

# 論文

# 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

金折 裕司\*・遠田 晋次\*\*・小泉 朗\*\*\*

## Three Destructive Inland Earthquakes and Accompanied Stress Change for their Adjacent Faults in the Central-western Yamaguchi Prefecture, Southwest Japan

Yuji KANAORI\*, Shinji TODA\*\* and Akira KOIZUMI\*\*\*

### Abstract

Three destructive inland earthquakes of JMA magnitudes 5 to 6 have successively occurred in central-western Yamaguchi Prefecture during the recent fifteen years. Following the 1987 M=5.2 Central Yamaguchi Prefecture earthquake, the M=6.0 Suo-nada earthquake and the M=6.1 Northern Yamaguchi Prefecture earthquake in 1991 and 1997, respectively, were strong enough to cause moderate damage on houses. The epicenters of these three earthquakes were located along the active W. Yaumeyama - Lake Ohara fault system. In this paper, we calculated the stress changes in the Coulomb Failure Function (CFF) induced by the three successive earthquakes, in order to evaluate seismic risk in and around this fault system. This calculation indicated that by the occurrence of these three earthquakes the stress increased in an approximately 10- to 30-km wide area along the W. Yaumeyama - Lake Ohara fault system. The maximum stress increase was estimated to be 0.46 MPa at the Sakota-Ikumo fault. The stress also increased at the Eastern Mt. Mitsugatake fault. In contrast, the post-seismic stress decreased along the Tokusa-Jifuku, the Lake Ohara and the Shibuki faults. No stress change was produced on the Kikugawa fault. Because faults approach their points of stress failure with increases in stress, the seismic risk of the parts of the faults that constitute the W. Yaumeyama - Lake Ohara fault system may be elevated after these events. The stress increase may shorten the period until the occurrence of the next earthquake for their stress-increased fault and may also trigger seismic activity along them.

キーワード：内陸地震，地震災害，応力変化，被害予測，活断層系

Key words：inland earthquake, earthquake disaster, stress change, risk assessment, active fault system

\* 山口大学理学部  
Faculty of Science, Yamaguchi University

\*\* 東京大学地震研究所  
Earthquake Research Institute of Tokyo University  
(現 産業技術総合研究所)  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

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

本論文に対する討論は平成14年2月末日までに受け付ける。

## 1. はじめに

地震が発生すると震源断層のすべりに伴って、その周辺地域や隣接する断層に応力の変化が誘発され、地震の活動パターンに変化が起きることが知られている（例えば、Stein et al., 1992）。さらに、複数の断層から構成される断層系の一部が活動して地震が起きると、活動した断層の両側で地震発生の危険度が高くなることも指摘されている（例えば、Kanaori et al., 1994）。したがって、過去に地震を発生させたことのある活断層や断層系を対象として地震危険度を評価する場合には、すべりに伴う応力変化や断層の連動性を考慮しなければならない。

山口県中西部では、1987年山口県中部の地震（M 5.2）（Mのスケールは特に断わらない限りJM Aスケールを用いた）が起きて以降、1991年周防灘の地震（M 6.0）と1997年山口県北部の地震（M 6.1）など、この15年ほどの間に3つの地震が発生し、家屋などの被害が出た。これら3つの地震はいずれも内陸地震で、その震央は弥畝山西一大原湖断層系に沿っている。山口県北部の地震が発生する以前に、金折（1997）は活断層の分布や歴史地震および最近の地震活動に基づいて、弥畝山西一大原湖断層系を定義するとともに、M 6.5前後の地震が発生する危険性を指摘した。実際に起きた地震のマグニチュードは6.1だったので、この地震によって解放されたモーメント量は予測された量の一部にしか過ぎない。このため、弥畝山西 - 大原湖断層系では依然として、M 6.5前後の地震が発生する危険性が残されている。この断層系における地震危険度を評価するためには、山口県北部の地震の発生によって、断層系を構成する断層および周辺の断層における応力変化を知る必要がある。

Stein et al. (1992) は、クーロン破壊関数 (Coulomb Failure Function: CFF) を用いて、1992年米国西部で発生したランダース地震 (M<sub>w</sub> 7.4) による応力変化 ( $\Delta$ CFF) を計算し、応力変化と余震の発生域との関係を見事に表現した。その後、1995年に発生した兵庫県南部地震 (M 7.2) についても、橋本 (1995, 1998) や Toda et al.

(1998) によって応力変化が計算され、地震後に応力が増加した地域と減少した地域が図示されている。さらに、Parsons et al. (2000) は同様な方法を用いて、1900年以降トルコの北アナトリア断層沿いに起きた地震に伴う応力変化を計算し、1999年イズミト大地震 (M<sub>w</sub> 7.4) の発生によって、イスタンブール付近で大地震発生の危険性が高まったことを指摘した。

このように、ランダース地震の発生以降、M 7を超える大地震を対象として、CFFを用いて地震発生に伴う応力変化が計算され、余震分布やその周辺断層での地震危険度が評価されている。しかしながら、M 5～6の地震を対象としては、これまで応力変化の計算例はない。我が国ではM 7前後もしくはそれを超える内陸地震によって大被害がもたらされてきた。このような地震は稀にしか起きていない。これに対して、被害の程度は小さいものの、圧倒的にM 5～6の地震の発生数が多い。したがって、M 5～6の地震によって誘発される地震被害を軽減させるためには、この規模の地震に伴う応力変化を調べる必要がある。

