

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247073

研究課題名(和文)放射光X線及び中性子を利用した地球深部水研究

研究課題名(英文)Deep Earth water research using synchrotron X-ray and neutron radiations

研究代表者

井上 徹 (INOUE, Toru)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号：00291500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：最先端の高圧合成実験技術、放射光X線その場観察実験技術、及び中性子散乱実験技術を駆使して、地球深部における水の存在可能性を探索する研究を行った。結果、下部マントルの主要構成鉱物であるブリッジマナイトに有意に水が含まれること、そしてその根拠を化学組成変化、単結晶X線構造解析による水素の存在可能性及び格子定数変化、赤外分光法によるOH振動ピークの検出、中性子回折による水素の存在位置の検出、及び体積弾性率等の物性定数の変化の立場から明らかにした。さらに、他の高圧含水相である superhydrous phase Bやphase Dにおいても、同様な置換が起こりうることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have explored the possible existence of water in the deep Earth by using the techniques of the state-of-the-art high-pressure synthesis experiment, synchrotron X-ray in situ observation and neutron scattering experiment. As the result, it became clear that bridgmanite, which is the most abundant mineral in the lower mantle, can contain significant amounts of water in its crystal structure. The fact was confirmed by chemical compositional change, possible existence of hydrogen and lattice constant change by single crystal X-ray diffraction, the detection of OH vibration peak by IR spectroscopy, the detection of hydrogen position by neutron diffraction, and the changes of physical properties such as bulk modulus. Furthermore, it became clarified that the similar substitution can occur in superhydrous phase B and phase D, which are the other high-pressure hydrous phases in the deep mantle.

研究分野：地球内部物性

キーワード：地球・惑星内部構造 地球・惑星内部ダイナミクス 地球・惑星内部物性 高圧含水鉱物 放射光X線  
中性子回折 地球深部水

## 1. 研究開始当初の背景

水は地球の重要な揮発性成分の1つであり、その水は地球内部の状態や進化に多大な影響を及ぼしてきている。特に最近、マントル鉱物に対する水の影響について活発に議論されてきている。その発端は、我々の研究で以下の事が明らかにされたことが大きい。1) 水はマントル鉱物の融点を著しく下げ、生成されるマグマの組成は無水条件下とは大きく異なる(超塩基性のマグマが生成される)(例えば Inoue and Sawamoto, 1992; Inoue, 1994)、2) マントル遷移層に存在するカンラン石の高圧相 wadsleyite, ringwoodite 中には最大約3 wt%ものH<sub>2</sub>Oが結晶構造中に含まれる(例えば Inoue et al., 1995, 1998)、3) これら鉱物中に含まれるH<sub>2</sub>Oはその熱弾性的性質を変化させる(例えば Inoue et al., 1998, 2004, Yusa and Inoue, 1997)。

一方、下部マントル領域においても高圧含水相の存在可能性が報告されてきてはいるが、それらはマントルジオサームより低温条件下で安定であり、一般的なマントルでは安定的には存在できないと考えられる。さらに下部マントルに存在する珪酸塩ペロブスカイト(ブリッジマナイト)には従来ほとんど水を含まないと報告されてきており、下部マントルは上部マントルやマントル遷移層に比べてドライな条件であると考えられてきた。ところが最近、申請者らの研究からこのブリッジマナイトに有意に水が含まれ得ることが明らかになった。この事は下部マントルもかなりの水の貯蔵庫となり得ることを示しており、この相の早急な解明は極めて重要である。さらに今までマントルジオサームよりも低温でのみ安定であると考えられてきた高圧含水相 superhydrous phase B や phase D にも Al と H のカップリング置換により、もはや別の相(新規含水相)とさえ思える程組成の違う高圧含水相が見出されてきている。加えてその置換の結果、安定領域が高温へと広がり、マントルジオサームに相当する高温下でも安定に存在できることが我々の研究より明らかになってきた。このように Al と H のカップリング置換が鍵となり、高圧相鉱物中への含水量が増加し、またその安定領域が高温側に拡張する様子が見えて来ていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、最近我々が合成に成功した Al に富む含水ブリッジマナイト, phase D, superhydrous phase B を始め、上部マントルへ

