

# 火花抵抗則の適用範囲についての実験的検証

高 義礼\*

## Experimental Verification to Elucidate Applicable Range of Spark-Resistance Formulae

Yoshinori TAKA\*

**Abstract** — In order to produce the new international standard for ESD (electrostatic discharge) immunity test, it must be studied the characteristics of air discharge (spark) phenomena. In this study, to elucidate the characteristics of spark discharge, especially to verify the applicable range of spark-resistance formulae proposed by Rompe-Weizel and Toepler, measurement system for the spark current waveform and spark length was developed. In this paper, spark voltage waveform and spark length was derived and measured at charge voltages from 300 V to 7000 V, these result was compared with calculated them from Rompe-Weizel's and Toepler's spark resistance formulae. As a result, it was found that Rompe-Weizel's formula was applicable to calculate spark voltage waveform at the charge voltage from 300 V to 7000 V.

**Key words** : Air discharge, Spark voltage, Spark length, Spark-resistance formulae

### 1. はじめに

近年ICの高集積・高速・低消費電力化が進み、電子機器の高機能化が図られてきた。しかしながらその一方で、帯電した人体からの静電気放電(ESD:Electrostatic Discharge)における故障や誤動作などの問題[1-5]が後を絶たない。このため電子機器の静電気耐性試験法[6,7]がIEC(国際電気標準会議: International Electrotechnical Commission)により定められ、各国でこの試験規格(IEC61000-4-2)[6,7]に基づいた試験がおこなわれるに至っている。ところで、現在の静電気耐性試験法は機器への接触放電を基本としているが、実際の帯電した人体からの放電は気中放電(火花放電)であるため、両者の放電メカニズムが異なり、試験にパスしてもなお誤動作発生の問題が絶えない。そのため、気中放電の諸特性を考慮した新たな静電気耐性試験法の提案が必要とされている。さて、気中放電(火花放電)であるが、当放電は、電極移動速度と火花長の関係[8]や、周波数スペクトル分布特性(特に高帯域側)[9]等において、不明の点が多い。このため本研究では火花チャンネルにおける電圧・電流・抵抗値をnsオー

ダの時間領域(広帯域)で測定し、火花放電の基本的な放電メカニズムを明らかにすることを目的としている。本研究ではこれまで、提唱されている火花抵抗則[10](Rompe-Weizel則, Toepler則)の適用範囲を詳しく検証することを目指して開発した火花電圧測定システムを用いておこなった予備実験の結果について示してきた。そこでは、測定された火花電流波形から火花電圧波形が導出できることを示した。本稿では、充電電圧を変えて取得した火花電流波形から火花電圧波形を導出し、これに火花抵抗則を用いて求めた火花電圧波形をフィッティングさせて、この際の火花長と測定された火花長とを比較した結果について示す。

### 2. 火花電圧測定装置

実験装置をFig.1に示す。直径70 mmの円板を500 MΩの高抵抗を通して高電圧直流電源により300 Vから7000 Vに充電する。同円板は微動ステージに固定されており、付属のカリパーによって10 μmの精度で直線的に移動できる。また、同円板は1m×1mのグラウンドに接続されたアルミ板中央に取り付けられた電流ターゲット(ESDガンの放電電流波形

\* 釧路高専電子工学科

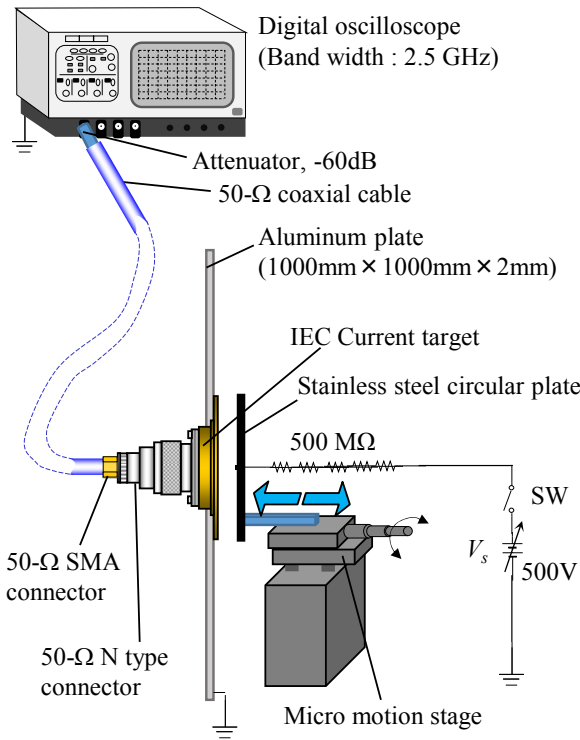


Fig.1 Measurement system for spark current and spark length.

