

月齢と丹波山地の微小地震発生の相関について

片 尾 浩*

Relation between Moon Phase and Occurrence of Micro-earthquakes in the Tamba Plateau

Hiroshi KATAO *

Abstract

In the Tamba Plateau, an earthquake swarm area in the Kinki district, Central Japan, seismicity was activated just after the Hyogo-ken Nanbu (Kobe) Earthquake ($M_j7.3$), which occurred in an adjacent area in 1995. We found that micro-earthquake activities in the Tamba Plateau corresponded to moon phase. Occurrences of micro-earthquakes increased after a new moon and a full moon during 1995 and 1996. Before 1995, such a correlation could not be found. The present study suggests a possibility that the stress change caused by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake made seismicity in the Tamba Plateau sensitive to tidal forces.

Key words : moon phase, seismicity, micro-earthquake, Tamba Plateau, 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

キーワード : 月齢, 地震活動, 微小地震, 丹波山地, 平成 7 年兵庫県南部地震

1. はじめに

地震活動と潮汐の関係については、古くから多くの研究者が関心を持ってきた。両者の相関について否定的な指摘も多いが、最近でも、三浪・山崎 (1990), Tsuruoka *et al.* (1995), Kasahara and Sato (2001) など有意な相関を指摘する研究がなされている。また兵庫県南部地震直後の一時期、余震活動に半日周期の余震発生数の増減が観測されている (Hirata *et al.*, 1996)。また月齢と地震活動との相関も賛否両論が出されている (宇津, 1979; タムラジャン, 1970)。本論では、近畿地方中部の丹波山地において 1995 年の兵庫県南部地震以降、月齢と相関があると思われる微小地震活動の変化がみられたので報告する。

丹波山地は定常的に微小地震活動の活発な地域である。図 1 は、京都大学防災研究所阿武山系観測網により決定された、1995 ~ 1996 年の 2 年間の近畿地方中北部の浅い地震 (30 km 以浅) の震央分布図である。この図の範囲に約 16000 個の震源が決定されている。これらのほとんどはマグニチュード (M) 3.0 以下の無感微小地震であり、この期間では $M5$ を超える地震は丹波山地内には起きていない。図のほぼ中央に有馬高槻構造線が東西に走り、その北側が北摂・丹波山地である。これらの微小地震は特定の活断層に沿って分布するというより、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いるのが特徴で、最も活動的な地域だけでも約 40 km 四方の広がり (図 1 の領域 A) がある。隣接する花折断層沿いや

