

中規模地震に先行する微小地震活動の静穏化について

片尾 浩

要 旨

1999年2月12日京都府亀岡市付近でM4.0の地震が発生した。この地震の前約3か月間にわたって周囲の微小地震活動が低下していたことがわかった。同様の地震活動の静穏化は1987年5月28日に同じく亀岡市付近で起きたM5.0の地震の前にもみられた。大地震の前に静穏化や空白域が観測された例は多いが、M4~5の中規模地震にも静穏化が起きる例があることがわかった。定量的に静穏化を検出することには問題も多いが、これらの静穏化は積算地震発生数のグラフ上で非常に顕著なものであり、地震発生予測の研究に資するものであると考えられる。

キーワード：地震活動の静穏化，微小地震活動，丹波山地，地震の発生予測

1. はじめに

大地震の前にその地域の地震活動が低下する例はこれまでに多数報告されている。（例えばKatsumata and Kasahara, 1999; Ohtake *et al.*, 1977など）京都府中部から大阪府北部にかけての北摂・丹波山地におけるマグニチュード（M）4~5の中規模地震についても本震前の微小地震活動の低下、いわゆる静穏化がみられたので報告する。

北摂・丹波山地は定常的な微小地震活動の活発な地域である。1995年の兵庫県南部地震直後から、震源域に隣接する丹波山地の地震活動は、それ以前の数倍活発となり現在も継続中である。（片尾, 1995）1999年2月12日3時16分京都府亀岡市付近（北緯34.991度、東経135.562度、深さ13.7km）においてM4.0の地震（以下1999年亀岡地震と呼ぶ）が発生した。亀岡市で震度4を記録したほか近畿の広い範囲で有感となった。その後活発な余震活動が続いていたが、1か月後の3月12日23時24分にはほぼ同じ場所（北緯34.986度、東経135.570度、深さ13.8km）でM4.0の地震が発生した。全体の余震活動は4月初旬まで続いた。1999年亀岡地震の北西約3kmの場所

は1987年5月28日にM5.0の地震（北緯35.015度、東経135.548度、深さ12.1km、以下1987年亀岡地震と呼ぶ）が起きている。この2つの地震の前数か月間、周辺の微小地震活動が明瞭に低下していたことがわかった。

2. データと解析

京都大学防災研究所地震予知研究センターの微小地震観測網は北陸・近畿・山陰・四国東部と広く分布しており、現在SATARNと称する処理システムで、気象台や他大学からの交換データも含め一括処理を行なっている（大見ほか, 1999）。しかし個々の地震の手動再検測処理はいくつかの小区域（SATARN以前の各地方観測所の観測網に準拠した区域分け）に分割して分担して行なわれ、各々の区域で震源データのサブセットが構築されている。本論文では、これらのサブセットのうち阿武山系観測網の再検測震源データを使用した。

阿武山系観測網は近畿地方中・北部に位置しており、丹波山地の微小地震活動域を中心とした旧阿武山観測所のテレメータ観測網（黒磯・渡辺, 1977）

に属した12箇所の観測点を継承している。中央部での観測点間隔は10~15kmと高密度で、北摂・丹波山地の微小地震活動域において精度の高い震源決定が可能であった。現在はこれにSATARN内部での隣接観測点、他大学の隣接観測点、気象庁観測網の観測点などを加えて自動処理および手動再検測処理を行っている。マグニチュード頻度分布から推定する亀岡市を含む観測網中央部の検知能力の下限はおよそM1.2である。

Fig. 1は、1999年亀岡地震の本震震央を中心にした20kmx20kmの矩型領域内の積算地震発生数のグラフである。期間は1998年1月1日から1999年4月30日まで、マグニチュードの下限は設けず深さ30km以下の震源決定された地震すべてを使っている。本震発生（1999年2月12日）の約3か月前の1998年11月はじめから地震活動が低下していることが読み取れる。積算地震発生数のグラフ上では、1998年11月以前の定常的な活動がほぼ一直線の傾き（2.16events/day）

