

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23654208

研究課題名（和文） 電子とのハイブリッド加速を用いたレーザー陽子ビーム生成

研究課題名（英文） Laser-driven proton generation assisted by electron beam produced by laser-plasma acceleration

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

研究成果の概要（和文）：本研究は、レーザープラズマ加速で得られる電子ビームを用い、陽子を加速する電場を形成するレーザー陽子ビーム生成の新技术を提案し、その原理実証を行うことを目的としている。高強度レーザーパルスを経済的に照射し、ピークエネルギー65 MeV、単色ピークの電荷量 90 pC のエネルギーの揃った準単色電子ビームを発生し、レーザープラズマ加速電子ビームの電荷量増強を達成した。また、薄膜ターゲットに高強度レーザーパルスを照射し、最高エネルギーが 1 MeV を超える陽子ビームを発生した。これらの要素技術を統合し、本研究で提案するレーザー陽子ビーム生成の原理実証を行うための実験を実施した。

研究成果の概要（英文）：We propose the novel method of laser-driven proton generation assisted by an electron beam obtained with laser-plasma acceleration, which produces an accelerating field for the proton acceleration. A quasi-monoenergetic electron beam with a narrow energy spread is produced by irradiating a gas jet with an intense laser pulse. The peak energy and the charge in monoenergetic peak are 65 MeV and 90 pC, respectively. The increase in the charge of an electron beam produced by laser-plasma acceleration has been achieved. A proton beam with the maximum energy of more than 1 MeV is also produced by irradiating a thin foil target by an intense laser pulse. We have conducted the experiment for the proof of the principle of the laser-driven proton generation proposed in this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：高性能レーザー、プラズマ、量子ビーム、レーザープラズマ加速、陽子ビーム、電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー陽子（イオン）ビームを用いた粒子線ガン治療は、身体への負担の小さな治療法としてその普及が望まれている。しかし、高エネルギー陽子加速器の装置規模の大きさ故、その施設は日本国内では数カ所しか

存在しないのが現状であり、装置の小型化、施設の汎用化が望まれている。

高エネルギー陽子加速器を小型化する技術として、レーザー陽子ビーム生成に大きな期待が寄せられており、現在、その研究が進められている。現状では、体内深部のガン治

療に必要とされるエネルギーが 100 MeV に迫る陽子ビーム発生には、単発動作のペタワット級の出力を持つ巨大なレーザー装置が必要である。レーザーを含む装置規模、建設コストで現在の粒子線ガン治療装置を大きく凌駕するメリットがあるとは言いがたい。高エネルギーの陽子ビームを、より小さなレーザー出力で効率よく発生する手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、高エネルギーの陽子ビームを、より小さなレーザー出力で効率よく発生するため、図 1 に示す様に、複数の高強度レーザーパルスを用い、陽子と電子を同時に加速（本研究では、これをハイブリッド加速と呼ぶ）し、高エネルギー電子ビームが形成する電場を用いて陽子を加速するレーザー陽子ビーム生成の新技术を提案し、その原理を実証することを目的とする。

