

論 文

帯電した人体からの放電電流波形

片岡忠史, 澤井丈徳, 増井典明^{*1}

(2004年3月17日受付; 2004年10月4日受理)

Waveforms of Discharge Current from Charged Human Body

Tadafumi KATAOKA, Takenori SAWAI and Noriaki MASUI^{*1}

(Received March 17, 2004; Accepted October 4, 2004)

An experimental investigation is presented on waveforms of discharge current from the human body charged to $\leq \pm 4\text{kV}$. An electrical discharge occurs between an index fingertip and the grounded spherical electrode approaching at 0.4mm/s. When the body potential is $\pm 4\text{kV}$, positive and negative waveforms of discharge current show two peaks. In the case of waveforms for -4kV , the second peaks are higher than the first peaks, whereas for $+4\text{kV}$, most of the first peaks are higher than the second peaks. With lowering the body potential, the second peaks of positive and negative waveforms lower and waveforms for $\pm 2\text{kV}$ are almost similar. The relationship between the waveform of discharge current and the skin resistance of the fingertip is also discussed. Intervals of the first and the second peaks of the waveforms shorten with decreasing the skin resistance. In the case of negative discharge, these intervals are shorter than the case of positive discharge. Positive and negative waveforms of discharge current from a 50 mm^2 silver painted area on the surface of an index fingertip are similar to the waveforms of discharge current from the charged metal spheres.

1. はじめに

半導体デバイスの細微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起き、問題になっている。帯電した人体からの静電気放電は、半導体デバイスの破壊にとどまらず、可燃性ガスや浮遊粉塵の引火爆発の原因の一つにもなっている。このように非常に大きな災害の引き金にもなりうる帯電した人体からの放電現象についてはいくつかの報告があるが、未だ現象の解明には至っていないようである^{1~5)}。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、人体帯電モデル(HBM: Human body model)がある。HBMは、帯電した人体を容量 100 pF のコンデンサで置き換え、コンデンサに充電した電荷を、 $1.5\text{ k}\Omega$ の抵抗を介して放電させることにより、人体からの放電を再現している。このとき、帯電極性は考慮していない。これまで我々が行ってきた実験では、帯電した人体の指先からの放電電流波形には個人差があり、さらに、同一の被験者でもその放電電流波形には、帯電極性による違いが明確に現れている。また、指先からの放電の

キーワード: ESD, 帯電した人体, 放電電流波形, 皮膚抵抗

* 東京理科大学工学部電気工学科 (162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3) Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601, Japan.

¹ masui@ee.kagu.tus.ac.jp

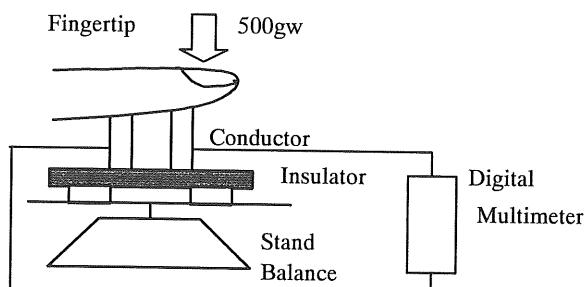


図1 皮膚抵抗の測定法の概略.
Fig.1 Measurement system of skin resistance.

場合、放電電流のピーク値は、人体の帯電電圧と同じ電圧を、HBMのコンデンサに充電して放電させたときに得られるピーク値よりも小さな値になる。

帯電した人体からの放電では、帯電した絶縁物に接地導体を接近させるときに発生する放電と同様、人体(指先あるいは手に持った金属)が接地導体に触れるまでに複数回の放電が発生する⁶⁾。我々が通常知覚するのは、このとき発生する最初の放電である。静電気放電(ESD)が原因で発生する障害は、主としてこの最初の放電によるものであると言われている⁷⁾。このとき放出される電荷量は、人体の総電荷量より小さい³⁾。このため、実際に帯電した人体から得られる放電電流のピーク値および放電のエネルギー