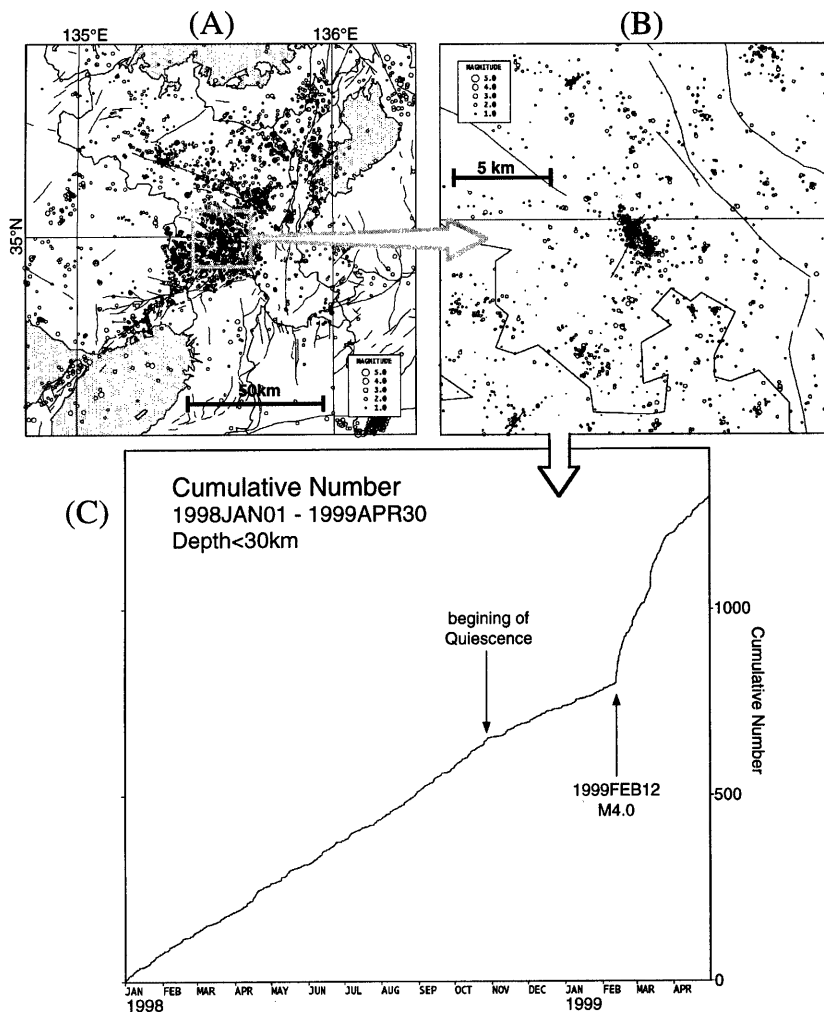


Fig. 1. (A) Epicenter distribution of shallow micro-earthquakes in the Northern Kinki District from JAN. 1, 1998 to APR. 30, 1999. (B) Epicenter distribution around the 1999 Kameoka Earthquake: 20km square area around epicenter of the mainshock. (C) Cumulative number of earthquakes occurred in the area shown in (B).

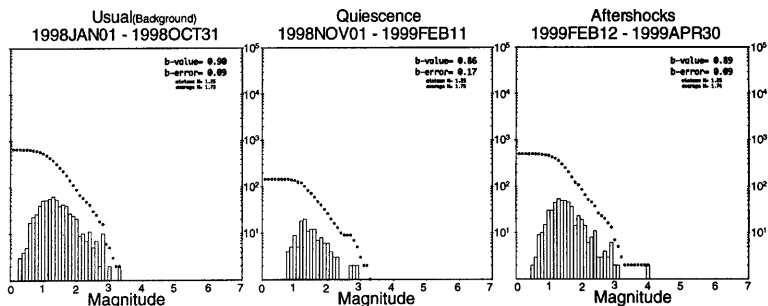


Fig. 2. Magnitude-Frequency histogram around the 1999 Kameoka Earthquake. (Left) Before the quiescence. (Middle) During the quiescence. (Right) After the mainshock.

