

Title	超高強度レーザー生成プラズマ中の高速電子輸送に関するX線分光診断法の開発
Author(s)	犬伏, 雄一
Citation	大阪大学, 2007, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/48553
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。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

氏名	犬伏雄一
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 21201 号
学位授与年月日	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科電気工学専攻
学位論文名	超高強度レーザー生成プラズマ中の高速電子輸送に関する X 線分光診断法の開発
論文審査委員	(主査) 教授 西村 博明 (副査) 教授 伊藤 利道 教授 熊谷 貞俊 教授 伊瀬 敏史 教授 辻 毅一郎 教授 佐々木孝友 教授 杉野 隆 教授 中塚 正大 教授 斗内 政吉 教授 西原 功修

論文内容の要旨

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程において行った「超高強度レーザー生成プラズマ中の高速電子輸送に関する X 線分光診断法の開発」に関する研究成果をまとめたものである。

本研究は、超高強度レーザー生成プラズマ中のエネルギー輸送機構を解明するための X 線分光診断法を新たに開発することを目的として行われた。

第 1 章では、高速点火方式のレーザー核融合の原理と研究の現状、超高強度レーザー生成プラズマの特徴についてまとめ、本研究の意義を述べた。

第 2 章では、超高強度レーザー生成プラズマから放射される X 線の特性と、プラズマのモデリング、X 線分光法によるプラズマの電子温度・密度診断法の原理について述べた。また、筆者が本研究を通じて開発を行い、超高強度レーザー生成プラズマ診断に用いた種々の X 線結晶分光器について、その特徴と設計法を述べた。

第 3 章では、平板ターゲットに相対論的強度のレーザーを照射し生成されたプラズマから放射される X 線を分光計測し、背景電子温度診断を行った。ここでは、 $\text{He}\alpha$ 線、 $\text{Ly}\beta$ 線といった共鳴線に加えて、部分電離イオンから放射されるシフト $\text{K}\alpha$ 線を用いることで、広範な電子温度領域を診断可能にした。実験の結果、超高強度レーザーによる加熱は極めて局所的であることが明らかとなった。また、平板ターゲットの裏面について同様の実験を行った結果、 $\text{He}\alpha$ 線の発光の様子からターゲットの裏面はターゲット内部よりも高温になっていることが観測された。これらの結果から、超高強度レーザー照射平板ターゲットは、ターゲット表面が最も高温であり、内部では比較的低温、更に裏面では温度が再び上昇するという背景電子温度プロファイルを有することが明らかとなった。

第 4 章では、偏光 X 線分光計測によるプラズマ中の高速電子速度分布診断法の開発を行った。偏光 X 線を分光計測することで、電子速度分布の診断が可能であり、本研究では $\text{He}\alpha$ 線を取り扱った。偏光 X 線分光実験に用いるレーザーについて考察を行った結果、 $\text{He}\alpha$ 線のエネルギーとプラズマの背景電子温度によって、観測される X 線の偏光度が変化することが明らかとなり、この結果を基に塩素をレーザーとした多層平板ターゲットを用いた実験を実施し、プラズマ中から放射される X 線の偏光度の空間分布を取得した。実験で得られた偏光度は、ターゲットの表面から深くなるほど高くなり、その結果、高速電子速度分布は、表面ではパンケーキ型、内部では葉巻型であることが

明らかとなった。更に、3次元の電子速度分布を取り扱う新たな偏光分光モデルを構築し、粒子シミュレーションを用いて解析を行い、実験結果と定性的に一致することが確かめられた。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果の総括を行った。

論文審査の結果の要旨

本論文は、レーザー駆動高速点火核融合における高速電子の輸送とエネルギー付与過程に関連し、被加熱プラズマ領域の微細な空間分解情報をもたらすと同時に、高速電子速度分布の直接観測を可能とするX線分光診断法の開発によって得られた研究成果をまとめたものである。従来、高速点火核融合プラズマの診断には、高速電子や核反応中性子など粒子計測が主流であったが、粒子には速度分布があるため、プラズマ加熱の様子を高時間分解で診断することが困難であり、さらに、プラズマ周辺で生成する強力な電磁場による偏向をうけるため、空間分解情報を提供するためにも制限があった。これらの課題を解決するため、X線を軸とした新しい診断法が求められていた。本研究による主な成果は以下の通りである。

- (1) 超高強度レーザー生成プラズマにおける背景電子温度診断を行うため、トレーサから放射される共鳴線に加えて、部分電離イオンから放射されるエネルギーシフト $K\alpha$ 線に着目した診断を実施し、広範な温度領域を診断可能にしている。相対論プラズマ発生照射強度下で、トレーサを含む多層ターゲット照射実験を行った結果、ターゲット表面と裏面における極めて薄い領域のみが高温状態にあり、古典的熱伝導から予想されるよりも遙かに局所過熱状態にあることを明らかとしている。
- (2) プラズマ中の高速電子速度分布に非等方性が存在すると、その高速電子により励起された束縛電子が脱励起する際に放射されるX線は偏光する。この特性に着目し、偏光X線分光計測からプラズマ中の高速電子速度分布の非等方性を診断する手法の開発を行っている。まず、偏光X線分光計測に適したトレーサについて考察を行い、トレーサ $He\alpha$ 線のエネルギーとプラズマの背景電子温度に対するX線偏光度の定量的評価を行っている。この中で、 $He\alpha$ 線励起エネルギーで規格化した際のトレーサ物質間に比例則があることを理論的に明らかにし、プラズマの背景電子温度の10倍以上のエネルギーの $He\alpha$ 線を放射する物質をトレーサとして用いるのが良いとの知見を得ている。
- (3) 最適トレーサの考察結果を基に多層平板ターゲットを用いた実験を実施し、プラズマ中から放射されるX線の偏光度の空間分布を取得した結果、X線の偏光度は、ターゲットの表面から深くなるほど高くなっている事を初めて示している。さらに、高速電子分布と偏光度に関する理論モデルとの比較から、表面ではパンケーキ型、内部では葉巻型的高速電子速度分布であることを明らかにしている。
- (4) 3次元の電子速度分布を取り扱う新たな偏光分光モデルを構築し、粒子シミュレーションを用いた解析を行っている。レーザー照射中のターゲット表面において高速電子がレーザー電場によって振動し、ターゲット内部では電子は前方方向に強い加速を受けている様子を見出している。さらに、これらの電子速度分布から導出されたX線の偏光度が実験結果と定性的に一致することを確かめている。

以上のように、本論文は高速点火核融合の追加熱過程においてエネルギー輸送の重要な媒体となる高速電子輸送に関する新しいX線診断法を世界に先駆け開発しており、従来の高エネルギー粒子計測では分解不可能であった空間分解情報の提供ならびに高速電子速度分布の直接計測を可能とするプラズマ診断法を提案し、実証するとともに、理論的考察を加えている。これらの成果は高速点火核融合研究の進展に重要な知見を与えるもので、核融合工学ならびにプラズマ診断学の進展に大きく貢献しており、博士論文として価値あるものと認める。