

人体からの静電気放電に及ぼす接地電極形状の影響(III)

吉原 宏*, 吉田 孝博*, 増井 典明*¹

(2009年8月3日受付; 2010年1月29日受理)

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

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

(Received August 3, 2009 ; Accepted January 29, 2010)

In recent years, electrostatic discharge (ESD) causes serious damages to semiconductor devices and electronic equipments. It is necessary to explain the characteristics of ESD in order to examine the cause of ESD troubles. In actual situation of ESD from a charged human body, the grounded metals have various shapes and the body potential takes various values. Therefore, in this study, we research the effects of the body potential and shape of the grounded electrode on the waveforms of discharge current, the gap length of discharge inception, and the number of discharge channel. The body potential is from $\pm 2\text{kV}$ to $\pm 8\text{kV}$. A rod electrode and hemisphere electrodes made of brass are used as the grounded electrodes. The radius of curvature of the grounded electrodes is from 2.5 mm to 20 mm. A plate electrode is also used. The appearance rate of the waveform of discharge current with multiple peaks and a single channel increases, when the body potential rises, and in addition, it increases, when the radius of curvature of the electrode closes to that of finger tip (15 mm). Waveforms of discharge current with multiple channels show the higher amplitude impulse associated with the wavefront than those with a single channel. ESD with multiple channels is not appeared when the discharge current has three peaks.

1. はじめに

近年, 半導体デバイスや電子機器等の微細化が進むにつれて, 静電気による誤動作, 破壊などの静電気障害が頻繁に発生し, 問題になっている。

その原因の1つに, 帯電した人体からの静電気放電(ESD: Electrostatic discharge)があり, 放電電流による半導体デバイスの破壊や, その放電に伴い発生する放射電磁ノイズによる誤動作の要因になっている。しかし, 帯電した人体からの放電現象については, 未だ解明には至っていない^{1,2)}。

一方, 半導体デバイスおよび電子機器の静電気耐性を評価する方法の一つとして, 国際標準規格 IEC-61000-4-2 で定められる ESD に対する機器のイミュニティを評価する試験法がある³⁾。この試験法は, 人体からの静電気放電を, 静電容量 150 pF のコンデンサの充電電荷を 330 Ω の抵抗を介した放電で模擬したものであり, 放電電流波形を図1のように定義している。しかしながら, 人体電位や極性による波形形状

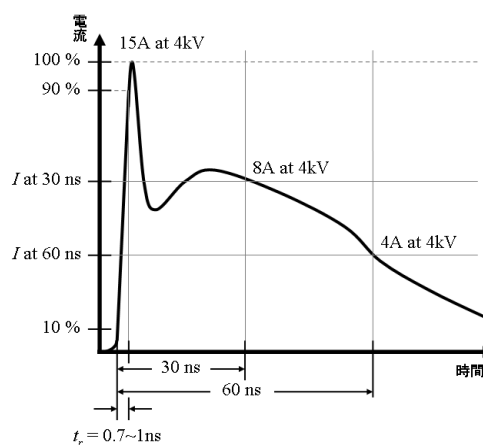


図1 ESD 試験器の電流波形 (IEC61000-4-2)

Fig. 1 Current waveform from ESD generator. (IEC61000-4-2)

の違いや, 放電対象となる接地金属の形状による放電特性の変化は考慮されていない。

そのため, 現実の ESD に即した試験方法の確立や, ESD 障害へのより確実な対応を検討するためには, 帯電した人体からの放電現象の解明が不可欠である。

当研究室のこれまでの研究において, 同一の被験者であっても指先からの放電電流は, 人体電位と極性および接地金属電極の形状によって異なった特性を示すことが明らかになっている⁴⁾。前報⁵⁾では曲率半径が 0.18-2.5 mm の接地電極を用いて, 曲率半径が小さい場合の放電特性について調査し,

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, IEC61000-4-2

* 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

接地電極の曲率半径, 人体電位および極性が, 放電電流波形および放電回路特性に及ぼす影響を検討した. 本報告では, 曲率半径が 2.5-20 mm の半球電極および平板電極を用いて, 曲率半径の大きい場合について, 前報と同様の検討を行った.

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2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. 接地金属板上に縦横1m角で厚さ1mmのテフロン板2枚を重ねて敷き, その上に70cm角で厚さ5mmのテフロン板とアクリル板を1枚ずつ重ねた厚さ計12mm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および±8kVに充電し, 指先に接地金属電極を0.4mm/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, 先端の曲率半径が2.5mmの真鍮棒電極, 曲率半径5, 10, 15, 20mmの真鍮半球電極および半径50mmの円盤形の真鍮平板電極である.

火花放電発生と同時に, 電流プローブ2で検出するトリガ信号を用いて, 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. なお, 指先と電極が接触したときのギャップ長をゼロ位置とする調整を毎回行った.

