

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247089

研究課題名(和文) 高圧物性から探る水星・火星核の組成とダイナミクス

研究課題名(英文) Composition and dynamics of Mercury and Mars cores approached from physical properties under high pressures

研究代表者

寺崎 英紀 (Terasaki, Hidenori)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50374898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水星・火星中心核の組成解明を目的として、核構成物質である鉄合金液体・固体の音速と密度をはじめとする弾性特性を惑星核条件まで調べた。高圧下での音速・密度同時測定システムを導入し、各圧力条件で音速と密度の関係性と体積弾性率を求めることが可能となった。この結果、純鉄の弾性特性に対する軽元素の効果、炭素・硫黄・珪素・ニッケルについて明らかにすることができ、その効果は元素種により大きく異なる傾向を示す事が明らかとなった。得られた結果に基づき、惑星および月の中心核の組成・条件に関する推定を行った。

研究成果の概要(英文)：To clarify the core compositions of Mercury and Mars, elastic properties of liquid and solid Fe-alloys were investigated up to the planetary core conditions. We developed simultaneous sound velocity and density measurement system under high pressure and obtained relationship between sound velocity and density. It is found that the effect of alloying elements (C, S, Si, Ni) on the elastic properties of iron shows significantly different trend depending on alloying elements. Based on these results, we estimated the composition and conditions of the planetary cores.

研究分野：高圧地球惑星科学

キーワード：中心核 地球型惑星 音速 密度 鉄合金 液体 高圧 弾性特性

1. 研究開始当初の背景

地球型惑星の核組成は、太陽系の元素分布とも密接に関連する重要な問題である。しかし水星や火星といった地球以外の地球型惑星核の組成の情報についてはほとんどわかっていない。これに関して、近年打ち上げが予定されている日欧共同の水星探査計画 (BepiColombo)では、水星の固有磁場や表面組成、重力場情報が得られる。またほぼ同時期の NASA の火星内部探査計画(InSight)では、地震と熱流量観測が実施され火星内部の構造・温度に関する直接情報が初めて得られることが期待される。これらの探査観測データに対し、惑星内部の情報を得るには、高温高压実験に基づく“実験データ”との対比が必須となる。特に核を構成する鉄合金の高温高压下での物性(密度・音速)が明らかとなれば水星・火星核組成の特定が初めて可能となる。

我々はこれまで高温高压下における鉄合金液体の物性測定を実施し、鉄-軽元素系液体の密度や粘性を明らかにしてきた(例えば Terasaki et al. 2006, 2010)。これより軽元素により密度の圧力変化に与える影響は異なることがわかってきた。また我々は高温高压下でX線トモグラフィ(CT)を用いた密度と音速測定システムを開発した。これにより高温高压下での密度と音速を測定することが可能となった。各圧力下での密度と音速が同時に求めれば、液体合金の密度と音速の関係性に加え、体積弾性率等の弾性定数も求められる。しかしこの装置を用いた測定は圧力領域が数万気圧と低圧力条件に限定されていた。さらに一部の組成の液体合金において測定が行われたに過ぎなかった。液体合金は大きな圧縮性のため圧力と共に物性が大きく変化する。従って惑星中心核の描像をより正確に理解するためには、測定圧力を拡張させ実際の惑星核条件において、様々な組成の鉄合金液体の弾性特性 (特に密度と音速) を調べることが必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、惑星核条件での弾性特性測定というターゲットを設定し、水星・火星核の組成とダイナミクスの解明に挑む。具体的には X 線吸収法と超音波法を用いて密度と音速の同時測定法を確立し、様々な組成の鉄合金液体と固体の測定することを目的とする。さらに測定の圧力領域を拡張させ、正確な種々の核物質の弾性特性を決定する。得られた物性データと水星と火星の探査データとの組み合わせにより信頼度の高い惑星核の組成モデルを構築する事を目指す。

