

[再録] 2009年2月号より

地震と活断層: その関係を捉え直す

島崎邦彦

しまざき くにひこ
東京大学地震研究所(当時)(地震学)/現・原子力規制委員会委員

地震と活断層の関係は、地下の震源断層の情報が地表に活断層地形として現われていることを基本として、論じられてきた。しかし2008年岩手・宮城内陸地震は、この仮定がまったく成り立たないことを示している。地下の震源断層に比べて、地表で認められる活断層の長さは著しく短い。また、予想に反して活動度は決して低くない。新たな評価手法が求められている。

震源断層、地表地震断層、そして活断層

日本およびその付近で発生する地震の震源は、海溝型と直下型に分類されることが多い。直下型はいわば、われわれの足下に震源がある地震である。日本列島の地殻内、足下の深さ約15 km(一部地域では深さ20 km)までの、地震発生層と呼ばれる部分で起こる*1。1995年(平成7年)阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震のように、直下型地震は、これまでしばしば大きな被害をもたらしてきた。この兵庫県南部地震の後も、2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖の地震、2007年能登半島地震、同年中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震と、次々と直下型の地震が起きて被害をもたらしている。

被害は主に強烈な揺れによってもたらされる。この揺れ、すなわち地震の波の生成は、地下の岩

盤が破壊して急速にずれることによる。直下型地震は、地殻上部あるいは地震発生層と呼ばれる厚さ15~20 kmの部分の破壊に他ならない。プレートの運動によって地下の地震発生層にひずみエネルギーが蓄積されていき、それが破壊(地震)によって一気に解消される。すなわち、ひずみエネルギーが震動のエネルギーに転換される。このとき破壊とともに、毎秒数十 cm 程度で岩盤がずれる。ずれの大きさは、阪神・淡路大震災を起こした兵庫県南部地震で1~2 m、破壊面のひろがりには差し渡し40~50 km、上下に15 kmにも及ぶ。この破壊面は、地層をずらし断層をつくるので、断層面とも呼ばれる。この面のすべてから地震の波が発生する。すなわち、断層面全体が震源(地震波発生の源)である。震源がひろがりをもっているため、震源域と呼ばれることが多い。気象庁が決定する震源は点だが、それは震源域の中で最初に破壊する部分を示しているにすぎない。

この震源域のひろがり(長方形で近似すれば、長さや幅)や、ずれの量は、震源の規模を示している。この規模を示すマグニチュードを M とすれば、断層の長さ L (km)は、 $L=10^{0.6M-2.9}$ で表される。これは松田(1975)¹による経験式で、マグニチュードと活断層の長さとの関係を表すものとして、広く使われてきた。とくに、活断層で発生する地震の規模を予測する場合に用いられている。松田式と呼ばれるこの関係によると、活断層の長さが20 kmで $M7.0$ 、40 kmで $M7.5$ 、80 kmで $M8.0$ と予想される。断層の長さはずれの量と比例するので、地震時のずれの量とマグニチュードとの関係も同様な式で表される。

*1—これらの地震の他に、沈み込んだプレート内(深さ60 km以上)で発生する地震も、都市の直下にあたる場合は直下型と呼ばれることがある。ここでの対象は浅い(20 km以下)地震に限り、深い地震は取り上げない。

2008年岩手・宮城内陸地震のマグニチュードは7.2、松田式によれば活断層の長さは26 kmとなる。しかし地震後に、1976年撮影の航空写真から鈴木・他(2008)²によって推定された活断層の長さは、3~4 kmにすぎなかった。

ここで、少し厳密に議論を進めることにしよう。まず地震波などから地下に想定される震源域、すなわち断層面を、震源断層と呼ぶ。そして、この震源断層が地表に達して、地表につくられる断層には、別の名称を用いる。震源断層と区別するために、(地表)地震断層と呼ぶ。なお、震源断層が地表付近まで達したためにできる、地表面のたわみ変形(撓曲)も地震断層に含めるものとする。震源断層と地表地震断層とは、混同されやすい。震源断層は、地震波や地殻変動などのデータから地下に想定されるものである。地震波や地殻変動をもたらした源として認識される。一方、地表地震断層は地表に実体を持ち、手で触ることができる。両者の認識法はまったく異なっている。かつて両者は同じ“地震断層”とされ、その長さは、活断層の長さと同しと考えられていた。

