

人体からの静電気放電に及ぼす接地電極形状の影響 (II)

吉原 宏*, 吉田孝博*, 増井典明*¹

(Received August 20, 2008; Accepted November 12, 2008)

Effect of the Shape of Grounded Electrode on the Electrostatic Discharge from Charged Human Body (Part II)

Hiroshi YOSHIHARA *, Takahiro YOSHIDA* and Noriaki MASUI*¹

(2008年8月20日受付; 2008年11月12日受理)

In this paper, the relationship between waveform of discharge current of ESD from the charged human body and the body potential is discussed. The shape of grounded metal in actual situation of ESD has many types. In this study, we research the effects of shape of the grounded electrode on the waveforms of discharge current. The grounded electrodes are brass needle and stick. The radius of curvature of electrode is from 0.18 mm to 2.5 mm. When the radius of curvature of the grounded electrode is smaller than 0.18 mm at the body potential is ± 4 kV, smaller than 0.47 mm in ± 6 kV, and 0.97 mm in ± 8 kV, the corona discharge occurs. When the corona discharge occurs, the charge released in the spark discharge decreases and the gap length of discharge inception is longer.

1. はじめに

近年, 半導体デバイスや電子機器が微細化するとともに, 電子機器製造ライン等で静電気放電 (ESD: Electrostatic Discharge) による誤作動や破壊などの静電気障害が頻繁に発生している. 現在, 人体からの放電に対する, 電子機器等の静電気耐性を評価する方法の一つに, 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, 人体からの放電を模擬する人体帯電モデル (HBM: Human Body Model) がある. しかし, 実際の人体からの放電電流波形は, 人体の電位や, 帯電極性等, さらに接地金属の形状によっても異なる¹⁻³⁾.

我々は, これまで実際に人体を帯電させ, 人体と先端が曲率半径 2.5 mm の棒電極, 曲率半径 10 mm および 20 mm の半球電極, 平板電極との間で ESD を発生させ, その時の放電開始ギャップ長と放電電流波形の測定, および放電路の写真撮影によって, 人体からの放電特性について検討を行ってきた²⁾. その結果, 放電電流波形および放電形態は, 帯電極性および帯電電位のみならず, 接地電極の形状によっても異なった特性を示すことを明らかにした.

しかし, 実際の人体と接地導体間の放電で, 鋭利な形状をした接地導体との間の放電も考慮しなければならない. そのため, 曲率半径が 2.5 mm より小さな接地電極による人体からの ESD の検討も必要である.

本研究では, 人体からの ESD の測定に, 曲率半径 0.18 mm から 2.5 mm の計 7 種類の針電極・棒電極を用いることにより, 接地金属電極の形状による放電電流への影響の検討を行った. さらに, 指先と接地金属電極間の放電路の撮影を行い, 放電形態の検討も併せて行った.

2. 装置および実験方法

2.1 放電電流波形および放電ギャップ長の測定

図 1 に測定装置の概略を示す. 被験者の指先は, テフロン棒と緩衝材によって固定する. 接地金属板上の厚さ 12 mm の絶縁板の上に裸足で立った被験者を 5GΩ の抵抗を介して ± 2 , ± 4 , ± 6 , ± 8 kV, に充電し, そこに接地金属電極を 0.4 mm/s の速さで近づけ放電させる.

今回の測定に用いた接地金属電極は, 曲率半径が, 0.18, 0.3, 0.36, 0.47, 0.97, 1.4 mm, の真鍮針電極と 2.5 mm の真鍮棒電極を接地金属電極として使用した.

火花放電が発生すると同時に, 電流プローブにより取り込んだ電流パルスをトリガ信号として, 放電開始ギャップ長を計測しているカウンタの読みを止め, 微動台とモータを接続しているクラッチを切る. 指先と電極が接触したときを, ギャップ長が零の位置とし, 毎回この調整を行った. 放電電流波形は, 電流プローブ (Tektronix CT-1) を用いて電圧波形に

キーワード: ESD, HBM, 放電電流, 放電電荷量, 放電開始ギャップ長, コロナ放電

* 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

¹ masui@ee.kagu.tus.ac.jp

変換し、オシロスコープ (Tektronix-TDS5104, 帯域 1 GHz, サンプル速度 5 Gs/s) で観測した. 放電の測定回数は, 各帯電電位 20 回である. 人体の静電容量および皮膚抵抗は, 過去に報告した方法⁴⁾を用い測定した. 本測定は 1 人の被験者で行い, 被験者の指先の平均皮膚抵抗は 1.11 MΩ, 静電容量は 188 pF であった. 測定は, 相対湿度 40±3%, 温度 23±2°C, 大気圧 1,010±10 hpa の暗室で行った.

