

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03758

研究課題名(和文) 強磁場下の超高強度レーザー駆動無衝突衝撃波とイオン加速

研究課題名(英文) Collisionless shock wave and ion acceleration driven by ultra-intense laser under a strong magnetic field

研究代表者

田口 俊弘 (Taguchi, Toshihiro)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：90171595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：強磁場下での荷電粒子ビーム不安定性を理論・シミュレーションにより解析することで、不安定性に伴って起こる現象の解析とその抑制手法の検証を行った。

強磁場下での電子ビーム不安定性では、不安定性が抑制される一方、印加磁場強度によってはビーム電子流のせき止めが生じることがわかり、その原因を詳細に調べた。超高強度レーザー光圧が誘起するイオン流の研究では、2流体不安定性による電磁乱流で高速電子が散乱されて局所的熱平衡化が生じること等を示した。高速点火レーザー核融合の加熱過程を対象に、外部強磁場による電子ビームガイドの効果を評価し、キロテスラ級磁場が電子ビーム発散を抑えてコア加熱効率が向上することを示した。

研究成果の概要(英文)：Propagation of charged particle beams in a magnetized high density plasmas has been intensively investigated by theory and simulation.

In the electron beam propagation under a strong magnetic field, we have found a new phenomenon, beam stagnation by a strong whistler wave. The physical mechanism for generation of such a large amplitude whistler wave has been clarified. The PIC simulations on ultra intense laser interaction with near critical density plasmas showed that two stream instability between high energy electrons and background electrons induces electromagnetic turbulence and the energy distribution becomes local Maxwellian due to the scattering by the electromagnetic fluctuations.

We also evaluated electron beam guiding effect by a strong magnetic field in an ignition-realization-class conditions in fast ignition laser fusion. We have confirmed that applied kilo-tesla-class magnetic field effectively guides the electron beam and then enhances the heating efficiency.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：レーザープラズマ 超高強度レーザー 強磁場 無衝突衝撃波 高速点火核融合 ビーム不安定性

1. 研究開始当初の背景

十数年前より、超高強度レーザー生成相対論プラズマ研究の一環として、高密度相対論電子流とプラズマの電磁相互作用の理論・シミュレーションならびに実験研究が盛んに行われてきた。これらの結果、相対論電子の発生と輸送、イオン加速、ガンマ線の発生に加え、ワイベル不安定性や電気抵抗の勾配による自発磁場発生、電子ビームのフィラメント化、相対論電子の振動によるX線放射等、高エネルギー密度状態のレーザープラズマ研究が進んだ。

例えば、 $10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ を超える強度を持つ超高強度レーザーと高密度プラズマ（電子密度 $\geq 10^{22}/\text{cm}^3$ ）の相互作用により発生する相対論電子ビームの伝搬を2次元粒子シミュレーションで解析した結果、レーザー照射で発生した電子ビームがワイベル不安定性により電流フィラメントに分裂し、磁場がビームに沿って現れることが示された [Y. Sentoku 他: Phys. Plasmas **7** (2000) 689]。この結果を受けて、本研究の研究代表者は、電流フィラメントのマーキングによる大規模構造の形成も確かめた [T. Taguchi 他: PRL, **86** (2001) 5055]。また、超高強度レーザーの輻射圧によるイオン加速も注目を集めており、相対論的臨界密度近くでの相対論電子の輸送が重要な課題となっている。例えば、L. O. Silva らのシミュレーション [F. Fiuza 他, PRL, **108**, 235004 (2012)] によれば、レーザー輻射圧とワイベル不安定性により駆動された無衝突衝撃波の前面で効率的なイオン加速が起きることが示されている。

このような相対論的高エネルギー荷電粒子の重要な応用として、大阪大学を中心として開発が進められている高速点火型レーザー核融合がある。高速点火とは高強度レーザーにより発生した電子ビームが圧縮された燃料コアを加熱して点火を促す技術であるが、種々の過程により発生するビーム電子の角度発散が問題となっている。