3. 研究の方法

(1) 高压下の音速・密度同時測定の開発

SPring-8 の BL22XU ビームラインに音速測定システムを新たに導入し、これまで行ってきた X 線吸収密度測定法と組み合わせて、キュービックアンビルプレスを用いた高温高压下における液体試料の密度と音速の同時測定法を開発した。

音速測定は、超音波パルスエコー法を用いた。この方法ではアンビル底面に貼付した圧電素子から超音波 (30-45MHz) を試料に入射し、試料端からの反射波をオシロスコープで検出し、入射波と反射波の到達時間差から試料中の伝搬時間を求めた。試料長の測定は、本課題で導入した CMOS カメラを用いて X 線イメージより求めた。密度測定は X 線密度吸収法を用いた。試料部からの X 線透過率をイオンチャンバー検出器から計測し、得られた X 線吸収プロファイルと Beer-Lambert の式から密度を算出した。また検出器系ステージを導入し、迅速な検出器の切替、効率的なデータ取得が可能となった。これは反応性・移動性の高い液体試料の測定に効果的である。BL22XU での装置の外観を Fig.1 に示す。

上記の装置を用いて、Fe-C, Fe-Ni, Fe-O, Fe-Ni-C, Fe-Ni-S, Fe-Ni-Si の各鉄合金試料の測定を実施した。超硬アンビル先端サイズ

6mmを使用し5 GPaまでの圧力条件での密度と音速を測定した。

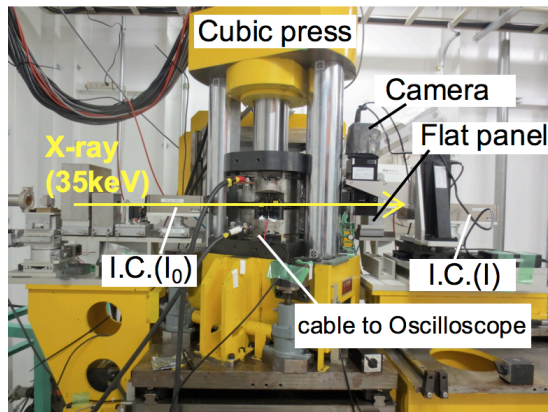


Fig. 1 Simultaneous sound velocity and density measurement system at BL22XU.

5 GPa以上の圧力では、BL04B1 ビームラインの1500t川井型マルチアンビル装置を用いた。音速測定は、ビームライン設置の高感度超音波計測システムを使用し、超音波パルスエコー法により測定した。密度測定は単色X線(33, 51 keV)を用いて、X線イメージング吸収法により測定した。この方法ではプレス下流に設置したCMOSカメラで試料からの透過X線強度(I)の二次元分布を測定し、プレス上流にも同じCMOSカメラ光学系を導入して入射X線強度(I₀)を測定した。上記のシステムを用いて、鉄合金(Fe-Ni, Fe-Ni-S, Fe-Ni-Si, Fe-Ni-C)試料を用いた測定を15 GPaまでの圧力条件で実施した。

(2)DACを用いた測定開発および圧力拡張密度測定のためのさらなる圧力拡張を目指して、外熱ダイヤモンドセル(DAC)を用いたX線吸収測定法を開発した。PF-AR放射光のNE1及びSPring-8のBL22XUによる測定を実施したビームラインで測定を実施した。30 KeVの単色X線を用い、X線透過率は、CCDカメラを用いたX線イメージング又はイオンチャンバーにより測定した。試料には低融点金属であるインジウムを用いた。試料部は、ガスケットに2~3個の穴をあけ、インジウムと標準物質(KBr, KCl)を封入した。複数物質(試料と標準物質)のX線吸収率を実測し、

Beer-Lambertの式を連立させることで、試料の密度を求めることが可能となる。この手法よりインジウム固体と液体の密度を19 GPa, 720 Kまでの条件で測定した。加えてSPring-8 BL35XUにおいてFe₃S, Fe-Si固体の音速を100 GPaの圧力条件まで測定した。