2.2 放電路の撮影

指先および放電ギャップ間に現れる放電路の形態と放電電流波形との関係を検討するために, デジタル一眼レフカメラ (PENTAX, *ist D) にイメージインテンシファイア (浜松ホトニクス ナイトビューア C3100) を取り付け放電形態の撮影を行った. カメラの絞りは F22, 感度は ISO800 相当とした.

3. 結果および考察

3.1 代表的な放電電流波形形状

図2(a)および(b)に, 人体帯電電位が+6 kVおよび-6 kVのときの平均的かつ特徴的な放電電流波形を示す.

本論文では, 立ち上がり部分の第1ピークの電流値と立ち上がりから第2ピークの出現までの時間間隔に着目し, 放電電流波形の形状を分類している.

正放電では, 図2(a)に示されるような4種類の放電電流波形が観測された. 波形Aは, 曲率半径1.47 mmの接地電極を用いたときの結果であり, 過去に報告した, 曲率半径10 mmの半球電極を用いて得られた2ピーク波形と同じ形状をしている⁵⁾. 波形B (曲率半径0.97 mm) は, 第1ピークは波形Aより低く, 第1ピークの出現後300-400 ns程度の間ほぼ一定の値を示した後第2ピークが立ち上がる波形となった. さらに, 曲率半径を小さくすると, 波形C (曲率半径0.3 mm) のように, 曲率半径の大きい場合の波形のような第1ピークがはっきりとした形では現れず, 200-300 ns程度の時間をかけて緩やかに立ち上がり, その後, ほぼ一定の電流値のまま300-400 nsの時間間隔において第2ピークが立ち上がる波形となる. 波形D (曲率半径0.18 mm) では, 第1ピークのみが100 ns程度の時間をかけて緩やかに立ち上がる波形となった.

負放電では, 図2(b)に示されるような3種類の放電電流波形が観測された. 波形E (曲率半径1.4 mm) は, 最初に鋭く立ち上がる第1ピークを持ち, 100-200 nsの時間間隔において第2ピークが立ち上がる. 波形F (曲率半径0.36 mm) では, 最初に小さなピークが現れ, 400-500 ns後に大きなピークが現れる. 波形G (曲率半径0.18 mm) は, 正放電のときの波形Dと同じく, 第1ピークのみが100 ns程度の時間をかけて緩やかに立ち上がる.

3.2 放電電流波形と接地電極形状の関係

図3に, 図2(a)に示した放電電流波形A-Dの接地電極の曲率

半径ごとの出現率を示す. 帯電電位は, +2kV~+8kVである. どの帯電電位においても, 曲率半径の大きな接地電極ほど波形Aの出現率が高く, 曲率半径が小さな接地電極ほど波形D

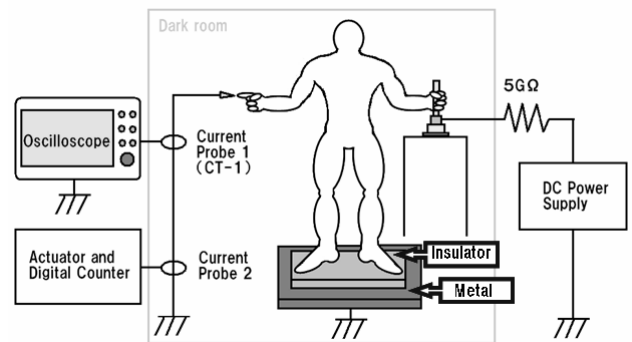
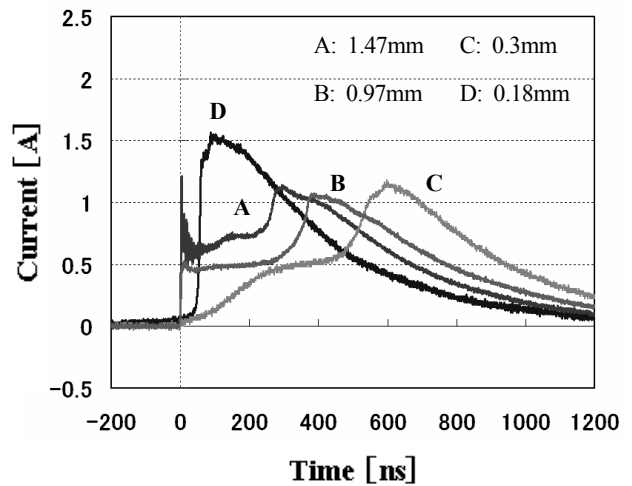


