

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成29年 6月 12日現在

機関番号：12608

研究種目：特別推進研究

研究期間：2012～2016

課題番号：24000005

研究課題名（和文） 地球中心核の物質と進化の解明

研究課題名（英文） Materials property and evolution of Earth's core

研究代表者

廣瀬 敬 (HIROSE, Kei)

東京工業大学・地球生命研究所・教授

研究者番号：50270921

交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：354,000,000円

研究成果の概要（和文）：

最も重要な成果は、コアの熱伝導率と熱史、及びコアの温度と組成に関するものである。コアの主成分である鉄の電気伝導度を、静的圧縮実験としては世界で初めて、コアの高圧高温下で測定することに成功した。電気伝導度から計算される熱伝導率は、従来の見積りの3倍近く大きい。この結果はコアが急速に冷えており、内核の年齢が若いことを示唆する。また、マントル最下部の融解温度が過去の実験結果に比べてかなり低いことがわかった。従って、コアの温度も低く、外核には大量の水素が含まれている必要がある。

研究成果の概要（英文）：

We have measured electrical conductivity of iron and alloys at high pressure and temperature corresponding to the Earth's core. Results demonstrate that core thermal conductivity calculated from electrical conductivity is three times as high as traditional estimate, indicating fast core cooling. The age of the inner core should be younger than one billion years. In addition, we also found that the solidus temperature of the lowermost mantle is lower by 500 K than previously thought. Since the lowermost mantle is not extensively molten, it suggests core temperature is also low. The core should include substantial amount of hydrogen to depress its melting temperature.

研究分野：

高圧地球科学、地球深部物質学

キーワード：

地球深部・コア・下部マントル・高圧・放射光

様式 C-19、F-19、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年のレーザー加熱式のダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた超高压高温実験の進歩はめざましい。特に、実験の圧力・温度範囲が地球中心まで広がったこと、地球深部の輸送特性や元素分配が測定可能になったこと、は特筆されるべきである。ポストペロフスカイト相の発見に代表される近年の高压実験の成果によって、地球のマントル物質に関する理解はすでにかなり進んでいる。一方、コアの物質学は未だ手つかずの状態に近い。そこで本研究は、コア物質に関する高压実験に主眼を置き、その成り立ちや進化を解明しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、レーザー加熱式 DAC を用いた、研究代表者らの世界をリードする超高压高温実験技術を基に、コアの化学組成 (軽元素の特定)、状態図、物性、マントルとの相互作用を明らかにすることを目的とした。具体的な研究目的は以下の通り。

(1) 液体鉄合金の音速測定

放射光施設 SPring-8 の X 線を使った非弾性散乱測定により、液体鉄合金の縦波速度を高压高温下で実測する。

(2) 放射光 X 線のナノビーム化

SPring-8 のビームライン BL10XU の X 線ビームをナノサイズ化し、X 線測定領域の温度不均質を数%以下へと格段に向上させる。

(3) 内核物質の結晶構造の決定

鉄合金の状態図を地球中心に至る超高压・超高温下で決定する。

(4) 内核-外核境界 (ICB) における軽元素の分別

超高压下における Fe-FeS 系・Fe-FeSi 系・Fe-FeO 系の状態図を作成する。

(5) 鉄の融解曲線の決定

DAC 中で鉄を融解させ、ICB 圧力まで融解曲線を決定する。

(6) 鉄の状態方程式の決定

ナノビーム化された X 線を用いて、地球コアの超高压までの体積測定を行い、鉄の状態方程式を精密決定する。

(7) コアの輸送特性と熱史

コア物質の電気伝導度をコアの圧力下で測定し、さらに Wiedemann-Franz の法則に従って熱伝導率を決定する。得られた熱伝導率を用いて、コアの熱史を計算し、地球初期のコアの温度や内核の年齢を推定する。

(8) コア-マントル間の熱的相互作用

MgO の熱伝導率をマントル全域の圧力で決定し、既知の MgSiO₃ ペロフスカイト相

の値も用いて、最下部マントルの熱伝導率を求める。

(9) コア-マントル間の化学的相互作用

金属鉄+シリケートの溶融実験を行い、コア-マントル間の元素分配を決定する。

3. 研究の方法

(1) 液体鉄合金の音速測定

液体鉄合金の縦波速度を X 線非弾性散乱法によって決定する。測定は SPring-8 のビームライン BL35XU と BL43XU にて行う。外熱式抵抗加熱 DAC とレーザー加熱 DAC の双方を用いる。

