

論 文

帯電した人体からの初期放電電荷量

増井典明*, 村上晋也*, 谷辰夫*

(1998年6月26日受付; 1999年6月25日受理)

Charge Released in the First Spark from the Charged Human Body

Noriaki MASUI,*,¹ Shinya MURAKAMI* and Tatsuo TANI*

(Received June 26, 1998; Accepted June 25, 1999)

When an electrical discharge occurs from the human body, a number of sparks are produced until a finger, or hand-held metal object comes into contact with an earthed electrode. An experimental investigation is presented of the relationship between the ratio of the charge released in the first spark to the total charge (initial discharge ratio) and the body potential ($\leq \pm 5,000$ V). The relationship between the initial discharge ratio and the conductive area of the discharge region on the subject is also investigated. The initial discharge ratio from the index fingertip, which has no conductive area, increases with increasing the body potential and is saturated at a ratio of approximately 65%. The initial discharge ratio from an 88 mm² silver painted conductive area on the surface of index fingertip increases from a ratio of approximately 60% to 80% with increasing the body potential. With a hand-held metal screwdriver approximately 80% of the total charge is released in the first spark, independent of the change in the initial body potential. Moreover, the relationship between the initial discharge ratio and the equivalent resistance estimated from the decaying portion of the discharge current is discussed.

1. はじめに

乾燥期には、衣服等の摩擦により人体は、容易に数キロボルトに帯電する。このときの人体の帯電電荷量は大きく、この電荷が一度に放出されれば、その放電エネルギーは大きなものとなる。たとえば人体が素足で、接地金属板上に置かれた厚さ 12 mm の絶縁板の上に立ったときの静電容量は、200 pF 前後になる¹⁾。容量 200 pF の人が 5,000 V に帯電したとき、全ての帯電電荷が一回で放電したとすると、そのときの放電エネルギーは 2.5 mJ となる。C-MOS-IC の絶縁破壊エネルギーは 1 μ s のパルス幅のサージで、100 μ J 程度といわれているので²⁾、この放電エネルギーがそのままデバイスに流入すれば、配線の溶断や接合の破壊を引き起こすことは十分に考えられる。

人体（指先）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ときに発生する放電と同様、人体（指先）が接地金属に触れるまでに複数回の放電が起こる^{1,3)}。我々が通常観測するのは、この最初の放電（以下初期放電とい

キーワード：静電気放電、人体帯電モデル、静電気障害

* 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, Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, 1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan

¹ masu3269@rs.kagu.sut.ac.jp

う）である。静電気放電（ESD）が原因で発生する障害は、主として初期放電によるものである⁴⁾。したがって、デバイスの破壊も含め、帯電した人体からの放電による障害の危険性を考える場合、その放電エネルギーは、人体の静電容量と放電前の帯電電位を用いて計算しても正確な値は得られない。

帯電した人体からの放電では、その放電電流波形および放電電荷量は、帯電電位はもちろん、指先からの放電か手に持った金属（工具等）からの放電かによっても大きく異なる^{1,5)}。帯電した人体からの初期放電で放出される電荷量（以下初期放電電荷量という）、すなわち放電エネルギーが、上記の条件によって変化することは十分に考えられる。

ここでは、初期放電電荷量と人体の帯電電位の関係、指先および手に持ったスクリュードライバーからの放電による初期放電電荷量について検討した結果を報告する。

2. 測定法

図 1 に人体からの放電電流波形の測定法の概略を示す。被験者は、接地金属板に重ねた厚さ 12 mm、面積 1 m² (1 m × 1 m) の絶縁板（厚さ 2 mm のテフロン板に厚さ 10 mm のアクリル板を重ねたもの）の上に裸足で立っている。このときの被験者の静電容量は 196 pF であった。被験者は、5,000 MΩ の抵抗を介して高電圧電源から充電される。帶

