エキシマレーザによる放電誘導の特性

正員 池上 知 顕 (熊本大) 学生員 垣 内 武 (熊本大)

正員 蛸 原 健 治 (熊本大) 正員 赤 崎 正 則 (九州東海大)

Characteristics of Electrical Discharge Induced by Excimer Laser

Tomoaki Ikegami, Member, Takeshi Kakiuchi, Associate,

Kenji Ebihara, Member (Kumamoto University),

Masanori Akazaki, Member (Kyushu Tokai University)

Characteristics of electrical discharges triggered by a high power KrF or ArF excimer laser were studied to investigate fundamental mechanisms of a laser-induced discharge. Experiments were done in the different kind of ambient gases (air, N_2 , O_2 of 100-1000mb in pressure) under an uniform DC electric field using Rogowski electrodes. Electrical characteristics such as 50% flashover voltage, an initial current due to a laser-produced plasma and a delay time from a laser incidence to a flashover were measured. Also optical measurements, such as a streak image of a flashover, transmittance of a laser light in gases, and temporal and spatial spectral emissions from molecular, atomic, and ionic species of O_2 and N_2 were carried out. It was found that oxygen molecules play an important role in characteristics of a laser-initiated discharge.

キーワード：レーザ誘導放電，エキシマレーザ，レーザ誘雷，火花放電

1. まえがき

レーザによる気体の絶縁破壊及びその放電過程は、1963年にMakerら⁽¹⁾により研究されて以来、レーザ核融合、レーザトリガギャップスイッチ、ロケット推進など広い分野で、レーザビームと気体との相互作用の解明、レーザによる高温・高密度プラズマの生成を目的として実験研究が行われてきた。大出力のレーザビームを集光して大気を絶縁破壊して導電性のプラズマチャンネルを形成し、放電を誘導しようとする研究は、雷放電の誘導を目的として最近興味を持たれ、多くの研究が行われている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

現在、レーザ誘雷の実験には、 CO_2 レーザ($\lambda=10.6\mu m$, 光子エネルギー $0.117eV$)⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾、エキシマレーザ(ArF: $\lambda=193nm$, $6.42eV$; KrF: $\lambda=248nm$, $5.0eV$; XeCl: $\lambda=308nm$, $4.03eV$)^{(8),(9)}、YAGレーザ($1.06\mu m$, $1.17eV$)などが用いられている。一般に気体に強力なレーザ光を照射すると、多光子吸収やカスケード破壊により、気体は局所的な絶縁破壊を生ずる。通常の大気の絶縁破壊に必要なレーザ光パワー密度は、大気条件やレーザ波長により異なるが、 $1GW/cm^2$ 程度と言われている。この値はポインティングベクトルを用いると、電界強度 $6 \times 10^5 V/cm$ に相当する。レーザ誘雷は現在まだ基礎研究の段階で、大気中で電極間に直流またはインパルス電圧を印加し、レーザ光照射により放電を誘導する実験が行われている。実用方式とし

ては強電離チャンネル方式と弱電離チャンネル方式が提案され、各々の特長を生かした試みが行われている。強電離チャンネル方式はレーザ光をレンズで集光して、 MV/cm 程度のレーザ光周波数の電界のもとで気体を絶縁破壊させてプラズマチャンネルを形成し、これに主放電を誘導するものである。一方、弱電離チャンネル方式は、紫外レーザの光電離効果により弱電離プラズマを生成し、放電誘導させるものである。

大気は窒素と酸素が主成分であり、レーザ誘導放電現象には、その他の水蒸気、エアゾルなどの微量の不純物や浮遊粒子なども影響していると言われているが、本論文ではこれらの不純物のない条件の下で、KrF及びArFエキシマレーザを用いた放電誘導の基礎特性を調べるために、放電容器内に純窒素ガス、純酸素ガス及び乾燥清浄空気を導入し、その中に設置したロゴウスキー電極に直流電圧を印加し、平等電界のもとでレーザ誘導放電の実験を行った。

2. 実験装置及び方法

図1は使用したレーザ誘導放電実験装置の概略図である。^{(10),(11)} 直径14cmのステンレス製の一對のロゴウスキー電極を3cm離してアクリル製の放電容器(容積 $300 \times 200 \times 200mm$)の中央に取り付けた。高圧直流電源($80kV$, $6mA$, PG80R6, Glassman High Voltage)により負極性高電圧を $1k\Omega$ の充電抵抗を介して上部電極に印加し、

