

Title	Formation of spatial perturbation on diamond foils due to nonuniform laser irradiation on direct-drive inertial confinement fusion
Author(s)	加藤, 弘樹
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/72646">https://doi.org/10.18910/72646</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 加藤 弘樹 )

## 論文題名

Formation of spatial perturbation on diamond foils due to nonuniform laser irradiation on direct-drive inertial confinement fusion  
 (慣性核融合における非一様レーザー照射によるダイヤモンド表面擾乱の形成)

## 論文内容の要旨 (1200字程度)

直接照射方式による慣性核融合では、核融合燃料が十分に圧縮及び加熱されるように多本数のレーザービーム照射で燃料カプセルが爆縮される。この方式で、高温 (約1億度)・高密度 (固体密度の約1000倍) 状態のプラズマが実現すると、10~100ピコ秒という短時間内に爆発的な核融合反応が可能となる。レーザーを用いた核融合はエネルギー源としての応用に繋がるだけでなく、太陽内部のエネルギー密度 ( $>10^8 \text{ J/cm}^3$ ) に匹敵する物質・プラズマを生成し、その状態方程式研究にも期待されている。このような高エネルギー密度状態かつレーザーの投入エネルギーを超える核融合反応を起こすには、均一なレーザー照射などで、十分球対称なカプセルの圧縮が必要とされている。

現状では、非一様なレーザー照射によって、表面上に形成されるプラズマの圧力が不均一になる。その結果、カプセル表面に振幅1  $\mu\text{m}$ にも満たない微小な凸凹 (インプリント擾乱) が形成し、表面が歪む。このインプリント擾乱が燃料圧縮段階で生じる流体不安定性 (特にレイリー・テラー不安定性) により増幅され、カプセルの圧縮・加熱を妨げている。したがって、非一様なレーザー照射下でもインプリント擾乱を抑えることが安定な燃料圧縮に対して重要課題となっている。これまで、レーザー照射時に物質表面上に形成されるプラズマの拡散的な熱伝導効果 (熱平滑化効果) によって圧力不均一が実効的に緩和されることが実証されてきた。一方で、この熱平滑化効果はレーザー照射極初期時に対してはプラズマ形成が不十分であり有効でないという欠点があった。

本研究では、新しいインプリント低減機構解明に向けて物質の圧縮率 (硬さ) や密度に着目し、非一様照射による極めて硬いダイヤモンドの表面擾乱形成について包括的に数値シミュレーション及び基礎実験を実施した。実験では、グリッドマスクで意図的に強度非一様性 (強度擾乱/平均強度) を付加させたレーザー光によって生じる擾乱の時間発展をX線シャドウグラフ法により観測した。さらに、メガバルオーダーの高圧下における物質の圧縮率を記述するプラズマ流体シミュレーションとの比較を行った。

実験及びシミュレーションの結果、物質の圧縮率と密度の効果によりダイヤモンドのインプリント擾乱は従来のカプセル材料であるポリスチレンの約30%にまで低減されていることが示唆された。本研究で着目した硬さや密度の効果により照射極初期での熱平滑化効果の欠点を補うことが可能となり、さらに、硬い物質と従来の熱平滑化効果との組み合わせによって、さらなるインプリントの低減が期待されている。

一方で、照射非一様性が増大すると、シミュレーションでは再現されないスパイク形状の擾乱がダイヤモンドに生じることが明らかになった。弾性限界強度を超えた圧力が表面上で局所的に発生することで固体強度がダイヤモンド表面擾乱の形成に影響することが示唆された。

さらに、本研究では、水素とメタンから成る原料ガスをフィラメント加熱によって熱分解し結晶成長させる方法 (HFCVD法) で慣性核融合用ダイヤモンドカプセル (直径0.5-2 mm, 膜厚10  $\mu\text{m}$ 以下) を作製した。その結果、真球度99.7%, そして数十ナノメートル以下の表面平滑性をもつ高精度な薄い球殻状カプセルの作製が可能となった。HFCVD法は大面積合成に適した特徴をもち、このようなカプセル大量作製が見込める手法で均一性の高い球状ダイヤモンドコーティングを可能にした。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 加 藤 弘 樹 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	藤岡 慎介
	副 査	教授	田島 節子
	副 査	教授	近藤 忠
	副 査	教授	中井 光男
	副 査	教授	千徳 靖彦
	副 査	教授	重森 啓介