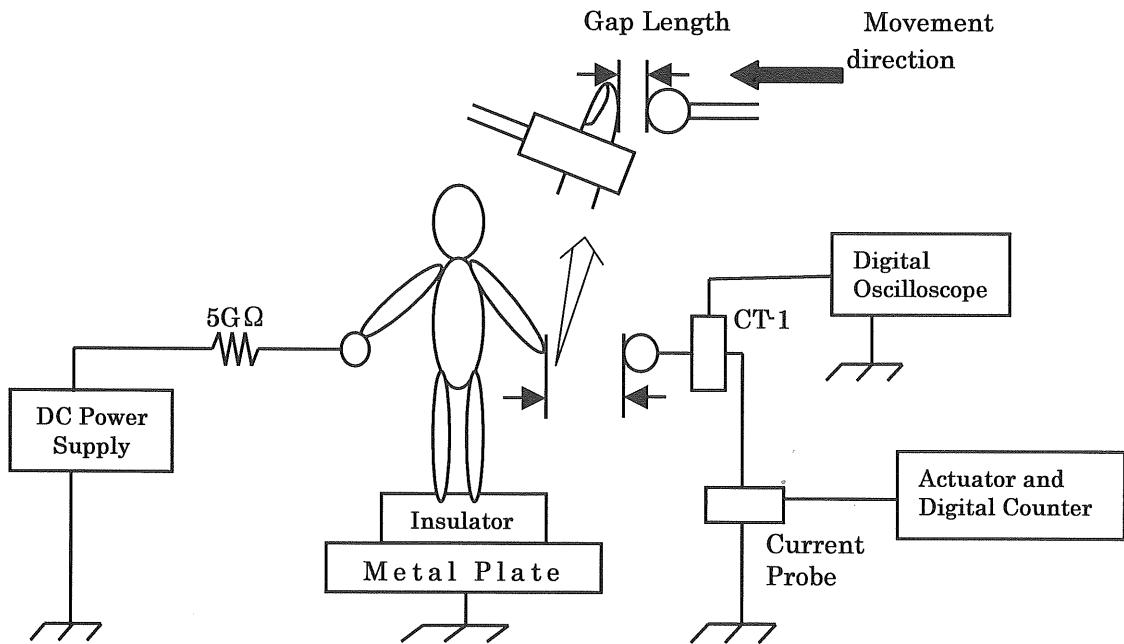


図 2 測定装置の概略.

Fig.2 Schematic view of apparatus for experiment.

等は、HBM に比べ小さくなる。

HBM および静電気障害防止の立場からは、基準は厳しくしておいた方が安全である。しかし、帯電した人体からの放電現象を整理することは、実際に発生する ESD 障害の対策（電子デバイスへの直接および間接 ESD も含めて）を考える上で重要なことであると考える。

本論文は、指先と接地金属間の放電において、最初に発生する放電電流波形と、人体の帶電極性との関係を実験的に検討した結果についての報告である。さらに、指先の皮膚抵抗の大きさと、放電電流波形および放電電流のピーク値との関係について検討した結果についても報告する。

2. 実験方法

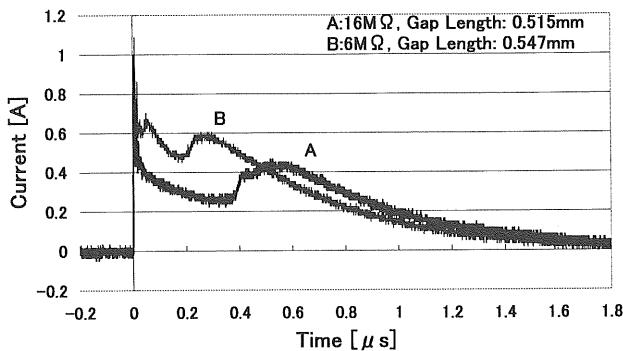
2.1 指先の皮膚抵抗の測定

図 1 に、今回用いた皮膚抵抗の測定法の概略を示す。間隔 1cm で配置した直径 3mm、絶縁板からの高さ 1.85cm の導体棒を、500g/cm² の力で押しつけたときの抵抗値を皮膚抵抗とした。これ以下の力では、測定値が安定しないことから、過去の報告にあるような接触圧 0.2~0.3kg/cm² よりも大きな接触圧で測定した⁸⁾。抵抗の測定には、デジタルマルチメータ（7532-01；YOKOGAWA、電源電圧 3V、最大 30MΩまで測定可）を使用した。各被験者ともデジタルマルチメータの指示値が安定したときの値を 10 回測定し、

