

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号： 16301  
 研究種目： 特別推進研究  
 研究期間： 2008～2012  
 課題番号： 20001005  
 研究課題名（和文） Fe 系物質の超高压下での挙動と最下部マントル～内核の物質科学  
 研究課題名（英文） Behavior of Fe-bearing materials under very high pressure and mineralogy of the lowermost mantle and the inner core  
 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

研究成果の概要（和文）： マルチアンビル装置やダイヤモンドアンビル装置による超高压実験と第一原理計算を併用し、下部マントル深部領域から内核に至る高温高压条件のもと、特に Fe 系物質の挙動を一つの焦点とした物質科学的研究をおこなった。下部マントル領域における Fe の電子スピン状態変化が、鉍物間元素分配や密度等に及ぼす影響や、内核条件下における Fe の安定相についての重要な知見を得た。また、ナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）を利用し超高压実験技術の開発と応用においても、大きな成果が得られた。

研究成果の概要（英文）： Behaviors of iron and iron-bearing minerals have been studied by both multianvil and diamond anvil cell experiments, in conjunction with ab initio calculations, under the pressure and temperature conditions from the deep lower mantle to the inner core of the Earth. A number of important results such as relevant to the partitioning of iron in the lower mantle and the phase relations of iron in the inner core, as well as technological developments in applying nano-polycrystalline diamond (NPD or HIME-diamond) to various high-pressure apparatus, have been obtained in this study.

### 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	78,900,000	23,670,000	102,570,000
2009 年度	89,400,000	26,820,000	116,220,000
2010 年度	101,700,000	30,501,014	132,201,014
2011 年度	87,600,000	26,280,000	113,880,000
2012 年度	76,500,000	22,950,000	99,450,000
総計	434,100,000	130,221,014	564,321,014

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード： ヒメダイヤ、超高压実験、地球・惑星内部、第一原理計算、マントル・核、鉄、固体地球物理学

#### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者を中心とした地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）の実験系グループでは、焼結ダイヤモンドアンビルを用いたマルチアンビル実験技術により、50 万気圧を越える圧力領域での実験を可能にし、この領

域での高温高压 X 線その場観察実験を可能にした。しかしながら、焼結ダイヤモンドの硬度上の限界から、100 万気圧以上の発生は極めて困難と予想されていた。

一方で、代表者らは独自に開発したナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）バルク試料

の4mm程度の大型化に成功しており、ダイヤモンドアンビル装置への応用が可能になりつつあった。また、単結晶ダイヤモンドを用いた実験においても、300万気圧近い圧力発生と、5000Kの同時発生という、地球の内核に近い圧力温度領域の発生が可能になっていた。

GRCの数値系部ループの代表である分担者らは、第一原理計算によってマントル深部～核領域における高温高压下での結晶構造や熱弾性的性質に関する新たな計算技法の開発をおこなっていた。特に地球内核の主要物質であるFeの結晶構造や、Niおよび軽元素などの影響、また下部マントル領域における鉱物中Feのスピン転移についての理論的予測と実験による検証が重要な課題となりつつあった。

## 2. 研究の目的

上記のような研究開始当初の状況を背景に本研究では、超高压実験と第一原理計算技術を基盤とした以下のような目的を設定した。

(1) Fe系物質を中心とした相変化・元素分配・密度変化・弾性的性質の精密決定をおこなう。特にFeのスピン転移の影響の検証を念頭においた、鉱物間分配実験をおこない、その下部マントル物質の相関係や密度変化に与える影響を見積もる。

(2) 内核条件下でのFeの結晶構造および、これに固溶すると考えられるNiの影響を評価する。また、これらの内核条件における融点についても明らかにするとともに、S、Si、Oなどの軽元素の影響の解明も目指す。

(3) ヒメダイヤの本格的な応用を目指し、従来のバルク試料の大型化を試みる。得られたヒメダイヤ試料を様々な形状のアンビルに加工し、従来を越える圧力発生を目指すとともに、多様な応用をおこなう。

