

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02994

研究課題名(和文)揮発性元素のマントル大循環

研究課題名(英文)Volatile Cycle in the Mantle

研究代表者

羽生 毅 (HANYU, Takeshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・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

研究者番号：50359197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球内部の揮発性成分の挙動を理解するために、マントル由来の火山岩に含まれる鉱物斑晶のメルト包有物の化学分析を行った。50～100ミクロンといった微小なメルト包有物の化学分析を行うために、各種の局所分析手法を組み合わせる方法を確立した。火山岩に応用した結果、下部マントルに由来する海洋島玄武岩のメルト包有物に過剰の塩素を検出した。これは海水由来の塩素が沈み込むスラブにより下部マントルに運ばれ、マントル深部が塩素の貯蔵庫になっており、塩素が地球規模で循環していることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

揮発性成分は地球表層に存在し、生命が育まれるなど地球の進化に重要な役割を果たしている。今回の成果から、地球表層とマントル深部のあいだで塩素が大循環していることが示された。これは水や二酸化炭素など他の揮発性成分も大循環していることを示唆するものであり、固体地球と地球表層の共進化を紐解く今後の研究につながる。また、今回確立した分析手法は火山学にも応用でき、マグマ噴出における揮発性成分の役割を理解する研究にも発展できる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project is to understand geochemical cycles of volatiles in the Earth from the studies of mineral-hosted melt inclusions in volcanic rocks derived from the mantle. We established a method to combine several in-situ analytical techniques to measure chemical composition of melt inclusions with the size of 50-100 microns. This method was applied to olivine-hosted melt inclusions in ocean island basalts that are sourced from deep-rooted mantle plumes. We found that those melt inclusions are enriched in Cl in correlation with Pb isotope ratios, suggesting that seawater-derived Cl was transported to the lower mantle by subducted slabs, and thereby the lower mantle involves a mantle domain that preserve significant amount of Cl originated from the Earth's surface. This is a firm evidence that Cl is cycled between the Earth's surface and the deep mantle.

研究分野：マントル地球科学

キーワード：揮発性元素 マントル 物質循環 メルト包有物 局所分析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マンツルの物質循環過程と化学的進化の解明は、マンツルダイナミクスを理解する上で重要な鍵となる。研究代表者らは、マンツルプルムにより運ばれた下部マンツル物質由来の海洋島玄武岩の岩石学・地球化学的研究を通じ、地球内部物質は地殻-マンツル間で大規模に循環し、沈み込んだスラブ由来の成分が下部マンツルに貯蔵されている証拠 (Hanyu and Kaneoka, Nature 1997)、スラブ成分が沈み込む際の化学的分別 (Hanyu et al., EPSL 2011; Hanyu et al., G-cubed 2011; Kawabata et al., J. Pet. 2011)、スラブ成分のマンツルでの滞留時間 (Hanyu et al., GCA 2014) 等について知見を得てきた。それでは、スラブの沈み込みにより水や二酸化炭素といった揮発性元素も表層-地殻-マンツル間で大規模に循環しているのであろうか？かつては、スラブに取り込まれた揮発性元素のほとんどは沈み込み帯での脱水や融解によって地球表層に戻されてしまうと考えられてきた。それに対して最近の高温高压実験研究からは下部マンツル条件下でも水や炭素を含む鉱物相が発見され、地球表層由来の揮発性元素の一部は下部マンツルまで持ち込まれる可能性が指摘されている。また研究代表者らの最新の研究成果として、マンツル深部由来の海洋島玄武岩のマグマ源に炭酸塩が寄与した痕跡を発見し、その炭酸塩はスラブの沈み込みによってもたらされたとするモデルを提唱した (Weiss et al., Nature 2016; Wang et al., PNAS 2018)。このように地球化学的側面からも揮発性元素のマンツル大循環の可能性が示唆されているが、実はこのような議論のほとんどは、水や炭素と挙動を共にする微量元素や希土類元素などの固体元素を利用した間接的な証拠に頼っていた。

揮発性元素のマンツル大循環の直接的証拠を得るためには、これまで使われてきた固体元素と組み合わせ、揮発性元素自体を分析する必要がある。揮発性元素はマグマの上昇噴出時に脱ガスを起こすため、揮発性元素を保持する試料としては海底噴出急冷ガラスか斑晶鉱物のメルト包有物に限られる。上部マンツルに存在する揮発性元素については、大洋中央海嶺において採取された急冷ガラス試料を用いた研究が盛んに行われてきた。一方、下部マンツルに存在する揮発性元素については、下部マンツル由来である海洋島玄武岩の急冷ガラス試料が希少なため、研究が進んでいなかった。そこで、本研究では海洋島玄武岩に多く含まれているオリビン斑晶に内包されるメルト包有物に着目し、脱ガス前のマグマの揮発性元素を分析することにした。

