



研究ノート

# レーザー誘雷

藤原 閱夫\*, 井澤 靖和\*\*

## Laser Induced Lightning

**Key words:** レーザー, 誘雷, レーザープラズマ, レーザー誘導放電

### 1. はじめに

夏の風物詩である雷。秋深まった北陸地方の雷“雪おこし”。しかし送電線事故の約2/3は落雷によるものであり雷はやっかいものでもある。大出力のパルスレーザーを大気中に集光すると、焦点にプラズマが発生する。このレーザー生成プラズマを避雷針として利用し、プラズマに沿って雷放電を誘導しようとするのがレーザー誘雷である。停電のない電力供給へのニーズとレーザー技術の進歩に伴ってレーザー誘雷が注目を集めるようになってきた<sup>1-7)</sup>。筆者らは1990年からレーザー核融合研究センターの烈光II号炭酸ガスレーザーを用いてレーザー誘雷研究を開始した。

レーザー誘雷の概念図を図1に示す。レーザー誘雷実現のためには、(1)レーザーによる長尺プラズマチャンネルの発生、(2)発生したレーザープラズマへの放電誘導、(3)レーザーの大

気中での吸収・散乱特性の把握、さらにレーザーの照射タイミングを決める(4)雷予知技術も不可欠であり、これらが組合わさってレーザー誘雷が可能となる。レーザー誘雷研究はレーザー技術は勿論、放電分野や雷挙動も含めた気象分野にまたがる学際的な研究テーマでもある。これまでの成果と研究の概略を以下にまとめる。

### 2. レーザーの選択と実験装置

どのようなレーザーがプラズマを作り易く誘雷に適したレーザーであろうか。プラズマを発生するのに必要なレーザーの集光強度はおよそ $10^9 \text{ W/cm}^2$ で、急峻な出力を発生できるパルスレーザーが適している。プラズマを作り易い波長は赤外域あるいは紫外域にあり<sup>8)</sup>、CO<sub>2</sub>レーザー(波長 $10.6 \mu\text{m}$ )やKrFエキシマレーザー(波長 $0.25 \mu\text{m}$ )が適当である。我々はより高出力が得られるパルスCO<sub>2</sub>レーザーを実験に使用し、レーザーによる放電誘導の室内実験を実施している。

実験の配置を図2に示す。レーザーは15m伝播した後、集光用の凹面鏡で反射して誘導用接地電極と高電圧を印加する左上棒電極間にプラズマチャンネルを発生させる。放電用の高電圧電源には出力電圧1.2MVの衝撃電圧発生装置(IG)を、レーザーには電子ビーム制御方式のパルスCO<sub>2</sub>レーザー(出力100J)を用いた。レーザーのパルス波形は、半値全幅40nsecの最初の鋭いピークとその約200nsec後に2度目の低いピークを持ったダブルパルスであり弱い発振のテールが続いている。レーザーのピーク

\*Etsuo FUJIWARA

1953年2月4日生

昭和56年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修了

現在、大阪大学レーザー核融合研究センター、助手、工学博士、レーザー工学

TEL 06-877-5111(内線6533)

