

火山性微動の出現様式

須 藤 靖 明

THE PATTERNS OF THE EMERGENCE OF THE VOLCANIC MICRO-TREMORS

By *Yasuaki SUDO*

Synopsis

An equipment was devised for the purpose of measuring the kinetic energy of the volcanic micro-tremors. The data obtained by this equipment for three years of 1971 to 1973 were analyzed from the point of view of the correlation between the emergence of micro-tremors and the rainfall, the seismic activity or the volcanic activity. The rainfall has a great influence on the emergence of micro-tremors. In case the rainfall is plentiful, the kinetic energy of micro-tremors, in most cases, is increasing. The earthquakes in and near Aso Caldera have an effect on the micro-tremors, but the earthquakes far from the Volcano Aso seem to have no relation to the micro-tremors. As regards the volcanic activity, the kinetic energy of micro-tremors maintains a high level when the volcanic ashes are ejected together with the volcanic gases and the water vapour from the crater.

1. は じ め に

阿蘇火山の火山活動の消長をきわめて良く示すものとして火山性微動がある。佐々¹⁾は、この火山性微動を周期の長さから4つに分類して、出現様式を述べている。すなわち、第1種微動(周期1秒)は、阿蘇中岳第1火口直下附近が発生源で火山ガスなどの内部爆発によるもので、爆発噴煙活動の旺盛な間は、振巾が概して小さく、その周期が活動状況で変化する。例えば、振巾が大きくなるのに周期が短くなるのは、擾乱源の上昇によるものと考えられる。第2種微動(周期3.5~7.0秒)は、岩漿溜の固有振動によるもので、火口底から蒸気が容易に逃げる場合は、岩漿溜内の圧力低下で振巾が小さくなる。つまり、岩漿溜内の勢力が爆発で消費されてしまうと出現しない。第3種微動(周期0.5秒)は、火山表面爆発や地下浅所での内部爆発によるものである。第4種微動(周期0.2秒)は、表面爆発によって生じるものと考えられている。

このように、火山性微動の出現様式から火山活動の状況を把握することは、今日でも続けられ、出現状態の変動を量的に計る第1歩として DEA-1 という微動エネルギー積算装置が開発された²⁾。この装置の目的は、微動の解析が連続して行われ、その結果の自動統計処理である。すなわち、地震計からの電気信号を全波整流し、2乗回路を通し、その値を瞬時読み取り、エネルギー量として count を行う装置である。今回、ここに報告することは、1971年から1973年までの3年間について、同装置による観測結果を火山活動状況、地震発生、降雨との関連から、火山性微動の出現様式を論じることである。

2. 観 測

DEA-1 による観測は、Fig. 1 に示された system で行われた。換震器は^{*} 周期1.0秒 $k=1.0$ の moving coil type の上下動地震計で、阿蘇中岳第1火口より南へ約1 km の砂千里観測室に設置された。同室は、地下3 m 程の所に埋設されたコンクリート建物で、換震器は、風雨など気象要素の直接的な影響から保護されている。換震器の出力は、同室より地下ケーブルで、約1.5 km 離れた本堂観測所に伝送され、増巾器、Band Pass Filter を通して、DEA-1 へ接続される。Band Pass Filter の通過帯域は、2.5~3.4 Hz で、その response curve

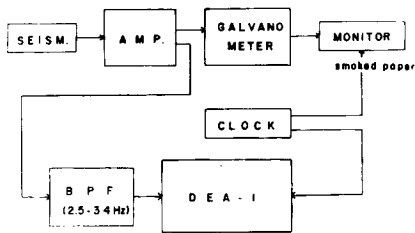


Fig. 1 Block diagram of observational system. DEA-1 is the digital energy accumulator which was devised for measuring automatically the kinetic energy of the volcanic micro-tremors.

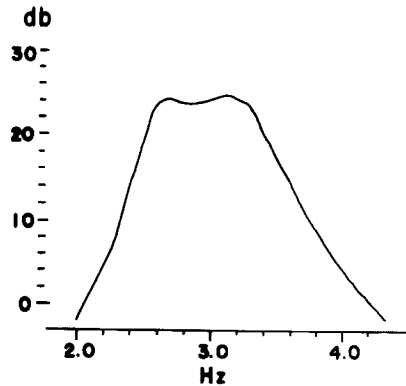


Fig. 2 Response curve of band pass filter.

