1986年伊豆大島噴火の前兆的火山性微動

橋本徹夫・館畑秀衛・清野政明

Premonitory Tremors before the 1986 Eruptions of Izu-Oshima Volcano

by

Tetsuo Hashimoto

Meteorological Research Institute, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

Hidee Tatehata

*Seismological and Volcanological Department,
Japan Meteorological Agency, Tokyo, 100 Japan*

and

Masaaki Seino

Meteorological Research Institute, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

(Received December 8, 1988 ; Revised January 17, 1989)

Abstract

A series of the volcanic eruptions of Izu-Oshima Volcano began on November 15, 1986. The tremors preceding these eruptions were investigated by using the seismic records obtained at Oshima Weather Station, 0.8km away from the Miharayama crater.

The intermittent tremors began to be observed in July, i. e., four months before the first volcanic eruption. The tremors were generated repeatedly with a relatively stable recurrence time. Their duration and amplitude were relatively stable as well. The generation mechanism of these tremors can be considered something like the following. Energy is continuously supplied into the source area; the accumulated energy is released when it exceeds some threshold value; the vibration in the source area which causes the energy release results in the generation of tremors.

Detailed observation showed that the maximum amplitudes of intermittent tremors gradually increased with time. The E-W components of the tremors were predominant in the early stage, while the N-S ones became dominant toward the end of October. The trains of the tremors generally recurred at regular intervals of about 2 hours. But trains of tremors were generated at intervals of about 3 hours from July 19 to 21, and from October 21 to 24.

The generation of tremors stopped on October 24. Tremors began to be observed again after a quiescence of 3 days, and then not intermittently but continuously. The apparent period of the tremors remained almost constant, i. e., 0.6 seconds, whether the tremors were intermittent or continuous.

Some of these characteristics of the tremors may be explained by the source migration and/or by the path effect, but most of them are attributed to the generation mechanism of the tremors.

The total energy of the premonitory volcanic tremors were estimated to be 10^{15} erg. It was found that the energy release rates of the source area increased toward the volcanic eruptions.

1. はじめに

1986年7月中旬頃から発生し始めた伊豆大島の火山性微動は、一定の発生間隔で発生する断続微動という（渡辺, 1987）特徴を持っていた。この断続微動は、10月24日に一時停止し、10月27日からは連続微動が発生するようになり、1986年11月15日からの山頂噴火に至ったという経緯を持つ。その後、11月21日にカルデラ北部と北西山腹で割れ目噴火が発生し、この噴火に伴う微動は、大島

測候所において最大 $300\mu\text{m}$ の振幅に達している（山里他, 1988）。

伊豆大島では、1974年6月を最後にして1分程度の短時間の孤立的微動は時々発生していたが、数分以上の継続時間を持つ微動は12年間発生していなかった。1986年の噴火前の微動は、このような静穏な時期を経過した後、7月から発生し始め、振幅・発生間隔・エネルギーなどが変化するという現象を経て、噴火に至ったという意味で、噴火の前兆的性格を持っていると考えられる。

微動を噴火の前兆と見なす研究は過去にも数多くある。伊豆大島における過去の前兆的微動の研究は、田中（1969）によってなされ、1966年の噴火活動期の例では、前駆微動が3～10時間発生して噴火すると論じている。また、阿蘇山の前兆的微動に関しては、1963年11月の小噴火に際して、2日前から微動が発生し、急激に振幅が増大し1時間前に振幅が激減して、噴火が発生したと報告されている（Kubotera, 1974）。桜島の場合は、浅い地震が発生したあと微動が現れ山頂爆発に至る経過を示す（加茂他, 1977；西, 1984）と言われている。

本研究では、1986年7月～11月の前兆微動の発生様式およびエネルギーの時間的推移について報告する。

Fig. 1 Location of seismic stations at Izu-Oshima Volcano. A~E: telemetered network stations. O: Oshima Weather Station.

Fig. 2 Seismogram (October 10, 1986) at station A. The volcanic tremors (indicated with arrows) occur at regular intervals of about 2 hours.

