

丹波山地における最近の微小地震活動の静穏化

片尾 浩

要 旨

丹波山地は定常的に地震活動の活発な地域である。兵庫県南部地震地震に誘発される形で近年活発であった丹波山地の微小地震活動は、2003年1月末頃からそれまでの6～7割に突然低下し、その後も低いレートを維持している。静穏化が顕著なのは京都府中部から琵琶湖西岸にかけての地域で、その周辺部では顕著な活動変化は見られない。丹波山地では、1995年兵庫県南部地震前やM4～5の中規模地震前に、微小地震活動が静穏化した例が知られている。

キーワード：地震活動、微小地震、丹波山地、静穏化

1. はじめに

大阪府北部から京都府中部、琵琶湖西岸にかけての丹波山地（以下単に丹波山地と呼ぶ）は、微小地震活動の活発な地域である。丹波山地はいわゆる近畿三角帯の西縁に位置し、また最近GPS連続観測の結果から提唱されている新潟神戸歪集中帯（Sagiya et al., 2000）の一翼を担う場所にあたる。丹波山地内には西山断層、亀岡断層、三峠断層、花折断層など多くの活断層が存在するが、微小地震分布はこれら特定の活断層に沿うのではなく、むしろ小さなクラスターを形成しながら面的にやや広域に広がっており、過去の大地震の余震活動とは考えにくい。有馬高槻構造線を境にして南北で地震活動の様相は対照的で、北側の北摂・丹波山地の活発な活動に対して、南側の大阪平野での活動は極めて低調である。

丹波山地の地震活動の大きな特徴は、地震活動が

極めて定常的であることである。大きな例外として、1995年1月に兵庫県南部地震（M7.3）が発生すると、その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化した。兵庫県南部地震前後の期間に分けて見ると積算発生数は各々ほぼ一直線を描く。兵庫県南部地震後の活発化した活動も通常の余震活動のような急激な減衰はみられず、ほぼ定常的に高い発生レートを維持してきた。（片尾, 2002）M3～5中規模地震が多数の余震をともなって発生した場合は積算曲線に段差を生じるが、丹波山地全体を長期にわたって見た場合その影響は少ない。

上述したように、丹波山地の微小地震活動は極めて定常的であったが、2003年1月末頃に地震発生数がそれまでの60～70%に突然減少し、現在も低下したままである。本研究では、丹波山地の微小地震の最近の静穏化について、おもに微小地震定常観測の結果をもとに報告する。

2. 最近の静穏化

Fig. 1は、1999年1月～2005年3月の近畿地方北部の浅い（30km以浅）微小地震の震央分布である。Fig. 1内に示す丹波山地から琵琶湖西岸にかけて北東―南西にのびた矩形領域内での積算の地震発生数を示したのがFig. 2である。データは京都大学防災研究所地震予知研究センター阿武山系観測網によるものである。（ただし、2001年までは再検測、2002年以降は自動処理による）

丹波山地の微小地震活動は、兵庫県南部地震直後から高い発生レートを維持してきたが、2003年1月末頃急激に地震発生数が低下し、その低いレートを保ったまま現在に至っている。Fig. 2における2001年8月および1999年2月などのステップ状の増加は、M4～5の中規模地震にともなう余震活動によるもので無視できる。これらの余震・群発活動（クラスター）を除去するためReasenber(1985)の方法で除群（デクラタリング）処理した結果がFig. 2で破線で示した積算曲線である。クラスターを除くと、丹波山地における微小地震活動の定常性がよくわかり、問題としている2003年初頭の地震発生レートの変化が、より顕著に認識できる。なお、静穏化の前後でb値に有意な変化は見られない。