は、Fig. 2にある通りである。増巾器との総合感度は、電圧比で、3.0 Hzで約4000倍となっている。これは、DEA-1の入力 levelの制約によるもので、 $0.2 \sim 0.5 V_{p-p}$ の入力が必要とされるからである。DEA-1の動作原理は、和田他²⁾に詳しく述べられているので、ここでは、ふれないことにする。積算数値を微動としての放出エネルギーに換算する時の仮定は、今回も同じで、対象とする微動は、中岳第1火口の表面近くから速度1.0 km/secで伝播する実体波とした。従って、後述のエネルギー値は、上記仮定に基づいた波動の上下動成分の値となっている。

3. 微動の出現様式

対象とした火山性微動は、ほぼ3.0 Hzを中心とするもので、佐々の第3種及び第4種の微動に含まれるわけであるが、ここでは、第3種、第4種と限定しないで、Fig. 2で示される帯域を通過する火口から出る微動とする。この帯域の微動は、佐々¹⁾も述べた如く、火口の表面活動に著しく対応する。つまり、火口底の乾燥赤熱現象、火災現象、湯だまり、土砂噴出、火山灰放出などの諸現象に対応して、微動の出現状態に変化が現われる。このような現象を起こす要因は、火山体内部のエネルギーのほかに、降雨、地震などの火山体への影響が考えられる。

a. 降雨との関係

降雨と微動エネルギーとの対応関係は、降水量とDEA-1のエネルギー値の各々の30分間毎の積算値をもって比較することで検討された。降水量は、中岳第1火口より西7 kmの所に位置する京大火山研究所で計測された値を使用した。したがって、厳密には、火口近くでの降雨の状態を表わすものではなく、火口近くより若干少めになることがあるが、ひどく異なるものではないと思われる。

降雨と微動エネルギーの間には、対応関係が認められる場合と、そうでない場合があり、対応関係が認められた場合には、降雨中に、あるいは、降雨後数時間以内に、微動エネルギーが増大する場合と、逆に減少する場合とがある。Fig. 3の各図は、微動エネルギーが増大する場合の代表的な例である。また、Fig. 4の各図は、減少する場合の代表的な例である。Fig. 5は、モニターとしての煤書き記録の一部で、左側がFig. 3の中の1972年8月28—29日にあたり、右側がFig. 4の中の1973年7月25—26日にあたる。Fig. 3及びFig. 4で、降雨は、棒状で示され、30分間の積算値を示している。ただし、30分間で10 mm以上になる場合は、すべて10 mmとして表わされ、全体の降水量は、図中に示されている。微動エネルギー値は、変動の絶対量が異なるので、各々について、その絶対量を左側に示してある。

降水量の大きさによって、降雨と微動の対応関係がいかなる関係にあるかをみるために、降雨によって、微動エネルギーが増大した場合と、減少した場合と、全くそれらしい変化が認められない場合のそれぞれの降雨

