

オマーンオフショライトと中央海嶺：SOS!の活動

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-05-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 海野, 進 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00025120

オマーンオフィオライトと中央海嶺

—SOS! の活動—

海 野 進*

はじめに

日本は海溝という巨大地震の巣とともに、多数の火山をかかえる世界有数の火山国である。今年に入ってから、北海道有珠山、伊豆諸島三宅島と噴火が続いたことは記憶に新しい。日本のような場所で起こる地震や火山噴火の原因は、海溝から沈み込むプレートにある。しかし、このような海溝沿いの火山活動は、地球全体で見れば高々 1 割ほどでしかない。地球上の火山活動の実に 8 割は、深海底の巨大火山脈「中央海嶺」で起きている。これこそ、地球をおおうプレートが生まれる場所なのだ。中央海嶺から地表にもたらされる大量の熱と物質は、地球全体の環境や生命の発生に大きな影響を与えてきた。この地球の壮大なダイナミクスについての謎を解き明かそうと、地球科学者は日夜研究に取り組んでいる。しかし、今日の観測技術をもってしても、深度三千メートルを越える海底の地下深部については、まだわからないことが多い。

一方、中央海嶺で生まれたプレートの一部が、大陸同士の衝突によって陸上に乗り上げることがある。これをオフィオライトという。シンドバッドの故郷であるアラビア半島のオマーン王国には延長 500 km におよぶ世界最大のオフィオライトがあり、中央海嶺の地下で起こるさまざまな現象を解き明かす重要な鍵として、世界中の地球科学者に注目されている。静岡大学ではこの数年来、新潟大学、金沢大学、日本地質調査所などと共同でオマーンオフィオライトを研究してきた。この調査により、中央海嶺の直下で湧き上がってきた物質がどのようにプレートを形成していくかなど、新知見が次々と得られている。私たち静大グループは、自分たちを“静岡大学オマーン研究グループ Shizuoka University Oman Study Group (SOS!)”と称している。SOS! のメンバーは、増田俊明教授をはじめとして海野、石川、道林の各研究室がそれぞれの専門と得意技を活かして、オマーンの地質研究に取り組んでいる。本論では SOS! の研究によって得られた成果をまじえて、オマーンオフィオライトを紹介しよう。

1. オマーンオフィオライトの成り立ち

3 億年前の地球にはただ一つの大洋パンサラッサと超大陸パンゲアがあった。三畳紀になるとパンゲアの東側でリフティングが始まり、“テチス海”中央海嶺として拡大を続けた。1 億 2 千万年前頃のテチス海は、北のユーラシアと南の Gondwana 大陸を隔てる深い入り江となっていた(図 1)。この海は“古地中海”と呼ばれている。この頃からユーラシアと Gondwana の西部を南北に走る割れ目が生じ、大西洋の拡大が始まった。同時にアフリカアラビア大陸の北上によってテチス海は閉じ始めた。今から 1 億年前にはテチス海の海洋底を作っていたプレートは 2 つに割れ、北側のプレー

* 静岡大学理学部生物地球環境科学科

トが南側に乗り上げた(Nicolas, 1995)。後のオマーンオフィオライトは、この頃テーチス海中央海嶺で生まれたプレートの一部である。テーチス海は8千万年前までに閉じ、上盤側のプレートの片割れはアラビア大陸に衝突して上に乗り上げた。通常は軽い大陸性プレートの下に重い海洋性プレートが沈み込むサブダクションが起こるのであるが、この場合は上下のプレートが逆転しているのでオブダクションと呼ばれる。テーチス海が閉じるにつれてインド亜大陸は北上し、白亜紀終わり頃にはマントル深部から上昇してきたブルームの上を通過した。このブルームによって発生した大量のマグマは、インド亜大陸に巨大噴火をもたらした。デカン高原の洪水玄武岩である。このときの火山活動の名残がレユニオン島のホットスポットである。アラビア半島とアジア大陸の間に挟まれたペルシャ湾はテーチス海の残骸と考えられており、現在イランの下に沈み込んでいる(Coleman, 1981)。

オフィオライトはいくつかの巨大なナップに分かれてアラビア半島の上にオブダクトしており、最大3枚のナップが衝上断層を境に重なっている(Glennie et al., 1974)。各オフィオライトナップはほとんど未変形の海洋性プレートの巨大な断片からなり、拡大軸における火成活動や鉱床形成過程、マントル下部地殻のテクトニクス of 解明などに絶好の研究試料を提供している。また、オブダクションに伴って形成されたテクトニックメランジェには中圧・高压タイプの変成岩を産し、ナップ下底面での剪断運動はマントルのカンラン岩をマイロナイトに変え、下盤側の準現地層に高温低压タイプの変成作用をもたらした。丁度、海底の溶岩や大陸棚の堆積物に、上から高温のマントルカンラン岩でアイロンがけをしたようなものである。その結果生じた変成岩をメタモーフィック・ソール metamorphic sole という。増田グループの精力的な研究により、どのようにしてオフィオライトがオブダクトしてきたか、その力学的なメカニズムが解き明かされつつある(増田ほか、1999)。

2. オフィオライトの地質

オフィオライトには海洋リソスフェアの初生的な構造・層序がほぼそのまま保存されている。大きなナップでは溶岩層からマントル上部まで厚さ14 kmにおよぶ断面を見ることができる(図2, 3)。これらの各岩相の侵食に対する抵抗力の違いは地形によく現れている。地殻最上部を構成する溶岩層は低平な丘陵地をつくり、いく筋ものワジ(Wadi)によって横切られている(図4a)。溶岩層の下位

