

## マイクロギャップ放電に伴う過渡電圧・電流立上り波形の 12 GHz 帯域測定と電極間電界強度特性

川又 憲<sup>†a)</sup> 嶺岸 茂樹<sup>††</sup> 芳賀 昭<sup>††</sup> 藤原 修<sup>†††</sup>

Measurement of Voltage and Current Waveforms Using 12 GHz Measurement System and Breakdown Field Strength due to Micro Gap Discharge

Ken KAWAMATA<sup>†a)</sup>, Shigeki MINEGISHI<sup>††</sup>, Akira HAGA<sup>††</sup>, and Osamu FUJIWARA<sup>†††</sup>

あらまし ESD (静電気放電) あるいは電気接点放電などのうち, おおよそ 1000 V 以下程度の比較的到低い電圧によって生じるマイクロギャップ放電に着目して実験的な検討を行った. 実験は, 放電開始時の急しゅんな過渡電圧及び電流の立上り特性について時間領域にて測定した. 更に, 測定により得られた立上り時間特性の過渡要因を考察するため, 放電時のギャップ長特性について測定を行い, 放電開始時の電極間電界強度を求めた. 測定のための実験系は, マイクロギャップ放電に伴う過渡変動が非常に急しゅんなであることを考慮して分布定数系で構成し, 放電電極部分の周波数帯域を 12 GHz まで吟味し, 広帯域での測定を行った. 実験の結果, 放電電圧 600 V 以下においては, 電圧及び電流の立上り時間は 32 ps 以下と 12 GHz の帯域に迫る超高速現象であることを確認した. また, 放電開始時のギャップ間電界強度は, 放電電圧が 450 V から低下するに従いギャップ間の電界値は上昇し, 放電電圧約 330 V におけるギャップ間の電界は  $8 \times 10^7$  [V/m] に達することを確認した.

キーワード ESD, 電気接点放電, 立上り時間, 分布定数システム, ギャップ長, 放電電界

## 1. ま え が き

ESD (静電気放電) あるいは電気接点間の放電に伴って, インパルス性の過渡電圧・電流変動が生じ, 広い周波数範囲に及ぶ電磁雑音源となる. 一方, 近年の電気電子システムは情報伝達信号のデジタル化が進み, 伝達信号の低レベル化により ESD などのインパルス性の電磁雑音波による影響を受けやすい傾向にある. このため放電に伴う電磁雑音は EMC 環境電磁工学上の重要な問題となっている [1].

このような問題を踏まえ, 本田らは, ESD によるインパルス性の電磁雑音が電子計算機に与える影響に

ついて報告し, ESD 雑音の脅威を早くから訴えている [2]~[4]. また, 藤原らは, ESD によって発生する電磁界の解析及び定量化に取り組み, ESD に伴う電磁界変動の特異性について多角的に解明している [5], [6].

ESD に伴う電磁雑音特性の代表的な特異性として, 比較的到低い電圧 (ここでは, おおよそ 1 kV 以下を低電圧 ESD と称する) の方が, 電磁雑音の干渉レベルが大きい場合がしばしばあり, また更に発生電磁雑音の周波数帯域がマイクロ波帯に及ぶ場合があるなどが報告されている [7], [8]. これらの要因として, 低電圧 ESD においては, 放電時の電極間隔がマイクロメータオーダーと非常に短く, よって放電発生時の電極間電界値が極端に増加することに起因すると考えられている. また, 非常に高い電極間の電界に加速された電荷の移動によって, 電圧・電流の過渡変動はピコ秒オーダーの超高速な時間変化を示し, マイクロ波領域に及ぶ高周波数域のスペクトル成分を含むと考えられている [9]. しかし, これらは非常に高速かつ広帯域の現象であるため, 時間領域におけるリアルタイム測定は難しく, これまでは解析的アプローチや周波数領域

<sup>†</sup> 八戸工業大学工学部, 八戸市

Faculty of Engineering, Hachinohe Inst. of Tech., 88-1 Obiraki Myo, Hachinohe-shi, 031-8501 Japan

<sup>††</sup> 東北学院大学工学部, 多賀城市

Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, 1-13-1 Chuo, Tagajo-shi, 985-8537 Japan

<sup>†††</sup> 名古屋工業大学工学部, 名古屋市

Faculty of Engineering, Nagoya Inst. of Tech., Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: kawamata@hi-tech.ac.jp

測定による実験データをもとにした検証が主流となっていた [10] ~ [12] .

