

表面電荷法を用いた人体容量の数値計算

藤原 修^{†a)} 井川 隆規[†]

Numerical Calculation of Human-Body Capacitance by Surface Charge Method

Osamu FUJIWARA^{†a)} and Takanori IKAWA[†]

あらまし 静電気放電 (ESD: ElectroStatic Discharge) で生ずる過渡的な電磁ノイズはハイテク機器に深刻な電磁障害を引き起こすとされる。この種の ESD の主要原因の一つに人体の帯電現象が知られており、それゆえに人体電位に深く関与する人体の静電容量がこれまでに測定されてきた。しかしながら、人体容量はグラウンド面と人体姿勢との関係に大きく左右されるので、人体容量を決定づける要因は明確でない。本論文では、表面電荷法でグラウンド面上の立位姿勢にある人体の静電容量を計算した。その際、人体は形状を多面体で構成し、本論文では 765, 917, 1,529 面の 3 種類の多面体モデルを用いた。この結果、容量値は足裏がグラウンド面に近づくほど増大すること、靴底と同じ高さ (10 mm) にある人体容量は 120 ~ 130 pF であること、十分離れた高さでは 60 pF 前後であること、などがわかった。この計算知見は人体容量の実測によって確認できた。

キーワード 静電気放電, 人体電位, 人体容量, 表面電荷法, 多面体モデル

1. ま え が き

近年、半導体デバイス技術の飛躍的な進歩に伴い IC の高速化・低消費電力化が進み、これらを多用する情報機器は大幅に高性能及び高機能化されるようになった。半面、電磁ノイズに対する耐性が劣化の傾向にあり、なかでも静電気放電 (ESD: ElectroStatic Discharge) で生ずる過渡的な電磁ノイズはハイテク機器に深刻な電磁障害を引き起こし、問題となっている [1], [2]。この種の ESD の主要原因の一つに人体の帯電現象が知られているが、人体電位の発生や減衰機構についてはまだ不明の部分が多い。筆者らはさきに、オフィスビル内での帯電人体における電位減衰過程を人体容量や靴・床材料の電気定数との関係において明らかにした [3] ~ [5]。

人体の電位上昇過程については人体容量が深く関与するものと推察され、これまでに行われた実測の結果、その値は 50 ~ 250 pF とされている [6]。人体容量とは導体と仮定した人体とグラウンド間に形成される浮遊容量であり、その値はグラウンド面に対する人体姿勢に大きく依存するため、容量値を決定づける要因は単

純でない。

本論文では、表面電荷法 [7] を用いた人体容量を数値解析し、容量値の決定要因を示す。なお、表面電荷法は、有限要素法などの他の数値計算法に比して解析手法が簡便で計算精度も高いことが知られている [8] ~ [10]。本論文は、人体容量を計算対象としているので、表面電荷法がより直接的であり、しかも 3 次元構造の複雑な人体形状に対しては入力データ作成も原理的に容易となり、それゆえに人体の容量解析に際しては表面電荷法を用いた。

2. 理 論

「静電容量」とは導体間の電位差と帯電量とを関係づける量であり、その値は導体の全表面が等電位面を形成することによって導き出される [11]。本章では、人体を導体とみなし、体表面では等電位面が形成されるものとして、人体の静電容量 (人体容量) の表面電荷法による計算式を導出する。

2.1 表面電荷法と計算式

表面電荷法とは、物体表面を四角形あるいは三角形の要素に分割し、その要素上で一定とした表面電荷によって誘導される電位や電界を数値的に求める技法である。いま、図 1 に示すようにグラウンド面上で導体を考え、この表面を N 個に要素分割する。そのとき、無限遠点を電位の基準とした要素 m における電

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: fujiwara@odin.elcom.nitech.ac.jp

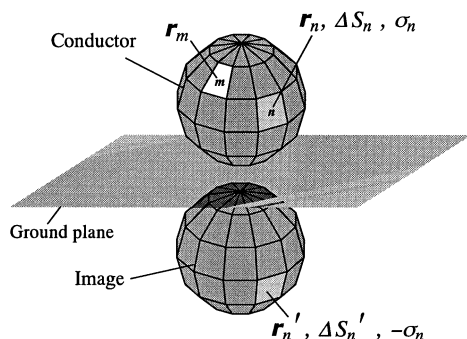


図1 表面電荷法

Fig. 1 Surface charge method.

