



総説

## 日本人による世界のオフィオライト研究

An overview of world ophiolite studies by Japanese researchers

海野 進\*

Susumu Umino\*

2017年10月1日受付.

2018年1月10日受理.

\* 金沢大学理工研究域

College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

Corresponding author: S. Umino.,  
sesumin@staff.kanazawa-u.ac.jp

### Abstract

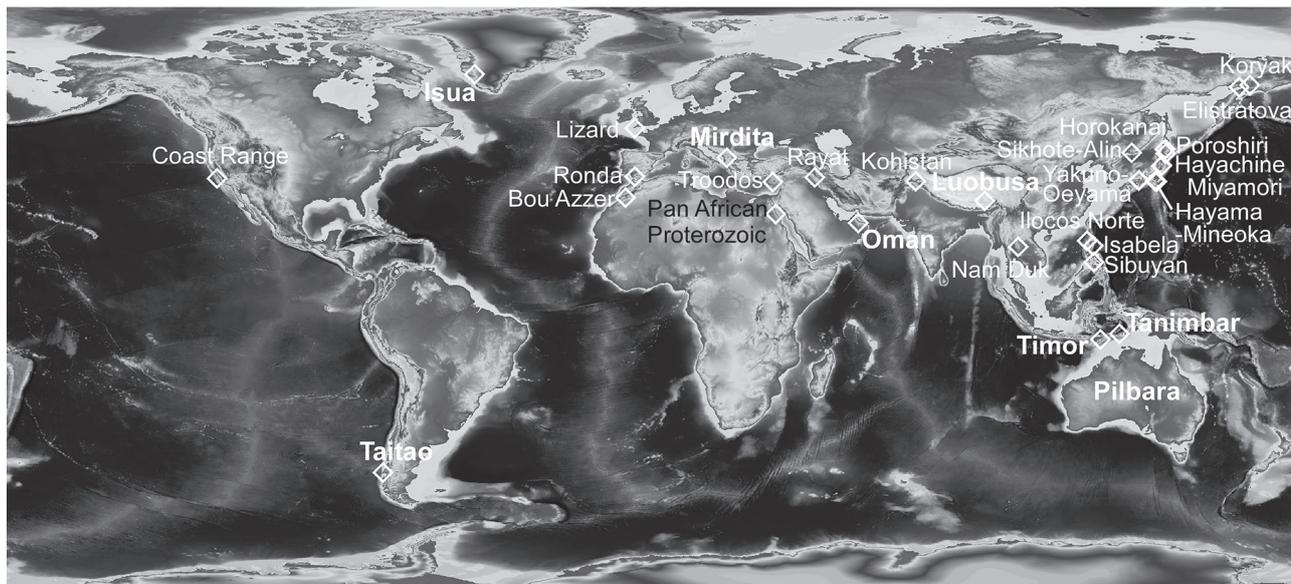
The last quarter-century has been a period of worldwide study of ophiolites by Japanese geologists, as described in this paper. The Oman Mountains expose the world largest and best preserved ophiolite that provides insights into crustal and mantle processes below a fast-spreading system and transformation of oceanic lithosphere to subarc crust and mantle. The Mirdita Ophiolite exposes mantle peridotites covered by mid-ocean ridge basalt (MORB) and arc tholeiitic to boninitic lavas, recording the transition from a spreading to a subduction environment. The Luobusa Ophiolite is well-known for its ultrahigh-pressure minerals such as coesite and micro-diamond inclusions in chromite, considered to represent recycling of subducted slab deep into the mantle at >380 km depth. The 5–3 Ma ophiolites in the Timor and Tanimbar Islands are the world's youngest, and are considered to have formed the forearc crust and mantle that collided with and obducted onto the northern edge of the Australian continent. Volcanic rocks have geochemical characteristics that are intermediate between arc tholeiite and MORB, although the mantle peridotites are not cognate with the overlying volcanic rocks. Another young ophiolite (6–5 Ma) of Taitao, southern Chile, was part of the eastern limb of the Chile Ridge, which was subducted and accreted in an accretionary complex along the western coast of Chile. In spite of their mid-ocean-ridge origin, the lavas and sheeted dikes of ophiolite have geochemical characteristics typical of arc magmas. Isua and Pilbara contain the world's oldest accretionary complexes consisting of superposed slices of oceanic crust that form a duplex structure, indicating the beginning of plate tectonics in the early Archean.

Keywords: ophiolite, Oman, Mirdita, Luobusa, Timor-Tanimbar, Taitao, Isua, Pilbara

### はじめに

ペンローズ会議 (Anonymous, 1972) はオフィオライトを「マフィックから超マフィック岩の集合体」と定義した。完全に発達したオフィオライトは下位から超マフィック複合岩体 (通常はテクトナイト), ガブロ複合岩体 (通常は集積組織を示し, 超マフィック岩類を含む), マフィックなシート状岩脈群, マフィック火山岩 (一般的には枕状溶岩), 堆積岩 (チャート, 頁岩の挟み, 少量の石灰岩) の順で累積した一連の複合岩体からなるが, 各構成要素が断層で接したり, 一部を欠く, あるいは初生的に欠如している場合もある。また, オフィオライトと呼ばれている岩体の多くは「異地性」であり (Coleman, 1977), 構造的に下位または上位の地層と断層で接する。通例, オフィオライトは海洋リソスフェア (海洋地殻+融け残りマントル) の断片と解釈されているが, ペンローズ会議 (Anonymous, 1972) によるオフィオライトの定義には成因や起源は含まれない。この点は注意を要する。こ

の20–30年間のオフィオライト研究の進展によって, オフィオライトの多くは島弧火成活動を含む複数の火成活動を通じて形成されたことを明らかにした (e.g., Umino et al., 1990; Shervais, 2001; Dilek and Polat, 2008)。したがって, 「海洋リソスフェアの断片」という表現は必ずしも適切とは言えない場合がある。例えば, オマーン山脈北部のオフィオライトではマントル岩中に島弧マグマの上昇経路となった高枯渇帯や非調和的ダナイト–クロミタイト岩体があり, 拡大軸下上昇した融け残りマントル岩が部分的に島弧下マントルへ改変されている (高澤, 2012; Kanke and Takazawa, 2014)。拡大軸下で形成された海洋地殻は島弧火成活動の産物である火山噴出物で覆われたり, 岩脈・深成岩体に貫入され, 地殻の一部あるいは大部分が島弧地殻に置換されている (Umino et al., 1990; Yamasaki et al., 2006; Tsuchiya et al., 2013; Yamazaki, 2013; Kusano et al., 2014, 2017)。この島弧深成岩体には伊豆–小笠原弧の中部地殻に相当するトーナライトや石英閃緑岩などの中間組成の深成岩も存在す



**Fig. 1.** Locations of ophiolites studied by Japanese researchers during the last quarter-century. Locations in bold text are described in this study.

