



解説

- 3. 高出力レーザープラズマ研究の新しい展開
- 3.4 レーザープラズマ工学（環境・宇宙・産業）応用

レーザー誘雷

島田義則, 内田成明
(財)レーザー技術総合研究所

Laser-Triggered Lightning

SHIMADA Yoshinori and UCHIDA Shigeaki

Institute for Laser Technology, Osaka 565-0871, Japan

(Received 25 October 2004 / Revised 1 December 2004)

Studies of laser-triggered lightning were conducted in laboratories and field experiments. Focused with MACH (Multi Active Channel) mirrors, a ~ 100 -J electron-beam sustained carbon dioxide laser was used to generate long laser-plasma channels. An 8.5 m plasma channel-guided discharge was performed. Critical conditions for initiating the discharge through the plasma channel were determined from laboratory experimental data.

An experimental site was constructed at Mt. Dake in Fukui prefecture close to the Japan seashore. An electron-beam sustained two-beam 2 kJ carbon dioxide laser with 500 and 1000 mm diameter Cassegrain type focusing mirrors and a 50 m tall lightning tower were installed. A plastic target was set at the top of the lightning tower to produce an ablation plasma channel for lightning leader initiation. An aerosol plasma channel was produced from the top of the plastic target for guiding the initiated leader. The laser plasma channel successfully triggered a lightning stroke. Rogowski coil current detectors at the top of the lightning tower monitored the current after the laser shot.

A UHF interferometer set 5 km from the experimental site detected UHF radiation at the same time as the laser irradiation. For the first time, laser-triggered lightning was successfully demonstrated.

Keywords:

laser-triggered lightning, laser plasma, carbon dioxide laser

1. はじめに

冬季における日本海沿岸での超高圧送電線の雷事故は2回線事故になるケースが多く電力系統に及ぼす影響は大きい。特に冬季の日本海沿岸に発生する雷は落雷エネルギーが大きく、超高圧電線に落雷すると重大事故となるケースが多い。多くの電子機器が利用されるようになっている現代の情報化社会において、雷撃による突然の停電、瞬時の電圧降下などにより、これら多くの電子機器に及ぼす影響は甚大である。そのため、送電線での落雷事故対策は重要な課題の一つである。従来の送電線耐雷対策は鉄塔塔脚接地抵抗の低減、送電用避雷器の設置などであったが、これらはいずれも落雷に対する受動的な対策であった。これに対し、レーザーやロケットを用いた誘雷技術は、落雷が発生する前に雷雲からの放電を安全な場所に誘導し事故を未然に防ぐことを特徴とした能動的な対策である。レーザー誘雷の概念は次のとおりである。まず、高い誘雷塔先端に生ずる高電界中に強力な炭酸ガスレーザーを集光して誘雷塔先端にレーザープラズマを生成する。そこから上向きリーダを発生させて、レーザープラズマに沿って上空に進展させる。十分に進展したリーダがそのまま自己進展して雷雲まで到達することによって、雷電荷を中和させ被害を低減することである。

レーザー誘雷の研究は1970年代に Ball [1]によって提案され、米国において約 20 m の塔を設置して、400 J の炭酸ガスレーザーと 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[2]。その後、80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。米国と日本では対象とした雷雲

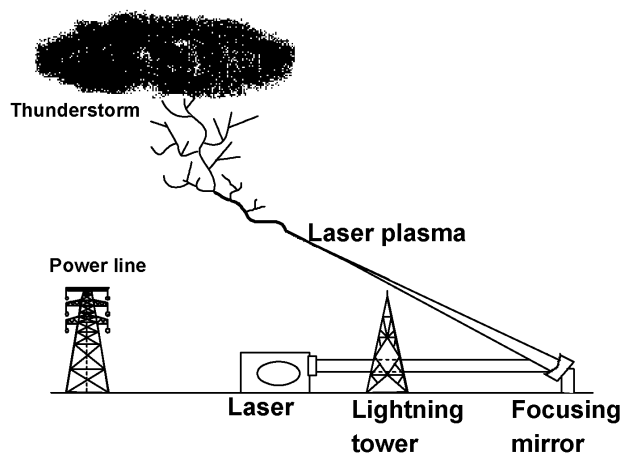


Fig. 1 Laser triggered lightning concept.