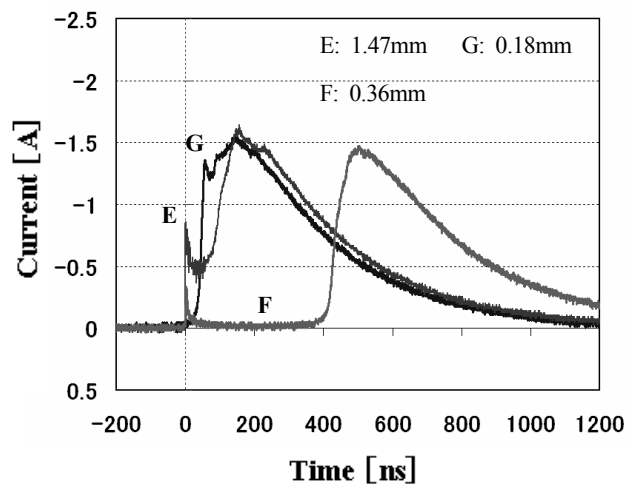
図1 測定装置の概略

Fig. 1 Schematic view of apparatus for experiment.



(a) 正放電 (+6 kV)

(a) Positive discharge (+6 kV)



(b) 負放電 (-6 kV)

(b) Negative discharge (-6 kV)

図2 放電電流波形

Fig. 2 Waveforms of discharge current.

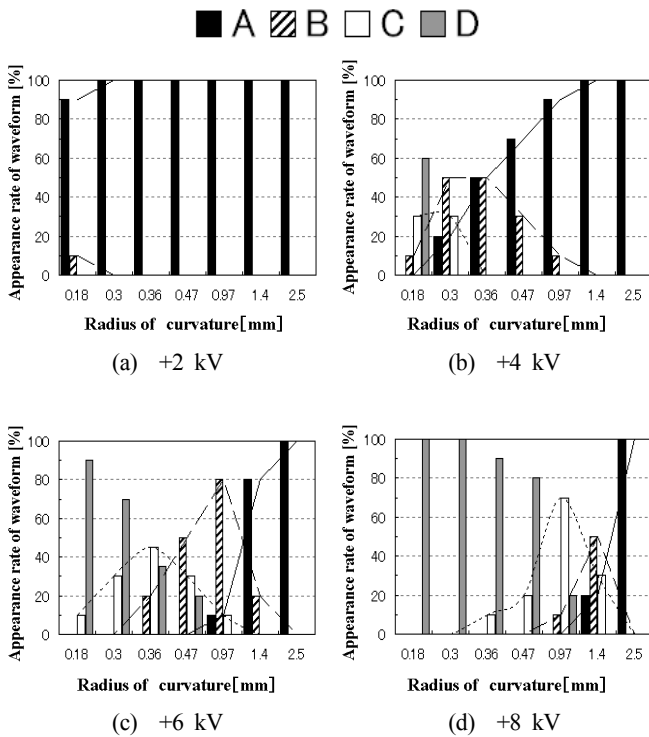


図3 放電電流波形の出現率
(正放電)

Fig. 3 Appearance rate of waveform.
(Positive discharge)

の出現率が高いことがわかる。しかし、+2 kVの場合は、曲率半径が最も小さい0.18 mmの電極で、僅かに波形Bが出現した以外は、曲率半径に関係なく全て波形Aであった。また、帯電電位が高くなるほど波形Dの出現率が高くなり、逆に低くなるほど波形Aの出現率が高くなることがわかる。

以上のことから、正放電の場合、接地電極の曲率半径が大きく、人体の帯電電位が低いほど、第1ピークの電流値が大きく、立ち上がりの鋭い放電電流波形（波形A）の出現率が高い。そして、接地電極の曲率半径が小さく、人体の帯電電位が高くなるとともに、第1ピークの電流値が小さい波形B、そして立ち上がりの緩やかな波形Cの順で出現率が高くなってゆき、最終的に緩やかな第1ピークのみが立ち上がる波形Dの出現率が高くなることがわかる。

