

令和元年6月20日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03749

研究課題名(和文) 高压变形実験で探る地球中心核の異方性

研究課題名(英文) Anisotropy of the Earth's inner core studied by high-pressure deformation experiments

研究代表者

西原 遊 (Nishihara, Yu)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授

研究者番号：10397036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：地球中心に位置する固体金属の内核における地震波異方性の成因を探るため、hcp鉄の変形実験と熱伝導率測定を行った。変形実験の結果得られた結晶選択配向は、主要すべり系が底面すべりであることを示し、これをもとに計算された異方性の大きさは内核の地震波異方性を十分に説明できるものであった。熱伝導率測定の結果、hcp鉄は方位によって3-4倍の差のある大きな熱伝導率異方性を持つことが明らかになった。この異方性は内核中の温度不均質を強くする作用を持つと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球中心に位置する内核を南北の極方向に伝播する縦波(P波)は赤道方向へ伝播するものに比べて約3%も高速であることが知られている(地震波速度異方性)。この原因として、様々な仮説が提唱されてきたが、いまだに一致した見解は得られていない。本研究の結果は内核内での変形流動により結晶が特定方位に配列することで内核の地震波速度異方性がうまく解釈できることを示し、この謎を解き明かすうえでの判断材料を提供した。

研究成果の概要(英文)：To investigate formation mechanism of the seismic anisotropy in the Earth's inner core, we conducted deformation experiments and thermal conductivity measurements on hcp-iron. Crystallographic-preferred orientation determined by the deformation experiments suggests predominance of basal slip in hcp-iron, and the strength of the calculated anisotropy is comparable to the inner core anisotropy. Thermal conductivity measurements revealed that the hcp-iron has a strong anisotropy where the thermal conductivity varies by a factor of 3-4 depending on crystallographic orientation. This strong anisotropy may enhance temperature heterogeneity in the inner core.

研究分野：固体地球科学

キーワード：地球中心核 hcp鉄 高温高压変形実験 結晶選択配向 地震波異方性

1. 研究開始当初の背景

- (1) 地球中心に位置する固体金属の内核には南北方向に伝播する P 波が赤道方向のものに対し約 3%も高速となる大きな地震波異方性が存在することがわかっている。この内核の異方性の成因には、変形モデルと成長モデルの2つに大別される様々なモデルが提案されているが現在までに明かな結論は得られていない (e.g. Sumita and Bergman, 2007)。
- (2) 地球の内核での地震波速度異方性は、変形によって生じる結晶選択配向が有力な原因の一つとして考えられているが、内核構成物質の hcp (六方最密構造) 鉄の結晶選択配向は実験試料の急冷回収ができない等の技術的理由からよくわかっていない。hcp 鉄についての室温下での一軸圧縮実験の報告は存在するものの、温度の効果が検討されていないうえ、一軸圧縮の性質上、主要すべり系を決定するために各すべり系の強度を仮定したシミュレーションが必要である (e.g. Merkel et al., 2004)。このため地球深部の変形で支配的と考えられる剪断変形での選択配向への適用には疑問が残されている。
- (3) 内核異方性を生み出している変形の駆動力の大きさは、内核中の温度不均質に依存していると考えられる。この温度不均質の大きさと方位は、hcp 鉄の持つ熱伝導率異方性の大きさと内核での hcp 鉄の選択配向によって決まっていると考えられる。しかしながら、これまで hcp 鉄の熱伝導率異方性は調べられていないため、内核の温度不均質の理解まだ進んでいない。

2. 研究の目的

- (1) 上述の研究背景より、内核異方性の原因を明らかにするためには内核を構成する hcp 鉄の高温高圧下での変形誘起結晶選択配向を明らかにすることが必要とされている。本研究では高温高圧変形実験と放射光その場観察技術を組み合わせることによって、hcp 鉄の変形誘起選択配向を解明することを目指した。変形実験では一軸圧縮、一軸引張および単純剪断変形を行い、それぞれの実験で発達する選択配向から総合的に hcp 鉄のすべり系を制約することを試みた。
- (2) 内核の温度不均質を理解するうえでは、重要な hcp 鉄の持つ熱伝導率異方性を明かにすることが重要である。そのため、異なる結晶選択配向を持つ hcp 鉄を試料として熱伝導率を測定し、その異方性を決定することを試みた。

