

西日本の地殻ブロック構造と地震活動

渡辺 邦彦

要 旨

内陸地殻はブロック構造をしており、ブロック相互の境界は、大規模活断層である場合が多い。地殻ブロックが広域応力の下でやや剛体的に振舞うため、ブロック境界すなわち大規模活断層帯が地殻の変位・変動の大部分を受け持ち、地震活動や地殻変動は、地殻ブロック境界に集中する。中部地方西部から中国地方東部の地域のブロック構造を推察し、ブロック境界での特徴的な地震活動メカニズムの解釈を試みた。

キーワード：ブロック構造，活断層，地震活動，機械的モデル

1. はじめに

1960年代後半、地震予知計画によって全国のいくつかの大学に微小地震観測所が設置された。京大防災研究所にも、1969年に鳥取微小地震観測所が設けられた。鳥取微小地震観測所は、近畿地方西部から中国地方東部に5箇所の地震観測点からなる鳥取観測網を展開し、高感度微小地震の定常観測を開始した。

5箇所の観測点からなる観測網の中央を、西北西から東南東方向に山崎断層が通っている。鳥取観測網設立当初の成果は、山崎断層に沿って微小地震が並んで発生していることを見出したことであった（Kishimoto and Nishida, 1973）。“活断層に沿う微小地震の線状配列”と言われ、微小地震観測研究黎明期の大きな成果のひとつであった。

微小地震観測がテレメータ化され、観測精度も解析方法も高度化されるにつれ、活断層と地震活動の関連は目新しいものではなくなった。特に、横ずれ断層系が卓越する中部地方から西日本においては、当然の現象として捉えられている。つまり、現在の地震活動（震央分布）と活断層分布は、大局的によく似ている。歴史地震の多くも、主要活断層を震源として起きていると考えるのが自然である。

このことから「地殻ブロック」の考えがでてくる。すなわち、内陸地殻はさまざまな形のブロックがせ

めぎあっている構造をしていると考えるものである。それら複数のブロックが広域応力の下でやや剛体的に振舞うため、ブロック境界が地殻の変位・変動の大部分を受け持ち、地震活動や地殻変動はブロック境界に集中すると考える。

中部地方から近畿地方の内帯には横ずれ活断層が多く分布している（活断層研究会編、1993）。ブロック構造の考え方は、現在のところ、横ずれ活断層地域に比較的よく適用できる。東北地方などにおいては、縦ずれ断層が卓越し、また火山活動などに伴う空間的に集中する活動も多く、明確なブロック構造を考えると難しい場合が多い。

渡辺（2002）は、近畿地方を、主要活断層と地震活動の双方を考慮してブロックにわけ、その境界に地震活動が活発であることを述べている。渡辺（2004）では、範囲を西は島根県東部にまで、東は中部地方西部にまで拡大して論じている。本研究は、これらの議論を復習しながら、さらに考察を加えたものである。用いた震源データは1999年4月以前に関しては京大防災研究所の thanks データ（京都大学防災研究所地震予知研究センターSATARNグループ、1998）を、同年5月以降は気象庁による統合震源速報を用い、解析には seis-pc（石川・中村、1997）を使用した。

2. 近畿地方～中国地方東部のブロック構造と地震

活動

2.1 近畿のブロック構造と過去の大地震

中部地方から近畿地方には、横ずれ活断層が密に分布している。その分布は山崎断層までであり、それ以西で大規模の活断層は激減する。それゆえ、地震活動と活断層分布の対応を見る領域として、近畿地方を対象とする。

この地域では、微小地震分布と活断層分布は非常によく対応している。渡辺（2002）では、主要活断層と地震活動の双方を考慮して、近畿地方及び中部地方西部をブロック構造に分けた。

一方、近畿地方には歴史資料が多くあり、過去の被害地震の記述も多い。歴史地震の震央は被害分布の中央に定められることが多いので、当時の都市域が震央となっている場合も多い。その意味で、震央の精度は必ずしも充分ではないが、大まかな分布を見る場合には有効であろう。渡辺（2002）が示したブロック構造に過去のM7以上の被害地震(宇佐美, 1996)を重ねてFig. 1に示す。図中の番号はそれぞれM7級以上の歴史地震を示す。すなわち、[745年, 美濃, M7.9], [868年, 播磨, M7以上], [880年, 出雲, M7程度], [1596年, 慶長伏見, M7以上], [1662年, 湖西地方, M7.6程度?], [1819年, 近江, M7以上], [1854年, 伊賀上野, M7以上], [1891年, 濃尾地震, M8.0], [1927年, 北丹後地震, M7.3], [1943年, 鳥取地震, M7.2], [1948年, 福井地震, M7.2], [1961年, 北美濃地震, M7.0], [1995年, 兵庫県南部地震, M7.3], [2000年, 鳥取県西部地震, M7.3]である。