図4に、図2(b)に示した波形E-Gの出現率と接地電極の曲率半径との関係を示す。帯電電位は、-2 kV～-8 kVである。どの帯電電位においても、曲率半径の大きな接地電極ほど波形Eの出現率が高く、曲率半径が小さな接地電極ほど波形Gの出現率が高いことがわかる。しかし、-2 kVの場合、曲率半径に関係なく、放電電流波形は全て波形Eとなった。

また、帯電電位が高くなるほど、波形Gの出現率が高くなり、一方、帯電電位が低くなるほど波形Eの出現率が高くなることがわかる。

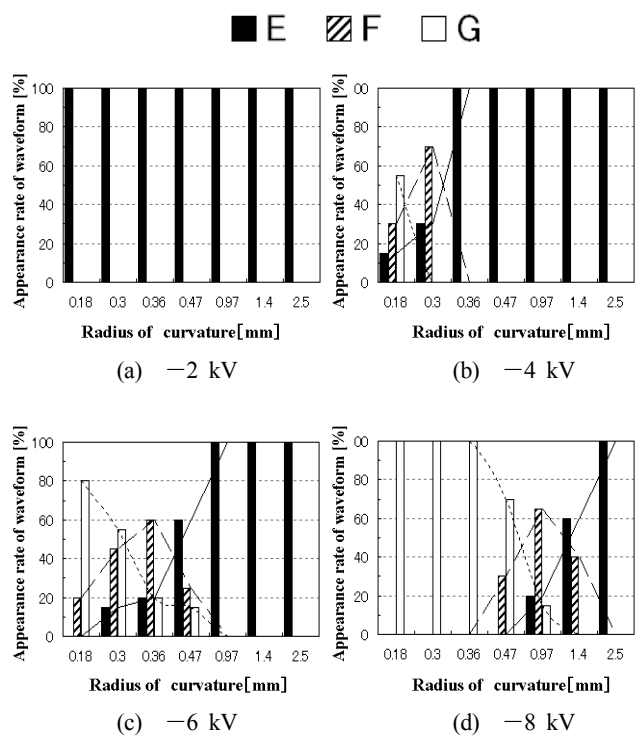


図4 放電電流波形の出現率
(負放電)

Fig. 4 Appearance rate of waveform.
(Negative discharge)

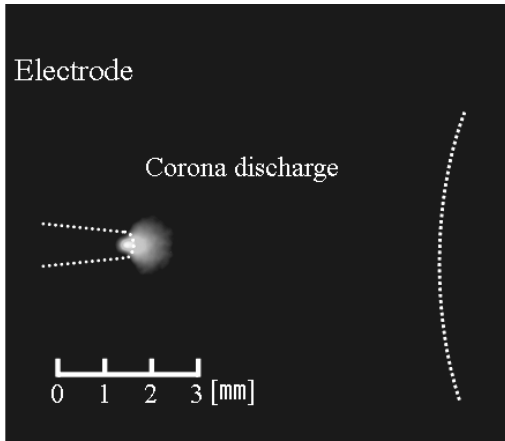
以上のことから、負放電の場合、接地電極の曲率半径が大きく、なおかつ、帯電電位が低いほど、波形Eの出現率が高い。そして、接地電極の曲率半径が小さく、帯電電位が高くなるとともに、波形Gの出現率が高くなるがわかる。

3.3 接地電極の曲率半径と放電形態の関係

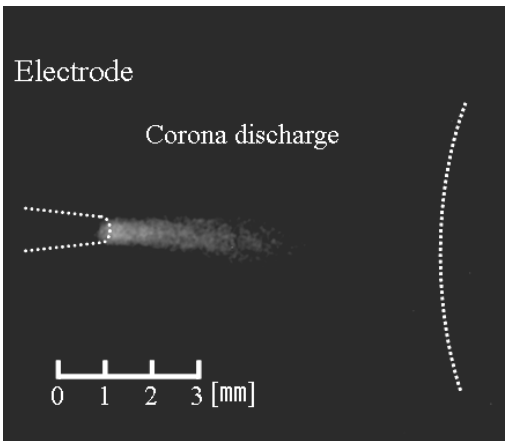
図5に、曲率半径0.18 mmの接地電極を使用し、帯電電位±8 kVのときの放電形態を示す。図5(a)および(b)は、接地電極が指先に接近し、火花放電が発生する直前までの様子を撮影したものである。

