

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：82502

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07459

研究課題名(和文)自己入射方式レーザー航跡場加速における電子入射点の解明

研究課題名(英文)Observation of self injection point of electrons in laser wakefield acceleration

研究代表者

中新 信彦(NAKANII, Nobuhiko)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・主任研究員(定常)

研究者番号：70615509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーパルスの伝搬および電子入射(波破碎)の様子を詳細に捉えるために拡大顕微鏡とイメージング分光器とを組み合わせた高空間分解イメージング分光システム的设计・開発を行った。システムの構築、絶対感度校正などの調整を行ったが、実際にレーザープラズマ中の自発光・散乱光のイメージング分光計測までは到達できなかったため今後の課題とする。一方、電子入射点の位置とエネルギーの相関を調べる上で必要な電子のエネルギー計測器の改良を行い、ポインティングが不安定な電子ビームに対してエネルギーが正確に計測ができる手法を確立し、その手法を用いて国内最高の0.6GeVの準単色電子線の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：We designed and developed a high spatially resolved imaging spectroscopy system combining a microscope and an imaging spectrometer in order to observe the propagation of intense laser pulses and electron injection(wave breaking). We constructed this system and performed sensitivity calibration of spectrometer, but we could not reach imaging spectroscopy of self emission and scattered light from laser plasma, so we will set it as future task. On the other hand, we improved the energy measuring instrument of electrons necessary for investigating the correlation between the position of electron injection point and electron energy, and established a method that can measure energy accurately for pointing unstable electron beams. We successfully observed the 0.6 GeV monoenergetic electron beam using this measurement method.

研究分野：レーザープラズマ粒子加速

キーワード：レーザー加速 高エネルギー電子

1. 研究開始当初の背景

レーザー航跡場加速 (LWFA) は高強度・超短パルスレーザーのポンデラモータイプ力によって電子プラズマ波を励起し、そのプラズマ波が持つ非常に強い縦方向電場によって電子を瞬時に高エネルギーに加速する加速法(図 1)であり、次世代のコンパクトな高エネルギー加速器として期待される技術である。さらにレーザー航跡場から発生する電子ビームはフェムト秒オーダーの短い時間幅であるため、ピコ秒～フェムト秒で変化する高速な現象の観測やX線自由電子レーザーへの応用も期待されている。

1979 年に理論が提唱[1]されて以降、2004-2005 年にかけて日英米仏のグループがそれぞれ準単色電子ビームの発生に成功[2]、その後 GeV を超える電子の加速が実証され、現在は米国のグループが最大 4.2GeV の電子ビームの発生に成功している[3]。エネルギー競争が加速する一方で、我々のグループはレーザー加速電子源の実用化を目指し、プラズマオプティクスという技術を用いて電子ビームのポインティングを安定化し、方向を自由自在に操ることに成功した[4,5]。そしてこの電子ビームを用いて世界で初めてシングルショットでの電子線回折像の取得に成功した。LWFA 技術は着実に進歩しているが、実用化には未だエネルギーや電荷量の安定性に課題が残されている。

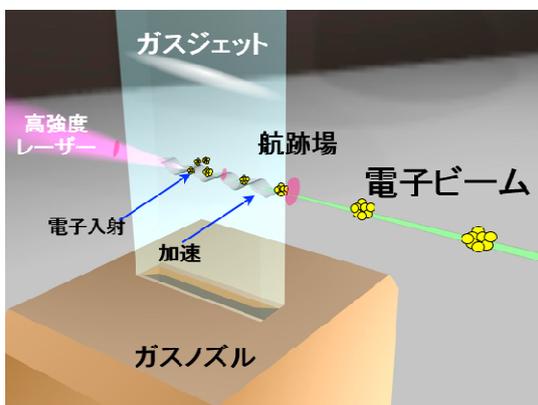


図 1 レーザー航跡場加速  
(自己入射方式)

