

1983 年三宅島噴火の熱的調査

鍵山恒臣*・宇平幸一**・山本博二**・辻 浩*・荒木卓次**
長田 昇****・小山悦郎*・竹田豊太郎****・渡部暉彦*****

(1984 年 12 月 11 日受理, 1984 年 9 月 27 日受付)

Geothermal Survey of the Eruption of the Volcano Miyake in 1983

Tsuneomi KAGIYAMA*, Kohichi UHIRA**, Hiroji YAMAMOTO**, Hiroshi TSUJI*,
Takuji ARAKI**, Noboru OSADA****, Etsuro KOYAMA*,
Toyotaro TAKEDA****, and Teruhiko WATANABE*****

The volcano Miyake is a volcanic island located at 200 km south of Tokyo. On October 3 in 1983, a fissure eruption took place at the southwestern flank after a quiescence of 21 years since 1962. Several kinds of thermal surveys were carried out before and after the eruption, and the following three items were examined.

1) Geothermal activity at the summit area before and after the eruption:

In general, a flank eruption is considered to be caused by a dike intrusion from the central conduit, which connects the summit crater and the magma reservoir at depth. The height of magma head in the conduit is expected to reflect the volcanic activity and the regional stress and to be elevated gradually associated with a supply of magma before the eruption. At the summit area, fumarolic and steaming activities continued discharging thermal energy along the rim of the old crater, which was buried by the lava flow and the scoria cone of the eruption of 1940. It is also known that the thermal activity increased from November, 1963, one year after the eruption of 1962. Therefore, a precursory and/or post eruptive thermal anomaly is expected to occur at the summit area.

2) Cooling of the eruption fissure: The present fissure is about 5 km long, and lava fountains took place at the northern part, while magmatophreatic explosions took place at the southern part. The fissure also intercepts the wall of old caldera. Cooling rates at those areas are expected to reflect the amount of heat source, which remains at shallow part after the eruption, and the difference of geological settings.

3) Thermal anomaly at the area between the northern tip of the eruption fissure and the summit: If the present fissure eruption was caused by a dike intrusion from the central conduit beneath the summit crater, magma or some high temperature matter must have existed and most possibly remains under those areas and thermal energy of those matter may be released through the subsurface cracks possibly created around them.

* 〒389-01 長野県軽井沢町長倉山, 東京大学地震研究所浅間火山観測所.
Asama Volcano Observatory, Karuizawa, Nagano 389-01, Japan.

** 〒100 東京都千代田区大手町 1-3-4, 気象庁地震火山業務課火山室.
Office of Volcanic Observations, Seismological and Volcanological Management Division,
Japan Meteorological Agency, Ote-machi 1-3-4, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan.

*** 〒100-11 東京都三宅島三宅村大字神着, 気象庁三宅島測候所.
Miyakejima Weather Station, Kamitsuki, Miyake-jima, Tokyo 100-11, Japan.

**** 〒113 東京都文京区弥生 1-1-1, 東京大学地震研究所.
Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113,
Japan.

***** 〒889-43 宮崎県えびの市大字末永 1489, 東京大学地震研究所霧島火山観測所.
Kirishima Volcano Observatory, Ebino, Miyazaki 889-43, Japan.

The results are as follows.

1) Geothermal activity of the summit area increased from 1963 to 1970, and turned to decrease since 1975. No precursory thermal anomaly was detected through the surveys before and after the eruption; at the end of the August in 1983, one month before the eruption, and on Oct., 6, 3 days after the eruption. The summit thermal activity began to increase about 10 days after the eruption and the steepest increase took place during one month after the end of October. Thermal energy release rate was estimated to be at the order of megawatt at the end of November and found to have increased as twice as that before the eruption. These facts are consistent with the results of apparent electrical resistivity surveys and chemical analysis of fumarolic gas. These facts suggest that a hydrothermal system supporting the summit thermal activity is located at shallow depth and the height of magma head was sufficiently deeper than that of the hydrothermal system just before the eruption.

2) Fumarolic temperature decreased rapidly at the northern tip of the eruption fissure and more and more gradually at the southern sites, while that of caldera wall decreased extremely rapidly. It is also indicated that the radius of crater near the caldera wall is significantly larger than that inside the caldera. These facts may reflect the difference of mechanical structure of volcanic body. The difference of cooling rates were not clear between the areas which caused lava fountains and magmatophreatic explosions.

3) Measurement of ground temperature at 70 cm depth was carried out repeatedly along the survey lines perpendicular to the fissure direction at the area between the summit and the northern tip of the eruption fissure. It was found that each profile has two peaks of temperature, and that thermal anomaly elongates about 130 m from the northern tip toward the summit.

1. はじめに

1983 年 10 月 3 日の三宅島噴火に際して、火山災害・噴火予知の社会的要請から活動状況の把握、今後の活動の推移の検討、将来の噴火活動予測のための基礎資料を得る事等を目的として各種の熱的調査を行った。これらの結果については、既に鍵山・他(1984)として報告してあるが、資料を解析していく過程において火山学的に見ても重要と思われる事実が明らかになってきた。三宅島の熱的状態は現在も変化しつつあり、まだ資料収集の段階にあるため解析も十分には進んでいないが、これまでに明らかになってきた概要を報告する。噴火時の火山の熱的状態については様々な興味を考えられるが、我々は以下に示す項目について検討を行った。

1) 三宅島火山山頂部(雄山)の地熱活動の噴火前後の挙動: 一般に山腹噴火はハワイの噴火などの類推から山頂火口下の火道から放射状にダイクが走り、山体斜面に達したものと解釈されており。(例えば NAKAMURA, 1977), 今回の三宅島火山の山腹噴火でも同様の事が起こったと期待される。また、同じ玄武岩質の伊豆大島三原山などでは、マグマだまりから山頂火口へと至る火道内にマグマが満たされており、マグマの頭位は火山活動の消長、あるいは周囲の応力状態を反映して昇降しているといった事も考えられている(YAMASHINA and NAKAMURA, 1978)。仮に三宅島

火山の噴火もこうした形態をとっているとすれば、地下のマグマは噴火前のある時期にかなり浅い部分にまで火道を上昇するはずであるから、山頂火口の地熱活動に何らかの熱的な前兆が現れている事も期待される。また、1940 年の噴火の例に見るように、山腹噴火の後に山頂噴火が発生したり、1962 年の噴火例のように山頂噴火は発生しなかったが山腹噴火から一年程経過した後に山頂部の地熱活動が活発化した例も知られている。この地熱活動域の拡大現象が山頂噴火の前兆であるか否か、否とすれば地熱活動活発化の原因は何かといった問題が未解決のまま残されており、これらの問題を検討する事は、マグマの地表近傍での挙動、あるいは、火山からの熱エネルギー放出のメカニズムを知る上で貴重な情報になる事が期待される。

2) 噴火地帯の温度の時間的推移: 噴火を行っている地点は、噴火時には 1000°C 以上の高温となり噴火後に冷却していくが、温度の低下速度は、噴火時の周囲の山体の加熱状況、地下に存在する熱源の規模と冷却過程の形態などに大きく依存する。今回の噴火地点は、三宅島中腹から南西に海底まで伸びており、噴火の形態も個々の火口が判別できない程に密に並んだ割れ目からほぼ線状に物質を噴出した地域、比較的孤立した火口の並ぶ地域、地下水や海水と接触してマグマ水蒸気爆発を起こした地域と様々な特徴を示している。こうした違いが、噴火後の冷却過程にどのような

影響を及ぼすかは、地下に残存する熱源について考える場合に重要な情報となろう。

3) 噴火割れ目の北端部の熱的構造: 三宅島火山の噴火が前述したように山頂火口下の火道から放射状に走るダイクによるものであるとすれば、割れ目北端と山頂とを結ぶ地帯には地表に現れていない割れ目と高温のマグマが存在するはずである。また、たとえ既にマグマが地下深部に逆流してしまったとしても、一時的に高温となった領域が存在するであろう。マグマによって供給された熱エネルギーは、これらの割れ目に拘束されながら地表に放出されていくはずである。このような冷却過程に関わる熱異常を検知できれば、山腹噴火は山頂火口下の火道から伸びたダイクによるものであるというモデルを熱的側面から検証する事

になるであろう。

三宅島の熱的調査は、噴火の約1ヶ月前にあたる1983年8月末から9月初めにかけて気象庁火山機動観測班が行っている他、1976年11月に気象庁火山機動観測班(気象庁観測部, 1977), 1980年9月(鍵山・他, 1982)と1982年11月に東大震研によって行われている。これらの観測の他、気象庁三宅島測候所は、雄山の地熱地帯について、年4回の定期観測を実施している。本報告では、これらの結果もあわせて、上述の3項目について検討する。

