

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340175

研究課題名(和文) 高強度レーザーによる超高圧領域での融解現象～高圧地球科学とレーザー核融合の結合～

研究課題名(英文) Experimental study on melting at ultrahigh pressures with intense laser for Earth science and laser fusion

研究代表者

重森 啓介 (Shigemori, Keisuke)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センタ・准教授

研究者番号：50335395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーを用いることにより、他の手法では得られない高温・高圧力状態を生成し、固体から液体への変化(融解)を実験的に検証した。実験では地球科学研究で重要な物質である鉄、およびレーザー核融合ターゲットの新材料であるダイヤモンドに着眼し、それぞれの高温・高圧状態での振る舞いを計測した。研究結果より、地球核を構成する鉄および鉄化合物に関する音速計測を行い、その化合物の配合比によって音速と圧力との関係、液体と固体の音速の違いに関する一連の成果が得られ、地球内部物質の制限条件を与える重要な結果を得た。またダイヤモンドに関しては融点近傍の音速計測より、これまでには見られなかった新しい傾向を観測した。

研究成果の概要(英文)：This experimental study is to melting phenomena at ultrahigh pressures with intense laser. In inertial confinement fusion, hydrodynamic instabilities are of great importance for high density compression. In order to mitigate these instabilities, we focus on stiffness on target material. Experiments were carried out to explore melting issues on ultrahigh pressure region with x-ray radiography technique. We found that the melting at ultrahigh-pressure is "simple" melting from diamond structure into liquid phase. Also found that the stiffness of diamond can mitigate the initial imprinting with its low compressibility. The melting issue at ultrahigh pressures are also of great important on Earth science. We carried out measurements of sound velocity of iron and iron mixture in order to determine the effects on composition of outer core of the Earth. We obtained the experimental data, suggesting the sound velocity shows good agreements with Birch's law at ultrahigh pressure up to 1 TPa.

研究分野：高エネルギー密度科学

キーワード：高強度レーザー 超高圧力 音速 鉄合金 ダイヤモンド 融解

1. 研究開始当初の背景

高強度レーザーを用いたレーザー核融合研究は、その過程で得られる高エネルギー密度状態を利用した多くの波及をもたしている。特に高強度レーザー照射による超高压力発生は、高压物性・物質科学をはじめ地球・惑星内部構造の解明といった応用に広く用いられるようになった。

この応用例の一つとしては、従来の方法では難しい地球最中深部の物性状態を得ることである。高強度レーザーによって地球核の状態を再現することが出来れば、内部構造をはじめとして、核の組成すなわち不純物の混入などの問題や内核(固体)と外核(液体)とのパラメータの違いなども得られる可能性がある。

もうひとつの応用は、レーザー核融合ターゲット物理である。現在使用されているターゲットのアブレタ材はポリスチレンなどのプラスチック系材料が主流であるが、ポリスチレンは融点が高く柔らかいため、照射初期で融解してプラズマ化に至る。一方で硬い物質の代表格であるダイヤモンドは融点も高く圧縮率も低いため、レーザー核融合で問題となる照射不均一性に起因する「インプリント」を抑制できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、高強度レーザーで得られる高温・高压状態を利用し、高压地球科学およびレーザー核融合において融解現象に焦点をあて、その相変化を介したクリティカルな物理を得ることを目標とする。地球科学的視点としては、X線シャドウグラフによる音速計測法により、地球核条件からスーパーアースに至る鉄および鉄合金の音速を計測することにより、地球やスーパーアースの内部構造や組成などを明らかにする。また、レーザー核融合においては、レーザー照射初期のインプリント生成において、物質の硬さおよび融点の高さに着目したターゲット設計を行い、新しいインプリント抑制法を開発することである。

3. 研究の方法

地球内部構造として重要なパラメータは、圧力、温度および音速である。この中でも音速は膨大な地震波観測データがあるため、多面的な比較が可能である。この音速計測に関して、我々はX線シャドウグラフ計測による音速計測法を適用した。図4に音速計測の概念図を示す。レーザー照射によって照射面より強い衝撃波が生成され、物質中を伝播する。衝撃波によって波面の後ろは圧縮され、裏面に到達すると裏面は自由膨張をはじめめる。一方で裏面からは反射希薄波(音速で伝播)が照射面に向かってすすみ、照射面に到達すると試料全体は加速をはじめめる。よって、圧縮された試料の厚さ(d_1)を衝撃波が裏面に到達するタイミングと希薄波が照射面に到達

