

# 火花放電における火花ギャップのインピーダンス推定に向けた基礎検討

高 義礼\*

## Feasibility Study for Impedance Estimation of Spark Channel

Yoshinori TAKA

**Abstract** — In order to estimate the impedance of spark channel, we conducted the fundamental experiment of spark and took the images of spark channel. Spark was caused by 7.2 kV of high voltage DC supply, and spark images were taken by high-speed camera whose shooting speed is 1000 fps. In this study, we newly developed shooting method was using external trigger signal. As a results, clear images were taken and found that spark channel was not uniform luminance and not straight filament.

**Key words** : Feasibility study, Impedance, Spark channel, estimation

### 1. はじめに

近年の電子機器は、ICの高集積・低消費電力化に伴い、高性能化が進んできている。しかしながらその結果、電子機器の電磁雑音に対する耐性の低下が深刻な問題となっている。機器の誤動作・破壊を引き起こす電磁雑音の発生原因は様々だが、特に帯電した人体からの静電気放電<sup>[1-5]</sup>によるものが主原因となる場合が多い。このことから、電子機器の静電気放電の耐性を調べるための試験法<sup>[6,7]</sup>が国際電気標準会議(IEC : International Electrotechnical Commission)によって定められてきた。しかし、この試験法は不十分であり、試験をパスしてもなお誤動作が発生する事例が後を絶たない。その原因は、当試験法では接触放電が用いられるが、実際の人体等からの放電は気中放電(火花放電)であり、両者の放電メカニズムが異なるからである。このような背景から、筆者は気中放電(火花放電)の放電特性を明らかにし、これを電子機器の電磁雑音対策に役立てることを目指している。本研究では、火花放電画像を高速カメラで撮影し、火花チャネル

の形状測定からそのインピーダンス推定(火花抵抗<sup>[8-14]</sup>推定)につなげられないかを検討しているが、本稿では筆者らが考案した火花画像取得を外部トリガ信号の利用でおこなう手法について示すとともに、取得火花画像から明らかになったことについて述べる。