ることから、部分的には大陸地殻という言い方もできる (Tatsumi et al., 2015). また、顕生代の緑色岩体はブルーム起源の巨大海台の一部が付加帯に取り込まれたもので、オフィオライトとは区別されるとの考えがある (石渡, 2010). しかしマントルポテンシャル温度が 1500–1600°C と推定される原生代～始生代の中央海嶺では、MgO 18–24 wt% のピクライト～コマチアイトが厚さ 25–30 km の海洋地殻を形成した可能性がある (Herzberg et al., 2010). このような海洋地殻の断片が付加帯を形成した場合、ブルーム起源の海台と拡大軸で形成された海洋地殻との区別は容易ではない。当面はペンローズ会議の提案のように、成因や起源を問わず「オフィオライト」の用語を使うのがよいだろう。新たな分析・解析手法の開発・導入や現在の海洋底形成プロセスについての理解とともに、オフィオライトの起源や定置プロセスについても再検討や新たな展開が今後も起きるであろう。

地質学会 100 周年までの日本人によるオフィオライト研究は限られた例外 (例えば, Obata, 1980; Ishiwatari, 1985; Umino et al., 1990; Yanai et al., 1990) をのぞいて、もっぱら日本国内や周辺地域の地質体に関するものであった。それらの多くはオフィオライト岩体を識別し、その産状と岩石化学的性質をもとに、どのようなテクトニックセッティングにおいて形成され、現在ある場に定置したかということに主眼がおかれていた (石渡, 1989; 2010). オフィオライトの定置機構には少なくとも付加型と大陸衝突型がある (石渡, 2010). 付加型のオフィオライトでは、構造的な下位ほど若い時代のオフィオライト、高压変成岩、付加体などがスラブの沈み込みによって底付けし、付加体の一部となる。日本をはじめとする極東地域、北米西岸、パプアニューギニア～ニューカレドニアなど、環太平洋造山帯の多くのオフィオライトは付加型とされている (Ishiwatari et al., 2003). 一方、

テーチス海オフィオライトなどの大陸衝突型のオフィオライトは、古い大陸地殻の上に衝上するか、上下 2 つの古い大陸地殻の間に挟まれる。オフィオライトナップの下にくるナップ群は、構造的な上位から下位にかけて遠洋性から浅海の大陸棚～縁辺の堆積岩へと変化する。Ishiwatari (1994) は世界のオフィオライトが約 750 Ma, 450 Ma, 150 Ma と 3 つの形成年代のピークがあることを指摘し、約 3 億年周期の地球の火成活動の活発な時期に対応すると考えた。さらに、大陸地域の造山帯とは異なり、環太平洋造山帯では古いオフィオライトが新しいオフィオライトの上に重なり、顕生代全体に渡って形成された「環太平洋顕生代多重オフィオライト帯」をなすとした (Ishiwatari, 1994).

100 周年以降の 25 年間は日本の地質学者が広く海外に活躍の幅を広げた四半世紀であった。とりわけ、日本人によってこれまで培われてきた精緻な野外調査技術と付加体研究などの日本発の地質学を活用して、多くの重要な成果が挙げられた。詳細な地質調査に基づく海洋地殻の形成プロセス (Adachi and Miyashita, 2003; Umino et al., 2003; Kusano et al., 2012; Umino, 2012) や始生代の海洋地殻層序の復元 (Maruyama and Komiya, 2011; Komiya et al., 1999, 2004), 海洋リソスフェア間の沈み込み帯発生過程と島弧の形成 (Ishikawa et al., 2002, 2005; Morishita et al., 2011; 高澤, 2012; Tsuchiya et al., 2013; Kanke and Takazawa, 2014; Kusano et al., 2014, 2017), 大陸縁へ衝上しつつある前弧地殻・マントル (Kaneko et al., 2007; 石川ほか, 2011) など枚挙にいとまがない。また、新たな分析機器の導入や解析手法の開発により、オフィオライトを構成するマントルカンラン岩の精密な上昇プロセス (Ozawa and Takahashi, 1995) やマントル中のマグマの移動・反応プロセス (Ozawa, 2001; 小澤, 2005; Sano and Kimura, 2007;

Akizawa et al., 2016a), マントルの流動・変形機構 (Michibayashi et al., 2000, 2006), マントル岩中の微小包有物の同定・分析 (Ahmed and Arai, 2002, 2003; Yamamoto et al., 2009, 2013) などが勢力的に進められた (Fig. 1). この四半世紀は日本人研究者が広く海外へ進出しただけでなく, 海外から日本の大学, 研究機関に留学した多くの外国人学生も研究の発展に貢献した (Ahmed and Arai, 2002, 2003; A' Shaikh et al., 2005, 2006; Veloso et al., 2005; バヤルマンダール, 2007; Payot et al., 2011; Abbou-Kebir et al., 2015 など). その結果, 日本の地質学者による数多のオフィオライト研究は, 国際的に第一線級の研究として認知され, 世界のオフィオライト研究の発展に大きな寄与をするまでに成長した. これらの研究成果が一握りの傑出した研究者にとどまらず, 個人や少数のグループから大規模な組織的調査まで多くの研究者によって行われた多岐に渡る研究であることは, 明治の文明開化以来, 欧米先進国の地質学研究を後追いしてきた日本の地質学が, ようやく成熟した段階を迎えつつあることを体現したものであり, 特筆に値する. そこで, 本小論ではこれらの日本人による数多くのオフィオライト研究のうち, 特に世界のオフィオライトについて行われた主だった研究を紹介する.

## 日本人による世界のオフィオライト研究

### 1. オマーンオフィオライト

オマーンオフィオライト研究については2度の海外学術調査以降, 継続的に金沢大学, 新潟大学, 静岡大学をはじめとする多くの大学, 研究機関の研究者によって実に多面的な研究が行われた. 125周年特集に別途レビューが掲載されるので, 詳細はそちらを参照されたい.

オマーンオフィオライトはオマーン湾に面したアラビア半島東縁に沿って延長450 km, 幅120 km以上に広がる世界最大のオフィオライトナップ群である. アラブ首長国連邦(UAE)北部からオマーン北部にまたがって延びる山脈沿いに分布することから, 全体を指す場合はUAE-オマーンオフィオライトなどと呼ばれる. 厚さ4-5 kmの海洋地殻から厚さ1 km以下のモホ遷移帯を経て厚さ8-10 kmのマントル岩までがほぼ連続的に露出する (Lippard et al., 1986; Nicolas, 1995). オフィオライトの主要な部分を形成したV1期は, 高速拡大軸で生じた海洋地殻とマントル(ハルツバージャイトとダナイト, 少量のルールズライト)からなる. 続いて起きたV2期は, 無人岩および島弧ソレアイト質火山岩, 岩脈と深成岩からなる. 厚い遠洋性堆積物の堆積間隙の後に起きたV3期は, アルカリ玄武岩の巨大溶岩流と岩脈群からなる (Umino, 2012). オフィオライト岩体は構造的低位にメタモフィックソールと呼ばれる変成岩からなるナップを伴っている. 変成度が上位のカンラン岩へ向けて角閃岩相からグラニュライト相まで上昇することから, 海洋リソスフェアの下に潜り込んだ海洋地殻が変成し, 一部がリソスフェア底に張り付いたままアラビア大陸に衝上したものとされている (Lippard et al., 1986; Nicolas, 1995).