そこで筆者らは、近年の高速デジタルオシロスコープの登場により可能となってきた GHz 帯域での時間領域測定を実現させるため、分布定数系により構成した放電実験回路を用いて 6 GHz 帯域までの ESD 現象測定及び検討を行ってきた [13] ~ [16] . しかし、観測された過渡変動時間は約 70 ps 以下と 6 GHz の帯域に迫るものであった . そこで今回は、実験システムの帯域を 12 GHz まで吟味した新たなシステムを構築し、低電圧 ESD に伴う過渡電圧・電流立ち上がり時間特性について測定を行った . 更に、放電開始時のギャップ長特性について測定を行い、放電開始時のギャップ間電界特性を実験的に求めた結果について述べる .

## 2. 12 GHz 帯域実験システムの構成

新たに構築した 12 GHz 帯域の放電実験システムの構成を図 1 に示す . システムは出力電圧及び極性可変の直流高電圧電源装置、中心導体に針電極を施した電源側セミリジットケーブル (UT141, 最長 1 m ~ 最短 0.2 m), 同様に平板電極を施した負荷側セミリジットケーブル (UT250, 最長 1 m ~ 最短 0.2 m), 反射波の到来を遅らせるための同軸ケーブル (5D2W, 3 m), 更には電界センサ及び磁界センサで構成している . ただし、実験システムの外部導体部並びに両センサの外部導体部は筐体アースとした . 本実験システムは放電によって発生する過渡現象に対して電氣的に均一な伝送路を提供し、分布定数線路上に蓄えた電荷により一定時間均一な電気エネルギーを供給した状態で、放電に伴う過渡現象の測定を行うものである . また今回のシステムでは、過渡変動のセンシングに微小ループアンテナによる磁界センサ、及び微小モノポールアンテナによる電界センサを用い、高電圧で変化する分布定数線路上の過渡変化分を非接触かつ広帯域に測定した .

次に放電電極部の詳細及び電圧・電流ピックアップ用センサの配置を図 2 に示す . 電極部は針電極を施した電源側セミリジットケーブルと平板電極を施した負荷側セミリジットケーブルにより針対平板の非対称電極を構成している . なお、電源側針電極の先端部曲率半径は 0.1 mm 及び 0.5 mm の 2 種類とした . また、負荷側平板電極の直径は 1.6 mm である . 電流成分をピックアップするための磁界センサは放電電極近傍に配置し、電圧成分をピックアップする電界センサは、電源側の充電電圧からの静電誘導を避けるため、電極

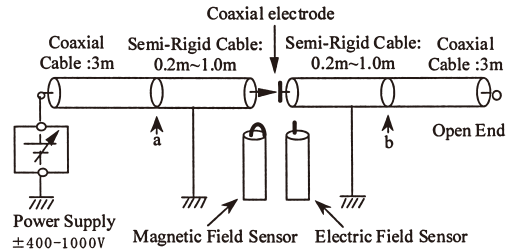


図 1 12 GHz 分布定数系放電実験システム  
Fig. 1 12 GHz experimental system using distributed constant system.

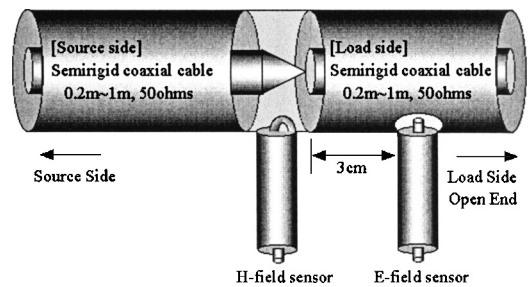


図 2 同軸型放電電極部の構造  
Fig. 2 Composition of the coaxial electrode.

