総説—オフィオライトの起源とエンプレイスメント—

丸山茂徳* 寺林 優** 藤岡換太郎***

Origin and Emplacement of Ophiolite : A Review

Shigenori MARUYAMA, Masaru TERABAYASHI and Kantaro FUJIOKA

Abstract

A brief review of the study on ophiolite is given. 165 years have passed already since a first use of the term "ophiolite" by BRONGNIART (1813), but still have not yet obtained a broadly satisfying solution on its origin and emplacement. However, the rapidly increased data set during the last 15 years on both on-land ophiolite and ocean-floors clearly indicate the strong constraints on its origin and emplacement.

The period during 1813-1927 was a time of description of ophiolite. BRONGNIART (1827) classified ophiolite into a group of igneous rocks, since then began a debate whether ophiolitic peridotite is igneous or the other in origin. SUESS (1909) had noticed that ophiolites appear characteristically in orogenic belts. It was STEINMANN (1927) who had first recognized a close association of peridotite, gabbro, diabase-spilite, and radiolarian chert suggesting a deep sea origin of ophiolite. The significance of his finding has never been looked back until the revolutional period of plate tectonics in the late '60s.

The second period of 1927-1949 was the time of debate on igneous origin. BOWEN and his coworkers insisted igneous origin based on experimental petrology for the ultramafic rocks in general. But if so, an abnormally high temperature ca. 1,900°C was necessary to explain the occurrence of dunite. BENSON (1926) pointed out that if BOWEN'S idea is true, the country rocks of ophiolite must be subjected a high-temperature contact metamorphism, but not in the field. HESS (1939) has given a new idea of serpentinite magma to solve the problem, but its possibility had completely been disproved by the experiment of MgO-SiO₂-H₂O by BOWEN and TUTTLE (1949).

The third period (1949-1959) began by a break-through idea of DE ROEVER (1957), who speculated that ophiolitic peridotite is a piece of mantle material, which was brought into an orogen by a tectonic process.

The fourth period (1959-1973) started by BRUNN (1959) who compared ophiolite with the rocks in the Mid-Atlantic Ridge. This period (1959-1973) was the time of plate tectonics. During the early '60s the ocean-floor spreading theory was proposed by HESS and DIETZ, and both thought that the layer 3 is composed of serpentinite or

*東京大学教養学部宇宙地球科学教室 Department of Earth Science and Astronomy, University of Tokyo

**富山県滑川市立滑川中学校 Namerikawa Junior High School

***東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo

eclogite. The year 1969 was a memorial year, when both MOORES and DAVIES distinguished cumulate peridotite from the underlying residue tectonite, the latter of which is a refractory mantle after the formation of oceanic crust by partial fusion of mantle peridotite. The best example of ophiolite was the Troodos massif in Cyprus, where the extensive-scale of parallel dike swarm develops indicating ocean-floor spreading. Thereafter an ophiolite boom has come out, and flood of papers appeared to regard ophiolite to be of mid-oceanic ridge in origin. However, several geologists have doubted mid-oceanic ridge origin by the facts of much thinner crust, more silicic volcanic composition, and frequent occurrence of phenocrystic augite in ophiolites. MIYASHIRO (1973) solved such problems, and concluded that Troodos was formed in an island-arc setting. This paper was very shocking for geologists who wanted to establish the basic framework of orogeny by plate tectonics in those days, but epoch-making on the study of ophiolite, and corresponding to the time, when the method of study has changed to be modernized and more interdisciplinary.

The fifth period since 1973 was the time of interdisciplinary approach. The first 10 years has clarified the general aspects of MORB and underlying abyssal peridotite through the DSDP/IPOD and dredging. One of the important aspects is that abyssal peridotites are not depleted in basaltic component, and consistent with primitive MORB composition. On the contrary, most on-land ophiolites exhibit the more depleted natures of tectonites and earlier crystallizing CPX and/or OPX than PL (ISHIWATARI 1985b), suggesting the different origin of ophiolite from mid-oceanic origin. Increasing descriptions of the presence of high-Mg andesite or calc-alkaline rocks in ophiolites, e. g., Troodos, Betts Cove, and New Caledonia, strongly constrain their tectonic setting. The absence of prehnite-pumpellyite facies, and the presence of prehnite-actinolite facies instead, from the present ocean-floor metamorphic rocks indicate the much higher geothermal gradients in the mid-oceanic ridge than that in ophiolite (MARUYAMA and LIU 1988). The fore-arc ophiolites such as Mariana, Tonga and Middle America have attracted geologists' interest as for the possible candidates of on-land ophiolites, by the geologic similarities to on-land ophiolite.

The emplacement mechanism of ophiolite has long been argued, and the possible models has been compiled by DEWEY (1976), and later modified by CASEY and DEWEY (1984) to explain the presence of boninite or high-Mg andesite.

The recent descriptions of volcanic rocks (presence of high-Mg andesite, calc-alkaline volcanics, MORB or back-arc basin basalt), crystallization sequence of minerals, metamorphism (presence of prehnite-pumpellyite facies), and the time span of pelagic sedimentation of the best studied 35 ophiolites in the world, indicate that most ophiolites were formed near subduction zones, presumably in the back-arc settings (MARUYAMA and TATSUMI 1988). The possible emplacement mechanism is the obduction of the peripheral part of back-arc basin, where listric normal faults reactivate, when the basin initiates to close.

I. はじめに

1960年代後半になってオフィオライトは陸上にのし上げた海洋プレートの断片であるという考えが主流を占めるようになり、造山帯の中のオフィオライト帯はかつてそこに広大なスケールで大海洋が存在していたことを示す傍証として、プレート古地理復元の最高重要要素と見なされてきた (DEWEY and BIRD 1971)。ところが、海洋底の地質学的な情報が集まるにつれ、そしてまた、一段と精度の上がった情報がオフィオライトからもたらされるにつれてこの考えは怪しくなってきた。この小論ではオフィオライトの起源とその搬入機構 (emplacement mechanism) についての研究を総括し、最近の知見を紹介する。

II. オフィオライトの起源についての研究史

BRONGNIART (1813) が初めてオフィオライトという言葉を使ってから165年が経過した。この間にその起源とエンプレイスメントをめぐる論争が続き、いまだ決着していないが時代の推移に依存して新しい情報がもたらされると共に論議は質的には深まった。今までの研究史を振り返ると大まかには5つの時期に区分できよう。

(1) 第I期 (1813-1927年): オフィオライトの定義と記載の時代

BRONGNIART (1813) は結晶質岩石の分類を試みたときに蛇紋岩をマトリックスとしてもつ岩石のグループをオフィオライトとして定義した。その時の彼の分類には火成岩と變成岩の明瞭な区分は為されていなかったが、1827年にははっきりと区別してオフィオライトを火成岩の中にいれている。この区分は後のオフィオライト火成岩説の始まりとも見なせるだろう。彼はオフィオライトを蛇紋岩と同義語とみなしたが、一方では火山岩、ハンレイ岩および蛇紋岩をひっくるめてオフィオライトとして扱ったりもした。

SUESS (1909) はオフィオライトという言葉は使わなかったが、それに相当する “roches vertes” が決して安定大陸には存在せず、造山帯の中に特徴的に出現することに気が付いていた。

オフィオライト層序に初めて気が付いたのは STEINMANN (1927) であった。彼はリグリアアルプスではカンラン岩、ハンレイ岩、輝緑岩—スピライトの複合岩体が放散虫チャートとよく伴うことを見出してオフィオライトは深海起源であることを指摘し、それらの組合せを三位一体として定義したが、そのことの成因論的な意味は1960年代になるまで省みられることはなかった。オフィオライトはこの時代には地質学の重要な問題の1つとして取り上げられたことはなかった。

(2) 第II期 (1927-1949年): Ophiolitic peridotite 火成岩説攻防の時代

代わって1920年代の後半からオフィオライト論争の中心になったのは BENSON (1926) を中心とする、野外の産状からの考察に基づいて “アルプス型カンラン岩” という言葉を定義した学派と BOWEN (1927) を核とする実験岩石学学派とであった。BENSON (1926) は主として原生代の頃に安定大陸の上に噴出または貫入した塩基性—超塩基性層状分化岩体と、造山帯の中に定置したオフィオライトとは産状が違うので、多分成因も違うのではないかと指摘した。アルプス型カンラン岩岩体のへりには一般的には接触變成帯を欠くので、その成因はマグマ貫入説では説明できないという論理であった。一方、BOWEN (1927) 学派はカンラン岩質マグマを主張した。BOWEN (1927) の実験に基づけばフォルステライトを主体とするダナイトマグマを作るには 1890°C の高温が必要であった。実験の系に Fe を入れてみても (BOWEN and SCHAIRER 1935) 事情はさほど変わらなかった。オフィオライトカンラン岩火成岩説の矛盾は丁度 “木製の釜で鉄を溶かそうとする” 空しい努力であった。この頃、HESS (1939) はアパラチア造山帯のオフィオライトの研究からオフィオライトは地向斜の両翼にマグマとして貫入すると述べこの論争に加わった。HESSはマグマから直接蛇紋石が晶出すると考えると BOWEN 学派が主張するほどの高温は必要でないと主張した。これを受けて BOWEN and TUTTLE (1949) は $MgO-SiO_2-H_2O$ 系の実験を始めたが、蛇紋石は500°C以上では不安定になることが明らかになり HESS (1939) の蛇紋岩マグマは存在しえないこと

が完全に実証された。

(3) 第Ⅲ期 (1959-1959年) : プレートテクトニクスの時代への移行期

この問題に新しい視点を開いたのは DE ROEVER (1957) であった。彼はアルプス型カンラン岩にはミロナイト化しているものがあることから、それらはマンツルの断片が造山帯に固体貫入したもので、そのために接触変成帯が欠如しているのもであると言いつつ。HESS (1960) はこの考えに賛同して、プエルトリコの幾つかのカンラン岩はそのような起源を持つのではないかと述べている。DE ROEVER (1957) の着想は第Ⅱ期の壁を打ち砕くに十分なものでオフィオライトの研究を決定的に新しい時代に導いたと思われる。

(4) 第Ⅳ期 (1959-1973年) : プレートテクトニクスの時代

1959年に BRUNN が大西洋中央海嶺の岩石とオフィオライトの類似性を指摘して以来、オフィオライトの研究は新しい時代に入った。1960年代の初めには海洋底拡大説が HESS (1962) や DIETZ (1962) によって提唱された。彼らは海洋地殻の第3層が蛇紋岩化した超塩基性岩かもしくはエクロジャイトでできていると考えた。DIETZ は超塩基性岩が造山帯の中にどのようにして搬入されるかについて考察した (DIETZ 1964)。

1969年に MOORES と DAVIES はそれぞれ Vourinous と Papua のオフィオライトの研究でカンラン岩には実は2種類あって、岩体の下部を構成する変成再結晶したテクトナイトとその上位に位置する結晶集積岩であるカンラン岩 (火成岩) があること、そして前者が海洋地殻を作った溶け残りマンツルであると解釈した。特に Troodos (GASS 1967) では幅125km にわたって平行岩脈群が顕著に発達していることから、オフィオライトが拡大軸で形成されたという結論を導きだした。この研究が契機になって世界の他のオフィオライトもまた総て海洋地殻とマンツルの断片であると解釈されるようになってゆく (GASS 1968, MOORES and VINE 1969)。1969年12月にはペンローズ会議が開かれ (DICKINSON 1970)、直後に同じ結論の論文が多数現れた (MOORES 1970, MOORES and VINE 1971, DEWEY and BIRD 1971, DAVIES 1971, COLEMAN 1971)。

但し、その様な短絡的なアナロジーによるオフィオライト=大洋底地殻+マンツル論に対して疑問を唱える研究者も少なくなかった。疑問を要約すると (1) 海洋地殻に相当する部分の厚さが薄い、(2) オフィオライトの火山岩は深海ソレイトの組成に比べて一般に SiO_2 にとみ、組成上うまく対応しない、(3) オフィオライトには普通輝石の斑晶が見られることが多いが、深海ソレイトにはそれが殆ど見られないように、火山岩の斑晶組合せも対応しないことがある、の3点であった。

