火山専用空中赤外映像装置に関する開発研究（第6報）　－ヘリコプターMSS及びランドサットTMデータによる桜島火山体の熱分布の解析－

著者	植原 茂次，矢崎 忍，熊谷 貞治，幾志 新吉，高橋 博
雑誌名	国立防災科学技術センター研究速報
号	76
ページ	1-33
発行年	1987-09-14
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002813/

528.74：551.21（522.8）

火山専用空中赤外映像装置に関する開発研究（第6報）
—ヘリコプターMSS及びランドサットTMデータによる桜島火山体の熱分布の解析—

植原茂次*・矢崎　忍*・熊谷貞治**・幾志新吉*・高橋　博***
国立防災科学技術センター

Developmental Study on New Airborne Multi－spectral Scanner System Specifically Oriented to Thermal Observation of Volcanoes (Sixth Report)
—Analyses of the Thermal Distribution of Sakurajima Volcano Body Using the Data Taken from a Helicopter Loaded MSS and Landsat TM—

By

S. Uehara, S. Yazaki, T. Kumagai, S. Kishi and H. Takahashi

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

In relation to the developmental study on the new airborne multi－spectral scanner system for thermal observation of volcanoes, the authors participated to the sixth cooperative comprehensive observations on Sakurajima Volcano in Nov. 1985, and analysed the thermal distribution of the volcano body using the data taken by a helicopter－loaded MSS and Landsat TM in order to evaluate the applicability of the new available means for thermal observation.

The helicopter－loaded MSS which furnishes a SiPD visible and a HgCdTe thermal detectors and side－looking function of vertical scanning with 60° FOV and 1 mrad IFOV, can detect two temperature ranges by setting low temp. mode (－20℃ to 80℃) or high temp. mode (－20℃ to 1500℃).

The thermal observations by helicopter－loaded MSS conducted from 13 points surrounding the Minamidake crater, which is frequently repeating explosive eruptions, with the distances from the crater about 1600 to 7700 m and 1000 m, 1850 m in altitudes on 27 Nov. 1985.

Landsat TM data of the volcano were taken at 10：16 AM on 26 Nov. 1985. The image shows dense volcanic smoke spreading to the SE direction from the crater.

The ground truth data were taken by the use of a portable thermal radiometer at two

*第4研究部，**第3研究部，***所長

places, Harutayama Volcanic Observatory and Yuno, Higashi-Sakurajima-cho, corresponding to the helicopter and Landsat observations.

As the results, the following conclusions are obtained.

(1) Side-looking thermal images taken by the helicopter-loaded MSS can detect two areas with slightly higher temperature on the flank of Minamidake volcano body except the crater with highest temperature. The areas correspond to the sites of Showa Crater and deep eroded gorge along the SE flank.

(2) A fairly good relationship between the helicopter-loaded MSS thermal data represented by 8 bit CCT count and ground truth data (observed temperature) is obtained.

(3) The thermal image of the Sakurajima Volcano derived from TM band 6 data shows two areas with slightly higher temperature except the Minamidake Crater with highest temperature. The areas correspond to the site of Anei Crater and a area located on the SSE flank of the Minamidake volcano body apart from the crater about 1000 m to its center.

The maximum temperatures of the crater, the former and the later areas mentioned above are calculated as 30℃, 16℃ and 17℃ respectively.

(4) The maximum and mean temperatures in the Minamidake Crater are estimated as 232℃ and 190℃ respectively based on the data of TM band 7 and Plank's Formula.

(5) The above mentioned results seems to be necessary to verify through improving ground truth method.

However, The data taken by the helicopter-loaded MSS and Landsat TM indicate to be effective means for watching volcanic activities.

目　次

1. はじめに …… 3
2. ヘリコプター搭載赤外走査放射計（MSS）による桜島火山の熱分布観測 …… 3
2.1 観測方法 …… 3
2.1.1 ヘリコプター搭載 MSS …… 3
2.1.2 搭載ヘリコプター …… 7
2.1.3 観測点と観測仕様 …… 7
2.2 ヘリコプター MSS による観測結果 …… 7
2.3 地上観測結果 …… 17
2.4 ヘリコプター MSS と地上の観測結果の比較 …… 18
2.5 観測結果等の考察 …… 21
2.5.1 火山体の温度異常域 …… 21
2.5.2 ヘリコプター MSS による桜島火山体の熱分布測定結果のまとめ … 23
3. ランドサット TM データによる桜島火山の熱分布の解析 …… 24
3.1 利用した TM データと地上観測 …… 24
3.2 TM バンド6データによる桜島火山の熱分布の解析 …… 25
3.2.1 地理的補正等 …… 25
3.2.2 温度の解析 …… 26
3.3 地上観測による火山体等の温度 …… 28
3.4 TM バンド6データによる温度解析結果と地上温度観測結果との比較 28
3.5 TM バンド7による南岳火口温度の推算 …… 29
3.6 ランドサット TM データによる桜島火山の熱分布解析結果のまとめ … 31
謝辞 …… 33
参考文献 …… 33

1. はじめに

桜島は最近継続的な噴火活動を行っており，我国における最も活動的な火山の１つとして，第３次噴火予知計画においても，整備された観測施設に基づく重点的な観測研究の実施と，定期的な総合集中観測による火山活動の診断が行われている．

昭和60年度の桜島の集中総合観測では，京都大学桜島火山観測所が，ヘリコプター搭載の熱赤外走査放射計による火山体の熱分布の観測実施を含めることになった．

国立防災科学技術センターは，火山専用空中赤外映像装置開発研究の一環として，桜島火山観測所が実施するヘリコプターによる熱観測に参加し，地上での温度グランドトルースを実施し，ヘリコプターによる観測データの処理・解析を行った．更に，その前日に撮られた，ランドサットTM（Thematic Mapper）の熱赤外バンド（バンド６）及び短波長赤外バンド（バンド７）を用いて，桜島の熱分布の解析を行い，グランドトルースデータと比較してその利用可能性を評価した．

本報告は，上述の２つの観測研究とその成果を取りまとめ，若干の考察を加えたものである．

2. ヘリコプター搭載赤外走査放射計（MSS）による桜島火山の熱分布観測

2.1 観測方法

2.1.1 ヘリコプター搭載MSS

使用したヘリコプター搭載MSSは，中日本航空所有のもので，その機器の仕様概要を以下に示す．

(1)名称：ヘリコプター搭載用高速高分解能スキャナー

(2)型式：J－SCAN－AT－2H

(3)分解能：赤外域　1 m rad，可視域　2 m rad

(4)スキャニング速度：120 scan / sec

(5)スキャニング角度：60°　鉛直方向スキャン

(6)主望遠鏡：直径　184mm，焦点距離　400mm

(7)検出器：

赤外域　8～14 μm　　HgCdTe

可視域　0.4～0.9 μm　　SiPD

(8)基準黒体炉：

サーモ・モジュール素子による気温フローティング・コントロール

(9)ジャイロ：

ディレクショナル・ジャイロ TKK DG－51改

バーチカル・ジャイロ TKK VG－40

⑽角度補正：

ヨーイング　機械式補正　±27°

ピッチング　機械式補正　± 5°

ローリング　信号補正　　±15°

⑾測定温度範囲：

－20～80℃（常温仕様）

－20～1500℃（高温仕様）

⑿データ集録：

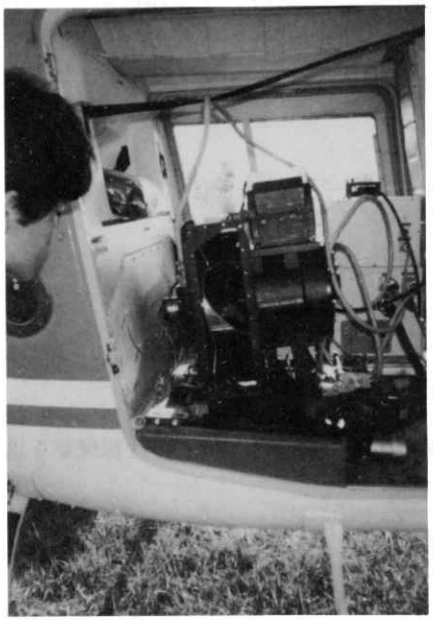


写真１　ヘリコプター搭載 MSS

Photo 1 Helicopter loaded MSS



写真２　搭載ヘリコプター

Photo 2 Helicopter used for observation

携帯用カセットVTRによるPCM方式

赤外信号　1/60秒について2048データポイント

可視信号　1/60秒について512データポイント

基準黒体炉温度

ジャイロ・データ（ヨーイング・エラー，ピッチング・エラー，ローリング）

ライン・ナンバー

時刻I/D

⒀機上モニター：

６×９インチCRTによる４ビット・ソース・データ・マップ表示（ローリング補正）

⒁メモリー・サイズ：

256×256　スクロール

⒂電　源：最大28Vの時　25A

表１　観測点の観測諸元
Table 1 Parameters in each obs. point

観測点	観測対象	観測時刻	ヘリコプター高度*	観測モード	南岳火口中心までの路離	南兵火口中心の地上分解能
6	南岳火口	07：03	1,850m	常温域	2,360m	2.4m
5	〃	：15	〃	〃	2,860	2.9
9	〃	：29	〃	〃	2,860	2.9
8	〃	：39	〃	〃	2,140	2.1
7	〃	：50	〃	〃	1,570	1.6
2	火山体	：59	1,000	〃	7,710	7.7
1	〃	08：10	〃	〃	5,360	5.4
4	〃	：14	〃	〃	6,500	6.5
3	〃	：20	〃	〃	6,070	6.1
W	海面	：26	〃	〃		
S	南岳火口	：42	1,850	高温域	2,860	2.9
E	〃	：50	〃	〃	3,710	3.7
E1	〃	：52	〃	〃	3,710	3.7

