

Title	高強度レーザー生成プラズマの粒子とエネルギーの輸送に関する運動論的シミュレーション研究
Author(s)	朝比奈, 隆志
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/72407
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (朝比奈 隆志)

論文題名 高強度レーザー生成プラズマの粒子とエネルギーの輸送に関する運動論的シミュレーション研究

論文内容の要旨

高強度レーザー技術の著しい進歩による照射強度の向上に伴い、レーザー生成プラズマに関する物理的課題も新たに生み出された。レーザーが高強度であるほど電子は高エネルギーとなり、長い平均自由行程を持つ電子の働きが顕著となる。このようなプラズマでは流体近似が破綻し、運動論的な取り扱いが必要である。強い電磁場とプラズマの非線形相互作用のために解析的アプローチは困難であり、計算機シミュレーションを用いる必要がある。これに加えて、近年ではキロテスラ (kT) 級の強磁場を組み合わせることで新たな研究分野がもたらされている。従来、sub-kT 級の準定常磁場が自己生成することは指摘されてきたが、最近の研究でkT級の外部印加磁場の生成に成功したことから強磁場の効果を人為的に導入することが可能となった。同時に、磁場の存在によりプラズマの非等方的な振る舞いが強くなるため、運動論的シミュレーション研究が一層重要となる研究分野である。

本論文では、非相対論的強度から相対論的強度までの様々な高強度レーザー生成プラズマの粒子とエネルギーの輸送について、流体的現象と運動論的現象との相互作用を軸に関連する現象を運動論的シミュレーションを用いて解明した。本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、本論文の背景として高強度レーザー技術の進展、運動論および流体モデルの概要、並びに研究の意義について述べた。

第2章では、本論文で主に用いた運動論的シミュレーション手法であるparticle-in-cell (PIC)法について説明した。

第3章では、磁化プラズマの電子熱伝導モデルの検証について述べた。近年活発化している磁化プラズマの流体シミュレーションに欠かせない電子熱伝導モデルにはBraginskii, Ji-Held, Epperlein-Hainesの3つのモデルが存在するが、それぞれが不確実性を持つ。この研究では、Braginskii, Epperlein-Haines, Ji-Heldの3種類の電子熱伝導モデルの検証をPICシミュレーションを用いて行った。シミュレーション結果からJi-Heldモデルが最も良い精度を持つことを明らかにした。また、シミュレーションから得られた分布関数より、比較的遅い電子が熱伝導に関与していることを明らかにし、Ji-Heldモデルが良い精度を持った理由として高次のSonine多項式が低速電子を良く表現するためであることを明らかにした。

第4章では、横磁場中のアブレーションプラズマにおける高域混成共鳴吸収による熱輸送の増加について述べた。kT級横磁場中のレーザーにはO (ordinary)モードおよびX (extraordinary)モードの2種類が存在し、中でもXモードのエバネッセント波は高域混成共鳴により運動論的電子を発生することが分散関係から予想される。この研究ではレーザーアブレーションプラズマに近い条件での熱輸送の特性の比較をPICシミュレーションを用いて行った。Xモードの照射による共鳴により高速電子が著しく発生することを確認し、それが初期に共鳴位置にエバネッセント波が届きにくい条件であっても、光圧による電子密度の急峻化によりエバネッセント波が届き、共鳴が起こることを明らかにした。また、発生した高速電子はバルク電子による輸送構造を変化させないまま著しい熱流束を発生させ、全熱流束を増加させることで流体運動に影響する可能性を示した。

第5章では、 10^{18} W/cm²以上のレーザーのプリパルスを利用したレーザー駆動イオン加速の効率化と、中性子源開発への応用について述べた。パルスレーザーではピーク強度に対して数桁以上低い強度と長いパルス幅を持つプリパルスと呼ばれる成分がメインパルスに先行して存在する。この研究では、プリパルスにより表面に生成するプリプラズマがレーザーの吸収率を向上させることに加え、裏面に衝撃波が到達するタイミングでメインパルスが入射されることでターゲットの両面のプラズマ条件を最適化し、その結果として高コントラストレーザーよりも効率的なイオン加速が可能であることを明らかにした。さらに、この加速イオンを用いた中性子源開発において既存の加速器型中性子源相当の平均中性子発生量を達成できる可能性を示し、減速体の厚さを用いてパルス幅を最適化できる可能性を示した。