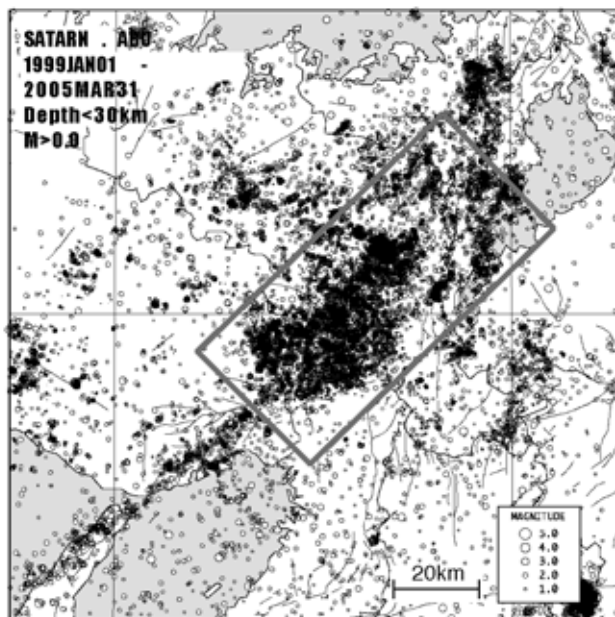


Fig. 1 Epicenter distribution of the Northern Kinki District determined by RCEP, DPRI, Kyoto Univ. (1999JAN-2005MAR)

同様の活動低下は気象庁の震源データでも確認できる。大阪管区の観測網は2003年3月にトリガーの変更を行なっているが、丹波山地以外の地域の状況を見ても、それによる影響は最小限にとどまっていると言える。（京都大学防災研究所地震予知研究センター、2004a） Fig. 3は気象庁の速報震源データのうちMが0.5以上のものを用いて、2002年1月から2004年10月までの期間の近畿地方周辺各地域における積算地震数グラフを示したものである。積算グラフには、問題となっている2003年1月末の位置と、2002年1年間の平均トレンドを点線で示している。和歌山市周辺域の定常活動には期間を通して顕著な変化はみられず、2003年3月のトリガー変更の影響がほとんど無いことがわかる。柳ヶ瀬断層、六甲・淡路島地域、山崎断層等の地域でも、特に地震活動の低下は見られない。一方、2003年初頭から積算曲線が折れ曲がり地震活動の低下を示しているのは、丹波山地中央部（亀岡市付近）、同じく東部（京北町付近）、花折断層・琵琶湖西岸地域である。丹波山地の中でも、南西部の北摂山地・帯での活動低下はあまり顕著ではない。丹波山地北部の三峠断層沿いでは、全体に低下傾向にはあるが、低下の始まる時期が他より早く、一致していないように見える。このように、2003年初等からの微小地震活動の静穏化は、丹波山地の微小地震地震定常活動域、特にその東部を中心とした地域に起きているようである。

ここで、解析に用いた阿武山系観測網の震源データについて整理しておく。2001年いっぱいまでは、テレメータ観測開始以来のルーチンで再検測作業を行っており、その再検測震源リストを用いている。2002年以降は省力化のためルーチン再検測作業を行わないことになったので、自動処理による震源リストをそのまま用いている。2002年4月からは、防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netの観測点の波形データが阿武山観測所系の処理にも取り込まれるようになったため、その前後の期間でマグニチュード（M）が系統的にずれるマグニチュードシフトが起きている。これは、不用意に特定のMを下限として積算曲線をプロットすると、2002年4月を境にグラフが折れ曲がり、見かけ上静穏化のよ