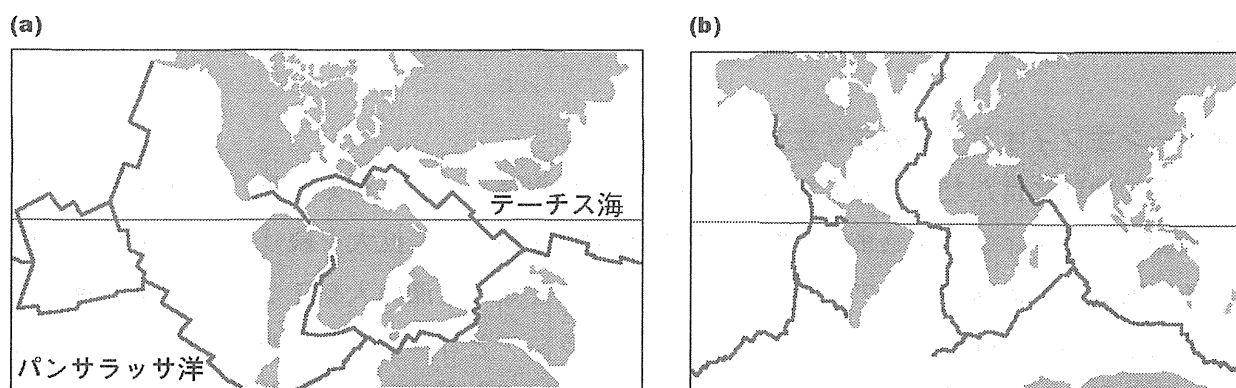
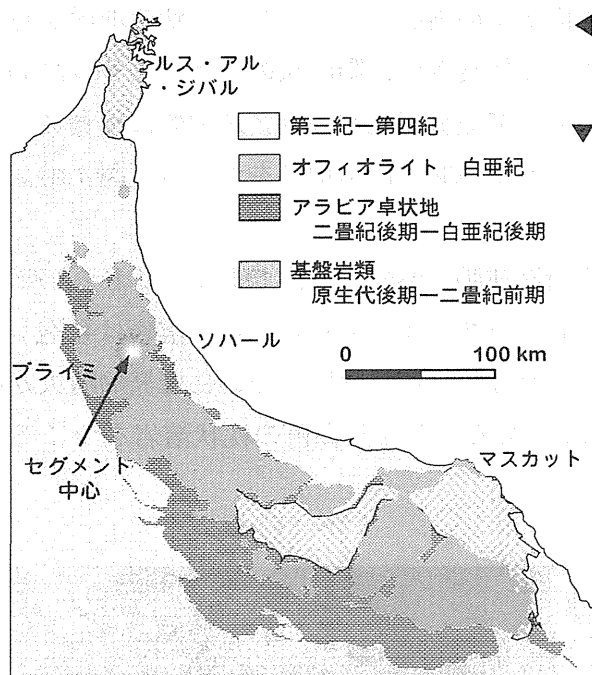


