

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287137

研究課題名(和文) 下部マントル鉱物の熱弾性特性及び熱伝導特性に対する鉄固溶効果の解明

研究課題名(英文) Understanding the solid solution effects of iron on the thermoelasticity and thermal conductivity of the lower mantle minerals

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：調和及び非調和格子動力学法と内部無撞着DFT+U法を組み合わせた独自の手法を開発し、鉄やアルミニウムを含むブリッジマナイト、フェロペリクレーズ(Fp)、ポスト・ペロブスカイトの高温高压弾性特性及び熱伝導特性を計算した。その結果、パイロライト組成が最も良く下部マントルの観測値を再現することや、Fpは他に比べ数倍大きな熱伝導率を持つことを見出した。同様の手法を水酸化鉄に適用した結果、パイロライト型構造を持つ新たな高压含水物質を発見した。これらは上下部マントルが一体となって運動すること、地表から沈み込んだ水がマントル最下部まで運ばれ得ることを示唆しており、本研究により地球深部の新たな描像が提案された。

研究成果の概要(英文)：Original approaches to compute thermoelasticity and thermal conductivity were developed based on the harmonic and anharmonic lattice dynamics theories combined with the internally-consistent DFT+U method, high-pressure and high-temperature elasticities and lattice thermal conductivities of iron and aluminum bearing bridgmanite (Br), ferropericlaese (Fp), and post-perovskite (PPv) were calculated. It was found that the pyrolytic composition can reproduce seismological properties observed in the lower mantle and that Fp has thermal conductivity several times larger than the others. The techniques were also applied to iron hydroxide, and then a new high-pressure phase with the pyrite structure was successfully discovered. These results propose new pictures of the mantle dynamics that Earth's mantle is now in the whole convection state, where the upper and lower mantles convect integrally, and the surface water can be transported down to the bottom of the mantle located at 2890 km depth.

研究分野：鉱物物性理論

キーワード：第一原理計算 熱弾性特性 熱伝導特性 鉄固溶効果 下部マントル 含水鉱物

1. 研究開始当初の背景

(1) 下部マントルは地球全体の体積の 50% 以上を占めており、そのため下部マントルの化学組成や熱特性の制約は、地球の形成・進化の過程を理解するために極めて重要である。下部マントルの主要構成物質はある程度の鉄を含んだブリッジマナイト (Br) とフェロペリクレス (Fp) という鉱物であると考えられているが、下部マントルのサンプルを直接入手することが困難であるため、これらの量比、それぞれにおける鉄含有量などは、いまだよくわかっていない。直接観察が不可能なため、地震学による観測値を合理的に再現できる岩石鉱物モデルを特定することが、下部マントルの組成を制約する最も確実な手段となる。しかし鉄・アルミ・水などを含む Br や Fp、Br の高压相であるポスト・ペロプスカイト (PPv) の弾性波速度は、特に高温高压下においてはほとんど理解されていない状況である。

(2) 地球内部物理学において重要でありながら、弾性特性以上によく制約されていない物理量に、熱伝導率や粘性率など高压下における鉱物の輸送特性がある。核の冷却速度、マントルの底面加熱は核マントル境界 (CMB) における熱流量によって規定されるが、その見積もりには現在でも 3TW 程度から 15TW 程度までという非常に大きな不確定性が存在している (Lay et al., 2008)。この大きな不確定性は、主に 135 万気圧 4000K に達する CMB の温度圧力条件下における鉱物の熱伝導率が、実験の技術的困難さのため、ほとんど制約されていないことによる。これらはマントル対流様式を決定する重要パラメータであるが、実験的制約が極めて困難であるというのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 実験困難な極端条件下における物性研究において、大変有用性の高い研究手段となってきたのが、非経験的理論シミュレーションである第一原理計算法である。申請者の研究グループは、これまで密度汎関数理論・擬ポテンシャル法・平面波展開法を組み合わせ、複雑な構造を有する鉱物に対する独自の第一原理計算手法の開発を進め、鉄を含まない鉱物については高温弾性特性、熱伝導特性とともに、実験と同程度かこれを超える精度での予測を可能としてきた。本研究では、これらの計算手法を鉄やアルミニウムを含む、より現実的な化学組成へと発展させる。具体的には、鉱物の高温弾性特性・熱伝導特性に対する鉄やアルミニウムの効果を高精度で計算する、第一原理計算手法の開発を行う。

