transducer with a commercially available ESD-gun, and showed that there exists a specific relationship of $I_p \cdot t_r^\xi / V_C = \text{constant}$ ($\xi=0.75$), between rise time t_r and current peak I_p . The current transducer, however, has frequency dependent transfer impedance, which should affect the measured current waveform. In this study, we investigated if the above-mentioned specific relationship can be obtained for air discharge of an ESD-gun onto a ground that assumes a metal enclosure of electronic equipment under test. A method was presented for estimating the discharge current from simultaneously measured magnetic fields with two magnetic field probes regardless of the distance between the gun discharge-point and the probe position. This method was validated for contact discharge of an ESD-gun to a SMA connector. With this method, we estimated the discharge currents injected onto a ground for air discharge testing of an ESD-gun with intentionally fast and slow approaches. As a result, we could confirm a specific relationship between rise time t_r and current peak I_p of $I_p \cdot t_r^\xi / V_C = \text{constant}$ with $\xi=0.57$ independent of charge voltages and gun approaches.

キーワード： 静電気試験器，気中放電，近傍磁界，放電電流波形，電流ピーク，立ち上がり時間

Keywords: ESD-gun, air discharge, magnetic near-field, discharge current waveform, current peak, rise-time

1. まえがき

近年の半導体技術の飛躍的な進歩に伴い IC の高速・高集積化が進んだ結果，高性能かつ高機能化された様々な電子機器が市場に供給されている。その一方で，電磁雑音に対する機器耐性の劣化も問題となっており，特に帯電人体からの静電気放電（ESD: Electrostatic discharge）は，ハイテク機器ほど深刻な障害を引き起こすことが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。

このような背景から，ESD に対する電子機器の耐性（イミュニティ）試験法が国際電気標準会議（IEC: International Electro-technical Commission）で取り決められ，例えば IEC 61000-4-2⁽³⁾では，帯電人体からの ESD を模擬した静電気試験法が示されている。そこでは，静電気試験器（以降は ESD ガンとよぶ）の接触放電に対する典型的な放電電流波形が具体的に規定されている。なお，接触放電とは IEC 推奨の試験法であり，ESD ガンを電子機器に直接接触させて電流を注入する試験方法である。絶縁塗装された機器に対してなど接触放電が行えない場合には，充電した ESD ガンのスイッチを押しながら供試機器へ近づけ気中放電を介して電流を注入する方法が取られる。ESD ガンの接触放電では充電電圧に比例する放電電流が注入され，毎回の電流波形も安定しているが，火花を伴わないため現実の ESD 現象を模

* 名古屋工業大学大学院情報工学専攻
〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi-ken, 466-8555

** 独立行政法人・情報通信研究機構
〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1
National Institute of Information and Communications Technology,
4-2-1 Nukii-kitamachi, Koganei-shi, Tokyo, 184-8795

擬する試験法としては疑問の部分もある。一方、気中放電は、火花を介するために、接触放電よりも厳しい試験法とされるが、放電電流は充電電圧には必ずしも比例せず、しかも波形そのものがガンの接近速度⁽⁴⁾に影響され、毎回の電流波形の再現性が悪いことから IEC では詳細を規定していない。筆者らは、気中放電に対する放電電流波形の決定因子を明らかにし、接近速度に影響されない気中放電の試験条件をみいだすことを目的として、市販 ESD ガンの IEC 推奨の電流検出変換器 (Pellegrini target) への気中放電に対する放電電流をガンの接近速度との関係において測定し、電流ピーク I_p と立ち上がり時間 t_r との間には、

$$\frac{I_p \cdot t_r^\xi}{V_c} = \text{constant} \quad (\xi = 0.75) \quad \dots\dots\dots (1)$$

という特定の関係が接近速度とは無関係に成り立つことを示した⁽⁶⁾。しかしながら、電流検出変換器は伝達インピーダンスが周波数依存性⁽⁶⁾⁽⁷⁾をもつことが指摘されており、それ故に、前述の特異関係は周波数特性に影響されているものとする。

