

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19403006  
 研究課題名 (和文) マントルの組成は中央海嶺プロセスを規定するか？-南西インド洋海嶺探査  
 研究課題名 (英文) Does mantle geochemistry control the mid-ocean ridge process? - Southwest Indian Ridge expedition  
 研究代表者  
 沖野 郷子 (KYOKO OKINO)  
 東京大学・海洋研究所・准教授  
 研究者番号：30313191

## 研究成果の概要 (和文)：

超低速拡大系である南西インド洋海嶺 34-41°E において、研究船を用いた地球物理学・地球化学的探査を行った。地磁気・重力・地震波構造探査の結果から、当該海域でのメルト供給量の時空間変動が明らかになり、その変動に対応して拡大プロセス (地形の非対称、斜交拡大) の変化が認められた。また、取得された岩石の分析からも、マントルの組成や温度の不均質が小スケールで生じていることが示された。上部マントルの電気伝導度構造と微小地震分布もあわせて明らかになった。

## 研究成果の概要 (英文)：

The geophysical and geochemical survey was done along the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge 31-41°E. Geophysical data shows the spatial and temporal variation of the melt supply in the area, which corresponds to the variation of mid-ocean ridge process such as spreading asymmetry and obliquity. The result of rock analysis also suggests the existence of small-scale heterogeneity of mantle geochemistry and/or temperature. The upper mantle structure and microseismicity are also revealed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2008 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

## 研究分野：海底テクトニクス

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：中央海嶺,海洋性地殻,マントル,海底拡大,ホットスポット

## 1. 研究開始当初の背景

中央海嶺プロセスは主に拡大速度に規制されると長く考えられてきたが、近年の研究では、拡大速度とメルト供給量のバランスが海嶺における諸現象と海洋性地殻の構造を決める要因として重要であるとの認識が生

まれてきた。例えば、メルト供給量が少ない海嶺セグメントで見られる大規模正断層の発達などは、概ねメルト供給/拡大速度比を変化させることで数値モデルでの再現が可能である。

しかしながら、観測データからメルト供給

量を正確に見積もることはしばしば困難で、メルト供給量/拡大速度比と実際の海底構造の変化の対応を明らかにした例は非常に少ない。また、メルト供給量の変化がそもそも何に起因するか（マンツルの温度などの物理条件か、マンツルの化学組成か）はまったく明らかになっていない。そのため、拡大速度が一定でメルト供給量の変化が確実に想定される海嶺系において総合的な観測研究を行うことが必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、ホットスポットの影響下にある（すなわちメルト供給が多い）と想定される超低速拡大海嶺、南西インド洋海嶺 34-41° E を対象とした地球物理学的・地球化学的観測研究を行い、メルト供給量の違いがどのような海底構造の変化を生じさせるか、またメルト供給量の変化はマンツルの化学組成とどのような関係があるかを明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

調査海域において、地球物理マッピング（地形、地磁気、重力観測）、海底地震計探査（微小地震分布、地震波速度構造）、電位差磁力計探査（電気伝導度構造）、岩石採取を実施する。得られたデータ・試料を元に、地殻構造と地殻の厚さの推定、海底拡大史の復元を行い、メルト供給量の時空間変化を明らかにする。また、上部マンツルに含まれる揮発性成分（水）と岩石中の液相濃集元素の量を明らかにし、マンツルの組成を推定する。以上の結果を総合的に考察することにより、当該海域におけるメルト供給量変化の実態とその規制要因を議論する。

## 4. 研究成果

### (1) 観測の概要

南西インド洋海嶺は、拡大速度が 14mm/年の超低速拡大系である。また、対象とした 34-41°E 付近では、海嶺軸の南東側にマリオンホットスポットが約 260km の距離に位置している（図 1）。このため、ホットスポットの影響によるマンツル組成の変化が予想され、