位 ϕ_{Bm} は、表面電荷密度を σ として、

$$\phi_{Bm} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\int_{\Delta S_n} \frac{\sigma(\mathbf{r}_n) \cdot d\mathbf{S}_n}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} + \int_{\Delta S'_n} \frac{-\sigma(\mathbf{r}'_n) \cdot d\mathbf{S}'_n}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_n|} \right) \quad (1)$$

$$\simeq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\sigma_n \cdot \Delta S_n}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} - \frac{\sigma_n \cdot \Delta S_n}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_n|} \right) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率であり、 n は各要素番号、 ΔS_n は要素 n の微小面積、 \mathbf{r}_n は ΔS_n の重心点、 $\Delta S'_n$ は ΔS_n の影像要素の微小面積、 \mathbf{r}'_n は $\Delta S'_n$ の重心点、 σ_n は ΔS_n で一様とした表面電荷密度である。式 (2) は、

$$M_{mn} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|} - \frac{1}{|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_n|} \right) \quad (3)$$

とおけば、

$$\begin{bmatrix} \phi_{B1} \\ \phi_{B2} \\ \vdots \\ \phi_{BN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1N} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1} & M_{N2} & \cdots & M_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot \Delta S_1 \\ \sigma_2 \cdot \Delta S_2 \\ \vdots \\ \sigma_N \cdot \Delta S_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

と表される。導体の表面電位は等電位となるので、これを $\phi = \phi_{Bm}$ ($m = 1, 2, 3, \dots, N$)、行列 M の逆行

列を行列 $A = (A_{ij})$ ($i, j = 1, 2, 3, \dots, N$) とおけば、

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot \Delta S_1 \\ \sigma_2 \cdot \Delta S_2 \\ \vdots \\ \sigma_N \cdot \Delta S_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \phi \quad (5)$$

となる。ただし、

$$\sum_{i=1}^N A_{in} M_{mi} = \sum_{i=j}^N A_{nj} M_{jm} \begin{cases} 1 & (n=m) \\ 0 & (n \neq m) \end{cases} \quad (6)$$

である。総電荷量を Q とすれば、

$$Q = \sum_{n=1}^N \sigma_n \cdot \Delta S_n = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N A_{nj} \cdot \phi \quad (7)$$

となり、導体のグラウンド面に対する静電容量を C とすれば、 $Q = C \cdot \phi$ の関係から、

$$C = \frac{Q}{\phi} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} \quad (8)$$

となって導体の静電容量 C を数値的に求めることができる。なお、式 (1) は分母が 0 となる特異的な数値積分を含み、その数値処理に際して計算誤差の発生 [12] が指摘されているが、複雑な 3 次元構造の人体を対象として計算誤差を論じた例は筆者らの知る限り見ない。本論文は、グラウンド面に対する人体の静電容量の大まかな把握を目的とするので、式 (1) の数値積分に際しては、簡単のために要素面の電荷分布を一様とし、これが重心点に集中するものとして各節点の電位を求め、これらを平均することで要素電位とした。

2.2 球体モデルと数値検証

グラウンド面上で立位姿勢にある人体の表面電荷法による容量計算に際しては、体表面での妥当な要素分割数を知る必要がある。特に、グラウンド面上へ 1 cm 程度に近接する足裏の電荷密度は人体容量に大きく影響するので、この場合の要素分割数は重要となる。ここでは、理論式から静電容量が計算可能な物体形状としてグラウンド面上の導体球を考え、人体とほぼ同じ表面積とされる球体 (半径: 50 cm) [6] を上限とした種類のサイズとそれらの表面の各要素分割数をパラメー

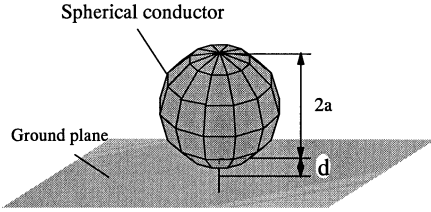


図2 球体の計算モデル
Fig.2 Spherical model for calculation.

