

活断層研究と内陸地震の長期予測： 阪神淡路大震災以降

遠田 晋次*

Active fault research associated with long-term earthquake
forecasting since the 1995 Kobe earthquake

Shinji TODA*

Abstract

The 1995 Kobe (Hyogo-ken-nambu) earthquake demonstrated three key features for seismic hazard assessment associated with active fault research. The first one is that the surface rupture occurred along the Nojima fault, one of the mapped faults inland Japan. It allowed us to confidently proceed vast amounts of the paleoseismic trenches since 1995. The surveys eventually lead to the publication of the national seismic hazard map in 2005. The second feature is that seismogenic faulting under the city of Kobe did not reach the earth's surface. Most of the destructive inland shocks of M~7 since then are indeed associated with such blind faults. Revisiting the inland earthquakes since 1923, I found that no more than half of the M~7 earthquakes left the surface breaks comparable to the seismic faults. It obviously underestimates the probabilities of M~7 shocks, which is also proven by comparisons between earthquake catalogs and simple summations of probabilities for all active faults. The third point from the Kobe earthquake is the importance of fault geometry which controls rupture initiation, propagation, and termination. Recent studies confirmed that five-kilometer separation of fault spacing works well to estimate the maximum extent of rupture. Intensive paleoseismic studies on several large fault systems, such as the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, reveal that they are composed of several behavioral segments and diverse multi-ruptures in their seismic cycles. To further improve long-term earthquake forecasting, recent development of satellite geodesy and new techniques such as LiDAR (Light Detection And Ranging) has been pervasive for finding hidden active faults. Interdisciplinary approaches to evaluate active faults and inland earthquakes are also required.

* 京都大学防災研究所地震予知研究センター
Earthquake Prediction Research Center, Disaster Prevention
Research Institute, Kyoto University

キーワード：兵庫県南部地震，活断層，内陸地殻内地震，野島断層，地震断層

Key words: Kobe (Hyogo-ken-nambu) earthquake, active fault, inland earthquake, Nojima fault, surface rupture

1. はじめに

1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災（以降、兵庫県南部地震とする）は戦後近代都市を襲った初めての大地震であり、数多くの防災上の教訓を残した。特に、この地震をきっかけに「活断層」という言葉が広く知られるようになり、活断層研究の重要性が地震の専門家だけでなく、一般社会にも理解されるようになった。内陸地殻内地震（以降、内陸地震）の予知予測に「活断層」がクローズアップされてきたのは好ましいことである。しかし、この地震によって、内陸地震と活断層の従来評価について、楽観論と悲観論の2つの側面が露呈された。

楽観的側面は、既知の活断層が活動し地震を起こし予め図示されていた断層トレース沿いで変位が発生した、という事実である。兵庫県南部地震では、淡路島北西岸に約11kmの地表地震断層（以降、地震断層とする）が現れた（栗田・水野, 1998）。これは地震以前より地形地質調査でその存在と活動度が明らかになっていた野島断層（水野・他, 1990）そのものであった。したがって、既知の活断層を徹底的に調査することにより内陸地震の予測が可能であるという期待をもたらした。

一方で、「震災の帯」の一因となった神戸市直下の六甲断層帯は地表に変位をもたらさなかった。野島断層と同等の地震モーメントを放出したにも関わらずである。神戸側だけに限れば、地表に全く断層変位が現れない状態で、内陸被害地震が生じたことになる。活断層が内陸地震発生に素直に対応しないという、いわゆる、伏在断層運動である。すなわち、淡路島側とは対称的に、地形地質情報が直接に震源断層の予測に利用できないという悲観的な側面が示された。実際、震災後15年間に発生した内陸地震によってその重要性がクローズアップされることになる。

著者は、この明石海峡を挟んだ2つの状況が、その後の内陸地震評価の成果と問題点を明示していたとみている。

さらに、兵庫県南部地震に象徴される活断層評価の第3番目のポイントは、断層の分布・幾何形態がもたらす地震規模予測の重要性である。すなわち、一度に地震を起こす断層区間を判断する「断層セグメンテーション・グルーピング問題」である。兵庫県南部地震では、明石海峡の野島断層と六甲断層帯の不連続部分（断層ステップ部分）で破壊が始まり、バイラテラルに破壊が進行し、野島断層では南西端の分岐部分、神戸側では東灘区付近の五助橋断層と甲陽断層がYの字に分岐する部分で止まった（Sekiguchi et al., 2002）。糸魚川-静岡構造線活断層帯などの長大断層や、断層がネットワーク状に密集する地域では、このような断層不連続や屈曲部の評価が重要で、破壊の開

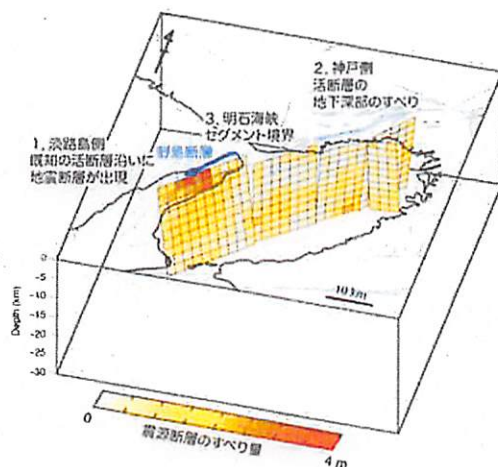


図1 兵庫県南部地震における震源断層と地震断層、および同地震に象徴される活断層評価に関する3つの視点。震源断層モデルはSekiguchi et al. (2002)。既知の活断層は青細線（活断層研究会, 1991）、地震断層（栗田・水野, 1998）は青太線で示す。

始、進展、停止予測に欠かせない要素である。

本稿では兵庫県南部地震に象徴される以上の3点(図1)に注目し、活断層研究と内陸地震の長期予測に関して兵庫県南部地震後15年間の進展と課題についてまとめてみたい。

2. 活断層調査「物量作戦」の成果と内陸地震の確率評価

2.1 兵庫県南部地震以前

約半世紀にわたる活断層研究進展の歴史は、松田(2008)や岡田(2008)に詳しくまとめられている。それによると、1960-70年代は数多くの活断層の発見、その分布やセンスによる応力場推定、活動度や地震規模の推定などが一気に進んだ時代で、その集約が「日本の活断層」(活断層研究会, 1980)の出版とされる。この頃までに大地震発生のポテンシャルを持つ主要な活断層は一通り

