

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05359

研究課題名(和文) レーザーとプラズマの相互作用におけるイオンビームの輸送と追加速方法の探索

研究課題名(英文) Study on Laser High-Quality-Ion Generation, Transport and Post-Acceleration

研究代表者

川田 重夫 (KAWATA, Shigeo)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30150296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レーザーとプラズマの相互作用におけるイオンビームの輸送と追加速方法の探索を目的とした。高強度短パルスレーザー技術の進展により、レーザー加速のイオンビームの研究・利用が現実味を帯びてきた。レーザー加速のイオンビームの制御を行うことに研究が移行しつつある。イオンビームを、粒子線がん治療・材料改変や基礎研究他の実用に供するためには、様々な制御が必要であり、目的に合った粒子エネルギー、エネルギースペクトル、ビーム長、イオンビーム広がりなどの制御の高度化が欠かせない。本研究では、このレーザー生成イオンビームの輸送と追加速方法を探索し、近い将来における実用への道につなげる新たな方法を見つけた。

研究成果の概要(英文)： In this research we have succeeded to find a new way to produce a high-quality ion beam generated by an interaction of intense short-pulse lasers with plasmas. The laser-produced ion beam can be used for cancer therapy, material processing, basic science, etc. In this research we employed thin foil targets, which are illuminated by intense short-pulse lasers. The ion beam is initially generated by the first plasma. In general, the ion beam has an energy spread and has a spacial divergence in transverse and longitudinal. The ion beam is transported to the second target, which is aligned to reduce the energy spread. The high-energy part of the ion beam is decelerated by the second target and the tail of the ion beam is accelerated by the electric field at the second target rear side, so that the longitudinal ion beam spread is reduced. The second target has also larger holes at the target rear, and the transverse electric field is generated to collimate the ion beam.

研究分野：プラズマ物理学，レーザーイオンビーム生成，イオンビーム慣性核融合，計算科学

キーワード：レーザーイオン生成，レーザー生成イオンビーム制御，粒子線がん治療，レーザープラズマ相互作用，ビームバンチング，ビームコリメーション，追加速，ビーム輸送

1. 研究開始当初の背景

レーザー技術の飛躍的な発展に刺激され、高強度短パルスレーザーによる粒子加速や放射生成などの研究が世界的に発展し、その応用への展開が現実味を帯びてきた。本研究では、レーザーにより生成されたイオンビームの輸送と追加速の方法を探索することを考える。現在までのレーザーによるイオンビーム生成の研究は、レーザーとプラズマの相互作用を研究することにより、おおむねイオンビームの生成メカニズムを中心に実施されてきた。そのため、実際にがん治療等の実用に供するまでには至っていないのが、本研究分野の現状である。

実用化のためには、レーザーによるイオンビーム生成と輸送の制御が必須であり、レーザーからイオンへの変換効率の向上に加えて、イオン粒子エネルギー、エネルギースペクトル、イオンビームの縦及び横の広がりなどの時間的及び空間的な制御、繰り返しオペレーションの研究等が欠かせない。これらの重要な点については未だに研究が進展していない。

このような現状の中で、本研究代表者らは、現在までにレーザーからイオンビームへのエネルギー変換の向上を飛躍させる方法を提案し(Phys. Rev. E78 (2008) 046401), そのアイデアは最近の実験で実証された (Phys. Rev. Lett.109(2012)234801)。実験的にもレーザーからイオンへのエネルギー変換効率を飛躍的に向上できた。また、レーザー生成イオン源の空間的に横方向の広がりを抑える方法についても、先駆けて提案をしている(Phys. of Plasmas, 12(2005) 073104; J. Appl. Phys., 101(2007) 113305)。

このようなレーザー生成のイオン源に関する研究は、その加速メカニズムを含めて多くの研究がなされているが、実用化には必須となるレーザーによって生成されたイオンビームの輸送と追加速に関してはほとんど手がついていない。本研究では、先駆けて本研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

