

静電気試験法による放電電流の FDTD シミュレーション

藤原 修^{†a)} 張 小江[†] 山中 幸雄^{††}

FDTD Simulation of Electrostatic Discharge Current by ESD Testing

Osamu FUJIWARA^{†a)}, Xiaojiang ZHANG[†], and Yukio YAMANAKA^{††}

あらまし 静電気放電 (Electrostatic Discharge: ESD) に伴う電磁雑音は、ハイテク機器に重大な電磁障害を引き起こすとされる。このような背景から、国際電気標準会議 (IEC) の静電気放電イミュニティ試験要求 IEC61000-40-2 は、製品の開発時に欠くことのできない試験項目となっている。一方、ESD 対策は、元来、設計段階から対処すべき問題であり、その機構解明や対策ルールの抽出に際しては、ESD 試験器 (放電ガン) に対する計算機シミュレーション技術の確立が期待されている。本論文では、放電ガンの計算機シミュレーションモデルの確立を目的として、接触放電の時間領域有限差分 (FDTD) モデリング法を提案した。提案モデリング法の妥当性は、50Ω 系の SMA コネクタに対して放電ガンの接触放電で注入される電流波形をシミュレートし、実測波形と比較することで検証できた。更にグラウンド板上に構成した伝送路の一端へ放電ガンの接触放電で線路を介して他端に誘導される電圧波形をシミュレートし、実験結果と比較した結果、シミュレーション波形は実測波形とおおむね一致し、提案 FDTD モデリング法の有効性が確認できた。

キーワード 静電気放電, 静電気試験器, 放電電流, FDTD 法

1. ま え が き

デジタル情報端末や通信機器は小型・軽量化、高性能化された半面、高速・低電力化した集積回路の多用で電磁雑音に対する機器耐性が大幅に劣化している [1]。特に、帯電金属体の静電気放電 (Electrostatic Discharge: ESD) で生ずる過渡的な電磁雑音は、マイクロ波帯にも及ぶ広帯域の周波数スペクトルを含み、ハイテク機器に強い電磁干渉を及ぼすとされる [2]。この種の機器の誤動作を防止するために静電気放電を模擬した耐性試験が従来から各社で行われてきたが、試験器の特性や試験方法などが異なると同じ機器であっても試験結果が異なることが明らかとなり、それゆえに静電気放電イミュニティ試験が国際電気標準会議 (IEC) によって制定された。特に、ESD イミュニティ試験要求 IEC61000-4-2 [3] においては、帯電人体からの ESD を模擬した試験法として、ESD 試験器 (以

降は放電ガンと呼ぶ) を、直接 ESD 試験では被試験体、間接 ESD では被試験体近辺に設置された金属板へそれぞれ接触させたまま、内蔵コンデンサの蓄積電荷をスイッチで放電することを規定している。一方、ESD 対策は、元来、設計段階から対処すべき問題ではあるが、その発生機構や侵入回路の特定がいまだに解明されておらず、それゆえに、機構解明や対策ルールの抽出に際しては、放電ガンに対する計算機シミュレーション技術の確立が期待されている [4] ~ [7]。

本論文では、放電ガンのフルウェーブシミュレーションモデルの確立を目的として、接触放電の時間領域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain: FDTD) モデリング法を提案し、放電電流のシミュレーション波形を測定波形と比較することでその妥当性を示す。

2. FDTD モデリング

IEC 61000-4-2 では、帯電人体から電子機器への放電を模擬する試験法として、一定の放電電流波形を発生させる放電ガンが規定されている。図 1(a) は放電ガンの構造例、同図 (b) には放電ガンの簡易等価回路をそれぞれ示す。この試験器は、人体容量としたコンデンサ C ($= 150 \text{ pF}$) に電荷を充電し、これを人体の皮膚抵抗に相当する抵抗 R ($= 330 \Omega$) を通して先端電

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市 Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

