

## (論文内容の要旨)

本論文は、レーザー核融合や高エネルギー粒子加速などの研究において重要な役割を果たす高強度レーザー生成プラズマ中でのエネルギー輸送の解明を目的としたものであり、高強度レーザー生成プラズマ特有の急峻な温度勾配下での電子の非局所的な熱輸送や熱緩和、および高速点火における相対論的プラズマ中でのエネルギー輸送の理論・シミュレーションに関する研究結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は序論で、レーザー核融合におけるエネルギーの吸収・伝播過程、近年注目を集めている超高強度レーザーを用いた高速点火における相対論的プラズマとその応用研究として位置づけられる高エネルギー粒子発生の研究について概説している。これに基づいて、本論文に研究課題であるレーザー核融合プラズマの電子の非局所エネルギー輸送や熱緩和研究の動機付けと意義を論じている。

第2章では、レーザーを照射された核融合プラズマ中での電子のエネルギー輸送の理論的な枠組みを概説するとともに、Spitzer-Hahm 理論に代表される局所理論が適用できない急峻な温度勾配のもとのでの電子のエネルギー輸送に関するこれまでの理論の枠組みと本研究で扱う研究課題について論じている。これに基づいて、非局所効果を取り入れた熱流速に関する Chapman-Enskog 展開による微分表式および積分表式の詳細を概説するとともに、熱緩和過程におけるこれまでの理論研究について論じている。

第3章では、急峻な温度勾配下におけるエネルギー輸送を解析するための Fokker-Planck 方程式に関する理論およびシミュレーション手法の詳細を記述するとともに、開発したコードに基づいてベンチマークとして実施した熱緩和、非局所熱輸送およびレーザーエネルギー吸収過程の典型的な結果を記述し、コードの正常動作を確認している。

第4章では、開発した Fokker-Planck コードをレーザー照射の不均一性に伴うレーザー核融合プラズマの熱緩和過程に適用し、任意の波長( $L$ )と有限の振幅を持った正弦波的な温度分布の緩和ダイナミックスとそのときの熱流束特性の詳細な解析を行っている。その結果、温度分布が短波長になると、波長に対して局所的に振舞う低エネルギー電子からの熱輸送への寄与は減少し、非局所的な高エネルギー電子からの寄与が相対的に増大する一方、駆動される熱流速は局所理論と比べると減少し、摂動論が適用できない有限振幅の温度分布においても熱緩和効果は小さくなることが分った。

これらの Fokker-Planck 方程式によるシミュレーション結果を理論的に説明するため、平均自由行程( $\lambda_e$ )の短い低エネルギー電子に対しては Chapman-Enskog 展開による高次(3次)の微分形式によって、平均自由行程の長い高エネルギー電子に対しては積分形式によって速度分布関数の近似解を導き、これらを自己無撞着に接続することによって、これまでの Spitzer-Hahm による局所的な理論モデルでは記述できない急峻な温度勾配を持った

プラズマ中での電子熱輸送を微積分表示によって記述する非局所的な理論モデルを導出した。その結果、開発した理論モデルは、レーザー核融合実験で問題となる温度変化の波長領域 ( $\lambda_e/L \sim 0.5$ ) において現象を適切に再現することが分かった。

第5章では、レーザー核融合における高速点火における相対論プラズマ中でのエネルギーの吸収や非局所熱輸送過程におけるプラズマ粒子間の衝突効果を明らかにするため、衝突効果を取り入れたプラズマ粒子シミュレーションを行い、 $10^{19}\text{-}10^{20}\text{W/cm}^2$  レベルの高強度レーザーに照射された固体炭素薄膜のエネルギー吸収と熱伝動に対する衝突効果、およびその際に形成されるプラズマの構造形成についての詳細な解析を行った。衝突を考慮しない場合（高強度レーザー領域）、固体内部の高密度領域においては衝撃波と希薄波が連結した多重的なプラズマ構造が形成されるとともに、レーザーと相互作用する臨界密度領域においてはスケール長の異なったプラズマが形成され、レーザーのエネルギー吸収と高エネルギー電子発生に伴う非局所的なエネルギー輸送が複雑なプラズマ構造を形成することを見出した。一方、衝突効果を考慮すると散逸効果のため多重構造は緩和され、その結果温度勾配は急峻になり、レーザーの吸収率が低下することを見出した。これらの結果は、超高強度レーザーを用いた高速点火プラズマにおいてもプラズマの衝突効果が重要な役割を果たすことを明らかにした。さらに、このようなプラズマ構造と照射するレーザーの強度や固体炭素の密度に関する依存性についても明らかにしている。

