

機関番号：32634

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540448

研究課題名(和文) 中央海嶺玄武岩の組成を規定する要因の解明—南西インド洋海嶺を例に—

研究課題名(英文) Conditions for the chemical compositions of Mid-Ocean Ridge Basalts in the case of the ultra-slow spreading Southwestern Indian Ridge

研究代表者

佐藤 暢 (SATO HIROSHI)

専修大学・経営学部・准教授

研究者番号：50365847

研究成果の概要(和文):超低速拡大海嶺であるインド洋南西インド洋海嶺の東経 34° から 40° の中央海嶺で採取された中央海嶺玄武岩およびマン틀カンラン岩について岩石学・地球化学的分析を行った。その結果、主成分元素組成から推定されるマグマ形成の物理条件がほぼ等しい一方で、微量元素組成には海嶺の地形にほぼ対応した違いが認められた。このことはこの海域での中央海嶺玄武岩の化学組成の差がマン틀の組成の違いによって生じていることを示唆する。

研究成果の概要(英文): Petrological and geochemical analysis are performed for the mid-ocean ridge basalts and mantle peridotites recovered along the ultra-slow spreading Southwest Indian ridge from 34° E to 40° E. Estimated physical conditions, e.g. pressure and temperature, for producing magma beneath the ridge based on major element compositions do not vary along the ridge. However, basalts from distinct ridge morphology have different trace element compositions. It suggests that the chemical heterogeneity of source mantle compositions beneath the ridge, rather than physical conditions of mantle, might strongly affect the chemical compositions of mid-ocean ridge basalts.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：海洋岩石学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：テクトニクス、中央海嶺、玄武岩、化学組成、微量元素

1. 研究開始当初の背景

中央海嶺に産出する火山岩の化学組成は、他のテクトニックセッティングに産出する火山岩類に比べ比較的均質な組成を示すことが知られていたため、中央海嶺玄武岩(MORB)と総称されてきた。しかしながら、地殻浅所での結晶分化作用の影響を取り除

いて比較した場合でも、その組成には多様性が見られる。中央海嶺は地球を取り巻くように分布しているため、MORBの組成によって、全地球規模での海嶺下でもマグマ生成プロセスの違いを比較することが可能となる。MORBの結晶分化作用の影響を排除するために取り入れられている指標が、MgO含有量が

8 重量%のときの各酸化物の重量%である (Klein and Langmuir, 1987, 1989; Langmuir et al., 1992 など)。特に $MgO=8wt\%$ での Na20 含有量 (Na8) は部分融解度の指標であり、FeO 含有量 (Fe8) は平均融解圧力の指標とされている。このような指標を用いると、中央海嶺または大洋によって違いが顕著であったので、大洋毎のマントル組成の違いやテクトニックな条件によってこの違いを説明することが試みられた。Langmuir らは、約 $250^{\circ}C$ におよぶマントルポテンシャル温度の差で組成差を説明しようとした。一方、Niu らは、ポテンシャル温度に大きな違いがないとし、拡大速度の違いに原因を求めている。このように MORB 組成の多様性に対して、異なる解釈がなされているのが現状である。南西インド洋海嶺は超低速拡大海嶺に分類される (年間両側 14mm) が、Na8-Fe8 については、東に向かって高 Na8-低 Fe8 となるトレンドがいくつか認められる。従来の説に基づけば、海嶺に沿う温度が急変する、地殻の厚さが急変する、部分的に拡大速度が変化していることになる。このように MORB の組成の多様性については、十分な説明がなされていないのが現状である。この原因の一つは、複数の中央海嶺での比較を行っているために、様々なパラメータ (拡大速度、マントルポテンシャル温度、マントル組成、部分融解度、融解深度・圧力) の合算である MORB の化学組成での比較になってしまっているためである。これを解決する方法は、比較対象となる MORB に関与するパラメータを減らし、その中での組成変化を調べることである。

このような現状を背景に、本研究では、南西インド洋海嶺の東経 40° 付近の海域で MORB の系統的な採取を行い、MORB 組成を決定する要因を解明することとなった。

2. 研究の目的

中央海嶺に産する玄武岩 (MORB) の化学組成は、ほぼ均質であると見なされてきたが、実際には有意な不均質さが明らかになってきた。何が MORB の不均質さに起因しているのかについては、議論が続いている。本研究は、拡大速度が等しい中央海嶺において、系統的な試料採取を行い、MORB の化学組成を規定するパラメータ (マントル温度、マントル組成、融解条件) を明らかにする。この研究に適した中央海嶺は、東経 40° 付近の南西インド洋海嶺であり、広域の拡大速度はほぼ同じ (年間両側 14mm) であるため、MORB 組成の違いはマントルの温度や組成、融解条件の違いに起因すると予想される。学術研究船白鳳丸を用いて実施される岩石学・地球物理学の観測において、海嶺軸に沿う系統的な試料採取を行った。

MORB の不均質の成因についての議論は、試

料数の少なさや分析手法毎の試料の違いにも起因している。従って、本研究では、完全に同じ試料を用いて、主成分元素組成、微量元素組成、同位体組成を検討する。完全に揃ったデータセットを用いることで、MORB の化学組成の多様性の原因を検討した。

一般に、火山岩の主成分元素組成は融解・結晶化の温度・圧力条件を反映し、微量元素や同位体組成は起源マントルの化学的性質を反映する。両方のデータセットが揃って初めて、MORB を用いた海嶺下の火成活動の様子を推定することが可能となる。しかしながら、既存のデータ (PetDB データベース) をコンパイルしたところ、これらのデータが完全に揃っていることは多くは無かった。本研究では、完全に同じ試料 (全岩および急冷ガラス) を用いて、主成分元素組成、微量元素組成、同位体組成を検討した。分析手法そのものはオーソドックスなものであるが、完全に揃ったデータセットを用いることで、MORB の化学組成の多様性が何に起因するのかを検討することが可能となった。

3. 研究の方法

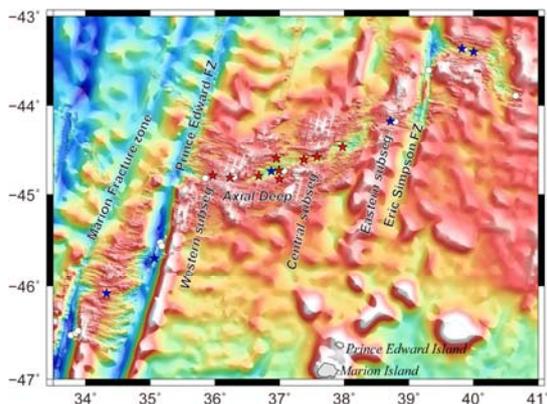
2008 年 1 月と 2010 年 1 月に実施された学術研究船「白鳳丸」による観測航海において、東経 34° から 40° の海域でドレッジによる試料採取を計 15 点において行った。尚、当初の航海計画では、更に東経 32° 、南緯 47° の海域までが調査海域として設定されていたが、この海域は常に低気圧が通過する地域となっており、研究船の安全な運行および観測が不可能と判断されたため、東経 34° から 40° の範囲を観測海域として再設定した。また、当初 2008 年 1 月と 2009 年 1 月に研究航海が設定されていたが、2008 年夏以降の原油高の影響により、後半の航海が 2010 年 1 月に延期となった。

これらの航海で採取された試料について、薄片に基づいた記載岩石学を行い、主成分元素組成分析を専修大学設置の蛍光 X 線分析装置 (XRF) により、微量元素組成分析を海洋研究開発機構設置の誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP-AES) により実施した。一部試料の微量元素組成分析、同位体組成、水含有量分析に関しては、研究協力者により、東京大学工学部、国立科学博物館、東京大学地殻化学実験施設において実施された。

4. 研究成果

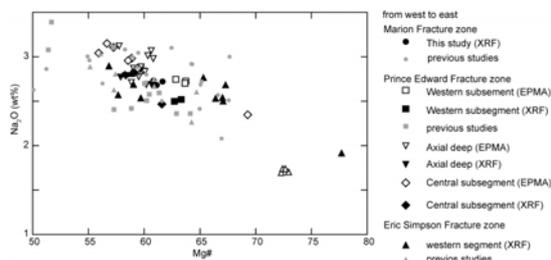
図 1 に示した 15 地点で試料の採取を行った。

採取された岩石はガラス質・無斑晶質の玄武岩から斑晶、特に斜長石、に富む玄武岩が主であった。また 2 地点からマントルカンラン岩類を、1 地点から変成岩類を採取した。図 1 調査海域の海底地形図と試料採取地



点。青星 (KH-07-4 航海)、赤星 (KH-09-5 航海)。

図2 採取された玄武岩類の主成分化学組成



成。一例として Na₂O 含有量と Mg# の変化を示す。

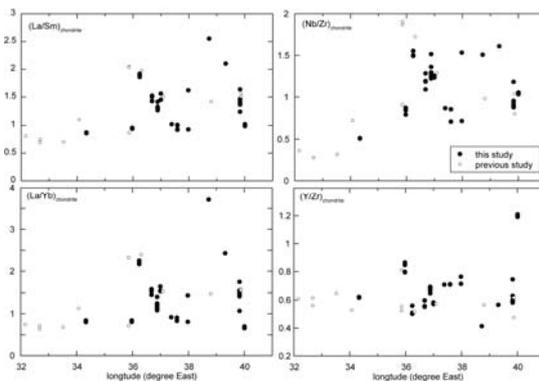
玄武岩類については、主成分元素組成において、結晶分化作用による組成の変化は認められるものの (図2)、本質的な違いは認められない。

すなわち、結晶分化した鉱物種および化学組成を推定し、それらを加えることによって推定される初生マグマの化学組成はほぼ同一組成を示す。このことは、マグマ形成の物理条件 (温度・圧力) がほぼ等しいことを意味する。

微量元素組成は、通常海底拡大をしている地形で採取された玄武岩とそうでない部分で異なった。

すなわち、図3に示した通り、希土類元素比で比べると、通常海底拡大をしている部分では $(La/Sm)_{chondrite}=1.0$ 、 $(La/Yn)_{chondrite}=0.8$ であるのに対し、通常拡大ではない部分 (図1の Axial deep など) ではより軽希土類 (この場合は La) に富む傾向が認められる。希土類元素以外の微量元素で比べると、Y/Zr はほぼ変化が認められないのに対し、Nb/Zr は希土類元素と同じ様なパターンとなる。このことは、通常拡大ではない部分ではより液相濃集度の高い元素に富むことを示している。

主成分元素組成から推定されるマグマ形成の物理条件がほぼ等しい一方で、微量元素組成に違いが見られることは、当該海域の



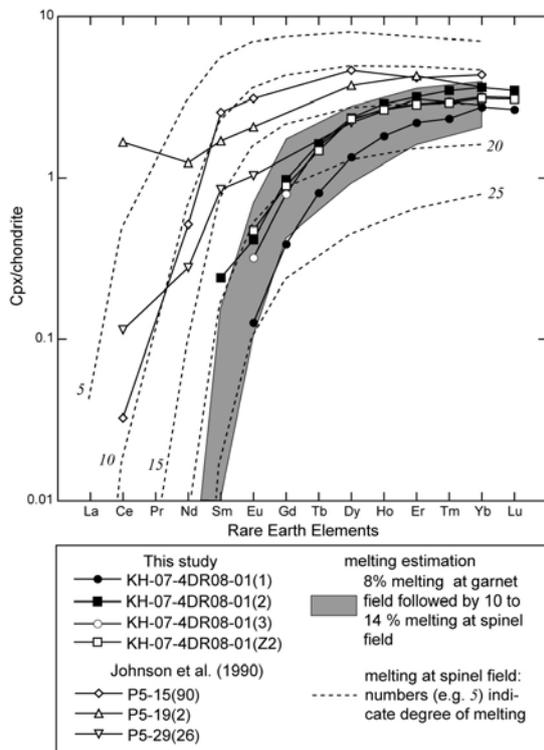
をとった。

MORB の化学組成はマンタルの組成の違いによる影響が大きいことが示唆される。

液相濃集元素に富む MORB は、プリンスエドワード断裂帯とエリックシンプソン断裂帯に挟まれるセグメント内の、Axial deep と western subsegment の境界に発達する < 型の高まりの部分で採取された。この高まりはやや東方まで連なっており、高まりの中心が西進してきたと考えられる。Axial deep 北側のかつての高まりの部分での試料採取は行っていないが、高まりの中心で液相濃集元素に富む MORB の活動が生じている可能性はきわめて高い。このことは、液相濃集元素に富むマンタルが西進してきたか、液相濃集元素に富むマンタルが3次元的には傾いて分布していて、次第に西の部分が融解し、液相濃集元素に富むマグマを作り出したというシナリオが考えられる。

< 型の高まりの南部、現在の Axial deep でも液相濃集元素に富む玄武岩類が採取された。マンタルの基本的な性質が同じで、液相濃集元素に富んでいるならば、一般的にはマグマの生産量が多くなることが期待される。しかしながら、axial deep の下ではマグマの生産量が少ないために、通常拡大の海底とはことなり、凹地になっていることが考えられる。したがって、このことは液相濃集元素以外の成分に関しても、玄武岩質マグマを作る範囲ではあるが不均質が存在し、axial deep の下のマンタルはやや枯渇した性質を有していることが推定される。

このような枯渇したマンタルの局所的な存在は、同時に採取されたマンタルカンラン岩の化学組成からも示唆される。当該海域の数カ所でマンタルカンラン岩を採取しているが、そのうち、プリンスエドワード断裂帯内の構造的な高まりから採取されたマンタルカンラン岩は特異な特徴を有していた。採取されたカンラン岩は礫岩中の礫として存在し、蛇紋岩化の程度も高かったが、初生鉱物としてカンラン石、単斜輝石、斜方輝石、ス図4 南西インド洋海嶺プリンスエドワード断裂帯で採取されたカンラン岩礫中の単斜輝石の希土類元素組成のコンドライト規



格化パターン。

ピネルを含んでおり、原岩はレルゾライトと推定された。初生の単斜輝石の微量（希土類）元素組成を測定したところ、軽希土類に著しく枯渇していた（図4）。

このような枯渇した特徴は同じ南西インド洋海嶺沿いで採取されている他のマントルカンラン岩には認められない特徴である。この希土類元素組成を基に融解プロセスを推定すると、マントル内のざくろ石安定領域から融解を開始し、その後スピネル安定領域まで融解が続いたことになる。南西インド洋海嶺沿いの他のマントルカンラン岩はスピネル安定領域での融解の融け残り成分で説明できるため、このカンラン岩の融解プロセスが他のマントルカンラン岩とは異なることとなる。

カンラン岩礫岩の基質部分には、カンラン岩由来の鉱物が多数含まれていた。その中から、スピネルを抽出し、 ^{187}Os 同位体比の測定を行った。 ^{187}Os 同位体比は 0.1209~0.1219 という値となり、南西インド洋海嶺や他の中央海嶺沿いに産出するマントルカンラン岩よりも著しく枯渇した値であった。更にこの同位体比を用いてマグマ抽出年代を計算すると、約 10 億年という値が得られた。従って、プリンスエドワード断裂帯内の構造的高まりから採取されたマントルカンラン岩は、現在の中央海嶺でのマグマ活動とは無関係であり、約 10 億年前にマグマを形成した後、マントル内に留まり、最近になって構造的に海底に露出したと考えられる。

