

大阪大学におけるレーザー電子加速研究

STUDY ON LASER-DRIVEN ELECTRON ACCELERATION AT OSAKA UNIVERSITY

中新信彦^{#, A, B)}, 細貝知直^{A, B)}, 益田伸一^{A, B)}, ジドコフアレクセイ^{A, B)}, パサックナヴィーン^{A, B)}, 岩佐健太^{C)}, 水田好雄^{C)}, 竹口直輝^{C)}, 末田敬一^{A)}, 金展^{A)}, 兒玉了祐^{A, C, D)}, Nobuhiko Nakanii^{#, A, B)}, Tomonao Hosokai^{A, B)}, Shin-ichi Masuda^{A, B)}, Alexei Zhidkov^{A, B)}, Naveen Pathak^{A, B)}, Kenta Iwasa^{C)}, Yoshio Mizuta^{C)}, Naoki Takeguchi^{C)}, Keiichi Sueda^{A)}, Zhan Jin^{A)}, and Ryosuke Kodama^{A, B, D)}

^{A)} Photon Pioneers Center, Osaka University

^{B)} CREST, Japan Science and Technology Agency

^{C)} Graduate School of Engineering, Osaka University

^{D)} Institute of Laser Engineering, Osaka University

Abstract

Laser wake-field acceleration (LWFA) is expected to be basis for a novel technology allowing to downsize high-energy particle accelerators into tabletop-size due to ultra-high-gradient acceleration fields in laser driven plasma waves. Nowadays, the topmost goal of LWFA researches is beam control and repeatable/stable generation on a state of the art level of conventional accelerators. In this paper, updated achievements of our recent activity on the staging LWFA aiming at practical accelerator devices are summarized.

1. はじめに

レーザー航跡場加速(Laser Wakefield Acceleration: LWFA)は高エネルギー加速器を従来の1/1000にもダウンサイズする技術として期待されている。一般に加速器の小型化にはより大きな加速電場が必要であるが、高周波加速器では加速管材料表面の絶縁破壊によって現実的には100MV/m程度が限界である。一方、超短パルス高強度レーザーとプラズマの相互作用によって励起される電子プラズマ波の加速電場は100GV/mを越える。TajimaとDawsonによってLWFAの理論が提唱されてから30余年が経過し¹⁾, 原理実証研究は進みGeV級の加速エネルギー利得²⁾や準単色ビームの発生³⁾は既に達成され現在は更なるエネルギーフロンティアに向かって研究開発競争が進んでいる。にもかかわらず、実用に耐えるレーザー航跡場加速器は未だに存在しない。LWFAを次世代加速器の候補として真面目に考えるなら、従来の高周波加速器並みの高い信頼性と制御性の確立は避けて通れない。高エネルギー加速器開発分野のみならず物性材料科学等の極短ビーム利用の応用研究からもLWFAには大きな期待が寄せられている。

本講演では、現在著者らが大阪大学光科学センターで取り組んでいるレーザー加速の実用化を目指したレーザー航跡場電子加速の取り組みと開発状況について報告する。

2. ステージングレーザー航跡場加速

高強度レーザーパルスの電磁場で電子を加速するためには、高強度レーザーパルスとプラズマの相互作用で励起される電子プラズマ波(レーザー航跡場)の超高電場を利用する。まず、超短パルスレーザー光をガスに集光して $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度の強度にするとレーザーパルスの後方に航跡場(ウェーク)が励起される。航跡場振動は位相速度がレーザーパルスの群速度(ほぼ光速)に等しい縦波であり、この電子密度の疎密によって生じる電場に電子を捕捉して加速する。

一般的な自己入射方式のLWFAにおいては1つのレーザーパルスで励起された1つのレーザー航跡場の中で電子の入射と加速を連続的に行う。しかしながら、電子ビームパラメータを精密に制御するためには、従来加速器と同様に加速場の適切な位相への正確な電子入射が必要である。この理由から、電子入射器用のレーザー航跡場と加速管用のレーザー航跡場を(同期した複数のレーザーパルスの照射で)独立に生成する多段(ステージング)レーザー航跡場加速が提案された。2段のステージングレーザー航跡場加速の場合はFig.1に示すように、上流のレーザー航跡場の波破碎で生成した電子バンチを下流の追加速レーザー航跡場に入射し加速を行う。追加速航跡場の数を増やし直列に配置することによってさらなる高エネルギーまで電子を加速することが可能になる。さらに、上流のレーザー航跡場で生成した低エミッタンス極短電子バンチを下流の

[#] nobu.nakanii@ppc.osaka-u.ac.jp

レーザー航跡場の適当な位相空間に正確に入射すると、位相回転によって Fig.1 の吹出し中に示す電子エネルギースペクトルの狭帯化が起こる。数値計算 (Fig.2) では、典型的なプラズマ波破碎による電子バンチの熱的なスペクトル (一点鎖線) が下流の追加加速レーザー航跡場の適当な位相 ϕ [rad] への入射で狭帯化 (実線) することが確認されている²⁾。

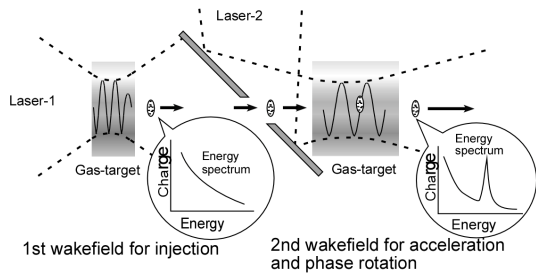


Figure 1: Typical configuration of staged LWFA.