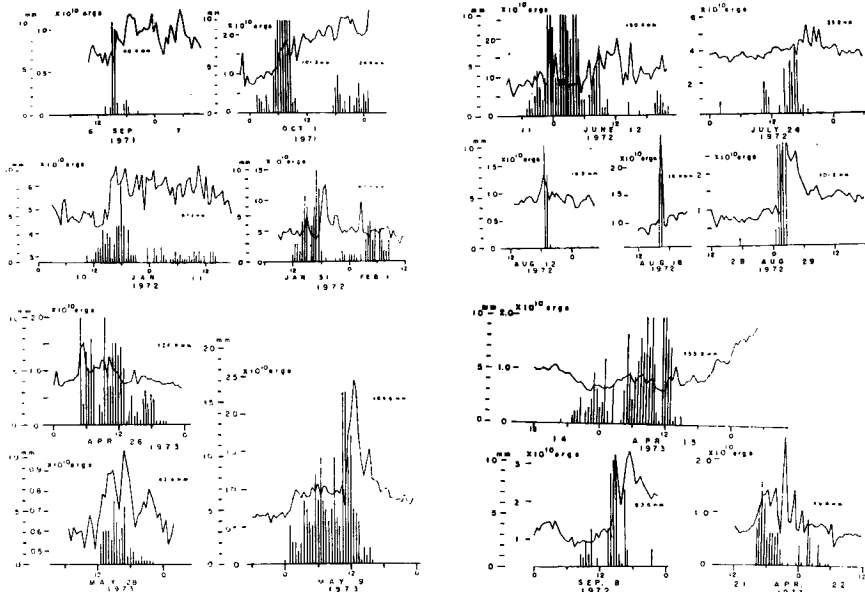


Fig. 3 Correlation between the kinetic energy of volcanic micro-tremors accumulated for 30 minutes and the precipitation for 30 minutes. The precipitation exceeding 10 mm for 30 minutes is indicated as 10 mm. These graphs are showing the typical cases that the energy is increasing with the rainfall.

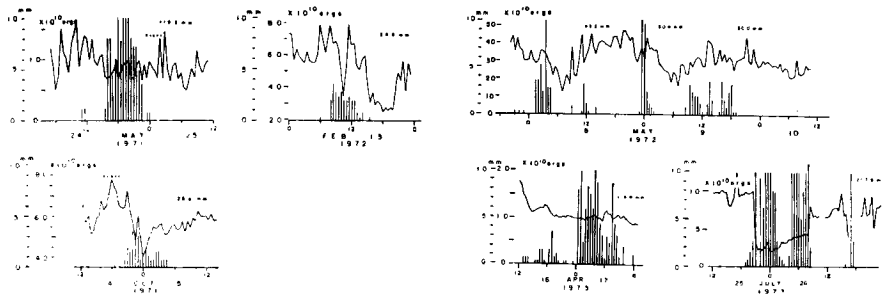


Fig. 4 Correlation between the kinetic energy of volcanic micro-tremors accumulated for 30 minutes and the precipitation for 30 minutes. The precipitation exceeding 10 mm for 30 minutes is indicated as 10 mm. These graphs are showing the typical cases that the energy is decreasing with the rainfall.

回数を調べ、降水量の大きさによって分類した。Table 1 は、こうして得られたもので、降水量が多ければ、ほとんどの場合、微動エネルギーに変動が生じ、そのエネルギーは増大する傾向にある。一方、降水量が少い場合は、必ずしも、微動エネルギーに変動が生じないし、変動が認められた場合でも、増大する時もあり、減少する時もある、傾向がはっきりしない。

Table 1 では、降雨継続時間の長短にかかわらず、その間の総降水量をもって、1回と計数しているので、単位時間内の降水量が少くても、降雨時間が長ければ、総降水量が多量となり、降雨状態が正しく表わされて

