

1968年11月8日焼岳に発生した 群発地震の発震機構について

尾 池 和 夫

ON THE MECHANISM OF THE EARTHQUAKE SWARM AT MT. YAKEDAKE ON NOVEMBER 8, 1968

By *Kazuo OIKE*

Abstract

The mechanism of earthquake swarm that occurred at Mt. Yakedake on November 8, 1968, have been studied. The swarm began at 01^h30^m and terminated at 14^h51^m. 43 shocks were recorded at Kamitakara by the vertical component seismograph for the observation of micro-earthquakes. The frequency distribution of the P~S interval times of the swarm corresponds to one of four peaks in that distribution which were observed at the station during four months before the occurrence of the earthquake swarm.

The foci of these shocks have been determined from the P~S times observed at the near micro-earthquake observation stations. They are confined within a small volume whose dimension is about 500 meters.

The time variation of the S/P which means the ratio of the maximum amplitudes of P and S waves have been investigated. The push-pull distributions of the initial P motions have been also studied. The results show that the focal mechanism changes in relation to the activity of the earthquake swarm and seems to approach the stationary state at the end of the swarm. It is supposed that the occurrence of the main shocks disturbed the stress field around their foci and gave the great influences upon the mechanism of the smaller shocks.

This earthquake swarm is separated into four sequences. In the first sequence the large shock of $M=3.4$ occurred in isolation. The main shock of $M=3.3$ and many aftershocks took place in the second sequence, the main shock of $M=3.1$ with some foreshocks and aftershocks occurred in the third one and the swarm of some smaller shocks occurred in the fourth one. This variation of the characteristics of the activity of each sequence seems to be related to the development of the fractures in the focal region.

1. 序

松代およびびの地域の群発地震の発生は、群発地震の性質を調べるために種々の資料を豊富に提供した。特にそれらの発震機構については、長期間にわたって一定の押引き分布を示すという特徴的な結果が得られている。市川(1967)は松代地震群の中の比較的大きな地震について、その発震機構を求め、時間的に変化が見られることを示したが¹⁾、その変化は小さい。岸本他(1967)は初期の松代地域における微小地震群の発震機構について押引分布を重ね合わせることににより、それらがほぼ一定していることを示した²⁾。いずれの場合も東西方向の主圧力軸、南北方向の主張力軸によって表わされる分布を示した。松代地域の地表面で観測された北西—南東方向の大規模な地割れの発生や、geodimeterによる地殻変動の観測結果と考え合わせても、この地震群が北信地域一帯に働く tectonic force によって起されたものであると考えられる^{3),4)}。

えびの地震についても、押引分布から発震機構は長期間にわたって一定していることが示された(渡辺(1969))⁵⁾。この群発地震も松代の場合と同様、かなり広い震源域を持ち、活動の期間も一年以上続いている。

一方、上記の例に比べてはるかに狭い地域に、しかも短期間に発生する小規模な群発地震活動の存在が知られている。特に微小地震観測網の整備によって、観測例が増え資料が得られ易くなった。岸本他(1966)は、兵庫県浜坂地域に発生し、鳥取微小地震観測所の観測点に記録された小規模な群発地震の発震機構を調べた⁶⁾。この例では、約70個の地震群が20日間に発生し、それらの震源はすべて数 100 m 以内の狭い地域に含まれている。特に著しい特徴は、この地震群の発震機構が時間とともに非常に変化し、しかもその変化が地震群中の main shocks と思われる $M=3.6$ および $M=3.1$ の2個の地震によって影響を大きく受けていることである。このことは、非常に狭い地域に、しかも短期間に多数の地震が発生した場合には、より広い地域一帯に働く tectonic force による一定な stress field が、一つの地震の発生によってその近傍に局所的な乱れを生じることによって由来しているのかもしれない。

1968年11月8日に発生した焼岳の群発地震活動は上記の浜坂の例と類似した特性を持つものであり、さらに小規模な活動である。以下にこの群発地震の性質を、浜坂の場合と比較して示す。

