

# 静電気放電における火花抵抗則の検証

## —火花電圧測定システムの開発—

高 義礼\*

## Verification of Spark-Resistance Formulae for

## Electrostatic Discharge

## -Development of Measurement System for Spark Voltage-

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 voltage and spark length was developed. In this paper, the author measured spark length at charge voltages below 500 V to investigate the measurement limitation of the developed system. As a result, we found that measurement limitation of the spark length is about 10  $\mu\text{m}$ .

**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。本稿では、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示し、予備実験としておこなった火花長の測定限界について調べた結果について報告する。

### 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500 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  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m/s}$ 程度で電流ターゲットへ接

\* 釧路高専電子工学科

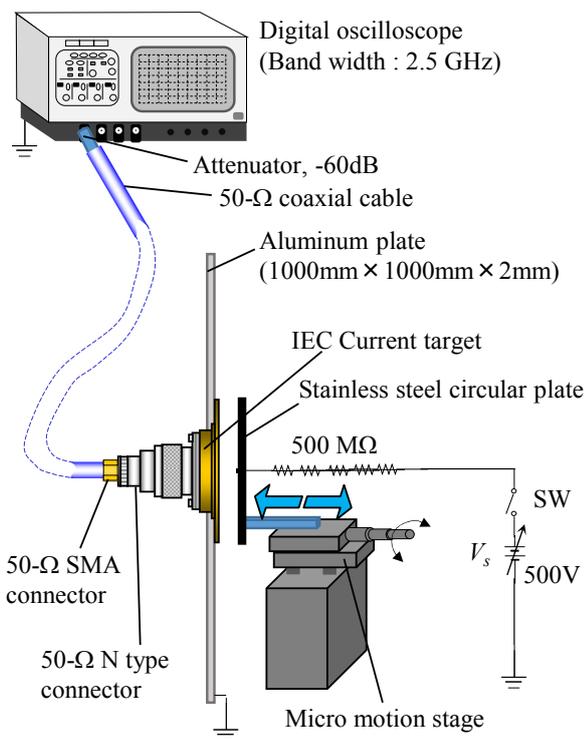


Fig.1 Measurement system for spark current and spark length.

近・放電した際の放電電流波形 $i_s(t)$ 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2.5 GHzのデジタルオシロスコープ (レクロイ WaveRunner625Zi) で電圧波形 $v_s(t)$ 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たて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。電流ターゲットは注入された電流波形 $i_s(t)$ が50  $\Omega$ 抵抗で $2 \times i_s(t) = v(t)$ 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

$$v_s(\tau) = \frac{Q_g - \int_0^\tau i_s(t) dt}{C_g} - 2i_s(t) \quad (1)$$

で計算される。ここで、 $Q_g$ は $C_g$ に蓄積される初期電荷量であり、 $i_s(t)$ を $-\infty \sim +\infty$ まで時間積分することからわかる。なお、現時点では、電流ターゲットのインダクタンスは考慮しておらず、今後その影響の検討が必要であると考えている。

### 3. 火花電流波形および火花長の測定結果

予備実験で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に示す。このときの充

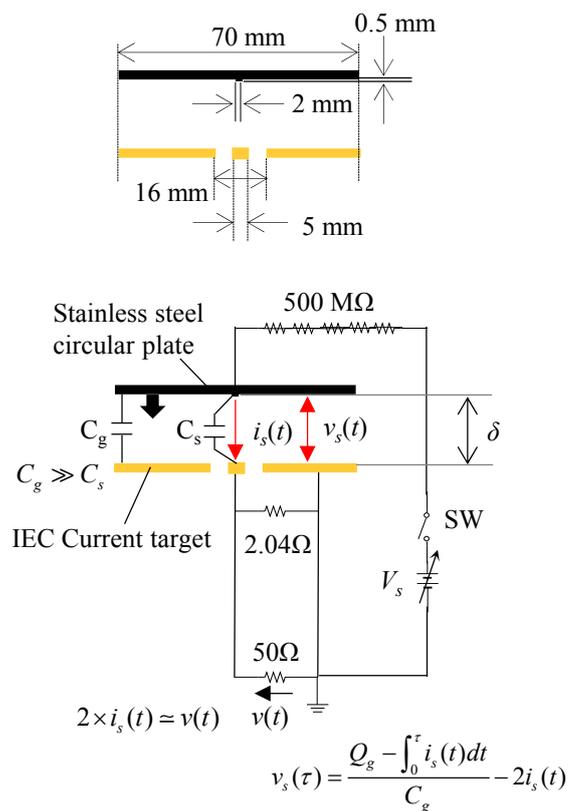


Fig.2 Equivalent circuit for spark current.

