

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17784

研究課題名(和文)高温高压下での固体鉄合金の弾性波速度・密度測定からの横波を主体とした地球核の探求

研究課題名(英文) Sound velocity and density measurements of solid iron alloys under high-pressure and high-temperature conditions

研究代表者

柴崎 裕樹 (Shibazaki, Yuki)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：10730830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球惑星核を構成する物質の解明を目的に、核の主要構成物質である固体鉄の弾性波速度及び密度測定を高温高压下で行った。従来、弾性波速度の密度依存性は、温度に依存せず線形であると経験的に考えられてきたが、本研究によって、温度上昇と共に線形関係から低速度側に逸脱することが定量的に分かった。本研究結果は、今後観測予定である火星の地震波データと比較することで、地球のみならず、火星核の組成解明にも繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：Measurements of sound velocity and density of solid iron were carried out under high-pressure and high-temperature conditions in order to discuss the compositions of planetary cores. Sound velocities, P-wave and S-wave velocities, of bcc- and fcc-Fe decrease with increasing temperature at a given density. These results will play a key role in discussing the compositions of planetary cores such as the Earth and Mars.

研究分野：高压地球科学

キーワード：高温高压 惑星中心核 鉄 弾性波速度

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震学的観測によって得られる地球中心核の物理量(密度や弾性波速度など)は、数少ない核の直接的な情報である。これらの物理学的情報と隕石などから得られる化学的知見によって、地球の核は固体の内核と液体の外核で構成され、鉄を主成分とし、少量の軽元素を含むと考えられている(Birch, 1952)。現在、化学的側面より、水素、炭素、酸素、珪素、硫黄などが軽元素の有力な候補として挙げられているが、決定的な証拠は無く、この軽元素の種類と量の解明が、核の研究における最重要課題の一つになっている。

(2) 地震学的に見積もられている核の密度が純鉄の密度より小さいことから、鉄と様々な軽元素合金の高温高压下での密度が測定され、密度欠損を説明する各軽元素の量が推定されてきている(e.g. Sata et al., 2010)。従来の核中の軽元素の研究は、この様に密度を基準として行われるものがほとんどであったが、近年、静的圧縮による高压下での弾性波速度測定技術が格段に進歩したことにより、超音波法やX線非弾性散乱法(IXS)、X線核共鳴非弾性散乱法(NRIXS)などによって高压下での鉄-軽元素合金の弾性波速度も測定され、核の弾性波速度分布との比較から軽元素量を見積もる方法もとられ始めている(e.g. Badro et al., 2007)。

(3) 弾性波速度を基準とした軽元素量の算出には、パーティクル(弾性波速度と密度の線形関係)を仮定して核の温度圧力条件まで実験値を外挿するのが一般的である。ただし、このような見積もり方法には以下のような問題点も含まれている。

パーティクルの温度依存性が未確定である(多くの場合、温度依存性を無視)。

縦波(v_p)のみの比較で、横波(v_s)はほぼ検討されていない。

これらの問題が生じている原因として、そもそも「 v_p の温度依存性が小さい」こと、高压下での測定の多くがダイヤモンドアンビルセル(DAC)によるIXS法やNRIXS法であるため、温度の制御が難しく「温度依存性を定量的に見積もれるほど十分な高温のデータがない」ことが挙げられる。また、これらのIXS法やNRIXS法では「直接 v_s を測定することが困難」であることも挙げられる。今後、次のステップとしてより精度よく地球核中の軽元素の制約、そして絶対量を議論していくためには、温度の効果を明確にし、 v_p だけでなく温度依存性の大きな v_s の比較も同時に行うことが必要不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 以上のことを踏まえ、本研究では、我々がこれまで弾性波速度測定法として用いてきたIXS法ではなく(Shibazaki et al.,

2012; Ohtani et al., 2013)、 v_p 、 v_s 両方が直接測定可能な超音波法を用いて、高温高压下での弾性波速度測定を行う。

(2) 高压下での超音波測定では、マルチアンビル高温高压装置を用いるため、DACによるIXS法より圧力発生面で劣ってしまうが、温度・圧力制御に非常に優れ、系統的な高温高压下での測定が可能である。そして何より v_s を直接測定可能という大きな利点がある。この利点を生かし、 v_p だけでなく、温度依存性の議論に適している v_s にも注目して、パーティクルの温度依存性を明確化していくことを研究目的とする。