2. 観 測 資 料

1968年7月以来、岐阜県吉城郡上宝村本郷の上宝地殻変動観測所において、この地域の微小地震活動を調べるため高感度短周期地震計による試験観測が行なわれた。計器は 1~30 c/s の範囲について地動速度に対して平坦な周波数特性を持つ上下動成分で、その感度は 1.6 mkine/cm であった。記録は 4 mm/sec の送り速度で行なわれた。

1968年11月8日、上宝村で震度Ⅱの地震を含む、一連の群発地震が焼岳の近くに発生し、上記の地震計にも多数が記録された。Fig. 1 は試験観測期間中の7月18日から11月7日までの P~S time の頻度分布と、11月8日のそれとを比較したものである。群発地震発生前の常時の活動の中に、4個のグループが明瞭に現われている。11月8日の群発地震はその中の3.0~3.4秒のグループに対応するものである。気象庁の「地震火山概況, No. 56」には、この群発地震活動は焼岳の活動として速報せられ、それによると、噴煙の状態が多少異常を示したという報告もあった。

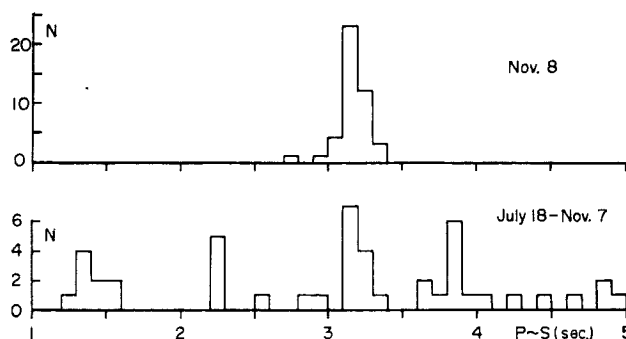


Fig. 1 The frequency distributions of the P~S time intervals obtained at the Kamitakara Observation Station. Upper; the distribution of the earthquake swarm on November 8, 1968, lower; that obtained before the swarm.

上宝観測所では11月8日1時30分に最初の地震が記録され、同日14時51分の記録を最後に群発活動が休止

した。この間合計43個の、P～S time 約3秒の記録が得られた。その後同日17時より10日まで、上高地大正池に気象庁地震観測所によって設置された地震計にも記録はなかった。したがってこの活動は非常に短期間に孤立して発生した群発地震であるといえる。

群発地震の中の数個は周辺の微小地震観測点によっても観測された。主な観測点の高感度短周期地震計で得られた記録の個数および P～S time の分布を Table 1 に示した。また記録の得られた観測点、および Table 1 の P～S time から求めた震源位置を Fig. 2 に示す。

Table 1 Total numbers of the earthquakes of the swarm recorded at the near stations and their P～S times.

Station	Total number	P～S time (sec)
Kamitakara	43	3.0～3.4
Matsushiro	11	7.0
Hoshina	10	7.7～7.8
Ikusaka	8	4.0～4.2
Inuyama	5	14.7～15.1

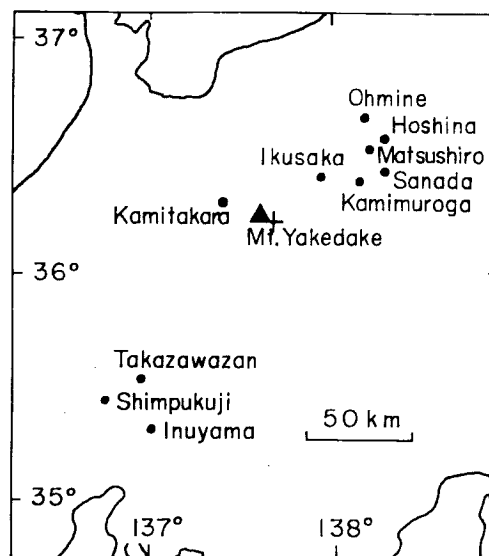


Fig. 2 Central part of Japan. The closed circles and the cross near the Mt. Yakedake indicate the observation stations and the epicenter of the swarm, respectively.