レーザーとプラズマの相互作用により生成されるイオンビームを利用に供するためには、イオンビームの各種の制御が欠かせない。しかし、1 レーザーパルスとプラズマとの1回の相互作用によりすべてを制御することは非常に難しい。従来の高エネルギー加速器同様に、それぞれの制御要求を実現する機能を持った複数の要素からなるレーザーによるイオンビーム生成制御方法が考えられる。多段加速を含むこの考え方と可能性を(S. Kawata, et al., Laser Therapy, 22(2013)103)に提案している。更に、EUで計画されているレーザーイオン加速プロジェクトの一つ(ELIMIAA (ELI Multidisciplinary Ion Acceleration Applications)

beamline)としても、概念設計を提案している。

レーザー生成によるイオンビームの実用化に向けた研究として、その輸送と追加速を目的とした。具体的には、以下について、主に数値シミュレーション手法により研究を行った。1)イオンビームのコリメーション方法と制御、2)イオンビームのバンチング方法と制御、3)多段加速の可能性の追求とその制御安定性、およびイオンエネルギーとそのスペクトルの制御、4)レーザーとターゲットアラインメントエラーのイオンビーム輸送と追加速への影響、について研究を行った。

3. 研究の方法

高強度短パルスのレーザーをターゲットに照射する場合、まずターゲットの電子にエネルギーが付与され高エネルギーの電子が生成される。高エネルギーの電子がターゲットの外に飛び出し、残されたイオンとの間に強力な電場 (TNSA 電場, $\sim MV/\mu m$) が生成される場合は、この電場でイオンの加速も行われる。一方、高エネルギー電子が、プラズマターゲット中で大きな電流を形成し、強力な磁場 ($\sim 10kT$ オーダー) が形成される場合がある。この場合は、急激に非常に強力な磁場が形成されるため、電磁誘導の法則により、プラズマ中を移動する強い電場が形成される (誘導電場, $\sim MV/\mu m$)。これによってもイオンの追加速が可能である。

また、この電場と磁場を加速のみならず、場の方向を変えることで、イオンビームのコリメーションやバンチングに用いることも可能である (S. Kawata, et al., Laser Therapy, 22(2013)103)。

このような電磁場及びターゲット構造を駆使して、レーザー生成のイオンビームの輸送と追加速方法の研究を行った。また研究手法には、主に粒子シミュレーション手法 (Particle-in-Cell 法)を用いた。プラズマターゲットの密度分布の影響、レーザーとターゲットアラインメントの影響、レーザー他の多くのパラメータのレーザーイオン加速システムへの影響を調べた。

4. 研究成果

本研究では、レーザーとプラズマの相互作用におけるイオンビームの輸送と追加速方法の探索を目的とした。高強度短パルスレーザー技術の進展により、レーザー加速のイオンビームの研究・利用が現実味を帯びてきた。イオン加速のメカニズムを研究する段階から、その制御を行うことに研究が移行しつつある。レーザー生成のイオンビームを、粒子線がん治療・材料改変や基礎研究他の実用に供するためには、様々な制御が必要であり、目的に合った粒子エネルギー、エネルギースペクトル、ビーム長、イオンビーム広がりなどの制

御の高度化が欠かせない。

本研究では、コンピュータシミュレーションにより、このレーザー生成イオンビームの輸送と追加速方法を探索し、近い将来における実用への道につなげることを狙った。2枚の薄膜ターゲットと2つのレーザーパルスを用いる事で、イオンビームのバンチングとコリメーション及びイオンビームバンチ全体の追加速にも成功した。

