

機関番号：82110

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340107

研究課題名 (和文) シングルショットレーザー航跡場フェムト秒イメージング

研究課題名 (英文) Single shot imaging for laser wakefield dynamics

研究代表者

近藤 公伯 (KONDO KIMINORI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・リーダー

研究者番号：80225614

研究成果の概要 (和文)：相対論的プラズマによる電子並びにイオン加速を効率よく起こすためにシングルショットでそのダイナミクスが観測可能な計測法の検討を進めた。具体的なレーザー電子加速としてはガスジェットガス種を変えることでアルゴンガスによる安定した準単色電子加速が可能であることを示した。またイオン加速においては薄膜を利用して最大 23 MeV のプロトン加速を観測した。

研究成果の概要 (英文)：The development of single shot method for the femto-second plasma dynamics measurement was advanced. In the laser driven electron acceleration, the stable quasi-monoenergetic electron bunch generation with Ar gas jet has been found by changing gas. In laser driven ion acceleration, 23 MeV protons has been detected with a thin foil target.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：超高速光技術、レーザー加速、相対論プラズマ、周波数空間干渉

1. 研究開始当初の背景

高強度光技術の進歩により、瞬間的なピーク強度がペタワット(PW; 10^{15} W)に達する光パルスが実験で利用できるようになった。このようなパルスを集光すれば電子が光電界の振動の1サイクル中に光速に達する、いわゆる相対論的光電磁場を発生することが可能であり、このような強力な光電場を使った荷電粒子の加速研究が精力的に進められている。このようなレーザー駆動の粒子線加速が実用化できれば、従来の加速器に比べ、はるかに小型の荷電粒子加速器が実現できる

可能性があり、例えば最近注目を集めている粒子線がん治療に應用できれば、人にやさしいがん治療を「いつでも、どこでも、だれにでも」提供可能な社会を創出できるので、極めて意義がある。ところでそのようなレーザー駆動加速を実用可能なものにするためには、その高エネルギー化、加速粒子数の増大、そして安定化が重要であり、そのためにはレーザー励起プラズマのダイナミクスを観測し制御することが重要である。研究開始当初においてはこのような背景が存在していた。

2. 研究の目的

以上の研究背景の中、フェムト秒の時間分解能を有し、シングルショットでプラズマ等の屈折率変化を2次元で可視化する計測法を考案したので、これを開発することを目標とした。また、これと並行してレーザー航跡場による電子加速、レーザー駆動イオン加速に関して基礎研究や応用研究を進めることを目標とした。

3. 研究の方法

シングルショットダイナミクス計測に関しては、提案書に示したように2次元の情報を特殊な光ファイバーで1次元に配列し、分光器によるシングルショットデータ取得が可能な状況を検討した。また、独自の発想に基づいたカーレンズモードロックリングチタンサファイアレーザーを開発し、リングキャビティー内での分散変遷の観測だけではなくモードロッカーチタンサファイア内の高速屈折率変化ダイナミクスを観測することで計測法の動作確認に用いることができると考えた。

レーザー航跡場電子加速研究では、現在、研究代表者が所属する日本原子力研究開発機構の比較的小型の **JLITE-X** レーザーによる実験により、使用するガスジェットの種類を変えてデータを取得することで、その電子加速に関するデータ取得を試みた。

また、レーザー駆動イオン加速研究では、研究開始から2年後の秋から、研究代表者は所属する原子力機構が行っていた「光医療産業バレー」拠点創出プロジェクトのプロジェクトリーダーに着任したこともあり、薄膜ターゲットを利用したイオン加速研究を行った。この現象では、薄膜における2次元的な反射形状や吸収形状の変化を伴って高速イオンの発生が行われることもあり、当該計測法が開発されたときの観測対象となりうる。

4. 研究成果

シングルショットダイナミクス計測に関しては、2次元の情報を特殊な光ファイバーで1次元に配列し、分光器によるシングルショットデータ取得が可能な状況を検討し、実際にそのようなファイバー束を試作した。この結果2次元的なイメージを1次元の情報に配列することに成功し、広帯域チャープパルスを用いることで予定した計測が実施できる状況に近づくことができた。計測が行えるようになるためには得られたスペクトル列から時間情報を逆算し、2次元情報に再配列してフェムト秒動画を再構成するソフトウェアの開発が必要であるが、現在はチャープパルスプローブで得られたスペクトルから屈折率、吸収率時間変化を求めるためのソフトウェア開発の途中である。試験的に作った

時間的な屈折率変化をスペクトル空間で表現して、それを逆算する段階まで到達することができた。これができれば後は1次元的に得られた時間情報を2次元的に再配列するソフトウェアを開発すれば目標の計測法が試験できるようになる、