または06-492-7613

\*\*Yasukazu IZAWA

1941年11月9日生

昭和44年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修了

現在、大阪大学レーザー核融合研究センター、教授、工学博士、レーザー工学



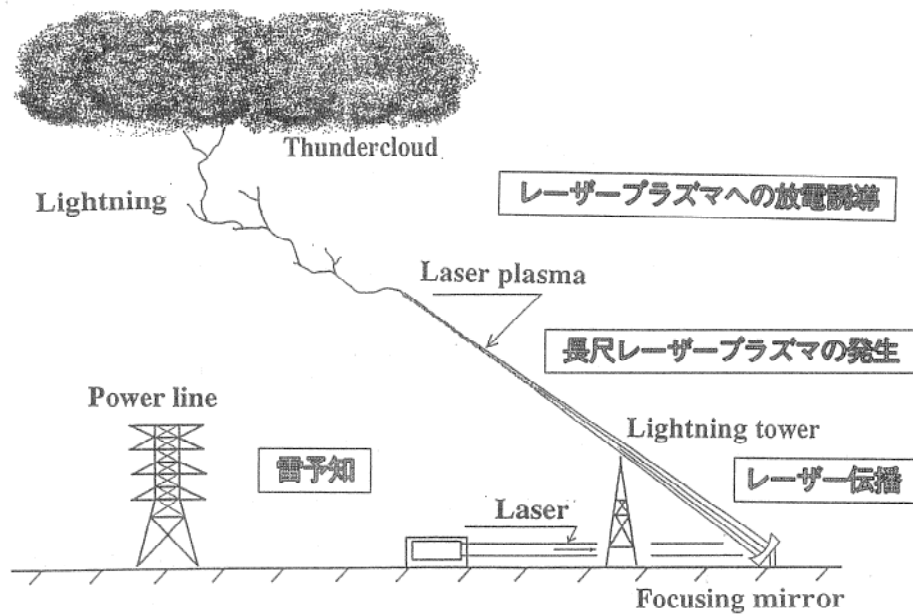


図1 レーザー誘雷の概念図

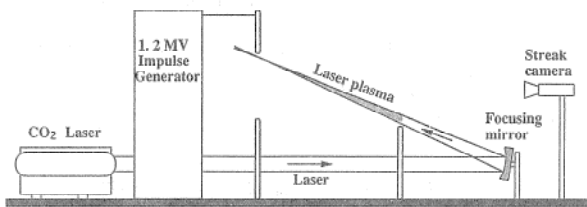


図2 CO<sub>2</sub>レーザーによる放電誘導実験の配置

パワーは約2GWである。

### 3. レーザーによる長尺プラズマチャンネルの発生と長放電誘導

パルスレーザー光を凸レンズあるいは凹面鏡で集光するとその焦点にプラズマが発生する。長いプラズマチャンネルを作るにはレーザーのエネルギーを増大し、長焦点のレンズで集光するのが一般的である。しかし放電誘導に適した

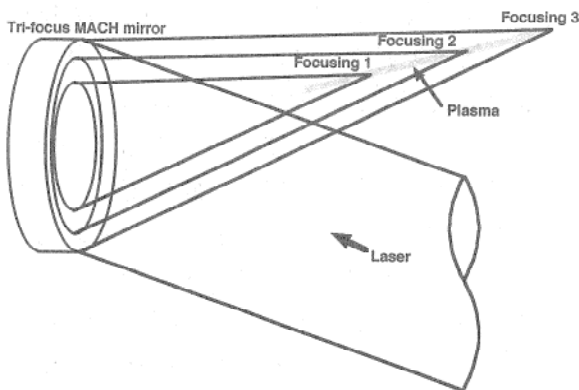


図3 多焦点MACH(Multi-Active CHannel)集光鏡

長いプラズマチャンネルを発生することはそう容易ではなく、従来レーザー誘導長は2~3mに留まっていた。筆者らは一枚の鏡の中に複数の焦点を持つ多焦点MACH(Multi-Active Channel)集光鏡を新たに発案し実験に導入した。MACH鏡は図3に示すように中央部で反射したレーザー光は鏡に近い位置に集光し、鏡の周辺部で反射したレーザー光は遠方に集光するように設計する。その結果、外周部のレーザー光は前方で発生したプラズマによる強い吸収の影響を受けずにそれよりも遠方に集光でき、より長いプラズマを発生することが可能となった。MACH鏡ではそれぞれのミラーで作られるプラズマの重ね合わせで長いプラズマを作ることができ、長尺プラズマの発生とそのスケーリン