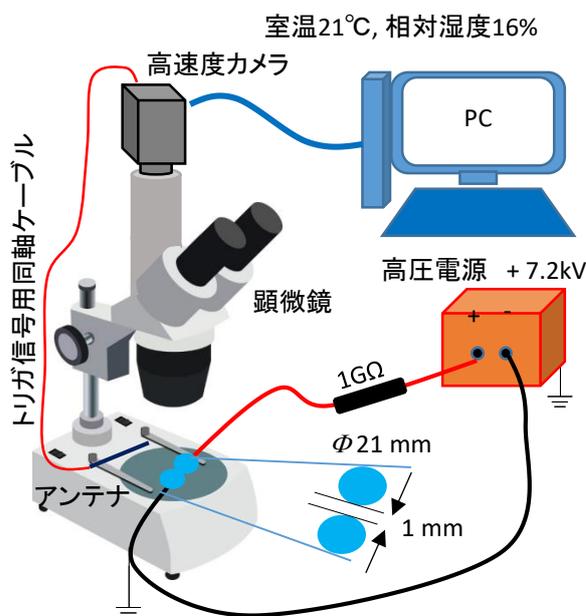


図1. 火花放電の撮影システム

\* 釧路高専創造工学科電子工学分野

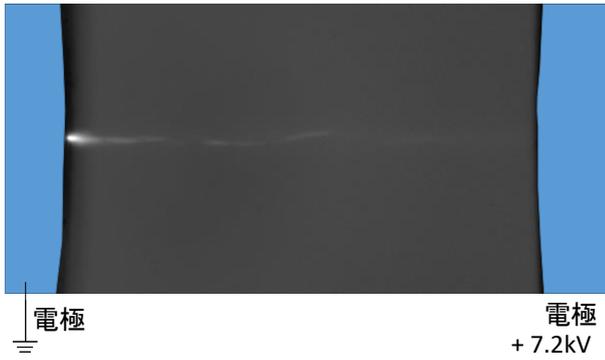


図2. 火花放電の様子

## 2. 実験システム

図1に実験装置を示す。全体の構成は、直流高電圧電源、円板電極、顕微鏡とこれに接続された高速度カメラからなる。顕微鏡のステージ上に直径21 mmの2つの円板電極を1 mmの間隔をあけて設置し放電させる。高電圧直流電源は+7.2 kVに設定し、電極間の容量と高抵抗 (1GΩ) で決まる時定数に従って、絶縁破壊電界に達するたびに火花放電が発生する (充放電を繰り返す) ようになっている。顕微鏡に高速度カメラ (Photoron製) を設置し、撮影は毎秒1000フレーム (1000fps) とし、1フレームの撮影時間は約1ms (996 μs)、画素数は最大の1024×1024として火花画像を撮影した。撮影は1セットで約5秒間おこなわれ、およそ5,000枚の画像を撮影できる。しかし、火花放電発生タイミングは予見不可能であり、しかも放電の持続時間は1 μsよりも短い。このため、適切なトリガ設定をしなければ1フレームにその様子を写しこむことが出来ない。そこで、使用した高速度カメラの”外部トリガ”機能を利用することとした。この際、外部トリガ信号に何をを用いるかが問題であるが、火花放電から

発せられる過渡電界をモノポールアンテナに見立てた導線で受信し、この導線に誘起されるインパルス電圧波形をトリガ信号とした。この電圧波形は同軸ケーブルを経由してカメラの外部トリガ入力端子 (TTLレベル) に入力される。この手法が今回新たに考案した撮影法である。ところで、高速度カメラの仕様では、トリガ信号が入った時点のフレームは撮像されない設定になっていることから、トリガ信号を遅延させなければ火花波形をトリガ発生時刻のフレームに写しこめない。このため、トリガ信号のカメラへの入力は1.1 ms遅延させた。火花放電の継続時間はおよそ数百nsであることから、上記処理にてトリガ信号が入った時点より1つまたは2つ前のフレームに火花放電画像を確実に撮影できるようになる。トリガ機能を用いた撮影法の模式図を図3に示す。ここでは、フレーム1からフレーム4の順番に新フレームが撮影されていく。今、フレーム2の露光中 (撮影中) に火花放電が発生したとすると、その時刻でトリガ信号が発生する。本カメラの仕様ではトリガ信号を入力した時刻のフレームは撮影されないため、このままだと火花の写真が撮れない。このため、トリガ信号の遅延処理の機能を使うことにした。表1に外部トリガ入力と遅延処理の手順についてまとめた。以上の処理により、持続時間が短く (< 1μs) 不規則に発生する火花放電の画像を確実にとらえることができるようになった。これにより、従前まで数千枚のフレームから偶然映り込んだフレームを抜き出していたが、効率的にデータ収集ができるようになった。