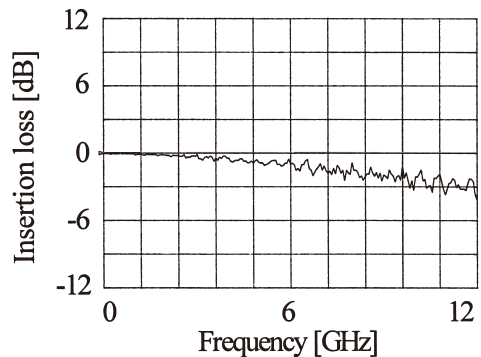


図 3 試作した実験システムの周波数特性  
(針電極曲率半径 0.5 mm)  
Fig. 3 Insertion loss of the coaxial electrode system.  
(The radius of curvature of needle electrode is 0.5 mm)

部から 3 cm 離れた負荷側へ配置した .

今回試作した分布定数系実験システムの周波数特性を図 3 に示す . なお、結果は針電極の曲率半径 0.5 mm の場合で表しているが、曲率半径 0.1 mm においてもおおむね同様の特性を示した . 周波数特性は電極部分を機械的に接触させた状態で、電源側セミリジットケーブルから電極部を介して負荷側のセミリジットケーブル間 (図 1 の a から b 点間) の挿入損で評価

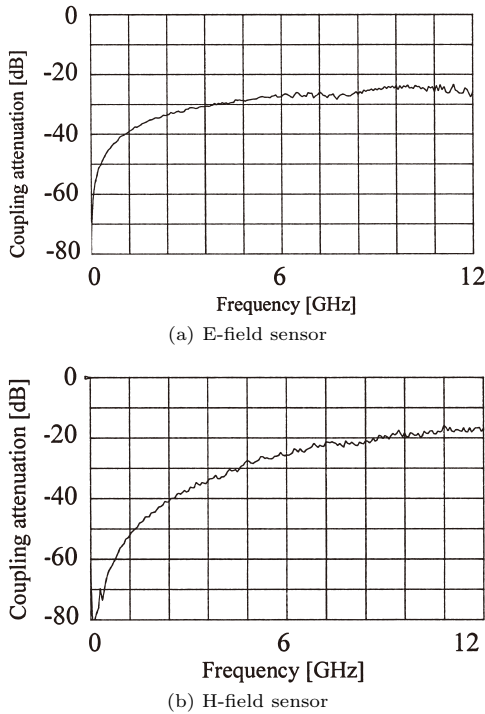


図 4 電界及び磁界センサの結合減衰量  
Fig. 4 Coupling attenuation of the E-field sensor and the H-field sensor.

した．同軸電極構造による分布定数系実験システムの挿入損は，12 GHz において約  $-3$  dB 程度とおおむね良好な周波数特性を示した．次に電圧及び電流センサの結合減衰量の周波数特性を図 4 に示す．図 4(a) が電圧センサの特性であり図 4(b) が電流センサの特性である．いずれのセンサも低域部分での結合量は低下しているが，数 GHz から 12 GHz までの高域部分においては，電圧センサで約  $-25$  dB 程度，電流センサで約  $-20$  dB 程度の結合量となっており，電圧及び電流の立上り部を構成する高周波数成分の測定が可能と考えられる．また，今回の実験結果は，これら周波数特性による補正及び電圧値あるいは電流値への換算は行っておらず，電界成分及び磁界成分によるセンサ出力電圧の測定値である．また，今回使用したセンサの時間領域におけるパルス応答特性は，立上り時間 34 ps のステップ的な立上り波形に対して，電圧センサは約 37 ps，電流センサは約 36 ps の立上り応答時間を示した．

### 3. 電圧・電流立上り波形の測定結果

電圧・電流立上り波形の測定パラメータは電源極性及び針電極先端部の曲率半径であり，それぞれの条件において電源電圧を 400 V から 1000 V まで変化させ，電極間隔を徐々に接近させ，放電が発生した瞬間の電

