

機関番号：16301

領域設定期間：平成27年度～令和元年度

領域番号：2706

研究領域名（和文）核－マンツルの相互作用と共進化～統合的地球深部科学の創成～

研究領域名（英文）Interaction and Coevolution of the Core and Mantle: Toward Integrated Deep Earth Science

領域代表者

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（領域設定期間全体）：（直接経費）1,163,400,000円

研究成果の概要

世界を先導する高圧実験と第一原理計算分野の研究者が中核となり、微小領域の高精度分析技術を有する地球化学分野の研究者、及び豊富な観測データを有する地震・電磁気観測分野と最新の素粒子実験技術を用いる地球ニュートリノ観測分野を合わせた地球物理学分野の研究者が連携し、核とマンツルの物理的・化学的相互作用と共進化を軸に、固体地球の主要構成領域である下部マンツル及び核の組成、始原物質の所在、核及びマンツルのエネルギー輸送など地球深部科学の長年の重要未解決問題に取り組んだ。これにより高圧地球科学・地球物理学・地球化学が融合した地球深部科学の新たな共同研究体制が確立され、従来の静的かつ個別領域的な地球深部科学から、動的・統合的観点から研究を行う新しい段階の地球深部科学が創出された。本領域の活動の結果、マンツル物質及び核物質の熱伝導率の高精度測定に基づく地球深部の熱特性と不均質性の新たなモデルの構築、ホットスポット岩石試料の高精度分析や地球ニュートリノ観測と元素分配や元素拡散の高精度測定データを組み合わせた始原物質や熱源元素の所在の新たなモデル構築、マンツル全域の圧力範囲で安定な新たな含水鉱物の発見に基づく地球深部水循環の新たなモデル構築など、地球内部の化学進化・熱進化過程に関し定量データに基づく新たなモデルの構築に成功した。また、本領域の多彩な研究分野と先端的な手法を活用した高度専門教育プログラムを作成し、幅広い視野を持った若手研究者の育成を行った。

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：核－マンツル相互作用、高圧地球科学、グローバル地震学、地球化学

1. 研究開始当初の背景

岩石からなるマンツルと金属鉄を主体とする核で構成される地球内部構造は、地球型惑星が普遍的に持つ最も顕著な成層構造である。地球全体の体積の8割を占めるマンツルの化学組成と、残りの2割に相当する核中の軽元素の特定は、地球の起源と進化に関わる中心的問題で60年余りに渡り未解決のままである。核とマンツルの境界層領域は、地震学により活発なマンツルの対流運動が示唆されているのに対し、地球化学からは地球形成当初の痕跡を46億年ものあいだ保持し続ける安定領域（リザーバー）であることが示唆されており、両者は相容れない。マンツル対流を駆動する熱源は核からマンツルに伝導する熱と、マンツル内にある放射性元素の崩壊熱である。地球物理観測からマンツルの熱流量が推定されているが、熱源となっている放射性元素の種類、量とその分布は分かっておらず、これまでの熱進化の理解と将来の予測は今なお不十分である。

このような地球内部科学における未解決の重要問題は、核とマンツルを結合系としてとらえ、その相互作用を明らかにすることにより初めて解明が可能である。現在では地球最深部に至る温度圧力条件での実験が可能になり、一方で高精度な地球物理学観測、地球化学精密分析、第一原理計算、連続体シミュレーション技術が大きく発展してきている。更に地球ニュートリノ観測による地球深部における放射性元素分布の観測も、実用性が高まってきた。これら独自に発展してきた実験、分析、観測、理論分野を有機的に統合させることにより、核－マンツル相互作用と共進化の解明に至る道筋が整ったといえよう。そこで本研究では、高圧実験及び第一原理計算により得られる超高温超高压条件での定量物性データと地球物理学及び地球化学にお

ける各種高精度観測データを結集することにより、地球内部科学の未解決問題の解明を行う。また大規模な分野間連携を通して、従来の静的・個別的な地球深部科学から動的・統合的地球深部科学という革新的な研究領域の創成を行う。

