

レーザーイオン源のための液体金属流標的形成の検討

STUDY ON FORMATION OF FLOWING LIQUID METAL TARGET FOR LASER ION SOURCE

高橋 一匡[#], 渡邊 駆大, 近藤 勇仁, 佐々木 徹, 菊池 崇志
Kazumasa Takahashi[#], Kakeru Watanabe, Yuto Kondo, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi
Nagaoka University of Technology

Abstract

To develop a laser ion source using a flowing metal laser target, we investigated the configuration of a small electromagnetic pump driven by moving permanent magnets. Based on the results, we constructed a circulating flow path for liquid metal with a diameter of 90 mm and demonstrated that it is possible to generate the pressure required for liquid metal to flow by placing a rotor with 16 neodymium magnets arranged on its circumference, facing both sides of the liquid metal flow path. We also confirmed that the system worked by observing that liquid gallium was circulated in the duct by the designed pump.

1. はじめに

レーザーイオン源はパルスレーザーを所望の元素を含む標的に照射してアブレーションプラズマを形成し、外部から印加した電界によりイオンビームを引き出すイオン源である。高融点の金属を含むあらゆる固体標的から容易にプラズマを形成できるため、様々なイオン種が要求される目的での利用や導入の検討が進められている。ここで、1 価イオン等の低価数のイオン供給であればレーザーのパワー密度をアブレーションが生じる閾値近傍まで抑えることで標的の損耗を最小化して長期間にわたり同じ表面から再現性の良いプラズマを形成可能である[1]。

一方で、多価イオンが要求される場合には標的上でレーザーパワー密度を増加させる必要がある。そのようなイオン源の運用では標的の表面が1度のレーザー照射で大きく変形するため、再現性の良いプラズマを得るためには、標的を動かして新しい表面にレーザーを照射してプラズマを発生させる必要がある[2]。その場合、同じレーザー標的を使う間にビームを供給可能な回数はレーザー標的の面積に依存し、表面を使い終わったらレーザー標的を交換する必要があり、レーザーを高繰り返しで照射したい場合には頻繁な標的の交換が必要となる。

これを避けて長期間に亘りイオンビームを供給するため、標的を従来の固体ではなく液体とし、レーザー照射位置における表面が回復する標的が検討されている[3, 4]。これまでのレーザーイオン源の液体金属標的の駆動のためにはインペラが回る通常の液体用ポンプを用いたテストが行われたきた。一方で、電磁ポンプを用いたよりシンプルな流路構造を採用すればより少量の液体を循環させることができると期待できる。そこで本研究では液体金属循環のため、既設の真空チャンバーに付属可能な小型の永久磁石回転型電磁ポンプ(Moving magnet pump, MMP)の利用を検討し、得られる性能を見積もった。

2. 電磁ポンプ性能の見積り

永久磁石を回転させて液体金属を駆動するポンプにはドラム型とディスク型の2種類が考えられるが、本実験ではより強い磁場を形成するのに有利と考えられるFigure 1に示すようなディスク型のポンプを検討した。MMPで発生可能な圧力差は以下の式で与えられる。

$$\Delta P = P_{max} - P_{loss} \quad (1)$$

ここで、 P_{max} はMMPによって発生可能な最大圧力であり、 P_{loss} は、流路を通して移動するに生じる圧力損失である。 P_{loss} は、流路形状、内部表面の粗さ、流体の特性、MMPの動作条件などのいくつかの要因に依存する。これらを予め予測することは困難なため、ポンプ性能の見積りにおいて圧力損失を無視することとすると、MMPにより得られる圧力は以下のEqs. (1)-(7)を使用して計算できる[5]。

$$P = \left(\frac{sv_{mag}\sigma B_{max}^2 L}{2} \right) K_{at} \quad (2)$$

ここで、 v_{mag} は磁石の移動速度、 σ は液体金属の導電率、 B_{max} は磁束密度の最大値、 L は磁場の移動に沿った流れの距離 (Fig. 1の流路における円弧部分に該当)、 K_{at} は減衰係数であり、磁場と液体金属のスリップ s および減

