X線自由電子レーザーを目指したレーザー航跡場加速研究の現状

細貝 知直^{1,2}, 大塚 崇光¹, 兒玉 了祐^{1,2,3}

¹大阪大学 光科学センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Status of Laser Wakefield Acceleration Research Aiming for X-ray Free Electron Laser

Tomonao HOSOKAI^{1,2}, Takamitsu OTSUKA¹, and Ryosuke KODAMA^{1,2,3}

¹Photon Pioneers Center, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

²Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

³Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received January 2, 2017)

We review laser wakefield acceleration (LWFA) research that aims at table-top sized X-ray free-electron laser (XFEL) based on LWFA under the ImpACT program. LWFA is expected to be a novel scheme for accelerating electron beams beyond GeV-class energy with compact devices. In recent studies, the pointing stability of the electron beams from LWFA has been dramatically improved by plasma-micro-optics (PMO) that function as a focusing and optical-guiding tool for intense laser pulses. The PMO enables electron beams to be precisely controlled and/or transported by the beam-optics of conventional accelerators. With these techniques a staging LWFA has been demonstrated successfully, and high quality quasi-mono-energetic beams below the 100 MeV range are produced with good repeatability. Sub-GeV electron beams are also produced with the boosters. Finally, we introduce a new facility that includes a laser system designed for the exclusive use of the laser-driven XFEL, which is under construction at the RIKEN-Harima-Campus.

Key Words: Staged laser wakefield acceleration, X-ray free electron laser

1. はじめに

X線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser: XFEL)はこれまでの短波長放射光光源が達成し得ない高いピーク輝度, 高い空間コヒーレンス及びフェムト秒オーダーの極短パルス性を特徴とする極短波長光源である。材料科学ではこの光源の極めて高いピーク輝度と極短パルス性を活かし, フェムト秒かつロングストロームオーダーの高い時間空間分解能で物質ダイナミクスの直接観測を, また, 超高圧物性物理では集光強度が 10^{20} W/cm²を越える高いパワー密度により極限超高圧下のサイエンスが拓かれている。さらに生物医学や創薬など様々な基礎科学分野の超高速過渡現象の解明にも劇的な変革をもたらし, 今後もさらなる応用展開が期待されている¹⁻³⁾。

しかしながら, XFELはGeV級の直線加速器と波長数センチの周期磁場構造を持つ巨大なアンジュレータによって構成されるため, 理化学研究所播磨キャンパスで現在稼働中の世界最小XFEL装置SACLA(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron LAsEr)でさえ総延長700 mにも達する(400 mの8 GeV直線加速器棟, 240 mの光源棟

(真空封込み型アンジュレータ), 60 mの実験研究棟より成る)。装置規模が巨大であるため建設と運用には国家プロジェクト規模の莫大な資金を必要とし, 既に欧州とアジアで建設が始まっているものの, 現在稼働しているXFELは米国のLCLS(SLAC Linac Coherent Light Source)と日本のSACLAの二つの施設のみである。フォトンコストは極めて高価となり, 従って限られた研究課題にのみ使用が許される。もしXFELが大学や企業の研究室で運用可能なサイズにまで小型化すれば, 研究分野の裾野は大きく広がり基礎科学から応用までの幅広い研究展開や新しい極限科学の創出が期待されるのみならず, 産業への貢献も計り知れない。

XFELでは

$$\lambda_{\text{FEL}} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

(ただし, λ_{FEL} : XFELの波長, λ_u : アンジュレータ磁場の周期長, γ : 電子の相対エネルギー, K : アンジュレータの偏向パラメータを表す)の関係が成り立つことから, XFEL装置の小型化は高エネルギー加速器の小型