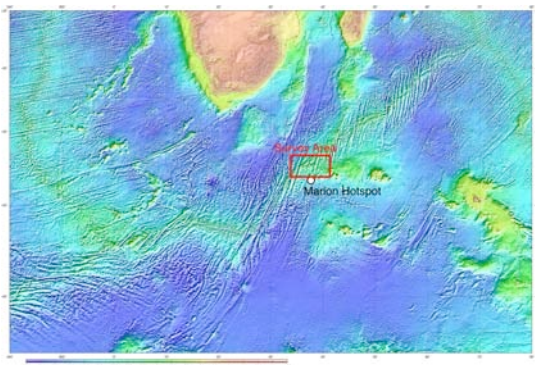


図 1 調査海域図

広域の重力異常からは、南東側では地殻が厚いことを示す低い重力異常があることから、ホットスポット-海嶺相互作用の結果としてメルト供給量が多いことが示唆されている。対象海域の中央海嶺は、南西インド洋海嶺の他の海域と同様に、断裂帯によって比較的短いセグメントに分かれており、36° E に Prince Edward 断裂帯があり、39° E に Eric Simpson 断裂帯がある。

研究船「白鳳丸」の KH07-4 航海（2007 年度）において、地球物理マッピング、海底地震計観測、海底電位差磁力計設置、ドレッジによる岩石採取を実施した。2008 年 12 月には、「海鷹丸」を用いて KH07-4 で設置した海底電位差磁力計を回収した。また、KH09-5 航海（2009 年度）において、地球物理マッピングおよび岩石採取を行った。

### (2) 地球物理マッピング

地球物理マッピング（マルチビーム測深、地磁気、重力）は、主として 35-39° E の範囲（Prince Edward、Eric Simpson 断裂帯には含まれた海嶺セグメント）で実施し、海嶺軸から片側 50-60km オフアキススまでの範囲をカバーした。

得られた地形データから、調査域では海嶺は 5 つのサブセグメントに分かれていることがわかった（図 2）。海嶺軸は概ね狭く深い軸谷が発達しており、プレート運動方向に直交するサブセグメントと、斜交するサブセグメントが存在する。海域西部では、西向き V 字型の高まりが存在する。海嶺軸をはさんだ構造の非対称性が広く見られ、特に斜交セグメントと断裂帯との交点付近で著しい。

地磁気異常からは詳細な拡大速度の変遷を求め、さらに地形を考慮した 3 次元インバ

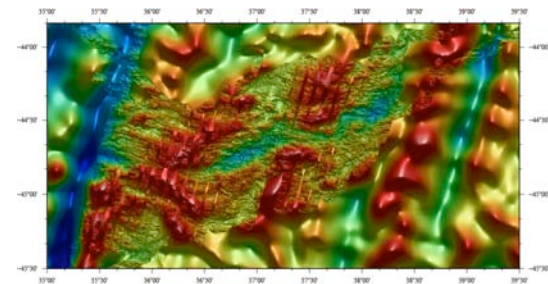


図 2 海底地形図と測線

ージョンを行って磁化強度分布を明らかにした（図 3a）。拡大速度は 14-16mm/yr でグローバルモデルからの推定よりやや速く、南側が速い非対称性拡大を示す。磁化強度は直交セグメントでは強く、斜交セグメントでは弱い。これは斜交セグメントでは定常的な地殻の生産が行われていないことを示唆する。

重力異常から推定した地殻の厚さは、直交セグメントでは概ね 5-6 km、斜交セグメントで 2-3 km となっている（図 3b）。これは

磁化強度分布の結果と整合的である。

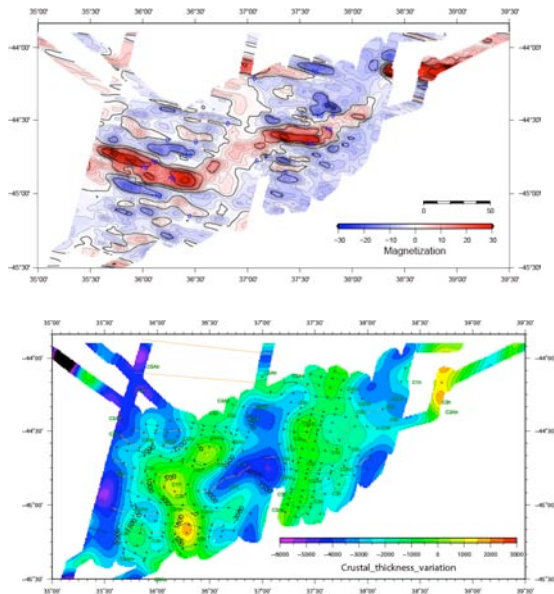


図 3 (上) 磁化強度分布

図 4 (下) 重力から求めた地殻の厚さ

(3) 地震探査

地震探査は KH07-4 航海において 37° E の斜交サブセグメント中軸部に海底地震計 (OBS) 10 台を 4 日間設置して行った。観測期間中に、構造探査を目的として 200×2 のエアガンレイを用いた人工地震探査もあわせて実施した。