90年代前半までの研究の概要は海野(1995)に, 2002年

までは宮下ほか(2002)にオフィオライト全体の総括がある. V1期についてはKusano et al.(2012)が岩相の層序変化に基づいて, 海嶺軸上, 海嶺斜面および山麓のオフリッジに定置した溶岩を区別し, オフリッジでは枯渇した未分化溶岩がその場で噴出したと説明した. Umino et al.(2003), Miyashita et al.(2003)はオマーン山脈北部のV1期のシート状岩脈群の走向と全岩組成の変化に基づいて古拡大軸のセグメント構造を論じた. またAdachi and Miyashita(2003)は同地域のセグメント境界にある深成岩体の構造と岩脈の貫入関係, 全岩・鉱物組成から北向きの伝搬性海嶺の存在を明らかにし, 宮下ほか(2002)は伝搬性拡大軸による海洋地殻構造のモデルを示した. 地震波トモグラフィーによれば拡大軸下のマグマ溜りは下部地殻を通してほぼ一定の4-5 kmの範囲に収まり, 下部地殻からマントルにかけて活発な熱水活動が存在することを示唆するが(Dunn et al., 2000), その実態はほとんど知られていなかった. Yoshitake et al.(2009)はシート状岩脈群~ガブロを置換する緑泥石岩体について報告し, Python et al.(2007)や秋澤ら(Akizawa et al., 2011, 2014, 2016b)は800°Cから500°Cという高温の熱水から形成されたCrに富むディオプサイド岩脈をマントル最上部~下部地殻から報告した. 下部地殻の層状ガブロから下位に向かって, ガブロ層の間にダナイトが挟在するようになり, 次第にダナイト優勢となって, ダナイト中にガブロシルやネットワーク状のガブロが出現するようになるモホ遷移帯へと移化する. 上杉ら(2003)とAkizawa and Arai(2009)はモホ遷移帯からハルツバージャイト優勢のマントルカンラン岩テクトナイトへの岩相・鉱物組成変化を報告し, 海嶺軸下で上昇したマグマが壁岩のハルツバージャイトと反応してダナイトを形成し, マグマチャンネルに取り残されたメルトは固化してガブロ岩脈となったと説明した. モホ遷移帯は, ダナイト-ガブロ複合岩体がアセノスフェアの対流に乗って回転し, リソスフェアである地殻下底に沿って塑性流動したと考えた. 中央海嶺玄武岩(MORB)はマントルハルツバージャイトと非平衡であるが, モホ遷移帯直下にはMORBと共存可能な高Mg値( $100 \times \text{Mg}/[\text{Mg} + \text{Fe}]$ )の単斜輝石を含有するハルツバージャイトが出現する (Akizawa et al., 2012). Akizawa et al.(2016a)は, 開放系の減圧溶融モデルを用いてダナイトチャンネルとハルツバージャイトの単斜輝石の微量元素組成をシミュレーションし, モホ遷移帯の分別集積溶融したメルトとザクロ石の安定領域で生じた軽希土類元素に富むメルトが混合して通常のMORBとなったこと, より高温のセグメント中心ではザクロ石の安定領域から溶融が開始することを示した. Takazawa et al.(2003)は北部オマーン山脈のV1期のマントルカンラン岩の全岩および鉱物組成から, ハルツバージャイトからなるカンラン岩体の低位にルールズライトが存在し, ザクロ石の安定領域での融け残り岩と軽希土類元素に枯渇したメルトとの反応, あるいは軽希土類元素に富んだメルトによる再肥沃化を受けたと考えた. Michibayashi et al.(2000)は, オマーン山脈北部のマントルカンラン岩の構造変形の剪断センスがモホ遷移帯から層序的に低位へ向かって逆転することを

示し、海嶺下にダイアピル的に上昇するマントル流動モデルを支持した。このダイアピルモデルによれば、北部オマーン山脈のオフィオライト岩体は海嶺軸の東翼にあたる。

V2期の火山層序的、地球化学的研究としては、Ishikawa et al. (2002, 2005), Kusano et al. (2014, 2017) などがあ  
る。Ishikawa et al. (2002) はオマーンオフィオライトの  
V2期の噴出物から初めて無人岩を報告し、Ishikawa et  
al. (2005) ではメタモルフィックソールの角閃岩の微量元素  
組成からスラブ流体の組成を推定し、V2期の島弧ソレ  
アイト質安山岩と無人岩の微量元素組成が復元できることを示  
した。また、Kusano et al. (2014, 2017) はV1期のMORB  
からV2期の島弧ソレアイト～無人岩へと後期ほど累進的に  
ソースマントルが枯渇していったことを示し、MORBの融  
け残りマントルがスラブ流体・メルトの付加によりその場で  
繰り返し融解したと考えた。これは拡大軸近傍で発生した若  
い海洋リソスフェアの低角高温の沈み込みによってマントル  
ウェッジ内で対流が起こらなかったため、それによりV2  
期の島弧火山活動は300万年足らずの短命で終わったと論  
じた。このマグマ組成とマントルウェッジの物質的進化の履  
歴は、古くて冷たい太平洋プレートの沈み込みに始まり、マ  
ントルウェッジ内で対流が起こることによってその後も持続  
的に島弧火成活動が続く伊豆-小笠原-マリアナ弧とは全く  
異なる(Kanayama et al., 2012; Umino et al., 2015, 2018)。  
Tsuchiya et al. (2013) はV1期の層状ガブロに貫入した島  
弧ソレアイト系列のガブロ、ガブロノーライト、閃緑岩、  
トーナライトなどからなるV2期の複合深成岩体の産状と分  
布、全岩・鉱物化学組成および99-100 Maというジルコン  
のU-Pb年代を報告した。高澤(2012)とKanke and Taka-  
zawa (2014) はマントル岩体中の高枯渇帯を報告し、ス  
ラブ流体が収束した流路に沿ってフラックス融解が起こり、  
V2期の島弧マグマの上昇経路となったと提唱した。この島  
弧メルトチャンネルとなった高枯渇帯と並行して走る左横  
ずれ剪断帯があるが、その変形組織の解析から拡大軸から  
沈み込み帯への転換ないし海洋リソスフェアの衝上運動に  
伴って形成された剪断帯であると考えられる(Michibayashi  
and Mainprice, 2004; Michibayashi et al., 2006)。マ  
ントルカンラン岩下部には厚さ10-30 cmの斜方輝石岩  
脈が分布し、上昇するスラブメルトとハルツバー  
ジャイトの反応によって形成されたと考えられる(Tamura  
and Arai, 2006)。カンラン岩面構造を横切る非調和  
的ダナイトに包有されるクロミタイトポッドを分析した  
Miura et al. (2012, 2014) は、クロムスピネルのCr/(Cr+Al)  
比(Cr値)が0.65-0.75と高く、パーガス閃石を包有  
すること、クロミタイトの周囲のダナイトやハルツバ  
ージャイト中の単斜輝石が重希土類元素に枯渇している  
ことから、島弧マグマが通過した上昇チャンネルに沿  
って非調和ダナイトが形成されたと考えた。これらの  
クロミタイトは白金族元素の中でもIr, Os, Ru含有量  
が高いことで、拡大軸下で形成された調和的クロミ  
タイトと区別される(Ahmed and Arai, 2002, 2003)。ま  
た、マントルカンラン岩最上部にはスピネルに乏しく  
Fo94に達する非調和ダナイト岩脈があり、無人岩  
マグマから晶出したカンラン

石集積岩と考えられる(Abbou-Kebir et al., 2015)。

モホ遷移帯からシート状岩脈群の最下部にかけて数m  
から数kmにわたる大小の“ウエールライト”の貫入  
岩体が分布する。これらの多くはダナイト～ウエール  
ライト～カンラン石ガブロの複合岩体で、層状ガ  
ブロとの鉱物組成の類似性からV1末期のオフ  
リッジの火成活動とされているが、一部にV2  
期のマグマ起源と考えられるものがある(Adachi  
and Miyashita, 2003; Yamasaki et al., 2006)。北  
部オマーン山脈にはオフィオライトで最大規模の  
ウエールライト岩体があり(Umino et al., 1990)、  
モホ遷移帯のウエールライト層と同様の鉱物  
組成からV1期の産物であると考えられる  
(Kaneko et al., 2014)。

90 Ma頃に流下したV3期のアルカリ玄武岩は、  
V2期の島弧ソレアイト質岩および無人岩類を  
被う厚さ30 mを超える頁岩層の上位に流下  
または頁岩層最上部に貫入している。V1溶  
岩の上部からV2溶岩にかけて貫入した西  
北西-東南東走向の厚い岩脈から供給され  
たV3溶岩は、拡大軸に平行する落差100  
m以上の深海地塁と地溝帯を埋める体積  
10 km<sup>3</sup>を超える巨大海底溶岩流を形成した  
(Umino, 2012)。