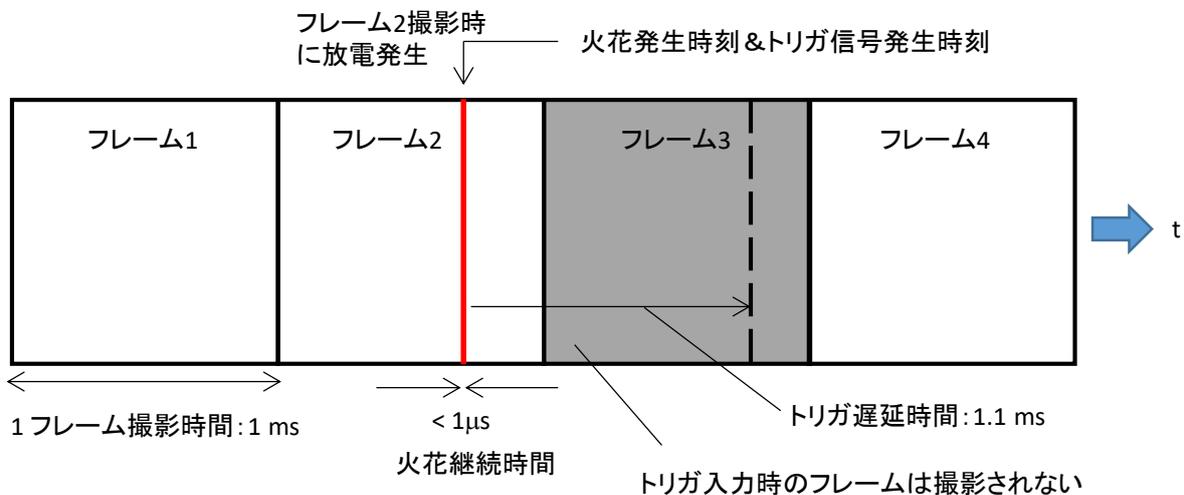


図3. トリガ機能を用いた撮影

表1.トリガ機能の実行手順

手順項目	実行方法
1)外部トリガ信号発生	火花放電時の放射過渡電界を利用
2)トリガ信号の受信方法	放電電極の近傍(数cm)に同軸ケーブルの中心導体をアンテナ代わりに配置。インパルス電圧波形をカメラの外部トリガ入力端子へ入力
3)トリガ信号の遅延処理	トリガ入力時の画像は撮影されないため、カメラのトリガ信号遅延機能を利用し、後続のフレームでトリガをかける

### 3. 実験結果

何度かテスト撮影を繰り返してみたが、事前の予測通りのタイミングで火花画像を取得できることが確かめられた。昨年度はトリガのかけ方において今年度のような手法がとられなかったため、数千枚の画像から偶然火花放電が映り込んだフレームを取り出していた。このため、非効率であったが、今年度は大幅な効率化を図ることが実現できた。図4. に撮影された火花画像の1例を示す。画面右手が+7.2 kVの電極側、左手がグラウンド電極側である。結果から、グラウンド側に輝度が一段と高い部分があること、それに続いてフィラメント上の発光部が+側の電極に向かって伸びていることなどが見てとれる。これはプラズマ状の火花チャンネルが見えているものと推察されるが、直線的ではなく、その長さは必ずしも電極間のギャップ長と一致するわけではないことがわかる。すなわち、概ね電界強度の高いところに沿って放電するが、火花通路はこれに完全に一致しないことを示している。また、よく見ると、輝度が高い部位と低い部位があり、かつ、それらの出現する部位がどの画像においてもおおよそ一致していることがわかる。ここでは3例しか示していないが、他の画像でもおおよそこの傾向になることを確かめた。その傾向とは、グラウンド側には強い発光点があり、それに続き+側電極に向かって一旦暗い部位があったのちに再び明るい部位が見られ、+側電極付近では明るい部位は見られない。この結果から、明るい発光部分がプラズマ密度の高い部分、暗い部分がプラズマ密度の低い部分だとすれば、火花チャンネルの導電率やインダクタンスの違いに影響することが示唆される。また、画像から火花チャンネルはきれいな円柱状ではなく、途中縊れたり捻じれたりしているようにも見えるので、そのことも火花チャンネルのインピーダンスに影響を与えるのではないかと推察される。本実験では気温21℃、相対湿度16%でおこなったが、今後異なる条件で撮影をおこない、火花画像に変化が現れるかどうか確かめてみる必要がある。

### 4. まとめと今後の課題

火花放電の放電特性を調べるために、高速度カメラを用いた火花画像の撮影システムを構築した。本研究では効率的な画像取得を目指して外部トリガの設定方法について考案し、トリガ信号受信直前のフレームに火花画像を確実に取得できるようにした。さらにこのシステムを使って、火花画像を撮影してみた。その結果、グラウンド側には強い発光点があり、その後+側電極に向かって一旦暗い部位があったのちに再び明るい部位が見られ、+側電極付近では明るい部位は見られないことがわかった。また、火花チャンネルはきれいな円柱状ではなく、途中縊れたり捻じれたりしているようにも見えることがわかった。これらは、火花チャンネルの導電率やインダクタンスに影響を与えると思われる。今後は電極形状、充電電圧を変えるなどしてさらなる実験を続ける予定である。