ここでは、山口県中西部において、弥畝山西一大原湖断層系沿いに起きたM 5～6の3つの被害地震を対象として、地震に伴うCFF変化を計算する。さらに、その計算結果に基づいて、この断層系を構成する断層およびその周辺に分布する断層の地震危険度について議論した。

## 2. 断層分布と地震活動

山口県中西部にはNE-SW方向の断層が卓越しており、一部にNW-SE方向の断層が認められる（図1）。これらの断層はいずれも明瞭なリアメントを形成している。さらに、その一部では変位地形が認められ、活断層である可能性が指摘される（金折, 1998）。地形学的に認められる変位のセンスはNE-SW方向の断層が右横ずれであるのに対し、NW-SE方向の断層は左横ずれを示している。NW-SE方向の代表的な断層として、確実度Iの菊川断層がある（活断層研究会, 1991）。

NE-SW方向の断層は主として地質境界を構

成している。調査地域中部には、この方向の断層として、迫田<sup>いづくも</sup>一生雲断層や徳佐<sup>じふく</sup>一地福断層、大原湖断層<sup>ふしのがわ</sup>、榎野川構造線などが認められる(村上・西野, 1967; 今岡ほか, 1984; 西村ほか, 1995)。これらの断層は合流したり分岐したりして、全体として弥畝山一大原湖断層系を構成している(金折, 1997; Kanaori, 1998)。さらに、この断層系の北西に、三ヶ岳<sup>みつがたけ</sup>東方断層と渋木断層、南西に佐波川<sup>さばがわ</sup>構造線が分布している。これらの断層のうち、大原湖断層と榎野川構造線北部、三ヶ岳東方断層と渋木断層に沿って右横ずれを示唆する変位地形が認められる。図1では、明瞭な変位地形が認められた断層を実線で表示した。

1997年山口県北部の地震の震央は、迫田一生雲断層の北東部付近に位置している(図3参照)。迫田一生雲断層や徳佐一地福断層には、幅数m程度のカクレーサイト帯が伴われ、一部に断層ガウジも確認されている(金折, 1998)。この2本の断層はいずれも榎野川構造線に合流している。大原湖断層は确实度IIの活断層であり(活断層研究会, 1991)、榎野川構造線に連続する。この構

造線に沿った山口盆地北縁では、地形的な変位や第四紀の堆積物を切る露頭が確認されており、この構造線も活断層として再活動していることが指摘される(玉村, 2000 未公表)。

図2には気象庁地震カタログに基づいて、1980年～1999年に山口県中西部で発生した地震の震央を示した。この地域の地震活動には、NE-SW方向の帯状配列が顕著に認められる(石川, 1995)。地震が配列するゾーンはほぼ弥畝山西一大原湖断層系に沿っている。この地震ゾーンに認められる3つのクラスターは、北東から南西に、山口県北部の地震、山口県中部の地震および、周防灘の地震にそれぞれ対応している(図3と4参照)。震源の深さの上限は約5kmであり、下限はほぼ20kmのところにある。

### 3. 被害地震と震源断層

これまでに山口県中西部で発生した被害地震の震央を図3に示した。これらの被害地震のうち、最近になって発生した1987年山口県中部の地震(M5.2)と1997年山口県北部の地震(M6.1)の