1968年に始まった深海堀削計画による深海ソレイトの研究、及びそれに先行してきたドレッジによる海洋底玄武岩の研究 (ENGEL and ENGEL 1964, SHIDO and MIYASHIRO 1973など) データに基づき、MIYASHIRO (1973) は上記の疑問を説明する1つの解を岩石学的な視点から与えた。当時世界で最も典型的であると信じられていたキプロスのオフィオライトは中央海嶺でできたのではなく島弧でできたと述べた。今振り返ってみると当然の明快な議論であるが、当時は大変な論争になり、オフィオライト中央海嶺起源説を唱える人達から猛烈な反論が巻き起こった (GASS *et al.* 1975, MOORES 1975, HYNES 1975)。これらの人達は火山岩の組成が島弧の火山岩の組成に似ているのは変質の効果によるものであるといたり、アルカリ岩の存在や地質の産状などを根拠にして声高々に反論した。またそれらを支持する心理的な背景として、プレートテクトニクスによる新しい地球観、特に造山運動論の構築に冷水をかけるものであるという気分があったように思われる。この論争は、後に新鮮な火山ガラスの組成が典型的なカルクアルカリ岩組成を示すこと (ROBINSON *et al.* 1983, RAUTENSCHLEIN *et al.* 1985)、古銅輝石斑晶の発見 (CAMERON 1985, DANCAN and GREEN 1987)、と微量元素組成 (PEARCE 1975, MCCULLOCH and CAMERON 1983) の検討によって完全に都城の勝利に終わり、島弧オフィオライト (epoch-making であったという意味で MIYASHIRO-type ophiolite と呼んでみてはどうであろう) とい

う言葉は定着した。トルドス岩体の海洋地殻はいまや島弧地殻であるとみなされるようになったが、しかし、ある種の超苦鉄質岩石の鉱物岩石学は MORB と平衡にあったとみなしてもよいので、島弧になる以前は海洋地殻の状態が存在したのかもしれない(荒井 1987)。

都城の視点は、それ以前の野外の産状と簡単な顕微鏡観察に基づく岩石学的なオフィオライトの研究から、より専門的な岩石学・岩石化学に基づいたものへと方法論的にレベルアップしたものであり、オフィオライトの研究を新しい段階へと導いた時代の節目にあたる。

(5) 第V期(1973年以降): 学際的アプローチの時代

1973年以降の大きな進歩は研究の細分化と近代化が起こり、様々な新しい手法で得られた情報を学際的に比較統合することによってオフィオライトの起源とエンブレイスメントが議論されるようになったことである。(1) まず始めにオフィオライトのモダンアナログである大西洋、太平洋、インド洋の海洋地殻とマンツルの性質がほぼ10年の間に殆ど解明された。そして、(2) その成果を横目にみながら同じ様な研究手法でオフィオライトを調べると現在の海洋底構成岩石との違いが次第に顕著になっていったこと、(3) マリアナやトンガの前弧海盆地域でオフィオライトが発見されたことは前弧海盆地域のテクトニクスとオフィオライトの起源や搬入機構の新しい側面を考える上で重要であった、の3点が重要な成果であろう。

1) MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt) と海洋マンツルの研究

ENGEL and ENGEL (1964) と ENGEL *et al.* (1965) によって海洋底からドレッジされた多数の火成岩が化学分析され、1.5km 以深にある岩石は深海ソレライトであることが1960年代中半にわかり、海洋底玄武岩の研究は多くの人達の興味を引き付けた。MIYASHIRO *et al.* (1969) と SHIDO and MIYASHIRO (1973) などによって、海洋底玄武岩はさらに相平衡論的に研究されるようになり MORB は斑晶として一般的にカンラン石あるいは斜長石のいずれか、もしくは両方を含み、普通輝石を含むことは非常に稀であることが分かった。KUSHIRO and THOMPSON (1972) は初生 MORB は 8 kb 前後の圧力でレルゾライトと平衡であることを未分化 MORB の溶融実験から示した。

火成岩成因論一般のなかで O'HARA (1968) と GREEN and RINGWOOD (1967) は上にあげた著者達に先駆けてすでに MORB の成因について彼らの説を提案していた。O'HARA (1968) は MORB の初生マグマはピクライトであるとみなしたが、KUSHIRO and THOMPSON (1972) による、未分化 MORB 実験では約 8 kb でレルゾライトと未分化 MORB が平衡共存できることを示し、O'HARA 説を支持しなかった。その後 PRESNALL *et al.* (1978) によるアルカリを含まないモデル玄武岩の系での相平衡実験から、やはり未分化 MORB は約 9 kb でマンツルと共存出来ることが示された。ところが同じ実験岩石学の立場から O'HARA を支持する論文も現れた (WALKER *et al.* 1979, STOLPER 1980)。しかし、TAKAHASHI and KUSHIRO (1983), FUJII and BOUGAULT (1983) と FUJII and SCARFE (1985) はメルトの組成を決定する手法に改良を加え、STOLPER や WALKER 達の実験データの矛盾を批判して KUSHIRO and THOMPSON (1972) 説を支持した。

高橋 (1986) は MORB 低圧起源説を支持する証拠として更に、カンラン石とメルトの元素分配からえられる初生マグマの MgO が 10-12wt% であり決してピクライトにならないこと、及びいわゆるピクライトはカンラン石の外來結晶の存在によるため、液の組成はピクライト質ではない、の2点を付け加えた。

TAKAHASHI and UTO (in prep.) は250個に及ぶスピネルレルゾライト捕獲岩のカンラン石の組成を決めて Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Ni の mantle array を提案して、初生 MORB の組成を場所毎に見積ることを試みた。結果は大西洋中央海嶺の下では SCHILLING *et al.* (1983) の指摘した微量成分と同位体組成の広域的な変化に加えて、マンツルの鉱物組成と主成分組成にも同様な変化があることを指摘した。この議論はひとえに mantle array の信憑性に依存するが、現実的であるように思える。ホットスポットの下に存在する、周囲よりも重いはずの Fe²⁺ に富むマンツルの存在は下部マンツルからやってきた、より始原的な Fe²⁺ に富む熱いマンツルブルームの存在と調和的である。

現時点では実験岩石学の立場からは、少なくともある種の MgO-rich MORB は、8-9kb 前後の圧力でレゾライトと平衡であることは動かしがたいと思われるが、これらの実験データの意味することは、未分化 MORB がマントルと平衡であった最終深度が約8-9kb であるということなので、それ以深のマグマの組成や、おそらく液相濃集元素を多量に含んだマグマ（ダイアビル）上昇のプロセスはわかっていない。

O'HARA vs KUSHIRO の MORB 初生マグマの組成／深度論争では未分化 MORB の組成は一定であると仮定されてきた。1960年代半ばからの10年間の研究では MORB は場所を問わず比較的均質であることが強調されてきたが、1970年代の半ばからは場所による組成差、(1) 数 km 範囲（互いに独立な初生 マグマの存在, BOUGAULT and HEKINIAN 1974; マグマの混合, DUNGAN *et al.* 1978), (2) 数百 km オーダーの範囲（ホットスポットマントルプルームの影響, SCHILLING *et al.* 1983), や (3) 更に広範囲に亘る、大西洋と太平洋地域での組成差（拡大速度の違い, FLOWER 1980）が明らかになってきた。

高圧下でペリドタイトの部分溶融によって生じた玄武質マグマが低圧下で結晶分化すると、初めに晶出する結晶はカンラン石でなければならないが、MIYASHIRO *et al.* (1969) は斑晶鉱物に斜長石しか含まない MORB (Pl-tholeiite) を記載し、MORB の多様性を示した。FLOWER (1981) は Pl-tholeiite は大西洋地域に選択的に出現することを示し、その成因は拡大速度に依存した結晶分化作用の違いであろうと解釈した。大西洋地域では結晶分化作用は比較的深部から浅部にわたって広い圧力範囲で起きるので、メルトと斜長石の密度の逆転する深部では重力差による斜長石斑晶の集積が特に、起きやすく Pl-tholeiite を作りうるであろう (FUJII and KUSHIRO 1977)。

1977年に、プレート発散速度の大きい太平洋地域のファンデフカ海嶺で伝播性拡大 (ridge propagation) が発見され、中央海嶺の研究はいつそう細かくなった (HEY 1977)。その後、伝播性拡大は太平洋地域ではむしろ一般的な現象であることが分かり、この現象には、近接する2つの伝播性拡大地点が接近するか離れてゆくかの二通りあり、前者はホットスポットと、後者はコールドスポットと関係しているらしいことが分った (玉木 1987の解説に詳しい)。拡大軸の詳細な mapping がすすむにつれて、重複拡大軸 (overlapping spreading center) の存在が明らかになった (MACDONALD and FOX 1983)。これは約100km 長の拡大軸が部分的に重複しながら全体として一続きの海嶺を作っている現象で、ひとつひとつの拡大軸セグメントの下には1つの大きなマグマ溜りが存在するためにその中央部が盛り上がっているらしい (MACDONALD *et al.* 1986)。マグマ溜りのへりと中央ではおそらくマグマの結晶分化作用の程度が違っているであろうから、今後細かなサンプリング調査によってマグマ溜りの中のプロセスが議論され、MORB の組成多様性がさらに詳細に分かってくるだろう。

実験岩石学の立場からの MORB 成因論では大西洋中央海嶺で採集された MORB を代表とみなして議論されたが、プレートテクトニクスにもとづいた大陸の成因論が展開された1960年代の終わりごろから、海洋プレートの一生、つまりウイilsonサイクルに従って海洋底玄武岩は組成を徐々に変化させてゆくことが分かっていた。大陸地殻が割れ始める時期には強アルカリ岩が、紅海の時期には中間的なアルカリ玄武岩を経て大西洋型 MORB に、そして最後には太平洋型 MORB へと組成を変化してゆく。大西洋型 MORB は一般的には未分化なものが多く、一方太平洋型 MORB は分化したものが多く Fe や Ti に富む。この違いは海洋底拡大速度の違いと関係しているらしい。つまり、マグマ供給率の大きい太平洋ではマグマ溜りが大きいために分化やマグマの混合がおきやすい (FLOWER 1981)。

このような海洋プレートの一生にともなう玄武岩マグマの組成変化はプレート境界とは無関係のアセノスフェアのテクトニクスと、スラブ引っ張り力に規制されたプレートダイナミクスの両面に関係しているのであろう。すなわち、大陸の分裂の開始は複数のマントルプルームの上昇と連結に依存し、1つのプレートの内部で起きるのであるから、これはプレート境界とは無関係の火成作用に属する。大西洋では最近2億年の間、深部マントルにたいして海嶺は固定していたことがマントルジオイドから推定されるので

(LE PICHON *et al.* 1985), ウイルソンサイクル前半の火成作用はアセノスフェアから上昇するマントブルームに主因があり, 海嶺下にマグマが能動的に貫入することによって起きるのであろう。一方, 大西洋のステージからさらに進化して, 海溝をへりにもつ太平洋の時期になるとプレートを動かせる力の7-8割を占めるスラブ引っ張り力が働き始めるために海嶺は受動的に開き初め, マントル深部に対しては固定されず移動し始める(窓型海嶺, UYEDA and MIYASHIRO 1974)。そのために MORB は浅部で比較的多量の部分溶融によって大量に形成されるとともに, 拡大速度は大西洋のステージの4-5倍に増加する。

このように MORB の組成の多様性は, これまでに考えられてきた, プレートダイナミクスよりもアセノスフェアの物質の流れによって規定されているように思われる。リソスフェアは海嶺で生まれ海溝でマントルへ沈み込むが, 深度670km よりも深くは沈み込まず上/下部マントル境界にそってスラブは滞留し, 広域的なスケールでのマントルの組成不均質の原因になりうるであろう。例えば, 最近2億年の間に日本列島の下に沈み込んだ海洋プレートの先端はアイスランドの下にまで達しているはずである。従って, 現在の大西洋 MORB は2億年前にパンサラサ海にあったスラブの汚染を受けるが, 太平洋 MORB にはそのような汚染は全くないはずである。何故ならば, 2億年前に太平洋プレートが出来て以来, 太平洋プレートの下には一貫してスラブの進入が無かったからである。従って同じホットスポットとはいえ大西洋と太平洋ではそのマントルブルームやマグマの組成が違っていきかねるべきである。この項で書いたことは予測されることとはいえ, いまだ十分に実証されていることではない。今後, 海洋地域の global geochemical mapping が行われ, アセノスフェアから核までを含めた物質(熱)の流れと大陸の移動の歴史を組み合わせた MORB 成因論が展開されてゆくことは疑いないであろう。

ドレッジや断裂帯の堀削などによって現在, 大西洋から29カ所, インド洋から19カ所, 太平洋から2カ所, 前弧海盆から7カ所, 背弧海盆から2カ所, 起源不明のカリブ海プレートから1カ所の合計60カ所から超苦鉄質岩石が採集されている(小沢 1985に最近のデータを付加)。大西洋, インド洋のペリドタイトは単斜輝石が枯渇していることはなく, MORB の溶け残りマントルとみて差し支えないが, カンラン石, 輝石, スピネルの固溶体組成を細かく検討すると, 部分溶融の程度は小さいとはいえ, 様々な程度に部分溶融したことが読み取れる。部分溶融の大きいペリドタイトは E-type MORB の分布するホットスポットの近くにあらわれるという傾向があり, 高温が部分溶融の進行を促進しているであろう(DICK *et al.* 1984, MICHAEL and BONATTI 1985, 小沢 1985)。