発見され、分布や長さとともに平均変位速度による活動度の区分(図2)もある程度実施されていた。重要構造物の耐震設計にも用いられる、いわゆる松田式(断層の長さやマグニチュードの関係式、松田, 1975)が提唱されたのもこの時代である。活動度や歴史地震記録の有無等により、具体的に複数の「要注意断層」(Matsuda, 1981)が抽出されるなど、活断層研究の進展がそのまま内陸地震予測に直結してきた時期でもある。

1980年代からはトレンチ調査法が米国から輸入され、同じく米国で提唱された固有地震モデル(Characteristic Earthquake Model, Schwartz and Coppersmith, 1984)を基に、今後の地震発生の定性的な予測が検討されるようになった(図2)。第四紀後期の地層と断層の関係を観察すれば、その活断層がいつ動いたのか(いつ大地震を発生させたのか)を知ることができる。ただし、断層露頭が見つかる機会は少ないため、断層直上に「トレ

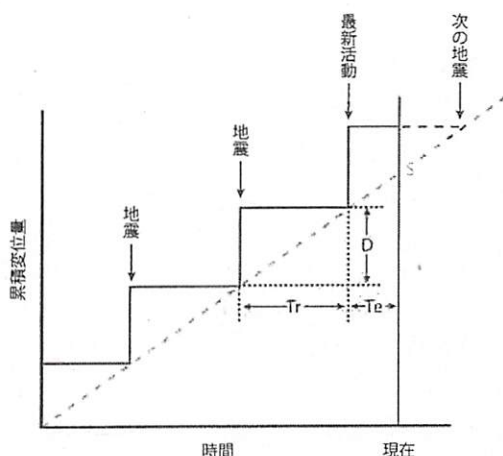


図2 活断層の平均変位速度(S)と変位量、活動間隔(T_r)の関係。地震時変位量(D)は活断層の長さから推定される。 T_r はトレンチ調査等によって直接検出される場合と、間接的にDとSによって推定される場合がある。 T_e は最新活動から現在までの経過時間を示し、 T_r とともに条件付き確率算定のための重要なパラメータとなる。Sはその速度により、A級($S \geq 1\text{mm/年}$)、B級($0.1 \leq S < 1\text{mm/年}$)、C級($0.01 \leq S < 0.1\text{mm/年}$)に活動度が区分される(活断層研究会, 1991)。推本(2005)による主要活断層の基本的な選定基準はB級以上で20km以上の長さを持つ活断層である。



図3 トレンチ壁面に出現した断層(赤線)と古地震を記録した地層境界(黄色線)。糸静線活断層系中央部、長野県富士見町若宮でのトレンチ壁面写真。水系によるグリッドは $1\text{m} \times 1\text{m}$ 。「断層による地層の切断、その後の地層による断層の被覆」により少なくとも2回の地震履歴(地震Iと地震II)を読み取ることができる。

ンチ」といわれる溝を掘って地層断面を調査する。地層が比較的連続的に堆積する場所であれば、大地震で表層の地層が切られた後、新しい堆積物がそれを覆うことで地震発生時期が地層に記録される(図3)。その後、地層中の木片や腐植物などに含まれる放射性炭素同位体による年代測定により発生時期が具体的に絞り込まれる。1980年前後より大学や地質調査所で地層断層や主要活断層でトレンチ調査が行われ(例えば、岡田, 1979), 断層の活動史に関するデータが蓄積されるようになった。松田(2008)によれば、1994年までに約40断層の50地点以上でトレンチ調査が実施されていたという。

以上のことから、すでに兵庫県南部地震以前において、学術的および地震予知の視点からは、活断層における地震発生予測の評価法がある程度確立されていたといえる。

2.2 兵庫県南部地震以降

そのような背景のもと、要注意断層の1つに指摘されていた六甲-淡路島断層帯(原文は Arima-Takatsuki-Rokko fault zone, Matsuda, 1981)が活動し、兵庫県南部地震を起こした。一般への周知や実用的予測という点では問題があったが、この地震によって、これまで実施してきた活断層調査と活動履歴解明による危険度評価がきわめて有効であることが示された。つまり、従来の調査・評価をすべての断層に展開することにより内陸地震の長期予測が可能であるという視座が確立された。よって、その後は主要活断層の活動史解明に力点が置かれるようになる。

兵庫県南部地震は、活断層および内陸地震予測における研究戦略と体制を一変させた。兵庫県南部地震の発生を受けて、地震短期予知悲観論がひろまり、地震予知から長期予測、決定論的予測から確率論的予測へのシフトが進んだ。地震発生確率予測も、トレンチ調査法、固有地震モデルと同様米国(例えば、Working Group on California Earthquake Probabilities, 1995)から少し遅れて日本の活断層評価に導入された。調査研究体制としては、1995年7月の地震防災対策特別措置法制定

により、総理府に地震調査研究推進本部が設置(現・文部科学省に設置、以下推本と略す)され、行政施策に直結する地震調査研究の責任体制の一元化が図られた(推本, 2010)。そのなかで、当面集中的に調査を実施すべき主要98断層帯が選定され、政府交付金による地方自治体、地質調査所(現、産業技術総合研究所)を中心に、精力的な調査が行われ、活動履歴や反射法地震探査による地下地質断面など多くのデータが急速に蓄積された。特に、1999年には「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」が策定され、活断層調査、地震発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成が目標課題として打ち出された。これらに一貫することは、調査研究予算を投資し、徹底的に調査量・データ数を増やすことにより、主要な活断層から発生する大地震をある程度予測できるという姿勢である。

上記主要98断層帯(その後2005年に12断層帯を追加)ではこの15年間に数100以上調査地点でトレンチ掘削が実施された。正確な数を精査した文献は無いが、これらの調査による過去の地震痕跡(古地震)は推本(2010)などの資料をもとに調べた限り、約500地震イベントにのぼる。断層を外したり古地震が検出できなかった調査も勘案し1トレンチ当たり平均で1地震イベントと考えると、約500個ものトレンチ調査が実施された計算になる。兵庫県南部地震以前の約10倍以上の速度で調査データが蓄積されたことになる。2005年にはこれらの調査データが一旦とりまとめられ、主要98断層帯の長期評価(予想されるマグニチュードと30年、50年、100年確率)として公表された(図4)。これらの成果は、海溝型地震などの評価とともに「全国を概観した地震動予測地図」として強震動予測の計算と成果公表へとつながった。

以上のように、兵庫県南部地震をきっかけに集中的かつ大規模な活断層調査が実施され、活断層の地震発生確率予測値が公表された。これは内陸地震評価に関して画期的な成果であり、大きな進歩でもある。