下部マントルの温度圧力条件下で安定に存在可能な含水相を合成・探索し、その安定領域の決定、さらにはその水素の置換のメカニズム・構造・物性を明らかにすることにより、下部マントルへの水の運搬や存在可能性を明らかにすることを目的に設定した。本研究には高温高圧下での放射光 X 線その場観察実験に加えて、最近我々グループが参加して建設した大型パルス中性子施設 J-PARC の高圧ビームライン”PLANET”を用いた中性子散乱実験を行い、X線では検出が難しい水素の位置の情報を検出することを試みた。本研究ではこのように最先端の高圧実験、放射光 X 線回折、中性子散乱技術を駆使して深部マントルの水の解明に挑んだ。具体的には、下記の4項目を重点的に解明することを目的とした。

- 1) Al を含んだ含水ブリッジマナイト、phase D 及び superhydrous phase B の X 線単結晶構造解析及び中性子回折から結晶構造、水素の存在位置の解明。
- 2) 高温高圧実験による上記3相の安定領域の解明、及び温度圧力変化による Al と H (H<sub>2</sub>O) 量の関係の解明。
- 3) 放射光 X 線その場観察実験による高温高圧下での状態方程式(熱弾性的性質及び高温高圧下での密度)及び弾性波速度の解明。
- 4) 安定領域、化学組成、結晶構造と物性の関連性の解明。地球内部への応用。

## 3. 研究の方法

本研究は、I) 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターの大型マルチアンビル型高圧発生装置を用いた高温高圧下での合成実験、及び放射光 X 線・中性子実験に向けての予備実験、II) 高エネ研、もしくは SPring-8 での放射光 X 線を用いた単結晶 X 線構造解析実験と高温高圧下での放射光 X 線その場観察実験(状態方程式及び弾性波速度の決定)、さらにIII) J-PARC の中性子を用いた中性子回折実験を行い、研究目的に前述した4つの項目の解明を目指した。4の項目はお互いに関係しあっており、それぞれの研究を有機的に繋げながら研究を遂行した。またI~IIIの実験手法においても、高圧発生装置を用いた実験がベースになることから、その実験技術開発においてはお互いにフィードバックしながら実験を遂行した。

## 4. 研究成果

当初の目的に設定した課題は一通り遂行することができた。全期間を通じて、大型高

圧発生装置を用いた高圧合成実験、Spring-8の高圧ビームラインBL04B1における放射光X線その場観察実験、大型パルス中性子施設J-PARCの高圧ビームライン”PLANET”を用いた中性子散乱実験を行うことができた。その結果、特に、含水ブリッジマナイトの化学組成及びその置換様式、結晶構造、水素の存在位置、弾性的性質などを明らかにすることができ、かなり確証たる結果が得られてきた。それらの成果は、現在までに国内外の学会で発表し続けてきたとともに、現在論文を執筆投稿中である。

含水ブリッジマナイトに加えて、その比較対象としてかなり無水ブリッジマナイトの研究が重要であることに気づき、その対称実験も行った。理由は、現在までに行われてきた研究には本当の意味での完全な無水の実験がなされてきていないためである。この無水ブリッジマナイトにはチェルマック置換型と酸素欠損置換型が存在するが、その存在可能範囲を明らかにできた。そして、この研究から含水置換の重要性を、さらに明確に示すことができた。尚、これらの研究を通して、非常に良質なブリッジマナイトの焼結体も作成可能になり、それは弾性波速度測定用の良質な試料として威力を発揮している。

含水ブリッジマナイトの研究に加えて、Alを含んだ phase D 及び superhydrous phase B の研究も進めることができ、国内外の学会で発表した。また Al を含んだ superhydrous phase B に関する研究は投稿論文としてまとめることができた。