1986 JUL

1986 AUG

1986 SEP

1986 OCT

1986 NOV

Fig. 3 Occurrence diagram of the volcanic tremors from July 19 to November 14, 1986 at Izu-Oshima Volcano. Heights and widths of rectangulars are maximum amplitudes (full-scale $2 \mu\text{m}$) and time durations, respectively. Intermittent tremors occurred from July 19 and continuous tremor from October 27, 1986. The eruptions occurred at 17:25 (JST) on November 15, 1986.

2. 観測点とデータ

Fig. 1 に地震観測点 A～E 及び大島測候所 (O) の位置を示す。A 点は火口から北北西 0.8km に位置し、固有周期 1 秒の変位倍率 500 倍で観測が行われていた。

ここで用いたデータは気象庁火山報告および大島測候所による火山観測原簿の A 点のデータである。これには、火山性微動の発生時刻、最大振幅とその周期、継続時間が記載されており、1986 年の連続微動は 3 時間ごとに読み取られているが、それ以外に、振幅の大きくなった時刻も記載されている。また、必要に応じて、原記録の調査も行った。解析期間は 1986 年 7 月 19 日～1986 年 11 月 4 日である。

3. 1986 年の噴火前の火山性微動の特徴

3.1 微動の発生の概略

Fig. 2 に 1986 年の A 点の火山性微動の記録の例を示す。7 月から発生し始めた三原山の火山性微動は周期性を持って発生し、継続時間も安定していたので、微動の発生している期間が記象紙には縞状の模様に見える。この前兆的微動の 3 成分を記録しているのは大島測候所の煤書き記録だけである。これらの記録は 60mm/1min の紙送りで記録されており、後で述べるように波動の見かけの周期が 0.6sec 程であるので、周波数解析及びパーティ

Fig. 4 Maximum amplitudes of the volcanic tremors. Open circles indicate intermittent tremors; crosses continuous tremor; squares, those falling outside of scale range.

クルモーシオンなどは精度の問題があり行わなかった。なお、このような一定の発生間隔で発生するという特徴を持つ微動は、諏訪之瀬島 (西他, 1988), パプア・ニューギニアのカルカル火山 (Mc Kee et al, 1981) などで観測されている。

この微動の発生を振幅・継続時間・発生間隔の 3 要素から検討した。ここでいう発生間隔は、ある微動の発現時刻から次の微動の発現時刻までの時間である。Fig. 3 に、1986 年 7 月～11 月の微動の発生ダイアグラムを示す。矩形の高さが振幅の大きさ (NS 成分が読み取れない場合は、EW 成分を用いた。), 幅が継続時間、左端が発生時刻である。大島測候所の A 点では、7 月 19 日から記載基準に達する振幅の微動の発生が認められ、徐々に振幅が増大した。但し、記象紙を再検討してみると、振幅が小さいため発生間隔が規則的かどうかの議論はできないが、7 月 7 日頃から微動が発生しているように見える。微動の発生間隔は、7 月 19 日～21 日には、約 3 時間であったが、その後は約 2 時間が基調となった。10 月には、2 時間おきの発生の間に、継続時間の短い微動が不規則に発生間隔が長くなり、約 2.7 時間となり、10 月 24 日に断続微動が止まり、10 月 27 日からは連続微動になって、11 月 15 日の噴火に至った。

RATIO OF AMPLITUDES

Fig. 5 Ratios among the three components of tremor amplitudes. Symbols are the same as in Fig. 4. E-W components of tremors are dominant over the N-S ones in the early stage, while the N-S ones become dominant over the E-W ones toward the end of October.

3.2 振幅・継続時間・発生間隔

今までは振幅・継続時間・発生間隔を総合的に検討してきたが、これらの3要素を別々に見る。Fig. 4は最大振幅の3成分の時系列である。断続微動の振幅が徐々に大きくなり、10月下旬に最大になり、NS成分は発生初期の約3倍の振幅になった。そして、断続微動が止まって、振幅が小さい連続微動になった。各成分の振幅比をFig. 5に示す。UD成分は他の成分に比べ小さい傾向にある。NS/EWは連続的に増加し、7月の微動の発生初期はEW成分の方が卓越していたが、10月下旬になってからは、NS成分の方が卓越するようになっている。振幅比では断続微動から連続微動に変化した時期も含め、全期間を通して、著しいギャップは見られない。

