

南西インド洋海嶺アトランティス海台に見られる超低速拡大軸の 火成活動と「地殻・マントル境界」

松 本 剛¹⁾ 宮 下 純 夫²⁾ 荒 井 章 司³⁾
森 下 知 晃³⁾ 前 田 仁 一 郎⁴⁾ 熊 谷 英 憲⁵⁾
大 友 幸 子⁶⁾ DICK, Henry J.B.⁷⁾

Magmatism and "Crust-mantle Boundary" on the Ultra-slow Spreading Ridge as Observed in Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge

Takeshi MATSUMOTO¹⁾, Sumio MIYASHITA²⁾, Shoji ARAI³⁾,
Tomoaki MORISHITA³⁾, Jin-ichiro MAEDA⁴⁾, Hidenori KUMAGAI⁵⁾,
Yukiko OHTOMO⁶⁾ and Henry J. B. DICK⁷⁾

Abstract

To characterise the crust-mantle boundary (petrological Moho) and to find evidence of ophiolite model, we investigated the lithology and the development process of the oceanic crust. We carried out geological and geophysical studies of Atlantis Bank core complex located at the eastern margin of the Atlantis-II active transform in the Southwest Indian Ridge (SWIR) using deep sea submersibles and remotely operated vehicles. Unaltered lower crust and uppermost mantle rocks were observed at the southwestern slope of Atlantis Bank. The lower crust of this part of Atlantis Bank is similar to the ophiolite exposed ashore. On the other hand, a large number of dike intrusions into gabbroic massifs were observed at the eastern wall and at the southern slope of the bank. This corresponds to the dike-gabbro transition in the ophiolite model. Dike intrusions were also observed in the mantle peridotite domains. This may, however, suggest melt intrusions into the bank near the spreading axis posterior to the mantle peridotite that was dragged out along the detachment faults, or may suggest possible horizontal melt intrusion from the segment centre to the segment edge characterised by a thin plutonic layer. The northern ridge-transform intersection RTI of the

¹⁾ 日本海洋事業株式会社。現、琉球大学理学部

²⁾ 新潟大学理学部地質科学教室

³⁾ 金沢大学理学部地球学教室

⁴⁾ 北海道大学大学院理学研究科

⁵⁾ 海洋科学技術センター/ウッズホール海洋研究所

⁶⁾ 山形大学教育学部

⁷⁾ ウッズホール海洋研究所

¹⁾ Nippon Marine Enterprises, Ltd. (Present address: Faculty of Science, University of the Ryukyus)

²⁾ Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

³⁾ Department of Earth Sciences, Kanazawa University

⁴⁾ Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

⁵⁾ Japan Marine Science and Technology Center / Woods Hole Oceanographic Institution

⁶⁾ Laboratory of Earth Science, Faculty of Education, Yamagata University

⁷⁾ Woods Hole Oceanographic Institution

Atlantis-II active transform presents an L-shaped nodal basin, while the southern RTI presents a V-shaped one. The difference between northern and southern RTI types suggests differences in the structure and basement rock types. A fossil transform fault and RTI relics at the northern side of the spreading axis west of the Atlantis-II active transform were observed, suggesting a sudden change of the spreading direction in SWIR from 20 Ma.

Key words : Atlantis Bank, ultra-slow spreading ridge, crust-mantle boundary

キーワード : アトランティス海台, 超低速拡大海嶺, 地殻-マントル境界

I. 序

中央海嶺でのマグマ活動, またその結果生成される海洋地殻の実態・形成過程を知る上で, 海洋底を構成する岩石に関する情報は不可欠である。しかし, 海底下深部を構成する岩石をそのままの状態で入手することは困難であるため, 海洋地殻, あるいは海洋域での地殻・マントル境界に関しては不明な点が多い。アクセスの困難さを補完する手段として, (1) マントルまで届く掘削, (2) 海洋底のアナログと目されるオフィオライトの調査, および (3) 海洋底で深部岩石が露出している場所の調査, の3つが考えられる。しかしながら, これらの手段はいずれも問題点を抱えており, 海洋地殻の実態を完全に解明する手段としては必ずしも万全ではない。(1) は技術的な困難が伴い, また実現しても面的な情報を得ることは困難である。(2) はオフィオライトの起源に関して議論があり, これが直ちに海洋地殻を代表するものという保証はない。(3) では露出している場所がほとんど断裂帯に限られ, その変形の影響, あるいは海嶺セグメント端に当たるといった問題があり, これも通常の海洋底の岩石の代表としては必ずしも万全ではない。しかし, このような問題点はあるものの, (3) の手段は, 中央海嶺で形成された岩石を直接観察することが可能であることから, その重要性は高い。本稿では, この (3) の手段に着目し, 深部地殻を構成するとされる岩石の露出する場所として知られている南西インド洋海嶺 (SWIR) 上のアトランティス海台 (Atlantis Bank) での調査結果を報告する。

SWIR は, 14 km/My の拡大速度を持つ超低速拡大海嶺である (Patriat *et al.*, 1997)。アトランティス-II 断裂帯は, SWIR 上の 57°E に位置する南北方向に約 200 km の拡大軸オフセットであり, 比高 6 km のトランスフォーム谷をなしている。形成された時期は約 56 Ma とされており (Patriat and Segoufin, 1988), 従って, ずれは平均約 3.6 km/My で成長していることになる。

アトランティス海台は, SWIR 拡大軸を分断するアトランティス-II 断裂帯の東側に位置しており, 13 Ma から 9.5 Ma の期間に形成された海洋地殻から構成されている (Dick *et al.*, 1991)。ODP (Ocean Drilling Program) の Leg 118 では, この海台の頂部平坦面 (水深 700 m) の西端, トランスフォーム断層から東に 18 km の距離のところで, Hole 735B が設けられ, 500 m の孔が掘削された。また, Leg 176 では同じ掘削孔で 1508 m まで掘り進められ, これらを通じてことごとくはんれい岩から成る試料が得られている (Dick *et al.*, 1991, 1999)。さらに, 1998 年の James Clark Ross/Ropos 調査 (MacLeod *et al.*, 1998), 多くのドレッジ試料によれば, 海台のほぼ全域からははんれい岩が採取され, 枕状溶岩など玄武岩質の岩石は海台北部のごく一部に限られている。また, 西側 (トランスフォーム断層側) 斜面の水深 4000 m 付近より, 場所により水深 2000 m 地点に至るまでマントルかんらん岩が得られ, さらには海台北部の水深 2000 m 以浅で石灰岩が得られるなど, 海台全体の地質構造を決定する上で重要な成果が得られている (Dick, 未発表資料)。

1998 年 10 ~ 11 月にかけての「よこすか」「し

んかい 6500」による MODE '98 Leg 4 航海 (Cruise ID=YK98-08), 2000 年 9 月の「かいれい」「かいこう」MODE 2000 航海 (Cruise ID=YK00-06) では, 潜航調査と併せてアトランティス-II 断裂帯とその東隣のノバラ断裂帯 (58.5° E) との間の拡大軸セグメントを中心とした地球物理マッピングが行われた (Arai *et al.*, 2000; Kinoshita *et al.*, 2001)。アトランティス-II 断裂帯とノバラ断裂帯との間には 2 個の拡大軸サブセグメントがあり (Cannat *et al.* (1999) によれば西から 19, 18. Hosford, *et al.* (2003) によれば西から AN-1, AN-2), アトランティス海台はそのうち西側のセグメントの最西端で形成された core complex¹⁾ である。併せて, これらセグメントの拡大速度が非対称であり, 北に 5.5 km/My, 南に 8.5 km/My であることが, 詳細な地磁気測定の結果明らかとなった (Hosford *et al.*, 2003)。このような条件下で形成され, 拡大軸セグメント・トランスフォーム断層による広域応力場の影響を受けつつ発達して来たアトランティス海台では, Hole 735B のはんれい岩の断面と併せて, マントルかんらん岩, 火山岩も共に産出している。このため, ここは海洋地殻・最上部マントルの層序について提唱されているいわゆる「オフィオライトモデル」(Nicolas, 1989) の普遍性の検証, 特に, 超低速拡大の環境で形成された海洋地殻に対するモデルの適否を検証することのできる場でもある。併せて, マントルかんらん岩とはんれい岩の詳細な分布を求めることによって, 岩石学的な意味でのモホ面 (地殻・上部マントル境界) の実体を解明するための格好のフィールドでもある。