1枚目の薄膜で、既に加速され入射されて

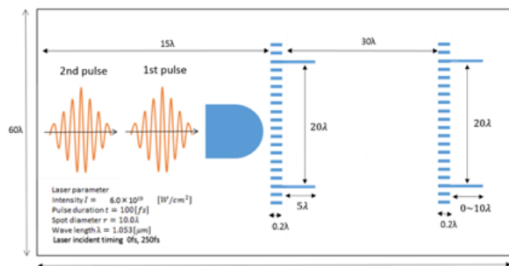


図. 2枚のターゲットによるイオンビームのバンチング、コリメーション及び追加速のモデル。

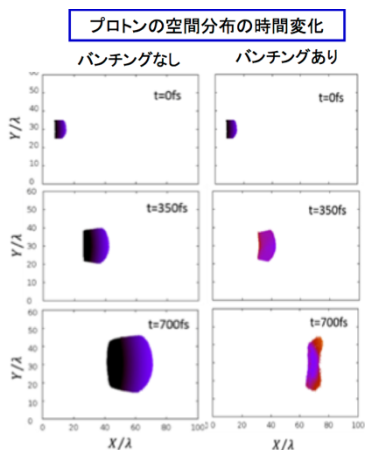


図. 2枚のターゲットを用いて効果的なバンチングを実現。

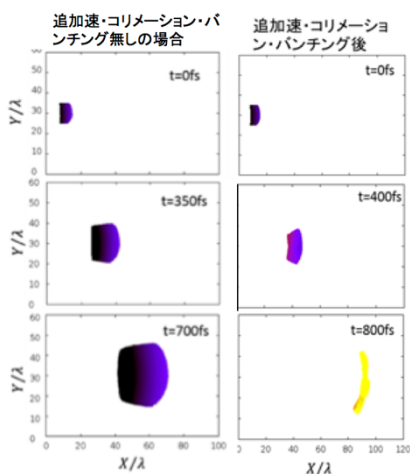


図. 本研究で得られた成果を適用する前と後のイオンビーム。ビームバンチングを行い、追加速し、さらにコリメーションを行い高品質のイオンビームが生成できた。

きたイオンビームの後方を加速する。1枚目の薄膜の厚みを調整することで、第1パルスレーザーが1枚目の薄膜を通過し2枚の薄膜ターゲットまで到達することで、イオンビームの前方のイオン速度を減速し、バンチングを効果的に実現することが出来た。また第2レーザーパルスを入射することで、2枚目の薄膜ターゲットにビームを追加速するための加速電場を形成することが出来た。追加速されたプロトンエネルギーを200MeV程度に上昇させることができた。更に、2枚目のターゲットの後方に、半径がレーザースポットサイズの半分程度の大きな穴を複数あけることで、バンチングされ追加速されたイオンビームの横方向の広がりを抑えることにも成功した。本研究により、イオンビームのバンチング、コリメーション、追加速を実現する方法を見つけることができた。

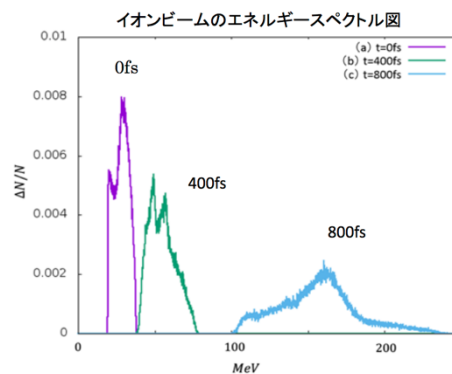


図. 高品質のイオンビームを追加速し、エネルギーピークを140MeV程度にすることができた。

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15件)

- ① S. Kawata, D. Kamiyama, Y. Ohtake, M. Takano, D. Barada, Q. Kong, P. X. Wang, Y. J. Gu, W. M. Wang, J. Limpouch, A. Andreev, S. V. Bulanov, Z. M. Sheng, O. Klimo, J. Psikal, Y. Y. Ma, X. F. Li, and Q. S. Yu, Controllable Laser Ion Acceleration, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.691, 2016, 012021, 1-8
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/691/1/012021>
- ② X. F. Li, Q. Yu, Y. J. Gu, J. F. Qu, Y. Y. Ma, Q. Kong and S. Kawata, Calculating the radiation characteristics of accelerated electrons in laser-plasma interactions, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.23, 2016, 033113, 1-5
<https://doi.org/10.1063/1.4943408>