① 速度構造探査

人工地震探査の解析には、三次元速度構造が決定可能である FAST を用いた。得られた構造を図 5 に示す。観測領域北東側で、周囲よ

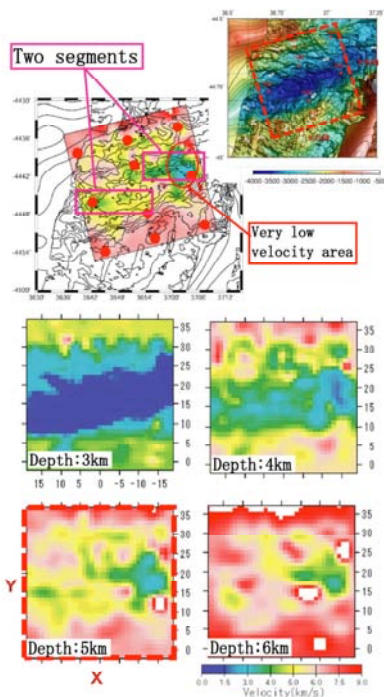


図 5 地震波速度構造

も地震波速度の遅い領域が確認された。また、速度構造と海底地形図を比較すると、低速度領域と観測領域中央部の東西 2 つのサブセグメントがほぼ一致する。

② 微小地震分布

自然地震の震源決定には、三次元構造が使用可能な NonLinLoc プログラムを用いた。その結果、観測期間内に 171 個の自然地震が検出され、その震源分布は、主に 3 つの場所に集中しており、それぞれ東西 2 つの小セグメント部分 (図 6 中の緑色枠、ピンク色枠) とその境界部分 (同水色枠) に対応した。

東側セグメントの地震は東端の低速度域をマグマ湧昇と解釈するならば、Volcanic な地震と考えられる。西側セグメントの地震は、西北西-東南東方向の地溝リニアメント上に存在しており、地溝部分が下に落ちるセンスの正断層型のメカニズム解が得られた。サブセグメント境界部の地震からは、トランスフォーム型の地震の可能性を示唆する横ずれ型のメカニズム解が得られた。よって同海域は、一見すると斜め拡大海嶺であるが、実際は拡大方向に直交するサブセグメントで構成されている可能性がある。

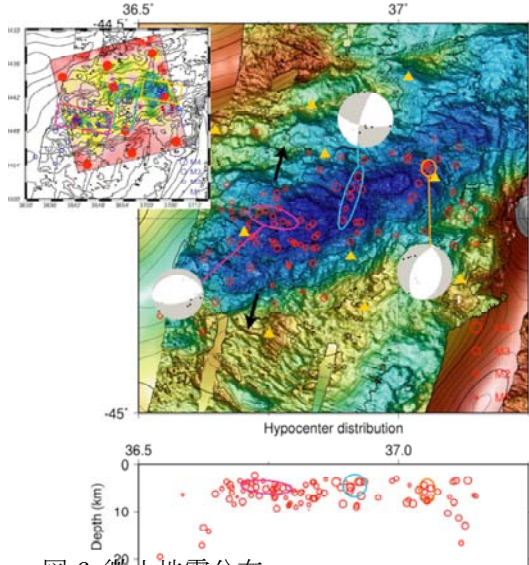


図 6 微小地震分布

(4) 上部マントル構造

上部マントルの比抵抗 (電気伝導度) 構造を magnetotelluric (MT) 法をもちいて明らかにした。上部マントル比抵抗構造を推定することで、超低速拡大系における熔融 (メルトの形成) や、ホットスポットとの相互作用の様式に地球物理学的な制約を与え、この系の理解を深めることが可能となる。

MT 法による上部マントル比抵抗構造調査では、海嶺軸を中心とする南北方向の測線上に、7 台の海底電位差磁力計 (OBEM) をもちいて、海底における長期間の電場・磁場観測を行った。測線の全長は約 110km (海洋地殻年

代は約 7Ma まで) であり, 観測点の間隔は, 拡大軸上付近では約 10km, 両端では約 30km である. 7 台の OBEM は, 2008 年 1 月の白鳳丸 KH07-04 航海で設置し, 2008 年 12 月の海鷹丸第 27 次航海で全てを回収した. 各 OBEM には, 全観測期間である約 11 か月間の観測データ (時刻, 磁場, 電場, 傾斜, 温度) データが記録されていた.

観測データの解析では, まず時系列のデータ処理として, (1) 1分間隔データに整形, (2) スパイク除去・データ補間, (3) ステップ状変化の補正, (4) 時刻補正, (5) 傾斜補正, (6) 座標回転, (7) 電場計算, (8) 長周期トレンド除去, (9) 地磁気日変化・潮汐成分除去, を行った. 次に, 得られた水平磁場 2 成分, 電場 2 成分時系列データから, BIRRP (Bounded Influence, Remote Reference Processing, Chave and Thomson, 2003, 2004) をもちいて, 周期 320~81920 秒の範囲で見かけ比抵抗と位相を求めた. そして, FS3D (Flattening surface 3D modelling, Baba and Seama, 2002) をもちいて海底地形の効果を計算し, Nolasco et al. (1998) の式により, 観測で得られた見かけ比抵抗と位相に海底地形の補正を行なった. 最後に, 海底地形補正後の見かけ比抵抗と位相をもちいて, 2 次元の上部マントル比抵抗構造を推定した. この推定には, NLCG (NonLinear Conjugate Algorithm, Rodi and Mackie, 2001) によるインバージョンをもちい, さらに, 得られた比抵抗構造にみられる特徴的な領域が必要かどうかを確認するために, フォワードモデリングによる比抵抗構造の信頼度テストも行った.

推定した 2 次元の上部マントル比抵抗構造には, 次の 4 つの特徴的な領域があることが分かった. すなわち, 1) 海底下から深さ約 15km まで  $1000 \Omega\text{m}$  以上という高比抵抗な領域, 2) 約 15km (領域 1 の下) から深さ 60km まで  $100 \Omega\text{m}$  以下の低比抵抗な領域, 3) 深さ 60km の下 (領域 2 の下) には,  $300 \sim 1000 \Omega\text{m}$  のやや高比抵抗な領域, 4) 深さ 60km の下 (領域 2 の下) の海嶺軸の南側にだけにある  $30 \sim 300 \Omega\text{m}$  のやや低比抵抗な領域, の 4 つである. これらの領域をそれぞれ, 領域 1 を地殻と枯渇したマントル, 領域 2 を 1-3% のメルトが含まれるマントル, 領域 3 をドライなオリビンからなるマントル, 領域 4 をやや温度の高いマントル (ホットスポットの影響かもしれない) と解釈した. これらの特徴は, これまで上部マントル比抵抗構造が推定されている, 高速拡大系の東太平洋中央海膨 (Baba et al., 2006) や, 低速の背弧拡大系である中部マリアナトラフ (Matsuno et al., submitted) とは, 大きく異なっている. 特に, 本研究では, 上部マントルの含水量がグローバルでは不均質であることを示唆する 60km

以深の高比抵抗な領域 (領域 3) や, 熔融深度が浅いことを示唆する 15-60km の低比抵抗な領域 (領域 2) の存在が推定されている. このため, 今後, この構造の推定にどの程度の任意性があるかを調べ, これらの領域の存在が確実なのかを慎重に検証していく必要がある.

#### (5) 岩石学的研究

対象海域の南側にはマリオンホットスポットが存在するが, 既存研究ではその影響を受けているセグメントは, 両断裂帯に挟まれたセグメントに限られ, Prince Edward 断裂帯の西側には影響していないとされている. また Eric Simpson 断裂帯の東側のセグメントでは DUPAL 異常が顕著であると報告されている. 2007 年度の航海では Prince Edward 断裂帯西側のセグメントから Eric Simpson 断裂帯東側のセグメントまでの比較的広い範囲において, 2009 年度の航海では, 両断裂帯で挟まれたセグメント内の小セグメント毎に, ドレッジによる試料採取を行った (図 7).

