

博士論文公聴会の公示（物理学専攻）

学位申請者： 森田大樹

論文題目： 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）

日時： 2021年2月4日(木) 16:50 - 18:20

場所： 理学研究科 H 棟 7 階セミナー室（H701 号室）

（部屋の換気等、新型コロナウイルス感染症拡大防止に留意しつつ、対面形式にて行う。

ご来聴の方はマスクの着用をお願い致します。）

オンラインによる聴講も可能。URL 等については、学内の方は下記を参照。

<https://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/naibu/kouchoukai.html>

学外の方は主査藤岡（sfujioka[at]ile.osaka-u.ac.jp [at]=@）に問い合わせること。

主査： 藤岡慎介

副査： 青木正治、千徳靖彦、中井光男、有川安信

論文要旨：

磁場は、宇宙・天体のプラズマの物理現象や熱核融合の研究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ので、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する必要がある。特に、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、固体とプラズマの間状態であり、理論・モデルで取り扱うことは容易ではない。WDM 状態における導電率の実験データは少なく、理論・モデルも開発途上であるため、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

はじめに、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、モデルも未だ開発途上である。本研究では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。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適用することで、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。