



Title	密度勾配を持つプラズマ中におけるエネルギー輸送に関する研究
Author(s)	林, 宜章
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/91774">https://doi.org/10.18910/91774</a>
rights	
Note	

*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 ( 林 宜章 )

## 論文題名

密度勾配を持つプラズマ中におけるエネルギー輸送に関する研究

## 論文内容の要旨

本論文では高速電子およびレーザー光が非一様密度分布中を伝播する際のエネルギー伝達過程をシミュレーションによって研究を行ったもので、密度勾配によりエネルギー伝達に伴う構造スケールが変化し、乱流化やエネルギー散逸といった不安定性が引き起こされる可能性と、この不安定性を積極的に利用することでレーザー核融合やレーザー粒子加速など実際の応用にも大きく貢献できることを示したものであり、全部で5章から構成されている。

第1章は序論であり、本論文の背景である核融合の概要、乱流の理論、プラズマにおけるスケールの重要性について概要をのべ、高密度プラズマ中でのエネルギー輸送がプラズマの密度勾配に強く影響される事例を紹介し、本論文の目的となる密度勾配が不安定性を誘起する可能性を提起し、本論文の構成を述べた。

第2章では、密度勾配中でのエネルギー輸送を考える上で必要となる数理モデルに関して記述している。まず本論文と関連の深いプラズマの基礎的な特性やレーザープラズマ相互作用について数式を用いて説明した後、本論文で用いた数値計算ツールである粒子シミュレーションについて詳細を説明し、最後に高密度プラズマ中での電子輸送を記述する電子磁気流体方程式を導入し、それを用いた先行研究について述べた。

第3章では、2次元粒子シミュレーションを用い、電子ビームを模した磁気双極構造の非一様密度プラズマ中における伝播に関する研究成果を述べた。双極渦が高密度領域に進入する際に、渦同士が接近し、磁場の増大と並進速度の増大という、第2章で述べた一般化電子磁気流体モデルによる予測と一致する結果を得たことを示している。このとき双極渦の中心のせん断速度の増加によりKelvin-Helmholtz不安定性が引き起こされ、双極渦の分裂及び乱流の発生が確認されたことを示した。同時に磁場エネルギーが運動エネルギーへ急速に変換され、高密度領域の背景プラズマの加熱を引き起こすことを示した。さらに電子磁気流体モデルでは欠落していた初期電場を導入し、粒子シミュレーションにおいて初期のプラズマ振動を抑制することで双極渦構造の安定性を高めたことを示し、シミュレーション技法としても重要な知見を得た。また入射角依存性を調べ、 $45^\circ$ よりも深い入射角で反射がおきることを示した。乱流化の解析のため、フーリエ解析によるエネルギーの波数分布を求め、双極渦の崩壊に伴い、乱流に特徴的な $-5/3$ 乗則に一致したエネルギースケールリングを確認した。

第4章では、2次元粒子シミュレーションを用い、非一様密度プラズマ中でのレーザー航跡波の伝播の研究に関して述べた。航跡波の位相速度が密度勾配により変化することが示され、増加する勾配中では超光速から光速に減速、減少勾配中では亜光速で同様に減速することが示された。またレーザー航跡波の形状は密度またはレーザー強度の上昇にともない、通常のパラボラ型から衝撃波様に変化し、その後乱流化がおこることを明らかにした。空孔に束縛された電子のエネルギー分布は準単色であるのに対して、乱流化後の高エネルギー電子のエネルギー分布は指数 $^{-2}$ のべき乗則分布であることを示し、密度勾配により航跡波のスケールが変化し、高速電子の生成、乱流化などの物理に影響を与えることを明らかにした。3章と同様にフーリエ解析によるエネルギーの波数分布を調べ、増加密度勾配での $-5/3$ 乗則との一致の傾向と、Wake の状態の間欠的な変化を確認した。

第5章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、将来の展望について記述し、本論文の結論とした。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 林 宜 章 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	羽原 英明
	副 査	教授	蔵満 康浩
	副 査	招へい教授	白神 宏之
	副 査	教授	村上 匡且
	副 査	教授	上田 良夫
	副 査	教授	兒玉 了祐
	副 査	教授	吉村 政志

## 論文審査の結果の要旨

本論文は密度勾配が存在する高密度プラズマ中におけるエネルギー輸送に関する研究を行ったもので、全部で5章から構成されている。

第1章は序論であり、まず本論文の目的を述べた後、背景であるレーザー核融合に関して説明し、特に高密度プラズマ中でのエネルギー輸送がプラズマの密度勾配に強く影響される事例を紹介した。また相互作用で形成されるプラズマ中での電子流体の構造長が、密度勾配によって断続的に変化することを指摘し、それが流体の乱流における構造長の変化と類似することから、プラズマ中の電子流体が乱流化している可能性を提起した。最後に本論文の構成を述べている。

第2章では、密度勾配中でのエネルギー輸送を考える上で必要となる数理モデルに関して記述している。最初に高密度プラズマ中での基礎方程式軍や基礎的な相互作用について述べた後、研究手法として一般的に用いられている2次元のPIC (Particle-In-Cell) 粒子シミュレーションを取り上げ、基本方程式から計算サイクルを説明している。次に高密度プラズマ中での電子輸送を記述する電子磁気流体方程式を導入し、密度勾配を持つプラズマ中でも適応可能な一般化電子磁気流体方程式とそれを用いた先行研究について述べている。

第3章では、2次元粒子シミュレーションを用い、電子ビームを模した磁気双極構造の非一様密度プラズマ中における伝播に関する研究成果を述べている。双極渦が高密度領域に進入する際に、渦同士が接近し、磁場の増大と並進速度の増大という、第2章で述べた一般化電子磁気流体モデルによる予測と一致する結果を得たことを示している。このとき双極渦の中心のせん断速度の増加によりKelvin-Helmholtz不安定性が引き起こされ、双極渦の分裂及び乱流の発生が確認されたことを示した。同時に磁場エネルギーが運動エネルギーへ急速に変換され、高密度領域の背景プラズマの加熱を引き起こすことを示した。さらに電子磁気流体モデルでは欠落していた初期電場を導入し、粒子シミュレーションにおいて初期のプラズマ振動を抑制することで双極渦構造の安定性を高めたことを示し、シミュレーション技法としても重要な知見を得ている。

第4章では、2次元粒子シミュレーションを用い、非一様密度プラズマ中でのレーザー航跡波の伝播の研究に関して述べている。航跡波の位相速度は、増加勾配では超光速から光速に減速、減少勾配では亜光速で同様に減速することが示されている。またレーザー航跡波の形状は密度またはレーザー強度の上昇にともない、パラボラ型から衝撃波様に変化し、その後乱流化がおこることを明らかにしている。空孔に束縛された電子のエネルギー分布は準単色であるのに対して、乱流化後の高エネルギー電子のエネルギー分布は指数<sup>-2</sup>のべき乗則分布であることを示し、密度勾配により航跡波のスケールが変化し、高速電子の生成、乱流化などの物理に影響を与えることを明らかにしている。

第5章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、将来の展望について記述し、本論文の結論としてい

る。

以上のように、本論文では高速電子およびレーザー光が非一様密度分布中を伝播する際のエネルギー伝達過程をシミュレーションによって研究し、密度勾配によりエネルギー伝達に伴う構造スケールが変化し、乱流化やエネルギー散逸といった不安定性が引き起こされることという新しい知見をもたらすだけでなく、この不安定性を積極的に利用することでレーザー核融合やレーザー粒子加速など実際の応用にも大きく貢献することが期待される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。