

エキシマレーザにより生成した 高圧アルゴンプラズマの形状に関する研究

Study on Shape of High-Pressure Argon Plasma Produced by the Excimer Laser

津田 紀生[†]、山田 諄[†]

Norio TSUDA, Jun YAMADA

Abstract : When a XeCl excimer laser was focused in the high-pressure argon gas up to 150atm, the plasma developed not only backward but also forward, which differed from one produced by the visible laser. The forward development of the high-pressure laser plasma was observed at the first time. The plasma shape was measured. The radius of the forward plasma was smaller than that of the focal spot, and the backward radius was the same as the light cone. The spherical aberration did not influence to the forward plasma development. It was found that the shape of plasma consisted of the two different cones with the large vertical angle and the small one.

1. はじめに

高圧ガス中にレーザ光を集光照射すると、集光レンズの焦点において高密度プラズマが生成される。レーザ光による気体の絶縁破壊に関する最初の研究は、1963 年の Mayerrand¹⁾によるものであり、その後、1965 年には Raizer²⁾によって実験結果と理論計算結果の比較が行われている。しかしながら、今まで行われた研究の多くは、可視光域で発振するレーザ光を用いて気体の絶縁破壊を行った時の破壊のしきい値を求めるものであった。また、気体を用いたレーザプラズマに関する研究の多くは、数気圧の圧力中にプラズマを生成する実験がほとんどであった。

そこで、以前我々の研究室では、150 気圧までの高圧アルゴンガス中に可視光域で発振するルビーレーザ光を集光照射してプラズマを生成し、その物性³⁾や成長メカニズム⁴⁾を解明してきた。

最近、紫外線領域で発振するエキシマレーザが開発され、ハイパワーな紫外線が簡単に利用できるようになった。そこで、紫外線領域で効率よく発振す

るエキシマレーザ光を 150 気圧までの高圧アルゴンガス中に集光照射したところプラズマは、可視光の時と異なり、焦点後方ばかりでなく焦点を越えて前方にも成長した。⁵⁾ 高圧レーザプラズマの実験において焦点前方へのプラズマの成長は、初めて観測された結果である。そこで今回、高圧アルゴンガス中に生成されたプラズマの形状について調べたので、その結果について報告する。

2. 実験方法

2. 1 実験装置

レーザプラズマの形状の測定に用いた実験装置を図 1 に示す。エキシマレーザは、媒質に XeCl を用いたので波長 308nm、最大パワー 17MW で発振し、レーザパルスの半値幅は 30ns で発振する。今回実験に使用したエキシマレーザは、最大 50Hz の繰り返し周波数で発振可能であるが、単発でパルス発振させて実験を行った。レーザ光の断面は 11×24mm の長方形で、圧力容器内に設置した、焦点距離 40mm の石英ガラス製のレンズを用いて集光した。集光されたレーザ光は、焦点距離 40mm の焦点において 120

[†] 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

×80 μm の楕円形となった。アルゴンガスを封入する圧力容器は、直径 110mm、長さ 140mm のステンレススチール製の円筒形で、光軸方向に直径 30mm、光軸と直角方向に直径 20mm の空洞を開け、厚さ 15mm の石英ガラス製の窓を取り付けることによって、ガスを封入した。圧力容器内にアルゴンガスを封入する時は、回転式真空ポンプで圧力容器内を 10^{-3}Pa 程度に排気し、アルゴンガスを数回入れ替えた後、アルゴンガスをチャンパー内に封入し、手動式圧縮機で加圧して実験を行った。圧力の上限は、容器に取り付けた石英ガラス製の窓の耐圧を考慮して 150 気圧とした。

集光レンズの焦点において生成されたプラズマの発光の様子は、焦点距離 100mm のリレーレンズを用いて、ストリークカメラの入射スリット上に 1:1 で結像するように光学系を設置し、光軸と直角方向の窓からストリークカメラを用いて測定した。