筆者らは、機器筐体を想定したグラウンドへの気中放電に対して式(1)の関係が成立するかどうかを実験的に調べた。まず、グラウンドへの気中放電では放電電流を直接測定できないため、ガン先端電極の近傍磁界で生ずる磁界プローブの誘導電圧から放電電流波形を逆推定する方法を検討した。その際、気中放電では放電目標点 (放電点) と実際の放電箇所とがずれると予想されるため、ガンのグラウンドへの気中放電で生ずる近傍磁界を 2 本の磁界プローブで同時測定し、両者の測定波形から放電点とプローブ間距離には影響されずに放電電流を推定する方法を示し、SMA コネクタへの接触放電で同推定法の有効性を確認した。つぎに ESD ガンのグラウンドへの気中放電を、意図的に接近速度を変えて繰り返し行い、放電電流波形を充電電圧との関係において推定した。その結果、ガンの充電電圧や接近速度に拘わらず前述の特異関係が $\xi=0.57$ で成り立つことがわかった。本論文では、これらのことを述べる。なお、ESD ガンによる放電電流波形のピークと立ち上がり時間に注目する理由は、つぎのとおりである。ESD ガンの電子機器への耐性試験は、どの程度の注入電流 (接触放電では充電電圧レベル) で機器の誤動作が生ずるかを調べるものであり、その誤動作機構は、現時点では十分には解明されていないが、定性的には誘導磁界 (電流波形に比例) の機器内回路との磁界結合で生ずる過渡電圧 (鎖交磁束の時間微分、即ち注入電流の時間微分波形に比例) が主因とされる。この過渡電圧は、注入電流波形のピークが高く、立ち上がり時間が短いほど増大し、電流波形の立ち下がり時間や継続時間にはほとんど影響されない。ESD ガンを用いた接触放電では、放電電流波形のピーク値 (充電電圧に比例) が機器の試験結果に及ぼす影響が大きいため、IEC では立ち上がり時間を $0.7 \sim 1 \text{ ns}$ と規定した上で、充電電圧を試験レベルに設定しているが、本論文では気中放電を対象としているの

図 1 静電気試験器の外観(a)と ESD ガンの内部構造および電極形状(b)

Fig. 1. Appearance of an ESD simulator and an ESD-gun (a), structure of an ESD-gun, and dimension of tip electrodes (b).

図 2 (a)ESD ガンのグラウンドに対する気中放電の測定装置と(b)磁界プローブの配置

Fig. 2. Measurement set up for air discharge onto a ground plate (a) and configuration of tip electrode and magnetic field probe(b).

で、放電電流波形のピークと立ち上がり時間の両方に注目した。

2. 気中放電と放電電流の推定

IEC 61000-4-2 規定の ESD ガンは、人体の静電容量に相当する 150 pF のコンデンサ C に充電した電荷を、皮膚抵抗に

相当する 330 Ω の抵抗器 R を介して電子機器へ放電する装置で、これによって電子機器の誤動作や破壊を試験するものである。ここでは、ESD ガン NoiseKen TCP-815P と静電気許容度試験器 ESS-2001 を使用した。静電気試験器の外観を図 1(a)、ESD ガンの内部構造および電極形状を図 1(b) にそれぞれ示す。同図(b)に示すように、接触放電と気中放電とは先端形状が異なる電極を使用する。なお、ESD ガンの接触放電に対する放電電流波形⁽⁸⁾は、回路時定数(150pF $\times$ 330 Ω =49.5ns)の3倍程度(150ns)まで継続するが、本論文では電流波形のピークと立ち上がり時間とに注目するので、これらの観測を目的とした波形測定を行う。