次に、このような計測法を試験するときのための観測対象として、独自の発想に基づいたカーレンズモードロックリングチタンサファイアレーザーを開発した。リングキャビティー内での分散変遷において、リングキャビティー内に設けた2つのチタンサファイア結晶でビーム集光点を作っており、片方は励起用グリーンビームによる励起が行われており、もう片方は励起はなされずにキャビティー内で発振するビームが集光されるように設定した。うまくキャビティーを調整し、励起ビームがある側では利得が得られ、他方では超短パルスになって光カー効果によるダイナミックな屈折率変化が発生することを想定した。実際にリングモードロックレーザーを発振させることに成功し、カーレンズモードロックに成功した。また、チャープミラーでの多重反射を利用し、キャビティー内での分散変化させてモードロック発振を実現し、漏れ光のパルス圧縮に必要な分散量の評価を通じて、励起ビームが内側のチタンサファイアにおいて最もパルス幅が短くなり、さらにチタンサファイア内集光点で自己位相変調による分散の発生が評価できた。このような屈折率のダイナミックな2次元的な変化はフェムト秒の時間スケールであるので、当該計測法の計測対象として興味深いと言える。

レーザー航跡場電子加速研究では、ピーク出力 10TW 級の **JLITE-X** レーザーを用いて実験を行った。使用するガスジェットの種類を変え、さらにそれぞれのガス種においてガスジェット背圧の制御によりガス密度を制御し、それによる電子密度の最適化を通じて準単色電子線加速を行った。特に **He** における加速電子の安定度に比べ、**Ar** における加速電子のポインティングや発生エネルギーの安定度が極めて高いことが分かり、比較的容易なレーザー加速安定化として重要な知見を得ることができた。なお **Ar** では 10MeV 程度の準単色電子線が安定して得られる。

レーザー駆動イオン加速研究では、研究代表者が平成 20 年度 4 月から所属することになった(独)日本原子力研究開発機構で進められてきた薄膜ターゲットを利用したイオン加速研究を行った。以前に得られた実験結果より薄膜による加速イオンはプロトンであり、プロトンエネルギーの向上にはターゲット照射強度を高くすることが重要であることが分かっていた。このことを受けて、使用するペタワット級レーザー装置 **J-KAREN** の

性能をより効率よく利用できるように、レーザー装置からターゲットチャンバー、そしてターゲットそのものへの結合効率を上げるための工事を行った。この結果、オンターゲットエネルギーは以前の2 Jから4倍の8 Jまで引き上げることができた。また、集光性能を高めるために、利用していたミラーのサイズと表面精度を大幅に改善し、少なくとも一つの集光スポットを得ることができるようになった。この結果、オンターゲットの照射強度を以前の 5×10^{19} W/cm²から 4×10^{20} W/cm²に引き上げることに成功した。これにより観測されたプロトンの最大エネルギーが以前の7 MeVから23 MeVへ向上した。さらにプラズマミラーを導入したサブミクロン厚さの薄膜照射実験により、コニカルテーパー構造のターゲットホルダーをサポートとしてレーザー照射を行うことで7 MeVの準単色プロトンの広がり角がわずかに16 mradで発生することを見出した。ここで得られた知見は、将来的にレーザー駆動のイオン加速器で広がり角やエネルギースペクトルを制御する上で重要な知見であると考えられる。

以上、こうして得られた研究結果は、提案する計測法の開発を進める上で極めて重要な情報を提供することができたと考えられる。

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17件)

