

論文

中国地方西部に認められるプレート内山ロー出雲地震帯の成因と地震活動

金折 裕司*・遠田 晋次**

Origin and Seismicity of the Yamaguchi-Izumo Intra-Plate Seismic Zone Identified in the Western Chugoku District, Southwest Japan

Yuji KANAORI* and Shinji TODA**

Abstract

An ENE-WSW-trending seismic zone, here named the Yamaguchi-Izumo Seismic Zone (YISZ), stretches 180 km from Yamaguchi City, Yamaguchi Prefecture to Izumo City, Shimane Prefecture in the Western Chugoku District of Japan. Earthquakes in this seismic zone have focal depths of 5 to 25 km. Approximately 70% of zone's length is found along active faults or lineaments, indicating that the zone is genetically related to the active structure. Based on the Japan Meteorological Agency Earthquake Catalog (from Jan. 14, 1923 to Dec. 31, 2005), three earthquakes with magnitudes greater than 6.0 (depth of 0 to 25 km) have occurred along the YISZ. The event generation rate is calculated to be 0.037 (3/82) events/year. On the other hand, from the Gutenberg-Richter relation of events that occurred during the eight years from Jan. 1 1998 to Dec. 31 2005, the generation rate is estimated to be 0.002 events/year, which is one order of magnitude smaller than the estimation from the Earthquake Catalog. This suggests that an earthquake in this zone is a characteristic earthquake, which is generated by the movement of a segment or a part of the active fault along the YISZ.

キーワード：プレート内地震，活断層，地震危険度，地震帯，中国地方

Key words : intra-plate earthquake, active fault, seismic risk, seismic zone, Chugoku District

* 山口大学 大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Yamaguchi University

** (独)産業技術総合研究所 活断層センター
Active Fault Research Center, National Institute of
Advanced Industrial Science and Technology
本論文に対する討論は平成19年8月末まで受け付ける。

1. はじめに

プレート境界に沿った地震帯の成因は、プレートの相互作用によって十分に理解されてきた(例えば Bolt, 1993)。プレート内にもこのような地震帯が存在することが報告されている。例えば、米国中東部では1811-1812年に大地震を起こした New Madrid 地震帯に関して数多くの研究があり、力学モデルを使って地震の再来周期や危険度などがシミュレーションされている(Kenner & Segall, 2000)。また、イランとイラクの Zagros 褶曲帯では、衝上断層群に沿って地震帯の存在が知られている(Yeat et al., 1997)。わが国では、1920年代初めに指摘された信濃川地震帯(大森, 1921)を対象として、河内・大木(1997)および河内(2000)が測地データに基づいて、そのテクトニクスを検討している。Xu & Oki (2004)は、この地震帯で発生する地震が埋没した活断層に沿って上昇する被圧熱水系に起因することを指摘している。石川(1990, 1995)は日本列島内およびその周辺の震央分布中に帯状の地震活動を示し、その中で地震が欠如している区域が地震の発生域となる可能性を指摘した。さらに、石川(1992)は帯状地震活動が火山フロントによる地殻弱線の可能性を述べている。しかしながら、これらの研究では帯状地震活動の成因や震源となる断層との関連性など未解明な問題が残されている。

Kanaori et al. (1991, 1992, 1993, 1994)や Kanaori & Kawakami (1996)は中部日本の活断層と歴史地震との時間的空間的な関係を解析し、大地震は活断層をつなぐ構造線もしくはブロック境界に沿って発生していることを指摘した。中部日本では数本の地震帯の存在が知られており、そのうちの1つは跡津川断層に沿っている(和田・伊藤, 1995)。渡辺(2002, 2004)は近畿-中国地方の地震活動とブロック構造との関係を述べている。一方、1995年兵庫県南部地震(Mj7.3)のような大地震の余震域は直線状に配列しており、活動した震源断層を表現している(平田, 1995)。これらのことから、プレート内地震帯は、(1)過去に大地震を発生させた震源断層に沿った長期間の余震活動、もしくは(2)震源となりうる活断層や活構

造の存在、を反映している可能性がある。

中国地方西部には、石川・吉川(1998)も指摘しているように、浅発地震の震央の配列で特徴づけられる ENE-WSW 方向の明瞭なプレート内地震帯が認められる(図1参照)。ここでは、この地震帯を山口-出雲地震帯と呼ぶ。Kanaori (1990)は活断層と活火山の配列に基づいて、西南日本内帯を数枚の ENE-WSW 方向のブロックに分けた。山口-出雲地震帯はこのブロック境界の1つに沿っている。Gutscher & Lallemand (1999)は、西南日本で起きた浅発(<70km) M > 5 の地震の配列に基づいて、北中国剪断帯(Northern Chugoku Shear Zone: NCSZ)を提唱している。山口-出雲地震帯はNCSZの西部にほぼ一致する。Gutscher & Lallemand (1999)は、NCSZの成因を説明するテクトニックなモデルを提示しているが、活構造との関連性については明確にしていない。高田ほか(2003)は、この地震帯の一部がリニアメントに沿っていることを示しているものの、地震帯とリニアメントとの直接的な関係は認められないとしている。

Kanaori (1997)と金折(1998)は、活断層、リニアメント、地質断層の分布に基づいて、長さ120kmに及ぶ大原湖-おおほらこ弥畝山西断層系やうねやまにしの存在を推定した。その後、この断層系を構成する弥畝山西断層については、福塚・金折(2002)によってその地形・地質的な特徴が明らかにされた。金折ほか(2006)は、大原湖断層系を構成する活断層の性状と活動性を明らかにしてきている。それまでは、中国地方西部には大規模な活断層系の存在は指摘されていなかったが(中田・今泉, 2002)、上記のように、大規模な活断層系の存在が確証されてきた。山口-出雲地震帯の中部-南西部はこの断層系に沿っており、この断層系が地震帯の成因に関連性を持つ可能性がある。

本論文では、山口-出雲地震帯での地震活動の特徴を述べるとともに、大原湖-弥畝山西断層系を含む活構造との成因的な関連性を明らかにする。さらに、この地震帯での地震危険性を議論する。

2. 中国地方西部の地震活動と山口ー出雲地震帯

国内の大学や国立研究機関で観測された地震データは、1997年10月から気象庁に一元化された。気象庁一元化データを使って作成した1998年1月1日-2005年12月31日の中国地方西部の地震活動 ($M_j \geq 1.0$, M_j : 気象庁マグニチュード) を図1に示す。この地域の地震活動は断面図をみると、明瞭に2層に分かれていることがわかる。上

部層は深度20-25km に下限を持ち、その上限の深さは西へ行くにつれて深くなる傾向がある。下部層の厚さはほぼ一定で約10km である。この層の上限は東端では深度25km 付近にあり、西に行くにつれて上限の深度が深くなり、西端では深度100km に達している。この層は、南海トラフで沈み込んだフィリピン海プレートのスラブを可視化している。

