

## 炭化水素油ターゲットを用いたレーザーイオン源による 陽子および炭素イオン供給の検討

### SUPPLY OF PROTON AND CARBON ION FROM LASER ION SOURCE USING HYDROCARBON OIL TARGET

高橋一匡<sup>#</sup>, 片根弘登, 宮崎翔, 春川直都, 石黒薫子, 佐々木徹, 菊池崇志

Kazumasa Takahashi<sup>#</sup>, Hiroto Katane, Kakeru Miyazaki, Naoto Harukawa, Kaoru Ishikuro,

Toru Sasaki, Takashi Kikuchi

Nagaoka University of Technology

#### Abstract

The supply of high-flux protons and carbon ions by a laser ion source has been studied for applications such as accelerator-driven neutron sources and heavy ion beam therapy. In order to develop a laser ion source with a laser target which can avoid the laser irradiation damage on the laser target, we have studied a laser target whose surface is continuously renewed by flowing hydrocarbon oil instead of solid hydrocarbon. In this study, we used a hydrocarbon oil for an oil diffusion pump that can exist as a liquid under vacuum and has a low vapor pressure. The formation of ablation plasma was confirmed using the target with hydrocarbon oil with a flow velocity of 1.5 cm/s and displacement of the liquid level of about  $\pm 50 \mu\text{m}$ . As the result of investigating the ion current and pulse width of the ablation plasma, an ion current of 100 mA and a pulse width of 1  $\mu\text{s}$  were obtained at the position 135 mm from the laser target. In addition, as the result of ion charge-state analysis, protons and carbon ions were observed. Furthermore, it was found that the peak of current tended to decrease as the number of laser irradiation increased.

#### 1. はじめに

レーザーイオン源はレーザーをターゲットに照射して生成されるプラズマからイオンビームを引き出すイオン源であり、大電流イオンビームを得られるイオン源として期待されている。近年では素粒子物理や放射線生物学への応用で必要とされる金属イオンの供給に利用されているほか[1], レーザー生成プラズマを直接 RFQ 線形加速器に入射して得られる大電流ビーム[2-6]を利用した粒子線治療のための炭素ビーム[7], リチウムビームと水素標的による加速器駆動中性子源のリチウムドライバーなどのイオン源として検討が進んでいる[8, 9].

現在のレーザーイオン源の加速器運転における定常的な利用方法の例として、米国ブルックヘブン国立研究所における金属イオン供給が挙げられる。ここではレーザーパワー密度をアブレーションプラズマが生成される閾値程度に抑えて大電流低価数イオンの生成するためにレーザーイオン源が用いられており、多価イオンを得るには後段に設置された電子ビームイオン源 (EBIS) にレーザーイオン源から引き出したイオンを入射し電子衝撃でさらなるイオン化が行われている。このように低いレーザーパワー密度に抑えることでターゲット損傷を抑え、長期的に同じターゲット表面へレーザーを照射しても再現性のあるプラズマの生成を実現している[1].

一方で、レーザーイオン源単体で多価イオンを生成する場合や合金、セラミックスやプラスチックのような複数の元素を含有する化合物ターゲットを用いた場合、単一の元素をターゲットにする場合と比

較して所望のイオン種の量は減少してしまうため、この減少を補って大電流化するためにはレーザーのパワー密度を高める必要がある。レーザーパワー密度を大きくするとレーザー照射によるターゲットの損傷が大きくなり、レーザー照射毎に照射面を更新する必要が生じる。このような利用ではレーザー照射回数がターゲット面積に制限されるためレーザーイオン源の定常運転にはレーザーターゲットの寿命が課題となる。

そこで、この課題を解決するため、連続的にターゲット表面を更新可能な循環する液体をターゲットとしたレーザーイオン源を検討する。本研究では陽子および炭素イオンの供給を目的とし、炭化水素からなる液体をターゲットとした。そのような候補のうち、真空中で扱える液体として、蒸気圧の低い油拡散真空ポンプ用のオイルを採用した。このオイルを循環させることで連続的に表面が更新されるターゲットを用いたレーザーイオン源を構築し、発生するプラズマの特性および得られるプラズマの再現性について検討した。

