震源断層-活断層システムのイメージングの意義と現状

佐藤比呂志¹⁾ 伊藤谷生²⁾ 池田安隆³⁾
平田直¹⁾ 今泉俊文⁴⁾ 井川猛⁵⁾

Significance of Imaging Seismogenic and Active Fault Systems for Earthquake Hazard Mitigation

Hiroshi SATO¹⁾, Tanio ITO²⁾, Yasutaka IKEDA³⁾, Naoshi HIRATA¹⁾,
Toshifumi IMAIZUMI⁴⁾ and Takeshi IKAWA⁵⁾

Abstract

Knowledge of the geometry and connectivity of seismogenic and active fault systems is a key to understanding on-going active tectonic processes and evaluating the risk of destructive earthquakes. Knowing the geometry of the deeper extensions of active faults in the seismogenic zone, contributes to estimating source parameters for scenario earthquakes, like fault geometry, co-seismic displacement, and the location of possible asperities. Together with monitoring seismicity and surface deformation, delineating the geometry of seismogenic faults allows us to construct quantitative models of crustal deformation. Seismic reflection profiling is a powerful tool to discern the deep geometry of faults. Since the Kobe earthquake of 1995, deep seismic profilings have been carried out across some active faults in the Japanese islands, such as the Ou Backbone Range in northern Honshu. Through these seismic experiments, using vibroseis trucks and explosive sources, the geometry of seismogenic and active fault systems is successfully obtained in spite of some difficulties due to rough topography, high attenuation and man-made noise. Deep seismic profiling has a great potential for the direct imaging deep crustal structures, including deep fault geometry.

Key words : seismogenic and active fault system, intra-arc destructive earthquake, deep geometry of faults, seismic reflection profiling, active tectonics, mitigation of seismic hazards, Japanese islands

キーワード : 震源断層-活断層システム, 内陸地震, 反射法地震探査, アクティブテクトニクス, 地震災害軽減, 日本列島

¹⁾ 東京大学地震研究所

²⁾ 千葉大学理学部

³⁾ 東京大学大学院理学系研究科

⁴⁾ 山梨大学教育人間科学部

⁵⁾ 地球科学総合研究所

¹⁾ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

²⁾ Department of Earth Sciences, Chiba University

³⁾ Department of Earth and Planetary Sciences, The University of Tokyo

⁴⁾ Department of Geography, Yamanashi University

⁵⁾ Japex Geoscience Institute

I. はじめに

活断層という言葉が一般にもよく知られるようになったのは、関東大震災以降最大の被害となった阪神・淡路大震災以降である。内陸で発生する地震は大規模なものであっても、破壊領域の規模は海溝型の巨大地震にくらべて遙かに小さい。しかしながら、大規模な内陸地震は震源と人口稠密地との距離が短いため、都市部に甚大な被害を与える。大規模な内陸地震は厚さ 15 km 程度の地殻上部の地震発生層を断ち切り、地表近傍にも地震断層や撓曲としてその痕跡を残す。このようなかつての地震活動の痕跡である活断層から、将来どのような地震が発生するのか、そのような地震によって都市ではどのような被害が発生するのかを予測することは、地震災害の軽減を目的とした施策を実施していく上で基本的な情報である。

1995 年の兵庫県南部地震は、大規模地震の危険性を一般に広く認識させ、地震による災害から国民の生命、身体、財産を保護することを目的とした地震防災対策特別措置法が制定された。同時に、地震に関する調査研究を政府として一元的に推進するため、地震調査研究推進本部が総理府に設置された。この地震調査研究推進本部のイニシアチブのもとに活断層についてのさまざまな調査研究が積極的に推進されてきた。とくに日本列島の主要な活断層についての調査が進行し（熊木，1999；佃，2001），主として活断層の活動歴をもとにした内陸地震の危険度評価も含めた長期評価が行われている（島崎，2001）他、地震によって発生する地表の強震動を精度よく予測するための平野部の地下構造調査も実施されるようになった（入倉・三宅，2001）。

活断層の危険度を評価するためには、地表近傍の活断層群と地震発生層中の震源断層との関係を理解することは重要であり、また震源断層の推定は精度よい強震動予測を行う上で基本的な情報である。こうした観点から、小論ではこのような活断層-震源断層システムのイメージングの意義とその重要性を概括し、反射法地震探査結果によって判明しつつある活断層-震源断層システムにつ

