

信頼性の高い電子機器の設計に関する研究

キーワード（帯電物体、誘導電圧、誤動作・故障、電子機器設計）

市川紀充*

1. はじめに

東日本大震災の発生により、太陽光発電設備等を活用した非常用電源設備が普及しているが、非常時にその設備が動作しない等のトラブルが発生することがある。また静電気や感電等が原因で太陽光発電設備の制御装置（電子機器）が誤動作^{1),2)}や誤停止を引き起こすことがある。主として静電気が原因で起こる電子機器の誤動作等を防止するには、障害の原因となる電子機器内に生じる誘導電圧を明らかにすることが必要になる³⁾。

例えば帯電した人体⁴⁾等（以下、帯電物体と呼ぶ。）が電子機器の近くを移動すると、電子機器内の電子回路基板上の導体に誘導電圧が発生し、その誘導電圧が原因で電子機器が誤動作等の障害を起こすことがある。電子機器内には、約5Vの電圧で故障する電子部品もある。人体等は10kVかそれ以上の電圧に帯電することがあり、帯電した人体等が電子機器に近づくと、電子機器内には相当大きな誘導電圧が発生する⁵⁾⁻⁹⁾。

本研究では、電子機器内に生じる誘導電圧が原因で起きる電子機器の誤動作を防止可能な電子機器設計に指針を与えることを目的として、一般に想定される実験環境で帯電物体が電子機器の近くを移動したとき、電子機器の金属筐体および筐体内に生じる誘導電圧を研究で明らかにした。本研究では、(a)帯電物体の接近で生じる誘導電圧、(b)帯電物体の孤立で生じる誘導電圧、(c)帯電物体の通過で生じる誘導電圧の3つの原因に分けて、電子機器の金属筐体および筐体内に生じる誘導電圧を検討した。本研究の成果は、信頼性の高い電子機器の設計に役立つ。

2. 年度別の進捗状況と成果

(1) 平成22年度

【H22進捗状況】

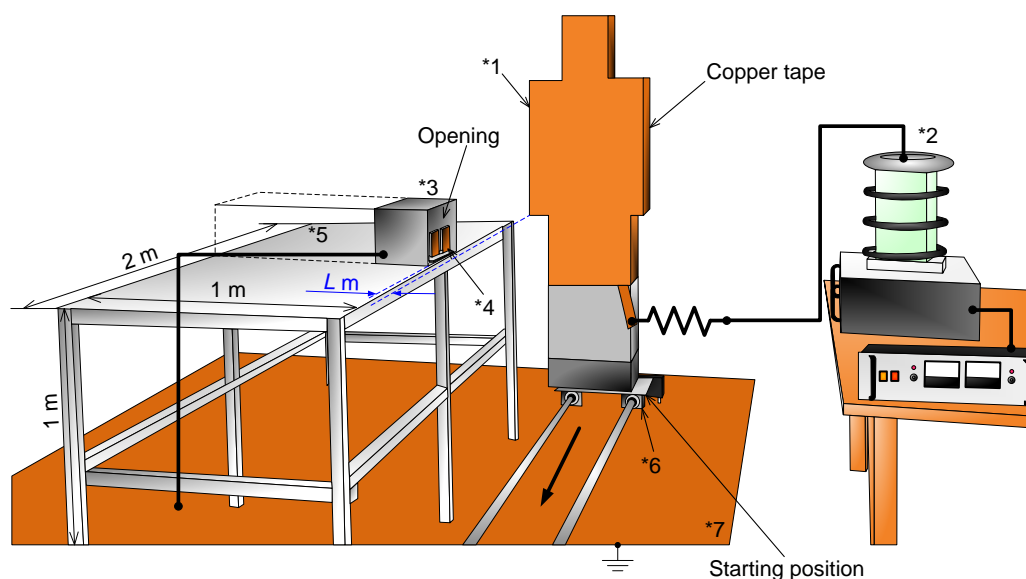
電子機器の金属筐体は、漏電による感電防止や高周波電流による筐体の電位上昇を防止すること等を目的として接地されている。他方、ノートパソコンや非接地で使用する電子機器の金属筐体は、電氣的

