



## 活断層研究と日本列島の現在のテクトニクス

池田安隆\*

Implications of active fault study for the present-day tectonics of the Japan arc

Yasutaka IKEDA\*

### Abstract

Faulting and other surface deformations in recent geologic time are essentially relevant to understanding present-day tectonic processes, which in turn are a key to *scientific*, not *empirical*, earthquake prediction. Geologic records are indispensable because instrumentally observed records, such as geodetic measurements and microseismicity, are not sufficient in time to cover a whole cycle of strain buildup and release in a orogenic zone.

Rheological structure of the Japan arc based on explosion seismology, heat-flow measurements, and laboratory experiments indicates that the western half of central and northern Honshu, including continental slopes on the Japan Sea side, is mechanically very weak; only the upper 15 kilometers of crustal rocks behaves elastic, and ductile lower crust is underlain directly by asthenospheric mantle. This zone of weakness was rifted and stretched during the early Miocene back-arc spreading event, and coincides broadly with the distribution of active faults. Since late Miocene time up to the present, the Japan arc has been subjected to east-west compression due principally to the westward convergence of the Pacific plate at Japan trench at a rate as high as ~90 millimeters per year.

If the megathrust at the Japan trench is locked, the plate convergence is to be accommodated mainly in this zone of weakness. Actually, geodetic observations in the last 100 years have revealed that strain accumulation rates over the mechanically weak zone are on the order as high as  $10^{-7}$  per year. However, geologically observed strain rates, based on slip rates on active faults and folding rates, are one order of magnitude lower than the geodetic rates. A possible explanation for this discrepancy between short-term (geodetic) and long-term (geologic) observations is that the strain accumulated in the last 100 years at abnormally high rates is likely to be released by slip on the megathrust at Japan trench, which would produce big earthquake(s) with magnitude 8 or greater. Only a fraction of plate convergence may be accommodated within the Japan arc as long-term deformation.

Whether or not the above scenario is real, the process of strain buildup and release in the Japan arc-trench system is unique, and should be understood with more geologic, as well as geophysical, observations.

### はじめに

現在の活断層研究には、大別して二つの流れがある。一つは、最近の地質時代における活断層の挙動を、過去に発生した地震一つ一つを識別するレベルまで時間解像度を高めて研究しようとする流れであり、これは古地震学 (paleoseismology) という呼び名で一括できよう。活断層のセグメンテーション問題やグルーピング問題も、広

い意味でこれに含めておこう。もう一つは、島弧や大陸のテクトニクスの研究の中に活断層研究を位置づけようとする流れである。

トレンチ法による断層の活動履歴の研究に代表される古地震学的な活断層研究は、現在世界的な流行であり、活断層研究の主要な流れであるかのような印象さえ受ける。古地震学が盛んであることの本質的な理由は、これが長期的な地震危険度予測に結びつくからである。地震予知に力を注いで防災対策の手をゆるめるといった戦略を採ったとすれば、

\*東京大学理学系研究科地理学教室

\*Department of Geography, University of Tokyo

それは明らかな誤りである。しかし、耐震構造建築物の普及に十分な予算をつぎ込む余裕のない発展途上国にとって、古地震学的手法による長期的地震予知は、我々日本人が想像する以上に重要な意味を持っている。今後は、現時点で確立された技術を用いて、個々の断層の地震発生履歴に関するデータを蓄積していくことが必要なのは言うまでもない。また同時に、本シンポジウムで議論されたようなトレンチ法の問題点や、断層のセグメンテーション問題、グルーピング問題等を解決するための基礎的な研究を進めることが重要な課題である。このような古地震学的データは、断層の破壊プロセスのモデル化に重要な拘束を与えるであろうし、逆に破壊プロセスの理論や地震学的観測事実はセグメンテーション問題やグルーピング問題等の解決に必要不可欠であろう。

