強電離・弱電離レーザプラズマチャンネルによる放電誘導

正員 島田 義則*

正員 内田 成明*

正員 河崎善一郎**

正員 山中 龍彦**

正員 高城 貫弘***

正員 古岡 芳弘***

名誉員 山中千代衛*

Experiments of Discharge Guiding using Strongly and Weakly Ionized Plasma Channel produced by KrF Laser

Yoshinori Shimada*, Member, Shigeaki Uchida*, Member, Zen-ichiro Kawasaki**, Member, Tatsuhiko Yamanaka**, Member
Yasuhiro Takagi***, Member, Yoshihiro Furuoka***, Member, Chiyoe Yamanaka*, Honorary Member

We have studied the feasibility of a hybrid discharge method (to guide the discharge with strongly and weakly ionized plasma channels) of a long guiding laser plasma channel. Charged particle densities in a weakly ionized plasma channel were measured as a function of the laser intensity. Critical condition of the weakly ionized plasma to guide an electrical streamer was determined. The electrical resistibility of plasma channel to generate the self-propagating streamer is smaller than 3.5 Ω m. The self-propagating streamer could heat the channel and leads to a main discharge.

キーワード：レーザ誘雷，強電離プラズマ，弱電離プラズマ，放電誘導，エキシマレーザ

Keywords : laser-triggered lightning, strongly ionized plasma, weakly ionized plasma, discharge guiding, excimer 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。このため電力業界にとっては、重要な課題の1つである。これを解決するための積極的な雷害対策の1つとしてレーザ誘雷が提案研究されている^{(1)~(4)}。レーザ誘雷の概念は、雷撃点となる高い誘雷塔を設置し、その先端に生ずる高電界中にレーザでプラズマを生成し、上向きリーダを発生させ、レーザプラズマに沿って上向きリーダを上空に進展させる。十分に進展したリーダは自己進展して雷雲まで到達し、誘雷塔に落雷させることにより雷電荷を中和させて落雷による被害を低減することである。

一般に、雷は雷雲から地上に向かって進展するものであるが、この方法はレーザプラズマによって強制的に上向きリーダを発生させること、次にそのリーダが自己進展できる高さまでプラズマチャンネルによってガイドすることが必要である。

当研究所は、実験室に於けるレーザ誘導放電に関する基礎研究を基に日本海側の冬季雷を研究対象としてレーザ誘雷の野外実験を行い、強電離レーザプラズマを誘雷塔先端に生成することによりリーダの発生に成功すると共に世界で始めて自然雷の落雷塔への誘導に成功し、レーザ誘雷の原理を実証した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。レーザ誘雷研究の次のステップは、確実にリーダをガイドし、主放電を生じさせることである。このためには長距離に渡って放電をレーザプラズマチャンネルでガイドすることが必要である。しかし、CO₂レーザを用いて長距離にわたりレーザプラズマを生成するためには大出力レーザ装置が必要となり実用上問題がある。このため、強電離プラズマチャンネル（主に赤外光レーザによって生成）にかわって、弱電離プラズマチャンネル（紫外光レーザによって生成）を組み合わせる方法が必要となる。

強電離・弱電離のプラズマの長、短所を述べる。赤外光レーザにより生成された強電離プラズマ（荷電粒子密度 n

* (財) レーザ技術総合研究所
〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4
Institute for Laser Technology
1-8-4, Utsubo-honmachi, Nishi-ku, Osaka 550-0004

