

1989年伊豆半島東方沖噴火後の微動観測

竹内 文朗・渋谷 拓郎・大倉 敬宏・渡辺 邦彦・
平野 憲雄・松村 一男・西上 欽也

OBSERVATION OF MICROTREMORS AFTER THE 1989 ERUPTION OFF EAST COAST OF IZU PENINSULA

By *Fumiaki TAKEUCHI, Takuo SHIBUTANI, Takahiro OHKURA,*
Kunihiko WATANABE, Norio HIRANO, Kazuo MATSUMURA
and *Kin'ya NISHIGAMI*

Synopsis

On July 13th, 1989, a volcanic eruption took place east off Ito City, Izu Peninsula. Microtremors of unusually large amplitudes with a frequency of about 1 Hz were associated with the eruption. We carried out a temporary observation of microtremors after the eruption, by two sets of array network.

Our observation determined the origins of the microtremors to be near the eruption point (Teisi knoll), which had been located beneath the sea. However the location of the origins seemed to vary from time to time within an area of several kilometers horizontally. This shows that the magma was also activated after the eruption not only near the Teisi knoll but also in adjacent regions.

Besides the major portion of the microtremors (1 Hz), some monochromatic tremors of about 20 Hz were also observed.

1. はじめに

静岡県伊豆半島の伊東市周辺は地震活動の活発な地域である。1930年の北伊豆地震 ($M=7.3$) の約半年前にはここで群発地震活動が発生していた。このほかにも間欠的な地震活動があり、最近では1974年5月9日に伊豆半島沖地震 ($M=6.9$) が起こっている。それ以来、ほぼ2年に1度の割合で $M6\sim7$ の地震が発生している。

今回は、1989年6月末から一連の活動が活発化した¹⁾。7月に入り有感地震の回数も増えてきた。同時に大振幅の微動が観測され、火山活動を伴う可能性が考えられた。7月13日18時33分頃にはついに海底噴火に至り²⁾、噴火地点は後に手石海丘と名づけられた。この前後に発生した微動は約1秒の卓越周期をもち、振幅が非常に大きく、伊東市内では有感の地域もあった。防災研究所の微小地震観測点は噴火地点から約200 km 以上離れているが、この微動によってトリガーが掛かるほどであった。

我々は、微動が噴火活動を解明する手がかりになると考え、臨時観測を実行した。目的は、振動源の位置を割り出すこと、連続観測で微動の消長をとらえることに絞った。観測に出発したのは、噴火のあった翌日