海洋科学技術センターの研究船・潜水調査船・無人探査機を用いた上記 2 行動に加えて, 2002 年 1 月に実施された「よこすか」「しんかい 6500」による ABCDE 航海 (Cruise ID=YK01-14) では, アトランティス海台での「その場観察」と可能な限り多くの「その場試料採取」によって上記の問題の解決を目指した。また併せて, 当該調査海域に見られる火成活動の活発なセグメントとそうでない (マントルかんらん岩類の露出する) セグメントの混在の実態とその成因, 存続性, セグメン

ト間の相互作用とそれらの原動力, 大規模なトランスフォーム断層の形成過程とその力学的性質, これらの結果によるアトランティス海台の形成・隆起・沈降・進化史の解明を目指した (Matsumoto *et al.*, 2002)。

II. 地形調査

海洋科学技術センターの船舶による 3 行動では, マダガスカル沖 SWIR アトランティス-II 断裂帯およびその周辺において, 潜航調査終了後の夜間および潜水船・無人探査機の整備日に, マルチビーム型音響測深機による海底地形調査をはじめとする航走地球物理探査を行った。海底地形調査に関しては, 1998 年の MODE '98 Leg4 では HS-10 測深機を, またその後の 2 行動については, SEA-BEAM 2100 型装置を用いた。図 1 はその結果を集大成したアトランティス-II 断裂帯周辺の海底地形図である。アトランティス海台に露出する海洋地殻の形成された年代 (13–9.5 Ma) を挟む過去から現在に至るまでのマグマ活動・テクトニクスの活動史に基づく考察を行うため, 拡大軸の北側約 150 km, 南側約 200 km をカバーする地域のマッピングが完成した。すなわち, 拡大軸の北側・南側について, それぞれ過去 27 Ma および 24 Ma から現在に至る構造発達史を含むデータが得られたことになる。海域全体の測線間隔は, 水深に応じて 8.5 分 (断裂帯域) から 4 分 (アトランティス海台上) へと適宜変化させた。広域調査の場合は南北測線としたが, 海台上調査時は, 主方向の微細構造を逃さないため, 南北方向から斜交する方向の測線を設けた。トランスフォーム域については, 1987 年に既に地形マッピングが行われていた (RC2709 航海: Dick *et al.*, 1991) が, GPS 導入による測位精度向上, 測深機の性能向上後であることを踏まえて, 再度の測深調査を行った。

1) アトランティス-II ~ ノバラ断裂帯間のセグメント構造

最も顕著な特徴は, トランスフォーム断層の南北両延長部の非活動的な断裂帯の地形のトレンドが湾曲し, トランスフォーム断層が南北方向を向

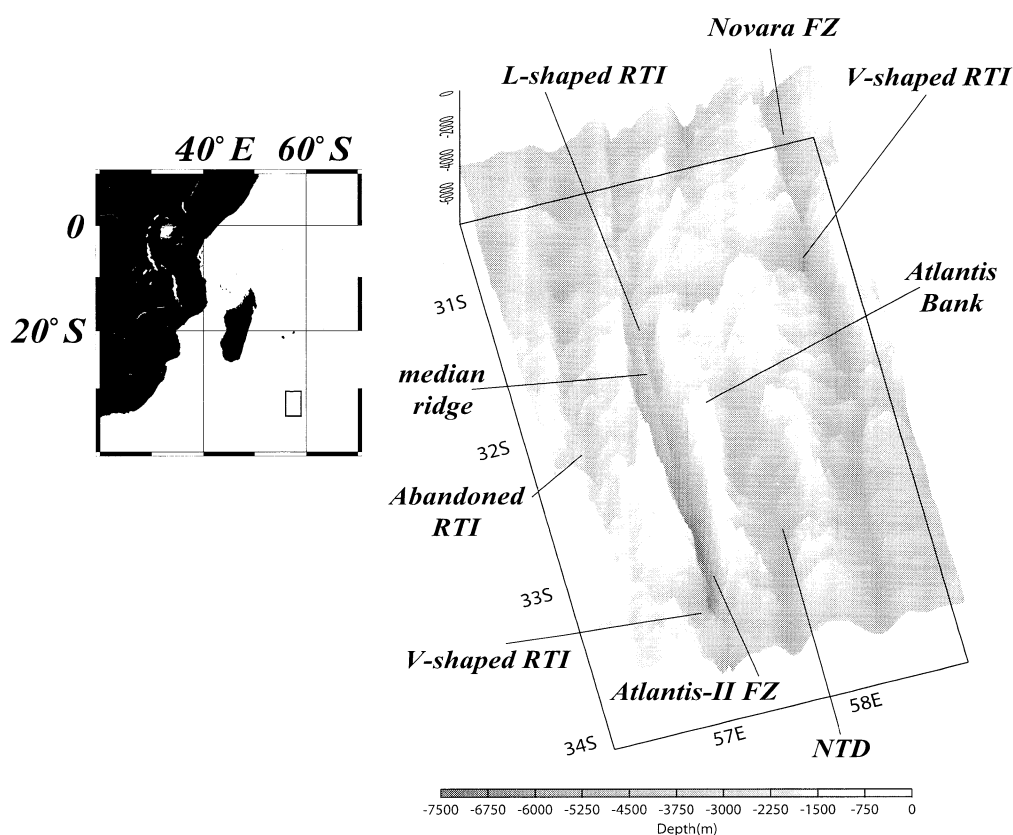


図 1 南西インド洋海嶺アトランティス-II～ノバラ断裂帯にかけてのセグメントの精密海底地形図。
MODE'98 Leg4, MODE 2000, ABCDE の 3 航海での測深調査結果をまとめたもの。

Fig. 1 Index map of the study area and 3-D topographic map of the area between Atlantis-II and Novara fracture zones on the Southwest Indian Ridge.

The 3-D image is based on the swath bathymetric survey by MODE'98 Leg4 (R/V YOKOSUKA), MODE 2000 (R/V KAIREI), and ABCDE (R/V YOKOSUKA) cruises.

いているのに対して、南北両延長部は $N10^{\circ}E$ を向いていることである。トランスフォーム軸のこのような回転は、20–17 Ma に SWIR の拡大の向きが約 10 度反時計回りに回転した変化に伴うものである (Patriat and Segoufin, 1988)。

海嶺とトランスフォーム断層との結節点 (Ridge-transform intersection, RTI) の形状の特徴として、南側が V 字型の結節盆地 (nodal basin) を構成するのに対して、北側は L 字型の結節盆地をなす。トランスフォーム断層内には、 $32^{\circ}45'S$ より北に向かって、明瞭な小海嶺 (median tectonic ridge) が見られる。トランスフォーム断

層は、南側 RTI から北側 RTI に向かって幅が広くなることから、張力場によりプルアパート海盆が形成され、またそれに伴う貫入が起こっていることが推定される。

アトランティス-II 断裂帯～ノバラ断裂帯間のセグメント AN-1 と AN-2 の境界は非トランスフォーム性のずれ (non-transform discontinuity, NTD) を形成している (Hosford *et al.*, 2003)。拡大軸を挟む $31^{\circ}00'S$ から $32^{\circ}30'S$ の間では AN-1 側に比べて AN-2 側の山体の体積が大きく、また AN-2 側内部において、その南側と北側では急に小さくなっていることから、この時期に相当す