放電電流波形は, 電流プローブ1 (Tektronix CT-1, 帯域1GHz) を用いて, オシロスコープ (Tektronix TDS5104, 帯域1GHz, サンプル速度5GS/s) で観測した. 放電は, 各人体電位および各接地金属電極において20回ずつ測定を行った.

今回の測定は, 被験者の指先の曲率半径が約15mm, 指先の平均皮膚抵抗は1.11MΩ, 人体の静電容量が188pFである1名の被験者(20代男性)で行った. また, 全ての測定は, 相対湿度40±3%, 温度23±2°C, 大気圧1,010±10hPaに測定暗室を調整し行った.

人体の皮膚抵抗は, 図3に示すように, 間隔10mmで配置した直径3mm, 絶縁板からの高さ20mmの導体棒に, 指先(第一関節より先の部分)を500gwの力で10秒間押しつけたときの導体棒間の抵抗値を皮膚抵抗とした.

図4に人体静電容量の測定装置の等価回路を示す. 既知の基準容量C₀と人体を直列に接続し, 電圧V₀をかける. V₀はC₀と人体の静電容量C_hの値に反比例して分圧される. このときの人体の電位をV_hとする. 人体と並列に, 人体から電位計に至るまでのケーブル等の浮遊容量C_eが挿入されているので, 次式(1)により人体の静電容量C_hを求める.

$$C_h = C_0(V_0/V_h - 1) - C_e \tag{1}$$

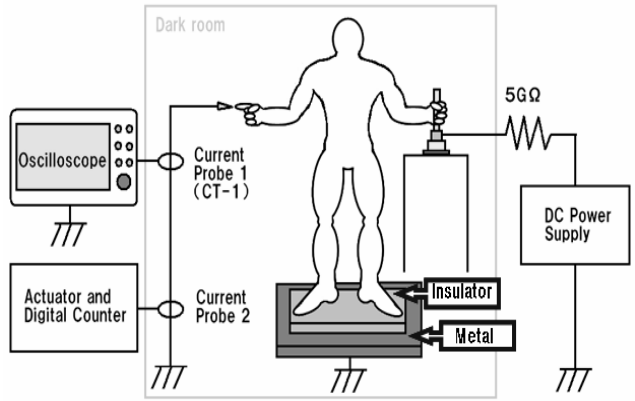


図2 測定装置の概略
Fig. 2 Schematic view of apparatus for experiment.

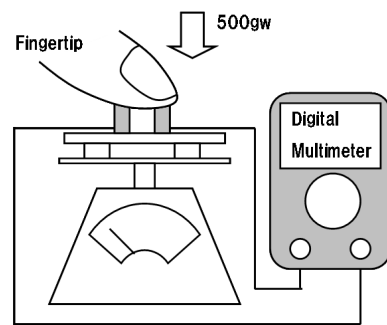


図3 皮膚抵抗の測定法
Fig. 3 Measurement system of skin resistance.

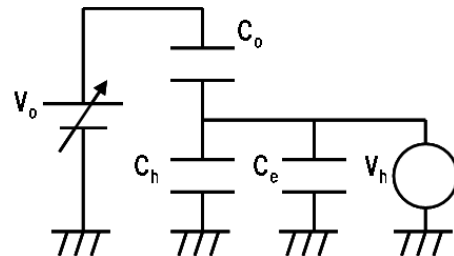


図4 人体静電容量を測定するための等価回路
Fig. 4 Equivalent circuit for measuring capacity of human body.

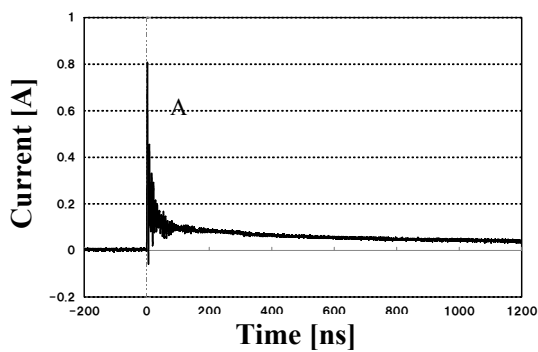
2.2 放電回路の撮影

指先および放電ギャップ間に現れる放電回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 C3100) を取り付け放電形態の撮影を行った.