地震活動の平面分布には、NE-SW から ENE-

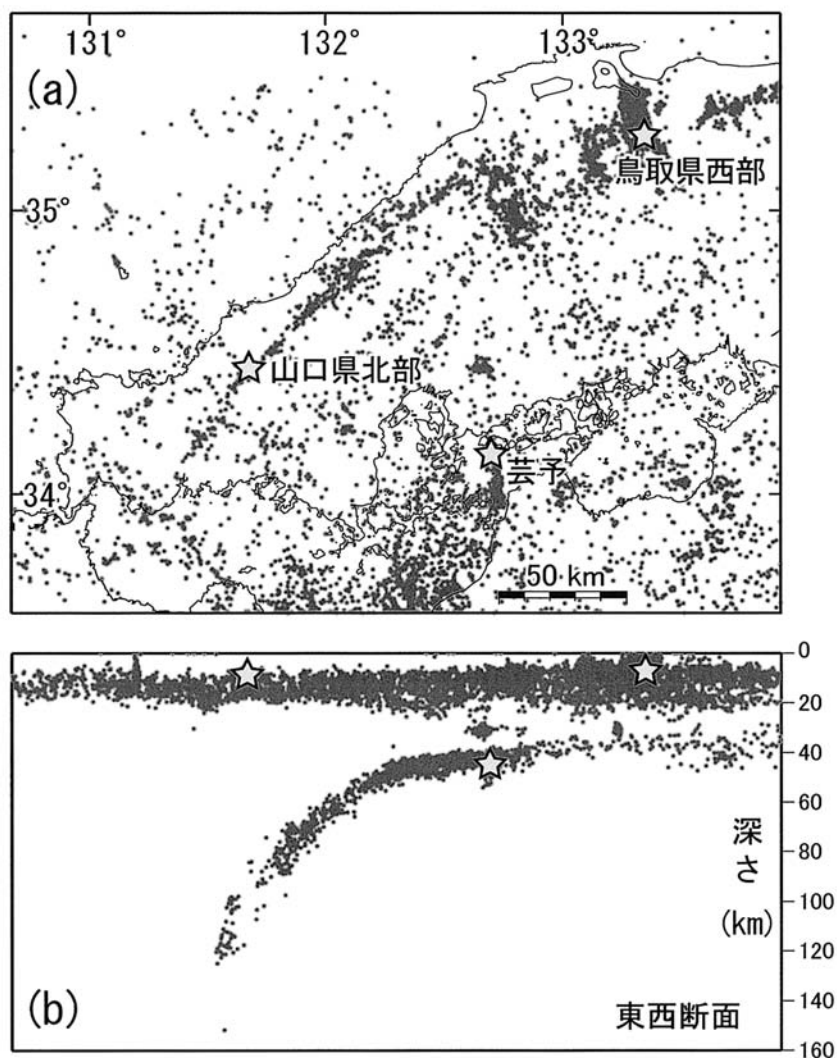


図1 中国地方西部における $M_j \geq 1.0$ の地震活動 (1998年1月1日-2005年12月31日) 気象庁一元化データを使用。星印は、1997年6月以降にこの地域で発生した被害地震の震源である。(a) 震央の分布。(b) 東西断面。この断面は、(a) 中の震源をすべて東西方向にプロットしたものである。

WSW方向とNW-SE方向の震源列で特徴づけられる地震帯が認められる。本論文では、このうち最もシャープで明瞭な震源列を山口-出雲地震帯と名づけた。この地震帯は、山口県山口市から島根県出雲市までENE-WSW方向に延び、全長は約180kmである。地震帯の北東端はNW-SE方向の幅の広い地震帯(幅約40km)と重複する。山口-出雲地震帯は、江津市と益田市の間の区間で、“杉”型に雁行配列しているようにみえる(図3c参照)。地震帯の下限の形態は波状を呈しているが、地震発生深度の上限と下限はそれぞれ5kmと25kmである(図3d参照)。

1997年以降、中国地方西部では3つの被害地震が発生している。そのうち、1997年山口県北部の地震(Mj6.6)と2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)は上部層内で発生したプレート内地震であるのに対して、2001年芸予地震(Mj6.7)は沈み込んだフィリピン海プレート内で起きたスラブ内地震である。山口県北部の地震の震央は、山口-出雲地震帯の中南部に位置している。

3. 活断層とリニアメント

図2には、中国地方西部のランドサット画像と確認されたリニアメントの位置を示す。この地域の中西部には、NE-SW—ENE-WSW方向に配列する数多くのリニアメントが発達していることがわかる。これらのリニアメントの一部は、断層に沿って形成された断層谷であることが指摘されていた(今村ほか, 1959)。

図3a, bには、調査地域のカシミール陰影図に、それぞれ活断層とリニアメントを加筆した。“この図には「新編日本の活断層」(活断層研究会, 1991)と「活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)をもとにして、新しく確認された活断層とリニアメントが加筆されている。表1には活断層と推定断層の一覧を示す。この表では、これまでに断層名がつけられているものはそれに従い、推定断層についてはそれが通過する地域名から、仮称を付けた。以下に、北東から南西への順に、活断層と推定断層を概説する。

3.1 北東部

木次南断層(SKF)は、活断層研究会(1991)に示されている確実度Ⅲの断層で、長さは約20kmである。直線状谷・屈曲および花崗岩/安山岩の断層露頭の存在が認められている。木次南断層から石見高原断層(仮称)までの約40km間は、リニアメントや活断層が確認されていない。

石見高原断層(仮称)は、島根県江津市南東部を占める石見高原内に位置し、ENE-WSW方向で雁行配列する長さ1.5-7kmの直線状谷や鞍部の連続から推定した断層で、全長は18kmである。

石見高原断層の南端から南西南約5kmに丸原断層(仮称)が位置する。この断層はNE-SW方向の断層崖や高度不連続の存在から推定した断層で、長さは約7kmである。

3.2 中央部

弥畝山西断層系は、ENE-WSW-NE-SW方向で長さ30kmの弥畝山西断層と、その中央部からWSW方向に分岐する長さ22kmの都茂断層、そして都茂断層の南西に位置する長さ10kmの日原断層(仮称)から構成される。このうち、弥畝山西断層と都茂断層については、福塚・金折(2002)によって詳しく調査されている。それによると、弥畝山西断層に沿って最大約700mの尾根-河川の右横ずれ屈曲が認められ、平均変位速度は0.8-2.8mm/年と見積もられている。この断層の南西部ではリニアメントが不明瞭である。この断層は重力異常の急変帯に沿っており、この断層系を境に地殻構造が異なると推定される(福塚・金折, 2002)。日原断層は、都茂断層南端の南約1kmから始まり、NE-WS方向で長さ0.5-2.5kmのリニアメントから構成され、全長は12kmである。弥畝山西断層の東北東端から日原断層の西南西端までの長さは47kmである。

島根県津和野町の青野山北西麓には、ENE-WSWに雁行配列する長さ0.1-1kmのリニアメントが認められることから、青野山北西麓断層(仮称)を推定した。この断層の全長は約3kmである。

3.3 南西部

山口県中北部では、地質境界を構成する地質断層としてNE-SW方向の徳佐-地福断層と迫田-

生雲断層の存在が知られている(今岡ほか, 1984; 井川・今岡, 2001)。これらの2本の断層は約5 km 離れて並走し、長さはそれぞれ30 km と25 km

