大出力レーザを用いた直流放電誘導特性

正員 相 磯 充 (東京電力)

正員 日 高 邦 彦 (東京大学)

Laser Triggered and Guided DC Electrical Discharge in Air

Mitsuru Aiso, Member (Tokyo Electric Power Company), Kunihiko Hidaka, Member (The University of Tokyo)

A 150J carbon dioxide laser focused by a 5m focal length concave mirror is transmitted into a rod-to-plane gap which is dc electrically stressed. The breakdown voltage of the gap with a laser irradiation is decreased down to 40% of the normal breakdown voltage without the laser irradiation in the case of negative voltage applications to the high potential rod electrode. On the other hand, in the case of positive voltage applications the breakdown voltage with the laser irradiation becomes 60% of the normal breakdown voltage. The guide effect of laser-induced plasma to electrical discharge appears clearly when a bright plasma channels are produced between electrodes.

キーワード：大出力レーザ、プラズマチャネル、直流、放電誘導、誘雷、CO₂レーザ

1. はじめに

近年、レーザ技術の進歩に伴い、多方面にわたりレーザを利用した研究が進められている。例えば大出力のレーザ光をパルス状に発射させ、更に凹面鏡や凸レンズなどの集光装置でエネルギーを集中させると、その焦点付近ではレーザビームに沿って気体の絶縁破壊が生じ、プラズマが形成される。レーザ誘雷はこのプラズマ状の道(チャネル)を利用して雷放電を送電線などの電力設備以外の場所(避雷用鉄塔)に導くものであり、我が国においては近年、積極的な耐雷技術の一つとして注目されている。このアイディアは1974年、Ballによって提案され⁽¹⁾、現在多くの機関で研究が進められている。しかしその多くは雷インパルス印加した棒対棒などの電極間にプラズマチャネルを生成させて放電を誘導しようとするものであり、「誘雷」に主眼をおいたものである⁽²⁾⁽³⁾。

レーザ生成プラズマによって誘導される放電の特性の中で、特徴的なものの一つに極性効果がある。インパルス電圧が印加された電極系において、レーザ生成プラズマの放電誘導効果は負極性放電に比べて正極性放電の方が小さいことが知られている。このため、50%スパークオーバ電圧は正極性の方が負極性より高くなり、通常のレーザがない場合の放電とは逆の特性になる。特にプラズマがギャップ中に生成されても正極性放電の50%スパークオーバ電圧はほとんど低下しないことが報告されている⁽⁴⁾。また、イメージコンバータカメラによる放電進展の観測でも、レーザ生

成プラズマがギャップ中に存在するときは、放電は正極側からは進展せず、負極側からの放電が全ギャップを進展することが報告されている⁽⁵⁾。これらの実験結果は、レーザ生成プラズマによる正極性放電の誘導は困難であることを示している。しかし、球状プラズマが空間的に密に生成されるような条件下では、正極性放電が誘導される場合があることも明らかにされている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

直流電圧印加の場合の過去における研究は、平板対平板や球対球などの平等電界であったり⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、棒対平板などの不平等電界であっても短ギャップ(数十mmオーダー)の条件下⁽¹²⁾⁽¹³⁾がほとんどである。

本論文では、従来あまり検討されていない直流電圧印加、ある程度長いギャップ長を有する不平等電界という条件の下で、大出力のCO₂レーザを用いて放電誘導実験を行い、その火花電圧特性ならびに放電進展過程を観測した。

2. 実験装置

図1に実験装置を示す。使用したレーザ装置は、パルス発振の放電横励起型CO₂レーザ(G.P.I製TC-150)である。レーザ光は波長10.6 μ m、ビーム開き角約0.5mradであり、出力は1パルスあたり150J(半値幅約40ns)、ピークパワー約1GWを得る。ビームは外径100mm×100mm、内径30mm×30mmの方形ビームである。レーザ光集光装置には、直径250mm、焦点距離5mの金蒸着凹面鏡及び平面鏡を用いた。電極は棒対平板である。また棒電極の先端形状が直径50mmの球及び先端角約60度の円錐形であ

る黄銅製の2種類の電極を用いた。使用した電圧は正負の直流電圧であり、交流をダイオードとコンデンサを用いて整流している。発生電圧の最大値は400kVである。

図1 実験配置図

Fig. 1. Experimental apparatus.

