

山陰地方における地震活動の時間的空間的変動の特徴

住友則彦・渡辺邦彦・松村一男・竹内文朗・
澁谷拓郎・中尾節郎・今田幸史*

* 京都大学大学院理学研究科

要旨

兵庫県南部地震以来、地方自治体等は地震情報の提供を望んでいる。地震活動の時間的空間的特徴を表現する方法に、震央分布図、時空間分布図、積算曲線、 b 値変化などがある。情報の定量化を念頭において、これらの表現を再検討し改良を試みた。近畿南西部から山陰にかけて最近の22年間に震源が決められた地震について、メッシュデータ化を行い、震央分布の新たな表示を行った。また、時空間分布の数値的表現を行った。さらにM別地震積算曲線の詳細を調べた。最後に b 値の時間変化の精度を検討した。

キーワード: 地震活動度, 時空間分布, 積算曲線, b 値, 鳥取活動帯, 山崎断層活動帯

1. はじめに

兵庫県南部地震後、大学の研究成果の社会への還元が強く望まれている。特に地方都市においては、地震防災への取り組みの中において地震活動に関する情報を可能な限り集め、独自の判断による市民への警報等を実現したいと望んでいるところもある。地震予知研究センターでも兵庫県南部地震発生後から、一つの試みとしてリアルタイムの震央分布図を10以上の自治体防災担当者へパソコン通信の形でデータ提供を行ってきた。また、インターネットのホームページにも同様な地震情報を公開し、誰でもが近畿地方の地震活動状況を目で見られるようにしている。

しかしながら、実際問題としてリアルタイム地震活動図(震央分布図)から、地震活動の異常を発見したり、活動予測をする事は至難の業である。専門家の間でもこれらの問題の確実度の判定基準はまちまちで、最善の方法はまだ確立されていない。

茂木(1998)によれば、一般的には地震予知の実現はかなり困難であるが、その中でも比較的予知しやすい地震とそうでない地震がある。兵庫県南部地震は後で調べてみれば、前駆的な現象が地震活動、地下水変化などに現れていた。従って注意深く監視をしておれば、事前に地震発生を予測できたかも知れない地震の一つであると述べられている。中でも、M-T図において1966年頃か

ら震源域を含むやや広域でM4以上の地震は一度も起きていないこと。また、いわゆる微小地震活動の空白域が次第に淡路の震源域に集中していったようにみえる、等と述べている。

確かに地震後の調査で、幾つかの地殻活動に異常が見られたとの報告はある(渡辺, 1998; 松村・片尾, 1996; 古澤, 1996)。しかし、結局のところは、地震活動に関する指標が確定されておらず、従ってリアルタイムでその指標の追跡をする機関がなかったことは事実であろう。

そこで、本論文では、地震活動の時空間変化のモニタリングを目指して、地震の専門家以外でもなるべく分かるようにするにはどのような表現が望ましいかを探る目的で、地震活動の従来の表現を見直し、できるだけ情報の数値化を試みる。また、地震後、松村他(1996)は兵庫県南部地震前の b 値の変化を報告したが、これを検証するため、用いられたデータの母集団に吟味を加えたい。

2. 地震活動の従来の表現法について

これまでに地震活動の表現として通常用いられる代表的なものに、

- a) 震央分布図
- b) 時空間分布

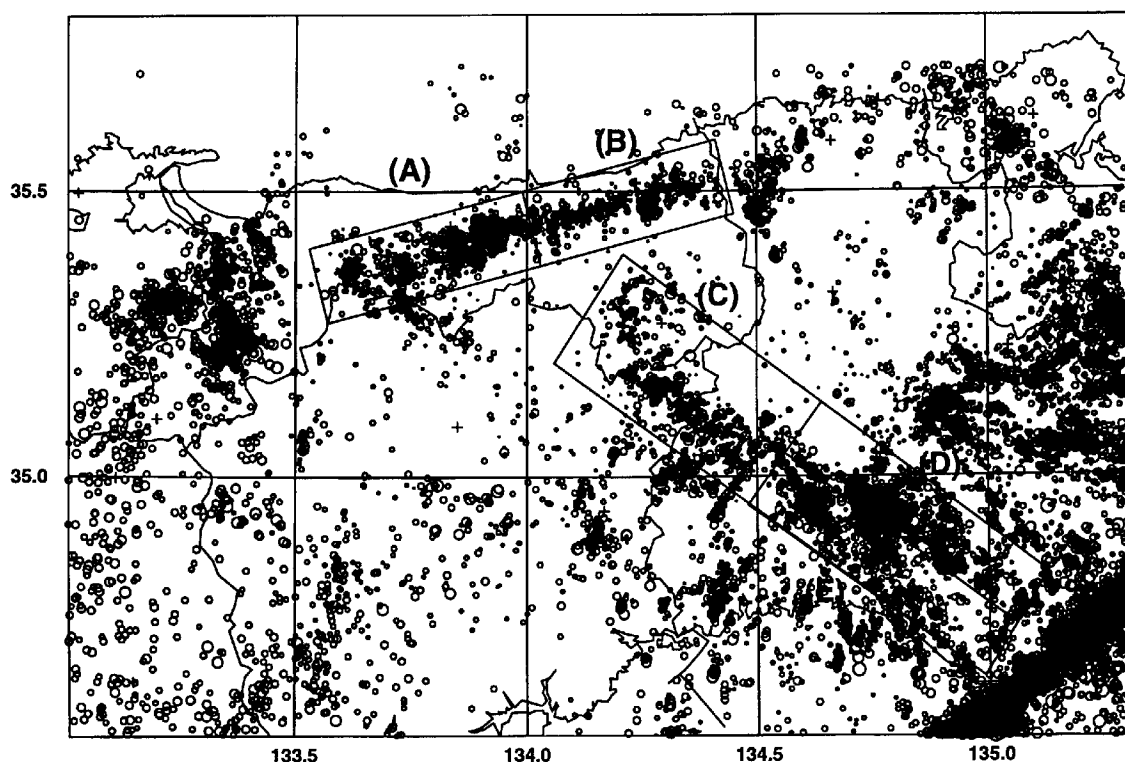


Fig. 1 Epicentral map of microearthquakes which occurred from 1977 to 1998 in northwestern Kinki and eastern Chugoku districts.