(2) 放射光 X 線のナノビーム化

SPring-8 のビームライン BL10XU に、あらたな X 線集光光学系を設計し、X 線モノクロメータとともに導入する。

(3) 内核物質の結晶構造の決定

レーザー加熱式 DAC を用いて内核に相当する超高压高温を発生し、SPring-8 の BL10XU にて、X 線回折測定を行う。

(4) 内核-外核境界における軽元素の分別

鉄合金をコアの圧力下で融解させ、試料を回収し、収束イオンビーム装置で融解させた部分を正確に切り出す。さらに同装置で融解組織を確認するとともに、共存する固体と液体の化学組成を定量化する。

(5) 鉄の融解曲線の決定

鉄をコアの圧力下で加熱し、試料を回収して、収束イオンビーム装置で切り出すとともに、融解組織の有無を確認する。

(6) 鉄の状態方程式の決定

SPring-8 のビームライン BL10XU で、ナノビーム化された X 線を用いて、鉄や鉄合金の体積を超高压下で測定し、高精度の状態方程式を得る。

(7) コアの輸送特性と熱史

純鉄と鉄合金の電気伝導度をコアの高压下で決定し、さらに Wiedemann-Franz の法則によって電気伝導度から熱伝導率を求める。電気伝導度測定には四端子法を用い、DAC 中の高压下で電気抵抗を測ったのち、試料の形状を考慮して電気伝導度を得る。

(8) コア-マントル間の熱的相互作用

サーモリフレクタンス法を用いて、DAC 中で MgO の熱拡散率を最下部マントルの圧力まで決定する。MgO のデータを用いて最下部マントルの熱伝導率とコア-マントル境界 (CMB) の熱流量を見積もる。

(9) コア-マントル間の化学的相互作用

レーザー加熱式 DAC でシリケートと鉄を同時に融解させ、両者の間の元素分配を、主要元素・カリウム・ウラン・トリウム・鉛について決定する。主要元素とカリウムは FE-EPMA により、ウラン・トリウム・

鉛についてはレーザーアブレーション ICP-MS を用いて定量分析を行う。

4. 研究成果

まず本研究の最も重要な成果は、コアの熱伝導率と熱史、及びコアの温度と組成に関するものである。

Gomi *et al.* (2013 *PEPI*)では、鉄および鉄-シリコン合金の電気伝導度を、静的圧縮実験としては世界で初めて、100 万気圧まで測定することに成功した。金属物理学ではよく知られた「抵抗率の飽和」現象を、コアの電気伝導度のモデリングに初めて取り入れた。さらに Ohta *et al.* (2016 *Nature*)ではコアの高圧高温下で鉄の電気伝導度を測定し、抵抗率の飽和を実際に確かめた(図1)。電気伝導度から Wiedemann-Franz の法則に従って求めたコアの熱伝導率は、従来の Stacey & Loper (2007) の見積りの3倍近く大きい。内核の誕生前から外核に熱対流を起こす必要があるため、この結果はコアが急速に冷えていることを意味している。すなわち、内核の誕生は10億年前より新しく、また現在のCMBの熱流量も10テラワット以上であることが明らかになった。

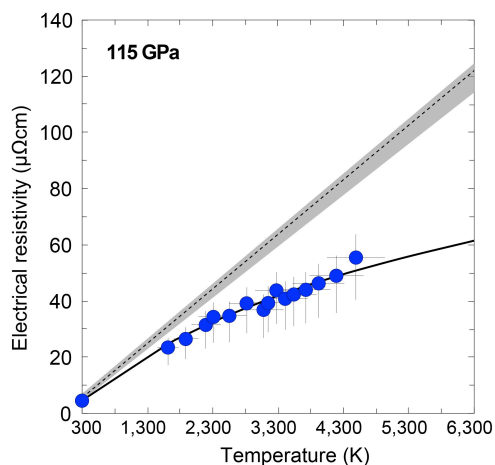


図1. 高圧高温下での鉄の電気抵抗率と飽和現象。Bloch-Grüneisen の法則に基づく従来の温度依存性よりも小さな温度効果(抵抗率の飽和)が観察され、これにより小さな電気抵抗率と大きな熱伝導率が明らかになった。