このようにマグマ活動に関与しない、枯渇したマントルカンラン岩が南西インド洋海嶺下に存在する可能性は高く、そのようなマントルとよりエンリッチしたマントルが共存していることが強く予想される。

中央海嶺玄武岩の化学組成は、特に南西インド洋海嶺の様な超低速拡大海嶺では、ソースマントルの化学組成に大きく依存する、という結論を得ることが出来た。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

1. Hiroshi Sato, Teruaki Ishii, Petrology and mineralogy of mantle peridotites from the southern Marianas. In Ogawa, Y. et al. (eds.) Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin, Modern Approaches in Solid Earth Sciences, vol. 8, 査読有, 2011, doi: 10.1007/978-90-481-8885-7_6.
2. 佐藤暢, 蛍光 X 線分析装置による岩石試料中の主成分元素の定量分析. 専修自然科学紀要、査読無、4 1 巻、2010、15-23.
3. 佐藤暢・水上和則、蛍光 X 線分析装置によるセラミクス試料中の主成分元素の定量分析用検量線. 専修自然科学紀要、査読無、4 1 巻、2010、25-30.
4. Taichi Sato, Kyoko Okino, Hidenori Kumagai, Magnetic structure of an oceanic core complex at the southernmost Central Indian Ridge: Analysis of shipboard and deep-sea three-component magnetometer data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 査読有, vol. 10, Q06003, doi:10.1029/2008GC002267.
5. Kentaro Nakamura, Tomoaki Morishita, Wolfgang Bach, Frieder Klein, Kaori Hara, Kyoko Okino, Ken Takai, Hidenori Kumagai, Serpentinized troctolites exposed near the Kairei Hydrothermal Field, Central Indian Ridge: Insights into the origin of the Kairei hydrothermal fluid supporting a unique microbial ecosystem, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有り, vol. 280, 2009, 128-136.

6. Hidenori Kumagai, ほか 14 名
Geological background of the Kairei
and Edmond hydrothermal fields along
the Central Indian Ridge:
Implications of their vent fluids'
distinct chemistry. Geofluids, 査読
有, vol. 8, 2008, 1-13.

〔学会発表〕 (計 10 件)

1. 佐藤暢ほか、IODP 第 322 次研究航海基盤
岩の岩石学. 日本地質学会第 117 年学
術大会、2010 年 9 月 20 日、富山大学
2. 佐藤暢ほか、南西インド洋海嶺 35E から
39E で採取された岩石類-白鳳丸 KH-09-5
航海速報-. 日本地球惑星科学連合 2010
年大会、2010 年 5 月 26 日、幕張メッセ
3. 佐藤暢ほか、南西インド洋海嶺 34° E から
40° E の 3 つのセグメントから得られ
た玄武岩の地球化学. 日本地球化学会第
56 回年会、2009 年 9 月 15 日、広島大
学
4. 佐藤暢ほか、南西インド洋海嶺 Prince
Edward 断裂帯沿いのかんらん岩礫岩の
形成年代と岩石組成. 日本地質学会第 1
16 年学術大会、2009 年 9 月 6 日、岡山
理科大学
5. 佐藤暢ほか、南西インド洋海嶺 (東経 3
8-40 度) から採取された火山岩と超
苦鉄質岩の岩石学・地球化学的特徴. 日
本地球惑星科学連合 2009 年大会、2009
年 5 月 17 日、幕張メッセ
6. 佐藤暢ほか、白鳳丸 KH-07-4 Leg 2 によ
る南西インド海嶺 34-40° E 航海で採取
された火山岩類の岩石学・地球化学. 日
本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008
年 5 月 25 日、幕張メッセ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 暢 (SATO HIROSHI)
専修大学・経営学部・准教授
研究者番号：50365847

(2) 研究分担者

熊谷 英憲 (KUMAGAI HIDENORI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
変動研究センター・技術研究主任
研究者番号：10344285
(H21→H22 連携研究者)