いての研究成果を紹介する。

II. 震源断層-活断層システムのイメージングの重要性

1) 活断層の危険度評価の精度の向上に向けて一断層の分岐形状を理解する

地震発生層で破壊を生じる内陸地震の震源断層は、地殻上部で分岐し地表近傍で認識される活断層群と一連のシステムを構成する場合がある（図 1）。近接して分布する活断層群がどのように連結し、そのシステムの中でどのように歪みを分配させているかを理解することは、地表近傍の活断層から震源断層の活動を推定する上で、極めて重要である（池田ほか，1996）。小論ではこうしたシステムとしての理解の重要性を強調するために、想定される震源断層とそれから派生して形成される活断層群に対して、「震源断層-活断層システム」と呼ぶ。

図 2 には淡路島を横切る地殻構造の模式的な概念図を示した。この図は 1995 年に東京大学地震研究所を中心とする研究グループによって実施された反射法地震探査と、合同地震観測によって得られた余震分布をもとに推定したものである（Sato *et al.*, 1998）。兵庫県南部地震では淡路島の北東部の野島断層に沿って地表地震断層が出現した。余震分布の集中域は六甲断層系から直線状にのび、淡路島北部では東側の仮屋断層と西側の野島断層

図 1 逆断層型活断層の模式概念図。

Fig. 1 Schematic diagram showing the structure of an active reverse fault system.

図 2 淡路島断面における震源断層-活断層システムの概念図 (Sato *et al.*, 1998).

Fig. 2 Geometry of seismogenic and active fault systems beneath Awaji Island after Sato *et al.* (1998).

の中間部に位置する (Hirata *et al.*, 1996)。反射法地震探査の結果から判断して、両断層は高角ではあるがそれぞれ東および西に傾斜し、二つの断層は地下 7 km 程度で収れんすることになる。その下にはほぼ垂直の余震集中域が直線状に分布していることから、この震源断層-活断層システムの形状は地下断面 (図 2) において基本的には Y 字形をなし、地表の活断層群は地殻中部の同一の主断層から分岐したものと判断される。

地殻中部の主断層から分岐する活断層の例として、台湾西部の地殻構造断面を示す (図 3)。地震時に地表で大きな変位を示した車籠埔断層 (経済

部中央地質調査所, 2000) の西側には、海岸沿いに背斜構造があり、石油探査の結果ではその地下に東傾斜の伏在する活断層 (彰化断層) が推定されている。こうした地質構造から指摘される重要な点は、地震発生層中の主断層が地表の 2 条の活断層に分岐しているという点である。1999 年の集集地震では東側の車籠埔断層しか活動していないが、海岸沿いの背斜東翼の地形面が大きく累積的な逆傾斜を示していることから判断して、彰化断層のみが活動する地震が将来発生する可能性を考慮する必要がある。

個々の活断層の活動歴から地下の主断層の活動

図 3 台湾西部の地下構造断面。Hsiao (1968), Chang (1971), Chinese Petroleum Corporation (1971), Chiu (1973) にもとづく池田安隆によるコンパイル。

Fig. 3 Geologic cross section across the western part of Central Taiwan, Nantou, compiled by Yasutaka Ikeda after Hsiao (1968), Chang (1971), Chinese Petroleum Corporation (1971) and Chiu (1973).

性を評価する場合には、分岐構造を含めた断層形状のシステムとしての理解が欠かせない。こうした分岐形態をとる断層系の場合、個々の分岐断層の活動を総合して、地下の主要断層の平均変位速度や活動間隔などを評価する必要がある。また、車籠埔断層とその西側の彰化断層のような衝上断層（スラスト）系の場合には、重力に逆らって一つの断層で短縮変形を賄うことができず、側方に短縮域を拡大させながら変形していく。類似した構造はヒマラヤなどのプレートの衝突境界で顕著であり、北海道中軸部の日高山脈の西側の褶曲-断層帯（伊藤，2000）や伊豆半島の付け根に位置する神縄-国府津-松田断層周辺にも見られる。こうした衝上断層の前方移動は短期間に終了する現象ではなく、地質学的にも有意な期間にわたって重複した活動時期をもつ場合が多い。