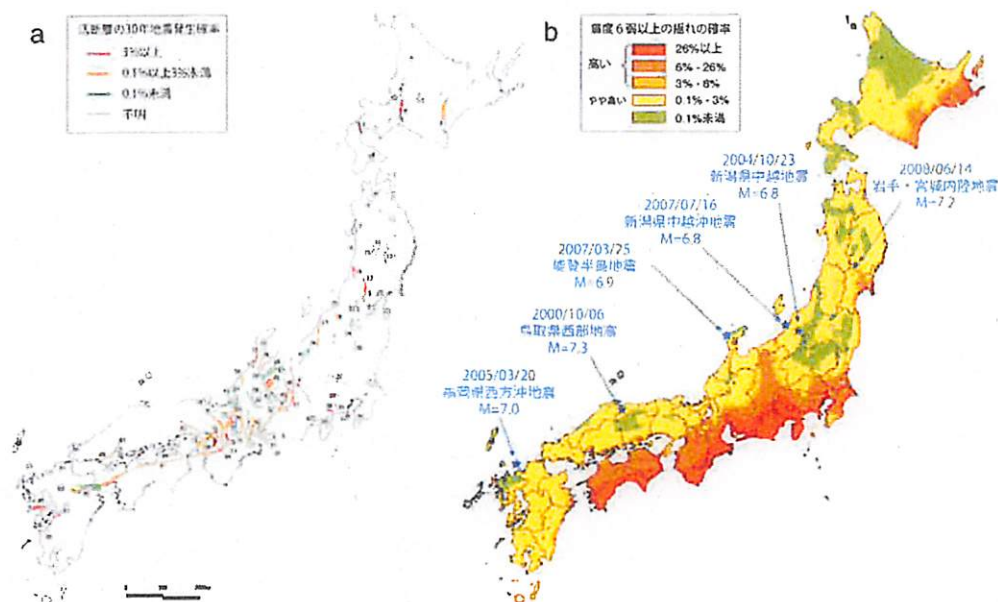


図4 (a) 主要98活断層帯の30年地震発生確率(推本, 2005)。(b) 地震動予測図(推本, 2005)と兵庫県南部地震以降のM6.5以上の内陸被害地震の分布。

しかし、日々の天気予報とは異なり、活動間隔が千年以上の断層活動について、個々の確率値が妥当かどうかを検証することはできない。また、震災以降15年経過した現在、主要活断層沿いでは大地震は発生しておらず、トレンチ調査等の成果についての具体的な検証は行われていない。

おそらく今後数10年間に、主要活断層で大地震が発生したところで、調査した活動履歴が正確かどうか、またそれを基にした確率値が妥当かどうかは検証できないだろう。その替わりとして、以下では、断層の超長期的な活動傾向と最近数回程度の地震活動の間の整合性を見ることで大雑把にトレンチ調査結果の妥当性を検討してみたい。

個々の活断層の確率評価に用いられる時間的パラメータは、平均活動間隔(Tr)、最新活動時期からの経過時間(Te)の2つである(図2)。このうち、 Tr についてはトレンチ調査によって直接検出する(直接法)以外に、地震時の想定変位量(D)と断層の平均変位速度(S)から以下の式で間接的に求めることができる(間接法、推本,

2005)。

$$Tr = D/S$$

なお、 D は松田(1975)による断層長(L)とマグニチュード(M)の経験式と、最大変位量(D)とマグニチュード(M)との経験式から導出される。 D が個々の断層長(L)の判断に左右されるという問題はあるが、間接法による Tr は長期間の平均的な活動間隔を表している。

ここでは推本(2010)によって公表されている活断層評価のうち、直接法によって活動間隔が明らかになっている33の断層について、間接法による活動間隔(Ti)と直接法による活動間隔(Td)との比較を試みた(図5)。各断層において、得られた個々の活動間隔はばらついているため、図5には Ti 、 Td ともに幅と平均値を示している。なお、各プロットについては調査密度(断層長10km当たりの調査地点数)によって色分けした。これは、阿寺断層帯や糸魚川-静岡構造線活断層帯など、1980年代から調査が実施されてきた断層で

は、調査数の増加とともに地震イベント数が増え、それに伴い活動間隔が短くなる傾向がみられたためである。すなわち、確率算定に十分な調査数が行われているかを検討する材料になると考えた。

図5を見る限り、ばらつきは大きいものの、回帰直線の傾きは0.84となり、全体としてTiとTdの一致は良い。つまり、トレンチ調査による断層活動の検出過程に顕著な誤りは無いと解釈される。ただし、厳密にはTdがTiに比べ若干長く見積もられている傾向があり、全体として幾分古地震イベントを見落としている可能性が考えられる。調査密度を考慮すると、調査密度が高い（赤点と橙点）断層のうち、別府崩平山断層を除き、TdとTiにはほぼ良い一致が見られるが、調査密度が低い断層では両者のばらつきが大きい。したがって、15年間の大規模な調査をもってしても、多くの断層で依然としてデータが不足している。Teの検出や具体的な活動時期や活動間隔のばらつきを解明するためにも更なる調査データの積み重ねが必要である。

ところで、条件付き確率算定に際して、平均活動間隔と最新活動からの経過時間の2つのパラメータ以外に、活動間隔のばらつき α を設定しなければならない。推本(2005)では確率密度分布にBrownian Passage Time関数(Matthews et al., 2002)を採用し、すべての断層に共通の $\alpha=0.24$ を用いた。これは過去4回以上の地震履歴が明らかかな4つの活断層帯から導き出された値である(推本, 2001)。しかし、この値は他の研究例(例えば, Ellsworth et al., 1999の0.5)に比べて明らかに小さく、断層が比較的規則的に活動していることが前提となっている。石関・隈元(2007)も小さな α を疑問視する指摘を行い、古地震履歴が3回以上得られている19の活断層のデータを用いて、 $\alpha=0.42$ の共通値を導いた。詳しく検討すると、ばらつきの小さなグループと、大きなグループにわけられ、それぞれ0.23と0.70とする方が良いという。地震発生の一連の繰り返しには個々の活断層の特性があり、共通の値を採用すること自体に問題があるのかもしれない。