活断層研究のもう一つの流れは、島弧や大陸のテクトニクスの研究の中に活断層研究を位置づけようとするものである。その様な研究の一つに、活断層が発達する場とその歴史性を明らかにしようとする試みがある。北部フォッサマグナや東北日本の内帯に発達する逆断層群の多くは、中新世前期における日本海の拡大に伴って張力で引き延ばされた大陸地殻の中に生まれた正断層であった。数Ma以降、日本列島は東西に強く圧縮されるようになり、その結果、かつて正断層として生まれた断層が逆断層や横ずれ断層となって再活動を始めた。奇妙なことに、現在沢山の活断層が分布している地域は、日本海の拡大時に中途半端に大陸地殻が引き延ばされて薄くなったところに一致していて、極端に引き延ばされた結果海洋の地殻ができた日本海盆は現在極めて安定で変形が少ない(佐藤, 1996)。日本列島の活断層の分布密度はなぜ大きいのか、その分布パターンはどの様に決まったのか、といった問題に答えるには、少なくとも中新世から現在までの日本列島のテクトニクスを総合的にとらえようとする視点が必要であろう(池田ほか, 1996)。

島弧や大陸の「現在」のテクトニクスを明らかにする上でも、活断層研究の役割は重要である。活動的な島弧や造山帯における「現在」のテクトニクスを明らかにするためには、測地学的なデータや地震学的なデータだけでは観測期間が短すぎるので、最近の地質時代の地表変形(活断層や活褶曲)に関するデータが重要である。本報告では、島弧における歪みの蓄積と解放の過程に焦点を当てて、日本列島の現在のテクトニクスを研究する意義について論じてみよう。

