

# THz 加速器のためのプラズマ THz 源及びレーザー航跡場電子源の開発

## DEVELOPMENT OF PLASMA THz SOURCE AND LASER WAKEFIELD ELECTRON SOURCE FOR THz ACCELERATOR

大塚崇光<sup>#</sup>, 鈴木優太, 植田大智, 片谷光祐, 白坂幹人, 塩澤友紀, 坂本千明, 種倉遙斗, 高久隼太郎, 湯上登  
Takamitsu Otsuka<sup>#</sup>, Yuta Suzuki, Daichi Ueda, Kousuke Kataya, Mikito Shirasaka, Tomoki Shiozawa,  
Chiaki Sakamoto, Haruto Tanekura, Juntaro Takaku, Noboru Yugami  
Utsunomiya University

### Abstract

We are conducting research aiming to demonstrate terahertz acceleration using a combination of laser wakefield acceleration and plasma electromagnetic wave sources. Due to the relatively long pulse duration of the laser system, the method of laser wakefield acceleration used is self-modulated laser wakefield acceleration. We have determined the optimal plasma density and plasma length using a two-dimensional particle code. Concurrently, we are advancing research on laser-generated gas plasma electromagnetic waves. We are working on constructing a radiation model to explain the obtained results.

### 1. はじめに

高強度フェムト秒レーザーによって生成されるプラズマ中にはレーザー進行方向及び垂直方向の電場が励起され、この電場を荷電粒子の加速に利用する加速手法をレーザー航跡場加速と呼び、その物理機構は 1979 年に T. Tajima 及び J. M. Dawson によって示された [1]。

Figure 1 は典型的なレーザー航跡場加速実験の概念図である。レーザー航跡場加速の研究はプラズマとレーザーパルスが共鳴するよう、プラズマ長とレーザーパルス長が同程度になる条件で行われるのが一般的である。プラズマの電子密度によってプラズマ長が決定され、高密度プラズマと容易に共鳴する 50 fs 以下のレーザーパルスが用いられる実験が主流である。また集光強度は、 $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> 以上が必要となり、小規模実験室でこれらの条件を満たすレーザーシステムを運用することは難しい。

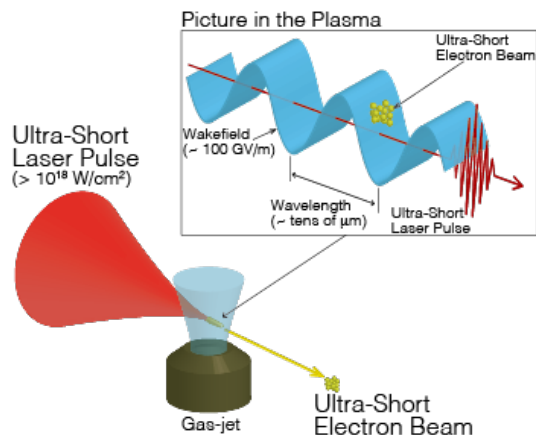


Figure 1: Schematic diagram of laser wakefield acceleration.

本研究では、比較的小型なレーザーで実験可能な自己変調レーザー航跡場を採用し、レーザー航跡場加速電子源とプラズマ電磁波源によるテラヘルツ加速を実証することを目標としている。

これまでに 1 TW 級のレーザーによって駆動される自己変調レーザー航跡場に関し二次元粒子シミュレーションを用いて計算を行なった。計算空間内に電子密度  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>、幅 130 ~ 300  $\mu$ m の水素プラズマを設定し波長 800 nm、レーザーエネルギー 120 mJ、レーザーパルス幅 120 fs (半値全幅) のレーザーパルスを入射させた。Figure 2 はプラズマの厚みと発生する電子ビームスペクトルの関係である。プラズマの厚みが 135 及び 150  $\mu$ m とそれ以上のプラズマの厚みでは、スペクトル構造が大きく異なる。プラズマ密度  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> における脱位相長 (加速位相から電子がスリップする距離) は 60  $\mu$ m 程度であり、 $x = 100$   $\mu$ m 付近で入射した電子は  $x = 160$   $\mu$ m 付近で脱位相する。従って、135 及び 150  $\mu$ m の計算結果は、電子が脱位相するまでに加速が終了する最適な条件であるといえる。

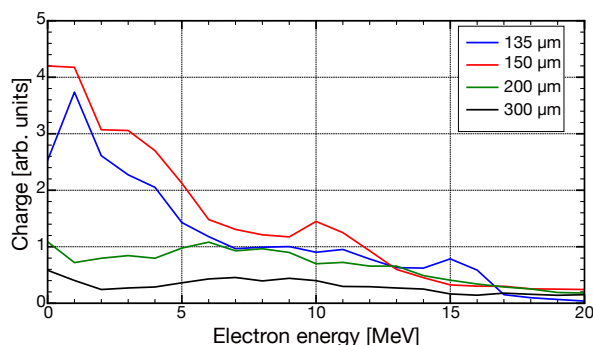


Figure 2: Electron energy spectra after propagating different plasma width.

<sup>#</sup> takamitsu@a.utsunomiya-u.ac.jp

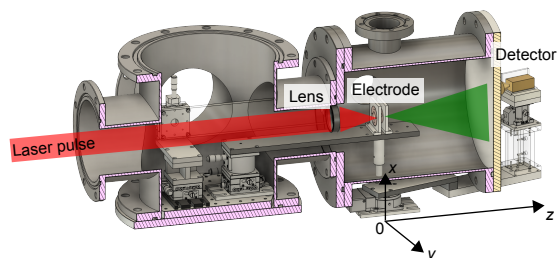


Figure 3: Schematic diagram of laser plasma EM wave source.

