

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24684044

研究課題名(和文) レーザー生成超強磁場を用いた高エネルギー量子ビーム制御と実験室X線天文学

研究課題名(英文) Control of energetic quantum beams and laboratory astrophysics by using laser-produced strong magnetic field

研究代表者

藤岡 慎介 (Fujioka, Shinsuke)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センタ・教授

研究者番号：40372635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,500,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーを物質に集光照射すると、エネルギー密度の高いプラズマが生成される。この高エネルギー密度プラズマは、エネルギー変換の機能を有しており、プラズマの形状をコイル型にすることで、レーザーのエネルギーを磁場のエネルギーに変換することが出来る。本研究では、キロ・ジュール級の高出力レーザーを用いてキロ・テスラ級の強い磁場を生成出来ることを実証した。レーザー加速電子ビームの発散を、レーザー生成のキロ・テスラ級の磁場を用いて低減出来ることも実証出来た。強磁場と高エネルギー密度を組み合わせた新しいプラズマ科学の発展に向け、国際研究協力体制を構築し、課題終了後も更なる発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：A high energy density plasma is generated from a matter irradiated by a high intensity laser pulse. Energy conversion is occurred in this high energy density plasma. For example, a part of laser energy can be converted into magnetic field energy by using a coil-shaped plasma. In this research, we have demonstrated generation of kilo-tesla-level magnetic field by using kilo-joule class high power laser and a capacitor-coil target. We have reduced divergence of relativistic electron beams accelerated by high-intensity laser-plasma interactions by using laser-produced kilo-tesla magnetic field. We have developed an international research team to open a new frontier of plasma physics by combining strong magnetic field and high energy density plasma. Further progress in this new plasma physics can be expected even after the end of this project.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高エネルギー密度科学 高強度レーザー 強磁場 レーザー核融合 レーザー生成プラズマ 高速点火

### 1. 研究開始当初の背景

高速点火レーザー核融合プラズマの研究では、レーザー加速電子の発散角が大きく、その電子ビームの指方性の改善が強く求められていた。その方法の一つとして、キロテスラ級の外部磁場をプラズマに印可する方法が提案されていたが、キロテスラ級の磁場を発生する具体的な方法が当時は無かった。研究代表者は、高強度レーザーでキロテスラ級の磁場を生成し、その磁場でレーザー加速電子ビームの伝播を制御することを提案した。また、このキロテスラ級磁場は、実験室天文学の発展にも寄与することにも着目した。

### 2. 研究の目的

高強度レーザーで生成される高エネルギー密度プラズマは、エネルギー変換の機能を有している。高出力レーザーのエネルギーを、高エネルギー密度プラズマを介して、磁場のエネルギーに変換することが出来れば、本研究で求められるキロ・テスラに相当することに着目した。高エネルギー密度プラズマの形状を「コイル型」にすることで、コイル付近に強い磁場を発生出来る可能性がある。

高エネルギー密度プラズマを利用して生成した磁場を、レーザー加速電子ビームの伝播制御に利用することを目指した。レーザー加速電子ビームは、ワイベル不安定性などのビーム不安定性によって、電子ビームが散乱され、その発散角が大きく広がることが知られている。電子ビームが物質やプラズマ中を伝播するに従って、ビーム径が広がっていき、エネルギーフラックスが急激に低下する。

この困難を解決する手法として、外部磁場による電子ビームのガイディングが提案されている。

### 3. 研究の方法

レーザー駆動キャパシター・コイル・ターゲットを用いてキロ・テスラの磁場の発生に成功した。キャパシター・コイル・ターゲットとは、平行に並べた二枚の金属板を一本のコイル型ワイヤーで繋いだターゲットである。一方の金属板に高強度レーザー照射しプラズマを生成する。プラズマからは電子が放出され、もう一方の金属板に電子が捕獲されることで、金属板間に電位差が生じる。この電位差によってワイヤー中に電流が駆動され、電流によって磁場が形成される。

磁場の測定方法として、ファラデー回転法、磁気プローブ、プロトン・ラジオグラフィ法を用いた。ファラデー回転は、磁場中に置かれた光学材料中で偏光が回転する現象であり、偏光の回転角度から磁場強度を求めることが出来る。磁気プローブはループ型のワイヤを用いたセンサーであり、ループを貫く磁束密度の時間変化に応じて、ループ中に電流が誘導され、誘導電流の時間変化を積分することで磁場強度を求める方法である。プロ

