

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610172

研究課題名(和文) レーザー航跡場とビーム航跡場のハイブリッド多段加速による超高エネルギー電子加速

研究課題名(英文) Ultrahigh energy electron acceleration in hybrid multi-stage acceleration using laser- and beam-driven wakefields

研究代表者

三浦 永祐 (MIURA, EISUKE)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：10358070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー航跡場加速で得られる電子バンチをビーム航跡場加速で多段加速するプラズマを用いた電子加速の新技术を提案した。本手法の実証には、レーザー航跡場加速によって高い電荷量を持つエネルギーの揃った準単色電子バンチを得る必要がある。準単色電子バンチを得るため、密度ジャンプを持つガスジェットを用いたレーザー航跡場加速を行った。超音速ガスジェット中にブレードを挿入し衝撃波を発生し、密度遷移領域のスケール長が20 μm程度で、最大2倍程度の密度比を持つ密度ジャンプを形成した。このガスジェットを用いて、電荷量が2 pCのエネルギー65 MeVにピークを持つ準単色電子バンチ発生に成功した。

研究成果の概要(英文)：We propose a novel method of plasma-based electron acceleration, in which an electron bunch obtained by laser wakefield acceleration is accelerated by beam wakefield acceleration. The key issue for proof of principle of the method is to obtain a high-charge, quasi-monoenergetic electron (QME) bunch with a narrow energy spread using laser wakefield acceleration. For the generation of a QME bunch, the electron acceleration using a gas jet with a density transition was conducted. The density transition was formed by a shock front induced by a blade inserted into a supersonic gas jet. The scale length of the transition region and maximum density ratio were estimated to be 20 μm and 2, respectively. We have produced a QME bunch containing 2 pC electrons with an energy of 65 MeV using the gas jet.

研究分野：プラズマ物理、レーザー工学

キーワード：高性能レーザー プラズマ 量子ビーム レーザー航跡場加速 ビーム航跡場加速

1. 研究開始当初の背景

超短パルス高強度レーザー、高エネルギー電子バンチとプラズマの相互作用を利用した電子加速であるレーザー航跡場加速、ビーム航跡場加速では、電子の粗密波であるプラズマ波の作り出す電場によって電子を加速する。プラズマ波の作り出す電場は、現在の高周波加速器の加速電場の 1000 倍にも達する。この高い加速電場を利用して、超高エネルギー電子加速を実現する技術として期待されている。

レーザー航跡場加速により、エネルギーの揃った準単色電子バンチが得られ[1]、その後エネルギーが 1 GeV に達する準単色電子バンチ加速が報告された[2]。さらなる高エネルギー化に向け、加速距離の増大、多段加速等、様々な取り組みがなされている。しかし、より強力なレーザー装置、複雑な照射系が必要となるので、まだ 1 GeV を凌駕する電子加速には成功していない。

一方、ビーム航跡場加速では、3 km にもおよぶ直線加速器からの 40 GeV 電子を長さ 1 m のプラズマ中で 80 GeV にまで加速することに成功している[3]。しかし、長い加速距離が得られる等の高エネルギー加速における利点があるにも関わらず、エネルギー利得は 2 倍程度にとどまっている。

各々の方式を単独で利用し、さらなる超高エネルギー電子加速を目指す上では、一長一短があることが明らかになってきた。レーザー航跡場加速とビーム航跡場加速の各々の持つ利点を融合することで、より小さな装置規模で超高エネルギー電子加速の実現が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、レーザー航跡場加速とビーム航跡場加速の各々の利点を融合し、図 1 に示すレーザー航跡場加速で得られる電子バンチを用いてビーム航跡場加速を行う新しい形のプラズマを用いた超高エネルギー電子加速手法を提案し、その原理実証を行うことを目的とする。