タとして、球体容量のグラウンド面上からの距離依存性を計算し、理論値との比較から妥当な要素分割数を把握する。この計算モデルを図2に示す。ただし、図では球体は四角形と三角形の両要素で構成された多面体モデル(72面)に置き換えている。この場合の静電容量 C_B は、球体半径を a 、グラウンド平面からの距離を d 、とすれば、

$$C_B(d) = 2\pi\epsilon_0 a \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^n}{\prod_{k=1}^n \{2(d+a) - \delta_{n-k}\}} \right\} \quad (9)$$

$$\delta_n = \begin{cases} 0 & (n=0) \\ a^2 & (n \geq 1) \end{cases} \quad (10)$$

と理論的に与えられる[13]。

図2の球体モデル(72面)について、半径を $a = 0.05, 0.25, 0.5$ mと変化させた場合の静電容量を計算した。なお、半径0.5mの球体の表面積は人体のそれにほぼ等しいとされる[6]。この結果を理論値と合わせて図3に示す。ただし、式(9)の計算では $n = 25$ とした。式(9)右辺の無限級数の計算に際しては、球体半径 a が大きく、グラウンド面との距離 d が短いほど収束には多くの項数が必要とするが、 $a = 0.5$ m, $d = 1$ cmでも $n = 25$ では相対誤差は0.1%以下であった。この図から、要素分割を72面に固定した場合には球体半径が小さく、また球体モデルがグラウンド平面から離れるほど計算値は理論値に近い値となっているが、球体サイズが大きい場合には両者に差が現れていることがわかる。人体の表面積とほぼ同じ球体モデル(半径: $a = 0.5$ m)で要素分割を72, 162, 648面とした場合についても静電容量を計算した。この結果を図4に示す。図から、球体がグラウンド面から十分に離れたときは球面分割数にかかわ

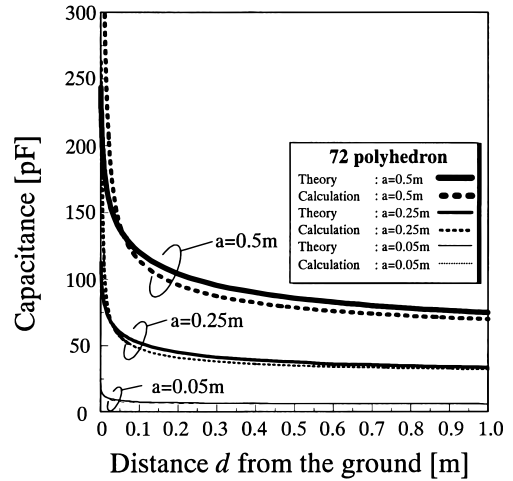


図3 72面多面体球モデルによる静電容量
Fig.3 Capacitance of 72 polyhedron simulating a spherical conductor.

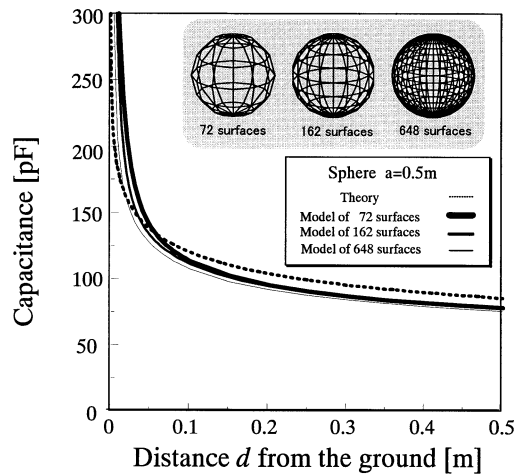


図4 分割要素数の異なった多面体球モデルにおける静電容量
Fig.4 Capacitances of polyhedrons having different surfaces for spherical conductor.