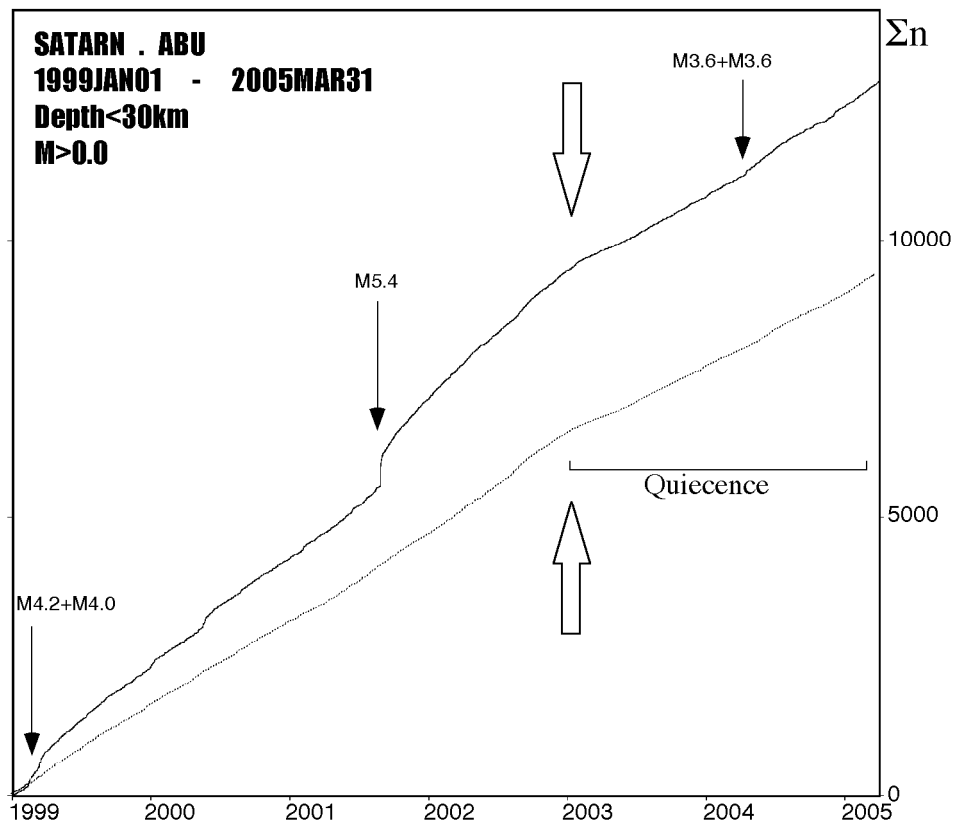


Fig. 2 Cumulative number of microearthquakes in the Tamba Plateau (1999JAN-2005MAR). Solid line is raw data. Dashed line is declustered data.

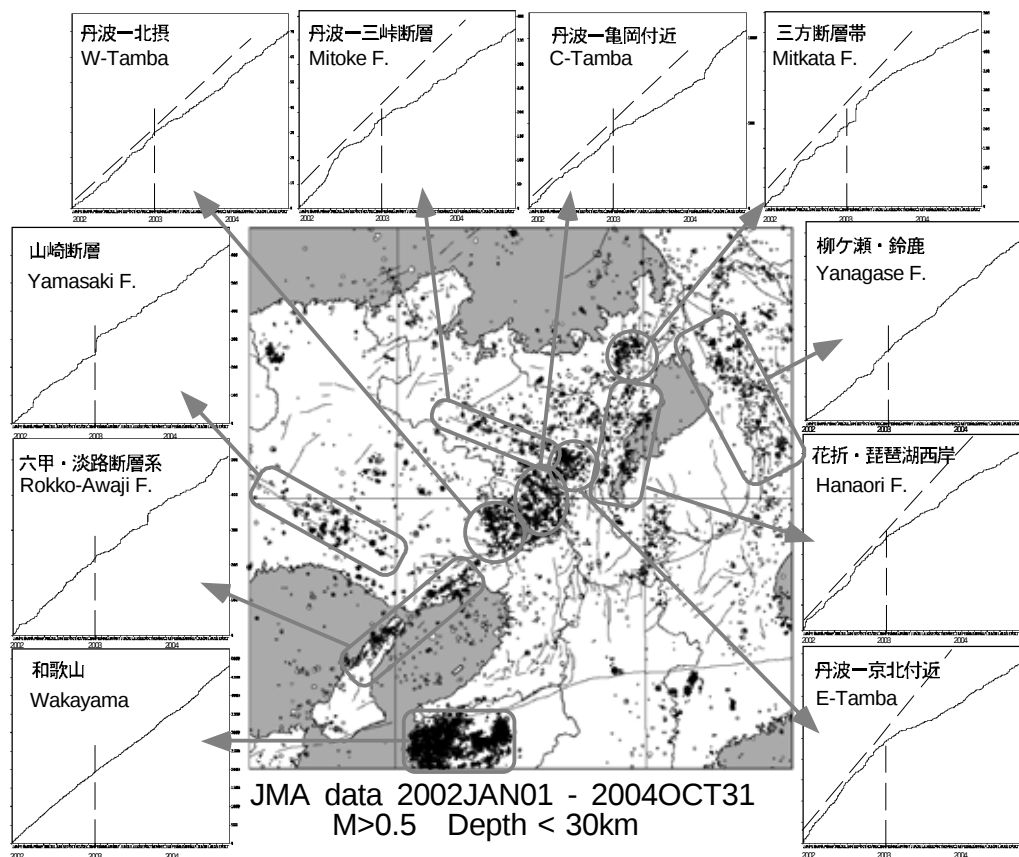


Fig. 3 Cumulative number of microearthquakes in the several regions around the Northern Kinki District (2002-2004OCT, JMA data).