Nomura *et al.* (2014 *Science*)では、放射光 X線を用いた高解像度のトモグラフィ画像を基に、微量な融解液の確認に成功した。その結果 CMB 圧力におけるマンツルのソリダス温度が 3600 K と、従来の見積りより 500 K も低い結果を得た。マンツル最下部は世界的には融解しておらず、またコアの温度は水平方向にきわめて均質と考えられることから、コア最上部の温度は 3600 K 以下と、伝統的な見積りよりも 400 K 以上低

いことがわかった。さらに、低温にも関わらず外核が液体であるためには、地球化学的に要請されるシリコンに加え、大量の水素が含まれている必要があることがわかった。

続いて、以下に研究目的ごとの主な成果を記す。

(1) 液体鉄合金の音速測定

液体鉄-炭素合金の X線非弾性散乱スペクトルを 70 万気圧下まで取得し、縦波速度を決定することに成功した(過去の静的圧縮実験による測定は最大 5 万気圧)(Nakajima *et al.*, 2015 *Nature Commun.*)。その結果、炭素はコアの主要な軽元素ではないことがわかった。

(2) 放射光 X線のナノビーム化

新規 X線集光光学系と液体室素型モノクロメータの導入により、試料上における X線ビームがすでに 1 ミクロン以下に集光され、また強度が約 20 倍増加した。これによって温度精度の高い実験、さらにはサブ秒での高速 X線回折測定が可能となった。

(3) 内核物質の結晶構造の決定

Fe-10%atmNi (Tateno *et al.*, 2012 *GRL*) および Fe-16atm%Si (Tateno *et al.*, 2015 *EPSL*) について内核に相当する超高压・超高温実験を行い、hcp 相が内核中で安定であることを確かめた。後者については 407 万気圧・5960 K における X線回折データの取得に成功し、静的高圧高温実験の世界記録を塗り替えることに成功した。続いて鉄-硫黄合金については、Fe₃S 相が 250 万気圧以上で分解すること、ゆえに内核には存在し得ないことを明らかにした(Ozawa *et al.*, 2013 *GRL*)。

(4) 内核-外核境界における軽元素の分別

FIB 装置を用いて、Fe-FeSi 系の融解相関係につき、予察的な結果を得た。共融点組成は高压下でシリコンに乏しくなっていくことがわかった。

(5) 鉄の融解曲線の決定

FIB 装置を用いた試料の組織観察から、200 万気圧における鉄の融解を確認することに成功した。

(6) 鉄の状態方程式の決定

Fe-16atm%Si の体積を 305 万気圧まで測定し、高精度の状態方程式を得ることに成功した(Tateno *et al.*, 2015 *EPSL*)。

(7) コアの輸送特性と熱史

最も重要な成果の1つとして上に書いた通り。

(8) コア-マンツル間の熱的相互作用

MgO の熱伝導率をマンツル全域の圧力で決定することに初めて成功した(Imada *et al.*, 2014 *GRL*)。さらに、既知の MgSiO₃ ペロフスカイト相の値も用いて、最下部マンツルの熱伝導率を求めた。

(9) コア-マントル間の化学的相互作用
CMB 圧力を上回る 138 万気圧・5500 K までの熔融金属-シリケートの反応実験に成功し、カリウムを含む親石元素の分配係数を得た。ウランとトリウムの分配係数の測定にも 40 万気圧・4000 K までの範囲で成功した。これらの結果、コアには放射性熱源がほとんど存在しないことがわかった。