らず、いずれの計算値も理論値より下回ることがわかる。しかしながら、球体がグラウンド面に近づくとき計算値はともに理論値を上回るが、球表面を細かく要素分割したモデルほど計算値は理論値に近づくことがわかる。なお、球体がグラウンド面から十分離れた場合の計算値が理論値を下回る理由は次のように推察する。本論文の数値計算に際しては、球体を内接多面体で近似したので、表面積が球体のそれよりも小さく、それゆえに総電荷量を一定とする場合には要素当りの平均

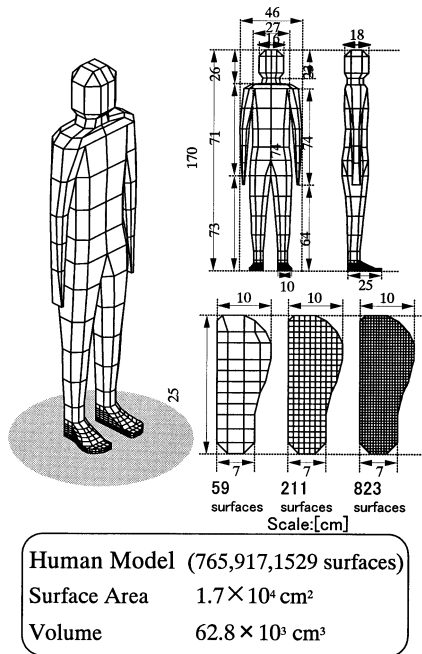


図5 人体モデル
Fig. 5 Human body model.

的な電荷密度が増加し、節点電位が高めに計算される結果として静電容量は理論値よりも低くなったのであろう。

2.3 多面体モデルと人体容量

グラウンド面上で立位姿勢にある人体の静電容量を求める。図5は、この場合の計算モデルを示す。同モデルは、文献[14]に基づく標準的な日本人寸法の体表面を、四角形または三角形で分割・構成した。身長は170 cm、体積は $62.8 \times 10^3 \text{ cm}^3$ (約63 kg 相当)、表面積は $1.70 \times 10^4 \text{ cm}^2$ 、足裏を除く要素分割数は、前節の結果を参考に706とした。グラウンド面に対向する足裏部分は、図5の右下図に示すように要素分割数を59, 211, 823とし、これらの3種類について人体容量を計算した。人体容量の計算結果を図6(a)に示す。図中の点線は、人体モデルと同じ身長で同体積かつ同表面積の楕円体の自由空間における静電容量であり、次のように計算した。半軸 a, b, c の楕円体の自由空間における静電容量 C_B は、

$$C_B = \frac{8\pi\epsilon_0}{\int_0^\infty \frac{d\lambda}{\sqrt{(a^2 + \lambda)(b^2 + \lambda)(c^2 + \lambda)}}} \quad (11)$$

で与えられるので[13]、これから同体積で同表面積の

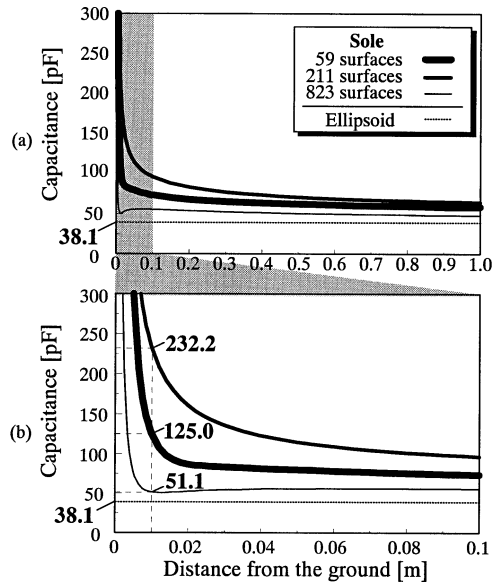


図6 人体モデルの静電容量
Fig. 6 Capacitance of human body model.

楕円体(半軸: 0.85, 0.19, 0.09 m)の静電容量を計算すると38.1 pFとなる。図から、人体容量はグラウンド面から離れるに従って急激に減少して一定となること、その値は48~65 pF程度で楕円体の容量値に近いこと、などがわかる。このことは、複雑な形状を有する人体でも自由空間中での孤立的な静電容量は表面積が同じ単純形状の導体のそれに近いことを意味する。ちなみに、人体モデルと同じ表面積($1.70 \times 10^4 \text{ cm}^2$)をもつ孤立した導体球(半径: 36.8 cm)の静電容量は約41 pFとなり、この場合もグラウンド面から離れた人体容量に近づく。図6(b)には、グラウンド面に近接した立位姿勢にある人体の容量計算結果を示す。この場合の人体容量は足裏部分の要素分割に大きく依存し、その値と分割数とは必ずしも一定の関係にないことがわかる。すなわち、図6の計算結果には、要素分割数を増加しても一定の値に収束する傾向はみられない。この原因は、2.1で述べたように表面電荷法の要素分割数と特異積分の取扱いによる計算誤差に基づくものと推察するが、詳細は現時点では不明である。

