

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 20 日現在

機関番号：33811

研究種目：若手 B

研究期間：2010～2011

課題番号：22740366

研究課題名（和文）ビート波レーザーによる遅波プラズマ波の制御とイオン加速実証

研究課題名（英文）Demonstration of Ion Acceleration by Slow Wave Driven by Beat Laser

研究代表者

森 芳孝 (MORI YOSHITAKA)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教

研究者番号：60440616

研究成果の概要（和文）：レーザー航跡場で、イオンが直接加速可能であることを実証するため、位相速度が光速より遥かに遅いプラズマ波（遅波）を、波長の異なる2本のレーザー（ビート波レーザー）により励起することを試みた。レーザーをプラズマ生成ガスジェットターゲットへ対向照射し、散乱光スペクトルを解析した結果、共鳴密度近傍において散乱光スペクトルの共鳴を観測した。遅波を仮定すると、現状の解析では、加速電場 $0.22 \text{ kV}/\mu\text{m}$ 、加速ゲイン 2 keV と算出され、イオンがプラズマ波で加速されうること示した。

研究成果の概要（英文）：Excitation of plasma slow wave driven by counter irradiation of double-line BEAT laser is examined to accelerate ions by plasma wave. When the laser was focused into the gas jet, scattered photon spectrum indicated a resonant excitation of plasma wave at the resonant density defined from the laser spectrum beating. If we assume a slow wave excitation, the wave amplitude is $0.22 \text{ kV}/\mu\text{m}$ and acceleration gain is 2 keV . This is a promising result to demonstrate acceleration of ions by plasma wave.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ制御・レーザー

1. 研究開始当初の背景

レーザープラズマ粒子加速の分野で、加速イオンの最大加速エネルギー値は、2000年よりあまり進展していなかった。これは、現在主流のレーザーによるイオン加速機構が、光速近くで運動する電子雲によって生成される電場により加速する一段直線加速であることに起因している。この機構で、陽子を静止質量近く(930MeV)まで加速するためには、レーザー強度は、少なくとも、現状よりも2桁以上高い($> 10^{22} \text{W/cm}^2$)必要があると報告されているが(Esirkepov他、PRL92 175003, 2004)、レーザー技術の更なる向上が求められている。異なるレーザーイオン加速手法が望まれる。申請者は、遅波進行プラズマ波によるイオン加速実証実験を提案した。イオンも電子と同じように進行プラズマ波に捕獲されれば、原理的に100MeVを超える加速が可能であり、さらに、将来、プラズマ制御に成功すれば、1 GeV以上の加速が可能である。このような状況の中、2009年に遮断密度付近のプラズマから10 MeV/核子を超えるイオン加速の実験方向があった(福田他 PRL103 165002 2009)。加速機構は、磁気渦に起因する加速電界によるものらしい。レーザーにおけるイオン加速研究は、新たなイオン加速機構を実験的に模索する段階に突入している。

2. 研究の目的

研究の目的は、レーザー航跡場で、イオンが直接加速可能であることを実証することである。2ビームビート波レーザーを対向照射することにより、重イオンプラズマ中に位相速度の遅いプラズマ波を外部強制振動により励起する。エネルギー50keV以上の陽子が捕獲される位相速度の遅い進行波プラズマ波を制御することを目指す。陽子をプラズマ波

によって加速するためには、以下の3つの課題を明らかにする必要がある。

- I. 位相速度の遅い重イオンプラズマ波の励起
- II. 重イオンプラズマ波へ陽子の入射とその加速実証
- III. 加速陽子をプラズマ波に捕獲及び加速し続けるための、プラズマ密度、加速電場強度及び位相速度の制御