2. 研究の目的

本領域を構成する研究者は、核とマントル領域における実験的研究において、国内外の追従を許さぬ研究活動を推進している。例えば本領域の分担者は、世界で初めて地球の中心に至る温度圧力を実現し、内核条件における鉄の結晶構造を明らかにした (Tateno et al., Science 2010)。また、21 世紀の地球科学最大の発見の 1 つと評されるポスト・ペロブスカイト相の発見 (Murakami et al., Science 2004)、さらに地球深部の水輸送に重要な役割を果たす新しい超高密度含水相 Phase H の発見 (Nishi et al., Nature Geo. 2014) など、従来の常識を覆す画期的な研究成果を相次いで発表している。高温高压下の第一原理計算分野も、国際的にトップレベルの研究成果をあげている。領域代表者らの第一原理計算グループは、国内でほぼ唯一かつ最大の研究組織を形成し、特に下部マントルから内核領域、さらには巨大惑星深部における結晶構造や物性の高精度の理論予測 (Tsuchiya et al., PRL 2006; Tsuchiya and Tsuchiya, PNAS 2011; Dekura et al., PRL 2013 など) において、世界を先導する成果をあげている。一方、本領域の地震学・地球電磁気学と数値モデリングの分担者も、我が国の稠密な観測網と、数値計算技術・コンピューター資源に基づく最先端の研究を進めており (Kawakatsu et al., Science 2010; Takahashi et al., Science 2005 など)、国際的に卓越した評価が得られている。地球化学分野に関しても、本領域の分担者らは高度な同位体分析と微量・微小分析技術に基づき、特に白金族・軽元素同位体地球化学の分野では世界をリードする研究活動を展開している (Sato, Suzuki et al., Nature Comm. 2013; Sano et al., Nature Comm. 2014 など)。また、ニュートリノなど素粒子観測技術の地球科学への応用の試みも分担者らが先導して行っており、国際的に大きな注目を集めている (Tanaka and Watanabe, Sci. Rep. 2014 など)。

我が国の地球深部研究分野では、主に高压実験分野と地震学を始めとした地球物理学分野の連携は従来から行われてきたが、高度な微小領域分析技術を有する地球化学分野や、近年著しい発展がみられる第一原理計算分野、また地球ニュートリノ観測分野との本格的な連携はこれまで例がない。本研究領域は、これら地球惑星科学の各分野に属する我が国のトップレベルの研究者が連携・協働し、核とマントルの物理的・化学的相互作用と共進化を軸に、固体地球の主要構成領域である下部マントル及び核の化学組成、始原物質の所在、核及びマントルのエネルギー輸送など、地球深部科学の長年の重要未解決問題の解明に取り組み、これを通じて新しい地球深部科学の創成を目指すものである。「核-マントルの相互作用と共進化」は、複雑な物理・化学プロセスである。このため、観測、実験、分析、理論といった異なる手法を結集し、緊密に連携して共同研究をおこなうことにより、初めてその解明が可能になる。本領域では、(1) 先進的な高压実験と第一原理計算の最近の発展を踏まえ、(2) 最新の化学分析手段により得られる地球深部の微量元素分配や同位体組成に基づく元素挙動の情報や、(3) 高度な地球物理データ解析・数値シミュレーション技術を駆使し、(4) 従来個別の研究対象であった地球の核とマントルを結合系としてとらえ、その相互作用の解明を通じて地球深部のダイナミクスと核-マントルの共進化に関する諸問題を明らかにする。また、この活動を通じて、従来の静的・個別的地球深部科学研究から動的・統合的地球深部科学研究へと質的転換を図る。

一方、本領域の多彩な研究分野と先端的な手法は、高度専門教育においても貴重な機会となる。そこで本領域では領域のユニークな連携研究組織を活用した教育プログラムを作成し、幅広い視野を持った若手研究者の育成も行う。