これらの研究以外に、下部マントルに存在するブリッジマナイトとペリクレーズの熔融関係を明らかにすることができた。また、地球深部へのCO<sub>2</sub>の輸送に関する研究も行い、新たな知見を得ることができた。さらに、新規高圧含水相(23Å相と命名)を発見し、その安定領域と結晶構造の候補を明らかにすることができた。更なる精密な構造解析の必要はあるが、新規高圧含水相であることは間違いない。現在はこの相の体積弾性率や弾性波速度を明らかにしてきており、現在これらの論文は執筆投稿中である。

研究成果は、主に国内学会では毎年のように、日本地球惑星科学連合大会(JpGU)、日本鉱物科学学会年会、高圧討論会(日本高圧力学会年会)で発表した。更に国際学会では、アメリカ地球物理学連合(AGU)、国際鉱物科学学会(IMA)、ゴールドシュミット国際会議、アジアオセアニア地球科学連合(AOGS)等で発表した。本研究テーマを遂行した研究代表

者の指導学生が、ゴールドシュミット国際会議、日本鉱物科学学会、日本高圧力学会で優秀発表賞を受賞したことは特筆に値する。更なる研究成果は、以下の「5. 主な発表論文等」を参照いただきたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件 : すべて査読有)

- 1 Kakizawa, S., T. Inoue, H. Nakano, M. Kuroda, N. Sakamoto and H. Yurimoto, Stability of Al-bearing superhydrous phase B at the mantle transition zone and the uppermost lower mantle. *Am. Mineral.*, 2018 (in press)
- 2 Ohnishi, S., Y. Kuwayama and T. Inoue, Melting relations in the MgO-MgSiO<sub>3</sub> system up to 70 GPa. *Phys. Chem. Minerals*, 44, 445-453, 2017.  
doi:10.1007/s00269-017-0871-8.
- 3 Shinozaki, A., K. Mimura, T. Nishida, T. Inoue, S. Nakano and H. Kagi, Stability and partial oligomerization of naphthalene under high pressure at room temperature. *Chem. Phys. Lett.*, **662**, 263-267, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2016.09.042>
- 4 Wang, M., Q. Liu, T. Inoue, B. Li, C. Yang, R. Tao, S. Pottish and J. Wood, The K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> fusion curve revisited: New experiments at high pressures up to 12 GPa. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **111**, 241-251, 2016.  
<http://doi.org/10.2465/jmps.150417>
- 5 Gréaux, S., Y. Kono, Y. Wang, A. Yamada, C. Zhou, Z. Jing, T. Inoue, Y. Higo, T. Irifune, N. Sakamoto, and H. Yurimoto, Sound velocities of aluminum-bearing stishovite in the mantle transition zone, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 4239-4246, 2016.  
doi:10.1002/2016GL068377, 2016.
- 6 Fujii, T., H. Ohfuji and T. Inoue, Phase relation of CaSO<sub>4</sub> at high pressure and temperature up to 90 GPa and 2300K. *Phys. Chem. Minerals*, **43**, 353-361, 2016.  
DOI 10.1007/s00269-016-0799-4
- 7 Kojitani, H., T. Inoue, and M. Akaogi, Precise measurements of enthalpy of postspinel transition in Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> and application to the phase boundary calculation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 729-742, 2016. doi:10.1002/2015JB012211.
- 8 Chang Y.-Y., S. D. Jacobsen, C. R. Bina,