る 9 Ma に AN-2 側セグメントで拡大軸でのマグマ活動が急に活発化したことを示唆している。一方、アトランティス海台を含む AN-1 により形成された古内縁隆起体 (Inside Corner High: ICH) 群については、山体の東西方向の幅は大きくは変化していない。最大幅を示すところはアトランティス海台の北半分であり、幅は約 30 km である。

トランスフォーム断層の西側のセグメント域に、活動を停止したトランスフォーム断層痕が $32^{\circ} 40' S$ 付近、 $56^{\circ} 15' E$ – $56^{\circ} 30' E$ 間に確認された。この断層全体の方向性は $N10^{\circ} E$ であり、トランスフォーム断層の延長部が示す方向性と一致しており、これは SWIR の拡大の向きが 15–20 Ma に変化する前のトランスフォーム断層と推定される。 $32^{\circ} 40' S$ 、 $56^{\circ} 15' E$ にある小海盆は、地形の形態から活動を停止した古 RTI であると見られる。従って、古拡大軸がこの小海盆の西に位置していたことになる。古海嶺軸に平行な構造を伴う古 ICH が古トランスフォーム断層の西側に見られる。古 RTI からは南に向かって拡大軸まで延びる NTD があり、その方向性はトランスフォーム断層と平行である。

2) アトランティス海台の地形の特徴

ABCDE 行動中海況の良好な日を選んで、SEA-BEAM 2100 型測深機によるアトランティス海台の地形の精査を行い、精密海底地形図を完成させた。図 2 はその結果で、50 m 格子間隔データに基づくアトランティス海台の地形図である。

海台の東西幅は $32^{\circ} 45' S$ を境に異なっており、これより北側では約 30 km、南側では約 15 km となっている。735B 地点を含む頂部平坦面は北側に位置し、最浅部の水深は約 700 m である。

図 2 は、海台を分断する断層系や崩落痕の分布を明らかにしている。海台を完全に断ち切るほぼ東西方向の (拡大軸に平行な) 剥離断層が海台の北端部と南端部 ($32^{\circ} 32'–37' S$ 、 $32^{\circ} 52'–55' S$) に分布している。一方において、拡大軸に直交する方向 (トランスフォーム断層に平行な方向) の正断層は海台の東側斜面に限られ、水深 1000 m・2500 m 付近に各 1 本が発達している。これらの断

層は、海台北端・南端部に走る東西方向の剥離断層によって切られてはならず、剥離断層の発達後に形成されたと推定される。

海台の西側斜面には多数の海底表面の崩落痕が示された。特に、 $32^{\circ} 50' S$ – $32^{\circ} 40' S$ に当たる頂部平坦面西側斜面で、水平規模 2.5 ~ 5 km 程度の「円形劇場」型崩落地形計 5 個所が南北に連なっている。また、トランスフォーム断層に接する縁でも多数の崩落地形が海台全体にわたって分布しているが、特に海台北西部の斜面については、 $N60^{\circ}–70^{\circ} E$ 方向の直線的な急崖が、また海台南西部の斜面については、 $N120^{\circ} E$ 方向の直線的な急崖がそれぞれ認められ、これらは断層崖に沿って発達した崩落痕と解釈される。

さらに、拡大軸に平行な火山性の列が海台の東側 (アトランティス-II・ノバラ両断列帯間の NTD の側) の $32^{\circ} 45' S$ 以北に多く分布していて、特に海台北端部では海台に乗り上げていることを示している。これらの列は、拡大軸セグメント AN-1 での火成活動により形成されたものが海底拡大によって南方に移動したものと見られる。一方、 $32^{\circ} 45' S$ より南側では、海台の南側にはその様な小海嶺の列は見られず、水深約 4600 m の平坦面となっている。このことから、海台形成時期の間に拡大軸セグメントでの火成活動が急変し、マグマの枯渇した状態から活発なマグマ活動へと変化したことが示唆される。地磁気異常 (Hosford *et al.*, 2003) により推定されるこの急変時の年代は約 12 Ma である。この場所は、アトランティス海台の東西幅が急変する場所と一致している。

III. アトランティス海台から採取された岩石試料とアトランティス海台の地質構造

図 3 (a-d) は、アトランティス海台でこれまでに行われた計 20 回の「しんかい 6500」および 3 回の「かいこう」潜航によって得られた岩石試料の分布を示す。分類は、volcanics (玄武岩・ドレライトなど)、oxide gabbros (oxide olivine gabbro を含む)、olivine gabbros (gabbro などを含む)、ultramafics (マントルかんらん岩、蛇紋岩化したものを含む) の様に簡略化して示した。

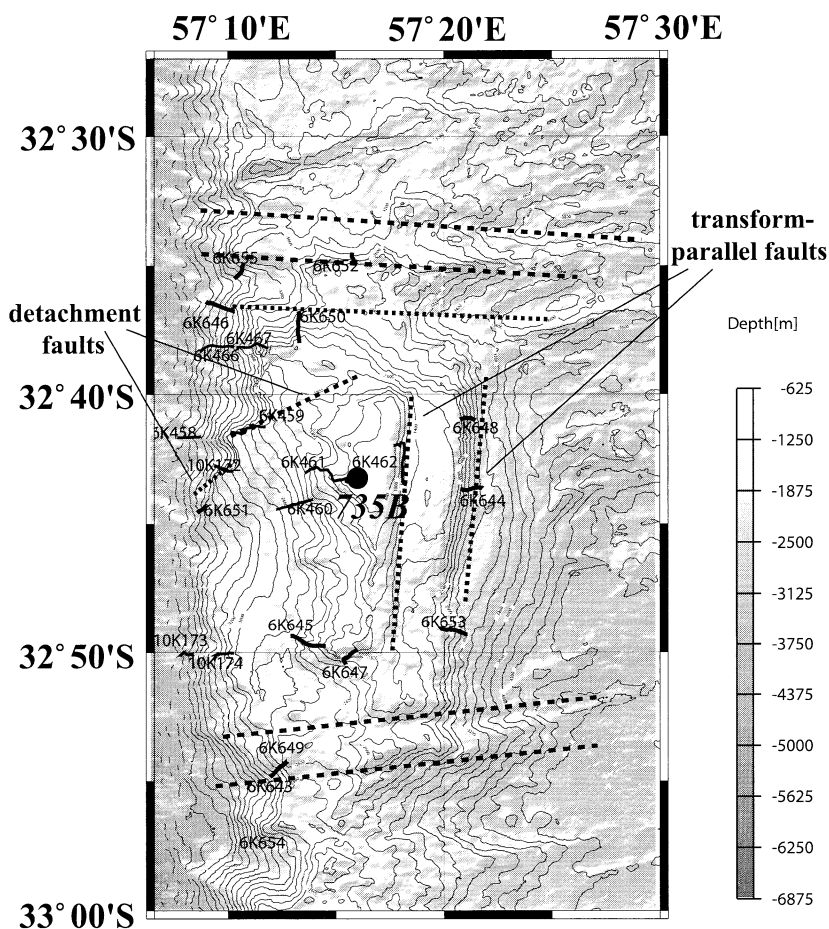


図 2 アトランティス海台の精密海底地形図。

ABCDE 航海により得られた測深調査結果に基づく。潜航調査航跡，断層系を記入。
潜航番号 458 - 467 は MODE'98 Leg4 「しんかい 6500」潜航，潜航番号 172 - 174 は MODE 2000 「かいこう」潜航，潜航番号 643-655 は ABCDE 「しんかい 6500」潜航。

Fig. 2 Detailed topographic map of Atlantis Bank, based on the swath bathymetric survey by ABCDE (R/V YOKOSUKA) cruise, overlaid by major faults and dive tracks.
#458 - 467 : SHINKAI 6500 MODE'98 Leg4, #172 - 174 : KAIKO MODE 2000, #643-655: SHINKAI 6500 ABCDE.

