

総 説

浅海域と湖沼域の活断層調査 —これまでの研究と今後の課題—

荒井晃作*

Kohsaku ARAI (2000) Analyses of active faults in shallow marine and lake areas -case studies and arguments about what to do-. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (2/3), p. 49-58, 5 figs.

Abstract: Studies of active faults are reviewed regarding the geological setting of shallow marine and lake environments in which they occur. In order to be able to reveal each event on the faults, surveys with a time resolution at least one 100 years and a vertical resolution in the order of several tens of cm are required. High resolution seismic survey that uses several kHz sound source is useful for studies of active faults.

Sedimentation rate and grain size of sediments have a strong bearing on studies of active faults. If the sedimentation rate is higher than the slip rate of an active fault, the datum plane of each event was formed within the sediment and they can provide a record of each activity. Finer grained sediments are advantages on for seismic survey and for sampling of sediments by coring. This implies that closed environments, such as bay and lake areas, are the best suited geological settings for analyses of active faults. On the other hand, open marine environments, such as shelf and shelf edge, that are characterized by coarse grain sediments and slow sedimentation, are less well suited and should be further studied in detail by new techniques.

要 旨

陸棚や内湾などの浅い海域における活断層調査の現状と課題を今までの研究をレビューし、地質条件の違いの観点からまとめた。断層の活動履歴を明らかにするには、少なくとも100年程度の時間分解能と、数十 cm の変位量を読み取れる垂直分解能の調査が必要である。音波探査は断層およびその周辺の地層の形態を明らかにするために有効な手段であり、数 kHz の音源を用いて調査を行えば、数十 cm の垂直分解能が得られる。

堆積速度と堆積物の粒度は、活断層調査において非常に重要である。堆積速度が大きい海域では、分解能が高くなるだけでなく、その速度が断層の変位速度を上回れば、基準面が形成される。その年代を得ることによって、イベントの時期が求められる。堆積物の粒度は音波探査のプロファイルに影響を与え、泥質な海域の方が地層の形態や変形が観察しやすい。同時に、基準面の年代を得るためのコア試料の採取も泥質な海域の方が容易である。このような観点から考えると、閉鎖的な内湾や湖沼環境が調査に適しており、大陸棚のような海域での調査が今後の課題である。

1. はじめに

陸上の活断層調査としては、近年、多くの地域でトレンチ掘削が行われ、断層の活動履歴を明らかにすることによって、将来の大地震の発生する危険性が全国的に検討されている。都市部に近い海域や湖沼の活断層も、陸域の活断層と同様に大きな被害をもたらす可能性があり、その活動履歴を把握することが重要である。海底や湖底に潜在する活断層調査の分布を知る手段としては反射法音波探査（本稿では以降、音波探査とする）が有効であるが、活動履歴を調査することは容易ではない。

堆積場である海域においては、陸上に比べると浸食の影響が小さく、地層や断層が保存されやすいと考えられる。1980年代後半に別府湾において、音波探査調査によって明瞭な活断層のイメージが得られ、活断層を挟む2地点で採取したコア試料を対比することによって、断層の活動間隔や活動履歴を求めることに成功した（島崎ほか、1986）。その後、内湾や湖を中心に同様な手法で調査された例がいくつかある。しかしながら、上記のような手法を用いても、必ずしも活断層の活動履歴を解明できない。

本稿においては、陸棚や湾などの浅い海域における活

*海洋地質部 (Marine Geology Department, GSJ)

Keywords: active fault, shallow marine, bay, lake, seismic survey

断層調査の現状を、地質条件の違いから整理し、海域活断層調査の問題点と今後の方針について検討する。

2. 音波探査の原理と活断層調査における制約

2.1 反射面の地質学的意味

音波探査は海域や湖沼域で活断層調査の分布を知る手段として極めて有効である。これはエアガンなどの人工音源から音波を発振し、海底および海底下からの反射波を、ストリーマーケーブルなどの受波部で受信する方法で、連続的な地質断面データを取得できる。

人工音源から発振された音波は海底面下に達し、音響インピーダンス（弾性波速度と密度の積）の異なる層の境界面で一部が反射する。この反射面は、物性の境界面を示すが、多くの石油探鉱で得られた音波探査データと掘削試料の年代の解析によって、同時面を示すことが知られている (Mitchum *et al.*, 1977など)。また、高分解能音波探査プロファイルでは、テフラ層が一連の反射面として認められる (岡村ほか1992bなど)。つまり、音波探査プロファイルに認められるそれぞれの反射面が、一連の地層に相当すると考えて良く、反射面が切られていれば断層と認定できる。

2.2 音源によるプロファイルの分解能の制約

人工音源は各種の装置が開発されており、各々異なった周波数帯域とエネルギーを持っている。水中を伝わる音波速度は約1500m/sであるので、音源の周波数帯域によって、プロファイルの垂直分解能が変わる。一般的な海底地質構造調査で用いられるエアガンは、高エネルギーの音源で、圧縮空気を放出することによって5-300 Hz (東海沖活断層研究会, 1999) の音波パルスを発振することができる。ただし、ガン容量によって周波数に差はある。例えば、50Hzの音波の水中での1波長は30mになる。エアガンを音源とするプロファイルの一般的な垂直解像度は数十mであり、それより細かい構造は観察できない。高電圧水中放電によって発振するスパークは、100Hz-3kHz (東海沖活断層研究会, 1999) の音源でエアガンよりエネルギーが低い。500Hzの音源の1波長は3mであることから、スパークを使用すれば、垂直分解能を数m程度にあげることができる。磁歪式の音源を用いるユニブームやソノプローブ、サブボトムプロファイラーは、数100Hz-10kHz以上の高い周波数帯域を用いるため、解像度がさらに向上する。5kHzの音源であれば、1波長は0.3mとなり、垂直解像度が数十cm単位の調査が可能になる。しかし、音源のエネルギーは低い。

例えば、岡村ほか (1992b) の別府湾の調査で用いられた磁歪式のソノプローブは4-8kHzの音源で、垂直方向の解像度は10-20cmであり、最大の透過深度は50mとさ