これに対して, 前弧海盆のペリドタイトは一般的には単斜輝石のモードが少ないか, 欠けていることが多く, 鉱物の固溶体組成も未分化 MORB とは平衡ではありえないことを示している(BLOOMER and HAWKINS 1983)。結晶集積岩にみられる鉱物の晶出順序も同様のことを示し, 前弧海盆ペリドタイトは島弧ソレイトや高 Mg 安山岩の溶け残りマントルであろう。背弧海盆や小海盆のマントルペリドタイトの性質は殆ど分かっていない。

かくして, マントルまでを含めた海洋地域の岩石の性質が次第にわかってくると, それらを合成して中央海嶺の岩石学的な構造モデルが提案されるようになった。HESS (1962, 1964) と DIETZ (1962) は地震波速度で定義される第3層(今日海洋地殻と考えられる部分を含む)は蛇紋岩でできているという構造モデルを提案した。MIYASHIRO *et al.* (1969) はこのモデルの可能性を完全には否定しなかったが, ドレッジされたペリドタイトの岩石学から, もっと信憑性の高いモデルを提案した。彼らのモデルでは海嶺直下の異常マントルは35km 深度まで斜長石レルゾライトで構成されていること, 割れ目のよく発達する上部においてさへ蛇紋岩は非常に限られるだろうと推定した。その後1981年まで中央海嶺の岩石学的モデルについて総括的に議論されたことがなかったが, EPR 研究グループはオフィオライトの研究と東太平洋海膨の, 地震波による研究を組み合わせ, 垂直断面でみるとひし形をしたマグマ溜りの形と, 海洋地殻形成プロセスを議論した(EPR Study Group 1981)。MARUYAMA and LIOU (1988) は DSDP とド

レッジによる採取岩石の種類と、その再結晶作用、MORB の組成、拡大速度、プレートの driving force、中央海嶺の地形、それら全てが大西洋と太平洋で系統的に違うことから、大西洋と太平洋では中央海嶺の岩石学的な構造は系統的に違っているとして第1図のモデルを提案している。背弧海盆の岩石学的構造についてはまだまったく分かっていない。

2) オフィオライト

オフィオライトの性質が現在の海洋地殻のそれとうまく対応しないことは1973年の都城論争を契機にしていっそう明確になり始めた。オフィオライトを構成する (1) テクトナイト、(2) 結晶集積岩、(3) 玄武岩、(4) 深海堆積物についての1973年以後の研究状況を初めに振り返り、次に前弧海盆オフィオライトの重要性についてマリアナとガテマラの例を要約する。最後にオフィオライトの産状一般についての簡単なまとめを行う。

(1) テクトイト

現在の海洋底からドレッジもしくはドリリングによって採集された超苦鉄質岩石は例外なくレルゾライトとハルツバージャイトである。ハルツバージャイトであっても Ca に富む輝石は常に存在するので、溶け残りマントルは玄武岩成分に枯渇していない (DICK *et al.* 1984, MICHAEL and BONATTI 1985, 小沢 1985)。ところがオフィオライトのテクトナイトは Liguria と Bay of Islands を除くと一般的にハルツバージャイトであり、玄武岩質成分に枯渇している (ISHIWATARI 1985b)。このような違いは鉱物組合せのみならず、全岩組成 (Al_2O_3 や CaO) や鉱物の固溶体組成 (カンラン石の XMg, 輝石の Al, スピネルの YCr) にも正確に反映している。そしてまたそのことから予測される部分溶融の程度の違いは結晶集積岩の鉱物晶出順序の違いとうまく対応している (ISHIWATARI 1985b, 石渡 本特集号)。

(2) 結晶集積岩

レルゾライト溶融実験に基づく、部分溶融の違いに応じて、低圧下でマグマから晶出する鉱物の順序は系統的に変化しなくてはならない。部分溶解率が小さい場合、カンラン石の次に晶出する鉱物は斜長石であるが、大きい場合は斜方輝石であり、その中間では Ca に富む単斜輝石でなければならない。ISHIWATARI (1985b) は15の世界の代表的なオフィオライトの性質を総括して、(1) で予測されることと、結晶集積岩にみられる鉱物晶出順序の違いが非常に調和的であることを示した。

(3) 玄武岩

オフィオライトにともなう玄武岩にはしばしば斜長石よりも早期に普通輝石が晶出することがあり、このことは部分溶融の程度が MORB よりも大きいのか、もしくは部分溶融 and/or 結晶分化作用の時に

第1図 大西洋と太平洋における海洋底 (海嶺) 変成作用の岩石学的モデル (MARUYAMA and LIOU, in prep.)

Fig. 1 Petrologic models of ocean-floor (ridge) metamorphism in the Atlantic and Pacific regions (MARUYAMA and LIOU, in prep.)

The geothermal gradient decreases in order of Pacific, Atlantic and back-arc basin, and hence the prehnite-pumpellyite facies does not appear in the Pacific region (below). Numbers of normal faults develop near the Mid-Atlantic Ridge, where rate of ocean-floor spreading velocity or magma supply is small, whereas in the East Pacific Rise those faults develop less frequently and the spreading rate is four times faster than that of Mid-Atlantic Ridge. In the Mid-Atlantic Ridge the 500°C isotherm occurs often within the upper mantle (Case B), into which hot seawater circulates to generate serpentinized peridotite along normal faults. However, in the East Pacific Rise the 500°C isotherm occurs in the crustal level, and never go downward due to the frequent magma (heat) supply, by which seawater cannot circulate in the lower crust and underlying mantle. Thus, the lower crust and underlying mantle are virtually anhydrous in the Pacific, but hydrous in the Atlantic (above).

PH_2O が高かったことを示している。前者の可能性については ISHIWATARI (1985b) のコンパイルした (1) と (2) の性質と調和的であるが、後者の可能性もまた大きい。というのは、オフィオライトの火山岩には後述するようにカルクアルカリ岩系の微量元素組成の特徴を持つものが存在するし (PEARCE 1975 など), また高 Mg 安山岩の存在も幾つかの代表的なオフィオライト 岩体から報告されるようになったからである (Troodos, Vourinos, Othris, New Caledonia, Betts Cove, Mariana)。

(4) 深海堆積物

オフィオライトの最上位にみられる深海堆積物には微化石を含んでいることが多く、この化石を使って1980年代には非常に精度よくオフィオライトの形成年代と深海の環境でいた時間の長さを求められるようになった。また火成鉱物の放射性年代のデータも増加してきた。その結果明らかになったことは、オフィオライトは形成後すぐに(30Ma 以内)造山帯の中へ搬入されてしまうことである(MARUYAMA and TATSUMI 1988)。例えば、コーストレンジオフィオライトでは25Ma 以内に Great Valley 前弧海盆堆積物に覆われるし(HOPSON *et al.* 1981)、トルドス(ROBERTSON and WOODCOCK 1979)やオーマン(COLEMAN 1981)では10Ma 以内に、Bay of Islands では30Ma 以内(MATTINSON 1976, DALLMYER and WILLIAMS 1975)に造山帯にエンブレイスメントし、夜久野では深海堆積物であるチャートの堆積する時間がなく、いきなり泥質堆積物が噴出岩層を覆っている(ISHIWARI 1985a)。この事実は30Ma よりも古い海洋地殻とその下のマンツルの付加の可能性を否定している。西太平洋地域では白亜紀よりも古い太平洋プレートが沈み込んでいるが、その様な地域ではオフィオライトの付加は起きないことになる。

(5) 前弧海盆オフィオライト

FISHER and ENGEL (1969) はトンガ海溝陸側斜面から超苦鉄質岩と玄武岩をドレッジで採集して初めて島弧海溝間隙にオフィオライトが存在することを発見した。KARIG (1971) もマリアナ海溝の陸側斜面にオフィオライトが露出していることを認め DICKINSON (1971) や DEWEY and BIRD (1971) もその重要性を論文の中で触れている。しかし、オフィオライト研究の中で前弧海盆オフィオライトが特に注目を浴びようになったのは(1)都城論争を契機にしてオフィオライトが島弧的な要素を伴うことがハッキリしてきたこと、(2)マリアナ前弧海盆にもドレッジでボニナイトが採集されたこと(BOGDANOV *et al.* 1977, DIETRICH *et al.* 1978, MEIJER 1980, BECCALUVA *et al.* 1980)、(3)マリアナ前弧海盆と中米海溝前弧海盆の2カ所で実際に堀削することによってデータがえられ、これらが中央海嶺と島弧の中間的な性質を示すことが次第に明確になってきたこと、の3点であった。

マリアナ前弧海盆では Leg 60の, Sites 458, 459, 460, 461でボニン岩、島弧ソレアイト、はんれい岩などが採集された(DSDP Initial Rept. 1981)。堆積物の厚さは最大600m に達する(堆積速度=1.7 mm/yr)が、それは火成作用終了後35Ma の間に堆積している。マリアナ前弧海盆の研究は KARIG (1971) の先駆的な研究以降、Dimitri Mendeleev 号によるボニン岩のドレッジ(BOGDANOV *et al.* 1977)、DSDP Leg 60(1981)、スクリップス海洋研究所の HAWKINS 達のドレッジ(HAWKINS *et al.* 1984)、東大海洋研究所のドレッジ(ISHII 1985)を経て、ハワイ大学の FRYER を中心としたグループによって Sea MARC II を用い、詳細な地形の研究をベースにしたドレッジ試料の検討(FRYER *et al.* 1985)の時期にきている。超苦鉄質岩はハルツバージャイトを主体とする点で深海ペリドタイトとは異なり、島弧ソレアイトやボニン岩の溶け残りマンツルとみてよい(BLOOMER and HAWKINS 1983, ISHII 1985)。そして結晶集積岩に見られる鉱物晶出順序はかんらん石、斜方輝石、普通輝石、斜長石であり、枯渇した溶け残りマンツルと調和的である(BLOOMER and HAWKINS 1983)。火山岩はボニン岩と島弧ソレアイトおよびその分化物である(DIETRICH *et al.* 1978, MEIJER 1980, ISHII 1985)。堆積物は典型的な深海堆積物ではなく島弧火山岩起源の凝灰岩をしばしば挟む。

海溝から陸側斜面に向かって約50km の所から、更に陸側120km までの間に蛇紋岩からなる無数の海山が発見された(FRYER *et al.* 1985)。これは沈み込む太平洋プレート起源の大量の水が前弧海盆の下のマンツルを蛇紋岩化させ、そのダイアピルが陸側斜面の弱線にそって上昇し、海底火山様の地形を作っていると解釈された。ところが北側の伊豆前弧海盆にはそれらが見られないことから、このような地形の発達は沈み込むプレート上の起伏の違いによるらしい(FRYER *et al.* 1985)。変成作用については系統的な研究はないが、沸石相、緑色片岩相と角閃岩相の存在が記載されている(DSDP, Leg 60 1981)。

中米海溝前弧海盆では Leg 67と84の2回にわたって堀削されたが、超苦鉄質岩まで抜いたのは84だけであった。この時は Sites 565, 566C, 567, 570の4本とも超苦鉄質岩を抜き、残りの569Aも、はなれい岩まで抜いている (DSDP, Leg 84, 1985)。ここでもマリアナ前弧海盆と似た結果が得られているが、変成相として新たにプレーナイト・アクチノ閃石相が認められる (OGAWA *et al.* 1985)。

