

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220712

研究課題名(和文) 下部マントルの化学組成と初期地球の分化過程

研究課題名(英文) Chemical composition of the lower mantle and differentiation of the early Earth

研究代表者

入船 徹男 (IRIFUNE, Tetsuo)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授

研究者番号：80193704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 172,300,000円

研究成果の概要(和文)：川井型多アンビル装置を中心とした実験技術開発に基づき、下部マントル上部に対応する高温高圧下での弾性波速度測定技術を確立するとともに、下部マントル深部に対応する温度圧力の安定発生を可能にした。これらの実験技術に基づき、下部マントル条件下での(1)主要高圧相の弾性波速度の精密測定、(2)マントル関連物質の融点・融解関係と元素分配、(3)沈み込むスラブ関連物質や含水高圧相の安定性、等に関して実験解明をおこなった。これらの実験結果と地震学・地球化学などから得られる情報を対比することにより、下部マントルを中心とした地球深部領域の化学組成と進化過程、また物質循環とダイナミクスに対して重要な制約を与えた。

研究成果の概要(英文)： Experimental techniques for sound velocity measurements and high pressure and temperature generation using Kawai-type multi-anvil apparatus have been expanded to the deeper regions of the Earth's lower mantle. A number of new experimental results particularly relevant to the following topics have been obtained under the pressure and temperature conditions of the deep lower mantle; 1) ultrasonic sound velocity measurements on major high-pressure minerals in the mantle and subducting slabs, 2) melting temperatures, melting relations, and element partitioning among high pressure minerals of the lower mantle materials, 3) phase relations and stabilities of some major mantle minerals and hydrous minerals, leading to important implications for the chemical compositions, evolution, and dynamics of the lower mantle of the Earth.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：下部マントル 弾性波 元素分配 相転移 超高压実験

1. 研究開始当初の背景

地球深部科学の最大の未解決問題の一つは、下部マントルの化学組成に関するものである。過去数十年にわたり、マントル全体がパイロライト的であるとする考えと、下部マントルに関しては輝石組成に近いペロブスカイト~コンドライトとする説が対立してきた。一方で、マントル遷移層下部領域における化学組成も、十分な解明に至っていなかった。

このようなマントル遷移層下部~下部マントル領域の物質や化学組成を推定するための、最も重要な情報は地震波速度データである。しかし、これを解釈するための、これらの候補物質に対する、下部マントル領域に対応する高温高压下での弾性波速度の精密測定は、技術的に不可能であった。

一方で、下部マントル深部領域での相関係や融解関係の精密決定は、マントルの分化過程や化学組成を制約する上で、重要な情報を与えてくれる。しかし 30 万気圧を越える領域でのマントル地温に沿った、あるいはそれ以上の高温下での実験は、ダイヤモンドアンビル装置に限られていた。

より精密な実験が可能なマルチアンビル装置では、圧力においては 50 万気圧を大きく超える領域の発生も可能になりつつあったが、このような高温下での実験は不可能であった。また、圧力的にも、下部マントル最下部に至る 135 万気圧程度の圧力発生は、従来の手法の延長では困難であると考えられていた。

2. 研究の目的

下部マントルの主要高压相、およびパイロライト等多成分系試料の高品質焼結体合成をおこない、超音波・放射光 X 線同時測定により、下部マントル領域下でのこれらの弾性波速度の精密測定をおこなう。

また、焼結ダイヤモンドとヒメダイヤを利用した X 線その場観察により、下部マントル深部におけるこれらの相関係・相境界や密度変化を決定する。また得られた試料の微小領域化学分析に基づき、マントル物質と核物質間の元素分配実験や、スラブ物質の相変化・密度変化等を明らかにする。

以上により得られた実験データを、地震学および地球化学的観測データと対比することにより、マントル遷移層下部~下部マントルの化学組成に強い制約を与える。さらにマントルの分化過程、マントル対流の様式、スラブの循環、地球の生成過程等に対しても、実験に基づく制約を与えることを目指す。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために超硬合金(WC)・焼結ダイヤモンド(SD)・単結晶ダイヤモンド(SCD)を用いた従来の超高压高温実験の改良により、下部マントル領域のより高い圧力・温度条件下での精密高温高压実験

