海底拡大研究の現状

玉 木 賢 策*

Progress of the Study of the Sea-Floor Spreading

Kensaku TAMAKI

Abstract

The progress of the study of the sea-floor spreading has mutual relationship with that of the ophiolite. The scientists to study ophiolites should fully understand the present progress of the study of the sea-floor spreading, and vice versa. We obtained the concept of the sea-floor spreading in 1960's in terms of diverging plate boundaries and started to observe geological process at the spreading axis in 1970's. Swath mapping of topography by multi narrow beam sonar and long range sidescan sonar, manned submersible observation, multi-channel seismic reflection survey of the spreading axis, and detailed geochemical study of sampled rocks dramatically improved our understanding of the geological process along the spreading axis in early 1980's. The trend of the study of the sea-floor spreading is shifting toward the global understanding of its dynamic process in late 1980's.

I. はじめに

オフィオライトが海洋性地殻の断片であるならば、海洋性地殻の生成の現場である海底拡大の地球科学はオフィオライト研究と極めて密接な関係を持つことになる。オフィオライト研究者にとって海底拡大の地学的研究のアップデートされた成果は常に把握しておかなくてはならないであろうし、逆に、海底拡大の地学的研究を行っている研究者にとって海洋性地殻を目の当たりにすることができるオフィオライトは常に強い関心をひかれる対象である。たとえオフィオライトが海洋性地殻の断片ではないとしても、それを立証するためには海洋性地殻とそれを生み出すプロセスである海底拡大を十分に理解することは当然必要となる。本小論ではオフィオライト研究者の参考になることを考慮しながら、海底拡大研究の歴史を概観し、現在の研究の到達点と、今後の方向性を簡単に紹介する。

II. 海底拡大研究史概観

1960年代初頭に提唱され、そして実証された海底拡大は、プレートテクトニクスが出現した1960年代後期にはまだ単なる拡散型プレート境界という現象としてのみ捉えられていたにすぎなかった。海底拡大の地学的実態が明らかになるのは、1971年から1974年にかけて実施された米仏共同による大西洋中央海嶺における FAMOUS 計画 (French American Mid-Ocean Undersea Study) (HEIRTZLER and VAN ANDEL 1977) 以降のことである。中央海嶺への地学的関心は当初、中軸谷を有し海嶺地形の顕著な大西洋中央海嶺に向けられ、FAMOUS 計画も大西洋中央海嶺で実施されている。しかし、1970年代末に潜水艇観測により東太平洋においてブラックスモーカーつまり熱水噴出が発見されて以来 (FRANCHETEAU

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

第1図 東太平洋の伝播性拡大と重複拡大軸 (MACDONALD et al. 1986)
 Fig. 1 Rift propagation and overlapping spreading centers (MACDONALD et al. 1986)

et al. 1979, CORLISS et al. 1979), 1980年代には、東太平洋、すなわち、東太平洋海膨、ガラパゴス海嶺、ファンデフカ海嶺が地学的関心をひきつけ研究の進展をになってきた。これは、太平洋の海嶺が大西洋中央海嶺よりも拡大速度が速いため、様々な地学現象が顕著に表れることに起因している。中軸マグマ溜まりの存在等はその顕著な例である。中軸マグマ溜まりは東太平洋海膨で反射法地震波探査で容易に観測されるのにたいし、大西洋中央海嶺では全く観測されていない。大西洋中央海嶺の片側拡大速度が1～2 cmであるのにたいし、東太平洋の各海嶺は4～8 cmに及んでおり、両者の間には大きな相違がある。このため、1980年代前半には多くの新観測技術が東太平洋の海嶺に投入され中央海嶺研究の上で大きな貢献がなされた。その実際についてはⅢ章、Ⅳ章で紹介する。このような東太平洋海膨を中心とした中央海嶺の諸プロセスの詳細な解明は1980年代後半に入って概ね一段落ついたように思われる。その後の研究の方向はⅤ章で紹介するように地球深部構造に起因すると考えられる中央海嶺のグローバルな多様性に焦点があてられている。

