

レーザーイオン源のためのグラファイト結晶レーザープラズマの分析 ANALYSIS OF LASER PLASMA FROM GRAPHITE SINGLE CRYSTAL FOR LASER ION SOURCE

不破康裕^{#, A, B, C)}, 池田峻輔^{C, D)}, 熊木雅史^{C, E)}, Christine Truong^{F)}, 金末猛^{G)},

岡村昌宏^{G)}, 岩下芳久^{B)}

Yasuhiro Fuwa^{#, A, B, C)}, Shunsuke Ikeda^{C, D)}, Masafumi Kumaki^{C, E)}, Christine Truong^{F)}, Takeshi Kanetsue^{G)},
Masahiro Okamura^{G)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}

^{A)} Department of Physics and Astronomy, Kyoto University, Kyoto, Kyoto, Japan

^{B)} Institute for Chemical Research, Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan

^{C)} Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN, Wako, Saitama, Japan

^{D)} Department of Energy Science, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Kanagawa, Japan

^{E)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo, Japan

^{F)} Department of Applied Physics, New York University Polytechnic School of Engineering, Brooklyn, NY 11201

^{G)} Collider-Accelerator Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973

Abstract

To investigate efficient graphite material for carbon ion production in laser ion source, the properties of ions in laser plasma produced from a graphite single-crystal is measured. The graphite crystal target has anisotropic hexagonal layer lattice, therefore the target was irradiated by laser on two different conditions of surface. One of the surface has its normal vector that is parallel to c-axis of the graphite crystal, and the other has its normal vector that is perpendicular to the c-axis. The produced plasma temperature is higher in perpendicularly-irradiation case than in the parallel-irradiation case. Compared to the plasma from isotropic materials, the plasma produced from graphite crystal has less ions and plasma temperature is lower.

1. はじめに

レーザーイオン源は大強度かつ高強度のイオンビームを生成可能であり、この特性を活かして重イオンビームの入射器としての応用が期待されている[1,2]。レーザーイオン源ではレーザーとターゲットの相互作用により発生するレーザープラズマを、引き出し電極までドリフトさせ、電場でイオンを引き出すことによりイオンビームを生成している。そのため、レーザーイオン源から得られるイオンビームの電流・イオン価数・パルス幅はレーザープラズマの発生時の特性に大きく依存する。しかしながら、現状ではレーザープラズマの発生過程は完全に理解されているとは言えず、ターゲット材に要求される材料特性も十分議論されているとは言えない。

本研究では、大強度・高価数の炭素イオン源の開発を目指し、種々の炭素ターゲットを用いてレーザープラズマ中のイオン特性を分析している。これまで焼結炭素ブロック、アモルファス炭素、グラファイト結晶(c軸に対して30°の角度でレーザーを照射)をターゲット材とした実験を実施し、グラファイト結晶から得られるイオンが、非晶性カーボン(焼結炭素、アモルファス炭素)から得られるイオンに比べてToFが遅くイオン価数も低いなどプラズ

マ温度が低い傾向にあるという結果を得た[3]。

本発表では、グラファイト結晶をターゲットとして用い、c面上にレーザーを照射した場合とc軸に垂直な方向からレーザーを照射した場合に生成されるレーザープラズマ中のイオン特性の分析実験の結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 グラファイト結晶

グラファイト結晶の構造を図1に示す。グラフイ

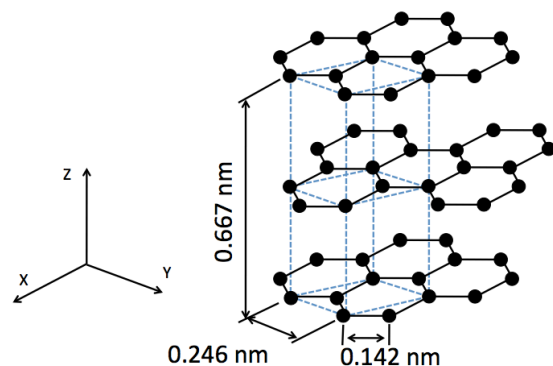


Figure 1: The structure of the graphite single crystal. The blue cuboid shows a unit cell.