うに見えることで容易に知ることができる。しかしながら、Mを制限せずにプロットした積算発生数は2002年4月前後で変化すること無く、2001年以前の時期から一直線に繋がっていることから、観測網の丹波山地中央部における検知能力にはほとんど変化がなかったと推測できる。丹波山地中央部では従来から京都大学防災研究所の観測点が密に配置されており、近年のHi-net観測点の整備がほとんど行われていないことから検知能力に変化がないことは妥当な結果と言えるだろう。（丹波山地の周辺部で、Hi-netによって大巾に観測点増強がなされた地域の場合は、検知能力にも大きな変化が期待されるので注意が必要である。）また、本研究で注目している2003年初頭の地震活動の低下は、上述の自動処理化やHi-netの導入後十分時間が経過した後に現れた現象なので、2002年4月以降の自動処理結果に基づいた地震活動変化の議論に問題は生じないと考えられる。

2003年1月末前後で、阿武山系観測網において観測点の増減や、トリガーパラメータや地震計感度の

変更など検知能力に影響する人為的な改変は行われていない。また、同時期に丹波山地内はもちろん西南日本において、地域の地震活動に影響を与えるような顕著な地殻活動（大地震の発生など）は発生していない。

3. 過去の静穏化の例

このように丹波山地全域において長期にわたり活動低下が観測された例としては、兵庫県南部地震前の数年間が挙げられる。Fig. 4の実線のグラフは、1990年1月～1995年6月の丹波山地の微小地震の積算発生数をFig. 1と同じ空間範囲（兵庫県南部地震の直接の震源域は含んでいない）で示したものである。1995年1月の兵庫県南部地震発生を契機に丹波山地の地震活動が活発化したことを明瞭に示している。また、1992年～1994年前半の期間、丹波山地の微小地震活動はそれ以前に比べて低下していたことがわかる。この静穏化期間には有感クラスの地震（ $M>3.5$ ）もほとんど起きていなかった（京都大学

