

1991年西表島群発地震と南琉球弧のテクトニクス

清水 公一・伊藤 潔・松村 一男・安藤 雅孝

1991 IRIOMOTE ISLAND EARTHQUAKE SWARM AND TECTONICS OF SOUTHWEST RYUKYU ARC

By *Koichi SHIMIZU, Kiyoshi ITO, Kazuo MATSUMURA and Masataka ANDO*

Synopsis

An earthquake swarm started on January 23, 1991 in Iriomote Island, southwest Ryukyu Arc, Japan. Six temporary seismic observation stations were set on the island and many events were recorded for the purpose of determining the precise distribution of hypocenters. More than 2,000 earthquakes were recorded from March 7 to May 4 and about 800 hypocenters were located in a small region of northwestern part of Iriomote Island, with focal depths shallower than 7 km. The hypocenter distribution was found to define a plane dipping S50°W with a dip angle of 65°. Composite plotting of P-wave first motions and the plane on which earthquakes are concentrated show that the maximum pressure axes lie in east-west to northeast-southwest direction. The direction is inconsistent with the stress field derived from the northwesterly subducting Philippine Sea plate. This suggests that stress field changes near Iriomote Island due to the opening of Okinawa Basin.

1. は じ め に

1991年1月23日、沖縄県の西表島測候所において有感地震が観測され、群発地震活動が始まった。その後、3月31日に最大の地震(M4.3)が発生し、4月17日の活動を境に地震の数は極端に減少し、おもな活動は終息した。気象庁では2月13日から20日まで機動観測班を西表島へ派遣し、震源が西表島北西部に存在することを明らかにした¹⁾。我々はこの群発地震の発生の原因を探るために3月5日から6月18日までの約3ヶ月半、臨時観測を実施した²⁾。本論文では臨時観測の概要を述べ、震源の時間的推移を示し、群発地震の発生原因について考察する。また、メカニズム解を推定し、南琉球弧のテクトニクスと今回の群発地震の関連について考察する。

2. 群発地震活動の概要

Fig. 1 は気象庁の資料による日別の地震回数を示している。黒い部分が西表島測候所における有感地震で、全体の数は他の官署のデータも含めて、西表島の地震だと判定された地震の回数である。今回の群発地震は1991年1月23日から始まり、2月13日にはM3.9の地震が発生し、西表島測候所で震度Ⅳを観測した。同日には、この地震を含めて48個の有感地震が観測され、これを機に地震活動が活発化した。その後の活動は消長を繰り返したが、4月17日の活動を境に地震の数は極端に減少した。5ヶ月後の9月18日にM3.0の地震が発生したが、活動の活発化は見られず、主な地震活動は4月17日までの約3カ月間で終了したと考えられる。最大地震(M4.3)は3月31日に発生した。

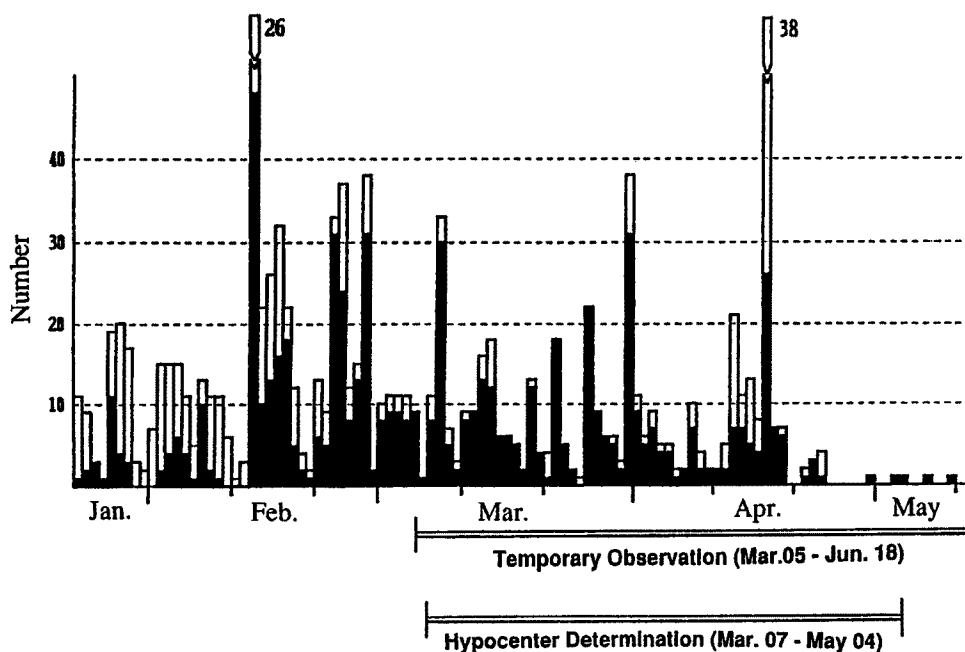


Fig. 1. Daily frequency of felt earthquakes observed at the Iriomote Meteorological Station of JMA (solid rectangle), and unfelt earthquakes of the Iriomote earthquake swarm recorded by seismological network of JMA (open rectangle).