周辺の観測点間のP波の発震時差を調べると、例えば犬山と生坂との間で各地震につき 16.2 ± 0.1 秒となる。このことから群発地震の震源域は約 500 m 以内の範囲に限られていると推定される。

3. P波およびS波の最大振巾と発震機構

短周期地震計を用いて微小地震を観測した場合、その記録波形は地震波伝播経路の微細構造の影響を大きく受けている。そのため、特に記録上の振巾を使って震源に関する性質を議論しようとする時には、慎重な

準備が必要であろう。しかし、ここで解析される資料は、1. で述べたように震源位置がほとんど同じである地震群についての同一観測点で得られた記録である。震源距離が 25 km 程度であることも考え合わせて、伝播経路の構造の影響はすべての地震に対してほぼ同一であると仮定することができる。したがって、個々の記録に現われた波形の性質の相異は、大部分発震機構の相異に由来するものであると考えられる。

岸本らは、浜坂群発地震の解析に際して、P 波群および S 波群中の最大振巾の比 (S/P) を計算し、発震機構の時間的变化を論じた。これは P 波初動振巾と P 波群中の最大振巾との間に直線関係が見られることに基づいている⁹⁾。以下、この方法を上宝で得られた記録に適用した結果を示す。

Fig. 3 の下半分は上宝で得られた43個の記録について、その P~S time 頻度分布、P 波初動の向きの割合、および S/P の値の頻度分布を示している。上半分に松代群発地震活動の初期に長野市信更町で観測された地震について同種の結果を比較のため図示した。松代群発地震の場合は、P 波初動の向きがすべて Down であり、 S/P の値もほとんど一定している。この地震活動の初期においては特に発震機構の変化が非常に少ないことから、この図に示された性質が一定した発震機構に基づいて現れたものと推定される。これと比較して、今回の焼岳に発生した群発地震の場合は P 波初動の向きは一定せず、同時に S/P の値も 0.3~4.1 と広い範囲に分布している。これらから、この群発地震中、個々の地震の発震機構は大きく変化したことがわかる。

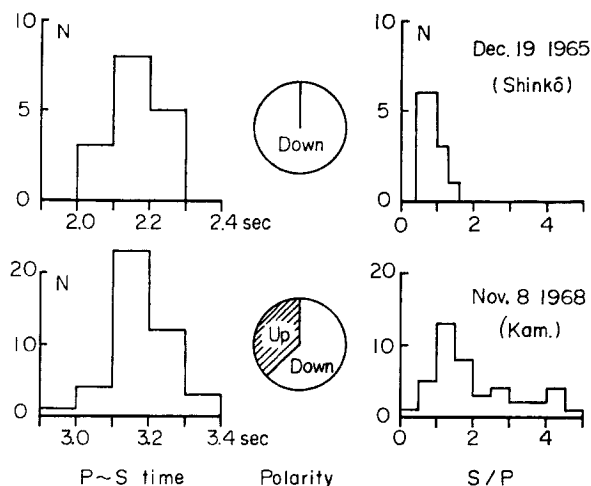


Fig. 3 The frequency distributions of the P~S times and S/P values and the ratio of the polarities of the initial P motions. Upper: the result in the case of the Matsushiro swarm which shows the constant mechanism, lower; the result for the swarm at Mt. Yakedake, which indicates the variation of the mechanism.

Fig. 4 に P 波初動の押引分布を示す。観測点が少なく、この図から nodal line を正確に決定することはできないが、明らかに発震機構の非常に異なる地震が存在したことを証明する結果が得られている。Fig. 5 に同地域で発生した 9 月 16 日の地震について、P 波初動方向の分布を示した。市川 (1967) は中部山岳地域の比較的大きな規模の地震について初動分布を調べ、ほとんど東西方向の主圧力軸で表わされることを示した¹⁾。Fig. 5 の分布は、この結果と一致せず、むしろ南北方向の主圧力軸によって表わされることも考えられるが、詳しくは不明である。11 月 8 日の群発地震は、この 9 月 16 日の地震と同じ初動分布で始まり、活動の活発化とともに変化して、再び元の状態に戻った。