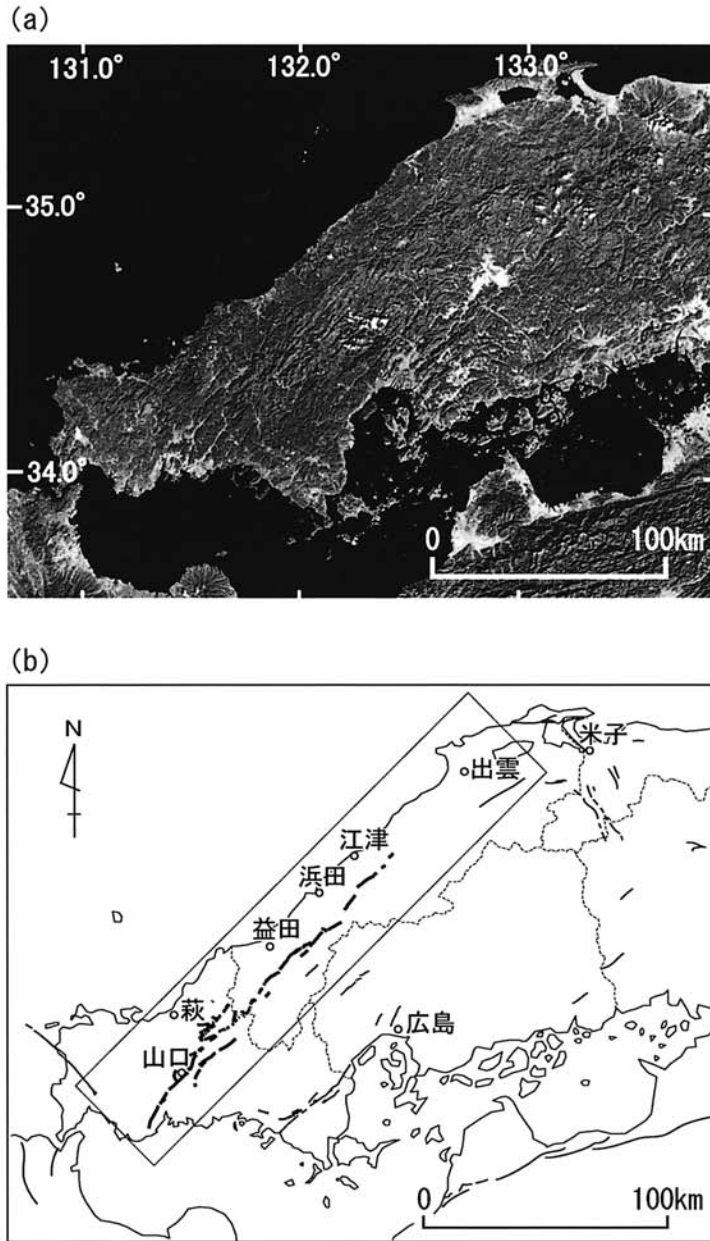
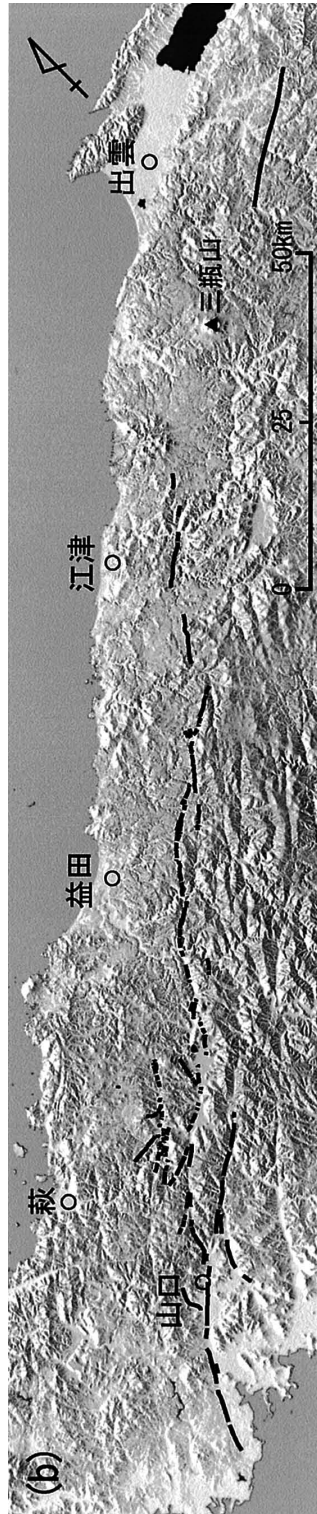
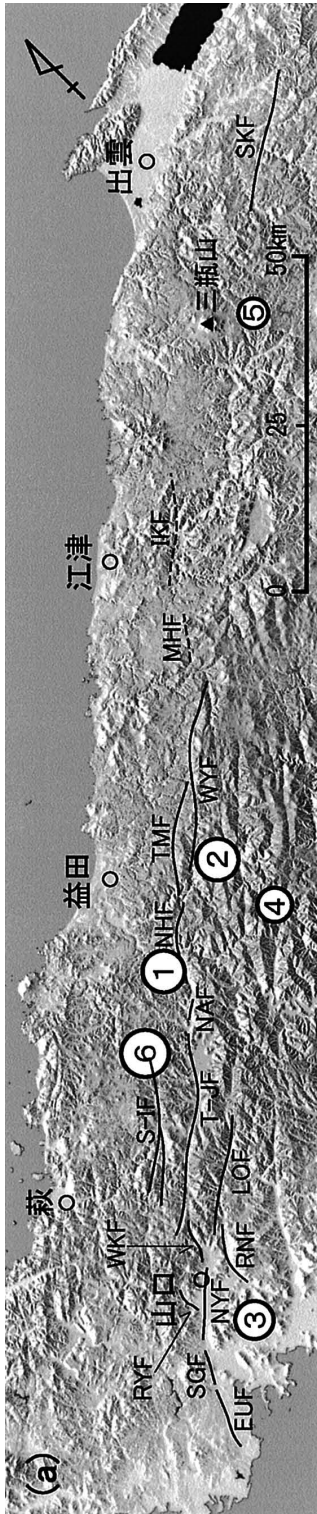


図2 (a) 中国地方西部のランドサット画像© (copyright) RESTEC。(b) 中国地方西部のリニアメントおよび活断層の分布。太線：本研究で判読された活断層とリニアメント。細線：活断層研究会 (1991), 地震調査推進本部 (2003, 2004), もしくは井上ほか (2002) に掲載されている活断層とリニアメント長方形の枠内が調査範囲である。



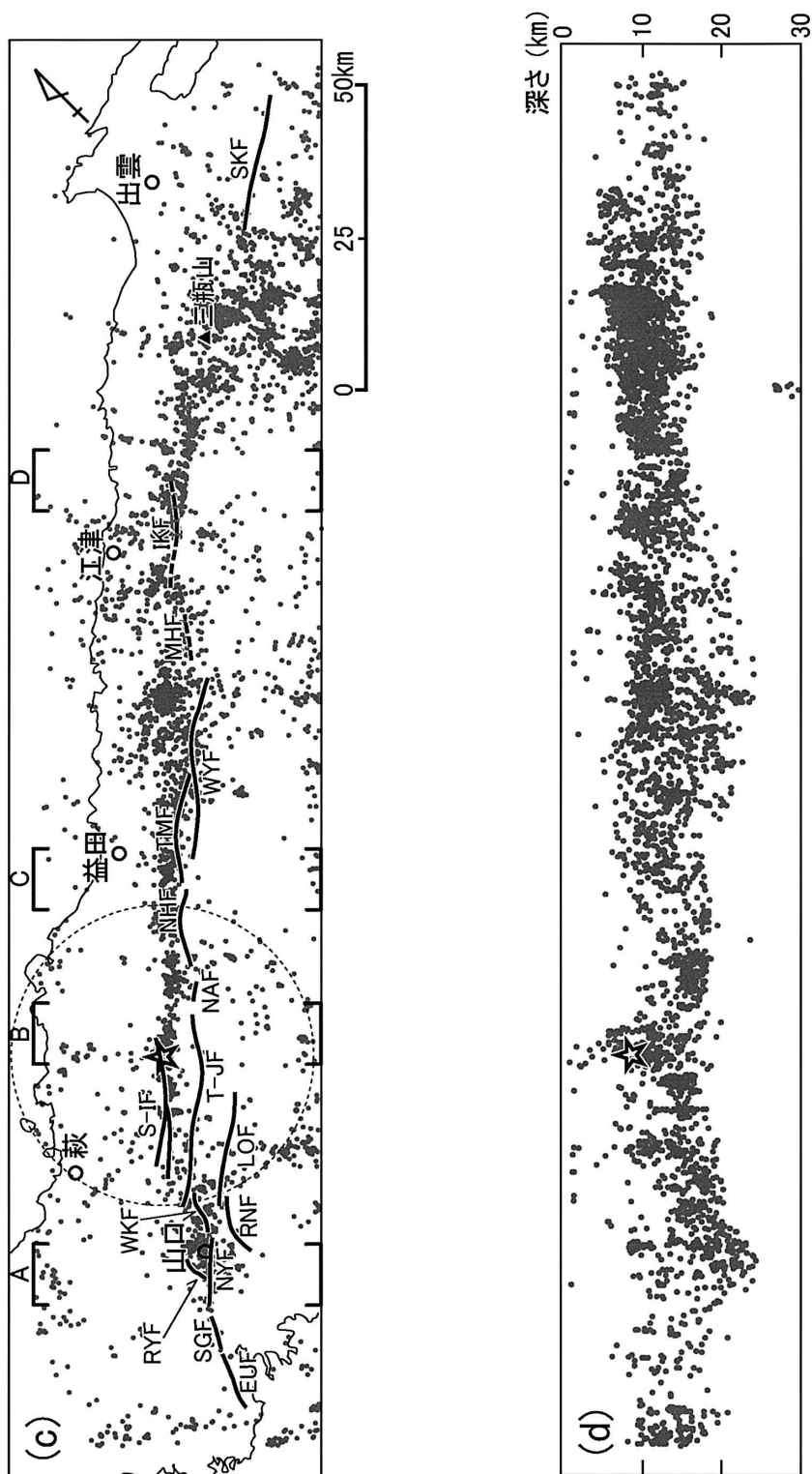


図3 山口-出雲地震帯に沿った活断層と地震活動。数値地図50mメッシュ標高(国土地理院, 2000)に加筆。(a) 活断層と被害地震 ($M_j \geq 6$) の震央。断層の略号は表1と同じである。被害地震番号は表2と同じである。○の大きさはマグニチュードの大小に対応させてある。(b) リニアメントの分布。(c) 活断層と地震の震央。星印は山口県北部の地震の震央である。使用したデータは図1と同じである。A-Dは地震帯に直交方向の断面の範囲である。点線の円は図7の解析範囲である。(d) 地震帯に沿った断面での地震活動。

