

低出力レーザーによるレーザー航跡場加速実験

LASER WAKEFIELD ACCELERATION BY LOW PEAK-POWER LASER

大塚 崇光^{#, A)}, 郡司 貴大^{A)}, 飯田 紘一^{A)}, 高橋 瑠伊^{A)}, 西田 大紀^{A)},
五十嵐 峻^{B)}, 片谷 光祐^{B)}, ペレラ ドウティカ^{B)}, 湯上 登^{A)}

Takamitsu Otsuka^{#, A)}, Takahiro Gunji^{A)}, Koichi Iida^{A)}, Rui Takahashi^{A)}, Daiki Nishida^{A)},

Ryo Igarashi^{B)}, Kosuke Kataya^{B)}, Duthika Perera^{B)}, Noboru Yugami^{A)}

^{A)} Graduate School of Regional Development and Creativity, Utsunomiya University

^{B)} School of Engineering, Utsunomiya University

Abstract

Laser wakefield acceleration (LWFA) driven by low peak power laser system has been investigated. In this case, relatively longer laser pulse is employed for creating plasma compared to standard LWFA. The pulse length of laser is not equal to the plasma wavelength, thus, wakefield does not grow up resonantly. To develop compact electron accelerator, we are studying self-modulated laser wakefield acceleration driven by 1 TW Ti:Sapphire laser with laser energy of 120 mJ and pulse width of 120 fs (full width at half maximum). Simulation results by 2-dimensional particle in cell code (2D-PIC) predicted that self-modulation occurs with electron density over 10^{20} cm^{-3} and laser spot diameter less than $10 \mu\text{m}$. In the experiment, self-focusing have been observed, however, electron beam has not been observed. This is because the electron density (initial gas density of gas-jet target) is not high enough for relativistic self-focusing.

1. はじめに

Figure 1 はレーザー航跡場加速の概念図である。高強度レーザーパルスがガス中を伝搬するとプラズマが励起され、レーザーパルスの後方には航跡場 (Wakefield) と呼ばれる電子の疎密波が生じる。航跡場中にはレーザー進行方向の縦電場と径方向の横電場が発生しており、これらの伝場を適切に利用することでプラズマ中の電子を加減速、収束、発散させることができる。この航跡場を利用した粒子加速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]。

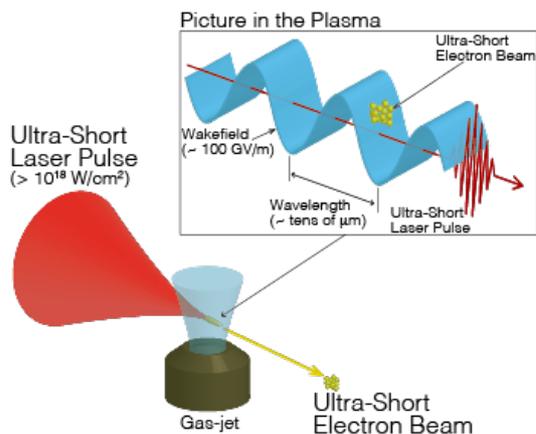


Figure 1: Schematic diagram of laser wakefield acceleration.

一般にレーザー航跡場加速研究はレーザーのパルス

[#]takamitsu@cc.utsunomiya-u.ac.jp

幅が比較的短く、集光強度が 10^{18} W/cm^2 を超える条件下で行われるが、これを満たすためには数十 TW を超えるレーザーシステムが必要となり、小規模実験室で運用することは難しい。

近年、低ピーク出力レーザーを用いる研究がいくつか報告されており、レーザー航跡場加速研究黎明期に行われた、相対論的自己収束とそれに伴い生じるレーザーパルスの包絡線の変調を利用する自己変調レーザー航跡場加速が研究されている[2, 3]。本研究ではレーザーパルス幅が比較的長い低ピーク出力レーザーシステムを用いてレーザー航跡場電子加速を行うため、自己変調レーザー航跡場加速について調査している。

2. PIC シミュレーション

低ピーク出力レーザーシステムによる自己変調レーザー航跡場加速について二次元粒子シミュレーションコード[4]を用いてシミュレーションを行

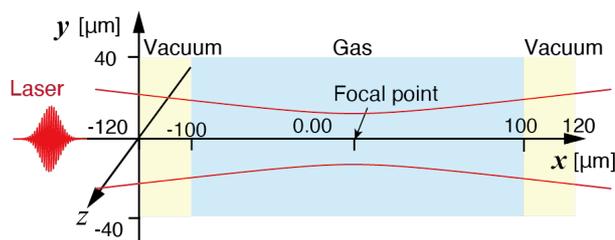


Figure 2: Schematic diagram of two-dimensional particle-in-cell simulation.

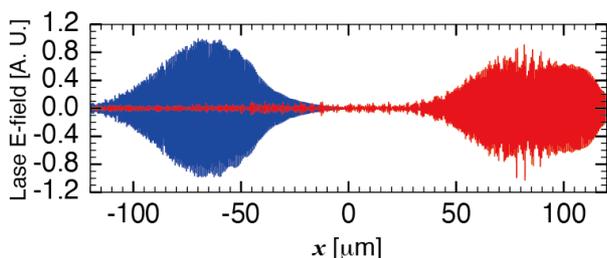


Figure 3: Initial laser field (blue line) and laser field in the plasma (Red line).