III. 海底拡大のテクトニクス

プレートテクトニクス出現の当初に、海嶺とトランスフォーム断層から構成されるプレート境界として単純にイメージされていた海底拡大のテクトニクスは、1970年代後半から1980年代前半にかけて、海底拡大テクトニクスの重要な要素である伝播性拡大と重複拡大軸という現象が新たに発見されたことにより、いよいよその実際のプロセスに光があてられることになる(玉木 1987)(第1図)。伝播性拡大は、地磁気全磁力異常の精査により(HEY 1987)、重複拡大軸は Seabeam による海底地形の精密マッピングにより(MACDONALD and FOX 1983)発見されたものである。伝播性拡大、重複拡大軸ともに海底拡大の火成活動と密接な関係を有している。

伝播性拡大は二つのわずかに方向の異なる拡大軸の一方が伸張していてもう一方の拡大軸がその長さを減じていく現象である(第2図)。伸張する拡大軸を伝播性拡大軸(propagating rift)、長さを減じていく拡大軸を退行性拡大軸(dying rift)と呼ぶ。伝播性拡大によってトランスフォーム断層からは第2図にみられるように拡大軸に斜交した疑似断層(pseudofault)、せん断変形帯(shear zone)が発生する。通常、伝播性拡大軸と退行性拡大軸は異なる方向性を有する。伝播性拡大が生じると、伝播性拡大軸の持つ方向が退行性拡大軸にたいして優勢になっていき最終的に拡大軸は伝播性拡大軸の方向にそろい、拡大軸は方向を変えることになる。伝播性拡大は拡大軸がその方向・配列を変える時に発生する現象といえることができる。

拡大軸がその方向を変えるのは、拡大軸の両側のプレート間の相対運動が変化した場合である。プレート間の相対運動の変化に対応して、拡大軸は新しい配列をとる必要性にせまられるのである。その好例がファンデフカ海嶺の伝播性拡大である(WILSON *et al.* 1984)。このような場合の伝播性拡大は受動的に生じるものと考えられるが、これに対してガラパゴス海嶺における例は、プレート間の相対運動の変化よりもむしろホットスポットに関連した能動的ものと考えられる。第3図にみられるようにガラパゴス海嶺ではガラパゴスホットスポットからそれぞれ西と東に遠ざかるように伝播性拡大が起こっている。ここでは火山岩分析値と伝播性海嶺の間に第3図にみられるような極めて顕著な相関がみられる。このような相関はオフィオライトを研究するうえで考慮しておく必要があろう。

重複拡大軸は、第4図にみられるように拡大軸が二重に存在する現象である。通常、重複している二つの拡大軸間の距離は1~15kmであり、拡大軸の重複部分の距離は3~35kmである。プレートを剛体と仮定するプレートテクトニクスでは、二つのプレートの間の拡大軸は一本であると考えられていたので、重複拡大軸の発見(MACDONALD and FOX 1983)は海洋底研究者には大きな驚きであった。これを機に、

第2図 ガラパゴス海嶺西経95°30'付近の伝播性拡大軸の模式図(CHRISTIE and SINTON 1981)

アミ部分は正帯磁部、白ヌキ部分は逆帯磁部の磁気縞模様を表す。この図では、伝播先端部(Propagating tip: PR Tip)が左方へ伝播していく。PseudofaultとFailed Riftの間がせん断帯(Shear Zone)。

Fig. 2 Typical pattern of rift propagation at 95°30' of the Galapagos Ridge (CHRISTIE and SINTON 1981)

第3図 伝播性拡大軸にそった火山岩分析値の変化 (DHRISTIE and SINTON 1981)

上図はガラパゴス海嶺の伝播性拡大軸の分布を示す。丸印はサンプリング地点。下図は FeO^*/MgO 分析値の経度に対する変化をしめす。V印は伝播性拡大の位置とその方向。 FeO^*/MgO の値が伝播性拡大と顕著な対応を示している。斜線部は伝播性拡大軸によって生成された地殻を示す。

Fig. 3 Geochemical variation of volcanic rocks along propagating rift (CHRISTIE and SINTON 1981)

中央海嶺の微細構造の研究が急速に進展することになる。次章で紹介するように重複海嶺は中軸マグマ溜まりの活動と密接な関係を持っており、その発見の海底拡大プロセス研究に果たした役割は大きい。