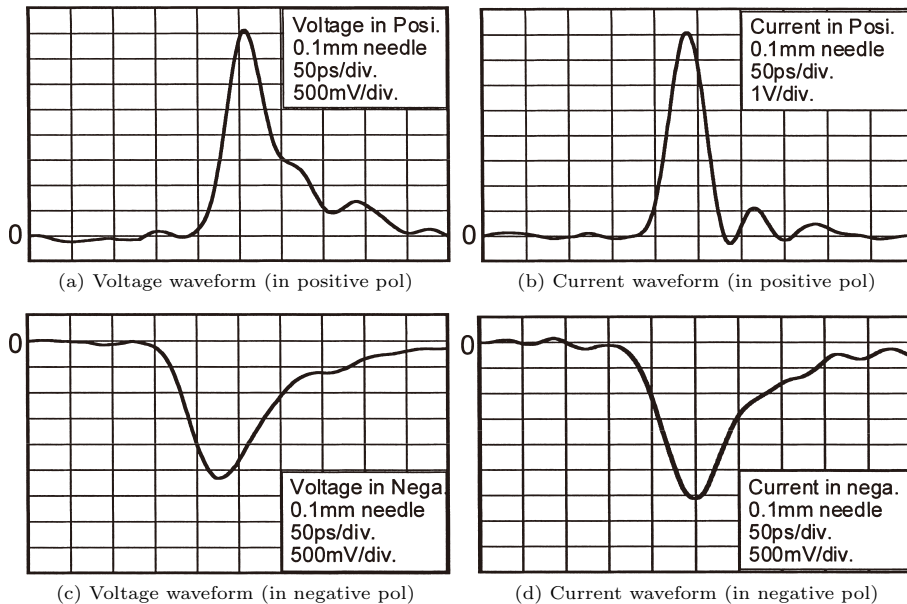


図 5 電圧及び電流の立上り実測波形  
Fig. 5 Measured voltage waveforms and current waveforms due to discharging.

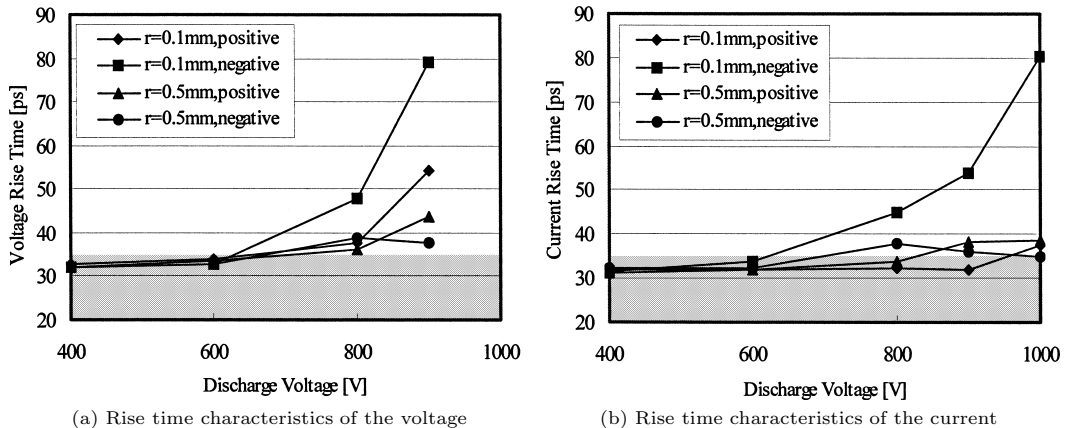


図 6 放電電圧と電圧・電流立上り時間の関係

Fig. 6 Relationship between the discharge voltage and the rise time.

