

## 床・床材の静電気帯電防止性能の新しい評価法\*

大澤 敦\*\*

### New Evaluation Method for Antistatic Efficiency of Floors and Floor Coverings\*

by Atsushi OHSAWA\*\*

**Abstract** : This paper presents a new evaluation method for antistatic efficiency used in floors and floor coverings. Flooring is one of essential elements for controlling static charge at work area, because the tribocharging between footwear and floor during walking causes the rise of human body potential. The human body charging often introduces electrostatic discharges. Moreover they cause unexpected electrostatic hazards, such as fires and explosions in flammable atmosphere, failure operations in electronic facilities and damage of electronic devices in many areas of industry. To prevent such hazards and failures due to the human body charging we use antistatic (dissipative) or conductive floor connected to ground as well as suitable footwear and clothes.

In this paper we characterize the electrostatic properties of floors numerically using an equivalent circuit model. In general the electrostatic properties for preventing hazards are determined by resistance path to ground (leakage resistance) and decay time of static charge. To obtain them the steady state and transient solutions of surface potential distribution are solved by using the equivalent circuit model. The modelling was in good agreement with the experimental results of several floor coverings. Note that the method can apply to not only floors, but also worksurfaces.

The surface potential distributions on square floors were numerically calculated when voltage was applied at the center of top surface and the bottom surface was bounded by a grounded conductor. A dimensionless equation for the surface potential was obtained. The equation showed that the surface potential is determined by the value of  $\chi = \rho_s L^2 / (\rho_v \delta)$ , where  $\rho_s$ : surface resistivity,  $\rho_v$ : volume resistivity,  $\delta$ : thickness and  $L$ : side length of the floor. Physical meaning of  $\chi$  is the ratio of surface resistance,  $R_s = \rho_s$ , to total volume resistance of floor,  $R_v = \rho_v \delta / L^2$ . Calculated leakage resistance and charge relaxation, which are the functions of material physical quantities and dimensions of floors, will be useful for designing and installing floors in industry. As a result we found that the condition for effective antistatic efficiencies is  $10^2 \leq \chi < 10^7$ . Consequently we can conclude that the condition is applicable to the evaluation method of the antistatatic floors and floor coverings.

**Keywords** ; Flooring, Electrostatic hazards, Human body charging, Antistatic efficiency, ESD control

---

\* 9th International Conference on Electrostatics および Journal of Electrostatics に一部発表

\*\* 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

### 1. はじめに

床に静電気対策を施すことは、人体帯電防止の重要な要素の一つである<sup>1-4)</sup>。靴と床との摩擦帯電により人体が帯電するが、床を適切に対策することによりこの帯電を防止することができるからである。一方、人体が帯電すると、しばしば静電気放電、特に火花(スパーク)放電が発生する。この放電により、多種の産業の事業場などで火災・爆発事故、電子デバイスなどの破壊・生産障害、電子機器の誤動作による生産障害・事故が生じている。このような静電気放電による災害・障害をもたらす人体帯電を防止するために、静電気対策、すなわち帯電防止の床が用いられている。なお、適切な衣服と靴の使用も人体帯電防止の重要な要素であることはいうまでもない。

本論文は床の等価回路モデルの解析によって得られた帯電防止性能の新しい評価法を紹介する。帯電防止性能は一般に漏洩抵抗(床の接地までの抵抗)と静電気の電荷の緩和時間によって決定されるが、ここではこれらを等価回路モデルによって数値的に求めている。このモデルによって、無次元化された表面電位分布を表す式が得られ、この表面電位分布が表面抵抗と全体積抵抗の比 $\chi$ で表されることを導いた。さらに、定常解および過渡解を解くことにより、広い範囲の $\chi$ に対して漏洩抵抗および電荷緩和時間を求め、 $10^2 \leq \chi < 10^7$ という帯電防止性能が有効な条件を導いた。ここで提案する評価法は、この条件を満たすか否かで評価する方法であり、床および床材の表面抵抗率、体積抵抗率および床のサイズによって評価することができる。

