松代地震のメカニズム

気象庁地震課 市 川 政 治

(昭和 42 年 5 月 27 日受理)

Statistical Study of the Focal Mechanism of Matsushiro Earthquake Swarm

Masaji ICHIKAWA

Seismological Section, the Japan Meteorological Agency

(Received May 27, 1967)

Since August 1965, lots of earthquakes have been occurring at Matsushiro and its vicinity, northern part of central Honshu. In order to elucidate the cause of the peculiar phenomenon various kinds of observations and surveys have been done in the earthquake occurrence area.

On the basis of data obtained by the permanent seismological stations of the Japan Meteorological Agency and 5 temporary stations established in the area, the mechanism of earthquakes which occurred during the period from October 1965 to February 1967 was analysed.

The distribution of the initial motion of P waves for the earthquakes is separated by two straight nodal lines, which are perpendicular to each other, and lie in the directions of $N 35^{\circ} \sim 55^{\circ} W$ and $N 35^{\circ} \sim 55^{\circ} E$. This suggests that the maximum pressure of stresses generating the earthquakes exists in the azimuth ranging from $N 80^{\circ} W$ to $N 100^{\circ} W$. The number of nodal plane solutions obtained is more than 300.

Results of the statistical studies on the solutions and on the relationship between the focal mechanism and the geodetic surveys are summarized as follows:

- 1) The predominant directions of the pressures corresponding to the major earthquakes systematically changed by 10° to 20° on December 1965 and April 1966.
- 2) There exist systematic variations in the predominant directions of pressures in each earthquake occurrence area. This may be caused by the variation of local geology in the area.
- 3) The strike direction of $N 55^{\circ} W$ for one of the two nodal lines agrees well with the strike of fault produced by the earthquake swarm in the central part of the earthquake occurrence area.
- 4) The predominant pressure directions are in good harmony with the axes of contraction of horizontal strains computed on the basis of data obtained by the geodetic survey carried out during the period from November 1965 to August 1966 at the central part of the earthquake occurrence area.

§ 1. ま え が き

1965年8月以来、長野県松代町周辺に群発している地震は約1年後の1966年10月に至りようやくその活動が衰え始めた。しかし、この頃を境にして北は長野県山の内村、南は同坂井村

1967年5月15日地震学会で発表

に至る長円形の地域に地震が発生している。

このひん発する地震を研究するため多数の機関により各種の観測・調査が行われている。ここでは気象庁の常時地震観測網および松代町周辺に設置された臨時観測点で得た松代地震の P 波初動に基づく地震のメカニズムの解析結果の統計，および起震歪力と測地学的現象との関連性を述べる。

§ 2. 資料および解析方法

1965 年 8 月から 9 月末にかけて発生した地震のうち気象庁常時観測網の多数の観測点で P 波初動の押し・引きが記録されたものはないので，メカニズムの解析は 1965 年 10 月以降のものに限られる。

1965 年 8 月から翌年 9 月ころまでの地震活動域のほぼ中央に存在する皆神山が 10 万年ほど前に噴出した溶岩円頂丘であることから，この地震群が地下岩しょうの活動に直接関係すると考えるむきもあるが，ここでは，これらの地震が構造的のものであると仮定し，各地点で観測された P 波の押し・引きの分布からそのメカニズムを解析する。

今回の群発地震のうち，資料の多数観測されたより大規模な地震の P 波初動の押し・引きの分布は，日本付近に発生する大部分の極浅発地震のそれと同じように，互に直交する 2 直線からなる典型的な象限型をしている。そこで，資料数が不十分で確かな節線が引けない場合も，その P 波初動の分布が互に直交する 2 節線で説明できるものと仮定して観測結果に矛盾しない両極端の 2 組の節線を引き，その中間の位置を以ってこの地震の節線の走向とする。また，この中央値からのずれもあわせ測定し，解析結果の統計の際にその値を考慮する。

