

超小型加速器を目指すレーザー航跡場加速の進展と展開

細貝 知直^{*,**}・中新 信彦^{*,**}・益田 伸一^{*,**}

Novel Accelerators Based on Laser Wake-Field: Latest Status and Advance

Tomonao HOSOKAI^{*,**}, Nobuhiko NAKANI^{*,**} and Shinichi MASUDA^{*,**}

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. Until recently, lots of proof-of-principle experiments have been done, and they have demonstrated the potential as a high-energy compact electron accelerator including quasi-mono-energetic and GeV class electron acceleration. Nowadays, the topmost goal of LWFA researches is beam control and 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.

Key words: laser wake-field acceleration (LWFA), wave-breaking electron injection, staging acceleration, plasma-micro-optics

今日の科学技術、産業、医療の発展に大きく貢献している加速器であるが、ビーム出力の高エネルギー化・大強度化とともに装置は巨大化し、最先端の加速器の建設には国家プロジェクト規模の膨大な資金と立地が必要とされるまでになった。現在、加速器の小型化への要求は非常に大きいものの、装置を飛躍的に小型化する技術はいまだ確立されていない。このような状況を背景に、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1000分の1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100 MV/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100 GV/mを超える。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、ギガエレクトロンボルト (GeV) 級の加速エネルギー

利得²⁻⁴⁾や準単色ビームの発生⁵⁻⁸⁾はすでに達成された。現在はさら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いまだに存在しない。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パルス粒子ビーム利用の応用研究からもLWFAに大きな期待が寄せられている今、その開発は急務である。

本稿では、現在著者らが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、安定な電子入射器とそれを用いた多段航跡場加速にフォーカスして概説する。また、近年の電子ビームの制御性の劇的な向上によって、従来加速器で利用される電磁石などのビームオプティクスを用いたビーム輸送技術の使用がLWFAでも可能となりつつあるので、紹介する。

* 大阪大学光科学センター (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1) E-mail: hosokai@ppc.osaka-u.ac.jp

** 科学技術振興機構 CREST (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

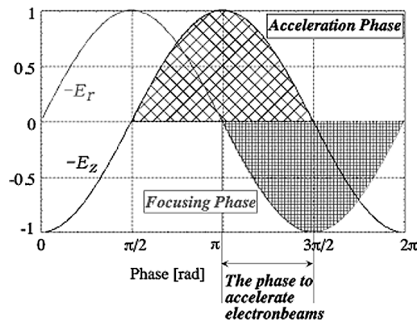


図1 レーザー航跡場中の縦方向 (z) と横方向 (r) の電場。

1. レーザー航跡場による電子加速

1.1 レーザー航跡場加速の原理

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。真空中を伝搬する光は電場の向きが伝搬方向に垂直に振動する横波であり、したがってレーザー電場をそのまま粒子加速に利用することはできないためである。まず、超短パルスレーザー光をガスに集光して 10^{18} W/cm^2 程度の強度にすると、レーザーの光電場は $\sim 10^9 \text{ V/cm}$ に達し、原子内の束縛電子はトンネル効果により 10 fs 以下の短時間のうちに完全電離してプラズマ化する。レーザーパルスはプラズマ電子をレーザーパルスのポンデロモータビ力により押し退けながら進むため、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加速電場に電子を捕捉して加速する（プラズマ振動をしている電子は速度がプラズマ波の位相速度から大きく外れているので、捕捉されない）。電子がプラズマ波に捕獲され連続的に加速されるためには、あらかじめ相対論的エネルギーまで加速した電子バンチを作り、航跡場の加速位相に乗って運動するように入射させる必要がある。また、極短パルスのシングル電子バンチを得るためには、電子バンチをプラズマ波の単一のバケットの加速位相に乗せるように入射させなければならない。超短レーザーパルスがレーザーの進行方向と半径方向に励起するレーザー航跡場の位相を図1に示す。進行方向のプラズマ波の電場は電子を加速もしくは減速させ、半径方向のプラズマ波の電場は電子を収束もしくは発散させるが、進行方向と半径方向の電場の位相は $\pi/2$ ずれているので、電子バンチが発散することなく加速されるのは進行方向位相の $\pi \sim 3\pi/2$ の区間である。したがって、極短電子バンチを効率的に軸方向へ加速するためには、入射電子のバンチ長はプラズマ波長の4分の1以下で