3. 研究の方法

地球内部のダイナミックな挙動や、地球の生成・進化過程を明らかにするために、我が国が世界を先導する実験・数値高压地球科学と観測地球物理学分野に加え、高度な分析技術を持つ地球化学や、急速に発展しつつあるニュートリノ地球物理学分野の研究者との連携・協働により本領域を推進する。そのために、本領域では研究項目として、物性測定 (A01)、化学分析 (A02)、物理観測 (A03)、理論計算 (A04) の 4 つを設定する。研究項目 A01 では、核とマントルの構造と動的挙動を支配する実験データを収集する。研究項目 A02 では、マントル由来物質の分析により核-マントル間の元素分配や同位体分別を制約するとともに、A01 及び A03 で得られた試料の微小領域分析も受け持つ。研究項目 A03 では、核とマントルにおける動的挙動に関する実証的なデータの取得を目指す。一方、研究項目 A04 をこれらの頂上に置き、A01、A02、A03 で得られたデータを第一原理計算や連続体シミュレーションにより解釈・モデル化するとともに、物性値・元素の挙動・深部構造に関する実験や観測に指針を与える。最終的には、これら 4 つの研究項目が連携し、また公募研究に基づく新たな視点からの研究も含め、核-マントル間の相互作用ならびに共進化過程の解明を通じ、動的・統合的地球深部科学を創成する。

それぞれの研究項目内においては、対象とそれに応じた異なるアプローチが必要であり、それぞれの項目において最も発展と成果が期待できる計画研究を設定した。研究項目 A01 においては「A01-1 ダイナミクス班」が地球深部物質の流動などの動的現象を高压下での変形実験により研究し、「A01-2 構造物性班」が核とマントルを構成する鉱物・マグマ・金属融体の物性を測定する。これらの基盤となる最新技術の開発を「A01-3 技術開発班」が担う。研究項目 A02

では、「A02-1 同位体班」が同位体地球化学的手法により核-マントル相互作用の痕跡並びに共進化の歴史を探り、「A02-2 元素分配班」が地球の分化過程における元素の挙動の解明を目指す。研究項目 A03 では、「A03-1 地震・電磁気観測班」が地震・電磁気によって地球深部構造の動的挙動の痕跡を探り、「A03-2 ニュートリノ観測班」が地球ニュートリノ観測による深部熱源の推定を行う。また、研究項目 A04 では、「A04-1 理論計算班」が第一原理計算に基づく超高压物性の高精度評価と、連続体シミュレーションによる核-マントル・ダイナミクスの数値モデリングを担当する。これら合計 4 研究項目、8 計画研究が有機的に連携を行い、(1) マントルと核の化学組成と放射性同位体分布、(2) 核-マントル境界領域の不均質構造の起源とリザーバーの関係、(3) 外核の化学成層と内核の不均質構造の原因、の解明を重要なターゲットとし、関連する地球深部科学分野の諸問題を核-マントル相互作用と共進化の視点から解明する。

また若手育成のためのインターシップを行うとともに、領域全体のシンポジウムや、国内外で活躍する領域外の研究者を招いた国際スクール及び国際レクチャー、海外からの招聘研究者から若手研究者へ研究アドバイスを与えるメンターワークショップ、若手研究者の海外中長期派遣を国際活動支援班と協力して実施する。また円滑な領域推進のために総括班会議を年に 3 回程度開催するとともに、必要に応じて複数計画研究による合同研究会を適宜開催する。

4. 研究の成果

本研究領域において新たな分野融合組織が構築され大規模共同研究が実施された結果、様々な研究成果が得られた。それらの成果は、*Nature* 誌 (8 件)、*Nature Geo.* 誌 (3 件)、*Nature Comm.* 誌 (10 件)、*Science* 誌 (2 件)、*PNAS* 誌 (3 件) などの高インパクトジャーナルを含む合計 561 編の原著論文 (内国際共著論文 291 件) として公表された。このことは本領域が従来の地球深部科学にブレークスルーをもたらし、世界的にも高い評価を得たことを示している。様々な成果に繋がる新たな共同研究が続々と生まれたことから、本領域が掲げた統合的地球深部科学の創成という目的はおおむね達成されたと考えられる。また、研究期間終了後も本研究で構築された連携研究組織や手法を維持・拡張することにより、さらなる発展が期待できる。以下に、本研究領域により得られた研究成果について、研究項目ごとにまとめて記す。