技術の開発を行う。また、代表者らが開発したナノ多結晶ダイヤモンド(NPD = ヒメダイヤ)を用い、最下部マントル領域の圧力発生を可能にする。

一方で、放射光 X 線その場観察と超音波測定を組み合わせ、弾性波速度精密測定技術を、下部マントル領域に対応する圧力温度条件下まで拡張する。また、測定に適した高压相の高品質多結晶を合成するため、新たな合成技術を開発する。

これらの技術に基づき、パイロライト及びその構成鉱物に対する弾性波速度精密測定を、下部マントル領域に対応する圧力温度条件下でおこなう。また、下部マントル深部領域におけるモデルマントル物質や沈み込むスラブ関連物質に対して、融解関係、元素分配、相変化、密度変化等に関する精密実験をおこなう。更にこれらの実験結果に基づき、マントル遷移層下部~下部マントル全域に対応する化学組成、物質循環、進化過程に対して強い制約を与える。

4. 研究成果

高温高压下での弾性波速度測定技術に関しては、下部マントル上部領域に対応する高温高压下での精密測定技術を確立した。この技術を用いてマントル遷移層下部~下部マントルの主要高压相である CaSiO_3 ペロブスカイト、 MgSiO_3 ブリッジマナイト、多様な組成のガーネット、また多成分系のパイロライトに対して、超音波速度測定を行った。

弾性波速度測定用の高品質多結晶焼結体の合成技術の開発過程で、世界初となる透明ナノ多結晶焼結体(透明ナノセラミックス)の合成に成功し、Nature Communications 誌等に発表した。これを契機として、代表者らの研究センターに新たに超高压材料科学部門が設置され、化学・物理・材料科学分野の教員が参画する新たな学際的研究が開始されるという、当初の想定外の効果が得られている。

WC を用いた高压・高温発生に関しては、代表者と企業で開発した新しい WC により、従来の限界をはるかに超える 50 万気圧領域での圧力発生を可能にした。また、WC を用いた下部マントル条件下での 3000K 領域の安定高温発生技術を確立し、下部マントル条件下での融解関係や新たな高压相の発見などを行った。更に代表者らが製作した NPD 製の乳鉢を活用した共同研究により、新たな加熱材の開発に成功し、最高 3800K の発生も達成した。一方で、SD を用いた高温発生技術の開発をすすめ、従来困難であったマントル地温程度の 2300K の安定発生を 65 万気圧程度の圧力下で可能にした。

NPD を用いた超高压発生に関しては、当初の目標であるマントル最下部の 135 万気圧の達成には至らなかった。これは大型超高压合成装置に不具合が生じ、研究期間の終盤において大型 NPD の合成が困難になったことによ

る。しかし、NPD を用いたマルチアンビル装置により、約 90 万気圧の発生に成功し、SD に比べてはるかに高い圧力発生効率で超高压発生が可能であることを確認した。また、高い X 線透過率を生かし、アンビルを通しての回折実験やイメージング実験が可能であることを示した。

以上のような実験技術の開発に基づき、マントル遷移層下部～下部マントル領域における化学組成、マントル物質の融解と元素分配、スラブ物質の循環、等に関して以下のような地球科学的成果が得られた。

(1) マントル遷移層下部～下部マントルの化学組成

常圧下で非晶質化するためこれまで測定が困難であった、CaSiO₃ペロプスカイトの弾性波速度精密測定に成功した。この結果から、マントル遷移層下部がハルツバージャイトの化学組成からなり、下部マントル最上部に玄武岩的化学組成の部分が存在することを示した (Nature 誌査読中)。また、MgSiO₃ブリッジマナイトや Fe, Al を含むブリッジマナイト、更にパイロライトに対する弾性波速度精密測定を行い、下部マントル上部がパイロライト的であるとする結論を得た。