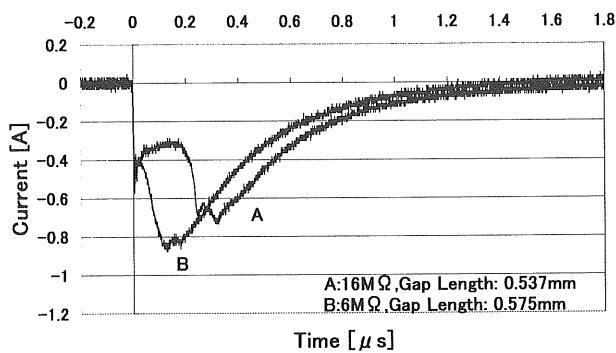
それらの平均値の MΩ未満を四捨五入した値を皮膚抵抗値とした。被験者には、皮膚抵抗に少なくとも数 MΩの差を持つ者を選んだ。本測定における、被験者(4 名)の指先の皮膚抵抗および静電容量は、それぞれ 6MΩ および 226pF, 8 MΩ および 246pF, 12 MΩ および 248pF, 16 MΩ および 238pF であった。

2.2 放電電流波形及び放電ギャップ長の測定

図 2 に、放電電流波形の測定系の概略を示す。接地導体板に厚さ 10mm のアクリル板と厚さ 2mm のテフロン板 (1m×1m) を重ね、その上に裸足で立った人体に、5GΩの抵抗を介して電圧(±2kV~±4kV)を印加した。このとき、被験者は充電用電極(直径 16mm の真鍮球)を手のひらで握り、10 ~15 秒間充電した。テフロン棒と緩衝材によって指先（人差し指）を固定した。指先は測定毎にアルコール洗浄し、乾燥させた後測定を行った。テフロン棒は測定前に除電器により除電した。被験者は、放電直前(2~3 秒前)に充電用電極を放すが、放電までの間の電荷のリークはほとんどなかった。固定された指先に、接地導体球(直径 16mm の真鍮球)を 0.4mm/s の速さで近づけ放電させる。放電で発生したパルス電流をトリガ信号として、ギャップ長を計測しているカウンタの読みを止めると同時に、微動台とモータを接続しているクラッチを切る。停止の信号



(a) Charged voltage = +4kV.



(b) Charged voltage = -4kV.

図3 指先からの放電電流波形

Fig.3 Waveforms of discharge current from fingertip.

が入ってから、カウンタ（最小読み： $1\mu\text{m}$ ）の読みが停止するまでに 1ms を要するが、この間に導体球が進む距離は $0.4\mu\text{m}$ でほとんど無視できる。指先と導体球が接触したときのカウンタの指示を基準（零点）にして、ギャップ間隔を 2.5mm にして導体球を接近させた。測定毎にこの調整を行った。放電電流波形は、電流プローブ(CT-1: ソニーテクトロニクス)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, 500MHz, 5GS/s)で観測した。実験は、相対湿度 $42 \pm 3\%$ 、温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ の雰囲気中で行った。人体の静電容量は、過去に報告した方法を用いて測定した^{3, 6)}。

3. 結果及び考察

3.1 帯電極性と放電電流波形の関係

図3(a)および図3(b)の波形Aに、指先の皮膚抵抗が $16\text{ M}\Omega$ の被験者がそれぞれ $+4\text{kV}$ および -4kV に帯電したときの放電電流波形を示す。金属球間の放電で、印加電圧が一定のとき、放電電流のピーク値が放電開始ギャップ長の増加とともに減少し、電流波形も一つのピークから二つのピークをもつようになることが判明している⁹⁾。この結果を踏まえ、ギャップ長がほぼ等しいときの電流波形を選ん

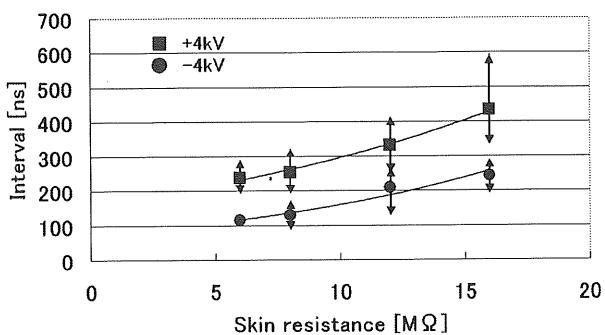


図4 最初のピークと2番目のピークの時間間隔と皮膚抵抗の関係

Fig.4 Intervals of the first peak and the second peak for each skin resistance.