(1) 研究項目 A01 : 物性測定

本研究項目では、核-マントル物質の高压物性に関し、実験的手法を用い研究に取り組んだ。地球深部の弾性特性、熱輸送特性、レオロジー特性、核とマントルの化学的相互作用、マグマの化学組成と物性、揮発性元素 (軽元素) 挙動の解明を計画した。熱輸送特性に関しては、核に相当する圧力条件において六方最密型純鉄の電気抵抗率の測定に世界に先駆けて成功し、従来の外挿値よりも大きな電気伝導率を持つことを見出した。レオロジー特性に関しては、下部マントル条件下で下部マントルの最主要鉱物であるブリッジマナイトの変形実験に世界で初めて成功し、沈み込み帯で観測されている下部マントルの地震波速度異方性から、沈み込んだスラブの流動パターンを推定した。弾性特性に関しては、下部マントル主要鉱物の一つである CaSiO_3 ペロブスカイトの S 波速度が、従来の測定値に比べ小さいことを見出した。これら 3 つの研究成果を *Nature* 誌において公表した他、無水・含水マグマの構造解析や、100 万気圧以上の圧力下での変形実験を可能とする世界初の技術開発に成功するなど、ほぼ計画通りに研究を進めることができた。

(2) 研究項目 A02 : 化学分析

本計画項目では、高压下での元素・同位体挙動を明らかにすることで核-マントルの相互作用の痕跡を見出し地球の初期進化を解明することを目標として、超高精度の同位体分析、地球深部条件下での高温高压元素分配実験を計画した。天然玄武岩試料における核-マントル相互作用の痕跡を示すタングステン同位体比異常の検出、35 億年前から数億年の期間で全マントル混合が生じたことを示す白金族元素の濃度変動の発見、初期地球においてマントルから核が分離した際にヘリウムなど希ガスが核へ分配したことを示すケイ酸塩-金属鉄間での高压高温分配係数の測定、核の温度圧力条件での Fe-S 系の相平衡の解明、還元的な下部マントル環境下における炭酸塩鉱物の安定性の解明、核-マントル相互作用のトレーサーとして強親鉄性元素を用いる際の炭素質メルトの役割の解明など、他の研究項目や公募研究とも緊密に連携しながら極めて挑戦的な研究をほぼ計画通りに行い、数々の重要な成果をあげ、*Nature Com.* 誌や *Sci. Rep.* 誌、その他国際誌において公表した。

(3) 研究項目 A03 : 物理観測

本研究項目では、核-マントル境界領域や内核の不均質構造に注目した地震観測データ及び電磁気データの取得、実測データに基づく地殻の岩石化学組成のモデル化を通じた地球ニュートリノ流量モデリング、地球ニュートリノの観測データ蓄積及び到来方向を検知できる検出器の基礎開発などを計画した。外核上部及び下部の不均質性の観測やその形成過程の推定、西太平洋直下マントル最下部において、約 300km の高空間分解能での不均質構造の推定やコンダクタンスが $10^8 \sim 10^9 \text{S}$ の高電気伝導度帯の発見、また地震波トモグラフィのデータが得られればほぼ自動的にニュートリノ流量が計算可能な方法の開発、模擬粒子を用いた到来方向検知型検出器の原理検証の成功など、当初の計画通りに研究を進め、成果を *Nature* 誌、*Nature Geo.* 誌、

Science 誌、Sci. Adv. 誌などに出版した。その他の顕著な成果として、タイ・マヒドン大との大規模国際共同研究により、タイに地震観測アレイを設置したほか、研究項目 A02 との共同研究が発展した結果、JAMSTEC と連携して海洋底地球ニュートリノ観測機開発のための共同研究体制が構築された。