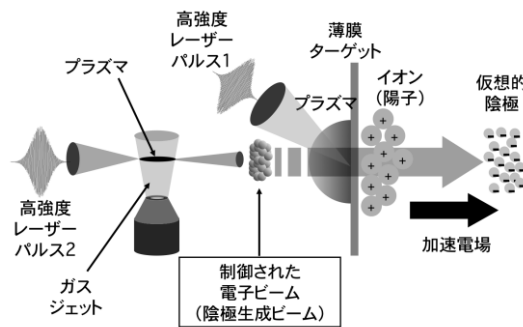


図 1 電子とのハイブリッド加速を用いたレーザー陽子ビーム生成の概念図。

3. 研究の方法

図 1 に示した様に、従来のレーザー陽子ビーム生成と同様、高強度レーザーパルス 1 を薄膜ターゲットに照射する。高強度レーザー電磁場中では、電子に対するローレンツ力の磁場に起因する力が支配的になり、電子がレーザー進行方向に加速される。発生した高エネルギー電子の一部は、薄膜裏面から真空中に飛び出し、仮想的な陰極を形成し、薄膜裏面との間に静電場が生じる。この電場によって薄膜表面に付着した水分や油分に由来する最も比電荷比の大きな陽子が加速される。高強度レーザーパルス 1 に同期して、高強度レーザーパルス 2 をガスジェットに照射し、レーザープラズマ電子加速（高強度レーザーパルスとプラズマの相互作用を利用した電子加速）によって高エネルギー電子ビームを発生する。この高エネルギー電子ビームは進行方向前方に設置された薄膜ターゲットを透過して仮想的陰極を形成し、薄膜裏面との間に電場を形成する。レーザーパルス 1 によって前駆的に加速された陽子を追加速し、高

エネルギー陽子ビームを発生する。

陽子のエネルギーは、加速電場を作り出す高エネルギー電子のエネルギー分布の指標となる等価電子温度に比例する。10 TW クラスのレーザーを用いてレーザープラズマ加速で得られる電子ビームの等価電子温度は、ペタワットレーザーを薄膜ターゲット照射した際に発生する高エネルギー電子の等価電子温度と同程度である。10 TW クラスのレーザーを用い、ペタワットレーザー照射と同程度の高エネルギー陽子ビーム発生が期待される。また、レーザープラズマ電子加速では、エネルギーの揃った準単色電子ビームの発生等、電子ビーム特性の制御が可能である。仮想的陰極を形成する電子ビームの特性制御によって陽子を加速する電場を制御し、エネルギーの揃った準単色陽子ビーム発生等、ビーム特性制御の可能性も秘めている。

本研究で提案するレーザー陽子ビーム生成手法の原理を実証するため、下記の 3 つの項目に沿って研究を進めた。

(1) 大電荷量を持つレーザープラズマ加速電子ビーム発生

本手法では、レーザープラズマ加速によって得られる電子ビームの形成する電場が、薄膜照射で発生する高エネルギー電子が形成する電場よりも支配的になることが鍵となる。電場強度は電荷量に比例するので、レーザープラズマ加速電子ビームの電荷量の増強を図った。

(2) 薄膜ターゲット照射による陽子ビーム発生

加速電場を形成するだけでは、陽子ビームは発生しないので、レーザーパルスを薄膜ターゲットに照射し、前駆的に陽子を生成する必要がある。薄膜ターゲット照射のみで陽子ビーム発生を試みた。

(3) 2 レーザーパルスのガスジェット、薄膜ターゲットへの同期照射による陽子ビーム発生

本研究で提案するレーザー陽子ビーム生成の原理を実証するため、ガスジェット、薄膜ターゲットに 2 レーザーパルスを同期照射し、陽子ビーム発生実験を実施した。

4. 研究成果

前節に示した各々の研究項目に対する成果を以下に示す。

(1) 大電荷量を持つレーザープラズマ加速電子ビーム発生

実験には、2 ビームの高強度レーザーパルスを発生するチタンサファイアレーザー装置（波長 800 nm）を用いた。音響光学効果を利用したスペクトル制御装置を用い、レーザー光のスペクトル幅を広げ、40 fs まで短パ

ルス化し、ピークパワー18 TW（エネルギー700 mJ）のレーザーパルスを得た。

エネルギー700 mJ、パルス幅40 fsの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、長さ2 mmのヘリウムガスジェットに照射し、電子ビームを発生した。レーザーパルス伝搬方向前方に加速される電子の軌道を磁場で曲げエネルギー分解し、発生電子ビームの特性を調べた。

プラズマの電子密度が $1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の時に得られた準単色電子ビームのエネルギー分解された電子像を図2(a)に、そのエネルギースペクトルを図2(b)を示す。図2(a)に示した電子像は1ショットで得られている。ピークエネルギー65 MeV、単色ピークの電荷量90 pC（電子数 5.6×10^8 ）を持つ準単色電子ビームが得られている。単色ピークの電荷量は図2(a)に見られる単色ピーク部分の電子像の強度分布の $1/e^2$ スポットに含まれる電荷量である。電子エネルギー分析装置の分解能を差し引き、相対的なエネルギー幅（エネルギー幅/ピークエネルギー）は半値全幅で35%と見積もられた。準単色電子ビームの発散角は単色ピーク部分の電子像の縦幅から、半値全幅で10 mradと見積もられた。