LWFA において航跡場への電子入射は最も重要で制御の難しい部分で、LWFA で電子を加速するにはプラズマ波の波長(数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$ )の半分の加速位相への電子の入射が必要である。自己入射方式 LWFA は高強度レーザーパルスによって振幅の大きいプラズマ波を励起し、その振幅がある閾値を超えることで起こるプラズマ波の破碎によってプラズマ電子の一部が加速位相に直接入射する手法[6,7]と比較

的容易に電子を加速位相に入射することができる。プラズマ波の破碎は非線形な現象で物理的に興味深いだけでなく、電子のエネルギーの安定性に深く寄与するため、その位置を特定し、物理を理解することは重要である。

LWFA 研究ではレーザーの伝播方向に対して横方向の散乱光・自発光の観測が行われており、図 2 は典型的な散乱光のイメージである。図のように魚の骨のように見えることから Fishbone 構造と呼ばれていて、高強度レーザーのプラズマ中での伝搬を表している。また、散乱光強度の強い部分では波破碎が起こっていると推測されていて、Thomas らはこの横方向の散乱光・自発光のイメージを分光することで、波破碎による電子の急激な加速からの放射を捉えることに成功しているが、拡大率が不十分で電子入射点の特定には至っていない[8]。



図 2 横方向散乱光イメージ  
(トムソン散乱光)

この電子が入射される位置を波長以内の分解能で計測できれば、レーザー航跡場中の物理現象を詳細に理解することが可能となる。LWFA では、空間スケールは高強度レーザーの集光径やプラズマ波の波長(数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$ )を十分に分解できる空間分解能が必要となる。最近の研究で 10fs 以下の極短パルスプローブを用いて高強度レーザーで励起された航跡場の電子の粗密を可視化することに成功している [9]。そこで、この拡大顕微鏡を用いた航跡場可視化と散乱光・自発光計測を同時に計測することで、航跡波の分布と電子入射位置を初めて実験的に特定する。これにより、従来不明であった電子入射位置を航跡波の波長オーダーで求めることができ、LWFA の加速機構のより詳細な理解が進むものと期待される。

[1] T.Tajima and J.M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 267(1979)  
 [2] E. Miura et al., Appl. Phys. Lett. 86, 251501 (2005), S.P.D. Mangles et al., Nature 431, 535 (2004), C.G.R. Geddes et al., Nature 431, 538 (2004), J. Faure et al., Nature 431, 541 (2004)  
 [3] W.P. Leemans et al., Phys. Rev. Lett. 113, 245002 (2014)  
 [4] T. Hosokai et al., Phys. Rev. Lett. 97, 075004 (2006)  
 [5] N. Nakanii et al., Phys. Rev. ST-AB 18, 021303 (2015)

- [6] S.V. Bulanov et al., JTEP Lett. 53, 565 (1991), Phys. Plasmas 19, 113102&113103 (2012)  
 [7] A. Modena et al., Nature 377, 606 (1995)  
 [8] A.G.R. Thomas et al., Phys. Rev. Lett. 98, 054802 (2007)  
 [9] A. Sävert et al., Phys. Rev. Lett. 115, 055002 (2015)

## 2. 研究の目的

本研究では拡大顕微鏡とイメージング分光器とを組み合わせた高空間分解イメージング分光システムを設計・開発を行い、プラズマ波からの散乱光および自発光の空間分布とスペクトルの空間分布をプラズマ波長以下の空間分解能で計測し、高強度レーザーパルスの伝搬および波破碎の様子を詳細に捉える。さらに極短パルスプローブによる航跡場可視化計測と合わせ、航跡場のどの部分で光の散乱や自発光が発生しているかを調べることによって波破碎による電子入射点を特定し、電子のエネルギーとの関連性を調べ、従来シミュレーションでしか知ることのできなかった加速の機構を実験的に明らかにする。

入射位置と電子エネルギーとの間に一定の相関を確認できれば、入射位置を固定することによってエネルギーの安定化が図れるということであり、入射位置の固定法を提案することで LWFA のエネルギーの安定化に道筋を立てることが出来る。レーザー航跡場加速器の実用化にまた一歩近づくことができる。