一方、1980年頃の実験によりその有用性が確認されていたレーザー駆動コイルによる強磁場発生技術が、ハイパワーレーザーの実現により最近再び注目を集めつつある。例えば、S. Fujioka 等の報告 [Scientific Rep. **3** (2013) 1170] によれば、キロテスラを超える強磁場発生が観測されている。そこで、これを高速点火における相対論電子ビームの磁場ガイドに応用し、発散を抑えてコア加熱効率を改善する技術が関心を集めている。

しかし、これまでのレーザープラズマ研究においてはプラズマが高密度であるため、磁場による電子サイクロトロン周波数は電子プラズマ周波数より遙かに小さく、外部磁場の効果は無視されてきた。しかし、キロテスラ級磁場を印加した高密度プラズマはこのような近似ができず、磁化プラズマとしての解析が必要となってくる。

本研究は、高密度プラズマにおける相対論

的磁化プラズマ理論という分野を開拓しながら、高速点火核融合の実現への貢献や高エネルギー粒子加速技術の開発などを見据えて課題の申請を行ったものである。

2. 研究の目的

本研究では、強磁場下でのレーザープラズマ相互作用について理論・シミュレーションによる研究を行うことで高密度相対論磁化プラズマという新しい分野の理論の構築を行うと共に、その応用として高エネルギー粒子生成技術や高速点火型レーザー核融合に対する実験提案を行うことを目的とした。

具体的には、荷電粒子ビーム不安定性からの非線形発展の解析、電磁乱流の発展による構造形成とそれに伴う異常輸送係数の評価、無衝突衝撃波の形成とそれによるイオン加速といったレーザープラズマ物理的現象が強磁場下でどの様に変化するのか、磁場が無いときには見られないような現象がどの様に起こるのかなどを調べる。さらに高速点火核融合において電子ビーム発散を外部磁場により抑制して加熱効率を増大させる効果を定量的に評価し、将来の点火実証実験における点火要件を明らかにすることも目的の一つとした。

3. 研究の方法

研究は主としてこれまで研究代表者や研究分担者などが開発してきた相対論プラズマ解析用計算機シミュレーションコードを用いてシミュレーション研究を行い、その出力データを元に新しい理論の構築を行うという方法を用いた。

相対論レーザープラズマ相互作用や荷電粒子ビームとプラズマとの相互作用をシミュレーションするには、荷電粒子の非平衡性の取り扱いが重要である。すなわちレーザー電磁場並びに印加磁場や自発電磁場をマクスウェル方程式を用いて計算すると同時に荷電粒子の速度分布を取り扱う必要がある。

そこで、シミュレーションは主として荷電粒子の個別運動を直接計算する粒子コードか、特定の粒子、例えばプラズマに突入する高速電子のような平衡状態から外れた状態を長時間保つ粒子のみ粒子法で解析し、それ以外の統計的平衡性が保たれている粒子成分を流体として解析する、粒子・流体ハイブリッドコードを用いた。さらに、高速点火核融合への効果を実証するための解析には、爆縮から点火までの過程をそれぞれの解析領域に最適な手法で解析するコードを組み合わせ合わせた統合コードを用いた。

4. 研究成果

本研究では、研究代表者および2名の研究分担者がそれぞれ分担して、以下の3テーマにつき研究の成果を上げた。

(1) 電子ビーム不安定性に対する外部磁場の抑制効果と非線形発展による構造形成

本研究の開始時において外部磁場による電子ビーム不安定性の抑制効果について、ビーム電子を粒子、背景プラズマを流体として取り扱うハイブリッドコードを用いて解析をしていたところ、興味深い現象を発見した。この結果を示したのが図1の(a), (b)である。

