

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 4 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14681

研究課題名（和文）高強度レーザーによるGiga-Gauss級準静的磁場生成と応用

研究課題名（英文）Giga-Gauss scale quasi-static magnetic field generation and application by high-power laser

研究代表者

安部 勇輝（Abe, Yuki）

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：70817543

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、白色矮星や中性子星表層の磁場強度に匹敵する磁場を実験室で生成する手法を確立した。高出力レーザーとマイクロスケールの物質の相対論的相互作用を利用して、10 kT級の磁束密度で反平行磁場からトロイダル磁場まで多様な磁場を生成できることが示された。プロトン偏向法による磁場計測により、レーザー条件やターゲット形状と磁場配位、磁場強度、持続時間の関係が明らかになり、実験室宇宙物理学を含む様々な研究展開が検討された。目的に応じて最適な磁場を造り出せるよう制御パラメータが整備されたことも本研究の成果として極めて重要であり、単なる学術的興味に終わらない、実用的な強磁場生成法が確立された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義はレーザーを用いた新たな強磁場生成法の確立により、地上で生成可能な磁場強度の上限が大幅に引き上げられたことにある。これにより、天文観測と理論計算に依存してきた磁気リコネクションを始めとする宇宙物理学において、「地上実験」という新しい研究アプローチの可能性が拓かれた。また、強磁場による高温プラズマの閉じ込め効果は核反応の促進効果をもたらす、慣性核融合炉や産業用中性子源の社会実装をより現実的なものにする意味でも本研究で得られた知見は重要である。

研究成果の概要（英文）：We established a method to produce a quasi-static magnetic field with astronomical strength in laboratory-scaled conditions. By using relativistic laser-plasma interaction in novel target geometries, 10-kT scale magnetic fields can be generated with a variety of orientation, including parallel, anti-parallel and toroidal. Looking forward to possible applications (laboratory astrophysics, nuclear fusion, particle beams etc.), we studied the parameters of resulting magnetized plasma structures in time and in space for various laser and target conditions. The obtained parameters are valuable for producing optimum magnetic fields depending on the application. Our work would lead to renewed attention to laser-plasma science for academic and industrial R&D.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：強磁場 レーザー 磁気リコネクション 宇宙物理 核融合

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

レーザーを用いたキロテスラ磁場の生成は、この10年間、慣性核融合を始めとするレーザープラズマ科学の分野において注目されてきた話題の一つである。これまでも、キャパシターコイル [S. Fujioka *et al.*, *Sci. Rep.* 3, 1170 (2013)] などを用いた磁場生成法により、数キロテスラの磁場が実験的に観測されてきた。天然磁石の最大磁束密度は約2T、非破壊型マグネットでは100T以下、破壊型マグネットでも1kT未満であることから、強い磁場を作るという点に関してレーザーは卓越した能力を持つ。しかし、数キロテスラの磁場の応用範囲は限定的であり、高速点火慣性核融合実験における高速電子の輸送制御など、強磁場が有効に活用された事例は数えるほどしかない。こうした背景から、10kTを超える磁場強度を実現する手法の確立が求められている。10kT級の磁場が実現すれば、相対論的磁気リコネクションや非線形ゼーマン効果といった宇宙物理と密接に関連する現象が実験的に観測可能な領域に入ることなどから、レーザー駆動磁場の応用範囲が大幅に広がると期待されている。

### 2. 研究の目的

高出力短パルスレーザーを用いた10kT級の磁場生成法を開発する。本研究では、単なる磁場強度の記録更新を目指すものではなく、磁場の強度や空間分布の制御性までを考慮した実用性の高い強磁場生成法の確立を目指す。レーザーおよびターゲットの条件と磁場の諸特性の関係を明らかにし、宇宙物理学を始めとする多様な研究展開の可能性を検証する。

### 3. 研究の方法

相対論強度域のレーザー相互作用を利用した強磁場生成法を検証した。この手法は高出力短パルスレーザーと物質の相対論的相互作用による電子の排斥効果を利用したもので、この効果に付随して物質表面に流れるメガアンペア級の帰還電流が強力な磁場を生成する。ターゲットの曲率半径が小さいほど強い磁場を生成しやすいため、ミクロンサイズの円筒形あるいは球殻形のターゲットを用いることで、10kT級の磁場を生成する。磁場の強度はターゲットの曲率半径のほか、レーザーエネルギーや集光強度によって制御し、磁場の配位はターゲットの形状やレーザー照射位置によって制御する。本研究では、こうした各種制御パラメータと磁場の強度及び配位の関係を実験・理論シミュレーションの両面から明らかにするとともに、生成された磁場の具体的な活用法を検討した。実験は大阪大学レーザー科学研究所のLFEXレーザー、ドイツ重イオン加速器研究所のPHELIXレーザーを用いて行い、日独仏露を含む共同研究者の協力を得て行われた。

### 4. 研究成果

本研究の主要な成果は、以下3点である。

- (1) 10 kT 級の磁場生成を可能にする手法の開発とその基礎物理の解明
- (2) 平行磁場から反平行、トロイダル磁場まで自在に生成できる高い制御性の実証
- (3) 磁気リコネクションによる高エネルギー粒子加速の観測と宇宙の関連性の発見