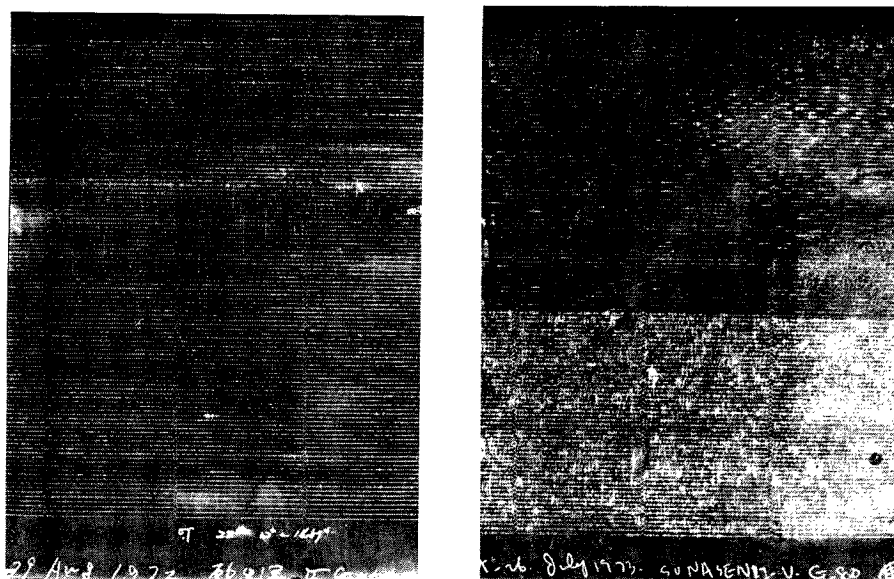


Fig. 5 Portions of the monitoring seismograms. Left is the case that the amplitudes are increasing with the rainfall as seen in Fig. 3. This seismogram was recorded on 28-29, Aug., 1972. Right is the case that the amplitudes are decreasing with the rainfall as seen in Fig. 4. This seismogram was recorded on 25-26, July, 1973. These seismograms were recorded from the bottom to the top.

Table 1 Relations between the emergence of volcanic micro-tremors and the number of rainfalls divided into the precipitation.

Precipitation (mm)	-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-
Increasing	13	10	8	5	5	13
Decreasing	9	20	9	2	2	5
Non correlation	32	15	7	1	1	0

Table 2 Relations between the emergence of volcanic micro-tremors and the number of rainfalls divided into the density of falling rain.

Density of falling rain (mm/hour)	-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-
Increasing	2	13	15	7	6	11
Decreasing	0	22	14	2	3	6
Non correlation	10	29	10	5	2	2

いない。そこで、降水量を、その降雨継続時間で割った数値で、Table 1 と同じく微動エネルギーの変動の対応性を検討してみたのが、Table 2 である。Table 2 では、この単位時間の降水量を 2 mm/hour 毎に区切って表わしてある。この表に於ても、Table 1 と同じことが云える。すなわち、単位時間の降雨が大になれば、ほとんどの場合、微動エネルギーに変動が生じ、そのエネルギーは、増大する傾向にある。

降雨によって、微動エネルギーが増大するということは、佐々^リがすでに述べているように、火口孔内及び

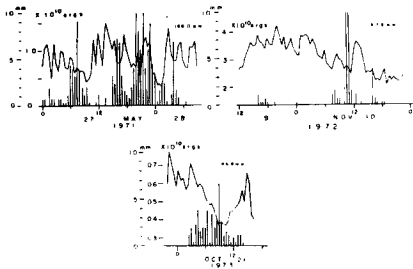


Fig. 6 Correlation between the kinetic energy of volcanic micro-tremors accumulated for 30 minutes and the precipitation for 30 minutes. The precipitation exceeding 10 mm for 30 minutes is indicated as 10 mm. These graphs are showing the typical cases that the energy is once decreasing and then increasing with the rainfall.

岩漿溜内に流れ込んだ水及び灰砂に刺激されて、内部爆発が盛んになることで説明される。すなわち、微動エネルギーが増大する場合、ほとんど、その増大している時は、土砂噴出が火口内で盛んに生じているか、火山灰の放出が多量になっている場合と一致している。一方、逆に、微動エネルギーが減少するということは、雨水によって、火口内に流れ込んだ水及び灰砂で、火口孔が完全にふさがれ、火口内一面に湯だまりが生じてしまうことによるであろう。しかし、この場合、湯だまりは、火口内の熱で熱せられ、急速に蒸発してしまうことが多い。しかし、蒸発してしまう前に、火口内で盛んに土砂噴出が生じる場合は、降雨によって、火口内に湯だまりが出来るまでは、微動エネルギーが減少していき、降雨後、その湯だまりから盛んな土砂噴出が生じて、微動エネルギーが増大するような場合もある。**Fig. 6** の各図は、このような場合の代表的な例である。

微動エネルギーが、降雨によって、増大する場合は、火山内部からの放出エネルギーが大なる時に生じやすく、逆に、微動エネルギーが減少する場合は、放出エネルギーが小さい時に生じるように考えられる。そして、微動エネルギーが、火山内部からの放出エネルギーの大きさを示すひとつの目安ならば、微動エネルギーの大きさの level が高い時に、降雨によって、微動エネルギーが増大する場合が生じ、低い時には、減少する場合が起こることになる。ところが、**Fig. 3, 4** の各図の代表的な例を見てもわかるように増大する場合に、微動エネルギー level の低い場合もあり、減少する場合に、高い場合もあって、降雨前の微動エネルギー level の高低には、降雨中あるいは降雨後の微動エネルギーの増減という現象は、必ずしも依存しないようである。むしろ、微動エネルギー level の高い時ほど、例えば、1972年の4月～5月の非常に高い時ほど、雨水によって、火口からのエネルギーの放出が、一時的におさえられて、減少する場合が起こるようである。

b. 地震活動との関係

地震活動と火山活動との相互関連性については、多くの研究^{3),4),5)}があるが、これらは、地震→噴火あるいは、噴火→地震という関係に於いて研究されているのが、ほとんどである。