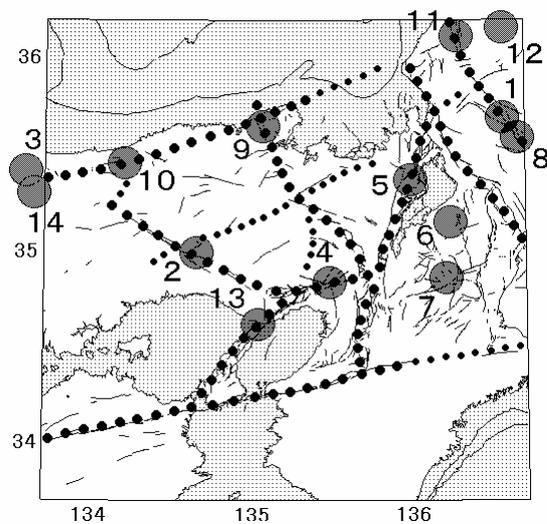


Fig. 1 Block boundary in Kinki region and historical large earthquakes (Watanabe, 2004)

Fig. 1 の14個のM7級大地震のうち11個がブロック境界に発生している。歴史上の大地震の震央は必ずしも正確ではないが、地震活動と活断層から推定したブロック境界は、過去に大地震を発生させてきたと考えてもよいであろう。

2.2 現在の地震活動とブロック境界

(1) 山陰地方の地震活動帯

昭和の鳥取地震(M7.2)は今から60年前の1943年9月に発生した。余震域は、鳥取県の東部から中部の倉吉市の西あたりにかけて、日本海に沿って約60kmにわたっていた。この地震から約20年後に鳥取微小地震観測所が設置され、以来40年間にわたって当該地域の地震活層を調査している。観測開始当初は、鳥取県の東部にも余震活動がかなり認められた(Fig. 2)。

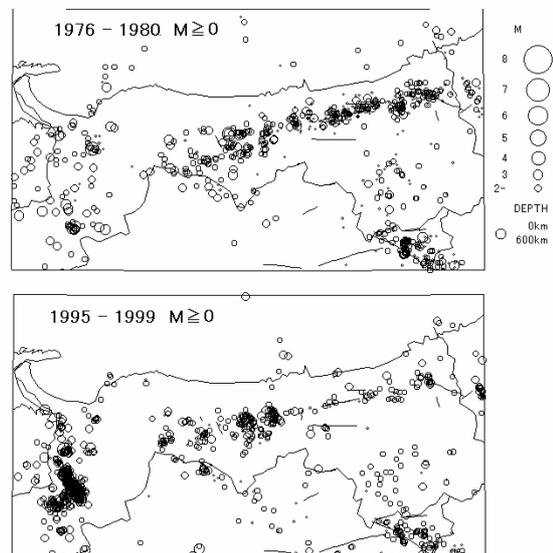


Fig. 2 Decay of aftershocks of 1943 Tottori earthquake (M7.2). On the upper figure, many aftershocks were recognized in eastern Tottori pref. On the lower figure, the aftershock activity had already decreased.

観測所設置から10年あまりたった1976年に微小地震観測がテレメータ化された。鳥取地震から30年後である。それ以降は、かなり精度が高い観測結果が得られている。すなわち、鳥取地震発生から現在までの60年の期間の後半30年間の地震データが精度よく参照できることになる。この30年間で鳥取地震の余震域の地震活動はかなり減少した。

1983年10月31日に、余震域の西端あたりに鳥取県中部地震(M6.2)が発生した。1943年鳥取地震の震源断層が東北東から西南西方向に、海岸線に並行

であったのに対し,1983年鳥取県中部地震は海岸線に直交する方向の震源断層の存在が指摘されている(地表には対応する断層は認められていない)。この鳥取県中部地震が40年前の鳥取地震の余震であるかどうかは判断が難しい。

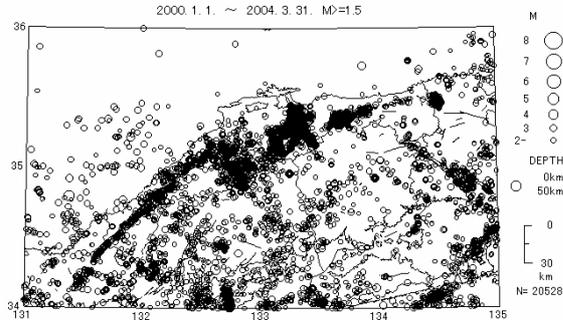


Fig. 3 Seismic activity in San'in district. A sharp seismic belt extends westward along the coast. But, any active fault is not recognized there.