(2) 下部マントル領域におけるマントル物質の融解と元素分配

下部マントルの主要鉱物である MgO の融点を精密決定し、従来の相反する結果に対して決定的な結果を得た (Nature Communications 誌発表)。また MgSiO₃-CaSiO₃系の融解関係を決定し、下部マントル深部での主要鉱物の融解関係に制約を与えた。その他、CV コンドライト、E コンドライト、パイロライト等を用いた融解実験をおこない、親鉄元素やハロゲン元素のケイ酸塩 鉄間の分配を明らかにし、マントルの分化過程に対する制約を行った。

(3) 下部マントル条件下での新含水相の発見

下部マントル条件下で安定な新しい含水鉱物 (phase H) を発見した。従来にない高い圧力まで安定であり、沈み込んだスラブとともに下部マントル深部まで水を運搬する可能性があることが示唆される (Nature Geoscience 誌発表)。更に FeOOH の新たな含水相を発見するとともに、これが FeO₂ と水素に分解するとする最近の研究結果を否定する結果を得た (Nature 誌発表)。これらの一連の研究は下部マントルにおける水と水素の挙動と関連し、大きな注目を集めている。

(4) マントル及びスラブ構成鉱物の相関係

マントルの主要鉱物である MgSiO₃ブリッジマナイトの安定性に対し、他の主要元素の影響を明らかにするため、MgSiO₃-Al₂O₃系および MgSiO₃-FeSiO₃系の相関係の詳細を 50-60 万気圧程度まで明らかにした。また沈み込み地殻物質やその構成鉱物の相関係を明らかにし、その過程で Al₂SiO₅カヤナイトの新高圧相を 2 つ発見し、いずれも結晶構造解析を

行った。これらの新高圧相は衝撃圧縮を被った隕石中などで見つかる可能性がある。

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 116 件)

(全て査読有)

1. Irifune, T., Ohuchi, T., Oxidation softens mantle rocks, *Nature*, 555, 314-315, 2018.
<http://www.nature.com/articles/d41586-018-02828-y>
2. Sakai, T., Yagi, T., Irifune, T., Kadobayashi, H., Hirao, N., Kunimoto, T., Ohfuji, H., Kawaguchi-Imada, S., Ohishi, Y., Tateno, S., Hirose, K., High Pressure Generation using Double-Stage Diamond Anvil Technique: Problems and Equations of State of Rhenium, *High Press. Res.*, 38, 107-119, 2018.
DOI:10.1080/08957959.2018.1448082
3. Higo, Y., Irifune, T., Funakoshi, K., Simultaneous high-pressure high-temperature elastic velocity measurement system up to 27 GPa and 1873K using ultrasonic and synchrotron X-ray techniques, *Rev. Sci. Instrum.*, 89, 014501, 2018.
DOI: 10.1063/1.4993121
4. Nishi, M., Gréaux, S., Tateno, S., Kuwayama, Y., Kawai, K., Irifune, T. and Maruyama, S., High-pressure phase transitions of anorthosite crust in the Earth's deep mantle, *Geosci. Front.*, 2017, (in press).
DOI:10.1016/j.gsf.2017.10.002
5. Kimura, T., Ohfuji, H., Nishi, M. and Irifune, T., Melting temperatures of MgO under high pressure by micro-texture analysis, *Nat. Commun.*, 8, 15735, 2017.
DOI:15735, 10.1038/ncomms15735
6. Liu, Z., Du, W., Shinmei, T., Gréaux, S., Zhou, C., Arimoto, T., Kunimoto, T. and Irifune, T., Garnets in the majorite-pyrope system: symmetry, lattice microstrain, and order-disorder of cations, *Phys. Chem. Miner.*, 44, 237-245, 2017.
DOI:10.1007/s00269-016-0852-3
7. Bindi, L., Sirotkina, E., Bobrov, A., Pushcharovsky, D. Y., and Irifune, T., Discovery of MgTiSi₂O₇: a new