** 大阪大学
〒565-0871 吹田市山田丘 2-1
Osaka University
2-1, Yamada-oka, Suita 565-0871

*** 関西電力（株）
〒661-0974 尼崎市若王子 3-11-20
Kansai Electric Power Co., INC.
3-11-20, Nakoji, Amagasaki 661-0974

$> 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) は、単位長さ上に生成されるプラズマ密度が高く、放電のトリガ効果に優れている、しかし、単位長さ当たり投入するエネルギーが大きい欠点がある。一方、紫外光レーザを用いた弱電離プラズマ (荷電粒子密度 $n < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) は、誘雷塔先端から発生するコロナ放電による空間電荷密度と同程度の密度であるために、鉄塔先端のコロナシースを突き破りリーダを生成することは困難であるが、弱電離プラズマの生成条件を最適化することにより、強電離プラズマで発生したリーダを長尺に渡ってガイドすることが可能である。紫外光と赤外光レーザを組み合わせた放電誘導実験は多数の研究機関で行われており^{(7)~(9)}、強電離プラズマ方式と比べ小さなエネルギーで放電ガイドが可能であることなどが明らかとなっている。

著者らは強電離・弱電離プラズマおののの長所を生かすために、それらを直列につなげたハイブリッド方式を新たに提案した。放電トリガ効果の高い強電離プラズマを雷雲の電界下で高電界のかかる誘雷塔先端から上空に生成することでリーダを発生させる。そして発生したリーダを自己進展可能な高さまで弱電離プラズマチャンネルでガイドしてやることでリーダは雷雲まで進展することが可能となる。強電離・弱電離プラズマを直列につなげ、強電離プラズマを誘雷塔の先端に生成することによりリーダを生成しやすくしたことが新規性である。

この方式を使用するにあたり、弱電離プラズマチャンネルの条件を明らかにする必要がある。即ち、強電離プラズマがリーダをトリガする条件は既に実験で求められているが弱電離プラズマがリーダ (或いはストリーマ) をガイドするための条件 (抵抗率、電子密度等) は実験的に明らかとなっていない。筆者らは、実験室内においてリーダ (実験室内ではストリーマ) をガイドするための弱電離プラズマ条件を実験的に求めた。

2. 紫外光レーザによって生成される荷電粒子密度

レーザ強度とそれにより大気中に生成される弱電離プラズマ密度について調べた。初期電荷密度は平板電極を用いたチャージコレクト方式を用いて測定した。30mm ϕ の平板-平板電極に高電圧を印加しておき、ギャップ間にレーザによる弱電離プラズマを生成すると、電界によって荷電粒子は電極に引き寄せられる。この電荷をコンデンサ (22 nF) に蓄積し、積分することによってプラズマ内の電荷密度を評価する。印加される E (電界 V/cm) / p (気圧 torr) に対するコンデンサー両端の検出電圧変化は、 E/p が低い場合は再結合や、拡散による電荷の消滅が生じるために、印加電圧に比例して増加する。 E/p が 5 V/cm $\cdot$ torr を越えると電荷の消滅と外部電界による 2 次電子の放出が釣り合った状態となり検出電圧に飽和現象が現れ、12 V/cm $\cdot$ torr を越えると 2 次電子の生成が活発となり検出電圧は急激に増加する。初期電荷を算出するには検出電圧が飽和する値を用いることにより、初期に生成された弱電離プラズマの初期電荷が測定できる⁽¹⁰⁾。実験では 9.1 V/cm $\cdot$ torr を用いた。レーザは

KrF (波長 248 nm, パルス幅は 30 ns) と 4 倍高調波 YAG (波長 266 nm, パルス幅は 3 ns) レーザの 2 種類を用いた。また、焦点距離 2m のレンズを用いてレーザ光を集光した。集光点でのレーザ光のバーンパターンはレーザの出射口が 30 $\times$ 10 mm であるために 1.2 $\times$ 3.5 mm である。2 m のレンズを用いて集光した場合、KrF レーザの回折限界時のビームウエストは 31 μ m であることから、ビーム品質が悪く絞られていないことが分かる。また、KrF レーザの回折限界時のレイリー長は 31 mm であるが、ビーム品質が悪いために 30 mm ϕ の平板-平板電極内ではほぼ一定の断面積であった。以上のことより、断面積 1 $\times$ 3 mm, 長さ 30 mm の領域の平均弱電離プラズマ密度を評価した。

