火薬により生成された高速微粒子流を活用した レーザー誘雷の高効率化

橋本 和久, 武田 和也, 河島 信樹, 島田 義則*, 内田 成明*

近畿大学 理工学部 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

* (財) レーザー技術総合研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Increase of Trigger Efficiency by Using an Artificial Aerosol Flow Produced by Gun Powder in Laser Triggered Lightning Experiment

Kazuhisa HASHIMOTO, Kazuya TAKEDA, Nobuki KAWASHIMA,
Yoshinori SHIMADA,* and Shigeaki UCHIDA*

School of Science and Engineering, Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502

*Institute for Laser Technology, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received July 1, 2002)

In order to increase the plasma production efficiency in laser triggered lightning experiments, we propose that a hyper-velocity micro-particle flow produced by a chemical explosion is used along the laser beam path. A preliminary experiment shows the feasibility of the proposed method in the laboratory by using a 100-J, 10-ns CO₂ laser.

Key Words: Laser, Triggering, Lightning, Micro-particle flow

1. はじめに

落雷は火災や電力設備の破壊, 場合によっては人命に関わる事故を引き起こすこともあり, 人々にとっては有り難くない自然現象である. 特に日本においては送電線等, 電力施設への落雷被害が多発しており問題となっている. このような落雷被害の対策として研究されているのがレーザー誘雷である. これはレーザーを用いて人為的に落雷を引き起こし, 雷放電を安全なところへ誘導する技術である.

レーザー誘雷はさらにいくつかの方式に分類される. その中の1つである強電離方式レーザー誘雷は大気中に長尺のプラズマチャンネルを生成する方法である. この方式ではしばしば10 μm 程度の比較的波長の長いレーザーが使用されているが, これは炭酸ガスレーザーのような高出力のレーザー装置が開発されており, 10 μm の光が大気中を高い透過率で伝搬するためレーザー誘雷への応用が有利であるためとされている^{1,2)}.

炭酸ガスレーザー(波長10.6 μm)を使用した場合, プラズマ化のための光強度しきい値は大気分子と比較して, 大気中のエアロゾル(微粒子)の方が低く通常エアロゾルが先にプラズマ化する. そのため, プラズマチャンネルは孤立した粒状の強電離プラズマが連なった形で形成される. このプラズマの間隔が短いほど放電がおこりやすく

なるので, 雨や雪などの気象条件により, 大気中のエアロゾル濃度が極端に減少した場合, 生成されたプラズマ間隔が長くなり放電しにくくなる. 実際の実験室実験では, 比較的容易にプラズマチャンネルが生成されていたものが, 野外実験では生成が非常に難しくなることが経験されている^{3,4)}.

本研究は人工的にエアロゾル(微粒子)を散布することにより, この問題を解決して安定した誘雷を可能にすることを目的としている. 散布する微粒子は光軸に沿わないと効果がない. そこで, 風等の悪天候中でも微粒子を光軸上に散布できるようにするために, 火薬を用いて超高速の微粒子の流れを作り, これをレーザー光の光軸にそって人工的に高速散布し, プラズマチャンネルを効率よく生成する方法を考案した(Fig. 1). 今回はこの方法を用いた場合のプラズマチャンネルの様子と, その放電励起に対する有効性を実証した実験についての報告を行う.

2. 実験装置

Fig. 2に実験装置全体の略図を示す. ガラス管内において微粒子を噴射し, レーザーによりプラズマチャンネルを生成する. 実際にはレーザーと微粒子の噴射方向は同じにするべきであるが, 今回は実験室の都合によりレー

Fig. 1 Use of a high speed aerosol flow to increase the efficiency of the triggering of lightning by a high power laser.

Fig. 2 Experimental configuration.

ザーの進行方向と向かい合う形で配置した。

高速微粒子流を供給するために考案した微粒子噴射装置の構造をFig. 3に示す。これは密閉したステンレス製の容器に装填した火薬を点火し、生成される微粒子を爆圧によりノズルから高速で噴射することにより光軸上に微粒子の帯(高速微粒子流)を作り出す装置である。今回の実験にはパウダー状の黒色火薬を使用した。この火薬を使用したのは入手が比較的容易であることと、燃焼時に約50%が気化して残りが粒子となる⁵⁾ので高速微粒子を作るのに適していると判断したからである。火薬の点火には電球のフィラメントを利用した。このフィラメントは400 Vで充電したコンデンサ(94 μ F)の電荷をサイリスタでスイッチングして流してやることにより瞬間的に加熱され火薬に点火する。

Fig. 3 Artificial aerosol thruster.

