

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17798

研究課題名(和文) kT級磁場下における超高強度レーザーと高エネルギー密度プラズマとの相互作用の物理

研究課題名(英文) Physics of interactions between ultrahigh intense laser and high energy density plasma under kilo tesla magnetic field

研究代表者

畑 昌育 (Hata, Masayasu)

大阪大学・レーザー科学研究所・特別研究員(PD)

研究者番号：60712429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超高強度レーザーとプラズマとの相互作用における外部磁場の影響を明らかにした。サブキロテスラ級の磁場の場合では、レーザーフィラメントが磁場に沿った方向に伸びる傾向があることを見出した。フィラメント内のプラズマはレーザー場によって排斥され、プラズマと磁場とがフィラメント外周で圧縮されることもわかった。印加磁場が十分に強い50キロテスラの場合には、冷たいプラズマモデルの線形分散関係は右回り円偏光レーザーはカットオフなしに高密度領域に伝播できることを示すが、シミュレーションの結果、高密度領域への伝播は、レーザーの先頭部分のみであり、後続のパルスは伝播できないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Effects of strong external magnetic field on interactions between ultrahigh intense laser and plasma have been investigated in this study. When the external magnetic field is set to sub-kilo tesla, laser filament tend to grow along the direction of the external magnetic field. In addition, the expulsion of electrons inside the filament causes the compression of the magnetic field outside the filament. When the external magnetic field is enough strong namely 50 kilo-tesla, the linear dispersion relation of cold plasma shows that right-handed polarized laser can propagate to high-density region without cutoff, but it cannot penetrate high-density region except the front part of the laser pulse in simulation.

研究分野：レーザープラズマ

キーワード：外部磁場 レーザープラズマ相互作用 超高強度レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

2013年に高出力レーザーによるキロテスラ級磁場生成法が報告され、実験室においてキロテスラ級磁場を生成することが容易になった。この手法では、キャパシターコイルターゲットと呼ばれる二つの円板をコイルで繋げたターゲットを用い、一方の円板にキロボルト・ナノ秒レーザーを照射し荷電分離を引き起こし、飛び出した電子が他方の円板に到達することにより二つの円板間に電位差ができ、コイルを大電流が流れ、コイル中心にキロテスラ級の磁場が発生する。コイル中心に磁場をかけたい試料を置くことは容易であり、さらに、その試料に超高強度レーザーを照射することもできる。磁場とプラズマとの歴史は長く、磁場閉じこめ核融合や宇宙プラズマでは数多くの研究がなされているが、レーザープラズマの分野では前例が少ない。レーザープラズマの特徴として、非常に短い時間スケール（プラズマ振動の時間スケール）と超高強度の電磁波（電子が相対論的領域まで加速される程強い電場）、そして生成されるプラズマが高エネルギー密度状態であることが挙げられる。したがって、レーザープラズマ特有の現象が起こると推察される。超高強度レーザーによる高エネルギー密度状態と強磁場との組み合わせは、これまで実験室において探索することのできなかった新しいパラメータ領域であり、未踏の研究領域である。

## 2. 研究の目的

本研究では、近年実験室において生成可能になったキロテスラ級磁場下における超高強度レーザーと高エネルギー密度プラズマとの相互作用を研究対象とする。強磁場下での超高強度レーザープラズマ相互作用実験が今後精力的に行われていくであろうことを踏まえ、本研究では、現時点で実現可能な磁場強度サブキロテスラ程度から、今後の研究の進展に伴って実現可能になるであろう数十キロテスラ程度の磁場までの外部磁場を想定し、磁場印加による新奇現象を明らかにする。

## 3. 研究の方法

サブキロテスラから数十キロテスラまでの磁場下における超高強度レーザープラズマ相互作用を多次元相対論的電磁粒子コードで計算し、粒子・電磁場の計測を行い解析する。相対論的電磁粒子コードは、荷電粒子の相対論的運動方程式およびMaxwell方程式をカップリングして解くコードであり、電磁場とプラズマとの相互作用を自己無撞着に解くことができ、本研究に適している。磁場に依存してドラスティックに変化する超高強度レーザープラズマ相互作用を、注目すべき現象に焦点を当て、磁場強度毎に分類することで、系統的な研究を展開する。