2. 研究の目的

地球表層の揮発性元素は沈み込むスラブによりマンツル深部まで運ばれるのか、そしてマンツル深部は揮発性元素の貯蔵庫になっているのか？これを解明するため、本研究では下部マンツル由来の海洋島玄武岩に含まれるオリビン斑晶のメルト包有物に対し、現在の技術で測定可能なあらゆる揮発性元素と固体元素を同一のメルト包有物に対して分析する。この一連の分析ルーチンを確立するのが目的の一つである。

研究には、沈み込んだスラブ成分の影響を強く受けるとされる南太平洋のフレンチポリネシア諸島やピトケアン島の海洋島玄武岩を用いる。これらの海洋島玄武岩はこれまでの固体元素やその同位体を用いた研究から、沈み込み成分がマグマ源に寄与していることが明らかになっている。このような海洋島玄武岩が持つ揮発性元素の特徴を明らかにするため、オリビン斑晶のメルト包有物の揮発性元素のデータセットを構築する。そして、各海洋島玄武岩の揮発性元素と固体元素組成の比較から、海洋島玄武岩のマグマ源である深部マンツル物質にスラブによって運ばれた揮発性元素が存在するかを検証し、そのようにしてマンツルを循環する揮発性元素の存在量を推定するのが最終的な研究目的である。

3. 研究の方法

(1) 試料

研究には沈み込んだスラブ成分の影響を強く受けるとされる南太平洋のフレンチポリネシア諸島やピトケアン島の玄武岩を用いた。これらの試料は、研究代表者らの過去の研究において採取済みであり、全岩試料の化学組成や各種同位体比がすでに測定されているものである。これらの海洋島玄武岩から新鮮なオリビン斑晶を分離し、オリビンに内包されるメルト包有物の組成分析を行った。以下に記すような種々の局所分析を行うので、メルト包有物は径 50 ミクロンより大きいものを選別した。

(2) 分析前準備

海洋島玄武岩試料の多くは陸上噴出したものであり、そのような試料のメルト包有物は徐冷したために微細な結晶の集合体になっている (図 1)。局所分析をする際にこのような不均質なメルト包有物は適していないので、一旦メルト包有物を溶融し、その後急冷することでガラス質の均質なメルト包有物を作成した。この作業には、本研究で導入した顕微鏡と加熱ステージを使用した。メルト包有物が露出しないようにオリビンを両面研磨したものを準備、顕微鏡で観察しながら加熱ステージを昇温し、溶融を確認した時点で急冷させた。

(3) 非破壊分析

メルト包有物の分析は破壊度の小さいものから順に行った。顕微ラマン分光分析法とマイクロX線CT技術を組み合わせ、メルト包有物中の気泡のCO₂量を正確に測定した。(2)の作業を行った後の均質化したメルト包有物にも、冷却時にメルトの体積が収縮することにより発生する気泡が存在する(図1)。この気泡には、メルトに対する溶解度の低いCO₂が多く分配されるので、通常行われているようなメルト部分の分析だけでは真のCO₂濃度を決定できない。そこで、メルト包有物を露出させる前の段階で気泡のCO₂の定量を行った。この分析は北海道大学総合博物館の顕微ラマン分光分析装置を用いて行った。

気泡のCO₂密度を元来メルトに溶け込んでいたときのCO₂濃度に変換するためには、気泡とメルト包有物本体の体積比を求める必要がある。本研究では海洋研究開発機構のマイクロX線CTスキャン装置を用いた形状解析法を新たに導入し、気泡とメルト包有物本体の正確な体積を決定した。

以上の分析値から、気泡中のCO₂がメルトに溶けていたときのCO₂濃度に換算した。この値と、次に二次イオン質量分析計(SIMS)で測定されるメルト部分のCO₂濃度を合算することにより、メルト包有物に含まれるCO₂全濃度を求めた。

