

論 文

帶電した人体からの放電電流波形の時間一周波数解析

吉田 孝博^{*1}, 久保田 啓吾^{**}, 澤井 丈徳^{***}, 増井 典明^{*}

(2006年11月8日受付; 2007年3月13日受理)

Time-Frequency Analysis of Discharge Current

from Charged Human Body

Takahiro YOSHIDA^{*1}, Keigo KUBOTA^{*}, Takenori SAWAI^{*} and Noriaki MASUI^{*}

(Received November 8, 2006; Accepted March 13, 2007)

In this paper, we propose to adopt time-frequency analysis using the spectrogram to analyze electrostatic discharge events. The time-frequency analysis enables to analyze the local frequency distribution of current waveform. As the application of this spectrogram, we analyze the waveforms of discharge currents from the charged human body. Body potential is from $\pm 2\text{kV}$ to $\pm 10\text{kV}$. The trends in the discharge from the charged human body are that most of the waveforms have fast rise and large peak value at the wavefront, when the body potential is lower than $+4\text{kV}$. It is found that the high frequency component is included in the wavefront of the discharge current by using the time-frequency analysis. Especially, in the case of the waveforms for $+4\text{kV}$, most wavefront of the discharge current contains the frequency component over 500MHz. When the body potential is higher than $+6\text{kV}$ and negative, frequency component is even in the maximum around 200MHz. Frequency component from DC to 20MHz with larger power is included behind the wavefront of the discharge current.

1. はじめに

電子機器や半導体デバイスが微細化するとともに、静電気放電(ESD : Electrostatic Discharge)による誤作動や破壊などの静電気障害が頻発している。現在、電子機器の静電気耐性を評価する方法の一つとして、人体帯電モデル(HBM : Human Body Model)がある。HBMは、帯電した人体をコンデンサで置き換え、放電抵抗を介してコンデンサに充電した電荷を放電させることにより、人体からの放電を再現している。しかし、実際の人体と接地金属間の放電電流波形は、帯電極性や帯電電圧、また被験者にも依存することが判明しており^{1,2)}、静電気障害と静電気放電現象との関連性を解明するために

キーワード: ESD, HBM, 放電電流, スペクトログラム

^{*} 東京理科大学 工学部 電気工学科 (102-0073 東京都千代田区九段北 1-14-6)

Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 1-14-6, Kudan-kita, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0073, Japan

^{**} 株式会社寺岡製作所 研究開発本部 生産技術研究部 (140-8711 東京都品川区広町 1-4-22)

Technical Engineering Department, Teraoka Seisakusho Co.,Ltd., 1-4-22, Hiromachi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-8711, Japan

^{***} セイコーエプソン株式会社 (392-8502 長野県諏訪市大和 3-3-5)

SEIKO EPSON Corp., 3-3-5, Owa, Suwa city, Nagano 392-8502, Japan

¹ yoshida@ee.kagu.tus.ac.jp

は、帯電体の種類、帯電電圧および極性などの放電条件の違いにより現れる現象の変化を捉える必要がある。そのため我々は、人体からの静電気放電による放電電流を測定し、その電流波形の形状、および放電ギャップ長、指先上の放電路のパターンを撮影した写真、放電電荷量などにより多角的に比較・検討を行ってきた^{1,3,4,5)}。

従来より、放電電流や放射電磁ノイズの分析では、波形全体に対して高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform)を用いて求められるスペクトルによる周波数解析が広く行われている^{6,7)}。しかし、スペクトルでは放電電流や放射電磁ノイズの波形の各時間位置に対する局所的な周波数特性までは得られない問題があった。また、他の周波数解析法としては、馬杉がWaveletを用いて多重解像度解析を行い、静電気放電のEMI評価を行った報告⁸⁾もあるが、放電電流波形を各周波数帯域毎に分割して周波数分析を行った結果は示されているものの、通常のスペクトル同様、各時間位置に対する周波数特性は得られない。放電電流の波形形状は、立ち上がりの鋭さや、1回の放電において出現するピーク電流の数が異なるなど、複雑な様相を示す。そのため、波形全体に対して周波数解析を行うスペクトルでは、波形全体の様相しか分析できない点が大きな問題となる。これら放電電流や放射電磁ノイズのさらなる検討を進めるためには、波形のどの部分にどのような周波数成分が含まれているのか、また、時間と共に