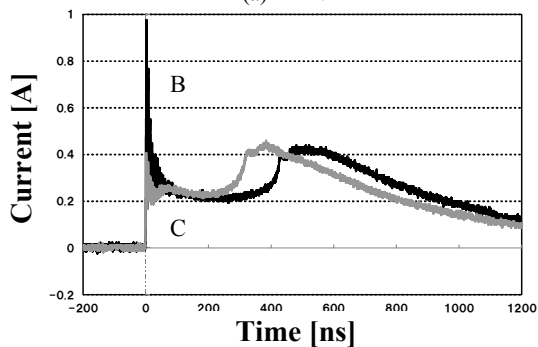
3. 結果

3.1 代表的な放電電流波形

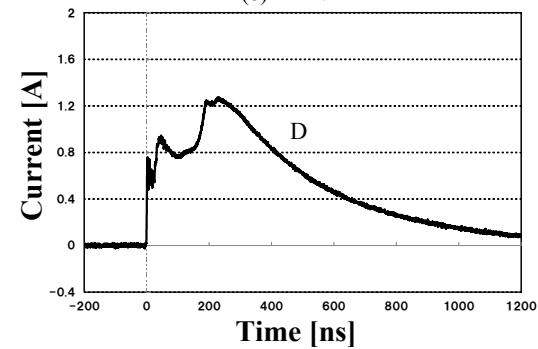
接地金属電極に曲率半径10mmの半球電極を用いて, 人体電位を±2-±8kVに変化させたときの平均的かつ特徴的な放



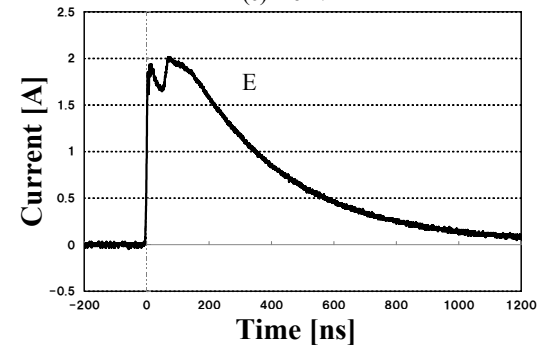
(a) +2kV



(b) +4kV

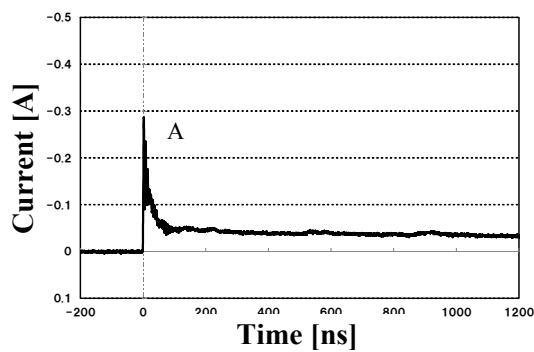


(c) +6kV

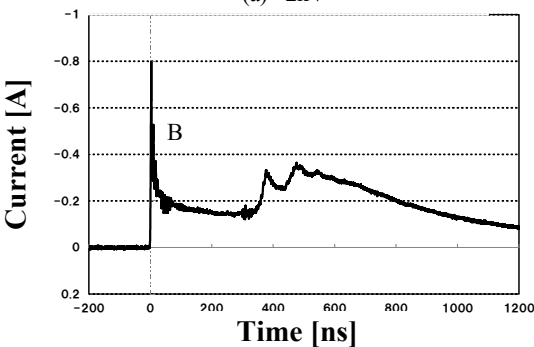


(d) +8kV

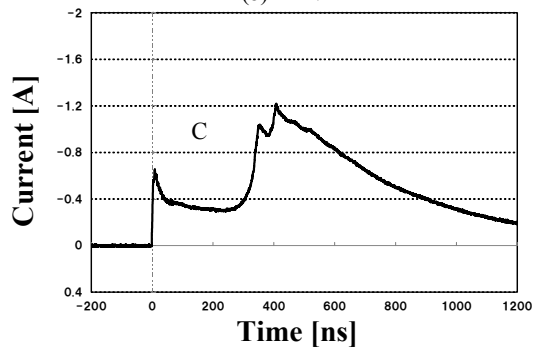
図5 放電電流波形 (正放電)
Fig. 5 Waveforms of discharge current.
(Positive discharge)



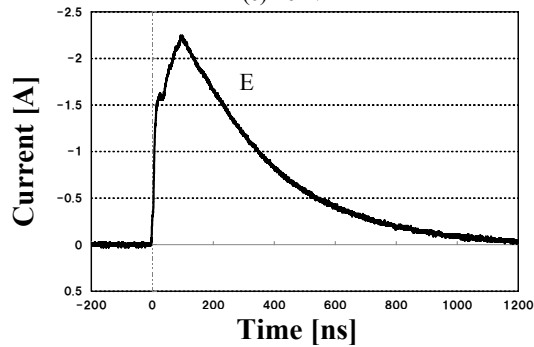
(a) -2kV



(b) -4kV



(c) -6kV



(d) -8kV

図6 放電電流波形 (負放電)
Fig. 6 Waveforms of discharge current.
(Negative discharge)