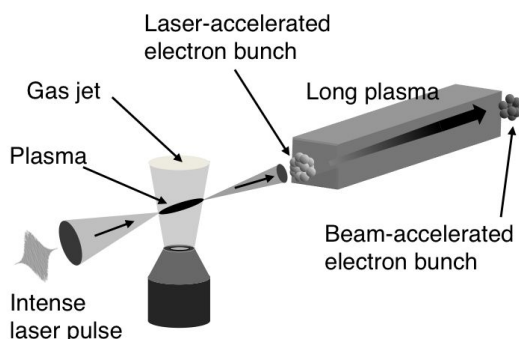


図 1 本研究で提案するプラズマを利用した超高エネルギー電子加速の概念図。

レーザー航跡場加速で高い電荷量を持つエネルギーの揃った準単色電子バンチが発生する際には、背景プラズマの電子密度の 10 倍にも達する高い電子密度を持つ電子バンチが得られる。また、装置全体を小型化する上では、ビーム航跡場加速に比べて利点を有する。

レーザー航跡場加速で得られる高い電子密度を持つ準単色電子バンチを用いてビーム航跡場加速を行えば、大振幅の非線形プラズマ波が励起され、線形領域でのエネルギー利得 2 を超える高いエネルギー利得が得られる可能性がある。また、電子バンチはプラズマ波を励起し自分自身のエネルギーを失うまでは、プラズマ中を伝搬するので、ビーム航跡場加速では、長い加速距離を得やすい。

図 1 に示す様に、レーザー航跡場加速で得られる高密度電子バンチを用いてビーム航跡場加速を行い、大振幅の非線形プラズマ波を励起し、長い加速距離を達成できれば、各々の方式を単独で利用した場合に比べて、より小さな装置規模で超高エネルギー電子加速が期待できる。

3. 研究の方法

先にも述べた様に、本研究で提案する超高エネルギー電子加速手法を実現するには、レーザー航跡場加速で高い電荷量を持つ準単色電子バンチを発生することが鍵となる。まず、図 2 (a) に示すような密度ジャンプを持つプラズマを用いた準単色電子バンチの発生を試みた。

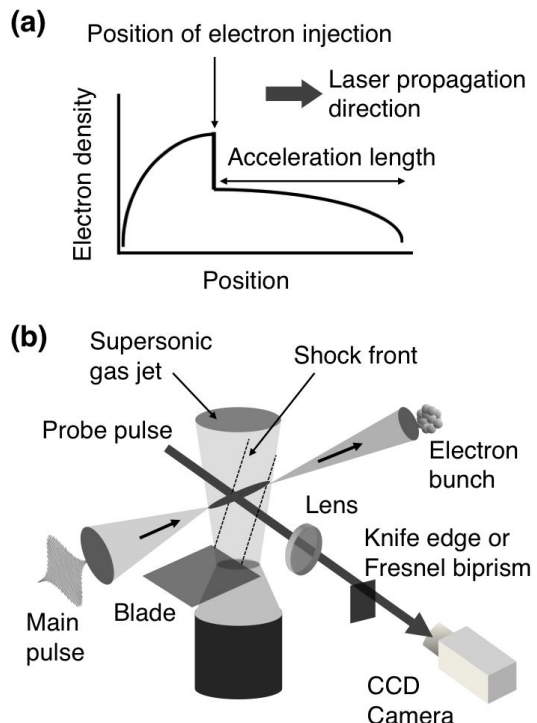


図 2 密度ジャンプを持つプラズマを用いたレーザー航跡場加速の (a) 概念図および (b) 実験配置図。

レーザー航跡場加速では、プラズマ波の電場を利用して電子を加速する。発生する電子バンチの特性を制御するには、プラズマ波への電子入射、捕捉を制御する必要がある。これまでは殆どの場合において、大振幅の非線形プラズマ波が破碎することにより、背景プラズマ中の電子をプラズマ波に入射、捕捉し加速している。しかし、大振幅プラズマ波の自己破碎という本来は不安定な非線形現象に依存しているため、プラズマ波への電子入射を制御することは困難である。