## 3. 研究の方法

上記のそれぞれの主要目的に対応し、以下のような方法により研究を推進する。

(1) 焼結ダイヤモンドアンビルを用いたマルチアンビル実験技術を発展させ、下部マントル中部領域に対応する50万気圧・2000K程度の高温高压下での、放射光X線その場観察および急冷回収実験をルーチン的に可能にする。この技術を用いて、マントルの代表的物質であると考えられるパイロライトや、その主要構成鉱物であるかんらん石の下部マントル中部に対応する圧力下までの相転移実験をX線その場観察によりおこなう。得られた試料の微小領域化学組成分析により、主要高压相間のFeの分配挙動や、それが密度などの物性に与える影響を評価する。また、関連する下部マントル鉱物の精密なP-V-T状

態方程式の決定も行う。

(2) レーザー加熱ダイヤモンドアンビル装置と放射光X線その場観察実験を組み合わせ、地球の内核条件下に対応する350万気圧・6000K程度の高温高压条件下でのFeおよびFe-Ni合金の結晶構造、また特にSi、Sなどに焦点を当てた相関係や融解関係を実験的に明らかにする。また、この領域および更に系外惑星内部に至る高温高压下での第一原理計算により新高圧相の探査をおこなうとともに、Fe系の結晶構造や物性予測をおこなう。

(3) 6000トン級の超大型マルチアンビル装置を建造し、これを用いた高温高压下での大容量高压相合成技術の開発をおこなう。特にヒメダイヤの大型化に特化し、高品質化と大型化、合成のルーチン化を推進する。得られたヒメダイヤを様々な形状に加工し、1) ダイヤモンドアンビル装置、2) マルチアンビル装置、3) 弾性などの物性測定、4) その他の応用、等をおこなう。

## 4. 研究成果

(1) パイロライト中の主要鉱物、特にMgシリケートペロブスカイトとマグネシウムスタイト間の元素分配を、下部マントル中部条件下で詳細に決定するとともに、その密度変化に及ぼす影響やスピン転移との関連を明らかにした。この結果、40万気圧付近以上の圧力でFeのマグネシウムスタイトへの顕著な濃集が見られ、この相における2価Feのスピン転移によるものと解釈された。この結果はScienceに発表され、大きな反響を得ている。また、かんらん石を用いた単純な系での同様の実験においても、これを支持する結果が得られている。更に、第一原理計算やダイヤモンドアンビル装置を用いた実験において、ペロブスカイト中の2価、3価のFeのスピン転移に関しても新たな知見が得られた。尚、超高压実験および第一原理計算結果から、これらの相中のスピン転移は下部マントル中の地震波速度や、密度変化に対して、観測にかかるほどの大きな影響は及ぼさないことも示された。

(2) レーザー加熱ダイヤモンドアンビル装置により、ほぼ当初の目標である温度圧力下での実験技術の開発が達成され、内核中におけるFeおよびFe-Ni合金が、融点直下まで六方晶であることが明らかになった。また、Feの相関係や融解関係に対する軽元素のうち、特にSiの影響に対して系統的な解明がおこなわれた。一方で、第一原理計算により、内核条件下での高温下では、乱層構造のFeが存在することが予測されたが、明確な実験的検証は得られていない。なお、第一原理数値シミュレーション分野と、実験分野のコラボレーションによる新高圧相の発見や、新し

い統合解析による圧力標準物質の状態方程式の確立など、本研究課題に関連した様々な成果が得られている。これらの成果は Proc. Natl. Acad. Sci. や J. Geophys. Res. などの一流誌に発表されている。

(3) 愛媛大学の支援により、世界最大のマルチアンビル装置が 2009 年に完成した。この装置の立ち上げとともに、15 万気圧・2600k 領域での試料サイズ 1.3cm (直径・長さ) の大型試料合成法を確立し、これにより 1cm 程度のヒメダイヤのルーチンの合成が可能になった。得られたヒメダイヤを利用し、主にダイヤモンドアンビル装置への応用が開始されるとともに、マルチアンビル装置への応用が試みられた。前者においては現在のところ 250 万気圧までに限られているが、特に先端サイズが大きなアンビルを用いた場合、単結晶に比べて 1.5~2 倍程度の高い圧力発生が可能であることがわかった。