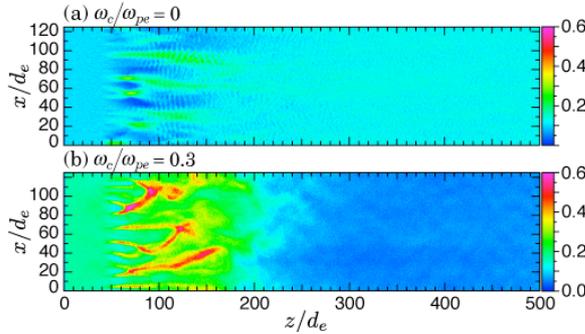


図1. 電子ビーム不安定性の非線形発展における磁場の効果

この図は、プラズマ中をz方向（横方向）に左から右へ流れる電子ビームのある時刻での密度を示している。ここで、 ω_c は外部磁場による電子サイクロトロン周波数、 ω_{pe} は背景プラズマ密度で評価される電子プラズマ周波数である。すなわち、規格化値 ω_c/ω_{pe} は外部磁場の強さを示す指標である。このシミュレーションでは、電子ビームの初期密度が背景プラズマの1/10で計算したものであり、図の色は電子ビーム密度を背景プラズマ密度で規格化した値を示している。

図1(a)は外部磁場がない場合 ($\omega_c/\omega_{pe}=0$) である。電子ビームが進むにつれて、ワイベル不安定性により電子ビーム密度の横方向の変調が起こるが、変調されたビームは電流に伴う電磁力で引き合ってマーキングする。このため電子ビームの横方向の速度拡がりが大きくなり、これが高速点火核融合ではコアプラズマへのエネルギー伝達効率を下げる一因となっている。そこで、 $\omega_c/\omega_{pe}=1$ となるような充分高い外部磁場を印加すると、マーキングの効果が抑制されて電子ビームの流れが層流に近くなることを確認した。

ところが、 $\omega_c/\omega_{pe}=0.3$ のとき (図1(b)) のように、外部磁場がそれほど大きくないとき、図のように電子ビームがせき止められ、電子ビーム密度が背景プラズマと同程度まで増加する“よどみ” (スタグネーション) が生じる。本研究では、このスタグネーションが起こる原因を詳細に探ることと、それが背景プラズマに与える影響について調べた。

まず、スタグネーションが起きている原因を探るため、図1(b)の時点での各物理量を進行方向に対して横方向 (図のx方向) に平均した値を計算した。結果を図2に示す。

図のように、電子ビームのスタグネーションによりビーム密度 (n_b : 点線) が盛り上がっている先に振動する横方向磁場 (B_x : 緑線, B_y : 赤線) が見られる。それらの波は B_x と B_y で位

相が90度ずれていることから、この波が円偏光波 (ホイッスラー波) であることがわかる。すなわち、何らかの原因で大振幅のホイッスラー波が発生し、そのポン德罗モーティブ力で電子ビームが制動を受けてよどむという結論に至った。

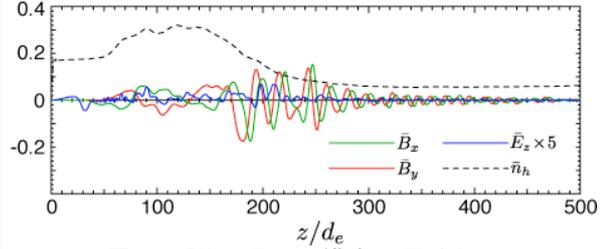


図2. 諸物理量の横方向平均値

この電子ビーム流をせき止めるような大振幅ホイッスラー波がなぜ発生するかの原因をさまざまな方向から調べた結果、次のようなシナリオであると結論付けた。

- (a) まず、強磁場下で不安定な斜め伝播モードが成長する。この斜め伝播モードは磁場中なので楕円偏光である。
- (b) 次に、斜め伝播モードが非線形結合により、大強度ホイッスラー波に成長する。

このシナリオを確認するためには、斜め伝播モードが起こりにくい状態にしてみればよい。そこで、ビーム方向の領域は維持したまま横方向の計算領域を小さくした計算を行ったところ、よどみが起こらず、電子ビームがスムーズに流れることが確認された。これにより、上記の仮定が実証されたので、以上をまとめて論文として公表した[論文5]。