c) 地震の積算曲線

d) b 値の変化

e) M-T 図

等があげられる。それぞれに長所、短所がある。例えば、a)では、活断層に沿う地震活動が見えるなど場所的な特徴は明瞭であるが、地震の全てが重畳されているので、地震活動パターンの時間変化等が見え難い。また活断層余震活動などに支配されて、地震活動の特性を見誤ることもある。b)では事前の静穏化領域の客観化や定量化ができていない。c)では、通常あるM以上全ての地震の積算で表示されることが多いが、M別の細かい変動が捉えられがたい。d)は、どの空間範囲を選ぶか、期間幅はどれくらいが適切か、さらにMの下限をどこに設定するかなど、母集団の選択に基準がはっきりしない。以上のような諸問題がそれぞれに残されている。ここでは、これらの諸問題が少しでも改善されるにはどのような方法が考えられるかを模索しつつ、地域として山陰地方の地震活動帯と山崎断層活動帯を選び、幾つかの試行を行った。なお、e)は、中大地震、例えばM5以上、の時系列として見ると、それは歪みエネルギー放出の程度を表していると考えられるので有効な方法であろう。ここでは特別な検討はしない。

3. メッシュデータによる震央分布図

初めに震央分布図を考える。多くの場合ある期間の全

ての地震の震央の重ね合わせで表示される。確かにこの表示方法によれば地震活動の空間的特色が浮き彫りにされることが多い。Fig. 1は、近畿南西から中国地方における地震の震央分布図である。1977年1月から1998年12月までの22年間に起きたM0以上の地震の震央が重ねられている。確かに山崎断層に沿った地震活動が明瞭である。しかし、異なる期間のこのような震央図からは当然の事ながら地震活動の拡大や縮小などの空間的パターン変化を見つける事は容易ではない。かなり専門的知識を必要とするだろう。

ここでは、まず、Fig. 1とほぼ同じ領域 (34.4° N $\sim$ 35.8° N, 133.0° E $\sim$ 135.2° E) を震源決定精度を考慮して約2km四方メッシュに区切り、1976年1月から1998年4月にかけての、 $M \geq 0$ 、深さ5km $\sim$ 20kmのTHANKS震源データ (松村他, 1996) を用いて、メッシュデータを作った。はじめに、メッシュ内地震数の多少によって区分し、分布図を求めた。用いた地震の総数は約22年間で18,083個で、メッシュの数は4,928である。従って1メッシュ当たりの地震数は平均約3.7個である。Fig. 2にメッシュ当たりの地震数の頻度分布を示した。分布はおおよそポワソン分布になった。図中の領域Aは全域を、領域Bは山崎断層周辺を、領域Cは鳥取地震活動帯を示す。ポワソン分布になることは当然とはいえ、地域によって若干パラメータに違いがあることは興味深い。

このようなメッシュデータを利用して、地震活動の空

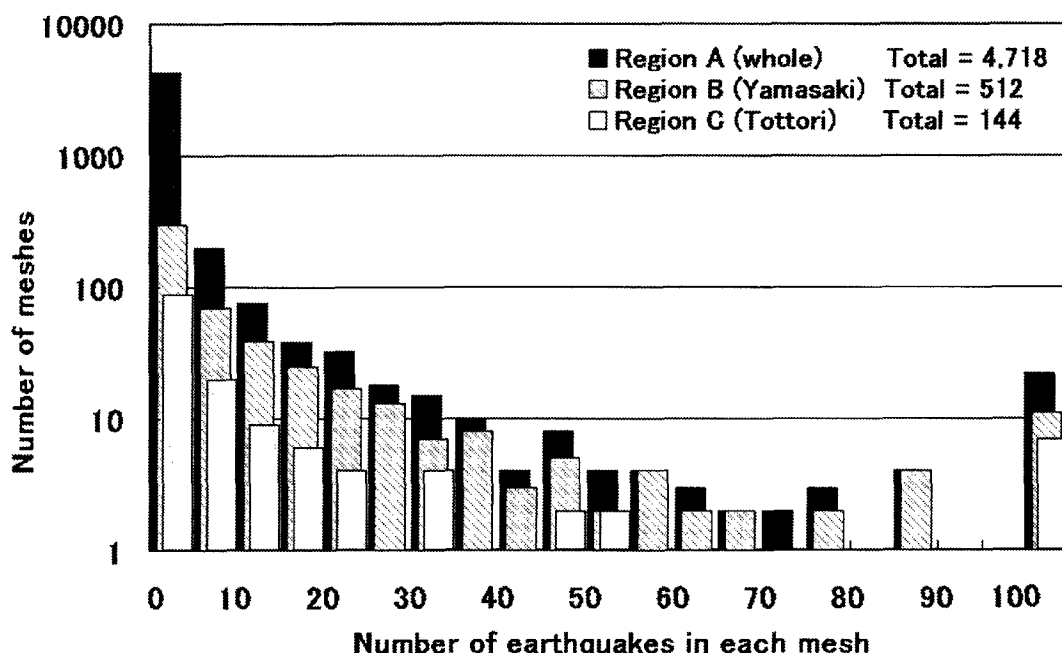


Fig. 2 Frequency distributions of microearthquakes per a geographical mesh whose unit size is approximately $2 \times 2 \text{ km}^2$. A, B and C indicate a whole area, a seismically active zone of Yamaguchi fault and one in Tottori Prefecture, respectively.

