

液体金属をターゲットとしたレーザーイオン源の基礎的検討

STUDY ON BASIC CHARACTERISTICS OF LASER ION SOURCE USING LIQUID METAL TARGET

高橋 一匡[#], 宮崎 翔, 春川 直都, 石黒 薫子, 石川 慎也, 佐々木 徹, 菊池 崇志
Kazumasa Takahashi[#], Kakeru Miyazaki, Naoto Harukawa, Kaoru Ishikuro, Shinya Ishikawa,
Toru Sasaki, Takashi Kikuchi
Nagaoka University of Technology

Abstract

The development of a long-life laser target is an issue in the continuous operation of the laser ion source. We have suggested using a liquid target that can recover from surface damage by laser irradiations. In this study, a low melting point alloy, U-alloy, was used as a liquid metal target. We investigated the behavior of liquid metal surface after laser irradiation with single shots and 10 Hz irradiation to understand the characteristics of surface recovery. Also, the ion current waveforms were measured to investigate the reproducibility of the plasma generation. As a result, it was found that the liquid after laser irradiation oscillates with a natural frequency that depends on the geometry of the liquid container. The results also indicated that the reproducibility of laser irradiation with 10 Hz was worse than that with single shots. On the other hand, the standard deviation normalized by the average value of the peak ion current was similar between the single shot and 10 Hz irradiation.

1. はじめに

レーザーイオン源は所望の元素を含有するターゲットにレーザーを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、高価数や大電流イオンビームを比較的簡易な装置で得られるイオン源として利用される。近年では素粒子物理実験で利用する金イオンや放射線生物学への応用で必要とされる様々な金属イオンの供給に利用されている[1]。また、プラズマから引き出されるイオンを低エネルギービーム輸送系 (Low Energy Beam Transport, LEBT) を経由せずに、直接 RFQ 線形加速器に入射するプラズマ直接入射法 (Direct Plasma Injection Scheme, DPIS)[2-6] を適用することで、より大電流ビームの加速が可能である。これを利用した粒子線治療のための炭素ビーム[7] やリチウムビームと水素標的による inverse kinematic reaction[8] を利用した指向性の高い中性子を発生す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[9-11]。

レーザーイオン源が加速器運転に使用されている例として米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)の金属イオンの供給がある。ここでは、レーザー出力密度をアブレーションプラズマ生成の閾値近傍に抑えたレーザーイオン源を用いて大電流低価数イオンを生成している。その後、RFQ 線形加速器で加速する前に高価数イオンを得るため、レーザーイオン源から取り出したイオンを後段に設置した電子ビームイオン源 (EBIS) に入射し、電子衝突によりさらに電離させている。このようにレーザーの出力密度を低くすることでターゲットの損傷を最小限に抑え、同じターゲット表面に長時間レーザーを照射しても長期

間にわたり再現性のあるプラズマを発生させて運用している[1]。

一方、レーザーイオン源単独で高価数イオンを生成する場合や、複数の元素を含む合金や化合物などのターゲットを使用する場合、単一元素ターゲットの場合に比べて所望のイオン種が減少する。そのため、所望のイオン種を大電流で得るためにはレーザーの出力密度を大きくする必要がある。しかし、レーザーの出力密度が大きくな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、レーザー照射のたびに照射面を新しくする必要がある。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、レーザーイオン源の定常的な動作のためにはレーザーターゲットの寿命が問題となる。

そこで、この課題を解決するため、ターゲット表面を回復可能な液体をターゲットとしたレーザーイオン源を検討する。本研究では比較的融点の合金である U-アロイを用いて静的に設置された状態の液体金属ターゲットを検討した。液体金属表面に繰り返しレーザーを照射し、液体表面の振る舞いの観測およびイオン電流を計測することでイオン電流波形の再現性に与える影響を調べた。

2. 実験装置

本実験では Fig. 1 に示すように器に入った液体金属に対して上からレーザーを照射する装置を構築し、真空チャンバー内の圧力 5×10^{-3} Pa でプラズマ生成を行った。液体ターゲットとして大気圧での融点が 60°C の In, Bi, Sn の合金である U-アロイ 60 を使い、直径 13 mm、深さ 8 mm の液体金属として準備した。フィルムシートヒーター (東京技研, FSHH-P2-50-1.1A) で加熱した台に液体金属を入れた真鍮製の容器を乗せて液体金属の加熱を行い、容器に取り付け

[#]kazumasa@vos.nagaokaut.ac.jp

た K 型熱電対で温度を計測した. レーザー照射時の温度は 100°C とした.

