

# マルチパルスレーザーを用いたレーザーイオン源

## LASER ION SOURCE WITH A MULTI PULSE LASER

不破康裕<sup>#, A,B)</sup>, 池田峻輔<sup>A,C)</sup>, 熊木雅史<sup>A,D)</sup>, 関根恵<sup>A,C)</sup>, 金未猛<sup>E)</sup>, 岡村昌宏<sup>E)</sup>, 岩下芳久<sup>B)</sup>  
 Yasuhiro Fuwa<sup>#, A,B)</sup>, Shunsuke Ikeda<sup>A,C)</sup>, Masafumi Kumaki<sup>A,D)</sup>, Megumi Sekine<sup>A,C)</sup>,  
 Takeshi Kanetsue<sup>E)</sup>, Masahiro Okamura<sup>E)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN

<sup>B)</sup> Kyoto University

<sup>C)</sup> Tokyo Institute of Technology

<sup>D)</sup> Waseda University

<sup>E)</sup> Brookhaven National Laboratory

### Abstract

To control an ion beam pulse width or intensity of laser ion source, multiple laser shots could be used. To confirm the feasibility of the multiple shot scheme, we are investigating the properties of plasmas produced by double laser shots. As results of the experimental study, when the interval of the laser shots is longer than  $10 \mu\text{s}$ , the ion current profile had a peak which is not observed in single laser experiment. The height of this peak is five times larger than that of single laser experiment.

### 1. はじめに

レーザーイオン源は大強度のイオンビームを生成可能なイオン源として、RFQ へのレーザープラズマ直接入射法(DPIS)を用いた大電流イオンビーム生成[1]やEBIS (Electron Beam Ion Source) のシードイオン源としての適用[2]が検討されている。Figure 1 にレーザーイオン源の模式図を示す。レーザーアブレーションしきい値を超えるエネルギー密度のレーザーをターゲット上に照射すると、ターゲットから初速度を持ったプラズマが生成する。このプラズマが引き出し電極に到達し、電場によってイオンが引き出されることでイオンビームが生成される。ターゲットから引き出し電極までのドリフト領域でプラズマは3次元的に膨張するため、イオンビームのパルス幅  $T$ 、ビーム電荷量  $C_{total}$ 、ピークイオン電流  $I_p$  はドリフト距離  $L$  の関数として以下のスケールング則に従う。

$$T \propto L$$

$$C_{total} \propto L^2$$

$$I_p \propto L^3$$

そのため、従来のイオン源ではターゲット上でのレーザーのパワー密度を調整することで、イオン価数分布やプラズマの膨張速度をコントロールしていた。本研究ではレーザーイオン源の運転自由度を増すことを目的として複数のパルスを用いたレーザーイオン源の可能性を検討している。

これまでの研究ではイオンビームのパルス幅を伸

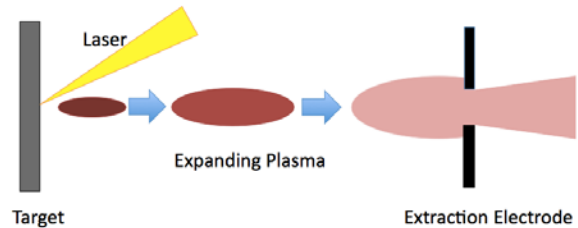


Figure 1: Schematic image of laser ion source

ばすことを目的として、2つのレーザーショットを用いた実験を実施した。この実験では2つのレーザータイミングのインターバル  $dt$  が十分長い場合にはそれぞれのプラズマの和として電流が観測された。一方、 $dt$  が  $10 \mu\text{s}$  以下の場合では、測定される電荷量が2つのプラズマの和と一致しないことが明らかとなった[3]。そこで本研究では、 $dt$  が  $10 \mu\text{s}$  以下の場合に発生するプラズマ中のイオンを分析し、さらに詳細な検討を行った。

