Osaka University Knowledge Archive

Title	レーザー生成プラズマチャンネルによる誘雷の実用化に関する研究
Author(s)	島田, 義則
Citation	大阪大学, 2007, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/48453
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

【175】

氏　　名	島（しま）　田（だ）　義（よし）　則（のり）
博士の専攻分野の名称	博　士（工　学）
学　位　記　番　号	第　２１４４９　号
学 位 授 与 年 月 日	平成 19 年３月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第４条第２項該当
学　位　論　文　名	**レーザー生成プラズマチャンネルによる誘雷の実用化に関する研究**
論 文 審 査 委 員	（主査） 教　授　中塚　正大 （副査） 教　授　佐々木孝友　　教　授　河崎善一郎　　教　授　辻　毅一郎 教　授　熊谷　貞俊　　教　授　伊藤　利道　　教　授　伊瀬　敏史 教　授　杉野　　隆　　教　授　西村　博明　　教　授　斗内　政吉

論 文 内 容 の 要 旨

わが国における送電線事故の 2/3 は落雷が原因となっている。近年のコンピュータ機器等の普及に伴い、停電事故の影響は広範囲に及ぶため、電力系統における雷害対策は重要性を増しでいる。この雷対策の１つとしてレーザー誘雷がある。レーザー誘雷の研究は 1970 年代に Ball によって提案され、米国に於て約 20 m の塔を設置して、400 J の CO_2 レーザーと 15 J の Nd : ガラスレーザーを用いて最初の実験が行われた。500 m 上空で長さ数 m のレーザープラズマの生成は成功したが、誘雷にまでは至らなかった。その後、80-90 年代に入り我が国でも研究が開始され、再び注目を集めることとなった。これは対象とした雷雲の違いによる。米国で行われた野外実験は夏季雷であり、雷雲の高度は高い。そのため自然雷は雷雲から地上に向かって進む下向きリーダがほとんどであるのに対して、日本では日本海側、特に北陸地方の冬季雷は雲底高度が低く、高い構造物の先端からリーダが上空に向かって進む上向きリーダが観測される。このことは、レーザー誘雷にとって好都合な条件であり、大出力レーザー技術の進歩と相まって精力的な研究が行われている。

筆者らは関西電力㈱と大阪大学の雷研究チームと共同でレーザー誘雷の実用化を目指し、室内での実験を行い、大出力 CO_2 レーザーを用いて大気中に強電離プラズマを生成して放電誘導の実験を行ってきた。

長尺のレーザープラズマチャンネルを生成するために MACH 鏡（Multi Active CHannel）を考案し、当時では世界最長の 8.5 m の放電誘導を成し遂げた。また、放電誘導機構を解明するためにマッハツェンダー干渉計を用いたプラズマの広がり方や、平等電界中においてリーダ進展が進展するための最低電界閾値の計測等の実験を行い、基礎的な放電特性の解明を行った。また、レーザープラズマチャンネルを直列に生み合わせることにより“Z 字型”を作り、それに放電を沿わせることにも成功した。また、兵庫県の山崎で大型人工雷発生装置を用いて誘雷模擬実験（スケールダウン放電実験）を行った。プラズマチャンネルから発生する両極性リーダの観測やレーザープラズマチャンネルが途切れたところからさらに上空に進展するリーダの進展様子を観測した。

これらのデータを基に実誘雷の実証に向けて平成５年度から日本海側の冬季雷をターゲットとして、福井県の美浜町にある嶽山（標高 200 m）で野外実験を行った。雷予知は漁船用レーダーを用いることにより、実験場に襲来する雷雲の動きを把握した。また、レーザー照射タイミングは雷雲内で発生するプレリミナリーブレークダウン（PB）を検知することにより、レーザー照射のタイミングを決定する自動照射システムを開発した。野外実験では降雨、降雪のためにプラズマの核となる大気中のダスト数が低下し、レーザープラズマチャンネルの密度が低下する現象が生じ

た。このため誘電塔先端の絶縁物ターゲットを設置し、それをレーザーで照射することにより高密度のプラズマチャンネルを生成することに成功した。これらの技術開発により、平成８年度には 2 kJ の炭酸ガスレーザーと誘雷塔先端に絶縁物ターゲットプラズマを用いることによって世界で初めて実誘雷の実証に成功した。

