

## 9. 霧島火山の地熱調査

鍵山恒臣  
宇平幸一  
渡部暉彦  
増谷文雄  
山口勝  
地震研究所

(昭和 54 年 5 月 30 日受理)

### 1. はじめに

霧島火山地域では、北西部の加久藤カルデラをはじめ、高千穂峰、新燃岳など活動火口周辺においても、しばしば群発地震活動が起こっており、最近の活動については、宮崎他(1976)、渡部他(1978)などの報告がある。霧島火山で予想される水蒸気爆発の予知のためには、火山の熱的活動の異常に注目する事が重要と思われ、特に群発地震活動と表面活動がどのように関連しているかは興味ある問題である。しかしながら、この地域の熱的異常の分布は、これまで、必ずしも充分には把握されていない。このような観点から、活動火口である高千穂峰御鉢と新燃岳の二火口、および霧島火山で熱的に最も活発である硫黄山(白鳥)を対象に熱的調査を行なった。測定の概要は Table 1 に示すように、赤外放射温度計による表面温度測定、噴気の連続写真撮影による放熱量測定、および CA 熱電対あるいは水銀留点温度計による噴気温度測定である。

### 2. 測定結果

#### 2-1. 表面温度分布

赤外放射温度計の設置点は、Fig. 1 に示すとおりである。今回の測定は、日射の影響

Table 1. Outlines of the geothermal survey of the volcanoes Kirishima in November 1978.

Item	Observation date		Method
Surface temperature distribution	Ohachi	Nov. 13-14	Infra-red radiometer
	Shinmoe-dake	Nov. 15-16	E. R. I. type Ground Scanner
	Iwo-yama	Nov. 21-22	Detector: thermistor bolometer Field of view: 5 mrad.
Heat discharge by fumarolic plume	Shinmoe-dake Iwo-yama	Nov. 9 Nov. 22	Successive photographing by camera
Fumarolic temperature	Ohachi Iwo-yama	Nov. 8 Nov. 21	CA thermocouple Mercury maximum thermometer



Fig. 1. Observation points for the surface temperature distributions.

1: Ohachi    2: Shinmoe-dake    3: Iwo-yama

に微弱な噴気が多数観察できたが、今回の測定範囲には含まれていない。

ii) 新燃岳 熱的異常域は 1959 年の噴火の際に生じた割れ目に沿って外壁西側から内壁西側にかけて分布する噴気地域と、文政火口周辺に拡がる内壁東側の熱異常地域との二地域に大別される。前者には噴気 (No. 1, No. 2, No. 3) を除いて高温部がないのに対して、後者には高温部が広く分布するが、強力な噴気はない (噴気 No. 4 は No. 1, No. 2 に比べてずっと小さい)。今回の測定には、外壁西側 (噴気 No. 3) は含まれていないが、

を避けるためいずれも夜間に行なった。測定器の不調のため、数分間測定しては、約 1 時間休ませねばならず、一つの表面温度分布を得るのに数時間要した。したがって、夜間の冷却による温度の経時変化の影響が心配されるが、熱的異常がないと思われる部分の温度が各プロファイルでほぼ一致している事や、測定中の気温の変動が小さい事から見て、測定時刻の違いによる温度の差は無視できると思われる。Table 2, 3, 4 および Fig. 2, 3, 4 に御鉢、新燃岳、硫黄山の各測定地点での測定条件と測定結果を示す。

i) 高千穂御鉢 火口底底部にリング状の高温部が見られる。また、同火口南側と西側の内壁上部

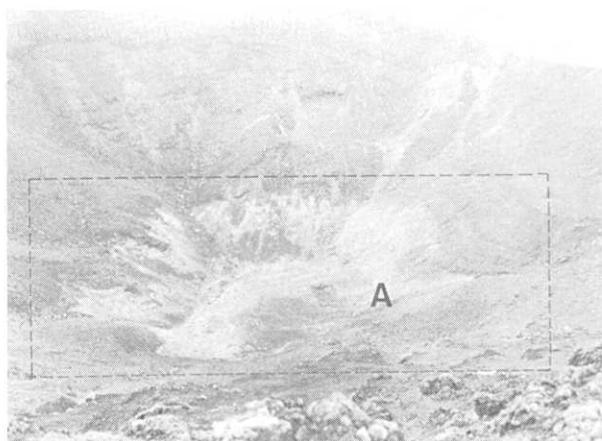


Fig. 2 a. Crater bottom of Ohachi. Surface temperature has been measured for the area surrounded with the broken line.

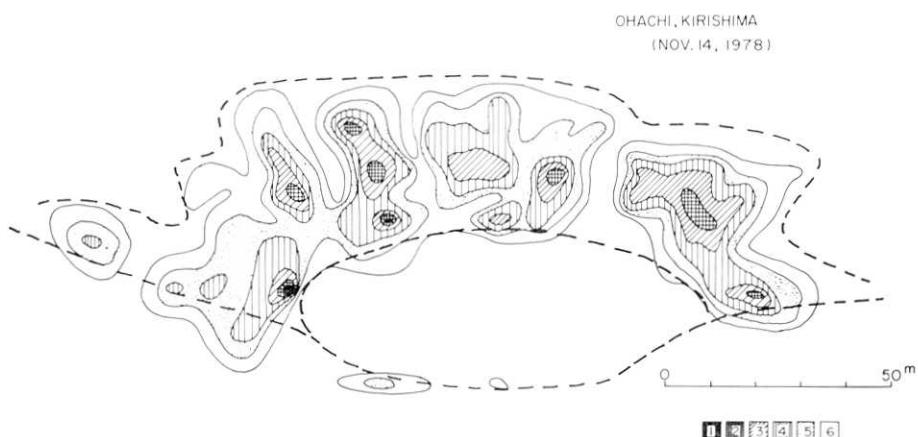


Fig. 2b. Surface temperature distribution of Ohachi. The observation was carried out at night from Nov. 13 to 14, 1978.  
 ① 40°C-35°C, ② 35°C-30°C, ③ 30°C-25°C, ④ 25°C-20°C,  
 ⑤ 20°C-15°C, ⑥ 15°C-10°C.



Fig. 3a. Summit crater of Shinmoe-dake.

Table 2. Meteorological data during the observation of Ohachi, Nov., 1978.

Time	Air temp. (°C)	Wet bulb temp. (°C)	Humidity (mm Hg)	Dip angle of the measured profile
Nov. 13	22:48			230°
	23:55			232°
Nov. 14	02:48	7.5	5.0	234°
	03:23	6.5	4.5	233°
	03:32	6.5	4.5	231°
	04:32	6.6	4.2	229°
	04:35	6.4	4.2	5.1
	05:39	6.2	3.9	4.9
	06:56	6.4	3.6	4.5
	07:35	6.4	3.6	4.5
	08:00	6.8	3.8	4.5
				222°, 220°

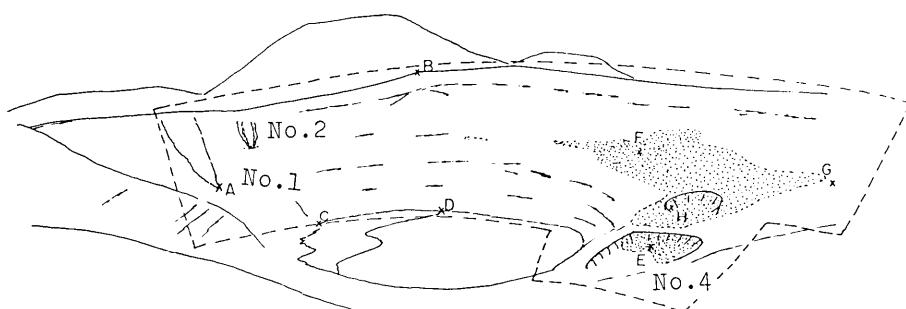


Fig. 3 b. A sketch of the summit crater of Shinmoe-dake. Surface temperature has been measured for the area surrounded with the broken line. The dotted areas indicate altered zones.

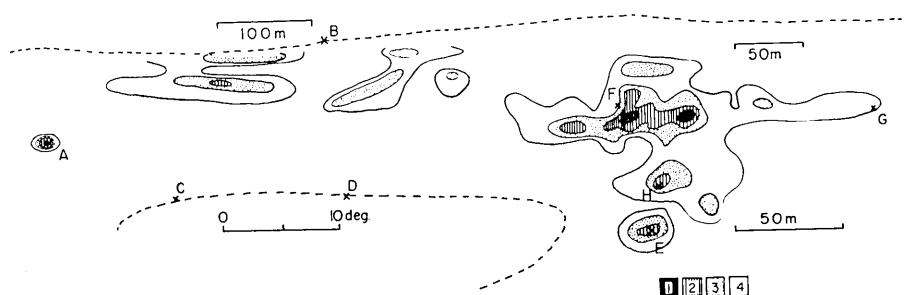


Fig. 3 c. Surface temperature distribution of Shinmoe-dake. The observation was carried out at night from Nov. 15 to 16, 1978.