### 2. 実験セットアップ

#### 2.1 ツインレーザー

本研究における実験では QUANTEL brilliant twin (最大レーザーエネルギー: 850 mJ、パルス幅: 6 ns (FWHM)、波長: 1064 nm)を用いた。このレーザーはオシレータ・Q スイッチがそれぞれ独立して2つ有しておりタイミングを独立に制御できる。それぞれのレーザーから出る光の偏光は  $90^\circ$  異なっており、Figure 2 に示すような光学系によって2つのレーザーを同一の光路に通すことができる。

<sup>#</sup> yasuihiro.fuwa@riken.jp

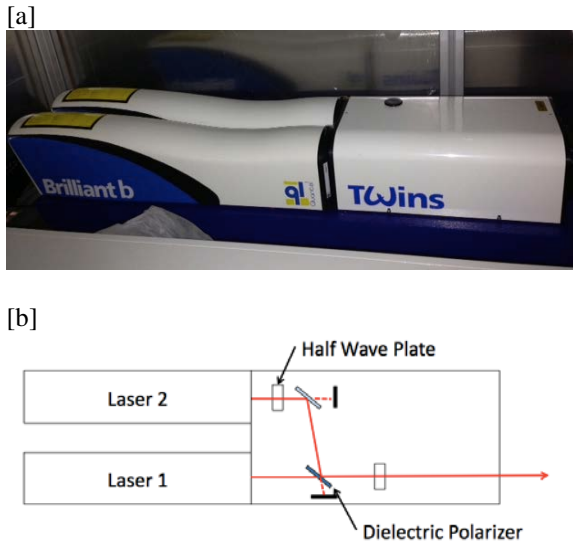


Figure 2: Quantel Brilliant twin laser. [a] Whole image. [b] Schematic image.

## 2 分析ライン

レーザーの照射チャンバー及びプラズマ分析ラインは Figure 3 のようになっている。本実験ではターゲットに鉄を使用した。レーザーエネルギーはパルスあたり最大 725 mJ で照射スポットの形状は長軸 4 mm、短軸 3 mm の楕円形である。照射時の真空度は  $10^{-4}$  Pa 程度に保たれていた。

## 3. 実験結果

まず、レーザートリガーのインターバルを  $0.1 \mu\text{s}$  から  $10 \mu\text{s}$  まで変化させてファラデーカップによりイオン電流を測定した。この測定で用いたファラデーカップはアパーチャ直径 10 mm のコリメータ・サブプレッションメッシュ(印加電圧: -3.5 kV)・検出電極から構成され、ターゲットからの距離  $L = 3.21$  m の位置に設置した。測定結果を Figure 4 に示す。ここでは、いずれのレーザーショットもエネルギー 630 mJ である。この結果を見ると  $110 \mu\text{s}$  付近に顕著なピークが現れ、レーザーインターバルが

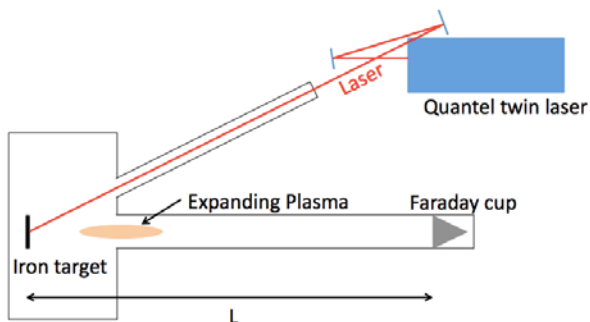


Figure 3: Layout of experiment

$1 \mu\text{s}$  から  $1.5 \mu\text{s}$  でピーク電流が最大となっていることがわかる。また、Figure 5 にレーザーをそれぞれシングルショットで照射した場合のイオン電流と  $1 \mu\text{s}$  のインターバルで照射した場合のイオン電流を比較するグラフを示す。この例では前段のレーザーがエネルギー 350 mJ、後段のレーザーがエネルギー 700 mJ である。この結果を見ると  $100 \mu\text{s}$  付近に見られるピークは 2 つのレーザープラズマのいずれとも形状が異なり最大電流値も 5 倍程度大きいことがわかる。また、ピークのテール部分は後段のレーザーによるものとほぼ等しいことがわかる。