### 2. モデル<sup>5)</sup>

本モデルは辺の長さ  $L$  が厚さ  $\delta$  より十分に長く、片

面が静電的に接地されたものに対して適用される。したがって床だけではなく、作業台シートなどの静電気帯電防止性能の評価にも用いることができる。モデルでは Fig. 1(a)のように正方形の床の底面が接地した静電的に導体である板に接触しており、電圧  $V_a$  が床の表面の中心に与えられる場合を考える。一般に床のベースコンクリートの抵抗は静電的に無視できるので、床の底面で電位を0と仮定することができる。また、境界条件として床の端は開放回路を仮定した。 $L \gg \delta$  より任意の格子点の等価回路は Fig. 1(b)のように格子点の周りの表面抵抗、体積抵抗およびキャパシタンスで表すことができる。この格子点の電位  $V_{i,j}$  を求めるための回路方程式はキルヒホッフの電流則により

$$\frac{V_{i,j} - V_{i+1,j}}{R_x} + \frac{V_{i,j} - V_{i-1,j}}{R_x} + \frac{V_{i,j} - V_{i,j+1}}{R_y} + \frac{V_{i,j} - V_{i,j-1}}{R_y} + \frac{V_{i,j}}{R_z} + C \frac{\partial V_{i,j}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $R_x, R_y$  は隣接した格子点間の  $x, y$  方向の表面抵抗、 $R_z$  および  $C$  は一つの格子要素の体積抵抗とキャパシタンスである。

$$R_x = \rho_s \frac{\Delta x}{\Delta y}, R_y = \rho_s \frac{\Delta y}{\Delta x}, R_z = \rho_v \frac{\delta}{\Delta x \Delta y} \quad \text{and}$$

$$C = \epsilon \frac{\Delta x \Delta y}{\delta}$$

を用いて、式(1)は

$$\frac{V_{i-1,j} - 2V_{i,j} + V_{i+1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{V_{i,j-1} - 2V_{i,j} + V_{i,j+1}}{(\Delta y)^2} - \frac{\rho_s}{\rho_v \delta} V_{i,j} - \frac{\rho_s \epsilon}{\delta} \frac{\partial V_{i,j}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

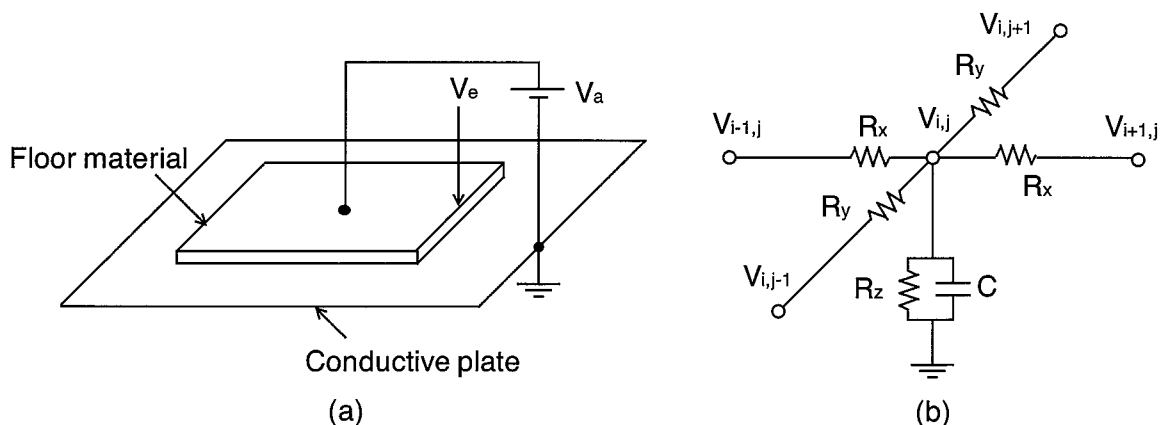


Fig. 1 Modelling of floor. (a) a modeled square floor. (b) an equivalent circuit model. 床のモデリング, (a) モデルに用いた正方形の床システム, (b) 等価回路モデル

となる。ここで、 $\Delta x, \Delta y$  は格子間距離、 $\rho_s, \rho_v$  は表面および体積抵抗率、 $\epsilon$  は誘電率である。無次元化のため、