## 2. ミルディータ(Mirdita)オフィオライト

ミルディータオフィオライトはイタリアアル  
プスからマケドニア～ギリシアを経てトル  
コに至る大陸衝突帯に分布する中～後期  
ジュラ紀のテーチス海オフィオライトの一  
つである。南北60 km、東西40 kmに  
広がる同オフィオライトは東のPelagonia、  
西のQqulia微小大陸の受動的縁辺域と接  
する。西半の西ミルディータオフィオ  
ライトは中央海嶺的とされ、蛇紋岩化し  
たレーブルライトからなるマントル岩が  
ソレアイト溶岩に覆われる(Dilek and  
Morishita, 2009)。東半の東ミル  
ディータオフィオライトはハルツバー  
ジャイトやダナイトからなるマントル  
岩が玄武岩～流紋デイサイトや無人  
岩溶岩に覆われる。下位から上位に向  
かってMORBから島弧ソレアイト質  
岩を経て無人岩となる。Morishita  
et al. (2011) は東ミルディータの  
マントル岩の岩相分布と鉱物組成変化  
を調べ、下部は含単斜輝石ハルツバ  
ージャイトからなり、上位ほど枯渇  
したハルツバージャイトとダナイトが  
多くなり、スピネルのCr値は含単  
斜輝石ハルツバージャイトで0.48、  
ダナイトで0.8を越えると報告した。  
マントル岩体上部にはシリカに富む  
流体とハルツバージャイトが反応し  
て形成された斜方輝石岩の岩脈・  
ネットワークが多く出現する。単  
斜輝石の微量元素組成のモデル計  
算から、含単斜輝石ハルツバー  
ジャイトは枯渇したMORBマントル  
が17 wt% 分別溶融してMORBを  
分離した融け残り岩であるとした。  
一方、メルトが枯渇したハルツバ  
ージャイトと反応しつつ上昇する  
開放系の計算では、集積メルトは  
ダナイトと平衡な組成となるが、  
観察される無人岩全岩化学組成  
とは一致しない。これは初生マグ  
マが噴出するまでに結晶分化や  
下部地殻と反応したためと考え  
られる(Morishita et al., 2011)。

## 3. ルオブサオフィオライトと古代のリサイクルスラブ

南チベットに位置するルオブサ  
オフィオライトは構造的低位の中  
新世のモラッセからなるLuobusa  
Formationと上位のインド垂大陸  
の三疊紀フリッシュの間に挟在し、  
ハルツ

バーチャイトからなるマントルカンラン岩を主体とし、溶岩、ガブロ、輝石岩、チャートが蛇紋岩マトリックス中に散在するメランジェによって覆われている(Yamamoto et al., 2009). ルオブサオフィオライトはまず 177 Ma 頃に中央海嶺で形成された海洋リソスフェアが、120 Ma になって沈み込み帯の火成活動を経験し、その後定置した、1.5 GPa の平衡圧力を記録するカンラン岩由来のスピネルから微小なダイヤモンドやコーサイトなどの超高压鉱物が報告された(Bai et al., 1993; Pearson et al., 1995; Yang et al., 2007) ことで注目される。Yamamoto et al. (2009) はマントル岩上部のダナイト中のクロミタイトから針状~薄板状のディプサイド、コーサイト、非晶質 MgSiO<sub>3</sub> を見出し、深さ 12.5 GPa 以上(>380 km) で安定な CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 構造をとるクロマイトの高压相が、低圧で形成した離溶ラメラであると考えた。このことから、クロミタイトは深さ 380 km に達するマントルで形成された後、海嶺下の浅所に上昇したと説明した。荒井(2010, 2012) は、低圧下で形成されたクロミタイトが沈み込むスラブとともに遷移帯、あるいは下部マントルまで運ばれた後、海嶺下に上昇してきたリサイクルスラブ由来である可能性を唱えた。クロマイト中の輝石やパーガス閃石、Na フロゴパイトなどの包有物は昇圧時に分解し、残ったケイ酸分がクロマイトに溶解した後、減圧時に離溶してケイ酸塩鉱物ラメラとなったと考えられる。また、クロマイト中の二酸化炭素包有物がマントル深部で還元されてダイヤモンドとなったと説明した。

#### 4. 世界で最も新しいオフィオライト: チモール-タニンバー諸島とタイタオ半島

オーストラリア大陸と南バンダ海盆の間に東西に延びるチモール~タニンバール諸島には 5-3 Ma (Harris, 2000) に形成された世界で最も新しい大陸衝突型のオフィオライトが分布する。チモール~タニンバール諸島の基盤岩は構造的な下位より(1)非・弱変成のオーストラリア大陸縁被覆岩類からなる褶曲・衝上断層帯、(2) 高压型変成帯、(3) オフィオライト岩体の順で衝上している。若い形成年代とオフィオライト帯の 100-200 km 背弧側に第四紀の火山フロントが位置することから、オフィオライトは沈み込んだ浮揚性の大陸プレートによって持ち上げられた前弧域の地殻・マントルであると考えられる(Kaneko et al., 2007; 石川ほか, 2011)。西チモールのオフィオライトではカンラン岩(Atapupu ユニット)の上位に枕状溶岩・ドレイイト(Ocussi ユニット)が累重するが、直接両者の関係は確かめられてはおらず、断層によって初生的な構造が乱されている可能性がある。オフィオライトの火山岩類は島弧ソレイトと中央海嶺玄武岩の中間的な組成を示し、背弧拡大の拡大初期~中期に形成される玄武岩と似ている。これに対してマントルカンラン岩は主にスピネルレゾライトからなり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に富む(<8.8 wt%) 斜方輝石やスピネル(Cr 値 0.1-0.3) を有することから、地殻を構成する火山岩類とは起源が異なると考えられる。枯渇したハルツバーチャイト、ダナイト、カンラン石ウェプステライトも存在するが、量的には少ない。この点は枯渇したハルツバーチャイト~ダナイトを多く産出する伊豆-小笠原-マ

リアナ前弧域とは異なる。Ishikawa et al. (2007) は、マントル岩中の枯渇したダナイト(スピネルの Cr 値 0.5-0.8) やチモール島東方の Moa 島にカンラン岩体に貫入した高 Mg 安山岩が存在することから、深さ方向に組成が変化する前弧域リソスフェアが衝上したと考えた。

