

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05968

研究課題名(和文) 静電気放電における火花チャネル電圧・電流・抵抗のGHz帯域測定

研究課題名(英文) GHz Band Measurement of Spark Current, Spark Voltage and Spark Resistance on Spark Channel due to Electrostatic Discharge

研究代表者

高 義礼 (Taka, Yoshinori)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：80335091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：新たな静電気対策試験法の提案を目指し、放電チャネルにおける電圧・電流・抵抗値をnsオーダの時間領域で実測して火花放電の放電メカニズムを詳しく解明することを試みた。本研究では火花電流と火花電圧を実験的に測定できる装置を開発し、その測定結果から、火花抵抗の時間的な変化を実験的に求められるようにした。実験では充電電圧を500Vおよび4000Vとし、その結果を、これまで提唱されている2つの火花抵抗則と比較した。結果より、現時点では500Vの充電電圧においてはToepler則の方が、一報、4000VにおいてはRompe-Weizel則の方が測定波形により一致することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To conduct further verification of Rompe-Weizel's and Toepler's spark resistance formulae for micro-gap ESDs, a newly developed measurement setup for spark currents, which allows to simply estimating the spark current and the corresponding spark voltage from the measured discharge currents, was used to measure the characteristics of spark discharges at charge voltages of 500 V and 4000 V. As a result, we found that the spark currents nearly equal to the measured discharge currents. It was also found that at a charge voltage of 500 V, the Toepler's formula is applicable to predicting the spark process, while at a charge voltage of 4000 V, the Rompe-Weizel's formula can well explain the spark process quantitatively. This result supports our previous study, despite the fact that the spark lengths estimated from both the spark resistance formulae with their commonly used spark constants do not agree with the measured results.

研究分野：電磁環境工学

キーワード：火花放電 火花電流 放電電流 火花電圧 火花抵抗則 静電気

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの飛躍的な進歩により IC の高集積・低消費電力化が進み、電子機器は大幅に高性能化されてきた。しかしながら、電子機器の電磁雑音に対する耐性は逆に低下してきており、その雑音対策が製品開発の現場で大きなウエイトを占めるようになってきている。近未来に差し迫るユビキタス社会では、この傾向が一層顕著になる可能性が高く、その対策が急務とされている。この主たる原因として、帯電人体からの静電気放電 (ESD : Electrostatic discharge) が挙げられ、ESD により直接機器に流入する電流や放電により発生する過渡電磁界が IC の破壊や機器の誤動作を引き起こすとされている。これに対し、国際電気標準会議 (IEC : International Electrotechnical Commission) では、電子機器の静電気放電に対する耐性試験法 (IEC61000-4-2) を定め、電子機器はこれにもとづき市場に供給される以前に電磁雑音に対する耐性を検査されることとなっている。この試験法では、帯電人体からの ESD を模擬したとされる放電ガン (ESD ガン) の使用が定められており、これは人体の静電容量とみなされた集中コンデンサに蓄積された電荷が皮膚抵抗とみなされた集中抵抗および金属の先端電極を通して放電 (接触放電) される構造になっている。このように、IEC の耐性試験法では ESD ガンは接触放電で使用することを基本とするが、実際の帯電人体からの放電は、体表面に広く分布した電荷が指先などを通して火花を介しておこなわれる気中放電となるので、両者は放電のメカニズムが本質的に異なる。このような違いから耐性試験をパスしても実使用で誤動作が発生するという問題が後を絶たない。したがって、上述の問題を克服するためには、まず気中放電の諸特性を明らかにすることが必要であり、申請者はこれまで、その解明に努めてきた。これを受け、この度の申請者の課題 (番号 : 15K05968) では、火花チャネルにおける電圧・電流・抵抗 (以降、火花抵抗と呼ぶ) の振る舞いを実験的に明らかにし、より詳細な放電メカニズムの解明に取り組んでいくことを目指してきた。これまで火花チャネルの電圧・電流の時間変化を ns オーダで同時計測した例はなく、既存の火花抵抗則を実験的に検証した例はない。申請者の研究が進めば上記パラメータの時々刻々の時間変化が明らかとなり、これをもとに、放射過渡電磁界の振る舞いなども FDTD 法などを用いてシミュレーションすることが可能となる。

2. 研究の目的

“1. 研究開始当初の背景”でも記述したが、現在の電子機器の静電気耐性試験は接触放電を基本とする試験であり、これは帯電した人体からの放電が気中放電 (火花放電) である事実と異なる。このため、試験をパスし

た機器であっても誤動作が後を絶たないという問題がある。したがって、より現実の放電現象の特性に即した新たな静電気耐性試験法を提案することが必要となることから、申請者はこれまで気中放電の諸特性について調べてきた。その結果、帯電体の移動速度により放電ギャップ長が変化することなどを実験的に明らかにしてきた (H24-H26 基盤研究 C)。本研究では、放電チャネルにおける電圧・電流・抵抗値を ns オーダの時間領域で実測し、火花放電の放電メカニズムを更に詳しく解明することを目指す。このような基礎データを蓄積し、新たな試験法を提案することが最終目標 (研究の目的) である。