3. 長大活断層系の重点的調査

兵庫県南部地震以降、M7.3を超える内陸活断層沿いの地殻内地震は発生していない。すなわち、国内では複数の断層が連動するような大地震は最近発生しておらず、長大断層系に関するデータの積み重ねはない。一方、国外では複数の隣接断層が連動するタイプの大地震が発生した(例えば、1999年トルコ、北アナトリア断層帯のイズミット地震、デズジェ地震、2001年チベット、クンルン地震、2002年アラスカ、デナリ地震、2005年パキスタンのカシミール地震、2008年中国の汶川地震など)。これらの地震では、地下の震源断層に対応する明瞭な地震断層が出現した(例えば, Barka et al., 2002)。これらの事例も含め、地震断層トレースと既知の活断層との関係がWesnousky(2006)によって再検討された。その結果、1990年代以降の評価基準となっていた「5 km ルール」(Wesnousky, 1988)に従うことが改めて示された。「5 km ルール」とは、断層不連続部が5 km以上離れた場合、地震時の破壊が進展しないという経験則で、活断層分布から活断層区間(地震規模)を予測する際に使われる。推本(2005)の主要活断層の定義は、「5 km ルール」を国内で検証した松田(1991)の起震断層を基にしている。したがって、断層のグルーピングは適切に行われており、最大地震規模予測においては概ね妥当な区分を行っているといえよう。

一方で、断層の分布や幾何形態だけではなく、詳しい地震発生履歴を組み併せて、長大断層系で起こる地震規模の多様性を評価する努力も実施されてきた。震災以降、特に中央構造線断層帯、六甲-淡路島断層帯、糸魚川-静岡構造線断層帯などで集中的な掘削調査が実施されてきた(例えば、宮腰ほか, 2004)。その結果、長大断層系におけるセグメンテーション区分や、地震サイクル毎の活動区間の変化(すなわち連動パターンの変化)など、詳細な活動様式が明らかになりつつある。例えば、六甲-淡路島断層帯では、兵庫県南部地震に先行する地震活動が1596年の伏見地震であることがトレンチ調査でも検証され、その際に有馬-高槻断層帯、五助橋断層、淡路島の楠本断層、東

浦断層、先山断層が連鎖的に活動したことがわかった(杉山, 1998; Lin et al., 1998)。一方、糸魚川-静岡構造線断層帯(以降、糸静線)では、全長約150 kmの断層帯全45箇所でトレンチ掘削および地層抜き取り調査が実施され、過去約1万年前以降に延べ約90回の古地震イベントが明らかになった(文部科学省研究開発局・他, 2010)。これらのイベントには、地層の欠損や年代測定値誤差により地震発生時期に概ね数10年~数100年程度の幅がある。したがって、隣り合う調査地点で地震発生年代が重なりあう場合であっても必ずし

も同一地震と確証はできないが、可能性は高いといえる。一方で、隣接する断層トレースや調査地点で同時期に活動した証拠がない場合、連動性を否定する積極的な証拠になる。当初糸静線では、最新活動が西暦841年もしくは762年の歴史地震に対応し、全域が活動した可能性が議論されていた(例えば、松田, 1998)。しかし、最近の調査によると、1200年前前後の活動は神城断層(大町)から牛伏寺断層(松本)に限られ、諏訪湖以南では対応する断層活動は検出されていない(文部科学省研究開発局・他, 2010)。つまり、糸静線では必ずしも全体が一度に活動するわけではない。ただし、長大断層系が多数の活動セグメントに区分された場合、最大地震規模は小さくなるが、分割で地震活動を起こすことになり、地震発生頻度(確率)は高くなる。

このように、長大活断層系から発生する地震に関して、調査データの大規模増量によって、セグメンテーション区分や活動区間の多様性など、複雑な地震発生像が得られてきた。また、地質学的時間精度を超えた動的破壊過程を予測するために、より現実的な数値実験等も実施されている(例えば、Kase and Day, 2006)。初期応力条件や複雑な断層形態など、パラメータ値設定に課題はあるものの、断層破壊の伝播、停止等の予測に関する新しい知見が得られつつある。

4. 今後の課題

4.1 兵庫県南部地震以降のM7地震、地表活断層と震源断層

兵庫県南部地震からの最大の課題は、神戸側に見られた震源断層と地表の活断層の関係であった(図1)。強震動を引き起こすほどのすべりにも関わらず、地表に明瞭な地震断層が出現せず、既知の活断層にも明瞭な変位は報告されなかった。このため、地震直後からこの問題を指摘する論調もあった。

兵庫県南部地震の場合は地震断層を生じなかったとはいえ、活動的な活断層帯直下に生じたものである。しかし、その後の15年間、主要活断層帯以外の地域で同様の現象が発生する。すなわち、

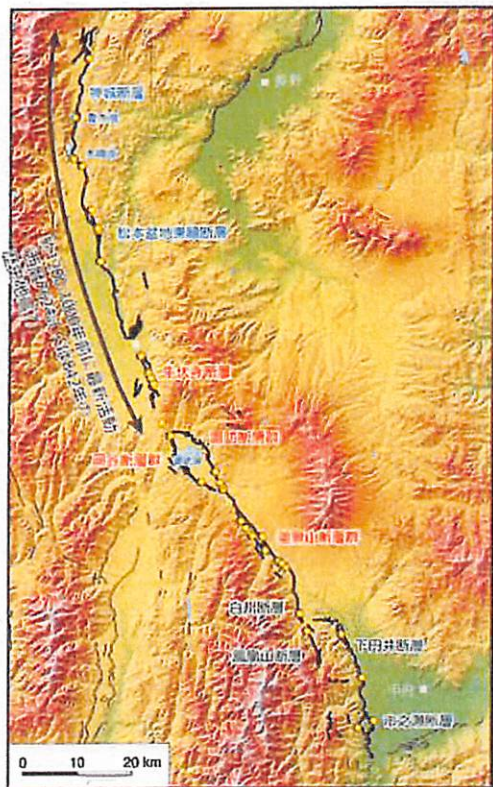


図6 糸魚川-静岡構造線活断層系の分布とトレンチ調査地点。断層線は黒太線、トレンチ調査地点は黄色点で示す。北部区間は東傾斜の逆断層(神城断層、松本盆地東縁断層)、中部区間は主として左横ずれ断層(牛伏寺断層、岡谷断層群、諏訪断層群、釜無山断層群)で、南部区間は西傾斜の逆断層(白州断層、鳳凰山断層、下田井断層、市之瀬断層)からなる。断層の分布と名称は下川・他(1995)による。

地表に明瞭な地震断層を伴わない、もしくは震源断層との対応関係が不明確な地震断層を伴うM7前後の内陸被害地震の続発である(2000年M7.3鳥取県西部, 2004年M6.8新潟県中越, 2005年M7.0福岡県北西沖, 2007年M6.9能登半島, 2007年M6.8新潟県中越沖, 2008年M7.2岩手・宮城内陸地震)。これらは地震動確率予測地図(図4, 推本, 2005)の確率値が相対的に低いゾーン内で発生し、「未知の活断層が動いた」とマスコミ等に批評されることになった。