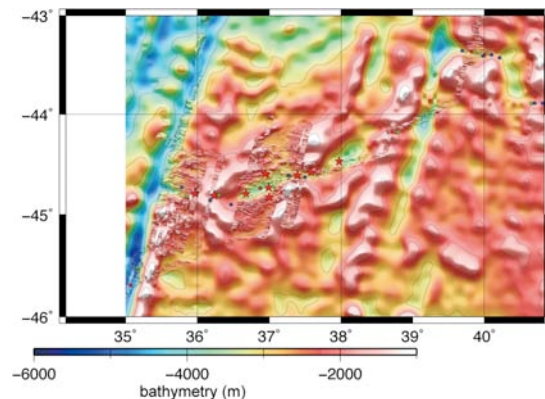


図 7 岩石採取地点. 赤が本研究で得られた試料, 青と緑は既存研究による

マントル起源かんらん岩: 南西インド洋海嶺の  $35^\circ \text{E}$  の Prince Edward 断裂帯内の南北性の構造的な高まり, および 2 つの断裂帯に挟まれたセグメント内の凹地からかんらん岩礫岩が採取された. Prince Edward 断裂帯から採取された礫岩の礫は蛇紋岩化したかんらん岩であり, 変質は著しいが, 残存鈹物のモード組成 (蛇紋石・変質鈹物 73.8%, かんらん石 1.6%, 単斜輝石 11.0%, 斜方輝石 12.3%, スピネル 1.3%) から, 源岩はレルゾライトと推定される. スピネルの化学組成は,  $\text{Cr}\# \approx 25 \sim 36$  (礫ごとの平均値) で, 礫の違いによる変化が大きい. 南西インド洋海嶺の他のセグメントで採取されたマントルかんらん岩中のスピネルの  $\text{Cr}\#$  ( $\sim 20$  から  $40$ ) と比べると, ほぼ同程度かやや枯渇した値を示している. また, 初生鈹物として残存している単斜輝石は, 希土類元素組成に著しく枯渇しており, ざくろ石かんらん岩安定領域での

溶融を示唆する.Prince Edward 断裂帯と Eric Simpson 断裂帯に挟まれたセグメント内の凹地から採取されたかんらん岩は、2009 年度の航海で採取されたものであり、現在、分析を進めている。

玄武岩：新鮮なガラスを含むものから若干の変質を被った、無斑晶質ないし斜長石斑晶を大量に含む玄武岩が採取された.Prince Edward 断裂帯西側のセグメントなど低速拡大海嶺に典型的な中軸谷内部の高まりからは、中央海嶺玄武岩 (MORB) に典型的な微量元素組成を有する玄武岩が採取された。一方で、Eric Simpson 断裂帯の東側のセグメントからはやや枯渇した特徴を示す玄武岩が採取された。特に、同位体的な異常が強い試料が報告されているセグメントからは、軽希土類のコンドライト規格化パターンが下に凸となるような試料が得られており、枯渇した MORB マントル (DMM) の単純な部分融解では説明できない。

このように、近接するセグメントの間や同一セグメント内でも異なる岩石組成が得られたことは、マントルソースの組成や温度について非常に小さいスケールでの不均質さを予想させる。2009 年度の航海では、ガラスに富む、新鮮な試料が採取されており、現在、高精度同位体分析等を含め、研究が進められている。

#### (6) まとめ

地球物理マッピングと地震波構造探査により、本海域では空間スケールで 50km 程度、時間スケールで 2m. y. 程度で大きくメルト供給量に変化していることが明らかになった。海底地形が示す非対称構造や断層分布などは地殻の厚さが示すメルト供給量と非常によく対応しており、今後定量的な議論を行っていく予定である。採取された岩石の分析からは、同一セグメント内でも異なる組成の岩石が見られた。このことから、マントルの組成や温度について小さいスケールの不均質が存在することが予想され、上述の物理探査で明らかになったメルト供給量の変動との対比が可能となった。さらに、電気伝導度構造探査からは、他の海嶺系とは大きく異なる構造が得られ、上部マントルの含水量がグローバルに不均質であることが示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

Curewitz, D., K. Okino et al., Structure analysis of fault populations along the oblique ultra-slow spreading Knipovich Ridge, North Atlantic Ocean, 74° 30' N-77° 50' N, J. Structural Geology, in press, 2010.