4. 研究成果

本研究により得られた成果を、各鉄合金液体・固体の結果ごとに以下に示す。

Fe-C: Fe-3.5wt%C液体の音速・密度の同時測定を、3.5 GPa, 1850 Kまで実施した。本測定条件においてFe-C液体の音速と密度の関係性は、線形関係を持つバーチ則に従うことがわかった。炭素の添加により液体鉄の音速・密度が共に2%程度減少した。一方、Fe-Cの体積弾性率は液体鉄から大きく変化しないが、その温度依存性は炭素の添加で大きくなることがわかった。この結果、月核に炭素が入った場合、月核の温度条件は1910-1950 Kと比較的高いことが推定された(Shimoyama, Terasaki et al. 2016)。最近の炭素の分配実験からも月核に炭素が入る可能性が報告され(Steenstra et al. 2017)、その条件は本結果とも整合的である。

Fe-Ni, Fe-Ni-C: Fe-10wt%Ni及びFe-10wt%Ni-4wt%Cの音速を6.6 GPa, 2183 Kまで測定した。この結果、Fe-Niの音速は温度依存性が非常に小さいが、Fe-Ni-Cは高温で音速は大きく減少することがわかった。得られた結果を音速と密度との関係性を示すバーチプロットに示すと、月の中心核条件である5 GPaにおいては、純鉄の音速と密度に対する不純物元素の効果は、ニッケルと炭素で逆傾向を示し(Niは密度を増加、音速を減少)、さらに硫黄の効果とも異なっていることがわかった。これは月核の地震波データから核中の元素を制約出来ることを示唆する(Kuwabara, Terasaki et al. 2016)。

Ni-S: Ni-32at%S液体の音速と密度を5.6 GPa,

1045 K の条件まで同時測定した。Ni-S 液体の音速と密度の圧力依存性は Fe-S 液体の傾向を調和的な傾向を持つことがわかった。しかし密度と音速の関係をバーチプロットした場合、Ni-S と Fe-S 液体は似た傾き(dV_p/dp)を持つものの、異なる領域に位置する。これはバーチプロットから惑星核の議論をする場合、ニッケルの影響を考慮する必要があることを示している(Terasaki et al. 2018)。

Fe-Ni-S: Fe-Ni-S 液体の音速と密度を 15 GPa, 2200 K までの圧力・温度条件で測定した。測定圧力領域で、硫黄量と共に音速および体積弾性率は大きく減少した。この傾向は Fe-S 系での報告例と調和的である。音速の圧力変化から体積弾性率を求めた。得られた弾性特性は密度測定結果とも整合的であった(Terasaki et al.)。さらに、熱力学解析から、15GPa, 1200K における $Fe_{70}S_{30}$ 液体の密度に制約を与えた(Urakawa and Suzuki, 2018)。

Fe_3S 固体については、レーザー加熱 DAC を用いて非弾性 X 線散乱法による 100 GPa, 1900 K までの条件で音速測定を行なった。高温下では音速の低下が推測される。

Fe-Ni-Si: Fe-Ni-Si 液体の音速と密度を 12 GPa, 2100 K までの条件で測定した。この結果、珪素の添加量により密度は減少するが、音速は増加することがわかった。一方、体積弾性率への影響は小さい。また Fe-Si 固体の弾性的性質についても、広範な圧力範囲で音速の圧力依存性を調べた。10 GPa までの低い圧力条件下では BL04B1 でマルチアンビル高圧発生装置と超音波法、より高い圧力条件下(～80GPa)では BL35XU で DAC と X 線非弾性散乱を組み合わせることで、測定を実施した。Fe-Si 合金は温度・圧力条件によって異なる結晶構造を示すが、体心立方(bcc)・面心立方(fcc)・六方細密(hcp)構造の各々に対して音速 - 密度の関係を明らかにし、サイズの異なる各惑星の核を理解する上での有益な情報を得た。

