

2025 年 12 月 10 日



分野: 自然科学系

キーワード: 多段衝撃波、自己相似解、準等エントロピー圧縮、超高密度物質、理論物理

レーザー核融合点火を支配する“隠れた法則”を発見 - 多段衝撃波による超高密度圧縮の新理論 -

【研究成果のポイント】

- ◆ ミリメートルサイズの球状固体燃料を多段の衝撃波が球対称に自己増幅しながら収束・反射し、固体密度の数千～数万倍の圧縮率を可能とする新しい圧縮理論を提案。
- ◆ レーザー核融合における燃料圧縮は、1 段のみの衝撃波では点火燃焼に必要な密度・圧力に到達するのは困難とされており、多段衝撃による圧縮が注目されてきたが、その複雑な時間発展と衝撃干渉を統一的に記述する理論は存在していなかった。
- ◆ この理論は、レーザー核融合(ICF)の点火設計、超高圧物質科学、実験室天体物理への応用など、広範な分野での基盤となる可能性に期待でき、AI やスパコンが主導する時代においても「理論が設計を導く羅針盤」としての役割を再提起。

❖ 概要

大阪大学レーザー科学研究所の村上匡且教授の研究グループは、レーザー核融合や高エネルギー密度物理の分野で、複数の衝撃波が段階的に収束・重なり中心で反射する現象を理論的に記述する、全く新しい枠組み——SCS(Stacked Converging Shocks)理論を確立しました。レーザーで物質を極限まで圧縮する「レーザー核融合」。その中心的課題である多段衝撃圧縮の物理過程を、世界で初めて解析的に解明しました。

従来のグーダライ(Guderley)解※¹—すなわち「球状に収束する単一衝撃波の古典理論」—を出発点として自己相似解※²を拡張することで、複数の衝撃波が段階的に収束・反射しながら圧力と密度を爆発的に増幅する過程を、明示的な解析解(比例則)として導出しました。

本成果は、レーザー核融合(ICF)の点火設計、超高圧物質科学、実験室天体物理への応用など、広範な分野での基盤となる可能性に期待でき、AI や数値最適化が主流化する現代の核融合研究において、理論が果たす「基準・指針(コンパス)」の意義を再び示すものです。

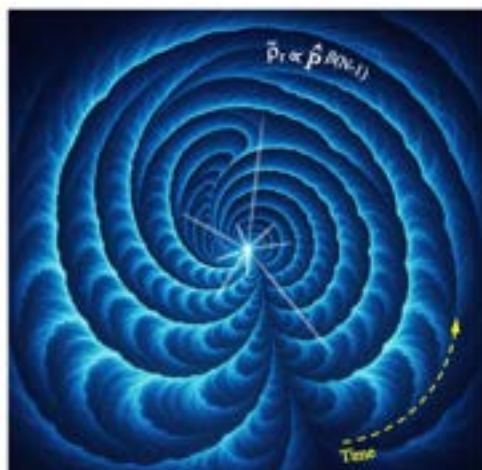


図1 多段収束衝撃のイメージ
衝撃波の各段が、先行段で形成された圧縮層に次々とパイルアップしながら中心へと自己相似的に収束し、圧力と密度を指数関数的に増幅していく過程を示す抽象概念図。

本研究成果は、米国物理学会誌 Physical Review E に11月17日に掲載されました。

【村上匡且教授のコメント】

AI が設計を進化させる時代にあっても、その背後には変わらない“物理の普遍法則”があります。現代の AI は、膨大な試行計算を重ね、その中から最も優れた解を見いだすことで設計や開発を加速させています。

一方で、今回の研究は、そうした AI の探索のさらに根底にある“秩序”——レーザー衝撃波によって物質を固体密度の数千倍から数万倍という極限状態に圧縮する過程を支配する物理法則——を、数式として明らかにすることを目指しました。

❖ 研究の背景

レーザー核融合における燃料圧縮は、1 段のみの衝撃波では点火燃焼に必要な密度・圧力に到達するのは困難とされ、そのため多段衝撃による圧縮が注目されてきました。しかし、その複雑な時間発展と衝撃干渉を統一的に記述する理論は存在していませんでした。