さらに、このピークは後段のレーザーパワー密度がターゲット上でアブレーションしきい値を超える場合には 1 段目のエネルギーによらず観測され、いずれもレーザーインターバルが  $1 \mu\text{s}$  付近でピークが最大となった。このピークのピーク電流値とピーク

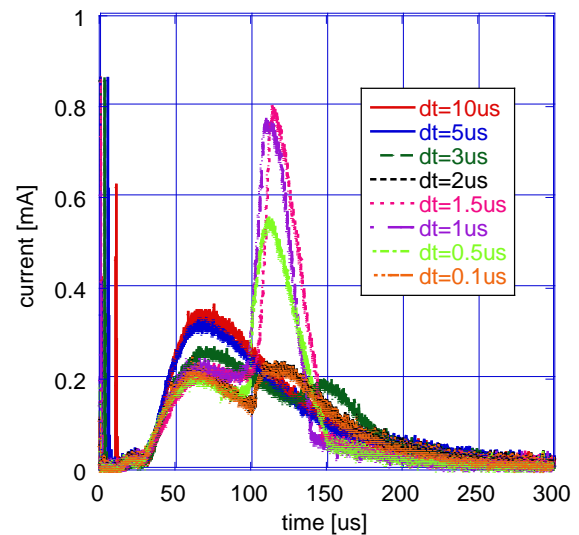


Figure 4: Obtained current form with various laser interval (both laser pulse have 630 mJ laser energy)

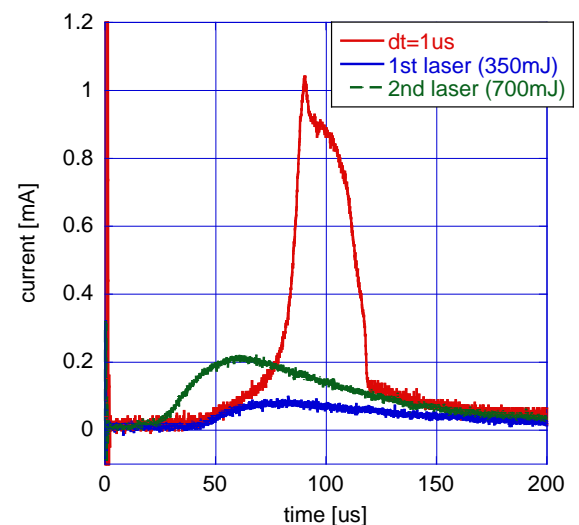


Figure 5: Comparison between single-laser plasma and double-laser plasma.

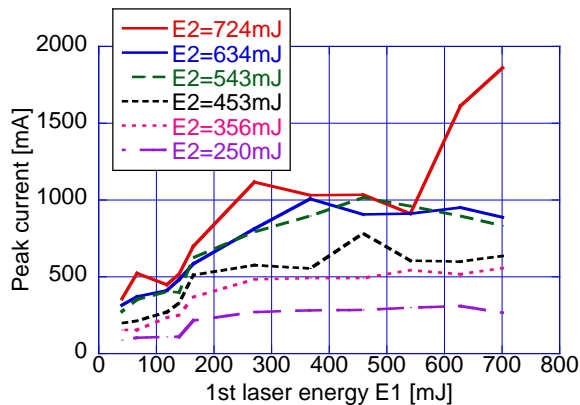


Figure 6: Peak current of second peak with various laser energy.

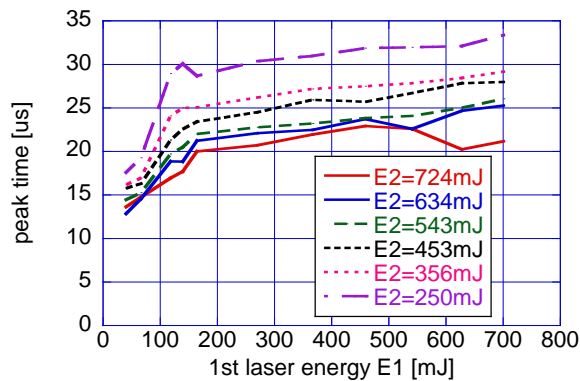


Figure 7: Peak timing of second peak with various laser energy.