間的特色を詳しく調べるつもりである。ねらいとしては一見地震活動が活発に見える山崎断層や鳥取活動帯で地震活動に隙間が見えないか、そこは例えばバリアになっているか等を調べる予定である。以前 Mino (1984) は地形等高線と地震発生との関係を調べたことがある。ここでも山陰地域について同様な試みをした。結果を Fig. 3 に示した。高度 500 m より高いところを格子模様で示した。確かに格子模様の地域では殆ど地震活動は見られない。次にこの様なメッシュデータを用いて地震活動のパターン変化の検出を試みた。ここでは比較的規模の大きな地震の、例えば前後 3 か年の平均活動のパターンに変化が合ったか否かをしらべた。例として、山陰では鳥取県中部の地震 (1983 年, M6.2) の場合を取り上げた。簡単のために、地震の前後各 3 年間の年平均地震発生数の差 dN をメッシュ毎に調べ、Fig. 4 に示した。この図では、鳥取県中部の地震以降に地震活動が活発になった地域 ($dN \geq 0$) は灰色で、静穏になっている地域 ($dN < 0$) はハッチで表示している。やや活発化した地域が活動帯に沿って余震域を越えて広がっていること、また、同じ活動帯の数十 km 離れた東部の広い範囲で、静穏化が見られることは興味深い。今回は各メッシュの元々の地震発生数の多少を問題としなかったが、今後は何らかの荷重をかけることを考えたい。

4. 時空間分布図を定量的表示にする試み

比較的大きな地震の前には、震源域を囲むある空間範囲で地震活動の静穏化が起きることは良く知られてい

る。この現象はいわゆる地震活動の空白域などと呼ばれる。地震空白域は第 1 種、第 2 種あるいは第 3 種と区別されることがある。すなわち、第 1 種とはプレート境界の大地震発生能力をもっている場所而未破壊域として残されている空白域、第 2 種とは大きい地震の前に地震活動の静穏化として前兆的に出現する空白域 (Mogi, 1979)、さらに第 3 種とは内陸の地震帯内で活動の低い地域 (石川, 1995) と定義されている。

しかし、特定の地震発生前から特定の場所における特定の時間からの静穏化を客観的に指摘することは一般にはかなり難しい。そもそもは、地震活動を表現するには、仮に震央だけを考えても x , y , t および地震数の 4 次元量が必要である。これを平面図もしくは 3 次元表示するためには、2 もしくは 1 変量を減らす工夫が必要である。その上、従来より地震の時空間分布図では、地震の大きさを○印の大きさで表示しているが、実際の震源域の広がりとは対応していない。従って分布図上での空白域の有無や広がり曖昧である。

そこでここでは時空間分布図において、従来のように地震を○印の重ね合わせとして示すのではなく、ある時間空間領域内に発生した地震数をカウントすることにより定量的に表示することを試みた。Fig. 5 に示す震央分布図において、鳥取地震活動帯を横 (活動帯に平行) 方向に 160 km、縦 (活動帯に直行) 方向に 40 km の矩形領域 (太線枠) に切り取り、この領域に含まれる地震に対して解析を行った。空間軸 (X 軸) は活動帯に平行にとり、1 km ごとにポイントを設け、それを中心とする 10 km の範囲を設定する。時間軸について

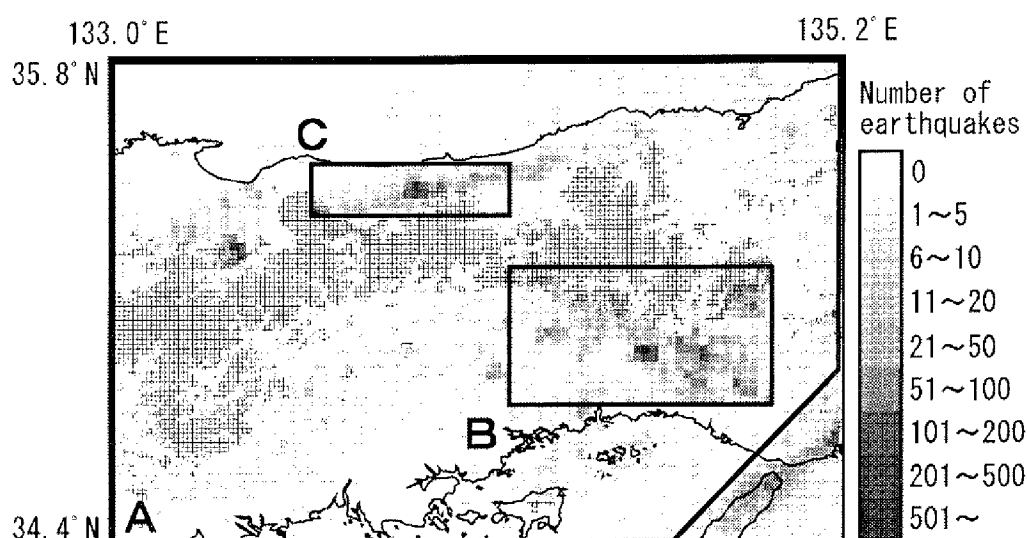


Fig. 3 Seismicity map expressed in mesh whose gray scale displays a degree of earthquake number. Darker gray shows higher seismicity, while lighter gray does lower one. White means no seismicity for 22 years. Areas higher than 500 m in topography are indicated by the checked pattern.