corresponding author's e-mail: shimada@ile.osaka-u.ac.jp

が異なっている。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90年代に研究が盛んとなった。大学、研究所などが競って放電誘導の実験を行った[3]。レーザーは炭酸ガスあるいはエキシマレーザーが主であった。これは大気中にプラズマを生成することが容易な波長が選ばれたためである。著者らはレーザー核融合用に開発された炭酸ガスレーザーの1ユニットを用いて放電誘導の実験を行った。そして、2kJの炭酸ガスレーザーをレーザー誘雷野外実験用として改良しそれを用いて世界で初めて実誘雷の実証に成功させた。本稿ではこれらの実験について紹介する。

2. 基礎実験

80年代後半から各研究所で実誘雷に向けた基礎実験が行われた。特に放電をガイドするために必要なプラズマ密度や放電をトリガするために必要な条件を明らかにする研究が行われた。ここでは、室内で行った長距離放電誘導実験、および放電をトリガするために必要なプラズマ密度について述べる。

大気中に 10^{10} W/cm² 程度の強力な炭酸ガスレーザー光を照射すると、大気の絶縁破壊が生じ、プラズマが生成される。この過程は高周波放電機構や逆制動輻射機構で説明できる。しかし、実際の大気中にはエアロゾルが浮遊しており、これらがプラズマ化するレーザー強度は大気の絶縁破壊強度より低く、先にプラズマ化する。したがって、炭酸ガスレーザーで生成されるプラズマチャンネルは、エアロゾルを核とする光軸に沿って生成されるビーズ状のプラズマとなる。エアロゾルがプラズマ化する強度は組成や粒子径によって決まり、一般に粒子径が小さくなるほど必要なレーザー強度は高くなる。ダストの粒子径が $1\ \mu\text{m}$ 程度であると、必要な炭酸ガスレーザー強度は 10^9 W/cm²、粒子径が $10\ \mu\text{m}$ であると 10^8 W/cm² 程度[4] 必要である。したがってレーザー強度を高くすればプラズマ化する単位体積あたりの粒子個数が増加し、プラズマビーズ間隔の小さな密度の高いプラズマチャンネルが生成可能となる。

このプラズマチャンネルを用いて放電をガイドするために必要なプラズマ密度を調べることが重要な課題であり、平板-平板電極を用いて電極間にレーザープラズマを生成し、プラズマビーズの平均間隔に対する50%フラッシュオーバー電界を求めた。レーザーは電子ビーム制御パルス炭酸ガスレーザーを用いた。出力エネルギーは100 J、パルス幅は40 nsである。平板電極の大きさは 2.0×1.5 mであり、電極周囲には端面からの放電を避けるために円筒状のコロナ防止リングを設けた。電極間隔は0.5 mとした。また平板電極中心にレーザーを貫通させるために直径50 mmの穴を開けた。高電圧の印加は直流高電圧発生装置を用いた。出力電圧は ± 500 kV、コンデンサー容量5 nFである。レー

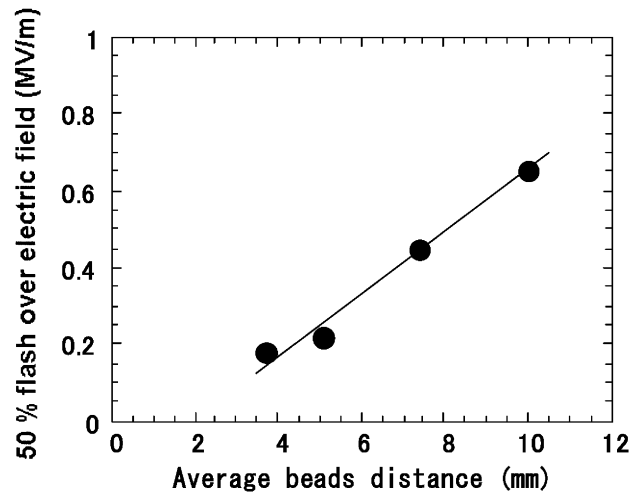


Fig. 2 50% flash over electric fields depends on average plasma beads distance in laser-plasma channels.