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 0.13, 0.15, 0.17 J の 3 パターンとした. 焦点距離 500 mm のレンズをターゲット表面から 245 mm に設置してレーザーをターゲット上に集光し, レーザーパワー密度 $8.8 \times 10^8 - 1.1 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ で液体金属ターゲットの中心に照射した. また, 生成したプラズマに対して直径 1 mm のアパーチャをもつ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 38 mm の位置に設置し, 同時に測定するレーザー変位計(LK-G85A, KEYENCE)のレーザー光を避けるため, レーザー照射の正面から 10 mm の位置にアパーチャがくるように設置した. プラズマの電子を追い返すリターディングの電圧 -50 V を印加することでイオン電流を計測した.

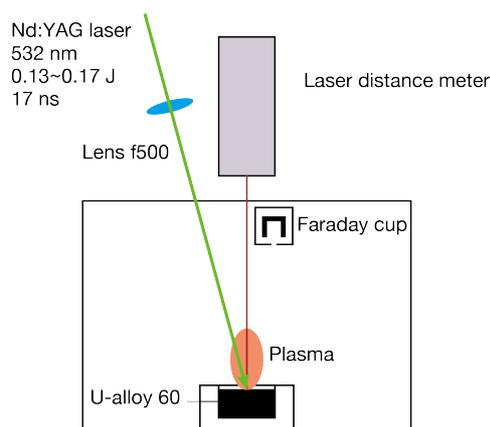


Figure 1: Schematic of experimental setup for measurement of plasma ion current and observation of liquid surface oscillation.

3. 実験結果と考察

まず, レーザーで照射した液体金属の表面の変動をレーザー変位計で測定した. レーザーのエネルギーとして 0.13-0.17 J で変化させた場合の表面の変動が Fig. 2 に示されており, レーザーエネルギーが大きいほど振幅も大きくなったが, 振動の周期には大きな変化が見られなかった. また, 減衰の時定数は 0.29 s 程度となり, 図に示されるように 1 s 程度で振動はほぼ消失した.

この振動をフーリエ変換(FFT)により解析した結果, Fig. 3 に示されるように振動開始から振動が収まるまでの間で FFT 解析すると 12 Hz が主な振動数として現れ, そのほかにも様々な周波数成分が含まれていた. 一方で, レーザー照射から少し減衰して 0.3 s ほど経過後はほとんど 12 Hz の振動のみが残っている.

この振動の特性を決定する要因を調べるため, 容器形状により定まる液体の固有振動数 f_{ij} (周方向 i 次, 径方向 j 次のモード) を以下の式によって見積もった[12].

$$f_{ij} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{v_{ij} \frac{g}{R} \tanh\left(v_{ij} \frac{h}{R}\right)}. \quad (1)$$

ここで, v_{ij} は $J_i'(v) = 0$ の第 j 番目の正根 ($J_i(v)$: 第 1 種 i 次ベッセル関数), g は重力加速度, h は液体容器底面からの液面高さ, R は液体容器半径である. この見積もりから周方向 0 次, 半径方向 1 次の固有振動数 f_{01} のモードが 12 Hz であり, 表面は主にこのモードで振動していることが明らかになった. レーザー照射直後に見られる他の振動数のピークは高次の固有振動数とも一致しなかった. これらの解析から, 軸対称容器中心へのレーザー照射直後は様々な周波数の振動が励起されるが主な液面揺動として残り, 減衰を決めるのは f_{01} モードの固有振動であることが示唆された.

続いて液体金属にレーザーを照射して得られるイオン電流信号の再現性について検討した. Figure 4 には同一の条件での 20 ショットのレーザー照射で得ら

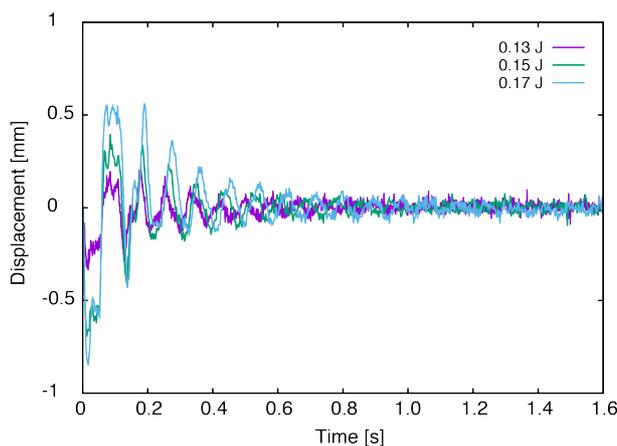


Figure 2: Surface variation of the liquid laser target measured for laser energy with 0.13, 0.15, and 0.17 J using a laser displacement sensor.

