レーザー解説

レーザー誘雷

藤原 関夫*・井澤 靖和*・河崎 善一郎**
松浦 虔士**・山中 千代衛***

(1991年6月19日 受理)

Laser Triggered Lightning

Etsuo FUJIWARA*, Yasukazu IZAWA*, Zen-ichiro KAWASAKI**,
Kenji MATSURA** and Chiyoe YAMANAKA***

(Received June 19, 1991)

Electrical discharge guided by a 100J/2GW pulse CO₂ laser is reviewed. A long air breakdown plasma channel is produced by using a Multi-Active CHannel (MACH) focusing mirror which has two focal lengths. The plasma channel has been used to guide electrical discharge over a distance of 6m in laboratory air at an applied potential of -1.2MV. A successive plasma channel produced by the laser is more effective for discharge guiding than the chains of break plasma beads. A stepped leader was observed with a streak camera for laser guided discharge. The mean propagation velocity of the stepped leader was 10^5 - 10^6 m/s.

Key Words: Laser, Lightning, Plasma, Discharge, Trigger.

1. はじめに

まばゆいばかりの稲妻と強烈な衝撃音を伴う雷は人々に恐れを抱かせるとともに興味をかき立ててやまない。他方、停電事故の約2/3は落雷によるものであり、何とかならないかという電力会社の担当者の声もある切実な問題である。雷研究とさらに一歩進めた誘雷はロマンと実益を合わせ持ったテーマであるといえる。誘雷のためにいろいろな方式が考案された。後述

のワイヤ付ロケット法、レーザー法の他にもフランクリンで有名な金属ワイヤで引っ張られた風や飛行船型バルーン法、あるいは荷電粒子ビームやマイクロ波、変わったところでは水鉄砲¹⁾というのもある。風や水鉄砲は風に流され易い欠点があるとされており、現在までにワイヤ付ロケット法だけが誘雷に成功している。

大出力のレーザー光を集光すると、気体中に絶縁破壊プラズマを生成することができる。このレーザー生成プラズマを避雷針として利用

*大阪大学レーザー核融合研究センター(〒565 吹田市山田丘2-6)

**大阪大学工学部電気工学科(〒565 吹田市山田丘2-6)

***財団法人レーザー技術総合研究所(〒550 大阪市西区靱本町1丁目8-4)

*ILE Osaka University (2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

**Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University (Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

***Institute for Laser Technology (1-8-4 Utsubo Honmachi, Nishiku, Osaka 550)

し、そのプラズマに沿って雷放電を誘導することが1970年代に提案された²⁾。その後、1979年に米国New Mexicoにおいてレーザ誘雷の実験が行われた³⁾。しかしこのときは500m上空で数mのプラズマ発生には成功したものの実現には至らなかった。他方、1965年から始まったワイヤ付ロケット誘雷によって数多くの成功が報告された。ロケット法はボビンに巻かれた直径0.2mm程度のスチールワイヤをプラスチック製の小型ロケットに結び付けて上空に発射する方式である。スチールワイヤは主放電(帰還雷撃)の前のリーダの進展過程ですでにプラズマ化し、落雷はこのようなプラズマに沿って起こる。ロケット誘雷はフランスのグループによって200回近い成功を収め、わが国でも昭和52年からスタートして100回以上の誘雷に成功し、多くの輝かしい成果を収めている⁴⁾。しかしロケット誘雷ではロケットを使用すること、金属ワイヤを打ち上げることに伴う多くの制約があることも事実である。レーザ誘雷ではスチールワイヤに代わってレーザで大気中にプラズマ誘導路を形成する方式である。ロケット誘雷ではその高度が100m程度あれば誘雷が可能であることを示しており⁴⁾、ロケット法と同程度の長さのプラズマチャンネルを作る必要があると考えられている。ロケット誘雷と比較するとレーザ誘雷の利点として、時間応答性が良いために雷放電に対応しやすく、また繰り返し動作にも向いているために実用化により適している点が上げられる。レーザ技術の進歩に伴って、誘雷をターゲットにした放電誘導実験も行われるようになってきた⁵⁻¹²⁾。このようなレーザ誘雷研究は、停電の少ない高品質な電力供給を目指す日本が最も熱心であり、電力中央研究所、慶応大学、名古屋大学、京都大学、(財)レーザ技術総合研究所と大阪大学のグループ、九州大学で活発な研究が進められている。また国外では上昇中のロケットへの落雷経験のあるフロリダのNASAが雷予知を含めて熱心である。