* ヘリコプター高度：南岳の標高が1,040mであるので，観測点１～４は桜島の火山全体を南岳噴火口の高度から視野に入れることとした．一方観測点６～９及びS，E，E1はサイドルッキング水平から上下方向30°の角度で南岳火口内を視野に入れるために，火口径200m，火口壁高300mの条件でヘリコプターの安全性を配慮して火口から2,000m離れた地点から観測することとしたため，ヘリコプター高度は1,850mとした．

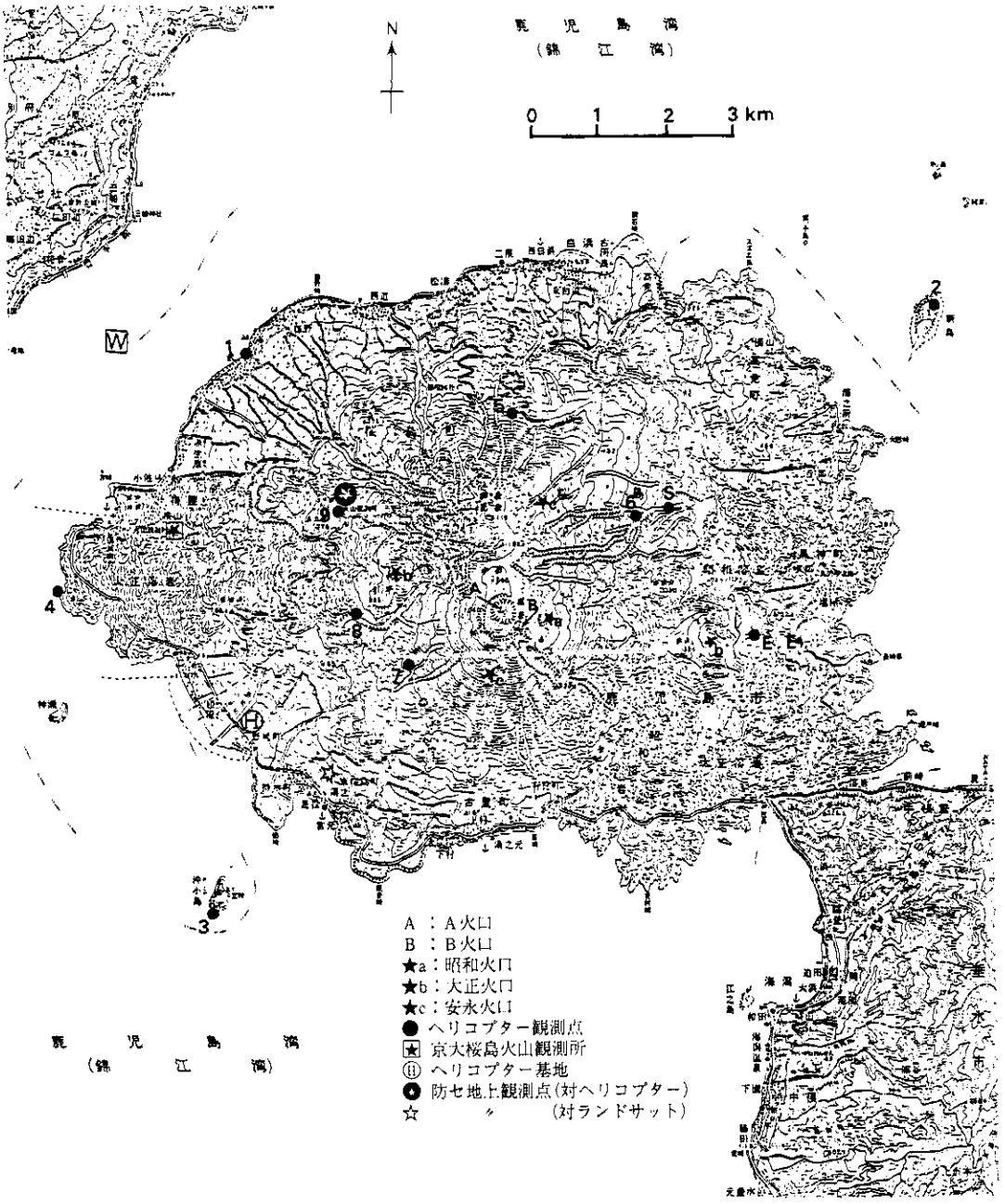


図１　桜島火山体熱分布観測位置図

Fig. 1 Observation locations for thermal distribution of Sakurajima Volcano body.

(16)特　徴：

ヘリコプターをホバリングさせ，サイドルッキングで画角60°×60°の画面範囲を測定・記録できる．

写真1及び2にヘリコプター搭載MSS及び搭載ヘリコプターを示す.

2.1.2 搭載ヘリコプター

(1)型　式：　Bell 206 B

(2)寸　法：

全　幅　10.16m，全　長　11.82m　　全　高　2.91m

(3)重　量：

自　重　660kg，最大重量　1452kg

(4)エンジン：最大出力　317 hp

(5)性　能：

最高速度　225km/h　　上昇限度　6096m　　最大積載量　792kg

巡航速度　219km/h　　航続距離　554km　　最大旅客数　4人

2.1.3 観測点と観測仕様

図1に桜島の熱観測におけるヘリコプター及び地上の位置を地図上に示す．更に表1にヘリコプターの観測高度，観測モード（常温域，高温域）及び観測時刻等を示す.

ヘリコプターの観測は1985年11月27日午前7時から9時頃まで行われた.

国立防災科学技術センターの地上観測は，上記ヘリコプター観測時間中，京大桜島火山観測所の春田山火山観測所において，南岳山頂を中心に，火山体，火口上の噴煙等を目標として，携帯用放射温度計及び接触温度計を用いて繰り返し温度観測を行った.

用いた放射温度計の仕様は次のとおりであり，接触温度計は放射温度計の較正用として用いた.

機種：Raynger Ⅱ（米国 Raytek 社製）　　測温範囲：－30～1400℃　　視野角：2°

精度：±（指示値の1％）±1℃

また，接触温度計は横河電気製 YEW MODEL 2542である.

2.2 ヘリコプター MSS による観測結果

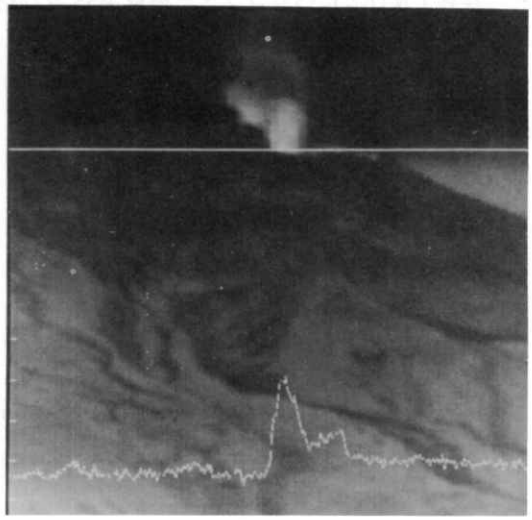
観測結果は各ピクセル毎8ビットのデジタルデータとし，2048ピクセル/ライン×4096ラインが各観測点毎の画像データとしてCCTに収録された.

国立防災センターでは，このCCTを用いて，各測点毎に南岳を中心とする画像をディスプレイし，CCTカウントのスライス画像及び設定した測線上のCCTカウントのプロファイルを作成し，温度分布の状況を検討した.

以下観測順に，熱分布画像を，図2(1)－(10)に示す.



(1)a, 熱分布スライス
(1)a, Slicing thermal distribution



(1)b, Hプロファイル
(1)b, H(horizontal) –profile

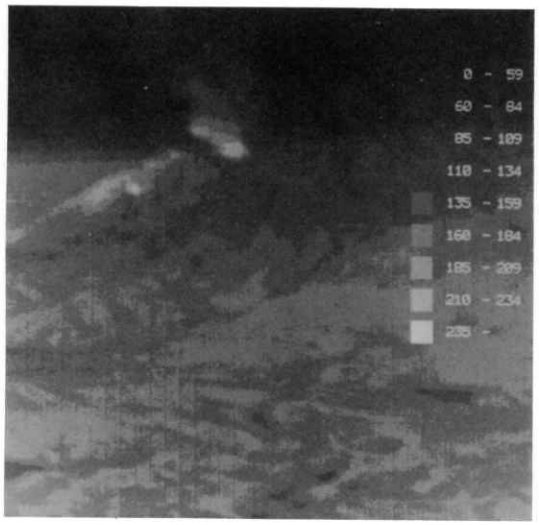


(1)c, Vプロファイル
(1)c, V(vertical) –profile

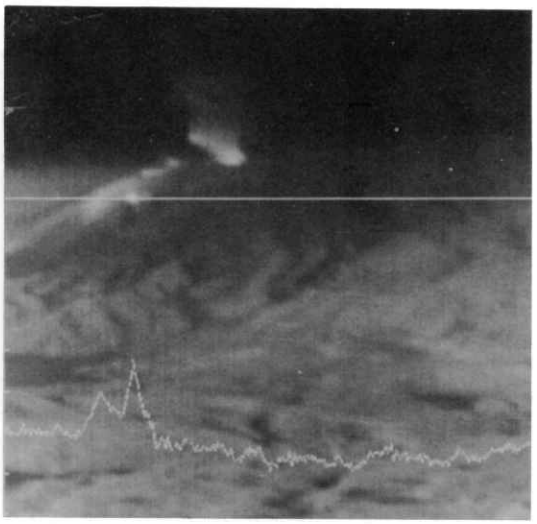
図 2 (1)観測点1よりの熱映像
t＝V.B, d＝NW, l＝5,360m, h＝1,000m
Fig. 2 (1) Thermal image from obs. point 1