- S.-M. Thomas, J. R. Smyth, D. J. Frost, T. Boffa Ballaran, C. A. McCammon, E. H. Hauri, T. Inoue, H. Yurimoto, Y. Meng, and P. Dera, Comparative compressibility of hydrous wadsleyite and ringwoodite: Effect of H<sub>2</sub>O and implications for detecting water in the transition zone. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 8259-8280, 2015.  
doi: 10.1002/2015JB012123
- 9 Cai, N., T. Inoue and T. Kikegawa, Thermal equation of state of lawsonite up to 10 GPa and 973 K. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **110**, 235-240, 2015.  
<http://doi.org/10.2465/jmps.150712>
  - 10 Cai, N., T. Inoue, K. Fujino, H. Ohfuji and H. Yurimoto, A Possible New Al-bearing hydrous Mg-silicate (23 Å phase) in the deep upper mantle, *Am. Mineral.*, **100**, 2330–2335, 2015. DOI: 10.2138/am-2015-5148
  - 11 Kakizawa, S., T. Inoue, H. Suenami and T. Kikegawa, Decarbonation and melting in MgCO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system at high temperature and high pressure. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **110**, 179-188, 2015.  
<http://doi.org/10.2465/jmps.150124>
  - 12 Mao, Z., J. Lin, J. Yang, T. Inoue, and V. B. Prakapenka, Effect of the Fe<sup>3+</sup> spin transition on the equation of state of bridgmanite, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4335-4342, 2015.  
DOI: 10.1002/2015GL064400
  - 13 Hattori, T., A. Sano-Furukawa, H. Arima, K. Komatsu, A. Yamada, Y. Inamura, T. Nakatani, Y. Seto, T. Nagai, W. Utsumi, T. Iitaka, H. Kagi, Y. Katayama, T. Inoue, T. Otomo, K. Suzuya, T. Kamiyama, M. Arai and T. Yagi, Design and Performance of High-Pressure PLANET Beamline at Pulsed Neutron Source at J-PARC, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **780**, 55-67, 2015.  
doi:10.1016/j.nima.2015.01.059
  - 14 Maruyama, K., H. Kagi, T. Inoue, H. Ohfuji and T. Yoshino, In Situ Observation of Pressure-Induced Crystallization from Amorphous Calcium Carbonate by Time-Resolved X-Ray Diffraction. *Chem. Lett.*, **44**, 434-436, 2015.  
<http://doi.org/10.1246/cl.141062>
  - 15 Yang, C., T. Inoue, A. Yamada, T. Kikegawa, J. Ando, Equation of state and phase transition of antigorite under high pressure and high temperature, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **228**, 56-62, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.07.008>
- [学会発表] (計 47 件) (研究代表者・分担者及び指導学生が発表の代表的なもののみ記載)
- 1 Xu, C. and Inoue, T., Effect of Al on stability of DHMS up to the uppermost lower mantle, AGU Fall Meeting 2017, 2017.
  - 2 Noda, M., Inoue, T. et al., Relationship between Al content and substitution mechanism of Al-bearing anhydrous bridgmanites, AGU Fall Meeting 2017, 2017.
  - 3 井上徹 他, MgSiO<sub>3</sub> bridgmanite 中への Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成分の固溶様式の多様性, 第 58 回 高圧討論会, 2017.
  - 4 野田昌道, 井上徹 他, 無水 bridgmanite の低 Al 量での置換様式, 第 58 回高圧討論会, 2017
  - 5 柿澤翔, 井上徹 他, Al に富む含水ブリッジマナイトの熱弾性特性, 第 58 回高圧討論会, 2017
  - 6 Inoue, T. et al., Importance of various type of Al substitutions into bridgmanites under high pressure, High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9), 2017.
  - 7 Kakizawa, S., Inoue, T. et al., Thermoelastic properties of Al-bearing hydrous bridgmanite, High-Pressure Mineral Physics Seminar (HPMPS-9), 2017.
  - 8 井上徹 他, Bridgmanite 中への多様な Al 置換様式の重要性, 日本鉱物科学会 2017 年年会・総会, 2017.
  - 9 柿澤翔, 井上徹 他, Al に富む Superhydrous phase B の単結晶構造解析, 日本鉱物科学会 2017 年年会・総会, 2017.
  - 10 Xu, C., Inoue, T., Effect of Al on stability of DHMS up to the uppermost lower mantle, 日本鉱物科学会 2017 年年会・総会, 2017.
  - 11 Inoue, T. et al., Importance of various Al substitution mechanism into bridgmanite under high pressure, 34th International Conference on Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits, 2017.
  - 12 Kakizawa, S., Inoue, T. et al., Determination of stability region and substitution mechanism of Al-bearing superhydrous phase B., 34th International Conference on Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits, 2017.
  - 13 井上徹 他, 高圧下における Al に富んだ