周波数成分がどのように変化してゆくのかを観測できる周波数分析法が必要である。

本研究では、短時間の分析フレームを時間方向にシフトし、それぞれの分析フレームに対してFFTを行うことでスペクトルの時間軌跡を得る解析法であるスペクトログラムを利用することで、静電気放電現象の時間一周期数解析を行うことを提案し、実際に、帯電電圧 $\pm 2\text{kV} \sim \pm 10\text{kV}$ に帶電した人体からの静電気放電の放電電流波形の解析を行った。解析方法の詳細は付録に示す。

2. 装置及び実験方法

2.1 放電電流波形の測定

図1に実験装置図を示す。接地金属板上に重ねた絶縁板の上に裸足で立った被験者を、 $5\text{G}\Omega$ の抵抗を介して $\pm 2\text{kV} \sim \pm 10\text{kV}$ に充電した後、電源を切り離し、接地導体球(直径16mmの真鍮球)を0.4mm/sの速さで指先に近づけ放電させる。放電の発生と同時に放電開始ギャップ長を計測するカウンタと微動台が止まる。放電電流波形は、電流プローブ(ヒートテクニクス CT-1、帯域1GHz)を用いて電圧波形に変換し、デジタルオシロスコープ(Tektronix TDS5052、帯域500MHz, 5GS/s)で観測した。この測定装置および測定方法は過去の報告³⁾と同様である。なお、放電電流の測定にあたり、測定に影響を与える導体球からの配線は、構造上可能な限り短距離で接地させた。しかし、実験装置には浮遊容量やインダクタンスの影響が回避できない要素として内在するが、これらの影響を過去に当実験装置にて検証したところ、測定結果にわずかな影響は見られるが、本質的な差ではないことを確認している。

今回の実験では、皮膚抵抗が平均 $15.9\text{M}\Omega$ (変動範囲 $12.3\text{M}\Omega \sim 20.6\text{M}\Omega$)、静電容量が平均 182pF である被験者に対して、各パラメータ(帯電電圧・極性)毎に10回測定し、計200回分の放電電流波形を得た。分析は、これらの測定データ全てを用いて放電電流の立ち上がり峻度およびピーク電流を測定した。なお、本文中で示す放電電流波形の波形形状やスペクトログラムの図は、帯電電圧・帯電極性毎に頻出する代表的な波形形状のデータ1つを選別して用いた結果である。一方、帯電電圧の違いによる比較では、全測定データを放電電流波形のピーク数毎に分類し、平均値により比較した。人体の静電容量及び皮膚抵抗は、過去に報告した方法を用いて測定した³⁾。なお、今回の測定では、皮膚抵抗は各測定日毎の放電実験前・実験中・実験後に測定を行い、平均値と、変動範囲を求めた。実験は平均相対湿度40.9% (変動範囲35.0%~47.7%)、平均温度23.1°C (変動範囲20.0°C~25.0°C) の暗室で行った。

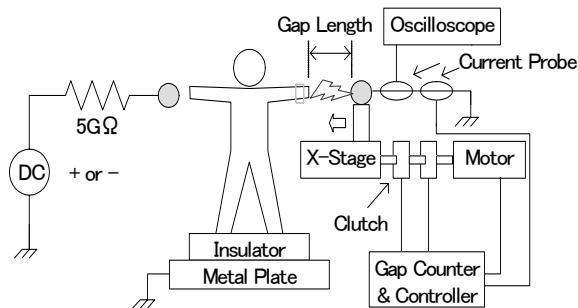


図1 実験装置の構成

Fig.1 Schematic view of the apparatus for measuring discharge current.

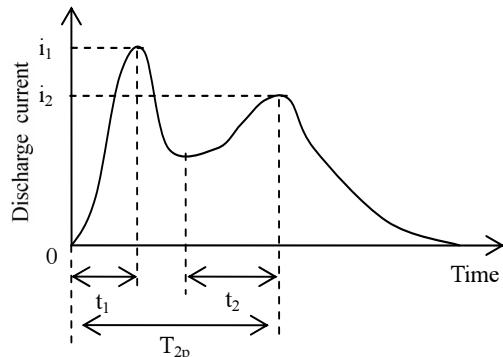


図2 放電電流波形の定義

Fig.2 Definition of parameters of the waveform of discharge current.

