

火花放電におけるストリーマ理論適用範囲の検証

高 義礼*

Verification of Applicable Range for Streamer Theory in The Spark Discharge

Yoshinori TAKA

Abstract — In order to verify the applicable range of streamer theory for spark discharge, we conducted the experiment of capturing spark images using high speed camera, and compare spark filaments with the theory. As a result, in the charge range of +12 kV to +15 kV, it was found that spark phenomenon indicates the tendency of streamer theory. On the other hand, in the charge voltages under +12 kV, spark aspect disagrees with streamer theory, and its spark mechanism will must be clarified in the future.

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^[1-5]によるものが主原因となる場合も多い。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^[6,7]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、この試験法には不十分な点があり、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。この様な背景から、筆者は気中放電(火花放電)の諸特性を明らかにし、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。特に本研究では、新しい静電気耐性試験法を提案することを目

的とし、その実現のためにまずは火花放電現象の発生メカニズムを詳しく調べようとしている。本稿では火花放電現象を説明するストリーマ理論^[8]に注目し、その適用範囲がどの程度の充電電圧(火花長)となるのか、また適用できない場合はどのような放電様相が支配的になるのかを調べた。実験では火花画像を取得し、その特徴からストリーマ理論を適用できるかどうかを調べた。

2. 火花放電理論

これまでの実験的検証では、比較的低気圧および短ギャップの場合はタウンゼント(Townsend)の理論が実験とよく合い、一方、常気圧かつ長ギャップの場合はストリーマ(Streamer)理論が適すると言われている^[9]。ただ、ストリーマ理論は概ね cm 以上のギャップ長で合うとされているので、筆者らが対象としている静電気放電(火花放電)における数 mm のギャップ長ではどのような放電様相となっているかが不明である。また、将来的には放電様相と機器誤動作との関係がどの様になっているかも調べる必要があると考えている。

ここで、ストリーマ理論について詳しく説明する。はじめ、陽陰電極間の電圧を高くしていく(電界を強

* 釧路高専創造工学科電子工学分野

めていく) と、偶存電子が電界により加速され周囲の気体分子と衝突する。この衝突により衝突電離が発生するが、これが連続的に発生することからギャップ間に電子雪崩が発生する。この時、軽い電子はすばやく陽極に移動するが、重い正イオンは移動度が小さいためギャップ間に筋状に取り残される。この正イオンの密度が大きいと、その強い電界によって周囲の電子をさらに引き込み、陽極近傍に新たな電子雪崩を複数形成する。その結果、電子と正イオンが混在するプラズマの経路が形成され、これが陰極に向かって成長していく。これをストリーマと呼ぶ。最終的に、このストリーマが陰極へ到達すると放電路が完成する(全路破壊)。なお、この経路が発光していわゆる火花として観測される。筆者の本研究では火花長が mm オーダーであり、この場合は準ストリーマ的な状態が観察されるのか、またはこれとは別の状態が観察されるのかを探っていく。

3. 火花画像撮影システム

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つの円板電極を数 mmの間隔をあけて設置し放電させる。ギャップ長は絶縁破壊電界に丁度達する距離とした。高電圧直流電源は+7 kV~+15 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