研究グループは、衝撃の段階的反射と圧縮増幅を「自己相似性」に基づいて記述することで、古典的グーダライ解を超える新しい解析的圧縮モデルを構築しました。

❖ 研究の内容

新たに提案された **SCS 理論**では、各ショックが先行段で形成された圧縮層へ逐次的に重畳(パイルアップ)しつつ収束するため、圧力・密度は**指数的に成長**します。これに**中心反射**が加わることで圧縮は幾何級数的^{※3}に増幅され、段階的な自己相似圧縮系列が成立します。

最終圧縮は段数 N とステージ間圧力比 \hat{p} により次式のように表されます：

$$\rho_r/\rho_0 \propto \hat{p}^{\beta(N-1)}$$

ここで β は断熱指数 γ に依存する定数であり、この理論式は 1 次元数値シミュレーションにより厳密に検証され、弱衝撃から強衝撃まで一貫したスケーリング則が成立することが確認されました。

また、段数を増やすにつれ圧縮はより等エントロピー的となり、エネルギー効率の高い高密度圧縮が可能になりました。

❖ 本研究成果の意義

本成果は、段階的衝撃による圧縮の「普遍スケーリング法則」を初めて解析的に導出したもので、多段ショックによる高密度化の物理的原理を明快に説明します。

この理論は、レーザー核融合(ICF)の点火設計、超高压物質科学、実験室天体物理への応用など、広範な分野での基盤となる可能性があります。

AI 駆動型最適化設計の補完として、「理論による予測と設計指針」を再興する重要な成果です。

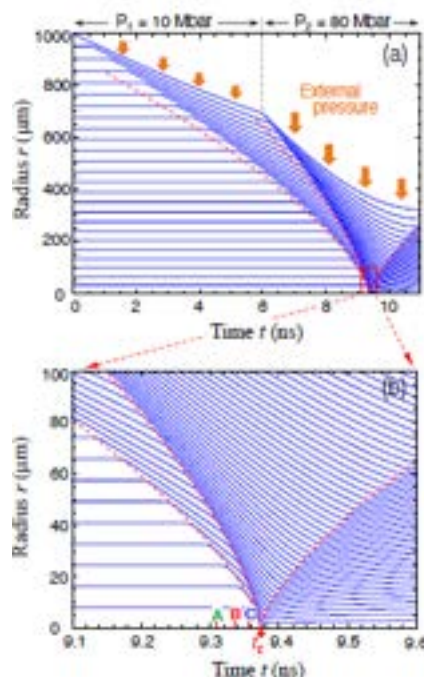


図2. 多段衝撃波による球状爆縮
各段階の衝撃波が、前段で圧縮された層をさらに押し込みながら中心に収束することで、密度と圧力が急速に高まっていく様子を示す概念図。

❖ **用語の説明**

※1 グーダライ(Guderley)解

球状または円筒状に収束する衝撃波の自己相似解として知られる古典的理論で、爆縮や点火過程の基礎となる解析モデル。

※2 自己相似解

Self-similar solution、空間と時間のスケールを適切に変換することで、物理現象を普遍的な無次元関係で表す解析手法。衝撃波や爆縮の理論解析で広く用いられる。

※3 幾何級数的

Geometric progression、ある量が段階を追うごとに一定の倍率で増加または減少すること。ここでは各衝撃段が前段の圧縮を倍加していく増幅過程を指す。

❖ **特記事項**

本研究成果は、米国物理学会誌 Physical Review E に11月17日に掲載されました。

論文タイトル: Self-Similar Multi-Shock Implosions for Ultra-High Compression of Matter 著者: M. Murakami

DOI: 10.1103/bbvn-x95v

なお、本研究は、日本学術振興会(JSPS)並びに(株)関西電力株式会社の補助金のもと行われ、大阪大学D3センターのスーパーコンピューター「SQUID」を使用して得られました。

❖ **参考 URL**

村上匡且教授

研究者総覧 URL <https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/5cb35151612fa19e.html>

日本語 <https://www.youtube.com/watch?v=2mlavy7V2I>

英語 <https://www.youtube.com/watch?v=eL4w1uGRk4U>

❖ **本件に関する問い合わせ先**

<研究に関するお問い合わせ>

大阪大学 レーザー科学研究所 教授 村上匡且(むらかみ まさかつ)

TEL(大学): 06-6879-8743 携帯: 070-5650-4354

E-mail: murakami.masakatsu.ile@osaka-u.ac.jp

❖ **発信先 報道機関**

大阪大学から 大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会