また、新たな応用として高圧 X 線吸収実験において大変有効であることが明らかになり、国内外の 20 近い研究グループとの共同研究が開始された。この分野においてヒメダイヤは「major breakthrough」(カーネギー研究所 H. K. Mao 氏) と、極めて高い評価を得ている。尚、本研究グループの成果ではないが、ヒメダイヤと同様のナノ多結晶ダイヤモンドを用いた 600 万気圧の発生が報告されており、本グループにおいても引き続き 1000 万気圧をめざした技術開発が進行中である。

マルチアンビル装置への応用に関しては、大型試料の数が限られているため、数回の試験的実験にとどまっている。現状では最高圧力は 50 万気圧程度と、焼結ダイヤモンドを用いた場合に比べてまだ低いが、圧力発生効率が大幅に上がっている点や、X 線透過率の高さなどの重要な利点を確認されており、引き続き実験技術の開発がすすめられている。

## 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 212 件)  
(査読有)

- ① Fang, L., Ohfuji, H., and Irifune, T., A novel technique for the synthesis of nanodiamond powder, J. Nanomater., 2013(2013), 201845, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/201845>
- ② Fujino, K., Nishio-Hamane, D., Kuwayama, Y., Sata, N., Murakami, S., Whittaker, M., Shinozaki, A., Ohfuji, H., Kojima, Y., Irifune, T., Hiraoka, N., Ishii, T. and Tsuei, K.-D., Spin transition and substitution of Fe<sup>3+</sup> in Al-bearing post-Mg-perovskite, Phys. Earth. Planet.

Inter., 217, 31-35, 2013.  
doi:10.1016/j.pepi.2013.01.006.

- ③ Isobe, F., Ohfuji, H., Sumiya, H. and Irifune, T., Nano-layered diamond sintered compact obtained by direct conversion from highly oriented graphite under high pressure and high temperature, J. Nanomater., 2013(2013), 380165, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/380165>
- ④ Nishi, M., Kubo, T., Ohfuji, H., Kato, T., Nishihara, Y., and Irifune, T., Slow Si-Al interdiffusion in garnet and stagnation of subducting slabs, Earth Planet. Sci. Lett., 361, 44-49, 2013.  
doi:10.1016/j.epsl.2012.11.022
- ⑤ Metsue, A., and Tsuchiya, T., Shear response of Fe-bearing MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite at lower mantle pressures, Proc. Jpn. Acad., B, 89(1), 51-58, 2013.  
doi:10.2183/pjab.89.51
- ⑥ Tsuchiya, T., and Wang, X., Ab initio investigation on the high-temperature thermodynamic properties of Fe<sup>3+</sup>-bearing MgSiO<sub>3</sub> perovskite, J. Geophys. Res., 118(1), 83-91, 2012.  
doi:10.1029/2012JB009696
- ⑦ Nishi, M., Irifune, T., Ohfuji, H., and Tange, Y., Intracrystalline nucleation during the post-garnet transformation under large overpressure conditions in deep subducting slabs, Geophys. Res. Lett., 39, L23302, 2012.  
doi:10.1029/2012GL053915
- ⑧ Kono, Y., Irifune, T., Ohfuji, H., Higo, Y., and Funakoshi, K., Sound velocities of MORB and absence of a basaltic layer in the mantle transition region, Geophys. Res. Lett., 39(24), L24306, 2012.  
doi:10.1029/2012GL054009
- ⑨ Ishimatsu, N., Matsumoto, K., Maruyama, H., Naomi, K., Mizumaki, M., Sumiya, H., and Irifune, T., Glitch-free X-ray absorption spectrum under high pressure obtained using nano polycrystalline diamond anvils, J. Synch. Rad. 19(5), 768-772, 2012.  
doi:10.1107/S0909049512026088
- ⑩ Ohfuji, H., Okimoto, S., Kunimoto, T., Isobe, F., Sumiya, H., Komatsu, K., and Irifune, T., Influence of graphite crystallinity on the microtexture of nano-polycrystalline diamond obtained by direct conversion, Phys. Chem. Miner., 39(7), 543-552, 2012.  
doi:10.1007/s00269-012-0510-3

