

## 招待論文

# 1995年兵庫県南部地震 (M 7.2) の発生と高槻-六甲-淡路構造線の活動

CAUSAL RELATIONSHIP BETWEEN GENERATION OF THE 1995  
M7.2 HYOGO-KEN-NANBU EARTHQUAKE AND MOVEMENT OF THE  
TAKATSUKI-ROKKO-AWAJI TECTONIC LINE

## 金折裕司

Yuji KANAORI

理博 山口大学教授 理学部化学・地球科学科  
(〒753 山口市大字吉田1677-1)

*Key Words* : Hyogo-ken-nanbu earthquake, Takatsuki-Rokko-Awaji tectonic line, fault system, seismic risk assessment, seismic moment

### 1. 緒 言

兵庫県南部地震 (M 7.2) に誘発された阪神・淡路大震災から2年が経過しようとしている。この間、断層の活動と内陸地震の発生との因果関係を示唆する多くの調査結果や観測データが得られてきた。さらに、この地震を契機に“活断層”という言葉がクローズアップされ、一般にも広く知られるようになってきた。このため、国内の研究機関や行政機関などによって、活断層の調査や観測が重点的に実施されるようになり、活断層の実態に関する知見やデータが飛躍的に増大してきている。このようなデータを活用して、断層の活動と地震発生の因果関係を、より深く理解していく必要があろう。

兵庫県南部地震後に蓄積されたデータは、既存のモデルでは、活断層の活動と地震の発生を、十分に解釈することができないことを意味していた。さらに、活断層から発生する地震の危険度を見積もる場合、従来の方法では精度よく見積もられないことが指摘されている<sup>1)</sup>。したがって、これまでに得られてきたデータを総合して、兵庫県南部地震の発生を十分に説明できる新しいモデルの構築や、断層で発生する地震危険度を評価する方法の改良が必要となってきた<sup>1),2)</sup>。

これまで、兵庫県南部地震のような内陸地震は“活断層が動いて起きる”とされ、その発生パターンは時間的にも空間的にも規則性がない、と誤解されてきた。つまり、内陸地震はどこで起こるかかわからないし、どの活断層が動くかわからないと考えられてきたのである。この背景として、「個々の活断層は一定の

周期で活動して同一規模の地震を繰り返す」とする固有地震説<sup>3)</sup>が受け入れられてきたことが挙げられよう。これまでの研究では、個々の活断層が強調されすぎたように思われてならない。

日本列島で起きる内陸地震や周辺海域の巨大地震は、当然、そのテクトニック (造構的) な環境を反映して起きているのである<sup>2)</sup>。言い換えると、個々の活断層はそれぞれが個別に活動して地震を起こすのではなく、日本列島の置かれている巨視的なテクトニクスを反映して、地殻を切る断層もしくは断層系 (構造線) が動いて地震が起きる。そうだとすれば、“活断層”は地震に伴って地表に現れた破壊面に過ぎないことになる<sup>4)</sup>。

ここでは、まず、兵庫県南部地震で地表に現れた破壊面やクラックなどの調査結果をもとに、この地震の発生と高槻-六甲-淡路構造線 (断層系) の活動との関連性を指摘する。この関連性を考慮に入れながら、内陸地震の危険度を見積もる場合、従来から用いられてきている活断層の平均変位速度や長さによる危険度評価<sup>5)</sup>の問題点などを指摘してみよう。そして、従来の危険度評価法に代る方法として、地震モーメントの平均解放速度を指標とした地震危険度の評価方法<sup>6),7)</sup>の概要について解説する。この危険度評価法の妥当性を、兵庫県南部地震に伴う余震域や地表に現れた破壊面の分布、および地震モーメントの計算結果に基づいて検証してみよう。最後に、この地震の発生で明らかになった内陸地震の発生と断層系の活動との関係をまとめることにする。

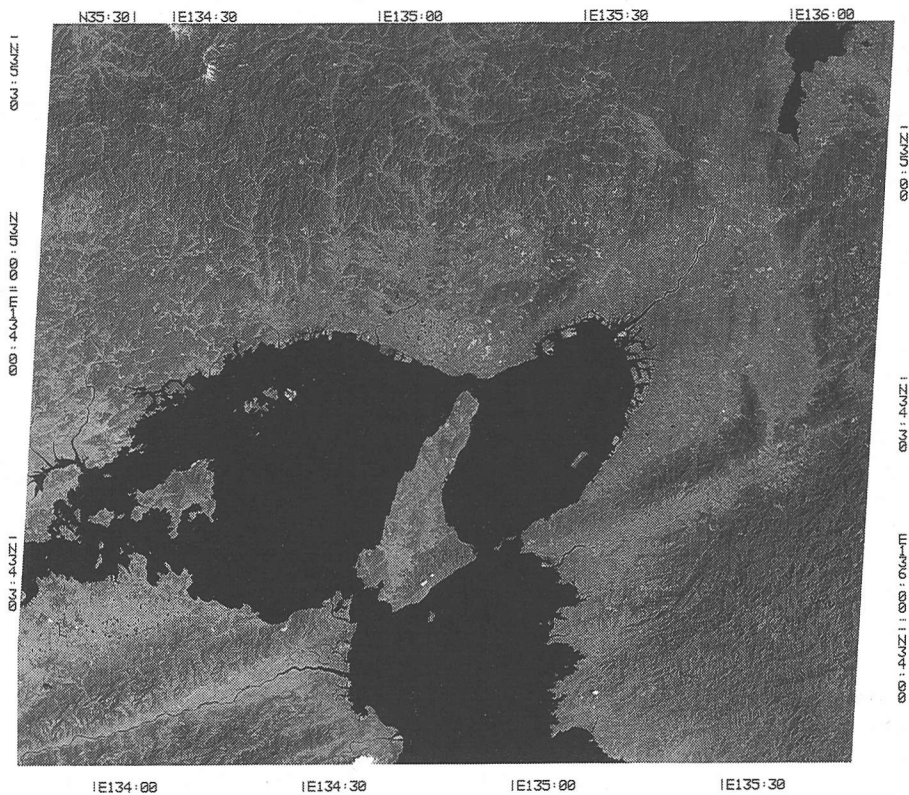


写真-1 阪神地域と淡路島を含む地域のランドサット画像（ナチュラルカラー）（1992年5月19日撮影，©リモートセンシング技術センター）。構造線が明瞭なリニアメント（線状模様）として現れている。

## 2. 活動した断層系と地震に伴う破壊面

### (1) 高槻-六甲-淡路構造線

兵庫県南部地震が起きた阪神から淡路島を含む地域のランドサット画像をながめてみると，方向の異なる明瞭なリニアメント（線状模様）が数本認められる（写真-1）。リニアメントと活断層分布との関係を調べると，これらのリニアメントは複数の活断層からなる断層系から形成されていることがわかる。すなわち，大阪平野と大阪湾を取り囲むように，花折-金剛断層線，高槻-六甲-淡路構造線，および中央構造線の存在が認定される（図-1）。

