

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20597

研究課題名（和文）時空間制御されたレーザー航跡場による電子ビーム発生

研究課題名（英文）Electron beam generation by spatio-temporally controlled laser wake field

研究代表者

大塚 崇光 (Otsuka, Takamitsu)

宇都宮大学・工学部・助教

研究者番号：30815709

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、本来光の速度で伝搬する集光面の速度を制御することにより、電子が加速位相から脱する長さ（脱位相長）を制御するレーザー航跡場加速における新しい基盤技術の確立を目指し研究を行なった。エネルギーが 120 mJ、パルス幅が 120 fs 程度のレーザーパルスをガスジェットに集光してレーザー航跡場を励起し、基礎的なデータ収集を行った。また、シミュレーションによって自己変調レーザー航跡場加速について調査し、低ピーク出力レーザーによる MeV 級電子発生に必要なパラメータを明らかにした。実験結果及び計算結果より、ガスターゲット技術の確立が重要であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー航跡場は非常に高い電場を励起できることから、次世代加速器技術として注目されている。また、航跡場中の加速位相は極めて短く、加速場に捕捉された電子バンチは極短バンチとなる。このような電子バンチは物質・材料、医療・生命科学研究などへの応用も期待できるが、レーザー装置が大型、複雑になるなどの問題点がある。本申請では低出力レーザーによって、制御性の高い航跡場を励起する手法に関して基礎研究を行なった。シミュレーションや実験を行い、ターゲット開発が重要であるという理解を得た。また、当初目標とは異なる手法として、自己変調レーザー航跡場加速の可能性と THz 電磁波による追加速の可能性に関して調査した。

研究成果の概要（英文）：In this research, it was studied a new basic technology for laser wakefield acceleration that controls dephasing length by controlling the speed of the focal plane. A laser wakefield was excited by focusing a laser pulse with an energy of 120 mJ and a pulse width of 120 fs onto a gas-jet target, and fundamental data were collected. We also investigated the self-modulated laser wake field acceleration by using a two-dimensional particle-in-cell simulation. A self-modulated laser wake field was excited by low peak power laser by using relatively high dense target. From these results, it was confirmed that the establishment of gas target technology is important.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：レーザー航跡場加速 高エネルギー密度科学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高強度レーザーがプラズマ中を伝搬すると、レーザーのポンデロモティブ力により、電子が排斥され電子の粗密波が励起される。この粗密波によって生じる電場は数百ギガボルト (GV) に達し、このようにして作り出されるレーザー航跡場 (電場) を用いて荷電粒子を加速する研究が行われている。近年のレーザー航跡場加速研究は、数十テラワット (TW) からペタワット (PW) クラスのレーザー装置を用いて行われる大型実験が主流になりつつあるが、小型のレーザー装置で航跡場を励起する実験も行われており、実験室レベルでメガエレクトロンボルト (MeV) 級のレーザー航跡場電子加速器が実現されれば、物質・材料科学、生命科学などへの応用が期待できる。

一般にレーザー航跡場加速研究で加速勾配を大きくするためには、高密度プラズマを用いる必要があるが、この場合加速された電子が加速場から抜け出す距離 (脱位相長) が短くなり加速距離を稼ぐことができない。また、航跡場を効率よく励起、成長させるためにはレーザーパルス長とプラズマ波長が同程度である必要がある。このような条件を満たすためには、レーザーパルス長が数十フェムト秒 (fs) のレーザー装置が必要となり、装置が複雑になる。

実験室でレーザー航跡場加速器を実現するためには、いかにして簡便なレーザー装置で加速勾配の大きな航跡場を励起するかが重要な点となる。

2. 研究の目的

航跡場の位相速度はプラズマ中を伝搬するレーザーパルスの群速度に等しく、真空中の光速よりも遅い。従って電子が高エネルギーに加速されるに伴い加速位相から脱してしまい加速長が制限されることが問題である。この問題の解決策として、超短パルスレーザーのチャープパルスと回折レンズを組み合わせることにより擬似的に光速を超える速度をもつ集光面を生成する方法が考えられる。この集光面によってレーザー進行方向に複数の航跡場を励起し、電子源と追加速場の役割を付与することができれば、それぞれの航跡場が励起される時間関係は、用いるパルスのチャープ形状によって制御可能である。