表1 山口-出雲地震帯に沿った活断層

略号*1	断層系・断層名	走向	長さ (km)	活断層研究会 (1991)*2 による確実度
SKF	木次南断層	NE-SW	20	確実度Ⅲ
IKF	石見高原断層 (仮称)	ENE-WSW	18	
MHF	丸原断層 (仮称)	NE-SW	7	
WYFS	弥畝山西断層系		(47)	
WYF	弥畝山西断層	ENE-WSW ~ NE-SW	30	確実度Ⅱ
TMF	都茂断層	ENE-WSW	22	
NHF	日原断層 (仮称)	ENE-WSW	12	
NAF	青野山北西麓断層 (仮称)	ENE-WSW	3	
T-JF	徳佐-地福断層	NE-SW	30	
S-IF	迫田-生雲断層	NE-SW	25	
LOFS	大原湖断層系		(57)	
LOF	大原湖断層	ENE-WSW	22	確実度Ⅲ
WKF	木戸山西方断層	NE-SW ~ NNE-SSW	10	
NYF	山口盆地北西縁断層	ENE-WSW	12	
RYP	吉敷川断層	N-S	4	
SGF	下郷断層	NNE-SSW	9	
EUF	宇部東部断層	NNE-SSW	11	
RNF	仁保川断層	NE-SW	10	

*1 略号は図3a中の記号に対応している。

*2 活断層研究会(1991)による日本の活断層での記載。それに記載されていない活断層は空欄になっている。

である。これらの地質断層に沿って、断続的にリニアメントが認められる。徳佐-地福断層の南西部の調査結果から、この断層の最新活動時期は7,500年前以前であることが指摘されている(森岡ほか、投稿中)。後で詳しく述べるように、迫田-生雲断層に沿って、1997年山口県北部の地震(Mj6.6)が発生している。

大原湖断層系の主部はENE-WSW—NNE-SSW走向を示し、北から大原湖断層、山口盆地北西縁断層、下郷断層、宇部東部断層が存在している(水野ほか、2003, 2004; 金折ほか、2006)。この断層系の主部は、地質境界をなす榎野川構造線に沿っている(西村ほか、1995; 武田・今岡、1999)。さらに、大原湖断層の南西部から仁保川断層が南

に分岐する。また、山口盆地北西縁断層からは、北ないし北北東へ吉敷川断層と木戸山西方断層が分岐する(金折ほか、2006)。そのうち、木戸山西方断層と下郷断層に沿って、約100mの右横ずれオフセットが認められている。吉敷川断層の周辺で1987年山口県中部の地震(Mj5.2)が起きている(水野、1989)。

木戸山西方断層の最新活動時期は3,500-4,500年前であり、活動間隔は2万年以上であるとされている(金折ほか、2006)。また、小松原ほか(2005)によると、宇部東部断層の最新活動時期は400-11,000年前と推定されている。いずれにしても、大原湖断層系を構成する活断層は完新世に活動したことが指摘される。

4. 地震帯と活断層

4.1 地震帯と活断層およびリニアメント

活断層および推定活断層の分布に地震の震央を重ねると、山口－出雲地震帯の全長約180kmのうち、約130km（全長の約70%）が活断層や推定活断層に沿っていることがわかる（図3c）。調査範囲の最北東部に位置する木次南断層に沿っては地震活動が認められないことから、この断層は地震帯の形成に関与していないように見える。地震帯の東北東部では約40kmの区間で活断層が認められない。この区間は、NW-SE方向の幅広い地震帯と重複する部分に相当し、その中央には活火山である三瓶山が存在する。三瓶山の下付近では、深度約30kmに地震のクラスターが認められる。

石見高原断層（IKF）から弥畝山西断層系（WYFS）を構成する3本の活断層を経て青野山北西麓断層（NAF）までは、活断層が地震帯の南東境界付近に位置している。その南西では、迫田－生雲断層（S-IF）が地震帯の北西境界に対応している。徳佐－地福断層（T-JF）の北東部から中部では地震活動が認められない。さらに、大原湖断層系を構成する大原湖断層（LOF）に沿って、地震活動が認められる。地震帯は山口盆地北西縁断層（NYF）まで追跡できるが、その南西に位置する下郷断層（SGF）と宇部東部断層（EUF）に沿った地域では地震活動が低調である。

図3dは山口－出雲地震帯に沿った断面での地震活動である。出雲市付近から石見高原断層（IKF）までは地震活動の下限はほぼ水平で、深度15-18kmにある。丸原断層（MHF）から弥畝山西断層（WYF）下では、下に凸の弧を描き、最大深度は約25kmである。日原断層（NHF）から徳佐－地福断層下ではふたたび水平に戻り17-19kmとなる。山口盆地北西縁断層（NYF）下ではV字状に地震発生の深度が深くなり、最大深度25kmに達している。

図4は山口－出雲地震帯の直交方向での断面図である。震源決定の精度は、一般的に水平方向に比べて深さ方向の方がかなり悪く、誤差を考慮しなければならない。しかしながら、この断面図を

見ると、断層から離れた地域に比べて断層周辺に震源が集中していることがわかる。断面Aでは、吉敷川断層（RYF）下の深度10km付近に地震の垂直配列が認められるほかは、山口盆地北西縁断

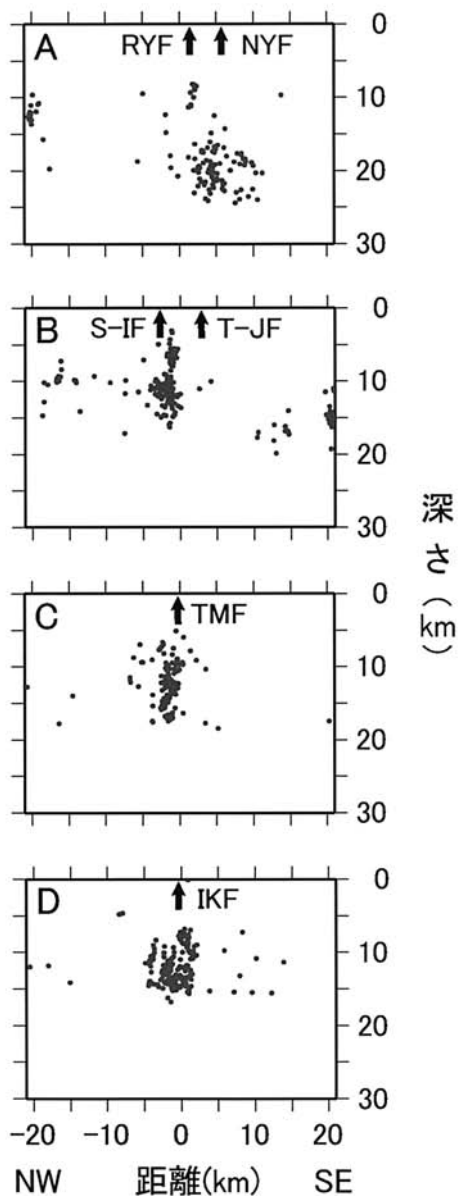


図4 山口－出雲地震帯と直交方向の地震活動。断面の位置は図3cに示してある。断面を作成した範囲の中心線と交差する活断層の地表での位置を矢印で示した。断層の略号は表1と同じである。

層 (NYF) を中心として、深度15-25 km に集中している。この断面では、大原湖断層系を構成する複数の断層が存在しているために、地震のばらつきが大きいと考えられる。断面 B においては、迫田-生雲断層 (S-IF) の南東側で深度3-17 km にかけて、ほぼ垂直な地震配列が認められる。地震帯の幅は、2-5 km である。断面 C では、都茂断層 (TMF) を中心として、深度5-18 km に地震の垂直配列が認められる。地震帯の幅は約3 km である。断面 D では、石見高原断層 (IKF) を中心として幅6 km の範囲内で、深度7-17 km に地震が発生している。地震帯の方向がこの断面線の直交方向と約15°斜交するため、地震帯の実幅は6 km より若干小さくなる。