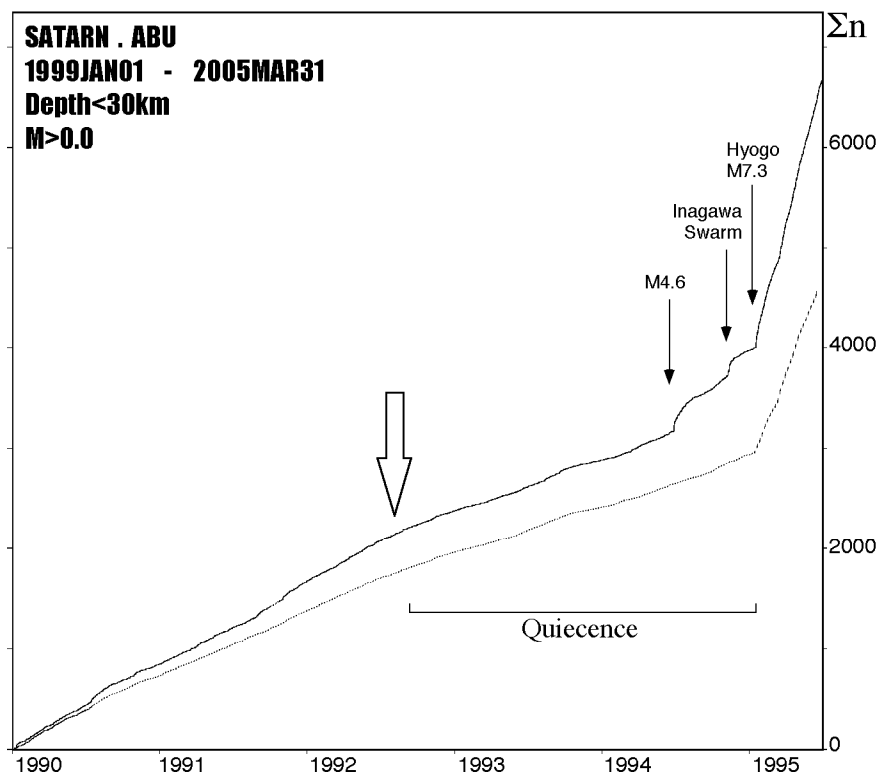


Fig. 4 Cumulative number of microearthquakes in the Tamba Plateau before the Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1990JAN-1995JUN). Solid line is raw data. Dashed line is declustered data.

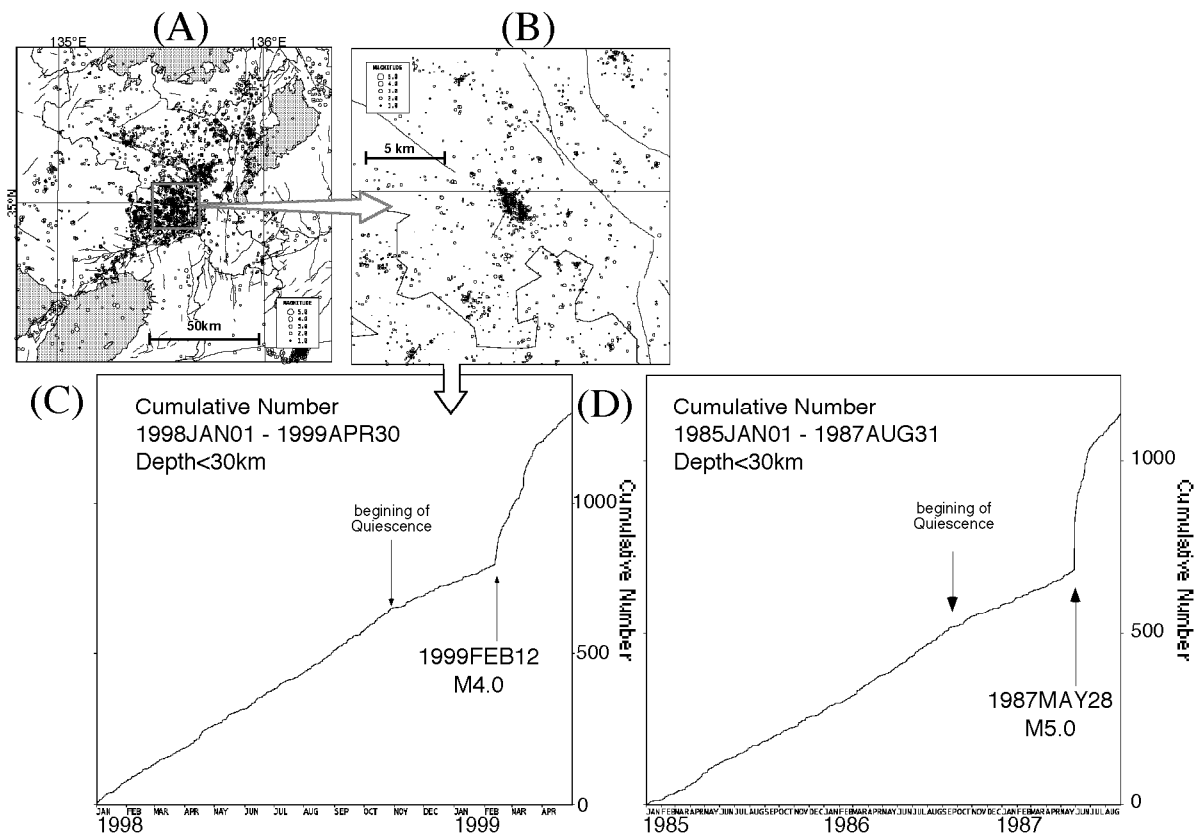


Fig. 5 Examples of seismic quiescence before the moderate-size earthquakes.