[#] fuwa@kyticer.kuicr.kyoto-u.ac.jp

ト単結晶は6角形の基本構造を持った層が積み重なった構造を有しており、層の法線ベクトルの方向に取った軸(図中のz軸)をc軸と呼ぶ。本研究で使用したグラファイト結晶の大きさは長さ31.2 mm、幅12.7 mm、厚さ8.9 mmで厚さ方向がc軸と一致している。

実験では(a) c軸に対して30°の角度でレーザーを照射した場合と、(b) c軸に対して垂直な面に対して30°の角度からレーザーを照射した場合の2つの条件でレーザーを照射した(図2参照)。

2.2 レーザー照射・プラズマ分析系

実験装置の概略図を図3に示す。実験装置はレーザー照射系、ファラデーカップ及び価数分析系からなり、実験時のチャンバー内の真空度は 10^{-4} Pa程度であった。照射に使用したレーザーは最大エネルギー2.3 JのNd-YAGレーザー(SAGA 230)で、レーザーショットのパルス幅は6 nsecであった。ターゲットはx-yステージに取り付けられ照射毎に1 mm移動させることで常に新しい面にレーザーを照射した。照射部のレーザーパワー密度は 10^{12} - 10^{13} W/cm²である。ファラデーカップはイオン電流測定に用いられ、ターゲットから2.4 mの位置に設置されている。このファラデーカップは直径10 mmのアパーチャ、電子サプレッションメッシュ、検出電極からなり、メッシュに-3.5 kVの電圧を印加することでプラズマ中のイオン電流を測定することができる。価数分析系は偏光角90°、曲率半径10 cmの静電アナライザーと二次電子増倍管からなり二次電子増倍管までのプラズマドリフト距離は3.8 mである。

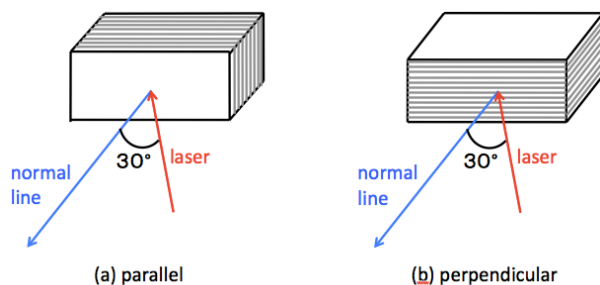


Figure 2: Laser irradiation geometry. Laser plasmas are propagate to target-normal direction (bleu arrows).

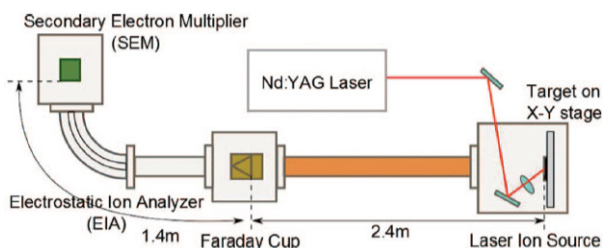


Figure 3: Schematic layout of the experimental setup.

る。

本実験ではレーザーエネルギーによるプラズマ特性の違いを評価するために各ターゲット配向に対してレーザーエネルギーを600 mJ、1800 mJの2つの条件で実験を実施した。

3. 実験結果

実験では、まず始めに最適なレーザー集束条件で実験を行うため、ファラデーカップで測定した電流の立ち上がり時間が最も速くなるようにレーザー集束レンズ位置を調整した。レンズ位置調整後のファラデーカップによる電流測定結果を図4に示す。この結果を見ると、同様のエネルギーでレーザーを照射した場合、レーザーをc軸と垂直方向に法線ベクトルを持つ面に照射した場合(図2の条件(b))の方が、レーザーをc軸と平行に法線ベクトルを持つ面に照射した場合(同、条件(a))と比べてToFが早いことがわかる。また、最大電流も同様に条件(b)の方が条件(a)と比べて大きい。また、この実験で得られた結果を、等方性炭素をレーザーターゲットに用いた場合(ピーク時のToF: 7 μsec、ピーク電流: 1.5 mJ)[3]と比較すると、ToFが遅くピーク電流も低いことがわかる。