に大地から絶縁された浮遊電位になる。平成22年度の研究では、接地された金属筐体内の二つの導体間（電子回路基板等を想定）に生じる誘導電圧と金属筐体の奥行き（体積）の関係を明らかにすることを目的として、主として実験研究を行った。電子機器の筐体には、プラスチック製の筐体や、一面がプラスチック等の非導電性の筐体が使用されている。平成22年度の研究では、図1の通り開口部のある金属筐体内を用いた。金属筐体内に生じる誘導電圧の測定には、高電圧の分野で一般に電圧測定器として使用されるスパークギャップと、そのギャップで生じる火花放電の電磁波を検出できる電磁波センサを用いた。金属筐体内に誘導電圧の測定器具に繋がった電線等を配置すると、筐体内の電界分布を乱してしまうため、正確な誘導電圧を測定できなくなる。このような理由から、スパークギャップと電磁波センサを用いた非接触の誘導電圧の測定法^{5)-7),9),10),14)}を用いている。

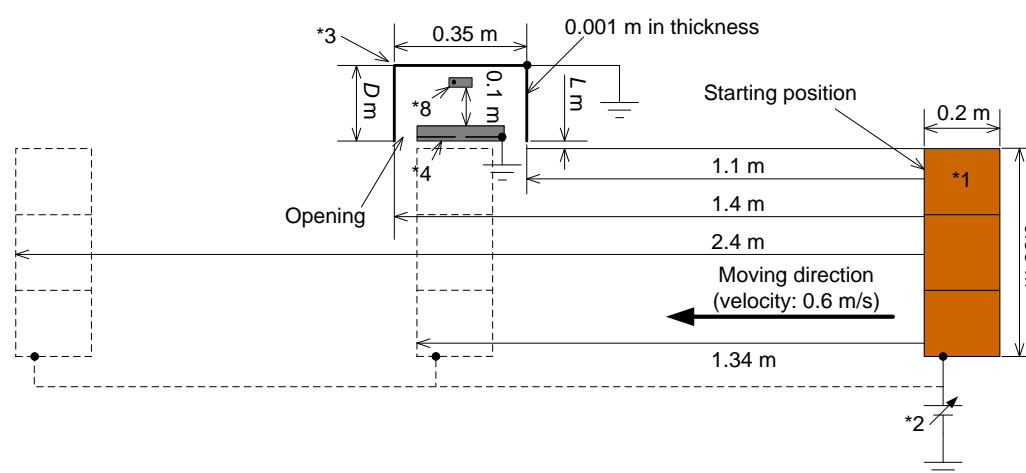
図1は、本研究に使用した実験装置を表している。本実験装置は、人体等の帯電物体が電子機器を模した金属筐体の前面を通過する状況を模擬した。帯電物体(*1)の大きさは、高さ1.8m、横0.55m、奥行き0.2mとした。帯電物体は、高電圧の直流電源に接続した。帯電物体は、移動ステージの上に置いてあり、人体がゆっくり歩行する速度(0.6m/s)で移動させた。電子機器の金属筐体として、前面のみ開口した図中のアルミの筐体(*3)(縦0.2m、横0.35m)を用いた。

図2は、帯電物体が金属筐体の前面を移動したとき、金属筐体内に生じる誘導電圧を測定できる誘導電極を表している。誘導電圧の測定の原理を、次の通り説明する。帯電物体が金属筐体の前面を移動すると、金属筐体内の誘導電極の二枚の銅板（スパークギャップ付き）に、静電誘導が原因で電圧が誘導する。二枚の銅板間の電位差がスパークギャップの火花電圧を超えると、スパークギャップで火花放電が起こる。スパークギャップの火花電圧は、パッシ

* : 工学院大学工学部電気システム工学科



(a) 3D view



(b) Top view

Figure 1. Arrangement of experimental setup. The distance L denotes the distance between the charged body (object) and the front of metal box. The depth D denotes the depth of the metal box. *1: charged object (body), *2: DC high voltage power supply (0-50 kV), *3: partially opened metal box, *4: induction electrode, *5: acrylic table (PMMA), *6: automatically transporting stage, *7: grounded copper plate, *8: EMI locator.