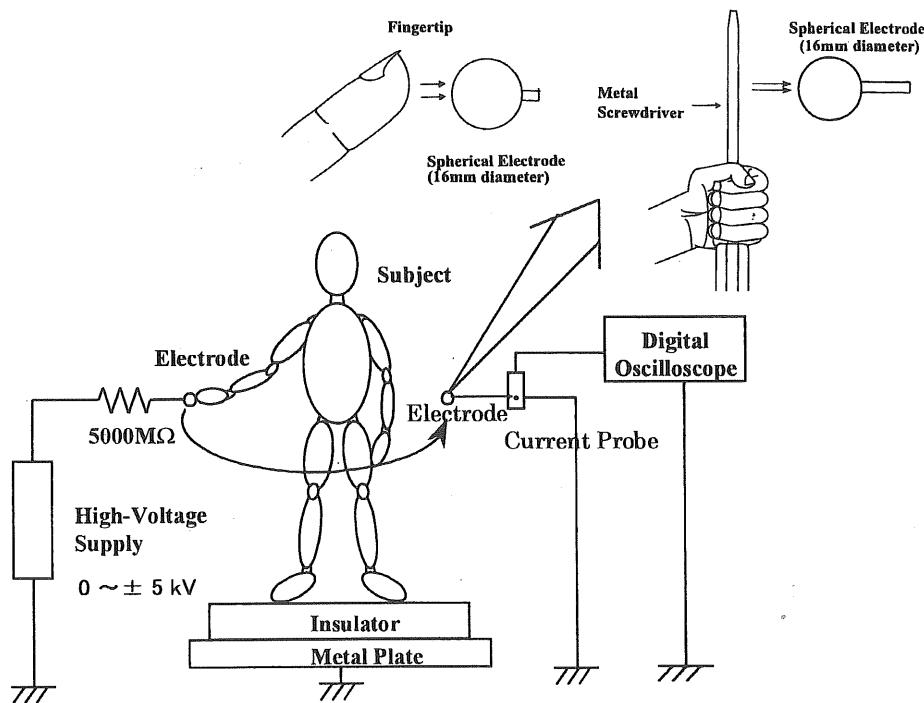


図 1 放電电流測定系の概略
Fig. 1 Measurement system of discharge current.

電電位は最高で $\pm 5,000$ Vとした。被験者の帶電量は、被験者の静電容量と帶電電位の積から求めた。図1に示すように、指先（人差し指）あるいは手に持った金属（市販されている金属製のスクリュードライバー）を接地電極（直径約16 mm (5/8 inch.) の金属球）に近づけ、放電させる。被験者は、スクリュードライバーの金属部分（直径6 mm の円柱部分）を握っている。放電电流波形はアース側に挿入した电流プローブ（ソニーテクトロニクス CT-1）で電圧波形に変換し、デジタルオシロスコープ（LeCroy 9361：300 MHz, 2.5 G サンプル/s）で測定し、放電電荷量は放電电流波形の積分値から求めた。

人体の静電容量は、人体を容量分圧器の一つのコンデンサと考え、絶縁板の上に裸足で立っている被験者に直列に接続した、容量既知のコンデンサを通して電圧を印加し、被験者の電位を誘導プローブと振動容量型電位計（TR8411；ADVANTECH）を用いて測定することによって求めた。測定環境は、温度24~26°C、相対湿度35~45%であった。温度および相対湿度の測定には、デジタル温湿度計HN-K (CHINO) を用いた。人体を帶電させてから放電するまでに要する時間は2~3秒であり、その間の電荷のリークはほとんど認められなかった。以下に示す測定値は、2回の測定の平均値である。

3. 結果および考察

3.1 放電电流波形

図2(a) および(b) に、+1,500 V に帶電した被験者の指

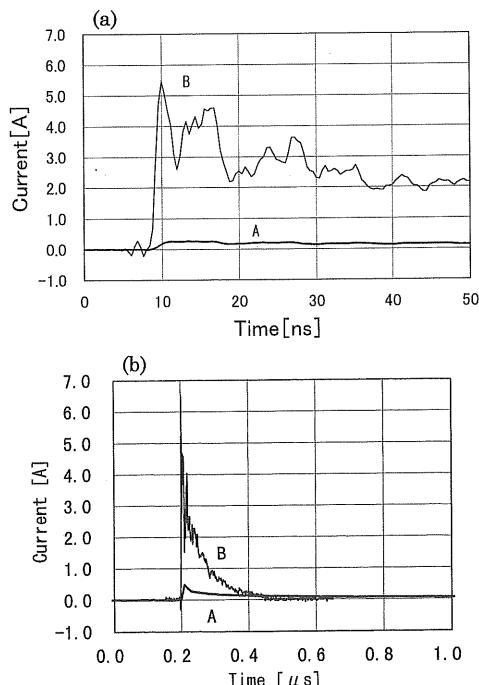


図 2 放電电流波形
(a) 10 ns/div, (b) 200 ns/div. 帯電電位 = +1,500 V,
A : 指先からの放電, B : 手に持った金属製のスクリュードライバーからの放電。
Fig. 2 Current waveform from a body charged to +1,500 V.
(a) 10 ns/div, (b) 200 ns/div. A : Discharge from index fingertip, B : Discharge from hand-held metal screwdriver.

