

東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会  
海洋リソスフェアの蛇紋岩化作用と  
物理・化学・生物プロセス  
- InterRidge-Japan 研究集会 -

日時：平成 29 年 11 月 27 日（月） 9:30 ~ 18:30  
11 月 28 日（火） 9:30 ~ 12:00

場所：東京大学大気海洋研究所 2 階 講堂  
〒277-8564 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 TEL 04-7136-6009

コンビーナー：藤井 昌一（国立極地研究所）fujii.masakazu@nipr.ac.jp  
針金 由美子（産業技術総合研究所）y-harigane@aist.go.jp  
奥村 知世（高知大学）tomoyook@kochi-u.ac.jp

大気海洋研究所対応：沖野 郷子（東京大学大気海洋研究所）okino@aori.u-tokyo.ac.jp

## プログラム

11 月 27 日（月）

9:30 受付開始

9:50 開会の辞

### セッション 1：地球物理背景と地質「物質とエネルギーの供給場」

10:00	トランスフォーム断層と水	沖野 郷子（東京大学大気海洋研究所）
10:15	Controlling factor of oceanic plate hydration at the north-western Pacific margin	藤江 剛（JAMSTEC）他
10:30	Resistivity imaging around a serpentine zone and an outer-rise fault zone	市原 寛（名古屋大学）
10:45	蛇紋岩化したカンラン岩の地震波速度	渡辺 了（富山大学）

### セッション 2：変形と水循環様式「水の流入と蛇紋岩化作用の促進」

11:15	海洋リソスフェアの沈み込み開始における深部熱水変質作用の役割	平内 健一（静岡大学）
11:30	かんらん岩の 25° S OCC 深部での変形・変質作用	曾田 祐介（大阪市立大学）他
11:45	アウターライズ領域での海洋マンツルの蛇紋岩化 1: 浸透率の実験データに基づくモデル	片山 郁夫・畠山 航平（広島大学）
12:00	アウターライズ領域での海洋マンツルの蛇紋岩化 2: 弾性波速度測定と観測結果の比較	畠山 航平・片山 郁夫（広島大学）

## 昼食

### セッション 3：水-岩石反応「水と珪酸塩鉱物の役割」

13:15	蛇紋岩化作用の多様性：岩石学的証拠	野坂 俊夫（岡山大学）
13:30	蛇紋岩化作用における Fe の挙動—蛇紋石の役割	水上 知行（金沢大学）
13:45	海洋底の蛇紋岩化に伴う物質移動とメッシュ組織	岡本 敦（東北大学）他
14:00	海底熱水系における蛇紋岩化作用の地球化学	中村 謙太郎（東京大学）

## セッション4：海底熱水系を支える蛇紋岩と最新のIODP航海掘削成果

14:30	しんかい湧水域を育む南部マリアナ前弧の地質	小原 泰彦 (海上保安庁海洋情報部) 他
14:45	低速拡大海嶺下におけるマグマ活動, 熱水活動, 生命活動に迫る: IODP Exp. 357 からの知見	秋澤 紀克 (京都大学) 他
15:00	低速拡大海域でのマントル掘削計画 SloMo: まだハンレイ岩だから下部地殻形成論の最新情報なども	森下 知晃 (金沢大学) 他
15:15	IODP Expedition 357: Atlantis Massif Serpentinization and Life	諸野 祐樹 (JAMSTEC) 他
15:30	IODP 第366次航海概報: マリアナ前弧蛇紋岩海山から得られた岩石	市山 祐司 (千葉大学)

## セッション5：生命の起源へ「有機炭素の登場と生物進化」

16:00	『生命の起源』を整理するところからはじめましょう	川口 慎介 (JAMSTEC)
16:15	日本の陸上蛇紋岩温泉: 白馬八方温泉における地球化学的研究	須田 好 (産業技術総合研究所) 他
16:30	微生物ゲノム情報で紐解く蛇紋岩生命圏	鈴木 志野 (JAMSTEC)
16:45	炭素、窒素、硫黄安定同位体比を用いた Shinkai Seep Field における湧出流体の起源と化学合成生物群集	大西 雄二 (岡山大学) 他
17:00	An overview of megafaunal communities at the Shinkai Seep Field, Southern Mariana Forearc	Chong Chen (JAMSTEC) 他
17:15	蛇紋岩化反応と生命	高井 研 (JAMSTEC)

## セッション5 終了後、総合議論

### 17:45~ ポスターセッション

#### ポスター公演

「しんかい」湧水域 (Shinkai Seep Field = SSF) 産チムニーの内部構造	石井 輝秋 (静岡大学) 他
オマーンオフィオライト Fizz 岩体北部におけるマントルかんらん岩の変質 -特に基底スラスト直上部の蛇紋岩化かんらん岩について-	吉田 有希 (新潟大学) 他
南西インド洋海嶺 Prince Edward Transform 断層かんらん岩の変形作用と含水鉱物	柿畑 優季 (新潟大学) 他
脆性-塑性遷移領域におけるかんらん岩のレオロジーに対する水の効果	中谷 貴之 (東北大学) 他
含水かんらん岩における極細粒延性剪断帯の構造岩石学: 三波川帯権現越露頭の例	駒井 美穂 (金沢大学) 他
インド洋での大陸分裂初期過程における大陸の引き延ばしと海底拡大	羽入 朋子 (総合研究大学院大学) 他
海洋下部地殻中のかんらん石の蛇紋石化による弾性波速度低下と速度逆転の可能性について	阿部 なつ江 (JAMSTEC) 他
トランスフォーム断層における地磁気異常の要因の推定	古川 優和 (神戸大学) 他
The magnetic signature of ultramafic-hosted hydrothermal systems	Florent Sztikar (JAMSTEC)
岩石磁気と磁気異常観測で見る海洋リソスフェアの蛇紋岩化	藤井 昌和 (極地研究所 / 総合研究大学院大学)
北極海ガッセル海嶺から得られた変形したかんらん岩の微細構造解析	針金 由美子 (産業技術総合研究所) 他
しんかい湧水域で発達するチムニーの微生物群集組成とその多様性	奥村 知世 (高知大学) 他

### 18:30~ 懇親会

11月28日(火)

9:00 開場

### セッション6: オマーンオフィオライト

9:30	オマーン掘削プロジェクト ChikyuOman 2017 Leg1 速報	高澤 栄一 (新潟大学 / JAMSTEC) 他
9:45	オマーン掘削プロジェクト ChikyuOman 2017 Leg2 速報	道林 克禎 (静岡大学) 他
10:00	海嶺付近の熱水循環: オマーンオフィオライトにおける緑泥石岩体の研究から	宮下 純夫 (新潟大学) 他

### セッション7: 島弧 - 前弧 - 背弧域

10:45	伊是名海穴の科学掘削が語る海底下鉱化作用	野崎 達生 (JAMSTEC) 他
11:00	鉛同位体比から見た中部沖縄トラフの熱水鉱化作用	戸塚 修平 (九州大学) 他
11:15	地球化学的解析に基づく中部沖縄トラフの熱水変質作用	堤 映日 (九州大学) 他
11:30	IODP Exp.352 伊豆 - 小笠原前弧域の火山岩の岩石磁気特性	本多 睦美 (静岡大学) 他
11:45	背弧海盆の非対称拡大はどのようにして起こるのか? - 南マリアナトラフでの観測事実と数値シミュレーション -	島 伸和 (神戸大学) 他

## トランスフォーム断層と水 Roll of water along long oceanic transform faults

沖野郷子（東大大海研）\*  
OKINO, Kyoko (AROI, U. Tokyo)

中央海嶺系をつなぐトランスフォーム断層（海洋トランスフォーム断層 OTF）は、時として数百キロに及ぶ構造で、リソスフェアの熱構造を規制するのみならず、隣接する中央海嶺系下のマントルフローや海洋地殻形成、熱水活動に大きな影響を及ぼしている。また、海洋プレートへの水の入り口としては、トランスフォーム断層とアウターライズで形成される正断層系が重要と考えられているが、アウターライズ域に比べて研究が進んでいるとはいえない。近年の数値シミュレーション研究によると、水の入り口としてのトランスフォーム断層は地球規模の水循環を考える上で無視できない役割を果たしていると考えられるが、実際の観測データからトランスフォーム断層に沿ったリソスフェアの破壊、変質などの実態を研究した例はほとんどない。

日本の中央海嶺・熱水研究グループは、長年にわたり中央インド洋海嶺を集中観測域として調査を進めてきた。その中で、マリーセレスト OTF（オフセットが  $215\text{km} \sim 10.7\text{m.y.}$  に及ぶ）と隣接する OTF がトランスフォーム断層研究に非常に良いターゲットであることを認識し、2016 年の白鳳丸航海で地形・地球物理調査を実施した。その結果、トランスフォーム断層内での断層分布を明らかにしたほか、重力異常解析を行い密度異常の有無を検討した。既存の研究により、トランスフォーム断層の重力異常には拡大速度依存性があるとされているが、マリーセレスト OTF（中速～低速拡大）の残留マントルブーゲー異常は明らかに負の値を示し、グローバルトレンドとは異なる様相を示す。これは断層下の質量欠損を示唆するが、現時点ではこの異常が蛇紋岩化による密度低下、破碎による空隙率の増加、レユニオンホットスポットからのマントルフローの影響による地殻の厚さ異常のどれに主として起因するかは限定できていない。また、断層谷内に存在する高まり（median ridge）が蛇紋岩体ではないかという調査前に提示された可能性は、岩石試料および地形等の解析結果から否定された。

本発表では、中央インド洋海嶺での観測結果を報告してトランスフォーム断層研究の重要性について論じると共に、現在計画中の MOWALL (Moho along transform WALL) プロジェクトについて紹介する。

## **Controlling factor of oceanic plate hydration at the north-western Pacific margin**

**G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. Miura (JAMSTEC), and T. Yamada (ERI, Univ. of Tokyo)**

As a part of global mantle convection, water is transported by subducting oceanic plates from Earth's surface into its interior, and the degree of hydration of the subducting oceanic plate determines the amount of transported water. In subduction zones, dehydration occurring within the subducting oceanic plate induces intra-slab intermediate-depth earthquakes, and the expelled water leads to arc magmatism, promotes metamorphism, lowers the slab temperature, and consequently affects interplate coupling. Thus, the degree of hydration of the oceanic plate before subduction is key to understanding these subduction zone phenomena as well as the global water cycle.

The first-order control on oceanic plate hydration has previously been considered to be hydrothermal circulation and alteration at the spreading ridge. Recently, seismic and electromagnetic structure studies in subduction zones around the world have revealed that plate bending-related normal faulting near the subduction trench also promotes hydration of the oceanic plate [e.g., Ranero et al., 2003; Grevenmeyer et al., 2007; Contreras-Reyes et al., 2008; Key et al., 2012, Fujie et al., 2013]. Unlike hydrothermal circulation near the spreading ridge, which is confined to the oceanic crust, bend faulting near the subduction trench can potentially cut across the entire crust and reach to the upper mantle. Thus, if bend faults act as pathways for water penetration into the mantle, the amount of water transported by the oceanic plate might be much larger than previously thought [Peacock 2001; Faccenda 2014].

Bend faulting shows remarkable variation among subduction trenches. However, the actual contribution of bend faulting and its spatial variations to plate hydration remains poorly understood because plate hydration is affected by various hydration and dehydration processes from the spreading ridge to the subduction trench and isolating the contribution of each process is not straightforward.

At the north-western Pacific margin off Japan, the old oceanic Pacific plate is subducting beneath the north-eastern Japan arc at the junction of the Japan and Kuril trenches. This is a particularly good place to investigate the contribution of bend faulting to plate hydration because the same oceanic plate is experiencing different bend faulting as it subducts at each trench. We conducted extensive seismic surveys in the outer trench areas of these subduction zones to compare the structural changes caused by bend faulting between these trenches. We found that structural changes caused by bend faulting before subduction differed distinctly between the two trenches and were well correlated with plate hydration after subduction, suggesting that the bend faulting controls spatial variations in plate hydration in these subduction zones. Differences in bend faulting are closely related to the angle between the current trench axis and axis of the ancient spreading ridge. Thus, we propose that this trench-ridge angle is a major factor controlling plate hydration.

## **Resistivity imaging around a serpentine zone and an outer-rise fault zone**

**Hiroshi Ichihara (Nagoya University)**

Electrical resistivity in the crust depends on pore fluid and clay minerals. Thus, resistivity imaging by EM observations clarify the fluid distribution in the fault and fracture zones (e.g. Ichihara et al., 2011; Naif et al., 2015). In this paper, I introduce resistivity distribution around the serpentine area in the northern Hokkaido to discuss the relationship between serpentinization and fluid. Then resistivity distribution in the outer-rise area off the Sanriku area is discussed.

Around the serpentine area in the northern Hokkaido, we estimated 3-D resistivity distribution based on land magnetotelluric data. The estimated model shows low resistivity ( $< 3$  ohm-m) in the serpentine area although borehole serpentine samples in the same geological unit is not low (30-1000 ohm-m) (Okazaki, personal comm.). It may imply that serpentine or its host rock can include high amount of pore fluid.

The resistivity distribution off the Sanriku area was estimated based on EM data acquired by OBEMs. The resistivity model shows that thick low resistivity layer in the surface ( $\sim 5$  km from ocean bottom). In addition, the thickness of the low resistivity layer may become thick toward the Japan trench. If this trend is true, the resistivity study supports the hypothesis of fluid inclusion and serpentinization with the developing of outer-rise normal faults.

## 蛇紋岩化したカンラン岩の地震波速度 Seismic velocities in serpentinized peridotites

渡辺 了\* (富山大)

Tohru Watanabe (University of Toyama)

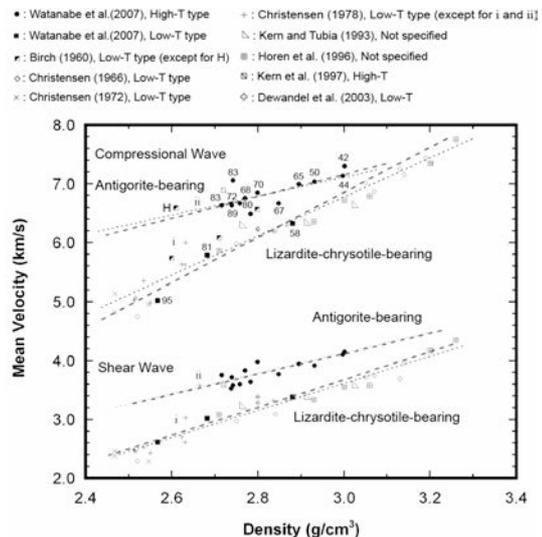
蛇紋岩は、地球内部における水の輸送媒体として重要な役割を果たしている。地球内部における水の循環を理解するためには、地震学的観測による蛇紋岩のマッピングが有効である。そのためには、蛇紋岩の地震波速度に関する理解が不可欠である。

蛇紋石には、主としてリザーダイト、クリソタイル、アンチゴライトの3つの形態がある。どの蛇紋石は、化学組成はほぼ  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  であり、ケイ素を含む四面体シートとマグネシウムを含む八面体シートからなる TO シートを基本構造としている。リザーダイトは低温相 (<300 °C)、アンチゴライトは高温相 (<700 °C) であり、クリソタイルは準安定相であると考えられている。

リザーダイトを含む低温型蛇紋岩とアンチゴライトを含む高温型蛇紋岩とは、明瞭に異なった地震波速度を示す。同じ密度 (同じ蛇紋石の体積分率) の場合、高温型蛇紋岩は低温型蛇紋岩よりも P 波、S 波ともに高速である (Watanabe et al., 2007)。また、低温型蛇紋岩は他の岩石種に比べて顕著に高  $V_p/V_s$  (または高ポアソン比) を示すが (Christensen, 1996)、高温型蛇紋岩の  $V_p/V_s$  は他の岩石種とあまり変わらない。したがって、観測された地震波速度を解釈する場合には、対象とする領域の温度構造を考慮し、適切なタイプの蛇紋岩の速度と比較しなければならぬ。

高温型蛇紋岩は、強い変形構造をもつものが多く、顕著な地震波速度異方性を示す。これは、アンチゴライト鉱物粒子の定向配列によるものである。アンチゴライト単結晶の P 波速度は TO シート内で速く (8.9 km/s)、TO シートに垂直な方向 (c 軸方向) で遅い (5.5 km/s)。その差は 47%にも及ぶ (Bezacier et al., 2010)。面構造をもつ蛇紋岩中では、アンチゴライトの c 軸が面構造に垂直に配列する傾向がある。そのため、P 波速度が面構造に平行な方向と垂直な方向とで大きな差が生じるのである。面構造に沿って伝わる S 波には、強い偏光異方性が生じる。これに対して、低温型蛇紋岩は、変形による定向配列が生じないため、ほぼ等方的な性質を示すものが多い。

高温型蛇紋岩が期待される領域で高い  $V_p/V_s$  が観測されている場合がある (例えば、南関東 (Kamiya and Kobayashi, 2007))。この高い  $V_p/V_s$  は、変形構造による異方性を考慮しても説明できない。このような領域では、流体が蛇紋岩中の空隙に存在して  $V_p/V_s$  を高くしている可能性がある。



海洋リソスフェアの沈み込み開始における深部熱水変質作用の役割  
A role of deep hydrothermal alteration on subduction initiation  
within oceanic lithosphere

平内健一\* (静岡大)

Ken-ichi Hirauchi (Shizuoka University)

少なくとも太古代以降、地球では中央海嶺の形成と海洋プレートの沈み込みが継続して起こっている。新たにプレートが沈み込みを開始するためには、沈み込みを駆動する力としての中央海嶺からの押し出し力が 2 つのプレートの間における剪断抵抗力に打ち勝つ必要がある。これまでの数値モデルによると、プレート間の平均剪断強度は 30 MPa 以下でなければならない (Toth & Gurnis, 1998, *J. Geophys. Res.*)。しかし、これまでの室内変形実験から得られた、海洋プレートの主要構成岩石であるかんらん岩の摩擦則および流動則を用いると、前述の平均剪断強度を大きく上回ってしまう。特に、マントルの塑性強度は温度(つまり深さ)に強く依存するため、2 つの変形則の交点(脆性・塑性遷移)の強度は約 1500 MPa にも達する。以上のことから、沈み込み開始時において、脆性・塑性遷移付近のプレート間の断層強度を約 2 桁低下させる特定のメカニズムが働いていることが予想される。これまでに、1) 塑性変形機構の遷移 (Bercovici & Ricard, 2014, *Nature*)、2) 過剰間隙水圧 (Dymkova & Gerya, 2013, *Geophys. Res. Lett.*)、3) プリュームの上昇 (Gerya et al., 2015, *Nature*) などのメカニズムが提唱されているが、未だ統一的な見解は得られていない。