〈2・1〉 近傍磁界の測定法 図 2 は、ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対する測定装置と近傍磁界を測定するための磁界プローブの配置を示す。図 2(a)には測定配置の全体図を、同図(b)には ESD ガンの先端電極および磁界プローブの配置を拡大して示す。図(a)のように、縦横 1m のアルミ板をグラウンドとし、その中央に ESD ガンを配置した。ただしガンは、接近速度をある程度一定に保てるように木枠からバネを介して吊るしている。近傍磁界測定に用いるしゃへい型磁界プローブは、図(b)に示すように配置した。このしゃへい型磁界プローブの外観とループの内部構造⁽⁹⁾を図 3 に示す。プローブは、特性インピーダンス 50 Ω のセミリジットケーブル製でループ(外形:10mm、ループ半径: $a=4.5$ [mm]、自己インダクタンス: $L=13.8$ [nH])を構成し、電界結合の影響を軽減するために、ループ中央で 1.0mm の間隙を設けて内導体と外導体とを接続している。

図 2(b)の配置で ESD ガンの気中放電で生ずる放電電流がガンの先端電極の中心線上を集中して一様に流れるものと

図 3 しゃへい型磁界プローブの外観(a)とループの内部構造(b)

Fig. 3. Appearance of shielded magnetic field probe (a) and structure of the loop.

したとき、そこから距離 d に配置した磁界プローブに誘導される電圧を $v(t)$ とすれば、放電電流 $i(t)$ は、

$$i(t) = \frac{L}{\mu_0 a} \left(\frac{d}{a} + \sqrt{\left(\frac{d}{a}\right)^2 - 1} \right) \left\{ \frac{v(t)}{Z_0} + \int_0^t v(t') \cdot \frac{dt'}{L} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ただし、 μ_0 は真空の透磁率、 L は磁界プローブの自己インダクタンス、 Z_0 は特性インピーダンスである。式(2)から、放電電流は磁界プローブの誘導電圧波形から計算できるが、その値は先端電極とプローブとの配置距離 d に依存するので、気中放電に対する放電点が設定の位置から外れれば推定電流に誤差を伴う。図 4 は ESD ガンのグラウンドへの気中放電に際して先端電極の放電点からのずれを表すイメージ図を示す。気中放電では充電したガンを近づけると、放電点と予め設定した磁界プローブとの配置距離 d にはずれ δ が生ずるものと予想される。このずれ δ に起因する推定放電電流の相対誤差 ε は、

$$\varepsilon = \frac{\frac{\delta}{a} + \sqrt{\left(\frac{d+\delta}{a}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{d}{a}\right)^2 - 1}}{\frac{d}{a} + \sqrt{\left(\frac{d}{a}\right)^2 - 1}} \dots\dots\dots (3)$$

と表される。ESD ガン先端電極の中心軸から磁界プローブの中心点までの距離 d は、先端電極にプローブを押し付けた場合が最小($d=12$ [mm])となるので、このときの先端電極とグラウンドとの接触点を目標の放電点とすれば、ずれ δ による放電電流の式(3)から求めた推定誤差は図 5 のよう

図 4 ESD ガンのグラウンドへの気中放電に際して先端電極が放電点から外れる様子

Fig. 4. An image of deviation from the discharge point for air discharge of an ESD gun onto a ground.

図 5 ESD ガンの先端電極が放電点から外れることに起因した推定放電電流の相対誤差

Fig. 5. Relative errors of estimated currents due to deviation from the discharge point of an ESD-gun.

になる。同図で横軸はずれ δ のループ半径 a ($=4.5[\text{mm}]$) に対する割合 δ/a を、縦軸は相対誤差 ε をそれぞれ表す。図から、放電点からループ半径分ずれた場合でも放電電流の推定誤差は35%を超えることがわかる。