佐藤暢・熊谷英憲・根尾夏紀・中村謙太郎, 中央海嶺玄武岩の化学組成の多様性とそ

の要因, 地学雑誌, 117 (1), 124-145, 2008. [学会発表] (計 23 件)

佐藤太一, 南西インド洋海嶺 34 - 40° E に位置する斜交拡大海嶺の地球物理的研究, 日本地球惑星科学連合大会, 2009. 5. 17, 幕張.

水野真理子, 南西インド洋海嶺, 東経 37 度付近における自然地震活動, 日本地球惑星科学連合大会, 2009. 5. 17, 幕張.

北村貴幸, 南西インド洋海嶺, 東経 37 度付近における 3 次元地震波速度構造, 日本地球惑星科学連合大会, 2009. 5. 17, 幕張.

佐藤暢, 白鳳丸 KH-07-4-Leg2 による南西インド洋海嶺 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大会, 2009. 5. 17, 幕張.

Ta, Sato, New results of surface geophysical survey at Southwest Indian Ridge 34-40E, implication for hotspot-ridge interaction, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2008. 12. 18, サンフランシスコ, USA.

島伸和, 白鳳丸 KH-07-4 Leg 2 による南西インド海嶺 34-40° E 航海の概要, 日本地球惑星科学連合大会, 2008. 5. 25, 幕張

[その他]

本課題を利用して以下の修士論文が提出された。

水間恵子, 南西インド洋海嶺 37° E における上部マントル電気伝導度構造の推定, 神戸大学大学院修士論文.

水野真理子, 東経 37 度付近における自然地震活動, 2009 年度千葉大学大学院修士論文.

北村貴幸, 南西インド洋海嶺, 東経 37° 付近における地震波速度構造の解析, 2008 年度千葉大学大学院修士論文.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

沖野 郷子 (OKINO KYOKO)  
東京大学・海洋研究所・准教授  
研究者番号: 30313191

##### (2) 研究分担者

島 伸和 (SHIMA NOBUKAZU)  
神戸大学・自然科学系先端融合研究環内海  
域環境教育研究センター・准教授  
研究者番号: 30270862  
佐藤 利典 (SATO TOSHINORI)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 70222015  
海野 進 (UMINO SUSUMU)  
金沢大学・自然システム学系・教授  
研究者番号: 30192511  
野木 義史 (NOGI YOSHIFUMI)

国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号：90280536  
富士原 敏也 (FUJIWARA TOSHIYA)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・研究員  
研究者番号：30359129  
中村 恭之 (NAKAMURA YASUYUKI)  
東京大学・海洋研究所・助教  
研究者番号：60345056  
山本 順司 (YAMAMOTO JUNJI)  
京都大学・理学(系)研究科(研究院)・  
助教  
研究者番号：60378536  
佐藤 暢 (SATO HIROSHI)  
専修大学・経営学部・准教授  
研究者番号：50365847  
熊谷 英憲 (KUMAGAI HIDENORI)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・技術研究主任  
研究者番号：10344285  
鈴木 勝彦 (SUZUKI KATSUHIKO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・チームリーダー/主任  
研究員  
研究者番号：70251329  
阿部 なつ江 (ABE NATSUE)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・研究員  
研究者番号：80302933  
原田 靖 (HARADA YASUSHI)  
東海大学・海洋学部・講師  
研究者番号：00366064  
浅田 美穂 (ASADA MIHO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・技術研究副主任  
研究者番号：90447376  
篠原 雅尚 (SHINOHARA MASANAO)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：90242172

(以上いずれも H20 年度より連携研究者)

(3) 研究協力者

中村謙太郎 (NAKAMURA KENTARO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・システム  
研究ラボ・研究員  
研究者番号：40512083  
仙田量子 (SENDA RYOKO)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・技術研究員

(以下協力大学院学生)

佐藤太一 (SATO TAICHI)  
東京大学大学院・理学系研究科・学生  
北村貴幸 (KITAMURA TAKAYUKI)  
千葉大学大学院・理学研究科・学生

水野真理子 (MIZUNO MARIKO)  
千葉大学大学院・理学研究科・学生

水間恵子 (MIZUMA KEIKO)  
神戸大学大学院・理学研究科・学生