これまでの研究航海において実施された地質調査や物理探査の結果は、海洋プレートの沈み込みがトランスフォーム断層や断裂帯などの「既存の弱面」を利用して起こった可能性を示唆している (石塚, 2016, 火山)。もし海水がそのような亀裂に沿ってプレート深部まで浸透すると、海水中の  $H_2O$  とマントル鉱物が反応して蛇紋石などの含水鉱物が形成されると予想される。一般に含水鉱物は他の造岩鉱物と比較して低い摩擦強度をもち、断層強度を低下させる働きをすることで知られる (Moore & Lockner, 2004, *J. Geophys. Res.*)。しかしながら、海洋プレート深部においてどのような化学反応が起こり、それがどの程度断層強度の弱下に寄与するのかについてはわかっていない。そこで、高温高压三軸変形装置を用いて、熱水条件下での人工かんらん岩試料の摩擦実験を行った。その結果、海洋プレートの脆性・塑性遷移に対応する温度圧力条件(圧力 1 GPa、温度 500°C) 下において、かんらん岩試料の剪断応力が剪断歪 ( $\gamma$ ) の増加にしたがって著しく低下することがわかった。この歪軟化挙動は、マントル鉱物の加水反応に伴って、滑石を主体とする局所的な剪断帯が形成されたことに起因する。さらに、 $\gamma = 4$  における剪断応力は剪断歪速度 ( $\dot{\gamma} = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) の低下にしたがって 250 MPa から 40 MPa に段階的に低下した。

以上の実験結果は、海洋プレート深部での岩石・水反応がプレート間の強度を著しく低下させる有力なメカニズムであることを示唆する (Hirauchi et al., 2016, *Nat. Commun.*)。大西洋の Romanche 断層は、深さが 20 km 以上にも及ぶトランスフォーム断層として知られる (Abercrombie & Ekström, 2001, *Nature*)。そのような深いトランスフォーム断層では、マントルへの海水の浸透に起因して滑石を含む「力学的な弱面」が形成されることにより、海洋プレートの沈み込みが可能な条件を満たすようになると考えられる。

かんらん岩の 25° S OCC 深部での変形・変質作用  
**Peridotite deformations and alterations at root zone of the 25S OCC**

曾田祐介<sup>\*1</sup>、奥平敬元<sup>1</sup>、水上知行<sup>2</sup>、森下知晃<sup>2</sup>、ウォリス・サイモン<sup>3</sup>

1) 大阪市立大学, 2) 金沢大学, 3) 東京大学

**Y. Soda<sup>\*1</sup>, T. Okudaira<sup>1</sup>, T. Mizukami<sup>2</sup>, T. Morishita<sup>2</sup>, S. Wallis<sup>3</sup>, (<sup>1</sup>Osaka City Univ., <sup>2</sup>Kanazawa Univ., and <sup>3</sup>Univ. of Tokyo)**

低速 - 中速拡大軸で見られる拡大軸と直交した線構造が特徴的な Oceanic Core Complex (OCC) の形成過程を明らかにするうえで、OCC 上昇時に活動するデタッチメント断層深部の変形情報は貴重である。分析した岩石試料は、インド洋ロドリゲス三重会合点近傍の 25S Oceanic Core Complex (OCC) (Kumagai et al., 2008) から採取したものである。直径 10cm 以下の小さな試料であるが、中心部はかんらん岩の組織、鉍物をよく残している。外側は滑石に変質しており、試料の端にはトレモラ閃石からなる変質した苦鉄質脈が伴われる。かんらん岩部分は、かんらん石、斜方輝石、スピネルからなる。特徴的にフロゴパイト (Mg に富む黒雲母) を含み、苦鉄質脈との境界部に緑泥石とともに多産する。鉍物化学組成は、かんらん石は Fo 値が 90-70 と大きくばらつき、苦鉄質脈の貫入により変質したことを示している。斜方輝石は Al, Cr に富むものと、富まないものが存在し、後者はフロゴパイトとともに産する。クロムスピネルは、Cr と Fe に富んだフェリットクロマイトに変質している。フロゴパイトは、かんらん岩としての初生鉍物組成を持つものと共存していないので、変質によるものである。

中心部のかんらん岩部分のかんらん石は、等粒状からポーフィロクラスティックな組織をなしている。大部分は比較的粗粒な粒子 (> 0.1 mm) からなるが、部分的に引きのばされ、ネックの部分が細粒化 (約 0.01 mm) していることがある。細粒かんらん石は伸長した形態をなすが、粒界は比較的直線的である。粗粒結晶は、波動消光も見られ、粒界も不規則な形態をしめす。斜方輝石 (滑石に置き換わっていることも多い) は、さまざまな程度に引き伸ばされており、かんらん岩マイロナイトに特徴的な組織をなしている。フロゴパイトの一部は、かんらん石の変形同時の晶出を示している。

かんらん石の結晶方位を EBSD で測定した。粗粒部はマントルかんらん岩に一般に見られる A type (Jung et al., 2006) のファブリックパターンを示し、細粒部は A type の強いファブリックパターンを示す。細粒部結晶内での回転軸の分布 (IPF) は、A type ファブリックで期待されるすべり系 [100] (010) と違うパターンになる。また、その回転軸と試料座標系の関係は、剪断による粒子の回転を示している。さらに、母晶の結晶方位と細粒部の CPO の集中部は比較的近い関係にある。これらのことは細粒部の CPO 発達が、単純な転位クリープと亜粒界の発達による細粒化だけではないことを示している (Prior and Wheeler, 1999 など)。

本試料では、OCC デタッチメント断層深部での苦鉄質脈の貫入と変形を見ることができ。従来の研究では、OCC 深部のかんらん岩には、CPO の弱い細粒かんらん石が見られ、その変形機構は粒径に依存する拡散クリープであるとされている (Jaroslow et al., 1996 など)。本試料には、かんらん石の転移クリープから拡散クリープへの移行過程が記録されている可能性がある。

アウターライズ領域での海洋マンツルの蛇紋岩化 1：  
浸透率の実験データに基づくモデル

**Serpentinization of oceanic mantle at outer-rise regions 1:  
Models based on experimental data of permeability**

片山郁夫, 畠山航平 (広島大学地球惑星システム学)

**Ikuo Katayama, Kohei Hatakeyama**

**(Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University)**

プレートの折れ曲がりに起因するアウターライズ断層は、その震源の深さが約 20 km に達し、その断層面が海底まで連続していることから、断層沿いに水がマンツルまで浸透している可能性が高い (例えば, Ranero et al., 2003)。とくに最上部マンツルに震源をもつ断層運動は、引張場による正断層型のことが多く、断層面が常に開口しているため、重力による海水の浸透を招く。断層沿いに海水がマンツルまで浸透すると、反応により蛇紋岩を生成するが、蛇紋岩化の進行は、反応速度と反応前線への水の供給速度のどちらか遅いプロセスに律速される。水熱合成実験によると、蛇紋岩化の反応速度は比較ため速いため、多くの場合、反応前線への水の供給速度がマンツルでの蛇紋岩化を制約すると考えられている (MacDonald and Fyfe, 1985)。そこで、私たちのグループでは、大学院生の畠山くんを中心に、蛇紋岩の浸透率を実験室で測定し、その結果に基づきアウターライズ領域での海洋マンツルの蛇紋岩の広がりを検証している。

試料としては、嶺岡帯に産する蛇紋岩とマリアナ海溝など海底ドレッジにより採取された蛇紋岩を用いた。いずれも、リーザードライトとクリソタイルを主体とする低温型蛇紋岩である。実験は広島大学に設置されている容器内変形透水試験機を用い、低差圧流量法により浸透率を求めた。蛇紋岩の浸透率はサンプルによって異なり、低封圧では  $10^{-16}$ - $10^{-18}$  m<sup>2</sup> の範囲であり、圧力の増加とともに粒界やクラックが閉鎖され浸透率は減少する傾向にある。そのため、蛇紋岩化の広がりが浸透率に支配される場合、圧力の増加つまり深さとともに蛇紋岩の広がり狭まることが予想される。また、蛇紋岩の生成量は水の供給量によるため時間依存プロセスであり、断層沿いの水の供給期間を 100 万年とすると (海溝から 100 km の区間をプレート速度 10 cm/year で割った値)、最上部マンツルでの蛇紋岩の広がり平均で 800 m と見積もられる (Hatakeyama et al., in press)。そのような見積もりが妥当かどうかは、実験室での蛇紋岩の弾性波速度測定と地震波探査による観測との照合が必要不可欠である。

MacDonald, A. H. and Fyfe, W. S. Rate of serpentinization in seafloor environments. *Tectonophysics* 116, 123–135 (1985).

Hatakeyama, K., Katayama, I., Hirauchi, K. and Michibayashi, K. Mantle hydration along outer-rise faults inferred from serpentinite permeability. *Scientific Reports* (in press).

Ranero, C. R., Phipps Morgan J., McIntosh K. and Reichert C. Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench. *Nature* 425, 367– 373 (2003).

アウターライズ領域での海洋マンツルの蛇紋岩化 2:  
弾性波速度測定と観測結果の比較

**Serpentinization of oceanic mantle at outer-rise regions 2:  
Measurement of elastic-wave velocity and its application**

畠山航平\*, 片山郁夫 (広島大学地球惑星システム学)

**Kohei Hatakeyama\*, Ikuo Katayama**

**(Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University)**

### 1. はじめに

近年の海底地震波探査からアウターライズ領域において海洋マンツルの地震波速度が著しく低下することが報告されている。この速度低下は、アウターライズ断層から海水がマンツルまで供給されることで蛇紋岩が形成していると解釈されている(e.g., Shillington et al. 2015)。私たちは、蛇紋岩の浸透率に基づくアウターライズ断層沿いの蛇紋岩化モデルを提唱し、断層沿いの蛇紋岩の広がり を推定している(Hatakeyama et al. in press)。本研究は蛇紋岩の空隙率及び間隙水の効果を考慮した弾性波速度の測定を行い、観測される地震波速度構造からアウターライズ領域での海洋マンツルの蛇紋岩化を再検証した。

### 2. 実験試料・手法

実験試料には嶺岡帯から採取した蛇紋岩と南マリアナ海溝、トンガ海溝の海底から採取された蛇紋岩を使用した。これらの試料中のカンラン石と輝石はほぼ蛇紋石(リザーダイト、クリソタイル)に置換されており、蛇紋岩化率はほぼ 100 %である。空隙率は気相置換法から測定し、大気圧において 0.3–24.7 %の値を示した。

実験には広島大学設置の容器内変形透水試験機を使用し、弾性波速度は振幅 5 V、周波数 2 MHz の正弦波を印加するパルス透過法から測定した。実験は、まず乾燥条件において封圧 200 MPa までの測定を行なった。その後、封圧を大気圧に解放し、間隙水を注入した含水条件において封圧 200 MPa までの測定を連続して行なった。間隙水には純水を使用し、間隙水圧はシリンジポンプを用いて 10 MP で一定に制御した。

### 3. 実験結果・考察

乾燥条件の封圧 200 MPa において、P 波速度は 3.63–5.40 km/s、S 波速度は 2.08–2.99 km/s の速度を示した。また、空隙率が高い試料ほど速度が遅い傾向を示し、この傾向はワイリーの関係と調和的である。含水条件の P 波速度は、乾燥条件の速度よりも低封圧下では 4–11 %、高封圧下では 1–6 %増加した。P 波速度の増加は、空隙が水で満たされることで全岩の体積弾性率が増加したことを意味している。S 波速度は、空隙率が低い試料ではほとんど変化が見られなかったが、空隙率が高い試料では約 6%程度 の速度低下が見られた。S 波速度の低下は、剛性率に対する間隙水の効果は小さいが、空隙に水が含まれたことで全岩の密度が増加したことを意味している。

### 4. 観測結果との比較

先行研究では乾燥条件での実験結果に基づき、蛇紋岩化の程度を評価しているが、含水条件下で粒界が水に満たされると、蛇紋岩の弾性波速度は若干増加する傾向にある。そのため、これまでの測定に基づく蛇紋岩化の見積もりは過小に評価している可能性が高く、観測結果と対比するには、本実験結果を用いる方が妥当である。

蛇紋岩化作用の多様性：岩石学的証拠  
Variation of serpentinization: Petrological evidence

野坂俊夫\*（岡山大）  
Toshio Nozaka (Okayama University)

蛇紋岩化作用によって生じる鉱物は、主に、アンチゴライト、リザダイト、クリソタイル、ブルース石、磁鉄鉱である。加えて、フェリリザダイト、クロンステットライト、滑石、緑泥石、スメクタイト、鉄硫化物、鉄-ニッケル硫化物/金属鉱物などを伴うこともよくある。これらのうちどの鉱物組み合わせが産出するかは、蛇紋岩化作用の温度、シリカ活動度、酸素フュガシティー、水/岩石比、初生鉱物組み合わせなどに応じて決まる。したがって岩石学的に組成-共生関係を明らかにすることによって、蛇紋岩化作用の物理的・化学的条件を推定することが可能となる。

しかしながら、実際のところ蛇紋岩の岩石学的研究は簡単ではない。上記の珪酸塩鉱物やブルース石は、固溶体を作り、顕微鏡や EPMA で識別可能なサイズ以下の混合層を作り、さらに空間的分布が不均一だからである。このような複雑さを克服するために、化学組成の回帰分析やラマン分光分析などが用いられる。また分布の不均質さを逆手にとって、岩石組織の観察に基づいた蛇紋岩化作用の進行過程の解析も行われている。このようにして現在は、蛇紋岩化作用は一般に条件の異なる複数の段階を経て進行するものと考えられている。

蛇紋岩化作用の岩石学的研究については、野坂（2012）でまとめた。今回は、その後の研究論文のいくつかを取り上げ、蛇紋岩化作用の多段階モデルについて検証を試みる。

文献

野坂俊夫 (2012) 蛇紋岩化作用における水素の発生に対する岩石学的制約条件.  
岩石鉱物科学 41, 174-184.

## 蛇紋岩化作用における Fe の挙動—蛇紋石の役割

水上知行（金沢大学）

マントルかんらん岩と水に富む流体の反応による蛇紋岩化作用は、高密度のマントル無水鉱物の分解と低密度の含水鉱物の生成といった岩石学的な変化だけでなく、Mg や Fe の状態変化によって、流体に特異な化学的性質を生じさせることが知られる。中でも Fe の酸化は、 $\text{H}_2\text{S}$  や  $\text{CH}_4$  に富む還元的な熱水の生成に寄与し、磁鉄鉱の生成を通じて岩石に強磁性を生み出す要因となっている。蛇紋石(Serp)はかんらん石(Ol)や斜方輝石(Opx)に比べて Fe に乏しく、余剰の Fe を担うブルース石や磁鉄鉱(Mgt)が注目される。しかし、近年、大西洋中央海嶺の蛇紋岩から  $\text{Fe}^{3+}$  を含む蛇紋石の存在が確認されており、かんらん石中の Fe の半量を担うことができる蛇紋石の役割は無視できない。海洋底や陸上に露出する蛇紋岩には後期の脈が認識でき、蛇紋岩基盤が反応物として流体の化学的性質に影響したことが推定される。流体中の化学種や反応速度は、温度や pH、酸化還元状態、流体-岩石比といった様々な要素によって変化する。蛇紋岩基盤の熱水循環システムを理解するためには、こういった熱化学的環境の変遷に応じて Fe の挙動を読み解くことが重要になる。そこで、中央海嶺の熱水噴出孔近傍で採取された蛇紋岩および、高 pH 条件の水熱実験で合成した試料について、蛇紋石中の Fe の価数及び配位状態に留意して解析を行なった。

中央インド洋海嶺、Kairei 熱水フィールド（高温型）の近傍で採取された蛇紋岩の組織から大きく 2 つの反応ステージが読み取れる。第 1 ステージは Opx の分解（バスタイト化）を伴い、 $\text{SiO}_2$  供給により誘発される  $\text{Ol}+\text{SiO}_2\rightarrow\text{Serp}\pm\text{Mgt}$  で特徴づけられ、Mgt が網目状に濃集する。第 2 ステージでは、Serp からの Fe の離脱によって Fe に乏しい Serp と Mgt が脈もしくは網目状に生じている。微小領域 XAFS によって第一ステージの Serp (Serp1) 中の Fe の配位状態を検討したところ、ほぼ 3 価で Ferri-Tschermak 成分として含まれていることが分かった。このステージでは Mgt 形成と合わせて流体の還元効果が非常に強かったと推定される。Serp1 から第 2 ステージの Serp (Serp2) へと Fe 量（配位状態については未検討）は減少し、ラマンスペクトルから結晶構造がリザーダイトに近づく変化が読み取れる。このステージでは Serp1 中の  $\text{Fe}^{3+}$  から還元反応によって Mgt が生じた可能性が強い。リソスフェリックマントルの磁化において、上記の複合的な Mgt 形成を考える必要があるだろう。

$\text{Fe}^{3+}$ 蛇紋石 (Serp1) は全面的に生じており、岩石の大規模酸化の産物として重要である。また、サブミクロンサイズの多孔質構造をなし、流体の浸透を促進したと考えられる。しかし、蛇紋石の理想式よりも  $\text{SiO}_2$  に富む組成、複合的なラマン OH バンドなど、典型的な蛇紋石とは異なる鉱物学的特徴を有する。強アルカリ水溶液を用いた水熱実験の生成物にも  $\text{SiO}_2$  に富む  $\text{Fe}^{3+}$ 蛇紋石が生じたが、 $\text{Fe}^{3+}$ は 4 配位であった。 $\text{Fe}^{3+}$ 蛇紋石の鉱物学的実体と環境による Fe の配位挙動の解明が求められる。

海洋底の蛇紋岩化に伴う物質移動とメッシュ組織  
**Mass transfer and development of mesh texture during serpentinization**

岡本 敦\* (東北大), 大柳 良介 (東北大), 針金 由美子 (産総研),  
 土屋 範芳 (東北大)

**Atsushi Okamoto (Tohoku Univ.), Ryosuke Oyanagi (Tohoku Univ.),  
 Yumiko Harigane(AIST), Noriyoshi Tsuchiya (Tohoku Univ.)**