レーザーは電子ビーム制御方式のパルス炭酸ガスレーザーを使用した。発振波長は10.6 μ m、発振時間は約10 nsでビーム径は10 cmである。パルスあたりのエネルギーは最大100 Jであり、ある程度なら調節して発振させることもできる。レーザーを集光するのに $f=4$ mのミラーを使用し、レーザーのトリガには高速微粒子流の通過センサーからの信号を利用した。このセンサーはレーザーダイオードとフォトトランジスタを使用した光遮断を検知するセンサーで高速微粒子流が通過すると信号が発生するしくみである。

電極板にはステンレス製の平板(中心にレーザー入射用直径25.4 mm穴付き)と0.5インチメッシュを使用した。コンデンサ(4000 pF, 耐圧50 kV)2本を直列に接続して電極と並列に挿入し、高電圧電源(MAX DC100 kV, 1 mA)と10 M Ω の充電抵抗によりコンデンサを充電しておくことにより、電極板間に最大100 kVの直流電圧を印加することができるようにした。電極板間にプラズマチャンネルができ、放電が励起された場合、コンデンサに充電された電荷がなくなるため、コンデンサ両端の電圧が降下する。これはコンデンサの両端の電圧を1000 M Ω と100 k Ω の抵抗で分圧することによりオシロスコープで計測した。

3. 実験結果

3.1 高速微粒子流の生成

再現性のよい高速微粒子流をうるために形状やトリガーの電源、トリガー電極の配置などの最適化を求めるために多くの時間を要した。Fig. 4に高速微粒子流を撮影したものを示す。また、微粒子流検出センサーを用いた微粒子流の到達時間と距離の関係をFig. 5に示す。距離に比例していないのは、微粒子流の流れが空気の抵抗で減速していることを示している。

3.2 プラズマチャンネルの生成

高速微粒子流にレーザーを照射することにより、プラズマチャンネルを生成する実験を行った。実験に使用した黒色火薬の量は0.1 gと0.2 gである。レーザーは微粒子噴射装置のノズル先端に集光し、高速微粒子流がノズル先端より50 cmの位置を通過するのをセンサーで検知しトリガをかけた。このプラズマチャンネルをビデオカメラ(60

Fig. 4 Time exposure photograph of an artificial aerosol flow.

Fig. 5 Arrival time of the artificial aerosol flow with the distance.

fps)で撮影した。また、自然のダスト微粒子のみで生成したプラズマチャンネルの撮影も行い、高速微粒子流を利用して生成したプラズマチャンネルとの比較を行った。Fig. 6に撮影したプラズマチャンネルを示す。この写真は、両端の間隔が約1 m、レーザー光は、写真右側から照射され、焦点距離4 mで写真の左端に焦点を結ぶ。

Fig. 6(a)は、高速微粒子流がない状態でのレーザーによるプラズマ生成である。レーザーの焦点付近で点状に明るくなっているが、自然にあるダスト(エアロゾル)のところで不連続にプラズマが生成されている。Fig. 6(b)は、高速微粒子流を発射してレーザーでプラズマを生成した場合で、レーザーの光軸にそってプラズマが連続的に生成されていることが分かる。

3.3 放電の励起効果

高速微粒子流を利用して生成したプラズマチャンネルによる放電の励起効果の有効性を調べた。電極板間隔20 cm、印加電圧は50 kVで実験を行った。高速微粒子流は黒色火薬0.1 gを使用して生成した。レーザーのエネルギーと

Fig. 6 Plasma channel produced by the laser (laser energy/shot = 18 J). (a) without the artificial aerosol flow and (b) with the artificial aerosol flow (gun powder: 0.1 g).