校正用電極：ノイズ研製06-00067A) と対向しており、円板中央の突起（直径2 mm、高さ0.5 mmの円柱）から電流ターゲットの中心導体へ放電する構造になっている。円板を10  $\mu\text{m/s}$  程度で電流ターゲットへ接近・放電した際の放電電流波形は同軸ケーブルと同軸型減衰器（-60dB）を通してターゲットに接続された帯域12 GHzのデジタルオシロスコープ（テクトロニクス TDS6124C, 12GHz, 40GS/s）で電圧波形 $v(t)$ として測定される。なお、火花放電した際の両者の距離（火花長 $\delta$ ）は、カリパーの目盛で判読する。Fig.2は放電電流の等価回路を示す。Fig.2上図は円板電極と電流ターゲットの配置と、各部の寸法を示す。電流ターゲットの内導体の直径は5 mmである。ここで、 $C_g$ は円板とターゲットのグラウンド間の浮遊容量、 $C_s$ は円板電極中央の円柱状突起と電流ターゲットの中心導体間を平行平板コンデンサとみなしたときの浮遊容量である。このとき、 $C_g \gg C_s$ となるように円柱状突起はできるだけ小さくした。これにより、 $C_s$ に溜まっている電荷による火花電流（観測にはかからない）の影響を小さくできる。したがって、火花電流 $i_s(t)$ はほぼターゲットに注入される電流 $i(t)$ と等しくなる。電流ターゲットは注入された電流波形 $i(t)$ が50  $\Omega$ 抵抗で $2 \times i(t) = v(t)$ として観測されるように設計されたものである。なお、火花電圧 $v_s(t)$ は

$$v_s(t) = V_c - \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^t i(t') dt' - Ri(t), C_g = \frac{1}{V_c} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) dt \quad (1)$$

$$i(t) = i_s(t) - C_s \frac{dv_s(t)}{dt} \quad (2)$$

で計算される。ここで、 $C_g$ は円板とターゲットのグ

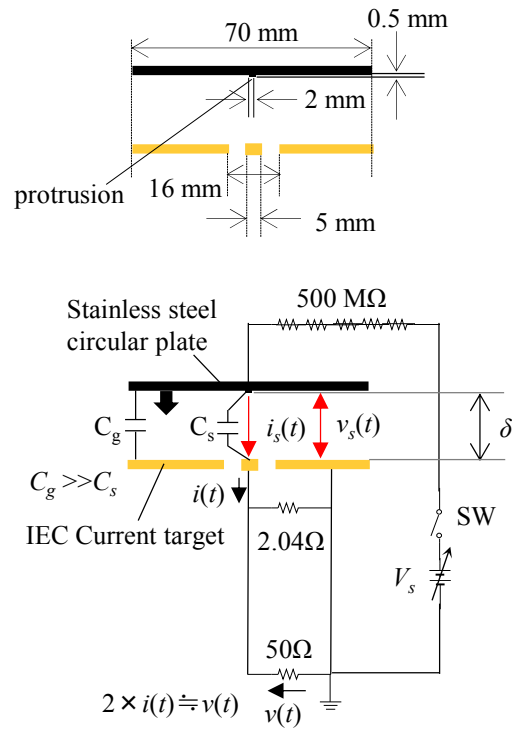


Fig.2 Equivalent circuit for spark current.

ラウンド間の浮遊容量であり、 $i(t)$ を $-\infty \sim +\infty$ まで時間積分したものを充電電圧で除することからわかる。一方、Rompe-Weizel則およびToepler則を用いた火花電圧の式は以下の様になる。ここで、 $K_{RW}$ と

$$\left. \begin{aligned} v_s(t) &= r(t) \times i_s(t) \approx \frac{K_{RW} \delta}{\sqrt{\int_{-\infty}^t i(t')^2 dt'}} \times i(t) \quad (3) \\ v_s(t) &= r(t) \times i_s(t) \approx \frac{K_T \delta}{\int_{-\infty}^t i(t') dt'} \times i(t) \quad (4) \end{aligned} \right\}$$

$K_T$ は火花定数と呼ばれるもので、ここでは文献10にしたがって $K_{RW} = 67.4 [\text{V} \cdot \text{s}^{0.5}/\text{m}]$ 、 $K_T = 3.7 \times 10^{-3} [\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}]$ の値を用いている。