## 3. 研究の方法

まず、拡大顕微鏡とイメージング分光器とを組み合わせた高空間分解イメージング分光システムの設計・開発を行う。高空間分解イメージング分光システムは図3に示すように拡大顕微鏡、ビームスプリッター、イメージング分光器から構成される。ガスの密度から想定されるプラズマ波の波長を分解可能な顕微鏡用対物レンズ・接眼レンズを選定し、その結像面に CCD を配置し二次元像を取得する。さらに CCD カメラと接眼レンズの間にビームスプリッターを設置し、観測光を2つに分け、分けられた光の結像面に分光器の入り口のスリットが来るように配置することで、スペクトルの空間分布（一次元）を取得できるシステムを構築する。

高強度レーザーパルスを長焦点の軸外し放物面鏡でガスジェットに集光し、レーザー航跡場を励起して高エネルギー電子を発生させる。レーザーの伝搬方向に対して垂直方向に散乱する光やプラズマからの自発光を高空間分解イメージング分光システム

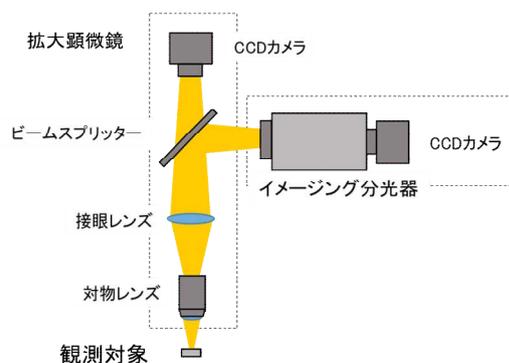


図3 高空間分解イメージング分光システム

で高空間分解二次元イメージとスペクトルの一次元空間分布を取得する。電子ビームはレーザーの伝搬方向に設置された検出器でその空間分布を計測する。さらに検出器の前に磁石を設置することによって電子ビームをエネルギー分解し、電子のエネルギースペクトルの計測も行う。電子ビームの検出には蛍光板と CCD カメラを用いる。

高強度レーザーの条件やガスの圧力（プラズマの電子密度）を様々に変化させ、電子入射が起こる条件、起こらない条件、複数の電子入射が起こる条件で計測を行い、散乱光・自発光の様子がどのように変化するかを調べ、散乱および自発光の発生メカニズムを理解する。

さらに高空間分解イメージング分光システムと極短パルスプローブを用いた航跡場計測とを併用し、航跡場のどの部分で散乱や自発光が発生するかを観測する。すでにガス充填中空ファイバーとチャープミラーを利用した極短パルスプローブ(<10fs)と拡大顕微鏡を用いて、電子プラズマ波の粗密を観測することに成功している。この航跡場の可視化と高空間分解イメージング分光計測とを同時に行うことで、レーザー航跡場のどの部分で散乱や自発光が発生しているかを調べ、波破碎による電子入射が起こっている点を特定する。

そして電子入射点の特定と同時に電子のエネルギーの計測を行い、電子入射点と電子のエネルギーの間どのような相関関係があるかを調査する。相関関係がある場合、入射点の固定が電子のエネルギーの安定化につながるため、電子入射点の固定方法を検討しエネルギーの安定化を目指す。また、Particle-in-cell(PIC)シミュレーションを行い、実験で得られた結果と照らし合わせることによって、電子入射の物理をより詳細に理解する。

## 4. 研究成果

28年度は拡大顕微鏡とイメージング分光器とを組み合わせた高空間分解イメージング分光システムの開発を行った。まず、散

乱光を広帯域で分光できるように既存の分光器のグレーティングを選定し、さらにガスの密度から想定されるプラズマ波の波長を分解可能な顕微鏡用対物レンズ・接眼レンズの選定を行い購入した。そして、結像面が分光器の入り口のスリットになるようレンズを配置したシステムの構築を行った。また、高強度レーザーを用いてレーザープラズマ加速による電子発生実験を行い、発生した電子の空間分布およびレーザーの入射方向に対して横方向への自発光・散乱光の空間分布の観測を行ったところ、電子ビームの空間分布と散乱光の強度が強い位置に相関が見られた。電子入射点と想定される散乱が強く起こる場所がビームの品質に影響を与えることがわかった。