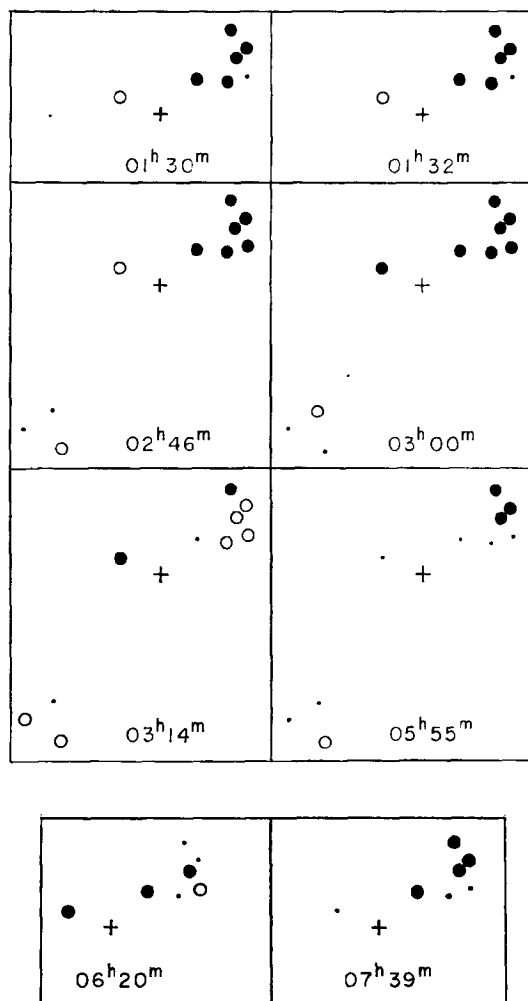


Fig. 4 The push-pull distributions of the initial P motions. The open circles and the closed circles indicate the dilatational and the compressional motions, respectively. Some of these distributions show the quite different patterns.

4. 発震機構の時間的变化

11月7日以前の3.2秒前後の P~S time を持つグループ (Fig. 1) の地震も、上宝から見た限りでは11月8日の群発地震と同じ地域で発生したと考えられる。北信地域の微小地震観測点でも、11月8日の地震と9月16日の地震の P~S time の差は、わずか0.1秒しかなく、これらの地震は同じ、あるいは隣接した震源域に発生したものであろう。Fig. 5 中の震央位置は地震月報によるものであり、P~S time から求めた Fig. 4 における震央位置とのずれは、ほとんど決定方法の相異によって生じたものと考えられる。

Fig. 6 にこれらの地震 (7月18日~11月7日) の記録上の振巾および S/P の値の時間的变化を示した。

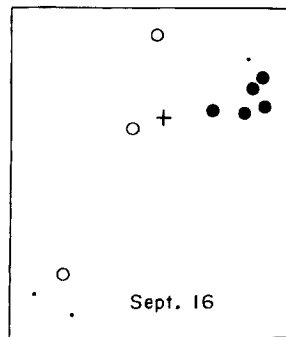


Fig. 5 The push-pull pattern of a shock which occurred before the swarm at the same region.

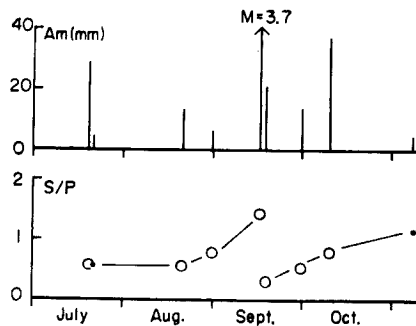


Fig. 6 The maximum amplitudes recorded at Kamitakara and the time variation of S/P values of the shocks near Mt. Yakedake.

