

# 1 TW レーザー駆動自己変調航跡場加速による MeV 級電子源の開発

## DEVELOPMENT OF MeV ELECTRON SOURCE BY 1 TW LASER DRIVEN SELF-MODULATED LASER WAKE FIELD ACCELERATION

大塚崇光<sup>#</sup>, 西田大紀, ペレラドゥティカ, 片谷光祐, 鈴木優太, 湯上登

Takamitsu Otsuka<sup>#</sup>, Daiki Nishida, Perera Duthika, Kouki Kataya, Yuta Suzuki, Noboru Yugami

Graduate School of Regional Development and Creativity, Utsunomiya University

### Abstract

We are investigating self-modulated laser wake field acceleration with the aim of developing a small MeV-class electron source. Using a two-dimensional particle simulation code, we calculated a laser pulse propagating in a plasma with an electron density of  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . We confirmed that a large electric field reaching several hundred GV/m is excited by the self-modulating laser wake field. Since the accelerated electrons slip out of the acceleration phase after at 60 mm, a thin gas target is required. The maximum energy of accelerated electrons is about 15 MeV, which is a thermal spectrum with a large energy spread.

### 1. はじめに

高強度フェムト秒レーザーパルスがガス中を伝搬するとプラズマが生成され、電子の粗密波であるプラズマ波によってレーザー進行方向及び垂直方向に電場が励起される。この電場を航跡場と呼び、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 (Laser wakefield Acceleration: LWFA) と呼び、その物理機構は 1979 年に T. Tajima 及び J. M. Dawson によって報告された[1]。

Figure 1 はレーザー航跡場加速実験の概念図である。一般にレーザー航跡場加速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。プラズマ長は、プラズマの電子密度に依存し、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、 $10^{18} \text{ W/cm}^2$  を超えるレーザー集光強度が必要となり、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容易ではない。

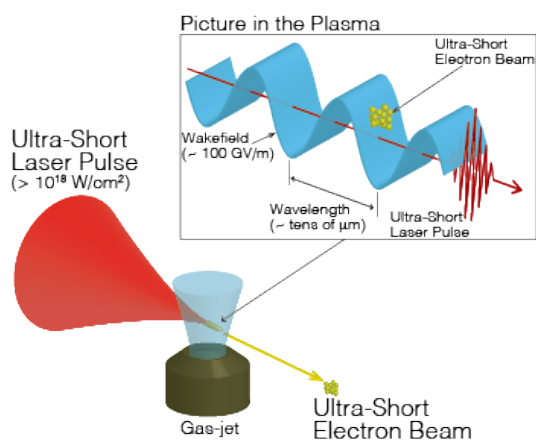


Figure 1: Schematic diagram of laser wakefield acceleration.

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

レーザー航跡場加速研究黎明期には、これらの条件を満たすレーザーシステムは開発過程にあり、プラズマ長に比べレーザーパルス長が長い条件下で実験が行われた。この場合、レーザーパルスの包絡線がプラズマ波との相互作用によって、プラズマ長程度に変調を受けることによってレーザー航跡場の励起、成長が達成される。

近年、この自己変調レーザー航跡場と呼ばれる手法を用いた研究がいくつか報告されている [2, 3]。この手法では高密度プラズマを用いるため、高い加速電場を励起できる一方で、脱位相長が短く、航跡場、電子入射の発生過程が複雑であり、その結果としてビームが不安定になることが問題である。

本研究では、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を調査し、安定な電子源を開発することを目標としている。

### 2. 2次元粒子コードによるシミュレーション

二次元粒子コードシミュレーション (two-dimensional particle-in-cell: 2D-PIC) [4] を用いて自己変調レーザー航跡場加速のシミュレーションを行った。Figure 2 は設定したシミュレーション空間の概念図である。計算空間内に初期電離した電子密度  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、幅 130 ~ 300 mm の水素プラズマを設定した。設定した空間に波長 800 nm、レーザーエネ

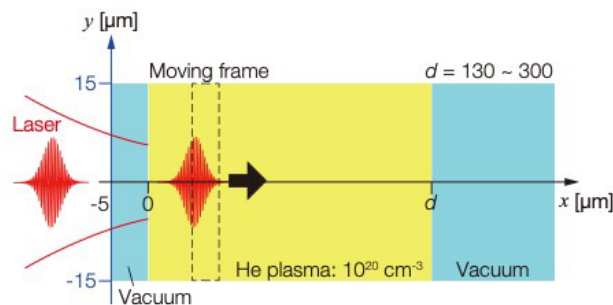


Figure 2: Schematic diagram of two-dimensional particle-in-cell simulation.