3. 実験

3.1 人体容量の測定方法

人体容量の測定方法を図7(a)、その等価回路を(b)にそれぞれ示す。図5の人体モデルに近い体型の被験者(身長: 168 cm、体重: 68 kg)は、ファラデーシー

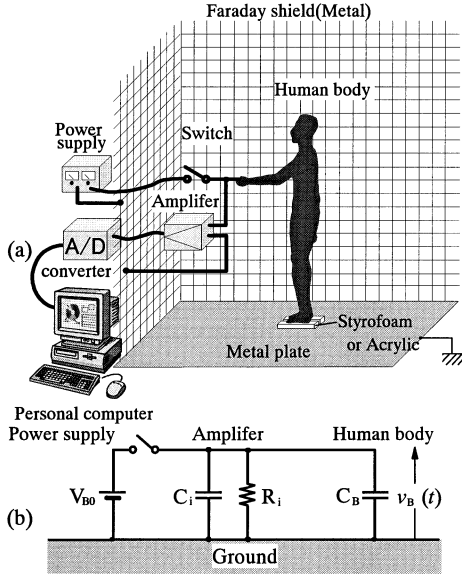


図 7 測定方法 (a) と等価回路 (b)

Fig. 7 (a) Measurement method and (b) an equivalent circuit.

ルド内の金属板上で発泡スチロール板または穴開きアクリル板（縦：30 cm，横：11 cm）上に裸足で直立する．ただし，穴開きアクリル板は直径 4.5 mm のドリルで 201 個，面積比で約 9% の穴を板全体にわたって無作為に開け，比誘電率を等価的に低くした．この状態でアナログスイッチ（東芝 TC4066BP）を介して電源から $V_{B0}(=10\text{ V})$ に充電する．アナログスイッチで電源をオフしたときの人体電位 $v_B(t)$ を低入力インピーダンス増幅器（入力抵抗： $R_i = 10.2\text{ M}\Omega$ ，入力容量： $C_i = 13.6\text{ pF}$ ）で増幅し，A/D コンバータを介して計算機に取り込む．ここで，A/D コンバータのサンプリング周波数は 200 kHz，量子化数は 12 bit である．なお，電位測定に際しては，金属板をグラウンドとし，測定機器のアースはこれに接続した．図 7 (b) の等価回路から，人体電位 $v_B(t)$ は，

$$\frac{v_B(t)}{V_{B0}} \simeq \exp \left[-\frac{t}{(C_i + C_B)R_i} \right] \quad (12)$$

と表されるので，この電位減衰特性から人体容量 C_B を求めることができる．

3.2 結果と考察

図 8 は発泡スチロール板の厚さを 2 cm ごとに 1～11 cm まで変化させた場合の測定例，図 9 は穴開きアクリル板を 3～10 mm まで変化させた場合の測定例

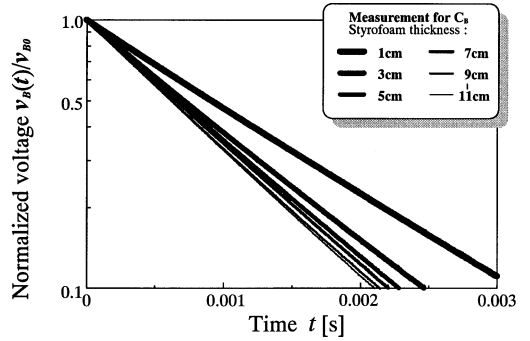


図 8 発泡スチロール板上の人体の電位測定例

Fig. 8 Measured potentials of human body on the styrofoam.