レーザのエネルギーを変化した場合の電荷粒子密度変化を図 1 に示す。● (当研究所で測定), ○, □印は KrF レーザ (波長 248 nm) での実験結果^{(10)~(12)}, また, ▲印はパルス幅 3 ns の YAG レーザと非線形結晶 (BBO 結晶) を用いて 4 ω 光 (波長 266 nm) を照射した場合に得られたデータである。図より、集光強度を増加させると荷電粒子密度は増加し、その傾きは 1.1 となった。粒子密度 N を多光子吸収の式に当てはめると

$$N \propto \tau \cdot (\sigma I)^{1.1} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。 N , σ , I , τ はそれぞれ、生成荷電粒子密度、荷電粒子生成断面積、レーザ強度、レーザパルス幅である。上式より、多くの弱電離プラズマを生成させるためには、レーザ強度及びパルス幅を長くすることが必要である。また、荷電粒子密度はレーザ強度の 1.1 乗に比例するので、1.1 光子で 1 電離 (248 nm の光子エネルギーは 5 eV, 5.5 eV で 1 電離) が生じていることを示す。大気を構成する主な元素 (窒素, 酸素, 等) で、イオン化ポテンシャルが 5.5 eV 以下の元素は見つからなかったが、実験結果より、5.5 eV で電離している。このため、イオン化されている粒子は大気中に含まれる不純物であると思われる。電離気体を特定する

図 1 レーザ照射強度に対する生成された荷電粒子密度
Fig. 1. Charged particle density depends on laser intensity and wavelength of laser.

ため、大気中に含まれる様々な無機、有機の気体についてテストを行った⁽¹³⁾。しかし、大気の粒子密度より 8~10 桁低い不純物を同定することは難しく同定には至っていない。また、窒素、酸素の励起準位からの電離過程も考えられる。

3. 強電離・弱電離プラズマ中での放電進展過程

実験は誘電塔先端と雷雲を模した棒-平板電極を用いて行った(図2)。ギャップ間隔は 14.5cm で、棒電極の直径は 3cm^φで、先端は 3cm^φの半球状である。平板電極は直径 1.2m のアルミ板を使用した。切れ目なく連続した強電離プラズマを棒電極の先端に生成するために、塩化ビニール製の絶縁物を棒電極の側面に取り付けた。長さは、強電離プラズマの先端で高い電位傾度が得られるようにコロナ放電領域を考慮して 3.5cm とした。棒電極へは直流電圧-150kV を印加した。電圧印加 1 分後での定常コロナ電流は 300 μ A であった。このコロナ放電による空間電荷を考慮して、負極性においても定常状態であれば適用可能な簡便電界計算法⁽¹⁴⁾ で求めた絶縁物先端での電界強度は $9.7 \sim 7.8 \times 10^5$ V/m である。

使用したレーザは KrF レーザで、これにより弱電離プラズマと強電離プラズマ生成の両方を同時に生成した。出力は 250mJ/パルス、パルス幅 30ns、繰り返し 80Hz である。レーザ光は焦点距離 $f=2.0$ m のレンズで集光し、平板電極中央に設けた導入穴を通して絶縁物を入射した。集光点は絶縁物ターゲットと平板電極の中間地点とした。平板電極から棒電極までの空間に生成された弱電離プラズマ密度は集光点までの位置により異なり、 $7.5 \sim 11 \times 10^{10}$ cm⁻³、プラズマ線密度は $2.4 \sim 2.5 \times 10^6$ cm⁻¹ で、長さは絶縁物先端からレーザ導入穴までの 11cm である。弱電離プラズマチャンネルを生成した残りのレーザエネルギーは棒電極先端の絶縁物上に照射され、強電離プラズマを生成する。

最大出力電圧 ± 100 kV の直流電圧印加装置を 2 台使用し、棒電極に負電圧を、平板電極に正電圧を同じ電圧だけ印加

図2 ハイブリッド放電実験配置

Fig. 2. Experimental setup for Hybrid plasma channels guided discharge.