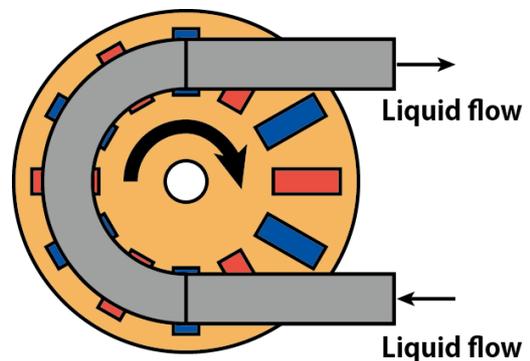


Figure 1: Schematic of a moving magnet pump.

衰係数 K_{at} は以下の式で定義される。

$$s = (v_{mag} - v_{LM})/v_{mag} \quad (3)$$

$$K_{at} = Re \left[\frac{\alpha^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{\tanh(\lambda A/2)}{(\lambda A/2)} \right) \right] \quad (4)$$

v_{LM} は液体金属の速度、 A は磁場に垂直方向の流路幅であり、 λ とモーター定数 α は以下の式で定義される。

$$\lambda^2 = \alpha^2 \left(1 + \frac{i\omega\sigma\tau^2\mu H}{D\pi^2} \right) \quad (5)$$

$$\alpha = \pi/\tau \quad (6)$$

ここで、 $i = \sqrt{-1}$ 、 ω はモーターの角周波数、 μ は透磁率、 H は磁力線に平行な流路の高さ、 D は磁石表面間の幅である。 τ は磁極ピッチであり、 R_{mag} と n_{mag} をそれぞれ磁石が並ぶ円周の半径および磁石個数とすると、以下のように表示する。

$$\tau = 2\pi R_{mag}/n_{mag} \quad (7)$$

ただし、これらの式では、A) 流路が非磁性材料で作られていること、B) 流路が電氣的に絶縁されているか流路の壁が非常に薄いこと、C) 正弦波磁場が流路の縦方向（流体の流れと平行）に沿って移動すること、および

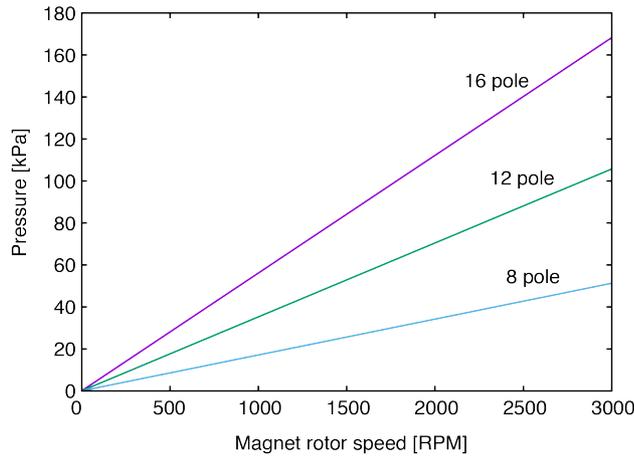


Figure 2: Pressure generation as a function of magnet rotor speed with the magnet pole numbers of 8, 12, and 16.

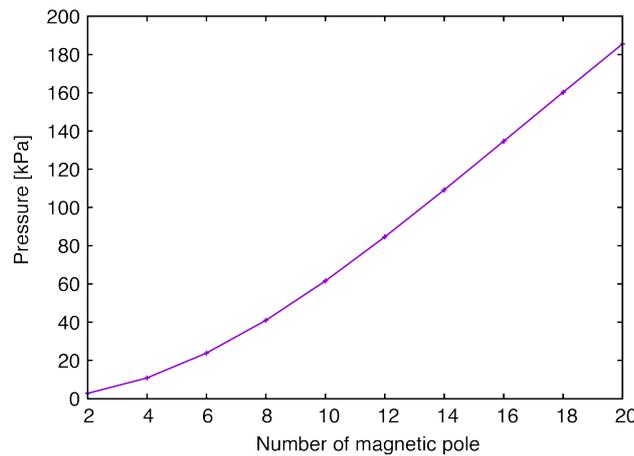


Figure 3: Pressure generation as a function of magnet pole number with the magnet rotor speed at 2400 RPM.