以下，潜航番号を引用する際には，#…の様に表記する。潜航番号 #458 ~ #467 (ただし #463 ~ #465 の 3 潜航を除く) は 1998 年 MODE '98 Leg4 航海における「しんかい 6500」潜航，潜航番号 #172 ~ #174 は 2000 年 MODE 2000 航海における「かいこう」潜航，潜航番号 #643 ~ #655 は 2002 年 ABCDE 航海における「しんかい 6500」潜航に当たる。

1) 南西側斜面 (#173, #174, #643, #649) (図 3c)

南西側斜面のうち，剥離断層などで分断されていない急斜面の地点では地殻・上部マントル境界が露出している可能性があり，それを目指して計 4 潜航を行った。

#173 では 5000 ~ 4500 m 付近を，#174 ではその上方の 3700 ~ 2950 m 付近の斜面の潜航調査

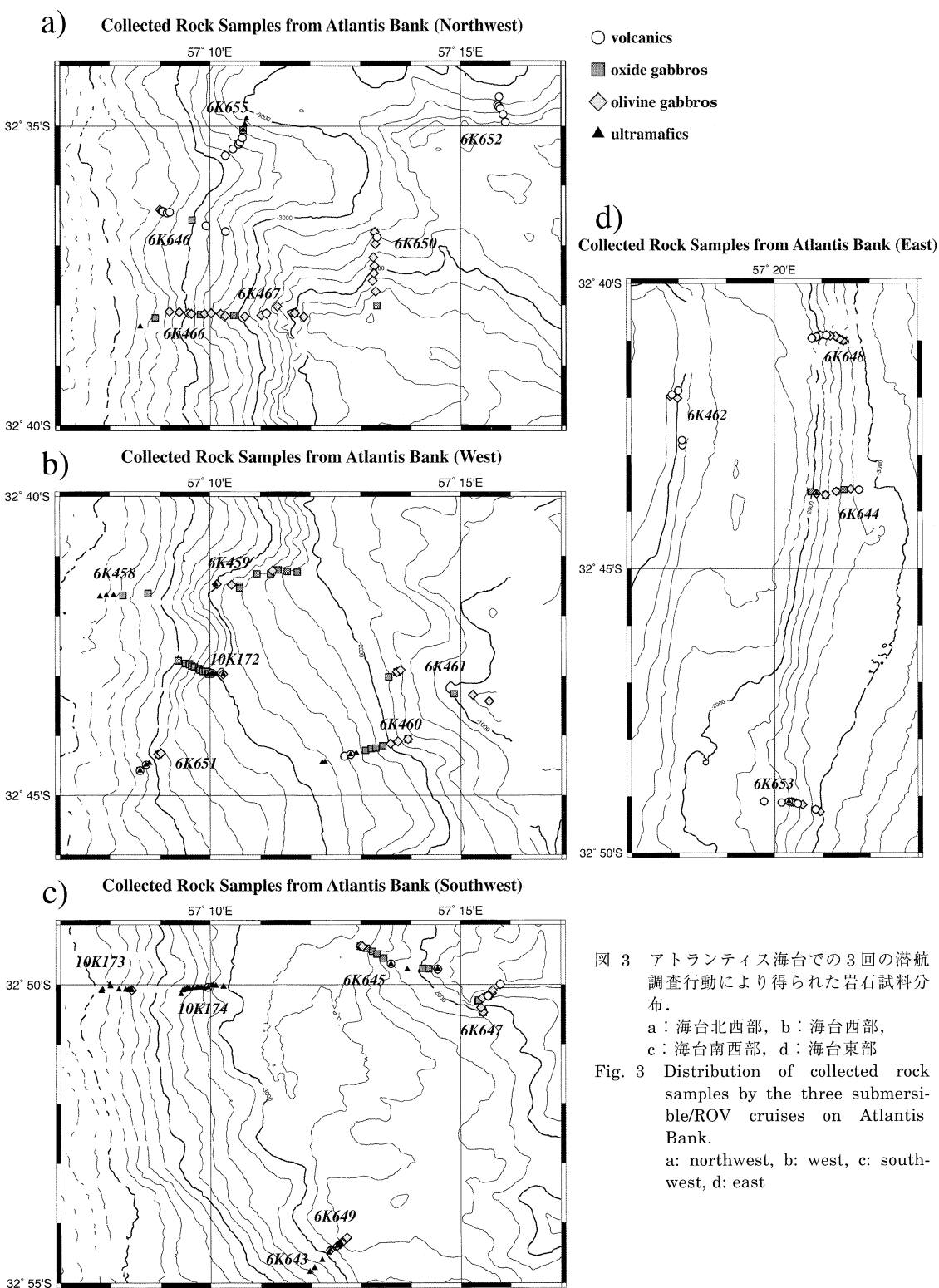


図 3 アトランティス海台での 3 回の潜航調査行動により得られた岩石試料分布。

a : 海台北西部, b : 海台西部,
 c : 海台南西部, d : 海台東部

Fig. 3 Distribution of collected rock samples by the three submersible/ROV cruises on Atlantis Bank.

a: northwest, b: west, c: southwest, d: east

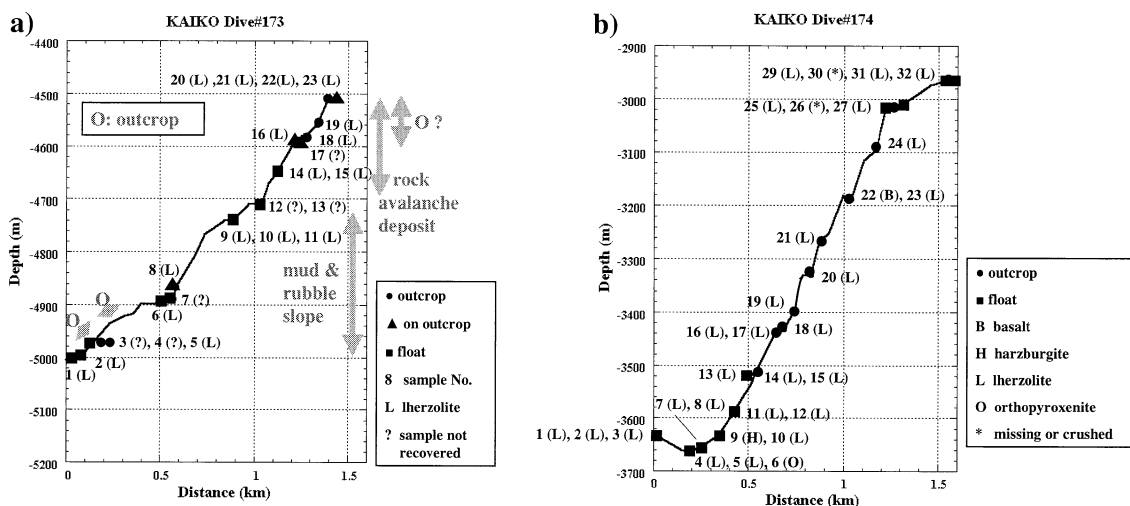


図 4 アトランティス海台南西部での「かいこう」#173 潜航 (a), #174 潜航 (b) の航跡鉛直断面と採取試料。

Fig. 4 Vertical profile of the rock samples collected by KAIKO Dives #173 (a) and #174 (b) on the southwestern slope of Atlantis Bank.