- ⑫ Zou, Y., Irifune, T., Greaux, S., Whitaker, M.L., Shinmei, T., Ohfuji, H., Negishi, R., and Higo, Y., Elasticity and sound velocities of polycrystalline Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> garnet up to 20 Gpa and 1700 K, *J. Appl. Phys.*, 112(1), 014910, 2012.  
doi: 10.1063/1.4736407
- ⑬ Wang, F., Tange, Y., Irifune, T., and Funakoshi, K., P-V-T equation of state of stishovite up to mid-lower mantle conditions, *J. Geophys. Res.*, 117, B06209, 2012.  
doi:10.1029/2011JB009100
- ⑭ Tange, Y., Kuwayama, Y., Irifune, T., Funakoshi, K., and Ohishi, Y., P-V-T equation of state of MgSiO<sub>3</sub> perovskite based on the MgO pressure scale: A comprehensive reference for mineralogy of the lower mantle, *J. Geophys. Res.*, 117, B06201, 2012.  
doi:10.1029/2011JB008988
- ⑮ Metsue, A., and Tsuchiya, T., Thermodynamic properties of (Mg, Fe<sup>2+</sup>)SiO<sub>3</sub> perovskite at the lower mantle pressures and temperatures: An internally consistent LSDA+U study, *Geophys. J. Inter.*, 190(1), 310-322, 2012.  
doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05511.x
- ⑯ Irifune, T., and Hemley, R. J., Synthetic diamond opens windows into the deep Earth, *EOS Trans. AGU*, 93(7), 65, 2012.  
doi:10.1029/2012E0070001
- ⑰ Fujino, K., Nishio-Hamane, D., Seto, Y., Sata, N., Nagai, T., Shinmei, T., Irifune, T., Ishii, H., Hiraoka, N., Cai, Y. Q., and Tsuei, K. D., Spin transition of ferric iron in Al-bearing Mg-perovskite up to 200 GPa and its implication for the lower mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 317-318, 407-412, 2012.  
doi:10.1016/j.epsl.2011.12.006
- ⑱ Stagno, V., Tange, Y., Miyajima, N., McCammon, C., Irifune, T., and Frost, D. J., The stability of magnesite in the transition zone and the lower mantle as function of oxygen fugacity, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L19309, 2011.  
doi:10.1029/2011GL049560
- ⑲ Tsuchiya, T., Elasticity of subducted basaltic crust at the lower mantle pressures: Insights on the nature of deep mantle heterogeneity, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 188(3-4), 142-149, 2011.  
doi:10.1016/j.pepi.2011.06.018
- ⑳ Dekura, H., Tsuchiya, T., Kuwayama, Y., and Tsuchiya, J., Theoretical and experimental evidence for a new post-cotunnite phase of titanium dioxide with significant optical absorption, *Phys. Rev. Lett.* 107, 045701, 2011.  
doi:10.1103/PhysRevLett.107.045701
- ㉑ Ishikawa, T., Tsuchiya, T., and Tsuchiya, J., Stacking disorder phase of iron in the Earth's inner core from first principles, *Phys. Rev. B*, 83, 212101, 2011.  
doi:10.1103/PhysRevB.83.212101
- ㉒ Nakamoto, Y., Sakata, M., Sumiya, H., Shimizu, K., Irifune, T., Matsuoka, T., and Ohishi, Y., High-pressure generation using nano-polycrystalline diamonds as anvil materials, *Rev. Sci. Instrum.* 82(6), 066104, 2011.  
doi:10.1063/1.3600794
- ㉓ Kuwayama, Y., Hirose, K., Sata, N., and Ohishi, Y., Pressure-induced structural evolution of pyrite-type SiO<sub>2</sub>, *Phys. Chem. Miner.*, 38(8), 591-597, 2011.  
doi: 10.1007/s00269-011-0431-6
- ㉔ Gréaux, S., Nishiyama, N., Kono, Y., Gautron, L., Ohfuji, H., Kunimoto, T., Menguy, N. and Irifune, T., Phase transformations of Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub> grossular garnet to the depths of the Earth's mantle transition zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 185(3-4), 89-99, 2011.  
doi:10.1016/j.pepi.2011.02.001
- ㉕ Dekura, H., Tsuchiya, T., and Tsuchiya, J., First principles prediction of post-pyrite phase transitions in germanium dioxide, *Phys. Rev. B*. 83, 134114, 2011.  
doi:10.1103/PhysRevB.83.134114
- ㉖ Tsuchiya, T., and Tsuchiya, J., Prediction of a hexagonal SiO<sub>2</sub> phase affecting stabilities of MgSiO<sub>3</sub> and CaSiO<sub>3</sub> at multimegabar pressures, *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(4), 1252-1255, 2011.  
doi:10.1073/pnas.1013594108
- ㉗ Nishi, M., Kubo, T., Kato, T., Tominaga, A., Shimojyuku, A., Doi, N., Funakoshi, K., and Higo, Y., Survival of majoritic garnet in diamond by direct kimberlite ascent from deep mantle, *Geophysical Research Letters*, 37, L09305, 2010.  
doi:10.1029/2010GL042706.