を保っていたが、11月時点で直線が急に折れ曲がったようにみえる。また11月以降、それ以前の2/3程度のレート (1.40events/day) に低下した活動は、本震発生までその低いレートをほぼ一定に保つという特徴を示している。活動度の変化があった11月の前および後の期間では、グラフはほぼ直線的な増加を示しており、結果的に静穏化の始まりが直線の折れ曲がりという形で非常に顕著に表われている。なお本震後の余震活動が終息した1999年5月以降は、静穏化前の地震発生率に復帰している。また、マグニチュードの下限をいろいろ変えて同様のグラフを作ると、ほぼ全てのマグニチュードで活動低下が起きていることがわかる。Fig. 2はFig. 1と同じ空間領域で静穏化前、静穏期、本震後の余震活動の3つの期間におけるマグニチュード頻度分布を示したもので、b値は各々の期間で0.90、0.86、0.89であり顕著なb値の変化はみられない。

気象庁の速報震源データについても同様の解析を行ってみると、防災研のデータと同じく積算曲線の折れ曲がりが見られる。すなわち、この静穏化は観測・処理システムの不具合による見かけ上のものではないことが確認できる。

1987年亀岡地震についても同様の解析を行うと、やはり本震発生の前に顕著な地震活動の低下がみられる。Fig. 3は、1987年亀岡地震の本震震央を中心にした20kmx20kmの矩型領域内の積算地震発生数のグラフである。期間は1985年1月1日から1987年8月31日までで、深さ30km以浅の震源決定された地震すべてを使っている。本震発生 (1987年5月28日) の約9か月前の1986年9月から地震活動が低下している。1985年1月から1986年8月までの発生率は0.82events/dayであるが、1986年9月から本震発生までの期間は0.71events/daysである。この場合も静穏化開始の前後の期間で、発生率はほぼ一定に保たれており、結果的に静穏化の始まりが直線の折れ曲が

りという形で顕著に表われている。1999年亀岡地震の例に比べて、1987年亀岡地震の際の地震発生率が全体的に小さいのは、兵庫県南部地震後の丹波山地の地震活動活発化の以前であるためである。静穏化前の定常状態の地震発生率は1999年の例の1/3と低い。また定常状態と静穏期の発生率のコントラストも小さい。1999年の例では全体的な地震活動の活発化により、より顕著に静穏化が現われたとも解釈できる。この例でも余震活動が終息した後は、静穏化前の地震発生率に復帰している。

1999年亀岡地震は、1987年亀岡地震とそれに続いて1988年12月に約5km南に起きたM4.0の地震の余震域の間隙を埋めるような位置に起きた。両地震とも発震機構は東西方向に主圧縮軸を持つ逆断層型であり、地下のひと続きの断層系に属するものと推察できる。

このような「静穏化」は来るべき本震の周囲のどの範囲で起きているのであろうか。Fig. 4は解析領域を10kmx10kmと狭くし、1999年亀岡地震の周辺地域で積算曲線を描かせたものである。本震震源を含む中央のブロックで最も顕著に静穏化が見られるが、サンプリングする地震数が領域面積とともに減少するため、小さな活動のゆらぎが強調されている。北東側のブロックではほぼ同時期に活動の低下がみられるが、あまり顕著ではない。また1998年11月の静穏化の始まりもゆるやかにみえる。南西側のブロックでは活動の変化はほとんどみられない。これらの結果は、静穏化が本震の周囲約10km前後の範囲で起きていることを示唆している。また同時に、解析領域をあまり狭くとるとバックグラウンドの活動の小さな揺らぎのため、かえって活動度の変化を積算曲線上で読み取ることを難しくしてしまうことも示している。逆に領域を広くとりすぎると、全体のトレンドに局所的な変化が埋もれてしまい検知しにくくなるし、静穏化の場所 (すなわち本震のおよそ位