さて、ここまでのシミュレーションは電子ビームと背景プラズマ中の電子のみの運動で解析してきたため、この大振幅ホイッスラー波によるよどみの効果がどの様な形で背景イオンに影響を与えるかまではわからない。そこで、最終年度よりイオン運動を含んだ解析を開始し、スタグネーションにより電子ビーム密度が上昇したときに、イオンがどのような影響を受けるかを調べた。この場合、ハイブリッドコードではイオン加速の解析が不十分なため、イオンも粒子として取り扱う必要がある。しかし、流体コードと異なり、粒子コードで開放境界条件を導入するのは容易ではない。このため、開放境界粒子コードへの改良が一つの問題となった。この問題はまだ完全に解決したとは言えず、今後も継続して改良を加えて、イオン加速と無衝突衝撃波形成の可能性などを調べる予定である。

(2) 強磁場下での無衝突衝撃波形成過程の解析とイオン加速

無衝突衝撃波の形成過程において、衝撃波の伝播方向に加えた外部磁場の効果を理論とシミュレーションにより研究した。無衝突衝撃波の形成過程について、ワイベル不安定性と2流体不安定性に起因する電磁乱流により、電子とイオンが強く散乱されることを

明らかにし、乱流の振幅と波長が外部磁場を印加することにより、前項(1)で議論した機構により増幅されることが明らかになった。その結果、外部磁場中ではより強く電子熱伝導が抑制され、衝撃波前後で電子温度のジャンプが生じるとともに、イオンも強い乱流粘性により衝撃波面で運動エネルギーが熱エネルギーに変換されることを明らかにした。

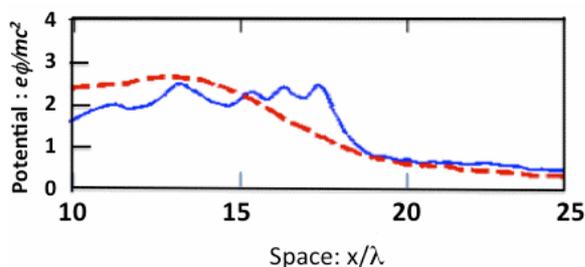


図3. 無衝突衝撃波の構造

図3は、高強度レーザーをプラズマに照射したときにプラズマ内部に生じる無衝突衝撃波の構造をレーザー照射方向(x方向)の電位分布で示したものである。ここで、青実線は外部磁場が無いとき、赤破線は外部磁場があるときの結果を示している。図より、磁場中で長波長の乱流により衝撃波の構造がデバイ長よりも長いスケールで変化することがわかる。(注: 相対論プラズマではデバイ長はスキン長 $\lambda=c/\omega_{pe}$ 程度である)

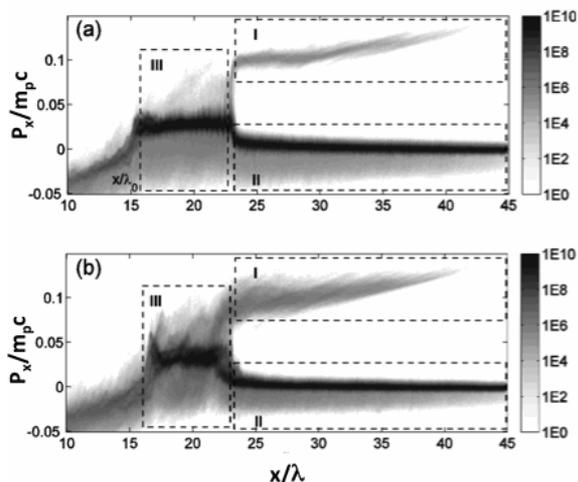


図4. 衝撃波によるイオン加速

図4は、(a)磁場が無いときと、(b)あるときのイオンのレーザー照射方向の速度分布の比較である。図より衝撃波(IとIIIの境界)の下流(I)で磁場を加えた方がより強いイオン加熱が起きていることがわかる。この結果の一部は論文として出版された[論文9]。

最終年度には、図4(b)に見られる様な衝撃波面におけるイオンの加速とイオンビームの散乱の機構を調べ、イオンビームの異常エネルギー緩和過程物理を明らかにした。関係するフランスLULIのFuchsらの実験結果の説明に成功し、論文にまとめた[論文1]。