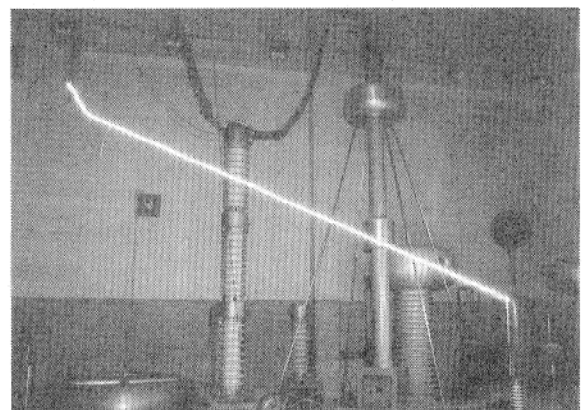


図4 6mのレーザー放電誘導写真。2焦点のMACH鏡を使用し、電極には1.2MVの電圧を印加した。レーザーを照射しないとき、放電距離は1.65mであった。

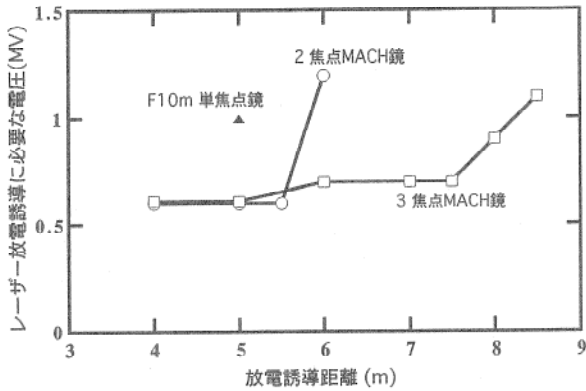


図5 レーザー誘導距離と放電に必要な電圧

グ則を立てる上で非常に都合がよいことがわかった。

2焦点のMACH鏡を使った実験では6mの放電誘導に成功し<sup>7,9,10</sup>(図4), 1992年にはさらに3焦点のMACH鏡を開発して8.5mの放電誘導に成功, 世界記録を更新した<sup>11)</sup>. 誘導距離と放電誘導に必要な電圧の関係を図5に示す. 1.2MVの印加電圧でレーザーを照射しない場合の放電可能な棒電極間隔は1.65mであったことから同一電圧で5倍以上の長尺の放電が可能であった. 3焦点MACH鏡では誘導距離7.5mと8.5mの間で必要な電圧が急激に増加している. このことはレーザーにより生成されたプラズマがまばらになり, 誘導効果を失う領域がこの間に存在することに対応している. また放電に必要な電圧は, レーザープラズマで誘導されている領域では, 誘導距離にほとんど関係なく一定であった. またレーザービームを3本に分割し, 3本の誘導路を重ね合わせた“Z”放電にも成功した(図6). 通常このような放電は困難であるが, レーザーを用いることによ

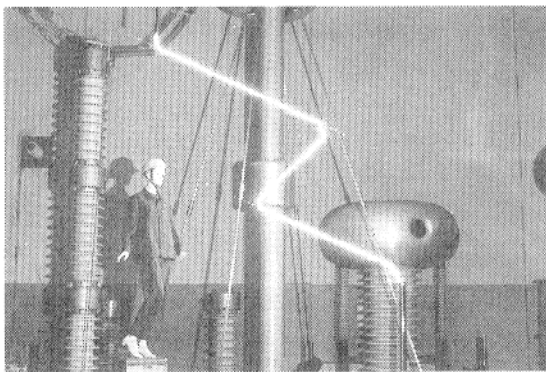
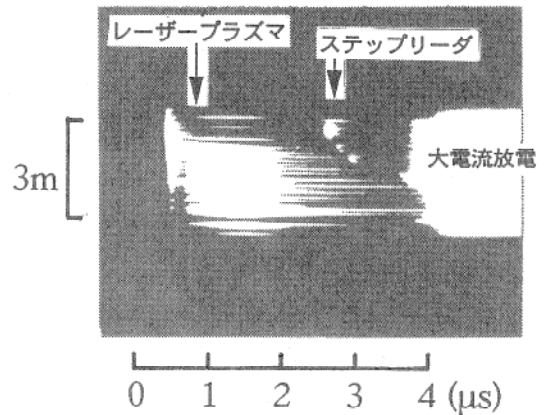


図6 3本のレーザービームを重ね合わせた“Z”放電. 放電長は4m, 印加電圧は-1MVである.

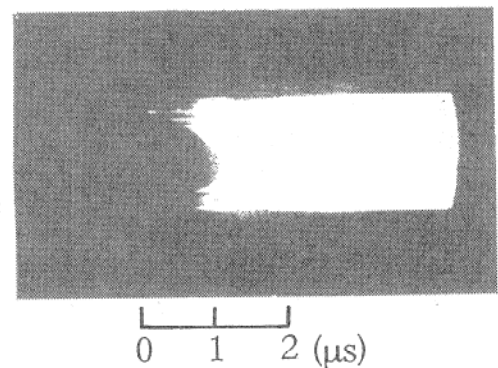
り放電路を自由に制御できることを示している.

#### 4. レーザープラズマへの放電誘導

レーザープラズマで誘導された放電と通常の放電とでは放電路形成の様子は同じであろうか? レーザーによる放電誘導過程のストリーク像を図7(a)に示す. 発光の上端が電圧印加電極, 下端が接地電極に対応し, その間隔は3mであ



(a)



(b)

自己放電

図7 レーザー放電誘導のストリーク写真 (a) レーザー誘導時, (b) 自然放電時

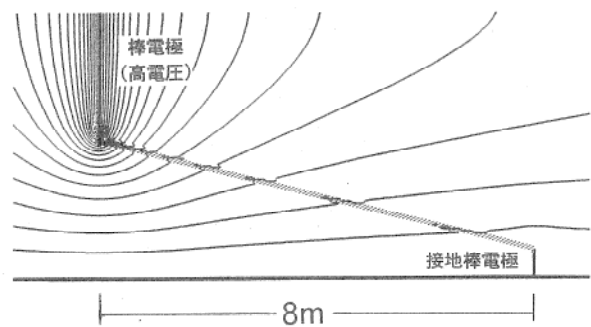


図8 レーザープラズマによる空間電界歪発生の3次元シミュレーション

る。最初の強い発光はレーザープラズマからの発光である。レーザー照射約 $2\mu\text{s}$ 後に前駆放電であるリーダが高電圧(1MV)を印加した上部電極からステップ状の強い発光を伴って進展し、下部電極に到達した直後に大電流放電が始まる。比較のために1.6mの通常の気中放電のストリーク像を(b)に示す。通常のギャップ放電でのなだらかな両電極からの連続リーダ進展とは明かに異なったステップリーダが見られる。ステップリーダは大気中では長ギャップ放電あるいは雷放電で見られる現象である。またレーザー誘導でのリーダの進展速度は通常の放電の10倍近い速さを持つことがわかった。