先からの放電电流波形（図中A）および、スクリュードライバーからの放電电流波形（図中B）を示す。図2(a) は、放電电流の立ち上がり部分を、図2(b) は放電电流波形の

全体像を示す。負に帯電した場合も同様の特性を示した。
 $+1,500\text{ V}$ に帯電した被験者の放電電流波形の立ち上がり度は、指先およびスクリュードライバーからの放電の場合、それぞれ、 0.30 A/ns および 5.0 A/ns であった。立ち上がり度は、電流のピーク値を電流波形の立ち上がり開始からピーク値に達するまでの時間で割った値である。スクリュードライバーからの放電の方が立ち上がりが一桁程度急峻であった。ただし、これらの値は、測定系の周波数帯域幅で制限されているので、若干厳密性に欠けると考えられる。放電電流のピーク値は、指先から、およびスクリュードライバーからの放電の場合、それぞれ、 0.47 A および 5.7 A であった。スクリュードライバーからの放電の方が、ピーク値が一桁以上大きくなっている。帯電電位が変化してもこの傾向は変わらない。これらの結果は、多くの研究者により報告されている結果と同様の傾向を示している⁶⁾。

図 2 (a) および (b) に示した電流波形は、それぞれ指先およびスクリュードライバーが接地導体球に触れるまでに生じる放電の内、最初の放電によるものである。

3.2 初期放電電荷量

初回の放電で放出される電荷量（初期放電電荷量； Q_i ）と、人体の帯電電位（正帯電の場合）との関係を調べた結果を図 3 に示す。初期放電電荷量は、スクリュードライバーからの放電の場合、人体の帯電電位の上昇とともにほぼ直線的に増加する。指先からの放電の場合、帯電電位が同じであっても初期放電電荷量はスクリュードライバーからの放電の場合に比べ少なく、帯電電位が $2,000\text{ V}$ 以下になると、非線形な帯電電位依存性を示す。なお、負帯電の場合も、これと同様の特性がみられた。

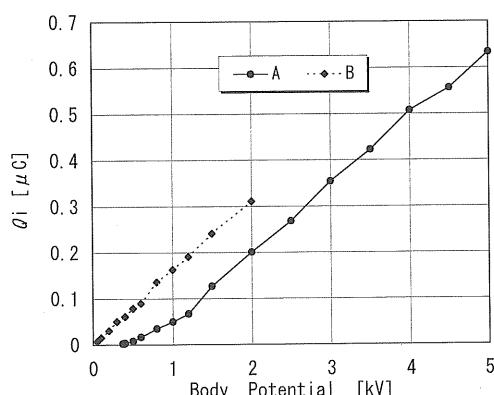


図 3 初期放電電荷量 (Q_i) と帯電電位の関係
A：指先からの放電，B：手に持った金属製のスクリュードライバーからの放電。

Fig. 3 The relation between initial released charge Q_i and the body potential.
A : Discharge from index fingertip, B : Discharge from hand-held metal screwdriver.

本研究の被験者の場合、指先からの放電では、帯電電位が正負ともに 370 V より低いときには、電流波形を測定することができなかった。被験者の帯電電位がパッシュエンの最小火花電圧 330 V ⁷⁾ より低いとき、電流パルス列が観測されたという報告があるが^{1,5)}、今回の被験者の場合、そのような電流パルス列は観測できなかった。これは、被験者の指先の抵抗（皮膚抵抗）の違いによるものと考えられる。一方、スクリュードライバーからの放電の場合、人体の帯電電位が正負ともに、パッシュエンの最小火花電圧 330 V より低い 50 V まで、電流波形を測定することができた。

指先とスクリュードライバーとでは表面の導電性が異なる。したがって、両者の表面にできる電界分布も異なり、その結果、このように放電電流波形および放電電流波形を測定できる最低帯電電位に違いが現れたものと考えられる。

平等電界中では、 330 V より高い電圧では気中放電で、これより低い電圧では接触あるいはそれに非常に近い放電となるといわれている⁵⁾。パッシュエンの法則は、導体電極間の平等電界中で成り立つ。図 1 に示されるような指先およびスクリュードライバーと球電極との間の放電で、火花放電が発生する最低電圧を 330 V とすることができるかどうかは確認していない。ただし、図 2 に示された結果は、被験者の観測から、気中放電によるものである。

最近の集積化技術の発展により、高密度化された集積回路は、数十 V の放電によって破壊されてしまうことがあるといわれている。この理由から、本研究では放電電流波形が測定できる最低電位まで測定範囲を広げている。ここでの「放電」は、気中放電および接触あるいはそれに非常に近い放電までを指している。