#### プレート境界断層の挙動

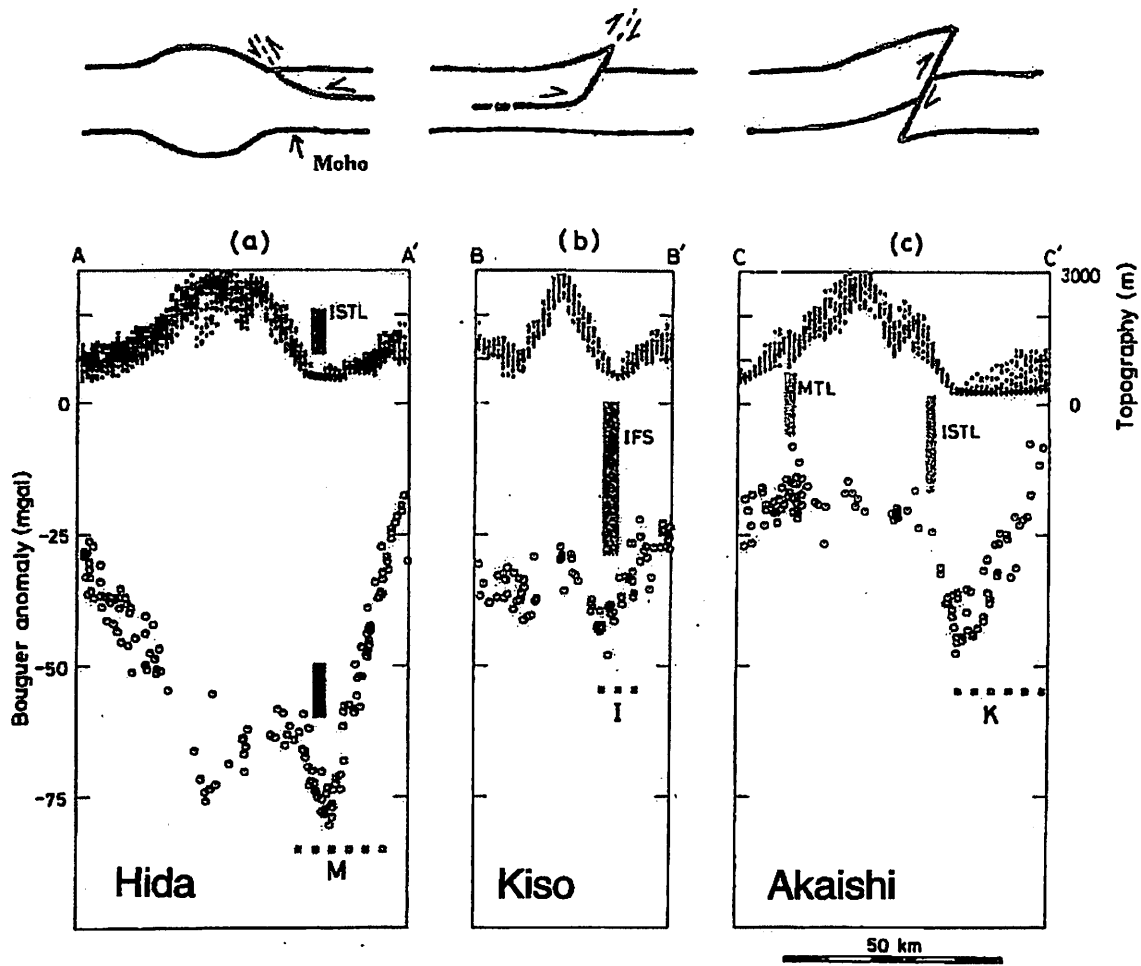
大陸や島弧のプレートの中で地震が発生するのは15-

20kmぐらいの深さの上部地殻の中だけで、下部地殻やマントルの中では地震が起こらない。上部地殻中では歪みが弾性的に蓄積され、それが地殻の破壊強度を超えると断層運動(seismicな)が起こって歪みを解消する。一方、ductileな下部地殻では急激な破壊が起こらない。San Andreas断層上での地質学的な(過去約1万年間の)平均すべり速度と、断層をまたぐ数十~百数十kmの幅の領域で観測される測地学的な(過去約20年間の)相対変位速度とは、驚く程良く一致する。これは、クリープすべりが生じているセグメントだけでなく、大地震を伴って間欠的にすべる(普段は完全に固着している)セグメントにおいても同様である。

U.S. Geological Surveyは、1973年頃からCalifornia州の中・南部で三辺測量をくり返し実施し、San Andreas断層周辺の測地水平変動を観測している(例えば、Lisowski et al., 1991)。その結果によれば、San Andreas断層を中心として幅40-100km位の範囲に、断層に平行する方向の(右ずれ)剪断歪みが蓄積していることが分かった。San Andreas断層をはさんだ両側のブロック間の相対変位速度は、"Big Bend"(Carizo PlainからTransverse Rangesまで)の部分で18-22mm/yrとやや小さいことを除けば、San FranciscoからSalton Seaまで31-38mm/yrの極めて一様な値を示す(Lisowski et al., 1991)。これはクリープすべりが生じているセグメントでも例外ではない。

一方、San Andreas断層は、クリープすべりが生じているセグメントを除くほとんどの区間が、普段は固着(lock)しており、100-300年に一度起こる大地震にともなって最大10mずつのずれを生じる(例えば、Niemi and Hall, 1992; Sieh, 1978a, 1978b, 1984; Sieh et al., 1989; Sieh and Williams, 1990)。地形・地質学的方法で決定したSan Andreas断層帯上での過去約1万年間における平均すべり速度は、 $34 \pm 4$ mm/yrぐらいの大きな値を示す(Budding et al., 1991; Clark et al., 1984; Niemi and Hall, 1992; Perkins et al., 1989; Prentice et al., 1993; Sieh and Jahns, 1984; Weber and Cotton, 1981; Weldon and Sieh, 1985)。重要なことは、この様な動きがSan Andreas断層上だけ、またはそれに併走する高々1~3本の断層上で生じていることである。

この様な現象は、San Andreas断層の断層面が下部地殻またはそれ以深まで達していて、そこでは定常的にクリープすべりが生じている事を示している(例えば、Thatcher, 1990)。断層面の固着している部分の厚さは、地表歪みの生じる領域の幅の数分の1程度になる。従って、測地学的な観測データと比較すると、固着部分の厚さ



第1図。(下) 飛騨・木曾・赤石の3つの山脈を東西に横切る地形と Bouguer 重力異常断面 (Yamamoto et al., 1982)。ISTL, 糸魚川静岡線; IFS, 伊那谷断層帯; M, 松本盆地; I, 伊那谷; K, 甲府盆地。(上) 飛騨・木曾・赤石山脈の推定地殻構造 (池田, 1996)。飛騨山脈は地殻の「根」を持ちその浮力で支えられたタイプの山脈である。糸魚川静岡構造線北部は東傾斜の左ずれ逆断層であるから、飛騨山脈の隆起とは無関係である。赤石山脈は正の Bouguer 異常があるので、山脈下ではモホ面が浅いらしい。糸魚川静岡構造線南部は西傾斜の逆断層であり、地殻全体を断ち切る根の深い断層である可能性が高い。このタイプの山脈は、日本では他に日高山脈だけである。木曾山脈は根の浅い listric な断層によって傾動隆起した山脈である。中部・近畿地方の断層地塊山脈は、ほとんどすべて木曾山脈タイプである。