3. 地震観測

臨時観測班は3月4～6日に観測点を設置し臨時観測を開始した。震源が西表島の北西部に集中しているという気象庁機動観測班の結果¹⁾がすでに得られていたので、震源域付近に密な観測点配置を行なった。

Table 1 に観測点の座標を示し、Fig. 2 にそれらの位置を示す。

商用電源を確保できない軍艦岩 (UR) 観測点は3月10日に撤収し、他の5観測点は委託観測とした。その後、4月中・下旬に観測点の点検を行ない、4月17日以降活動が低下したので、6月18～19日に全観測点を撤収した。その間の約3ヶ月半、臨時観測を継続した。

船浦 (FU) 観測点には3成分、他の5点には上下動成分のみの地震計を設置した。地震計はいずれも固有周波数2 Hzの速度型地震計 (L22D) を用い、砂岩または石灰岩の上に石膏で固定した。

記録器はイベントレコーダー (EDR-1000) を用いた。地震計の信号は60 dB増幅した後、12ビット100 HzでAD変換し、トリガー方式でフロッピーディスクに記録した。時計は記録器に内蔵されており、JJY

Table 1. List of temporary observation stations

	Station	Longitude (E)	Latitude (N)	H (m)
1	SY Shirahama	123° 46' 06.2"	24° 25' 20.7"	10
2	OH Ohtomi	123 52 48.7	24 16 46.2	30
3	AK Akabanare	123 52 29.4	24 23 43.7	30
4	FU Funaura	123 48 20.9	24 23 51.2	50
5	SH Shirahama	123 45 13.2	24 21 22.6	5
6	UR Gunkaniwa	123 47 45.6	24 21 34.9	5

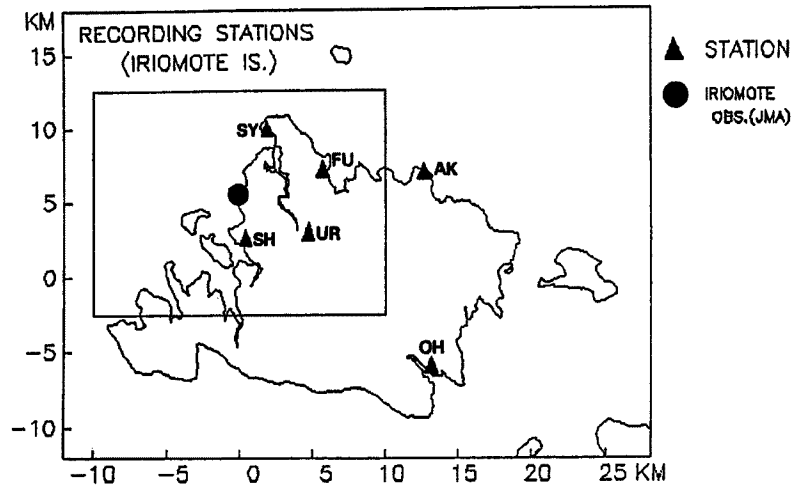


Fig. 2. Locations of temporary seismic observation stations. Gunkaniwa (UR) station was stopped on March 10.

の信号を同時に記録し時計を補正した。時計の1日の遅れ進みは0.01~0.03秒であったので、1日1回JJYが受信できれば0.01秒程度の精度で時刻の検測が可能であった。

4. 震源決定

3月7日~5月4日の期間に発生した地震のうち3点以上で記録されたものについて、PおよびS-P時とその精度、初動方向と両振幅を読み取った。地震はMS-DOS形式で記録されており、パソコンのディスプレイとマウスを用いて読み取りを行った。PとS-P時のグラフを表示し、これらが直線から大きく離れるものは読み直した。

震源決定の精度を向上するために、震源決定には Tarantola and Valette³⁾ の定式化による Nonlinear Inversion を使ったマスターイベント法を用いた。この震源決定にはP波およびS波の走時を用いた。マスターイベントの位置は、1個の地震についてP波およびS波の走時を計算してその残差の標準偏差が小さくなるように震源の位置を決定する方法（以下「従来の震源決定法」と呼ぶ）で決定した。この地域の数値構造は未調査なので、海域の調査結果⁴⁾などを参考にして、P波速度3.5 km/sの層を2 km、5.0 km/sの層を3 km、その下は6.0 km/sという水平成層モデルを用いた。S波速度については $V_P/V_S=1.73$ を仮定した。結果から言えば今回の解析では Nonlinear Inversion を使ったマスターイベント法は、従来の震源決定法と特に異なった結果を与えなかった。

3月8日~5月4日に発生した地震のうち震源域を取

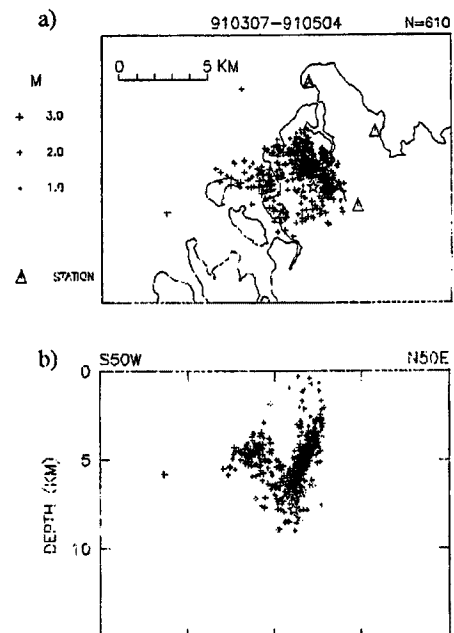


Fig. 3. Hypocenter distribution of earthquakes from March 7 to May 4 determined from the data at three stations, SH, SY and FU; a), distribution of epicenters; b), distribution of hypocenters projected on the vertical section in S50°W-N50°E direction. Star denotes the location of master event.

り囲む FU・SH・SY の3点で記録されたものについて震央分布を Fig. 3(a) に、 $S50^{\circ}W$ - $N50^{\circ}E$ 断面に投影した震源を同 (b) に示す。図には傾斜方向 $S50^{\circ}W$ 、傾斜角 65° の面に多くの震源が集中しているようすが現れている。さらに、この面とほぼ直交する傾斜方向 $N50^{\circ}E$ 、傾斜角 40° の面にも、数はやや少ないものの震源が集中しているように見える。この面状に広がる2つの震源域をそれぞれ震源域 A、震源域 B と呼ぶことにする。

観測点の配置、P および S 波の検測精度などによって、見かけ上、面的な分布が見える場合がある。このことをチェックするために、実際の観測点配置と同じ観測点で、理論的な走時を計算し、それにランダムな誤差を与えて震源の拡がり調べた。その結果、上記の面の走向方向の誤差は無いことが分かった。しかし、震源域 A の深さ方向の拡がり誤差は誤差の方向に一致する。ただし、その誤差の大きさは実際の $1/3$ 程度であり、面の拡がりとしては、有意なものと考えられる。用いた速度構造によって深さの絶対値は 3 km 程度変わるが、分布の形は変化しないことも確かめた。

観測点数が増えるにしたがって震源決定の精度が向上することが期待される。Fig. 4 には、FU・SH・SY・AK・OH の5点で記録されたデータを用いて決めた地震の震央、深さ方向の断面図を示す。この結果、特に震源域 A はさらに鮮明な面状分布を示すことがわかる。なお、この震源域 A の走向は後述するように、西表島の活断層の走向 (Fig. 11) とおよそ一致する。

Fig. 5 には、FU・SH・SY の各点で記録された地震の震源の位置を10日毎に区切って表したものである。震源域 B の活動が時間とともに衰退し、震源域 A の活動が活発になるようすが現れている。

震源が面状に分布するという群発地震はあまり例がないが、1978年の青森県西海岸(岩崎村)における群発地震^{5),6)}が、その少ない例の1つである。この地震は震源域が時間と共に拡大し、最終的に $5 \times 3\text{ km}$ の面状分布になった。佐藤ら⁶⁾はこの面の方向が断層面と一致するものと仮定して地震のメカニズム解を求め、東北地方内陸に発生する地震のメカニズム解と調和的であることを示した。