そこで、次に活断層について触れよう。活断層とは、同じ震源域が繰り返し活動することによってつくられ、保持されている地形である。地表面は常に風化・浸食、あるいは堆積によって均されているので、たまたま地震断層が地表に出現して地表に段差ができて、長い年月の間には均されて消えてしまう。しかし、大地震の震源は繰り返し活動するので、繰り返し地表地震断層がつくられ、均されきらずに残留する地形ができる。これが活断層として認知される。しかし、ここには地表での風化・浸食・堆積作用と、震源の活動とのせめぎ合いがあり、前者が強ければ、活断層として認知されるとは限らない。

震源断層の活動によって、地表に地震断層が現れる。しかし、破壊現象に偶然性が伴うために、震源断層と地表地震断層の長さは同じとは限らない。実際、多くの観測事実は、地表地震断層のほうが震源断層より短いことを示している。断層面の一部が地表付近に達せず、そこでは地震断層が

認められないためである。一方、活断層は個々の地表地震断層の累積の結果である。個々の地表地震断層の長さが震源断層より短くとも、累積である活断層の長さは震源断層の長さに等しいであろうと、これまで推測されていた。

活断層から地震を予測する

阪神・淡路大震災後、政府に地震調査研究推進本部が設置され、基盤的調査観測の一環として、活断層調査が行われるようになった。活断層調査は、それ以前にも行われていたが、それらは特定の目的をもった学術調査であり、対象となった活断層はごく限られていた。これに対し、全国一律の基準で主要活断層帯が選ばれ、そのすべてが調査の対象となったことは画期的である。その結果、将来地震を発生する155の震源域が明らかとなった。全国の地震危険度の推定に大きな貢献をしたと思う。

しかし個々の調査は必ずしも十分ではなかった。全体の約1/4で平均活動間隔が不明で、平均活動間隔が判明した断層の17%で最新活動時期が不明、あるいは不確定である。調査期間が不十分だったためもあるが、多くは、調査によって主要活断層帯やその周辺で新たに発見された活断層が、未調査に終わったためである。現在、これを改善するための補完調査や、最初の選定後に見つかった主要活断層帯の追加調査が続けられている。ここでは、当初の98主要活断層帯の調査と評価が終了し、2005年にまとめられた結果³に主にもとづいて、議論を展開することとする。

これらの調査結果から活断層の長期的な活動が予測され、地震調査委員会から各活断層帯の長期評価が公表されている。その際、将来起こる地震のマグニチュードは、活断層の長さから松田式によって推定される。既に述べたように、活断層の長さは、将来起こる地震の震源断層の長さに等しい、との仮定にもとづいている。主要活断層帯はいずれも長さ20 km以上であり、松田式によればM7.0以上の地震に対応する。なお、主要活

断層帯以外の活断層では178の震源域が推定されており、地震のマグニチュードは同様に活断層の長さから推定されている。

主要活断層帯では、主に活断層の掘削(トレンチ)調査から過去の活動履歴を解明し、その結果から平均活動間隔や最新活動時期を推定する。そして、将来の活動時期を予測し、今後一定期間(たとえば30年間)内の地震発生の確率を計算する。この確率の値によって、評価された活断層の約1/4が相対的に地震発生の可能性の高い断層、次の1/4が可能性のやや高い断層と呼ばれている。

過去の活動履歴が不明な場合には、活断層の長さが平均活動間隔の推定にも使われる。活断層の長さが、地震1回分のずれの量に比例するからである。地震1回分のずれの量を、平均的なずれの累積率(年あたり)、すなわち平均ずれ速度で割ることによって平均活動間隔が推定できる。このように活断層評価では、活断層の長さが大きな役割を果たしている。長さから、マグニチュードや地震1回分のずれの量が算出されている。これは、活断層の長さの推定が最も信頼度が高いとの共通理解にもとづいている。

ここでは簡単のために、単に活断層の長さとして記したが、実際には複数の活断層が同時に活動することが多く、そのような場合は、これら全体の長さを意味する。1891(明治24)年濃尾地震では、温見断層の北西部、根尾谷断層帯、梅原断層帯が同時に活動し、全体の長さは76 km、 $M8.0$ と推定されている。断層を破壊が伝播する際に、先端部から約3~4 km程度の範囲では破壊が誘発されやすい⁴。このため、5 km以内に近接する断層は、同時に活動する可能性があると考えて合体させ⁵、断層帯全体の長さからマグニチュードが推定される。この手法により、活断層帯から発生する地震の最大規模が推定できる⁶。実際には、長大な活断層帯の一部が活動する場合もあり、その推定手法⁷などの議論もあるが、ここでは割愛する。これらはすべて、震源断層の長さが活断層(帯)の長さと同じという仮定にもとづいていることを指摘して、先に進むこととする。