イメージコンバータカメラ (ナック製、ウルトラナック FS501 UV) はレーザトリガ発振用の入力パルスを用いて同期をとった。また、図1(b)に示す回路で放電電流を測定した。

3. レーザ照射時の火花電圧特性

図1に示す実験配置における実験を始めるにあたり、まずギャップ間で焦点の位置を変化させた時に、レーザ照射時の火花電圧 V_{ind} がどのように変化するかを測定した。棒電極先端形状は球を用い、ギャップ長は40cmとした。結果を図2に示す。

図の横軸は、凹面鏡と棒電極先端との距離 L (図1(a)参照) である。なお、 V_{nat} はレーザを照射しない場合の火花電圧である。また、 V_{ind} は以下のようにして求めた。即ち、予備実験により V_{ind} のおおよその値を見極めた上で、その値の約80~90%の電圧を印加し、レーザを照射する。そこで火花放電が誘導された場合はその電圧値を記録し、誘導されなかった場合は誘導されるまであるステップごとに印加電圧を上昇させる。以上のような上昇法を用いて、5回測定を行い、その記録された電圧値の平均値として V_{ind} とした。

図2より、正負ともに $L=4.4m$ の時に V_{ind} が最低となることがわかる。また、その時の V_{ind} はレーザを照射しない通常の場合の火花電圧 V_{nat} に対して、正極性の時で65%、負極性で41%まで低下している。

図2 レーザ焦点位置と火花電圧

Fig. 2. The Relation between induced breakdown voltage and the position of focal point of laser.

ここで実際にレーザを集光することによって生成されるプラズマの静止写真を凹面鏡からの距離のスケールとともに図3に示す。

図3 プラズマチャネルの静止写真

Fig. 3. Still photograph of laser induced plasma.

この図を更に詳細に検討した結果、次のようなことがわかった。凹面鏡から $L=3.7\sim 4.4m$ ほど離れた区間におけるプラズマ球の密度は、プラズマ球の間隔が10mm以下であり、レーザが伝搬する直線上においてプラズマが占める割合が50%以上に達している。それに対して、 $L=3.7\sim 4.4m$ の外側の領域では、プラズマ球の間隔が10mmより大きく、より密度が小さくなっている。図2で V_{ind} の最小値が現れるのは、このプラズマ球密度の高い領域に電極ギャップを設けているためであると考えられる。

続いて凹面鏡と棒電極先端の距離 L をこの V_{ind} が最低となる値 ($L=4.4m$) に固定し、平板電極を動かすことによりギャップ長を変化させ火花電圧を測定した。なお、この先断らない限り、 L の値は4.4mに固定するものとする。棒電極の先端形状としては先に用いた球電極の他に円錐針電極も用いた。

正極性電を印加した場合の結果を図4に、負極性の場合を図5にそれぞれ示す。ただし、負極性において、ギャップ

棒長 40cm で V_{nat} が約 400kV (棒電極先端形状がどちらでも) になるため、それ以上のギャップ長では発生電圧の制限から V_{nat} の測定を行うことができなかった。

図4 ギャップ長-火花電圧特性 (正極性)

Fig. 4. Breakdown voltage against gap length(positive polarity).

図5 ギャップ長-火花電圧特性 (負極性)

Fig. 5. Breakdown voltage against gap length(negative polarity).

図4より、球及び円錐どちらの電極形状においても V_{nat} に対して V_{ind} が 60~65%程度にまで低下している。また、電極先端形状の相違は V_{nat} 及び V_{ind} 両方に対してほとんど影響を与えていない。

図5より、負極性においても電極先端形状の相違は V_{ind} にあまり影響を与えていない。

またこの実験方法では、レーザの伝搬経路に棒電極があるために、電極先端にレーザが当たっていることになる。そこで、その影響を調べるため、棒電極をレーザ伝搬経路から平板電極に対して平行にずらし (その量を軸ずれと呼ぶ)、火花電圧を測定した。結果を図6に示す。なお、これから先の実験では、棒電極は円錐針のみを用いる。

正負とも、軸ずれが大きいほど火花電圧が上昇している。

また、棒電極先端付近でのレーザのビーム径は約 3cm 程度であり、軸ずれ 2cm 以上ではレーザが棒電極先端に当たらない。更に、軸ずれなしの火花電圧から急激に変化することもないことから、レーザが棒電極先端に当たることによる火花電圧への影響はあまりないと考えられる。

図6 軸ずれによる火花電圧の変化

Fig. 6. Induced breakdown voltage against the position of laser-induced plasma.

