

令和元年6月11日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14418

研究課題名(和文) 高圧下音速測定による中心コアの組成解明

研究課題名(英文) The composition of the core by sound velocity measurements under high pressure

研究代表者

中島 陽一 (Nakajima, Yoichi)

熊本大学・大学院先導機構・助教

研究者番号：50700209

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)：液体鉄、液体鉄リン合金、液体鉄窒素合金の音速を、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル装置と非弾性X線散乱法により最大80GPaまで決定した。その結果、液体鉄の音速に対して、リンはほとんど寄与せず、窒素は増大させることが明らかとなった。得られた圧力-音速データからそれぞれの合金の状態方程式を構築し、地球液体外核圧力領域における音速と密度も見積もり、地震波観測と比較した。その結果、液体外核中のリン及び窒素の最大存在量はそれぞれ17wt%及び3.5wt%と制約された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球中心核の化学組成は、地球の材料物質、マグマオーシャンから金属核が分離した核形成時の状況、及びマントル対流・コアダイナモといった現在のダイナミクスを理解するために欠かせない。地球中心核の大部分を占める液体外核は鉄(Fe)を主成分とし、10%程度の軽元素が含まれていることが知られているが、この軽元素種類、量比については未解明のままである。当核研究課題では、コア軽元素の候補であるリンと窒素に着目し、これら元素と鉄の液体合金の音速を高圧下で測定し、地球中心核の唯一の観測情報である地震波速度と比較することで、リン及び窒素の含有量に制約を与えた。

研究成果の概要(英文)：We have determined the P-wave velocity of liquid Fe, Fe-P, and Fe-N alloys up to 80 GPa using the laser-heated diamond anvil cell combined with the inelastic X-ray scattering method. The results show that phosphorous has negligible effect on the P-wave velocity of liquid Fe while nitrogen increases that of liquid Fe. Based on the present pressure-velocity data, we constructed equations of state (EoS) for liquid Fe-P and Fe-N. Using the EoSs, we estimated the velocity and density of both alloys under the Earth's core conditions, and then compared them with the seismological observations of the liquid outer core. From the comparison, the maximum contents of phosphorus and nitrogen in the core are constrained to be 17 wt% and 3.5 wt%, respectively.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：地球コア 軽元素 液体鉄合金 高圧下音速測定 非弾性X線散乱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球中心には鉄を主成分とした金属コアがあり、その大部分をしめる外核は液体状態である。コアの化学組成は、地球磁場の成因と考えられているコアダイナモの解明、現在のコアの温度分布、さらに初期地球のマグマーション中で進行したコア形成時の状況や、その後のコアの化学・熱進化の解明に欠かすことができない。地球コアの物理的観測情報は、地球内部を伝搬する地震波の観測によって得られる速度及び密度に限られる。地震波観測によると液体コアの音速は、その主成分である鉄の音速に比べ4%程度速く、密度は10%程度軽いことが知られている。すなわち、コアには鉄よりも軽く、鉄の音速を増加させる何らかの軽元素が含まれている。宇宙から飛来する隕石や、地球深部から地表に噴出するマントル鉱物の化学組成の比較、鉄との化学親和性からコアの軽元素候補として水素、炭素、窒素、酸素、ケイ素、リン、硫黄などが検討されてきた。しかしながら、どの軽元素候補が、どの程度コアに存在しているのかについて、未だ明らかになっていない。その最たる理由は、地震波観測と直接比較するための地球コアに相当する高压高温下(>136 GPa, >4000 K)での候補となる液体鉄合金の音速や密度といった物性測定が圧倒的に不足しているためである。

### 2. 研究の目的

これまでに高压下での測定が全く行われていない液体鉄-リン及び鉄-窒素合金の音速測定を高压下で行う。さらに、静的圧縮実験において6 GPaまでしか行われていない液体純鉄の音速をさらに高压下で行う。これらの実験結果と地震波観測を比較することで、地球コアに含まれるリン及び窒素量を制約する。

### 3. 研究の方法

レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用い高压高温を発生させ、液体鉄合金の高分解能非弾性 X 線散乱(IXS)測定を行う。IXSにより得られる液体合金中の縦波音響フォノン分散関係から、P波速度を決定する。IXS測定は大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL43LXUで行われた。室温で、試料を目的圧力まで加圧し、レーザー加熱装置により加熱した。加熱中に X 線回折パターンを観察し、固体試料からの X 線回折ピークの消失と、液体からの散漫散乱の出現により融解を確認し、その後高分解能 IXS 分光器により IXS データを取得した。得られた圧力-音速データから、液体鉄合金試料の状態方程式の構築も行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 液体 Fe の音速