高槻-六甲-淡路構造線の東側の約20 kmには，中生界と新生界を区分する中央構造線に匹敵する地質境界線として，有馬-高槻構造線が存在する<sup>8)</sup>。有馬-高槻構造線の西南西延長で，神戸市北部を占める六甲山系には，右横ずれセンスを持つ北東-南西～東北東-西南西方向の活断層が雁行状に配列している<sup>9)</sup>。さらに，淡路島の北部にも野島断層などの右横ずれの活断層が存在する。これらのことから，高槻-六甲-淡路構

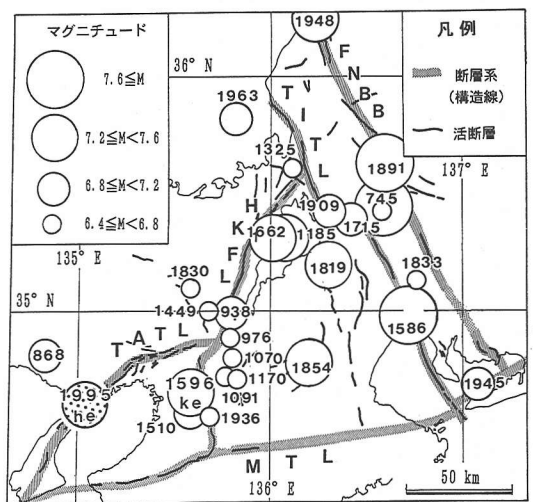


図-1 断層系の位置を歴史被害地震 ( $M \geq 6.4$ ) の震央<sup>2)</sup>。震央の位置は宇佐美<sup>18)</sup>に基づく。ke: 慶長伏見地震, he: 兵庫県南部地震, HKFL: 花折-金剛断層線, MTL: 中央構造線, TATL: 高槻-六甲-淡路構造線, TITL: 敦賀湾-伊勢湾構造線, FNBB: 福井-根尾谷ブロック境界。

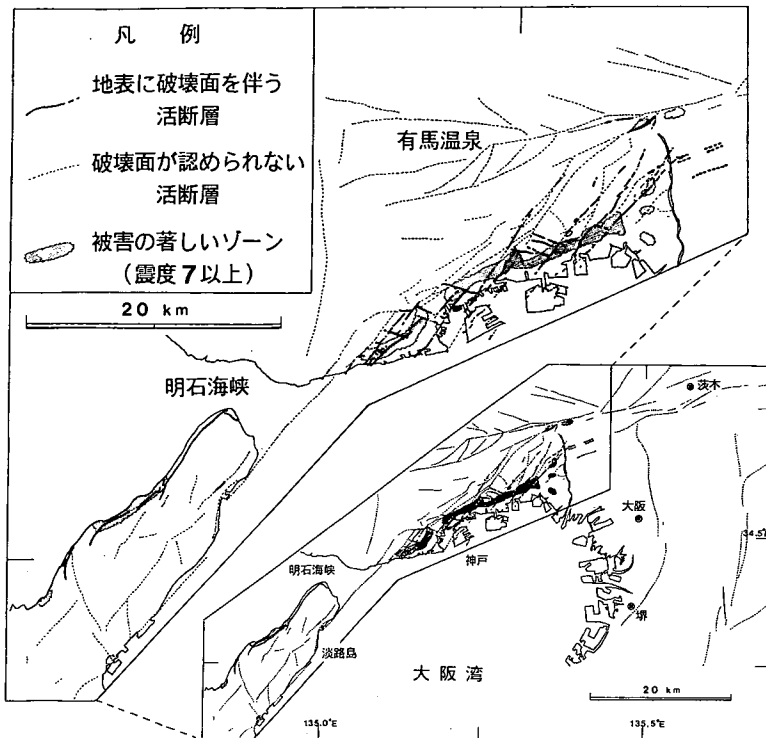


図-2 兵庫県南部地震の被害域と、地表に現れた破壊面および既存の活断層分布。活断層の分布は、主として活断層研究会<sup>9)</sup>に基づく。被害域と地表に現れた破壊面の分布は、筆者らの現地調査結果と、日本応用地質学会 阪神・淡路大震災調査委員会<sup>11)</sup>の結果を総合したものである。

造線は、有馬-高槻構造線から西南西に連続して淡路島を縦断し、中央構造線までつながる可能性がある<sup>2),10)</sup>。この構造線の全長は100 kmに達すると推定される。

また、琵琶湖の西岸を通る花折断層と、生駒断層、金剛断層など南北方向の活断層をつなぐ断層系として、花折-金剛断層線が定義されている<sup>11)</sup>。高槻-六甲-淡路構造線は京都盆地南部で花折-金剛断層と分岐し、淡路島の最南部で中央構造線に合流する。中央構造線に沿っても、右横ずれの活断層が雁行状に配列している<sup>12)</sup>。

## (2) 地表に現れた破壊面

家屋などの被害が集中したゾーン(震度7以上)と活断層の分布、地表に破壊面が現れたゾーンを、図-2に示した。阪神地域で被害の集中したゾーンは海岸線に平行で、六甲山系の活断層群の分布するゾーンや地表に破壊面が現れたゾーンと必ずしも一致していない。

淡路島北部では、西岸沿いの野島断層に沿って地表

に破壊面が出現し、北東-南西方向に約9 kmほど連続した(写真-2)。この破壊面の最大変位は、右横ずれ1.7 m、垂直1.3 m北西落ちである<sup>13)</sup>。地表に現れた破壊面に近づいてみると、長さ1 m程度の開口クラックが雁行状に配列していることがわかる。この開口クラックの配列パターンが“杉の字のつくり”に似ていることから杉型雁行と呼ばれ、右横ずれの剪断ゾーンに伴って出現する伸張クラックであることが知られている<sup>14)</sup>。

断層面には、ストリエーション(条線)が刻まれていることがある。写真-3には2方向のストリエーションが明瞭に認められ、水平に近い条線(S<sub>H</sub>)がほぼ垂直な条線(S<sub>V</sub>)を切っているように見える。一般に、条線の方法は断層の運動方向の指標として用いられており、2方向の条線の存在は、まず、断層が上下に運動した後、水平運動が起きたことを示唆している。

地震発生から4カ月後に、野島断層の東5 kmに、北東-南西方向で数10 cmの変位を持つ破壊面が長さ1.5 kmにわたって連続していることが確認され

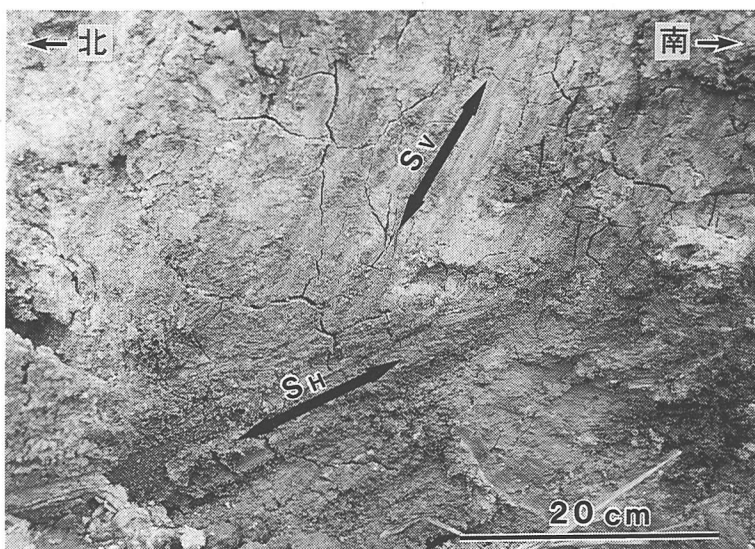


写真-3 兵庫県南部地震に伴って地表に現れた破壊面に刻まれたストリエーション(条線)。2方向のストリエーションが認められ、傾斜の緩い $S_H$ が急傾斜の $S_V$ を切っている。