震央は原則として気象庁の常時および臨時観測点の P および S 波の発震時から決定したものを採用するが，震央が松代や長野など震央近傍の P 波初動方向，押し・引きと矛盾する場合は，その震央を計算された震央に対する標準誤差の程度に応じて移動することもある。

§ 3. 解析結果

1965 年 10 月から 1967 年 2 月までに松代町とその周辺地域に発生した地震のうち気象庁常時観測網による資料を解析し，メカニズムの決定された地震の数は 87 に及ぶ。上記のようにほとんどの地震の P 波の押し・引き分布は遠方での不確実な資料を除き，互に直交する 2 本の直線で四象限に区分されるので，節線・起震歪力の主圧力・主張力は互にそれぞれ 45° の角度をなし，かつ，主圧力・主張力の軸は地表に平行である。参考までに若干の地震の P 波初動分布を Fig. 1 に示す。

Fig. 1. Distribution of initial motion of *P* waves for some earthquakes occurring in the vicinity of Matsushiro.

● compression, ○ dilatation.

7: 02h57m, Nov. 23, 1965	29: 10h21m, Apr. 17, 1966
9: 06 54 , Dec. 8, 1965	45: 05 57 , May. 25, 1966
14: 20 15 , Jan. 23, 1966	55: 09 43 , June 12, 1966
21: 05 25 , Apr. 1, 1966	64: 03 48 , Aug. 3, 1966

1966年9月以降は松代町周辺に設置された気象庁臨時観測点 (Fig. 6 参照) の資料から規模 $2\frac{1}{2}$ ~4 の地震の震央が相当の正確さで決定され、同時に *P* 波の押し・引きも観測されている。これらの資料によりメカニズムの解析された地震の数は228に及ぶ。

これらの地震のメカニズムの決定精度は解析に用いた資料数が少ないので、常時観測網の観測値に基づく結果にくらべて精度は落ちるものの、両観測網の資料から独立に求められた同じ地震のメカニズムの解析結果は誤差の範囲内で一致している。これらの解析結果は後日まとめて発表する予定である。

§ 4. 主圧力方向の統計的研究

一定の地域内に発生する小区域地震（最大有感距離が 100 km 以上 200 km 未満の地震）以上の階級の極浅発地震の主圧力は、少なくとも約半世紀に近い期間に得られた資料の統計によると、一般に時間の経過には無関係で、それぞれの地域固有の方向を持ち、かつこれらは地体構造と関係しているようである（本多ら（1940），（1952），市川（1965），（1966））。

1 年余に亘って発生し続けている松代周辺の地震のメカニズムがはたしてその活動の消長に無関係に同じであるか、また、小地震のメカニズムもより大きな規模の地震と同じメカニズムで起っているのかなどを多数の解析結果に基づき調べる。

4.1. 主圧力方向の時間的変動

Fig. 1 からわかるように松代周辺に発生している地震のメカニズムは、日本各地に発生する極浅発地震と同じように、この地域固有のパターンを持ち主圧力は $N 70^{\circ} \sim 110^{\circ} W$ の範囲内に存在する。この幅 40° のばらつきは単に偶然的なものか、あるいはまた地震活動の消長や地震発生地域の構造に起因するものであろうか。

Fig. 2 に示した主圧力方向の時間的変化図からうかがえるように、この群発地震初期の 1965 年 11 月から 12 月上旬にかけて発生した地震の主圧力は東一西から時計回りの方向に多少かたよっているが、同年 12 月中旬以降翌 3 年月頃までの地震の主圧力方向は上の期間のそれにくらべて反時計回りの方向に回転している。

4 月になると主圧力の方向は更に同じ方向に回転し、5 月以降の地震の主圧力の方向は $N 95^{\circ} \sim 110^{\circ} W$ となっている。このように松代周辺に発生したより規模の大きな地震の主圧力方向は時間の経過にともない、系統的な変化をしているらしいことがわかる。

Fig. 2. Pressure direction vs time.