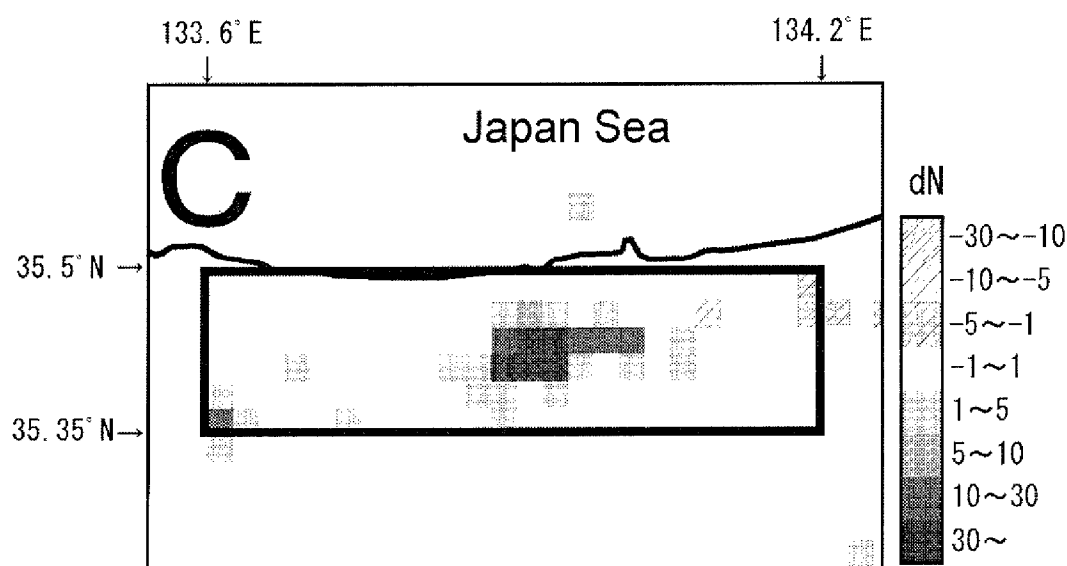


Fig. 4 Seismicity change for Tottori-ken Chubu Earthquake (M6.2, 1983) before and after 3 years. Darker gray indicates seismicity became higher after the main event, while thicker hatched pattern displays seismicity became lower.

は1日ごとにポイントを設け、その前30日の範囲を設定する。このような時空間範囲に含まれる地震をカウントする。Mの下限の決め方は、空白域の様相を変化させるので、重要であるが、ここでは検知能力を考慮して、解析の対象とする地震をM1以上とした。Fig. 6は鳥取県中部の地震（1983年、M6.2）の場合のこの手法による時空間分布図である。この場合、地震活動度は設定された時空間範囲内の地震数であるが、図中のグレースケールで示されるように、たとえば地震数が0個の領域

は白、1個の領域は淡いグレー、8個以上の領域は黒で表示される。

1983年の後半部で $x = -5$ km付近の黒い領域が鳥取県中部の地震の本震および余震活動を示す。その約1か月前には $x = -40$ kmから $x = 30$ kmにかけての広い地域で空白域が形成されていたことがわかる。また、破線で示すように震源域周辺では地震発生の約5か月前から空白域が形成されていたことが見て取れる。この空白域に関しては、Tsukuda（1988）とShibutani and Oike

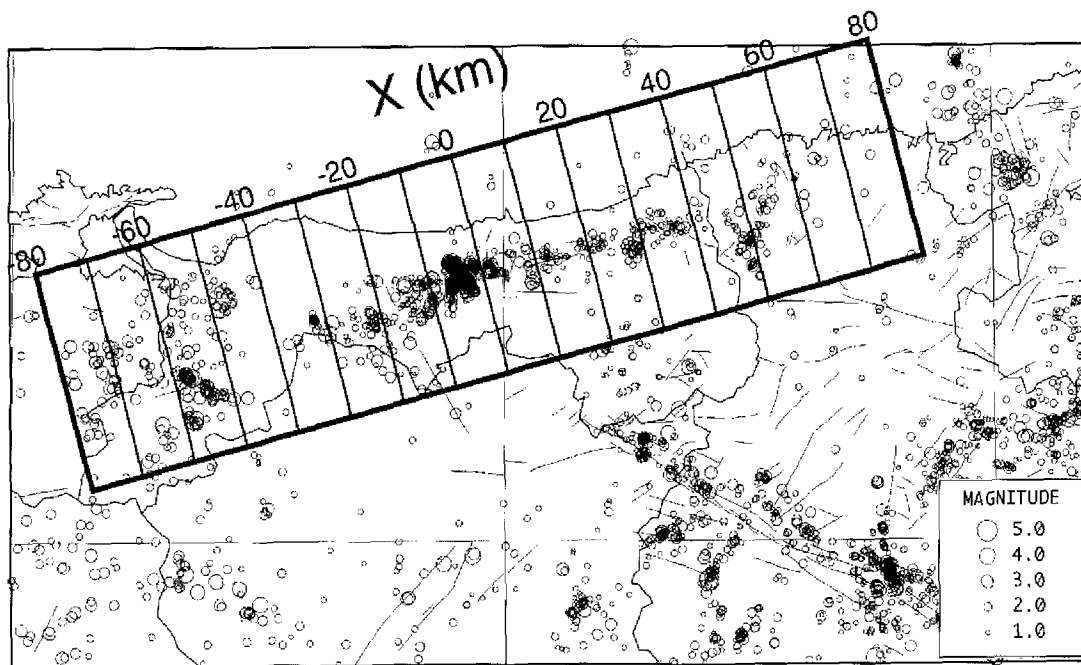


Fig. 5 Epicenter distribution map in and around the Tottori seismically active zone. Earthquakes whose magnitude was greater than and equal to 1, whose depth was shallower than and equal to 30 km, and which occurred in the period from June 1, 1976 to December 31, 1983 were plotted. Earthquakes in the region surrounded by the thick square were analyzed. The X axis corresponds to that in Fig. 6.