2.2 放電電流波形の形状測定

放電電流波形の形状を定量的に検討するため、形状の特徴を示すパラメータとして、ピークが2つ存在する2ピーク波形に対しては、第1ピーク・第2ピークの立ち上がり峻度をそれぞれ $D_1(i_1/t_1)$, $D_2(i_2/t_2)$, 第2ピークの出現時間を T_{2p} として、図2のように定義し測定を行った。さらに3ピーク波形においては、第2ピークと同様に、第3ピークの立ち上がり峻度を $D_3(i_3/t_3)$, 第3ピークの出現時間を T_{3p} として測定を行った。ここで、 t_1 は電流値0から第1ピークのピーク電流 i_1 に至るまでに要する時間、 t_2 は第1ピークと第2ピークの間の極小値から、第2ピークのピーク電流 i_2 に至るまでに要する時間とした。

3. 結果及び考察

3.1 放電電流波形とスペクトログラムとの関係

図3に、帯電電圧を $+2\text{kV} \sim +10\text{kV}$ の間で 2kV 刻みで変化させたときの正放電時の放電電流波形を示す。なお、この放電電流波形の時間軸は、放電開始を時間位置0nsに揃え、-100ns~1000nsの範囲を表示した。図中の矢印は、各放電電流波形の第1ピークの放電電流値を示している。図4に、各帯電電圧における放電電流波形より求めたスペクトログラムを示す。

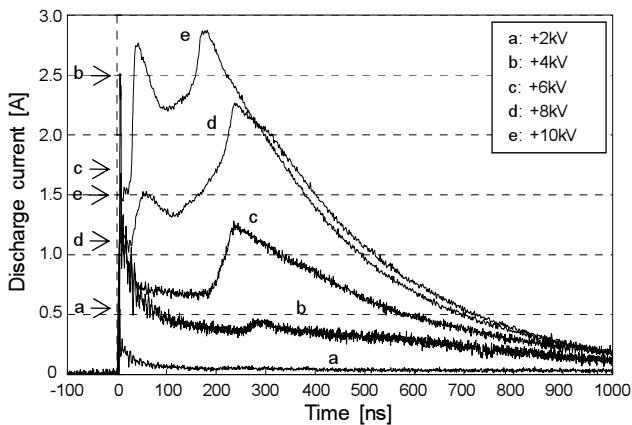


図3 放電電流波形(正放電時)

Fig.3 Waveforms of typical positive discharge currents.

このスペクトログラムの時間軸と放電電流波形の時間軸を統一し、放電開始を時間位置 0ns として揃えて表示した。なお、見やすさを考慮して、図4中の左側の図は、広範囲の図として、放電電流波形の時間位置 -50ns～400ns、周波数 DC～500MHz の範囲を抽出して表示したものであり、右側の図は、第1ピーク近傍の拡大図として、時間位置 -50ns～200ns、周波数 DC～100MHz の範囲を抽出して表示したものである。各時間、各周波数における対数振幅値は色の濃淡で表現されており、白色に近いほど大きくなっている。図4(a)の各スペクトログラム右肩に対数振幅のスケールを示すが、スペクトルの対数振幅値は相対的な値であるため、単位 dB である。スケールの範囲は左側の図では 0～45dB、右側の図では 0～55dB とした。同様に、図5に負放電時の帯電電圧 -2kV～-10kV の放電電流波形を、図6にそのスペクトログラムを示す。図3および図5に示された放電電流波形は、各帯電電圧において頻出した代表的な形状の波形である。

一般的に、立ち上がり・立ち下がりが極めて鋭いインパルス形状の波形の周波数特性は、低い周波数成分から高い周波数成分まで一様に含む広帯域信号となるが、図3～図6の結果より、人体からの放電においては、主に、第1ピーク部分に立ち上がりの鋭い波形が見られ、その部分で高い周波数成分まで含む傾向が見られた。

これらのスペクトログラムにおいて、±2kV～±10kV の帯電電圧全体の傾向として、時間 1ns～20ns の位置に存在する第1ピークが主に立ち上がり峻度が大きいインパルス形状を示す。対数振幅値が 15dB 以上となる周波数帯域は、正放電の場合は、DC～200MHz 前後に分布し、負放電の場合には、DC～100MHz 前後に分布しており、正放電の方が負放電よりも、より高い周波数成分まで含む傾向が現れている。正放電および負放電において、帯電電圧の上昇とともに、DC～20MHz 程度の低い周波数に集中するようになる。この低い周波数における大きな振幅成分、つまり大きな放電電荷量が、

