



Title	A theoretical and numerical study of isochoric heating in relativistic laser produced plasmas
Author(s)	東, 直樹
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/87812
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、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (東 直 樹)	
論文題名	A theoretical and numerical study of isochoric heating in relativistic laser produced plasmas (相対論的レーザー生成プラズマの等積加熱に関する理論的研究)
論文内容の要旨	
強いレーザー光を物質に照射すると物質は加熱されプラズマ化する。特に、電子を瞬間的に相対論的エネルギーへ加速する短パルス高強度レーザー光（相対論的レーザー光）を固体物質に照射する際の加熱過程は、プラズマ化した物質が膨張し飛散するよりも速い過程であるため等積加熱過程と呼ばれる。このような等積加熱過程では、まず非線形な相対論的レーザー・プラズマ相互作用により非熱的な相対論的エネルギーを持つ高速電子ビーム（相対論的電子ビーム）が生成される。相対論的レーザー光のエネルギーは、相対論的電子ビームの生成と電離やクーロン衝突などの原子過程を介してプラズマへ変換される。さらに、相対論的電子ビームの電流はメガアンペアを超えるためプラズマ中に強い電場・磁場が励起され、プラズマの集団効果にも相互に影響を及ぼしながら、相対論的電子ビームのエネルギーはプラズマ内部へ輸送される。このように非局所性を持った相対論的電子ビームによる加熱がもたらす非平衡な高温・高密度プラズマの形成過程の解明が、星の内部のような極限状態の物性を調べる高エネルギー密度科学などの基礎研究や、高輝度 X 線・中性子・高エネルギーイオンという新たなレーザー駆動量子線源の開発などの応用研究に寄与すること、究極的にはレーザー核融合実現へ展開することが期待されている。 チャープパルス増幅法の発明によりレーザー光を短パルス化することが可能となり、光の集光強度が飛躍的に向上した。圧力がギガバールを超える相対論的レーザー光は、固体密度以上の高密度のプラズマを 1 千万度以上の高温に加熱できるという潜在性があることから、相対論的レーザー光と高密度プラズマの相互作用、特に相対論的電子ビームによるエネルギー輸送の研究が世界各地で精力的に行われてきた。近年、相対論的強度かつピコ秒パルスの大出力レーザーを用いた等積加熱実験において、相対論的電子ビームによるエネルギー輸送のみでは説明が困難なほど高温・高密度な高エネルギー密度状態のプラズマが生成されたことが X 線計測結果から示唆された。レーザー光の照射時間であるピコ秒の時間スケールにおいて、従来の等積加熱の物理的描像からは予測されなかった高速な熱拡散が駆動され、レーザー光照射面近傍から 10 μm 以上の深い領域において、高密度プラズマが電子温度数千万度以上に加熱されたと推定される。 本研究では、プラズマ粒子シミュレーションに 2 体クーロン衝突モデルを組み込み、相対論的レーザー光を含む電磁場とプラズマの非線形相互作用および相対論的電子ビームのエネルギー輸送を自己無撞着に計算することで、ピコ秒の時間スケールにおける固体物質の等積加熱過程の数値シミュレーションを行った。その結果、従来の等積加熱の物理モデルの予測通り、相対論的電子ビームが固体領域に輸送されジュール加熱やドラッグ加熱が定常的に起こり、空間的にほぼ一様に加熱されていることを確認した。その一方で、ピコ秒の時間スケールにおいて熱拡散が、他の加熱機構を凌駕しつつ高温化したレーザー光吸収領域から高速に伝播することで、高密度プラズマが局所的に数千万度まで加熱されることを明らかにした。 従来の等積加熱の物理モデルでは、高密度プラズマ内部における相対論的電子ビームのエネルギー輸送に焦点が置かれていた。本研究は、レーザー光吸収領域におけるプラズマの時間発展を考慮することで、高密度プラズマ内部においてピコ秒の時間スケールで「高速熱拡散」が生じること、また、その伝播速度が時間によらず一定であることを導く新たな等積加熱の物理モデルを提案した。さらに、等積加熱過程のエネルギー方程式の数値解析を行い、提案した物理モデルのパラメーター依存性などを検証し、その妥当性を確認した。 以上、本研究は、相対論的レーザー光による固体物質の等積加熱過程という非局所的にエネルギーが輸送される非平衡な高エネルギー密度プラズマ形成過程において、レーザー光吸収領域から高速に伝播する「高速熱拡散」という新たな物理的描像を与え、その物理的特性を明らかにし、従来の物理的描像では説明が困難であった現象に説明を与えた。本成果は「相対論的レーザー光を使っていかに効率よく物質を等積加熱できるか」について関心のあ	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (東 直 樹)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 千徳 靖彦
	副 査	教授 中井 光男
	副 査	教授 藤岡 慎介
	副 査	教授 越野 幹人
	副 査	准教授 岩田 夏弥