(3) まずは、核中の軽元素の議論を行う上で最も基本となる固体Feの高温高压下での弾性波速度(v_p 、 v_s)及び密度測定を行った。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、パルス・エコー・オーバーラップ法(以下、超音波法)と放射光X線によるX線ラジオグラフィ法を用いて、高温高压下での弾性波速度測定を行った。測定手法は、先行研究(Higo et al., 2009)に詳細が記述されているが、超音波法によって試料中を超音波が伝搬する時間を測定し、X線ラジオグラフィ法から高温高压下での試料長を測定することで、時間と長さの関係から、試料の弾性波速度を測定する方法である。実験は、放射光施設SPring-8のBL04B1ビームライン及び放射光施設PF-ARのNE7Aビームラインにて行った。SPring-8のBL04B1には、マルチアンビル装置と超音波測定装置、X線ラジオグラフィ用CCDカメラが設置されており、高温高压下での弾性波速度測定が可能であるビームラインである(Higo et al., 2009)。PF-ARのNE7Aは、研究協力者である西田博士を中心に既存のマルチアンビル装置に超音波測定用の装置群を立ち上げ、こちらでも高温高压下での弾性波速度測定が可能となっている(Nishida et al., 2016)。またどちらのビームラインでも、XRD測定が可能ことから、高温高压下での密度測定も可能である。

(2) 超音波測定には10°Y-cut LiNbO₃圧電素子を用い、周波数は、P波速度(v_p)用には57MHz、S波速度(v_s)用には30MHzを用いた。超音波の通り道となるバッファローッドには、イットリウム安定化ジルコニア(YSZ)を用いた。

(3) 試料にはFeの粉末をペレット状に固めたものを用いた。実験後の試料の組成を電子顕微分析にて測定したところ、99.8(5) wt.% Fe + 0.2(1) wt.% Oであり、バッファローッド(YSZ)からのコンタミネーションは見られなかった。

(4) はじめに目標圧力まで加圧した後、目標温度まで加熱した。低温では差応力のため弾性波速度・密度が正確に測定出来ない。そのため、一度目的温度まで加熱後、10分程度アニールを行い、温度を下げながら100~150 毎に、X線回折、X線ラジオグラフィ像、超音波データ (V_p , V_s) を取得していった。

4. 研究成果

(1) 本研究の実験温度圧力条件は、20万気圧(GPa)、1400Kであり、bcc相とfcc相について、それぞれの V_p , V_s の温度圧力(密度)依存性について求めた。

(2) 図1に得られた bcc-Fe の結果を、図2に fcc-Fe の結果を示す。パーチ則の温度依存性を議論するため、横軸は密度でプロットしている。

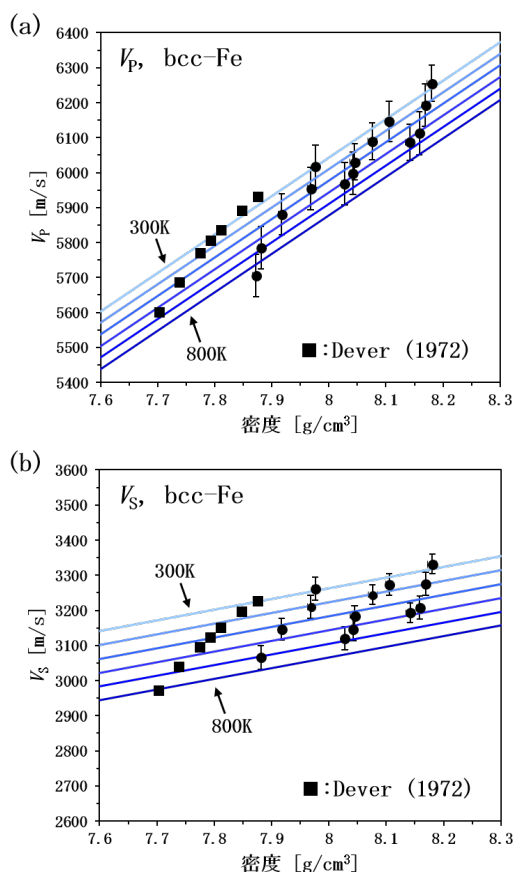


図1 bcc-Fe の(a) V_p , (b) V_s の密度依存性は常圧の先行研究(Dever, 1972)