^{††} 独立行政法人 通信総合研究所, 横須賀市 Independent Administrative Institutions, Communications Research Laboratory, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

a) E-mail: fujiwara@odin.elcom.nitech.ac.jp

極から放電するものである．ただし，IEC 61000-4-2 では放電ガンの満たすべき要求仕様として帯電人体からの放電電流の実測結果に基づく放電電流波形を規定している．その電流波形を図 2 に示す．図に示すように，最初のピーク電流の立ち上がり時間は 0.7~1 ns で，電流振幅については，例えば 1 kV 充電時には最初のピーク電流が 3.75 A，30 ns 後が 2 A，60 ns 後が 1 A となり，放電開始から 60 ns 後の放電電流は 30 ns 後の放電電流の半分に減衰している．このような放電電

流波形を満足するように放電ガンを校正することが要求されるが，それには IEC 推奨の電流検出変換器 (Pellegrini target [3]) に直接放電し，電流波形を測定する必要がある．この変換器は，抵抗内蔵の平面円板電極と N 型コネクタとからなり，N 型コネクタの外導体と内導体がそれぞれ 2Ω の抵抗と 48Ω の抵抗を介して平面円板電極に接続されているので，浮遊容量や寄生インダクタンスを無視できる周波数領域では円板電極に注入された電流波形は 50Ω 負荷に現れる電圧波形と一致する．しかしながら，同変換器は周波数依存の伝達特性を有することが判明し，それゆえに観測の電圧波形は電流波形とは必ずしも一致しないことが指摘されている [6] ．

本論文は，放電ガンの接触放電で生ずる電流波形を予測するためのシミュレーションモデルの確立を目的としているので，波形観測には上述の電流検出変換器は使用せず，50Ω の SMA コネクタの中心導体へ直接放電して観測することにし，この場合の 50Ω 負荷に現れる電圧波形（これを 50Ω で除すれば電流波形になる）を考察の対象とする．なお，ESD ガンの放電電流波形の立ち上がり時間から見ると，周波数成分は 1 GHz 以下であり，この周波数範囲においては電流検出変換器と SMA コネクタのいずれも平坦な周波数特性を有し，両者の違いは負荷条件だけと考える．また，SMA コネクタを採用することで，複雑な構造を有する電流検出変換器のモデリングを避けることができ，ESD ガンのモデリングの検証だけに焦点を絞れる利点もある．図 3 にこのような場合の放電ガンを対象とした FDTD モデリングを示す．図 3 (a) は市販されている放電ガンの SMA コネクタへの接触放電の様

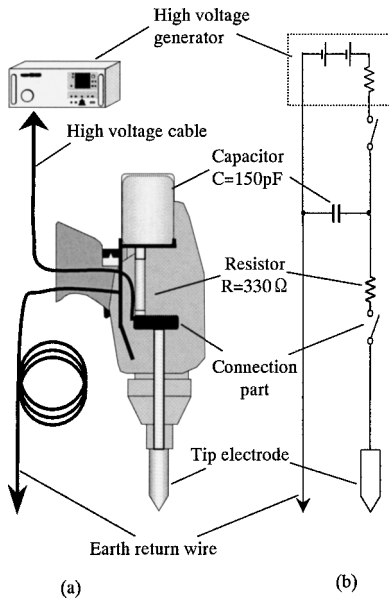


図 1 放電ガンの構造例 (a) と簡易等価回路 (b)
Fig. 1 (a) Structure of an ESD-gun and (b) its simplified equivalent circuit.

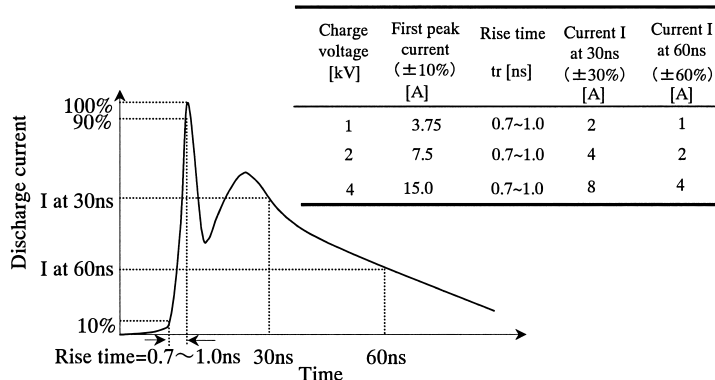


図 2 放電電流波形の規定波形
Fig. 2 The typical waveform of the discharge current.

