



|              |  |
|--------------|--|
| Title        | Experimental study on direct-drive inertial confinement fusion with diamond material targets |
| Author(s)    | 川崎, 昂輝   |
| Citation     | 大阪大学, 2024, 博士論文   |
| Version Type | VoR  |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.18910/96081">https://doi.org/10.18910/96081</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 ( 川崎 昂輝 )

論文題名

Experimental study on direct-drive inertial confinement fusion with diamond material targets  
(ダイヤモンド材料ターゲットを用いた直接駆動慣性閉じ込め核融合に関する研究)

## 論文内容の要旨

本論文は直接駆動慣性閉じ込め核融合（直接照射型レーザー核融合）に用いるダイヤモンド燃料カプセルの開発および、ダイヤモンドにおけるレーザープラズマ相互作用（Laser plasma interactions: LPIs）と高速電子の発生に関する実験的研究の成果を纏めたものである。

第1章では、核融合の原理・概要を解説し、本研究の位置付けを記した。核融合は、温室効果ガスを排出しないなどの理由により、次世代エネルギー源として魅力的である。核融合の中でも、レーザー核融合は、出力の調整が容易であるという特徴を有する。本研究はレーザー核融合の性能向上に資することを目的に実施した。

第2章では、レーザー核融合の物理、課題、そして本研究の背景を示した。核融合燃料を封入した直径数ミリメートルの燃料カプセルを高強度レーザーにより爆縮（圧縮）することで、高利得爆縮が可能となる。一方で、レーザーの非一様性に起因するアブレーション面の擾乱（インプリント擾乱）の発生、およびその擾乱のレイリーテイラー不安定性による増幅が問題である。これらの解決のために、ターゲットデザインおよびレーザー照射スキームの観点から種々のアプローチが提案された。本研究では、インプリント擾乱低減の効果が大きいダイヤモンドターゲットに着目した。ダイヤモンドターゲットは、有望なレーザー照射スキームである衝撃波点火方式への適用も可能である。ダイヤモンドターゲットの直接照射型レーザー核融合への適用を見据え、ダイヤモンド燃料カプセルの製作手法を確立すること、ダイヤモンドにおけるLPIsの物理を明らかにすることに取り組んだ。LPIsに関する研究は、従来よりも高い強度のレーザー照射を伴い、LPIsが顕著に発生する衝撃波点火方式への応用を見据えた観点からも重要である。

第3章では、ダイヤモンド燃料カプセルの開発研究について述べた。ダイヤモンドはその低い圧縮率ゆえにインプリント擾乱を低減する。本研究は、ダイヤモンド合成のために熱フィラメント気相成長法を用いた。本手法は、先行研究で採用された成膜方法（マイクロ波プラズマ気相成長法）と比較し、大量生産化への拡張性が高い。まず、高い表面平滑性を有したダイヤモンドカプセルを得るために、ダイヤモンド成膜条件の最適化およびカプセル製作プロセスの改良を実施した。次に得られたカプセルを包括的に特性評価した。結果として、数10ナノメートルの平滑性を有するナノ多結晶ダイヤモンドカプセルの作製に成功し、このナノ多結晶中の非ダイヤモンド成分の含有率、膜厚、密度、およびモードナンバーといった重要なパラメータを明らかにした。また、この特性評価したカプセルを、激光XII号におけるレーザー照射実験に導入し、アブレーション面の発光をX線計測系で観察することで爆縮軌跡を取得した。実験結果は輻射流体シミュレーションと一致し、本研究の製作工程の妥当性および定量評価の正確性が実証された。

第4章ではLPIsの実験的研究について述べた。誘導ラマン散乱（Stimulated Raman Scattering: SRS）と二電子崩壊不安定性（Two Plasmon Decay: TPD）は電子プラズマ波を生成し、先行加熱の観点などから爆縮性能に影響を及ぼす高速電子の発生において重要である。密度勾配を持つプラズマにおけるSRSとTPDの成長率は、波の共鳴条件の制限から、Rosenbluthの式によって与えられる。一方で、プラズマ中の波は様々な機構で減衰するため、SRSおよびTPDの発生程度は自明とは言えず、実験的な評価が必要である。本研究においては、SRS、TPDおよび高速電子の特性評価のための計測系（散乱光計測、高速電子計測、X線計測および衝撃波計測）を激光XII号に構築し、従来の典型的なカプセル材のプラスチックターゲットにおいて、SRSとTPDの生成量、高速電子の温度および変換効率を明らかにした。そして、ダイヤモンドにおけるLPIsをプラスチックターゲットとの比較の観点から議論した。実験結果から、SRS、TPDおよび高速電子量がダイヤモンドにおいて減少することが明らかになり、プラスチックとダイヤモンドで観測された差異は、水素イオンによる高いイオン音波減衰率によるものであることが示された。これはSRSとTPDの飽和機構として、電子プラズマ波のイオンとの相互作用が重要であることを意味する。以上から、ダイヤモンドは先行加熱を引き起こす高速電子の発生を抑制する観点から優位であること、また、高速電子の積極的な活用が期待される衝撃波点火方式などへの応用には、カプセル材の水素含有率により高速電子量を制御できることが示唆された。

