

# マルチカスプ磁場ガイディングを用いたレーザーイオン源の長パルス化 ELONGATION OF PULSE WIDTH FOR LASER ION SOURCE WITH GUIDING BY MULTICUSP MAGNETIC FIELD

高橋一匡<sup>#,A)</sup>, 梅澤 将充<sup>A)</sup>, 内野 拓海<sup>A)</sup>, 池上 京祐<sup>A)</sup>, 佐々木徹<sup>A)</sup>, 菊池崇志<sup>A)</sup>, 原田信弘<sup>A)</sup>  
Kazumasa Takahashi<sup>#,A)</sup>, Masamichi Umezawa<sup>A)</sup>, Takumi Uchino<sup>A)</sup>, Keisuke Ikegami,  
Toru Sasaki<sup>A)</sup>, Takashi Kikuchi<sup>A)</sup>, Nob. Harada<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Nagaoka University of Technology

## Abstract

We have demonstrated the laser plasma guiding using a multicusp magnetic field generated with eight neodymium magnets for elongating pulse width and increasing ion current of laser ion source. A Nd:YAG laser with wavelength of 532 nm was employed to generate laser ablation plasma. Various materials such as aluminum, copper, and lead were examined for laser targets. Plasma ion current was measured as a function of distance from the laser target with a biased Faraday cup. The results indicated that ion current in the magnetic field was higher than that without the magnetic field and pulse width increased as without the magnetic field.

## 1. はじめに

レーザーと真空容器および真空排気系から成る装置構成で、固体ターゲットから高価数や大電流のイオンを供給することができるレーザーイオン源が注目されている。レーザーアブレーションプラズマの生成にはパルスレーザーが用いられ、パルスの生成されたプラズマはターゲット面に対して垂直方向にドリフト速度をもって膨張する。任意のパルス幅を持つイオンビーム形成のため、レーザーターゲットからイオンビームの引き出し電極までのプラズマの自由膨張距離を長くすることにより、ビームのパルス幅を伸ばすことが可能である。一方で、プラズマ密度の低下によって、引き出されるイオンビームの電流密度が大きく低下する。

ソレノイド磁場の印加によりイオン電流の増加が可能であることが示されているが<sup>[1-4]</sup>、永久磁石により形成した磁場によってプラズマのガイディングが可能であれば、磁場の形成に電源を必要としない簡便な装置構成でイオン源の電流増加が期待できる。これまでにリング状の永久磁石を並べることにより交番磁場を形成し、プラズマの輸送が試みられたが、磁束密度の変動に伴いプラズマ密度の変動が示された<sup>[5]</sup>。

本研究では、アブレーションプラズマが磁場中を移動しないよう、輸送管中央部で磁束密度の小さくなる多数の極をもつマルチカスプ磁場によるプラズマのガイディングを検討した。進行方向以外の膨張を抑制しながらプラズマを輸送し、イオン密度の低下を抑えて長パルス化させることを目的とし、輸送距離を変えてイオン電流波形を測定することにより、マルチカスプ状の磁場配位が輸送中のプラズマに与える影響を調べた。

## 2. 実験装置および方法

エネルギー402 mJ および波長 532 nm の Nd:YAG レーザーをターゲット面垂直方向から 60°の角度で入射し、レンズによってターゲット上に集光させて照射強度  $2 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> でアブレーションプラズマを生成した。ターゲットにはアルミニウム、銅および鉛を用いた。また、Figure 1 に実験セットアップの概略図を示す。プラズマ輸送管の外側に8個のネオ

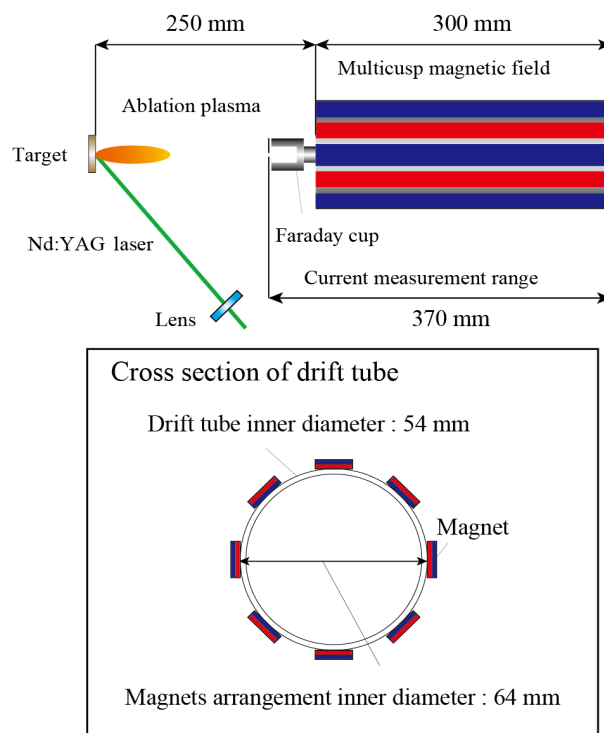


Figure 1: Schematic of experimental setup.