エンの法則で知られている通り、計算および実験で明らかになっている。スパークギャップで起きる火花放電を電磁波センサで検出すれば、帯電物体の電圧と金属筐体内の誘導電極に生じる誘導電圧の比がわかる。

本研究では、金属筐体の奥行きと筐体内に生じる誘導電圧の関係を明らかにするため、奥行きのみ異なる金属筐体 (奥行き 0.2 m、0.4 m、0.5 m、0.7 m、1.0 m) を用いて実験を行った。

本実験は、温度 9~10℃、相対湿度 70%~77%の室内で行った。

【H22 研究成果】

代表的な研究成果は、次の通り。実験研究の結果、帯電物体が接地された金属筐体の前面を通過すると、金属筐体内に生じる誘導電圧は、金属筐体の奥行きを 0.2 m (体積 : 0.014 m³) から 1.0 m (体積 : 0.07 m³) まで変えても、その大きさがほとんど変わらないことを明らかにした。このように接地された金属

筐体内に生じる誘導電圧は、筐体の大きさには依存しないことがわかった。

本研究の成果は、国内外の学会等で発表し、国外の英文論文誌に参考文献 10) の論文が掲載された。

(2) 平成 23 年度

【H23 進捗状況】

これまでの研究で、帯電物体が金属筐体の前を移動すると、金属筐体内に正極性と負極性の誘導電圧 (放電) ¹⁰⁾ が発生することを明らかにしたが、正極性と負極性の誘導電圧が順番に現れる理由がわかつ

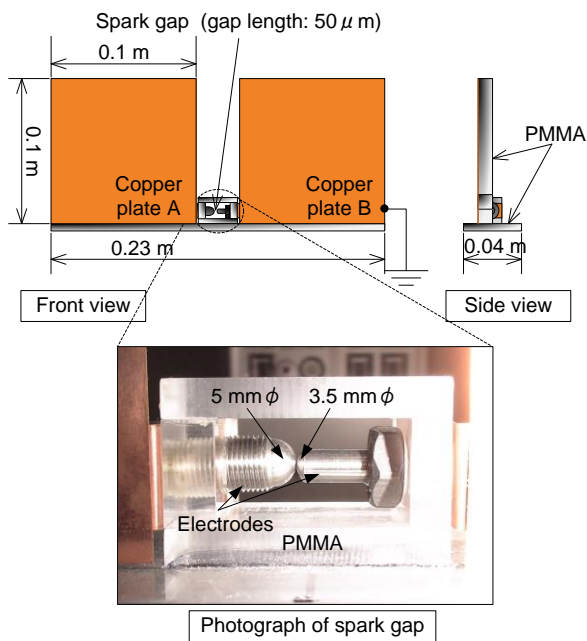
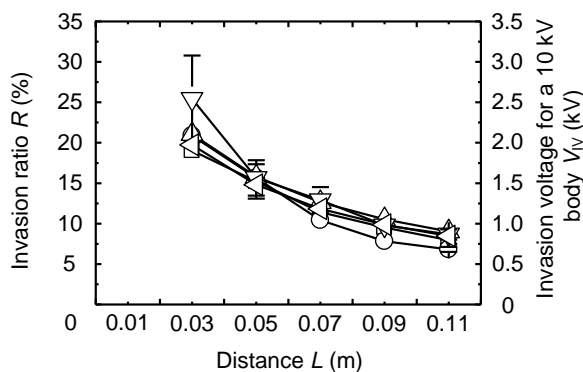


Figure 2. Induction electrode.



- : Metal box A (0.014 m³), ▽ : Metal box D (0.049 m³),
- : Metal box B (0.028 m³), ◁ : Metal box E (0.07 m³),
- △ : Metal box C (0.035 m³),

Figure 3. The invasion ratio generated in partially opened metal boxes with different volumes, and the invasion voltage for a 10 kV body.

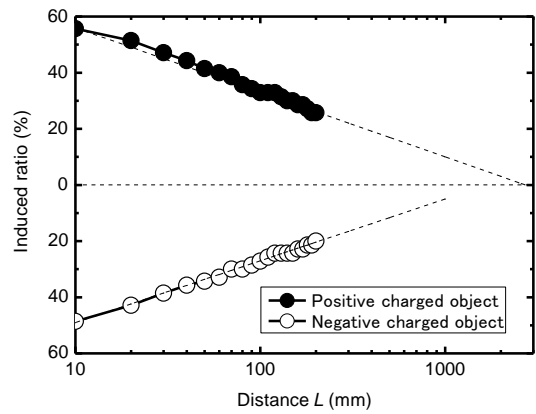


Figure 4. The extrapolation of the induced ratio at the distance L .

