

## 熱赤外映像観測からみた桜島南岳山体斜面の熱活動

横尾亮彦\*・井口正人\*・石原和弘\*

(2006年12月25日受付, 2007年3月13日受理)

Geothermal Activity on the Flank of Sakurajima Volcano  
Inferred from Infrared Thermal Observation

Akihiko YOKOO\*, Masato IGUCHI\* and Kazuhiro ISHIHARA\*

In June 2006, Showa crater on the southeastern flank of Minamidake, Sakurajima volcano erupted after 58 years silence. Geothermal observation has been repeated 5 times since March 2006, using an infrared thermal camera. The results of the observation were compared with the previous data. Thermal anomaly areas identified in 2006 coincide with the previous results. Increasing temperatures of the ground surface were recognized on the southeastern flank of the volcano in particular around Showa crater and fumarolic zones, over the data of 1992. In contrast, no significant change in the temperature was observed on the southern flank. These results suggest that the geothermal activity on the southeastern flank of the volcano became high prior to the 2006 eruption at Showa crater.

**Key words:** infrared thermal observation, Sakurajima volcano, Showa crater, geothermal activity

## 1. はじめに

1972年秋から南岳山頂火口の噴火活動が激化した桜島では、1974年から1992年にかけて集中総合観測の一貫として、山麓および空中からの熱赤外スキャナーによる火口内および山体の熱異常の観測が繰り返し行われた(例えば、加茂・西, 1975; 加茂・他, 1977)。その結果、桜島には、南岳山頂火口内と、火口の東(昭和火口周辺)、南東、南の山体斜面に熱異常域が存在することがわかった。また、1974~1983年までの期間における山頂火口内からの熱放出率は75~147 MW以上(原著論文ではcal/s単位で記述されている)、山体斜面の各熱異常域からの熱放出率はこれよりも一桁小さく3~16 MWと見積もられた(Table 1; 加茂・他, 1980; 1986)。

南岳東斜面には、1939~1941年の噴火活動で形成され、1946年の昭和噴火で約0.2 km<sup>3</sup>の溶岩(石原・他, 1981)を流出した昭和火口がある。ここでは、1948年7月を最後に噴火活動は発生していなかった。昭和火口周辺の熱活動は、1976年までは南岳山体斜面における熱異常域の中で、もっとも熱放出率が大きかったものの(加

茂・他, 1980)、その後、1992年までの間は、次第に地表温度が低下する傾向にあった(加茂・他, 1995)。ところが、2006年2月下旬頃から昭和火口近傍で噴気活動の活発化が認められ、6月4日に58年ぶりとなる噴火が始まった。今回の噴火活動は高さ数100 m~1,000 m程度の噴煙の間欠的な放出で特徴付けられ、およそ半月間継続した。

GPS連続観測によって、1995年以降、桜島の北東にある始良カルデラへのマグマ蓄積が継続していることがわかってきたが(井口, 2006)、2006年の噴火活動に直接関連する前兆現象は、地震観測では捉えられなかった。火山噴火前には熱異常域の変化が確認されることもあり(たとえば、伊豆大島1986年噴火; 鍵山・辻, 1987)、今回の一連の噴火活動に関連して、昭和火口周辺を含む桜島南岳山体斜面の熱活動がどのように推移していたのかを知ることは重要である。そこで、2006年に実施した5回の熱赤外映像観測結果と、過去の観測結果とを比較し、桜島南岳山体斜面の熱活動の推移について検討した。

\* 〒891-1419 鹿児島市桜島横山町 1722-19  
京都大学防災研究所附属火山活動研究センター  
Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1722-19,

Sakurajima Yokoyama-cho, Kagoshima 891-1419, Japan.