図1. 1億2千万年前(a)と(b)現在のプレート配置。1億2千万年前には大陸はテーチス海という入り江の周りに集まっていた。



◀図 2. アラビア半島東端にあるオマーンの地質概略図。SOS! の調査地域で見つかったセグメント中心の位置を示してある。

▼図 3. 海洋リソスフェア上部の地震波速度構造とオマーンオフィオライトの層序の比較。

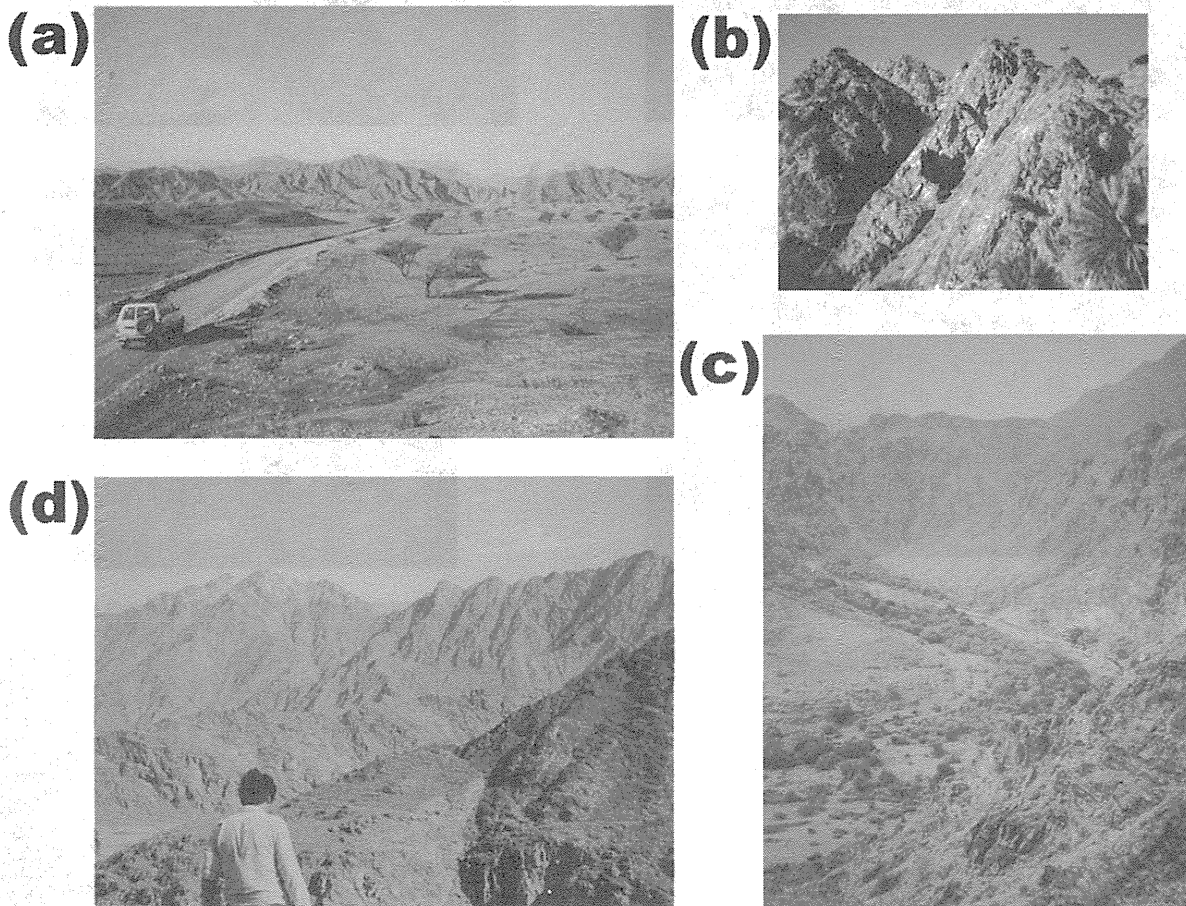
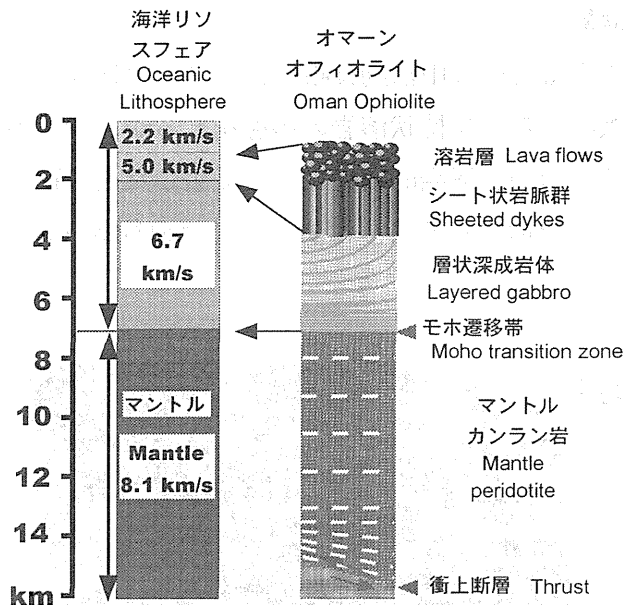
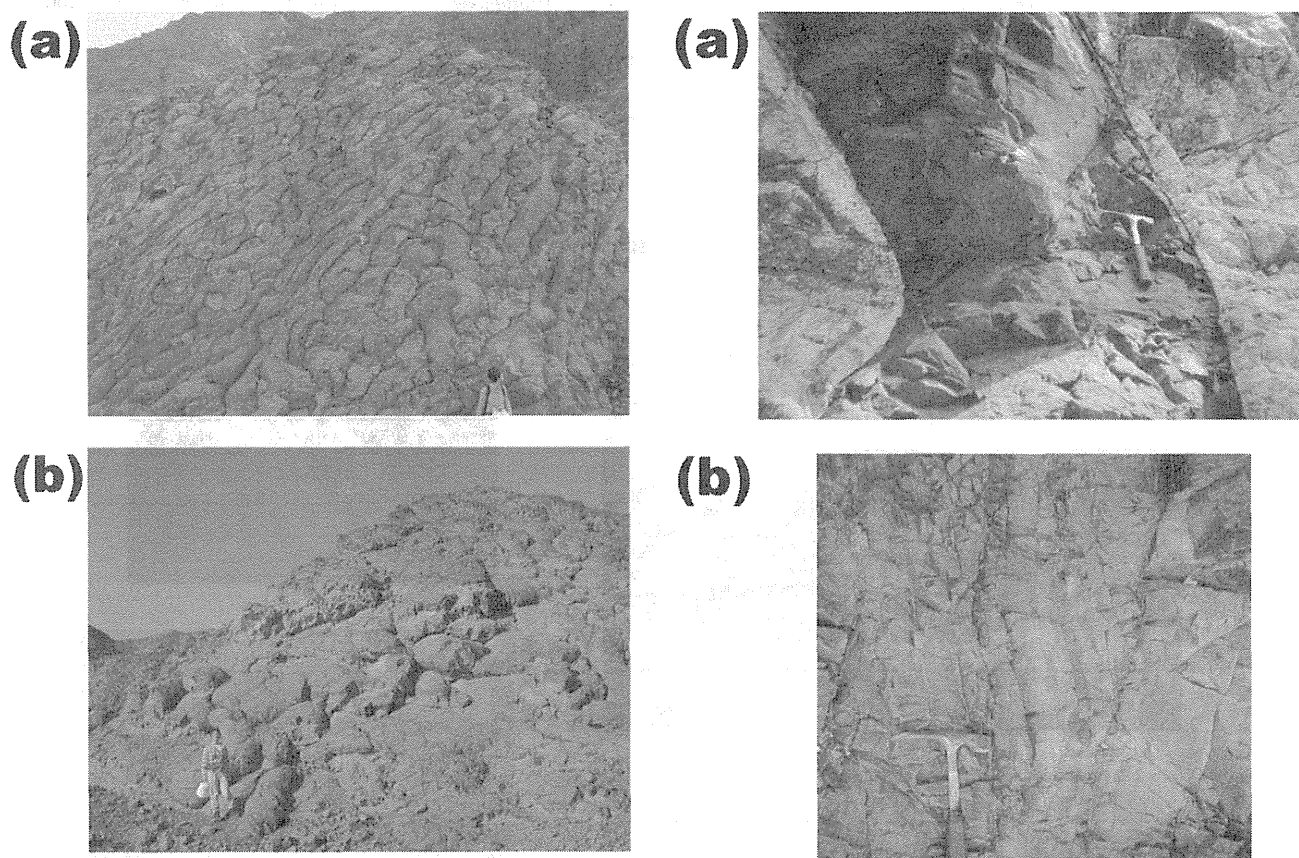


図 4. オマーンオフィオライトの地質と地形。(a)車の停車している平原と向こうの低い丘は溶岩層。背後の尾根はシート状岩脈群, (b)ケスタ地形を見せるシート状岩脈群, (c)層状ガブロの崖 (右) と川底に見えているモホ, (d)マントルカンラン岩の急峻な山

に現れるシート状岩脈群はやや急峻な小山になり、岩脈面が山の斜面となったケスタ状の地形が見られる（図 4 b）。層状深成岩体は縦横に交差する節理にそって侵食され、階段状のテラスをもつ高い山地となる（図 4 c）。マントルカンラン岩は断層や節理に沿って蛇紋岩化が進み、選択的に侵食された結果、深い峡谷とのこぎりの歯のようなぎざぎざの尾根をもつ急峻な山岳地形をつくる（図 4 d）。