写真-2 兵庫県南部地震に伴って地表に現れた破壊面、淡路島北淡町。(株)日本航空撮影。

た<sup>15)</sup>。このことから、淡路島では西岸の野島断層だけでなく、東岸の断層に沿って破壊面が出現したことになる。したがって、兵庫県南部地震の発生を単に野島断層の活動だけで説明することは困難であり、大規模な断層系の存在を推定しなければならない。

六甲山系に分布する既知の活断層およびその東の宝塚市付近には、地表に数10 cm以下の右横ずれ変位を伴う剪断クラックが随所で確認されている。その一例を写真-4に示した。剪断クラックは長さ数10 mほど追跡され、長いものは数100 mに及ぶと推定される。

図-3に六甲山系に現れた剪断クラックと活断層および断層帯との関係を模式的に示した。地表に出現した雁行状の剪断クラックは、六甲山系に分布する既存の活断層に沿った変位を反映しているとみなされる。そして、剪断クラックが出現した活断層の分布するゾーンとして断層帯が認定され、兵庫県南部地震が大規模な断層系の活動で起きたことが示唆される。同様な地表クラックと断層帯の関係は、1969年にイランで起きたDasht-e-Bayaz地震( $M 7.2$ )<sup>16)</sup>でも確認されている。

### (3) 推定破壊域

兵庫県南部地震の震央は、高槻-六甲-淡路構造線のほぼ中央部に位置していた(図-1参照)。この地震に伴う余震の分布を図-4に示す。余震の分布と構造線の位置を重ねあわせてみると、構造線の中央部約40 kmのゾーンに沿って余震が起きていることがわかる。図-5(a)に、余震域や地表に現れた破壊面やクラックが分布するゾーンの存在から推定された兵庫県南部地震に伴う破壊域を示した。推定された破壊域

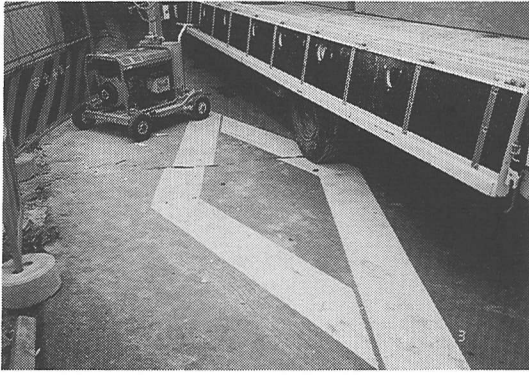


写真-4 宝塚高架橋（中国自動車道）脇で発見された右ずれ剪断クラック。道路に描かれた標識が右にずれている。名古屋道路エンジニア（株）榎田末治氏撮影。

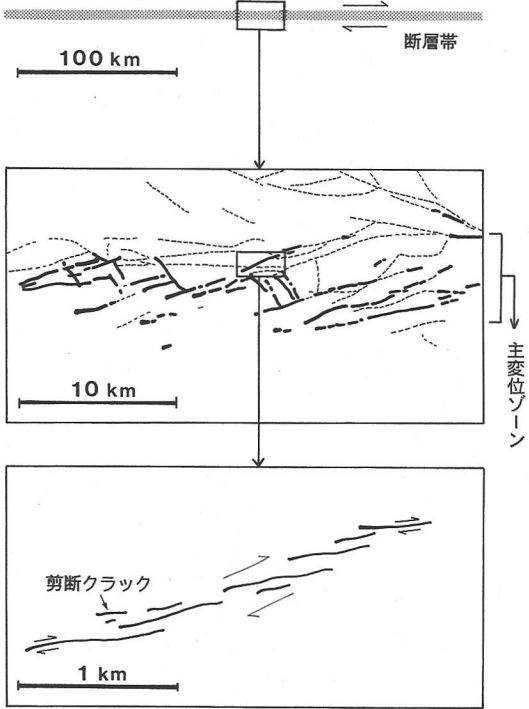


図-3 地表に現れた剪断クラックと活断層、および断層帯の関係を示す概念図。既存の活断層に沿って、地震時に剪断クラックが出現した。さらに、剪断クラックの現れた活断層が断層帯を形成している。

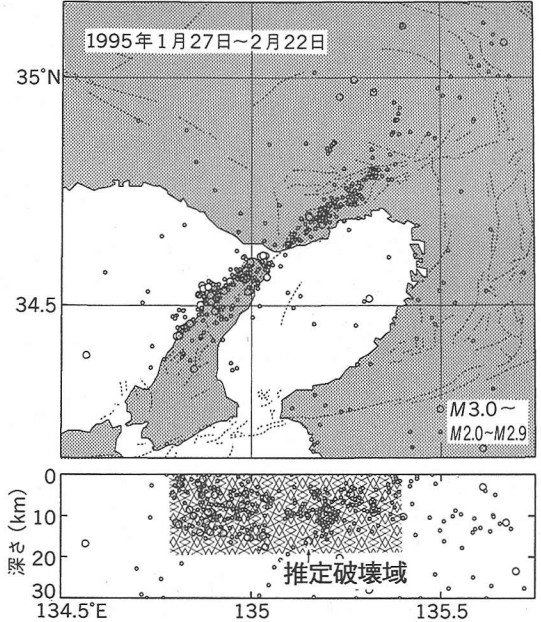


図-4 余震の震央分布<sup>42)</sup>と推定破壊域。

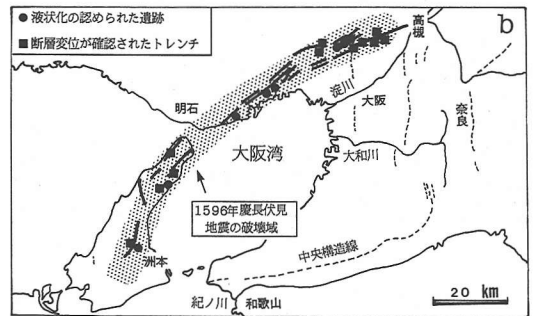
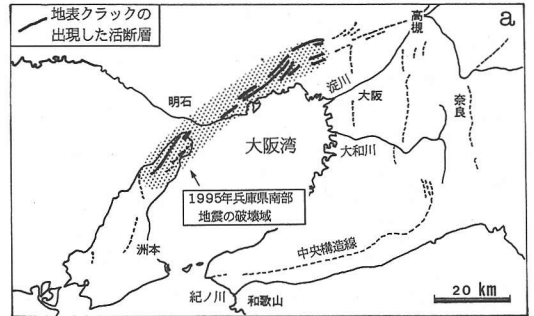


図-5 (a)余震と地表に現れたクラックの分布から推定された1995年兵庫県南部地震の推定破壊域。(b)液状化の認められた遺跡<sup>20)</sup>と断層変位が確認されたトレンチ<sup>21)</sup>から推定された1596年慶長伏見地震の破壊域。

