紫外レーザーを用いたレーザー誘雷 — エキシマレーザーの放電誘導特性 —

三木 恵*・和田 淳*・新藤 孝敏*

(1996年3月21日 受理)

Artificial Triggered Lightning Using Ultraviolet Lasers — Guiding of the Electrical Discharges by an Excimer Laser —

Megumu MIKI*, Atsushi WADA* and Takatoshi SHINDO*

(Received March 21, 1996)

Guiding and triggering of the electrical discharges in 1m air gaps by excimer lasers (KrF ($\lambda=248\text{nm}$), ArF ($\lambda=193\text{nm}$)) have been performed. A laser pulse (KrF: 750mJ, ArF: 550mJ) produced a plasma channel over a distance of more than 0.5m by focused with a lens. Characteristics of guided discharges along the plasma channel were investigated in detail. From these results, it is found that an excimer laser pulse can guide the positive discharges and propagate in the plasma channel produced by itself without loss. However the excimer lasers have little ability to trigger the discharges. Further the guiding ability is not maintained for a long time compared with that of infrared lasers. On the basis of these experimental results, we discussed the basic concept of the laser triggered lightning with an excimer laser.

Key Words: Excimer laser, Laser-produced plasma, Laser-guided discharge, Lightning

1. はじめに

近年、日本を中心としてレーザー誘雷の研究が活発に進められている。特に誘雷の基礎研究として高電圧発生装置を用いた放電誘導実験が多くの研究機関にて実施されている。

レーザーは電離チャネル(プラズマ)を生成する

ことによってはじめて放電を誘導することができる。このようなプラズマ生成のためには、レーザーのピークパワーが一定のしきい値より高い必要がある。プラズマ生成のピークパワーのしきい値はレーザーの波長により変化し、赤外領域および紫外領域が低い¹⁾。よって、これらの波長領域のレーザーがプラズマ生成には適してい

* (財) 電力中央研究所 雷放電グループ (〒201 狛江市岩戸北2-11-1)

* Lightning discharge group, Central Research Institute of Electric Power Industry (11-1 Iwadokita 2-Chome, Komae, Tokyo 201)

ると言える。さらにプラズマの大きさや電子温度等のパラメータはパルスエネルギーに依存している。放電を誘導するためには長い距離にわたってプラズマを生成する必要があるため、パルスエネルギーは大きい方がよい。一般にCO₂レーザーのような赤外レーザーは、プラズマ生成のピークパワーのしきい値が低く、また比較的容易にパルスエネルギーを上げられることから、放電誘導実験には多く用いられている。そのため、赤外レーザーでは既に数m以上の長ギャップにおける放電誘導の実験が内外ともに多く報告されており、そのメカニズムも解明されつつある²⁻⁶⁾。

一方、紫外レーザーでは、数10cm程度のギャップでさえ大気中における放電誘導実験の報告は極めて少ない⁷⁻⁹⁾。これは紫外レーザーでは赤外レーザーのように容易にパルスエネルギーを上げられないので、長い距離にわたってプラズマチャンネルを気中に生成するのがこれまで困難だったためと考えられる。しかし、紫外レーザーはプラズマに吸収、散乱されにくいいため、長いプラズマチャンネルを生成するのには適している。紫外レーザーによる長距離プラズマチャンネルの応用例としては加速器中の電子ビームの伝搬経路の制御(ガイド)がある¹⁰⁾。この応用では、既に90m以上の距離にわたるプラズマの生成と電子ビームのガイドが報告されている¹¹⁾。その他、電子ビームの制御の研究においてはギャップ長0.6mの低気圧放電管内の放電をレーザービームに沿って発生させ、スパークオーバー電圧を最大30%まで低下させたことが報告されている¹²⁾。またレーザートリガギャップの実験においても紫外レーザーは赤外レーザーと比べてはるかに少ないエネルギーで放電を誘発出来るという結果が報告されている¹³⁾。これらの実験結果から紫外レーザーには放電路を制御する能力(放電ガイド効果)やスパークオーバー電圧を低下させる能力(放電トリガ効果)があることが期待できる。以上より長距離にわたり放電を誘導する必要がある。レーザー誘雷には紫外レーザーが有利であると考えられる。