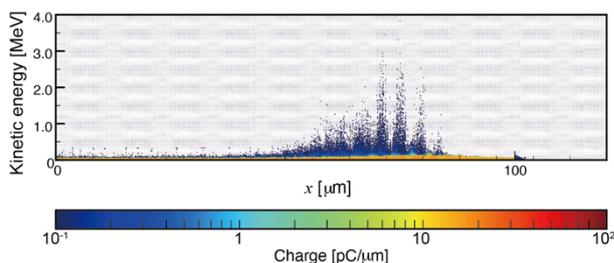


Figure 4: Kinetic energy distribution in the wakefield.

なった. Figure 2 は設定した計算空間の概念図であり, 縦横 $80 \mu\text{m} \times 240 \mu\text{m}$ の計算空間を設定し, 初期電離した電子密度 10^{19}cm^{-3} , 幅 $200 \mu\text{m}$ のプラズマを設定した. 設定した空間に波長 800nm , レーザーエネルギー 120mJ , レーザーパルス幅 120fs (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 $3.6 \mu\text{m}$ であり集光強度は 10^{19}W/cm^2 である.

Figure 3 のようにガウス型の入射レーザーの電場がプラズマ中で変調され, それにともない生じた航跡場によって Fig. 4 のように電子が加速されていることがわかる.

3. 実験結果

Figure 5 は構築した実験装置である. 1TW レーザーシステム (波長 800nm , 最大レーザーエネルギー 120mJ , 半値全幅パルス幅 120fs) から射出されたレーザーを真空容器に導き, 焦点距離 $f = 175 \text{mm}$ の非軸放物面鏡を用いて超音速ノズルから噴出するガスジェットに集光照射しプラズマを生成した. ガス種は比較的電離しやすい Ar ガスを用い, ガス配管に掛ける圧力は最大で 0.95MPa とした. レーザーの一部からプローブレーザーを生成し, レーザー干渉計を構築してプラズマの電子密度を計測した. また, レーザー進行方向にシンチレータースクリーンを設置し, 電子ビームをモニターした.

Figure 6 は圧力が 0.95MPa の時のレーザー伝搬軸上のプラズマ密度分布である. シミュレーションで設定したプラズマ密度と同程度のプラズマ密度 (10^{19}cm^{-3}) に達しているが, これまでに電子ビームを観測できていない.

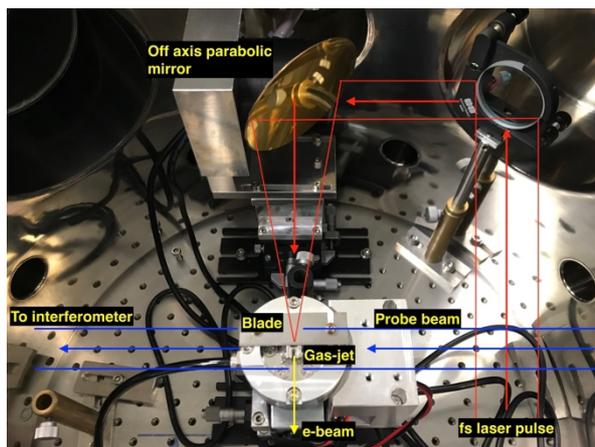


Figure 5: Experimental setup.

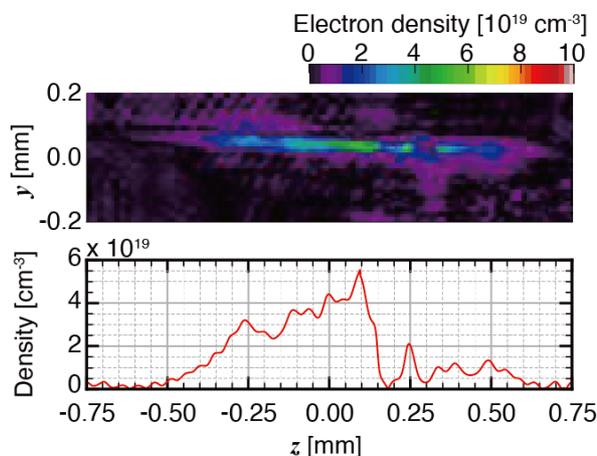


Figure 6: Results of plasma density measurement.

4. 今後の展望

2D-PIC シミュレーションを行い, 1TW 級のレーザーによってレーザー航跡場加速研究が行える条件を示したが, 実験的に電子ビームを観測するに至っていない. シミュレーションにおける集光径 $3.6 \mu\text{m}$ を実験で達成することは難しく, レーザー強度が相対論的強度に達していない. 相対論的自己収束が生じているかを確認し, ターゲット開発にも取り組む.

謝辞

本研究は科学研究費助成事業 JP19K20597, JP22K03565, JP22H01197 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 $<10 \text{mJ}$ 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).