した。レーザ照射は、棒電極先端に定常状態のコロナシースが形成されるまでの時間、約 60 秒後に行った。レーザを 80 Hz で照射した場合の 50%フラッシュオーバー電圧は-150 kV であった。レーザプラズマによる放電誘導実験は印加電圧-150kV、レーザ繰り返し周波数 80Hz で行った。

レーザを単一パルス照射した場合のストリーマの進展過程をストリークカメラで観測した結果を図3に示す。印加電圧は 0 kV と 95 kV の 2 種類で行った。縦軸が空間方向、下部が棒電極側、上部が平板電極側である。横軸が時間である。印加電圧が 0 kV の場合は弱電離プラズマ部分の発光は見られないが、95 kV 印加時では棒電極から平板電極に向けて負のストリーマが進展する様子が観られた。主放電には至らなかった。

次に、1 Ω の抵抗を電流モニタとして挿入して測定した印加電圧-150kV 時の、ギャップ間に流れる電流を図4に示す。主放電には至っていない。電流はレーザのパルス幅よりも短い 20 ns 程度で立ち上がり、その後減衰する。この電流波形より求めた電荷量は約 30 nC である。30 nC の電荷量は強電離と弱電離プラズマが印加電界により電子増倍をおこし流れた電流である。

次にレーザ照射を繰り返した場合について述べる。レーザ誘導放電は放電回路のプラズマ密度が低いため、1 回のレーザ照射では放電が起こらない。主放電に至るまでにはレーザ照射の繰り返しが必要で、多くは数発目で主放電に至る

図3 負極性ストリーマのストリーク写真

Fig. 3. Streak photograph of negative streamer through laser plasma channels.

図4 レーザを照射した場合に流れる電流波形

Fig. 4. Electric current waveform (500 mV/div, 100 ns/div).

図 5 繰り返しによる電荷量の増加概念図

Fig. 5. Concept of the electric charge increasing by the repetition of the laser.

図 6 強電離・弱電離プラズマによる放電誘導

Fig. 6. Discharge photograph guided by the strongly and weakly ionized plasma channel.

(図 5)。レーザを数回繰り返し、放電が生じた様子を図 6 に示す。放電路は弱電離プラズマに沿って直線的に進展する。

放電したときのレーザ照射回数を N_f 、注目しているレーザパルスまでの回数を N_{ob} として、主放電到達割合 N_{ob}/N_f を定義する。主放電時の主放電到達割合 N_{ob}/N_f は 1 である。 N_{ob}/N_f が増すことによって、プラズマチャンネルの発光量が増加する様子を図 7 に示す。発光する場所は棒電極から進展し平板電極に伸びる。また、レーザ照射回数が増えるにつれてチャンネル発光の強さが増す。

主放電まで至った場合のストリーク写真を図 8 (a)にまた、そのときの電流を図 8 (b)示す。(a)図より、最後のレーザが照射されプラズマチャンネルに沿って負のストリーマが進展する。次に自己進展する数本の正ストリーマが平板電極から棒電極に向かって進展し、さらにチャンネルを加熱する。これは負ストリーマに比べ、正ストリーマは低い

図 7 プラズマチャンネルの発光写真

Fig. 7. Streak photograph of luminescing form the plasma channel.

(a) ストリーク写真

1V/div, 200ns/div

(b) 電流変化

図 8 放電誘導時のストリーク写真と電流変化

Fig. 8. Streak photograph of the discharge guiding and current changing at the discharge.

外部電界で進展することが可能であるためである⁽¹⁵⁾。また、正ストリーマ進展速度は負ストリーマのそれに比べて遅い。そして、棒電極付近の電界が平板電極付近のそれに比べて高いために、正ストリーマの進展速度が棒電極側に進むに連れて早くなる。

(b)図はレーザプラズマチャンネルにより負ストリーマが進展し、その後、正ストリーマ進展が生じ主放電に至るときの電流変化である。ここで、レーザ繰り返し照射により

図9 N_{ob}/N_f と電荷量の関係

Fig. 9. Mount of electric charge increase with increasing N_{ob}/N_f .