#### 2. 実験装置

液体ターゲットとして Fig. 1 に示すように真空中で液体を循環させるような装置を構築し、真空チャンバーの外から回転導入機を利用してマグネットポンプを駆動することで液体を循環させた。使用した液体ターゲットは炭化水素(主にアルキルナフタレン)からなる油拡散ポンプ用の真空ポンプ油 (ULVOIL D-11) であり、実験環境の 20 °Cでの蒸気圧は  $7.3 \times 10^{-5}$  Pa である。

<sup>#</sup>kazumasa@vos.nagaokaut.ac.jp

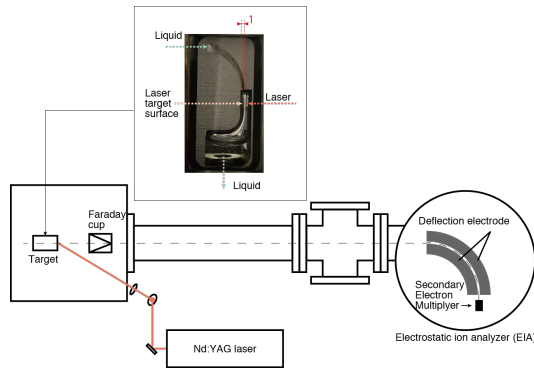


Figure 1: Schematic of experimental setup.

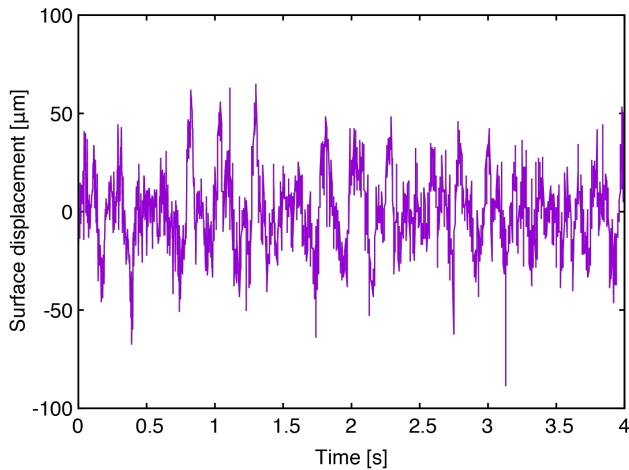


Figure 2: Surface displacement of the liquid laser target measured using a laser displacement sensor.

まず、液体ターゲットの液面の変動をレーザー変位計(LK-G85A, KEYENCE)で測定した結果、Fig. 2に示されるように変位は $\pm 50 \mu\text{m}$ 程度となった。発生するプラズマの特性はターゲット上でのレーザーのパワー密度に依存するが、このときの照射面の変動に伴うレーザーのスポットサイズの変動は1%未満であり、レーザーパワー密度にはほとんど影響を与えないと考えられる。また、液中の微細な気泡の移動を動画で観測することで流速を計測した結果、流速は $1.5 \text{ cm/s}$ であった。

本実験では真空チャンバー内の圧力 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ でプラズマ生成を行った。プラズマ生成に用いたレーザーはNd:YAGレーザーの2倍波(532 nm)であり、パルス幅16-18 ns、エネルギーは0.3 Jである。レーザーを焦点距離300 mmのレンズを用いてターゲット上に集光し、レーザーパワー密度 $1.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ で照射した。

また、生成したプラズマに対してファラデーカップを用いたイオン電流の測定を行った。ファラデーカップはレーザーターゲットから135 mmの位置に設置し、プラズマの電子を追い返すリターディングの電圧 $-30 \text{ V}$ を印加することでイオン電流を計測した。さらにファラデーカップを取り除き、後方に設