以上をまとめると、山口-出雲地震帯は大部分が活断層から構成される大原湖-弥畝山西断層系およびその東北東延長部に位置する石見高原断層に沿い、震源はほぼ鉛直方向の狭いゾーン内に制約される。地震帯の幅は震源決定時の誤差による広がりはあるものの、2-6 km の範囲におさまっている。したがって、山口-出雲地震帯は、この地域の活構造に関連していることが指摘される。しかしながら、その成因的な関係については、今後の課題である。

4.2 山口県北部の地震と迫田-生雲断層

1997年6月25日に山口県北部を震源とする Mj6.6 の地震が発生した。震央の位置は34.45°N, 131.67°E で、震源の深さは12 km である (気象庁, 1997)。この地震の余震は、平面的には NE-SW 方向で長さ約10 km ほどのゾーンに集中する。このゾーンは傾斜がほぼ垂直であり、深度15 km 付近から5 km にかけて認められる。余震の集中するゾーンは、迫田-生雲断層の北東部を覆っている (地質調査所, 1998)。この地震の発震機構は東西圧縮による右横ずれ型と報告されている (気象庁, 1997)。一方、迫田-生雲断層に伴う断層露頭中に発達する断層ガウジの方向性から、この断層の運動方向は右横ずれであり、山口県北部地震の発震機構と一致し、この地震が迫田-生雲断層の活動と関連していると考えられる (金折ほか, 1999)。

5. 議論

5.1 地震危険度

石川 (1990) は日本列島内陸の地震活動の分布を解析し、地震帯を認定するとともに、地震帯中で地震活動が連続しない区域を空白域とよび、18箇所の空白域で地震が発生する危険性を指摘した。さらに、石川 (1995) はこれらの空白域で、1995年兵庫県南部地震と1995年新潟県北部の地震が発生したと主張している。1997年山口県北部の地震の震央は、石川 (1995) が抽出した Y1 空白域にあった。

Kanaori (1997) と金折 (1998) は活断層とリニアメント、地質断層などの連続性に基づいて定義した大原湖-弥畝山西断層系に沿って起きた歴史地震によるモーメント解放速度を計算し、この断層系で Mj6.5 規模の地震が発生する危険性を指摘した。これらの論文の投稿後に山口県北部の地震が発生した。金折ほか (2001) と Kanaori et al. (2002) は、大原湖断層系とその南西延長上で起きた3つの地震: 1987年山口県中部の地震 (Mj5.2)、1991年周防灘の地震 (Mj6.1) および1997年山口県北部の地震 (Mj6.6) がこの断層系に関係していると仮定して、クーロン破壊関数 (CFF) を用いて応力変化を計算し、この断層系に沿って応力が高められ、地震活動が高い状態にあることを指摘した。これらのことから、山口-出雲地震帯の中-南西部を占める大原湖-弥畝山西断層系は、今後も依然として被害地震を発生させる危険性がある。

山口-出雲地震帯に沿った地震活動の特徴を把握するために、地震の年間発生率 (個/年) とマグニチュードの関係を図5に示した。この関係をグーテンベルグ-リヒター (G-R) 式で近似すると、次の式が得られる。

$$\log N = 3.69 - 1.06 M_j$$

ここで、N は年間の地震発生数である。

上式から、Mj6.0の地震の年間発生率を見積もると、0.002個/年となる。

表2に示すように、山口-出雲地震帯に沿った地域 (60×230 km, 図2参照) では、国立天文台 (2005) と宇佐美 (2003) に基づくと、1600年以

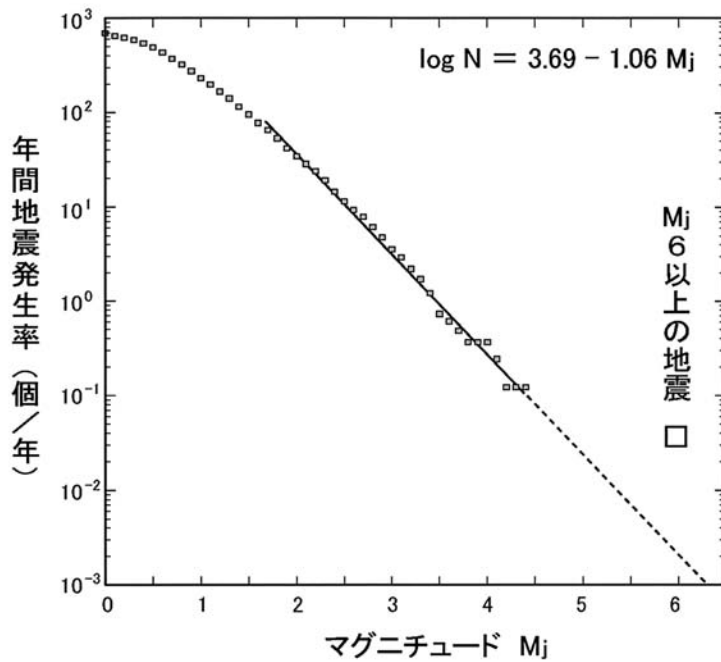


図5 山口ー出雲地震帯に沿った地震の発生個数とマグニチュードの関係。
Mj6以上の地震（発生深度0-25km）は気象庁一元化地震カタログ
（確定値）（1923/01/14-2005/12/31）に基づいて計算した。

表2 山口ー出雲地震帯周辺で起きた被害地震
国立天文台（2005）と宇佐美（2003）に基づいて作成

No.	西暦年月日	和暦年月日	マグニチュード Mj	発生地域	東経 北緯
1	1676. 7. 12	延宝4. 6. 2	6. 5	石見	131. 8° E 34. 5° N
2	1778. 2. 14	安永7. 1. 18	6. 5	石見	132. 0° E 34. 6° N
3	1793. 1. 13	寛政4. 12. 2	6. 4	長門・周防	131. 5° E 34. 1° N
4	1859. 10. 4	安政6. 9. 9	6. 2	石見	132. 0° E 34. 5° N
5	1978. 6. 04	昭和53	6. 1	島根県中部	132. 7° E 35. 1° N
6	1997. 6. 25	平成9	6. 6	山口県北部	131. 67° E 34. 45° N

降、1676年石見の地震 (Mj6.5)、1778年石見の地震 (Mj6.5)、1793年長門・周防の地震 (Mj6.4)、1859年石見の地震 (Mj6.2)、1978年島根県中部の地震 (Mj6.1)、1997年山口県北部の地震 (Mj6.6) と、1676年から330年間に Mj6 を超える被害地震が 6 回発生しており、年間発生率は約0.02 (6/330) 個/年となる。さらに、気象庁一元化地震カタログ (確定値) (1923/01/14-2005/12/31) に基づくと、上記の被害地震に加えて、調査地域内では山口県北部で Mj6.2 の地震 (1941/04/06, 深さ 1 km, 震央34.517°N, 131.633°E) が発生している。この期間の年間地震発生率は0.037 (3 個/82年) となり、G-R の式からの予測値より一桁大きい。したがって、これらの被害地震は、断層系を構成する活断層やセグメントの活動で発生する固有地震であるとみなされる (Schwartz & Coppersmith, 1984)。

山口－出雲地震帯を構成する断層のうち、弥畝山西断層と徳佐－地福断層が最も長く約30km である。この断層に沿ったリニアメントは断続的であり、連続性がよくない。一方、この地震帯でこれまで発生した被害地震の最大マグニチュードは Mj6.6 である。このマグニチュードを使って、断層長とマグニチュードの関係 (松田, 1975) から活動した断層の長さを見積もると、11.5km が得られる。これらのことも、断層全体が一度に活動するのではなく、部分的に活動している可能性を示唆している。