活断層が高い密度で分布する近畿三角帯と呼ばれる地域には、しばしば逆断層で境された幅 30 km に満たない隆起帯が形成されている。地震発生層の厚さを考慮すれば、幅 15 km 程度の隆起帯を限る逆断層の深部延長は、地震発生層中で連結することになる。大規模な内陸地震の破壊は地震発生層の下限付近で発生することが多いため、その二つの活断層のいずれかは分岐した副次的な断層となる。こうした断層系の地下での連結性を明らかにすることは、被害予測の上からも重要な課題となる。

2) 正確な強震動予測に向けて

大規模な地震に伴って発生する地表の震動を高い精度で予測することは、地震災害の軽減に向けた防災対策を施す上で基本的な情報となる。地震に伴って発生する地表の揺れは、さまざまな要因

図 4 高角度断層と低角度断層から発生する強震動の地表分布 (佐藤・平田, 2000)。

Fig. 4 Distribution in the area of strong surface ground motion produce by two different seismogenic faults after Sato and Hirata (2000).

によって支配されるが、大きくは地下の断層面上の大きな破壊を発生させるアスペリティとの距離とその場所の震動特性によるところが大きい。アスペリティから地表までの距離は、震源断層の位置によって大きく異なる。

兵庫県南部地震のようなほぼ垂直に近い震源断層と、1999年台湾中部で発生した集集地震(M7.8)のような衝上断層(スラスト)による地震では、強震動の発生域に大きな違いがある(図4)。高角の断層の場合、震動の強い領域は大略、地表の断層線に沿った地域で発生する。しかしながら、大きな震動は低角度の断層の場合、断層線の周辺ではなく、震源域からの距離が近い上盤側の広い領域で発生することになる。したがって、特定の活断層がずれ動いた場合、どのような地盤震動が発生するかという問いに正確に答えていくためには、その活断層の深部形状について妥当な推定が必要になる。

現状では、震源断層の三次元的な探査は実施されておらず、断層面上のアスペリティとそれ以外

の断層面との物性の差異を議論する資料はない。しかし、反射法地震探査によってとらえやすい低角度の断層の場合、断層面上の物性の空間変化についても検出できる可能性を秘めている。

3) よりよい地殻活動の理解に向けて

兵庫県南部地震以降、稠密な地震・GPSによる地殻変動の定常観測点の設置、活断層の活動歴調査などさまざまな地震活動についての調査研究が進行している。内陸地震発生についての時間的な評価としては活断層の活動歴を中心とした長期評価が最も有効な方法となっている。このような長期評価は千年を超える活動間隔をもとしたものであり、100年オーダーでの評価となる。現時点では内陸地震の短期予知に関して確立された方法はないが、現実的な防災対策を検討する上で、100年オーダーの評価からいかに短期予測に近づけるかは重要な課題である。内陸地震に伴う地殻変動は、海溝型の地震に伴うものにくらべ桁程度小さい上に、プレート境界部からの擾乱を被るため内陸地震に伴う地殻変動のみを独立して検出することが難しい。しかしながら、内陸地震の発生に先行した地殻変動がとらえられている例もあり(例えば、多田, 1986; 小松原・栗田, 2001)、今後、詳細な地殻活動のモニターによって、内陸地震の切迫性が定量的に評価できる可能性も残されている。このような地殻活動の理解にとって、地殻構造とくに震源断層-活断層システムの深部形状は決定的に重要である。断層の深部形状が既知であれば、地殻のどの部分のどの程度のすべりによって地殻変動が発生しているのかを高い精度で明らかにすることが可能になる(図5)。また、断層の深部形状や地殻の不均質性についての理解なしには、発生する地震の物理的な意味を十分に理解することはできない。地震活動や地殻変動などの地殻活動のモデル化は地震発生予測の精度向上ために不可欠であり、断層の深部形状や地殻の不均質性の理解は定量的なモデル構築の基礎を提供することになる。

変動地形や活断層の発掘調査から、日本列島に分布するほとんどの活断層は千年を超える活動間隔を示している。したがって、このような地殻変

図 5 地殻変動のパターンと断層による滑りの概念図。

Fig. 5 Schematic diagram showing the relationship between crustal deformation and slip in a fault.