3. 研究の方法

Fig. 1 は測定装置を示す。直流電源から 500 MΩ の抵抗を介してステンレス円板を充電する。円板の直径は 70 mm、厚さは 1 mm であり、中央には直径 2 mm、高さ 0.5 mm の先端が球面形状の突起がある。対向電極としての IEC 規定のターゲットは、直径 5 mm の中心導体と内径 16 mm の外導体との間を 2.04 Ω の直流抵抗 R で接続され、伝達インピーダンスは 4 GHz までほぼ一定 (約 2 Ω) である。円板を最小目盛 10 μm の微動ステージを用いて 10 μm/s 以下の速度でターゲットに接近させ、中央の突起からターゲットの中心電極へ放電させる。そのとき、 δ は火花長、 $i(t)$ は放電電流であり、これは、ターゲットに 20 dB 減

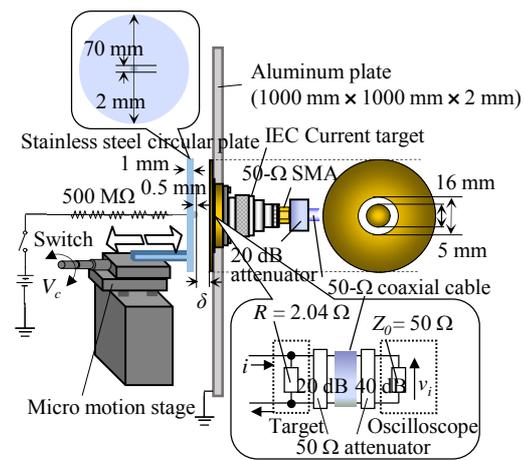


Fig. 1 Measurement setup for spark current.

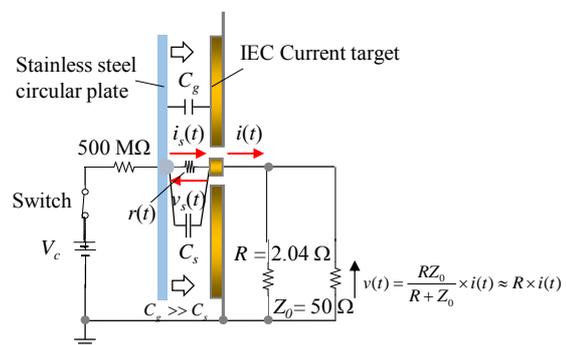


Fig. 2 Equivalent circuit for spark current.

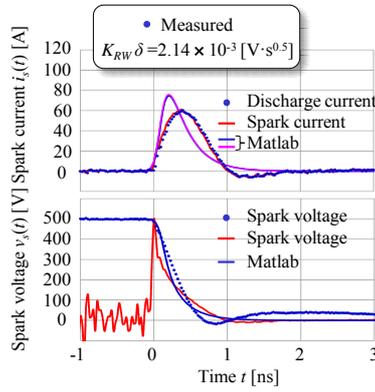


Fig. 3 Discharge currents, spark currents and the corresponding spark voltages at a charge voltage of $V_c = 500$ V. Rompe-Weizel's formula was used for Matlab calculation.

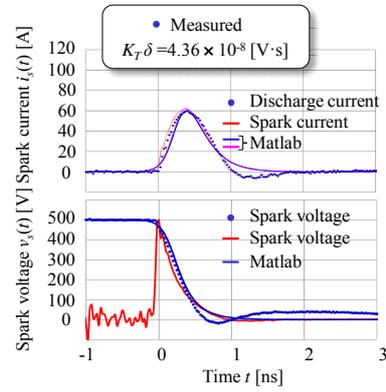


Fig. 5 Discharge currents, spark currents and the corresponding spark voltages at a charge voltage of $V_c = 500$ V. Toepler's formula was used for Matlab calculation.

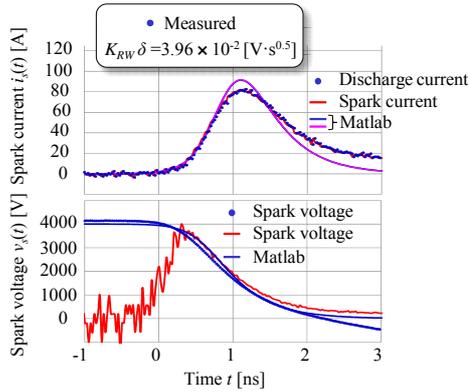


Fig. 4 Discharge currents, spark currents and the corresponding spark voltages at a charge voltage of $V_c = 4000$ V. Rompe-Weizel's formula was used for Matlab calculation.