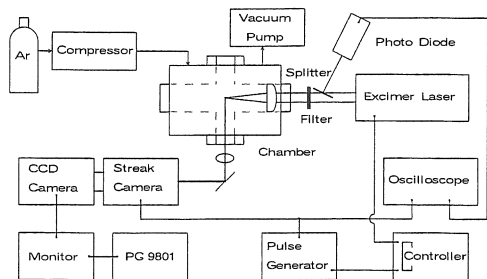


図 1 実験装置の配置図

2. 2 レーザパルス

エキシマレーザー光のパルス波形を図 2 に示す。これは、レーザー光の一部をスプリッターで反射させ、フォトダイオードにレーザー光の一部入射させる事によ

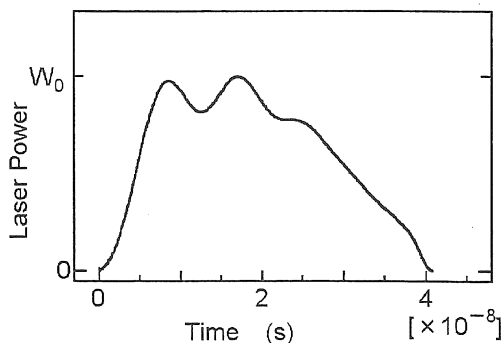


図 2 レーザパルス

って測定した。レーザーパルスは複雑な形をしているが、半値幅 33ns の台形で近似できる。

3. 紫外線レーザーによって生成したプラズマの特徴

エキシマレーザーによって生成されたプラズマの電子密度は、波長 488nm、最大パワー 15mW のアルゴンイオンレーザーを用いて干渉計を構成し、フリッジの変化から測定した結果、レーザーパワーが 15MW の時、150 気圧までほぼ完全に電離しており、電子密度は 10^{27}m^{-3} に達することが分かった。しかし、圧力が 100 気圧を超えた場合レーザーパワーが低くなると電子密度は急激に低くなった。また、電子密度は焦点で一番高く、前方より後方が低くなった。

線スペクトル強度比と連続光から求めた、電子温度は集光レンズの焦点において 10^6K 程度になった。しかし、電子温度も電子密度同様、圧力が 100 気圧を超えた場合、レーザーパワーが低くなると急激に低くなった。また、温度分布は焦点で一番高く前方より後方が高くなった。

また、プラズマ周波数とレーザー光の周波数を比較した。その結果、可視光と異なり紫外線レーザー光の周波数は、プラズマ周波数より数倍高く、レーザー光はプラズマ中を透過出来ることが分かった。

4. プラズマストリーク像

ある光強度でしきい値をとったプラズマのストリーク像を図 3 に示す。この図は、上から下に向かって時間掃引しており、横方向はプラズマの大きさを表し、境界の内側はプラズマを示す。図よりプラズマは、最初集光レンズの焦点において生成され、前

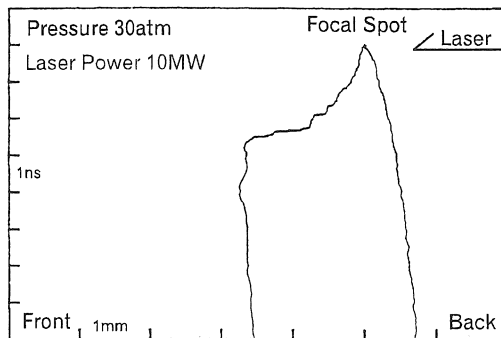


図 3 プラズマストリーク像

方と後方に非対称に成長していることが分かる。そこで、前方と後方に成長するプラズマの成長の様子を比較してみると、前方に成長するプラズマは、時間と共に成長速度が速くなり、レーザー光照射中にも関わらず成長が止まり、その後減衰する。しかし、後方に成長するプラズマは、時間と共に成長速度が遅くなる事が分かる。

5. プラズマ半径方向の大きさの測定

プラズマ半径方向の測定は、図1に示す実験装置において、ストリークカメラとCCDカメラを横に倒して、プラズマ半径方向の測定を行った。このようにして得られたプラズマ半径方向のストリーク像を図4に示す。図の横方向はプラズマ半径方向の大きさを表している。このストリーク像を用いてプラズマ半径方向の大きさを求める時は、レーザーパルス終了時のプラズマの大きさをを用いた。また、光軸に水平な方向のプラズマ半径方向の大きさを測定する時は、チャンバーを横に倒し、チャンバー上部の窓から測定した。このようにして求めた、プラズマ半径方向の測定値を図5に示す。図5aは、レーザー光の短径方向のプラズマ半径を表し、図5bは、レーザー光の長径方向のプラズマ半径をそれぞれ表す。また、実線は理論計算によって求めた、集光したレーザー光の光路を表し、白丸又は黒丸はプラズマ半径方向のストリーク像から求めたプラズマ半径方向の大きさを表す。図より、焦点後方において理論光路とプラズマ半径方向の大きさは、ほぼ等しい。しかし、前方におけるプラズマ半径方向の大きさは、理論光路より小さくなった。これは、前方プラズマの成長