タイタオオフィオライトはチリ海嶺とチリ海溝の三重会合点の 30 km 南東に位置する。オフィオライトはチリのタイタオ半島西端の南北 40 km ほどに広がり、北から南に向かって火山岩類(Main Volcanic Unit および Chile Margin Unit)、シート状岩脈群、ガブロ、マントルカンラン岩が分布する(Anma et al., 2006)。シート状岩脈群およびガブロから 5.7-5.2 Ma のジルコン U-Pb 年代が得られており、シート状岩脈群は 5.1 Ma のジルコン U-Pb 年代を有する Seno Hoppner 花崗岩によって貫入されている。またマントル岩と接して南部にも 5.9-3.9 Ma の花崗岩類が分布し、合わせて Taitao 花崗岩類と呼ばれている(Shin et al., 2009)。カンラン岩とガブロ類は褶曲と衝上断層による変形・変位を被り、オフィオライト南東部でテクトニックスライスとなって繰り返している(Annma et al., 2009)。太平洋沿岸に分布するシート状岩脈群は北西-南東走向であるが、北端の Estro Cono では北北東-南南西走向である。Veloso et al. (2005) および Anma et al. (2006) は、沈み込んだチリ海嶺の東翼が付加してオフィオライトとなり、引き続いて沈み込んだ海嶺西翼との剪断によってカンラン岩およびガブロが塑性変形を受けたとした。岩石磁気学的考察によると、シート状岩脈群の初生的な走向は北北東-南南西であり(Veloso et al., 2005)、現在沈み込みつつある北北西-南南東走向の海嶺軸とは斜交する。Anma et al. (2006) はこれを近傍のトランスフォーム断層の影響によると考えた。タイタオオフィオライトの火山岩およびシート状岩脈群は Nb, Ta に対して Rb, Ba、軽希土類元素濃度が高く、通常の MORB とは異なる特徴を示す(Shin et al., 2009)。これはチリ海嶺の玄武岩の地球化学特徴と共通しており、Sturm et al. (2000) は拡大中のチリ海嶺が沈み込んだ結果、沈み込んだ変質海洋地殻が崩壊して海嶺下のアセノスフェアに取り込まれたか、沈み込んだ海嶺軸を通過してマントルウェッジが海嶺下に混入したと説明した。そこで Anma et al. (2006) はチリ海嶺玄武岩のようなスラブ的な成分を有する海洋地殻が沈み込み、タイタオオフィオライトを形成したと考えた。また、タイタオオフィオライトとなった若くて高温の海洋地殻が部分溶融してタイタオ花崗岩類となったとした(Annma et al., 2009; Shin et al., 2009)。タイタオオフィオライトは拡大中の若く浮揚性の海嶺が沈み込むことによって、正真正の中央海嶺起源でありながら島弧的な性質を有するオフィオライトが形成された実例として、オフィオライトの形成場について地球化学的データのみで立脚した議論に警鐘を鳴らすものとして重要である(宮下ほか, 2002)。

#### 5. 最古の付加体: プレートテクトニクスの始まり

西グリーンランド南部に分布する 38.8-36.6 億年前の Amitsoq gneiss と 28.2 億年前の Ikkattoq gneiss からなる Akulleq テレーンには、地球最古の表層岩起源の地質帯

であるイスア岩体 (Isua supra-crustal belt) が分布する (Friend et al., 1987; Nutman et al., 1989; Komiya et al., 1999). イスア岩体は Akulleq テレーン内の表層岩体の中では最大のもので、延長 35 km に及ぶ弧状の分布をなし、強い変形と角閃岩相の変成作用を被っている。最も変成度が低い岩体北東部では、変形が弱く、初生的な構造を残している。Komiya et al. (1999) らは変成作用を受ける前の初生的な岩相を同定し、岩体を構成する岩相区分を行い、タービダイト、チャートと縞状鉄鉱層、枕状溶岩やハイアロクラスタイトなどの水底溶岩、貫入岩体、超マフィック岩体を識別した。さらに、これらの岩相に基づいてイスア岩体の海洋地殻層序の復元を行い、デュープレックス構造の存在を示すことによって、地球最古の付加体であることを明らかにした (Komiya et al., 1999, 2004; Maruyama and Komiya, 2011)。したがって、顕生代に起きていたようなプレートテクトニクスは 38 億年前には始まっていたと論じた。

オーストラリア大陸は東から西へ向かって順次古いクラトンが分布し、西南部と西北部に始生代のイルガン (Yilgan) とピルバラ (Pilbara) 地塊がある。最も古いピルバラ地塊は、中心部～北部をしめる 38–28 億年前の低変成度の玄武岩～コマチアイトと花崗岩類およびこれらを被う 28–25 億年前の被覆岩層からなる (Hickman, 2012)。火山岩類は不整合で重なる 8 つの火山サイクルからなり、コマチアイト (MgO > 22 wt%) は各サイクルの最下部に多く、コマチアイト質玄武岩 (MgO 8–22 wt%) は下部に集中するが、層序的上部にも少量出現する。ソレイト質玄武岩は TiO<sub>2</sub> 含有量が高いもの (TiO<sub>2</sub> > 0.8 wt%) と低いもの (TiO<sub>2</sub> < 0.8 wt%) が互層する。梶島・寺林 (2002)、Komiya et al. (2002) らはノースポール周辺のピルバラ地塊において、火山岩を含む一連の堆積層序を復元し、厚さ 100–1000 m の枕状溶岩などの水底溶岩流に始まり、その上位に 10–70 m の層状チャート、最上位に薄い玄武岩質砂岩が堆積することを示した。火山岩中の残留単斜輝石の微量元素・希土類元素濃度は、MORB および大洋島玄武岩的な特徴を示す (Komiya et al., 2002) ことから、海洋地殻上部に相当するとした。一連の層序を有する構造単位は断層で繰り返し、衝上断層で重なる 3 つのユニットを構成する。彼らはこのような地質構造を付加体に発達するデュープレックス構造ととらえ、最上位の玄武岩質砂岩を海溝充填堆積物に対比した。また、顕生代の付加体に比べて海溝充填堆積物が薄いことを挙げ、当時の未発達な島弧・大陸地殻からの陸源堆積物の供給が乏しかった可能性や、厚い海洋地殻の付加プロセスの違いを指摘した。変成鉱物組合せの層序変化から、これらの火山岩類は広域的にブドウ石-パンペリー石相から緑色片岩相までの変成作用を被っており、比較的低压であることから一種の大洋底変成作用であると考えられる (Terabayashi et al., 2003)。

## おわりに

100 周年以降の四半世紀は、日本の地質学者が世界に広く活躍の場を駆け、国内の地質研究に根ざしたアイデアで世界を席卷した 25 年間であった。この観点から本小論では世

界のオフィオライト研究を取り上げて紹介させていただいた。しかし、これらの研究事例についてもほんのダイジェストでしかなく、全容を網羅するにはほど遠い。国内のオフィオライト研究の近年の進展をはじめ、アフリカ-中東、ヨーロッパ、モンゴル、アリューシャンのオフィオライトなど今回紹介できなかった研究が数多く存在する。また、本小論で紹介した事例についても、筆者の理解不足から不十分な解説や誤解を招くような表現があるかも知れない。平にご容赦願いたい。

## 謝 辞

本小論をまとめるにあたり、静岡大学の道林克禎氏をはじめ編集委員の方々には多大なご苦勞をおかけした。査読者の森下知晃氏、宮下純夫氏には建設的なコメントをいただいた。あらためて御礼申し上げます。

## 文 献

- Abbou-Kebir, K., Arai, S. and Ahmed, A. H., 2015, Spinel-free dunites as a proxy to komatiitic melt activity in the mantle. *Lithos*, **216–217**, 315–323.
- Adachi, Y. and Miyashita, S., 2003, Geology and petrology of the plutonic complexes in the Wadi Fizh area: Multiple magmatic events and segment structure in the northern Oman ophiolite. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 8619, doi: 10.1029/2001GC000272.
- Ahmed, A. H. and Arai, S., 2002, Unexpectedly high-PGE chromitite from the deeper mantle section of the northern Oman ophiolite and its tectonic implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 263–278.
- Ahmed, A. H. and Arai, S., 2003, Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman Ophiolite. *Can. Mineral.*, **41**, 597–616.
- Akizawa, N. and Arai, S., 2009, Petrologic profile of peridotite layers under a possible Moho in the northern Oman ophiolite: an example from Wadi Fizh. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **104**, 389–394.
- Akizawa, N., Arai, S. and Tamura, A., 2012, Behavior of MORB magmas at uppermost mantle beneath a fast-spreading axis: an example from Wadi Fizh of the northern Oman ophiolite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **164**, 601–625.
- Akizawa, N., Arai, S., Tamura, A., Uesugi, J. and Python, M., 2011, Crustal diopsidites from the northern Oman ophiolite: Evidence for hydrothermal circulation through suboceanic Moho. *Jour. Mag. Min. Petr. Sci.*, **106**, 261–266.
- Akizawa, N., Ozawa, K., Tamura, A., Michibayashi, K. and Arai, S., 2016a, Three-dimensional evolution of melting, heat and melt transfer in ascending mantle beneath a ast-spreading ridge segment constrained by trace elements in clinopyroxene from concordant dunites and host harzburgites of the Oman Ophiolite. *Jour. Petrol.*, **57**, 777–814.
- Akizawa, N., Tamura, A., Fukushi, K., Yamamoto, J., Mizukami, T., Python, M. and Arai, S., 2016b, High-temperature hydrothermal activities around suboceanic Moho: An example from diopsidite and anorthosite in Wadi Fizh, Oman ophiolite. *Lithos*, **263**, 66–87.
- Anma, R., Armstrong, R., Danhara, T., Orihashi, Y. and Iwano, H., 2006, Zircon sensitive high mass-resolution ion microprobe U–Pb and fission-track ages for gabbros and sheeted dykes of the Taitao ophiolite, Southern Chile, and their tectonic implications. *Island Arc*, **15**, 130–142.
- Anma, R., Armstrong, R., Orihashi, Y., Ike, S., Shin, K.-C., Kon, Y.,...Hervé, F., 2009, Are the Taitao granites formed