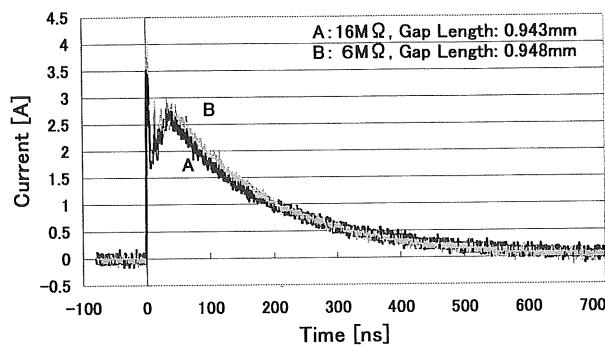
表1 最初のピークと2番目のピークとの間の時間間隔の平均値（帯電電圧： $\pm 4\text{kV}$ ）Table1 Mean values of intervals of the first and the second peak of discharge current. Charged voltage = $\pm 4\text{kV}$

Skin Resistance	$6\text{ M}\Omega$	$8\text{ M}\Omega$	$12\text{ M}\Omega$	$16\text{ M}\Omega$
Positive Discharge	237ns	254ns	331ns	435ns
Negative Discharge	115ns	130ns	208ns	244ns

だ。正放電および負放電ともに大きく分けると、二つのピークを持つ放電電流波形を示しているが、正放電では二番目に現れるピークが最初のピークよりも低くなる傾向があり、負放電では最初のピークの後にそれよりも大きなピークが現れる。

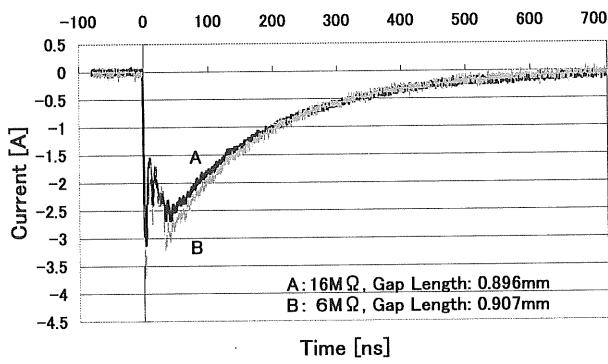
人体は電源から隔離されているので、放電が起り電流が流れると、人体抵抗（皮膚抵抗）での電圧降下によりギャップ間電圧が低下し、放電電流が低下する。放電電流が低下すると、再びギャップ間電圧が増加し、二番目のピークが現れる。もし、金属球間の放電と同じ現象が起きているとすると、二番目のピークまでの間ではグロー放電が発生し、その後アーカ放電に至りギャップ間を短絡すると考えられる¹⁰⁾。このとき、人体は電源から隔離されているため、人体の静電容量に蓄えられた電荷は減衰するのみであるので、放電電流は図のように減衰する。

負放電の場合は、電子雪崩の移動速度 ($2 \times 10^7 \text{ cm/s}$) と正イオンの移動速度 ($2 \times 10^5 \text{ cm/s}$) の違いにより¹¹⁾、放電電流の最初のピークに対応する電子雪崩がギャップ間を横切った後、指先近傍に取り残された正イオンによって電界が強められるので、指先の皮膚抵抗が低められ、二番目の



(a) Charged voltage = +4kV.

A : Skin resistance=16MΩ, B : Skin resistance=6MΩ.



(b) Charged voltage = -4kV.