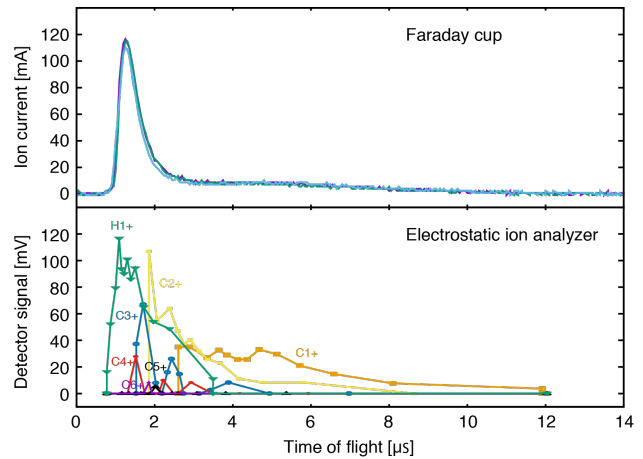


Figure 3: Ion current measured with a Faraday cup (upper) and the ion-state charge distribution using an electrostatic ion analyzer (lower).

置されている静電イオン分析器を用いた価数分析を行い、生成されたイオン種および価数を調べた。イオンの検出にはPHOTONIS社製チャンネルトロンMAGNUM5900を用いている。静電型の価数分析器は正負の電圧を印加した扇型の電極の間を、電場による向心力と遠心力が釣り合ったイオンだけが通過して信号を取得する。この信号を電極への印加電圧を変化させながら取得することでイオン価数の分布を得た。

### 3. 実験結果と考察

Figure 3の上図には連続する3ショットのレーザー照射で得られたイオン電流波形が示されており、この結果に示されるようにプラズマの生成が確認された。さらに発生したプラズマに対してイオン電流の測定および価数分析を行った結果、Fig. 3の下図に示されるように陽子および1価から6価までの炭素イオンが生成されていることが示された。このうち、陽子が他のイオンよりやや速く、炭素イオンは他のレーザーイオン源同様、高価数イオンほど速い傾向が示された。ここで、Fig. 3の価数分析のイオンの飛行時間は価数分析器までの飛行時間にファラデーカップまでの飛行距離 $L_F$ と価数分析器の検出器までの飛行距離 $L_{EIA}$ の比 $L_F/L_{EIA}$ をかけることで求めており、ファラデーカップの位置での価数分布を算出している。また、本実験ではターゲットから135 mmの位置で100 mA程度の電流と $1 \mu\text{s}$ 程度のパルス幅のイオン電流が得られたが、レーザーイオン源ではパルス幅 $\tau$ およびイオン電流密度 $j$ はレーザーターゲットからのプラズマ輸送距離 $L$ に対してそれぞれ $\tau \propto L, j \propto L^{-3}$ の関係があるため、任意の位置でのイオン電流およびパルス幅はこれらの関係を用いて算出することが可能である。

さらに、液体をターゲットとした際に得られるアブレーションプラズマの再現性を検討した。Figure 4は同じ条件でレーザーを繰り返し照射した際にファ

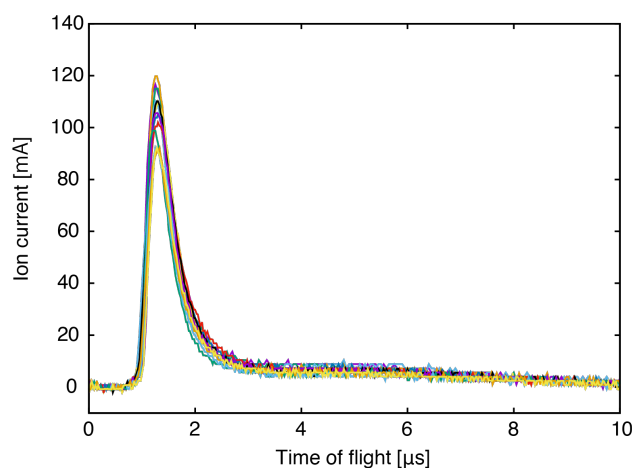


Figure 4: Ion current waveforms measured using a Faraday cup with the same condition.