図5(a), (b)より、火花放電開始前に、コロナ放電が発生していることが確認できる。図5(a)の正放電（電極は負）における電極先端のグローコロナ、図5(b)の負放電（電極は正）においては、ブラシコロナの発生が観られる^{6,7)}。また、図5(b)の負放電の写真撮影時に、我々はチリチリという音の発生を確認した。その後、全路崩壊に至り、火花放電が発生した。

図6に曲率半径0.18 mmの接地電極を使用した際の帯電電位±8kVにおけるコロナ放電の電流パルスを示す。火花放電の放電電流の前に、コロナ放電特有のパルス状の放電電流が正放電、負放電ともに確認できた。正放電の方がパルスの時間間隔が広く、電流値が小さいことが確認できる。なお、横軸が負になっているのは、火花放電の開始時刻を0秒ととしているため、このような表記とした。



(a) 接地金属からの負コロナ
(人体電位: +8 kV)
(a) Negative corona from the grounded electrode.
(Human body potential: +8 kV)



(b) 接地金属からの正コロナ
(人体電位: -8 kV)
(b) Positive corona from the grounded electrode.
(Human body potential: -8 kV)

図5 コロナ放電の様子 (曲率半径: 0.18 mm)

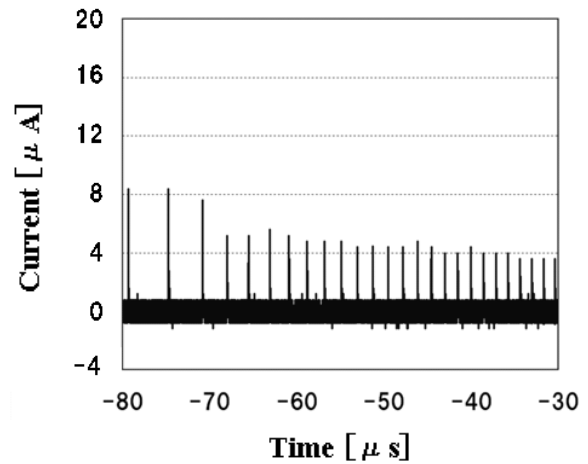
Fig. 5 Forms of corona discharge channel.
(Radius of curvature: 0.18 mm)

波形Dおよび波形Gをとまなう放電では、極性によらず、火花放電の発生前にコロナ放電が発生している。火花放電の前にコロナ放電が発生すると、放電開始ギャップ長が長くなり、立ち上がりの緩やかな波形が多くなる。コロナ放電によりギャップ間に形成される空間電荷の影響と考えられる。

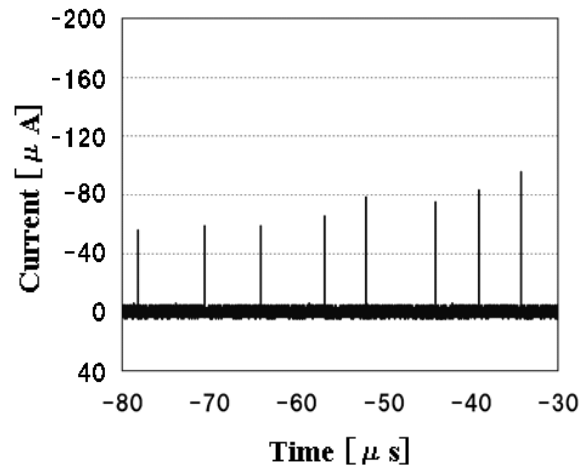
コロナ放電は、 ± 4 kVにおいて接地電極の曲率半径0.18 mm, ± 6 kVで0.47 mm, ± 8 kVで0.97 mmより小さいときに観られた。

3.4 接地電極形状と放電電荷量の関係

図7に、それぞれ正放電および負放電における接地電極の



(a) 接地金属からの負コロナ
(人体電位: +8 kV)
(a) Negative corona from the grounded electrode.
(Human body potential: +8 kV)



(a) 接地金属からの正コロナ
(人体電位: -8 kV)
(b) Positive corona ofrom the grounded electrode.
(Human body potential: -8 kV)