Fig. 3 に山陰地方の広域の地震活動を示す。海岸線に平行な地震活動は、鳥取県中部地震の活動域から少し西まで続き、大山の山体で消滅し、その西で海岸線に直交する2000年鳥取県西部地震の震源域となる。その西には島根平野の低活動域があり、地震活動はその南の島根・岡山の県境あたりに移っている。さらに西では、三瓶山を中心とするやや幅が広い、海岸線に直交する活動域があり、その西は海岸線に沿って細長い活動帯が山口県へ向かって伸びている。この活動帯は非常に明瞭であるが、これに対応する活断層は報告されていない。

鳥取県以東の活動を見てみる。Fig. 1 の山陰海岸沿いのブロック境界は鳥取県西部地震域から北丹後地震域までの、鳥取地震断層帯に沿っている。鳥取県西部地震(2000年10月6日, M7.3)の数日後に兵庫県北部に小地震が数回発生し、同年12月には小規模群発地震が発生し、翌年1月12日にいわゆる兵庫県北部の地震(M5.3)が発生した。鳥取県西部地震と兵庫県北部の地震は、山陰沿岸のブロック境界に沿って約100kmはなれた地域に発生した地震活動であるが、時間的な経緯を見ると何らかの関わりがあったように思える。ブロック境界あるいはブロック構造そのものが応力を伝播する機構を備えている可能性を示唆するものであろう。

マクロに見ると、山陰地方には海岸線に沿う大きな構造線が伸びていて、それらがところどころで海岸線に直交する構造線であたかもトランスフォーム断層でずれるように食い違っている。

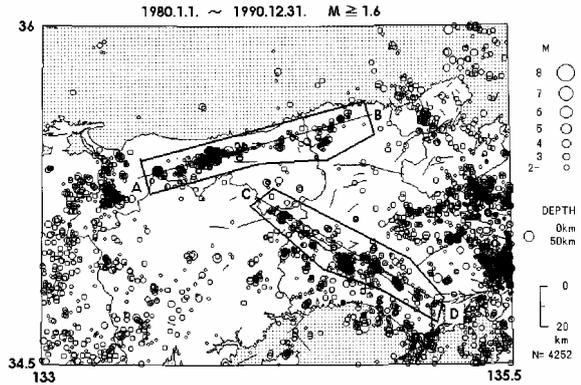


Fig. 4 Tottori earthquake fault area (upper) and Yamasaki fault area (lower). A-B and C-D lines are the axes for time-space projection in Fig.5.

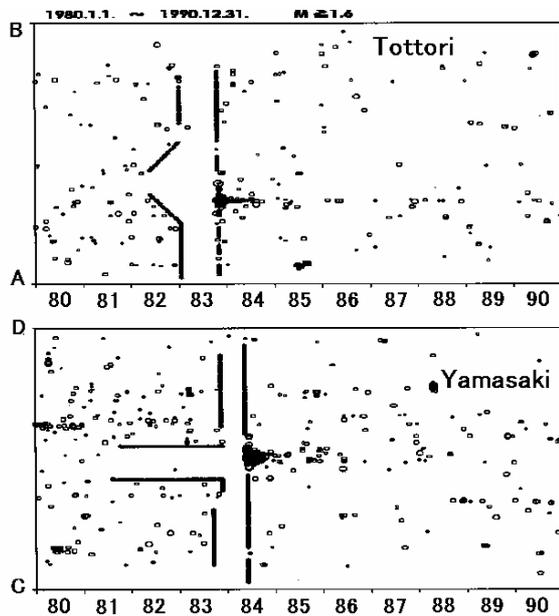


Fig. 5 Time-space distribution of epicenters for both Tottori and Yamasaki areas. Seismic quiescence preceding the moderate earthquake occurrence can be recognized in both figures (Watanabe, 2002).