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, T = \frac{t}{\epsilon \rho_v} \text{ and } \phi = \frac{V}{V_a}$$

を用いると、式(2)は

$$\frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{(\Delta X)^2} + \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{(\Delta Y)^2} - \frac{\rho_s L^2}{\rho_v \delta} \phi_{i,j} - \frac{\rho_s L^2}{\rho_v \delta} \frac{\partial \phi_{i,j}}{\partial T} = 0 \quad (3)$$

となり、数学的表現で表すと

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} - \chi \phi - \chi \frac{\partial \phi}{\partial T} = 0 \quad (4)$$

となる。ここで、

$$\chi = \frac{\rho_s L^2}{\rho_v \delta} \quad (5)$$

式(4)は物理的には変形された拡散方程式を表しており、 $\chi$  は電荷の拡散係数の逆数を表していることになる。この無次元抵抗 $\chi$ は表面抵抗、 $R_s = \rho_s$ 、と全体積抵抗、 $R_v = \rho_v \delta / L^2$ 、の比で表されていることは興味深いところである。表面電位分布を表すこの式は $\chi$ のみで表面電位を決定できることを示しているの、異種のあらゆる床の静電気的特性はその床の $\chi$ についてこの式を解くことによって得られることを示している。定常解の数値解法にSOR法、電荷緩和を求めるための過渡解の解法にADI法を用いた。また、 $\Delta X = \Delta Y = 0.01$ とした。

漏洩抵抗は次のようにして求めた。定常解の全電流は各格子の体積抵抗を流れる電流 $I_{i,j}$ の総和であるので、

$$\sum I_{i,j} = \sum \frac{V_{i,j}(\Delta x)^2}{\rho_v \delta} \quad (6)$$

となる。したがって、

$$R = \frac{V_a}{\sum I_{i,j}} = \frac{\rho_s}{\sum \phi_{i,j} \chi (\Delta X)^2}$$

となる。

### 3. 結果および検討

表面電位の代表値として、Fig. 1(a)に示すように無次元化した辺の中央の電位  $V_e/V_a$  を Fig. 2 に示す。典型

的な無次元表面電位の分布を Fig. 3(a)-(d)に示す。Fig. 3(a)に示すように表面抵抗が体積抵抗よりも十分小さいとき、すなわち、 $\chi$ が小さいとき( $\chi \leq 10^{-2}$ )、表面はあたかも導電性の挙動を示すので、表面電位分布は与えた電圧  $V_a$  に同電位となる。逆に表面抵抗が体積抵抗よりも十分大きいとき( $\chi \geq 10^7$ )、すなわち、 $\chi$ が大きいとき電圧を与えた部分でほとんどの電流が底面へと流れるため、その部分のみ  $V_a$  となり、それ以外は0電位となる。実際に表面抵抗のみが小さな床を帯電防止として施工された床を見ることがあるが、Fig. 3(a), (b)からも解るようにこのような床ではしばしば、災害や障害が起きている<sup>6)</sup>。これは表面抵抗のみで帯電防止性能を評価する規格<sup>7)</sup>があるからである。

漏洩抵抗と $\chi$ との関係を Fig. 4 に示す。漏洩抵抗は $\chi$ に依存し、前述した電位分布からもわかるように全表面積  $L^2$  で決まる体積抵抗 $\rho_v \delta / L^2$  と電位を与えた部分の表面積  $A_0$  で決まる体積抵抗 $\rho_v \delta / A_0$  に制限される。これらは Fig. 4 で $\chi$ が小さいあるいは大きいときの直線部分に相当し、電位分布は Fig. 3(a)と(d)に相当する。

電荷緩和を調べるため、定常状態に達した後、電源  $V_a$  を取り去った後の過渡解を求めた結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)は床の中心部の規格化した電位  $V_e/V_a$  の減衰を無次元時間  $T = t/(\epsilon \rho_v)$  で示している。 $\chi$ が  $10^{-2}$  よりも小さく、 $10^7$  よりも大きいとき減衰は直線(線形)となっており、これは上述した Fig. 4 の直線部に相当する。その他のカーブは非線形である。このように非線形となる理由は同電位である格子点間の表面抵抗は無視でき、表面電位が0である格子の体積抵抗およびキャパシタンスは無視できるので、時間とともに電位分布が変化することによる床の実効的なインピーダンスが時間とともに変化することに起因している。次に、無次元時間