本研究期間内では、I に着手した。

3. 研究の方法

陽子をプラズマ波で加速するためには、(1)遅波プラズマ波の励起と(2)陽子の入射が求められる。遅波を励起するため、波長の異なるビートレーザーを対向照射し、プラズマ生成領域で集光位置が一致するように調整する。プラズマは、超音速ガスジェット流へレーザーを集光することで生成する。集光強度が 10^{17}W/cm^2 以上では、Heなどの軽ガスは完全電離するため、ガスジェットの封入圧力を調整することでプラズマ密度を調整する。プラズマ密度は、レーザー光の一部を取り出すため時間同期しているプローブ干渉系で計測する。プローブ光の波長は 2ω (400nm)であり、プラズマ自発光成分をおさえている。プラズマ波の励起は、プラズマによるレーザーの散乱光スペクトルから求める。散乱光スペクトル及び加速イオンを計測するため、片側の集光光学系の中心には計測穴を設けた。遅波プラズマ波加速を実証するための実験光学系レイアウトと計測器配置を図1に示す。

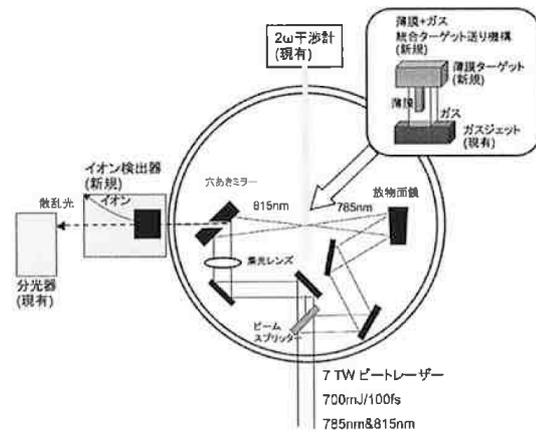


図 1. 申請時の遅波プラズマ波加速実験光学系レイアウトと計測器配置

4. 研究成果

(1) 主な成果

① 加速電場と加速イオン利得

位相速度の遅いプラズマ波をプラズマ波レーザーにより、外部制御して励起するために、ビート波レーザーの波長間隔(〜30 nm)で決定される電子密度(10^{18} cm^{-3})のプラズマを生成する必要がある。干渉系で実測したレーザー照射方向の電子密度分布を図2に示す。封入ガス圧は10気圧であった。レーザー(波長787nmと813nm)はガスジェットノズル上2mmへ照射した。封入圧力が1.8気圧のとき、電子密度はビートレーザー波長間隔(26 nm)で決定される共鳴密度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に一致する。

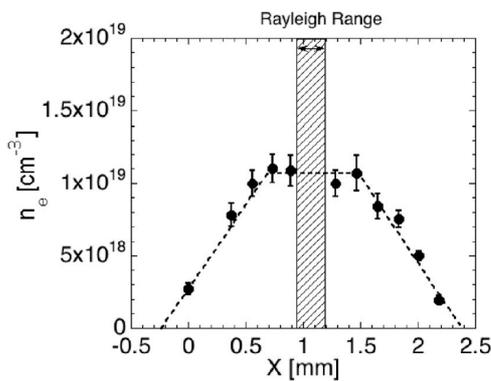


図2 電子密度の空間分布

遅波プラズマ波の強度は散乱光スペクトルから求めた。2009年の実験で得られた散乱光の結果を、今回得られた電子密度でプロットした散乱光強度の結果を図3に示す。

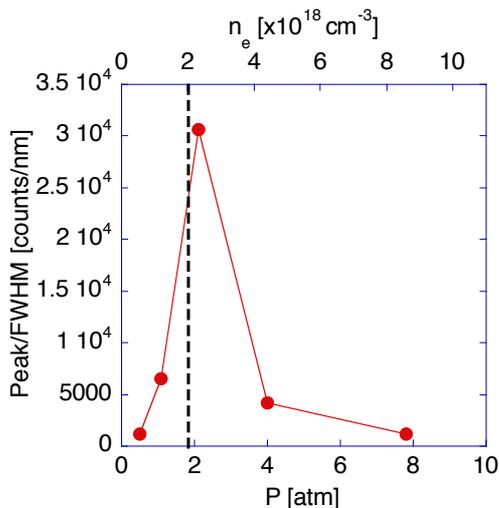


図3. 電子密度に対する規格化散乱光ピークの分布

図3より、想定している共鳴密度(図中点線)