- ③ Jian-Xun Liu, Yan-Yun Ma, Jun Zhao, Tong-Pu Yu, Xiao-Hu Yang, Long-Fei Gan, Guo-Bo Zhang, Jian-Feng Yan, Hong-Bin Zhuo, Jin-Jin Liu, Yuan Zhao and Shigeo Kawata, High-Flux low-divergence positron beam generation from ultra-intense laser irradiated a tapered hollow target, *Physics of Plasmas*, 查読有, 22 卷, 2015, 103102, 1-6 <https://doi.org/10.1063/1.4932997>
- ④ X. F. Li, Q. Yu, Y. J. Gu, S. Huang, Q. Kong and S. Kawata, Bubble shape and electromagnetic field in the nonlinear regime for laser wakefield acceleration, *Physics of Plasmas*, 查読有, Vol. 22, 2015, 083112, 1-6 <https://doi.org/10.1063/1.4928908>
- ⑤ Guo-Bo Zhang, Yan-Yun Ma, Han Xu, Nasr A. M. Hafz, Xiao-Hu Yang, Min Chen, Tong-Pu Yu, De-Bin Zou, Jian-Xun Liu, Jian-Feng Yan, Hong-Bin Zhuo, Long-Fei Gan, Li-Chao Tian, Fu-Qiu Shao, Yan Yin, and S. Kawata, Enhanced electron injection in laser-driven bubble acceleration by ultra-intense laser irradiating foil-gas targets, *Physics of Plasmas*, 查読有, Vol. 22, 2015, 083110, 1-6 <https://doi.org/10.1063/1.4927583>
- ⑥ Q. Yu, Y. J. Gu, X. F. Li, S. Huang, Q. Kong and S. Kawata, Electron self-injection into the phase of a wake excited by a driver laser in a nonuniform density target, *Physics of Plasmas*, 查読有, Vol. 22, 2015, 073107, 1-4 <https://doi.org/10.1063/1.4926589>
- ⑦ Q. Yu, Q. Kong, Y. J. Gu, X. F. Li, S. Huang and S. Kawata, High-quality electron beams generation in a linear upramp density target, *Euro physics Letters*, 查読有, Vol. 110, 2015, 35002, 1-5 <http://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/110/35002>
- ⑧ Y. J. Gu, Q. Kong, S. Kawata, T. Izumiya, T. Nagashima, M. Takano, X. F. Li, Q. Yu, D. Barada, Y. Y. Ma and P. X. Wang, Ion Acceleration by Ultra-intense Laser Pulse Interacting with Double-layer Near-critical Density Plasma, *Journal of Physics: Conference Series*, 查読有, Vol. 688, 2016, 012021, 1-5 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/688/1/012021/pdf>
- ⑨ S. Kawata, T. Izumiya, D. Sato, T. Nagashima, M. Takano, D. Barada, Y. J. Gu, Y. Y. Ma, Q. Kong, P. X Wang and W. M. Wang, Ion beam control in laser plasma interaction, *Journal of Physics: Conference Series*, 查読有, Vol. 688, 2016, 012045, 1-5 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/688/1/012045/pdf>
- ⑩ M. Takano, T. Nagashima, T. Izumiya, Y. J. Gu, D. Barada, Q. Kong, P. X. Wang, Y. Y. Ma, W. M. Wang and S. Kawata, Collimation of laser-produced proton beam, *Journal of Physics: Conference Series*, 查読有, Vol. 688, 2016, 012061, 1-5 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/688/1/012061/pdf>
- ⑪ D. Kamiyama, M. Takano, T. Nagashima, D. Barada, Y. J. Gu, X. F. Li, Q. Kong, P. X. Wang and S. Kawata, Controllable laser ion beam generation, *Journal of Physics: Conference Series*, 查読有, Vol. 717, 2016, 012065, 1-5 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/717/1/012065/pdf>
- ⑫ Q. Yu, Y. J. Gu, X. F. Li, J. F. Qu, Q. Kong and S. Kawata, Control of laser absorbing efficiency and proton quality by a specific double target, *New Journal of Physics*, 查読有, Vol. 18, 2016, 083024, 1-10 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/18/8/083024/pdf>
- ⑬ J. X. Liu, Y. Y. Ma, T. P. Yu, J. Zhao, X. H. Yang, L. F. Gan, G. B. Zhang, Y. Zhao, S. J. Zhang, J. J. Liu, H. B. Zhuo, F. Q. Shao and S. Kawata, Enhanced electron positron pair production by ultra intense laser irradiating a compound target, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 查読有, Vol. 58, 2016, 125007 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0741-3335/58/12/125007/meta>
- ⑭ S. Kawata, Y. J. Gu, X. F. Li, T. Karino, H. Katoh, J. Limpouch, O. Klimo, D. Margarone, Q. Yu, Q. Kong, S. Weber, S. Bulanov, and A. Andreev, Dynamic stabilization of filamentation instability, *Physics of Plasmas*, 查読有, Vol. 25, 2017, 011601, 1-6 <https://doi.org/10.1063/1.5017517>
- ⑮ B. B. Xu, Y. Y. Ma, X. H. Yang, W. H. Tang, Z. Y. Ge, Y. Zhao, Y. Z. Ke and S. Kawata, Effect of bromine-dopant on radiation-driven Rayleigh-Taylor instability in plastic foil, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 查読有, Vol. 59, No. 10, 2017, 105012 <http://iopscience.iop.org/article/10>