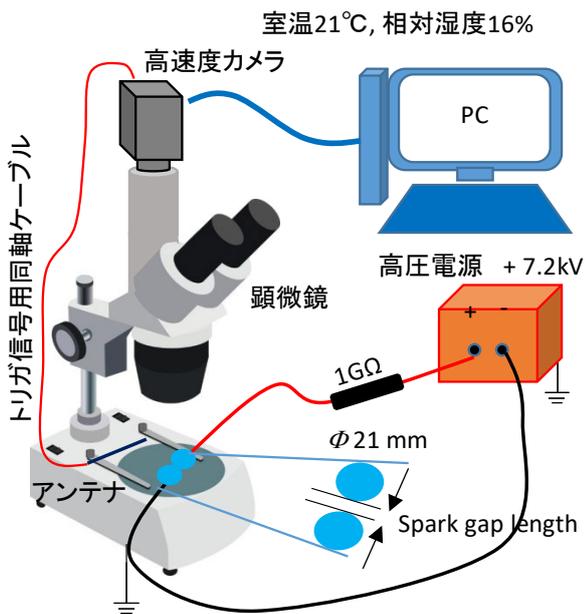


図1. 火花放電の撮影システム

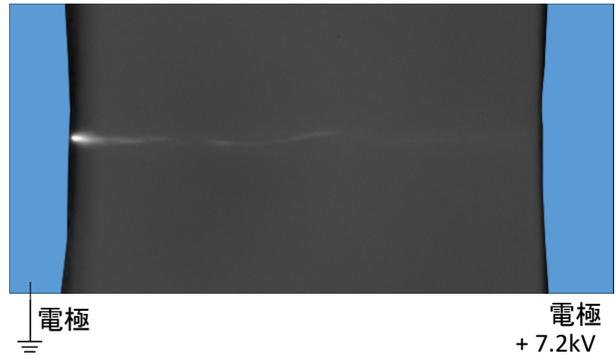


図2. 火花放電の様子

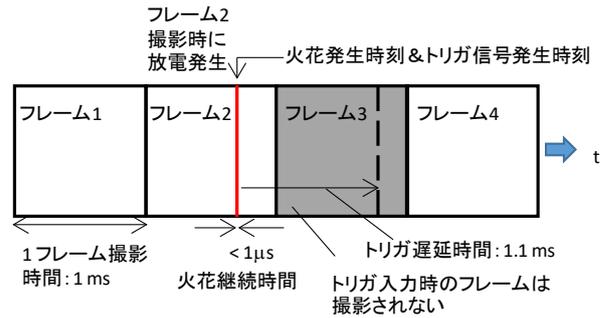


図3. トリガ機能を用いた撮影

(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(正確には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、火花放電の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(数百ns)。このため、適切なトリガ設定をしなければ特定の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を受信し、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

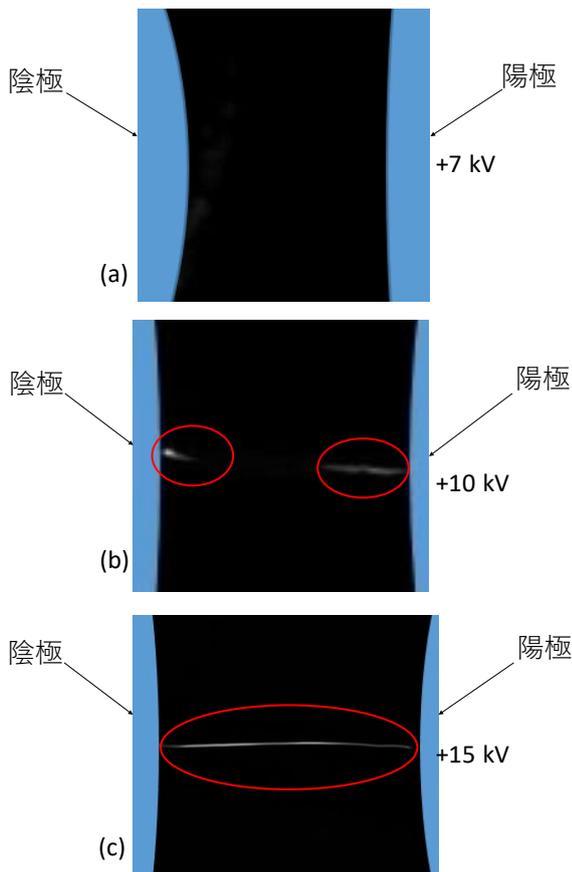


図4. 火花放電画像. (a) 暗部のみの場合, (b) 明暗が観測された場合, (c) 明のみの場合.

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。以上の処理により、持続時間が短く（ $< 1\mu\text{s}$ ）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。

4. 実験結果

図4に取得された火花放電画像を示す。同図(a)は陽極の電位が+7kVの場合で、この場合トリガ信号は取れているので確かに放電はあったが明るいフィラメントは観測されなかった。また同図(b)は同+10kVの場合で、陽極と陰極に近い部分で明るいフィラメント（赤囲み部分）が観測された。さらに同図(c)は同+15kVの場合であり、濃淡はあるものの陽極から陰極まで明るいフ

ィラメント（赤囲み部分）が観測されている。このように、+15kV程度になると火花経路が明るく発光することが確認された。この時の火花長はおよそ5 mm程度であった。以上の画像のように傾向によって3つに分類したところ、+7kV付近ではほぼ図4. (a)の画像が、+8kVから+11kVまでは図4. (b)の画像が、+12kVから+15kVまでは図4. (c)の画像が支配的となることがわかった。これらの結果から+12kV以上ではストリーマ放電かまたはそれに近いメカニズムで放電していると推察できるが、+8kVから+11kV、+7kV付近では単純にストリーマ理論では放電メカニズムを説明できないと考えられる。この結果はタウンゼントの理論とストリーマ理論の間にあたり、機器誤動作の傾向に対しても影響する可能性が推察される。今後詳しく検討する必要があると思われる。

5. まとめと今後の課題

火花放電現象を説明するストリーマ理論^[8]に注目し、その適用範囲がどの程度の充電電圧（火花長）となるのか、また適用できない場合はどのような放電態様が支配的になるのかを調べた。その結果、+7kV付近ではほぼ暗部だけの画像が、+8kVから+11kVまでは陽極と陰極に近い部分が明となる画像が、+12kVから+15kVまでは全火花経路において明となる画像が得られた。これらの結果から+12kV以上ではストリーマ放電かそれに近いメカニズムで放電していると推察できるが、+8kVから+11kV、+7kV付近では単純にストリーマ理論では放電メカニズムを説明できないと考えられる。今後は、mmオーダーの火花長となる充電電圧における放電メカニズムの解明が必要である。

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) John M. Meek, 堀井 憲爾: “長ギャップの火花破壊”, 電気學會雜誌, Vol.91, No. 1, pp. 1-6 (1971)
- (9) 今西周蔵, 鷺見篤 : “高電圧工学” , pp. 2-4, コロナ社 (1973-3)