6章では、本研究で行った急峻な温度勾配をもった核融合プラズマの熱緩和過程と超高強度レーザーを用いた高速点火プラズマの理論およびシミュレーションによる解析に関して得られた主要な結論と今後の課題について述べている。

|     |         |
|-----|---------|
| 氏 名 | Chen Mo |
|-----|---------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(論文審査の結果の要旨)</p> <p>本論文は、レーザー核融合や高エネルギー粒子加速などの研究において重要な役割を果たす高強度レーザー生成プラズマ中でのエネルギー輸送の解明を目的としたものであり、レーザー生成プラズマ特有の急峻な温度勾配下での電子熱輸送の非局所性や熱緩和とそれらに伴うプラズマの構造形成、および、超高強度レーザーと物質と相互作用によって生成された相対論プラズマにおけるエネルギー吸収と熱輸送の理論・シミュレーションに関する研究を行い、以下に示す重要な知見を得た。</p> <p>1) 平均自由行程(<math>\lambda_e</math>)の短い低エネルギー電子に対してはChapman-Enskog展開による高次の微分形式によって、平均自由行程の長い高エネルギー電子に対しては積分形式によって速度分布関数の近似解を導き、これらを自己無撞着に接続することによって、これまでのSpitzer-Hahmによる局所的な理論モデルでは記述できない急峻な温度勾配を持ったプラズマ中での電子熱輸送を微積分表示によって記述する非局所的な理論モデルを提案した。</p> <p>2) 開発した非局所的な理論モデルをレーザー照射の不均一性に伴うレーザー核融合プラズマの熱緩和現象に適用し、任意の波長(<math>L</math>)と有限の振幅を持った正弦波的な温度分布の熱緩和ダイナミクスとそのときの熱流束特性を詳細に解析した。その結果、温度分布が短波長になると、波長に対して局所的に振舞う低エネルギー電子からの熱輸送への寄与は減少し、非局所的な高エネルギー電子からの寄与が相対的に増大する一方、駆動される熱流速は局所理論と比べると減少し、摂動論が適用できない有限振幅の温度分布においても熱緩和効果は小さくなることが分った。</p> <p>3) 非線形衝突項を有するFokker-Planck方程式を解くコードを開発し、様々な振幅と波長を持った正弦波様の温度分布の熱緩和過程のシミュレーションを行い、理論モデルと比較・検討した。その結果、開発した理論モデルは、レーザー核融合実験で問題となる温度変化の波長領域(<math>\lambda_e/L \sim 0.5</math>)においては現象を適切に再現することが分かった。</p> <p>4) 衝突効果を取り入れたプラズマ粒子シミュレーションを行い、相対論領域の高強度レーザーに照射された固体薄膜のエネルギー吸収と熱伝導に対する衝突効果の影響について解析を行った。その結果、衝突を考慮しない場合(高強度レーザー領域)、衝撃波と希薄波が連結した多重的なプラズマ構造が形成されることを見出した。一方、衝突効果を考慮すると散逸効果のため多重構造は緩和され、その結果温度勾配は急峻になり、レーザーの吸収率が低下することを見出した。これらの結果は、高温の相対論領域のプラズマにおいても衝突効果が重要な役割を果たすことを示しており、高速点火を中心としたレーザー核融合や高強度レーザーの応用研究について重要な指針を与えるものである。</p> <p>よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年8月27日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|