ザーは高圧印加電極側より入射し、レーザー光の焦点は接地側平板電極面上とした。使用した集光鏡のFナンバー(焦点距離/集光鏡径)はF:100, F:40, F:20である。レーザーエネルギーは150, 75 Jでパルス幅50 nsである。プラズマビーズの平均間隔は使用する集光鏡のF値とレーザーエネルギーを変えて3.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mmのレーザープラズマとなるように調整した。ただし、プラズマビーズ平均間隔は、プラズマビーズが存在する領域(チャンネル)が円筒であると仮定して、レーザープラズマの接写写真より、生成されたプラズマビーズをカウントし、その数密度の逆数の立方根とした。50%フラッシュオーバー電圧は昇降法により求めた。

プラズマビーズの平均間隔を一定とし、平板-平板電極間隔を縮めた場合、50%フラッシュオーバー電圧値は直線的に減少し原点を通る直線となった。これより放電現象はプラズマビーズ間に印加されている電界強度に依存すると考えてよい。また平板電極に設けたレーザー入射穴の直径を50 mmから35 mmに変化させたが放電電圧の低下は認められなかった。このため穴の直径による放電電圧の変化は無視できる。プラズマビーズ間平均間隔と50%フラッシュオーバー電界との関係をFig. 2に示す。ただし電極間にレーザープラズマチャンネルがない場合の50%フラッシュオーバー電界は2.5 MV/mである。50%フラッシュオーバー電界はプラズマビーズ間隔に逆比例して減少し、ビーズ間距離4 mmで0.2 MV/mであった。

また、ストリークカメラを用いて、放電開始過程を観測した。観測結果をFig. 3に示す。レーザー光は図中の下部より照射し、視野は0.5 mの電極間の全領域をカバーしている。時間は左から右に進展する。左側の線状の発光がレーザープラズマの減衰時の発光であり、図中央で放電に至る。レーザー照射から主放電に至るまでの放電遅れは4.0 μs である。図より個々のビーズ状プラズマから発光が生じ、両極に進展し、隣り合ったビーズ状プラズマと結合し、電極間にわたって短絡が生じると主放電に至ることがわかった。

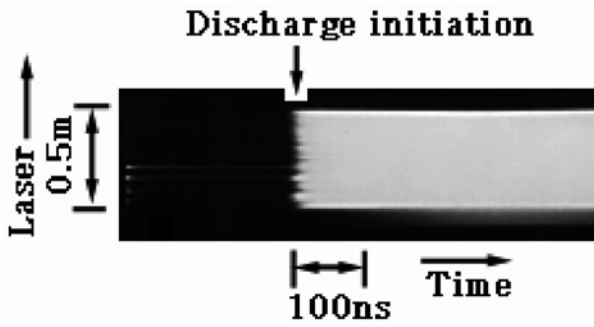


Fig. 3 Streak image of discharge guided with plasma channels consisting of many plasma beads originated in aerosol in air.

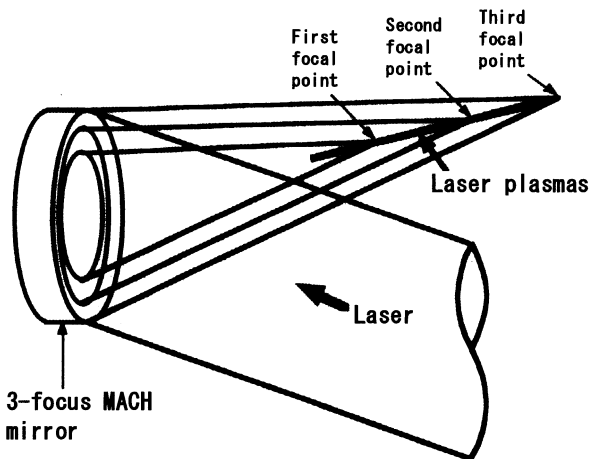


Fig. 4 Schematic of multiactive channel (MACH) mirror consisting of multi-concentric ring-shaped focusing mirrors. As each mirror has different focusing points, each plasma-channel is generated in different positions, producing a long plasma channel.