を行い、岩石試料を得た (図 4a, b)。岩相は主としてスピネルレーゾライトである。マイロナイト化した岩石も転石として認められるが、典型的なものは粗粒でプロトグラニュー組織を示す。

#173 では斜長石を欠くスピネルレーゾライトが、それより上位で地殻・マントル境界直下付近と考えられる #174 では斜長石を含むスピネルレーゾライトが、それぞれ得られた。#174 では含斜長石ハルツバーガイトも得られた。斜長石-スピネルレーゾライトには、はんれい岩〜クリノパイロクシナイト脈がしばしば認められる。斜長石はスピネルに伴い、不定形であり、侵入したメルトからの晶出を示唆する。斜長石の量は輝石、スピネルの量と相関を示さず、サブソリダスでの再結晶起源は否定される。かんらん石の Fo 値 ($=100 \times \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 原子比) は、レーゾライトで 90.5 前後であるが、ハルツバーガイトでは Fo 値は 91 前後とやや高い。Fo 値の測定誤差は通常 ± 0.2 以下であることから、両者は有意に差がある。スピネルの Cr# ($=\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 原子比) はレーゾライトでは 0.15 前後であるが、ハルツ

バーガイトでは 0.5 に達する。スピネルは一般に斜長石の量が多くなる (5%まで) と、Ti に富むようになる。かんらん石の Fo 値 (または斜方輝石の Mg#) は、斜長石の量が増えると低くなる (90.2 まで) 傾向がある (荒井ほか, 2001, 2002)。

一方、#643・#649 の 2 潜航を通して、海台南西側斜面に当たる $32^{\circ} 54' \text{S}$, $57^{\circ} 12' \text{E}$ 付近の調査を行った。この地点は南部の剥離断層に挟まれ、また南西落ちの急崖上であり、#173・#174 の結果に基づくと地殻・マントル境界の露出の可能性の高い地点であった。得られた岩石試料を表 1 に、またその潜航航跡断面上の鉛直分布を図 5 に示す。#643 の開始点の水深は 3430 m であり、そこから $\text{N}45^{\circ} \text{E}$ 方向に斜面を上昇した。#643 では、高度差 800 m の斜面の途中で計 7 箇所から試料が採取されたが、うち 4 箇所は露頭から (試料番号 6K#643-R01 ~ 02, R03 ~ 04, R06 ~ 07, R14 ~ 15), 3 箇所は転石であった (試料番号 6K#643-R05, R08 ~ 10, R11 ~ 13)。

#643 の最初の着底地点付近は堆積物に覆われていたが、水深 3400 m 付近迄は堆積物上に転石が

表 1 「しんかい 6500」 #643・#649 潜航で採取された岩石試料。
採取地点の状況は (1) 露頭から (outcrop), (2) 露頭上の基盤岩から (on outcrop), (3) 転石 (float on sediment あるいは talus) と分類される。分布の状況と推定される「モホ面」との関係は本文を参照のこと。

Table 1 Rock samples collected by Dive #643 and #649 by SHINKAI 6500 during the ABCDE cruise.
Sampling location is classified as (1) 'outcrop', (2) 'on outcrop', (3) 'float on sediment' or 'talus'.

Sample No.	Date & Time (local)	Latitude	Longitude	Depth	Location	Sampled rock type
6K # 643-R01	Dec 31, 2001 12:42	32° 54.8120'S	57° 11.9716'E	3396 m	outcrop	harzburgite
6K # 643-R02	Dec 31, 2001 12:42	32° 54.8121'S	57° 11.9716'E	3396 m	outcrop	harzburgite
6K # 643-R03	Dec 31, 2001 13:05	32° 54.7500'S	57° 12.0641'E	3281 m	outcrop	lherzolite
6K # 643-R04	Dec 31, 2001 13:05	32° 54.7500'S	57° 12.0641'E	3276 m	outcrop	lherzolite
6K # 643-R05	Dec 31, 2001 13:43	32° 54.6158'S	57° 12.2174'E	3118 m	float on sediment	lherzolite
6K # 643-R06	Dec 31, 2001 14:13	32° 54.4950'S	57° 12.3515'E	2974 m	on outcrop	harzburgite
6K # 643-R07	Dec 31, 2001 14:13	32° 54.4950'S	57° 12.3515'E	2974 m	on outcrop	harzburgite with troctolite vein
6K # 643-R08	Dec 31, 2001 14:48	32° 54.4486'S	57° 12.3849'E	2876 m	float on sediment	gabbro
6K # 643-R09	Dec 31, 2001 14:48	32° 54.4486'S	57° 12.3849'E	2876 m	float on sediment	lherzolite
6K # 643-R10	Dec 31, 2001 14:48	32° 54.4486'S	57° 12.3849'E	2876 m	float on sediment	lherzolite
6K # 643-R11	Dec 31, 2001 15:19	32° 54.3813'S	57° 12.5181'E	2715 m	talus	gabbro
6K # 643-R12	Dec 31, 2001 15:19	32° 54.3813'S	57° 12.5181'E	2713 m	talus	lherzolite
6K # 643-R13	Dec 31, 2001 15:19	32° 54.3813'S	57° 12.5181'E	2712 m	talus	harzburgite
6K # 643-R14	Dec 31, 2001 15:53	32° 54.3489'S	57° 12.5843'E	2622 m	outcrop	lherzolite
6K # 643-R15	Dec 31, 2001 15:53	32° 54.3489'S	57° 12.5843'E	2605 m	outcrop	harzburgite with dunite and gabbro vein
6K # 649-R01	Jan 14, 2002 12:45	32° 54.3431'S	57° 12.5709'E	2609 m	outcrop	lherzolite
6K # 649-R02	Jan 14, 2002 12:51	32° 54.3431'S	57° 12.5709'E	2609 m	outcrop	lherzolite
6K # 649-R03	Jan 14, 2002 13:06	32° 54.3272'S	57° 12.5811'E	2593 m	outcrop	lherzolite
6K # 649-R04	Jan 14, 2002 13:23	32° 54.3272'S	57° 12.5811'E	2577 m	outcrop	ophicalcite breccia; including one large lherzolite
6K # 649-R05	Jan 14, 2002 13:40	32° 54.3337'S	57° 12.5948'E	2564 m	outcrop	lherzolite
6K # 649-R06	Jan 14, 2002 13:51	32° 54.3337'S	57° 12.5948'E	2561 m	outcrop	olivine gabbro
6K # 649-R07	Jan 14, 2002 14:22	32° 54.3207'S	57° 12.6153'E	2537 m	outcrop	carbonate
6K # 649-R08	Jan 14, 2002 14:35	32° 54.3229'S	57° 12.6123'E	2541 m	on outcrop	microgabbro/pegmatitic olivine gabbro contact.
6K # 649-R09	Jan 14, 2002 14:35	32° 54.3229'S	57° 12.6123'E	2541 m	outcrop	olivine gabbro
6K # 649-R10	Jan 14, 2002 15:01	32° 54.2580'S	57° 12.7060'E	2502 m	float	olivine gabbro
6K # 649-R11	Jan 14, 2002 15:04	32° 54.2580'S	57° 12.7060'E	2502 m	outcrop	olivine gabbro
6K # 649-R12	Jan 14, 2002 16:12	32° 54.2385'S	57° 12.7171'E	2493 m	float	olivine gabbro
6K # 649-R13	Jan 14, 2002 16:12	32° 54.2385'S	57° 12.7171'E	2493 m	float	olivine gabbro
6K # 649-R14	Jan 14, 2002 16:18	32° 54.2385'S	57° 12.7171'E	2493 m	float	olivine gabbro

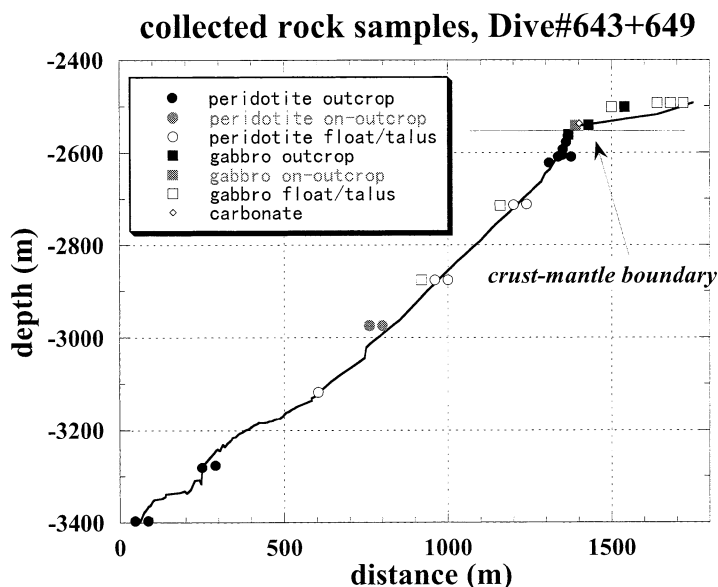


図 5 アトランティス海台南西部での「しんかい 6500」#643・#649 両潜航を合わせた航跡鉛直断面と採取試料。

Fig. 5 Vertical profile of the rock samples collected by SHINKAI 6500 Dives #643 and #649 on the southwestern slope of Atlantis Bank.