- high-pressure silicate with the weberite structure synthesized at transition zone conditions, *Phys. Chem. Miner.*, 44(6), 419-424, 2017. DOI: 10.1007/s00269-016-0868-8
8. Ohuchi, T., Lei, X., Ohfuji, H., Higo, Y., Tange, Y., Sakai, T., Fujino, K. and Irifune, T., Intermediate-depth earthquakes linked to localized heating in dunite and harzburgite, *Nat. Geo.*, 10, 771-776, 2017. DOI: 10.1038/ngeo3011
 9. Liu, Z., Nishi, M., Ishii, T., Fei, H., Miyajima, N., Ballaran, T.B., Ohfuji, H., Sakai, T., Wang, L., Shcheka, S., Arimoto, T., Tange, Y., Higo, Y., Irifune, T. and Katsura, T., Phase relations in the system MgSiO₃-Al₂O₃ up to 2300 K at lower mantle pressures, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 122(10), 7775-7788, 2017. DOI: 10.1002/2017JB014579
 10. Nomura, R., Zhou, Y. and Irifune, T., Melting phase relations in the MgSiO₃-CaSiO₃ system at 24 Gpa, Melting phase relations in the MgSiO₃-CaSiO₃ system at 24 GPa, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 4(34), 2017. DOI: 10.1186/s40645-017-0149-2
 11. Gréaux, S., Nishi, M., Tateno, S., Kuwayama, Y., Hirao, N., Kawai, K., Maruyama, S. and Irifune, T., High-pressure phase relation of KREEP basalts: a clue for finding the lost Hadean crust?, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 274, 184-194, 2017. DOI: 10.1016/j.pepi.2017.12.004
 12. Sirotkina, E. A., Bobrov, A. V., Bindi, L. and Irifune, T., Chromium-bearing phases in the Earth's mantle: Evidence from experiments in the Mg₂SiO₄ system at 10-24 GPa and 1600 , *Am. Mineral.*, 103, 151-160, 2017. DOI: 10.2138/am-2018-6264
 13. Bindi, L., Tamarova, A., Bobrov, A. V., Sirotkina, E. A. Sirotkina, Tschauner, O, Walter, M. J., and Irifune, T., Incorporation of high amounts of Na in ringwoodite: Possible implications for transport of alkali into lower mantle, *Am. Mineral.*, 101, 483-486, 2016. DOI: 10.2138/am-2016-5570
 14. Kunimoto, T., Irifune, T., Tange, Y. and Wada, K., Pressure generation to 50 GPa in Kawai-type multianvil apparatus using newly developed tungsten carbide anvils, *High Pres. Res.*, 36(2), 97-104, 2016. DOI: 10.1080/08957959.2016.1148149
 15. Dewaele, A., Worth, N., Pickard, C. J., Needs, R. J., Pascarelli, S., Mathon, O., Mezouar, M. and Irifune, T., Synthesis and stability of xenon oxides Xe₂O₅ and Xe₃O₂ under pressure, *Nat. Chem.*, 2016. DOI:10.1038/nchem2528
 16. Liu, Z., Irifune, T., Nishi, M., Tange, Y., Arimoto, T. and Shinmei, T., Phase relations in the system MgSiO₃-Al₂O₃ to 52 GPa and 2000K, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 257, 18-27, 2016. DOI:10.1016/j.pepi.2016.05.00
 17. Zhou, Y., Irifune, T., Ohfuji, T., Shinmei, T. and Du, W. Stability region of K_{0.2}Na_{0.8}AlSi₃O₈ hollandite at 22 GPa and 2273 K, *Phys. Chem. Miner.*, 2016. DOI:10.1007/s00269-016-0834-5
 18. Gréaux, S., Kono, Y., Wang, Y., Yamada, A., Zhou, C., Jing, Z., Inoue, T., Higo, Y., Irifune, T., Sakamoto, N., and Yurimoto, H., Sound velocities of aluminum-bearing stishovite in the mantle transition zone, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4239-4246, 2016. DOI:10.1002/2016GL068377
 19. Irifune, T., Kawakami, K., Arimoto, T., Ohfuji, H., Kunimoto, T., and Shinmei, T., Pressure-induced nano-crystallization of silicate garnets from glass, *Nat. Commun.*, 7, 13753, 2016. DOI: 10.1038/ncomms13753
 20. Sakai, T., Dekura, H. and Hirao, N., Experimental and theoretical thermal equations of state of MgSiO₃ post-perovskite at multi-megabar pressures, *Sci. Rep.*, 6, 22652, 2016. DOI:10.1038/srep22652
 21. Ohuchi, T., Kawazoe, T., Higo, Y., Funakoshi, K., Suzuki, A., Kikegawa, T. and Irifune, T., Dislocation-accommodated grain boundary sliding as the major deformation mechanism of olivine in the Earth's upper mantle, *Sci. Adv.*, 1(9), e1500360, 2015. DOI: 10.1126/sciadv.1500360
 22. Arimoto, T., Greaux, S., Irifune, T., Zhou, C. and Higo, Y., Sound