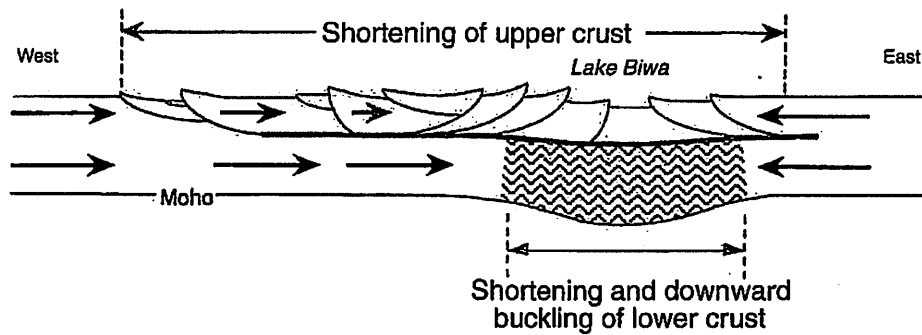
は10~20kmぐらいになるであろう。この値は、微小地震の分布から推定される脆性的な地殻の厚さ(地震発生層の厚さ)と良く一致している。この値から計算される下部地殻でのクリープすべり速度は、約40mm/yr程度となり、プレート運動モデル (DeMets et al., 1990) から期待される速度48mm/yrとかなり良く一致する。足りない分は、内陸部 (Basin and Range 地域など) における広域的なプレート内変形でまかなわれているものと推定される。また、測地変位速度と地質学的な断層面上でのすべり速度とが一致することは、上部地殻内での非弾性的な変形が無視できるほど小さく (Lisowski et al., 1991), プレート相対運動のほとんどが断層面上で生じていることを

意味する。同じく横ずれ型プレート境界断層である北 Anatolia 断層でも、同様な現象が観測されている (池田ほか, 1994)。

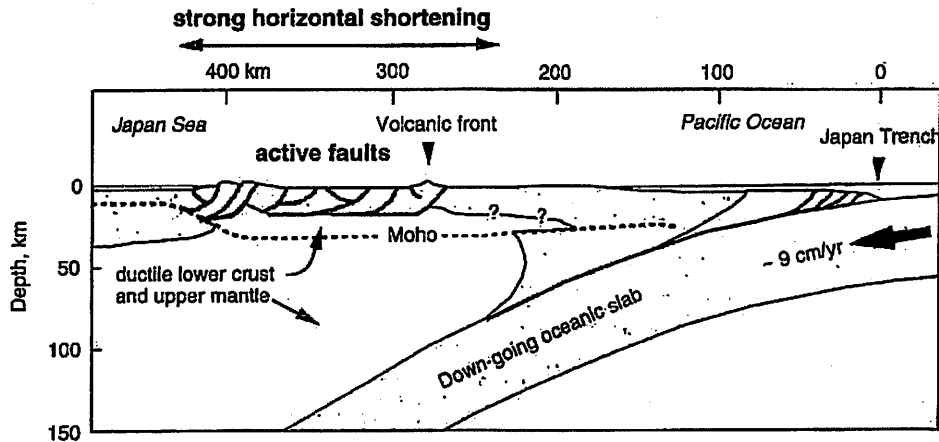
### 日本列島の「現在」のテクトニクス

このように、大陸のプレート境界で起こっている歪みの蓄積と解放の過程は、極めて単純であるらしい。ところが、日本列島で起こっている地殻歪みの蓄積と解放の過程は、一筋縄で説明できそうにない。

日本列島の陸域に発達するプレート内断層の大部分は、San Andreas 断層のように下部地殻まで達する「根の深



第2図. 近畿三角帯を東西に横切る推定地下構造 (池田, 1992a, 1992b). 太実線は、上部地殻と下部地殻の間に想定される大規模なデコルマン。波線模様は、水平短縮で厚くなりかつ東西圧縮力によって下方に buckling した下部地殻。近畿三角帯の地下では、モホ面が周囲より4-8 km 深いにも関わらず地形は低く、広い範囲にわたって負のフリーエア異常を示す。これは、この地域の地殻がアイソスターに逆らって強制的に下方へ押し込まれていることを示す。若狭湾岸の沈水地形に示されるように、この地域はかつて (鮮新世の初め頃まで) かなりの起伏の山地であったがその後沈降に転じたらしい。