IV. 中軸マグマ溜まりと海洋性地殻

反射法地震波探査によって中央海嶺の拡大軸にそって最初に中軸マグマ溜まり (axial magma chamber) が発見されたものやはり東太平洋海膨においてであった (HERRON *et al.* 1978)。その後、極めて明瞭な中軸マグマ溜まりがラウ海盆の拡大軸で発見された (第5図) (MORTON and SLEEP 1985)。これらの成果をうけて DETRICK *et al.* (1987) は東太平洋海膨 $9^{\circ}\text{N} \sim 13^{\circ}\text{N}$ において計画的な反射法地震波探査を行った。この計画ではとくに Seabeam のデータにしたがって厳密に拡大軸直上の断面をとるよう

第4図 東太平洋海膨にみられる重複拡大軸 (MACDONALD and FOX 1983)

太線は拡大軸。海底地形コンターは Seabeam によって得られたもの。

Fig. 4 Overlapping spreading center on the East Pacific Rise (MACDONALD and FOX 1983)

に測線がはられた。その結果、中軸マグマ溜まりの幅は約3～4km、海底下の深度は1～2kmであることが明らかになった。拡大軸に直交する断面では中軸マグマ溜まりの上面は平坦になっており、モホ面からの反射は拡大軸部直下の幅1～2km範囲では観察できない。中軸マグマ溜まりは断面でみるとキノコに似た形で貫入しているものと推定されている(第6図)。

DETRICK *et al.* (1987) による拡大軸にそった測線では、中軸マグマ溜まりは数10kmの距離にわたって観測されるが、重複拡大軸の部分では観察されていない。また、拡大軸にそった地形断面も重複拡大軸と密接な相関を示すことが Seabeam による精密地形測量で明らかにされている (MACDONALD and SEMPERE 1984)。重複拡大軸の部分では水深は相対的に深くなり、重複拡大軸と重複拡大軸の間の中央部あたりで最も浅くなる(第7図)。これは、重複拡大軸が拡大軸のセグメントとセグメントの間の境界に相当しているということを示している。反射法地震波探査による中軸マグマ溜まりの観測結果から、連続

第5図 反射法地震波探査によって捉えられた中軸マグマチャンバー (矢印A)
(MORTON and SLEEP 1985)

ラウ海盆内の拡大軸におけるもの。縦軸は秒による往復走時表示。

Fig. 5 Axial magma chamber detected by multi channel seismic reflection profiling in the Lau Basin (MORTON and SLEEP 1985)

第6図 海洋性地殻の生成と中軸マグマ溜まり (DETRICK *et al.* 1987)
拡大軸に直交する断面の模式図。

Fig. 6 Generation of the oceanic crust and axial magma chamber (DETRICK *et al.* 1987)

したマグマ溜まりの一つ一つがこの拡大軸の一つ一つのセグメントに対応していると考えられている。

現在のところ一般に、アセノスフェアから上昇してくるダイアピアの一つのユニットがこのような重複拡大軸と重複拡大軸の間の拡大軸の一つのセグメントに対応しているのではないかと考えられている。第7図に示した拡大軸にそった火山岩分析値の系統的な変化もこのような考えと整合性があるものと解釈できる。このような拡大軸の水深と、岩石分析値の間の秩序だった相関は KLEIN and LANGMUIR (1987) によってさらに系統化されて明らかにされている。

中軸マグマ溜まりはまた海洋性地殻の生成プロセスを考える上でも極めて重要である。第6図は現在一般に考えられている中軸マグマ溜まりと海洋性地殻の関係を図示したものである。マグマ溜まりの上面が、旧来から屈折波地震波探査で観測されている海洋性地殻第二層と第三層の境界に、マグマ溜まりの下面がモホ面に対比されている。マグマ溜まり本体は、海底拡大にともなって拡大

軸から離れていくにつれて固結し第三層を形成する。第二層の中下部は、vent が固結して形成された複合侵入岩体からなり、第二層の上部は枕状溶岩層からなる。このようなシナリオは反射法地震波探査による中軸マグマ溜まりを直接観測できるようになっていよいよ確からしいものになり、さらに地震学的モ