2. 噴火前後の雄山の挙動

三宅島山頂部(雄山)には、1940年の噴火前には3つの火口が東西に並んでいたが、このうち西端の上

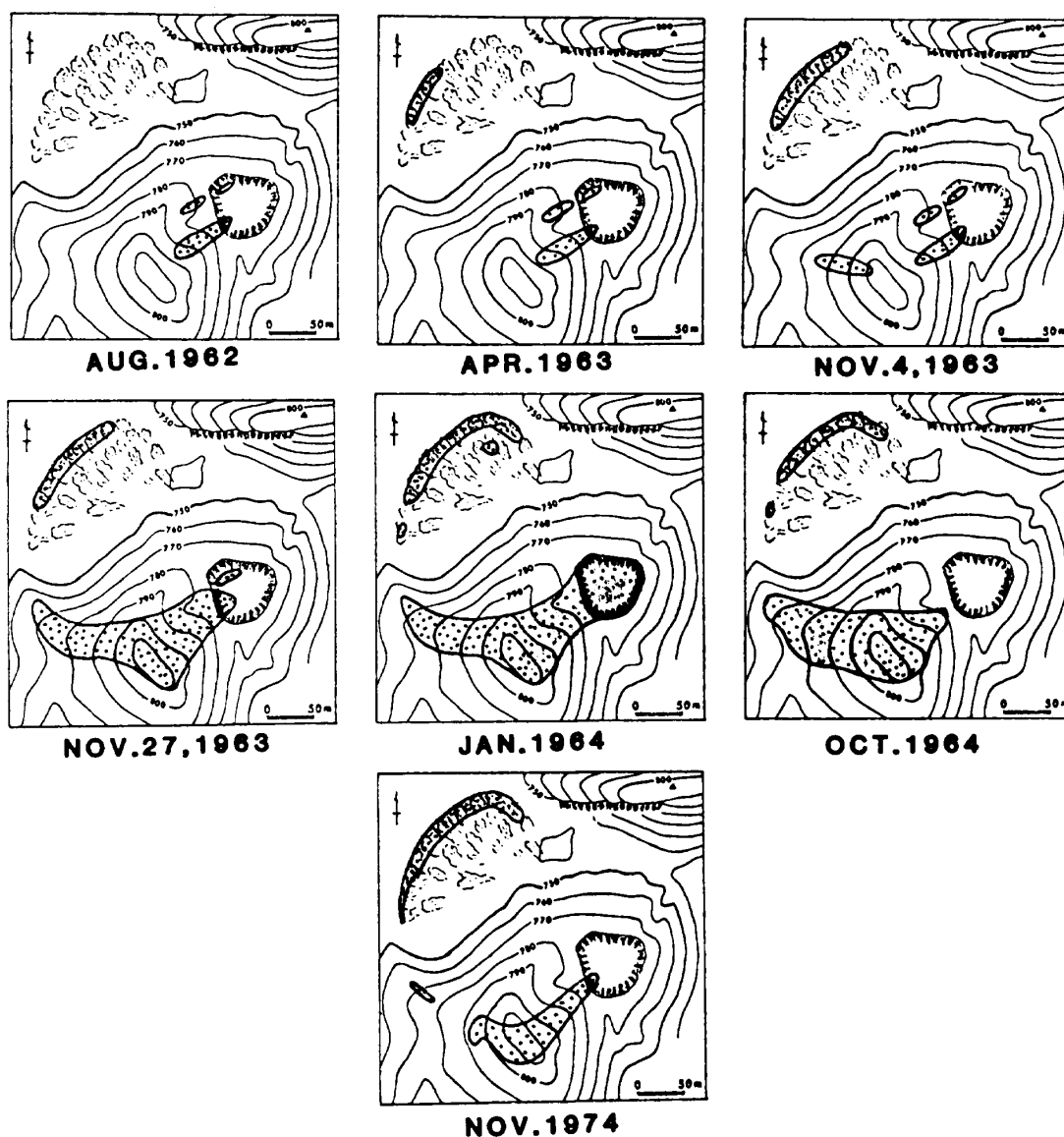


Fig. 1. Increase of geothermal activity of the summit area after the eruption of 1962 (after TANAKA and FURUTA, 1979).

段火口は、1940年の山頂噴火の際に火口南東部に生成された碎屑丘とその後の溶岩流によって埋められている (TSUYA, 1941). この地域には今回 (1983年) の噴火の前から地熱活動が知られており、Fig. 1に示すように、1962年の噴火の時までは1940年の噴火口の周辺に噴気が見られるだけであったのが、噴火から一年程経過した後に旧上段火口の火口縁に沿うように円弧状に活動域が拡大した事が知られている。この節では、同地域の地熱活動に今回の山腹噴火の前兆が現れていないか、噴火後の活動に変化は見られないかの2点に注目して解析を行った。以下にそれぞれの資料を示し、検討を加えよう。

2-1. 地中温度

気象庁三宅島測候所では、旧上段火口北西部の溶岩に埋められた部分の地熱異常を第1噴気地帯、1940年の碎屑丘斜面の地熱異常を第2噴気地帯と呼び、噴気温度および地中温度測定を実施している。この地域一帯の地熱活動は、溶岩に覆われた場所では岩塊の隙間から噴気が出ている状態、スコリアに覆われた場所では Steaming ground の状態となっているが、噴気は勢いが弱く、溶岩の隙間からかすかに噴気がでている状態である。そのため、外気の混入の程度によって測定される温度もばらついており、測定される温度も Steaming ground での地中温度よりも低くなっている。したがって本論の検討からは溶岩に覆われた場所での噴気温度は除外した。Fig. 2a, b, c は、1975年以降の No. 2, 10, 25 の各測定点における 50 cm 深地中温度の変化を例として示したものである。測定点の位置は Fig. 3 に示すように旧上段火口の中心を通る線上に並び、溶岩の末端 (旧火口の火口縁にほぼ一致) からそれぞれ 2, 10, 25 m の距離にある。火口縁の近くに位置する No. 2 の点では比較的高温を示し、また温度の低下傾向が明瞭に見られる。一方、火口縁からより離れた場合に位置する No. 25 では、同地域の熱異常のない平常温度に近い値を示し、かつ経年的な変化も見られない。ここには示さないが、その他の多くの測定点でも同様の傾向が見られる。これらのデータには気温の季節変化や降雨などの外的要因の影響が考えられるが、同地域のように地中における熱エネルギーの輸送が主に水蒸気の上昇による場所から熱伝導による場所へと移行する領域では、従来一般に行われてきたある基準点における地中温度の時間変化による補正は無意味であるので、以下に示すようにその影響の程度を検討する。各測定点における経年変化を最

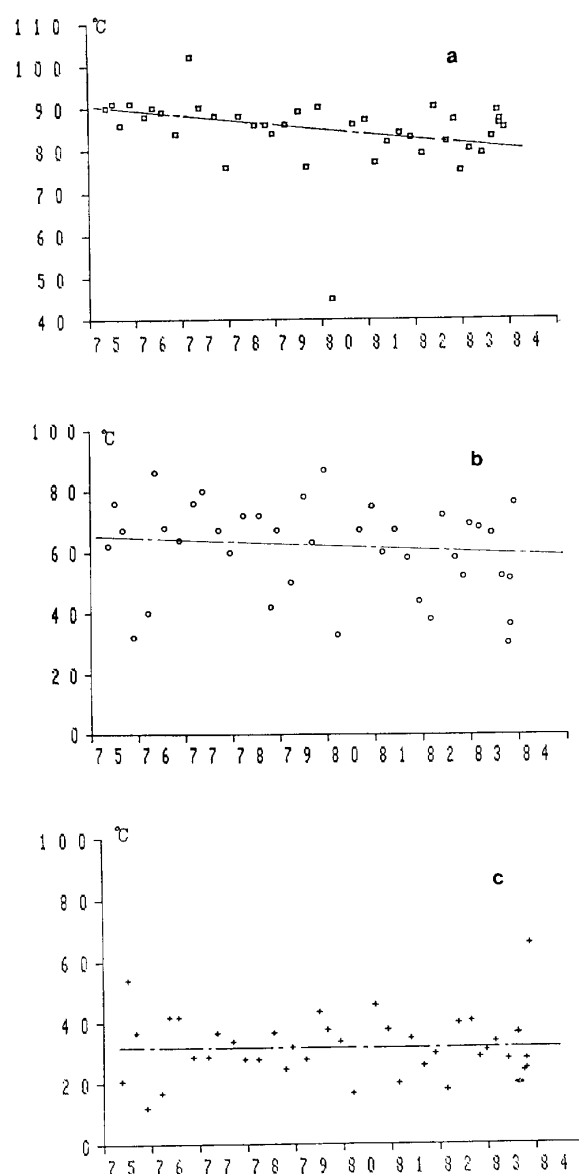


Fig. 2. Temporal variation of ground temperature at 50 cm depth. a: No. 2, b: No. 10, c: No. 25.

小自乗法で求めると、次式が得られる。

$$T_2 = -3.09 \times 10^{-3} \times N + 90.5, \sigma = 4.6^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$T_{10} = -1.73 \times 10^{-3} \times N + 66.2, \sigma = 13.3^\circ\text{C}, \quad (2)$$

$$T_{25} = +0.25 \times 10^{-3} \times N + 32.0, \sigma = 8.9^\circ\text{C}, \quad (3)$$

ここで T は各測定点における温度、 N は 1975 年 1 月 1 日からの日数である。なお、1980 年 3 月 17 日の測定値はほとんどの測定点において異常に低い値が記録されており測定器の不調等も考えられるのでここでの議論からは除外した。この経年変化からの温度差 ΔT には、季節変化や降雨などの外的要因、地熱活動

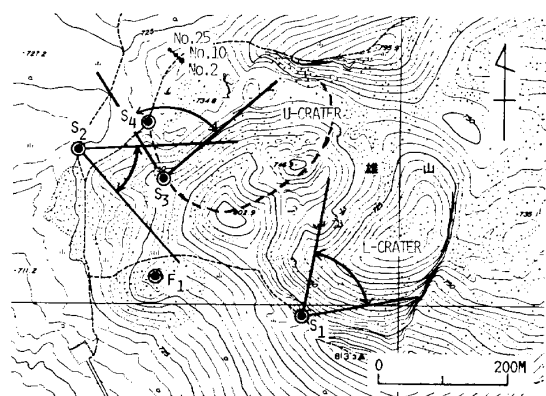


Fig. 3. Observation points for the present survey. S1~S4: observation points of infrared imageries of the summit area. F1: observation point of infrared imageries of the eruption fissure. No. 2~25: measuring points of ground temperature. Solid line indicates the survey line for the temperature profile.

の短期的な変動などが含まれていると考えられる。Fig. 4a, b, c は、 ΔT と気温 T_a との関係を示している。気温は、50 cm 深の地中温度である事を考慮して測定日を入れて前 5 日間の三宅島測候所における平均値を使用している。比較的高温で、水蒸気の上昇による熱エネルギー輸送が卓越する No. 2 では気温変化の影響はほとんどなく、同地域の平常温度に近いと思われる No. 25 では明瞭な関係が見られ、ほぼ予想した結果となる。中間的な温度である No. 10 では、ばらつきが大きい以下に示す処理を No. 2, No. 25 と同様に行う。この測定点でばらつきが大きいのは、後述するように測定点が Steaming ground の端に位置するためと思われる。各点において以下の式が得られた。

$$\Delta T_2 = 0.031 \times T_a - 0.55, \quad \sigma = 6.4^\circ\text{C}, \quad (4)$$

$$\Delta T_{10} = 0.32 \times T_a - 5.77, \quad \sigma = 13.1^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$\Delta T_{25} = 0.84 \times T_a - 15.09, \quad \sigma = 7.3^\circ\text{C}, \quad (6)$$

これらの関係式から 9 月の平均気温である 25°C を基準として気温変化を補正した残差 $\Delta T'$ と雨量との関係をとると、Fig. 5a, b, c に示すようになる。なお、雨量は、三宅島測候所における測定日を含めた前 5 日間の降水量としている。No. 2 では降雨の影響がほとんどない事がわかるが、No. 10, No. 25 では当初予想したような負の相関は確認されない。この事は、温度測定直前の降雨が必ずしも地中温度の低下には結びつかない事を示していると言えよう。この図に

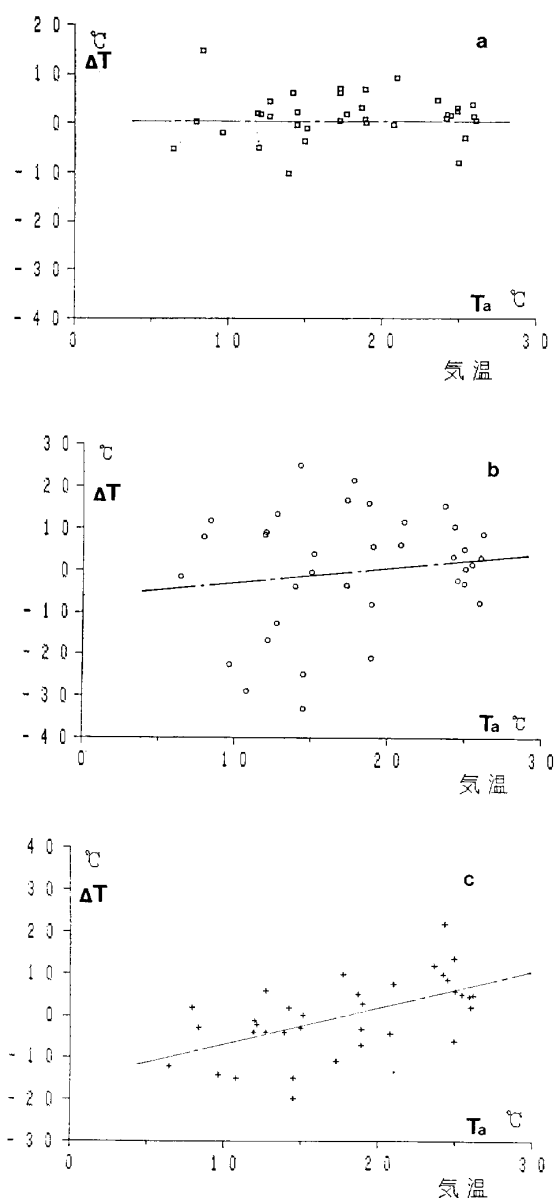


Fig. 4. Relations between air temperature and ground temperature. ΔT represents the residual value of ground temperature after reduction of the long term temporal variations formulated by (1), (2) and (3), respectively. Air temperature is the average of 5 days before the observation at Miyake-jima Weather Station. a: No. 2, b: No. 10, c: No. 25.