(4) 研究項目 A04 : 理論計算

本研究項目は、第一原理計算と連続体シミュレーションの2つの手法を柱として、実験グループに対し理論的予察や検証を提供するするとともに観測グループが取得する観測データの解釈や地球深部の主要な境界層領域の形成・進化プロセスのモデル化を計画した。マントル深部温度圧力条件における主要地球深部物質の熱弾性特性、熱伝導率、原子拡散係数、元素分配や同位体分別の計算に必要な第一原理計算コード群を開発した他、揮発性成分や軽元素成分を考慮したマントル対流計算及びダイナモ計算コードを開発した。これにより下部マントルの平均化学組成、下部マントル深部で安定な新たな高压含水鉱物の発見、下部マントルにおける始原物質リザーバーの力学的安定性、内核の粘性率などの成果を、Nature 誌、Nature Geo. 誌、Nature Comm. 誌、Sci. Adv. 誌、Sci. Rep. 誌等において公表した他、マントル中の含水量の時間発展や核-マントルの熱化学的相互作用による核の不均質構造の形成機構などについて国際誌に発表するなど、ほぼ当初の計画通りに研究を進めた。

(5) 研究項目 B01 : 統合解析(公募研究)

本研究項目は、領域の複数の計画研究との連携によって成し遂げられる融合研究を実施し、領域を補強することを目的とした公募研究からなる。100 万気圧を超える圧力下での核-マントル物質の融解実験手法の開発や水素同位体の高精度分析手法の開発などを行い、それらの手法を複数のグループが活用したり、得られた結果を計画研究と連携して解析することで、異なる研究分野間の有機的な連携とそれに基づく領域の補強を実施した。

(6) 研究項目 X00 : 総括班(計画研究の研究を統合して得られた、領域全体としての主な成果)

①核-マントルの物理的相互作用

・エネルギー輸送と外核の不均質構造: 超高压下で測定した六方最密型純鉄の電気抵抗 (Ohta et al., Nature, 2016) と、第一原理計算に基づく下部マントル鉱物 (ブリッジマナイト、ポスト・ペロブスカイト、フェロペリクレス) の格子熱伝導率 (Tsuchiya et al., Ann. Rev. Earth Planet Sci., 2020) を、核-マントル結合系シミュレーション (Takehiro and Sasaki, Front. Earth Sci., 2018) に当てはめると、外核最上部に軽元素濃度の低い熱的安定成層が形成されることが分かった。この低速度層は地震学的に観測される大きな速度勾配を持つ領域 (Kaneshima, PEPI, 2015) に対応するものと考えられ、核-マントルの熱的相互作用について統一的なモデルが得られた。

②核-マントルの化学的相互作用

・地球深部水: 第一原理計算及び高温高压実験により、マントル最下部まで安定な新たな高压含水鉱物相を発見し (Nishi et al., Nature, 2017)、従来水を多く含むことはないと考えられていた下部マントルも、沈み込んだ水を大量に貯水できる可能性があることを示した。その後、新たな高压含水相の安定性を考慮したマントル対流計算が行われ (Nakagawa et al., Prog. Earth Planet. Sci., 2018)、初期地球には現在の地球表層の海水量の最大 10 倍以上を持つ海洋が存在し、プレートテクトニクスによってほとんどの海水が下部マントルに沈み込み、現在の海水量となったという知見が得られた。

・始原物質: 代表的なホットスポット火山であるハワイ、ロイヒ火山、サモアの海洋島玄武岩に含まれるタングステンの同位体において、核-マントル相互作用の痕跡を示す顕著な負異常値が得られた (Takamasa et al., 2020; Suzuki et al., 準備中)。この結果は、ハワイプルームがマントル最下部において発生し上昇しているとする地震学からの知見と調和的である。また高压下での拡散実験から、タングステンは核からマントルへ浸透するのに十分な粒界拡散係数を有していることが分かり (Yoshino et al., EPSL, 2020)、タングステン同位体の負異常値の起源が核からのタングステンにより説明できることを示した。一方、タングステンと同様にロイヒ玄武岩に多く含まれるヘリウム-3 の鉄-ケイ酸塩間分配を第一原理計算により調べたところ、マントル最下部圧力において十分核に分配される程度の分配係数を有することが分かった (Xiong and Tsuchiya, 投稿中)。これらの結果は、ヘリウム-3 などの始原的同位体は核に貯蔵されており、核-マントル相互作用を通じてマントル、ひいては地表にもたらされていることを示唆する。