水面と岩石学的モホ面の相違に関する議論等、より詳細な議論に発展している(荒井 1988)。

重複拡大軸の発見と、中軸マグマ溜まりの観測は拡大軸のセグメント化を明らかにしたが、このようなセグメント化は海洋性地殻が従来考えられていたように一様ではないことを示唆している。まだ正確な観測データは提出されていないが、一つのセグメントの中央部で地殻が厚く、端部で薄いことは十分に予想される。一つのセグメントのオーダーは数10kmであるが、これにトランスフォーム断層とトランスフォーム断層の間のさらに大きな数100 km オーダーの変化も加わってきて海洋性地殻の地域的な非一様性はさらに大きくなる。しかし、このような非一様性は海底拡大のプロセスに密接に関連した系統的なものであることが予想される(KLEIN and LANGMUIR 1987)。オフィオライトのデータから地殻の厚さを議論する場合には常に留意しておくべき問題であろう。

V. 背弧海盆の海底拡大

背弧海盆における海底拡大のテクトニクスも基本的には、中央海嶺における拡大テクトニクスと同様である。背弧海盆においても、マリアナトラフ、日本海、ラウ海盆、ビスマルク海において、伝播性拡大、重複拡大軸が観測されている(玉木・小林 1988)。第6図に示したように極めて顕著な中軸マグマ溜まりも、ラウ海盆において観測されている(MORTON and SLEEP 1985)。中央海嶺における海底拡大と比較して、背弧海盆の海底拡大の大きな特徴は拡大軸の配

列が不安定であるということである。背弧海盆の拡大軸が不安定である原因としては次の二つを挙げることができる。一つは、背弧海盆拡大の際、島弧側のプレートが非剛体的に変形する場合がしばしばあることによる。海底拡大の際、片側のプレートが非剛体的にふるまうと、拡大軸近辺の応力場が変化することになり、拡大軸は頻繁な伝播性拡大をひきおこしながら配列を常時変化させていくことになる。日本列島が折れ曲がるという変形を起こしながら行われた日本海の拡大は、このような頻繁な伝播性拡大をともなっていたと推定されている(玉木・小林 1988)。また、四国海盆や南シナ海海盆のように比較的安定した拡大を行っていた背弧海盆でも、拡大の後期になって突然拡大方向を大きく変更している(CHAMOT-ROOKE *et al.* 1987, PAUTOT *et al.* 1986)。これらの場合も伝播性拡大をともなったものと推定される。

もう一つの原因は、拡大軸のジャンプが比較的頻繁に起こる可能性があることである。これは、背弧海盆の拡大の際に生じる島弧のドリフトにともない、拡大軸自身もドリフトしアセノスフェアダイアピアの

第7図 東太平洋海膨拡大軸にそった火山岩分析値の変化(THOMPSON *et al.* 1985) 点線、破線は拡大軸にそった海底地形のプロファイルを示す。Sr含有比と重複拡大軸(OSC)との相関が顕著である。

Fig. 7 Geochemical variation of volcanic rocks along the East Pacific Rise (THOMPSON *et al.* 1988)

第 8 図 オーストラリアー南極海嶺にそった火山岩分析値の変化 (KLEIN *et al.* 1988)

図 a は拡大軸の配置とサンプリング地点を示す。図 d, e, f にみられる分析値のギャップはインド洋 (図左側) と太平洋 (図右側) の深海性玄武岩岩石区の相違を表す。

Fig. 8 Geochemical variation of volcanic rocks along the Australia-Antarctica ridge (KLEIN *et al.* 1988)

されている (小沢一仁 1986, Leg 109 Shipboard Scientific Party 1986)。深海掘削計画第 109 次航海では大西洋中央海嶺 23°N 近くで中軸谷内を 100m 掘削しているが、すべて蛇紋岩化した超塩基性岩であった。掘削地点は最も近いトランスフォーム断層からも 30km も離れた拡大軸の直上であった。大西洋ではトランスフォーム断層からはしばしば超塩基性岩が採取されているが、トランスフォーム断層と無関係に拡大軸そのものから超塩基性岩が採取されたのは興味あることである。この地点では潜水艇でも蛇紋岩