レーザ誘雷の実現のためには、(1)レーザによる長尺プラズマチャンネルの発生技術、(2)

得られたレーザプラズマへの放電誘導特性、および(3)レーザの大気中での吸収・散乱特性の把握が重要である。さらにレーザの照射タイミングを決める落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誘雷が実現可能になろう。レーザ誘雷研究は端緒にすぎたばかりであり、ここではレーザによる長尺プラズマチャンネルの発生を中心に述べる。

2. レーザの選択

どのような波長のレーザが誘雷に適しているのだろうか？その前にレーザ誘雷には2種類の方法が考案されている。一方は高強度パルスレーザを大気中で集光することによって気中絶縁破壊によるプラズマを発生させ、得ら

Fig.1 Breakdown threshold intensity versus wavelength of input laser at four selected pressures¹³⁾.

Fig.2 Schematic diagram of the experimental facility. A CO₂ laser of 100J/2GW produces plasma channels between two electrodes.

れたプラズマに沿って放電を誘導するプラズマチャンネル方式である。他方は高エネルギーレーザーを集光せずにそのまま大気中に照射し、そのエネルギーによって大気を加熱・高温化する方法である。高温度となった空気は膨張し、その中心は密度の低い放電路になりやすい領域を形成する。希薄化チャンネル方式と呼ばれるが、プラズマチャンネル法よりも高出力レーザーが必要であり、大気中での基礎実験例がほとんどないのが現状である。

プラズマチャンネル法に限ると、レーザーの選択は、どのような波長のレーザーがプラズマを作り易いかに言い換えることができる。Fig.1はプラズマ発生に必要なレーザー強度の波長依存性を示している¹³⁾。波長1 μm 付近が最も臨界レーザー強度が高い、すなわち最もプラズマをつくり難い波長であるといえる。それよりも長波長側では高周波放電過程あるいは逆制動輻射過程による電子加速によって臨界レーザー強度が下がってくる。他方、短波長側では多光子吸収電離過程によって短波長レーザーほど臨界レーザー強度が下がってくる。レーザーの選択は、両極端の波長、すなわち遠赤外線レーザーあるいは紫外線レーザーの中で高出力レーザーを捜すことから始まる。これまでのところ最も高出力が得られているレーザーは、遠赤外

ではCO₂レーザー(波長10.6 μm)であり、紫外ではエキシマレーザーである。放電誘導研究の初期にはガラスレーザー(波長1.06 μm)も使用されたが¹⁴⁾、今日ではCO₂レーザーとエキシマレーザーの両レーザーが主に使用されている。

3. 実験装置

パルス炭酸ガスレーザーと新たに開発した集光鏡を用いて、レーザーによる長尺プラズマチャンネルの生成と長ギャップ放電誘導の実験を行なった。実験の配置をFig.2に示す。電極には電圧印可側と接地側の両方に先端を半球にした直径3 cmの棒電極を使用している。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上部棒電極間にプラズマチャンネルを発生させている。放電用の高電圧電源にはインパルス高電圧発生装置(IG)を用いており、出力電圧は1.2MV、電圧の立ち上がり時間(10%–90%)は2 μs 、波尾は55 μs である。実験では、誘導用接地電極をかすめる様にしてレーザーを照射した。

3.1 レーザー装置

レーザーには電子ビーム制御のパルス炭酸ガスレーザー(波長10.6 μm)を用いた。レーザー

Fig.3 Pulse shape of a 100J CO₂ laser. The cavity is a positive branch unstable resonator.

ビームの直径は10cmで励起長は1mである。レーザーの集光強度を高くする必要から、レーザービームの発散角の低減は特に重要であり、そのために共振器には正ブランチの不安定共振器を採用した。レーザー出力は100Jである。フォトドラッグ検出器によってレーザー光のパルス波形を測定した結果をFig.3に示す。半値幅40nsecの最初の鋭いピークとその約200nsec後に2度目の低いピークがあり弱い発振のテールが続いている。レーザーのピークパワーは2GWであった。

3.2 集光光学系

従来は球面の凹面反射鏡あるいは凸レンズが用いられており、長いプラズマチャンネルを発生するためには、 f/D の大きい(f :凹面鏡の焦点距離、 D :レーザービームの直径)凹面鏡をもちいて集光部分の長さを長くしていた。しかしその結果として以下のような問題が生じていた。

(イ) 集光部分の直径が大きくなり、集光強度が上がらないためにプラズマチャンネルの発生が困難になる。

(ロ) つながったプラズマチャンネルではなく、ビーズ状の途切れたプラズマになりやすい。このような途切れたプラズマは放電誘導にはあまり適さない。

Fig.4 Multi Active CHannel (MACH) focusing mirror.