4. レーザ照射時の放電進展形態

〈4・1〉 レーザ照射時放電進展のストリーク写真 放電誘導の様子をより詳しく観測するため、イメージコンバータカメラを用いた撮影を試みた。条件は、棒対平板電極構成でギャップ長 60cm、棒電極先端形状は円錐針である。まず負極性の場合について、レーザ照射時放電進展のストリーク写真を撮影した。撮影範囲はギャップ間全体であり、印加電圧 269kV、ストリーク速度 30ns/mm、レンズ絞り 2.8 である。結果を図7に示す。図中の目盛りとストリーク速度から写真の時間スケールがわかるようになっている。

図7 放電進展のストリーク写真1(負極性)

Fig. 7. Time-resolved observation of laser induced breakdown phenomena using streak camera 1(negative polarity).

図7において、図中の左端近くの明かりはプラズマの残光であり、中央に放電の様子が写っている。放電による発光

は 300ns 程しか継続しておらず、またその発光もギャップ間で不連続であり、縞模様になっている様子が観察できる。

そこでこの放電の様子をより詳しく見るために、撮影範囲を棒電極から約 22cm の部分に拡大した。その結果を図 8 に示す。また、図 8 の理解を助けるためにその模式図を図 9 に示す。

図 8 放電進展のストリーク写真 2(負極性)

Fig. 8. Time-resolved observation of laser induced breakdown phenomena using streak camera 2(negative polarity).

図 9 図 8 に示されたストリーク像の模式図

Fig. 9. Schematic diagram of streak image shown in Fig. 8.

図 8 及び図 9 から明らかなように、放電による発光は図 7 と同様にギャップ間で断続的で、縞模様になっている。そしてその暗い部分とプラズマが光っていた部分がほぼ一致している。即ち、放電はプラズマ球の間を結ぶように進展していると考えられる。

〈4・2〉 レーザ照射時の放電電流 放電のストリーク写真からは、放電の発光が非常に短く、またプラズマ球の間を結ぶような形態であることが見て取れるが、この放電が本当の火花放電であるかどうかを確認するため、放電電流を測定した。得られた波形を図 10 に示す。なお、実験条件は負極性、ギャップ長 40cm であり、波形の掃引はレーザープラズマの発光をトリガにして行った。また、同じ条件下で撮影された放電の静止写真を図 11 に示す。

図 10 中央に示すように、光ファイバからの出力に対応して電流波形が急峻な立ち上がりを見せている。しかしその時間はわずかに 100ns 程度であり、その後約 1A の電流

が流れていることが確認できる。この電流は十 msec オーダまで流れ続け、その波形の積分から電荷量を求めたところ、約 8mC 程になった。この時の印加電圧は 210kV であり、 $Q=CV$ から概算してコンデンサに貯められていた電荷量を求めると約 10.5mC となる。よって大部分の電荷が電流として流れ、図 11 のような放電発光となって現れたことになる。また、持続して流れている電流値 1A は、直流電圧出力端の平滑コンデンサと放電ギャップとの間に直列に挿入された電流制限抵抗 200k Ω と印加電圧 210kV から求められる電流値とほぼ同じである。さらに、この電流制限抵抗を 24k Ω にした時、持続電流が予測される値とほぼ一致する 8A まで上昇することを確認している。

図 10 放電電流波形

Fig. 10. Discharge current and emission from laser induced plasma and electrical discharge.

図 11 レーザ照射時の火花放電の静止写真

Fig. 11. Still photograph of laser induced breakdown.