期間中最大の地震 ($M=3.7$) の直後に S/P 値の急激な変化があり、発震機構の変化したことが推定される。図中の白丸は上宝での初動が down であることを表わし、点は初動方向が不明のものである。9月16日以後、S/Pの値は徐々に回復し、11月8日の群発地震活動最初の値に連続している。

Fig. 7 に11月8日の上宝における記録上の最大振幅と S/P の値の時間的变化を示した。1時～8時の間は気象庁地震観測所の短周期地震計記録 (WWSSN) から得られた結果をも併記した。図中の白丸、黒丸および点は初動の down, up および不明をそれぞれ表わしている。上宝では1時～15時の群発活動前後に、同程度の P～S time を持つ記録は得られていない。よって、この14時間に発生した地震は、孤立して起った群発地震活動によるものである。

Fig. 7 の最大振幅の時間的分布を見ると、活動の休止する期間のあることがわかる。これらの休止期間を境として、群発地震活動を4期間に分解することができる。すなわち、2時、4時、8時頃を境として、それぞれ一個の比較的大規模な地震によって代表される第Ⅰ～第Ⅲ期と、散発的に微小地震が発生する第Ⅳ期の活動に分けられる。

S/Pの値は、地震活動の激しい時期に対応して、急激に変化している。まず、第Ⅰ期では、11月7日以前の状態に連続した値を示し、第Ⅱ期の最初に発生した規模の大きい地震 ($M=3.3$) の直後には、最も激しく変化している。このことは松代の気象庁地震観測所での観測結果にも顕著に現われ、P波初動の向きも反転している。**Fig. 4** に示された初動分布の中でも、S/Pの値の変化に対応して3時14分の地震が最も著しい分布の変化を示した。第Ⅲ期でも、地震発生状況に呼応してS/Pの値もやや複雑に変化を示す。第

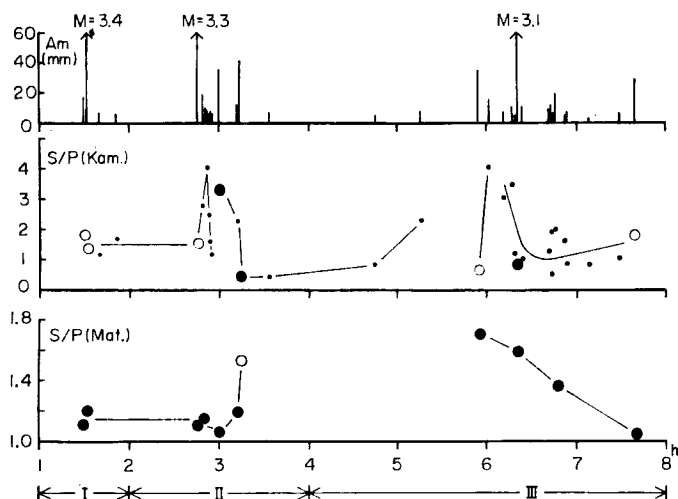


Fig. 7 (a) The maximum amplitudes at Kamitakara and the time variation of S/P values of the earthquake swarm of November 8, observed at Kamitakara and Matsushiro. Open and closed circles indicate the dilatational and compressional motions of the P waves. I~IV indicate four sequences which determined from the existence of three quiet periods.

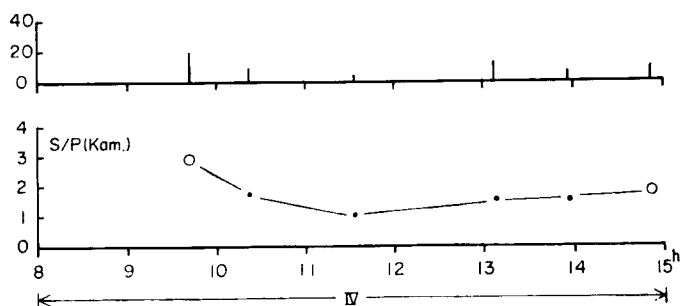


Fig. 7(b) Continued from Fig. 7 (a).

IV期では比較的变化が少なく、群発活動の最終段階では、P波初動およびS/Pの値ともに最初の状態と一致した。

5. 考 察

第I～第III期の活動の中には、それぞれ、main shockと思われる地震が発生している。この群発活動によって放出されたtotal energyはこれらのmain shockによって放出されたenergyの和で代表されるとしてよい。 $\log E = 11.8 + 1.5M$ の関係を用いて放出energyを計算すると次のようになる。

I. $M=3.4$ $E_1=8.0 \times 10^{16}$ erg

II. $M=3.3$ $E_2=5.5 \times 10^{16}$ erg

III. $M=3.1$ $E_3=3.0 \times 10^{16}$ erg

total energy $E=E_1+E_2+E_3=1.7 \times 10^{17}$ erg.

この結果は浜坂の群発地震についての $\text{total energy} = 2.1 \times 10^{17} \text{ erg}$ をやや下まわる程度で、震源域の広さとともに両者の群発地震の類似点の一つである。

直径 500 m 程度の球に相当する earthquake volume は、 $M=3.5$ 程度の規模の地震に対応するものである。したがって焼岳に発生した群発地震中のほとんどの地震は第Ⅰ～第Ⅲ期の main shock に対応する earthquake volume の中で発生したものと考えられる。すなわち、main shock の発生によって stress field が大きく変化したため、より小規模の地震を誘起し、その発震機構が複雑な変化を示したものであろう。

第Ⅰ～第Ⅳ期の各々の活動について、地震発生の型式を見ると、Ⅰ：単発型→Ⅱ：余震型→Ⅲ：前震型→Ⅳ：群発型と順次移行している傾向が見られる。すなわち、第Ⅰ期では $M=3.4$ の地震発生があり、その前後に数個の微小地震を伴っているのみで、時間的にも短時間で休止期間に入る。第Ⅱ期は最初の $M=3.3$ の main shock の発生で始まり、多くの余震があつて休止期間となる。第Ⅲ期は微小地震の発生に始まり、 $M=3.1$ の main shock の発生後その余震が続く。第Ⅳ期では散発的に微小地震が発生し、活動の継続する時間も最も長い。前震、余震、群発地震の発生と地殻の性質との関係について、茂木 (1963) の得た結果と比較すれば⁷⁾、上記の経過は震源域での破壊の進行に伴って、不均質性の影響が大きくなっていくことを示しているのではないであろうか。浜坂の群発地震活動についても同じように3～4期に分けて考えられる傾向がある。

地震記録の上に見られる性質について、浜坂および焼岳に起った群発地震は、種々の類似した特徴を持っているが、さらにこれらが発生した地域はいずれも第4紀火山帯に含まれており、前者は温泉地であり、後者は活火山である。地殻の地域的特性との関連で、群発地震の一つの型と見るべきかもしれない。焼岳については、この群発地震発生後、活動休止期間があつたが、1969年8月末以来、再び活動している。この活動の性質についても研究結果が得られるのを待って、さらに詳細な考察を進めなければならない。

この研究に際し、貴重な資料を提供していただいた気象庁地震観測所相原奎二氏、大山微小地震観測所長飯田汲事教授、北信微小地震・地殻変動観測所大竹政和氏および上宝地殻変動観測所和田安男氏ならびに和田博夫氏、以上の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 市川政治：松代地震のメカニズム，地震Ⅱ，第20巻，第2号，1967，pp. 116～127.
- 2) 岸本兆方・尾池和夫・見野和夫：松代群発地震の2，3の性質について，京都大学防災研究所年報第10号A，1967，pp. 43～50.
- 3) Nakamura, K. and Y. Tsuneishi: Ground Cracks at Matsushiro Probably of Underlying Strike-Slip Fault Origin, II, The Matsushiro Earthquake Fault, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 45, 1967, pp. 417～471.
- 4) Kasahara, K., A. Okada, M. Shibano, K. Sasaki and S. Matsumoto: Electro-Optical Measurement of Horizontal Strains Accumulating in the Swarm Earthquake Area (3), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 45, 1967, pp. 225～239.
- 5) 渡辺邦彦：えびの地震に関する2，3の考察，地震Ⅱ，第22巻（印刷中），
- 6) Kishimoto, Y. and M. Hashizume: On the Mechanism of Earthquake Swarm at Hamasaka, Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Vol. 16, 1966, pp. 41～55.
- 7) Mogi, K.: Some Discussions on Aftershocks, Foreshocks and Earthquake Swarms—the Fracture of a Semi-infinite Body Caused by an Inner Stress Origin and its Relation to the Earthquake Phenomena (Third Paper), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 41, 1963, pp. 615～658.