(ハ) 大気中に生成したプラズマはCO₂レーザーを吸収してしまい、レーザーはプラズマを透過できない。そのために球面鏡では焦点位置以遠に長いプラズマを作ることが困難である。

このような問題に対して、一枚の鏡の中に複数の焦点を持つ多焦点 MACH (Multi-Active CHannel) 集光鏡を新たに考案し実験に導入した(Fig.4)。MACH鏡では、中央部で反射したレーザー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は遠方に集光するように設計している。その結果として、レーザーは前方で発生したプラズマ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できる。また凹面鏡のように、集光部分の一点に必要な以上のエネルギーの集中が起こるのではなく、MACH鏡では集光エネルギーの分散を図ることができるために少ないレーザーエネルギーで長いプラズマを作ることができる。

実験では2種類の集光鏡を準備した。一方はMACH鏡であり、焦点距離10mと8mの凹面鏡を組み合わせた2焦点を持たせている。各焦点への集光エネルギーは鏡の面積比から1:1とした。他方の鏡は、比較のために焦点距離10mの通常の凹面鏡(以後R20鏡という)を準備した。

4. レーザーによるプラズマの発生

プラズマチャンネルの測定はスチールカメラによる写真撮影によって求めた。レーザーの出力は本実験を通して100J一定の条件で実施し

Fig.5 Time integrated photographs of laser plasmas produced by an outside mirror (a), an inside mirror (b), and two mirrors (c) of a MACH focusing mirror.

た。集光鏡にはMACH鏡を使用している。Fig.5(a)はMACH鏡の内円部のミラーを覆って外周部のミラーだけでプラズマを生成した写真を、(b)は内円部のミラーだけでプラズマを生成した写真を、(c)は覆いを取り省いて2焦点で集光した写真を示す。(a)と(b)を足し合わせた結果が(c)であることを示しており、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る。このことはスケーリング則を立てる上で非常に都合がよい。写真観測による連続的なプラズマチャンネルの長さは、凹面鏡では約3m強、MACH鏡では約5mであった。またレー

Fig.6 Streak camera images of a laser produced plasma. (a) The MACH mirror (focal lengths of 10m and 8m), (b) A mirror with a 10m focal length.

ザーの集光点以遠では、プラズマによってレーザーが吸収されてしまうために長いプラズマチャンネルは生成されず、約0.5m程度の弱い連続的なプラズマが観測されている。焦点の後方2mの位置に直径10cmのエネルギーメータを置き、レーザーの透過エネルギーからプラズマによる吸収率を求めた。吸収率はR20鏡での84%に対して、MACH鏡では76%と若干少ない値は示すものの、3/4以上のエネルギーが吸収されていることから実用上の問題はないと思われる。MACH鏡では集光エネルギーの分散を図っており、その結果単焦点鏡に見られる集光点付近の密度の高いプラズマによるレーザー光の強い吸収が少ないために透過光が若干多いと考えられる。

可視のストリークカメラを用いてレーザープラズマの発光からプラズマが成長する過程を調べた。MACH鏡とR20鏡について測定した結果をFig.6に示す。図では高電圧電極の位置を0m

にしている。 $R\ 20$ 鏡を用いた場合には、エネルギー密度の高い鏡の焦点の位置から絶縁破壊が始まって集光鏡側(図では下方向)へ順次プラズマが形成されていく。他方、MACH鏡の場合は、光が先に到達する内円部の焦点位置(2.5m位置)から両方向にプラズマ領域が進行しており、外周部の焦点(0.5m位置)すぎまで発光が見られる。ストリーク写真から得られたプラズマの成長速度は光速の $1/3 \sim 1/4$ と速い。また最初の強い発光の後240nsecで再び発光が強くなり、以後600nsecの間緩慢な増大が続き、その後また減衰していく。これはレーザーのパルス波形に対応しており、高強度のレーザーパルスに続く弱いテール部分のレーザー光もプラズマの加熱には有効なことがわかる。

