

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 8 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13918

研究課題名(和文) エスカルゴターゲットと高強度レーザーを利用した地上最強磁場の生成

研究課題名(英文) Generation of strongest magnetic field on the earth by using high-intensity laser and snail target

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：40372635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー技術の急速な進展により、レーザー光の高強度化が進んでいる。超高強度レーザーを物体に照射することで、様々な地上最強・史上最強を生み出せる可能性がある。我々は、大阪大学レーザー科学研究所にある世界最大級の高強度レーザーLFEXレーザーを、円筒形状のターゲットの内面に照射し、円筒内面に大電流を誘起し、地上最強の磁場を発生させることに挑戦した。LFEXレーザーの1ビームを磁場発生、もう1ビームをプローブ用のプロトン発生に用い、磁場の強度をプロトンラジオグラフィ法を用いて生成した。直径300ミクロンの円筒形状ターゲットで、地上最大級の2.3 kTの磁場を発生させることに実験的に成功した。

研究成果の概要(英文)：Laser intensity is continuously rising up because of the rapid progress of laser technologies. Various new world records can be realized by irradiating high-intensity laser pulse on a matter. We have challenged to generate strongest magnetic field on the earth with one of the world largest high-intensity laser facility called as LFEX at Institute of Laser Engineering in Osaka University. The high-intensity laser was irradiated on the inner surface of a tiny metal cylinder to drive a circular electric current along the surface of the cylinder, and the current generates a pulsed magnetic field in the cylinder. One of the LFEX laser beams was focused on a 300 micron-diameter cylinder to produce a magnetic field, and the other was focused on a planar foil to accelerate a proton beam to probe the magnetic field structure with the proton radiography scheme. We have achieved 2.3 kT of magnetic field strength, this is close to the largest magnetic field that was achieved on the earth.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：強磁場 高強度レーザー プラズマ スネールターゲット 高エネルギー密度科学

1. 研究開始当初の背景

高出力高強度レーザーを物体に照射することで、高エネルギー密度プラズマを生成することが可能である。高エネルギー密度プラズマは、エネルギー変換媒体としての機能を有しており、X線や電子、イオン等の量子ビームの発生や、高圧力・高速流体の生成などに利用されている。

我々の研究成果では、キャパシター・コイル・ターゲットと呼ぶ特殊形状のターゲットにナノ秒レーザーを照射することにより、高出力高強度レーザーのエネルギーを効率的に磁場のエネルギーに変換できることが明らかにしている。磁場の強度は1キロテスラに迫り、この磁場を活用することで、実験室宇宙物理学及び核融合エネルギー科学の新しい展開を図れることに注目している。

レーザー技術の急速な進展により、レーザーの高強度化が行われている。大阪大学レーザー科学研究所には世界最大の高強度レーザーLFEXがあり、LFEXを活用することで、様々な世界記録を達成出来ると期待できる。本研究では、LFEXレーザーを用いて磁場強度の世界記録の達成を目指した。

2. 研究の目的

レーザー駆動方式の強磁場生成の実現により、強磁場と高エネルギー密度プラズマの組み合わせによる新しいプラズマ科学研究の展開が期待される。磁場の強度を上昇されることで、研究の幅を大きく広げることが可能である。

強磁場中ではゼーマン分離のように、原子中の電子のエネルギー準位が変化する。弱い磁場に対しては、エネルギー準位の変化量は磁場の強度に比例するが、磁場強度が強くと、その関係は非線形になる。非線形ゼーマン効果は、天体観測で見つかっており、観測結果から磁場強度を推定するものさしの役割を果たしているが、実験的な検証は行われていない。

またプラズマ中に存在する磁場は、形状の

変化を起こすことが知られている。これは磁気リコネクションと呼ばれ、天体における粒子加速機構の一つである。磁場の強度が強くと、加速される粒子のエネルギーは光速に近づき、相対論的磁気リコネクションと呼ばれる。

本研究では、上記の例のような、強磁場とプラズマの組み合わせによる新しいプラズマ科学研究への発展を支えるベースとなる、強磁場発生技術の開発を行った。

3. 研究の方法

共同研究者である Philippe Korneev 准教授が発案したスネール・ターゲットを用いて強磁場を発生させた。図1はスネール・ターゲットの模式図と写真である。直径は300 $\mu\text{m}$ である。図1は磁場発生メカニズムを模式的に示している。高強度レーザーの振動電場によって電子が高エネルギーにまで加速され、ターゲットの外部に放出される。局所的に電子が欠乏すると、電荷中性を保つために、周囲からレーザー照射点に向けて電子が流れる。この電流が磁場を形成する。レーザー照射面の法線方向にも電子が加速される。この電流も磁場を形成する。結果として、図1(c)の2次元シミュレーション結果に示すように、スネール・ターゲットの内部には、反平行の10kT級の磁場が形成される。