以上の性質はオフィオライト一般のそれと非常によく似ている。ただし、変成作用の性格は現在のところプレーナイト・パンペリー石相が記載されていない点では異なっている。

しかしながら、前弧海盆オフィオライトの起源については単純ではない。DEWEY (1976) によるオフィオライト搬入モデル (後述) の前弧海盆オフィオライトは (1) 大陸が分離するとき、もしくは (2) 背弧海盆形成時に島弧が割れるときに出来る、海洋地殻+マントルのいずれかであるが、他に (3) subduction や obduction などの過程で島弧海溝間隙にすでに付加された大海洋プレートの破片などの可能性が考えられよう。LEITCH (1984) は前弧海盆オフィオライトを、(1) 海洋プレート中のトランスフォーム断層が、プレート相対運動の変化に応じて島弧になった時の海洋プレート、と (2) マリアナ弧のように背弧海盆起源のもの、の2つに区分した。KARIG (1982) は拡大軸の下側に海洋プレートの沈み込みがあるという特殊な三重点を考えてマントルの上に直接、高 Mg 安山岩からなる島弧地殻を作ることが出来る造構場を提案した (第2図の2)。三重点は一般には非常に不安定で、時間とともに移動するので、ある程度側方に続くオフィオライト岩体の説明は出来るかも知れない。例えば Troodos 岩体はマントルの上に直接、高 Mg 安山岩を伴う島弧の岩石からできているのであるから、この例に相当する可能性がある。CASEY and DEWEY (1984) は普通の海洋地殻の上にボニン岩を作るモデルを考えだした (第2図の1と2)。第2図の1ではプレートbとcの間に、回転の極近くで出来た、出来て間もない若い海洋地殻が、つぎの瞬間には回転の極の反対側で沈み込み、ボニン岩を普通の海洋地殻の上に作るというモデルで、第2図の3では拡大軸をつなぐトランスフォーム断層がプレート相対運動の変化に対応して、沈み込み帯に変化してボニン岩を作るというモデルである。ボニン岩や高 Mg 安山岩を形成する最も一般的な造構場は、背弧海盆形成の為に熱いマントルブルームの上昇と沈み込みによる加水の2つの条件の組合せが可能であろう。若いプレートの沈み込みはマグマの組成をよりボニン岩質にする効果をもつのであろう (TATSUMI and MARUYAMA 1988)。

結局、マリアナ前弧海盆オフィオライトの起源とテクトニクスについては既に大枠は解明されてしまった感がある。変形フロントから約30km 深度までのスラブの沈み込みの間に起きる、沸石相からプレーナイト・パンペリー石相、パンペリー石・アクチノ閃石相を経て緑色 (藍閃石) 片岩相に至る脱水反応を定量的に取り扱い、前弧海盆の下に超鉄質岩の、時間と熱構造に依存した再結晶作用を半定量化すれば最後に残った前弧海盆オフィオライト上昇テクトニクスの本質的な問題は解かれたことになるだろう。

(6) オフィオライトの産状

巨大な超苦鉄質岩体を伴うオフィオライトはテーチス区にそって出現する。西から、アドリア海を取り囲むようにして、イタリアからアルプス、ダイナリク、ヘレニック、キプロス、トルコ、ザグロスを経てオーマンからヒマラヤ、パプアへと続く。この列は後述するように、北側の大陸縁辺海洋地殻の下に南側のテーチス海洋プレートが沈み込み、しまいにはそのプレート上のインド、サウジアラビアなどの大陸が沈み込み、浮力性沈み込みの為に沈み込みが停止して、海洋地殻とマントルを大陸の上に持ち上げたようにみえる (DEWEY 1976)。この列のオフィオライトは世界の他の地域のものに比べて若く、中生代後期のものなので比較的よく調べられている。その産状には共通した現象を伴う。すなわち見かけ下位から上位に向かって、大陸地殻とその被覆岩類、大陸棚および斜面堆積物、深海堆積物、そしてオフィオライトの順序でナップとして積み重なっている (GIENNIE *et al.* 1974, BROOKFIELD 1976)。オフィオライト岩体 (ナップ) の基底にはエンブレイスメントの時期に出来たと思われる接触変成帯を伴う。時代は古くオルドヴィス紀であるが、Bay of Islands オフィオライトも全く同じ産状を示す (STEVENS 1970,

第2図 ボニン岩を生じる造構場((1) と (3) は CASEY and DEWEY (1984) から, (2) は KARIG (1982) から引用)

Fig. 2 Tectonic setting to generate boninite series magma

(1) and (3) are from CASEY and DEWEY (1984), and (2) is from KARIG (1982). There are three plates, a, b, and c, and a rotates in a manner of strike-slip movement with respect to b and c. The place 1 born near the rotation pole moves downward, and is subducted by the newly formed oceanic plate c with resultant formation of boninite. (2) shows that boninite can be formed at RTF (ridge, trench, transform fault) triple Junction. (a) is the case of the southern tip of Mariana Trough, where spreading axis of back-arc opening meets with trench and transform fault. The Pacific plate subducts supplying enough water to generate boninite underneath the spreading center. (b) is the case of Tonga-New Hebrides, and has a similar tectonic setting to (a). (3) shows the case that the change of relative plate motion makes boninite on the MORB crust. A transform fault bridging two spreading axes changes to trench according to the change of relative plate motion. Note the difference that boninite rests directly on the mantle peridotite in the case (2), but not in (3).

DEWEY 1976, MOORES 1982)。

オフィオライト岩体の規模がさらに小さくしかも破碎が著しくすすみ *dismembered ophiolite* と呼ばれるものは様々な tectonic setting に出現し, あるものは低温高圧型変成作用を受け, 他のものは海洋底変成作用だけを被っている。それらの包括的なまとめについてはいまだになされていないようである。

III. Back-arc basin basalt (BABB) と背弧海盆の成因

マリアナトラフの DSDP 試料を記載した RIDLEY *et al.* (1974) は BABB は MORB と極めて似ていて互いに他を区別するのは難しいと結論した。この論文の与えた影響はかなり大きく, 別の独立した根拠から, オフィオライトの生成した造構環境が背弧海盆であると考えられるオフィオライトの場合でも,

主成分や微量元素組成から MORB との違いを議論するということができなかった。玄武岩の Ti, Zr, Y 濃度を組み合わせる化学組成と造構環境との関係を論じた PEARCE and CANN (1971) は島弧、海洋底、プレート内の3つの違いを示す図を提案したにすぎない。しかし、たいていの背弧海盆では拡大軸の下に沈み込んだスラブが存在するので、沈み込んだスラブは何らかの影響を BABB に与えているはずである (FRYER *et al.* 1982)。SATO and TOHARA (1985) はスコシア海、ラウ海盆、マリアナトラフ、四国パレセベラ海盆と西フィリピン海の玄武岩をコンパイルすることによって BABB が島弧玄武岩と MORB の中間的な性質を示すことを明らかにした。BABB の特徴は (1) 主成分組成は MORB とほぼ同一であるが、若干ノルム斜長石成分に富み、ノルムカンラン石成分に乏しい。(2) 液相濃集元素 (Rb, K, Ba, La, Nb, Th 等) は一般に N-MORB よりも富んでおり、島弧ソレアイトよりも乏しい。又、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は0.7028-0.7045で N-MORB と島弧ソレアイトの中間的な組成を有する (佐藤 1986)。

TSUCHIDA (1987) はラウ海盆、西フィリピン海、四国パレセベラ海盆、マリアナトラフとスコシア海の火山岩の主成分元素の分析値約500をコンパイルして、MORB のそれと比較し、主成分元素においても BABB は MORB とかなり違った組成を持っていることを示した。第3図の1は酸化物と FeO^*/MgO の関係を示す図であるが、MORB に比べて K_2O , P_2O_5 , Na_2O , MgO に系統的な違いがみられる。SATO and TOHARA (1985) と佐藤 (1986) の指摘した、BABB が液相濃集元素に富む傾向はこの図においても顕著であるが、それは、もしマントルがそれらの濃度に関して均質であればマントルの部分溶融率が MORB のそれよりも小さいことを示している。 $\text{MgO}-\text{FeO}^*/\text{MgO}$ 図の関係 (第3図の2) はそのことを強く示唆している。

このような違いが見られる限り、オフィオライトの主成分化学組成はもう一度系統的に MORB と比較検討されるべきであろう。

主成分元素における K_2O の組成差はまた海洋底変成作用によって生じた角閃石の組成差にも反映しているはずである。その論理は次の通りである。角閃岩相の変塩基性岩を構成する鉱物は斜長石と角閃石±酸化物鉱物の3種類にすぎなく、常に成分の数から要請される相の最大数6 (温度と圧力一定の時の) よりも小さい。そのために鉱物の組成が全岩組成によってコントロールされやすくなる。例えば、 K_2O は斜長石には殆ど入らず、角閃石だけに濃集するので、角閃石の K_2O は全岩組成の K_2O 量を示すことになるはずである。この考えを検証するために、大西洋と太平洋の海洋底変成岩の角閃石を組成を $\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}^*/\text{MgO}$ 図に示したのが第4図である。太平洋の角閃石は最も K_2O が少なく大西洋のそれはその次に少ない。しかし、カリブ海プレート中のケイマンライズの角閃石は K_2O に著しく富んでいる。Del Puerto, Yap, Hayfork, Marble Mtn. などのオフィオライトの角閃石は系統的に K_2O に富んでおり、太平洋や大西洋の海洋底変成岩の角閃石とは異なっている。これらの角閃石はむしろ、カリブ海プレートのような小海盆や、データの報告はいまだないが、フィリピン海のような背弧海盆から期待される角閃石組成に似ているであろう。ここでは海洋底変成作用の固溶体岩石学的な研究からも今後、オフィオライトの起源についての束縛条件をだすことができるような時期にきていることを強調しておく。

以上の議論のデータは、しかしながらすべて海洋地域内に生じた背弧海盆玄武岩についてのものである。日本海のような大陸地殻断裂型背弧海盆についても同様の違いが期待される理論的な根拠はない。背弧海盆の水深と年代の関係 (都城 1987私信) は大陸地殻断裂型背弧海盆では部分溶融の程度が大きく、下位のマントルはハンツパージャイトを主体とするのかも知れない。

背弧海盆の成因はずっと、プレートダイナミックによるものであると説明されてきた。それに対して MIYASHIRO (1986) はプレートのへの火成活動とは無関係なアセノスフェアのホットリージョンが原因で背弧海盆が出来るという異端説を提案した。提案されてから4年たったが、この説は異端でなくなり初めている。

第3-2図 背弧海盆玄武岩の $\text{MgO-FeO}^*/\text{MgO}$ 図

Fig. 3-2 $\text{MgO-FeO}^*/\text{MgO}$ diagram of BABB

The inset diagram at right-hand side up shows the reason why most BABB are plotted in the lower side of the average trends of Pacific and Atlantic MORBs. BABB are formed by much lower degree of partial melting of mantle peridotite than the case of MORB. If the primary magma (1) formed by the lower degree of partial melting fractionates, its trend never cross-cut the crystallization trend (2) led by the magma formed by the higher degree of partial melting in the $\text{MgO-FeO}^*/\text{MgO}$ diagram (NAKAGAWA *et al.* 1987).

IV. 海洋底変成作用

オフィオライトは一般に変成作用を受け、多少なりとも再結晶作用を被っている。その変成作用の存在については古くから知られていたが、変成相系列を正確に決めうるような相平衡論的な研究は、東台湾 Ophiolite (LIU *et al.* 1977), Del Puerto Coast Range Ophiolite (EVARTS and SCHIFFMAN

第3-1図 背弧海盆玄武岩の化学分析値約500の酸化物 wt% vs 分化指数 (FeO^*/MgO , TSUCHIDA 1987)

Fig. 3-1 Oxides vs differentiation index (FeO^*/MgO) diagram of about 500 back-arc basin basalts (BABB)

Solid lines in the diagram mean the average trends of MORB (TSUCHIDA 1987).

第4図 大西洋と太平洋の海洋地殻の變成岩の角閃石の K_2O と FeO^*/MgO 比の関係

Fig. 4 The relationship between K_2O and FeO^*/MgO of Ca-amphibole formed by the ocean-floor metamorphism

Data source are from the Pacific, Atlantic and Caribbean regions. Cayman Rise, a small-scale spreading center, occurs at NW corner of the Caribbean plate as a cold pull-apart rift, where metamorphosed oceanic crusts are exposed. Note the systematic compositional difference of Ca-amphiboles among the Pacific, Atlantic and Caribbean, corresponding to bulk composition as shown in Fig. 3. Ca-amphiboles from several on-land ophiolites are clearly different from those in the Pacific and Atlantic regions (MARUYAMA *et al.*, in prep.).