れている。このように、高い周波数の音源を用いれば、観察解像度が向上し、詳細な構造を見ることができる。一般に活断層の1回のイベントの変位量が数m以下であることから、音波探査プロファイルで1回のイベントを識別するためには、数十cmの分解能が必要である。しかしながら、高い周波数の音波は水中および堆積物中でエネルギーの減衰が大きく、浅海域の海底下でも数十m程度しかイメージできないという欠点がある。エアガンなどの低い周波数の音源を用いれば、海底下の透過深度は大きく、深部の地層まで観察できるものの、十分な分解能は得られない。

2.3 地形・地質構造による制約

音波探査では、地形や地層の傾斜によっても活断層の変位量を求めるのが難しいことがある。水深の浅い海域では多重反射が重なり、海底面下の地質構造が見えにくい。多重反射は水深の2倍の深さに重なるため、水深数十mの海域では、海底下数十mまでの地層の観察には支障がない。しかし、水深数mの海域では、海底下数mの層準に多重反射が重なり、地質構造を十分に検討できない。音波探査の作業そのものも困難なこともあって、10m以浅の海域はデータの空白域になる。多重反射の除去には、マルチチャンネルの音波探査が必要である。

逆に水深の深い海域では、急峻な起伏の地形があると、山頂や斜め下方の谷底から反射した音波も真下から反射したとしてプロファイルを作成するため、双曲線状の反射が重なり、実際の断面とは異なった形態に見える。これは、特に大水深になると顕著になり、実際の構造に戻すためにマイグレーション処理が必要になる。本稿で議論する浅海域においては、あまり問題にはならない。

3. 地質条件と活断層調査の制約

3.1 地質条件

以上述べてきたように、音波探査には原理的な制約が数多くある。さらに、地質条件によって、音波探査プロファイルでの活断層の見え方に大きな違いが生じる。プロファイルの質に大きな影響を与えるのが、堆積物の粒度である。得られたプロファイルの断層の見え方や調査可能な分解能は、堆積速度によって違いがある。ここでは地質条件の違いによる活断層調査の制約をまとめる。

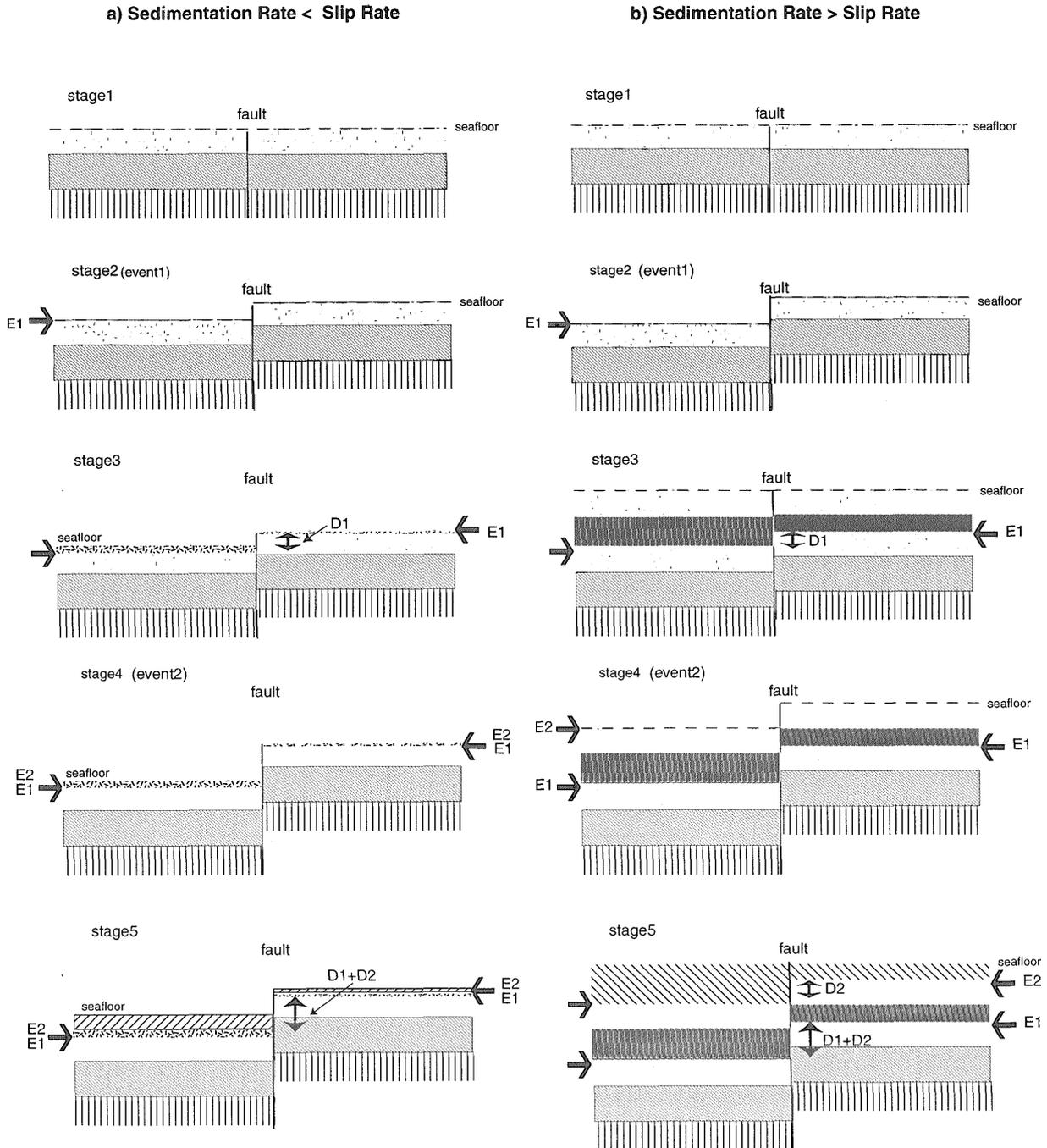
3.2 粒度

池原ほか (1990) は、隠岐トラフの南西部の陸棚斜面から海盆における底質と、3.5kHzサブボトムプロファイラー (以下、SBPと呼ぶ) 記録の特徴を検討し、SBPのプロファイル上での海底面における反射と、内部反射の特徴から、8つの音響的層相に分類した。それによると、礫岩や粗粒砂岩などの堆積物では、海底面の反射が