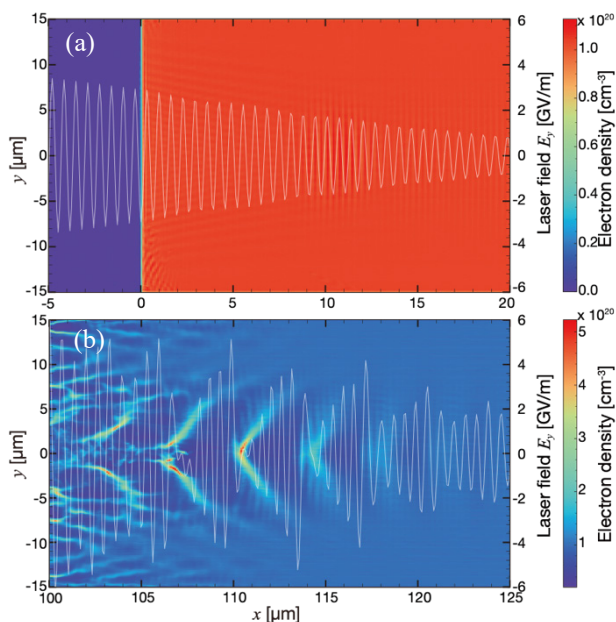


Figure 3: Laser field (white line) and electron density distribution in the plasma. (a) Initial condition, (b) in the plasma.

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、レーザープラズマ相互作用の計算を行なった。集光径は 10 mm であり集光強度は約  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> である。計算は固定フレームではなく、レーザーの伝搬と共に計算フレームが移動する Moving frame を採用した。

Figure 3(a) の白の実線は、真空から一様なプラズマ中に入射するレーザー電場 (伝搬軸上の電場) であり、伝搬過程で Figure 3(b) の白の実線のように変調され、電子の粗密波が励起されていることがわかる。Figure 3(b) の 108 mm 付近で波が破碎し、航跡場に電子が入射している。

### 3. プラズマの厚みと電子のスペクトル

Figure 4 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。135 及び 150 mm 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 mm 程度であり、 $x = 100$  mm 付近で入射した電子は  $x = 160$  mm 付近で脱位相する。従って、135 及び 150 mm 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。

### 4. 今後の展望

2D-PIC を用いて電子密度  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> のプラズマ中で生じる自己変調レーザー航跡場加速について計算した。熱的なスペクトルではあるが、電子が加速されることが確認され、脱位相が生じる 60 mm 程度で加速を終える必要があることが明らかとなった。

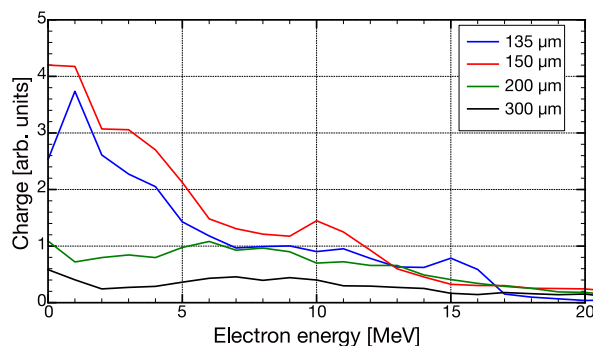


Figure 4: Electron energy spectra after propagating different plasma width.

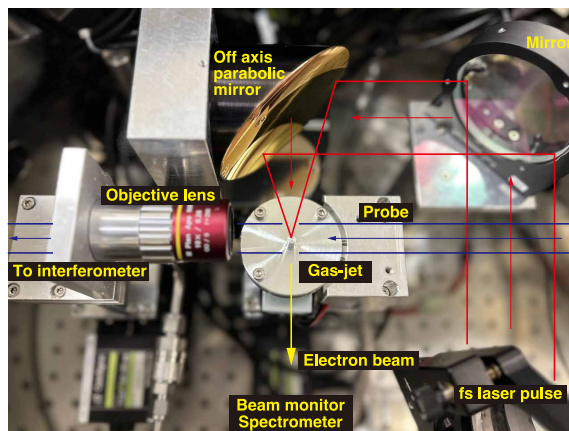


Figure 5: Experimental setup.

Figure 5 は実験装置である。今後は直径 150 mm の細管から噴出するガス流れの実験及び数値解析による評価と、このガス流れを標的としたレーザー航跡場加速実験を行う予定である。

### 謝辞

本研究は科学研究費助成事業 JP19K20597、JP22K03565、JP22H01197、JP23K11701 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] A. J. Goers *et al.*, “Multi-MeV Electron Acceleration by Subterawatt Laser Pulses”, Phys. Rev. Lett. **115**, 194802 (2015).
- [3] F. Salehi *et al.*, “MeV electron acceleration at 1 kHz with <10 mJ laser pulses”, Opt. Lett. **42**, 215 (2017).
- [4] Y. Sentoku *et al.*, “Numerical methods for particle simulations at extreme densities and temperatures: Weighted particles, relativistic collisions and reduced currents”, J. Comput. Phys. **227**, 6846 (2008).