著者らは比較的パルスエネルギーが大きく、ビーム拡がり角の小さいエキシマレーザーを用い

て、長尺プラズマチャンネルを生成した。なお、出来るだけ長い距離に亘る効率的なプラズマチャンネルの生成のため、実験では長焦点の石英レンズを用いてレーザーパルスを弱収束させ、光学的絶縁破壊を伴わないプラズマチャンネルを生成した。さらに、インパルス電圧発生装置により生成した気中放電の誘導を試みた。その結果、最大1mのギャップにて放電誘導に成功した。また、このような紫外レーザーにより誘導された放電の測定を詳細に行い、その結果を基に紫外レーザーによる誘雷システムについての検討を行った。

2. 実験装置

Fig. 1に実験系の概要を示す。使用したレーザーはエキシマレーザー(Lambda Physik社製, LPX150)であり、設定の変更によりArFレーザー(波長=193nm:パルスエネルギー=550mJ)とKrFレーザー(波長=248nm:パルスエネルギー=750mJ)の発振が可能である。ビーム発散角はいずれも0.2mrad以下である。レーザーは石英レンズによりギャップ中に集光され、プラズマを生成する(Fig. 2)。プラズマは青く発光するチャンネルであり、基本的には光学的絶縁破壊を伴っていない。一部小さな白色光が見えるが、これは空気中の塵のため生成された光学的絶縁破壊を伴ったプラズマである。高圧電極にはインパルス電圧発生器により雷インパルス電圧($1 \times 40\mu\text{s}$)を印加した。使用したインパルス電圧発生器は最大印加電圧が1MV、最大蓄積エネルギーが5kJである。インパルス電圧の印加とレーザー照射のタイミングは任意に設定可能であり、本論文ではこのレーザー照射と電圧印加の時間間隔を遅れ時間と呼ぶことにする。ここで、遅れ時間が正とは、レーザー照射が電圧印加より早い場合

Fig. 1 Experimental setup.

Fig. 2 Plasma channel produced by a KrF laser pulse (wavelength=248nm, pulse energy=750mJ).

Fig. 3 Electrical discharge guided by a plasma channel for positive polarity (gap length = 0.33m).

であり、遅れ時間が負とはレーザー照射が電圧印加より遅れる場合を示す。ここでFig. 3にレーザーにより誘導された放電の代表的な例を示す。この時のギャップ長は水平方向(x)に32.5cm, 垂直方向(y)に10cmであり、レーザーは焦点距離1m (@ $\lambda=546.1\text{nm}$)のレンズにより集光している。また、遅れ時間は $3.5\mu\text{s}$ であり、印加電圧は正極性で220kVである。放電チャネルが直線的に形成されている部分は放電がレーザー生成プラズマに誘導された部分である。この長さは放電ガイド効果の指標となるので本論文ではこの長さを放電ガイド長と呼ぶ。

3. 実験結果

3.1 遅れ時間と放電誘導効果

紫外レーザーによる放電のガイド効果について調べるため、放電ガイド長と遅れ時間の関係を調べた(Fig. 4)。ギャップの設定はFig. 3の写真と同じである。実験はKrFレーザーの正極性と負

Fig. 4 Delay time characteristics of the guide length. Guide length is the length of the discharge channel formed along the laser beam.

極性の2つの場合とArFレーザーの負極性の場合について行った。データは約35shotsのデータの平均値である。Fig. 4の結果はKrFとArFでは放電ガイド長には大きな差がないことを示している。パルスエネルギーはKrFレーザーが750mJ, ArFレーザーが550mJであるので、エネルギー差を考えればArFの方が放電誘導のエネルギー効率はよいと言える。また基本的な特性はほぼ同じであり、いずれにおいても遅れ時間が $10\mu\text{s}$ 以上になると放電誘導能力が低下している。この図は紫外レーザーにより生成されたプラズマもその放電誘導特性に極性効果があることを示しており、負極性放電が正極性放電より誘導されやすいことがわかる。この実験ではギャップを非対称にしてあるので、正極性、負極性の結果はそれぞれ正リーダ、負リーダとレーザー生成プラズマとの相互作用を示している。放電ガイド長が最も長かったのは、負極性では遅れ時間が $-1\mu\text{s}$ の時である。正極性でも遅れ時間が短い方がガイド長が長かったが、 $-1\mu\text{s}$ と $0\mu\text{s}$ では大きな差はなかった。この結果から電圧を先に印加したときの方が電圧を後から印加するより誘導効果がよいことがわかる。但し、印加電圧波形の立上り時間が $2\mu\text{s}$ なので、 $2\mu\text{s}$ 以上に負の遅れ時間が大きくなると放電ガイド長は減衰する。