化, またはアンジュレータ磁場の短周期化(アンジュレータ光の波長を一定とする場合, アンジュレータの磁場周期を短くすると, 必要な電子エネルギーが小さくできる)もしくは, その両方を実施することで原理的には可能である³⁾(アンジュレータに関しては文献4)に譲る)。ここで, GeV級の高エネルギー加速器部の小型化に期待されている方策がレーザー航跡場加速(Laser Wakefield Acceleration: LWFA)である⁵⁾。LWFAは高強度超短パルスレーザーの伝搬に伴って励起される電子プラズマ波を利用した粒子加速法であり, この電子プラズマ波が有する非常に大きな加速電場は高周波加速の1000倍を超える100 GV/mにも達するため, 全長数百メートルの10 GeV級電子加速器部を数メートルの卓上サイズにまで小型化することができると期待される。自由電子レーザー(Free Electron Laser: FEL)のドライバーとしてレーザー航跡場加速を用いるアイディアはこれまでに提案され既に開発競争が始まっている⁶⁻⁸⁾。硬X線領域のFELで自己増幅放射(Self-Amplified Spontaneous Emission: SASE)を行う為には, 電子ビームが10 GeV級の加速エネルギーのみならず, 高い単色性($\Delta E/E < 0.1\%$), 超低エミッタンス性($< 1 \text{ } \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$), kA級の大電流(極短パルスかつ大電荷量)を同時に満足しアンジュレータへ輸送されることも重要となる⁹⁾。本稿では内閣府IMPACTプログラム「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」^{†1)}の下で著者らが取り組んでいるGeV級ステージングレーザー航跡場加速研究の現状をXFELのドライバー電子ビーム開発としての視点から概説した後, 理化学研究所播磨キャンパスにて構築を進めているレーザー航跡場加速ブラットホームの開発状況を紹介する。

2. ステージングレーザー航跡場加速

レーザー航跡場加速は研究黎明期に目標とされたGeV級の加速^{10,11)}や準単色ビーム発生¹²⁻¹⁶⁾の原理実証は既に達成され, 電子加速機構としての高いポテンシャルが示されている。しかしながら, 従来加速器のように電子ビームを毎ショット再現性良く生成することが未解決の大きな課題として残されている。高強度レーザーパルスを標的ガスに集光するだけの, 所謂これまでのレーザー航跡場加速においては, 非線形レーザー航跡場の中でプラズマ波の破碎による電子入射(被加速電子の生成)とプラズマ波の超高電場による加速がほぼ同時に起こる^{17,18)}。フェムト秒スケールの極短・単色・高エネルギーの電子バンチを毎ショット再現性良く生成するには, ~ 10 ミクロン以下の微小領域に励起されるレーザー航跡場の極めて狭い(~ 10 フェムト秒以下の)加速位相へ被加速電子を正確に入射する必要がある。これを制御性の乏しい非線形航跡場の中で実施することは現在の技術では不可能に近い。加えて, 電子ビームの大電荷量化に適切な標的のプラズマ密度と高エネルギー加速化

を目指す場合の標的密度はトレードオフの関係にあるため, これらの両立は電子の入射と加速が同時に起こる従来のレーザー航跡場加速では困難である。

これらを解決する方策として, ステージングレーザー航跡場加速が提案されている^{19,20)}。複数の高強度レーザーパルスでレーザー航跡場を駆動し, その機能を電子入射と加速に分離(従来加速器の電子銃と加速管に相当)する。2ステージ(二段)加速の例をFig. 1に示す。ガス標的の上流(高密度部)と下流(低密度部)にそれぞれ焦点距離の異なる高強度レーザーパルス(レーザーパルス1, 2)を照射しそれらパルスの後方に機能の異なるレーザー航跡場を励起する。上流の非線形プラズマ波(レーザー航跡場)の破碎が電子銃に相当しフェムト秒スケールの極短電子バンチの発生を担い, 加速管に相当する下流の線形レーザー航跡場(追加速場)がその電子バンチを追加速する。このように, 機能の異なるレーザー航跡場をそれぞれ独立に励起することで電子入射と追加速を同時に最適化することができ, さらに相対的に制御性の高い線形レーザー航跡場を追加速場とすることで電子入射の条件を緩くすることができると期待される。Fig. 2に追加速場の標的密度に対する入射電子のエネルギーへの要求値の簡単な見積もりを示す。入射電子のエネルギーは, 標的ガスのプラズマ密度に対するプラズマ波の群速度に相対論効果を考慮し見積もられた²¹⁾。追加速には線形領域近傍の $a_0 \sim 1$ が用いられるが, これまでの非線形航跡場 $a_0 \sim 3, 5$ の場合も比較として図中に示す。また, パルス放電による長尺の追加速場用の光導波路(後述)形成の容易さを考慮して追加速の標的密度には 10^{18} cm^{-3} 近傍を選択している。

ここで, a_0 は追加速レーザー航跡場を駆動するレーザーの規格化強度であり(相対論的效果の目安となる値), $a_0 = eE_0 / (m_0 c \omega) = 0.85 \lambda (\mu\text{m}) I (10^{18} \text{ W/cm}^2)^{1/2}$ で表される。ここで, E_0 はレーザー電場強度, e は電子の電荷量, m_0 は電子の静止質量, ω , λ はそれぞれレーザーの角周波数と波長である。追加速はこの条件を満足するように初段航跡場で電子(典型的には $\sim 20 \text{ MeV}$ 以上)を生

Fig. 1 Setup for 2-staged laser wakefield acceleration.