以上からこの放電は火花放電であると考えることができる。すなわち、不連続に存在する導電性の高いプラズマ球の間を放電が橋絡する形で、全路破壊が生じていると考えられる。

〈4・3〉 他の研究例との比較 まず、印加電圧ないし対象とする放電の極性効果について検討してみる。研究例が多いインパルス電圧印加時においては、レーザーパワーやギャップ長、電極配置などによっても異なるが、負極性において

はレーザー照射時の火花電圧がレーザーを照射しない時の火花電圧に対して大きく低下する。一方、正極性ではほとんど低下しないことが知られている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。それに対し、本実験の結果は、直流電圧印加時に、正極性においても、レーザー照射時の火花電圧がレーザーを照射しない時の火花電圧よりも大きく低下(40%程度の低下)することが確認された。

次に、直流電圧印加時の放電誘導特性について考えてみる。印加電圧として直流電圧を用いている実験例はあまり多くないが、そのいずれにおいても、レーザー照射による火花電圧の低下は、雷インパルスなどに比べてあまり大きくないことがわかっている⁽¹⁶⁾。しかし、本実験においては、正極性で約60%、負極性で約40%にまで、レーザー照射により火花電圧が低下することが確認された。

そこで、本実験と他の直流電圧印加のいくつかの研究例との比較を行う。ここで比較の対象とするのは、慶応大学の内山氏ら(以下単に慶応大学と記す)及び九州大学の村岡氏ら(以下単に九州大学と記す)の研究グループによるものである⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

表1に本実験と他の研究例の実験条件の比較をまとめたものを示す。

表1 実験条件の比較

Table 1. Comparison of experimental conditions.

	本実験	慶応大学 ⁽¹⁷⁾	九州大学 ⁽¹⁸⁾
レーザー出力 [J]	150	50	50
凹面鏡焦点距離 [m]	5	10	1
印加電圧極性	正/負	負	負*
電極構成	棒対平板	棒対棒	平板対平板(突起)**
プラズマチャンネル長 [m]	1.5~2	約2.5	約0.25
ギャップ長 [cm]	40~80	173	100(90)***
放電誘導電圧比 [%]****	60/40	80	83
放電遅れ時間 [μs]	10~100	10~25	12~13

* 放電の極性は正極性

** 接地側電極に棒電極の突起

*** 平板間は100cmだが、棒の突起が10cm

**** V_{ind}/V_{nat} を百分率で表したものの

表1からわかるように、実験条件はそれぞれ様々であり、簡単に比較することは難しいが、各項目ごとに比較してみる。

レーザー出力は本実験で用いたものが一番大きく、これが火花電圧低下の大きな要因であることは間違いない。また、ギャップ長に対するプラズマチャンネルの長さが三者それぞれに大きな差がある。慶応大学の例ではギャップ長が長く、そのギャップ間すべてをプラズマが生成されるようになっているものの、その分プラズマ球の密度としては小さくなっている。それに対し九州大学の例では、プラズマ球の密度は十分に大きくなっているものの、逆にそれがギャップ間の一部(しかも半分以下)にしか存在していない。本実験では他の2つに比べ、このプラズマ球密度及びプラズマチャンネル長とギャップ長のバランスがよく、これが火花電圧が

大きく低下した最大の原因と考えられる。

また、図12に示すように、棒対棒電極構成においても、直流電圧印加時にレーザーを照射することで火花電圧が大きく低下することを確認でき、本実験の結果は棒対平板電極構成特有なものではないと考えられる。

図12 棒対棒電極の場合

Fig.12. Breakdown against gap length(rod to rod).

5. おわりに

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 焦点距離5mの凹面鏡でレーザー光を集光した場合、凹面鏡から3.7m~4.4mほど離れた(焦点位置から凹面鏡側に0.6~1.3mの)場所に生成されるプラズマ球の密度が最も高く、その場所に電極を設置した場合にレーザー照射時の火花電圧は大きく低下する。
- 直流電圧印加時の棒対平板電極構成において、レーザー照射時の火花電圧が、正極性で60%、負極性で40%程度にまで、レーザーなしの通常の火花電圧よりも低下することが確認された。
- レーザー照射時の火花放電は、ギャップ間に生成されるプラズマ球密度が高い場合、不連続に存在する導電性の高いプラズマ球の間を放電が橋絡する形で全路破壊に至る、という形態をとっていると考えられる。

本実験を進めるにあたり、協力いただいた本学卒論生の田辺愛貴君に謝意を表します。

(平成10年5月8日受付, 同10年11月9日再受付)

文 献

- (1) L.M.Ball: "The Laser Lightning Rod System", Appl.Opt., Vol.13,1974, p2292.
- (2) 相原、新藤、三木、鈴木: "レーザーによる気中放電の誘導特性ならびに放電進展過程の観測", 電気学会論文誌B, 112, 1992.
- (3) 秋山、入野、村岡、本田、田中、木下、片平、赤崎: "レーザーによる大気中の放電誘導特性(14)", 放電・高電圧合同研究会, ED-93-176, HV-93-84,1993.