電流波形を、正放電に関しては図5に、負放電に関しては図6に示す。なお、今回は人体電位が正の場合の放電を正放電、逆に負の場合を負放電と定義する。

正放電では、人体電位が低い+2kVのとき、図5(a)のように最初に鋭く立ち上がる1つのピークのみを持った1ピーク波形(波形A)が現れ、+4kVになると図5(b)のように最初の

鋭いピークの後に2つ目のピークを持つ2ピーク波形が現れる。同じ2ピーク波形でも、最初のピークが2つ目のピークより大きい波形Bと、逆に最初のピークよりも2つ目のピークの方が大きい波形Cが現れる。+6kVでは図5(c)のように3つのピークを持つ3ピーク波形(波形D)が現れる。+8kVでは最初のピークが緩やかに立ち上がった後に図5(d)のよう

に2つ目のピークが現れる波形Eとなっている。

負放電では、人体電位が -2kV のときは、図6(a)のように、正放電の $+2\text{kV}$ と同じく1つのピークを持った波形Aが現れた。同様に、 -4kV では図6(b)のような波形Bが、 -6kV では図6(c)のような波形Cが現れ、 $+4\text{kV}$ の波形形状と同様の形状であった。 -8kV では $+8\text{kV}$ と同じく図6(d)のような波形Eとなった。また、負放電では正放電の波形Dのような3つのピークを持つ波形は現れなかった。

3.2 放電電流波形の出現率

図7に、図5に示した正放電における放電電流波形A-Eの人体電位および接地電極の曲率半径ごとの出現率を示す。以下、平板電極については曲率半径をPlateと示した。

人体電位 $+2\text{kV}$ では、曲率半径に関係なく全て波形Aであった。しかし、 $+4\text{kV}$ になると波形Aは現れなくなり、波形Bの出現率が最も高くなる。接地電極と指先の曲率半径(15 mm)の違いが大きくなるほど波形Bの出現率が高くなり、接地電極の曲率半径が指先の曲率半径に近いほど波形Cの出現率が高くなる傾向を示す。 $+6\text{kV}$ では、曲率半径15 mmに近いほど波形Dの出現率が高くなり、逆に離れるほど波形Cの出現率が高くなる傾向を示す。 $+8\text{kV}$ では、曲率半径15 mmに近いほど波形Eの出現率が高くなり、逆に離れるほど波形C、Dの出現率が高くなる傾向を示す。

図8に、図6に示した負放電における放電電流波形A-Eの人体電位および接地電極の曲率半径ごとの出現率を示す。人体電位 -2kV では、波形Aの出現率が最も高いが、 $+2\text{kV}$ と異なり指先の曲率半径に近い曲率半径ほど波形Bが多く出現した。 -4kV 、 -6kV ともに曲率半径15 mmに近いほど波形Cの出現率が高くなり、逆に離れるほど波形Bの出現率が高くなる傾向を示す。 -8kV では $+8\text{kV}$ と同様に、曲率半径15 mmに近い曲率半径で波形Eの出現率が高くなり、逆に離れるほど波形Cの出現率が高くなる傾向を示す。

以上の結果から、正放電、負放電ともに、人体電位が低く、接地電極と指先の曲率半径の違いが大きいくほど、最初のピークのみが大きく、鋭く立ち上がる1ピーク波形の出現率が高くなることわかる。そして、接地電極の曲率半径が指先の曲率半径に近づき、なおかつ人体電位が高くなるとともに、2ピーク波形が出現し、続いて正放電の場合のみ3ピーク波形が出現する。最終的には、正放電、負放電ともに最初のピークが緩やかに立ち上がり、次のピークが現れる波形Eの出現率が高くなる。

3.3 接地電極形状と放電形態の関係

すでに報告したように⁶⁾、指先と接地電極との間で発生するESDの放電形態には、放電路が1本観測される単数路放電と、複数本観測される複数路放電がある。

図9に、 $\pm 4\text{kV}$ における、指先と曲率半径10 mmの接地電

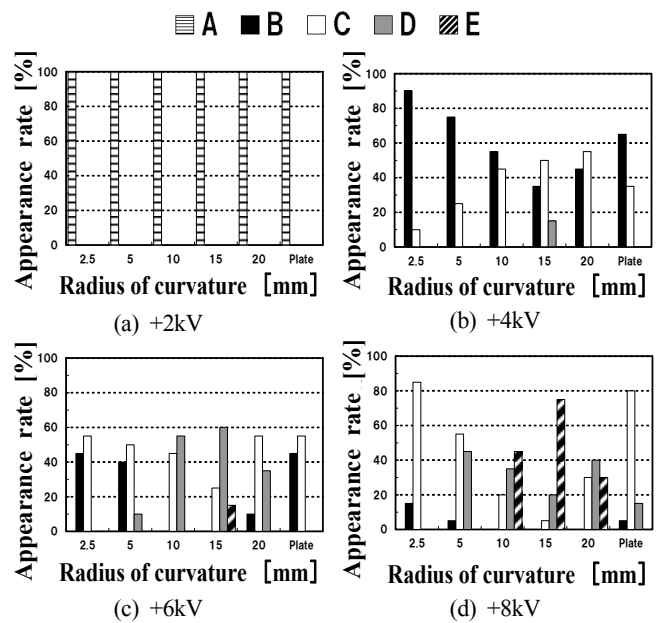


図7 放電電流波形の出現率 (正放電)