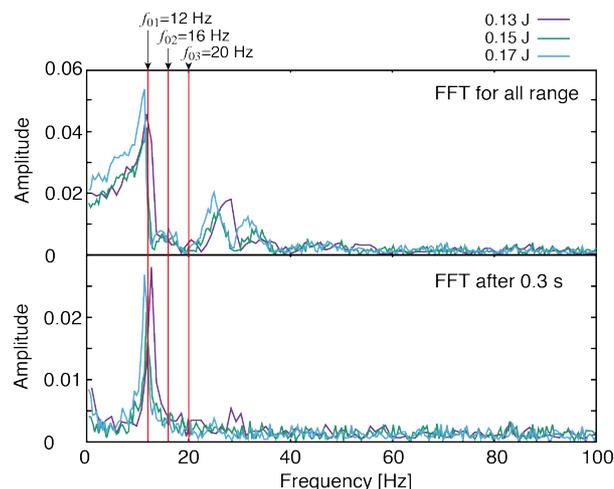


Figure 3: FFT analysis of surface oscillation shown in Fig. 2. The analysis was performed for the ranges of whole time and after 0.3 s from the laser irradiation.

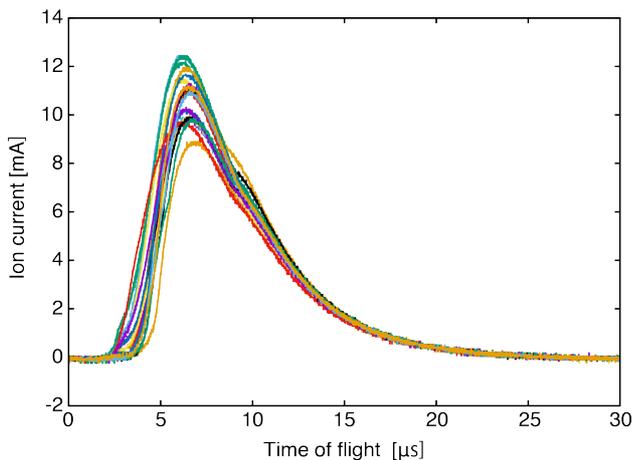


Figure 4: Ion current waveforms measured by 20 laser irradiation under the same condition.

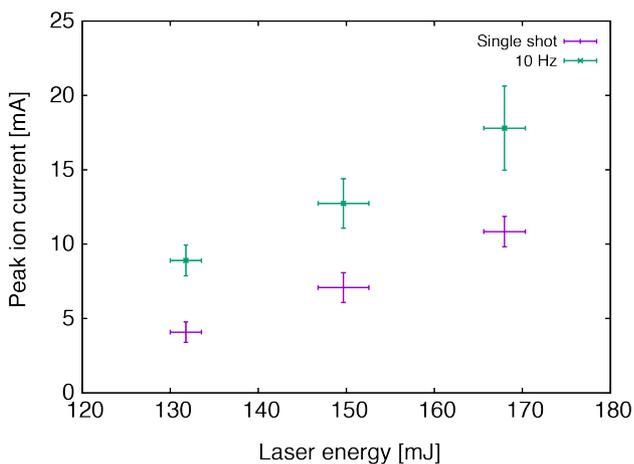


Figure 5: Peak ion current obtained by single shots and 10 Hz irradiations as a function of laser energy. The error bars indicate standard deviations of signals and laser energies.

