

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04040

研究課題名(和文)液体鉄合金の高圧下音速測定に基づくコア軽元素の解明

研究課題名(英文) Investigation of the core light element based on high-pressure sound velocity measurements of liquid Fe alloys

研究代表者

中島 陽一 (Nakajima, Yoichi)

熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・准教授

研究者番号：50700209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：液体鉄合金の高圧高温下における音速は、地球液体コア中の軽元素を決定するために不可欠である。本研究課題では、液体Fe-PとFe-Si、およびFeの音速を高圧下で測定し、地球液体コアの地震波観測と比較することで、液体コア中のリンとケイ素の存在量に制約を与えた。その結果、リンがコアの音速と密度に与える影響は僅かであることが明らかになった。

また、ケイ素は液体Feの音速を著しく増大させるため、現在の液体コアの地震波速度を説明するには、地球形成時にコアに取り込まれたと考えられているケイ素含有量では多過ぎる事が明らかになり、現在の地球コアはコア形成初期に比べケイ素に枯渇していることが予想される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では、隕石や岩石の化学組成や、地球形成時の元素分配に基づきコア組成が議論されてきた。本研究課題では、高圧下でコア組成の候補となる液体鉄合金の音速を実際に測定し、現在のコアの音速と密度を比較する事で、コア化学組成に制約を与えた。本研究結果により、従来の間接的手法によるコア組成モデルを実際のコアの観測情報と比較できるようになったことは、大きな学術的意義をもつ。

地球コアの化学組成は、地球形成過程やその後の熱的・化学進化を解き明かす上で不可欠な情報である。我々地球の成り立ちから現在に至る歴史を紐解くことは、人類の共通のテーマの一つであり、本研究結果は社会的意義も大きいと期待している。

研究成果の概要(英文)：The sound velocity of liquid Fe alloys at high pressure is essential to understanding the light elements in the Earth's liquid core. We measured the sound velocity of liquid Fe alloys with P or Si under high-pressure conditions to determine the compositional effect of each alloying element on the velocity and density of liquid Fe. We constrained the concentrations of P and Si in the liquid core by comparing the present results with seismological observations. Considering geochemical observations, we found that the impact of P on the seismological observables of the core can be pretty little. We also investigated that Si significantly increases the sound velocity of liquid Fe. Therefore, the Si contents expected from the recent core formation models can be too much to explain the sound velocity of the present-day liquid core, indicating that the present-day core will be depleted in Si relative to the ancient core just after the core formation process.

研究分野：地球科学、高圧物性物理学

キーワード：地球コア コア軽元素 液体鉄合金 高圧高温実験 非弾性X線散乱 X線回折

1. 研究開始当初の背景

地球中心核(コア)は主成分を鉄(Fe)とし、地球全質量の 30%を占める。液体外核はコア全質量の 95%を占め、コアの大部分は液体状態である。地震波観測と液体鉄の物性との比較から、コアには何らかの軽く、音速を増加させる元素が含まれていると考えられている(Birch, 1952JGR)。隕石などの宇宙化学的情報、マントル捕獲岩などの地球化学的情報から水素(H)、炭素(C)、酸素(O)、ケイ素(Si)、リン(P)、硫黄(S)などがその候補として挙げられる (Stevenson, 1981Science)。コアの組成、すなわち液体外核中の軽元素の種類とその存在量比は、地球の全組成、45.5 億年前のマグマオーシャンからの金属コア分離を含む地球形成過程、その後の地球内部の化学的・熱的進化、さらに地球磁場形成に重要なコアダイナミクスといった重要な問題を解決するためには必要不可欠である。しかし、1950 年代にコアの軽元素問題が初めて提起されて以降、60 年以上経過した現在においても、未解明のままである。

コアの情報は地震波観測から得られる P 波速度、S 波速度、密度に限られる。そのため、地球コア圧力温度条件下において、候補となる液体鉄合金の物性を実際に測定し、地震波観測と直接比較することが、コアの組成を解明する唯一の手法である。しかし、従来の研究では、固体鉄合金の物性測定から液体鉄合金の物性を推定する方法や、地球出発物質・コア形成圧力温度酸素雰囲気等を仮定したコア形成時のコア-マントル間元素分配といった間接的な見積もりが多数であった。そのため、鉄合金の融解時の物性変化、地球始原物質中の軽元素量、コア形成過程の物理的条件などの仮定が必要であり、提案されているコア軽元素は多種多様で混沌としていた。