3.3 初期放電率 (Q_r)

初期放電電荷量と人体の帯電電位との関係は、初期放電率 (= 初期放電電荷量 / 帯電電荷量) と人体の帯電電位の関係をみるとさらに明らかになる。人体の帯電電荷量は、(帯電電位 / 196 pF) から求めた。

図 4 の曲線 A および曲線 C に、それぞれ指先およびスクリュードライバーからの放電による初期放電率の帯電電位依存性を示す。指先からの放電では、初期放電率は人体の帯電電位の上昇とともに飽和する傾向を示し、本研究における帯電電位の範囲内で、最大約 65% であった。一方、スクリュードライバーからの放電では、初期放電率は指先からの放電のときよりも大きな値を示し、帯電電位の上昇に対してほぼ一定の値（約 80%）を示した。これらの特性は、負帯電の場合にもみられた。

スクリュードライバーからの放電の場合、帯電電位が最高で $2,000\text{ V}$ になっている。これは、これ以上の電位では、

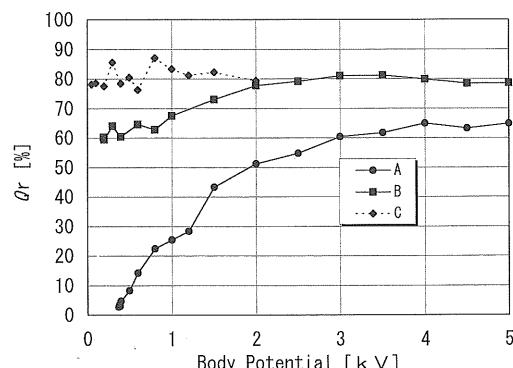


図 4 初期放電率 (Q_r) と帶電電位の関係 (正帶電)
A : 指先からの放電, B : 指先の 88 mm^2 の導電部分からの放電, C : 手に持った金属製のスクリュードライバーからの放電.

Fig. 4 The relation between the initial discharge ratio Q_r and the positive body potential.

A : Discharge from index fingertip, B : Discharge from the conductive area of 88 mm^2 on the surface of index fingertip, C : Discharge from hand-held metal screwdriver.

放電電流のピーク値がオシロスコープの測定限界 (最大 8 A) を超えてしまうことによる。この点については、被験者は異なるがアッテネータ (TEKTRONIX011-0069-02; ソニーテクトロニクス) を用い、入力レベルを 1/2 にすることにより、初期放電率が 2,000 V 以上でも帶電電位の上昇に対しほぼ一定の値を示すことを確認している。

初期放電率と放電に関与する部分 (放電部位) の導電性との関係をさらに詳しく検討するために、指先に導電性塗料 (銀ペースト) を塗ることにより、導電部分を形成し、この導電部分と接地電極との間で発生する放電による初期放電率と帶電電位の関係を調べた。結果を図 4 の曲線 B に示す。帶電電位の上昇とともに、初期放電率は約 60% から 80% まで増加する。このときの導電部分の面積は、 88 mm^2 であった。負帯電の場合にも、同様の結果が得られている。

手のひらとスクリュードライバーの金属部分との接触面積は、握っている部分の長さが約 90 mm、スクリュードライバーの金属部分の直径が 6 mm であることから、約 $1,700 \text{ mm}^2$ と見積もることができる。帶電電位 3,000 V 以下における初期放電率は、指先および掌等人体の放電に関与する部分が導電性を持つと、急激に増加することがわかる。このように、人体の表面積に比べ非常に小さな面積が導電性を持つことによって、初期放電率 (すなわち初期放電電荷量) が大きくなり、その帶電電位依存性が大きく異なることがわかった。原因の一つとして、放電部位の導電部分面積の変化による、放電形態の変化が考えられるが、確認はしていない。

導電部分の面積が 88 mm^2 のとき、帶電電位が 2,000 V 以上ではスクリュードライバーのときと同様に帶電電位の

変化に対し、ほぼ一定の値を示している。また、2,000 V 以下でもスクリュードライバーの場合に近い値を示している。さらに、導電部分を持たない指先から放電が起こる最低電位より低い帶電電位 190 V まで、電流波形が測定できた。