するタイミングの時間差($t_r - t_s$)で割ることにより、圧縮試料中の音速を導出することができる。この振る舞いを計測するために、図2のようなX線シャドウグラフ法を用いた。X線の影絵によって試料の表裏面の時間軌跡を計測することにより、音速の導出に必要なパラメータを得る。得られた音速より、音速曲線の不連続が観測されるため、ここから融解圧力をもとめた。さらにX線シャドウグラフ計測に加えて、可視光スペクトルによる温度計測を行い、圧力と温度、音速の関係より融解曲線を得る。また、後述のダイヤモンドに関して基礎データとして音速の計測を実施した。

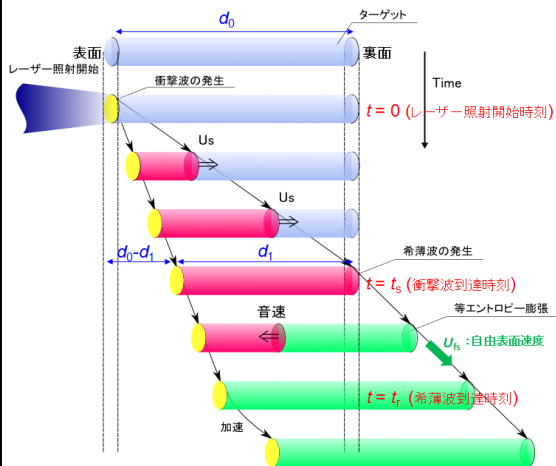


図1 高強度レーザーによって圧縮される試料の時間変化

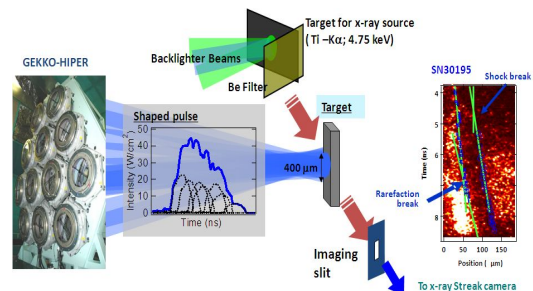


図2 音速計測のためのX線シャドウグラフ実験配置図

ダイヤモンドによるインプリント抑制に関しては、同じX線シャドウグラフ法を用いたが、X線の観測方向を試料横ではなく前面に配置し、透過X線のコントラストより面密度積を実験的に得た。配置図の概略を図3に示す。ここでは照射レーザーにグリッド状のマスクを使用し、ターゲット上で強度擾乱を持たせたパルス照射することによってインプリント擾乱を定量的に評価した。通常のインプリント擾乱は観測限界より小さな値であるため、強度擾乱の無いレーザー光をこの後に照射して試料を加速させることにより、加速段階でおこるレイリーテラー不安定性で擾乱を増幅し、この成長する擾乱の時

間変化を計測することによりインプリント擾乱を外挿で得た。

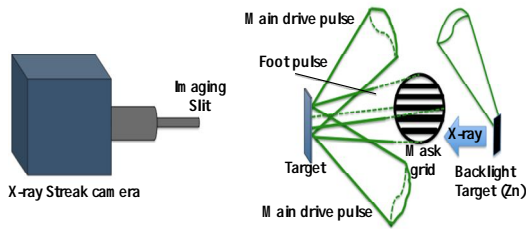


図 3 ダイヤモンドのインプリント擾乱計測配置図

4. 研究成果

地球の核を模擬した音速計測に関して、広い圧力領域での音速計測結果が得られた。図 4 に音速の密度依存性を示す。実験では鉄および鉄の化合物のほか、参照物質としてニッケルおよびバナジウムの計測も行った。実験結果より、音速は密度に比例して増加し、いわゆる「バーチカル」に従うことが明らかになった。またこれまでの静的圧縮実験などの結果と同様に、Si の化合物は純鉄に比して音速は大きく、Ni の化合物はやや小さくなること明らかになった。