Fig. 7 Appearance rate of 5 kinds of waveform of discharge current. (Positive discharge)

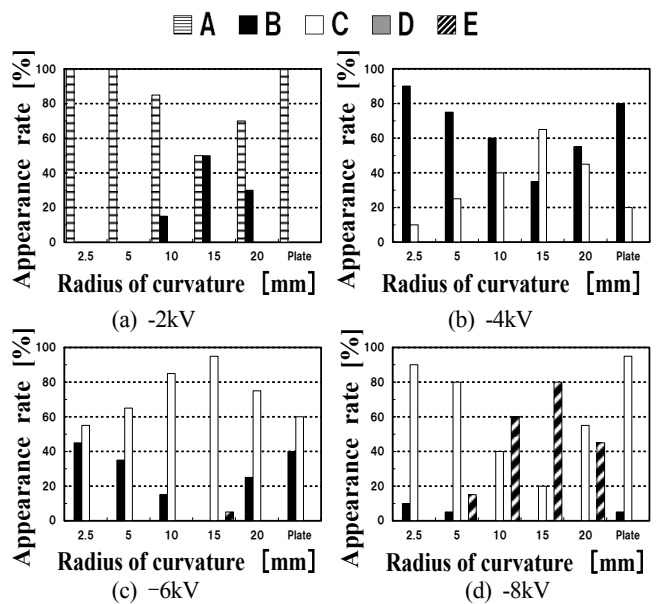


図8 放電電流波形の出現率 (負放電)

Fig. 8 Appearance rate of 5 kinds of waveform of discharge current. (Negative discharge)

極間の単数路放電および複数路放電の一例を示す。また、図10(a)に曲率半径10 mmの接地電極を用いたときの、各人体電位における単数路放電と複数路放電の出現率を示す。人体電位が $\pm 2\text{kV}$ の場合、全ての放電が複数路放電となり、その放電路数は4本以上と多く出現する場合も観測された。人体電位を高くし、 $\pm 4\text{kV}$ になると、単数路放電が現れ、複数路放電の放電路数も2-3本程度の場合がほとんどである。 $\pm 6\text{kV}$ では複数路放電に比べ単数路放電の出現率が高くなる。 $\pm 8\text{kV}$ になると単数路放電のみが出現する。

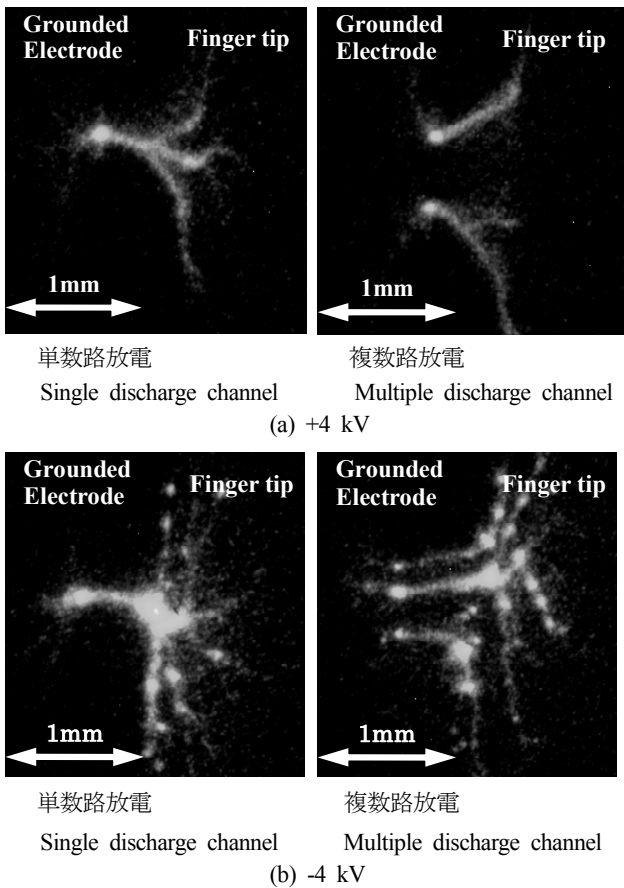


図9 放電路写真
Fig. 9 Photographs of discharge channel.