(注記)
●熱分布スライスの数字はCCT・V
●プロファイルの目盛りはCCT・Vで50刻み, 0, 50, 100, 150, 200, 250
t：目標 V.B：火山体
d：南岳を望む方向
l：南岳から観測点までの水平距離
h：観測高度の標高

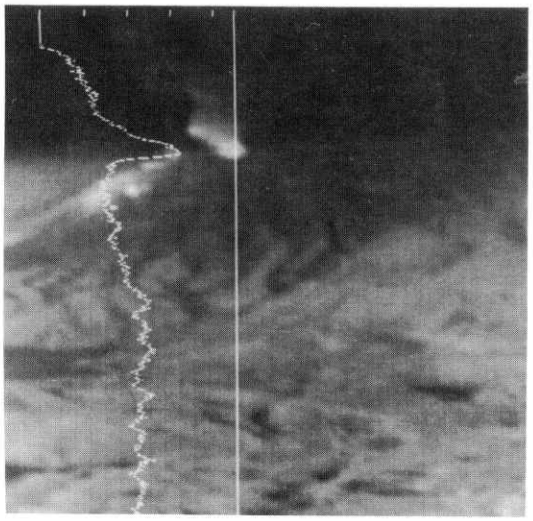
Notes :
for Slicing of thermal distribution : figures indicate CCT count
for H and V profile : scale marks are given in every 50 CCT counts as 0, 50, 100, 150, 200, 250
t : target, V. B : volcano body,
d : obs. direction to Minamidake
l : distance from obs. point to Minamidake
h : altitude of obs. by helicopter



(2)a，熱分布スライス
(2)a，Slicing of thermal distribution



(2)b，Hプロファイル
(2)b，H–profile

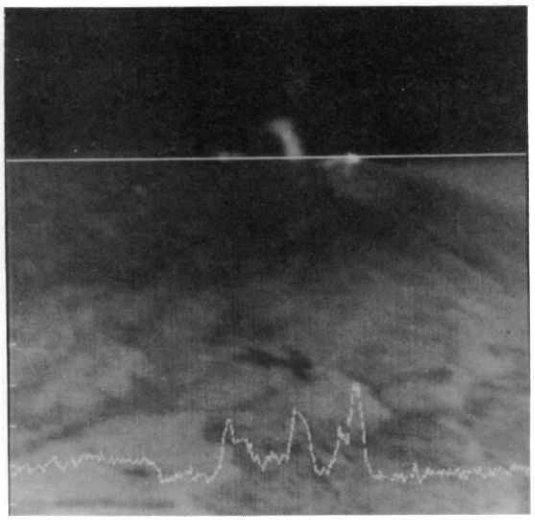


(2)c，Vプロファイル
(2)c，V–profile

図2(2)観測点2からの熱映像
t＝V.B，　d：NE，　l＝7,710m，　h＝1,000m
Fig. 2 (2) Thermal image from obs. point 2



(3)a, 熱分布スライス
(3)a, Slicing of thermal distribution



(3)b, Hプロファイル
(3)b, H–profile

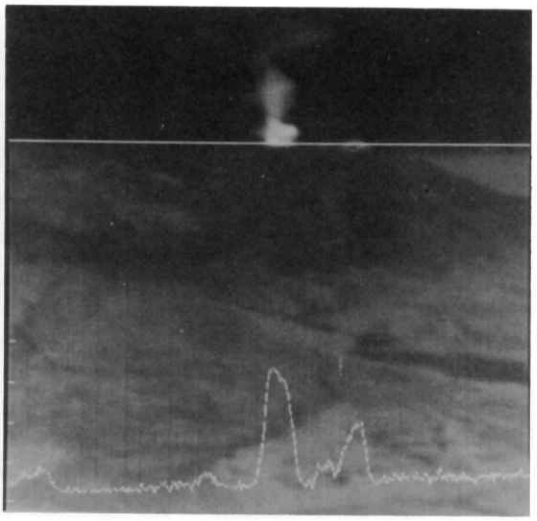


(3)c, Vプロファイル
(3)c, V–profile

図 2 (3)観測点3よりの熱映像
t：V.B, d：SW, l＝6,070m, h＝1,000m
Fig. 2 (3) The thermal image from obs. point 3



(4)a，熱分布スライス
(4)a，Slicing of thermal distribution

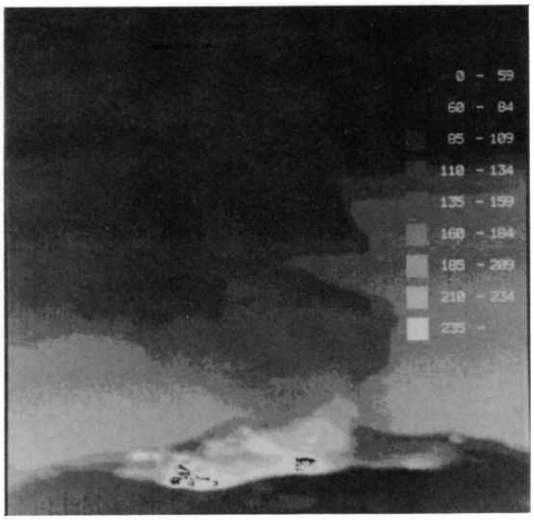


(4)b，Hプロファイル
(4)b，H–profile



(4)c，Vプロファイル
(4)c，V–profile

図2(4)観測点4よりの熱映像
t：V.B.　d：W.　l＝6,500m，　h＝1,000m
Fig. 2 (4) Thermal image from obs. point 4



(5)a，熱分布スライス
(5)a，Slicing of thermal distribution



(5)b，Hプロファイル
(5)b，H–profile

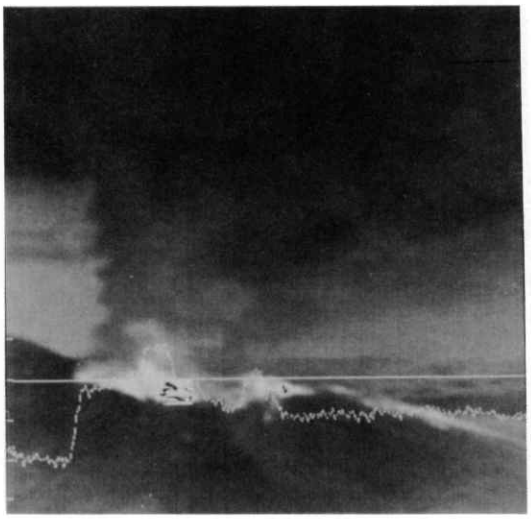


(5)c，Vプロファイル
(5)c，V–profile

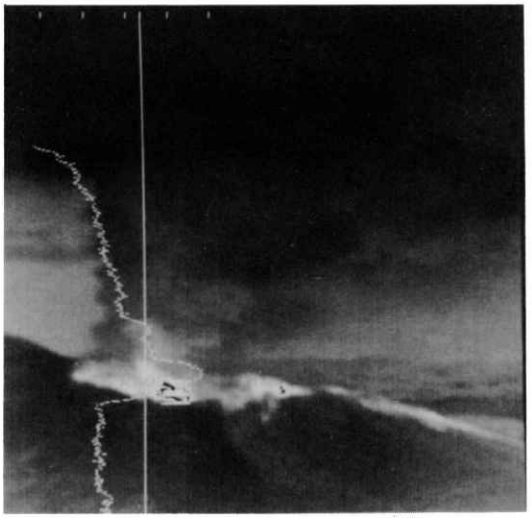
図２(5)観測点５よりの熱映像
t：M.C（南岳火口）　d：N，　l＝2,860m，
h＝1,850m
Fig. 2 (5) Thermal image from obs. point 5



(6)a，熱分布スライス
(6)a，Slicing of thermal distribution

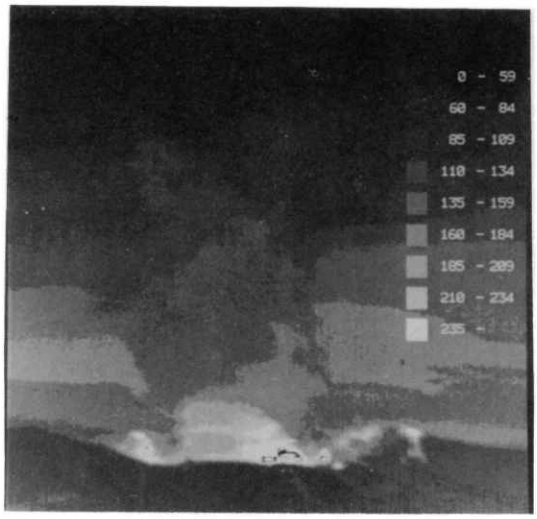


(6)b，Hプロファイル
(6)b，H–profile



(6)c，Vプロファイル
(6)c，V–profile

図2(6)観測点7からの熱映像
t：M.C，d：WSW，l＝1,570m，h＝1,850m
Fig. 2 (6) Thermal image from obs. point 7



(7)a，熱分布スライス
(7)a，Slicing of thermal distribution



(7)b，Hプロファイル
(7)b，H–profile



(7)c，Vプロファイル
(7)c，V–profile

図2(7)観測点8よりの熱映像
t：M.C.　d：W.　l＝2,140m，h＝1,850m
Fig. 2 (7) Thermal image from obs. point 8