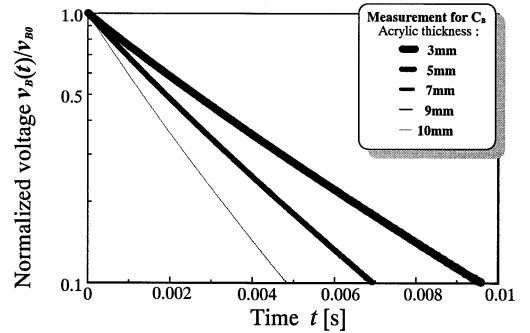


図 9 穴開きアクリル板上の人体の電位測定例

Fig. 9 Measured potentials of human body on the acrylic having holes.

をそれぞれ示す．ただし，縦軸は初期電位で規格化した人体電位を対数目盛で表している．これらの図より，人体電位の測定値はほぼ直線状であり，それゆえに指数減衰の式 (12) に従っていること，半減期で見ると板の厚さが薄くなるほど減衰時間が延びていること，などが確認できる．式 (12) を測定値にあてはめて求めた人体容量を図 10 に示す．図中の 印は発泡スチロール板を用いた測定結果であり， 印は穴開きアクリル板を用いた結果である．図から，板の厚さが 10 mm 以上では測定値は足裏部分を 59 面分割した表面電荷法の計算結果に近い傾向を示していることがわかる．板の厚さが 10 mm の場合について両者を比較すると，発泡スチロール板で 122.6 pF，穴開きアクリル板では 189.6 pF となっており，後者のほうが前者よりも 70 pF 程度高くなっていることがわかる．この理由は次のように考える．穴開きアクリル板を挟んだグラウンド面と足裏とで形成される等価的な静電容量 C_{acrylic} は，足裏の面積を S ，アクリル板の穴の総面

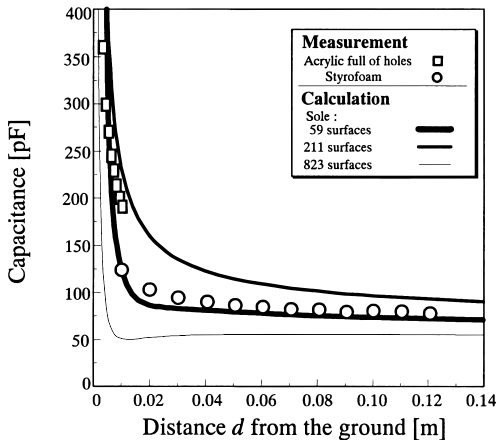


図 10 人体容量の測定結果

Fig. 10 Measured capacitances of human body.

積を S_{hole} , グラウンド面と足裏との間の距離を d とすれば,

$$C_{\text{acrylic}} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S_{\text{hole}}}{d} + \varepsilon_0 \frac{S - S_{\text{hole}}}{d} \quad (13)$$

と表される．ただし, $\varepsilon_r (= 2.6)$ はアクリル樹脂の比誘電率である．穴開きアクリル板には面積比で約 9% に穴が開けられているので, $S_{\text{hole}} = 0.09S$ となり, 穴開きアクリル板の等価的な比誘電率は $(0.91\varepsilon_r + 0.09) = 2.46$ となる．それゆえに, 式 (13) において, $d = 1 \text{ cm}$, $S = 157 \text{ cm}^2$ (足裏面を半軸 12.5, 4.0 cm の楕円形で近似) とおけば, 静電容量 C_{acrylic} は 34.1 pF と計算され, 両足分で約 70 pF となる．結局, アクリル板の存在が足裏とグラウンド面との間に形成される静電容量を増加させることで, 穴開きアクリル板で測定した場合の人体容量が大きくなったものと推察される．このことから, 板の厚さが 10 mm よりも薄い場合には穴開きアクリル板の容量を差し引いた測定値は足裏部分を 823 面分割した表面電荷法の計算結果に近づくことがわかる．なお, 計算モデルは被験者の体型に近いが, 測定に際しては, 図 7 (a) に示すように被験者は姿勢の点で図 5 の計算モデルとは多少異なっている．それ以外にも, 衣服や髪の毛なども計算モデルには考慮されていないが, 測定値は図 10 に示したように立位姿勢の計算値と大まかに一致している．このことは, 片腕を上げた姿勢や衣服と髪の毛の存在は人体容量には大きく影響しないことを示唆している．