- due to subduction of the Chile ridge? *Lithos*, **113**, 246–258.
- Anonymous, 1972, Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, **17**, 24–25.
- Arai, S., 2010, Possible recycled origin for ultrahigh-pressure chromitites in ophiolites. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **105**, 280–285.
- 荒井章司(Arai, S.), 2012, ポディフォーム・クロミタイトはマントル内を循環するか?: 超高压クロミタイトの謎(Podiform chromitites possibly recycled within the mantle). 岩石鉱物科学(*Jour. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **41**, 247–256.
- A'Shaikh, D., Matsueda, H., Mizuta, T. and Miyashita, S., 2006, Hydrothermal Alteration of Oman Ophiolite Extrusives in Ghuzayn Area. *Resour. Geol.*, **56**, 167–183.
- A' Shaikh, D., Miyashita, S. and Matsueda, H., 2005, The petrological and geochemical characteristics of a volcanic suite within Oman ophiolite. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **100**, 202–220.
- Bai, W. J., Zhou, M. F. and Robinson, P., 1993, Possibly diamond-bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Donqiao ophiolites, Tibet. *Can. Jour. Earth Sci.*, **30**, 1650–1659.
- サムスレン バヤルマンダル(Bayarmandal, L.), 2007, 西モンゴル, アルタイ地域のハнтаイシルオフィオライトの岩石学的特徴と形成場のテクトニックセッティング(Petrological characteristics and tectonic setting of the Hantaishir ophiolite complex, Altai region, West Mongolia). 岩石鉱物科学(*Jour. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **36**, 42–57.
- Coleman, R. G., 1977, *Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere?*, Springer Berlin, 229p.
- Dilek, Y. and Morishita, T., 2009, Melt migration and upper mantle evolution during incipient arc construction: Jurassic eastern Mirdita ophiolite, Albania. *Island Arc*, **18**, 551–554.
- Dilek, Y. and Polat, A., 2008, Suprasubduction zone ophiolites and Archean tectonics. *Geology*, **36**, 431–432.
- Dunn, R. A., Toomey, D. R. and Solomon, S. C., 2000, Three-dimensional seismic structure and physical properties of the crust and shallow mantle beneath the East Pacific Rise at 9°30'N. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 23537–23555.
- Friend, C. R. L., Nutman, A. P. and McGregor, V. R., 1987, Late Archean tectonics in the Faeringehavn-TreBrodre area, south of Bukesfjorden, southern West Greenland. *Jour. Geol. Soc. London*, **144**, 369–376.
- Harris, R. A. and Long, T., 2000, Timor ophiolite, Indonesia: Model or myth? In Dilek, Y., Moores, E. M., Elthon, D. and Nicolas, A. eds., *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Geol. Soc. Am., Spec. Pap., 321–330.
- Herzberg, C., Condie, K. and Korenaga, J., 2010, Thermal history of the Earth and its petrological expression. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **292**, 79–88.
- Hickman, A. H., 2012, Review of the Pilbara Craton and Fortescue Basin, Western Australia: Crustal evolution providing environments for early life. *Island Arc*, **21**, 1–31.
- 石川 晃・金子慶之・太田 努・磯崎行雄(Ishikawa, A., Kaneko, Y., Ota, T. and Isozaki, Y.), 2011, インドネシア非火山性外弧のオフィオライトー世界最若オフィオライトの産状と岩石学的多様性ー(Ophiolites in the non-volcanic Banda Outer Arc of East Indonesia: Field occurrence and petrological variety of the world's youngest ophiolite). 地学雑(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **119**, 1–13.
- Ishikawa, T., Fujisawa, S., Nagaishi, K. and Masuda, T., 2005, Trace element characteristics of the fluid liberated from amphibolite-facies slab: Inference from the metamorphic sole beneath the Oman ophiolite and implication for boninite genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **240**, 355–377.
- Ishikawa, A., Kaneko, Y., Kadarusman, A. and Ota, T., 2007, Multiple generations of forearc mafic-ultramafic rocks in the Timor-Tanimbar ophiolite, eastern Indonesia. *Gondwana Res.*, **11**, 200–217.
- Ishikawa, T., Nagaishi, K. and Umino, S., 2002, Boninitic volcanism in the Oman ophiolite: Implications for thermal condition during transition from spreading ridge to arc. *Geology*, **30**, 899–902.
- Ishiwatari, A., 1985, Alpine ophiolites: product of low-degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **76**, 93–108.
- 石渡 明(Ishiwatari, A.), 1989, 日本のオフィオライト(Ophiolites of Japan). 地学雑(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **98**, 290–303.
- 石渡 明(Ishiwatari, A.), 2010, オフィオライト研究の新展開(New developments in ophiolites studies). 地学雑(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **119**, 841–851.
- Ishiwatari, A., Sokolov, S. D. and Vysotskiy, S. V., 2003, Petrological diversity and origin of ophiolites in Japan and Far East Russia with emphasis on depleted harzburgite. In Dilek, Y. and Robinson, P. T. eds., *Ophiolites in Earth History*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **218**, 597–617.
- Ishiwatari, A., Malpas, J. and Ishizuka, H., 1994, Circum-Pacific Ophiolites. In Ishiwatari, A., Malpas, J. and Ishizuka, H. eds., *Proc. 29th IGC(Kyoto), Part D*, VSP Publishers, Utrecht. 1–6.
- 梶島太郎・磯崎行雄・平田岳史・丸山茂徳・君波和雄・西村祐二郎(Kabashima, T., Isozaki, Y., Hirata, T., Maruyama, S., Kiminami, K. and Nishimura, Y.), 2003, レーザーアブレーション ICP-MS による西オーストラリア, ノースポール地域の太古代酸性貫入岩・火山岩類のジルコン U-Pb 年代(U-Pb Zircon Ages by Laser Ablation ICP-MS Technique from the Archean Felsic Intrusive and Volcanics in the North Pole Area, Western Australia). 地学雑(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **117**, 1–17.
- Kanayama, K., Umino, S. and Ishizuka, O., 2012, Eocene volcanism during the incipient stage of Izu-Ogasawara Arc: Geology and petrology of the Mukojima Island Group, the Ogasawara Islands. *Island Arc*, **21**, 288–316.
- Kaneko, K., Adachi, Y. and Miyashita, S., 2014, Origin of large wehrlitic intrusions found from Wadi Barghah to Salahi area in the northern Oman ophiolite. In Rollinson, H. R., Searle, M. P., Abbasi, I. A., Al-Lazki, A. and Al Kindi, M. H. eds., *Tectonic Evolution of the Oman Mountains*, Geol. Soc. London, Spec. Publ., **392**, 205–220.
- Kaneko, Y., Maruyama, S., Kadarusman, A., Ota, T., Ishikawa, M., Tsujimori, T.,...Okamoto, K., 2007, On-going orogeny in the outer-arc of the Timor-Tanimbar region, eastern Indonesia. *Gondwana Res.*, **11**, 218–233.
- Kanke, N. and Takazawa, E., 2014, A kilometre-scale highly refractory harzburgite zone in the mantle section of the northern Oman Ophiolite (Fizh Block): implications for flux melting of oceanic lithospheric mantle. In Rollinson, H. R., et al., eds., *Tectonic Evolution of the Oman Mountains*, Geol. Soc. London, Spec. Publ., **395**, 229–246.
- Komiya, T., Maruyama, S., Hirata, H. and Yurimoto, H., 2002, Petrology and geochemistry of MORB and OIB in the mid-Archean Northe Pole region, Pilbara Craton, western Australia: Implications for the composition and temperature of the upper mantle at 3.5 Ga. *Int. Geol. Rev.*, **44**, 988–1016.
- Komiya, T., Maruyama, S., Hirata, H., Yurimoto, H. and Nohda, S., 2004, Geochemistry of the oldest MORB and OIB in the Isua Supracrustal Belt, southern West Greenland: Implications for the composition and temperature of early Archean upper mantle T. *Island Arc*, **13**, 47–72.
- Komiya, T., Maruyama, S., Masuda, T., Nohda, S., Hayashi, M. and Okamoto, K., 1999, Plate tectonics at 3.8–3.7 Ga: Field evidence from the Isua accretionary complex, southern West Greenland. *Jour. Geol.*, **107**, 515–554.
- Kusano, Y., Adachi, Y., Miyashita, S. and Umino, S., 2012, Lava accretion system around mid-ocean ridges: Volcanic stratigraphy in the Wadi Fizh area, northern Oman ophiolite.