〈2・2〉 放電電流の推定法 本節では、ESD ガンの気中放電に際して放電点と磁界プローブの設定配置との距離に依存しない放電電流推定法を述べる。図6は2本の磁界プローブの誘導電圧から放電電流を推定するための測定配置を示す。ESD ガン先端電極の中心軸から予め等距離 ($2d=28\text{ mm}$) となるように2本の磁界プローブ (プローブA、プローブBと呼ぶ) を図のように配置するが、実際の気中放電に際しては、先端電極は必ずしも両プローブ間の中央ではなく、片方のプローブ方向へずれることが予想される (図ではプローブBの方向へずれている様子を描いている)。そのずれ δ は2本のプローブのループ面と平行な面内の中心線上で生ずるものと仮定すれば、各プローブの中心とガン先端電極の中心線との距離は、図6に示すように、それぞれ $d+\delta$ 、 $d-\delta$ となる。そのとき、プローブA、Bに誘導される電圧をそれぞれ $v_A(t)$ 、 $v_B(t)$ とすると、放電電流 $i(t)$ は、

$$i(t) = \frac{L}{\mu_0 a} \left(\frac{d+\delta}{a} + \sqrt{\left(\frac{d+\delta}{a} \right)^2 - 1} \right) \left\{ \frac{v_A(t)}{Z_0} + \int_0^t v_A(t') \cdot \frac{dt'}{L} \right\} \\ = \frac{L}{\mu_0 a} \left(\frac{d-\delta}{a} + \sqrt{\left(\frac{d-\delta}{a} \right)^2 - 1} \right) \left\{ \frac{v_B(t)}{Z_0} + \int_0^t v_B(t') \cdot \frac{dt'}{L} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。式(4)において、

$$I_A = \frac{v_A(t)}{Z_0} + \int_0^t v_A(t') \cdot \frac{dt'}{L}, \quad I_B = \frac{v_B(t)}{Z_0} + \int_0^t v_B(t') \cdot \frac{dt'}{L} \quad \dots\dots\dots (5)$$

とおき、 δ を求めると、

$$\delta = a \cdot \sqrt{\left(\frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \right)^2 \left(\frac{d}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \frac{(I_A - I_B)^2}{I_A I_B}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図6 2本の磁界プローブの誘導電圧から放電電流を計算するための測定配置

Fig. 6. Measurement configuration for calculating discharge current from induced voltages through two magnetic field probes.

となる。この δ を式(4)へ代入すれば、

$$i(t) = \frac{L}{\mu_0 a} \left[\frac{d}{a} + \sqrt{\left(\frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \right)^2 \left(\frac{d}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \frac{(I_A - I_B)^2}{I_A I_B}} \right. \\ \left. + \sqrt{\left(\frac{d}{a} + \sqrt{\left(\frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \right)^2 \left(\frac{d}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \frac{(I_A - I_B)^2}{I_A I_B}} \right)^2 - 1} \right] \times I_A(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。式(7)はずれ δ を含まないので、放電電流 $i(t)$ は2本の磁界プローブの誘導電圧から計算することができる。

3. 実験

本章では、ESD ガンの SMA コネクタへの接触放電に対する放電電流と近傍磁界の同時測定から、前節の方法の有効性を確認する。つぎにグラウンドへの気中放電に対する放電電流を近傍磁界の測定波形から ESD ガンの充電電圧と接近速度との関係において推定する。

〈3・1〉 SMA コネクタへの接触放電 特性インピーダンス 50Ω で伝達周波数特性が 12GHz まで平坦な SMA コネクタに対して接触放電を行い、2本の磁界プローブに誘導された電圧波形から放電電流を推定した。磁界プローブの配置を図7に示す。磁界プローブを2本対向させてグラウンド面に固定 ($2d=28\text{ mm}$) し、それらの出力はデジタルオシロスコープ (入力抵抗: 50Ω , 帯域幅: 6GHz , 標本化周波数: 20GHz , 量子化ビット数: 8ビット), SMA コネクタには別のデジタルオシロスコープ (入力抵抗: 50Ω , 帯域幅: 1.5GHz , 標本化周波数: 8GHz , 量子化ビット数: 8ビット) へそれぞれ同軸ケーブルを介して接続した。図8は SMA コネクタへの接触放電で等距離配置した磁界プローブによる誘導電圧と放電電流を示す。図から、2本の磁界プローブは等距離配置でも、プローブ特性の相違もあって両者の測定波形は完全には一致しないが、それらから推定した放電電流波形は測定波形に概ね一致していることがわかる。図9は SMA コネクタへの接触放電において ESD ガンの先端電

図7 ESD ガンの SMA コネクタへの接触放電に対する放電電流推定法の検証

Fig. 7. Validation of discharge current estimated through two magnetic field probes for contact discharge of an ESD-gun to a SMA connector.