紫外レーザーによるスパークオーバー電圧の低下を調べるため、Fig. 3のギャップ配置にて50%

スパークオーバ電圧の測定を行い、レーザー照射がない放電との比較を行った。測定手法は試行回数10回の補間法を用いた。負極性では遅れ時間 $-1\mu\text{s}$ の設定で最もスパークオーバ電圧が低下し、レーザーの照射がなかった場合と比べて約15%低下した。しかし、遅れ時間が $0\mu\text{s}$ 以上ではスパークオーバ電圧の低下はほとんどみられなかった。また正極性においては遅れ時間 $3.5\mu\text{s}$ のときが最も低下し、約15%の低下が見られた。しかし、遅れ時間が $10\mu\text{s}$ では既にスパークオーバ電圧の低下はなかった。この実験結果より、紫外レーザーにより生成されたプラズマチャネルは赤外レーザーにより生成されたプラズマチャネルに比べスパークオーバ電圧を低下させる能力が低いことが分かった。

3.2 放電ガイド長-ギャップ長特性

ギャップ長を変化させた場合の放電ガイド長を測定した(Fig. 5)。ギャップ長は水平方向の長さのみを変化させた。プロットは約20shotsの平均値である。遅れ時間は $-1\mu\text{s}$ に設定したが、比較のため $3.5\mu\text{s}$ 遅れについても実験を行った。印加電圧はレーザーを照射しない場合の50%スパークオーバ電圧である。ArFレーザーでは焦点距離2mのレンズを、KrFレーザーでは2.5mのレンズを使用した。ただし、ギャップ長32.5cmのときのデータは焦点距離1mのレンズによるものである。ギャップ長が長くなるにつれガイド長は0.5m程度で飽和してくる。これは放電を誘導

Fig. 5 Guide length vs gap length characteristics.

Fig. 6 Electrical discharge guided by an ArF laser pulse in a 1m air gap with negative polarity. (Delay time: $-1\mu\text{s}$)

出来るプラズマチャネルの長さよりギャップ長が長くなり、ギャップ長が増えても放電ガイド長は増加しなくなるためである。この飽和による漸近値が放電誘導可能なプラズマチャネルの全長を示していると考えられる。この特性ではKrFレーザーとArFレーザーはほぼ同じであり、最大の放電ガイド長は共に0.5m程度になると評価できる。但し、KrFレーザーは750mJ、ArFレーザーは550mJとパルスエネルギーが異なっていることを考えると、ArFレーザーの方が若干誘導の効率がよいと言える。またArFレーザーの遅れ時間が $3.5\mu\text{s}$ のデータから、ギャップが長いと時間経過に伴うプラズマの放電誘導能力の減衰が大きいことがわかる。これより、放電誘導効果を長時間にわたり持続しているプラズマは焦点付近の短い部分のみであることがわかる。Fig. 4では $10\mu\text{s}$ までガイド長が変化しない特性になっているが、これは $10\mu\text{s}$ 以上放電誘導効果を持続するプラズマの長さがギャップ長に対して長いと生じたと考えられる。

本実験における放電状況の静止写真をFig. 6に示す。これは最も長いギャップにおけるArFレーザーによる放電誘導であり、ギャップ長は水平方向に1m、垂直方向に0.1mであり、遅れ時間は $-1\mu\text{s}$ の時のものである。