界センサ及び電流センサ出力波形を高速デジタルオシロスコープ (TEKTRONIX TDS6124C, 12 GHz, 40 GS/s) により観測した。

図 5 に電圧・電流の立上り部分に回答した両センサの出力波形を示す。図 (a), (c) が電圧波形であり、図 (b), (d) が電流波形である。また、図 (a), (b) が正極の場合であり、図 (c), (d) が負極の場合である。更に、針電極の先端部曲率半径は両図とも 0.1 mm, 電源電圧は 800 V の結果である。なお、本システムでは放電開始直後の電圧・電流変動はステップ的な立上りを示すが、各センサの回答により出力波形はインパルス的となる。今回は、両センサ出力波形の立上り応答時間 (10 ~ 90%) から電圧及び電流の立上り時間を測定した。結果を見ると、正極における電圧及び電流の立上り時間は、約 35 ps 程度と非常に高速であることが分かる。これに対して、負極における立上り時間は約 45 ps 程度と、正極に比べ若干立上り時間が長くなる傾向を確認した。

次に、これらの電圧・電流立上り時間と放電電圧の関係性を定量的に検討するため、立上り時間特性を求めた結果を図 6 に示す。図 (a) は電圧立上り時間特性であり、図 (b) は電流立上り時間特性である。両図とも横軸は放電電圧 400 V から 1000 V であり、縦軸は立上り時間 ps である。また、それぞれのプロットは 6 回から 10 回程度の実験による平均値である。更に図中の網がけ部分は今回使用したオシロスコープの帯域制限域を示している。この結果から、まず、600 V 以下の放電電圧において電圧及び電流の立上り時間は約 32 ps 程度と非常に高速であることが分かる。ただし、

この立上り時間についてはシステムの帯域制限域に達しており、現象本来の立上り時間はより高速であると予測される。次に、800 V から 1000 V の放電電圧上昇に伴って電圧・電流立上り時間も徐々に長くなる傾向を示した。更に、針電極曲率半径 0.1 mm における負極の放電条件において、電圧及び電流立上り時間は急激に長くなり、900 V から 1000 V の放電電圧においては、立上り時間は約 80 ps 程度となった。

#### 4. 放電時ギャップ長の測定と電極間電界強度特性

これまでの結果から、放電立上り時間は 32 ps 以下の非常に急しゅんな現象であることを確認した。これらは前述のとおり、既に 12 GHz システムの帯域制限による影響を受けているものと推察され、実際の現象はより高速であることが予想される。これら実際の立上り時間を推定する上で、放電開始時におけるギャップ間の電界強度を明らかにする必要がある。

そこで今回、放電開始ギャップ長を実験的に測定し、その結果から電極間電界値の算出を行った。放電開始時の電極間電界の大きさは式 (1) により求めた。

$$E = V/d \text{ [V/m]} \quad (1)$$

ここで、 $V$  は放電電圧 [V]、 $d$  は放電開始時のギャップ長 [m] である。

ギャップ長測定システムは 6 GHz 帯域の旧型電極を用い [16]、同軸テーパー構造の針対平板電極及びデジタルマイクロメータヘッドで構成した。実験において電源側の針電極を施したセミリジットケーブルをマイ

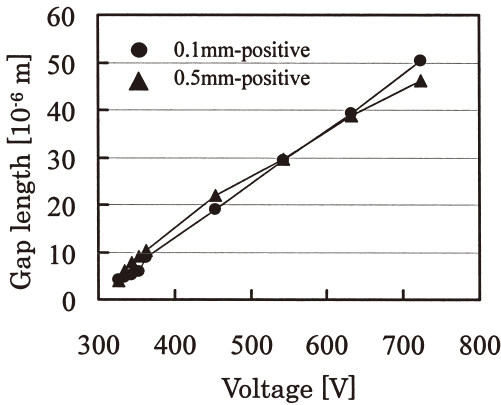


図 7 放電開始時のギャップ長  
Fig. 7 Gap length at the start of the discharge.