29年度は電子入射点（波破碎点）の位置とエネルギーの相関を調べるのに必要となる電子のエネルギー計測器の改良を行った。従来の計測法では磁石で電子ビームを偏向してエネルギーごとに分離し、2次元検出器でその分布を計測する。磁石の磁場分布から軌道計算を行って、2次元検出器上の位置と到達する電子のエネルギーを関連付けることでエネルギーを評価している。磁石への電子の入射位置によって検出器に到達する電子のエネルギーが大きく異なるため、通常、磁石の入り口に径の小さいコリメータを設置して入射位置を決め、電子のエネルギーを一意に決定している。しかし、この場合コリメータを通る電子しか計測できないため、レーザー加速のポインティングが不安定な電子ビームに対してエネルギーの計測ができる確率が低く、上記の電子入射点とエネルギーを調べる上で問題になることがわかった。

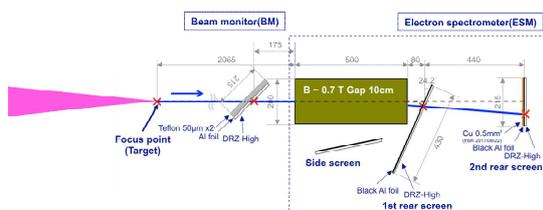


図4 電子エネルギー計測器

そこで、磁石入り口に高エネルギーの電子に比較的影響を与えにくい薄い2次元検出器を配置して、偏向前の空間分布を同時計測することによって、入射位置を考慮し補正が可能なエネルギー計測器を開発した（図4）。これにより位置安定性が不安定な電子ビームに対しても高い確率でエネルギーを計測できるようになった。この計測器を用いて、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所のJ-KAREN-Pレーザー(10J,40fs)を直径1cmのガスジェット標的に集光し発生する電子ビームを計測し、国内最高の0.6GeV(加速勾配60GeV/m以上)の準単色電子線の観測に成功した(図5)。一方で、レーザープラズマ中での自発光・散乱光の高空間分解イメージング分光計測については、システムの構築、

分光器の絶対感度校正などの調整を行ったが、実際の自発光・散乱光の分光計測までは到達できなかったため、今後の課題とする。

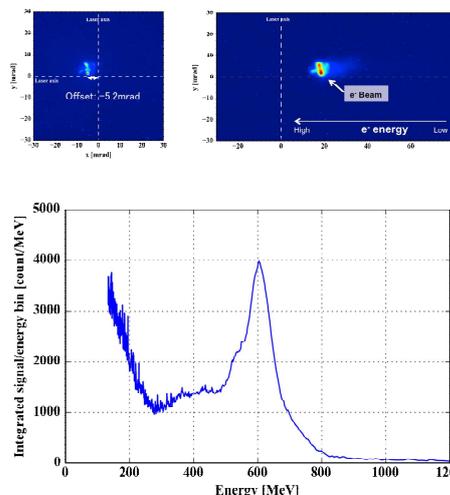


図5 (左上) 電子のビームプロファイル、(右上) 磁石偏向後のプロファイル、(下) 電子ビームの入射軸を補正したエネルギースペクトル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

①K. Huang, T. Esirkepov, J.K. Koga, H. Kotaki, M. Mori, Y. Hayashi, N. Nakanii, S.V. Bulanov, and M. Kando, Electro-optic spatial decoding on the spherical-wavefront Coulomb fields of plasma electron sources, Scientific Reports 8, 2938 (2018) 査読あり

[学会発表] (計 1 件)

①中新信彦、10J クラス超短パルスレーザーを用いた GeV 電子加速試験、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月23日、東京理科大学野田キャンパス

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中新 信彦 (NAKANII, Nobuhiko)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発  
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究  
部・主任研究員 (定常)

研究者番号： 70615509

(2) 研究分担者

なし

(3) 研究協力者

なし