(8)a，熱分布スライス
(8)a，Slicing of thermal distribution



(8)b，Hプロファイル
(8)b，H–profile

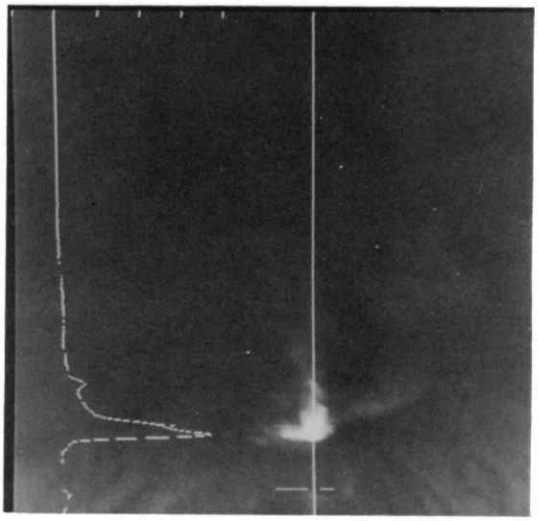


(8)c，Vプロファイル
(8)c，V–profile

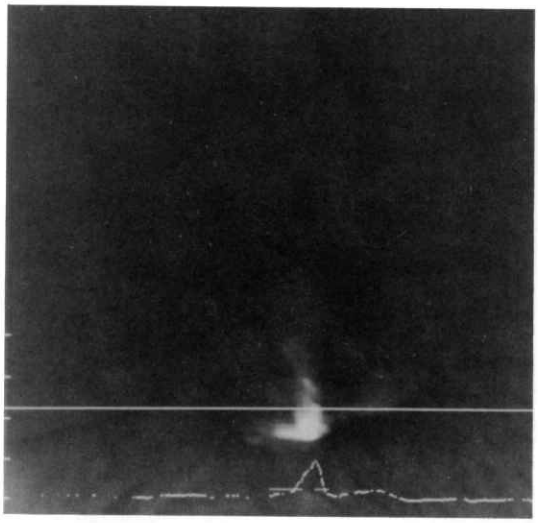
図2(8)観測点9よりの熱映像
t：M.C，d：NW，l＝2,860m，h＝1,850m
Fig. 2 (8) Thermal image from obs. point 9



(9)a, 熱分布スライス
(9)a, Slicing of thermal distribution



(9)b, Vプロファイル
(9)b, V–profile



(9)c, Hプロファイル（火口内）
(9)c, H–profile (crater)

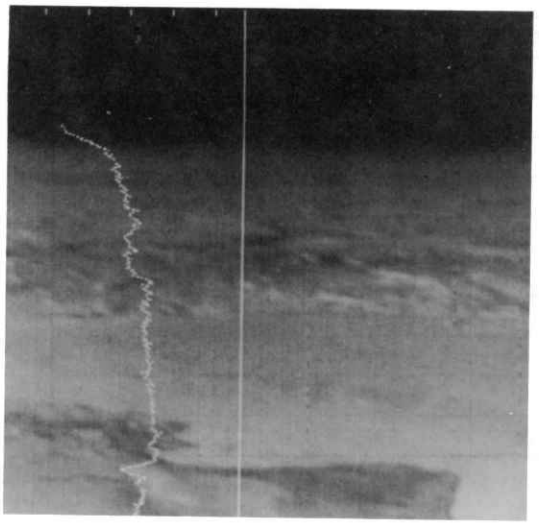


(9)d, Hプロファイル（東側山腹）
(9)d, H–profile (east flank)

図 2 (9)観測点Eよりの熱映像（高温域）
t：M.C&V.B, d：E, l＝3,710m, h＝1,850m
Fig. 2 (9) Thermal image from obs. point E (high temp. mode)



⑽a，Ｈプロファイル
⑽a，H–profile



⑽b，Ｖプロファイル
⑽b，V–profile

図２⑽観測点（ヘリポート付近）よりの熱映像
ｔ：鹿児島湾海面，ｄ：NNW 方向を望む
Fig. 2 (10) Thermal image from over the heli–port
t : Sea surface of Kagoshima Bay,
d : NNW to the bay

2.3　地上観測結果

春田山火山観測所から南岳を中心とする火山体及び噴煙等の温度を，放射温度計で繰り返し観測した．その目標エリアの概略の位置を写真３に示す．また表２にはこれら観測目標エリアまでの概略的な平均距離と視野の大きさを示す．

放射温度計の放射率は，目標の放射率が不明であるので，身近な対象を接触温度計で測定して，その値と合うよう放射温度計の放射率を設定することとした．

しかし，地面等の自然の対象物の温度を接触温度計で測定することは困難で，建物の壁面，舗装道路面を対象として比較観測の結果，放射率は殆んど1.0に近い結果が得られたので，観測は，放射率1.0に設定し，終始一貫して実施した．

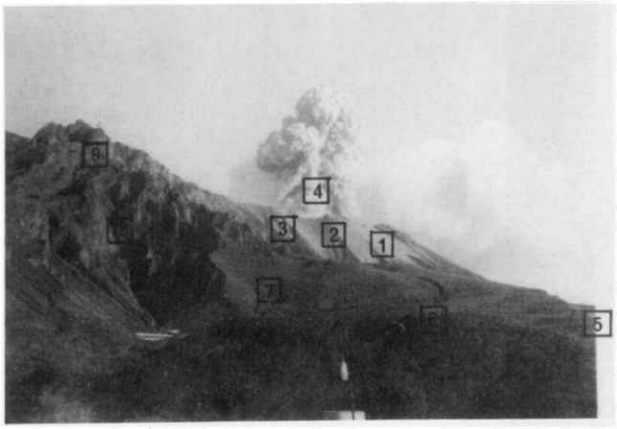


写真３　火山体温度地上観測(春田山火山観測所地点)における観測目標エリアの位置

Photo 3 Observed target areas of the volcano body by ground-–based observation at Harutayama Volcanic Observatory

表２　火山体温度地上観測(春田山火山観測所地点)の目標エリアとその距離及び視野の概略値

Table 2 Target areas of the volcano body for ground-–based temperature observation and their distances and fields of view from Harutayama Volcanic Observatory.

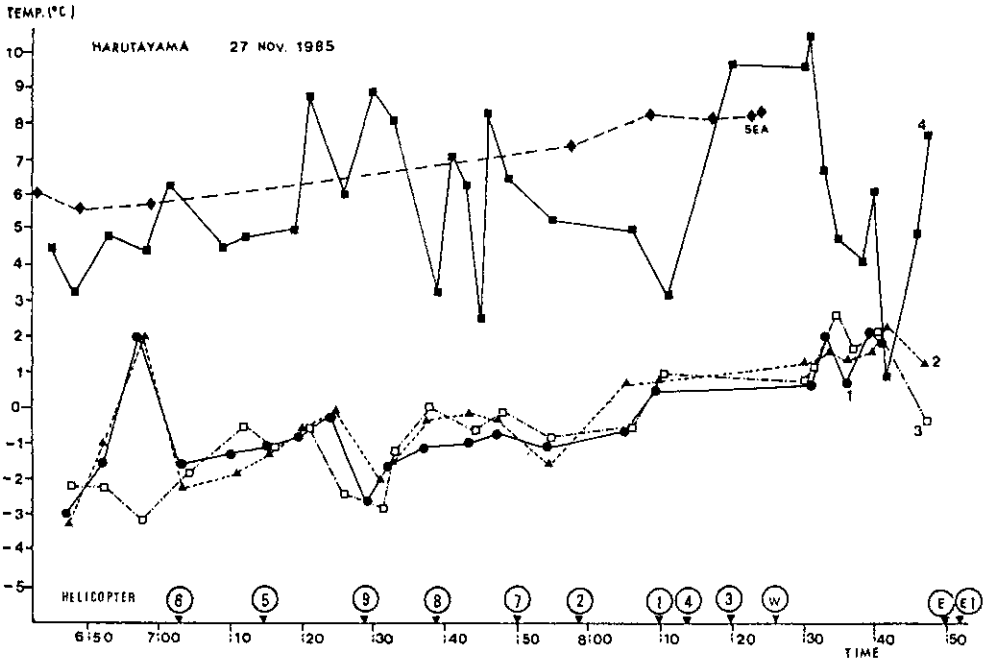
目標番号	目標までの平均距離	目標の平均視野
1	2,570m	90m
2	2,360	83
3	2,000	70
4	2,710	95
5	1,210	42
6	860	30
7	1,000	35
8	1,430	50
9	1,640	57
海	3,930	138

図３(a)(b)は，放射温度計による各目標エリア毎の時系列観測値をプロットしたもので，目標４の噴煙温度を除き，多少の変動はあるものの，朝の７時頃から９時頃迄の２時間の観測値は除々に上昇している．