クロメータヘッドにより徐々に負荷側の平板電極に接近させ、放電が開始した瞬間のギャップ間隔を 1 μm 分解能で観測するものである。実験のパラメータはこれまでと同様、電源極性及び針電極先端部の曲率半径を 0.5 mm 及び 0.1 mm と変化させ、それぞれの条件において電源電圧約 330 V から約 750 V までの放電開始時におけるギャップ長を測定した。

図 7 に放電開始時のギャップ長特性を示す。図は正極におけるギャップ長特性であり、 $r_1$  が針先端曲率半径 0.1 mm、 $r_2$  が 0.5 mm の場合のギャップ長特性である。それぞれのプロットはいずれも 80 回以上の実験による平均値である。針先端部曲率半径 0.1 mm 及び 0.5 mm とともに、放電電圧約 750 V における電極間ギャップ長は約 45 ~ 50 μm 程度あり、放電電圧の低下に伴ってギャップ間隔は短くなり、今回の最低放電電圧 326 V におけるギャップ長は両針電極とも、約 4 ~ 5 μm 程度と非常に短いギャップ長であることが分かった。また、今回の放電電圧 750 V から 326 V の範囲においては、放電電圧とギャップ長はおおむね直線的な関係を示すことが分かった。ただし、326 V 未満の更なる低電圧領域での関係については今のところ未確認であり、今後の課題である。

次に、式 (1) により放電開始時における電極間の電界強度を求めた結果を図 8 に示す。パラメータはこれまでと同様で正極における針先端部曲率半径 0.1 mm が  $r_1$ 、及び 0.5 mm が  $r_2$  の場合を表している。放電開始時の電極間における電界値は、電圧約 750 V から約 450 V の間では約  $20 \times 10^6$  V/m 程度でおおむね一定な値を示した。これに対して、電圧 400 V 以下

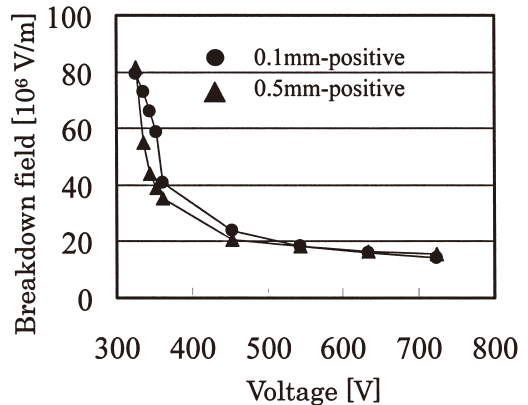


図 8 放電時のギャップ間電界強度特性  
Fig. 8 Breakdown field characteristics at the start of the discharge.

では電界値が急激に上昇し、約 330 V における電界は  $80 \times 10^6$  V/m と非常に高い電界値を示すことが分かった。この結果は、低電圧 ESD の方が、電磁干渉レベルが高い場合がある事象に対する要因の一部と考えられるが、本結果と発生電磁界強度の関係については、今後更に検討を行い明らかにする必要があると考える。

## 5. む す び

1000 V 以下の比較的に低い電圧領域におけるマイクロギャップ放電に着目し、過渡変化の立上り時間特性及び電極間の電界強度特性の測定を行った。

その結果、放電電圧 600 V 以下においては、電圧及び電流の立上り時間は 32 ps あるいはそれ以下と 12 GHz の帯域に迫る非常に高速な現象であることを確認した。これらの立上り時間は放電電圧、電源極性、更には放電電極形状により変化することを確認した。また、放電開始時のギャップ長は放電電圧に比例しておおむね直線的に変化するのに対して、電極間の電界強度は、約 400 V 以下の放電電圧において急激に上昇し、今回の最低放電電圧約 330 V におけるギャップ間の電界強度は  $8 \times 10^7$  V/m に達することを確認した。

以上のことから、低電圧 ESD による電磁雑音波の周波数成分はマイクロ波領域の幅広い周波数スペクトルを含み、更に、電磁干渉レベルが大きくなる可能性を実験的に確認した。今後更に EMC の観点から、より低い電圧領域におけるマイクロギャップ放電現象について検討するとともに、これらの低電圧放電と発生電磁雑音特性の関係についても検討を進める予定である。