図6 コロナ放電の電流波形 (曲率半径: 0.18 mm)

Fig. 6 Waveforms of corona discharge current.
(Radius of curvature: 0.18 mm)

曲率半径と平均放電電荷量の関係を示す。放電電荷量は、放電電流波形を積分することにより算出した。放電極性に関わらず、接地電極の曲率半径が1.5-1 mmより小さくなると放電電荷量が減少してゆく。電荷量が減少し始める接地電極の曲率半径は、各帯電電位において、コロナ放電が発生する曲率半径と一致している。したがって、図7に示された結果は、火花放電の前に発生するコロナ放電により人体の電荷が減少し、火花放電で放出される電荷量が減少したことを示している。

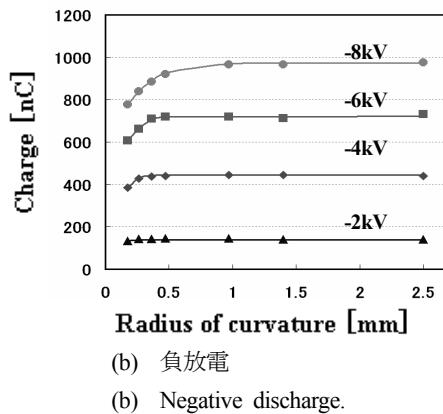
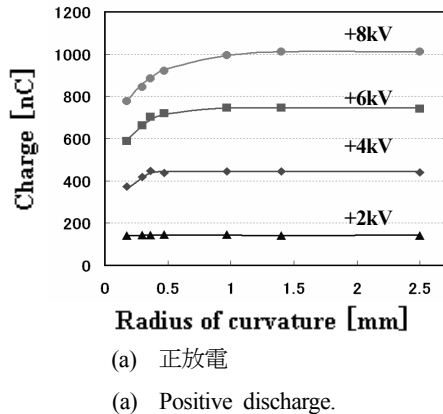


図7 接地電極の曲率半径と放電開始ギャップ長の関係

Fig. 7 Relationship between average charge and the radius of curvature of the grounded electrodes.

帯電電位が高くなると接地電極の曲率半径が大きいときにもコロナ放電が発生するので、放電電荷量が減少し始める接地電極の曲率半径は、帯電電位が高いほど大きい値となる。

図8に、帯電電位がそれぞれ+6 kVおよび-6 kVのときの、正放電および負放電における、接地電極の曲率半径と平均放電電荷量の関係を示す。正放電の場合(図8(a)), 波形A, B, Cでは、放電電荷量は曲率半径によらず一定で、その値も波形による差異はほとんどなかったが、波形Dでは曲率半径が小さくなるほど、放電電荷量が減少し、他の波形に比べ少ない値を示すことがわかった。一方、負放電の場合は、波形E, Fの放電電荷量は曲率半径によらず一定であるが、波形Gでは、曲率半径が小さくなるほど、放電電荷量が減少している。これは火花放電の前にコロナ放電が発生するとき特有の傾向である。

3.5 接地電極形状と放電開始ギャップ長の関係

図9に、接地電極の曲率半径と平均放電開始ギャップ長の関係を示す。正放電および負放電ともに、電極の曲率半径の減少とともに、しばらくは放電開始ギャップ長に大きな変化は現れないが、コロナ放電が発生する曲率半径より小さくなると、放電開始ギャップ長は長くなる。さらに、曲率半径を

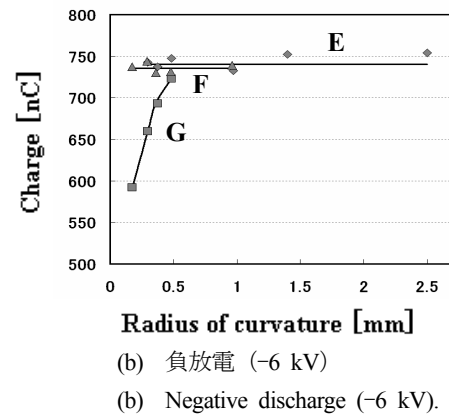
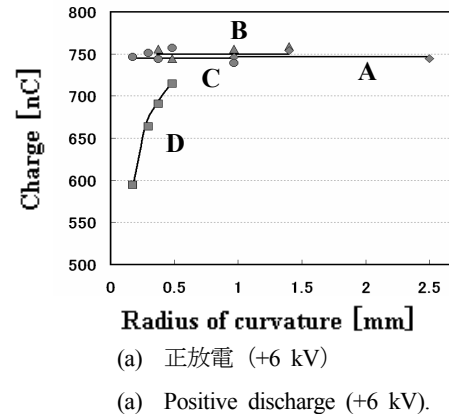


図8 接地電極の曲率半径と放電開始ギャップ長の関係
(放電電流波形形状別)

Fig. 8 Relationship between average charge and the radius of curvature of the grounded electrodes.