また、プロトンビームとプラズマの相互作用

用のシミュレーションを行い、イオンビームと高速電子ビームによる2流体不安定性によりプラズマが乱流状態になりその中で無衝突衝撃波が発生することも見出した。

上記結果をさらに電子ビームとイオンの相互作用を含む場合に拡張し、相対論電子とイオンビームが共存する場合、電子ビームのフィラメント化により生じる静電場により、イオンビームもフィラメント化し、強い散乱を受けることを発見している。今後これらの結果を論文としてまとめる予定である。

(3) 高速点火型レーザー核融合での強磁場による高速電子のガイディングの検証

本研究開始までの成果により、ビームガイドにはキロテスラ級の磁場が必要であること、また爆縮により形成される磁場配位は電子ビーム生成点よりもコア領域の磁場が強くなるミラー配位となるが、ミラー比が4程度であればガイディング効果に加えビーム収束効果により大幅な加熱効率向上が期待されることが示されている。一方、ミラー比が20を超える場合、ミラー反射による電子反射効果が顕著になり、磁場を加えない場合よりも電子輸送効率が低下することが示されていた。本研究では、外部印加のキロテスラ級磁場による大発散角電子ビームガイディング効果を爆縮からコア加熱までの統合シミュレーションにより評価した。磁場印加下での爆縮シミュレーションの結果、燃料を従来の中空のシェルから中実球にすることにより最大圧縮時のミラー比を3程度にまで低減できることを示した。

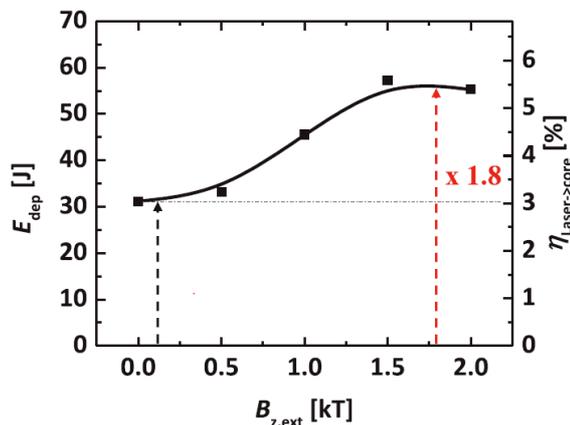


図5. 加熱実証対象解析におけるコア加熱エネルギーの印加磁場強度に対する依存性

中実球爆縮プロファイルを用いた加熱計算では、磁場印加により加熱効率が最大80%程度増加した(図5)。また、加熱効率は加熱レーザーを最大圧縮のタイミングで入射した場合が最も高くなった。一方、最大圧縮より100~200ps早いタイミングで入射の方が、内向ショックを強めることにより、プラズマイオンの平均温度や中性子出力が高くなることも示し、より効率的な点火方式への

可能性を示唆した。これらの結果は、論文としてまとめた[論文 6]。また、その有効性は2016年度統合実験により実証された。

高速点火方式による核融合点火には、現行実験で用いている加熱レーザーよりも100倍程度の高エネルギーが必要とされている。以上の結果を元に、将来の点火実証のために要求されるレーザースペックの評価や、現行実験の位置づけ、点火実証に向けたスケーリング則取得等のためには、目標となる点火実証条件を明らかにする必要がある。そこで、本研究後半期より、点火実証クラスの高強度レーザーによる高速電子ビーム生成と印加磁場によるビームガイドング効果や、点火に要する電子ビームエネルギーの低減化に対する印加磁場効果の評価も開始した。

相対論電磁粒子コードを用い、点火実証級の $5 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ レーザー照射により生じる電子ビーム特性評価、並びにガイドングに要する磁場強度評価を行った。現行実験 ($\sim 10^{19} \text{W/cm}^2$) に比べ、レーザー強度が1桁高くなることから、生成電子のエネルギーが高くなった。その結果、現行加熱実証実験での印加磁場強度 ($\sim 1 \text{kT}$) よりも一桁大きな磁場 (10kT) がガイドングに必要であることが示された(図6)。