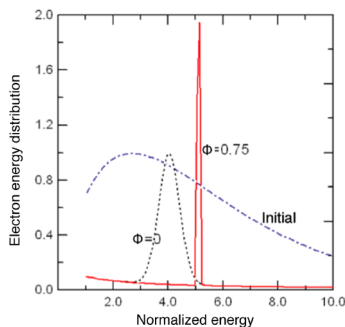


Figure 2: Energy spectrum narrowing of injected electron bunch by phase rotation effect in wake-field for post-acceleration.

3. レーザー航跡場加速器の開發現状

3.1 電子入射器

近年、プラズママイクロオプティクス (PMO: Plasma Micro Optics) と呼ばれるプラズマ光導波技術の開発³⁻⁵⁾によって、LWFA の電子ビームの品質、安定性、制御性が飛躍的に向上し実用加速器に近づいた (詳細は文献[3-5]に譲る)。

LWFA のドライバーとして用いられる数十フェムト秒、数十 TW の高強度レーザーパルスは CPA (Chirped Pulse Amplification) 法により生成されるが、レーザーパルスのナノ秒~ピコ秒前には裾野のようなプレパルスが存在する。著者らはこのプレパルスで生成されるプリフォームドプラズマを積極的に高強度レーザー光の伝播制御に活用する PMO を考案し制御性と再現性の高い電

子ビーム発生を実現した³⁻⁴⁾。PMO は光ファイバーやレンズと同様のウェーブガイド機能や集光機能を持ち、TW 級のハイパワー領域のレーザー光にも使用可能なプラズマで作られた光学素子である⁵⁾。PMO はガス標的のレーザー集光点付近にレーザー軸方向の磁場を印加し、さらにレーザープレパルスの強度・形などを適当に調整することで形成される^{3,4,5)}。

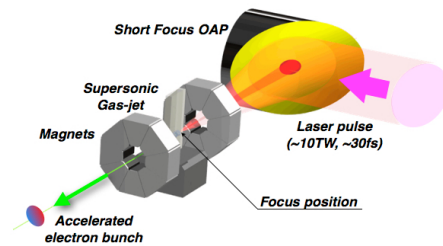


Figure 3: Experimental set up for LWFA injector.

Fig.3にレーザー航跡場電子入射器の実験配置を示す。真空容器中にシート形状の超音速ヘリウムガスジェット標的を挟むように二つの永久磁石を配置し、ガスジェット内のレーザー伝播軸方向に約 0.2T の磁場を印加する。リング状磁石の中心穴を通して高強度レーザーパルス ($\sim 10\text{TW}$, $\sim 30\text{fs}$) を標的ガス上に短焦点の軸外し放物面鏡 (F 値 ~ 3.5) を用いて集光する。PMO を形成しなかった場合 (磁場 $B=0$: これまでの LWFA) と形成した場合 (磁場 $B=0.2\text{T}$) の電子ビームの空間プロファイルを図 4 (a), (b) に示す。PMO を形成した場合は、電子ビームの指向性は非常に高く、横方向幾何学的エミッタンスは $0.02\pi\text{mm mrad}$ 、位置安定性は $300\mu\text{rad}(\text{rms})$ 以下、総電荷量は 1nC に達しこれまでの十倍以上の値を示す。ビームの指向性と位置安定性の劇的な向上 (Fig.5) は PMO の形成ダイナミクスに大きく起因している (詳細は文献[3,5]を参照)。また、この PMO を用いると電子ビームの正確なステアリング (方向操作) も可能である¹⁸⁾。入射器からの電子ビームは、エネルギースペクトルが熱的に広がっている (有効電子温度 $\sim 25\text{MeV}$) にも関わらず、高い指向性を維持したまま放出方向を操舵される (Fig.6)。この PMO を用いたステアリングでは、電子ビームのエネルギースペクトル・電荷量・エミッタンスは維持されたまま放出方向のみ変化する。これは、エネルギー広がりを持つ極短電子バンチを下流のレーザー航跡場へ正確に入射することが求められる多段レーザー航跡場加速器の電子入射器にとって極めて有用な機能である。

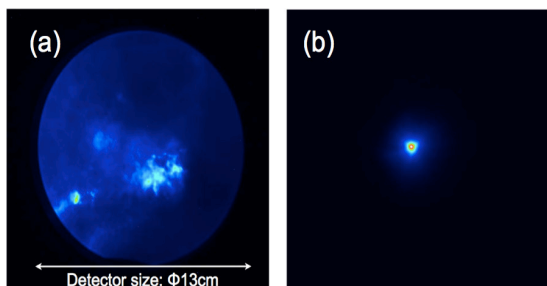


Figure 4: Electron beam profiles without PMO (a), and with PMO (b).