D) 磁場が液体金属の高さまたは厚さ方向に沿っていることを前提としている。減衰係数 K_{at} を実験的に求められる係数として扱っている文献もある [6]。今回の本研究では簡単のため、液体金属の流速よりも磁石速度は十分大きい($s = 1$)として MMP 出力の予測を行った。

発生可能な流体の圧力を決定づけるパラメータは数多くあるが、コンパクトな流路を実現するというコンセプトと現実的な磁石サイズ等のバランスから、まずは液体の主な流路形状を流路中心が直径 90 mm の円形と決定し、その他のパラメータが得られる圧力に与える影響を調べた。

Figures 2, 3 に磁石の極数に対する圧力および磁石の回転速度に対する圧力の値の例を示す。結果より、これらのパラメータに対し、圧力は単調増加であり、およそ 10^4 – 10^5 Pa 程度の圧力が発生可能であることがわかる。このとき、Table 1 のパラメータを仮定している。

また、Eqs. (1)–(7)を用いることができる前提として磁極が形成する磁場の分布が正弦波であることが求められる。この条件を満たす磁場が形成可能か Poisson/Superfish を用いて磁場分布を検討した。Figure 4 は直径 90 mm の円周上に 16 極となるように幅 10 mm の磁石を均等に並べた際の磁石間隔を用いて直線上に並べた磁場分布の計算結果である。この計算において磁石は縦軸および横軸に対して対称な配置となっている。また、このときの向かい合う磁石の中心の磁束密度分布を Fig. 5 に示す。図に示されるように概ね正弦波となる磁場分布を得ることができることがわかる。

Table 1: Assumed Parameters

B_{max} [mT]	300
R_{mag} [mm]	45
A [mm]	10
H [mm]	5
D [mm]	18
L [mm]	45π
σ [S/m]	10^7

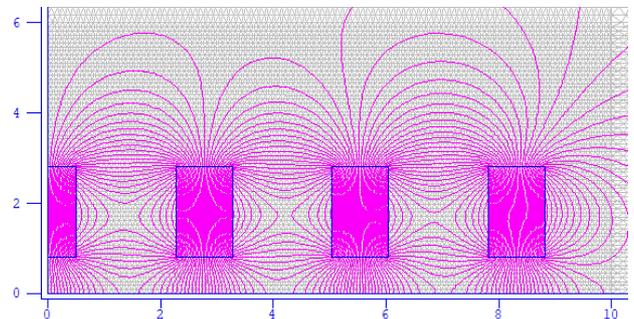


Figure 4: Distribution of magnetic field generated using neodymium magnets calculated by Poisson/Superfish which is the software to simulate magnetic fields.

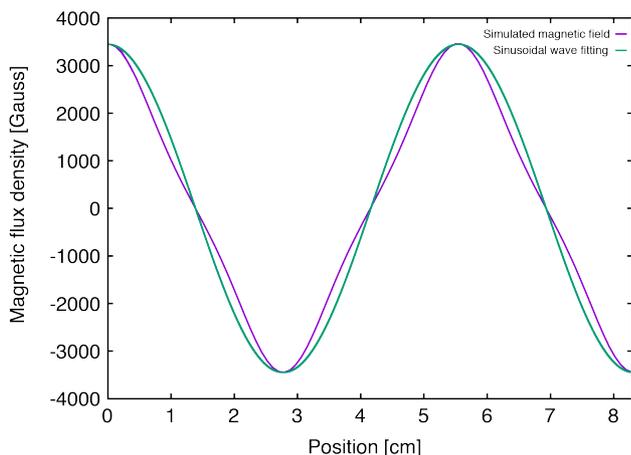


Figure 5: Estimated magnetic flux density induced at the center of faced magnets.