液体 Fe について 16–45 GPa、2200–2700 K の圧力温度範囲において IXS 測定を行い、液体鉄の縦波速度を決定した(図1)。本実験結果は Anderson and Ahrens [1]により報告されている液体鉄の状態方程式と比較すると、30GPa以上の圧力範囲でよく一致している。一方、20GPa以下と比較的低圧な領域では過去の研究結果と比較し5-7%程度速い音速を得た。Anderson and Ahrens [1]は270 GPa以上で取得された衝撃圧縮実験と1気圧での測定データに基づき状態方程式を構築しているため、データが欠損している圧力範囲では系統的エラーを潜在的に含んでおり、このことが20 GPa以下での本研究結果との差異の原因であると考えられる。また、本実験と衝撃圧縮実験との低圧領域での差異は、最近6 GPaまで行われた超音波測定結果[2]から見積もられるものと同程度であった。

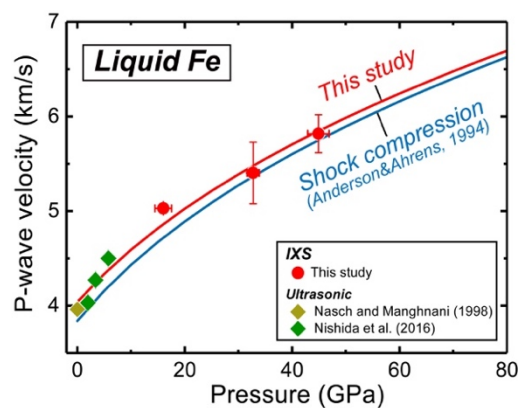


図1 液体鉄の P 波速度

#### (2) 液体 Fe-P の音速

液体 Fe<sub>75</sub>P<sub>25</sub> 合金について、37-80 GPa、2450–2800 K の圧力温度範囲において IXS 測定を行い、リンが液体鉄の音速に与える影響を調べた。IXS データから得られた液体 Fe<sub>75</sub>P<sub>25</sub> 合金の圧力(P)と P 波速度(V<sub>p</sub>)の関係を図2に示す。本研究で得られた純鉄の音速と比較した結果、リンは Fe の音速にほとんど影響を及ぼさないことが明らかとなった。液体 Fe<sub>75</sub>P<sub>25</sub> の P-V<sub>p</sub> データから体積弾性率及びその圧力微分を求め状態方程式を構築した。状態方程式を用いて地球コア圧力条件下(136 GPa)での音速及び密度を見積もり、地震波観測から得られる液体外核のものと比較し、リンの液体外核中の存在量を検討した。その結果、音速の比較でその存在量に制約を与えることはできないが、密度の比較から外核中のリンの最大溶解量は17wt%と制約された。

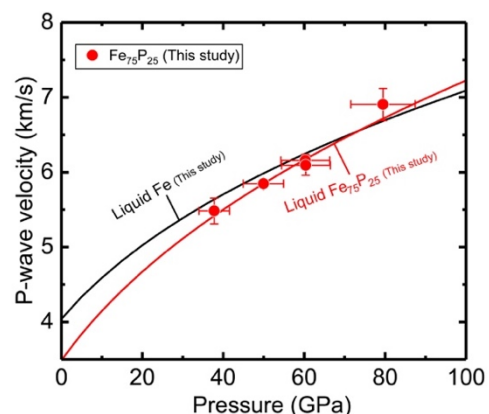


図2 液体鉄-リン合金の P 波速度

### (3) 液体 Fe-N の音速

液体  $\text{Fe}_{80}\text{N}_{20}$  合金について 15–76 GPa、1850–2250 K の圧力温度範囲において IXS 測定を行い、窒素が液体鉄の音速に与える影響を調べた。本研究により得られた液体  $\text{Fe}_{80}\text{N}_{20}$  合金の P 波速度を図 3 に示した。純鉄の音速と比較すると、窒素は液体 Fe の音速を増大させることが明らかとなった。また、本実験結果に基づき構築した状態方程式を用いて、地球コア圧力条件下 (136 GPa) での液体  $\text{Fe}_{80}\text{N}_{20}$  合金の音速及び密度を見積もり、外核の地震波観測と比較した。音速の比較から、外核の窒素量は最大で 3.5wt% と制約された。また、外核の密度を説明するには 6.8wt% の窒素が必要であり、音速の比較から得られる窒素最大固溶量では説明できず、窒素だけで外核の地震波観測を十分に説明することはできないことが示された。

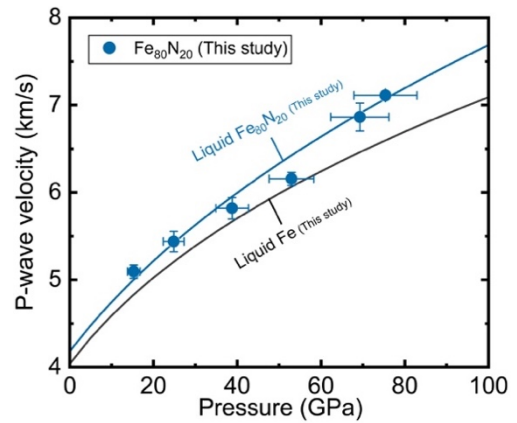


図 3 液体鉄-窒素合金の P 波速度

#### <引用文献>

- [1] Anderson, W. W., and T. J. Ahrens (1994) An equation of state for liquid iron and implications for the Earth's core, *J. Geophys. Res.*, 99(B3), 4273–4284.
- [2] Nishida, K., A. Suzuki, H. Terasaki, Y. Shibazaki, Y. Higo, S. Kuwabara, Y. Shimoyama, M. Sakurai, M. Ushioda, E. Takahashi, T. Kikegawa, D. Wakabayashi, and N. Funamori (2016), Towards a consensus on the pressure and composition dependence of sound velocity in the liquid Fe–S system, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 257, 230–239.