図8 ESD ガンの SMA コネクタへの接触放電において等距離配置した磁界プローブによる誘導電圧波形(a)と放電電流の計算波形と測定波形(b)
Fig. 8. Voltage waveforms (a) induced in the two magnetic field probes placed at the equi-distance from the tip electrode and measured and calculated current waveforms (b) for contact discharge of an ESD-gun on a SMA connector.

図9 ESD ガンの SMA コネクタへの接触放電において意図的にずらして配置した磁界プローブによる誘導電圧波形(a)と放電電流の計算波形と測定波形(b)
Fig. 9. Voltage waveforms (a) induced in the two magnetic field probes placed intentionally at different distance from the tip electrode and measured and calculated current waveforms (b) for contact discharge of an ESD-gun on a SMA connector.

極を意図的にずらして接触させた場合の磁界プローブ（プローブ A の配置距離は先端電極中心軸から 16 mm，プローブ B では 12 mm）による誘導電圧波形と放電電流波形を示す。図から，磁界プローブ B のほうがプローブ A よりも誘導電圧が高く測定されており，2 本のプローブ誘導電圧から推定した放電電流は，プローブ単体による各推定波形の中間に入り，測定波形に概ね一致していることがわかる。

〈3・2〉 グラウンドへの気中放電 図 6 の配置で，ESD ガンのスイッチを押したままグラウンドへ近づけて放電させ，2 本の磁界プローブに誘導される電圧を同時測定した。なお，ガン近づける際にステンレス製のボールをガイドとして使い，ガンのハンドルと反対側の側面を押し当てた状態でグラウンドへ近づけていくことにより，ガンの先端電極が 2 本のプローブのループ面に平行な面上からずれないようにした。充電電圧は $V_c=1\text{kV}$ から 5kV まで 1kV 毎とし，各充電電圧につき，グラウンドへ素早く接近させて放電させる方法（接近速度：約 $20\text{-}25\text{cm/s}$ ；高速接近と呼ぶ）と，できるだけゆっくり接近させて放電させる方法（接近速度：約 $1.5\text{-}2\text{cm/s}$ ；低速接近）の 2 種類を 12 回ずつ試みた。なお，測定は，気温 28°C ，相対湿度 30% の屋内で行った。

結果を図 10，図 11 に示す。図(a)は ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対するプローブ A の誘導電圧波形，同(b)はプローブ A, B の誘導電圧波形から推定した放電電流波形の一例をそれぞれ示す。これらの図から，充電電圧の上昇に伴って放電電流のピークは増大しているが，立ち上がり時間は緩やかになる傾向がみられること，その程度は高い充電電圧で高速接近よりも低速接近のほうが顕著であること，などがわかる。

図 12 は放電電流波形の立ち上がり時間と電流ピークの間係を（平均値 $\pm$ 標準偏差）で示す。ただし，縦軸は電流ピークを充電電圧で規格化して示している。図中の白丸は高速接近，灰色の丸印は低速接近に対する結果を表す。図から，グラウンドへの気中放電に対する放電電流波形については，立ち上がり時間と規格化ピークとの間には充電電圧や接近速度とは無関係に決まる特定の関係が存在すること，しかし充電電圧が低いほど規格化ピークは上昇し，立ち上がり時間も短くなること，この傾向は接近速度にはあまり依存していないこと，などがわかる。

図中の太い実線は，すべてのデータに当てはめた回帰直線であり，

$$\frac{I_p \cdot t_r^\xi}{V_c} = \text{constant} (\xi=0.57) \dots\dots\dots (8)$$

と表され，式(1)と同じタイプの関係式となった。なお，文献(10)では帯電人体の腕を模擬した金属製回転楕円体の気中放電で放電電流を測定し，波形のピークと立ち上がり時間のアーク長依存性を求めているが，これらのデータから式(9)と同様の関係式が誘導でき，この場合には $\xi=0.61$ であった⁽¹¹⁾。

図 10 ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対する磁界プローブの誘導電圧波形(a)と放電電流の推定波形(b)(I)
Fig. 10. Measured voltage waveforms (a) induced in the two magnetic field probes and discharge waveforms (b) estimated for air discharge of an ESD gun onto a ground (I).