今回、パーチ則の温度依存性を定量的に議論するため、以下のような線形な温度依存性を弾性波速度 密度の関係に導入した。

$$V_{p,s} = a^{p,s} + b^{p,s}(T) \quad [1]$$

$$b^{p,s}(T) = b_0^{p,s} + b_1^{p,s}(T-300) \quad [2]$$

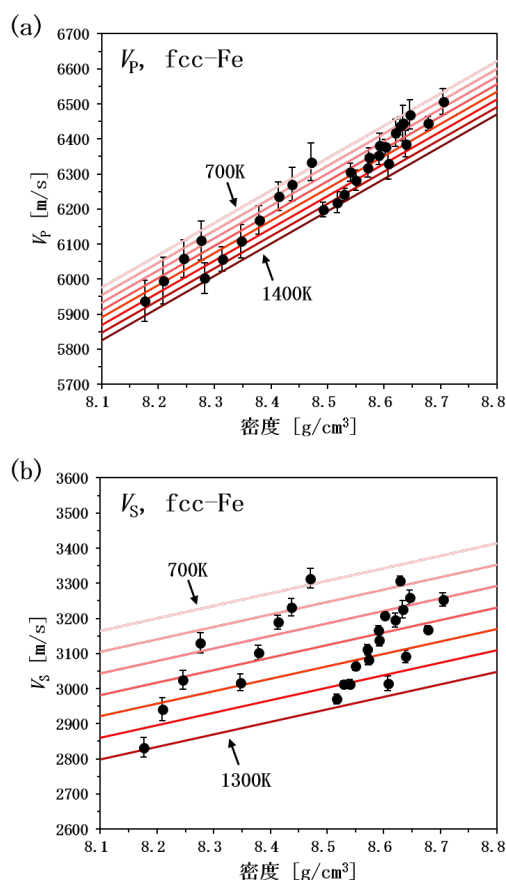


図2 fcc-Fe の(a) V_p , (b) V_s の密度依存性

$V_{p,s}$ は実験で得られた各弾性波速度、 ρ は実験で得られた密度、 T は実験温度であり、 $a^{p,s}$, $b_0^{p,s}$, $b_1^{p,s}$ はフィッティング・パラメータとして、切片にのみ線形の温度依存性を持たせた形である。図1、2の各直線は、式[1], [2]を使って実験結果をフィッティングして得られたパラメータを用いて、各温度(100K 毎)で求めた弾性波速度 密度の関係である。

(3) 実験結果は、式[1], [2]の関係式をよく満たし、図1、2から明らかのように、パーチ則には温度依存性が明確に存在することが分かる。一方で、本温度圧力範囲においては、一定温度下では、パーチ則(弾性波速度 密度の線形関係)は比較的良く成り立っていると考えられる。

(4) 今回の実験によると、bcc相とfcc相の相転移の間で、顕著な弾性波速度の不連続は観察されなかった。また、bcc相とfcc相の間で、 V_p , V_s 共にパーチ則の傾きの違いも特に見られなかった。

(5) 温度依存性については、bcc相、fcc相共に、 V_p よりも V_s の方が2倍程度大きい。これは体積弾性率(K)よりも剛性率(G)の方が、温度依存性が大きいことに起因していると考えられる。bcc相とfcc相の温度依存性を比較すると、bcc相よりもfcc相の方がさ

らに2倍程度温度依存性が大きかった。これは、相(つまり構造)の違いによるものと言うよりは、fcc相の方がより高温であることが原因だと考えられる。このことを考えると、今回のような数百度の温度幅で考える場合は、線形の温度依存性でも成り立つが、より幅広い温度幅で考える場合は、温度依存性を非線形に考えるべきであると考えられる。

(6)今回測定したfcc相は、水星や火星といった比較的小型の惑星や、月などの衛星の中心核を主に形成していると考えられている(e.g., Antonangeli et al., 2015)。月に関しては月震波データが存在するが、月の核の情報が得られるほど十分なものではなく、更なるデータの取得が必要とされる。また、水星や火星の地震波データは存在していないが、NASAによる火星探査InSight計画は、火星の地震波データの取得が主なミッションとなっており、2018年5月に無事探査機が打ち上げられた。本研究で得られたfcc相及びbcc相の高温高压下での弾性波速度(v_p , v_s)密度の関係を、今後得られるであろう、これらの地震波データと比較することで、地球以外の惑星核の組成についても詳細に議論することが可能になると考えられる。これによって、比較惑星学の観点から、太陽系の形成についても理解が深まっていくことが期待される。

<引用文献>

Antonangeli, D., G. Morard, N.C. Schmerr, T. Komabayashi, M. Krisch, G. Fiquet, and Y. Fei, Toward a mineral physics reference model for the Moon's core, PNAS, Vol. 112, 2015, 3916 - 3919.

Badro, J., G. Fiquet, F. Guyot, E. Gregoryanz, F. Occelli, D. Antonangeli, and M. d'Astuto, Effect of light elements on the sound velocities in solid iron: Implications for the composition of Earth's core, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 254, 2007, 233 - 238.

Birch, F., Elasticity and constitution of the Earth's interior, Journal of Geophysical Research, Vol. 57, 1952, 227 - 286.

Dever, D. J., Temperature dependence of the elastic constants in iron single crystals: relationship to spin order and diffusion anomalies, Journal of Applied Physics, Vol. 43, 1972, 3293 - 3301.

Higo, Y., Y. Kono, T. Inoue, T. Irifune, and K. Funakoshi, A system for measuring elastic wave velocity under high pressure and high temperature using a combination of ultrasonic measurement and the multi-anvil apparatus at SPring-8, Journal of Synchrotron Radiation, Vol. 16, 2009, 762 - 768.