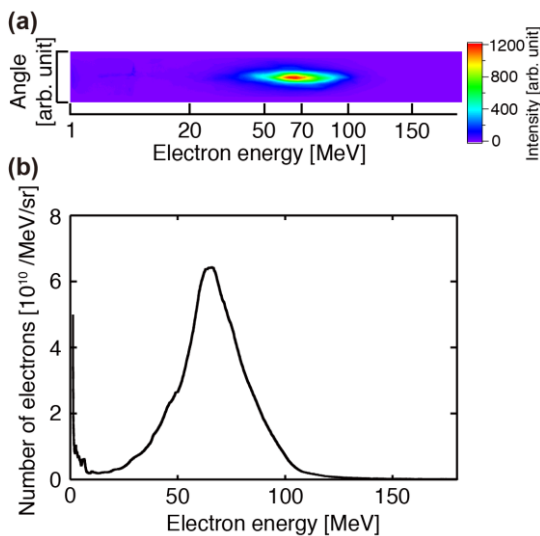


図2 典型的な準単色電子ビームの(a)エネルギー分解された電子像、(b)電子エネルギースペクトル。

図3は電子ビームのエネルギースペクトルのプラズマ電子密度依存性である。ガスジェットの密度を変化させ、プラズマの電子密度を変化させている。準単色電子ビームは、 $1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 近傍の狭い電子密度領域でのみ発生することがわかった。図3中に破線で示した様に、プラズマの電子密度を高くすると、電子ビームのエネルギースペクトルはマックスウエル状分布になるが、エネルギーが1 MeV以上の電子の総電荷量は数100 pCに達す

る。エネルギーの揃った準単色電子ビーム、マックスウエル状のエネルギー分布を持つ電子ビーム、いずれの場合においても、1パルスあたりの電荷量は高周波加速器からの電子ビームに匹敵し、レーザープラズマ加速電子ビームの電荷量増強を達成した。

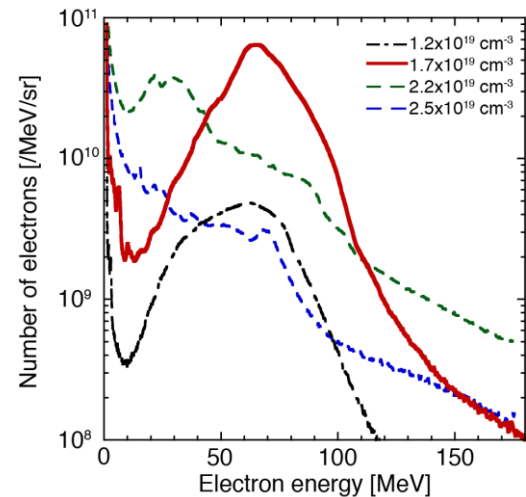


図3 電子ビームのエネルギースペクトルのプラズマ電子密度依存性。

(2) 薄膜ターゲット照射による陽子ビーム発生

エネルギー250 mJ、パルス幅65 fsのレーザーパルスを焦点距離175 mmの軸外し放物面鏡で集光し、アルミニウム $3 \mu\text{m}$ の薄膜ターゲットに照射した。レーザー光の偏光はp偏光、薄膜ターゲットへの入射角度は 45° であった。ターゲットのレーザー照射面の裏面側のターゲット面に直交する方向に陽子ビーム検出器を設置した。検出器として、ガフクロミックフィルム(XR-SP2, International Specialty Products)を積層して用いた。薄膜ターゲットとガフクロミックフィルムの距離は75 mmであった。