溶岩層

拡大軸での火山活動は噴火、マグマの貫入などに伴う断層運動と溶岩の流出である。これらの溶岩は板状あるいは枕状溶岩の形態をとるが、少量のハイアロクラスタイトも見られる。溶岩は発泡しているものの、爆発的噴火によって生じた火砕物は全く見られない。高い水圧のために爆発的噴火が妨げられたのであろう。溶岩の多くは直径 50 cm から 1 m もある大きな茶褐色の枕状溶岩をつくるが



▲図 5 . 枕状溶岩(a)と水底パホエホエ溶岩(b)。



図 6 . 岩脈のいろいろ。(a)単純岩脈, (b)重複岩脈 ▶ (ハンマーの右の岩脈), (c)複合岩脈。

(図 5 a)、地域によっては板状のシート溶岩となる割合が 50%を越えることもある。従来、水底溶岩のつくる形態は枕状溶岩とシート溶岩しか知られていなかったが、私たちの調査により新たに枕状溶岩よりもつぶれた形態をした“水底パホエホエ溶岩”が確認された(図 5 b)。水底パホエホエ溶岩には中空になったローブ(溶岩チューブ)が見られることもある。このような溶岩形態はほぼ水平な平坦地を流れた場合に形成される(海野・小幡, 2000; Umino et al., 2000)。また、いわゆる枕状溶岩は数度以上の斜面を流れたときに生じる。従って、溶岩の形態を調べることで火山体の古地形を復元することが可能となる。水底パホエホエ溶岩は、しばしば隣り合った溶岩ローブ同士が合体しながら風船のように膨張し、大きなシート溶岩を形成することがある(Gregg and Chadowick, 1996)。焼津の大崩海岸に行くと、枕状溶岩の間にその例を見ることができる。

シート状岩脈群

溶岩層の下部では岩脈が多く見られるようになり、下方でやがてシート状岩脈群に移り変わる。シート状岩脈群とは、岩脈の中に岩脈が繰り返し貫入することによって生じる平行岩脈群の一種で、引張応力場にある中央海嶺を特徴づけるものである(図 4 b)。プレートの拡大は、地殻上部においては岩脈貫入によって地殻を押し広げたり、正断層やブロック運動によって地殻を側方に引き延ばすことによって起きる。一方、地殻下部の拡大はマグマ溜りと周辺の高温のガブロの流動によってまかなわれる。シート状岩脈群の厚さは 500 m から 2 km ほどで、単純岩脈や重複岩脈、また稀に複合岩脈が見られる。単純岩脈とは、冷たい母岩に対して岩脈のマグマが冷やされてできる急冷縁が岩脈の側面にただ一つあるもので、最も一般的な岩脈である(図 6 a)。私たちの調査によれば、オマーンのシート状岩脈の 99%は単純岩脈である。一方、外側に対して冷やされたことを示す急冷縁が、岩脈の側面に複数存在するものを重複岩脈という(図 6 b)。同じ岩脈中にマグマの貫入が時間をおいて繰り返されたために生じる。マグマ貫入が繰り返される度に、マグマの組成や斑晶量が異なる場合は複合岩脈という(図 6 c)。複合岩脈では一般に貫入の時間間隔が短いために、重複した急冷縁は見られない。これは密度成層したマグマ溜りから、組成等を異にしたマグマが相次いで流出することによって生じる。もし、複合岩脈が地表に達して溶岩となると、複合溶岩流ということになる。静岡でも大崩海岸の枕状溶岩に、複合溶岩流の例を見ることができる。

深成岩体

シート状岩脈群の下位にある深成岩体は、中央海嶺下のマグマ溜りが固結したものである。岩脈は深成岩体から派生しているが、深成岩体が岩脈を捕獲岩として取り込むことがある(図 7 a)。これはマグマ溜りの固結しつつある天井を破って岩脈が貫入したり、既に固結した岩脈の中にマグマ溜り上部に集まった分化したメルトが貫入していくためである。とくに層状深成岩体上部からシート状岩脈群にかけて大小さまざまな深成岩体が点在している。これらの多くはトーナライトや閃緑岩で、下位のマグマ溜りにあった玄武岩質マグマの分化もしくはマグマ溜りの天井の再溶融で生じたと考えられている。ときとして塊状無層理のホルンブレンドを含む粗粒のガブロが現れる。これはマグマ溜りの天井付近で結晶化したマグマの残液に水などの揮発成分が濃集して生じた分化物と考えられる。

トーナライトや閃緑岩よりも下の層準にはモード組成がほとんど変化せずに斜長石と単斜輝石の平行配列による葉理が発達しているガブロ(planar-laminated (Pallister and Hopson, 1981) もしく

は foliated gabbro (Nicolas, 1989)) が現れる (図 7 b)。下位に行くにつれて次第に斜長石とマフィック鉱物の割合が変化することによってできる層理が発達し、やがてガブロの主体をなす層状深成岩体に移り変わる (図 7 c)。多くの地域では層理は平行であるが、Wadi Salahi などでは斜交層理がしばしば見られ、スランプ構造も観察される (図 7 d)。層状構造はシート状岩脈群との境界面に対して直交するところと、ほぼ調和的に平行になっているところがある。下位へ向かうに連れて層理は急傾斜するようになるが、モホ面に近付くと再びゆるやかになりモホ面に対して整合的になる。静岡県内では、三ヶ日の北にある富幕山 (とんまくやま) など御荷鉾 (みかぶ) 帯の層状深成岩体を見ることができる。

拡大速度の速い海嶺下のマグマ溜りは、岩脈群の直下にメルトが集まったレンズ状のシルがあり、その下には半ば結晶化しておかゆ状になったマッシュ mush があるらしいことが、地震波トモグラフィなどでわかっている (Kent et al., 1993 など)。私の研究室では、このメルトレنزの天井で急冷されて固結したのがシート状岩脈群直下に見られる閃緑岩や塊状ガブロであると考えている。また、メルトレنزの床で晶出した鉱物は無層理の結晶集合体となるが、結晶化は次々と晶出した鉱物の上で起きていくので、やがてマッシュの中に埋もれていく。そのため、下に埋もれた結晶集合体は上下につぶされ、結晶の方向が次第にそろっていくことになる。このようにして葉理構造を持ったガブロとなるのであろう。