4. む す び

人体の帯電現象は ESD 発生原因の一つであり, それゆえに人体電位に深く関与する人体の静電容量が測定されてきた．しかしながら, 人体容量はグラウンド面と人体姿勢との関係に大きく左右されるので, 容量値決定の要因は単純でない．本論文では, グラウンド面上で立位姿勢にある人体を多面体モデルに置き換え, この場合の静電容量を表面電荷法で計算した．その結果, 容量値は足裏がグラウンド面に近づくほど増大すること, 靴底と同じ高さ (10 mm) にある人体容量は 120 ~ 130 pF であること, 十分離れた高さでは 60 pF 前後であること, などがわかった．また, 数値結果の妥当性は人体容量を測定することで確認できた．今後の課題としては, グラウンド面上で種々の姿勢にある人体容量を計算し, 容量値の決定要因を明らかにすることがあげられる．

文 献

- [1] 例えば, 伊藤健一, “ノイズ対策技術の動向,” 電学論 C, vol.115-C, no.4, pp.512–516, April 1995.
- [2] 藤原 修, “ESD 現象をとらえるソースモデルと界特性,” 信学誌, vol.78, no.9, pp.849–850, Sept. 1995.
- [3] O. Fujiwara and H. Endoh, “Computation of Potential Attenuation Process for Charged Human Body Using Numerical Inverse Laplace Transform,” IEICE Trans. Commun., vol.E78-B, no.2, pp.188–192, Feb. 1995.
- [4] 藤原 修, 中澤孝一郎, 竹下裕章, “帯電床電位の電磁場論的解析,” 信学論 (B-II), vol.J80-B-II, no.9, pp.784–790, Sept. 1997.
- [5] 藤原 修, 竹下裕章, “人体帯電電位を決定づける靴の電気定数の特性測定,” 電学論 A, vol.117-A, no.12, pp.1165–1169, Dec. 1997.
- [6] H.W. Ott, 実践ノイズ通減技法, pp.347–377, ジャテック出版, 1990.
- [7] 例えば, K. Chen, H. Chuang, and C. Lin, “Steady-State and Shock Currents Induced by EFL Electric Fields in a Human Body,” IEEE Trans. Bio-Med. Engn, vol.BME-33, no.8, Aug. 1986.
- [8] 千葉敦生, 伊坂勝生, 大野木幸男, “交流電界中の人体モデルに誘導される電流密度の解析,” 信学論 (B-II), vol.J77-B-II, no.2, pp.93–100, Feb. 1994.
- [9] 里 周二, 村瀬 洋, “電荷重畳法と表面電荷法の電界誤差の原因と到達精度,” 電学論 A, vol.117-A, no.3, pp.331–332, March 1997.
- [10] 坪井 始, 浅原知行, “表面電荷法による電界解析における計算誤差の評価法,” 電学論 A, vol.117-A, no.10, pp.1040–1045, Oct. 1997.
- [11] 村崎憲雄, 静電気対策ハンドブック (上), pp.16–17, マグロウヒル好学社, Nov. 1977.
- [12] 内川嘉樹, 大江俊美, 後藤圭司, “表面電荷法の改良,” 電

学論 A, vol.101-A, no.5, pp.263-270, May 1981.

- [13] 竹山説三, 電磁気学現象理論, pp.147-148, 164-167, 丸善, 1979.

- [14] 生命工学技術研究所, 設計のための人体寸法データ集, 日本出版サービス, 1996.

(平成13年3月16日受付, 5月24日再受付)



藤原 修 (正員)

昭46名工大・工・電子卒。昭48名大大学院修士課程了。同年(株)日立製作所中央研究所入所。昭51同所退職。昭55名大大学院博士後期課程了。名大工学部助手, 講師を経て, 昭60名工大工学部助教授, 現在, 同電気情報教授。平3~4スイス連邦工科大客員教授。放電雑音, 生体電磁環境, 環境電磁工学に関する研究に従事。工博。電気学会, IEEE各会員。



井川 隆規

平8名工大・工・電気情報卒。同10同大大学院博士前期課程了。現在, トヨタ自動車(株)勤務。在学中, 環境電磁工学に関する研究に従事。