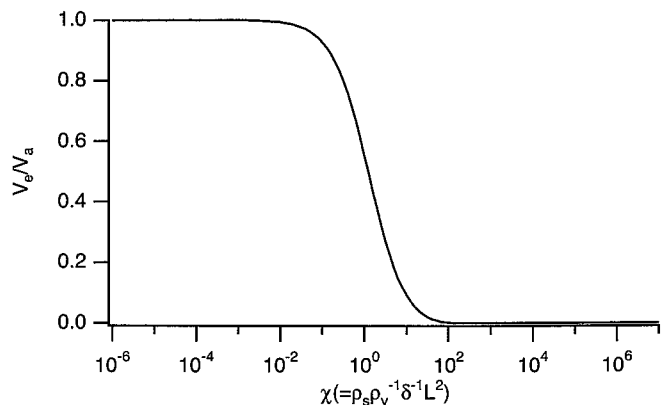


Fig. 2 Normalized surface potential at the center of the side,  $V_e/V_a$ .  
無次元化した辺の中央の電位,  $V_e/V_a$ .

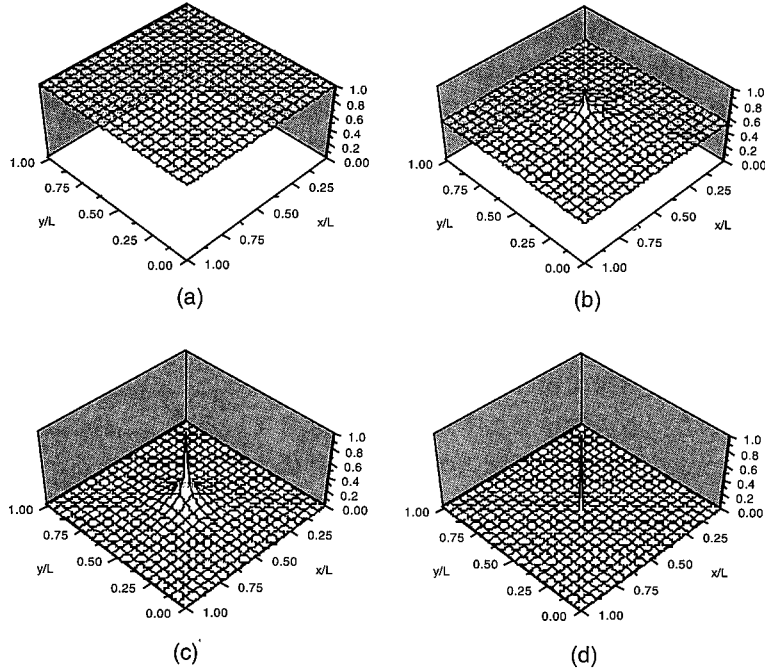


Fig. 3 Typical distributions of surface potential for different values of  $\chi$ , (a)  $\chi=10^{-2}$  (b)  $10^0$ , (c)  $10^2$ , and (d)  $10^7$ .  
無次元表面電位分布の例, (a)  $\chi=10^{-2}$  (b)  $10^0$ , (c)  $10^2$ , and (d)  $10^7$

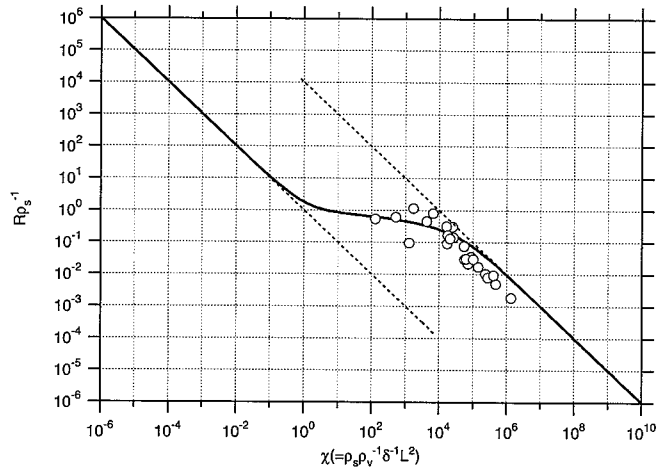


Fig. 4 Resistance to ground of square floor with the bottom surface being bounded by a grounded conductor.  
Circles: Experimental results.  
漏洩抵抗と  $\chi$  との関係, ○は実験結果