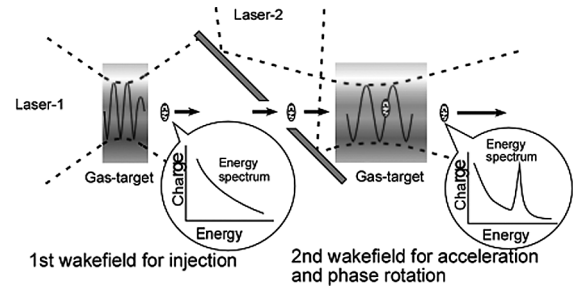


図2 多段レーザー航跡場加速。

なければならない。実際には、LWFAの典型的なプラズマ波長はおよそ $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度なので、時間幅 $6 \sim 60 \text{ fs}$ 、空間的にも $2 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度の極短電子バンチを生成して加速可能な位相に整合するように入射させなければならない。LWFA研究黎明期においては、この電子入射に高周波加速器が用いられたものの⁹⁾、レーザー航跡場の非常に狭い位相への電子入射の要求を満足する極短パルス超低エミッタンス電子ビーム発生 の困難さと、高周波加速器とレーザー航跡場のフェムト秒オーダーの同期が大きな技術的課題となり¹⁰⁾、現在は従来加速器を用いない自己入射 (self-injection) 型の電子入射が主流である¹¹⁻¹⁴⁾。最も簡単かつ現実的なものは、プラズマ波の破碎による電子入射法¹⁴⁻¹⁶⁾である。プラズマ波の伝搬途中に急峻な密度勾配を設けることで密度境界部分での局所的なプラズマ波破碎を誘起し、破碎したプラズマ波より相対論的エネルギーをもつ電子を放出させ、加速場となるレーザー航跡場へ入射する。このプラズマ波の破碎法を含む自己入射方式では、電子入射と加速航跡場との間に同期ジッターは原理的には存在せず、極短電子バンチを航跡場の加速位相に正確に入射することが可能である。

1.2 多段レーザー航跡場加速

自己入射方式のレーザー航跡場加速においては、高強度レーザーパルスが励起する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。前節で述べた通り、電子ビームパラメータを精密に制御するためには、加速を担うレーザー航跡場の（加速）位相への正確な電子入射が不可欠である。しかしながら、電子入射に適した非線形レーザー航跡場と電子加速に適した線形航跡場を励起するための最適なレーザー集光条件は各々異なるため、1つのレーザーパルスによる精密なビームパラメータの制御はきわめて困難である。以上より、現実的な（安定かつ制御性の高い）加速器を作るためには、電子入射用のレーザー航跡場と加速用レーザー航跡場を（複数のレーザーパルスの照射で）独立に生成する多段加速が現実的である。多段加速

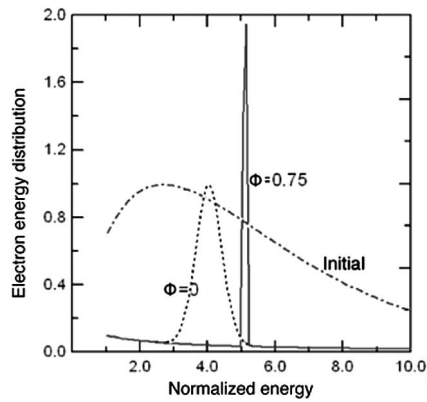


図3 レーザー航跡場中の位相回転による入射電子ビームのエネルギースペクトルの狭帯化。

とは独立した複数の加速場によって電子を段階的に加速するものであり、2段レーザー航跡場加速の場合は図2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。

一方、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レーザー航跡場の適当な位相空間に正確に入射させると、位相回転によって図2の吹き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。前方に減速位相、後方に加速位相があるレーザー航跡場の境界部分に電子バンチを入射させると、電子バンチの低エネルギー成分は加速され高エネルギー成分は減速されるためであり、この現象を「位相回転」とよぶ。なお、位相回転ではエネルギー幅が狭くなる一方、バンチ幅は航跡場の波長（数 μm ）以下程度に維持される。したがって、多段航跡場加速ではエネルギースペクトルの制御性の高い極短パルス電子加速器も期待できる。数値計算では、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¹⁷⁾（図3）。