Fig. 2 の主圧力方向の状態を考慮して、1965 年 11 月～12 月上旬、12 月中旬～1966 年 3 月上旬、3 月下旬～4 月中旬、4 月中旬～6 月下旬、7 月上旬～8 月下旬、および 9 月上旬～10 月の各期間内に発生した地震のメカニズム解析結果をそれぞれ一群とし、一元配置法にもとづき、各群間の主圧力の平均方向の差異存在の有無を調べたところ、各期間に発生した地震の主

圧力の平均方向が同じであると言う仮定は 1% の危険率で棄却され、主圧力の卓越方向が時間的にある変化をしていることが明らかとなった。

上の結果はメカニズムの解析できた規模の大きな地震についての統計結果であるから、これがメカニズムの決まらなかった小地震にもみられるかどうか調べる必要がある。

1965 年 10 月～1966 年 12 月までの期間を上記の統計検定の際に採用した時間区分を基礎にして 12 期間に分け、それぞれの期間内に発生した地震のうち、少なくとも震央付近の 5 観測点で P 波の押し・引きが観測された地震を用い、各観測点で観測された P 波の押し・引きの回数とその比を求めた。このようにして求めた各点の押し・引きの回数とその比の分布図を Fig. 3 に示す。

Fig. 3. Distribution of the ratio of compression (black portion) and dilatation (white portion) of P waves for earthquakes in various periods at each station.

各図のうち、節線付近の観測点の長野・松代・松本・軽井沢・名古屋等に特に注目して地震のメカニズムの時間的変動を調べる。

1965年10月から12月上旬にかけて発生した地震のうち、上の条件に属する地震に対する松代・長野・松本の P 波初動はすべて押しであるのに対し、12月上旬から翌年2月上旬における軽井沢の初動はすべては引き波である。軽井沢の P 波初動の状態のこの変化は、第2期における地震の主圧力方向あるいは節線の走向が反時計回りの方向に多少回転したことを示唆する。

1966年2月以降になるとそれまで押し波しか観測されなかった松本に引き波で始まる地震が観測され出し、それ以前に比して更に反時計回りの方向に回転した主圧力を持つ地震が多く発生し出していることがわかる。

同じ状態は1966年12月ころまで続いているが、ただ1966年4月12日から14日にかけて発生した地震のうちに、甲府に引き波を与えるようなメカニズムを持つ地震が発生している。軽井沢の初動はすべて引き波、松本のそれはこれに反してすべて押し波であることなどを考えると、この期間には東-西方向から時計回りに 30° くらい回転した主圧力方向を持った地震が発生していると言える。

小地震を含めたこの統計的調査結果は、メカニズムの解析された地震の主圧力の卓越方向の時間的変動、すなわち、本群発地震の初期における主圧力の卓越方向と中期以降のそれとの間

Fig. 4. Percentage of pressure directions for major earthquakes occurring in various periods (A), upper and lower limits of pressure directions inferred from the superposed distribution of initial motion of P waves for earthquakes including smaller ones (B), and the cumulative seismic energy released by earthquakes whose epicenters were determined by JMA (C).

には $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ の系統的な変化があるということと矛盾しない。また、この調査によると地震のメカニズムの変動はより複雑で、2~3 日から 1~2 カ月の時間単位で系統的な変化をしているようにみえる。

Fig. 4 に各期間における主圧力方向のひん度分布、重畳初動分布図から推定した主圧力の卓越方向、および気象庁決定の地震の規模から算出した 1965 年 11 月~1966 年 12 月までに松代町とその周辺で放出された地震のエネルギーの積算図を示す。これらの図から地震活動の活発化した 1966 年 4 月~6 月の地震発生のメカニズムは心持ち、その前後のそれと異なることがうかがえる。

4.2. 主圧力方向と地震の規模

ある限られた地域に発生する地震の主圧力方向は、地震の規模が小さくなるに従ってその分布の規則性が乱れてくると言われているのでこの点を調べてみる。

前記のように松代の地震の主圧力の卓越方向は時間の経過に伴い、 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ の系統的变化をしているらしいので、Fig. 5 の主圧力方向—地震の規模の関係図はこの点を考慮して作られている。