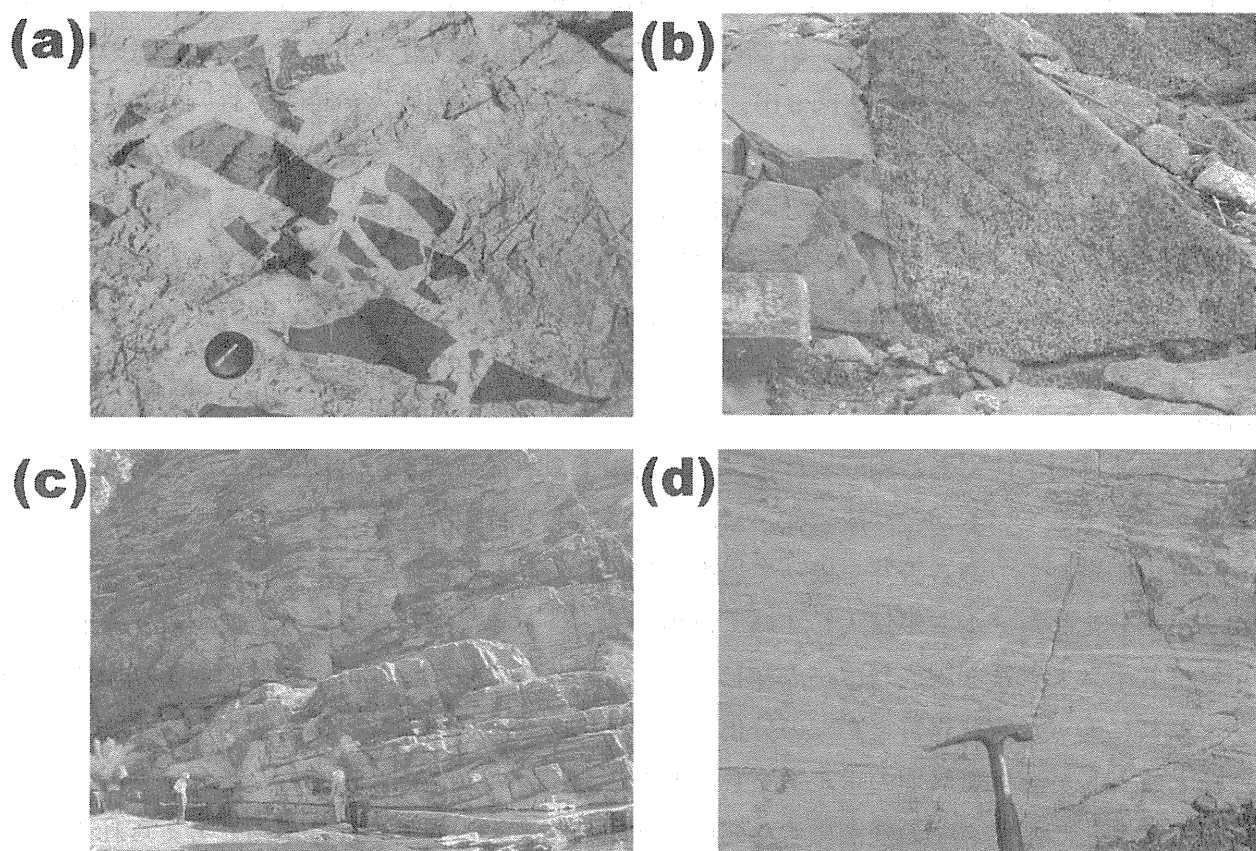


図 7. 深成岩体の組織と構造。(a) トーナル岩に取り込まれた岩脈の捕獲岩。マグマ溜りの天井部、(b) 岩脈 (左) に切られる葉理構造を持つガブロ、(c) 層状深成岩体、(d) 層状ガブロの乱れた層理。

モホ遷移帯

モホ面は地震学的には弾性波速度が異なる境界のことであるが、オマーンオフィオライトではマントルカンラン岩から層状深成岩体のガブロまでの間にある厚いダナイト（カンラン石のみからなるカンラン岩の一種）を主体とした地層のことである。これは、高速拡大海嶺下で上昇してくるマグマとマントルカンラン岩が反応した結果生じた岩相で、この反応によりマグマ溜りに供給されるマグマの化学組成が規制されるという点で非常に重要である（松影・荒井, 1999）。とくにマグマの供給中心ではモホ遷移帯は厚く発達し、500 m を越える（図 8 a）。

マントルカンラン岩

マントルを構成していたカンラン岩は、ほとんどが少量の単斜輝石を含むハルツバージャイトである。伸長した斜方輝石やスピネルによってつくられる面構造は概ねモホ面に平行で、多くの場合面構造にほぼ平行に厚さ 1 cm から 20 cm ほどのダナイトの薄層を挟在する。ダナイト層はそのまま層状構造を切るダナイト脈に連続的に漸移することがある（図 8 b）。ダナイトの他に斜方輝岩やガブロの小岩脈もしばしば見られる。面構造には非調和的に貫入しているが、貫入後に変形してジグザグに走っているものもあり、マントルの塑性流動とマグマの貫入活動が同時期に行われたことを示している。マントル層の下部では単斜輝石の量が増え、レールゾライトも現れる（高沢, 1999）。また、ハルツバージャイトに挟在するダナイトの層が厚くなり、数 10 cm から 1 m ほどの規則的な互層が見られることがある。ナップ最下部のカンラン岩は衝上したときに強く剪断変形を受け、一見層状深成岩体のような見事な層状構造を示す（Boudier and Coleman, 1981）。これはマイロナイトないし超マイロナイト