このような現状を打破するために、本研究代表者は高圧下での液体鉄合金の音速測定を行うために技術開発を行い、これまでに液体 Fe-C と Fe-Ni-S 合金の最大 70GPa までの測定に成功させ、炭素と硫黄のコア中存在量に制約を与えた(Nakajima et al. 2015Nat. Commun.; Kawaguchi Nakajima et al. 2017JGR)。しかし、高圧下における他の軽元素候補の液体 Fe の物性に対する効果については、ほとんど分かっていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、これまでに高圧下での音速測定が行われていない液体鉄軽元素合金についての高圧下における音速測定データを取得し、候補となる軽元素の液体コア中での存在量に制約を与えることを目的とした。さらに、研究代表者がこれまでに報告している液体 Fe-C と Fe-Ni-S 合金の音速測定結果、先行研究で報告されているコア形成過程でのマグマオーシャンと液体コア間での元素分配結果を考慮し、地球コアの組成決定を試みた。

3. 研究の方法

本研究課題では、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置を用いて高圧高温を発生し、大型放射光施設 SPring-8 の BL35XU や BL43LXU で得られる非弾性 X 線散乱データから、液体鉄合金の音速測定を行った。また、SPring-8 の BL10XU では、高圧高温下 X 線回折測定を行い、液体および固体鉄合金の構造密度測定を行った。高圧高温実験により得られた液体及び固体鉄合金の高圧下における音速および密度と、地球コアの地震波観測とを比較することにより、コア組成の検討を行った。

4. 研究成果

本研究課題ではこれまでに得られている炭素と硫黄以外の軽元素候補を含む液体鉄の音速測定を目的としたが、課題期間中には特に液体 Fe-P 合金(Kinoshita, Nakajima et al. 2020PSSb)、液体 Fe-Si 合金(Nakajima et al. 2020JGR)の音速測定、液体 Fe(Kuwayama, Morard, Nakajima et al. 2020PRL)の音速密度測定、固体 Fe-P 合金(Nakajima et al., 2020AmeMine)の構造密度測定から新たな知見を得ることができた。それぞれの詳細については以下の通りである。

(1) 液体コア中のリンの存在量

液体 Fe-P 合金の 60GPa、2800K までの圧力温度条件で得られた音速データから、圧力-温度-密度-音速の状態方程式を構築し、地球コア圧力温度下における液体 Fe の音速と密度に対するリン含有量依存性を見積もった(Kinoshita, Nakajima et al. 2020PSSb)。その結果、液体 Fe の音速に対するリンの効果は大変小さく、液体コアと液体 Fe の音速差をリンだけでは説明できないことが明らかになった。また、密度の比較から、許容される液体コア中のリン含有量は最大で約 15wt%であると見積もられる。一方、地球化学的研究より見積もられているコア中のリン存在量はたかだか 0.2–0.4wt%であり、最もリ

ンに富む鉄隕石でさえ、そのリン含有量は 1wt%であることを考えると、液体コアの音速と密度に対するリンの影響はコア中の他の軽元素と比較し僅かであると予想される。

液体 Fe-P 合金の音速測定実験中、出発試料である $\text{Fe}_{75}\text{P}_{25}$ を融解させる過程においてリキダス相として Fe_2P が観察されたが、40GPa 以上の圧力では、従来知られていない結晶構造である可能性が見いだされた。そこで、 Fe_2P 相の高圧高温下構造密度測定を 83GPa、2330K まで詳細に行った。その結果、既に知られていた C23 型構造から C37 型構造に 42GPa で相転移することを発見した(Nakajima et al., 2020AmeMine)。なお、その後の追加実験で C37 型構造が少なくとも 153GPa まで安定であることを確認している。先行研究によると、 Fe_2S 、 Ni_2Si 、 Ni_2P も地球コア圧力条件で C37 型構造であることが報告されている(Tateno et al. 2019GRL, Erradonea et al. 2008PRB, Inerbaev et al., 2020ACS Earth Space Chem.)。これらのことから、液体コアが S、P、Si を含む場合、C37 型 ($\text{Fe,Ni})_2(\text{S,P,Si})$ 相が液体コアから結晶化し、固体内核を形成している可能性が示唆された。また、これらの元素群は他の地球型惑星コアにおいても主要な構成成分であるため、この C37 型相は他の惑星、例えばコア中心圧力が 40GPa を超える火星や金星での存在についても、検討されるべき相であることが示された。