^{†1)} <http://www.jst.go.jp/impact/sano/>

Fig. 2 Required injection energy of electron beam for staging acceleration.

成し追加速レーザー航跡場へ入射させる。電子をさらなる超高エネルギーへ加速するには追加速レーザー航跡場のみを多段化すればよく、さらに電子入射のタイミングを調整することで追加速場での電子ビームのエネルギースペクトルの狭帯化やパルス圧縮などの制御も可能になる²²⁾。

3. ステージング加速の開発状況

3.1. 電子入射用レーザー航跡場(入射器)

ステージングレーザー航跡場加速で制御性の高い電子ビームを生成するには、各ステージで励起されるレーザー航跡場の高い再現性が前提となる。しかし、レーザー航跡場を励起する高強度レーザーパルスはガス標的内部の初期密度擾乱によるレーザーパルスの回折、高強度レーザーパルスによる自己集束、イオン化による屈折率分布の変化等の影響により安定な伝播を維持することが難しく、そのようなレーザーパルスで励起される航跡場には高い再現性を期待できない。その解決策として近年、著者らによりプラズママイクロオプティクス(Plasma Micro-Optics: PMO)が提案され、高強度レーザーパルス伝播の安定化とともにレーザー航跡場から発生する電子ビームの品質と安定性が飛躍的に向上した^{23,24)}。

PMOとは光ファイバやレンズと同様のウエ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^{23,24)}。PMOはガス標的内部のレーザー集光点付近にレーザー伝播軸方向に磁場を印加し、さらにレーザーパルスの強度・形などを適当に調整することにより形成される。レーザー航跡場を励起するメインレーザーパルスが到着する前にこれを焦点付近に形成することにより高強度のメインレーザーパルスの安定な伝播を可能とし指向性の高い電子ビームの安定な発生に大きく寄与する。

Fig. 3 にステージング加速の際にシャドウグラフ法で計測されたPMOのイメージを示す。レーザー集光点付

Fig. 3 Typical shadowgraph image of staging LWFA.

近に鼓形状のPMOとその後ろに長尺の直線状のPMOが形成されている。この鼓形状のPMOがメインパルスに対して集光オプティクスとして振る舞うことで、焦点付近のレーザースポットサイズ程度の微小領域で強いプラズマ波破碎による電子入射が発生するようになり、極めて安定に指向性の良い大電荷量(> 1 nC/shot)かつ、高エネルギーの電子ビーム(< 30 MeV)を発生する²²⁾。

Fig. 4 にPMOを採用した入射器からの電子ビームの空間プロファイルとその電子ビームの位置安定性を示す。また、このPMOによる光導波を用いて電子入射器からの電子ビームを正確にステアリング(射出方向の制御)することができることも最近示された²⁵⁾。

3.2 追加速用レーザー航跡場(ブースター)

Fig. 5 にステージングレーザー航跡場加速の原理実証の例として2段階のステージングレーザー航跡場加速で得られた典型的なエネルギースペクトルを示す。Fig. 3 に示した追加速場となる長尺(~2 mm)直線状のPMOは光ファイバのように振る舞い、入射電子ビームの高い指向性と位置安定性($\pm 500 \mu\text{rad}$ 以下)を維持したまま追加速(~100 MeV)と準単色化($\Delta E/E < 10\%$)が同時に達成された²²⁾。この原理実証実験では、レーザー航跡場を励起

Fig. 4 Typical spatial profile (a) and pointing stability (b) of electron beams from injector.

Fig. 5 Typical energy spectrum of electron beam of injector (a) and after booster (b).

する主レーザーパルスのピコ秒前のプレパルス(ペダスタルパルス)をパルス圧縮器内回折格子の角度を調整することにより光ファイバ状のPMOを生成した。これにより、追加速場が形成される光ファイバ状PMOの有無しそれぞれの条件を作り出し、入射電子の追加速を確認している。最近、脱位相長の長い $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下の低密度領域での追加速場(ブースター)の研究開発がビームのGeV級高エネルギー化を念頭に進められており、100 GV/m以上の加速勾配と1 GeVに迫る加速エネルギーも観測され始めている。再現性の高いGeV級高エネルギー加速を目標に、より長尺の加速場($\sim 10 \text{ cm}$ 級)形成のための高速パルス放電を用いたPMO²⁶⁻²⁹⁾の開発も並行して進められている。