下部電極は1k Ω 抵抗を介して接地した。また、電極間には直列接続した2個の2000pFのセラミックコンデンサを並列に接続し、フラッシュオーバーまでの電極電圧の変化を少なくした。放電時の電圧波形は高電圧プローブ(HV-P60, DC-50MHz, 岩通)を用い、また電流波形は抵抗($R_s=0.1\Omega$, 51 Ω)両端の電圧により測定した。放電容器内はロータリポンプで数mbまで排気した後、マスフローコントローラを用いて、乾燥清浄空気、酸素ガス(99.99%), 窒素ガス(99.99%)のいずれかのガスを導入し、100mb~1000mbの範囲の圧力で実験を行った。使用したエキシマレーザ(LPX305icc, Lambda Physik)は作動ガスによって248nm(KrF)または193nm(ArF)の波長で発振可能である。最高繰り返し周波数は50Hz, 最大レーザ出力はKrFで850mJ, ArFで400mJ, またビーム拡がり是不安定共振器により約0.4mradである。放電容器窓に設置した $f=200\text{mm}$ の合成石英レンズ(波長248nmと193nmでは焦点距離はそれぞれ181mm, 164mmとなる)によりレーザビームを上下電極間の中央に集光した。ArFレーザを入射する場合は、大気中の酸素分子によるレーザ光の吸収を防ぐために、窒素置換した光ガイドパイプを用いて容器内に入射した。どちらの場合にも焦点近傍に発光を伴う光電離によるプラズマが生成された。レーザ入射・透過光波形はバイプラナー光電管(R1193U-05, 浜松ホトニクス)で、またレーザエネルギーはエネルギーメータ(Lambda Physik)で測定した。レーザ誘導放電時の電圧、電流波形をデジタルオシロスコープ(HP54504A, Hewlett Packard)で測定し、レーザ入射からフラッシュオーバーまでの遅れ時間を求めた。イメージコンバータカメラ(IMACON790, Hadland Photonics)を用いて、レーザ誘導放電時の動的振る舞いを調べた。また誘導放電プラズマからの放射光の分光測定も行った。使用した分光システムは特定のスペクトルの時間変化測定には分光器(P-250, Nikon)と光電子増倍管(R928, 浜松ホトニクス)を、またスペクトルの時間積分した空間分布測定には分光器(G-500, 逆分散3nm/mm, Nikon)とCCDカメラ(XC-77RR, SONY)を用いた。

3. 実験結果と検討

< 3・1 > レーザによる放電誘導特性 気体の種類, 気圧, レーザエネルギー密度, レーザ波長, 印加電圧等の条件を変えて実験を行い、レーザ誘導放電現象を調べた。

図2にKrFエキシマレーザによって誘導されたフラッシュオーバーのイメージコンバータカメラによるストリーク像を示す。1000mbの乾燥清浄空気中で、45kVの電圧を印加したログウスキー電極間に500mJのレーザ光を集光してフラッシュオーバーさせたときのものである。本実験の光学系において、レーザのビーム拡がり0.4mrad, 集光レンズの焦点距離を180mmとすると、集点での回折限界によるレーザ光の半径は約70 μm となり、光エネルギー密度は $3\times 10^3\text{J}/\text{cm}^2$ になる。レーザ光のパルス幅は約20nsであり、パワー

図1 レーザ誘導放電の実験装置図
Fig.1. Experimental setup for a laser-induced discharge.

図2 レーザ誘導によるフラッシュオーバーのストリーク像
Fig.2. Streak image of flashover induced by a KrF laser.

密度は $1.5\times 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$ となり、電界強度に換算すると $7.5\times 10^6\text{V}/\text{cm}$ に相当する。実際にはレーザ光の回折、レンズの収差、レーザによって生成されたプラズマによるレーザ光の散乱などにより、これらの値より小さくなると考えられる。駒撮り写真によると、この条件においてはレーザ照射瞬間には球状の強電離プラズマが形成され、時間とともにレーザ軸方向に菌形状に変形する。図2においてはレーザプラズマによる発光は約0.5 μs で一度消滅しているが、レーザ入射後7 μs で電極間にフラッシュオーバーが生じている。