一方、図2(a)に示す様に、プラズマ中に電子密度のジャンプ(不連続点)があると、そこでプラズマ波は破碎しプラズマ波への電子入射、捕捉が起こる[4]。この手法では、密度の不連続性を利用し強制的に波破碎を起こすので、大振幅プラズマ波の自己破碎よりは、プラズマ波への電子入射の制御性を高くできる。電子密度の遷移領域のスケール長がプラズマ波の波長よりも十分に短いと、プラズマ波への電子入射は局所的に起こる。プラズマ波の電場の加速位相の一部に電子は捕捉され、同じ強度の電場で加速されるので、エネルギーの揃った準単色電子バンチを発生できる。この手法では、密度の不連続性を利用し強制的に波破碎を起こすので、電子入射が起こる場所を固定できる。つまり加速距離を一定にすることができ、電子線のエネルギーを安定化することも期待される。

4. 研究成果

(1) 密度ジャンプを持つガスジェットが発生
実験配置を図2(b)に示す。プラズマを発生する超音速ガスジェット中にブレードを挿入して衝撃波を発生し、その衝撃波面にガス密度のジャンプを形成する。電子加速を行う際に用いるヘリウムは完全電離するので、ガス密度分布が電子密度分布に相当し、プラズマ中に電子密度のジャンプが形成される。

直径1.6 mmの円形開口から噴出されるマッハ数が5程度の超音速ガスジェット中にブレードを挿入し、衝撃波を発生しガス密度分布の制御を試みた。ガスジェットの特性評価には、ヘリウムと同じ比熱比を持ち、屈折率が高く密度変化の検出が容易なアルゴンを用いた。Nd:YAGレーザーの2倍高調波光(波長532 nm、パルス幅10 ns)をプローブパルスとして使い、結像レンズの集光点付近にナイフエッジを設置し、シュリーレン像を観測した。プローブパルスはガス密度が最大になるタイミングで入射した。ブレードの先端を円形開口中心から300 μmの位置にセットした。観測されたシュリーレン像を図3(a)に示す。矢印で示した様に、衝撃波面の形成が観測されている。ノズル開口上方500 μmの位置では、密度ジャンプの遷移領域のスケール長は20 μm程度と見積もられた。

また、結像レンズの後ろにフレネル複プリズムを設置して干渉計を構成し、ガス密度分

布を測定した。干渉像の観測には、Nd:YAGレーザーの2倍高調波光を用いた。図3(a)の場合と同じブレード位置、ガス密度で観測された干渉像を図3(b)に示す。衝撃波面前後つまり密度遷移領域でのフリンジシフトはブレード側が大きく、図2(a)に示した低密度に遷移する密度分布が得られていることがわかる。図3(c)は、密度遷移領域でのフリンジシフトの比のノズル開口からの距離依存性を示す。ブレードを挿入することによりガス密度分布が円柱対称でなくなることを考慮し、密度分布を評価する必要があるが、図3(c)に示したフリンジシフトの比は密度遷移領域でのおおよそのガス密度比を与える。最大で2倍程度の密度比を持つ密度ジャンプが得られることがわかった。

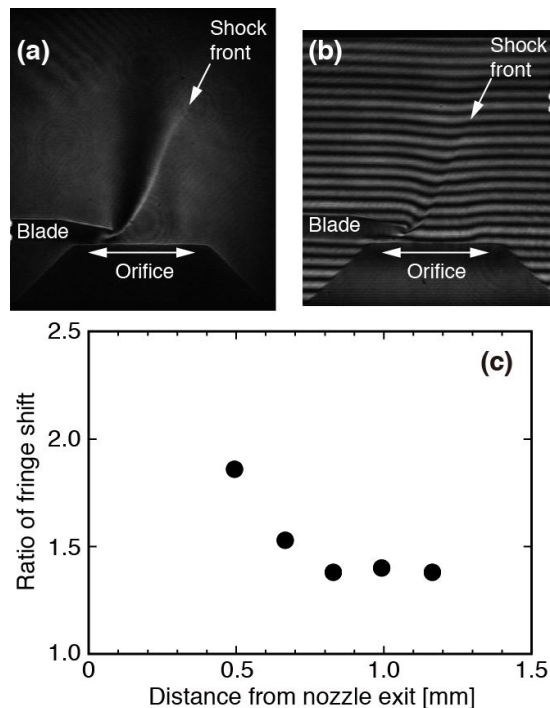


図3 超音速アルゴンガスジェットにブレードを挿入し観測された(a)シュリーレン像および(b)干渉像。(c)密度遷移領域でのフリンジシフト比のノズル開口からの距離依存性。