5.2 地震活動の経時変化

図 6 に Mj1.0, 2.0 以上の地震についてそれぞれ、山口－出雲地震帯に沿った地域内での地震発生数の経時変化を示した。この地震帯での地震発生数は単調に増加していることがわかる。この地震帯の周辺では2000年鳥取県西部地震 (Mj7.3)、2001年芸予地震 (Mj6.7)、2005年福岡県西方沖地震 (Mj7.0) が発生している。これら大地震と地震帯での地震発生個数の経時変化との関係を見ると、山口－出雲地震帯内では、大地震前後には地震活動の増加は認められない。しかしながら、いずれの図にも2003年前半に地震発生数の急激な増

加が認められ、特に Mj ≥ 2.0 の地震にその傾向が顕著である。この増加の原因については今のところ明らかではないので、今後の課題として挙げられる。

5.3 広域応力場と構造発達史

GPS 観測による速度ベクトル (多田ほか, 1997) や山陰沖の海底活構造 (伊藤・荒戸, 1999; Itoh et al., 2002)、震源メカニズム解 (石川, 2002) に基づくと、中国地方西部は現在、東西圧縮場に

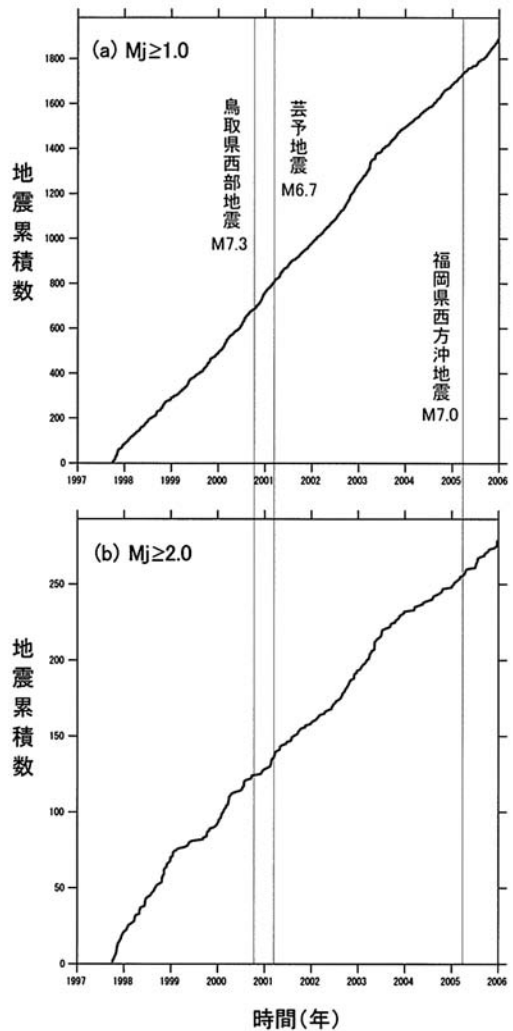


図 6 山口－出雲地震帯に沿った地震発生の経時変化。(a) Mj ≥ 1.0。(b) Mj ≥ 2.0。

置かれていることがわかる。東西圧縮の応力場において、NE-SW—ENE-WSW 方向の断層は右横ずれ運動を起こしやすい。山口—出雲地震帯に沿った活断層やリニアメントはほとんどすべてがこの方向なので、東西圧縮応力場で右横ずれ運動を起こして、地震を発生してきていることになる。山口県北部の地震の右横ずれ型の震源メカニズムもこのことを裏づけている。

山口—出雲地震帯に沿った弥畝山西断層系や大原湖断層系を構成する活断層の一部は地質断層に沿っていると同時に、迫田—生雲断層や徳佐—地福断層はこれまで地質断層として知られてきた(今村ほか, 1959; 西村ほか, 1995)。これらの地質断層は、白亜紀に形成されたブロック境界の一部を構成し、南北圧縮場で左横ずれに運動した後、中新世以降に東西圧縮場に転換すると、右横ずれにインバージョンしたと推定されている(Kanaori, 1990; 金折, 1999)。Fabbri et al. (2004)によると、中国地方西部に発達するNE-SW方向のリニアメントは、南北圧縮応力場で形成された断層が現在の東西圧縮応力場で右横ずれに再活動したことの特徴であるとされている。一方、Itoh & Takemura (1993)は、NE-SW方向のリニアメントや断層がフィリピン海プレートの斜め沈み込みに駆動された中央構造線の活動に伴う二次的な剪断面であるとしている。いずれにしても、中国地方西部に発達するこれらのリニアメントや活断層は、現在の東西圧縮場を反映して右横ずれに活動していることになる。

5.4 歪速度

中国地方西部は、日本列島内陸において歪速度の遅い地域の一つである(Sagiya et al., 2000)。地震発生率は局所的な歪速度に比例するため(Dieterich, 1994)、中国地方西部では低調な地震活動が期待される。これに反して、山口—出雲地震帯では高い地震活動を維持している。これは多数の微小地震を伴うサンアンドレアス断層のクリープ性セグメントに類似し、断層帯沿いの歪局所化によるものと考えられる(Wallace, 1990)。

この歪局所化は山口—出雲地震帯で発生した被

害地震の余震継続時間にも現れている。山口県北部地震(Mj6.6)の余震の発生数の経時変化を図7に示す。山口県北部の地震は気象庁に地震観測データが一元化される約3ヶ月前に発生したので、規模の小さい地震はデータから欠落している可能性が高い。したがって、この図では、 $M_j \geq 2.5$ の1日当たりの発生個数をプロットした。1990年以降、山口県北部の地震発生前までの平均地震発生個数は0.006個/日である。地震発生後には 10^3 個/日まで増加したあと、指数関数的に減少し、 10^3 日(約3年)でバックグラウンドに戻っている。

Dieterich (1994)によると、断層沿いの歪速度は余震継続時間に反比例するとされている。すなわち、余震継続時間が短いほど歪速度が速く、逆に余震継続時間が長いほど歪速度は遅い。さらに、余震継続時間はMに依存しないとされている。上述したように、山口県北部の地震の余震活動は約3年で終了し、バックグラウンドに戻っている(図7参照)。これに対して、1995年兵庫県南部地震(Mj7.3)や鳥取県西部地震(Mj7.3)などでは、余震継続時間は20年を超えると予測されている(遠田, 2002)。これらの地震は山口県北部の地震よりもMが大きく、応力変化域が広いために余震が広範囲に分散し、長期間継続するように見える。そのことを考慮しても、山口県北部の地震の余震継続時間は有意に短い。

したがって、山口—出雲地震帯沿いの歪速度は、局所的に日本列島の主要活断層沿いよりも速いと推定される。主要活断層の1つである根尾谷断層は長さ約80kmで、その平均変位速度は数m/千年と見積もられている(岡田・安藤, 1979)。この値から歪速度を見積もると、 10^{-15}sec^{-1} のオーダーになる。

5.5 地震帯の幅とプロセスゾーン

すでに述べたように、山口—出雲地震帯は、活断層から構成される大原湖—弥畝山西断層系およびその延長部に沿っており、これらの活構造が地震帯の形成に関わっている可能性が高い。さらに、これらの活構造は、大規模なブロック境界や