示されるデータのばらつきを支配する要因は他にあると思われるが、現段階では明らかではないので気温補正のみを施し以下の検討を行う。

i) 噴火 (1983 年) 前の長期的傾向

Fig. 6a, b, c に気温の変化を補正した結果を示す。補正された温度値から求められる各測定点における経年変化は、次式のようなになる。

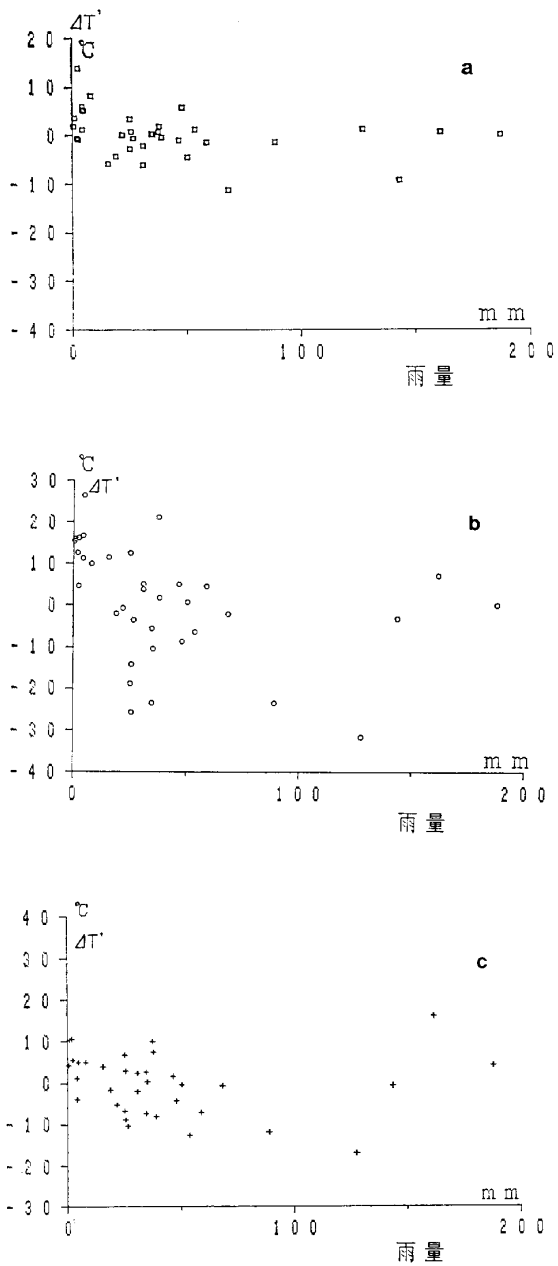


Fig. 5. Relations between ground temperature disturbance and precipitation. $\Delta T'_2$, $\Delta T'_{10}$ and $\Delta T'_{25}$ represent the residual values of ΔT_2 , ΔT_{10} and ΔT_{25} after reduction of the effect of air temperature variation formulated by (4), (5) and (6), respectively. Precipitation is the value for 5 days before the observation at Miyake-jima Weather Station. a: No. 2, b: No. 10, c: No. 25.

$$T_2 = -3.09 \times 10^{-3} \times N + 90.7, \quad \sigma = 4.6^\circ\text{C}, \quad (7)$$

$$T_{10} = -1.57 \times 10^{-3} \times N + 68.2, \quad \sigma = 13.1^\circ\text{C}, \quad (8)$$

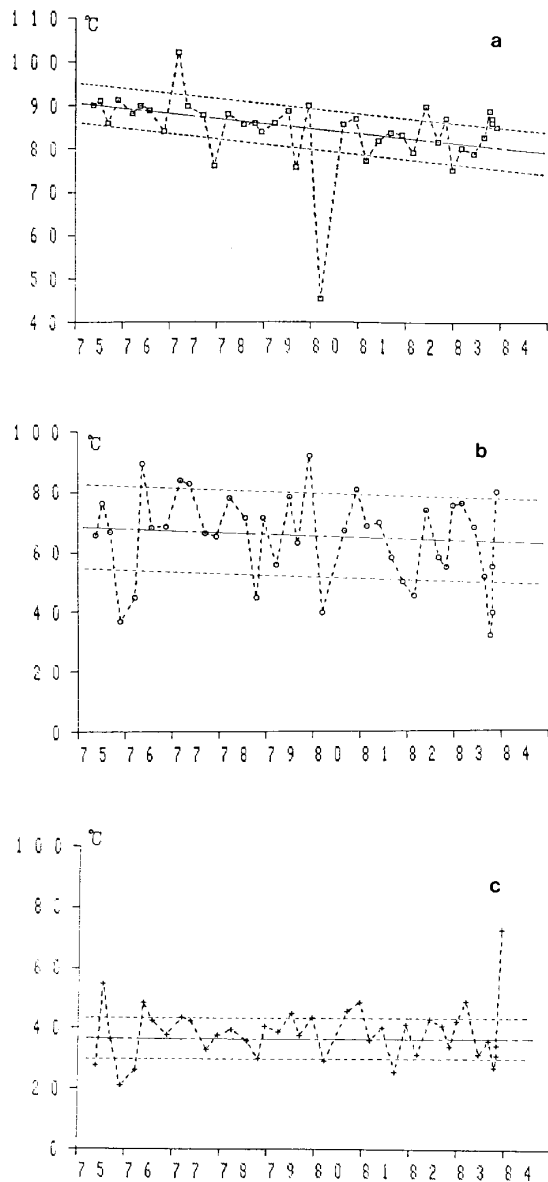


Fig. 6. Temporal variation of ground temperature corrected by the formulae (4)~(6); a: No. 2, b: No. 10, c: No. 25.

$$T_{25} = +0.66 \times 10^{-3} \times N + 37.2, \quad \sigma = 7.3^\circ\text{C}, \quad (9)$$

各点における経年変化は、No. 2 で $-1.1^\circ\text{C}/\text{yr}$ 、No. 10 で $-0.6^\circ\text{C}/\text{yr}$ となる。また、No. 25 では数値的には $+0.22^\circ\text{C}/\text{yr}$ (10 年に 2.2°C の上昇) と得られるが、測定精度上有意とは言えず経年変化は無視する。1975 年以前の地中温度については、田中・古田 (1979) によってまとめられており、第 1 噴気地帯、第 2 噴気地帯ともにその最高温度は 1963 年から 1969 年頃まで緩やかに上昇し続け、1970 年から 1975 年の間にほぼ一定に達している。これまでの測定結果では No. 2 の地中温度は同地域の最高温度、もしくは

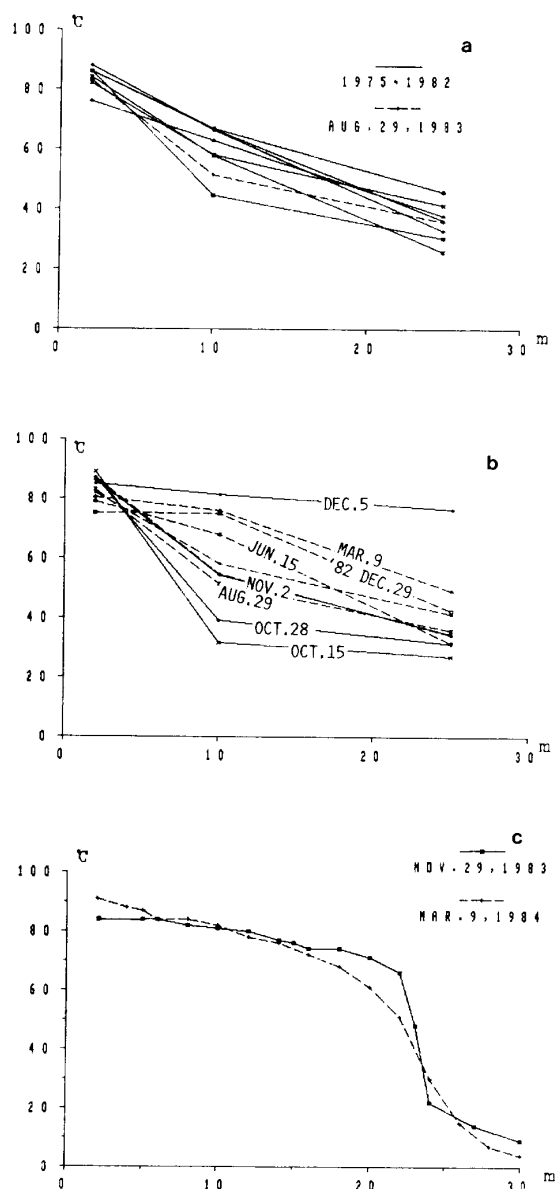


Fig. 7. Temperature profiles measured along the survey line from No. 2 to No. 25 in Fig. 3. a) Broken line: Aug. 29, 1983, solid lines: 1975~1982. b) Broken lines: before the eruption, solid lines: after the eruption. c) Solid line: Nov. 29, 1983, broken line: Mar. 9, 1984.