本研究で提案する磁場生成法の基礎物理や磁場の諸特性は、粒子(Particle-in-Cell: PIC)シミュレーションによって検証され、ターゲット表面を流れる帰還電流や磁場の強度及び空間分布とレーザー・ターゲット条件の関係が明らかにされた。また、シミュレーションに

よる磁場の強度・分布に関する計算結果は実験でもベンチマークされ、その信頼性が担保された。

また、実験では研究開始当初より検討されてきた円筒型ターゲット内面のレーザー照射による「反平行磁場」の生成のほか、蝸牛型ターゲットを用いた平行磁場の生成、球殻ターゲットを用いたトロイダル磁場の生成が観測され、磁場配位に関する高い制御性が示された。磁場配位の制御は主に、ターゲット形状やレーザー照射位置の工夫により、ターゲットから排斥される高速電子の方向や帰還電流の向き、膨張プラズマの噴出方向を調整することで可能であることが分かった。

反平行磁場の生成実験では、磁場の界面で起こる磁気リコネクションに付随する高エネルギー粒子加速（電子および陽子の加速）を観測した。実験で生成された磁場の強度（2.1 kT）や磁場中の電子の温度（ $1e9$  K）および密度（ $1e24$   $m^{-3}$ ）、そして磁気リコネクションによって加速された陽子の速度（ $0.2$  c）は、「はくちょう座 X-1」で観測されているものと類似していることが分かった。はくちょう座 X-1 は強力な X 線パルサーとして知られる連星系であり、その伴星では磁気リコネクションによる高エネルギー粒子加速が起きていると考えられている。こうしたレーザープラズマ実験が X-1 の地上実験として真に意味のあるものかどうかは今後さらなる検討が必要であるが、実験結果と宇宙の関連性が見出されたことは本研究における大きな収穫である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Abe Y., Johzaki T., Sunahara A., Arikawa Y., Ozaki T., Ishii K., Hanayama R., Okihara S., Miura E., Komeda O., Sakata S., Matsuo K., Morita H., Takizawa R., Mizutani R., Iwamoto A., Sakagami H., Sentoku Y., Shiraga H., Nakai M., Fujioka S., Mori Y., Kitagawa Y.	4. 巻 36
2. 論文標題 Monte Carlo particle collision model for qualitative analysis of neutron energy spectra from anisotropic inertial confinement fusion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100803 ~ 100803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Abe Y., Morace A., Arikawa Y., Mirfayzi S. R., Golovin D., Law K. F. F., Fujioka S., Yogo A., Nakai M.	4. 巻 92
2. 論文標題 Dosimetric calibration of GafChromic HD-V2, MD-V3, and EBT3 films for dose ranges up to 100 kGy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063301 ~ 063301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043628	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Law K. F. F., Abe Y., Morace A., Arikawa Y., Sakata S., Lee S., Matsuo K., Morita H., Ochiai Y., Liu C., Yogo A., Okamoto K., Golovin D., Ehret M., Ozaki T., Nakai M., Sentoku Y., Santos J. J., d'Humières E., Korneev Ph., Fujioka S.	4. 巻 102
2. 論文標題 Relativistic magnetic reconnection in laser laboratory for testing an emission mechanism of hard-state black hole system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 033202-033202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.033202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Margarone D., Morace A., Bonvalet J., Abe Y., Kantarelou V., Raffestin D., Giuffrida L., Nicolai P., Tosca M., Picciotto A., Petringa G., Cirrone G., Fukuda Y., Kuramitsu Y., Habara H., Arikawa Y., Fujioka S., D'Humieres E., Korn G., Batani D.	4. 巻 8
2. 論文標題 Generation of $\gamma$ -Particle Beams With a Multi-kJ, Peta-Watt Class Laser System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 343-343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2020.00343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Golovin Daniil O., Mirfayzi Seyed R., Gu Yan Jun, Abe Yuki, Honoki Yuki, Mori Takato, Nagatomo Hideo, Okamoto Kazuki, Shokita Satoru, Yamanoi Kohei, Arikawa Yasunobu, Korn Georg, Pikuz Tatiana A., Fujioka Shinsuke, Kodama Ryosuke, Bulanov Sergey V., Yogo Akifumi	4. 巻 36
2. 論文標題 Enhancement of ion energy and flux by the influence of magnetic reconnection in foam targets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100840 ~ 100840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100840	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bukharskii N D, Kochetkov Y V, Ehret M, Gubskiy K L, Kuznetsov A P, Santos J J, Zielbauer B, Abe Y, Law F, Korneev Ph A	4. 巻 1686
2. 論文標題 On the proton radiography of magnetic fields in targets irradiated by intense picosecond laser pulses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012004 ~ 012004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1686/1/012004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Golovin D.O., Mirfayzi S.R., Shokita S., Abe Y., Lan Z., Arikawa Y., Morace A., Pikuz T.A., Yogo A.	4. 巻 16