形のモデル化は、現在観測できる地殻変動と異なる時間帯域についても検討される必要がある。震源断層-活断層システムの形状についての理解が進めば、数万から数十万年オーダーでの変動地形・地質学的な地殻変動をもとに、地殻の水平変形とくに地殻内での蓄積歪みの速度やその分配を明らかにすることが可能になる。こうした知見は、プレートの動きから境界条件として要請される応力や歪みが島弧地殻の中でどのような分布で蓄積され、解放されるかという島弧地殻の変形プロセスを理解する上で重要な資料となる。

III. 断層の再活動性と地質学的な断層形状の推定

活断層の深部形状については、現在支配的な造構応力場に対応し、最も破壊しやすい断層の形状

をなしているという見方がある。第四紀後期に初めて形成された断層についてはこうした推定が当てはまるが、日本列島の活断層の多くは現在とは異なる応力状態のもとで形成された断層の再活動である場合が多く、現在の応力場から単純に断層面の形状を予測することができない。現在の日本列島の基本的な地殻構造は、その位置や形状を含め、日本列島がアジア大陸から分離した新第三紀初頭に大きな改変をうけた。この時期に活動した断層システムの多くは、現在の造構応力場のもとで再活動しているものが多い。日本海東縁の中新世の正断層の逆断層としての再活動は顕著な事例であり (Okamura *et al.*, 1995), 北部フォッサマグナの西縁を限る糸魚川-静岡構造線の北部など、東北日本の多数の活断層が中新世に活動した履歴を有している (佐藤・池田, 1999)。また、中部日本の横ずれ断層も中部日本の中新世の屈曲に伴う大規模なキンク褶曲の翼部に位置しており (Kano *et al.*, 1990), 第四紀後期に形成された断層ではない。西南日本で顕著な横ずれ変位で知られる中央構造線活断層系についても、反射法地震探査によれば低角度で北傾斜を示すことが明らかにされており (Ito *et al.*, 1996), 近年実施されたGPSの稠密観測から得られた地殻変動モデルともよい一致を示している (Tabei *et al.*, 2001)。低角の断層によって横ずれ運動が卓越している事実は、マクロスケールで見れば断層が極めて動きやすい性質をもつことを表していることになる。日本列島の多くの活断層が、初生的には現在とは必ずしも一致しない応力条件で形成されたことを考えると、活断層の深部形状の推定には、断層の形成史についての力学的な理解が欠かせない。

断層の深部形状の推定に重要な拘束条件を与えるデータとして、表層地質から推定される地質構造や変動地形学的に復元される過去10万年以降の地殻変動がある。活断層の評価では断層直近の地形面の変位が問題にされることが多いが、地形面に記録されている変形としてはより波長の長い変形がある。こうした長波長の地殻変動はより深部の断層の形状を反映していることから、推定される地殻中部の断層の形状を拘束する一つの条件

図 6 千屋断層を横切る反射法地震探査断面とその地質学的解釈 (Sato *et al.*, 1997).
探査測線位置は図 7 に示す。

Fig. 6 Migrated depth converted seismic section and geologic interpretation across the Senya fault, Akita prefecture (Sato *et al.*, 1997).
The location of the seismic line is shown in Fig. 7.

を提供している。また、地質学的方法としては、バランス断面法がある。この方法は、変形前の地層の長さもしくは体積が、変形後も保存されるという仮定のもとで断層の形状を推定する方法である。これらの手法は、石油探査などで用いられる地下の断面を合理的に推定するための手法であるが、断層の地下形状の推定にとって極めて有効である (例えば, Suppe, 1983; Woodward *et al.*, 1989)。

1) 堆積層中の Thin-skinned テクトニクス

北日本などの厚い第三系が堆積している短縮変形域では、堆積層中の層理面を滑り面として変形する Thin-skinned テクトニクスと呼ばれるあたかも本のページのような変形をしていることが明らかになってきた。こうした変形様式については、とくに北海道の石油探査によって典型的に示されているが (例えば, 小椋・掃部, 1992), 地下構造探査の進展に伴い、北日本の活断層沿いの変形についても同様の変形が見られることが明瞭になった (佐藤・平田, 2000)。1896 年に陸羽地震 ($M_{7.2}$) の地震を発生させた千屋断層 (図 6) や、