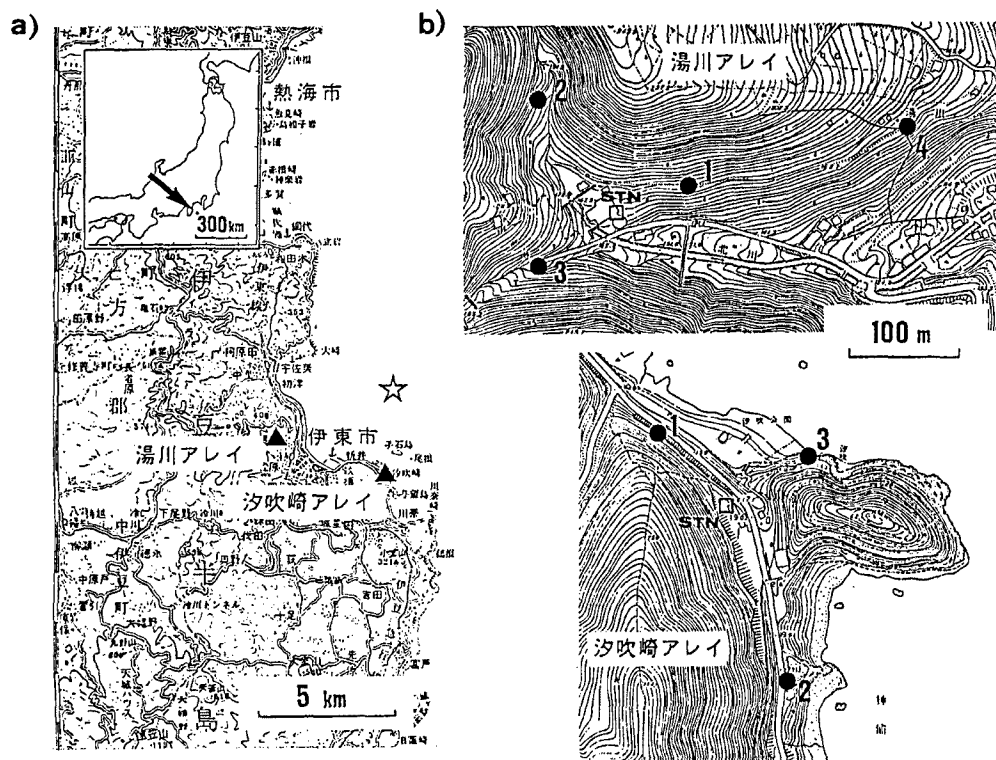


Fig. 1 a) Location of two observation array sites. The location of the volcanic eruption (Teisi Knoll) of July 13th, 1989 is also shown in the figure (☆).
b) Location of sensors at Yukawa and Shiofuki-zaki array sites.

の7月14日早朝であった。現地にはこの日の午後到着した。伊東市役所で情報を集め、観測地点を伊東市湯川に定めて地震計のアレイを展開した。また7月17日からは同市南部の汐吹崎にもアレイを設置し (Fig. 1 (a)), 2カ所から微動の到来方向を求めることを試みた。

2. 観測点と観測方式

湯川、汐吹崎両地点に展開したアレイ観測の方式について述べる。

2.1 湯川におけるアレイ観測

伊東市北西の山際の湯川地区に1 Hz 上下動3点からなるアレイ観測網を展開した。噴火地点から西南西約5 kmにあたる。山の中腹部であるため、平坦な場所を確保することは出来なかったが、周辺の谷地形を利用して、地震計を設置した点相互の高度は比較的うまく合わせることができた。スパンは約150 mでほぼ正三角形である。後に7月15日から地震計を1台追加して東西に長い4点アレイ観測とした。これらの位置を Fig. 1 (b) に示す。ノイズレベルが高かったので、アンプゲインは100倍がやっとであった。しかし、この感度でも、長時間にわたる微動や、たくさんの微小地震を観測することができた。

記録は、ペンレコーダーによる連続記録を、7月14日から19日まで行ない、これと並行して、TEAC製DR-F1記録器により、14 bitのデジタル・トリガー収録を行なった。サンプリングは100 Hzで、1トリガーの記録時間は35秒である。ただし、18日以後はパソコンによる準連続収録方式³⁾に変更した。こちらは12 bitで122 Hzのサンプリングを行ない、光ディスクに記録した。4分間観測すると、光ディスクに15秒

間書き込むため、この間だけは欠測となる。

2.2 汐吹崎におけるアレイ観測

伊東市街南東の海岸沿い、汐吹崎に第2のアレイを設けた (Fig. 1 (b))。噴火地点からは約 3 km 南方にあたる。海に突き出た岩盤の露頭を選んだ。地形の制約上、南北に細長いトリパートイトとなった。地震計は湯川と同じ 1 Hz の上下動であるが、波打ち際の1点には水平動2成分も加え、3成分観測を行なった。しかし、水平動2成分は、ノイズが非常に大きく、解析には用いる事ができなかった。ここは、市街地に近く、しかも波打ち際であるにもかかわらず、湯川より静かであり、アンプゲインは400倍まで上げることができた。記録の開始は7月17日夜で、湯川と同仕様のパソコンによる準連続収録方式³⁾を採用した。その後、