・熱源元素量: 地球ニュートリノ観測データの精度向上 (Watanabe et al., 準備中) と日本の地殻中に含まれる放射性元素量のモデル化 (Takeuchi et al., PEPI, 2019) を組み合わせることにより、マントル以深における放射性同位体の崩壊熱総量を約 20TW と見積もった。一方、第一原理計算により主要熱源元素であるカリウム-40 はウランやトリウムと同様、核に含まれないことが分かった (Xiong et al., JGR, 2018)。これにより従来大きな不確定性があったマントルの自己発熱量について約 20TW であると制約できた。

これら領域全体としての成果については、個々の原著論文とは別に取りまとめを行い、月刊地球総特集において邦文解説集として出版した他、米国地球物理学連合から英文書籍として出版する予定である (現在編集作業中)。

5. 主な発表論文等（受賞等を含む）論文はすべて査読有（計 561 件、内国際共著論文 291 件）
1. *Suzuki Y., Kawai K., Geller R., Tanaka S., 他 5 名 (2020) High-resolution 3-D S-velocity structure in the D'' region at the western margin of the Pacific LLSVP: evidence for small-scale plumes and paleoslabs. **Phys. Earth Planet. Int.**, in press.
 2. Takamasa A., *Suzuki K., Fukami Y., Iizuka T., 他 4 名 (2020) Improved method for highly precise and accurate $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ isotope measurements by multiple collector inductively-coupled plasma mass spectrometry and application for terrestrial samples. **Gochem. J.**, 54, 117-127.
 3. *Nishida K., Shibazaki Y., Terasaki H., Higo Y., Suzuki A., Funamori N., Hirose K. (2020) Effect of sulfur on sound velocity of liquid iron under Martian core conditions. **Nature Comm.**, 11, 1954.
 4. *Tsuchiya T., Tsuchiya J., Dekura H., Ritterbex S. (2020) Ab initio study on the lower mantle minerals. **Ann. Rev. Earth Planet. Sci.**, 48, 99-119.
 5. *Ritterbex S., Tsuchiya T. (2020) Viscosity of hcp iron at Earth's inner core conditions from density functional theory. **Sci. Rep.**, 10, 6311.
 6. *Yoshino T., 他 3 名 (2020) Grain boundary diffusion of W in lower mantle phase with implications for isotopic heterogeneity in oceanic island basalts by core-mantle interactions. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 530, 115887.
 7. *Takeuchi N., Ueki K., Iizuka T., Nagao J., Tanaka A., Enomoto S., Shirahata Y., Watanabe H., Yamano M., Tanaka H.K.M. (2019) Stochastic modeling of 3-D compositional distribution in the crust with Bayesian inference and application to geoneutrino observation in Japan. **Phys. Earth Planet. Int.**, 288, 37-57.
 8. *Takahashi F., Shimizu H., Tsunakawa H. (2019) Mercury's anomalous magnetic field caused by a symmetry-breaking self-regulating dynamo. **Nature Comm.**, 10, 208.
 9. *Nakajima A., Sakamaki T., Kawazoe T., Suzuki A. (2019) Hydrous magnesium-rich magma genesis at the top of the lower mantle. **Sci. Rep.**, 9, 7420.
 10. *Greaves S., Irifune T., Higo Y., Tange Y., Arimoto T., Liu Z., Yamada A. (2019) Sound velocity of CaSiO_3 perovskite suggests the presence of basaltic crust in the Earth's lower mantle. **Nature**, 565, 218-221.
 11. *Xiong Z., Tsuchiya T., Taniuchi T. (2018) Ab initio prediction of potassium partitioning into Earth's core. **J. Geophys. Res.**, 123, 6451-6458.
 12. *Sano-Furukawa A., 他 7 名 (2018) Direct observation of symmetrization of hydrogen bond in δ - AlOOH under mantle conditions using neutron diffraction. **Sci. Rep.**, 8, 15520.
