帯電物体の移動により金属筐体内部に生じる静電誘導電圧 —金属筐体内の導体部分の面積比と誘導電圧の関係—

正 員 市川 紀充^{*, **}

Electrostatically Induced Voltage Generated in a Metal Box When a Charged Body Moves —Relation Between the Ratio of Conducting Parts in the Box and the Induced Voltage—

Norimitsu Ichikawa^{*, **, Member}

When charged bodies such as a human body and a tool wagon *etc.* move near an electronic equipment of a partially opened metal box, an electrostatically induced voltage appears in the metal box. The induced voltage causes a breakdown of a device or a malfunction of the equipment. In this study, the author measured the induced voltage in the box using a sphere gap and an electromagnetic wave sensor. This paper presents that the author measures the induced voltage with changing the area of two metal foils in the box. As the results, the author clears that the induced voltage increases up to 1.6 times when the area of induction electrode is 10 times (100cm^2) larger than that of 10cm^2 , and the induced voltage doesn't change so far as the area of an ungrounded metal foil is not changed. The fruit will be useful for designing the printed circuit board as a basic study for preventing the malfunction or the failure of the electronic equipment of the partially opened metal box.

キーワード：静電誘導電圧，帯電物体の移動，導体の面積，開口部つき金属筐体

Keywords：Electrostatically induced voltage, moving charged body, area of conductor, partially opened metal box

1. はじめに

放電・静電気の応用は，工業技術等で利用される役に立つ面と，障害として作用する面がある。マイクロエレクトロニクス化の進行する現代社会において，放電・静電気障害は無視できない大きな問題となりうる。

人体やツールワゴン等の帯電した物体が，開口部のある金属筐体で覆われた電子機器の近くを移動すると，静電誘導により筐体内の導体に電圧が生じ，電子機器の誤動作や電子回路の破壊が起こるおそれがある^{(1)~(5)}。金属筐体内の電子部品は，10V程度⁽⁶⁾の電圧で故障する可能性がある。人体等は容易に10kV⁽⁷⁾以上に帯電することが知られており，電子部品の破壊電圧はこの電圧と比べて非常に小さい。シリコン半導体のオフ状態の絶縁抵抗は相当高く，浮遊電位に近い導体が存在する場合がある。したがって，人体等が金属筐体に近づくだけで，筐体内の導体には相当大きな電圧が生じる可能性がある。

金属筐体内の導体に誘導する電圧を測定することは，難しい。電圧を測定するために電線を金属筐体内の導体に接続すると，筐体内の電界を乱してしまい正確な電圧を測定できない。金属筐体内の電界を乱さずに電圧を測定するには，測定装置の工夫が必要になる。

本研究では，球電極と電磁波センサを併用^{(8)~(9)}し，帯電した物体（帯電した人体等を想定）が開口部のある金属筐体（筐体で覆われた電子機器を想定）の近くを移動したときに筐体内の面積の異なる二つの導体間（電子回路基板の隣接する信号線，あるいは信号線とグランド線を想定）に生じる電位差を推定した。実験では，筐体内の隣接する導体の配置（例えば電子回路基板のレイアウト）を想定して，導体の面積を変えている。

本研究で得られた結果から，非接地側（浮遊電位）の導体の面積が大きくなるとともに導体に誘導する電圧が高くなり，電子部品を容易に破壊する可能性があることがわかった。また，導体間の電位差は隣接する二つの導体を非接地にするよりも片方の導体を接地したほうが，導体の面積が増加するとともに高くなることがわかった。このことから，導体間の電位差は例えば面積の大きな電子回路基板の二つの信号線が隣り合うよりも，面積の大きな信号線とグランド線が隣り合った場合のほうが高くなるといえる。こ

* 独立行政法人 産業安全研究所 物理工学安全研究グループ
〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6
National Institute of Industrial Safety,
1-4-6, Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024

** 東京農工大学 大学院工学教育部 電子情報工学専攻
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16
Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16, Nakamachi, Koganei, Tokyo 184-8588