- ite. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **13**, Q05012, doi: 10.1029/2011GC004006.
- Kusano, Y., Hayashi, M., Adachi, Y., Umino, S. and Miyashita, S., 2014, Evolution of volcanism and magmatism during initial arc stage: constraints on the tectonic setting of the Oman Ophiolite. In Rollinson, H. R., et al., eds., *Tectonic Evolution of the Oman Mountains*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **392**, 177–193.
- Kusano, Y., Umino, S., Shinjo, R., Ikei, A., Adachi, Y., Miyashita, S. and Arai, S., 2017, Contribution of slab-derived fluid and sedimentary melt in the incipient arc magmas with development of the paleo-arc in the Oman Ophiolite. *Chemical Geol.*, **449**, 206–225.
- Lippard, S. J., Shelton, A. W. and Gass, I. G., 1986, *The Ophiolite of Northern Oman*. Geol. Soc. London, Mem., **11**, Blackwell Sci. Pub., Oxford, 178p.
- Maruyama, S. and Komiya, T., 2011, The oldest pillow lavas, 3.8–3.7 Ga from Isua Supracrustal Belt, SW Greenland: Plate tectonics had already begun by 3.8 Ga. *Jour. Geogr.*, **120**, 869–876.
- Michibayashi, K., Gerbert-Gaillard, L. and Nicolas, A., 2000, Shear sense inversion in the Hilti mantle section (Oman ophiolite) and active mantle uprise. *Marine Geophys. Res.*, **21**, 259–268.
- Michibayashi, K. and Mainprice, D., 2004, The Role of Pre-existing Mechanical Anisotropy on Shear Zone Development within Oceanic Mantle Lithosphere: an Example from the Oman Ophiolite. *Jour. Petrol.*, **45**, 405–414.
- Michibayashi, K., Ina, T. and Kanagawa, K., 2006, The effect of dynamic recrystallization on olivine fabric and seismic anisotropy: Insights from a ductile shear zone in the Oman ophiolite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 695–708.
- Miura, M., Arai, S., Ahmed, A. H., Mizukami, T., Okuno, M. and Yamamoto, S., 2012, Podiform chromitite classification revisited: A comparison of discordant and concordant chromitite pods from Wadi Hilti, northern Oman ophiolite. *Jour. Asia Earth Sci.*, **59**, 52–61.
- Miura, M., Arai, S. and Tamura, A., 2014, Formation of discordant chromitite at the initiation of sub-arc mantle processes: Observations from the northern Oman ophiolite. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **109**, 38–43.
- Miyashita, S., Adachi, Y. and Umino, S., 2003, Along axis magmatic system in the northern Oman Ophiolite: Implications of compositional variation of the sheeted dike complex. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **8617**, doi: 10.1029/2001GC000235.
- 宮下純夫・海野 進・足立佳子 (Miyashita, S., Umino, S. and Adachi, Y.), 2002, 総説: オフィオライト研究の新しい局面—オフィオライトを例として (A new perspective of ophiolite studies with special reference to the Oman ophiolite). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **108**, 520–535.
- Morishita, T., Dilek, Y., Shallo, M., Tamura, A. and Arai, S., 2011, Insight into the uppermost mantle section of a maturing arc: the eastern Mirdita ophiolite, Albania. *Lithos*, **124**, 215–226.
- Nicolas, A., 1995, *The Mid-Oceanic Ridges*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 200p.
- Nutman, A. P., Friend, C. R. L., Baadsgaard, H. and McGregor, V. R., 1989, Evolution and assembly of Archean gneiss terranes in the Godthåsfjord region, southern West Greenland; structural, metamorphic, and isotopic evidence. *Tectonics*, **8**, 573–589.
- Obata, M., 1980, The Ronda peridotite: Garnet-, spinel-, and plagioclase-lherzolite facies and the P-T trajectories of a high-temperature mantle intrusion. *Jour. Petrol.*, **21**, 533–572.
- Ozawa, K., 2001, Mass balance equations for open magmatic systems: Trace element behavior and its application to open system melting in the upper mantle. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 13407–13434.
- 小澤一仁 (Ozawa, K.), 2005, 上部マントルにおけるマグマの形成過程: マントル物質科学における近年の展開 (Generation of magmas in the upper mantle: recent developments in studies on mantle materials). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **114**, 385–409.
- Ozawa, K. and Takahashi, N., 1995, P-T history of a mantle diapir: the Horoman peridotite complex, Hokkaido, northern Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **120**, 223–248.
- Payot, B. D., Arai, S. and Tamayo, R. A., Jr., 2011, Abyssal harzburgite veined by silica-oversaturated melt in the Sibuyan Ultramafics, Romblon, Central Philippines. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **106**, 175–180.
- Pearson, D. G., Davies, G. R. and Nixon, P. H., 1995, Orogenic ultramafic rocks of UHP (diamond facies) origin. In Coleman, R. G. and Wang, X. ed. *Ultrahigh Pressure Metamorphism*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 456–510.
- Python, M., Ceuleneer, G., Ishida, Y., Barrat, J. A. and Arai, S., 2007, Oman diopsidites: a new lithology diagnostic of very high temperature hydrothermal circulation in mantle peridotite below oceanic spreading centres. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **255**, 289–305.
- Sano, S. and Kimura, J.-I., 2007, Clinopyroxene REE Geochemistry of the Red Hills Peridotite, New Zealand: Interpretation of Magmatic Processes in the Upper Mantle and in the Moho Transition Zone. *Jour. Petrol.*, **48**, 113–139.
- Shervais, J. W., 2001, Birth, death, and resurrection: The life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2000GC000080.
- Shin, K.-C., Anma, R., Nakano, T., Orihashi, Y. and Ike, S., 2009, The Taitao ophiolite-granite complex, Chile: Emplacement of ridge-trench intersection oceanic lithosphere on land and the origin of calc-alkaline I-type granites. *Epi-sodes*, **38**, 283–297.
- Sturm, M. E., Klein, E. M., Karsten, J. L. and Karson, J. A., 2000, Evidence for subduction-related contamination of the mantle beneath the southern Chile Ridge: Implications for ambiguous ophiolite compositions. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **349**, 13–20.
- 高澤栄一 (Takahashi, E.), 2012, オマーンオフィオライト・マントルセクションの組成マッピングからみた初期島弧におけるマントル熔融と反応過程 (Melting and reaction in an incipient subarc mantle as inferred from the spatial compositional variability in the mantle section of the Oman ophiolite). *岩石鉱物科学 (Jour. Mag. Mineral. Petrol. Sci.)*, **41**, 257–266.
- Takazawa, E., Okayasu, T. and Satoh, K., 2003, Geochemistry and origin of the basal lherzolites from the northern Oman ophiolite (northern Fizh block). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 1021, doi: 10.1029/2001/GC000232.
- Tamura, A. and Arai, S., 2006, Harzburgite-dunite-orthopyroxene suite as a record of supra-subduction zone setting for the Oman ophiolite mantle. *Lithos*, **90**, 43–56.
- Tatsumi, Y., Sato, T., and Kodaira, S., 2015, Evolution of the Earth as an andesite planet: water, plate tectonics, and delamination of anti-continent. *Earth Planets Space*, **67**: 91, doi 10.1186/s40623-015-0267-2.
- Terabayashi, M., Masuda, Y. and Ozawa, H., 2003, Archean ocean-floor metamorphism in the North Pole area, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Res.*, **123**, 167–180.
- Tsuchiya, N., Shibata, T., Yoshikawa, M., Adachi, Y., Miyashita, S., Adachi, T.,...Osanai, Y., 2013, Petrology of Lasail plutonic complex, northern Oman ophiolite, Oman: An example of arc-like magmatism associated with ophiolite detachment. *Lithos*, **156–159**, 120–138.
- 上杉次郎・荒井章司・森下知晃・松陰香子・角島和之・田村明弘・阿部なつ江 (Uesugi, J., Arai, S., Morishita, T., Matsukage, K., Kadoshima, K., Tamura, A. and Abe, N.), 2003, オマー