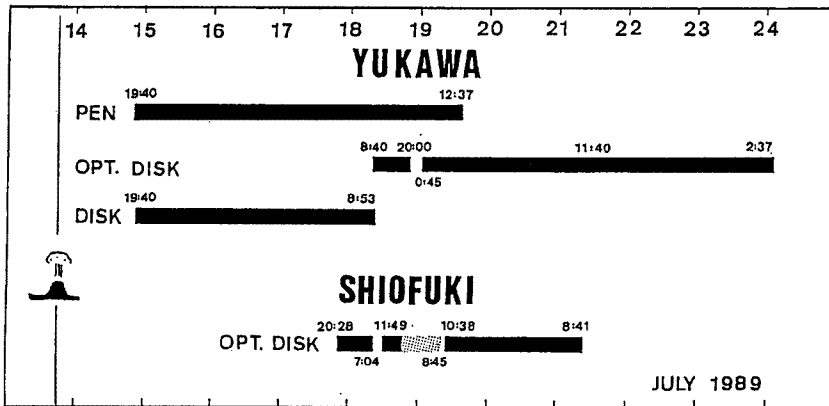


Fig. 2 Outline of the observation periods at two array sites.

- Pen; visible recooding with a paper speed of 1 mm/sec.
- Opt. Disk; almost continuous, 14 bit digital recording with 122 Hz sampling using optical disk.
- Disk; 12 bit trigger recording with 100 Hz sampling.

汐吹崎アレイ

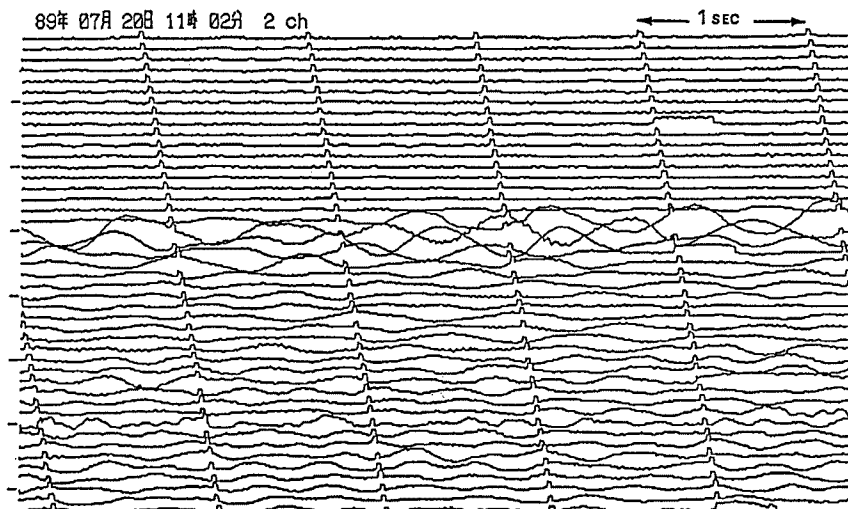


Fig. 3 Example of microtremor waveforms recorded at No. 2 point of the Shiofuki-zaki array site, reproduced from the optical disk system. In this example the microtremor began with a frequency of about 1 Hz, but the frequency changes slowly up to 2 Hz.

地震・微動活動ともに低下したので、同月24日に徹収した。観測期間と観測計器を Fig. 2 にまとめた。

両観測点のセンサーの位置は、徹収時に測距儀を用いて測量した。求めたセンサー位置の相対誤差は数十 cm 以内である。また、センサーとアンプ・フィルターを含めた総合特性は帰学後、観測状況を再現しつつ振動台で検定した。地震計の固有周波数と対象とする微動の卓越周波数がいずれも約 1 Hz であるので、個々の地震計の位相特性による波形の遅れが無視できない。遅れ時間は最も大きいセンサーでは 1 Hz の信号に対し約 0.02 秒であった。アレイ内センサー相互の遅れ時間の差も最大約 0.01 秒に達した。後節で微動の到来方向を求めるが、ここではこの検定結果による補正を行なった。

3. 微動波形

Fig. 3 に汐吹崎で得られた微動の波形例を示す。微動の始まりは比較的突然であるとの印象を受けるが、それでも地震波形の初動ほど急激な立ち上がりではない。微動の始まりには、微小地震が発生し、あたかもそれが契機となったように見える例もあったが、そうでない場合も多く、一概には言えない。微動が始まると、ほとんどの場合我々の測定レベルで数十秒間継続する。長いときは、数分以上継続する時もある。終わりは、たいてい始まりほど明瞭ではなく、いつの間にかノズルレベル以下になる。