防災研究所地震予知研究センター， 1999）。その後，1994年後半には京都府中部の地震（M4.6）や兵庫県猪名川町付近における2度の群発活動など活発化を呈し，兵庫県南部地震の発生を迎えている。Fig. 4で破線で示したのはデクラスタしたカタログによる積算曲線で，元のカatalogと同様に1992年後半からの静穏化を示している。さらに，1994年後半の活発な活動はデクラスタにより除くことができる極くローカルなものが主で，静穏化は1995年1月の兵庫県南部地震発生まで継続していたことがわかる。

一方，M4～5の中規模地震に先行する微小地震活動の静穏化の例は，丹波山地の定常活動域の中でもいくつか知られている（片尾，2000）。Fig. 5の（A）～（C）は1999年2月12日亀岡市付近のM4.0に先行した静穏化の例で，（A）：1998年1月～1998年4月の近畿地方北部の浅い地震の震央分布，（B）：同期間1999年2月12日亀岡付近M4.0の周囲20km四方の震央分布，（C）：（B）で示した地震の積算発生日数となっている。Fig. 5（D）は同じく亀岡付近の1985年1月～1987年8月の積算発生日数で，1987年5月28日のM5.0に先行する静穏化が見られる。いず

れの例も，中規模地震発生の3～9ヶ月前に，定常的であった地震発生レートが突然低下し，本震発生までその低いレートを維持するという経緯をたどっている。これらの静穏化は本震震央からの距離約20km内のローカルな範囲で起きている。

4. 最近の静穏化後の経過と考察

2003年1月から継続中の静穏化期間において，丹波山地ではやはり有感クラスの地震（ $M>3.5$ ）が起きていなかったが，2004年4月16日京都府中部の亀岡市付近でM3.6の地震が発生し，約1か月後の5月19日にもほぼ同じ場所で再びM3.6の地震が発生した。第6図には，同地震の周辺の1987～2004年4月の震央分布などを示す。震源データは京都大学防災研究所地震予知研究センター阿武山系観測網によるものである。この付近では1987年5月28日にM5.0，1999年2～3月にM4.0の地震が2回発生しており，前節で述べたようにその双方で本震に先行する局地的な微小地震活動の静穏化があったことが知られている（片尾，2000）。1987年および1999

年の地震は、発震機構や余震分布からみて地下で・続きとなった逆断層で発生したと推定できるが、2004年の地震は震央がやや西寄りで、それらとは異なる断層系で発生したと考えられる。初動の押し引きから求めた2004年4月16日の地震の発震機構（上半球、ステレオ投影）をFig. 6内に示す。

京都大学防災研究所地震予知研究センター（2004c）は、時間的な地震数の変化を表す指標Z値（Wyss and Habermann, 1988; Wiemer, 2001）の丹波山地・帯におけるマッピングを行なった。2003年2月以降1年間と1998年から2003年の期間を比較した場合、丹波山地の中でも亀岡市付近が最も大きなZ値を示していたことがわかった。つまり2004年4月16日の地震は、時間的予測はできなかったものの、まさにZ値解析から予測された場所に起きたと言える。では、2003年初頭からの丹波山地の静穏化は、この地震に先行する異常だったのだろうか？現状では静穏化が起きるメカニズムがよく

わかっていないとはいえ、丹波山地のほぼ全体といった広範囲に1年以上にわたって見られた現象が、たかだかM3クラスの地震に先行するものだったは考えにくい。

Fig. 7には、Fig. 6右の震央分布拡大図の範囲内での2002～2004年4月の積算地震発生数を示したものである。丹波山地の他の地域と同じく、2003年1月頃から活動が低下していたことがわかるが、図をよく見ると2004年1月頃からさらに一段と活動が低下していることが分かる。2004年1月頃からの活動低下は、丹波山地内であっても亀岡周辺以外の他の地域ではみられない。2004年1月頃からの活動低下は、1987年および1999年の2例と同じく、2004年4月16日のM3.6の地震に先行する局地的な静穏化であると考えられる。そうすると、2003年1月頃からの丹波山地全体の活動低下に、さらに局地的な静穏化が重畳して現れたものと解釈できる。したがって、2003年1月頃からの丹波山地全体の活動低下は、2004年4月16日の地震とは独立の現象であり、原因は他にある可能性が高い。前述のZ値もこのごくローカルな静穏化を捉えたものである可能性が高い。Fig. 1にもみられるように、丹波山地における

