

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18684034

研究課題名 (和文) 高強度レーザーを用いた地球深部構造の解明

研究課題名 (英文) Experimental Study on Deep Earth Physics with Intense Laser

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：50335095

研究成果の概要：高強度レーザーを物質に照射すると、高温・高圧力のプラズマがピストンとなって物質中に衝撃波が伝播する。この衝撃波伝播に伴う衝撃圧縮によって、地球の最中心部を凌駕する圧力を発生することが可能である。本研究では、高強度レーザーによって創り出される高圧力状態の生成、物性パラメータの計測およびその計測法開発を実施した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2007 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	10,600,000	3,180,000	13,780,000

研究分野：高エネルギー密度科学，レーザー核融合

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：衝撃波，X線シャドウグラフ，X線回折，高圧相転移

1. 研究開始当初の背景

地球深部のような高温・高圧の高エネルギー密度状態は、高強度レーザーを用いることによって実現可能であり、高強度レーザーを用いた高エネルギー密度状態の研究に大きな期待が寄せられていた。地球は大きく分けて地殻・マントル・核で構成されており、最深部は温度 6000～8000K、圧力約 350 GPa の高温高圧状態であることが予測されている。これまでの研究では、多くの地震波データを解析し、更に地球内部を模擬した高圧実験データと組み合わせることにより、マントル内のブルームダイナミクスの解明など大きな成果を挙げてきた。しかしながら、ダイヤモンドアンビル等を使用した静的圧縮法では

下部マントル付近まで到達するのが限度であり、核（内核・外核）の領域での実験データは殆ど無いのが現状であった。また、この温度・圧力領域での構造変化（固体-液体も含めて）の実験的研究は全くなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、高強度レーザーによって得られる高温・高圧状態を利用して今まで到達が困難であった地球内核に匹敵する条件を生成し、その物性パラメータの計測を通して地球科学上でクリティカルな問題の解決に寄与することが主目的である。

3. 研究の方法

高強度レーザーを物質に照射すると、表面でのプラズマ化とともにアブレーションが発生し、その反作用で物質中に強い衝撃波が伝播する。その衝撃波の圧力はレーザーの吸収率・強度・波長に依存する。発生する圧力は、

$$P(\text{Mbar}) = 57 (I/\lambda_L)^{2/3} \quad (1)$$

と近似される。ここで λ_L は照射レーザーの波長(μm)、 I_L は吸収強度(W/cm^2)である。1ミクロン以下の波長の高強度レーザー(強度 $\sim 1 \times 10^{15} \text{ W}/\text{cm}^2$)を使用することにより、TPa級の圧力を容易に発生することが可能である。このような超高压力の発生は、レーザーが空間的・時間的に集中できることに起因し、到達圧力は地球の中心部はおろか、爆縮などの概念を利用することにより太陽の中心部に匹敵する条件を得ることが可能であり、これを核融合エネルギーに応用するための研究がすすめられている。

この過渡的な超高压状態を生成し、なおかつ地球科学で重要なパラメータ(圧力・温度)を得ることが重要である。さらにその状態の計測を正確に行うとともに、これら条件下での物性測定(融点、構造など)を行う。

4. 研究成果

主な研究成果を2点、下記にまとめて示す。

・X線シャドウグラフによる音速計測

地球の核の圧力・温度条件下で実験的に得たいパラメータは数多くあるが、その中でも重要なパラメータは音速である。音速(弾性波速度)は地震波計測などとの互換性が強いだけでなく、物質の状態(構造、液化など)を現す重要な指標であるため、様々な圧力・