以上の測定結果から、探査データ情報と合わせ惑星内部構造モデリングを行い、水星と火星中心核の S, Si 量を見積もった。この結果、水星はこれまでの推定量と調和的な硫黄量がみつめられたが、火星核は従来以上の S 量が必要となる事が推定される。本研究で得られた弾性特性は、内部構造・組成を推定する上で、今後予定される惑星の内部観測データと比較から有益データになると期待される。

Indium: 外熱 DAC を用いた X 線イメージング吸収法で、インジウム密度を 19 GPa, 720 K までの条件で測定した。この結果、吸収法から求めた 500 K までの固体インジウム密度は、X 線回折からの密度と 2 %以内の精度で一致し、弾性定数を精度良く決定することが出来た(Takubo, Terasaki et al. 2018)。この手法を用いてインジウム液体の密度を求めた結果、これまで報告されていた固液の密度逆転は起こらないことがわかった。本結果より外熱 DAC を用いた密度測定が確立されたことで、密度測定圧力が拡張できた意義は大きい。

本課題に関連して、鉄合金物性、惑星中心核に焦点を当てた"月・火星・水星内部研究会"を開催し、実験・観測・分析の観点から地球型惑星内部構造について議論を行った。また地球惑星連合大会において惑星核セッションを企画し学術交流をおこなった。加えて、地球深部についてまとめた著書を取りまとめ、出版した(Terasaki and Fischer, 2016)。また高圧下の液体密度測定技術についてのレビューを *Magmas under pressure* にまとめた(Terasaki and Nishida, 2018)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 40 件) (全て査読有り)

1. Terasaki, H., K. Nishida, S. Urakawa, Y. Takubo, S. Kuwabara, Y. Shimoyama, K. Uesugi, Y. Kono, A. Takeuchi, Y. Suzuki, Y. Higo, T. Kondo, Sound velocity and density of liquid $Ni_{68}S_{32}$ under pressure using ultrasonic and X-ray absorption with tomography methods, *Comptes Rendus Geoscience*, in press, 2018.
2. Takubo, Y., H. Terasaki, T. Kondo, S. Mitai,