最近15年間がこのような地震が多発する特殊な状況下にあったのだろうか。この点を明確にするため、遠田(2007)は、内陸地震のマグニチュードと地表地震断層の出現率との関係を再検討した。活断層による変位地形は、(クリープ性の変動が無いと仮定して)過去の地震活動による地表断層変位の累積結果である。そのため、上記の再検討は、活断層調査によって将来発生する内陸地震をどの程度評価できるかを判断する材料にもなる。以下ではその内容を簡単に紹介し、現行の主要活断層調査による確率評価の限界を示す。

遠田(2007)は、気象庁地震カタログに網羅されている1923年以降の地震を用いて再検討を試みた。1923年以降、気象庁地震カタログでM6.5以上の内陸地震は30個発生している(福岡県西方沖地震、中越沖地震など震源域が陸域にない地震は除く)。このうち、地震断層として記載されている内陸地震は11個であり、単純に約1/3が地震断層を生じたことになる。しかし、地震断層の出現状況は単純ではなく、十把一絡げに統計に使用するわけにはいかない。そのため、ここでは地震断層に以下の3段階のランク付けを行った。ランク1は震源断層と地震断層の長さが対応すると思われるもの、ランク2は部分的に震源断層が地表に露出したと考えられるもの、ランク3は連続性に乏しく震源断層の延長である可能性が低いもの、もしくは表層での誘発性変位として説明ができるもの、である。このなかで、地震断層の長さや変位量から地震規模を推定できるのはランク1のみである。検討の結果、M6.5以上の地震でランク1の地震断層を生じた地震はわずか5個で、出現率にしてわ

ずか17%に過ぎなかった(図7)。M7.0以上で出現率は44%となった。つまり、地震断層を基に地震発生事象を推定するならば、M6.5以上では6個に5個、M7.0以上では2個に1個もの見落としを生じる。すなわち、活断層調査によるM6.5以上の地震発生確率は現実の約1/6、M7.0以上では約1/2の過小見積もりとなっている可能性がある。したがって、活断層が未発見の地域でも現実問題としてM7.0前後までの内陸地震を考慮しなければならないことになる。

一方、推本(2005)には主要活断層帯における今後30年間の発生確率(平均値と最大値)、その他の活断層におけるポアソン確率がまとめられている。上記の問題を独立に検証するために、ここでは主要活断層とその他の活断層の想定マグニチュードとその発生確率を用いて、M別の年間地震発生頻度を計算した(図8)。M6.8以上の地震の年間発生率は0.045~0.092(図8の灰丸と黒丸)、M7.0以上の地震の年間発生率は0.032~0.076となる。それぞれ、実際の地震カタログ(宇佐見, 2003と気象庁一元化カタログ)による0.14, 0.11に比べて顕著に低い。既知の活断層を震源としてモデル化することでは、実際に発生する地震の半分程度

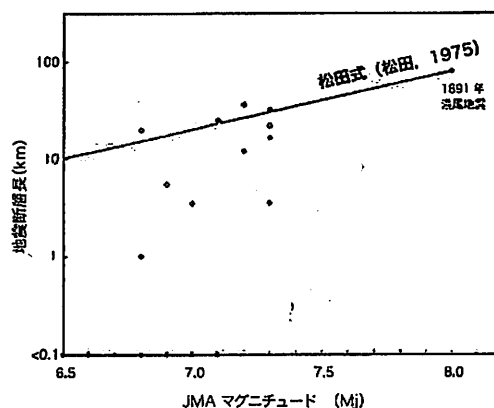


図7 気象庁マグニチュードと地震断層長との関係。1923年以降の陸域直下で発生したM $\geq$ 6.5地震をプロットした。1922年以前ではM8.0の濃尾地震のみを用いている。地震断層を生じた地震数は約1/3で、そのうち松田(1975)に従う地震断層は5断層程度しかない。松田ダイアグラム、Mと地震断層長さの関係。

しか再現できない。つまり、地震断層によって得られた知見と同様の結果となり、多数の伏在断層の存在が疑われる。同様の議論は浅田（1991）により展開され、「C級活断層問題」と提唱された。未だに解明されていない。参考までに、松田（1991）の意見も加えて、C級活断層問題を以下に要約する。

「日本列島に分布する活断層はその活動度により、A・B・C級に分けられる（図2）。単純に考えると、その活動はA級で1000年に、B級で1万年に、C級で10万年に1回となる。最近100年ほどの活断層による地震ではA、B、C級活断層による地震が同数であるから、C級活断層はA級活断層の100倍存在しなければ説明できない。しかし、活断層研究会（1991）では、B級活断層はA級活断層の10倍程度記載されているが、C級活断層はB級よりも若干数が少ない。多くのC級活断層が未発見なのではないだろうか。」

層が未発見なのではないだろうか。」

ところで、地表に明瞭な変位を伴わない地震は地震動評価の面でもきわめて重大な意味を持つ。香川ほか（2004）やKagawa et al.（2004）は、地震観測記録のスペクトル特性について、地表断層地震と伏在断層地震による相違を調べ、伏在断層地震の方が地表断層地震に比べて周期1秒を中心に大きな地震動となることを明らかにしている。周期約1秒の強震動パルスは、いわゆるキラーパルスと呼ばれ、建築物や土木構造物の甚大な被害の主原因とされている。すなわち、同程度の地震規模であれば、地表まで切断しない断層を伴った地震の方が、構造物に及ぼす被害は甚大となる。伏在断層問題は、地震動評価の面でも避けて通ることはできない。

4.2 2010年ハイチ地震と主要活断層の地震発生確率の信頼性

2010年1月12日にハイチ共和国を襲ったMw = 7.0の内陸地震（USGS, 2010）は、あらためて活断層評価の難しさを提示した。同地震の震央は首都ポルトープランスの西南西約20kmのエンリキロ断層沿いに位置する。同地震では、遠地地震解析（例えば、Hayes, 2010）やInSAR解析（例えば、橋本, 2010）により、エンリキロ断層に沿う東西約50kmの断層が逆断層成分を伴った左横ずれ断層運動を起こしたとされている。エンリキロ断層は、北アメリカプレートとカリブプレートの境界の変形帯南縁にあたり、ゴナーブ（Gonave）マイクロプレート南縁を画する主要活断層である（Mann et al., 1995）。同断層の左横ずれ平均変位速度はGPS観測に基づき約7 mm/年とされている（Manaker et al., 2008）。日本の活断層と比較すると、中央構造線活断層帯や糸静線に匹敵する。すなわち、主要活断層で兵庫県南部地震の2倍程度の地震モーメント（八木, 2010）をもつ内陸地震が発生したことになる。ちなみに、八木（2010）によると、断層の大きさはほぼ兵庫県南部地震と同程度なので、断層変位量は約2倍になるとされている。