図10(b)に $\pm 4\text{kV}$ における接地電極の曲率半径と単数路放電および複数路放電の出現率の関係を示す。正放電、負放電ともに、接地電極の曲率半径が指先の曲率半径 (15 mm) に近いほど単数路放電の出現率が高く、逆に離れているほど複数路放電の出現率が高い。

図10(c)に、各放電電流波形における単数路放電と複数路放電の出現率を示す。なお、図10(c)は、本研究における全ての測定結果を用いて算出した。正放電、負放電ともに、波形Aの場合は全て複数路放電となり、波形Bにおいても複数路放電の出現率は80%以上であった。しかし、波形Cの複数路出現率は30%を下回った。正放電の波形DおよびE、負放電の波形Eでは全て単数路放電であった。

3.4 接地電極形状と放電開始ギャップ長の関係

図11に、人体電位および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。正放電では、波形Aのみ出現する+2kVの場合、平均放電開始ギャップ長は接地電極の変化に対しほぼ一定の値を示した。接地電極の曲率半径により波形形状が変化する正放電の+4kV以上および負放電では、接地電極と指先の曲率半径が近くなるほど、放電開始ギャップ長は長くなる。

表1に、+6kVおよび-6kVの場合の、各放電電流波形形状における平均放電開始ギャップ長を示す。波形Bの放電開始

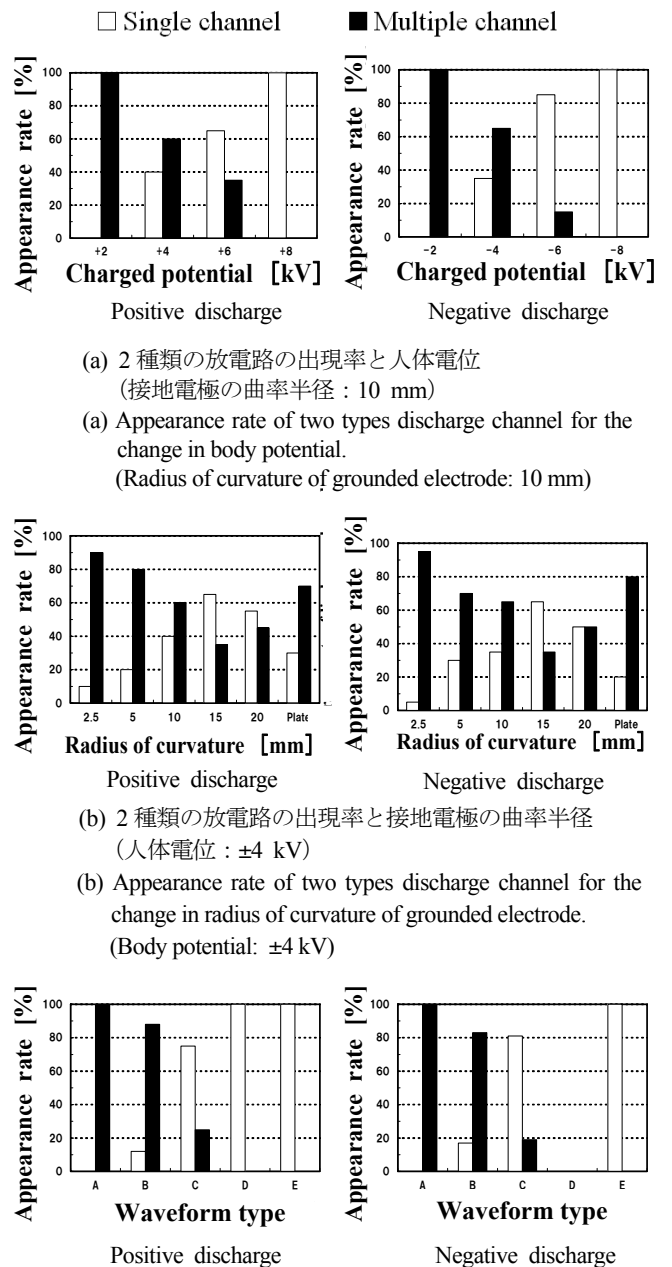


図10 複数路放電と単数路放電の出現率
Fig. 10 Appearance rate of single discharge channel and multiple discharge channels.