3. 研究の方法

- (1) hcp 鉄の変形実験を行い、実験中に発達する結晶選択配向をその場観察した。出発物質にはあらかじめ焼結した鉄多結晶体を用いた。実験は SPring-8、BL04B1 に設置された D-DIA 装置 SPEED-MkII-D を用いて行った。hcp 鉄の安定領域である 13~17GPa、723K で一軸圧縮・引張変形実験および単純剪断変形実験を行った。一軸変形実験では円柱状試料を、剪断変形実験では円柱軸に対し 45°の角度で切断した Al₂O₃ ピストンによって挟まれたディスク状試料を用いて、セル全体の軸圧縮により試料を変形させた。変形中の試料の二次元回折パターンを 50-60 keV の単色 X 線とイメージングプレートまたは CCD 検出器を用いて取得した。二次元回折パターンをソフトウェア MAUD で解析し試料の結晶選択配向を決定した。
- (2) 箔、線、そして粉末焼結体の 3 種類の鉄試料を出発物質として用いて、最高 45GPa までの高圧下で hcp 鉄の熱伝導測定を行った。実験にはダイヤモンドアンビルセルを用い、結晶選択配向は SPring-8、BL10XU で取得した二次元 X 線回折パターンから決定した。熱伝導率測定にはサーモリフレクタンス法を用いた。

4. 研究成果

- (1) 圧縮変形実験では圧縮方向に $\langle 0001 \rangle$ が、引張実験では引張方向に $\langle 12\bar{1}0 \rangle$ が、単純剪断変形実験では剪断方向とせん断面法線方向にそれぞれ $\langle 12\bar{1}0 \rangle$ と $\langle 0001 \rangle$ が配向することが分かった。

図 1 に剪断変形実験で得られた選択配向の一例を表す極点図を示す。

これらの結果を総合すると、実験における主要すべり系は底面すべりである可能性が高いと結論づけられる。

- (2) 実験で得られた選択配向をもとに計算すると、内核条件での P 波速度の異方性は最大で 6%にも達し (図 2)、このメカニズムが内核異方性を十分説明できる可能性を持つことが明らかになった。

- (3) 熱伝導率測定の結果、hcp 鉄は、c 軸方向の熱伝導率が a

軸方向のそれに比べて 3~4 倍も高い、極めて大きな異方性を持つことが明らかになった。内核表面では赤道方向が選択的に冷却されていることと、内核中では c 軸が極方向に配向している可能性が高いことを併せて考えると、hcp 鉄の異方性は内核

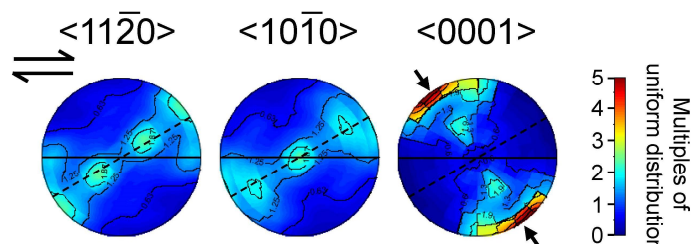


図 1

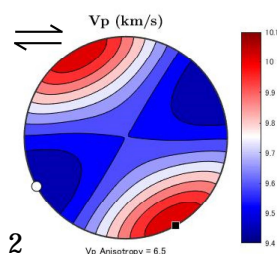


図 2

の温度不均質を強くする作用を示すと考えられる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 19 件)

Xingcheng Liu, Kyoko N. Matsukage, Yu Nishihara, Toshihiro Suzuki, and Eiichi Takahashi, Stability of hydrous phases of Al-rich phase D and Al-rich phase H in deep subducted oceanic crust, *American Mineralogist*, 査読有, in press 104, 64-72 (2019), 10.2138/am-2019-6559.