### 3. 火花電流波形および火花長の測定結果

測定した放電電流波形および火花電圧の時間変化についてFig.3からFig.6に示す。各図で上図が測定された火花電流波形 $i(t)$ 、下図がその火花電流波形から求められた火花電圧波形 $v_s(t)$ を示す。火花電圧波形のグラフのうちで▲は測定された火花電流から式(1)を用いて導出されたもの、黄色と灰色の実線はそれぞれRompe-WeizelおよびToeplerの火花抵抗則から求めた波形である。ここで、両火花抵抗則から求める際は実測電流波形から求めた波形にフィットするように火花長 $\delta$ を調整している。なお、実測の火花長 $\delta$ と式(3)、(4)で用いた火花長との比較はFig.7に示している。結果から、Rompe-Weizel則とToepler則から求めた放電電圧波形は概ね形状が一致している。しかしながら、Fig.7から、火花長 $\delta$ は実測とRompe-Weizel則が比較的合い、Toepler則は1000 V以下の電圧では実測と合わないことがわか

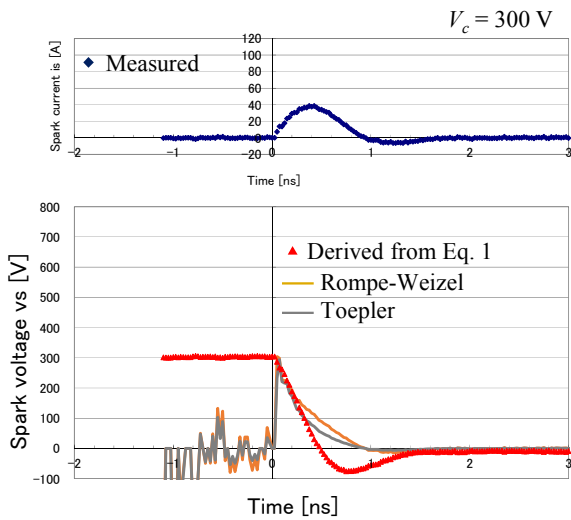


Fig.3 Measured spark current waveform and the corresponding spark voltages at a charge voltage of 300 V.

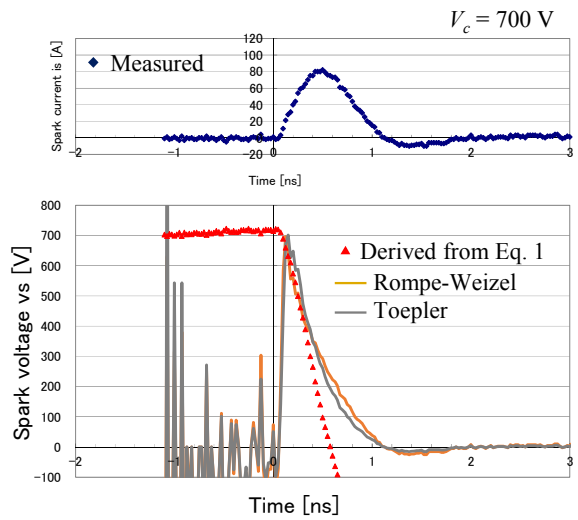


Fig.4 Measured spark current waveform and the corresponding spark voltages at a charge voltage of 700 V.

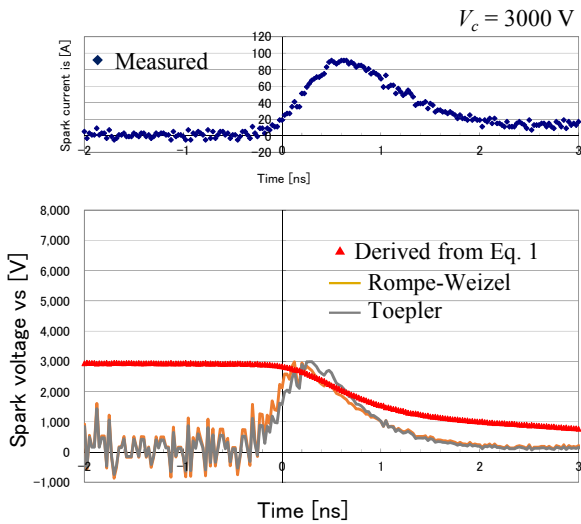


Fig.5 Measured spark current waveform and the corresponding spark voltages at a charge voltage of 3000 V.

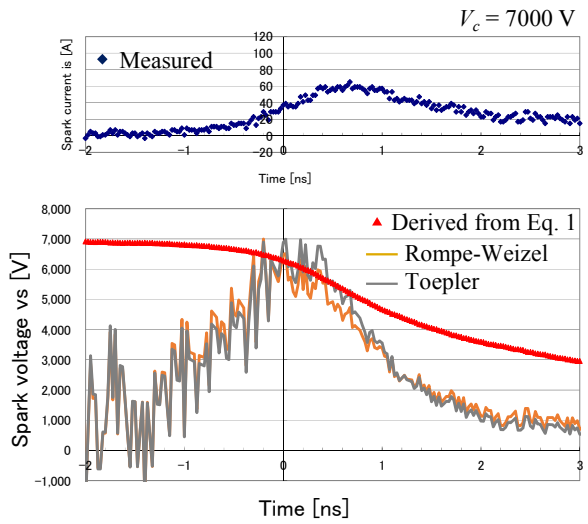


Fig.6 Measured spark current waveform and the corresponding spark voltages at a charge voltage of 7000 V.