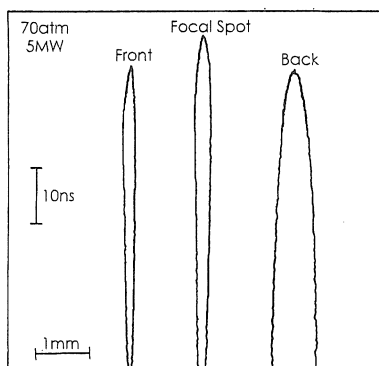


図4 プラズマ半径方向ストリーク像

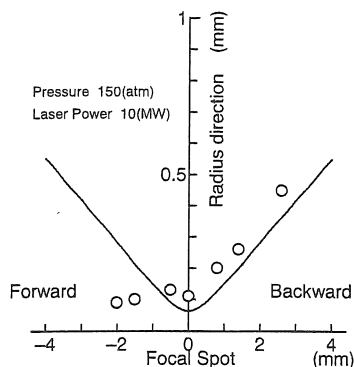


図5a プラズマ半径方向（レーザー光の短径方向）

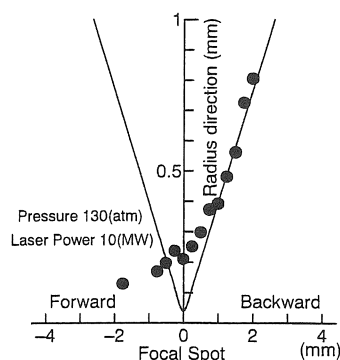


図5b プラズマ半径方向（レーザー光の長径方向）

にレーザー光の自己収束効果が作用しているためであると考えられる。また、焦点では実験によって求めたプラズマ半径方向の大きさは約2.3倍程度、焦点より大きい。これは、集光レンズの焦点において収差が生じている為ではないかと考えられる。

6. プラズマ長の測定結果

プラズマの形状を調べるために、プラズマ長について測定した結果を以下に示す。

6.1 後方プラズマ長

後方プラズマ長のレーザーパワー依存性について調べた結果を図6に示す。後方プラズマ長は、レーザーパワーの増加に伴い長くなっている事が分かる。また、集光レンズの焦点距離が長くなるに従い後方プラズマ長が長くなった。これは、焦点距離が長くなるとレンズの集光角が小さくなるためであると考えられる。

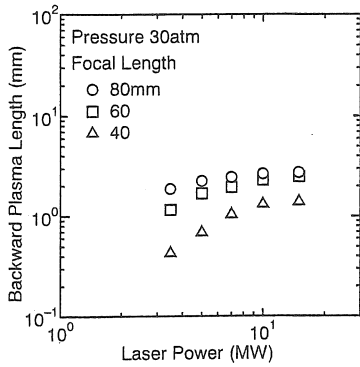


図 6 後方プラズマ長のレーザーパワー依存性

6. 2 前方プラズマ長

前方プラズマ長のレーザーパワー依存性について調べた結果を図 7 に示す。図より、レーザーパワーが高くなると、前方プラズマ長はわずかに短くなった。また、焦点距離が長くなるほど、前方プラズマ長は短くなった。プラズマの前方成長は、レーザー光の周波数がプラズマ周波数より約二倍程高いために、レーザー光がプラズマ中を透過し、前方に成長すると考えられる。しかしながら、集光レンズの焦点距離やレーザーパワーの増加に伴い、後方プラズマ長も長くなる。レーザー光は後方プラズマにより吸収されるので、前方プラズマ長は、レーザーパワーの増加に伴い短くなったと考えられる。

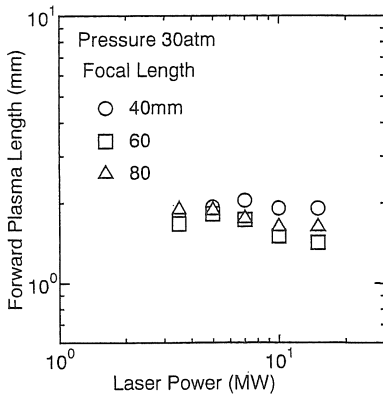


図 7 前方プラズマ長のレーザーパワー依存性

6. 3 プラズマの形状

プラズマの形状を模式的に図 8 に示す。プラズマは図に示すように、前方後方二つの円錐形で構成され、後方の円錐は頂角が大きな円錐形で、前方は頂角の小さな円錐形で構成されると考えられる。