海嶺や屈曲断層における海洋リソスフェアの蛇紋岩化作用は、地球内部の水循環、海洋底の生物圏の形成、沈み込み帯の地震発生など様々な現象に大きな影響を与える。近年、蛇紋岩化作用について、反応実験、天然の産状、モデリングなどの研究が精力的に進められているが、実効的な反応速度については、まだよくわかっていない。海洋底の蛇紋岩には普遍的にメッシュ組織が発達する。この組織の特徴は、(1)ポリゴンを作るように割れていて、(2)累帯構造(コア、リム、ベイン)を持っていることである。このような不均質な組織は、蛇紋岩化作用が定常的に「isochemical」な環境で進むわけではなく、破壊や物質移動を含めたプロセスが働いていることを示唆する。

蛇紋岩化した海洋底のハルツバージャイトやトロクトライトには、メッシュ組織が発達している。我々は、このような岩石において、特徴的なAl累帯構造(Alに富むコア、Alに乏しいリム、Alに富むベイン)をもつメッシュ組織を見出した。Al量は、供給源(輝石、長石)の近傍ほど高くなっている。このような元素移動とメッシュ組織の関係を理解するために、かんらん石-斜長石の「境界」を導入した実験システムにおいて、230°C、飽和蒸気圧で長期間(最長332日)の水熱実験を行った。

かんらん石-斜長石境界からの距離に応じた反応物の変化を解析ところ、境界から離れたところでは、蛇紋石(Alを含まない)-ブルース石-マグネタイトというisochemicalな反応が進行する一方で、境界付近では、Al-蛇紋石と少量のサポナイトからなるSi-Al-Ca反応帯の発達が確認された。Siフロント(ブルー石消滅)は、Alフロントよりも5倍程度進行しており、マグネタイト消滅とほぼ一致する。また、非常に特徴的な点は、isochemical領域においては、細粒の蛇紋石がかんらん石周りに散らばって形成しているのに対して、反応帯のAl-蛇紋石による反応組織は、もともとのかんらん石の粒子形状を綺麗に残しており、顕著なAl(中心部から、Alに富む領域I, Alに乏しい領域II, Alに富む領域III)の累帯構造が発達していた。このAl累帯構造は、交代作用の進行に伴う流体中のAl濃度の変化に対応していると考えられる。組織の時間・空間変化を解析した結果、メッシュ組織は、まず、isochemicalに近い状態で反応が進行し、その後Alフロントが到達したのちに、内側と外側の2方向に置換反応が進行したことが明らかになった。また、内側へ進行する反応は、仮像を作る体積一定の置換反応であることがわかった。このような溶液中のAl濃度変化に応じた置換組織の変化は、Al-Si錯体の形成によってAlの拡散が遅くなったためであろう。水熱実験の組織は天然のものと非常によく似ており、天然でも閉鎖系に近いisochemicalな反応から、Alの移動が促進される開放系へと変化したことを示唆している。AlはSiと共に、地殻物質に多く含まれる元素であり、地殻-マントル境界をまたぐ熱水系における物質循環や流体流動のトレーサーになる可能性がある。

## 海底熱水系における蛇紋岩化作用の地球化学 Geochemistry of serpentinization in seafloor hydrothermal systems

中村謙太郎\* (東京大)  
Kentaro Nakamura (Univ. Tokyo)

海底熱水系では、海洋地殻と海水との間で大規模な化学相互作用が普遍的に起こっており、固体地球と表層との間の主要な物質交換の場となっている。この海底熱水活動による海洋への物質の出入りは、地球史を通じて海洋組成と海洋環境の変遷に大きな影響をおよぼしていると考えられており、その解析は重要な地球科学のテーマの一つとなってきた (Elderfield and Schultz, 1996; German and Von Damm, 2003)。また、海底熱水噴出孔で発見された光合成に頼らない生態系は、海底熱水系における水-岩石相互作用が生命の進化とも密接な関係があることを示唆するものとして、多くの科学者の注目を集めている (McCollom and Shock, 1997; Kelley et al., 2005; Nakamura and Takai, 2015)。

最も主要な海底熱水系である中央海嶺熱水系の多くは、中央海嶺玄武岩と呼ばれる比較的液相濃集元素に乏しい玄武岩を基盤としている。一方、大西洋中央海嶺などの拡大速度の遅い海嶺においては、海底面の一部にかんらん岩が露出していることが確認されている (Lagabriele et al., 1998)。このようなエリアでは、かんらん岩をホストとする海底熱水活動が見つかっている (Charlou et al., 2002)。このかんらん岩をホストとする熱水の際立った特徴の一つが水素含有量の多さであり、これはかんらん岩に含まれるかんらん石および輝石が蛇紋石へと変質する際に、2価鉄を酸化して水を還元する反応が起こり水素を発生するためである。

現実の海底では、かんらん岩の露出するような場であっても、常に玄武岩質な岩石も伴われている。このような場においては、熱水はかんらん岩と反応した後に玄武岩と反応したり、逆に玄武岩と反応した後にかんらん岩と反応するという複雑な反応系列をたどると考えられる。このような自然の多様性は、単純な玄武岩-水反応およびかんらん岩-水反応だけでは予想できない、変わった化学組成の熱水や変わった鉱物組み合わせの変質岩を産み出している (Bach and Klein, 2009; Nakamura et al., 2009)。

また、時代をはるか過去に遡ると、太古代の海底にはコマチアイトと呼ばれるかんらん岩質な噴出岩が活動していたことが知られている。このような時代に起こった海底熱水活動について考察すると、かんらん岩質な岩石の蛇紋石化に岩石の Al 含有量が重要な役割を果たしていることがわかる (Shibuya et al., 2015)。コマチアイトの Al 含有量は時代と共に変化していることが知られており、コマチアイトをホストとする海底熱水の組成も、それにつれて変化したと考えられる。

さらに、近年のオマーンオフィオライトにおける研究進展から、玄武岩からなる一般的な海洋地殻においても、地殻深部のはんれい岩層からマントルのかんらん岩層まで、水が浸透して水-岩石反応が起こっていたことがわかっている (宮下ほか, 2015)。フィールドで得られている鉱物学的データからは、玄武岩質であるはずのはんれい岩層を流れる熱水の組成が、かんらん岩と反応した熱水と類似していた可能性が示唆される。海洋地殻の深部では、私達のまだ知らない蛇紋石化作用が存在しているのかもしれない。

しんかい湧水域を育む南部マリアナ前弧の地質  
**Geology of the Southern Mariana Forearc and its relationship with the Shinkai Seep Field**

小原泰彦\* (海上保安庁海洋情報部・海洋研究開発機構)、奥村知世 (高知大学)、Robert J. Stern (Univ. of Texas at Dallas)、大家翔馬 (静岡大学)、藤井昌和 (国立極地研究所)、笠谷貴文 (海洋研究開発機構)、Fernando Martinez (Univ. of Hawaii)、石井輝秋 (静岡大学)、道林克禎 (静岡大学)、しんかい湧水域研究グループ一同

**Ohara, Y.\* (Hydrographic and Oceanographic Dept. of Japan/JAMSTEC), T. Okumura (Kochi Univ.), R.J. Stern (Univ. of Texas at Dallas), Y. Onishi (Okayama Univ.), S. Oya (Shizuoka Univ.), M. Fujii (National Inst. of Polar Res.), T. Kasaya (JAMSTEC), F. Martinez (Univ. of Hawaii), T. Ishii (Shizuoka Univ.), K. Michibayashi (Shizuoka Univ.), Science party for the Shinkai Seep Expeditions**

2010年に Challenger Deep 北東の南部マリアナ前弧斜面で発見された「しんかい湧水域 (Shinkai Seep Field; SSF)」(Ohara et al., PNAS, 2012)は、大西洋 中央海嶺 Lost City Field やマリアナ前弧 South Chamorro Seamount、ニューカレドニア Prony Bay Field に並ぶアルカリ性蛇紋岩湧水域であり、地球初期生命発生時に想定されているアルカリ性熱水のモダンアナログとして注目される。

2010年の発見以降、これまでに4回の航海を実施し、SSF およびその周辺で 6K、Kaiko Mk-IV、YKDT による潜航調査を行った。その結果、

- 複数の炭酸塩・ブルーサイトチムニーやシロウリガイコロニーを発見し、SSF の空間的配置の概要を把握することができた(Okumura et al., G3, 2016)。
- SSF を形づくる pH = 9.9 という高アルカリ性流体の採取に成功した (大西ほか, 本予稿集)。
- Kaiko Mk-IV に装着したマルチビーム測深機 SeaBat 7125 によるマッピングにより、分解能が 1 m 程度の超精密海底地形データの取得に成功した。
- SSF 近傍において、マリアナトラフ (背弧海盆) 由来の新鮮な玄武岩ガラスを採取する (Stern et al., Island Arc, 2014) と共に、SSF の上部斜面において、枕状溶岩の存在を確認し、SSF 近傍にて背弧アセノスフェアの流入を伴う前弧リフティングが発生していることが示唆された (Ohara et al., AGU, 2016; JpGU, 2017)。
- SSF 近傍におけるモホ面は約 4500 m という浅所に存在する。
- SSF 近傍のマントルかんらん岩は、枯渇した組成から比較的肥沃な組成まで広範囲に分布することが明らかとなった。このうち、比較的肥沃な組成のマントルかんらん岩は、マリアナトラフを構成する肥沃なマントル由来である可能性がある。などの重要な成果が得られている。

本講演では、上記成果の総括を行うと共に、南部マリアナ前弧における SSF の存在についての地質学的な考察を試みる。

低速拡大海嶺下におけるマグマ活動，熱水活動，生命活動に迫る：  
IODP Exp. 357 からの知見  
**Magmatic, hydrothermal and life activities beneath slow-spreading ridge:  
perspectives from IODP Exp. 357**

秋澤紀克\* (京都大学)，田村明弘 (金沢大学)，森下知晃 (金沢大学)  
**Norikatsu Akizawa (Kyoto Univ.), Akihiro Tamura (Kanazawa Univ.),  
Tomoaki Morishita (Kanazawa Univ.)**

現在の中央海嶺のうち，およそ 50%にあたる 30,000 km は～40 mm/year で拡大する低速拡大海嶺である (例えば，Solomon, 1989)．その中でも大西洋中央海嶺近傍の Atlantis Massif と呼ばれる岩体では，マグマ活動や熱水活動をターゲットとした研究が進んでいる．Atlantis Massif では，かんらん岩やトロクトライト，ガブロといった海洋リソスフェアでも下部を構成するとされる岩石類が採取されている一方で，‘特異な’熱水活動域である Lost City が発見されているためである．ここでは岩石の熱水変質が～2 Ma 続き (Früh-Green et al., 2003)，その間は還元的で高い pH を示す熱水活動が起こっていたと推測されている．そのような熱水活動は初期地球でも起こっていたと推測される (つまり，初期地球はコマチアイト=かんらん岩に似た組成の地殻に覆われ，それと海水の相互反応により，この‘特異な’熱水活動が起こっていた) ため，地球における初期生命誕生場の謎に迫るという点において，Atlantis Massif での生命活動研究も盛んに行われている．

2015 年 10 月 24～11 月 9 日には，Atlantis Massif Lost City 熱水域で掘削が行われた (IODP Exp. 357 Atlantis Massif Serpentinization & Life)．地学の研究者と共に生物学の研究者も参加し，分野融合的な掘削プロジェクトとなった．採取されたサンプルは激しく変質を受けているが，慎重に岩石観察・化学分析を行うと，初生的な (つまり，無水の) 鉱物が残っていた．採取された岩石の中でも特に注目に値するのが，ダナイトと呼ばれる岩石である．ダナイトはマグマ活動を示唆する岩石であり，その解析は低速拡大海嶺軸直下でのマグマ活動の解明につながることを期待される．ダナイト中には単斜輝石と呼ばれるマグマの組成情報を引き出すことのできる鉱物が残っており，その化学的解析結果から，液相濃集元素に枯渇したマグマの存在が示唆された．つまり，中央海嶺で一般的に確認される中央海嶺玄武岩質のマグマとは全く異なる特異なマグマの組成であった．その理由として，熱水がマントルに達することによりかんらん岩の融点が下がり (例えば，Kushiro, 1975)，液相濃集元素に枯渇したマントルが再融解したというストーリーが考えられる．枯渇したマグマから形成されるノーライトという深成岩が大西洋中央海嶺から報告されており (Nonnotte et al., 2005)，その存在は本解釈をサポートする．本研究結果は，低速拡大海嶺軸直下における深部まで達する熱水循環を示唆しており，その実体を解明することで初期生命誕生場の環境制約につながると期待できる．

本発表では，Atlantis Massif でのマグマ活動，熱水活動，生命活動の概略発表と共に，IODP Exp. 357 で得られたダナイトに関する研究を詳細に発表する．

低速拡大海域でのマントル掘削計画 SloMo :  
 まだハンレイ岩だから下部地殻形成論の最新情報なども  
**Mantle Drilling Project at Slow-spreading Ridges (SloMo):**  
**Recent progress in Oceanic Lower Crust formation, and etc.**

森下知晃\* (金沢大)、Nguyen, Du Khac (金沢大), 針金由美子 (産総研),  
 曾田祐介 (大阪市立大), Chris MacLeod (カーディフ大学), Peter Blum  
 (テキサス A & M 大学), Henry J. B. Dick (ウッズホール海洋研究所),  
 LEG360 サイエンスチーム

**Morishita, T. (Kanazawa Univ.), Nguyen, D.K. (Kanazawa Univ.), Harigane, Y.**  
**(AIST), Soda, Y. (Osaka City Univ), MacLeod (Cardiff Univ.), Blum, P. (Texas A**  
**& M Univ.) , Dick, H.J.B. (WHOI), Leg360 Science Team**

海洋マントル掘削計画において、最重要議論の一つは、掘削地点の選定である。近年の海洋底探査および直接観察・試料採取の成果によって、拡大速度の異なる海洋プレート最上部の構成要素は大きく異なることが予想されている。マグマの形成と固化による海洋プレート形成が予想されている高速拡大と異なり、低速拡大海域は、メルトの供給量とプレートの拡大速度とのバランスによって、メルトの供給量が“そこそこ”の時は、海洋コアコンプレックスと呼ばれる海洋下部地殻-上部マントル起源の岩石引きずりによる海洋プレート形成が起きることが予想されている (Buck et al., 2005 *Nature*)。超低速拡大南西インド洋海嶺において、試料採取や調査が行われている海洋コアコンプレックスの一つである Atlantis Bank で、マントル掘削計画が提案されている (SloMo)。

これまでの事前調査により Atlantis Bank 地下の  $5 \pm 1$  km にモホ面の存在が推定されている (Muller et al., 1997 *EPSL*)。これに加え、Atlantis Bank では、潜水艇やドレッジによる陸上調査に匹敵するような調査と試料採取が行われている。また、1500m に及ぶ掘削に成功している (掘削孔 735B) (Dick et al., 2000 *EPSL*)。これらの成果から、Atlantis Bank でのモホ面は蛇紋岩化前線 (蛇紋岩/かんらん岩境界) である可能性が指摘されている。そこで、SloMo は、まずは、JR で蛇紋岩層の掘削を行い (Phase I)、次に CHIKYU でモホ面を貫通するマントル掘削 (Phase II) という計画である。Phase I は 2015 年 12 月-2016 年 1 月にかけて行われ、およそ 800m のハンレイ岩が掘削された。近年、下部地殻を構成しているハンレイ岩は、これまでのマグマだまりの結晶化という静的なイメージから、既存の岩石とその後に通過するメルトや海水の浸透によって大きく変動して行くイメージへと変わってきている (Lissenberg & Macleod, 2017, *Jour. Petrol.*)。掘削孔 735B の情報も加え、Atlantis Bank で採取されたハンレイ岩の実態は、マントル掘削に届いておらずとも、海洋下部地殻の形成、海洋プレートへの水浸透などを解明する手がかりとなるはずである。

本発表では、掘削成果・最新ハンレイ岩研究の進展、さらに発表後においては本掘削提案が申請から、評価、改定も含め、どのような経緯で掘削計画として認められたのかといった生々しい様子などもお伝えできればと考えている。

Leg360 の乗船研究者である、阿部なつ江さん (JAMSTEC)、野坂俊夫さん (岡山大学)、Sanfilippo, Alessio さん (金沢大学-パビア大学) との乗船中・後の議論は本発表を行う上で重要でした。この場をかりて、お礼を申し上げます。

## IODP Expedition 357: Atlantis Massif Serpentinization and Life

Gretchen Früh-Green<sup>1</sup>, Beth Orcutt<sup>2</sup>, Yuki Morono<sup>3\*</sup> and IODP Expedition 357 Scientists.

<sup>1</sup>ETH Zurich , <sup>2</sup>Bigelow Laboratory for Ocean Sciences , <sup>3</sup>JAMSTEC

Serpentinization is a fundamental process that controls rheology and geophysical properties of the oceanic lithosphere and has major consequences for heat flux, geochemical cycles and microbial activity in a wide variety of oceanic and terrestrial environments. International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 357: Atlantis Massif Serpentinization and Life was conducted by the *James Cook* (Natural Environment Research Council, UK) at the Atlantis Massif on the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge, where the Lost City vent field stands near the summit of the ridge, to better understand the role of serpentinization in driving hydrothermal systems, in sustaining microbiological communities, and in the sequestration of carbon in ultramafic rock.

Expedition 357 was the first IODP Expedition to utilize seabed rock drills as a method for acquiring sub-surface core material. During Expedition 357, two seabed rock drills were deployed: the MeBo 70 rock drill from MARUM (Bremen, Germany) and the RD2 rock drill from the British Geological Survey. Although drilling conditions proved challenging, the drills recovered a wide range of lower crustal and upper mantle lithologies with varying degrees of alteration and deformation in the Atlantis Massif. The total length of cores recovered by two seabed drills during Expedition 357 was 57 m after 109 m of total penetration, and with an average core recovery of 53% at nine different sites. We present an overview of the scientific objective, operational performance, and some preliminary information from onboard activities of Expedition 357 including microbiological studies to study the links between serpentinization processes and life that can be supported in low temperature ultramafic hydrothermal systems.

