

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247091

研究課題名(和文) マントル組成半球構造のキャラクタリゼーションと成因解明

研究課題名(英文) Characterization and genesis of mantle compositional hemispheres

研究代表者

岩森 光 (Iwamori, Hikaru)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・分野長

研究者番号：80221795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,700,000円

研究成果の概要(和文)：全地球に分布する主に第四紀に噴火した玄武岩の組成に基づき、地球内部の不均質構造を調べた。これは人体の血液検査に例えることができる。特に、最近提案された「マントルの東西半球構造」に注目し、(1)半球構造の境界付近の詳細研究、(2)地球全体のデータに関する独立成分分析、(3)水を含むマントル対流シミュレーションを行った。その結果、東半球はより親水成分に富み、かつマントル浅部から内核にいたるまで、超大陸の分布に支配される「Top-down hemispherical dynamics」を介して長波長の大構造を有することが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Geochemical heterogeneity in the Earth's mantle has been investigated based on the Quaternary basalts over the globe. With a special attention to recently proposed "east-west mantle geochemical hemispheres", (1) detailed inspection along the hemisphere boundary, (2) Independent Component Analysis of global geochemical data, and (3) numerical simulation of water-bearing mantle convection have been performed. As a result, it has been revealed that (A) the eastern hemisphere is relatively enriched in hydrophile components, and (B) the hemispherical structure extends from the near-surface to the inner core via "top-down hemispherical dynamics" in which the supercontinent and focused subduction towards it could have created the global hemispherical structure.

研究分野：地質学

キーワード：マントル 組成 同位体 半球構造 統計解析 独立成分分析 水 物質循環

1. 研究開始当初の背景

全地球質量の70%、熱容量の90%以上を占めるマントルの対流は、プレート運動とそれに伴う地震・火成活動を引き起こし、外核の冷却を通して地球磁場に大きな影響を与えるなど、地球内部の構造形成および表層変動現象の支配的要因である。この重要性のため、マントルの構造とダイナミクスは、固体地球科学の中心課題の一つとして、地球物理学、地質・岩石学、地球化学の多様な手法を用いて研究されてきた。地球の“CT スキャン”に相当する地震波トモグラフィは、地球内部の高解像度3次元構造(例えるなら骨格や内臓の位置や形)をとらえることに成功したが、その物質組成や形成年代についての制約に乏しい。一方、マントルに由来する玄武岩マグマとその化学・同位体組成を、いわば地球の“血液検査データ”として用い、地震波からは得られないマントルの組成構造およびその形成年代を推定する Chemical Geodynamics (Allègre, 1982, Tectonophys.) が展開された。特に海洋玄武岩は、地表に広く分布する「マントルからのメッセージ」(Hofmann, 1997, Nature)として組成解読の主要な研究対象であり、データの質・量が増加してきた。その結果、表層付近で生み出される多様な組成不均質が、沈み込みと対流によって地球内部でカオティックに攪拌されるという描像(“Mantle Zoo”; Stracke et al., 2005, G3)が定着しつつある。

このような状況の中、本研究代表者は、「独立成分分析」を用いた新たなデータ解析手法および島弧玄武岩から沈み込み物質の影響を除き、マントル組成を海洋玄武岩と同一基準で解読することに初めて成功し、5000超のSr, Nd, Pb同位体データセットから、マントルがおおよそ東西半球に分けられることを発見した(Iwamori & Nakamura, 2012, GJ)。東半球は西半球よりも過去に沈み込んだと考えられる親水成分に富むのである。長波長の半球構造の存在は、カオティックに攪拌される従来の対流の描像とは大きくことなる。半球構造の成因解明は、地球内部物質循環のあらたなパラダイム提唱につながる可能性がある。

2. 研究の目的

東半球のマントルは、「かつて超大陸下に位置し、沈み込みと親水成分が集中した部分」(Iwamori & Nakamura, 2012, GJ)と推定されている。この推定を検証するため、半球構造の境界と空間分布を精密にマッピングし、現在の海陸および過去の超大陸分布との対応関係を明確にする。第四紀に噴出した海洋および島弧玄武岩に基づく解析では、半球構造の一端はおおよそ日付変更線付近に位置するが、反対側の境界はアフリカ大陸から南米