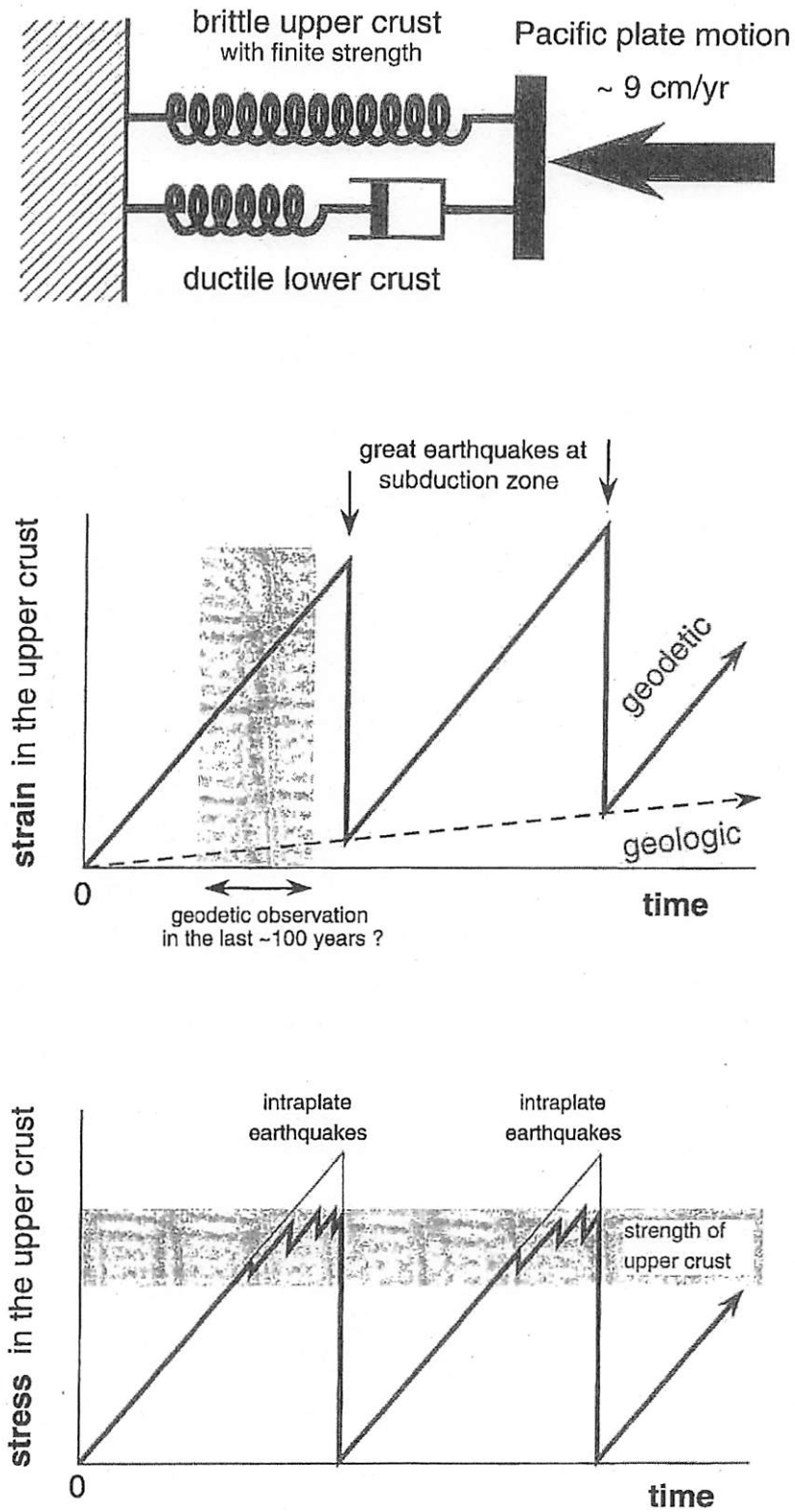
第3図. 東北日本を東西に横切る強度断面 (嶋本, 1989を簡略化) と、活断層の模式的な geometry. 砂目は強度の高い部分。