は、高槻-六甲-淡路構造線中央部の長さ 40 km、幅 20 km のゾーンであるとみなされる<sup>17)</sup>。

### 3. 1596 年慶長伏見地震

近畿地方に被害を与えてきた歴史地震<sup>18)</sup>のうち、マグニチュード  $M 6.4$  以上の大地震の震央の大半は、活断層をつなぐ線として定義される断層系（構造線）上、もしくはそれに沿っている（図-1 参照）。

近畿地方を襲った規模の大きい歴史地震の 1 つとして、1596 年慶長伏見地震が有名である。この地震で震度 6 の地震動を被ったと推定された範囲は、高槻-六甲-淡路構造線と花折-金剛断層線、中央構造線に囲まれた地域に一致する。震度 6 の地域の広がりから、地震のマグニチュードは 7.5 と見積もられ、震央は被害範囲のほぼ中央部に想定された<sup>19)</sup>（図-1 中の ke）。

最近では、我が国全体で年間 1 万件以上におよぶ遺跡が発掘されており、その一部では地震に伴う液状化痕が確認されている<sup>19)</sup>。利用可能な遺跡の発掘データに基づくと、液状化痕の確認された遺跡の一部は、京都から淡路島にかけての高槻-六甲-淡路構造線に沿っている<sup>20)</sup>。これらの液状化を誘発したと推定される地震イベントの時期は、紀元前 500 年頃、西暦 500 年頃、および 1500 年頃の 3 回である。このうち、1500 年頃の液状化イベントは、1596 年慶長伏見地震（推定  $M 7.5$ ）に対応する可能性がある。図-5(b)に示すように、1500 年頃のイベントを示す遺跡の位置は、淡路島中南部から六甲山系東まで、高槻-六甲-淡路構造線全域の広い範囲に及んでいる。さらに、兵庫県南部地震後に発掘されたトレンチ調査の結果<sup>21)</sup>から、1596 年慶長伏見地震と推定される断層変位が、高槻-六甲-淡路構造線の東部と南部を構成する活断層で確認されている。兵庫県南部地震を発生させた高槻-六甲-淡路構造線は、約 400 年前の慶長伏見地震の時には、その全域が動いた可能性が指摘される。

以上のことから、慶長伏見地震では高槻-六甲-淡路構造線の全域が破壊したと推定されるのに対し、兵庫県南部地震ではその構造線の東部と西部が未破壊のまま残されている（図-5）。未破壊の領域の長さはそれぞれ 30 km である。この領域では歪み解放されていないため、地震発生危険性が指摘される。

### 4. 既存の地震危険度評価-その問題点

断層から発生する地震の危険度を評価する場合、既存の方法では断層の長さとその平均変位速度がそれぞれ独立に用いられてきた<sup>22), 23)</sup>。つまり、断層の長さ

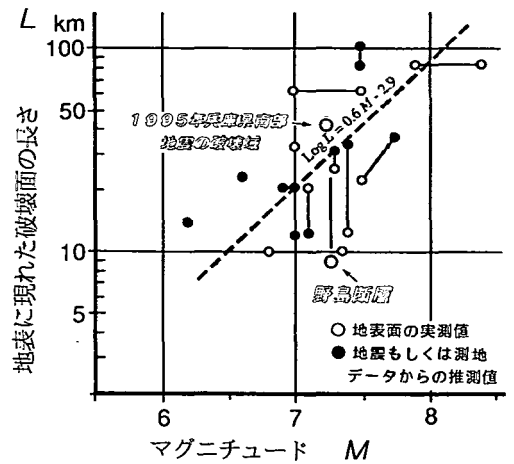


図-6 地震に伴って地表に現れた破壊面（断層）の長さ  $L$  とその地震のマグニチュード  $M$  の関係<sup>22)</sup>。同一の地震の実測値と推定値は実線で結んである。図には 1995 年兵庫県南部地震 ( $M 7.2$ ) の震源断層と野島断層に沿って現れた断層のデータが加筆されている。

はそこから発生する地震の規模を想定するのに用いられ、平均変位速度は断層の活動間隔を見積もることに使われてきた。ここでは、この 2 つのパラメータを用いた地震危険度の評価の概要を解説するとともに、その問題点を指摘してみよう。

#### (1) 断層の長さ地震の規模

図-6 に、地震の時に地表に現れた破壊面（断層）の長さ  $L$  とその地震のマグニチュード  $M$  の関係を示す。この関係から、 $L$  と  $M$  について次の経験式が導かれている<sup>22)</sup>。

$$\log L(\text{km}) = 0.6M - 2.9 \quad (1)$$

この関係式を使うと、断層の長さ  $L$  が与えられた場合、そこで発生する地震のマグニチュード  $M$  が想定できることになる。そして、活動した断層の長さが長いほど、そこで起きる地震の規模が大きいことを意味する。この場合、地表で確認される断層は、地震を起こした破壊面が地表と交わる線であるため、断層の長さ  $L$  は、当然、震源となった地下の破壊面の長さには等しいか、もしくはそれより短いことになる。例えば、兵庫県南部地震に伴って地表に現れた破壊面は野島断層に沿っており、その長さは 9 km であった<sup>13)</sup>。一方、余震や破壊面の分布から実際の震源断層の長さは 40 km と推定され、野島断層の活動だけではこの分布が説明できない。

兵庫県南部地震のマグニチュード 7.2 から、式(1)を使って断層の長さを見積もると 26 km が得られ、地表に現れた破壊面である野島断層より長く、震源断

層の長さより短くなっている。逆に、余震分布から推定された震源断層の長さ 40 km からマグニチュード  $M$  を計算すると、7.5 が得られ実際よりも大きい値が得られる。断層の長さと地震のマグニチュードの関係を使って規模を見積もる場合、 $M$  のおおよその値が与えられることを念頭に置く必要がある。

## (2) 平均変位速度

断層に沿って確認される地層や地形のずれは、その断層が形成されて以降に起きた複数回の活動で累積された変位をみていることになる。断層の累積変位量  $D$  を、それが蓄積された期間  $\tau$  で割った値  $D/\tau$  が、その断層の平均変位速度  $S$  である。地層や地形の指標を使うため、平均変位速度は数十万年から百万年間の平均値として得られるのが普通である。ここで、平均変位速度はあくまでも長期間での平均値であり、1 回の変位量を示すものではないことを留意しておかなければならない。

平均変位速度  $S$  を指標として、『新編日本の活断層』<sup>9)</sup> では、活断層が次の 3 種類に分類されて描かれている。単位はいずれも m/千年 (mm/年) である。

- A 級活断層  $1 \leq S < 10$
- B 級活断層  $0.1 \leq S < 1$
- C 級活断層  $0.01 \leq S < 0.1$

兵庫県南部地震では野島断層に沿って、1.7 m の右横ずれ変位が現れた。この断層は高槻-六甲-淡路構造線を構成しており、1596 年慶長地震 ( $M 7.5$ ) の時にも活動したことが推定される。地震後に行なわれた野島断層のトレンチ発掘調査によっても、このことが確認された<sup>24)</sup>。野島断層は約 400 年間に 1.7 m 変位したことになり、平均変位速度として 4 m/千年が得られる。上記の分類に従えば野島断層は A 級活断層に属することになる。ところが、『新編日本の活断層』<sup>9)</sup> では B 級活断層に分類されていた。このことは、1 回の地震による変位量が、長期間のすべりの平均値として得られる平均変位速度と必ずしも同じ桁でないことを意味している。次に述べるように、平均変位速度から特定の地震の規模やその活動間隔を見積もる時には注意が必要である。