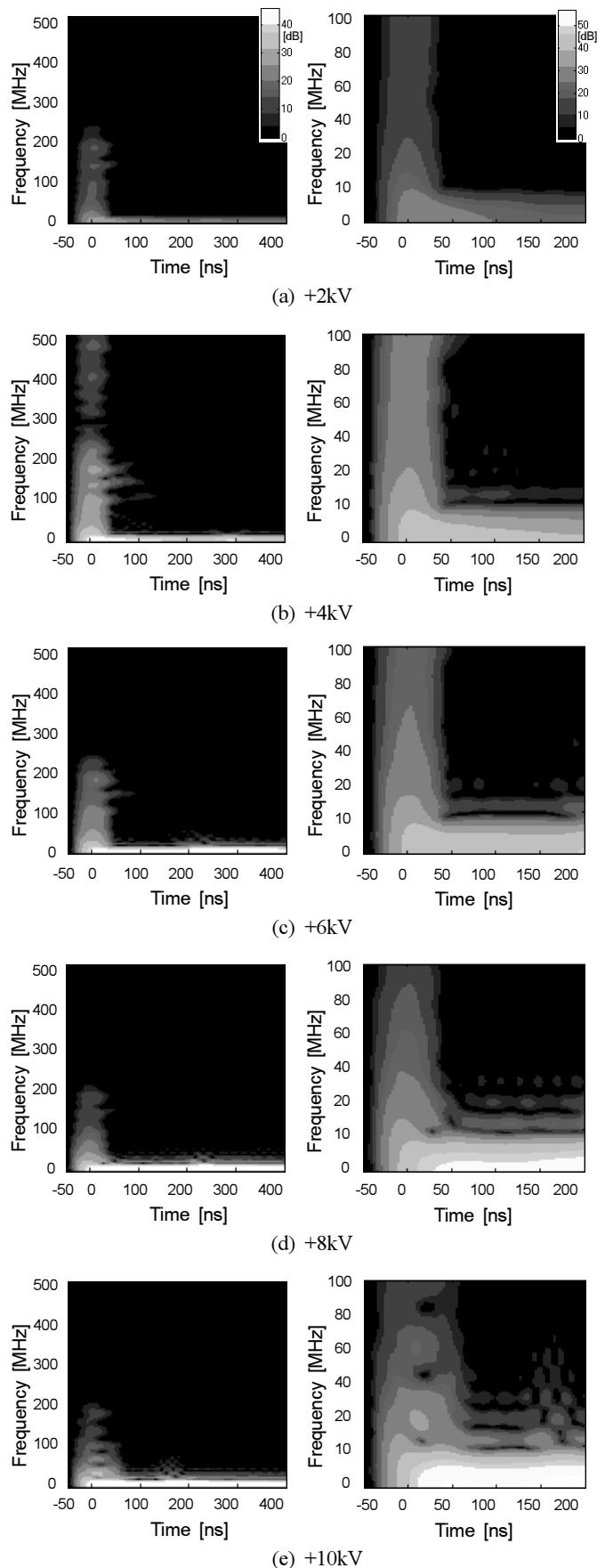


図4 スペクトログラム(正放電)

Fig.4 Spectrograms of typical positive discharge currents.

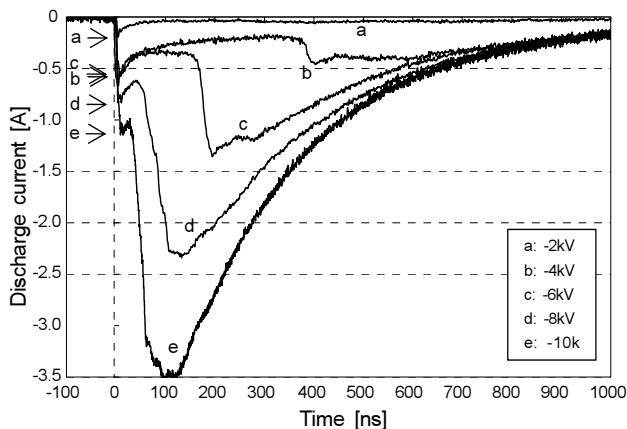


図5 放電電流波形(負放電時)

Fig.5 Waveforms of typical negative discharge currents.