他方、新しい試みとしてこれまで述べてきたような高強度レーザーを使用するかわりに、少ないレーザーのエネルギーでプラズマを発生する実験も行われている。TEA炭酸ガスレーザーとXeClエキシマレーザー(波長 $0.308\ \mu\text{m}$)を重畳した基礎実験では、まずエキシマレーザーで予備電離プラズマを大気中に生成し、続いて炭酸ガスレーザーを照射して予備電離プラズマを加熱し、高密度プラズマを発生することに成功している⁹⁾。この場合にはレーザーのピーク強度を少なくできる特徴がある。

5. 放電誘導

上記の出力100J CO_2 レーザーを使用し、IGからの出力電圧は -1.2MV 印加の条件で測定した。この電圧での50%の確率でフラッシュオーバーが起こる電極間距離は $1.6\text{m} \sim 1.7\text{m}$ の間であった。遅延時間は、最も放電誘導が起こり易いレーザー照射から $100\ \mu\text{s}$ の後に電圧を印加するようにした。 $R\ 20$ 鏡で集光した場合には、放電誘導が可能な長さは4mまでであった。それに対してMACH鏡では同等のレーザー出力で6mまでの放電誘導が可能であった。これまでの報告が $2 \sim 3\text{m}$ ^{6,12,15)}に留まっていたことから、放電誘導長の大幅な更新が達成されたといえる。MACH鏡を用いた場合の時間積分写真の

Fig.7 Time integrated photographs of laser guided arc. The electrode separation is 6m.

一例をFig.7に示す。レーザープラズマによってガイドされている部分は揺らぎのない一直線に放電する特徴があるのに対して、十分にガイドされていない誘導用接地電極付近約1mの領域では、放電路のゆらぎあるいは光軸からのずれが観測された。ガイドされていない領域では、レーザープラズマはおよそ10cm間隔以上のビーズ状の離散的な分布を示しており、このような離散的なプラズマ形状は放電誘導の効果があまりないことがわかる。従って、途切れのない連続したプラズマチャンネルを作ることが重要であると言える。

ところでレーザー生成プラズマが導電性を持つと言っても金属線のような訳にはいかないと考えてよいであろう。弱電離プラズマ中をリーダが成長するためには、電界強度はいかほど必要であろうか？そのための予備実験として誘導距離と放電誘導に必要な電圧の関係を調べた。レーザー光路は上部電極と誘導用接地電極両方の先端をかすめるように調整した。IGの出力電圧波高値を100kV間隔で変え、放電が誘導された最低の電圧をFig.8に示す。この図より、誘導距離5.5mと6.0m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。他方、5.5m以下では通常の気中放電と

Fig.8 Breakdown threshold voltages versus electrode separation for guided arcs. The focusing point of MACH mirror is under a high voltage electrode. The delay time is $100\mu\text{s}$.

Fig.9 Streak camera images of arc discharges at an applied voltage of -1.2MV ; (a) A laser guided arc. The electrode distance is 4.88m ; (b) An unguided arc. The electrode distance is 1.6m .

異なって、放電に必要な電圧が電極間距離によらず一定であった。棒電極ではその先端で強い

不均一電界を生じており、その影響と思われるが明かではない。均一電界中での測定が必要である。

さて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？ストリークカメラによって、主放電に到る前のリーダが進展する過程を観測した。典型的な 5m の放電誘導過程のストリーク像を Fig.9 に示す。比較のために 1.6m の通常の気中放電のストリーク像も示す。

レーザー誘導の場合は、レーザー照射から $100\mu\text{s}$ の遅延時間をおいたので、レーザー光による光学的絶縁破壊の発光はすでに終了して写っていない。レーザー誘導ではリーダが高電圧を印可した電極(負電圧)からステップ状の強い発光を伴って進展しており、通常のギャップ放電におけるなだらかな両電極からの連続した進展とは明かに異なっている。ステップリーダの進展速度は、ステップ状の強い発光の先端を結んだ平均速度で与えると $10^5\text{--}10^6\text{m/s}$ であった。このようなステップリーダは自然雷で観測されている特異な現象であり、その原因は必ずしも明かではない。大気中の短ギャップ放電ではこのような現象が現れていないことから、長ギャップ放電あるいはレーザー誘導放電特有の現象と思われる、この分野の解明にも寄与するものと思われる。

遅延時間

レーザープラズマの寿命はどの程度であろうか？このことは複数のレーザーあるいは高繰り返しのレーザーを使って一本の誘導路を形成するときに重要である。実験では、レーザー照射から $1\mu\text{s}\sim 1\text{ms}$ の後に電圧を印加して放電誘導の有無を調べた。上部電極と誘導用接地電極との間隔は、連続したプラズマチャンネルの長さに匹敵する 5m に選んでいる。各遅延時間で 5 回測定し、遅延時間に対する放電誘導確率を求めた結果を Fig.10 に示す。測定結果からは、遅延時間 $200\mu\text{s}$ 以降では誘導効果が弱くなり 1ms では誘導できないことを示しており、このあたりが誘導可能な時間限界といえる。また山

Fig.10 Breakdown probability of laser guided arc versus the delay time between the laser and impulse voltage.