1983), 夜久野 Ophiolite (ISHIWATARI 1985a), 幌加内 Ophiolite (ISHIZUKA 1985) まで待たねばならない。夜久野 Ophiolite を除いて、これらの研究者はオフィオライトの變成作用は現在の海洋底變成作用に対応するものであるとみなした。變成相系列は、沸石相、プレーナイトパンペリー石相、緑色片岩相、角閃岩相に至る典型的な低压高温型に属するが、ある種のオフィオライト、例えば、ボルネオ (HUTCHISON 1978) や夜久野 (ISHIWATARI 1985a) にはグラニコライト相を伴うことがある。

大西洋とインド洋からドレッジされた海洋底岩石の變成作用が1966年に初めて記載された (MELSON *et al.* 1966, MELSON and VAN ANDEL 1966, CANN and VINE 1966)。それらの記載及び大西洋中央海嶺の岩石の變成作用を自ら記載して MIYASHIRO *et al.* (1969, 1971) は海洋底變成作用の性質一般をまとめ、(1) 變成相系列は典型的な低压型であるが、プレーナイトパンペリー石相を欠く、(2) 變成再結晶作用は海嶺での循環熱水によるもの、の2点を明らかにした。

その後、ドレッジによる試料の他に1968年に始まった海洋底掘削計画による試料の研究が始まり、1988年末の時点で海洋底には約600カ所のボーリング孔が開けられ、その内の約半分の300カ所では海洋底玄武岩まで貫入している (第5図)。ドレッジや深海掘削計画の岩石試料の再結晶作用をコンパイルして MARUYAMA and LIOU (1988) は次のことを指摘した。それらは (1) プレーナイトパンペリー石相はごく一部の MgO に富む岩石に出現するだけで一般的には欠如する。代わってプレーナイトアクチノライト相が一般的に出現する。このことは變成作用の地温勾配がオフィオライトのそれよりも大きいことを意味する (第1図)、(2) 變成再結晶作用は海洋地殻形成後13Ma 以内に起きる、(3) 太平洋では變成作用時の地温勾配が大西洋のそれよりも大きい、また太平洋では地殻下部のはんれい岩が殆ど再結晶していないが大西洋で

第5図 1968年に始まった深海掘削計画によって 現在までに海洋底に開けられたボーリング孔のうちで玄武岩質海洋地殻まで達した掘削孔の位置とその番号 (MARUYAMA and LIOU in prep.)

Fig. 5 Drilled site and its number by the Deep Sea Drilling Project since 1968

Only the sites which could reach to the basaltic layer are shown (MARUYAMA and LIOU, in prep.).

はグラニュライト（輝石ホルンフェルス相）に再結晶しているものがあること、(4) マグマ供給率の高い太平洋の海嶺では熱水循環水が下部地殻まで到達しないが拡大速度の遅い大西洋では 下部地殻やマントルまで到達して地殻下部やマントルの岩石を再結晶させている（第1図，第6図）。

(1) から (4) の特徴の中で (3) と (4) はオフィオライトの特徴と調和的であるが (1) と (2) は不調和である。プレーナイトパンペリー石相が出現するようなやや低い地温勾配は CONDIE (1982) による地殻熱流量のコンパイルに従うと背弧海盆などの小海盆が適当である。背弧海盆の海洋底玄武岩のドレッジや掘削はフィリピン海，スコシア海，ラウ海盆，チレニア海などで行われているが，沸石相より高い変成相が記載されているのはフィリピン海だけである。フィリピン海では沸石相に加えプレーナイトパンペリー石相からグラニュライト相までの変成相が記載されている (MARUYAMA and LIOU 1988)。このように背弧海盆の変成作用についてのデータはまだ不十分ではあるが背弧海盆の海洋底変成作用はオフィオライトの変成作用の特徴と極めて類似している可能性が大きい。

V. オフィオライトのエンプレイスメントについての研究史

Hess (1939) はオフィオライトはマグマとして地向斜の翼部の，地殻の構造が急変する位置に2列になって貫入するとみなした。もともとこの考えは STILLE (1924) によって地向斜内初期火成活動として位

第6図 大西洋、太平洋、インド洋、背弧海盆、海膨と海台、前弧海盆、及び海山に穿孔したボーリング孔のうち最も長いコラムの再結晶作用（ただしアイスランドは陸上ボーリングによる）

Fig. 6 Summary of the ocean-floor metamorphism at different tectonic settings; Atlantic, Pacific, and Indian Oceans, back-arc basin, rise or plateau, fore-arc basin, and seamount

Columnar sections show the longest five or two of drilled holes. The column of Iceland is by on-land drilling. Sedimentary covers of each hole is subtracted, because the ocean-floor metamorphism occurs within 13 Ma after the magmatism. A summary of metamorphic facies and the presence of serpentinized peridotite by dredging are shown in the bottom of the figure. The facies boundary between zeolite and PrA facies occurs at 600m deep in the Atlantic, but much deeper at 1600m in the Atlantic. The recrystallized gabbro and serpentinized peridotite are common in the Atlantic, but rare in the Pacific. Note the presence of PP facies in the back-arc basin. Abbreviations; PP=prehnite-pumpellyite facies, PrA=prehnite-actinolite facies, GS=greenschist facies, AM=amphibolite facies, and PxH=pyroxene hornfels facies.

置づけられていたもので、後に AUBOUIN (1965) などに引き継がれてゆく。これらの、マグマとしての現地性貫入説に対して、マントルの破片の固体貫入説を初めて唱えたのは DE ROEVER (1957) であった。その後さらに具体的に、海洋地殻が沈み込む時に付加すると解釈したのは DIETZ (1964) であった。HAMILTON (1969) がフランシスカン層群とコーストレンジオフィオライトの解釈を古太平洋プレートの沈み込みで説明し、同年12月にペンローズ会議が開かれた直後の1970、71年までにオフィオライトのエンブレイスメントモデルが次々に提案された (MOORES 1970, COLEMAN 1971, TEMPLE and ZIMMERMAN 1969, DEWEY and BIRD 1971)。その後、1975年までの間に提案されたモデルは DOWEY (1976) に手際よくレビューされている (第7図)。7つの異なったモデルが提案されているが、それらは (1) 沈

Dewey (1976)

第7図 オフィオライト搬入機構モデル (DEWEY 1976)

Fig. 7 The emplacement model of ophiolite (DEWEY 1976)

HESS has proposed a model that ophiolite is emplaced as a magma intrusion in two wings of a geosyncline (HESS 1939). See the text for the details of each model.

み込みによるもの (HAMILTON 1969), 沈み込み過程での付加=第7図-(1) B では島弧そのものが沈み込み, 背弧海盆海洋地殻が露出する (BLAKE and JONES 1974), (2) 大西洋型プレート縁が海洋プレートの下に沈み込む (A, MCKENZIE 1969, DEWEY and BIRD 1971); 海洋プレート上に微小大陸がある場合も同様のことが起きる (B, COLEMAN 1971, DEWEY and BIRD 1970), (3) 大西洋型大陸縁の上に重力滑りで生成直後の海洋地殻が移動する (REINHARDT 1969, CHURCH 1972), (4) 海嶺が海溝に転化した後 (DEWEY 1975) (2) の状態になる (DEWEY 1976), (5) 海嶺の沈み込み (CHRISTENSEN and SALISBURY 1975), (6) 背弧海盆の中央部で新たな沈み込みが始まり背弧海盆海洋地殻が大陸の上にのしあげる (DEWEY and BIRD 1971), 及び (7) 大陸や島弧の衝突にともなってプレート境界深部からオフィオライトが上昇貫入する (DEWEY 1977)。DEWEY (1976) は採用しなかったが, これらのモデルの他にダイアピルによるもの (MAXWELL 1973) があるが, このモデルでは例えば前弧海盆オフィオライトは沈み込むスラブ由来の水の為に下位のマントルが蛇紋岩化することによって, ダイアピル

上昇すると説明することが出来る。DEWEY (1976) は従来のモデルのコンパイルと共に現在のプレート境界のタイプをモダンアナログとしてにらみながら、これら7つのモデルをまとめあげた。

(2) のタイプは現在のインド洋の状態である。オーストラリア北方では大陸を乗せた海洋プレートがインドネシア弧の下に沈み込んでいるが、将来インドネシア弧はオーストラリア大陸の上にのしあげて 島弧オフィオライトのエンプレイスメントがおきるであろうし、インドネシア弧以西のインド洋では同様のことが、白亜紀にテチス海で頻繁に起きたと思われる。この場合、沈み込まれる側の海洋プレート上では当然ながら沈み込み帯火成作用を受けるはずだから海洋地殻やマントルは島弧的でなければならない。このことが多分都城型オフィオライトの成因論的な意味なのであろう。DEWEY (1976) のモデルを検討すると (1) B, (2), (4), (6) のオフィオライトは島弧的な要素を示すべきであろう。一方、(1) A, (3), (5) ではオフィオライトは海嶺玄武岩とその下のレルゾライト-ハルツバージャイトでなければならない。(7) では両者のケースが考えられるであろう。

ところが、1970年代の後半から80年代の前半にかけてプレート収束域の細かな構造が音波反射波や CO-CORP で調べられると、世界中のどこにも DEWEY (1976) の (2) を除くエンプレイスメントの例が見られないことが明確になった。つまり、大きな海洋プレートは総てマントルまでを含めた形で付加することなく沈み込むプレートとともに静かに沈み込んでしまうようである。(2) においては一定時間以上が経過すると沈み込まれる側の海洋プレートは島弧に転化してしまい、我々が現在オフィオライトと呼んでいるような岩体と程遠くなってしまうであろう。キプロス、ギリシャ、オマンなどのオフィオライトはトングークマデック弧や千島弧などとは比較にならないくらい海洋的なのである。

DEWEY (1976) の図をよく観察すると (2) A では島弧の少し背弧側の、より海洋地殻的な部分が、(2) B では前弧海盆側のより海洋地殻的な部分が最終的に露出するように描かれている。これらがオフィオライトに対応するのであるとしても、(2) モデルが御都合主義とみなされずに生き残るには、オフィオライトにともなう対の現象としてかなり大きな島弧が大陸の上にオブダクトして 並走することが必要になるが、ヒマラヤ山脈 (SEARLE *et al.* 1987, HONEGGER *et al.* 1982) の例を除いてそういう例はあまり多くは存在しない。

BROOKFIELD (1976) は世界の中—新生代の巨大オフィオライトナップの産状をコンパイルして、オフィオライトのエンプレイスメントはプレート相対運動が変化するときには起きると解釈した。CASEY and DEWEY (1984) はオフィオライトのエンプレイスメントがオフィオライト形成後すぐに起きること、オフィオライトには島弧的な要素が一般的なことの2点を重視して、(1) トランスフォーム断層がプレート相対運動の変化に対応して沈み込み帯に変化するとき、或は(2) 海洋地域内で1つの回転の極の手前と後ろ側でそれぞれ拡大と収束が起きる場合には、海嶺で出来た若いプレートが次の瞬間に海溝に沈み込むという変化が期待される場合がある。その時にオフィオライトの付加が起きるというモデルを提案した(第2図)。

BROOKFIELD (1976) の考え(オフィオライト搬入世界同時説)はプレート相対運動の変化が汎世界的に同時に起きるということがはっきりとしてきた1980年代の前半に MOORES (1982) によってもう一度強調された。すなわち世界の主な中—新生代のオフィオライトのエンプレイスメントは5, 5-23, 23-36, 36-53.5, 53.5-65, 65-100, 100-136, 136-157Ma 頃に起きたというのである (MOORES 1982)。この考えの評価についてはしばらくの時間が必要であろう。というのは世界のたいていのオフィオライトは背弧海盆や小海盆起源のようにみえるので、背弧海盆や小海盆の消滅がプレート相対運動のグローバルな変化と対応しているかどうかの理論的根拠がいまのところハッキリしていないからである。

VI. オフィオライトの起源とエンプレイスメント

1973年の都城論争を契機にしてオフィオライトの研究は新しい時代に突入し、様ざまの違った側面から

学際的に研究されるようになった。この項ではオフィオライトの起源とエンブレイスメントを束縛する3つの性質（火成作用、変成作用、堆積作用）について、もっともよく調べられた世界のオフィオライト岩体35について要約し、その起源とエンブレイスメントを論じる。

第1表は Bay of Islands, Betts Cove, Fidalgo island, Trinity, Canyon Mtn, Smartville, Chile, Coast Range (Del Puerto, Elder Creek, Paskenta, Stonyford, Healdsburg, Quinto Creek, Llanada, Cuesta Ridge, Stanley Mtn, Point Sal, Mt Diablo), Troodos, Vourinous, Pindos, Othris, Oman, E. Taiwan, Papua, New Caledonia, Zambales, New Zealand, Yakuno, Horokanai, Miyamori, Bonin island, Mariana, Khain Taishir, Liguria の各オフィオライト岩体について、(1) プレーナイトパンペリー石相 (PP) が存在するか、(2) 火山岩は MORB, カルクアルカリ岩 (CA), 高 Mg 安山岩 (HMA) の何れであるか、(3) 伴う深海堆積物の堆積時間、及び (4) それらの性質から推定された造構環境を示す。この要約に使用した文献と詳細な議論については MARUYAMA and TATSUMI (1988), MARUYAMA and LIOU (1988) で公表し、論文は準備中の段階であるが必要な方にはコピーをさしあげるつもりである。この表から分かることは35の岩体のうちで22には PP 相の変成作用が明確に記載され、15の岩体から CA もしくは HMA の火山岩の存在が確かめられている。さらにオフィオライト岩体が形成されてから30Ma 以内に造山帯の中にエンブレイスメントしていることがわかる。空白の部分については記載が不十分もしくは文献学の不備によるもので、今後 PP, CA, HMA の発見報告は増加することはあっても減少することはないであろう。