## (3) 平均変位速度と活動間隔

Wallace<sup>25)</sup> は、断層の活動間隔  $R$  (年) と 1 回の断層の変位量  $d$  (m)、平均変位速度  $S$  (m/年) の間に、 $R = d / (S - C)$  の関係が成立していることを示した。ここで、 $C$  (m) は断層変位のクリープ成分である。日本に存在する活断層ではクリープ成分が認められていないので  $C$  がゼロとなり、 $R = d / S$  が得られる<sup>22)</sup>。この関係に基づくと、図-7 に示すように、1 回の地

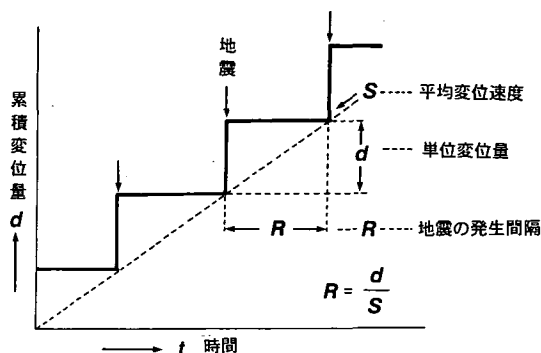


図-7 活断層の平均変位速度を指標とした地震の危険度評価<sup>23)</sup>。地震に伴う変位量  $d$  とその活動間隔  $R$  の関係を示す。

震に伴う変位量  $d$  が与えられれば、それを平均変位速度  $S$  で割ることによって、地震の発生間隔  $R$  が計算されることになる。

上記の  $d$  と  $S$  の関係を使って、これまで活断層の活動間隔  $R$  が見積もられてきた。例えば、1930 年北伊豆地震 ( $M 7.3$ ) では、丹那断層に 2 m の右横ずれ変位が生じた。丹那断層は平均変位速度が 2 m/千年であり、A 級活断層に分類される。変位量と平均変位速度の関係から、丹那断層の活動間隔を求めると千年が得られる<sup>26)</sup>。さらに、C 級活断層に属する深溝断層は、1945 年三河地震 ( $M 6.8$ ) の時に約 1 m ほど垂直に変位した。深溝断層の平均変位速度は 0.08 m/千年なので、活動間隔として約 1 万年が得られることになる。かくして、A 級活断層は千年に 1 回、C 級活断層は 1 万年に 1 回、B 級活断層はその中間的な発生間隔をもつと考えられてきたのである。しかしながら、活断層の級ごとに活動間隔が異なることは明確に示されていないばかりか、その物理学的な意味はよくわかっていない<sup>27)</sup>。

すでに述べたように、兵庫県南部地震での野島断層に見られたように、1 回の地震で地表に生じた変位は、長い期間での平均変位速度を必ずしも反映していなかった。さらに、この地震で神戸市側に現れた地表変位は、淡路島北部に比べて大変小さかった。1984 年長野県西部地震 ( $M 6.8$ ) では地表変位が確認されていない<sup>28)</sup>。これらのことから、1 回の地震変位  $d$  と平均変位速度  $S$  から見積もられた活動間隔  $R$  を使って、地震の危険度や次に起きる時期を想定する場合には、思わぬ過小評価をする危険性があることが指摘される<sup>29)</sup>。例えば、有馬-高槻構造線の右横ずれ平均変位速度は 0.5~1.5 m/千年と見積もられている<sup>30)</sup>。野島断層もこの程度の平均変位速度を持つとすれば、その活動間隔は  $1.7 \text{ m} / (0.5 \sim 1.5) \text{ m/千年}$  となり、

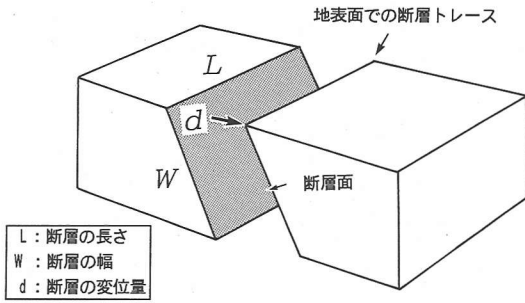


図-8 断層と変位を示す概念。

1100~3400年となる。これは今回の地震の活動間隔の4~10倍も大きい。一方、400年前の慶長伏見地震が野島断層の活動と関係していないとみなし、この活動間隔が妥当であるとする考えもあり<sup>31)</sup>、これについては今後の検討が必要であろう。

このようにして推定された活動間隔には、1/2から2倍のばらつきがあるとする指摘がある<sup>32)</sup>。例えば、1000年の活動間隔を持つ断層の場合、その断層の活動間隔は500年から2000年の範囲にあることになる。このようなばらつきを持った値は構造物の耐久年数を100年と想定しても、そのような短期間ではもはや活動するかしないかの意味を持たないことになる。

## 5. 新しい地震危険度評価法の提案

ここでは断層の長さ、変位量もしくは平均変位速度の関数であるモーメントとその平均解放速度を指標として、地震危険度を見積もる方法について詳しく解説する<sup>1),6),17)</sup>。この方法は断層の長さ、平均変位速度とを、それぞれ独立に扱う従来の方法の欠点を補うものである。

### (1) モーメントの平均解放速度

長さ  $L$  の断層が地震時に  $d$  だけ変位したとすると(図-8)、断層運動で解放される地震のモーメント  $m_0$  は  $\mu L W d$  で与えられる。ここで、 $\mu$  は剛性率で、 $W$  は断層の幅である。さらに、同一断層面において任意の期間  $\tau$  に地震で解放されたモーメントの総量は  $\mu L W \Sigma d$  となる。 $\Sigma d$  は累積変位量  $D$  に等しいので、地震モーメントの平均解放速度  $r$  は、次の式で表される。

$$r = \mu L W D / \tau \quad (2)$$

ここで、 $D/\tau$  は断層の平均変位速度  $S$  である。地震モーメントの平均解放速度  $r$  は、剛性率と断層面の面積および平均変位速度の積として与えられることになる。

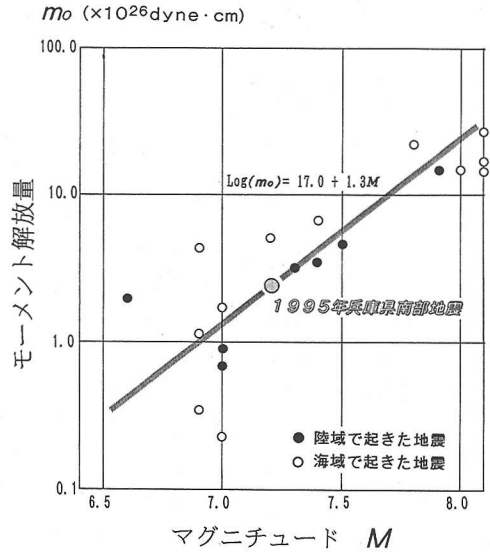


図-9 中部日本で起きた地震によるモーメント解放量  $m_0$  とマグニチュード  $M$  の関係<sup>6)</sup>。直線は Wesnousky et al.<sup>33)</sup> による。データは主として宇佐美<sup>18)</sup> に基づく。参考までに、海域で起きた地震のデータも示した。