見られ、水深 3400 m 付近で、塊状のかんらん岩から成る堆積物に覆われていない露頭が出現した。さらにその上、水深 3290 m 付近は破碎されたかんらん岩の露頭、その上位の水深 2977 m よりも浅いところの露頭は、塊状のかんらん岩から成っていた。この地点で採取された試料には、はんれい岩の脈が含まれていた（試料番号 6K#643-R07）。露頭間には角ばった数 m の巨礫が見られ、最近の崩落あるいは地滑りを示している。水深 2662 m から上は急崖の露頭であった。最も浅い地点の水深 2600 m の露頭から採取された試料（試料番号 6K#643-R15）は主にダナイトで構成されており、スピネルの多い薄層と両輝石を含むかんらん岩を伴って層状構造を形成している。この層状構造ははんれい岩の脈によって切られている。また露頭観察により、ダナイトはダイク状に産していることが推定される。このようなダナイトの産状と他の岩相との関係は、オフィオライトの地殻・マントル境界のそれと類似している（Nicolas, 1989）。

#649 では、#643 の結果を確認しつつ、詳細な

観察と充分注意を払った試料採取によって地殻・マントル境界の確認を目指すための潜航を行った。#643 航跡上の水深 2800 m 付近に着底し、その場所から進路を N45°E として、詳細な観察を行いながら斜面を上昇した。水深 2600 m から浅いところではさらに速力を下げてより綿密な観察を行った。またこの潜航では、できるだけ現地性の試料を採取すべく、試料採取の多くは露頭もしくは露頭に由来すると思われる場所で行った。その結果、水深 2562 m 付近にかんらん岩の上に直接 2 m の層状構造の発達したはんれい岩の露頭が整合的に分布していることが確認され（口絵 1）、水深 2564 m から下の露頭からはレールズライト（6K#649-R01～R05）、そのわずか 3 m 上の水深 2561 m の場所では変形を受けていない olivine gabbronorite が採取された（6K#649-R06）。また、この層状構造の発達した olivine gabbronorite 層の上部に塊状はんれい岩が続いていることが、目視観察の結果から明らかになった（口絵 1）。このような岩相の関係は、オフィオライトで観察さ

れる地殻・マントル境界付近の岩相関係と類似しており、水深 2562 m 付近が海底に露出した地殻・マントル境界面である可能性を示唆する。ただし、この olivine gabbro なのかんらん石の組成は、Fo 値 70.8–71.7、斜長石の An 組成は 50 前後であり、かんらん岩中のかんらん石の Fo 値が 90–91 であることから、マントルと平衡にあったメルトから晶出した岩石とはみなされない。この点については後述する。

#643 の結果と併せて、少なくとも低速拡大海嶺で形成されたこの地点の地殻・マントル境界の直下はレールゾライトが大勢を占め、その中に少量のダナイトが含まれるという構造が明らかとなった。また、その境界面の上面のはんれい岩層からは、oxide gabbro が全く採取されなかった。海台の他の地点、特に北西側斜面で oxide gabbro が多く見られることと好対照をなす。

2) 西側斜面北部 (#458, #459, #172, #651) (図 3b)

西側斜面北部は多くの小規模な剥離断層で断ち切れ、それにより層序の逆転しているところが多く見受けられる。この場所で 4 潜航が行われた。

#458 と #459 との間には明瞭な断層が走っている。#458 では露頭の試料は採取されなかったが、露頭上に乗っていて明らかに露頭から剥ぎ取られたと現場で判断された試料を採取したところ、4609 m よりも深いところの試料はハルツバーガイト、4404 m より浅いところの試料は oxide olivine gabbro と明瞭に岩相が分離された。さらにその上部に当たる #459 では、断層面上を航走したが、最初の着底地点に当たる水深 3000 m ではハルツバーガイト、その上部の水深 2950 m では metagabbro が、さらにその上の 2601 m では前潜航と同じく oxide olivine gabbro が採取された。これらは全て露頭上に乗っていて、明らかに露頭から剥ぎ取られた試料である。この領域では、はんれい岩は一部を除いて oxide gabbro または oxide olivine gabbro などの鉄チタン酸化物に富むものであった。

#172 では、上記 2 潜航の結果との対比を行うため、水深 3900 m 付近から上昇し、海底観察と試

料採取を行った。水深 3040 m 付近までは、ドレライトが採取された 1 箇所を除いて、試料は全て oxide gabbro または oxide olivine gabbro といった鉄チタン酸化物に富むものであった。一方、水深 3000 m 付近で岩相が急変し、再び露頭の現れるところからはハルツバーガイトが採取された。従って、この岩相の急変しているところが剥離断層の境界面と見ることができる。

#651 は、#458 に見られた層序の南への連続性を確認するために設けられた潜航であった。水深 4090 m 付近よりも深いところでは、露頭から採取された試料はレールゾライトであったが、この地点から水深 4000 m 付近まで堆積物に覆われていない露頭が続き、その上部は堆積物で覆われ、さらに再び露頭の現れる水深 3920 m 地点およびその上部で採取された試料は、マイロナイト化したはんれい岩であった。従って、水深 4000 ~ 3900 m 付近に地殻・マントル境界があるはずである。しかし、この地点はやはりマイロナイト化作用の影響を受けている。結論として、海台のこの部分は下部地殻・上部マントルを構成する岩石から成り、剥離断層によって上盤・下盤に分断され、その結果双方に地殻・上部マントル境界が現れていると見ることができる。変形作用の影響を受けていない整合的な地殻・マントル境界の露出する箇所は、南西側斜面に限られていると見られる。

3) 東側斜面 (#644, #648, #653) (図 3d)

東側斜面の 3 潜航 (#644, #648, #653) は、トランスフォーム断層に平行な南北走向の正断層に沿った地質構造と岩相分布を調査する目的で実施された。

#644 では、水深 2881 ~ 2194 m の範囲では堆積物の上に巨礫 (径 10 m 以上) から小礫 (径数 cm) まだが点在、この間で 11 個の試料を採取した。また水深 2133 m から上は角礫が目立ち始め、さらに 2114 m から上はほとんど垂直に切り立った崖で、表面は波打っており、また断層粘土で覆われている箇所も見られた。水深 1980 m 付近には緩斜面のところに堆積物に覆われていない露頭が現れ、そこで岩石試料を採取した。採取された岩石のほとんどはマイロナイト化したはんれい岩で、

