

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02982

研究課題名(和文)スピネルかんらん岩ゼノリスの高精度圧力計開発：リソスフェア薄化機構の解明への応用

研究課題名(英文) Development of high-precision geobarometry for spinel lherzolite xenoliths:
Applications to resolving mechanism of the lithosphere thinning

研究代表者

小澤 一仁 (Ozawa, Kazuhito)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：90160853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：地球の熱史に大きな影響を及ぼす大陸リソスフェアの厚さと熱流量の変動を知るために、テクトニクスが異なる3地域に産するザクロ石かんらん岩およびスピネルかんらん岩ゼノリスを用いてマンツルの温度構造を高い精度と確度で決定する方法の開発に成功した。モロッコの中アトラス地域では山脈中央部でより高温、縁辺部でより低温の温度構造が推定されリソスフェアの薄化の空間変化を解明した。東北日本弧一ノ目淵では、温度構造の推定に成功すると同時に、メルトの存在を示すガラスや流体の存在を示す組織、さらに変形組織の深さ変化を明らかにし、リソスフェアとアセノスフェア境界が含水ソリダスによって支配されていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球の熱史を理解することは、人類がこの地球上に住むことが可能となった表層環境がどのようにして形成されたのかという本質的な疑問に答える上で避けて通ることができない。表層環境の形成と進化は、地球内部と表層での熱や物質のやり取りによって支配されている。本研究では、この本質的な疑問に答えるために、これまで困難であった浅所のリソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)付近の温度構造をマンツル由来物質を用いて高精度で決定する手法を開発し、数ヶ所の大陸・島弧地域に適用して、温度構造決定に成功した。この手法を全球のLABに適用することによって、地球熱史理解がさらに進むことが期待される点で学術的な意義がある。

研究成果の概要(英文)：In order to understand temporal variations of heat flow through the continental lithosphere, which plays a critical role in the thermal history of the Earth, a high-resolution method for estimating derivation depth of mantle xenoliths entrapped in rapidly ascending magmas was developed and applied to several regions of arc and continental environments. Our study of two localities in the Middle Atlas of Morocco has successfully estimated the derivation depth and temperature, which are characterized by higher temperature and low gradient in the central area than in the marginal area, suggesting extensive lithosphere thinning in the central area. Our study of xenoliths from the Ichinomegata maar of the Northeastern Japan arc has again successfully estimated their derivation depths. The depth variations of temperature and microstructures relevant to the presence of melt/fluid and those of deformation show that the wet solidus governs the depth of lithosphere-asthenosphere boundary.

研究分野：地球惑星物質科学

キーワード：上部マンツル スピネルかんらん岩 リソスフェア アセノスフェア 地質温度圧力計

1. 研究開始当初の背景

厚さ 30km~300km で地球表層を覆い弾性的に振る舞うリソスフェアの変動は、地球内部の熱が地球表層を通して地球外へ放出される速度を支配しており、従って地球熱史さらには地球表層環境史に大きな影響を与える。リソスフェアの変動で最も重要な点は、その厚さの全球空間変化とその時間変化である。現在のリソスフェアは海洋リソスフェアと大陸リソスフェアに大別され、一般に海洋リソスフェアは、時間とともに厚くなり、100km 以下程度までに達する。一方で、現在の大陸リソスフェアは 40km~300km と大きな厚さの空間変化を示し、表層地質や地殻年代との相関が認められるが、その変化が何に支配されているかが良くわかっていない。大陸リソスフェアは全球表面の約 4 割を占めるにもかかわらず、大陸リソスフェアを通して放出される地球内部の熱は全球の 1~2 割程度であり (Jaupart & Mareschal, 2011)、地球にとっては断熱材のような役割をはたしている。このため、大陸リソスフェアの専有面積と厚さの時間・空間変化に支配されて放出されるマントルからの熱流量とその変動を明らかにすることは、地球熱史を解明する上で不可欠である。この課題を解決するためには、二つの対照的な側面の理解が必要である。第 1 は、リソスフェアはどのようにして厚くなるのか (厚化機構)、その限界を決めているのは何かである。第 2 は、厚いリソスフェアはどのように薄くなるのか (薄化機構)、その限界を決めているのは何かである。視点を変えれば、両課題は、リソスフェアとその厚さを決定しているアセノスフェアとの境界(Lithosphere-Asthenosphere Boundary: LAB)で起きるリソスフェアとアセノスフェア間での熱・物質・力学相互作用の実体を明らかにすることにつながる。