- S. Kamada, T. Kikegawa, A. Machida, Development of density measurement for metals at high pressures and high temperatures using X-ray absorption imaging combined with externally heated diamond anvil cell, *Comptes Rendus Geoscience*, in press, 2018. (doi:10.1016/j.crte.2018.04.002)
3. Kishimoto, S., Urakawa, S., H. Terasaki, S. Kuwabara, K. Nishida, T. Sakamaki, A. Takeuchi, K. Uesugi, Metal-Silicate Separation Process in the Planetary Interior, *SPring-8/SACRA Research Report*, **6**, 2018.
 4. Shimoyama Y., H. Terasaki, S. Urakawa, Y. Takubo, S. Kuwabara, S. Kishimoto, T. Watanuki, A. Machida, Y. Katayama, T. Kondo, Thermoelastic properties of liquid Fe-C revealed by sound velocity and density measurements at high pressure, *Journal of Geophysical Research*, **121**, 10.1002/2016JB012968, 2016.
 5. 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 Earth and Planetary Interiors*, **257**, 230-239, 2016.
 6. Shibazaki, Y., K. Nishida, Y. Higo, M. Igarashi, M. Tahara, T. Sakamaki, H. Terasaki, Y. Shimoyama, S. Kuwabara, Y. Takubo, E. Ohtani, Compressional and shear wave velocities for polycrystalline bcc-Fe up to 6.3 GPa and 800 K, *American Mineralogist*, **101**, doi: 10.2138/am-2016-5545, 2016.
 7. Kuwabara, S., H. Terasaki, K. Nishida, Y. Shimoyama, Y. Takubo, Y. Higo, Y. Shibazaki, S. Urakawa, K. Uesugi, A. Takeuchi, T. Kondo, Sound velocity and elastic properties of Fe-Ni and Fe-Ni-C liquids at high pressure, *Physics and Chemistry of Minerals*, **43**, 229-236, 2016.
 8. Shigemori, K., H. Kato, M. Nakai, R. Hosogi, T. Sakaiya, H. Terasaki, S. Fujioka, A. Sunahara, H. Azechi, Mitigation of Laser Imprinting with Diamond Ablator for Direct-Drive Inertial Confinement Fusion Targets, *Journal of Physics: Conference Series*, **688**, 12107, 2016 (doi: 10.1088/1742-6596/688/1/012107).
 9. Takubo Y., H. Terasaki, Y. Shimoyama, S. Kuwabara, S. Urakawa, T. Kondo, A. Suzuki, K. Nishida, E. Ohtani, T. Watanuki, Y. Katayama, Density and Thermoelastic Properties of Liquid Fe-FeO at High Pressure, *SPring-8 Section A: Scientific Research Report*, Vol. 4, No.1, 53-57, 2016.
 10. Urakawa, S., A. Nakatsuka, H. Terasaki, K. Uesugi, Density measurement of Fe-Ni-S liquid using X-ray micro-CT at high pressures, *SPring-8/SACRA Research Report*, **3**, 306-310, 2015.
 11. Urakawa, S., H. Terasaki, K. Uesugi, In situ observation of 3-D fine texture of Fe-Ni-S melt in olivine under high pressure and temperature using X-ray micro-CT, *SPring-8/SACRA Research Report*, **3**, 311-314, 2015.
 12. Terasaki, H., Y. Shibazaki, K. Nishida, R. Tateyama, S. Takahashi, M. Ishii, Y. Shimoyama, E. Ohtani, K. Funakoshi, Y. Higo, Repulsive nature for hydrogen incorporation to Fe₃C up to 14 GPa, *ISIJ international*, **54**, 11, 2637-2642, 2014.
 13. Shibazaki, Y., H. Terasaki, E. Ohtani, R. Tateyama, K. Nishida, K. Funakoshi, Y. Higo, High-pressure and high-temperature phase diagram for Fe_{0.9}Ni_{0.1}-H alloy, *Physics of Earth and Planetary Interiors*, **228**, 192-201, 2014.
 14. Kamada S., E. Ohtani, H. Terasaki, T. Sakai, S. Takahashi, N. Hirao, Y. Ohishi, Equation of state of Fe₃S at room temperature up to 2 Megabars, *Physics of Earth and Planetary Interiors*, **228**, 106-113, 2014.
- ほか 26 件
- [学会発表] (計 144 件)
1. H. Terasaki, M. Maki, Y. Shimoyama, K. Nishida, S. Urakawa, Y. Takubo, Y. Shibazaki, T. Sakamaki, Y. Higo, A. Machida, T. Kondo, A. Rivoldini, Sound velocity and elastic properties of liquid Fe-Ni-Si at high pressure, High Pressure Mineral Physics Seminar-9, Sep. 24-28, 2017, Saint Malo, France.
 2. 寺崎 英紀、下山 裕太、真木 まゆみ、黒川 冬華、浦川 啓、西田 圭佑、斉藤 龍之介、田窪 勇作、柴崎 裕樹、坂巻 竜也、町田 晃彦、肥後 祐司、近藤 忠、Fe-Ni-S 融体の弾性特性から探る火星内部構造、PPS10-13, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年 5 月 20-25 日、幕張メッセ、千葉 (招待講演)
 3. Terasaki, H., F. Kurokawa, Y. Shimoyama, S. Urakawa, Y. Takubo, K. Nishida, Y. Shibazaki, A. Machida, T. Watanuki, Y. Higo, T. Kondo, Sound velocity and density of liquid Fe-Ni-S at high pressure, American Geophysical Union 2016 Fall meeting, Dec.12-16, 2016, San Francisco, USA.
 4. 寺崎英紀, X線イメージングを用いた液体金属の弾性および界面特性測定, 第5回 JASRI ワークショップ「地球惑星科学検討ワークショップ:大容量高圧プレス・ビームラインの将来」, 佐用,