IODP 第 366 次航海概報：マリアナ前弧蛇紋岩海山から得られた岩石  
**Preliminary Report of IODP Exp. 366:**  
**Rocks recovered from Mariana serpentinite seamounts**

市山祐司（千葉大）  
**Yuji Ichiyama (Chiba University)**

2016年12月～2017年2月にかけて、IODP 第366次航海（Mariana Convergent Margin）がグアム島東方沖マリアナ前弧域で実施された。この航海では、3つの蛇紋岩海山（Yinazao 海山、Asùt Tesoru 海山、Fantangisña 海山）で掘削コアの回収と CORK の設置、1つの蛇紋岩海山（南チャモロ海山）から CORK の回収が行われた。本発表では、本航海の概要を報告するとともに、3つの蛇紋岩海山から回収された試料のうち、発表者が持ち帰った試料についての記載岩石学的観察の結果を報告する。

本航海で掘削された3つの蛇紋岩海山から回収されたコア試料は、いずれも様々なサイズの石質岩片を含むシルトサイズの蛇紋石泥である。石質岩片の殆どは、著しく蛇紋岩化した超苦鉄質岩であり、僅かに苦鉄質岩、苦鉄質砂岩、チャート、石灰岩、角閃岩も採取された。蛇紋岩の原岩はハルツバージャイトないしダナイトであり、一般には原岩の組織を残しているものの、多数の蛇紋石脈によって貫かれている。Yinazao 海山と Fantangisña 海山からの蛇紋岩はクリソライトとリザーダイトからなるメッシュ組織が卓越するのに対し、Asùt Tesoru 海山からの蛇紋岩は、アンチゴライトとブルーサイトから構成され、しばしばトラモラ閃石を含むことがある。いずれの海山からも比較的新鮮なかんらん岩も採取することができ、蛇紋岩化以前の性質を解析するうえで重要な試料である。苦鉄質岩は、チタンオージャイトを含むアルカリ玄武岩～ドレライトが卓越し、多かれ少なかれ変質・変成作用を被っている。Asùt Tesoru 海山からは、アルカリ輝石、アルカリ角閃石、ローソン石、アラレ石といった高压変成鉱物を含む苦鉄質岩が多数認められた。アルカリ輝石は残存単斜輝石を置換、もしくはエピタキシャルに形成されており、白雲母、緑泥石、パンペリー石とともにマトリックスにも存在する。アルカリ輝石は Ae-Jd 成分に富み、Jd 成分は最高で 75% に達する。アルカリ角閃石は、 $Al_2O_3$  を最大で 8 wt% を含むリーベック閃石である。アルカリ輝石と石英の共生を確認することができていないが、アラレ石の存在から、少なくとも 200°C 程度で 6kbar 以上の変成条件が考えられる。この条件は、Maekawa et al. (1992) によって報告されたコニカル海山の高压変成鉱物を含む苦鉄質岩とおおよそ同等の変成条件である。

『生命の起源』を整理するところからはじめましょう  
**Classification of each ‘origin of life’**

川口慎介\* (JAMSTEC)  
**KAWAGUCCI Shinsuke (JAMSTEC)**

とても著名な研究者達が「蛇紋岩化作用は『生命の起源』につながる」という文言を用意したので、ウブな若者もゲスな大人も猫も杓子も付和雷同異口同音に文脈も踏まえ「蛇紋岩化作用は『生命の起源』につながる」と御題目を唱え始めている。しかし少し冷静になって考えた時、はたして蛇紋岩化作用はどのように『生命の起源』と関係しているのだろうか。そこで、『生命の起源』をあらためて整理し、蛇紋岩化作用の関わる多様な研究について、それぞれがどのような文脈で『生命の起源』研究と位置付けられるかを考え直す機会を提供しようというのが、本講演の目的である。

『生命の起源』は一般に2つの意味（文脈）で使われている。『非生物反応による生物有機物の合成＝化学進化』と『現存生物の共通祖先＝LUCA』である。

『化学進化』研究は、無機炭素から小さな有機物が合成され、大きな有機物となりやがて生物体有機物となる過程が対象である。1953年の『ミラーの実験』が代表例であり、今では無機炭素から生物体有機物に至る個々の反応について個別に実験室で再現されている<sup>[北台ら 2016 地球化学]</sup>。化学進化の文脈において蛇紋岩化作用は、(i)無機反応により還元環境を形成する ( $H_2$  濃度をあげる) ことで酸化的な無機炭素 ( $CO_2$ ,  $CO$ ) の還元による有機合成 ( $CH_4$ ,  $H_2CO$  など) を促す, (ii)水圏から水を奪うことで有機物の脱水縮合を促す, (iii)アルカリ性の蛇紋岩流体と酸性の古海水の間に pH 勾配を形成することで有機物の多様な存在状態を可能にする, などの役割で関与すると考えられている。一方、化学進化の実態に現世の蛇紋岩流体系の観測によって迫ることは、生物起源有機物による“汚染”が不可避であるため、極めて困難である。

『LUCA』研究は、現存する生物の特徴（系統・機能・生態など）を対象とする。1977年の海底熱水発見や微生物系統分類を端緒とし、地質学的地球史を包含しながらも、現存する無機化学合成微生物生態系を『モダンアナログと見なした観測研究』を中心としている。LUCA 研究の文脈において蛇紋岩化作用は、蛇紋岩湧水場が太古・現世に共通して起こりうることを踏まえ、系統分類に基づく LUCA 候補である水素消費・好熱微生物の生息場を形成する役割で関与する。なお LUCA 研究においてメタンは、主に水素消費微生物の産物と位置付けられ、極限環境における微生物活性の有無を判定する指標として利用される。厳密には、LUCA 時代には存在しなかったはずの酸素を用いる代謝までを含めた極限環境生態系研究は、LUCA 研究とは区別されるべきである。中村と高井<sup>[2014 PEPS]</sup>による熱水域における生物利用可能エネルギー計算値と微生物叢の関係性（たとえば水素 1mM を超えればメタン菌が優先する）についても、あくまで酸素の溢れた現在の地球環境での観測結果に基づいていることに注意が必要である。

化学進化研究と LUCA 研究の区別は徹底すべきであるが、それぞれの研究の発展においては双方の知見が相互に有用である。化学進化と LUCA の接点が『生命とは何か』であり、そこに真の『生命の起源』がある。

日本の陸上蛇紋岩温泉：白馬八方温泉における地球化学的研究  
**On-land serpentinite-hosted hot spring in Japan:  
Geochemical study for Hakuba Happo hot spring**

須田好\* (産総研)、Gilbert Alexis (東工大)、上田修裕 (東工大)、  
齋藤拓也 (JAMSTEC)、佐藤友彦 (東工大)、澤木佑介 (東大)、  
山田桂太 (東工大)、吉田尚弘 (東工大)、上野雄一郎 (東工大)  
**Suda K. (AIST), Gilbert A. (Tokyo Tech), Ueda H. (Tokyo Tech),  
Saito T. (JAMSTEC), Sato T. (Tokyo Tech), Sawaki Y. (UTokyo),  
Yamada K. (Tokyo Tech), Yoshida N. (Tokyo Tech), Ueno Y. (Tokyo Tech)**

2001年に大西洋で超苦鉄質岩を母岩とする海底熱水域が発見されたことを発端として (Kelley et al., 2001)、蛇紋岩化作用を伴う岩石-水の反応系はその特異な性質から多大な注目を集めるようになった。蛇紋岩化作用で形成される高水素濃度 (超還元的) 環境では非生物的に有機物が合成される可能性が想定されており、生命の化学進化と関連付けて着目されている (例えば、Holm and Charlou, 2001)。したがって、*c* で起きる反応機構を理解することは、初期地球における生命誕生の謎を探求する上で重要である。しかしながら、蛇紋岩-水反応系で観測される炭化水素や有機酸といった単純な有機化合物ですら、それらの生成機構は十分に明らかでない。

本研究では蛇紋岩-水反応系の自然現象を解読することを目的として、2010年から長野県白馬岳地域の蛇紋岩体直上に位置する白馬八方温泉において研究を行ってきた。白馬八方温泉は高濃度の水素およびメタンを含む温度約50°Cの強アルカリ性温泉で、一般的な低温の蛇紋岩-水反応系と共通する特徴を示す (Schrenk et al., 2013)。2本の掘削源泉井戸 (Happo #1 と Happo #3) から採取した遊離ガス試料中からはそれぞれ、炭素数1~5までの飽和炭化水素 ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) が検出された。2本の井戸は互いに数百メートル程度しか離れていないが、含まれる  $\text{C}_1$ - $\text{C}_5$  炭化水素の濃度および炭素同位体組成には異なる特徴が観測された。Happo #1 の源泉井戸から採取された炭化水素は、(1) メタンを除いた  $\text{C}_2$ - $\text{C}_5$  炭化水素の濃度が Schulz-Flory 分布を示し (Schulz, 1935; Flory, 1936)、(2)  $\text{C}_1$ - $\text{C}_5$  炭化水素の炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) と炭素数の逆数 ( $1/n$ ) との間に線形関係があることが分かった (Suda et al., 2017)。全く同様の特徴を有する炭化水素が、海底の蛇紋岩熱水系である Lost City 熱水域でも観測されている (Proskurowski et al., 2008)。これらの規則的な濃度・炭素同位体組成は、重合過程による炭化水素の生成を仮定すると説明することができる。一方で、Happo #3 の源泉井戸から得られる炭化水素には、上記のような規則的な特徴は見られなかった。Happo #1 試料と比較すると、 $\text{CH}_4$  や  $\text{C}_2\text{H}_6$  に対して  $\text{C}_3\text{H}_8$  と  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  が選択的に消費されている傾向があり、微生物による炭化水素分解の兆候と推測される。

## 微生物ゲノム情報で紐解く蛇紋岩生命圏

Title: Serpentinization biosphere illustrated by the microbial genome constitution

鈴木志野\* (海洋研究開発機構)

Shino Suzuki (JAMSTEC)

微生物は、還元的なエネルギー物質を酸化する反応によりエネルギーを獲得している。地下環境で発生した還元物質が地球表層付近に流入し、表層の酸化物質と交わり得るような流動的なシステム（例えば、蛇紋岩湧水、蛇紋岩海山、温泉、(泥)火山、熱水鉱床、メタンハイドレートなど）では、境界面で酸化・還元の大きな電位差が生じるため微生物は多大なエネルギーを得ることが可能となり、その結果、特異な微生物生態系を形成する様子がしばしば見受けられる。一方、地下環境では、様々な物理化学的要因により、生命活動に必要なエネルギーが獲得できない、生体分子が安定して存在できない等の理由から、生命が生息できない環境も存在すると考えられている。そのような非生命圏と生命圏の遷移部は、ある物理化学的因子において最も選択圧がかかる極限的な環境であり、その環境で生命を維持するには、何らかの適応が必須となる。

我々は陸上の蛇紋岩化反応サイト、The Cedars において、水素を多く含む超塩基性 (pH = ~12)、超還元性 (Eh = ~700 mV) 蛇紋岩化流体に生息する微生物の研究を行ってきた。この超塩基性、かつ、ナトリウムイオンをほとんど含まない湧水は、陽イオンの駆動力を用いたエネルギー産生が難しく、また、有機炭素、主要な電子受容体（酸素、硝酸、硫酸など）、リン酸・炭酸水素イオンなどがほとんど存在しないことから、どのように微生物が生きているのかを推定することは非常に困難であった。実際、深部流体と地球表層の境界面には、 $10^4$  細胞/mL が検出されるのに対し、深部蛇紋岩化流体そのものには、生命の存在は確認されているものの、細胞数は検出限界 ( $10^2$  細胞/mL) 以下であり、地球上の極限生命環境の一つであると考えられた。

我々は、環境中に生息する微生物の分離培養、環境ゲノミクス、ゲノム再構築、トランスクリプトミクス等を行い、深部蛇紋岩流体、および、それと地表との境界面における微生物活動、および、適応進化の全体像の解明を試みた。その結果、この環境、特に深部流体に生息する微生物は、それぞれの微生物が属する系統門の中で最小のゲノムサイズを持つものが多くいることが明らかとなった。この環境に生息する微生物全体に見られる極端なゲノム縮小は、核酸構成物質であるリンや炭素の獲得、エネルギー産生が困難な環境への適応の結果と考えられ、また極端なゲノム縮小を経てもなおゲノム上に残された遺伝子群は、この環境で生きる上で必須であると推定された。深部流体に生息する微生物群は、そのゲノムから 70% は生存戦略が全く未知の系統群 Candidate Phyla Radiation に属することが分かったが、それ以外の 30% のほとんどが水素、二酸化炭素、一酸化炭素、電子を利用し、酢酸を生成することで生育する酢酸生成菌であることが示され、メタン菌が酢酸菌として生きるよう適応した例も見られた。これらの結果は、この深部環境において酢酸生成によるエネルギー産生が重要であることを示すだけでなく、それぞれの微生物のゲノム上に書き込まれた情報に、彼らの生きる地下生命圏がどういったものであったのか？を知る手がかりが隠されていることを示している。

炭素、窒素、硫黄安定同位体比を用いた Shinki Seep Field における  
湧出流体の起源と化学合成生物群集

**Origin of the emitting fluid and sustained animal community in the Shinkai Seep  
Field using carbon, nitrogen, and sulfur isotope ratios**

大西雄二\* (岡山大)、山中寿朗 (東京海洋大)、奥村知世 (高知大)、川口  
慎介 (JAMSTEC)、渡部裕美 (JAMSTEC)、小原泰彦 (海上保安庁・JAMSTEC)  
Onishi Y. (Okayama Univ.), Yamanaka T. (Tokyo Univ. of Marine Science and  
Technology), Okumura T. (Kochi Univ.), Kawagucci S. (JAMSTEC), Watanabe H.  
(JAMSTEC), Ohara Y. (Hydrographic and Oceanographic Dept. of  
Japan/JAMSTEC)

2010年に南部マリアナ前弧で発見された Shinkai Seep Field (SSF)は現在知られている中で最も水深の深い、超塩基性岩の蛇紋岩化反応に支えられている生態系である。その主な構成生物であるシロウリガイは共生細菌による化学合成にその栄養源を依存していることから、この生物群集は蛇紋岩化反応によって発生する還元的な流体によって支えられていると考えられている。本研究では、SSFにおいて生物群集を支えている流体の起源と生物群集との関係について流体や生物の安定同位体比を用いて明らかにすることを目的とした。

試料は YK13-08、YK14-13、YK15-11、KR16-14 航海において JAMSTEC の有人潜水調査船「しんかい 6500」、無人探査機「かいこう」の潜航調査をシロウリガイコロニーや蛇紋岩化したかんらん岩の割れ目から発達したチムニー周辺で行い、様々な生物と懸濁粒子、コロニー直下の堆積物、チムニー片、海水試料を採取した。また、海底下から非常に低流量で湧出していると考えられる流体を捕える為に、YK15-11 航海の際にチムニーの断面に流体貯留器 (GATS) を設置し、その中に捕えられた流体を翌年回収した。

GATS 内部に捕えられた流体やチムニー中の間隙水において、蛇紋岩化反応が関与する流体に特徴的な高い pH (~10) が見られ、これは SSF においても海底下から蛇紋岩化反応の関与する流体が湧出していることを示している。それらの流体では硫酸濃度が低く、硫化水素が検出された。Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>濃度は海水と大きく変わらないことから、これら流体の起源が海水であると考えられる。得られた硫酸と硫化水素の  $\delta^{34}\text{S}$  値は海水硫酸の大部分が微生物的に還元されている事を示していると考えられる。

堆積物中では、深さとともに全有機炭素 (TOC)、酸揮発性硫化物 (AVS) 濃度が増加し、それらの同位体比は減少する傾向が見られた。これはコロニー直下の堆積物中において、硫酸還元細菌の活動によって生じる硫化水素を用いた一次生産が行われている事を示している。

シロウリガイやヒゲムシの  $\delta^{34}\text{S}$  値は堆積物中 AVS の  $\delta^{34}\text{S}$  値とほぼ等しい値であった。このことはこの海域の生物の生育を支えるエネルギー源が堆積物中の硫酸還元細菌の活動に由来する硫化水素であることを示している。一方、チムニー周辺から得られたイソギンチャクやツノツバサゴカイでは  $\delta^{34}\text{S}$  値は海水硫酸と同じだが、 $\delta^{15}\text{N}$  値が低く、さらに  $\delta^{13}\text{C}$  値はチムニー中の CH<sub>4</sub> の値の範囲に含まれる事から、主にメタン資化細菌に由来する有機物を摂食している可能性が考えられる。さらに多毛類やヨコエビは懸濁粒子と堆積有機物との中間的な同位体組成を持ち、光合成、化学合成両方に由来する有機物を摂食していると考えられる。以上から、SSF における生物群集は蛇紋岩化反応の関与する流体に支えられているが、海洋表層からの沈降粒子も重要な栄養源である可能性が考えられる。

## An overview of megafaunal communities at the Shinkai Seep Field, Southern Mariana Forearc

Chong Chen<sup>1\*</sup>, Hiromi Kayama Watanabe<sup>1</sup>, Yasuhiko Ohara<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2–15 Natsushima, Yokosuka, Kanagawa, 237-0061, Japan; <sup>2</sup>Hydrographic and Oceanographic Department of Japan, Building 4, 3-1-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8932, Japan

\* Presenting / corresponding author. E-mail: [cchen@jamstec.go.jp](mailto:cchen@jamstec.go.jp)

The “Shinkai Seep Field” (SSF) is a serpentinite-hosted chemosynthetic ecosystem in the Southern Mariana Forearc discovered during a DSV *Shinkai 6500* dive in September 2010. It is the fourth known serpentinite-hosted system globally, and at ~5700 m deep it is by far the deepest. Since the discovery of the SSF, the megafaunal communities there have been investigated during four JAMSTEC research voyages (including YK13-08, YK14-13, YK15-11, and KR16-14) using both DSV *Shinkai 6500* and ROV *KAIKO*. Two main habitat types are present for chemosynthetic ecosystem associated megafauna within the SSF. Firstly, a number of vesicomyid clam colonies dominated by *Calyptogena (Abyssogena) mariana*, which was the first sign of chemosynthetic activity at the SSF, are scattered around the approximately 500 m by 300 m area of the SSF. The colonies vary greatly in size and the amount of live clams in each colony differ. Secondly, four brucite and carbonate chimney sites have been discovered. These chimney sites lack *C. mariana* clams and are instead dominated by two lineages of tube polychaetes in the genus *Phyllochaetopterus*. One lineage is genetically close to *P. polus* from the Mid-Atlantic Ridge, while the other is certainly new. Although the extent to which the two *Phyllochaetopterus* lineages rely on chemosynthetic ecosystems remain unclear, the provannid snail *Provanna cingulata* recently described from these chimney sites certainly depends on chemosynthetic activity. The two habitat types are rather different in megafaunal composition, and the chimney sites are more species rich compared to the clam sites. Taxa collected or sighted at each habitat type, as well as their ecological roles in the SSF, will be presented and discussed.