① 30°C-25°C, ② 25°C-20°C, ③ 20°C-15°C, ④ 15°C-10°C.

その他の熱異常地域は全て測定範囲内に含まれている。測定中に霧が発生したため、測定結果は良好とは言えず、特に内壁北側の測定値には影響が出ている可能性があるので、再測の際考慮すべきである。

Table 3a. Meteorological data during the observation of Shinmoe-dake in November 1978.

Time	Air temp. (°C)	Wet bulb temp. (°C)	Humidity (mm Hg)	Dip angle of the measured profile
Nov. 15	20:05	3.6	3.2	5.6
	22:25	2.8	2.2	5.1
	23:00	4.2	0.4	2.8
Nov. 16	03:42	3.4	2.8	234°, 236°, 238° 240°
Nov. 16	04:00			
	5:00	fog		
Nov. 16	06:30	4.8	3.3	226°
	07:10	4.4	3.8	224°, 222°, 233° 235°, 237°, 239°
	09:50	7.8	6.4	6.3

iii) 硫黄山(白鳥) 道路沿いの噴気が二ヶ所、高温部となっている(G, H点). K点の熱異常は微弱な噴気のためである. 今回の測定範囲は、硫黄山の西側斜面のみであり、地熱活動域の大部分は陵線の陰になっている.

## 2-2. 噴気温度測定

i) 御鉢 Fig. 2a の A点において 11月8日に水銀留点温度計により 96°C の噴気温度を得た. この結果は、1972年の気象庁観測部(1973)の測定値と変化がない.

ii) 硫黄山 Fig. 5 に示す地点で噴気温度を測定し、Table 5 の結果を得た. 最高温度は 174°C を得たが、熱電対の故障のため、1975年3月に 247°C を記録した地点での測定はできなかった. したがって、更に高い温度が測定される可能性はある. 参考のため Fig. 6, Table 6 に 1975年3月の測定結果を示す.

Table 3b. Positions of marking points of Shinmoe-dake.

Point	Dip angle* (in degree)	Horizontal angle* (in degree)
A	232.9	54.6
B	241.4	79.0
C	227.9	65.8
D	227.7	80.5
E	224.0	106.7
F	235.5	104.4
G	234.4	126.0
H	228.5	108.6

\*Angles are measured from an arbitrary determined direction.



Fig. 4a. West flank of Iwo-yama.

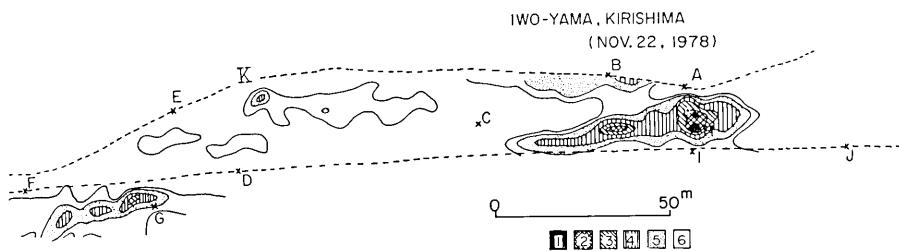


Fig. 4 b. Surface temperature distribution of the west flank of Iwo-yama, night observation from Nov. 21 to 22, 1978.

- ① 30°C-25°C, ② 25°C-20°C, ③ 20°C-15°C, ④ 15-10°C,
- ⑤ 10°C-6°C, ⑥ 6°C-4°C.

Table 4 a. Meteorological data during the observation of Iwo-yama in November 1978.

Time	Air temp. (°C)	Wet bulb temp. (°C)	Humidity (mm Hg)	Dip angle of the measured profile
Nov. 21	21:27	3.8	2.2	246°, 245°
	23:00	4.2	-1.2	244°
Nov. 22	00:30	5.2	-1.0	243°
	02:28	5.6	-0.4	242°, 241°
	04:29	5.2	-1.0	247°, 248°, 249°
	06:40	5.6	-0.4	240°, 239°, 238° 237°, 236°, 250°

Table 4 b. Positions of marking points of Iwo-yama.

Point	Dip angle* (in degree)	Horizontal angle* (in degree)
A	247.5	115.5
B	248.3	108.3
C	244.6	89.7
D	241.0	79.0
E	246.0	73.9
F	239.7	61.4
G	238.1	72.0
H	243.6	116.2
I	242.2	116.2
J	242.2	128.3
K	247.0	81.0

\*Angles are taken from an arbitrary determined direction.

度測定をする場合、面積の大部分を占める温度を採用する。

1) の方法は得られる平均値に熱異常域の温度データも含まれるから、原理的に正しくない。また、観測範囲中に熱異常地域が占める割合によつても平均値が大きく変化するから実用に適さない。2), 3) の方法は、結果として大きくはずれた基準温度を探る事はまず

### 3. 表面温度の定量的解析

得られた表面温度分布を解釈する際には、熱的異常がないと思われる場所の基準温度、および測定された温度値に含まれるばらつきを知ることが重要である。従来、基準温度の設定には以下に示す方法がとられている。

- 1) 得られた温度分布の平均値を採用する。
- 2) 現場で熱異常がないと思われる場所を選び、その地点の温度を採用する。
- 3) 特にサーモカメラなどで温

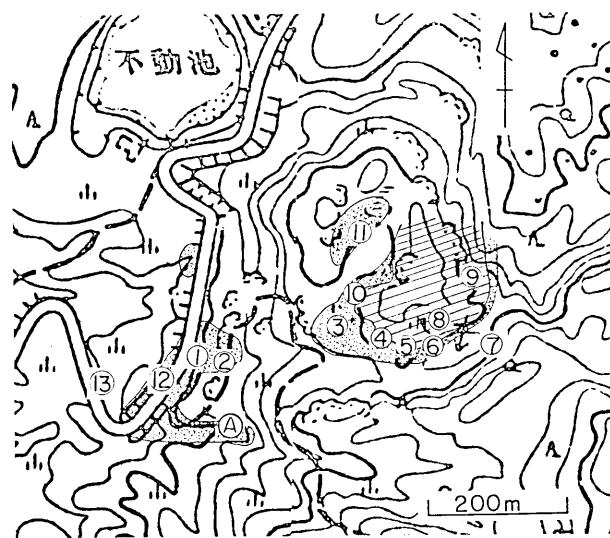


Fig. 5. Points where the fumarolic temperature was measured at Iwo-yama in November 1978. The results are presented in Table 5. The dotted and striped areas indicate the areas where the fumarolic temperature is higher than 96°C and higher than 100°C, respectively.

Table 5. Fumarolic temperature at Iwo-yama, November 21, 1978.

Measured point	Temperature °C	Measured point	Temperature °C
1	91.2	6	91.0
	95.0		94.0
	95.5		94.5
	96.5*		174.0
2	94.2	8	139.0*
	95.0		93.5*
3	94.7	9	147.0*
	94.0		104.0*
	95.0	10	96.0*
4	97.0	11	96.0*
5	112.0	12	96.0*
	128.0		
	156.0		

\*Measured by mercury maximum thermometer.

起らないが、異常がないと思われる温度にはある幅があり、どこに基準温度を採るかは主観による。このように、基準温度の設定はあいまいで、測定値に含まれる誤差の評価、“熱異常”とみなす基準などは、ほとんど考慮されていない。

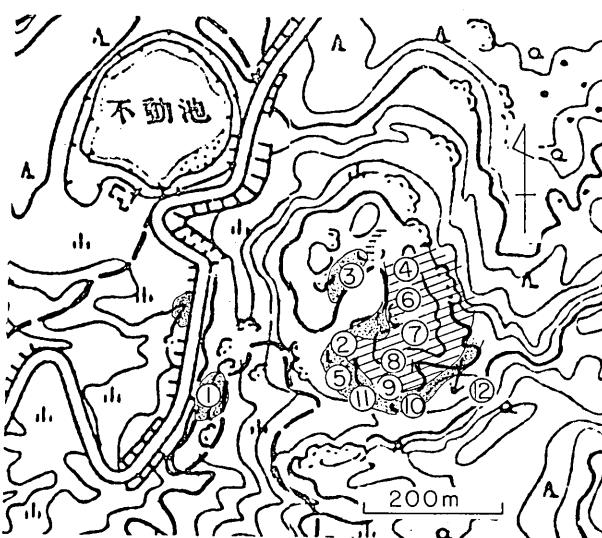


Fig. 6. Points where the fumarolic temperature was measured at Iwo-yama in March 1975. The results are presented in Table 6. The dotted and striped areas indicate the same as Fig. 5.