(2) 開発した手法を用いて鉄、アルミニウム、水などの不純物を含む Br, Fp, PPv の密度、弾性波速度、熱伝導率を温度、圧力、組成の関数として決定する。得られた結果に基づき

下部マントルの地震学的観測結果 (密度、P 波速度、S 波速度、体積弾性波速度) を同時に矛盾なく説明できる組成を精密に制約して、下部マントルの新たな鉱物学モデルを構築する。さらに得られた鉱物学モデルが持つ熱特性 (温度構造や CMB 熱流量) を決定して、マントルや外核のダイナミクスについて考察する。

3. 研究の方法

(1) 局所密度近似などの従来の第一原理計算の手法では、鉄を初めとする遷移金属元素の部分的に満たされた軌道を正しく表現することができない。そこで本研究では部分的に満たされた軌道間のクーロン相互作用をより厳密に記述する内部無動着 LDA+U 法 (Cococcioni & de Gironcoli, 2005; Tsuchiya et al., 2006) を適用し、鉄 - 酸素結合を定量的に取り扱う。

(2) 地球深部は高温である。温度効果は、格子動力学法により取り入れることが可能である。しかし、鉄などの不純物を含まない場合に対して温度効果を求める際に用いられてきたにおいては効果的であった密度汎関数摂動理論は、大きな計算セル (スーパーセル) が必要となる不純物を含む系に対しては実用性に乏しい。そこで本研究では、スーパーセル中で原子を直接変位させて 2 次の力定数行列を求める有限変位調和格子動力学法を用いて温度効果を求める。この方法をさらに 3 次の力定数行列にまで拡張し、非調和格子動力学理論とボルツマン輸送方程式を組み合わせ、下部マントル物質の格子熱伝導率を求める。

4. 研究成果

(1) 下部マントルの平均組成: 調和格子動力学法と内部無動着 LDA+U 法を組み合わせた独自の手法を用いて Br 及び Fp の高温高压弾性特性に対する鉄やアルミニウムの効果を計算した。異なる (Mg+Fe)/Si 比を有する岩石組成について計算を行い、それらの弾性波速度をモデル化した。観測に基づく地球内部の地震波速度モデル (PREM) と比較した結果、Br と Fp を 8:2 の割合 (体積比) で含むパイロライト組成が最も良く下部マントルの観測値を再現することを見出した。上部マントルもパイロライト組成は有することが知られており、本研究の結果は上下部マントルが平均的には同じ化学組成を有することを示す。このことは、上下部マントルが一体となって流動する状態にある可能性が高いことを示唆している。(Nature Geo., 2015)

(2) 非調和格子動力学法と内部無動着 LDA+U 法を組み合わせた地球深部物質の高温高压熱伝導率に対する鉄固溶効果の計算手法開発: 非調和格子動力学理論とボルツマン輸送方程式、内部無動着 LDA+U 法を組み

合わせた手法を開発し、下部マントル全域にわたる温度圧力条件下で Br, Fp, PPv の格子熱伝導率の高精度計算に成功した。その結果 CMB 条件下で、Fp が、Br に比べ 5 倍程度大きい熱伝導率を持つことを見出した。(Phys. Rev. B, 2017)

(2) 下部マントル最深部圧力下で安定なパイライト型 FeOOH 高压相の発見：内部無撞着 DFT+U 法を水酸化鉄 FeOOH の高压相平衡探査に適用した結果、 ϵ 相からパイライト型構造相への新たな相転移を発見した。得られた結果に基づき超高压実験を行った結果、下部マントル中部圧力域において予測された新たな相転移の再現に成功した。先行研究で示された下部マントル領域における FeO₂ 相の存在の可能性を否定するとともに、下部マントルにおける水素の挙動を制約した。(Nature, 印刷中)