レーザ入射エネルギー700mJ, 印加電圧40kVの場合の電流波形を図3に示す。レーザ入射とほぼ同時に電子電流が流れ、その後フラッシュオーバーに至るまでイオンによる電流が継続して流れている。エキシマレーザの光子エネルギーはKrFレーザで5.0eV, ArFレーザで6.42eVであり、 O_2 や N_2 の解離エネルギー以下であるため、エキシマレーザを用いた本実験では、初期の電子電流はレーザ光の多光子吸収などによる N_2 , O_2 の光電離によって生成されたと考えられる。電子はドリフト速度約 $8\times 10^6\text{cm}/\text{s}$ で陽極に向かって移動し、電子付着により生じた酸素の負イオンや電離により

図3 レーザ誘導によるフラッシュオーバー時の電流波形

Fig.3. Current waveform of flashover induced by a KrF laser.

図4 入射レーザエネルギーと50%フラッシュオーバー電圧の関係

Fig.4. Relation between incident laser energy and 50% flashover voltage.

生じた正イオンは、それぞれ陽極、陰極に向かって移動し、レーザ入射から約13μsでフラッシュオーバーに至っている。その後はコンデンサーの電荷の反転により約3MHzの振動電流が流れている。

図4は空気1000mb中における50%フラッシュオーバー電圧とKrFレーザ入射エネルギーとの関係を示す。約400mJまでのエネルギー領域では、50%フラッシュオーバー電圧は入射エネルギーの増加に比例して減少するが、それ以上のエネルギー増加に対しては、あまり減少しない。これは入射レーザエネルギーに対して、生成される電子が飽和する傾向があるためである。

図5に400mJのKrFエキシマレーザを入射した場合の50%

図5 雰囲気ガス圧力と50%フラッシュオーバー電圧の関係

Fig.5. Relation between ambient gas pressure and 50% flashover voltage.

フラッシュオーバー電圧と雰囲気ガス圧力との関係を酸素、空気、窒素の各ガスに対して測定した結果を示す。またレーザを入射しない場合の空気中における特性を図中に▽印で示す。この自爆放電電圧は、ほぼパッシェン曲線に従って直線的に増加しており、1000mbでの破壊電圧は実験装置の制約から測定できなかったが約80kVと推定される。400mb以上の圧力においてレーザ入射による50%フラッシュオーバー電圧の低下は著しくなり、600mb以上の圧力では、空気の場合フラッシュオーバー電圧は約2分の1に低下している。300mb以下の圧力では光電離や衝突電離によって生成される電子の減少や拡散による電子消失の増大などにより、レーザ入射によるフラッシュオーバー電圧の低下は少なくなる。3つのガスのフラッシュオーバー電圧の低下の割合は酸素ガス、空気、窒素ガスの順で大きくなっている。O₂は光電離により11.5eVのエネルギーでO₂(B³Σ_g⁻)を経てO(3P)とO(1D)に電離し、さらに13.62eVのエネルギーで電離する。他方N₂はN(4S)に解離するのに9.76eVのエネルギーを必要とし、さらにN⁺への電離には14.53eVのエネルギーが必要である。よってO₂、N₂が原子に解離し、電離するのに要するエネルギーは、それぞれ25.1eVと24.3eVとなり、両者の差は少ない。一方、分子から直接電離する場合、O₂とN₂の電離エネルギーはそれぞれ12.1eVと15.6eVであり、レーザ光による電離が多光子吸収によるものとなればO₂の方が電離しやすく、またO₂の電子親和力が高いことから、酸素分子は電子の生成、消滅過程に深く関わっており、そのため空気中と酸素中で破壊特性が類似すると考えられる。

空気に300mJのArFレーザを入射した場合のフラッシ

図6 雰囲気ガス圧力と50%フラッシュオーバー電圧の関係 (KrFレーザとArFレーザの違い)

Fig.6. Relation between ambient gas pressure and 50% flashover voltage. (Difference between KrF and ArF laser)

オーバー電圧特性を比較のためにKrFレーザの結果とともに図6に示す。ArFレーザの場合、500mb以下の圧力においてもフラッシュオーバー電圧の低下がみられ、レーザ波長が酸素分子の吸収スペクトルと一部重なるため、少ない粒子密度においてもレーザエネルギーが吸収され、光電離による初期電子が効率良く生成されるためと考えられる。そこで雰囲気ガスの種類、レーザ波長に対して、レーザ誘導時の50%フラッシュオーバー電圧特性が異なる原因を調べた。