A : Skin resistance=16MΩ, B : Skin resistance=6MΩ

図 5 導電性塗料を塗布した指先からの放電電流波形

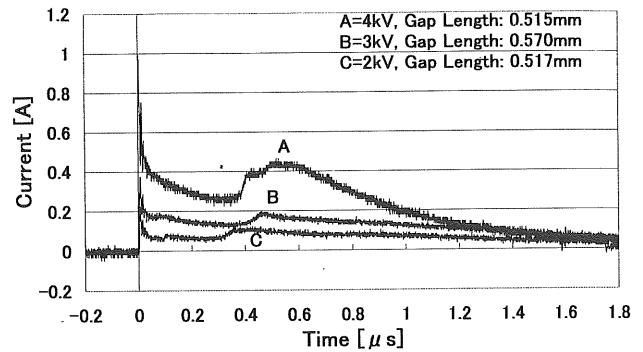
Fig.5 Waveforms of discharge current from conductive area on the fingertip.

ピークが早く現れる現象を示したものと考えられる。また、皮膚抵抗が低くなることにより、二番目のピーク値も正放電の場合に比べ、大きくなったものと考えられる。

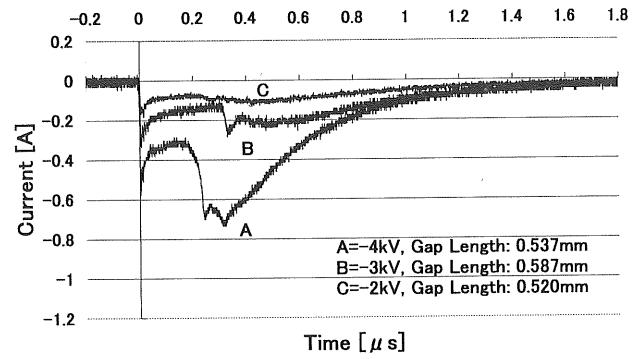
3.2 指先の皮膚抵抗と放電電流波形の関係

図 3(a)および(b)の波形 B に、指先の皮膚抵抗が $6\text{M}\Omega$ の被験者がそれぞれ $+4\text{kV}$ および -4kV に帯電したときの放電電流波形を示す。波形 A と比べると、正放電および負放電ともに皮膚抵抗の低い方が、二番目のピークが早く現れている。この現象をさらに詳しく調べる為に、被験者の数を増やして同様の実験を行った。図 4 に、放電電流波形の立ち上がりから、二番目のピークが現れるまでの時間と皮膚抵抗の関係を示す。被験者の皮膚抵抗は、 $6\text{M}\Omega$, $8\text{M}\Omega$, $12\text{M}\Omega$, $16\text{M}\Omega$ である。図 4 に示した時間間隔の平均値を表 1 に示す。正放電及び負放電ともに皮膚抵抗が低くなるとともに、二番目のピークが現れるまでの時間間隔が短くなることがわかる。

皮膚抵抗の低下とともに、二番目のピークが早く現れる



(a) A : Charged voltage = +4kV, B : Charged voltage = +3kV, C : Charged voltage = +2kV.



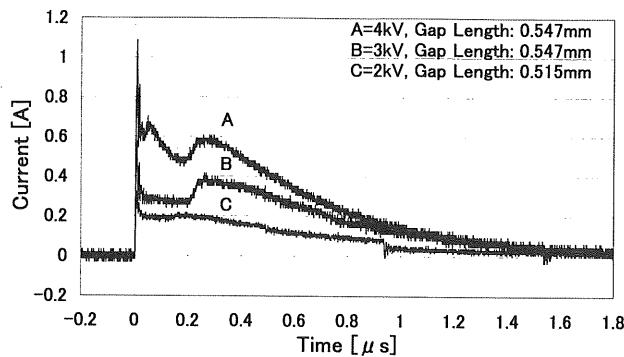
(b) A : Charged voltage = -4kV, B : Charged voltage = -3kV, C : Charged voltage = -2kV.