図 11 ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対する磁界プローブの誘導電圧波形(a)と放電電流の推定波形(b)(II)
Fig. 11. Measured voltage waveforms (a) induced in the two magnetic field probes and discharge waveforms (b) estimated for air discharge of an ESD gun onto a ground (II).

図 12 ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対する放電電流の立ち上がり時間とピーク値との関係
Fig. 12. Relationship between rise time t_r and current peak I_p of discharge current for air discharge of an ESD-gun onto a ground.

4. むすび

ESD ガンの気中放電を介する放電電流の特性解明はイミューニティの向上設計に役立つ。筆者らは先に、ESD ガンの校正用電流検出変換器への気中放電に対する放電電流を測定し、ピーク I_p と立ち上がり時間 t_r との間には、式(1)で与えられる特定の関係が存在することをみいだしたが、本論文では、同関係がグラウンドへの気中放電においても成り立つかどうかを検討した。それに先立ち、ESD ガンの気中放電に伴って発生する近傍磁界を 2 本の磁界プローブで同時測定し、両者の測定波形から放電点とプローブとの距離には影響されずに放電電流を推定する方法を示し、その有効性を SMA コネクタへの接触放電に対して検証した。つぎ

に、ESD ガンのグラウンドへの気中放電を、接近速度を変えて繰り返し行い、放電電流を充電電圧との関係において推定した結果、ガンの充電電圧や接近速度に拘わらず前述の特異関係が $\zeta=0.57$ で成り立つことがわかった。

今後の課題としては、ESD ガンの気中放電による放電電流波形のピークと立ち上がり時間との間に成り立つ特異関係の機構解明があげられる。

(平成 17 年 3 月 15 日受付, 平成 17 年 9 月 7 日再受付)