Corresponding author: Akihiko Yokoo  
e-mail: yokoo@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

Table 1. Estimated heat discharge rate  $Q$  [MW] from the anomaly areas

Date	A	B	C	D	Reference
1974/12	16	11		3.1	Kamo <i>et al.</i> (1980)
1976/04	13	8.0		7.5	Kamo <i>et al.</i> (1980)
1976/12	10	3.9		5.0	Kamo <i>et al.</i> (1980)
1982/04	13				Kamo <i>et al.</i> (1986)
1982/12	14				Kamo <i>et al.</i> (1986)
1983/03	11				Kamo <i>et al.</i> (1986)
1983/10	10				Kamo <i>et al.</i> (1986)
2006/03	18±3	17±2	9.3	1.9	this study
2006/05	14±3	13±1	3.3		this study
2006/07	(4.0±0.6)	(6.2±0.6)			this study
2006/09	8.9±1.3	14±1			this study
2006/11	8.0±1.1	8.7±0.9	3.3		this study

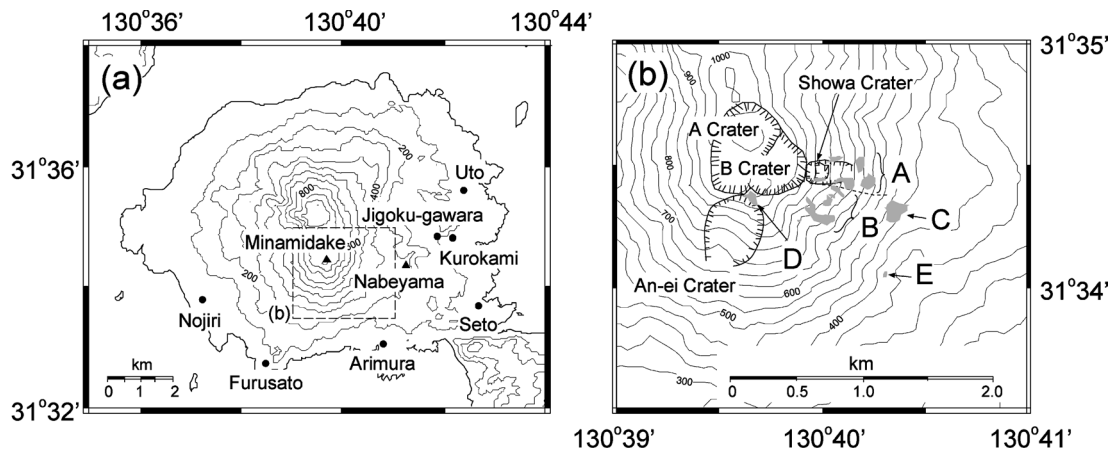


Fig. 1. (a) Map of Sakurajima volcano with seven locations of the 2006 thermal observation (solid circles). (b) Five thermal anomaly areas ( $2^{\circ}\text{C}$  higher than the surface temperature at the normal area on Nov. 2006) were recognized on southeastern flank of Minamidake (A-E).

## 2. 熱赤外映像観測と大気補正

熱赤外映像カメラを用いた観測は2006年3月29日、5月22日、7月12日、9月21日、11月2日の計5回、いずれも日没後の19時から21時にかけて実施した。観測点はFig. 1aに示す7箇所である<sup>1</sup>。使用したカメラはNEC三栄製TH7102MVであり、視野角水平 $29^{\circ}$ ×垂直 $22^{\circ}$ の付属標準レンズを用いた。この値は、1992年を除くこれまでの観測で使用された機材の視野角(水平 $25\sim 30^{\circ}$ ×垂直 $18\sim 25^{\circ}$ )と大きな違いはない(1992年は水平 $15^{\circ}$ ×垂直 $10^{\circ}$ )。また、本カメラの検出波長は $8\sim 14\mu\text{m}$ である。各観測点では現地地上温度・湿度をアスマン温度計を用いて計測した。

桜島における熱観測では、各観測点からそれぞれの熱異常域までの視線距離は長いため(約 $2\sim 4.5\text{ km}$ ; Fig.