今回の微動を特徴づける卓越周波数は約 1 Hz で、他の機関の観測でもだいたい同様の報告が行なわれている⁴⁾⁵⁾。しかし、一続きの微動をみると、開始直後は 1 Hz の周期が卓越していても、徐々に短周期側に移行し、終了時には 2 Hz 程度になることもある。Fig. 3 に示したのはその好例である。また、最初から 10 Hz 程度で始まり、そのままほとんど卓越周期が変わらず終了する例もある。これらの周波数成分を見るために、湯川で 7 月 14 日、16 日、19 日に観測された微動のスペクトルをとり、Fig. 4 に示した。1 Hz の他に 5 Hz、10 Hz、20 Hz あたりにもピークが認められる。14 日の例では、1 Hz が最も大きく、5 Hz はピークを示すものの、1 Hz より小さい、16 日には、これら 2 つの周波数のピークは、ほぼ同じ高さを示す。19 日の例は、5 Hz が最も大きく、1 Hz はピークを形成しない程小さい。この様にピーク相互の大小関係が一定せず、時間的に変化することは、観測点の地盤特性をこえる振動源での周波数の変化を示すものと考えられる。またピークの周波数が時間的に遷移することもある。その他約 20 Hz の単色の微動も記録された (Fig. 5)。これは、周波数が高いので、最初は人工ノイズであると考えていた。事実、我々のアレイの一方でこの単色の波形が観測されていても、同時刻の、もう一方のアレイ記録にはそれらしき波形が見あたらないことがほとんどである。しかし、詳細に調べたとこ

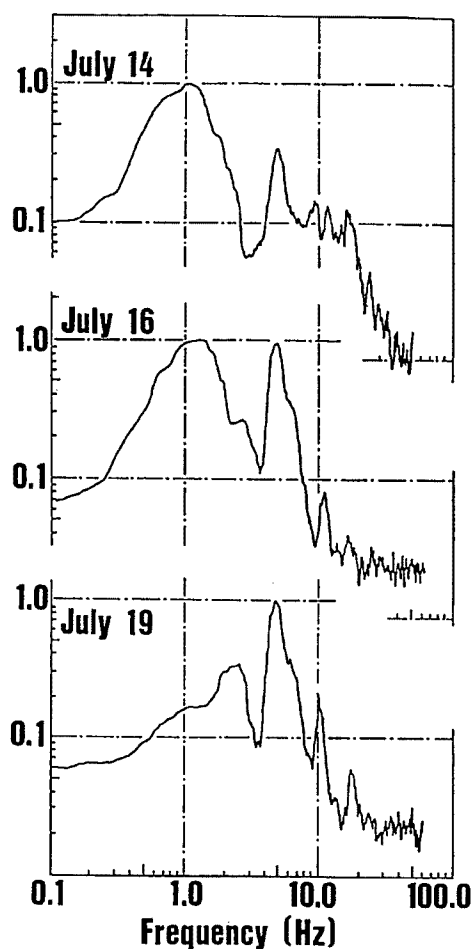


Fig. 4. Examples of microtremor spectra recorded at Yukawa array site. Recorded dates are shown in the figure. The peak frequencies are 1, 5 and 10 Hz. The frequency that gives the maximum peak changes from time to time.

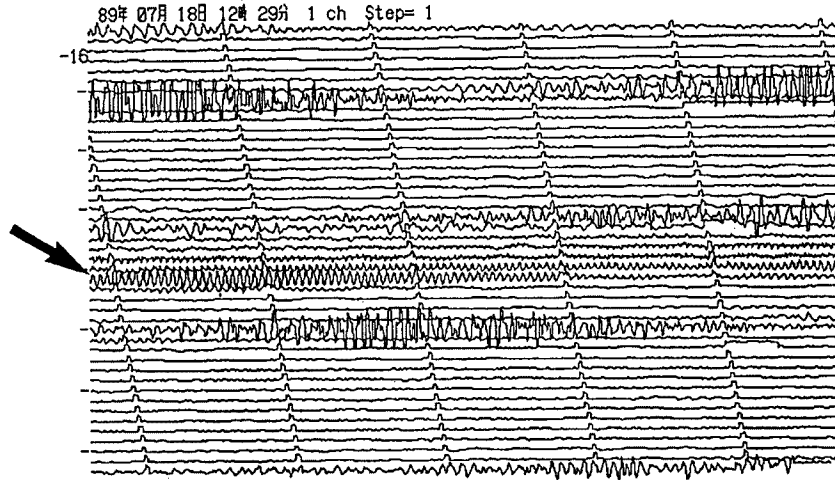
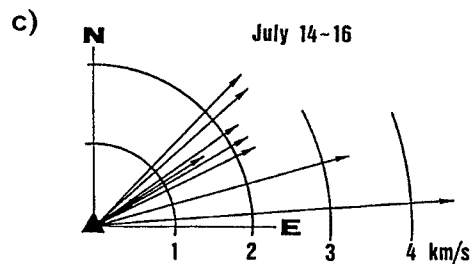
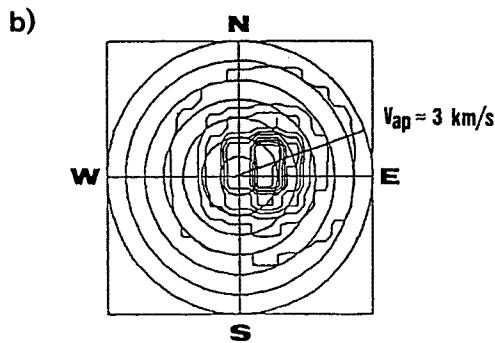
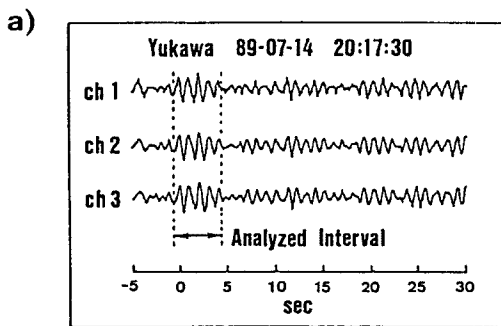


Fig. 5. Example of monochromatic microtremors (nearly 20 Hz) recorded at Shiofuki-zaki array site.

る、1, 2例のみであるが、2点で同時刻に同じ約 20 Hz の微動が観測されていることがあり、この単色のな微動が自然現象である可能性は否定しきれない。今後の検討を要する。



4. 微動の到来方向と振動源

アレイで観測した微動記録から、Capon の⁶⁾方法で、その到来方向と見かけ速度を求めることができる。Fig. 6 に 7 月 14 日、湯川で記録した微動の波形例と解析結果を示す。微動の振幅が大きく、3つのセンサーの波形の対応が良いところ 5 秒間を解析した(同図 a)。その結果、到来方向は東北東で見かけ速度は約 3 km/s と求まった。(同図 b)。このようにして求めた 14 日の数例、16 日の 1 例について微動の到来方向と見かけ速度をあわせて同図 (c) に示す。これらの例では、到来方向は東から東北の間約 40 度の幅で分布している。見かけ速度は約 1.5 ないし 4.5 km/s であった。

Fig. 6 a) Example of microtremor waveforms recorded at Yukawa array site on July 14. A high cut filter (5 Hz) was applied to the original data.
b) Direction of approach and apparent velocity calculated for the waveforms. Calculation was made on 5 sec data as shown by \longleftrightarrow in the figure a).
c) Range of approach directions calculated for waveform data shown in a) and some other cases during July 14-16.