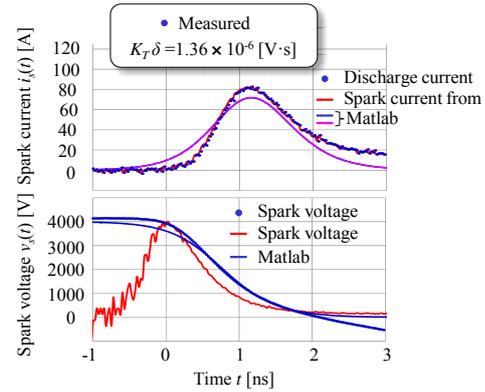


Fig. 6 Discharge currents, spark currents and the corresponding spark voltages at a charge voltage of $V_c = 4000$ V. Toepler's formula was used for Matlab calculation.

衰器, 50 Ω 同軸ケーブル, 40 dB 減衰器を介して帯域 12 GHz, サンプリング周波数 40 GHz のデジタルオシロスコープの 50 Ω 入りに現れる電圧波形 $v_i(t)$ として測定する。Fig.2 の等価回路において, C_g は円板とターゲットグラウンド間との容量, C_s は円板中央の突起とターゲットの中心導体間との容量をそれぞれ示すが, Fig. 1 の電極寸法では $C_g \gg C_s$ であり, $C_g/C_s \gg 25$ であれば, Matlab シミュレーション(後述)から, $i(t)$ のピーク値は $i_s(t)$ のその5%以下であり, $i(t) = i_s(t)$ としてよいことを確認した。 V_c は充電電圧, $i_s(t)$ は火花電流, $v_s(t)$ は火花電圧, $r(t)$ は火花抵抗である。Fig. 2 の等価回路から, $v_s(t)$ は,

$$v_s(t) = V_c - \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^t i(t) dt - Ri(t), C_g = \frac{1}{V_c} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) dt \quad (1)$$

と導出できる。一方, $v_s(t)$ は, Rompe-Weizel と Toepler の火花抵抗則を用いれば, それぞれ,

$$v_s(t) = r(t) I i_s(t); \frac{K_{RW} d}{\sqrt{\int_{-\infty}^t i(t)^2 dt}} I i(t) \quad (2)$$

$$v_s(t) = r(t) I i_s(t); \frac{K_T d}{\int_{-\infty}^t i(t)^2 dt} I i(t)$$

と表される。ここで, K_{RW} [$V \cdot s^{0.5} \cdot m^{-1}$], K_T [$V \cdot s \cdot m^{-1}$]は火花定数である。 $v_s(t)$ は, V_c に対する

る $i(t)$ を測定すれば式(1)から計算でき, (1)式と(2)式は, $K_{RW} \delta$ [$V \cdot s^{0.5}$], $K_T \delta$ [$V \cdot s$]を与えれば, Matlab (R2013b)のソルバー(ode45)から $i(t)$, $v_s(t)$ の波形が数値的に解析できることを示す。

4. 研究成果

Fig. 3-6は500Vと4000V充電の火花放電に伴う放電電流と火花電圧の測定波形を, Matlab シミュレーション波形と比較して示す。Fig.3は充電電圧が500Vの場合である。上図は電流波形を示し, 青の点線(ドット)はオシロスコープで観測される放電電流波形であり, 赤の実線は火花ギャップ間を流れる火花電流波形である。また, 青とピンクの実線は, 放電電流波形と火花電流波形を用いて Matlab シミュレーションをおこなった結果である。下図は放電電圧波形を示し, 青い点線(ドット)は式(1)から求めた結果であり, 赤い実線は式(2)から求めたものである。また, 青い実線は Matlab シミュレーションより得た結果である。Fig. 4は4000Vの場合の結果を示す。なお, Fig. 3と4はRompe-Weizel則を用いたばあであり, Fig. 5と6はFig. 3および4と同じ解析をおこなっているが, Toepler則を用いた場合である。以上の結果より, 現時点では500Vの充電電圧においてはToepler則の方が, 一報, 4000Vにおいては

Rompe-Weizel 則の方が測定波形により一致していることが明らかとなった。今後は、より多くの充電電圧(4000V以上も含めて)で同様の検討をする必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

高 義礼、藤原 修、平行円板電極におけるマイクロギャップ間の火花放電に伴う放電電流の測定と火花抵抗則に基づく実験検証、電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門) 査読有、137 巻、No. 10、2017、598-599
DOI: 10.1541/ieejieiss.137.598

高 義礼、藤原 修、平行円板電極のマイクロギャップ間の火花放電に対する火花抵抗則の適用性、電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門) 査読有、138 巻、No. 1、2018、42-43
DOI: 10.1541/ieejfms.138.42

Yoshinori Taka, 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) 査読有、138 巻、No. 6、2018、316-321
DOI: 10.1541/ieejfms.138.316

〔学会発表〕(計 1件)

Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara, Experimental Verification of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap ESD in Parallel Disc Electrodes, International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC ' Beijing, 2017), October 28-31, 2017, China National Convention Center / Beijing, China

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

高 義礼(TAKA Yoshinori)
釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授
研究者番号：80335091

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()