今後、レーザー誘雷の実用化を目指し、さらに放電の確率を上昇させ、誘雷範囲を拡大するためには長尺のプラズマチャンネルが必要となる。しかし、CO_2 レーザーのみで長尺のプラズマチャンネルを生成するには、多大のエネルギーを必要とし、コンパクトな誘雷装置とはなりにくい。そこで、長尺プラズマの機能を雷のトリガ機能と誘導機能に分け、前者を短尺の強電離プラズマに、後者をエネルギー消費の少ない長尺の弱電離プラズマに担わせる方法（ハイブリッド方式）を提案し、その有用性を実験的に確かめた。

最後に、雷を効率よく誘雷するために必要なレーザープラズマの長さとレーザー誘雷システム、および雷の防御範囲について検討し、実用化に向けた装置概念を示した。

論文審査の結果の要旨

わが国における送電線事故の大半は落雷が原因であると言われている。近年、コンピュータ機器等の普及に伴い、停電事故の影響は広範囲に及ぶため電力系統における雷害対策は重要である。雷対策の１つとしてレーザー誘雷がある。1970 年代に米国で研究が開始されたが誘雷の実現にまでは至っていない。80-90 年代に入り我が国でも研究が始まり注目を集めている。日本では日本海側北陸地方の冬季雷は雲底高度が低くレーザー誘雷にとって好都合で、大出力レーザー技術の進歩と相まって精力的な研究が行われている。本論文はレーザー技術総合研究所、関西電力㈱と大阪大学が共同でレーザー誘雷の実用化を目指した研究の成果をまとめたものである。

第１章は緒論であり研究の背景を明らかにし、この研究の価値を位置づけている。

第２章では北陸地方に発生する冬季雷の発生原理、レーザー誘雷の概念と、大気中で発生するレーザープラズマの生成メカニズムおよびレーザープラズマ生成に対するレーザー波長の依存性についての考察をまとめている。

誘雷等先端の電界について数値計算を行い評価している。放電塔先端から 0.1 m 上空では 570 kV/m、0.2 m では 290 kV/m の電界となることを示し、この強電界で放電するプラズマチャンネルを生成することが必要であることを提案している。

大気中に生成されるレーザープラズマのレーザー波長依存性を利用し、赤外域では高周波理論によりプラズマ生成閾値は低くなることを示している。CO_2 レーザー生成プラズマはエアロゾルを起源としてプラズマが生成されるためにビーズ状のプラズマチャンネルとなることを明らかにしている。電子ビーム制御型 CO_2 レーザーを設計し、不安定共振器利用時のレーザーエネルギー等を計測、評価し、出力パルスエネルギー100 J を実現している。

第３章では、CO_2 レーザーによって生成されるビーズ状のプラズマチャンネルによって生じる放電生成と誘導過程について議論している。放電開始条件を平板－平板電極を用いて、プラズマビーズ間短絡電界を測定し、放電電界はプラズマビーズ間隔が小さくなると減少すること、また CO_2 レーザーで生成したビーズ状レーザープラズマの放電過程をストリークカメラで観測し、外部電界によって、個々のビーズ状プラズマから両極に向かって、ストリーマが進展し、主放電に至ることを明らかにしている。放電遅れ時間はプラズマビーズ間隔に対して一定の値を示し、放電路形成時間は平均 10 μs と考えられ、この時間までに隣接するプラズマビーズと短絡すれば放電に至ることを示している。

平等電界中で、プラズマ長さを半分にした場合の放電進展過程について実験を行っている。レーザープラズマチャンネル長とビーズ短絡電界を用いることによって、プラズマチャンネル長がギャップ間隔より短い場合の放電電界の計算式を提案し、実験結果と良く一致することを示している。またレーザー誘導効率を定義し求めている。プラズマチャンネルを生成する側に正極性電圧を印加した場合、プラズマビーズ平均間隔 5 mm では 80%、10 mm では 40% であること、負極性を印加した場合はビーズ平均間隔 5 mm では 67%、10 mm では０%であると明らかにしている。