2. レーザー航跡場加速器の開発現状

近年、プラズママイクロ-optics (plasma micro optics: PMO) とよばれるプラズマ光導波技術の開発¹⁸⁻²⁰⁾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¹⁸⁻²⁰⁾に譲るが、本節ではPMOを用いた多段レーザー航跡場加速開発の現状を紹介する。

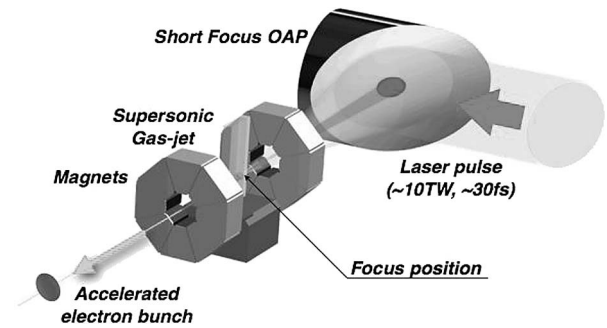


図4 LWFA入射器の実験配置。

2.1 電子入射器

LWFAのドライバーとして用いられる数十 fs、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。LWFAではこのプレパルスが集光点付近に球状プラズマ（プレプラズマ）を形成し高強度のメインパルスの集光を妨げるため、レーザー航跡場で加速される電子ビームは飛散し、再現性も乏しくなる^{14, 21, 22)}。一方、筆者らはこのプレプラズマを積極的に活用する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^{18, 19)}。PMOと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、テラワット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デバイスである²⁰⁾。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¹⁸⁻²⁰⁾。図4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2つの永久磁石を配置し、ガスジェット内のレーザー伝搬軸方向に約0.2 T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（ ~ 10 TW、 ~ 30 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。集光強度は $\sim 8.0 \times 10^{19}$ W/cm²で、メインパルスに対するASE (amplified spontaneous emission) プレパルスの典型的なコントラスト比は $10^6 \sim 10^7$ 程度である。この軸方向外部磁場とASEプレパルスでPMOを形成した後に、メインパルスが集光点に到達し、LWFAが実施される。PMOを形成しなかった場合（磁場 $B = 0$ ）と形成した場合（磁場 $B = 0.2$ T）の電子ビームの空間プロファイルを図5 (a), (b)に示す。PMOを形成しない場合（図5 (a)）は、電子ビームは広い領域に飛散し、再現性もきわめて悪い（いわゆる、よく知られた典型的なLWFAの電子ビームである）。一方、PMOを形成した場合（図5 (b)）は、電子ビームの