* 京都大学防災研究所地震予知研究センター

* Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

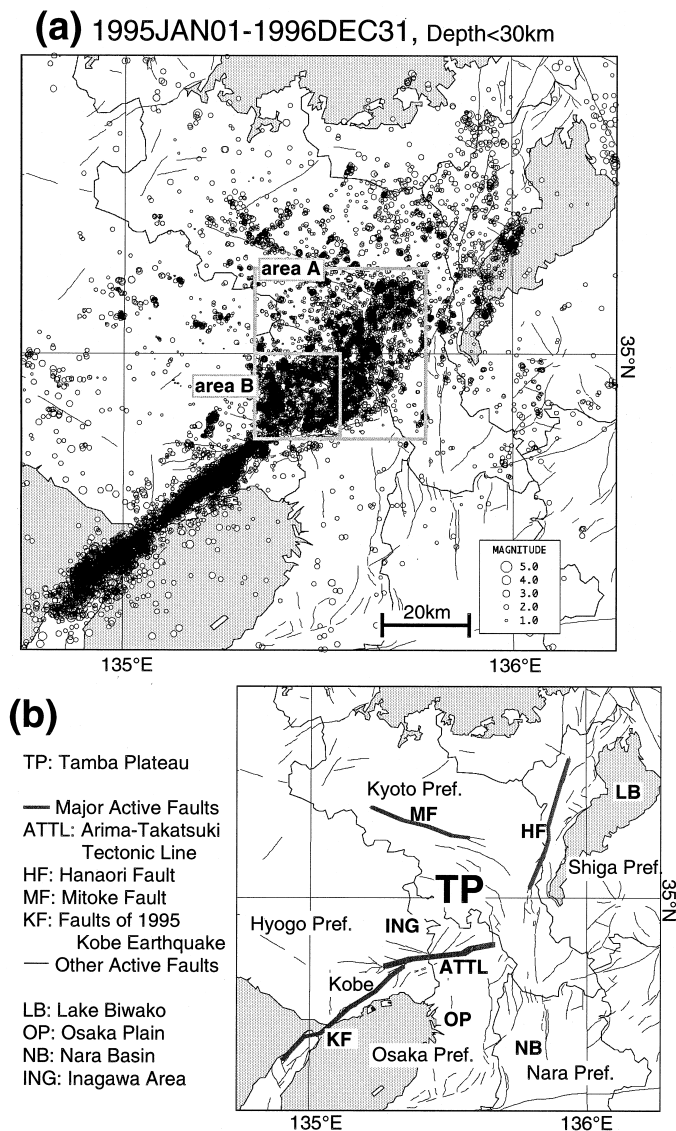


図 1 (a) 近畿地方中・北部の 30 km より浅い微小地震分布。(1995 年～1996 年).
 (b) 地名索引図。太い灰色の線は主要な活断層，細い線はその他の活断層を表す。

Fig. 1 (a) Shallow seismicity of the Northern Kinki district after the Hyogoken-Nanbu Earthquake: 1995-1996.
 (b) Location map. Thick gray lines represent major active faults. Thin lines are other active faults.

琵琶湖西岸，京都府中部の三峠断層沿いも微小地震活動の活発な地域である。丹波山地とは対照的に，大阪平野，奈良盆地などでは微小地震活動は低調で，とくに有馬高槻構造線を境とした南北の地震活動のコントラストは顕著である。図の左下

の帯状の分布は 1995 年兵庫県南部地震の余震活動である。

京都大学防災研究所地震予知研究センターの阿武山系観測網は近畿地方中・北部に 12 点の観測点を展開しており，1976 年のテレメータ観測開始以

来均質な震源データが得られている。丹波山地の微小地震活動域中央部での観測点間隔は 10 ～ 15 km と高密度で、精度の高い震源決定が可能であり、検知能力の下限はおよそ $M1.1$ ある。以下の議論はこの阿武山系観測網の再検測震源データに基づいて行う。

1995 年兵庫県南部地震震源域の北東に隣接する丹波山地の地震活動は、兵庫県南部地震本震 ($M7.3$) 直後から大きく変化し、それ以前の数倍活発となった (片尾, 1995; 片尾・安藤, 1996)。この高い発生頻度は現在も維持されており、神戸-淡路島間の余震活動が本震後順調に減衰したのと対照的に、最近では兵庫県南部地震の余震域よりも北摂・丹波山地の活動の方がはるかに活発である。

II. 丹波山地における約半月周期の活動変化

兵庫県南部地震直後から活発化した丹波山地の微小地震活動を観測していく過程で、日別の微小地震発生数の推移をみてみると、約半月周期で増減を繰り返しているように見えた。約半月周期の自然現象としては月の公転がまず思い浮かぶため、地震の発震時と月齢の相関を調べてみることにした。図 2 は 1995 年 1 月 31 日の朔から 1996 年 12 月 11 日の朔までの間、図 1 に示す領域 A 内の地震の発生時刻を月齢別にヒストグラムにしたものである。ここで横軸はある地震の発生直前の朔から次の朔までの時間を 1 とし、各地震の発震時がどの期間に該るかを積算したものである。図 2 では月齢を 20 分割してヒストグラムにした。長期間にわたり積算したのは、1 朔望月内の変化を直接数えても、地震活動の時間的な「ゆらぎ」のため特徴がはっきりしないためである。図 2 では、地震発生数は朔から次の朔までの間に緩やかに変化しており、朔および望の後数日間に地震活動の極大がみられる。逆の見方をすると、朔および望の前数日間は相対的に地震活動が低下する傾向にあるとも言える。図 2 を作成するにあたっては、時間的には約 2 年間 (24 朔望月分) を重ねあわせた (スタッキング) ことになり、空間的にも比較的広域をカバーしているため、曜日や時間帯など人