## 4. 研究成果

## (1) サブキロテスラ級磁場下における超高強度レーザープラズマ相互作用

考える系はシンプルかつ実験に近いものを扱い、複数回の実行が可能な計算規模（時空間サイズ）に設定した。レーザーやプラズマのパラメータは実験に近い条件をなるべく採用し、実験による検証も将来的にできるようにした。レーザーは空間的にはガウシアン、時間的には矩形のプロファイルを持つものを想定し、最大強度 $4 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>、波長1  $\mu$ m、スポット径(FWHM)20  $\mu$ m、パルス幅無限の直線偏光とした。ターゲットは、レーザーのメインパルスに先行する比較的低強度ではあるが長パルスであるプリパルスによってあらかじめプラズマ化・膨張しているとして、スケール長20  $\mu$ mのプリプラズマ付きCHプラズマを置いた(図1)。そして、外部磁場としてx方向に平行磁場を印加した。外部磁場強度は0, 0.5, 1.0, 5.0 kTと振って500 fsのシミュレーションを実施した。

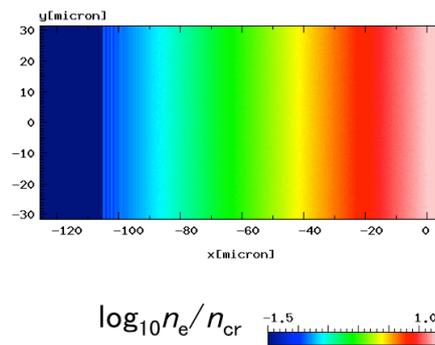


図1：ターゲットの初期電子密度

図2に500 fsにおけるレーザー周期平均電場強度および電子密度の二次元プロファイルを示す。磁場なしと0.5 kTとでは大きな違いはないが、5 kTの場合には、レーザー場のフィラメント構造が磁力線方向に直線的に伸びる傾向があることがわかった。これに付随して、電子密度プロファイルにおける構造も直線的になっている。この現象は外部磁場によって磁力線垂直方向の運動が阻害されたことによるものと考えられる。図3に、外部磁場が0.5および5 kTの場合の500 fsにおけるレーザー周期平均磁場Bxの二次元プロファイルを示す。磁場Bxにおいても構造形成が起きており、初期に印加した磁場が強められている箇所と弱められている箇所があることがわかる。この磁場の強弱は、レーザー場および電子密度における構造形成と同じ場所にできており、フィラメント内では、電子の排斥が起こっており、磁場が弱くなっていた。そして、フィラメント周辺部では、押し退けられた電子の堆積および磁場の圧縮が起き、初期磁場よりも強い磁場が生じていることがわかった。

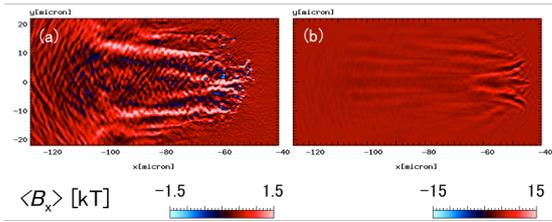


図2：外部磁場が(a)0.5 kT および(b)5 kT の場合の  $t = 500$  fs におけるレーザー周期で時間平均した  $x$  方向磁場の二次元プロファイル