(2) 鳥取地震域と山崎断層帯の相互活動

山陰沿岸を山口県まで折れ曲がりながら延びる地震活動帯の中の東の一部、鳥取地震域の活動と、山崎断層帯の地震活動を比較する。Fig. 4 に本稿で鳥取地震域、山崎断層帯として区切った領域を図示し、その範囲の1980年から1989年の10年間の地震活動の時間・空間分布をFig. 5に示す。

Fig. 5によると、1983年鳥取県中部地震に先行する約1年間、鳥取地震域全域にわたって微小地震活

動の静穏化が認められる。1983年10月31日に、鳥取県中部地震(M6.2)が図の鳥取地震域の西から1/3程度のところに発生したことによってこの静穏化は解消され、地震活動は通常の状態に戻った。

仮に力武(1986)の前兆現象出現時間に関する式

$$\log T = 0.60M - 1.01 \quad (1)$$

を適用すると、M6.2の場合の前兆現象出現時間は513日(約1年5ヶ月)となる。鳥取県中部地震に先行して出現したこの静穏化を、前駆的静穏化と考えても、力武の経験式と特に矛盾はない。

問題は静穏化の出現範囲である。鳥取県中部地震はM6.2なので、その震源域の差し渡しは高々10kmと考えられる。注目すべきは、M6.2地震に先行して日本海沿岸の約60kmにわたる鳥取地震域の全域にこの静穏化が出現したことであり、しかもこの鳥取地震域全域の静穏化は、たかだかM6.2の鳥取県中部地震の発生で解消されたことである。これは、第2種空白域の概念とは相容れないものである。

さらに特筆すべき現象は、丹波ブロックのもう一方の境界である山崎断層の活動である。この1983年10月の鳥取県中部地震の発生をきっかけにしたように、山崎断層帯全域の微小地震活動が静穏化した。そして約7ヵ月後の1984年5月30日の兵庫県南西部の地震(いわゆる山崎断層の地震、M5.6)の発生で、山崎断層帯全域の静穏化が元に復した。全長約80kmの山崎断層帯全域の活動が静穏化し、それがM5.6地震の発生で元に戻ったことは、鳥取地震域の場合と同じである。ちなみに、この場合を力武の式に適用すると、前兆出現時間は223日(約7ヶ月)となり、よく一致する。

鳥取地震域や山崎断層帯は冒頭のFig. 1に示した地殻ブロック境界をなしている。鳥取地震域と山崎断層帯の両者が、静穏化と中規模地震をいわば相補的に起こしたことは、地殻ブロック構造論の妥当性を示していると考えさせる。

(3) 兵庫県南部地震と山崎断層

兵庫県南部地震の震源断層である六甲淡路の断層系と山崎断層は、共役関係にあると考える事ができる。Fig. 1に示した地殻ブロック分けによると、この両者は、後にFig. 8に述べる播磨ブロックの両側の境界をなすと考えられる。

山崎断層域の地震活動が兵庫県南部地震に先行してやや静穏化し、南部地震の発生後約1年間は逆に通常の3倍程度に活発化したことが認められている(渡辺, 2002)。このことから、六甲淡路の断層系と山崎断層も、何らかの関わりを持っていることが推測される。

上に示した諸事象を総合的に考え、丹波ブロック、

播磨ブロックのそれぞれの境界である鳥取地震断層帯、山崎断層帯、および六甲淡路断層帯は、互に関連した活動をしているであろうことが推察される。

3. 鳥取県西部地震域以西の日本海沿岸の活動域

活断層分布を見ると、兵庫県西部の山崎断層より西には顕著な活断層が殆ど認められていない(活断層研究会編, 1993)。これは地質的要因もあってか、岡山県以西では活断層が地表地形として認められにくいのではないかとというのがひとつの考え方である。ただ、岡山県から広島県東部にかけては、微小地震活動も比較的低調で、線状分布もほとんど認められないため、顕著な伏在断層の存在も疑わしい。すなわち、地殻ブロック構造が発達していると考えられる根拠は乏しい。