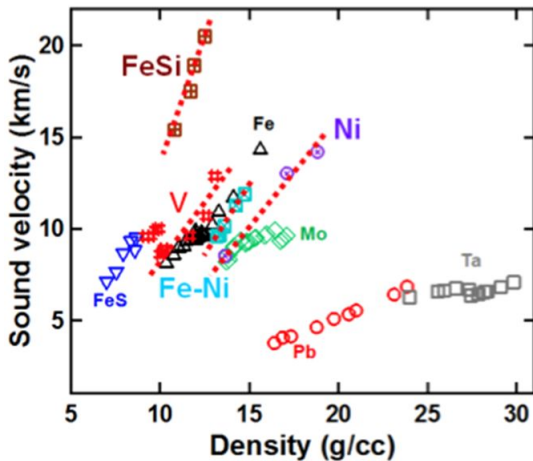


図 4 種々の物質の音速計測結果

一方、ダイヤモンドの音速も広い圧力領域で計測を行い、固体から液体までのデータが得られた。図 5 に実験結果を示す。これまでの別の手法での実験より、ダイヤモンドのユゴニオ上では約 700 GPa より融解が始まり、約 1100 GPa で完全に液化すると考えられている。その中間は液体と固体が共存する領域であり、さらに領域でダイヤモンドから BC8 構造に固体相が相転移することが推測されている。本実験結果では、音速は液化が開始する 700 GPa より 1100 GPa までほぼ単調に音速が減少し、液化が終了した後に徐々に増加することを示唆している。最近の第一原理計算や分子動力学シミュレーションより、音速の減少は融解でよく説明ができることがわかった。一方でダイヤモンドと BC8 構造の炭素では、後者の方が音速の計算値が約 10% 高くなることから、固体・液体の混合領域で

は単純にダイヤモンドから液体へと相転移していることが示唆されている。

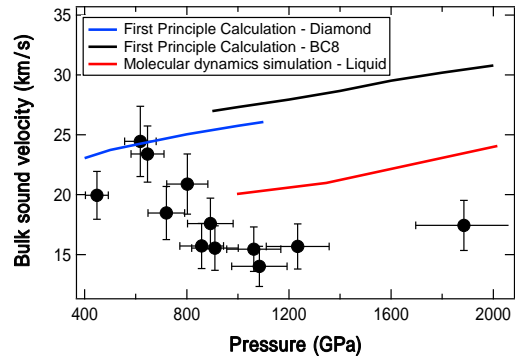


図 5 ダイヤモンドの音速計測結果および第一原理計算結果

次に、ダイヤモンドによるインプリント計測に関する結果を述べる。図 6 に X 線シャドウグラフ計測によるダイヤモンドおよび参照物質として使用したポリスチレンの生データを示す。実験結果より、照射不均一によって発生した空間擾乱が成長する過程が観測されている。このデータよりインプリント擾乱を解析することになるが、ダイヤモンドの実験結果から、通常発生する正弦波状の擾乱からずれた形状の構造が観測されている。現在この原因を解析中であるが、その原因は照射初期に発生する表面の混相状態にあると考えられている。照射初期の強度は 10^{12} W/cm² の領域であるため 融点および弾塑性転移の高いダイヤモンドは初期状態を保持している状態と、融解や弾塑性転移によって変化している状態が共存する可能性がある。これによって、圧縮率の低いダイヤモンド構造の状態と、圧縮率の高い液相や塑性体状態が分布し、非正弦波状の擾乱を形成していることが示唆されている。この詳細を解析するため、2 次元シミュレーションコードによってダイヤモンドの相転移を考慮した計算を進行しており、これまでに行われた衝撃圧縮実験のデータテーブルを計算コードに組み込む作業をすすめている