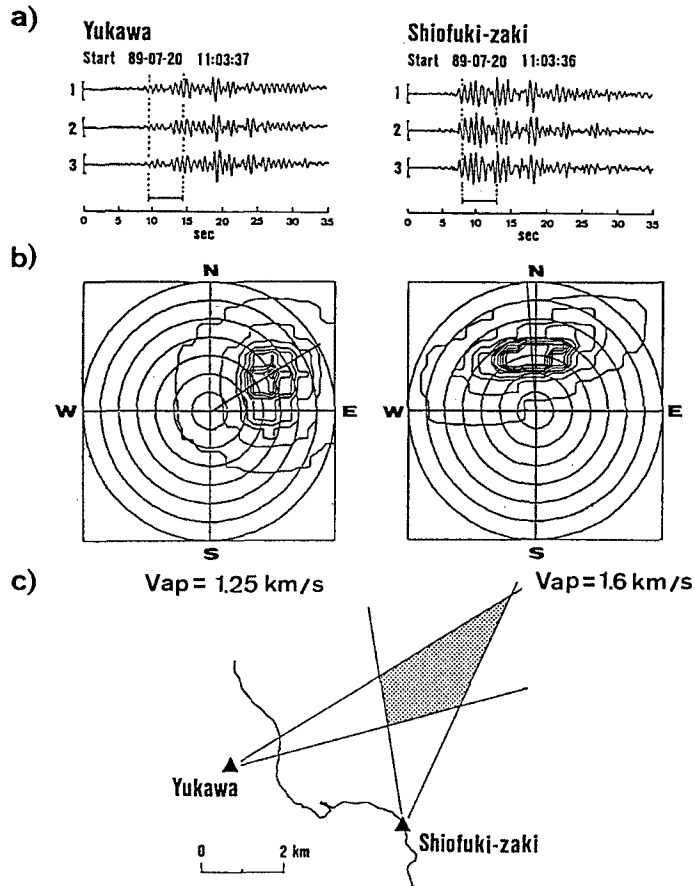


Fig. 7 Approach directions of microtremor simultaneously recorded at both of the array sites on July 20.

- a) Example of microtremor waveforms. A high cut filter (5 Hz) was also applied to this waveform data. Left; at Yukawa array site. Right; at Shiofuki-zaki array site.
- b) Approach directions and apparent velocities.
- c) Possible area of microtremor origin (shaded) as derived from seven pairs of records (including this example) obtained during July 20 and 21. Teisi knoll is located near the center of the shaded area.

見かけ速度の違いは、観測点と振動源の距離の違いを反映していると思われる。従って、微動は湯川から距離も方向も違う、広がりを持った範囲から伝わって来たと考えられる。

両アレイで共通に記録できた微動については、それぞれのアレイから見た到来方向の交点を求めることにより、さらに詳しい振動源の位置を知る事ができる。ここでは、両アレイとも3ないし4点だけの観測であるので厳密ではないが、到来方向の交点は振動源の地表投影点を示すものと解釈する。もちろん、双方のアレイが同一起源の波群を対象としていることが必要条件である。

汐吹崎の観測が開始されたのは7月17日からである。そこでこれ以後両アレイに共通して明瞭に記録された波群の到来方向を調べ、微動の振動源を推定した。悪天候などの理由で、7月17日から19日にかけてはよい記録がなかった。7月20日、21日には数例共通して観測できた微動があった。そのうち、7月20日11時03分の波形例を Fig. 7 (a) に示す。双方のアレイから求めた到来方向は同図 (b) のように手石海丘の方を指す。他の6例もあわせて、20日と21日の微動の振動源分布範囲を同図 (c) に砂目で示す。なお見かけ速度は

同図 (b) に見る通り、湯川では約 1.25 km/s、汐吹崎では約 1.6 km/s であった。14日頃の湯川の結果と比べれば、非常に遅く求まっている。この理由を考えてみる。

14日頃には湯川からみて近いところが振動源になっていたのに対し、20日頃には、より遠い手石海丘付近のみが主要な振動源になっていたことも考えられる⁷⁾。そうだとすれば、13日～17日に他機関が求めた振動源⁸⁾は手石海丘より相当陸側であったとしているのと、調和する。