現在の大陸下 LAB の深さとその広域的空間変化は、主として地球物理学的観測によって推定されて、プレート運動が遠く及ばない大陸内部で、古い大陸リソスフェアが薄化していると解釈されるケース (e.g., Levander et al., 2011; Crow et al. 2011; Duggen et al., 2009) が数多く報告されている。上述のように大陸リソスフェアの薄化は、地球の熱放出を加速させる上に、プレートテクトニクスにとって謎の多いプレート沈み込み開始を誘引するため(Bird, 1979)、その機構を理解することは重要である。大陸リソスフェアの薄化は、ダイナミックな現象であり、その厚さが連続的に空間変化する地域の熱流量とその時空変化を知ることは、薄化機構解明にとって不可欠なアプローチである。しかしながら、過去に遡ることができない地球物理学的観測だけでこの問題の解決に迫ることはできない。地球熱放出に関わる大陸リソスフェアの挙動を知る上で重要な過去情報は火山岩に含まれるリソスフェアを構成するマントル物質の断片であるマントルゼノリスより得る事ができる。マントルゼノリスは数十 cm 以下のマントルの断片であり、マントルからの情報を抽出するためには、ゼノリスがどの深さにあったのか (由来深度) を推定することが極めて重要である。その推定値から、大陸リソスフェアの温度の深さ変化 (温度構造) がわかり、アセノスフェアからの熱流量を知ることができる。このような温度構造を定常的熱輸送モデルによって再現することで、リソスフェアの熱流量が推定されている。

ゼノリスはマグマによって地質学的に見ればほぼ瞬間的に地球表層に運ばれ冷却凍結されるため、ゼノリス構成鉱物が均質で化学平衡にあり、適切な熱力学に基づく温度圧力計が適用できれば、個々の試料がマグマに取り込まれる直前に位置していた場の温度と圧力を決定でき、さらに試料が位置していた深さに幅がある場合には、ゼノリスのみで温度構造も熱流量も推定できる。ゼノリスから得られる地温勾配を再現しようとした研究では、150km 以深のデータが大きくばらつくことが指摘されており、地温勾配推定値の不確定性は±50%以上に達する。このため、多くの研究では推定温度・圧力値を用いそれらの相関は重視しない (Lenardic and Moresi, 2000; Sleep, 2003; Davis et al., 2003; Artemieva, 2006; McKenzie and Priestley, 2008; Eaton et al., 2009 等)。また、150km 以深のばらつきは地温勾配からの温度変動によるとされているが、温度の時間変化が必ずもたらす非平衡過程は考慮されていない。ゼノリスの鉱物は、程度の差こそあれ必ず化学不均質性 (累帯構造) を持つが、これまでのほとんどの研究では、化学平衡を仮定して温度と圧力が推定されている。一方で、累帯構造は、ダイナミックな現象の貴重な記録であり、地温勾配の時間変化に関する情報を提供する。さらに大陸リソスフェアが 50km 前後まで薄化するケースについては、スピネルかんらん岩が安定となる 60km 以浅の圧力範囲は、有用な圧力計がないために空白域になっている。このような浅所領域で正確な圧力推定を行うと同時に、ゼノリス鉱物に化学組成の累帯構造として記録されている非平衡過程を読み解くことで地温勾配の時間変化を推定する必要がある。

2. 研究の目的

上述した背景を踏まえて、本研究の目的は、リソスフェアの厚さ変動の一側面である薄化に焦点を絞り、アセノスフェアとの熱・物質・力学相互作用の機構を解明することである。本研究では、地質学的にはほぼ瞬間に地球内部から抽出されたマントル物質 (マントルゼノリス) を用いて、マントルゼノリスの圧力推定が困難とされてきた 60km 以浅で安定なスピネルかんらん岩にも適用可能な圧力計を開発することでゼノリスの由来深度を±数 km の精度で決定し、その物質に記録されている構成鉱物に記録されている温度に敏感な非平衡現象から熱・物質・力学相互作用の変動を読み解く。これを地球内部からの熱放出効率に大きな影響を与えるリソスフェアの薄化が報告されている世界の大陸地域の火山群から数地域を選択し、そこに産するマントルゼノリスに本研究の手法を適用し、大陸リソスフェアの薄化機構を解明する。

研究対象としては、厚い大陸リソスフェアからモロッコの中アトラス地域とアメリカ合衆国コロラド高原とその周辺地域、島弧リソスフェアから東北日本の背弧にある一ノ目潟マールを選択した。大陸リソスフェアの二地域については、これまでも地球物理学観測や地質学的考察からマンツルの薄化モデルが提案されているがその実体は不明である。東北日本弧については、火山弧下の LAB が地殻とマンツルの境界であるモホ面に達している可能性が地球物理学的観測から示唆されている。背弧での LAB の理解を深める事で、島弧下 LAB の時空変化を明らかにし、極端に薄化したリソスフェアが、島弧のマグマ生成、地殻の改変成長に果たす役割の理解に迫ることができるはずである。

3. 研究の方法

本研究では、まずスピネルかんらん岩ゼノリスを多産するモロッコの新第三紀-第四紀アルカリ玄武岩地域で野外調査とサンプリングを実施する。実施にあたっては、モロッコの Cadi Ayyad 大学 N. Youbi 教授の協力を得る。広域的に分布する複数の火山で、ゼノリスを地表にもたらした噴火ユニットの同定、ユニット内のゼノリス分布とサイズ分布を決定し、ゼノリスとホストの火山岩が接しているサンプルをできるだけ多く採取する。持ち帰った試料の薄片を作成する。温度・圧力推定を行うサンプルは、偏光顕微鏡観察に基づいてその由来深さと岩相の多様性をできるだけ広げるように厳選する。電子プローブマイクロアナライザーを用い、選択した琢磨薄片の全構成鉱物の不均質性を明らかにし、ゼノリスが経験した温度・圧力・化学組成変化によって生じた不均質性と微細構造の関係を把握する。これらがわかると、マグマに取り込まれる以前の情報とマグマに取り込まれてからの情報を分離することが可能となる。鉱物内の元素分布などを拡散反応モデルによって定量的に再現することで、ゼノリスがマグマに取り込まれる直前の条件を記録している鉱物粒子中の位置と成分を特定する。それらと適切な温度圧力計を組み合わせて、マグマへの捕獲直前の地温勾配、さらには温度・圧力履歴の深さ変化を定量的に明らかにする。

一ノ目潟およびコロラド高原とその周辺地域については、所有しているゼノリスサンプルを用い、モロッコのゼノリスと同様のアプローチで研究を進める。一ノ目潟については、これまでの詳細な研究でわかっている火山層序とゼノリスの特徴との関係に関する情報も用いる。これらの研究地域でのマンツルゼノリスの由来深度を推定する際に用いる温度圧力計については、それぞれの地域でのマンツル物質が辿った温度・圧力・化学環境の履歴に違いがあると考えられるので、より客観的に適切な温度圧力計を選択する。

本研究の目的である高精度での圧力推定を可能とするためには、ゼノリス由来深度の推定精度と確度をできる限り高めることが重要である。確度向上のためには、鉱物の化学組成に基づく地質温度圧力計の適用だけでは不十分であるために、ゼノリス試料やそれぞれの地域から得られる他の情報を用いて温度圧力の推定絶対値を検証する必要がある。ゼノリス試料そのものから得られるものとしては、マグマによるゼノリスの輸送時間スケールの推定と化学組成にあまり依存せず温度・圧力に敏感である相関係がある。前者は速い反応の進行度を記録している化学組成不均質を用いる。これらは、かんらん石中の Ca の累帯構造とかんらん石とスピネルの間での Fe-Mg 交換反応による不均質性である。さらに、ゼノリス中やゼノリス表面に記録された反応過程を示す組織から温度圧力とその変化を読み取る。これらは、エネルギー分散形 X-線分析装置・電子線後方散乱回折装置付の電界放射形走査電子顕微鏡を用いて定量化する。対象地域から得られる情報としては、当該地域の地球物理観測によって推定される地殻とマンツルの構造である。第一は、地殻とマンツルの境界（モホ面）深度、第二は地球物理学観測から推定されているリソスフェアの厚さ、第三は、震源深度分布の下限である。ゼノリスから推定した温度圧力とこれらの情報の整合性を確認することで推定深度の確度を高めることができる。

4. 研究成果

29年度に、モロッコの Cadi Ayyad 大学 Youbi 教授と Boumehdi 教授の協力を得て、スピネルかんらん岩ゼノリスを多産するモロッコの新第三紀-第四紀アルカリ玄武岩地域で野外調査を実施し、有益な野外情報を得ると同時に大量のサンプル採集を行った。広域的に分布する複数の火山を対象とし、噴火ユニットの同定、ユニット内のゼノリス分布とサイズ分布の決定、ゼノリスとホストが接しているサンプルの採取に行った。特にゼノリスを大量に産し、Middle Atlas 山脈の中央部と縁辺部に位置している Bou-Ibalrhathene マール(BI)と Tafraoute マール(TF)では、火山砕屑岩層中に産する試料について、産出層序と肉眼観察による粒径やコンパクト度合いといった特徴に相関関係があることがわかった。ゼノリスを大量に産する 2 地域で火山地質学とゼノリス岩石学を結合させることができた点は、最大の成果であった。これら二つのマールからの試料の分析解析に焦点を絞って研究をすすめた。

2 地域から得られるゼノリスの詳細な分析の結果、直方輝石の Wo ($Ca/(Mg+Fe+Ca)$ 成分) 含有量、あるいは Wo Lindsley (Lindsley (1983)の方法により輝石台形に投影した時の Wo 値) とかんらん石中の CaO 含有量が極めて良い相関関係を示していること、BI と TF では、直方輝石とかんらん石の化学組成に明瞭な差があることが判明した。このことは、2 地域のマンツルの化学組成差だけでは説明できない温度圧力条件の差が存在し、それはかんらん石の CaO 含有量と直

方輝石の W_o 含有量を用いた温度圧力計を用いることで推定できることを示唆している。

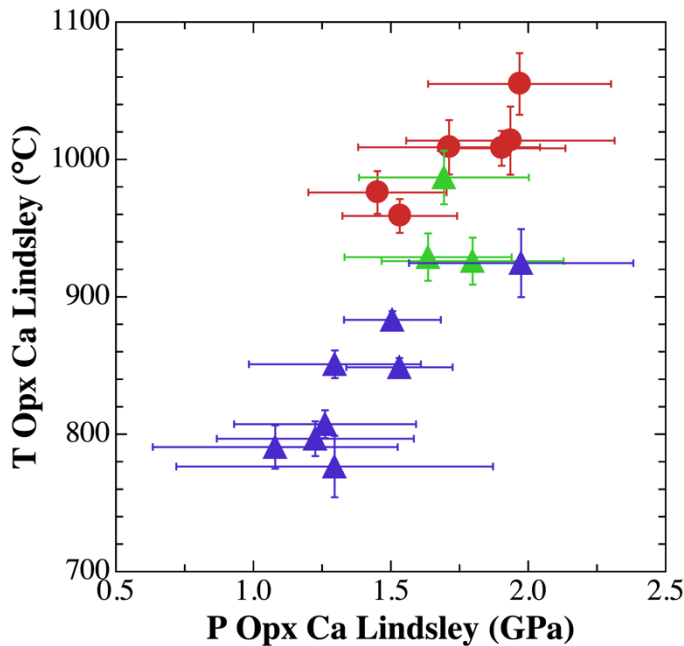


図1：かんらん石の CaO 含有量と直方輝石中の $Ca/(Mg+Fe+Ca)$ 成分量を用いて推定したモロッコの Middle Atlas 山脈の Bou-Ibalrhatene マール(赤)と Tafraoute マール(青と緑)産マントルゼノリスのホストマグマに取り込まれる直前の温度と圧力。

図1に Köhler and Brey (1990)の実験結果を用いて校正した Ca-in-Olivine 温度圧力計 (Aoki et al., 2020) と Lindsley (1983)の Ca-in-Opx 温度圧力計 (KUILF) によって推定したゼノリスがホストマグマに取り込まれる直前に記録していた温度と圧力の関係を示した。この図より、TF に比べて BI のゼノリスが噴火直前により高温で緩い地温勾配にあったマントルに由来したこと、高温・高圧領域で両者の温度構造は一致する傾向を示し、両者の差をもたらした要因が共通な

熱源に関係することがわかった。この結果から、Middle Atlas 山脈の縁辺部よりも中央部直下により浅所まで高温のアセノスフェアが上昇し、BI の最深部のサンプルが地球物理学的に観測されているリソスフェア-アセノスフェア境界 (LAB) 近傍に位置していることがわかる。輝石中の CaO , Al_2O_3 , Cr_2O_3 の累帯構造は、2.0GPa に達する深部由来のゼノリスほど加熱を経験しており、1.5GPa 以下のゼノリスは弱い加熱を経験したかあるいはまったく経験していないことを示している。さらに詳細に累帯構造の解析により、マグマによる加熱の前に別の加熱(第一加熱ステージ)が起きた事がわかった。第一加熱ステージについては、加熱温度の推定も行った。その結果、より深部でより高温で加熱されていることがわかった。第一加熱ステージの加熱時間差は、瞬間加熱と熱伝導を仮定すると数百 m 程度の違いを意味することから、この加熱は瞬間的ではなく、リソスフェア深部から徐々に進行したことを示している。以上の結果は、リソスフェアの薄化に伴うリソスフェアとアセノスフェア間での熱のやりとりが極めて動的であり熱伝導輸送に比べて極めて短時間で起きる機構によっていることを示している。

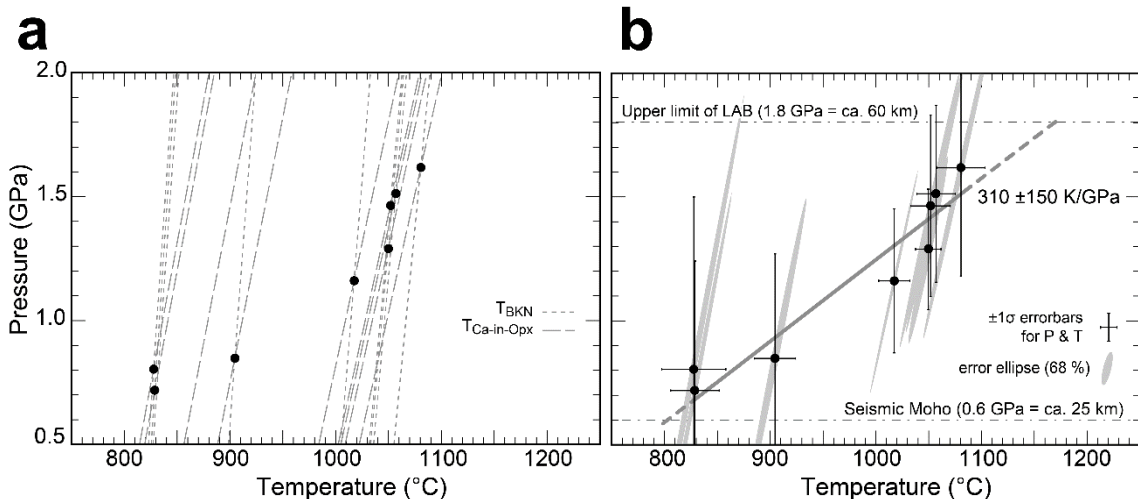


図2：一ノ目瀉ゼノリスに含まれる単斜輝石と直方輝石の化学組成から推定した由来温度圧力。(a)破線 (Opx-Cpx) と点線 (Ca-in-Opx) で示した地質温度圧力計の交点として推定されるそれぞれの捕獲岩の温度圧力。(b)輝石の化学組成のバラつきからモンテカルロ法を用いて求めた温度圧力の推定誤差。Sato and Ozawa (2019)による。

一ノ目瀉産のゼノリスについてもモロッコ Middle Atlas 山脈と同様のアプローチで圧力推定を行った。一ノ目瀉で適用した温度・圧力計は、モロッコ産ゼノリスとは異なり、かんらん石中の CaO 含有量を用いず、Brey and Köhler(1990)による Ca-in-Opx 温度圧力計と Opx-Cpx 温度圧力計である。これらの温度圧力計は、同一の実験に基づいていること、関連する鉱物が二つの輝石のみであることから温度圧力推定にとって理想的なペアである。図2に調べた9つのゼノリスサンプルのうちで成功した8つの温度圧力推定結果をその推定方法と誤差推定も含めて示す。

この由来深度推定に基づいて 28-55 km の範囲にわたって噴出直前のマントル構造を復元した。捕獲岩の熱史・変形微細構造・鉱物組み合わせ・部分熔融の有無について、明瞭な系統的深さ変化が認められた。一ノ目瀉下のマントルは、単調冷却を呈し・比較的還元的であり・弱変形で粗粒かつ等粒状組織を示し・斜長石と角閃石を含んでいて・流体包有物を含みサブソリダス条件にあった浅部領域(28-32 km)と、冷却後強加熱を呈し・比較的酸化的であり・強変形で細粒かつポーフィロクラスチック組織を示し・斜長石と角閃石を含まず、ガラスを含み部分熔融していた深部領域(41-55 km)から構成されていることがわかった。

変形組織の深さ変化は流動変形が深所でより進んでいることを示している。このことから、深部領域(～25-40 km)はレオロジ的に LAB 領域であり、浅部領域(～40-60 km)はマントルリソスフェアであったと解釈される。深部由来の岩石のみが部分熔融していることから、レオロジ的 LAB 領域は、含水カンラン岩の部分熔融によって形成されたと考えられる。LAB 領域は冷却後加熱の熱史によって特徴づけられることから、マントル深部からの加熱によって含水カンラン岩のソリダス条件(～950-1000 °C)を超える高温条件に到達し熔融に至ったことを示しており、一ノ目瀉下の LAB 領域が動的に形成されたこと、すなわちリソスフェアが薄化したことを示唆している。復元されたマントル構造は定常状態にはなく、レオロジ境界としての LAB が含水マントルの融点によって深さ 40km まで上昇したことによって形成されたものである。

一ノ目瀉下の LAB 領域の形成が含水カンラン岩の部分熔融によって支配されているならば、それを東北日本弧下に拡張することで、東北日本弧下の LAB 領域の空間変化を復元できるはずである。この考えに基づいて東北日本弧下のマントルの構造を推定した。一ノ目瀉下において、LAB 領域の上面は約 40 km の深さに存在する。一方、東北日本弧横断方向のウェッジマントルにおける地震波速度構造によって推定された地震学的 LAB は、日本海の下では約 60 km である(Huang et al., 2011)のに対し、火山弧下では LAB がモホ面のすぐ下にあるか一致する(～30km)ことが示唆されている(Nakajima et al., 2001)。以上から、東北日本弧下の LAB 領域が火山弧下から背弧にかけて 60 km まで深くなることわかる。

火山弧側から背弧側にかけて低下する地温勾配、含水カンラン岩の熔融条件、熔融温度が深さによらずほぼ同じであることから、部分熔融を生じる深さが火山弧側から背弧側にかけて深くなることが推定される(Kuritani et al., 2014a,b)。一ノ目瀉下の LAB 領域が含水マントルの部分熔融によって決まってくることを火山弧まで拡張すれば、部分熔融深度が火山弧側から背弧側にかけて深くなると言えるため、火山岩から推定されたマグマ分離深度とあわせれば、東北日本弧下のマグマ分離は時間変化する LAB の深さに支配されていると推察される。東北日本弧下の LAB 領域は、アセノスフェアからの熱と物質(水)の輸送によってダイナミックに形成されマグマの生成を支配していると考えられる。

コロラド高原産のゼノリスについてもモロッコ Middle Atlas 山脈および一ノ目瀉と同様のアプローチで圧力推定を行った。コロラド高原で適用した温度圧力計は、モロッコ産ゼノリスと同じである。コロラド高原産ゼノリスは、ザクロ石を含むために、これまでは、Opx-Cpx 温度圧力計と輝石中の Al₂O₃ 含有量を用いて圧力推定が行われている(Ehrenberg, 1982)。しかし、ザクロ石は例外なく分解反応を経験しており、かなり粗粒の分解反応生成物の中央に反応し残しとしてのみ見出される。この事はゼノリスが、かつてはザクロ石かんらん岩安定領域に存在していたが、マグマに取り込まれる直前に、より浅いスピネルかんらん岩安定領域に移動したことを示唆している。モロッコで適用し Al を含む相のありなしに依存しない温度圧力計のペアをコロラド高原に適用することで、この仮説を検証することが可能となる。推定した温度は先行研究と同じ範囲に収まった一方で、圧力はより浅所に推定された。このことは、ゼノリスがマグマに取り込まれる直前にマントルが上昇したことを示唆している。さらに輝石の累帯構造から、深部のゼノリスは冷却、浅部のゼノリスは逆に加熱を経験していることがわかった。最深部由来で最も高温を記録しているゼノリスのかんらん石にのみ Cr と Al に富む微少包有物を含むことから、このゼノリスがアセノスフェア由来であり、LAB はその直上に位置しアセノスフェアとリソスフェアの上昇に伴って浅所領域が過熱を経験している可能性が明らかとなった。

本研究で対象とした 3 地域から得られた結果のうちで共通する重要な点は以下のようにまとめることができる。

- (1) ゼノリスが取り込まれて輸送されるホストマグマによる加熱イベントとは異なる、より長期間の加熱イベントを取り込まれる直前で経験している。この加熱イベントは、由来深度が深ければ深いほど長期間・高温であり、ゼノリスがリソスフェアとアセノスフェア境界近傍の情報を提供していることを示している。
- (2) マントルゼノリスがマグマに取り込まれて地表に輸送されるイベントは、リソスフェアの加熱に引き続き起きており、リソスフェアの温度構造の改変を必ず伴っている。このことは、マントルゼノリスがマグマの形成とまったく無関係で異質な「ゼノリス」と呼ぶべきものではなく、マグマと成因的(特に熱的)に関係していることを示している。
- (3) マグマに取り込まれる直前の加熱イベントの加熱時間スケールは、ある深度での瞬間加熱とその維持+熱伝導モデルでは説明できず、加熱イベントがリソスフェアとアセノスフェア境界の深度を大きく変動しながら進むダイナミックな現象であることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 10.小澤一仁・佐藤侑人・成田冨理	4. 巻 124
2. 論文標題 スピネルカンラン岩捕獲岩の圧力推定の現状, 問題点, 解決策: リソスフェア-アセノスフェア境界域のダイナミクスの理解に向けて	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 575-592
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 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 Hibiya Yuki, Archer Gregory J., Tanaka Ryoji, Sanborn Matthew E., Sato Yuya, Iizuka Tsuyoshi, Ozawa Kazuhito, Walker Richard J., Yamaguchi Akira, Yin Qing-Zhu, Nakamura Tomoki, Irving Anthony J.	4. 巻 245
2. 論文標題 The origin of the unique achondrite Northwest Africa 6704: Constraints from petrology, chemistry and Re-Os, O and Ti isotope systematics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 597 ~ 627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2018.04.031	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 Naemura Kosuke, Hirajima Takao, Svojtka Martin, Shimizu Ichiko, Iizuka Tsuyosi	4. 巻 8
2. 論文標題 Fossilized Melts in Mantle Wedge Peridotites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-28264-6	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 該当する
1. 著者名 Takeuchi N., Ueki K., Iizuka T., Nagao J., Tanaka A., Enomoto S., Shirahata Y., Watanabe H., Yamano M., Tanaka H.K.M.	4. 巻 288
2. 論文標題 Stochastic modeling of 3-D compositional distribution in the crust with Bayesian inference and application to geoneutrino observation in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 37 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2019.01.002	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 Kobayashi Masahiro, Sumino Hirochika, Burgess Ray, Nakai Shun'ichi, Iizuka Tsuyoshi, Nagao Jun, Kagi Hiroyuki, Nakamura Michihiko, Takahashi Eiichi, Kogiso Tetsu, Ballentine Chris J.	4. 巻 20
2. 論文標題 Halogen Heterogeneity in the Lithosphere and Evolution of Mantle Halogen Abundances Inferred From Intraplate Mantle Xenoliths	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 952 ~ 973
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GC007903	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 Hibiya Yuki, Iizuka Tsuyoshi, Yamashita Katsuyuki, Yoneda Shigekazu, Yamakawa Akane	4. 巻 43
2. 論文標題 Sequential Chemical Separation of Cr and Ti from a Single Digest for High Precision Isotope Measurements of Planetary Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geostandards and Geoanalytical Research	6. 最初と最後の頁 133 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ggr.12249	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 Amelin Yuri, Koefoed Piers, Iizuka Tsuyoshi, Fernandes Vera Assis, Huyskens Magdalena H., Yin Qing-Zhu, Irving Anthony J.	4. 巻 245
2. 論文標題 U-Pb, Rb-Sr and Ar-Ar systematics of the ungrouped achondrites Northwest Africa 6704 and Northwest Africa 6693	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 628 ~ 642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2018.09.021	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 長谷川汰河、道林克禎、小澤一仁	4. 巻 44
2. 論文標題 岩手県早池峰-宮守オフィオライトカンラン岩の構造岩石学的特徴	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 静岡大学地球科学研究報告	6. 最初と最後の頁 31-46
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 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 Itano Keita, Iizuka Tsuyoshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Unraveling the mechanism and impact of oxide production in LA-ICP-MS by comprehensive analysis of REE-Th-U phosphates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Analytical Atomic Spectrometry	6. 最初と最後の頁 2003 ~ 2010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7ja00182g	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 Liu Fulai, Liu Chaohui, Itano Keita, Iizuka Tsuyoshi, Cai Jia, Wang Fang	4. 巻 300
2. 論文標題 Geochemistry, U-Pb dating, and Lu-Hf isotopes of zircon and monazite of porphyritic granites within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Implications for petrogenesis and tectonic setting	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Precambrian Research	6. 最初と最後の頁 78 ~ 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precamres.2017.08.007	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 Iizuka Tsuyoshi, Yamaguchi Takao, Itano Keita, Hibiya Yuki, Suzuki Kazue	4. 巻 274-275
2. 論文標題 What Hf isotopes in zircon tell us about crust-mantle evolution	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 304 ~ 327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2017.01.006	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 Kashiwabara Teruhiko, Kubo Sayuri, Tanaka Masato, Senda Ryoko, Iizuka Tsuyoshi, Tanimizu Masaharu, Takahashi Yoshio	4. 巻 204
2. 論文標題 Stable isotope fractionation of tungsten during adsorption on Fe and Mn (oxyhydr)oxides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 52 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2017.01.031	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 Genda Hidenori, Iizuka Tsuyoshi, Sasaki Takanori, Ueno Yuichiro, Ikoma Masahiro	4. 巻 470
2. 論文標題 Ejection of iron-bearing giant-impact fragments and the dynamical and geochemical influence of the fragment re-accretion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 87 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.04.035	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 Sato Yuto, Ozawa Kazuhito	4. 巻 104
2. 論文標題 Reconstruction of the lithosphere-asthenosphere boundary zone beneath Ichinomegata maar, Northeast Japan, by geobarometry of spinel peridotite xenoliths	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1285 ~ 1306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2019-6858	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8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kazuhito Ozawa, Yuto Sato, Saeri Narita, Nasrddine Youbi, Ahmed Boumehdi, and Hiroko Nagahara
2. 発表標題 Decoding thermal events before and during mantle xenolith extraction
3. 学会等名 EGU General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Saeri Narita and Kazuhito Ozawa
2. 発表標題 Thermal and kinematic history of subcontinental lithosphere: Mantle xenoliths from Colorado plateau and Rio Grande rift
3. 学会等名 JpGU2018 (日本地球惑星科学連合2018年大会) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日比谷 由紀, 飯塚 毅, 榎本 葉月
2. 発表標題 初期太陽系におけるニオブ-92の不均質
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhito Ozawa, Nasrddine Youbi, Moulay Ahmed Boumehti, Dan McKenzie, and Hiroko Nagahara
2. 発表標題 Evaluation of thermobarometry for spinel lherzolite fragments in alkali basalts
3. 学会等名 EGU General Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsuyoshi Iizuka
2. 発表標題 Evolution of the continental crust as recorded by detrital minerals.
3. 学会等名 5th International Conference on Analytical Science & Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsuyoshi Iizuka
2. 発表標題 Evolution of the continental crust as recorded by U-Pb and Hf isotopes in detrital zircon
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Winter Conference on Plasma Spectrometry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 飯塚 毅
2. 発表標題 LA-ICP-MSが拓く放射性同位体地球化学
3. 学会等名 プラズマ分光分析研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 飯塚 毅
2. 発表標題 LA-ICP-MSで拓くモナザイト地球化学
3. 学会等名 炭酸塩鉱物の局所領域年代測定ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 国立天文台	4. 発行年 2018年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 1160
3. 書名 理科年表 2019 地質および鉱物, 654-686	

〔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	飯塚 毅 (Iizuka Tsuyoshi) (70614569)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	

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			
モロッコ	Cadi Ayyad 大学			