<sup>1</sup>2006年6月の噴火以降、地獄河原からの観測は行っていない。

1)、観測結果の大気補正が必要である。そこで、まず、各観測点の地上温度・湿度と、鹿児島市上空の高層気象データを用いて、大気中の水蒸気、乾燥空気、エアロゾルによる赤外線吸収補正の経験式(近藤, 2000)によって赤外線の大気透過率 $\tau$ を推定した。そして、山体斜面からの熱放射率 $\epsilon$ を0.97(江原, 1975)として、観測値 $T_{\text{obs}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]と大気平均気温 $t_{\text{ave}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]から

$$T = 4 \sqrt{\frac{(T_{\text{obs}} + 273.15)^4 - (1 - \tau) \cdot (t_{\text{ave}} + 273.15)^4}{\tau \epsilon}} - 273.15 \quad (1)$$

の式により山体斜面における地表温度 $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]を見積もった。

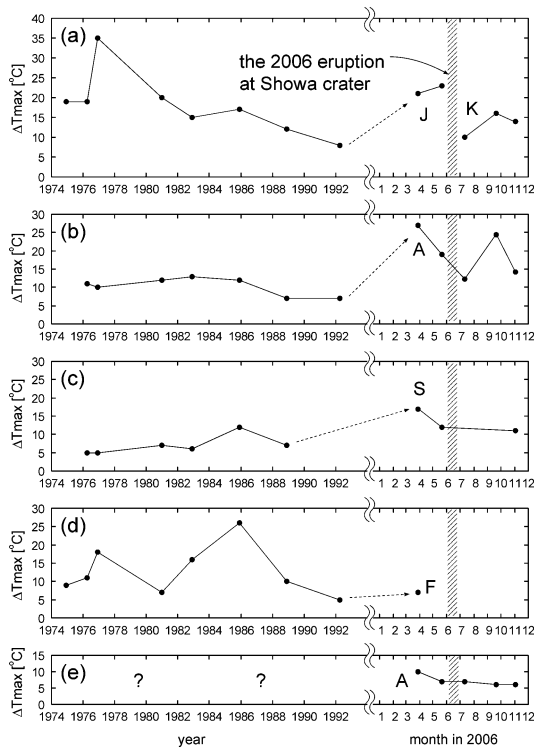


Fig. 2. Temporal changes of  $\Delta T_{max}$  at the thermal anomaly areas of A (a) to E (e) from 1974 up to 1992 and during 2006. Capitals of A, F, J, K, S in each graph are the initials of the locations of the 2006 observations: Arimura, Furusato, Jigoku-gawara, Kurokami and Seto. Data of 1970s-1990s are referred from Kamo and Nishi (1975) and Kamo *et al.* (1980, 1982, 1986, 1988, 1989, 1995).

### 3. 観測により検知された熱異常域

2006年の熱赤外映像観測によって同定された桜島の熱異常域は、以下のA~Eの5箇所である (Fig. 1b)。ここでは、周囲山体表面温度よりも約 $2^{\circ}\text{C}$ 以上高い領域を熱異常域A~Eとして判断した。

- A: 昭和火口内および昭和溶岩流を含む昭和火口周辺の地域 (標高600~850m付近)。
- B: 南岳南東斜面に発達する侵食谷の内部 (標高650~850m付近)。
- C: B火口と鍋山の間地点にあたる南岳東南東斜面 (標高450~500m付近)。
- D: 安永火口上端部 (標高950~1,050m付近)。
- E: 熱異常域Cからおよそ500m南の南岳南東斜面 (標高380m付近)。

なお、熱異常域Aと熱異常域Bは、Fig. 1bに破線で示さ

れる昭和火口南縁の尾根を境として区別した。熱異常域A~Dの存在については、従来の報告書 (加茂・他, 1995など) ですでに指摘されてきた通りであるが、熱異常域Eについての報告はない。これは、従来の観測点からは熱異常域Eに相当する地点が見逃せなかったためである。

### 4. 熱活動の推移

各熱異常域の地表温度  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] と近傍の熱異常の認められない領域における平均地表温度  $T_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] との温度差  $\Delta T = T - T_0$  により、熱異常域の活動の推移を検討した。2006年のいずれの観測時期も、平均地表温度  $T_0$  の算出のための熱異常のない領域の位置・地表面積の大きさは、対象となる各熱異常域に対して一定とした ( $0.5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ m}^2$ )。