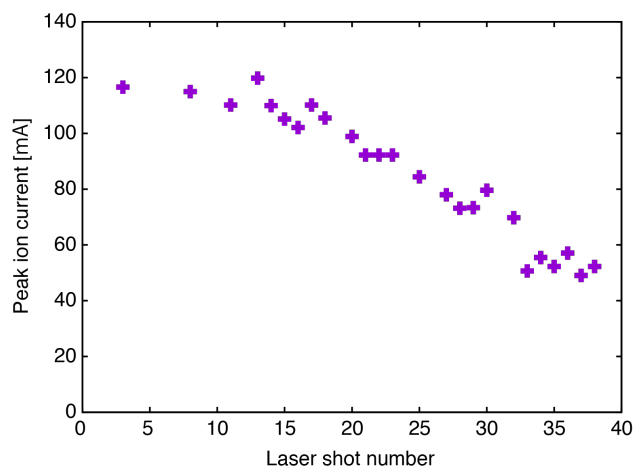


Figure 5: Variation of the peak value of ion current waveform as a function of the number of laser irradiation.

ラダーカップで測定したイオン電流波形を重ねたものであり、Fig. 5はFig. 4で得られたイオン電流波形のピークをレーザー照射回数に対してプロットしたものである。この結果、レーザー照射回数が増加するにつれて電流のピークが減少していく傾向が示された。この原因については現在調査中であり、今後原因の究明および改善の方法について検討をしていく予定である。

#### 4. まとめ

従来レーザーイオン源のレーザーターゲットには固体が用いられてきたが、レーザー照射によるターゲット損耗を回避するため、循環する液体を利用してレーザー照射面が連続的に更新されるターゲットを提案し、液体をターゲットにした際に得られるアブレーションプラズマの特性を調べた。本研究では陽子と炭素イオンの供給を目的とし、蒸気圧の低い油拡散真空ポンプ用炭化水素油を用いた液体ター

ゲットレーザーイオン源開発に向けて陽子と炭素イオン供給の特性とイオン電流の再現性を調べた。その結果、レーザー照射面の変動が少ない液体ターゲットを形成し、レーザーを照射することで陽子および炭素イオンが得られることを実証した。一方で、レーザー照射回数とともにイオン電流が減っていく傾向が示された。このイオン電流の減少の原因の解明と改善は今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] M. Okamura *et al.*, “Performance of the low charge state laser ion source in BNL”, in Proc. 2nd North American Particle Accelerator Conference (NAPAC2016), Chicago, IL, USA, 2016, pp. 49-53.
- [2] M. Okamura *et al.*, “Simulation of direct injection scheme for RFQ linac”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 761-763.
- [3] T. Takeuchi *et al.*, “Acceleration of heavy ion beams by means of direct injection into RFQ Linac”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 764-766.
- [4] T. Takeuchi *et al.*, “Measurement of the laser plasma properties of the direct plasma injection method to the RFQ LINAC on the RIKEN laser ion source”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 767-769.
- [5] H. Kashiwagi *et al.*, “Nd-YAG laser ion source for direct injection scheme”, Rev. Sci. Instrum. 87, 2004, pp. 1569-1571.
- [6] M. Okamura *et al.*, “Direct plasma injection scheme in accelerators (invited)”, Rev. Sci. Instrum. 79, 2008, pp. 02B314-1-5.
- [7] T. Sako *et al.*, “Development of C6+ laser ion source and RFQ linac for carbon ion radiotherapy”, Rev. Sci. Instrum. 87, 2016, pp. 02C109-1-3.
- [8] S. Ikeda *et al.*, “Neutron generator based on intense lithium beam driver”, Rev. Sci. Instrum. 91, 2020, pp. 023304-1-5.
- [9] A. Cannavò *et al.*, “Optimization of laser-target parameters for the production of stable lithium beam”, Rev. Sci. Instrum. 91, 2020, pp. 033317-1-5.