- ① 「プラズマの空間的周期構造の生成とレーザー光制御への応用」、近藤公伯、児玉了祐、プラズマ・核融合学会誌、84、199-203 (2008).
- ② “Fast Heating of Cylindrically Imploded Plasmas by Petawatt Laser Light”, H. Nakamura 他 8 名中 4 番目, Phys. Rev. Lett., 100, 165001 (2008).
- ③ “Absolute calibration of imaging plate for GeV electrons”, N. Nakanii 他 13 名中 2 番目, Rev. Sci. Instrum. 79, 066102 (2008).
- ④ “Split-aperture laser pulse compressor design tolerant to alignment and line-density difference”, M. C. Rushford 他 8 名中 5 番目, Opt. Lett. 33, 1902-1904 (2008).
- ⑤ “Spectrum modulation of relativistic electrons by laser wakefield”, N. Nakanii 他 19 名中 2 番目, Appl. Phys. Lett. 93, 081501 (2008).
- ⑥ 「スペクトル干渉法によるフェムト秒生成プラズマの計測」、近藤公伯、光学、37、648-650 (2008)
- ⑦ “Superthermal and efficient-heating modes in the interaction of a cone target with ultraintense laser light”, H. Nakamura 他 11 名中 7 番目, Phys. Rev. Lett. 102 045009 (2009).
- ⑧ “Plasma physics and laser development for the Fast-Ignition Realization Experiment (FIREX) Project”, H. Azechi 他 37 名中 12 番目, Nucl. Fusion 49, 104024 (2009).
- ⑨ “Generation of stable and low-divergence 10-MeV quasimonoeenergetic electron bunch using argon gas jet”, M. Mori 他 13 名中 2 番目, Phys. Rev. STAB 12, 082801 (2009).
- ⑩ “Autoinjection of electrons into a wake field using a capillary with attached cone”, Y. Mori 他 17 名中 3 番目, Phys. Plasmas 16, 123103 (2009).
- ⑪ “Simulation of Laser-Accelerated Proton Focusing and Diagnostics with a Permanent Magnet Quadrupole Triplet”, H. Sakaki 他 9 名中 7 番目, Plasma and Fusion Research: Rapid Comm. 5, 009 (2010).
- ⑫ “Measurement and simulated transport of 1.9 MeV laser-accelerated proton bunches through an integrated test beam line at 1 Hz”, M. Nishiuchi 他 31 名中 23 番目. Shirai, Phys. Rev. STAB 13 071304 (2010).
- ⑬ “Correlation between laser accelerated MeV proton and electron beams using simple fluid model for target normal sheath acceleration”, M. Tambo 他 12 名中 4 番目, Phys. Plasmas 17 073110 (2010).
- ⑭ “High temporal and spatial quality petawatt-class Ti:sapphire chirped-pulse amplification laser system”, H. Kiriya 他 19 名中 14 番目, Opt. Lett. 35 1497 (2010).
- ⑮ “Measurement of relative biological effectiveness of protons in human cancer cells using a laser-driven quasimonoeenergetic proton beamline”, A. Yogo 他 18 名中 19 番目, Appl. Phys. Lett. 98 053701 (2011).
- ⑯ “Model experiment of cosmic ray acceleration due to an incoherent wakefield induced by an intense laser pulse”, Y. Kuramitsu 他 19 名中 3 番目, Phys. Plasmas 18 010701 (2011).
- ⑰ “Experimental evidence of nonthermal acceleration of relativistic electrons by

an intense laser pulse”, Y. Kuramitsu
他 20 名中 3 番目, Phys. Rev. E83 026401
(2011).

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① K. Kondo, “Ultrafast high field science”,
3rd Asian Summer School on
Laser-Plasma Acceleration and
Radiation, Jul. 21-25, 2008, APRI GIST
Gwanju, Korea
- ② K. Kondo, “Ultrafast Plasma Photonics
— measurement and control of laser
wakefield —”, International
Conference on Plasma Physics 2008,
Sep. 8 – 12, 2008, Fukuoka, Japan
- ③ K. Kondo 他 8 名, “Stable 10 MeV class
quasi-mono energetic electron bunch
generation by laser wakefield and
self-channeling”, International
Conference on Ultrahigh Intensity
Lasers 2008, Oct. 27-31, 2008, Tongli,
China
- ④ 近藤公伯、小菅淳、杉山僚、”チャープパ
ルス増幅動作を伴うカーレンズモードロ
ックリングキャビティ”、応用物理学会
秋、平成 21 年 9 月 10 日富山大学
- ⑤ 近藤公伯、”高強度レーザー技術の現状と
展望”、日本物理学会 春、平成 22 年 3
月 23 日、岡山大学
- ⑥ K. Kondo, “High power laser science at
JAEA”, JSPS Asian CORE Workshop
on Next Generation Ultra-Short Pulse
Lasers for High Field Ultrafast Science,
Mar. 3, 2011, RIKEN Wako, Japan

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称：チャープパルス増幅を利用した光発振
器内での強光電磁場発生器
発明者：近藤公伯、杉山僚
権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機
構
種類：特許
番号：特願 2009-006125
出願年月日：平成 21 年 1 月 14 日
国内外の別：国内

名称：チャープパルス増幅を利用した光発振
器内での強光電磁場発生器
発明者：近藤公伯、神門正城、杉山僚
権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機
構
種類：国内優先権出願

番号：特願 2009-142687
出願年月日：平成 21 年 6 月 15 日
国内外の別：国内優先権出願

○取得状況 (計 1 件)

名称：Wide-band ultrashort-pulse optical
oscillator utilizing chirped pulse
amplification
発明者：Kiminori Kondo and Takashige
Omatsu
権利者：Osaka University
種類：US patent
番号：PCT JP2007/060634
取得年月日：2011 年 2 月 2 日
国内外の別：国外 (米国)

〔その他〕

ホームページ等

<http://wwwaprc.kansai.jaea.go.jp/aprc/beam-ldpb.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 公伯 (KONDO KIMINORI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量
子ビーム応用研究部門・リーダー

研究者番号：80225614

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし