

令和2年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「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～」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2年6月

領域代表者 愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授・土屋 卓久

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額	5
4 研究領域の目的及び概要	6
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	8
6 研究目的の達成度及び主な成果	10
7 研究発表の状況	15
8 研究組織の連携体制	20
9 研究費の使用状況	21
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	23
11 若手研究者の育成に関する取組実績	24
12 総括班評価者による評価	25

研究組織

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	15H05826 「核-マントルの相互作用と共進化」の推進と支援	平成27年度 ～ 令和元年度	土屋 卓久	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授	9
Y00 国	15K21712 「核-マントルの相互作用と共進化」の国際活動支援	平成27年度 ～ 令和元年度	土屋 卓久	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授	9
A01-1 計	15H05827 核-マントル物質の動的挙動	平成27年度 ～ 令和元年度	芳野 極	岡山大学・惑星物質研究所・教授	6
A01-2 計	15H05828 核-マントル物質の構造と物性	平成27年度 ～ 令和元年度	鈴木 昭夫	東北大学・理学研究科・准教授	8
A01-3 計	15H05829 核-マントル物質の精密高压実験技術の開発	平成27年度 ～ 令和元年度	入船 徹男	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授	6
A02-1 計	15H05830 同位体から制約する核-マントルの共進化	平成27年度 ～ 令和元年度	鈴木 勝彦	海洋研究開発機構・海洋機能利用部門(海底資源センター)・センター長	6
A02-2 計	15H05831 元素分配から制約する核-マントルの相互作用	平成27年度 ～ 令和元年度	M. Satish-Kumar	新潟大学・自然科学系・教授	6
A03-1 計	15H05832 核-マントルの地震・電磁気観測	平成27年度 ～ 令和元年度	田中 聡	海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・グループリーダー	11
A03-2 計	15H05833 ニュートリノ観測から制約する核-マントルの化学組成	平成27年度 ～ 令和元年度	田中 宏幸	東京大学・地震研究所・教授	7
A04-1 計	15H05834 核-マントル物質とダイナミクスの理論モデリング	平成27年度 ～ 令和元年度	土屋 卓久	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授	7

総括班・総括班以外の計画研究 計 10 件 (廃止を含む)

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数 (辞退又は削除した者を除く。)

2 公募研究

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	16H01119 ハイパワーレーザー衝撃圧縮を用いた溶融鉄合金の輸送特性解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	尾崎 典雅	大阪大学・工学研究科・准教授	1
A01 公	16H01122 下部マントル条件下におけるブリッジマナイトの結晶方位定向配列に関する実験的研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	大内 智博	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・講師	1
A02 公	16H01113 超高感度レーザー希ガス局所分析から制約する核-マントル共進化	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	角野 浩史	東京大学・総合文化研究科・准教授	1
A02 公	16H01115 従来手法を統合した下部マントルにおける融解現象の理解	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	新名 良介	東京工業大学・地球生命研究所・特任助教	1
A02 公	16H01123 マントル 3 5 億年の熱・化学進化解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	木村 純一	海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・分野長代理	1
A03 公	16H01116 地磁気データで明らかにする核-マントル結合の時空間変動	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	松島 政貴	東京工業大学・理工学研究科・助教	1
A03 公	16H01121 地球自由振動の解析による核-マントル境界領域と内核の構造に関する研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	須田 直樹	広島大学・理学系・教授	1
A03 公	16H01124 CMB における局所超低速度異常領域のグローバルマッピング	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	大林 政行	海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員	1
A04 公	16H01117 核マントル境界直下の安定成層の形成および破壊に関する流体力学的研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	竹広 真一	京都大学・数理解析研究所・准教授	1
B01 公	16H01112 地球内核の組成と異方性の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	坂巻 竜也	東北大学・理学研究科・助教	1
B01 公	16H01114 ニュートリノ振動を用いた地球深部の化学組成構造の測定	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	武多 昭道	東京大学・地震研究所・助教	1
B01 公	16H01118 二次イオン質量分析法とイオン注入法の融合による元素定量分析法の開発	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	伊藤 正一	京都大学・理学研究科・准教授	1

A01 公	18H04368 ハイパワーレーザーショックとX F E Lを用いた溶融鉄合金の総合 的理解	平成 30 年度 ～ 令和元年度	尾崎 典雅	大阪大学・工学研究科・准 教授	1
A01 公	18H04369 下部マントルでの二相系のレオロ ジーの制約：多様な粘性率構造の 解明に向けて	平成 30 年度 ～ 令和元年度	辻野 典秀	岡山大学・惑星物質研究所・ 助手	1
A01 公	18H04370 回転式ダイヤモンドアンビル装置 による沈み込んだスラブ内レオロ ジーの検証	平成 30 年度 ～ 令和元年度	東 真太郎	東京工業大学・理学院・助 教	1
A02 公	18H04365 高温高压実験と超高感度希ガス分 析から制約する地球内部始源的リ ザーバーの在処	平成 30 年度 ～ 令和元年度	角野 浩史	東京大学・総合文化研究 科・准教授	1
A02 公	18H04372 マントル 3 5 億年の水・化学・熱 進化解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	木村 純一	海洋研究開発機構・海域地 震火山部門(火山・地球内部 研究センター)・シニアスタ ッフ	1
A03 公	18H04373 波形インバージョンによる CMB 局所異常解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大林 政行	海洋研究開発機構・海域地 震火山部門(火山・地球内部 研究センター)・主任研究員	1
A04 公	18H04371 軽元素の含有による液体鉄合金の 輸送特性変化に関する第一原理的 研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大村 訓史	広島工業大学・工学部・准 教授	1
B01 公	18H04366 高速 2 次元測温法から探る核マン トル物質の融解現象	平成 30 年度 ～ 令和元年度	新名 良介	明治大学・理工学部・専任 准教授	1
B01 公	18H04367 二次イオン質量分析法とイオン注 入法を融合した軽元素定量分析及 び同位体比分析	平成 30 年度 ～ 令和元年度	伊藤 正一	京都大学・理学研究科・准 教授	1

公募研究 計 21 件 (廃止を含む)

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数 (辞退又は削除した者を除く。)

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

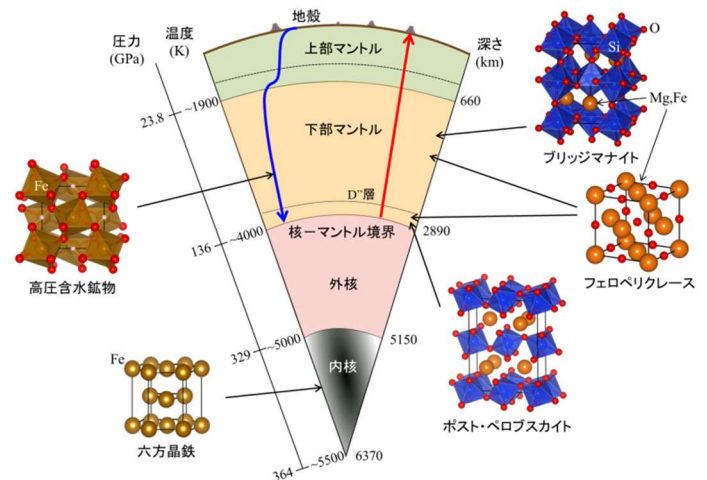
年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	335,010,000 円	257,700,000 円	77,310,000 円
平成 28 年度	318,630,000 円	245,100,000 円	73,530,000 円
平成 29 年度	316,030,000 円	243,100,000 円	72,930,000 円
平成 30 年度	289,120,000 円	222,400,000 円	66,720,000 円
令和元年度	253,630,000 円	195,100,000 円	58,530,000 円
合計	1,512,420,000 円	1,163,400,000 円	349,020,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

研究領域の研究目的

岩石からなるマント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(右図)。地球全体の体積の8割を占めるマントルの化学組成と、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。核とマントルの境界層領域は、地震学により活発なマント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。マントル対流を駆動する熱源は核からマントルに伝導する熱と、マント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ト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と量は分かっておらず、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、核とマント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-マント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、高压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。

全体構想

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、国内外の追随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。一方で、高度な超高压技術を応用して世界最硬ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)の開発に成功し(Irifune et al., Nature, 2003)、その次世代超高压実験への応用に向けた独創的取り組みも行われている。

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(Tschiya et al., PRL, 2006; Tschiya and Tschiya, 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。実験および理論両面において、高压地球科学の研究者が我が国の地球科学の中で卓抜した成果をあげていることは、地球惑星科学分野でグローバルCOE拠点に選出された2つの拠点の代表者、及

び地球科学分野で唯一の世界トップレベル研究拠点（WPI）の代表者が、いずれも高圧地球科学分野の研究者であることにも表れている。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）。

本研究領域は、地球惑星科学の各分野（固体地球惑星物理学、岩石鉱物鉱床学、地球宇宙化学）に属する我が国のトップレベルの研究者が連携・協働し、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）先進的な高圧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元素の挙動や同位体組成に基づく時間軸の情報や、（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-マントルの共進化を明らかにする。これにより、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。

我が国の地球深部研究分野では、主に高圧実験分野と地震学を始めとした地球物理学分野との連携により、地球深部の構造と物質に関して世界を先導する成果をあげてきた。また、第一原理計算に基づく独自の数値計算技術は、実験では到達不可能な超高压領域での地球物質の結晶構造や物性の定量的予測を可能にした。一方、地球化学分野では、高度な微小領域分析技術を発展させることにより、核とマントルの相互作用に係わる分析データが蓄積されている。更に最近では、放射光を組み合わせた高压下でのレオロジー等、物性精密測定実験技術が大きく発展し、また第一原理計算により高温高压下での熱伝導度・拡散係数の定量的予測が可能になるなど、地球深部物質の動的挙動に関する実験・数値計算技術が急速に進歩している。

海外に目を転じると、地球深部科学の組織的推進は、米国では高圧物質科学コンソーシアム（COMPRES）が形成され、放射光実験施設・中性子実験施設におけるビームラインの高度化や実験技術の共有などにより、グループ全体の研究活動の底上げを行いつつ進められてきた。ヨーロッパでは EU Access to Research Infrastructures Programme などのプログラムにより、大型施設の共同利用研究が精力的に行われている。しかし、これらの連携組織は必ずしも明確な研究ターゲットを持つものでなく、また分野の垣根を超えた統合的な領域形成を目指すものでもない。一方で本領域では、高圧地球科学分野のみならず、多様な分野の研究者が参画することで、国際的に例のない幅広い学際的研究組織により、核とマントルの相互作用と共進化を軸に研究を推進し、新たな統合的学術領域を創成することを目指している。

本領域は従来の地球科学研究の枠を超えた広がりを持ち、地球科学の新たな潮流を創成する点で、我が国の特徴ある学術研究の更なる発展・強化に大きく貢献する。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は、固体地球の大部分を占めるマントルと核の理解が不可欠である。我が国が世界を先導する実験・数値高圧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・協働による本領域の推進により、これらの解明が可能になるとともに、将来的には地球深部のみならず表層環境の変遷、ひいては全地球の長期的未来予測にも繋がるような、重要な基礎的研究が大きく進展すると考えられる。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

・領域代表者には領域全体をまとめ、学際的な研究を進めるための工夫が求められる。(指摘事項)