はそれに近い値となっている。したがって、雄山の地熱活動は、長期的にはこの時期をピークに以後下降する傾向に転じていた事がわかる。

ii) 噴火の前兆的現象

噴火の前兆的現象の有無に注目すると、噴火の約1ヶ月前の1983年8月29日、三宅島近海に群発地震が発生していた1982年12月29日などを含めて噴火前に行われた地中温度測定の結果は、全て長期的な

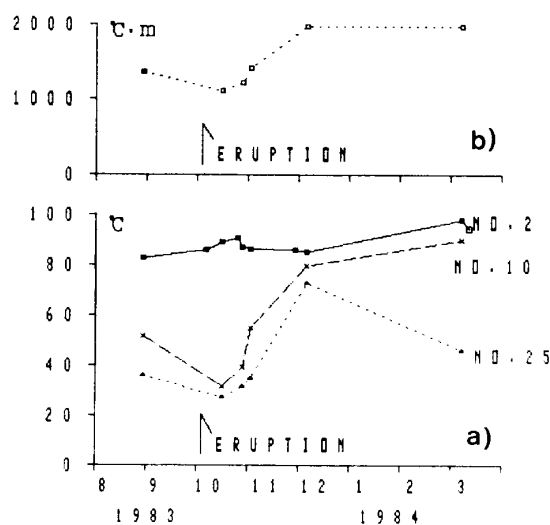


Fig. 8. Temporal variation of geothermal activity before and after the eruption. a; Ground temperature. b: Integrated value of temperature from the distance of 0 m to 25 m in Fig. 7.

冷却傾向から特にはずれてはいない。Fig. 7a, bは円弧状の地熱異常を垂直に横切る測線上の距離を横軸にしてNo. 2~No. 25のデータを示したものであるが、噴火前1年間の温度プロファイルは1975年以降1982年までとほぼ同じ領域を占めており、特に噴火前に活動が活発化している様子はない。また地中温度分布調査の結果も1976年の調査結果(気象庁観測部, 1977)と比較して最高温度、高温部の面積とも特に活発化している様子はなく、噴火の1ヶ月前までは異常がなかったと言えよう。これ以降噴火までの間に異常があったかどうかについては噴火直後のデータから類推せざるを得ない。Fig. 8aは噴火前後の短期間に注目して測定結果を示したものである。なお、噴火後は、地震研によっても噴気・地中温度測定が行われたが、そのうちNo. 2から2m程離れた溶岩流に対面する土手の微小噴気群の温度は、No. 2の地中温度とほぼ一致し、かつ地中温度分布調査(鍵山・他, 1984)でも付近一帯が一様な温度のSteaming groundとなっているので、この点のデータもNo. 2のデータとして加えている。噴火直後の10月6日の調査ではわずかな温度上昇はあるが、有意な上昇ではない。また、小坂・他(1984)は、雄山の噴気ガスの化学分析を1983年10月15日、12月9日および1984年2月25日に行なった結果、10月の分析結果がマグマ起源と思われるような特に異常なガスではなかったのに対して、12月の分析結果では H_2 などの成分が

含まれ、2月には異常成分の比率が急速に減少した事を明らかにしている。したがって、少なくとも10月15日までは地下のマグマの影響が雄山の地熱活動に現れたとは考えにくく、噴火直前あるいは噴火時には温度異常が現れたのでないかという期待に対しては否定的結論を出さざるを得ない。

iii) 噴火後の地熱活動の推移

一方、噴火後の地熱活動の推移に注目すると、Fig. 7b に示すように、10月15日には、噴火前のプロフィールに比べて熱異常域が著しく縮小し、その後10月末から11月にかけて活動が活発化し、噴火前の勢いを上回っている。それに対して、No. 2の地中温度はFig. 8a に示すように10月半ばに有意な温度上昇を示した後は11月に入るとむしろ低下を示し、地熱活動の面積的拡大に先行するような変化を示している。10月15日の測定前の10月11日頃に100mm程度の降雨があり、熱異常域の縮小にはこの影響も考えられるが、Fig. 5 に示すように雨量と温度低下とは必ずしも対応していないのでこの原因は別に検討したい。11月以降の変化を見るために、1983年11月29日と1984年3月9日には細かいプロフィール(Fig. 7c)を得たが、それによると地熱異常の面積的ひろがりほとんど変化していないが、活動の中心部(No. 2付近)において更に温度が上昇している。Fig. 8aを見ると、3月上旬には再び低下が見られる。こうした変化は、地熱活動が単調に増大しているのではなく、活動が波状的に活発化しその影響がしだいに周囲におよぶといった変動をしている事を示すものかもしれない。地熱活動の推移を量的に見るためにFig. 7で0mから25mまでの温度曲線によって囲まれた部分の面積を計算すると、Fig. 8b に示すように、

地熱活動は10月末から11月末にかけて著しく活発化し、その後の拡大は鈍化している事がわかる。なお、プロフィールには、活動の中心から周辺に向かって温度が70°C程度から平常温度へと急激に低下する特徴があり、地熱活動に明瞭な境界がある事がわかる。したがって、境界付近の測定点では活動のわずかな変化に対しても測定値が大きく変動する事になる。

2-2. 地上赤外映像

地上からの赤外映像は、噴火前の1982年11月18日と噴火後の1983年10月25日および11月27日に得られている。使用した赤外カメラは、松下技研製のパナサーモMG-IR12(検出波長8~14 μ)で、噴火前は撮像範囲18°噴火後は36°である。分解能が異なるため測定される最高温度等は比較する事が難しいが異常の分布状況等の比較は可能である。ここでは、1982年11月と1983年11月の映像について解析する。

a. 第1噴気地帯(1982年11月18日)

Fig. 3のS3点に赤外カメラを設置し、午前8時45分から9時30分にかけてFig. 9に示す旧上段火口周辺の赤外映像を撮像した。当日は、晴れ時々曇りの天気で日射が対象地にあたり始めていた。一般に表面温度は、日射の当たり具合、植生の状況等によりそれぞれ違った温度となる。したがって、映像を、その地表面の状況が一樣と思われる小区域に分割し、それぞれの小区域について熱異常のない標準的な温度 T_0 およびその標準偏差 σT を求める事で $T_A = T_0 + 3\sigma T$ よりも高温の部分を熱異常として検出する(鍵山・他, 1979)。統計処理によって検知された熱異常は、旧上段火口の西端の通称サウナと呼ばれる一帯(図中A)

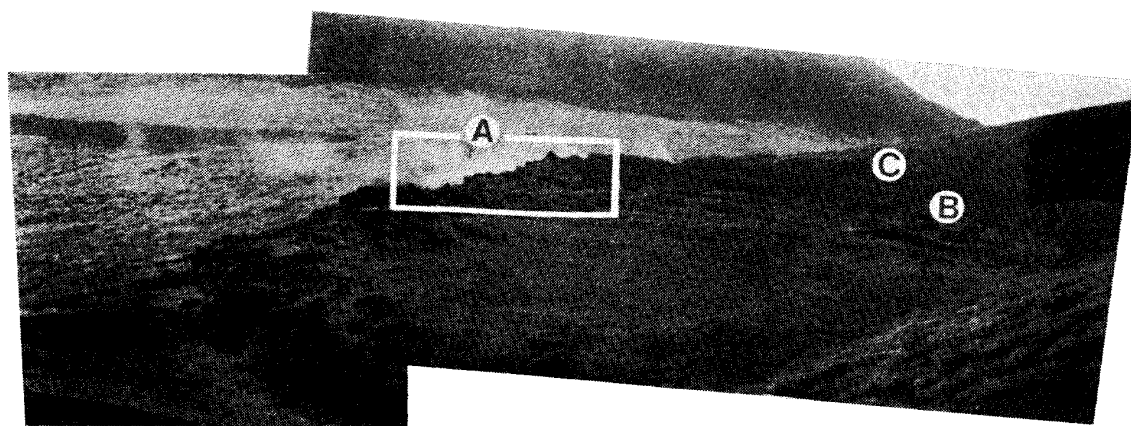


Fig. 9. Geothermal area of the buried U-Crater viewed from point S3 in Fig. 3.

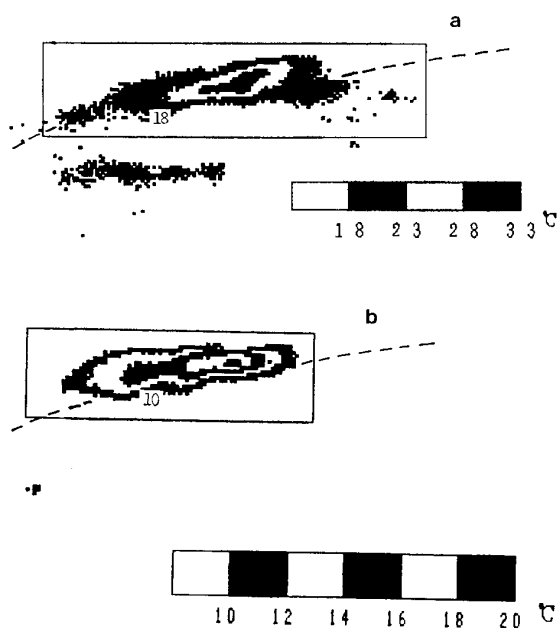


Fig. 10. Surface temperature distribution around the anomaly "A" in Fig. 9. a: Nov. 18, 1982, b: Nov. 27, 1983.

と旧上段火口の北端 (図中B) の2ヶ所である。図のAからBにかけては実際にはリング状に噴気が続いているが (図1参照), これらは溶岩岩塊の陰になっている。したがって, この測定点からの映像の解析は, 陰になっていない部分における地熱活動に注目している事になる。Fig. 10a は, サウナ周辺の温度分布で図中の矩形は Fig. 9 の矩形にほぼ対応している。スコリアおよび溶岩の露出する部分の標準的な温度は, 14.7°C , 標準偏差 σT は 1.08°C と求められるので熱異常は, 18.0°C 以上の部分と思われる。矩形内の領域について表面温度の面積頻度分布を調べると, 最高温度は, 31°C , 熱異常の面積は, 映像上の画素数にして 1218 画素, 赤外カメラからの距離と角度を考慮すると約 850 m^2 となる。熱収支法 (SEKIOKA, 1983) を適用して得られる熱エネルギー放出率は, 0.19 MW と推定される。

b. 第1噴気地帯 (1983年11月27日)

前項と同様, Fig. 3 のS3点に赤外カメラを設置し, 午前11時38分から11時55分にかけて撮像した。当日は曇天の好条件であった。統計処理によって検知された熱異常は, 前回の旧上段火口西端部および北端部に加えて図のCで示す地点にわずかな異常が確認された。西端部の温度分布を Fig. 10b に示す。熱異常のない標準的な表面温度 T_0 は 8.0°C , σT は 0.65°C となり, 熱異常は 10.0°C 以上の部分とな

る。矩形内の領域について表面温度の面積頻度分布を調べると, 最高温度は 19°C , 熱異常の面積は 774 画素, 2200 m^2 となる。ただし, この時の測定は好条件に恵まれているため (σT が小), より低いレベルの熱異常まで検出している事を考慮する必要がある。前回 (1982年) の結果と同じ $T_0 + 3.2^{\circ}\text{C}$ である 11.2°C 以上の面積を比較すると 632 画素, 1770 m^2 となる。熱収支法を適用して得られる熱エネルギー放出率は, 0.37 MW と推定され, 噴火前に比べ約2倍になっている。

c. 第2噴気地帯 (1983年11月27日)

Fig. 3 のS2点に赤外カメラを設置し, 午後0時10分から0時22分にかけて碎屑丘の西側斜面の赤外映像を撮像した。測定時は曇天の好条件であった。統計処理によって検知された熱異常は, Fig. 11a, b に示すように碎屑丘斜面に2ヶ所である。この熱異常の左下にもう1ヶ所熱異常が存在するがこの映像では斜面の陰となっている。 T_0 および σT は, 映像の右 (やや南寄り斜面) と左 (北寄り斜面) でわずかな日



Fig. 11a. Geothermal area of the western flank of the 1940's scoria cone viewed from point S2 in Fig. 3.