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 37 件) 全て査読あり

1. Hirose, K., Phase transition and melting in the deep lower mantle, *AGU monograph "Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core"*, p. 209-224, 2016.
2. Kato, C., Hirose, K., Nomura, R., Miyake, A., Ohishi, Y., Melting in the FeO-SiO₂ system to deep lower mantle pressures: implications for subducted Banded Iron Formations, *Earth and Planetary Science Letters*, 440, 56-61, 2016.
3. Ohta, K., Kuwayama, Y., Hirose, K., Shimizu, K., Ohishi, Y., Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions, *Nature*, 534, 95-98, doi:10.1038/nature17957, 2016.
4. Umemoto, K., Kawamura, K., Hirose, K., Wentzcovitch, R. M., Post-stishovite transition in hydrous aluminous SiO₂, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 255, 18-26, 2016.
5. Tagawa, S., Ohta, K., Hirose, K., Kato, C., Ohishi, Y., Compression of Fe-Si-H alloys to core pressures, *Geophysical Research Letters*, 43, doi:10.1002/2016GL068848, 2016.
6. Tateno, S., Kuwayama, Y., Hirose, K., Ohishi, Y., Crystal structure of Fe-Si alloy in the Earth's inner core, *Earth and Planetary Science Letters*, 418, 11-19, 2015.
7. Hirose, K., Wentzcovitch, R., Yuen, D., Lay, T., Mineralogy of the deep mantle – the post-perovskite phase and its geophysical significance, In: Gerald Schubert (editor-in-chief) *Treatise on Geophysics*, 2nd edition, Vol 2. Oxford: Elsevier; p. 85-115, 2015
8. Labrosse, S., Hernlund, J., Hirose, K., Fractional melting and freezing in the deep mantle and implications for the formation of a basal magma ocean, in "Early Earth: Accretion and Differentiation", *AGU monograph*, 212, 111-130, 2015.
9. Gomi, H., Hirose, K., Electrical resistivity and thermal conductivity of hcp Fe-Ni alloys under high pressure: Implications for thermal convection in the Earth's core, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, doi:10.1016/j.pepi.2015.04.003, 2015.
10. Minobe, S., Nakajima, Y., Hirose, K., Ohishi, Y., Stability and compressibility of a new iron-nitride β -Fe₇N₃ to core pressures, *Geophysical Research Letters*, 42, doi:10.1002/2015GL064496, 2015.
11. Komabayashi, T., Kato, J., Hirose, K., Tsutsui, S., Imada, S., Nakajima, Y., Baron, A. Q. R., Temperature dependence of the velocity-density relation for liquid metals under high pressure: implications for the Earth's outer core, *American Mineralogist*, 100, 2602-2609, 2015.
12. Umemoto, K., Sugimura, E., de Gironcoli, S., Nakajima, Y., Hirose, K., Ohishi, Y., Wentzcovitch, R. M., Nature of the volume isotope effect in ice, *Physical Review Letters*, 115, 173005, 2015.
13. Umemoto, K., Hirose, K., Liquid iron-hydrogen alloys at outer core conditions by first-principles calculations, *Geophysical Research Letters*, 42, 7513-7520, doi:10.1002/2015GL065899, 2015.
14. Nakajima, Y., Imada, S., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Tateno, S., Tsutsui, S., Kuwayama, Y., Baron, A. Q. R., Carbon depleted outer core revealed by sound velocity measurements of liquid Fe-C alloy, *Nature Communications*, 6:8942 doi: 10.1038/ncomms9942, 2015.
15. Tatsumi, Y., Suzuki, T., Ozawa, H., Hirose, K., Hanyu, T., Ohishi, Y., Accumulation of 'anti-continent' at the base of the mantle and its recycling in mantle plumes, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 143, 23-33 DOI:10.1016/j.gca.2013.11.019, 2014.
16. Nomura, R., Hirose, K., Uesugi, K., Ohishi, Y., Tsuchiyama, A., Miyake, A., Low core-mantle boundary temperature inferred from the solidus of pyrolite, *Science*, 343, 522-525, DOI: 10.1126/science.1248186, 2014.
17. Caracas, R., Ozawa, H., Hirose, K., Ishii, H., Hiraoka, N., Ohishi, Y., Hirao, N., Identifying the spin transition in Fe²⁺-rich MgSiO₃ perovskite from X-ray diffraction and vibrational spectroscopy, *American Mineralogist*, 99, 1270-1276, 2014.
18. Hirose, K., Deep Earth mineralogy revealed by ultrahigh-pressure experiments, *Mineralogical Magazine*, 78, 437-446, 2014.
19. 太田 健二、八木 貴志、廣瀬 敬、パルス光加熱サーモリフレクタンズ法を用いた高圧下での下部マントル鉱物の格子熱伝導率測定、高圧力の科学と技術、24, 118-125, 2014.
20. Tateno, S., Hirose, K., Ohishi, Y., Melting experiments on peridotite to lowermost mantle conditions, *Journal of Geophysical Research*, Solid Earth, 119, 4684-4694, doi:10.1002/2013JB010616, 2014.