- doi:10.1029/2008JB005813.
- [学会発表] (計 650 件)
- ②⑧ Kono, Y., Irifune, T., Higo, Y., Inoue, T., Barnhoorn, A., and Suetsugu, D., P-V-T relation of MgO derived by simultaneous elastic wave velocity and in situ X-ray measurements: A new pressure scale for the mantle transition region, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 183(1-2), 196-211, 2010.  
doi:10.1016/j.pepi.2010.03.010.
  - ②⑨ Ohfuji, H., Okada, T., Yagi, T., Sumiya, H., and Irifune, T., Application of nano-polycrystalline diamond to laser-heated diamond anvil cell experiments, *High Press. Res.* 30(1), 142-150, 2010.  
doi: 10.1080/08957951003600764.
  - ③⑩ Irifune, T., Shinmei, T., McCammon, C. A., Miyajima, N., Rubie, D. C., and Frost, D. J., Iron partitioning and density changes of pyrolite in Earth's lower mantle, *Science*, 327(5962), 193-195, 2010.  
doi:10.1126/science.1181443.
  - ③⑪ Kawai, K., and Tsuchiya, T., Temperature profile in the lowermost mantle from seismological and mineral physics joint modeling, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106(52), 22119-22123, 2009.  
doi:10.1073/pnas.0905920106.
  - ③⑫ Kuwayama, Y., Sawai, T., Hirose, K., Sata, N., and Ohishi, Y., Phase relations of iron-silicon alloys at high pressure and high temperature, *Physics and Chemistry of Minerals*, 36(9), 511-518, 2009.  
doi:10.1007/s00269-009-0296-0.
  - ③⑬ Tsuchiya, T., and Fujibuchi, M., Effects of Si on the elastic property of Fe at Earth's inner core pressures: First principles study. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 174(1-4), 212-219, 2009.  
doi:10.1016/j.pepi.2009.01.007.
  - ③⑭ Odake, S., Ohfuji, H., Okuchi, T., Kagi, H., Sumiya, H., and Irifune, T., Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamonds: a comparative study with single crystal diamond, *Diamond and Related Materials*, 18(5-8), 877-880, 2009.  
doi:10.1016/j.diamond.2008.10.066.
  - ③⑮ Tange, Y., Nishihara, Y., and Tsuchiya, T., Unified analyses for P-V-T equation of state of MgO: A solution for pressure-scale problems in High P-T experiments, *J. Geophys. Res.* 114, B03208, 2009.
  - ④① Irifune, T., Arimoto, T., Ohfuji, H., Shinmei, T., Making gem-quality polycrystalline high-pressure minerals (poly-gems) for sound velocity measurements, AGU Fall Meeting 2012, December 6, 2012, San Francisco, USA.
  - ④② Irifune, T., Shinmei, T., Isobe, F., Arimoto, T., Nishiyama, N., Ohfuji, H., Greaux, S., Zou, Y., Kimura, M., Making sintered nano- to micro-polycrystalline high-pressure minerals using multianvil apparatus, 50th EHPRG Meeting, September 17, 2012, Thessaloniki, Greece.
  - ④③ Irifune, T., Recent activities of Ehime group at BL04B1, SPring-8, 2nd workshop for Extreme Conditions Research in a Large Volume Press at PETRA III, DESY, September 10, 2012, Hamburg, Germany.
  - ④④ Irifune, T., Multianvil technology for synthesis of consolidated nano-micro polycrystalline high-pressure minerals, Gordon Research Conferences, University of New England, June 28, 2012, Maine, USA.
  - ④⑤ Irifune, T., Nano-polycrystalline diamond (NPD): A new window into the deep Earth, AIRAPT 23(International Conference on High Pressure Science and Technology), September 29, 2011, Mumbai, India.
  - ④⑥ Irifune, T., Tange, Y., Shinmei, T., Kimura, Y., Iron partitioning between silicate perovskite and ferropelliclase in pyrolite to 50 GPa using kawai-type multianvil apparatus, Asia Oceania Geosciences Society 2011, August 8, 2011, Taipei, Taiwan.
  - ④⑦ Irifune, T., Kono, Y., Higo, Y., Nishiyama, N., Fate of stagnant slabs: Constraints from density and sound velocities of pyrolite and subducted slab materials, JpGU 2011, May 25, 2011, Chiba, Japan.
  - ④⑧ Irifune, T., SOSEKI laboratory and new developments in multianvil technology, The 2010 TANDEM Symposium on deep earth mineralogy, November 5, 2010, Wuhan, China.
  - ④⑨ Irifune, T., Nano-polycrystalline diamond: a potential third-generation ultrahard material for LVP experiments, Workshop for Extreme Conditions Research in a Large Volume Press at PETRA