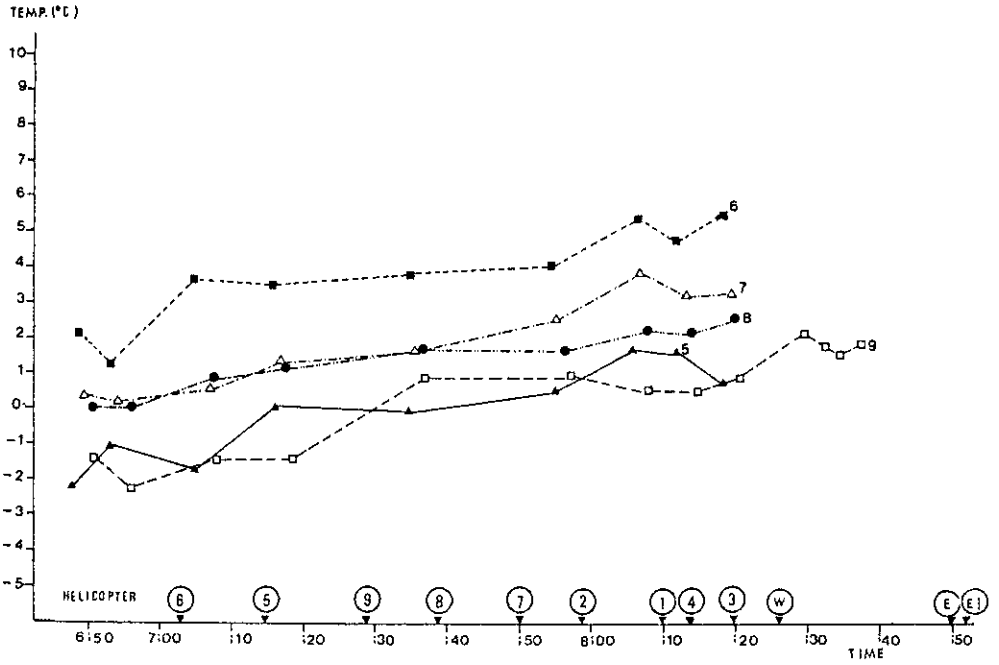
2.4　ヘリコプター MSS と地上の観測結果の比較

春田山における地上観測と対応するヘリコプター観測は，図１の観測点１からの熱映像で，図２(1)に示されたものであり，観測時刻は８時10分である．

図４は，図２(1)の映像をディスプレイし，地上観測の目標エリア（写真３）に対応するエリアを与えたもので，この各エリア内の CCT 値の分布を求め，その最大・最小値の範囲と，表３に示す８時10分の地上観測温度との対応を求めて図５に示す．但し，噴煙温度は噴火活



(a)目標 1 ～ 4 及び海面
(a) Targets 1 to 4 and sea surface



(b)目標 5 ～ 9
(b) Targets 5 to 9

図 3　火山体等温度の放射温度計による地上観測結果
Fig. 3 Ground truth data for temperatures of volcano body taken by portable thermal radiometer

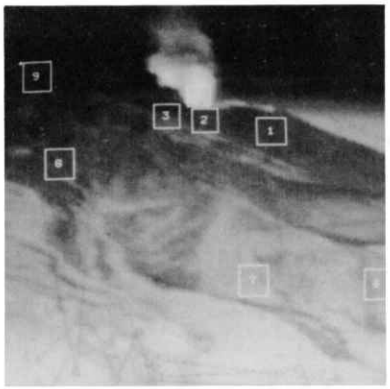


図４　ヘリコプター観測点１の熱映像における地上観測目標エリア

Fig. 4 Ground truth target areas indicated in the thermal image taken by helicopter MSS at obs. point 1

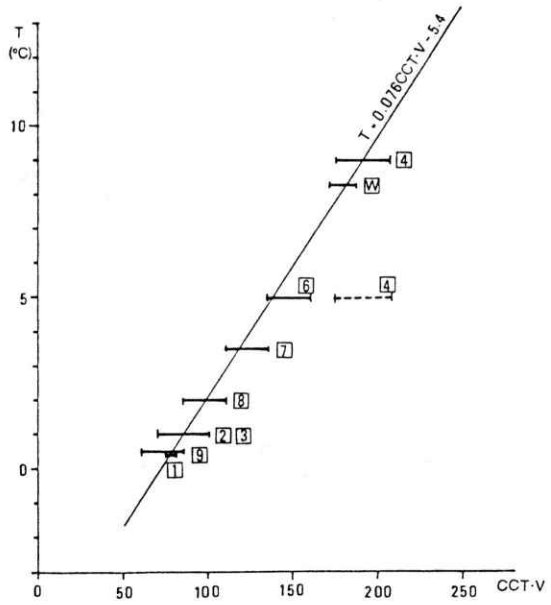


図５　地上観測目標エリアの温度とそれに対応するヘリコプター観測熱映像 CCT 値との関係

Fig. 5 Relationship between the temperatures of ground truth target areas and their corresponding CCT counts of the thermal image taken by helicopter MSS at obs. point 1

表３　地上観測における目標エリアの温度（ヘリコプター観測と同期した時）

Table 3 Observed temperatures of targets areas from Harutayama corresponding to the ones by helicopter MSS.

目標エリア番号	地表状況	ヘリコプター観測同期の観測温度	目標エリアの概略の位置		
			観測光路長	標高	その他
1	露岩裸地山腹	0.5℃	2,570m	970m	
2	〃	1.0	2,360	970	
3	〃	1.0	2,000	900	
4	噴煙	9.0	2,710	1,100	
5	枯草山腹	1.4	1,210	450	
6	〃	5.0	860	450	
7	〃	3.5	1,000	500	
8	露岩裸地山腹	2.0	1,430	700	
9	〃	0.5	1,640	950	
海面	鹿児島湾内海面	8.3	3,930	0	視野伏角約5.8°

動との関係で変動が激しく，両観測値の対応が明確でないので，観測中の高い噴煙温度の平均として９℃，低い温度の平均を５℃として図中に表示している．また海面観測時刻は８時26分で，この時点の地上からの観測温度は8.3℃である．

図５のCCT値（CCT・V）と地上観測温度T（℃）との関係は，噴煙の低温の場合を除くと，一応リニアな関係を描くことができ，概略的には

$$T = 0.076\,CCT \cdot V - 5.4 \quad \cdots\cdots(1)$$

という関係が得られた．各エリアのCCT・Vの平均値では相関係数は0.981となる．

2.5 観測結果等の考察

2.5.1 火山体の温度異常域

(1)火山体全体からみた温度異常域

季節的には，N～NW方向の風が卓越し，噴煙はS～SEの方向であるため，この方向からの観測熱映像は撮られていない．

火山体全体としての熱異常をみるために，観測点１～４の熱映像があるので，図２(1)～(4)に沿って順次解説する．

図２(1)は地上観測ともほぼ同一方向からの熱映像であり，南岳を中心にNW方向から観測している．南岳Ａ火口からの噴煙と南岳火口壁の高温部が卓越し，高度とともに漸減する火山体の温度プロファイルが示されているが，目標エリア７付近の大正溶岩噴出口付近には特に高温域は認められない．

図２(2)は観測点２の新島（NE方向）から南岳を中心に観測している．これには南岳Ａ火口の噴煙の他に，左側の山腹に高温部のあるのが注目される．この山腹の高温部は左側山腹斜面に沿ってかなり広い分布を示し，その内側にも高温のスポットがある．これら高温部は，CCT値の鉛直プロファイルが噴煙の最高で220を示めすのに対し，内側の高温スポットで190，左側山腹斜面で150程度の最大値が観測されている．これら高温部の位値は，Ａ火口の噴煙を除く左側山腹部のものは，内側の高温スポットが昭和溶岩の噴火口，左側陵線に沿った山腹部のものは，Ｂ火口から南東方向に連続してみられる浸食谷に沿った部分とみられる．

図２(3)は沖小島上空から（SW方向）南岳を中心に観測した熱映像である．上記観測点２と逆の方向である．この映像では南岳山頂火口部の高温部のみが顕著であり，その水平プロファイルでは３つのピークがみられる．最大のピークは右端の山頂部のものでCCT値は170程度，Ａ火口噴煙は120，その左の高温部は100程度である．

この位置からは，Ａ火口よりやや右側下方に安永溶岩の噴出口が見られるはずであるが，やや谷間になっているせいか高温部は明瞭に現われてはいない．南岳右端の山頂高温部は観測点２の映像に現われたＢ火口を頂点とする左側山腹の高温部と同じ場所とみられるが，(3)の映像には右側山腹斜面の高温部は現われておらず，山体の地形により観測ができなかった

ものとみられる．

図２(4)は西の方向から南岳を中心に遠望した熱映像である．顕著な高温部は南岳Ａ火口の噴煙と南岳山頂右端部にみられるが，これは上記(3)の映像に現われているＢ火口のものと同じとみられる．

(2)火口部の温度異常域

一方火口部の温度分布を観測した図２(5)～(8)について考察する．

図２(5)は北の上空から南岳火口を観測した熱映像である．CCT の最大値は220程度であり，Ａ火口内は150～220の CCT 値となっている．

図２(6)は観測点７からの熱映像で SE 方向から火口を観測している．この映像では火口内はＡ火口とＢ火口及びそれと連続する南東側山腹部の高温部が現われている．

図２(7)は観測点８，即ち西方向から火口内を観測した熱映像である．火口温度のピーク CCT 値はＡ火口南寄りで255の最大値に達したところもある．また南岳南東側山頂部Ｂ火口附近に高温のスポットが観測されている．

図２(8)は観測点９，即ち春田山火山観測所上空より NW 方向から火口を観測した熱映像である．Ａ火口の中心部は CCT 値が255の最大値に達している．また南西火口壁にも高温の小スポットがみられる．

(3)高温域による観測結果

図２(9)は観測点Ｅ，即ち東方向から南岳火口内を高温域で観測した熱映像である．高温域としたため火口内を除けば，ほとんど CCT 値は70～50程度となる．鉛直プロファイルで見



写真４　NNW 方向約2000ｍの高度約1800ｍから南岳火口を望む，真中の火口は中岳山頂火口，左側火口は北岳の山頂火口，ヘリコプターより，1985年11月27日午前11時30分頃

Photo 4 Minamidake Crater observed from the helicopter with NNW direction, 2000m distance and 1800m in altitude at about 11 . 30 AM on 27 Nov. 1985
The central summit crater is Nakadake and the left one is Kitadake.