刻時精度の高い稠密観測によって、浅い地震の震源を精密に決定することが可能になってきたので、今後は群発地震の震源が面状に分布する例が増えてくるものと思

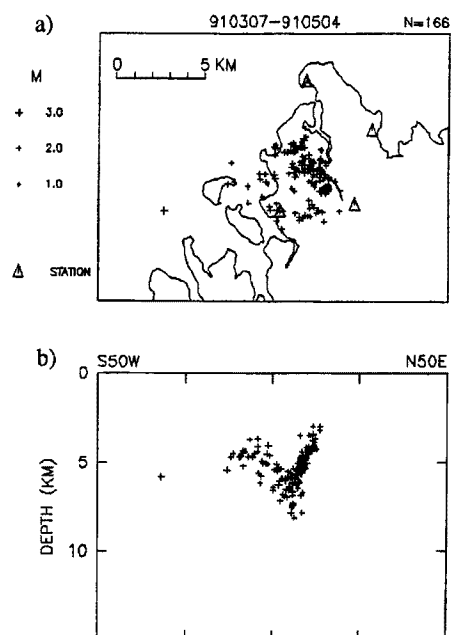
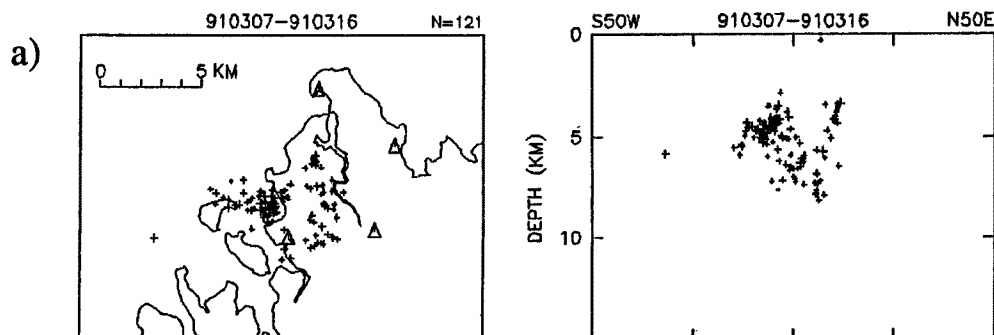


Fig. 4. Hypocenter distribution of earthquakes from March 7 to May 4 determined from the data at five stations, SH, SY, FU, AK and OH.