震源断層より短い活断層

地下の弱面、すなわち将来地震が起こった時に、震源断層となる面と活断層との関係を簡略化して図1⁸に示す。これまでの活断層評価は図の(b)の場合を仮定していた。すなわち、将来発生する地震の震源断層の長さは、地表で認定される活断層の長さと同じと考えられてきた。

地震発生層より下部では塑性流動変形によってひずみが解消されており、地震発生層の破壊は下部から開始される。このため図1(c)のように、震源域が小さい場合にはまったく地表に達しない。ある程度大きくなると、図1(a)のように一部が地表に達する。さらに震源域が大きくなれば、図1(b)のようになるという共通認識があり、それはおよそ $M7.0$ 程度以上とされていた。既述の主要活断層帯として、長さ20 km以上($M7.0$ 以上に対応)の断層帯が選ばれたのは、このためであろう。

しかし、活断層が認められていない陸上で、2000年鳥取県西部地震 $M7.3$ が発生した。北北西-南南東に延びる左横ずれ断層の活動による。『新編日本の活断層』⁹には、この方向に延びる活断層は付近に記載されていない。震源断層を横切って西南西-東北東に延びる長さ8 kmの鎌倉山南方断層(活断層である可能性は低い)が記載されているのみである。一方、『活断層詳細デジタルマップ』¹⁰には、震源断層とほぼ平行する長さ約8 kmの活断層が記載されており、谷の屈曲は左横ずれを示し、鳥取県西部地震と整合的である。ただし、その位置は震源断層と一致せず、その南西約5 kmにある。

地震後の調査によれば、震源断層のほぼ直上に長さ約3 kmの推定活断層(谷は左横ずれ)、あるいはリニアメント^{*2}が認められた¹¹。周辺には平行

*2—活断層の可能性をもつ線状地形。詳細は2009年2月号の中田氏の解説「活断層調査において変動地形学的手法がなぜ重要か」の「変動地形学的手法とリニアメント判読の根本的相違」の節参照。

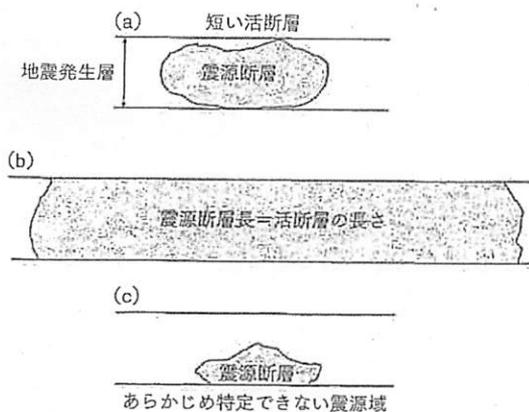


図1—活断層と震源断層との関係を示す模式断面図
(文献8より)

する推定活断層やいくつかのリニアメントが認められるが、これらは震源断層とは垂直な方向に分布しており、長さは10 kmを超えない。

2005年福岡県西方沖の地震M7.0も同様な西北西-東南東に延びる左横ずれ断層の活動によるが、震源域の海底には地震時のずれや段差は認められなかった。北西端の長さ約2 kmの断層を除き、震源断層の直上に活断層は認められない。しかし、北西端の北東に平行する2本(長さ約2 kmと約4 km)の断層と北東約4~10 kmに北西-南東に延びる活断層帯が認められた¹²。

さらに、2008年岩手・宮城内陸地震M7.2は、どの文献にも活断層の記載がない地域で発生した。西に傾斜し、ほぼ南北に延びる逆断層の活動による。北北東-南南西に延びる長さ約20 kmの地帯に地表変状が点在し、その一部は地震断層と考えられる。地震後の調査から、この地域に長さ約3~4 kmの活断層が確認されている²。

これらの観測事実は、図1(a)の場合がM7.0未満の地震に対応するのではなく、M7.0~7.3の地震に相当する場合があることを示している。震源断層が地表に届くには、この断層が地震発生層のほぼ全域の深さに及んでいると思われる。それゆえ活断層が存在するならば、たとえ長さが短くとも、M6.9程度以上の地震を想定すべきである⁷。