図7は1000mbの空気、窒素ガス、酸素ガスに300mJのKrFレーザを入射したとき、レーザプラズマによって生成される初期電子による電流波形を入射レーザ波形と共に示す。このとき、印加電圧はフラッシュオーバーが起きないように23kVとし、また電流検出抵抗は $R_s=51\Omega$ とした。酸素ガス及び空気中での電流波形にみられる振動は、電流のパルス幅が短いために生じる放電回路のリードインダクタンスの影響である。いずれのガスにおいてもレーザ入射と同時に電流が流れている。窒素ガス中で最も多く電子が生成され、レーザ入射後300nsまで電流は増加し、その後緩やかに減少している。 N_2 と O_2 を4:1の割合で含む空気の場合、電流波形は窒素ガスよりむしろ酸素ガスの場合に近い。電流は酸素ガス中で最も小さく、入射レーザパルス幅とほぼ同じ時間だけ流れている。これらの雰囲気ガスによる違いは、空気、酸素ガス中ではレーザにより生成された電子は O_2 への付着により速やかに消滅するが、窒素ガス中では電界により加速された電子により、寿命の長い準安定励起分子($A_3\Sigma_u^+$)が生成され、さらに解離・電離されるためと考えられる⁽¹²⁾。また、電流波形を時間積分した初

図7 KrFレーザ入射時の初期電流波形

Fig.7. Initial current waveform after a KrF laser incidence.

期電荷量が多いガスほど、図5におけるフラッシュオーバー電圧が小さくなっている。

KrFとArFエキシマレーザの異なるガス中での透過特性を調べるために、1000mbの空気、窒素ガスあるいは酸素ガス中において、プラズマ生成時に透過するレーザ光強度をバイプラナ光電管を用いて測定した。図8にKrFレーザの場合、図9にArFレーザの場合の透過レーザ波形を真空中に透過したレーザ波形と共に示す。真空中を透過した波形と、ガス中を透過した波形の差がプラズマ生成のために吸収・散乱されたレーザパワーを示す。KrFレーザの場合、いずれのガス中においてもレーザパワーが最大になる時刻から吸収が始まり、ほぼこの時刻からプラズマからの発光が観測された。吸収・散乱されるレーザパワーは窒素ガス、空気、酸素ガスの順に大きくなる。レーザ光の吸収が始まった後、約10nsで急にレーザ光の透過率が大きくなり、プラズマによるレーザ光エネル

図8 KrFレーザ光のプラズマ生成時の透過波形
Fig.8. Waveform of a KrF laser after a plasma production.

図9 ArFレーザ光のプラズマ生成時の透過波形
Fig.9. Waveform of an ArF laser after a plasma production.

ギーの吸収が飽和することを示している。ArFレーザの場合、KrFレーザとは異なりレーザ光は主に O_2 によって吸収されるため、酸素ガス中ではレーザパワーが低い時刻から吸収が始まっており、初期電子の生成効率が高い。

< 3・2 > 誘導放電時間遅れ特性 レーザ入射からフラッシュオーバーに至るまでの時間は、レーザにより生成された初期電子の増殖過程、つまりストリーマの形成時間とストリーマによって形成された放電チャネルが電流によって加熱され、熱電離が支配的になるまでに要する時間によって決まる。そこでレーザ入射からフラッシュオーバーまでの遅れ時間(τ_d)のレーザエネルギー依存性、及び異なる雰囲気ガス中での E/P 依存性を調べた。図10に1000mb空気中でのKrFレーザ入射エネルギーと τ_d の関係を示す。印加電圧の増加とともに τ_d は小さくなるが、55kVではレーザエネルギーに対する依存性は小さい。これは図4と同様に、レーザ入射エネルギーが大きくなるほど、光電離により生成されるプラズマ領域が大きくなるため全電子数は増加するが、焦点近傍で生成される電子数はプラズマに