ギャップ長が最も短く、次いで波形C、波形D、波形Eの順で長くなるのが分かる。

3.5 接地電極形状と初期放電率の関係

表2に、人体電位および各放電電流波形形状における平均初期放電率を示す。接地電極を指先へ接近させる静電気放電では、最初の火花放電の後に、さらにギャップ間が近づくと、次の火花放電が起きるが、我々は最初の火花放電のみを対象として測定を行っている。初期放電率は、図5、6で例示した放電電流波形から求めた放電電荷量を人体の帯電電量で除した

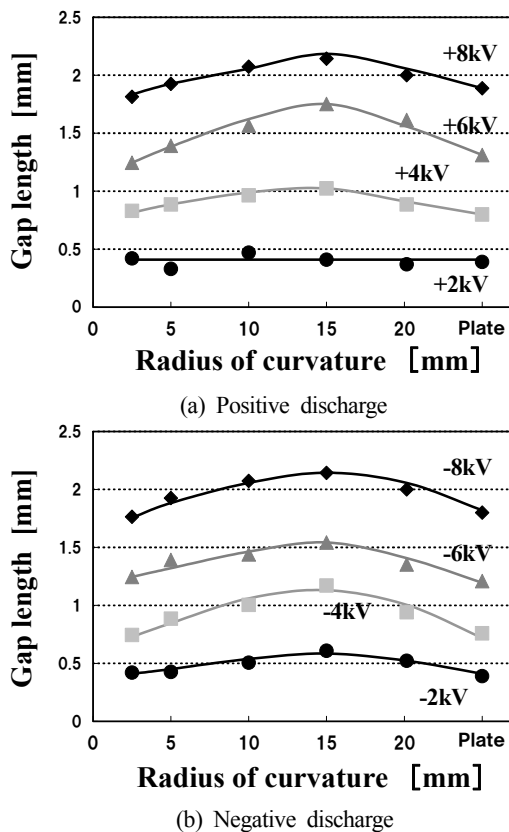


図11 接地電極曲率半径と平均放電開始ギャップ長の関係
Fig. 11 Relationship between average gap length of discharge inception and the radius of curvature of grounded electrode.

表1 放電電流波形と平均放電開始ギャップ長の関係
Table 1 Relationship between waveforms of discharge current and average gap length of discharge inception.

Waveforms of discharge current	Average gap length of discharge inception [mm]	
	+ 6kV	- 6kV
A	×	×
B	1.102	1.093
C	1.543	1.615
D	1.721	×
E	1.991	1.839

表2 放電電流波形と初期放電率の関係

Table 2 Relationship between waveforms of discharge current and average initial discharge ratio.

Waveforms of discharge current	Average initial discharge ratio [%]							
	+2kV	-2kV	+4kV	-4kV	+6kV	-6kV	+8kV	-8kV
A	16.1	16.9	×	×	×	×	×	×
B	×	19.1	49.9	51.2	59.9	63.1	61.8	64.8
C	×	×	46.1	48.3	56.7	60.3	58.2	61.2
D	×	×	53.2	×	62.4	×	64.9	×
E	×	×	×	×	67.7	66.5	68.6	67.1

値を百分率で表した値である⁷⁾。表2より、初期放電率は人体電位が高いほど高くなる傾向がある。人体電位 ± 2 kVでは初期放電率は20%を下回り、 -2 kVの場合には、波形Aの方が波形Bに比べ2-3%程度さらに低い値となった。 ± 4 kV以上になると初期放電率は45%を超え、 ± 8 kVになると65%程度になる。また、人体電位が高く、指先と接地電極の曲率半径が近いほど多く出現する波形Eが最も初期放電率が高く、次いで波形Dが高い。なお、2つのピークをもつ波形Bおよび波形Cの比較では、第1ピークがより高く鋭い波形Bの方が、波形Cに比べて初期放電率が3-5%程度高くなった。

4. 考察

4.1 放電開始ギャップ長

我々はすでに、高圧側の電極が導電性ペーストを塗付した指先や15 mmの金属半球電極であると、接地電極の曲率半径を2.5-20 mmの半球電極および平板の範囲で変化させた場合でも、放電開始ギャップ長は大きく変化せず複数放電も出現しないことを報告している⁵⁾。しかし、人体の指先からの放電では、接地電極の曲率半径が2.5-20 mmの半球電極および平板電極において、曲率半径によって放電開始ギャップ長が変化し、複数放電も出現するなど、金属間放電とは異なる特性が現れた。なお、今回の実験ではコロナ放電は発生しなかった。

この結果について、我々は以下のように推測している。電極の曲率半径が指先と異なってくると、ギャップ間はみかけ上、不平等電界となるが、一方の電極が指先の場合、指先の皮膚抵抗が高いため電荷が移動し難く、導体どうしのような電界の集中が起こらないため、ギャップが短くならないと衝突電離を起こすのに必要な電界を得ることができない。さらに、不平等電界では、衝突電離に必要な電界領域が狭くなることも一因と考えられる。その一例として、人指し指よりも曲率半径の小さい小指からの放電では、接地電極の曲率半径が同じであるにもかかわらず、人指し指のときよりも放電開始ギャップ長が短くなるという結果が得られている。

