

科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 30 年 8 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0163

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Control of energetic charged particle beam and laboratory astrophysics by using laser-produced magnetic field(Fostering Joint International Research)

研究代表者

藤岡 慎介 (Fujioka, Shinsuke)

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：40372635

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：米国ローレンスリバモア国立研究所のJohn Moody博士のグループに所属し、レーザー駆動方式による強磁場の発生に関する実験的研究を行った。研究所内のJupiter Laser Facilityにて、レーザー加速プロトンビームの伝播を制御する実験を行った。ロチェスター大学のOMEGA-EPレーザー装置を用いて、レーザー駆動方式によって生成される磁場強度及び時間履歴の、レーザーのパルス幅及び強度依存性を計測し、長パルスレーザーを用いて、長パルス磁場を発生可能であることを明らかにした。また、世界最大のNIFレーザーを用いた磁場発生実験も行い、将来の実験に向けた貴重なデータを得ることが出来た。

研究成果の概要（英文）：I was a visiting scientist in the research group led by Dr. John Moody at Lawrence Livermore National Laboratory. I performed experimental studies on generation of strong magnetic field driven by high-intensity laser for control of energetic charged particle beam and laboratory astrophysics. We investigated control of laser-driven proton beam by using Jupiter Laser Facility at LLNL. On the OMEGA-EP laser facility, we have investigate dependence of magnetic field strength and pulse duration on laser intensity and pulse duration. We have clarified long magnetic field pulse can be produced by using longer laser pulses up to 10 ns. We have performed an experiment on the National Ignition Facility and obtained several experimental results that is useful for the future experiments.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：強磁場 プラズマ 高強度レーザー 実験室天文学 レーザー加速 レーザープラズマ

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高強度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、地上最大強度級の磁場である。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た。

国際共同研究加速基金のベース課題である、若手研究(A)「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」で開発した、キャパシター・コイル法は、世界中の大型レーザーで使われるようになり、米国のOMEGAレーザー、中国の神光II号レーザー、仏国のLULIレーザー等で成果が出始めていた。我々は、レーザー駆動強磁場を用いたプラズマ科学研究でのイニシアティブを維持するために、米国ローレンスリバモア国立研究所のJohn Moody博士のグループに参加することを提案し、採択された。

2. 研究の目的

米国ローレンス・リバモア国立研究所では、世界最大レーザー装置であるNational Ignition Facilityが完成し、人類初の核融合点火実証を目指した研究が行われていた。しかしながら、予め計画された期限内に核融合点火を達成することは出来なかった。点火達成に至らない最大の障害は、流体不安定性による高温低密度の点火部と低温高密度の燃料部間の流体混合による冷却によって、点火部の温度が急激に低下することである。

乱流混合に伴う点火部の冷却を避ける方法として複数の提案が出されているが、我々が注目したのは、外部磁場印加による熱電子の閉じ込めと、磁気圧を用いた流体混合の抑制である。

電子は磁力線にまとわりつく特性を有する。点火部に磁場を印加することで、熱伝導を担う電子を磁力線で点火部に閉じ込められると期待される。

同時に、核融合燃料の圧縮に伴い、燃料に印加した磁場も圧縮され、圧縮された磁場が持つ圧力は、流体混合を妨げる抗力として働く。特に流体混合によって燃料部が深く点火部に入る場合、圧縮された磁場の強度が更に大きくなり、その結果、深く入り込んだ燃料部を押し戻すことになる。

これらの予測が正しいことは、2次元の磁

気流体シミュレーションコードで確認され、その実験への適用が望まれていた。図1は、2次元流体シミュレーションの結果である。

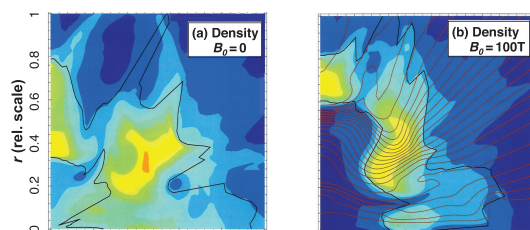


図1 L. J. Perkins *et al.*, *Physics of Plasma*, 20, 072708 (2013)より。2次元MHDシミュレーションによる点火部と燃料部の密度分布。外部磁場を印加しない場合、点火部と燃料部が混合し、点火には至らない。一方(b)のように100 Tの種磁場を印加した場合は、点火部で圧縮された磁場の圧力によって、燃料部が入ってくるのを押し戻すため、低密度の点火部と高密度の燃料部が明確に分離され形成されている。