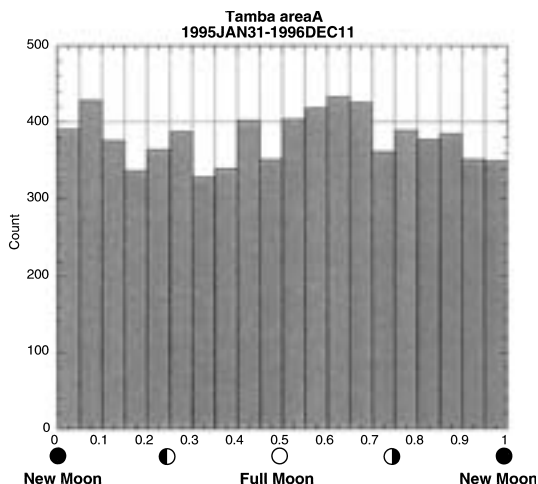


図 2 1995 年 1 月 31 日～1996 年 12 月 11 日の期間に、図 1 の領域 A 内で起きた地震の発震時についての月齢別ヒストグラム。

Fig. 2 The relation between moon phase and stacked frequency of micro-earthquake occurrence in area A shown in Fig. 1 for the period from Jan. 31, 1995 through Dec. 11, 1996.

間活動あるいは天候等の自然条件による検知能力の変化の効果はキャンセルされていると考えられる。再検測震源データを用いているため、採石発破などはあらかじめ震源リストから取り除かれている。また、 $M3 \sim 4$ の中規模地震は小規模ながら集中的に余震活動をとまうことが多いが、これも期間を長く取ってスタッキングしたために、全体的な月齢との相関をみる場合には平均化されていると考えてもよいであろう。

兵庫県南部地震以降、同様の解析を丹波山地内で解析領域や時間範囲を様々に変えていってみても、朔及び望の後数日間に 2 つのピークがみられるという特徴は共通にみられる。その中でも最も半月周期の変化が顕著であるのは丹波山地南西部である。地域を図 1 に示す領域 B に限って解析した月齢別ヒストグラムを図 3a に示す。図 3c には図 3a と同じ時空間範囲での日別地震発生数を示すが、多数の余震をとまう中規模地震のような顕著な突発的あるいは集中的な活動はとくに無かったことがわかる。図 3b はマグニチュード頻