無次元時間

$$T^* = \frac{t}{\epsilon \rho_s \chi} = \frac{t \delta}{\epsilon \rho_s L^2}$$

で電荷緩和を表すと、式(4)は

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} - \chi \phi - \frac{\partial \phi}{\partial T^*} = 0 \quad (7)$$

のように書き換えることができる。ここで、無次元時間  $T^*$  の物理的意味は電荷の緩和時間  $\epsilon \rho_s L^2 / \delta$  が表面抵抗  $R_s (= \rho_s)$  と全静電容量  $\epsilon L^2 / \delta$  の積で表されていること

である。Fig. 5(b)は無次元時間  $T^*$  を用いた電荷緩和を示す。

#### 4. 帯電防止性能の評価法

適切な床の選択には、第一に前述したような  $\chi \leq 10^{-2}$ ,  $\chi \geq 10^7$  を避けるべきであるので、 $10^{-2} < \chi < 10^7$  という帯電防止性能の条件を得る。多くの指針<sup>1-4)</sup>や規格<sup>8,9)</sup>で異なる抵抗値が推奨されているが、電子デバイスなどの生産障害や爆発などの災害防止の観点からは漏洩抵抗が  $10^5 - 10^9 \Omega^4)$  の条件が望ましい。欧州規格の EN