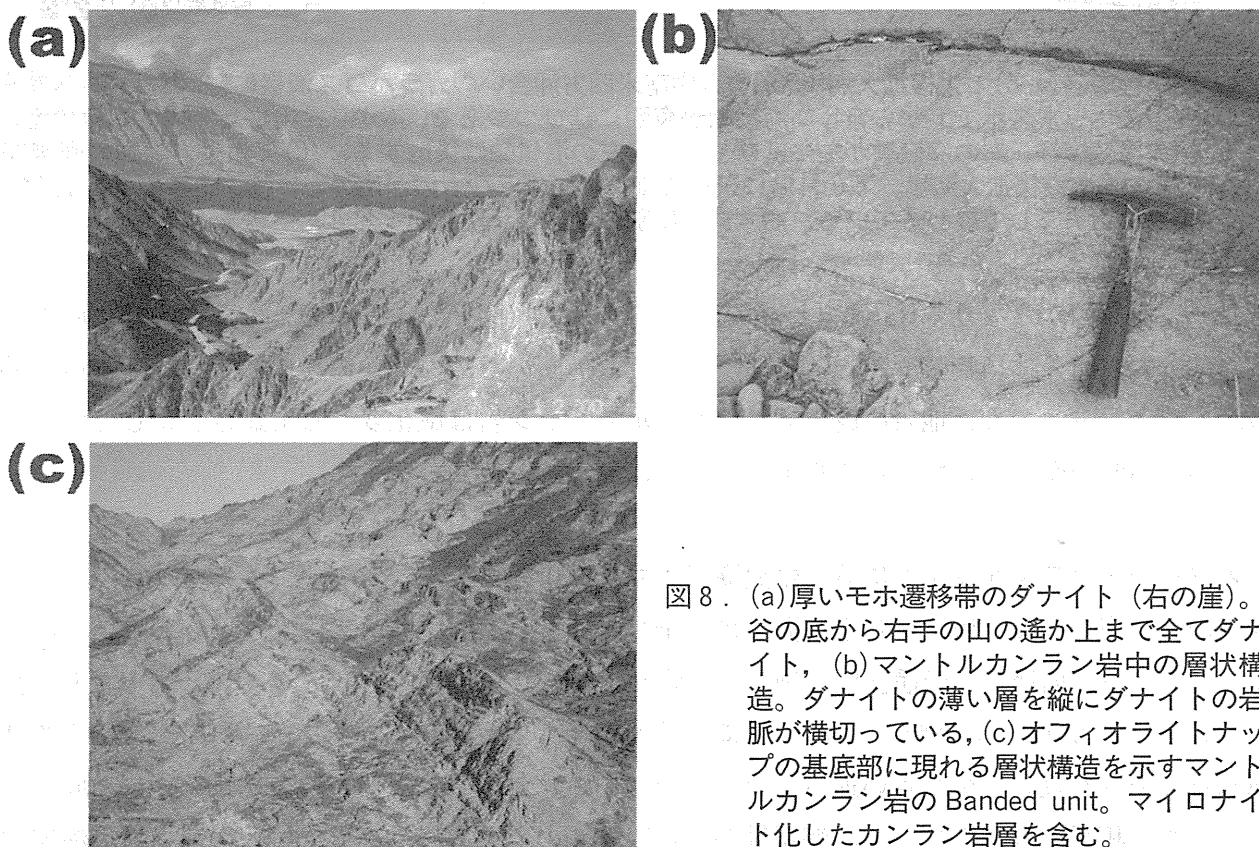
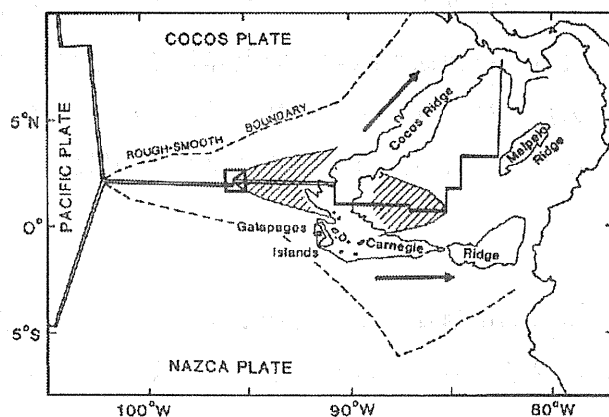
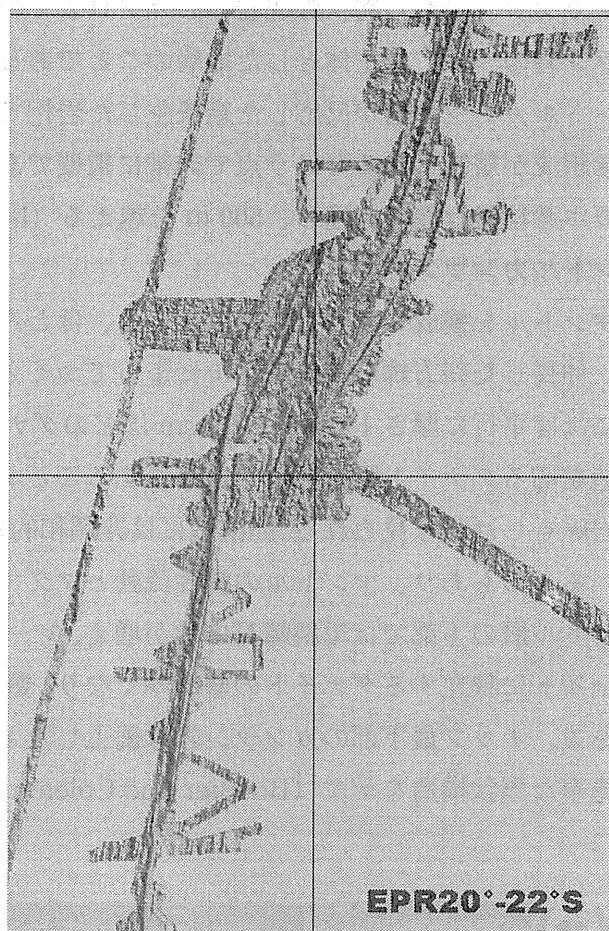


図 8. (a) 厚いモホ遷移帯のダナイト（右の崖）。谷の底から右手の山の遙か上まで全てダナイト、(b) マントルカンラン岩中の層状構造。ダナイトの薄い層を縦にダナイトの岩脈が横切っている、(c) オフィオライトナップの基底部に現れる層状構造を示すマントルカンラン岩の Banded unit。マイロナイト化したカンラン岩層を含む。

(a)



(c)



(b)