この垂直に切り立った斜面を構成していると推定される。#648についても同様、採取されたはんれい岩のほとんどはマイロナイト化したものであった。

#653では、採取された岩石は前2潜航（#644・#648）で採取されたものと同じくはんれい岩が大勢を占める。水深2887～2374 mからの試料はこの場所のはんれい岩が脆性・延性転移領域にあることを示している。上部で採取されたoxide gabbroは、下部に比べてより脆性変形を強く受けている。735B試料に見られる様に、oxide gabbroは通常は剪断帯に沿って出現するので、この潜航地点に見られた試料は、断層内あるいはその近傍で形成されたものの可能性が高い。また、潜航地点の水深が北側の2潜航よりも深い方にシフトしているにもかかわらず、採取されたはんれい岩の多くはカタクレサイトであった。また途中に見られる火山岩のうち、露頭から採取されたものはドレライトであったことから、この付近はオフィオライトモデルの岩脈群～はんれい岩漸移域に当たることが推定される。

なお、枕状溶岩が1個所で採取された。枕状溶岩は東側斜面の断層面での他の2潜航では見られていないので、この地点が断層の上盤により近いことを示していると考えられる。

IV. 考 察

1) 「モホ面」直下から直上にかけての岩相変化

荒井ほか（2002）に示される様に、本研究により採取されたスピネルレーゾライトはほぼ均質であり、超低速拡大軸下でのMORBの溶け残りマントルであると見られる。海嶺下のテクトニクスを考慮すると、地殻・マントル境界直下の斜長石を含むかんらん岩は拡大軸下のマントルでメルトの通路の近傍に由来するものである。溶け残りレーゾライトにメルトが付加し、様々な程度に溶融/メルト除去が起きたものであろう。さらに、メルトの近傍（現在ではモホ付近）ではダナイトやトロクトライトが存在している可能性が高い。また、これまでに報告されている海洋底のかんらん岩およびオフィオライトのマントル部分のかん

らん岩の岩相変化を考慮すると、海洋底のマントルは拡大速度によらず深部はレーゾライト、浅部はハルツバーグイトとダナイトより成るが、この岩相変化は低速であるほど地殻・マントル境界直下で急激に起こっていることが予想される。

前述の通り、#649において一見整合的に見えるマントルとはんれい岩とのコンタクトが観察されてはいるが、地殻・マントル境界直上のはんれい岩については、マントルと平衡に存在しえない分化した組成を有している。しかし、この化学組成のギャップは、本研究によって観察されたはんれい岩とかんらん岩との境界が断層などの境界であると結論付けられるのではなく、(1) 超低速拡大軸ではマントル上部においても熱伝導冷却が進行しており、マントル上部において結晶分化作用を行った分化したメルトが地殻・マントル境界より上位にもたらされるという考え（Bown and White, 1994; Coogan *et al.*, 2002）、あるいは、(2) アトランティス海台はセグメントの終端部に近いので、セグメント中央部からセグメントに沿ってここまで側方移動して来たマグマの分化の程度が高かったという考え（Bloomer *et al.*, 1989; Dick *et al.*, 2000）、もしくは(1)(2)の複合によって説明することができる。

2) ドレライト分布

オフィオライトモデルにおけるシート状岩脈に相当するドレライトについては、全23潜航中13潜航で採取された（#460, #462, #467, #172, #174, #644, #645, #646, #647, #648, #651, #653, #655）。多くははんれい岩層の上部に位置しており、アトランティス海台の岩体が、少なくとも部分的には、オフィオライトと同様の構造を持つことを示唆している。しかし、かんらん岩の分布域に出現しているものも6例あり（#172, #174, #645, #646, #651, #655）、特に#651では、かんらん岩中にダイクとして貫入している産状が確認された。しかもこれらは海台の西側斜面に集中している。これらは西側斜面のトランスフォーム断層もしくは剥離断層の斜面に沿った潜航である。メルトが下方から供給されたものであれば、海台が未だ拡大軸にあって火成活動の生起している時

期に海台が断層に沿って隆起することにより、持ち上げられたマントルかんらん岩層を割って岩脈が入り込んだものと推定される。一方、海台が形成された時期にこの場所は拡大軸セグメント端に位置していたことから、メルトの供給が少ないため、深成岩層が発達せず、最上部マントルに玄武岩質マグマが直接貫入したことによるとも考えられる。その場合は、メルトの供給の多いセグメント中心から供給の少ないセグメント端への水平方向に移動して来た可能性もある。

3) アトランティス海台南西部で変形を受けていない地殻・上部マントル境界が確認されたことについて

海台は北端・南端を剥離断層で断ち切られ、また東側斜面をトランスフォーム断層に平行な断層で断ち切られ、これらの断層に沿って変則的に隆起することによって形成されたとされている。上記3行動とも、各潜航地点を選定するに際しては、露岩の期待できる断層上を候補に選ぶことが多く、結果として、採取された岩石の多くはマイロナイト化されたものであった(特に、東側斜面の#644・#648、南側斜面の#645・#647)。一方、変形を受けていない地殻・上部マントル境界が観察された#643・#649潜航地点は、海台の南部を切る2本の剥離断層に挟まれた個所であった。また、海台の北半分に当たる $32^{\circ}45'S$ から北では、海台の東部にはほぼ東西方向の小海嶺が分布しているのに対し、それより南側にはその様な小海嶺が見られない。小海嶺は拡大軸とほぼ平行であることから、拡大に伴う火山活動の産物と見られ、この時期(12 Ma)に拡大軸での火成活動が急変し、それまでのマグマ活動を伴わないテクトニックな張力による拡大からマグマ活動による拡大に転移したと推定される。南西側斜面では熱あるいは断層による変質によってこの構造境界が改変されることなく保存されていたと推定される。また、同じく東側斜面の潜航でも、 $32^{\circ}49'S$ の#653ではカタクレーサイトが採取されているのに対し、小海嶺分布限界よりも北に当たる#644($32^{\circ}44'S$)・#648($32^{\circ}41'S$)ではマイロナイトが多く採取されていることも、このことを裏付けている。

4) アトランティス海台の隆起とアトランティス・II トランスフォーム断層のリフティング

アトランティス海台は、頂上部から石灰岩が採取されている(Kinoshita *et al.*, 2001)ことから、過去のある時期に海面まで達していたこと、また、最浅部の水深が700 mであり、周辺との比高が5000 mを超えるなど、変則的な隆起痕が見られる。一方、海台の地形はその南北端付近に見られるほぼ東西方向の剥離断層群、東側斜面に走るほぼ南北方向の2本の正断層、北西側斜面のトランスフォーム断層沿いに見られる小規模な断層など、四方を断層で境されている。断層崖の比高から判断して、これらの断層沿いに2 kmの隆起が起こったことを示している。この隆起の原動力となる広域応力場については、観察された地質構造、採取試料等について、矛盾無く説明するためのモデルを構築しなければならない。

Baines *et al.* (2002) は、過去の拡大方向の変化によって広域応力場が変化し、その結果トランスフォーム断層の東側がアイソスタティックに隆起したというモデルで、アトランティス海台のこの変則的な隆起を説明しようとしている。南西インド洋海嶺を挟む海域のプレート拡大方向は、20 Maより反時計周りに 10° 回転したことが知られている(Patriat and Segoufin, 1988)。海台の地形の特徴としては、頂部は緩いドーム状地形を示しているものの、それがトランスフォーム断層に平行な比高約1 kmの2本の断層によって断ち切られていること、またその周辺では、ICHの列がトランスフォーム断層の東側でこれと平行した長さ135 kmにわたる高まりの列(transverse ridges)を伴っていることが知られている。アトランティス海台の異常な隆起・沈降は、このような拡大方向の急変の影響によるトランスフォームのずれの発達、トランスフォーム断層脇でのプレートの曲げによるtransverse ridgeの隆起とそれに続く熱作用による沈降に負うところが大きい(Baines *et al.*, 2002)。トランスフォーム断層の南北端でのリフトの伝播の違いの結果、非対称なブルアパート海盆が形成された。トランスフォーム断層に沿ってリフティングが一様ではなく南端