このほか、ビーズ状プラズマの消滅過程やプラズマチャンネルの放電有効寿命の計測を行った。

長尺のプラズマチャンネルを生成するために多焦点を持つ集光鏡を用いた。MACH (Multi Active Channel) 鏡の概念を Fig. 4 に示す。単焦点の集光鏡では焦点付近にしかプラズマが生成されず、長尺のプラズマチャンネルを生成することは困難であるため、一枚の鏡の中に複数の焦点を持つ多焦点集光鏡を新たに開発し長尺のプラズマチャンネルを生成した。炭酸ガスレーザーと MACH 鏡を用いることにより、自然放電では約 1 m の距離しか放電が生じない電圧 (1 MV) で、当時としては最長記録の 8.5 m の放電誘導を実現した (Fig. 5) [5]。

3. 野外実験

3.1 野外実験場概要

基礎実験でのデータを基に平成 5 年度から福井県美浜町の嶽山 (だけやま: 標高 200 m) の山頂で野外実験を行った。Fig. 6 に野外実験場配置を示す。誘雷塔 (50 m)、レーザー室、集光鏡室、観測兼レーザー制御室および雷観測装置群がある。レーザー室、集光鏡室および観測機器は観測

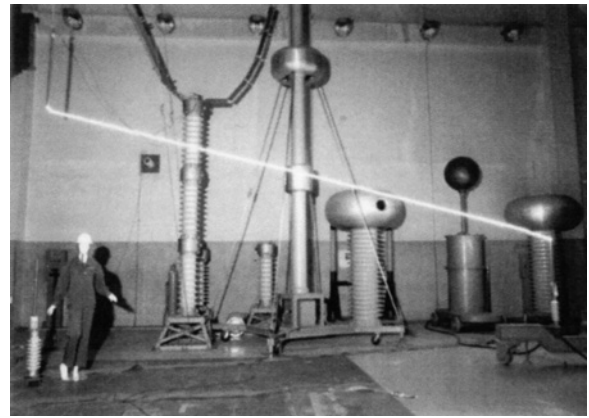


Fig. 5 8.5 m gap discharge guided by laser plasma channels produced with MACH mirrors. Applied voltage was 1 MV.

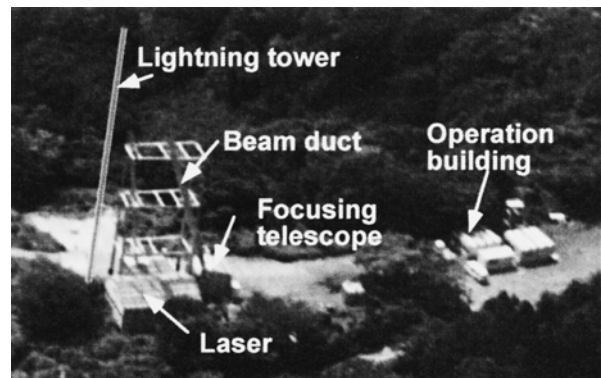


Fig. 6 Overview of experimental site at Mt. Dake.

室と光ファイバーで結ばれ、落雷時のサージなどの影響を受けずにレーザーの運転や雷雲の観測ができる。誘雷塔はレーザープラズマからリーダが生成可能な高電界を誘起し、かつ誘雷した場合の落雷点として設置した。誘雷塔の高さは、室内実験で得られたデータを基に算出した。プラズマチャンネルからリーダを発生させるためには 200~600 kV/m の電界 (プラズマチャンネル密度に依存する) が必要であり、この高電界を得るために誘雷塔高さを 50 m と決定した [6]。また実際に高電界が先端に存在することを確認するために、電界測定器を誘雷塔の先端に設置して測定を行った。その結果、地上電界より約 100~150 倍の電界集中度 (地上電界 1~5 kV/m の範囲で測定) が得られ [7]、リーダを発生させるために十分な電界強度が存在することを確認した。

レーザー装置は 2 ビーム同時発振の電子ビーム制御型 TEA 炭酸ガスレーザーを使用した。各ビームは口径 210 mm^φ、パルス幅 50 ns で 1 kJ を出力する [8]。集光鏡から誘雷塔先端までレーザー光を伝搬させる際、雨・雪による伝搬ロスを防止するために、地上から長さ 25 m のビームダクトを設置した。これにより、集光鏡から誘雷塔先端までのレーザーが伝搬する体積の約 80% をカバーし、散乱・吸収によるエネルギーロスを低減させて安定したエネルギー伝送を可能とした。