### 5. 主な発表論文等

#### [雑誌論文] (計 6 件)

- ① Baron, A.Q.R., Ishikawa, D., Fukui, H., Nakajima, Y. (2019) Auxiliary optics for meV-resolved inelastic x-ray scattering at SPring-8: Microfocus, analyzer masks, Soller slit, soller screen, and beam position monitor. *AIP Conf. Proc.*, 2054, 020002. (査読有)
- ② Inui, M., Suekuni, K., Kajihara, Y., Hosokawa, S., Takabatake, T., Nakajima, Y., Matsuda, K., Ohara, K., Uchiyama, H., Tsutsui, H. (2019) Static and dynamic structures of liquid  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ : a melt of the thermoelectric clathrate compounds. *J. Phys. Cond. Matt.*, 30, 455101. (査読有)
- ③ Ozawa, H., Tateno, S., Xie, L., Nakajima, Y., Sakamoto, N., Kawaguchi, S.I., Yoneda, A. and Hirao, N. (2018) Boron-doped diamond as a new heating element for internal-resistive heated diamond-anvil cell. *High Press. Res.*, 38, 120-135. (査読有)
- ④ Morard, G., Nakajima, Y., Andrault, D., Antonangeli, D., Auzende, A.L., Boulard, E., Cervera, S., Clark, A., Lord, O.T., Siebert, J., Svitlyk, V., Garbarino, G., Mezouar, M. (2017) Structure and density of Fe-C liquid alloys under high pressure, *J. Geophys. Res.*, 10, 7813-7823. (査読有)
- ⑤ Morard, G., Andrault, D., Antonangeli, D., Nakajima, Y., Auzende, A.L., Boulard, E., Cervera, S., Clark, A., Lord, O.T., Siebert, J., Svitlyk, V., Garbarino, G., Mezouar, M. (2017) Fe-FeO and Fe-Fe<sub>3</sub>C melting relations at Earth's Core-Mantle Boundary conditions: implications for a volatile-rich or oxygen-rich core, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 473, 94-103. (査読有)
- ⑥ Kawaguchi, S.I., Nakajima, Y., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Tateno, S., Kuwayama, Y., Tsutsui, S., Baron, A.Q.R. (2017) Sound velocity of liquid Fe-Ni-S at high pressure. *J. Geophys. Res.* 122, 3624-3634. (査読有)

#### [学会発表] (計 8 件)

- ① Nakajima Y., Sound velocity of liquid Fe-P alloy under high pressure based on inelastic X-ray scattering measurements, Joint Symposium of Misasa 2019 & Core-Mantle Coevolution, 2019 年 3 月 18-21 日, プランナール三朝, 鳥取県三朝町.
- ② Nakajima Y., Inelastic scattering measurements on iron alloys under high pressure: applications for the nature of planetary cores, The 9th TOYOTA RIKEN International Workshop on New Developments and Prospects for the Future of Mossbauer Spectroscopy (IWMS 2018), 2018 年 11 月 15-17 日, 豊田産業技術記念館, 愛知県名古屋市.
- ③ Nakajima Y., Sound velocity of liquid Fe under high pressure, Japan Geoscience Union Meeting 2018, May. 20-24 2018, Makuhari (JPN) 2018 年 5 月 20-24 日, 幕張メッセ, 千葉県幕張市.
- ④ Nakajima Y., Inelastic X-ray measurements on liquid alloys under high pressures. 5th International Symposium on Kumamoto Synchrotron Radiation, 2017 年 11 月 1-2 日, 熊本大学, 熊本県熊本市.
- ⑤ Nakajima Y., Constrains on light elements in Earth's core via sound velocity measurements of liquid

Fe alloys. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月20-25日, 幕張メッセ, 千葉県幕張市.

- ⑥ 中島陽一, 高圧下におけるFe-Si-H合金の核共鳴非弾性散乱測定. 第59回高圧討論会, 2018年11月26-28日, 岡山理科大, 岡山県岡山市.
- ⑦ 中島陽一, 高圧下における地球コア物質の核共鳴非弾性散乱測定. 第11回SPRUC核共鳴研究会, 2018年3月2日, 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市.
- ⑧ 中島陽一, 非弾性X線散乱による液体鉄合金の高圧下音速測定. 第58回高圧討論会, 2017年11月8-10日, 名古屋大学, 愛知県名古屋.

## 6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。