岩手県北部地震に伴う断層では、地表に明瞭な地震断層を出現させたが、このような断層は地表出現衝上断層 (Emergent thrust) と呼ばれるタイプである。構造探査の結果、堆積層中に水平なデタッチメントが形成されていることが判明している。また、ウェッジ型の衝上断層はとくに堆積層が厚く発達する地域で特徴的な断層で、山形県庄内平野西縁の活断層系や、石狩平野東縁断層帯で見いだされている (山形県, 1998; 栗田・横井, 2000)。また、仙台市の長町-利府断層なども主断層の前面は撓曲構造のみであり、類似の形状をとる (宮城県, 1997)。これらの断層の特徴は主断層に沿っては撓曲を示すのみで、主断層と平行な断層が地表では出現しない。その代わり、隆起帯の内部に主断層と平行する逆向きの傾斜の衝上断層 (バックスラスト) が発達することである。

2) 震源断層のイメージング

これまで述べたように、活断層からの内陸地震の長期予測・想定される内陸地震の強震動予測、さらには内陸地震の発生メカニズムを明らかにする上で、震源断層-活断層システムの形状を明らか

図 7 奥羽脊梁山地の反射法地震探査断面 (Sato *et al.*, 2002).

(A) 重ね反射断面図 (マイグレーション処理はほどこしていない).

(B) 反射断面の地質学的解釈. (C) 測線位置図.

Fig. 7 CMP deep reflection profiles across the Ou Backbone range, and the geologic interpretation of the profiles (Sato *et al.*, 2002).

(A) Un-migrated, stacked sections.

(B) Geologic interpretation of seismic profiles. (C) Location of the seismic lines.

図 8 別府湾における中央構造線を横切る反射法地震探査断面 (Ikawa *et al.*, 1998).

- (A) 時間マイグレーション断面.
(B) 測線位置図.

Fig. 8 Seismic reflection profile in Beppu Bay across Median Tectonic Line (Ikawa *et al.*, 1998).

- (A) Time migrated section.
(B) The location of seismic line.

にすることは、重要である。活断層の浅層構造や地質構造からも、地下深部の震源断層の形状を推定できるが、直接的には物理探査による震源断層のイメージングが鍵となる。大陸地殻では反射法地震探査によって上部マントルまでのリソスフェア構造の詳細なイメージングが行われている (例えば, Clowes *et al.*, 1999)。しかし、日本列島の場合、付加体としての起源に由来する地殻構造の複雑性、急峻な地形、高い人工的なノイズレベル、高い地温勾配による地震波の減衰など、反射法地震探査による深部地殻のイメージングにとって不利な要素が多い。しかしながら、90年代にはいって国内でも積極的に実施されるようになり、とくにパイプロサイスと呼ばれる起震車での低周波・多数回発震、さらに多大チャネルによる展開長の増加などのデータ取得法の改良により、日高山脈の地下構造 (伊藤, 2000) を初めとして地殻スケールの詳細なイメージングが可能になりつつある。

図 7 に示したのは、東北日本の中央部に位置する奥羽脊梁山地を横切る深部地殻反射法地震探査断面とその解釈図である (Sato *et al.*, 2002)。震

源には最大 500 kg のダイナマイトの他、石油探査で用いられるパイプロサイス 4 台を用いた。脊梁山地の西側では東に傾斜した、東側では西に傾斜した反射イベントがマッピングされた。この二つの断層は往復走時約 4.5 秒で交わるが、この深さはほぼ地震発生層の下限に相当する。つまり、脊梁山地は両側の逆断層の変位によってその間の三角形の上部地殻のブロックを押し上げることによって形成されたと理解できる。1896 年の陸羽地震の際には、真昼山地の東縁に位置する川舟断層も活動した。この断層も反射法地震探査によってイメージングされているが、この地震を引き起こした千屋断層とは地下 5 km 程度で交わる。真昼山地を含む比較的浅い地殻ブロックは、このような地震の際の共役的な逆断層の動きによって隆起したものである。

図 8 に示したのは別府湾で実施されたエアガンによる反射法地震探査断面である (Ikawa *et al.*, 1998)。北傾斜の中央構造線とその横ずれを伴う正断層運動に伴って形成された北側の堆積層が明瞭にイメージングされている。音波探査により、別府湾内には多数の活断層群がマッピングされ、