以上のオフィオライトの性質は現在の大西洋、太平洋やインド洋の性質とは著しく違っている。この点についてはオフィオライトを生じたマンツルの部分溶融率から ISHIWATARI (1985b) が結論した、“たいていのオフィオライトは MORB とその下のマンツルとは対比できない” ことと調和的である。これら3つの性質を満足する造構場は近傍に海溝が存在した小海盆、前弧海盆や背弧海盆であろう。

現在約20の背弧海盆などの小海盆が海洋地域に散在しているが、それらは30Ma 以内の短時間に形成されていること、また形成年代がもっとも古いものでも80Ma 前にしか過ぎない（トラップされたクラプレート起源の Aleutian basin を除く）ので、それら小海盆や背弧海盆の寿命は最大80Ma であり、生成後80Ma 以内に消滅することを示していると思われる（第8図, MARUYAMA and TATSUMI 1988）。このことはオフィオライト縁海起源説にとって都合がよい事実である。

それでは背弧海盆や小海盆が島弧や大陸の上に衝上しつつあるモダンアナログがあるであろうか？ モダンアナログとしては日本海東縁 (TAMAKI and HONZA 1985, 倉本 本特集号) が挙げられるであろう。日本海は約 15Ma 前に形成され (OTOFUJI and MATSUDA 1984), 約 2 Ma 或は 0.5Ma 前に東北日本弧の下に沈み込みを開始した (TAMAKI and HONZA 1985, 瀬野 1986)。日本海の東縁では日本海スラブが、常に東側に傾斜した逆断層面を形成しているかというそうではなく、西側に傾斜した back-thrusting を伴っている場所がある。奥尻海嶺がその例である (TAMAKI and HONZA 1985)。ここではこの逆断層にそって、日本海海洋地殻がオブダクションしつつある (TAMAKI and HONZA 1985, 倉本 本特集号)。ここでは、この例を基にしてオフィオライトのエンブレイスメントを次のように考える。初めに背弧海盆が大陸縁や島弧の断裂によって出来るときは listric normal faults が発達するが、それらの傾斜は拡大軸側に傾斜することが多い。浅いところでは傾斜は高角だが深いところでは低角である (第9図の1)。また初期の火成活動は島弧的な要素が強く現れるはずである。背弧海盆の形成がアセノスフェアからのマンツルブルームの上昇に主因があるのであれば高 Mg 安山岩の出現も十分期待されるはずである (巽 1988 私信)。次に背弧海盆の収束運動が始まると、まず初めに古い listric normal fault が再活動して back-thrusting の役割をして背弧海盆海洋地殻の縁をオブダクションさせる (第9図の2)。沈み込み運動が始まって 10Ma も経過すると今度は海洋プレート側が沈み込むようになりオフィオライトオブダクションは起きなくなる。この推定は、東太平洋地域で起きている海嶺と海溝接触部では例外がなく

第1表 良く調べられた世界のオフィオライト35の変成作用, 火成作用, 堆積作用の性質の要約と推定されている造構場 (MARYAMA and TATSUMI 1988)

Table 1 Summary of metamorphic, igneous, and sedimentary facies of the best studied 35 ophiolites in the world, and their expected tectonic settings (MARUYAMA and TATSUMI 1988)

	PP	MORB CA HMA	Time span of chert sequence	Tectonic setting
Bay of islands		+	OMa (igneous: 506 Ma; empl> 470-460 Ma) (Igneous: 463 Ma; empl: ?)	major ocean or back-arc basin
Betts Cove		+ +		fore-arc
Fidalgo island		+		arc
Trinity	+	+		back-arc basin
Canyon Mtn		? +		arc
Smartville	+	+		arc
Chile	+	+		back-arc basin
Coast Range				fore-arc or back-arc basin
Del Puerto	+	+ +	12 Ma (150-138 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Elder Creek	+	+	15 Ma (157-142 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Paskenta	+		15 Ma (157-142 Ma)	seamount
Stonyford	+		2 Ma (140-138 Ma)	seamount
Healdsburg	+	+	25 Ma (163-138 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Quinto Creek	+	+		fore-arc or back-arc basin
Llanada	+	+	24 Ma (162-138 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Cuesta Ridge	+	+	12 Ma (150-138 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Stanley Mtn	+	+	(? -138 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Point Sal	+	+	20 Ma (158-138 Ma)	fore-arc or back-arc basin
Mt Diablo	+	+ +		fore-arc or back-arc basin
Troodos	+	+ +	<10 Ma	fore-arc or back-arc basin
Vourinous		+ +		fore-arc or back-arc basin
Pindos	+	+ +		fore-arc or back-arc basin
Othris		+ +		fore-arc or back-arc basin
Oman	+	+ +		fore-arc or back-arc basin
E. Taiwan	+	+	chert absent	S. China Sea (small ocean basin)
Papua		+		fore-arc or back-arc basin
New Caledonia		+ +		fore-arc
Zambales		+		back-arc basin
New Zealand	+	+ +		back-arc basin or fore-arc
Yakuno	+	+	OMa 30 Ma (145 Ma-115 Ma)	back-arc basin or fore-arc
Horokanai	+	+		back-arc basin or fore-arc
Miyamori		+		arc
Bonin island		+ +		fore-arc
Mariana		+ +		fore-arc
Khain Taishir		+		major ocean ?
Liguria	+	+		back-arc basin (small ocean basin ?)

常に海嶺(最も浮力に富むはずの)が、オフィオライトのオブダクションを伴わずに、静かに沈み込んでいる事実に基づく。このモデルが正しいとするとオフィオライトのオブダクションは背弧海盆が閉じる初期に限られる。そして搬入されるオフィオライトは弧背海盆拡大の初期に形成された島弧の要素の強い海洋地殻ということになる。このモデルは DEWEY (1976) のモデル (6) (第7図) と似ているが背弧海盆の中央部で海溝が発生するのではなく縁でおき、縁の海洋地殻とマントルがオブダクションするという点では異なっている。

マリアナなどの前弧海盆オフィオライトは島弧的な要素をそなえ、テーチス区などに特徴的に出現する巨大オフィオライトと似ているが、実はマリアナ前弧海盆オフィオライトは造山帯の中にいまだエンプレイスメントしていないことに注意すべきである。地質学者がオフィオライトとして記載し

てきたものは例外なく、ほとんどが大陸起源碎屑物からなる褶曲帯中に出現するものをさすからである。つまり、マリアナ前弧海盆オフィオライトがそのような最終的な形態をとるためのエンプレイスメントテクトニクスはマリアナ弧が将来、日本列島に衝突した時におきるテクトニクスに依存する。はたしてその時、マリアナ前弧海盆オフィオライトのオブダクションはあるのであろうか？

第8図 背弧海盆と小海盆の年代と形成に要した時間

Fig. 8 Age and active period of back-arc basin and small ocean-basin

20 examples are present in the present ocean. All are younger than Late Cretaceous except for the Aleutian basin, which is of trapped Kula plate origin. Two conclusions are led from this figure, (1) the active period of such basin is less than 30 Ma, and (2) such basin must annihilate within 80 Ma after the formation.

VII. 議 論

オフィオライトは1960年代の後半から地質学の重要な問題の1つになり、そのためにこれまでに何回かレビューされたことがある。日本では岩崎 (1973) によって、世界にさがかけて試みられた。内容は不完全ではあったが、何故オフィオライトの研究が重要なのかという雰囲気はよく伝えられている。アメリカではオブダクションという言葉を定義した COLEMAN (1977) によりレビューがなされた。彼のレビューでは (1) DE ROEVER (1957) の研究を全く評価していない、(2) 逆に THAYER (1967) や WYLLIE (1967) の研究を、60年代後半の時期に、BOWEN のカンラン岩マグマ説の後継者として位置づけ、マントル破片説と対置させている、の2つの点が今回のレビューとの大きな違いである。DE ROEVER (1957) は確かに BOWEN vs BENSON の論争の壁をぶち破る epoch-making な発想であったと評価したい。DE ROEVER (1957) をそのように評価すると THAYER (1967) や WYLLIE (1967) のオフィオライト論は DE ROEVER から10年遅れ、無意味な議論を繰り返したとしか評価できなくなる。MOORES (1982)

第9図 背弧海盆海洋地殻とマンタルのオブダクションモデル (MARUYAMA 1988)

Fig. 9 Obduction model of oceanic crust and underlying mantle in a back-arc basin (MARUYAMA 1988) Numbers of listric normal faults develop at the initial stage of back-arc opening along the rifted continental margin or island arc. Those faults reactivate to obduct the oceanic crust and underlying mantle, when the back-arc basin initiates to subduct. If the subduction continues, ophiolite obduction never continue, because the oceanic plate is always denser than the continental plate even if it is a ridge, as well documented in the ridge subduction off N. and S. Americas. Ophiolite obduction is possible only in the early stage of closing back-arc basin. Note that the obducted part of back-arc basin is a peripheral part of back-arc basin, where igneous rocks may be intermediate between arc magma and BABB.

オフィオライト研究の歴史を単なる年表として紹介するのではなく偏見ではあるかもしれないが主観的に時代の節目を作った論文を評価したことである。ただし、最近数年の研究については著者達が見落したり、評価の客観性について疑問符のつくものがいくらかあるであろう。それらについては勿論、著者達の責任である。

1973年以降、オフィオライトの研究は学際的になり、大量のデータがもたらされた。しかしそれらのほとんどは2億年よりも新しい海洋地域と顕生代のオフィオライトの研究であった。造山帯のオフィオライトを研究すればするほど、その起源は“大西洋や太平洋などの海洋スラブ”ではないことが明らかになってきたのがここ15年間の成果ではなかったろうか。このレビューを書いて感じたことはオフィオライト問題は現在ほぼ収束しつつあるという点である。これからの研究方向については海洋底の研究はオフィオライトとして捉えるのではなくアセノスフェアのテクトニクスとして捉えられ、地球内部のダイナミクスの研究に大きな貢献をするであろうこと、いまだ十分には手つかずの先カンブリア時代のオフィオライトの研究は太古代から原生代の地球の熱史、海水や大気の進化やテクトニクス自体の進化などに非常に多くの情報をもたせるであろうということである。オフィオライトの研究者は先カンブリア時代の地球史をひもとく鍵を握っている。

の彼らに対する評価はこのレビュー程シビアではないが DE ROEVER (1957) はかなり評価されている。MOORES はプリンストン大学で HESS から Vourinous 岩体の研究で学位を取った人であり、その後 Troodos の研究を始め、都城論争の中心の1人でもあった。MOORES (1982) のレビューでは HESS を評価しすぎるきらいがある。不思議なことに、COLEMAN (1977) も MOORES (1982) も DIETZ (1964) を決して評価しようとししない。その理由をかって丸山は COLEMAN に直接聞いたことがあるが、返答は要領を得なかった。どうも DIETZ が地質学者として地域地質をこなしただけで書いた論文でないというのが理由のようであった。

1984年に J. Geol. Soc. London は Blackwell から “*Ophiolite and Oceanic Lithosphere*” という本(論文集)を発刊した。本のタイトルは勇ましいが、オフィオライト研究のレビューは含まれず、内容の多くは地域地質に関したものである。

この小論で著者達が試みたのは、

オフィオライトに関するフランス語で書かれた古い文献の翻訳や古典的な論文の評価について議論して下さった, Drs., A. M. C. SENGÖR, R. SEDLOCK, R. G. COLEMAN, 石渡 明の方々に深く感謝します。