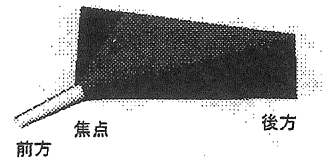


図 8 プラズマの形状

7. レーザ光のエネルギー分布

レーザー光のエネルギー分布は、レーザー光の光路にスプリッターを入れ一部を反射させ、受光面に直径 1mm の穴の空いたスリットを付けたフォトダイオードをマイクロメータ付き X ステージと Z ステージにのせて測定した。レーザーパルスの横方向のエネルギー分布を図 9a に縦方向のエネルギー分布を図 9b に示す。図より、レーザー光のエネルギー分布は均一ではなく、中心部分とサイド部分で強度差が存在する事が分かった。この為、集光レンズの焦点における破壊にレンズの収差の影響は、ほとんど無いと考えられる。

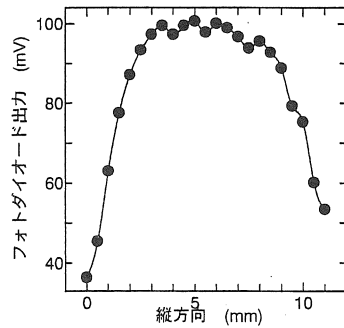


図 9 a エネルギー分布 (レーザー光の短径方向)

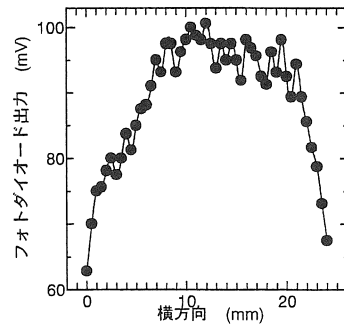


図 9 b エネルギー分布 (レーザー光の長径方向)

8. レンズの焦点距離の移動

レーザ光が破壊のしきい値付近の時、圧力が増加すると絶縁破壊が生じる場所が集光レンズの焦点から光軸前方に移動する現象が実験中に観測された。レーザ光は、レンズによって集光されているので光強度は集光レンズの焦点が最も高いと考えられる。この為、圧力の増加に伴い、集光レンズの焦点距離が増加したのではないかと考えた。そこで、気体の屈折率を考慮した集光レンズの実効的な焦点距離を求め、実験結果と比較した。レンズは、焦点から出た光がレンズを透過した後、平行ビームになるように設計されている。この為、実効焦点距離 F を求めると以下のような式で表される。

$$F = \frac{r^2 - (n^2/n_x^2 - 1)T_d^2}{2(n/n_x - 1)T_d} \quad (1)$$

ここで、 r は光軸から平行ビームまでの距離、 n はレンズの屈折率、 n_x は高圧気体中の屈折率、 T_d はレンズの厚みを表す。

気体の屈折率の圧力依存性は、圧力 p を用いると以下のように表される。

$$n_x = 1 + p(n_{x0} - 1) \quad (2)$$

上式を用い、圧力の増加による屈折率の増加が 1 より大きく離れていない時は次式で近似される。

$$F_x \approx \left(1 + \frac{p(n_{x0} - 1)n}{n - 1}\right)F \quad (3)$$

上式より、実効焦点距離は圧力の増加に伴い増加する事が分かる。上式を、用いて計算した理論計算値と実験によって求めた値を比較した結果を図 10 に示す。図より実験結果と理論計算値は、ほぼ一致することが分かった。以上の結果から、圧力が高くなると、レンズの実効的な焦点距離が 150 気圧で数 mm と無視出来ないことが分かった。