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 18 件)

M. Nishi, Y. Kuwayama, J. Tsuchiya, and T. Tsuchiya, The pyrite-type high-pressure form of FeOOH, Nature, 査読有, 印刷中

H. Fukui, A. Baron, D. Ishikawa, H. Uchiyama, Y. Ohishi, T. Tsuchiya, H. Kobayashi, T. Matsuzaki, T. Yoshino, and T. Katsura, Pressure dependence of transverse acoustic phonon energy in ferropericlase across the spin transition. Journal of Physics: Condensed Matter, 査読有, 29, 245401, 2017
DOI:10.1088/1361-648X/aa7026

H. Dekura and T. Tsuchiya, Ab initio lattice thermal conductivity of MgO using a full solution to the linearized Boltzmann transport equation. Physical Review B, 査読有, 95, 184303, 2017
DOI:10.1103/PhysRevB.95.184303

土屋卓久, 核 - マントルの相互作用と共進化 - 統合的地球深部科学の創成 -. JGL, 査読無, 13, No.1, 12-14, 2017 (依頼原稿)

J. Tsuchiya and T. Tsuchiya, First principles calculation of the elasticity of ice VIII and X. The Journal of Chemical Physics, 査読有, 146, 014501, 2017
DOI:10.1063/1.4973339

土屋卓久, 鉱物物性シミュレーションから探る地球深部ダイナミクス. 化学と工業, 査読無, 69, 452-454, 2016 (依頼原稿)

T. Sakamaki, E. Ohtani, H. Fukui, S. Kamada,

S. Takahashi, T. Sakairi, A. Takahata, T. Sakai, S. Tsutsui, D. Ishikawa, R. Shiraiishi, Y. Seto, T. Tsuchiya, and A. Q. R. Baron, Constraints on Earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions. Science Advances, 査読有, 2, e1500802, 2016
DOI:10.1126/sciadv.1500802

H. Ichikawa and T. Tsuchiya, Atomic transport property of Fe-O liquid alloys in the Earth's outer core P,T condition. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 査読有, 247, 27-35, 2015
DOI:10.1016/j.pepi.2015.03.006

K. Miyanishi, Y. Tange, N. Ozaki, T. Kimura, T. Sano, Y. Sakawa, T. Tsuchiya, and R. Kodama, Laser-shock compression of magnesium oxide in the warm-dense-matter regime. Physics Review E, 査読有, 92, 023103, 2015
DOI:10.1103/PhysRevE.92.023103

S. Mazevet, T. Tsuchiya, T. Taniuchi, A. Benuzzi-Mounaix, and F. Guyot, Melting and metallization of silica in the cores of gas giants, ice giants, and super Earths. Physical Review B, 査読有, 92, 014105, 2015
DOI:10.1103/PhysRevB.92.014105

X. Wang, T. Tsuchiya, and A. Hase, Computational support for a pyrolytic lower mantle containing ferric iron. Nature Geoscience, 査読有, 8, 556-559, 2015
DOI:10.1038/ngeo2458

K. Kawai and T. Tsuchiya, Small shear modulus of cubic CaSiO₃ perovskite. Geophysical Research Letters 42, 2718-2726, 2015
DOI:10.1002/2015GL063446

土屋卓久, 第一原理計算による理論高压鉱物物性学の開拓. 岩石鉱物科学, 査読有, 44, 10-24, 2015
DOI:10.2465/gkk.150104

K. Kawai and T. Tsuchiya, Elasticity and phase stability of pyrope garnet from ab initio computation. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 査読有, 240, 125-131, 2015
DOI:10.1016/j.pepi.2014.10.005

H. Yusa, T. Tsuchiya, M. Akaogi, H. Kojitani, D. Yamazaki, N. Hirao, Y. Ohishi, and T. Kikegawa, Postperovskite phase transition of ZnGeO₃: Comparative crystal chemistry of postperovskite phase transition from germanate perovskites. Inorganic Chemistry, 査読有, 53, 11732-11739, 2014