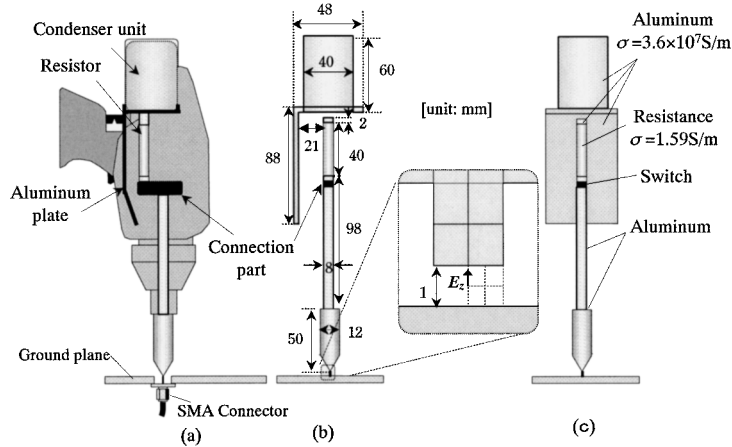


図3 放電ガンの SMA コネクタへの接触放電 (a) とその FDTD モデリング (b), (c)
 Fig. 3 (a) Contact discharge to a SMA connector with an ESD-gun and (b), (c) its FDTD modelings.

子, 同図 (b), (c) にはその FDTD モデリングをそれぞれ示している. FDTD 法においては, 放電ガンモデルを 1 mm の立方セルで組み立て, 各セルに対応した電気定数を与えることでモデリングした. 放電ガンの先端電極は同形状の金属体 (アルミニウム: 導電率 $\sigma = 3.6 \times 10^7$ [S/m]), 330Ω の抵抗 R は実寸法の抵抗体 (導電率: $\sigma = \ell / AR = 1.46$ [S/m]; 長さ: ℓ ; 断面積: A) でそれぞれ模擬した. コンデンサユニットは同形状のアルミニウムの円柱体に置き換える. 先端電極と抵抗体との間に介在する結合部は, コンデンサ C の充電と放電とを切り換えるスイッチング回路と放電電流の立上りを制御するためのインダクタが内蔵されているが, 放電ガンの構造上, 結合部の内部構造が不明のため, ここでは結合部を集中定数のインダクタンス L で模擬し, その値は放電電流波形の立上りの測定結果 (後述) から推定する. なお, ESD ガンのスイッチ部から電極先端までのインダクタンス成分は, 既に導体としてモデリングされているので, 集中定数のインダクタンス L には含まない.

放電ガンは放電する前に, まず内蔵コンデンサ C を所定の試験電圧 V_s まで充電するので, それによって放電ガン周囲の空間の静電界は一意的に決まる. それゆえに, FDTD シミュレーションにおいては, コンデンサ C への充電過程とコンデンサ C からの放電過程とに分けて放電ガンを励振する. 図 4 は ESD ガンの充電モデルと放電モデルを示す. まず, コンデンサへの充電過程は, 放電スイッチ部をオフとし,