震源の浅さや地震規模を考えると、エンリキロ

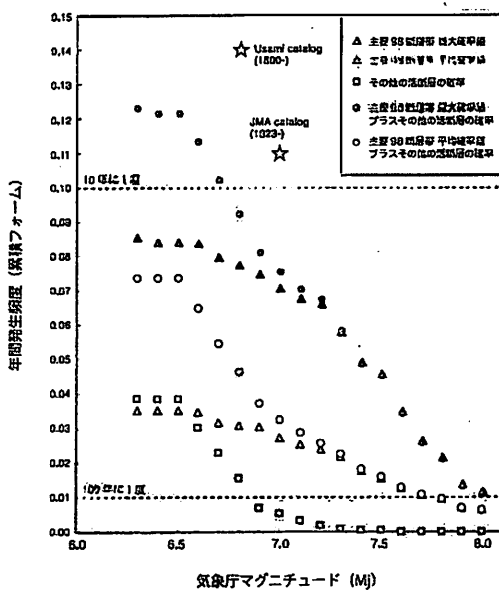


図8 推本（2005）の活断層の確率評価結果を用いて再現した地震発生頻度。最大確率値と平均確率値の両シナリオを活用した。星印は宇佐見（2003）の1800年以降の地震カタログ、および気象庁地震カタログによるM ≥ 6.8とM ≥ 7.0の年間地震発生率を示す。既知の活断層のみによって、カタログの地震頻度を量的に再現することはできない。

断層沿いに地表地震断層の出現が予想された。しかし、地震後に撮影された衛星写真を拡大・精査しても、エンリキ断層沿いのトレース (Mann et al., 1995) に、地震断層の存在を示唆する変位は全く認められなかった。一方で、過去の断層活動による河川の系統的左横ずれ地形や低断層崖などの累積変動地形は認められる。衛星写真における検知限界を考えても、少なくとも50cm程度の変位があれば認識できるはずである。原稿執筆時点 (2010年1月28日) において、現地調査等の詳しい報告はないものの、連続する地震断層の報告はない。一方で、InSAR 解析結果においても、エンリキ断層沿いの明瞭な変位を示唆する干渉縞のオフセットは認められない (橋本, 2010; 宇宙航空研究開発機構, 2010; 国土地理院, 2010)。したがって、今回のハイチ地震のように、 $M_w = 7.0$ に達するほどの地震が主要断層直下に発生しても、兵庫県南部地震の神戸側と同様、地表に痕跡を残さない場合があり得る。このことは、古地震の地表変位痕跡を頼りにした活動履歴調査の信頼性を揺るがす事実である。したがって、主要活断層であっても、トレンチ調査による活動履歴の不完全性を念頭に置くべきであろう。ハイチ地震は、現行のトレンチ調査に基づく地震確率評価の限界を知り今後評価法を改善する上で、きわめて重要な地震であったといえよう。今後、トレンチ調査を補完する調査法の開発や、より現実的な内陸地震の評価法に関するブレイクスルーが必要な時期にきている。

5. おわりに

兵庫県南部地震以降の15年間、内陸地震評価という観点からの活断層調査が急速に進み、それ以前の10倍以上のスピードで古地震データの集積が行われた。また、古地震データから算出された平均活動間隔と最新活動からの経過年をもとに、主要活断層の地震発生確率評価が行われ、「全国を概観する地震動予測地図」作成につながった。実用的な内陸地震防災への第一歩を踏み出したといえる。量から質への転換が期待される時期でもある。しかしながら、活断層調査手法は震災以前と

ほぼ変わらず、確率評価自体も1990年前後からカリフォルニアで実施されてきたものである。全球測位システム (GPS) や合成開口レーダ干渉法 (InSAR) など、宇宙測地技術を取り入れて進展をみせる測地分野や、地震波トモグラフィー等が進展めざましい地震学分野に比べると、調査や評価技術に新たな展開が見られない。

一方で、これらの宇宙測地・リモートセンシング技術は活断層研究にも影響を与えつつあり、一部空中写真に替わって断層地形の抽出や確認作業にALOS等の衛星画像が利用されるようになりつつある。また、InSARによって地震に伴う広域変動が把握できるようになり、現地調査結果との照合だけではなく、震源断層と地震断層の関係がより詳細に議論できるようになった。震源断層周辺のわずかな変動も検知できるため、誘発的な断層運動や褶曲の成長までもが可視化されるようになった (例えば、Nishimura et al., 2008)。さらに、現地調査にフードバックできる情報も得られ、効率的に地震後の調査が実施されるようになった。

活断層の認知・検出に関しては、航空レーザ計測技術 (LiDAR: Light Detection And Ranging) が活躍しつつある。航空レーザ計測は、飛行機またはヘリコプターから地上に向けて発射され、地表面や地物で反射して戻ってきた膨大なレーザパルスから、高密度かつ高精度の三次元デジタルデータを取得する測量技術である (斉藤, 2008)。地表面が樹木や建造物の覆われた場合でも、照射された一発のレーザパルスに対して複数の反射パルスが受信されることから、最後に到達するパルスから地表面までの距離を検出することができ、森林の生い茂る山地内や都市部などで詳細な地形イメージが得られる。国外では既にいくつかの研究事例があり、従来空中写真判読では認められなかった山間部や都市部での断層トレースが新たに発見されるようになった (例えば、Kondo et al., 2008, 丸山・他, 2009, 図9)。