中心から離れてしまい、拡大軸が死滅し、新たにダイアピア直上に拡大軸が生じることによるものである。こうした拡大軸のジャンプはラウ海盆において実際に観測されており、日本海など多くの背弧海盆でも起こったのではないかと考えられる (玉木・小林 1988)。

背弧海盆の場合、拡大テクトニクスの複雑さの他に、地殻構造が一般大洋とは異なってくる可能性があることにも注意が必要である。日本海の大和海盆の場合、速度構造は通常の海洋性地殻とほぼ同じであるが、厚さが通常の海洋性地殻の 5 km と比較して 15~17km と異常に厚い特異な地殻構造が観測されている (HIRATA *et al.* 1987, KATAO 1988)。背弧海盆におけるこのような異常な地殻の形成機構はまだ不明であるが、オフィオライトの層序を背弧海盆の地殻構造と比較する場合には、このような異常な地殻が背弧海盆に存在することもあることに留意しておく必要があろう。また、オフィオライト形成に関する議論の際にしばしば背弧海盆の地殻の島弧へのオブダクションの可能性が指摘されるが、TAMAKI and HONZA (1985) は日本海東縁において実際に日本海盆の地殻がオブダクションを開始していることを指摘している。背弧海盆の地殻の島弧へのオブダクションは十分起こりえることと考えてよいであろう。

VI. 海底拡大のグローバルな多様性

以上、海底拡大テクトニクス、火成活動の拡大軸における実際を紹介してきたが、最後にふれておかななくてはならないのは、全地球的規模での海底拡大プロセスの多様性である。

海底拡大をグローバルにみた場合、最も際立っているのは大西洋中央海嶺と東太平洋海膨の拡大様式の相違である。Ⅲ章で述べたように拡大速度の速い東太平洋海膨では、中軸マグマ溜まりと重複拡大軸をともなう拡大軸のセグメント化が顕著であるが、拡大速度の遅い大西洋中央海嶺の拡大軸ではマグマ溜まりは観測されていない。

大西洋中央海嶺の拡大軸では、しばしば超塩基性岩が、ドレッジ、深海掘削、潜水艇によって海底から採取

の露頭が確認されている (Leg 109 Shipboard Scientific Party 1986)。掘削点付近では新しい火山も確認されており、このことはこの付近では拡大軸が火山活動を十分ともなわずに拡大していることを示している。超塩基性岩が海底まで露出しているのは、火山活動が不活発であるのに、海底拡大活動が行われ、マントル物質が海底に顔を出したものと考えられている。現在のところ、拡大軸部に超塩基性岩が露出している現象は東太平洋では確認されていない。

このような大西洋、太平洋の海底拡大プロセスの相違は、インド洋も含めて各大洋固有の岩石区の議論に発展してきている (KLEIN *et al.* 1988)。最近オーストラリア大陸と南極大陸の間のオーストラリアー南極海嶺の拡大軸部で系統的に採取された玄武岩岩石サンプル分析結果に基づいて、太平洋岩石区とインド洋岩石区の極めて顕著な境界が発見されている (第8図)。このような各大洋固有の岩石区が存在は、各大洋下のアセノスフェアの組成の相違を反映したものと考えられており、地球深部構造の進化に関連した問題につながる重要なものである。オフィオライトが過去の海洋性地殻の組成に関する情報を持っているとすれば、オフィオライトの研究が地球深部構造の進化に大きな貢献をなすことも期待される。現在行われている地球深部構造の議論は、地震波により得られたデータに基づいたもので、現在の構造に関する情報しか提供することができない。オフィオライトが過去の海洋性地殻に関する正確な情報を提供できるとすれば、それは極めて貴重なものになるはずである。今後の進展が期待される。