日本列島およびその周辺で起きた地震について、マグニチュード  $M$  と地震で解放されたモーメント  $m_0$  には、次の経験式が得られている<sup>33)</sup>。

$$\log m_0 = 17.0 + 1.3M \quad (3)$$

図-9に、中部日本にこれまで起きた地震によるモーメント解放量  $m_0$  とマグニチュード  $M$  の関係を示す。特に、陸域で起きた地震について、上記の式(3)が成立する傾向が読み取れる。兵庫県南部地震 ( $M$  7.2) のモーメント量として  $2.49 \times 10^{26}$  dyne·cm/年 が得られており<sup>34)</sup>、この地震でも上記(3)の関係が成立していることがわかる。

### (2) 平均解放速度と地震の発生間隔

モーメント平均解放速度が一定であるとみなされる場合には、対象とする断層もしくは断層系に蓄積される最大モーメント  $m_0$  は、地震の発生間隔  $T$  とモーメントの平均解放速度  $r$  の積で与えられる。つまり、 $m_0 = rT$  が成立する。この両辺の対数を取り、式(3)を使って  $m_0$  を消去すると次の関係が導かれる。

$$\log T = 1.3M + 17.0 - \log r \quad (4)$$

図-10には、 $r$  を与えた場合について、地震の発生間隔  $T$  と想定される地震のマグニチュード  $M$  の関係を示した。この関係を利用すると、対象とする断層もしくは断層系での地震モーメントの平均解放速度が与えられれば、想定される地震のマグニチュード  $M$  から、地震の発生間隔  $T$  が求まることになる。ま



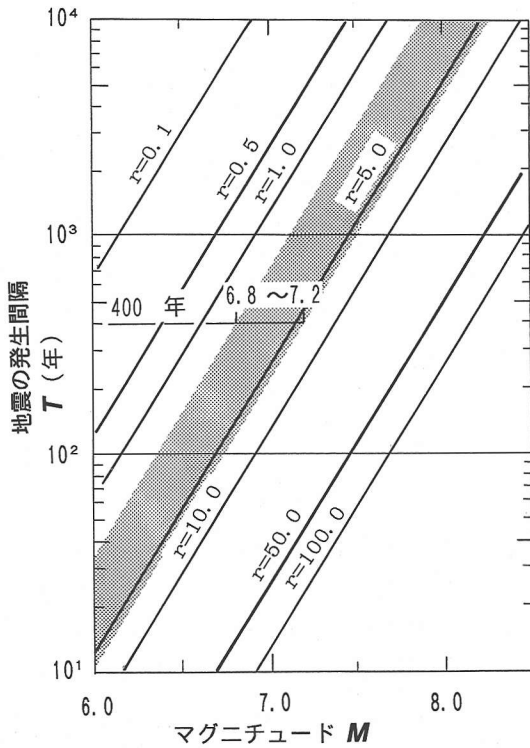


図-10 モーメントの平均解放速度  $r$  ( $\times 10^{26}$  dyne $\cdot$ cm/年) を指標とした場合の、地震の発生間隔  $T$  とその地震のマグニチュード  $M$  の関係<sup>14)</sup>。砂目をつけたゾーンは、構成する活断層の平均変位速度から求められた高槻-六甲-淡路構造線でのモーメント平均解放速度  $r$  の範囲を示す。

た、逆に、地震の発生間隔  $T$  がわかれば、その断層や断層系で起きる地震のマグニチュード  $M$  が予測できることになる。

ここで、1995年兵庫南部地震 ( $M$  7.2) と高槻-六甲-淡路構造線の活動との関係を検討してみよう<sup>17)</sup>。余震分布や地表破壊面の分布から推定された破壊セグメントの長さ  $L$  と幅  $W$  はそれぞれ、40 km と 20 km で与えられる。一方、有馬-高槻構造線を構成する活断層の平均変位速度は、河成段丘の変位量から地形学的に見積もられており、それぞれ右横ずれ 0.5~1.5 mm/年、垂直ずれ 0.1~0.8 mm/年である<sup>30)</sup>。これらの値を式(2)に代入すると、モーメント平均解放速度  $r$  として、 $0.0017\sim 0.0063 \times 10^{26}$  dyne $\cdot$ cm/年が得られる(表-1)。高槻-六甲-淡路構造線での1つ前の地震イベントが1596年慶長伏見地震であるとする<sup>20), 21)</sup>、地震の発生間隔  $T$  として約400年が見込まれる。このようにして見積もられた  $r$  と  $T$  から、図-10に示されるように、マグニチュード  $M$  として6.8~7.2が得られる。 $M$  の上限値は兵庫県南部地震

表-1 兵庫県南部地震を起こした破壊面でのモーメント平均解放速度

変位成分	平均変位速度* S (mm/年)	モーメント平均解放速度 $r$ ( $\times 10^{26}$ dyne $\cdot$ cm/年)
右横ずれ	0.5~1.5	0.0014~0.0041
垂直ずれ	0.1~0.8	0.0003~0.0022
合計		0.0017~0.0063

$L=40$  km,  $W=20$  km,  $\mu=3.4 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup>

\*寒川<sup>30)</sup>に基づく

の値と一致し、この評価法の妥当性を裏付けていると同時に<sup>11)</sup>、モーメント平均解放速度が一定であるとした仮定も満足していると考えられる。

高槻-六甲-淡路構造線の東側と西側でそれぞれ長さ30 kmの未破壊領域が認定された。そこで発生すると想定される地震のマグニチュード  $M$  を、上記と同様な方法で見積もると6.7~7.1が得られる。

### (3) 地震規模ポテンシャルと危険度

断層もしくは断層系において、仮に今活動が起これり、モーメントが解放されると仮定する。この時の地震のマグニチュードを、その断層もしくは断層系の地震規模ポテンシャル  $M_p$  と呼ぶことにする。この地震規模ポテンシャルは次のようにして、見積もることができる<sup>11)</sup>。

まず、対象とする断層ないし断層系について最新の地震からの経過時間  $t$  (年) を計算する。式(4)もしくは図-10の地震の発生間隔  $T$  を経過時間  $t$  に置き換える。そうすると、対象とする断層もしくは断層系のモーメント平均解放速度  $r$  と経過時間  $t$  から、現時点で発生するとした場合、その地震のマグニチュードを想定することが可能となる。

大規模構造物の近傍に断層もしくは断層系が存在する場合、それから発生する地震を耐震設計上の入力として考慮する場合も、ここでの考え方が適用できる。構造物の耐久年数を100年とみた場合、最新の地震から現在より100年後までの期間を経過時間と考え、上記と同様な見積もりを行なうと、100年後での地震規模ポテンシャルが計算できる。

表-2には実際の計算例として、1995年現在 ( $M_p$ ) および100年後 ( $M_{p+100}$ ) での敦賀湾-伊勢湾構造線を構成する断層の地震規模ポテンシャルを示した。この場合、最新の活動期での破壊域もしくは空白域を、次の地震での破壊域と想定している。今後は、大規模構造物の耐震設計のための地震入力の基礎データとして、この地震規模ポテンシャルを用いてはどうだろうか。

地震モーメントの平均解放速度を使って、断層もし

表-2 地震規模ポテンシャルの計算例.