3. 研究の方法

我々が開発したレーザー駆動磁場を、米国の国家プロジェクトであるNational Ignition Facilityの点火実験に導入することは容易ではない。レーザー駆動磁場の発生過程の理解、発生した磁場の特性及びその制御性を明らかにする必要がある。John Moody氏らのグループらと協力し、米国内で二番目、世界でも三番目のエネルギーを誇るロチェスター大学のOMEGAレーザーにおいて実験を行った。

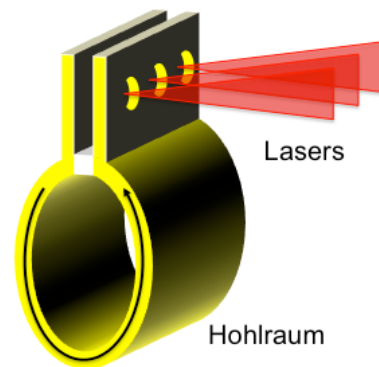


図2 レーザー駆動キャパシター・コイル法を用いたホーラムターゲット。ホーラムターゲットから張り出すように、レーザー駆動キャパシターを取り付け、そこに高強度レーザーを集光照射することで、ホーラム壁に電流を流し、ホーラム内部に磁場を形成する。

実験では、図2に示すような、National Ignition Facilityで用いられている金円筒(ホーラム)を模したコイルを用い、燃料を圧縮するためのX線を発生させる本来のホーラムの役割と、核融合点火条件を緩和させる磁場発生役割の両方を同時に担わせることとした。このホーラム型コイルに、レーザー

駆動のキャパシターを取り付け、OMEGA レーザーを照射することで、強磁場を発生させた。

発生した磁場の強度と形状を観測するために、プロトン・ラジオグラフィを用いた。プロトン・ラジオグラフィでは、プロトンが磁場中でローレンツ力を受け、プロトンの軌跡が偏向することを利用する。偏向したプロトンビームの空間形状から、逆問題を解くことで、磁場の形状と強度を求める。

レーザー駆動方式によって発生する磁場の制御性を確認するために、駆動用レーザーのパルス幅を 1 ns から 10 ns まで変えた。この際に、レーザーのピーク強度は一定に固定した。

4. 研究成果

レーザー駆動磁場を、核融合点火に適用するためには、発生する磁場のパルス幅は少なくとも 10 ns 以上でなくてはならない。これまでの実験は、全て 1 ns 程度のパルス幅で行われてきた。そのため、発生した磁場のパルス幅も数 ns 程度であり、核融合点火に適用するには不十分であった。

図 3 に示すように、パルス幅を 1 ns から 10 ns に変えることで、発生した磁場のパルス幅も 10 ns を越えることが明らかになった。これは、レーザー駆動キャパシターは、実はキャパシターとしての機能よりも、ダイオードとしての機能を有していることを示唆している。

つまり、レーザー駆動によって、電流が駆動されており、レーザーのパルス幅に応じて、流れる電流の時間幅も変化していることを示している。引き続き、理論およびシミュレーションによる解析を進めて行く。

上記の研究に加えて、従来から使われている通常のホーラムの中にも磁場が自己生成し、ホーラム内でのエネルギー輸送が、磁場の影響を受けている可能性を実験的に研究した。ホーラムの一部を切り出した形状のターゲット内面にレーザーを照射し、生成した磁場形状をプロトンラジオグラフィ法を用いて観測した。自己生成磁場の形状は、プラズマが磁力線を運ぶ効果と、プラズマ中の熱電子が磁力線を運ぶネルンスト効果の重ね合わせによって決定されており、特にネルンスト効果においては、プラズマ中での熱伝導の非局所性が重要な役割を果たしていることが明らかになることが出来た。