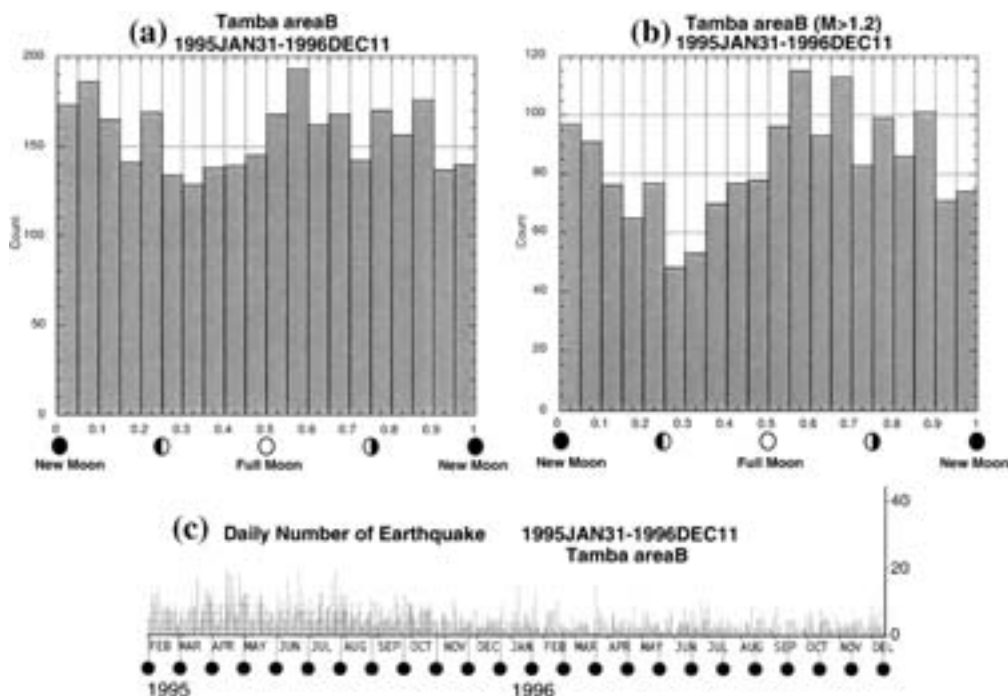


図 3 (a) 1995 年 1 月 31 日～1996 年 12 月 11 日の期間で、図 1 の領域 B 内に起きた地震の発震時についての月齢別ヒストグラム。
(b) 同じく M1.2 以上のものに限ったヒストグラム。
(c) 同じく日別地震発生数。黒円は新月の時刻を表す。

Fig. 3 Relations between moon phase and stacked frequency of micro-earthquake occurrence in area B shown in Fig. 1 for same period as Fig. 2. Histogram of all the earthquakes is shown in (a) and that for earthquakes of $M > 1.2$ is in (b). Daily frequency of earthquake and moon phase (New moon, solid symbol) over the same period is shown in (c).

度分布から推定したこの地域における検知能力の下限に近い M1.2 以上の地震だけを用いて作成したヒストグラムで、上述の特徴がより顕著に現われている。一方、丹波山地北東部（花折断層沿いなど：図 1 領域 A の右上部など）では全体としては南西部同様の月齢に同期したような変化があるものの、地震活動の時空間的なクラスターリングが顕著なため、その「ゆらぎ」が影響するためか、南西部ほど顕著な半月周期の変動はみられなかった。

地震活動の解析では大地震にともなう余震活動や群発地震をデータから取り除くデクラスターリングがしばしば用いられる。これは大地震の震源域や群発地震域を含む広域での地震活動変化をみる

ために必要とされる。しかし丹波山地に定常的に発生するような中・小規模地震にともなう余震活動は個々の地震によって活動パターンが大きく異なる。例えば図 2 の元となった図 1 に示す領域 A 内では、1995～1996 年の間の最大の地震である 1995 年 7 月 24 日京都大阪府境付近の地震 (M4.1) の余震活動は低調であった。これに次ぐ最大のものは 1996 年 5 月 29 日の保津峡付近の地震であるが、M3.8 ながら本震後 1 か月間に約 300 個と多数の余震をともなった。（ちなみに、この 2 つの地震は図 1 の領域 B には含まれない。）このように各々余震活動の個性の違いが大きいため、機械的に余震を除去することは難しい。その上、本震-余震系列を成さずいくつかの微小地震がか

たまって起きる小群発的な活動については、デクラスタリングの操作はある程度恣意的なものにならざるを得ない。また、中規模地震や集中的活動自体が月齢に相関して起きている可能性も否定できないため、本解析では無理にデクラスタリングを行わないことにし、長期間にわたる月齢別積算をとることで少数の突発的・集中的活動の効果を平均し、大局的な変動を抽出するよう試みた。

図4は丹波山地南西部(領域B)について、時間範囲を1年(12朔望月)とし、2か月ごとに時間範囲をずらしていった解析結果を示す。約2年間強にわたり一貫して朔及び望の後数日間に地震活動のピークがある、あるいは朔及び望の前数日間は地震活動が低下するという特徴が維持されていることがわかる。これらすべての時間範囲に共通して含まれる活動は存在しないため、この結果は中規模地震にともなう余震活動など少数の突発的・集中的な活動による見かけ上の変化ではない可能性が高いと言えよう。

ここでいう「丹波山地南西部」は、丹波山地の微小地震活動域の中では兵庫県南部地震震源域(北東端は兵庫県宝塚市付近)に最も近い地域である。この地域内にある兵庫県猪名川町では、兵庫県南部地震直後から深さ約3kmの浅い微小地震活動が活発になるなど、上述の兵庫県南部地震以後の丹波山地の地震活動活発化の中でも、最も影響を受けやすい位置にあったと考えられる。