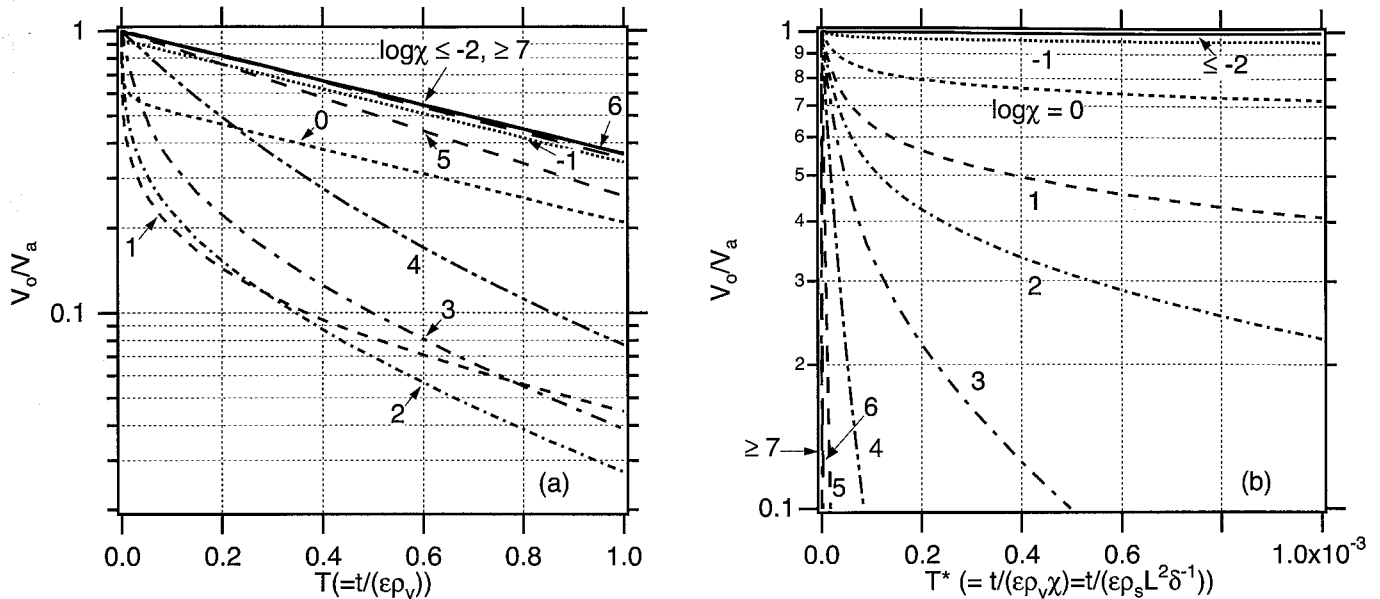


Fig. 5 Decays of normalized surface potential at the center of floor,  $V_0/V_a$ , with dimensionless time (a)  $T$  and (b)  $T^*$  for different values of  $\chi$ .  
 $\chi$  に対する床面の中心における電位の緩和特性, (a) 無次元時間  $T$ , (b)  $T^*$

100015-1<sup>9)</sup>では表面抵抗率が  $10^4$ - $10^9$   $\Omega$ , 体積抵抗率が  $10^3$ - $10^8$   $\Omega\text{cm}$  を要求している。また, 通常の床の大きさから妥当な厚さと辺の長さの範囲を考慮に入れると帯電防止性能があるといえる床は上記の  $10^{-2} < \chi < 10^7$  という範囲に入る。さらに, Fig. 5 に示した緩和時間を考慮し, また, Fig. 2, 3 に示すように端で電位が 0 であるという条件を加えると,

$$10^2 \leq \chi < 10^7 \quad (8)$$

となり, これを帯電防止床の条件として提唱する。

モデルの妥当性の検討のためいくつかの種類およびサイズの帯電防止床材の漏洩抵抗の実験結果との比較を Fig. 4 にプロットして示した。モデルの計算結果は実験と良く一致している。

提案する評価法は表面抵抗率と体積抵抗率および床のサイズから  $\chi$  を求め, 帯電防止の条件式(8)により決定する方法である。抵抗率が不明の場合は IEC などの規格に準じて測定すればよい。床を正方形としてモデル化した, 短い方の辺を  $L$  としてよい。短い方で評価することは帯電防止性能を厳しく見積もることになる。必要であれば長い方の辺を用いた評価を参考値としても良い。

ここで, 帯電防止性能としてコロナ放電を用いている床, たとえば事務所などで使用される導電性繊維を用いたフロアカーペットなどはモデルに考慮していないので, 本評価法は適用できないことを付記する。

## 5. 結論

床の帯電防止性能の条件  $10^{-2} \leq \chi < 10^7$  を等価回路モデル解析によって導出し, これを用いた帯電防止性能の評価法を提案した。モデルは帯電防止床の実験結果と良く一致した。本条件は現存する最新の指針や規格の範囲にあり, さらにこれらに修正を与えるものであった。現在, 帯電防止床に多種の材料やタイプなどが存在するので, このモデルの結果は適切な床材の選択のガイドラインとして有効であろう。なお, 提案した評価法は床のみではなく作業台シートなどの帯電防止性能の評価にも適用することができる。

## 参考文献

- 1) O. J. McAteer, Electrostatic Discharge Control, McGraw-Hill, New York, (1989)
- 2) G. T. Dangelmayer, ESD Program Management: A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control, Chapman & Hall, New York, (1990)
- 3) ESD ADV-2.0, ESD Association Advisory for Protection and Sensitivity Testing of Electrostatic Discharge Susceptible Items -Handbook, (1994)
- 4) R. C. Allen, Evaluation Eng. 38 (12) (1999) 92
- 5) A. Ohsawa, J. Electrostat., 51-52(2001), 625-631

- 6) H. Ono, A. Ohsawa and Y. Tabata, Proceedings of 4th International Conference on Applied Electrostatics, Dalian University of Technology Press, (2001), 189-192
- 7) ANSI/EIA-541 (1988)
- 8) For example, IEC 61340-4-1 (1995) and EOS/ESD S4.1-1990 (1990).
- 9) EN 100015-1, Basic Specification: Protection of Electrostatic Devices -Part 1 General Requirements. (1992)

(平成 13 年 12 月 28 日 受理)