放電電流波形の第1ピーク以降の電流値が大きい包絡部分に存在していることが分かる。

3.2 放電電流の立ち上がり傾度とスペクトログラムとの関係

帶電電圧+4kV時に、対数振幅値15dB以上となる周波数域がDC～500MHzに分布する放電電流波形が得られた。このような高い周波数成分は他の放電では見られなかった。今回の帶電電圧+4kVの測定では、50%の頻度で出現した。なお、これらの波形に500MHz以上のさらに高い周波数成分が含まれる可能性があるが、今回の測定に用いたオシロスコープの帯域が500MHzであるため、今後はさらに広帯域なオシロスコープにより実験を行い検討する必要がある。

放電電流に含まれる周波数成分に影響を与える放電電流の立ち上がり傾度とピーク電流値は、帶電電圧の違いにより異なっている。図7に放電電流の立ち上がり傾度の平均値と帶電電圧の関係を示す。図7の平均立ち上がり傾度は、全測定データを帶電電圧とピーク数で分類した上で平均を求めたものである。この図より、第1ピークの立ち上がり傾度D₁は帶電電圧に比例して大きくなるわけではなく、この被験者の場合、帶電電圧+4kVにおいて最大となり、低い帶電電圧でも高い周波数成分を含む放電が現れることが分かる。ここでは取り上げなかった他の被験者でも、+4kV以下でD₁が最大となる結果が得られている。これらの結果から、放射ノイズにより生ずる電子機器の誤作動等のEMIに対しては、一概に帶電電圧の大小で障害の大小を評価することは困難であり、第1ピークにおける周波数特性が深く関係すると見える。本田⁹⁾は、間接ESDにおいては高電圧よりも3kV以下の低電圧の方のEMI作用が強い場合があると報告している。本研究で得られた結果は、人体からの放電でも、同様のことが起こることを定量的に説明している。負放電では、D₁は平均0.071A/ns、D₂は平均0.014A/nsとなり、第1ピークの立ち上がり傾度D₁は、負放電時よりも正放電時の方が

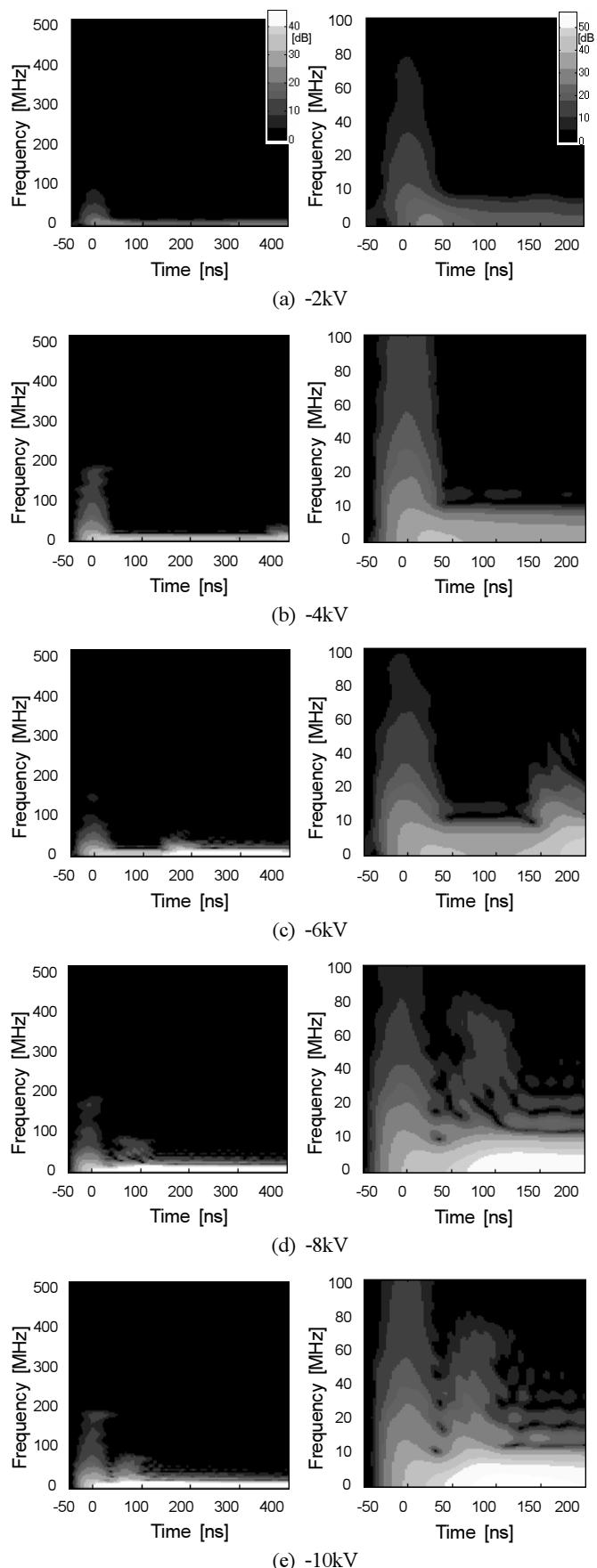


図6 スペクトログラム(負放電)