## 2. 縦電場印加型プラズマ電磁波源の特性

高強度超短パルスレーザーをガスに集光しプラズマを励起すると、ラジアル偏波の電磁波が発生する。さらに外部からプラズマに電場を印加することで、電磁波強度が印加電場の二乗に比例して大きくなることが知られている [2, 3]。一方でこれまでに全て説明できる放射モデルは提案されておらず、テラヘルツ加速用の高出力電磁波源を実現するためには発生原理の解明が重要となる。

### 2.1 実験装置

Figure 3 は縦電場印加型プラズマ電磁波源の実験配置図である。Ti:Sapphire レーザー (最大エネルギー 85 mJ、パルス幅 120 fs、波長 800 nm) を集光距離  $f=200$  及び  $400$  mm のレンズを用いて実験チャンバー内に集光照射しプラズマを励起した。集光点に設置した穴あきの電極対 (ギャップ間隔 5 mm) に最大 17 kV のパルス電圧を印加し、レーザー進行方向に最大電場 35 kV/cm をプラズマに与えた。印加する電場の向きは配線を入れ替えることで変更した。実験チャンバーの圧力は大気圧、2.5 気圧とした。発生した電磁波を 140 – 220 GHz、220 – 325 GHz に感度を有するショットキーバリアダイオードを用いて検波した。検波した電場の向きは Fig. 3 の  $y$  軸方向の電場である。

### 2.2 実験結果

Figure 4 は電磁波の最大信号電圧と印加電場の関係である。Figure 3 のレーザー光軸で  $yz$  平面をスキャンし最大電圧を得る角度で計測した。

Figure 4(a) 及び (b) は焦点距離  $f=200$  mm の結果であり、ガス圧や電場の向きによる変化はいずれの周波数帯域の結果においても生じなかった。

一方で Fig. 4(c) 及び (d) は  $f=400$  mm の結果であり、レーザー進行方向の電場を印加した場合 (図中の青い丸及び三角) とレーザー進行方向逆向きの電場を印加した場合 (図中の赤い丸及び三角) で変化が見られたが、ガス圧 2.5 気圧では 0-10 kV/cm の範囲においてのみ電場の向きによる大きな変化はない。

Figure 4(a) 及び (b)、及び Figure 4(c) 及び (d) は、レンズの集光距離が異なるため、レーザーの集光強度が異なり、プラズマ密度が変化しているといえる。今後、干渉計による密度計測を行いモデルの構築を進める。

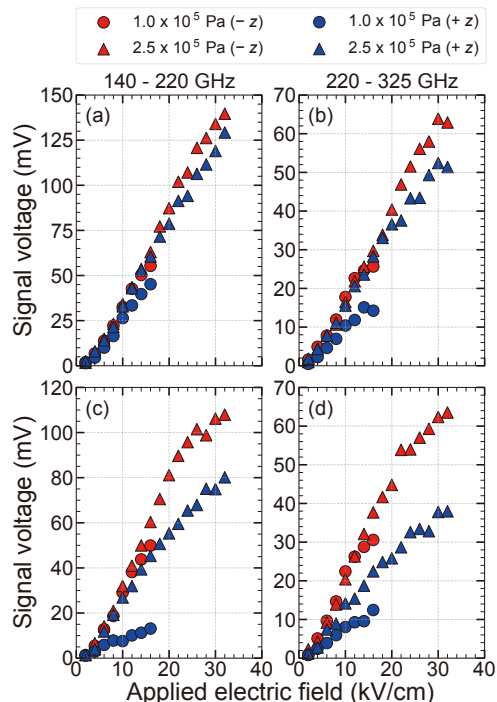


Figure 4: Signal voltage vs. applied voltage. (a) and (b) are dependent on a focal length of 200 mm, (c) and (d) are dependent on a focal length of 400 mm, respectively. The red circles and triangles represent the results for the electric field opposite to the laser propagation direction, while the blue circles and blue triangles represent the results for the electric field in the direction of laser propagation.

## 3. 今後の展望

これまでにシミュレーションによって自己変調レーザー航跡場加速のパラメータを調査し、最適なプラズマ条件を明らかにしている。現在はこのプラズマパラメータを実現するためガスジェットターゲットの開発を進めている。並行して電場をプラズマに印加するプラズマ電磁波源のモデルの構築、高出力化を進め、レーザー航跡場加速とプラズマ電磁波源の組み合わせによるテラヘルツ加速の実証を目指す。

## 謝辞

本研究は科学研究費助成事業 22K03565, 22H01197, 23K11701, 23K20038 の支援のもと行われました。深く感謝します。

## 参考文献

- [1] T. Tajima *et al.*, “Laser Electron Accelerator”, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 98 (1988).
- [2] Yi Liu *et al.*, “Amplification of transition-Cherenkov terahertz radiation of femtosecond filament in air”, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 051108 (2008).

**PASJ2024 WEP065**

- [3] T. Fukuda *et al.*, “Characteristics of terahertz waves from laser-created plasma with an external electric field”, *Jpn. Appl. Phys.* **58**, 070909 (2019).