2. 実験装置および方法

帯電板と筐体の前面開口部は、平行に向き合う。金属筐体内には、誘導電極（図 2）を筐体開口部から **10mm** 奥に立て置き、二枚のアルミ箔は帯電板と平行かつ対向している。誘導電極の球電極間で生じる放電を検出するために、金属筐体内に EMI ロケータ（三基電子工業社製、ES-81V）を筐体前面から **300mm** 奥に立てて置いた。このロケータは、アンテナ(25mm)と本体(縦 **96mm**×横 **61mm**×奥行き **15mm**)からなる。ロケータのアンテナと誘導電極の球ギャップは、金属筐体の中心軸上にある。帯電板と金属筐体前面間の距離は **60mm** であり、帯電板の中心軸が金属筐体前面の中心に来るときの移動速度は、約 **1m/s** になる。この速度は、ゆっくりと歩行する人体の移動速度を想定している。

〈2・2〉 実験方法 本研究では、球電極と EMI ロケータを併用して、金属筐体内にある面積比の異なる二つの導体間に生じる電位差を推定した。実験で用いた球電極は標準的な電圧測定器⁽¹⁰⁾として高電圧技術者に利用されている。EMI ロケータは静電気放電の検出器⁽¹¹⁾⁽¹²⁾として用いられている。このロケータの原理を、以下に説明する。インパルス状の電界をモノポールアンテナで受信し、それによる誘導電圧をバッファアンプで増幅した後、比較器を介してラッチへ導き、検出した電界レベルが一定のしきい値を越えると、ラッチを反転させて LED ランプと警告音によ

The diagram illustrates the experimental setup for the impact test. It shows a cross-section of a specimen with a central gap. The specimen is 245mm wide and 120mm high. The gap is 100mm wide and 100mm high. The gap is filled with an 'Aluminum foil'. The specimen is supported by a 'Steel sphere (4mm φ, 50 μm gap)'. A 'Micrometer' is used to measure the gap. The specimen is divided into 'Left' and 'Right' sections.

Fig. 2. Induction electrode.

Fig. 3. Flowchart for obtaining the threshold voltage of the charged plate.

て知らせてくれる。

帯電した物体が移動したときに筐体内の導体間に生じる電位差を推定する手順を以下に説明する。帯電板が図1の左側から移動すると、誘導電極(図2)の左側、次に右側のアルミ箔と向き合う。そのとき、左右のアルミ箔には静電誘導により電圧が生じる。二枚のアルミ箔間の電位差 V_u が球電極間の放電電圧 V_s (パッシェン電圧) 以上になると、電極間で放電する。EMI ロケータが放電を検出すると、警告音を鳴らす。帯電板電圧を徐々に下げて実験を繰り返すと、誘導電極の球電極間で放電する ($V_u=V_s$) 最低の帯電板電圧がわかる。実験では、ロケータが鳴る(球電極間で放電する)最低の帯電板電圧(以下、最低の帯電板電圧と呼ぶ)を図3の手順で測定した。球電極間の放電電圧 V_s を求めるために、本研究ではパッシェンの式を用いた。以下のパッシェンの式⁽¹³⁾から、球電極間の放電電圧 V_s がもとめられる。

$$V_s = 312 + 6.2d \quad (8 \leq d \leq 100),$$

V_s : 放電電圧 [V], d : 球電極間のギャップ長 [μm].