文 献

- 荒井章司 (1987) : 地表にのしあげたマントル—地殻スライス。科学, **58**, 685-695.
- AUBOUIN, J. (1965) : *Geosynclines*. Amsterdam : Elsevier, 1-335.
- BECCALUVA, L., MACCIOTTA, G., SAVELLI, C., SERRI, G. and ZEDA, O. (1980) : Geochronology and K-Ar ages of volcanics dredged in the Philippine Sea (Mariana, Yap, and Palau Trenches and Palece Vela Basin). In HAYES, D. E. ed. "*The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*", Geophys. Monogr. 23, Am. Geophys. Union, 247-268.
- BENSON, W. M. (1926) : The tectonic conditions accompanying the intrusion of basic and ultramafic igneous rocks. *Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **19**, 1-90.
- BLAKE, M. C. and JONES, D. L. (1974) : Origin of Franciscan melange in northern California. In DOTT, R. H. and SHAVER, R. H. eds. "*Geosynclinal Sedimentation*", Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Pub., **19**, 345-357.
- BLOOMER, S. H. and HAWKINS, J. W. (1983) : Gabbroic and ultramafic rocks from the Mariana trench: An island arc ophiolite. In HAYES, D. E. ed. "*The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*", Part 2, Geophys. Monogr., **27**, Am. Geophys. Union, 294-317.
- BOGDANOV, N. et al. (Scientific Staff). (1977) : Initial reports of the geological study of oceanic crust of the Philippine Sea floor. *Ophioliti*, **2**, 137-168.
- BOUGAULT, H. and HEKINIAN, R. (1974) : Rift valley in the Atlantic ocean near 36°50'N : Petrology and geochemistry of basaltic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **24**, 249-261.
- BOWEN, N. L. (1927) : The origin of ultrabasic and related rocks. *Am. J. Sci.*, **14**, 89-108.
- and SCHAIRER, J. F. (1935) : The system MgO-FeO-SiO₂. *Am. J. Sci.*, **29**, 151-217.
- and TUTTLE, O. F. (1949) : The system MgO-SiO₂-H₂O. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **60**, 439-460.
- BRONGNIART, A. (1813) : Essai de classification mineralogique des roches melanges. *J. Mines*, **34**, 199.
- BROGNIART, A. (1827) : "*Classification et Caracteres Mineralogique des Roches Homogenes et Heterogens*", F. G. Levrault, Paris.
- BROOKFIELD, M. E. (1976) : The emplacement of giant ophiolite nappes. I. Mesozoic-Cenozoic examples. *Tectonophysics*, **37**, 247-303.
- BRUNN, J. H. (1959) : La dorsale medio-atlantique et les epanchements ophiolitiques. *C. R. Soc. Geol. Fr.*, **8**, 234-236.
- CAMERON, W. E. (1985) : Petrology and origin of primitive lavas from the Troodos ophiolite, Cyprus. *Contr. Mineral. Petrol.*, **89**, 239-255.
- CANN, J. R. and VINE F. J. (1966) : An area on the crest of the Carlsberg Ridge : Petrography and magnetic survey. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **259**, 198-217.
- CASEY, J. F. and DEWEY, J. F. (1984) : Initiation of subduction zones along transform and accreting plate boundaries, triple-junction evolution, and fore-arc spreading centers—Implications for ophiolitic geology and obduction. In GASS, I. G., LIPPARD S. J. and SHELTON, A. W. eds. "*Ophiolites and Oceanic Lithosphere*", Blackwell, Oxford, 269-290.
- CHRISTENSEN, N. I. and SALISBURY, M. H. (1975) : Structure and constitution of the lower oceanic crust. *Rev. Geophys. Space Physics*, **13**, 57-86.
- CHURCH, W. R. (1972) : Ophiolite : its definition, origin as oceanic crust, and mode of emplacement in orogenic belts, with special reference to the Appalachians. *Dept. Energy*,

- Mines Resource Can., Publ.*, **42**, 71-85.
- COLEMAN, R. G. (1971) : Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1212-1222.
- (1977) : *Ophiolites*. Springer-Verlag, New York, 229p.
- (1981) : Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 2497-2508.
- CONDIE, K. C. (1982) : “*Plate tectonics and crustal evolution*”, second edition, Pergamon Press, 310p.
- DALLMEYER, R. D. and WILLIAMS, H. (1975) : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ release spectra of hornblende from the Bay of Islands metamorphic aureole, western Newfoundland: their bearing on the timing of ophiolite obduction at the Ordovician continental margin of eastern North America. *Can. J. Earth Sci.*, **12**, 1685-1690.
- DANCAN, R. A. and GREEN, D. H. (1987) : The genesis of refractory melts in the formation of oceanic crust. *Contr. Mineral. Petrol.*, **96**, 326-342.
- DAVIES, H. L. (1969) : Peridotite-gabbro-basalt complex in eastern Papua: An overthrust plate of oceanic mantle and crust. Ph. D. thesis, Stanford Univ., Stanford, California, 88p.
- (1971) : Peridotite-gabbro-basalt complex in eastern Papua. *Bur. Miner. Resour. Bull.*, **128**, 48p.
- DE ROEVER, W. P. (1957) : Sind die alpinotypen Peridotitmassen vielleicht tektonisch verfrachtete Bruchstücke der Peridotitschale? *Geol. Rundsch.*, **46**, 137-146.
- DEWEY, J. F. (1975) : Finite plate evolution: Implications for the evolution of transforms, triple junction, and orogenic belts. *Am. J. Sci.*, **275-A**, 260-284.
- (1976) : Ophiolite obduction. *Tectonophysics*, **31**, 93-120.
- (1977) : Suture zone complexities: A review. *Tectonophysics*, **40**, 53-67.
- and BIRD, J. M. (1970) : Mountain belts and the new global tectonics. *J. Geophys. Res.*, **75**, 2625-2627.
- and — (1971) : Origin and emplacement of ophiolite suite: Apalachian ophiolites in Newfoundland. *J. Geophys. Res.*, **76**, 3179-3206.
- DICK, H. J. B., FISHER, R. L. and BRYAN, W. B. (1984) : Mineralogic variability of the uppermost mantle along mid-ocean ridges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 88-106.
- DICKINSON, W. R. (1970) : The new global tectonics. *Geotimes*, **15**, 14-16.
- (1971) : Plate tectonic models of geosynclines. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **10**, 165-174.
- DIETRICH, V. R., EMMERMANN, R., OBERHANSLI, R. and PUCHELT, H. (1978) : Geochemistry of basaltic and gabbroic rocks from the west Mariana basin and the Mariana trench. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **39**, 127-144.
- DIETZ, R. S. (1962) : Ocean-basin evolution by sea-floor spreading. In RUNCORN, S. K. ed. “*Continental drift*”, Academic Press, 289-298.
- (1964) : Alpine serpentinites as oceanic rind fragments. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **74**, 947-952.
- DUNGAN, M. A., RHODES, J. M., LONG, P. E., BLANCHARD, D. P., BRANNON, J. C. and RODGERS, K. V. (1978) : The petrology and geochemistry of basalts from Site 396, Leg 45 and 46 of the Deep Sea Drilling Project. *Init. Rep. D. S. D. P.*, **46**, 89-113.
- East Pacific Rise Study Group (1981) : Crustal processes of the mid-ocean ridge. *Science*, **213**, 31-40.
- ENGEL, A. E. J. and ENGEL, C. G. (1964) : Composition of basalts from the Mid-Atlantic Ridge. *Science*, **144**, 1330-1333.
- and HAVENS, R. G. (1965) : Chemical characteristics of oceanic basalts and upper mantle. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **76**, 719-734.
- EVARTS, R. C. and SCHIFFMANN, P. (1983) : Submarine hydrothermal metamorphism of the Del Puerto Ophiolite, California. *Amer. J. Sci.*, **283**, 289-341.
- FISHER, R. L. and ENGEL, C. G. (1969) : Ultramafic and basaltic rocks dredged from the nearshore flank of the Tonga trench. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **80**, 1373-1378.

- FLOWER, M. F. J. (1980) : Accumulation of calcic plagioclase in oceanic tholeiite and indication of spreading rate? *Nature*, London, **287**, 530-532.
- (1981) : Thermal and kinematic control on ocean-ridge magma fractionation: Contrasts between Atlantic and Pacific spreading axis. *J. geol. Soc. London*, **131**, 695-712.
- FRYER, P., AMBOS, E. L. and HUSSONG, D. M. (1985) : Origin and emplacement of Mariana forearc seamounts. *Geology*, **13**, 774-777.
- , SINTON, J. M. and PHILPOTTS, J. A. (1982) : Basaltic glasses from the Mariana Trough. *Initial Rep. D. S. D. P.*, **60**, 601-609.
- FUJII, T. and BOUGAULT, H. (1983) : Melting relations of a magnesian abyssal Tholeiite and the origin of MORBs. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **62**, 283-295.
- and KUSHIRO, I. (1977) : Density, viscosity and compressibility of basaltic liquid at high pressure. *Annu. Rep. Geophys. Lab. Carnegie Inst.*, **76**, 419-424.
- and SCARFE, C. M. (1985) : Composition of liquids coexisting with spinel lherzolite at 10 Kbar and the genesis of MORBs. *Contr. Mineral. Petrol.*, **90**, 18-28.
- GASS, I. G. (1967) : The ultramafic volcanic assemblage of the Troodos Massif, Cyprus. In WYLLIE, P. J. ed. "*Ultramafic and Related Rocks*", 121-134, John Wiley, New York.
- (1968) : Is the Troodos masif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor? *Nature*, **220**, 39-42.
- , NEARY, C. R., PLANT, J., ROBERTSON, A. H. F., SIMONIAN, K. O., SMEWING, J., SPOONER, E. T. C. and WILSON, R. A. M. (1975) : Comments on "The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc", by A. Miyashiro. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **25**, 236-238.
- GLENNIE, K. W., BOEUF, M. G. A., HUGHES-CLARKE, M. W., MOODY-STUART, M., PILLAR, W. F. H. and REINHARDT, D. M. (1974) : Geology of the Oman Mountains, Part One (Text), Part Two (Tables and Illustrations), Part Three (Enclosures) Kon. Netherlands, *Geol. Mijb. Gen. Ver. Verh.*, **31**, 423p.
- GREEN D. H. and RINGWOOD, A. E. (1967) : The genesis of basaltic magmas. *Contr. Mineral. Petrol.*, **15**, 103-190.
- HAMILTON, W. (1969) : Mesozoic California and the underflow of Pacific mantle. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **80**, 2409-2430.
- HUTCHISON, C. S. (1978) : Ophiolite metamorphism in northern Borneo. *Lithos*, **11**, 195-208.
- HAWKINS, J. W., VOLPE, A. and WRIGHT, E. (1984) : Ophiolite series rocks in the Mariana forearc seamounts. *EOS*, **65**, 1136.
- HESS, H. H. (1939) : Island arcs, gravity anomalies, and serpentinite intrusions, a contribution to the ophiolite problem. Int. Geol. Congr. Moscow 1937, Rep. 17, **2**, 263-283.
- (1960) : Caribbean Research Project: Progress report. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **71**, 235-240.
- (1962) : History of ocean basins. In ENGEL, A. E. J. et al. eds. "*Petrologic studies (Buddinton volume)*", Geol. Soc. Am., 599-620.
- (1964) : The oceanic crust, the upper mantle and the Mayaguez serpentinized peridotite. In BURK, C. A. ed., "*A study of serpentinite*", Publ. Nat. Acad. Sci. Nat. Res. Council., **1188**, 169-175.
- HEY, R. (1977) : A new class of pseudo faults and their bearing on plate tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **37**, 321-325.
- HONEGGER, K., DIETRICH, V., FRANK, W., GANSSE, A., THONI, M. and TROMMSDORFF, V. (1982) : Magmatism and metamorphism in the Ladakh Himalayas (the Indus-Tsangpo suture zone). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **60**, 253-292.
- HOPSON, C. A., MATTINSON, J. M. and PESSANGNO, E. A. Jr. (1981) : Coast range ophiolite, western California. In ERNST, W. G. ed. "*The Geotectonic Development of California*", Rubey vol. I, Prentice-Hall, 418-510.
- HYNES, A. (1975) : Comment on "The Troodos ophiolitic complex was formed in an island