る。ただ、1000 V以下では火花長が100  $\mu\text{m}$ 以下となり、表面粗さや形状の影響が大きくなるため一概にRompe-Weizel則が適用できるとは断定できない。本稿の実験では電極表面は研磨処理をしておらず、表面の凹凸が放電に影響している可能性が十分にある。よって研磨された電極表面での実験が今後必要である。また、7000 V以上の電圧において両者がどこまで適用可能であるかについても今後詳しく調べる必要がある。

#### 4. まとめ

これまで示されている火花抵抗則の適用範囲について詳しく調べるため、火花電圧を測定するための装置を開発し、測定した火花電流波形から火花電圧波形を導出した。これに対し、Rompe-Weizel則およびToepler則から求めた火花電圧波形を比較したところ、Rompe-Weizel則では概ねどの充電電圧でも合うのに対して、Toepler則の場合は2000 V以上の充電電圧では割と合うが、1000 V以下の充電電圧では合わないことが示された。しかしながら、1000 V

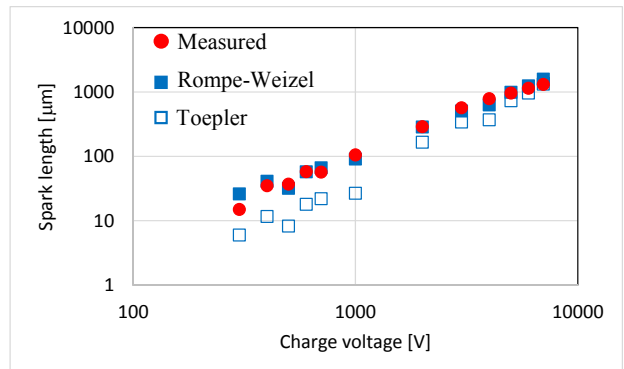


Fig.7 Spark length for charge voltages from 300 V to 7000 V.

以下では火花長が100  $\mu\text{m}$ 以下となり、電極表面の形状や粗さが影響するためRompe-Weizel則があうとは現在のところ断定できない。今後実験的に詳しい検討が必要である。また、2000 V以上では両抵抗則が実測に合うように見えるが、7000 V以上においても合うかどうかを今後調べる必要がある。

#### 謝 辞

本研究は日本学術振興会の平成27-29 年度科学研究費助成金（課題番号：JSPS 15K05968）によっておこなわれた。ここに深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- [1]嶺岸茂樹：「静電気放電ESD のEMC に関する研究動向」, 電学論A, Vol.132, No.5, pp.335-338 (2012-5)
- [2]G. P. Fotis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos : “Measurement of the electric field radiated by electrostatic discharges” , Measurement Science and Technology, Vol.17, pp.1292-1298 (2006)
- [3]R. Jobava, D. Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, and M. Aidam : “Computer simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans” , IEEE Trans. EMC, Vol.42, No.1, pp.54-65 (2001)
- [4]G. Cerri, R. De Leo, and P. V. Mariani : “Theoretical and experimental evaluation of electromagnetic fields radiated by ESD” , Proc. 2001 IEEE EMC International Symposium, Montreal, Canada, pp.1269-1272 (2001)
- [5]O. Fujiwara : “An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge” , IEICE Trans. COMMUN., Vol.E79-B, No.4, pp.483-489 (1996)
- [6]IEC (International Electrotechnical Commission) : “IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4 : Testing and measurement techniques – Section2: Electrostatic discharge immunity test”, Edition 1.2 (2001-4)
- [7]IEC (International Electrotechnical Commission), “IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4 : Testing and measurement techniques - Section2: Electrostatic discharge immunity test, ” Edition 2.0, Dec. (2008)
- [8]森 育子・高 義礼・藤原 修：「帯電人体からの金属棒を介した気中放電による放電電流の広帯域測定」, 電学論A, Vol.126, No.9, pp.902-908 (2006-9)
- [9]川又憲, 嶺岸茂樹, 芳賀昭：「1,500V以下のESDに伴う過渡電圧の立上り時間及び周波数スペクトルに関する実験的検討」, 電子情報通信学会誌B, Vol.J86-B, No.7, pp.1191-1198, 2003年7月
- [10]Yoshinori TAKA, Osamu FUJIWARA : “Verification of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap ESD”, IEICE Trans, Commun., Vol.E93-B, No.7, pp.1801-1806, July, 2010
- [11] The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ), “Handbook of Discharge”, Ohmsha Publishing Co., Ltd. pp.199-201 1995
- [12] The Institute of Electrostatics Japan, “Handbook of