球電極間のギャップ長を $50\mu\text{m}$ にすると、電極間の放電電圧 V_s は、パッシェンの式から 622V になる。最低の帯電板電圧に対するアルミ箔間(球電極間)の放電電圧(622V)の割合を求めれば、何 kV の物体が金属筐体の近くを移動したときに、筐体内のアルミ箔間には何 V の電位差が生じるかがわかる。これを侵入率 (invasion ratio) と名付けている。この侵入率に帯電した物体の電圧(例えば人体の帯電電圧: 10kV) を掛ければ、金属筐体内の二枚のアルミ箔間の電位差を推定できる。このような手順にもとづいて、本論文では金属筐体内にある二枚のアルミ箔間の電位差 (invasion voltage) を推定している。

実験を始める前に球電極間および実験装置をメチルアルコール(CH_3OH)で洗浄し、放電を安定させるために球電極間で多数回放電させてから実験を開始した。実験では、ア

図4 実験で使った両側のアルミ箔の面積

Fig. 4. Area of the aluminum foil used for the experiment.

ルミ箔の面積を変えながら、(i)誘導電極の片側アルミ箔(左か右)を接地した場合と(ii)両側アルミ箔を非接地にした場合の3通りの測定を行っている。実験室の室内環境は、温度 $15\text{-}20^\circ\text{C}$, 相対湿度 $40\text{-}45\%$ にしている。

3. 実験結果

〈3・1〉 二枚のアルミ箔の面積比が 1:1 の場合 図5は、誘導電極の二枚のアルミ箔の面積比を 1:1 (図4(a))にしたときに誘導電極の球電極間で放電する最低の帯電板電圧と、アルミ箔の面積の関係を示している。この図から、次のことがわかる。アルミ箔の面積が大きくなるにつれて、最低の帯電板電圧が減少する。両側のアルミ箔を非接地(Δ)にすると、この最低の帯電板電圧は片側のアルミ箔を接地($\circ$)した場合より最大で約 100% 高くなる。

図5 アルミ箔の面積と帯電板電圧の関係 (面積比 1:1)

Fig. 5. Relation between the area of aluminum foil and the voltage of the charged plate (the ratio of area 1:1).

図6 金属筐体内のアルミ箔間に生じる電位差 (面積比 1:1)

Fig. 6. Invasion voltage between foils generated in a metal box (the ratio of area 1:1).

実験で得られた最低の帯電板電圧に対する放電電圧(622V)の割合(侵入率)を求めると、図6が得られる。図6は、人体等の帯電した物体が金属筐体の近くを移動したときに金属筐体内の二枚のアルミ箔間に生じる電位差と、アルミ箔の面積の関係を示している。左側の軸は侵入率(invasion ratio)を表しており、右側の軸は10kVに帯電した人体等が金属筐体の近くを移動したときに筐体内のアルミ箔間に生じる電位差(invasion voltage : invasion ratio $\times$ 10kV)を表している。この図から、次のことがわかる。両側のアルミ箔の面積が10cm²の場合、約0.3-0.5kVの電位差が筐体内部に生じる。二枚のアルミ箔間に生じる電位差は、アルミ箔の面積が大きくなるとともに高くなり、二枚のアルミ箔の面積が10倍(100cm²)になると最大で約1.6倍になる。その傾向は、非線形になる。二枚のアルミ箔のうち片方のアルミ箔が接地(○)してあると、アルミ箔間に生じる電位差は両方のアルミ箔を非接地にした場合(△)より

も最大で約90%大きくなる。

〈3・2〉 二枚のアルミ箔の面積比が非対称の場合 図7

は、左側のアルミ箔の面積Lを(a): 100cm², (b): 50cm²に固定して、右側のアルミ箔の面積Rを変えて測定した(図4(b)) 最低の帯電板電圧と、右側のアルミ箔の面積Rの関係を示している。図(a), (b)は、測定した5通りの内(図4(b))の2通りの実験結果を示している。図(a), (b)から以下のことがわかる。右側のアルミ箔を接地(○)すると、最低の帯電板電圧はアルミ箔の面積Rの増加にともなって最大で約20%増加する。左側のアルミ箔を接地(△)すると、最低の帯電板電圧は面積Rの増加とともに減少する。両側のアルミ箔を非接地(▽)にすると、(a)は面積R: 50cm², (b)は30cm²上で凸になり、最低の帯電板電圧の最大値はそれぞれ(a)約15kV, (b)18kVになる。

〈3・1〉の手順と同様にして侵入率をもとめると、図8が得られる。図8は、金属筐体内のアルミ箔間に生じる電位差と、右側のアルミ箔の面積Rの関係を示している。図6

(a) Area L of the aluminum foil: 100cm²

(b) Area L of the aluminum foil: 50cm²

図7 右側アルミ箔の面積Rと帯電板電圧の関係(非対称)

Fig. 7. Relation between the area R of right side aluminum foil and the voltage of the charged plate (asymmetry).