Table 6. Fumarolic temperature at Iwo-yama, March 1975.

Measured point	Temperature °C	Measured point	Temperature °C
1	95	9	97
2	95		154*
	183*	10	100*
3	95	11	173*
4	180*		94
5	93		103*
6	247*		94
	200*		95.5
7	110*		96.5
	185*		96.5*
8	178*	12	96.5*
	186*		95.5
	186*		94.5

\*Measured by mercury maximum thermometer.

今回は、測定範囲において  $1^{\circ}\text{C}$  ごとの温度を示す面積頻度分布を作成し、基準温度  $T_0$ 、温度のばらつき  $\sigma_T$ 、異常の規模の見つもりを試みた。Fig. 7, 8, 9 は御鉢、新燃岳、硫黄山の面積頻度分布である。温度データは内挿により水平角、垂直角  $0.1^{\circ}$  ごとの格子

点上の温度値になおし、更に各温度ごとの格子点の頻度を求めている。即ち、格子点1点は、水平角、垂直角 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ の面積を表すものと考えればよい。それぞれの $7^\circ\text{C}$ ,  $7^\circ\text{C}$ ,  $3^\circ\text{C}$ 付近のピークは基準温度 $T_0$ とみなせるであろう。また、ピークの幅は測定された温度のばらつきと考えられる。ただし、そのばらつきは、読みとり誤差、測定誤差、現場の放射率のばらつき、微気象的要因の違いなどが複合したものと考える。こうした理由に基づいて、面積の頻度分布から $T_0$ と $\sigma_T$ 等の推定法を以下に示すこととする。

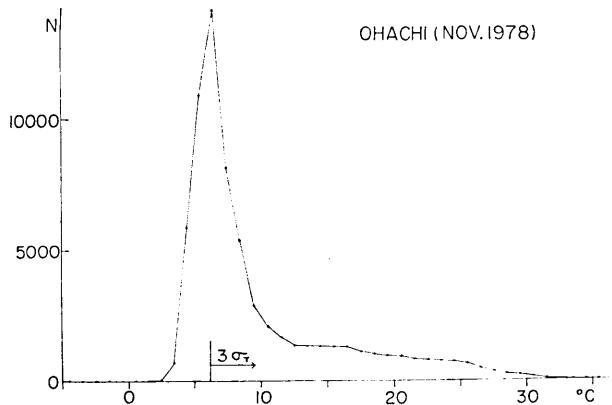


Fig. 7. Frequency of the temperature values, Ohachi in November 1978 (Fig. 2 b). The temperature values are given on the mesh points of horizontal angle  $0.1^\circ \times$  dip angle  $0.1^\circ$ .

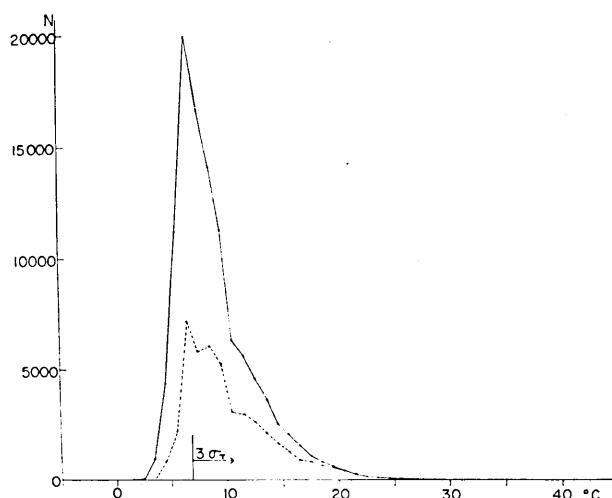


Fig. 8. Frequency of the temperature values, Shinmoe-dake in November 1978. Solid line for the whole area observed and broken line for the right side on Fig. 3 c.

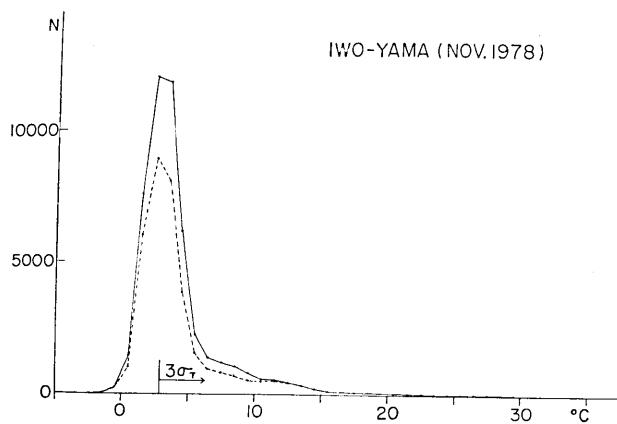


Fig. 9. Frequency of the temperature values of Iwo-yama in November 1978.  
Solid line for the whole area observed and broken line for the right side  
of point C on Fig. 4 b.

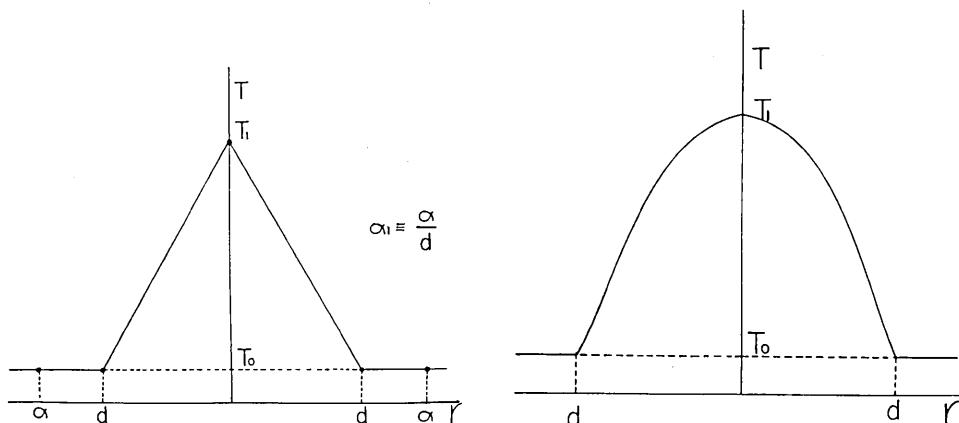


Fig. 10 a. Assumed axial symmetric temperature distribution function.  $\alpha_1$  represents the upper limit of integral calculus.

Fig. 10 b. General axial symmetric temperature distribution function.

### 3-1. 推定方法

i) Fig. 10 a で表わされるような軸対称な温度分布を考える (以下円錐モデルと呼ぶ).

$$\begin{aligned} T(r) &= T_1 - (T_1 - T_0) \cdot r/d & r \leq d \\ &= T_0 & r \geq d \end{aligned} \quad (1)$$

表面温度が  $T \sim T+dT$  であるような面積は、

$$N(T)dT = 2\pi d^2 / (T_1 - T_0)^2 \cdot (T_1 - T) \cdot dT \quad (2)$$

となる。表面温度が  $T^\circ\text{C}$  以上である部分の面積は(3)式となる。

$$S^2(T) = \pi \cdot d^2 / (T_1 - T_0)^2 \cdot (T_1 - T)^2 \quad T_0 < T \leq T_1 \quad (3)$$

実際の温度の測定値はある温度  $T_r$  のまわりに正規分布的に分散していると考えると、 $T \sim T+dT$  の測定値をとる確率は、

$$f(T)dT = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T-T_r)^2}{2\sigma_T^2}\right) dT ,$$

であるから、(1)式のような温度分布を示す場所を  $r=\alpha$  の円内について温度測定を行なう時に測定値が  $T \sim T+dT$  になるような面積の期待値および  $T$  以上の高温部の面積の期待値は、(4)式、(5)式で与えられる。

$$\begin{aligned} N(T)dT &= \left\{ \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T-T_r)^2}{2\sigma_T^2}\right) r \cdot dr \right\} dT \\ &= \left\{ \int_0^1 \frac{\sqrt{2\pi}d^2}{\sigma_T} \exp\left(-\frac{[T-T_1+(T_1-T_0)t]^2}{2\sigma_T^2}\right) t dt \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{2\pi}d^2}{2\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma_T^2}\right) \cdot (\alpha_1^2 - 1) \right\} dT, \quad \alpha_1 \equiv \alpha/d \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S^2(T) &= \int_T^\infty N(T)dT \\ &= \int_T^\infty dT \left\{ \int_0^1 \frac{\sqrt{2\pi}d^2}{\sigma_T} \exp\left(-\frac{[T-T_1+(T_1-T_0)t]^2}{2\sigma_T^2}\right) t dt \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{2\pi}d^2}{2\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma_T^2}\right) \cdot (\alpha_1^2 - 1) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