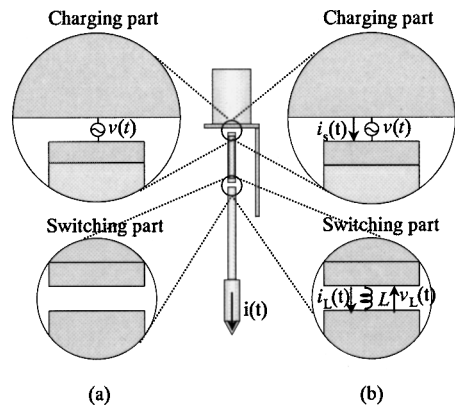


図4 放電ガンの充電モデル (a) と放電モデル (b)
 Fig. 4 (a) Charging model and (b) discharge model of the ESD-gun.

$$v(t) = V_s(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

の指数関数型電圧源を上下金属体間のギャップを通して与えることで模擬する. ここで, V_s はコンデンサの充電電圧, τ は充電時定数である. この充電過程における空間電磁界を FDTD 法で数値的に求め, 定常に達したときの電界値を放電前の静電界とみなせばよい. 次に, コンデンサ C からの放電過程は, 充電後に放電スイッチ部を集中定数のインダクタンス L に置き換え,

$$v(t) = V_s(1 - e^{-\tau_0/\tau}) - \frac{1}{C} \int_{\tau_0}^t i_s(\xi) d\xi \quad (2)$$

で励振することによって模擬する．ここで，コンデンサ C は集中定数とし， $i_s(t)$ は励振点での電流， τ_0 は充電終了時刻である (τ_0 は $(5 \sim 6)\tau$ 程度であればよい)．

なお，スイッチ部におけるインダクタンス L の FDTD 計算への組み込みについては，例えば L を z 方向に配置したとき， L に流れる電流 $i_L(t)$ とその両端の電圧 $v_L(t) (= L di_L/dt)$ との関係を利用すれば，電流密度 $J_L(t)$ と電界 $E_z(t)$ との間には

$$\begin{aligned} J_L(t) &= \frac{i_L(t)}{\Delta x \Delta y} = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \cdot \frac{1}{L} \int_0^t v_L(\xi) d\xi \\ &= \frac{\Delta z}{\Delta x \Delta y} \cdot \frac{1}{L} \int_0^t E_z(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

という関係式が導かれる [8]．ここで， Δx ， Δy ， Δz はそれぞれ x ， y ， z 方向のセル寸法である．上式をマクスウェルの方程式へ代入すればインダクタンス L を FDTD 計算に組み入れることが可能となる．

3. 実験検証

提案した FDTD モデリング法の妥当性を検証するために，放電ガンから SMA コネクタへの接触放電によるシミュレーションと実験を行い，両者の放電電流波形を比較する．図 5 は放電ガンから SMA コネクタへの接触放電実験の配置を示す．縦 1 m × 横 1 m のアルミニウム板の中央に SMA コネクタを取り付け，その中心導体に放電ガンの先端電極を垂直に接触・固定した．SMA コネクタには 50 Ω 同軸ケーブルを介して入力インピーダンス $Z_i (= 50 \Omega)$ のデジタルオシロスコープ (サンプリング周波数: 8 GHz; 帯域幅: 1.5 GHz) を接続する．放電ガンを 300 V に充電した後に電荷を放出し，この電流によって同軸ケーブ

ルの終端負荷 $Z_i (= 50 \Omega)$ に現れる電圧波形をデジタルオシロスコープによって観測した．なお，帰路電線の規定長は 2 m であるが，ここでは FDTD シミュレーションの便宜上 50 cm とした．実験で使用した ESD 試験器は NoiseKen ESS-2001 であり，帰路電線のアース面への接触は試験器セットアップの指定位置とした．なお，この接地位置を変えても放電電流波形には目立った影響は観測されなかった．

図 6 は放電ガンの SMA コネクタへの接触放電に対する FDTD モデル配置と計算領域を示す．シミュレーションでは，図に示すように全空間を 1 辺 1 mm の立方セル 438 × 108 × 298 セルでモデリングし，吸収境界条件として 12 層の PML (Perfectly Matched Layer) を適用した．アルミニウム板は完全導体で模擬し，放電ガンのモデルはアルミニウム板に対して垂直に設置した．帰路線路については FDTD の 50 cm の銅線で模擬した．SMA コネクタは放電ガンの先端電極とグラウンド板との間に 1 セル設け，そこに 50 Ω の集中抵抗を挿入することで模擬した．なお， δ -ギャップ給電法で用いた式 (1)，式 (2) の電圧源 $v(t)$ は，充電電圧 $V_s = 300$ [V]，充電時定数 $\tau = 5$ [ns] とした．