強いが、堆積物中で音波は減衰し、内部構造が見えにくい特徴がある。一方、泥質の堆積物では、連続した反射面が数多く認められ、探査深度も大きい。つまり、泥質堆積物の方が地形の形態や変形が観察しやすく、音波探

査調査に適している。

また、地層中にガス層などが存在すると、音波が散乱して反射面が見えにくいことがある (Allis, *et al.*, 1989 など)。



第 1 図 堆積速度と変位速度の違いによる活断層の見え方の違い。a)：堆積速度が小さい場合で、堆積物が断層の変位を埋積する前に、次のイベントが生じる。b)：堆積速度が大きい場合で、断層の変位を埋めてから次のイベントが生じるため、コア試料による活断層の活動度の解析には理想的である。E1：初めのイベント、D1：初めのイベントによる変位量、E2：2番目のイベント、D2：2番目のイベントによる変位量。

Fig. 1 Two cases the active faulting with a different relationship between slip rate and sedimentation rate. a) : slip rate larger than sedimentation rate. b) : sedimentation rate larger than slip rate. In case b), the datum plane of each event was formed within the sediment. E1 : first event of fault, D1 : thickness of the downthrown offset during the event 1, E2 : second event of fault, and D2 : thickness of the downthrown offset on the event 2.

3.3 堆積速度と変位速度

第1図に示すように、堆積速度が断層の変位速度を上回っている場合には、変位が生じた後、断層地形が埋積され海底面は平らになる。次のイベントで断層が活動すると、この平坦面が基準面としてずれの大きさを示す。この基準面の年代が決定できれば、その断層の活動時期がわかる。一方、堆積速度が断層の変位速度より小さい場合には、断層崖が形成され基準面が存在しないので、1回ごとのイベントを識別し、履歴を明らかにすることが困難になる(第1-a図)。ただし、断層の相対的沈降側には断層の活動に伴う斜面崩壊のイベント堆積物などが残されていれば、地震発生時期を推定できる可能性がある。音波探査やコア試料を詳細に観察する必要がある。

松田(1975)の活断層の活動度と過去の平均変位速度は分類によると、A級活断層の平均変位速度は100-1000cm/1,000年、B級活断層は10-100cm/1,000年、C級は1-10cm/1,000年とされている。仮に、A-B級の境界の100cm/1000年の変位速度の活断層の履歴を明らかにする場合、基準面が形成されるためには、堆積速度は少なくともそれ以上でなくてはならない。

大陸棚斜面より浅い環境は、湖沼や内湾などの閉鎖的な海域と、大陸棚や陸棚斜面など外洋に分けられる。外洋には、海嶺のような浅い独立した高まりの環境も存在する。湖沼や内湾などの閉鎖的な環境では、後背地から供給された碎屑物が泥質なものも含めて大部分がその中に堆積するので堆積速度が大きく、一般的には細粒堆積物が優勢である。堆積速度は、環境や場所によって大きく違いがある。例えば、大阪湾や(井内, 1990)、別府湾の(岡村ほか, 1992)、内湾環境の研究では、海底下十数メートルの層準で鬼界アカホヤ火山灰層が報告されており、6300年前の火山灰層の年代値(町田・新井, 1978)で平均堆積速度を算出すると、180cm/千年以上と大きい。また、斎藤・池原(1992)は、日本周辺海域の堆積速度をまとめているが、それによると、東京湾の方が大阪湾よりやや大きく、堆積速度は100-2000cm/千年である。

一方で、外洋では、細粒堆積物が拡散されやすいため、粗粒な堆積物が優勢になる傾向がある。斎藤・池原(1992)は、陸棚の堆積速度は20-100数十cm/千年で、東京湾よりほぼ1桁小さいことを示している。以上のことから、内湾では基準面が形成されやすく、外洋の陸棚では必ずしも基準面が形成されないことがある。

3.4 海水準変動と堆積環境

このような堆積環境は、海水準が過去約6000年間ほぼ一定に保たれてきたために維持されてきたが、それ以前は100m以上に達する氷河性海水準変動があつて(Fairbanks, 1989など)、堆積環境も大きく変化した。日本周

辺の海水準変動に関しては、斎藤(1998)やSaito *et al.* (1998)がまとめている。それによると、約1万8千年前の最終氷期の極大期では現在よりも約110~115m低く、約6000年前に現在より3m高い海水準に達して、現在に至っていると推定している。低海水準期には、内湾や内側陸棚は陸化し、河川成堆積物がたまったり、侵食場が形成された。この時期に作られる不整合面や削剥面は、特徴的な反射面として残されており(Okamura and Blum, 1993など)、基準面として有効である。堆積物は、外側陸棚や陸棚斜面に運ばれるため、外側陸棚や陸棚斜面は氷期には堆積速度が大きく、間氷期には小さい。一方、内湾や内側陸棚は逆に氷期には堆積速度が小さく、河川成堆積物が堆積している場合には粒度も粗い。

約6000年前以降は、ほぼ一定の環境が維持されていたと考えられるが、それ以前から約1万8千年前の最終氷期の極大期までは、海水準の変動量の大きい時代で、堆積速度も大きく変化しているため、年代値の見積もりなど十分に注意しなくてはならない。