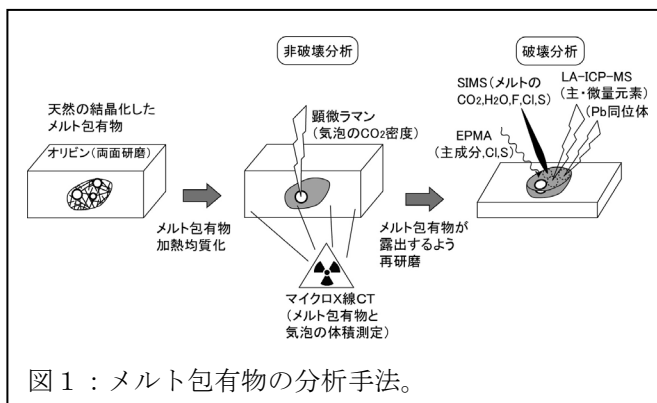


図1：メルト包有物の分析手法。

(4) 破壊分析

オリビンを再研磨しメルト包有物を露出させ、海洋研究開発機構高知コア研究所のSIMSを用いてメルト部分のH₂O, CO₂, F, Cl, S及びPの濃度を測定した(図1)。SIMSによる局所分析のスポットは10ミクロン程度であり、その後の分析のための分析領域も温存するように測定を行うことが可能である(図2)。

次に、海洋研究開発機構(横須賀本部)の電子線プローブ(EPMA)を用いて主成分元素とCl, Sの測定を行った。EPMAは非破壊分析であるが、EPMA分析時に必要な炭素薄膜蒸着がSIMSによるCO₂分析時のコンタミネーションになることを防ぐため、SIMSより後に行った。

その後、同機構のレーザーアブレーション誘導プラズマ質量分析計(LA-ICP-MS)を用いて主成分と微量元素を同時に測定した(図1)。アブレーションのスポット径は20~30ミクロンである(図2)。最後にマルチコレクターLA-ICP-MSでPb同位体比を測定する。この測定にはさらにスポット径30ミクロンでレーザーを当てる領域が必要なので、サイズが十分大きいメルト包有物のみを対象とした。

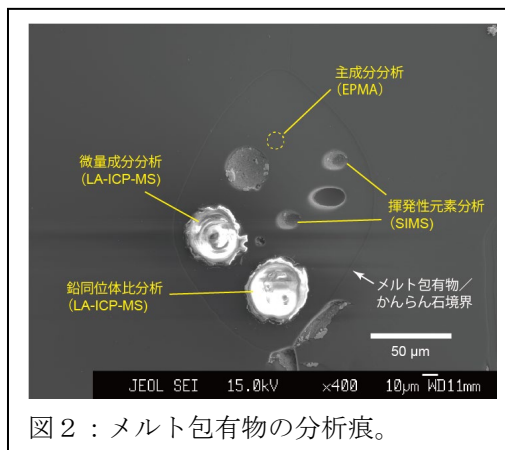


図2：メルト包有物の分析痕。

4. 研究成果

(1) メルト包有物分析手法の確立

上記のような試料準備、非破壊分析、破壊分析といった一連の分析をルーチン化し、50ミクロン以上のサイズのメルト包有物から二酸化炭素を含む揮発性元素、主成分元素、微量元素、Pb同位体比を高精度に測定する手法を確立した(Hanyu et al., 査読中)。

従来の手法で特に問題だったのは、気泡のあるメルト包有物のCO₂濃度を求める方法である。ほとんどのメルト包有物には気泡が存在し、メルトへの溶解度の低いCO₂は大半が気泡に存在していると考えられる。気泡中のCO₂密度はラマン分光法により測定できるものの、メルト(ガラス)に溶け込んでいるCO₂と合算する際に、ガラス部分と気泡の体積比を測定する必要がある。先行研究では顕微鏡下でメルト包有物と気泡の大きさを測定し、体積比を計算していた。しかし、メルト包有物を楕円体と仮定し、また顕微鏡

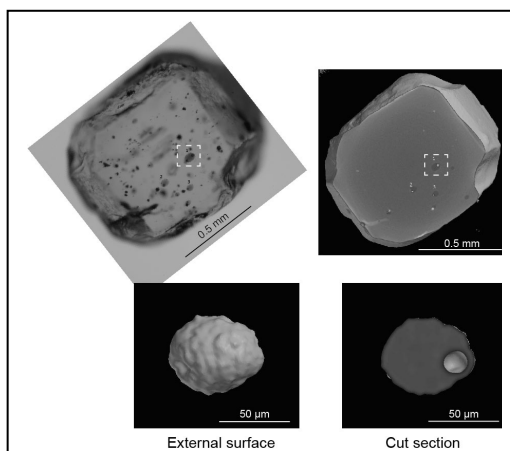


図3：マイクロX線CTで得られたメルト包有物の画像。(左上) 研磨されたオリビンの光学顕微鏡像。(右上) マイクロX線CT像。(左下) 破線で囲われたところにあるメルト包有物の3次元像。(右下) その断面。球形の気泡が見える。

