

# レーザー誘起衝撃波を用いた高温高压下の鉄の音速計測

境家達弘<sup>1)</sup>, 高橋英樹<sup>1)</sup>, 近藤忠<sup>1)</sup>, 重森啓介<sup>2)</sup>, 門野敏彦<sup>2)</sup>,  
弘中陽一郎<sup>2)</sup>, 城下明之<sup>2)</sup>, 大崎教匡<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>大阪大学大学院理学研究科, <sup>2)</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

## 背景&目的

地球の内部構造は主に地震波観測によって調べられており, その観測結果から推定された地震波の速度分布 (=音速分布) は地球の内部構造を決定する[1]. 地表から地球中心に向かって中心までの距離の約半分の深さのところから鉄を主成分とするコア (地球核) と呼ばれる領域に入る. コアはさらに外核と内核に分けられ, 外核は液体, 内核は固体であると考えられている. 外核における鉄の対流は, ダイナモ機構による地球磁場の発生源と考えられ, 生命にも大きな影響を与えるので, 外核における鉄の状態 (物性や結晶構造) を調べることは大変重要である. 特に, 地震波観測結果などと直接比較することが可能な音速 (弾性波速度) を測定することは地球内部を探る上で重要である.

これまで報告されている純鉄の音速実験[2-5]のデータは圧力-温度条件が限られており, 地震波から推定される地球モデル (PREM[2]) と比較するには十分ではない. また, 軽元素の効果[6]や固相-固相転移の存在[2,3]といった問題もある. さらに, 恒星内部で起こる核融合の最終生成物でもある鉄は, 宇宙中に存在しており, 特に巨大惑星内部[7]への応用を考えると地球核条件以上の高压領域での音速計測が重要である. そこで本研究では, 純鉄を用いて, 静的圧縮法 (DAC[5]など) 或いは動的圧縮法 (2段式軽ガス銃[2]など) によって生成が困難である 400 GPa 以上の圧力条件下で音速計測を行い, 地球の外核条件に制限をかけることを目的として実験を行った.

## 実験手法

高压と高温を同時に発生できる手法の中で, 最も高温高压を生成可能な大型レーザー[8] (激光 XII 号 HIPER レーザーシステム) によるレーザー誘起衝撃圧縮法を用いて, 高温高压下での純鉄の音速を時間分解 X 線撮影法[4]を使って測定した.

図 1 に実験セットアップを示す. まず, 試料に圧縮用レーザーを照射し, 試料内部に衝撃波を伝播させることによって高温・高压状態を生成する. 一方, 試料の側面から, 金属物質にレーザー照射して発生

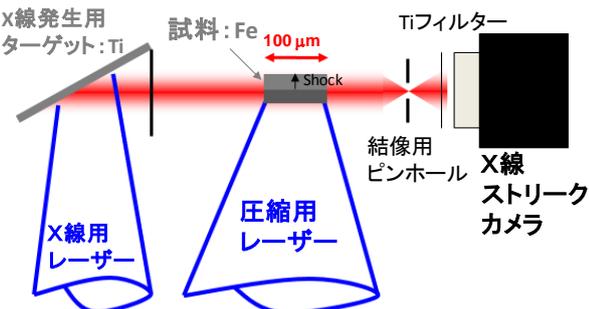


図 1. 実験セットアップ.

させた X 線を試料に照射し, その射影像から試料表面・裏面の動きを観測する. 試料中を伝播した衝撃波は試料裏面に到達すると裏面は自由膨張し希薄波が音速で試料表面に向かって伝播する. この希薄波が表面に到達すると, 試料全体が加速を始める. X 線撮影によって, 試料裏面に衝撃波が到達する時刻 ( $t_s$ ) とその時の試料の厚さ ( $d_1$ ), 希薄波が試料表面に到達するまでの時間 ( $t_r$ ) を観測することで, 試料の音速 ( $c_s = d_1/t_r$ ) を得ることができる (図 2(a)).

試料には純鉄 (純度 99.5% @ Goodfellow 製) を用いた. 純鉄の厚みは 38.2  $\mu\text{m}$  であった. X 線撮影用の X 線光源にはチタンを用いた. 圧縮用のレーザーは全 12 本のビーム (パルス幅: 2.5 ns) のうち 7 本のビームを用い, 各々遅延を付加して, パルス幅 7 ns の擬似フラットトップパルスにした. レーザー波長は 3 倍波の 351 nm, エネルギーは約 150 J/ビーム, スポット径は約 300  $\mu\text{m}$  である.