ここでは、地震と火山性微動の出現様式との間に、どのような関係があるかを考えてみた。**Fig. 7,8,9** は、1日の微動のエネルギー積算値を、1971年、1972年、1973年の各1年間にわたってプロットしたものである。図中、微動エネルギーの曲線が欠けている部分は、雷などにより、DEA-1に故障を生じた所である。また、これらの図には、阿蘇火山を中心に半径約100 km以内に震央をもつ地震 ($M \geq 3.5$) と、火口周辺の火山性地震の発生した日と、1日に50 mm以上の降雨のあった日とをそれぞれ示してある。

(地震の波動そのものが DEA-1 に count され、微動エネルギーが見かけ上大きくなっている場合)

この場合は、ここで考える微動と地震との相互関連性とは異なるが、**Fig. 7~9** の各図で、微動エネルギーが見かけ上極端に大きくなっているのが、予め考慮しておく必要がある。

1971年；2月15日雲仙群発地震 (Max. $M=4.6$)、3月13日熊本県中央部地震 ($M=3.9$)、3月21日日向灘地震 ($M=4.4$)、6月24日阿蘇群発地震 (Max. $M=3.2$)、同日豊後水道地震 ($M=3.9$)。

1972年；6月17,18日火山性地震 (震度各 I)、8月29日火山性地震 (震度 I)、12月2日大分県南東部地震 (深発)、12月4日日向灘地震 ($M=5.0$)。

1973年；8月30日火山性地震群発、9月2日福岡県西部地震 ($M=4.8$)。

(地震の発生により、その後微動エネルギーに変化が生じたと思われる場合)