Fig. 2に各熱異常域における温度差の最高値  $\Delta T_{max}$  を従来の観測によってもとめられた値 (例えば加茂・西, 1975) とともに時系列で並べた。1990年頃に比べて、2006年の  $\Delta T_{max}$  は昭和火口周辺の熱異常域A, Bで約 $5 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 高くなっている。昭和火口の南東の領域Cも数 $^{\circ}\text{C}$ ~約 $10^{\circ}\text{C}$ 上昇している。これに対して安永火口上端部の熱異常域Dでは変化は約 $2^{\circ}\text{C}$ と小さい。なお、2006年7月は、もやがかかり、視界が悪かったために、前後の結果に比べて小さい値を示す。

各熱異常域からの熱放出率をKagiyama and Hagiwara (1980) の式

$$Q = (k_1 + k_2) \sum_{T > T_0 + 3\sigma} (T - T_0) \cdot S(T) \quad (2)$$

によって見積もり、Table 1にまとめた。 $T_0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] は熱異常のない領域の平均地表温度、 $\sigma$  はその標準偏差、 $S(T)$  [ $\text{m}^2$ ] は地表温度が  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] の領域の面積である。式 (2) 中の係数  $k_1$  および  $k_2$  には、経験的に用いられている  $2 \text{ W/m}^2\text{C}$ 、 $35 \text{ W/m}^2\text{C}$  をそれぞれ採用した (Sekioka, 1983)。なお、係数  $k_1$ ,  $k_2$  の値は観測時の気象条件に依存するため、場合によっては見積もられる結果は一桁程度変わらうが、2006年の各観測時期における、各熱異常域間の熱放出率の相対的な関係は変わらない。

2006年における昭和火口付近の熱異常域Aからの熱放出率はそれぞれ $8 \sim 18 \text{ MW}$ であり、南岳山頂火口からの噴火活動が活発であった1974~1983年とほぼ同じ値であった。昭和火口南側の熱異常域Bからの熱放出率は $9 \sim 17 \text{ MW}$ であり、Aの熱放出率と同程度にまで上昇していた。これに対して、安永火口上端部の熱異常域Dからの熱放出率はA, Bに比べて小さい $2 \text{ MW}$ と見積もられた。