い」断層ではなくて、上部地殻内だけに発達する「根の浅い」断層ではないかと考えられる証拠がある (池田, 1992a, 1992b, 1994; 第1図)。木曾山脈は、顕著な傾動隆起を示す幅15km前後の細長い山脈であり、東縁を伊那谷断層帯 (低角スラスト) で境される。Moho面まで達する深い断層では、このように短波長の変形は生じ得ない。従って、木曾山脈の短波長の傾動隆起はlistricな断層に沿う地塊の回転によって最も合理的に説明できる。中部・近畿地方の断層地塊山脈は、(1) 山脈の幅が狭く (10kmないしそれ以下)、(2) 傾動を伴い、(3) 地殻の「根」がないことから判断して、ほとんどすべて木曾山脈タイプである (例えば、養老・鈴鹿・金剛・和泉山脈など)。これらの山脈を隆起させた断層は根が浅く、多分 brittle-ductile transition zone 付近に発達すると予想される大規模なデコルマンに収斂し、下部地殻では上部地殻とは全く独立に ductile な変形が生じている可能性がある

(第2図)。

日本列島において過去百年間の測量によって観測された歪み速度は、およそ  $10^{-7}/\text{yr}$  のオーダーである (例えば、橋本, 1990)。一方、活断層の平均すべり速度から計算される第四紀の平均歪み速度 (Wesnousky et al., 1984; Kaizuka and Imaizumi, 1984)、新第三紀・第四紀の地層の変形量から見積もった鮮新世以降の歪み速度 (Sato, 1994)、および過去400年間の歴史地震に伴う地震モーメント解放量から見積もった歪み速度の3者は、 $10^{-8}/\text{yr}$  のオーダーであり、測地歪みよりおよそ一桁も小さい。

日本列島の地殻変動は、基本的には、太平洋プレートが本州を含むプレートを押し縮めることによって生じる。日本列島の背後にある日本海と中国大陸のプレートは、ほとんど未変形である。一方、日本海東縁の大陸斜面を含む日本列島内帯は、lithospheric mantle を欠くために変形しやすらしい (第3図)。したがって、日本海溝のプレ



第4図。(上)日本列島における地殻歪みの蓄積と解放の過程を説明する単純なモデル。上部地殻と下部地殻は、力学的に decouple しているものとする。(中)日本列島内帯の上部地殻の歪み。地質学的に観測される低速度の歪みは、下部地殻の流動を反映している。(下)上部地殻内の応力。上部地殻内の応力が高まると、内陸活断層が動いて応力の一部を解消する。日本海溝で「たが」がはずれる(プレート境界断層が動く)と、上部地殻内の応力は一気に低下する。

ート境界断層が固着して滑らなければ、9cm/yr位の速さで西進する太平洋プレートの運動は、ほとんどすべて日本列島が縮むことによって吸収される。その結果我々は異常に大きな歪み速度を観測することになるだろう。もしそうだとすれば、過去100年以上蓄積されてきた大きな歪み(弾性歪み)の大部分は、将来日本海溝で起こるプレート境界地震によって解放されると考えられる(第4図)。地質学的に観測されるゆっくりとした地殻歪みの蓄積は、上部地殻内ではプレート内活断層の活動によって、下部地殻内ではductileな流動によって生じる永久変形であると考えられる(第4図)。

このシナリオが事実かどうかは、将来蓄積されるであろう活断層や活褶曲の変位速度のデータとGPS測量のデータなどによって明らかにされるであろう。いずれにしても、日本列島における地殻歪みの蓄積と解放の過程は、大陸のプレート境界でのそれとは異なるユニークなものであり、日本の地球科学が学際的な研究によって貢献できる重要なテーマであると考えられる。さらに、この種の問題を解明こそが、地震予知を学問的に実現する近道ではないだろうか。