4. 研究成果

図2(a)に示すように、スネール・ターゲットを取り囲むように、プロトン感受フィルム(Radiochromic film)を設置した。スネール・ターゲットに超高強度レーザーを照射すると同時に、3mm離れた位置に置いたアルミニウム平板にも超高強度レーザーを照射した。アルミニウム平板の裏面からは、プロトンが加速され、このプロトンがスネール・ターゲットの内部及び周囲に形成された磁場のローレンツ力で偏向する。

図2(b)が実験結果である。レーザーショットする前のプロトンビームパターンには、スネ

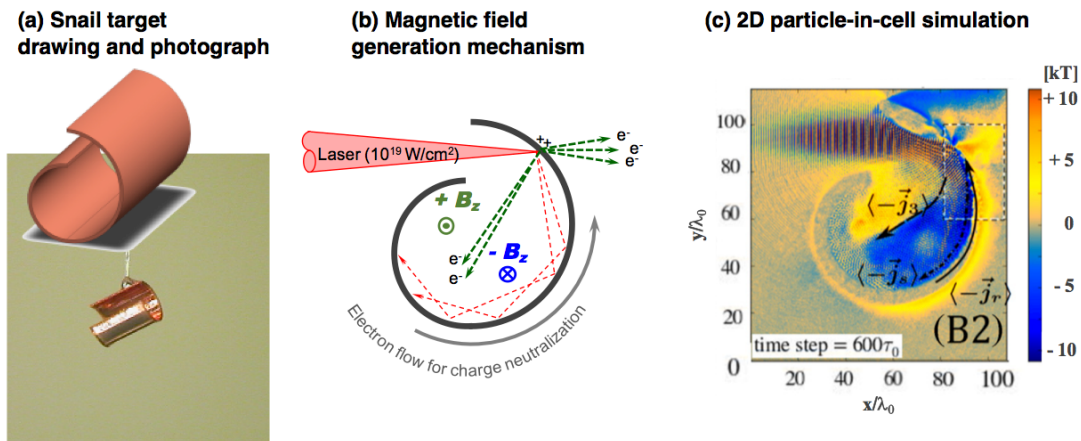


図1 (a)スネールターゲットの模式図と先行実験で用いたターゲット写真。(b)スネールターゲット中での磁場形成の模式図。(c)スネールターゲット中での磁場形成に関する2次元粒子シミュレーション結果

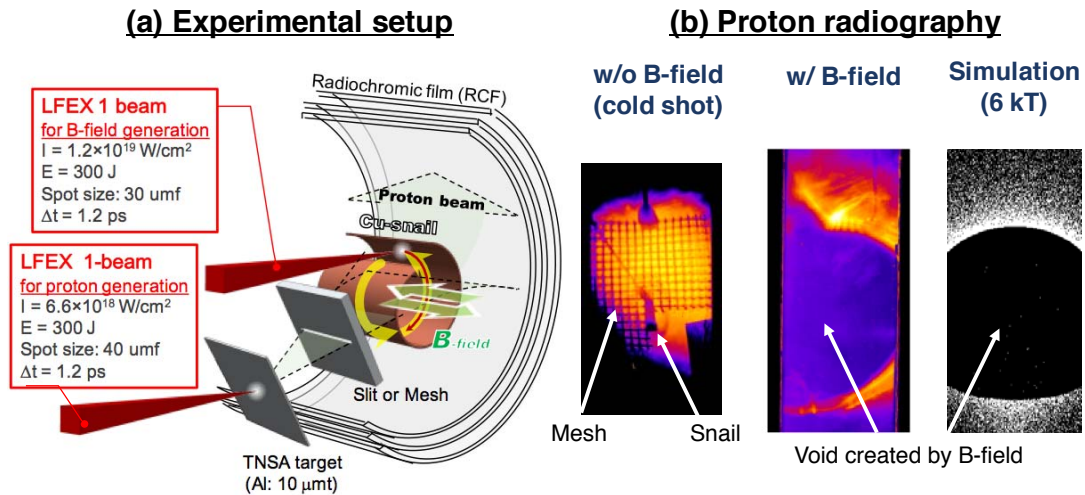


図 2 プロトン・ラジオグラフィー法を用いた磁場強度計測法の模式図. (b)プロトン・ラジオグラフィーのパターン. 2.3 kT の磁場強度に対応している.