PMOの登場によって電子ビームの位置安定性が従来加速器並みに向上したことにより、従来加速器で使用されているビーム光学でのビームハンドリングも可能になり既に使用が始まっている³⁰⁾。例えば集束用磁気レンズとエネルギー選別スリットを用いて、10-100 MeV級の電子ビームを $\Delta E/E \sim 1\%$ 程度の単色性で再現性良く切り出し(Fig. 6)下流に輸送することにも成功している。このように、最近のレーザー航跡場加速はPMOと従来ビーム光学の組み合わせにより電子ビームの制御性が格段に向上している。

Fig. 6 Typical images of screen on electron energy spectrometer that indicate energy spectra of energy-sliced electron beams of injector. The vertical axis indicate 3 successive shots for 3 different slicing conditions of (a)-(c).

Fig. 7 Conceptual design of LWFA platform at ImPACT program.

4. レーザー航跡場加速プラットホーム

4.1. プラットホームの概念設計

内閣府ImPACTプロジェクト「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」では、レーザー航跡場加速駆動のX線自由電子レーザーの実現を究極の目標に設定し、レーザー航跡場電子加速に関する要素技術開発が進められている⁷⁾。プログラムでは大阪大学、量子科学技術研究開発機構(QST)関西研究所、長岡科学技術大学等の参画機関で開発されている要素技術を理化学研究所播磨SPRING-8キャンパスに構築されるレーザー航跡場加速プラットホームにて統合し、加速長10 cm以下で1 GeV以上、エネルギー広がり1%以下、パルス幅 $\sim 10 \text{ fs}$ 、エミッタンス $< 1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下のビームを再現性よく発生するレーザー航跡場駆動のGeV級実用電子加速技術の確立を目指す。さらに、このレーザー駆動電子加速器を高エネルギー加速器研究機構(KEK)で開発中のマイクロアンジュレーター⁴⁾と組み合わせ、X線自由電子レーザーを含む軟X線 $\sim$ X線領域の極短波長放射光源の研究開発が推進される。このレーザー航跡場加速プラットホームはSCSS(SPRING-8 Compact SASE Source)計画¹²⁾で使用されていた加速器トンネルを用いて展開することがImPACTプログラムで承認され、既にトンネル内にはプラットホームレーザーの為にクリーンルーム建設が進められている。Fig. 7にレーザー航跡場加速プラットホームの概念図を示す。再現性の高い安定なGeV級の加速を実現する為に前章で述べたステージングレーザー航跡場加速を採用し、初段は電子入射、二段目は位相回転(単色化)と追加速、三段目は追加速の機能をそれぞれのレーザー航跡場が担う。それぞれのレーザー航跡場を励起する三つのレーザーパルスは正確に時間同期し、さらにそれぞれの航跡場の機能に最適化されたエネルギーとパルス幅に調整される。なお追加速部をモジュール化し段数を加えていくことでより高い加速エネルギーを目指すことも検討されている。

4.2. プラットホームレーザー

構築している多段レーザー航跡場加速用レーザーシステムの構成図をFig. 8に示す。フロントエンドシステムにはチャープパルス増幅方式の40 TW級のチタンサファイアレーザーを用いる。三つのレーザー航跡場の正確な

¹²⁾ <http://xfel.riken.jp/sacla/index00.htm>

Fig. 8 Schematic diagram of laser system for LWFA platform.

時間同期を得るためにフロントエンドシステムから射出されるレーザーパルスをつのレーザーパルスに分岐した後にそれぞれ独立の増幅器を用いて1パルス当たり1.5 J, 3 J, 14 Jまで増幅する。さらにそれぞれのレーザーパルスを各段のレーザー航跡場に最適なパルス幅とチャープとする為にそれぞれ独立にパルス圧縮を行う。最終的にプラットホームレーザーシステムから射出される三つのレーザーパルスは電子入射、位相回転器、追加速の機能に特化したプラズマ波を励起するため、それぞれ1パルス当たり1 J-20 fs, 2 J-50 fs及び10 J-100 fsに調整される。パルスの繰返しはそれぞれ初段10 Hz, 二段5 Hz, 三段0.1 Hzである。