しかし、両期間の記録方式に起因する解析区間の選び方による可能性もある。湯川の14日頃のデータは、トリガー方式による記録であった。従って、約35秒のデータの中で、振幅の大きなところを解析している。すなわち、一連の微動の中で特に振幅の大きい部分が選ばれている。それに対して、20日頃は連続的な記録の中で、一連の微動の開始部分を主に対象としている。いわば微動の立ち上がりを解析したことになる。したがって、14日頃と20日頃で振動源の位置が本当に変化したのではなく、両時期とも一連の微動の発生は手石海丘で始まり、時間とともに陸側へ移動したとも考えられる。この事を次の方法で確認した。汐吹崎アレイの記録で、センサー No. 1 と No. 3 の微動波形を5秒間ずつに分け、各々の範囲での波群の到着時間差をプロットした。到着時間差は、二つの波形の一方をずらせて相関係数を求め、それが最大になる場合のずらした時間とした。相互相関係数の最大値を与える時間差である。この方法で7月18日の03時14分頃に約1分間継続した微動を解析すると、到達時間差は時間と共に変化し、最大約0.05秒の変動がみられた (Fig. 8)。この0.05秒の到達時間差は、見から速度を1.6 km/s と仮定すると、到来方向に換算して約30度の動きに相当する。汐吹崎からの距離を3 km とすれば、30度の角度変化は接線方向約1.5 km の変化にあたる。さらに、この変化は30秒以内に起こっているので、接線方向の移動速度になおすと約50 m/s となる。

以上をまとめると、微動の振動源は手石海丘は勿論、その近傍数 km の範囲にわたっていて、ひと続きの微動の中でも、振動源が時間とともに移動したと思われる。ただし、解析に使うことのできる観測データが少ないので、これ以上の厳密な議論は難しい。この問題は、現在著者らの1人大倉が、他機関と協力してデータを持ち寄り検討中であるので、その結果を待ちたい。

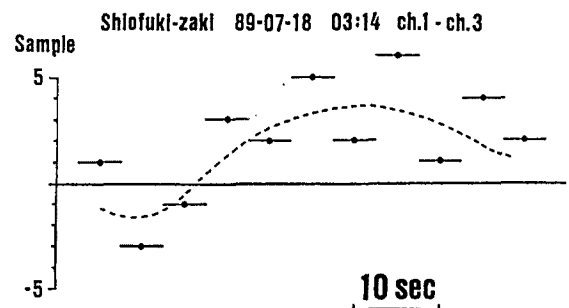


Fig. 8. Difference of the arrival times between No. 1 and No. 3 sensors at Shiofuki-zaki array site. The unit of the vertical axis is the number of samples, where one sample indicates about 8 m sec. Positive values represent delays of point No. 3. with respect to No. 1

5. 微動と地震活動

湯川ではペンレコーダーによる連続可視記録をとった。Fig. 9 に、このモニター波形および後のパソコンによる連続記録から求めた、微動と地震活動の消長のようすを示す。微動は周期約1秒の振動の最大振幅を10分毎に読み取り、それらの2時間毎の平均値をプロットしたものである。これをもって微動の活動を代表させることにする。約10分間の観測期間を通じて、微動活動は1日半位の周期で消長を繰り返す、全体的にはだんだん低下したようである。14日の観測開始直後に記録された微動が、観測期間中最大であり、その振幅は1～2 m_{kine} に達した。地震は S-P 時間が5秒以内のものを選び、その2時間毎の個数を示した。ほとんどが手石海丘あるいは7月9日の M 5.5 の地震の近傍に震源をもつと思われるもので、S-P 時間が1～2秒の地震である。微動が活発であったのは14日～15日午前、16日午前、17日午後、19日午前、21日午前、22日昼である。これらの時期には地震数もやや増えている。すなわち、上述の1日半程度の周期で両者共に活発化する傾向があるといえる。ただし、同じ10分毎の読み取り値からそれぞれ1時間、30分、20分の平均