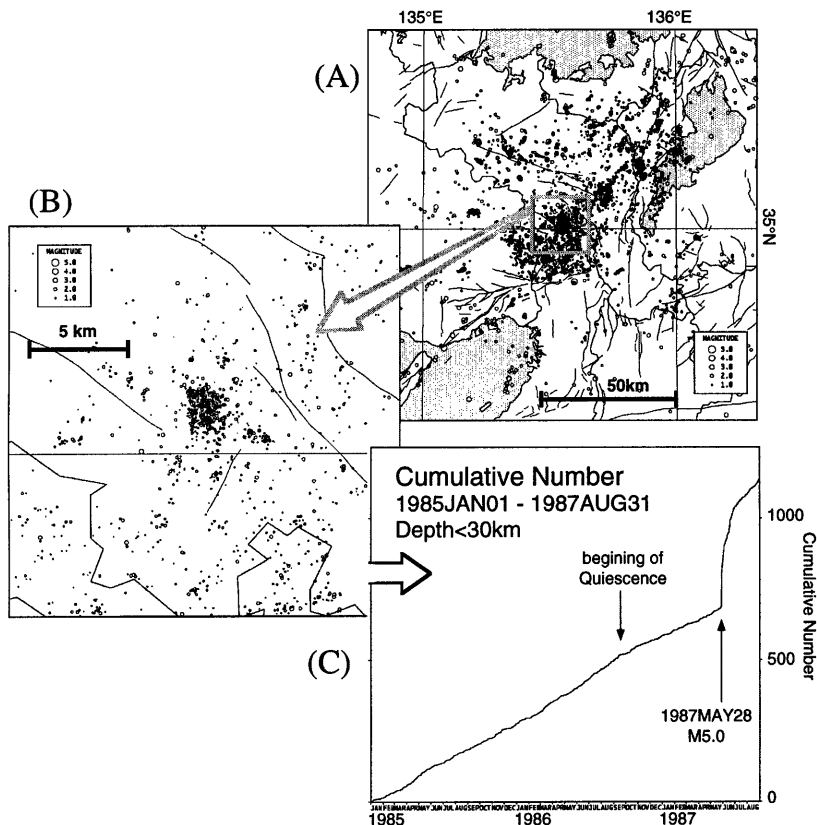


Fig. 3. (A) Epicenter distribution of shallow micro-earthquakes in the Northern Kinki District from JAN. 1, 1985 to AUG. 31, 1987. (B) Epicenter distribution around the 1987 Kameoka Earthquake: 20km square area around epicenter of the mainshock. (C) Cumulative number of earthquakes occurred in the area shown in (B).

置)の特定もできない。空白域を示すのによく使われる手法で、本震からの距離と時間の時空間分布をプロットしてみても、特に本震震源の近傍で活動低下が著しいようには見えない。静穏化は本震の震源域(余震分布によるとせいぜい3km)よりもひとまわり大きな領域で起きているようである。亀岡地震の例では、解析領域を20km×20km程度にするのが適当であるらしいが、適切な領域の広さは地域の地震活動特性、観測網の検知能力によって変わるものであろう。

3. 議論

Shibutani and Oike (1989)は、1983年鳥取県中部地震(M6.3)や1984年山崎断層の地震(M5.6)ら

の中規模地震に先行する地震活動の低下がみられたことを指摘している。今回の解析によりM4~5クラスでも活動低下がみられる例があることがわかった。

静穏化の解析を行う空間領域を20km四方としたことは、前述のようにある程度多数の地震の平均的な発生レートを見ることで小さな活動のゆらぎを抑え、積算曲線上のパターン認識を容易にするという意味がある。定常的な活動が積算曲線上ではほぼ直線となるという「予測可能」な状態であれば、変化が有った場合検出が容易になる。逆に定常活動がランダムに大きなゆらぎを示しているとき有意な変化を検出することが困難となる。