次に、静電アナライザーを用いて価数分布を測定した。二次電子増倍管により測定された信号から再構成されたレーザープラズマ中の価数分布を図5-8に示す。また、図9-12はファラデーカップによる電流測定結果と価数分析結果から推定される各イオンの生成数を示す。これを見ると、条件(b)の方が若干6価の生成割合が多いものの、レーザーの照射方向がプラズマ中の価数分布に与える影響はあまり無いことがいえ。

4. 考察

実験の結果よりc軸に垂直な法線ベクトルを持つ面をレーザー照射面にした場合の方が、c軸に平

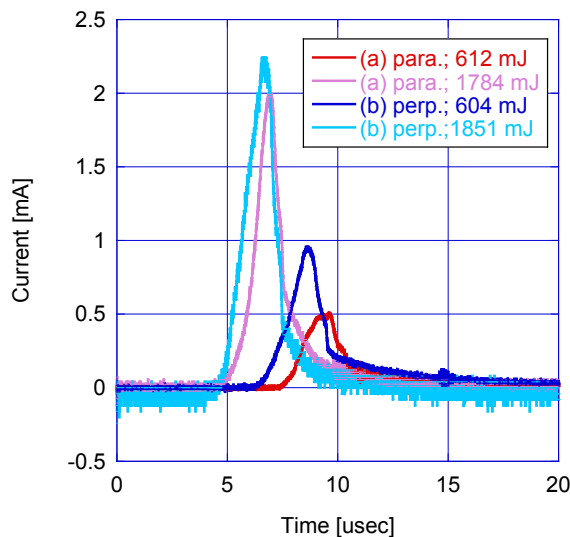


Figure 4: The structure of the graphite single crystal. The blue cuboid shows a unit lattice.

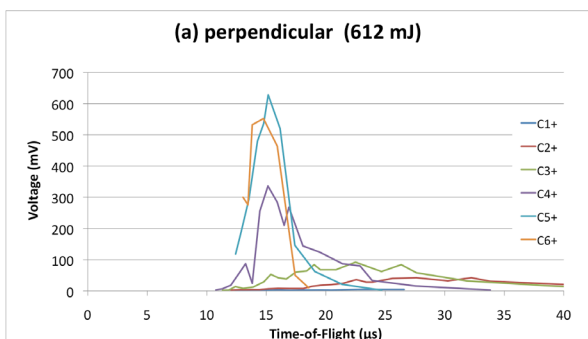


Figure 5: The result of charge state analysis. [(a) parallel, laser energy: 612 mJ].

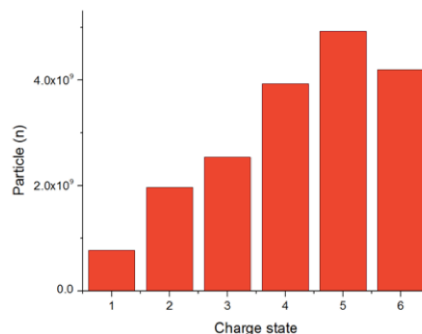


Figure 9: The estimated number of produced ions. [(a) parallel, laser energy: 612 mJ].

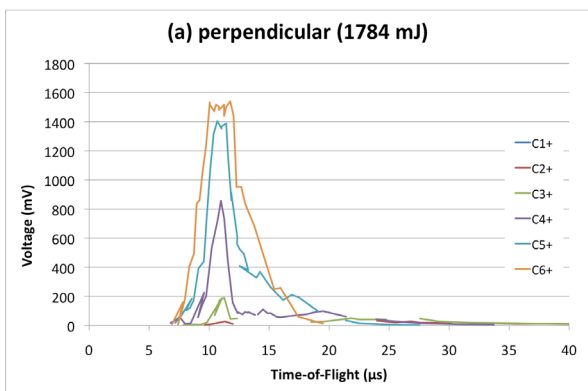


Figure 6: The result of charge state analysis. [(a) parallel, laser energy: 1784 mJ].