[学会発表] (計 20 件)

- ① S. Kawata, Y. Ohtake, D. Kamiyama, D. Barada, Q. Kong, Y. J. Gu, P. X. Wang, Y. Y. Ma, W. M. Wang, X. F. Li, Q. Yu, J. Limpouch, A. Andreev, S. Bulanov, Z. M. Sheng, O. Klimo and J. Psikal, Controllable multi-stage laser ion acceleration, 2nd International Symposium Series on High Power Laser Science and Engineering(invited talk), 2016
- ② D. Kamiyama, M. Takano, T. Nagashima, D. Barada, Y. J. Gu, X. Li, Q. Yu, Q. Kong, P. X. Wang and S. Kawata, Controllable Laser Ion Beam Generation, 9th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, 2015
- ③ S. Kawata, D. Kamiyama, Y. Ohtake, D. Barada, Q. Kong, P. X. Wang, Y. J. Gu, W. M. Wang, J. Limpouch, A. Andreev, S. V. Bulanov, Z. M. sheng, O. Klimo, J. Psikal, Y. Y. Ma, X. F. Li and Q. S. Yu, Controllable Laser Ion Acceleration, 24th Annual International Laser Physics Workshop, 2015
- ④ 神山大樹, 高野真弘, 長嶋俊宏, 茨田大輔, Y. J. Gu, X. Li, Q. Kong, P. X. Wang, 川田重夫, プラズマ中の誘導電場を用いたイオンビームの質向上, 日本物理学会 2015 秋季大会, 2015
- ⑤ D. Kamiyama, Y. Ohtake, M. Ito, K. Nakazato, I. Hirasima, D. Barada, Y. J. Gu, X. F. Li, Q. Kong, P. X. Wang, Q. Yu and S. Kawata, Controllability of Laser Ion Beam Generation, ASHULA Grand Seminar /Symposium 2016, 2016
- ⑥ K. Nakazato, Y. Ootake, S. Kawata, X. F. Li, Y. J. Gu, Q. Kong, P. X. Wang, Q. Yu, Control of Laser-Driven Ion Acceleration, 21th International Symposium on Heavy Ion Fusion, 2016
- ⑦ 大竹祐太郎, 中里和貴, 李曉鋒, 川田重夫, Yan Jun Gu, Qing Kong, Ping Xiao Wang, Qin Yu, レーザーとターゲットの相互作用によるイオンビームの高品質化, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016
- ⑧ 中里和貴, 大竹祐太郎, 李曉鋒, 川田重夫, Y. J. Gu, Q. Kong, P. X. Wang, Q. Yu, 高強度レーザーによるイオンビームのコリメーション, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016
- ⑨ S. Kawata, HIF research activities in Japan, US Japan Workshop on Intense Beam Physics, Materials Studies and Heavy Ion Fusion, 2017