2. 論文標題 Calibration of imaging plates sensitivity to high energy photons and ions for laser-plasma interaction sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 T02005 ~ T02005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/02/T02005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Ehret, Yu. Kochetkov, Y. Abe, K. F. F. Law, V. Stepanischev, S. Fujioka, E. d'Humieres, B. Zielbauer, V. Bagnoud, G. Schaumann, M. Roth, V. Tikhonchuk, J.J. Santos, and Ph. Korneev	4. 巻 1908.11430v1
2. 論文標題 Kilotesla plasmoid formation by a trapped relativistic laser beam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Y. Abe, B. Zhu, A. Morace, K.F.F. Law, Ph. Korneev, J. J. Santos, M. Ehret, I. Kotchetkov, N. Bukharski, T. Iyoda, K. Nagai, Z. Zhang, and S. Fujioka
2. 発表標題 Control of kilo-Tesla-scale magnetic fields driven by high-power laser and micro-coil targets
3. 学会等名 Symposium on Photon and Beam Science (OPT02021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Abe, A. Morace, B. Zhu, A. Nakao, S. Asano, J. Dun, Y. Arikawa, T. Minami, Y. Fukuda, H. Shiraga, M. Nakai, A. Yogo, Y. Mori, Y. Kitagawa, E. Miura, Y. Kuramitsu, S. Fujioka and Z. Zhang
2. 発表標題 Bright point neutron sources from spherically convergent plasma fusion driven by short-pulse lasers with relativistic intensities
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Abe, T. Johzaki, A. Sunahara, Y. Arikawa, T. Ozaki, K. Ishii, R. Hanayama, S. Okihara, E. Miura, A. Iwamoto, H. Sakagami, Y. Sentoku, Y. Kuramitsu, H. Habara, H. Shiraga, M. Nakai, S. Fujioka, Y. Mori, and Y. Kitagawa
2. 発表標題 Monte Carlo particle collision model for spectral analysis of neutrons from laser-driven neutron sources
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安部 勇輝, 中尾 采美, 有川 安信, 東口 武史, 白神 宏之, 藤岡 慎介, 中井 光男, 余語 寛文
2. 発表標題 レーザー駆動中性子源の開発動向と応用展望
3. 学会等名 レーザー学会第41回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安部勇輝, 城崎知至, 砂原淳, 有川安信, 尾崎哲, 石井勝弘, 花山良平, 沖原伸一郎, 三浦永祐, 坂田匠平, 松尾一輝, 森田大樹, 瀧澤龍之介, 岩本晃史, 坂上仁志, 千徳靖彦, 白神宏之, 中井光男, 藤岡慎介, 森芳孝, 北川米喜
2. 発表標題 非等方爆縮プラズマから生成される核融合中性子スペクトル解析のためのモンテ カルコ運動論モデル
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Abe, A. Morace, Y. Arikawa, S. Shokita, S.R. Mirfayzi, D. Golovin, K.F.F. Law, S. Fujioka, A. Yogo, S. Tojo, and M. Nakai
2. 発表標題 Dosimetric calibration of GAFCHROMIC HD-V2, MD-V3, and EBT3 films for dose ranges up to 30 MGy
3. 学会等名 The 2020 High-Temperature Plasma Diagnostics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 B. Zhu, Y. Abe, Z. Zhang, M. Takemura, Y. Zhang, L. Cheng, X. Yuan, S. Guo, Z. Lan, A. Morace, A. Nakao, R. Takizawa, C. Liu, H. Morita, A. Yogo, Y. Arikawa, M. Nakai, H. Shiraga, Y. Li, S. Fujioka
2. 発表標題 Collimated charged particles generation with accompanied magnetic field
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安部勇輝, 中尾采美, 有川安信, 東口武史, 白神宏之, 藤岡慎介, 余語覚文, 中井光男
2. 発表標題 レーザー駆動中性子源を用いた放射化元素分析の応用展望
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Abe, K. F. F. Law, A. Morace, Y. Arikawa, S. Sakata, S. Lee, K. Matsuo, H. Morita, Y. Ochiai, C. Liu, A. Yogo, D. Golovin, M. Ehret, T. Ozaki, M. Nakai, Y. Sentoku, J.J. Santos, E. d'Humieres, Ph. Korneev, and S. Fujioka
2. 発表標題 Laboratory-produced quasi-static magnetic field with astronomical strength driven by ultra-high intensity lasers
3. 学会等名 The 37th Samahang Pisika ng Pilipinas International Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤岡 慎介 (Fujioka Shinsuke) (40372635)	大阪大学レーザー科学研究所  (14401)	
研究協力者	ロー ファーレイ (Law King Fai Farley)	東京大学大学院理学系研究科  (12601)	
研究協力者	コルニーフ フィリップ (Korneev Phillip)		
研究協力者	ガブリエル シャオマン (Gabriel Schaumann)		
研究協力者	サントス ジョアオ (Santos Joao)		



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	染川 智弘  (Somekawa Tomohiro)  (00508442)	レーザー技術総合研究所    (74417)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関