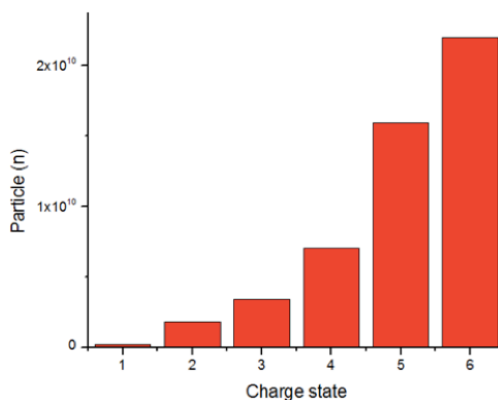


Figure 10: The estimated number of produced ions. [(a) parallel, laser energy: 1784 mJ].

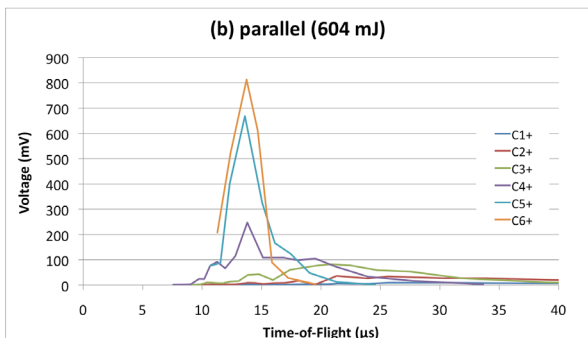


Figure 7: The result of charge state analysis. [(b) perpendicular, laser energy 604 mJ].

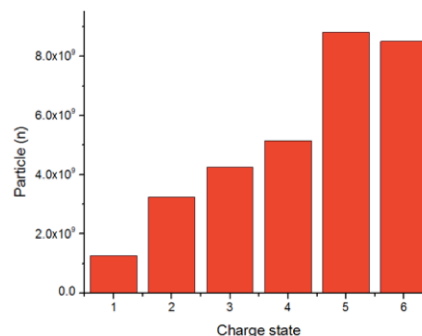


Figure 11: The estimated number of produced ions. [(b) perpendicular, laser energy: 604 mJ].

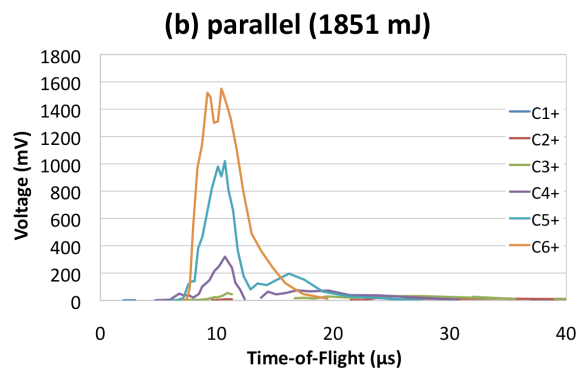


Figure 8: The result of charge state analysis. [(b) perpendicular, laser energy 1851 mJ].

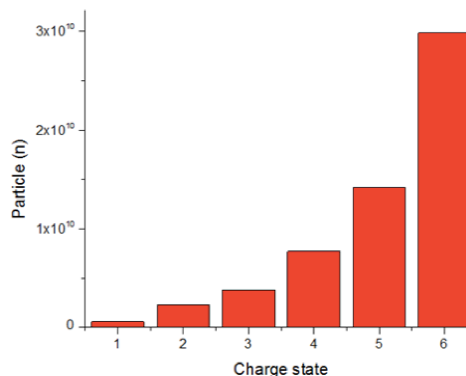


Figure 12: The estimated number of produced ions. [(b) perpendicular, laser energy: 1851 mJ].