レーザー駆動強磁場を用いた X 線天文学研究のために、多次元流体シミュレーションコード、原子物理の専門家との議論を行い、円筒形状の低密度シリコンターゲットを用いた、強磁場発生と強磁場中でのゼーマン分光に関する研究も開始することが出来た。

今回、研究代表者がローレンス・リバモア研究所に滞在していることを一つの契機に、高エネルギー密度科学分野における日米の協力の気運が高まり、ワークショップを開催

し、日米から 40 名近い研究者が参加した。当該分野において、国際共同研究を加速していく上で、貴重な成果と知見を得ることが出来た。

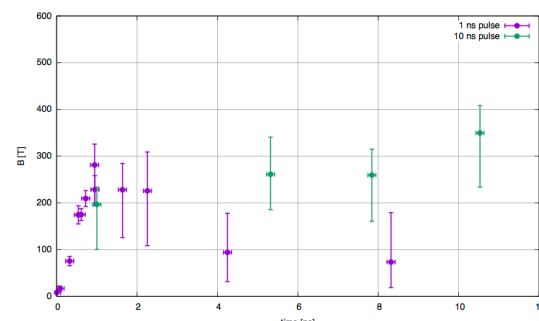


図 3 ホーラム型のコイルターゲットで発生する磁場の時間変化. 紫色の点が、パルス幅 1 ns で得られた磁場の時間変化で、緑色の点が、パルス幅が 10 ns で得られた磁場の時間変化. パルス幅が 1 ns の場合、約 3 ns 程度で磁場強度が半分になるのに対し、パルス幅が 10 ns の場合、10 ns 後でも十分高い磁場強度 (300 T) を保っている. 磁場のパルス幅をレーザーパルス幅でコントロール出来ることを明らかにすることが出来た。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- Schillaci F., De Marco M., Giuffrida L., Fujioka S., Zhang Z., Korn G., Margarone D., AIP Advance, Vol. 8, p. 025103 (2018).
- Bailly-Grandvaux M., Santos J. J., Bellei C., Forestier-Colleoni P., Fujioka S., et al., Nature Communications, Vol. 9, p 102 (2018).
- Matsuo Kazuki, Nagatomo Hideo, Zhang Zhe, Nicolai Philippe, Sano Takayoshi, Sakata Shohei, Kojima Sadaoki, Lee Seung Ho, Law King Fai Farley, Arikawa Yasunobu, Sakawa Youichi, Morita Taichi, Kuramitsu Yasuhiro, Fujioka Shinsuke, Azechi Hiroshi, Physical Review E, Vol. 95, p. 53204 (2017).

[学会発表] (計 2 件)

- M. Dozieres, P. Forestier-Colleoni, M. S. Wei, P.-A. Gourdain, J. R. Davies, S. Fujioka, J. Pebbles, M. Campbell, J. J. Santos, D. Batani, C. McGuffey, F. N. Beg, Characterization of cylindrically imploded magnetized plasma by spectroscopy and proton probing, 59th American Physical Society, Division of Plasma Physics.
- B. Pollock, A. Moore, N. Meezan, D. Eder, J. Kane, D. Strozzi, S. Wilks, H. Rinderknecht, A. Zylstra, S. Fujioka, G.

Kemp, J. Moody, Proton deflectometry
characterization of Biermann- Battery field
advection, 59th American Physical Society,
Division of Plasma Physics

[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

地上最大級の強磁場を使い光速電子の誘導
に成功

[http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/
2018/20180111_1](http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20180111_1)

強磁場によるレーザープラズマの閉じ込め
に成功

[http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/
2017/20170512_1](http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2017/20170512_1)

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) 研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

John D. Moody

Lawrence Livermore National Laboratory,
グループリーダー

Bradley Pollock

Lawrence Livermore National Laboratory,
研究員

[その他の研究協力者]