トンラジオグラフィは、磁場中に荷電粒子であるプロトンを入射し、プロトンがローレンツ力を受けて曲がった軌跡から磁場強度を求める方法である。

### 4. 研究成果

レーザー駆動キャパシター・コイル・ターゲットで発生した磁場を、それぞれ全く原理の異なる独立した手法で測定し、それぞれが矛盾の無い磁場強度を示していることが確認され、レーザー条件によるが 600 - 1500 テスラの磁場を、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の激光 XII 号レーザー装置で発生出来ることが明らかになった。この成果は、我々の分野で大変注目されており、フランス、中国、米国等で追試や、磁場を用いた応用研究が国際共同研究で展開されている。

レーザー駆動のキロテスラ磁場による高速電子ビームのガイディングについて実験を行った。レーザー生成強磁場中に置いた、平板のターゲットに短パルス高強度レーザーを照射し、高速電子ビームを発生させ、電子ビームの空間広がりを平板ターゲットの裏面から観測した。ターゲットの位置や、磁場発生から高強度レーザーを照射する時間差を変化させ、最適な条件を見つけだした。結果として、外部磁場を印可しない場合、電子ビームがワイベル不安定性によって、フィラメント状に割れているのに対して、外部磁場を印可することで、電子ビームの広がりが抑制され、ターゲット裏面も加熱されていることが確認された。この成果は、高強度レーザーによる物質加熱、固体密度の高エネルギー密度プラズマの生成の研究に資するものである。

天文学に関連する研究として、強磁場下における高エネルギー密度プラズマの流体運動に関する研究を行った。強磁場下でのプラズマ流体の振る舞いを決定する二つの物理量が存在する。一つはベータ値であり、もう一つはホール係数である。ベータ値は、プラズマの圧力と磁気圧の和であり、ホール係数は、サイクロトロン周波数と電子-電子衝突時間である。ベータ値が小さいほど、プラズマの流体運動は磁気圧によって支配されることになり、ホール係数が大きいほど、プラズマ中での熱伝導が磁場の影響を強く受ける。高エネルギー密度プラズマ中では、キロテスラ級の磁場であっても、プラズマ圧の方が大きく、ベータ値は大きい。一方、ホール係数は 1 を越えることもあり、外部磁場が熱伝導に与える影響は無視出来ない。

本研究では、二つのキャパシター・コイル・ターゲットをヘルムホルツ型に並べたターゲットを用い、空間的に均一な磁場を生成した。その磁場中にプラスチックターゲットを置き、プラスチックプラズマの加速軌跡を X 線バックライト法を用いて観測した。

外部磁場を加えることでプラズマの加速

速度が約 50%上昇することが確認された。この観測結果を理解するために、2次元の流体シミュレーションコードを開発し、実験結果と比較した。磁力線を跨ぐ方向への熱伝導が抑制されることで、プラズマの表面方向に沿った熱伝導が抑制され、その結果として流体速度が上昇することが解明された。

更に、流体不安定性の成長についても実験を行い、プラズマの流体不安定性の成長によって、磁力線密度の空間的な粗密が形成され、結果として熱伝導が空間的に非一様になり、不安定性の成長が加速されることも明らかになった。

これらの成果は、磁場と高エネルギー密度プラズマを繋ぐ、新しいプラズマ科学研究の発展に資するものであり、多数の招待講演、学会発表を通じて成果を世界に発信した。またそれにより国際共同研究ネットワークを構築することが出来た。