Fig. 6は3成分の最大振幅のみかけの周期である。連続微動になって、バラツキが小さくなっているが、微動の発生から噴火までほぼ変化がなかったと考えられる。平均で約0.6secである。

Fig. 7に継続時間に示す。継続時間は8月を除いて全体的に安定していて、系統的变化はみられない。但し、8月中旬に継続時間が長くなっているが、これは、NS成分を500倍から5000倍に変えたことに対応するのかも知れない。Fig. 8に発生間隔を示す。発生間隔は2時間が基調になっているのが明瞭に見える。7月の微動の発生初期は、渡辺(1987)によれば、約3.5時間で、7月21日から約2時間に変化し、この発生間隔の時間変化は、

7月21日に山頂直下でM $\sim$ 2の地震を含む小群発地震に対応しているということである。8月には4時間からそれ以上の発生間隔もある。これは振幅が小さいために2時間ごとの微動の発生が検出できないだけなのかも知れない。発生間隔は8月14 $\sim$ 21日の安定した時期では 112.2 ± 5.4 分ほどで発生していた。9月中旬からは発生状況が乱れがちになり、10月21日から発生間隔が長くなっているのが分かる。

Fig. 9に1986年の断続微動の3成分の振幅別度数分布を示す。NS・EW成分は $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ にピークを持ち、UD成分は $0.3 \mu\text{m}$ にピークを持っている。但し、ノイズレベルは $0.1 \mu\text{m}$ である。この事実は、振幅の小さい地震ほど発生数が多くなるという、一般の地震で用いられる石本・飯田の式に合うものでない。Fig. 10に継続時間の度数分布を示す。継続時間は25分までの微動が主で、5分 $\sim$ 20分にピークを持つ。Fig. 11で発生間隔の度数分布を示す。発生間隔は、約2時間にピークがあり、大多数の微動が、約2時間で発生したことが分かる。振幅・継続時間・発生間隔が、バラツキはあるが、ある値を中心にして、分布している。

3.3 微動発生の特徴と考察

1986年の全体的な前兆的微動は、このように発生間隔がほぼ一定で、振幅・継続時間が安定した発生様式を持つことが主要な特徴と言える。この断続微動の発生のメカニズムは、発生源に継続的

PERIOD

Fig. 6 Apparent periods of the maximum amplitudes of tremors. Symbols are the same as in Fig. 4. The period of each component remains almost constant.

TIME DURATION

Fig. 7 Time durations of the intermittent tremors.

TIME INTERVAL

Fig. 8 Time intervals of the intermittent tremors. Symbols are the same as in Fig. 4. The tremors mostly recurred at intervals of about 2 hours. The intermittent tremors stopped on October 24 and the continuous tremor started on October 27.

Fig. 9 Frequency distribution of amplitudes of the intermittent tremors. N-S components have peaks at $0.3\sim 0.5 \mu\text{m}$, E-W at $0.4\sim 0.5 \mu\text{m}$ and U-D at $0.3 \mu\text{m}$. Those data do not agree with Ishimoto-Iida's general relation between amplitudes and frequencies of earthquakes.

Fig. 10 Frequency distribution of time durations of the intermittent tremors.

Fig. 11 Frequency distribution of time intervals of the intermittent tremors. The distribution has a peak at intervals of about 2 hours.