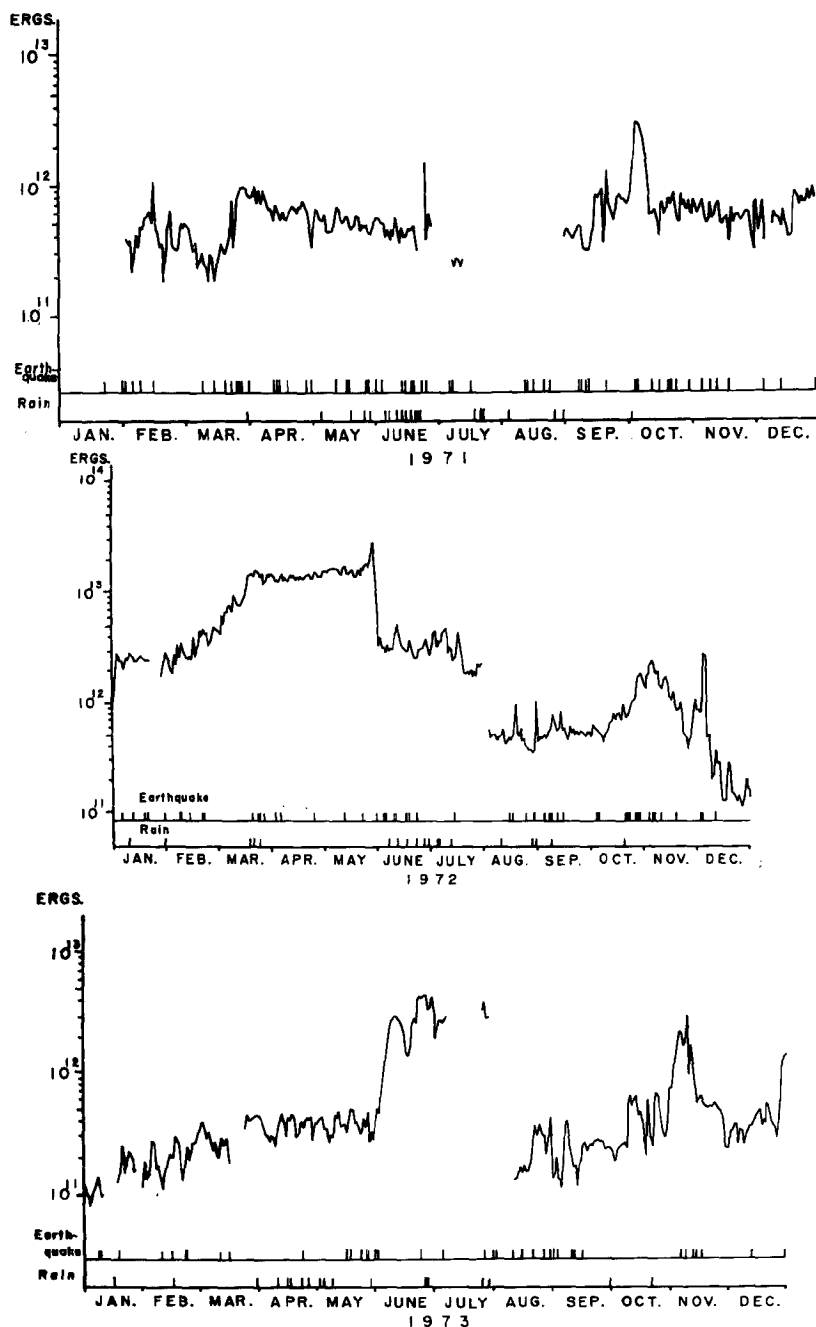


Fig. 7 Daily total kinetic energy of volcanic micro-tremors. The bars of "earthquake" in the graph mean the date when the volcanic earthquakes or local earthquakes near the Volcano Aso occurred. The bars of "rain" mean the date when the precipitation is exceeding 50 mm a day.

1971年；3月24日からの増大に対して、24日熊本県中央部地震 ($M=4.2$), 25日豊後水道地震 ($M=4.2$), 26日雲仙群発地震 ($\text{Max. } M=3.8$) が生じている。5月10日からの増大に対して、同日の火山性地震(震度 I)が対応する。9月12日からの増大に対して、9日から13日にかけての火山性地震の頻発、11日の雲仙群発地震 ($\text{Max. } M=4.3$) が対応する。10月4日の急激な増大は、熊本県中央部地震 ($M=3.5$) の後で生じている。

1972年；1月2日頃からの急激な増大に対し、1971年12月31日の火山性地震の頻発が対応する。5月23日頃からの増大は、22日の火山性地震(震度 I)の発生による。6月9日から13日までの増大は、9,10日の阿蘇群発地震 ($\text{Max. } M=3.2$) の発生による。9月6日からの増大に対し、6,7日の有明海地震 ($M=5.2, 4.2$) が対応する。12日の増大も、11日の有明海地震 ($M=3.8$) が対応する。11月2日からの増大に対して、2日の雲仙群発地震 ($\text{Max. } M=4.4$) が対応する。11月18日の増大は、熊本県北東部地震 ($M=3.9$) による。

1973年；1月19日からの増大は、19日の火山性地震の発生後に起っている。2月24日からの増大に対して、23日からの阿蘇群発地震 ($\text{Max. } M=3.2$) が生じている。3月下旬からの増大は、23日の火山性地震の頻発による。5月16日からの増大は、14日、16日の火山性地震(各震度 I)による。5月末からの急激な増大に対し、24日大分県南西部地震(深さ 120 km), 25, 27, 31日の火山性地震(各震度 I)が生じている。6月23日からの増大は、23日の阿蘇群発地震 ($\text{Max. } M=3.1$) が対応している。8月20日からの増大に対して、19日の火山性地震の頻発が生じている。9月5日から10日にかけての増大は、5日の火山性地震の頻発に対応している。