- arc," by A. MIYASHIRO. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **25**, 213-216.
- Initial Report of DSDP, Leg. 60. (1981), U. S. Government Printing Office, Washington.
- Initial Report of DSDP, Leg. 84. (1985), U. S. Government Printing Office, Washington.
- ISHII, T. (1985) : Dredged samples from the Ogasawara fore-arc seamount or "Ogasawara paleoland"—"fore-arc ophiolite". In NASU, N. et al. eds. "*Formation of Active Ocean Margins*", Terra Sci. Pub. Company, 307-342.
- ISHIWATARI, A. (1985a) : Granulite-facies metacumulates of the Yakuno Ophiolite, Japan : Evidence for unusually thick oceanic crust. *J. Petrol.*, **26**, 1-30.
- (1985b) : Igneous petrogenesis of the Yakuno ophiolite (Japan) in the context of the diversity of ophiolites. *Contr. Mineral. Petrol.*, **89**, 155-167.
- ISHIZUKA, H. (1985) : Prograde metamorphism of the Horokanai ophiolite in the Kamuikotan Zone, Hokkaido, Japan. *J. Petrol.*, **26**, 391-417.
- 岩崎正夫 (1973) : 海洋地殻の "化石" —— オフィオライト. "世界の変動帯", 岩波書店, 68-77.
- KARIG, D. E. (1971) : Structural history of the Mariana Island Arc System. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **82**, 323-344.
- (1982) : Initiation of subduction zones: Implications for arc evolution and ophiolite development. In LEGGETT, J. K. ed. "*Trench-Forearc Geology: Sedimentation and Tectonics on Modern and Ancient Active Plate Margins*", Geol. Soc. Spec. Pub., Blackwell, Oxford, 563-576.
- KUSHIRO, I. and TOMPSON, R. N. (1972) : Origin of some abyssal tholeiites from the Mid-Atlantic Ridge. *Carnegie Inst. Washington, Yearb.*, **71**, 403-406.
- LE PICHEON, X., HUCHON, P. and BARRIER, E. (1985) : Pangea, geoid and the evolution of the western margin of the Pacific ocean. In N. NASU et al. eds. "*Formation of Active Ocean Margins*", Terra Sci. Pub., Tokyo, 3-42.
- LEITCH, E. C. (1984) : Island arc elements and arc-related ophiolites. *Tectonophysics*, **106**, 177-203.
- LIU, G., LAN, C. Y., SUPPE, J. and ERNST, W. G. (1977) : The East Taiwan Ophiolite, its occurrence, petrology, metamorphism and tectonic setting. *Min. Res. Ser. Org., Sp. Rep.*, No. 1, Taipei, Taiwan, 212p.
- MACDONALD, K. C. and FOX, P. J. (1983) : Overlapping spreading centers: New accretion geometry on the East Pacific Rise. *Nature*, **302**, 55-58.
- , SEMPERE, J. C. and FOX, P. J. (1986) : Reply: The debate concerning overlapping spreading centers and mid-oceanic ridge processes. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10501-10511.
- MARUYAMA, S. (1988) : Formation and annihilation of back-arc basin, and origin of ophiolite. Abst. In "*Tectonics of Eastern Asia and Western Pacific Continental Margin*", 1988 DELP Tokyo Symposium, 51-52.
- and LIU, J. G. (1988) : Ocean-floor metamorphism at different tectonic settings: A review on the DSDP drilling projects. *EOS*, **69**, p. 1403.
- and TATSUMI, Y. (1988) : Origin and emplacement of ophiolite. Proceedings of "*Ophiolites and the high pressure metamorphism, field meeting of Japan*", Kyoto-Tokushima, p. 22.
- MATTINSON, J. M. (1976) : Ages of zircons from the Bay of Islands ophiolite complex, western Newfoundland. *Geology*, **4**, 393-394.
- MAXWELL, J. C. (1973) : Ophiolites—old oceanic crust or internal diapir? In "*Symp. Ophiolites in the Earth's Crust*", Moscow, Acad. Sci. USSR, 71-73.
- MCCULLOCH, M. T. and CAMERON, W. E. (1983) : Nd-Sr isotopic study of primitive lavas from the Troodos ophiolite, Cyprus: Evidence for a subduction-related setting. *Geology*, **11**, 727-731.
- MCKENZIE, D. P. (1969) : Speculations on the consequences and causes of plate motion. *Geophys. J. R. Astrono. Soc.*, **18**, 1-32.
- MEIJER, A. (1980) : Primitive arc volcanism and a boninite series: Examples from western Pacific island arcs. In HAYES, D. E. ed., "*The Tectonic and Geologic Evolution of*

- Southeast Asian Seas and Islands*”, Geophys. Monogr. 23, Am. Geophys. Union, 269-282.
- MELSON, W. G. and VAN ANDEL, Tj. H. (1966) : Metamorphism in the Mid-Atlantic Ridge, 22° N latitude. *Marine Geol.*, **4**, 165-186.
- , BOWEN, V. T., VAN ANDEL, Tj. H. and SIEVER, R. (1966) : Greenstones from the central valley of the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, London, **209**, 604-605.
- MICHAEL, P. J. and BONATTI, E. (1985) : Peridotite composition from the North Atlantic : regional and tectonic variations and implications for partial melting. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **73**, 91-104.
- MIYASHIRO, A. (1973) : The Troodos complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 218-224.
- 都城秋穂 (1979) : オフィオライト問題。岩波講座地球科学12, 変動する地球Ⅲ, 造山運動, 第3章 4節, 167-178. 岩波書店。
- MIYASHIRO, A. (1986) : Hot region and the origin of marginal basin in the western Pacific. *Tectonophysics*, **122**, 195-216.
- , SHIDO, F. and EWING, M. (1969) : Diversity and origin of abyssal tholeiites from the Mid-Atlantic Ridge near 24° and 30° north latitude. *Contr. Mineral. Petrol.*, **23**, 38-52.
- , — and — (1971) : Metamorphism in the Mid-Atlantic Ridge near 24° N and 30° N. *Phil. Trans. Royal Soc. London, A*, **268**, 589-603.
- MOORES, E. M. (1969) : Petrology and structure of the Vourinos ophiolitic complex, northern Greece. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **118**, 74p.
- (1970) : Ultramafics and orogeny, with models for the U. S. Cordillera and the Tethys. *Nature*, **228**, 837-842.
- (1975) : Discussion of “Origin of Troodos and other ophiolites: A reply to HYNES”, by A. MIYASHIRO. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **25**, 223-226.
- (1982) : Origin and emplacement of ophiolites. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 735-760.
- and VINE, F. J. (1969) : Troodos massif, Cyprus, a deep ocean floor: Preliminary structural and petrologic evidence (abstract). *EOS Trans. AGU*, **50**, p. 333.
- and — (1971) : The Troodos massif, Cyprus, and other ophiolites as oceanic crust: Evaluation and implications. *Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **268**, 443-446.
- 中川光弘, 霜鳥 洋, 吉田武義, (1988) : 東北日本弧, 第四紀玄武岩組成の水平変化。岩鉱, **83**, 9-25.
- OGAWA, Y., FUJIOKA, K., NISHIYAMA, T., UEHARA, S. and NAKAGAWA, M. (1985) : Ophiolitic rocks of the Middle America trench landward slope off Guatemala: Deformational characteristics and tectonic significance. *Intial Rept. D. S. D. P.*, **84**, 791-809.
- O’HARA, M. J. (1968) : The bearing of phase equilibria studies in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth Sci. Rev.*, **4**, 69-133.
- OTOFUJI, Y. and MATSUDA, T. (1984) : Timing of rotational motion of southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **70**, 373-382.
- 小沢一仁 (1985) : 超苦鉄質岩から見た海嶺下の上部マントル。月刊地球, **8**, 476-479.
- PEARCE, J. A. (1975) : Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics*, **25**, 41-67.
- and CANN, J. R. (1971) : Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **12**, 339-349.
- PRESNALL, D. C., DIXON, S. A., DIXON, J. R., O’DONNELL, T. H., BRENNER, N. L., SCHROCK, R. L. and DYCUS, D. W. (1978) : Liquidus phase relations on the join diopside-forsterite-anorthite from 1 atm to 20 kbar: their bearing on the generation and crystallization of basaltic magma. *Contr. Mineral. Petrol.*, **66**, 203-220.
- RAUTENSCHLEIN, M., JENNER, G. A., HERTOGEN, J., HOFMANN, A. W., KERRICH, R.,

- SCHMINCKE, H.-U. and WHITE, W. M. (1985) : Isotopic and trace element composition of volcanic glasses from the Akaki Canyon, Cyprus: Implications for the origin of the Troodos ophiolite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 369-383.
- REINHARDT, B. M. (1969) : On the genesis and emplacement of ophiolites in the Oman Mountains geosyncline. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **49**, 1-30.
- RIDLEY, W. I., RHODES, J. M., REID, A. M., JAKES, P., SHIN, C. and BASS, M. N. (1974) : Basalts from Leg 6 of the Deep-Sea Drilling Project. *J. Petrol.*, **15**, 140-159.
- ROBERTSON, A. H. F. and WOODCOCK, N. H. (1979) : Tectonic setting of the Troodos massif in the east Mediterranean. In PANAYIOTOU A. ed. "Ophiolites", Proc. Int. Ophiolite Symp., Cyprus, 1979, Cyprus Geol. Surv. Dept., 36-49.
- ROBINSON, P. T., MELSON, W. G., O'HEARN, T. and SCHMINCKE, H.-U. (1983) : Volcanic glass compositions of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geology*, **11**, 400-404.
- 佐藤博明 (1986) : 海洋地域の火山及び火山岩. 火山第2集, **30**, 特別号, S170-S188.
- SATO, H. and TOHARA, T. (1985) : Geochemical characteristics of back-arc basin basalt. In NASU, N. et al. eds. "Formation of Active Ocean Margin" Terra Sci. Pub., Tokyo, 399-410.
- SCHILLING, J.-G., ZAJAC, M., EVANS, R., JOHNSTON, T., WHITE, W., DEVINE, J. D. and KINGSLEY, R. (1983) : Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic ridge from 29° N to 73° N. *Am. J. Sci.*, **283**, 510-586.
- SEARLE, M. P., WINDLEY, B. F., COWARD, M. P., COOPER, D. J. W., REX, D., TINHDONG, L., XIAO, XUCHANG, JA, M. Q., THAKUR, V. C. and KUMAR, S. (1987) : The closing Tethys and the tectonics of the Himalaya. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **98**, 678-701.
- 瀬野徹三 (1986) : 日本列島の中期更新世 —50万年前に何が起ったか?—. 月刊地球, **8**, 708-715.
- SHIDO, F. and MIYASHIRO, A. (1973) : Compositional difference between abyssal tholeiites from north and south of the Azores on the mid-Atlantic Ridge. *Nature, Phys. Sci.*, **245**, 59-60.
- STEINMANN, G. (1927) : Die ophiolitischen Zonen in der mediterranen Kettingebirgen. *Int. Geol. Congr.* 14th, **2**, 638-667.
- STEVENS, R. K. (1970) : Cambro-Ordovician flysch sedimentation and tectonics in west Newfoundland and their possible bearing on a proto-Atlantic ocean. *Geol. Assoc. Can. Spec. Paper*, **7**, 165-177.
- STILLE, H. (1924) : "Grundfragen der ver gleichenden Tektonik", Borntraeger, Stuttgart, 443p.
- STOLPER, E. (1980) : A phase diagram for mid-ocean ridge basalts: preliminary results and implications for petrologists. *Contr. Mineral. Petrol.*, **74**, 13-27.
- SUESS, E. (1909) : Das Antlitz der Erde. Freytag, Leipzig, **3**, 789p.
- 高橋栄一 (1986) : 玄武岩マグマの起源. 火山第2集, **30**, 特別号, 17-40.
- TAKAHASHI, E. and KUSHIRO, I. (1983) : Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magma genesis. *Am. Mineralogist*, **68**, 859-879.
- and UTO, K. (in preparation) : Primary basalt magma compositions and Mg/Fe ratio of their mantle sources.
- 玉木賢策 (1987) : 海底拡大のテクトニクス. 科学, **57**, 276-286.
- TAMAKI, K. and HONZA, E. (1985) : Incipient subduction and obduction along the eastern margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, **119**, 381-406.
- TATSUMI, Y. and MARUYAMA, S. (in press) : Boninites and high-magnesian andesites: Tectonics and petrogenesis. In Crawford, A. L. ed. "Boninite".
- TEMPLE, P. G. and ZIMMERMAN, J. (1969) : Tectonic significance of Alpine ophiolites in Greece and Turkey. *Geol. Soc. Am. Abst.*, 221-222.
- THAYER, T. P. (1967) : Chemical and structural relations of ultramafic and feldspathic rocks in Alpine intrusive complexes. In WYLLIE, P. J. ed. "Ultramafic and Related Rocks",

- New York, Wiley, 222-238.
- TSUCHIDA, M. (1987) : Origin of back-arc basin basalt. Graduation thesis, Fac. Education, Toyama University, 60p.
- UYEDA, S. and MIYASHIRO, A. (1974) : Plate tectonics and the Japanese islands. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **85**, 1159-1170.
- WALKER, D., SHIBATA, T. and DELONG, S. E. (1979) : Abyssal tholeiites from the Oceanographer fracture zone. II, Phase equilibria and mixing. *Contr. Mineral. Petrol.*, **70**, 111-125.
- WYLLIE, P. J. ed. (1967) : *Ultramafic and Related Rocks*. New York, Wiley, 464p.
- (1989年1月20日受付, 1989年4月12日受理)