リーダ放電が延びるために必要な大気中の電界強度はいくらであろうか？一辺1.5m四方の平行平板電極を作り、一様電界中でのレーザー誘導実験を行った。その結果レーザーを照射することにより0.2MV/mの電界強度でリーダの進展が可能であることがわかった。レーザーを照射しない場合には、放電に3MV/mの電界強度が必要とされており、レーザー照射によって放電開始電界強度の大幅な低減が可能となった。

実験と並行してシミュレーションによる放電誘導メカニズムの把握にも努めている。レーザープラズマによって空間電界が歪む様子を3次元シミュレーションした結果を図8に示す。上部棒電極(電圧印加)と接地棒電極間にレーザープラズマは細長く一様に形成されていると仮定した(図中の破線領域)。電界歪はレーザープラズマ近傍の狭い領域に限られており、レーザーによる放電誘導の有無はこのようなプラズマ近傍の電界が放電のしきい値を越えるかどうかにかのみ依存していることを示唆している。

## 5. 将来への展望

冬季の雷雲の高度を考えると必要なプラズマチャンネルの長さは100m程度と考えられる。雷雲予知技術では、雲間放電からの電磁ノイズの方位を計測し、雷雲の位置を高精度に実時間でマッピングできるSAFIRシステムが大阪大学と関西電力との共同研究で稼働を開始した。さらに降雨降雷時の大気中のレーザー伝播特性の測定も含めて広範囲の学際的研究が重要であ

る。MACH鏡は長プラズマチャンネル発生への確かな可能性を示したといえる。もちろん大出力レーザーの技術開発は重要である。レーザー誘雷には出力1~2kJクラスのレーザーが必要と思われるが、幸いなことにレーザー核融合研究センターではレーザー核融合研究のために出力10kJのCO<sub>2</sub>レーザー(烈光VIII号)がすでに開発されているのは心強いかぎりである。

尚、本研究は関西電力(株)、(財)レーザー技術総合研究所及び大阪大学との共同研究として実施されている。共同研究のメンバーは以下の通りである。(財)レーザー技術総合研究所:内田成明, 島田義則, 西口彰夫, 山中千代衛, 阪大レーザー研:藤原関夫, 井澤靖和, 山中龍彦, 阪大工:河崎善一郎, 松浦慶士, 関西電力(株):永井敏雄, 下倉尚義

## 参 考 文 献

- 1) 新藤, 鈴木: 電力中央研究所報告 No.182010(1982).
- 2) 内山, 広橋, 宮田, 坂井: レーザー研究, **16**, 267(1988).
- 3) 新藤, 佐々木: 電気学会誌, **111**, 739(1991).
- 4) J. R. Oreig, U. W. Koopman, R. F. Fernald et al.: Phys. Rev. Lett., **41**, 174 (1978).
- 5) 久保, 竹谷, 神野, 森岡, 板谷他: 電気学会高電圧研究会, HV-91-2, 9(1991).
- 6) C. Honda, M. Eto, T. Takuma, K. Muraoka et al.: 4th Asian Conf. on Elect. Discharge 18 22 Oct., Pusan. Korea (1991).
- 7) 藤原, 井澤, 河崎, 松浦, 山中: 「レーザー誘雷」, レーザー研究, **19**, 528(1991).
- 8) H. T. Buscher et al.: Phys. Rev. Lett., **15**, 847 (1965).
- 9) Z. Kawasaki, K. Matsuura, E. Fujiwara, Y. Izawa, K. Nakamura, C. Yamanaka, T. Nagai: "Long laser-induced discharge in atmospheric air" Res. Lett. Atmos. Electr. **12**, 139 (1992).

- 10) K. Nakamura, C. Yamanaka, E. Fujiwara, Y. Izawa, Z. Kawasaki, K. Matsuura, T. Nagai : "Long laser-induced discharge in atmospheric air" CLEO '92 Anaheim, California, USA, May 10-15, CThP8 (1992).
- 11) Z. Kawasaki, K. Nakamura, E. Fujiwara, K. Matsuura, Y. Izawa, T. Nagai, Y. Sonoi, C. Yamanaka : "Preliminary experiments of laser induced lightning" Eleventh International Wroclow Symposium on Electro Magnetic Compatibility, Wroclow. Poland. Sept. 2-4. N2. 557 (1992).