(V-shaped RTI に接するところ) に比べて北端 (同じく L-shaped RTI) の方が拡大傾向が強い。その結果、リフティングの伝播、非対称なブルアパート海盆の形成、北半分にのみ median ridge が形成されているなど、今日見られる海底地形を生み出したと考えられる。

V. ま と め

本論文は、海洋科学技術センターが行ったアトランティス海台におけるこれまでの深海潜水調査船・無人探査機による調査結果をまとめたものである。アトランティス海台では、計 20 回の有人潜水船「しんかい 6500」潜航、3 回の深海無人探査機「かいこう」の潜航が行われ、「その場観察」の結果をもとに、その地質構造と成因とがほぼ明らかにになった。

海域で下部地殻・上部マントル境界が直接記載され、岩石試料が得られたのは、世界初である。本研究により、アトランティス海台では、変形を受けていない層状はんれい岩が最上部マントルかんらん岩の上位に整合的に産出していることが示された。また、アトランティス海台の東壁には岩脈群～はんれい岩漸移域に当たる層序が露出しており、これについても精密なマッピングが行われた。以上により、アトランティス海台の下部地殻の少なくとも一部は、陸上に露出するオフィオライトと近似すると見られる。

アトランティス海台は地滑り、崩落と断層によって切り裂かれており、このことが幸いして、海底表面の観察・岩石採取が可能であり、これと ODP 深海掘削の成果との組合せによって、海嶺で形成された海洋地殻の現場 3 次元構造が明らかにされたことになる。しかし、Hole 735B の下面と今回確認された「モホ」の直上とは直結してはならず、特に低速拡大海嶺で形成された海洋地殻が、程度の差こそあれ、本質的にオフィオライトと同一であるか否かについて結論を出すには、さらに進んだ調査が必要である。また、かんらん岩の直上、あるいはかんらん岩の分布域に見られるドレライトの成因として、セグメント軸に沿ったメルトの移動によるものであるか否かを検証するためにも、

アトランティス海台は、海洋地殻・マントルの実態を研究するための IODP (Integrated Ocean Drilling Program) 掘削の主要な対象の一つであることは間違いない。

謝 辞

本研究は、文部科学省より予算配分を受け、海洋科学技術センターの業務運営費の「深海調査研究開発費」による総合的試験研究の一環として実施された。また、海洋科学技術センターと米国ウッズホール海洋研究所との協力協定に基づく深海調査研究の一環として、同研究所との協力のもとに実施された。本研究は、3 航海を通じ、著者を含む日米併せて計 32 名の研究者が参加して行われた共同事業である。これら関係各位に謝意を表する次第である。

注

- 1) 張力場で地殻下部の変成岩・火成岩が上昇することにより形成されたドーム状地形。地殻表層には低角正断層である剥離断層=detachment fault が発達する。典型的な core complex である北米大陸 Basin and Range と同様のものが大西洋中央海嶺のメガマリオンとして発達している (Cann *et al.*, 1997; Tucholke *et al.*, 1998 等)。

文 献

- Arai, S., Dick, H. and MODE 2000 Scientific Party (2000): *Cruise Report MODE 2000 (KAIREI/KAI-KO KR00-06)*. JAMSTEC (confidential report).
- 荒井章司・Dick, H.J.B.・KR00-06 乗船研究者・原 久美子 (2001): 超低速拡大軸下の上部マントルの不均質性: 南西インド洋海嶺, アトランティス・バンクにおける「かいこう」による潜航調査予報。地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会, K1-008.
- 荒井章司・原 久美子・KR00-06 乗船研究者 (2002): 南西インド洋海嶺アトランティス・バンクに見られる超低速拡大軸下の最上部マントル・マグマ過程。地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会, J034-015.
- Baines, G., Cheadle, M., John, B. and Kusznir, N. (2002): Origin of anomalous uplift at inside corner highs: The importance of transform parallel normal faulting and transverse ridge formation, *EOS, Trans. AGU*, **83** (47), Fall Meet. Suppl., Abstract, T11A-1235.
- Bloomer, S.H., Natland, J.H. and Fisher, R.L. (1989): Mineral relationships in gabbroic rocks from fracture zones of Indian Ocean ridges: Evidence for extensive fractionation, parental diversity and boundary-layer recrystallization. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. eds.: *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., No.

- 42, 107-124.
- Bown, J.W. and White, R.S. (1994): Variation with spreading rate of oceanic crustal thickness and geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **121**, 435-449.
- Cann J.R., Blackman, D.K., Smith, D.K., McAllister, E., Janssen, B., Mello, S., Avgerinos, E., Pascoe, A.R. and Escartin, J. (1997): Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, **385**, 329-332.
- Cannat, M., Rommevaux-Jestin, C., Sauter, D., Deplus, C. and Mendel, V. (1999): Formation of the axial relief at the very slow spreading Southwest Indian Ridge (49° to 69° E). *J. Geophys. Res.*, **104**, 22825-22843.
- Coogan, L.A., MacLeod, C.J., Dick, H.J.B., Edwards, S.J., Kvassnes, A., Natland, J.H., Robinson, P.T., Thompson, G. and O'Hara, M.J. (2002): Whole-rock geochemistry of gabbros from the Southwest Indian Ridge: Constraints on geochemical fractionations between the upper and lower oceanic crust and magma chamber processes at (very) slow-spreading ridges. *Chemical Geology*, **178**, 1-22.
- Dick, H.J.B., Schouten, H., Meyer, P.S., Gallo, D.G., Bergh, H., Tyce, R., Patriat, P., Johnson, K.T.M., Snow, J. and Fisher, A. (1991): Tectonic evolution of the Atlantis II fracture zone. *Proc. ODP, Sci. Results*, **118**, 359-398.
- Dick, H. J. B., Natland, J. H. and Miller, D. J. (1999): *Proc. ODP Init. Repts*, **176**. College Station TX (Ocean Drilling Program). CD-ROM
- Dick, H.J.B. *et al.* (2000): A long *in-situ* section of the lower ocean crust : Results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **179**, 31-51.
- Hosford, A., Tivey, M., Matsumoto, T., Dick, H., Schouten, H. and Kinoshita, H. (2003): Crustal magnetization and accretion at the Southwest Indian Ridge near the Atlantis II fracture zone, 0-25 Ma. *J. Geophys. Res.*, **108**, B3, 2169-2191.
- Kinoshita, H., Dick, H. and YOKOSUKA/SHINKAI 6500 Scientific Party (2001): *MODE'98 Leg4 Cruise Repor.* JAMSTEC (confidential report).
- MacLeod, C., Allerton, S., Dick, H.J.B., Robinson, P. and Party, J.S. (1998): Geology of Atlantis Bank, SW Indian Ridge: Preliminary results of RRS James Clark Ross Cruise 31. *AGU Fall Meeting 1998*, T32-F08.
- Matsumoto, T., Dick, H. and ABCDE Scientific Party (2002): *Preliminary Report ABCDE YOKOSUKA/SHINKAI 6500 YK01-14*. JAMSTEC (confidential report).
- Nicolas, A. (1989): *Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere*. Kluwer Academic Pub.
- Patriat, P. and Segoufin, J. (1988): Reconstruction of the Central Indian Ocean. *Tectonophysics*, **155**, 211-234.
- Patriat, P., Sauter, D., Munschy, M. and Parson, L. (1997): A survey of the Southwest Indian Ridge axis between Atlantis II fracture zone and the Indian Ocean Triple Junction: Regional setting and large-scale segmentation. *Mar. Geophys. Res.*, **19**, 457-480.
- Tucholke, B.E., Lin, J. and Kleinrock, M.C. (1998): Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge. *J. Geophys. Res.*, **103**, 9857-9866.

(2003年5月6日受付, 2003年9月29日受理)