本解析のように空間領域をやや広くとった場合、本震震源が解析領域の中心に位置することは必ずし

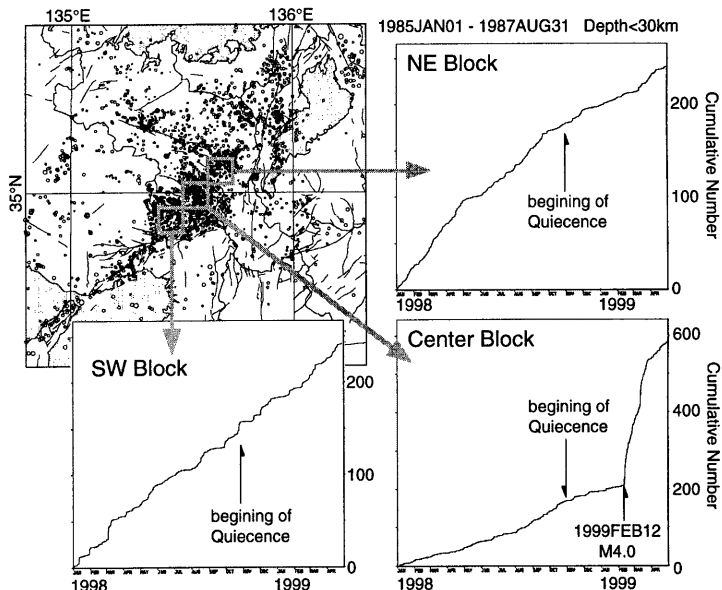


Fig. 4. Cumulative number of earthquakes from JAN. 1, 1998 to APR. 30, 1999 in the 10km square areas around the 1999 Kameoka Earthquake.

も必要ではなく、数kmずれていてもこの種の静穏化を検知することができる。これは10~20km程度の大きな区域わけにより、比較的広い範囲の地震活動の静穏化の有無をモニターできるという意味で地震発生予測に有利であると言える。空白域を検出する方法では、本震震源からの距離など何らかの形で空間軸を設定しなければならないが、震源域の小さなM4クラスの地震については、将来の本震震源位置を正確に予測し、そこを空間軸の原点としない限り明瞭な空白域を見つけ出すことは容易ではない。

静穏化が積算曲線上で明瞭に見られると言ってもこれまでの解析は視覚的・定性的なものにすぎない。何らかの形で定量的に検出されることが望まれる。これまでも多くの研究者により地震活動の変化を示す手法が提案されている。(Matthews and Reasenber, 1988; Wiemer and Wyss, 1994など)どのような方法をとっても検出の基準とするパラメータは、地震活動および観測の状況やテクトニクス的な背景を勘案して適宜決めざるを得ない。ここでは、亀岡地震について積算曲線上の特徴がよく表われるように簡単な方法で定量的解析を試みる。Fig. 5は1999年亀岡地震の解析領域について、1998年1月から1999年4月までの地震発生率の時間変化をグラフにしたものである。Fig. 5(A)は時間ウィンドウ

の幅を30日間としてその間に起きた地震数を単純に時間で割ったものの変化である。本震前に地震発生率が低下していることはこの図からも読み取ることができる。50日以下の短周期の変動は地震活動の小さなゆらぎによるものである。M2程度の微小地震であっても余震活動が存在する。また本震余震関係が明瞭でなくとも一定の時間空間領域に微小地震が続発することはよくあることで、いわゆるバックグラウンド活動も決してランダムなものではない。積算直線上ではごく小さな変動で視覚的に無視できたものが、発生率グラフでは強調されて見えることになる。Fig. 5(B)は30日間のウィンドウ内で積算個数・時間平面における回帰直線の傾きを最小自乗法で求めたもので、Fig. 5(A)に比べて数日程度の短周期変動が除去され変化が見易くなっている。Fig. 5(C)は回帰直線の傾きを100日間の時間ウィンドウで求めたもので、短周期変動がさらに除去され本震前の静穏化が明瞭となっている。これらの図の期間に限れば、例えば静穏化前に2.0events/day前後で変動していた発生率が1.5events/dayあたりに下降した時点でかなり特異な事が起きていると判断でき、閾値を設けて機械的に静穏化を検出できる可能性は高いと言えるであろう。Fig. 5(B)と(C)を比較すればわかるように時間ウィンドウの長さといったパラメータ選択

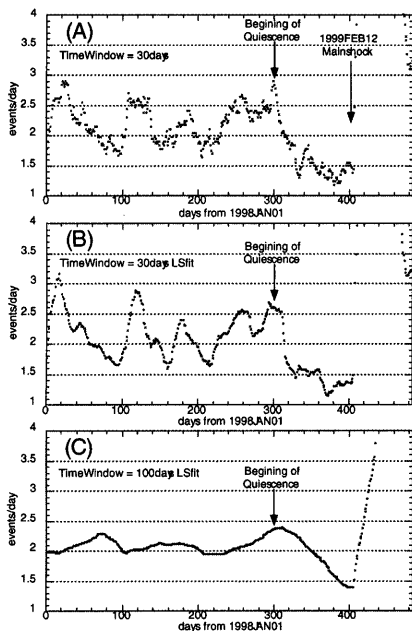


Fig. 5. Temporal variation of occurrence rate from JAN. 1, 1998 to APR. 30, 1999 in 20km square area around the 1999 Kameoka Earthquake.