図 7 は放電ガンの SMA コネクタへの接触放電で観測される電圧波形の FDTD 計算結果と測定結果を，結合部のインダクタンス L をパラメータとして示す．上図は放電開始から 60 ns までの時間波形であり，同下図は 0 ~ 10 ns 間の拡大図である．図から，インダクタンス $L = 0$ とした電流ピークの計算値は実測値よりもかなり高くなっていること， L を挿入することで電流の立上りが緩くなってピーク値が減少していること， $L = 200$ nH とした計算波形は測定波形をおおむね表すこと，などがわかる．また，測定波形の第 2

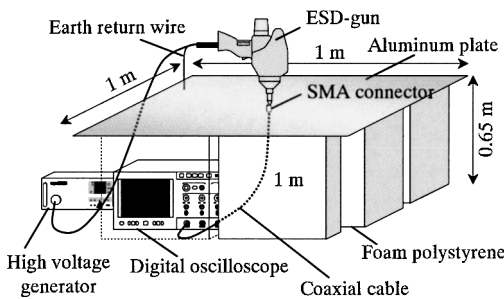


図 5 放電ガンの SMA コネクタへの接触放電実験
Fig. 5 Experimental set-up for contact discharge to a SMA connector with an ESD-gun.

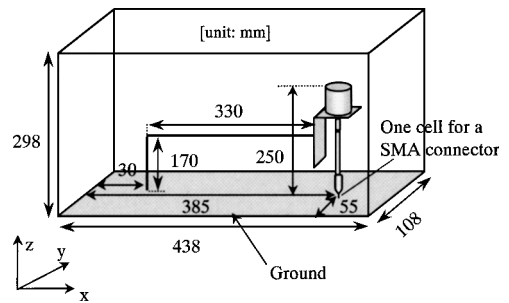


図 6 放電ガンのモデル配置と計算領域
Fig. 6 Model arrangement of the ESD-gun and calculation region.

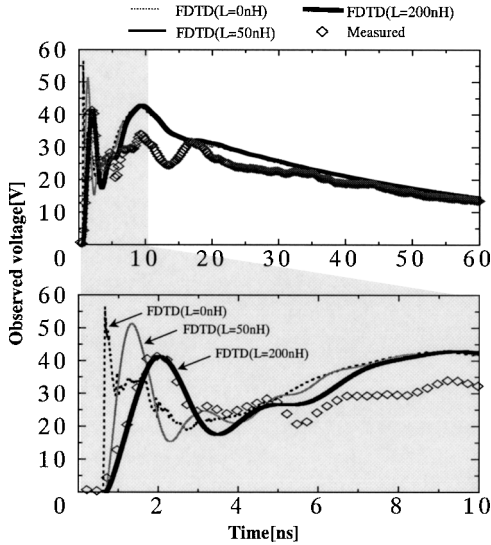


図7 放電ガンの SMA コネクタを介した電流注入による観測電圧波形

Fig. 7 Observed waveform of the voltage induced by current injection through a SMA connector connected to the ESD-gun.