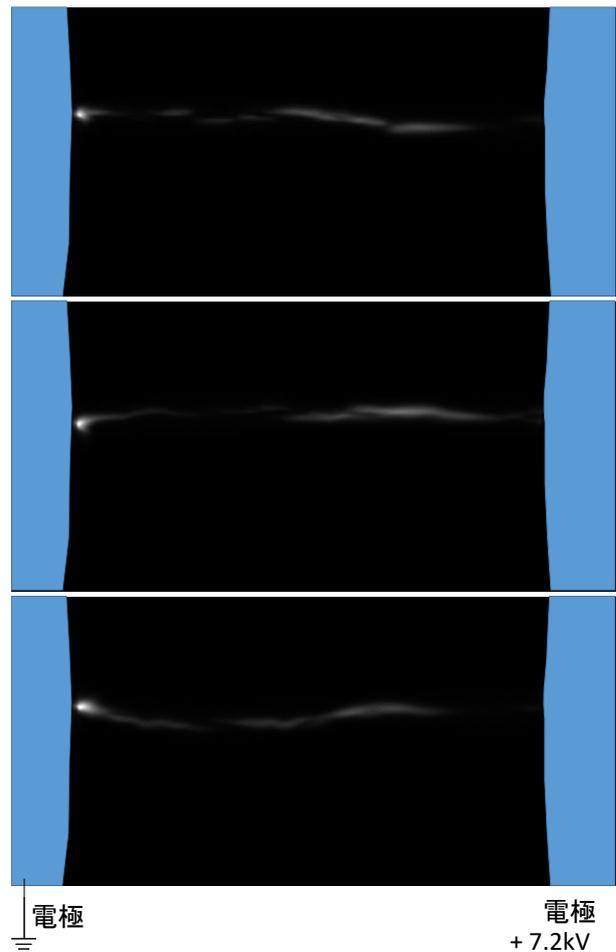


図4. 火花放電画像

## 参考文献

- (1) S. Minegishi: "Recent Topics on Electrostatic Discharge ESD from Viewpoint of EMC", IEEJ Trans. FM, Vol.132, No.5, pp.335-338 (2012-5) (in Japanese)  
嶺岸茂樹: 「静電気放電ESDのEMCに関する研究動向」, 電気学会論文誌A(基礎・材料・共通部門), 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) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: "Verification of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap ESD," IEICE Transactions on Communications, Vol.E93-B, No.7, pp.1801-1806 (2010-7).
- (9) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: "Measurement of Discharge Current caused by Spark Between Micro-Gap of Parallel Disc Electrodes and Experimental Verification based on Spark-Resistance Formula," IEEJ, Transactions on Fundamental and Materials, Vol.137, No.10, pp.598-599 (2017-10).  
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, Vol.137, No.10, pp.598-599 (2017-10).
- (10) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: "Applicability of Spark resistance Formulae to Micro-gap Spark in Parallel Disc Electrodes," IEEJ, Transactions on Fundamental and Materials, Vol.138, No.1, pp.42-43 (2018-1).  
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, Vol.138, No.1, pp.42-43 (2018-01).
- (11) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: "Validity and Applicability of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap Sparks in Parallel Disc Electrodes," IEEJ, Transactions on Fundamental and Materials, Vol.138, No.6, pp.316-321 (2018-6).
- (12) 高 義礼、藤原 修: 「ふたつの異なる火花抵抗則から導出される火花て放電の特性測定と妥当性のさらなる実験検証」, 電気学会論文誌A(基礎・材料・共通部門), Vol.140, No.2, pp.72-79 (2020-2)
- (13) M. Toepler, "Zur Kenntnis der Gesetze der Gleit-funkenbildung," Ann. Physik 21, 12, 193 (1906).
- (14) R. Rompe and W. Weizel, "Über das Toeplersche Funkengesetz," Z. Physik 122, 636 (1944-01).