それらの活動履歴もよく復元されている（例えば、島崎ほか，2000）。大分県による総合的な活断層調査も進行しており，今後，震源断層-活断層システムの活動様式が解明されることになるだろう。

奥羽脊梁山地の実験をはじめ，近年実施された深部地殻反射法地震探査によって，日本列島の地殻においてもほぼ大陸と同様の，多数の反射層に富む下部地殻（laminated lower crust）の存在が明らかになりつつある。東北地方で実施した合同観測の結果によれば，脊梁山地周辺には多数のS波反射面が見いだされており，液体の存在が指摘されている（Hasegawa *et al.*, 2000）。地殻深部の液体は断層の強度をドラスティックに低下させる可能性があり，内陸地震の発生メカニズムについても，新たな展望が開かれる可能性がある。

日本列島の地殻深部のイメージングは決して容易ではないが，物理探査手法の適正化によって現実可能な課題となりつつある。島弧地殻変形の素過程・地震の発生メカニズムへの理解，さらには発生する地震の予測など，深部地殻のイメージングの果たす役割は大きい。

IV. ま と め

小論では，震源断層-活断層システムのイメージングの意義を述べるとともに，90年代以降積極的に推進されてきた反射法地震探査によるイメージングの実例について紹介した。日本列島の基本的な地表の活断層マッピングはほぼ終了し，詳細図の検討に移っている。今後必要になるのは，これらのシステムを3次元的に解き明かす震源断層-活断層システムの3Dマッピングである。反射法地震探査が基軸的な手法として役割を果たすことはいうまでもないが，日本列島の主要な活断層が現在とは異なるテクトニクスのもとで形成されたことを考えれば，震源断層-活断層システムの3Dマッピングには日本列島の形成史をも視野にいたれた地球科学の広範な研究を集結していく必要がある。

文 献

- Chang, S.S.L. (1971): Subsurface geologic study of the Taichung basin. *Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan*, **8**, 21-45.
- Chinese Petroleum Corporation (1971): *Geologic map of western Taiwan*. Taiwan Petroleum Exploration Division, Chinese Petroleum Corporation (scale 1: 200,000).
- Chiu, H.T. (1973): Basement rocks under the Neogene formations of the west central plain of Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, **16**, 51-58.
- Clowes, R., Cook, F.A., Hajnal, Z., Hall, J., Lewry, J., Lucas, St. and Wardle, R. (1999): Canada's LITHOPROBE Project (collaborative, multidisciplinary geoscience research leads to new understanding of continental evolution). *Episodes*, **22**, 3-20.
- Hasegawa, A., Yamamoto, A., Umino, N., Miura, S., Horiuchi, S., Zhao, D. and Sato, H. (2000): Seismic activity and deformation process of the overriding plate in the northeastern Japan subduction zone. *Tectonophysics*, **319**, 225-239.
- Hirata, N., Ohmi, S., Sakai, S., Katsumata, K., Matsumoto, M., Takanami, T., Yamamoto, A., Iidaka, T., Urabe, T., Sekine, M., Ooida, T., Yamazaki, F., Kata, H., Umeda, Y., Nakamura, M., Seto, N., Matsushima, T., Shimizu, H. and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1996): Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. *J. Phys. Earth*, **44**, 317-328.
- Hsiao, P.T. (1968): Seismic study of the Taichung area, Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, **6**, 209-218.
- Ikawa, T., Yusa, Y., Takemura, T. and Ito, T. (1998): Marine seismic profiling across the Beppu bay, northeastern extreme of the Beppu-Shimabara graben, southwest Japan. *Abstract for 8th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, Bracerona*, 70.
- 池田安隆・島崎邦彦・山崎晴雄 (1996): 活断層とは何か。東京大学出版会，220p.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2001): シナリオ地震の強振動予測。地学雑誌，**110**，849-875.
- 伊藤谷生 (2000): 日高衝突帯-前縁褶曲・衝上断層帯の地殻構造。石油技術協会誌，**65**，103-109.
- Ito, T., Ikawa, T., Yamakita, S. and Maeda, T. (1996): Gently N-dipping Median Tectonic Line (MTL) revealed by recent seismic reflection studies, southwest Japan. *Tectonophysics*, **264**, 51-63.
- Kano, K., Kosaka, K., Mirata, M. and Yanai, S. (1990): Intra-arc deformation with the vertical rotation axes: The case of the pre-Middle Miocene terranes of Southwest Japan. *Tectonophysics*, **176**, 333-354.
- 經濟部中央地質調查書編 (2000): 九二一地震地質調査報告。經濟部中央地質調查書，台北，314p.
- 小松原 琢・栗田泰夫 (2001): 1970年秋田県南東部地震前後の上下地殻変動データの解析。地震 **2**, **54**, 33-44.