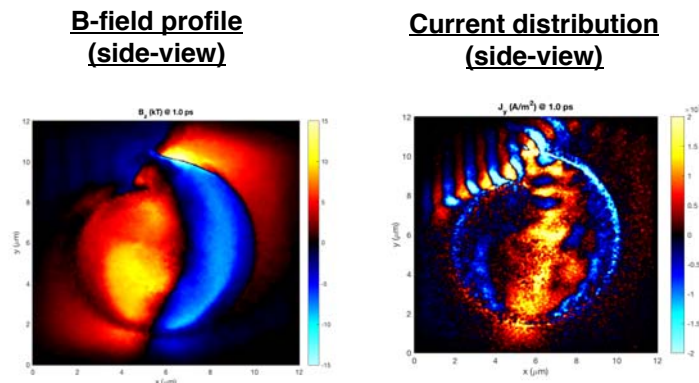


図 3 3次元 Particle-in-cell シミュレーションによるスネールターゲット中の電子運動の解析結果. 磁場の境界にそって, 大電流が流れている.

ール・ターゲットと空間基準であるメッシュの影が見える. レーザーを照射すると, このパターンが大きく歪み, 巨大な「ボイド」が観測された. このボイドのサイズが磁場強度と対応しており, 2.3 kT の磁場を想定した計算で得られたボイドのサイズ及び形状が一致した.

図 3 に示したように, 実験結果を解析するために, 3次元の Particle-in-Cell シミュレーションを行った. スネールターゲット中には, 互いに磁力線の向きが異なる反平行の磁場が生成され, その境界に大電流が流れていることが明らかになった. 磁気リコネクションに伴う誘導電流である可能性があり, 引き続き解析を進めて行く.

## 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)

- 藤岡慎介, パワーレーザーによるキロ・

テスラ級磁場生成とその応用, プラズマ核融合学会誌, Vol. 92, p. 514 - 522 (2016).

- Abe Y., Law K. F. F., Korneev Ph., Fujioka S., Kojima S., Lee S.-H., Sakata S., Matsuo K., Oshima A., Morace A., Arikawa Y., Yogo A., Nakai M., Norimatsu T., d'Humi?res E., Santos J. J., Kondo K., Sunahara A., Gus'kov S., Tikhonchuk V. "Whispering gallery effect in relativistic optics", JETP Letters, p. 1 - 5 (2018).
- JJ Santos, M Bailly-Grandvaux, M Ehret, AV Arefiev, D Batani, FN Beg, A Calisti, S Ferri, R Florido, P Forestier-Colleoni, S Fujioka, et al., "Laser-driven strong magnetic fields with application to charged beam transport and magnetized high energy-density physics", Physics of Plasmas, (2018).

[学会発表] (計 7 件)

- Y. Abe, K.-F. Law A. Morace, S. Fujioka et al., "Kilo-Tesla Magnetic Field Generated

with a Snail Target and LFEX Laser”,  
OPIC2016.

- Y. Abe, S. Fujioka, et al., Super-intense quasi-static magnetic field generation experiment with a snail- shaped target and high power lasers, ELCLIM2016
- 藤岡慎介, レーザー核融合と高エネルギー密度科学の進展と将来展望, 第11回核融合エネルギー連合講演会(招待講演)
- 藤岡慎介, 大エネルギーレーザーで創る多様で魅力的な極限実験室, 光・量子ビーム合同シンポジウム 2016(招待講演)
- K. F. F. Law, S. Fujioka et al., Optimization of spatial uniformity of laser accelerated proton beam for application on electromagnetic field diagnosis, Plasma Conference 2018
- J. J. Santos, S. Fujioka et al., Laser-driven strong magnetostatic fields with applications to charged beam transport and magnetized high energy-density physics, 59th Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics(招待講演)
- K. F. F. Law, S. Fujioka et al., スネールターゲットの内面照射による陽子加速, 日本物理学会 第73回年次大会

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

超強強度場科学グループ ホームページ

<http://lf-lab.net>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤岡慎介 (Shinsuke Fujioka)

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：40372635

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 研究協力者

( )