ると，A火口中心部が鋭いピークを示し，CCT値は最大255に達している．

また，南から南東の山腹部には，周囲に比してやや高温の分布がみられ，図2(2)に現われた昭和火口の小高温スポットも注目される．

高温域についても基準熱源データが与えられておらず，また，地上観測も火口内の測温はできなかった．

11月27日は噴火活動が静穏であったため，ヘリコプター・MSSによる観測終了後，放射温度計を携帯して，ヘリコプター上より火口内の観測を試みたが，安全上の配慮から火口近くで長い観測はできず，また噴煙のため火口底の高温部が覆われていたため，特に顕著な高温は観測されなかった．写真4は南岳噴火口をヘリコプターから撮影したものである．

2.5.2　ヘリコプターMSSによる桜島火山体の熱分布測定結果のまとめ

観測は，1985年11月25日午後に京大桜島火山観測所において観測の精細な手順，分担，準備等の打合せが行われた．翌26日は早朝から配置につき，観測を開始したが中途でMSSにトラブルが発生し，中断となった．従って26日中はMSSの調整をする一方，防災センター職員は桜島火山の噴火予知観測施設及び島内の火山防災対策，特に泥流対策を中心に視察調査を行った．

27日は前日と同様，早朝から観測作業を開始し，正午頃には観測作業は終了した．

27日は前日より気温は1.5℃程高かったが快晴で気象条件は余り変らず，風向は26日のNWから27日はNNW～Nであった．しかし，噴火活動は26日に比してかなり静穏で噴煙も少なかった．

ヘリコプターMSSと防災センターの地上観測から得られた成果を要約し以下に示す．

(1)　火山体全体の熱分布から得られた異常高温域は，南岳山頂のA火口を中心とする火口部の他，昭和火口，南岳B火口から南東方向の山腹斜面の浸食谷に沿ってやや顕著に現われているが，安永火口はあまり明瞭でなく，また大正火口に熱異常域は認められなかった．

(2)　MSS観測値であるCCT値と放射温度計による観測値は，対象物の放射率，大気補正等の問題を含んでいるが，各エリアの平均的な観測値の間では相関係数は0.981とかなり良いリニアな関係が得られた．このことは，両観測装置が対象からの赤外放射エネルギーの検出では，同様な機能を発揮したものと評価できよう．

(3)　MSSの観測値の較正として基準熱源データを同時収録できなかったことは，MSSの測温機能上は重大な欠陥であり，今後の改善が必要である．

観測値の補正については，放射率，測定視野の大きさ（地上分解能及び観測対象エリア内の平均値），大気透過率（観測光路長中の気温，相対湿度から求められる可降水量等に依存）等の問題があるため厳密にはこのような火山体の温度測定には困難が多いとみられる．今回は観測データ（CCT値）と放射エネルギーとの関係が明らかでないため，補正はできなかっ

た．

(4)　高温域については利用できるMSS観測データが少く，グランドトルースデータもないため，十分な評価はできなかったが，火口内の温度分布は，低温域の場合より，火口中心部の高温が明瞭に検出できたように思われる．

(5)　ヘリコプター・MSSによるサイドルッキング熱映像は，以上述べたように基準熱源データ収録等に問題があり，直接的な測温機能は十分でないが，火山体の熱分布異常を，噴火・爆発の危険を避けて観測するためには有効な手段であると評価できよう．更に，熱異常域の位置確認のためには，可視域の映像も同時に撮ることが有効と思われる．

3.　ランドサットTMデータによる桜島火山の熱分布の解析

3.1　利用したTMデータと地上観測

1985年11月26日午前10時16分にランドサット５号がPath 112，Low 38のシーンを観測した．

前節のヘリコプター・MSS観測もこれと日時を合わせて行う予定であったが，前述したようにMSSのトラブルで中断となり，その事後処置を協議したため，ランドサットの通過時刻における地上観測はできなかった．

しかし，翌27日は，前述したように，前日に比し気温が平均して1.5℃程度高く，風向がNWからNNW～Nと多少異なった他は，湿度条件もあまり変らず，快晴であったので，ランドサットの通過時刻に合わせて，27日に地上観測を実施した．地上観測点は，図１に示すごとく東桜島町湯之で，南岳を中心とした火山体山腹及び鹿児島湾を対象として，前節に述べた携帯用放射温度計を用いて行った．写真５は地上観測でねらった火山体の目標エリアの

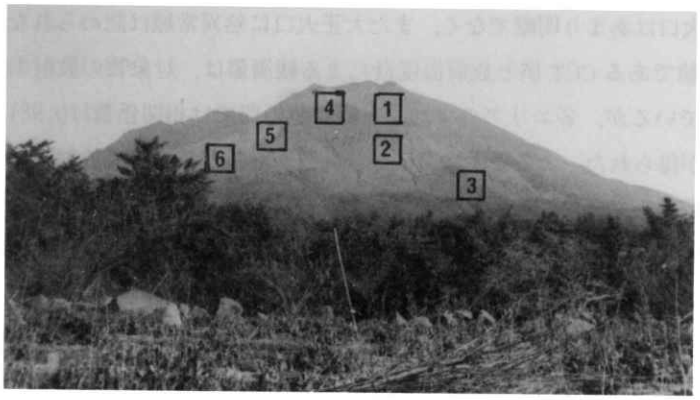


写真５　地上観測におけるランドサットTMバンド６データを対象とした目標エリアの位置

Photo 5 Observed target areas of the volcano body from ground-based observation point (Yuno, Higashi Sakurajima-cho) for Landsat TM

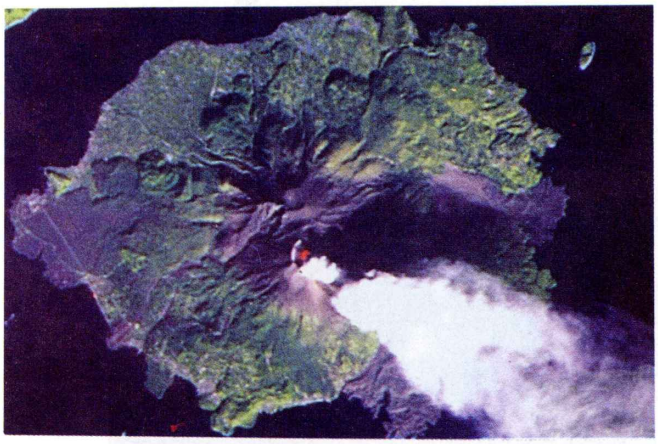


写真6　ランドサットTMバンド3，5，7による桜島のフォールスカラー，1985年11月26日午前10時16分

Photo 6 False color image of Sakurajima made by TM band 3, 5, 7 data taken at 10 : 16 AM 26 Nov. 1985

位置を示す．

また写真6はTMバンド3，5，7のフォールスカラーにより，11月26日の桜島火山の活動状況を示す．NWの風向により桜島の東南部は噴煙で覆われ，その陰がその北側を暗くしている．この噴煙の部分は解析不可能であるが，南岳火口はバンド7が明るくオレンヂ色となっており，火口が高温であることを示している．

3.2　TMバンド6データによる桜島火山の熱分布の解析

3.2.1　地理的補正等

バルク処理のTM・CCTデータから桜島を含む解析対象領域を切り出し，写真6に示すように，バンド3，5，7にB, G, Rを配し，フォールスカラーを作成した．

一方，京大桜島火山観測所の御好意で提供いただいた，25mメッシュの桜島の標高データ

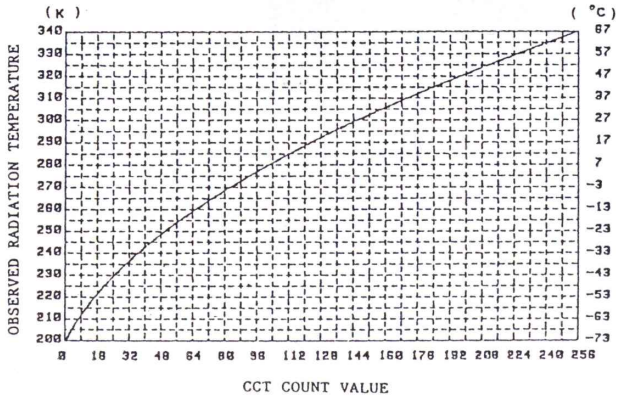


図6　ランドサットTMバンド6 CCTカウントと放射温度との関係（舘ら(1985)による）

Fig. 6 Relationship between CCT count value of Landsat TM band 6 and radiation temperature (after Tachi et al)

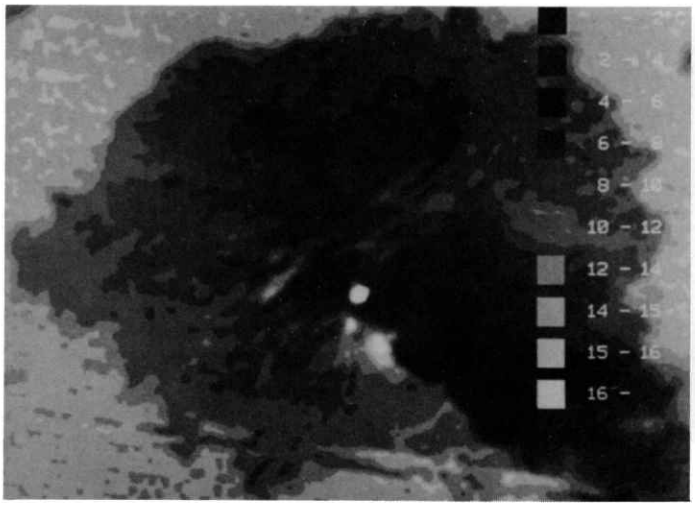


図7　ランドサットTMバンド6データから検出された桜島の温度分布
（℃）（1985年11月26日午前10時16分）

Fig. 7 Temperature distribution of Sakurajima Volcano derived from Landsat TM band 6 data taken on 26 Nov. 1985