大陸にかけてやや不明瞭である。境界の鮮明さ(境界をまたいで組成変化が不連続かどうか)も、半球構造成因の推定に重要であり、代表的境界での調査・サンプリング、およびこれまで考慮されてこなかった大陸内火山を解析に取り入れ、精密マッピングを行う。同時に、これまでの同位体比のみに基づく解析を、元素濃度を含めて拡張し、各半球の化学・同位体組成を包括的に把握する。マントルの組成不均質の実態、特にどのような沈み込み成分か(堆積物、海洋玄武岩質地殻、大陸地殻、リソスフェア成分など)に注目しながら解析を行う。組成構造の分布、および起源を解明することにより、地球内部物質循環を実証的に検証する。

以上の観測と解析に加え、数値シミュレーションによる再現実験を行う。上記の組成構造の時空分布及び組成の特徴が、マントル対流の中でどのように説明されるのかを、元素分別過程と循環を組み込んだ数値シミュレーションにより検証する。最終的に、組成半球構造と地球内部ダイナミクスの統合的モデルの提案を目指す。

マントル組成不均質は、従来、(A)主に海洋玄武岩を用いて推定、(B)複数の「端成分」(極端な同位体比をもつ仮想的な成分)に分解、(C)それらの組成空間での混合(必ずしも実際のプロセスに対応しない)により不均質構造全体を説明してきた(e.g., Hart et al., 1992, Science; Stracke et al., 2005, G3)。本研究では、(A')海洋+島弧+大陸の全テクトニクス場の玄武岩を用い、(B')端成分についての知見に加え、統計学的手法で全体構造(端成分同士の関係)を地理的分布および組成空間の両面から客観的に解析し、(C')抽出された特徴を、マントル対流のシミュレーションを通して物質循環の実プロセスと結び統合性の3点が特色である。これらの検証を通して、大規模不均質構造の成因のみならず、モデル依存性の大きいマントル対流と物質循環に対しても確度の高い制約が課せると期待される。

引用文献

- Allègre, 1982, Tectonophys. 81, 109-132.
 Hofmann, 1997, Nature 385, 219-229.
 Stracke et al., 2005, G-cubed 6,
 doi:10.1029/2004GC000824.
 Iwamori and Nakamura, 2012, Geochem. J. 46, e39-e46.
 Hart et al., 1992, Science 256, 517-520.

3. 研究の方法

(1) 本研究では、全研究期間の3年間で、半球構造を代表するあるいは組成構造境界をまたぎながらもデータに乏しい重要地域の玄武岩(日本列島・カムチャッカ、南アフ

リカ・カメルーンライン、南太平洋ポリネシア諸島)のおよそ 100 試料について、約 40 元素の濃度および Sr, Nd, Pb に関わる同位体比($87\text{Sr}/86\text{Sr}$, $143\text{Nd}/144\text{Nd}$, $206\text{Pb}/204\text{Pb}$, $207\text{Pb}/204\text{Pb}$, $208\text{Pb}/204\text{Pb}$) を分析した。同時に、既存の公開データベースである GEOROC および PetDB を併用し、高い対費用効果を保ちつつ、グローバル組成構造とその境界の精密マッピングおよび組成キャラクタリゼーションを行った。

(2) アフリカ・カメルーンの試料は、研究分担者である横山博士および海外研究協力者である Aka 博士から提供を受けると同時に、ポストドクの Asaah 博士の現地調査・サンプリングにより入手した。カメルーンはやや半球組成ドメインの境界に近く、典型的な西半球の同位体組成を示す玄武岩とともに、東半球的な同位体組成を示す岩石が知られており、両者の関係を調べるために適している。また、組成半球構造境界付近に位置するカムチャッカ半島北部 (Klyuchevskoy 火山群、海岸沿いの East Cone 群、および Srediny Range 北端部) のヘリコプターを要する調査・サンプリングを実施した (岩森、中村博士および東工大・大学院生 西澤氏)。カムチャッカ半島は、アリューシャンにかけて組成半球構造の境界をまたぐと同時に、典型的な東半球の組成を示す日本列島をつなぐ場所にあり、境界付近の遷移を検討した。ロシア科学アカデミー・Churikova 博士、Gordeychik 博士より、フィールド調査・試料送付等のロジスティクスを含めた全面支援を受けつつ、共同研究を行った。南太平洋ポリネシア諸島 (以降、ピトケアン島を含む) については、連携研究者である羽生博士から提供を受けると同時に、現地調査・試料採取を行った (羽生博士、研究協力者 清水博士、東工大・大学院生 小澤氏)。南太平洋ポリネシア諸島は、EMI、EMII、HIMU の端成分に近い極端かつ多様な同位体組成をもつ島が共存し、かつ東西組成半球構造の境界付近に位置する。これらに注目しながら研究を進めた。