ここで寄り道をして、短い活断層に対するこれ

までの評価法について触れよう。これまでは、松田式が用いられてきた。すなわち、短い活断層からは規模の小さな地震が発生するとされてきた。長さが10 kmの活断層であれば、M6.5の地震が発生することになる。しかし、松田式のもととなったデータを確かめると、M7.0未満のデータは4個あるが、地表地震断層の長さを示すデータは1個しかない。他は、震源断層の長さが用いられている。地表地震断層の長さとして使われたのは、1894年庄内地震の「矢流沢断層」の長さだが、その後の調査から地震断層ではないことが判明している¹³。すなわち、M7.0未満で松田式を支えるデータはない。短い活断層に対して、松田式を適用する根拠となる観察事実はないのである。

一連の断層であっても、それらを分割して短い断層の集まりであるとすれば、個々の断層から想定される地震の規模は小さくなる。片川・他(2005)¹⁴は、能登沖の海底音波探査から、三つの短い断層F14(最長約12 km)、F15(11 km)、F16(11 km)を推定した。松田式によれば、長さ12 kmはM6.6に対応する。連続する一つの断層のように見えるが、中間部に当たるF15では堆積層上部まで地震による変形が及んでいないとして分割した。しかし2007年能登半島地震M6.9は、F14とF15とが同時に活動した結果と思われる。余震は、一連の断層のほぼ全域にわたっている¹⁵。

短い活断層と地下の震源断層のずれ

長さは短くとも地表に活断層として現れていれば、将来震源断層となる地下の弱面は地震発生層の全域にわたっていると考えられるので、発生する地震のマグニチュードは最低でもM6.9程度であると述べた。実際に規模を推定するには、地下の弱面(将来発生する地震の震源断層)の長さを推定する必要がある。楕円形状の震源断層を仮定した手法¹⁶が提案されているが、活断層と震源断層の関係は、より複雑と考えられる。

一例を図2¹⁷に示す。1943年鳥取地震(M7.3)の地表地震断層(図上部○印)、震源断層(図下部、断面図)、

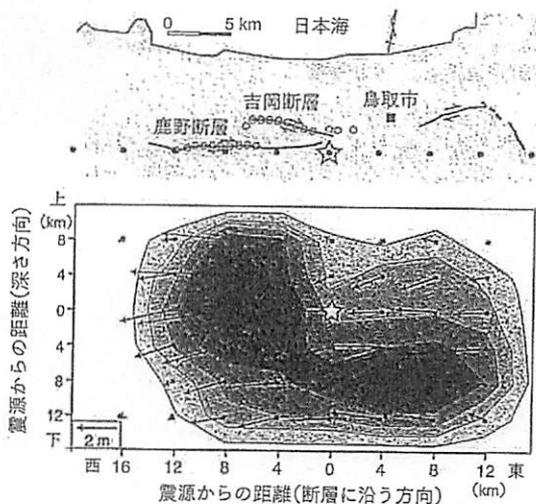


図2—鳥取地震の地表地震断層および付近の活断層(上)と震源断層面のずれの量分布(下)
 上は地図、下は●で示された位置に対応する断面図で、○印が地表地震断層、☆印が気象庁による震央(上)と震源(下)の位置を示す。(文献17より一部改変)

および付近の活断層分布(図上部)である(詳細は2009年2月号の中田氏の解説「1943年鳥取地震と活断層」参照)。震源断層の長さは約28 kmと推定されるが、地表地震断層の長さは約12 kmにすぎない。『新編日本の活断層』⁹⁾には、鳥取市西方の鹿野断層、吉岡断層が記載されているが、東方には活断層が記載されていない。この図にあるのは、最近発見された長さ約6 kmの活断層である。

図2下の震源断層面のずれの量分布は、東部のやや深い部分と、西部の浅い部分との2カ所で、ずれの量が大きくなっていることを示す。ずれの量が中央で最も大きく、周辺で小さくなるような教科書的な分布ではない。西部の浅い部分でずれの量が大きくなっている場所が、地表地震断層に対応する。一方、鳥取市の東では、地表地震断層は認められず、活断層もこれまで認められなかった。そこでは、やや深い部分でずれの量が最大となっている。

このようなずれの量の分布は、阪神・淡路大震災を起こした兵庫県南部地震でも見られた。震源断層の南西部、淡路島側では浅い部分でずれの量が大きく、野島断層で1 m程度のずれが観察された。一方震源断層の北東部、神戸側では、やや

深い部分でずれの量が大きく、明瞭な地表地震断層は出現しなかった。一般に、地表地震断層の大きなずれは、地下浅部でずれの量が大きい場所に対応しており、やや深い場所でのずれの量とは対応しない。