DOI:10.1021/ic501958y

K. Kawai and T. Tsuchiya, P-V-T equation of state of cubic CaSiO_3 perovskite from first principles computation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読有, 119, 2801-2809, 2014

DOI:10.1002/2013JB010905

H. Ichikawa, T. Tsuchiya, and Y. Tange, The P-V-T equation of state and thermodynamic properties of liquid iron. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読有, 119, 240-252, 2014

DOI:10.1002/2013JB010732

X. Wang and T. Tsuchiya, Ab initio computation on the Fe L-edge X-ray emission spectroscopy of Fe-bearing MgSiO_3 perovskite. *American Mineralogist*, 査読有, 99, 387-392, 2014

DOI:10.2138/am.2014.4518

〔学会発表〕(計78件)

土屋卓久, 地球中心にはどのような物質があるのか? 第55回玉城嘉十郎教授記念公開学術講演会 - 明らかにされる太陽系と地球深部の固体物質 -, 京都大, 京都府京都市 (2016年12月6日) (依頼講演)

T. Tsuchiya, H. Ichikawa, and S. Ohmura, Thermoelasticity of Fe-light element alloys by ab initio molecular dynamics simulations to model the outer core composition. AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, USA (2016年12月15日)

J. Tsuchiya, T. Tsuchiya, M. Nishi and Y. Kuwayama, High pressure behaviors of FeOOH and Fe-bearing phase H. AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, USA (2016年12月14日)

H. Dekura and T. Tsuchiya, Thermal conductivity of lower mantle minerals from ab initio anharmonic lattice dynamics. 2016 International Conference on the Earth's Deep Interior, Wuhan, China (2016年11月6日)

土屋卓久, 桑山靖弘, 河合研志, 石井水晶, 鉄系合金の高温高压弾性特性. 第57回高压討論会, 筑波大, 茨城県つくば市 (2016年10月28日)

土屋 旬, 土屋卓久, 西 真之, 桑山靖弘, FeOOH の高压相転移. 日本鉱物科学会年会, 金沢大, 石川県金沢市 (2016年9月25日)

土屋卓久, 第一原理計算による地球内部物理学. 日本地球化学会年会, 大阪市大, 大阪府大阪市 (2016年9月16日) (招待講演)

Z. Xiong, T. Tsuchiya, and T. Taniuchi, Ab

initio prediction of potassium partitioning into the Earth's core. Goldschmidt conference 2016, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Yokohama (2016年6月27日)

H. Dekura and T. Tsuchiya, Thermal conductivity of lower mantle minerals from ab initio anharmonic lattice dynamics. Goldschmidt conference 2016, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Yokohama (2016年6月27日)

T. Tsuchiya, Y. Kuwayama, K. Kawai, and M. Ishii, High-P,T elasticity of iron and some alloys. Goldschmidt conference 2016, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Yokohama (2016年6月27日)

H. Ichikawa, T. Tsuchiya, and M. Ohsumi, The equation of state of liquid pure Fe and Fe-light elements alloys by ab initio molecular dynamics simulations to confine the outer core composition. Goldschmidt conference 2016, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Yokohama (2016年6月27日)

H. Dekura and T. Tsuchiya, Thermal conductivity of lower mantle minerals from ab initio anharmonic lattice dynamics. 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ, 千葉県千葉市 (2016年5月23日)

H. Dekura and T. Tsuchiya, Electron-phonon contribution to electrical resistivity of hcp Fe. 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ, 千葉県千葉市 (2016年5月23日)

T. Tsuchiya, Y. Kuwayama, M. Ishii, and K. Kawai, High-P,T elasticity of iron and iron-carbon alloy. 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ, 千葉県千葉市 (2016年5月23日)

H. Ichikawa, T. Tsuchiya, and M. Ohsumi, Outer core compositions by thermoelastic properties of liquid Fe alloys. 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ, 千葉県千葉市 (2016年5月23日)

S. Ohmura, T. Arai, and T. Tsuchiya, Viscosity of basaltic melt under high pressure: ab initio molecular dynamics simulations. 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ, 千葉県千葉市 (2016年5月23日)