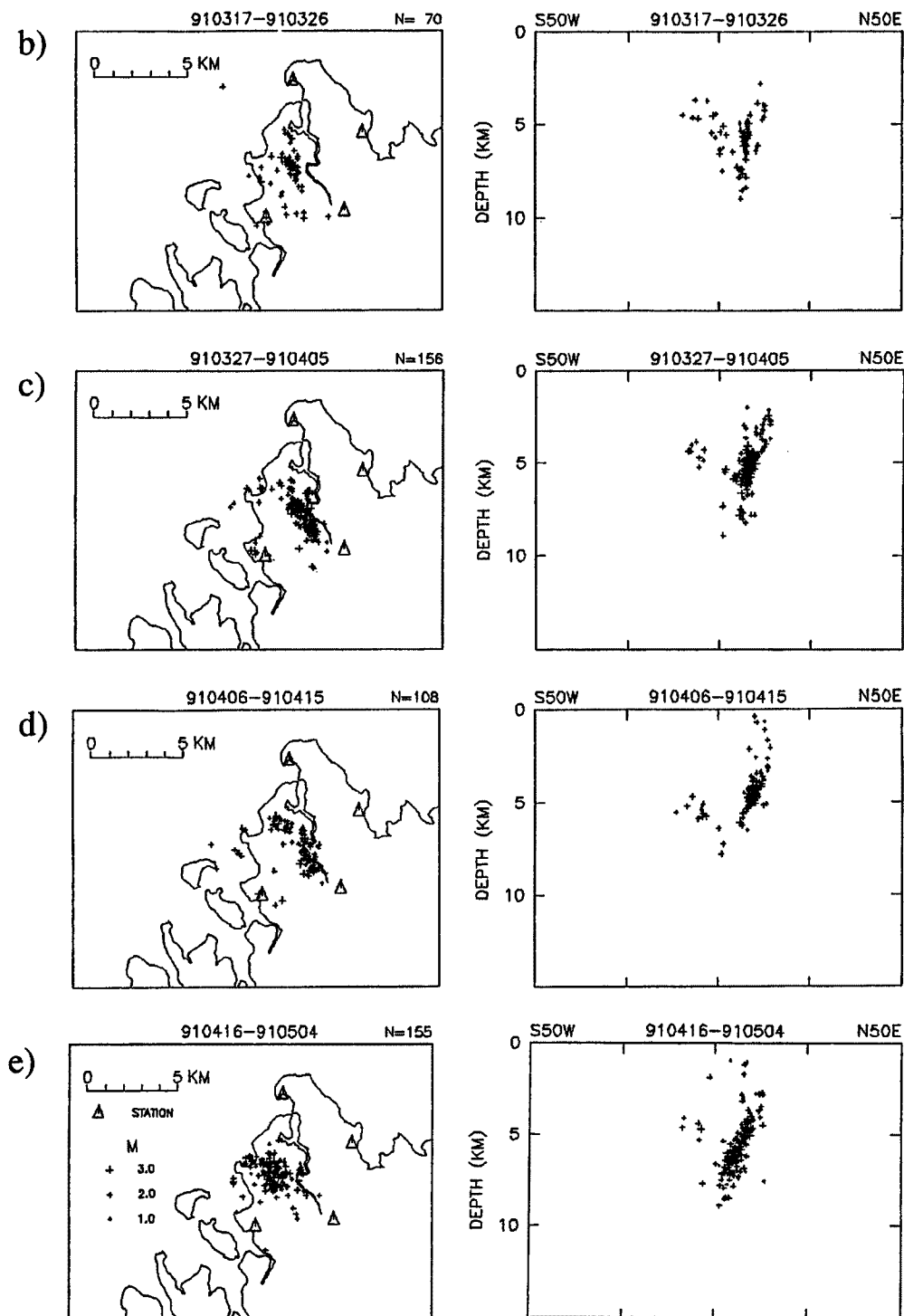


Fig. 5. Hypocenter distribution of earthquakes determined from the data at three stations, SH, SY and FU for successive five periods of a) March 7-16, b) March 17-26, c) March 27-April 5, d) April 6-15 and e) April 15-May 4. These figures show the time variation of spatial distribution of hypocenters.

われる。したがって、次に述べるように、メカニズム解を合わせて考えることによって、その発生地域の応力場を知ることができる。

5. メカニズム解の推定

複数の地震のP波初動を震源球の下半球に等積投影したものをFig. 6に示す。観測点の数が少ないこと、震源が浅いことなどの理由からこのデータのみによってメカニズム解を求めることは困難である。しかし、初動は圧倒的に押しが多く、これらは震央の真上付近で押しが卓越していることを示している。そこで、前節で述べた震源域Aの面状分布を断層面と仮定する。Fig. 6にはこの面を重ねて示す。これらのことから、群発地震を発生させた主圧力軸はおよそ東西ないし北東—南西方向であると推定される。

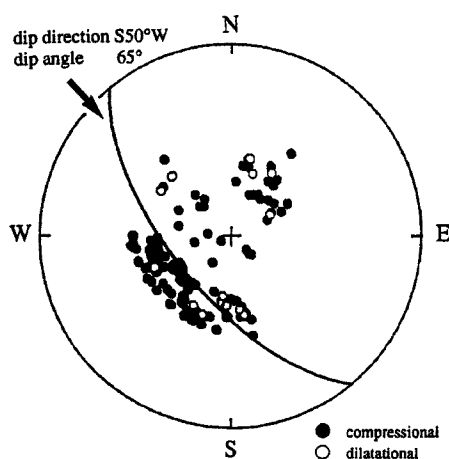


Fig. 6. Composite plots of first motions projected on lower hemisphere of equal-area net. Open and solid circles show dilatation and compression, respectively. A plane in the figure shows the plane on which earthquakes are concentrated.

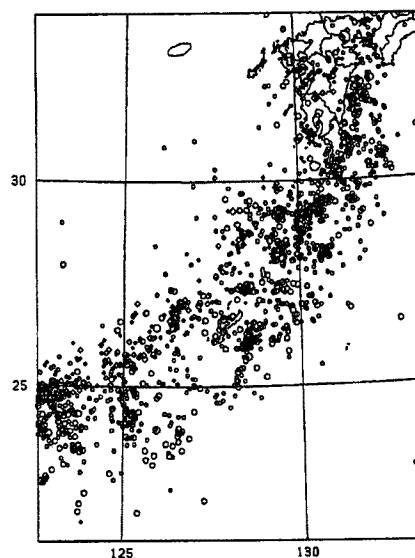


Fig. 7. Epicenter distribution of earthquakes with magnitude equal to or greater than 4.5 from January, 1964 to May, 1990 (ISC). Circles denote events shallower than 100 km and squares denote those deeper than 100 km.

6. 火山活動との関連

Fig. 7には琉球弧の震央分布を示す。データはISC (International Seismological Centre) による1964年1月～1990年5月のもので、マグニチュード4.5以上の地震である。これらの地震の深さ分布から等深度線求めたものがFig. 8である。等深度線の間隔から地震面の傾斜は南西にいくほど緩やかになる傾向にあることが分かる。また、南西側ほど地震の発生深度の限界が深くなっている。

北琉球弧では火山フロントはトカラ火山列に一致し明瞭である。しかし、沖縄硫黄島以南では第四紀火山が認められていないので、火山フロントについては不明な点が多い。ただ、南琉球には唯一西表島北方海底火山 (Fig. 11) が1924年に噴火したことが確認されている^{7,8)}。また、中部琉球弧においても地磁気異常を伴う海山や海丘は第四紀火山活動の可能性が高いことを示している⁹⁾。これらは火山フロントが南琉球弧まで延長されることを示唆するもので、その結果として、西表島付近に火山活動がある可能性がある。ただ