炭酸ガスレーザーの波長は $10\ \mu\text{m}$ で可視光より長波長であるため、鉄塔先端付近に強力なプラズマを生成するためには大口径の集光鏡を用いる必要がある。基礎実験のデータを基に、焦点距離が $50\ \text{m}$ で、主鏡口径が $500\ \text{mm}^\phi$ (Fナンバー:100)と $1,000\ \text{mm}^\phi$ (Fナンバー:50)のカセグレン型集光鏡を開発した[9]。また、カセグレン鏡の副鏡を長尺プラズマ生成に有効なMACH集光鏡とした。

ここで、ロケット誘雷実験について触れる。日本海側の冬季雷において、誘雷に成功した場合のロケット高さは $20\sim 300\ \text{m}$ の範囲に分布しており、中間値は $135\ \text{m}$ である[10]。しかし、ロケットの高度が $20\sim 70\ \text{m}$ であっても数%の確率で誘雷に成功していることから、自然落雷が生じるエネルギーが雷雲に備わっていれば高度が低くても誘雷は成功すると考えられる。また、ロケットの上昇速度は $100\ \text{m/s}$ 以上である。しかし、上昇速度が $100\ \text{m/s}$ より遅くなるとイオンの移動速度以下となり、ロケットの先端にイオンによるコロナシースが形成されるため、電界が緩和され、誘雷成功率は低下する結果が得られている[11,12]。野外実験では誘雷塔高さ $50\ \text{m}$ の上に約 $10\ \text{m}$ のプラズマチャンネルを生成した。また、レーザープラズマの生成時間は $\sim\mu\text{s}$ (パルスのテール部分を含む)程度の極短時間であるので誘雷塔先端にコロナシースを突破する強力なレーザープラズマを生成することにより、リーダが誘起され上向きに進展する。このトリガ効果はスケールダウン実験により確認されている[6]。

誘雷塔先端に密度の高いプラズマチャンネルを生成することが重要であるが、雨・雪によるレーザーエネルギー減衰や誘雷塔先端からのコロナ放電による除塵作用のため、大気中のダストが減少し、誘雷塔先端から $30\ \text{cm}$ の範囲でプラズマが極端に生成されにくいことがわかってきた[13]。このため、誘雷塔先端に絶縁物ターゲットを設置し、そこにレーザーを照射することによって、長尺で連続的なプラズマチャンネルを生成する方法を考案した[14]。絶縁物ターゲットは塩化ビニール樹脂とし、形状は円筒形とした。線状のプラズマを生成するため、主鏡口径 $500\ \text{mm}^\phi$ カセグレン型集光鏡の45度反射鏡をシリンドリカルミラーにして、誘雷塔先端のターゲット上に線集光するようにした。一方、主鏡口径 $1,000\ \text{mm}^\phi$ カセグレン型集光鏡はMACH鏡を用い、ターゲットプラズマの先端から上空に $10\ \text{m}$ 長のビーズ状プラズマチャンネルを生成した。

レーザーの照射タイミングは雷雲の電界を計測しながら手動で決定することもできるが、雷雲の内部で生じるプレリミナリーブレイクダウン (PB) を検知してレーザーを自動的に照射するシステム (PBトリガシステム) を用いた。

雷予知のため雷観測ネットワークを設置し、雷雲の動きをモニターした。電界観測網は誘雷実験場 (嶽山) から見て主に雷雲が接近してくる方向となる北西の方向に6点の雷観測ネットワーク拠点を設置した。各地点には針端電流計を設置し、雷雲接近の予知および観測を行った。針端電流計は高さ $3\ \text{m}$ の支持棒の先端に針を付けた構造となっており、そこから発生するコロナ電流を測定する。電流値はデジタルデータに変換され蓄えられるとともに、電話回線

で嶽山山頂に送られた。さらに、気象観測レーダ (福井県久須夜) のレーダ情報を受信するシステムを構築した。また、船舶用のレーダを野外実験場に設置し、それを鉛直面内に回転させ、雷雲の縦断面を観測することにより雲の状態を把握した。冬季に雲頂高度が約 $5\sim 6\ \text{km}$ を超える雲はかなり発達した雷雲で発雷の可能性が高いことがわかっており、船舶用レーダを用いることによって、地上からは識別しにくい発雷可能な雷雲を識別した。