- 2/10, 2017 (招待講演)
5. Terasaki, H., S. Kuwabara, K. Nishida, Y. Shimoyama, Y. Takubo, Y. Higo, Y. Shibazaki, S. Urakawa, T. Kondo, The effects of pressure and alloying Ni and C on sound velocity of liquid Fe-alloys, American Geophysical Union 2015 Fall meeting, Dec.14-18, 2015, San Francisco, USA.
 6. Terasaki, H., Y. Shimoyama, Y. Takubo, S. Kuwabara, K. Nishida, Y. Higo, S. Urakawa, S. Kishimoto, Y. Shibazaki, T. Sakamaki, M. Tahara, M. Igarashi, T. Watanuki, A. Machida, Y. Tange, Y. Katayama, T. Kondo, Development of sound velocity and density measurement for liquid Fe-alloys using multi-anvil apparatus up to 11 GPa, Joint AIRAPT-25 & EHPRG-53, Aug. 30-Sep. 4, 2015, Madrid, Spain.
 7. Terasaki, H. Y. Shimoyama, S. Kuwabara, Y. Takubo, S. Urakawa, S. Kishimoto, T. Watanuki, A. Machida, Y. Katayama, T. Kondo, S. Sasaki, Density and sound velocity of liquid Fe-alloys under high pressure: Implication for Mercury core, Messenger-BepiColombo Joint Science Meeting, June 16-18, 2015, Berlin, Germany.
 8. Terasaki, H., S. Kuwabara, Y. Shimoyama, Y. Takubo, S. Urakawa, K. Nishida, A. Takeuchi, Y. Suzuki, K. Uesugi, Y. Higo, T. Watanuki, Y. Katayama, T. Kondo, Sound velocity and density of liquid Fe-Ni-Si under pressure: Application to the composition of planetary molten core, AGU Fall Meeting, USA, 12/15-19, 2014.
 9. 寺崎英紀、桑原荘馬、下山裕太、田窪勇作、浦川啓、西田圭佑、鈴木芳生、竹内晃久、上杉健太郎、肥後祐司、片山芳則、綿貫徹、近藤忠、X線CTと超音波法を用いた合金融体の弾性特性測定, SPring-8 高圧物質科学研究会・地球惑星科学研究会合同研究会, 東京, 9/14, 2014 (招待講演)
 10. 寺崎英紀、桑原荘馬、下山裕太、田窪勇作、浦川啓、西田圭佑、鈴木芳生、竹内晃久、上杉健太郎、肥後祐司、片山芳則、近藤忠、鉄合金融体の音速・密度に与える軽元素の効果: 惑星外核の組成解明に向けて, 月・火星・水星内部研究会, 大阪大学, 9月8-9日, 2014
ほか 134 件

[図書] (計 2 件)

1. Terasaki, H., K. Nishida, Density and elasticity measurements for liquid materials. In *Magmas Under Pressure: Advances in High-Pressure Experiments on Structure and Properties of Melts* (Eds. Y. Kono, C. Sanloup), Elsevier, pp233-260, 2018.

ISBN-13: 978-0128113011

2. Terasaki, H., R.A. Fischer, *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core*, AGU monograph series, AGU/Wiley, ISBN: 978-1-118-99247-0, 312 pages, 2016.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://anvil.ess.sci.osaka-u.ac.jp/m3/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺崎 英紀 (TERASAKI, Hidenori)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 50374898

(2) 研究分担者

浦川 啓 (URAKAWA, Satoru)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 30201958

肥後 祐司 (HIGO, Yuji)

(財)高輝度光科学研究センター・利用促進部門・研究員

研究者番号: 10423435

坂巻 竜也 (SAKAMAKI, Tatsuya)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 30630769

鎌田 誠司 (KAMADA, Seiji)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 30611793

(3) 連携研究者

西田 圭佑 (NISHIDA, Keisuke)

東京大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 40530887

近藤 忠 (KONDO, Tadashi)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 20252223

鈴木 昭夫 (SUZUKI, Akio)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 20281975

佐々木 晶 (SASAKI, Sho)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 10183823

(4) 研究協力者

なし