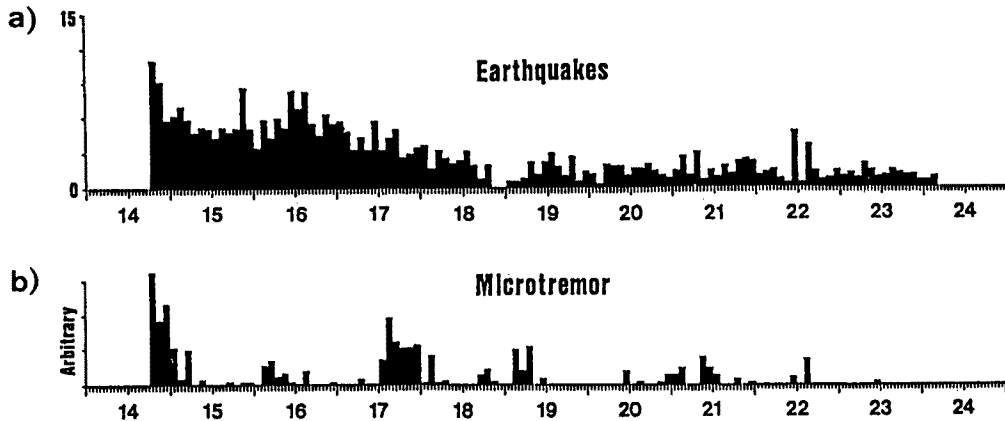


Fig. 9. Time variations of a) the amplitude of microtremors and b) the number of microearthquakes, both measured for every two hours. The amplitude of the microtremors on July 14 is as large as 1-2 m kine.

値を計算して、同様の図を作成したが、時間単位を小さくすると、この関係はだんだん不明瞭になった。つまり、一つ一つの地震が各々の微動に対応するのではなく、約2時間単位で両者の活動度に相関が高くなるということである。これを解釈すると、一つの原因から、ある時は地震が、ある時は微動が発生するのであるが、地震と微動の間で因果関係を持つ訳ではないのであろう。

6. おわりに

以上示したように、我々の観測期間の相当な時間にわたって、活発な微動の発生があった。微動の発生が地下のマグマ活動と対応すると考えれば、手石海丘付近の地下では噴火後もマグマが活動していた事になる。

また、アレイ観測から求めた微動の到来方向や見かけ速度の違いなどから、そのようなマグマ活動が手石海丘下だけでなく、水平方向数 km の広がりを持つ範囲に分布していると推定される。一続きの微動の振動源が時間的に動いていることを示すデータも得られた。

本稿では事実を主に示した。さらに詳しい検討は、今後の問題としたい。

Capon の方法による解析プログラムは東京大学地震研究所伊豆大島火山観測所の山岡耕春氏に拝借しました。また観測時には湯川さつき会館の皆様、汐吹公園の稲葉幾世氏、防災研究所の、安藤雅孝、平原和朗、吉岡祥一の各氏、京都大学理学部の中村佳重郎氏、金沢大学理学部学生の東田進也、栗原勝両氏にお世話になりました。皆様に御礼申し上げます。

本研究の一部は、文部省科研費・自然災害求別研究(1) No. 01601023 および同・総合研究(A) No. 01102042 によった。

参 考 文 献

- 1) 気象庁地震火山部：平成元年7月の伊豆半島東方沖の群発地震及び火山噴火，災害時地震火山現象速報，第3号，1989，pp. 39.
- 2) 下鶴大輔：Event Chronology，1989年7月21日火山噴火予知連絡会海底火山部会資料，1989.

- 3) 平野憲雄：京都大学防災研究所年報，第32号 B-1，1989，pp.125-132.
- 4) 後藤和彦・森 滋男・福井敬一：1989年7月伊豆東方沖火山噴火に伴う微動—臨時観測で捉えられた13日の噴火に伴う微動—，地震学会講演予稿集，No. 2，1989，p. 99.
- 5) 山岡耕春・山科健一郎・長田 昇：地震計アレイによる伊豆東方沖海底噴火後の火山性微動，地震学会講演予稿集，No. 2，1989，p. 109.
- 6) Capon, J.: High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers, Vol. 57, 1969, pp. 1408-1418.
- 7) 京都大学防災研究所：伊東市における微動観測について—1989年7月13日の噴火後の観測—地震予知連絡会会報，Vol. 43，1990，pp. 214-223.
- 8) 名古屋大学伊豆観測団：伊東沖海底噴火に伴う火山性微動，地震学会講演予稿集，No. 2，1989，p. 136.