

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340173
 研究課題名 (和文) 2相系としてとらえた高圧下における下部マントルレオロジーの研究
 研究課題名 (英文) Two-phase rheology of earth's lower mantle
 研究代表者
 山崎 大輔 (YAMAZAKI DAISUKE)
 岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授
 研究者番号：90346693

研究成果の概要：

地球の下部マントルは主に珪酸塩鉱物とフェロペリクレスで構成されていることから、単相ではなく2相系としてのレオロジー特性が重要であるとの認識に基づき、2相系の下部マントル岩石を実験室内で再現するために高温高圧実験を行った。実験試料の微細構造観察により、比較的低温である沈み込んでいくスラブの粘性率はフェロペリクレスのそれに制約されていること、マントル最下部で観測されている地震波速度の異方性はフェロペリクレスに起因していることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：高圧地球科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地球惑星物質・レオロジー・高温高圧

1. 研究開始当初の背景

地球内部のダイナミクスを研究する上で、マントル対流は、核と相互関係をもち地球表層の諸現象にも影響をあたえる非常に重要な現象である。しかし、下部マントルのレオロジーに関しては、まだ十分研究されたとはいえない。下部マントルは珪酸塩ペロフスカイト (以下、Pv) が体積の8割程度を占めることから (マントル最下部ではPvが高圧相転移したポストペロフスカイト (以下、PPv))、

全岩のレオロジー特性としてPv (あるいはPPv) で代表させている研究が多い。しかしながら、2次的な相であるフェロペリクレス (以下、Fp) が粘性率においてPvよりも2-3桁低いことから、重要な役割を果たすと考えられる。そこで、下部マントルのレオロジーを2相系のそれとしてとらえた研究が重要である。

2. 研究の目的

2相系のレオロジーは単相のそれと様々な

点で異なっており、とくに2相が形成する組織に依存する点が顕著な相違点である。柔らかい相がネットワークを構成するように分布している組織を呈する場合、柔らかい相が全岩のレオロジーを支配する。一方、堅い相がフレームを構成するように分布している場合、堅い相が全岩のレオロジーを支配する。

実際の下部マントルに関しては、PvとFpで粘性率に2-3桁の相違があることから、これらの2相の微細構造（相分布や粒径など）が重要なレオロジーにおける要因となる。そこで、実験室内に安定して下部マントル条件を再現し、下部マントル条件下での2相の組織を明らかにしそれがレオロジーに与える影響を理解するとともに、主要構成相でないFpの重要性について考察する。

3. 研究の方法

下部マントルの条件を再現するために高圧実験の手法を用いた。

(1) オリビンを出発試料に用いて下部マントルを代表する岩石であるPv+Fp相を合成し、下部マントル条件下で電気伝導度測定を行った。また、回収試料に対して、Pv-Fp-Pv境界の二面角の測定を行った。これらの実験・測定により、2相の分布あるいはFpの連結性を調べた。さらに、あらかじめ合成したPv+Fp相に対して高温高圧疑似変形実験を行い、それぞれの相に対する歪みの集中度合いを理解するため選択配向の程度を電子線後方散乱回折方(SEM+EBSD)により測定した。

(2) 最下部マントル物質であると考えられているPPvのアナログ物質に対して定歪み変形実験を行い、微細構造観察を行った。

4. 研究成果

(1) 二面角の測定結果は105~110度であり、下部マントルにおけるFpの存在量(~

20%)を考慮すると、Fpは下部マントルにおいて連結していると思われる。一方、電気伝導度測定から、比較的低温(1400K以下)で合成された試料は電気伝導度が高くFpが連結していることを示す。これらの結果は、少なくとも、沈み込んでいくスラブのような比較的低温の箇所では、Fpが連結していることを示している。さらに、疑似変形実験の試料において、予備的な結晶方位観察を行ったところFpが選択配向していることが示され、かなりの歪みが分配されており、変形に寄与していることが示唆される。以上のことから、下部マントル上部においては、Fpが全岩のレオロジーに貢献していることが明らかである。