また、 $N(T)$  の最大値を与える温度  $T_M$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} N'(T) &= \frac{\sqrt{2\pi}d^2}{\sigma_T} \int_0^1 \exp\left(-\frac{[T-T_1+(T_1-T_0)t]^2}{2\sigma_T^2}\right) \cdot \left(\frac{-[T-T_1+(T_1-T_0)t]}{\sigma_T^2}\right) dt \\ &\quad + \frac{\sqrt{2\pi}d^2}{2\sigma_T} (\alpha_1^2 - 1) \left(-\frac{(T-T_0)}{\sigma_T^2}\right) \exp\left(-\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma_T^2}\right) = 0 , \\ I_1 &\equiv \int_0^1 \exp\left(-\frac{[T_M-T_1+(T_1-T_0)t]^2}{2\sigma_T^2}\right) t dt , \\ I_2 &\equiv \int_0^1 \exp\left(-\frac{[T_M-T_1+(T_1-T_0)t]^2}{2\sigma_T^2}\right) t^2 dt , \end{aligned}$$

よろ、

$$\frac{T_M-T_0}{T_1-T_0} = \frac{I_1-I_2}{I_1 + \frac{\alpha_1^2-1}{2} \exp\left(-\frac{(T_M-T_0)^2}{2\sigma_T^2}\right)}$$

$I_1, I_2$  は無次元パラメータ  $x=(T_M-T_0)/\sigma_T, x_0=(T_1-T_0)/\sigma_T$  で表わされるから、

$$\frac{x}{x_0} = \frac{I_1(x, x_0) - I_2(x, x_0)}{I_1(x, x_0) + \frac{\alpha_1^2-1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)} \quad (6)$$

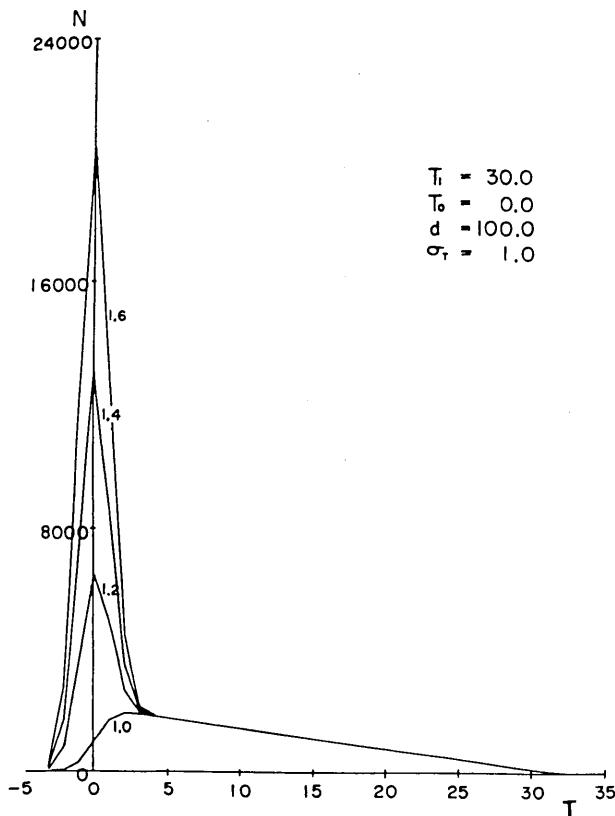


Fig. 11. Calculated results of  $N(T)$ . Parameters adopted for  $N(T)$  calculation are shown. Numbers labelling the curves are the values of  $\alpha_1$ . When  $T$  is equal to  $T_M$ , calculated  $N(T)$  has a maximum value.

Fig. 11 は、 $\alpha_1$  をパラメータとした  $N(T)$  のモデル計算の例である。ただし  $N$  は本文中で水平角、垂直角  $0.1^\circ$  を 1 単位として、1 単位  $\times$  1 単位の微小面積素片の数で面積を表わしたものである。 $T_1 - T_0$ 、 $\sigma_T$ 、 $d$  などは御鉢の場合にはほぼ対応させている。 $\alpha_1 \geq 1.2$  では  $N(T)$  の最大値を与える温度  $T_M$  は  $T_0$  とほとんど一致している。また、 $T > T_0 + 3\sigma_T$  では、 $\alpha_1$  を変えても  $N(T)$  はほとんど影響を受けない。Fig. 12 は  $1/x_0$  をパラメータに  $x/x_0$  を  $\alpha_1$  の関数で表わしたものである。この図から実際に与えた  $T_0$  と  $N(T)$  の最大を与える  $T_M$  とのくい違いが  $\alpha_1$  によってどの程度変わるか知る事ができる。

ii)  $T_0$ 、 $\sigma_T$  の推定 (4) 式は次のように書きかえる事ができる。

$$N(T) = \exp\left(-\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma_T^2}\right) F(T, T_0, T_1, \sigma_T, d, \alpha_1) \quad (4')$$

実際の測定結果に近い値として、 $\sigma_T = 1.0^\circ C$ 、 $T_1 = 30.0^\circ C$ 、 $d = 100.0$  単位 ( $D = 0.1^\circ \times 100 = 10^\circ$ ) の場合に  $F$  を計算すると Table 7 のようになる。 $\alpha_1 = 1.6$  では、 $T_0 - 3\sigma_T \leq T \leq T_0 + \sigma_T$  の範囲で  $F_{\max}/F_{\min} = 1.13$ 、 $\alpha_1 = 2.0$  では  $F_{\max}/F_{\min} = 1.07$  となる。 $F$  をほぼ一定とみなせる範囲では

$$\log N(T) = -\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma_T^2} + \text{const.} \quad (7)$$

となるから、最小二乗法により  $T_0, \sigma_T$  を推定できる。

$T_0, \sigma_T$  の推定値が信頼できるかどうかは  $\alpha_1$  による。Fig. 13, Fig. 14 は  $T_0, \sigma_T$  の  $\alpha_1$  による変化のモデル計算の例である。 $T_0, T_1, \sigma_T, d$  は先に与えた値と同じである。 $a, b, c$  はそれぞれ最小二乗法を適用する範囲を  $T_0-3\sigma_T \leq T \leq T_0+2\sigma_T, T_0-3\sigma_T \leq T \leq T_0+\sigma_T, T_0-3\sigma_T \leq T \leq T_0$  にとった場合である。c の結果が  $\alpha_1$  の影響が少なく最良であるが、実際のフィールドでは高温異常だけでなく低温異常もある事があり、本報文では b の範囲を使っている。 $T_0, \sigma_T$  ともにやや大きく評価されるが  $\alpha_1 > 1.2$  程度であれば赤外放射温度計の精度に比べて十分に信頼できる事がわかる。

iii) 異常の規模の推定 (3)式より

$$S(T) = \sqrt{\pi} \cdot \frac{d}{T_1 - T_0} (T_1 - T) \quad (3')$$

$\sigma_T=0$  の場合には傾き  $-\sqrt{\pi} \cdot d / T_1 - T_0$ 、温度軸との交点  $T=T_1$  から熱異常の規模  $d, T_1$  が推定できる。また  $\sigma_T$  を考えに入れた推定法は次のようになる。Fig. 15 は ii) と同じパラメータで計算した  $S(T)$  である。 $T_0 \leq T \leq T_0 + 3\sigma_T$  の範囲で  $S(T)$  は急激に変化する。 $\alpha_1$  を大きくするとこの傾向は著しくなる。また、 $T \geq T_1 - 3\sigma_T$  でも  $S(T)$  は  $\sigma_T=0$  の場合よりやや大きくなる。したがつ

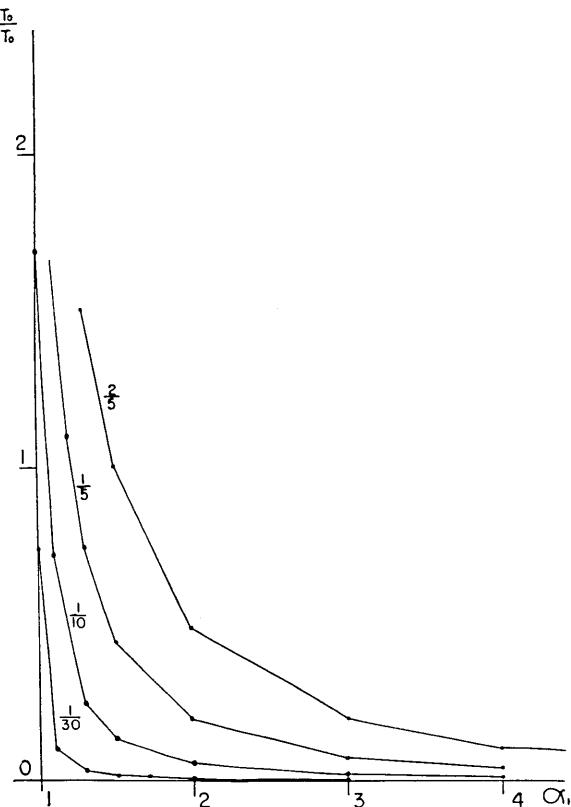


Fig. 12. Non-dimensional values  $(T_M - T_0) / (T_1 - T_0)$  are shown as a function of  $\alpha_1$ . Numbers labelling the curves are the values of  $1/x_0$ .