第5章は結論であり、本研究を総括した。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

|                 |     |     |       |
|-----------------|-----|-----|-------|
| 氏 名 ( 川 崎 昂 輝 ) |     |     |       |
|                 | (職) | 氏 名 |       |
| 論文審査担当者         | 主 査 | 教授  | 重森 啓介 |
|                 | 副 査 | 教授  | 村田 勲  |
|                 | 副 査 | 准教授 | 帆足 英二 |

## 論文審査の結果の要旨

直接駆動慣性閉じ込め核融合（直接照射型レーザー核融合）は、核融合発電への適用性が高く、次世代エネルギー源として期待されている。一方で、レーザーの非一様性に起因するアブレーション面の擾乱（インプリント擾乱）の発生及びその擾乱のレイリーテイラー不安定性による増幅が問題である。ダイヤモンドはその圧縮率の低さから、インプリント擾乱の低減効果が大きいことが知られている。また近年では、レイリーテイラー不安定性の抑制のために、燃料カプセルをゆっくりと圧縮した後に、高強度スパイクパルスの照射によって発生する衝撃波によって点火を引き起こす衝撃波点火方式が注目されている。本論文は、ダイヤモンド燃料カプセルを直接照射型レーザー核融合ひいては衝撃波点火方式へ適用するために実施した、ダイヤモンドカプセルの開発研究、およびダイヤモンドにおけるレーザープラズマ相互作用の実験的研究についてまとめている。

第1章では、核融合の原理・概要を解説し、本研究はレーザー核融合の性能向上に資することを目的に実施したことを述べている。

第2章では、レーザー核融合の基本概念（ターゲット・レーザー・爆縮プロセス）について概説している。またインプリント擾乱およびレイリーテイラー不安定性のメカニズムを解説し、これらを解決するために提案された種々のアプローチについて纏めている。その中でも本研究は、ダイヤモンドカプセルと衝撃波点火方式に着眼しており、これらのアプローチは技術的に比較的シンプルであり核融合発電への適用性が高い技術である。

第3章では、ダイヤモンドカプセルの開発研究について纏めている。低い圧縮率を持つダイヤモンドがインプリント擾乱を低減できることを示し、またダイヤモンドカプセルの開発に関する先行研究を纏めている。本研究は、ダイヤモンド合成のために熱フィラメント気相成長法を用いている。この方法は、先行研究で採用された成膜方法（マイクロ波プラズマ気相成長法）と比較し、合成面積の制限を受けてないため、大量生産化への拡張性が高い。本研究では、高い表面平滑性を有したダイヤモンドカプセルを得るために、ダイヤモンド成膜条件の最適化およびカプセル製作プロセスの改良が実施され、得られたカプセルが包括的に特性評価されている。結果として、数10ナノメートルの平滑性を有するナノ多結晶ダイヤモンドカプセルの作製に成功しており、このナノ多結晶中の非ダイヤモンド成分の含有率、膜厚、密度、及びモードナンバーといった重要なパラメータについても定量評価している。また、この特性評価したカプセルを、激光 XII 号におけるレーザー照射実験に導入し、爆縮軌跡が輻射流体シミュレーションと一致することを確認しており、本研究の製作工程の妥当性及び定量評価の正確性を実証している。

第4章ではレーザープラズマ相互作用の実験的研究についてまとめている。誘導ラマン散乱（Stimulated Raman Scattering: SRS）と二電子崩壊不安定性（Two Plasmon Decay: TPD）は電子プラズマ波を生成し、高速電子の発生を伴う。高速電子は爆縮初期には燃料の先行加熱を引き起こし問題であるが、衝撃波点火方式のスパイクパルス照射時は、カプセル表層で吸収され高効率なアブレーションに寄与することも指摘されており、高速電子の発生を制御するこ

とは最重要課題である。本章では、密度勾配を持つプラズマにおける SRS と TPD の成長率は、波の共鳴条件の制限から、Rosenbluth の式によって与えられることが示されている。一方で、プラズマ波は様々な機構で減衰するため、SRS 及び TPD の発生程度は自明では無く、実験的な評価が必要である。本研究においては、SRS、TPD および高速電子の特性評価のための計測系を激光 XII 号に構築し、従来の典型的なカプセル材であるプラスチックターゲットへのレーザー照射実験を通して、まずプラスチックにおける SRS と TPD の生成量、高速電子の温度および変換効率を評価している。次にダイヤモンドターゲットへのレーザー照射実験において、SRS、TPD および高速電子量がダイヤモンドにおいて減少するという実験結果を得ている。さらに、プラスチックとダイヤモンドで観測された差異が、水素イオンによる高いイオン音波減衰率によるものであることを、輻射流体シミュレーションを援用した解析により明らかにしている。これらの結果は、水素含有率の低いダイヤモンドカプセルは高速電子抑制の観点から優位であることを示している。また衝撃波点火方式のスパークパルス照射時のような高速電子の積極的な活用が検討される際は、カプセル材（多結晶ダイヤモンド等）の水素含有率を調整することによって高速電子量を制御できる可能性を示している。

第5章は結論であり、本研究を総括している。

以上のように、本論文は直接照射型レーザー核融合において基盤技術になり得るダイヤモンド燃料カプセルの製作手法を確立し、またレーザープラズマ相互作用の詳細なメカニズムの新たな知見を得ることにより、ターゲット設計において水素含有率という新たな指針の重要性を示しており、レーザー核融合の性能向上に資するものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。