プラズマチャンネルに流れた電荷量に着目する。プラズマチャンネル密度条件がある閾値以上であれば、自己進展する正ストリーマが発生し主放電に至るので、正ストリーマが発生する閾値を求めることが必要なプラズマチャンネルの条件となる。レーザプラズマチャンネル中を流れる電荷量を縦軸に、主放電到達割合 N_{ob}/N_f を横軸にプロットした結果を図9に示す。図より、主放電到達割合 N_{ob}/N_f が ~ 0.3 程度まではチャンネル中を流れる電荷量の変化は小さい。その後、傾きが右上がりとなり、主放電到達割合が1に近づくに従い次第に増加する。この曲線を1の所まで外掃すると115nCである。

強電離プラズマ部分は1気圧大気中のプラズマであるためプラズマ温度は1~2eV程度で、荷電粒子密度 $\sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ⁽¹⁶⁾、電気抵抗は $10^3 \Omega \text{m}$ 程度である。この値は、ストリーマが進展する密度 $10^{13} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に比べて高く、強電離プラズマにおける抵抗値は弱電離プラズマのそれより低い。また、繰り返し照射によるプラズマ密度変化も小さいと考えられる。このため、強電離プラズマと弱電離プラズマ直列に繋がった状態での全プラズマチャンネル抵抗値は弱電離プラズマの抵抗値で決定される。

上記の議論から、150 kVの印加電圧は弱電離プラズマチャンネルに印加されているとする。弱電離プラズマに流れた電荷量を115 nC、電流が流れている時間を100 nsすると、弱電離プラズマチャンネル抵抗値は $150 \text{ kV} / (115 \text{ nC} / 100 \text{ ns}) = 130 \text{ k}\Omega$ である。プラズマチャンネルの断面積を感熱紙についてのパターンで評価し、弱電離プラズマ抵抗率を求めると約 $3.5 \Omega \text{m}$ である。このことより、ストリーマの直径より太く、かつ、抵抗率 $3.5 \Omega \text{m}$ 以下のプラズマを大気中に生成することにより自己進展するストリーマを生成させることが出来る。これがストリーマを発生させるための必要条件である。自己進展ストリーマがチャンネルを加熱し

図10 電子密度、温度に対する抵抗率

Fig. 10. Electric resistivity depends on electron density and temperature.

主放電に至る過程は、初期に自己進展ストリーマが進展できる程度のプラズマチャンネル抵抗値以下にすることにより達成する。このため、放電誘導するために能動的に行わなければならない事柄は初期弱電離プラズマ抵抗値を $3.5 \Omega \text{m}$ 以下とすることが条件である。

一般にプラズマの抵抗率 η は

$$\eta = \frac{m_e (\nu_{en} + \nu_{ei})}{e^2 \cdot n_e} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で示される。 m_e , ν_{ne} , ν_{ei} , e , n_e はそれぞれ、電子の質量、電子と中性粒子との衝突周波数、電子と荷電粒子との衝突周波数、電子電荷、電子密度である。ここで、中性粒子温度を 400°K ⁽¹⁹⁾、1気圧とした場合の電子密度、温度に対するプラズマの抵抗率変化を図10に示す⁽²⁰⁾。大気中を進展するストリーマの電子温度を約1~10eV⁽²¹⁾⁽²²⁾、抵抗率を $3.5 \Omega \text{m}$ とすると、プラズマチャンネル内の電子密度は $1.5 \sim 6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ である。したがって、ストリーマをガイドするためには、 $1.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 以上のプラズマ密度のチャンネルを能動的に生成すれば、放電チャンネルは自己加熱するために必要なチャンネル抵抗値以下となり、自己放電誘導が生じる。