Kenji Ohta, Yu Nishihara, Yuuki Satoh, Kei Hirose, Takashi Yagi, Saori I. Kawaguchi, Naohisa Hirao, Yasuo Ohishi, An experimental examination of thermal conductivity anisotropy in hcp iron, *Frontiers in Earth Science, Solid Earth Geophysics*, 査読有, 6, 176, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00176> (2018), 10.3389/feart.2018.00176.

Tomohiro Ohuchi, Xinglin Lei, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Takeshi Sakai, Kiyoshi Fujino, Semi-brittle behavior of wet olivine aggregates: the role of aqueous fluid in faulting at upper mantle pressures, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 査読有, 173:88 (2018), 10.1007/s00410-018-1515-9.

Yu Nishihara, Tomohiro Ohuchi, Takaaki Kawazoe, Yusuke Seto, Genta Maruyama, Yuji Higo, Ken-ichi Funakoshi, Yoshinori Tange, and Tetsuo Irifune, Deformation-induced crystallographic-preferred orientation of hcp-iron: An experimental study using a deformation-DIA apparatus, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 490 151-160 (2018), 10.1016/j.epsl.2018.03.029.

Kenji Ohta, Sho Suehiro, Kei Hirose, Yasuo Ohishi, Electrical resistivity of fcc phase iron hydrides at high pressures and temperatures, *Comptes Rendus Geoscience*, 査読有, -in press. (2018), 10.1016/j.crte.2018.05.004.

Kyoko N. Matsukage, Mika Hashimoto, and Yu Nishihara, Morphological stability of hydrous liquid droplets on grain boundaries of eclogite minerals in the deep upper mantle, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 112 346-358 (2017), 10.2465/jmps.170309.

Tomohiro Ohuchi, Takaaki Kawazoe, Yuji Higo, Akio Suzuki, Flow behavior and microstructures of hydrous olivine aggregates at upper mantle pressures and temperatures, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 査読有, 172(8) (2017), 10.1007/s00410-017-1375-8.

Tomohiro Ohuchi, Xinglin Lei, Hiroaki Ohfuji, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Takeshi Sakai, Kiyoshi Fujino, Tetsuo Irifune, Intermediate-depth earthquakes linked to localized heating in dunite and harzburgite, *Nature Geoscience*, 査読有, 10(10) 10.1038/NGEO3011-+ (2017), 10.1038/NGEO3011.

Nozomi Kondo, Takashi Yoshino, Kyoko N. Matsukage, Tetsu Kogiso, Major element composition of an Early Enriched Reservoir: constraints from Nd-142/Nd-144 isotope systematics in the early Earth and high-pressure melting experiments of a primitive peridotite, *Progress in Earth and Planetary Science*, 査読有, 3 (2016), 10.1186/s40645-016-0099-0.

Yu Nishihara and Kyoko N. Matsukage, Iron-titanium oxyhydroxides as water carriers in the Earth's deep mantle, *American Mineralogist*, 査読有, 101 919-927 (2016), 10.2138/am-2016-5517.

Yu Nishihara, Kazuki Fuke, Yoshinori Tange, and Yuji Higo, Determination of pressure effect on thermocouple electromotive force using multi-anvil apparatus, *High Pressure Research*, 査読有, 36 121-139 (2016), 10.1080/08957959.2016.1169275.

Yu Nishihara, Genta Maruyama, and Masayuki Nishi, Growth kinetics of forsterite reaction rims at high-pressure, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 257 220-229 (2016), 10.1016/j.pepi.2016.06.008.

Takaaki Kawazoe, Yu Nishihara, Tomohiro Ohuchi, Nobuyoshi Miyajima, Genta Maruyama, Yuji Higo, Ken-ichi Funakoshi, and Tetsuo Irifune, Creep strength of ringwoodite measured at pressure-temperature conditions of the lower part of the mantle transition zone using a deformation-DIA apparatus, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 454 10-19 (2016), 10.1016/j.epsl.2016.08.011.

Noriyoshi Tsujino, Yu Nishihara, Daisuke Yamazaki, Yusuke Seto, Yuji Higo, and Eiichi Takahashi, Mantle dynamics inferred from the crystallographic preferred orientation of bridgmanite, *Nature*, 査読有, 539 81-89 (2016), 10.1038/nature19777.