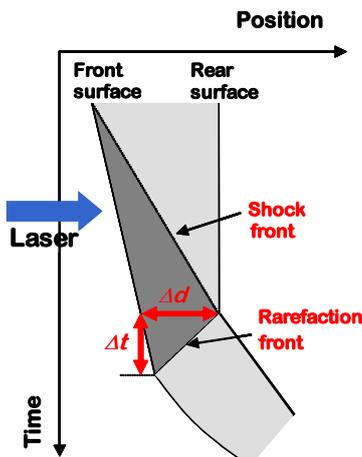


図1 レーザー照射ターゲットの典型的な流線図
温度条件下での音速を実験的に得ることに

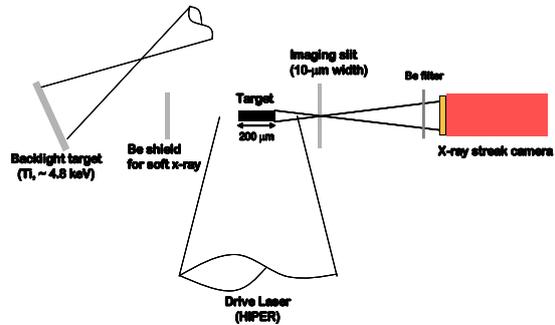


図2 X線シャドウグラフによる音速計測配置図

は大きな意味がある。

レーザーで圧縮された物質中の音速を測る手段として、レーザー照射によって圧縮・加速する試料の表裏面の軌跡(流線)を計測する方法がある。図1にレーザーで照射された試料の軌跡図(流線図)を示す。ある薄膜試料にレーザーが照射されると、試料中を衝撃波がその衝撃波速度(v_s)で伝播する。レーザー照射面、すなわち「ピストン」となる面はその粒子速度(v_p)で移動する。衝撃波面が裏面に到達すると、反射希薄波が照射面側に伝播する。反射希薄波が照射面に到達すると、試料は全体として加速を始める。希薄波は音速で伝播するため、衝撃波が裏面に到達したときの試料の長さ(長さ Δd)、および衝撃波が裏面に通過する時間と希薄波が表面に到達する時間の差(Δt)より、衝撃波で圧縮された領域の音速($\Delta d/\Delta t$)を得ることが可能である。さらに、衝撃波到達時の試料の長さより圧縮率、密度を簡単に導出することが出来る。状態方程式自体は衝撃波速度と粒子速度だけでも得られるが、前章で述べたようなユゴニオ上に物質の状態が無い場合、この音速計測と流の線概念は非常に重要である。

この流線図を実験的に得るためには、時間分解X線シャドウグラフ法を用いるのが有効である。典型的な実験配置図を図2に示す。薄膜試料の側面側に別のX線源発生用のターゲットを配置し、時間的に同期させて別のレーザー光を照射する。発生したX線による試料のシャドウはスリット等によってX線ストリークカメラに結像される。X線ストリークカメラによって時間-空間の「影絵」が得られ

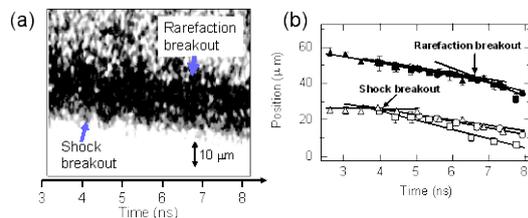


図3 音速計測の生データ例

るため、境界面、すなわち照射試料の表裏面の軌跡をプロットすることにより、図1で示すような流線図が得られる。図3に実験データ(X線ストリークカメラの生データ)およ

びこの解析結果の一例を示す。シャドウグラフ像より試料の表裏面をエッジ検出し、流線図を得るためのプロットを行った。X線源の光量の問題でやや不鮮明な結果であるが、複数のショットデータ（各記号）により解析を行った。図3は前節の2段パルス照射時の鉄試料の軌跡であり、実験データより表裏面の動き、特に図3の生データは反射希薄波が照射面に到達するタイミングを示している。

これまでもガス銃による1段衝撃波での音速計測はなされており、これを図4に示す。最初に行われた実験では、圧力が200~250 GPa周辺で音速の不連続が観測され、これは何らかの固体-固体相転移が起こりうるためと解釈されていた。その後、鉄の融点曲線に関する理論的な研究が大きく進展し、最近の実験で観測された225~250 GPaでの音速の不連続に関しては、液化によって250 GPa以上での音速が低下していると解釈されている。これは鉄の音速に関する最近の理論計算などもよく一致することから、溶解によって音速がこの領域で変化することの説明は可能である。しかしながら、温度計測がなされていないことやユゴニオ上のみデータが限定されているという問題があるため、様々なパラメータにおける音速計測が重要になる。

高強度レーザーによる本研究の計測結果を同時に図4にプロットしている。我々の実験では固体状態を生成することが目的であったが、結果は液体の音速に近いものであった。これはパルス成型の不完全さによって、