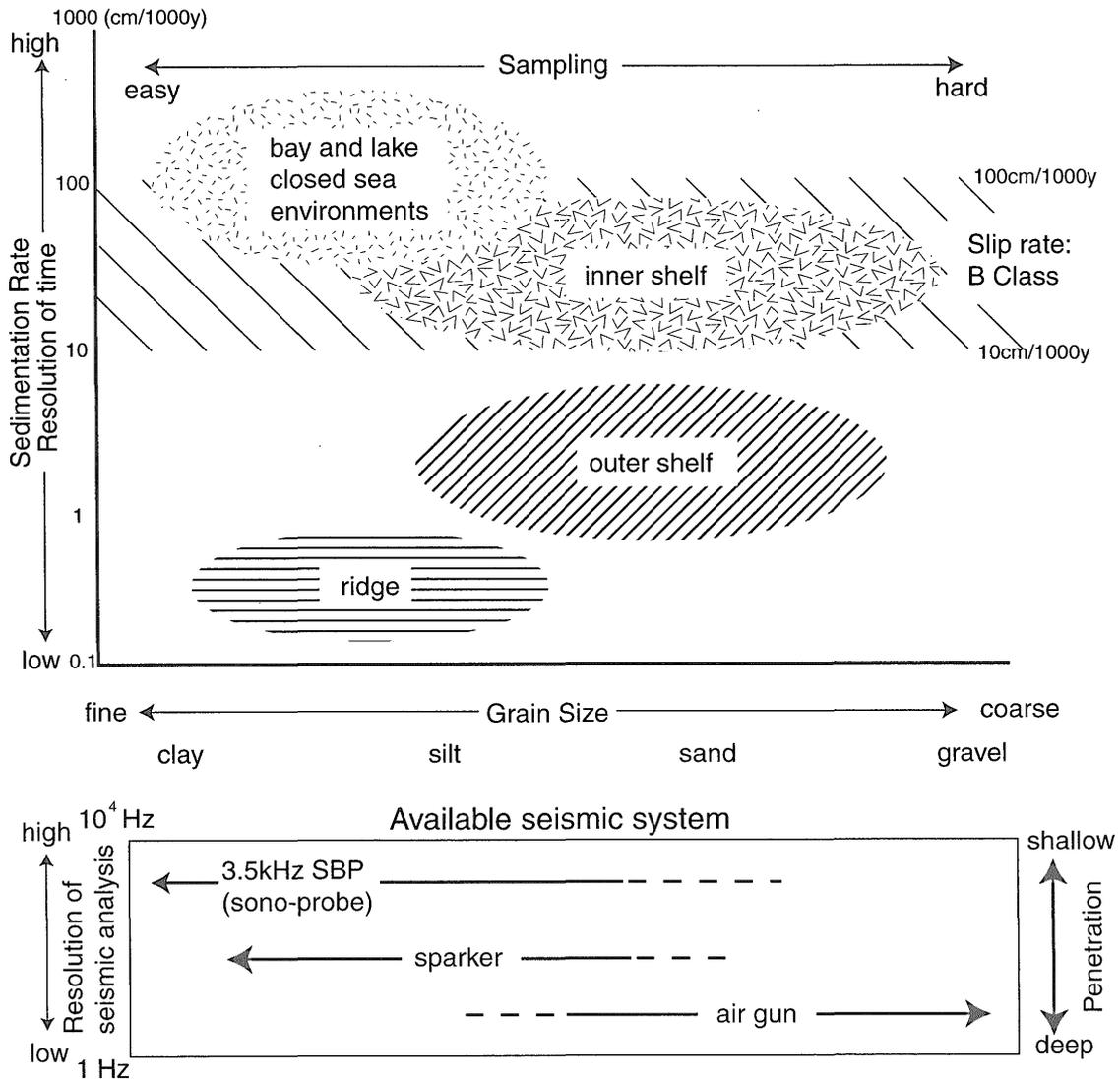
3.5 堆積物採取

断層の活動時期を知るためには、基準面の年代を知る必要がある。断層を挟んで採取したコア試料とイベント層準とを対比し、その年代を明らかにすることによって、イベントの時期と、その変位量を見積もることが可能になる。コア試料の採取にはピストンコーラーが用いられているが、採取できる長さは最大で20m程度である。例えば、堆積速度が200cm/千年に達する内湾環境では、20mの長さのコアが採取できて、約1万年の履歴が復元できる。採取されるコア試料は、表層の欠損の無いものでなくてはならない。泥質堆積物は、コーラーが貫入しやすく、良好のコア試料が得られるが、粗粒堆積物などのコーラーが貫入しにくい層が挟まれていたり、コア試料採取地点の水深が深くなればなるほど試料採取が困難になる。粗粒堆積物には、パイプコーラーが有効である。

4. 浅海域の活断層調査に関わる諸条件

以上述べた諸条件の違いによる、活断層調査の制約を第2図にまとめた。地質条件については、横軸に粒度と縦軸に堆積速度をとって浅海域堆積環境を示した。その下側には、粒度に適した音波探査システムを示し、その垂直分解能および透過深度を図示した。

湖沼や内湾などの閉ざされた海域では、堆積速度が大きいために時間分解能が高い。仮に堆積速度が200cm/千年の場合に、10cmは50年に相当する。そして、泥質堆積物が卓越しているために、音波探査によって構造が見えやすく、高分解能の音波探査が可能である。垂直分解能20cmのソノプローブを用いて調査した場合、100年単位の時間分解能をもつ。コア試料の採取も泥の卓越した内



第2図 浅海域の地質条件とそれに適した音波探査システム。浅海域の地質条件と堆積物の粒度，堆積速度の関係を示す。
 Fig. 2 Studies of active faults under different kind of geological setting. Schematic diagram showing sedimentation rate, grain size and each geological setting of shallow marine and lake environments.

湾では，比較的容易である。

一方，大陸棚から陸棚斜面の特に外縁付近では，堆積速度は小さく，仮に堆積速度が20cm/千年のコア試料を採取した場合に，10cmは500年に相当する。また，粗粒な堆積物が優勢になり，高周波数の音波は減衰してしまうために十分なプロフィールのイメージが得られない。堆積速度が20cm/千年の海域で調査した場合，断層の変位量がそれを上回っていれば，第1-a図のように基準面が形成されず，活動履歴を知ることが困難である。コア試料の採取も砂が卓越した海域では難しい。

第2図には，松田(1975)の分類によるB級活断層(変位速度が10-100cm/4年)の変位速度を斜線で示した。仮にB級の活断層が海底や湖底に存在している場合に，この斜線より堆積速度が大きければ，基準面が形成され，活動時期や変位量が見えやすい。一方，堆積速度が斜線

より小さい海域では，基準面が形成されないのでイベントの発生時期を知るのは困難になる。つまり，浅海域の活断層調査は：

1. 音波探査によって地層の形態や変形が見やすいこと。
 2. 堆積物の採取が容易であること。
 3. 基準面が形成されている可能性が高いこと。
- の3点を考慮すると，内湾や湖沼などの閉鎖的な海域が，極めて有利である。