蛇紋岩化反応と生命  
**Serpentinization and life**

高井研\* (JAMSTEC D-SUGAR)  
**Ken Takai (D-SUGAR, JAMSTEC)**

Serpentinization occurs everywhere in the Earth and even in the Universe. Thus, serpentinization represents one of the most fundamental energy-yielding water-rock reactions in the Universe. Serpentinization-driven energy potentials are always within the energetic habitability of water-based life. Many peoples have believed that serpentinization is the most plausible chemical process sustaining birth and continuity of life in the Earth and in other extraterrestrial bodies.

Why is serpentinization so important? It is simply because serpentinization produces abundant H<sub>2</sub> as a very useful energy source of various abiotic reactions and biotic metabolisms from water. It has been believed that serpentinization produces considerable amounts of H<sub>2</sub> under any of the conditions. However, under certain conditions such as a lower-temperature CO<sub>2</sub>-rich condition, H<sub>2</sub> is not produced through serpentinization (Ueda et al., 2016). Thus, serpentinization is not always almighty, particularly in the ancient Earth and the extraterrestrial bodies.

Serpentinization does not always support life. Rather, the process alone restrains life. Low-temperature serpentinization-driven fluids are usually too alkaline for alkaline limit of microbial growth (pH 12.4 or even more). The alkaline pH itself can be a powerful restraint for life in terms of energy metabolisms based on proton-motive force, while the alkaline-pH-controlled chemical speciation of DIC and carbonate-precipitation of Ca and Mg in the ambient water would have significant influence on maintenance and survival of living forms there. The energy, carbon and elemental supplies and metabolisms are highly restrained in low-temperature serpentinization-driven fluids.

One solution is high temperature. In high-temperature serpentinization-driven fluids, the pH of fluid shifts to neutral due to the solubility of brucite. Thus, higher-temperature fluids not exceeding the temperature limit for life are habitable (rather prosperous). Another solution is mixing with different reactions and different physical and chemical conditions of fluids. In many serpentinization-driven hydrothermal systems, hydrothermal fluids are affected not only by serpentinization but also by hydrothermal reactions with other rocks, and are mixed with magmatic volatiles, subseafloor fluids and seawater. Concurrence of serpentinization and other process is a key for interaction between serpentinization and life.

I will talk about some of the examples showing two sides of relationship between serpentinization and life.

オマーン掘削プロジェクト ChikyuOman 2017 Leg1 速報  
Oman Drilling Project ChikyuOman 2017 Leg 1 Overview

高澤栄一\*(新潟大/ JAMSTEC)、道林克禎(静岡大)、Oman Drilling Project  
Phase 1 Science Party  
Eiichi Takazawa (Niigata Univ/JAMSTEC), Katsuyoshi Michibayashi (Shizuoka  
Univ), Oman Drilling Project Phase 1 Science Party

オマーン掘削プロジェクトが2016年12月から開始され、2017年3月末までに、オマーンオフィオライトの6カ所のサイトで、計4孔のコア掘削と2孔のロータリー掘削が実施された。掘削されたコアは地球深部探査船「ちきゅう」に運ばれ、2017年7月15日から9月15日にかけて船上においてコアの記載と分析がなされた。前半の1ヶ月(Leg 1)と後半の1ヶ月(Leg 2)に分けられ、乗船科学者も一部を除き、大部分が交代した。Leg 1で記載を行なったコアはオマーンオフィオライトの下部～中部地殻に相当する2孔から掘削されたもので、それぞれ layered gabbro (Hole GT1A), layered gabbro と foliated gabbro およびそれらの遷移部 (Hole GT2A) であり、コアの全長は各約400mに達した。船上でのコア観察、記載、分析は、6つの専門チーム (Igneous Petrology, Alteration, Structural geology, Geochemistry, Physical Properties, Paleomagnetism) に分かれた34人の乗船研究者によって行われた。うち日本から参加した乗船研究者はシニア研究者が8名、大学院生が5名であった。

粒度と鉱物モードの変化によって、Hole GT1Aは7つの lithological unit に分けられた。Hole GT1Aのコアの岩石タイプは olivine gabbro が最も多く、olivine-bearing gabbro と olivine melagabbro が次に多い。斜方輝石を含む gabbro 類や斜長石に富む gabbro 類も少量含まれる。一方、Hole GT2Aは上部の約50mは foliated gabbro に相当し、遷移部を経て、下部の約150mの layered gabbro へと変化する。foliated gabbro はより細粒な olivine gabbro からなるほか、varitextured gabbro も一部に含まれる。layered gabbro は olivine gabbro と olivine-bearing gabbro が卓越する。一部に olivine melagabbro も挟在し、olivine-bearing gabbro とリズムカルな層状構造を呈する。Hole GT1Aと同様に、Hole GT2Aにも斜方輝石を含む層も局所的に存在し、一部は gabbro-norite や troctolite に相当する。今回、XRF-CLを用いてコアの組成マッピングを行なった。その結果、数センチ規模のモーダルな層状構造が多数検出され、層状構造の成因とも関係している。本講演ではそれらのいくつかの例を紹介したい。

オマーン掘削プロジェクト ChikyuOman 2017 Leg2 速報  
Oman Drilling Project ChikyuOman 2017 Leg 2 Overview

道林克禎\* (静岡大)、高澤栄一 (新潟大/JAMSTEC)  
Oman Drilling Project Phase 1 Science Party  
K. Michibayashi (Shizuoka Univ), E. Takazawa (Niigata Univ/JAMSTEC),  
Oman Drilling Project Phase 1 Science Party

オマーン掘削プロジェクトが2016年12月から開始され、2017年3月末までに、オマーンオフィオライトの6カ所のサイトで、計4孔のコア掘削と2孔のロータリー掘削が実施された。掘削されたコアは地球深部探査船「ちきゅう」に運ばれ、2017年7月15日から9月15日にかけて船上においてコアの記載と分析がなされた。前半の1ヶ月 (Leg 1) と後半の1ヶ月 (Leg 2) に分けられ、乗船科学者も一部を除き、大部分が交代した。

Leg 2 で記載を行なったコアはオマーンオフィオライトの上部地殻を構成する複合岩脈群とガブロ層の境界(Hole GT3A)とオフィオライト基底部分で炭酸塩岩化作用が卓越した地点(Hole BT1B)から掘削された、それぞれ300mと400mである。船上でのコア観察、記載、分析は、6つの専門チーム (Igneous Petrology, Alteration, Structural geology, Geochemistry, Physical Properties, Paleomagnetism) に分かれた34人の乗船研究者によって行われた。うち日本から参加した乗船研究者はシニア研究者が6名、大学院生が1名、学部生1名であった。

Hole GT3Aのコア試料は、全体として上位がドレライトと玄武岩、下位にハンレイ岩からなる海洋地殻の火山岩から深成岩への岩相境界付近の岩石で構成されている。Hole BT1Bのコア試料は、上位3分の2程度がListveniteと総称されるカンラン岩起源の炭酸塩岩から構成されており、その下位にオフィオライトの基底部分となる断層粘土やカタクレーサイトなどの断層岩を境界として主に玄武岩起源の変成岩(metamorphic sole)が分布している。本講演では、ちきゅう船上で得られたこれらの掘削コアの分析結果の紹介する。

海嶺付近の熱水循環：オマーンオフィオライトにおける緑泥石岩体の研究から  
**Hydrothermal circulation beneath ocean ridges: significance of chloritite bodies in the Oman ophiolite**

宮下純夫\* (新潟大学)・足立佳子 (電中研)・金子 龍 ((株) 応用地質)  
**Sumio MIYASHITA\*, Yoshiko ADACHI, and Ryu KANEKO**

海嶺下における熱水循環は、熱い海洋地殻との相互作用によって地殻の組成を変化させるとともに、海洋底に熱水噴出をもたらし、その周辺には地殻から溶脱した金属元素によって塊状硫化鉄床を形成する。しかし、そうした熱水循環の深部における実体については、まだ十分に理解が進んではいない。特に、海洋地殻の主要部分を占めるガブロ層まで含めた熱水循環システムに関しては、研究例は少ない。従来の研究では、海嶺軸直下の浅部に存在するメルトレンズとの間を中心とした熱水循環システムで説明される事が多く (例えば Alt, 1995)、海嶺翼部での実体については言及例が少ない (Fouquet et al., 1996; Haymon et al., 2005 など)。

我々は、高速拡大海洋地殻・上部マントルのアナログとみなされるオマーンオフィオライトにおいて、10カ所から緑泥石岩体及びその関連岩体を発見した。最大で300-200 mもの巨大なものから100-1000 mほどの帯状分布を示すものまで、産状は多岐にわたっている。また、これらの緑泥石岩体の産出位置は、上部ガブロの最下部付近から溶岩層にまでわたっており、垂直的な変化についても検討可能となった。今回の発表では、代表的な緑泥石岩体の産状、記載岩石学的特徴、全岩化学組成などについて概要を報告し、本緑泥石岩体岩の意義について議論する。

上部ガブロ中に産出する岩体は鉄に富んだ緑泥石から大部分が構成されており、源岩から大量のSiO<sub>2</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>Oなどが除去される一方、FeO および水が大量に付加されている。一方、シート状岩脈群や溶岩層内では、石英が緑泥石の粒間や脈状に加わる。つまり、ガブロ中の緑泥石岩にシリカを加えた様な全岩組成を示す。それ以外の元素組成はシリカの付加による相対的濃度の減少によってほぼ説明される。なお、上位の緑泥石岩体にはシリカに富んだ脈が発達しており、ゴッサンに類似する強変質帯が出現する。

下位の緑泥石岩の大部分ではCuが検出限界以下 (<1 ppm) である一方、上位の緑泥石—石英岩には、局所的に高い濃度を有する岩石が出現する。一般に変質を被っていないオマーンやEPRのガブロやドレライトなどは100 ppm程度のCu濃度を示すが、今回の結果は、緑泥石岩体とその周囲からはCuが著しく溶脱しており、塊状硫化鉄床のルーツである事を示唆している。

大規模な塊状硫化鉄床の基底部には、変質パイプと呼ばれる著しく珪化変質した岩石が産出する事が知られているが (Humpris et al., 1995 など)、上位に出現する緑泥石岩ほど石英が増加していくことと調和的である。

緑泥石岩体が上部ガブロの基底部付近にまで及んでいるという観察事実は、その形成場が海嶺直下のメルトレンズの上ではなく、海嶺翼部であった事を示している。なぜなら上部ガブロはメルトレンズの周囲で形成されるからである。高速拡大海嶺では、大規模な塊状硫化鉄床は海嶺軸部ではなく翼部において形成されるとする主張があるが (Fouquet et al., 1996 など)、今回の結果は、海嶺翼部のガブロ層中における、highly focused discharge zoneの存在を示しており、海嶺翼部における熱水循環の重要性を物語っている。

**伊是名海穴の科学掘削が語る海底下鉍化作用**  
**Subseafloor mineralization observed by scientific drilling at the Izena Hole**

野崎達生\*<sup>1,2,3,4</sup>, 熊谷英憲<sup>1</sup>, 石橋純一郎<sup>5</sup>, 高谷雄太郎<sup>6,1,2,4</sup>,  
 前田玲奈<sup>1</sup>, CK16-05 航海乗船者一同

1. JAMSTEC, 2. 東大・工, 3. 神戸大・理, 4. 千葉工大・次世代資源,  
 5. 九大・理, 6. 早大・創造理工

Tatsuo Nozaki\*<sup>1,2,3,4</sup>, Hidenori Kumagai<sup>1</sup>, Jun-Ichiro Ishibashi<sup>5</sup>, Yutaro  
 Takaya<sup>6,1,2,4</sup>, Lena Maeda<sup>1</sup> and CK16-05 Cruise members

1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kobe Univ., 4. ChibaTech,  
 5. Kyushu Univ., 6. Waseda Univ.

戦略的イノベーション創造プログラム「次世代海洋資源調査技術」における「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」の一環として、沖縄トラフ伊是名海穴における科学掘削調査 (CK16-05 航海) が 2016 年 11~12 月に実施された。本航海では、コア試料採取と物理検層による海底下鉍体分布の把握およびコア試料の物性計測を主な目的とし、Hakurei サイトでは、8 Site, 9 Hole において総掘削長 834.0 m のコア試料採取と 5 Hole における物理検層を実施した。本講演では、コア試料の記載・岩相・XRD 分析結果に基づき、伊是名海穴の海底下鉍化作用について議論する。

JOGMEC ニュースリリース (2013, 2016) と同様に、北部マウンド中心に位置する Hole C9027A, B および北部マウンド東方の Hole C9025A, C9026A, C9028A, C9032A から硫化鉍物に富む層を捉えた。特に、北部マウンド東方では層厚 30~35 m の海底下鉍体を捉えたが、塊状硫化鉍には複数枚の非変質~弱変質堆積物が挟在されており、単純一様な塊状鉍体ではないことが明らかとなった。Hole C9025A, C9026A, C9032A の物理検層によるガンマ線強度は類似した深度プロファイルを示し、海底下鉍体と挟在される堆積物が連続的に広く延長していることが確認された。また、Hole C9025A, C9026A において、海底下鉍体とその上位の堆積物層を連続的に採取することに成功した。船上記載と XRD 分析の結果、海底下鉍体の上部境界は上位から下位にかけて、硬石膏に富む中性変質粘土層⇒カオリナイトに富む酸性変質粘土層⇒重晶石に富む層 (硬石膏層に由来)⇒硫化鉍と遷移する。このような層準変化は、上部境界ほど明瞭ではないが海底下鉍体の下部境界でも観察される。また、北部マウンド北方あるいは北西の Hole C9029A, C9030A からは細粒~粗粒パミスが互層するコア試料が得られており、カルデラ底の東端よりさらに東方に位置する Hole C9031A からは、半遠洋性堆積物に富むコア試料が得られている。したがって、Hakurei サイトの海底下鉍体は、パミスと堆積物の互層を鉍化作用の受け皿とし、透水率の高いパミス層では既存のパミス層を置換しながら鉍化作用が進行していると考えられる。また、堆積物との境界部分では硬石膏によるキャップ層が形成され、海底下の熱水移動を側方に規制していたと考えられる。キャップ層直上に認められる酸性変質粘土層は、キャップ層からしばしば漏れ出る酸性流体により、pH が間欠的に低下した層に形成されたと考えれば調和的である。以上のことから、海底下鉍体は硬石膏によるキャップ層とその外側にしばしば形成される酸性粘土層を随伴しており、熱水活動の強弱に伴って、このようなキャップ層を移動させながら成長していると考え、コア試料の記載・岩相・XRD 分析結果を調和的に説明できる。

鉛同位体比から見た中部沖縄トラフの熱水鉱化作用  
Pb isotopic study of hydrothermal mineralization in middle-Okinawa Trough

戸塚修平\*<sup>1</sup>・石橋純一郎<sup>1</sup>，野崎達生<sup>2</sup>，島田和彦<sup>1</sup>，木村純一<sup>2</sup>・常青<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>九大・理，<sup>2</sup>海洋研究開発機構

S.Totsuka\*<sup>1</sup>, J.-I. Ishibashi<sup>1</sup>, T. Nozaki<sup>2</sup>, K. Shimada<sup>1</sup>, J.-I. Kimura<sup>2</sup> and Q. Chang<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Faculty of Sci., Kyushu Univ., <sup>2</sup>JAMSTEC

2014, 2016年にSIP研究課題「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)」の下で実施された地球深部探査船「ちきゅう」の科学掘削航海によって、沖縄トラフの伊平屋北海丘および伊是名海穴 Hakurei サイトの熱水域の海底下から堆積物試料が系統的に採取された。これらの試料中に産出する熱水性鉱物を解析し、方鉛鉱(PbS)を対象に鉛同位体比測定を行い、鉱物形成環境の議論と金属元素の起源の推定を試みた。

掘削コア試料(計10孔、最深で海底下200.5 m)から研磨片を作製し、顕微鏡観察とXRD, EPMAによる分析を行った。これにより産出鉱物を同定し、主要構成鉱物の化学組成を分析した。またLA-MC-ICP-MSを用いて方鉛鉱の鉛同位体比測定を行った。

伊平屋北海丘熱水域の周辺は軽石に覆われていた。熱水域の中心部では大量の熱水変質粘土鉱物(イライト, Mg-クロライト), 硬石膏とともに少量の硫化鉱物(黄鉄鉱, 閃亜鉛鉱, 方鉛鉱, 黄銅鉱)をコアの中から確認できた。一方、伊是名海穴 Hakurei サイト周辺は軽石と半遠洋性堆積物(泥, 生物起源物質)に覆われていた。熱水域の中心部では熱水変質粘土鉱物(イライト, Mg-クロライト)とともに硫化鉱物(黄鉄鉱, 閃亜鉛鉱, 方鉛鉱, 黄銅鉱, 磁硫鉄鉱, キューバ鉱)をコアの中から確認できた。

伊平屋北海丘, 伊是名海穴 Hakurei サイトの鉛同位体比はいずれも火山岩と半遠洋性堆積物の混合線に乗り、前者は火山岩寄り、後者は堆積物寄りの値を示した(図1)。この結果は、前者のコアには厚い軽石層が、後者のコアには軽石とともに泥質・砂質堆積物の層が確認されたことと調和的である。伊是名海穴 Hakurei サイトでは、海底面の硫化物マウンドと海底下の下部鉱体の試料で同位体比が異なっており、下部鉱体は形成される際に周辺の堆積物の影響をより強く受けている可能性が考えられる。また本研究で用いた海底熱水域の試料において、鉛同位体比は同一掘削孔での深度や鉱物組合せ・鉱物組織に依存しなかった。以上のことは、熱水サイトごとに金属元素の供給源として火山岩と堆積物の寄与の程度が異なり、かつ同一熱水サイト内でも場所によってその程度が若干異なること、また熱水域内の同一地点においては鉛同位体的に非常に均質な熱水が断続的に鉱化作用をもたらしていることを示唆している。

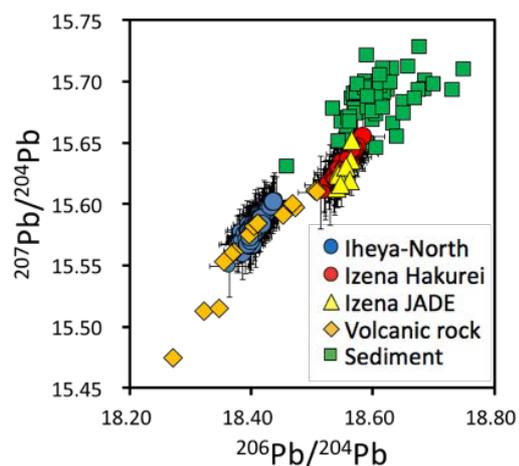


図1 沖縄トラフの熱水域掘削試料中の方鉛鉱と火山岩・堆積物の鉛同位体比の比較  
火山岩, 堆積物, JADE サイトの鉱石の値は Bentahila et al. (2008); Halbach et al. (1997); Hoang and Uto (2006); Shu et al. (2017); Zhang et al. (2008) の報告値。

## 地球化学的解析に基づく中部沖縄トラフの熱水変質作用

## Hydrothermal alteration in the middle Okinawa Trough based on geochemical analysis

堤映日\*・石橋純一郎（九大），土岐知弘（琉球大），高谷雄太郎（早稲田大），野崎達生（JAMSTEC），CK16-05 乗船者一同

A. Tsutsumi\*, J.-I. Ishibashi (Kyushu Univ.), T. Toki (Ryukyu Univ.),

Y. Takaya (Waseda Univ.), T. Nozaki (JAMSTEC) and CK16-05 on-board member

SIP「次世代海洋資源調査技術」の枠組みのもとで，地球深部探査船「ちきゅう」による掘削調査航海 (Exp.909) が，2016年11月16日～12月15日に沖縄トラフ伊是名海穴の海底熱水域で実施された．本研究では，得られた堆積物試料とコア試料から抽出した間隙水試料の化学組成の鉛直分布から，熱水変質作用の地球化学的特徴を議論する．堆積物試料の解析は，Shao et al. (2017 *Chem. Geol.*) にならい，イオン価数が高い微量元素 (HFSE) の挙動に着目する．彼らは，沖縄トラフ伊平屋北海丘の熱水域から得られた堆積物試料の Zr/Hf 比と Zr/Y 比の関係が，未変質な火山性碎屑物 (パミス) からなる層と熱水変質により生成されたクロライトを多量に含む層との間でほぼ一致していることを示し，熱水変質作用ではこれらの元素が動きにくいと説明している．

本航海の掘削孔のうち，Holes C9026A, C9030A および C9032A について，層序の異なる深度別に堆積物試料の全岩化学分析結果を用いて Zr/Hf 比と Zr/Y 比をプロットした (図 1)．Hole C9030A を基準に異なる領域にプロットされた群に注目すると，伊是名海穴はこの関係が多様で，Group I (Zr/Hf = 35-45, Zr/Y = 2-6)，Group II (Zr/Hf = 40-45, Zr/Y = 7-9)，Group III (Zr/Hf = 20-30, Zr/Y < 3) に分類された．Shao et al. (2017) の伊平屋北海丘のデータは Group I にほぼ一致する．

熱水活動が認められない Hole C9030A の試料は全て Group I に分類される．海底下鉍体の西端の Hole C9026A では，Group I の未変質層と粘土鉍物を含む層 (0-30 mbsf) が硫化鉍物層の上位に分布し，硫化鉍物層の下位に分布する珪化した堆積物層 (>90 mbsf) は Group III に分類される．海底下鉍体の東端に近い Hole C9032A では，Group I に分類される未変質層と粘土鉍物を含む層 (0-14 mbsf) の下位に Group II に分類される熱水変質層 (16-32 mbsf) が出現し，硫化鉍物層になる．その下位の熱水変質層 (54 mbsf) は Group III に分類されたが，試料数が少なく検討が必要である．

間隙水の化学組成は，Group I の上位の堆積層では海水に近い化学組成，Group II, III の組成を示す下位の堆積層では熱水に近い化学組成を示す．

Hole C9032A の Group III の組成を示す堆積層では，急激な組成変化が認められる．

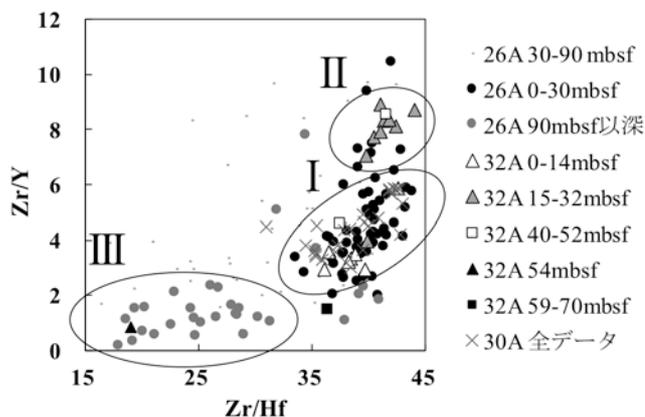


図 1 Zr/Hf-Zr/Y ダイアグラム

**IODP Exp.352 伊豆-小笠原前弧域の火山岩の岩石磁気特性**  
**IODP Exp.352 Magnetic properties of volcanic rocks recovered from Izu-Bonin**  
**fore-arc**

本多睦美\*、道林克禎（静岡大学）、藤井昌和（極地研/総研大）、山本由弦  
 （JAMSTEC）、針金由美子（産総研）

**M. Honda\*, K. Mishibayashi (Shizuoka Univ.), M. Fujii (NIPR/SOKENDAI), Y.**  
**Yamamoto (JAMSTEC) and Y. Harigane (GSJ, AIST)**

Exp. 352 は伊豆-小笠原前弧域で実施された。4 地点で掘削が行われ、海溝側の 2 地点 (U1440, U1441) にて前弧玄武岩、島弧側の 2 地点 (U1439, U1442) でボニナイトが採取された。船上分析の結果、P 波速度と全岩密度は正の相関をもち、密度が減少すると P 波速度が低下することを示した。そのうちボニナイトにおいて、P 波速度—全岩密度の関係に 2 つの平行な傾向がみられた。Christeson et al. (2017) では、ボニナイトを 1 つの傾向とみなしアスペリティ圧縮モデルとフィッティングを行っているが、前弧玄武岩 (U1440, U1441) や、一般的な海洋地殻 (Hole 504B, 1256D) と比べてばらつきが大きい。一方、帯磁率は  $4\text{-}35 \times 10^6$  (SI) と  $125\text{-}805 \times 10^6$  (SI) にピークを持つバイモーダル分布を示した (本多, 2016MS)。高帯磁率グループと低帯磁率グループは異なる P 波速度—全岩密度トレンドをもち、前弧玄武岩系列は全て高帯磁率グループに属し、ボニナイト系列は掘削地点に関係なく両グループに属した。そこで本研究では、伊豆—小笠原前弧域から採取された前弧玄武岩とボニナイトの岩石磁気特性に注目し、これらの火山岩が分布する前弧域の海洋地殻構造を考察することを目的とした。

4 地点の火山岩について薄片観察、全岩化学組成分析、熱磁気特性と磁気ヒステリシスの分析を行った。反射顕微鏡による薄片観察の結果、多角形～樹枝状の鉄チタン鉱物が認められた。全岩化学組成分析の結果、ボニナイトのうち高帯磁率の試料は  $\text{FeO}^* = 6.5\text{-}8.8$  wt. %、低帯磁率の試料は  $\text{FeO}^* = 4.6\text{-}8.4$  wt. % だった。前弧玄武岩の  $\text{FeO}^*$  量は  $7.7\text{-}13.2$  wt. % とボニナイトに比べて多かった。また、高帯磁率のボニナイトは  $\text{TiO}_2 = 0.15\text{-}0.51$  wt. %、低帯磁率のボニナイトは  $\text{TiO}_2 = 0.13\text{-}0.36$  wt. % だった。前弧玄武岩の  $\text{TiO}_2$  量は  $0.65\text{-}1.01$  wt. % とボニナイトに比べて多かった。帯磁率の主な担い手である磁鉄鉱 ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ) の構成元素について帯磁率と全岩化学組成の相関はみられなかった。

熱磁気特性と磁気ヒステリシスの分析結果について、高帯磁率グループに属する前弧玄武岩は上に凸の温度磁化 ( $J_s\text{-}T$ ) 曲線と高い飽和磁化 ( $0.5\text{-}1.1 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ) をもっていた。そのうち  $J_s\text{-}T$  曲線の変曲点を 1 つ持つ試料は、 $T_c \sim 500$  °C であることから強磁性のチタン磁鉄鉱を含むことが示唆された。変曲点を 2 つもつ試料は、 $300$  °C と  $500$  °C に変曲点をもつことからチタノマグヘマイトを含むことが示唆された。高帯磁率のボニナイトも類似の結果を示した。 $200\text{-}300$  °C 以下において酸化した場合にマグヘマイト化する (e.g. Tanaka & Yamamoto, 2014) ため高帯磁率試料の一部は低温酸化していることが考えられる。一方、低帯磁率グループに属するボニナイトは下に凸の  $J_s\text{-}T$  曲線と低い飽和磁化 ( $0.0005\text{-}0.07 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ) をもち、ヒステリシスループは線形を示したことから、常磁性鉱物を含むことが示された。

背弧海盆の非対称拡大はどのようにして起こるのか？

- 南マリアナトラフでの観測事実と数値シミュレーション -

**How does asymmetry seafloor spreading occur in back-arc basins?**

**Evidences from the Southern Mariana back-arc basin and Numerical modelling**

島 伸和\* (神戸大学)、中久喜 伴益 (広島大学)、  
松野 哲男 (神戸大学)、沖野 郷子 (東京大学)

**Nobukazu Seama\* (Kobe Univ.), Tomoeki Nakakuki (Hiroshima Univ.),  
Tetsuo Matsuno (Kobe Univ.), Kyoko Okino (Univ. of Tokyo)**

背弧海盆での非対称な海洋底拡大は、地磁気異常の研究から多くの背弧海盆で確認されている。背弧海盆は、中央海嶺とは異なって沈み込むスラブが存在していることから、上部マントルの構造に非対称性があるため、その海洋底拡大に非対称性があってもよいと考えられており、いくつかのモデルも提案されているが推測の域を出ない。本研究では、南マリアナトラフ背弧海盆での観測事実を積み上げ、これらの観測事実を説明する非対称な海洋底拡大が起こる具体的なメカニズムを提唱し、数値シミュレーションの結果も踏まえて、実際に起こりうるメカニズムであることを示す。南マリアナトラフ背弧海盆の拡大軸は、2つの拡大軸セグメントならなり、遅い拡大速度であるにも関わらず、速い拡大速度で見られる中央海嶺のような盛り上がり地形を示して、スラブからの脱水による影響が示唆されている。Seama and Okino (2015)は、地磁気異常と海底地形のデータを解析し、この南側のセグメントでは、海溝側が遅く古島弧側が速い非対称拡大が連続的に起こっていることを示した。さらに、地震学的手法による沈み込むスラブの上面の深さと拡大軸の位置に着目し、スラブからの脱水が非対称拡大に影響を与えているという仮説を提案した。すなわち、スラブから出てきた水が脱水域の上のマントルの粘性とソリダス温度を低下させるため、拡大軸が脱水域の位置に固定されやすい状況になっており、本来受動的で動くはずの拡大軸が海溝軸から一定の距離に制限されることで、非対称拡大が起こるとした。この拡大軸を横断した測線で、海底電位差磁力計の観測にもとづくMT解析により、上部マントル比抵抗構造が推定されている(Matsuno et al., in prep.)。この結果、拡大軸のやや海溝側の深さ10-20km付近に低比抵抗領域があり、その下には、スラブ直上まで比抵抗値の低い領域が非対称に広がっている。上部マントルでの低比抵抗は水やメルトの存在で説明できるため、上で提案された仮説は、上部マントル比抵抗構造としても支持されている。一方、この拡大軸のサブセグメントで得られたAUV「Urashima」による地形とサイドスキャンによる断層地形の分布、さらに潜水船「しんかい6500」の映像から推定した堆積物の分布は、この拡大軸が海溝側に数100mスケールで移動していることを示しており、微視的なスケールでの非対称拡大の様式を明らかにした(Okamoto et al., in prep.)。海溝側に溶融帯が存在すれば、それが拡大軸の移動に影響を与えていると考えることで、この非対称拡大様式の説明がつく。さらに、海洋地殻・マントル物質の相図にもとづくスラブからの脱水と水による強度低下を組み込んだ数値シミュレーションを背弧海盆の拡大に適用したところ、背弧海盆の拡大軸が、スラブでの脱水域に固定されることが示された(Nakakuki et al., in prep.)。我々が得た観測事実と数値シミュレーションの結果は、スラブからの脱水が背弧海盆の拡大に影響を与えて、非対称拡大を引き起こしていることを示している。

「しんかい」湧水域(Shinkai Seep Field = SSF)産チムニーの内部構造  
**Observation on the white chimney recovered from the Shinkai Seep Field**

石井輝秋\* (静岡大学)・奥村知世 (高知大学)・Ignacio Pujana (テキサス大学)・小原泰彦 (海上保安庁)・「しんかい」湧水域研究グループ一同  
**T. Ishii\* (Shizuoka Univ.), T. Okumura (Kochi Univ.), Ignacio Pujana (Univ. of Texas), Ohara, Y. (JHOD), Science party of the Shinkai Seep Field Expeditions**

近年有人潜水艇やROVによる調査研究により、シロウリガイ、シンカイコシオリエビ、各種巻貝、チューブワーム等からなる深海生物群集が、大洋中央海嶺や海溝陸側斜面域を中心に汎世界的分布が確認されつつある。これらの深海生物群集は地質学的立地条件から (A) 熱水噴出孔生物群集 (hydrothermal vent communities) と (B) 冷水湧水域生物群集 (cold seepage communities) とに大別でき、前者を熱水系、後者を冷水系と略称できる。

熱水噴出孔生物群集は、深海底での火成活動の場である (A-1) 大洋中央海嶺の拡大軸 (太平洋、大西洋、インド洋中央海嶺他)、(A-2) 縁海の拡大軸 (マリアナトラフ、沖縄トラフ、マヌス海盆、カリフォルニア湾他) 等から多数の報告がある。更に、その他の広義の発散的プレート境界に加え、(A-3) 島弧性海底火山に伴う生物群集 (鹿児島湾、相模湾初島沖等) や (A-4) ホットスポット (未確認) も考えられる。冷水湧水域生物群集は (B-1) 海洋プレートの沈み込みの場である、活動的大陸縁辺部や島弧域の海溝陸側斜面上 (オレゴン沖、日本海溝、南海トラフ他)、(B-2) 非活動的大陸縁辺部の堆積物上 (フロリダ沖、ニューファンドランド沖等)、更にその他に (B-3) 化石有機物質の濃集帯 (北海のノルウェー沖、日本海の表層型ガスハイドレート域他) 等に分類出来る。グループ (A) の熱水噴出孔生物群集は地球の内部熱エネルギーに支えられていると考えられるが、グループ (B) の冷水湧水域生物群集は堆積物中に埋積された、太陽エネルギーによる光合成の産物である、化石有機物質由来のメタンガス等に支えられている可能性が高いので、太陽エネルギーに間接的に支えられているとみなせる。

最近蛇紋岩分布域に棲息する蛇紋岩湧水域生物群集が、大洋中央海嶺域と海溝陸側斜面域から報告されていて、ここではこれらをグループ (C) の生態系とする。即ち (C-1) 中央海嶺オフリッジの蛇紋岩露出地域 (大西洋中央海嶺の Lost City 低熱水域)、(C-2) 海溝陸側斜面の蛇紋岩海山山頂域 (中部マリアナ前弧の南チャモロ海山等)、(C-3) 海溝陸側斜面の蛇紋岩分布域 (南部マリアナ海溝陸側斜面の「しんかい」湧水域=SSF: Shinkai Seep Field) である。グループ (C) 生態系を支えるエネルギー源として、橄欖岩の蛇紋岩化反応で生じる水素がの可能性が強く示唆されており、深海底のみならず初期地球の生命発生時や地球外惑星での、生命を支えるエネルギー源としての可能性を秘めている。

上記「しんかい」湧水域SSF生物群集は「よこすか」YK10-12研究航海の「しんかい6500」第1234潜航調査(石井が乗船)の際に、南部マリアナ海溝陸側斜面の上部マントル橄欖岩分布域(水深約5600m)で発見され、シロウリガイが広範に分布する深海生物群集であることが確認され、シロウリガイとホワイトチムニー破片の転石が採取された。シロウリガイコロニー分布域がモホ面直下であることから、生態系を支える冷湧水とモホ面との関連が強く示唆されている。その後、「しんかい6500」の数次に渡る調査で、多くのチムニーが採取されている。

ここではSSFで採取された、硬質と軟質2種類のホワイトチムニーの内部構造を、CTスキャンとXRFマッピングによる非破壊的観察により、その特徴を明らかにしチムニーの成因解明を目指す。尚分析は松崎琢也氏他(高知大学)と高橋聡氏(東京大学)にお世話になった。

オマーンオフィオライト Fizh 岩体北部におけるマントルかんらん岩の変質—特に基底スラスト直上部の蛇紋岩化かんらん岩について—

**Alteration of the mantle peridotite in the northern Fizh block, Oman ophiolite  
- Serpentinized peridotites, especially directly above the basal thrust -**

吉田有希\* (新潟大)、高澤栄一 (新潟大/JAMSTEC)、植田勇人 (新潟大)、  
田村芳彦 (JAMSTEC)

**Yuki Yoshida (Niigata Univ), Eiichi Takazawa (Niigata Univ/JAMSTEC), Hayato Ueta (Niigata Univ), Yoshihiko Tamura (JAMSTEC)**

オマーンオフィオライト北部のマントルセクションは、主にハルツバージャイトとダナイトで構成され、一部にレルゾライトを伴い、全域に渡って蛇紋岩化作用を被っている。本研究は、Fizh 岩体北部の Ash Shiyah 地域および Wadi Shuwayhah におけるメタモルフィックソール直上部のかんらん岩(マントルセクション基底部)と、それより上位のマントルセクション内部のかんらん岩を対象に、蛇紋岩化作用の記載と分析を行った。

鏡下観察の結果、マントルセクション内部～上部においてマグネタイトは比較的大きな脈中にもみ分布に限られるのに対し、基底部においては蛇紋石の微細なメッシュ組織中にも多量のマグネタイトが確認された。また基底部では斜方輝石(Opx)のバスタイト化が顕著で、リムに滑石を伴うものも認められる。さらに、メタモルフィックソールとマントルセクションの境界部には単斜輝石、グロシユラー等からなるロジンジャイト脈が分布する。

顕微ラマンによる分析の結果、本研究地域の蛇紋石の多くがリザダイトあるいはクリソタイルであることが分かったが、基底部における蛇紋石の一部にアンチゴライトのピークが認められた。蛇紋石の EPMA 測定結果からは、マグネタイトの形成に伴って蛇紋石の組成がブルーサイトの混在を示唆する Si に乏しい組成からより純粋な蛇紋石の組成へと変化していることが明らかとなった。