(a) Area L of the aluminum foil: 100cm²

(b) Area L of the aluminum foil: 50cm²

図8 金属筐体内のアルミ箔間に生じる電位差(非対称)

Fig. 8. Invasion voltage between foils generated in a metal box (asymmetry).

と同様、軸の左側は侵入率 (invasion ratio)、右側の軸は 10kV に帯電した人体等が金属筐体の近くを移動したときに筐体内の二枚のアルミ箔間に生じる電位差 (invasion voltage) を表している。図 8 から、以下のことがわかる。二枚のアルミ箔を非接地(▽)にすると、アルミ箔間に生じる電位差は、右側のアルミ箔の面積 R にかかわらずほぼ一定になる。右側のアルミ箔を接地(○)すると、アルミ箔間の電位差は、右側のアルミ箔の面積 R の増加とともに最大で約 15%減少する。右側のアルミ箔を接地したときにアルミ箔間に生じる電位差は、非接地(▽)よりも最大で約 80%高くなる。左側のアルミ箔(△)を接地すると、アルミ箔間に生じる電位差は、(a), (b)のいずれの場合も右側アルミ箔の面積 R の増加とともに約 0.5-0.8kV に増加する。左右のアルミ箔の面積比が 1:1 になると、アルミ箔間に生じる電位差は右側のアルミ箔を接地のときの電位差(○)と同じ値になる。

4. 考 察

〈4・1〉 二枚のアルミ箔の面積比が 1:1 の場合 金属筐体内にある二枚のアルミ箔の面積が大きくなる (10 cm² → 100cm²) と、筐体内のアルミ箔間に生じる電位差が高くなることがわかった (図 6)。この理由は、以下のように説明できる。

〈4・1・1〉 片側のアルミ箔を接地した場合 金属筐体内にある誘導電極のアルミ箔間の電位差が静電容量による分圧で決まると仮定すると、アルミ箔の面積を変えたときにアルミ箔間に生じる電位差は、式(1)になる。この式から、金属筐体内のアルミ箔の面積を変えたときの対地静電容量の変化量 ΔC_g に比べて、帯電板とアルミ箔間の静電容量の変化量 ΔC_f の方が大きい ($\Delta C_f > \Delta C_g$) と仮定すると、アルミ箔の面積の増加に伴ってアルミ箔間に生じる電位差 V_u は高くなるといえる。

$$V_u = \frac{C_f + \Delta C_f}{(C_g + \Delta C_g) + (C_f + \Delta C_f)} U \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 U は帯電板電圧を表している。

〈4・1・2〉 両側のアルミ箔を非接地にした場合 上記と同様に容量分圧と仮定すると、金属筐体内にある二枚のアルミ箔間の電位差は、式(2)になる。この式から、アルミ箔間電位差は誘導電極の左側のアルミ箔と帯電板間の静電容量 C_l と、右側のアルミ箔と帯電板間の静電容量 C_r の差の関数になることがわかる⁽⁸⁾。したがって、アルミ箔の面積が大きくなるほど、帯電板がアルミ箔の前面を通過するときに生じる静電容量の差 ($|C_l - C_r|$) が大きくなり、アルミ箔間の電位差が大きくなるといえる。

$$V_u = \frac{C_g |C_l - C_r| U}{C_r C_d + C_d C_l + C_r C_l + C_g (C_r + 2C_g + C_l + C_g)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 C_d は誘導電極のアルミ箔間の静電容量を表している。