(2) PPv相に関する変形実験を行った結果、[100](010)をすべり系とする顕著な選択配向が観測された。この実験結果と地震学的な観測とを比較すると、マントル最下部において観測されている地震波速度の異方性はFpの選択配向が大きく貢献していると思われる。従って、マントル最下部においても、Fpの変形が全岩のレオロジーに重要な役割を果たしている。

以上のように、これまで明らかにされてこなかったFpの下部マントルレオロジーにおける重要性、例えば、比較的低温である沈み込んでいくスラブの粘性率はFpのそれに制約されていること、マントル最下部で観測されている地震波速度の異方性はFpに起因していることなどを高圧実験により生成された試料の微細構造観察に基づいて明らかにした。今後、導入予定の冷却ステージ(平成21年度予定)をSEM+EBSDに装着することによって、従来不可能であった電子線に弱いPvの観察が可能となることから、本研究で得られたPv+Fp変形相の選択配向・微細構造をさらに詳細に観察することを計画している。そ

れによって、現在までの成果に加えて付加的なデータを供出し、本成果を確固たるものとしていく。

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 41 件) (全て査読あり)

1. Yamazaki D., Yoshino T., Matsuzaki T., Katsura T., Yoneda A. Texture of (Mg,Fe)SiO₃ perovskite and ferro-periclase aggregate: implications for rheology of the lower mantle. Phys. Earth Planet. Inter., in press, (2009).
2. Katsura T., Yokoshi S., Kawabe K., Shatskiy A., Manthilake M. A. G. M., Zhai S., Fukui H., Hegoda H. A. C. I., Yoshino T., Yamazaki D., Matsuzaki T., Yoneda A., Ito E., Sugita M., Tomioka N., Hagiya K., Nozawa A., Funakoshi K., P-V-T relations of MgSiO₃ perovskite determined by in situ X-ray diffraction using a large-volume high-pressure apparatus, Geophys. Res. Lett., 36, L01305, 2009.
3. Matsui M., Ito E., Katsura T., Yamazaki D., Yoshino T., Yokoyama A., Funakoshi K., The temperature-pressure-volume equation of state of platinum, J. Appl. Phys, 105, 013505, 2009.
4. Shatskiy A., Yamazaki D., Morard G., Cooray T., Matsuzaki T., Higo Y., Funakoshi K., Sumiya H., Ito E., Katsura T., Boron-doped diamond heater and its application to large-volume, high-pressure, and high-temperature experiments, Rev. Sci. Instrum., 80, 023907, 2009.
5. Ito E., Fukui H., Katsura T., Yamazaki D., Yoshino T., Aizawa Y., Kubo A., Yokoshi S., Kawabe K., Zhai S., Shatskiy A., Okube M., Nozawa A., Funakoshi K., Determination of high-pressure phase equilibria of Fe₂O₃ using the Kawai-type apparatus equipped with sintered diamond anvils, Am. Min., 94, 205-209, 2009.
6. Fukui H., Katsura T., Kuribayashi T., Matsuzaki T., Yoneda A., Ito E., Kudoh Y., Tsutsuid S., Baronb A. Q. R., Precise determination of elastic constants by high-resolution inelastic X-ray scattering, Journal of Synchrotron Radiation, 15, 618-623, (2008).
7. Jin C -Q. Zhou J -S. Goodenough J B. Liu Q Q. Zhao J G. Yang L X. Yu Y. Yu R C. Katsura T., Shatskiy A., Ito E., High-pressure synthesis of the cubic perovskite BaRuO₃ and evolution of ferromagnetism in ARuO₃ (A = Ca, Sr, Ba) ruthenates, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 105, 7115-7119, (2008).
8. Kubo A., Ito E., Katsura T., Fujino K., Funakoshi K., In situ X-ray diffraction of pyrolite to 40 GPa using Kawai-type apparatus with sintered diamond anvils: possibility for the existence of iron-rich metallic particles in the lower mantle, High Pressure Res., 28, 351-362, (2008).
9. Ota T., Kobayashi K., Katsura T., Nakamura E., Tourmaline breakdown in a pelitic system: implications for boron cycling through subduction zones, Contribution to Mineralogy and Petrology, 155, 19-32, (2008).
10. Yamamoto J., Ando J., Kagi H., Inoue T., Yamada A., Yamazaki D., Irifune T., In situ strength measurements on natural