調査に関する新技術だけではなく、内陸地震評価に関しても4節で議論した課題を克服するようなブレイクスルーが必要である。そのためには、

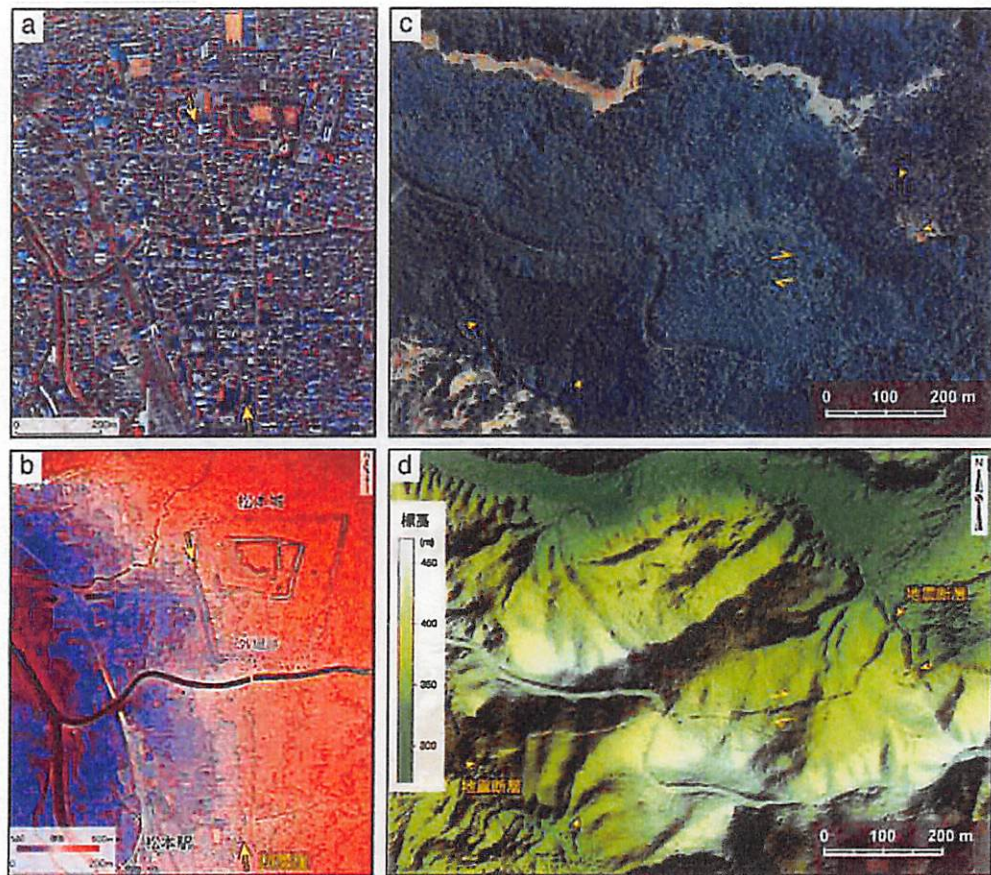


図9 航空レーザ計測データ DEM による断層地形の陰影図。(a) と (b) は、都市部における航空レーザ活用例 (Kondo et al., 2008)。(a) 松本市街地のオルソ写真。写真からは (b) に示す断層崖は見いだせない。(b) 航空レーザ計測による DEM 陰影図。松本市街地を南北に走る低断層崖が認められる。糸静線活断層帯牛伏寺断層の北端にあたる。(c) と (d) は山間部における事例。(c) 宮城県栗原市荒砥沢ダム北方の2008年岩手・宮城内陸地震直後の空中写真 (国土地理院発行 CTO20083-C6-378)。(d) 航空レーザ計測による DEM 陰影図に現れた岩手・宮城内陸地震における地震断層 (丸山・他, 2009)。

地形地質を主とした活断層研究の枠にとらわれず、地震や測地の研究者との相互連携を深め、震源断層と地表活断層との関係を明らかにしていく必要がある。また、予測モデルに関しても、カリフォルニアの UNICERF モデル (Field et al., 2008) に見られるように、地震活動、測地データ、地殻構造、活断層など多層データを融合した地震発生モデルの構築が重要と考えられる。

謝 辞

図5は、地震調査委員会長期評価部会の活断層評価手法等検討分科会において、著者らが参加した地震イベント年代推定ワーキンググループでの作業・議論に基づくものである。特に、国土地理院の石岡隆幸氏、産業技術総合研究所活断層・地震研究センターの吾妻 崇氏にはデータ収集作業を手伝っていただき、有益な議論をさせていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 浅田 敏：活断層に関する2～3の問題。活断層研究, 9: 1-3, 1991.
- 栗田泰夫・水野清秀：1万分の1兵庫県南部に伴う地震断層ストリップマップー野島・小倉及び灘川地震断層ー説明書。構造図(12), 地質調査所, 74p, 1998.
- Barka, A.H.S. Akyuz, E. Altunel, G. Sunal, Z. Cakir, A. Dikbas, B. Yerli, R. Armijo, B. Meyer, J.B. de Chabaliar, T. Rockwell, J.R. Dolan, R. Hartleb, T. Dawson, S. Christofferson, A. Tucker, T. Fumal, R. Langridge, H. Stenner, W. Lettis, J. Bachhuber, and W. Page: The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M7.4), North Anatolian fault, Bull. Seismol. Soc. Amer., Vol.92, pp.43-60, 2002.
- Ellsworth, W.L., M.V. Matthews, R.M. Nadeu, S.P. Nishenko, P.A. Reasenber, and R.W. Simpson: A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities, USGS Open-File Report, Vol.99-522, 1999.
- Field, E.H., T.E. Dawson, K.R. Felzer, A.D. Frankel, V. Gupta, T.H. Jordan, T. Parsons, M.D. Petersen, R.S. Stein, R.J. Weldon II, and C.J. Wills: The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 2 (UCERF 2), USGS Open File Report 2007-1437, <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1437/>, (参照2010-2-11), 2007.
- 橋本 学：「だいち」PALSARで捉えた2010年1月13日ハイチ地震に伴う地殻変動, <http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~hasimoto/Manabu/haiti_SAR.htm>, (参照2010-2-5), 2010.
- Hayes, G.: Finite fault model: updated result of the Jan 12, 2010 Mw 7.0 Haiti earthquake, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010rja6/finite_fault.php>, (参照2010-2-5), 2010.
- 石岡隆幸・隈元 崇：地震調査委員会の活断層評価の結果を基にした地震発生間隔のばらつきの解析。活断層研究, Vol. 27, pp. 63-73, 2007.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：長期的な地震発生確率の評価手法について, 99p., 2001.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図。報告書, 121p., 2005.
- 地震調査研究推進本部, 地震調査研究推進本部：地震による軽減を目指して, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>, (参照2010-2-12), 2010.
- 香川敬生・入倉孝次郎・P.G. Somerville：地表断層と潜在断層の地震動と断層破壊, 月刊地球, 号外 No. 46, pp. 232-237, 2004.
- Kagawa, T., K. Irikura, and P.G. Somerville: Differences in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquakes, Earth Planet and Space, Vol.56, pp.3-14, 2004.
- Kase, Y. and S. Day: Spontaneous rupture processes on a bending fault, Geophys. Res. Lett., 33, L10302, doi:10.1029/2006GL025870, 2006.
- 活断層研究会：「日本の活断層ー分布図と資料」, 東京大学出版会, 363p., 1980.
- 活断層研究会：「新編日本の活断層ー分布図と資料」, 東京大学出版会, 437p., 1991.
- 国土地理院：2010年1月12日ハイチ共和国の地震に伴う地殻変動：合成開口レーダー（SAR）解析による地殻変動と断層, <<http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic100112-index.html>>, (参照2010-2-5), 2010.
- Kondo, H., S. Toda, K. Okumura, K. Takada, and T. Chiba: A fault scarp in an urban area identified by LiDAR survey: A case study on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan, Geomorphology, Vol.101, pp.731-739, doi:10.1016/j.geomorph.2008.02.012, 2008.
- Lin, A., T. Maruyama, and T. Miyata: Paleoseismic events and the 1596 Keicho-Fushimi large earthquake produced by slip on the Gosukebashi fault at the eastern Rokko Mountains, Japan. Isl. Arc Vol.7, pp.621-636, 1998.
- 丸山 正, 遠田晋次, 吉見雅行, 小俣雅志：2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層沿いの詳細地形ー地震断層・変動地形調査における航空レーザ計測の有効性ー, 活断層研究, Vol. 30, pp. 1-12, 2009.
- Manaker, D.M., E. Calais, A.M. Freed, S.T. Ali, P. Przybylski, G. Mattioli, P. Jansma, C. Prepetit, and J.B. de Chabaliar: Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean, Geophys. J. Int., Vol.174, pp.889-903, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03819.x, 2008.
- Mann, P., F.W. Taylor, L. Edwards, and T.L. Ku: Actively evolving microplate formation by oblique collision and sideways motion along strike-slip faults: An example from the northwestern Car-