誘雷塔に流れる電流は先端部に取り付けられたロゴスキーコイルにより測定した。大電流と小電流測定用の2つのコイルを取り付け、それぞれ最大 $50\ \text{kA}$ と $500\ \text{A}$ の塔電流を $1\ \mu\text{s}$ のサンプリングで測定した。

雷放電路の記録は、実験場から南東に約 $5\ \text{km}$ 離れた観測点にUHF電波干渉計[15]を設置して放射源を測定することにより行った。

3.2 観測結果

Fig. 7は平成9年1月29日21時32分、広角のCCDカメラで捉えたリーダ進展の齧取り写真である。画面下中央付近に破線で誘雷塔を示す。9齧の全時間は $360\ \text{ms}$ である。リーダの軌跡は、はじめに画面上で誘雷塔から左側に進展し、その後上空に向かって進展している。また3齧目には2方向に分枝し、一方が画面右側に進展している。やがて発光は減衰し消滅した。このようにリーダ進展は雷雲の中心に向かって直線的に進展せず、正リーダの常として大きく旋回し進展した。また、誘雷塔先端のロゴスキーコイル電流計で測定した電流値はマイナス $250\ \text{A}$ と小さく、主放電には至らなかった。

Fig. 8は平成9年2月11日23時11分のレーザー照射で雷をトリガしたときのロゴスキーコイルで計測した誘雷塔に流れた電流変化である。図より、レーザーが照射されてから誘雷塔の電流が増加し約 $700\ \mu\text{s}$ 後に主放電に至ったことがわかる。

Fig. 9は郷市 (ごいち) 観測所に設置した干渉計により得られた結果である。上段にUHFの波形、中段、下段はUHFの発生源の方向をマッピングしたものである。マッピングの結果、これらの信号発生方向は誘雷実験場であることが確認された。また、上段のUHF振幅波形においてレーザートリガタイミングから $17\ \mu\text{s}$ 後にUHFパルスが記録されて

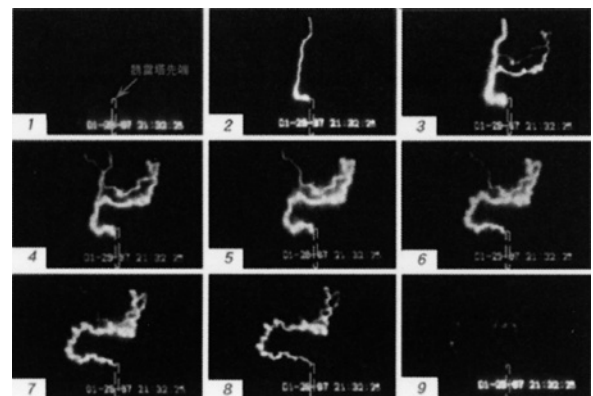


Fig. 7 Time elapsed frame images of leader propagation from the lightning tower.

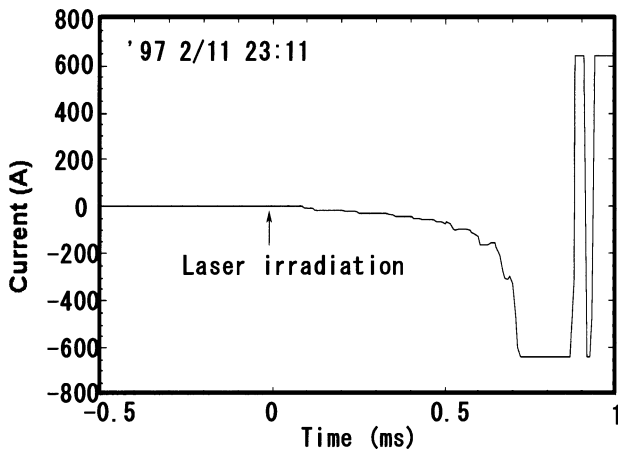


Fig. 8 Electric current waveform at the lightning tower.

