

# 静電気放電における火花抵抗則の適用範囲についての検証

高 義礼\*

## Verification of Applicable Range of Spark-Resistance Formulae for Electrostatic Discharge

Yoshinori TAKA\*

**Abstract** — In order to establish a new international standard for ESD (electrostatic discharge) immunity test, it is crucial to scrutinize 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, a measurement system for the spark current waveform and spark length was developed. In this paper, spark voltage waveforms were derived from measured spark current waveforms at charge voltages of 500 V and 4000 V, and these results were compared with waveforms calculated from Rompe-Weizel's and Toepler's spark resistance formulae. As a result, it was found that the spark constants we used of Rompe-Weizel's and Toepler's formula are similar to the values widely used by many researchers at the charge voltage higher than 2000 V.

**Key words** : Spark discharge, Spark voltage waveform, Spark length, Spark-resistance formulae, spark constant

### 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オーダーの時間領域(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実験の結果について示してきた[11]。そこでは、充電電圧500Vの場合はToepler則が比較的良好に合うこと、一方、4000Vの場合はRompe-Weizel則が比較的良好に合うことが示された。ただし、これらの結果は2つの充電電圧しか見ておらず、広い充電電圧における検討が今後の課題であった。本稿の実験では500Vから4000Vの充電電圧においていくつか測定し、火花電圧波形を求める際の火花定数の値について、これまで研究者の間で広く使用されてきた値と比較した。

### 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 M $\Omega$ 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  $\mu$ mの精度で直線的に移動できる。また、同円板は1m $\times$ 1mのグラウンドに接続されたアルミ板中央に取り付

\* 釧路高専電子工学科

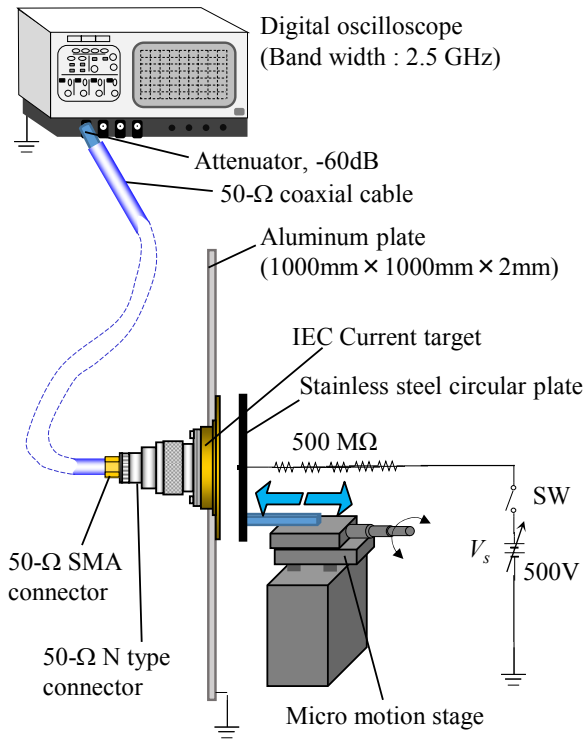


Fig.1 Measurement system for spark current and spark length.

けられた電流ターゲット (ESDガンの放電電流波形校正用電極: 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 μm/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 Ω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