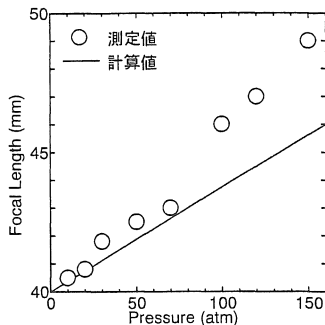


図 10 焦点距離の圧力依存性

9. 収差の検討

焦点前方へのプラズマの成長がレンズの収差の影響であるかどうか実験を行い確認した。焦点距離 40mm のレンズで 11×24mm のレーザ光を集光したときのレーザ光の光路を光線追跡法で計算したものとレンズの球面収差を計算した結果を図 11 に示す。図よりレーザ光が長方形の為、焦点において収差が生じ、焦点距離がレーザ光の長径と短径で異なっている事が分かる。そこで、実際の収差がどれくらいか計算したところ約 4mm の収差が存在する事が分かった。

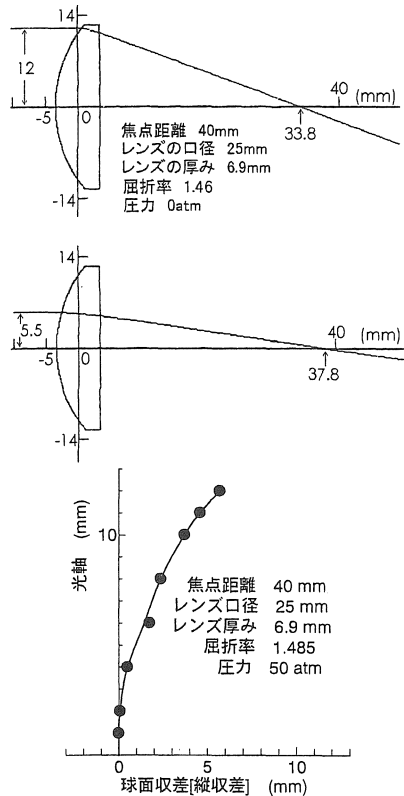


図 11 レンズの収差

そこで、レーザ光の光路に直径 11mm のスリットを入れ、収差の影響を調べた結果を図 12 に示す。この図は、中心が穴のスリットと外側に穴を開けたスリットを入れた場合、集光レンズの焦点の位置を測定した結果を表したものである。図より、中心に穴を開けたスリットを入れた場合、スリットがない時と焦点の位置がほとんど同じである事が分かった。

よって、前方成長が集光レンズの収差の影響によるものでない事が分かった。

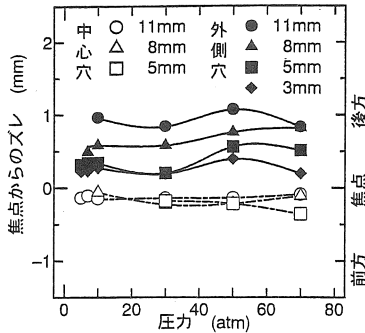


図 1 2 スリットを入れた場合の収差の影響

10. 総括

高圧ガス中に紫外線領域で発振するエキシマレーザー光を集光照射したところプラズマは焦点後方ばかりでなく前方にも成長した。そこで、プラズマ半径方向の大きさを測定したところ、焦点前方においてプラズマは自己収束していることが確認された。

レンズの収差を計算したところ、約 4mm の収差が確認された。しかし、レーザー光の光軸上にスリッ

トを入れ、収差の影響を測定した所、前方プラズマ成長に収差の影響はほとんど無いことが分かった。

高圧ガス中にレーザー光を集光照射して生成したプラズマは大きさの異なる二つの円錐形で構成され、それぞれの形状は、後方は頂角の大きな円錐形で、前方は頂角の小さな円錐形であることが分かった。

参考文献

- 1) R. G. Mayerrand and A. F. Haught: Gas Breakdown at the Optical Frequencies, Phys. Rev. Letters, vol.11, pp401, 1963.
- 2) Yu. P. Raizer: Sov. Phys. JETP vol.21, pp1009, 1965.
- 3) J. Yamada, T. Tamano and T. Okuda: Physical Properties of Laser Produced Dense Plasma in High-Pressure Argon Gases, Jpn. J. Appl. Phys, vol.60, pp907, 1991.
- 4) J. Yamada and T. Okuda: Development Mechanism of Laser Spark in High Pressure Argon Gas, Jpn. J. Appl. Phys, vol.18, pp139, 1979.
- 5) J. Yamada, N. Tsuda, Y. Uchida, H. Huruhashi and T. Sahashi: Trans. IEE Jpn. Vol.114A, pp303, 1994.

(受理 平成 11 年 3 月 20 日)