21. Imada, S., Ohta, K., Yagi, T., Hirose, K., Yoshida, H., Nagahara, H., Measurements of lattice thermal conductivity of MgO measured to core-mantle boundary pressures, *Geophysical Research Letters*, 41, 4542–4547, doi:10.1002/2014GL060423, 2014.
22. Umemoto, K., Hirose, K., Imada, S., Nakajima, Y., Komabayashi, T., Tsutsui, S., Baron, A. Q. R., Liquid iron-sulfur alloys at outer core conditions by first-principles calculations, *Geophysical Research Letters*, 41, doi:10.1002/2014GL061233, 2014.
23. Kato, J., Hirose, K., Ohishi, Y., High-pressure experiments on phase transition boundaries between corundum, Rh₂O₃(II) and CaIrO₃-type structures in Al₂O₃, *American Mineralogist*, 98, 335–339, 10.2138/am.2013.4133, 2013.
24. Sinmyo, R., Hirose, K., Iron partitioning in pyrolytic lower mantle, *Physics and Chemistry of Minerals*, 40, 107–113, DOI 10.1007/s00269-012-0551-7, 2013.
25. Noguchi, M., Komabayashi, T., Hirose, K., Ohishi, Y., High-temperature compression experiments of CaSiO₃ perovskite to lowermost mantle conditions and its thermal equation of state, *Physics and Chemistry of Minerals*, 40, 81–91, DOI 10.1007/s00269-012-0549-1, 2013.
26. Hirose, K., High-Pressure, High-Temperature X-ray Diffraction Measurements and the Discovery of Post-Perovskite Phase Transition, *Journal of the Physical Society of Japan*, 82, 021010, doi: 10.7566/JPSJ.82.021010, 2013.
27. Dai, L., Kudo, Y., Hirose, K., Murakami, M., Asahara, Y., Ozawa, H., Ohishi, Y., Hirao, N., Sound velocities of Na_{0.4}Mg_{0.6}Al_{1.6}Si_{0.4}O₄ NAL and CF phases to 73 GPa determined by Brillouin scattering method, *Physics and Chemistry of Minerals*, 40, 195–201, DOI 10.1007/s00269-012-0558-0, 2013.
28. Hirose, K., Labrosse, S., Hernlund, J., Composition and state of the core, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41:657–691, DOI: 10.1146/annurev-earth-050212-124007, 2013.
29. Asahara, Y., Hirose, K., Ohishi, Y., Hirao, N., Ozawa, H., Murakami, M., Acoustic velocity measurement for stishovite across the post-stishovite phase transition under deviatoric stress: implication to the seismic feature of subducting slabs in the mid-mantle, *American Mineralogist*, 98, 2053–2062, DOI: 10.2138/am.2013.4145, 2013.
30. Gomi, H., Ohta, K., Hirose, K., Labrosse, S., Hernlund, J., The high conductivity of iron and thermal evolution of Earth's core, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 224, 88–103, doi:10.1016/j.pepi.2013.07.010, 2013.
31. Ohta, K., Yagi, T., Hirose, K., Thermal diffusivities of MgSiO₃ and Al-bearing MgSiO₃ perovskites, *American Mineralogist*, 99, 94–97, doi:10.2138/am.2014.4598, 2014.
32. Ozawa, H., Hirose, K., Suzuki, T., Ohishi, Y., Hirao, N., Decomposition of Fe₃S above 250 GPa, *Geophysical Research Letters*, 40, 1–5, doi:10.1002/grl.50946, 2013.
33. Kato, C., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Ohishi, Y., NAL phase in K-rich portion of the lower mantle, *Geophysical Research Letters*, 40, 5085–5088, doi:10.1002/grl.50966, 2013.
34. Tateno, S., Hirose, K., Komabayashi, T., Ozawa, H., Ohishi, Y., The structure of Fe-Ni alloy in Earth's inner core, *Geophysical Research Letters*, 39, L12305, doi:10.1029/2012GL052103, 2012.
35. Ohta, K., Yagi, T., Taketoshi, N., Hirose, K., Komabayashi, T., Baba, T., Ohishi, Y., Hernlund, J., Lattice thermal conductivity of MgSiO₃ perovskite and post-perovskite at the core-mantle boundary, *Earth and Planetary Science Letters*, 349/350, 109–115, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.043>, 2012.
36. Kudo, Y., Hirose, K., Murakami, M., Asahara, Y., Ozawa, H., Ohishi, Y., Hirao, N., Sound velocity measurements of CaSiO₃ perovskite to 133 GPa and implications for lowermost mantle seismic anomalies, *Earth and Planetary Science Letters*, 349/350, 1–7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.040>, 2012.
37. Sugimura, E., Komabayashi, T., Ohta, K., Hirose, K., Ohishi, Y., Dubrovinsky, L., Experimental evidence for superionic conduction in H₂O ice, *Journal of Chemical Physics*, 137, 194505, [org/10.1063/1.4766816](http://dx.doi.org/10.1063/1.4766816), 2012.