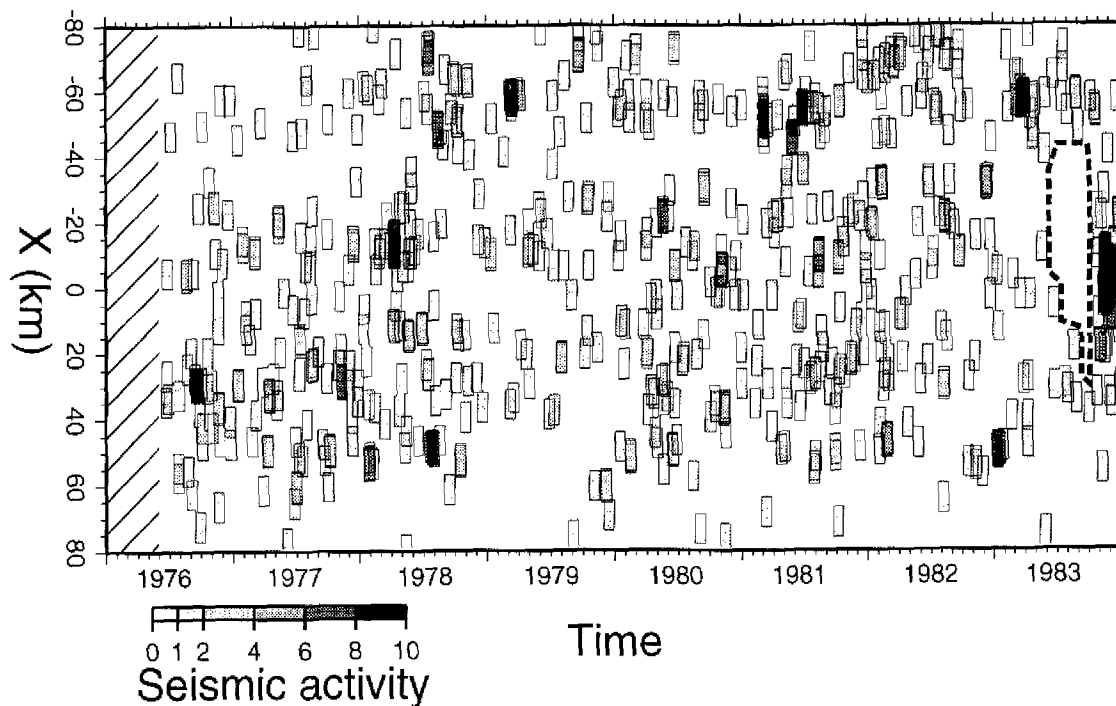


Fig. 6 Quantitative representation of a space-time distribution diagram for Tottori-ken Chubu Earthquake (M6.2, 1983). The detail can be referred to the text. The hatched area in the first half of 1976 indicates no data.

(1989) によりすでに報告されている。

ただし、同規模の空白域は他の時空間領域にもいくつか見いだせる。たとえば1979年7月から1980年3月にかけての $x=40$ km付近の領域、1982年2月から7月にかけての $x=-50$ kmから $x=0$ kmの領域などである。したがって地震発生前に定量的に空白域を抽出するのはこの図だけからは非常に難しいと言わざるを得ない。定常状態からの差を数値化する方法などを検討する必要がある。

また今回の解析では、地震数をカウントする時間・空間の範囲の幅をそれぞれ30日、10 kmに設定したが、このことはひとつの地震が影響を及ぼす時空間領域を決めることになるので、統計処理の面だけからではなく、物理的な側面からもこれらの値をどのように設定すべきか検討する必要がある。

5. 全M積算とM別積算との比較

地震活動の変化を見るのに地震数の積算曲線の折れ曲がりで表示されることが多い。この場合殆どが、ある最小M以上全ての地震の積算数で表され、地震の大小は問題にされない。しかし、現実にはMが小さい地震の発生数が積算曲線の体勢を決めるので、Mの下限の選び方には注意を要する。これは次に述べるb値を求める場合と共通する問題である。また、特定の大きさの地震（当然Mに幅をもつ）が、場の変化に敏感であることも考えられる。そこで、ここではM別の積算曲線を調べることにした。対象地域として山陰では、鳥取活動帯東部（Fig. 1の(A)）と西部（Fig. 1の(B)）とに分割した。ただし境界は鳥取県中部の地震（1983年、M6.2）の震源域にとった。また山崎断層では、南東部上（Fig. 1の(D)の上半分）、南東部下（Fig. 1の(D)の下半分）および北西部（Fig. 1の(C)）に分けた。山崎断層の地震（1984年、M5.6）は南東部下の地域に含まれる。

山崎断層南東部下の積算曲線で奇妙な事が見つかった。すなわち、全地震の積算では1991年で折れ曲がりが見えたが、M別で見ると $0 \leq M < 1$ では1991年を境に減少が見られ、逆に $1 \leq M < 2$ では増加の傾向が見られた。しかし、この傾向は $0 \leq M < 2$ では目立たなくなった（Fig. 7）。不思議なことは鳥取活動帯東部、西部でも殆ど似たような傾向が見られた（Fig. 8）。この様な変化の考えられる原因として、

- ・トリガーレベルや条件の変更
- ・インテリジェント化など観測システムの変更
- ・M決定方式の変更
- ・読みとり方の変更

等人為的な要因が考えられる。これらの可能性について詳細にチェックしたが、特定できるものはなかった。他の要因として、自然現象の可能性は残るが、もしそうだとすればよほど特殊なことが近畿西部や山陰に起きていることになる。このほかに指摘しておくべき事として、Fig. 9に示すように鳥取活動帯における $M > 3$ 地震の活