し、西表島海底火山の位置ははっきりせず、Fig. 11 の位置は推定である⁸⁾。西表島付近に火山があるとすれば、Fig. 8 の深発地震面からその深さは 90 km 程度で、西表島北方火山の推定位置でもおよそ 110 km である。これらは北琉球の火山フロント付近の深発地震面が 150 km 程度であるのに比べて、かなり浅い。また、西表島近傍の熱的活動としては竹富島東方の海底温泉があり、50°C 以上の湯が海底に吹き出している。

群発地震は火山活動と関連している場合が多い。今回の西表島群発地震についても、西表海底火山との関連が懸念された。しかし、火山活動との関連を示す兆候は特に観測されなかった。東北日本弧でも火山からやや離れた海溝側にも、内陸側と同様に群発地震が頻発する地域がある¹⁰⁾。今回の群発地震も、上記の火山の位置などを考慮すると、西表島付近の火山フロントからやや海溝側に発生する群発地震の1つと考えられる。これらの地震と火山活動の関係は今後の課題であろう。

群発地震は水の作用によって発生するという考え方があり。例えば、松代群発地震では活動末期に推定 1000万トンの地下水が噴出した。このことから中村¹¹⁾ は高圧地下水の浸透がマグマと同様な役割を担ったという「水噴火説」と提唱している。また田中¹²⁾ は、松代群発地震や前述の青森県西海岸群発地震などの震源域の拡大を多孔質媒質中の流体の拡散方程式を用いて近似できることを示し、これらの群発地震が水などの流体に関係している可能性を示唆した。今回の地震観測は群発地震活動が始まってから約1ヶ月半後に始められ、3ヶ月半の期間であったので、震源域の広がりについて定量的な議論は困難である。しかし前述のように、地震の活動域が時間とともに震源域 B から震源域 A へ移動していること、また震源が浅いことなどから、今回の群発地震に水が関与をしている可能性があるといえよう。

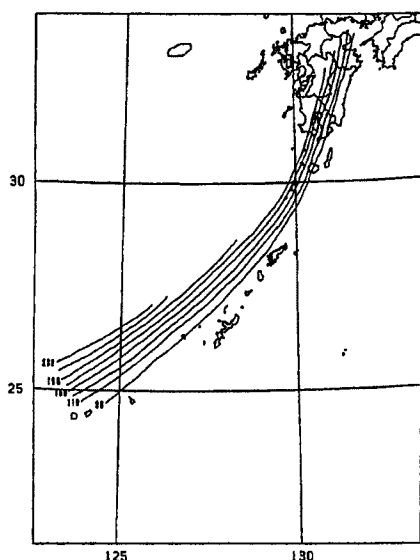


Fig. 8. Isodepth lines of earthquake determined from the events in Fig. 7.

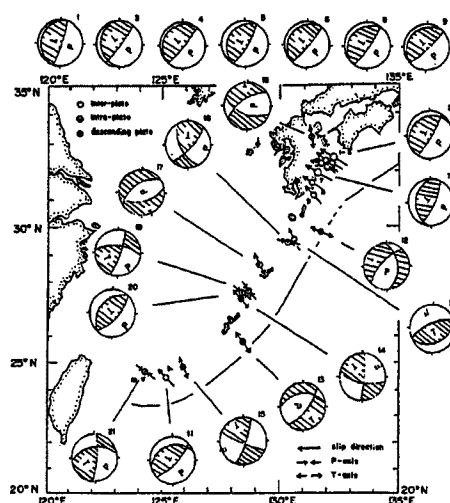


Fig. 9. Focal mechanism solutions for earthquakes shallower than 60 km¹³⁾. Projection is lower hemisphere of Wulff's net.

7. 琉球弧のテクトニクスと群発地震

西表島群発地震のメカニズムは、西表島付近の琉球弧陸域の主圧力軸方向が東西ないし北東—南西方向に主圧力軸を持つことを示唆する。Shiono et. al.¹³⁾ は ISC のデータを用いて、琉球弧に発生した地震のメカニズム解を求めている (Fig. 9)。琉球弧は地理的条件などにより、地震の観測点数、観測点配置ともにメカニズム解の決定に十分ではない。したがって、決定されたメカニズム解は少ない。西表島に最も近いメカ

ニズム解は Fig. 9 の No. 21 で, P 軸は北西—南東方向を向き, フィリピン海プレート沈み込みの方向と調和的である。これは今回の群発地震のメカニズム解から想定される主圧力軸とは調和的でない。ただし, この地震は震源の深さが 65 km と深く, 上部地殻の応力場を反映していない可能性もある。