ABUSATARN1987-2004APR22

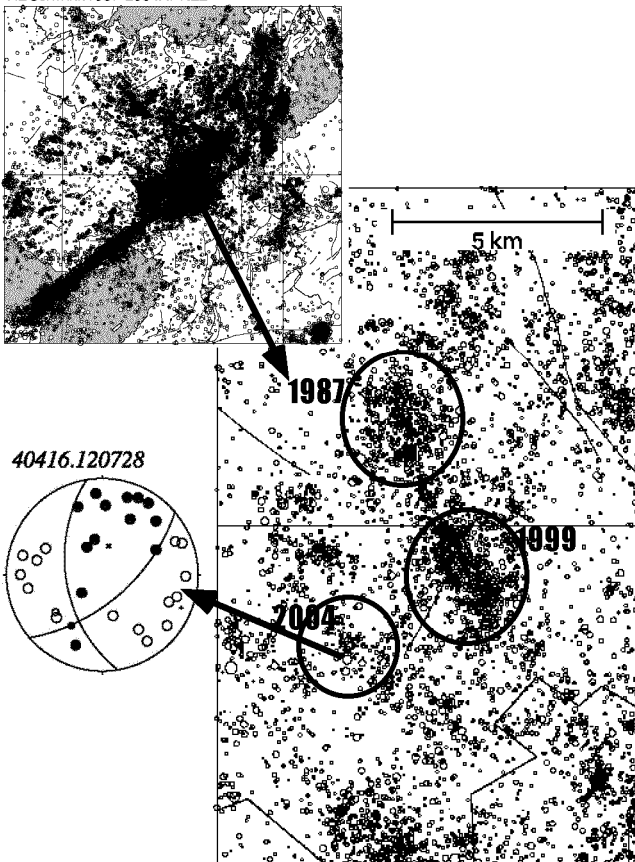


Fig. 6 A M3.6 earthquake occurred on Apr. 16, 2004 inear Kameoka City n the Tamba Plateau.

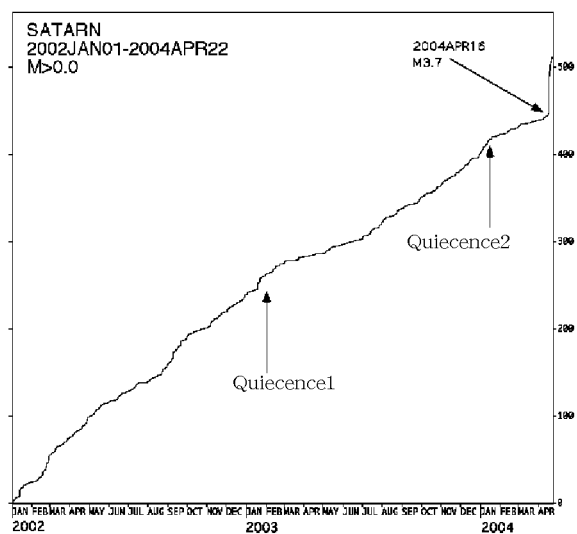


Fig. 7 Cumulative number of microearthquakes in the region of Fig. 6 (2002-2004APR).

静穏化は2004年4月16日の地震やそれ以後に発生した有感クラスの地震の後も継続しており、これらを契機に何らかの変化があったようには見えない。しかしながら、2005年に入って発生レートが回復しつつあるようにも見えるので、今後の推移を見守る必要がある。

京都大学防災研究所地震予知研究センターで行われている地殻変動連続観測では、天ヶ瀬観測所および阿武山観測所の伸縮計記録に2003年2月頃から歪みレートの大きな変化が見られる。また、同じ時期に逢坂山観測所の水位記録にも大きな変化が現れており、これらの変化は、降雨の影響とは考えにくい。（京都大学防災研究所地震予知研究センター、2004d）地殻変動と地震活動の変化のはじまりが、2003年1月末～2月とほぼ時を同じくしている点が興味深い。これらの地殻変動連続観測点におけるトレンドの変化は、兵庫県南部地震の前年にも観測されている。ただし、その際は地震活動の変化が1992年頃から見られたのに対して同期してはいなかった、また変化は今回とは逆センスであった。