ていなかった。さらに本研究で検討を行っている誘導電圧の問題は、電磁界計算ソフト等を用いた 3D シミュレーションでは検討が難しい配置 (例えば、金属筐体内に厚さが 0.1 mm 程度の銅板を配置している等) も扱っており、主として実験で検討を行うことが必要になる。平成 23 年度の研究では、帯電物体が金属筐体の前を移動したとき、正極性と負極性の誘導電圧が生じる理由を明らかにすることを目的の一つとして、帯電物体が非接地の金属筐体の前を移動したとき、金属筐体に生じる誘導電圧を、帯電物体の電圧極性、帯電物体と金属筐体間の距離を変えて明らかにした。

本実験は、温度 14°C、相対湿度 70%の室内で行った。

【H23 研究成果】

パソコンの電源プラグ (3P プラグ) のアース線を確実に接地しないと、金属筐体は電気的に絶縁された浮遊電位になる。一般にビルや住宅のコンセントは接地端子の付いていない 2P プラグが多く使用されており、パソコンや計測器等の金属筐体は接地しないで使用されることが多い。これらの金属筐体は、しばしば火花放電 (電磁パルス) の発生源となる。静電気が原因で起きる電磁パルスは、パソコンや計測器等の電子機器の誤動作や誤停止の原因となる。

H23 の研究で得られた成果の一部を、図 4 に表す。図 4 は、帯電物体 (± 7 kV) が一般的な電子機器の金属筐体 (0.014 m³) の前を移動したとき、その非接地の金属筐体に生じる誘導電圧の割合 (誘導率) を表した結果を表している。誘導率は、以下の式で表せる。誘導率に帯電物体の電圧を掛けることで、

非接地の金属筐体に生じる誘導電圧を求められる。

a) 正極性帯電物体: $R_P = -23 \log_{10} L + 79$ (%)

b) 負極性帯電物体: $R_N = -22 \log_{10} L + 71$ (%)

本研究の成果は、国内外の学会等で参考文献 11) の論文を発表した。

(3) 平成 24 年度

【H24 進捗状況】

帯電物体の移動により電子機器の金属筐体および筐体内に生じる誘導電圧は、各導体間の静電容量が分かれば、計算で求めることができる。しかし電気磁気学で学ぶ基本的な静電容量の式は、導体間の間隔が狭いときにしか適用できないこともある。本研究で製作した実験装置のように各導体間の間隔が広がると、近くにある近接する物体の影響を考慮しないと、正確な誘導電圧を求めることが困難となる。一般に電子部品として使用される小さなコンデンサの静電容量を計測できる静電容量測定器は複数ある。一般的な静電容量測定器はコンデンサの電子部品を浮遊電位にして測定する。他方、対地静電容量を測定できる静電容量測定器は、一般には入手することはできないが、その測定器の使用により導体の対地静電容量を測定できる。

このように帯電物体が移動したとき、距離の離れた導体間の正確な静電容量を二種類の方法で求め、金属筐体および筐体内の誘導電圧を明らかにした研究は筆者の知る限りで報告されていなかった。本研究では、平成 23 年度の実験で測定した誘導電圧を、二種類の方法で求めた各導体間の静電容量から求めた誘導電圧と比較検討した。

【H24 研究成果】

図 5 は、帯電物体が金属筐体 (非接地) の前を移動したとき、金属筐体に生じる誘導電圧の最大値の

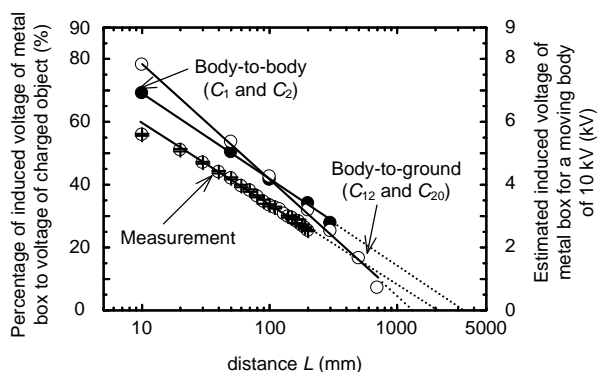


Figure 5. Estimated induced voltage of a metal box for a moving charged body of 10 kV.