論文審査の結果の要旨

強いレーザー光を物質に照射すると物質は加熱されプラズマとなる。近年の高強度レーザーは、固体物質の体積を維持したままプラズマ化し1千万度以上の高温に加熱する能力を持つ。このような高強度レーザーによる加熱を等積加熱と呼ぶ。等積加熱は高速電子流による非局所的加熱と熱拡散が複合する過渡的な非平衡現象である。等積加熱の加熱機構を理解することができれば、実験室で恒星内部に相当するような高温・高密度プラズマを作り出すことが可能となり、高エネルギー密度科学などの学術的研究や、レーザー駆動高輝度X線・中性子・高エネルギーイオンなど新たな量子線源への応用研究、究極的にはレーザー核融合の実現などへの展開が期待される。

本論文は7章で構成されており、第1章は研究の背景として、等積加熱の応用としてレーザー核融合の概要を記述している。

第2章は非平衡プラズマのダイナミクスを計算するために援用したプラズマ粒子コードの概要、特に加熱計算に必要なクーロン衝突モデルの詳細を説明している。

第3章は等積加熱のこれまでの理論的解釈について、特に相対論的レーザーの吸収及び高速電子の発生過程、また高密度プラズマ内部の加熱機構に関して説明し、最新の実験結果に対する従来理論の問題点を指摘している。

第4章は、1次元プラズマ粒子コードによって、等積加熱のシミュレーションを行い、相対論的レーザーによる加熱時間が凡そピコ秒を超えると、従来の物理モデルでは予測し得なかった高速に進行する熱拡散が発現することを明らかにした。様々な条件によるシミュレーションを行い高速熱拡散過程の特性、特に発現の時間スケールや熱拡散の伝播速度を明らかにした。

第5章では、前章でのシミュレーション結果を説明するため、高強度レーザー加熱で必然的に存在する低密度プラズマでのレーザー吸収・加熱過程を含めた新たな物理描像で等積加熱を捉え、高速熱拡散の伝播速度や時間スケールを導く理論を提示した。

第6章は、高密度プラズマの加熱を記述する偏微分方程式を同様の物理描像に対して数値的に解き、等積加熱の時間発展に対する理論的予測の正しさ及び多次元性を検証した。

第7章は本研究のまとめであり、本研究成果が等積加熱の理解を一層進めるとともに、高エネルギー密度科学及び核融合を含めた応用研究の進展に大きく貢献するものであることが述べられている。

以上、本研究は、高強度レーザー光による固体物質の等積加熱という、非局所的にエネルギーが輸送される非平衡状態において、レーザー光が吸収される加熱領域から高速で伝播する「高速熱拡散」という新たな物理的描像を与え、その特性を初めて明らかにした。本成果は「相対論的レーザー光を使っていかに効率よく物質を加熱できるか」について、関心のある理学・工学の別を問わない広範な分野の発展に資する成果である。以上により、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。