- upper-mantle minerals, *Phys Chem Minerals*, 35, 249-257, (2008).
11. Yamazaki D., Ito E., Post-Perovskite Transformation in Germanates Using Sintered Diamond Anvils, *The Review of High Pressure Science and Technology*, 18, 254-259, (2008).
 12. N. Sata, H. Ohfuji, K. Hirose, H. Kobayashi, Y. Ohishi, N. Hirao, New high-pressure B2 phase of FeS above 180 GPa, *Am. Mineral.*, 93, 492-494, 2008.
 13. Yoshino T., Manthilake G., Matsuzaki T., Katsura T., Dry mantle transition zone inferred from the conductivity of wadsleyite and ringwoodite, *Nature*, 451 (7175), 326-329, (2008).
 14. Yoshino T., Nishi M., Matsuzaki T., Yamazaki D., Katsura T., Electrical conductivity of majorite garnet and its implications for electrical structure in the mantle transition zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 170, 193-200, (2008).
 15. Yoshino T., Yamazaki D., Ito E., Katsura T., No interconnection of ferro-periclase in post-spinel phase inferred from conductivity measurement, *Geophysical Research Letters*, 35, L22303, (2008).
 16. Zhai S., Ito E., Phase relations of $\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{11}$ at high-pressure and high-temperature with implications for subducted continental crust into the deep mantle, *Phys. Earth Planet. In.*, 167, 161-167, (2008).
 17. Zhai S., Ito E., Yoneda A., Effects of pre-heated pyrophyllite gaskets on high-pressure generation in the Kawai-type multi-anvil experiments, *High Pressure Res.*, 28, 265-271, (2008).
 18. Fuji-ta K., Katsura T., Matsuzaki T., Ichiki M., Electrical conductivity measurement of brucite under crystal pressure and temperature conditions, *Earth, Planets and Space*, 59, 645-648, (2007).
 19. Fuji-ta K., Katsura T., Matsuzaki T., Ichiki M. and Kobayashi T., Electrical conductivity measurement of gneiss under mid- to lower crystal P-T conditions, *Tectonophysics*, 434, 93-101, (2007).
 20. Furuichi H., Ito E., Fujii N., Kanno Y., Torii, N., Transformation of gold by shearing at high pressure and at room temperature, *Solid State Commun.*, 144, 475-477, (2007).
 21. Ito E., Theory and Practice-Multianvil Cells and High-Pressure Experimental Methods. *Treatise on Geophysics Volume 2: Mineral Physics*, eds. G. Schubert, B. Romanowicz, A. Dziewonski, 197-230, (2007).
 22. Katsura T., Mantle, Electrical Conductivity, *Mineralogy in "Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism"* ed by D. Gubbins & E. Herrero-Bervera, 684-687, (2007).
 23. Katsura T., Phase-relation studies of mantle minerals by in situ X-ray diffraction using multianvil apparatus, *The Geological Society America Special Paper 421: Advances in High-Pressure Mineralogy Article*, 189-205, (2007).
 24. Katsura T., Yokoshi S., Kawabe K., Shatskiy A., Okube M., Fukui H., Ito E., Nozawa A. and Funakoshi K., Pressure dependence of electrical conductivity of