- 含水及び無水ブリッジマナイトの弾性波速度, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 (JpGU-AGU Joint Meeting 2017), 2017.
- 14 Xu, C., Inoue, T. *et al.*, Effect of Al on stability of DHMS up to uppermost lower mantle, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 (JpGU-AGU Joint Meeting 2017), 2017.
  - 15 柿澤翔, 井上徹 他, Al に富む含水ブリッジマナイトの状態方程式, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 (JpGU-AGU Joint Meeting 2017), 2017.
  - 16 大西里佳, 桑山靖弘, 井上徹, Melting relations in the MgO-MgSiO<sub>3</sub> system under the lower mantle conditions, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 (JpGU-AGU Joint Meeting 2017), 2017.
  - 17 井上徹 他, 高圧下における Al に富むブリッジマナイトの弾性波速度測定, 第 57 回高圧討論会, 2016.
  - 18 井上徹 他, Al に富む無水及び含水ブリッジマナイトの弾性波速度測定, 日本鉱物科学会 2016 年年会・総会, 2016.
  - 19 柿澤翔, 井上徹 他, Al に富む superhydrous phase B の安定領域及び置換様式の決定, 日本鉱物科学会 2016 年年会・総会, 2016.
  - 20 Inoue, T., Hydrous bridgmanite: Water storage capacity in the lower mantle, International Symposium "Advances in High-pressure Research-III: Towards Geodynamic Implications-2016", 2016.
  - 21 Inoue, T. *et al.*, Hydrous bridgmanite: Possible water reservoir in the lower mantle, Goldschmidt 2016, 2016.
  - 22 Ohnishi, S., Kuwayama, Y. and Inoue, T., Melting relations in the MgO-MgSiO<sub>3</sub> system and the effect of other elements in the lower mantle, Goldschmidt 2016, 2016.
  - 23 Kakizawa, S., Inoue, T. *et al.*, Behavior of Al-bearing hydrous bridgmanite at high pressure, Goldschmidt 2016, 2016.
  - 24 井上徹 他, Hydrous bridgmanite: Water storage capacity in the lower mantle, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
  - 25 柿澤翔, 井上徹 他, Compressibility of Al-bearing hydrous bridgmanite, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
  - 26 大西里佳, 桑山靖弘, 井上徹, Melting relations in the MgO-MgSiO<sub>3</sub> system under the lower mantle condition using a CO<sub>2</sub> laser heated diamond anvil cell, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
  - 27 井上徹 他, 高圧含水鉱物の合成とそのキャラクターゼーション, 第 56 回高圧討論会, 2015.
  - 28 柿澤翔, 井上徹 他, Al に富む含水 bridgmanite の状態方程式決定の試み, 第 56 回高圧討論会, 2015.
  - 29 大西里佳, 桑山靖弘, 井上徹, CO<sub>2</sub> レーザー両側直接加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた MgO-MgSiO<sub>3</sub> 系の溶解関係, 第 56 回高圧討論会, 2015.
  - 30 栗林貴弘, 井上徹 他, Phase D 構造中への Al の置換機構, 第 56 回高圧討論会, 2015.
  - 31 柿澤翔, 井上徹 他, Al に富む含水ブリッジマナイトの含水量の圧力依存性, 日本鉱物科学会 2015 年年会・総会, 2015.
  - 32 栗林貴弘, 井上徹 他, Al-bearing phase D の単結晶放射光 X 線構造解析, 日本鉱物科学会 2015 年年会・総会, 2015.
  - 33 Inoue, T., The stability and water solubility of high pressure hydrous and nominally anhydrous minerals in the mantle, International Seminar "High-Pressure Mineralogy: Theory and Experiment", 2015.
  - 34 Inoue, T. *et al.*, The stability and water solubility of possible Al-bearing high pressure hydrous and nominally anhydrous minerals in the mantle, Goldschmidt2015, 2015.
  - 35 Kakizawa, S., Inoue, T. *et al.*, Water solubility of Al-bearing bridgmanite at the lower mantle condition, Goldschmidt2015, 2015.
  - 36 井上徹 他, Recent progress for stability and water solubility of hydrous and nominally anhydrous minerals in the mantle, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015.
  - 37 Cai, N., 井上徹 他, Dehydration of chlorite and formation of a new hydrous phase, 日本地球惑星科学連合 2015, 2015.
  - 38 Inoue, T. *et al.*, In situ X-ray observation of dehydration and EoS of chlorite under high pressure and temperature, 2014 AGU Fall Meeting, 2014.
  - 39 井上徹 他, 含水 bridgmanite の合成とキャラクターゼーション, 第 55 回高圧討論会, 2014.
  - 40 栗林貴弘, 井上徹 他, Al と H を含有する MgSiO<sub>3</sub> ペロブスカイト, bridgmanite の結晶構造の精密化, 第 55 回高圧討論会, 2014.
  - 41 柿澤翔, 井上徹 他, 高温高圧下における