ピーク値については、計算波形の方がやや大きくなっているが、この相違は放電ガンのモデリング誤差に基づくものと推察する。なお、実験に際してのアルミニウム板は縦 1m × 横 1m と放電電流波形の立上り時間に対して十分な大きさとはいえず、端部での電流反射が測定波形に影響しているおそれもある。検証実験では、放電箇所はアルミニウム板の中央に設置しているので、端部からの第 1 反射波が観測波形に現れる時間は、放電開始後 3~4 ns である。このタイミングは第 1 ピーク値と第 2 ピーク値の間にあるが、多重反射が第 2 ピーク値に影響を及ぼしている可能性もある。

4. 伝送線路の FDTD シミュレーション

放電ガンの提案 FDTD モデリングの有用性を示すために、ESD イミュニティ試験のケーススタディの一例として、伝送線路への接触放電実験を行った。このような回路構造において、従来では規格どおりの ESD 放電電流をそのまま注入して回路シミュレーションを行っているが、それでは終端で誘起される電圧波形を正しく予測することはできない。なぜならば、規格の放電電流波形は電流検出変換器に対するものであり、放電対象が変われば電流波形も変わるからである。しかしながら、本手法のように ESD ガン自身をモデリ

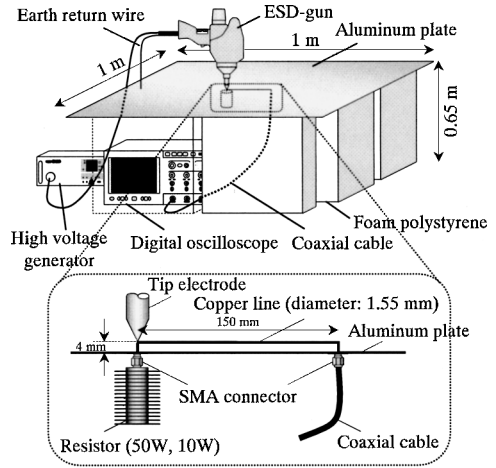


図8 放電ガンで励振する伝送線路の実験配置図

Fig. 8 Experimental set-up for a transmission line excited by the ESD-gun.

ングすれば、任意の回路構造に対しての ESD 放電のシミュレーションが可能となる。図 8 にこの実験の配置を示す。直径 1.55 mm、長さ 150 mm の銅線（円形断面）の両端を、図に示すように SMA コネクタの中心導体に接続・固定した。線路のアルミニウム板から高さは 4 mm とした。このような伝送線路の一端に放電ガンを垂直に固定・接続し、SMA コネクタには 50Ω の抵抗器を取り付け、他端には 50Ω 同軸ケーブルを介して前述のデジタルオシロスコープを接続した。1kV に充電した放電ガンから伝送線路へ電流を注入し、伝送線路を介して終端負荷 $Z_i (= 50\Omega)$ に現れる電圧波形を観測した。なお、この電圧波形から伝送線路の伝達特性を利用して電極位置の電圧及び電極からの注入電流を求めることは可能である。電極からの注入電流を算出する際には、負荷条件としては 50Ω の終端抵抗と伝送線路の始端から右側に見た入力インピーダンスの並列値になり、放電波形の過渡変動時間に比して線路長が十分に短い場合には集中近似として終端抵抗とオシロスコープの内部抵抗の並列値となる。

図 9 は放電ガンと伝送線路のモデル配置と計算領域を示す。シミュレーションでは、全空間を 1 mm の立方セル $588 \times 108 \times 298$ セルでモデリングし、グラウンドから 4 セルの高さに伝送線路を配置した。伝送線路の材質は銅 ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ [S/m]) とし、長さを 150 セルとした。伝送線路とグラウンドの接触部分は、集中定数の抵抗 50Ω を挿入することで抵抗器と終端

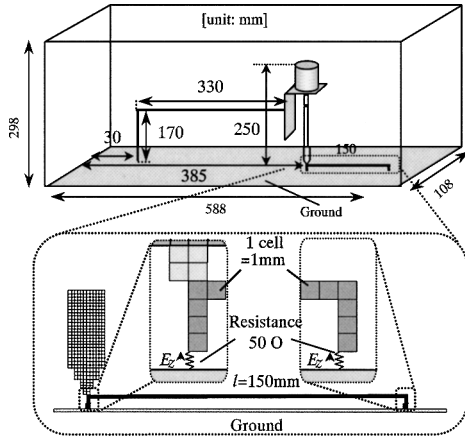


図 9 放電ガンと伝送線路のモデル配置と計算領域
Fig.9 Model arrangement of the ESD-gun and transmission line, and and calculation region.