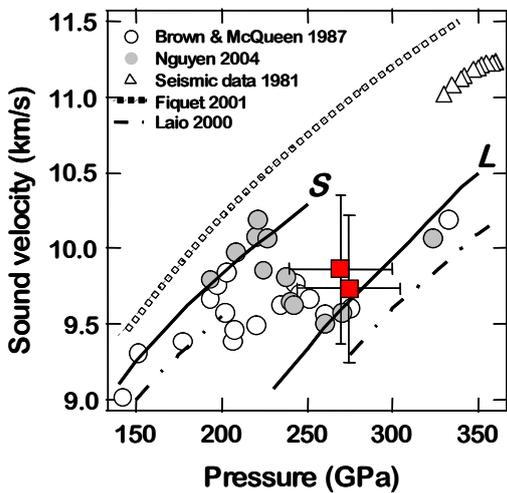


図4 音速計測結果

圧縮と同時に膨張も局所的に起こるような条件であったために（特にレーザー照射面近傍）、温度が衝撃波面よりやや上昇したことに起因すると解釈している。今後は波形成型に関するデータベースを固めることにより、1段圧縮では困難な高圧力下(250 GPa以上)での固体音速データを得る予定である。

・ナノ秒 X 線回折による構造解析

これまで述べてきたのは、主に衝撃波の流体パラメータに関する事項であり、試料の「マクロ」な振る舞いを実験的に観測するものであった。高強度レーザーを用いる別の特徴の一つとしては、前節で述べたようなレーザープラズマから発生するX線などをプローブ源として利用できる点である。高温・高密度状態にあるレーザープラズマからは、粒子（電子、陽子、重イオンなど）や電磁波（赤外光~X線）が放射されるが、中でもX線をプローブ光源として用いる応用は広く行われている。得たいX線の波長（光子エネルギー）はターゲット物質によって特性X線として選択可能であり、時間幅は短いものの放射光などの光源よりも高いピーク輝度が得られるため、衝撃圧縮時の過渡現象を追うには最適の光源である。

既にいくつかの先駆的な研究がなされており、例えば鉄の α 相から ϵ 相への転移が高強度レーザーによる短パルスX線回折法によって観測されている。このX線回折と従来からの光学計測を同時に行うことにより、流体パラメータと構造情報を同時に得るための試みを開始した。図5に実験配置の概略を示す。試料を照射するレーザーとは別のビームを試料の背面側に配置したX線発生用のターゲットに照射し、そこから放出されるX線（特性X線）の回折パターンをイメージングプレート（IP）で測定した。我々はまずこの方式で回折像が得られるかどうかのテストを行うために、試料にレーザーを照射しない（衝撃圧縮しない）条件下での計測を実施した。

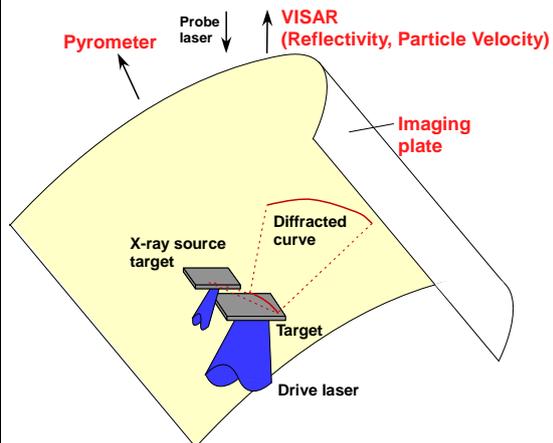


図5 X線回折計測の実験配置概略

図6に得られたデータの一例を示す。試料は鉄の単結晶 (bcc: α) を使用し、表面（裏面）の面方位は(100)であった。X線源ターゲットには同じく鉄を用い、約6.7 keVの $K\alpha$ 線の回折線を観測した。得られた回折線より、本来の鉄の単結晶では現れるはずの無い結