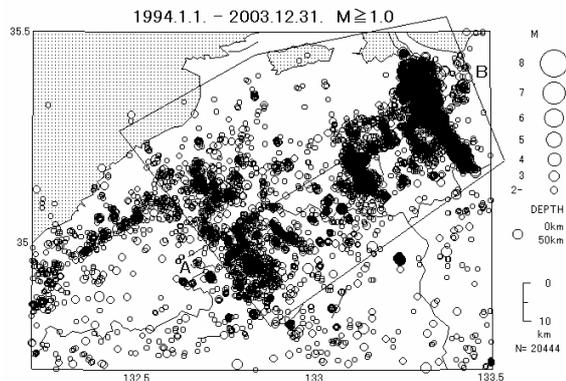


Fig. 6 Seismic activity in eastern Shimane pref. There are two active zones perpendicular to the Japan Sea coast. The east one is the aftershock area of 2000 western Tottori earthquake and the west one is Mt. Sanbe area. Time-space distribution of epicenters in the surrounded area is shown in Fig. 7 (Watanabe, 2004).

これに対して、山陰地方の日本海沿岸域は地震活動が活発である。Fig. 3に中国地方全域の地震分布を示したが、山陰海岸に沿う形で、地震活動の線状分布が明瞭である。しかも明瞭な折れ曲がりや乗り移りも認められる。しかし、これらの地震活動帯に対応する大規模活断層は認められていない。このことから、地表地形に認められない伏在断層の存在の可能性、ひいては地殻ブロック構造の存在が考えられる。近畿地方の解析では、微小地震活動に大規模で明瞭な線状分布があれば、それはおおむね顕著な活断層と対応していた。山陰地方の日本海沿岸域では活断層が認められていないが、伏在断層あるいは

地表に認められない構造線が存在すると考えて、地震活動の線状分布をもって地殻ブロック境界と考えるでも差し支えないのではなかろうか。

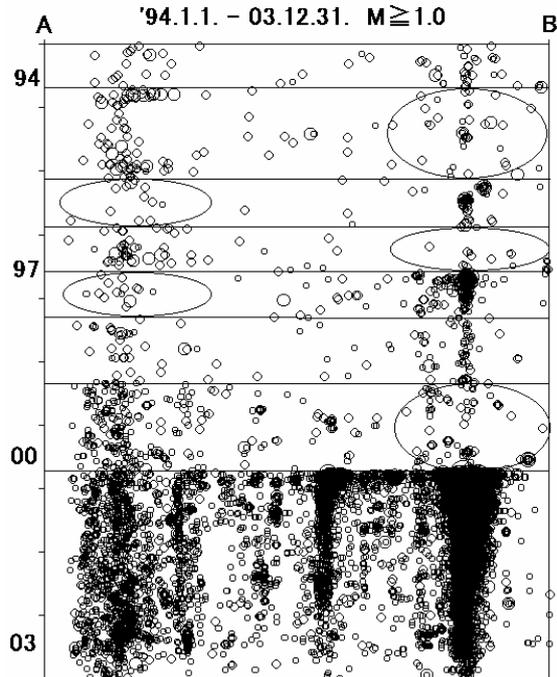


Fig. 7 Time-space distribution of epicenters in eastern Shimane pref. The activity on the right hand side is that of the 2000 western Tottori earthquake area. The shadowy activity on the left hand side is that of Mt. Sanbe region (Watanabe, 2004).

Fig. 6 および Fig. 7 にそれぞれ、2000 年鳥取県西部地震域とその西にやや幅を持って日本海沿岸に直交する地震活動（これを本稿では、三瓶山周辺の活動と称する）域を含む領域の震央分布と、その範囲内の 1994 年から 2003 年の 10 年間の地震活動の時間・空間分布を示す。Fig. 7 には、活動状況が変わったと思われる時期に横線をいれ、活動が相対的に低調と判断した期間を楕円で示した。

鳥取県西部地震域には 1989 年以來 2000 年 10 月の M7.3 地震発生までに、M5 級地震が 7 回発生している（梅田, 2001）。それぞれの M5 級地震に際して、その都度、本震～余震活動の系列を繰り返してきた。すなわち地震活動は盛衰を繰り返している。Fig. 7 によると、この鳥取県西部域の盛衰と三瓶山周辺の地震活動とは、互いに活動が相反する、いわゆる相補的活動が数回認められる。たとえば、94 年後半から 96 年初めの期間は三瓶山領域が活発で鳥取県西部領域は低調であった。その後、96 年 4 月の M4.3