- (Mg,Fe)SiO₃ ilmenite, Phys. Chem. Mineral., 34 (4), 249-255, (2007).
25. H. Ohfuji, N. Sata, H. Kobayashi, Y. Ohishi, K. Hirose and T. Irifune, A new high-pressure and high-temperature polymorph of FeS, Phys. Chem. Minerals, 34, 335-343, 2007.
26. Kojitani H., Katsura T., Akaogi M., Aluminum substitution mechanisms in perovskite-type MgSiO₃: An investigation by Rietveld analysis, Phys. Chem. Mineral., 34 (4), 257-267, (2007).
27. Litasov K. D., Kagi H., Shatskiy A., Ohtani E., Lakshtanov D.L., Bass J. D., Ito E., High hydrogen solubility in Al-rich stishovite and water transport in the lower mantle, Earth Planet. Sci. Lett., 262, 620-634, (2007).
28. Shatskiy A., Fukui H., Matsuzaki T., Shinoda K., Yoneda A., Yamazaki D., Ito E., Katsura T., Growth of large (1 mm) MgSiO₃ perovskite single crystals: A thermal gradient method at ultrahigh pressure, American Mineralogists, 92, 1744-1749, (2007).
29. Song, M.-S, Yoneda A., Ito E., Ultrasonic measurements of single-crystal gold under hydrostatic pressures up to 8 GPa in a Kawai-type multi-anvil apparatus, Chinese Science Bulletin, 52, 1600 - 1606, (2007).
30. Yamazaki D., Ito E., Tange Y., Yoshino T., Zhai S., Fukui H., Shatskiy A., Katsura T., Funakoshi K., Phase boundary between ilmenite and perovskite structures in MnGeO₃ determined by in situ X-ray diffraction measurements. Phys. Chem. Mineral., 34 (4), 269-273, (2007).
31. Yamazaki D., Karato S., Lattice preferred orientation of lower mantle materials and seismic anisotropy in the D" layer, in "Post-perovskite: the last mantle phase transition" ed by K. Hirose, J. Brodholt, T. Lay and D. Yuen, AGU Monograph 69-78, (2007).
32. Yoshino T., Nishihara Y., Karato S., Complete wetting of olivine grain boundaries by hydrous melt near the mantle transition zone, Earth and Planetary Science Letters, 256 (3-4), 466-472, (2007).
33. Yoshino T., Yamazaki D., Grain growth kinetics of CaIrO₃ perovskite and post-perovskite, with implications for rheology of D" layer. Earth and Planetary Science Letters, 255 (3-4), 485-493, (2007).
34. Ito E., Sintered diamond multi anvil apparatus and its application to mineral physics, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 101 (3), 118-121, (2006).
35. Matsui M., Katsura T., Kuwata A., Hagiya K., Tomioka N., Sugita M., Yokoshi S., Nozawa A., Funakoshi K., Equation of state of (Mg_{0.8}, Fe_{0.2})₂SiO₄ ringwoodite from synchrotron X-ray diffraction up to 20 GPa and 1700K, Eur. J. Mineral., 18, 523-528, (2006).
36. Xue X., Kanzaki M., Fukui H., Ito E., Hashimoto T., Cation order and hydrogen bonding of high-pressure phases in the Al₂O₃-SiO₂-H₂O system: An NMR and Raman study, Am. Miner., 91, 850-861, (2006).
37. Yamazaki D., Shinmei T., Inoue T., Irifune T., Nozawa A., Funakoshi K.,