よるレーザ光の散乱や電子の O_2 への付着のために電子数密度の増加が飽和することと、大きな E/P においてはストリーマ形成に必要な初期電子数が少なく済むためと考えられる。図11は、KrFエキシマレーザ400mJを入射した場合の(a)空気、(b)窒素ガス、(c)酸素ガスに対するフラッシュオーバー遅れ時間 τ_d と E/P の関係である。圧力が600mb, 800mb, 1000mbの条件のもとで印加電圧を変えて τ_d を測定した。図11(a)の空気の場合 E/P が小さい領域では τ_d のばらつきは大きい、 E/P が大きい範囲では τ_d は

$$\tau_d \sim (E/P)^{-10} \dots\dots\dots(1)$$

で表される直線となる。図(c)の酸素の場合も τ_d はほぼこの直線上にある。図(b)の窒素の場合 τ_d は E/P とともにほぼ直線的に減少し、

$$\tau_d \sim (E/P)^{-7.4} \dots\dots\dots(2)$$

で表される。いずれのガスにおいてもフラッシュオーバー遅れ時間は電子が電界から受けるエネルギーに比例して小さくなっているが、窒素ガス中では同じ E/P でも圧力が高いほど τ_d は小さくなっている。実験条件の範囲では酸素ガ

図10 放電遅れ時間と入射レーザーエネルギーの関係

Fig.10. Relation between discharge time lag and incident laser energy.

ス、空気、窒素ガス中での電子のドリフト速度 V_d の E/P 依存性は、

$$V_d \sim (E/P)^{0.9} \dots\dots\dots (3)$$

で近似できることから⁽¹³⁾、式(1)、(2)で表される特性は電子のドリフト速度のみでは説明できない。窒素ガス中の放電遅れ時間は、 E/P が約 $15 \sim 20 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{mb})$ 以下では他のガス中より短いことから、レーザー入射により生成された初期電荷量により支配されると考えられる。また E/P が大きいところでは空気と酸素ガス中の遅れ時間特性は類似しており、これは $< 3 \cdot 1 >$ で述べたように O_2 が電子の生成・消滅過程、およびストリーマの形成時間に関与しているためと考えられる。また窒素ガス中よりも放電遅れ時間が短くなるのは、 O_2 が N_2 よりも電離エネルギーが小さいため、放電チャネルが加熱され熱電離が支配的になるまでの時間が短いと考えられる。

〈3・3〉レーザー誘導放電の分光測定 レーザ光を照射した場合の空気、窒素ガス、酸素ガス中の絶縁破壊現象を解明するために、エキシマレーザー光による生成プラズマの分光光学計測を行った。気体はかなりの程度に解離、電離されており、高温・高密度のプラズマ状態であるため、その放射光は主に原子やイオン種からの発光スペクトルである。図12は酸素ガス1000mb中でKrFレーザー600mJを入射し生成したプラズマからの発光スペクトルのうち、400nm近傍を分光写真撮影したものである。高温プラズマの再結合放射による連続スペクトルの中に、表1に示すような酸素の特長的なスペクトルが観測された。

図13(a)、(b)はそれぞれ1000mbの空気と酸素ガス中に400mJのKrFレーザーを入射したときに観測される O_2^- ($\lambda =$

(a) 空気

(b) 窒素

(c) 酸素

図11 放電遅れ時間と E/P の関係

Fig.11. Relation between discharge time lag and E/P .

図 1 2 KrFレーザ生成プラズマからの発光スペクトル

Fig.12. Emission spectra from a plasma produced by a KrF laser.

表 1 酸素プラズマ中で観測されたスペクトル
Table1. Identified spectra in an oxygen plasma.

発光種	観測された波長 (nm)
OI	436.83, 615.82, 645.37, 777.19, 777.41, 794.76, 795.08
OII	406.90, 407.22, 407.59, 411.92, 415.33, 418.55, 418.98, 431.72, 434.94, 436.69, 441.70, 459.09, 464.18, 464.91, 494.30, 672.12
O ₂ ⁻	436.47, 445.83

436.47nm) のスペクトル強度の時間変化を示したものである。図中には電極間に電圧を印加しない場合と20kVの電圧を印加した場合を入射レーザ波形とともに示す。空気、酸素ガスいずれの場合もO₂⁻スペクトルのピークはレーザのピークから約50ns遅れている。初期電子電流は図7に示すように空気中で数百ns、酸素ガス中で50ns以内で減衰していることから、O₂⁻の生成は初期電子の付着によると考えられる。空気の場合には、O₂⁻スペクトルの減衰が酸素中に較べて速く、また電圧印加によるスペクトル強度の変化が少ない。レーザによって生成される初期電子数は窒素を含む方が多いため、衝突によりO₂⁻から電子の離脱が起きるため減衰が速いと考えられる。酸素ガス中では電圧の印加によって加速された初期電子のO₂への付着や励起が盛んになるためO₂⁻の生成が促進されている。