4. 考 察

4.1 紫外レーザーの放電誘導特性と誘雷システム

これまでの実験結果より、紫外レーザーパルスによりプラズマチャネルを生成し、不平等電界下の気中放電を誘導することが可能であることが実証された。特に今回の実験ではギャップ長1m、放電ガイド長0.5mとこれまでの紫外レーザーによる気中放電の誘導実験では最も長い放電の誘導に成功した。この結果から、複雑な自然現象である雷も基本的には電気放電現象であるので、紫外レーザーを用いて雷放電を誘導することは原理的には可能であると言える。

紫外レーザーには赤外レーザーにはない利点がある。その一つは正極性放電の誘導が可能であるという点である(Fig. 2)。放電ガイド効果に関しては負極性と比べると効果は低下するが、赤外レーザーのように正極性リーダがプラズマにまったく沿わないということはない。また放電トリガ効果に関しては正極性の方が負極性の場合より効果が持続するという結果になっている。

紫外レーザーのもう一つの利点は放電を誘導するのに必要なエネルギーが赤外レーザーより少なくすむことである。単純に考えると放電を0.5mガイドするのに必要なKrFレーザーは750mJ、ArFレーザーでは550mJであった。ここでレーザーパルスエネルギーと放電ガイド長の関係が線形であると仮定すると放電を1mガイドするのに必要なエネルギーはKrFレーザーで1.5J、ArFレーザーで1.1Jとなる。一方、赤外レーザーでは最も効率のよい放電誘導は大阪大学が得た結果であり、100Jのパルスで8.5mを誘導している¹⁴⁾。同じように放電を1mガイドするのに必要なエネルギーを求めると約11Jとなり、約10倍の差があることになる。

紫外レーザーにもいくつかの欠点がある。まず実験3.1の結果でも明らかなように放電のスパークオーバ電圧を低下させる能力(放電トリガ効果)に乏しいことが挙げられる。この結果はレーザートリガギャップの実験から期待される結果とは異なっているが、これはレーザートリガギャップ実験は数cm以下の小ギャップでかつ平等電界下の放電を対象とするのに対して、今回の実験では長ギャップでかつ不平等電界下の放電を対象としており、その差によるものと考

えられる。放電トリガ効果の不足は誘雷を考えた場合、レーザーを用いても他の高構造物に先だって避雷塔からの上向き放電が発生しない可能性が高いことを示している。よって、紫外レーザーを用いた場合は避雷塔を被遮蔽物程度に高くしたり、避雷塔の位置を雷雲の来る方向へ設置するなどして、雷雲と避雷塔の距離を被遮蔽物との距離より小さくすることが必要になる。なお、放電トリガ効果の向上策として紫外レーザーに赤外レーザーを重畳して、紫外レーザーによる長尺プラズマ中に高電離プラズマを生成することも提案されている¹⁵⁾。

もう一つの欠点としてプラズマの放電誘導効果の持続時間が数 μs と短いことがある。Fig. 4の遅れ特性を見ても、ガイド効果でさえ10 μs しか持続しない。さらに、Fig. 5より明らかなように放電誘導可能なプラズマは集光レンズの焦点付近のみであり、プラズマチャネルの中央部分に限られている。雷放電は実験室内の放電に比べて進展に要する時間が長いので、その間プラズマの効果を持続させる必要がある。この対策の一つとして他の種類のレーザーを重畳することによりプラズマを加熱してその効果を維持することが提案されている¹⁶⁾。

4.2 紫外レーザーの伝搬特性と誘雷システム

紫外レーザーの利点の一つに伝搬特性がある。すなわち赤外レーザーでは生成したプラズマにレーザー光自らが吸収、散乱されてしまうという欠点があるが、一般に波長が短いほどプラズマによる吸収、散乱の影響を受けにくいので、紫外レーザーでは生成したプラズマによる吸収、散乱の影響は少ないと考えられる。この点を確認するための実験を行った。まず、レンズによりビームを集光し、生成されたプラズマの後方にジュールメータを置いてエネルギーを測定した。次にレンズを使用せずにレーザーを伝搬させ、同じ位置にジュールメータを置いてエネルギーを測定した。得られた測定値(パルスエネルギー)は2つの場合で差はなかった。この結果はエキシマレーザーではプラズマ生成にほとんどエネルギーが消費されておらず、また散乱もないことを示している。赤外レーザーでは50Jの