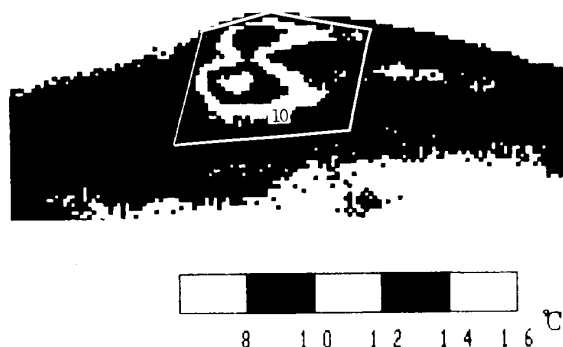


Fig. 11b. Surface temperature distribution of the western flank of the 1940's scoria cone measured on Nov. 27, 1983.

射の状態の違いのために異なっており、右側では $T_0 = 8.9^\circ\text{C}$, $\sigma T = 0.49^\circ\text{C}$, $T_A = 10.4^\circ\text{C}$, 左側で $T_0 = 8.7^\circ\text{C}$, $\sigma T = 0.29^\circ\text{C}$, $T_A = 9.6^\circ\text{C}$ とわずかであるが

南側で熱異常検出限界温度が高い。したがって、Fig. 11b の 10°C 以上の部分のうち、右側の異常はみかけのものである。実線で囲まれた部分については、 10°C

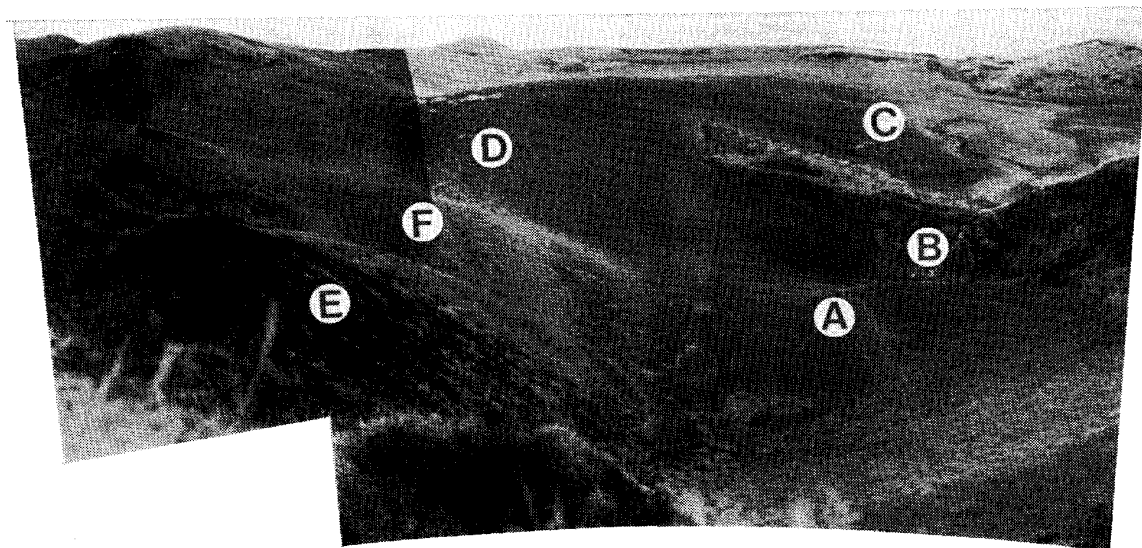


Fig. 12. View of L-Crater and the eastern part of the caldera floor from S1 in Fig. 3.

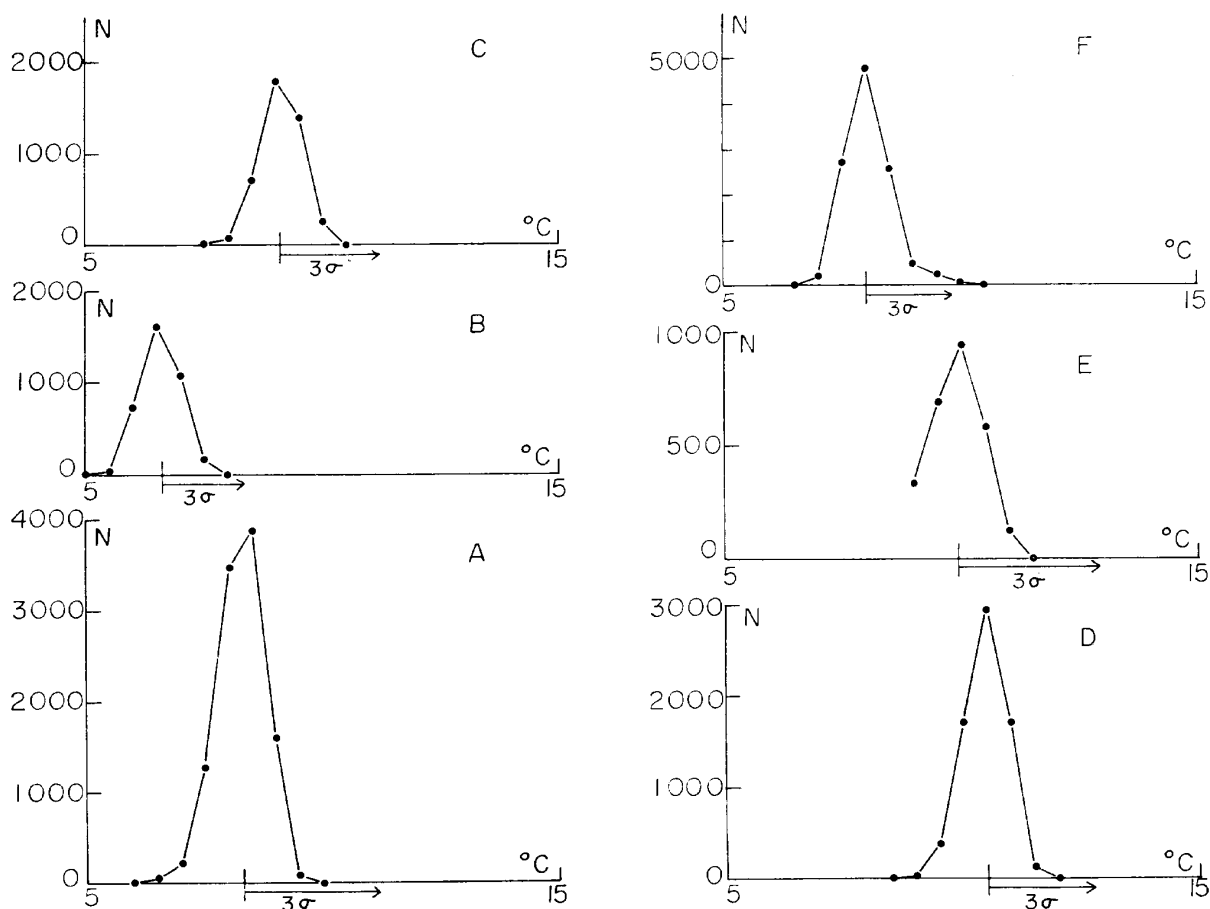


Fig. 13. Frequency of temperature for each part of the ground surface presented in Fig. 12.

以上の部分は熱異常と考えられ、面積頻度を調べると最高温度は上の異常が 13.0°C 、下の異常が 15.5°C 、熱異常の面積は映像上では 552 画素となる。この区域は、撮像を行うのに他に適した場所がなく、対象を見上げる形で測定を行うため、地表面を低角度で撮像している。したがって、面積および熱エネルギー放出率の推定そのものに無理があるが、試みに計算すると、熱異常の面積は 1000 m^2 、熱エネルギー放出率は、 0.1 MW 程度となる。

d. 山頂火口東部 (1983 年 11 月 27 日)

Fig. 3 の S 1 点に赤外カメラを設置し、午前 10 時 30 分から 10 時 39 分にかけて Fig. 12 に示すように下段 (大穴) 火口 (A) からカルデラ北東部 (C) にかけて赤外映像を撮像した。測定時は曇天の好条件であった。Fig. 12 の各区域ごとに面積頻度を調べると、Fig. 13 のように誤差の範囲に全表面が入る事になり、熱異常は検出されない。この事は前述の熱異常域の拡大が少なくともこの時点までは山頂火口東部にはおこなっていない事を示している。

2-3. 噴気による熱エネルギー放出率

第 1 噴気地帯の噴気活動は、噴煙を形成しているため、前項の地表面温度からの熱エネルギー放出率の推定値には、その寄与は含まれていない。この一帯の噴気は、噴出口を特定する事が困難で従来の水蒸気密度等を直接測定する方法は適用する事ができない。一般に噴気は噴出直後に一旦水蒸気が凝縮し、上昇するにつれて周囲の空気と混合する事によりしだいに液滴が蒸発していく。この液滴が消滅する領域では、気塊中の水蒸気はほぼ飽和状態にある。この高さにおける気塊の上昇速度を $V\text{ m/sec}$ 、断面積を $S\text{ m}^2$ とすると、通過する空気の体積は $SV\text{ m}^3/\text{sec}$ となる。気塊の温度 (周囲の気温よりもわずかに高い程度であるのでここでは気温で近似する) に対応する飽和水蒸気圧を $ew\text{ mmHg}$ とすれば、この空気塊に含まれる水蒸気量 n モルは、

$$n = (ew/760) \cdot SV/RT, \quad (10)$$

で表される。ここで R 、 T は気体定数および絶対温度である。この水蒸気は、周囲の空気の水蒸気圧を ew' とすれば、 $n(ew'/ew)$ は周囲の空気起源、残りは噴気起源の水蒸気となる。ただし、噴気によってもたらされる空気の体積等は無視している。

1983 年 11 月 29 日に目視で測定した結果では、 $S=5\text{ m} \times 100\text{ m}$ 、 $V=1\text{ m/sec}$ 程度であり、気温 8°C 、湿度 62% であった。これらの結果から水蒸気の放出