Fig.6 Spectrograms of typical negative discharge currents.

平均3.3倍ほど大きい。第2ピークの立ち上がり峻度 D_2 は、極性に関わらず近い値となっているが、帯電電圧が高いほど、第2ピークの立ち上がり峻度 D_2 が大きくなつた。

3.3 ピーク電流とスペクトログラムとの関係

図8に各ピーク電流の平均値と帯電電圧の関係を示す。この図より、帯電極性に関わらず、帯電電圧の上昇と共に、第2ピーク電流 i_2 ・第3ピーク電流 i_3 共に上昇していることが分かる。図4および図5からわかるように、第1ピーク電流 i_1 は波形形状に依存するため、帯電電圧との相関性は低い。また、正放電時には、帯電電圧が+6kVを超えると第1ピーク電流 i_1 よりも第2ピーク電流 i_2 が大きくなる。負放電時には、帯電電圧が-4kVを超えると、 i_1 よりも i_2 が大きくなる。この結果とスペクトログラムとの対応から、帯電電圧に比例して第2・第3ピーク電流が大きくなると、主にDC~20MHz程度の低い周波数成分が増加することが分かる。

4. まとめ

スペクトログラムによる時間一周波数解析を用いることにより、以下に示される放電電流波形の局所的で特徴的な波形形状とその部分に含まれる周波数成分との関係が解析でき、時間一周波数解析は静電気放電現象の分析において有効であるといえる。

- (1) 主に正放電時の第1ピークにおいて、立ち上がりが鋭いピークをもつ放電電流波形が出現し、この第1ピークでは500MHz程度までの高い周波数成分を含む特徴がある。
- (2) 帯電電圧に比例して第2、第3ピーク電流が大きくなり、第1ピーク以降の電流値が大きい包絡部分では、DC~20MHz程度の低い周波数に成分が集中している。
- (3) 正放電の方が立ち上がり峻度が大きく、高周波成分を含む放電電流が発生する。

参考文献

- 1) 片岡忠史、増井典明：静電気学会誌、28、6, pp.310-315(2004)
- 2) A.G Bailey, J.M. Smallwood and H. Tomita: Inst. Phys. Conf Ser., No.118, Section 2, pp.101(1991)
- 3) 片岡忠史、増井典明：静電気学会春期講演会論、pp.29-30(2002)
- 4) 澤井丈徳、吉田孝博、増井典明：静電気障害防止技術シンポジウム、pp.79-84(2004)
- 5) 澤井丈徳、吉田孝博、増井典明：静電気学会春期講演会論、pp.5-8(2005)
- 6) 本田昌實：第15回EOS/ESD/EMCシンポジウム、pp.83-90(2005)
- 7) 名取章二、和田辰彦、伊藤裕蔵、坂田博政、片岡宏治、大津孝佳、田辺英男：第15回EOS/ESD/EMCシンポジウム、pp.91-95(2005)
- 8) 馬杉正男：電子情報通信学会論文誌B, Vol.J84-B, No.11, pp.2048-2058(2001)
- 9) 本田昌實：電子情報通信学会誌、Vol.78, No.9,

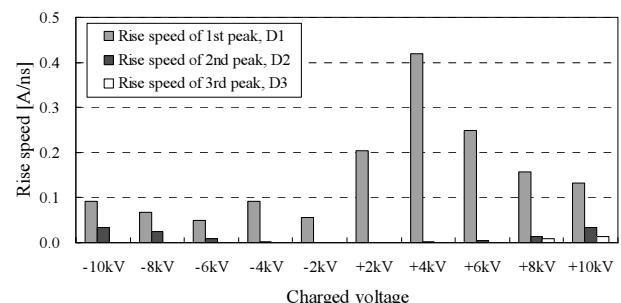


図7 放電電流の立ち上がり峻度の平均値と帯電電圧の関係

Fig.7 Relationship between average rising speed of discharge currents and charged voltage.