実際の揺れは、淡路島側でも神戸側でも強烈であり、家屋倒壊などの大きな被害をもたらした。その意味で、大きなずれの量が浅い部分にあっても、やや深い部分にあっても、同じである。1943年鳥取地震の場合も鳥取市東部(やや深い場所で大きなずれ)で大きな被害となっている。被害を予測するには、浅い部分でも、やや深い部分でも、ずれの量が大きな個所を知る必要がある。しかし、やや深い部分でずれの量が大きい場合には、地表地震断層が出現しにくく、活断層も明瞭ではない場合がある。

短い活断層で発生する地震のマグニチュードの上限

活断層があれば、たとえ短くともM6.9以上のマグニチュードの地震発生を考えるべきだと述べた。それでは、活断層があれば、たとえ短くともM8の地震をも考えなければならないのだろうか？ 震源断層が長大になればなるほど、地表で認められる活断層の長さがごく短いとは考えにくくなる。短い活断層で発生する地震のマグニチュードの上限はいくつなのだろうか？

活断層の長さの頻度分布を用いて、この疑問に答えてみよう。偶然性に支配されるさまざまなスケールの分布ではベキ乗分布が成り立つことがよく知られている。地震のマグニチュード別頻度分布はその良い例で、マグニチュードが1減少すると、頻度は約10倍になる。実際の観測結果にこの法則を当てはめてみると、あるマグニチュードまでは予測どおりの結果がえられる。しかしそれ以下では、この法則は成り立たない。予想される頻度よりも観測頻度のほうが小さくなってしまふ。これは、小さいマグニチュードの地震は存在するが、観測されなくなるためである。

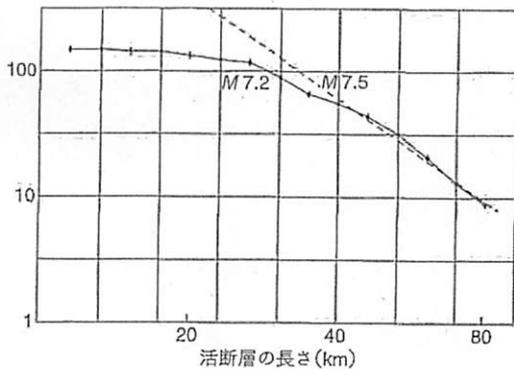


図3—活断層の長さ(km)と活断層の累積数の関係
縦軸は一定の長さ以上の活断層数を対数目盛りで示した。(文献8より一部改変)

図3^aに活断層の長さ(km)と活断層の累積数の関係を示す。一定の長さ以上の活断層の数を示す縦軸は、対数目盛りとなっている。データとして、長期評価された155の震源域に対応する活断層の長さ^aを用いた。長さが40 km以上ではほぼ直線に乗り、ベキ乗則が成り立っていることがわかる。しかし、40 km未満では活断層の数が予測より少ない。地下の震源断層の長さはベキ乗則に従うと考えられるので、地下の震源断層より短い活断層が存在することを示している。このような短い活断層は、長さ40 km未満に存在する。すなわち松田式を用いれば、マグニチュード7.5未満の地震は、短い活断層から発生することがある。逆に言えば、短い活断層で発生する地震のマグニチュードの上限は7.4程度であると結論される。同様な傾向は、松田(1990)⁶の起震断層の長さの頻度分布の図¹⁶でも認めることができる。

図3をもう一度見ると、もう一つの曲がり方がM7.2にあることがわかる。同様に萩原・糸田(2002)¹⁶の図ではM7.1に、また活断層詳細デジタルマップのデータをもとにした沖野・隈元(2007)¹⁹の図ではM7.2に、曲がり方を認めることができる。すなわちM7.0~7.1以下の範囲で、活断層では表現されない地震が存在する。これは図1(c)の状況を示していると考えられる。よって、地表に活断層が現れない場合でも上限M7.0~7.1程度の地震発生の可能性を考慮する必要がある。

短い活断層の評価

以上の考察から、長さ40 km未満の活断層では、松田式を用いたマグニチュードの推定が過小評価となる場合があることがわかった。また、長さ17 km(M6.9に対応)未満の活断層に対して松田式を適用して、発生する地震の最大マグニチュードを推定するならば、それは過小評価となる。少なくともM6.9の地震が起こりうるものと考えなければならぬ。

それでは、より適正にマグニチュードを推定する方法はないのだろうか？ そのためには地表の活断層の長さではなく、将来震源断層となりうる地下の弱面の長さを用いる必要がある。地下の弱面の情報を示すのは、重力異常などの地球物理学データや地質断層などの地質学的データであり、これらを総合することが望ましい。