基底部におけるアンチゴライトの存在は、比較的高温の蛇紋石化(300-500 °C)が生じたことを示す。同様にマントルセクション基底部のかんらん岩中に認められる滑石を伴った Opx は、Enstatite + H<sub>2</sub>O → Talc + Forsterite (約 650 °C, 1 GPa)の反応によって生じたと考えられる。また、メタモルフィックソール/マントルセクション境界部で確認されたロジンジャイト脈は、その鉱物組み合わせから 300-650°C 程度の形成温度条件が見積もられる。したがって、マントルセクション基底部では衝上に伴った流体供給が存在し、輝石類の変質および高温蛇紋岩化が生じるとともに、蛇紋岩化に伴った Ca の流体への溶脱によるロジンジャイト化が進行したと推測される。

さらに、基底部における多量のマグネタイトは蛇紋石の化学組成から Brucite + Si(aqueous solution(aq)) → Serpentine + Magnetite + water + H<sub>2</sub>O という反応によって生じたと考えられる。蛇紋石化における Si(aq)の供給源は一般に輝石の蛇紋石化によるものとされるが、本研究に関してはマグネタイトが Opx の有無によらず非常に広域的に分布することから、Opx の蛇紋石化が Si(aq)の供給の全てを担っているとは考えにくい。したがって、そのような Si(aq)は衝上に伴いメタモルフィックソールから直上部へと直接供給されたとするのが妥当と考える。

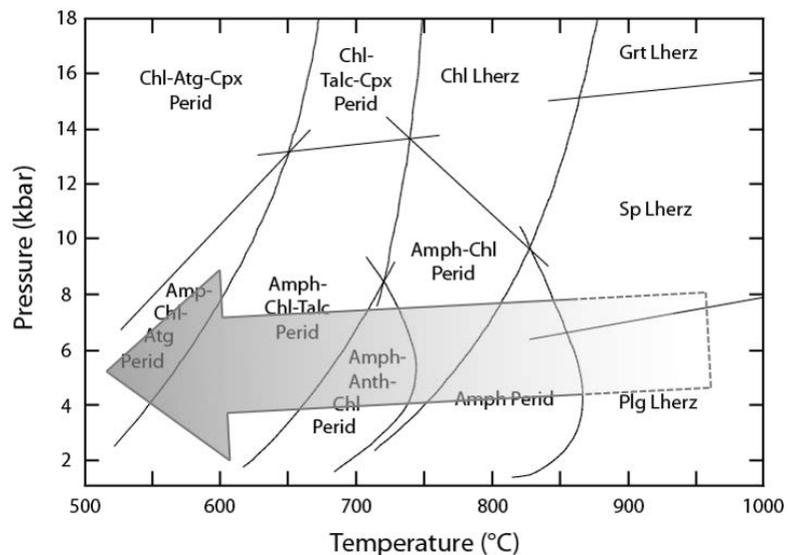
南西インド洋海嶺 Prince Edward Transform 断層かんらん岩の  
変形作用と含水鉱物

Peridotites derived from the Prince Edward Transform fault, the Southwest  
Indian Ridge: deformation and hydrous minerals

柿畑優季・道林克禎 (静岡大), Henry J. B. Dick (ウッズホール海洋研究所)  
Yuki Kakihata・Katsuyoshi Michibayashi (Shizuoka University), Henry J. B. Dick  
(Woods Hole Oceanographic Institution)

南西インド洋海嶺は、インド洋の3つの海嶺の交点であるロドリゲス3重点から南西に延びる海嶺である。拡大速度は約14 mm/yrであり、世界で拡大速度の遅い海嶺の1つである(Dick *et al.*, 2003)。このような超低速拡大海嶺では下部からのマグマの供給が緩やかであり、相対的に冷却の影響が大きくなることから、玄武岩質の海洋地殻の厚さが1~2 km程度と非常に薄く、部分的にかんらん岩が露出している。南西インド洋海嶺のPrince Edward Transform断層において1983年にドレッジ調査が行われ、かんらん岩が採取された(PROTEA5航海)。本研究では、この調査で採取されたかんらん岩を解析した。

本研究で用いたかんらん岩に、角閃石の変形構造を含むウルトラマイロナイトを確認した。このウルトラマイロナイトに角閃石以外の含水鉱物が確認されないことから、角閃石が安定な700~800 °Cで剪断変形したと考えられる。また、局所的な変形によって細粒化した組織には角閃石が含まれ、この細粒部を緑泥石脈が切っていた。さらに、未変形な低温蛇紋石脈がこれらの組織を切っていた。このような構造は、かんらん岩中において700~800 °Cで角閃石が生じ、温度が低下して600~700 °Cで形成した緑泥石脈によって切られることで形成したと考察される。そして、蛇紋石脈は500 °C以下で形成したと考えられる(図1)。以上の観察結果から、Prince Edward Transform断層のかんらん岩は、800 °Cから500 °C以下にかけて、水の影響を受け続けたことが示唆される。



かんらん岩に含まれる含水鉱物の温度・圧力変化。矢印は温度の低下に伴う鉱物相の変化を表す。Jenkins, 1981に加筆。

脆性-塑性遷移領域におけるかんらん岩のレオロジーに対する水の効果  
**Effect of water on the rheology of peridotite in the brittle-ductile transition zone**

中谷貴之\*(東北大)、武藤潤 (東北大)、木戸正紀 (東北大)  
**Takayuki Nakatani\* (Tohoku Univ.), Jun Muto (Tohoku Univ.),  
 Masanori Kido (Tohoku Univ.)**

かんらん岩の脆性-塑性遷移条件の決定は、海洋および大陸リソスフェアにおける震源分布の支配要因を理解する上で極めて重要である。Druiventak et al., (2011) は、乾燥条件下においてかんらん岩の一軸圧縮実験を行い、600°Cから転位滑りに支配された結晶塑性が卓越することを示した。そしてその実験結果に基づいて、海洋リソスフェアにおける地震発生の最大深度が600°Cの等温線に一致すると考えた。一方で、最新の海洋リソスフェアの温度構造モデルは、地震の最大深度がより高温の700-800°Cの等温線と一致することを示している (Grose and Afonso, 2013)。また近年の物理観測結果から、特別に深い震源を持つ地震が、海洋および大陸リソスフェアで生じていることが明らかになっており (例えば, Aderhold and Abercrombie, 2016 ; Inbal et al., 2016)、脆性領域を600°Cを超えて深部に延長させる要因を考える必要がある。水流体は、有効封圧を下げることで岩石の脆性強度を低下させうため、その有力な候補の一つである。しかし、水はそのような効果に加え、かんらん石や輝石に固溶して岩石の塑性強度を低下させたり、またかんらん石や輝石と化学反応を起こして含水鉱物を形成し、塑性変形の促進及び摩擦特性の変化をもたらすため、脆性-塑性遷移領域において、水が脆性及び塑性どちらを促進するか自明ではない。

本研究では、脆性-塑性遷移領域における水の効果を検証するため、グリッグス型変形試験機を用いて、乾燥及び含水 (1wt% H<sub>2</sub>O) 条件下においてかんらん岩の一軸圧縮実験を温度600°C、封圧1.0 GPa、歪速度 $7.4 \times 10^{-7}$ - $2.9 \times 10^{-6}$  s<sup>-1</sup>の条件で行った。出発物質にはコアリングした幌満産のダナイトをもちいた。降伏応力は乾燥条件下で800 MPaであったのに対し、含水条件下では600 MPaまで低下した。また、乾燥条件下では、圧縮軸に対して45°の方向に走る既存の蛇紋石脈にやや変形が集中した一方で、含水条件では、圧縮軸に対して30°の角度をなす破砕帯の形成が認められ、特に歪速度 $2.9 \times 10^{-6}$  s<sup>-1</sup>の条件では、破砕帯と同様の角度をなす明瞭な断層によって試料が二分されていた。含水条件下の降伏応力に明瞭な歪速度依存性がなかったことも考慮すると、水はかんらん岩の脆性的な変形を促進し、強度を低下させたと結論できる。さらに、含水条件下で明瞭な断層形成が確認された実験では、降伏後に差応力が500 MPaまで緩やかに低下しており、断層近傍の破砕帯において形成された滑石および蛇紋石がさらなる応力の低下をもたらしていた可能性が示唆される。Inbal et al., (2016)は、アメリカ西海岸のトランスフォーム断層の深部延長にあたる上部マントルで観測された特異な地震の発生が、<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比の観測結果などから水流体の存在と関係していると考えたが、今回の実験結果はその主張を支持する。

—参考文献— Druiventak, et al., (2011) *EPSL*, 311(3), 199-211; Grose & Afonso, (2013) *G-cubed*, 14(9), 3751-3778; Aderhold & Abercrombie (2016) *JGR* 121(5), 3462-3478; Inbal et al. (2016) *Science*, 354(6308), 88-92.

## 含水かんらん岩における極細粒延性剪断帯の構造岩石学：三波川帯権現越露頭の例

### Petrological and structural analyses of ultrafine-grained ductile shear zone in wet peridotite

#### -A case study in the Gongen outcrop in the Sanbagawa belt-

駒井美穂(1), 水上知行(1), 新井翔(1), 永治方敬(2), Wallis Simon(3) (1. 金沢大学, 2. 東北大学, 3. 東京大学)

剪断帯は地球の地殻と上部マントルにおいて大きなテクトニック変位を引き起こすために重要な構造である。沈み込み境界や海洋底デタッチメント断層の深部延長など、マントルに大きな変位を伴う境界を形成するためにはかんらん岩の弱化が必要である。岩石を構成する鉱物の細粒化は岩石強度を小さくし、剪断の局在化を促進する主要なメカニズムと考えられており、構成鉱物の粒径減少は露出した剪断帯で一般的に観察される。しかし、含水条件でのかんらん岩の細粒化を解析した研究例は少ない。

本研究では天然の 10 ミクロンオーダーの極細粒含水かんらん岩の構造解析を行い、含水条件での細粒化過程とレオロジーについて検討した。研究試料は西南日本三波川帯東赤石超マフィック岩体の極細粒剪断帯のダナイトで、100 ミクロンオーダーから 10 ミクロンオーダーへの再結晶を示す。変形の温度-圧力条件は共生鉱物組み合わせ(Chl 安定, Atg, Phl 不安定)と岩体の温度-圧力履歴から約 3.5GPa と 700°C である。EBSD マップ分析から、かんらん石の粒径、結晶内部方位差(MO)、結晶方位選択配向(CPO)を決定し、FE-SEM を用いて酸化デコレーションにより可視化した転位の微細構造観察を行った。かんらん石レオロジーの観点から微細構造観察を評価するために、この温度-圧力条件で差応力と粒径を軸にとった変形メカニズムマップを作成した。転位移動律速粒界すべり(DisGBS) - これは近年含水条件で決定された流動則である - を、このマップでは考慮している。

サンプル内のかんらん石粒子は coarse 粒子(mm スケール)、fine 粒子(100 $\mu$ m スケール)、ultrafine 粒子(10 $\mu$ m スケール)に分割できる。coarse 粒子は、a 軸と c 軸に平行な転位すべりを示唆する転位壁の発達と大きな MO により特徴づけられる。fine 粒子は大きな MO と高い転位密度(推定される差応力は 180~360MPa)を持っており、CPO は弱い。ultrafine 粒子の多くは小さな MO と低い転位密度をし、CPO は fine 粒子よりも弱い。coarse、fine、ultrafine 粒子の粒径と差応力見積もりはメカニズムマップ内でそれぞれ転位クリープ、DisGBS クリープ、DisGBS-拡散クリープ境界にプロットされる。

fine 粒子内部において、様々な方位をもつ転位壁の集合は亜粒を定義するセル構造を形成する。この転位壁は転位の少ないネオブラストを作る粒界に発達していくと考えられる。亜粒と再結晶ネオブラストのサイズは約 2 $\mu$ m である。この粒径に実験的に決定された粒径差応力計を適用すると fine 粒子よりも高い差応力(約 800MPa)に相当する。低転位密度の ultrafine 粒子の粒界が高転位密度の粒子に湾入する構造が見られ、ネオブラストから ultrafine 粒子への粒成長が示唆される。メカニズムマップより、fine 粒子の歪み速度は、先に 800°C で生じた 100 ミクロンオーダーの再結晶粒と同程度である。二つの再結晶粒子を対比し、等歪み速度での細粒化を含んだ変形プロセスを提案する。1mm スケールのかんらん石は 800°C で 100 ミクロンオーダーへ細粒化し、その後の温度低下によって岩石の変形強度は上昇する。一定の歪み速度を保つためにある応力を越えるまで高い応力が蓄積し、この条件下において数ミクロンスケールの再結晶粒が形成される。再結晶粒が増えると変形メカニズムが DisGBS クリープから拡散クリープ領域に遷移し、より低い応力で変形できるようになる。変形により高い応力が蓄積されなくなると再結晶は止まり、粒成長のプロセスが卓越して定常粒径まで成長すると考えられる。約 20 $\mu$ m という ultrafine 粒子の中央粒径は転位・拡散プロセスが競合する条件下における定常粒径であると解釈される。含水条件は転位と拡散過程の両方を促進し、転位壁や再結晶粒の形成に寄与していると考えられる。

インド洋での大陸分裂初期過程における大陸の引き延ばしと海底拡大  
**The continental extension and seafloor spreading during initial break up process in Indian Ocean**

羽入朋子\* (総研大)、野木義史 (極地研)、藤井昌和 (極地研)  
**Tomoko Hanyu (SOKENDAI), Yosifumi Nogi (NIPR), Masakazu Fujii (NIPR)**

南極プレートは海嶺に囲まれており、これらの海嶺は Gondwana 大陸分裂からの海底拡大によって形成された。Gondwana 大陸の分裂は過去約 2 億年の間では南半球における重要な地質学的イベントであり、南大洋における地球物理学的観測を用いた海底拡大史の解明は初期 Gondwana 大陸分裂の過程を明らかにするための鍵となるものである。しかしその詳細は未だ明らかにされておらず、特に地磁気異常データに関しては、南インド洋では地磁気縞模様を明らかにするための十分なデータが得られていない。Gondwana 初期分裂過程における海底拡大の詳細を明らかにする事を目的として、我々は南アフリカ沖 Natal Valley 及び Mozambique Ridge (21°S/27°E-37°S/39°E) と南極昭和基地沖 Cosmonauts Sea (63°S/34.5°E-70°S/45.5°E) での系統的な地磁気 3 成分観測および解析を行った。

Natal Valley 及び Mozambique Ridge はアフリカ-南アメリカ-南極間の分裂によって形成されたと考えられている。しかし、この海域の地殻がどのように発達したかについては未だ明らかになっていない。解析の結果、我々はこの海域の北側が引き延ばされた大陸地殻に玄武岩が貫入して形成された事を明らかにした。また、南 Natal Valley の東側に、新たに北東-南西の拡大方向を持つ M10-M0 の地磁気年代を同定した。Mozambique Ridge の南側は、北東-南西方向の海底拡大とホットスポットとの相互作用により形成されたと考えられる。観測された拡大方向は、この海域の南側が南アメリカ-アフリカ間の海底拡大により形成された事を示した。この海域全体は M0 頃には形成が終了しており、M0 以降に南アフリカ-南極間の海底拡大が開始したと推定される。

一方、Cosmonauts Sea は南極-スリランカ/インド/マダガスカル間の分裂によって形成されたと考えられている。しかし、この海域での地磁気年代線は粗い測線でのみ同定されているため、ここでの海底拡大史は未だ明らかになっていない。第 54 次日本南極地域観測隊 (JARE) を中心とした砕氷船「しらせ」航海による観測データをもとに、我々はこの海域で新たに、複数のセグメントからなる南東-北西方向の M10N-M3n までの地磁気年代を同定した。さらに、M1n-M0r までに拡大方向の変化が起こり、M0 以降は南南西-北北東方向の海底拡大になったと推定した。また、本研究の結果は、この海域に広い範囲で大陸海洋遷移帯が存在している可能性を示した。

どちらの海域も、M10 (133Ma) 頃に海底拡大が開始している。また、M0 (124Ma) に拡大方向や拡大速度の変化が起こっている。本発表では、地磁気年代 M10 (133Ma) と M0 (124Ma) に注目して、インド洋での海底拡大史について議論する。

## 海洋下部地殻中のかんらん石の蛇紋石化による弾性波速度低下と速度逆転の可能性について

阿部なつ江\*・廣瀬丈博（海洋研究開発機構）・  
多田井修（株式会社マリン・ワークジャパン）

**Natsue Abe, Takehiro Hirose (JAMSTEC), Osamu Tadai (Marine Works Japan Ltd.)**

海洋下部地殻は、これまでインド洋（Atlantis Bank: ODP Legs 118, 176 & 179, and IODP Exp. 360）や太平洋（Hess Deep: ODP 147, IODP 345: Gillis et al., 2014）および大西洋（Atlantis Massif: IODP exp. 304 & 305, 340T: Blackman et al., 2006, 2011）において60~80%という高い回収率で最大海底下1500mまでの試料が採取されている。試料は広義の斑れい岩類で、狭義の斑れい岩（Cpx+Pl）から非常にかんらん石（以下O1）に富む（>70 vol%）トロクトライトまで多様なモード組成を示し、平均的なO1モードは10%以上になる。またそのO1は、他の鉱物と比べて低温変質（蛇紋石化）率が高い傾向がある。

モード組成や変質程度に多様な変化が見られるこれらの斑れい岩コア試料は、その岩石物性（特にP波速度）に地域差が見られる。船上におけるコア試料（2 cm 角立方体）の弾性波速度計測値は、大西洋の試料は5.0~6.7 km/sを示しており、斑れい岩の平均的な弾性波速度として用いられる6.0~7.0 km/sや、インド洋において掘削された斑れい岩コア試料（Hole 735B; Dick et al., 1999）のそれ（6.0~7.3 km/s）よりも平均で約1 km/s遅い（図1）。船上計測・記載データを詳細に解析した結果、同じ斑れい岩でも、より初生的な全岩化学組成を持つO1モード量が多いが故に蛇紋石化率が高い試料が、弾性波速度が遅い傾向がある。この傾向は、予察的に行われた200MPaまでの加圧条件下での弾性波測定実験においても認められる。