割合を表している。その割合とは、帯電物体の電圧に対する金属筐体の誘導電圧の大きさを表している。人体等は一般に 10 kV 程度かそれ以上に帯電することがあり、図中の右側の軸は帯電物体が 10 kV のときに金属筐体に生じる誘導電圧を表している。図中では、一般的な静電容量測定器を用いて測定した各導体間の静電容量から計算で求めた誘導電圧 (図中の Body-to-body)、対地静電容量を測定できる静電容量測定器で測定した結果から各導体間の静電容量を求めてから計算で得られた誘導電圧 (Body-to-ground)、実際に測定した誘導電圧 (Measurement) をそれぞれ表している。図 5 から、測定で得られた誘導電圧は、二種類の計算で得られた結果よりも約 25% ($L: 10$ mm) 小さくなる。その差が生じた理由は、電荷の漏洩といえる。この図からわかる通り、帯電物体と金属筐体間の距離が 1 m 以上離れても、電子部品の故障を引き起こす誘導電圧が発生する可能性がある。

本研究の成果は、国外の学会および参考文献 12) の専門誌で発表している。

(4) 平成 25 年度

【H25 進捗状況】

これまでの研究では、帯電物体が金属筐体に近づき通過するときに生じる誘導電圧の問題を取り上げていた。しかし例えばパソコン (電子機器) のキーボードを操作していた人体が、椅子から立ち上がり、そのパソコンから遠ざかるときに生じる誘導電圧の問題もある。

特にノートパソコン等のバッテリー駆動の電子機器は、常に電氣的に絶縁された (浮遊電位) 非接地の金属筐体になり、この種の誘導電圧の問題が発生している可能性が高い。仮に帯電した金属筐体の近くにコイン等の導体が置いてあり、その導体間での火花放電が起こる。金属同士の接近で生じる火花放電は広帯域の電磁パルスの発生源になることが知られている。金属同士の接近で生じる電磁パルスは、人体がドアノブに触れる瞬間に生じる放電の電磁パルスよりも、電子機器にとっては大変脅威となる。

このようなトピックに関する研究報告は少しあるが、本実験装置のように実際のモデルに近い大きさの装置を用いて、一般性のある実験研究を行った報告は著者の知る限りでは報告されていない。

平成 25 年度の研究では、人体等の帯電物体が電

子機器の金属筐体(浮遊電位)から遠ざかったとき、開口部の無い金属筐体に生じる誘導電圧の問題に関して検討を行った。

本実験は、温度 25℃、相対湿度 63%の室内で行った。

【H25 研究成果】

図 6 は、帯電物体 (0.7 kV) が非接地の金属筐体から遠ざかったとき、金属筐体に生じる誘導電圧(最大 -2.3 kV) の測定結果を表している。このように帯電物体が金属筐体から遠ざかると、金属筐体には帯電物体の電圧の -3.3 倍の誘導電圧が生じることを明らかにした。一般に導体に生じる誘導電圧は、各導体間の静電容量で構成されるキャパシタンスモデルを用いて計算する。このようなモデルでは、各導体間の静電容量の比から、浮遊電位の導体に生じる誘導電圧を計算する。しかし本研究のように帯電

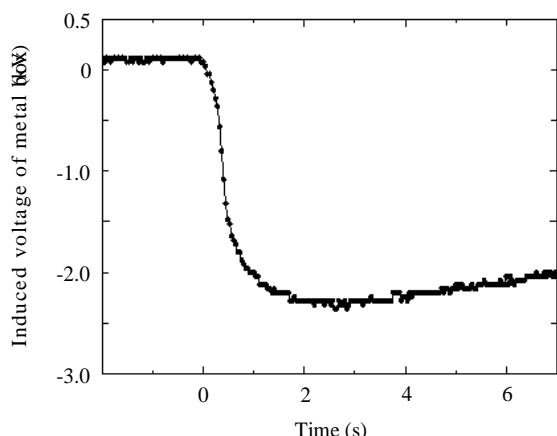


Figure 6. Induced voltage when a charged body moves away from a metal box (L : 10 mm).