(2) 液体コア中のケイ素の存在量

液体 Fe-Si 合金の音速測定を 56GPa、3200K までの圧力温度条件で行い、状態方程式を構築し、地球コア圧力温度下における液体 Fe の音速と密度に対するケイ素含有量依存性を見積もった(Nakajima et al. 2020JGR)。その結果を地震波観測と比較すると、液体コア中には最大で 1.9wt%程度のケイ素しか含まれない事が明らかになった。さらに、このような少量のケイ素では、液体コアの密度を十分に説明できず、他の軽元素が必要となる。また、コア形成時の元素分配結果から提唱されている最近のコア形成モデルでは、2–9wt%と多くのケイ素がコアに取り込まれたと見積もられている(例えば Fischer, Nakajima et al. 2015GCA)。本研究の音速測定から得られる現在のコアのケイ素含有量と、コア形成モデルによる地球形成時の含有量の違いから、コア中のケイ素量は地球史を通して減少し、現在では枯渇していることが示唆される。このことは、最近の Fe-Si-O 合金の融解実験(Hirose et al. 2017Nature)やコア形成時の元素分配に基づく熱力学計算(O'Rourke&Stevenson, 2016Nature)から予想される、コア冷却過程において SiO_2 もしくは MgSiO_3 が析出し、コア中からケイ素が失われたとする化学進化モデルを支持する結果である。

(3) 液体鉄の地球コア条件下での音速と密度

液体 Fe の音速を 45GPa、2700K まで、密度を 116GPa、4350K まで測定することに成功した (Kuwayama, Morard, Nakajima et al. 2020PRL)。従来は、マルチアンビルプレスによる 6GPa 以下、及び衝撃圧縮実験による 260GPa 以上のデータに限られていた液体鉄の音速と密度データを取得することにより、液体コア圧力温度条件下でも適用可能な液体 Fe の信頼性の高い状態方程式を構築した。この液体純鉄の状態方程式と液体コアの地震波観測を比較すると、コアの深さ方向によらず密度が 8%低く、音速が 4%速い事が明らかになった。本成果は、液体コア組成を制約するためのレファレンスとして、今後広く用いられることになることが期待される。