分光器(G-500)の写真分光測光部にCCDカメラを設置し、レーザ誘導放電時のスペクトル強度の空間強度分布を測定した。空気1000mb, 印加電圧45kVのもとで、360mJのKrFレーザ入射によりフラッシュオーバーさせ、このときの波長範囲430~440nmおよび590~600nmで観測されるスペクトル分布を図14(a), (b)に示す。また図14(c)に酸素ガス1000mb中での430~440nmのスペクトル分布を示す。測定領域はレーザ光焦点で電極間中央の上下約10mmの範囲

(a) 空気

(b) 酸素

図 1 3 O₂⁻スペクトル強度の時間変化
Fig.13. Temporal behavior of O₂⁻ spectral intensity.

である。図中の観測位置 h は入射レーザ光軸からの距離を表し、 $h=+15\text{mm}$ と $h=-15\text{mm}$ はそれぞれ電圧印加電極と接地電極の位置である。十分なスペクトル像を得るために、図14(a), (b), (c)はディジタル化したビデオ信号をフレームメモリー上で、それぞれ14回、9回、3回積算したものである。測定したスペクトル強度は時間積分値であるため、光軸近傍の $h \pm 1.5\text{mm}$ での発光は、レーザによる初期プラズマからの発光が含まれるが、それ以外の領域からの発光は電極間を橋絡したアークからのスペクトルである。再結合放射による連続スペクトルに重畳して、空気中、酸素ガス中でOIIのスペクトル(431.72nm, 434.94nm, 436.69nm)が、また空気中でNIIスペクトル(593.18nm, 594.17nm)が観測された。空気中と酸素ガス中でのスペクトルを比較するとスペクトル強度は酸素ガス中の方が空気中よりも大きく、その強度分布は電極間では大きな変化は見られない。一方、空気中ではレーザ光の集光点近傍で、連続スペクトルの強度が減少しており、これは窒素ガス中においても観測され、また図2に示した空気中でのフラッシュオーバーのストリーク写真においても認められる。またフラッシュオーバーの駒撮り写真から、この領域ではアークが収縮するのが観測されている⁽¹⁴⁾。この理由として、酸素ガス中ではレーザ入射によって生じた初期電子はO₂への付着により急速に減少するが、空気中の場合O₂が少なく、電子の衝突によりN₂が解離、電離し、レーザ光焦点近傍で電子や正イオン密度が高く導電率が大きくなるためと考え

(a) 空気

(b) 空気

(c) 酸素

図14 フラッシュオーバー時のスペクトル強度空間分布

Fig.14. Spatial profiles of spectral intensity at a flashover.

られる。

4. むすび

乾燥空気、窒素ガス、酸素ガスなどの雰囲気ガス中の平等電界のもとで、エキシマレーザ光生成プラズマによる放電誘導実験を行い、以下のことがわかった。

- (1) 紫外波長域のエキシマレーザ光は O_2 による吸収率が大きいので生成される初期電子数は多いが、空気、酸素ガス中では電子付着による O_2^- 生成のため急速に減少する。
- (2) レーザ入射による50%フラッシュオーバー電圧は、レーザによって生成される初期電荷量が多いほど低下する。
- (3) 50%フラッシュオーバー電圧やレーザ入射からの放電遅れ時間などの特性は、 O_2 による電子の生成・消滅過程が支配的なため、空気、酸素ガス中では似た特性になる。
- (4) 空気、窒素ガス中ではフラッシュオーバー時のレーザ光焦点近傍からの発光強度が弱いことから、フラッシュオーバーが終了するまでの間、この領域の導電率は高いと考えられる。

最後に、本研究の遂行に当たり卒業研究として実験協力していただいた米田 健君（現、九州大学大学院総合理工学研究科2年）、木下弘美君（現、オムロンライフサイエンス(株)）、新垣秀治君（現、熊本大学大学院工学研究科1年）、金城達也君（現、熊本大学研究生）に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費「一般研究(A)」および九州電力(株)との共同研究費によるものである。