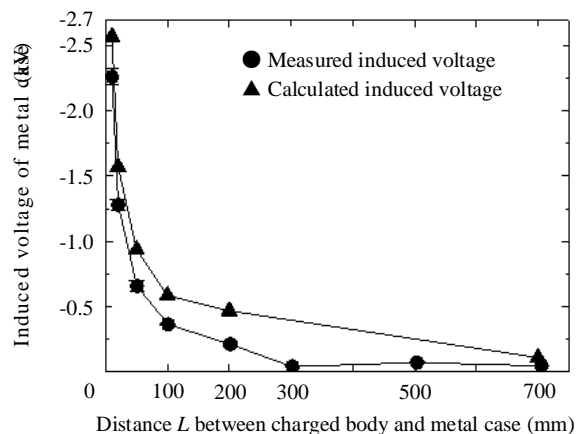


Figure 7. Comparison of measured and calculated results of induced voltage of metal box.

物体が浮遊電位の導体から遠ざかるときは、ボルテージデバイダー (分圧器) の原理で誘導電圧の理論計算等を行うと、実験結果とは電圧極性も異なる間違った結果が得られる。このように誘導電圧の問題を検討するには、(a)帯電物体の接近で生じる誘導電圧、(b)帯電物体の孤立で生じる誘導電圧、(c)帯電物体の通過で生じる誘導電圧の三つに分けて考えることが必要といえる。

帯電物体が金属筐体 (浮遊電位) から遠ざかったときに生じる誘導電圧は、金属筐体に生じる正確な電荷量が明らかにならないと、計算から求めることはできない。実験で得られた逆極性の誘導電圧の結果を検討するために電荷量を測定し、誘導電圧を計算した結果を実験結果と比較した。

図 7 は、帯電物体 (0.7 kV) を金属筐体から遠ざけたとき、金属筐体に生じる誘導電圧の最大値を測定と計算で比較した結果を表している。測定で得られた金属筐体に生じる誘導電圧は、帯電物体と金属筐体間の距離 L の増加にともなって、計算で得られた結果と同様の傾向になることがわかる。

本研究の成果は、国内の学会および学会論文誌で参考文献 13)の論文を発表した。

(5) 平成 26 年度

【H26 進捗状況】

人体等の帯電物体が電子機器の金属筐体から遠ざかったときに生じる誘導電圧の問題は、非接地の金属筐体だけでなく、接地された金属筐体内でも発生する。H26 年度の研究では、一般的な電子機器の金属筐体 (縦 0.2 m、横 0.35 m、奥行き 0.2 m) から帯電物体が遠ざかったとき、開口部のある接地された金属筐体内に生じる誘導電圧の問題を検討した。

本研究では、帯電物体が金属筐体から遠ざかったとき、金属筐体内に生じる誘導電圧は図 2 の誘導電極と電磁波センサを用いた非接触測定で明らかにした。また非接触測定で得られた誘導電圧の結果は、静電気の電圧を測定できる表面電位計で測定した結果、さらに測定した電荷量から計算で求めた結果と比較検討を行った。

本実験は、温度 14℃~16℃、相対湿度 52%~58%の室内で行った。

【H26 研究成果】

図 8 は、帯電物体が開口部のある接地された金属筐体から遠ざかったとき、金属筐体内に生じる誘導電圧を測定と計算から検討した結果を表している。

平成25年度の研究で得られた結果と同様、金属筐体内に生じる誘導電圧は、帯電物体の電圧とは逆極性になる。スパークギャップと電磁波センサを用いた誘導電圧測定法の結果は、表面電位計で測定した結果と比べると72%の大きさになるが、帯電物体と金属筐体間の距離 L が増加すると、表面電位計で測定した結果に近づくことがわかる。このように三通りの方法で測定した誘導電圧は、同様の傾向になる。

本研究の成果は、国外の学会で参考文献14)の論文を発表した。平成22年度～26年度までに実施した研究では、UDMで主要な設備を購入していない。

3. おわりに

本研究では、人体等の帯電物体が電子機器(金属筐体)の近くを移動したとき、金属筐体および筐体内に生じる誘導電圧を明らかにし、電子機器の機器設計に指針を与え、新しい試験法を提案することを提案することを目的として実施した。

