

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287136

研究課題名(和文) 軽元素の六方晶鉄のレオロジーへの影響：内核の構造とダイナミクスへの応用

研究課題名(英文) Effect of light element on rheology of hcp-iron: Structure and dynamics of the inner core

研究代表者

山崎 大輔 (Yamazaki, Daisuke)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：90346693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：内核物質である六方晶鉄合金の粒成長速度と拡散速度を実験的に決定し、内核の変形機構および粘性率を推定した。その結果、地震波速度減衰の東西方向の不均質性を説明する為には、化学組成の不均質性が必要なが判明した。さらに、珪素の粘性率に対する依存性が小さいことを明らかにすることによって、他の軽元素が核中に大きく不均質に固溶し、レオロジー特性の不均質性を生み出している可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We determined the grain growth and diffusion rates of hcp iron and estimated the dominant deformation mechanism and viscosity of the inner core based on the experimental results. As a result, chemical heterogeneity is essential to interpret the observed heterogeneity between the eastern and western sides of the inner core in seismic attenuation. Moreover, we experimentally showed the small effect of Si on viscosity of hcp iron, indicating that light element (s) rather than Si may significantly affect the viscosity of the inner core.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：内核 拡散 粒成長

1. 研究開始当初の背景

地球の内核外核境界から深さ 200-250 km の領域において観測されている地震波速度の減衰(Q^{-1})は、東西方向に不均質な構造をしており、東側では西側と比較して3倍程度大きい (Monnereau et al., 201)。また、地震波速度においても、不均質性が見られる。さらに、多重散乱理論に基づいた地震学的考察により推定された結晶粒径は、東側では数キロメートルであり、西側では数百メートルである。これらの観測は、内核(半径 1220 km)が東西方向に非対称な構造をしていることを示している。

この非対称性を生み出す原因として内核の西側から東側への流動変形が提唱されている (Alboussiere et al., 2010)。流体力学的考察により、その流動速度は毎年約 1.5 cm と見積もられ、時間スケールとして1億年程度となる。この流動速度は内核の成長速度の数十倍となるため、内核の構成物質は常にフレッシュされていることとなる。つまり、終端である東側では内核物質の融解が起こり、始点である西側では、液体である外核物質の結晶化が起きる。この説に従うと、結晶粒径の東西での違いは、流動中の粒成長によると解釈される。一方、減衰率の東西変化は、内核の西側から東側への流動変形に伴う選択配向の発達と結晶粒成長によるものと説明されているが、粗粒な東側で減衰が大きいことをみてもこの解釈は納得できるものではない。つまり、内核の地震学的観測を統一的に解釈するダイナミクスモデルは未だ構築されていない。

2. 研究の目的

地球の核は鉄ニッケル合金を主成分としている。実験的に決定された鉄ニッケル合金の密度と地震学的密度との比較から、平均的に外核では10%程度、内核でも3%程度の密度欠損が指摘されている。これらの欠損は、軽

元素(Si, S, C, O, H などの)の固溶によると考えられるが、元素の定量に関して見解の一致に至っていない。

このような軽元素は、内核は液体の外核の継続的な冷却に伴う固化により成長し続けているということから、固化年代によって内核に固溶している軽元素の量が異なってくることを予想され、内核に不均質性をもたらしている可能性がある。従って、本研究の目的は、内核構成物質の結晶粒成長速度と粘性に関して、特に軽元素の影響に関して、実験的に決定し、内核のダイナミクスと組成に新たな制約を与えることである。

3. 研究の方法

高压実験を用いた研究により、内核は六方晶系の鉄合金で構成されていることが示されている。六方晶系の鉄は、高压下のみで安定であるため、高压実験が非常に有効な手段である。本研究では、比較的試料容積の大きい川井型マルチアンビル高压実験手法を用いて、(1) その場 X 線観察による粒成長実験、(2)同位体元素を用いた拡散実験、(3)変形実験を行った。

(1)の粒成長実験では、六方晶鉄が常圧下に回収できないことと、粒成長を観察するにはある程度の試料サイズが必要なことから、川井型マルチアンビル装置による X 線その場観察が非常に有効な手段である。実験においては、鉄のブロック試料を多軸鍛造により初期粒径を調整して出発物質とした。これを、放射光施設 SPring-8 に設置されている高压装置を用いて、X 線の回折斑点数の減少をその場観察することによって、圧力約 55 GPa での粒成長を観察した。

(2)の拡散実験では、 ^{54}Fe に富んだ試料と天然比の試料とを接触させ試料カプセルに封入し、60 GPa の圧力下で拡散させた。常圧下に回収することによる元素移動は結晶格子長を越えることはないことから、回収試料によ