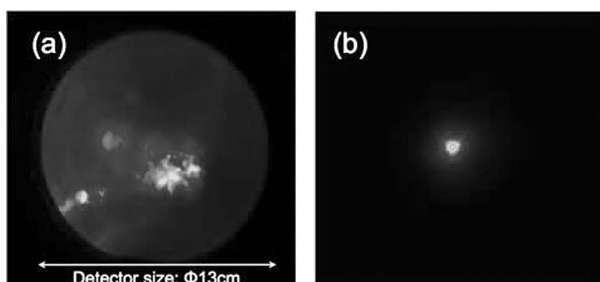


図5 PMOを用いない場合 (a) と用いる場合 (b) の典型的な電子ビームの空間プロファイル。

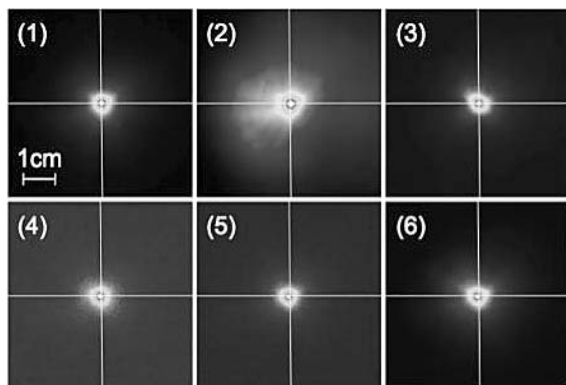


図6 電子ビームの空間プロファイル (連続6ショット)。

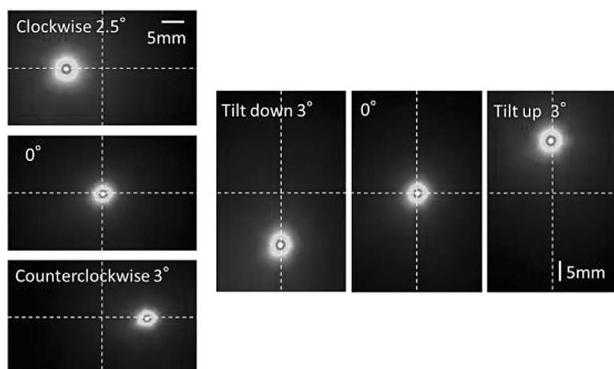


図7 PMOによる電子ビームステアリング。

指向性と位置安定性は非常に高く、横方向幾何学的エミッタンスは $0.02 \pi \text{ mm mrad}$ ときわめて小さく、総電荷量は 1 nC に達し、PMOを形成しない場合 (a) の10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 (図6) はPMOのダイナミクスに大きく起因しているが、メカニズムの詳細は文献^{18,20)}を参照されたい。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²³⁾。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 (その有効電子温度は $\sim 25 \text{ MeV}$ である) にもかかわらず、高い指向性を維持したまま放出方向を印加磁場の方向に正確に変える (図7)。 0° をレーザー軸とし外部磁場の水平垂直方向の傾斜角

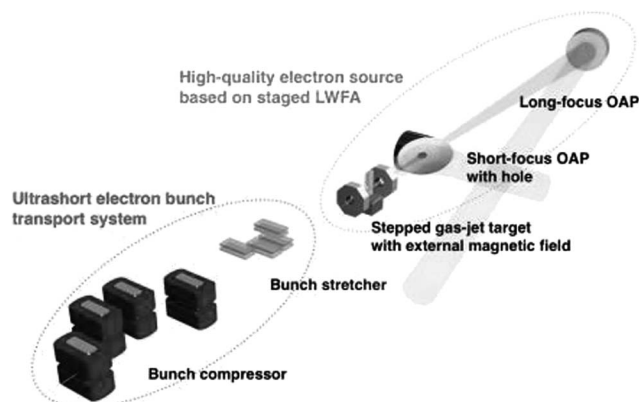


図8 多段 (2 段) LWFA の概略。

度を図中に示す。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も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、きわめて有用な機能である。

2.2 多段レーザー航跡場加速

多段レーザー航跡場加速の原理実証は、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スプラッシュプラズマチャネル (PMO)²⁰⁾を形成して実施された¹⁹⁾。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 (チャネル長 $\sim 2 \text{ mm}$ で $\sim 100 \text{ MeV}$) と位相回転による準単色化 ($\Delta E/E < 10\%$) を同時に達成し (詳細は文献¹⁹⁾を参照のこと)、電子入射器を用いた多段レーザー航跡場加速が世界で初めて実証された。この実証実験では1つのレーザーパルスで2つの航跡場 (電子入射部と加速部) を駆動するため、電子の追加速航跡場への入射位相を制御する術をもたない。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。筆者らは、2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 (器) を、多段加速の原理実証実験をベースに構築中である²⁴⁾。システムの概略図を図8に示す。このシステムは、高品質極短電子ビーム発生部を構成する電子入射器、後段レーザー航跡場、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輸送部で構成されている。電子ビームの飛躍的な位置安定性と指向性の向上、さらにビームステアリング技術の確立によって、レーザー航跡場

加速においても従来加速器で利用される四極磁石や偏向磁石などの磁気回路を用いたビーム輸送技術を用いて加速器ビームラインの構築が可能になりつつある。

本稿では、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、筆者らの取り組みについて概説した。上述の通り、研究当初の目標であった GeV 級の電子加速や準単色ビーム発生は、すでに世界各国の研究機関で原理実証された。高い加速勾配と到達加速エネルギー利得は加速器の重要な性能指標であるため、現在も世界各国の大型レーザー研究施設では、10 ペタワット級以上の超高強度レーザーの開発とともに、加速エネルギー利得のチャンピオンデータ更新に向かって全力疾走を続けている。これらの研究の進展とともに、レーザー航跡場加速の粒子加速機構としての高いポテンシャルは徐々に認められるようになってきた。一方で、発生する電子ビームの安定化は実用デバイスとしてきわめて重要であり、今後は次世代加速器の候補として、高周波加速器並みの高い信頼性と安定性/再現性を原理実証研究と並行して追求していくことが必要である。