（平成5年8月2日受付）

文 献

- (1) Maker, R.W., Terhune, and C.M. Savage : Proceedings of 3rd International Conference on Quantum Electronics (Edited by P. Grivet and N. Bloembergen, Colombia, New York, 1959 (1963))
- (2) 新藤, 鈴木 : 「レーザによる気体の絶縁破壊と誘雷」, 電力中央研究所報告, No.182010 (昭57)
- (3) 山部, 中村, 堀井 : 「レーザを利用した誘雷技術」, 応用物理, **61**, 718 (1992)
- (4) 堀井 : 「雷は制御できるか? ロケット誘雷など」, 電学誌, **110**, 21 (平2)
- (5) J. Greig, D.W. Koopman, R.F. Fernsler, R.E. Pechacek, I.M. Vitkovitsky, and A.W. Ali : "Electrical discharges guided by pulsed CO_2 -laser radiation", *Phys. Rev. Lett.*, **41**, 175 (1978)
- (6) S. Yoshida, S. Kubodera, T. Sasaki, R. Ozaki, and T. Uchiyama : "Study of electrical breakdown induced by pulsed CO_2 laser radiation", *J. Appl. Phys.*, **59**, 1904 (1986)

- (7) C.Honda, H.Eto, T.Takuma, T.Yosioka, O.Katahira, and M.Akazaki : "A study on Laser-Induced Discharge in Atmospheric Air", Proc. of 7th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Dresden, paper 42.24 (1991)
- (8) V.Kumar and R.K.Tharejia : "Laser-induced gas breakdown in the presence of a static electric field", *J. Appl. Phys.*, **64**, 5269 (1988)
- (9) J.Sasaki, S.Kubodera, R.Ozaki, 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.*, **60**, 3845 (1986)
- (10) 池上, 白石, 木下, 米田, 蛭原, 赤崎: 「エキシマレーザによる放電誘導実験 (II)」, 電気学会放電研資, ED-92-13, 115 (平4)
- (11) 池上, 垣内, 蛭原, 園田, 赤崎: 「エキシマレーザによる放電誘導実験 (IV)」, 電気学会放電・高電圧合同研資, ED-92-71, 1 (平4)
- (12) 酸素・窒素プラズマ反応とその応用調査専門委員会: 「酸素・窒素プラズマ反応とその応用」, 電気学会技報 (II部), No. 340 (平2)
- (13) J.S.Chang, R.M.Hobson, 市川, 金田: 電離気体の原子・分子過程 (昭64) 東京電機大学出版局
- (14) 本田, 江藤, 村岡, 宅間, 吉岡, 片平, 池上, 蛭原, 赤崎: 「レーザによる大気中の放電誘導特性 (2)」, 電気学会高電圧研資, HV-91-5, 39 (平3)

池上 知 顕 (正員) 1955年9月1日生。80年

3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科助手, 88年4月熊本大学工学部電気情報工学科助手, 90年2月同助教授, 現在に至る。レーザ誘導放電, 酸化物高温超伝導体作製プロセスの開発, 高温超伝導体の応用などに関する研究に従事。工学博士。応用物理学会, プラズマ・核融合学会会員。

垣内 武 (学生員) 1970年1月19日生。9

2年3月熊本大学工学部電気情報工学科卒業。同年4月同学大学院工学研究科修士課程入学, 現在に至る。

蛭原 健治 (正員) 1941年10月27日生。6

7年3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月大阪市立大学助手, 69年4月山口大学講師。75年4月熊本大学工学部電気工学科助教授, 84年2月同教授, 現在に至る。高温酸化物超伝導薄膜作製プロセスの開発と超伝導体の応用, 放電プラズマプロセスの研究などに従事。工学博士。日本物理学会, 応用物理学会, 電子情報通信学会, MRS学会会員。

赤崎 正 則 (正員) 1927年1月2日生。52年

3月九州大学工学部電気工学科卒業。55年3月同大学大学院研究奨学生前期修了。同年4月九州大学工学部助手, 57年4月同大学助教授, 67年4月同教授, 79年4月同大学大学院総合理工学研究科(エネルギー変換専攻)教授, 86年同研究科長, 90年4月熊本大学工学部教授, 91年11月九州東海大学工学部教授, 92年4月同大学工学部長, 現在に至る。工学博士。この間, 高電圧工学, 放電工学およびプラズマ工学の研究に従事。80年電気学会論文賞, 86年同電力賞受賞。照明学会, 静電気学会, プラズマ・核融合学会, 応用物理学会, IEEEフェロー。