に近い密度で共鳴的に散乱光強度が上昇していることがわかる。実験結果より、遅波が励起されていると仮定してプラズマ波の変調度を概算すると、現状では、変調度 0.11、イオンの加速勾配は、0.22 GV/m であった。本数値については、さらなる解析が必要である。遅波プラズマ波で、陽子を加速するための物理パラメータを整理すると表1のようになる。陽子の加速利得は現状では 2keV となった。

電子密度: n_e	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
規格化位相速度: β	0.019
捕獲陽子エネルギー: E_{cap}	0.17 MeV
変調度: ϵ	0.11
加速勾配: E	0.22 GV/m
波の持続時間: τ	150 fs
加速長: $\beta \tau c$	9 μm
加速利得	2 keV

表1: 陽子加速のための物理パラメータ整理

② 対向照射システムの改良

遅波励起とイオン加速実証の確実性を向上するために、2010年度に構築した非対称対向照射システムを全反射型対向照射システムとした。一方の照射システムの集光ミラーの中心に計測穴を設けることで、加速陽子を光学系の外で計測できるように改良した。さらに、対向2ビームのアライメント手法の開発をおこなった。レーザー照射方向に対して、斜め上部からモニターするために導入したター監視カメラにより、レーザー伝搬方向の横軸に対する対向2ビームの照射位置アライメントを実施し、さらに、既設のレーザー照射横方向からモニターするプローブ光学系により、伝搬方向に対する上下方向のビームアライメントを実施した結果、2ビームのポイントングを精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以内に抑えることができた。以上の成果により、2ビームがレーザープラズマ相互作用領域で確実に衝突可能となった。

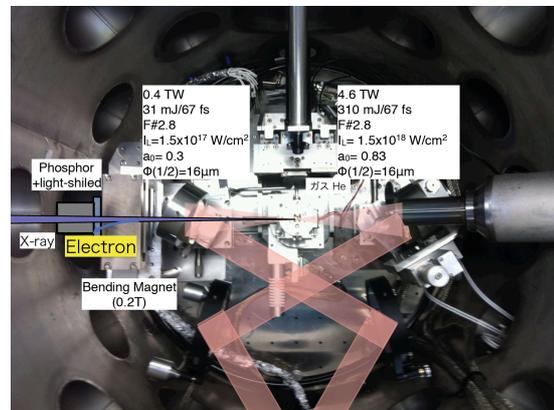


図4. 構築した全反射型対向照射システム

③インライン粒子計測器の構築

インラインで加速陽子を計測することに先立ち、まず確実に発生している高速電子計測システムを構築した。本計測システムを今後陽子計測器へ拡張していく。

(2)得られた成果の国内外の位置づけ

プラズマ波によるイオン加速の実験的報告は国内外で皆無に近い。物理学会を中心に報告を続けており、加速実証の実験結果が期待されている。国外での報告は、今後検討する。

(3)今後の展望

これまでの成果を論文化し、今後の研究計画を再検討する。研究を開始した当初、プラズマ波によるイオン加速研究は他では全くやられておらず、手探りの状況が続いてきた。今回の研究により、遅波によるイオン加速の実験データを取得することができた。この実験成果より、実験的にイオンの加速ゲインを予測することが初めて可能となったため、イオン加速実証への展望は着実に開かれつつある。

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6件)

① Y. Mori and Y. Kitagawa, “Acceleration of cone-produced electrons by double-line Ti-sapphire laser Beating”, *Physics of Plasmas*, 査読有、Vol. 19、2012、053106、DOI:10.1063/1.4707390

② Yoshitaka Mori, Hajime Kuwabara, Katsuhiro Ishii, Ryohei Hanayama, Toshiyuki Kawashima, and Yoneyoshi Kitagawa, “Head-On Inverse Compton Scattering X-rays with Energy beyond 10keV from Laser-Accelerated Quasi-Monoenergetic Electron Bunches”, *Applied Physics Express*, 査読有、Vol. 5、2012、056401、DOI:10.1143/APEX.5.056401

③ Y. Kitagawa, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Satoh, T. Kurita, M. Takagi, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, Y. Nishimura, A. Sunahara, and Y. Sentoku, “Fusion using fast heating of a compactly imploded core”, *Physical Review Letters*, 査読有、Vol. 108、2012、155001、DOI:10.1103/PhysRevLett.108.155001

④ Y. Kitagawa, Y. Mori, R. Hanayama, S. Okihara, K. Fujita, K. Ishii, T. Kawashima, N. Sato, T. Sekine, R. Yasuhara, M. Takagi, N. Nakamura, Y.