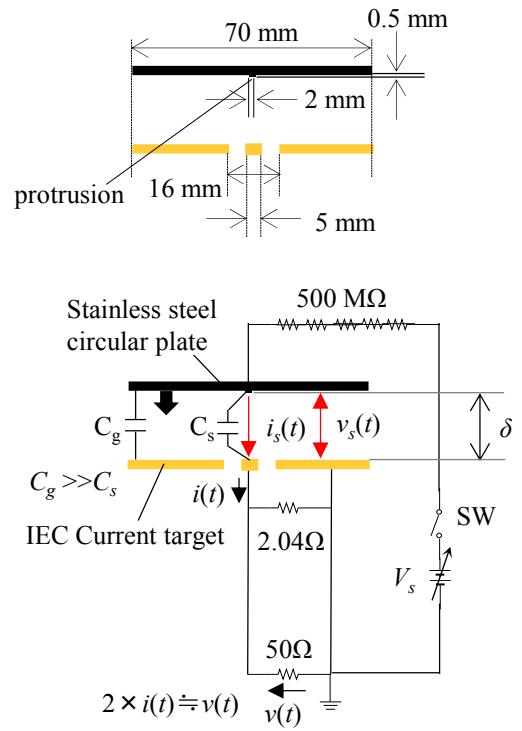


Fig.2 Equivalent circuit for spark current.

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.

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

ここで,  $K_{RW}$ と $K_T$ は火花定数と呼ばれるもので, 文献10によれば $K_{RW} = 67.4[\text{V} \cdot \text{s}^{0.5}/\text{m}]$ ,  $K_T = 3.7 \times 10^{-3}[\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}]$ であり, これらは一般的に広く用いられている値である.

### 3. 火花電流および火花電圧波形の測定結果

測定した放電電流波形および火花電圧波形の時間変化についてFig.3およびFig.4に示す. なお両図は充電電圧500Vおよび4000Vの場合の一例である. 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導出した火花電圧波形 $v_s(t)$ である. なお, 下図における黒の破線は式(1)から, 赤と青の破線は式(3) (Rompe-Weizel則)ならびに式(4) (Toepler則)から求めた結果である. ここで, 両火花抵抗則から求める際は実測の火花電流波形から求めた波形に一致するように火花定数を調整した. なお, このとき, 火花長は実測値を用いており, 充電電圧500Vにおいては54μm, 充電電圧4000Vにおいては829μmであった. 充電電圧500Vにおいては, Rompe-Weizel則で93[V · s<sup>0.5</sup>/m], Toepler則で6.7 × 10<sup>-3</sup>[V · s/m]とし, 充電電圧4000Vにおいては

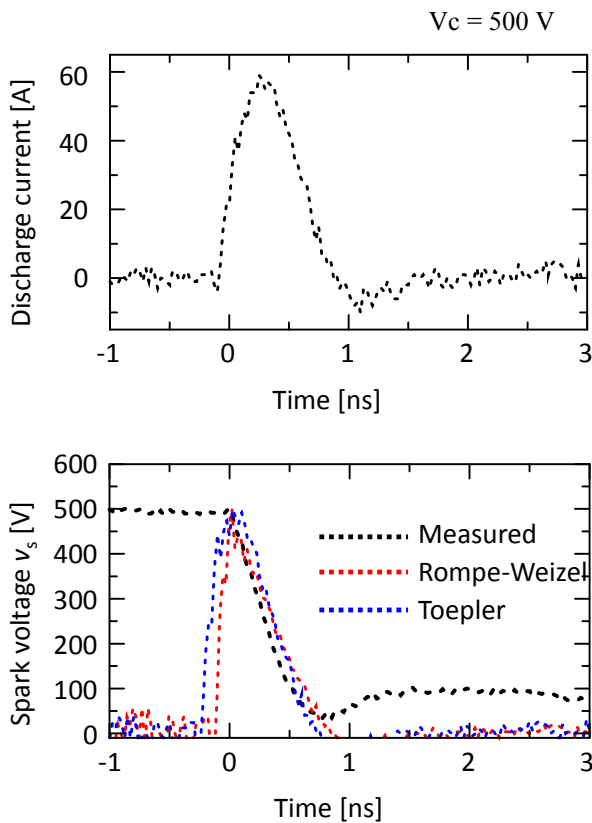


Fig.3 Measured spark current waveform and the corresponding spark voltages at a charge voltage of 500 V. Upper : measured current waveform. Lower : spark voltage waveforms derived from measured current waveform and calculated by Rompe-weize's and Toepler's formulae.