と 6 月の M4.5 をきっかけに鳥取県西部域の活発期が 10 ヶ月足らず続いたが、その間、三瓶山周辺領域は逆に比較的低調であった。その後、活動は逆転し 97 年 9 月に鳥取県西部域に M5.5 が発生するまでは三瓶山領域が活発で、鳥取県西部域は静穏となった。97 年 9 月の M5.5 発生から約 1 年の間、鳥取県西部域が再び活発になり、三瓶山領域はやや低調になった。この数年間は、双方の領域の活動が、活発と静穏とを交互に繰り返す、いわゆるシーソー運動を示していた。その後特に両地域とも通常の活動状況のようであったが、99 年 5 月頃から鳥取県西部領域の活動がやや低下し、2000 年 10 月の鳥取県西部地震に至った。

これらから、北北西～南南東方向に伸びる鳥取県西部地震断層域を東の境界とし、三瓶山周辺領域のやや幅がある北北西～南南東方向の活動域を西側の境界とするブロックの存在を推測し、本稿では、松江ブロックと称することとした。この領域は地震予知連絡会が指定する特定観測地域に相当し、地震活動の空白域と考えられている。本研究では、この領域はいわゆる地殻ブロックであり、ブロックの両側境界に地震活動が活発であると考えた。

ここまで述べてきたブロック境界を Fig. 8 に示す。

4. ブロック境界全域が静穏化するメカニズム

先にのべたように、鳥取県中部地震(M6.2)に先行した鳥取地震断層域全域の静穏化、および、山崎断層の地震(M5.6)に先行した山崎断層域全域の静穏化が認められた。震源域の空間ディメンションは 5～10km であるが、静穏化は断層に沿って、鳥取地震断層域の場合は約 60km、山崎断層域では約 80km にも及んだ。この広域の静穏化は、いわゆる第 2 種空白域と異なり、断層帯域の全域にわたって地震活動が静穏化するものであった。

Fig. 9 に、そのメカニズムを推測し 4 段階にわけて図示した。図にしたがって断層の全域が静穏化する機構について述べる。

広域応力のもとに、応力方向と斜交する横ずれ活断層が存在すると考える。応力は断層の走行に平行な成分と断層に垂直な法線成分とにわけられる。この時期、断層周辺には通常程度に小地震が発生している。

広域応力が増大すると法線応力が増大し、これは破壊強度を増大させ、その結果、小地震の発生が減少する。これが大規模地震に先行する広域の地震活動の静穏化として現れると考える。

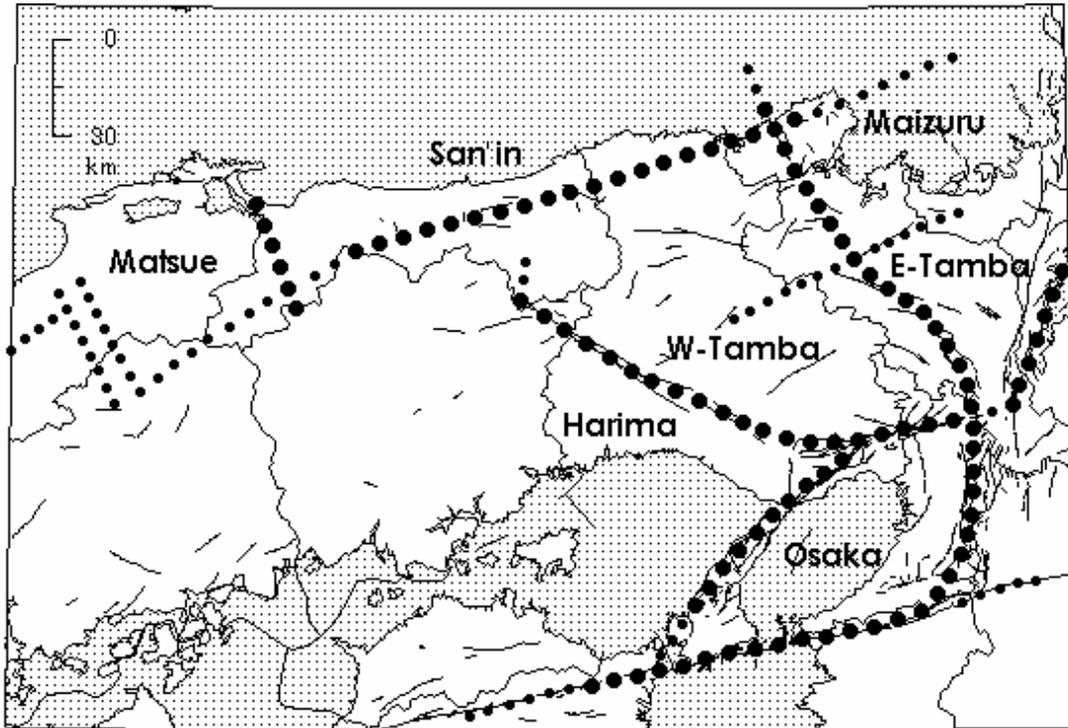


Fig. 8 Block structure of the studied region (Watanabe,2004)