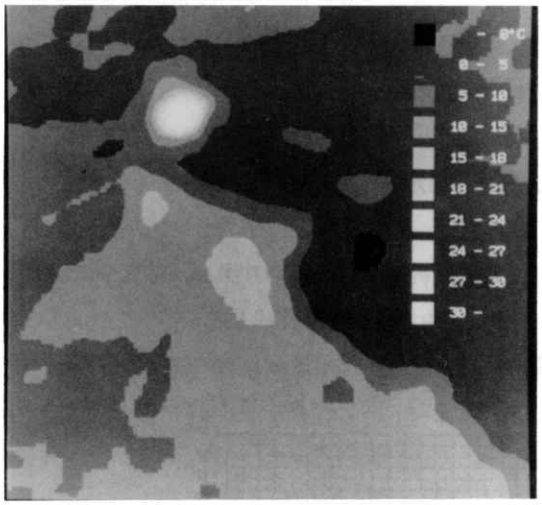


図8　南岳火口とその南部周辺の温度分布の詳細

Fig. 8 Detailed temperature distribution of the area surrounding Minamidake Crater

を用い，陸域と海域に2値化し，海岸線を画像化する．海岸線に10点のGCP（地上基準点）を選び，その地図座標及び画像座標を読みとり，アフィン変換によるTMデータの幾何補正を行った．

次に衛星の軌道及び高度データを用い，標高による衛星画像の視差を補正すると共に，TMデータを標高メッシュ（25m×25m）に合わせてリサンプリングした．

3.2.2　温度の解析

TMバンド6（10.4～12.5 μm）データから温度への換算は，舘ら（1985）によって示めされた次式を用いた．

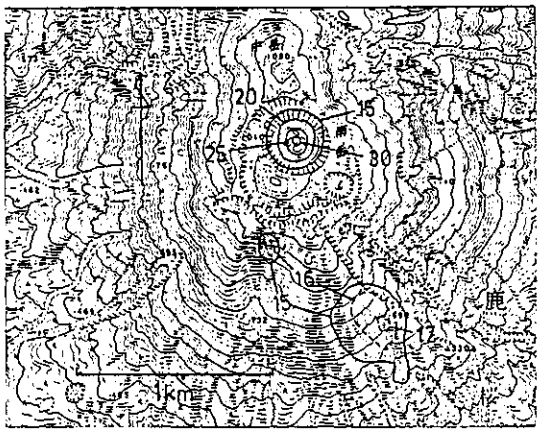


図９　南岳火口及び周辺の高温部の地理的位置

Fig. 9 Detailed geographical location of the areas indicating higher temperature surrounding Minamidake Crater

$$\frac{1.40654}{255} V_c = (5.1292\times10^{-5}T - 0.017651)\ T + 1.47852 \qquad \cdots (2)$$

$$T_c = T - 273.15 \qquad \cdots (3)$$

この関係はまた図６に示めされている．

表４　目標エリアの地上観測温度とTMバンド６データによる温度の比較

Table 4 Comparison of temperatures derived from Landsat TM band 6 data and observed by ground-based observation

観測エリア	地上状況	正射投影の測定エリア径	地上測定平均温度	TMデータによる温度
1	山頂部露岩	92m	10.3℃	10-12℃
2	中腹部裸地	74	18.1	10-12
3	山麓部林地	61	16.8	8-10
4	山頂部露岩	85	9.0	8-10
5	上中腹部裸地	79	17.5	10-12
6	下中腹部裸地	66	18.1	8-10
海	鹿児島湾中部	100	11.9	14-16

図７は桜島全体の熱分布を換算温度のスライスとして示めしたもので，南岳火口の他，南及び南東山腹にやや高い温度分布がみられるが，南岳から南東及び東方向は，噴煙とその影により火山体の温度分布は不明である．

図８は南岳とその南及び南東山腹の高温部を含むエリアを拡大した温度分布であり，南岳火口中の温度は15～30℃が検出されている．

図９は図８の温度分布の地理的位置を精細に知るために，地図上に高温部分をプロットし，等温線で示したものである．

南岳火口の高温部はＡ火口の位置に一致しており，その南方約560ｍに中心をもち，長径約150ｍ，短径約90ｍの15～16℃の高温部分は，安永火口の上部に位置している．更に，南

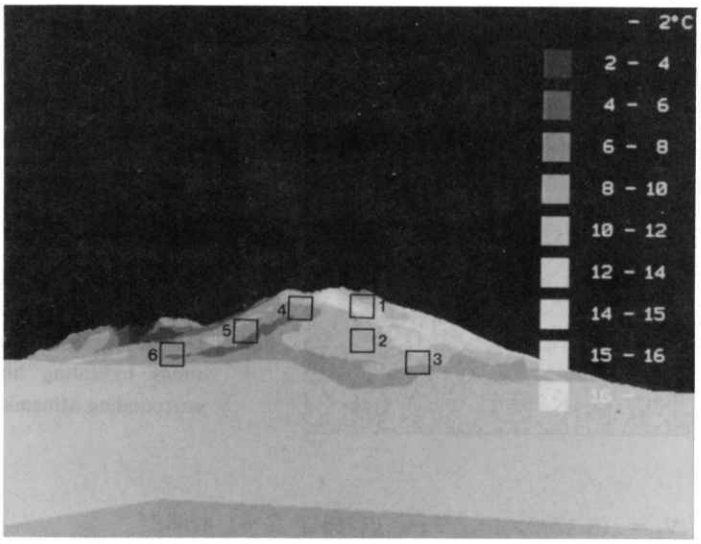


図10　写真５に対応したTMデータによる温度分布透視投影図(単位：℃)

Fig. 10 A horizontally projected figure of temperature distribution derived from TM band 6 data, viewed from ground truth obs. point

岳火口中心から南南東約1,000ｍに中心をもち，長径560ｍ，短径350ｍの15～17℃の高温部が検出されている．これは南岳Ｂ火口より南東方向斜面の浸食谷に隣接した場所で，前節のヘリコプター・MSS熱映像に現われたものと，完全に一致しているかはやや疑問であるが，それに連続した高温部ともみられる．

3.3　地上観測による火山体等の温度

写真５に示す目標エリア及び鹿児島湾内の海面温度は，図１に示す東桜島町湯之の地点から27日午前10時15分を中心として前後数分間に３回づつ，放射温度計による観測を行った．その結果は表４に示す．

3.4　TMバンド６データによる温度解析結果と地上温度観測結果の比較

TMデータによる温度解析結果と地上温度観測結果を比較するためには，目標エリアの一致，大気透過率の補正及び放射率の補正をする必要がある．しかしながら，地上観測は火山体を横から観測したものであり，目標エリアの正確な範囲は確定できない．

そこで，桜島の標高メッシュ・データを用いて，図７に示すTMデータからの温度分布を用い，地上観測地点から南岳の中心を望む透視投影図を作成して，写真５に示す目標エリアと大略対応するとみられるエリアを設定し，その温度分布と比較することとした．図10は写真５に対応したTMデータによる温度分布透視投影図を示す．

図10の各エリアの平均温度は，表４に地上観測結果と対比して示されている．

地上観測を行った27日は，ランドサットが観測した26日より，平均気温で約1.5℃高かったが，観測結果は未補正であるがその気温差を考えても両者にはかなりの差がある．この差異を明確に述べることは困難であるが，ランドサットTMバンド６の地上分解能が120ｍであるのに対し，地上観測の放射計視野は表４に示すごとく60～100ｍであり，観測方向が鉛直方向と横方向という違いもあることから，放射率の違いも考えられる．

特に海面温度については，地上観測の場合鹿児島湾の海面を遠望して浅い角度で観測しており，波浪やうねり等があるとしても，海面の放射率はかなり小となることが考えられ，結果として低い海面温度になったものと考えられる．

いずれにしても，衛星観測による広域的な熱分布のグランドトルースの方法は，航空機MSSの利用，地上の温度観測方法，気象条件の観測を含めて更に検討し，実験を重ねる必要がある．

3.5 TMバンド７による南岳火口温度の推算

豊田ら（1986）は，1986年４月26日に発生したソ連のチェルノブイリ原子力発電所の事故後３日目の29日に撮られた，ランドサットTMバンド７データを用いて，発電所の事故による高温部の検出を試みた．

1985年11月26日に撮られた桜島のTM映像も，写真６のバンド３，５，７のそれぞれB，G，Rの配色によるフォールスカラー画像に見るごとく，噴火中の南岳火口は赤色を呈し，バンド７の輝度が高く，高温の状態にあることを示している．

本研究でも，前記の論文を参考として，南岳火口の高い温度を以下に示す方法で推定する

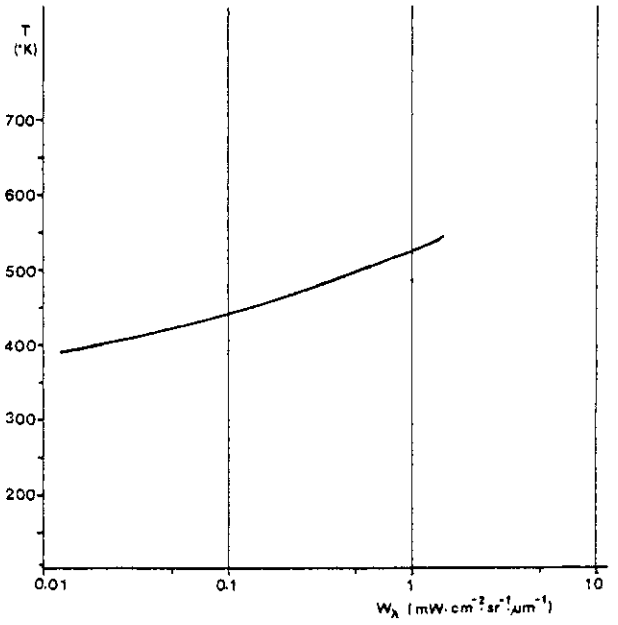


図11　TMバンド７の中心波長（λ = 2.215 μ m）に対する黒体放射エネルギーと絶体温度との関係

Fig. 11 Relationship between radiation energy for TM band 7,central wave length = 2.215 micron m, and absolute temperature of black body