視野に対して深さ方向の長さを水平方向の長さと同じと仮定するなど、不確定性の大きい方法で求めざるを得なかった。本研究ではマイクロX線CTスキャン装置を用いた形状解析法を導入し、気泡とメルト包有物本体の正確な体積を決定した。これにより、メルト包有物とその中の気泡の3次元像が1ミクロン程度の空間分解能で取得でき、10ミクロン以上ある気泡の体積を高い精度で測定することが可能となった(図3)。

実際、従来法と本研究手法による結果を比較すると、従来法では多くの場合メルト包有物のCO₂濃度が過少評価される傾向があることが分かった。火山学ではマグマ中のCO₂濃度を用いてマグマだまりの深度の推定が行われている。メルト包有物を用いてこのような研究を行う際には、従来法で求めたマグマだまり深度は再考の必要がある可能性が指摘できる。ここで提案する新しい分析手法を採用することで、正確なマグマだまり深度や詳細な脱ガス過程を求めることができるようになり、火山の噴火プロセスの理解を進展させることが期待できる。

(2) 塩素のマンテル大循環の解明

本研究では、南太平洋オーストラル諸島の海洋島火山から採取した玄武岩のオリビン斑晶に内包されるメルト包有物の塩素の分析を行い、マグマが持つ塩素は、沈み込む海洋地殻によってマンテルへ運ばれた海水に由来することを突き止めた(Hanyu et al., Nature Communications 2019)。

オーストラル諸島の海洋島火山は、深さ約2900kmに及ぶマンテルの最下層から上昇してきたマンテルプルームに由来するものであり、従ってその玄武岩は下部マンテルの化学組成を反映している。これまでの固体元素を用いた研究から、オーストラル諸島の火山のマグマ源には、およそ20億年前に地表から下部マンテルへ沈み込んだ海洋地殻が含まれていることが分かっていた。そこで、沈み込んだ海洋地殻に伴って揮発性元素が下部マンテルまで運搬されたかを検証するため、この玄武岩に含まれる揮発性元素を分析した。

本研究で開発した手法を、オーストラル諸島のライババエ島の玄武岩のオリビン斑晶に含まれるメルト包有物に応用した。ライババエ島には化学組成の異なる二種類の玄武岩が産出しており、その化学組成の差、特に鉛同位体比(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)の差はマグマ源に含まれる熱水変質した海洋地殻量の違いを反映している。メルト包有物の²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pbの値は広い範囲を示し、ライババエ島のマグマ源には様々な割合で沈み込んだ過去の海洋地殻が寄与していることが分かった。そして、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pbと塩素量の指標であるCl/K比やCl/Nb比の間に相関があることを発見した(図4)。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pbが低くなるほどCl/KやCl/Nbが上昇することは、マグマ源における海洋地殻成分が増えるほど相対的に塩素に富んでいることを示している。このことは、熱水変質で海水を取り込むことにより塩素に富んだ海洋地殻が作られ、その海洋地殻が沈み込むことでマンテル最下層に塩素を運搬・貯蔵していたことを意味する(図5)。その後マンテルプルームにより上昇しライババエ島のマグマを作るといった、塩素の大循環が起きていたことが明らかになった。

ライババエ島のマグマ源となった下部マンテル物質のCl/Nb比は少なくとも15以上であることが言える(図4)。沈み込む海洋地殻のNb濃度は変質の有無にかかわらず2~4ppmの範囲にあるので、Cl濃度は30~60ppm以上となる。このような塩素濃度を持つ海洋地殻が毎年海水からマンテルに運ぶ塩素量は、火山活動によりマンテルから毎年脱ガスされる塩素量に匹敵する。また、塩素を含む

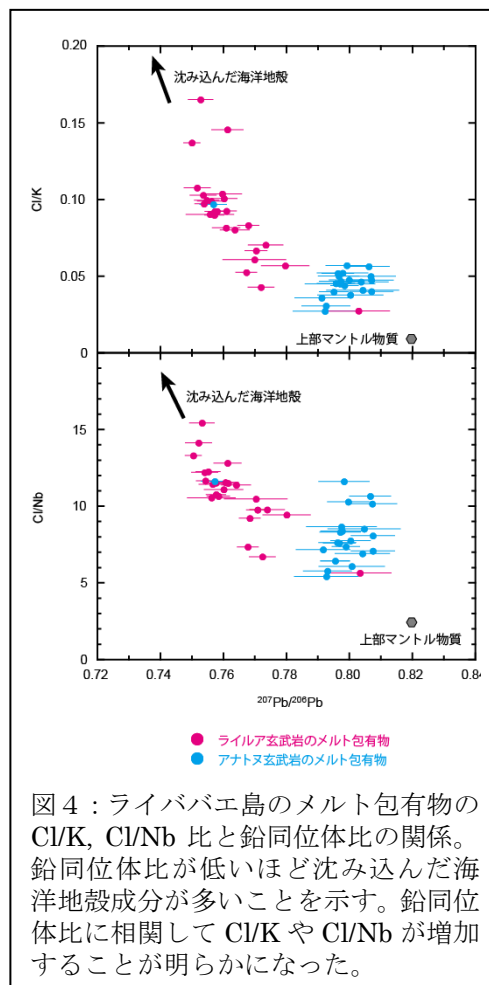


図4：ライババエ島のメルト包有物のCl/K, Cl/Nb比と鉛同位体比の関係。鉛同位体比が低いほど沈み込んだ海洋地殻成分が多いことを示す。鉛同位体比に相関してCl/KやCl/Nbが増加することが明らかになった。

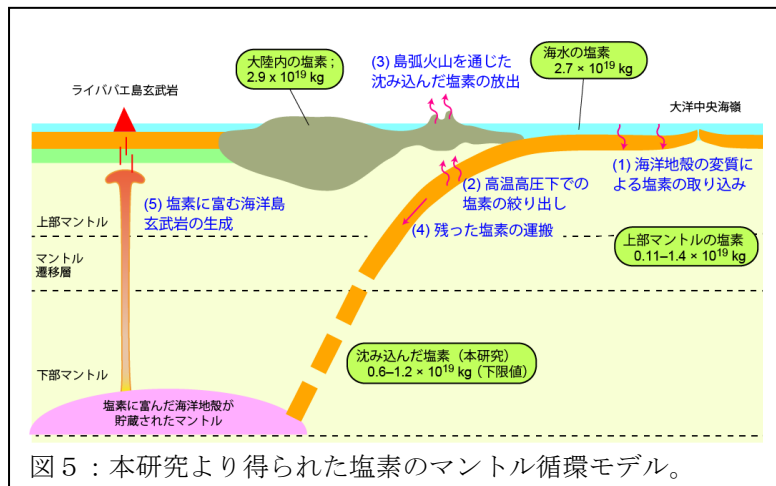


図5：本研究より得られた塩素のマンテル循環モデル。

海洋地殻の沈み込みが 40 億年間継続して起きていたとすると、その総量は上部マントルの塩素量に匹敵し、現在の海水に含まれる塩素の少なくとも 20~40%に相当する(図 5)。このことは、沈み込んだ海洋地殻が地球の主要な塩素貯蔵庫であることを示すとともに、地球表層環境の塩素量を抑制していたことを示唆する。固体地球のダイナミクスが、塩素の挙動を通じて、地球表層における生命進化にも影響を及ぼしていた可能性が指摘された。

(3) 地球内部における揮発性元素の挙動

上記(2)の成果も加味し、これまでに分析されてきたマントル由来の火山岩の揮発性元素のデータをまとめ、沈み込む海洋地殻が地球表層からマントルへ運ばれた揮発性元素についての考察を総論としてまとめた(Hanyu and Chen, AGU book, 印刷中)。

地球表層(大気、海洋)を占める揮発性元素は、もともとは固体地球に存在したものが火山活動などに伴う脱ガスにより供給されたものである。一方、地球表層に存在する揮発性元素は、熱水変質作用により海洋地殻に取り込まれる。それが沈み込むことにより揮発性元素もマントルへ還流するが、大部分の揮発性元素は沈み込み帯において絞り出されマントル深部までは持ち込まれないと従来考えられていた。しかし、最近の高温高圧実験研究から、沈み込み帯下でも安定に存在しうる揮発性元素を含む鉱物が報告され、一部の揮発性元素は地球表層からマントル深部へ運搬される可能性も指摘されている。これを検証するには、マントル深部由来の火山岩の揮発性元素量を調べるのが必須である。