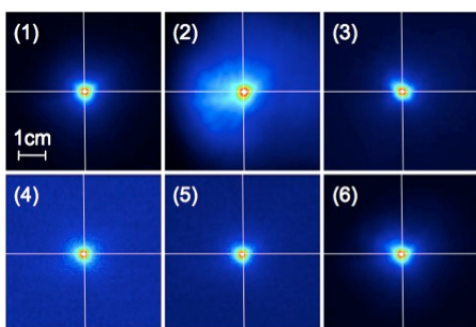


Figure 5: Electron beam profiles of 6 successive shots.

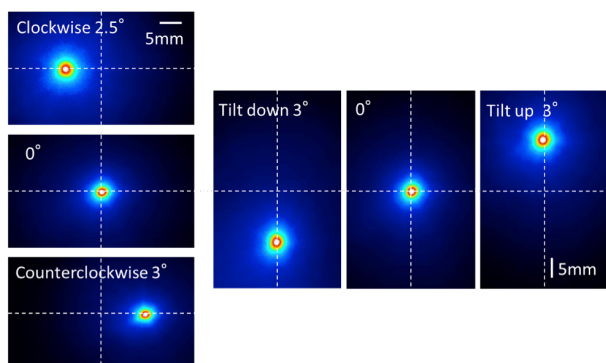


Figure 6: Pointing control of electron beams by PMO.

3.2 二段ステージング加速

多段 LWFA の原理実証は前段にコーン形状の PMO を、後段に長尺中空ファイバー形状の PMO(スプラッシュプラズマチャンネル⁵⁾)を形成して実施された⁴⁾。各 PMO の中で励起されるレーザー航跡場がそれぞれ電子入射器と追加速管の役目を負う。この実験で、電子ビームは高い指向性と安定性を維持したままビームの追加速 (チャンネル長 ~ 2 mm で ~ 100 MeV) と位相回転による準単色化($\Delta E/E < 10\%$)を同時に達成し電子入射器を用いた多段 LWFA を世界で初めて実証した。先に述べた通り、電子ビームのエネルギースペクトルを安定かつ自在に操るためには、同期のとれた別々のレーザーパルスで

各々のレーザー航跡場を独立に駆動し電子入射の位相制御を正確に行うことが必要であるため、著者らは二つのレーザーパルスで駆動する二段レーザー航跡場加速装置にアップグレード中である。さらに、発生した極短電子バンチを任意の地点まで輸送するための電子ビームラインも稼働を開始した (Fig. 7)。

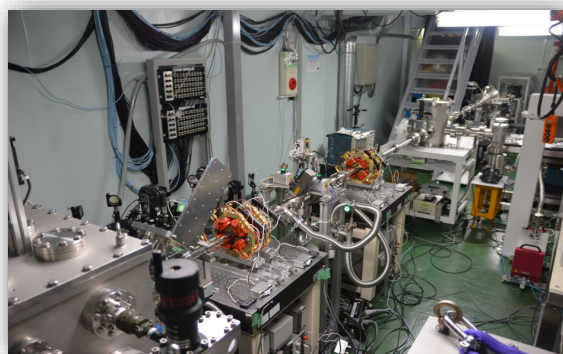


Figure 7: LWFA beam-line at Osaka University.

4. まとめ

超小型高エネルギー電子加速器の実現を目指すレーザー航跡場加速の現状と取り組みについて報告した。LWFA 研究において電子ビームの安定化は極めて重要である。そのために著者らは PMO を開発した。これによって、これまで不安定で制御が困難であった LWFA がようやく制御可能な電子加速法となりつつある。この PMO によるビームの安定化技術をベースに多段 LWFA やビームステアリングなど実用化に近づくための研究も始まっている。加えて、電子ビームの位置安定性の劇的な向上により従来加速器のビーム光学の使用が可能となり、加速器としてのビームラインの構築も進められている。これからも LWFA 加速器の実現に向けて着実に開発を進めて行く必要がある。

参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, (1979) 267.
- [2] T. Hosokai, S. Masuda, N. Nakanii, *et al*, Proc. of Int. Conf. on High Energy Density Sciences 2012 (2012) HED-6-4.
- [3] T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, *et al*, Phys. Rev. Lett. **97**, (2006) 075004.
- [4] T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Yamazaki, *et al*, Appl. Phys. Lett. **96**, (2010) 121501.
- [5] Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda, *et al*, Phys. Rev. ST Accel. Beams. **15**, (2012) 121301.