Fig. 10 は南琉球弧とその周辺における広域応力場を表わしている。このうち琉球弧陸域 (宮古島・小浜島・与那国島) は Kuramoto and Konishi¹⁴⁾ が断層の走向をもとに決定したデータを用いている。その結果は, 水平主圧力軸がフィリピン海プレートの沈み込みの方向と調和的な北西—南東方向であることを示す。今回の群発地震のメカニズム解から想定される主圧力軸方向は, この結果とも調和的でない。

今回の群発地震のメカニズム解から想定されるような応力場は, 現在の南琉球弧において存在し得るだろうか。Nakamura and Uyeda¹⁵⁾ は, 沈み込み帯の応力場を模式化して, 島弧の外帯で沈み込みの方向と同一方向に向く σ_{Hmax} が背弧側に行くにつれて弱まり, やがてそれと直交する方向に σ_{Hmax} の向きが変化すると解釈している。彼らはさらに, 背弧海盆が拡大している場合には σ_{Hmax} の向きの変化する位置が海溝寄りになると述べている。実際, Fig. 10 の沖縄トラフではそのような応力場が存在している。Fig. 11 には西表島の活断層を示している¹⁶⁾。この活断層の走向は今回の群発地震の並びとほぼ調和的である。西表島の上部地殻の応力場はこのようなものである可能性が高い。これらのことから, 海溝側ではフィリピン海プ

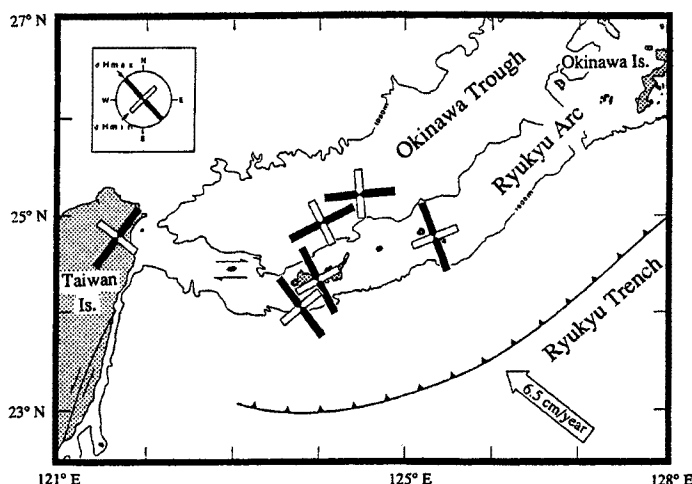


Fig. 10. Stress field in southwest Ryukyu arc⁹⁾.

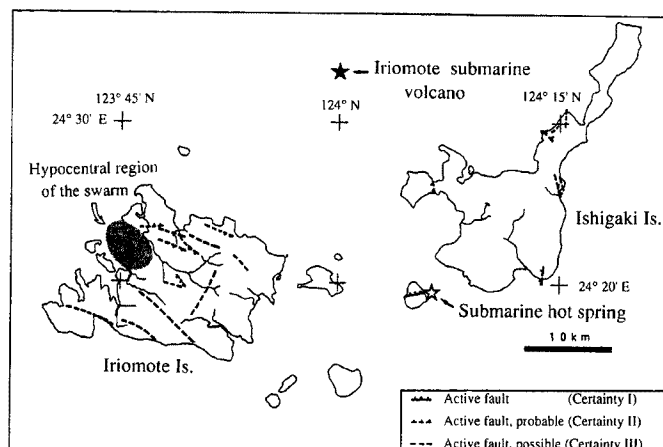


Fig. 11. Distribution of active faults on Iriomote island^{12,9,16)}.

レークの沈み込みが支配的な応力場が、西表島付近で変化する可能性がある。

8. お わ り に

1991年1月23日、沖縄県西表島で群発地震活動が発生し、約3ヶ月間にわたって活発な群発地震活動が続いた。我々は臨時地震観測を行ない、得られたデータについて震源決定を行なった。その結果、傾斜方向S50°W、傾斜角65°の面に多くの震源が集中していること、震源域が時間とともに移動したことが分かった。この震源の並びの方向はこの地域の活断層の走向と調和的である。また、震源域の時間変化は群発地震活動に水などの流体が関与していたことを示唆する。

さらに、面状の震源分布と群発地震の初動方向の重ね合わせから東西ないし北東―南西方向の主圧力軸が推定される。この結果は北西―南東方向のフィリピン海プレートの運動による主圧力軸とは矛盾する。西表島付近で外弧側と内弧側の応力場が変化している可能性がある。これらは琉球弧南部の複雑な応力場の表れである可能性が高いので、今後の研究が期待される。