- (4) 本田、宅間、村岡、赤崎、木下、片平: “レーザによる大気中の放電誘導特性”, 電気学会論文誌 B Vol.113, p.995, 1994.
- (5) M.Miki, Y.Aihara and T.Shindo: “Development of long gap discharge guided by a pulsed CO₂ laser”, J.Phys. D, Vol.26, pp.1244, 1993.
- (6) 三木 恵、相原良典、和田 淳、新藤孝敏: “気中放電のレーザによる誘導特性(その4)”, 放電・高電圧合同研究会, ED-92-74, HV-92-12, 1992.
- (7) 梅木、江間、内海、村岡、植田、田中、木下、諸岡、本田: “レーザによる正極性リーダの放電誘導特性”, 電気学会研究会資料 放電・高電圧合同研究会, ED-97-45, HV-97-50, 1997.
- (8) L.Gao and V.Scuka: “Pulsed Laser Triggered Discharge in a Homogeneous Electric Field”, ISH'97, Vol.2, p.149-153, 1997.
- (9) 中村、鈴木、山部、堀井: “紫外光レーザを用いた誘雷の基礎的検討”, 電学論 B, 113-B, p.1265-1273, 1993.
- (10) 久保、板谷、松村: “レーザ誘雷に関する基礎的研究”, 電学論 A, 112-A, p.620-628, 1992.
- (11) 猪原、毎熊、佐藤、石峰、山部: “直流電場中での CO₂ レーザによるプラズマ生成と放電誘導特性”, 電学論 A, 115-A, p.630-636, 1995.
- (12) 福岡、河田、米田、細川、三好: “レーザトリガによる不平等電界ギャップの絶縁破壊 [III]-負針照射の場合-”, 電学論 A, 101-A, p.595-562, 1981.
- (13) 西嶋、高橋、生澤: “大気中直流準平等電界ギャップの XeCl レーザ誘導破壊遅れ”, 電学論 A, 115-A, p.569-575, 1995.
- (14) 三木、他: “正極性放電のレーザによる誘導特性”, 電気学会論文誌 Vol.115A, pp.644-651, 1995.
- (15) M.Miki et al.: “Fundamental study of laser-triggered lightning - Characteristics of laser-guided discharges in long air gaps-”, 23rd International Conference on Lightning Protection Vol.1, pp.10-15, 1996.
- (16) 電気学会技術報告第 553 号 “大出力レーザの開発状況と各種レーザの電力技術への応用”, 1995.
- (17) 広橋、栄、坂井、内山: “レーザによる誘雷”, 平成元年電気学会全国大会, S.2-5, 1989.
- (18) 馬場、上田、内海、田中、村岡、木下、諸岡: “直流高電界のプラズマ生成および放電誘導に及ぼす影響”, 電気学会放電・高電圧研究会資料, ED-97-1, 1997.

相 磯 充 (正員) 1973 年 6 月 4 日生。96 年 3 月 東京大学工学部電気工学科卒業。98 年 3 月同大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月、東京電力(株)に入社、現在に至る。

日 高 邦 彦 (正員) 1953 年 4 月 27 日生。76 年 3 月 東京大学工学部電気工学科卒業、81 年 3 月同大学院工学系研究科電気工学博士課程修了。工学博士。87 年 1 月東京大学工学部電気工学科講師、88 年 1 月同助教授、97 年 2 月同教授。現在に至る。83 年及び 96 年静電気学会論文賞、85 年電気学会論文賞、86 年 IEE Duddell 賞受賞。主として放電現象及び高電圧工学に関する研究に従事。IEEE、

静電気学会会員。