Table 7. The influence of the observation range upon the observed temperature reduction.  $F$  is calculated with  $T_0=0.0^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_T=1.0^\circ\text{C}$ ,  $T_1=30.0^\circ\text{C}$  and  $d=100.0$ .

$\alpha_1$	T				
	-3	-2	-1	0	+1
1.2	0.577	0.586	0.605	0.653	0.829
1.4	1.228	1.238	1.257	1.305	1.481
1.6	1.980	1.990	2.009	2.057	2.233
1.8	2.833	2.842	2.861	2.909	3.086
2.0	3.785	3.795	3.814	3.862	4.038

unit:  $10^4$

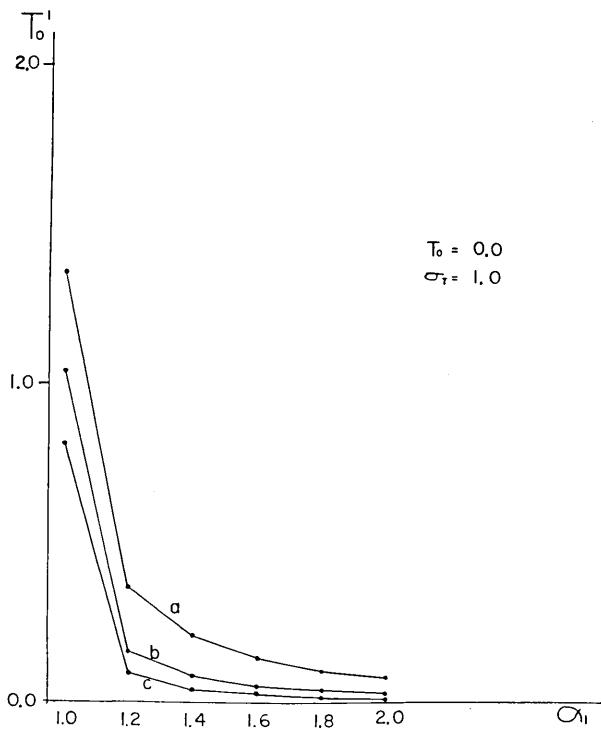


Fig. 13. Estimated value of  $T_0$  by Eq. (7). The true value of  $T_0$  is presented 0.0°C.

て、直線の傾きは、 $T_0+3\sigma < T < T_1-3\sigma_T$  の範囲で最小二乗法により決定するのが適當であろう。Fig. 16 は最小二乗法を適用する範囲を変えた場合の直線の傾き  $m$  の変化である。 $a$  は  $T \leq t \leq T_1-3\sigma_T$  の  $S(T)$  から求められた  $m(T)$  であり、 $b$  は  $T \leq t$  の  $S(T)$  から求めた  $m(T)$  である。モデルは  $m=-5.91$  を与えている。 $T$  を小さくすると  $m$  は  $-5.91$  に近づき再び悪くなる。また、 $a$  の推定がより妥当である事もわかる。実際の推定では最高温度を  $T_1$  として  $a$  の推定法により  $d$ 、 $T_1$  を求めればよい。ただし、この場合も  $m=-5.86$  となり  $-5.91$  とは一致しない。即ち、モデルで最初設定した、 $T_1=30.0^\circ\text{C}$ 、 $d=100.0$  単位は、以上の処理により、 $T_1=30.6^\circ\text{C}$ 、 $d=101.6$  単位と推定される。しかし、2% 程度の誤差は赤外放射温度計の誤差を考えれば十分である。

iv)  $\alpha_1$  のチェック 推定された  $T_0$ 、 $\sigma_T$ 、 $T_1$ 、 $d$  が妥当であるかどうかは  $\alpha_1$  の大きさによる。推定された  $(T_1-T_0)/\sigma_T$  を使い、Fig. 12 で  $T_M-T_0$  が十分小さくなる  $\alpha_1$  を求め  $\alpha_1^0$  とする。推定に使用した微小面積素片の総数を  $NT$  とすると、

$$\alpha_1^0 = \frac{NT}{\pi d^2} \quad (8)$$

$\alpha_1 > \alpha_1^0$  をみたせば、推定された  $T_0$  はほぼ妥当な値であり、 $\sigma_T$ 、 $d$ 、 $T_1$  もほぼ信頼できる値と言える。

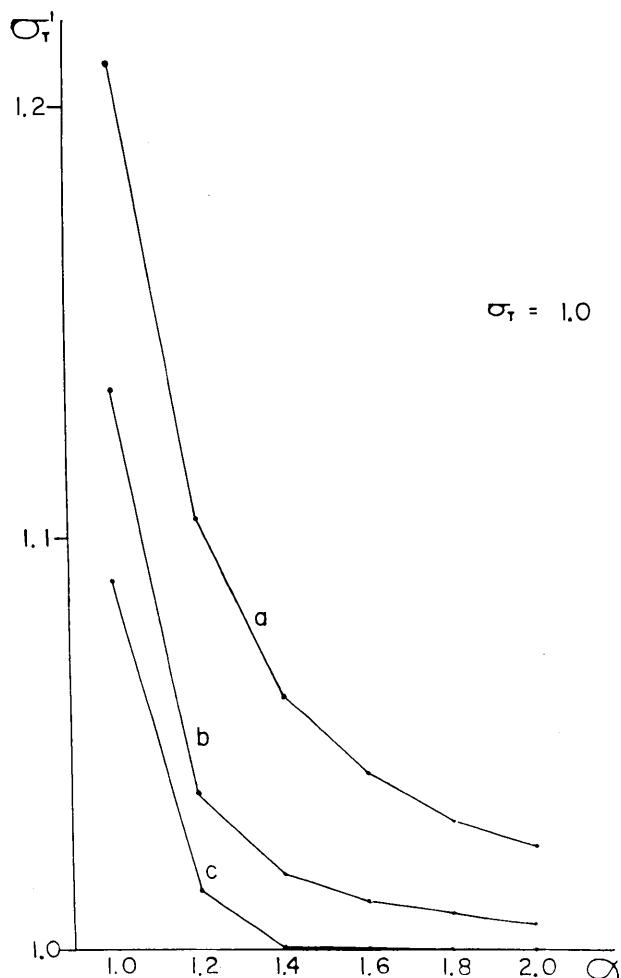


Fig. 14. Estimated value of  $\sigma_r$  by Eq. (7). The true value of  $\sigma_r$  is presented 1.0°C.

v) 円錐モデルが成立しない場合 一般に Fig. 10b に示すような軸対称な温度分布を考える。

$$\begin{aligned}
 T &= g(r) && (r < d) \\
 T &= g(d) = T_0 && (r = d) \\
 T &= T_0 && (r > d)
 \end{aligned} \tag{9}$$

円錐モデルの計算から類推すると、(測定範囲)/(熱異常範囲) を大きくすれば面積頻度は  $T = T_0$  の付近で正規分布に近くなるであろう。したがって  $T_0$ ,  $\sigma_r$  の推定法は、なお有効と思われる。