以上のように、現状液体鉄合金の物性測定に関して、70GPa、3200K までの音速測定をルーチンに行えるようになった。その結果、本研究課題においては、リン及びケイ素の液体コア中の存在量に制約を与えることができた。さらに、実際の地球コア最上部に相当する圧力温度に迫る条件での液体 Fe の密度測定も可能となり、コア軽元素が満たすべき液体 Fe の音速と密度への影響を精度よく決定することができた。今後、液体コア組成をさらに精度良く決定すべく、液体鉄軽元素合金の音速も、実際のコア圧力条件下で測定可能になるよう、一層の実験技術の向上を行っていく予定である。さらに、他の有力な軽元素候補である酸素や水素の液体 Fe の物性への影響も地球コア組成解明のためには不可欠となっており、今後明らかにしていくべき課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakajima Yoichi, Araki Shunya, Kinoshita Daisuke, Hirose Kei, Tateno Shigehiko, Kawaguchi Saori I., Hirao Naohisa	4. 巻 105
2. 論文標題 New pressure-induced phase transition to Co ₂ Si-type Fe ₂ P	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1752 ~ 1755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kinoshita Daisuke, Nakajima Yoichi, Kuwayama Yasuhiro, Hirose Kei, Iwamoto Asaki, Ishikawa Daisuke, Baron Alfred Q. R.	4. 巻 257
2. 論文標題 Sound Velocity of Liquid Fe-P at High Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2000171 ~ 2000171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202000171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuwayama Yasuhiro, Morard Guillaume, Nakajima Yoichi, Hirose Kei, Baron Alfred Q. R., Kawaguchi Saori I., Tsuchiya Taku, Ishikawa Daisuke, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 124
2. 論文標題 Equation of State of Liquid Iron under Extreme Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 165701 ~ 165701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.165701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Oka Kenta, Hirose Kei, Tagawa Shoh, Kidokoro Yuto, Nakajima Yoichi, Kuwayama Yasuhiro, Morard Guillaume, Coudurier Nicolas, Fiquet Guillaume	4. 巻 104
2. 論文標題 Melting in the Fe-FeO system to 204 GPa: Implications for oxygen in Earth's core	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1603 ~ 1607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2019-7081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakajima Yoichi, Kawaguchi Saori I., Hirose Kei, Tateno Shigehiko, Kuwayama Yasuhiro, Sinmyo Ryosuke, Ozawa Haruka, Tsutsui Satoshi, Uchiyama Hiroshi, Baron Alfred Q. R.	4. 巻 125
2. 論文標題 Silicon Depleted Present Day Earth's Outer Core Revealed by Sound Velocity Measurements of Liquid Fe-Si Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB019399	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jennings E.S., Jacobson S.A., Rubie D.C., Nakajima Y., Vogel A.K., Rose-Weston L.A., Frost D.J.	4. 巻 293
2. 論文標題 Metal-silicate partitioning of W and Mo and the role of carbon in controlling their abundances in the bulk silicate earth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 40~69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2020.09.035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 中島陽一, 岩本朝希, 上野雄生, 桑山靖弘, 廣瀬敬, MORARD Guillaume, 石川大介, BARON Alfred Q.R.
2. 発表標題 高圧下における液体Fe-S合金の非弾性X線散乱測定
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 見崎湧哉, 中島陽一, 上野雄生, 岩本朝希, 河口沙織, 平尾直久
2. 発表標題 Co ₂ Pの圧力誘起相転移
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Iwamoto, Y. Nakajima, D. Kinoshita, Y. Kuwayama, K. Hirose, D. Ishikawa, A.Q.R. Baron
2. 発表標題 Sound velocity measurements of liquid Fe-N up to 100 GPa
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 見崎湧哉, 中島陽一, 上野雄生, 岩本朝希, 河口沙織, 平尾直久
2. 発表標題 Co2Pの圧力誘起相転移
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島陽一, 岩本朝希, 上野雄生, 桑山靖弘, 廣瀬敬, MORARD Guillaume, 石川大介, BARON Alfred Q.R
2. 発表標題 高圧下における液体Fe-S合金の非弾性X線散乱測定
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑山 靖弘, 廣瀬 敬, 中島 陽一, 安達 由紀, Baron Alfred, Morard Guillaume, 河口 沙織, 石川 大介, 平尾 直久, 大石 泰生
2. 発表標題 Density and Sound Velocity of Liquid Fe and FeO at High Pressure
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本 朝希, 中島 陽一, 木下 大輔, 桑山 靖弘, 廣瀬 敬, 石川 大介, Baron Alfred
2. 発表標題 Sound velocity measurements of liquid Fe-N up to 100 GPa
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 陽一, 荒木 駿也, 木下 大輔, 廣瀬 敬, 館野 繁彦, 河口 沙織, 平尾 直久
2. 発表標題 Fe2Pの高圧相転移と弾性特性
3. 学会等名 第61回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Iwamoto, Y. Nakajima, D. Kinoshita, Y. Kuwayama, K. Hirose, D. Ishikawa, A.Q.R. Baron
2. 発表標題 Nitrogen in the core based on sound velocity measurements of liquid Fe-N at high pressure
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nakajima, D. Kinoshita, Y. Kuwayama, K. Hirose, A. Iwamoto, D. Ishikawa, A.Q.R. Baron
2. 発表標題 Sound wave velocity of liquid Fe-P at high pressure
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kuwayama, G. Morard, Y. Nakajima, K. Hirose, A.Q.R. Baron, S.I. Kawaguchi, T. Tsuchiya, D. Ishikawa, N. Hirao, Y. Ohishi
2. 発表標題 Equation of state for liquid iron under extreme conditions
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakajima Y., Kuwayama Y., Hirose K., Ishikawa D., Baron A.Q.R.
2. 発表標題 Inelastic X-ray scattering measurements of liquid Fe alloys under high pressures
3. 学会等名 Opto-X-NANO 2019 conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakajima Y.
2. 発表標題 Inelastic X-ray scattering measurements on liquid Fe-S Inelastic X-ray scattering measurements on liquid Fe-S alloys under high pressures
3. 学会等名 Pan Pacific International Symposium on Chalcogenide Functional Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakajima Y., Kinoshita D., Kuwayama Y., Hirose K., Iwamoto A., Ishikawa D., Baron A.Q.R.
2. 発表標題 Inelastic X-ray scattering measurements of liquid Fe-P alloys under high pressures
3. 学会等名 14th International Conference on the Structure of Non-Crystalline Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iwamoto A., Nakajima Y., Kinoshita D., Kuwayama Y., Hirose K., Ishikawa D., Baron A.Q.R.
2. 発表標題 Inelastic X-ray measurements of liquid Fe-N alloy under high pressure
3. 学会等名 14th International Conference on the Structure of Non-Crystalline Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jennings E., Rubie D.C., Jacobson S.A., Morbidelli A., Nakajima Y., Vogel A.K., Rose-Weston L.A., Frost D.J.
2. 発表標題 Metal-silicate partitioning of Mo and W in Earth's mantle during core formation
3. 学会等名 EPSG-DPS Joint Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島陽一, 木下大輔, 桑山靖弘, 廣瀬敬, 岩本朝希, 石川大介, Alfred Q.R. BARON
2. 発表標題 高压下における液体Fe-Pの弾性特性
3. 学会等名 第60回高压討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本朝希, 中島陽一, 木下大輔, 桑山靖弘, 廣瀬敬, 石川大介, Alfred Q.R. BARON
2. 発表標題 高压下における液体Fe-N合金のX線非弾性散乱測定
3. 学会等名 第60回高压討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中昇兵, 中口慎也, 高良明英, 中島陽一, 下條冬樹
2. 発表標題 第一原理計算に基づく高圧下における液体Fe-0合金の構造と電子状態II
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	パロン アルフレッド (Baron Alfred)		
研究協力者	下條 冬樹 (Shimojo Fuyuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Sorbonne University	Grenoble Alpes University		
ドイツ	University of Bayreuth			