CO₂レーザーパルス为例にとると、10mの凹面鏡により2m程度のプラズマを生成すると、40J程度のエネルギーがプラズマへの吸収、散乱で損失することが確認されている³⁾。これから紫外レーザーの損失は赤外レーザーと比べて極めて少ないことがわかる。レーザー生成プラズマは主にレーザーのパラメータの中で主にパルスエネルギーとパワー密度の2つに依存するが、この実験結果は紫外レーザーでは、パルスエネルギーよりもプラズマ生成のしきい値であるパワー密度が大きな比重を占めることを示している。

ここで放電誘導可能なプラズマを生成するためのパワー密度の推定を行う。放電チャネルが直線状でなくなる点のレーザーのパワー密度が放電誘導のしきい値と考えられるが、放電チャネルがプラズマから逸れる原因はプラズマパラメータだけでなく、電界の大きさや分布も大きく関係している。そのため厳密には、放電誘導可能なプラズマを生成するためのパワー密度のしきい値は局所的な電界の関数でもある。本実験では非対称のギャップ配置になっており、ギャップ中心部の電界分布は複雑である。このため、ここでは高圧電極近傍の高電界領域において放電がレーザー生成プラズマから逸れるポイントのビーム断面積を測定し、パワー密度を推定することとした。この条件は自然雷を考えた場合、避雷針の先端における状況を模擬するものである。ビーム断面積は写真フィルム(ポラロイドフィルム、667使用)にレーザーを照射した時のフィルムの変色により推定したものであり、ArFレーザーでは0.055cm²、KrFレーザーでは0.033cm²であった。パルス幅はカタログ値を用いてArFレーザーで20ns、KrFレーザーで25nsとした。これらの値およびエネルギー値からパワー密度を計算するとArFレーザーで0.5GW/cm²、KrFレーザーで0.9GW/cm²となった。ただしここではビーム断面における強度プロファイルを一様と仮定しているが、実際は中心部分が高く周囲が低いプロファイルになっており、実際の値はここで求められた値より大きくなると考えられる。

中村らも放電誘導可能なプラズマチャネル生

成のためのしきい値を導出している¹⁷⁾。彼らの値は0.72GW/cm²であり、我々の値0.9GW/cm²とはほぼ同じである。この2つはまったく異なる実験結果に基づくものであり、いくつかの仮定の上に導出されたものであるが、この一致はこれらのしきい値が実際の値から大きくはずれてはいないことを示していると考えられる。

4.3 紫外レーザーによる誘雷システム

ここで紫外レーザーを用いた誘雷システムについて検討してみる。紫外レーザーによる誘雷システムとしては中村らによる提案がある¹⁷⁾。このシステムを参考に、新たに得られた実験結果を考慮して誘雷システムの検討を進める。これまでの実験結果が示すように紫外レーザーは放電ガイドの効率が良いことから、雷放電をトリガするのではなく雷放電路を制御するガイド型誘雷に適していると見られる。使用する紫外レーザーはプラズマを生成するパワー、エネルギーが必要であるので、エキシマレーザーが最有力候補になる。また、レーザーは少なくとも100m以上は伝搬する必要があるため、空気中の分子による吸収、散乱の効果は重要である。この点からArFレーザー(波長193nm)よりはKrFレーザー(波長248nm)あるいはXeClレーザー(波長308nm)が適当であろうと考えられる。さらに、出来るだけコンパクトなシステムにするため、レンズ等による光学系は用いずに、雷雲に向かってそのままレーザーを照射する方式を考える。

以上の点を考慮して誘雷用レーザーの仕様の概要を推定してみる。

レーザーの伝搬モードがTEM₀₀とするとビーム断面積と伝搬距離の関係は次式のように表すことが出来る¹⁸⁾。

$$b = \pi W_0^2 / \lambda \quad (1)$$

$$\theta = \lambda / 2\pi W_0 \quad (2)$$

$$W(z)^2 = W_0^2 \left(1 + (z/b)^2 \right) \quad (3)$$

λ : レーザーの波長

$W(z)$: レーザー照射口からの距離 z における

- ビーム半径
 W_0 : レーザー照射口付近のビーム半径
 θ : レーザーのビーム発散角 (全角)
 b : コンフォーカル距離 (ビームの平衡伝搬の指標)