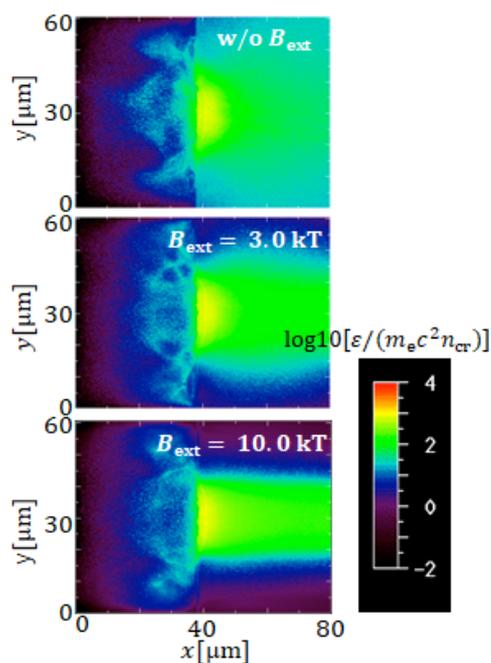


図6. 点火実証級の高強度レーザーにより生成した高エネルギー電子のエネルギー密度の空間分布

図6上のように、印加磁場無しの場合は y 方向に電子が広がっているのに対し、図6下のように 10kT 磁場印加の場合はビーム径は広がらずにほぼまっすぐ伝播している。一方で、 10kT クラスの磁場を印加した場合でも、レーザーから電子ビームへのエネルギー変換効率やエネルギースペクトルに、磁場の影響はほとんどないことが分かった。ただし、生成電子の大半が 10MeV 以上の高エネルギー

一成分であり、高効率加熱のためにはこの成分を抑え、より低エネルギー成分を増加させる必要があることが示された。これらの結果は、国内学会で発表するとともに、更なる解析を進めている。今後、加熱用レーザーの短パルス化や、レーザー強度低減化等により電子エネルギーの低減化を図り、コア加熱から核燃焼までの統合計算による点火条件評価を進める予定である。

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 11 件)

1. K. Mima, J. Fuchs, T. Taguchi 他, "Theory and Experiments on Collective Scattering of Laser Produced Intense Proton Beam in Plasmas", *Matter and Radiation at Extremes*, 3 (2018) 127-134. 査読有り
DOI: 10.1016/j.mre.2017.12.004
2. N. Iwata, S. Kojima, Y. Sentoku, M. Hata, and K. Mima, "Plasma density limits for hole boring by intense laser pulses", *Nature Communications* 9:623, (2018) 1-7. 査読有り
DOI: 10.1038/s41467-018-02829-5.
3. H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina 他, "Compression and electron beam heating of solid target under the external magnetic field for fast ignition", *Nuclear Fusion* 57(2017) 086009-1-6. 査読有り
DOI: 10.1088/1741-4326/aa74f0
4. T. Asahina, H. Nagatomo, A. Sunahara, T. Johzaki, M. Hata, K. Mima, 他, "Validation of thermal conductivity in magnetized plasmas using particle-in-cell simulations", *Phys. Plasmas* 24 (2017) 042117-1-6. 査読有り
5. T. Taguchi, T. M. Antonsen Jr., K. Mima, "Stagnation of electron flow by a nonlinearly generated whistler wave", *J. Plasma Phys.* 83(2017) 905830204-1-10. 査読有り
DOI: 10.1017/S0022377817000204
6. T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, Y. Sentoku, M. Hata, T. Taguchi, 他, "Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion *Plasma Phys. and Controlled Fusion*, 59 (2017) 014045-1-8. 査読有り
DOI: 10.1088/0741-3335/59/1/014045
7. A. Yogo, K. Mima, N. Iwata, S. Tosaki, 他, "Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses", *Scientific Reports* 7 (2017) 424511-10. 査読有り
DOI: 10.1038/srep42451
8. H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina, K. Matsuo, 他, "An optimum design of