#### 文 献

- 橋本 学, 1990, 測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪み速度 (I): 本州・四国・九州. 地震, 43, 13-26.
- 池田安隆, 1992a, 下部地殻の変形とそれに起因する地表変形: 近畿三角帯の第四紀テクトニクス試論. 月刊地球, 14, 348-349.
- 池田安隆, 1992b, 日本の逆断層: flake tectonicsの可能性について. 月刊地球(号外), 5, 117-120.
- 池田安隆, 1996, 飛騨山脈の形成に関する地形学的観測事実. 月刊地球, 18, 72-76.
- 池田安隆・島崎邦彦・山崎晴雄, 1996, 活断層とはなにか. 東京大学出版会, 220p.
- 池田安隆・Herece, E.・隈元 崇, 1994, 北アナトリア断層西部の完新世後期の活動度に関する調査. 地学雑誌, 103, 404-408.
- Budding, K.E., Schwartz, D.P., and Oppenheim, D.H., 1991, Slip rate, earthquake recurrence, and seismogenic potential of the Rodgers Creek fault zone, northern California. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 447-450.
- Clark, M.M., Harms, K.K., Lienkaemper, J.J., Harwood, D.S., Lajoie, K.R., Matti, J.C., Perkins, J.A., Rymer, M.J., Sarna-Wojcicki, A.M., Sharp, R.V., Sims, D.A., Tinsley, J.C., and Ziony, J.I., 1984, Preliminary slip-rate table and map of Late Quaternary faults of California. *U.S. Geol. Survey Open File Rep.*, 84-106.
- Demets, C., Gordon, R.G., Argus, D., and Stein, S., 1990, Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- Kajizuka, S., and Imaizumi, T., 1984, Horizontal strain rates of the Japanese Islands estimated from Quaternary fault data. *Geogr. Rep. Tokyo Metropol. Univ.*, 19, 43-65.
- Lisowski, M., Savage, J.C., and Prescott, W.H., 1991, The velocity field along the San Andreas fault in central and southern California. *J. Geophys. Res.*, 96, 8369-8389.
- Niemi, T.M., and Hall, N.T., 1992, Late Holocene slip rate and recurrence of great earthquakes on the San Andreas fault in northern California. *Geology*, 20, 195-198, 1992.
- Perkins, J.A., Sims, J.D., and Sturgess, S.S., 1989, Late Holocene movement along the San Andreas fault at Melendy Ranch: Implications for the distribution of fault slip in central California. *J. Geophys. Res.*, 94, 10, 217-10, 230.
- Prentice, C., Niemi, T.M., and Hall, N.T., 1993, *Quaternary Tectonics of the Northern San Andreas Fault, San Francisco Peninsula, Point Reyes, and Point Arena, California*. Geology Field Trip Guidebook, U.S. Geological Survey.
- Sato, H., 1994, The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *J. Geophys. Res.*, 99, 22261-22274.
- 佐藤比呂志, 1996, 日本列島のインバージョンテクトニクス. 活断層研究, 15, 128-132.
- 嶋本利彦, 1989, 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス—剛体プレートから変形するプレートへ. 科学, 59, 170-180.
- Sieh, K., 1978a, Pre-historic large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallet Creek, California. *J. Geophys. Res.*, 83, 3907-3939.
- Sieh, K., 1978b, Slip along the San Andreas fault associated with the great 1857 earthquake. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 68, 1421-1448.
- Sieh, K., 1984, Lateral offset and revised dates of large prehistoric earthquakes at Pallet Creek, southern California. *J. Geophys. Res.*, 89, 7641-7670.
- Sieh, K.E., & Jahns, R.H., 1984, Holocene activity of the San Andreas fault at Wallace Creek, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 95, 883-896.
- Sieh, K., Stuiver, M., and Brillinger, D., 1989, A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California. *J. Geophys. Res.*, 94, 603-623.
- Sieh, K.E., and Williams, P.L., 1990, Behavior of the southernmost San Andreas fault during the past 300 years. *J. Geophys. Res.*, 95, 6629-6645.
- Thatcher, W., 1990, Present-day crustal movements and the mechanics of cyclic deformation. In: *The San Andreas Fault System, California*, edited by R.E. Wallace, U.S. Geol. Survey Prof. Pap. 1515, 189-205.
- Weber, G.E., and Cotton, W.R., 1981, Geologic investigation of recurrence intervals and recency of faulting along the San Gregorio fault zone, San Mateo County, California. *U.S. Geol. Survey Open File Rep.*, 81-263, 99p.
- Weldon, R.J., & Sieh, K.E., 1985, Holocene rate of slip and tentative recurrence interval for large earthquakes on the San Andreas fault, Cajon Pass, southern California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 96, 793-812.
- Wesnousky, S.G., Scholtz, C.H., and Shimazaki, K., 1982, Deformation of an island arc: rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from

- seismicity and Quaternary fault data. *J. Geophys. Res.*, **87**, 6829-6852.
- Yamamoto, A., Nozaki, K., Fukao, Y., Furumoto, M., Shichi, R., and Ezaka, T., 1982, Gravity survey in the central ranges, Honshu, Japan. *J. Phys. Earth*, **30**, 201-243. (1996年8月24日受付)
- (1996年9月13日受理)

**キーワード**

活断層、歪み速度、歪みの蓄積、歪みの解放、地殻レオロジー

**Key words :** active fault, strain rate, strain buildup, strain release, crustal reology