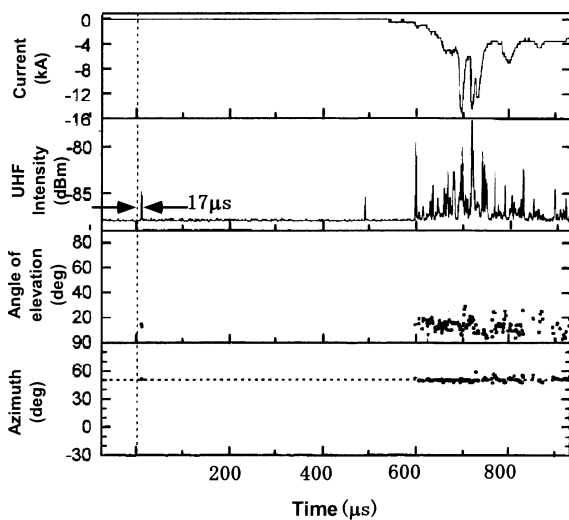


Fig. 9 Discharge mapping using UHF interferometer.

いる。この時間間隔はレーザートリガが入ってからレーザーが照射されるまでの時間差に対応し、レーザーが照射されると同時に上向きリーダがトリガされたことを示す。

4. まとめ

本稿では、炭酸ガスレーザーを大気中に照射しレーザープラズマチャンネルを生成して放電をトリガ、ガイドする室内基礎実験と、それをを用いた野外でのレーザー実誘雷実験について述べた。

80年代から始まった研究は実誘雷をトリガするところまで来た。その後、長尺プラズマチャンネルを生成するためにフェムト秒レーザーやYAGレーザーの4倍高調波を用

いてさらに長尺のプラズマチャンネルを生成する研究も続けられている。また、ドイツでは2004年秋から冬にかけてフェムト秒レーザーでプラズマチャンネルを生成し、実誘雷を行う計画である。しかし、今日ではレーザー誘雷に変わる高電圧アレスタの開発や耐雷サージ技術が進んだこと、また、レーザー誘雷ではキーテクノロジーとなるレーザーがまだまだ高価なことなどが障害となり、日本における野外実験は行われていないのが現状である。

レーザー誘雷はレーザーで生成したプラズマチャンネルで放電を誘導できる。しかも、導電率が高いために比較的低電圧で長距離を伝搬させることができるポテンシャルを有する。

近年では気象変動が激しく、雷も以前に比べ頻繁に発生するようになってきている。レーザー誘雷はアレスタ等の受動的な雷対策と違い、「雷を落としたいところには落とさない」ことができるメリットがある。しかし、実用化には大きなハードルがあることは事実である。ハードルをできるだけ低くできるような鋭意研究を進めていく。

参考文献

- [1] L.M. Ball, Appl. Opt. 13, 2292 (1974).
- [2] C.W. Schubert *et al.*, "Investigation into triggering lightning with a pulsed laser", *IEEE Int. Pulsed Power Conf. (USA)* (1979) p.132-135.
- [3] 新藤孝敏他：「レーザによる気体の絶縁破壊と誘雷」, 電中研調査報告 T182010, (1982).
- [4] D.E. Lencioni, Appl. Phys. Lett. 23, 12 (1973).
- [5] 藤原関夫他：レーザー研究 19, 528 (1991).
- [6] 島田義則他：レーザー研究 24, 572 (1996).
- [7] D. Wang *et al.*, J. Geophysical Res. 99, D8, 16907 (1994).
- [8] C. Yamanaka *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. QE-17, 1678 (1981).
- [9] S. Uchida *et al.*, "Generation of plasma channels for laser triggered lightning", CLEO '93, CWH6.
- [10] 堀井憲爾他：「最近のロケット誘雷実験-1995年-」, 電気学会放電高圧合同研究会 ED-96-70, HV-96-49 (1997).
- [11] 山中龍彦他：レーザー研究 24, 533 (1996).
- [12] C.B. Moore *et al.*, "Characteristics of The French Ruggieri Anti-Hail Rockets Used to Trigger Lightning", Measurement Notes NOTE #27, New Mexico Institute of Mining & Technology (1982).
- [13] 安田裕彦他：レーザー研究 24, 582 (1996).
- [14] 島田義則他：「レーザ誘雷の基礎実験2」, 電気学会放電高圧合同研究会 ED-97-49, HV-97-54 (1997).
- [15] 和田将一他：電学論 B, 116, 322 (1996).