大気中を進展するストリーマ内部のプラズマ密度は、 $10^{13} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ であり、今回の結果と比較すると同程度から2桁低い値である。

4. 結論

本稿は、強電離・弱電離プラズマを用いた場合の放電誘導過程の条件を導出した。レーザの照射を繰り返すと、チャンネルに沿って負ストリーマが進展してチャンネルを加熱する。これによりチャンネルに流れる電荷量が増加し、チャンネルの抵抗を減少させ、最後に自己進展する正スト

リーマが発生して主放電に至る。実験結果より自己進展する正ストリーマを発生させるためにはチャンネルに 115nC 以上の電荷を流す必要がある。この条件では、チャンネルの抵抗率 $3.5 \Omega\text{m}$ 、電子密度 $1.5 \sim 6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ である。したがって、ストリーマをガイドするためには、上記以上の弱电離プラズマ密度を生成する必要がある。

この研究を遂行するに当たり、大阪大学卒業生の緒方淳寿氏に感謝する。

(平成 10 年 10 月 7 日受付, 平成 15 年 7 月 4 日再受付)

文 献

- (1) L. M. Ball : "The Laser Lightning Rod System : Thunderstorm Domestication", *Appl. Opt.*, Vol.13, No.10, pp.2292-2296 (1974)
- (2) C. W. Schubert, J. Capt, and J. Lippert : "Investigation into triggering lightning with a pulsed laser", *IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, pp.132-135, USA (1979)
- (3) T. Shindo and T. Suzuki : "Laser-induced gas breakdown and its application for lightning protection", Central Research Institute of Electric Power Industry, Electric Engineering Laboratory, Rep., No.182010 (1982) (in Japanese)
新藤孝敏・鈴木俊男:「レーザーによる気体の絶縁破壊と誘雷」, 電中研調査報告, T182010 (1982)
- (4) E. Fujiwara, Y. Izawa, Z. Kawasaki, K. Matsu-ura, and C. Yamanaka : "Laser triggered lightning", *Rev. Laser Engineering*, Vol.19, No.6, pp.528-537 (1991) (in Japanese)
藤原関夫・伊澤靖和・河崎善一郎・松浦茂士・山中千代衛:「レーザー誘雷」, レーザー研究, 19, No.6, pp.528-537 (1991)
- (5) Y. Shimada, S. Uchida, H. Yasuda, S. Motokoshi, C. Yamanaka, Z-I. Kawasaki, T. Yamanaka, Y. Ishikubo, and M. Adachi : "Laser triggered lightning", *Proc. SPIE*, Vol.3423, p.258 (1997)
- (6) T. Yamanaka, S. Uchida, Y. Shimada, H. Yasuda, S. Motokoshi, K. Tsubakimoto, Z. Kawasaki, Y. Ichikubo, M. Adachi, and C. Yamanaka : "First observation of laser triggered lightning", *Proc. of SPIE - Conference on High Power Laser Ablation*, Vol.3343, p.281 (1998)
- (7) Y. Shimada, A. Ogata, S. Uchida, C. Yamanaka, H. Ishida, and K. Kawabata : "Laser plasma guiding discharge for laser-triggered lightning", *Proc. of ICPIG 2001 International Conference*, Vol.1, p.283 (2001)
- (8) M. Jinno, M. Kubo, and R. Itatani : "Triggering Discharge and Guiding Discharge Path by Weak ionized channel with Different Wavelength Laser Beams", *T. IEE Japan*, Vol.115-A, No.7, pp.595-604 (1995-7) (in Japanese)
神野雅文・久保 晃・板谷良平:「非発光電離路を用いた異波長レーザー併用による放電の誘発と誘導」, 電学論 A, 115, 7, pp.595-604, (1995-7)
- (9) M. Uchiyumi, H. Hayashi, K. Ueda, K. Muraoka, F. Kinoshita, M. Akazaki, T. Tanaka, and C. Honda : "Optimization of usage of UV and IR Laser in inducing an impulse discharge", *T. IEE Japan*, Vol.119-A, No.6, pp.828-834 (1999-6) (in Japanese)
内海通弘・林 宏充・植田清隆・村岡克紀・木下文宏・赤崎正則・田中紀捷・本田親久:「紫外・赤外レーザー併用による放電誘導特性の向上」, 電学論 A, 119, 6, pp.828-834 (1999-6)
- (10) J. Sasaki, S. Kubodera, R. Ozaki, and T. Uchiyama : "Characteristics of interelectrode flashover in air with the existence of a weakly ionized plasma channel induced by a KrF laser (248nm)", *J. Appl. Phys.*, Vol.60, p.3845 (1986)
- (11) K. Nakamura, T. Suzuki, C. Yamabe, and K. Horii : "Fundamental Research for Lightning Trigger Experiment by Using UV Lasers", *T. IEE Japan*, Vol.113-A, No.11, p.1265 (1993-11) (in Japanese)
中村圭二・鈴木孝光・山部長兵衛・堀井憲爾:「紫外レーザーを用いたレーザー誘雷の基礎的検討」, 電学論 B, 113, 11, p.1265 (1993-11)
- (12) M. Yamaura, N. Hayashi, S. Ihara, S. Satoh, and C. Yamabe : "Investigation of Weakly ionized Plasma Channel by Accumulation Effect of Charged Particles Using High Repetition Rate KrF Laser", *T. IEE Japan*, Vol. 121-A, No. 9, p. 828 (2002) (in Japanese)