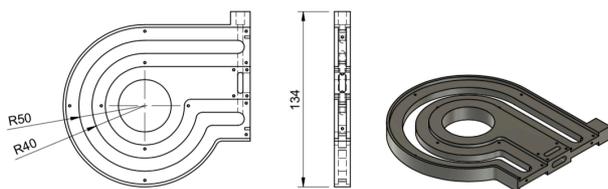


Figure 6: The design of liquid metal flow duct. The duct mainly consists of the circle with a diameter of 90 mm. The duct has windows to observe the liquid behavior and to irradiate a laser.

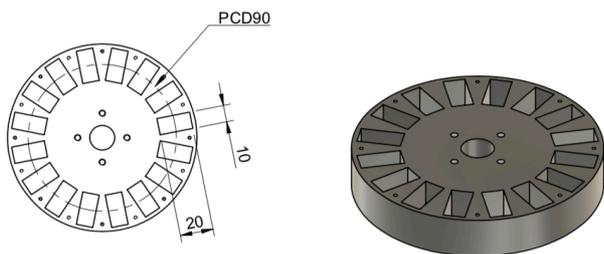


Figure 7: The design of magnet rotor. Each magnet has a dimension of L20 mm × W10 mm × D20 mm. The magnets are arranged on the circle with diameter of 90 mm.

3. 液体流路および磁石ローターの設計

ここまでの見積りを元に流路および磁石ローターの設

計を行った。基本的な形状は Fig. 6 に示すような直径 90 mm となる円弧状だが、可能な限り磁石の移動に沿う流路が長くなるよう半円よりも長くした。また、レーザー標的を形成する箇所については正面の斜め上方または下方からレーザーを入射出来るよう縦方向に長穴となっている。さらに、レーザー照射時の液体の振る舞いが観測できるように、横側には窓を設けた。また、加熱は幅 10 mm のカプトンフィルムヒーターで行えるようにしてある。

磁石のローターについては、長さ 20 mm、幅 10 mm、厚み 20 mm のネオジウム磁石を用いた。これを Fig. 7 に示すようなローターにはめていき、厚み 1 mm のステンレス板で蓋をしている。磁極数が多いほど高い圧力の発生に有利なため、可能な限り磁石を多く配置した 16 極とした。これを向かい合う磁石の表面間の距離が 18 mm となるように固定する構造とした。これらの液体金属の流路および磁石ローターを構築し、低融点金属であるガリウムを用いた動作試験により液体ガリウムが循環することを確認した。

4. まとめ

レーザーイオン源の液体金属ターゲットを形成するための小型の永久磁石回転式電磁ポンプおよび液体金属流路の構成を検討した。直径 90 mm の液体金属用の循環流路を構築し、16 個のネオジウム磁石が周上に配置されたローターを液体金属流路の両側に向かい合わせることで液体金属が流れるのに必要な圧力を発生可能なことを示した。また、液体ガリウムを用いてシステムが動作し、液体金属流が形成されることを確認した。今後は圧力、流速を測定し、見積りと比較するとともに液体金属に対するレーザー照射実験を行う予定である。

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] Boris Sharkov and Richard Scrivens, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, **33** (2005) pp. 1778-1785.
- [3] A. Cannavò *et al.*, JINST **19** (2024) P06017.
- [4] K. Takahashi *et al.*, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online (Kyushu University) (2022) pp. 1054-1057 (in Japanese).
- [5] M. G. Hvasta, W. K. Nollet, M. H. Anderson, Nuclear Engineering and Design **327** (2018) pp. 228-237.
- [6] E. Koroteeva *et al.*, Fusion Engineering and Design **106** (2016) pp. 85-92.