Miyamoto, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, H. Kan, “Efficient fusion neutron generation using 10 TW high-repetition rate diode-pumped laser”, *Plasma and Fusion Research*, 査読有、vol. 6、2011、1306006

⑤ Y. Mori, K. Fujita, R. Hanayama, K. Ishii, Y. Kitagawa, H. Kuwabara, T. Kawashima, “Inverse Compton Scattering by laser accelerated Electrons and its application to standoff detection of hidden objects”, *Proceedings of IPAC'10*, Kyoto, Japan, Published by the IPAC'10 OC/ACFA, 査読無、2010、4004

⑥ Shuji OOTSUKA, Yoshitaka MORI, Takahiro MAKINO, Mari OHTA, Hajime KUWABARA, Yoneyoshi KITAGAWA, “Influence of femtosecond laser generated X-ray irradiation on germination of *Aspergillus Awamori*”, *The Review of Laser Engineering*, 査読有、vol. 38、2010、386

[学会発表] (計8件)

① 森芳孝、桑原一、花山良平、石井勝弘、川嶋利幸、北川米喜、“レーザー加速電子によるレーザー光の逆コンプトン散乱エックス線発生と遠隔透視応用 IV”、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月27日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス

② Yoshitaka Mori, Hajime Kuwabara, Katsuhiro Ishii, Ryohei Hanayama, Toshiyuki Kawashima, and Yoneyoshi Kitagawa, “Inverse Compton Scattering from Laser accelerated electrons and its application for Stand-off Detection III”、プラズマコンファレンス2011、2011年11月24日、金沢

③ 森芳孝、桑原一、藤田和久、石井勝弘、花山良平、川嶋利幸、北川米喜、“レーザー加速電子によるレーザー光の逆コンプトン散乱エックス線発生と遠隔透視応用 II”、日本物理学会第66回年次大会、2011年3月28日、新潟大学(新潟)

④ 森芳孝、桑原一、藤田和久、石井勝弘、花山良平、川嶋利幸、北川米喜、“レーザー加速準単色電子による逆コンプトン散乱準単色 X 線の発生”、レーザー学会学術講演会第31回年次大会、2011年1月10日、電通大(調布)

⑤ 森芳孝、桑原一、藤田和久、石井勝弘、花山良平、川嶋利幸、北川米喜、“レーザー加速電子によるレーザー逆コンプトン散乱X線発生と遠隔透視応用”、プラズマ・核融合学会第27回年会、2010年12月1日、北海道大学(札幌)

⑥森芳孝、桑原一、石井勝弘、花山良平、川嶋利幸、北川米喜、“Mono-energetic Xray generation from laser produced mono-energetic electron beam “、第52回アメリカ物理学会年会プラズマ分科会、2010年11月11日、シカゴ(米国)

⑦森芳孝、北川米喜、石井勝弘、花山良平、桑原一、川嶋利幸、“ダブルラインビート波レーザーを用いた対向照射レーザープラズマ研究”、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 23 日、大阪府立大(中百舌鳥)

⑧Y. Mori、K. Fujita、R. Hanayama、K. Ishii、Y. Kitagawa、H. Kuwabara、T. Kawashima、“Inverse Compton Scattering by laser accelerated Electrons and its application to stand off detection of hidden objects”、第一回国際加速器会議(IPAC'10)、2010年5月27日、京都国際会議場(京都)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 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 0 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

<http://www.gpi.ac.jp/bunya/energy/research1.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 芳孝 (MORI YOSHITAKA)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教

研究者番号：60440616