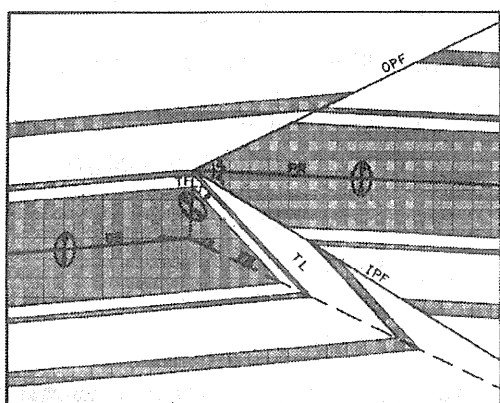


図9 伝播性海嶺(a, b)と重複拡大海嶺(c)。(a)中南米西方沖合いのガラパゴス海嶺には、ガラパゴス諸島付近のホットスポットから新しい海嶺軸が東西に延びつつある、(b)模式化した伝播性海嶺の地磁気異常縞模様。右の海嶺軸が左に延びて行き、左の海嶺軸は後退する、(c)東太平洋海膨の南緯20°-22°にある重複拡大海嶺。下から縦に延びる細い筋のようなものが南の海嶺軸。十字の少し上(北)で右にカーブして終わっている。右(東)に別の海嶺軸が現れ、上(北)へ続く。

化したカンラン岩からなり、Banded Unit と呼ばれている (図8c)。日本のような造山帯に産出する蛇紋岩は、変質時の体積膨張や断層運動の際に受けた剪断のために、蛇の模様のような黒緑色の縞が見られる。オマーンでも、地表に露出するマントルカンラン岩は風化変質して蛇紋岩化していることがあるが、剪断を受けていないため真黒い硬い岩になることが多い。

3. オマーン・オフィオライトに見る中央海嶺のマグマ供給系

地球の海洋底に延々と横たわる中央海嶺は、全てが連続した一大海底火山脈というわけではない。トランスフォーム断層や、伝播性拡大軸、重複拡大軸などで0.5-30 km ほどのずれがあったり、食い違っていたりする(図9; 海野, 1994)。伝播性拡大軸とは、短いトランスフォーム断層で接する2つの海嶺軸の方向が互いに少し食い違っているものである。このとき、一方の海嶺軸が他方に向かって延びていき、相手方は縮んでいく。海嶺軸が死んでいくのである。重複拡大軸とは高速拡大海嶺に特

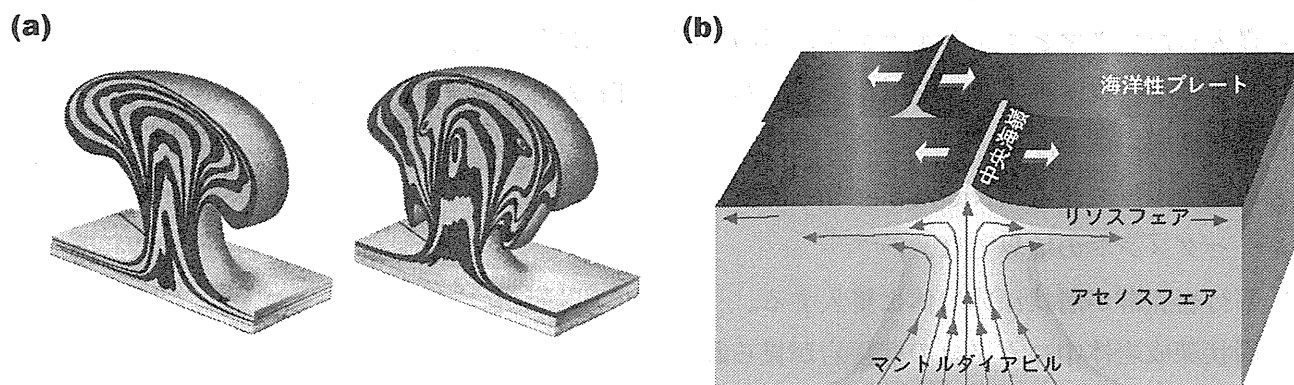


図10. ダイアピルの概念図(a)と中央海嶺の模式図(b)。キノコか海坊主のような形をしたダイアピルが海嶺の直下で湧き上がり、分離したマグマがマグマ溜りへと上昇していく。(Nicolas, 1995) より。

有の現象で、海嶺軸がわずかな距離を隔てて重なっている部分をいう。重複する部分では、海嶺軸は互いに相手の方向に折れ曲がる。拡大速度が速いので、海嶺軸付近の高温で軟らかいプレートが剛体(硬い板)としてふるまわないためである。

このようなずれや食い違いによって海嶺は細かなセグメント(部分)に分かれている。セグメントは海嶺軸に沿った重力異常や地震波速度構造、溶岩の岩石学的特徴や全岩化学組成の変化と関係がある(海野, 1994)。それは、マンテル中を上昇するアセノスフェアの流れ方や、下部地殻のマグマ溜り内部でのマグマの運ばれ方と対応している。オマーンオフィオライトにおいても高速拡大海嶺におけるセグメントの境界に相当する不連続や、マンテル上昇流の中心が見出されている。これらは古海嶺軸方向に 50 km ほどの延長を有し、これまでに 4 つのマンテル上昇流の中心が提唱されている。

拡大軸下におけるマンテル上昇流

中央海嶺の下ではプレートが拡大するのにともなってマンテル中に上昇流が発生する。この上昇流は海嶺軸にそってどこでも一樣というわけではなく、流れの活発なところと弱いところがある。そのため、上昇流は海坊主の頭のような形をしたマンテルダイアピルとなる(図 10)。オマーンオフィオライトでマンテルカンラン岩を構成している鉱物の変形構造を調べると、このようなダイアピルを見つけることができる。それらは海嶺軸方向にややのびた直径 10 km 前後の円筒状をした領域に垂直方向のマンテル物質の流動を示す鉱物の線構造が見られ、その外側では水平に近い傾斜で放射状に線構造が向いている。このような構造は、上昇流がモホ直下に達したところで中心から外へ向かって流動するようにカンラン岩の流れが変化していくために生じる。剪断のセンスから上昇流の中心ほど流れが速く、また放射状に外へ流れている頂部ではモホに近い上側ほど速い(図 10)。道林研究室では、このカンラン岩の変形構造を調べ、マンテルの流動の仕方やプレート運動について研究している。それによると、オフィオライト北部の岩体ではマンテルの流動はモホに近いところで遅く、深部へ行くと東向きの剪断運動を示す。このことから、現在のオフィオライト岩体は海嶺軸の東側のプレートであったことがわかる。