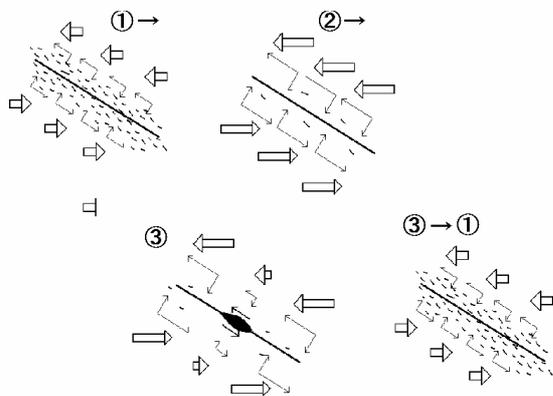


Fig. 9 Mechanism of quiescence appearance in the whole area along a major active fault. Short line segments mean microearthquakes.

やがて断層面上のある箇所では、断層全域には達しない程度の破壊、すなわち M5 級程度の中規模地震が発生したとする。この地震で、震源域周辺の応力が開放される。断層周辺の応力状態は均等ではなく

なる。

ここで、断層周辺の全域で応力が平均化される機構が存在する考える。すなわち、何らかの力学的作用によって、破壊された領域すなわち震源域周辺の応力の低下が補われ、その結果、断層周辺全域の応力状態が少し下がって平均化されて、 の状態にもどり、断層周辺の地震活動はまた元のレベルにもどり活動を開始する。

応力の平均化機構について、機械的モデルを考えてみる。Fig. 10 は Kasahara(1967)による広域応力と部分破壊のモデルである。このモデルにおいて、図の右から三番目のセグメントが耐え切れずに破壊され地震が起きたとする。そのセグメントに蓄えられていた歪エネルギーのみが開放されるが、広域応力は常に供給され続ける。したがって、新たに供給される応力はすべてのセグメントが分け持って支えることになる。その結果、地震を起こさなかったセグメントの歪エネルギー蓄積量はさらに増えることとなる。応力平均化機構がないため、次に耐えられなくなった別のセグメントが次に破壊するであろう。このモデルでは、破壊に順番が考えられる。

筆者はこのモデルに広域連結ダッシュポットを追

加した (Fig. 11)。これによって、各セグメントに蓄えられた歪エネルギーは平均化されている。今、右から三番目のブロックが破壊されたとする。開放されたこのブロックの歪エネルギーは、短時間の内にダッシュポット内の流体の移動によって再び平均化される。全てのセグメントの歪エネルギーは、破壊直前よりやや減少して同じレベルになる。すなわち、一度地震を起こしたセグメントも、歪エネルギーの観点からはすぐに他のセグメントと同じレベルになる。次にどのセグメントに地震が起きるかは、これだけでは決まらないこととなる。

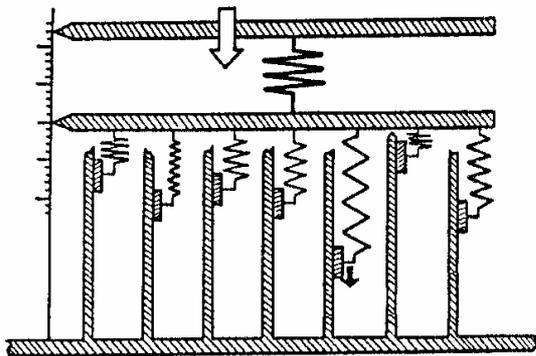


Fig. 10 Mechanical model explaining the occurrence of inland crustal earthquakes (Kasahara, 1967)