[対応] 異なる分野から70名を超える研究者が参画する本領域では、領域全体の研究目的をメンバー全員が共有するなど領域内の一体感の醸成が、研究目的を達成するために極めて重要となる。そこで領域内のネットワークやコミュニケーションの緊密化を目的として、毎月一回メールニュース配信を行い領域内の情報交換を緊密に行った他、領域全体での成果発表会において領域の方針を周知徹底するとともに、学会での特別セッションや夏の学校・冬の学校などを開催し、領域が目指す分野間連携による学際研究を強く奨励した。さらに成果発表会だけでなく、各計画研究が行う班会議や複数の計画研究や公募研究が合同して行う合同班会議にも領域代表者が出席し、計画研究代表者とともに全体計画に対する各計画研究の進行状況の確認や計画研究間の調整を行った。これらを通じて領域の連帯感が大きく向上した結果、高圧地球科学と地震学分野の従来への連携に加え、高圧地球科学分野と地球化学分野、高圧地球科学分野とニュートリノ分野、地震学分野と地球化学分野の連携が徐々に開始された。融合研究論文数も順調に増加し、新たな研究領域の開拓が着実に進んだと考えている。

・ニュートリノ班の研究計画の見直しが必要である。(留意事項)

[対応] 計画研究A03-2ニュートリノ観測班の「到来方向検知型ニュートリノ検出器開発」の研究テーマにおいて、当初計画では平成29年度以降開発することになっていた中型検出器の開発を取りやめ、大型化に適した撮像デバイスを用いて多角的に小型検出器をテストし、疑似ニュートリノ信号(中性子線)の3次元撮像を実現することで将来のKamLAND実装に向けたノウハウを蓄積することを目的とした研究に注力することとした。当初計画の目的は「将来の地球ニュートリノイメージングに向けて、ニュートリノの到来方向決定精度を中性子反応点の画像化を行うことで、実験的に決定する」ことにあり、中型検出器の開発を取りやめても、上記目的を達成することが可能である。

また、本計画研究では到来方向検知型検出器の開発だけではなく、地殻モデリングを通じたマントルニュートリノフラックスの解析も行っている。KamLANDのデータ蓄積量も増加し、その結果は領域全体の推進にも大きく貢献すると期待されるため、研究期間内で他の計画研究との融合がより可能である。それらの研究により注力するよう研究計画を修正する。本変更は当初のメンバーで十分に対応可能であるため、組織変更等の大幅な計画変更は行わない。

・地球システム進化モデルの構築に向けた体制強化の検討が必要である。(留意事項)

[対応] 日本国内で地球内部のグローバルシステムをモデル化できる研究者は少なく、アメリカやヨーロッパに比べ遅れている面がある。この指摘への対応を通じて我が国においてこの研究分野を強化することも、本領域が果たすべき役割の一つと考えている。この指摘を受け、計画研究A04-1理論計算班において核-マントル結合系のダイナミクスを専門的に研究している研究者1名(中川)を新たに研究分担者に加えると同時に、核ダイナミクスの研究を公募研究において2件採択(松島・竹広)し、地球内部の熱進化とこれに付随する化学進化に関する研究体制の強化を行った。さらに、公募研究において、時間軸を強く意識した地球深部ダイナミクス研究課題を採択し(木村)、地球化学的側面からの進化モデル研究の強化を行った。また国際活動支援班とも共同してマントル、核のダイナミクスを専門とする海外著名研究者であるP. Tackley教授(スイス工科大)やB. Buffett教授(UC Berkeley)のグループとの連携を強化し、従来から行ってきた国際共同研究を拡充するとともに、研究、教育の両面から本領域の推進に協力を得ることとした。これらの対応策の他、キックオフシンポジウムや成果発表会を通じて、本領域の問題設定が地球深部の現在の姿を解明することだけにとどまらず、核とマントルの相互作用を介した不均質性の形成や進化の過程の解明にあることを領域メンバー全員に周知し、地球史を通じた時間スケールを意識した研究を行う方針を徹底した。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

・研究項目 A02 について他の研究項目とのつながりが少し弱い印象がある。研究項目 A04 との連携などを通して、地球の進化過程解明に必要な幅広い時間軸に対応した元素・同位体分別についての詳細な情報を提供できるよう期待する。(留意事項)

[対応] 研究項目 A02 は当初、個別に行われており他研究項目との連携が弱い印象があったが、A02 が中心となり複数研究項目が参加した合同研究集会の開催や、成果発表会、学会特別セッションなどにおいて領域の研究方針と目的意識の共有を促した結果、現在では数々の共同研究が展開され、本領域の独創性を特徴づける基軸分野の一つに位置付けられる状況となった。特に核-マンツルの化学的相互作用、始原物質・揮発性元素分布、核形成に伴う化学進化、初期地球イベントの時期・有無などについて、研究項目 A03 及び A04 との連携が進み重要な成果が得られている。また、この指摘にさらに対応するため、天然岩石試料の動態分析を専門とする研究分担者を 1 名(石川)追加し、共進化にかかわる時間軸に関する研究を進め、マンツルオーバーターンの時期などについて新たな知見を得た。

・研究項目 A03 の電気伝導度構造は興味深いテーマであるがその観測可能性についての評価は十分に説明されておらず、また、電磁気観測の位置づけや意義が不明瞭であるため改善が望まれる。(留意事項)

[対応] マンツル深部の電気伝導度分布は、ある地域のみに見れた地球磁場の急変(ローカル地磁気ジャークと呼ばれる現象)を、地球磁場と地球電場を同時に用いて推定する。ただし、この現象は数年から十数年に一度の頻度でしか発生しないので、新規の観測で確実に捕捉するのは困難である。そこで、本研究計画では衛星によって観測された 2003 年と 2007 年の南大西洋で発生した地磁気ジャークに関連した電磁場を用いた。解析の結果、南大西洋からアフリカの直下のマンツル最下部に高電気伝導度の領域が存在することを明らかにした。この高電気伝導度領域は、地震学的に見出された大規模地震波低速度領域の西端に位置し、その解釈から物質と状態について制限を与えうるものであることが期待される。また、太平洋地域においてはこのようなローカル地磁気ジャークはこれまで観測されたことがなく、太平洋と大西洋直下のマンツルの物性の違いを反映している可能性があり、下部マンツルでは degree 2 のパターンが卓越するという地球深部科学の常識に新たな視点を加えるという意義を持つ。さらに、古地磁気分野からの寄与も考慮すべきであるという所見を重要と受け止め、研究項目 A03 に古地磁気学の専門家 1 名(山本)を研究分担者として追加し、研究組織を強化した。

・地球深部物質の物性把握に重要となる高エネ研(KEK)の放射光実験でのビームタイム確保が懸念事項として記されているが、共進化プロセス解明への優先度を考慮し迅速な対応を期待する。(参考意見)

[対応] 地球深部物質の物性把握のために D111 型ガイドブロックを KEK の PF-AR に導入したが、経費削減のために KEK の放射光実験設備の運転時間の削減や、PF-AR はこれまでの 6.5GeV から 5GeV 運転への変更が検討された。しかし、本領域で計画している大容量プレスの実験には、高エネルギーにおける高いフラックスが必要であるため、5GeV 運転に変更された場合には全く成果が得られなくなってしまう。そこで本プロジェクトが世界的に唯一のユニークさを持っていることを施設側に主張した結果、5GeV と 6.5GeV 運転が併用されることになり、当該研究の D111 型ガイドブロックを用いた実験課題が優先的に利用できるよう配慮された。またそのビームタイム配分は、D111 型高圧変形装置を用いた実験など他の放射光施設にはない PF-AR の特徴を重視し、傾斜配分された。施設側へ要望した結果、実験成果を得るために最低限のビームタイムは確保することができた。

・積極的なアウトリーチ活動を行っているが、SNS などを通じて実験やセミナー映像を発信することも効果的と思われる。

[対応] ニュースレター(年 2 回)、メールニュース(月 1 回)、プレスリリース、一般普及講演会、中高生向けの授業などのアウトリーチ活動の積極的な実施に加え、所見に従って SNS についても更新頻度を高め積極的な活用を行った。その結果、一般からの投稿やアクセスが大きく増加した。また SNS を見て領域主催の研究集会に参加したという大学院生や学会ブースへのリピーターの親子が現れるなど、大きな効果が得られた。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

研究項目 A01 物性測定 本研究項目では、核-マントル物質の高圧物性に関し、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。

研究項目 A02 化学分析 本計画項目では、高圧下での元素・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圧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-金属鉄間での高圧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。

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。

研究項目 A04 理論計算 本研究項目では、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圧含水鉱物の発見、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

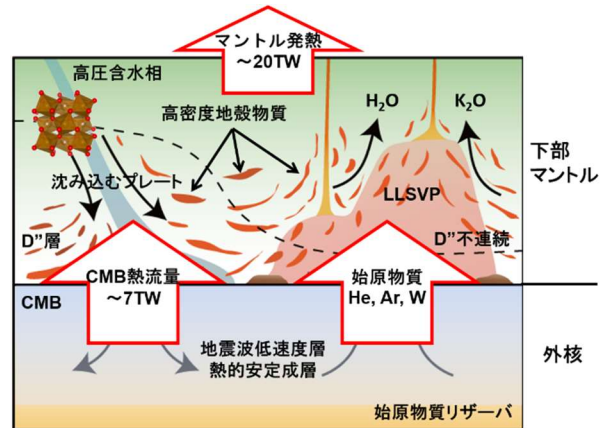
均質構造の形成機構などについて国際誌に発表するなど、ほぼ当初の計画通りに研究を進めた。

研究項目 B01 統合解析 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、当初の計画通りに有機的な連携研究とそれに基づく領域の補強を実施することができた。

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 (下図参照))

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、フェロペリクレーズ) 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、ハワイブ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実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)。このように総括班の研究についてもおおむね計画通りに達成できたと考えている。

(2) 本研究により得られた成果

*特記ない場合、公募Aは所属研究項目内において、公募Bは領域全体において共同研究を実施

研究項目 A01 物性測定

A01-1 (計画・芳野)・核-マントル相互作用による海洋島玄武岩の W 同位体進化を提案 (A03-1 との共同研究) : 下部マントル物質におけるタングステン(W)の大きな粒界拡散係数を測定し、海洋島玄武岩で観測される負の W 同位体比異常が核-マントル相互作用により生じている可能性を示唆した (図 1) (Yoshino et al., EPSL, 2020)。

- ・純鉄の電気抵抗率測定から外核の大きな熱伝導率を提案 : 外核に相当する温度圧力条件で六方最密充填構造の純鉄の電気抵抗率の測定に世界に先駆けて成功し、外核の大きな伝導熱流量を推定した(Ohta et al., Nature, 2016)。

- ・下部マントルにおける沈み込んだスラブの流動様式の解明 (A01-3 との共同研究) : 下部マントル条件下で下部マントルの主要鉱物であるブリッジマナイトの変形実験に成功し、沈み込んだスラブの流動パターンを推定した (図 2) (Tsuchino et al., Nature, 2016)。

A01-2 (計画・鈴木昭)・高圧含水鉱物の相平衡 : 高密度含水相である AlOOH-FeOOH 系の相平衡および X 線回折実験を高温高圧下で行い、これらの固溶体が地球深部への水輸送に重要な役割を担うことを示した(Ohira et al., Am. Min., 2019; Xu et al., Am. Min., 2019)。

- ・惑星核の組成 : 鉄合金液体の密度と弾性波速度を高温高圧下で測定し、惑星核の化学組成を制約した(Terasaki et al., JGR, 2019)。

A01-3 (計画・入船)・下部マントル領域での精密弾性波速度測定 : 超高压下での高品質多結晶焼結体技術(Irifune et al., Nature Comm., 2016)と超音波測定技術を組み合わせ、従来困難であった CaSiO_3 ペロブスカイトの弾性波速度測定に成功し、下部マントル最上部における不均質 (図 3) に関する知見を得た(Greaux et al., Nature, 2019)。

- ・ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) の多様な応用 (A02-2 との共同研究) : 独自に開発した NPD を使い、回転式ダイヤモンドアンビル装置など従来の限界を打破する新たな超高压技術の開発に成功し、最下部マントル・核物質の構造・物性測定への新たな道を拓いた(例えば Nomura et al., Rev. Sci. Inst., 2017)。

A01 (公募・尾崎)・250GPa までの熔融液体鉄合金状態の生成 : レーザーショック超高压実験を実施し、250GPa までの熔融液体鉄及び鉄合金の状態を生成することに成功した。

A01 (公募・大内)・D-DIA 型変形装置における高压発生 : D-DIA 型変形装置にて用いるアンビルの超硬部をジャケット材で補強するにより、圧力発生効率を維持しつつ耐荷重性能を向上させ、24GPa の圧力発生に成功した(Ohuchi et al., Nature Geo., 2017)。

A01 (公募・辻野)・ポスト・スピネル相の流動則の決定 : ポスト・スピネル相のせん断変形実験を行い、歪量が 1.2 まではブリッジナイトがフレーム枠を作り全体の応力を支えることを明らかにした。

A01 (公募・東)・下部マントルの流動特性 : 新しく開発した回転式ダイヤモンドアンビル装置を用いて、下部マントル物質の変形実験を行い、歪-応力曲線を取得した。歪が大きくなるにつれ、ブリッジナイトの流動強度が減少し、フェロペリクレースに近づく様が観察された(Azuma et al., 投稿中)。

研究項目 A02 化学分析

A02-1 (計画・鈴木勝)・核-マントル相互作用の痕跡を検知 (A01-1、A04-1 との共同研究) : アファールプルーム活動に起因するエチオピアの玄武岩、その影響を受けているアデン湾の海嶺玄武岩において ^{182}W の負の異常を発見した。これはアファールプルームが核-マントル境界を起源とし、核の物質を含んでいることを示唆する(Suzuki et al., 準備中)。

- ・43 億年前のカナダ Acasta 変成岩のオスミウム同位体比によるマントルの初期進化の制約 : 岩石とし

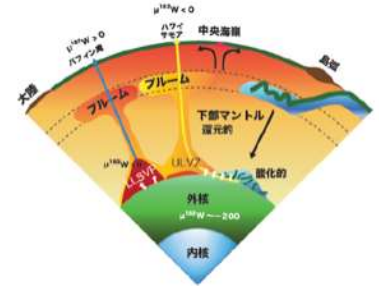


図 1 核-マントル相互作用による W 同位体進化の模式図

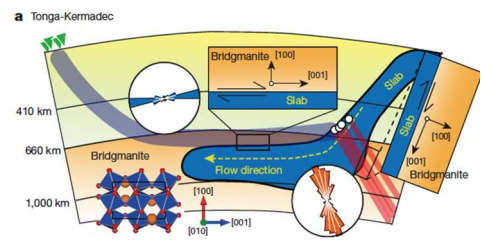


図 2 トンガケルマディックスラブ近傍の地球マントルの内部構造の模式図

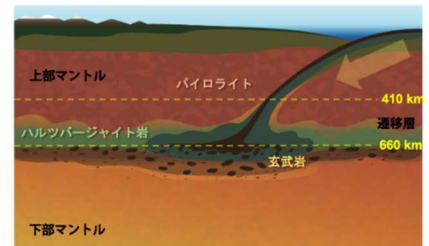


図 3 弾性波速度に基づく下部マントル上部の不均質構造モデル

て最古の年代を示すカナダ Acasta 変成岩に含まれる極微量の Os の分析に成功し、高い同位体比から約 43 億年前にはまだ隕石の後期重爆撃が起きていなかった可能性を指摘した。また太古代後期に再度マントル中の白金族元素濃度が上昇していることから、マントルオーバートーンにより核-マントル境界付近から白金族元素が上昇した可能性を指摘した(Ishikawa et al., GCA, 2017; 準備中)。

・高圧下での 3 次元「化学的」イメージング：特性 X 線エネルギーを利用して数十ナノメートルの空間分解能での 3 次元「化学的」イメージングを実現した。これによりマントル最深部の流動変形に伴う同位体プロセス解明に向けた実験研究が初めて可能になった(Nomura and Uesugi, Rev. Sci. Inst., 2016)。

A02-2 (計画・Satish)・下部マントルにおける炭素循環 (A01-2、A04-1 との共同研究)：マグネサイトと石英の高温高圧実験により沈み込む冷たいスラブ由来の超深部ダイヤモンドの存在が明らかになった(Maeda et al., Sci. Rep., 2017)。

・核に含まれる軽元素 (A04-1 との共同研究)：現在の核とマントル中に存在するケイ素及び酸素フガシティを再現するためには、ケイ素と硫黄はそれぞれ 2.1~7.4wt%、6.1~2.3wt%必要であることが分かった(Mori et al., EPSL, 2017)。

A02 (公募・角野)・金属-ケイ酸塩メルト間の希ガス分配 (A04-1 との共同研究)：マルチアンビル装置を用いて鉄とケイ酸塩に希ガスを分配させ、顕微レーザーアブレーション装置と超高感度質量分析計により回収試料中の希ガス濃度を測定し、8GPa まで熔融鉄-ケイ酸塩間の希ガスの分配係数を決定した (図 4)。

A02 (公募・木村)・35 億年間のマントル化学分化：岩石の化学組成と岩石学モデルを用い、海嶺と沈み込み帯火成作用とマントル化学分化を検討し、35 億年間のマントル冷却史、枯渇・富化マントルの成因について包括的な描像を提唱した。

研究項目 A03 物理観測

A03-1 (計画・田中聡)・西太平洋直下マントル最下部の微細構造 (A04-1 との共同研究)：タイにおける臨時地震観測網と周辺の既存観測網のデータを統合して西太平洋下マントル最下部の地震波速度構造を推定し、沈み込んだプレートと小規模な上昇流の混在を解明した (図 5) (Suzuki et al., 印刷中)。

・内核半球的不均質構造の境界の解明：北米・欧州の既存地震観測網やタイの臨時観測網のデータを解析し、内核半球の構造境界の広い遷移幅や、北極地域が西半球側に属することを明らかにした (Iritani et al., EPSL, 2019; Ohtaki et al., 投稿中)。

・外核最下部の地震波速度勾配の解明 (A04-1 との共同研究)：外核最下部の新たな速度構造推定法を開発し日本の稠密地震観測網データに適用した結果、外核最下部に速度不均質性が存在することがわかった(Ohtaki and Kaneshima, JGR, 2015; Ohtaki et al., JGR, 2018)。

A03-2 (計画・田中宏)・客観的地球ニュートリノ流量の導出：日本列島に存在する岩石種を網羅する岩石化学組成データベースを構築し、深部岩相や岩石組成などすべてを確率分布関数として表現することによって、客観的地球ニュートリノ流量を導出した(Takeuchi et al., PEPI, 2019)。

・地球反ニュートリノ観測値の確度向上：検出器が有する光電子増倍管の個体差の補正、データ取得効率の評価、原子炉ニュートリノスペクトルの予測精度の向上により、世界で初めて不定性 20%を下回る地球反ニュートリノを観測した(Watanabe et al., 準備中)。

A03 (公募・松島)・外核内の流れの推定方法を改良：外核内の流れを推定するために整備された地磁気モデルを用いて外核内の流れを計算した。地磁気永年変化の相関から、流れの推定方法が改良されたことを確認した。

A03 (公募・須田)・自由振動モード解析による核-マントル境界構造：地球自由振動のモードごとに定

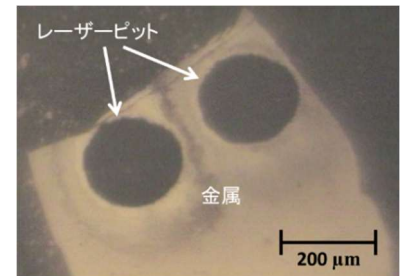


図 4 アルゴンを溶かした金属にレーザーで開けた穴

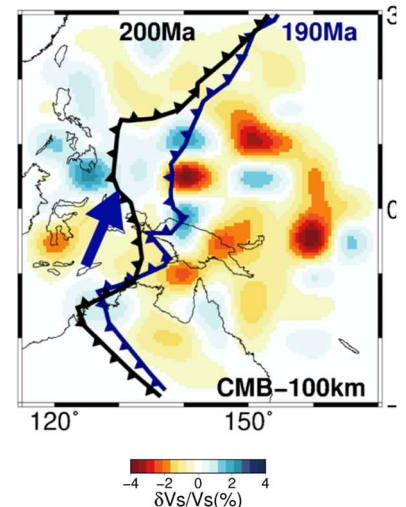


図 5 西太平洋直下マントル最下部の S 波速度不均質構造

まる核-マントル境界付近の構造に関するパラメータを求めるためのインバージョンを、モード間の干渉を扱いながら実行するソフトウェアを開発した。

A03 (公募・大林)・可能な限りの広帯域大量地震波形データ処理：太平洋 LLSVP の北西端に ScS 波 SKS 波が通過するデータを収集し、約 10 秒までの地震波形データを用いてインバージョンを実行して、マントル最下部の詳細な構造を求めた。

研究項目 A04 理論計算

A04-1 (計画・土屋)・内核の流動特性：内核条件 (330 万気圧、~5000°C) における hcp 鉄の粘性率の第一原理計算に成功し、内核の並進運動や差動回転が安定ではないことを示した(Ritterbex and Tsuchiya, Sci. Rep., 2020)。

・元素分配の第一原理計算 (A02-1、A02-2、A02 公募との共同研究)：熱力学積分法に基づく独自の自由エネルギー計算プログラムを開発し、核-マントル境界条件での鉄-ケイ酸塩間の元素分配の第一原理計算を可能にした(Xiong et al., JGR, 2018)。

・含水鉱物の新しい高圧相の発見 (A01-3 との共同研究)：下部マントル条件下で安定となる FeOOH の新しい高圧相 (図 6) を報告した(Nishi et al., Nature, 2017)。またマントルにおける水素の挙動を制約し、現在の海洋の約 10 倍の水を含む可能性を示した。

・下部マントルにおけるリザーバー (A03-1 との共同研究)：組成の違いによる粘性率の違いを考慮したマントル対流シミュレーションにより、大規模低速領域と沈み込み帯の間に、リザーバーの可能性のある安定領域が存在することを見出した (図 7) (Ballmer et al., Nature Geo., 2017)。

・下部マントル平均化学組成の特定：第一原理計算により下部マントル主要鉱物の高温高圧熱弾性特性を計算し、パイロライト組成が下部マントルの地震波速度をよく再現できることを示した(Wang et al., Nature Geo., 2015)。

A04 (公募・竹広)・外核上部安定成層の厚さ：外核内の熱組成対流が発生可能な領域を定量的に判断する基準として、浮力による仕事率を提案し、1 次元熱および組成収支モデルを用いて外核上部安定成層の厚さを見積もった(Takehiro and Sasaki, Front. Earth Sci., 2018)。

A04 (公募・大村)・鉄-軽元素合金液体の構造：第一原理計算により、「侵入型」軽元素の方が「置換型」に比べ、液体鉄の構造に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。また、液体鉄中で炭素-炭素は強く結びつくが、硫黄-硫黄は低濃度の場合斥力的な挙動を示すことが分かった(Ohmura et al., J. Phys. Cond. Mat., 2020)。

研究項目 B01 統合解析

B01 (公募・坂巻)・核圧力条件での鉄の縦波速度測定：X 線非弾性散乱とダイヤモンドアンビル高圧発生装置を組みわせることで 250 万気圧までの圧力条件下で鉄の縦波速度測定に成功し、密度と縦波速度の間の線形性を確認した(Sakamaki et al., Sci. Adv., 2016)。

B01 (公募・武多)・ニュートリノ振動を用いた下部マントル中の水分量測定：これまで用いてきた大気中で宇宙線により生成されるニュートリノに加えて、太陽から飛来するニュートリノを用いることで、測定感度を向上できることを確認した。

B01 (公募・伊藤)・同位体の定量分析：マントルを構成する固体物質の揮発性成分である水素や炭素の同位体分別係数、分配係数、核を構成する金属鉄の自己拡散係数の推定というテーマに特化した定量分析、同位体比分析の複数班の分析拠点として二次イオン質量分析法を応用した分析手法の開発を行った(Kuwahara et al., GRL, 2019; Kawasaki et al., GCA, 2017; Greenwood et al., Geochem. J., 2017)。

B01, A02 (公募・新名)・核-マントル物質の融解現象：新しい温度決定システムを構築し、主にダイヤモンドアンビルセルを用いた核及びマントル物質の融解現象を理解するための実験的研究を推進した(Ozawa et al., GRL, 2018; Tateno et al., Am. Min., 2018; Mori et al., EPSL, 2017)。

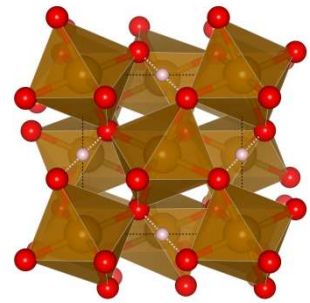


図 6 発見された新高圧含水相の結晶構造 (赤：酸素、茶色：鉄、ピンク：水素)

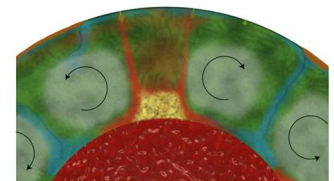


図 7 下部マントルのリザーバーである可能性のある領域 (灰色)

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

研究項目 A01 物性測定

A01-1 (計画・芳野) 計 66 件 (すべて査読有)

1. *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.
2. *Zhang B., Yoshino T., Zhao C. (2019) The effect of water on Fe-Mg interdiffusion rates in ringwoodite and implications for the electrical conductivity in the mantle transition zone. **J. Geophys. Res.**, 124, 2510-2524.
3. *Yoshino T., Jaseem V. (2018) Fluorine solubility in bridgmanite: a potential fluorine reservoir in the Earth's mantle. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 504, 106-114.
4. Nakakoji T., *Hiraga T., Nagao H., Ito S., Kano M. (2018) Diffusion creep and grain growth in forsterite +20 vol% enstatite aggregates: 1. High-resolution experiments and their data analyses. **J. Geophys. Res.**, 123, 9486-9512.
5. *Nishihara Y., 他 8 名 (2018) Deformation-induced crystallographic-preferred orientation of hcp-iron: An experimental study using a deformation-DIA apparatus. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 490, 151-160.
6. *Ohta K., Yagi T., Hirose K., Ohishi Y. (2017) Thermal conductivity of ferroperricite in the Earth's lower mantle. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 465, 29-37.
7. *Yoshino T., Kamada S., Zhao C., Ohtani E., Hirao N. (2016) Electrical conductivity model of Al-bearing bridgmanite with implications for the electrical structure of the Earth's lower mantle. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 434, 208-219.
8. *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.
9. *Tsuji 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.
10. *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.

A01-2 (計画・鈴木昭) 計 108 件 (すべて査読有)

1. *Nishida K., Shibasaki 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.
2. *Yamane R., Komatsu K., Maynard-Casely H.E., Lee S., Booth N., Kagi H. (2019) Search for a ferroelectrically ordered form of ice VII by neutron diffraction under high pressure and high electric field. **Phys. Rev. B**, 99, 174201.
3. *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.
4. *Shinozaki A., Komatsu K., Kagi H., Fujimoto C., Machida S., Sano-Furukawa A., Hattori T. (2018) Behavior of intermolecular interactions in α -glycine under high pressure. **J. Chem. Phys.**, 148, 044507.
5. *Ohashi T., Sakamaki T., Funakoshi K., Suzuki A. (2018) Pressure-induced structural changes of basaltic glass. **J. Mineral. Petrol. Sci.**, 113, 286-292.
6. *Ohnishi S., Kuwayama Y., Inoue T. (2017) Melting relations in the MgO-MgSiO₃ system up to 70 GPa. **Phys. Chem. Minerals**, 44, 445-453.
7. Maruyama K., *Kagi H., Komatsu K., Yoshino T., Nakano S. (2017) Pressure-induced phase transition of vaterite, a metastable phase of CaCO₃. **J. Raman Spectro.**, 48, 1449-1453.
8. *Klotz S., Komatsu K., Pietrucci F., Kagi H., Ludl A.-A., Machida S., Hattori T., Sano-Furukawa A., Bove L.E. (2016) Ice VII from aqueous salt solutions: From a glass to a crystal with broken H-bonds. **Sci. Rep.**, 6, 32040.
9. *Komatsu K., Kagi H. (7 番目) (2016) Partially ordered state of ice XV. **Sci. Rep.**, 6, 28920.
10. *Shimoyama Y., Terasaki H., 他 8 名 (2016) Thermoelastic properties of liquid Fe-C revealed by sound velocity and density measurements at high pressure. **J. Geophys. Res.**, 121, 7984-7995.

A01-3 (計画・入船) 計 107 件 (すべて査読有)

1. *Greaux S., Irifune T., Higo Y., Tange Y., Arimoto T., Liu Z., Yamada A. (2019) Sound velocity of CaSiO₃ perovskite suggests the presence of basaltic crust in the Earth's lower mantle. **Nature**, 565, 218-221.
2. *Zhou Y., Irifune T., Ohfuji H., Kuribayashi T. (2018) New high-pressure forms of Al₂SiO₅. **Geophys. Res. Lett.**, 45, 8167-8172.
3. *Kimura T., Ohfuji H., Nishi M., Irifune T. (2017) Melting temperatures of MgO under high pressure by micro-texture analysis. **Nature Comm.**, 8, 15735.
4. *Nomura R., Azuma S., Uesugi K., Nakashima Y., Irifune T., 他 4 名 (2017) High-pressure rotational deformation apparatus to 135 GPa. **Rev. Sci. Inst.**, 88, 044501.
5. *Yamazaki D., Tsujino N., Yoneda A., Ito E., Yoshino T., Tange Y., Higo, Y. (2017) Grain growth of ϵ -iron: Implications to grain size and its evolution in the Earth's inner core. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 459, 238-243.
6. *Ishimatsu N., Kawamura N., Mizumaki M., Maruyama H., Sumiya H., Irifune T. (2016) Applications of nano-polycrystalline diamond anvils to X-ray absorption spectroscopy under high pressure. **High Press. Res.**, 36, 381-390.
7. *Irifune T., 他 5 名 (2016) Pressure-induced nano-crystallization of silicate garnets from glass. **Nature Comm.**, 7, 13753.
8. *Dewaele A., Worth N., Pickard C.J., Needs R.J., Pascarelli S., Mathon O., Mezouar M., Irifune T. (2016) Xenon oxides

under pressure. **Nature Chem.**, 8, 784-90.

9. *Sakai T., Dekura H., Hirao N. (2015) Experimental and theoretical thermal equations of state of MgSiO₃ post-perovskite at multimegabar pressures. **Sci. Rep.**, 6, 22652.
10. *Iitaka T., Fukui H., Li Z., Hiraoka N., Irifune T. (2015) Pressure-induced dissociation of water molecules in ice VII. **Sci. Rep.**, 5, 12551.

A01 (公募・尾崎) 計 20 件 (すべて査読有)

1. *Mabey P., Ozaki N. (15 番目), 他 4 名 (2019) Laboratory study of stationary accretion shock relevant to astrophysical systems. **Sci. Rep.**, 9, 8157.
2. *Sekine T., Ozaki N., 他 10 名 (2016) Shock Compression Response of Forsterite above 250 GPa. **Sci. Adv.**, 2, e1600157.
3. *Denoeud A., Ozaki N., 他 19 名 (2016) Dynamic X-ray diffraction observation of shocked solid iron up to 170 GPa. **PNAS**, 113, 7745-7749.
4. *Ozaki N., 他 11 名 (2016) Dynamic compression of dense oxide (Gd₃Ga₅O₁₂) from 0.4 to 2.6 TPa: Universal Hugoniot of fluid metals. **Sci. Rep.**, 6, 26000.

A01 (公募・大内) 計 4 件 (すべて査読有)

1. *Ohuchi T., Lei X., Ohfuji H., Higo Y., Tange Y., Sakai T., Fujino K., Irifune T. (2017) Intermediate-depth earthquakes linked to localized heating in dunite and harzburgite. **Nat. Geosci.**, 10, 771-776.
2. *Ohuchi T., Kawazoe T., Higo Y., Suzuki A. (2017) Flow behavior and microstructures of hydrous olivine aggregates at upper mantle pressures and temperatures. **Contrib. Mineral. Petrol.**, 172, 65.
3. *Kawazoe T., Nishihara Y., Ohuchi T., 他 5 名 (2016) Creep strength of ringwoodite measured at pressure-temperature conditions of the lower part of the mantle transition zone using a deformation-DIA apparatus. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 454, 10-19.

A01 (公募・辻野) 計 7 件 (すべて査読有)

1. *Tsujino N., Marza A., Yamazaki D. (2020) Pressure dependence of Si diffusion in γ -Fe. **Am. Mineral.**, 105, 319-324.
2. *Tsujino N., Yoshino T., Yamazaki D., Sakurai M., Sun W., Xu F., Tange Y., Higo Y. (2019) Phase transition of wadsleyite-ringwoodite in the system Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄. **Am. Mineral.**, 104, 588-594.
3. *Ishii T., Tsujino N. (15 番目), 他 4 名 (2019) Sharp 660-km discontinuity controlled by extremely narrow binary post-spinel transition. **Nature Geo.**, 12, 869-872.
4. *Ishii T., Tsujino N. (14 番目), 他 4 名 (2018) Complete agreement of the post-spinel transition with the 660-km seismic discontinuity. **Sci. Rep.**, 8, 6358.

A01 (公募・東) 計 1 件 (すべて査読有)

1. *Katayama I., Matsuoka Y., Azuma S. (2019) Sensitivity of elastic thickness to water in the Martian lithosphere. **Prog. Earth Planet. Sci.**, 6, 51.

研究項目 A02 化学分析

A02-1 (計画・鈴木勝) 計 80 件 (すべて査読有)

1. Takamasa A., *Suzuki K., Fukami Y., Iizuka T., Tejada M.L.G., Fujisaki W., Orihashi Y., Matsumoto T. (2020) Improved method for highly precise and accurate ¹⁸²W/¹⁸⁴W isotope measurements by multiple collector inductively-coupled plasma mass spectrometry and application for terrestrial samples. **Gochem. J.**, 54, 117-127.
2. *Onoue T., Takahata N., Miura M., Sato H., Ishikawa A., Soda K., Sano Y., Isozaki Y. (2019) Enhanced flux of extraterrestrial ³He across the Permian-Triassic boundary. **Prog. Earth Planet. Sci.**, 6, 18.
3. *Fujiiya W., Hoppe P., Ushikubo T., Fukuda K., Lindgren P., Lee M.R., Koike M., Shirai K., Sano Y. (2019) Migration of D-type asteroids from the outer Solar System inferred from carbonate in meteorites. **Nature Astro.**, 3, 910-915.
4. *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.
5. *Azuma S., Nomura R., Uesugi K., Nakashima Y., Kojima Y., Doi S., Kakizawa S. (2017) Anvil design for slip-free high-pressure deformation experiments in a rotational diamond anvil cell. **High Press. Res.**, 38, 23-31.
6. *Ishikawa A., Suzuki K., Collerson K.D., Liu J., Pearson D.G., Komiya T. (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.
7. *Senda R., Shimizu K., Suzuki K. (2016) Ancient depleted mantle as a source of boninites in the Izu-Bonin-Mariana arc: Evidence from Os isotopes in Cr-spinel and magnetite. **Chem. Geol.**, 439, 110-119.
8. *Kato C., Hirose K., Nomura R., Ballmer M.D., Miyake A., Ohishi Y. (2016) Melting in the FeO-SiO₂ system to deep lower-mantle pressures: Implications for subducted Banded Iron Formations. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 440, 56-61.
9. *Nomura R., Uesugi K. (2016) High-pressure in situ X-ray laminography using diamond anvil cell. **Rev. Sci. Inst.**, 87, 046105.
10. *Sekine Y., Shibuya T., Postberg F., Hsu H.-W., Suzuki K., 他 7 名 (2015) High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments in the chondrite-like core of Enceladus. **Nature Comm.**, 6, 8604.

A02-2 (計画・Satish-Kumar) 計 47 件 (すべて査読有)

1. *Akizawa N., Früh-Green G.L., Tamura A., Tamura C., Morishita T. (2020) Compositional heterogeneity and melt transport in mantle beneath Mid-Atlantic Ridge constrained by peridotite, dunite, and wehrlite from Atlantis Massif. **Lithos**, 354-355, 105364.
2. *Higashino F., Satish-Kumar M. (4 番目), 他 4 名 (2019) Brine infiltration in the middle to lower crust in a collision zone: Mass transfer and microtexture development through wet grain-boundary diffusion. **J. Petrol.**, 60, 2, 329-358.
3. *Kamada S., 他 9 名 (2019) Elastic constants of single-crystal Pt measured up to 20 GPa based on inelastic X-ray scattering: Implication for the establishment of an equation of state. **Compt. Rend. Geosci.**, 351, 236-242.

4. *Nakamura Y., Toyoshima T., Satish-Kumar M. (2018) Microstructure and geochemical signatures of metasedimentary origin pseudotachylyte: Implications for fluid activity during paleoseismicity. **Tectonophys.**, 745, 170-182.
5. *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 MgCO₃ and SiO₂. **Sci. Rep.**, 7, 40602.
6. *Nakamura Y., Yoshino T., Satish-Kumar M. (2017) An experimental kinetic study on the structural evolution of natural carbonaceous material to graphite. **Am. Mineral.**, 102, 135-148.
7. Mori Y., Ozawa H., *Hirose K., Sinmyo R., Tateno S., Morard G., Ohishi Y. (2017) Melting experiments on Fe-Fe₃S system to 254 GPa. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 464, 135-141.
8. *Fukui H., Kamada S. (5 番目), 他 6 名 (2016) Effect of cation substitution on bridgmanite elasticity: A key to interpret seismic anomalies in the lower mantle. **Sci. Rep.**, 6, 33337.
9. *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.
10. *Tateno S., Kuwayama Y., Hirose K., Ohishi Y. (2015) The structure of Fe-Si alloy in Earth's inner core. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 418, 11-19.

A02 (公募・木村) 計 43 件 (すべて査読有)

1. *Hanyu T., Shimizu K., Ushikubo T., Kimura J.-I., Chang Q., Hamada M., Ito M., Iwamori H., Ishikawa T. (2019) Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle. **Nature Comm.**, 10, 60.
2. *Wang X., Kimura J.-I. (15 番目) (2018) Recycled ancient ghost carbonate in the Pitcairn mantle plume. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, 115, 8682-8687.
3. *木村純一 (2018) マントル 35 億年の化学進化. **地球化学**, 52, 29-53.
4. *Kimura J.-I., Gill J.B., Skora S., van Keken P.E., Kawabata H. (2016) Origin of geochemical mantle components: Roles of subduction filter. **Geochem. Geophys. Geosys.**, 17, 3289-3325.

A02 (公募・角野) 計 3 件 (すべて査読有)

1. *Seki K., Sumino H. (5 番目), 他 3 名 (2019) Variations in thermal state revealed by the geochemistry of fumarolic gases and hot-spring waters of the Tateyama volcanic hydrothermal system, Japan. **Bull. Volcanol.**, 81, 8.
2. *Kobayashi M., Sumino H., 他 9 名 (2019) Halogen heterogeneity in the lithosphere and evolution of mantle halogen abundances inferred from intraplate mantle xenoliths. **Geochem. Geophys. Geosys.**, 20, 952-973.
3. *Broadley M.W., Kagi H., Burgess R., Zedgenizov D., Mikhail S., Almayrac M., Ragozin A., Pomazansky B., Sumino H. (2018) Plume-lithosphere interaction, and the formation of fibrous diamonds. **Geochem. Perspec. Lett.**, 8, 26-30.

研究項目 A03 物理観測

A03-1 (計画・田中聡) 計 45 件 (すべて査読有)

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. *Ohtaki T., Kaneshima S., Ichikawa H., Tsuchiya T. (2018) Seismological evidence for laterally heterogeneous lowermost outer core of the Earth. **J. Geophys. Res.**, 123, 10903.
3. *Kaneshima S. (2018) Array analyses of SmKS waves and the stratification of Earth's outermost core. **Phys. Earth Planet. Int.**, 276, 234-246.
4. *Yamazaki Y., Yamamoto Y. (2018) Relative paleointensity and inclination anomaly over the last 8 Myr obtained from the integrated ocean drilling program site U1335 sediments in the eastern equatorial Pacific. **J. Geophys. Res.**, 123, 7305-7320.
5. *Yukutake T., Shimizu H. (2018) A generating process of geomagnetic drifting field. **Earth Planet. Space**, 70, 145.
6. *Hirose K., Morard G., Sinmyo R., Umemoto K., Hernlund J., *Helffrich G., Labrosse S. (2017) Crystallization of silicon dioxide and compositional evolution of the Earth's core. **Nature**, 543, 99-102.
7. *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.
8. *Takeuchi N. (2016) Differential Monte Carlo method for computing seismogram envelopes and their partial derivatives. **J. Geophys. Res.**, 121, 3428-3444.
9. Borgeaud A.F.E., Konishi K., *Kawai K., Geller R.J. (2016) Finite frequency effects on apparent S-wave splitting in the D'' layer: Comparison between ray theory and full-wave synthetics. **Geophys. J. Int.**, 207, 12-28.
10. *Tanaka S., Tkalcic H. (2015) Complex inner core boundary from frequency characteristics of the reflection coefficients of PKiKP waves observed by Hi-net. **Prog. Earth Planet. Sci.**, 2, 34.

A03-2 (計画・田中宏) 計 39 件 (すべて査読有)

1. *Gando A., Mitsui T. (16 番目), Watanabe H. (32 番目), 他 25 名 (2019) Precision analysis of the ¹³⁶Xe two-neutrino $\beta\beta$ spectrum in KamLAND-Zen and its impact on the quenching of nuclear matrix elements. **Phys. Rev. Lett.**, 122, 192501.
2. *Hibiya Y., Iizuka T. (6 番目), 他 6 名 (2019) The origin of the unique achondrite Northwest Africa 6704: Constraints from petrology, chemistry and Re-Os, O and Ti isotope systematics. **Geochim Cosmochim Acta.**, 245, 597-627.
3. *Iwamori H., Nakamura H., Yoshida M., Nakagawa T., Ueki K., Nakao A., Nishizawa T., Haraguchi S. (2019) Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. **Comp. Rend. Geosci.**, 351, 209-220.
4. *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.
5. *Iizuka T., Yamaguchi T., Itano K., Hibiya Y., Suzuki K. (2017) What Hf isotope isotopes in zircon tell us about crust-mantle evolution. **Lithos**, 274-275, 304-327.
6. *Iwamori H., Ueki K. (7 番目) (2016) Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses:

Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses. **Geochem. Geophys. Geosyst.**, 18, 994-1012.

7. *Ueki K., Iwamori H. (2016) Density and seismic velocity of hydrous melts at crustal and upper mantle conditions. **Geochem. Geophys. Geosyst.**, 17, 1799-1814.
8. *Gando A., Watanabe H. (26 番目), Enomoto S. (43 番目), 他 37 名 (2016) Search for double-beta decay of ^{136}Xe to excited states of ^{136}Ba with the KamLAND-Zen experiment. **Nucl. Phys. A**, 946, 171-181.
9. *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.
10. *Shimizu I. (20 番目), Watanabe H. (27 番目), Enomoto S. (53 番目), 他 48 名 (2015) Search for the proton decay mode $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ with KamLAND. **Phys. Rev. D**, 92, 052006.

A03 (公募・大林) 計 8 件 (すべて査読有)

1. *Suetsugu D., Shiobara H., Sugioka H., Ito A., Isse T., Ishihara Y., Tanaka S., Obayashi M., Tonegawa T., Yoshimitsu J., Kobayashi T. (2019) High QScS beneath the Ontong Java Plateau. **Earth Planet. Space**, 71, 97.
2. Chen H., *Niu F., Obayashi M., 他 5 名 (2017) Mantle seismic anisotropy beneath NE China and implications for the lithospheric delamination hypothesis beneath the southern Great Xing'an range. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 471, 32-41.
3. *Obayashi M., Ishihara Y., Suetsugu D. (2017) Effects of shallow-layer reverberation on measurement of teleseismic P wave travel times for ocean bottom seismograph data. **Earth Planet. Space**, 69, 44.
4. *Obayashi M., 他 7 名 (2016) Mantle plumes beneath the South Pacific superswell revealed by finite frequency P tomography using regional seafloor and island data. **Geophys. Res. Lett.**, 43, 11628-11634.

研究項目 A04 理論計算

A04-1 (計画・土屋) 計 48 件 (すべて査読有)

1. *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.
2. *Ritterbex S., Tsuchiya T. (2020) Viscosity of hcp iron at Earth's inner core conditions from density functional theory. **Sci. Rep.**, 10, 6311.
3. *Dekura H., Tsuchiya T. (2019) Lattice thermal conductivity of MgSiO_3 post-perovskite under the lowermost mantle conditions from ab initio anharmonic lattice dynamics. **Geophys. Res. Lett.**, 46, 12919-12926.
4. *Takahashi F., Shimizu H., Tsunakawa H. (2019) Mercury's anomalous magnetic field caused by a symmetry-breaking self-regulating dynamo. **Nature Comm.**, 10, 208.
5. *Xiong Z., Tsuchiya T., Taniuchi T. (2018) Ab initio prediction of potassium partitioning into Earth's core. **J. Geophys. Res.**, 123, 6451-6458.
6. *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.
7. *Nishi M., Kuwayama Y., *Tsuchiya J., Tsuchiya T. (2017) The pyrite-type high-pressure form of FeOOH . **Nature**, 547, 205-208.
8. *Miyagoshi T., Kameyama M., Ogawa M. (2017) Extremely long transition phase of thermal convection in the mantle of massive super-Earths. **Earth Planet. Space**, 69, 49.
9. *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.
10. *Wang X., *Tsuchiya T., Hase A. (2015) Computational support for a pyrolytic lower mantle containing ferric iron. **Nature Geo.**, 8, 556-559.

A04 (公募・大村) 計 4 件 (すべて査読有)

1. *Ohmura S., Tsuchiya T., Shimojo F. (2020) Structures of liquid iron-light-element mixtures under high pressure. **Phys. Stat. Sol. B**, 印刷中.
2. *Hada M., Miyata K., Ohmura S., 他 21 名 (2019) Selective reduction mechanism of graphene oxide driven by the photon mode versus the thermal mode. **ACS Nano**, 13, 10103-10112.
3. *Ohmura S., Shimojo F. (2019) Structural change in liquid sulphur from chain polymeric liquid to atomic simple liquid under high pressure. **J. Phys. Cond. Matt.**, 31, 215101.
4. *大村訓史, 下條冬樹, 土屋卓久 (2019) 共有結合性にとらわれた原子が液体中でどのように動くのかー共有結合性液体の高圧物性ー. **日本物理学会誌**, 74, 621-626.

研究項目 B01 統合解析

B01 (公募・坂巻) 計 8 件 (すべて査読有)

1. *坂巻竜也 (2017) 高圧下でのマグマ物性：地球深部でのマグマの挙動解明. **岩石鉱物科学**, 46, 30-34.
2. Sakairi T., *Ohtani E., Kamada S., Sakai T., Sakamaki T., Hirao N. (2017) Melting relations in the Fe-S-Si system at high pressure and temperature: Implications for the planetary core. **Prog. Earth Planet. Sci.**, 4, 10.
3. *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.
4. Hamada M., *Kamada S., Ohtani E., Mitsui T., Masuda R., Sakamaki T., Suzuki N., Maeda F., Akasaka M. (2016) Magnetic and spin transitions in wüstite: A synchrotron Mössbauer spectroscopic study. **Phys. Rev. B**, 93, 155165.
5. *Shibasaki Y., Sakamaki T. (6 番目), 他 5 名 (2016) Compressional and shear wave velocities for polycrystalline bcc-Fe up to 6.3 GPa and 800 K. **Am. Mineral.**, 101, 1150-1160.

B01 (公募・武多) 計 1 件 (すべて査読有)

1. *Nishiyama R., Taketa A., Miyamoto S., Kasahara K. (2016) Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons. **Geophys. J. Int.**, 206, 1039-1050.

B01 (公募・伊藤) 計 11 件 (すべて査読有)

1. *Kuwahara H., Itoh S., Nakada R., Irifune T. (2019) The effects of carbon concentration and silicate composition on the metal-silicate partitioning of carbon in a shallow magma ocean. **Geophys. Res. Lett.**, 46, 9422-9429.
2. *Yoshizaki T., Nakashima D., Nakamura T., Park C., Sakamoto N., Ishida H., Itoh S. (2019) Nebular history of an ultrarefractory phase bearing CAI from a reduced type CV chondrite. **Geochim. Cosmochim. Acta**, 252 39-60.
3. *Ohmichi E., Miki T., Horie H., Okamoto T., Takahashi H., Higashi Y., Itoh S., Ohta H. (2018) Mechanically detected terahertz electron spin resonance using SOI-based thin piezoresistive microcantilevers. **J. Mag. Res.**, 287 41-46.
4. *Kawasaki N., Itoh S., Sakamoto N., Yurimoto H. (2017) Chronological study of oxygen isotope composition for the solar protoplanetary disk recorded in a fluffy Type A CAI from Vigarano. **Geochim. Cosmochim. Acta.**, 201, 83-102.
5. *Greenwood J.P., Sakamoto N., Itoh S., Warren H.P., Singer J.A., Yanai K., Yurimoto H. (2017) The lunar magma ocean volatile signature recorded in chlorine-rich glasses in KREEP basalts 15382 and 15386. **Geochem. J.**, 51, 105-114.

B01, A02 (公募・新名) 計 27 件 (すべて査読有)

1. *Ozawa K., Anzai M., Hirose K., Sinmyo R., Tateno S. (2018) Experimental determination of eutectic liquid compositions in the MgO-SiO₂ system to the lowermost mantle pressures. **Geophys. Res. Lett.**, 45, 9552-9558.
2. *Hirose K., Sinmyo R., Hernlund J. (2017) Perovskite in Earth's deep interior. **Science**, 358, 734-738.
3. *Sinmyo R., McCammon C., Dubrovinsky L. (2017) The spin state of Fe³⁺ in lower mantle bridgmanite. **Am. Mineral.**, 102, 1263-1269.
4. *Sinmyo R., Keppler H. (2017) Electrical conductivity of NaCl-bearing aqueous fluids to 600 °C and 1 GPa. **Contrib. Mineral. Petrol.**, 172, 4.
5. *Sinmyo R., 他 6 名 (2016) Discovery of Fe₇O₉: a new iron oxide with a complex monoclinic structure. **Sci. Rep.**, 6, 32852.

<書籍> 計 10 件

1. 土屋卓久, 他 (日本地球惑星科学連合編) (2020) 地球・惑星・生命, 東京大学出版, 280 頁.
2. 入船徹男, 鍵裕之, 土屋卓久, 他 (日本鉱物科学会、宝石学会) (2019) 鉱物・宝石の科学事典, 朝倉書店, 664 頁.
3. 入船徹男, 土屋卓久, 他 (2018) 図説地球科学の事典, 朝倉書店, 248 頁.
4. *Tsuchiya T. (2017) Van der Waals Force. In *Encyclopedia of Geochemistry* (ed. White W.M., Springer, 2017).
5. *Tsuchiya T., Kawai K., Wang X., Ichikawa H., Dekura H. (2016) Temperature of the lower mantle and core based on ab initio mineral physics data. In *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core* (eds. Terasaki H., Fischer R., AGU Monograph) pp. 13-30.
6. *Irifune T., Tsuchiya T. (2015) Phase transitions and mineralogy of the lower mantle. In *Treatise on Geophysics (Second Edition) vol. 2* (ed. Schubert G., Elsevier) pp. 33-60.
7. *Kawai K., Tsuchiya T. (2015) Elasticity of continental crust around the mantle transition zone. In *The Earth's Heterogeneous Mantle* (eds. Khan A. and Deschamps F., Springer) pp. 259-274.

<ホームページ> 計 75 件

1. 土屋卓久 「Is the Earth's inner core oscillating and translating anomalously?」 PHYS.ORG (2020 年 4 月 14 日)
2. 西真之, 土屋 旬 「マントル最深部に水素 愛媛大が可能性示唆」読売新聞 (2017 年 7 月 4 日)
3. 土屋卓久 「地球深部の実体に迫る マントル岩石比率導く 土屋卓久教授 高度な理論計算成功」愛媛新聞 (2016 年 1 月 1 日)
4. 領域ホームページ、<http://core-mantle.jp/>

<主催シンポジウムの状況> 計 15 件

1. 国際ワークショップ「タイにおける地球物理学的観測—現在と未来—」(2019 年 8 月 1 日~8 月 2 日) Mahidol University, Bangkok, Thailand (参加者 58 名)
2. 平成 30 年度成果発表会兼国際シンポジウム (2019 年 3 月 18 日~3 月 21 日) 岡山大 (参加者 100 名)
3. 第 2 回国際ウィンタースクール (2019 年 3 月 7 日~3 月 10 日) 岐阜県飛騨市 (参加者 40 名)
4. 平成 29 年度成果発表会兼国際シンポジウム (2018 年 3 月 26 日~3 月 29 日) 愛媛大 (参加者 87 名)
5. 平成 28 年度成果発表会 (2017 年 3 月 26 日~3 月 28 日) JAMSTEC 横浜研究所 (参加者 91 名)
6. 第 1 回国際ウィンタースクール (2017 年 1 月 9 日~1 月 12 日) 群馬県草津温泉 (参加者 41 名)
7. 国際シンポジウム (2016 年 11 月 4 日~11 月 6 日) 武漢、中国 (参加者 61 名)
8. サマースクール (2016 年 7 月 11~7 月 21 日) Gran Sasso Science Institute, L'Aquila, Italy (参加者 44 名)
9. 平成 27 年度成果発表会 (2016 年 3 月 28 日~3 月 29 日) 東京大 (参加者 70 名)
10. 国際シンポジウム (2015 年 11 月 4 日~11 月 7 日) 松山市道後温泉 (参加者 70 名)
11. キックオフシンポジウム (2015 年 8 月 7~8 月 8 日) 愛媛大 (参加者 75 名)

<一般向けアウトリーチ活動等>

(一般普及講演、サイエンスカフェ、小中高校生向け授業、イベント出展) 計 83 件

1. 土屋卓久 「Deep Earth Science from Quantum Physics」Public lecture (2019 年 8 月 6 日) タイ・マヒドン大
2. 土屋卓久, 鈴木勝彦 「物理で明かす地球の深部, 化学でひも解く地球の歴史, 地震で探る日本の地下」領域一般講演会 (2018 年 3 月 6 日) 愛媛大
3. 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— (2016 年 12 月 6 日) 京都大 (解説) 計 57 件
1. 土屋卓久, 太田健二, 石川晃, 他 (2018) 総特集「核—マントルの相互作用と共進化」, **月刊地球**, 40, 6, 313-376.
2. *土屋卓久 (2018) 地球内部物質計算機科学, **パリテイ**, 33, 67-68.
3. *土屋卓久 (2017) 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**, 13, 12-14.
4. *土屋卓久 (2016) 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**, 69, 452-454.

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。



従来の地球深部科学においては高圧実験、地震・電磁気観測及び古典力学的連続体シミュレーションが重要な役割を担ってきたが、この枠組みのみでは本領域が掲げる核-マントルの相互作用と共進化の研究は困難である。国際的にインパクトの高いブレークスルーをもたらすには、新たな研究基軸を従来の研究手法と融合させ、統合的な学術領域を創成することが必要である。そこで本領域では、従来の上記3つの手法に精密測定から地球内部の元素・同位体挙動に制約を与える地球化学と地球中心部まで見通すことができる新たな地球ニュートリノ観測を加え、極端条件下での物性研究を第一原理計

算に基づく高精度理論計算が牽引する、これまでにはなかった新たな研究体制（図）を構築した。

異なる複数分野の連携は、総括班会議において定期的に状況確認を行うとともに、各年度実施した成果発表会や合同班会議、学会特別セッション、若手の会を通して深化を促すことで、当初想定以上の進展を見せた。例えば、日本地球惑星科学連合年会における本領域が主催した特別セッションでは、領域開始後1年目の平成28年には45件だった発表件数が、2年目の平成29年には88件と倍増し、以降学会内で最大規模のセッションとなったが、特に1年目と2年目以降の特別セッションにおける発表の種類を比較すると、本領域の研究組織を活用した新たな共同研究による成果発表が増加しており、本領域の研究方針に従って計画研究及び公募研究間の連携が進展したことが明確に見て取れる。活発な分野間連携は、共同研究件数や融合研究論文数の変化にも顕著に表れている。共同研究件数に関しては、領域発足とともに領域の方針に従って分野間連携が速やかに開始されたことにより、初年度から各年概ね200件程度で推移した。その一方で、融合研究論文数については、領域が発足した平成27年度にはのべ11件だったが、平成28年度にはのべ68件、令和元年度にはのべ92件と大幅に増加しており（特に地球化学と地球物理学の分野融合論文が顕著に増加）、多数の共同研究が着実に遂行されたことが分かる。

新たな分野間連携により実現した研究の具体例としては、以下のようなものがある。第一原理計算により予測した下部マントル全域の圧力範囲で安定な新たな含水鉱物を高圧実験により実験的に検証し、この知見を取り入れたマントル対流計算から地球深部の水循環の新たなモデルを作成した。第一原理計算と高圧実験により得られたマントルと核の熱伝導率を用いて核-マントル結合系対流計算を行い、地震学的に観測された外核最上部の地震波低速度異常の形成機構を考察した。地震波トモグラフィから地殻発熱量を求めるために開発した地球化学的手法、測定精度を向上させた地球ニュートリノのデータ、第一原理計算により求めた放射性熱源元素のマントル-核間における分配特性を組み合わせ、マントル中の熱源元素総量をモデル化した。またこれらを総括し、マントル及び核の運動特性を考察した。

これら分野間連携の成果をはじめとして、本領域の成果はNature誌（8件）、Nature Geo.誌（3件）、Nature Comm.誌（10件）、Science誌（2件）、PNAS誌（3件）など、高インパクトジャーナルにおいて多数公表された。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、研究期間終了後も構築した連携組織や手法を維持・拡張することにより、さらなる発展も期待できる。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

総括班の活動状況

本領域推進に必要な設備備品は各計画研究において導入するため、総括班では大型備品の購入は行わないこととした。本領域における総括班の役割は、領域の統括、領域において行われる研究のソフト面からの支援、および教育支援である。本研究領域では、計画研究の研究費と総括班の研究費を明瞭に区分し、領域全体のイベントや研究活動、広報活動のための共通経費を支出した。本研究領域で進められる研究は、各分担者の所属機関内で行われる研究と、領域に関連した大型実験施設や共同利用・共同研究施設を活用しながら進める研究からなるが、本領域においては大型備品の多くは後者に措置し、領域内での共同利用を推奨することで効果的な研究費の使用を行った。また、国際活動支援班経費と併せて国際活動支援を行い、中長期の研究者の海外への派遣41件、海外からの受入56件を行った。

設備等の活用状況や研究費の効果的使用の工夫

計画研究 A01-1 ダイナミクス班では、特殊変形試験用 D111 型ガイドブロックを高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 PF の PF-AR07 ビームラインに導入した。この装置の立ち上げのため、国際活動支援班の支援のもとメンバーをイギリスに長期派遣し、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンのドブソン教授から技術指導を受けた。その後、この設備を主体として下部マントル条件における放射光その場観察超高压変形実験を行うことにより、今までと比べて高い圧力で変形実験が可能となった。装置は PF のビーム運転時に割り当てられたビームタイム範囲内で運用されており、事業が終了した後もユーザーを拡大して、継続的に使用される予定である。消耗品費の大部分は、高压実験に必要な高価なダイヤモンドアンビル、超硬アンビルの購入に使用した。これにより、従来は実行を躊躇していた超高压条件での実験を頻繁に挑戦することが可能となり、本研究において様々な新たな知見を得ることに繋がった。

計画研究 A01-2 構造物性班においては、実験試料を合成するため超高温真空雰囲気加熱装置を総合科学研究機構に、またブリルアン散乱とラマン散乱の同時測定のため分光器を東北大に、ダイヤモンドアンビルセル用のファイバーレーザー加熱システムを東京大に、外核金属メルトの密度・音速測定用として高温真空炉を大阪大にそれぞれ設置、また高压実験用部品作成のため総合科学研究機構に精密加工機を導入した。これらの装置は同位体班をはじめとする他計画研究メンバーとの共同研究にも利用された他、これまで構造物性班が SPring-8、KEK、J-PARC などの共用量子ビーム施設に導入してきた設備を他の班の多くの研究者が活用しており、導入設備を有効に活用して実験を行った。

計画研究 A01-3 技術開発班においては、小型切削加工機を岡山大に、低温高压発生装置を東京大に、デジタルマイクロスコープを愛媛大に、卓上型 X 線回折装置を広島大にそれぞれ設置した。このうちとりわけ汎用性の高い小型切削加工機とデジタルマイクロスコープに関しては、ダイナミクス班、構造物性班、同位体班や公募研究にも活用され、特に超高压実験技術開発における各種部品の加工や精度確認、また得られた合成物質の加工・観察等に用いられた。また低温高压発生装置はナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) を用いた中性子回折実験に、卓上型 X 線回折装置は NPD を用いた X 線吸収実験の予備実験において活用され、それぞれ先駆的な実験技術の開発に結びついた。これらを通じ、下部マントル深部～核領域での相関係・レオロジー・元素分配などに関する多くの研究成果が得られた。なお小型切削加工機・デジタルマイクロスコープに関しては、本研究期間終了後も愛媛大と岡山大の共同利用・共同研究拠点において活用される見込みである。

計画研究 A02-1 同位体班及び計画研究 A02-2 元素分配班では、高压実験試料の水素・炭素・酸素・硫

黄・タングステン・白金族元素の同位体比を極微小試料に対して或いは微小領域において高精度で測定することを目的として、高感度シグナル増幅器を JAMSTEC に、高精度安定同位体比質量分析システムを新潟大に設置した。これらの装置は他班の研究者にも開放し、領域の基盤設備として常時稼働することで効率的に用いるとともに、博士研究員と大学院生のトレーニングを兼ねた初期設定と標準ガス分析の実施や、領域内の他の研究機関の大学院生向けに先端技術インターンシップを開催するなど、教育面でも有効活用した。これらの装置により、高圧実験試料や天然岩石試料の微小領域での高精度同位体分析及び元素分配分析を行うことが可能となり、その結果、ホットスポット玄武岩試料において核-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に成功した他、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、他の班や公募研究との連携のもと地球深部における元素挙動に関し重要な成果を得ることができた。

計画研究 A03-1 地震・電磁気観測班では、タイにおける広帯域地震観測網設置のために地震計を新規購入した他、機材運送やバッテリーなど消耗品の購入に研究費を使用した。その他、海底地震観測を補完するための差圧型水圧計を導入した。この際、40 箇所に及ぶタイにおける地震観測機材の新規導入は観測条件の特に厳しい地点のみに限定し、その他は東京大学地震研究所の観測機器共同利用制度を活用することで効率的に観測網を構築した。また、機材をタイから再輸入する際、税関と協議を行い、機材の写真照合など厳密に物品管理を行うことによって関税免除措置を受けた。また、用意した地震計を小学校の敷地や共同研究者の知人の土地に設置して土地賃貸料を、またデータを現場収録することによって通信費用を節約した。このように観測経費を可能な限り節約し、できるだけ観測点を増やす工夫を行った。一方、予想以上の降雨・洪水、雷の影響で約半数の観測点で障害が発生したため、国際活動支援班と東京大地震研究所の支援のもと、故障した地震計等の大規模な修理が必要となった。

計画研究 A03-2 ニュートリノ観測班では、実験に必須な独自のミラー系をデザインするための光学シミュレーション設備を整備し、多パラメータの最適化をすることで従来不達であった 2cm の目標分解能を達成することが可能となり、10 パラメータによる非線形形状のミラー系のデザインを完成させることができた。また発光位置の三次元測定をする為に検出器を設置できる大きさの暗室を整備したことにより、開発した技術を組み合わせた実験を飛躍的に進めることができた。

計画研究 A04-1 理論計算班では、クラスター型並列計算機システムを愛媛大に導入した。この設備は班のメンバーが計算コード開発及び大規模シミュレーションを行う上で中核的な基盤設備として活用した他、2017 年度及び 2018 年度に他班の若手研究者や留学生などに対して第一原理計算のインターンシップを実施した際に用いるなど高度先端教育のためのリソースとしても活用された。

本領域における多くの研究において、各計画研究が導入した基盤設備を異なる計画研究や公募研究の研究者が利用して効率的に共同研究を推進する工夫を行った。また、そのために必要となる高圧実験試料準備用消耗品、および既存設備周辺の測定機器等にも十分な研究費を割り当て、挑戦的な課題を実行する際に経済面で躊躇することがないように配慮を行った。また特任助教、研究支援員等の採用による研究の円滑な推進のための人的リソースの確保、領域内インターンシップなどの高度先端教育プログラムの実施などへも経費を使用し、若手の育成にも注力した。

最終年度繰越しが承認された計画研究と繰越しの内容

総括班、計画研究 A01-2、A02-1、A02-2、A03-1、A04-1 及び国際活動支援班において、最終年度に繰越しを行った。いずれの場合も、年度末に実施を予定していた成果発表会が新型コロナウイルスの感染拡大により延期となったため、その開催経費や参加旅費を繰越しが必要が生じたというのが、主な理由である。その他、研究計画 A02-1 では、令和元年 9 月から 10 月にかけて関東地方を襲った台風により質量分析計が故障し、次年度まで分析を継続する必要が生じたため、必要経費の繰越しを行った。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

応募時に選択した研究の対象

「②当該領域の各段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果

本研究領域は、地球惑星科学の各分野（岩石鉱物鉱床学、地球宇宙化学、固体地球惑星物理学）において中心的に活動する研究者が連携・協働し、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・化学プロセスであり、このため観測、実験、分析、理論といった異なる分野の最新手法を結集し、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) 世界をリードしてきた高圧実験と第一原理計算による超高温超高压下における定量物性データ、(2) 最新の化学分析技術により得られる超精密元素・同位体分配データ、(3) 新たな地震波観測網やニュートリノ観測技術を用いた地球物理学データを統合して、地球深部の構造やダイナミクスを統一的に理解する新たな取り組みが行われた。このような新たな分野間連携を通して、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ることが可能となった結果、分野ごとに細分化されていた旧来的な地球深部科学から複数分野が有機的に連携した統合的地球深部科学への革新的転換が実現した。その端的な例として、地球ニュートリノ観測に成功した素粒子地球科学の参画がある。ニュートリノ観測から得られる地球内部の熱源元素量に関する情報により、素粒子地球科学、地球化学、高圧地球科学の有機的連携が世界で初めて行われるに至り、海洋底観測機開発計画立案へと繋がった。また、タイ国における広域地震観測網の敷設などの大規模連携をはじめとした国際共同研究も活発に行われたことから、本領域の先進的な学際研究は国内外において大きな注目を集めた。このことは、例えば、日本地球惑星科学連合年會において本領域が主催した国際セッションでの発表件数が、領域開始後1年目の平成28年度には45件だったものが、2年目の平成29年には88件と倍増し、以降学会内で最大規模のセッションとなったことや、初年度には8件だった国際学会での招待講演・基調講演件数が、令和元年度には37件まで増加したことなどから明確に見て取れる。

このように先進的な学際研究組織を構築して重要諸問題に取り組んだ結果、様々な共同研究が活発に行われ数多くの新たな知見が得られた。発表した原著論文総数は561件（内291件の国際共著論文）にのぼり、Nature誌8件、Nature Geo.誌3件、Nature Comm.誌10件、Science誌2件、PNAS誌3件など、高インパクトジャーナルにも多数の論文が出版された。特に下部マントルの化学組成と流動特性、核-マントル間のエネルギー輸送と熱源元素量、地球深部水の循環モデル、始原物質リザーバー、外核の構造と化学不均質などの新たな知見については領域全体の成果として別途取りまとめを行い、国内外の関連分野の発展や教育に資するべく日本語及び英文書籍（現在編集中）として出版を行った。これら多岐にわたる領域の活動を通し国内外の地球深部科学分野及び関連諸分野に大きく貢献した結果、研究期間を通して日本高圧力学会賞や日本地球惑星科学連合西田賞をはじめとして、計30件と非常に多くの学会賞等（内国際賞12件、学生の優秀発表賞等は除く）を受賞するに至った。

その他、本領域では、従来の分野の枠を超えた新たな学術領域ならではの専門教育の推進にも注力した。その結果、学会奨励賞や優秀発表賞等計24件に及ぶ若手の受賞や、47名に達する若手の研究職への就職（内19名が無期雇用）に繋がるなど、若手育成の観点からも当該研究分野及び関連分野の発展に多大な貢献を行った。以上のように、本領域において構築されたあらたな研究領域、培われた技術や得られた知見、また次世代を担う人材は、地球環境学、太陽系科学、宇宙生命学など関連他分野にも大きなインパクトと波及効果を与えるものであるといえる。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域は、高圧地球科学や地震学、地球電磁気学を中心とした従来の地球深部科学の研究者に加え、地球化学や素粒子物理学、計算物理学といった複数分野の研究者が新たに連携する異分野融合型の組織である。複数分野を横断する研究プロジェクトから新しい統合的地球科学の創成を目指す本領域の方針を長期的に発展させるには、従来の地球深部科学分野の枠に縛られず、新たな分野を切り拓くことに積極的な若手研究者の育成が重要であると考え、このような観点のもと本領域においては様々な教育プログラムを準備し、国際的・学際的な研究推進との相乗効果により、幅広い視野を持つ次世代を担う人材育成の取り組みを行った。

具体的には海外著名研究者を招いた国際レクチャー及び国際セミナー、夏の学校、冬の学校の開催、各分野の拠点施設における先端技術インターンシップの実施、主要学会における領域セッションや年度末に行う領域成果発表会での発表機会の提供、若手の会の組織化などを行った。国際レクチャーは計9回、国際セミナーは計27回実施し、特に国際レクチャーでは領域全体に対し分野の異なる若手研究者の積極的な参加を広く呼び掛け、基礎から最先端の応用まで数日間をかけて集中講義形式で講義を開催して先端教育を行った。さらにこれらとは別に平成28年7月には、素粒子物理学と地球化学、高圧地球科学が連携した夏の学校をヨーロッパのコミュニティと共同してイタリア・ラクイラにおいて開催し、領域代表者を含む2名の講師及び3名の受講生を領域から派遣した。また、平成29年1月には、高圧地球科学、地震学、地球化学、地球力学の世界的権威を海外から招き、地球深部の不均質と始原物質をテーマとした第1回国際冬の学校を群馬県草津温泉において、平成31年3月には地球内部のエネルギー循環や熱史をテーマとした第2回国際冬の学校を岐阜県飛騨市において、それぞれ主催した。国内外から受講者を募り選抜を行った結果、第1回冬の学校では国内から30名、海外から11名（計41名）を、第2回冬の学校では国内から30名、海外から10名（計40名）を受け入れ、領域内のみならず領域外の若手研究者に対しても先端教育の機会を提供した。これらの学校は、異なる分野をそれぞれ代表する第一級の研究者の講義を一度に聴講できる貴重な機会となっただけでなく、国内外の様々な大学や研究機関から受講者が集まったため、分野や国籍を超えて若手研究者や大学院生が交流し国際的な人脈をつくる非常に重要な場にもなった。さらにこれらのスクールにおいては、受講者が自らの研究を発表するポスターセッションも開催し、互いに活発に議論を行った他、関連分野の講師陣による個別指導（メンターワークショップ）も実施した。世界的権威による直接指導は、若手研究者にとって単なる助言の枠を超えて今後の励みとなる貴重な経験となり、受講者から大きな好評を得た。その他、各計画研究が導入した先端機器と領域内の共同研究体制を活用して、若手研究者が異なる分野の研究手法を学ぶ先端技術インターンシップを期間中に計5回開催し、領域全体として技術面からの若手育成にも取り組んだ。

これら総括班が主体となって行った高度先端教育の取り組みに加え、領域内の若手研究者や大学院生を中心とした組織「若手の会」を発足させ、独自に企画した研究集会を計5回実施するなど主体的に分野の枠を超えた活動を行った。この若手の会の活動は年々活発化し、そこで得た着想に基づき自主的に共同研究を実施して論文発表まで至った事例が得られるなど、当初の想定以上に大きな成果をあげた。このように本領域では従来の分野の枠を超えた新たな学術領域ならではの専門教育を推進した。多様な分野の交流は、領域内の若手研究者の視野を広げることに資する一方で、分野を超えて職を獲得する可能性も広がり、領域全体の底上げにも大きく寄与した。その結果、計24件に及ぶ学会奨励賞や優秀発表賞等の受賞があった他、47名に達する多くの若手が研究職（内19名が無期雇用）に就職するに至るなど、若手研究者育成の取り組みも着実に実を結んだと考えている。

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

評価体制 本領域は高圧地球科学・地球化学・地震学など、研究手法などが大きく異なる複数の分野から構成されている。そのためそれぞれの分野の世界的権威4名からなるアドバイザリーボードを組織化し、各研究領域及び総括班の活動に関して外部評価を実施した。以下に評価者からの評価コメントを記載する。

兼岡一郎（東京大学名誉教授）

「総括班を含む全体としての活動」について：平成27年度から令和元年度にわたる5年間を通じて、高圧地球科学、グローバル地震学、地球化学、ニュートリノ観測を活かした素粒子地球科学など異分野の研究者たちが結集して、地球深部に関する物質的特性や進化などにまつわる諸問題を検討する試みは、当初はやや個別の分野の延長の傾向があったものの次第に相互の関係性が高まり、意義のある成果を挙げたとして高く評価できる。その最大の成果は、それまで各分野において個別に研究されてきた地球深部についての問題を、グローバルな見地からそれぞれの分野の研究者が協同して研究し、また共通の場で議論することにより、地球深部にかかわる問題点についての共通認識が得られ、課題が明確にされて研究が進められた点にある。特に今後の研究を担っていく若手研究者に対して、広い視野と分野をまたいだ共同研究などの必要性を強く意識させることになり、今後の研究に対して大きな指針を与えたことにある。それらは、総括班などにより企画された海外研究者を招いた各種のシンポジウム、スクール、レクチャー、セミナーのみならず、国内でもインターンシップの開催や関連学会におけるセッションの企画などを通じて積極的に活動し、数多くの国内外の共同研究や分野間の連携目的で各年に開催された若手研究集会などが大きな効果を挙げたことを評価したい。しかしこの活動はようやく軌道に乗った段階であり、真に意義あるものにするためには当プロジェクト終了後もその理念を継続していくことがきわめて重要であることを、強く認識しておいて欲しい。

「計画研究・公募研究などの研究活動」について：本研究プロジェクトを担った研究者による研究成果は、Natureを始めとする多くの一流国際学術研究誌や学術誌における560編に及ぶ論文掲載や国際学会における多くの招待講演、学会賞などの受賞にもそのレベルの高さと共に顕著に示されている。それらは各年度末に行なわれた成果発表会においても紹介され、プロジェクト参加者はそれらを共有することにより、それぞれの研究意欲を高める役割を果たしたことも高く評価できる。

本プロジェクトの成果の特徴として、異なった分野、手法に基づく共通の対象に対して、理論と実験や観測などを組み合わせることにより、これまではさまざまな解釈がされてきた結果にたいしても、全体としてより調和的な解釈を可能にする見方を提示し、それまで固定化されてきた地球深部の物質的な特性に対して新たな情報を与える成果を挙げてきた。それらによって地球深部に関するイメージをある程度まで具体化することに貢献する一方で、新たな研究課題などが広がることになったことも自然を対象とする研究の必然であろう。新たなプロジェクトなどにより、特に時間軸を意識した共進化に関してもより理解を深めることが望まれる。

深尾良夫（東京大学名誉教授、JAMSTEC 特任上席研究員）

本「新学術領域研究」では「総合的地球深部科学の創成」を目指して、4項目・8班からなる研究計画が展開され、この3月をもって成功裏に終了した。総合的に期待を上回る成果を上げ、発表論文数も5年間で500件を超えた。この間の、国際学会における招待講演107回、受賞49件、成果発表会4回、国際シンポジウム主催7回、国際スクール主催3回、国際レクチャー主催9件、国際セミナー主催27件、合同班会議5回、若手研究集会5回、国内+海外共同研究522+480件といった数字が、活発な研究活動、多彩な成果並びに国際的な評価を物語る。

核の熱伝導率（実験室測定）、下部マンツルの熱伝導率（第一原理計算）、外殻最上部の安定成層（数値シミュレーション+地震学的構造）、地球ダイナモシミュレーションのそれぞれで成果があった。これらは互いに深く繋がって内核形成史を軸に更に大きなシナリオに発展しようとしている。また第一原理計算により下部マンツルで安定な含水鉱物の存在が予測され、それが実際に高温高圧実験で合成され、この反応を取り込んだマンツル対流シミュレーションにより海洋の10倍に達する水が下部マンツルに貯留されている可能性が示されるなど、研究の発展サイクルがうまく回っている。今後更に、大気海洋起源論も取り込んだ発展が期待できる。地球形成時に核に取り込まれたタングステンやヘリウム3が、

核・マントル境界（鉄・シリケート境界）を通して漏れ出し、マントルブルームに乗って地表にまで到達しているとするシナリオも提示されている。これもまた、元素同位体比の高感度測定、拡散係数の高温高压測定、分配に関する第一原理計算など異なる分野の連携の成果である。異なる分野の連携という観点からは、反ニュートリノ高精度検出を目指す物理実験グループと測定値の地球科学的意義を明らかにしようとする伝統的地球科学グループの協力が新鮮であった。

以上、特に異分野の連携によって大きな成果を得られた例を取り上げた。無論、成果はこれらに限らないが、これらは個別研究に閉じていてはなしえなかった典型例であり、今後の更なる進展を切望するものである。

八木健彦（東京大学名誉教授）

本新学術領域研究は、地球深部構造の解明を目指して行われてきた従来の大型研究が、主として高压実験や地震学、それに地球ダイナミクスのシミュレーションの3つを組み合わせられてきたのに対し、それ以外にも同位体化学やニュートリノ観測、そして第一原理計算による新鉱物や極限条件下における物性予測といった様々な研究手法を組み合わせ、核とマントルの構造や相互作用、そしてその進化を解明しようとしたものである。また高压実験も従来は主として地球深部における安定な鉱物相の解明が中心であったが、本研究では熱伝導率や粘性、変形機構といったダイナミクスに関係が深い物理量の測定も行われ、従来の研究には無い議論が可能になった。

当初はこれだけ広い分野の研究者を集めて、はたして有機的に結び付いた相乗効果が得られるのだろうかという懸念も無いわけではなかった。しかし毎年開かれた全体での研究会を始め、様々な情報交換の場が設けられ、従来には無かった異分野の協同による新たな視点での研究成果が見られて、試みは成功したと言えるであろう。高压実験に関して言えば、従来とても考えられなかったメガバール超高压領域における変形実験や電気伝導度測定といった新しい実験技術が開発され、静的な構造だけでなく地球の進化をもたらした動的現象にも言及できるようになったことは大きな進歩であろう。下部マントルからコアにいたる地球深部の問題の解明に関しては、従来の地震学や高压科学など個々の研究手法だけでは観測量や測定量が圧倒的に不足している。しかし本領域で行われたように、長足の進歩をとげたそれぞれの新しい研究手法を組み合わせることにより、我々の理解をずっと深めることが可能だということを示せたと思われる。今後もこのような研究がさらに発展することを期待したい。

Shun-ichiro Karato (Adolph Knopf Professor, Yale University, U.S.A.)

This is a very ambitious project to address one of the key questions in Earth science: core-mantle co-evolution taking the advantage of Japanese Earth science. In addition to an already strong area such as high-pressure mineral physics, this project also includes geoneutrino studies that are the new strength of Japanese science.

The overall accomplishment is remarkable, and I am particularly impressed by some results in which they tried to link results from a few different disciplines such as mineral physics and geochemistry (e.g., element solubility, geoneutrino estimate on some elements, geochemical constraint and energy budget). Earth and planetary science is science on the natural system where a large number of variables play roles, and therefore a comparison to observations is a key.

A particularly important in this sort of project is education of young scientists including graduate students. I understand a number of seminars have been organized based on this project, and I am sure those activities provided excellent opportunities for students and post-docs.

Although my overall evaluation is “excellent”, I do have a few suggestions that you may consider to make your research activities even better. I emphasized the link with observations. In this connection, the link with seismological observations and the link with geodynamic studies are not as much as I would have hoped. For example, new results obtained in this project should have some seismological consequences on the structure of the D” layer and the outer-most regions of the core. Also given the emphasis on the core (+ core-mantle interaction), I would like to see more interdisciplinary studies on core dynamics incorporating new mineral physics constraints where they compare various models with geophysical and/or geochemical observations.

Having said that, you have made a truly remarkable accomplishment, and I feel very lucky to be a part of the evaluation committee of this project.