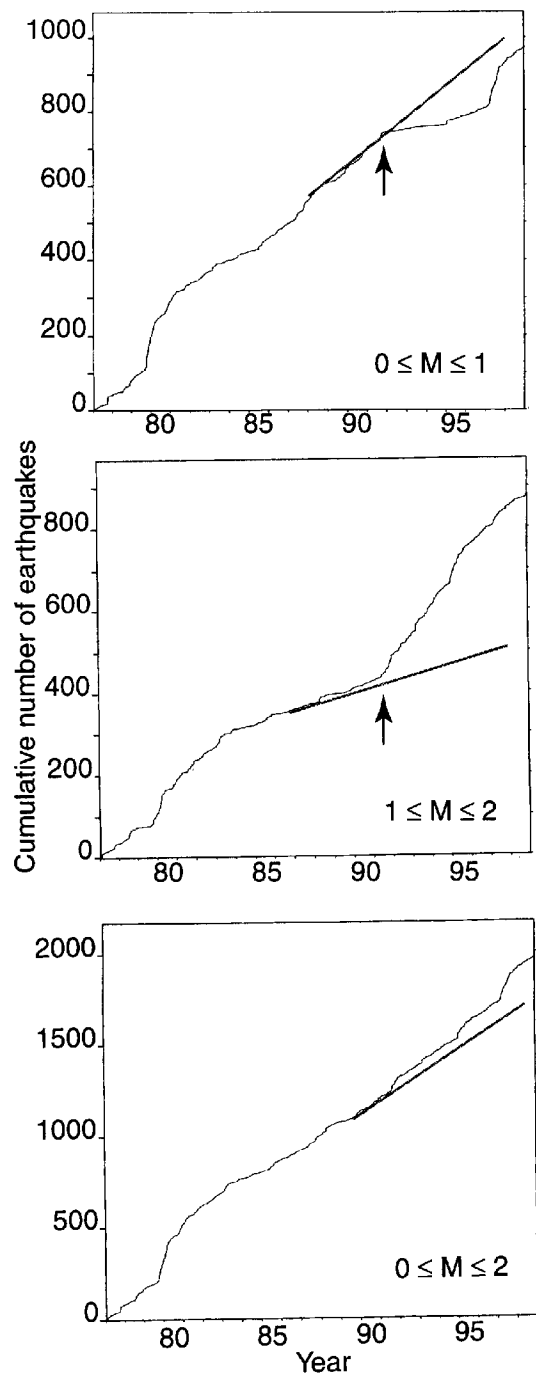


Fig. 7 Anomalous behaviour of cumulative number of microearthquakes in upper portion of southeastern part of Yamasaki fault zone. Activity suddenly became low in magnitudes between 0 and 1 around 1991, while it became high in magnitudes 1 and 2. This tendency is not clear in magnitudes between 0 and 2.

動が極めて低下している事実である。兵庫県南部地震の場合、震源域では $M > 5$ の地震は30年以上に亘って皆無であったことが、茂木（1998）によって指摘されていることなどを考え合わせると、注意すべき事かも

知れない。

6. b 値の精度の検討

兵庫県南部地震の前に、丹波帯のb値が大きく変化したとの渡辺の報告がある（渡辺，1998）。また、松村他（1996）は、中地震から大地震の場合、地震の前にb値が大きくなる傾向にあることを指摘している。彼らは兵庫県南部地震に際しても、山崎断層周辺でもやはりb値は大きく変化したと発表している（松村他，1996）。

しかし、b値の求め方自体にはこれまで様々な議論が成されている。そもそも Gutenberg - Richter (G-R) の式、

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

は何を表すかであるが、単なる経験式であるとするより、ある地域の地震発生を特徴づける統計的な分布関数と位置づける考え方が主流であろう。パラメータa, b, 中でもbは地震発生域の不均質の程度を反映するとされ、またそれは地殻応力の集中等によって時間変化も起こりうると考えられている。b値の求め方には最小自乗法による方法や宇津（1965）のモーメント法が代表的であるが、後者は地震の分布が指数分布であることを仮定し、最尤法で定めるパラメータと一致することがAki（1965）によって証明されている。宇津の方法によるb値を表す式は次のようになる。

$$b = 0.4343 / (\bar{M} - M_S) \quad (2)$$

ここに M_S と $\bar{M}$ はそれぞれ観測されたすべての地震のMの最小値および平均値である。この平均値は対象とする地震の中で、Mの小さい地震からの寄与が大きい。すなわち地震の分布がG-Rの式に従うならば、Mの線型的な減少に対して地震数は指数関数的に増加するから、結局、平均Mは小さい地震数に大きく依存することになる。そこで問題になるのは対象とする範囲の地震の最小Mの選び方である。例えば山崎断層活動帯の場合を示す。Fig. 10に示したように、G-R曲線はMが1.2付近で上に凸に折れ曲がっている。これは地震観測網の検知能力を反映していることに他ならないが、地震の本質的な性質も若干含まれている可能性は残される。しかし、いまそれらを区別できる方法はない。自然現象としてもG-R曲線はどこかでピーク値をもつはずであるが、これがM1.2付近であることは考えにくい。一般には、式(2)などによってb値を求める場合、指数分布を仮定している。この仮定の上で、できるだけMの広い範囲にわたる地震を対象とすべきであるが、実際上はMの小さい方は観測網に依存する検知能力に、大きい側は期間の選び方に依存する。従って厳密にはもはや指数分布の仮定から外れることになる。

しかし、通常は、ある最小Mを選び、それ以上のMを有する地震に関して、十分広い範囲と長い時間をとれば、G-R曲線は直線性（つまり指数分布の仮定）が成り立つとして解析される。しかし、最小Mをどこに設定