以上から、ここ10余年間の南岳山体斜面の熱活動の変化は、主として、昭和火口周辺を含む南東斜面で生じ

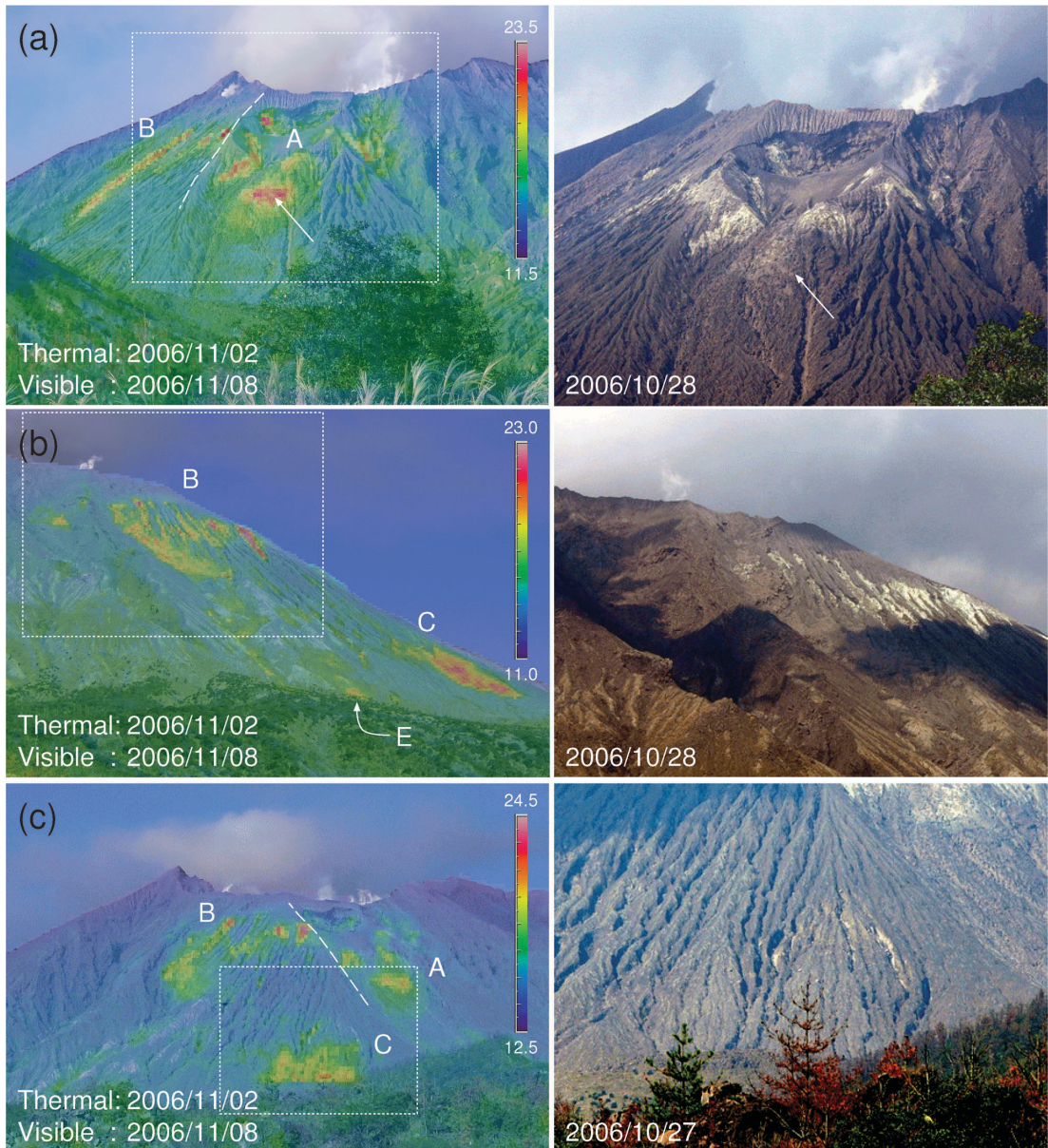


Fig. 3. Combining infrared thermal image with visible image taken from (a) Kurokami, (b) Arimura and (c) Seto. The color scales in the left images show the observed raw temperatures  $T_{obs}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Capitals of A-E mean the five thermal anomaly areas. Squares drawn by white dotted line are the FOV of right-sided close-up images. Arrowed anomaly region on a part of Showa Lava in (a) was not clear in 1992.

ていたことがわかる。とくに、熱異常域 A, B における 2006 年 3 月の  $\Delta T_{max}$  は、1992 年に比べて約  $15\sim 20^{\circ}\text{C}$  上昇しており (Fig. 2), 2006 年 6 月の昭和火口付近からの噴火に先立って、桜島南岳の南東斜面における熱活動はすでに活発化していたといえる。

### 5. 桜島南岳南東斜面の熱活動

昭和火口付近からの噴火に先立って熱活動が活発化した桜島南岳の南東斜面に分布する熱異常域 A~C について、熱異常域と地形の対応および噴火前後における熱異常域の変化を調べた。黒神, 有村, 瀬戸から撮影した熱赤外画像を、同地点から撮影した可視画像に重ね合わせ