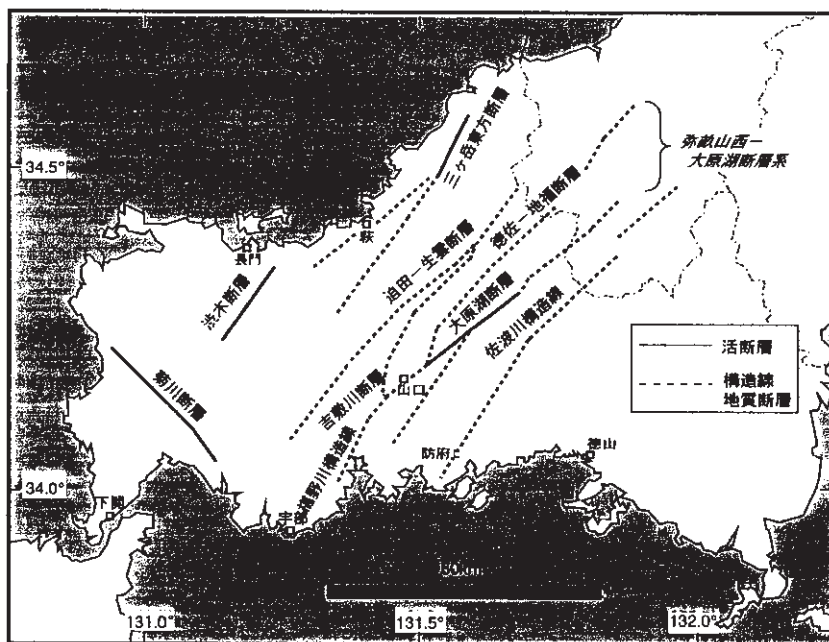


図1 山口県中西部の断層と断層系。実線は明瞭な変位地形が確認され、活断層である可能性の高い断層を示す。

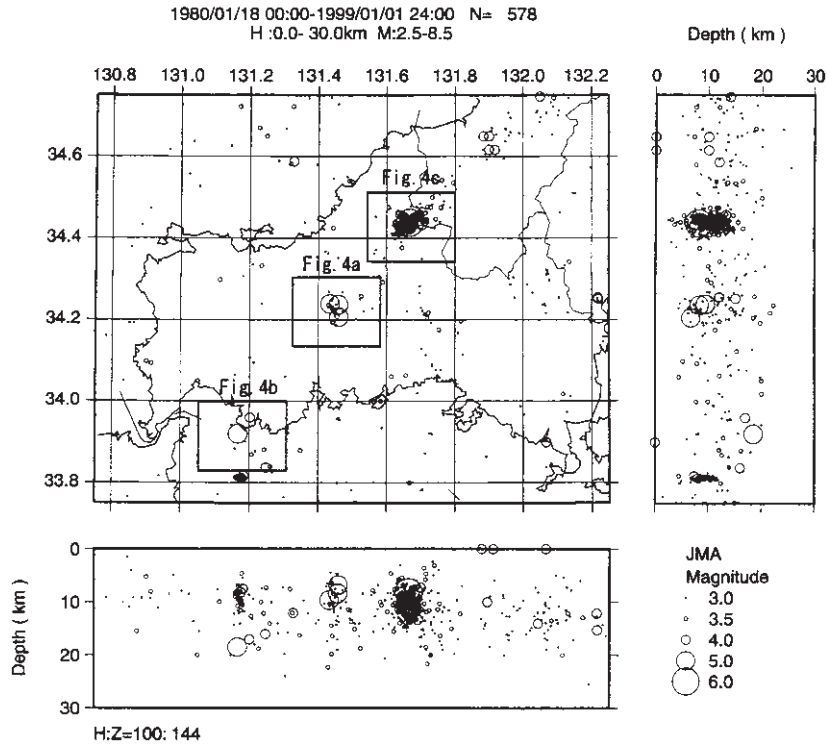


図2 山口県中西部の地震活動。1980年1月1日から1999年12月31日。気象庁地震カタログに基づく。枠内の地震活動については図4参照。

2つの被害地震は弥敷山西一大原湖断層系に沿っている。さらに、1991年周防灘の地震(M 6.0)はこの断層系の南西延長部に位置している。いずれの地震も震源の深さが20 km以浅であり、内陸地震に相当する。これらのことは、3つの被害地震の発生が弥敷山西一大原湖断層系もしくはそれを構成する活断層の活動に関連している可能性を示唆している。

図4には気象庁地震カタログに基づいて、主震後1日もしくは1ヶ月での余震分布を示した。1987年山口県中部の地震と1991年周防灘の地震については観測された余震の数が少なかったために、1ヶ月間の余震をプロットした。主震発生後の時間が長くなると破壊領域よりも余震域が拡大するため(Tajima and Kanamori, 1985)、この2つの地震については実際の破壊面より大きい可能性がある。

表1には上記3つの被害地震の概要を示した。

以下に、これら被害地震の概要と推定された震源断層について詳しく述べる。

### 3.1 山口県中部の地震(M 5.2)

1987年11月18日0時57分に山口県阿武郡旭村を震央とするM 5.2の地震が発生した。震源の深さは8 kmと推定された。山口市で震度4を観測したほか、中国地方から四国地方で有感となった(気象庁発表)。この地震の発震機構解による震源断層の走向はN 30° Eで傾斜は80° SEであり、ずれのセンスは右横ずれとされている(高橋・石川, 1988)。余震はその後長期にわたって断続的に起きた。主震後1ヶ月間に発生した余震の分布には、特に顕著な方向性は認められない(図4a)。吉敷川に沿って、家屋やアスファルト舗装道路に亀裂が確認された(水野, 1989)。しかしながら、この地震による地表破壊面もしくは地震断層は確認されていない。

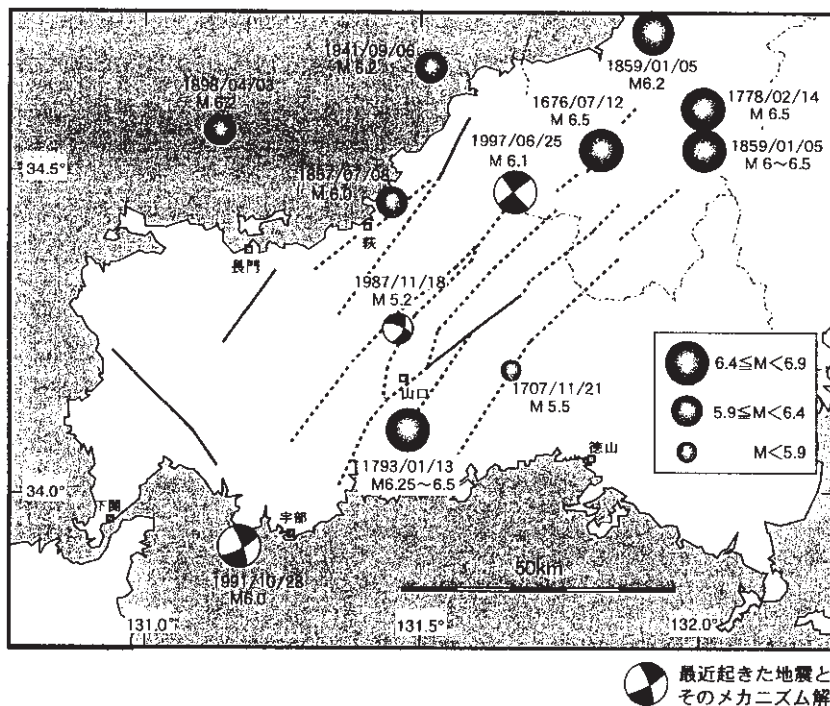


図3 山口県中部地域で発生した被害地震の震央。震央の位置は宇佐美 (1996) に基づいている。最近発生した3つの被害地震については、発震機構解を示した。1987年山口県中部の地震と1991年周防灘の地震、1997年山口県北部の地震の発震機構解はそれぞれ、高橋・石川 (1988) と Harvard CMT カタログ, Ide (1999) に基づいている。

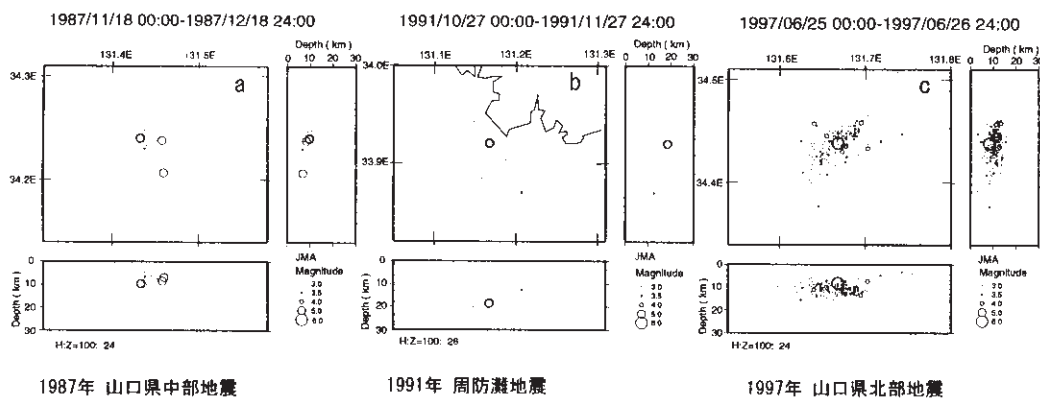


図4 山口県中部で発生した3つの被害地震に伴われる余震分布。(a) 1987年山口県中部の地震 (M 5.2)。(b) 1991年周防灘の地震 (M 6.0)。(c) 1997年山口県北部の地震 (M 6.1)。いずれも気象庁地震カタログに基づいている。

地震発生後に、山口県吉敷郡吉敷で第四系と基盤岩が接する断層が発見され、吉敷川断層と命名

された (水野, 1989)。発見された断層の走向は N 80° E であり、発震機構解による震源断層の走向

表1 山口県中西部で発生した3つの被害地震

発生年月日	地震名	震源地	震央		マグニチュード M	深さ (km)	家屋被害		死傷者	
			緯度	経度			全壊	半壊	死者	傷者
1987.11.18	山口県中部	旭村	34° 14' 18" N	131° 27' 30" E	5.2	8	0	1	0	2
1991.10.28	周防灘	周防灘	33° 55' 12" N	131° 10' 00" E	6.0	19	0	0	0	1
1997.6.25	山口県北部	阿東町	34° 27' 00" N	131° 40' 20" E	6.1	12	1	7	0	2

と斜交している。山口県中部の地震では地表破壊面が確認されていないため、この発見された断層と震源断層との関係はよくわかっていない。余震の震源は全て 10 km 以浅である。

この地震では、山口市で軽傷 2 名、建物一部破損 1 件、道路・家屋などの亀裂、井戸水の濁りなどの被害が報告されている(宇佐美, 1996)。地震の被害は、震央の南南西方向にあたる山口市の吉敷川地域に集中した。

### 3.2 周防灘の地震 (M 6.1)

1991 年 10 月 28 日 10 時 9 分に周防灘を震央とする M 6.1 の地震が発生した。震源の深さは 19 km である。福岡で震度 4 を記録したほか、下関や山口、萩で震度 3 が観測され、北は福井から南は鹿児島まで広い範囲で有感となった(気象庁発表)。この地震は海域で発生したため、地表破壊面もしくは地震断層は確認されていない。Harvard CMT カタログによる発震機構解に基づき、震源断層の走向を N 66° E で傾斜は 84° SE とすると、ずれのセンスは右横ずれとみなされる。

図 4 b に地震後 1 ヶ月間に発生した余震の分布を示した。余震の観測数が少ないため、その集中性などはよくわからない。余震の震源の深さは 10 ~ 20 km の範囲にある。

地震による被害は軽傷者が 1 名、建物に軽微な被害があったことが報告されている(宇佐美, 1996)。

### 3.3 山口県北部の地震 (M 6.1)

1997 年 6 月 25 日午後 6 時 50 分に山口県北部を震源とする M 6.1 の地震が発生した。震源の深

さは 12 km である(気象庁発表)。この地震によって、島根県益田市で震度 5 強が観測され、山口県萩市と山口市、下関市などで震度 4 が記録された(下関気象台発表)。このほか、東は福井市(震度 2)、南は鹿児島市(震度 1)まで、西日本の広い範囲で揺れが観測された(気象庁発表)。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(地震調査委員会, 1997; 気象庁, 1997; Ide, 1999)。図 4 c に地震発生後 1 日間の余震分布を示す。余震の震央は NE - SW 方向の 2 つのゾーンに集中している。幅の広い北西側のゾーンは迫田 - 生雲断層に沿っているの対し、南東側の狭いゾーンは徳佐 - 地福断層に沿っている。

余震の分布と発震機構に基づいて、山口県北部の地震は NE-SW 方向に伸びる迫田 - 生雲断層の右横ずれ運動で発生したと推定された(山口県防災会議震災対策専門部会, 1997)。この地震に伴って地表に現われた破壊面もしくは地震断層は確認されていない。一方、金折ほか(1999)は、この地震の震央付近で NE - SW 方向のカタクレースイト帯とそれを切る断層ガウジを発見し、迫田 - 生雲断層が活断層である可能性を指摘した。