(2) 密度ジャンプを持つガスジェットを用いた電子加速

ガスジェットにブレードを挿入し、密度ジャンプを持つガスジェットを発生して電子加速実験を行った。ブレードの先端位置をノズル開口中心から300 μmの位置に設置した。波長800 nm、エネルギー700 mJ、パルス幅40 fsのチタンサファイアレーザーパルスを焦点距離720 mmの軸外し放物面鏡で集光し、ブレード側からガスジェットに入射した。レーザーはノズル開口から1 mm上方に集光した。電子加速実験ではヘリウムガスジェットを用い、ブレードがない状態で $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の電子密度が得られるようガ

ス密度を設定した。発生した電子バンチを0.7 Tの磁場を持つ二極磁石に入射し軌道を曲げ、エネルギー分解された電子像を観測した。

波長 800 nm、パルス幅 60 fs のチタンサファイアレーザーパルスを探プローブパルスとして観測されたプラズマのシャドーグラフ像を図4に示す。シャドーグラフ像に、電子密度のジャンプに起因する不連続部が観測された。このシャドーグラフ像を用い、レーザー集光位置と密度ジャンプ点の相対位置を調整し、準単色電子バンチが得られる条件を調べた。

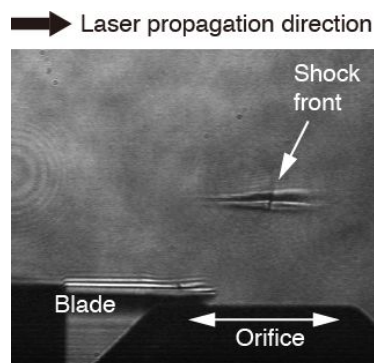


図4 密度ジャンプを持つガスジェットを用いて観測されたプラズマのシャドーグラフ像。

図5に準単色電子バンチが得られた際に観測された(a)エネルギー分解された電子像、(b)エネルギースペクトルを示す。図5(a)に示した電子像は5ショットの重ね取りで得られている。65 MeV および 35 MeV にピークを持つ準単色電子線の発生が観測された。65 MeV ピークの電荷量は 2 pC 程度と見積もられた。また、相対的なエネルギー幅(半値幅)は 15% であった。5ショットの重ね取り中の別ショットで、35 MeV の準単色電子バンチが発生したため、複数のピークが観測されたと考えている。

得られた準単色電子バンチの電荷量は 2 pC 程度であり、非線形のビーム航跡場の励起を可能とする高密度電子バンチが得られる十分な電荷量ではなかった。励起されたプラズマ波の振幅が大きくなり、入射される電子数が少なかったためと考えられる。より大振幅のプラズマ波を励起し、電荷量を増強するには、レーザーの高出力化が必要となる。エネルギーが揃っているとは言え、相対的なエネルギー幅は 15% 程度であった。密度遷移領域のスケール長がプラズマ波の波長と同程度で、局所的な電子入射が起こらなかったためエネルギー幅が広がったと考えられる。より急峻な勾配を持つ密度ジャンプを得るには、超音速ガスジェット自体のマッハ数を増大させるあるいは、集光光学系を改良しノズル開口に近い位置にレーザーを集光する等の必要がある。より電荷量が高くエネルギー

幅の狭い良質な準単色電子バンチを得るには、さらなる照射条件等の最適が必要であるが、レーザー航跡場加速における電子バンチ特性制御の基盤技術を確立できたと考えている。