第6章では、本論文の結論を述べ、総括を行った。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (朝 比 奈 隆 志)	
論文審査担当者	(職) 氏 名
	主 査 (教授) 重森 啓介
	副 査 (教授) 北田 孝典
	副 査 (准教授) 帆足 英二
	副 査 (准教授) 長友 英夫

論文審査の結果の要旨

高強度レーザー技術の著しい進歩による照射強度の向上に伴い、レーザー生成プラズマに関する物理的課題も新たに生み出された。レーザーが高強度であるほど電子は高エネルギーとなり、長い平均自由行程を持つ電子の働きが顕著となる。このようなプラズマでは流体近似が破綻し、運動論的な取り扱いが必要である。強い電磁場とプラズマの非線形相互作用のために解析的アプローチは困難であり、計算機シミュレーションを用いる必要がある。これに加えて、近年ではキロテスラ (kT) 級の強磁場を組み合わせることで新たな研究分野がもたらされている。従来、sub-kT 級の準定常磁場が自己生成することは指摘されてきたが、最近の研究で kT 級の外部印加磁場の生成に成功したことから強磁場の効果を人為的に導入することが可能となった。同時に、磁場の存在によりプラズマの非等方的な振る舞いが強くなるため、運動論的シミュレーション研究が一層重要となる研究分野である。

本論文では、高強度レーザー生成プラズマの粒子とエネルギーの輸送について、流体的現象と運動論的現象との相互作用を運動論的シミュレーションを用いて解明した。本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の背景として高強度レーザー技術の進展、運動論および流体モデルの概要、並びに研究の意義について述べた。

第 2 章では、本論文で主に用いた運動論的シミュレーション手法である particle-in-cell (PIC) 法について説明した。

第 3 章では、磁化プラズマの電子熱伝導モデルの検証について述べた。近年活発化している磁化プラズマの流体シミュレーションに欠かせない電子熱伝導モデルには Braginskii, Ji-Held, Epperlein-Haines の 3 つのモデルが存在するが、それぞれが不確実性を持つ。この研究では、Braginskii, Epperlein-Haines, Ji-Held の 3 種類の電子熱伝導モデルの検証を PIC シミュレーションを用いて行った。シミュレーション結果から Ji-Held モデルが最も良い精度を持つことを明らかにした。また、シミュレーションから得られた分布関数より、比較的遅い電子が熱伝導に関与していることを明らかにし、Ji-Held モデルが良い精度を持った理由として高次の Sonine 多項式が低速電子を良く表現するためであることを明らかにした。

第 4 章では、横磁場中のアブレーションプラズマにおける高域混成共鳴吸収による熱輸送の増加について述べた。kT 級横磁場中のレーザーには 0 (ordinary) モードおよび X (extraordinary) モードの 2 種類が存在し、中でも X モードのエバネッセント波は高域混成共鳴により運動論的電子を発生することが分散関係から予想される。この研究ではレーザーアブレーションプラズマに近い条件での熱輸送の特性の比較を PIC シミュレーションを用いて行った。X モードの照射による共鳴により高速電子が著しく発生することを確認し、それが初期に共鳴位置にエバネッセント波が届きにくい条件であっても、光圧による電子密度の急峻化によりエバネッセント波が届き、共鳴が起こることを明らかにした。また、発生した高速電子はバルク電子による輸送構造を変化させないまま著しい熱流束を発生させ、全熱流束を増加させることで流体運動に影響する可能性を示した。

第5章では、 10^{18} W/cm²以上のレーザーのプリパルスを利用したレーザー駆動イオン加速の効率化と、中性子源開発への応用について述べた。パルスレーザーではピーク強度に対して数桁以上低い強度と長いパルス幅を持つプリパルスと呼ばれる成分がメインパルスに先行して存在する。この研究では、プリパルスにより表面に生成するプリプラズマがレーザーの吸収率を向上させることに加えて、裏面に衝撃波が到達するタイミングでメインパルスが入射されることによりターゲットの両面のプラズマ条件を最適化し、その結果として高コントラストレーザーよりも効率的なイオン加速が可能であることを明らかにした。さらに、この加速イオンを用いた中性子源開発においてRANS相当の平均中性子発生量を達成できる可能性を示し、減速体の厚さを用いてパルス幅を最適化できる可能性を示した。

第6章では、本論文の結論を述べ、総括を行った。

以上のように、本論文は高強度レーザー生成プラズマにおける運動論的な効果をシミュレーションによって詳細に解析し、その輸送機構や強磁場化条件におけるレーザー吸収メカニズムに関する新たな知見を与えた。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。