本研究の目的は、本来光の速度で伝搬する集光面の速度を制御することにより、脱位相長を制御するレーザー航跡場加速における新しい基盤技術の確立である。

3. 研究の方法

図 1 は実験装置図である。1 TW Ti:Sapphire レーザー (エネルギー 120 mJ, パルス幅 120 fs) を真空チャンバー内に設置したガスジェットノズルから噴射するガスターゲット (厚み 1 mm) に集光照射した。励起されたプラズマを観測するため集光点側面からプローブレザーを入射させ、影絵と干渉計測を行なった。

また、2 次元粒子コード (2D-PIC) を用いてシミュレーションを行なった。図 2 は計算空間の概念図である。レーザーパルス (エネルギー 120 mJ, パルス幅 120 fs, 規格化ベクトルポテンシャル $a_0 = 1$) を電子密度が $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマに入射させレーザーとプラズマの相互作用による航跡場の励起過程をシミュレーションした。

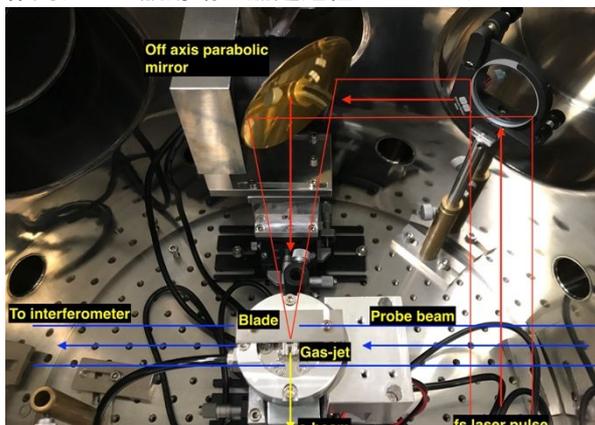


図 1. 実験装置図。真空チャンバー内に設置したガスジェットから噴出するガスターゲットに、Ti:Sapphire レーザーをレンズや軸外し放物面鏡を用いて集光照射した。レーザー進行方向に対して垂直方向からプローブレザーを入射しプラズマを観測し解析した。

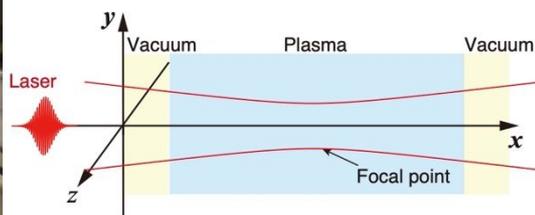


図 2. シミュレーション空間の概念図。真空領域とプラズマ領域を設定し、y 軸方向に電場をもつレーザーパルスを伝搬させた。簡単化のためレーザーによる電離は無視し、初期電離しているプラズマを設定した。