の任意性により、結果の様相が大きく変わることに注意が必要である。

Fig. 6は1987年亀岡地震について1983年1月から1989年12月までとこれまでの積算曲線図よりも長い期間をとって地震発生率の時間変化をみたもので、Fig. 5(C)と同様回帰直線の傾きを100日間の時間ウィンドウで求めたものである。1987年亀岡地震前の静穏化はグラフ上によく表われている。しかしこの静穏期間における地震発生率は全期間を通じた最小値ではないことがわかる。1983年11月16日に解析領域内でM3.8の地震（北緯35.023度、東経135.622度、深さ12.8km）が起き、規模が小さいながら活発な余震活動をともなった。この地震の前の地震発生率は約0.5event/dayと低く、この地震にも静穏化現象がともなったことを示唆している。問題はこの地震の余震活動がおさまった直後にも約0.5events/dayと低い値が見られることで、これには対応する中規模地震が存在しない。また図中の時間軸で800日付近にも短期間ながら発生率の低下が見られるが、これにも該当する中規模地震は無い。この例では機械的な基準を設けて静穏化を検出する方法には限界があることを示している。地震活動の変化にはさらに長期

の10年オーダーのゆっくりした変動もあり、静穏化検出のためには、検出方法に改善を加えるとともに、地震活動および観測の状況を考慮しながら注意深く監視する必要があると言える。

静穏化パターンをみる時空間領域内に、多くの余震をとまなう別の中規模地震や群発地震活動が含まれると、積算曲線の形状が乱され、単純なパターン認識が通用しなくなり、静穏化の検出が困難になる。丹波山地という限られた領域内の中規模地震のみをみても余震活動には大きなバリエーションがある。例えばここでとりあげた亀岡地震は、改良大森公式に従う余震活動の減衰を呈するが、1985年10月3日花折峠の地震（M5.0）のように、本震直後に多数の余震が発生するものの、その後急激に活動が減衰（ p 値で2程度に相当）する例も多い。余震活動の活発さは本震のマグニチュードに依らず、かなり個性的である。機械的な基準を設けて、自動的に地震カタログから余震だけ取り除くということは難しいと言える。

前震活動が有る場合も単純な静穏化パターンを乱すであろう。1994年6月28日の京北町付近の地震（M4.6）の前には、同年2月ごろから顕著な前震活動が続いていた。（片尾，1994）1968年の和知地震（M5.6）は活発な前震活動が続いたことが知られている。

2つの亀岡地震前の静穏化の始まりは積算曲線上で直線の折れ曲がりという形で非常にシャープに見える。地震活動は隣接地域における大地震の発生などの影響を受け急激な変化をする例がある。兵庫県南部地震直後から続く丹波山地の活動活発化もその例である。亀岡地震の静穏化開始時期、すなわち1986年9月および1998年11月に周囲で顕著な活動があったかどうかは興味ある問題であるが、少なくとも近畿中・北部において特に目立った活動は見当たらない。

M4クラスの中規模地震の前に必ずこのような活動低下がともなうわけではない。本論文でとりあげた

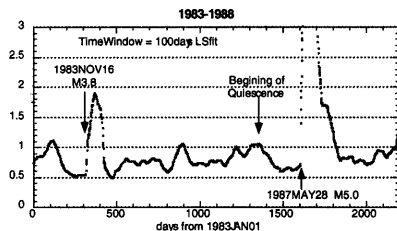


Fig. 6. Temporal variation of occurrence rate from JAN. 1, 1983 to DEC. 31, 1988 in 20km square area around the 1987 Kameoka Earthquake.