近年、筆者らは、レーザープレパルス制御、外部磁場プラズマ制御、光導波路生成等の要素技術開発の積み上げの成果としてプラズママイクロオプティクスを開発した。これによって、これまで不安定で制御が困難と考えられていた LWFA が、ようやく安定かつ制御可能な電子加速器となりつつある。この LWFA 電子入射器の安定化技術をベースに、レーザー航跡場を加速管のように直列に並べて追加速を行う多段レーザー航跡場加速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飛躍的な向上により従来加速器のビームオプティクスの使用が可能となり、プラズマの制御だけに頼っていたビームの制御に従来の高周波加速器の技術を加えて使用することが可能になった。これからはレーザー航跡場加速器の実現に向けて着実に開発を進めていく必要がある。

現在、レーザー航跡場加速研究は原理実証段階から現実的な加速器構築段階へ向かう過渡期にある。現実的な加速器の実現に向けて解決すべき問題はまだまだ山積しており、基本的な要素技術開発は着実に進めていかなくてはならないが、そのためにはこれまで以上に高いレベルでのプラズマダイナミクスを含めた粒子加速機構の理解が鍵となる。今後レーザー航跡場加速器の研究開発が進み、信頼性の高い安定な超高エネルギー電子加速器や桌上極短パルス高品質電子源が登場すれば、エネルギーフロンティア科学や超高速動の物性科学研究を展開する大きな力となるであろう。

う。電子ビームの高エネルギー性と極短パルス性を生かしたさまざまな応用が展開されると同時に、この新しいコンパクトな高エネルギー極短電子加速器を用いた新しい二次光源（例えば、全光駆動桌上 XFEL 光源、桌上サイズの高輝度極短パルス X 線-ガンマ線源など）と、それらを活用したユニークな研究や産業応用が創出されていくであろう。

本稿をまとめるにあたりご協力いただきました、大阪大学の兒玉了祐教授、佐野智一准教授、Alexei G. Zhidkov 特任教授、島根大学の荒河一渡准教授、高輝度光科学研究センターの矢橋牧名博士に篤く御礼申し上げます。

文 献

- 1) T. Tajima and J. M. Dawson: "Laser electron accelerator," *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979) 267-270.
- 2) W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Tóth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder and S. M. Hooker: "GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator," *Nat. Phys.*, **2** (2006) 696-699.
- 3) N. A. M. Hafz, T. M. Jeong, I. W. Choi, S. K. Lee, K. H. Pae, V. V. Kulagin, J. H. Sung, T. J. Yu, K. Hong, T. Hosokai, J. R. Cary, D. Ko and J. Lee: "Stable generation of GeV-class electron beams from self-guided laser-plasma channels," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 571-577.
- 4) X. Wang, R. Zgadzaj, N. Fazel, Z. Li, S. A. Yi, X. Zhang, W. Henderson, Y.-Y. Chang, R. Korzekwa, H.-E. Tsai *et al.*: "Quasimonoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV," *Nat. Commun.*, **4** (2013) 1988.
- 5) S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin, A. G. R. Thomas, J. L. Collier, A. E. Dangor, E. J. Divall, P. S. Foster, J. G. Gallacher, C. J. Hooker *et al.*: "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions," *Nature*, **431** (2004) 535-538.
- 6) C. G. R. Geddes, Cs. Tóth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary and W. P. Leemans: "High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding," *Nature*, **431** (2004) 538-541.
- 7) J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy and V. Malka: "A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams," *Nature*, **431** (2004) 541-544.
- 8) E. Miura, K. Koyama, S. Kato, N. Saito, M. Adachi, Y. Kawada, T. Nakamura, M. Tanimoto: "Demonstration of quasi-monoenergetic electron-beam generation in laser-driven plasma acceleration," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 251501.
- 9) K. Nakajima: "Challenge to a tabletop high-energy laser wakefield accelerator," *Phys. Plasmas*, **3** (1996) 2169-2174.
- 10) M. Uesaka, T. Watanabe, T. Kobayashi, T. Ueda, K. Yoshii, G. Wu, X. Li, Y. Muroya, J. Sugahara, K. Kinoshita *et al.*: "Hundreds- and tens-femtosecond time-resolved pump-and-probe analysis," *Rad. Phys. Chem.*, **60** (2001) 303-306.
- 11) D. Umstadter, J. M. Kim and E. Dodd: "Laser injection of ultrashort electron pulses into wakefield plasma waves," *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 2073-2076.
- 12) E. Esarey, R. F. Hubbard, W. P. Leemans, A. Ting and P. Sprangle: "Electron injection into plasma wakefields by colliding laser pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **79** (1997) 2682-2685.
- 13) V. Malka, S. Fritzler, E. Lefebvre, M.-M. Aleonard, F. Burgy, J.-P. Chambaret, J.-F. Chemin, K. Krushelnick, G. Malka, S. P.