一方、かんらん石を多く含む斑れい岩（トロクトライトなど）は、海洋下部地殻の最下部、モホ面に近い部分により多く存在していると考えられている。したがって、この観察結果から、十分に加水作用が進んだ（変質が進行した）海洋下部地殻は、その上部（浅部）よりも速度が低くなる可能性があり、海洋下部地殻中で下位（深部）で速度低下が見られる海域があることが予想される。

### 引用文献

- Blackman et al., (2011) Drilling constraints on lithospheric accretion and evolution at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge 30 N. *J. Geophys. Res.*, 116:B07103. doi:10.1029/2010JB007931
- Blackman et al. (2006) *Proc. IODP*, 304/305. doi:10.2204/iodp.proc.304305.2006
- Dick et al., *Proc. ODP, Init. Repts.*, 176: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1–314. doi:10.2973/odp.proc.ir.176.103.1999
- Gillis et al. (2014) Primitive layered gabbros from fast-spreading lower oceanic crust. *Nature*, 505, 204-207, doi:10.1038/nature12778

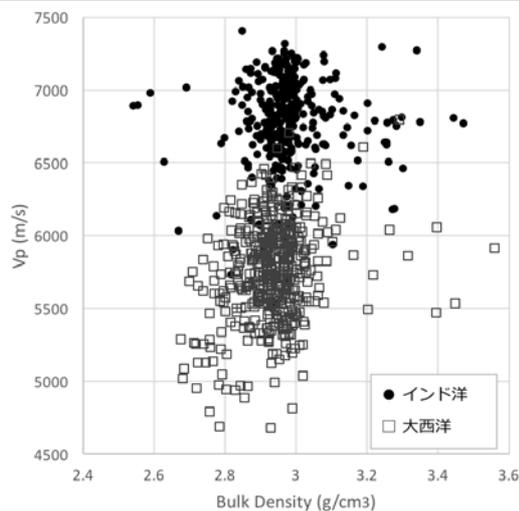


図1 インド洋と大西洋の掘削で得られた斑れい岩試料のP波速度と全岩密度の関係。大西洋の斑れい岩は、インド洋のものに比べて平均で約0.9km/s遅いことが分かる。

トランスフォーム断層における地磁気異常の要因の推定  
**Estimating sources of magnetic anomalies at transform faults**

古川優和\* (神戸大学)、藤井昌和 (国立極地研究所)、  
 島伸和 (神戸大学)、沖野郷子 (東京大学大気海洋研究所)  
**Yuka Furukawa (Kobe Univ.), Masakazu Fujii (National Institute of Polar  
 Research), Nobukazu Seama (Kobe Univ.), Kyoko Okino (AORI, UTokyo)**

地球内部の水循環におけるトランスフォーム断層の海水流入口としての役割を明らかにするためには、トランスフォーム断層の磁化構造が重要な鍵を握ると期待されている。地球内部に水が流入しマンツルの主要物質であるかんらん石と反応すると蛇紋石と磁鉄鉱が生成され、磁鉄鉱が残留磁化を獲得および誘導磁化を担うためである。本研究では、トランスフォーム断層で観測された地磁気異常から磁化構造を推定し、マンツル物質が蛇紋岩化した大きさを推定することでトランスフォーム断層からの水の流入の仕方を明らかにする。

対象とする研究地域は、インド洋中央海嶺の Maria Celeste トランスフォーム断層と Argo トランスフォーム断層である。これらのトランスフォーム断層は長さがそれぞれ 250km、100km の長い断層であり、年代差が最大約 7Ma であるため、より多くの海水が流入している可能性がある。これらの断層を対象とし、KH15-5 航海 (2016 年) において深海曳航調査システム Deep-tow に搭載されたプロトン磁力計とフラックスゲート型磁力計 (OBM) を使用して地磁気観測を行った。断層沿いの海嶺に近い部分 (海嶺の中央から約 30km) を海嶺に直行して横切るように、Maria Celeste トランスフォーム断層では南緯 17 度 37 分-南緯 18 度 01 分、Argo トランスフォーム断層では南緯 13 度 33 分-南緯 13 度 54 分に長さ約 50km の測線を設定した。これらの測線に沿って海底からの高度がほぼ一定 (約 800m) になるように Deep-tow を曳航した。

データ取得の際、プロトン磁力計のデータを一部取得できていない期間があったため、OBM データで補間した。OBM の機器特性などを除いてプロトン磁力計での観測値にフィットさせた値を用いた。解析に用いる地形データは、同航海においてマルチナロー音響測深器「SeaBeam2120」によって得られたデータを使用した。フォワード・インバージョン解析では、測線に沿った鉛直断面の 2 次元の磁化構造を仮定し、測線の直交方向には同様の構造が無限に伸びているものとした。測線方向のデータ間隔で磁化層を鉛直に分割し、磁化層の上面・下面に囲まれたブロックの各面からの磁場及び全てのブロックからの寄与を足し合わせ、観測高度で得られる地磁気異常を計算した。

観測地形と曳航高度データを用いたフォワード解析により、理論磁気異常を計算した。地磁気異常に対する地形のみによる効果を見るために、磁化層の上面は観測地形とし、厚さ一定 (1km)、磁化強度一定 (5A/m) と仮定して計算した。観測磁気異常からインバージョンで磁化構造を求め、その結果から再度磁化構造を仮定して計算値を観測値に近づけた。地形のみによる効果を計算した結果はほとんど観測値を説明できず、特に地形の起伏が大きい所では計算値と観測値の差が大きいため、地形以外からの寄与があると考えられる。今後、蛇紋岩化の影響を推定する。

## The magnetic signature of ultramafic-hosted hydrothermal systems

Florent Sztikar (JAMSTEC)

While the magnetic response of basalt-hosted hydrothermal systems is well known, that of ultramafic-hosted hydrothermal sites (UMHS) remains comparatively poorly documented. Here we present the magnetic signature of three UMHS investigated to date on the Mid-Atlantic Ridge, i.e. sites Rainbow, Lost City and Logachev. Two types magnetic signatures are observed. Sites Rainbow and Lost City are both characterized by a variably strong positive reduced-to-the-pole magnetic anomaly, i.e. a positive magnetization contrast. Conversely, site Logachev does not exhibit any clear magnetic signature.

Rock-magnetic measurements on samples from site Rainbow reveal a strong magnetization (~30 A/m adding induced and remanent contributions) borne by sulfide-impregnated serpentinites; the magnetic carrier being magnetite. This observation can be explained by three non-exclusive processes: (1) higher temperature serpentinization at the site resulting in the formation of more abundant / more strongly magnetized magnetite; (2) the reducing hydrothermal fluid protecting magnetite at the site from the oxidation, which otherwise affects magnetite in contact with seawater; and (3) the formation of primary (hydrothermal) magnetite.

The positive magnetic anomaly associated with Lost City is characterized by considerably weaker amplitude, underlining the role of temperature in the accumulation of magnetite within the site stockwork or plumbing system. Indeed, whereas high temperature promotes significant production and partitioning of iron into magnetite, low temperature favors iron partitioning into various alteration phases, resulting in a magnetite-poor rock.

Hydrothermal site Logachev is much smaller (of the order of 10 m) than the previous ones (several 100 m). This site, known as "smoking crater", is episodically affected by explosions. The lack of any significant magnetic signature is explained by its small size and the random orientation of the (possibly magnetized) blocks spread out from the explosions.

While basalt-hosted sites are characterized by a lack of magnetization, UMHS are characterized by a positive magnetization contrast, ranging from very strong (at site Rainbow) to negligible (at site Logachev) as a function of parameters such as the temperature, the size of the deposit and the mode of discharge.

岩石磁気と磁気異常観測で見る海洋リソスフェアの蛇紋岩化  
**Serpentinization of oceanic lithosphere:**  
**Insights from rock magnetism and marine magnetic anomalies**

藤井 昌和 (極地研/総研大)

Masakazu FUJII (National Institute of Polar Research/SOKENDAI)

Exposures of ultramafic mantle rocks are extensively distributed within slow spreading environments, where alteration processes significantly influence submarine ecosystems as well as lithospheric properties. In order to reveal the role of serpentinization in the Earth oceanic lithosphere dynamics, I utilize the rock magnetism and magnetic field measurement techniques because detection of magnetic signal related to crustal iron behavior is powerful for characterizing serpentinization in nano- to thousands kilo-meters spatial scale. In this presentation, I introduce our observation of a ultramafic hydrothermal site and newly proposed three-stage model for magnetic mineral formation in ultramafic hydrothermal systems.

Our scientific team investigated the Yokoniwa hydrothermal field (YHF) in the Central Indian Ridge. The YHF is an inactive ultramafic hydrothermal vent field developed at a non-transform offset massif. Dead chimneys are widely observed along with a very weak venting of low-temperature fluids, indicating that the hydrothermal activity is almost finished. We deployed the submersible *SHINKAI 6500* and autonomous underwater vehicle *r2D4* in order to obtain high-resolution vector magnetic data and seafloor rocks during YK09-13-leg2, KH10-6, YK13-03, and YK13-03 cruises. The distribution of crustal magnetization from the magnetic anomaly revealed that the YHF is associated with enhanced magnetization, which also occurs at the ultramafic Rainbow and Ashadze-1 sites of the Mid-Atlantic Ridge. The rock magnetic analysis on samples including basalt, dolerite, gabbro, serpentinized peridotite, and sulfide show that only highly serpentinized peridotite carries high magnetic susceptibility and NRM intensity that can explain the high magnetization of the YHF. These observations reflect abundant and strongly magnetized magnetite grains within the highly serpentinized peridotite.

Based on comparisons of Yokoniwa with Rainbow, and Ashadze I propose the following three-stage model for magnetic mineral formation in ultramafic hydrothermal fields: During the initial stage of an ultramafic hydrothermal system, magnetite forms with serpentine and  $H_2$  through hydrothermal alteration of peridotites, and pyrrhotite mineralization occurs under reductive conditions. Once the serpentinization reaction has progressed, the amount of magnetite creation increases dramatically, strengthening the magnetization. Pyrrhotite creation continues as long as the  $H_2$  content of the hydrothermal fluids continues to create a reducing environment in this developing stage. Hot and reduced hydrothermal fluids maintain the stability of magnetite and pyrrhotite with no low-temperature oxidation. Finally, once the reaction of the ultramafic rock ceases,  $H_2$  is no longer formed in the system. The conditions then become oxidative, which allows pyrrhotite to be converted into nonmagnetic iron sulfide or oxide, reducing considerably their magnetization considerably.

[References] Fujii et al., 2016 EPSL; Fujii et al., 2016 G-cubed; Sztikar et al., 2014 Geology

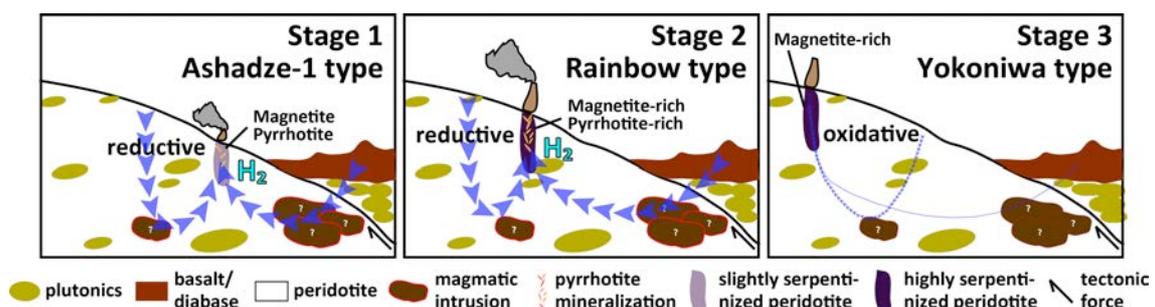


Figure. Three-stages model of magnetic mineral formation in ultramafic hydrothermal systems.

北極海ガッケル海嶺から得られた変形したかんらん岩の微細構造解析  
**Microstructural analysis of deformed peridotites from the Gakkel Ridge in the Arctic Ocean**

針金由美子\* (産総研)、森下知晃 (金沢大)、Jonathan E. Snow (Univ. Houston)  
**Yumiko Harigane (GSJ, AIST), Tomoaki Morishita (Kanazawa Univ.), Jonathan E. Snow (Univ. Houston)**

北極海ガッケル海嶺は北アメリカプレートとユーラシアプレートを分ける発散プレート境界であり、その拡大速度は超低速(6-13 mm/yr in full spreading rate)である(D'Errico et al., 2016 ほか)。ガッケル海嶺は大きく3つのテクトニックセグメント、Western Volcanic Zone, Sparsely Magmatic Zone (SMZ)と Eastern Volcanic Zone に分類されている(Michael et al., 2003)。この SMZ は他のセグメントに比べてかんらん岩が多く採取されており、地球化学的なアプローチによるマントル溶融過程や不均質性の議論(例えば Hellebrand et al., 2002; D'Errico et al., 2016 など)が活発である。しかし、こうしたかんらん岩が海底面に露出する過程は不明である。そこで、本研究は SMZ におけるかんらん岩の構造発達過程を考察するため、変形したかんらん岩に注目して、主要鉱物の微細構造解析と化学組成分析を行った。

本研究は、R/V Polarstern による2つの調査航海(2001年, the international Arctic Mid-Ocean Ridge Expedition と 2004年, ARK XX-2)のドレッジ2地点(PS59-235, PS66-238)から得られた14試料の変形したかんらん岩を微細構造解析に用いた。肉眼・顕微鏡観察において、プロトグラニューラー～伸長状組織を示すかんらん岩(2試料)、かんらん岩マイロナイト(5試料)、かんらん岩ウルトラマイロナイト(2試料)、かんらん岩カタクレサイトおよび角礫岩(4試料)、蛇紋岩(1試料)を確認した。

プロトグラニューラー～伸長状組織を示すかんらん岩は蛇紋岩化作用を被っておらず、新鮮であった。またプロトグラニューラー組織をもつかんらん岩は斜長石を含んでいた。それ以外のかんらん岩試料は蛇紋岩化作用を受けており、試料表面には Mn 酸化物による被覆が見られたほか、炭酸塩鉱物が晶出していた。そして、かんらん岩カタクレサイト・角礫岩はかんらん岩マイロナイトやウルトラマイロナイトから構成されるクラストと、炭酸塩鉱物や蛇紋石などからなる基質が確認された。

プロトグラニューラー～伸長状組織を示すかんらん岩、かんらん岩マイロナイトとかんらん岩カタクレサイトのクラストについて、主要鉱物の主要元素化学組成と結晶方位定向配列を産総研地質調査総合センター共同利用実験室の EPMA と SEM-EBSD システムを用いて分析した。主要鉱物化学組成分析の結果、スピネルの Cr# は 13 から 39 と幅広い組成範囲を示した。プロトグラニューラー～伸長状組織を示すかんらん岩は主に [100] と [001] が面構造上に帯状に分布し、[010] が面構造に垂直な方向に集中するパターンを示した。かんらん岩マイロナイト 6 試料から、かんらん石の [100] が線構造に平行で、[001] が面構造に垂直な方向に集中する [100](001) パターンを示した。講演ではかんらん岩の詳細な微細構造観察、化学組成分析と結晶方位解析の結果について紹介する。

しんかい湧水域で発達するチムニーの微生物群集組成とその多様性  
**Microbial community compositions and its variation in chimneys at the Shinkai  
 Seep Field**

奥村知世\* (高知大)、高井研、平井美穂、布浦拓郎、高木善弘 (JAMSTEC)、  
 砂村倫成 (東京大)、小原泰彦 (海上保安庁・JAMSTEC)  
**Tomoyo Okumura\* (Kochi Univ.), Ken Takai, Miho Hirai, Takuro Nunoura,  
 Yoshihiro Takaki (JAMSTEC), Michinari Sunamura (Tokyo Univ.), Yasuhiko  
 Ohara (Hydrographic and Oceanographic Dept. of Japan/JAMSTEC)**

蛇紋岩化反応という水・岩石相互作用を発端とする化学合成生態系は、初期地球や地球外惑星の生命圏のアナログとして近年注目されている。南部マリアナ前弧、陸側斜面の水深約 5700 m で 2010 年に発見されたしんかい湧水域は (Ohara et al., 2012), 既知の大西洋中央海嶺の Lost City 熱水域や北部マリアナ海溝前弧の蛇紋岩海山群 (コンカル・南チャモロ海山等), そしてニューカレドニアの Prony Bay 熱水域とは異なるテクトニックセッティングかつ、世界最深の蛇紋岩化反応に関連した湧水サイトである。これまでに YK10-12・YK13-08・YK14-13・YK15-11・KR-16-14 航海で合計 5 地点のチムニー密集サイトを発見し、分布するチムニーの構造や分布する巻貝・多毛類等の動物群集は、上述のその他のサイトでは見られない特徴を有していたことが明らかとなった (Okumura et al., 2016)。しかし、しんかい湧水域では、湧水が目視や温度・化学センサーの異常で確認できないため、このサイトの生態系を育む地球化学的条件は直接計測・測定できていない。そこで本研究では、この生態系を支えると考えられている化学合成微生物に着目し、チムニーに分布する微生物の群集組成を調べることで、湧水域の化学条件を推定することを目的とした。

先行研究では、チムニーの鉱物組成や組織・安定同位体組成からチムニーをタイプ分けし、その形成条件を以下のように推測している。**タイプ 1** : ブルーサイトに富む白色のチムニー。微生物マットが表面に発達し、石化された微生物細胞が多く含まれる。アルカリ性の湧水が比較的活発に湧き出す中で素早く成長すると考えられる。**タイプ 2** : より炭酸カルシウムを多く含む薄茶色のチムニー。巻貝や多毛類が表面に密集している。湧出活動がタイプ 1 より穏やかで、比較的ゆっくり成長する (Okumura et al., 2016)。この 2 タイプのチムニーに対して、原核生物の SSU rRNA 遺伝子タグシーケンス配列の解析を行った結果、タイプ 1 のチムニーでは、好アルカリ性や硫黄酸化細菌の系統が多く認められ、タイプ 2 のチムニーでは、好氣的メタン酸化細菌や、甲殻類・貝類に共生する細菌と近縁の系統が多く認められた。また、蛇紋岩化反応に関連する湧水域では、水素資化メタン生成古細菌や嫌氣的メタン酸化古細菌などが一次生産者として重要視されているが、しんかい湧水域のチムニーでは、両タイプともにごくわずかに検出される程度であった。しんかい湧水域では、湧水活動の強弱によって異なる微化学環境がチムニータイプ毎に成立し、それに応じて化学合成微生物や動物の分布の違いが生まれていると考えられる。この結果は、蛇紋岩化反応に関連する湧水が育む化学合成生態系の多様性の理解をより一層深めると期待できる。