(Typical shape of waveforms of discharge current)

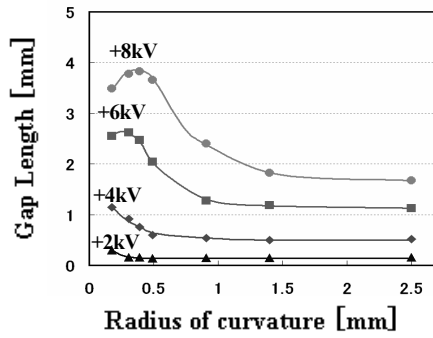
減少させていくと、放電開始ギャップ長は最大値を示した後、短くなる。帯電電位が高く、接地電極の曲率半径が小さくなると、強いコロナ放電が発生し、帯電電位が下がり、火花放電の開始に必要な電界強度を得るために、放電開始ギャップ長がより短くなったことによるものと考えられる。

接地金属に見立てた電極先端の曲率半径を変化させ、放電電流波形を観測した結果、種々の形状の波形が得られた。このような放電が人体と電子機器あるいは電子デバイスとの間で発生した場合、どのような障害が起こるかは、今後の検討課題である。

4. まとめ

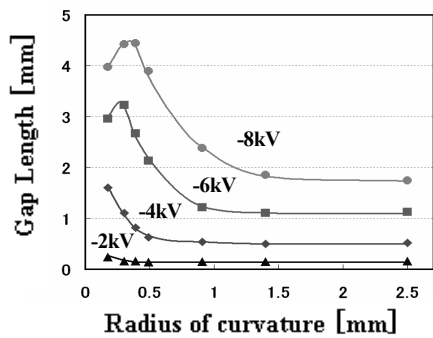
接地電極の形状が、人体からの放電電流波形に大きな影響を及ぼすことを確認した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 正放電および負放電ともに、接地金属電極の曲率半径が小さく、なおかつ帯電電位が高くなると、立ち上がりの緩やかな第1ピークのみを持つ放電電流波形の出現率が高くなる。



(a) 正放電

(a) Positive discharge.



(b) 負放電

(b) Negative discharge.

図9 接地電極の曲率半径と放電開始ギャップ長の関係
 Fig. 9 Relationship between average Gap Length and the radius of curvature of the grounded electrodes.

(2) 放電電流波形が立ち上がりの緩やかな第1ピークのみを持つ波形となる場合、接地電極の針電極の先端からコロナ放電が発生している。

(3) コロナ放電が発生している場合、火花放電で放出される放電電荷量は曲率半径が小さくなるほど減少する。

(4) コロナ放電が発生している場合、曲率半径が小さいほど、放電開始ギャップ長は長くなるが、さらに曲率半径を小さく、帯電電位を高くすると、放電開始ギャップ長が短くなる。

最後に、本研究を進めるにあたって、東京理科大学卒業研究生小菅貴裕氏、竹内勝実氏、渡部智規氏の三名には実験に対する援助および被験者として御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片岡忠史, 澤井丈徳, 増井典明: 静電気学会誌, **28** (2004) 310
- 2) 吉原 宏, 吉田孝博, 増井典明: 静電気学会春期講演会論文集, pp.49-52 (2008)
- 3) 澤井丈徳, 吉田孝博, 増井典明: 静電気学会講演論文集, pp.297-302 (2005)
- 4) 片岡忠史, 増井典明: 静電気学会春期講演会論文集, pp.29-30 (2002)
- 5) 吉田孝博, 久保田啓吾, 澤井丈徳, 増井典明: 静電気学会誌, **31** (2007) 113
- 6) 電気学会: 「放電ハンドブック上巻」, pp.139-144, オーム社 (1998)
- 7) 大木正路: 「高電圧工学」, pp.70-77, 槇書店 (1982)