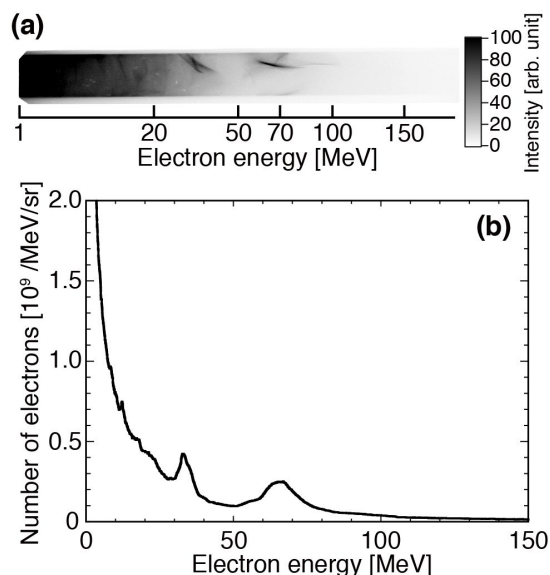


図5 密度ジャンプを持つガスジェットを用いて発生した電子バンチの(a)エネルギー分解電子像および(b)電子エネルギースペクトル。

<引用文献>

- [1] E. Miura et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 251501 (2005).他
- [2] W. P. Leemans et al., Nature Phys. **2**, 696(2006).
- [3] I. Blumenfeld et al., Nature **445**, 741 (2007).
- [4] S. V. Bulanov et al., Phys. Rev. E **58**, R5257 (1998).

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計3件)

Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “X-ray pulse generation by laser Compton scattering using a high-charge laser-accelerated, quasi-monoenergetic electron beam”, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 7, 2014, 046701/1-4
DOI: 10.7567/APEX.7.46701

三浦 永祐, 黒田 隆之助, 豊川 弘之, “レーザーと加速器を組み合わせた高エネルギーX線源開発と応用”, レーザー研究, 査読有, 42巻, 2014, 23-31
DOI: なし

Eisuke Miura, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “X-ray generation via laser Compton

scattering using electron beam driven by laser-plasma acceleration”, Technical Digest of Frontiers in Optics 2013 / Laser Science XXIX, 2013, FTh2A.1:1-2, 査読無
DOI:10.1364/FIO.2013.FTh2A.1

〔学会発表〕(計 6 件)

三浦 永祐、丸山 昂貴、黒田 隆之助、豊川 弘之、”レーザー駆動電子線を用いた X 線発生“、レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会、2015 年 1 月 12 日、東海大学高輪校舎(東京都品川区)

三浦 永祐、黒田 隆之助、豊川 弘之、”高出力フェムト秒レーザー生成プラズマ X 線源の開発と応用“、第 11 回レーザー学会「マイクロ固体フォトニクス」専門委員会および第 2 回に本燃焼学会レーザー点火研究委員会、2014 年 12 月 22 日、産業技術総合研究所東事業所(茨城県つくば市)(招待講演)

三浦 永祐、丸山 昂貴、黒田 隆之助、豊川 弘之、”レーザープラズマ加速電子線を用いた X 線発生“、Plasma Conference 2014、2014 年 11 月 21 日、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

三浦 永祐、丸山 昂貴、黒田 隆之助、豊川 弘之、”レーザー加速電子線を用いたレーザーコンプトン散硬 X 線発生“、レーザー研シンポジウム 2014、2014 年 4 月 17 日、大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)(招待講演)

Eisuke Miura, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “X-ray generation via laser Compton scattering using electron beam driven by laser-plasma acceleration”, Frontiers in Optics 2013 / Laser Science XXIX, 2013 年 10 月 10 日、Hilton Bonnet Creek(米国フロリダ州オーランド)(招待講演)

Eisuke Miura, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “Characteristics of X-rays produced via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser-plasma acceleration”, The 8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2013 Nara), 2013 年 9 月 12 日、奈良県新公会堂(奈良県奈良市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 永祐 (MIURA EISUKE)
独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・上級主任研究員
研究者番号: 10358070

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者

丸山 昂貴 (MARUYAMA KOHKI)
宇都宮大学大学院・工学研究科電気工学専攻・修士課程大学院生