- ibbean plate margin, *Tectonophysics*, Vol.246, pp.1-69, 1995.
- 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について, *地質*, 2, Vol. 28, pp.269-283, 1975.
- Matsuda, T.: Active faults and damaging earthquakes in Japan-Macroseismic zoning and precaution faults zones, *M. Ewing Ser. 4, Amer. Geophys. Union*, pp.279-289, 1981.
- 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図, *地震研究所彙報*, Vol. 65, pp. 289-319, 1990.
- 松田時彦：浅田先生のコメントに対するお答え, *活断層研究*, Vol. 9, pp. 4-5, 1991.
- 松田時彦：活断層からの長期地震予測の現状－糸魚川－静岡構造線活断層系を例にして－, *地質*, 2, Vol. 50, 別冊 pp. 23-33, 1998.
- 松田時彦：活断層研究の歴史と課題, *活断層研究*, Vol. 28, pp. 15-22, 2008.
- Matthews, M.V, W.L. Ellsworth, and P.A. Reasenberg: A brownian model for recurrence earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol.92, pp.2233-2250, 2002.
- 宮腰勝義, 上田圭一, 幡谷竜太, 阿部信太郎, 三浦大助, 濱田崇臣, 青柳恭平, 井上大榮：地震規模評価のための活断層調査法・活動性評価法, *電力中央研究所報告*, 総合報告：U46, 189p., 2004.
- 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩：明石地域の地質, *地域地質研究報告* (5万分の1地質図幅), *地質調査所*, 90p. 1990.
- 文部科学省研究開発局・国土地理院・東京大学地震研究所：糸魚川－静岡構造線断層帯における重点的な調査観測, *平成21年度成果報告書*, 印刷中, 2010.
- Nishimura, T., M. Tobita, H. Yarai, T. Amagi, M. Fujiwara, H. Une, and M. Koarai: Episodic growth of fault-related fold in northern Japan observed by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.35, L13301, doi:10.1029/2008GL034337, 2008.
- 岡田篤正, 安藤雅孝, 仙 為成：トレンチ発掘による活断層の調査, *月刊地球*, Vol. 1, pp. 608-615, 1979.
- 岡田篤正：日本における活断層調査研究の現状と展望, *活断層研究*, Vol. 28, pp. 7-13, 2008.
- 斉藤和也監修：「図解航空レーザ計測」, *財団法人日本測量調査技術協会*, 208p. 2008.
- Schwartz, D.P and K.J. Coppersmith: Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, *J. Geophys. Res.*, Vol.89, pp.5681-5698, 1984.
- Sekiguchi, H., K. Irikura and T. Iwata: Source inversion for estimating continuous slip distribution on the fault -Introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults, *Geophys. J. Int.*, Vol.150, pp.377-391, 2002.
- 下川浩一・水野清秀・井村隆介・奥村晃史・杉山雄一・山崎晴雄：糸魚川－静岡構造線活断層系トリップマップ, 10万分の1構造図 (11), *地質調査所*, 1995.
- 杉山雄一：活断層・古地震研究の現状と今後の課題, *地質ニュース*, Vol. 523, pp. 12-20, 1998.
- 遠田晋次：「未知の活断層」を評価する試み, *地質調査総合センター研究資料集*, No. 458, pp. 21-26, 2007.
- 宇佐見龍大：最新版日本被害地震総覧 [416]-2001, *東京大学出版会*, 605p., 2003.
- USGS: Magnitude 7.0-Haiti region, 2010 January 12 21:53:10 UTC, <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010rja6/>>, (参照2010-2-5), 2010.
- 宇宙航空研究開発機構：陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)搭載のLバンド合成開口レーダ(PALSAR: パルスアー)によるハイチ地震にともなう緊急観測 (3). <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_pal_haiti_100126.htm>, (参照2010-2-5), 2010.
- Wenousky, S.G.: Seismological and structural evolution of strike-slip faults, *Nature*, Vol.335, pp. 340-343, 1988.
- Wenousky, S.G.: Predicting the endpoints of earthquake ruptures, *Nature*, Vol.444, pp.358-360, doi:10.1038/nature05275, 2006.
- Working Group on California Earthquake Probabilities: Seismic hazards in southern California: Probable earthquakes, 1994 to 2024, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol.85, pp.379-439, 1995.
- 八木勇治：2010年1月12日 (UT) ハイチで発生した大地震 (暫定), <<http://www.geol.tsukuba.ac.jp/yagi-y/EQ/20100112/>>, (参照2010-2-5), 2010.

(投稿受理：平成22年2月15日)