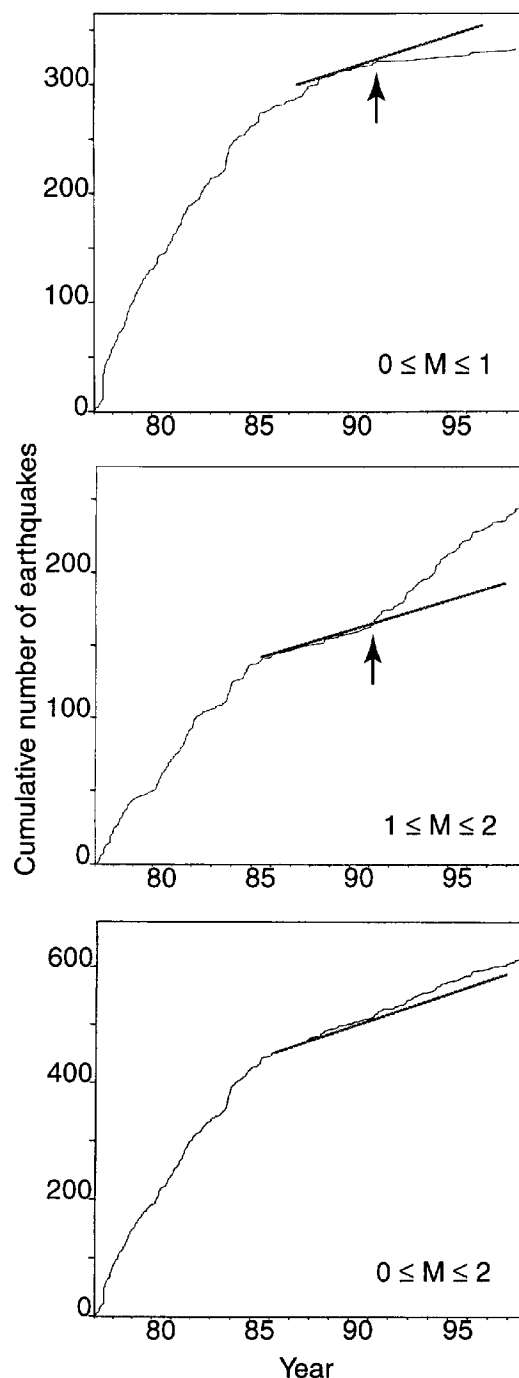


Fig. 8 In eastern portion of Tottori seismically active zone, a similar anomaly of cumulative number curves was found in the same magnitude range as in Yamasaki fault zone.

するかは場所によっても、時期によっても変化するもので、経験による他はない。さらに十分長い時間とはどの程度か、これも基準が必ずしも確定されていない。これはむしろ最大Mの選び方に依存するだろう。松村他（1996）は、最尤法により、解析期間を2年とし、期間を1年ずつオーバーラップさせつつ、b値の変化を調

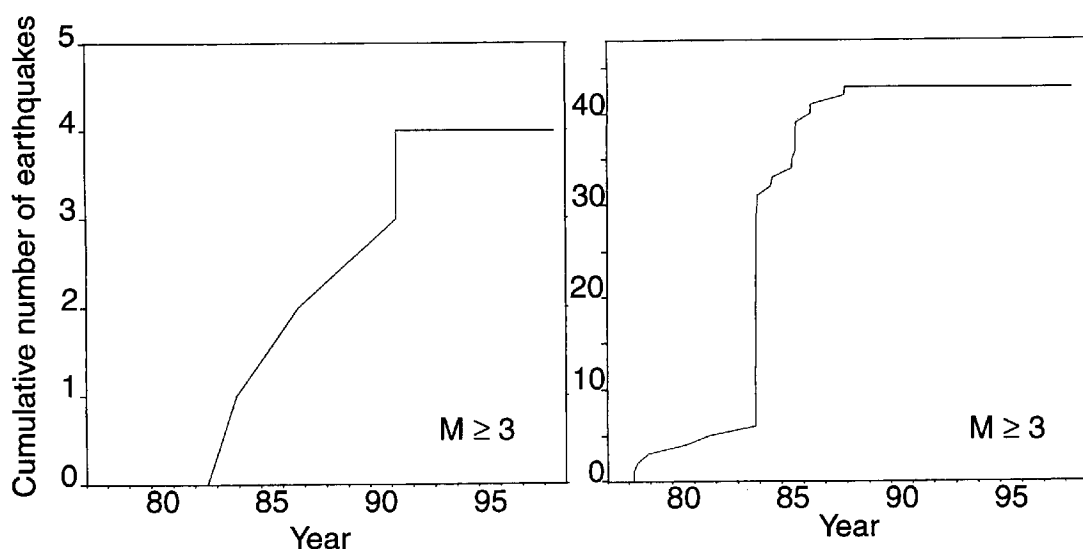


Fig. 9 Cumulative curves of $M \geq 3$ in eastern portion (left) and western portion (right) of Tottori seismically active zone. Almost no earthquake of $M \geq 3$ has occurred since 1992.

べているが、個々の解析区間に入った地震が指数分布に従っているかどうか、疑問の余地が残っている。そこで、ここでは地震の M の下限を少しずつ変えて、 b 値の時間変化のゆらぎを調べた (Fig. 11)。図中のA, B, Cは松村他 (1996) の地域分け、鳥取県西部、鳥取県中央部および山崎断層域に対応する。これによると、地震の規模の下限値を $M1.4$ から $M2.0$ まで変化させると、得られる b 値に大きなばらつきが生じることが分かった。しかし、このばらつきを考慮に入れても、1991年頃から3つの地域で b 値の上昇がみられることを否定できない。この変化が兵庫県南部地震に関連した広域の現象かどうかは分からないが、同様な b 値の変動は1991年頃から丹波帯にも見られるので (渡辺, 1998)、近畿・中国地域に共通した広域の変化の可能性が高い。広域の地殻応力の変化によるのかも知れないが今後の検討課題とする。

7. おわりに

地震活動度の表示方法である時空間分布図、 M 別積算曲線、震央分布図、 b 値変化図等幾つかを再検討した。若干の改善策を示した。最善の方法を特定することはできなかった。地震の時空間的活動を統計的に考えると、母集団の設定への依存性がかなり強い事である。十分長い時間と十分広い空間を選ばなければ、得られるパラメータの信頼性は当然ながら高くなる。しかし、地震現象を考えると、母集団の性質は空間的にも変化が大きい上、時間的にもかなり変化 (1-2年) が顕著である場所もあるので、パラメータの見かけの変動と場の真の変動によるものとの区別は一般には難しい。

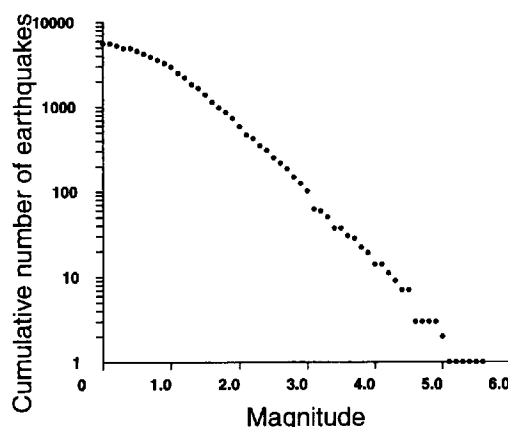


Fig. 10 Cumulative frequency distribution of magnitudes of Yamasaki fault area during the period 1977 - 1998. Frequency curve shows a slight convex around $M = 1.2$.