## 実験結果

図 2(b) は X 線撮影法を使った音速計測の生画像である. 白い部分ほど X 線の透過量が多いことを示す. 図の左側からレーザーが照射されていて, 紙面裏側から来る X 線によって試料の影が観測されている. このデータの縦軸で表わされる各時刻において, 計測器の時間分解能程度 (約 140 ps) の時間で空間プロファイルを積分し, そのラインプロファイルから試料表面と裏面の軌跡をそれぞれ決定した. 得られた軌跡から衝撃波と希薄波の伝播時間を評価した (図 2(b) 中矢印). この値と試料厚みから純鉄の音速を導出し, 過去の実験報告例とともに図 3 にプロットした. 800 GPa を超える圧力まで音速データの取得に成功した. これは天王星や海王星の核と同程度の圧力領域[7]に相当する. 本実験結果は, 過去の報告と調和的であり, 圧力に対して音速が単調に増加

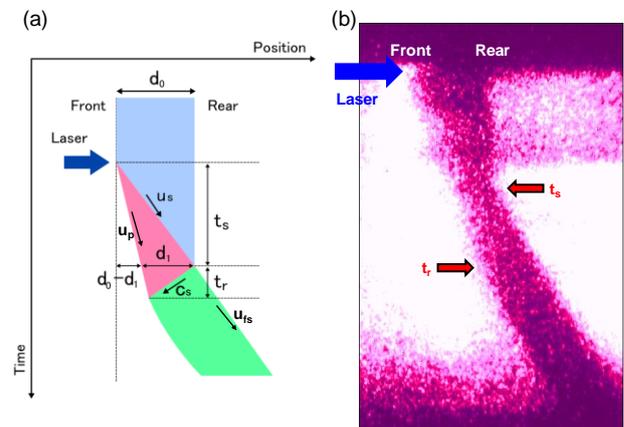


図 2. (a) 音速測定概念図. 側面から見た試料の断面. (b) X 線撮影生画像. 黒い部分が試料の影, 白い部分が透過 X 線を示している.

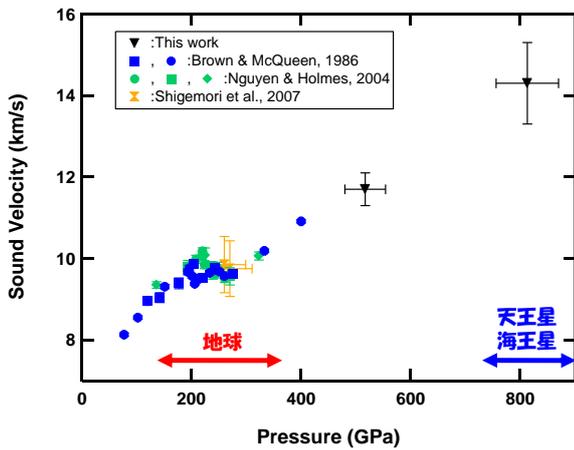


図 3. 純鉄の音速と圧力の関係. 矢印は地球や惑星の核の圧力領域を示している.

する傾向が見られた. また, X線撮影による試料表面・裏面の軌跡から高温高压下の試料の圧力・密度などの状態量を音速計測と同時に取得でき, 取得した圧力・密度などはこれまでに得られている純鉄のユゴニオ曲線[9]とよく一致していた. また, 高温高压下における音速と密度の関係は, 地球内部を構成する物質においても考えられている音速が密度に比例するという関係[10,11] (Birch's Law) と調和的であった. これらの結果は, 高温高压下での熔融鉄の音速データから外核領域への外挿による検討の可能性を示唆し, 軽元素を含んだ鉄合金の音速計測を行うことによって, 外核での軽元素の含有量等に制限をかけることができると考えられる[6].

## まとめ

大型レーザーを用いて時間分解X線撮影法による高温高压下の純鉄の音速測定を行った. この手法により高温高压下における試料の表面と裏面の軌跡を測定することで, 音速だけでなく, 圧力や密度などの状態量を同時に取得することが出来た. 800 GPaを超える圧力での音速データを取得し, これは天王星や海王星の核の圧力領域に相当し, 巨大惑星内部への応用の可能性がある. 取得した音速データは, これまでに報告されている熔融鉄の音速結果と調和的であり, 高压領域において熔融鉄の音速と密度との関係が Birch's Law に従う傾向にあることを示した.

## 謝辞

本実験は, 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの共同利用実験のもとで行いました. 本実験の実施において, 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターのレーザー部, ターゲット部, プラズマ計測部の方々にご協力して頂いたことを心より感謝いたします.

## 参考文献

- [1] Dziewonski, A. M., and D. L. Anderson (1981), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 25, 297-356.
- [2] Brown, M. J., and R. G. McQueen (1986), *J. Geophys. Res.*, 91, 7485-7494.
- [3] Nguyen, J. H., and N. C. Holmes (2004), *Nature*, 427,

339-342.

- [4] Shigemori, K., *et al.*(2007), *Eur. Phys. J. D*, 44, 301-305.
- [5] Fiquet, G., *et al.*(2001), *Science*, 291, 468-471.
- [6] Badro, J., *et al.*(2007), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 254, 233-238.
- [7] Guillot, T., *et al.*(1999), *Science*, 286, 72-77.
- [8] Yamanaka, C., *et al.*(1987), *Nucl. Fusion*, 27, 19-30.
- [9] Brown, J. M., *et al.*(2000), *J. Appl. Phys.*, 88, 5496-5498.
- [10] Birch, F. (1960), *J. Geophys. Res.*, 65, 1083-1102.
- [11] Birch, F. (1961), *J. Geophys. Res.*, 66, 2199-2224.