トリガのタイミングを変えて行き、それぞれの条件でプラズマチャンネルが放電を励起できるかどうかを調べた。レーザーのトリガのタイミングはノズル先端に設置した高速微粒子流通過センサの反応時から任意の遅延時間を設定することにより変化させた。放電の有無の確認はビデオカメラによる撮影と、電極板間の電圧の計測により行った。

実験結果を Fig. 7に示す。横軸にレーザーのエネルギー、縦軸にレーザーのトリガー・タイミングで高速微粒子流のノズル先端通過時からの遅延時間をとっている。自然に存在しているダスト微粒子だけを利用した場合を遅延時間 0 sとした。プラズマチャンネルが放電を励起した場合を○印、励起しなかった場合には×印で表している。また、コンデンサにためた電荷が完全に放電しきらずに、一部だけ放電するという現象が見られたので2 kV以上放電した事象については△印で表した。このグラフから分かるように高速微粒子流を使わない場合(Delay time = 0), 30 J以上でないと放電しない。高速微粒子流を用いると、とくに遅延時間2~3 msにおいて完全な放電が20 Jくらいまで励起されており、また部分的な放電は、もっとずっと低いエネルギーでも励起されている。このことから、レーザーのみの場合と比べ、高速微粒子流を用いると、安定して放電を励起することができるだけでなく、より低い電圧でも放電を励起できるということが確認できた。

4. 検 討

自然に存在しているダスト微粒子だけを利用した場合、十分放電を励起できると思われる条件下でも放電の励起に失敗することが多い。これはダスト微粒子の分布が安定しておらず、プラズマチャンネルが途中で大きくとぎれるなどしたためであると考えられる。それに対して高速微粒子流を利用した場合は、常に安定した量の微粒子を供給することができるので、安定して放電を励起することができた。また、高速微粒子流を利用することにより、より低い電圧で放電を励起することも確認できた。これはFig. 6に示したように自然に存在しているダスト微粒子だけを利用した場合と比較して、プラズマ間

Fig. 7 Effect of the artificial aerosol to the discharge by the laser. The delay time 0 means without any artificial aerosol. Here, [○] shows that a clear discharge (complete discharge of the capacitor) is excited, [△] a partial discharge and [×] no discharge is excited.

隔の短いプラズマチャンネルを作ることができたためであると考えられる。プラズマ間隔が短い方が放電を励起する効果は高くなる³⁾。

なお、この実験では高速微粒子流を利用した場合でも遅延時間5 ms以上ではほとんど放電を励起することができなかった。これには次のような理由が考えられる。今回の実験ではレーザーは高速微粒子流の先端より入射させた。このためプラズマチャンネルは高速微粒子流の先端より生成されてゆく。レーザー照射のトリガタイミングを遅らせた場合、高速微粒子流はその時間分先に進んでいるのでプラズマチャンネルのできる位置も変わってくる。このため、遅延時間が長い場合は高速微粒子流の先端が電極板間の領域を通り抜け、電極板間でプラズマチャンネルがあまりできなくなってしまうのである。

5. まとめ

今回の実験では人工的に生成した高速微粒子流を利用することにより、安定して放電を励起することのできるプラズマチャンネルを作ることができることを示し、この方式のレーザー誘雷における放電励起に対する有効性

を実証した。またこのプラズマチャンネルは自然に存在しているダスト微粒子だけを利用した場合のプラズマチャンネルと比較して、より低い電圧で放電を励起することができることも明らかにした。これらの結果より強電離方式のレーザー誘雷に高速微粒子流を利用することは非常に有効であるといえる。今後、さらにどのようにレーザーと高速微粒子流を組み合わせるのが有効なのかを火薬の質・量や噴射ノズルの形状、レーザーのタイミングや光学系の設定等の観点から検討を行い、この方法による長距離放電実験での検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 山中 龍彦：レーザー研究 **5** (1996) 533.
- 2) 山中 龍彦，内田 成明：原子力と先端技術 [III] ((社)日本原子力産業会議 日本原子力システム研究懇話会，1996) p. 73.
- 3) 島田 義則，内田 成明，安田 裕彦，本越 伸二，山中 千代衛，王道 洪，綿田 恭之，河崎 善一郎，山中 龍彦，石窪 雄二，足立 幹雄：レーザー研究 **5** (1996) 572.
- 4) 安田 裕彦，内田 成明，島田 義則，本越 伸二，椿本 孝治，山中 千代衛，藤田 尚徳，井澤 靖和，山中 龍彦，河崎 善一郎，石窪 雄二，足立 幹雄：レーザー研究 **5** (1996) 582.
- 5) 吉田 忠雄，田村 昌光：エネルギー物質の科学 (朝倉書店，1996) p. 124.