理化学研究所播磨キャンパスの旧SCSSトンネルに構築中のプラットホームレーザーシステムの鳥瞰図をFig. 9に示す。トンネルの一部を精密に温度湿度管理したクリーンルームに改造し全てのレーザーコンポーネントを一列に配置しトンネル内部に収納する。ただし振動の大きな真空ポンプ類、排熱の大きな各種電源類、最終段アンプ用のポンプレーザーはトンネル外に設置する。ステージングレーザー航跡場加速では複数のレーザー航跡場の空間的な重ね合わせが安定かつ再現性の良い電子ビーム発生にとって極めて重要であることがこれまでの研究開発により明らかにされており、このレーザー航跡場同士の軸ずれを防ぐ為に三つの(初段、二段及び三段の航跡場を励起する)レーザーパルスを伝送する全ての光学コンポーネントを一枚の光学テーブル上に配置する構成を採用している。同様の理由から三つのパルス圧縮器ユニットも真空容器中に設置した一枚の光学定盤上に並列に配置される。さらにトンネル内部の床は強固な一枚の岩盤で構成されており、レーザーシステム、パルス圧縮器用真空容器及びレーザー航跡場加速ビームライン等全ての機器をトンネル内部に設置することで外部からの振動を高いレベルで避けることができる。レーザー装置は平成28年度末の設置完了、プラットホーム構築は平成29年度上半期の完了を目指しており、その後ImPACTプロジェクト終了までに1 GeV級電子の安定発生とマイクロアンジュレーターを用いたkeV領域

Fig. 9 Bird's-eye view of laser system for LWFA platform in former SCSS accelerator tunnel.

までのX線放射の観測及びX線自由電子レーザー実現への指針を得る計画である。

5. まとめと今後の展望

本稿では内閣府革新的研究開発推進プログラムImPACT「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」のもとで実施されているレーザー航跡場加速電子ビーム駆動XFELの実現を究極目標に設定したレーザー航跡場加速要素技術開発とレーザー航跡場加速統合プラットホーム開発について概説した。レーザー航跡場加速研究はGeV級の加速や準単色電子の発生など原理実証が既に為され、現在は加速器実現に向かう過渡期にある。これまでのようなレーザー入力を大強度化するだけの力任せの加速では、到達加速エネルギーのチャンピオンレコードは更新されても、それらによってレーザー航跡場加速が現実の加速器に近づくことはない。一方PMOの登場によって電子ビームの位置安定性が従来加速器並みに向上し、従来加速器で使用されているビームオプティクスを用いたビームハンドリングが可能になり電子ビームの制御性が劇的に向上した。このような状況を背景にレーザー航跡場加速ベースのXFEL開発へのチャレンジがImPACTプログラムに採択された。これまでにプログラムではエネルギー選別によるエネルギー広がり $\Delta E/E < 1\%$ の100 MeV級電子ビームの安定生成や追加速パラメータでのGeV級電子ビーム加速などが達成された。これらの成果をもとに再現性の高いGeV級の高エネルギー加速へと研究開発は展開し、 ~ 10 cm級の長尺PMOの開発も現在進んでおり、その実現も近い。今後高エネルギー電子ビーム発生安定化が進むに従い、従来加速器技術によるビームの輸送と制御の技術がより一層重要になる。これからのレーザー航跡場加速器実現を含めたレーザー航跡場加速の展開は、プラズマダイナミクスを含めた粒子加速機構の詳細にわたる理解をベースとした研究開発とともに、最先端の加速器技術との融合が不可欠になる。近年、米国や欧州では粒子加速を含むハイパワーレーザー応用に携わる研究者と大型加速器施

¹³ <http://www.eupraxia-project.eu/>

設の研究者が連携協力しレーザー駆動の超小型高エネルギー粒子加速器の実現に向けた研究体制を確立しつつある¹³。日本がこの研究分野のトップランナーであり続けるためには、ImPACTプログラムで開始されたレーザー航跡場加速電子によるXFEL開発をさらに大きく展開し、オールジャパンの研究体制の構築が急務である。その為にも現在著者らが構築中のレーザー航跡場加速プラットフォームを多くの方々に有効に利用して頂き、それによりレーザー航跡場加速器研究が大きく拓かれていくことを期待したい。