また、ギャップ間隔が狭くなると、指先表面の電界が強められ、指先表面の凹凸部分や汗腺等の比較的電荷が集中しやすい部分に複数路放電が発生するものと考えられる。

ここで、 $\pm 4\text{kV}$ と $\pm 6\text{kV}$ を例にとり、人体電位を放電開始ギャップ長で除して、みかけの放電開始電界強度と放電電流波形形状との関係を調査すると、 50kV/cm 付近で波形 B、 40kV/cm 付近で波形 C、 35kV/cm 付近で波形 D、 30kV/cm 付近で波形 E となった。また、 45kV/cm 以上のときに複数路放電が出現した。この傾向は、金属間放電において、放電開始電界強度が高いほど最初のピーク電流値が高く鋭くなり、その放電電流波形形状は放電開始電界強度に依存するという過去の報告と一致する⁸⁾。したがって、指先からの静電気放電においても、放電開始電界強度が高いほど最初のピーク電流値が高く鋭くなり、放電電流波形の形状も放電開始電界強度に依存するものと考えられる。

4.2 放電電流波形のピーク数

放電電流波形に複数ピークが現れる現象は以下のように考えられる。人体は高抵抗により電源から切り離されているので、放電により電荷が放出されると、皮膚抵抗による電圧降下でギャップ間電圧が低下し、これに伴い放電電流が低下する。そして放電電流が低下すると再びギャップ間電圧が増加し、2 番目以降のピークが現れる⁹⁾。1 ピーク波形は $\pm 2\text{kV}$ のような低電位のときに出現する。このように人体電位が低く充電電荷量が少ないときには、放電開始電界強度が比較的高いため発生する大きな 1 ピーク目で充電電荷量の大半が流れ、ギャップ間電圧が低下してしまい、以降のピークを出現させることができない。逆に、人体電位が高いと、放電開始ギャップ長が長く放電開始電界強度が比較的低くなるため、最初のピーク電流値が小さい。低い放電開始電界強度と多く残留する人体の充電電荷によりギャップ間電圧の低下と増加を繰り返し、複数ピークを発生させる。

複数路放電は、単数路放電に比べ放電開始ギャップ長が短く、なおかつ人体電位が低いときに出現しやすいため、波形 A の 1 ピーク波形や波形 B のような 1 ピーク目の高い 2 ピーク波形になる。

4.3 初期放電率

2 ピーク波形である波形 B、C においては、複数路放電の出現しやすい波形 B の方が、ほぼ単数路放電となる波形 C に比べ初期放電率が高い。これは、複数路の方が単数路に比べ、一度に流せる電流が大きくなるためであると考えられる。

人体電位が $\pm 2\text{kV}$ のときの初期放電率が 20% 以下と極めて

低いのは、前項でも論じたように放電開始ギャップ長が短く放電開始電界強度が高いため、1 ピーク目で充電電荷量の大半が流れ、ギャップ間電圧が低下した結果、残留電荷の割合が大きくなるためと考えられる。

5. まとめ

人体の帯電電位および接地電極の形状が、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のようになる。

- (1) 正放電および負放電ともに、人体電位が高く、接地電極の曲率半径が指先に近いほど、複数のピークを持つ波形が出現する。この場合には、放電開始ギャップ長が長くなる傾向がある。
- (2) 正放電および負放電ともに、人体電位が低く、接地電極の曲率半径が指先と異なるほど複数路放電が出現する。この場合、1 つ目のピークが高く鋭い放電電流波形が出現する。
- (3) 人体電位が高く、接地電極の曲率半径と指先が近い場合に頻出する波形形状では、初期放電率が高くなる。
- (4) 人体電位が等しい同じ 2 ピーク波形の場合、単数路放電よりも複数路放電の方が、放電電荷量が大きく、1 ピーク目の立ち上がりが高く鋭い放電電流波形となる。
- (5) 人体電位が $\pm 2\text{kV}$ では、初期放電率が 20% 以下と低くなる。

参考文献

- 1) A.G. Bailey, J.M. Smallwood and H. Tomita : Inst. Phys. Conf. Ser., No.118 : Section 2 (1991) 101
- 2) 近藤崇文, 平田晃正, 藤原 修, 石上 忍 : 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ, 環境電磁工学, **105**, 454 (2003) 51
- 3) 静電気学会 : 静電気ハンドブック, pp.252, オーム社, (1998)
- 4) 片岡忠史, 増井典明 : 静電気学会春期講演会論文集, p.29 (2002)
- 5) 吉原 宏, 吉田孝博, 増井典明 : 静電気学会講演論文集, p. 229 (2008)
- 6) 高澤裕之, 吉田孝博, 増井典明 : 静電気学会講演論文集, p. 45 (2006)
- 7) 増井典明, 村上晋也, 谷辰夫 : 静電気学会誌, **23** (1999) 191
- 8) 隅田 淳, 吉田孝博, 増井典明 : 静電気学会講演論文集, p. 205 (2007)
- 9) 片岡忠史, 澤井丈徳, 増井典明 : 静電気学会誌, **28** (2004) 310