文 献

- 荒井章司 (1988) : 地表にのしあげたマントル—地殻スライス. 科学, **58**, p. 685-695.
- CHAMOT-ROOKE, N., RENARD, V. and LEPICHON, X. (1987) : Magnetic anomalies in the Shikoku basin: a new interpretation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **83**, 214-228.
- CHRISTIE, D. M. and SINTON, J. M. (1981) : Evolution of abyssal lavas along propagating segments of the Galapagos spreading center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **56**, 321-335.
- CORLISS, J. B. *et al* (1979) : Submarine thermal springs on the Galapagos rift. *Science*, **203**, 1073-1083.
- DETRICK, R. S., BUHL, P., VELA, E., MUTTER, J., ORCUTT, J., MADSEN, J. and BROCHER, T. (1987) : Multi-channel seismic imaging of a crustal magma chamber along the East Pacific Rise. *Nature*, **326**, 35-41.
- FRANCHETAU, J. *et al.* (1979) : Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, **277**, 523-528.
- HEIRTZLER, J. R. and VAN ANDEL, T. H. (1977) : Project FAMOUS: Its origin, programs and setting. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **88**, 481-487.
- HERRON, T. J., LUDWIG, W. J., STOFFA, P. L., KAN, T. K. and BUHL, P. (1978) : Structure of the East Pacific Rise crest from multichannel seismic data. *J. Geophys. Res.*, **83**, 798-804.
- HEY, R. (1977) : A new class of pseudofaults and their bearing on plate tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **37**, 321-325.
- , DUENNEBIER, F. K. and MORGAN, W. J. (1980) : Propagating rifts on midocean ridges. *J. Geophys. Res.*, **85**, 3647-3658.
- HIRATA, N., KINOSHITA, H., SUYEHIRO, K., SUYEMASU, M., MATSUDA, N., OUCHI, T., KATAO, H., KORESAWA, S. and NAGUMO, S. (1987) : Report on DELP 1985 Cruises in the Japan Sea Part II : seismic refraction experiment conducted in the Yamato Basin, Southeast Japan Sea. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **62**, 347-365.
- KATAO, H. (1988) : Seismic structure and formation of the Yamato Basin. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **63**, 51-86.
- KLEIN, E. M., LANGMUIR, C. H., ZINDLER, A., STAUDIGEL, H. and HAMELIN, B. (1988) : Isotope evidence of a mantle convection boundary at the Australian-Antarctic discordance. *Nature*, **333**, 623-629.
- LANGMUIR, C. H., BENDER, J. F. and BATIZA, R. (1986) : Petrological and tectonic segmen-

- tation of the East Pacific Rise, $5^{\circ}30'-14^{\circ}30'N$. *Nature*, **322**, 422-429.
- Leg 109 Shipboard Scientific Party (1986): Coring the crust and the mantle. *Nature*, **323**, 492-493.
- MACDONALD, K. and FOX, P. J. (1983): Overlapping spreading centers: new accretion geometry on the East Pacific Rise. *Nature*, **302**, 55-58.
- and SEMPERE, J. C. (1984): East Pacific Rise from Siqueiros to Orozco Fracture Zones: along-strike continuity of axial neovolcanic zone and structure and evolution of overlapping spreading centers. *J. Geophys. Res.*, **89**, 6049-6069.
- , — and FOX, P. J. (1986): Reply: The debate concerning overlapping spreading centers and mid-oceanic ridge processes. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10501-10511.
- MCCARTHY, J., MUTTER, J. C., MORTON, J. L., SLEEP, N. H. and THOMPSON, G. A. (1988): Relic magma chamber structures preserved within the Mesozoic north Atlantic crust? *Geol. Soc. Am. Bull.*, **100**, 1423-1436.
- 小沢一仁 (1986): 超苦鉄質岩から見た海嶺下の上部マントル. 月刊地球, **86**, 476-479.
- PAUTOT, G., RANGIN, C., BRIAIS, A., TAPPONNIER, P., BEUZART, P., LERICOLAIS, G., MATHIEU, X., WU, J., HAN, S., LI, H., LU, Y. and ZHAO, J. (1986): Spreading direction in the central South China Sea. *Nature*, **321**, 150-154.
- 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.
- 玉木賢策, 小林和男 (1988): 地磁気異常からみた日本海. 海洋科学, **20**, 705-710.
- THOMPSON, G., BRYAN, B., BALLARD, R., HAMURO, K. and MELSON, W. G. (1985): Axial processes along a segment of the East Pacific Rise, 10° - $12^{\circ}N$. *Nature*, **318**, 1-5.
- WILSON, D. S., HEY, R. N. and NISHIMURA, C. (1984): Propagation as a mechanism of reorientation of the Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, **89**, 9251-9225.
- (1989年1月20日受付, 1989年4月12日受理)