III. 兵庫県南部地震以前の活動

兵庫県南部地震以前の丹波山地では、これまで述べてきたような半月周期の活動変化はみられなかった。図5に丹波山地南西部(図1の領域B)について、同様の月齢別ヒストグラムを1990年2月25日から1993年12月13日までの48朔望月分について作成したものを示す。図2などに比べて解析期間を長く取ったのは、兵庫県南部地震発生以前であるため、丹波山地における地震活動度が相対的に低い時期にあたるためである。1994年は、領域B内の兵庫県猪名川町において7月と11月に活発な群発地震が発生したため解析からは除外した。図5ではこれまで紹介してきたような

朔および望付近にとくに顕著なピークはみられない。兵庫県南部地震以前に半月周期の活動変化が見出せないということは、兵庫県南部地震以後にみられる半月周期の活動変化が兵庫県南部地震による地殻の状態変化によってもたらされたことを示唆する。

過去の研究においても群発地震や大地震の余震活動等で潮汐との相関が見出される例は多いが、1995年以降の丹波山地も兵庫県南部地震の発生による応力変化を受け、潮汐に関連したトリガーを受けやすい状態となり、結果的に月齢に相関する活動変化がみられるようになってのかもしれない。

IV. 考 察

本論では月齢と地震活動が相関している可能性を示してきたが、これを直接的に支持するデータはいまのところ存在しない。とくに、こういった変化をもたらすメカニズムについては全く想像の域をでない。また、示された約半月周期の地震活動の変化が偶然の産物であることを明確に否定することも不可能である。

しかし、1995年以降の丹波山地全域における活動の活発化は、兵庫県南部地震による応力変化で丹波山地における地震活動が大きな影響を受けていることを示しており、直接的または間接的に地球潮汐や海洋潮汐に起因する地震のトリガー作用を受けやすい状態になっている可能性は高いと思われる。

半月周期のピークは、朔もしくは望の後の数日間に現われる傾向があるが、この時期に地球潮汐あるいは海洋潮汐の振幅が極大となる。半日といった短期間における応力や歪みの変化の振幅大きいことが地震発生をトリガーすると考えると都合がよい。

半月周期の地震発生数の増減が潮汐に起因する効果であるならば、短周期の潮汐(M2やO1分潮の振幅の絶対値等)に直接対応して微小地震が発生していることが期待される。しかし、例えば地球潮汐による東西方向(丹波地域の応力場の主圧縮軸方向)の応力あるいは歪の理論値と個々の微小地震の発生時刻との相関をみてみても、現在の