負荷を模擬した．充電電圧 V_s は 1kV，充電時定数 τ は 5 ns，スイッチ部のインダクタンス L は 200 nH とした．

なお，実験に際しての線路は直径 1.55 mm の円形断面であるが，その FDTD モデリングは 1 mm 平方の方形断面であり，両者の断面の形状寸法は異なっている．この相違が線路の伝達特性（送端負荷の電圧に対する受端負荷に現れる電圧の比）に与える影響を調べるために，図 9 に示す計算領域で方形断面モデルの線路に対する伝達特性を FDTD 法でシミュレートし，併せてネットワークアナライザで線路の伝達係数 S_{21} を測定した．なお，線路の伝達特性は次のようにシミュレートした．送端となる線路とグラウンドとの接触部分を，50 Ω の内部抵抗を通してピーク電圧を V_p ($= 1$ V) とするガウスパルスの電圧源 $v_s(t) = V_p \exp\{-(t - t_0)^2/s^2\}$ (t_0, s : 形状パラメータ) で δ -ギャップ給電した．そのとき他端の線路とグラウンドの間に挿入した 50 Ω の集中抵抗に現れる電圧を計算し，これのフーリエ変換と給電電圧のそれとの比をとることで伝達特性を求めた．ただし，給電電圧源の形状パラメータは， $v_s(0)/V_p \ll 1$ を満たし， $v_s(t)$ の遮断周波数が 1GHz を超えるように， $t_0 = 0.5$ ns， $s = t_0/4$ と定めた．図 10 は図 8 の伝送線路の伝達特性を示す．上図は S_{21} の絶対値であり，その位相を下図に示している．図中の実線は FDTD 計算値，ダイヤモンドマークは測定値であり，両者は大体一致していることがわかる．このことは，図 9 に

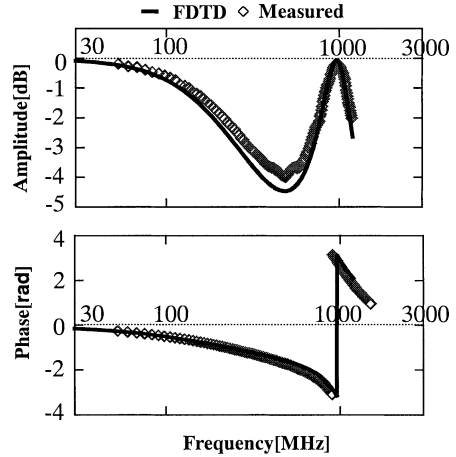


図 10 図 8 に示す伝送線路の伝達特性
Fig.10 Transmission characteristics of the transmission line shown in Fig. 8.

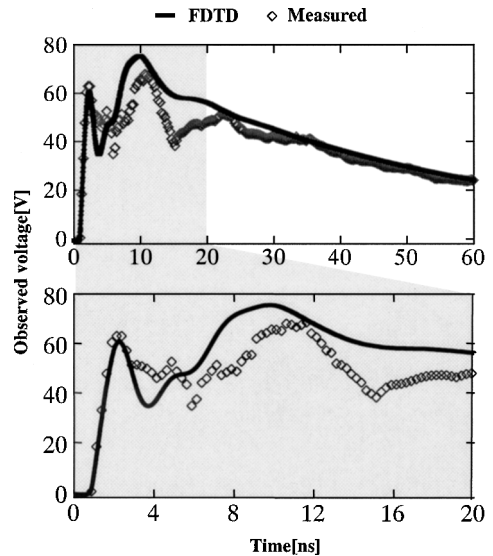


図 11 放電ガンで励振した伝送線路の受端側に誘導された電圧波形
Fig.11 Waveforms of the voltages induced across the termination resistor of the transmission line excited by the ESD-gun.