にエネルギーが供給され、蓄積されたエネルギーがあるしきい値に達した時に解放され、同時に微動が発生するという過程を示していると思われる。しかしながら、メカニズムを決定するにはデータが十分とは思えないので、ここでは具体的なモデルは提出しないが、メカニズムを拘束する現象について述べることはできるので、更に、発生様式を詳しく検討すると、(a) 噴火が近付くに連れて、振幅が増大していき、10月24日に一度休止したが、27日から連続微動に変わって、振幅が小さくなった。(b) 振幅比はEW成分卓越から、NS成分卓越に、連続的に変化した。(c) 発生間隔は、7月21日には約3時間から約2時間になり10月21日には約2.7時間になった。(d) 継続時間は、8月の中旬を除いて、系統的には変化しなかった。(e) 最大振幅の周期はほとんど一定と見なせる。これらの特徴は微動の発生機構に起因する現象として説明してもよいと考えられるが、他に、微動の発生源の移動、伝達経路の問題も考えられる。即ち、(a) と (b) に示した振幅の増大と振幅比の変化は、微動の発生場所が移動する場合にも生じうる。しかし、規則的に発生するための条件は、どこでも成り立つのではなく、たとえば、間欠泉のような機構が考えられるが(渡辺, 1987; Kieffer, 1984), この機構を移動しながらも保持することは、難しいように思われる。(e) の周期一定であることは、発生源のスケールによると考えられるが、伝達経路の構造による励起の可能性も否定できない。従って、(a) ~ (d) は発生のメカニズムによるもので、発生源の移動はなかったと考えることが妥当のように思われる。また、発生間隔がほぼ一定であったが、振幅は増大していることを考慮すると、発生間隔を決定する条件と振幅を決定する条件は独立しているのではないかと考えられる。また、振幅が増大したことにたいし、エネルギーを解放するしきい値が大きくなっていったことも考えられ、これらの条件を満足するメカニズムを考える必要がある。

4. 1986年の微動のエネルギー推移

4.1 エネルギー指標

火山活動の指標の1つとして、振幅・継続時間・発生間隔の要素を組み合わせたところの微動のエネルギーを考える。先に述べたように、1986年の微動は、全体的には発生間隔・振幅・継続時間などが安定して発生した。このような場合、最大振幅の周期一定とした上で、次のような簡便な方法でエネルギーに比例する量を見積ることができる。

エネルギーに比例する量をエネルギー指標と呼ぶことにすると、

[エネルギー指標]

$$= [\text{最大振幅}]^2 \times [\text{継続時間}]$$

Fig. 12 に、この式から計算した1986年の微動のエネルギー指標の変化を示す。上の図がエネルギー指標の累積値で、下が日単位の放出率である。縦軸は各々リニアスケールの相対値である。エネルギー指標の累積値は $9 \times 10^6 \mu\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ であり、日単位の放出率の最大値は $6 \times 10^5 \mu\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ である。連続微動になって振幅は小さくなったが、継続時間が長くなった分だけ微動のエネルギー指標が大きくなっていると考えられる。微動の日単位のエネルギー指標は増減はあるが、10月中旬から増加の傾向を示し、微動のエネルギー指標の累積値は噴火が近づくとつれて加速的に増大していた。

以上のことから、1986年の噴火前の火山性微動が、噴火が近付いてきたことの指標として重要な意味を持つと思われる。

4.2 エネルギー換算

微動の発生源におけるエネルギーをエネルギー指標から換算してみる。このためには微動の波動的性質を検討する必要があるが、今回のデータだけでは不確定な要素が多過ぎる。Yokoyama (1956), 田中 (1968) などではRayleigh波としてエネルギーを求めているが、ここでは、次の4種類の波に対するエネルギーの換算を行ってみた。Table 1 に、入射波がそれぞれP波・SH波・Rayleigh波の場合のエネルギーの式を示し、それから計算された1986年7月19日~11月14日に放出された微動の全エネルギー量を示す。なお、発生源は火口直下で、移動していないと仮定し、発生源からの距離 $r = 1 \text{ km}$, $V_p = 2 \text{ km/sec}$, $V_p/V_s = \sqrt{3}$, $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$, $T_0 = 0.6 \text{ sec}$, 実体波の場合は入射角 $\alpha = 30^\circ$ として計算すると、微動の総発生エネルギーはおおよそ $5 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{16} \text{ erg}$ となる。

但し、断続微動と連続微動のエネルギーの見積りにおいて、最大振幅を用いることにはやや問題がある。断続微動の全体の形は紡錘形をしており、最大振幅を用いて、エネルギーを計算すると過大評価になるが、一方、連続微動は比較的定常的な形で振動していて、最大振幅を用いることによる過大評価の度合は小さいと考えられる。ある断続微動の一連のピークの値を読み取って、(振幅)²の時間積分をしたものと(最大振幅)²から求めたものを比較すると、前者は後者の約10分の1であった。また、連続微動の場合は、約3分の1であった。従って、このことを考えると、前兆的微動の総エ

Fig. 12 Temporal variations of an energy index of the volcanic tremor. The energy index equals to $(\text{Maximum amplitude})^2 \times (\text{time duration})$. Upper: accumulated value (full-scale = $9 \times 10^6 \mu\text{m}^2 \cdot \text{sec}$). Bottom: daily rates (full-scale = $6 \times 10^5 \mu\text{m}^2 \cdot \text{sec/day}$).