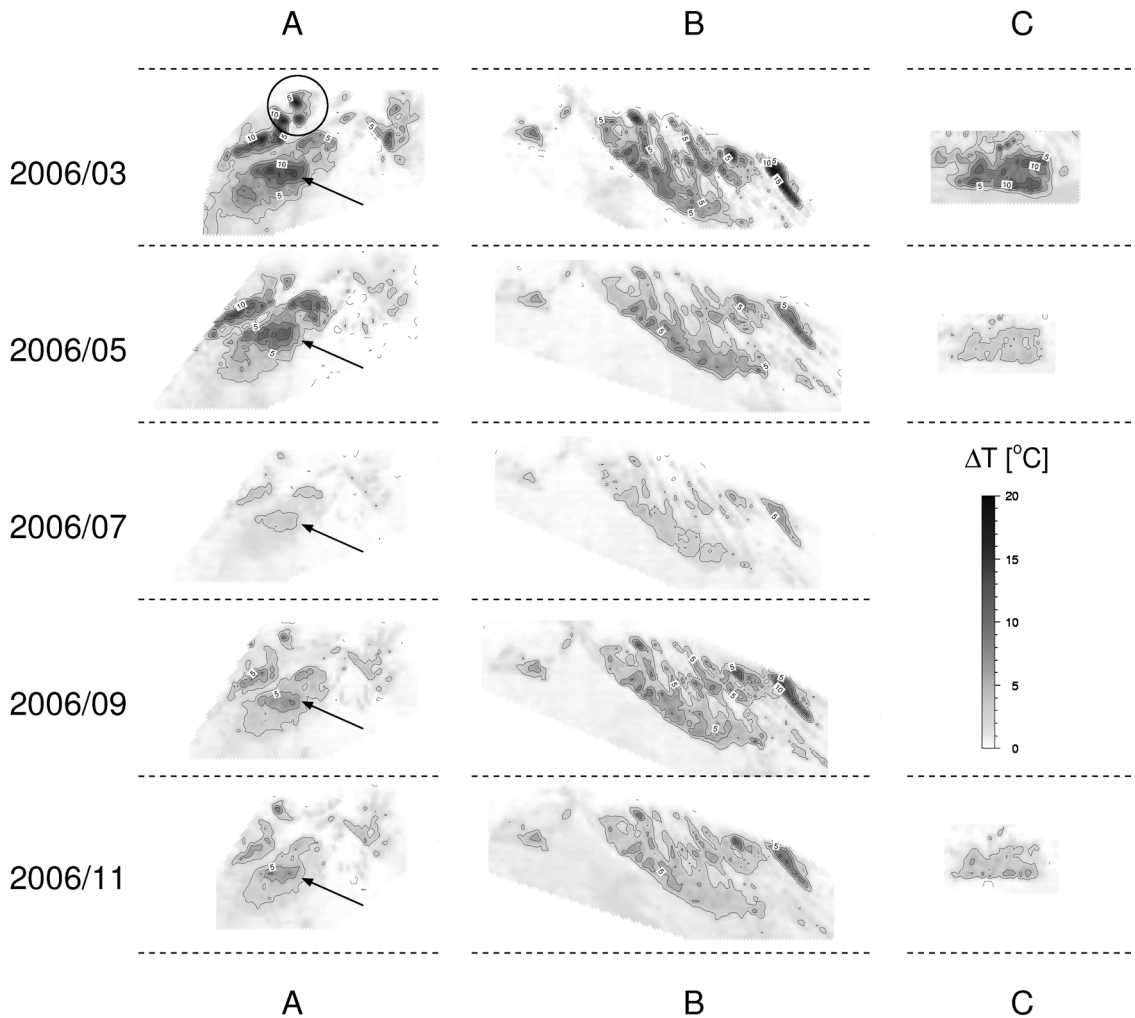


Fig. 4. Distribution patterns of  $\Delta T$  at the thermal anomaly areas of A, B and C, during the 2006 observations. Contour interval of  $\Delta T$  is 2.5°C. Arrows show the anomaly region on a part of Showa Lava.

たものを Fig. 3 左列に、また、それぞれの熱異常域近傍を拡大した可視画像を Fig. 3 右列に示す。Fig. 4 は、熱異常域 A~C の地表温度と熱異常の認められない部分の地表温度との差  $\Delta T$  の変化である。

昭和火口周辺の熱異常域 A では、昭和火口東側にある昭和溶岩流上の熱異常部分 (Fig. 3a 矢印) を除いたすべての熱異常部分で、昇華物の付着によって山体表面が白色に変色していることが可視画像上で確認できる (Fig. 3a)。これらのうち、2006 年の噴火活動で新たに開口した火口の南西側内壁に位置する熱異常部分は、2006 年 6 月の噴火以前でも同じ位置に確認できる (Fig. 4 左 丸印)。他方、昭和溶岩流上に認められる熱異常部分は、周囲の昭和溶岩流よりも明るい色合いを呈すものの、白色