この図から 1965 年 11 月~1966 年 3 月までと、1966 年 7 月以降の地震の主圧力方向の散らばりは、地震の規模が小さくなるに従って確かにその幅が大きくなる。全資料を通してみると $N 100^{\circ} W$ より大きな主圧力方向を持つ地震は 3 例に過ぎないことは面白い。

この $N 100^{\circ} W$ という主圧力方向に対応する一節線の走向 $N 55^{\circ} W$ は、松代地震に伴って発生したと思われる断層の走向と同じであるが、 $N 100^{\circ} W$ より反時計回りの方向に回転した主圧力方向を持つ地震が少ないということ、は、上記の地震断層の発生と関係があるのかも知れない。

4.3. 小規模地震の主圧力方向の地域性

臨時観測点での観測資料にもとづく震央決定の正確さは 1~2 km であり、また、この小規模地震のメカニズムは地震発生域が拡大した 1966 年 9 月以降のものであるから地震のメカ

Fig. 5. Relation between earthquake magnitudes and pressure directions in various periods.

Fig. 6. Distribution of JMA permanent and temporary stations in the vicinity of Matsushiro

- N: Nagano District Meteorological Observatory
- M: Matsushiro Seismological Observatory
- U: Ueda temporary station
- I: Iiyama temporary station
- Sk: Suzaka temporary station
- Sn: Shinmachi temporary station
- Si: Shinonoi temporary station (Nov. 1966 to Dec. 1966)

Fig. 7. Distributions of locations of earthquakes whose mechanism was determined, percentage of pressure directions, and mean pressure direction in each area.

ニズムの地域性を調べるには都合がよい。

地震発生域を震央の分布密度や個々の地震の主圧力方向の分布の傾向を考慮して Fig. 7 に示した 5 区域に分け、一元配置法で各地域の地震の主圧力卓越方向のあいだの系統的差異の有無を検定した。その結果によると各地域間の主圧力の平均方向のあいだに差がないという仮定は 5% の危険率をもって棄却される。

各地震の主圧力方向は同じ正確さで決められていないので、主圧力方向の可変範囲に応じ、下のような荷重を乗じて平均方向を求めた。

主圧力の 可変範囲	0°~5°	0°~10°	11°~15°	16°~20°	21°~25°	26°~
荷 重	1.0	0.25	0.1	0.06	0.04	0.03

Fig. 7 には主圧力の平均方向の計算に用いた地震の震央、各地域の主圧力方向のひん度分布および主圧力の平均方向 (A: $N 90^{\circ} \pm 3.2^{\circ} W$, B: $N 111^{\circ} \pm 5.5^{\circ} W$, C: $N 79^{\circ} \pm 1.5^{\circ} W$, D: $N 82^{\circ} \pm 1.5^{\circ} W$, E: $N 105^{\circ} \pm 2.5^{\circ} W$), も示す。

この図から C および D 地区の主圧力の卓越方向は他の地区のそれに比して $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ほど反時計回りの方向にずれていることがわかる。この C・D 地区は松代地震観測所の南の地域から若穂町にかけての地域に当り、群発地震発生当初から 1966 年 9 月ころまでの地震活動域に相当する。さらに、この卓越方向は Fig. 5 の結果と矛盾しない。

§ 5. 地震のメカニズムと地震に伴う地形変動

極浅発地震の起震歪力の主圧力方向と土地の歪の状態が中部日本以西の各地でよく調和していることが笠原ら (1964) により見出され、市川 (1965) により確認されている。

今回の群発地震に当り笠原ら (1966) はデオディメータにより松代周辺の土地の歪を測定しているが、その結果によると少なくとも 1966 年 9 月ころまでの当該地区の土地は、時間の経過に伴い多少の変化はみられるが、東一西方向に縮み、南一北方向に伸びている。この現象は起震歪力から推定される状態とよく一致する。