〈4・2〉 二枚のアルミ箔の面積比が非対称な場合 左

右のアルミ箔の面積比が非対称になる場合の結果を整理すると、図 9 になる。この図では、左側のアルミ箔の面積 L を 10, 20, 40, 50, 100cm² にして測定した結果を、誘導電極の接地場所で区別して表している。

(I) は、右側のアルミ箔を接地して測定した結果を示している。この図から、アルミ箔間に生じる電位差は非接地側のアルミ箔の面積 L が大きくなるにつれて高くなる。この理由は、非接地側のアルミ箔の面積 L が大きくなるほど帯

(I) Right side aluminum foil grounded

(II) Left side aluminum foil grounded

(III) Both aluminum foils floating (ungrounded)

図 9 誘導電極の接地場所における比較

Fig. 9. Comparison of grounding parts of the induction electrode.

図 10 金属筐体内部の二枚のアルミ箔間に生じる電位差の推定
(左右のアルミ箔の面積比：非対称，左側アルミ箔を接地)

Fig. 10. Estimation of invasion voltage between two aluminum foils in the metal box (the ratio of area of both aluminum foils: asymmetrical, left side aluminum foil grounded).

電板とアルミ箔間との静電容量が大きくなり，二枚のアルミ箔間の電位差が増加するからだといえる。

(II)は，左側のアルミ箔を接地して測定した結果を示している。アルミ箔間に生じる電位差は，非接地側のアルミ箔の面積 R の増加にともなって高くなっていることがわかる。

この図を横軸対数で表すと図 10 になる。図 10 から，金属筐体内の二枚のアルミ箔間に 10V (0.001%) の電圧が生じる最低のアルミ箔の面積 R は，以下の実験式($L:100\text{cm}^2$)を仮定すると，約 0.18cm^2 であると推測できる。

$$\text{Invasion ratio (\%)} = 3 \log_{10} R + 2.25,$$

ここで， R は右側のアルミ箔の面積 (cm^2)を表している。

(I)と(II)の結果から，アルミ箔間に生じる電位差は接地側のアルミ箔の面積の大きさによって著しく変化しないことがわかる。非接地側のアルミ箔の対地静電容量がほとんど変化しないと見なせば，これは当然の結果だといえる。

(III)は，両側のアルミ箔を非接地にして測定した結果を示している。この図から，アルミ箔間に生じる電位差は最大で約 0.2kV ($R:10\text{cm}^2$)の差があるが，それ以外の範囲では面積 L にあまり影響されないことがわかる。測定範囲の全体からみれば，アルミ箔の面積 L にはあまり依存しないといえる。

5. まとめ

本論文は，球電極と電磁波センサを併用し，帯電した物体 (10kV) が開口部のある金属筐体の近くを移動したときに筐体内の二つの導体間に生じる電位差を，導体の面積比を変えて推定した。その結果，以下のことを実験から明らかにした。

- 1) 二つの導体間に生じる電位差は，導体の面積が10倍大きくなると，約1.6倍高くなる。これは，導体の面積が大きくなるほど誘導する電位差が高くなり，電子機器の誤

動作や電子回路の破壊が起こりやすくなるといえる。

- 2) 導体間に生じる電位差は，接地側の導体の面積の大きさにはほとんど依存しない。これは，導体間に誘導する電位差はグラウンド線の面積を大きくしても変化しないといえる。しかし，導体の接地が不十分（不完全な接地）な場合は高い電圧がグラウンド線に生じる可能性があるともいえる。
- 3) 本研究の条件で得られた実験式から，金属筐体内にある非接地側の導体の面積を 0.18cm^2 (18mm^2)以下にすれば，二つの導体間に生じる電位差を約10V（電子部品を破壊する可能性のある電圧）以下に低減できると推測できた。本研究の実験環境では，上記で得られた導体の面積以下であれば，誘導電圧を数Vに抑えることができると思われる。