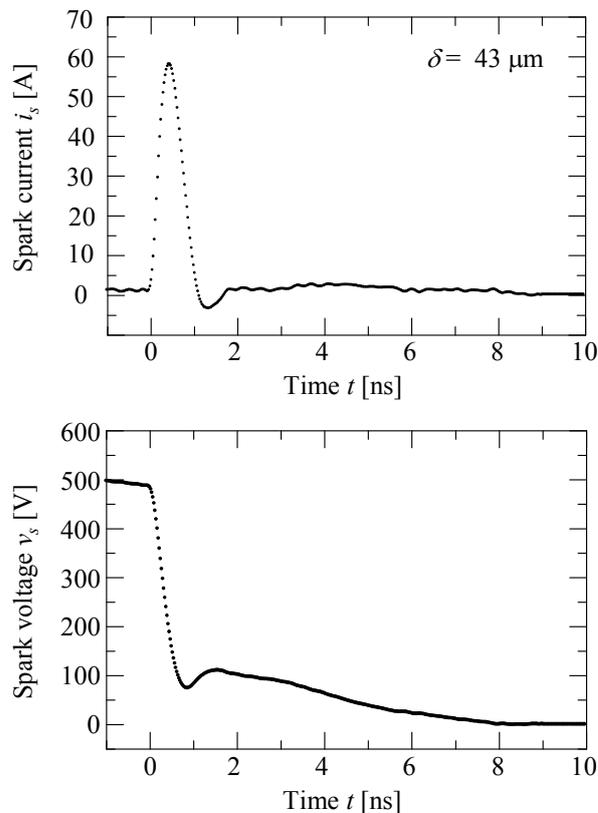


Fig.3 Measured spark current waveform and time dependent of spark voltage.

電電圧は500 V、火花長 $\delta$ は43  $\mu\text{m}$ であった。電流波形 (上図) の測定範囲は10 nsである。電流波形から計算した火花電圧波形 (下図) は式(1)より求めた。

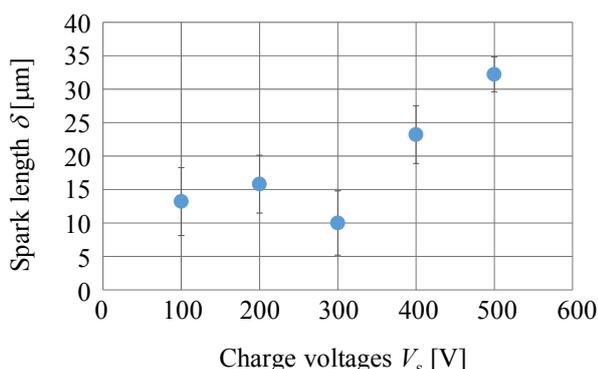


Fig.4 Spark length for charge voltages below 500 V.

同図より，火花発生直後に火花ギャップの電圧が充電電圧からステップ的に変化することがわかる．一方，火花長 $\delta$ の測定限界については，以下のように調べた．充電電圧を500 Vから100 Vきざみで下げていき最小100 Vまでとし，各充電電圧において10回ずつ測定した平均値を求めた．結果をFig.4に示す．同図の横軸は充電電圧 $V_s$  [V]，縦軸は火花長 $\delta$  [ $\mu\text{m}$ ]である．エラーバーは標準偏差を表している．結果より，400 Vまでは充電電圧とともに火花長が減少しているのがわかる．例えば，500 Vのときの火花長33  $\mu\text{m}$ は筆者らの過去の文献[8]で示されている値と近いであることから，本測定装置を用いて火花長が概ね測定できているものと判断できる．一方，300 V以下では充電電圧にかかわらず火花長がカリパーの測定精度10  $\mu\text{m}$ 程度となっており，測定限界となっていることがわかる．なお，Paschen則[11,12]によれば大気圧下では最小火花電圧が350 V程度であり，このことが測定結果として現れている可能性もあるので，今後詳しい測定が必要である．

#### 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た．火花長を測定したところ，筆者らの過去の文献に示されている値とほぼ同程度となることがわかり，本装置は概ね火花電圧を測定できることが示された．今後は，充電電圧を変えて火花電圧を測定し，これをRompe-Weizel則，Toepler則等と比較することが課題となる．

#### 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．

#### 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 Electrostatics” , Ohmsha Publishing Co., Ltd. p.221 1994