土屋卓久, 地球深部の理解はどこまで進んでいるのか. 愛媛大 GRC・東大地震研協定記念講演会, 愛媛大, 愛媛県松山市 (2016年4月29日) (依頼講演)

T. Tsuchiya, Composition of the Earth from ab initio mineral physics. 1st neutrino oscillation

tomography workshop, ERI, Tokyo, Bunkyo (2016年1月6日)

J. Tsuchiya and T. Tsuchiya, First principles investigation of Fe and Al bearing phase H. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2015年12月15日) (招待講演)

T. Tsuchiya, K. Kawai, Y. Kuwayama, M. Ohsumi, and M. Ishii, High-P,T elasticity of hcp iron: Reinvestigation of the applicability of hcp iron to the Earth's inner core. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2015年12月14日)

②① K. Kawai and T. Tsuchiya, A possible new host mineral of large-ion elements in the Earth's deep interior. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2015年12月14日)

②② 土屋卓久, 状態方程式を含めた熱力学特性の第一原理計算. 衝突研究会 2016, 北大低温研, 北海道札幌市 (2015年11月26日) (招待講演)

②③ 大村訓史, 下條冬樹, 土屋卓久, 超高压環境下における液体酸素の構造: 第一原理分子動力学シミュレーション. 第56回高压討論会, JMS アステールプラザ, 広島県広島市 (2015年11月10日) (招待講演)

②④ 出倉春彦, 土屋卓久, マルチメガバール条件下における固体金属鉄の第一原理電子-フォノン相互作用計算. 第56回高压討論会, JMS アステールプラザ, 広島県広島市 (11/10/2015)

②⑤ 長谷淳史, 土屋卓久, 内部無撞着 LSDA+U 法に基づく $MgSiO_3$ ブリッジマナイトの熱弾性特性に対する二価、三価鉄の固溶効果の計算. 日本鉱物科学会年会, 東京大, 東京都文京区 (09/27/2015)

②⑥ T. Tsuchiya, Matter in extreme condition. J-SEDI, ERI, Tokyo, Bunkyo (2015年9月24日) (招待講演)

②⑦ 土屋卓久, 地球深部の理解はどこまで進んでいるのか, 知の拠点セミナー, 京都大学東京オフィス, 東京都品川区 (2015年9月18日) (依頼講演)

②⑧ 土屋卓久, 鉄液相・固相の高温高压弾性特性. 東京大学地震研究所・研究集会「地球内部構造の観測・監視技術の現状と未来」, 東京大, 東京都文京区 (2015年9月11日) (招待講演)

②⑨ T. Tsuchiya, Ab initio modeling of Earth's composition. ELSI (WPI) site visit, TiTech, Tokyo, Meguro (09/01/2015)

③⑩ T. Tsuchiya and T. Taniuchi, Thermodynamic integration method for high pressure melting of silicates. International School and Workshop "Matter in Extreme Conditions", Montgenevre, France (2015年2月5日) (招待講演)

③⑪ H. Ichikawa, T. Tsuchiya, and M. Ohsumi, The equations of state of liquid pure Fe and Fe-light elements alloys by ab initio molecular dynamics simulations. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014年12月18日)

③⑫ J. Tsuchiya, T. Tsuchiya, M. Nishi, and M. Mookherjee, Phase H: A new high pressure phase of dense hydrous magnesium silicates in the lower mantle. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014年12月18日)

③⑬ J. Tsuchiya, T. Tsuchiya, J. Townsend, S. Jacobsen, and C. Bina, First principles investigations of hydrous phases at the bottom of the lower mantle. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014年12月16日) (招待講演)

③⑭ X. Wang, T. Tsuchiya, and A. Hase, A pyrolytic lower mantle with $(Mg,Fe^{3+})(Si,Al^{3+})O_3$ bridgmanite. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014年12月16日)

③⑮ K. Kawai and T. Tsuchiya, Small shear modulus of cubic $CaSiO_3$ perovskite. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2014年12月16日)

③⑯ 出倉春彦, 土屋卓久, 第一原理計算法による熱伝導率計算と核-マントル境界の熱特性. 第55回高压討論会, 徳島大, 徳島県徳島市 (2014年11月24日) (招待講演)