帶電電位 +2,000 V において、スクリュードライバーおよび 88 mm^2 の導電部分からの放電電流波形のピーク値は、それぞれ 6.8 A および 2.4 A であった。また、立ち下がり時間はそれぞれ 133 ns および 304 ns であった。このように、 88 mm^2 の導電部分からの放電の場合、スクリュードライバーからの放電に比べ、放電電流のピーク値は低いが立ち下がり時間が長くなり、その結果、帶電電位が 2,000 V のときの初期放電率 (初期放電電荷量) が、スクリュードライバーからの放電の場合とほぼ等しくなる。帶電電位が +5,000 V のときでも、 88 mm^2 の導電部分からの放電電流波形のピーク値および立ち下がり時間は、それぞれ 4.4 A および 371 ns であった。図 2 (b) からも推測できるように、帶電電位が同じ場合でも、放電部位の導電部分の面積 (スクリュードライバーも含む) が大きくなると、短時間に電荷が放出されるようになる。これらの特性は、負帯電の場合にもみられた。

導電部分の面積が 88 mm^2 のときには、放電電流のピーク値はオシロスコープの測定限界 (8 A) の範囲内にある。

3.4 放電時の人体の等価抵抗

初期放電率に関する放電時の電荷の移動に直接影響を持つのは、人体を含んだ放電回路の抵抗 (放電時の人体の等価抵抗ということにする) と考えられることから、放電時の人体等価抵抗 (R) と帶電電位の関係を検討した。

一般に、人体からの放電電流波形は、 R (抵抗), L (インダクタンス), C (コンデンサ) 直列回路の過渡現象で得られる非振動的な電流波形と類似の形をしている。放電回路のインダクタンス成分は主として電流波形の立ち上がり時間およびピーク値に影響を及ぼし、放電電流波形の減衰部分は、 CR 減衰曲線で近似できるとする報告がいくつかある^{5,8)}。

帶電体の抵抗を無視できるように、人体の代わりにコンデンサを用いて、このコンデンサに充電した電荷を、金属球間で放電させたときの放電電流波形を調べた。図 5 に電極配置の概略を示す。電極は直径約 16 mm (5/8 inch.) の真鍮球である。被験者の指先の曲率半径が、この値に近いことから、直径 16 mm の球を選んでいる。これらの電極は、テフロン棒で支持されている。放電は、接地金属球を電源側金属球に接近させることにより発生させた。放電電圧は +1,500 V、コンデンサの静電容量は浮遊容量も含め 110 pF (100 pF のセラミックコンデンサに回路の浮遊容量 10

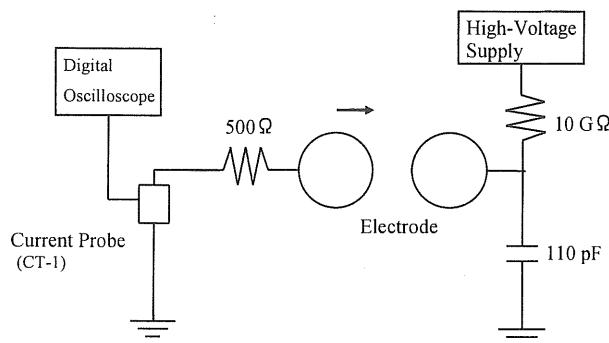


図 5 導体球間の放電電流の測定装置の概略図

Fig. 5 Schematic view of the apparatus for measuring the discharge current generated between spherical metal electrodes.

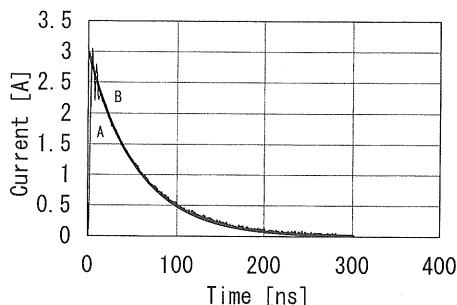


図 6 +1,500 V に帯電した 110 pF のコンデンサに接続された球電極と接地球電極間の放電電流波形（接地球電極には、直列に無誘導抵抗 500 Ω が接続されている）

A : 測定結果, B : CR 減衰曲線

Fig. 6 Current waveform of the spark between the spherical electrode connected to the capacitor of 110 pF charged up to +1,500 V and the earthed spherical electrode.