大地震の発生に先行してその周辺地域で地震活動の低下が見られることは、過去にも多くの報告例がある（例えば、Katsumata et al., 1999）。ある地域で特定のM以上の地震が起きなくなっている場合は、第2種空白域と呼ばれる。地震の先行（前兆）現象については、地震予知への応用を視野にいれて、先行期間の長さと来るべき大地震のMとの間に正の相関があると指摘している研究が多い（大竹、1998）。前節で述べた1987年および1999年の2回の亀岡付近の地震前と兵庫県南部地震前の静穏化期間については、一応Mと先行期間の間に正の相関があるとしても矛盾しない。今回問題としている静穏化は出現後すでに2年間以上が経過しており、もしこれが将来の地震に先行する現象と仮定すると、M7クラスの地震に先行する現象と考えてもおかしくない。ただし、兵庫県南部地震前の例のように、丹波山地外の地震に対する先行現象が現れる場合もあるので、場所の予測に関しても不確定要素が多い。

現時点では、丹波山地の微小地震活動低下のメカニズムはわからないが、将来の大地震に先行する静穏化を見ている可能性がある一方、兵庫県南部地震に誘発される形で1995年以来続いていた丹波山地の活発な活動が終息していく過程を見ている可能性もある。

5. まとめ

丹波山地の微小地震活動は、2003年1月末頃から例年の6～7割に低下し、現在も低いレートを維持したままである。地震活動の静穏化が見られるのは、京都府中部から琵琶湖西岸にかけての地域で、その周辺部では顕著な活動変化は見られない。丹波山地では、1995年兵庫県南部地震やいくつかの丹波山地内の中規模地震の前に、微小地震活動が静穏化した例が知られている。丹波山地の地震活動については、今後とも注意深く見守っていく必要がある。

Fig. 3などの作成には気象庁一元化震源データを使わせて頂いた。その他は京都大学防災研究所地震予知研究センター阿武山系観測網の震源データを使用した。ルーチン観測に携わるスタッフの不断努力に感謝する。

参考文献

- 大竹政和（1998）：地震発生の長期予測における地震空白域と地震活動静穏化現象の意義，地震，2，50，83-99.
- 片尾 浩（2000）：中規模地震に先行する微小地震活動の静穏化について，京都大学防災研究所年報，43，B-1，95-102.
- 片尾 浩（2002）：丹波山地の地震活動，月刊地球，号外No.38，42-49.

- 京都大学防災研究所地震予知研究センター(1999) :
最近の近畿北部における地震活動～近畿北部における地震活動の静穏化と活発化～, 地震予知連絡会会報, 62, 389-396.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター(2004a) :
丹波山地の地震活動活発化～その後～, 地震予知連絡会会報, 71, 639-642.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター(2004b) :
丹波山地の微小地震活動低下と2004年4月16日亀岡付近M3.7の地震について, 地震予知連絡会会報, 72, 515-521.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター(2004c) :
近畿北部における最近の地震活動パターンの時空間的变化, 地震予知連絡会会報, 72, 522-527.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター(2004d) :
地殻変動連続観測記録に見られる最近約1年間の歪レートの変化と水位変化, 地震予知連絡会会報, 72, 528-529.
- 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.
- Reasenber, P., (1985): Second-Order moment of Centrsl California seismicity, 1969-1982, J. Geophys.Res., 90, B7, 5479-5495.
- Sagiya, T., Miyazaki S. and Tada T. (2000): Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, Pure Appl. Geophys., 157, 2303-2322.
- Wiemer, S. (2001): A Software Package to analyze seismicity: ZMAP, Seismol. Res. Lett., 72, 373-382.
- Wyss, M and Habermann R. E. (1988): Precursory Seismic Quiescence, Pageoph., 126, 319-332, 1988.

Recent Seismic Quiecence in the Tamba Plateau

Hiroshi KATAO

Synopsis

Since begining of 2003, micro-earthquake activity in the Tamba Plateau, Central Japan, have been lowered. This seismic quiecence is similar to that before the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and some moderate-size earthquakes in the Tamba region.

Keywords: seismicity, micro-earthquake, Tamba plateau, seismic quiecence