本研究成果の一部から、次のことを明らかにした。

- (1) 接地された金属筐体内に生じる誘導電圧の大きさは、筐体の奥行き(体積)には依存しない。
- (2) 浮遊電位の金属筐体には、帯電物体と金属筐体間の距離が1 m以上離れても、電子部品の静電破壊電圧を超える誘導電圧が発生する。
- (3) 帯電物体が浮遊電位の金属筐体から遠ざかると、金属筐体に生じる誘導電圧は、帯電物体の電圧の-3倍以上になることがある。
- (4) 帯電物体が接地された金属筐体から遠ざかると、金属筐体内には帯電物体の-0.4倍程度の誘導電圧が生じる。

本研究の成果は、信頼性の高い電子機器の設計に役立つと思われる。

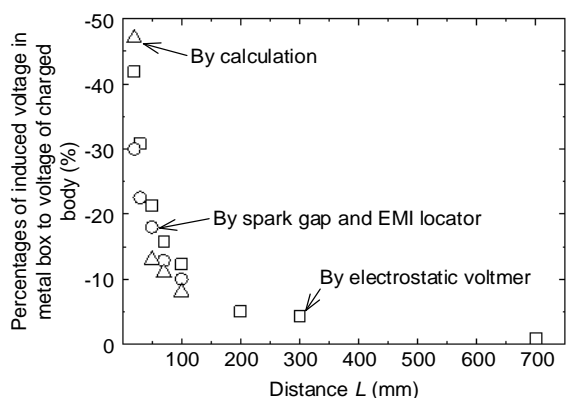


Figure 8. Percentages of induced voltages in the metal box, by measurements and calculation.

参考文献

- 1) 電気学会編、電気工学ハンドブック(第7版)、オーム社、pp. 2335-2338、2013
- 2) Masamitsu Honda, A new threat—EMI effect by indirect ESD on electronic equipment, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 25, No. 5, pp. 939-944, 1989
- 3) 藤原修 他、スマートシティの電磁環境対策、S&T出版、pp. 106-118、2012
- 4) 渡邊政宏、市川紀充、坂本哲夫、帯電した人体の動きによって発生する誘導電圧を利用した動作判別、*静電気学会誌*、Vol. 38, No. 4, pp. 183-188、2014
- 5) 市川紀充、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—、*電気学会論文誌 C*、Vol. 125, No. 7, pp. 1030-1036、2005
- 6) Norimitsu Ichikawa, Electrostatically induced potential difference between conductive objects contained in a partially opened metal box, *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, No. 7, pp. 414-422, 2007
- 7) 市川紀充、非接地金属筐体内の導体に生じる静電誘導電圧、*電気設備学会誌*、Vol. 30, No. 7, pp. 599-606、2010
- 8) Norimitsu Ichikawa, Measuring of electrostatically induced voltage and its polarity in partially opened metal box by means of neon lamp and photomultiplier tube, *Journal of Electrostatics*, Vol. 68, No. 4, pp. 315-320, 2010
- 9) 市川紀充、金属筐体開口部に取り付けられたシールド導体による静電誘導電圧の低減効果、*電気設備学会誌*、Vol. 31, No. 10, pp. 813-820、2011
- 10) Norimitsu Ichikawa, Yuuki Huruta, Electrostatically induced voltage generated in "metal boxes with different volume" measured by spark gap and electromagnetic wave sensor, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, No. 5, pp. 1433-1438, 2011
- 11) Norimitsu Ichikawa, Seiji Takei, Change in electrostatically induced voltages of an ungrounded metal box without openings generated by a moving charged object, *14th International Symposium on Electrets, Montpellier*, pp. 191-192, 2011.
- 12) Norimitsu Ichikawa, Measurement and calculation of electrostatically induced voltage of ungrounded metal box generated by moving charged body, *Journal of Electrostatics*, 2015 (掲載決定)
- 13) 市川紀充、牧田幸太、帯電した物体を金属筐体から遠ざけたときに生じる静電誘導電圧、*電気学会論文誌 D*、Vol. 134, No. 10, pp. 870-875、2014
- 14) Norimitsu Ichikawa, Electrostatically induced voltage on conductive objects contained in metal box when charged body moves away from the box, *9th Conference of the French Society of Electrostatics, Toulouse*, pp. 225-230, 2014