地震と微動の相互関係を、主として、地震の発生後に、微動エネルギーが増大する場合について述べたわけであるが、阿蘇中岳第1火口周辺に震源を持つ火山性地震の発生による場合が多いことに気付く。これは、火山性地震の発生自体が阿蘇中岳の火山活動の一部分であり、微動もまた一部分であることから、相互に影響していることは、当然なことであって、むしろ、後で述べる火山活動との関係の中で考えるべきものと思われる。次に、微動に影響を与える地震として挙げられているのに、阿蘇群発地震というのがある。この阿蘇群発地震は、和田他⁶⁾が述べている、阿蘇火山西部外輪山周辺に生じるもので、カルデラの構造と密接な関係をもつ地震と考えられている。この阿蘇群発地震によって、微動エネルギーが増大する場合もあることは、カルデラの構造と中央火口丘の活動との関係が、かなり密接しているという点で、注目すべきことであろう。阿蘇から見て震央距離の大きい地震の中で、熊本県中央部や北東部の地震の場合は、雲仙、有明海などの地震の場合よりも、比較的、阿蘇火山に近いことから、微動に影響を与える可能性があり得るが、後者の場合は、更に検証を行わなければならない。何故なら、比較的大きな地震で、阿蘇地域に於ても有感地震となった場合でも、微動に変動が現出しない例があるからである。例えば、日向灘地震は、1971年から1973年の3年間の間に、 $M \geq 4.5$ が10回発生しているが、全て微動に変動が生じていない。また、豊後水道の地震も、 $M \geq 4.5$ が4回発生しているが、影響がない。

c. 火山活動との関係

ここで、考える火山活動とは、阿蘇中岳第1火口の表面活動という意味に限定し、その活動現象と、微動との関係を、1971年から、時間経過に沿って、述べてみる。これは、先にも述べたが、微動の活動が、表面活動の消長を表現していることを改めて、述べることもある。

1971年；2月、3月は、火口底が全面赤熱化しており、火口孔より数10 m もの火炎が昇っていた。3月末より、火山灰の放出がはじまり、微動エネルギーが増大したが、5月からは、火山灰の放出がとまって、徐々に下降していく。5月、6月は、全面赤熱→降雨→湯だまり→乾燥→赤熱という process をくりかえした。7月から、この process の中に、土砂噴出が加わり、8月から火山灰の放出が激しくなってきた。9月上旬に、火口周辺に火山性地震が頻発してから、徐々に微動が増大し、火山灰放出も続いた。しかし、10月中旬から、火山灰の量も少なくなると、目だった現象はみられなくなった。**Fig. 7** で、特に注目される9月20日と10月上旬の極端な微動エネルギーの増大は、いずれも、多量の火山灰噴出によるものである。

1972年；火口底の赤熱は、前年夏以降みられなかったが、3月中旬に、再び認められるようになってきた。3月下旬より微動エネルギー level は、きわめて高くなり、近年にみられないほどに達し、5月下旬まで続い

た。この間の火口状態は、赤熱化しており、鳴動がきわめて強く、火炎が、火山灰と高温高圧の火山ガスとともに、火口孔から吹き出していた。5月27日朝から、微動エネルギーは、急激に増大し、28日に突然極端に減少してしまった。この急激な変動と直接結びつくような現象は、みあたらない。6月、7月は、梅雨期にあたり、前述の赤熱→降雨→湯だまり→土砂噴出→火山灰放出→乾燥→赤熱の process を何度となく繰り返した。特に、6月13日、25日、7月3日には、多量の火山灰放出があり、また、6月24日、7月6日には、土砂噴出が100 m 以上に達し、これらに対応して、微動エネルギーが増大している。7月下旬から、湯だまりが出来たままとなって、微動エネルギー level が下がった。8月15日の増大は、多量の火山灰の放出による。8月下旬には、断続的に微動が出現なくなるいわゆる微動停止現象が生じ、微動エネルギーは更に低下した。10月下旬から11月下旬までの微動エネルギー level の増大期は、火口孔から高温高圧の火山ガスの噴出とともに、きわめて強い鳴動が聞かれた。12月20日頃から、9月下旬以来3ヶ月ぶりに少量の火山灰の放出がみられた。