謝 辞

本研究は、内閣府革新的研究開発推進プログラム ImPACT「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」の支援を戴き実施しております。暖かいご支援とご指導を戴いておりますプロジェクトマネージャーの佐野 雄二博士に篤く御礼申し上げます。また、本稿をまとめるに当たりご助言頂きました理化学研究所矢橋 牧名博士に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 矢橋 牧名, 富樫 格, 永園 充, 田中 均, 石川 哲也: レーザー研究 **37** (2009) 879.
- 2) 矢橋 牧名: レーザー研究 **40** (2012) 675.
- 3) 石川 哲也: 光学 **43** (2014) 406.
- 4) 山本 樹: レーザー研究 **45** (2017) 82.
- 5) T. Tajima and J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 267.
- 6) M.-E. Couprie: レーザー研究 **45** (2017) 94.
- 7) A. R. Maier, A. Meseck, S. Reiche, C. B. Schroeder, T. Seggebrock, and F. Gruner: Phys. Rev. X **2** (2012) 031019.
- 8) C. B. Schroeder, W. M. Fawley, F. Gruner, M. Bakeman, K. Nakamura, K. E. Robinson, Cs. Toth, E. Esarey, and W. P. Leemans: AIP Conf. Proc. **1086** (2009) 637.
- 9) 田中 均: “X線自由電子レーザー概論”, 高エネルギー加速器セミナー(OHOテキスト, 2013).
- 10) 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: Nat. Phys. **2** (2006) 696.
- 11) S. Karsch, J. Osterhoff, A. Popp, T. P. Rowlands-Rees, Zs Major, M. Fuchs, B. Marx, R. Hörlein, K. Schmid, L. Veisz, *et al.*: New J. Phys. **9** (2007) 415.
- 12) 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.*: Nature **431** (2004) 535.
- 13) C. G. R. Geddes, Cs. Toth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary, and W. P. Leemans: Nature **431** (2004) 538.
- 14) J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgyand, and V. Malka: Nature **431** (2004) 541.
- 15) E. Miura, K. Koyama, S. Kato, N. Saito, M. Adachi, Y. Kawada, T. Nakamura, and M. Tanimoto: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 251501.
- 16) A. Yamazaki, H. Kotaki, I. Daito, M. Kando, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, S. Kondo, S. Kanazawa, T. Homma, K. Nakajima, *et al.*: Phys. Plasmas **12** (2005) 093101.
- 17) 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, *et al.*: Nat. Photonics **2** (2008) 571.
- 18) A. Pukhov and J. Meyer-Ter-Vehn: Appl. Phys. B **74** (2002) 355.
- 19) A. J. Gonsalves, K. Nakamura, C. Lin, D. Panasenkov, S. Shiraishi, T. Sokollik, C. Benedetti, C. B. Schroeder, C. G. R. Geddes, J. van Tilborg, *et al.*: Nat. Phys. **7** (2011) 862.
- 20) S. Steinke, J. van Tilborg, C. Benedetti, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, J. Daniels, K. K. Swanson, A. J. Gonsalves, K. Nakamura, N. H. Matlis, *et al.*: Nature **530** (2016) 190.
- 21) E. Esarey, P. Sprangle, J. Krall, and A. Ting: IEEE Trans. Plasma Sci. **24** (1996) 252.
- 22) T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Yamazaki, Y. Mizuta, M. Uesaka, and R. Kodama: Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 121501.
- 23) Y. Mizuta, T. Hosokai, S. Masuda, A. Zhidkov, K. Makito, N. Nakanii, S. Kajino, A. Nishida, M. Kando, M. Mori, *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **15** (2012) 121301.
- 24) T. Hosokai, K. Kinoshita, A. Zhidkov, A. Maekawa, A. Yamazaki, and M. Uesaka: Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 075004.
- 25) N. Nakanii, T. Hosokai, K. Iwasa, S. Masuda, A. Zhidkov, N. Pathak, H. Nakahara, Y. Mizuta, N. Takeguchi, and R. Kodama: Phys. Rev. ST Accel. Beams **18** (2015) 021303.
- 26) Y. Ehrlich, C. Cohen, A. Zigler, J. Krall, P. Sprangle, and E. Esarey: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 4186.
- 27) T. Hosokai, M. Kando, H. Dewa, H. Kotaki, S. Kondo, N. Hasegawa, K. Nakajima, and K. Horioka: Opt. Lett. **25** (2000) 10.
- 28) A. Butler, D. J. Spence, and S. M. Hooker: Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 185003.
- 29) T. Kameshima, H. Kotaki, M. Kando, I. Daito, K. Kawase, Y. Fukuda, L. M. Chan, T. Homma, S. Kondo, T. Z. Esirkepov, *et al.*: Phys. Plasmas **16** (2009) 093101.
- 30) N. Nakanii, T. Hosokai, S. Masuda, A. G. Zhidkov, Z. Jin, Y. Mizuta, H. Nakahara, S. Kajino, K. Makito, A. Nishida, *et al.*: Proc. International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (2012) HED-P12.