5. 内湾環境における活断層の活動度の評価

別府湾における活断層調査(島崎ほか，1986；岡村ほか，1992bなど)は，内湾の活断層調査の成功例としてよく知られている。そこでは，磁歪式の音源(ソノプロー

ブ)を用いた音波探査プロフィールより、24本の断層を認めた。プロフィールの分解能は10~20cmで(岡村ほか, 1992b), 透過深度は40m以上に達している。そこでは4層準の顕著な反射面が認められており、下位の反射面ほど変位量大きい。上位から2層準目の反射面は鬼界アカホヤ火山灰層に対比される。5本の主だった断層を挟むようにコア試料を採取し、200メッシュ以上の粗粒堆積物の構成比, 石灰質ナンノ化石の観察や帯磁率の測定などを行い、放射性炭素年代測定も実施している。対比の結果、ある層準だけ相対的沈降側に厚い堆積物が認められ、その層準が地震発生層準であると考えた(岡村ほか, 1992b)。亀川沖西断層の場合で、過去6700年に3回のイベントが見いだされ、断層の隆起側の平均堆積速度200cm/千年と仮定して、5300年前のイベントの変位量が176cm, 3500年前のイベントの変位量が55cm, 680年前のイベントの変位量が115cmと推定され、断層の履歴

が解明された(第3図: 岡村ほか, 1992b)。

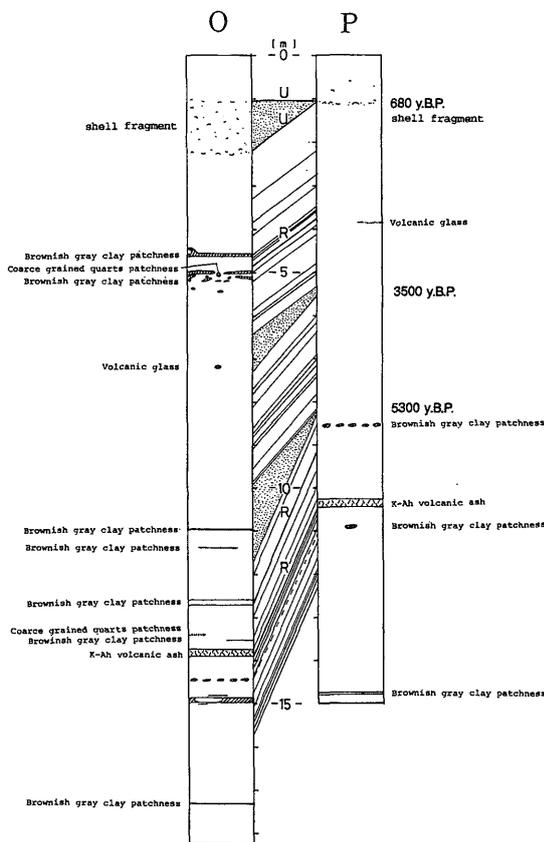
同様の研究例は四国北西部の伊予灘北東部の海底などが知られている(堤 ほか, 1990; 小川ほか, 1992)。伊予灘北東部においても、解像度の高い磁歪式のソノプロブが使われており、音響基盤までに9つの反射面を見いだしている。2本の断層を挟むように3地点で約10m程度のコアが採取され、音波探査プロフィールの対比とともに、放射性炭素年代によって、約6200年前と約4000年前に断層の活動があり、それぞれ数メートルの変位量を推定している。しかし、4000年前以降は堆積速度が激減しており(500cm/千年が9 cm/千年に減少した)、変位の累積性は認められるが、活動履歴は明らかにできていない(小川ほか, 1992)。先述のように、堆積速度が変位量を上回ることが、断層の活動履歴を解明する上で重要であると言える。

今泉ほか(1987)は三浦半島南東部沖金田湾の海底活断層調査を、同様のソノプロブを使って実施した。この断層は北西-南東方向に長さ2km以上連続し、金田湾断層と命名された。その断層面はほぼ垂直であり、断層変位の上下成分は場所によって違いがあることから、三浦半島を横切る陸上の活断層と同様に、横ずれ成分の卓越した断層と考えている(今泉ほか, 1987)。ただし、同海域の堆積物が最終氷期以降にたまったものであり、それに変位を与えている金田湾断層は少なくとも最終氷期以降に活動していることを示している。この海域では、堆積物は採取されていない。

また、千田ほか(1991)は九州東部の八代海で同様にソノプロブを用いた音波探査から、鬼界アカホヤ火山灰層と考えられる反射面を断層の両側で対比し、2.5mの累積変位量を認めている。しかし、音波探査プロフィールの透過深度は別府湾より小さく、場所によっては音響散乱域が認められ、十分な記録は得られていない。その原因として、堆積物の粒度が粗いこともあるが、音響散乱域はガスのトラップに原因があるのではないかと推測されている(千田ほか, 1991)。また、堆積物も採取されていない。

湖沼でも同様に活断層の調査は行われている。琵琶湖ではソノプロブを用いた音波探査の結果、表層堆積物に変位を与えるような断層が報告されている(岡村, 1992a)。また、アメリカ合衆国のタホ湖の例では(隈元ほか, 1995)、音波探査を用いて、第四紀に繰り返し活動していることを明らかにした。これらの調査例では、コア試料の採取と活動履歴を解明することが今後の課題である。

1995年の兵庫県南部地震後、横倉ほか(1998)や横倉ほか(1999)は、海底下数kmに達する地下深部の地質構造を広域的に解明することを目的とし、大阪湾周辺をエアガンと48チャンネルのストリーマケーブルを使ってマルチチャンネル音波探査を行った。この調査の垂直分解能は数十mであり、断層活動の1回ごとのイベン



第3図 別府湾北西部における亀川沖西断層の対比例(岡村ほか, 1992b)。断層を挟むように採取したコア試料を、対比すると、相対的沈降側に厚い堆積物が厚い層準があり(図のハッチ部)、その層準にイベントが生じたと判断できる。

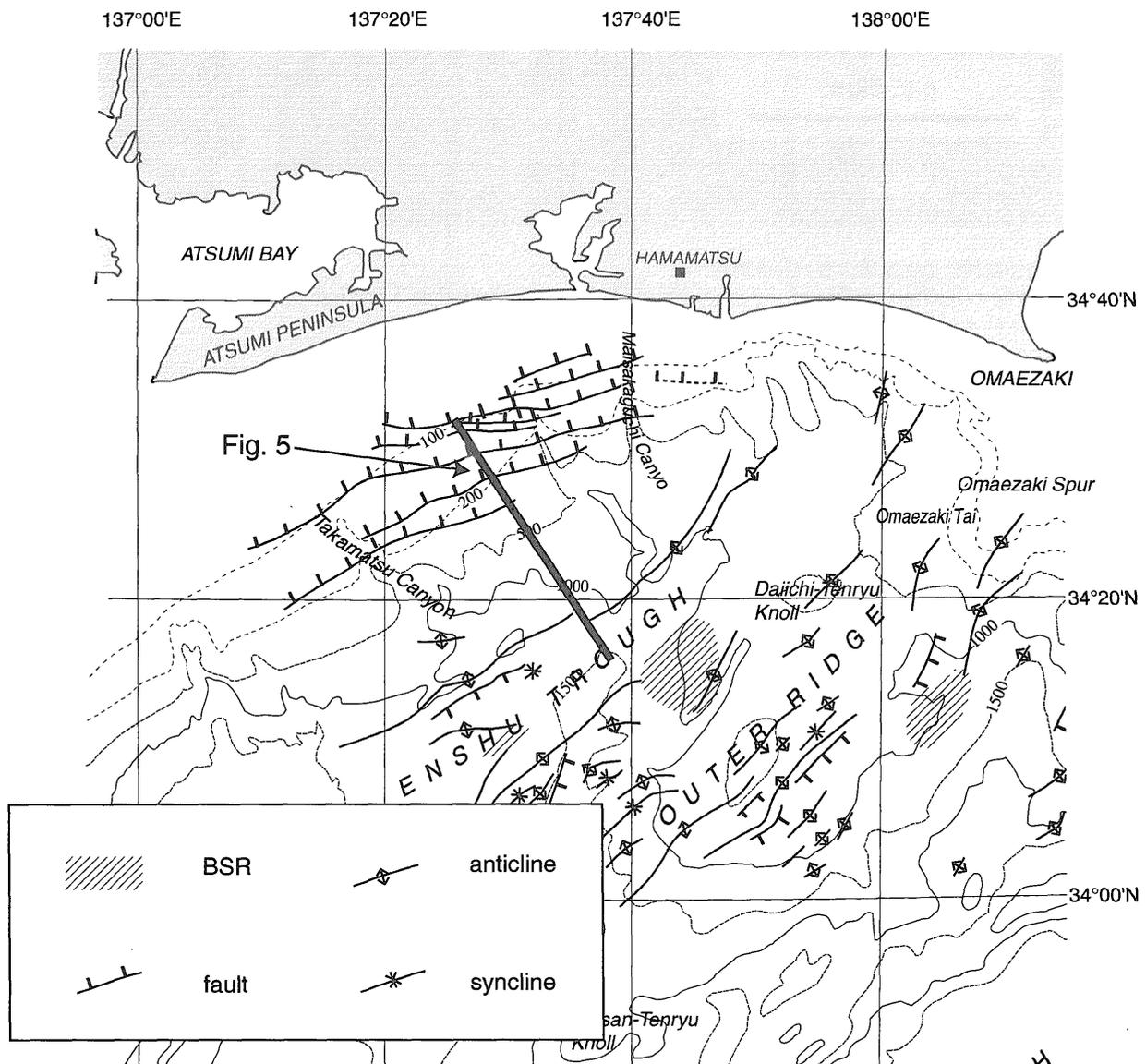
Fig. 3 Kamegawa-oki Nishi Fault in the northwestern Beppu Bay (After Okamura et al., 1992b). The diagrams showing correlation of two cores which corrected both side of active fault. Faulting events are recognized in the diagram as shaded triangular areas.

トを識別できない。音波探査の結果、一部を除き大阪湾の断層は、堆積層の浅部には達しておらず、撓曲帯を形成している。撓曲帯の解釈については、本特集号の岡村のレビューにふれられている。横倉ほか(1998)は大阪層群およびその上位の堆積物中に挟まれる海成粘土層のうち、4層準を音波探査プロファイル中の顕著な反射面として認めた。そして、この4層準の海成粘土層の年代を火山灰層との層位関係をもとに、およそ1.1 Ma, 0.87 Ma, 0.6 Ma, 0.3 Maと決定した。その結果、大阪湾断層の変位速度を、平均50-60 cm/千年で過去1.1 Maの間はほぼ一定であることを示した。