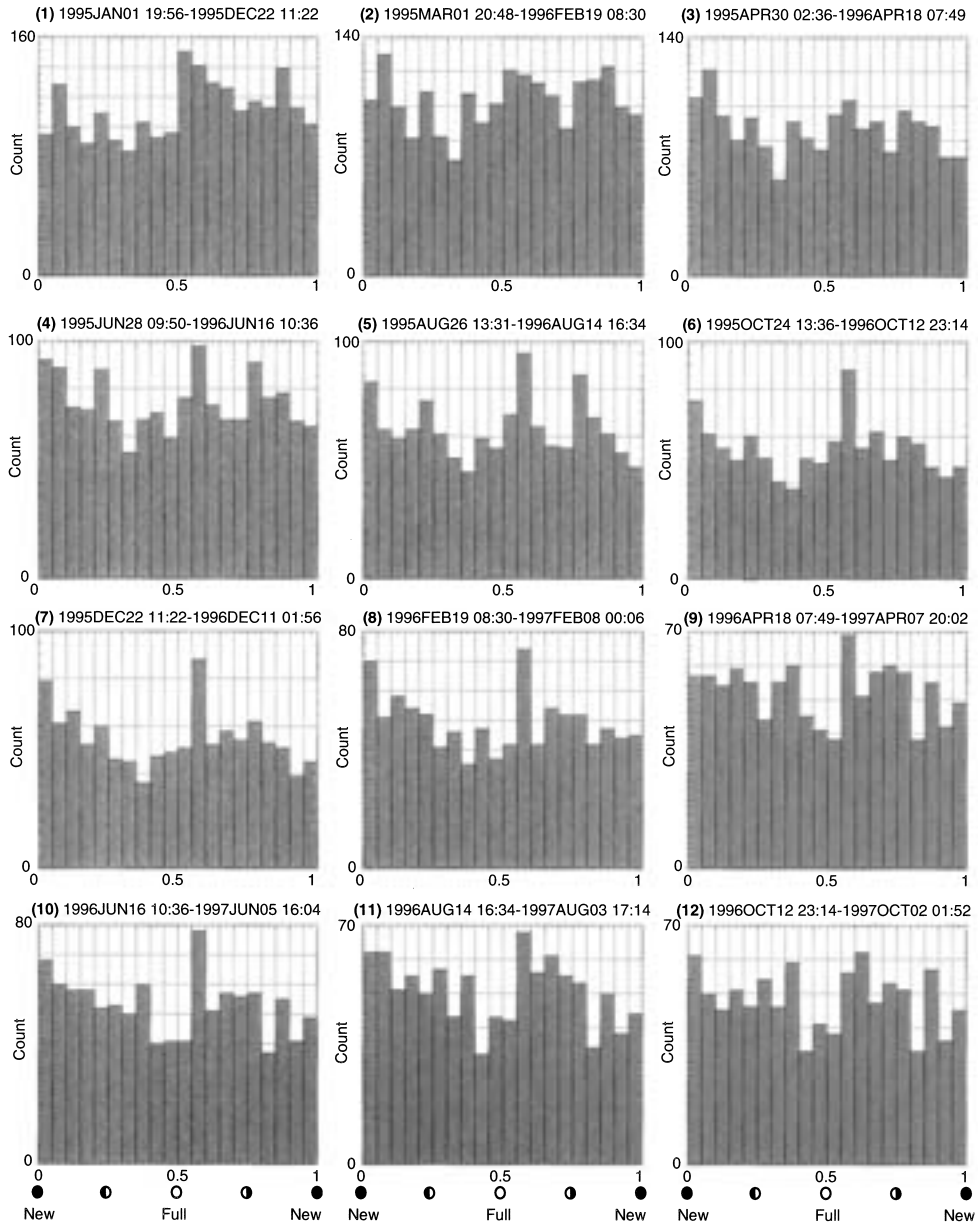


図 4 1995 年 1 月 1 日～1997 年 11 月 2 日の間、図 1 の領域 B 内の地震の発震時について 12 朔望月分の月齢別ヒストグラムを 2 か月ごとに時間範囲をずらして作成したもの。

Fig. 4 Relations between moon phase and stacked frequency of micro-earthquake occurrence in area B shown in Fig. 1.

Each result is for successive two-month shifts during the period from Jan. 31, 1995 through Nov. 2, 1997.

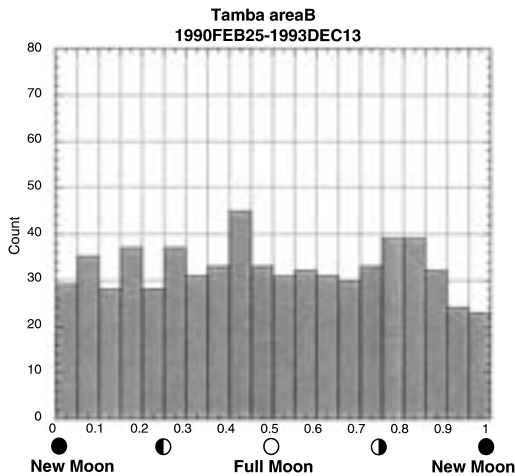


図 5 兵庫県南部地震前の 1990 年 2 月 25 日～1993 年 12 月 13 日の間、図 1 の領域 B 内の地震の発震時についての月齢別ヒストグラム。

Fig. 5 The relation between moon phase and stacked frequency of micro-earthquake occurrence in area B shown in Fig. 1 for the period from Feb. 25 1990 through Dec. 13, 1993, before the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.

