

24Aa01

高強度短パルスレーザーを用いた強磁場生成とその応用

Kilotesla magnetic field generation using high-intensity short-pulse lasers and its applications

Hiroki Morita, Yuki Abe¹, Law King Fai Farley¹, Baojun Zhu¹, Ryunosuke Takizawa¹, Dun Jinyuan¹, Takayoshi Sano¹, Masakatsu Murakami¹, Shinsuke Fujioka¹

Utsunomiya Univ., ¹ILE, Osaka Univ.

キロテスラ級の強磁場は高エネルギー密度プラズマにおいて、流体的不安定性や高エネルギー荷電粒子ビームの制御、レーザー核融合などの応用研究や、磁気リコネクション、無衝突衝撃波などの基礎研究など、様々な用途で用いられている。強磁場を生成する方法としてよく用いられているのが、レーザー駆動コイルである。テラワット級のナノ秒高出力レーザーと組み合わせることで数百テスラに及ぶ強磁場を生成することができる。

2018年にはレーザー駆動コイルにパルス幅がピコ秒以下の短パルス高強度レーザーを用いると、磁場の発生時間は短くなる代わりに、レーザーから磁場へのエネルギー変換効率は、従来のナノ秒高出力レーザーを使う場合よりも10～100倍ほど高いということが報告された[1]。しかし短パルスレーザー駆動の磁場生成に関しては、実験的にも理論的にも十分に調べられておらず、そのメカニズムは十分に理解されていない。短パルスレーザー照射による高温電子および電圧の発生メカニズムは、従来のナノ秒高出力レーザー照射による場合と大きく異なるため、従来の磁場発生モデルは適応出来ず、改善や新たな開発が必要である。

一般的にレーザー駆動コイルは、二枚の金属板がワイヤーコイルでつながれた形状をしている。高強度短パルスレーザーを用いる場合、レーザー照射時の電荷欠損が主な電圧生成のソースとなる。先行研究では、電荷欠損に伴う帯電および放電をベースに、短パルスレーザー照射時の電流についてモデルが構築された[1]。しかし、このモデルでは、非照射側の金属板の影響やパルス幅の影響が十分に考慮されていない。非照射板の影響は、照射レーザーのパルス幅が、レーザー生成電子がもう片方の板に到達するまでの数ピコ秒の時間スケールよりも長い場合に顕著に生じることが予想される。

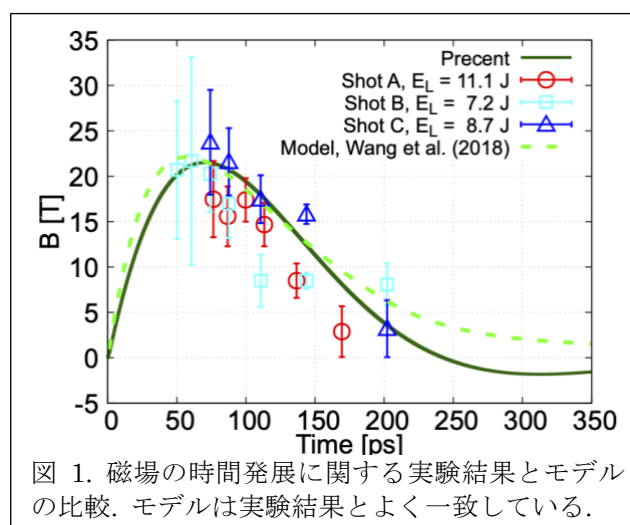


図 1. 磁場の時間発展に関する実験結果とモデルの比較。モデルは実験結果とよく一致している。

そこで今回、我々は非照射板の影響および照射レーザーのパルスの影響を考慮したモデルを開発した。図1は、レーザー駆動コイルに短パルスレーザー照射した際に生成される磁場の時間発展について、実験結果、既存モデルおよび開発したモデルを比較したものである。どちらのモデルについても実験結果をよく再現しているが、Wang *et al*のモデルの場合、パルス幅の効果(この実験では30 fs)を考慮すると、実験結果を再現できない。また、Wang *et al*のモデルでは、高エネルギー電子へのエネルギー変換効率が40%と高く設定されているが、我々が開発したモデルでは、25%で実験結果を再現できる。この変換効率は過去の実験結果ともおよそ一致している[2]。

また、最近では、図2に示すような非照射板を持たない「スネル型マイクロコイル」に直接、高強度レーザーを照射することでキロテスラ級の強磁場を生成できるということが数値的に、また実験的にも検証されている[3,4]。これと合わせて、スネル型コイルで生成できる磁場を種磁場として、1 MTに及ぶ超強磁場生成が可能であるということを示唆することも数値的

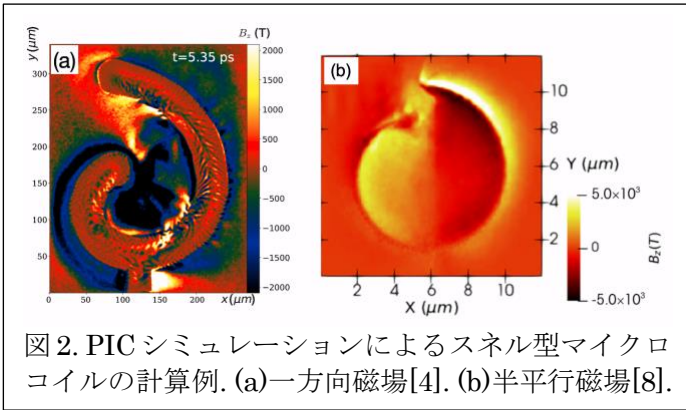


図2. PICシミュレーションによるスネル型マイクロコイルの計算例. (a)一方向磁場[4]. (b)半平行磁場[8].