上記(2)のように、塩素は地球表層からマントル深部へ運搬され、塩素に富んだマントル成分が存在することが明らかとなった。そこで、その他の揮発性元素についても同様のことが起きているかどうかを調べるため、マントル深部由来の海洋島玄武岩に対して各種揮発性元素のデータを収集した。揮発性元素に富んでいるかどうかを判別するために、部分融解や結晶分化作用においてそれぞれの揮発性元素と同様の挙動を取る固体元素との比を求めた。その結果、 H_2O/Ce 比については代表的な海洋島玄武岩に共通して、上部マントル由来の大洋中央海嶺玄武岩(MORB)に比較して低い値を示すことが分かった。このことは、沈み込む海洋地殻が沈み込み帯における脱水反応により水に乏しくなっていることを示唆する。一方、 F/Nd と Cl/Nb については、海洋島玄武岩のタイプに応じて異なる傾向を示す。上記(2)でも研究した HIMU と呼ばれるタイプの海洋島玄武岩では F/Nd 、 Cl/Nb とも MORB より高い値を示す。一方、EM と呼ばれるタイプの海洋島玄武岩では F/Nd 、 Cl/Nb とも MORB より低い値を示す。この結果から、どのような海洋地殻(玄武岩、堆積物、かんらん岩)が沈み込むかによって、運搬される揮発性元素の挙動が異なる可能性が示唆された。しかし、このようなデータがまだ限られていることも明らかとなり、固体地球と地球表層環境の共進化を理解する上でも、火山岩の揮発性元素の研究を促進する必要がある。

<引用文献>

- Hanyu, T. and I. Kaneoka, The uniform and low $^3He/^4He$ ratios of HIMU basalts as evidence for their origin as recycled materials, *Nature*, 390, 273-276, 1997.
- Hanyu, T., Y. Tatsumi, R. Senda, T. Miyazaki, Q. Chang, Y. Hirahara, T. Takahashi, H. Kawabata, K. Suzuki, J.-I. Kimura and S. Nakai, Geochemical characteristics and origin of the HIMU reservoir: A possible mantle plume source in the lower mantle, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q0AC09, doi:10.1029/2010GC003252, 2011.
- Hanyu, T., Y. Tatsumi and J.-I. Kimura, Constraints on the origin of the HIMU reservoir from He-Ne-Ar isotope systematics, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 307, 377-386, doi:10.1016/j.epsl.2011.05.012, 2011.
- Kawabata, H., T. Hanyu, Q. Chang, J.-I. Kimura, A. R. L. Nichols and Y. Tatsumi, The petrology and geochemistry of St. Helena alkali basalts: evaluation of the oceanic crust-recycling model for HIMU OIB, *J. Petrol.*, 52, 791-838, doi:10.1093/petrology/egr003, 2011.
- Hanyu, T., H. Kawabata, Y. Tatsumi, J.-I. Kimura, H. Hyodo, K. Sato, T. Miyazaki, Q. Chang, Y. Hirahara, T. Takahashi, R. Senda and S. Nakai, Isotope evolution in the HIMU reservoir beneath St. Helena: Implications for the mantle recycling of U and Th, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 143, 232-252, doi:10.1016/j.gca.2014.03.016, 2014.
- Weiss, Y., C. Class, S. L. Goldstein and T. Hanyu, Key new pieces to the HIMU puzzle from olivines and diamond inclusions, *Nature*, 537, 666-670, doi:10.1038/nature19113, 2016.
- Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori and T. Ishikawa, Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle, *Nat. Commun.*, 10, 60, doi:10.1038/s41467-018-07955-8, 2019.
- Hanyu, T. and L.-H. Chen, Geochemical diversity in the mantle, in *Mantle Convection and Surface Expressions* (edited by H. Marquardt, M. Ballmer, S. Cottaar and J. Konter), AGU book (in press).
- Wang, X.-J., L.-H. Chen, A. W. Hofmann, T. Hanyu, H. Kawabata, Y. Zhong, L.-W. Xie, J.-H. Shi, T. Miyazaki, Y. Hirahara, T. Takahashi, R. Senda, Q. Chang, B. S. Vaglarov and J.-I. Kimura, Recycled ancient 'ghost' carbonate in the Pitcairn mantle plume, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 115, 8682-8687, doi:10.1073/pnas.1719570115, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Hanyu, T., L.-H. Chen	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Geochemical diversity in the mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AGU book; Mantle Convection and Surface Expressions (edited by H. Marquardt, M. Ballmer, S. Cottaar and J. Konter)	6. 最初と最後の頁 -
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 該当する

1. 著者名 Yokokura, L., Y. Hagiwara, J. Yamamoto	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Pressure dependence of micro-Raman mass spectrometry for carbon isotopic composition of carbon dioxide fluid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 -
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 Hagiwara, Y., J. Torimoto, J. Yamamoto	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Pressure measurement and detection of small H ₂ O amounts in high-pressure H ₂ O-CO ₂ fluid up to 141 MPa using Fermi diad splits and bandwidths of CO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 -
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 Hagiwara J., J. Torimoto, J. Yamamoto	4. 巻 114
2. 論文標題 Thermoelastic equilibrium of fluid inclusion-host mineral systems under homogenization measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 149 - 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2465/jmps.181109b	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 Hamada, M., H. Iwamori, P. A. Brandl, T. Ushikubo, K. Shimizu, M. Ito, H. Li, I. P. Savov	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Temporal evolution of proto-Izu-Bonin-Mariana arc volcanism over 10 Ma: Constraints from statistical analysis of melt inclusion compositions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Petrology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1093/petrology/egaa022	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 Shimizu, K., M. Ito, Q. Chang, T. Miyazaki, K. Ueki, C. Toyama, R. Senda, B. S. Vaglarov, T. Ishikawa, J.-I. Kimura	4. 巻 522
2. 論文標題 Identifying volatile mantle trend with the water-fluorine-cerium systematics of basaltic glass	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 283 - 294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.chemgeo.2019.06.014	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 Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori, T. Ishikawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1038/s41467-018-07955-8	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 Wang, X.-J., L.-H. Chen, A. W. Hofmann, T. Hanyu, H. Kawabata, Y. Zhong, L.-W. Xie, J.-H. Shi, T. Miyazaki, Y. Hirahara, T. Takahashi, R. Senda, Q. Chang, B. S. Vaglarov, J.-I. Kimura	4. 巻 115
2. 論文標題 Recycled ancient ghost carbonate in the Pitcairn mantle plume	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	6. 最初と最後の頁 8682-8687
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1073/pnas.1719570115	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 Shimizu, K., T. Ushikubo, T. Murai, F. Matsu'ura, Y. Ueno	4. 巻 53
2. 論文標題 In situ analyses of hydrogen and sulfur isotope ratios in basaltic glass using SIMS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 195-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2343/geochemj.2.0559	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 Hagiwara Y., K. Takahata, J. Torimoto, J. Yamamoto	4. 巻 49
2. 論文標題 CO2 Raman thermometer improvement: comparing hot band and Stokes and anti-Stokes Raman scattering thermometers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 1776-1781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1002/jrs.5461	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 Hagiwara Y., Y. Sogo, K. Takahata, J. Yamamoto	4. 巻 52
2. 論文標題 Temperature dependence of CO2 densimetry using micro-Raman Spectrometry at laboratory conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 379-383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2343/geochemj.2.0523	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 Morihiisa Hamada, Jun-Ichi Kimura, Qing Chang, Takeshi Hanyu, Takayuki Ushikubo, Kenji Shimizu, Motoo Ito, Takahiro Ozawa, Hikaru Iwamori	4. 巻 52
2. 論文標題 High-precision in situ analysis of Pb isotopes in melt inclusions by LA-ICP-MS and application of Independent Component Analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 69-74
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 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Hirai, Y., Y. Tamura, K. Hoernle, C. Timm, F. Hauff, R. Werner, T. Hanyu, B. S. Vaglarov, Q. Chang, T. Miyazaki, J.-I. Kimura
2. 発表標題 Interaction between mafic magma and lithospheric mantle: Evidence from the geochemistry of olivines and olivine-hosted melt inclusions in lavas from Kibblewhite Volcano, Kermadec arc
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirai, Y., Y. Tamura, K. Hoernle, C. Timm, F. Hauff, R. Werner, T. Hanyu, B. Vaglarov, Q. Chang, T. Miyazaki, J.-I. Kimura
2. 発表標題 Origin of variable CaO/Al ₂ O ₃ in olivine-hosted melt inclusions from Kibblewhite volcano, Kermadec arc
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際セッション) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ozawa, H. Iwamori, T. Hanyu, M. Hamada, K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, H. Nakamura, M. Ito
2. 発表標題 Estimation of the origin of Pitcairn Island OIB by Independent Component Analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際セッション) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hanyu, T.
2. 発表標題 Volatile composition in ocean island basalts
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際セッション) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hanyu, T., J. Yamamoto, K. Kimoto, Y. Nakamura, K. Shimizu, T. Ushikubo
2. 発表標題 Total carbon dioxide in melt inclusions with shrinkage bubbles
3. 学会等名 Goldschmidt 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽生毅、木村純一、常青、浜田盛久、清水健二、牛久保孝行、伊藤元雄、石川剛志、岩森光
2. 発表標題 炭酸塩化された海洋地殻リサイクルの証拠；HIMU玄武岩のメルト包有物より
3. 学会等名 日本地球化学会第66回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽生毅、山本順司、木元克典、中村由里子、清水健二、牛久保孝行
2. 発表標題 気泡のあるメルト包有物の二酸化炭素精密測定
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 健二、牛久保 孝行、村居 呂一、松浦 史宏、上野 雄一郎
2. 発表標題 SIMSによる玄武岩質ガラスの水素、硫黄同位体比分析法とその応用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hanyu, T., J. Yamamoto, K. Kimoto, Y. Nakamura, K. Shimizu, T. Ushikubo
2. 発表標題 Precise determination of carbon dioxide contents in melt inclusions
3. 学会等名 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 平井康裕、田村芳彦、Kaj Hoernle、Reinhard Werner、Folkmar Hauff、Christian Timm、羽生毅、Bogdan Vaglarov、宮崎隆、常青、木村純一
2. 発表標題 南部ケルマディック弧Kibblewhite火山の初生安山岩質メルト
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会（2018札幌大会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hanyu, T.
2. 発表標題 Expedition KH-17-J01 to South Edge of the OJP
3. 学会等名 国立科学博物館 国際シンポジウム2018 海底火山 - 躍動する地球を見る窓（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水健二、牛久保孝行、兼岡一郎
2. 発表標題 ハワイ沖ロイヒ、キラウエア深海底ガラス中の揮発性物質濃度と水素同位体比-地球の水の起源物質を求めて-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimizu, K., T. Ushikubo, I. Kaneoka
2. 発表標題 Volatile concentrations and hydrogen isotope ratios of submarine glasses from Loihi and Kilauea
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浜田 盛久, 木村 純一, 常 青, 羽生 毅, 牛久保 孝行, 清水 健二, 伊藤 元雄, 小澤 恭弘, 岩森 光
2. 発表標題 LA-ICP-MSによるメルト包有物の鉛同位体比の高精度局所分析
3. 学会等名 日本鉱物科学会2017年年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小澤 恭弘, 羽生 毅, 浜田 盛久, 清水 健二, 牛久保 孝行, 伊藤 元雄, 岩森 光
2. 発表標題 Pitcairn島のOlivineホストのメルト包有物におけるマルチ微量化学分析
3. 学会等名 2017年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小澤 恭弘, 羽生 毅, 岩森 光, 浜田 盛久, 牛久保 孝行, 清水 健二, 伊藤 元雄, 木村 純一, 常 青, 石川 剛志
2. 発表標題 Geochemistry of olivine melt inclusions in Pitcairn Island basalts: A multiple-instrument approach
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 羽生 毅、清水 健二、牛久保 孝行、山本 順司、木元 克典、中村 由里子、木村 純一、常 青、浜田 盛久、伊藤 元雄、岩森 光、石川 剛志
2. 発表標題 Volatiles in olivine-hosted melt inclusions in HIMU basalts from Raivavae, South Pacific
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>海底堆積物がマントル深部を巡る大循環をしていたことが判明 http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20180814/ 海水由来の塩素がマントルに大量貯蔵されていたことを発見 http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20190118/</p>
--

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	清水 健二 (SHIMIZU Kenji) (30420491)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・技術研究員 (82706)	
研究分担者	山本 順司 (YAMAMOTO Junji) (60378536)	北海道大学・総合博物館・准教授 (10101)	
研究協力者	牛久保 孝行 (USHIKUBO Takayuki) (10722837)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・技術研究員 (82706)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木村 純一 (KIMURA Jun-Ichi) (30241730)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・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 (82706)	
研究協力者	常 青 (CHANG Qing) (30359195)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・技術主任 (82706)	
研究協力者	木元 克典 (KIMOTO Katsunori) (40359162)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・主任技術研究員 (82706)	