変色は認められない。この部分の熱異常は 1992 年の観測結果 (加茂・他, 1995) では顕著でないが、2006 年はいずれの観測時期も明瞭であり (Fig. 4 左 矢印)、1992 年に比べて、南岳の南東側斜面の熱活動が活発化したことを示している。

昭和火口南の熱異常域 B では、熱異常が観察される侵食谷のうち昭和火口に近いものは、その内部表面が A の熱異常部と同様に顕著に白色変色している (Fig. 3b)、比較的大規模な南側の侵食谷内部は広範囲にわたって熱異常を示すものの、白色変色は観察されない。また、昭和火口の南東にある熱異常域 C については、周囲地形・堆積物との明瞭な違いは認められない (Fig. 3c)。

Fig. 4 と Table 1 によれば、2006 年の活動期間を通じ

て、南岳南東斜面にある熱異常域 A~C のいずれにおいても  $\Delta T$  分布の様子、熱放出率は漸次縮小および低下するようにみえる。6月の昭和火口付近からの噴火をきっかけに、南岳南東斜面の熱活動が低下し始めた可能性が示唆される。

## 6. ま と め

2006年に桜島において行った熱赤外線映像観測によると、従来から報告のあった4箇所熱異常域 A~D に加えて、南岳南東斜面の標高 380 m 付近にも熱異常域 E が確認された。前回 1992 年の観測結果と比較すると、3箇所熱異常域 A~C における地表温度と熱異常の認められない地表温度の差の最大値  $\Delta T_{max}$  が上昇していた。また、昭和火口東側の昭和溶岩流上に明瞭な熱異常が観測された。2006年6月の昭和火口からの噴火に先行して、ここ 10 余年の間に、桜島南岳の南東斜面では熱活動が活発化していたものと考えられる。

## 謝 辞

熱赤外線映像観測に際し、京都大学防災研究所の為栗健氏、大久保綾子氏、福岡麻沙代氏に御協力をいただいた。鹿児島市上空の高層気象データは鹿児島地方気象台の菅井明氏からいただいた。査読者である鍵山恒臣氏、藤光康宏氏からの建設的な指摘により本稿は大きく改善された。以上の方々に深く感謝します。なお、本研究の一部は 21 COE プログラム「災害学理の究明と防災学の構築」(No. 14219301, 代表: 河田恵昭) の支援を受けて行われた。

## 引用文献

江原幸雄 (1975) 桜島火山周辺地域における地表物質の放射率決定。桜島火山の総合調査報告, 40-42。  
井口正人 (2006) マグマの蓄積過程にある始良カルデラ。月刊地球, 28, 115-121。  
石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一 (1981) 桜島

火山の溶岩流 (I) —有史時代の溶岩流の容積—。京大防災研年報, 24B, 1-10。

- Kagiya, T. and M. Hagiwara (1980) Geothermal survey in and around O-ana crater and Jodo-daira flat, the Volcanoes Azuma. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 55, 681-703。  
鍵山恒臣・辻 浩 (1987) 1986年伊豆大島噴火の熱的前兆と現況。月刊地球, 9, 435-440。  
加茂幸介・西 潔 (1975) 赤外線映像による桜島南岳の地表温度異常域の調査。桜島火山の総合調査報告, 33-39。  
加茂幸介・江頭庸夫・西 潔・石原和弘 (1977) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第2回桜島火山の集中総合観測, 34-44。  
加茂幸介・西 潔・高山鉄朗 (1980) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第3回桜島火山の集中総合観測, 27-33。  
加茂幸介・西 潔・高山鉄朗・須藤靖明 (1982) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第4回桜島火山の集中総合観測, 29-31。  
加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鉄朗 (1986) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第5回桜島火山の集中総合観測, 29-32。  
加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鉄朗 (1988) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第6回桜島火山の集中総合観測, 31-36。  
加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鉄朗 (1989) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第7回桜島火山の集中総合観測, 27-31。  
加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鉄朗 (1995) 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査。第8回桜島火山の集中総合観測, 31-36。  
近藤純正 (2000) 地表面に近い大気の科学 理解と応用。東京大学出版会, pp. 324。  
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. *Mem. National Defense Academy Japan*, 23, 95-103。

(編集担当 松島喜雄)