図 6 指先からの放電電流波形（皮膚抵抗 $16\text{M}\Omega$ ）。

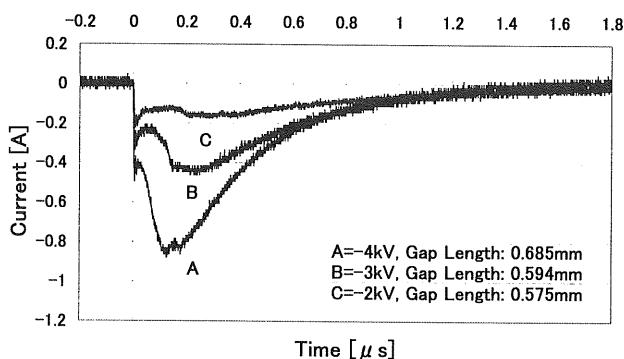
Fig.6 Waveforms of discharge current from fingertip ; skin resistance=16MΩ.

現象は、3.1 で説明したように、放電開始後、放電電流が流れることによるギャップ間電圧の減少から、増加までの時間が短くなることによるものである。また、負放電の方が時間間隔が短くなっている理由は、先に述べたように、正イオンによって指先付近の電界が強められ、皮膚抵抗が低下することによるものと考えられる。

皮膚抵抗と放電電流波形の関係をさらに詳しく検討する為に、皮膚抵抗 $6\text{M}\Omega$ と $16\text{M}\Omega$ の被験者の指先に導電性塗料(銀ペースト)を塗布し、被験者固有の皮膚抵抗の影響を取り除いた場合の放電電流波形を測定した。塗布した面積は約 50mm^2 で円に近い形にした。図 5(a)および(b)に、それぞれ帯電電圧が $+4\text{kV}$ 、および -4kV のときの各被験者の放電電流波形を示す。導電性塗料を塗布した指先からの放電では、正放電及び負放電で、ピーク値に多少の差は見られるが、金属球間の放電のときのように、正放電および負放電でほぼ同じ形をしている⁹⁾。また、二番目のピークが最初のピークのすぐ後に現れている。



(a) A : Charged voltage = +4kV, B : Charged voltage = +3kV, C : Charged voltage = +2kV.



(b) A:Charged voltage = -4kV, B:Charged voltage = -3kV
C : Charged voltage = -2kV

図7 指先からの放電電流波形（皮膚抵抗 $6\text{ M}\Omega$ ）。

Fig.7 Waveforms of discharge current from fingertip ; skin resistance= $6\text{ M}\Omega$.

導電性塗料塗布時の放電では、塗料を塗布していない指先からの放電電流波形とは異なり、放電部分が導電性を持っているため、金属球同士の放電電流波形に近づいたものとみなすことができる。帯電電圧 $\pm 2\text{kV}$ および -2kV の場合も、同様の結果が得られた。これらの結果から、指先からの放電電流波形の二番目のピークは、帯電極性により異なった形を示すが、皮膚抵抗の低下とともに、帯電極性に依存しなくなると結論できる。

3.3 帯電電圧と放電電流波形の関係

帯電電圧と放電電流波形の関係を調べる為に、人体の帯電電圧を $\pm 4\text{kV}$ に加え、 $\pm 2\text{kV}$ 、 $\pm 3\text{kV}$ と変化させ実験を行った。図6(a)、(b)および図7(a)、(b)の波形B、Cにそれぞれ指先の皮膚抵抗が $16\text{ M}\Omega$ および $6\text{ M}\Omega$ の被験者の、 $\pm 3\text{kV}$ および $\pm 2\text{kV}$ のときの放電電流波形を示す。比較の為、帯電電圧 $\pm 4\text{kV}$ の場合の放電電流波形も波形Aに示す。

帯電電圧 $\pm 3\text{kV}$ の場合、 $\pm 4\text{kV}$ の場合と同様、皮膚抵抗の小さい被験者($6\text{ M}\Omega$)の方が、放電電流の二番目のピーク

が現れるまでの時間間隔が短くなることがわかる。また、正放電および負放電ともに電圧の低下とともに、最初のピークと二番目のピークの高さに差がなくなる傾向を示している。帯電電圧 $\pm 2\text{kV}$ のときには、 $\pm 3\text{kV}$ 、 $\pm 4\text{kV}$ のときのような二番目のピークがほとんど認められなくなり、正および負の放電電流波形はほぼ同じ形を示すようになる。 $\pm 2\text{kV}$ のとき、正放電および負放電ともに二番目のピークがはっきりと認められない理由として、指先の皮膚抵抗が大きいこと、および人体の電位が低いことから、ギャップ間の電圧が放電電流を増加させるほどには高くならないためと考えられる。