たとえば2000年鳥取県西部地震の震源断層に沿って、重力異常の急変帯が存在する²⁰。その長さはおよそ25 km程度で、松田式によればM7.2に対応する。このように推定すればその結果は、実際に発生した鳥取県西部地震のマグニチュード(7.3)に近い。また、2008年岩手・宮城内陸地震の場合には、明瞭な重力異常の急変帯は見られないが、付近に存在する地質断層(餅乾-細倉構造帯)の長さ約20 kmからは、M7.0の地震が想定される。さらに踏み込んで、この断層が北部の北上低地西縁断層帯の南端から分岐した断層であると考えれば、長さは約30 kmでM7.3の地震の発生が考えられる。

次に、地震発生頻度について、簡単に触れよう。短い活断層は、マグニチュードが過小評価されるだけでなく、その活動度もこれまで過小評価されていた。2000年鳥取県西部地震の震源域付近で見られた、長さ約7 kmの久住リニアメントで、井上・他(2002)¹¹は断層露頭を見だし、掘削(トレンチ)調査を行っている。その結果によれば8~13世紀の活動が認められる。よって約1000年前にもM7程度の地震が発生したと考え

られる。1000年間に一度のM7程度の地震発生は、日本でも最も活動度の高い活断層に対応する。同様に、岩手・宮城内陸地震後に見いだされた長さ約3~4kmの活断層での掘削調査の結果、約5000年前以降今回を含め複数回の活動が認められた²⁾。これらの結果は、短い活断層の活動度が、他の活断層とほぼ変わらないことを示している。

* *

活断層の長さは、地表で計測可能であり、比較的容易に得られ、かつ信頼度が高いために、活断層で将来発生する地震のマグニチュードの推定に用いられてきた。また、場合によっては平均活動間隔の推定にも利用された。これは、地下の震源断層(地震波の源)の長さと同程度の長さであると前提にもとづいている。しかし近年の事例は、その前提が必ずしも成り立たない場合があることを示した。これまでの枠組みの変更が求められている。

ここでの考察から、活断層の長さが40km未満の場合には、長さにもとづくマグニチュードの推定には過小評価の可能性があることが明らかとなった。とくに長さ17km未満の場合に、活断層の長さからマグニチュードを推定すると過小評価となる。この場合は、少なくともM6.9の地震発生を考慮する必要がある。

この小文では、活断層の長さと同程度の長さの関係について、主に述べた。同様な議論が、地表地震断層の長さと同程度の長さの関係についても、行われているがここでは省略した。

文献

- 1—松田時彦: 地震, 28, 269 (1975)
- 2—鈴木康弘・他: 活断層研究, 29, 25 (2008)
- 3—地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会: 「基盤的調査観測対象断層の評価手法」報告書(2005)
- 4—S. G. Wesnousky: Bull. Seismol. Soc. Amer., 98, 1609 (2008)
- 5—松田時彦: 「最大地震規模による日本列島の地震分帯図」, 東京大学地震研究所彙報, 65, 289 (1990)
- 6—小田切聡子・島崎邦彦: 地震, 53, 45 (2000)
- 7—島崎邦彦: 活断層研究, 28, 41 (2008)
- 8—島崎邦彦: 「震源断層より短い活断層の長期予測」, 日本活断層学会 2008年度秋季学術大会講演予稿集, 19 (2008)
- 9—活断層研究会: 新編日本の活断層——分布図と資料, 東京大学出版会(1991)

- 10—中田高・今泉俊文編: 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会(2002)
- 11—堤浩之・他: 月刊地球, 号外31, 81 (2000); 井上大策・他: 地震, 54, 557 (2002)
- 12—海上保安庁海洋情報部: 地震予知連絡会会報, 74, 498 (2005)
- 13—鈴木康弘・他: 地震, 42, 151 (1989)
- 14—片川秀基・他: 地学雑誌, 114, 791 (2005)
- 15—平田直・他: 科学, 77, 562 (2007)
- 16—沖野範子・隈元崇: 活断層研究, 26, 29 (2006)
- 17—中田高・他: 活断層研究, 24, 39 (2004)
- 18—萩原幸男・糸田千鶴: 活断層研究, 21, 1 (2002)
- 19—沖野範子・隈元崇: 活断層研究, 27, 75 (2007)
- 20—本多亮・他: 地震, 55, 83 (2002) http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/research/tottori_grv/gravity_map.html