この地震による人的被害としては、2 名の軽傷者が報告されている。家屋の被害は、全壊が 1 件、半壊が 7 件、一部破損が 216 件に及んだ(山口県防災会議震災対策専門部会, 1997)。地震の震央に近い山口県阿武郡阿東町生雲西分では 3 棟の家屋が全半壊し、コンクリートの舗装道路に 40 m にわたって亀裂が生じるなどの被害が生じた(山本, 1997)。家屋に被害の出た地域は、被害の最も大きかった生雲西分を中心として、半径約 10 km の円内に収まっている(金折ほか, 1999; Kanaori

et al., 1999)。

#### 4. 応力変化の解析方法

##### 4.1 クーロン破壊関数 (CFF)

地震が発生すると震源の周辺では応力変化が起き、それが引き金となって周辺の断層で地震が誘発されることが指摘されている (例えば, King et al., 1994)。応力変化の計算にはクーロン破壊関数 (CFF) が使われる (例えば, 橋本, 1995)。地震によるCFFの変化 ( $\Delta CFF$ ) は次の式で表される。

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu (\Delta \sigma_n - \Delta P)$$

ここで、 $\Delta \tau$  は対象とする断層面上のすべりに対する剪断応力の変化、 $\Delta \sigma_n$  は法線応力の変化、 $\Delta P$  は間隙水圧の変化、 $\mu$  は内部摩擦係数である。 $\Delta P$  は見積もりが困難な量であるため、摩擦係数  $\mu$  を小さくして計算が行われている (King et al., 1994)。その場合、以下の式が導かれる。

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu \Delta \sigma_n$$

ここでは法線応力は伸張の場合を正にとる。実際の計算では、ヤング率を 8.0 GPa, ポアソン比を 0.25 とする半無限弾性体を仮定した。さらに, King et al. (1994) にしたがって内部摩擦係数として 0.4 を与えた。

##### 4.2 入力データ

表 2 には各地震について、CFF の計算に用いた入力データを示した。計算に用いた断層の走向と傾斜およびずれのセンスは発震機構解に基づいている。すなわち山口県中部の地震は、高橋・石川

(1988) に基づいて、震源断層の走向・傾斜を  $N 30^\circ E / 80^\circ SE$  とし、ずれのセンスは右横ずれとした。同様に、周防灘の地震では Harvard CMT カタログに基づいて、断層面を  $N 66^\circ / 84^\circ SE$  とし、右横ずれのセンスとみなした。さらに、山口県北部の地震については Ide (1999) に基づいて、断層面を  $N 45^\circ E / 90^\circ$  とし、ずれのセンスを右横ずれとして計算した。

それぞれの地震に伴うすべり量は、武村 (1998) のスケーリング則を使ってマグニチュード  $M$  から求めた。この場合、地震によるすべり量は右横ずれを正にとった。山口県中部の地震では 0.17 m となり、周防灘の地震と山口県北部の地震ではそれぞれ 0.36 m と 0.82 m を与えた。

断層面の長さは余震域の走向方向の広がりを考慮して、山口県中部の地震は 5 km とし残りの 2 地震は 10 km とした。

断層面の深さは余震域の鉛直方向の広がりに基づいて、上限と下限をそれぞれ次のように仮定した。山口県中部の地震では 7 km と 10 km, 周防灘の地震は 15 km と 22 km, 山口県北部の地震は 8 km と 13 km とした。

以上の値を用いて、剛性率  $\mu = 3.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  を与え、地震によるモーメント解放量を計算すると、山口県中部地震で  $8.7 \times 10^{15} \text{ Nm}$ , 周防灘地震で  $8.0 \times 10^{17} \text{ Nm}$ , 山口県北部地震では  $1.4 \times 10^{18} \text{ Nm}$  が得られた。

#### 5. CFFの変化

山口県中西部で発生した 3 つの被害地震はいずれも弥敵山西一大原湖断層系に沿っており、地震の発生に伴い断層系を構成する断層や周辺地域で

表 2 3つの被害地震に関する断層データ

地震名	走向	傾斜	すべり量 右横ずれ(m)	断層面(長さ) (km)	断層面(深さ)		モーメント解放量 (Nm)
					上限(km)	下限(km)	
山口県中部地震	N30° E	80° SE	0.17	5	7	10	$8.7 \times 10^{15}$
周防灘地震	N66° E	84° SE	0.36	10	15	22	$8.0 \times 10^{17}$
山口県北部地震	N45° E	90°	0.82	10	8	13	$1.4 \times 10^{18}$

応力状態が変化すると推定される、ここでは、上記の方法で計算されたCFFの変化( $\Delta$ CFF)を以下に述べる。

### 5.1 応力変化域

山口県中西部で発生した3つの被害地震の発生後のCFFの変化( $\Delta$ CFF)を図5に示した。この図では、東西圧縮場における鉛直横ずれ断層での解を求めた。

図5aは、1987年山口県中部の地震の発生後の $\Delta$ CFFを示している。この図では、応力変化を詳細に検討するため、範囲を $-0.005 \sim 0.005$  MPa ( $\pm 5$  kPa)の範囲で表示した。計算された応力変化の最大値と最小値はこの範囲を超えている。この地震の発生により、山口市北部でNE-SW方向とNW-SE方向で応力が高められたゾーンが出現した。