この研究で得られた成果は，電子機器の誤動作を防止するための機器設計（例えば電子回路基板の設計）の基礎として役立つと思われる。今後は，金属筐体内に実装した片面板を配置し，帯電した物体が近づいたときに実際の電子機器に生じる誘導電圧を推定し，電子機器設計時の安全な設計指針を提案したい。

本研究の一部は，科学研究費補助金（日本学術振興会特別研究員奨励費）により行われた。

有益な討論を頂いた，小野 雅司氏（元：東京都工業技術センター）に心から御礼を申し上げます。指導して頂いた，高橋雄造教授，大熊康典助手，奥村克夫教授（芝浦工業大学）に心から御礼申し上げます。

（平成 16 年 9 月 29 日受付，平成 17 年 2 月 25 日再受付）

文 献

- (1) A. J. Wallash, T. S. Hughbanks, and S. H. Voldman: "ESD failure mechanism of inductive and magnetoresistive recording heads",

-
- EOS/ESD Symposium, Florida, pp.322-330 (1995)
- (2) H. Tian, and J. J. K. Lee: "Electrostatic discharge damage of MR heads", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.31, No.6, pp.2624-2626 (1995)
- (3) J. A. Strojny: "Some factors influencing electrostatic discharge from a human body", *J. Electrostatics*, 40&41, pp.547-552 (1997)
- (4) T. O. Cheung: "Direct charging charge device model testing of magneto-resistive recording head", EOS/ESD Symposium, California, pp.398-404 (1997)
- (5) W. D. Greason: "Electrostatic discharge characteristics for the human body and circuit packs", *J. Electrostatics*, Vol.59, pp.285-300 (2003)
- (6) A. Wallash: "A study of shunt ESD protection for GMR recording heads", *J. Electrostatics*, Vol.56, pp.295-302 (2002)
- (7) H. M. Walmsley: "Hazards from people and clothing", *J. Electrostatics*, Vol.27 pp.113-116 (1992)
- (8) N. Ichikawa, Y. Ohkuma, and Y. Takahashi: "Electrostatically induced voltage generated in a metal box when a charged body moves", J-K Symposium on ED and HVE, Nagasaki, pp.141-144 (2003)
- (9) N. Ichikawa, Y. Ohkuma, and Y. Takahashi: "Electrostatically induced voltage appearing in a metal box when a charged body moves -influence of grounding of a metal box-", 15th International Conf. on Gas Discharge and their Applications, Toulouse, Vol.1, pp.469-472 (2004)
- (10) IEEJ: High voltage engineering, rev. ed., pp.98-99 (1997) (in Japanese)
- 電気学会：高電圧工学（第二次改訂版），第4章，「高電圧測定法」，pp.98-99 (1997)
- (11) M. Honda: "A new threat-EMI effect by indirect ESD on electronic equipment", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.25, No.5, pp.939-944 (1989)
- (12) O. Fujiwara and Y. Murase: "Distance attenuation of electric field radiated by electrostatic discharge occurring in a corridor", *T. IEE Japan*, Vol.121, No.12, pp.1807-1812 (2001-12) (in Japanese)
- 藤原 修・村瀬友宏：「廊下空間の静電気放電で生ずる放射電界の距離減衰」，電学論C，130，12，pp.1807-1812 (2001-12)
- (13) R. M. Schaffert: *Electrophotography*, rev. ed., Focal Press, London, p.523 (1975)

市川 紀 充 （正員） 1978年2月11日生。2000年3月工学院大学卒業。2002年3月芝浦工業大学大学院修士課程修了。2002年4月東京農工大学大学院博士後期課程入学。2004年4月日本学術振興会特別研究員(DC2)。2005年4月独立行政法人産業安全研究所入所。現在は，同研究所物理工学安全研究グループ研究員。電気設備学会論文賞，論文奨励賞，発表奨励賞を各受賞。電気設備学会，放電学会，静電気学会，IEEE 等会員。