- D. Mangles *et al.*: “Electron acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse,” *Science*, **298** (2002) 1596–1600.
- 14) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, K. Nakamura, T. Watanabe, T. Ueda, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima and M. Uesaka: “Effect of a laser prepulse on a narrow-cone ejection of MeV electrons from a gas jet irradiated by an ultrashort laser pulse,” *Phys. Rev. E.*, **67** (2003) 036407.
 - 15) S. V. Bulanov, F. Pegoraro, A. M. Pukhov and A. S. Sakharov: “Transverse-wake wave breaking,” *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 4205–4208.
 - 16) S. V. Bulanov, N. Naumova, F. Pegoraro and J. Sakai: “Particle injection into the wave acceleration phase due to nonlinear wake wave breaking,” *Phys. Rev. E*, **58** (1998) R5257.
 - 17) T. Hosokai, S. Masuda, N. Nakanii, A. Zhidkov, Z. Jin, T. Sano, K. Arakawa, Y. Mizuta, S. Kajino, K. Makito *et al.*: “Repeatable high-quality electron bunch driven by staged LWFA: Towards single-shot ultrafast electron imaging,” *Proc. of International Conference on High Energy Density Sciences (HED)*, HED-6-4 (Yokohama, 2012).
 - 18) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, A. Maekawa, A. Yamazaki and M. Uesaka: “Effect of external static magnetic field on the emittance and total charge of electron beams generated by laser-wakefield acceleration,” *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 075004.
 - 19) T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Yamazaki, Y. Mizuta, M. Uesaka and R. Kodama: “Electron energy boosting in laser-wake-field acceleration with external magnetic field $B \sim 1$ T and laser prepulses,” *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010) 121501.
 - 20) Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda, A. Zhidkov, K. Makito, N. Nakanii, S. Kajino, A. Nishida, M. Kando, M. Mori, H. Kotaki, Y. Hayashi, S. V. Bulanov and R. Kodama: “Splash plasma channels produced by picosecond laser pulses in argon gas for laser wakefield acceleration,” *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams.*, **15** (2012) 121301.
 - 21) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, K. Nakamura, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima and M. Uesaka: “Refraction effects on the cavity formation and interaction of an intense ultra-short laser pulse with a gas jet,” *Phys. Plasmas*, **11** (2004) L57.
 - 22) T. Hosokai, K. Kinoshita, T. Ohkubo, A. Maekawa, M. Uesaka, A. Zhidkov, A. Yamazaki, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, S. V. Bulanov, P. Tomassini, A. Giulietti and D. Giulietti: “Observation of strong correlation between quasimonoeenergetic electron beam generation by laser wakefield and laser guiding inside a preplasma cavity,” *Phys. Rev. E.*, **73** (2006) 036407.
 - 23) H. Nakahara, T. Hosokai, S. Masuda, N. Nakanii, Y. Mizuta, S. Kajino, K. Makito, A. Zhidkov and R. Kodama: “Electron injection control on laser-wakefield acceleration by external magnetic field,” *Proc. of International Conference on High Energy Density Sciences (HED)*, HED-P20 (Yokohama, 2012).
 - 24) N. Nakanii, T. Hosokai, S. Masuda, A. G. Zhidkov, Z. Jin, Y. Mizuta, H. Nakahara, S. Kajino, K. Makito, A. Nishida *et al.*: “Development of high-quality electron beam via laser wakefield accelerator towards ultrafast imaging,” *Proc. of International Conference on High Energy Density Sciences (HEDS)*, HED-P12 (Yokohama, 2012).

(2014 年 7 月 3 日受理)