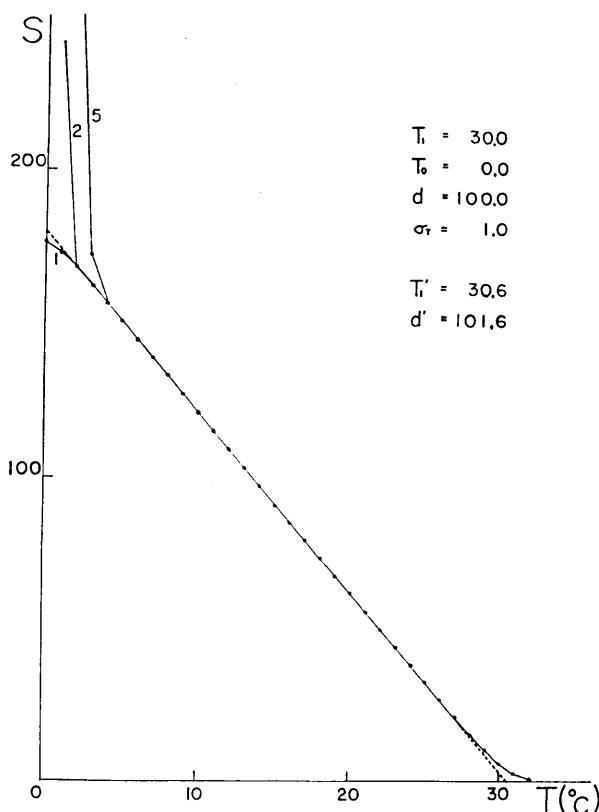


Fig. 15. Examples of  $S-T$  relation for an ideally given model. Parameters adopted for  $S(T)$  calculation are shown. Numbers labelling the curves are the values of  $\alpha_1$ .  $T'_1$  and  $d'$  mean the estimated values of  $T_1$  and  $d$  by the least square method.

また、 $T_0 < T \leq T_1$  の範囲で、

$$S^*(T) = \pi r^*, \quad r = \frac{S(T)}{\sqrt{\pi}}$$

すなわち、軸対称な温度分布に換算した時の等温線の半径を  $S(T)$  によって知る事ができる

### 3-2. 推定結果

以上述べてきた方法を前出の頻度分布に適用し、表面温度分布の定量的議論を試みた。

Table 8 の  $T_0$ ,  $\sigma_T$  は 3-1 の ii) に示した方法で求めた各観測対象地の基準温度と測定値のばらつき（標準偏差）である。（測定範囲）/（熱異常の範囲）の影響は  $T > T_0 + 3\sigma_T$  でほとんどないから (3-1, i)), 本報告では  $T > T_0 + 3\sigma_T$  を“熱異常”と定義する。また、 $T^\circ C$  以上の温度を示す格子点の数を  $S^*(T)$  として平方根をとると、Fig. 17, 18, 19, に

示す  $S(T)$  が求められる。 $S(T)$  は 3-1 の v) に示すように軸対称な温度分布に換算した場合の等温線の半径に相当するものである。そのうち、御鉢の場合は熱異常の分布が円錐的になり、異常の拡がりは  $D = 8.9^\circ$ 、最高温度  $T_1 = 33.4^\circ\text{C}$  が求められる(3-1, iii))。即ち、御鉢の熱異常は基準温度  $T_0 = 6.2^\circ\text{C}$ 、最高温度  $T_1 = 33.4^\circ\text{C}$ 、異常の拡がり  $D = 8.9^\circ$  の円錐的な熱異常と同程度の規模を持ち、測定値のばらつきは  $\sigma_T = 1.1^\circ\text{C}$  である事になる。以上の推定が信頼できる値であるかどうかは  $\alpha_1 = (\text{測定範囲の半径}) / (\text{熱異常の半径})$  によって判断できる。御鉢の場合には、格子点総数  $NT = 67191$ 、 $D = 8.9^\circ$  から  $\alpha_1 = \sqrt{NT/\pi} \times (D \times 10)^2 = 1.64$  となる。3-1, ii), iii) に示すように、御鉢の場合に必要とされる  $\alpha_1^0$  は 1.2 程度であるから以上の推定は十分に信頼できる。新燃岳、硫黄山の場合には  $D$  が求められないためチェックする事はできない。

以上の解析を今後の再測の結果にも適用する事により、得られた温度分布を単に感覚的に比較するだけではなく、データの基準温度とばらつきをふまえた上で熱異常域の面積、規模を比較する事ができるであろう。実際の熱異常地は单一の異常ではなく複合したものである。また、温度分布も軸対称モデルで表わされるものではない。しかし、複合した熱異常地を单一の軸対称な熱異常分布に換算して異常の規模を比較する事は意

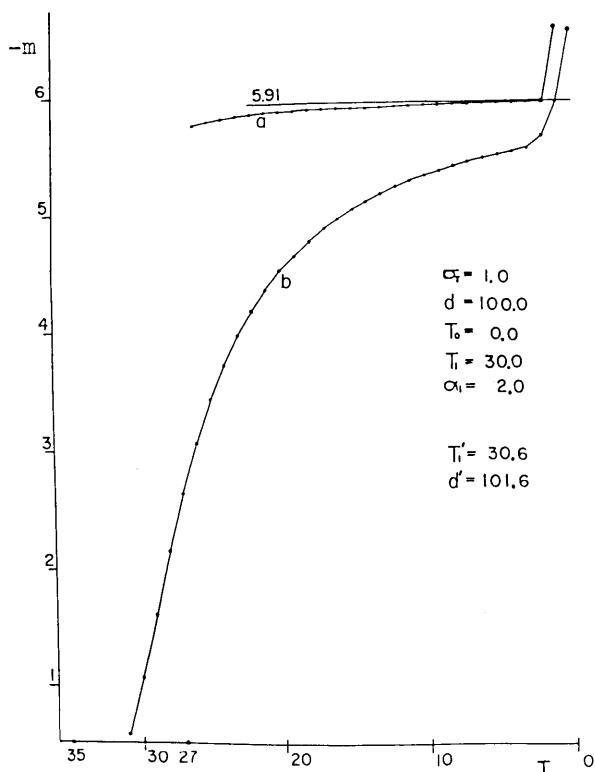


Fig. 16. Estimated values of  $m$ ;  $m$  indicates the inclination of straight line determined by the least square method. a:  $m$  is determined with  $S(27)$ ,  $S(26)$ , ...,  $S(T)$ . b:  $m$  is determined with the whole data higher than  $T^\circ\text{C}$ . The theoretically given inclination ( $m = -5.91$ ) is also shown in the figure, for the case without observational errors.

Table 8. Estimation of characteristic values.

	$T_0^\circ\text{C}$	$\sigma_T^\circ\text{C}$	$T_1^\circ\text{C}$	$D^\circ\text{deg}$
Ohachi	6.2	1.1	33.4	8.9
Shinmoe-dake	6.9	1.2		
Iwo-yama	2.9	1.2	28.4	

$T_0$ : Estimated normal surface temperature.

$\sigma_T$ : Standard deviation of errors contained in observed values.

$T_1$ : Estimated maximum temperature.

$D$ : Radius of thermal anomaly under the assumption of "conelike temperature distribution".

味あることであろうし、また、赤外放射温度計で測定される温度は、ある視野角内（本報告で使用した Ground Scanner は 5 mrad.）の平均的な温度であるために、得られる温度分布は実際の温度分布に window がかかるたるものとなる事を考えれば、計算の簡単のため円錐モデルで換算する事は、さほど問題とはならないであろう。

#### 4. 热エネルギーと $H_2O$ の放出量の推定

##### 4-1. 热エネルギーの放出量

推定には、噴気が卓越する場所と噴気が微弱な steaming ground に対して別々の方法を用いた。噴気放熱量  $\dot{Q}$  [watt] は、BRIGGS (1969) の plume rise の式を変形する事により、(10) 式あるいは (11) 式によって推定する事ができる（鍵山, 1978）。ここで、 $u$  [m/s]: 風速、 $h$  [m]: 噴出点からの上昇高度、 $x$  [m]: 噴出点からの水平距離、 $t$  [s]: 噴出後の時間である。

$$h = C_1 \cdot x^{2/3}, \quad (10)$$

$$\dot{Q} = 2.7 \times 10^4 \cdot C_1^3 \cdot u^3 \quad (10)$$

$$h = C_2 \cdot t^{2/3}, \quad (11)$$

$$\dot{Q} = 2.7 \times 10^4 C_2^3 \cdot u \quad (11)$$

steaming ground に対して、SEKIOKA and YUHARA (1974) は熱収支法にもとづき (12) 式を提出している。

$$\Delta Q = K \cdot \Delta T \quad (12)$$

ここで  $\Delta Q$  [HFU],  $\Delta T$  [°C] は、二地点の放熱量の差および表面温

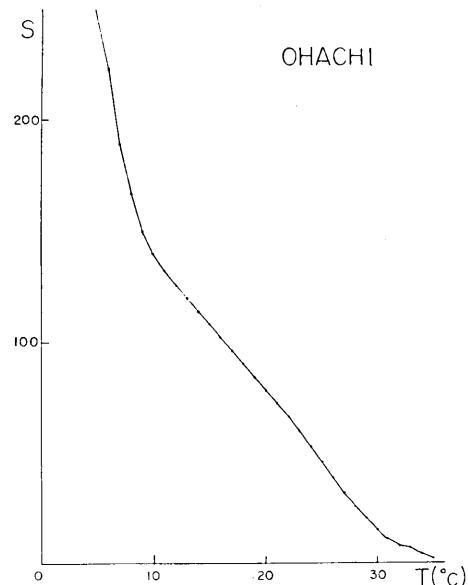


Fig. 17.  $S$ - $T$  relation for the observation data of Ohachi.