- bridgmanite 中の含水量の温度圧力依存,  
第 55 回高圧討論会, 2014.
- 42 井上徹 他, 緑泥石の脱水分解反応境界とその状態方程式, 日本鉱物科学会 2014 年年会・総会, 2014.
  - 43 井上徹 他, Al と H に富む Mg-bridgmanite の合成とキャラクタリゼーション, 日本鉱物科学会 2014 年年会・総会, 2014.
  - 44 栗林貴弘, 井上徹 他, Al と H に富む Mg-bridgmanite の放射光 X 線単結晶構造解析, 日本鉱物科学会 2014 年年会・総会, 2014.
  - 45 Inoue, T. *et al.*, Al incorporation in dense hydrous magnesium silicates, IMA2014, 2014.
  - 46 Inoue, T. *et al.*, Coupled substitution of H<sup>+</sup> and Al<sup>3+</sup> into deep mantle minerals, AOGS2014, 2014.
  - 47 Kakizawa, S., Inoue, T. *et al.*, Reaction and melting in the MgCO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system at high temperature and high pressure, AOGS2014, 2014.

[図書] (計 2 件)

- 1 井上徹 図説地球科学の事典 (朝倉書店: 鳥海光弘 他編): 第 3 章 3-11 含水鉱物と地球深部水の循環 (執筆 P70-71) P248, 2018.
- 2 井上徹 地球ダイナミクス (朝倉書店: 山本明彦編): 第 8 章 地球内部の物質科学 (執筆 P155-174) P229, 2014.

[その他]

ホームページ等

- 1) 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻  
<http://depss.hiroshima-u.ac.jp/GS/index.html>
- 2) 広島大学「プレート収束域の物質科学研究拠点」  
<http://hiper.hiroshima-u.ac.jp/>
- 3) 愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター  
<http://www.grc.ehime-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 徹 (INOUE, Toru)  
広島大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00291500

### (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

栗林 貴弘 (KURIBAYASHI, Takahiro)

東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 20302086

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

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・研究員  
研究者番号: 10423435

### (3) 連携研究者

塚本 尚義 (YURIMOTO, Hisayoshi)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 80191485

Steeve Greaux

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・研究員  
研究者番号: 90543166

### (4) 研究協力者

蔡 鬧 (CAI, Nao)  
末次 秀規 (SUENAMI, Hideki)  
柿澤 翔 (KAKIZAWA, Sho)  
徐 超文 (XU, Chaowen)  
野田 昌道 (NODA, Masamichi)