行な法線ベクトルをもつ面をレーザー照射面とした場合よりプラズマ温度が高いこと傾向にあると言える。しかしながら、等方性炭素材料をターゲット材にした場合と比較すると、グラファイト結晶を用いた場合には、レーザー照射方向によらずプラズマ生成効率が低いと言える。

図 13 - 14 はレーザー照射後のグラファイト結晶表面の拡大写真である。なお、図 14 において紙面上横方向が c 軸に相当する。これを見ると、図 13 に示した照射条件(a)においてはターゲット上のクレーター周辺部においてグラファイト層構造が剥離していることがわかる。また、照射条件(b)においてもレーザー照射面において c 軸と平行・垂直方向にそれぞれ変色が見られる。この変色の原因は現状では不明であるが、プラズマの生成以外にエネルギーが消費されていることがわかる。

このエネルギー散逸やプラズマの生成効率をより詳細に評価することが今後の課題となる。

5. 結論

グラファイト結晶をレーザーイオン源のターゲット材として用い、その異方性による炭素イオン生成特性を測定した。それぞれの結果を等方性炭素材を用いた結果と比較したところ、グラファイト結晶のプラズマ生成効率が等方性炭素に比べて低いことが明らかとなった。

謝辞

本研究は理研の大学院生リサーチ・アソシエイト制度の元での成果です。

参考文献

- [1] S. Kondrashev, *et al.*, J. Appl. Phys. **100**, 103301 (2006).
- [2] M. Okamura, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02B314 (2008).
- [3] Y. Fuwa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 02B924 (2014).

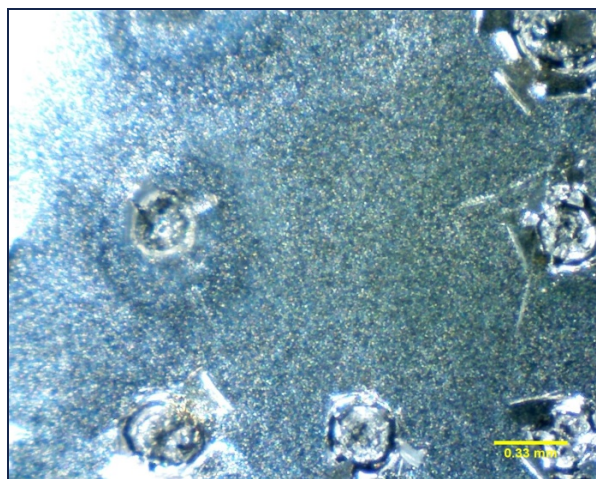


Figure 13: The image of laser irradiated surface. [laser irradiation condition: (a) parallel]

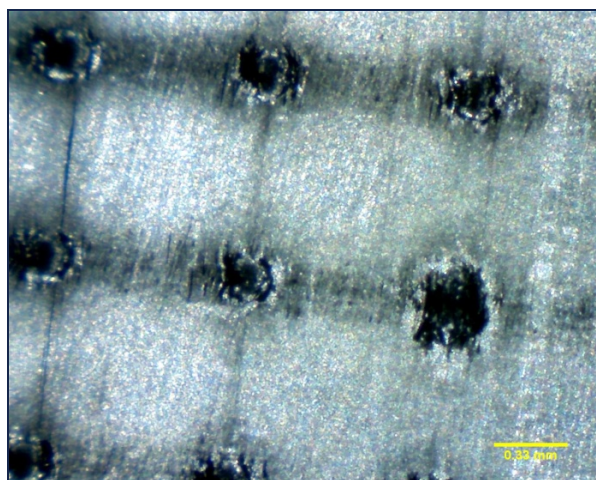


Figure 14: The image of laser irradiated surface. [laser irradiation condition: (b) perpendicular]