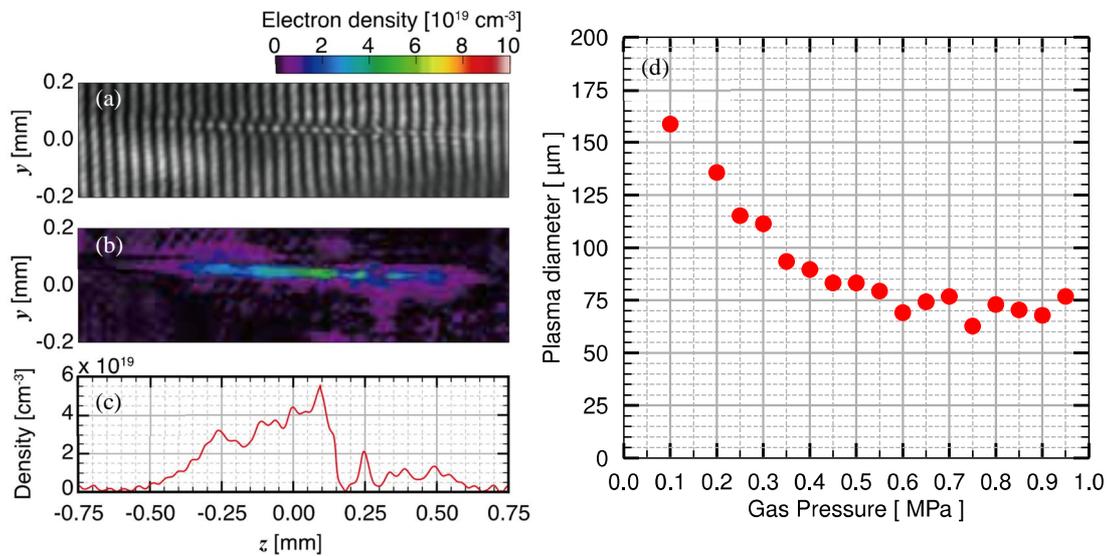


図 3. (a) 干渉計測結果及び (b) 解析したプラズマの電子密度分布, (c) レーザー伝搬軸上の電子密度分布. (d) ガスジェットの背圧とプラズマ直径の関係.

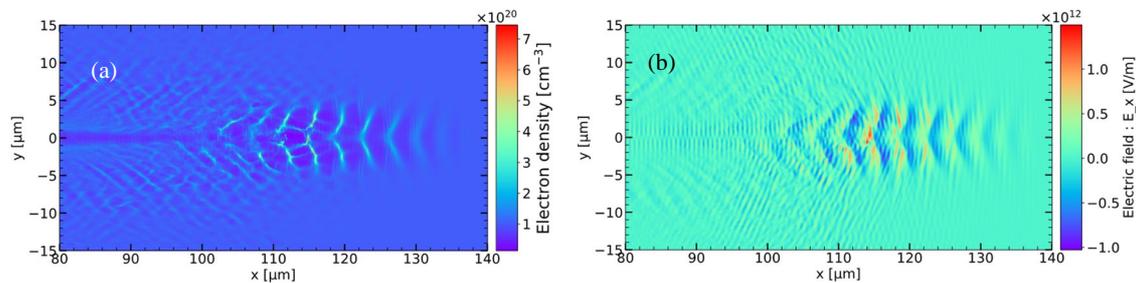


図 4. プラズマ中の (a) 電子密度分布, (b) x 方向の電場 E_x . レーザーによって電子の粗密波 (航跡場) が生じ, それにともない TV 級の加速電場が励起される.

4. 研究成果

基礎実験としてパルス幅が 120 fs の 1 TW のレーザーによって作られるレーザー生成プラズマについて調査した. 図 3 は干渉計測の結果である. 図 3(a)-(c) より, レーザー伝搬軸上に約 10^{19} cm^{-3} のプラズマが励起されていることがわかる. また, 図 3(d) よりプラズマ直径はガスジェットの背圧に依存し小さくなることがわかる. プラズマ直径がレーザーの集光と同程度であると仮定すると, 図 3(d) に示したように約 $75 \mu\text{m}$ 程度で飽和し, このときのレーザー強度は相対論的強度に達しない. したがって, 今回の実験パラメータによってレーザー航跡場励起し, 電子ビームを加速することはできないといえる.

2D-PIC を用いて計算実験を行った. 図 4 は計算結果の一例である. 電子密度を変化させ, 計算を行った結果, 図 4 に示したように電子密度が 10^{20} cm^{-3} を超える領域において自己変調レーザー航跡場が確認され, 電子が MeV 程度まで加速された. また, 航跡場はレーザーが $130 \mu\text{m}$ 程度伝搬したのちに減衰し, 電子ビームも脱位相することが明らかとなった.

実験及び計算結果より, 低出力レーザーによって航跡場を励起するためには高いガス密度かつ数百 μm の厚みのガスターゲットを供給する必要がある. この課題を解決するため, 数値流体物理学を用いてガスターゲットの計算を始めた.

本成果をもとに, 低出力レーザー駆動航跡場による電子ビームとガスプラズマから放射される電磁波を組み合わせることによる追加速の構想を得た. 本研究期間内にプラズマからの電磁波計測を行い直線およびラジアル偏向高出力電磁波の発生方法を確立した [1, 2].