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

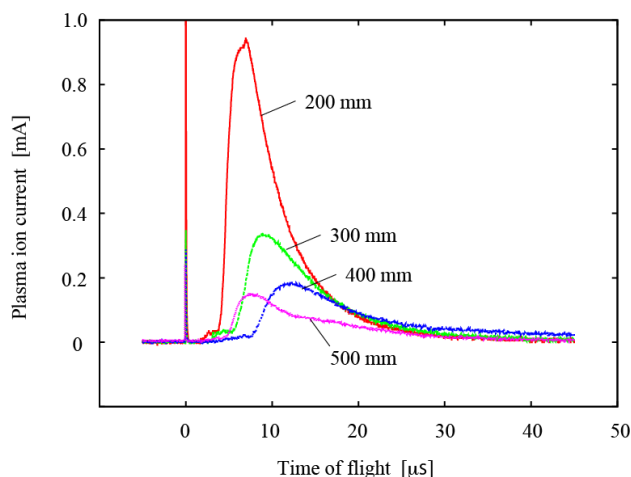


Figure 2: Typical variation of the plasma ion current for various plasma drifting distance ( $L = 200, 300, 400, 500$  mm) using the copper target.

ジム磁石を隣り合う磁石の極性の向きが逆になるよう円周上に並べることにより、8極のマルチカusp磁場を形成した。磁石の先端をレーザーターゲットから250 mmの位置に配置して、長さ300 mmの間で磁場を印加した。使用した磁石の表面磁束は $2 \times 10^2$  mTであり、輸送管内壁近傍での磁束密度はおよそ90 mTであった。

直径1 mmのアパーチャをもち、プラズマからイオンを引き出すため-30 Vを印加したファラデーカップを用いて輸送管中心のプラズマのイオン電流波形を計測した。輸送距離に対するイオン電流の変化を調べるため、ターゲットからの距離180 mmから550 mmまで10 mm間隔でプラズマイオン電流の計測を行った。

### 3. 実験結果と考察

ターゲットとして銅を用いて異なる輸送距離で計測した典型的なイオン電流波形の変化を Figure 2 に示す。Time of flightの原点はレーザー照射のタイミングを示しており、図中の数値はターゲットからの輸送距離を示している。イオン電流波形の概形は磁場の無い条件と大きくは変化せず、shifted-Maxwellian<sup>[6]</sup>様の波形が得られた。一方で、ターゲットから500 mmの位置での波形は200 mm ~ 400 mmまでのTime of flightの立ち上がりが早くなることが示され、この傾向はアルミニウム、銅、鉛のいずれでも同様であった。

レーザーターゲットからの距離 $L$ に対するイオン電流 $J$ のピーク値の変化を Figure 3 に示す。アルミニウム、銅、鉛のいずれも磁場の無い領域ではプラズマイオン電流 $J$ はプラズマの三次元的な膨張に伴い $J \propto L^{-3}$ の関係を保って減少するが、マルチカusp磁場を輸送中はイオン電流の低下が抑えられ、後半では $J \propto L^{-1}$ に近づくことが明らかになった。一方で磁場の領域にプラズマが進入しても直ちに磁場に対する応答を示さず、イオン電流の増加の開始位置や増加量はターゲット材料に依存し、軽いイオンほど

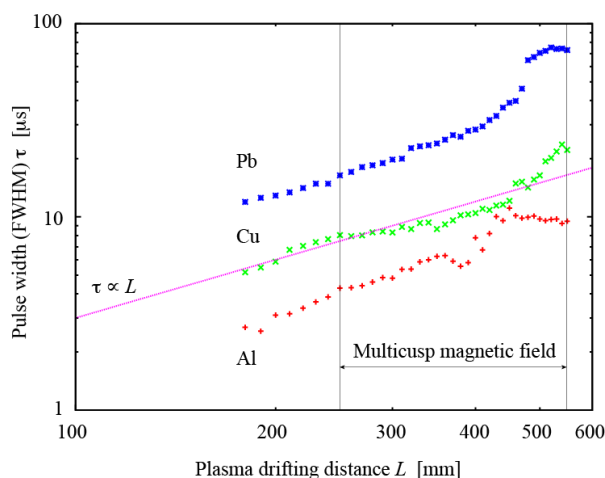


Figure 3: Peak plasma ion current variation as a function of the plasma drifting distance from the laser target (Al, Cu, Pb).