セグメンテーションとシート状岩脈群

セグメント中央部ではマンテル上昇流が活発でマグマの生産量が高い。従って、

- 1) マントル中に多数の岩脈貫入がある。
- 2) 貫入したマグマとマントルカンラン岩の反応が頻繁に生じる。
- 3) ダナイト〜ウェールライト（カンラン石と単斜輝石からなる岩石）の貫入が多発する。
- 4) 層状深成岩体が厚い。

などの現象が見られる (Nicolas et al., 1988)。

また、セグメントの境界では、

- 5) 平行岩脈群が層状深成岩体に貫入する。
- 6) 層状深成岩体中にガブロの捕獲岩が見られる。

これは伝播性拡大軸や重複拡大軸では、一方の海嶺軸下のマグマ溜りから派生する岩脈やマグマポケットが、隣王海嶺軸下のマグマ溜りで固結した深成岩体中に貫入していくためである。

新潟大学の宮下研究室では上述の点に注目して、オフィオライト北部岩体に新たなマグマ供給中心とセグメント境界を見いだした (宮下・足立, 1999; 図2)。私の研究室でこのセグメント内のシート状岩脈群の厚さと化学組成を調べた結果、マグマ供給中心から離れるに連れて岩脈は厚くなり、より低温で分化していくことが判明した。これはマグマ供給中心では、岩脈の貫入が頻発するために圧縮的な応力場が発生しやすく、地殻を押し広げるのがむづかしいためである (海野ほか, 1999 a, 1999 b)。一方、マグマ供給中心から遠く離れたセグメント境界では、岩脈の貫入頻度が小さいために、圧縮的な応力場を生じにくい。従って、岩脈は容易に厚くなることができる。また、マグマ溜りへの供給が途絶えがちなために、マグマの温度が下がり結晶分化が進みやすい。

おわりに

間もなく日本初の深海科学掘削船 (通称“ゴジラ丸”) の建造が始まる。大地を動かす源である地球深部の物質や、地球環境の変遷と生命の起源を探るのが目的だ。私たちはオマーンで得られた知識を活用し、この巨大科学プロジェクト (IODP) によって 21 世紀の地球科学をリードしていきたいと考えている。

引用文献

- Boudier, F. and Coleman, R.G., 1981. Cross section through the peridotite in the Samail Ophiolite, southeastern Oman Mountains. *J. Geophys. Res.*, 86, 2573-2592.
- Ceuleneer, G., Nicolas, A. and Boudier, F. (1988) : Mantle flow patterns at an oceanic spreading centre : the Oman peridotites record. *Tectonophysics*, 151, 1-26.
- Coleman, R.G. (1981) : Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman. *J. Geophys. Res.*, 86, 2497-2508.
- Glennie, K.W., Beouf, M.G.A., Hughes Clark, M.W., Moody-Stuart, M., Pilaar, W.F.H. and Reinhardt, B.M. (1974) : The geology of the Oman Mountains. Konin, Netherlands Geol. Mijnbouw. Genoot. Verdh. 31.
- Gregg, T.K.P. and Chadwick, W.W., Jr., 1996. Submarine lava-flow inflation : A model for the

formation of lava pillars. *Geology*, 24, 981-984.

Kent, G.M., Harding and M.C., Orcutt, 1993. Distribution of magma beneath the East Pacific Rise between the Clipperton Transform and the 9°17'N Deval from Forward modeling of common depth point data. *J. Geophys. Res.*, 98, 13945-13969.

増田俊明・釘宮康郎・青島逸子・山浦洋平・溝上周作, 1999. オマーンの異常な (?) 変成岩. 国際学術研究研究成果報告書「海洋地殻生成のダイナミクスーオマーンオフィオライトを例としてー」, 131-150.

松影香子・荒井章司, 1999. オマーンオフィオライトのマントル〜モホ遷移帯の火成岩岩石学. 月刊地球, 21, 339-344.

宮下純夫・足立佳子, 1999. オマーンオフィオライトにおける海洋地殻の改編ー北部フィズ地域における例. 月刊地球, 21, 345-353.

Nicolas, A. (1989) : Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 40.

Nicolas, A., 1995. *The Mid-Oceanic Ridges*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 200 p.

Pallister, J.S. and Hopson, C.A. (1981) : Samail ophiolite plutonic suite : field relationships, phase variation, cryptic variation and leysing, and a model of a spreading ridge magma chamber. *J. Geophys. Res.*, 86, 2593-2644.

Pallister, J.S. and Knight, R.J. (1981) : Rare-earth element geochemistry of the Samail ophiolite near Ibra, Oman. *J. Geophys. Res.*, 86, 2673-2698.

高沢栄一, 1999. オマーンオフィオライトのレルゾライトの起源. 月刊地球, 21, 382-388.

海野 進, 1994. 中央海嶺のマグマ供給システム. 地学雑誌, 103, 498-521.

海野 進・中目 大・当山奈々美・杉山佳子・堀田史子, 1999 a. オマーン・オフィオライトのシート状岩脈群の構造とセグメンテーションー北部オマーン山脈・ソハール周辺についてー. 月刊地球, 21, 362-366.

海野 進・中目 大・当山奈々美・杉山佳子・堀田史子, 1999 b. オマーン・オフィオライトのシート状岩脈群の構造とセグメンテーションー北部オマーン山脈・ソハール周辺についてー. 国際学術研究研究成果報告書「海洋地殻生成のダイナミクスーオマーンオフィオライトを例としてー」, 75-91.

海野 進・小幡涼江, 2000. 溶岩流の構造とダイナミクスー溶岩供給率と形成時間ー. 月刊地球, 22, 552-557.

Umino, S., Lipman, P.W. and Obata, S., 2000. Subaqueous lava flow lobes, observed on ROV *KAIKO* dives off Hawaii. *Geology*, 28, 502-506.