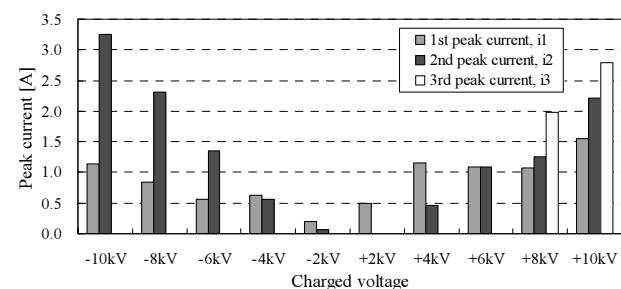


図8 各ピーク電流の平均値と帯電電圧の関係

Fig.8 Relationship between average peak currents and charged voltage.

pp.849-850(1995)

- 10) 三浦種敏：新版 聴覚と音声、電子情報通信学会、pp.311-312(1980)
- 11) 小林一行：MATLAB ハンドブック、秀和システム、pp.188(2004)

付録 スペクトログラムによる時間一周波数解析

放電電流波形のどの部分にどのような周波数成分が含まれているのか、また、時間と共に周波数成分がどのように変化してゆくのかを観測するために、本研究ではスペクトログラムを用いて時間一周波数解析を行つた。例として、図9(a)に示す放電電流の時間波形に対する、スペクトルを図9(b)に、スペクトログラムを図9(c)に示す。

スペクトログラムは、図10に示すように分析フレームを時間方向にシフトし、それぞれの分析フレームに対して高速フーリエ変換(FFT)を行うことでスペクトルの時間軌跡を得る解析法であり、古くから、音声の声紋分析などの信号処理の分野で用いられている手法^{10,11)}である。オシロスコープから得られる離散信号のサンプリング周波数(サンプル速度)を f_s [Hz]([サンプル/s])とすると、サンプリング定理より、この離散信号に含まれる周波数成分の上限は、 $f_{\max} \leq f_s/2$ である。この時、スペクトログラムの周波数分解能 Δf [Hz]は、FFTを行う際の分析窓のサンプル数を N [サンプル]とすると、 $\Delta f = f_s/N$ で示される。また、この N [サンプル]の分析フレームの時間長は、 $T = N/f_s$ となる。従つて、周波数分解能を高めるためには N を大きくする必要

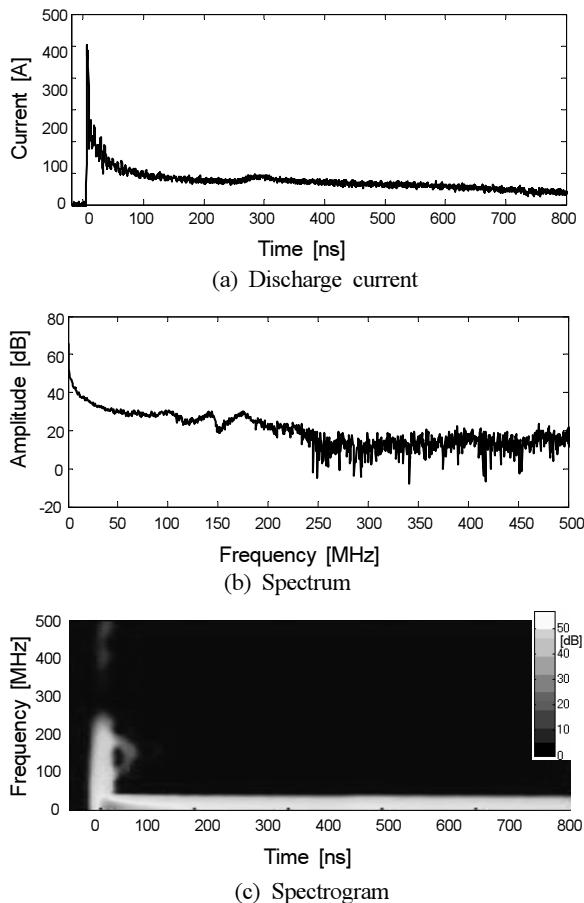


図9 スペクトルとスペクトログラムの例

Fig.9 Example of spectrum and spectrogram of discharge current.