- 熊木 洋 (1999): 地震防災における地震調査研究の課題, 特に活断層の長期評価について. 地形, **20**, 405-418.
- 栗田裕司・横井 悟 (2000): 北海道南西部における新生代テクトニクスの変遷と油田構造形成. 石油技術協会誌, **65**, 58-70.
- 宮城県 (1997): 長町-利府線断層帯に関する調査. 平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集, 科学技術庁, 30-34.
- 小椋伸幸・掃部 満 (1992): 天北・羽幌地域の石油地質―深部構造特性と炭化水素ポテンシャル―. 石油技術協会誌, **57**, 32-44.
- Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, E. and Satoh, M. (1995): Rifting and basin inversion in the eastern margin of the Japan Sea. *The Island Arc*, **4**, 166-181.
- 佐藤比呂志・平田 直 (2000): 内陸大規模地震の震源断層を探る. 科学, **70**, 58-65.
- 佐藤比呂志・池田安隆 (1999): 東北日本の地殻構造と伸張テクトニクス. 月刊地球, 号外, **27**, 135-141.
- Sato, H., Ikeda, Y., Imaizumi, T., Mikada, H., Tsutsumi, H., Koshiya, S., Togo, M., Toda, S., Kawamura, T., Matsuta, N., Yanagi, H., Itoh, T., Miyauchi, T., Orgren, C., Shishikura, M., Suzuki, H., Soeda, Y., Noda, K., Yagi, H., Kumamoto, T., Hirata, N., Iwasaki, T., Saka, M., Ichinose, Y., Aoki, Y., Shimizu, N., Ishimaru, K., Sakai, R. and Ikawa, T. (1997): Evolution of the active Senya thrust fault, northern Honshu, Japan. *Abstr. Seis. Soc. Japan*, No. 2, 117.
- Sato, H., Hirata, N., Ito, T., Tsumura, N. and Ikawa, T. (1998): Seismic reflection profiling across the seismogenic fault of the 1995 Kobe earthquake, southwestern Japan. *Tectonophysics*, **286**, 19-30.
- Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., Matsubara, M. and Ikawa, T. (2002): Deep seismic reflection profiling across the Ou Backbone Rang, northern Honshu island, Japan. *Tectonophysics*. (in press)
- 島崎邦彦 (2001): 大地震発生の長期的予測. 地学雑誌, **110**, 816-827.
- 島崎邦彦・松岡裕美・岡村 眞・千田 昇・中田 高 (2000): 別府湾の海底活断層分布. 月刊地球, 号外, **28**, 80-84.
- Suppe, J. (1983): Geometry and kinematics of fault bend folding. *Am. J. Science*, **283**, 684-721.
- Tabai, T., Hashimoto, M. and Miyazaki, S. (2001): Subsurface structure and faulting of the Median Tectonic Line, southwest Japan inferred from GPS velocity field. *Abstract for Vientnam 2001 IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly*, 330-331.
- 多田 堯 (1986): 1982年浦河沖地震断層モデルとその地学的意義. 地震2, **40**, 27-37.
- 佃 栄吉 (2001): ナショナルセンターを目指した活断層研究センターの試み. 地学雑誌, **110**, 808-815.
- Woodward, N.B., Boyer, S.E. and Suppe, J. (1989): *Balanced geological cross-sections: An essential technique in geological research and exploration*. Short Course in Geology, AGU, Vol. 6, 132 p.
- 山形県 (1998): 山形県活断層調査―庄内平野東縁断層帯・山形盆地断層帯・新庄盆地断層帯に関する調査―. 第2回活断層調査成果報告会予稿集, 221-224.

(2001年10月15日受付, 2001年11月2日受理)