謝 辞

この研究は文部省突発自然災害調査研究「西表島群発地震の調査・研究」(研究代表者、安藤雅孝; 課題番号、02306030) で実施した。

観測点の設置・点検・撤収は著者ら以外に次の各氏によってなされた。設置、中尾節郎・和田博夫(京都大学防災研究所)、酒井 要・小林 勝(東京大学地震研究所)、樋口鋼児(京都大学理学部); 点検、古川雅英(京都大学防災研究所: 現在 放射線医学総合研究所); 撤収、小泉 誠(京都大学防災研究所)、Enrico A. Mangao (PHIVOLCS); 地震観測に際しては琉球大学熱帯農学研究施設を拠点にして行動した。同施設の方々にお世話になった。小嶺智治(FU)、竹下千花男(AK)、柴 龍彦(SY)、内原 勲(OH)の各氏、ならびに白浜小中学校の方々(SH)にはフロッピーディスクの交換・発送をお願いした。また、沖縄県八重山支庁、竹富町の方々、白井祥平氏(太平洋資源開発研究所)には、観測に際して便宜を図って頂いた。木村政昭氏(琉球大学理学部)には西表海底火山について情報を頂いた。観測点の設置、地震活動の様子については気象庁の石川有三、黒磯章夫両氏から情報の提供を受けた。京都大学防災研究所の渋谷拓郎氏にはマスターイベント法のプログラムを使用させて頂いた。古川雅英氏、片尾 浩氏(京都大学防災研究所)には南琉球弧のテクトニクスについて有益な助言を頂いた。以上の方々に深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 永岡 修・草野富二雄・石川有三: 石垣島近海(西表島付近)の群発地震, 月刊地球, Vol. 13, No. 10, 1991, pp. 679-684.
- 2) 伊藤 潔・松村一男・清水公一: 1991年西表島群発地震, 月刊地球, Vol. 13, No. 10, 1991, pp. 639-643.
- 3) Tarantola, A. and B. Valette: Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved Using the Least Squares Criterion, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, No. 2, 1982, pp. 219-232.
- 4) Hirata, N., H. Kinoshita, H. Katao, H. Baba, Y. Kaiho, S. Koresawa, Y. Ono and K. Hayashi: Report on DELP 1988 Cruises in Okinawa Trough, Part 3. Crustal Structure of the Southern Okinawa Trough, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 66, part 1, 1991, pp. 37-70.
- 5) 堀内茂木・佐藤俊也・堀修一郎・佐藤隆司・楠瀬勤一郎・石井 紘・高木章雄・佐藤魂夫・畠山恒俊・長谷川武司: 青森県西海岸(岩崎村付近)の群発地震(I)―無線テレメータを用いて精密決定された震源分布―, 地震, 第2輯, 第34巻, 1981, pp. 81-93.

- 6) 佐藤俊也・堀内茂木・堀修一郎・佐藤隆司・楠瀬勤一郎・村上栄寿・立花憲司・石井 紘・高木章雄・佐藤魂夫・長谷川武司：青森県西海岸（岩崎村付近）の群発地震（Ⅱ）—地震活動と地殻変動について—, 地震, 第2輯, 第36巻, 1983, pp. 63-75.
- 7) 加藤祐三：琉球列島西表海底火山の位置と噴出物量, 琉球列島の地質学的研究, 第5巻, 1982, pp. 69-73.
- 8) 加藤祐三：1924年西表海底火山噴火, 月刊地球, Vol. 13, No. 10, 1991, pp. 644-649.
- 9) 古川雅英：琉球弧のテクトニクスと西表島群発地震, 月刊地球, Vol. 13, No. 10, 1991, pp. 656-663.
- 10) 植木貞人・高木章雄：東北地方内陸部に発生した群発性地震活動のカタログ, 月刊地球, Vol. 11, No. 4, 1989, pp. 190-194.
- 11) 中村一明：火山とプレートテクトニクス, 東京大学出版会, 1989, pp. 222-236.
- 12) 田中和夫：群発地震の震源域の拡大・成長, 月刊地球, Vol. 12, No. 6, 1990, pp. 331-335.
- 13) Shiono, K., T. Mikumo and Y. Ishikawa: Tectonics of the Kyushu-Ryukyu Arc as Evidenced from Seismicity and Focal Mechanism of Shallow to Intermediate-depth Earthquakes, J. Phys. Earth, Vol. 28, No. 1, 1980, pp. 17-43.
- 14) Kuramoto, S. and K. Konishi: The Southwest Ryukyu Arc is a Migrating Microplate (Forearc Sliver), Tectonophysics, Vol. 163, 1989, pp. 75-91.
- 15) Nakamura, K. and S. Uyeda: Stress Gradient in Arc-Back Arc Regions and Plate Subduction, J. Geophys. Res., Vol. 85, No. B11, 1980, pp. 6419-6428.
- 16) 活断層研究会編：新編日本の活断層, 東京大学出版会, 1991, pp. 410-411.