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概ね相似なイオン電流波形のプラズマの生成が確認された。

さらに、シングルショットおよび 10 Hz でレーザーを照射した際に得られた電流波形のピークの変化について調べた結果を Figure 5 に示す。図に示されるように、シングルショットと 10 Hz 照射のいずれの条件でも、レーザーエネルギーとともにイオン電流は増加し、10 Hz 照射ではシングルショットに比較してイオン電流が増加した。これは振動中の表面へレーザー照射したことによりプラズマ噴出方向がファラデーカップ側へ変化したことを示唆している可能性がある。

また、Fig. 6 はレーザー照射毎のプラズマ生成の再現性に注目するため、レーザーエネルギーに対して Fig. 5 の結果のエラーバーに示されるピークイオン電流の標準偏差を縦軸としたグラフである。Fig. 6(a) に示されるようにレーザーエネルギーの増加に対し、シングルショットではピークイオン電流の標準偏差

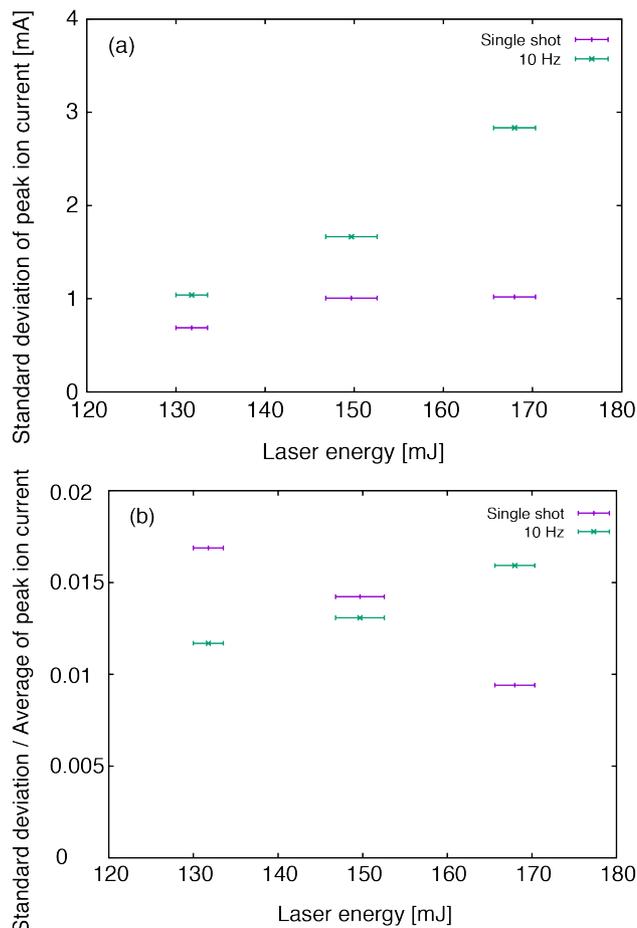


Figure 6: (a) Standard deviation of peak ion current and (b) the standard deviation normalized by averaged value of peak ion current as a function of laser energy.

は大きく増えなかったが、10 Hz の照射では増加した。一方で、Fig. 6(b)に示されるように平均値で規格化したばらつきはシングルショットでは減少する傾向がみられた。ただし、ピークイオン電流のばらつきのオーダーは同程度 (1-2%程度)であり、極端な差は確認されなかった。

4. まとめ

レーザーイオン源のターゲットとして低融点の合金である U-アロイを用い、静的に設置された状態の液体金属に対してレーザーを照射した際の応答について検討した。液体金属表面に繰り返しレーザーを照射し、イオン電流を計測することで液体表面の振る舞いの観測し、イオン電流波形の再現性に与える影響を調べた。その結果、レーザー照射後の液体は液体容器の形状に依存した固有振動数で揺動することが明らかになった。また、シングルショットと 10 Hz のレーザー照射による再現性の比較のため、イオン電流のピークのばらつきを調べた結果、10 Hz のレーザー照射の方がシングルショット照射時よりもイオン電流のばらつきが大きくなることが示された。一方で、平均値で規格化したピークイオン電流

のばらつきはシングルショットと 10 Hz 照射時で同程度となった。

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] M. Lebois *et al.*, “Development of a kinematically focused neutron source with the p (${}^7\text{Li}$, n) ${}^7\text{Be}$ inverse reaction,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip., vol. 735, 2014, pp. 145-151.
- [9] S. Ikeda *et al.*, “Neutron generator based on intense lithium beam driver”, Rev. Sci. Instrum. 91, 2020, pp. 023304-1-5.
- [10] 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.
- [11] M. Okamura *et al.*, “Demonstration of an intense lithium beam for forward-directed pulsed neutron generation,” Sci. Rep., 12(1), 2022, p. 14016.
- [12] 大山 巧, 「円筒容器内の非線形スロッシング現象の解析」, 土木学会論文集, 第 417 号/II-13, 1990, pp. 255-264.