率は、 1.6 kg/sec と計算される。噴気の平均的な温度は 80°C 程度であるので、熱エネルギーの放出率は約 4 MW と計算される。ただし、上昇速度や噴気の断面積の推定値に含まれる誤差を考慮すると、この地域からの熱エネルギー放出率が数 MW のオーダーである事を示すと考えるべきであろう。

2-4. 雄山の地熱活動の推移とその機構

以上示してきた結果から雄山の地熱活動は、1975 年に降下降する傾向にあり、噴火前に熱的異常が現れた可能性は低い。また、噴火後は 10 月末から 11 月末にかけて急激に活発化し、それ以降は緩やかな増大になっている。活動域の拡大の範囲は、旧上段火口に限られ、その西端 (サウナ周辺) での熱的拡大が旧上段火口全体においても同様に起こっているとすれば、熱エネルギー放出率は噴火の前後でおよそ 2 倍程度に増大した事になる。

こうした雄山の挙動には、地熱活動が噴火前に活発化せず、噴火後に活発化した事に特徴があると言えよう。これは、例えば浅間火山が 1982 年から 1983 年にかけて 3 回の噴火を行った期間に、 SO_2 の放出率がその前後に比べて増大した例 (九大理・東大震研, 1984)、あるいは、1926 年および 1962 年の十勝火山の噴火前に見られた熱的および火山ガスの異常の例 (北海道防災会議, 1971) などとは際だった対照を示している。一方、山腹噴火については一般に次のようなイメージが持たれているであろう。すなわち、地下深部からのマグマの供給とともに山体が徐々に膨み、マグマの頭位も上昇する (山体が膨む事なく地下深部からいきなり噴火する事はハワイにおける傾斜観測の結果などから考えにくいであろう)。この間の比較的ゆっくりとした (火山および観測系を総合した応答時間に比較して) 頭位の上昇の後に、ダイクが急激に成長し噴火を開始する。その際地震も群発する。

一方、非噴火時の地熱活動の熱源は、明らかでない事が多いが、たとえば九重火山 (江原・他, 1981) や箱根火山 (湯原, 1968; OKI and HIRANO, 1974) のように、地下のマグマだまり (深さ 10 km 程度) から分離した高温のガス、あるいはマグマ柱からのガスなどが一例として考えられる。しかし、三宅島火山の雄山の地熱活動の場合には次のような理由により適合しない。

- 1) 直接マグマだまりを熱源とするのであれば、非噴火時の噴気ガスにもマグマに起因する成分が含まれているはずであるが、そのような事はな

い。

- 2) 同様に、噴火の前にマグマの活動が活発化する、あるいは地下深部からマグマだまりにマグマが供給されていた事に伴い噴火の前兆として地熱活動の活発化が観測されるはずであるが、観測されなかった。

したがって、三宅島火山の場合には、噴火前に継続していた雄山の地熱活動の熱源を直接マグマだまり、あるいは火道のマグマ柱に求める事はできない。

こうした熱的観測からの要請に対応していくつかの興味ある事実が電磁気学的手法により明らかにされた。行武・他 (1982) は VLF および ELF による電気比抵抗測定を行い、地熱地帯の直下 100 m から 600 m (海拔 600 m から 100 m) 付近に低抵抗層の存在を明らかにした。歌田・他 (1984, 1985) は噴火後、電気比抵抗の再測および測定点の増設を行い、地熱地帯直下に見られる低抵抗層がカルデラ内に広く存在するのではなく、旧上段火口直下の限られた領域に局在する事、噴火前の 1980 年 10 月と噴火後の 1983 年 11 月とを比較して噴火前に雄山の地熱地帯の浅部に限られていた低抵抗の領域が噴火後には深部にまで続くようになり、あたかも熱水系が地下深部とつながっているような結果を得ている。また、1984 年 2 月の測定ではこの低抵抗の領域は更に浅い部分に拡大している事も明らかにされた。これらの事実は、地表において観測された地熱活動の活発化と時間的にも空間的にも調和的である。

このような地熱活動の拡大現象は、全磁力の観測結果ではこの領域が 1000°C 程度の高温になったとは考えにくく (中川・他, 1984)、地震の発生状況 (活動が低調である事や、地震により励起されたマグマ柱の振動を思わせる波形が噴火後しだいに減っていった) なども合わせて考えると、噴火後更にマグマが上昇してきたとは思われない。むしろマグマは噴火後深部に逆流してしまい、比較的浅い部分に残っているマグマ、あるいはマグマによって高温になった周囲の山体の熱が地下水系との熱交換によって多量の水蒸気を生成したために起こったものと推定される。このような過程が噴火のたびに繰り返されているとすれば、噴火前に旧上段火口直下に見られた低抵抗の領域がそれまでの非噴火時の熱エネルギー放出を保持する熱水系であったと考えられる。

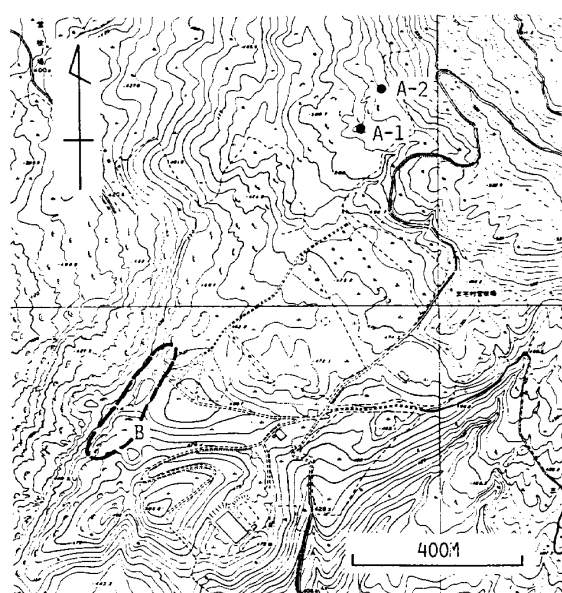
このような立場に立てば、噴火の前兆として雄山の地熱活動が活発化しなかった事は次のように説明する

事が可能である。マグマが地下深部から徐々にマグマだまりに供給されている時期にマグマ柱の頭位がこの熱水系の底部に達したならば、山頂の地熱活動は活発化するはずである。実際にはそのような事は起こらなかったから、マグマの頭位は噴火前の段階において、この層よりも十分に深いレベルにあった。その後群発地震を伴いながら急激にダイクを形成して噴火に至った。この際、マグマが一旦火道を垂直に上昇した後水平方向にダイクを形成したか、あるいは斜め上方にダイクを形成したかについては知り得ないが、今回の噴火の最高地点は海拔 500 m であるから、少なくとも数 100 m は上昇しているであろう。また、マグマから分離したガスによる熱エネルギーの供給を考慮すれば、この高度差は更に大きくなると思われる。

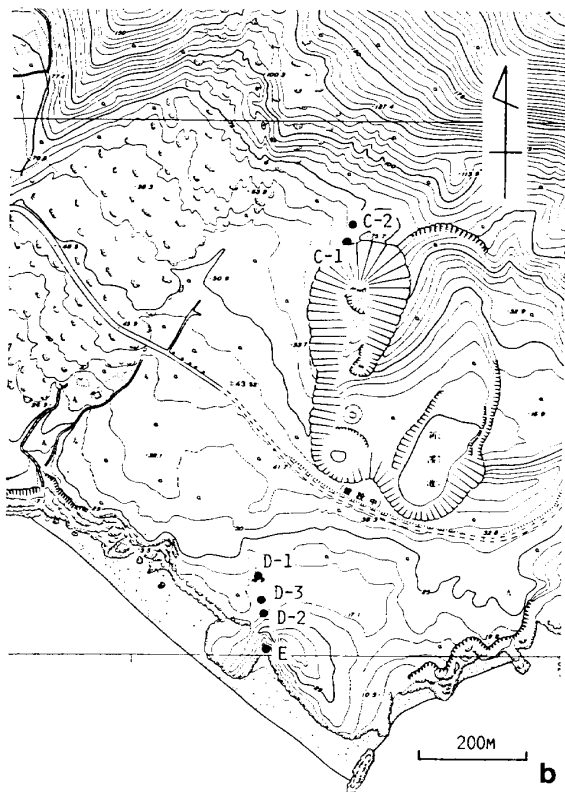
こうした考えは、有珠火山の 1977 年の噴火の際に昭和新山の熱的活動に変化がなかった事 (北大理・東大震研, 1978) にも適応し得るものかものかもしれない。また、浅間火山や十勝火山では、非噴火時の熱エネルギー放出を保持する熱源が地下のマグマと深く関わりあっている事を示すものかもしれない。

3. 噴火地帯の冷却

Fig. 14a, b に示す地点で熱電対温度計による噴気温度測定を実施した。Fig. 15 は、その結果を割れ目の北端部 (A)、七島展望台付近 (B)、水蒸気爆発を行った地域 (C, D) 等に分けて示したものである。割れ目の北端の冷却は比較的早いものに対して、七島展望台付近は噴火後 2 ヶ月でも 800°C 以上を維持している。こうした違いは、歌田・他 (1984) の VLF による電気比抵抗の繰り返し測定でも見られ、噴気温度の低下に地域性が見られるようである。こうした興味から、1984 年 3 月に噴火割れ目を縦断する温度測定を実施した。Fig. 16 は、1983 年 10 月末、11 月末および 1984 年 3 月半ばにおける噴気温度を雄山上段火口からの距離で示したものである。割れ目の北端の冷却が比較的早く、南に向かって冷却速度が系統的に遅くなっているようである (1~2 km)。更に古期カルデラの壁 (2.5 km 付近) に近づくと、再び冷却が早くなる事がわかる。2.7 km 付近は古期カルデラの外壁にあたり、比較的孤立した火口が並んでいるが、この地域は 1983 年 10 月 7 日の空中赤外映像でもほとんど高温を示さず噴火直後から低温であったことがわかる。大島 (1984) は、古期カルデラの外では内に比べて今回の噴火により生成された火口の直径が大きい事



a



b

Fig. 14. Measuring points of fumarolic temperature. a: Northern part, b: Southern part.