敦賀湾-伊勢湾構造線 ( $L=185$  km,  $r=0.0122-0.0138 \times 10^{26}$  dyne  $\cdot$  cm/年)

想定破壊域*	長さ	モーメント平均解放速度	経過時間**	地震規模ポテンシャル	
	$L$ (km)	$r$ ( $\times 10^{26}$ dyne $\cdot$ cm/年)	$t$ (年)	$M_D$	$M_{D+100}$
空白域 D (甲斐城断層)	30+	0.00198-0.0024	1000	7.2	7.2
空白域 E (柳ヶ瀬断層)	30	0.00198-0.0024	670	7.0	7.1
1909年姉川地震 (関ヶ原断層)	15	0.00099-0.00112	86	6.1	6.4
1586年天正地震 (養老断層・伊勢湾断層)	80	0.0053-0.0060	409	7.2	7.3

\*空白域の位置は金折・川上りに基づいている.

\*\*1995年現在

くは断層系の地震危険度, すなわち, 来たるべき地震のマグニチュード, モーメント解放量, 発生時期, 破壊面の長さを推定しようとする場合, その精度は(1)震源となる破壊面の規模, (2)平均変位速度もしくは歴史地震のマグニチュードに依存している. したがって, 上記に述べてきた方法を用いて地震危険度を計算する場合, この2つのパラメータをできる限り正確に調べていかなければならない.

## 6. 断層活動と地震発生

内陸地震として最大規模であった1891年濃尾地震( $M 8.0$ )の発生を契機に, 「断層が動くとき地震が起きる」ことが指摘され<sup>35)</sup>, この因果関係は現在では広く受け入れられている. そして, この地震以降, 中部地方西部から中国地方東部にかけて内陸地震が続発し, 大被害が発生した<sup>36)</sup>. しかし一方では, 皮肉なことに地震が起きる度に, 断層活動と地震発生の因果関係が明瞭になり, それに関する知識を学んできたことも確かであろう. 都市およびその周辺地域では, 1948年福井地震( $M 7.1$ )以降, 大規模な地震被害が発生しなかったことから, 地震の脅威が遠のいたかのように感じられていた. ところが, 1995年1月17日に突如として, 阪神から淡路島にかけての地域に大地震が襲い, 大都市神戸に信じられないような大災害が発生した.

6300人を越える犠牲者が出た兵庫県南部地震から, 私たちはいま断層と地震に関して何を知り, 何を学ばなければならないのだろうか. そして, それから得た知見を充分に活用し, 今後起きるであろう内陸地震による災害の軽減に役立てていかなければならない. 兵庫県南部地震の発生と断層活動との関連性については, 現在もなお議論が続けられているが<sup>37), 37), 38)</sup>, 次のことが指摘されよう.

(1)淡路島北部から六甲山系におよぶ断層系(構造線)の活動で, この地震が発生したと推定される. このことは, 個々の活断層が独立して動くとする“固有地震モデル”が成立しない場合があることを意味している<sup>39)</sup>. 淡路島北部では既存の野島断層に沿って地表に明瞭な破壊面が出現したのに対し, 六甲山系の活断層沿いの地域では, 小規模な地表クラックしか出現しなかった. これらのことから, 地震は地殻を構成する断層に沿った岩盤の食い違いで起き, 地震に伴って地表に現れた破壊面が, “活断層”であるとみなすことができよう.

(2)この地震の震源となった断層系は, それに対応する歴史地震がよくわかっていなかったため, 1000年以上も活動していない地震が起きる危険性の高い断層系とする見方もあった<sup>40)</sup>. しかしながら, 兵庫県南部地震の直後に行なわれたトレンチ掘削による野島断層の調査から, この断層では400年前にも活動があった証拠が提出された<sup>24)</sup>. トレンチ掘削で確認された上記400年前のイベントは, 1596年慶長伏見地震(推定 $M 7.5$ )に対応する可能性が高い. 兵庫県地震と慶長伏見地震では規模が異なることから, 破壊域や連動した断層系に違いがあると思われる. このことから, 地震ごとに連動する断層系や破壊域が異なり, それに伴って発生する地震の規模が異なることが予想される.

(3)日本列島内陸の活断層はばらつきはあるものの, 約1000年もしくはそれより長い期間に一度動いて地震を起こすとみなされていた<sup>22), 23)</sup>. 今回の地震はこれよりもかなり短い間隔で起きたため, 活断層の活動間隔に対して大幅な見直しが要求される. 一方, 兵庫県南部地震の発生はこれまでのモデルで充分説明できるとする指摘もあるが<sup>31)</sup>, これについては再検討が必要であると考えられる.

(4)兵庫県南部地震は高槻-六甲-淡路構造線の中央

部の40 kmが破壊して起きたと推定され、その東側と西側のそれぞれ30 kmは未破壊で残されているので、将来この部分でM7前後の地震の発生が危惧される。

## 7. 結 語

以上に、兵庫県南部地震の発生と高槻-淡路-六甲構造線の活動性との関連性を指摘してきた。この地震の発生が意味したことを考慮に入れると、既存の断層と地震に関するモデルを見直さなければならない。従来のモデルは単純すぎたきらいがあり、兵庫県南部地震の発生をこれらのモデルの中で十分に位置付けることが困難であり、かつ、矛盾する点も多く認められた。内陸地震で誘発される地盤災害を軽減する意味でも、これまでのモデルに拘泥することなく、新たな視点から断層と地震を捉え直す必要がある。既成の概念を見直す切っ掛けとしての兵庫県南部地震は、あまりにも犠牲が大きすぎたのではなからうか。

今後も個々の活断層を対象として詳しく研究することの重要性は指摘するまでもないが、その活断層を断層系(構造線)の構成要素として位置付け、巨視的な視点から個々活断層で得られたデータを検討していくことも必要であろう。特に、大規模構造物の耐震設計上の基礎資料を得るためには、ここで提示した地震危険度の評価方法について、その妥当性を検討して頂ければ幸いである。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、岐阜大学川上紳一助教授には貴重な助言を頂いた。(財)電力中央研究所遠田晋次氏、(株)名古屋道路エンジニア榎田末治氏、(株)国際航業妹尾正晴氏、東洋地質調査(株)中井卓己氏には、兵庫県南部地震に関わる現地踏査結果についてご教示頂いた。図の作成や参考文献の整理は、園原(安藤)由美子さんをお願いした。ここに記して深謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 金折裕司, 川上紳一: 内陸被害地震の危険度評価と中部日本の断層系への適用, 応用地質, 37巻, pp. 201-218, 1996.
- 2) 金折裕司, 川上紳一: マイクロプレート・モデルと内陸被害地震: 1995年兵庫県南部地震(M7.2)の発生を考える, 地震2, Vol. 49, pp. 125-139, 1996.
- 3) Schwartz, D. P. and Coppersmith, K. J.: Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas faults, *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, pp. 5681-5698, 1984.
- 4) Kanaori, Y., Kawakami, S. and Yairi, K.: 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.