- implosion with external magnetic field for electron beam guiding in fast ignition”, J. Phys.: Conf. Series 717 (2016) 012041-1-4. 査読有り
DOI: 10.1088/1742-6596/717/1/012041
9. K. Mima, Q. Jia, H. B. Cai, T. Taguchi, 他, “Intense laser driven collision-less shock and ion acceleration in magnetized plasmas”, J. of Phys.: Conf. Series, 717 (2016) 012070-1-4. 査読有り
DOI: 10.1088/1742-6596/717/1/012070
10. T. Taguchi, T. M. Antonsen, Jr., K. Mima, “Suppression of beam merging and hosing instabilities in the magnetized fast ignition”, J. of Physics: Conf. Series 688 (2016) 12117-1-4. 査読有り
DOI: 10.1088/1742-6596/688/1/012117
11. T. Johzaki, T. Taguchi, Y. Sentoku 他, “Control of an electron beam using strong magnetic field for efficient core heating in fast ignition”, Nuclear Fusion 55 (2015) 053022-1-7. 査読有り
DOI: 10.1088/0029-5515/55/5/053022

[学会発表] (計 17 件)

1. 田口俊弘, “Structure Formation due to Nonlinearly Amplified Whistler Wave in Electron Beam Propagation under a Strong Magnetic Field”, IFSA2017 (2017).
2. 田口俊弘, “Ion acceleration driven by a relativistic electron beam under a strong magnetic field”, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2017).
3. 三間 圀興, “Efficient Ion Acceleration by Colliding Collision-less Shock in NRCD Plasmas”, IFSA2017 (2017)
4. 城崎知至, “Demonstration of Effective Core Heating in Magnetized Fast Ignition Laser Fusion and Prospect for Ignition”, Plasma Conference (2017).
5. 城崎知至, “Core heating dynamics in magnetized fast ignition”, IFSA2017 (2017).
6. 城崎知至, “Demonstration of Efficient Core Heating of Magnetized Fast Ignition in FIREX project”, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2017).
7. 三間 圀興, “Efficient ion acceleration by Multi-picosecond kJ LFEX laser”, 13th Direct Drive and Fast Ignition Workshop (2017).
8. 田口俊弘, “Nonlinear structure formation in a beam plasma interaction under a strong magnetic field”, 12th Asia Pacific Plasma Theory Conference (2016).
9. 田口俊弘, “Excitation of large whistler wave in electron beam-plasma interaction”, 13th Asia Pacific Physics Conference (2016).
10. 三間 圀興, “A new model for TNSA in the multi-ps laser-foil interactions”, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2016).
11. 城崎知至, “Integrated Simulation for Magnetized Fast Ignition Laser Fusion”, 12th Asia Pacific Plasma Theory Conference (2016).
12. 城崎知至, “Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion”, 43rd European Physical Society Conference on Plasma Physics (2016).
13. 三間 圀興, “Ion acceleration with kJ picosecond laser LFEX”, International workshop on high energy density physics with intense ion and laser beams (2016).
14. 田口俊弘, “Nonlinear Amplification of the Whistler Wave in a Magnetized Relativistic Beam-Plasma Interaction”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2015).
15. 三間 圀興, “Ultra intense laser driven collision-less shock and ion acceleration”, OPIC2015 (2015).
16. 城崎知至, “Electron Beam Guiding by External Magnetic Fields in Imploded Fuel Plasma”, IFSA2015 (2015).
17. 城崎知至, “Magnetic Guiding of Electron Beam in Imploded Spherical Solid Targets”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2015).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田口 俊弘 (Toshihiro Taguchi)
 摂南大学・理工学部・教授
 研究者番号: 90171595

(2) 研究分担者

三間 圀興 (Kunioki Mima)
 光産業創成大学院大学・光産業創成
 研究科・特任教授
 研究者番号: 30033921

城崎 知至 (Tomoyuki Johzaki)
 広島大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 10397680

(3) 連携研究者

坂上 仁志 (Hitoshi Sakagami)
 核融合科学研・ヘリカル研究部・教授
 研究者番号: 30254452

長友 英夫 (Hideo Nagatomo)
 大阪大学・レーザー科学研究所・准教授
 研究者番号: 10283813

砂原 淳 (Atsushi Sunahara)
 Purdue 大学・CMUXE・客員教授
 研究者番号: 00370213