- Generation of pressures to ~60GPa in Kawai-type apparatus and stability of MnGeO_3 perovskite at high pressure and high temperature, *Am. Miner.*, 91, 1342-1345, (2006).
38. Yamazaki D., Yoshino T., Ohfuji H., Ando J., Yoneda A., Origin of seismic anisotropy in the D'' layer inferred from shear deformation experiments on post-perovskite phase, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 252, 372-378, (2006).
39. Yoshino T., Matsuzaki T., Yamashita S., Katsura T., Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere, *Nature*, 443, 973-976, (2006).
40. Yoshino T., Price J.D., Wark D.A., Watson E.B., Effect of faceting on pore geometry in texturally equilibrated rocks: implications for low permeability at low porosity, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152, 169-186, (2006).
41. Zhang B., Katsura T., Shatskiy A., Matsuzaki T., Wu X., Electrical conductivity of FeTiO_3 ilmenite at high temperature and high pressure, *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, 73, 134104, (2006). [学会発表] (研究代表者が筆頭で発表した分のみ、計 10 件)
- ① 山崎大輔、アントン・シャッキー、伊藤英司、桂智男、芳野極、ギヨム・モラード、ボロン-カーボンヒーターを用いた珪酸塩鉱物の熔融実験、第 49 回高圧討論会、2008 年 11 月 13 日、姫路
- ② 山崎大輔、上杉健太郎、Texture of $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ perovskite and ferro-periclasite aggregate: implications for rheology of the lower mantle、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月 27 日、千葉
- ③ Yamazaki Daisuke, Ando J., Karato S., Ohfuji H., Yoneda A., Yoshino T., Lattice preferred orientation of lower mantle materials and seismic anisotropy in the D'' layer, 5th Annual Meeting AOGS 2008、2008 年 6 月 16 日~20 日、Busan, Korea
- ④ D. Yamazaki, Grain Growth Kinetics of Majorite, 7th High Pressure Mineral Physics Seminar、2007 年 5 月 8 日~12 日、松島
- ⑤ 山崎大輔、Grain growth of Majorite、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、2007 年 5 月 19 日~24 日、千葉
- ⑥ 山崎大輔、伊藤英司、アントン・シャッキー、芳野極、ザイ・シャンメン、福井宏之、桂智男、ギート・マンシレイ、丹下慶範、船越賢一、 MnGeO_3 ポストペロフスカイト観察、第 48 回高圧討論会、2007 年 11 月 22 日、倉吉
- ⑦ 山崎大輔、唐戸俊一郎、 $(\text{Mg, Fe})\text{O}$ に関する変形実験、日本地球惑星科学連合 2006 年大会、2006 年 5 月 14 日~18 日、千葉
- ⑧ 山崎大輔、芳野極、大藤弘明、伊藤英司、ペロフスカイトとマグネシオヴスタイトの 2 相系のレオロジーの予察的研究、日本地球惑星科学連合 2006 年大会、2006 年 5 月 14 日~18 日、千葉
- ⑨ D. Yamazaki, T. Yoshino, H. Ohfuji, E. Ito, Two-phase rheology of the mixture of $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ perovskite and magnesiowustite: morphology and lattice preferred orientation, 19th General Meeting of the International Mineralogical Association、2006 年 7 月 23 日~28 日、神戸
- ⑩ 山崎大輔、伊藤英司、ザイ・シャンメン、芳野極、福井宏之、アントン・シャッキー、桂

智男、丹下慶範、舟越賢一、MnGeO₃ の高圧下での相転移観察、第 47 回高圧討論会、2006 年 11 月 9 日～11 日、熊本

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 大輔 (YAMAZAKI DAISUKE)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：90346693

(2) 研究分担者

桂 智男 (KATURA TOMOO)

岡山大学・地球物質科学研究センター・教授

研究者番号：40260666

芳野 極 (YOSHINO TAKASHI)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：30423338

伊藤 英司 (ITO EIJI) (～平成19年度)

岡山大学・地球物質科学研究センター・教授

研究者番号：00033259

大藤 弘明 (OFUJI HIROAKI) (～平成19年度)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：80403864

(3) 連携研究者

伊藤 英司 (ITO EIJI) (平成20年度)

岡山大学・地球物質科学研究センター・名誉教授

研究者番号：00033259

大藤 弘明 (OFUJI HIROAKI) (平成20年度)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：80403864