地震活動の最盛期にあたる 1966 年 8 月ころに皆神山近辺の地域に発生したがん行状の地割れ群や、三角測量の解析結果などからこの地区に $N 55^{\circ} W$ に走る水平断層の発生が推定されている。この断層の走向は 1966 年 4 月以降において当該地区に発生したより大規模な地震の P 波の一節線の走向とほぼ一致する。ただ、1966 年 9 月以降は地震が上記断層の走向と直角の細長い地域に発生している事実は注目に値する。

一方、1966 年 8 月ころ皆神山周辺で土地が異常に隆起しているが、この隆起量は水平断層発生と関係づけるにはその値が大きすぎるようである。

§ 6. 中部日本における過去の地震のメカニズム

松代地区を含む中部日本に発生した極浅発地震の起震歪力の状態や松代周辺地区に発生した地震の P 波初動分布を 1926 年から今回の群発地震直前までの資料にもとづき調査する。

Fig. 8. Pressure directions of earthquakes occurring in central part of Japan (1926~1965).

Fig. 8 は 1926 年から 1965 年までに中部日本に発生した極浅発地震の主圧力方向の分布図であり、Fig. 9 は過去に松代周辺に発生した地震の初動分布図である。Fig. 8 中の 震 の部分が今回の群発地震発生域に当たるが、この地域の北のはずれに発生した 1943 年 10 月 13 日の野尻湖付近の地震や、メカニズムが解析できなかった 1941 年 3 月 7 日の地震を除けば、この地域の地震は今回の地震のメカニズムとほとんどそのメカニズムが同じであることがわかる。

今回の群発地震発生域から少しはずれた長野県山の内村に 1966 年 11 月に発生した一群の地震や同年 12 月に新潟・長野県境近くの飯山に発生した地震のメカニズムは、1943 年の野尻湖の地震と同様にそのメカニズムは松代地震のものと多少異なる。この地域差はおそらく地殻

Fig. 9. Distribution of initial motion of P waves for earthquakes occurring in the vicinity of Matsushiro in the past (1926~1958).

上層の地質構造の差異によるものだろうと思われる。

§ 7. む す び

松代付近に発生した多数の地震の P 波の押し・引きの分布から推定した地震のメカニズムは、測地学的現象とよい調和を示している。また、今回の地震のメカニズムは過去にこの付近に起った地震のメカニズムとも非常によく一致している。

各地震のメカニズム同志も非常によく似ているが、これを統計的に調べてみると、時間・空間・地震の大きさに関係した系統的な変化やかたよりが存在することがわかった。

この時間・空間的な系統的差異は各時点における地震活動の中心地の地殻上層の地質構造に多かれ少なかれ関係するのではないかと思われる。

文 献

- 本多弘吉・正務 章, 1940, 本邦付近の地殻内部における起震歪力について, 駿震時報 11, 183~219.
- Honda, H. and A. Masatsuka, 1952. On the Mechanism of Earthquakes and the Stresses Producing Them in Japan and its Vicinity. Sci. Rep. Tohoku Univ., 5, Geophys. 4, 42~60.
- Ichikawa, M., 1965, Mechanism of Earthquakes Occurring in Central and Southwestern Japan, and Some Related Problems. Pap. Met. Geophys., 16, 104~156.
- 市川政治, 1966, 日本付近の地震のメカニズムに関する統計的研究と二, 三の問題. 研究時報 18, 83~154.
- Kasahara, K. and A. Sugimura, 1964, Horizontal Secular Deformation of Land Deduced from Retriangulation Data, Land Deformation in Central Japan. Bull. Earthq. Res. Inst., 42, 479~490.
- Kasahara, K. and A. Okada, 1966, Electro-Optical Measurement of Horizontal Strains Accumulating in the Swarm Earthquake Area (1). Bull. Earthq. Res. Inst. 44, 335~350.