[学会発表] (計 10 件)

1. Alfred Q.R. Baron, Phonons and Electrons in Superconductors via non-resonant inelastic x-ray scattering, 17th Crossroads Worksho, 2016年1月18日, 東京大学(東京都文京区)。
2. Alfred Q.R. Baron, Multi-Photon, 14.4 keV, Nuclear Excitation using the SACLA X-Ray Laser, Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2016), 2016年1月8日, Snowbird, Utah, USA.
3. Kei Hirose, Crystallization in Earth's core after high-temperature core formation, 2015 AGU Fall Meeting, 2015年12月17日, サンフランシスコ, USA.
4. Kei Hirose, Crystallization of SiO₂ in Earth's core after high-temperature core formation, The Earth's Mantle and Core: Structure, Composition, Evolution, 2015

年 11 月 6 日, 道後プリンスホテル(愛媛県、松山市).

5. Alfred Q.R. Baron, Phonons and Electrons in YBa₂Cu₃O_{6+y} via non-resonant inelastic x-ray scattering, 9th International Conference on Inelastic X-Ray Scattering (IXS 2015) , 2015 年 11 月 22 日, Hisnchu, Taiwan.
6. Kei Hirose, Overview of the dynamo evolution problem and the heat “paradox, Geophysical & Geochemical Constraints on Early Planetary Dynamos, 2015 年 9 月 16 日, Wakakusa no Yado Maruei (山梨県南都留郡).
7. Y. Ohishi, N. Hirao, Y. Mori, K. Shimizu and Kei Hirose, High-Pressure Applications by using X-ray Micro-Beam at SPring-8, Joint AIRAPT-25 & EHPRG-53 International Conference On High Pressure Science And Technology, 2015 年 9 月 3 日, Madrid, Spain.
8. Alfred Q.R. Baron, Pushing the limits of non-resonant IXS to Investigate Cuprate Superconductors, Gordon Conference on X-Ray Science, 2015 年 7 月 27 日, Washington, USA.
9. Kei Hirose, ”Melting experiments in a diamond-anvil cell combined with ex-situ textural and chemical characterizations by FIB/SEM/TEM”, New Frontier in Studying Chemistry under Extreme Conditions, 2015 年 5 月 19 日, 中国, 上海市.
10. Alfred Q.R. Baron , Calculations for Non-Resonant Inelastic X-Ray Scattering, Kickoff Meeting for Tohyama Post-K Computational Project, 2015 年 3 月 16 日, 東京大学 (東京都) .

[図書] (計 1 件)

1. 廣瀬 敬, 岩波書店, できたての地球 - 生命誕生の条件 -, 126 ページ, 2015.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 敬 (HIROSE, Kei)
東京工業大学・地球生命研究所・教授
研究者番号: 50270921

(2) 研究分担者

大石 泰生 (OHISHI, Yasuo)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・利用促進部門・研究員

研究者番号: 20344400

Alfred Baron (ALFRED, Baron)

国立研究開発法人理化学研究所・放射線光科学研究センター・准主任研究員
研究者番号: 90442920

駒林 鉄也 (KOMABAYASHI, Tetsuya)

エジンバラ大学・地球科学科・講師
研究者番号: 20444119

(3) 連携研究者

Hernlund John (HERNLUND, John)

東京工業大学・地球生命研究所・教授
研究者番号: 30723712

舘野 繁彦 (TATENO, Shigehiko)

岡山大学・地球物質科学研究センター・特任准教授
研究者番号: 30572903

小澤 春香 (OZAWA, Haruka)

岡山大学・地球物質科学研究センター・スーパーテクニシャン
研究者番号: 10598832

木村 純一 (KIMURA, Jyunichi)

海洋研究開発機構・地球内部物質循環分野・技術研究主幹
研究者番号: 30241730

野村 龍一 (NOMURA, Ryuichi)

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: 40734570

梅本 幸一郎 (UMEMOTO Koichiro)

東京工業大学・地球生命研究所・WPI 研究員
研究者番号: 60726991