- ンオフィオライトにおけるマントルー地殻境界の実体と多様性 (Significance and variety of mantle-crust boundary in the Oman Ophiolite). *地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **112**, 750–768.
- 海野 進(Umino, S.), 1995, 北部オマーン山脈サマイル・オフィオライトの地質(Geology of the Semail Ophiolite, northern Oman Mountains). *地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **104**, 321–349.
- Umino, S., 2012, Emplacement mechanism of off-axis large submarine lava field from the Oman Ophiolite. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, B11210, doi: 10.1029/2012JB009198.
- Umino, S., Kanayama, K., Kitamura, K., Tamura, A., Ishizuka, O., Senda, R. and Arai, S., 2018, Did boninite originate from the heterogeneous mantle with recycled ancient slab? *Island Arc*, **27**, e12221.
- Umino, S., Kitamura, K., Kanayama, K., Tamura, A., Sakamoto, N., Ishizuka, O. and Arai, S., 2015, Thermal and chemical evolution of the subarc mantle revealed by spinel-hosted melt inclusions in boninite from the Ogasawara (Bonin) Archipelago, Japan. *Geology*, **43**, 151–54.
- Umino, S., Miyashita, S., Hotta, F. and Adachi, Y., 2003, Along-Strike Variation of the Sheeted Dike Complex in the Oman Ophiolite: Insights into Subaxial Ridge Segment Structures and Magma Plumbing System. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **6**, 10.1029/2001GC000233.
- Umino, S., Yanai, S., Jaman, A. R., Nakamura, Y. and Iiyama, J. T., 1990, The transition from spreading to subduction: evidence from the Semail ophiolite, northern Oman mountains. *In Malpas, J. et al. eds., Ophiolites, Oceanic Crustal Analogues*, Geol. Surv. Dept., Cyprus, Nicosia, 375–384.
- Veloso, E. A. E., Anma, R. and Yamazaki, T., 2005, Tectonic rotations during the Chile Ridge collision and obduction of the Taitao ophiolite (southern Chile). *Island Arc*, **14**, 599–615.
- Yamamoto, S., Komiya, T., Hirose, K. and Maruyama, S., 2009, Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromitites: In-situ ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Lithos*, **109**, 314–322.
- Yamamoto, S., Komiya, T., Yamamoto, H., Kaneko, Y., Terabayashi, M., Katayama, I., Hirata, T., 2013, Recycled crustal zircons from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Island Arc*, **22**, 89–103.
- Yamasaki, T., Maeda, J. and Mizuta, T., 2006, Geochemical evidence in clinopyroxenes from gabbroic sequence for two distinct magmatisms in the Oman ophiolite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **251**, 52–65.
- Yamazaki, S., 2013, *Incipient Island Arc Crust Formation within Oceanic Crusta Sequence: Geology, Geochemistry and Chronology of Late Intrusive Rocks in the Oman Ophiolite*. PhD thesis, Niigata University, 148p.
- Yanai, S., Umino, S., Ibrahim, S. O., Nakamura, Y. and Iiyama, J. T., 1990, Subduction- and collision-related emplacement of the Semail ophiolite, Northern Oman mountains. *In Malpas, J. et al. eds., Ophiolites, Oceanic Crustal Analogues*, Geol. Surv. Dept., Cyprus, Nicosia, 385–396.
- Yang, J.-S., Dobrzhinetskaya, L., Bai, W.-J., Fang, Q.-S., Robinson, P. T., Zhang, J. and Green, H. W., 2007, Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geology*, **35**, 875–878.
- Yoshitake, N., Arai, S., Ishida, Y. and Tamura, A., 2009, Oman diopsidites: a new lithology diagnostic of very high temperature hydrothermal circulation in mantle peridotite below oceanic spreading centres. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **104**, 156–163.

## (著者プロフィール)

海野 進 金沢大学教授。81年 東京大学理学部卒、87年 同大学院理学系研究科博士課程修了、静岡大学教授を経て、08年より現職。IODP 科学計画委員、Island Arc 編集委員長等を歴任。12年より小笠原世界自然遺産地域科学委員。研究テーマ：海洋地殻形成、沈み込み帯発生、溶岩流の定置機構。

URL : [http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/~umino/Umino\\_Main.html](http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/~umino/Umino_Main.html)

## (要 旨)

海野 進, 2018, 日本人による世界のオフィオライト研究. *地質雑*, **124**, 593–601. (Umino, S., 2018, An overview of world ophiolite studies by Japanese researchers. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 593–601.)

100周年以降の25年間は日本の地質学者が広く海外に活躍の場を拡げるとともに、新たな分析機器の導入や解析手法の開発により、オフィオライトを構成するマントルカンラン岩の精密な上昇プロセスやマントル中のマグマの移動・反応プロセス、マントルの流動・変形機構、マントル岩中の微小包有物の同定・分析などが势力的に進められた。また、フィールド地質学の分野でも、詳細な地質調査に基づいて海洋地殻の形成プロセスや始生代の海洋地殻層序の復元などが行われた。本小論ではこれらの日本人によって行われた海外のオフィオライト研究のうち、世界で最も規模が大きく保存状態がよいとされるオマーン、島弧下マントルが露出するミルディータ、リサイクルしたスラブ由来の超高压鉍物を含むルオブサ、世界で最も新しいチモールとタイタオ、世界最古の付加体からなるイスアとピルバラの各オフィオライトについて紹介した。