1991年周防灘の地震と1997年山口県北部の地震はいずれも、NE-SW方向の応力が高められた地域の両側で発生していることがわかる。

次に、1991年周防灘の地震と1997年山口県北部の地震の発生後における応力変化を図5bに示した。この図では応力変化を $0.03 \sim -0.03$  MPaの範囲で表示した。同様に、計算された応力変化の最大値と最小値はこの範囲を超えている。1991年の地震では、震源断層を中心としてENE-WSWおよびNNW-SSE方向の直交する2ゾーンで応力が高められている。この直交するゾーンの外側で応力の低下が起きている。さらに、1997年山口県北部地震では、NE-SWおよびNW-SE方向の直交する2ゾーンで応力が高められ、その外側でN-SおよびE-W方向に応力が低下した地域が出現している。

3地震の発生によって、おおまかには弥敵山西-大原湖断層系に沿った幅 $10 \sim 30$  kmのゾーン内で応力が高まったことがわかる。逆に、ゾーンの外側の地域では一部の地域を除いて、応力が低下している。

### 5.2 断層沿いの応力変化

山口県中西部に分布する断層を対象として、3

つの被害地震の発生による地下 $10$  kmでの応力変化の計算結果を図6に示した。同一の断層に沿った地域でも場所によって応力が増加した部分と減少した部分があることがわかる。弥敵山西-大原湖断層系を構成する断層においても、山口県北部の地震では震源断層の北西延長部の迫田-生雲断層で応力が高められ、その最大値は $0.5$  MPaに達している。一方、隣接する徳佐-地福断層とその南東側の大原湖断層では応力が低下している。応力の低下量の最大値はそれぞれ $-0.4$  と  $-0.1$  MPaである。

さらに、山口県中部地震の震源断層の両側において、榎野川構造線と迫田-生雲断層の一部で $0.1$  MPa前後の応力増加が認められた。そのほか、三ヶ岳東方断層で $0.1$  MPaの応力増加が認められた以外は、佐波川構造線や波木断層で若干の応力の増減が認められる程度である。

一方、菊川断層については、この3地震の発生にはほとんど影響されていないことがわかる。

## 6. 応力変化と地震危険度

山口県中西部における地震危険度は上記3被害地震の発生によって、どのように変化したのだろうか？一般に、地震が発生すると破壊した領域では応力が解放され、地震発生の危険性が低くなると考えられる。

破壊した領域の周辺において、地震発生により応力が高められた地域では破壊応力に近づくため、次の地震がトリガーされる危険性が高くなったとみなすことができる(Toda, et al., 1998)。逆に、応力が低下した地域では、次の地震がトリガーされる危険性が低減されたと考えられる。さらに、応力が高められた地域では破壊応力に近づくことになるため、次の地震が発生するまでの期間が短縮されることが予想される。逆に、応力が低下した地域では、次の地震が発生するまでの時間に遅延が起きることが指摘される。

したがって、山口県北部の地震の発生により迫田-生雲断層の活動部では応力が解放され、次の地震が起きるまでの期間に遅延が生じ、地震危険度が小さくなったとみることができる。しかしな



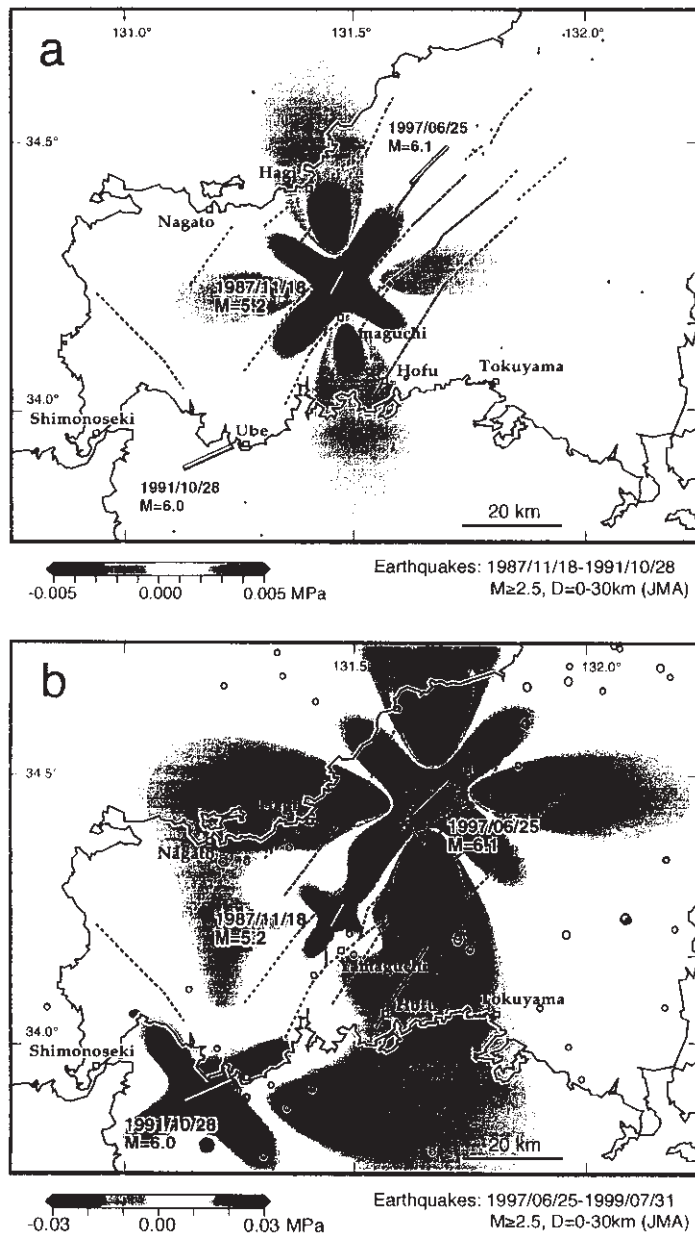


図5 被害地震発生後のクローン破壊関数 (CFF) の変化と地震活動。地下 5 ~ 15 km 区間の最大値を求めた。(a) 1987 年山口県中部の地震発生後の応力変化 ( $\Delta CFF$ )。この地震発生直後から 1991 年周防灘の地震直前までの地震活動を示した。(b) 3つの被害地震発生後の応力変化 ( $\Delta CFF$ )。1997 年山口県北部の地震直後から 1999 年 7 月までの地震活動が示してある。