部等は最大2.5kHzの高繰り返しXeClエキシマレーザーを用いて、繰り返し周波数とレーザートリガーによる放電確率の測定をおこなった¹⁶⁾。2kHz以上の繰り返しでトリガー確率が高くなることを示しており、プラズマの寿命に関してほぼ同様の結果を得ている。またFig.10での絶縁破壊時間は、立上り2 μ sのIGからの出力電圧が80%に達した時間から放電開始までの時間として定義している。

他方、遅延時間が短い4 μ s以下でも放電誘導確率の減少が見られた。一見奇妙であるが、これは連続的に見えるプラズマチャンネルにおいても、拡大写真を取ると微少なプラズマの密な集合体で構成されており、それぞれのプラズマが拡散して連続してつながるまでの時間が関係していると考えられる。微小プラズマは大気中のほこりなどの吸収体がレーザーで加熱されプラズマ化したものと思われる。測定結果からは放電誘導に最も適した遅延時間は10 μ s~100 μ sであった。

ところでどのような荷電粒子が放電誘導に寄与しているのでしょうか。知られている反応定数¹⁷⁾を用いてシミュレーションしたところ、レーザーで生成された電子の寿命はずいぶん短く、100ns以下の寿命でほとんどプラスイオンと再結合してしまう。しかし再結合しなかった

残りの電子は酸素に電子付着して酸素イオンとして残る。

この酸素イオンの寿命はmsオーダーと長く、これが放電誘導の源と考えられている。電界あるいは光によって酸素イオンから電子が容易に飛び出し、それを種として電子なだれが進行する。

6. 雷予知

雷放電に伴って広い帯域にわたって電磁波が放射される。1Hz~1MHz程度までの広帯域で帰還雷撃に伴う電磁波を受信し、その放射源の位置測定をおこなう二つのシステムが実用化されている。一方は直交ループアンテナで磁界信号を受信し、多点で方位測定を同時に行って位置標定をするものでLLP (Lightning Location and Protection)システムと呼ばれている¹⁸⁻²⁰⁾。他方は4点以上で電磁波の到着時間差を測定して位置標定を行うものでLPATS (Lightning Positioning and Tracking System)システムと呼ばれている²¹⁾。これらのシステムはすでに全国に設置されており、落雷地点やその極性などを知ることができる。

しかしレーザー誘雷では、さらに高い精度でリアルタイムの雷雲位置標定システムが必要であろう。フランスで開発されたVHF帯あるいはUHF帯での干渉法によるリアルタイム電磁波到来方位測定システムSAFIR (Système d'Alerte Foudre par Interferometric Radio électrique)は高い空間、時間分解能を持つとされており²²⁾、日本でも研究が進められている。また二重偏波レーダによる雷雲内の観測も始まっている²³⁾。レーザー誘雷には地上への落雷以前の雲内放電やリーダ進展のキャッチが重要であろう。

7. 将来への展望

レーザー誘雷の研究はスタートしたばかりで

Fig.11 Schematic diagram of future laser tiggering lightning.

ある。その実現のためには、レーザーによる100m級の長プラズマチャンネルの発生、得られたレーザープラズマへの放電誘導、およびプラズマ発生部までのレーザーの大気中での透過特性の把握、さらに雷予知も含めて幾つものハードルが待ち受けている。MACH鏡は長プラズマチャンネル発生への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最重要課題である。幸いなことに大阪大学レーザー研で、レーザー核融合研究のために出力10kJの炭酸ガスレーザー(烈光Ⅷ号)がすでに開発され、稼働しているのは心強いからである。レーザー誘雷には烈光Ⅷ号よりも少ないレーザー出力で可能と思われるからである。今後の着実な進展が望める分野であると言える。