## 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] 本田昌實, 川村雄克, “ESD の特徴と計算機に対する影響(その1),” 信学技報, EMCJ83-75, 1983.
- [3] 本田昌實, 川村雄克, “ESD の特徴と計算機に対する影響(その2),” 信学技報, EMCJ83-87, 1984.
- [4] 本田昌實, “金属物体で発生する静電気放電(ESD)現象の脅威,” 信学誌, vol.78, no.9, pp.849-850, Sept. 1995.
- [5] 藤原 修, “ESD のソースモデルと発生電磁界,” 第31回東北大学電気通信研究所シンポジウム「放電とEMC」, pp.95-100, 1994.
- [6] 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.
- [7] 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計測と解析,” 信学論(B-II), vol. J75-B-II, no.9, pp.647-654, Sept. 1992.
- [8] 馬杉正男, “電気ダイポールによる静電気放電の過渡応答解析,” 信学論(B-II), vol. J75-B-II, no.12, pp.981-988, Dec. 1992.
- [9] 本田昌實, “静電気放電(ESD)現象の基本的な捉え方,” 第31回東北大学電気通信研究所シンポジウム「放電とEMC」, pp.79-86, 1994.
- [10] 藤原 修, 張 小江, 山中幸雄, “静電気試験法による放電電流のFDTDシミュレーション,” 信学論(B), vol. J86-B, no.11, pp.2390-2398, Nov. 2003.
- [11] B. Daout and H. Ryser, “The reproducibility of the rising slope in ESD testing,” Proc. 1986 IEEE Int'l Symp. on Electromagn. Compat., pp.467-474, Aug. 1986.
- [12] D. Pommerenke, “ESD: Waveform calculation, field and current of human and simulator ESD,” J. Electrostatics, vol.38, pp.31-54, 1996.
- [13] 川又 憲, 楊 心偉, 芳賀 昭, 佐藤利三郎, “電気接点放電による高速過渡現象の分布定数系実験回路を用いた観測法の提案,” 信学論(B-II), vol. J72-B-II, no.10, pp.565-571, Oct. 1989.
- [14] K. Kawamata, S. Minegishi, A. Haga, and R. Sato, “A measurement of very fast transition durations due to gap discharge in air using distributed constant line system,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.41, no.2, pp.137-141, 1999.
- [15] 川又 憲, 嶺岸茂樹, 芳賀 昭, “1,500 V 以下の ESD に伴う過渡電圧の立上り時間及び周波数スペクトルに関する実験的検討,” 信学論(B), vol. J86-B, no.7, pp.1191-1198, July 2003.
- [16] K. Kawamata, S. Minegishi, and A. Haga, “Wide-band measurement of transition duration and frequency spectra due to small gap discharge as low voltage ESD,” J. Electrostatics, vol.62, pp.185-193, 2004.

(平成 19 年 2 月 14 日受付, 6 月 11 日再受付)

## 川又 憲 (正員)



平元東北学院大学院博士前期課程了。同年4月東北電力(株)入社。平4年3月同退職。同年4月八戸工業大・工・電気助手, 講師を経て平15 同助教授。現在, 環境電磁工学に関連して電気接点放電及びESD などによる放電雑音のメカニズム究明並びに分布定数回路応用に関する研究に従事。工博・電気学会, ESDA, IEEE 各会員。

## 嶺岸 茂樹 (正員)



昭56 東北学院大学院博士後期課程了。同年4月同大・工・電気助手, 講師, 助教授を経て, 平11 同教授。現在, 環境電磁工学に関連して, 電気接点開離時における電磁雑音の過渡プロセス究明並びに分布定数回路応用に関する研究に従事。工博・電気学会, IEEE 各会員。

## 芳賀 昭



昭45 山形大学院修士課程了。同年4月シチズン時計技術研究所入所。昭47 東北学院大・工・電気助手, 講師, 助教授を経て, 平4 同教授。現在, 環境電磁工学に関連して, 磁気遮へいを中心とした磁気応用工学及び低周波環境磁界測定技術などに関する研究に従事。工博・電気学会, 日本応用磁気学会, IEEE 各会員。

## 藤原 修 (正員)



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。名工大工学部助手, 講師を経て, 昭60 同助教授, 現在, 同教授。工博。平3-4 スイス連邦工科大客員教授。放電雑音, 生体電磁環境, 環境電磁工学に関連する研究に従事。昭55 電気学会論文賞, 平12 年度本会論文賞受賞。電気学会, IEEE 各会員。