1973年；前年末からの少量の火山灰噴出は、3月中旬まで続き、3月下旬より、鳴動が大きくなるとともに、火山灰の放出がみられなくなった。4月、5月は、鳴動は更に強くなり、降雨期には、湯だまりが出来、土砂噴が生じ、時々人身大の噴石が飛ぶようになった。5月25日に、火口周辺で、火山性地震が頻発し、火山灰の放出が再びはじまり、微動エネルギーが急激に増大した。この増大と対応して、鳴動が弱くなり、6月15日頃より聞かれなくなった。DEA-1 が7月から故障し、欠測の日が続くが、8月1日に赤熱の噴石と多量の火山灰の放出があって、2日に火口周辺の火山性地震が頻発してから、極端に微動エネルギーが減少してしまった。6日から火口周辺で、きわめて小さい火山性地震が数多く発生したが、連日の驟雨のため、多量の灰砂が火口孔に流れ込み、火口孔が閉塞され、微動エネルギーは、低いままであった。19日から再び火口周辺の微小地震が1日に数100回以上発生しはじめ、微動エネルギーは、徐々に増大していった。以後、微小地震の発生回数は、段々と少なくなっていった。10月9日には、火口底に出来ていた湯だまりから、激しい土砂噴が生じ、火口孔が開口し、鳴動が聞かれるようになり、微動エネルギーが上昇しはじめ、11月上旬には、鳴動が一層強くなり、火山性地震が頻発した。

1971年からの3年間について、火口表面活動と微動エネルギーの変動を順次に見たわけであるが、微動エネルギーの level の変動が 10^{11} ergs/day から 10^{13} ergs/day のように大きく変わる。そして、エネルギーの level が大きい場合は、ほとんどの場合、火山灰の噴出がみられる。これは、火山内部からの地下エネルギーの放出が、激しい場合に当たっているのであろう。

4. お わ り に

DEA-1 の火山性微動エネルギーの連続観測の結果から、降雨、地震、火山活動と、微動エネルギー level の増減との関係を検討してみた結果、次のようなことがわかった。

今回、対象としたのは、阿蘇火山の微動としては、比較的短周期の微動に属する 3.0 Hz を中心としたものである。この微動が、降雨による影響をかなり受けることがわかった。これは、この微動の発生源が火口の極く浅い附近にあると判断してさしつかえないものであろう。また、火口孔より高温高圧の火山ガスとともに、火山灰の放出が生じる時は、必ず微動エネルギーの level も高いことから、微動の発生機構が考えられる。つまり、火口の火道内を通過する火山噴出物と火道との相互関係で発生するものであろう。しかし、この微動の発生の機構については、まだまだ研究が必要である。次に、地震との関係であるが、まだ観測資料も少ないこともあって、はっきりとした結論を下すことは、非常に危険である。今回の検討した期間内では、阿蘇カルデラ内外で、中央火口丘に比較的近い所に震源をもつ地震は、微動にかなりの影響を与えるが、日向灘、豊後水道などの地震で、比較的規模の大きなものでも、ほとんど無関係であることがわかった。

今回は、3.0 Hz 附近の微動と限定して考えてみたのであるが、今後は、もっと短周期の、あるいは長周期の微動についても、その出現様式をあきらかにしていくことも必要であろう。

本研究を行うにあたり、京大理学部のと田卓彦助教授から多くの御教示をいただいた。また、京大防災研究

所の加茂幸介教授からも多くの御助言をいただいた。観測にあたり、京大火山研究施設の職員の方々には、種々の点でお世話になった。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 佐々憲三：阿蘇火山爆発予知の問題，火山，第1集，第3巻，第2号，1937, pp. 125-143.
- 2) 和田卓彦・加茂幸介・須藤靖明：火山性微動の観測の数値化，火山，第2集，第15巻，第1号，1970, pp. 1-9.
- 3) 水上 武：霧島火山群の地震噴火活動と日向灘地震とは関係があるか？，火山，第2集，第13巻，第1号，1968, pp. 48（講演要旨）
- 4) 横山 泉：大地震によって誘発された噴火，北大地物研究報告，25, 1971, pp. 129-139.
- 5) 神沼克伊：地震火山活動の互関性，関東大地震50周年論文集，1973, pp. 185-197.
- 6) 和田卓彦・加茂幸介・須藤靖明：阿蘇外輪域に発生した群発地震活動，火山，第2集，第18巻，第1号，1973, pp. 19-31.