がら、破壊が地表まで達しなかったため、非破壊の領域として残されている震源断層より上位の非破壊部と断層中部から北西部にかけて応力が高め

られ、次の地震発生までの期間の短縮が予想されることから、地震危険度が高まったと評価される。また、三ヶ岳東方断層の活断層部も同様に地震危

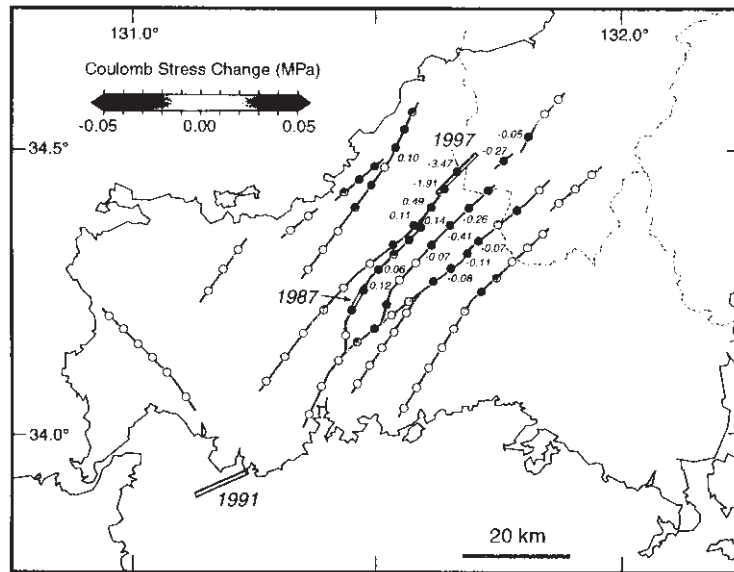


図6 3被害地震発生後の断層沿いの応力変化 ( $\Delta CFF$ )。地下 10 km での計算結果。

険度が高まったと推定される。さらに、1987年と1991年の地震によって榎野川構造線の一部で応力が高められ、次の地震が発生するまでの期間が短縮され、地震危険度が増加した。

逆に、大原湖断層と徳佐 - 徳佐断層では、1987年と1991年の地震の発生によって応力低下がもたらされたため、次の地震までの期間に遅延が生じ、地震危険度が小さくなったと判断される。菊川断層はこれらの地震の発生でほとんど影響を受けなかったと推定される。

弥畝山西 - 大原湖断層系および周辺の活断層による地震モーメント解放速度は、中部～近畿地方の活断層や活断層系の1/2～1/10であることが知られている(金折, 1997)。地震モーメントの解放速度は歪の蓄積速度に関係しており、解放速度が小さいと蓄積速度も小さくなる(金折, 1997)。

図7には歪の蓄積速度と次の地震までの時間短縮量の関係を模式的に示した。この図に示すように、歪の蓄積速度が小さい断層では大きい断層に比べて、次に地震が起きるまでの時間短縮量が大きくなるが推定される。したがって、3つの被害地震の発生によって、山口県中西部では中部

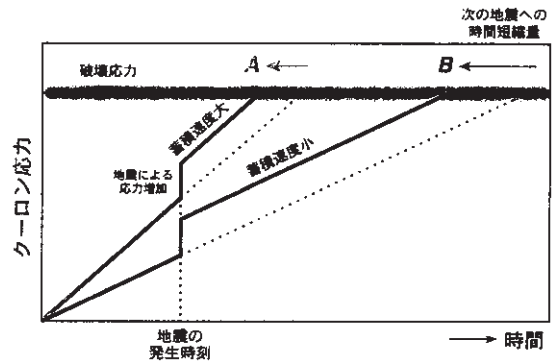


図7 歪の蓄積速度と次の地震までの時間短縮量の関係を示す模式図。蓄積速度の遅い断層(B)の方が速い断層(A)に比べて、時間短縮量が大きいことがわかる。

～近畿地方の断層に比べて、地震モーメントの解放速度が小さいことから、次の地震までの期間がかなり短縮されたことが予測される。

また、応力が高められると地震の発生数が非線形的に増加することが知られている(Toda et al., 1998)。したがって、弥畝山西 - 大原湖断層系においても3つの地震の発生によって応力が高められたことにより、今後地震発生数の増加が見込ま

れる。

以上のことから、弥敵山西 - 大原湖断層系に沿った3地震の発生によって、この断層系に沿った地域では一部を除いて、次の地震が発生するまでの期間が短縮されるとともに地震発生数の増加が見込まれ、全体的に地震危険度が高まっていることが指摘される。