## 論文審査の結果の要旨

レーザー照射（直接照射方式）で十分球対称に核融合燃料カプセルが爆縮すると、高温（約 1 億度）・高密度（固体密度の約 1000 倍）状態のプラズマが形成し、レーザーの投入エネルギーを超える核融合反応が可能となる。現状では、レーザー強度の非一様性によって、カプセル表面上に形成されるプラズマの圧力が不均一になる。その結果、表面に微小な凸凹形状の擾乱（インプリント擾乱）が生じる。このインプリント擾乱が燃料圧縮段階で生じるレイリー・テラー不安定性により増幅され、非対称爆縮へと発展し問題となっている。したがって、非一様なレーザー照射下でもインプリント擾乱を抑えることが安定な燃料圧縮に対して重要課題となっている。これまで、レーザー照射時に物質表面上に形成されるプラズマの拡散的な熱伝導効果（熱平滑化効果）によって圧力不均一が緩和される現象が実証されてきた。一方で、擾乱波長が大きくなるにつれてこの熱平滑化効果は得られず、また照射極初期時に対しても有効でないという欠点があった。

本研究の前半部では、インプリント低減の解決策として状態方程式と関係する物質の圧縮率（硬さ）に着眼し、非一様照射による極めて硬いダイヤモンドの表面擾乱形成について二次元プラズマ流体シミュレーション (PINOCO-2D) 及び基礎実験を包括的に実施した。シミュレーション結果はダイヤモンドのインプリント擾乱が典型的なカプセル材であるポリスチレンの約 30% にまで低減されることを示し、さらに発生する擾乱の違いは照射時における物質の圧縮度と密接に関係することが示された。また、レーザー強度が増大すると熱平滑化効果が促進され、インプリント擾乱に対するレーザー強度依存性が明らかになった。得られた数値シミュレーション結果の妥当性を明らかにするために、ポリスチレン及びダイヤモンドの薄膜ターゲットを用いた照射基礎実験を実施した。実験では、グリッドマスクで意図的に照射非一様性（強度擾乱/平均強度：10%）を付加させたレーザー光によって生じる擾乱の時間発展を X 線シャドウグラフ法により観測した。実験結果は二次元シミュレーションと同等な結果を示すことが確認され、ポリスチレンとダイヤモンドを比較することで圧縮率と密度が表面擾乱の低減に寄与することを明らかにした。本研究で着眼した硬さや密度の効果により照射極初期での熱平滑化効果の欠点を補うことが可能となり、更に擾乱波長の大きさに制限のないインプリント擾乱の抑えにも期待できる。また、照射非一様性を増大させると、シミュレーションでは再現されないスパイク形状の擾乱がダイヤモンドに生じることが明らかになり、実験及びシミュレーションから表面擾乱形成に対する固体強度の影響を示した。

本研究の後半部では、カプセルの爆縮性能向上に向けて、原料ガスをフィラメント加熱によって熱分解し結晶成長させる方法（HFCVD 法）で、多結晶ダイヤモンドカプセルの合成開発を実施した。その結果、原理的に合成面積の制限がない HFCVD 法において直径 0.5~2 mm、膜厚 10 μm 以下の薄い球殻状カプセルの作製を可能にした。また、得られた膜質は本来の単結晶ダイヤモンドと同等のヌーブ硬度（約 100 GPa）をもつことが確認された。

以上の基礎実験及びプラズマ流体シミュレーションから、ダイヤモンドを用いた直接照射方式のカプセルとしての有効性を初めて明らかにし、更にターゲット開発において、一度で大量の球状合成が見込める手法で慣性核融合用ダイヤモンドカプセルの作製に成功した。これらの成果は直接照射方式における燃料圧縮の安定化に資するものであり、レーザー核融合研究を始めとするプラズマ科学の進展に寄与するものと考えられる。よって、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。