将来のレーザー誘雷のイメージをFig.11に示す。空から降りて来るリーダをレーザーで迎え撃つ図ではあるが、実際にはレーザープラズマの先端から逆にリーダが雷雲に向かって伸びていくケースが多いと思われる。その場合にはレーザーの照射タイミングが μs を競うことはないであろう。またMACH鏡の段数は数10段にも及ぶため、連続的な曲面を持った鏡になるであろう。光軸上の集光強度が一定になるような鏡の曲面は次式で与えられる。レーザーは平行ビームで、鏡に対して垂直に入射すると仮定している。

$$Y(r) = 1/(2a) * (\ln(r^2 + h/g) - \ln(r_1^2 + h/g))$$

$$g = (b-a)/(r_2^2 - r_1^2)$$

$$h = (ar_2^2 - br_1^2)/(r_2^2 - r_1^2)$$

ここで $Y(r)$ は光軸からの距離 r で与えられる鏡の反射曲面の座標、 r_1 および r_2 はそれぞれ反射鏡の内径と外径、 a 、 b はそれぞれ鏡の r_1 、 r_2 位置での反射光の焦点位置を与えている($b > a$)。このミラーは中心に穴が開いており、形状は例えば朝顔の花のような外側に開いた曲面を持つ。

謝辞

本研究に当たっては、大阪大学レーザー核融合研究センターにおいてレーザー核融合実験に使用されていた烈光Ⅱ号炭酸ガスレーザーを使用した。中井所長の厚意に感謝いたします。また本研究は関西電力(株)によってサポートされたものであり、関電総合技術研究所の永井敏雄、園井康夫両研究員には多くのアドバイスを戴き深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 秋山秀典, 前田定男, 高木浩一: 「水誘雷の検討」電気学会高电压研究会, HV-91-10 (1991) 87.
- 2) L. M. Ball: Appl. Opt., 13 (1974) 2292.
- 3) 新藤, 鈴木: 「レーザーによる気体の絶縁破壊と誘導」電力中央研究所報告No.182010 (1982).
- 4) 堀井憲爾: 電気学会誌, 110巻1号 (1990) 21.
- 5) 内山, 広橋, 宮田, 坂井: レーザー研究, 16巻5号 (1988) 267.
- 6) 新藤, 鈴木, 相原, 三木: 電気学会放電高电压合同研究会, ED-90-166 (1990) 37.
- 7) 広橋, 栄, 坂井, 内山: 電気学会放電研究会, No.123 (1989) 45.
- 8) 首藤, 西村, 藤原, 河崎, 井澤, 松浦, 園井, 永井, 山中: 電気学会光・量子デバイス研究会, OQD-91-7 (1991).
- 9) 久保, 竹谷, 神野, 森岡, 板谷, 園井, 永井: 電気学会高电压研究会, HV-91-2 (1991) 9.
- 10) 鈴木, 中村, 山部, 堀井: 電気学会高电压研究会, HV-91-3 (1991) 19.
- 11) 本田, 江藤, 村岡, 宅間, 吉岡, 片平, 池上,

- 赤碕：電気学会高電圧研究会, HV-91-5 (1991) 39.
- 12) 広橋, 栄, 坂井, 内山：電気学会放電研究会「レーザー誘雷」No.123 (1989) 45.
- 13) H. T. Buscher et al.: Phys. Rev. Lett., 15 (1965) 847.
- 14) D. W. Koopman et al.: J. Appl. Phys., 42 (1971) 1883.
- 15) J. R. Greig, D. W. Koopman, R. F. Fernsler, R. E. Pechacek, I. M. vitkovitsky, A. W. Ali: Phys. Rev. Lett., 41 (1978) 174.
- 16) 中村, 鈴木, 安田, 山部, 堀井, 後藤, 佐藤, 高木：電気学会高電圧研究会, HV-91-4 (1991) 29.
- 17) D. W. Koopman, K. A. Saum: J. Appl. phys., 44 (1973) 5328.
- 18) 北條他：電気学会論文 B108 (1988) 165.
- 19) R. E. Orville, et al.: Geophys. Res. Lett. 15 (1988) 129.
- 20) J. Hojo, et al.: J. Geophys. Res. 94 (1989) 13207.
- 21) M. J. G. Janssen: Proc. 1989 Int. Conf. on Lightning and Static Electricity, Bath, 12A (1989) 2.
- 22) P. Richard, et al.: Proc. 8th Int. Conf. Atmos. Electricity, Uppsala (1988) 687.
- 23) S. Fukao, Y. Maekawa, Y. Sonoi, F. Yoshino: Geophysical Research Letters, 18 (1991) 179.