一般に伝搬距離 z が b より長くなるとビームは急速に発散するため, b はコンフォーカル距離と呼ばれレーザービームの平衡伝搬の指標として扱われる。

雷を導く避雷塔の高さを 100m, 雷放電をガイドする長さを 100m とおく。避雷塔は高めであるが, これは 4.1 において検討したようにエキシマレーザーは放電トリガ効果がないためである。プラズマはレーザー照射口から 200m の位置まで生成される必要がある, $b=200\text{m}$ となる。用いるレーザーは KrF レーザー (波長 248nm) とし, レーザーのパルス幅 τ は一般的な放電励起 KrF レーザーの値である 25ns (FWHM) を, 放電誘導のためのしきい値は前節で求めた $0.9\text{GW}/\text{cm}^2$ を用いる。また放電誘導可能なプラズマチャネルの半径は 1mm とする。

以上の仮定の上で必要なレーザーのパルスエネルギーを推定してみる。(1)式よりレーザー照射口付近のビーム半径 W_0 は 3.97mm と求まる。ここで(3)式を用いると, レーザーが 200m 伝搬した地点ではビーム半径 W は広がって $1.414W_0$ になっていることがわかる。この時ビームの中心から半径 0.5mm 以内においてパワー密度がプラズマチャネル生成のしきい値以上でなくてはならない。ビーム断面におけるパワー密度は次式で与えられる。

$$I = I_0 (W_0 / W)^2 \exp(-2(r/W)^2) \quad (4)$$

- r : ビーム中心からの径方向の距離
 I_0 : ビーム中心におけるパワー密度

この式より $z=200\text{m}$, $r=0.5\text{mm}$ の点におけるパワー密度は $0.469I_0$ となる。この値が $0.9\text{GW}/\text{cm}^2$ 以上となるとして I_0 を求め, 次式でパルスエネルギーを求めると 12J という値が得られる。

$$E = \pi W_0^2 I_0 \tau / 2 \quad (5)$$

Fig. 7 Basic concept of the artificial triggered lightning using ultraviolet lasers.

この値は, 現在開発されている放電励起方式 KrF レーザーの最大値程度の大きさであり¹⁹⁾, ビーム質やパルス幅等多くの要求を考慮しても, 実現可能な値と考えられる。Fig. 7 に検討したレーザー誘雷システムの概要を示す。

既に紫外レーザーによる誘雷システムについては中村らによっても検討がなされているが¹⁷⁾, 彼らの試算ではパルスエネルギー 3.67J, パルス幅 10ns, ビーム径 3.98mm により 200m の距離にわたり雷放電を誘導できるとしている。本論文において検討したシステムとの差が生じる主な原因はパルス幅および生成するプラズマの半径の設定にあると考えられる。彼らはパルス幅を 10ns と仮定しており, 我々の 2/5 である。数値的にはパルス幅を小さくすると, エネルギー値を小さく出来るので, レーザー装置としては小型化につながる。しかし, パルス幅が短いと増幅器の中をビームが通過してもエネルギーの増加率は小さい。このため, 短いパルス幅でエネルギーを増幅するためには, 多段増幅が必要になるので最終的なシステムとしては大型化する可能性がある。さらに, 短いパルス幅を短くすることは共振器の中でのビームの往復回数が減ることとなり, ビーム質が劣化する原因になる。従ってパルス幅の短縮が有効かどうかについては更なる検討が必要である。また, プラズマチャネルの径はレーザーエネルギー値と直接結びついており, プラズマチャネルの径を細くすれば必要なエネルギー値はさらに小さくすることが可能である。中村らの試算ではプラズマチャネルの径は考慮していないが, 同様の条件で計算をしてみると