$x = 4 \mu\text{m}$  の位置 (図1参照) を通過する高エネルギー電子を観測することで、強磁場下の超高強度レーザープラズマ相互作用によって生成される高エネルギー電子の特性をみた。図3に電子ビームフルエンスの  $y$  方向分布を示す。追加のシミュレーションを2つ実施したため、磁場なし、外部磁場 0.1, 0.5, 1.0, 5.0 kT の5つのケースのデータを載せている。図よりわかるように、外部磁場が 0.1 kT の場合は、磁場なしの場合とほとんど結果が変わらないが、0.5 kT を超えてくると電子ビームが局在化してくる。1 kT の場合では、磁場による電子ビームのガイド効果が顕著に現れており、半値全幅で  $23 \mu\text{m}$  とレーザーのスポット径とほぼ同じ値が得られている。さらに外部磁場が 5 kT の場合には、電子ビームフルエンス分布にも構造がでており、この構造はフィラメント構造を反映していることがわかった。5 kT という強い外部磁場下では、超高強度レーザーによって生成される MeV 電子でも、そのラーモア半径が  $1 \mu\text{m}$  と非常に小さくなるため、生成点における高エネルギー電子の分布がそのまま維持されて伝播していると考えられる。

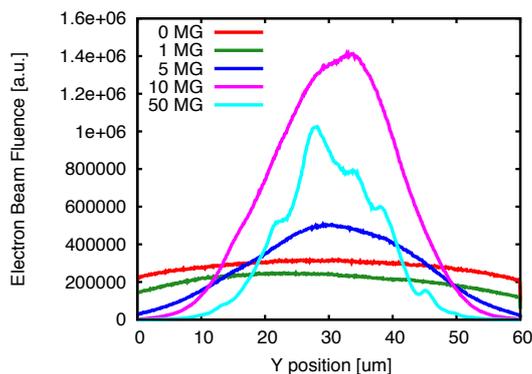


図3：ターゲット後方 ( $x = 4 \mu\text{m}$ ) で計測した電子ビームフルエンスの外部磁場強度依存性

(2) 50 キロテスラ強磁場下における超高強度レーザープラズマ相互作用

シミュレーション条件は一つ前のシミュレーションとほとんど同じで磁場の強度の

みを 50 kT に変更して 600 fs のシミュレーションを実施した。図4に 200, 300, 400, 500 fs におけるレーザー周期で平均した電場強度および電子密度の二次元プロファイルを示す。磁場なしの場合に電磁波が侵入できなくなる古典臨界密度 ( $n_{cr}$ ) は、 $x = -60 \mu\text{m}$  の辺りで、レーザーが相対論的強度であるため、その効果を考慮した場合には相対論的臨界密度が古典臨界密度の約2倍となり、その密度は  $x = -46 \mu\text{m}$  の辺りになる。図4より、非常に強い磁場をかけた場合には、レーザーが古典的臨界密度だけではなく、相対論的臨界密度をも超えて伝播していることがわかる。また、図4 (a-3) を見ると、一部の成分は  $x = 24 \mu\text{m}$  の辺りで反射されており、一部成分はさらに高密度領域まで侵入していることがわかる。この  $x = 24 \mu\text{m}$  における電子密度を調べると  $6n_{cr}$  となっていた。外部磁場に平行に伝播する電磁波の線形分散関係によると、今回のシミュレーションのパラメータの場合、右回りの円偏光成分は臨界密度が消失し、左回りの円偏光成分に対しては臨界密度が  $6n_{cr}$  となる。シミュレーションの結果は、概ね線形分散関係の通りとなっているが、図4 (a-4, 5) を見ると後続のパルスが高密度領域に伝播することができなくなっていることがわかる。このことは理論的な予測とは異なる振る舞いであり、なんらかの電磁波伝播の阻害機構があると考えられた。シミュレーション結果の詳細な解析を行った結果、電磁波伝播が阻害されている領域でイオン音波が励起されていることがわかり、入射電磁波がイオン音波と反射電磁波に崩壊していると考えられた。このことは、本研究において全く予想していなかった結果であり、今後のさらなる研究展開が期待される。例えば、パルス先頭部はイオン音波を励起する前に透過することができているが、透過することのできるパルス幅は何で決まるのか、磁場強度依存性やレーザー強度依存性がどうなっているかを調べることで、透過条件を明らかにできると推察される。