(3) 入手した試料について、まず岩石記載、電子線マイクロアナライザ (EPMA / SEM-EDX) による鉱物分析を行う。また、メノウ乳鉢を用いて岩石試料を粉碎し、蛍光 X 線分析 (XRF) による主成分分析を行った。EPMA / SEM-EDX、岩石粉碎装置、ビードサンプラーおよび XRF はいずれも海洋研究開発機構と東京工業大学に既設の装置を用いた。これらの分析によって結晶分別や地殻混入などの影響を評価した。また、全試料について、誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) を用いた微量元素分析を行った。マントルを循環する成分、特に沈み込み成分を特定するために必要な、微量 27 元素濃度パターン (液相濃集元素および希土類元素)

を分析した。また、Sr, Nd, Pb に関わる同位体比を、海洋研究機構の質量分析計を用いて測定した。

(4) 分析と並行してデータ多変量解析を行い、分析結果の解釈を進めた。「独立成分分析」は比較的新しい多変量統計解析手法であり、データの非正規性に着目してデータ群を作り出す元となった独立な成分 (この場合には、一連の挙動を示す微量元素および同位体比からなる複数のベクトル) を抽出する手法である。地球化学データにも有効であることが示されており (Iwamori & Albarède, 2008, G3) 新たに構築するデータセットに応用し、東西組成半球を生み出す独立成分を、微量元素組成も含めて特定した。地球マントルの Sr-Nd-Pb 同位体不均質は、たかだか 2 つの独立成分で統計的には十分な精度で記述できることが分かっている (Iwamori et al., 2010, EPSL; Iwamori & Nakamura, 2012, GJ) : それらは、長期的に (数億年以上の間) マントル岩石が (1) メルト成分に富んでいたか、枯渇していたかを表わす独立成分 1 (IC1) (2) 水溶液成分に富んでいたか、枯渇していたかを表わす独立成分 2 (IC2) である。これらの成分の空間分布や性質に注目しながら、解析を行った。

(5) 同時に、水を含む元素輸送をマントル対流シミュレーションに組み込み、プレートの沈み込みに伴って水がマントル対流に与える影響、およびマントルの組成がどのように進化するかをフォワードに検証した。粘性の圧力および含水量依存性をパラメータとしながら、水が含水成分の輸送や地球内部の広がりに関わる素過程を抽出した。

4 . 研究成果

(1) アフリカ・カメルーン火山列 (CVL) : これまでデータがごくわずしか報告されていなかった内陸の Oku 火山とその周辺の岩石を採取・分析し、海洋域から大陸内部まで続く CVL のデータを系統的に得た。その結果、海洋域から大陸に向かって、IC1 が概ね増加してプルーム成分が支配的になる。Oku 火山付近では、最も IC1 が高く、IC2 の低い玄武岩を見出した。同時に、IC1 が負値、IC2 が 0 ~ 正值を示す玄武岩が共存することも見出した。主成分、微量元素濃度と、同位体、IC 成分の統合的な解析により、これらが、IC2 の低いマントルプルームに由来する成分、IC1 が負値となるリソスフェアの枯渇マントル、およびリソスフェア中の水溶液成分に富むメタソマティズムを蒙った局所的不均質の相互作用によって生み出されていることが分かった。従って、CVL のプルームは、IC2 が低い典型的な西半球組成をもつと考えられる (Asaah et al., 2015, 主な発表論文 ; Asaah et al. (投稿中))。

(2) カムチャッカ半島：クルイチェフスコイ火山群のトルバチク火山について、その基盤に相当する古期から、最近噴出した溶岩までを、系統的に分析し、2系列のマグマが存在することを明らかにした(Churikova et al., 2015, 主な発表論文)。また、半島北東部の前弧領域に新たに高 Mg 安山岩、初生的玄武岩などを、60 kmほどの比較的狭い領域内に点在する単成火山群として発見した。特に高 Mg 安山岩中に、これまで報告されている島弧火山岩中で、最も Ni に富むカンラン石斑晶が含まれることを発見した。これらの成因を解析したところ、海山の沈み込みに伴って放出された流体が、本来火山のできないはずの前弧域に一過性かつ多様な組成を示す火成活動を引き起こしたことが明らかとなった。この成果は現在投稿・改訂中である。また、Srediny Range 最北端にも、地形的にはごく若いと考えられる火山を発見し、年代測定、化学・同位体分析を行った。これらの結果と、従来報告されているカムチャッカ半島全域におけるデータを合わせて解析したところ、IC2 に関しては半島の中に大きな変化はなく、全体として負値を示し、東半球マントルの特徴を備えていることが分かった(論文準備中)。

(3) 南太平洋・ピトケアン島：ピトケアン島のテッドサイトにおいて、カンラン石斑晶を多く含む玄武岩を中心に調査・試料採取を行った。また既存の試料と合わせ、セルフラッグ装置を用いて、岩石からカンラン石斑晶を効率良く分離し、斑晶中メルト包有物を数多く抽出した。ピトケアン島は、IC2 が世界で最も高い値を示す玄武岩が存在し、揮発性成分の分析が重要と考えられる。このため、噴火過程での影響(揮発性成分の散逸)が少ないと予想される上記包有物を、海洋研究開発機構・高知コア研究センターの SIMS を用いて分析し、ハロゲンや水素同位体を含むマルチ元素・同位体分析を推進した。現在、分析・解析を進めている。並行して、全岩化学・同位体データの解析を行い、(A) HIMU 玄武岩(Tubuai, Rurutu, Mangaia 島)と EM1 玄武岩(Rarotonga, Pitcairn)が比較的狭い地域に密集し、特に Mangaia と Rarotonga はわずか 200 km の距離にも関わらず、組成半球構造の両極端に近い組成をもつこと、(B) これらの混在は、沈み込む脱水作用を受けたプレート物質と、その脱水流体がプレート直上の物質境界層で加水反応を起こし、スラブの一部として「脱水・加水を蒙った物質のパッケージ」としてマントル中を循環したものであると推定された(Iwamori & Nakamura, 2015, 主な発表論文)。

(4) 多変量解析：従来の海洋玄武岩(海嶺+海洋島)島弧玄武岩に加え、大陸内の玄武岩組成もコンパイルし、全世界を稠密の

覆うデータセットを構築した。このデータセットについて、独立成分分析を実施したところ、より半球構造が明確となった。さらに、この半球構造が、内核の地震波速度構造と空間パターンにおいて酷似することを見出した。これらの結果は、地球全体が、海嶺玄武岩の源であるマントル浅部から内核にいたるまで、何らかの機構を介して長波長の大構造を有することを意味し、実際のマントル対流が、従来のカオティックな描像と大きく異なる可能性を示唆する(Iwamori & Nakamura, 2015, 主な発表論文)。独立成分分析に加え、クラスタ解析の新しい手法を開発し、このデータセットに応用した。その結果、独立成分分析での結果をより確かなものとすると同時に(すなわち、データ全体の平面的構造や、従来の端成分(例えば、HIMU、EM、DMM など)が独立な端成分ではなく、2つの独立成分の重ね合わせで表現されるべきものであることを確認)「普通のマントル」として特に注目されていない部分にも、複数のクラスタが存在し、成因的な意味を持ちうることを示した(Iwamori et al., 2017, 主な発表論文)。

(5) マントル対流シミュレーション：水による岩石の粘性および密度低下を考慮し、沈み込み帯スケール(~300 km 深度)、全マントルスケール(矩形モデルおよび円筒モデル)での複数のモデル計算を行った。その結果、沈み込むプレートの脱水と流体移動、流体と固相の反応による物性変化、対流構造の変化による脱水・流体移動へのフィードバックが重要な働きをし、沈み込み帯の熔融領域や地球物理学的構造に加え、プレートテクトニクス様の対流を説明する上でも不可欠であることが分かった(Nakagawa et al., 2015, 主な発表論文; Horiuchi & Iwamori, 2016, 主な発表論文; Nakao et al., 2016, 主な発表論文)。現在、これらの対流モデルに元素輸送、同位体分別を組み込み、マントルの同位体不均質および半球構造の成因との関連性を研究中である(論文準備中)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計15件、全件 査読有)

Iwamori, H., K. Yoshida, H. Nakamura, T. Kuwatani, M. Hamada, S. Haraguchi, K. Ueki, 2017, Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses, *Geochem. Geophys. Geosys.* 18, 994-1012, doi:10.1002/2016GC006663.

Nakao, A., H. Iwamori, T. Nakakuki, 2016, Effects of water transportation on

subduction dynamics: Roles of viscosity and density reduction, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 454, 178-191, doi:10.1016/j.epsl.2016.08.016.

Horiuchi, S., H. Iwamori, 2016, A consistent model for fluid distribution, viscosity distribution, and flow-thermal structure in subduction zone, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3238-3260, doi:10.1002/2015JB012384.

岩森光, 2016, マントル対流と全地球ダイナミクス, *火山*, 61, 1-22, doi: 10.18940/kazan.61.1_1

Iwamori Hikaru, Nakamura Hitomi, 2015, Isotopic heterogeneity of oceanic, arc and continental basalts and its implications for mantle dynamics. *Gondwana Res.* 27, 1131-1152, doi:10.1016/j.gr.2014.09.003

Churikova, T.G., Gordeychik, B.N., Iwamori, H., Nakamura, H., Ishizuka, O., Nishizawa, T., Haraguchi, S., Miyazaki, T., Vaglarov, B.S., 2015, Petrological and geochemical evolution of the Tolbachik volcanic massif, Kamchatka, Russia, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 307, 156-181, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.026

Asaah Asobo, Yokoyama Tetsuya, Aka Festus, Usui Tomohiro, Kuritani Takeshi, Wirmvem Mengnjo, Iwamori Hikaru, Fozing E.M., Tarmen J., Mofor G.Z., Ohba Takeshi, Tanyileke G., Hell J.V., 2015, Geochemistry of lavas from maar-bearing volcanoes in the Oku Volcanic Group of the Cameroon Volcanic Line, *Chem. Geol.*, 406, 55-69, doi: 10.1016/j.chemgeo.2015.03.030

Nakagawa Takashi, Nakakuki Tomoeki, Iwamori Hikaru, 2015, Water circulation and global mantle dynamics: Insight from numerical modeling, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 16, 1449-1464, doi: 10.1002/2014GC005701

〔学会発表〕(計 15 件)

Iwamori, H., Horiuchi, S., Nakao, A., Nakakuki, T., 2016, Role of Water in Subduction Zone Dynamics, *Goldschmidt Conference*, 30-Jun-2016, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市). (Invited)

Iwamori, H., Ikemoto, A., Nakamura, H., Yoshida, M., Yanagi, R., 2016, Subduction factory and its impact on global mantle

heterogeneity, *Goldschmidt Conference*, 29-Jun-2016, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市). (Keynote)

Iwamori, H., Nakamura, H., Yoshida, M., 2015, East-west mantle geochemical hemispheres and its implications for a coupled supercontinent-mantle-core dynamics, *The 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)*, Prague, Czech Republic (Keynote talk) Oral, 2015/06/28.

Hikaru Iwamori, Hitomi Nakamura, Mantle geochemical hemispheres and their implications on mantle dynamics, *China-Japan Joint Forum on Geochemistry and Cosmochemistry*, Toyama University, 富山県富山市, 2014/09/16 (Invited)

Hikaru Iwamori, Hitomi Nakamura, Takeshi Hanyu, Junichi Kimura, Tomoeki Nakakuki, Takashi Nakagawa, Masaki Yoshida, Satoru Tanaka, Daisuke Suetsugu, Masayuki Obayashi, Subduction Process and a New Hypothesis for "Top-down Hemispherical Dynamics" of the Earth, *日本地球惑星科学連合 2014 年大会*, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014/04/28 (Invited)

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩森 光 (Iwamori, Hikaru)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・分野長
研究者番号：8 0 2 2 1 7 9 5

(2)研究分担者

中村 仁美 (Nakamura, Hitomi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・研究員
研究者番号：6 0 5 7 2 6 5 9

横山 哲也 (Yokoyama, Tetsuya)
東京工業大学・理学院・准教授
研究者番号：0 0 4 6 7 0 2 8

石塚 治 (Ishizuka, Osamu)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・主任研究員
研究者番号：9 0 3 5 6 4 4 4

吉田 昌樹 (Yoshida, Masaki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員
研究者番号：0 0 3 7 1 7 1 6

(3)連携研究者

羽生 毅 (Hanyu, Takeshi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球
内部物質循環研究分野・主任研究員
研究者番号：50359197

(4)研究協力者

Tatiana Churikova
Boris Gordeychik
Asobo Asaah
Festus T. Aka
清水 健二 (Shimizu, Kenji)
西澤 達治 (Nishizawa, Tatsuji)
小澤 恭弘 (Ozawa, Takahiro)