Kenji Ohta, Yasuhiro Kuwayama, Kei Hirose, Katsuya Shimizu, Yasuo Ohishi, Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions, *Nature*, 査読有, 534(7605) 95-+ (2016), 10.1038/nature17957.

Kyoko N. Matsukage, Yu Nishihara, Fumiya Noritake, Katsuyuki Kawamura, Noriyoshi Tsujino, Moe Sakurai, Yuji Higo, Junichi Nakajima, Akira Hasegawa, and Eiichi Takahashi, Elastic wave velocity anomalies of anorthite in subducting plate: In situ experiments, *American Mineralogist*, 査読有, 100 1856-1865 (2015), 10.2138/am-2015-5240.

Tomohiro Ohuchi, Takaaki Kawazoe, Yuji Higo, Ken-ichi Funakoshi, Akio Suzuki, Takumi Kikegawa, Tetsuo Irifune, Dislocation-accommodated grain boundary sliding as the major deformation mechanism of olivine in the Earth's upper mantle, *Science Advances*, 査読有, 1(9) e1500360 (2015), 10.1126/sciadv.1500360.

Tomohiro Ohuchi, Yu Nishihara, Yusuke Seto, Takaaki Kawazoe, Masayuki Nishi, Genta Maruyama, Mika Hashimoto, Yuji Higo, Ken-ichi Funakoshi, Akio Suzuki, Takumi Kikegawa, and Tetsuo Irifune, In situ observation of crystallographic preferred orientation of deforming olivine at high pressure and high temperature, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 査読有, 243 1-21 (2015), 10.1016/j.pepi.2015.04.004.

Fumiya Noritake, Katsuyuki Kawamura and Kyoko N. Matsukage, Elastic anomalies of anorthite: Molecular dynamics simulations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 244, 32-41 (2015), 10.1016/j.pepi.2015.05.002.

[学会発表](計 25 件)

西原遊、Hunt Simon、Dobson David、亀卦川卓美、船守展正、肥後祐司, Crystallographic-preferred orientation of MnGeO₃ perovskite, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 (2018).

太田健二、西原遊、佐藤雄輝、廣瀬敬、八木貴志、河口沙織、平尾直久、大石泰生, Anisotropic thermal conductivity of hcp iron and the implications for the Earth's inner core, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 (2018).

Nishihara, Y., Hunt, S., Dobson, D., Higo, Y., Crystallographic-preferred orientation of MnGeO₃ perovskite, IMA2018 (2018).

Matsukage, K. N., Nishihara, Y., Liu, X., Seto, Y., Takahashi, E., Iron-titanium oxyhydroxides as a water transporter into the Earth's mantle transition zone and lower mantle, IMA2018 (2018).

西原遊, 土居峻太, 肥後祐司, 丹下慶範, R 型熱電対の起電力への圧力効果, 第 59 回 高压討論会 (2018).

西原遊, 土居峻太, 山崎大輔, 辻野典秀, 芳野極, 久保友明, 今村公裕, D111 型装置を用いた高温高压変形実験, 第 59 回 高压討論会 (2018).

Azuma, S., Nomura, R., Uesugi, K., Nishihara, Y., Doi, S., Arimoto, T. and Irifune, T., Deformation microstructures of subducted slabs in the lower mantle, AGU Fall Meeting 2018 (2018).