ところ有意な傾向は見出せない。微小地震活動の増減には、潮汐による歪や応力が直接作用しているのではなく、地下流体の挙動などが間接的に関与している可能性が考えられる。例えば、地震発生帯内部での水の移動による間隙水圧の変化は地震発生を促進あるいは抑制するが、水の移動は透水係数に関連して潮汐よりも十分長い時定数を有するため位相のずれが生じる、といったモデルが成り立つかもしれない。個々の震源周辺の岩石の物性や地下流体の特性がそれぞれに異なり、個別の遅延時間を経て応答する場合には、短周期の潮汐とうまく対応せず、全体を平均した傾向として半月周期が現われてきているとも考えられる。

最近の観測坑道間における岩盤の弾性波速度の精密連続測定によると、長期トレンドおよび短周期の潮汐に加えて約 2 週間周期での速度変化が記録されており、この周期での変動は歪み計など他の地殻変動観測機器では捉えられていないことが

わかった (Yamamura *et al.*, 2000)。岩盤の弾性波速度も応力に加えて水の挙動に大きく支配されることが知られている。この現象が本稿で述べた地震活動変化と直接関連するかどうかは不明であるが、同じく半月周期を呈する現象として注目される。

V. まとめ

兵庫県南部地震以後活発化した丹波山地の微小地震活動で、月齢に相関する地震発生数の増減がみられた。

朔および望の後数日間に地震活動の極大がみられる。この傾向は約 2 年間にわたり一貫して続いており、とくに丹波山地南西部において顕著である。

兵庫県南部地震以前の丹波山地において、地震活動と月齢の相関はみられなかった。

兵庫県南部地震による応力変化で丹波山地における地震活動が潮汐に起因するトリガー作用を受けやすい状態になっている可能性がある。

謝 辞

兵庫県南部地震以降の地震活動に半月周期の増減があるのではないかと最初に指摘し、検討してみようと言ってくださった京都大学防災研究所の住友則彦教授（現神戸学院大）に感謝する。

2 名の匿名査読者からのコメントは、本稿を改善するにあたって非常に有益であった。

文 献

- Hirata, N., Ohmi, S., Sakai, S., Katsumata, K., Matsumoto, S., Takanami, T., Yamamoto, A., Iidaka, T., Urabe, T., Sekine, M., Ooida, T., Yamazaki, F., Katao, H., Umeda, Y., Nakamura, M., Seto, N., Matsushima, T., Shimizu, H. and Japanese University Group of the Urgent Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1996): Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. *J. Phys. Earth*, **44**, 317–328.
- Kasahara, J. and Sato, T. (2001): Tidal effects on volcanic earthquakes and deep-sea hydrothermal activity revealed by ocean bottom seismometer measurements. *J. Geodetic Society of Japan*, **47**, 424–433.
- 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.
- 片尾 浩・安藤雅孝 (1996): 兵庫県南部地震前後の地殻活動. 科学, **66**(2), 78-85.
- 三浪俊夫・山崎義典 (1990): 潮汐力による地殻歪と地震の発生. 月刊地球, **12**, 369-378.
- タムラジャン, G.P. (1971): 日本の破壊地震の月令について. 地震 2, **24**, 67-68.
- Tsuruoka, H., Ohtake, M. and Sato, H. (1995): Statistical test of the tidal triggering of earthquakes; Contribution of the ocean tidal loading effect. *Geophys. J. Inter.*, **122**, 183-194.
- 宇津徳治 (1979): 日本の大地震は月齢と関係があるか. 地震 2, **32**, 495-497.
- Yamamura, K., Sano, O., Utada, H., Fukao, Y., Nakao, S. and Takei, Y. (2000): Longterm observation of tidal variation of in situ seismic velocity at Aburatsubo, Japan. *Symp. Tidal Studies in Tectonic Active Regions*, 52-56.
- (2001 年 12 月 19 日受付, 2002 年 3 月 25 日受理)