人体に刺激が与えられると、発汗により一時に皮膚抵抗が下がり（皮膚電気反射：Galvanic Skin Reflex），この現象が放電に影響を及ぼすとする報告がある¹²⁾。しかし、皮膚電気刺激に対する人体の反応時間は100ms以上あり¹³⁾、静電気放電は数100nsから数 μs の短時間で終了することから、放電時の電気的刺激による皮膚抵抗の変化はないものと考えられる。今回の測定における、人体を帯電させる際の充電電流密度（最大 4kV 、充電抵抗： $5\text{ G}\Omega$ 、充電用電極；直径 16 mm ）は最大約 $0.4\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ となり、電気的刺激は小さいものと考えられる。

なお、3.1でも述べたように、金属球間の放電で、放電電流波形は放電開始ギャップ長に依存し、印加電圧が変化すると、この依存性も変わることがわかっている⁹⁾。しかし、今回の測定範囲では、放電開始ギャップ長のばらつく範囲が狭く、帯電電圧が変わっても、放電電流波形の放電開始ギャップ長への依存性は明確ではなかった。したがって、帯電電圧と放電電流波形の関係についても、ギャップ長のほぼ等しい波形で比較検討した。

人体からの放電現象に関する要因は多数あり、特に被験者による影響が大きいと考えられる。今回は4人の被験者を対象に検討してきたが、今後はさらに被験者の数を増やして同様の測定を行い、今回得られた結果の再現性について詳細な検討を行う予定である。

4. 結 論

今回の測定から、正および負に帯電した人体からの放電電流波形について、以下のような結論が得られた。

(1) 正および負に帯電した人体からの放電電流波形を比較すると、正放電では二番目に現れるピークが最初のピークよりも低くなる傾向を示し、負放電では最初のピークの後にこれより大きなピークが現れた。

(2) 放電電流波形の最初のピークと二番目に現れるピークとの間の時間間隔は、皮膚抵抗の低下とともに、短くなる

傾向を示した。

- (3) 指先の微小面積に導電性塗料を塗布した場合の放電電流波形では、正帯電および負帯電とともに、最初のピークの直後に二番目のピークが現れ、放電電流波形は金属球間の放電のように、帯電符号に関係なくほぼ同じ形になった。
(4) 放電電流波形の二番目に現れるピークは、帯電電圧の低下とともに減少し、帯電電圧±2kV の時には、双方ともにほぼ同じ電流波形を示した。

参考文献

- 1) 増井典明, 首藤克彦, 村田雄司, 葛西昭成: 静電気学会講演論文集, p.403 (1993)
- 2) 増井典明, 首藤克彦, 村田雄司, 葛西昭成: 静電気学会講演論文集, p.319 (1994)
- 3) 増井典明, 村上晋也, 谷辰夫: 静電気学会誌, 23 (1999) 191
- 4) A. G. Bailey, J. M. Smallwood and H. Tomita : *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 118: Section 2 (1991) 101
- 5) 小野雅司: 東京都立工業技術センター研究報告書, 第17号(1988) 43
- 6) 増井典明, 首藤克彦, 葛西昭和, 村田雄司: 電気学会電子回路研究会資料, ECT-95-19 (1995) 47
- 7) J. A. Cross: *Electrostatics (Principle, Problems and Applications)*, p.354, Adam Hilger, Bristol (1987)
- 8) 田中隆二, 市川健二: 電撃危険性と危険限界, 産業安全研究所資料, R118-SD-70-1, p18 (1970)
- 9) 増井典明, 藤原岳史, 海老沼康光, 新條達俊: 静電気学会誌, 27 (2003) 85
- 10) 森 為可: 電気学会雑誌, 75(1955)1156
- 11) 武田 進: 気体放電の基礎, p.76, 東京電機大学出版局 (1990)
- 12) 木村恵英, 岩崎楠也, 今村勝昭: *Sanyo Technical Rev.*, 17 (1985) 95
- 13) 猪飼道夫, 江橋慎四郎, 飯塚鉄夫, 高石昌広編: 体育科学事典, 第一法規出版 (1970)