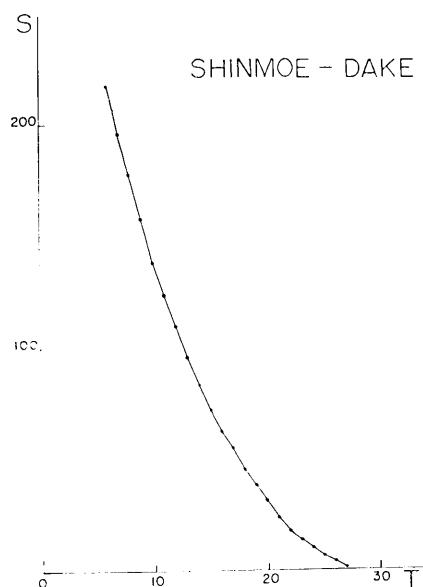


Fig. 18.  $S$ - $T$  relation for the observation data of Shinmoe-dake.

度の差であり、 $K$  は各種気象要素で定まる定数である。今回の推定では、一方の地点を 3 節で示した表面温度が  $T_0$  °C となる所にとり、その地点での放熱量を無視する。定数  $K$  は、これまでの測定で 800 程度となる(閑岡他, 1978)事を考え、(12') 式を使用した。

$$\dot{Q} = 34 \times \sum_i \Delta T_i \cdot S_i \quad (12')$$

$\Delta T_i$  [°C],  $S_i$  [m<sup>2</sup>] は  $i$  地点の温度差と面積である。また、無風状態で、噴気の最高上昇高度  $H$  [m] が測定される場合には、(13) 式 (MORTON *et al.*, 1956) を適用した。

$$\dot{Q} = (H/8.2)^4 \quad (13)$$

Table 9 に推定結果を示す。

- i) 御鉢 Fig. 7 の  $T > T_0 + 3\sigma_T$  の部分を“熱異常域”とみなして (12') 式を使うと、 $2.1 \times 10^6$  watt となる。
- ii) 新燃岳 噴気 No. 1, No. 2 に (11) 式を適用すると、それぞれ  $1.4 \times 10^7$  watt,  $1.2 \times 10^6$  watt となる。噴気 No. 3 は写真を撮影できなかったが、No. 1 と No. 2 の中間くらいの強さであるから、暫定的に幾何平均をとると、 $4.1 \times 10^6$  watt となる。噴気 No. 4 を含む一帯の噴気は微弱なので (12') 式を適用し、 $2.0 \times 10^6$  watt を得た。
- iii) 硫黄山 11 月 22 日撮影の噴気の連続写真を用いて (10) 式を適用すると  $6.2 \times 10^7$  watt, (11) 式を適用すると  $5.8 \times 10^7$  watt が得られる。一方、11 月 7 日は全く風のない

Table 9. Heat discharge and H<sub>2</sub>O emission rates from major active craters in Kirishima in November 1978.

	Heat discharge 10 <sup>6</sup> watt	H <sub>2</sub> O emission 10 <sup>3</sup> g/sec	SO <sub>2</sub> emission t/day	H <sub>2</sub> O/SO <sub>2</sub>
Ohachi	2.1	<0.78		
Shinmoe-dake fumarole No. 1	14.			
fumarole No. 2	1.2			
fumarole No. 3	4.1			
inner wall east side	2.0			
total	22.	7.2-7.9		
Iwo-yama	61.	22.	17.*	110

\*Estimated by correlation spectrometer on Nov. 2, 1976 (KAMADA and OTA, 1977).

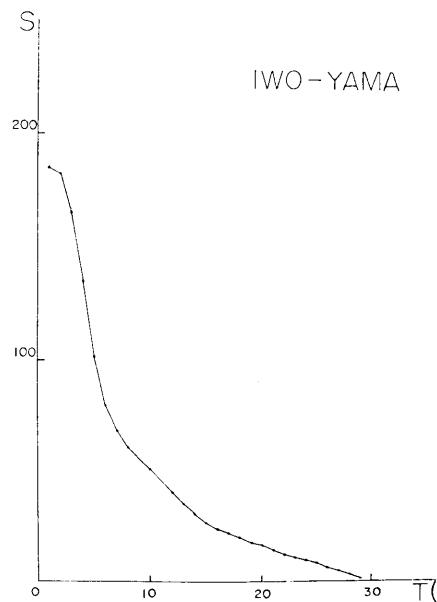


Fig. 19. S-T relation for the observation data of Iwo-yama.



Fig. 20. Recharging areas needed to maintain the  $H_2O$  emissions estimated in Table 9 by the annual precipitation of 4300 mm. The larger and the smaller circles are for the cases where 1% and 100% of the precipitation are discharged, respectively. For the steaming grounds, presented by broken lines, the estimated values are the upper limit of  $H_2O$  emissions.

静穏な日で、硫黄山の噴気が 700~750 m 程上昇していた。(13) 式を適用すると、 $5.3 \sim 7.0 \times 10^7$  watt となる。以上の平均から、硫黄山全体の放熱量は  $6.1 \times 10^7$  watt と推定される。

#### 4-2. $H_2O$ の放出量

熱エネルギーの放出は、噴気の場合大部分は水蒸気の放出に伴うものである。120°C 程度の  $H_2O$  が 0°C まで冷却すると仮定すると  $H_2O$  1 g あたり 650 cal 程度を放出する。steaming ground については  $H_2O$  1 g あたり 630 cal と仮定するが顯熱輸送のため、全体の放熱量に占める  $H_2O$  放出の寄与は一部となるから、この方法によって推定される  $H_2O$  の放出量は上限値を与える事になる。Table 9 に  $H_2O$  の放出量を示す。

ここで推定された  $H_2O$  の放出量を地下水でまかなう事が可能かどうか問題であるが、霧島の年間降水量を 4300 mm として、全降水量の 100% あるいは 1% が地下で水蒸気となり放出されるとした場合に必要な集水半径は、Fig. 20 に示す大小の円内を要する程度である。地形から判断すると充分にまかなえる量である。

また、硫黄山からの  $SO_2$  の放出量は、1976 年 11 月 2 日に相関スペクトロメーターにより 17 t/day が得られている（鎌田・太田, 1977）。 $H_2O/SO_2$  は 110 となり、一般の

硫気地帯での噴気ガスの化学分析の結果と矛盾しない。

### 5. 最近 3 年間の硫黄山(白鳥)について

硫黄山は、最近 3 年間にその熱的活動が活発化しているように見える。その徵候は、おもに南西部に見られ、a) Fig. 5 の ⑫ で示す道路の石垣のすき間から 1975 年 3 月には目立たなかった噴気が 1977 年 3 月には確認できる程になっている。b) Fig. 5 の ⑤ で示す沢に同様に噴気活動が始まっている。c) Fig. 5 の ⑬ で示す部分が変質し、15 cm 深の地中温度は、96°C を示している。この地点の変質は 1975 年には確認されていなかったものである。d) Fig. 5 の ⑨ で示す部分に 1975 年から 1977 年にかけてイオウの付着が著しい。こうした状況の変化が表面温度分布および噴気温度の過去のデータと比較して定量的に検出できるかどうかを試みた。

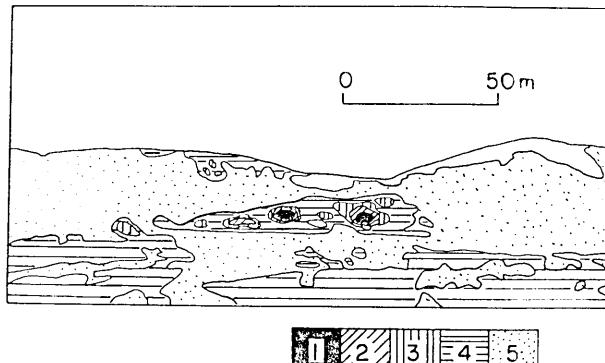


Fig. 21 a. Surface temperature distribution of the west flank of Iwo-yama, measured by Canon Thermo-camera CT-5B (field of view: 1.3 mrad.). The observation was carried out in the morning on March 21, 1977.  
 ① 61°C-55°C, ② 55°C-49°C, ③ 49°C-43°C, ④ 43°C-37°C, ⑤ 37°C-31°C.