- 5) 垣見俊弘: 古地震研究の歩み-古地震から大地震の再来を予測する, 太田陽子・島崎邦彦編, 古地震を探る, 古今書院, pp. 3-26, 1995.
- 6) Kanaori, Y., Kawakami, S. and Yairi, K.: Space-time distribution patterns of destructive earthquakes in the inner belt of central Japan (part 2): moment-release rates and earthquake prediction, *Eng. Geol.*, Vol. 32, pp. 113-122, 1992.
- 7) Kanaori, Y., Kawakami, S. and Yairi, K.: Space-time distribution patterns of destructive earthquakes in the inner belt of central Japan (part 3): seismic risk assessment, *Eng. Geol.*, Vol. 33, pp. 99-110, 1992.
- 8) 藤田和夫, 奥田 悟: 近畿・四国における中央構造線のネオテクトニクス, 杉山隆二編, 中央構造線, 東海大学出版会, pp. 87-109, 1973.
- 9) 活断層研究会編: 新編日本の活断層-分布図と資料, 東京大学出版会, pp. 438, 1991.
- 10) Kanaori, Y., Kawakami, S. and Yairi, K.: The block structure and Quaternary strike-slip block rotation of central Japan, *Tectonics*, Vol. 11, pp. 47-56, 1992.
- 11) 金折裕司, 川上紳一, 矢入憲二: 近畿地方に被害を与えた歴史地震(M $\geq$ 6.4)の時空分布に認められる規則性-花折断層-金剛断層と敦賀湾-伊勢湾構造線の活動-, 応用地質, Vol. 33, pp. 187-201, 1992.
- 12) 岡田篤正, 寒川 旭: 和泉山脈南麓域における中央構造線の断層変位地形と断層運動, 地理評, Vol. 51, pp. 385-405, 1978.
- 13) 粟田泰夫, 水野清秀, 杉山雄一, 下川浩一, 井村隆介, 木村克己: 1995年兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層, 地質ニュース, Vol. 486, pp. 16-20, 1995.
- 14) 植村 武, 水谷伸治郎編: 地質構造の形成, 岩波講座地球科学9, 294 pp, 1979.
- 15) 林 愛明, 宇田進一: 野島断層のセグメンテーションと断層破壊プロセス, 地震2, 第48巻, pp. 375-386.
- 16) Tchalenko, J. S. and Ambraseys, N. N.: Structural analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake fractures, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 81, pp. 41-60, 1970.
- 17) Kanaori, Y. and Kawakami, S.: The 1995 7.2 magnitude Kobe earthquake and the Arima-Takatsuki tectonic line: implications of the seismic risk for central Japan, *Eng. Geol.* (Special issue: Fault Activity and Earthquake Proof Design, eds by Y. Kanaori and T. Watanabe), Vol. 43, pp. 135-150, 1996.
- 18) 宇佐美龍夫: 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, pp. 435, 1987.
- 19) 寒川 旭: 遺跡の地震痕, 土と基礎, Vol. 40, pp. 13-18, 1992.
- 20) 金折裕司, 矢入憲二, 川上紳一, 服部俊之: 中部日本内帯の主要構造線の活動サイクル: 沖積平野と盆地内の遺跡発掘で確認された地盤液状化イベント, 地震2, Vol. 46, pp. 119-133, 1993.
- 21) 地質調査所: 平成7年度活断層研究調査概要報告書, 地質

- 調査所研究資料集, No. 259, 98 pp, 1996.
- 22) 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2, Vol. 28, pp. 269-283, 1975.
  - 23) 松田時彦: 活断層の活動予測, 地学雑誌, Vol. 101, pp. 442-452, 1992.
  - 24) 鈴木康弘, 渡辺満久, 中田 高, 岡田篤正, 澤 祥, 今泉俊文, 平野信一, 前奎英明: 野島断層トレンチ調査団, 野島断層のトレンチ調査 (第2報), 1995年地震学会秋期大会講演概要集, A 70.
  - 25) Wallace, R. E.: Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 82, pp. 2875-2890, 1970.
  - 26) 松田時彦: 活断層をみる, 島崎邦彦・松田時彦編, 地震と断層, 東京大学出版会, pp. 24-44, 1994.
  - 27) 川上紳一, 金折裕司, 矢入憲二: C級活断層問題と今後の活断層研究, 活断層研究, Vol. 10, pp. 1-7, 1992.
  - 28) 山科健一郎, 松田時彦, 有山智雄: 1984年長野県西部地震による地変, 地震研彙報, Vol. 60, pp. 249-279, 1985.
  - 29) Wallace, R. E.: Grouping and migration of surface faulting and variations in slip rates on faults in the Great Basin Province, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 2875-2890, 1987.
  - 30) 寒川 旭: 有馬-高槻構造線中・東部地域の断層変位地形と断層運動, 地理学評論, Vol. 51, pp. 760-775, 1978.
  - 31) 島崎邦彦: 古地震学からみた兵庫県南部地震, 科学, Vol. 66, pp. 74-77, 1996.
  - 32) 松田時彦: 地殻運動の大きさと頻度, 地形, Vol. 4, pp. 151-165, 1983.
  - 33) Wesnousky, S. G., Scholz, C. H. and Shimazaki, K.: 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.*, Vol. 87, pp. 6829-6852, 1982.
  - 34) 菊地正幸: 遠地実体波による震源のメカニズム, 月刊地球, 号外 No. 13, pp. 47-53, 1995.
  - 35) Koto, B.: On the cause of the great earthquake in Central Japan, *Jour. Coll. Sci., Imp. Univ. Japan*, Vol. 5, pp. 196-353, 1893.
  - 36) Kanaori, Y., Kawakami, S., Yairi, K. and Niwa, S.: A sequence of destructive earthquakes and the coupling of fault systems in Japan. *Eng. Geol.*, Vol. 37, pp. 167-180, 1994.
  - 37) 鶴本利彦: “震災の帯”の不思議, 科学, Vol. 65, pp. 195-198, 1995.
  - 38) 橋本 学: 兵庫県南部地震による地殻変動と断層運動の推定, 地質ニュース, No. 490, pp. 33-40, 1995.
  - 39) Scholz, C. H.: *The mechanics of earthquakes and faulting*, Cambridge Univ. Press, pp. 439, ショルツ著・柳谷俊訳, 地震と断層の力学, 古今書院, pp. 509, 1990.
  - 40) Matsuda, T.: Active faults and damaging earthquakes in Japan-macroscopic zoning and precaution fault zones, In *Earthquake Prediction; an international review*, eds by Simpson, D. W. and Richard, P. G., Am. Geophys. Union, pp. 279-289, 1981.
  - 41) 日本応用地質学会 阪神・淡路大震災調査委員会: 兵庫県南部地震-地質・地盤と災害-報告書, pp. 116-159, 1995.
  - 42) 平田 直: 平成7年兵庫県南部地震緊急地殻活動調査, 地震学会ニュースレター, Vol. 6, pp. 8-9, 1995.
  - 43) 松田時彦: 活断層と地震-その地質学的研究, 地質学論集, Vol. 12, pp. 15-32, 1976.

(1996.11.21 受付)