## 7. おわりに

山口県中西部で発生した3つの被害地震について、それらの震源断層を詳しく検討してきた。さらに、これらの地震発生によるクーロン破壊関数(CFF)の変化を計算し、この地域の地震危険度との関係を議論してきた。その結果、被害地震の震央が並ぶ弥敵山西 - 大原湖断層系に沿った地域において応力が高められ、依然として地震発生の危険性が高いことが指摘された。また、これら応力増加によって、次の地震の発生時期が早まったと推定されることから、この断層系に沿った地域では地震に関して引き続き警戒していく必要がある。逆に、大原湖断層や渋木断層では応力低下が起き、次の地震発生時期が遅らされたことになる。

これまで、CFFによる応力変化の計算はM7以上の断層について行われてきた。しかしながら、我が国ではM5~6程度の地震が数多く発生しており、少なからず被害が出ている。したがって、地震被害を軽減するためには、これらの規模の地震の詳細な解析がますます必要となるであろう。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、山口県防災会議地震対策専門部会(委員長:山口大学工学部三浦房紀教授)の委員の方々には、山口県の断層や地震に関して多くの議論を頂いた。地震分布図の作成にあたっては、東京大学地震研究所鶴岡弘博士の地震解析システム(鶴岡, 1998)を使用させて頂いた。

本研究の一部には科学研究費補助金(no.12680463)の一部を使用した。

## 参考文献

- 1) 橋本 学: 兵庫県南部地震に伴う応力変化—断層モデルによるクーロン破壊関数の変化の計算と地震活動の変化との比較, 地震2輯, vol. 48, pp.521-530, 1995.
- 2) 橋本 学: 兵庫県南部地震震源域におけるクーロン破壊関数の時間変化のシミュレーション, 地震2輯, vol. 50 別冊, pp.229-249, 1998.
- 3) Ide, S.: Source process of the 1997 Yamaguchi, Japan, earthquake analyzed in different frequency bands, Geophys. Res. Lett., vol.26, pp.1973-1976, 1999.
- 4) 今岡照喜・上田 薫・村上充英・鈴木哲夫・脇坂安彦・甲斐野信一・横山義人・佐々木 浩(1984): 山口県十種ヶ峰周辺の白亜紀阿武群, 山口大学教養部紀要, vol. 18, pp.79-101, 1984.
- 5) 石川有三: 地震活動域の意義, 月刊地球, 号外, No.13, pp.71-80, 1995.
- 6) 地震調査委員会: 1997年6月25日山口県北部の地震(M6.1), SEISMO (MONTHLY地震レポート), vol. 1, pp. 6 - 7, 1997.
- 7) 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, 1997.
- 8) 金折裕司: 中国地方西部におけるカタクレサイト帯の再活動と断層ガウジの形成, 月刊地球, vol.21, pp.22-29, 1998.
- 9) 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, 1998.
- 10) 金折裕司・小林健治・安野泰伸・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.287-297, 1999.
- 11) 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.
- 12) Kanaori, Y., M.Sugito and T.Yamamoto: House damage by and simulation of ground motions of the 1997 magnitude 6.1 Northern Yamaguchi Prefecture earthquake, Jour. Natl. Disas. Sci., vol.21, pp.53-64, 1999.
- 13) 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, 438p, 1991.
- 14) King, G.C.P., S.R.Stein, and J.Lin: Static stress

- changes and triggering of earthquakes, Bull. Soc. Am., vol.84, pp.935-953, 1994.
- 15) 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.
  - 16) 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結果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.
  - 17) 村上充英・西野英之: 中国西部における後期中生代酸性岩類の火山層序学的研究 (II), 山口大学理科学部報告, vol. 17, pp.35-40, 1967.
  - 18) 西村祐二郎・今岡照喜・宇多村 譲・亀谷 敦: 新編山口県の地質 1:150,000, 山口県地学会, 1995.
  - 19) Parsons, T., S.Toda, R.S.Stein, A.Barka, J.H.Dieterich: Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: An interaction-based probability calculation, Science, vol.288, pp.661-665, 2000.
  - 20) Stein, R.S., G.C.P.King, and J.Lin: Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake, Science, vol.258, pp.1328-1332, 1992.
  - 21) Tajima, F. and H. Kanamori, Global survey of aftershock area expansion patterns, Phys. Earth Planet. Inter., vol.40, pp.77-134, 1985.
  - 22) 高橋道夫・石川有三: 1987年11月18日, 山口県の地震, 地震学会昭和63年度春季大会講演予稿集, pp.37, 1988.
  - 23) 武村雅之: 日本列島における地殻内地震のスケーリング則 - 地震断層の影響および地震被害との関連 -, 地震 2 輯, vol. 51, pp.211-226, 1998.
  - 24) 玉村修司: 山口複合盆地周辺の活断層とテクトニクス, 山口大学理学部卒業論文 (手記), 53p, 2000.
  - 25) Toda, S., R.S.Stein, P.A.Reasenber and J.H.Dieterich; Stress transferred by the 1995 M = 6.9 Kobe, Japan, shock : Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, J. Geophys. Res., vol.103, pp.24543-24565, 1998.
  - 26) 鶴岡 弘: WWWを用いた地震情報検索・解析システムの開発, 情報学基礎, vol.49, pp.65-70, 1998.
  - 27) 宇佐美龍夫: 新編日本被害地震総覧 [増補改訂版 4
- 16-1995], 東京大学出版会, 493p, 1996.
- 28) 山口県防災会議震災対策専門部会:1997年6月25日「山口県北部地震」とその被害の概要, 山口県総務部消防防災課, 8p, 1997.
  - 29) 山本哲朗: 1997年山口県北部地震とその被害, 地盤工学会誌, vol.45, pp.38, 1997.
- (投稿受理:平成12年9月13日  
訂正稿受理:平成13年5月7日)