示す伝送線路の FDTD モデリングで図 8 の伝送線路の伝達特性がおおむね模擬できていることを意味する．図 11 は放電ガンの接触放電で伝送線路の受端側に誘導された電圧波形の計算結果と測定結果を比較して示す．図から，計算波形と測定波形はおおむね一致していることがわかる．なお，第 1 ピーク以降の計算波形

と測定波形に相違が認められるが、これは、伝送線路のモデリング誤差ではなく、前章でも述べたように放電ガン自身のモデリング誤差によるものと考えられる。

5. む す び

電子機器の ESD 対策は設計段階から対処すべき問題であり、その機構解明や対策設計に際しては、放電ガンに対する計算機シミュレーション技術の確立が期待されている。本論文では、この放電ガンのフルウェーブシミュレーションモデルの確立を目的として、接触放電に対する FDTD モデリング法を提案した。すなわち、放電ガンの先端電極部とコンデンサユニットを金属体、人体の皮膚抵抗に相当する $330\ \Omega$ の抵抗 R を実寸法の抵抗体、人体容量とした $150\ \text{pF}$ のコンデンサ及び先端電極部と抵抗体との間に介在するスイッチ部を集中定数の容量 C とインダクタンス L とでそれぞれモデリングした。このモデリングの妥当性は、SMA コネクタへの放電ガンの接触放電で注入される放電電流のシミュレーション波形と測定波形とを比較することで検証した。更に、伝送線路の一端への接触放電で他端に誘導される電圧波形をシミュレートし、測定波形との対照から放電ガンに対する提案モデリング法の有効性を確認した。今後の課題としては、提案モデルの改良とシミュレーション精度の向上が挙げられる。

文 献

- [1] 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 (B-II), vol. J79-B-II, no. 11, pp. 718–726, Nov. 1996.
- [2] 藤原 修, “ESD 現象をとらえるソースモデルと界特性” 信学誌, vol. 78, no. 9, pp. 851–852, Sept. 1995.
- [3] 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] 室田修男, “人体帯電モデル型静電気試験器の放電電流特性” 信学論 (B-II), vol. J79-B-II, no. 11, pp. 789–796, Nov. 1996.
- [5] R. Jobava, D. Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, and M. Aidam, “Computer simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 42, no. 1, pp. 54–65, Feb. 2000.
- [6] P. Leuchtman and J. Sroka, “Enhanced field simulations and measurements of the ESD calibration setup,” Proc. 2001 IEEE EMC International Symposium, pp. 1273–1278, Montreal, Canada, 2001.
- [7] G. Cerri, R. De Leo, and V.M. Primiani, “Theoretical

and experimental evaluation of electromagnetic fields radiated by ESD,” Proc. 2001 IEEE EMC International Symposium, pp. 1269–1272, Montreal, Canada, 2001.

- [8] A. Taflove, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Norwood, MA, 1995.

(平成 15 年 2 月 25 日受付, 6 月 18 日再受付)



藤原 修 (正員)

昭 46 名工大・工・電子卒・昭 48 名大大学院修士課程了。同年 (株) 日立製作所中央研究所入所。昭 51 同所退職。昭 55 名大大学院博士後期課程了。名大工学部助手, 講師を経て, 昭 60 名大工学部助教授。現在, 同電気情報教授。平 3~4 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。工博, 電気学会, IEEE, 各会員。昭 55 電気学会論文賞受賞, 平 12 年度本会論文賞受賞。



張 小江 (学生員)

平 13 帝京大・理工・情報科学卒。平 15 名工大大学院博士前期課程了。在学中, 環境電磁工学に関する研究に従事。



山中 幸雄 (正員)

昭 55 名大・工・電気卒。昭 58 同大大学院修士課程了。同年郵政省電波研究所 (現通信総合研究所) 入所。現在, 横須賀無線通信研究センター電磁環境グループリーダー。人工雑音の統計的性質, EMC の測定法等の研究に従事。