参考文献

- 石川有三 (1995) : 地震活動空白域の定義, 月刊地球, 号外 No. 13, 71-80.
- 宇津徳治 (1965) : 地震の規模別度数の統計式 $\log n = a - bM$ の係数 b を求める一方法, 北海道大学地球物理学研究報告, 第 13 号, pp. 99-103.
- 古澤 保 (1996) : 地殻変動連続観測による兵庫県南部地震, 京都大学防災研究所『阪神・淡路大震災 - 防災研究への取り組み - 』, pp. 34-42.
- 松村一男・片尾 浩 (1996) : 兵庫県南部地震前後の地殻活動 - 近畿地方の地震活動の特性, 京都大学防災

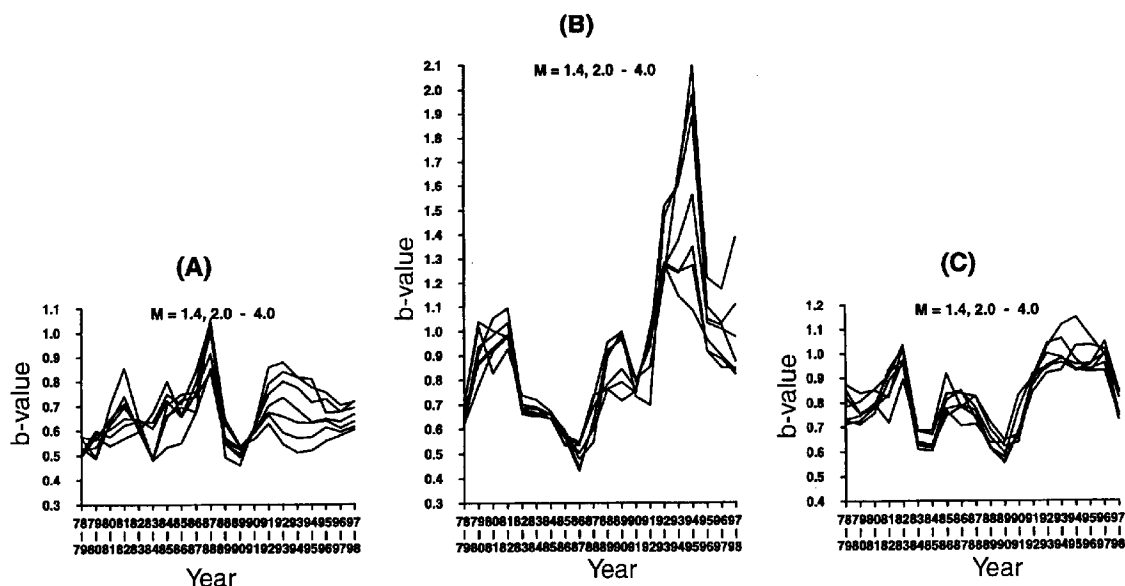


Fig. 11 Variations of b-values calculated with magnitude range from 1.4 - 2.0 to 4.0 in eastern Shimane Prefecture (A), in Tottori seismically active zone (B) and in Yamasaki fault area (c).

研究所【阪神・淡路大震災 - 防災研究への取り組み -】, pp. 3-11.

松村一男・中尾節郎・渡辺邦彦・西上欽也 (1996): 兵庫県南部地震前後の中国地方東部・近畿地方西部の地震活動, 京都防災研究所年報, 第39号B-1, pp. 191-214.

茂木清夫 (1998): 地震予知を考える, 岩波新書, 254 pp.
渡辺 晃 (1998): 1995年兵庫県南部地震と震源域周辺の地震活動 - バックグラウンド地震活動は何を示しているか -, 京都防災研究所年報, 第41号B-1, pp. 25-42.

Aki, K. (1965): Maximum Likelihood Estimation of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits, Bull. Earthq. Res. Inst., pp. 237-239.

Mino, K. (1984): On a Formation Mechanism of Topography and Its Relation to Earthquake Occurrence in Southwest Japan, Bull. D.P.R.I., Kyoto Univ., Vol. 34, pp. 129-167.

Mogi, K. (1979): Two kinds of seismic gaps, Pure Appl. Geophys., Vol. 117, pp. 1-15.

Shibutani, T. and Oike, K. (1989): On features of spatial and temporal variation of seismicity before and after moderate earthquakes, J. Phys. Earth, Vol. 37, pp. 201 - 224.

Tsukuda, T. (1988): Coda-Q before and after the 1983 Misasa earthquake of M6.2, Tottori Prefecture, Japan, Pure Appl. Geophys., Vol. 128, pp. 261 - 279.

Spatial and Temporal Features of Seismic Activity in San'in Districts, Southwest Japan

Norihiko SUMITOMO, Kunihiro WATANABE, Kazuo MATSUMURA, Fumiaki TAKEUCHI,
Takuo SHIBUTANI, Setsuro NAKAO and Yukihiro IMADA*

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

There are a lot of methods to express spatial and temporal features of seismic activity such as a hypocenter map, a spatial and temporal distribution map, a cumulative earthquake number curve and a b-value. Because they are not necessarily suitable methods to give citizens seismic activity information which is strongly needed since Hyogo-ken Nambu Earthquake, we reexamine these method and try to modify them. Using a seismic catalog which includes all microearthquakes occurred in south western Kinki district and San'in district during the period from 1977 to 1998, we first made a mesh data set of seismicity and displayed a new distribution of seismicity. Next, we improved the spatial and temporal distribution map so as to express it in numerical way to detect quiescence of seismicity. Also we examined cumulative earthquake number curves for each M. Finally, we checked the temporal changes of b-values in view of accuracy of the method previously reported.

Keywords: seismic activity; spatial and temporal distribution; cumulative curve; b value; Tottori active zone; Yamasaki Fault active zone