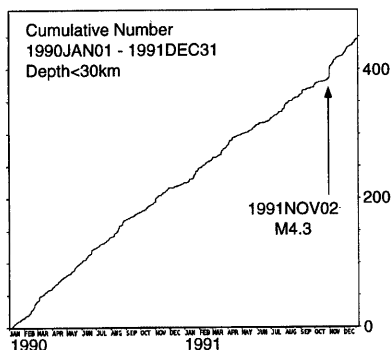


Fig. 7 Cumulative number of earthquakes from JAN. 1, 1990 to DEC. 31, 1991 in the 20km square areas around the M4.3 earthquake on NOV. 2, 1991 near Kameoka.

2つの亀岡地震の他にも、北摂・丹波山地ではM4クラスの中規模地震が多く発生している。例えば1991年11月2日亀岡市北部の地震（北緯35.039度、東経135.551度、深さ11.6km、M4.3）の前にはこのような静穏化はみられない。（Fig. 7）花折断層や琵琶湖西岸域では、地震活動が時間空間的にクラスター化する傾向が強いためか、亀岡の例で見られるような明瞭な静穏化を検出することが困難なようである。

少々粗雑な議論ではあるが、2つの亀岡地震前の静穏化の例に基づいて、事前に本震の発生の予測が可能であったかどうかを検討してみる。積算曲線の「折れ曲がり」は、静穏化が始まって1か月ほど経過すると認識可能であろう。これが定常活動のゆらぎではないと確定できるのは2～3か月後であるとなると、2つの地震について本震前に静穏化の出現を十分認識できたことになる。また、解析領域の大

きを20km四方とすると市町村スケールよりやや大きい郡単位程度の空間分解能で震央位置の予測が可能であろう。様々な地震前兆現象の先行期間と本震のマグニチュードの関係については過去に多くの研究者によって経験式が提示されている。本論文でとりあげた2つの亀岡地震に先行する静穏期間の長ささと本震のMは、大竹（1980）が提唱した経験式 $\log(T)=0.39M+0.46$ によく一致する。（Fig. 8）この式自体はプレート間の巨大地震前に現われる空白域の出現期間TとマグニチュードMについて求めたもので、内陸の中小地震に適用できるか疑問がある。もちろん、たった2つの例がたまたま既存の経験式のひとつにあてはまるということは偶然に過ぎず、大きな意義はないであろう。しかし、これは静穏化の先行期間の長さが本震の規模に比例する可能性を示唆するもので、地震発生予測の観点から留意すべき問題である。もともと解析領域の広さから最大M5程度の地震を想定しているの、先行期間もせいぜい1年未満と考えるのが妥当かもしれない。もしさらに大きなM6～7の大地震の前兆として静穏化が現われているのなら、一般にさらに広域かつ顕著な変化がみられるであろうと考えられる。以上まとめると、前震や震源域以外の群発地震活動などが無い理想的な事例を想定すると、空間的には約10km程度の精度で、時間的には本震の1ヶ月から数か月前にM4～5の規模で地震が発生すると予測できるということになる。

本論文で用いたような単純な手法で本震前の活動低下を検知できるのは、丹波山地のように定期的に微小地震活動が活発で、かつ活動が2次元に比較的広い範囲に分布している地域に限られるかもしれない。実際、このような丹波山地の活動様式は、日本の内陸部の微小地震活動としては特異な例であるとも言える。跡津川断層のように活断層に沿って線状に地震活動が分布する場合は、空間領域のとりかたに工夫する必要があるだろう。また時間的にクラスターを作る活動（例えば伊豆東方の群発地震活動）領域では、バックグラウンドの定常活動自体が特定できない場合が有り得る。また、丹波山地内においても同様の静穏化を示す例があまり無いことから、この現象は2つの亀岡地震を起した一連の地下断層系特有の活動特性によるもので、一般的に適用できるものではないとも考えられる。おそらく顕著な静穏化が現われるかどうか、前震活動がみられるかどうかといった地震活動上の特徴は、個々の断層系の履歴、断層面の物性、周囲の応力状態、地下流体の影響などによって左右されるものであろう。