不平等電界での放電進展過程について実験では放電の開始は、棒電極周りに存在するコロナシースの外にあるプラ

ズマチャンネルから、両極性リーダーによって開始することを示している。発生機序を考慮し、両極性リーダーを発生させるためには、レーザープラズマチャンネルの長さは、コロナシース半径より長く、プラズマビーズ密度の高いチャンネルが必要であることを示している。

新規に多焦点集光鏡（MACH 鏡、Multi Active CHannel）を発案し、世界最長の 8.5 m におよぶ長尺放電誘導とプラズマチャンネルを実現し、またレーザーによって完全に放電構造を制御できることを述べている。

第４章では平成５年度より行ったレーザー誘雷野外実験について述べている。福井県三浜町嶽山に 50 m 高さのレーザー誘雷装置を設置し、降雪時にビーズ状プラズマチャンネル数が減少する効果の対策としてダスト散布やレーザービームダクトの設置を検討し、開発した CO_2 レーザー、２台の大型カセグレン鏡について説明している。

平成８年度に２回の誘雷現象を観測した結果を示している。１回目は１月 29 日であり、郷市観測所の北の方で最初の雲内放電があり、嶽山付近の電界分布が変化し、そこにレーザープラズマを生成したことによって誘雷塔の先端から放電リーダーが誘発されたことを示している。平成８年２月 11 日には嶽山山頂に雷が襲来し、電界が上昇したところにレーザーを照射することによってリーダーをトリガさせることに成功し、最終的には主放電まで至ったことを示している。得られたロゴスキー電流波形等によりレーザー照射後、誘雷塔から上向きリーダーが発生したことを確認し、これらの結果より、世界で初めてレーザー実誘雷を実証したことを示している。

第５章では強電離・弱電離プラズマチャンネルを組み合わせたハイブリッド方式による放電誘導実験についてまとめている。紫外レーザーの伝播特性は雪による減衰が最も大きく、降雪強度が 1.2 mm/h で透過率が 50%となる伝播距離は 700 m、降雪強度が 3.6 mm/h では 250 m であることを示している。弱電離プラズマ密度をチャージコレクターおよびマイクロ波干渉計により計測し、プラズマ密度はレーザー強度、レーザーフラックスに依存することを明らかにしている。放電ガイドに必要なプラズマ密度 10^{13} cm^{-3} を大気中に生成するためには 10-100 J/cm^2 が必要であることを提案している。ストリークカメラを用いて弱電離プラズマ中でのストリーマの進展速度の計測を行ない、プラズマ密度が 1-2×10^{13} cm^{-3} では進展速度は 5×10^6～1.5×10^7 m/s であること、弱電離プラズマの初期密度、及び初期外部電界の増加対して線形的に速くなることをはじめて示している。ストリーマ先端電界をポッケル効果電界計により先端電界は 2.7-3.0 MV/m であることを計測している。そして弱電離プラズマ中の進展モデルを立て、ストリーマ進展速度の実験式を明らかにし、プラズマチャンネルの寿命から弱電離プラズマ１本の長さを 50 m 以下とする必要があると結論している。

第６章では実誘雷を行うために必要なレーザープラズマチャンネル長さの検討と防御範囲について検討している。リーダーが進展するための最低必要な電位歪みと高さを計算し、平均電界 10 kV/m を仮定すると、必要なプラズマ長さは 129 m となることを示している。この結果より、必要なレーザー誘雷装置を算出し、強電離プラズマチャンネルを生成するために必要な CO_2 レーザーは出力 100 J、繰り返し２ショット、２ショット間の繰り返し間隔 10 ms、また弱電離プラズマチャンネルを生成するために必要な紫外光レーザーは出力 35 J、装置数４台、繰り返し間隔 10 ms が必要であることを明らかにしている。レーザー自動照射システムを３箇所に設置すると防御範囲は天頂角 30 度で半径 1.5 km であることを明らかにし、実用化可能であることを示している。

以上のように、本論文は高出力レーザーを用いて冬季雷を安全に地上に誘導する方式を明確にし、実際に高出力炭酸ガスレーザーによるレーザー誘雷に成功し、実用化システムを提案し、レーザー誘雷が電力の安全性を確保する技術として有効であることを世界ではじめて示し、電気工学、レーザー工学へ多大の寄与をなしたものと言える。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。