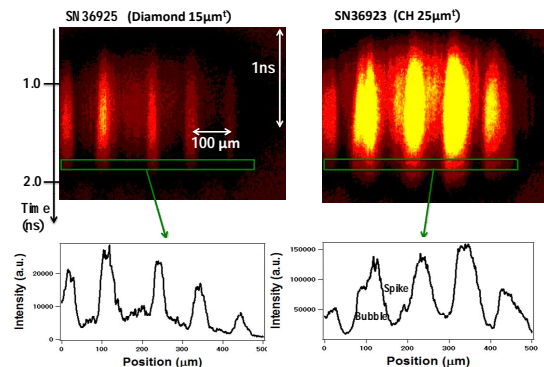


図 6 ダイヤモンドおよびポリスチレンのインプリント計測結果

ダイヤモンドとポリスチレンのインプリント計測結果より、インプリント擾乱の振幅を評価した。解析結果より、発生するダイヤモンドのインプリント擾乱の空間振幅はポリスチレンの約 20%となり、圧縮率を加味したモデル計算ともよく一致した。このことから、レーザー核融合ターゲットのアブレーター材として、ダイヤモンドのような硬い(圧縮率の低い)物資は有望であることが証明された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

T. Sakaiya, H. Takahashi, T. Kondo, T. Kadono, Y. Hironaka, T. Irifune, and K. Shigemori, "Sound velocity and density measurements of liquid iron up to 800 GPa: A universal relation between Birch's law coefficients for solid and liquid metals" Earth Planet. Sci. Lett. 392, 80 (2014).

K. Shigemori, Y. Hironaka, H. Nagatomo, S. Fujioka, A. Sunahara, T. Kadono, H. Azechi, and K. Shimizu, "Extremely high-pressure generation and compression with laser implosion plasmas" Appl. Phys. Lett. 102, 183501 (2013).

D. Batani, S. Paleari, T. Vinci, R. Benocci, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Kadono, and A. Shiroshta, "Advances in the investigation of shock-induced reflectivity of porous carbon", Laser and Particle Beams 31, 457 (2013).

K. Shigemori, T. Sakaiya, Y. Asakura, T. Kondo, K. Shimizu, T. Kadono, Y. Hironaka, and H. Azechi, "Sound velocity measurements by x-ray shadowgraph technique for melting phenomena at ultrahigh-pressure regime", Review of Scientific Instruments 83, 10E529 (2012).

[学会発表](計 11 件)

「地球核条件下にレーザー衝撃圧縮された Fe-Si 合金の音速」

日本地球惑星連合 連合大会

2015 年 5 月 26 日

「物質の硬さに着目したレーザー核融合ターゲットの設計」

第 51 回高压討論会

2014 年 11 月 24 日

「音速計測による炭素の超高压相の観測」

Plasma Conference 2014

2014 年 11 月 18 日

「Proving diamonds under ultra-high

pressure with sound velocity measurements」

56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics

2014 年 10 月 30 日

「Mitigation of initial imprinting with diamond ablator」

56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics

2014 年 10 月 30 日

「Mitigation of laser imprinting with diamond ablator for direct-drive inertial confinement fusion targets」

56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics

2013 年 11 月 15 日

「Mitigation of initial imprinting by diamond ablator for direct drive ICF targets」

8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications

2013 年 9 月 10 日

「ダイヤモンドアブレーターによる流体不安定性の抑制

日本物理学会 第 68 回年会

2013 年 3 月 27 日「高強度レーザー照射された融点付近の単結晶ダイヤモンドの音速計測」

Plasma Conference 2011

2011 年 11 月 24 日

「Measurements of sound velocity of diamond at the pressure around the melt」

7th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications

2011 年 9 月 10 日

「Measurements of sound velocity of diamond at the pressure around the melt」

3rd International Conference on High Energy Density Physics 2011

2011 年 5 月 12 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重森 啓介 (SHIGEMORI Keisuke)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究

センター・准教授

研究者番号：5 0 3 3 5 3 9 5

(2) 研究分担者

境家 達弘 (SAKAIYA Tatsuhiro)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：6 0 4 5 2 4 2 1

近藤 忠 (KONDO Tadashi)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：20252223

中井 光男 (NAKAI Mitsuo)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究
センター・教授
研究者番号：70201663