 13. *Takehiro S., Sasaki Y. (2018) On destruction of a thermally stable layer by compositional convection in the Earth's outer core. **Front. Earth Sci.**, 6, 192.
 14. *Nishi M., Kuwayama Y., *Tsuchiya J., Tsuchiya T. (2017) The pyrite-type high-pressure form of FeOOH . **Nature**, 547, 205-208.
 15. *Ishikawa A., Suzuki K., 他 4 名 (2017) Rhenium-osmium isotopes and highly siderophile elements in ultramafic rocks from the Eoarchean Saglek Block, northern Labrador, Canada: implications for Archean mantle evolution. **Geochim. Cosmochim. Acta**, 216, 286-311.
 16. *Maeda F., Ohtani E., Kamada S., Sakamaki T., Hirao N., Ohishi Y. (2017) Diamond formation in the deep lower mantle: a high-pressure reaction of MgCO_3 and SiO_2 . **Sci. Rep.**, 7, 40602.
 17. *Ohta K., Kuwayama Y., Hirose K., Shimizu K., Ohishi Y. (2016) Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions. **Nature**, 534, 95-98.
 18. *Tsujino N., Nishihara Y., Yamazaki D., Seto Y., Higo Y., Takahashi E. (2016) Mantle dynamics inferred from the crystallographic preferred orientation of bridgmanite. **Nature**, 539, 81-84.
 19. *Irifune T., Kawakami K., Arimoto T., Ohfuji H., Kunimoto T., Shinmei T. (2016) Pressure-induced nano-crystallization of silicate garnets from glass. **Nature Comm.**, 7, 13753.
 20. *Ballmer M.D., Houser C., Hernlund J.W., Wentzcovitch R.M., Hirose K. (2016) Persistence of strong silica-enriched domains in the Earth's lower mantle. **Nature Geo.**, 10, 236-241.
 21. *Shimizu I. (17 番目), Watanabe H. (25 番目), Enomoto S. (40 番目), 他 35 名 (2016) Search for Majorana neutrino near the inverted mass hierarchy region with KamLAND-Zen. **Phys. Rev. Lett.**, 117, 082503.
 22. *Sakamaki T., 他 13 名 (2016) Constraints on Earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions. **Sci. Adv.**, 2, e1500802.
 23. *Ohta K., Ichimaru K., Einaga M., Kawaguchi S., Shimizu K., Matsuoka T., Hirao N., Ohishi Y. (2015) Phase boundary of hot dense fluid hydrogen. **Sci. Rep.**, 5, 16560.
 24. *Nakajima Y., Imada S., Hirose K., Komabayashi T., Ozawa H., Tateno S., Tsutsui S., Kuwayama Y., Baron A.Q.R. (2015) Carbon-depleted outer core revealed by sound velocity measurements of liquid iron-carbon alloy. **Nature Comm.**, 6, 8942.
 25. *Ballmer M.D., Schmerr N.C., Nakagawa T., Ritsema J. (2015) Compositional mantle layering revealed by slab stagnation at ~ 1000 km depth. **Sci. Adv.**, 1, e1500815.
 26. *Wang X., *Tsuchiya T., Hase A. (2015) Computational support for a pyrolytic lower mantle containing ferric iron. **Nature Geo.**, 8, 556-559.
- 受賞等（計 30 件、内国際賞 12 件、学生の優秀発表賞等は除く）
1. 土屋卓久、日本高圧力学会賞、日本高圧力学会（2019 年 10 月）
 2. 野村龍一、ドーンボス記念賞、International Union of Geodesy and Geophysics（2018 年 7 月）
 3. 土屋卓久、地球惑星科学振興西田賞、日本地球惑星科学連合（2017 年 5 月）
 4. 川勝均、Beno Gutenberg Medal、European Geophysical Union（2017 年 4 月）
 5. 入船徹男、Robert Wilhelm Bunsen Medal、European Geophysical Union（2015 年 11 月）