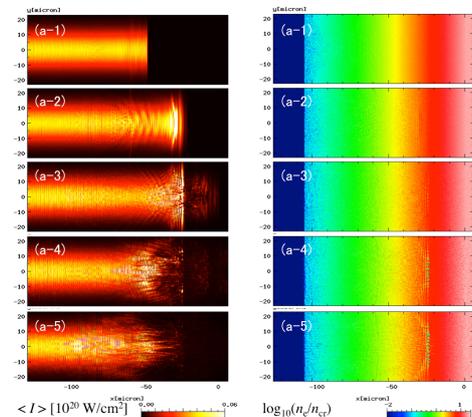


図4： $t = (1) 200, (2) 300, (3) 400, (4) 500, (5) 600$  fs におけるレーザー周期で平均した電場強度 (a) と電子密度 (b) の二次元プロ

ファイル

## 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)

- ① T. Sano, Y. Tanaka, I. Iwata, M. Hata, et al., “Broadening of cyclotron resonance conditions in the relativistic interaction of an intense laser with overdense plasmas”, *Physical Review E* 96, 043209 (2017). 査読あり, (DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.043209>)
- ② T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, Y. Sentoku, H. Sakagami, M. Hata, et al., “Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 59, 014045 (2016). 査読あり, (DOI: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014045>)
- ③ M. Hata et al., “Study of fast electron generation using multi beam of LFEX-class laser”, *Journal of Physics: Conference Series* 717, 012037 (2016). 査読あり, (DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/717/1/012037>)

[学会発表] (計 11 件)

- ① M. Hata et al., “Effects of strong external magnetic fields on high-intense laser light propagation into high-density plasma”, 14<sup>th</sup> Direct-Drive and Fast-Ignition Workshop, 20-22 Mar. 2018, York, UK
- ② 畑昌査 et al., “外部磁場印加高密度プラズマ中における高強度レーザー伝播”, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 1 月 24-26 日, 京都
- ③ M. Hata et al., “High intensity laser-plasma interactions with strong external magnetic field”, *Plasma Conference 2017*, 20-24 Nov. 2017, Himeji, Japan
- ④ M. Hata et al., “Effects of strong external magnetic fields on laser-plasma-interactions”, The 10<sup>th</sup> International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 11-15 Sep. 2017, Saint-Malo, France
- ⑤ 畑昌査 et al., “強磁場中の高強度レーザープラズマ相互作用に関する研究 II”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 3 月 17-20 日, 大阪

- ⑥ M. Hata et al., “Influence of strong external magnetic fields on laser-plasma-interactions and characteristics of the generated fast electrons”, 34<sup>th</sup> European Conference on Laser Interaction with Matter, 18-23 Sep. 2016, Moscow, Russia
- ⑦ 畑昌査 et al., “強磁場中の高強度レーザープラズマ相互作用に関する研究”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 9 月 13-16 日, 石川
- ⑧ 畑昌査 et al., “LFEX レーザーの複数ビーム照射により生成される高速電子の特性とその制御”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 3 月 19-22 日, 仙台
- ⑨ 畑昌査 et al., “LFEX ペタワットレーザーの複数ビーム照射により生成される高速電子の特性”, プラズマ核融合学会第 32 回年会, 11 月 24-27 日, 名古屋
- ⑩ M. Hata et al., “Study of fast electron generation using multi beam of LFEX-class laser”, The 9<sup>th</sup> International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 20-25 Sep. 2015, Seattle, US
- ⑪ 畑昌査 et al., “ペタワットレーザーの複数ビーム照射による高速電子生成に関する研究”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 9 月 16-19 日, 大阪

[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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

畑 昌査 (HATA Masayasu)

大阪大学・レーザー科学研究所・日本学術振興会特別研究員 (PD)

研究者番号: 60712429

### (2) 研究分担者

### (3) 研究協力者