る同位体分析を行った。2 次イオン質量分析装置を用いて、拡散プロファイルを測定し、拡散速度を見積もった。

(3)の変形実験では、(1)の粒成長実験と同様に、放射光を用いたその場観察法を用いた。高圧変形装置に、純鉄と 5 wt%の珪素が添加された鉄試料の 2 種類を変形コラムに直列に配置し、相互の強度について観察した。

4 . 研究成果

粒成長実験の結果を内核の温度・圧力条件まで外挿すると、初期粒径に依存せず、100 万年間の成長時間で数百メートルのサイズになることが判明した。100 万年間という時間スケールは、内核の歴史においては微々たる時間経過であり、内核の粒径は数百メートル以上であるという地震学的予測と一致する。このような粒径は、内核の温度と応力条件を勘案すると、ハーバー・ドーン・クリープが支配的な流動機構であることを示している。逆に、数百メートルから数キロメートルに成長するのに要する時間は 30 億年以上となり、もし提唱されている西側から東側への流動変形モデルが正しいなら、内核の年齢は 30 億年よりも大きくなる。一方、最近の実験結果がしめすように 10 億年以下の若い年齢であるならば (Ohta et al., 2016) 内核の東西方向の不均質性は流動変形モデルでは説明できないことになる。

拡散係数は、物質移動の素過程であり、粘性率に密接に関連している。従って、得られた拡散係数から、内核の変形機構の推定を試みた。転位クリープや拡散クリープに比較して、ハーバー・ドーン・クリープを想定した場合の粘性率が低くなることが分かった。このことは、過去のアナログ物質に対する実験結果 (Van Orman, 2004) ならびに上述の粒成長実験の結果とも調和的である。ハーバー・ドーン・クリープを仮定した場合の粘性率として、約 10^{11} Pas を得た。この値は、現

在まで見積もられている値 ($10^{10} \sim 10^{21}$ Pas) の範囲において (Buffett, 1977 他) 比較的低い値となる。また、この機構では、粘性率は粒径や応力に不感応であることが知られている。従って、内核に組成勾配が無いならば粘性率は一様であることになる。

粘性率は地震波速度減衰とも密接に関連していることから、上述した結果は、一様な化学組成の内核では、観測されている地震波速度減衰の不均質性を説明できないことを示している。変形実験の結果は、珪素を添加した試料と純鉄の間では、粘性率に大きな相違がないこと示した。この結果は、珪素は内核において重要な役割を果たしていない可能性が高くなった。

このように本研究では、レオロジー特性を物質科学的に調べることによって、内核のダイナミクスと化学組成に新たな制約を与えた。今後は、より詳細な軽元素のレオロジーへの影響を調べることによって、全地球的な化学進化を解き明かしていく必要がある。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件) (全て査読有り)

1. F. Xu, D. Yamazaki, N. Sakamoto, W. Sun, H. Fei, H. Yurimoto (2017) Silicon and oxygen self-diffusion in stishovite: Implications for stability of SiO_2 -rich seismic reflectors in the mid-mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 332-339, doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.044.
2. D. Yamazaki, N. Tsujino, A. Yoenda, E. Ito, T. Yoshino, Y. Tange, Y. Higo (2017) Grain growth of ϵ -iron: Implications to grain size and its evolution in the Earth's inner core, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 238-243, doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.049.
3. N. Tsujino, Y. Nishihara, D. Yamazaki, Y. Seto, Y. Higo, E. Takahashi (2016) Mantle dynamics inferred from the crystallographic orientation of bridgmanite, *Nature*, 539, 81-84, doi:10.1038/nature19777.
4. T. Yoshino, D. Yamazaki, Y. Tange, Y. Higo (2016) Short-period cyclic loading system for in situ X-ray observation of anelastic properties at high pressure, *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 105106, doi.org/10.1063/1.4963747.

