The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Generation model of laser-driven magnetic field with consideration of warm-dense-matter properties
Author(s)	森田, 大樹
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82004
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　森田　大樹　　）	
論文題名	Generation model of laser-driven magnetic field with consideration of warm-dense-matter properties （Warm Dense Matterの特性を考慮したレーザー駆動磁場の発生に関するモデル）

論文内容の要旨

磁場は、宇宙・天体でのプラズマ物理現象や核融合研究の分野において重要な役割を果たしている。磁化プラズマ研究のために磁場発生に関する研究が様々行われている。中でも高出力レーザーを用いた「レーザー駆動コイル」という手法は、100 Tを超える強磁場を容易に生成することができる。最近ではこのレーザー駆動コイルを使い、様々な強磁場中でのプラズマ物理現象の実験研究が行われている。

金属やプラズマのような導電性が高い物質が十分に「磁化」されるためには、印加される磁場の持続時間よりも物質中への磁場の拡散時間が短くなければならない。十分な磁化を実現するためにはこの磁場拡散の時間スケールを把握しておく必要がある。

一方で、100 T を超える強磁場はパルス的に発生し、磁場強度が強いほどそのパルス幅は短いという特徴を持つ。パルス強磁場は物質中に誘導加熱を引き起こし物質の導電率を大きく変化させる。磁場の拡散時間は物質の導電率に比例するので、拡散時間を評価するためには0.01 eV～100 eV といった広い温度領域での導電率の温度変化を考慮する必要がある。しかし、パルス磁場の拡散過程において、急激に加熱される金属は固体密度のまま数eVという温度まで上昇する。この状態は warm dense matter (WDM) と呼ばれる、モデルで取り扱うことが難しい固体とプラズマの中間状態である。WDM 状態における導電率の実験データは少なくモデルも発展途上であるため、正確な拡散時間を見積もるためには実験データを必要としない第一原理的な導電率の評価が必要になる。

本研究の目的は、レーザー駆動コイルによって生成されるパルス磁場が、どのように金属中に拡散するのかを明らかにすることである。著者は主に以下3つの課題について研究を行った。

1. WDM 状態における導電率の評価
2. コイル断面における電流密度分布および導電率の時間発展を考慮したレーザー駆動コイルのモデリング
3. 導電率の温度依存性を考慮した金属へのパルス磁場拡散

始めに、WDM状態における導電率の温度依存性を数値的に評価した。上で述べたようにWDM状態における導電率の実験データは少なく、モデルも未だ発展途上である。本研究では導電率を評価するために、実験データを必要としない第一原理分子動力学シミュレーションを用いた。また、導電率の温度依存性を考慮した電磁場の時間発展を数値的に解析するため、本研究の基盤となる加熱機構を含んだ電磁場シミュレーションを開発した。

第二に、開発した電磁場シミュレーションを用い、磁場発生手法の一つであるレーザー駆動コイルのモデリングを行った。従来、レーザー駆動コイルの電流の時間発展は回路方程式を基にモデリングされていた。著者らはそこに電磁場シミュレーションを応用することで、コイル断面における電流密度分布の時間発展および、Joule加熱に伴う導電率の時間変化を考慮したモデルを開発した。また、開発したモデルが実験結果と比較し従来の回路モデルよりも実験結果をよく再現することを示した。

最後に、レーザー駆動コイルで生成されるパルス磁場が、金属中に誘導加熱を起こし、導電率を変化させながら浸透する過程を数値的に評価した。パルス磁場の拡散は高強度レーザーを用いた核融合研究において重要な役割を果たしている。最近のレーザー核融合研究では、燃料プラズマの加熱効率を向上させるために、レーザー駆動コイルで生成される強磁場を応用するという方法が検討されている。強磁場による加熱効率の向上を実現するためには、生成された強磁場がそのパルス幅時間内に燃料プラズマを十分に磁化している必要がある。燃料プラズマの加熱効率の向上を図る本手法において、直接計測することが難しいパルス磁場拡散の数値的評価は、より実験に近い状況を模擬したシミュレーションや、原理実証に向けた実験のデザイン、および実験結果の解析を助力する。本研究成果は核融合研究だけでなく、レーザー駆動コイルで生成される強磁場を用いた磁化プラズマ研究を行う上でも当該分野に大きく貢献するものである。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　森田　大樹　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	藤岡　慎介
	副 査　教授	青木　正治
	副 査　教授	中井　光男
	副 査　教授	千徳　靖彦
	副 査　講師	有川　安信

論文審査の結果の要旨

高出力レーザーをコイル形状のターゲットに照射することで, 100 T を超える強磁場のパルスを発生させることができる。このレーザー駆動コイルを使い、強磁場中でのプラズマ物理現象の実験が盛んに行われるようになった。 特に、最近のレーザー核融合研究では、レーザー駆動コイルで生成される強磁場を応用し、燃料プラズマの加熱効率を向上させる手法が研究されている。

物質内に磁場を浸透させるには、印加される磁場の持続時間よりも物質中への磁場の拡散時間が短くなければならない。パルス強磁場は物質中に誘導加熱を引き起こし物質の温度と導電率を大きく変化させる。磁場の拡散時間は物質の導電率に比例するため、拡散時間を評価するためには 0.01 eV - 100 eV といった温度領域での導電率の温度依存性を考慮しなければならない。特に、パルス磁場の拡散過程において、金属は急激に加熱され固体密度のまま数 eV の温度まで上昇する。この状態は warm dense matter (WDM) と呼ばれ、固体とプラズマの中間状態である。WDM 状態における導電率の実験データは少なく、正確な拡散時間を見積もるためには第一原理的な導電率の計算が必要である。

本論文は五つの章で構成されている。第一章はイントロダクションであり、本研究の背景となるレーザー駆動強磁場及びレーザー核融合に関する概要が記述されている。

第二章では WDM 状態における導電率の温度依存性を数値計算について記述している。導電率を評価するために、第一原理分子動力学シミュレーションを用いた。数値計算の結果とモデルの比較も行っており，付録 B にその詳細が記述されている。

第三章では第二章で計算した導電率の温度依存性を考慮した電磁場シミュレーションを開発し、磁場発生手法の一つであるレーザー駆動コイルのモデリングを行った。従来、レーザー駆動コイルの電流の時間発展は回路方程式を基にモデリングされていた。森田氏はコイル断面における電流密度分布の時間発展および､Joule加熱に伴う導電率の時間変化を考慮したモデルを構築し、従来の回路モデルよりも実験結果を良く再現することを示した。

第四章では第三章で開発した導電率の温度依存性を考慮した電磁場シミュレーションを用い、レーザー駆動コイルで生成されるパルス磁場が、金属中に誘導加熱を起こし、導電率を変化させながら浸透する過程を調べた。パルス磁場の拡散は高強度レーザーを用いた核融合研究において重要な役割を果たしている。数値計算によって、直接計測することが難しいパルス磁場拡散の理解が進み、過去の実験結果の解釈に加えて、レーザー核融合による点火実証に向けたデザインへ貢献した。

第五章は本研究のまとめであり、本研究成果は核融合研究だけでなく、レーザー駆動コイルで生成される強磁場を用いた高エネルギー密度磁化プラズマの発展に大きく貢献するものであることが記述されている。

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.