Non-inductive resistor, 500 Ω, is connected in series to the earthed electrode. A : Experimental data, B : Theoretical CR decaying curve.

pF の合計), 電極とアースとの間に挿入した抵抗 (無誘導抵抗) は 500 Ω である。静電容量の測定には, 浮遊容量も含め, LCR メータ (AG-4304 : ANDO, 1 kHz で測定) を使用した。放電電流の測定には, 図 1 と同様の, 電流プローブとデジタルオシロスコープを使用した。人体帯電モデル (HBM) では, 人体を静電容量 100~200 pF のコンデンサと 500~1,500 Ω の抵抗で置き換えていることから, 抵抗およびコンデンサの容量に上記の値を用いた。球電極は, 90 × 90 × 200 mm³ のアクリル製の箱に納め, 箱の中には, 乾燥剤 (シリカゲル) およびエアーフィルタを通過した空気流を 1 L/min の流量で注入し, 測定時の温度は 25°C, 相対湿度は 10% であった。温湿度の測定にはデジタル温湿度計 HN-K (CHINO) を用いた。図 6 の曲線 A に, 球電極間の放電電流波形を示す。図中の曲線 B は,

$$I = I_{\max} \exp(-t/CR) \quad (1)$$

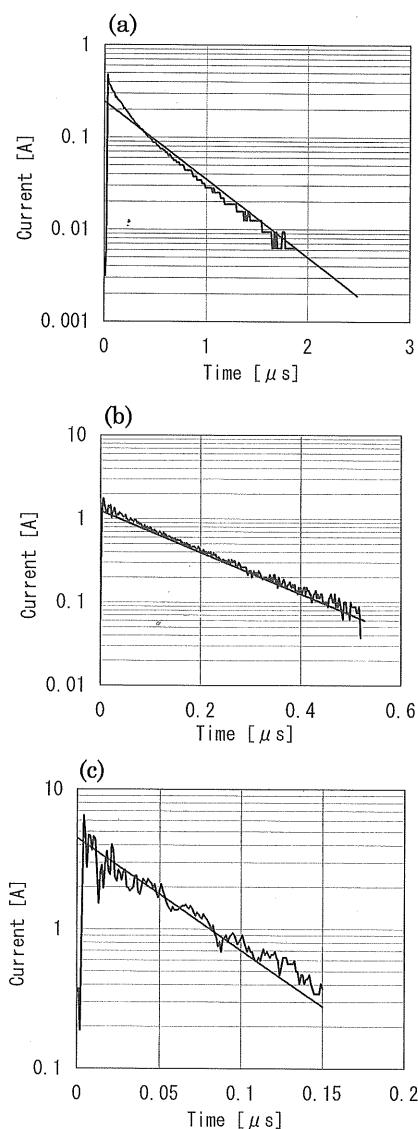


図 7 片対数グラフ上にプロットした, +1,500 V に帯電した人体からの放電電流波形 (直線は CR 減衰曲線を表している)

(a) 指先からの放電, (b) 指先の 88 mm² の導電部分からの放電, (c) 手に持った金属製のスクリュードライバーからの放電。

Fig. 7 Current waveforms of the spark plotted on log-linear graph (linear regression lines show CR decaying curves).

Body potential is +1,500 V. (a) Discharge from index fingertip, (b) Discharge from the conductive area of 88 mm² on the surface of index fingertip, (c) Discharge from hand-held metal screwdriver.

から求めた。ここで, $I_{\max} = 1,500/500 = 3 \text{ A}$, $CR = 110 \times 500 \times 10^{-12} = 5.5 \times 10^{-8} \text{ s}$ である。電流波形の減衰部分では測定結果とよく一致している。

以上の結果から, 電流波形の減衰部分を CR 減衰曲線で近似できることがわかる。この場合, 火花放電路および電流プローブが挿入されているアース回路の抵抗は, R (500 Ω) に対して充分に小さいので無視しても差し支えないということができる。なお, 図 6 に示された放電電流波形の

積分から求めた放電電荷量は、 110 pF ($+1,500 \text{ V}$ 帯電) に充電された電荷量とほぼ一致していることを確認している。

CR 減衰曲線は片対数グラフ上で直線になるはずである。 $+1,500 \text{ V}$ に帯電した人体の指先、指先の 88 mm^2 の導電部分およびスクリュードライバーからの放電電流波形を片対数グラフに書き直した結果を、それぞれ図 7 (a), (b) および (c) に示す。指先 (a) の場合、電流波形の立ち上がりに大きなピークがみられる。これは、放電開始時の放電形態が、スクリュードライバーおよび 88 mm^2 の導電部分からの放電の場合と異なっていることによるものと考えられるが、本実験では確認できていない。

しかし、ピーク付近を除いた減衰部分は直線近似できるものと考えられる。導電部分の面積が 88 mm^2 (図 7 (b)) からの放電およびスクリュードライバー (図 7 (c)) からの放電の場合では、指先からの放電のように電流波形の立ち上がりに大きなピークはみられず、電流波形の減衰部分はほぼ直線になる。