山浦道照・林 信哉・猪原 啓・佐藤三郎・山部長兵衛:「高繰り返し KrF エキシマレーザーを用いた荷電粒子蓄積効果による弱电離プラズマチャネルの検討」, 電学論 A, 121, 9, p.828 (2001-9)

- (13) Y. Shimada, S. Uchida, C. Yamanaka, A. Ogata, T. Yamanaka, Z-I. Kawasaki, E. Fujiwara, Y. Ishikubo, and K. Kawabata : "Experiments of discharge guiding using strongly and weakly ionized plasma channels for laser-triggered lightning", *Proc. of SPIE - High-Power Lasers in Energy Engineering*, Vol.3886, p.663 (1999)
- (14) 藤田博之:「直流パルス性正針コロナ場の簡便電界計算法」, 電学論 A, Vol.100, No.6, p.323 (1980-6)
- (15) C. T. Phelps : "field-Enhanced Propagation of Corona Streamers", *J. Geophysical Res.*, Vol.76, No.24, p.5799 (1971)
- (16) 本田親久・古賀誠一・中澤雅明・内野喜一郎・村岡克紀・宅間 董・木下文宏・片平 治・赤崎正則:「レーザーによる大気中の放電誘導特性(7)」, 電気学会放電高電圧合同研資, ED-92-75, HV-92-13, p.39 (1992)
- (17) I. Gallimberti : "A computer model for streamer propagation", *J. Phys. D:Appl. Phys.*, Vol.5, p.2179 (1972)
- (18) R. T. Water : "breakdown in nonuniform fields", *IEE Proc.*, Vol.128-A, p.319 (1981)
- (19) D. M. Phillips : "Determination of gas temperature from unresolved bands in the spectrum from a nitrogen discharge", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.9, p.507 (1976)
- (20) 例えば, F. F. Chen : プラズマ物理学, 丸善 (1976)
- (21) A. Gibert, J. Dupuy, M. Bayle, and P. Bayle : "Schieren study of the transition to spark of a discharge in air and SF_6 ", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.16, p.1493 (1983)
- (22) G. Hartmann and I. Gallimberti : "The influence of metastable molecules on the streamer progression", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.8, p.670 (1975)