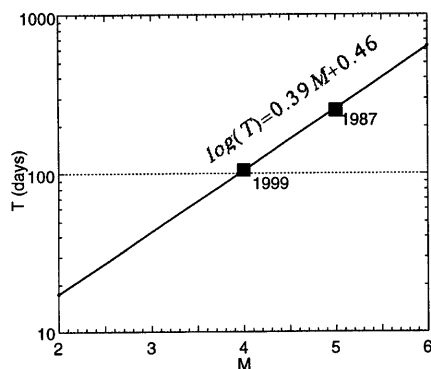


Fig. 8. Relation between the magnitude of mainshock and the length of quiescence period.

5. まとめ

京都府亀岡市付近でおきた1999年2月の地震 (M4.0) および1987年5月の地震 (M5.0) の前数ヶ月間、周囲の微小地震活動が静穏化していたことがわかった。静穏化の特徴は顕著で、ある程度事前に本震発生が予測できた可能性がある。ただし数値的に静穏化を自動検出するには多くの問題がある。丹波山地のように定常的地震活動が活発かつ一定である場合でなければ予測は難しいと考えられるが、長期間にわたる観測でこのような活動特性を地域ごとに把握し注意深く解析し、同様の例を集めることができれば、地震発生予測に資する可能性が高いと思われる。

参考文献

- 大竹政和(1980): 地震空白域にみとづく地震予知, 国立防災科学技術センター研究報告, 23, 65-110.
- 大見士朗・渡辺邦彦・平野憲雄・中川 渥・竹内文朗・片尾 浩・竹内晴子・浅田照行・小泉 誠・伊藤 潔, 和田博夫・澁谷拓郎・松村一男・許斐直・近藤和男・渡辺 晃(1999): 微小地震観測網 SATARNシステムの現状と概要, 京都大学防災研究所年報, 42, B-1, 45-59.
- 片尾 浩(1994): 6月28日京都府中部の地震(M4.6)とその顕著な前震活動について, 日本地震学会講演予稿集, No.2, 150.
- 片尾 浩(1995): 兵庫県南部地震前後の北摂・丹波地域の地震活動, 日本地震学会講演予稿集, No.2, A49.
- 黒磯章夫・渡辺 晃(1977): 阿武山地震観測所の微小地震テレメータシステムについて, 地震, 2, 30, 91-106.
- Katsumata, K., and Kasahara M. (1999): Precursory seismic quiescence before the 1994 Kurile Earthquake (Mw=8.3) revealed by three independent seismic catalogs, *Pure appl. geophys.*, 55, 443-470.
- Matthews, M., and Reasenber P. A. (1988): Statistical methods for investigationg quiescence and othe temporal seismicity patterns, *PAGEOPH.*, 126, 357-372.
- Ohtake, M., Matsumoto T. , and Latham G. V. (1977): Seismic gap near Oaxaca, Southern Maxico as a probable precursor to a large earthquake, *Pure appl. geophys.*, 115, 375-385.
- Shibutani, T., and Oike K. (1989): On features of spatial and temporal variation of seismicity before and after moderate earthquakes, *J. Phys. Earth*, 37, 201-224.
- Wiemer, S., and Wyss M. (1994): Seismic quiescence before the Landers (M=7.5) and Big Bear (M=6.5) 1992 Earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 900-916.

Seismic quiescence before the moderate-size earthquakes

Hiroshi KATAO

Synopsis

On February 12, 1999, the earthquake with magnitude 4.0 occurred near the Kameoka City, Kyoto Prefecture. Before the earthquake, micro-earthquake activity around the epicenter was lowered since November, 1998. Similer phenomenon was also observed before the M5.0 earthquake on May 28, 1987 near Kameoka. These seismic quiescence can be detected clearly on the cumulative curve of the earthquake occurrence in 20 km square area including epicenter of the mainshock. Many exsamples of seismic quiescence before great earthquakes have been reported. We confirmed that seismic quiescence occurred before some moderate-size earthquakes. Analyses about such quiescence are important for investigation of earthquake prediction.

Keywords: seismic quiescence, micro-earthquake activity, Tamba Plateau, earthquake prediction