図4(a)はフィルターなし、図4(b)はガフクロミックフィルムの前に $3 \mu\text{m}$ のアルミニウムフィルターを設置して得られた像である。図中の番号は、積層したフィルムの層の番号であり、小さな番号程入射面に近い。図4の像は各々100ショット程度の重ね取りで得られている。オレンジ色であったフィルムが放射線の照射によって黒化している。ガフクロミックフィルムは陽子だけではなく、高エネルギー電子、薄膜ターゲット内の制動放射で発生するX線にも感度がある。アルミニウム $3 \mu\text{m}$ では、光子エネルギーが5 keVを超えるX線、エネルギー20 keVを超える電子の透過率は100%に近い。アルミニウムフィルターの有無で、黒化度が大きく異なるのは、陽子によって黒化したためと考えられる。

エネルギー300 keV の陽子のアルミニウム中での飛程は $3 \mu\text{m}$ 程度である。図4 (b)に示した様に、厚さ $3 \mu\text{m}$ のアルミニウムフィルターがある場合、黒化度が低くなっている。このことから、主にエネルギー300 keV 以下の陽子が発生していると考えられる。詳細な組成は明らかにされていないが、ガフクロミックフィルムはプラスチックが主成分であり、厚さは実測で $100 \mu\text{m}$ 程度であった。エネルギー3 MeV の陽子のプラスチック中での飛程が $100 \mu\text{m}$ 程度であるので、2層目のフィルムは3 MeV 以上のエネルギーを持つ陽子を検出する。図4(a)の2層目のフィルムが、僅かではあるが黒化していることから、最高エネルギーが3 MeV に達する陽子の発生が示唆されている。

ガフクロミックフィルム XR-SP2 の最低感度は0.05 Gy 程度である。陽子の平均エネルギーを100 keV とし、1層目のフィルム中で100%エネルギーを付与したと仮定すると、発生陽子数は 10^7 /pulse 程度と見積もられる。像サイズからビーム発散角を見積ることができる。フィルムサイズが小さなため、ビーム全体をカバーできていないが、発散角は 35° 以上であり、指向性の高い陽子ビームは得られなかった。

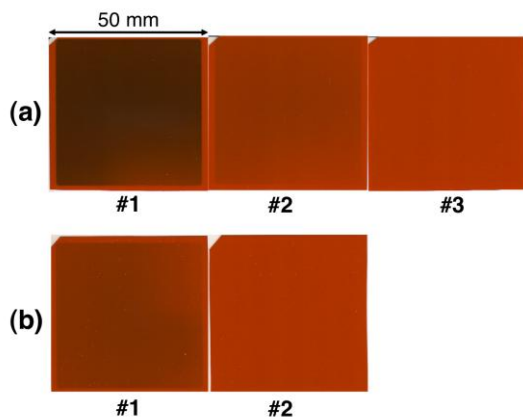


図4 積層したガフクロミックフィルムを用いて観測された陽子ビーム像。(a)フィルター無し、(b)アルミニウム $3 \mu\text{m}$ のフィルター有り。

(3) 2レーザーパルスのガスジェット、薄膜ターゲットへの同期照射による陽子ビーム発生

上述の様に、レーザープラズマ加速電子ビームの大電荷量化、陽子ビーム発生と必要な要素技術が確立できたので、これらを統合した陽子ビーム発生実験を行った。

エネルギー700 mJ、パルス幅40 fs の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、長さ2 mm のヘリウムガスジェットに照射した。これに同期して、エネ

ギー150 mJ、パルス幅100 fs のレーザーパルスを焦点距離175 mm の軸外し放物面鏡で集光し、アルミニウム $3 \mu\text{m}$ の薄膜ターゲットに 45° の入射角で照射した。各々の集光照射装置、ターゲット保持装置設置の制限から、ガスジェットと薄膜ターゲットの距離を1 m程度にせざるを得なかった。陽子ビームの検出には、ガフクロミックフィルムを積層した検出器を用いた。フォトダイオードを用いて2レーザーパルスのおおよその同期を取った後、薄膜を照射するレーザーパルスの光路長を変化させ、陽子ビームが発生するタイミングを調べた。