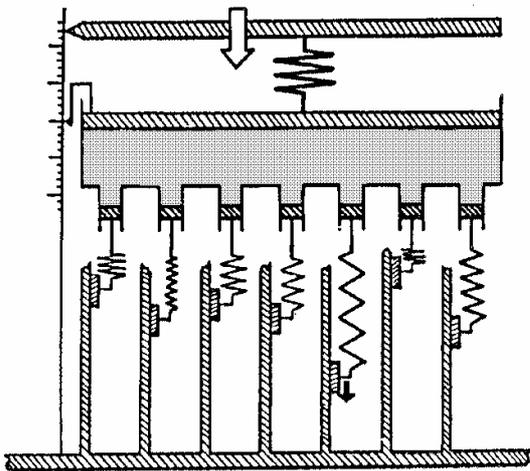


Fig. 11 Newly proposed model to explain the tectonic stress averaging along a block boundary (Watanabe, 2004)

これは思考のための機械的モデルである。実際の地殻内で流体の移動があるかどうかを論じているの

ではない。ただこのダッシュポットの働きの考え方で表現できるような機構が地殻の内部に存在するのではないかという推測を述べている。上部地殻の弾性的性質によるものか下部地殻の流動性の結果なのか、現実の地殻物理的機構の解明は今後の問題である。

5. おわりに

近畿地方の場合、大規模の活断層系と、帯状あるいは線状に分布する現在の微小地震活動はよく対応する。この帯状領域で地殻をブロックに分けてみると、歴史上の大地震の発生もブロック境界に集中することがわかる。

中国地方以西では活断層はあまり明瞭でない。しかし、微小地震活動が線状に分布する地帯が存在する。ここには伏在断層があると仮定して、地震活動の線状分布で地殻をブロックにわけると、

これらの作業によって、西日本の地殻を Fig. 8 に示すようにブロック分けした。

グローバルな地球の場合、いくつものプレートのせめぎあい地震活動や火山活動などのダイナミックな地球活動が説明できる。これと同様に、内陸地殻の活動も、全般的な現象は地殻ブロックの考え方ではば矛盾がないように思われる。

本稿では、地殻ブロックにかかわると思われる特徴的地震活動として、ブロック境界の全域に及ぶ静穏化現象や、あい隣り合うブロック境界が相互に関連すると思われる活動の存在を指摘した。

そのうち、ブロック境界の全域に及ぶ現象の説明のために機械的モデルを導入して思考実験を試みたものである。

山崎断層における約 30 年間の伸縮計や傾斜計による断層挙動の計測の結果、断層域は地殻情報が集中して現れる領域であるとも考えられるようになった。内陸地震を論ずる場合、第一義的不均質としての地殻ブロック構造がまず大切であると考えられる。

本研究では、地震データとして京大 thanks データおよび気象庁による統合震源データを利用させていただいた。地震活動解析には seis-pc を使わせていただいた。記して謝意を表します。

参考文献

石川有三・中村浩二 (1997): SEIS-PC for Windows95, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, p.78.

- 宇佐美龍夫(1996): 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, p.493 .
- 梅田康弘・研究代表者(2001): 2000年10月鳥取県西部地震による被害に関する調査研究, 平成12年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書, p.219 .
- 活断層研究会編(1993): 新編日本の活断層 分布図と資料, 東京大学出版会, p438 .
- 京都大学防災研究所地震予知研究センターSATARNグループ(1998): 京都大学防災研究所内帯地震観測所統合震データファイル, 西南日本における地震活動の定量的評価の研究(京都大学防災研究所共同研究8P-2報告書), pp.1-13 .
- 力武常次(1986): 地震前兆現象 地震予知のためのデータベース, 東京大学出版会, p232 .
- 渡辺邦彦(2002): 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 .
- 渡辺邦彦(2004): 地殻ブロック境界としての大規模活断層 地震活動に見られる断層相互の関連, 月刊地球号外, No.46, pp.112-119 .
- Kasahara, K. (1967): A simulation of energy release process in a seismic region, Proc. Japan Acad., 43, pp.483-488 .
- Kishimoto, Y. and Nishida, R. (1973): Mechanisms of microearthquakes and their relation to geological structures, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.23, Part 1, No.210, pp.1-25 .

On the block structure of the crust in western Japan and its seismic activity

Kunihiko WATANABE

Synopsis

Inland crust consists of crustal blocks. In almost cases, boundaries of these blocks coincide with major active faults and active seismic belts. Inland seismic activity, crustal deformation and some other crustal phenomena are considerably caused by these block movements.

The block structure in western Japan is examined. The mechanism of typical seismic activity along the fault is also supposed.

Keywords: block structure, active fault, seismic activity, mechanical model