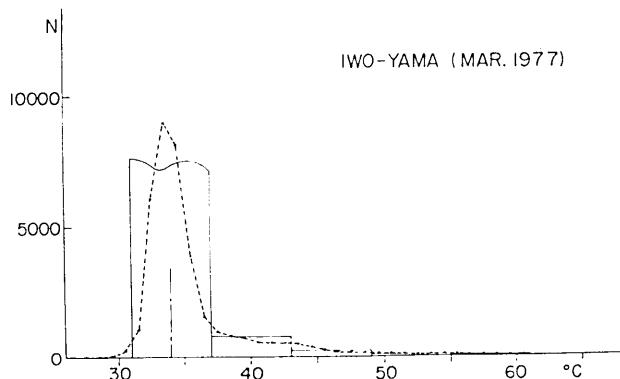


Fig. 21 b. Frequency of the surface temperature for Fig. 14 a. The broken line is the result of November 1978 (Fig. 9) for the comparison.

Fig. 21a は 1977 年 3 月 21 日にキャノンサーモカメラ CT-5B (視野角 1.3 mrad) によって得られた硫黄山西斜面の表面温度分布である。Fig. 4b と比較して、熱的異常のパターンには変化がなく、最高温度と平常な温度との差も、どちらも 30°C 程度である。温度の面積頻度により比較するために、Fig. 21a の各温度段階の面積を 1 mm メッシュで読みとり、1978 年の測定と同じように水平角、垂直角  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  の格子点の数に換算したのが Fig. 21b である。1978 年 11 月の結果 (Fig. 9) を重ねると、ほとんど一致しており、“熱異常”的面積もほぼ等しい。したがって、表面温度測定の結果からは、1977 年 3 月と 1978 年 11 月の間には西側斜面の熱的活動の変化が認められない。

Fig. 6 および Table 6 は 1975 年 3 月の噴気温度の測定結果である。噴気温度を比較する場合、一般に水の沸点以下では比較が容易だが、沸点以上の場合には、測定の位置により温度が異なるために単純に比較する事はできない。したがって、1975 年と 1978 年の噴気温度を比較する際、両者の測定点が非常に近い場合をとっても温度の上昇、下降が有意であるのかどうかはわからない。ただし、Fig. 5 の ⑪ と Fig. 6 の ⑧ については測定点は全く同じであり、測定された温度も沸点から沸点以上への上昇（1975 年に 95°C、1978 年に 104°C）であるから、この変化は有意である。

## 6. まとめ

1978 年 11 月に霧島火山高千穂御鉢火口、新燃岳火口、硫黄山（白鳥）の熱測定を行なった。結果は以下の通りである。

- 1) 赤外放射温度計による表面温度測定で、それぞれの地点の温度分布が明らかになった。
- 2) 表面温度データを定量的に解析し、基準温度  $T_0$  と温度値のばらつき  $\sigma_T$  を求めた。 $T > T_0 + 3\sigma_T$  の温度を示す部分を熱異常域とみなし、その位置が把握された。
- 3) 热エネルギーと  $H_2O$  の放出量は Table 9 に示すとおりである。
- 4) 硫黄山は、最近 3 年間に熱的活動が南西側へ拡大している徴候がある。しかしながら、西側斜面の表面温度測定では 1977 年 3 月と 1978 年 11 月との間に、その活動の変化は見られない。噴気温度測定では、1 測点について有意な上昇が見られるが、他の測点については位置の同定が困難なため比較する事ができない。

硫黄山の噴気温度について、過去 25 年間の経緯を見ると、1954 年には 96°C～120°C (地質調査所地熱調査班, 1955) であり、露木 (1974) も 140°C 以上の報告はないとしている。1972 年には 156°C が報告され (気象庁観測部, 1973), 1975 年の 247°C に至っている。こうした噴気温度の上昇傾向は、単に硫黄鉱山の閉鎖 (1962) の影響とも考えられるが、最近 3 年間の地熱活動の活発化と関連して、今後更に注目していく必要がある。

- 5) 御鉢、新燃岳両火口は、今回初めて熱異常の分布が把握された。今後の再測により、活動の推移に注目していく必要がある。

## 7. 謝 辞

地震研究所、宮崎務氏には霧島の地熱活動について有益な助言をいただいた。同所、下鶴大輔教授、萩原幸男教授、藤沢英幸博士には原稿を読んでいただき、問題点を指摘して

いただいた。あわせて謝意を表します。

### 文 献

- BRIGGS, G. A., 1969, Plume rise, *Critical Review Series, Rep. TID-25075. At Energy Comm.* Washington, D. C.
- 地質調査所地熱調査班, 1955, 宮崎県海老野地熱地帯調査報告, 地質調査所月報, 6, 611-626.
- 鍵山恒臣, 1978, 火山からの噴気による熱エネルギーと  $H_2O$  の放出量—Plume rise からの推定一, 火山第2集, 23, 183-197.
- 鎌田政明・太田一也, 1977, 桜島火山南岳からの  $SO_2$  (二酸化イオウ) の放出量, 第2回桜島火山の集中総合観測 (昭和51年11月~12月), 98-104.
- 気象庁観測部, 1973, 火山機動観測実施報告, 9, 21-50.
- 宮崎 務・山口 勝・増谷文雄・寺尾弘子, 1976, "1975~1976年" 霧島火山周辺における地震活動, 地震研究所叢報, 51, 115-140.
- MORTON, B. R., G. TAYLOR and J. S. TURNER, 1956, Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proc. Roy. Soc., Ser. a*, 234, 1-22.
- SEKIOKA, M. and K. YUHARA, 1974, Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface, *J. Geophys. Res.*, 79, 2053-2058.
- 閔岡 満・伊藤芳朗・斎藤輝夫・大庭 基・高橋憲一, 1978, 箱根大涌谷における放熱量測定, 地熱, 15, 11-18.
- 露木利貞, 1974, 南九州の温泉と地熱, 地熱, 11, 5-12.
- 渡部暉彦・山口 勝・増谷文雄・宮崎 勿・寺尾弘子, 1978, 1977~1978年霧島火山周辺における地震活動, 火山第2集, 23, 286.

### 9. Geothermal Survey of the Volcanoes Kirishima.

By Tsuneomi KAGIYAMA, Kohichi UHIRA, Teruhiko WATANABE,  
Fumio MASUTANI and Masaru YAMAGUCHI,  
Earthquake Research Institute.

In and around the volcanoes Kirishima, there were many seismic swarms since September 1975, especially frequent under the craters Ohachi and Shinmoe-dake. For the prediction of steam explosion which is most probable at the volcanoes Kirishima, it is important to notice the variation in their thermal activities. However, the thermal states of these craters have not been investigated thoroughly. Therefore, the authors carried out geothermal surveys of Ohachi and Shinmoe-dake which are present active craters, and of Iwo-yama, the most thermally active area in Kirishima, during November, 1978. The results of the surveys are summarized as follows.

1) Surface temperature distributions are made clear by the measurements with an infra-red thermometer (Fig. 2 b, 3 c, 4 b).

2) Statistics of these surface temperature distributions give the surface temperature of the "normal" area,  $T_0$  as 6.2°C, 6.9°C and 2.9°C, at Ohachi, Shinmoe-dake and Iwo-yama, respectively (Table 8). Through these analyses, high thermal anomalies (higher than  $T_0+3\sigma_T$ ) are recognized at each site.

3) The fumarolic temperature of Ohachi is 96°C, the same as in 1972, which is the boiling temperature of water at that altitude. The fumarolic temperatures of Iwo-yama range from 93.5°C to 174.0°C (Table 5).

4) Heat discharge and H<sub>2</sub>O emission rates from these areas are estimated by successive photographs of fumarolic plumes and by surface temperature distributions of steaming grounds. The heat discharge rates of Ohachi, Shinmoe-dake and Iwo-yama are  $2.1 \times 10^6$  watt,  $2.2 \times 10^7$  watt and  $6.1 \times 10^7$  watt, respectively. The H<sub>2</sub>O emission rate of Ohachi is less than  $7.8 \times 10^2$  g/sec, from Shinmoe-dake, between  $7.2 \times 10^3$  and  $7.9 \times 10^3$  g/sec and from Iwo-yama,  $2.2 \times 10^4$  g/sec (Table 9).