- velocities of $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ almandine up to 19 GPa and 1700 K, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 246, 1-8, 2015.
DOI: 10.1016/j.pepi.2015.06.004
23. Nishi, M., Irifune, T., Greaux, S., Tange, T., and Higo, Y., Phase transitions of serpentine in the lower mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 245, 52-58, 2015.
DOI:10.1016/j.pepi.2015.05.007,
24. Sakai, T., Yagi, T., Ohfuji, H., Irifune, T., Ohishi, Y., Hirao, N., Suzuki, Y., Kuroda, Y., Asakawa, T., and Kanemura, T., High-pressure generation using double stage micro-paired diamond anvils shaped by focused ion beam, *Rev. Sci. Instrum.*, 86, 033905, 2015.
DOI: 10.1063/1.4914844
25. Liu, Z., Irifune, T., Greaux, S., Arimoto, T., Shinmei, T. and Higo, Y., Elastic wave velocity of polycrystalline $\text{Mj}_{80}\text{Py}_{20}$ garnet to 21 GPa and 2000 K, *Phys. Chem. Miner.*, 42, 213-222, 2015.
DOI: 10.1007/s00269-014-0712-y
26. Ohuchi, T., and Irifune, T., Crystallographic preferred orientation of olivine in the Earth's deep upper mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 228, 220-231, 2014.
DOI: 10.1016/j.pepi.2013.11.013
27. Nishi, M., Irifune, T., Tsuchiya, J., Tange, Y., Nishihara, Y., Fujino, K., Higo, Y., Stability of hydrous silicate at high pressures and water transport to the deep lower mantle, *Nat. Geo.*, 7, 224-227, 2014.
DOI: 10.1038/ngeo2074
28. Zhou C., Greaux, S., Nishiyama, N., Irifune, T., and Higo, Y., Sound velocities measurement on MgSiO_3 akimotoite at high pressures and high temperatures with simultaneous in situ X-ray diffraction and ultrasonic study, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 228, 97-105, 2014.
DOI: 10.1016/j.pepi.2013.06.005
29. Irifune, T., Isobe, F., and Shinmei, T., A novel large-volume Kawai-type apparatus and its application to the synthesis of sintered bodies of nano-polycrystalline diamond, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 228, 255-261, 2014.
- DOI:10.1016/j.pepi.2013.09.007
- [学会発表](計 230 件)
(国際会議での総会・特別・受賞講演)
1. Irifune, T., Synthesis of novel nano-ceramics using large-volume multi-anvil press, AIRAPT26 Joint with ACHPR 8 & CHPC 19, 2017. (総会講演)
 2. Irifune, T., Multianvil techniques and their application in Earth and materials sciences, INTERNATIONAL SCHOOL of CRYSTALLOGRAPHY Erice 2016: High-pressure crystallography: Status artis and emerging opportunities, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, 2016. (基調講演)
 3. Irifune, T., Deep mantle mineralogy and novel materials synthesis using multianvil high-pressure technology (Robert Wilhelm Bunsen Medal Lecture), European Geosciences Union General Assembly 2016, 2016. (受賞講演)
 4. Irifune, T., Synthesis of nano-polycrystalline diamond and related materials, Museum, Fersman Mineralogical, 2015. (特別講演)
 5. Irifune, T., Large multi-anvil press and application to novel materials synthesis, 2015 COMPRES Annual Meeting, 2015. (基調講演)
 6. Irifune, T., LMAP technologies for higher pressures and larger sample volumes, US Large Multi-Anvil Workshop, 2015. (基調講演)
 7. Irifune, T., Geoscience and Diamond, 9th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2015, Shizuoka Convention & Arts Center "GRANSHIP", 2015. (総会講演)
 8. Irifune, T., Advancement of multi-anvil technology and synthesis of novel sintered nano-polycrystalline materials, The 7th Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-7), 2015. (総会講演)
 9. Irifune, T., Multi-anvil high-pressure technology and mineralogy of the deep mantle, Australian Earth Sciences Convention 2014, 2014. (受賞講演)
 10. Irifune, T., Synthesis and applications of consolidated bodies of ultrahard nano-polycrystalline diamond, High Pressure Science at