2レーザーパルスの同期照射実験を行ったが、陽子ビームの発生は観測されなかった。理由としては以下の様なものが考えられる。先に述べた予備実験と比べて、薄膜ターゲットを照射するレーザーパワーが1/3程度であり、パワー不足のため被加速陽子を発生できなかった。ガスジェット照射で発生する高エネルギー電子ビームのエネルギー、電荷量のモニターがないため、その発生の保証がなく、高エネルギー電子ビームが発生していたとしても、ガスジェットと薄膜の距離が長いいため、電子ビームが発散し薄膜裏面との間に電場を形成できていなかった。2レーザーパルスの同期精度が不十分であった。

薄膜ターゲットを照射するレーザーパルスのパワー増強、電子ビームの電荷量を常時モニターするためのコイルの設置、ガスジェット・薄膜間の距離を短くする照射配置、複数のフェムト秒プローブレーザーパルスを用いたプラズマ同時観測による2レーザーパルスの同期手法等、装置改造、プラズマならびにビームの診断法の改良を引き続き進めている。現在進めているこれらの取り組みが実現できれば、本研究で提案したレーザー陽子ビーム生成の新手法の原理実証が可能であると考えている。

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3件)

- ① Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shyun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, “X-ray generation via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser-plasma acceleration”, AIP Conference Proceedings, ADVANCED ACCELERATOR CONCEPTS、査読無、Vol. 1507、2012、304-309
DOI: 10.1063/1.4773712
- ② 三浦 永祐、 “レーザー加速電子線を用いた超短パルス X線発生”, レーザー研

究、査読有、40巻、2012、850-857
なし

- ③ Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shyun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray pulse generation via laser Compton scattering using laser-accelerated electron beam", Proceedings of International Conference on High Energy Density Sciences 2012 (HEDS 2012)、査読無、2012、HED-7-3 1-4
なし (CD-ROM)

〔学会発表〕(計6件)

- ① 三浦 永祐、黒田 隆之助、豊川 弘之、 "レーザー加速準単色電子線を用いたレーザーコンプトン散乱X線の特性"、第34回レーザー学会学術講演会、2013年1月28日、姫路商工会議所(兵庫県)
- ② 三浦 永祐、黒田 隆之助、豊川 弘之、 "レーザープラズマ加速準単色電子線を用いたレーザーコンプトン散乱X線発生"、2012年度レーザー励起X線源とその応用研究会 in 宮崎、2012年12月7日、宮崎市民プラザ(宮崎県)
- ③ Eisuke Miura, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray pulse generation via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser acceleration", 54th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, American Physical Society、2012年10月31日、Rhode Island Convention Center (米国ロードアイランド州プロビデンス)
- ④ 三浦 永祐、黒田 隆之助、豊川 弘之、 "レーザー加速準単色電子線によるレーザーコンプトン散乱X線発生"、2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会2012年9月13日、愛媛大学・松山大学(愛媛県)
- ⑤ Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shyun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa, "X-ray generation via laser Compton scattering using quasi-monoenergetic electron beam driven by laser-plasma acceleration", The 2012 Advanced Accelerator Concepts Workshop (AAC2012)、2012年6月12日、The AT&T Executive Education & Conference Center (米国テキサス州オースチン)
- ⑥ Eisuke Miura, Satoshi Ishii, Kenji Tanaka, Shyun Kashiwaya, Ryunosuke Kuroda, and Hiroyuki Toyokawa,

"X-ray pulse generation via laser Compton scattering using laser-accelerated electron beam", International Conference on High Energy Density Sciences2012 (HEDS 2012)、2012年4月27日、パシフィコ横浜(神奈川県)(招待講演)

〔図書〕(計1件)

- ① Eisuke Miura, InTech、"Femtosecond-scale optics", Chapter 2, "Electron Acceleration using an ultrashort ultraintense laser pulse"、2011、pp. 23-52

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) 研究協力者

田中 健治 (TANAKA KENJI)
東京理科大学大学院・理工学研究科電気工学専攻・修士課程大学院生

柏屋 駿 (KASHIWAYA SHYUN)
東京理科大学・理工学部電気工学科・学生