があるが、 N を大きくすることにより分析フレームの時間長 T が大きくなり、時間分解能は低下する。そのため今回は、相反する時間分解能と周波数分解能を両立させるため、FFTに与える分析フレーム N は所望の周波数分解能が得られる程度に大きく確保し、その分析フレームの先頭に実際の局所的な分析対象データ N' サンプル($N > N'$)をハニング窓を乗じた後に代入し、その残り後半部分に0の値を代入し、時間分解能を維持した上で、擬似的に周波数分解能を向上させた。

なお、今回の実験による測定データは5GS/sなので、FFTで分析できる周波数範囲は、DC～2.5GHzとなる。しかし、オシロスコープのアナログ帯域が500MHzであるので、DC～500MHzの周波数成分を詳細に分析する。そのため、周波数分解能を優先し、FFTを行う際の分析フレーム N を16384サンプル(3.28μs)、分析対象データ N' を512サンプル(102ns)に設定し、周波数分解能0.3MHzで分析を行った。また、時間分解能は、分析フレーム長に加えて、分析フレームのシフト量にも影響を受けるため、この分析フレームのシフト量は分析対象データ長 N' の1/5となる102サンプル(2.4ns)としてMATLABにてプログラムを作成し、分析を行った。

このスペクトログラム分析による濃淡、すなわち対数振幅値は、相対的なものであるため、一般的には単位dBとして

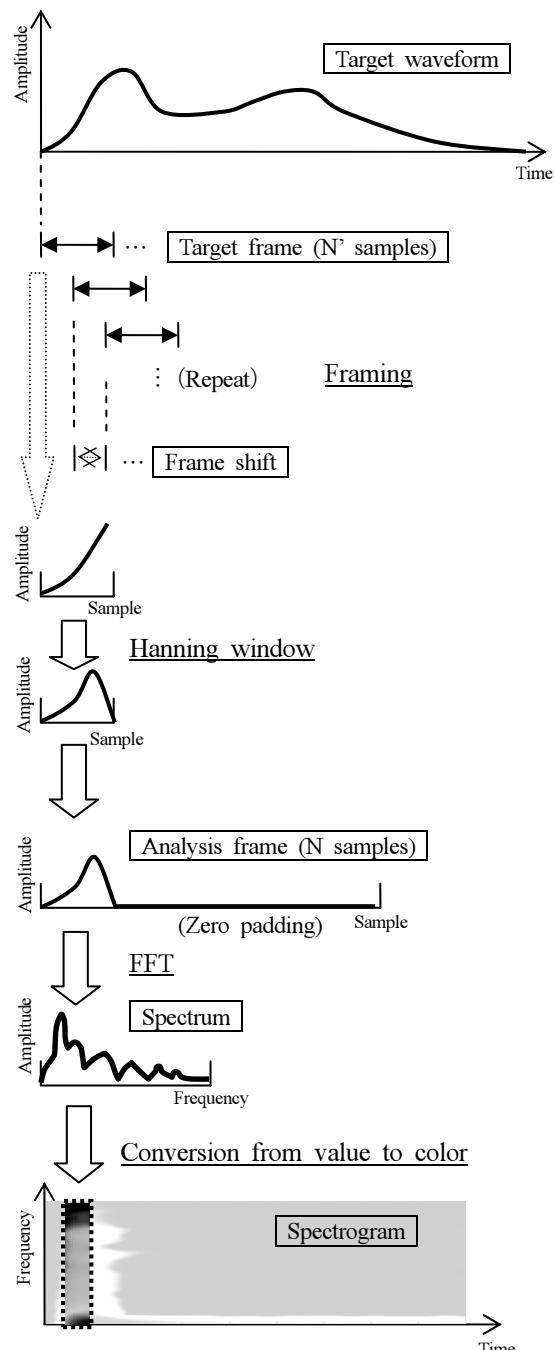


図10 スペクトログラムの作成手順

Fig.10 Method of spectrogram analysis.

出力する。この際の基準値(0dB)は、分析窓の種類や時間長、計算方法により変化するため、絶対的な基準ではない。しかし、今回のスペクトログラム分析では、分析全体にわたり同種の一定時間長の窓を統一して用いて周波数解析を行っているため、各放電電流波形から得られるスペクトログラムの結果が直接比較できる。たとえば、分析する波形の振幅が10倍異なる場合、スペクトログラムの出力値は20dBの差として現れる。また、スペクトログラムは、各周波数、各時間位置での放電電荷量の相対的な分布を示しているともいえる。