6. 外洋環境における活断層の活動度の評価

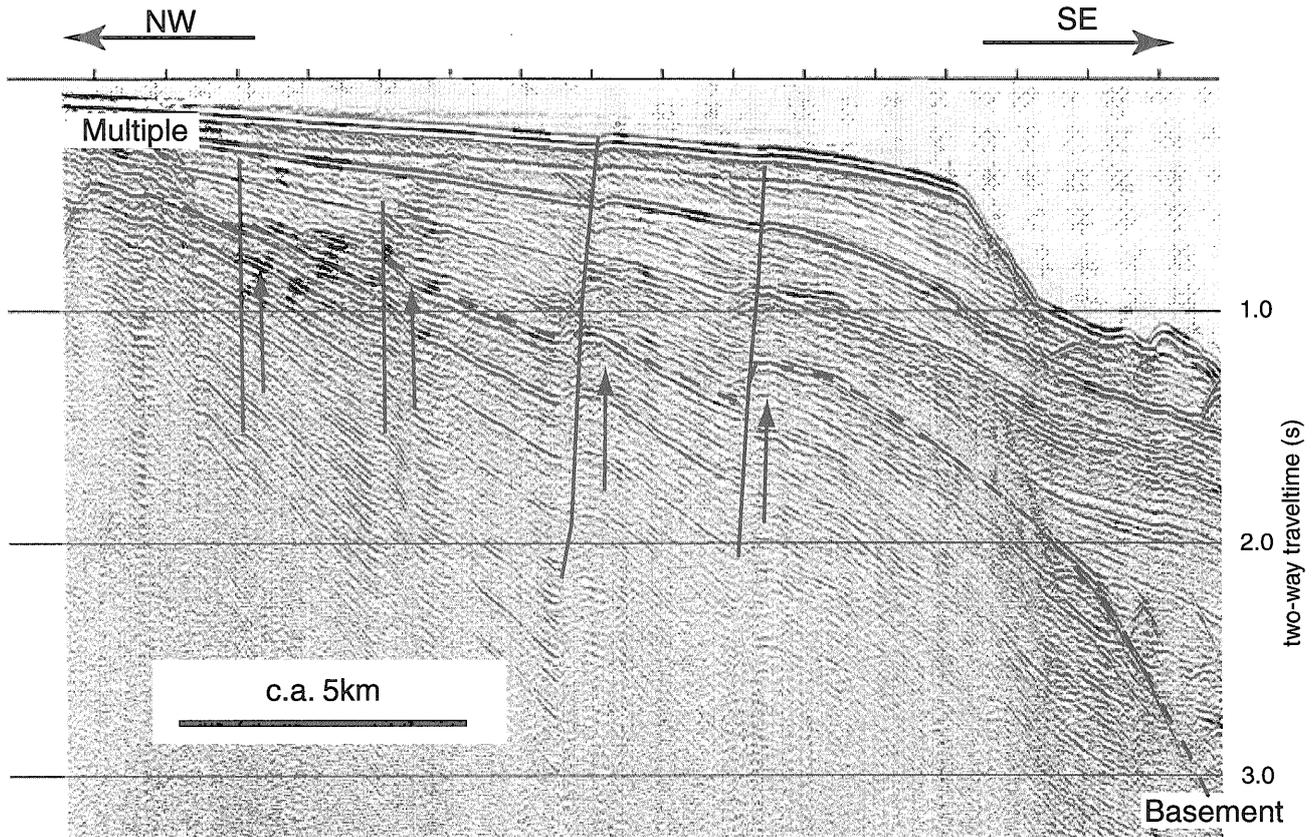
活断層の分布は内湾のような、高分解能音波探査やコ

ア試料採取に適した海域に限られているわけではない。陸棚や陸棚斜面のような外洋環境においても、都市部に近い海域では、活動履歴を検討する必要がある。岩淵(1998)は秋田沖の陸棚の音波探査記録の再解析から、活断層の詳細な形態を明らかにした。音波探査調査には、スパーカーと同時にソノプローブ(SBP)の調査を行っている。同海域に広く認められる侵食面を最終氷期(18,000年前)に形成されたと考え、それが18m変位していることから、平均変位速度を約90~140cm/千年と見積もっている。断層の相対的下降側の平均堆積速度は、侵食面形成年代を18,000年前に仮定すれば、180cm/千年と内湾環境に匹敵し、ソノプローブを用いたプロファイルの垂直分解能は少なくとも50cmとされているので、時間分解能は数100年である。岩淵(1998)は、ソノプローブの音波探査プロファイル中に認められる反射面のう



第4図 東海沖の陸棚上の活断層の分布図。

Fig. 4 Preliminary structural map of the offshore Tokai district, with active faults indicated.



第5図 東海沖陸棚上の活断層の音波探査断面。

Fig. 5 Seismic reflection profile of the continental shelf to the shelf slop. Location of the line indicated on Fig. 4. Vertical scale is presented in seconds of two-way travel time.

ち、相対的に沈降する側にのみ認められる3枚の反射面を、断層運動に伴って凹地に堆積したイベント堆積物であると仮定した。その年代を18,000年以降の堆積速度を一定と仮定して算出した結果、断層の活動間隔は概ね2千数百年で、単位変位量は2 m程度と推定している。ここでは、侵食面の形成以降の堆積速度が一定と仮定されているが、海水準の変化に伴い、どの様に堆積速度が変化したのか、十分に検討が必要である。

外側陸棚域の活断層調査としては、岡村ほか(1994)は、1964年の新潟沖地震の震源域と考えられる粟島付近の大陸棚において3.5kHzSBPとエアガンを用いたシングルチャンネルの音波探査調査を実施している。また、いくつかの測線についてはエアガンより分解能の高い、ウォーターガンを音源として調査している。その結果、大陸棚に沿って分布する2つの隆起帯(粟島隆起帯と新潟沖隆起帯)を見だし、そのうちの粟島隆起帯が新潟地震の震源域にほぼ一致していることを示した。新潟地震を起こした地震断層は、この粟島隆起帯に沿って分布する西傾斜の高角逆断層であり、最近200-300万年間に1500m以上も変位していることを報告した。そして、最終氷期(18,000年前)に形成された侵食面の累積変位量を見積もり、平均変位量を0.7m/千年としたが、個々の

イベントを見いだすことはできなかった。

荒井ほか(1998)も東海沖の大陸棚～陸棚斜面の活断層を報告している(第4, 5図)。3.5kHzSBPの結果から、最終氷期に形成された陸棚上に最大15m以下の変位が認められ、それ以降の平均変位速度は数十cm/千年であると推定した。同時にエアガンによる音波探査断面は、新第三紀に形成されたと考えられる音響基盤にも500m以上に及ぶ累積変位が認められ、基盤形成以降に活動が繰り返していたことを示唆している。しかし、個々のイベントを見いだすことはできていない。

活断層研究会(1980, 1991)は、海上保安庁水路部の音波探査データや、地質調査所の20万分の1の海洋地質図を基にして日本周辺海域の活断層の分布を示している。しかし、実際には岡村ほか(1994)や荒井ほか(1998)の示した陸棚上の活断層は、示されていない。これは、従来のプロファイルが陸棚の活断層の分布を明らかにするためのデータとして十分でないことを示している。活断層研究会(1991)では、明らかに活断層が存在しない領域と、プロファイルの解像度が十分でないために活断層が示されていない領域があり、各々が区別されていないことに注意が必要である。

7. 今後の課題 一まとめにかえて—

陸棚や湾などの浅い海域における活断層調査の現状をまとめてきた。海域や湖沼の断層の活動履歴を明らかにするためには、1つ1つのイベントを識別できる分解能の調査が必要である。それは、少なくとも100年程度の時間分解能と、数十 cm の変位量を読み取れる垂直分解能の調査である。実際の調査にあたっては、次にあげる点に考慮なくてはならない。

1. 泥質な堆積物の方が音波探査に適しており、地層の形態や変形が観察しやすい。
2. 堆積速度と断層の変位速度は、断層の見え方を支配する。堆積速度が、変位速度を上回ってれば、基準面が形成され、その年代を知ることによって、1回の活動の時期と変位量を求めることができる。
3. 泥質な堆積物の方が試料採取が容易であり、擾乱のないコア試料が得られれば、基準面の年代を知ることができる。