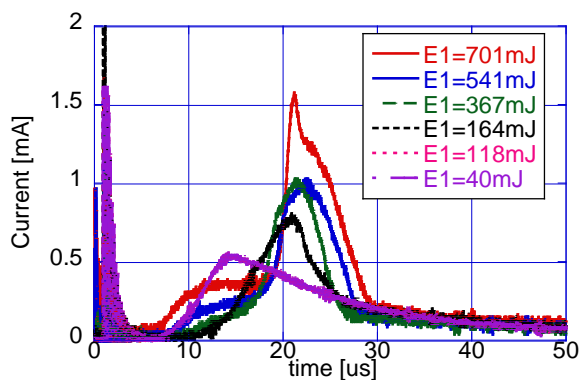
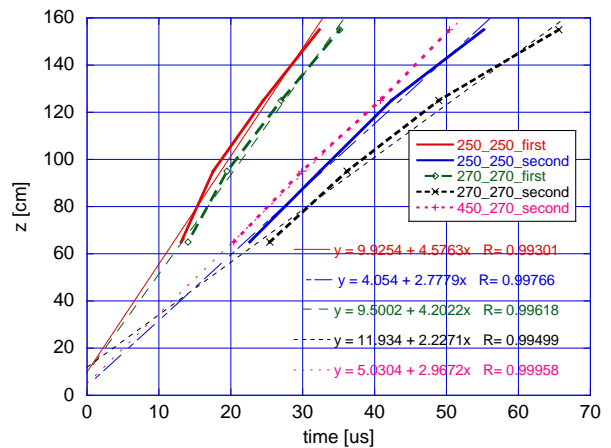


Figure 8: Current profile with 724 mJ second laser energy.

クとなるタイミングを様々なレーザーエネルギーで測定した。この測定では検出器としてアパーチャ直径 1 mm のファラデーカップをターゲットから 65 cm の位置で用いた。レーザーインターバルは全て 0.9 μs とした。結果を Figure 5、6 に示す。この結果を見るとピーク電流及びピーク時間は 2 発目のレーザーが 724 mJ の場合を除き同様の傾向が見られる。724 mJ の場合は 1 発目のレーザーエネルギーに対して一定の傾向が見られない。Figure 8 に



2 発目のレーザーエネルギーが 724 mJ の場合の電流イオン電流プロファイルを示す。これを見ると E1=701 mJ の場合にはピークの頂点の形状が異なっていることがわかる。

### 3.2 ToF 分析

ターゲットとファラデーカップの間の距離を変化させ、ピークとなる ToF を調べた。この測定では、アパーチャ直径 1 mm のファラデーカップをターゲットから 65 cm、95 cm、125cm、155cm の位置で用いた。結果を Figure 7 に示す。この図中には得られた結果から原点方向に外挿した近似曲線も示している。この結果を見るとピークの ToF は測定位置に対して線形に変化していることがわかる。また、原点方向への外挿結果からいずれも 4 cm 以上のオフセットを持っていることがわかる。これらのことは、今回の実験で見られたピークがプラズマのドリフト過程ではなく、ターゲットから数 cm 以内の初期過程で形成されていることを示唆している。

発生の過程としては 1 発目のレーザーによる中性ガスの影響や表面状態の変化などいくつかの要因が関係していると推測されるが、現状では何が重要な要素となっているかは断言できない。

## 4. まとめ

2 つのレーザーインターバルを 1 μs 程度で照射する場合に電流プロファイルが大きく変わり鋭いピークが観測された。このピークの電流値は最大で単発のレーザーを用いた場合の 5 倍程度の強度を持っていることが明らかとなった。今後はこのピークの形成過程の解明を目指す。

## 参考文献

[1] M. Okamura et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **606**, 94-96 (2009)  
 [2] K. Kondo et al., Rev. Sci. Instrum. **81**, 02B716 (2010)  
 [3] M. Okamura et al., Rev. Sci. Instrum. **83**, 02B308 (2012)