晶面と平行な面 (200), およびそこからシフトした2つの線が現れていることがわかった。このうちのひとつは1軸圧縮(約5%)されてシフトしたものであり, もうひとつは α から ϵ (hcp 構造) に相転移したことによって新たに現れたものであると推測される。この結果は前述の以前の実験結果と非常によく一致している。このデータはレーザーによる衝撃圧縮無し(0)のデータであるが, X線源から放出されるX線のうち比較的低エネルギーの高輝度X線が試料裏面で吸収を受け, これによって裏面側から衝撃波が駆動されていることを示唆している。本来であれば, 特性線のみを通すようなフィルターを試料とX線源の間に挿入すべきであったが, 本実験では試料とX線源を別々に設計したため, 結果的にX線輻射による衝撃波発生を排除することが出来なかったことにより, X線源からのX線による衝撃圧縮された状態が計測されたものとなった。実験結果自体は興味深いものであるが, 純粋にレーザー駆動の衝撃圧縮のみを観測する場合, 改良が必要である。現在ターゲットデザインを見直し, 実際の「レーザー衝撃圧縮」での回折像を得るための準備をすすめている。さらに光学計測との同時計測を本格的に実施する予定である。

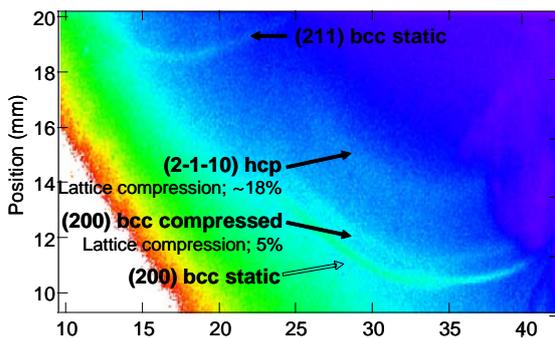


図 6 X線回折による鉄の圧縮状態の観測例

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7件)

- ① 生駒大洋, 佐野孝好, 境家達弘, 重森啓介 「高強度レーザーで木星の内部を覗く〜数百ギガパスカルの水素の状態方程式〜」 プラズマ・核融合学会誌, 第84巻, 第2号, pp. 93-99 (2008) (解説論文)
- ② K. Shigemori, D. Ichinose, T. Irifune 他 “Measurements of sound velocity of laser-irradiated iron foils relevant to Earth core conditions” European Physical Journal D, Vol. 44, No. 2, pp. 301-306 (2007) (論文, 査読有)

- ③ 重森啓介, 入船徹男, 近藤忠, 境家達弘, 「高強度レーザーによる高圧地球科学研究」高圧力の科学と技術, Vol. 18, No. 1, pp. 55-61 (2008) (解説論文)
- ④ K. Otani, K. Shigemori他 (9人中2番目) “Reduction of the Rayleigh-Taylor instability growth with cocktail color irradiation” Physics of Plasmas, Vol. 14, pp. 122702 (2007) (解説論文)
- ⑤ 重森啓介, 「高強度レーザー誘起衝撃波による金属炭素生成の可能性」高圧力の科学と技術, Vol. 16, No. 3, pp. 243-250 (2006) (解説論文)
- ⑥ H. Nagao, K. G. Nakamura, K. Kondo, N. Ozaki, K. Takamatsu, T. Ono, T. Shiota, D. Ichinose, K. A. Tanaka, K. Wakabayashi, K. Okada, M. Yoshida, M. Nakai, K. Nagai, K. Shigemori, T. Sakaiya, K. Otani, “Hugoniot measurement of diamond under laser shock compression up to 2 TPa” Physics of Plasmas, Vol. 13, pp. 052705 (2006) (論文, 査読有)
- ⑦ K. Shigemori, K. Otani, T. Shiota, H. Azechi, and K. Mima, “Shock pyrometry of laser-irradiated foils below 1 eV” Japanese Journal of Applied Physics, Vo. 45, No. 5A, pp. 4224 (2006) (論文, 査読有)

[学会発表] (計11件)