西原遊, 久保友明, 芳野極, 大内智博, 山崎大輔, 辻野典秀, D111-type guide block for

- high-pressure deformation experiments, 日本地球惑星科学連合会 2017 年大会 (2017).
西原遊, 土居峻太, 柿澤翔, 肥後祐司, 丹下慶範, 入船徹男, Effect of pressure on temperature measurements using WRe thermocouple and its impact on geophysics, 日本地球惑星科学連合会 2017 年大会 (2017).
西原遊, 土居峻太, 柿澤翔, 肥後祐司, 丹下慶範, 入船徹男, WRe 熱電対への圧力効果とその地球深部科学への影響, 日本鉱物科学会 2017 年年会・総会 (2017).
Ohta, K., Sato, Y., Nishihara, Y., Yagi, T., Hirose, K., Kawaguchi-Imada, S., Hirao, N. and Ohishi, Y., Is thermal conductivity of hcp iron anisotropic?, High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9) (2018).
太田健二, 佐藤雄輝, 西原遊, 八木貴志, 廣瀬敬, 河口沙織, 平尾直久, 大石泰生, hcp 鉄の熱伝導率異方性の測定, 第 58 回高圧討論会 (2017).
西原遊, 土居峻太, 柿澤翔, 肥後祐司, 丹下慶範, 入船徹男, WRe 熱電対起電力への圧力効果とその地球深部科学への影響, 第 58 回高圧討論会 (2017).
西原遊, 福家一樹, 丹下慶範, 肥後祐司, Determination of pressure effect on the thermocouple electromotive force using multi-anvil apparatus, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016).
西原遊, 大内智博, 川添貴章, 丸山玄太, 瀬戸雄介, 肥後祐司, 舟越賢一, 丹下慶範, 高圧変形その場観察実験による hcp 金属の格子選択配向の研究, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016).
Matsukage, K., Liu, X., Nishihara, Y., Suzuki, T., Seto, Y. and Takahashi, E., Subducting basaltic crust as a water transporter into the Earth's mantle transition zone, Goldschmidt 2016 (2016).
Nishihara Y., Ohuchi T., Kawazoe T, Maruyama G, Seto Y, Higo Y, Funakoshi K-I, Tange Y., Lattice-preferred-orientation of hcp metals studied by high-pressure deformation, Goldschmidt 2016 (2016).
Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Miyajima, N., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K. and Irifune, T., Creep strength of ringwoodite measured up to 1700 K at 17-18 GPa using a deformation-DIA apparatus, Goldschmidt 2016 (2016).
西原遊, 久保友明, 芳野極, 大内智博, 山崎大輔, 鈴木昭夫, KEK での大容量プレスを用いた高圧変形実験, 第 57 回高圧討論会 (2016).
西原遊, 丹下慶範, 肥後祐司, マルチアンビル装置を用いた熱電対起電力の圧力効果の測定, 第 57 回高圧討論会 (2016).
- 21 Liu, X., Matsukage, K. N., Takahashi, E., Suzuki, T. and Nishihara, Y., Phase D(H) as a major water carrier in the subducting oceanic crust into the lower mantle, 2016 International Conference on the Earth's Deep Interior (2016).
 - 22 西原遊, 丸山玄太, 高圧下でのフォルステライト反応帯の組織と成長カインेटイクス, 日本地球惑星科学連合 2015 (2015).
 - 23 Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., In situ creep strength measurement on ringwoodite up to 1700 K at 17-18 GPa using a deformation -DIA apparatus, Japan Geoscience Union Meeting 2015 (2015).
 - 24 Tsujino, N., Nishihara, Y., Yamazaki, D. and Seto, Y., Lattice preferred orientation of bridgmanite: Implications for seismic anisotropy in the lower mantle, Goldschmidt2015 (2015).
 - 25 西原遊, 福家一樹, 肥後祐司, 丹下慶範, マルチアンビル装置を用いた熱電対起電力への圧力効果の測定法, 第 56 回高圧討論会 (2015).

〔図書〕(計 0 件)

〔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://grc.ehime-u.ac.jp/archives/1431>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：太田 健二

ローマ字氏名：(OHTA, kenji)

所属研究機関名：東京工業大学
部局名：理学院
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20727218

研究分担者氏名：大内 智博
ローマ字氏名：(OHUCHI, tomohiro)
所属研究機関名：愛媛大学
部局名：地球深部ダイナミクス研究センター
職名：講師
研究者番号（8桁）：60570504

研究分担者氏名：松影 香子
ローマ字氏名：(MATSUKAGE, kyoko N.)
所属研究機関名：帝京科学大学
部局名：総合教育センター
職名：准教授
研究者番号（8桁）：80343078

(2)研究協力者

研究協力者氏名：瀬戸 雄介
ローマ字氏名：(SETO, yusuke)

研究協力者氏名：肥後 祐司
ローマ字氏名：(HIGO, yuji)

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。