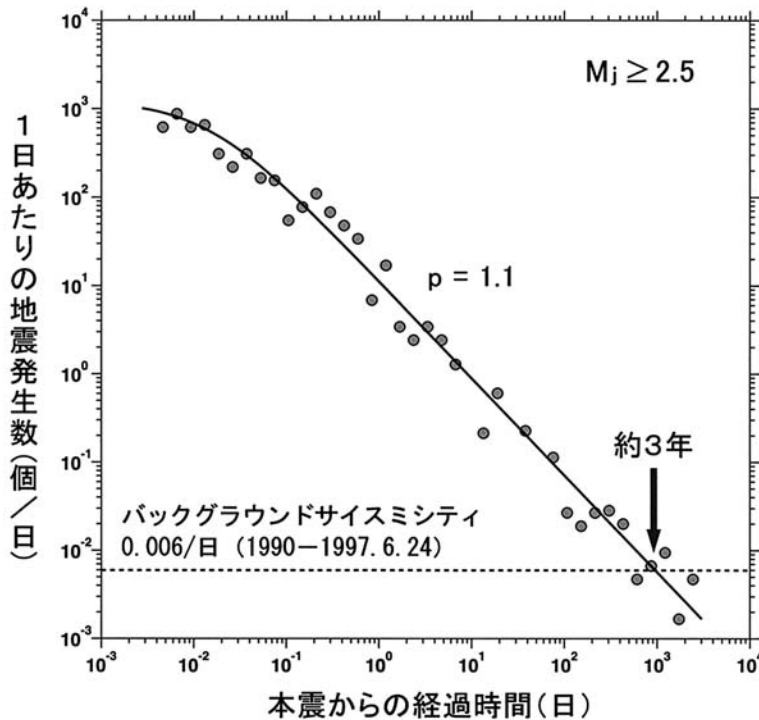


図7 山口県北部の地震の余震 ($M_j \geq 2.5$) の経時変化。データの取得範囲は図3cの点線の円内である。

剪断帯に一致していることから、その運動もしくは再活動に関係している可能性が指摘される。ブロック境界や剪断帯を構成する断層には、断層運動に関わって形成されたプロセスゾーンの存在が知られている(金折, 2001)。プロセスゾーンの幅は断層の長さの100分の1程度であると推定されている (Vermilye & Scholz, 1998)。この場合、プロセスゾーンは断層周辺に発達するマイクロクラックの分布と頻度の観察から認定されている。このようにして認定されたプロセスゾーンを、後述する地震学的プロセスゾーンと区別するために、地質学的プロセスゾーンと呼ぶ。

山口-出雲地震帯を構成する断層の最大長30kmから、地質学的プロセスゾーンの幅を見積もると、0.3kmが得られる。これに対して、山口-出雲地震帯全体がブロック境界を構成する大規模断層から構成されていると考え、地質学的プロセスゾーンの幅はその全長約180kmから、約

2 kmと見積もられる。地震は断層運動に伴って発生することから、地震帯それ自体を地震学的プロセスゾーンとみなすと、山口-出雲地震帯に伴う地震学的プロセスゾーンの幅は2-6kmとなる(図4参照)。この幅は、震源決定時の誤差が含まれるため実際の幅よりも広がっているが、地震帯の全長から見積もられた地質学的プロセスゾーンの幅とオーダー的に一致し、最長の構成断層から見積もられた値より一桁ほど大きい。このことから、構成断層は個々に形成されたのではなく、ブロック境界を構成する大規模な断層の一部をみている可能性が指摘される。

地震観測点の配置や観測精度を検討しなければならないが、山口-出雲地震帯の地震活動は、大原湖-弥歎山西断層系の長さから見積もられたプロセスゾーンの幅にほぼ一致し、地震学的プロセスゾーンは、大規模な断層や構造線の形成に関与した地質学的プロセスゾーンの存在に関係してい

る可能性がある。

6. 結論

中国地方西部に認められる ENE-WSW 方向の山口-出雲地震帯は、全長180kmの約70%が活断層やリニアメントに沿っている。地震帯、すなわち地震学的プロセスゾーンの幅は2-6kmで、地震帯の全長から見積もられた地質学的プロセスゾーンの幅とオーダー的に一致する。山口-出雲地震帯に沿った活断層は NE-SE-ENE-WSW 方向であり、この地域が現在置かれている東西圧縮応力場では右横ずれセンスで活動しやすいことから、地震帯の形成はこれらの活断層やリニアメントから構成される大規模な活構造と関係していることが結論づけられる。これらの活構造は、白亜紀の南北圧縮応力場で形成された左横ずれ断層が現在の東西圧縮場でインバージョンして、右横ずれ運動を起こし、地震を発生させていると推定される。

ゲーテンベルグ-リヒター (G-R) の関係から見積もと、山口-出雲地震帯に沿った地域での年間地震発生率は0.002個/年となる。気象庁一元化地震カタログ(確定値)(1923/01/14-2005/12/31)に基づく、調査地域内ではMj6以上の地震(深さ0-25km)が3個発生しているの、この期間の年間地震発生率は0.037(3個/82年)となり、G-R関係から見積もられた値より一桁大きい。このことは、山口-出雲地震帯ではそれに沿った活断層やセグメントが固有地震を発生してきていることを意味している。

この地震帯の中南部で発生した1997年山口県北部の地震(Mj6.6)の余震活動は約3年でバックグラウンドに戻っている。中国地方西部は全体的に歪速度が遅い地域であるが、地震帯沿いの地域は、日本列島の主要活断層沿いよりも歪速度が速いことが指摘される。

したがって、中国地方西部において、内陸地震による被害の軽減もしくは地域防災のためには、山口-出雲地震帯に沿った地震活動に注目していく必要がある。

謝 辞

中国地方西部のリニアメントと活断層の関係については、(株)阪神コンサルタンツの田中竹延氏にご教示頂いた。また、この地域の地質データに関しては、山口大学大学院理工学研究科今岡照喜教授によるところが大きい。この研究の一部は独立行政法人原子力安全基盤機構の原子力安全基盤調査提案公募研究の一環として実施された。研究費の一部には、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号16310127)を使用した。

引用文献

- Bolt, B.A.: Earthquake and geological discovery. Scientific American Library, 229p, 1993.
- 地質調査所: 6月25日の山口県北部の地震の震源域の地質について。地震予知連絡会報, vol. 59, pp. 511-523, 1998.
- Dieterich, J.M.: a constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. J. Geophys. Res., vol.99, pp.2601-2618, 1994.
- Fabbri, O., K. Iwamura, S. Matsunaga, G. Coromina, and Y. Kanaori: Distributed strike-slip faulting, block rotation and possible intracrustal vertical decoupling in the convergent zone of SW Japan. Geological Society, London, Special Publications, vol.227, pp.141-165, 2004.
- 塚塚康三郎・金折裕司: 断層の地形・地質学的特徴と地震活動および重力異常 - 島根県西部、弥畝山西断層を例として -。応用地質, vol. 43, pp. 226-234, 2002.
- Gutscher, M.A. and S. Lallemand: Birth of a major strike-slip fault in SW Japan. Terra Nova, vol.11, pp.203-209, 1999.
- 平田直: 平成7年兵庫県南部地震緊急地殻調査。地震学会ニュースレター, vol. 6, pp. 8-9, 1995.
- 井川寿之・今岡照喜: 山口県中央部、白亜紀阿武層群の火山層序・構造と佐々並コールドロンの発見。地質学雑誌, vol. 107, pp. 243-257, 2001.
- 今村外治・楠見久・中野光雄・吉村典久・岡本和夫: 三段峡、八幡高原地域を主とするいわゆる断層谷の地質学的研究。三段峡と八幡高原総合学術調査研究報告, pp. 64-83, 1959.
- 今岡照喜・上田薫・村上允英・鈴木哲夫・脇坂安彦・甲斐野信一・横山義人・佐々木 浩: 山口県十種ヶ峰周辺の白亜紀阿武層群。山口大教養紀