#### 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 77 件)

以下主要な成果のみ。

- S. Fujioka, Y. Arikawa, S. Kojima, T. Johzaki, H. Nagatomo, H. Sawada, S. H. Lee, T. Shioto, N. Ohnishi, A. Morace, X. Vaisseau, S. Sakata, Y. Abe, K. Matsuo, K. F. Farley Law, S. Tosaki, A. Yogo, K. Shigemori, Y. Hironaka, Z. Zhang, A. Sunahara, T. Ozaki, H. Sakagami, K. Mima, Y. Fujimoto, K. Yamanoi, T. Norimatsu, S. Tokita, Y. Nakata, J. Kawanaka, T. Jitsuno, N. Miyanaga, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, K. Kondo, M. Bailly-Grandvaux, C. Bellei, J. J. Santos, and H. Azechi, *Phys. Plasmas* **23**, 056308 (2016).
- S. Kojima, T. Ikenouchi, Y. Arikawa, S. Sakata, Z. Zhang, Y. Abe, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, T. Ozaki, S. Miyamoto, M. Yamaguchi, A. Takemoto, S. Fujioka, and H. Azechi, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 043502 (2016).
- K. F. F. Law, M. Bailly-Grandvaux, A. Morace, S. Sakata, K. Matsuo, S. Kojima, S. Lee, X. Vaisseau, Y. Arikawa, A. Yogo, K. Kondo, Z. Zhang, C. Bellei, J. J. Santos, S. Fujioka, and H. Azechi, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 091104 (2016).
- S. Fujioka, T. Johzaki, Y. Arikawa, Z. Zhang, A. Morace, T. Ikenouchi, T. Ozaki, T. Nagai, Y. Abe, S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, M. Utsugi, S. Hattori, T. Hosoda, S. H. Lee, K. Shigemori, Y. Hironaka, A. Sunahara, H. Sakagami, K. Mima, Y. Fujimoto, K. Yamanoi, T. Norimatsu, S. Tokita, Y. Nakata, J. Kawanaka, T. Jitsuno, N. Miyanaga, M. Nakai, H. Nishimura, and H. Shiraga, *Phys. Rev. E* **91**, 063102

(2015).

- J. J. Santos, M. Bailly-Grandvaux, L. Giuffrida, P. Forestier-Colleoni, S. Fujioka, Z. Zhang, P. Korneev, R. Bouillaud, S. Dorard, D. Batani, M. Chevrot, J. E. Cross, R. Crowston, J.-L. Dubois, J. Gazave, G. Gregori, E. d'Humières, S. Hulin, K. Ishihara, S. Kojima, E. Loyez, J.-R. Marquès, A. Morace, P. Nicolaï, O. Peyrusse, A. Poyé, D. Raffestin, J. Ribolzi, M. Roth, G. Schaumann, F. Serres, V. T. Tikhonchuk, P. Vacar, and N. Woolsey, *New J. Phys.* **17**, 083051 (2015).
- S. Fujioka, Z. Zhang, K. Ishihara, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Johzaki, A. Sunahara, N. Yamamoto, H. Nakashima, T. Watanabe, H. Shiraga, H. Nishimura, and H. Azechi, *Sci. Rep.* **3**, 1170 (2013).

[学会発表](計 43 件)

以下、プレナリー及び招待講演のみ

- S. Fujioka et al., Fast Ignition Realization Experiment with High-Contrast Kilo-Joule Peta-Watt Laser "LFEX" and Strong External Magnetic Field, 57th Annual Meeting of APS Division of Plasma Physics, 57APS-DPP, Savannah, USA, 2015/11/16 - 2015/11/20 (招待講演)
- S. Fujioka et al., Toward Efficient Heating in the Fast Ignition Scheme with Stable Compression, Plasma Mirror and External B-Field", The 9th Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2015/9/20 - 2015/9/25 (プレナリー講演)
- 藤岡慎介 他, 高出力レーザーを用いたキロテスラ級磁場の発生とプラズマ科学への応用, PLASMA2014, 2014/11/18 - 2014/11/21 (招待講演)
- S. Fujioka et al., Strong Magnetic Field Generation for Inertial Confinement Fusion and High Energy Density Physics, 33<sup>rd</sup> European Conference on Laser Interaction with Matter, 2014/8/31 - 2014/9/5 (招待講演)
- S. Fujioka et al., Efficient Generation and Collimation of Relativistic Electron Beams for Fast-Ignition Laser Fusion, The Eighth Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2013/9/8 - 2013/9/13 (招待講演)
- 藤岡慎介 他, 高出力大エネルギーレーザーを用いたキロテスラ級磁場の発生とその応用, レーザー学会年次大会, 2014/1/20 - 2014/1/24 (招待講演)
- S. Fujioka et al., Application of Kilotesla Magnetic Field Generated by High Power Laser to Laboratory Astrophysics, The 5<sup>th</sup> International Workshop on Laboratory Astrophysics, 2013/8/5 - 2013/8/8 (招待講演)

- S. Fujioka et al., “Fast-ignition laser inertial fusion research on GEKKO-LFEX laser facility”, 4<sup>th</sup> International Conference on High Energy Density Physics, 2013/6/25 – 2013/6/28
- S. Fujioka et al., “The physics of high energy density plasmas generated with intense lasers for energy and fundamental processes”, 39<sup>th</sup> European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2012/7/2 – 2012/7/6 ( プレナリー講演 )

〔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://lf-lab.net>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤岡慎介 (FUJIOKA Shinsuke)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号：4 0 3 7 2 6 3 5

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし