

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02003

研究課題名(和文) 定常的リソスフェア-アセノスフェア境界領域の支配要因

研究課題名(英文) The lithosphere-asthenosphere boundary zone at steady state

研究代表者

小澤 一仁 (Ozawa, Kazuhito)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号：90160853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：リソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)の深さがどのような機構で決定されるかを明らかにするために、古い海洋地域で成立する「定常的LAB仮説」が、異なるテクトニクス環境でも成り立つのかを、マントルに由来するカンラン岩ゼノリスとそれを地表にもたらしたマグマの固結物である火山岩を合わせて用い、LABより浅部の地温勾配とより深部のポテンシャル温度からLAB深度を推定することで、非海洋地域である沈み込み帯背弧や大陸地域で検討した。これらの非海洋地域では、LABは本質的に動的であるが、LAB深度が90-120kmの範囲で定常的LAB仮説を満たす条件が一定時間にわたって存在することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体地球の熱史は、海と陸地の違いを生み出すことなどを通して、現在の地球表層が生命に富んだ環境になった要因である。地球内部の熱状態の変動を知る事は、固体地球だけではなく地球の表層環境の長期的未来変動を理解する上で重要である。そのためには、地球内部から宇宙空間への熱放出の効率やその地域性および経年変化を理解し、地球表層を覆っているプレートの厚さがどのような機構で変動するのかを明らかにする必要がある。その機構は海洋地域や大陸地域などによって大きく異なるため、本研究では、プレートの厚さを決定するプレートの底を、できる限り多様なテクトニック場でプレートの底領域に由来する物質を用いてその実体を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Aiming at clarification of controlling factors that determine the depth of lithosphere-asthenosphere boundary (LAB), it is examined if the “steady LAB hypothesis,” which is established beneath old oceanic plates, is applicable to various non-oceanic tectonic settings. For this purpose, depths of LAB were determined by combining petrologic and geochemical data from mantle xenoliths and their host magmas. The former provides geothermal gradient of the lithosphere, and the latter provides potential temperature of the asthenosphere (T_p). Examined areas are back-arc of Tohoku, Japan, the Colorado Plateau and Rio Grande Rift in North America, and Middle Atlas, Morocco. In these examined areas LABs are essentially dynamic involving transient processes affected by upwelling of asthenosphere. However, there are continent continental regions with a period when steady LAB was attained at the depth of 90-120km, which is governed by T_p and the asthenosphere composition including H₂O and CO₂.

研究分野：地球惑星物質科学

キーワード：リソスフェア-アセノスフェア境界 ポテンシャル温度 マントルかんらん岩 マントルソリダス 定常的リソスフェア-アセノスフェア境界

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球の表面を覆うプレート(リソスフェア)とその直下のアセノスフェアの境界(LAB)は、地球内部からの熱放出と物質輸送を支配してきた領域である。地震波観測によって、現在の海洋下 LAB は、海嶺から遠ざかるにつれて深くなり、古い海洋プレートでは上限深度 60-80km に達することがわかってきた(Kawakatsu and Utada, 2017; Tharimena et al., 2017; Rychert et al., 2020)。LAB の深度が上限に達するのは、古いプレートからの熱流量となんらかのアセノスフェアの対流による熱流束が釣り合い定常状態になっているためであると考えられている(Parsons and MacKenzie, 1978)。このような定常的な熱輸送状態にある要因としては、リソスフェア直下にある冷却に伴って生じる小スケール熱対流や深部に由来するより高温のマントル上昇流によって熱流量のさらなる低下やリソスフェアがさらに厚くなることを妨げているといった機構が考えられてきた。これらのモデルを検証するためには、熱的定常状態に達したとされる 60-80km の LAB の深さの決定要因、すなわち LAB を決めるレオロジーの性質変化をもたらす要因を、それに大きな影響を及ぼすリソスフェアの熱物質構造(地温勾配とリソスフェアの組成)とアセノスフェアの熱物質状態(マントルポテンシャル温度とソースマントル組成)の関係を検討する必要がある。そこで、リソスフェアとアセノスフェアの物質として始原的マントル組成を想定した場合、その融解開始曲線(ソリダス)(Hirschmann, 2000) 近傍がレオロジーの大きな変化をもたらすこと(Yamauchi and Takei, 2020)、海洋リソスフェアの地温変化は、海洋底の熱流量から推定できること(McKenzie et al., 2005)、現在の海洋リソスフェア下の最上部マントルの熱状態は中央海嶺下のポテンシャル温度(T_p)で代表できること(Wiens et al., 2006)を踏まえ、始原的マントルのソリダス曲線、古い海洋リソスフェアの地温勾配、そして現在の最上部マントルに相当する T_p の断熱曲線の関係を検討すると、深さ ~ 70km、温度 ~ 1350°C で交差する。さらに、その深さは北西太平洋での地震波観測によって推定された LAB の上限値にほぼ一致する。この事は、定常的 LAB の深さが、LAB 領域の地温曲線がソリダスに内接する条件によって決まることを示唆する。このような機構で熱的定常状態に達し、LAB の深さが決定されるという仮説を「定常的 LAB 境界仮説」と呼ぶ。この仮説が成立している LAB が、実際どの程度一般的なのか、あるいは特殊なのか不明である。「定常的 LAB 境界仮説」を満たしているかどうかは、特定地域の LAB 周辺において、上述の三つの要素、(1) LAB 深さ近傍のマントル物質の融解曲線、(2) リソスフェアの温度構造、そして(3)アセノスフェアの T_p を知る事で確認する事ができるはずである。

2. 研究の目的

本研究は、定常的熱流束均衡が上部マントル(リソスフェアとアセノスフェア)の熱状態とマントル物質の溶融条件によって決まるという「定常的 LAB 境界仮説」が成立しているかどうかを、テクトニックな環境の異なるいくつかの地域で得られる LAB 領域物質から(1) LAB 深さ近傍のマントル物質の化学組成、(2) リソスフェアの温度構造、そして(3)アセノスフェアのポテンシャル温度 T_p を解読することで明らかにする事を目的とする。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために最も適している地球内部物質は、マグマに取り込まれて地質学的時間スケールとしては一瞬で地球表層に運搬され急速に冷却する LAB 近傍の岩石片(マントルゼノリスあるいは単にゼノリス)である。本研究では、(1)リソスフェア由来ゼノリスの化学組成、(2)リソスフェア由来ゼノリスがマグマに取り込まれる温度圧力条件、(3) (1)と(2)の情報を提供するマントルゼノリスを地表にもたらしたマグマの固結物(玄武岩等の火山岩)を用いてそのマグマがマントルで生成された条件(初生マグマの溶融温度・圧力)とアセノスフェアの組成を明らかにし、溶融開始の条件(ソリダスの温度・圧力)から T_p を推定する。(2)で重要な点は、リソスフェアは温度・圧力条件が変動する場であるため、単純に温度・圧力計をマントルゼノリスに適用することはできず、マントル物質の経験した温度・圧力履歴の情報を読み解くことで、マグマに取り込まれる直前の条件を推定する必要があることである。このアプローチは、完全なセットである(1)-(3)全てを明らかにすることなく熱的な定常状態にあるのかどうかを、リソスフェアの温度構造の時間空間変化から確認することができる点でも重要である。(3)では、初生マグマ組成の推定とその溶融温度圧力推定が必要であるが、すでに報告されている手法で不十分な場合には新たな手法を開発する。(2)の最深部の圧力と(3)の条件から融解深さによってそれぞれ LAB の深度の下限値と上限値が得られるのでそれを用いて LAB の深度にできる限り強い制約を課す。以上に地震学的情報もあわせて、「定常的 LAB 境界仮説」がその対象地域に適用できるのかどうか検討する。「定常的リソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)仮説」を LAB 近傍物質から検証するために、本研究では研究対象として、研究期間と多様性を考慮し、島弧・大陸域の多様なテクトニクス環境に産する LAB 近傍に由来するマントル捕獲岩とそのホストの火山岩を産する 3 地域を選択した。これらは、島弧環境にある日本の目黒火山、モロッコの Middle Atlas 山地 (Bou Ibarghatene mar と Tafouraut mar)、アメリカ合衆国のコロラド高原 (Thumb diatrema)と Rio Grande Rift (Potrillo scoria cone)である。これらのマントルゼノリスとゼノリスのホストの火山岩について、EPMA・XRF・ICP-MS・TIMS 等の分析装置を用いて、鉍物化学組成・

全岩主成分・微量成分と同位体組成・微細構造の空間変化を決定した。以上に基づいて、3地域それぞれの地域でマントルゼノリスから(1)-(3)をできる限り決定した。その推定値と地質・地球物理情報から「定常的 LAB 仮説」が成立していたのかどうかを検証した。

4. 研究成果

島弧環境である東北日本の背弧にある一ノ目瀉火山では、Sato and Ozawa (2019)によって、LAB の最浅部深度約 40km, LAB より浅部の地温勾配約 15K/km, LAB 帯中の地温勾配約 4K/km, LAB の最深部深度約 55km と推定され、深さ幅のある LAB 帯が把握された。さらにマグマ生成条件(温度 1225°C, 圧力 1.8GPa, ソースマントル含水量 0.55wt%; Kuritani et al., 2014)から, Katz et al. (2003)を用いて LAB のより深部の含水マントルの T_p を約 1280°C と推定した。LAB 帯は部分溶融しており, 粒界メルトは組織平衡に達していないことから, 非定常的熱イベントが起きたことがわかる。これを確認するために鉱物の累帯構造の詳細な解析を行った (Sato and Ozawa, 2023)。一ノ目瀉下のマントルは, 日本海で形成され約 1400 万年間の冷却を経て 55km より厚いリソスフェアとなり, 定常的 LAB の深さに向けて冷却が進行していた。しかし, 定常的 LAB に達する前に, 4 万年より短期間の加熱により海洋リソスフェアが部分溶融し LAB が上昇したことがわかった。定常的 LAB に向かって冷却厚化する背弧海盆リソスフェアと沈み込み帯内部のマントル対流のカップリングは, リソスフェアの厚さが約 60km になって初めて生じ, 数万年程度でリソスフェアの熱的浸食が起きたことを示している。このことは, 島弧・背弧海盆系では定常的 LAB の形成は困難であり, その要因は沈み込みスラブによって誘引されるウェッジマントル内の上昇流と冷却によって厚くなった海洋リソスフェアのカップリングであると考えられる。

北アメリカ大陸, コロラド高原に産する液相濃集元素に富む特異なマグマ(ミネット; Roden, 1981)によって地表に運ばれたマントルゼノリスを検討した。その結果を図 1 にまとめた。重要な点は, (1) ゼノリスがマグマに取り込まれる直前の圧力と温度条件として 1.5GPa, 920-950°C, (2) 累帯構造内部にある化学組成の平坦部の化学組成を用いて~100 年過去に遡った時点で, 2-3GPa, 900-1150°C, さらに(3)ザクロ石の分解反応以前で, >3.5-4GPa, <1000-1200°C と温度圧力が変化していることがわかった。これらからコロラド高原下リソスフェアが上昇したこと (Pederson et al., 2002 等), 低圧の試料にのみ加熱記録があることがわかった (図 1)。最深部由来で最も高温を記録しているゼノリス(図 1c)は他と異なりメルト成分に枯渇し, かんらん石が Cr と Al に富む微少包有物を含むことからアセノスフェア由来であると考えられ, ミネットの活動当時の LAB はその直下に位置しており, アセノスフェアはリソスフェアの上昇を伴いつつリソスフェア化したと考えられる。リソスフェア底部の温度勾配は, 100K/GPa と極めて高く, 2GPa より浅所由来のカンラン岩のみに加熱が記録されていることから, 過去において LAB 近傍の加熱イベントがあり, その後にアセノスフェアの熱を輸送していた熱境界層であったと考えられる。以上のことから, コロラド高原下の LAB はアセノスフェア物質の底付けによって加熱され薄くなり, それに引き続いて冷却することで厚くなったと考えられる。リソスフェアの厚さは 120km に達し, 定常的 LAB である海洋リソスフェアの 70-80km より厚いにもかかわらず, コロラド高原下のリソスフェアは冷却によってさらに厚くなっていることは, 120km 以上の厚さの定常状態があることを示唆している。その要因は, マントルの化学組成であり, 例えば LAB 領域のマントルがメルト成分, 特に H₂O や CO₂ に富み, そのためソリダス温度が低下することで, 同じポテンシャル温度に対してもより深いところで溶融条件に達するためであると考えられる。

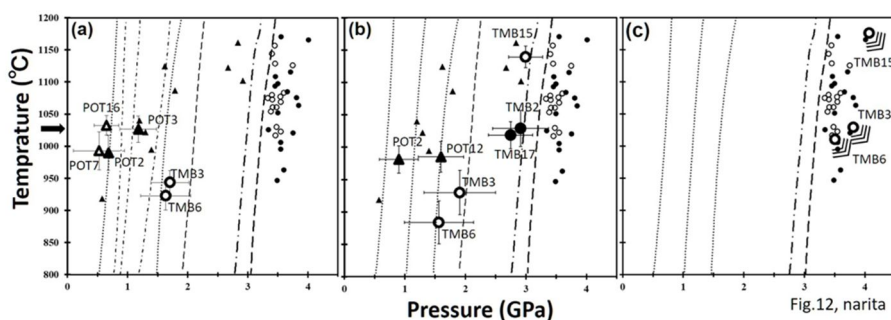


図 1: Narita and Ozawa (準備中) によるコロラド高原(大きな丸)と Rio Grande rift (大きな三角)のマントルゼノリスから読み解いた温度・圧力条件の変遷。小さな白抜き丸と黒丸は Ehrenberg (1982) によるコロラド

高原の温度圧力推定値で, それぞれ等粒状組織と細粒の変形組織を持つサンプルである。白抜き三角と黒三角は Kil and Wendlandt (2004)による Rio Grande rift の温度圧力推定値で, それぞれ単斜輝岩とそれに伴う脈を伴うサンプルと伴わないサンプルである。(a)ゼノリスがマグマに取り込まれる直前の条件, (b)マグマに取り込まれる前に起きたより低温の加熱イベント前 (~100 年以上前) の条件, (c) コロラド高原について, ザクロ石分解前の最低圧力最高温度条件。(a)の縦軸に示した矢印は, Smith (2000)による Rio Grande Rift のマントルゼノリスの温度推定値。破線などは, CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS)系の相境界。細点線は, Gasparik (1984)と Klemme and O'Neill (2000)による低圧側から斜長石-スピネルカンラン岩, スピネルグラニュライト(かんらん石を含まない) ザクロ石グラニュライト(ザクロ石輝岩), スピネルカンラン岩-ザクロ石カンラン岩の相境界。太い破線と一点鎖線は, O'Neill (1981) と Klemme (2004)による CMAS-Cr-Fe 系で, スピネルの Cr/(Cr+Al)=Cr# が 0.5 で, かんらん石の Mg/(Mg+Fe) 値が, 高圧から低圧に向かってそれぞれ 1.0 と 0.915 の場合のスピネルカンラン岩-ザクロ石カンラン岩の相境界。(a)と(b)の細い破線は, Nickel (1986)による CMAS-Cr 系で, Cr# が ~0.3 の場合のザクロ石グラニュライトの安定領域の低圧限界。(a)の三本の細い一点鎖線は, Gasparik (2003)による CMAS-Na 系で, 斜長石の Ca/(Na+Ca)が低圧から高圧に向かってそれぞれ 0.95, 0.6, 0.3 の場合のカンラン石-斜長石の共存する領域の高圧限界である。

Rio Grande Rift に産するマントルゼノリス中の鉱物累帯構造と微細構造についても、コロラド高原と同様に詳細に調べた。ホストマグマに取り込まれる直前とそれより 100 年以上前の温度圧力条件を推定することができた (図 1a,b)。両者を比較すると、低圧ほど高温になっている傾向が見て取れる、これは、加熱を経験しつつ上昇した可能性が示唆される。減圧は、スピネルかんらん岩中の細粒部に見られるかんらん石と斜長石の共存関係によっても示唆される。加熱の時間スケールはマントルの流動のタイムスケールより圧倒的に小さいことから、メルトの浸透流による輸送やマグマの移動による加熱が考えられる。以上から、Rio Grande Rift では、リソスフェアの引張によって駆動されるアセノスフェアの上昇によって融解が促進されそのメルトが浅所になんらかの機構で輸送されたと考えられる。二つのサンプルには、輝岩とそれに伴う細粒脈が認められることから、加熱の少なくとも一部は、割れ目系を用いて上昇したマグマによるものであると考えられる。

モロッコ Middle Atlas 山脈の 2 地域の火山に産するカンラン岩ゼノリスの研究を進め、既に詳細な研究を行っているゼノリスのホスト火山岩について全岩、主成分、微量成分、Sr, Nd, Pb 同位体組成を決定し、火山岩の斑晶とマトリックスの岩石・鉱物学的特徴を明らかにした。またカンラン岩ゼノリスの Os 同位体と白金族元素の分析も行った。図 2 に変質効果が最も少ないサンプルの組成 (Bou Ibarghatene は白抜き赤丸, Tafouraut は白抜き青三角と緑四角) と、 K_2O 含有量が 1 wt.% 程度であることから低溶融度を想定し、それらからマグマと平衡にあるかんらん石をかんらん石の $Mg/(Mg+Fe)$ が 0.895 になるまで付け加えることで推定した初生マグマ組成 (Bou Ibarghatene は赤丸, Tafouraut は青三角と緑四角) を Irvine and Baragar (1971) の方法に SiO_2 に不飽和でノルム Albite=0 で $Ca_2SiO_4 > 0$ に計算される場合に負のノルム Quartz を許容して Olivine-Nepheline-Quartz 面にプロットした結果を示す。Bou Ibarghatene と Tafouraut の 2 番目に L.O.I. が少ないサンプル (BI-hNa と TF-hNa) と推定した初生メルト組成は、 $Ol'-Ne'-Qz'$ 三角形の $Ol'-Ne'$ 辺より左側 (Qz' が負) の領域にプロットされる。一方で、Tafouraut の 2 番目に L.O.I. が少ないサンプルと推定した初生メルト組成 (TF-LLOI) は、 $Ol'-Ne'-Qz'$ 三角形の内側にプロットされる。

図 2 には、カンラン岩の高温高压溶融実験の結果を内挿した等圧力線も示した。 $Ol'-Ne'-Qz'$ 三角形の外側にプロットされる組成は、実験データに基づく等圧力線の内挿領域外にプロットされるため、等圧力線を外挿する必要がある。図 2 では、直線的に外挿した等圧力線を細線で示した。この外挿が妥当であるとする、BI-hNa と TF-hNa から推定した初生マグマの溶融圧力は、それぞれ 4.7GPa および 3.5GPa となる。一方 TF-LLOI から推定した初生マグマの溶融圧力は、1.2GPa と推定される。BI-hNa と TF-hNa の推定については、注意が必要である。サンドイッチ法で溶融メルト組成を決定した Takahashi and Kushiro (1983) による 2GPa と 3GPa の等圧力線 (図 2 の細い一点鎖線 TK1983) は、 Qz' の少ない低溶融度量域で極めて非線形となっている。この実験結果による非線形性に従って Sakuyama et al. (2002) と Kimura et al. (2020) による等圧力線を外挿すると、BI-hNa は ~4GPa, TF-hNa は、~2.5GPa と推定される。このようにさらなる検討が必要であるが、圧力については (1) ~3GPa 以上であること、(2) Bou Ibarghatene と Tafouraut を比較すると前者は後者より高压であることは言える。

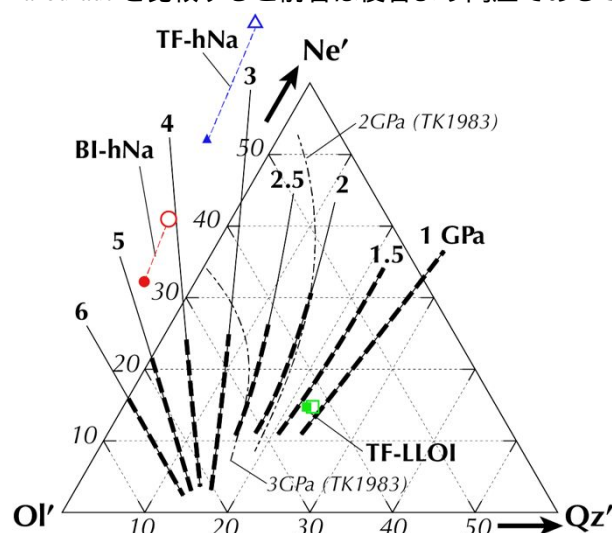


図 2: モロッコの Middle Atlas 火山岩 (白抜き赤丸が Bou Ibarghatene mar (BI) で白抜き青三角と白抜き緑四角が Tafouraut mar (TF) から推定された初生マグマ組成 (赤丸が BI で青三角と緑四角が TF) を Irvine and Baragar (1971) に従って Olivine-Nepheline-Quartz 面 ($Ol'-Ne'-Qz'$ 三角形) に投影した図。Irvine and Baragar (1971) では、石英成分が不足した程度にかかわらず全てが $Ol'-Ne'$ 辺上に圧縮されるが、ノルム Ca_2SiO_4 の計算直前に計算される負の石英成分を許容してプロットした。等圧力線は、Kimura et al. (2020) と Sakuyama et al. (2014) による。実験がある範囲内を太破線で示し外挿した領域は細い実線で示す。より低溶融度に相当する条件で実験した Takahashi and Kushiro (1983) による 2GPa と 3GPa の等圧力線 (TK1983) は、低溶融度量域で極めて非線形となっている。

図 2 の結果に基づいて、実験およびそのコンパイルによって推定されているソリダスを用いてポテンシャル温度を推定した (図 3)。TF-LLOI は、全てのソリダスより高温側にプロットされるので、溶融マントルの断熱勾配を用いてソリダス温度圧力を推定し、そこから固体マントルの断熱勾配を用いて 1 気圧まで外挿しポテンシャル温度を求めた。BI-hNa と TF-hNa はソリダスより低温側にプロットされることから、 H_2O や CO_2 の存在が示唆されるが、溶融度が小さいと仮定して固体マントルの断熱勾配を用いてポテンシャル温度の最低推定値を求めた。結果は、図 3 に示すように ~1400°C となった。この温度は、現在の中央海嶺下のポテンシャル温度の上限値の範囲内におさまる (1350 - 1400°C, mean 1365±26°C; Putirka, 2009; Herzberg et al., 2007; Herzberg and Asimow, 2008; Lee et al. 2009)。

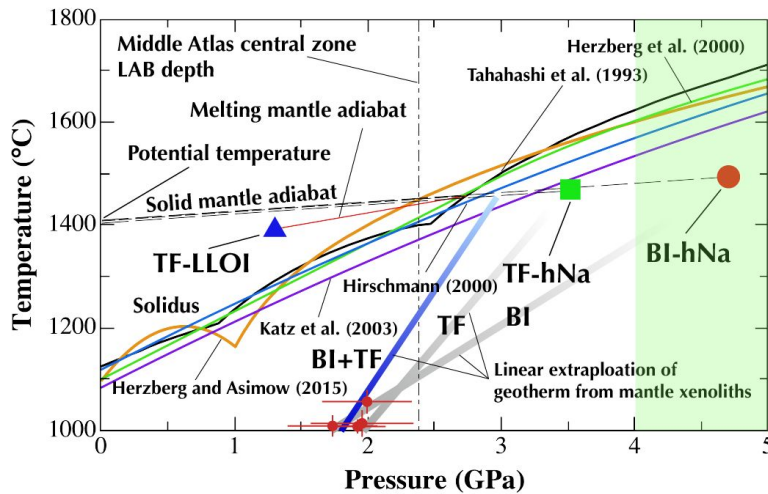


図3: モロッコの Middle Atlas 火山岩から計算された初生マグマ組成を $Ol^1 - Ne^1 - Qz^1$ 三角形 (図2) にプロットし等圧力線と比較することで得られた熔融圧力と Sakuyama et al. (2014)の温度計による温度をプロットした。赤丸が Bou Ibarghatene (BI) で青三角と緑四角が Tafouraut (TF) 熔融実験による始源的マンタルのソリダス曲線も示す。かんらん岩ゼノリスを用いて推定したリソスフェアの温度圧力勾配の深部へ深部まで線形外挿したデータも示した。小さい誤差付きの赤丸は、Bou Ibarghatene ゼノリスから推定した温度圧力である。Middle Atlas 中央部で Teixell et al., (2005)などによって推定された LAB の深さを一点鎖線で示した。また Middle Atlas 縁辺部の LAB の深さ範囲を緑色の網掛け領域で示した。

モロッコの Middle Atlas のかんらん岩ゼノリスの温度圧力推定によって得られた地温勾配は、Middle Atlas 中央部に位置する Bou Ibarghatene と縁辺部に位置する Tafouraut では異なり、前者ではゼノリス由来深度の温度は高いが勾配はゆるく、後者はゼノリス由来深度の温度は低い勾配はきつい。両者を統合してものは、さらにきつい勾配を示す(図3)。BI と TF 個別の外挿線は途中で交差し推定したそれぞれの熔融条件近傍に到達している。統合した外挿線は、 1400°C の断熱線とソリダスの交差点近傍 (深さ $\sim 90\text{km}$) に達する。かんらん岩ゼノリス中の鉱物の累帯構造の解析から、前者では深所で加熱が検出されるが、後者では冷却史のみを経験している。また、地震波、地温勾配、地形などの地球物理学的観測データに基づいて Middle Atlas の外側では、 $140\text{-}200\text{km}$ の深さにある LAB がその直下であ、 $\sim 80\text{km}$ 程度と浅くなっているとされ (Teixell et al., 2005), リソスフェアの薄化モデルが提唱されている (例えば, Duggen, et al., 2016)。以上の情報をもとにして Middle Atlas の LAB の時間空間変化のシナリオを提案する。

Bou Ibarghatene の熔融条件は 4GPa 以深であると考えられるので、そのマグマ生成は Middle Atlas のリソスフェアが薄くなり始める段階で H_2O や CO_2 の多い $1400\text{-}1500^{\circ}\text{C}$ のマンタルの上昇によって引き起こされたと考えられる。Middle Atlas 中央部では、リソスフェアの薄化が進行することでリソスフェアが長期間にわたって温められ加熱を記録したであろう。一方で Middle Atlas 縁辺部では、リソスフェアの薄化が遅れて進行しマグマ生成は現在の Middle Atlas 中央部の LAB 深さに近い浅所までマンタルが上昇して熔融した。より浅所まで上昇したにもかかわらずリソスフェアが過熱イベントを記録していないのは、上昇が遅れたためであろう。このシナリオでは Tafouraut のポテンシャル温度が Bou Ibarghatene より低いことが期待されるが、現時点で両者の差は、Middle Atlas の中央部と縁辺部のアセノスフェアの H_2O や CO_2 を含めた化学組成に関して制約できていないために、解決できない。ソースマンタル組成推定は、今後の課題である。

本研究で対象とした3地域から得られた結果は以下のようにまとめることができる。

(1) 東北日本一ノ目湯火山下では、背弧海盆拡大によって $70\text{-}80\text{km}$ 程度の深さの定常的 LAB に向かってリソスフェアが厚くなっていく途上で沈み込みによって誘発された上昇流によってリソスフェアが浸食され 40km 程度に薄くなった。

(2) コロラド高原下では、アセノスフェア物質の底付けによってリソスフェアが加熱され薄くなり、それに引き続いて冷却することで厚くなった。リソスフェアの厚さは 120km に達し、定常的 LAB である海洋リソスフェアの $70\text{-}80\text{km}$ より厚い (120km 以上) 定常的 LAB の存在を示唆している。リソスフェア物質が長期的な物質輸送により H_2O や CO_2 に富むようになり、そのためソリダス温度が低下することで、同じポテンシャル温度に対してもより深いところで熔融条件に達するためであると解釈される。

(3) Rio Grande rift 下では、リソスフェアの引張によって駆動されるアセノスフェアの上昇によって融解が促進されそのメルトが浅所になんらかの機構で輸送された。加熱の少なくとも一部は、引張場で形成が促進される割れ目系を用いて上昇したマグマによるものである。ゼノリス由来深度は最大で 60km であることから、引張場になる前には定常的 LAB であったと考えられる。

(4) モロッコの Middle Atlas 中央下では、 $\sim 140\text{-}200\text{km}$ あったリソスフェアが $\sim 80\text{km}$ まで薄くなる初期段階により深部でマグマ生成が起き、その後 LAB が浅くなりつつ Middle Atlas 縁辺下で浅い熔融が生じた。このため、リソスフェアの地温勾配は中央部でゆるく縁辺部できつくなるような空間変化が生じた。この深さで定常的 LAB 仮説を満たしている可能性が示唆される。

(5) 本研究から「定常的 LAB 仮説」を満たす条件は長期間にわたって成立せず、LAB は基本的に動的であることがわかった。ただし、「定常的 LAB 仮説」が成立している条件が初期条件や境界条件として認識できること、 $90\text{km}\text{-}120\text{km}$ 程度の深さで仮説を満たす条件があり得、それはポテンシャル温度とアセノスフェア組成に支配されていることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 20件／うち国際共著 11件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Akizawa Norikatsu, Ozawa Kazuhito, Masako Yoshikawa	4. 巻 127
2. 論文標題 Decoding pressure-temperature-deformation history of the mantle: Critical review on the Horoman peridotite complex and new proposals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 269 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2021.0005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akizawa Norikatsu, Ohara Yasuhiko, Okino Kyoko, Ishizuka Osamu, Yamashita Hiroyuki, Machida Shiki, Sanfilippo Alessio, Basch Valentin, Snow Jonathan E., Sen Atlanta, Hirauchi Ken-ichi, Michibayashi Katsuyoshi, Harigane Yumiko, Fujii Masakazu, Asanuma Hisashi, Hirata Takafumi	4. 巻 8
2. 論文標題 Geochemical characteristics of back-arc basin lower crust and upper mantle at final spreading stage of Shikoku Basin: an example of Mado Megamullion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-021-00454-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Akizawa Norikatsu, Yamaguchi Asuka, Tani Kenichiro, Ishikawa Akira, Fujita Ryo, Choi Sung Hi	4. 巻 59
2. 論文標題 Highly refractory dunite formation at Gibbs Island and Bruce Bank, and its role in the evolution of the circum-Antarctic continent	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Canadian Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1731 ~ 1753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3749/canmin.2100030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuritani Takeshi, Sato Eiichi, Wada Keiji, Matsumoto Akiko, Nakagawa Mitsuhiro, Zhao Dapeng, Shimizu Kenji, Ushikubo Takayuki	4. 巻 417
2. 論文標題 Conditions of magma generation at the Me-akan volcano, northern Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107323 ~ 107323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2021.107323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuritani Takeshi, Shimizu Kenji, Ushikubo Takayuki, Xia Qun-Ke, Liu Jia, Nakagawa Mitsuhiro, Taniuchi Hajime, Sato Eiichi, Doi Nobuo	4. 巻 11
2. 論文標題 Tracing the subducting Pacific slab to the mantle transition zone with hydrogen isotopes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18755-18755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-98307-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sas May, Shane Phil, Kuritani Takeshi, Zellmer Georg F, Kent Adam J R, Nakagawa Mitsuhiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Mush, Melts and Metasediments: a History of Rhyolites from the Okataina Volcanic Centre, New Zealand, as Captured in Plagioclase	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Petrology	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/petrology/egab038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Taniuchi Hajime, Kuritani Takeshi, Nakagawa Mitsuhiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Na/K Diversity of Primary Basaltic Magmas Induced by the Separation of Slab-derived Supercritical Liquid: Implications from Alkali Basaltic Lavas from Rishiri Volcano, Southern Kuril Arc	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Petrology	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/petrology/egab099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Tomo, Ozawa Kazuhito, Bodinier Jean-Louis, Boudier Françoise, Sato Yuto	4. 巻 372-373
2. 論文標題 Thermal and decompression history of the Lanzo Massif, northern Italy: Implications for the thermal structure near the lithosphere-asthenosphere boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 105661 ~ 105661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2020.105661	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ueda Tadamasa, Obata Masaaki, Ozawa Kazuhito, Shimizu Ichiko	4. 巻 125
2. 論文標題 The Ductile to Brittle Transition Recorded in the Balmuccia Peridotite Body, Italy: Ambient Temperature for the Onset of Seismic Rupture in Mantle Rocks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB017385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Takafumi, Ozawa Kazuhito, Kuritani Takeshi, Iizuka Tsuyoshi, Nakagawa Mitsuhiro	4. 巻 105
2. 論文標題 Thermal state of the upper mantle and the origin of the Cambrian-Ordovician ophiolite pulse: Constraints from ultramafic dikes of the Hayachine-Miyamori ophiolite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1778 ~ 1801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小澤一仁・佐藤侑人・木村皐史・田上創・Hassan Eman Saad Abdelsalam	4. 巻 1
2. 論文標題 モホロビッチ不連続面 (Moho) とリソスフェア-アセノスフェア境界 (LAB) の一致 (MohoLAB) : 大陸地殻の進化を支配する重要な境界	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 新地球	6. 最初と最後の頁 3-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuritani Takeshi, Nakagawa Mitsuhiro, Nishimoto Jumpei, Yokoyama Tetsuya, Miyamoto Tsuyoshi	4. 巻 366-367
2. 論文標題 Magma plumbing system for the Millennium Eruption at Changbaishan volcano, China: Constraints from whole-rock U-Th disequilibrium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 105564 ~ 105564
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2020.105564	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taniuchi Hajime, Kuritani Takeshi, Nakagawa Mitsuhiro	4. 巻 354-355
2. 論文標題 Generation of calc-alkaline andesite magma through crustal melting induced by emplacement of mantle-derived water-rich primary magma: Evidence from Rishiri Volcano, southern Kuril Arc	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 105362 ~ 105362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2019.105362	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taniuchi Hajime, Kuritani Takeshi, Yokoyama Tetsuya, Nakamura Eizo, Nakagawa Mitsuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 A new concept for the genesis of felsic magma: the separation of slab-derived supercritical liquid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8698 ~ 8698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-65641-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Brahm R, Zellmer G F, Kuritani T, Sakamoto N, Yurimoto H, Nakagawa M, Sato E	4. 巻 63
2. 論文標題 Olivine Melt Inclusion Constraints on Some Intensive Properties of Subvolcanic Crystal Mushes and Their Evolution through Boundary Layer Fractionation in Northern Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Petrology	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/petrology/egac016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Liu J., Xia Q. K., Sun H., Hanski E., Kuritani T., Gu X. Y., Chen H.	4. 巻 127
2. 論文標題 Compositional Variation of Picrites in the Emeishan Large Igneous Province Modulated by Water in the Mantle Plume	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB023584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Liu Jia, Tao Chunhui, Zhou Jianping, Shimizu Kenji, Li Wei, Liang Jin, Liao Shili, Kuritani Takeshi, Deloule Etienne, Ushikubo Takayuki, Nakagawa Mitsuhiro, Yang Weifang, Zhang Guoyin, Liu Yunlong, Zhu Chuanwei, Sun Hao, Zhou Jingjun	4. 巻 584
2. 論文標題 Water enrichment in the mid-ocean ridge by recycling of mantle wedge residue	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117455 ~ 117455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2022.117455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Saad Eman, Ozawa Kazuhito, Kuritani Takeshi, Khudeir Ali A.	4. 巻 118
2. 論文標題 Magma fractionation and emplacement mechanism in a subvolcanic plumbing system in a continental region: constraints from the late Neoproterozoic Wadi Dib ring complex in the Eastern Desert, Egypt	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.220801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuritani Takeshi	4. 巻 450-451
2. 論文標題 Geochemical constraints on the evolution of the magmatic system leading to catastrophic eruptions at Aira Caldera, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 107208 ~ 107208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2023.107208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akizawa Norikatsu, Hirano Naoto, Matsuzaki Kenji M., Machida Shiki, Tamura Chiori, Kaneko Junji, Iwano Hideki, Danhara Tohru, Hirata Takafumi	4. 巻 444
2. 論文標題 A direct evidence for disturbance of whole sediment layer in the subducting Pacific plate by petit-spot magma-water/sediment interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Marine Geology	6. 最初と最後の頁 106712 ~ 106712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.margeo.2021.106712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Yuto, Ozawa Kazuhito	4. 巻 128
2. 論文標題 Thermal Evolution of the Lithosphere Asthenosphere Boundary Beneath Arc and Its Geodynamic Implications: Depth Variation of Thermal Histories of Mantle Xenoliths From Ichinomegata, Northeast Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JB027208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 *Kazuhito Ozawa, Eman Saad Hassan, Hideto Yoshida, Ali Abdel-Kader Khudeir
2. 発表標題 New deformation proxy for alkaline felsic rocks: Na-K zoning of alkali feldspar in syenites from the Wadi Dib alkaline ring complex, Eastern Desert, Egypt
3. 学会等名 Japanese Geoscience Union
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐敷和, 柵山徹也, 木村純一
2. 発表標題 西南日本, 第四紀横田アルカリ玄武岩マグマの成因
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林裕馬, 柵山徹也, 清水健二, 牛久保孝之, 羽生毅, 常青, 木村純一
2. 発表標題 中国東北部五大連池市周辺域の新生代アルカリ玄武岩から推定されるマントル揮発成分量
3. 学会等名 日本火山学会 2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ozawa, C. J. Garrido, K. Hidas, J-L. Bodinier, T. Aoki, F. Boudier
2. 発表標題 Plagioclase peridotite or olivine-plagioclase assemblage in orogenic peridotites: its implications on high-temperature decompression of the subcontinental lithosphere-asthenosphere boundary zone
3. 学会等名 European Geoscience Union General Assembly
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ozawa, C. J. Garrido, K. Hidas, J-L. Bodinier, T. Aoki, F. Boudier
2. 発表標題 Olivine-plagioclase assemblage in orogenic peridotites: Proxy for the extent of lithosphere thinning and asthenosphere shallowing
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤一仁・田上創
2. 発表標題 Spatial variation of lithosphere-asthenosphere interaction revealed from peridotites and gabbros in the Hidaka metamorphic belt
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saad, E., Ozawa, K., Kuritani, T., and Khudeir, A. A.
2. 発表標題 Fractionation of a shallow silicic magmas body through interaction of collapse of volcanic structure and roof boundary layer documented in the Wadi Dib ring complex, Eastern Desert of Egypt
3. 学会等名 European Geoscience Union Annual Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saad, E., Ozawa, K., Kuritani, T., and Khudeir, A. A.
2. 発表標題 Coupling of fractionation and collapse of volcanic pile and roof boundary layer of a magma body documented in the Wadi Dib ring complex, Eastern Desert of Egypt
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saad, E., Ozawa, K., Kuritani, T., and Khudeir, A. A.
2. 発表標題 Estimation of melting conditions and potential temperature for highly alkaline fractionated trachybasalts: Wadi Dib ring complex in the Nubian Shield, Eastern Desert of Egypt
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ozawa, K., Sato, Y., Youbi, N., and Boumehdi, M. A.
2. 発表標題 Deformation coupled with thermal event in the lithosphere-asthenosphere boundary zone: microstructural evidence from crystal Interface migration in peridotite xenoliths
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗谷豪・清水健二・牛久保孝行・Xia Qun-ke・Liu Jia・中川光弘・谷内元・佐藤鋭一・土井宣夫
2. 発表標題 斑晶メルト包有物の水素同位体比による沈み込む太平洋プレートの追跡
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗谷豪・中川光弘・松本亜希子
2. 発表標題 桜島の完新世噴出物のSr-Nd-Pb同位体比分析に基づくマグマ系の進化についての検討
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akizawa, N., Ishikawa, A., Niwa, Y., Alard, O., Greau, Y., Hirano, N., Machida, S.
2. 発表標題 Geochemical stratigraphy of oceanic lithosphere reconstructed by spinel/garnet peridotite xenoliths from petit-spots in the northwestern Pacific
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋澤 紀克, 小澤 一仁, 小木曾 哲, 石川 晃, ウォリス サイモン, 川本 竜彦, 田村 明弘, 森下 知晃
2. 発表標題 Evidence for suboceanic small-scale convection from a “garnet”-bearing lherzolite xenolith, Aitutaki Island, Cook Islands
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kang M., Sakuyama T., Shimizu K., Ushikubo T.
2. 発表標題 Geochemistry of Melt Inclusion in Scoria, Jeju Island, South Korea
3. 学会等名 2023 Joint Fall Meeting of Korean Geological Societies (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 秋澤 紀克 , 小澤 一仁編集	4. 発行年 2020年
2. 出版社 マントル出版	5. 総ページ数 67
3. 書名 新地球	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	秋澤 紀克 (Akizawa Norikatsu) (40750013)	東京大学・大気海洋研究所・助教 (12601)	
研究分担者	栗谷 豪 (Kuritani Takeshi) (80397900)	北海道大学・理学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	柵山 徹也 (Sakuyama Tetsuya) (80553081)	大阪公立大学・大学院理学研究科・准教授 (24405)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
エジプト	Assiut University		
モロッコ	Cadi Ayyad University		
スペイン	University of Granada		

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	University of Montpellier			