- 要, vol. 18, pp. 79-101, 1984.
- 井上大榮・宮腰勝義・上田圭一・宮脇明子・松浦一樹：2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査。地震 第2輯, vol. 54, pp. 557-573, 2002.
- 石川有三：日本列島内陸部の地震活動域空白域-序論-。月刊地球, 号外, no. 6, pp. 355-361, 1990.
- 石川有三：日本列島の地震活動。月刊地球, 号外, no. 4, pp. 134-139, 1992.
- 石川有三：地震活動域の意義。月刊地球, 号外, no. 13, pp. 71-80, 1995.
- 石川有三：西南日本とアムールプレート。地球, 号外, no. 38, pp. 20-30, 2002.
- 石川有三・吉川澄夫：地震帯の解明とそれを利用した地震予知研究。地球, 号外, no. 20, pp. 116-118, 1998.
- 伊藤康人・荒戸裕之：九州西方-山陰・北陸海域：日本海南部における鮮新世以降の応力場変遷。地質ニュース, vol. 541, pp. 25-31, 1999.
- Itoh, Y. and K. Takemura: Quaternary geomorphic trends within Southwest Japan, extensive wrench deformation related to transcurrent motions of Median Tectonic Line. *Tectonophysics*, vol. 227, pp. 95-104, 1993.
- Itoh, Y., H. Tsutsumi, H. Yamamoto and H. Arato: Active right-lateral strike-slip fault zone along the southern margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, vol. 351, pp. 301-314, 2002.
- 地震調査研究推進本部：菊川断層帯の長期評価について。平成15年9月10日 (<http://www.jishin.go.jp/main/>), 2003.
- 地震調査研究推進本部：岩国断層帯の長期評価について。平成16年2月12日 (<http://www.jishin.go.jp/main/>), 2003.
- 金折裕司：地震モーメントの平均解放速度に基づく内陸地震の危険度評価：中国地方西部の活断層系からの例。応用地質, vol. 39, pp. 287-297, 1998.
- 金折裕司：中国地方西部におけるカクレーサイト帯の再活動と断層ガウジの形成。月刊地球, no. 21, pp. 22-29, 1999.
- 金折裕司：断層の影響はどこまで及んでいるか。応用地質, vol. 41, pp. 323-332, 2001.
- 金折裕司・小林健治・安野伸泰・割ヶ谷隆志・山本哲朗：1997年山口県北部地震 (M6.1) の震源断層と家屋被害。応用地質, vol. 40, pp. 220-230, 1999.
- 金折裕司・田中竹延・柳田誠：山口大学断層テクトニクス研究グループ：山口県中部, 大原湖断層系の性状と活動性。応用地質, vol. 47, pp. 218-231, 2006.
- 金折裕司・遠田晋次・小泉朗：山口県中西部で発生した3被害地震と周辺断層付近の応力変化。自然災害科学, vol. 20, pp. 213-224, 2001.
- Kanaori, Y.: Late Mesozoic-Cenozoic strike-slip and block rotation in the inner belt of Southwest Japan. *Tectonophysics*, vol. 177, pp. 381-399, 1990.
- Kanaori, Y.: Seismic risk assessment of active fault systems in the western Chugoku district of southwest Japan. *Jour. Natl Disas. Sci.*, vol. 19, pp. 9-29, 1997.
- Kanaori, Y. and S. Kawakami: The 1995 7.2 magnitude Kobe earthquake and the Arima-Takatsuki tectonic line: implications of the seismic risk for central Japan. *Eng. Geol.*, vol. 43, pp. 135-150, 1996.
- Kanaori, Y., S. Kawakami and K. Yairi: Space-time distribution patterns of destructive earthquakes in the inner belt of central Japan: activity intervals and locations of earthquakes. *Eng. Geol.*, vol. 31, pp. 209-230, 1991.
- Kanaori, Y., S. Kawakami and K. Yairi: The block structure and Quaternary strike-slip block rotation of central Japan. *Tectonics*, vol. 11, pp. 47-56, 1992.
- Kanaori, Y., S. Kawakami and K. Yairi: Space-time correlations between inland earthquakes in central Japan and great offshore earthquakes along the Nankai trough: implication for destructive earthquake prediction. *Eng. Geol.*, vol. 33, pp. 289-303, 1993.
- Kanaori, Y., S. Kawakami, K. Yairi and S. Niwa: A sequence of destructive earthquakes and the coupling of fault systems in central Japan. *Eng. Geol.*, vol. 37, pp. 167-180, 1994.
- Kanaori, Y., S. Toda and A. Koizumi: Three destructive inland earthquakes in the Central-western Yamaguchi Prefecture, Southwest Japan and accompanied stress Changes to their adjacent faults. *Eng. Geol.*, vol. 66, pp. 143-156, 2002.
- 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, 東京, 437p, 1991.
- 気象庁：地震概況 (1997年6月~1997年7月)。日本地震学会ニュースレター, vol. 9, pp. 35-36, 1997.
- 河内一男：1918年信州大町地震の断層運動-信濃川

- 地震帯のテクトニクス (II). 地震第2輯, vol. 53, pp. 65-72, 2000.
- 河内一男・大木靖衛: 1964年新潟地震による地塊の傾動と信濃川地震帯のテクトニクス. 地震 第2輯, vol. 50, pp. 303-314, 1997.
- 国土地理院: 数値地図50mメッシュ (標高) 日本-III. CD-ROM版, 2000.
- 国立天文台: 理科年表 平成18年版. 丸善, 1000p, 2005.
- 小松原琢・水野清秀・金折裕司・小笠原洋・新見健・木下博久: 山口県大原湖断層帯西部, 宇部東部断層のトレンチ調査. 活断層・古地震研究報告, no. 5, pp. 139-145, 2005.
- Kenner, S.J. and P. Segall: A Mechanical Model for Intraplate Earthquakes: Application to the New Madrid Seismic Zone. *Science*, vol.5488, pp.2329-2332, 2000.
- 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. 地震 第2輯, vol. 28, pp. 269-283, 1975.
- 水野篤行: 1987年11月18日山口地震吉敷川地域における被害調査とネオテクトニクスに関する問題. 山口地学会誌, vol. 23, pp. 10-18, 1989.
- 水野清秀・下川浩一・佃栄吉・小松原琢・新見健・井上基・木下博久・松山紀香・金折裕司: 山口県大原湖断層帯の活動性に関する地質調査 (予報). 活断層・古地震研究報告, vol. 3, pp. 175-184, 2003.
- 水野清秀・小松原琢・下川浩一・金折裕司・森野道夫・三輪敦志・信岡信: 山口盆地地下の伏在断層. 活断層・古地震研究報告, vol. 4, pp. 221-230, 2004.
- 森岡達也・佐川厚志・金折裕司・田中竹延: 山口県中央部, 徳佐-地福断層南西部と木戸山西方断層北東端の性状および活動性. (投稿中), 2006.
- 中田高・今泉俊文: 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 東京, DVD-ROM 2枚・60p, 2002.
- 西村祐二郎・今岡照喜・宇多村譲・亀谷敦: 新編山口県地質図 (1: 150,000). 山口地学会, 1995.
- 岡田篤正・安藤雅孝: 日本の活断層と地震. *科学*, no. 49, pp. 158-169, 1979.
- 大森房吉: 大正7年信州大町地方激震調査報告. 震災予防調査会報告. no. 94, pp. 16-69, 1921.
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Toda: Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, vol.157, pp.2303-2322, 2000.
- Schwartz, D.P. and K.J. Coppersmith: Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San andreas faults. *J. Geophys. Res.*, vol.89, pp.5681-5698, 1984.
- 多田亮・鷲谷威・宮崎真一: GPSでみた変動する日本列島. *科学*, vol. 67, pp. 917-924, 1997.
- 高田圭太・中田高・野原壮・原口強・池田安隆・伊藤 潔・今泉俊文・大槻憲四郎・鷲谷威・堤浩之: 震源断層となりうる活断層とリアメントの検討-中国地方を事例として-. 活断層研究, vol. 23, pp. 77-91, 2003.
- 武田賢治・今岡照喜: 山口地域の白亜紀環状岩脈とコールドロン. *地質学論集*, vol. 53, pp. 199-219, 1999.
- 遠田晋次: 応力ステップ・応力速度変化に伴う地震発生率の変化-地震発生確率予測の高精度化に向けて. *地学雑誌*, vol. 111, pp. 233-247, 2002.
- 宇佐美龍夫: 最新版日本被害地震総覧 [416]-2001. 東京大学出版会, 東京, 605p, 2003.
- Vermilye, J.M. and C.H. Scholz: The process zone: A microstructural view of fault growth. *J. Geophys. Res.*, vol.103, pp.12, 223-12, 237, 1998.
- 和田博夫・伊藤潔: 跡津川断層付近の地震活動. 京都大学防災研究所年報, vol. 38 B, pp. 235-250, 1995.
- Wallace, R.E. ed.: The San Andreas fault system, California. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, no.1515, 283p, 1990.
- 渡辺邦彦: 微小地震から見た近畿-中国地方. 月刊地球, 号外, no. 38, pp. 149-156, 2002.
- 渡辺邦彦: 西日本の地殻ブロック構造と地震活動. 京都大学防災研究所年報, vol. 47 B, pp. 665-672, 2004.
- Xu, H. and Oki, Y.: The expulsion of geopressured hydrothermal system associated with the destructive earthquakes and buried active faults in the Shinanogawa seismic belt, Japan. *The Island Arc*, vol.13, pp.333-345, 2004.
- Yeats, R.S., K. Sieh and C.R. Allen: The geology of earthquakes. Oxford Univ. Press, 568p, 1997.

(投稿受理:平成18年6月7日
訂正稿受理:平成19年1月11日)