我々より細い径になっている。しかし、径が細いと、低温の中性原子との衝突や拡散の効果が強まり、プラズマの減衰が早くなる。

一方、我々の検討ではビーム質を理想的な条件に設定しているので、ビーム発散角は0.04mradと極めて小さくなっている。一般に、大出力エキシマレーザーのビーム発散角は数mrad程度と大きいので、注入同期方式や不安定共振器等を使用して発散角を抑える必要がある。このビーム発散角が大きくなると、(1)(2)式からわかるようにコンフォーカル距離 b が減少し、200mの点のビーム断面積が大きくなってしまう。仮に $\theta=0.1\text{mrad}$ とすると、200mの地点でビーム断面積は約40倍になり、必要なエネルギーも大幅に増加してしまう。したがってエキシマレーザーを用いた誘雷システムではレーザーの伝搬特性の向上が極めて重要なポイントであることがわかる。

5. 結 論

紫外レーザーによる誘雷システムの検討をするために、30cm以上のギャップ長にて気中放電の誘導実験を行った。その結果、最大1mのギャップ長にて約50cmの距離にわたり放電をガイドすることに成功した。さらに紫外レーザーの放電誘導特性の測定から、紫外レーザーは赤外レーザーとは異なった放電誘導特性を持つことが明らかになった。紫外レーザーの利点としては正極性放電の放電ガイドが可能、放電ガイドにおけるエネルギー効率が良好、レーザーのプラズマ中の伝搬特性がよいことなどが明らかになったが、一方、プラズマチャネルの放電誘導が可能な時間が短いことや放電トリガの能力に乏しいなどの欠点も明らかになった。これらの結果に基づき紫外レーザーを用いた実誘雷システムの概念設計を行い、その実現が可能であることを示した。なお、今後より詳細に検討を進めるためには、紫外レーザーによるプラズマ生成とそれを用いた放電誘導メカニズムの定量的な解明が重要である。また長ギャップの放電の誘導特性や長距離の大気中の伝搬特性の解明のために大出力紫外レーザーによる大規模実験もそ

の実施が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 新藤孝敏, 鈴木俊男: 電力中央研究所調査報告 182010 (1982).
- 2) G. N. Aleksandrov et al.: Sov. Tech. Phys. Lett. 15 (1989) 628.
- 3) 広橋道夫, 栄千治, 坂井辰彦, 内山太郎: 放電研究 No.123 (1989) 45.
- 4) 藤原関夫, 井澤靖和, 河崎善一郎, 松浦慶士, 山中千代衛: レーザー研究 19 (1991) 528.
- 5) 三木 恵, 和田 淳: 大気電気研究会 No. 45 (1994).
- 6) 内海通弘, 入野 仁, 慎野武男, 田中祀捷, 村岡克紀, Grigory Baitsur, 木下文宏, 片平治, 本田親久, 辻利則, 赤崎正則: 電気学会論文誌 115A (1995) 614.
- 7) J. Sasaki et al.: J. Appl. Phys. 60 (1986) 3845
- 8) 久保, 神野雅文, 森岡仁志, 尾崎隆英, 板谷良平, 園井康夫, 永井敏雄: 電気学会高電圧研究会 HV-91-96 (1991) 71.
- 9) 三木 恵, 和田 淳: 電気学会論文誌 114A (1994) 727.
- 10) C. A. Frost et al.: Appl. Phys. Lett. 41 (1982) 813.
- 11) R. L. Carson et al.: J. Appl. Phys. 61 (1987) 12.
- 12) P. W. Werner et al.: Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 2986.
- 13) J. R. Woodworth et al.: J. Appl. Phys. 56 (1984) 1382.
- 14) 永井敏雄, 園井康夫, 藤原関夫, 井澤靖和, 河崎善一郎, 松浦慶士, 山中千代衛: 電気学会放電高電圧合同研究会 ED-92-71 (1992).
- 15) 神野雅文, 久保, 板谷良平: 電気学会論文誌 115-A (1995) 595.
- 16) Xin Miao Zhao et al.: CLEO'95, CWE2, (1995) 182.
- 17) 中村圭二, 鈴木孝光, 山部長兵衛, 堀井憲爾: 電気学会論文誌 113-B (1993) 1265.
- 18) レーザー学会編: 「レーザーハンドブック」オーム社.
- 19) 挟間寿文, 宮崎健創, 山田家和勝, 佐藤卓蔵: 量子デバイス研究会資料 QCD-89-10 (1989).