Nishida, K., A. Suzuki, H. Terasaki, Y. Shibazaki, Y. Higo, S. Kuwabara, Y. Shimoyama, M. Sakurai, M. Ushioda, E. Takahashi, T. Kikegawa, D. Wakamayashi, and N. Funamori, Towards a consensus on the pressure and composition dependence of sound velocity in the liquid Fe-S system, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 257, 2016, 230 - 239.

Ohtani, E., Y. Shibazaki, T. Sakai, K. Mibe, H. Fukui, S. Kamada, T. Sakamaki, Y. Seto, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Sound velocity of hexagonal close-packed iron up to core pressures, Geophysical Research Letters, Vol. 40, 2013, 1 - 6.

Sata, N., K. Hirose, G. Shen, Y. Nakajima, Y. Ohishi, and N. Hirao, Compression of FeSi, Fe₃C, Fe_{0.95}O, and FeS under the core pressures and implication for light element in the Earth's core, Journal of Geophysical Research, Vol. 115, 2010, B09204.

Shibazaki, Y., E. Ohtani, H. Fukui, T. Sakai, S. Kamada, D. Ishikawa, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron, N. Nishitani, N. Hirao, and K. Takemura, Sound velocity measurements in dhcp-FeH up to 70 GPa with inelastic X-ray scattering: Implications for the composition of the Earth's core, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 313 - 314, 2012, 79 - 85.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Shibazaki, Y. and Y. Kono, Effect of silicon, carbon, and sulfur on structure of liquid iron and implications for structure-property relations in liquid iron-light element alloys,

Journal of Geophysical Research:
Solid Earth, 査読有, in press
DOI: doi.org/10.1029/2018JB015456

Shibazaki, Y., K. Nishida, Y. Higo,
M. Igarashi, M. Tahara, T. Sakamaki,
H. Terasaki, Y. Shimoyama, S.
Kuwabara, Y. Takubo, and E. Ohtani,
Compressional and shear wave
velocities for polycrystalline
bcc-Fe up to 6.3 GPa and 800 K,
American Mineralogist, 査読有, Vol.
101, 2016, 1150 - 1160
DOI: doi.org/10.2138/am-2016-5545

Kuwabara, S., H. Terasaki, K.
Nishida, Y. Shimoyama, Y. Takubo, Y.
Higo, Y. Shibazaki, S. Urakawa, K.
Uesugi, A. Takeuchi, and T. Kondo,
Sound velocity and elastic
properties of Fe-Ni and Fe-Ni-C
liquids at high pressure, Physics
and Chemistry of Minerals, 査読有,
Vol. 43, 2016, 229 - 236
DOI:
doi.org/10.1007/s00269-015-0789-
y

Nishida, K., A. Suzuki, H. Terasaki,
Y. Shibazaki, Y. Higo, S. Kuwabara,
Y. Shimoyama, M. Sakurai, M. Ushioda,
E. Takahashi, T. Kikegawa, D.
Wakabayashi, N. Funamori, Towards a
consensus on the pressure and
composition dependence of sound
velocity in the liquid Fe-S system,
Physics of the Earth and Planetary
Interiors, 査読有, Vol. 257, 2016,
230 - 239
DOI:
doi.org/10.1016/j.pepi.2016.06.00
9

[学会発表](計 6 件)

柴崎裕樹, 河野義生, “ 高圧下におけ
る液体鉄系合金の局所構造測定とそ
の軽元素依存性 ”, 第58回高圧討論
会, 2017年

柴崎裕樹, 西田圭祐, 戸邊宙, 阿部
涼太, 鈴木昭夫, 寺崎英紀, 下山裕
太, 黒川冬華, 肥後祐司, 亀掛川卓
美, “ fcc-Feの弾性波速度に対する水
素の効果 ”, 第57回高圧討論会, 2016
年

Shibazaki, Y., K. Nishida, Y. Higo,
M. Igarashi, M. Tahara, T. Sakamaki,
H. Terasaki, Y. Shimoyama, S.
Kuwabara, Y. Takubo, and E.
Ohtani, “ Sound velocity
measurements of solid iron under

high pressure and high temperature
using an ultrasonic method ”, Japan
Geoscience Union Meeting 2015, 2015
年

柴崎裕樹, 西田圭祐, 肥後祐司, 五
十嵐愛子, 田原政紀, 坂巻竜也, 寺崎
英紀, 下山裕太, 田窪勇作, 桑原壮
馬, 大谷栄治, “ 超音波法を用いた高
温高圧下での固体鉄の弾性波速度・密
度測定 ”, 第56回高圧討論会, 2015年

6 . 研究組織

(1)研究代表者

柴崎 裕樹 (SHIBAZAKI, Yuki)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・
助教
研究者番号 : 10730830

(2)研究協力者

西田 圭祐 (NISHIDA, Keisuke)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号 : 40530887