を示しており、これらの事実は、カルデラ壁において割れ目の生成が物理的に困難であった事を反映したものである。

一方、水蒸気爆発を行った新霽・新鼻地区の冷却は、比較的遅く、また新霽と新鼻とを比較した場合には、新鼻の方がより海水の影響を受けると思われる

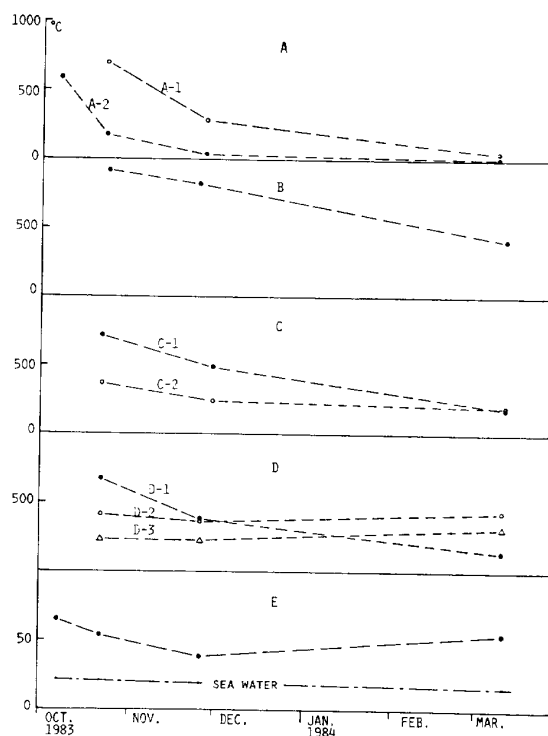


Fig. 15. Temporal variation of fumarolic temperature. A: Northern tip of the eruption fissure. B: Central part of the eruption fissure at the old caldera floor. C: near to Shinmio Crater. D: Scoria cone of Nippana. E: Surface temperature of water filling the main vent of the scoria cone of Nippana. Temperature of the sea-water: nearest to point E.

が、その差は 1984 年 3 月の時点では明確ではない。なお、新鼻では 1984 年 3 月に 1983 年 11 月の測定値よりも高い値が測定された。噴気温度は測定地点の微妙な違いによって変わる事が多く D 点はそのためかもしれないが、E 点の測定値は赤外放射温度計による火孔の水面の温度であり、そのような理由は考えにくい。また、潮の干満の影響の疑いもあるので翌日別の時間帯に測定したが同様の結果が得られた。したがって、断定はできないが新鼻では温度上昇が起こった可能性もある。

4. 割れ目北端部の熱的挙動

噴火割れ目北端部には、大島 (1984) が記載するように碎屑丘 ACl およびその西に数個の火口が確認されるが、最も北側の火口 A1 よりも更に北側には、溶岩やスコリア等を噴出した形跡のない穴があり、腐食土が焼結しているのが観察される。この穴よりも山頂側には火口らしいものは見られない。この穴を噴火割

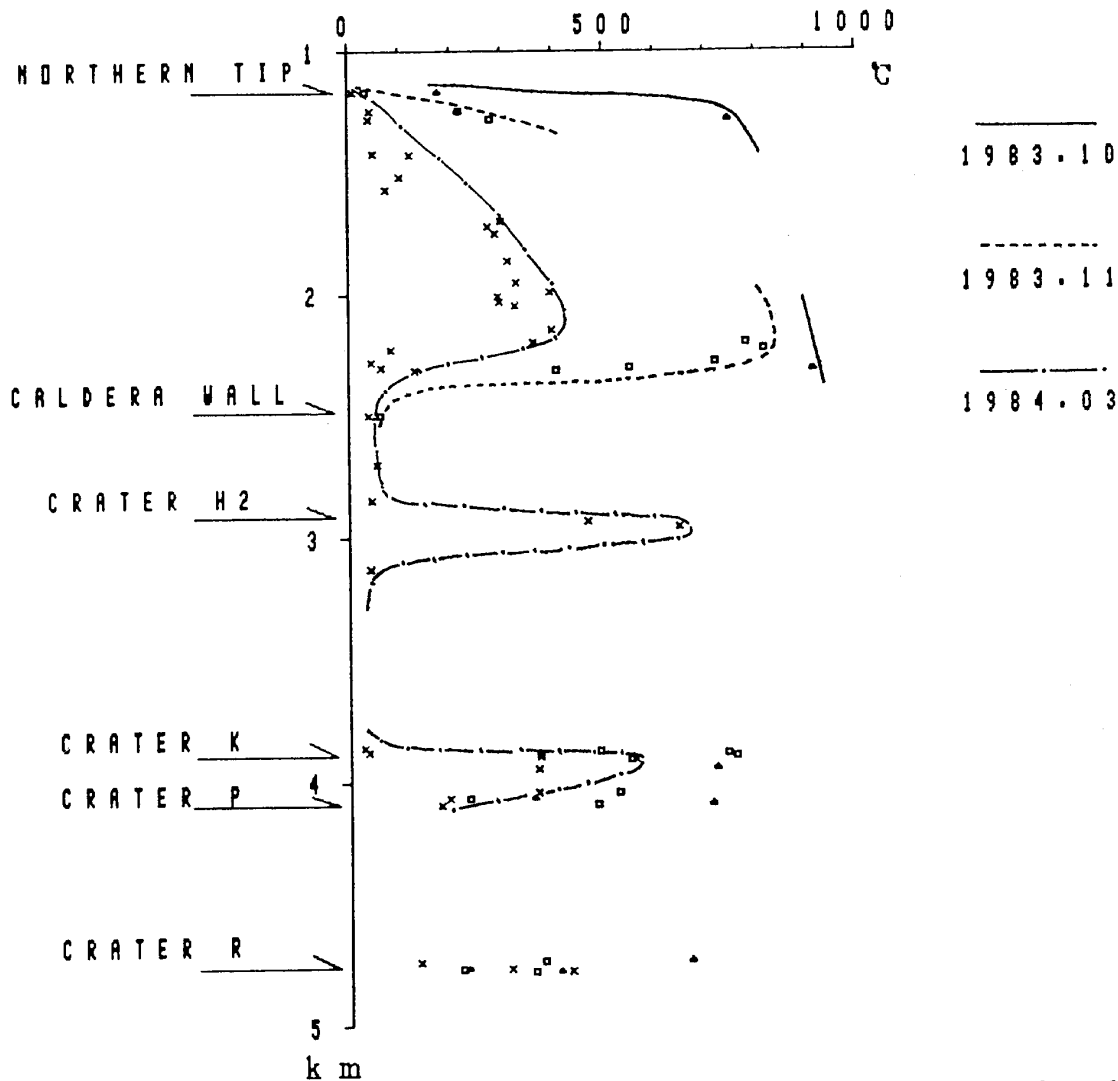


Fig. 16. Fumarolic temperature along the eruption fissure. Distance is measured from the summit crater.

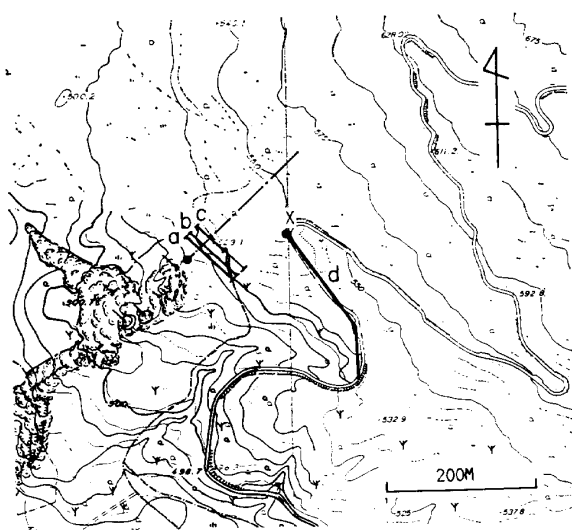


Fig. 17. Measuring lines for temperature profiles at the northern tip of the eruption fissure. Lines a, b, c are located at 20 m, 30 m and 41 m from the northern pit. A small crack was found at point X.

れ目の北端として、Fig. 17 に示すように山頂側 20 m, 30 m, 41 m の地点においてそれぞれ割れ目の延長方向に測線 a, b, c 更に山頂側の道路に測線 d を設け 70 cm 深地中温度の繰り返し測定を行った。その結果、Fig. 18 に示すように、1983 年 10 月末の測定では測線 a および b において熱異常が出ているが、測線 c にはほとんど異常はなく、さらに山頂側の測線 d には全く異常は見られなかった。1983 年 11 月末の測定では、測線 c においても熱異常が明瞭になっており、噴火の割れ目を山頂側に延長する方向に異常が拡大している事がわかる。1984 年 3 月の測定では、温度異常は低くなったが、それぞれの測線に 2 つのピークが明瞭になっており、地下に 2 本の割れ目が存在する事が予想される。また、測線 d は、1983 年 11 月には再測を行う事ができなかったが、1984 年 3 月には温度異常が確認され、2 つのピークも明瞭であ

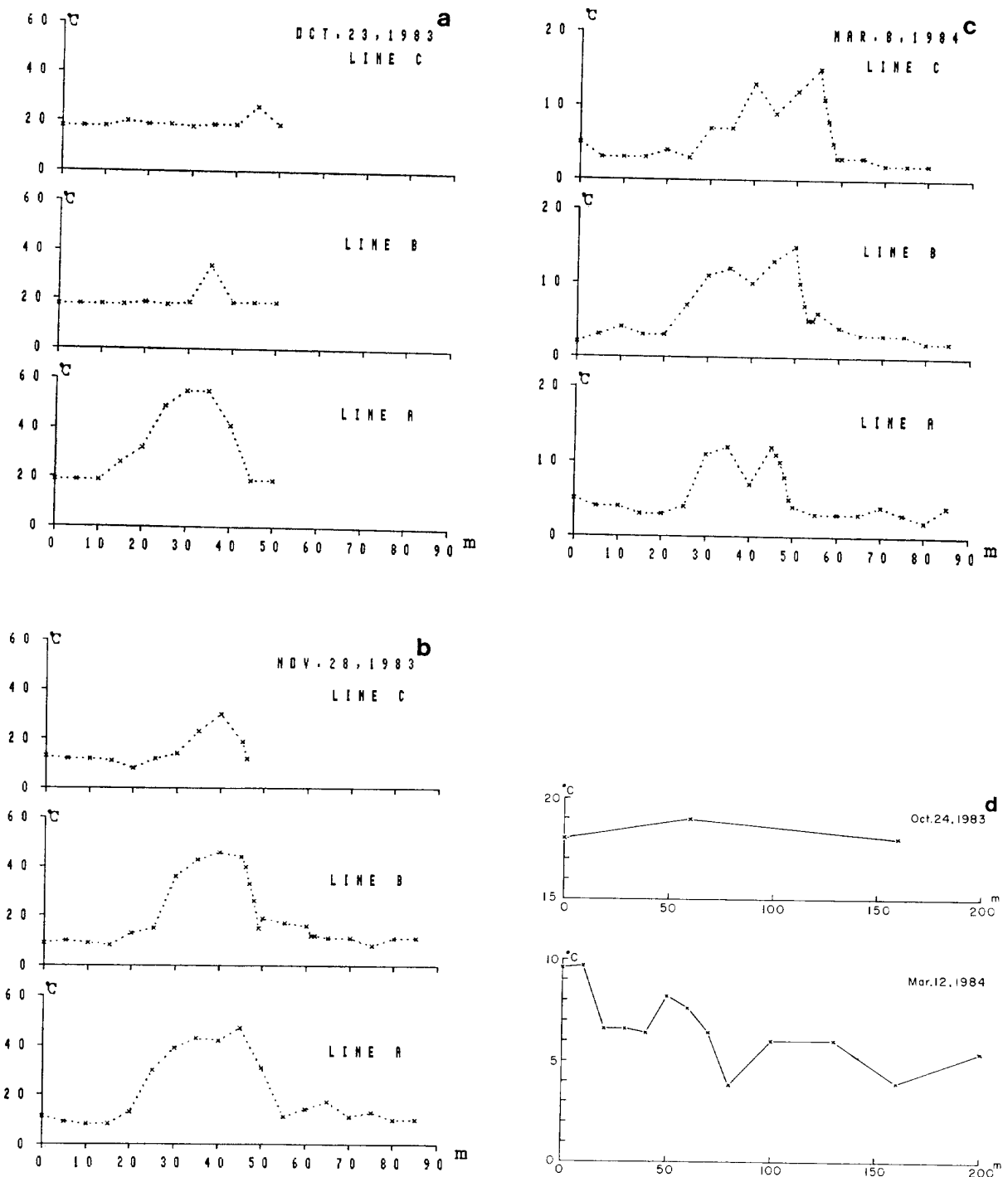


Fig. 18. Profiles of ground temperature at 70 cm depth along the a, b, c and d lines. Distances are measured from northwest to southeast. a: Oct. 23, 1983, b: Nov. 28, 1983, c: Mar. 8, 1984, d: line d.