③⑰ X. Wang, T. Tsuchiya, and A. Hase, Thermoelastic properties of lower mantle minerals: Implication for lower mantle's composition. 第55回高压討論会, 徳島大, 徳島県徳島市 (11/24/2014)

③⑱ 土屋 旬, 土屋卓久, 下部マントルにおける phase H の安定性. 第55回高压討論会, 徳島大, 徳島県徳島市 (11/24/2014)

③⑲ 長谷淳史, 土屋卓久, 内部無撞着 LSDA+U 法に基づく $MgSiO_3$ ブリッジマナイトの弾性特性に対する二価、三価鉄の固溶効果の計算. 第55回高压討論会, 徳島大, 徳島県徳島市 (11/22/2014)

④⑰ 土屋卓久, 第一原理計算による理論高压鉱物物性学の開拓. 日本鉱物科学会 2014 年年会, 熊本大, 熊本県熊本市 (2014年9月18日)

日) (学会賞受賞講演)

④① 土屋卓久, 第一原理計算からの地球惑星科学. 日本地質学会第 121 年学術大会, 鹿児島大, 鹿児島県鹿児島市 (2014 年 9 月 15 日) (招待講演)

④② T. Tsuchiya and H. Dekura, Thermal property modeling of the core-mantle boundary. IMA 2014, Johannesburg, South Africa (2014 年 9 月 4 日)

④③ T. Taniuchi and T. Tsuchiya, Development of an ab initio calculation method for liquid free energy based on the thermodynamic integration. AOGS 2014, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido, Sapporo (2014 年 8 月 1 日)

④④ X. Wang and T. Tsuchiya, Thermodynamic properties of $MgSiO_3$ post perovskite with Fe^{3+} and Al^{3+} incorporation: An internally consistent LSDA+U study. AOGS 2014, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido, Sapporo (08/01/2014)

④⑤ J. Tsuchiya and T. Tsuchiya, First principles prediction of a new high pressure phase of dense hydrous magnesium silicates in the lower mantle. AOGS 2014, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido, Sapporo (08/01/2014)

④⑥ X. Wang and T. Tsuchiya, A pyrolitic lower mantle with $(Mg, Fe^{3+})(Si, Al^{3+})O_3$ perovskite. AOGS 2014, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido, Sapporo (07/29/2014)

④⑦ J. Tsuchiya and T. Tsuchiya, First principles investigation of the stability of phase H in the lower mantle. AOGS 2014, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido, Sapporo (07/29/2014)

④⑧ 河合研志, 土屋卓久, 立方晶カルシウムペロブスカイトの小さな剛性率. 日本地球惑星科学連合, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市 (05/02/2014)

〔図書〕(計4件)

T. Tsuchiya, Van der Waals Force. Encyclopedia of Geochemistry (ed. W. M. White, Springer, 2017).

T. Tsuchiya, K. Kawai, X. Wang, H. Ichikawa, and H. Dekura, Temperature of the lower mantle and core based on ab initio mineral physics data. Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core (eds. H. Terasaki and R. A. Fischer, Wiley, 2016) Chap. 2, pp. 13-30.

T. Irifune and T. Tsuchiya, Phase transitions and mineralogy of the lower mantle. Treatise on Geophysics, vol. 2, 2nd edition (ed. G. Schubert,

Elsevier, 2015) Chap. 2.03, pp. 33-60.

K. Kawai and T. Tsuchiya, Elasticity of continental crust around the mantle transition zone. The Earth's Heterogeneous Mantle (eds. A. Khan and F. Deschamps, Springer, 2015) Chap. 8, pp. 259-274.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<https://sites.google.com/site/ehimetmpg/home>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

土屋 旬 (TSUCHIYA, Jun)
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: 00527608

(3)連携研究者

出倉 春彦 (DEKURA, Haruhiko)
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: 907001463

(4)研究協力者

長谷 淳史 (HASE, Atsushi)
市川 浩樹 (ICHIKAWA, Hiroki)
WANG, Xianlong
XIONG, Zhihua