Rompe-Weizel則で $61[\text{V} \cdot \text{s}^{0.5}/\text{m}]$ , Toepler則で $3.45 \times 10^{-3}[\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}]$ とした. これらの火花定数の値を2章で示した一般的に使用されている値と比べると, 充電電圧が500Vにおいては両者ともに一致しなかったが, 一方で充電電圧が4000Vの時は両者とも概ね一致した. 同様に, 1000Vのとき ( $\delta = 98 \mu\text{m}$ ) は Rompe-Weizel則で $91[\text{V} \cdot \text{s}^{0.5}/\text{m}]$ , Toepler則で $4.90 \times 10^{-3}[\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}]$ , 2000Vのとき ( $\delta = 316 \mu\text{m}$ ) は Rompe-Weizel則で $63[\text{V} \cdot \text{s}^{0.5}/\text{m}]$ , Toepler則で $3.65 \times 10^{-3}[\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}]$ であった. 以上の結果から, 1000V以下の低電圧では火花定数は一般的に使われている値と一致しないが, 2000V以上の高電圧になるとこれまで広く使用されている火花定数の値と一致することが示唆された. 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これまで使用されてきた火花定数が使用できないとは断定できない. 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, 数百Vから数kVにわたる電圧において火花定数の値がどのようになるかについて今後詳しく調べる必要がある.

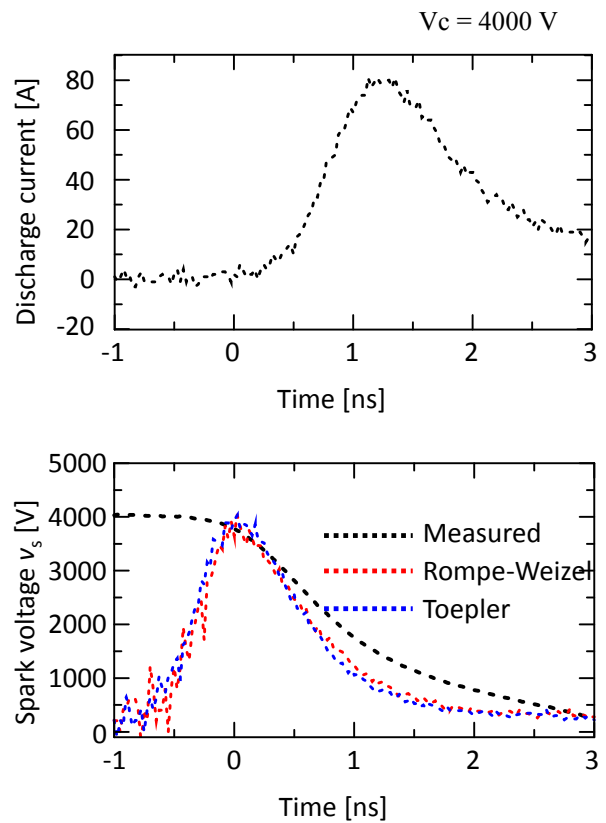


Fig.4 Measured spark current waveform and the corresponding spark voltages at a charge voltage of 4000 V. Upper : measured current waveform. Lower : spark voltage waveforms derived from measured current waveform and calculated by Rompe-weize's and Toepler's formulae.

#### 4. まとめ

これまで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, 火花定数を調整することで両者ともに実測波形に合うことが示された. 火花定数については, 500Vおよび1000Vでは一般的に使われている値[10]と一致しないが, 2000Vおよび4000Vになると一致することが示された. 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これまで使用されてきた火花定数が使用できないとは断定できない. 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, 数百Vから数kVにわたる広い電圧範囲において火花定数の値がどのようになるかについて今後詳しく調べる必要がある.

#### 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 および JSPS 18K04093) によっておこなわれた. ここに深く感謝の意を表す.

## 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] Yoshinori Taka and Osamu Fujiwara, “Validity and Applicability of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap Sparks in Parallel Disc Electrodes”, 電気学会論文誌A(基礎・材料・共通部門) Vol.138 / No.6, pp.316-321, June, 2018