以上の結果から、放電電流の減衰部分を、 CR 減衰曲線で近似し、以下の方法で抵抗を求め、放電時の人体の等価抵抗とした。

Bailey 等⁵⁾ の報告にしたがって、放電電流の減衰曲線が

$$I(t) = I_1 \exp(-t/CR) \quad (2)$$

で表されると仮定する。放電電流が I_1 から $0.5 I_1$ になるまでの時間を t_{12} とすると、等価抵抗 R は、

$$R = 1.44(t_{12}/C) \quad (3)$$

となる。ここで C は、

$$C = (\text{初期放電電荷量 } q) / (\text{人体の帯電電位 } V)$$

$$= \text{初期放電率} \times \text{被験者の静電容量} \quad (4)$$

で求めている。

図中の直線は、(3)式で求めた帯電電位が $1,500 \text{ V}$ のときの等価抵抗 R (表 1 参照) と、(4)式から求めた C を (1)

式に代入して求めた。ここで、 $I_{\max} = 1,500/R$ である。

図 8 に、正に帯電したときの、人体の等価抵抗と帯電電位の関係を示す。指先からの放電の場合(図中 A)，等価抵抗は帯電電位の減少とともに徐々に増加し、 $2,000 \text{ V}$ 以下では急激に増加していることがわかる。帯電電位 $+370 \text{ V}$ で $2.8 \times 10^5 \Omega$ であった。一方、スクリュードライバー(図中 C) および導電部分の面積が 88 mm^2 (図中 B) の場合、等価抵抗は帯電電位にほとんど依存せず、導電部分を持たない指先の場合より低い値を示す。

図 8 に示された結果および負帯電時の等価抵抗の抜粋を表 1 に示す。負帯電の場合も、正帯電の場合と同様の帯電電位依存性を示すことがわかる。しかし、帯電電位が $\pm 400 \text{ V}$ のときの指先からの放電では、負帯電と正帯電とで、他の帯電電位に比べ等価抵抗の値に大きな相違がみられる。

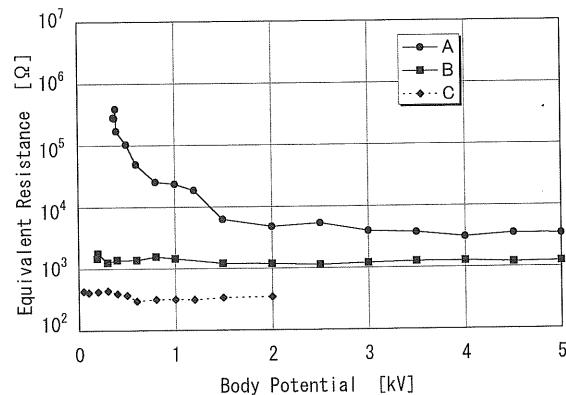


図 8 人体の等価抵抗と帯電電位との関係 (正帯電)
A : 指先からの放電, B : 指先の 88 mm^2 の導電部分からの放電, C : 手に持った金属製のスクリュードライバーからの放電。

Fig. 8 The equivalent resistance of the positively charged body.

A : Discharge from index fingertip, B : Discharge from the conductive area of 88 mm^2 on the surface of index fingertip, C : Discharge from hand-held metal screwdriver.

表 1 放電電流波形の減衰曲線から求めた人体の等価抵抗 [Ω]。

Table 1 Equivalent resistance of human body estimated from the decaying portion of discharge [Ω] .

Discharge electrode	Polarity	Applied voltage [V]					
		400	1000	1500	2000	3000	4000
A	Positive	1.7×10^5	2.4×10^4	6.1×10^3	4.7×10^3	3.9×10^3	3.1×10^3
	Negative	2.5×10^5	2.3×10^4	1.4×10^4	6.1×10^3	3.6×10^3	2.7×10^3
B	Positive	1.4×10^3	1.4×10^3	1.2×10^3	1.2×10^3	1.2×10^3	1.3×10^3
	Negative	1.2×10^3	1.1×10^3	1.3×10^3	1.1×10^3	1.2×10^3	1.1×10^3
C	Positive	3.9×10^2	3.2×10^2	3.3×10^2	3.5×10^2		
	Negative	5.4×10^2	4.4×10^2	4.3×10^2	4.2×10^2		

A : 指先, B : 指先の 88 mm^2 の導電部分, C : 手に持った金属製のスクリュードライバー

A : Index fingertip, B : Conductive area of 88 mm^2 on the surface of an index fingertip, C : Hand-held metal screwdriver.