本研究によって低出力レーザーによる航跡場は発生のための基礎パラメータを明らかにした. 当初の研究目標は達成できていないが, 今回の結果をもとに, 引き続き集光面の速度を制御することにより脱位相長を制御するレーザー航跡場加速に関して調査を続ける.

[参考文献]

- (1) T. Fukuda *et al.*, Characteristics of terahertz waves from laser-created plasma with an external electric field, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, 070909 (2019).
- (2) T. Fukuda *et al.*, Experiments of forward THz emission from femtosecond laser created plasma with applied transverse electric field in air, *Jpn. J. Appl. Phys.* 59, 020902 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fukuda T., Otsuka T. P., Kobayashi T., Asai T., Yoshida Y., Yamamoto K., Nagami T., Yamanaka H., Endo S., Yugami N.	4. 巻 58
2. 論文標題 Characteristics of terahertz waves from laser-created plasma with an external electric field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 070909 ~ 070909
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab2c31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Fukuda, T. P. Otsuka, Y. Sentoku, H. Nagatomo, H. Sakagami, R. Kodama and N. Yugami	4. 巻 59
2. 論文標題 Experiments of forward THz emission from femtosecond laser created plasma with applied transverse electric field in air	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020902 ~ 020902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab67e1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大塚 崇光, 郡司 貴大, 飯田 紘一, 高橋 瑠伊, 西田 大紀, 五十嵐 峻, 片谷 光祐, ペレラ ドウティカ, 湯上 登
2. 発表標題 低出力レーザーによるレーザー航跡場加速実験
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takamitsu P Otsuka, Takahiro Gunji, Koichi Iida, Rui Takahashi, Daiki Nishida, Duthika Perera, Kosuke Kataya, Yuta Ikoma, Noboru Yugami
2. 発表標題 Fundamental Research of Laser Wakefield Acceleration driven by TW-class Laser
3. 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaoru Kobayashi, Akihito Ichige, Hidetoshi Ito, Ren Kashihara, Takamitsu Otsuka, Noboru Yugami
2. 発表標題 THz source driven by femtosecond laser created plasma with applied transverse electric field in air
3. 学会等名 第25回産研国際シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 圭佑, 小川 拓也, 武田 蒼輝, 大塚 崇光, 湯上 登
2. 発表標題 フラッシュ電離による電磁波の周波数上昇に関する数値解析
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市毛 彰人, 柏原 廉, 小林 郁, 伊藤 秀敏, 大塚 崇光, 湯上 登
2. 発表標題 縦静電場印加型レーザー生成プラズマからの電磁波放射
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤 隆希, 郡司 貴大, 吉岡 海夏音, 飯田 紘一, 高橋 瑠伊, 西田 大紀, 大塚 崇光, 湯上 登
2. 発表標題 低出力レーザー装置によるレーザー航跡場電子加速実験
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市毛 彰人, 山本 晃佑, 永見 崇晃, 小林 郁, 遠藤 奨真, 山中 晴貴, 小川 拓也, 後藤 隆希, 吉岡 海夏音, 吉田 圭佑, 大塚 崇光, 湯上 登
2. 発表標題 静電場印加レーザープラズマからのテラヘルツ電磁波放射
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 圭佑, 小川 拓也, 永見 崇晃, 山中 晴貴, 後藤 隆希, 山本 晃佑, 遠藤 奨真, 市毛 彰人, 小林 郁, 吉岡 海夏音, 大塚 崇光, 湯上 登
2. 発表標題 フラッシュ電離による THz 電磁波の周波数上昇実験
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤 隆希, 山中 晴貴, 永見 崇晃, 山本 晃佑, 遠藤 奨真, 市毛 彰人, 小川 拓也, 小林 郁, 吉田 圭佑, 吉岡 海夏音, 大塚 崇光, 湯上 登
2. 発表標題 低出力レーザーを用いたレーザー航跡場加速電子源の研究
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Otsuka, Y. Yoshida, T. Fukuda, H. Yamanaka, F. H. Bahron, T. Kobayashi, K. Yamamoto, T. Nagami, S. Endo, and N. Yugami
2. 発表標題 Laser Wakefield Acceleration driven by Low Peak Power Laser System
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------