に予測されている[5,6]。図2(a)に示すようにコイルの端に高強度レーザーを照射すると、電荷欠損に伴う帰還電流によりコイル中心に最大2 kTの磁場が生成される。コイル中心に生成される磁場の時間発展も実験的に計測し、キロテスラに及ぶ強磁場が100 ps程度維持できることが示された。今回開発した磁場生成モデルは、スネル型コイルを用いて生成できる強磁場についても、よく一致する結果を与えた。

このスネル型コイルは、レーザーの集光位置を変えることで、図2(b)に示すように、コイル断面で半平行な磁場構造を作ることができる[7]。高強度レーザーをスネル型コイルのもう一端にも当たるように照射すると、電荷欠損がコイルの両端で生じ、両端から帰還電流が流れる。帰還電流とコイル内面に生じる高速電子流によりコイル断面には二つの回路が生じる。このとき発生する磁場は、図2(b)のような反平行構造を形成する。このような半平行磁場がある状況では、磁場の界面において、相対論的磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速が発生する。我々はこのコンセプトに基づき、磁気リコネクションに関する実験を行い、スネル型コイルを用いて、1 psの間に2.1 kTの最大磁場を観測し、冪乗のエネルギースペクトルを示す電子も同時に観測した。

高強度レーザーを用いて生じる強磁場をイオン加速に応用するという研究もいくつか行われている[9,10]。レーザー駆動イオン加速の代表例の一つとして、Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)という機構がある。薄膜ターゲットに対して高強度レーザーを照射すると、加速された電子はターゲット裏面を抜ける際に、電荷分離に伴う強力な電場を生成する。TNSAでは、この電場によって、ターゲット裏面に付着するイオンが高エネルギーまで加速される。このとき、電子が加速されることで薄膜では電荷欠損が生じている。薄膜にソレノイド型コイル

を取り付けておくことで、スネル型コイルの場合と同じように、薄膜での電荷欠損による大電流がコイルに流れ、強磁場を生成できる。この強磁場はイオン加速と同時に生成されるため、強磁場による自発的なイオンビームの収束効果が期待できる。

最近、我々はこの原理実証実験を行い、強磁場による陽子ビームの収束に成功した。図3(a)、(b)はそれぞれ、ソレノイドコイル付きの薄膜ターゲット、薄膜ターゲットのみを用いた場合の陽子ビームパターンである。青色で示している部分が、陽子線量が多い部分に対応している。図3(a)、(b)を見比べると明らかなように、ソレノイド型コイルを取り付けた場合、もう一方と比べて2倍以上ビーム径が小さい陽子ビームが観測された。この結果はコイルで陽子ビームを収束するのに十分な磁場が発生していたことを示している。陽子ビームはラジオクロミックフィルムで検出された。どちらの場合も300 Jのエネルギーでレーザーを薄膜に照射した。

陽子ビームの計測と併せて、ソレノイド型コイルによって生成される磁場の時間発展も同時に計測し、数十ピコ秒の間、1 kT以上の磁場が持続していることを観測した。これについても開発した磁場生成モデルとの比較を行い、モデルが実験結果とよく一致することを示した。

本講演では、上記の結果の詳細について議論する。

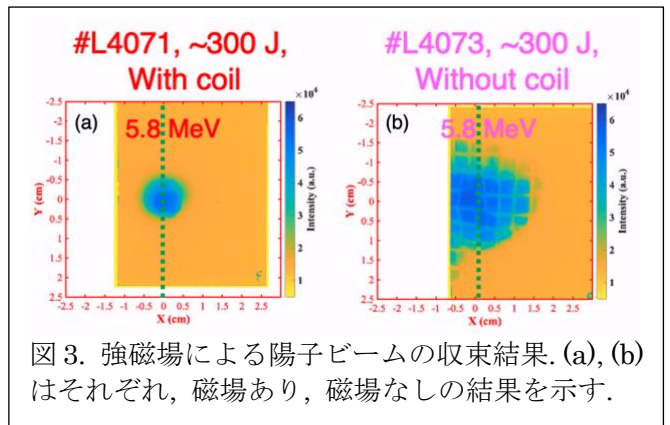


図3. 強磁場による陽子ビームの収束結果. (a), (b)はそれぞれ、磁場あり、磁場なしの結果を示す。

【参考文献】

- [1] W. Wang *et al.*, Phys. Plasmas 25, 083111 (2018)
- [2] Y. Ping *et al.* Phys. Rev. Lett. 100, 085004 (2008)
- [3] E. Ehret *et al.*, Phys. Rev. E 106, 045211 (2022)
- [4] Iu. V. Kochetkov *et al.*, Sci. Rep. (2022) 12:13734
- [5] M. Murakami *et al.*, Sci. Rep. (2020) 10:16653
- [6] M.-A. H. Zosa *et al.*, Appl. Phys. Lett. 120, 132403 (2022)
- [7] P. Korneev *et al.*, Phys. Rev. E 91, 043107 (2015)
- [8] K. F. F. Law *et al.*, Phys. Rev. E 102, 033202 (2020)
- [9] K. Weichman *et al.*, Sci. Rep. (2020)10:18966
- [10] K. Weichman *et al.*, Phys. Plasmas 29, 053104 (2022)