これらの観点から、内湾のような地質条件が活断層調査に適していることが言える。一方で、大陸棚や陸棚斜面にも、活断層が分布しており、これらの活動履歴の解明が今後の重要な課題になる。砂質な海域では高周波数の音源を用いて、受波部をマルチチャンネルにするなど、新たに工夫が必要である。変位速度が堆積速度を上回っているような海域では、急激な断層変位に伴うイベント堆積物などの存在を詳細に検討する必要がある。堆積速度が変位速度を上回って基準面が存在するような場合でも、砂質な海域ではコア採取が困難であり、パイプロコアラを用いるなど、従来の手法に加えて新たな工夫が必要である。

謝辞 本論をまとめるにあたり、地質調査所海洋地質部海洋堆積研究室長の岡村行信氏には、執筆の機会を与えていただいたと同時に、査読者として、たいへん有益なコメントをいただき、原稿が躍進的に改善された。ここに記して謝意を表す。

文 献

荒井晃作・岡村行信・倉本真一 (1998) 東海沖大陸棚に新たに見つかった活断層。1998年合同大会予稿集, 312.

Allis, R. G., Yusa, Y. and Taishi, H. (1989) Gas in Beppu Bay inferred from acoustic reflection anomalies. *The Quaternary Research (Daiyonki-kenkyu)*, **28**, 185-197.

Fairbanks, R. G. (1989) A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event

and deep-ocean circulation. *Nature*, **342**, 637-642.

千田 昇・岡村 眞・小川光明 (1991) 八代海海底の活断層について。活断層研究, no. 9, 93-97.

池原 研・佐藤幹夫・山本博文 (1990) 高分解能音波探査記録からみた隠岐トラフの堆積作用。地質学雑誌, **96**, 37-49.

今泉俊文・島崎邦彦・宮武 隆・中田 高・岡村 眞・千田 昇・貝塚爽平・岩田孝行・神谷真一郎・畑中雄樹・橋田俊彦 (1987) 三浦半島南東部沖金田湾における海底活断層の発見 (新称: 金田湾断層)。活断層研究, no. 4, 28-36.

井内美郎 (1990) 内湾域“沖積層”区分の再検討—大阪湾を例として—。第四紀研究, **29**, 405-416.

岩淵 洋 (1998) 男鹿半島の南方に見いだされた海底活断層。海洋科学技術, **10**, 1-15.

活断層研究会 (1980) 日本の活断層。東京大学出版会, 東京, 363p.

活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層。東京大学出版会, 東京, 448p.

隈元 崇・Wesnousky, S. G.・岡村 眞・堤 浩之・千田 昇・島崎邦彦・中田 高 (1995) アメリカ合衆国, シェラネバダ山脈内タホ湖底の活断層—音波探査機を用いた予備調査—。活断層研究, no. 13, 47-53.

町田 洋・新井房夫 (1978) 南九州から噴出した広域テフラ—アカホヤ火山灰。第四紀研究, **17**, 143-163.

松田時彦 (1975) 活断層から発生する地震の規模と周期について。地震, **28**, 269-283.

Mitchum, R.M., Vail, P.R., and Thompson, S. (1977) Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: the depositional sequences as a basic unit for stratigraphic analysis. In Payton, C.E., ed.: Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration., *Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem.*, no. 26, 53-62.

小川光明・岡村 眞・島崎邦彦・中田 高・千田 昇・中村俊夫・宮武 隆・前杵英明・堤 浩之 (1992) 伊予灘北東部における中央構造線海底活断層の完新世活動。地質学論集, no. 40, 75-97.

岡村 眞・佐藤比呂志・隈元 崇・堤 昭人・嶋本利彦・東郷正美・植村善博・松田時彦・露口耕治 (1992a) 琵琶湖湖底活断層の音波探査 (予報)。活断層研究, no. 10, 53-64.

岡村 眞・島崎邦彦・中田 高・千田 昇・宮武 隆・前杵英明・堤 浩之・中村俊夫・山口智香・小

- 川光明(1992b) 別府湾北西部の海底活断層—浅海底活断層調査の新技术とその成果—。地質学論集, no. 40, 65-74.
- Okamura, Y. and Blum, P. (1993) Seismic stratigraphy of Quaternary stacked progradational sequences in the southwest Japan forearc: an example of fourth-order sequences in an active margin. *Spec. Pubs. Int. Ass. Sediment.*, no. 18, 213-232.
- 岡村行信・佐藤幹夫・宮崎純一(1994) 新潟沖大陸棚の活断層—とくに新潟地震との関係について—。地震, 46, 413-423.
- 岡村行信(1998) アナログテープに記録されたシングルチャンネル音波探査データのデジタル化と信号処理。海洋調査技術, 10, 17-27.
- 斎藤文紀(1998) 東シナ海陸棚における最終氷期の海水準。第四紀研究, 37, 235-242.
- 斎藤文紀・池原 研(1992) 河川から日本周辺海域への堆積物供給量と海域での堆積速度。地質ニュース, no. 452, 59-64.
- Saito, Y., Katayama, K., Ikehara, K., Kato, Y., Matsumoto, E., Oguri, K., Oda, M., and Yumoto, M. (1998) Transgressive and high-stand systems tract and post-glacial transgression, the East China Sea. *Sedimentary Geology*, 122, 217-232.
- 島崎邦彦・中田 高・千田 昇・宮武 隆・岡村 眞・白神 宏・前杢英明・松本宏彰・辻井 学・清川昌一・平田和彦(1986) 海底活断層のボーリング調査による字地震発生時期予測の研究—別府湾海底活断層を事例として—(予報)。活断層研究, no. 2, 83-88.
- 東海沖海底活断層研究会(1999) 東海沖の海底活断層, 東京大学出版会, 東京, 151p.
- 堤 浩之・中田 高・小川光明・岡村 眞・島崎邦彦(1990) 伊予灘北東部海底における中央構造線。活断層研究, no. 8, 49-57.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部 進(1998) 大阪湾における反射法深部構造探査。地調月報, 49, 571-590.
- 横倉隆伸・山口和雄・加野直巳・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部 進(1999) 神戸・芦屋周辺地域における反射法深部構造探査。地調月報, 50, 245-267.

(受付:1999年10月13日;受理:2000年1月19日)