III, October 14-15, 2010, Lüneburg, Germany.

- ⑩ 入船 徹男, 地球深部の構造・物質・ダイナミクス, 第 45 回地盤工学研究発表会特別講演会, 2010 年 8 月 19 日, 松山, 愛媛.
- ⑪ 入船徹男, 超高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの合成と応用, 日本化学会西日本大会 2009, 2009 年 11 月 8 日, 愛媛大学.
- ⑫ 入船徹男, 高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの合成とその超高压化学研究への応用, 第 43 回日本芳香族工業会大会 (松山大会), 2009 年 10 月 15 日, 松山市総合コミュニティセンター, 愛媛県.
- ⑬ 入船徹男, 新名亨, 磯部太志, 大藤弘明, 西山宣正, 國本健広, 河野義生, 仲本麻里子, 栗尾文子, 実平武, 木村正樹, 小竹翔子, 鍵裕之, 角谷均, 高压直接変換ナノ多結晶ダイヤモンドの微細構造・物性・応用, 日本セラミックス協会第 22 回秋季シンポジウム, 2009 年 9 月 16 日, 愛媛大学.
- ⑭ 入船徹男, Development of multianvil technology and its application to deep Earth mineralogy and novel materials synthesis, 2009 年度高压力学会賞受賞講演, July 27, 2009, AIRAPT-22 & HPCJ-50, Odaiba, Tokyo, Japan.

[その他]

ホームページ等

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

## 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

土屋 卓久 (TSUCHIYA TAKU)

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: 70403863

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・准教授

研究者番号: 80403864

丹下 慶範 (TANGE YOSHINORI)

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: 70543164

桑山 靖弘 (KUWAYAMA YASUHIRO)

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: 00554015

肥後 祐司 (HIGO YUJI)

公益財団法人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: 10423435

臼井 佑介 (USUI YUSUKE)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・研究機関研究員

研究者番号: 70435824

(H20→H21-H23: 連携研究者)

西山 宣正 (NISHIYAMA NORIMASA)

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: 10452682

(H21-H23)

石河 孝洋 (ISHIKAWA TAKAHIRO)

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: 40423082

(H21-H22)

### (3) 連携研究者

Matthew L. Whitaker

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: 10570567

(H22)

西原 遊 (NISHIHARA YU)

愛媛大学・上級研究員センター・上級研究員

研究者番号: 10397036

國本 健広 (KUNIMOTO TAKEHIRO)

公益財団法人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: 20543169