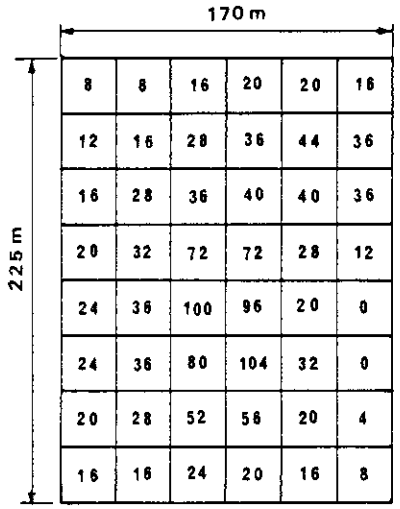


図12　南岳火口の高温部におけるTMバンド７のピクセル単位CCT・カウントの分布

Fig. 12 Distribution of CCT count value of TM band 7 in each picture element in the area showing highest temperature in the Minamidake Crater

ことを試みた．

TMバンド７（2.08～2.35 μm）のゲインは，フライト後の実験結果では，5.63×10^{-3}mW・$Cm^{-2}\cdot Sr^{-1}\mu m^{-1}$/１ CCT・Vという報告がある．

黒体放射に関しては次式のプランクの法則がある．

$$W_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{\exp(ch\,/\,\lambda kT)-1} \qquad \cdots(4)$$

ここに，

W_λ：黒体の単位表面積から単位時間に放射されるエネルギーの単位波長当りの大きさ（$Wcm^{-2}\mu m^{-1}$）

λ　：波長（μm）

T　：絶体温度（°K）

h　：プランク定数（6.626×10^{-34} W・sec^2）

c　：光速度（$2.998\times10^{10}cm\cdot sec^{-1}$）

k　：ボルツマン定数（$1.380\times10^{-23}W\cdot sec\cdot K^{-1}$）

(4)式にTMバンド７の中心波長λ＝2.215 μmを代入し，黒体の放射エネルギーW_λ（$mW\cdot cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot\mu m^{-1}$）と黒体温度T（°K）との関係を求めると図11が得られる．

一方，南岳火口部分のTMバンド７のCCT・Vをピクセル単位（約28m×28m，バルク処理データ）で部分的にみると，図12に示すごとく，最大のCCT・Vは104である．

山頂温度は火口外でバンド６から12～16℃程度であるが，バンド７は上記計算結果ではCCT・V＝１が98.1℃（371.3°K）に相当し，CCT・V＝255が270.2℃（543.4°K）であるので，太陽光の反射等の影響を無視してCCT・Vの最大値104は，0.586 $mW\cdot cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot\mu$

m^{-1}に相当し，232.3℃（505.5°K）となる．

また，図12に示す約170m×225m範囲の平均は，CCT・V＝32で，0.180 mW・cm^{-2}・sr^{-1}・μm^{-1}の放射エネルギーとなり，189.8℃（463.0°K）となった．

3.6 ランドサットTMデータによる桜島火山の熱分布解析結果のまとめ

(1) TMバンド6の常温域における桜島火山の熱分布は，南岳南東に拡散した噴煙部分を除き，全体としては日照と標高による地表温度の差が現われている．しかし，噴火活動中の南岳A火口とその南方約560mの安永火口位置及び南南東1000mに中心をもつ温度異常域が検出され，南岳のA火口の温度は最高30℃，安永火口位置は同じく16℃，南南東のものは同じく約17℃という結果を得た．

(2) 地上観測の目標エリア温度に大略対応するTMバンド6データから得られた温度との比較では，山頂部露岩部を除き良い一致は得られなかった．これは地上観測日が1日遅れで，気温も1.5℃程度高かったこと，海面温度は観測角度の違い等が大きく影響していると思われる．

(3) (1)で述べた温度異常域は，ヘリコプターMSSの熱分布観測結果と比較すると，南岳火口部を除くと，安永火口部はヘリコプター観測では検出されておらず，南岳南南東1000mに中心を持つ異常域は，ヘリコプター観測から検出された，南岳南東斜面の浸食谷に沿った高温部と隣接した位置にあると考えられる．

(4) 京都大学桜島火山観測所がこれまで実施してきた航空機搭載走査放射計及び地上からの走査放射計による観測によって確認している温度異常域と比較すると，噴煙で覆われた部分を除くと，南岳火口，安永火口は一致しており，南岳南南東の異常域も，南東山腹斜面の浸食谷に沿ったものの一部と考えればこれも一致していることになり，ランドサットTMデー

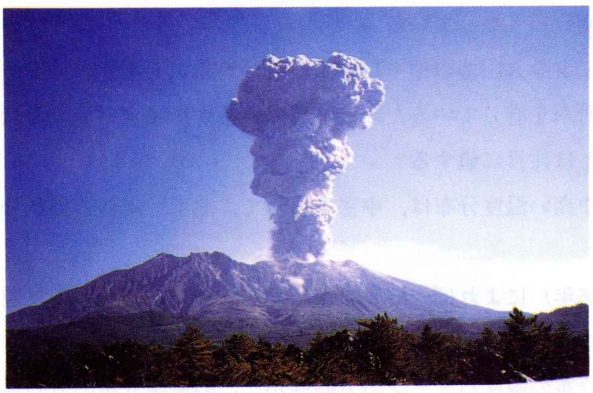


写真7 桜島南岳の噴火活動状況1985年11月25日午後2時頃京都大学桜島火山観測所より

Photo 7 An explosive eruption of Minamidake of Sakurajima Volcano at about 2 PM on 25 Nov. 1985 viewed from Sakurajima Volcanic Observation Station, Kyoto Univ.



写真８　桜島火山体の浸食状況ヘリコプターにて東側より撮影

Photo 8 The state of erosion of Sakurajima volcano body taken from the east by the helicopter



写真９　地獄河原の泥流流下堆積域の状況

Photo 9 Jigokugawara where mud flows have frequently occured

タでも，火山体の温度分布から異常域を検出することが可能であることが明らかになると共に，特に新しい温度異常域は発生していないと云うことができよう．

(5)　図７により桜島火山の全体の熱映像から中岳の南西山腹斜面の野尻川上流浸食谷は，周辺よりやや高い温度分布を示している．

また，桜島東部の第１，第２黒神川及び地獄河原にかけての浸食谷や泥流堆積地も周辺よりやや高い温度分布となっている．

これは浸食により火山体のやや高い温度部分が露出しているのか，泥流堆積物質が風化等により高い放射率を有しているためか不明であるが，浸食や泥流の発生地域が温度分布として現われたことは注目に値する．

(6)　上記のやや高い温度分布は，中岳を通って，北東－南西の線状分布として大局的に見ることができる．

加茂ら（1986年）によれば，桜島の深度12km以浅のＡ型地震の震源は，南岳直下から主として南西～南南西方向の沖小島，観音崎方向に深さを増して分布している．

上述した熱分布の線状パターンの方向性が，この震源分布の方向性と大略一致していることは，火山体の構造と火山活動との関係及び，火山体の崩壊・浸食との関係として考慮する必要があるかもしれない．

(7) TMバンド7のCCT・Vから南岳火口の最高温度を232℃，平均温度を190℃と推定したが，グランド・トルース・データがないため実証できなかった．

しかしTMバンド7のCCT・V＝1～255は，98℃（371°K）～270℃（543°K）までの温度範囲であるため，マグマの溶融する1000～1200℃までの測温機能はない．

従って，このような高温までも測定できる航空機搭載の火山専用赤外映像装置の開発は火山噴火予知研究を促進する上で不可欠であると考えられる．

最後に桜島の噴火活動と火山体浸食の状況を写真7，8，9に示す．

謝　辞

本研究は，昭和60年度桜島総合集中観測に国立防災科学技術センターとして始めて参加して得られた結果であるが，京都大学防災研究所附属桜島火山観測所の加茂幸介所長（専門委員）始め所員の皆様には，標高データベースの提供，観測活動への支援，観測施設の案内等多大の御協力を賜りました．ここに記して心から感謝の意を表します．

また，千葉大学映像隔測研究センターの三輪卓司教授（専門委員）には，現地観測等において種々御協力をいただきました．

参考文献

1) 福山博之・小野晃司（1981）：桜島火山地質図 1/25,000，地質調査所

2) 加茂幸介ら（1986）：第5回桜島火山の集中総合観測（昭和57年10～12月）pp 1～10，29～32.

3) 舘　和夫・綾部広一（1985）：ランドサット5号による我国上空からのTM画像(2)，日本リモートセンシング学会誌 Vol. **5**，No. **4**，pp 71～83.

4) 豊田弘道・田中総太郎・中山裕則（1986）：衛星画像に見るチェルノブイリ原子力発電所とその周辺，日本リモートセンシング学会誌 Vol. **6**，No. **2**，pp 71－91.

5) 植原茂次・高橋　博・幾志新吉・熊谷貞治・矢崎忍（1986）：ランドサット・TMデータによる桜島火山熱分布の測定．火山，**2**，**31**，**4**，297－298.

（1987年7月8日　原稿受理）