る。なお、西側のピークの地点 (Fig. 17 の X 点) には、Fig. 19 に示すような亀裂がアスファルト道路に見られた。この亀裂が噴火時に生成されたものかどうか興味あるところであるが、亀裂の位置、走行方向は、噴火の割れ目を雁行を伴いながら延長させていくと調和的であり、中村 (私信) は、この図を含めた数

枚の写真から噴火時に張力により生成された割れ目と判断している。測線 d の東側のピークの位置には特に亀裂らしいものは確認できないが、各測線の 2 つのピーク間の距離と割れ目北端からの距離との関係を見ると Fig. 20 に示すようにほぼ直線に乗る事から、それぞれのピークは割れ目の延長上にできる 2 本の亀裂を



Fig. 19. Crack observed at point X in Fig. 17; 2 cm wide and 2 m long. Photo was taken from the summit side. "T" represents a measuring point of ground temperature.

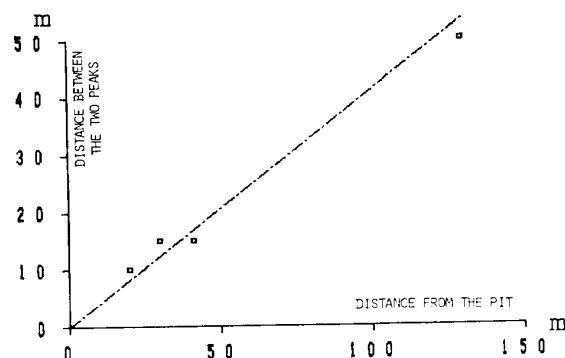


Fig. 20. Relation between the distance from the northern tip of the eruption fissure and the separation of the two peaks of the temperature profiles presented in Fig. 18.

示し、地上に現れてはいないが地下には東側の系列がこの地点を走っているものと思われる。こうした事実、割れ目の北端から山頂側に少なくとも百数十mは割れ目が存在し、この割れ目に沿って熱が輸送されている事を示すと思われる。これより山頂側には残念ながら測線を設定していないが、今後測定を行う予定である。

5. まとめ

1983 年三宅島噴火前後の熱的調査の結果、以下のような事が明らかになった。

1) 雄山の地熱活動は、長期的には 1970 年から 1975 年頃をピークに以後冷却していく傾向があり、この傾向は噴火の一ヶ月前にあたる 1983 年 9 月初めまで続いていた。また、噴火直後の 10 月 6 日の調査でも地熱活動は活発化していない。したがって、噴火前に熱的前兆が現れた可能性は低い。

2) 噴火後の雄山の地熱活動は、10 月半ば以降活発化し、特に 10 月末から 11 月末に最も急であった。こうした変化は、上昇したマグマの熱によって新たに水蒸気が多量に生成され、雄山の地熱活動を形成している熱水系に供給されたためと推定される。熱的活動の拡大は、旧上段火口周辺に限られる。

3) 今回の噴火前後の雄山の挙動は、雄山の地熱活動を支える熱源が比較的浅部にあり、地下のマグマは、浅部の熱水系に影響を及ぼす事なく噴火へと至った事を示唆している。今回の噴火に対して、噴火の前兆として地熱異常が報告された火山も、十勝岳 1962 年、秋田駒ヶ岳 1971 年、新潟焼山 1974 年などこれまでに例が多く、また他方、最近の霧島火山新燃岳のように地熱異常が噴火へ結びついていない例も多い。したがって、今後、熱的な異常と噴火との関係を地熱活動を支える熱水系の構造にまで立ち入って検討していく事が重要な課題となるであろう。

4) 噴火地帯の冷却は、割れ目の北端と古期カルデラの壁の部分で最も早く、その中間部で遅くなっており、噴火時の割れ目の活動、浅部の地下構造などを反映しているように見える。本報告では、噴気温度のデータを示したが、同地域の赤外映像について現在解析中であり、冷却の議論は別の機会に行いたい。

5) 噴火の割れ目の北端と山頂とを結ぶ地帯について割れ目を垂直に横切る方向に測線を設けて 70 cm 深地中温度を測定した。その結果、割れ目北端から山頂側に割れ目を 130 m 延長する地域で温度上昇が観測された。この事は、割れ目がマグマ噴出の北端から更に 100 数十 m 山頂側へ続いている事を示しているが、現段階ではこの事からすぐに割れ目が山頂直下まで続いているとは結論できない。この事を検証するには更に深い孔による温度測定を行う事が望まれるとともに、電気比抵抗測定等の手法を適用することが有効となるであろう。これらの測定によって、三宅島火山の山腹噴火の形態がより明らかにされると期待される。

S174 鍵山恒臣・宇平幸一・山本博二・辻 浩・荒木卓次・長田 昇・小山悦郎・竹田豊太郎・渡部暉彦

謝 辞

本調査を実施するにあたり、東京都三宅支庁、三宅村役場の関係者の方々には、施設・車等の利用その他について強力な御支援をいただいた。調査が円滑に行えた事については、三宅島、山田民蔵氏、東京大学地震研究所、宮崎務氏の御世話によるところが大きい。また、三宅島測候所の資料を提供していただいた気象庁火山室、三宅島測候所の方々の御厚意に感謝します。地震研究所、笹井洋一、歌田久司、中川一郎の各氏には著者の興味に賛同して頂き、双方の資料に基づき有益な議論をして頂いた。同地震研究所、下鶴大輔教授、中村一明助教授には本研究の全般にわたり、様々な形で御指導頂いた。以上の方々にお礼申し上げます。

引用文献

- 江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎 (1981): 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれから推定される熱水系と火山ガスの起源. 火山, 第2集, **26**, 35-56.
- 北海道防災会議 (1971): 十勝岳. 北海道における火山に関する研究報告書第1編.
- 北海道大学理学部・東京大学地震研究所 (1978): 1977年有珠山噴火の熱学的調査 (1977年8月~12月). 火山噴火予知連会報, **11**, 21-28.
- 鍵山恒臣・宇平幸一・渡部暉彦・増谷文雄・山口 勝 (1979): 霧島火山の地熱調査. 地震研究所彙報, **54**, 187-210.
- 鍵山恒臣・竹田豊太郎・長田 昇 (1982): 三宅島火山の熱的調査. 三宅島集中総合観測報告 (昭和55年), 55-73.
- 鍵山恒臣・渡部暉彦・辻 浩・小山悦郎・竹田豊太郎・宇平幸一・山本博二 (1984): 1983年三宅島噴火の熱的調査. 自然災害特別研究突発災害研究成果「昭和58年10月3日三宅島噴火および災害に関する調査研究」, 169-182.
- 気象庁観測部 (1977): 火山機動観測実施報告 13号, 27-53.
- 九州大学理学部島原火山観測所・東京大学地震研究所浅間火山観測所 (1984): 浅間火山1982-1983年噴火に関連した二酸化イオウ放出量の変化. 火山噴火予知連会報, **30**, 111-113.
- 中川一郎・笹井洋一・歌田久司・石川良宣・小山 茂・大地 洸・徳本哲男 (1984): 1983年10月三宅島噴火に関連した地磁気変化. 火山, 第2集, **29**, 三宅島噴火特集号, S101-S112.
- NAKAMURA, K. (1977): Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation—Principle and proposal. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* **2**, 1-16.
- OKI, Y. and HIRANO, T. (1974): Hydrothermal system and seismic activity of Hakone Volcano. *Proc. U.S.-Japan Coop. Sci. Seminar, The Utilization of Volcano Energy*, 13-40.
- 小坂丈子・平林順一・小沢竹二郎 (1984): 三宅島1983年噴火後の火山ガス組成. 自然災害特別研究突発災害研究成果「昭和58年10月3日三宅島噴火および災害に関する調査研究」, 209-215.
- 大島 治 (1984): 1984年10月3日三宅島噴火によって生じた火口列と溶岩分布. 自然災害特別研究突発災害研究成果「昭和58年10月3日三宅島噴火および災害に関する調査研究」, 199-206.
- SEKIOKA, M. (1983): Proposal of a convenient version of the heat balance technique estimating heat flux on geothermal and volcanic fields by means of infrared remote sensing. *Memoirs Defense Academy*, **23**, 95-103.
- 田中康裕・古田美佐夫 (1979): 三宅島. 気象研究所技術報告第2号, 主要活火山の地殻変動並びに地熱状態の調査研究, 182-186.
- TSUYA, H. (1941): The eruption of Miyake-sima, one of the Seven Izu Islands, in 1940, Part 1, Geological observation of the Miyake-sima eruption of 1940 (1) *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **19**, 260-294.
- 歌田久司・笹井洋一・中川一郎・小山 茂・石川良宣 (1984a): 三宅島火山噴火後の電気比抵抗測定. 自然災害特別研究突発災害研究成果「昭和58年10月3日三宅島噴火および災害に関する調査研究」, 145-155.
- 歌田久司・笹井洋一・中川一郎・小山 茂・石川良宣・浜野洋三 (1984b): 1983年10月三宅島火山噴火に伴った電気比抵抗変化. 火山, 第2集, **29**, 三宅島噴火特集号, S113-S124.
- YAMASHINA K. and NAKAMURA, K. (1978): Correlation between tectonic earthquakes and volcanic activity of Izu-Oshima volcano, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **4**, 233-250.
- 湯原浩三 (1968): 箱根火山の噴気活動とその熱源について. 火山, 第2集, **13**, 74-83.
- 行武 毅・吉野登志男・歌田久司・河村 謙・大池 洸・小池捷春・O. A. Veliz Castillo・田中良和・三品正明 (1982): 三宅島における電気比抵抗測定. 三宅島集中総合観測報告 (昭和55年), 43-53.