Third-Generation Synchrotron
Facilities: State-of-the-art and
Future Prospects, ESRF workshop, 2014.
(基調講演)

〔図書〕(計4件)

1. Irifune, T., and Tsuchiya, T., Phase transitions and mineralogy of the lower mantle, *Treatise on Geophysics 2nd Edition* (ed. D. Price), Elsevier Science, p.p.33-60, 2015.
2. Irifune, T., and Sumiya, H., Nanopolycrystalline diamond without binder and its application to various high-pressure apparatus, *Comprehensive Hard Materials* (ed. Sarin, V. K. and Nebel, C. E.), Elsevier, p.p.173-191, 2014.

〔その他〕

成果の発表は、学会での発表や論文発表以外に、代表者がセンター長を務める愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター(GRC)のホームページ、及び年3回発行されているニュースレターにおいて適宜平易な紹介をおこなった。また、公開講演会等の他に、愛媛大学ミュージアムにおける成果の展示や、日本地球惑星科学連合のGRCブースにおける展示・ショートセミナーを通じて、高校生をはじめとする一般向けの展示とアウトリーチ活動を行った。

重要な研究成果が得られた際には、積極的にプレスリリースを行い、以下のような記事などとして紹介されている。

(報道)

1. 日刊工業新聞 2017年8月30日 “プレート内の深い地震 変形で岩石溶融、断層に 愛媛大など”
2. 読売新聞 2017年7月4日 “マントル最深部に水素 愛媛大が可能性示唆”
3. 読売新聞 2017年6月6日 “マントル融点最高 5600度 愛媛大構成鉱物ペリクレス解明”
4. 科学新聞 2016年12月16日 “透明ナノ多結晶ガーネット 世界初 愛媛大チームが合成”
5. NHK ワールドTV「サイエンスビュー」 2016年7月13日 “美しいだけじゃない! 誕生・スーパーダイヤモンド” 再放送
6. 毎日新聞 2015年11月19日 “欧州の国際賞「ブンゼン・メダル」愛媛大 入船教授に”
7. 朝日新聞 2015年6月1日 “地球深部の研究 内容は 成果は”
8. 産経新聞 2015年4月28日 “最硬物質で工業発展に寄与”
9. 朝日新聞 2014年9月8日 “豪州地質

学会リングウッド賞受賞「マイヒーローの背中見て」

10. 日本経済新聞 2014年8月14日 “未知の鉱物、高压で創出”

(受賞・受章)

- 2017年 日本鉱物科学会研究奨励賞(境 毅)
2017年 日本鉱物科学会賞(大藤弘明)
2017年 JpGU フェロー称号(入船徹男)
2017年 愛媛新聞賞(入船徹男)
2016年 ヨーロッパ地球科学連合
R. W. Bunsen メダル(入船徹男)
2015年 紫綬褒章(入船徹男)
2014年 日本高圧力学会奨励賞(西 真之)
2014年 オーストラリア地質学会
A. E. Ringwood メダル賞(入船徹男)

(ホームページ等)

<http://www.grc.ehime-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

入船 徹男(IRIFUNE Tetsuo)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授
研究者番号: 80193704

(2)研究分担者

大藤 弘明(OHFUJI Hiroaki)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授
研究者番号: 80403864

境 毅(SAKAI Takeshi)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・講師
研究者番号: 90451616

西 真之(NISHI Masayuki)

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: 10584120

肥後 祐司(HIGO Yuji)

(公財)高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・主幹研究員
研究者番号: 10423435

丹下 慶範(TANGE Yoshinori)

(公財)高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員
研究者番号: 70543164

(平成25-27年度まで研究分担者)