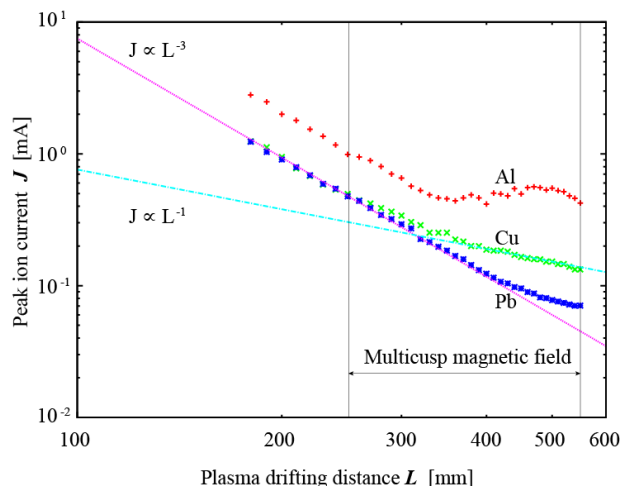


Figure 4: Pulse width (FWHM) variation as a function of the plasma drifting distance from the laser target (Al, Cu, Pb).

増加量大きい傾向が示された。

磁束密度に対するプラズマガイド効果の関係を検討するため、磁気圧とプラズマの圧力の比較を行う。レーザーターゲットから250 mm輸送した磁場に入射するプラズマのイオン数密度 $n$ はイオン電流 $J$ を表す下記の式から求められる。

$$J = ZenvA \quad (1)$$

ここで、 $Z$ はイオン価数、 $e$ は素電荷、 $v$ は速度、 $A$ はファラデーカップのアパーチャ面積を示し、1価イオンを仮定し、ピークの位置でのプラズマ中の密度を求めるとアルミニウム、銅、鉛のピーク値の位置における速度 $v$ はTime of flightから計算すると、それぞれ40 km/s, 30 km/s, 20 km/sであることから $10^{11} \sim 10^{12}$  個/cc程度と見積られる。また、この $10^8$  W/cm<sup>2</sup>のオーダーのレーザー照射強度では電子温度を数 eVとして<sup>[4]</sup>

$$p = (Z+1)nkT \quad (2)$$

を用いてプラズマの圧力を見積もると 0.1 ~ 1 Pa のオーダーである。また、磁気圧は

$$p_B = B^2 / 2\mu_0 \quad (3)$$

で計算することができ、輸送管内壁面上で測定された 90 mT で見積もられる磁気圧は  $10^3$  Pa オーダーである。これは磁場の開始地点であるレーザーターゲットから 250 mm の位置でのアブレーションプラズマの圧力と比較し十分大きい。すなわち、Figure 3 の結果から、マルチカusp磁場によるガイディングの効果は磁気圧がプラズマ圧力より十分大きくても磁場領域に進入して直ぐに中心部には影響を与えないことが示唆される。

Figure 4 はレーザーターゲットからの距離に対するパルス幅の変化を示す。パルス幅はイオン電流波形の半値全幅 (FWHM) として評価を行った。いずれのターゲット材料もパルス幅の増加は磁場が無い線形の増加よりも高くなる領域があり、輸送距離によって変動するもののマルチカusp磁場内を輸送中は磁場の無い条件と同程度のパルス幅の増加の傾向を持つことが示された。

#### 4. まとめ

マルチカusp磁場を用いたアブレーションプラズマのガイディング効果を検討するため、レーザーターゲットからの輸送距離に対するイオン電流波形の変化を調べた。その結果、マルチカusp磁場で輸送中のプラズマのイオン電流は自由膨張時と比較し、低下を抑えられることが示された。また、パルス幅の増加は磁場が無い場合と同程度であり、電流密度を維持したままパルス幅を長くすることができることが示された。

#### 参考文献

- [1] L. G. Gray, R. H. Hughes, R. J. Anderson, J. Appl. Phys., 53, 6628 (1982).
- [2] M. Okamura, A. Adeyemi, T. Kanetsue et al.: Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A510.
- [3] K. Takahashi, M. Okamura, M. Sekine, E. Cushing, P. Jandovitz: AIP Conf. Proc. 1525 (2013) 241.
- [4] 高橋一匡、他:電気学会パルスパワー研究会(2013) PST-13-055,PPT-13-040,ED-13-045
- [5] K. Takahashi, S. Ikeda, F. Isono, K. Takayama, J. Hasegawa, M. Nakajima, K. Horioka, J. Plasma Fusion Res., 8, 1206005-1 (2013).
- [6] R. Kelly and R. W. Dreyfus, Surf. Sci. 198 (1988) 263.