文 献

- (1) For example and T. Takagi : "Research and Development on EMC/EMI Measurements and Technologies in Japan", *Trans. IEICE*, Vol.J79-B-II, No.11, pp.718-726 (1996-11) (in Japanese)
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, pp.718-726 (1996-11)
- (2) M. Honda : "EMI Aspects of the Metal-Metal ESD to the Electronic Equipment", *JIEICE*, Vol.78, No.9, pp.849-850 (1995-9) (in Japanese)
本田昌實 : 「金属物体で発生する静電気放電 (ESD) の脅威」, 信学誌, **78**, 9, pp.849-852 (1995-9)
- (3) Japanese Industrial Standards Committee : "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4 : Testing and measurement techniques - Section2. Electrostatic discharge immunity test", JIS C 1000-4-2 : 1999 (IEC 61000-4-2 : 1995/Amd. 1) (1999) (in Japanese)
日本工業標準調査会 : 「電磁両立性- 第 4 部 : 試験及び測定技術- 第 2 節 : 静電気放電イミュニティ試験」, JIS C 1000-4-2 : 1999 (IEC 61000-4-2 : 1995/Amd. 1)(1999)
- (4) For instance, M. Masuigi : "Analysis of Transient Responses of Electric Fields Accompanied by a Movement of a Discharge Electrode", *Trans. IEICE*, Vol.J76-B-II, No.11, pp.916-919 (1993-11) (in Japanese)
例えば、馬杉正男 : 「放電電極の移動に伴う電界の過渡応答解析」, 信学論, **J76-B-II**, 11, pp.916-919 (1993-11)
- (5) I. Mori, O. Fujiwara, S. Ishigami, and Y. Yamanaka : "Characteristic measurement of transient current injected by air discharge of an ESD-gun", *Proc. 2004 International Symposium on EMC, Sendai, 2D1-1*, pp.417-420 (2004-6)
- (6) J. Sroca : "Target Influence on the Calibration Uncertainty of ESD Simulators", *Proc. of IEEE International Symposium on EMC, Zurich, 37G4* (2001)
- (7) T. Gotoh, O. Fujiwara, S. Ishigami, and Y. Yamanaka : "Characteristic measurement of transfer impedance of Pellegrini target in contact discharge with ESD-gun", *Technical report of IEICE., EMCJ2003-68, MW2003-165*, pp.9-13 (2003-10) (in Japanese)
後藤剛史・藤原 修・石上 忍・山中幸雄 : 「静電気試験器の校正用電流検出変換器に対する伝達インピーダンスの特性測定」, 信学技報, **EMCJ2003-68, MW2003-165**, pp.9-13 (2003-10)
- (8) For instance : "Characteristics of the discharge current by the human charge model ESD simulator", *Trans. IEICE*, Vol. J79-B-II, No.11, pp.789-796 (1996-11) (in Japanese)
室田修男 : 「人体帯電モデル型静電気試験機の放電電流特性」, 信学論, **J79-B-II**, 11, pp.789-796 (1996-11)
- (9) O. Fujiwara, I.Mori, S.Ishigami, and Y.Yamanaka : "Calculation of magnetic near-field generated by the contact discharge of an ESD-gun", *IEEJ Trans. FM.*, Vol.124, No.9, pp.763-768 (2004-9) (in Japanese)
藤原 修・森 育子・石上 忍・山中幸雄 : 「ESD ガンの接触放電に対する近傍空間の磁界計算」, 電学論 A, **124**, No.9, pp.763-769 (2004-9)
- (10) D.Pommerenke : "ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit", *Journal of Electrostatics* 36, pp.31-54 (1995)
- (11) I. Mori, O. Fujiwara, S. Ishigami, and Y. Yamanaka : "A study on rise-time and peak of the transient current injected through air discharge of an ESD-gun", *IEEJ Trans Fundamentals and materials*, Vol. 125, No.7 (2005-07) (to be published)

森 育 子

(非会員) 1973 年 1 月 5 日生。2002 年 3 月名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業。2004 年 3 月同大学院工学研究科博士前期課程電気情報工学専攻修了。現在、同大学院工学研究科博士後期課程情報工学専攻在学中。環境電磁工学に関する研究に従事。

藤 原 修

(正員) 1948 年 8 月 11 日生。1971 年 3 月名古屋工業大学工学部電子工学科卒業。1973 年 3 月名古屋大学大学院修士課程修了。同年 (株)日立製作所中央研究所入所。1976 年同所退職。1980 年 3 月名古屋大学大学院博士後期課程修了。名古屋大学工学部助手、講師を経て、1985 年 4 月名古屋工業大学工学部助教授。現在、同大学院情報工学専攻・教授。1991~1992 年スイス連邦工科大学客員教授。放電雑音、生体電磁環境、環境電磁工学に関する研究に従事。工学博士。1980 年電気学会論文賞受賞。2000 年度電子情報通信学会論文賞受賞。2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sendai, The Best Paper Award (The Risaburo Sato Award)。電子情報通信学会、IEEE、各会員。

石 上 忍

(正員) 1967 年生。1990 年電気通信大学工学部電気通信工学科卒業。1992 年同大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学工学部助手。現在、独立行政法人情報通信研究機構・無線通信部門電磁環境センター・通信システム EMC グループ主任研究員。ESD, イミュニティ試験, EMC 測定法の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、IEEE 各会員。

山 中 幸 雄

(正員) 1958 年 3 月生。1980 年名古屋大学工学部電気系学科卒業。1983 年同大学院工学研究科電気・電子専攻修了。同年郵政省電波研究所 (現、独立行政法人情報通信研究機構) 入所。以来、電磁環境・電磁妨害波の測定法の研究及標準化に従事。現在、同機構無線通信部門電磁環境センター EMC 計測グループリーダー。電子情報通信学会会員。