島 田 義 則

会各会員。

(正員) 1965 年 12 月 8 日生まれ。1990 年 3 月大阪大学大学院工学研究科電磁エネルギー工学専攻博士前期課程終了。同年ヤマハ発動機(株)入社。1992 年 6 月(財)レーザー技術総合研究所入所。レーザー誘導放電, レーザープラズマに関する研究に従事。1998 年レーザー学会進歩賞受賞。放電学会, 応用物理学会, プラズマ核融合学会, レーザー学会, 日本大気電気学会各会員。

内 田 成 明

(正員) 1959 年 4 月 10 日生まれ。1992 年 7 月米国ロチェスター大学院工学研究科博士課程終了。同年 10 月(財)レーザー技術総合研究所入所。工学博士。レーザー誘導放電, レーザープラズマ, レーザー推進ロケットに関する研究に従事。1998 年レーザー学会進歩賞受賞。アメリカ物理学会, レーザー学会, 日本大気電気学会各会員。

河 崎 善 一 郎

(正員) 1949 年 1 月 17 日生まれ。1978 年 3 月大阪大学大学院博士課程終了。1979 年 4 月名古屋大学空電研究所入所。1989 年 7 月大阪大学工学部講師。1991 年同助教授。2000 年大阪大学大学院教授。工学博士。電波理工学, 大気電気学, 環境電磁工学, 電気工学に関する研究に従事。1998 年レーザー学会進歩賞受賞。1992 年日本大気電気学会賞受賞。気象学会, 日本大気電気学会, AGU, IEEE 各会員。

山 中 龍 彦

(正員) 1938年月日生まれ。1963年3月大阪大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学。日本学術振興会奨励研究員を経て大阪大学工学部電気工学科助手, 同レーザー工学研究施設助教授, 名古屋大学プラズマ研究所助教授, 大阪大学レーザー核融合研究センター助教授を経て1980年大阪大学工学部電磁エネルギー工学専攻教授, 1985年大阪大学レーザー核融合研究センター教授。1999年同センター長。2002年福井工業大学教授。工学博士。レーザによる核融合及び高出力レーザ応用, 光学素子, 高出力レーザの研究に従事。1998年レーザー学会進歩賞受賞。電気学会学術振興賞, レーザー学会学術振興賞受賞。レーザー学会, 日本物理学会, 応用物理学会, プラズマ・核融合学会, 日本原子力学会, 米国物理学会各会員。

高 城 貴 弘

(正員) 1969年3月2日生まれ。1994年3月大阪府立大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月関西電力株式会社入社。2001年総合技術研究所電力技術研究所流通設備研究室(送電), 2003年研究開発室電力技術研究所電力基盤技術研究室(流通)勤務。主に送電線の保守, 設計等に携わり, 2001年から送電線関係の研究・開発に従事。

古 岡 芳 弘

(正員) 1955年12月17日生まれ。1978年3月福井大学工学部電気工学科卒業。同年4月関西電力株式会社入社。2001年総合技術研究所電力技術研究所流通設備研究室(送電)主幹, 2003年研究開発室勤務。

山 中 千 代 衛

(名誉員) 1923年12月14日生まれ。1948年大阪大学工学部電気工学科卒業。1953年大阪大学大学院特別研究生修了, MIT大学留学。工学博士。大阪大学工学部助手, 講師, 助教授を経て1963年大阪大学教授, レーザー工学研究施設長, 同大学レーザー核融合研究センター長を歴任。1987年同大学名誉教授。(財)レーザー技術総合研究所長で現在に及ぶ。1990年姫路工業大学学長, 1995年同大学名誉教授。電気学会会長, レーザー学会会長歴任。プラズマ物理, レーザ工学, 核融合工学の研究に従事。電子情報通信学会, 照明学会, 原子力学会, プラズマ・核融合学会, 応用物理学会, 高温学会各会員。電気学会功績賞, 進歩賞, 論文賞。レーザー学会功績賞, 進歩賞。IEEE ライフフェロー, APS フェロー, 米国核融合協会研究推進賞, エドワード・テラー賞。紫綬褒章受章。勲二等瑞宝章受章。