- ⑩ 北田 耕平, 大竹 祐太郎, 中里 和貴, 李 曉鋒, 川田 重夫, 高強度短パルスレーザーと薄膜の相互作用によるバンチングについて, 第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会, 2017
- ⑪ 辻中直人, 中里 和貴, 大竹 祐太郎, 北田 耕平, 伊藤慎太郎, 李 曉鋒, 川田 重夫, 高強度短パルスレーザーと薄膜ターゲットを用いたイオンビームのコリメーション, 第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会, 2017
- ⑫ 伊藤 慎太郎, 北田 耕平, 辻中 直人, 中里 和貴, 大竹 祐太郎, 李 曉鋒, 川田 重夫, 第 7 回電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会, 2017
- ⑬ 中里和貴, 大竹祐太郎, 李曉鋒, 川田重夫, Y. J. Gu, Q. Kong P. X. Wang, Q. Yu, 高強度短パルスレーザーによるイオンビームの制御, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017
- ⑭ 佐藤 遼, 加藤 寛樹, 久保 雄明, 狩野 貴宏, 川田 重夫, A. I. Ogoyski, 重イオンビーム慣性核融合における Wobbling beam による燃料標的の均一爆縮, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018
- ⑮ 中里 和貴, 大竹 祐太郎, 李曉鋒, 川田 重夫, Y. J. Gu, Q. Kong, 高強度短パルスレーザーによるイオンビームの制御, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018
- ⑯ 舘 健介, 中里 和貴, 滝沢 裕一郎, 李 曉鋒, 顧 彦珺, 川田 重夫, 高強度短パルスレーザーにより生成されたイオンビームのコリメーションについて, 第 8 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, 2018
- ⑰ 滝沢 裕一郎, 中里 和貴, 李 曉鋒, 顧 彦珺, 川田 重夫, 高強度短パルスレーザーによるイオンビーム生成の高効率化について, 第 8 回電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会, 2018
- ⑱ 佐々木 徹, 高橋 一匡, 菊池 崇志, 川田 重夫, 堀岡 一彦, 高山 健, 巨大クラスターイオン慣性核融合の燃料標的構造の理論的検討, Plasma Conference 2017, 2017
- ⑲ 佐藤 遼, 加藤 寛樹, 久保 雄明, 飯沼 拓也, 狩野 貴宏, 川田 重夫, Alexander Ivanov Ogoyski, 重イオンビーム慣性核融合における燃料標的の均一圧縮について, Plasma Conference 2017, 2017
- ⑳ 中里 和貴, 大竹 祐太郎, 李 曉鋒, 川田 重夫, Gu YanJun, Kong Qing, Wang PingXiao, Yu Qin, 高強度短パルスレーザーによるイオンビームの高品質化, Plasma Conference 2017, 2017

[図書] (計 1 件)

- ① 川田重夫, 森北出版株式会社, プラズマ
入門 (第2版), 2016, 116

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川田 重夫 (KAWATA, Shigeo)
宇都宮大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 3 0 1 5 0 2 9 6

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()