Table 1 Energy estimation of tremors. U_P , U_S , and U_R are the displacement amplitudes of P-wave, S-wave and Rayleigh wave, respectively. T_0 is the period of the volcanic tremors, fixed to 0.6 sec. τ is time duration. V_P , V_S and V_R are the wave velocity of P-wave, S-wave and Rayleigh wave, respectively. ρ is the density ($\rho=2\text{g/cm}^3$). r is the distance from the source of tremors ($r=1\text{km}$). α is the incidence angle with respect to the vertical axis ($\alpha=30^\circ$). β is scattered angle. $\gamma=V_S/V_P$ ($=1/\sqrt{3}$). In the right column are shown the calculated total energy of the volcanic tremors.

P-wave	$8 \pi^3 \rho r^2 V_P \left[\frac{\cos^2 2\beta + \gamma^2 \sin 2\alpha \sin \beta}{2 \cos \alpha \sin 2\beta} \cdot \frac{U_P}{T_0} \right]^2 \gamma$	$2.0 \times 10^{16} \text{erg}$
SH-wave	$2 \pi^3 \rho r^2 V_S \left[\frac{U_S}{T_0} \right]^2 \gamma$	$3.5 \times 10^{15} \text{erg}$
SV-wave	$8 \pi^3 \rho r^2 V_S \left[\frac{\cos^2 2\alpha + \gamma^2 \sin 2\alpha \sin \beta}{2 \cos \alpha \sin 2\alpha} \cdot \frac{U_S}{T_0} \right]^2 \gamma$	$4.7 \times 10^{15} \text{erg}$
Rayleigh Wave	$2.5 \pi^2 \rho r V_R^2 \left[\frac{U_R}{0.42} \right]^2 \frac{\tau}{T_0}$	$4.7 \times 10^{15} \text{erg}$

エネルギーは 10^{15}erg のオーダーとなる。なお、この要素を考えると、噴火前の微動のエネルギーは一層加速的に増大していたことが強調できる。

5. ま と め

約12年ぶりの伊豆大島火山の1986年11月の噴火に先立ち、約4か月前の7月から発生した火山性微動は、噴火の前兆的微動であると考えられ、次のような特徴を持っている。

この前兆的微動は、発生間隔の規則性、振幅及び継続時間の安定性という発生様式を持つことが主要な特徴である。このような断続微動の発生メカニズムは、発生源に継続的にエネルギーが供給され、蓄積されたエネルギーが、あるしきい値に達した時に解放され、同時に微動が発生するという過程を示しているように思われる。更に詳しくみると、噴火が近づくに連れ最大振幅が徐々に増大する、最大振幅の卓越成分は、微動の発生の当初、EW成分であったが、徐々にNS成分が大きくなるなどの特徴がみられた。断続微動の発生間隔は、7月19日～21日は約3時間であったが、その後、約2時間になり10月21日から約2.7時間となり、10月24日に断続微動が止まって、10月27日からは連続微動になった。断続微動は、主として5～25分の継続時間を示した。最大振幅の見かけの周期は、約0.6秒であり、ほぼ一定であった。これらの事実の中には、個別的には発生源の移動、伝達経路で説明できるものもあるが、全体的には、発生

メカニズムによると考えられる。

また、最大振幅・周期・継続時間から推定された1986年の前兆的火山性微動のエネルギーは、総量 10^{15}erg のオーダーとなり、噴火が近づくに連れて、加速的に増大したという特徴を持っている。このことは噴火の予測にとって重要な意味を持つと考えられる。