これは、正負放電の放電形態の違いによるものと考えられる。

放電時の人体等価抵抗として、今までに数百Ωから数kΩまでの値が報告されている^{9,10)}。これらの報告では、人体の帯電電位は2,000V前後で、広範囲の電位では検討されていない。今回の測定では、人体の等価抵抗は帯電電位および放電部位の導電部分の面積に依存し、特に導電部分を持たない指先からの放電のとき、帯電電位が2,000V以下になると等価抵抗は急激に増加し、数百kΩになるという結果が得られた。

このような等価抵抗と帯電電位および放電部位の導電面積の関係が、人体固有の性質、あるいは放電形態の変化、の何れの原因によるかは、今後の検討課題である。

人体に刺激が与えられると、発汗により一時的に皮膚抵抗が下がる（皮膚電気反射：Galvanic Skin Reflex）が、この現象が放電時の人体の等価抵抗に影響を及ぼすとする報告もある⁹⁾。しかし、皮膚電気刺激に対する人体の反応時間は100ms以上ある¹¹⁾。静電気放電は数100nsから数μsの非常に短時間で終了することから、帯電電位と等価抵抗の関係を説明するには他の要因を考えるべきである。

本研究から放電電流の減衰部分から求めた人体の等価抵抗は、放電部位の導電部分の大きさによって異なった値および帯電電位依存性を示すことが確認できた。また、同じ帯電電位でも、等価抵抗が高くなると初期放電率が減少し、反対に等価抵抗が低くなると、初期放電率が増加し、さらに、等価抵抗が一定の値を示す帯電電位の範囲において、初期放電率も一定の値を示すことがわかった。半導体ICの破壊モデルの一つである人体帯電モデル(HBM)を考える場合には、これらの特性に注意する必要があるものと考える。

本研究では、被験者の静電容量が一定のときの放電現象について検討した。しかし、人体は種々の姿勢をとることから静電容量は一定ではなく、とりうる値の範囲も広い。人体の静電容量が人体からの放電現象に及ぼす影響、放電部位の導電性と放電形態の関係および人体の等価回路については今後の検討課題である。

4. 結論

正負に帯電した人体からの放電で以下の事柄を確認する

ことができた。

1) 帯電した人体の指先からの放電では、初期放電率は人体の帯電電位の増加とともに飽和する傾向を示した。本実験の帯電電位の範囲内で、初期放電率は最大約65%となつた。

2) 指先の88mm²の導電部分からの放電の場合、帯電電位2,000V以上では、初期放電率はスクリュードライバーからの放電の場合とほぼ同じ値を示した。帯電電位が2,000Vより低いときでも、初期放電率は導電部分を持たない指先からの放電に比べ、著しく高い値を示し、スクリュードライバーからの初期放電率に近い値を示した。

3) スクリュードライバーからの放電の場合、初期放電率は人体の帯電電位に依存せず、ほぼ一定の値(約80%)を示した。

4) 放電に関与する導電部分の面積が大きくなると、初期放電率および放電電流のピーク値は大きくなり、立ち上がり時間は短くなる。また、立ち上がり峻度も大きくなる。

5) 放電電流の減衰部分から求めた人体の等価抵抗は、放電に関与する導電部分の面積の増加とともに減少する。とくに指先のみのとき、等価抵抗は帯電電位の減少とともに徐々に増加し、2,000V以下では急激に増加する。帯電電位+370Vでは、 $2.8 \times 10^5 \Omega$ であった。

参考文献

- 1) 増井典明, 首藤克彦, 萩西昭成, 村田雄司: 電気学会電子回路研究会資料, ECT-95-19 (1995) 47
- 2) 本阿彌忠彦: 静電気学会誌, 8 (1984) 378
- 3) N. Gibson and F.C. Lloid : Br. J. Appl. Phys., 16 (1965) 1619
- 4) J.A. Cross : *Electrostatics (Principle, Problems and Applications)*, p. 354, Adam Hilger, Bristol (1987).
- 5) A.G. Bailey, J.M. Smallwood and H. Tomita : Inst. Phys. Conf. Ser., No. 118, Section 2 (1991) 101
- 6) 例えば、宮原信文: EMC, No. 39 (1991) 131, ミマツデータシステム
- 7) 大重力, 原雅則: 高電圧現象, p. 48, 森北出版 (1974).
- 8) H.M. Hyatt : J. Electrostat., 31 (1993) 339
- 9) 木村恵英, 岩崎楠也, 今村勝昭: Sanyo Technical Rev., 17 (1985) 95
- 10) B.A. Unger : IEEE, Reliability Physics, 19th (1981)
- 11) 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)