5. H. Fei, S. Koizumi, N. Sakamoto, M. Hashiguchi, H. Yurimoto, K. Marquardt, N. Miyajima, D. Yamazaki, T. Katsura (2016) New constraints on upper mantle creep mechanism inferred from silicon grain-boundary diffusion rates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 433, 350-359, doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.014.
6. N. Yasui, M. Sougawa, M. Hirai, K. Yamamoto, T. Okada, D. Yamazaki, Y. Kojima, H. Ohfuji, S. Kunitsugu, K. Takarabe (2015) High-pressure and high-temperature synthesis of rhenium carbide using rhenium and nanoscale amorphous two-dimensional carbon nitride, *Cogent Physics*, 2, 1076702, doi.org/10.1080/23311940.2015.1076702.
7. F. Ono, N. Nishihira, Y. Hada, Y. Mori, K. Takarabe, M. Saigusa, Y. Matsushima, D. Yamazaki, E. Ito (2015) Strong tolerance of blue-green alga *Microcystis flos-aquae* to very high pressure, *J. Phys. Chem. of Solids*, 84, 57-62, doi.org/10.1016/j.jpics.2014.08.008.
8. S. Zhai, W. Xue, D. Yamazaki, F. Ma (2015) Trace element composition in tuite decomposed from natural apatite in high-pressure and high-temperature experiments, *Science China-Earth Sciences*, 57, 2922-2927, DOI: 10.1007/s11430-014-4980-7.
9. Fei, H., Wiedenbeck, M., Yamazaki, D. and Katsura, T. (2014) No effect of water on oxygen self-diffusion rate in forsterite, *J. Geophys. Res.*, 119, 7598-7606, doi:10.1002/2014JB011141.
10. Yusa, H., Tsuchiya, T., Akaogi, M., Kojitani, H., Yamazaki, D., Hirao, N., Ohishi, Y. and Kikegawa, T. (2014) Postperovskite Phase Transition of ZnGeO₃: Comparative Crystal Chemistry of Postperovskite Phase Transition from Germanate Perovskites, *Inorg. Chem.*, 53, 11732-11739, doi:10.1021/ic501958y.
11. Zhang, B., Yoshino, T., Yamazaki, D., Manthilake and G., Katsura, T. (2014) Electrical conductivity anisotropy in partially molten peridotite under shear deformation, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 405, 98-109, doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.018.
12. 芳野極・山崎大輔・肥後祐司・舟越賢一 (2014) 高温高圧下における周期振動実験による地震波減衰測定, *高圧力の科学と技術*, 24, 126-135, doi.org/10.4131/jshpreview.24.126.
13. Yamazaki, D., Yoshino, T. and Nakakuki, T. (2014) Interconnection of ferro-periclase controls subducted slab morphology at the top of the lower mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 403, 352-357, doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.017.
14. Ishii, T., Kojitani, H., Tsukamoto, S., Fujino, K., Mori, D., Inaguma, Y., Tsujino, N., Yoshino, T., Yamazaki, D., Higo, Y., Funakoshi, K. and Akaogi, M. (2014) High-pressure phase transitions in FeCr₂O₄ and structure analysis of new post-spinel FeCr₂O₄ and Fe₂Cr₂O₅ phases with meteoritical and petrological implications, *Am. Mineral.*, 99, 1788-1797, doi.org/10.2138/am.2014.4736.
15. Shimojuku, A., Boujibar, A., Yamazaki, D., Yoshino, T., Tomioka, N. and Xu, J. (2014) Growth of ringwoodite reaction rims from MgSiO₃ perovskite and periclase at 22.5 GPa and 1,800 °C, *Phys. Chem. Minerals*, 41, 555-567, DOI: 10.1007/s00269-014-0669-x.
16. Shimojuku, A., Yoshino, T. and Yamazaki, D. (2014) Electrical conductivity of brine-bearing quartzite at 1 GPa: implications for fluid content and salinity of the crust, *Earth Planets Space*, 66, 2, DOI: 10.1186/1880-5981-66-2.
- 〔学会発表〕(計7件)
1. 山崎大輔、焼結ダイヤモンドを用いた川井型装置による圧力発生、高圧討論会、2016年10月28日、つくば市
2. D. Yamazaki, N. Sakamoto, H. Yurimoto, Preliminary result on iron self-diffusion in ε-iron, 地球惑星関連連合大会、2016年5月23日、千葉市
3. D. Yamazaki, N. Tsujino, T. Yoshino, E. Ito, Y. Higo, Y. Tange, Inner core dynamics inferred from grain growth of ε-iron, AGU fall meeting, 2015年12月16日、サンフランシスコ
4. 山崎大輔・村上元彦・下宿彰・シューファン・瀬戸雄介・平尾直久、ペロフスカイトからポストペロフスカイトへの相転移における結晶方位関係、高圧討論会、2015年11月11日、広島市
5. D. Yamazaki, N. Tsujino, A. Yoenda, T. Yoshino, Y. Higo, Inner core dynamics inferred from grain growth of ε-iron, 地球惑星関連連合大会、2015年5月26日、千葉市
6. 山崎大輔・辻野典秀・米田明・芳野極・肥後祐司、六方晶鉄の粒成長、高圧討論会、2014年11月22日、徳島市
7. 山崎大輔、アンチゴライトの非弾性的性質、地球惑星関連連合大会、2014年4月30日、横浜市
- 〔その他〕
- ホームページ：
http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hacto/

(1)研究代表者

山崎 大輔 (YAMAZAKI, Daisuke)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：90346693

(2)研究分担者

米田 明 (YONEDA, Akira)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：10262841

芳野 極 (YOSHINO, Takashi)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：30423338