謝 辞

データをまとめるにあたって、大島測候所や気象庁地震火山部地震火山業務課火山室の人々にお世話になりました。様々な討論をして下さった、気象研究所の吉川澄夫主任研究官・山里平氏・干場充之氏に感謝します。論文を書くに当たって助言をして下さった、古屋逸夫第三研究室長・小高俊一主任研究官に感謝します。また、データの整理をして下さった富田穂子氏、作図を手伝って下さった登嶋絵美氏に御礼申し上げます。

参考文献

- Kieffer, S.W., 1984: Seismicity at Old Faithful Geyser: an isolated source of geothermal noise and possible analogue of volcanic seismicity., J. Volcano. Geotherm. Res., 22, 59-95.
 Kubotera, A., 1974: Volcanic tremors at Aso Volcano, in Physical Volcanology (L.Civetta et al., eds), 29-48, Elsevier.

- McKee, C. O., D. A. Wallace, R. A. Almond, and B. Talais, 1981: Fatal hydro-eruption of Karkar volcano in 1979, development of a maar-like crater. In: R. W. Johnson (Editor), Cook-Ravbrian Volume of Volcanological Papers. Geol. Surv. Papua New Guinea, Mem., 10, 63-84.
- Yokoyama, I., 1956: Energetics in Active Volcanoes, 1st Papers., Bull. Earthq. Res. Inst., 185-195.
- 加茂幸介, 古沢保, 赤松純平, 1977: 桜島の火山性微動の性質について. 火山, 第2集, 22, 41-58.
- 笠原慶一, 1983: 地震の力学. 鹿島出版会, pp14-17.
- 西澤, 1984: 爆発に先行する火山性B型地震の群発. 京大防災研究所年報, 第27号B-1, 29-34.
- 西澤, 中村貞美, 園田忠雄, 岡田弘, 前川徳光, 植木貞人, 河野俊夫, 渡辺暉彦, 増谷文雄, 小野博尉, 須藤靖明, 1988: 諏訪之瀬島火山の地震活動. 第1回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, 1-11.
- 力武常次, 佐藤良輔, 荻原幸男, 1980: 物理数学II, 東大出版会, pp9-16
- 田中康裕, 1969: 伊豆大島の地震計測学的研究 (II). 気象研究所研究報告, 20, 385-416.
- 渡辺秀文, 1987: 火山性微動からみた伊豆大島火山の噴火機構. 月刊地球, 9, 475-480.
- 山里平, 中禮正明, 清野政明, 安藤邦彦, 1988: 伊豆大島噴火活動期における火山性微動の挙動. 火山, 第2集, 33, 120-127.

1986年伊豆大島噴火の前兆的火山性微動

橋本徹夫・館畑秀衛*・清野政明

約12年ぶりの伊豆大島火山の1986年11月の噴火に先立ち, 約4か月前の7月から, 断続的に火山性微動が発生した。大島測候所の観測点A点(三原山火口から0.8km)の地震計のデータを用いて, この前兆的性質を持った微動の特徴を述べる。

この前兆的微動は, 一定の発生間隔で発生し, 振幅及び継続時間が安定した発生様式を持つことが主要な特徴である。このような断続微動の発生メカニズムは, 発生源に継続的にエネルギーが供給され, 蓄積されたエネルギーが, あるしきい値に達した時に解放され, 同時に微動が発生するという過程を示しているように思われる。更に, 詳しくみると, 最大振幅が徐々に増加して行くとともに, 最大振幅の卓越成分は, 微動の発生の当初, EW成分であったが, 徐々にNS成分が大きくなった。断続微動の発生間隔は, 全体的には約2時間であるが, 7月19日~21日と10月21日~24日では約3時間であった。10月24日に断続微動が止まって, 10月27日からは連続微動になった。最大振幅の見かけの周期は, 約0.6秒であり, ほぼ一定と見なせる。これらの事実の中には, 個別的には発生源の移動, 伝達経路で説明できるものもあるが, 全体的には, 発生メカニズムによると考えられる。

また, 最大振幅・周期・継続時間から推定された1986年の前兆的火山性微動のエネルギーは, 総量 10^{15} ergのオーダーであり, 噴火が近づくに連れて, エネルギーの放出率が増大したという特徴を持っている。