- ① 重森啓介, 大谷一人, 城下明之, 弘中陽一郎, 門野敏彦, 佐野孝好, 中井光男, 疇地 宏, 三間罔興, 尾崎典雅, 宮西宏併, 遠藤 恭, 木村友亮, 兒玉了祐, 清水克哉, 境家達弘, 高橋英樹, 近藤 忠, 入船徹男, 土屋卓久, 生駒大洋, 岩本晃史, 奥地拓生, 大野宗祐, 杉田精司, 関根康人, 松井孝典, 荒川政彦, 中村昭子, Justin Wark, 「高強度レーザーによる地球・惑星科学研究」, 第24回プラズマ・核融合学会年会, 栃木県県民文化会館, 2008年12月1日
- ② K. Shigemori, “High Energy Density Science Experiments with intense laser at ILE, Osaka University (招待講演)”, The 4th international conference on laser probing (LAP2008), Nagoya University, Japan, October 10, 2008
- ③ 重森啓介, 「高強度レーザー誘起衝撃波の発生とその応用 (招待講演)」レーザー学会学術講演会第28回年次大会, 名古屋国際会議場, 2008年1月31日
- ④ 重森啓介, 弘中陽一郎, 一之瀬大吾, 門野敏彦, 大谷一人, 「レーザー衝撃圧縮

試料の光学計測とX線回折の同時計測」, 第 48 回高压討論会, 倉吉パークスクエア, 2007 年 11 月 20~22 日

- ⑤ 重森啓介, 清水克哉, 中本有紀, 入船徹男, 角谷均, 尾崎典雅, 兒玉了祐, 大谷一人, 門野敏彦, 弘中陽一郎, 三間囿興, 「波形成型高強度レーザーパルスによるダイヤモンド圧縮」, 第 48 回高压討論会, 倉吉パークスクエア, 2007 年 11 月 20~22 日
- ⑥ 重森啓介, 清水克哉, 中本有紀, 入船徹男, 角谷均, 尾崎典雅, 兒玉了祐, 大谷一人, 門野敏彦, 弘中陽一郎, 三間囿興, 「高強度レーザーによるダイヤモンドの超高压下物性の研究」, 日本物理学会第 52 回年会, 北海道大学, 2007 年 9 月 21 日
- ⑦ K. Shigemori, K. Shimizu, Y. Nakamoto, T. Irifune, H. Sumiya, N. Ozaki, R. Kodama, K. Otani, D. Ichinose, Y. Hironaka, T. Kadono, H. Azechi, K. Mima, J. Wark, B. Remington, “Multiple Shock Compression of Diamond Foils with a Shaped Laser Pulse over 1 TPa (招待講演)”, 5th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, International Conference Center Kobe, Kobe, Japan, September 9-14, 2007
- ⑧ K. Shigemori, D. Ichinose, K. Otani, T. Kadono, H. Azechi, K. Mima, T. Irifune, T. Sakaiya, T. Kondo, N. Ozaki, R. Kodama, J. Wark, J. Hawreliak, B. Remington, “Shock compression of iron foils to Earth core conditions with GEKKO-HIPER laser facility” 15th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter June 24-29, 2007, Kohala Coast, HI, USA
- ⑨ 重森啓介, 一之瀬大吾, 入船徹男A, 大谷一人, 疇地宏, 境家達弘, 三間囿興, 尾崎典雅, 兒玉了祐, Bruce Remington, Jim Hawreliak, Justin Wark, 「高強度レーザーによる地球核条件における物性パラメータ計測」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月 20 日 重森啓介, 一之瀬大吾, 入船徹男A, 大谷一人, 疇地宏, 境家達弘, 三間囿興, 尾崎典雅, 兒玉了祐, Bruce Remington, Jim Hawreliak, Justin Wark, 「高強度レーザーによる地球核条件における物性パラメータ計測」, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007 年 5 月 23 日
- ⑩ 重森啓介, 一之瀬大吾, 大谷一人, 佐野孝好, 境家達弘, 疇地宏, 生駒大洋A,

入船徹男B, 三間囿興, 「高強度レーザー誘起衝撃波の

地球・惑星科学研究への応用」, 第 23 回プラズマ・核融合学会年会, 筑波大学, 2006 年 11 月 30 日

- ⑪ 重森啓介, 一之瀬大吾, 大谷一人, 佐野孝好, 生駒大洋, 入船徹男, 「高強度レーザー誘起衝撃波の地球・惑星科学研究への応用」, 第 47 回高压討論会, 熊本市産業文化会館, 2006 年 11 月 9~11 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/p hi/index.html>

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: 50335095

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: