

火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90 A) による  
薩摩硫黄島火山の山体表面温度観測

鶴川元雄\*・矢崎 忍\*\*・宮坂 聡\*\*\*

Surface Temperature Observation by the Air-borne Multispectral Scanner,  
VAM-90A, at the Satsuma-Iojima Volcano

By

Motoo UKAWA\*, Shinobu YAZAKI\*\* and Satoshi MIYASAKA\*\*\*

\*Volcanic Activity Laboratory, Earthquake Research Center,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

\*\*Advanced Measurement and Analysis Technology Division,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

\*\*\*Nakanihon Air Service Co. Ltd., Japan

Abstract

Surface temperature distribution was observed at the Satsuma-Iojima volcano in Kyushu, by using the airborne multi-spectral scanner VAM-90A. This instrument has nine wavebands of information from visible to infrared. Satsuma-Iojima is an active volcano located at the rim of the Kikaigashima crater, and high geothermal activity has been reported in the middle 1990s. The observation was performed on October 21, 1997. Temperature anomalies higher than 100 °C were detected in the summit crater and on the eastern flank of the Iodake. The highest temperature was detected on the northern rim of the summit crater of the Iodake. A false color image was synthesized from two visible bands and one infrared band. The false color image suggests that the high temperature spots in the crater are located along surface structures, probably fissures. The present data are useful for comparison with temperature data at future observation to detect space-temporal change of geothermal activities.

**Key words :** Temperature measurement, Satsuma-Iojima, Volcano, MSS

1. はじめに

薩摩硫黄島は、鹿児島県種子島の西方に位置する東西6 km、南北3 kmの火山島である(図1)。別名、鬼界ヶ島と呼ばれるこの島は、5~6千年前に九州から本州全域に火山灰を降下させる巨大噴火を起こした鬼界カルデラの縁の一部で、1900年以降も1934年から1935年にかけて海底大噴火が発生している。薩摩硫黄島は、現在も地

熱・噴気活動が活発で、最高峰である硫黄岳(標高704 m)の山頂火口の噴気孔では、最高900°Cに達する噴気温度が観測されている(風早・篠原, 1996)。

1996年以降、同島の地熱活動が1990年代前半に比較して高まっていることが地質調査所により報告された。1996年10月及び1997年1月の地質調査所の調査で、硫黄岳山頂火口内のクレーターの拡大、夜間の赤映現象、硫黄の燃焼等、活発な地熱活動が明らかになった。またメルトインクルージョンの分析から、マグマヘッドが海水準より上にある可能性が指摘された(地質調査所, 1997)。

このため防災科学技術研究所では、現在の地熱高温域の範囲及び温度を面的に把握し、今後、火山活動がさら

\*防災科学技術研究所 地震調査研究センター  
火山噴火調査研究室

\*\*防災科学技術研究所 先端解析技術研究部

\*\*\*中日本航空株式会社

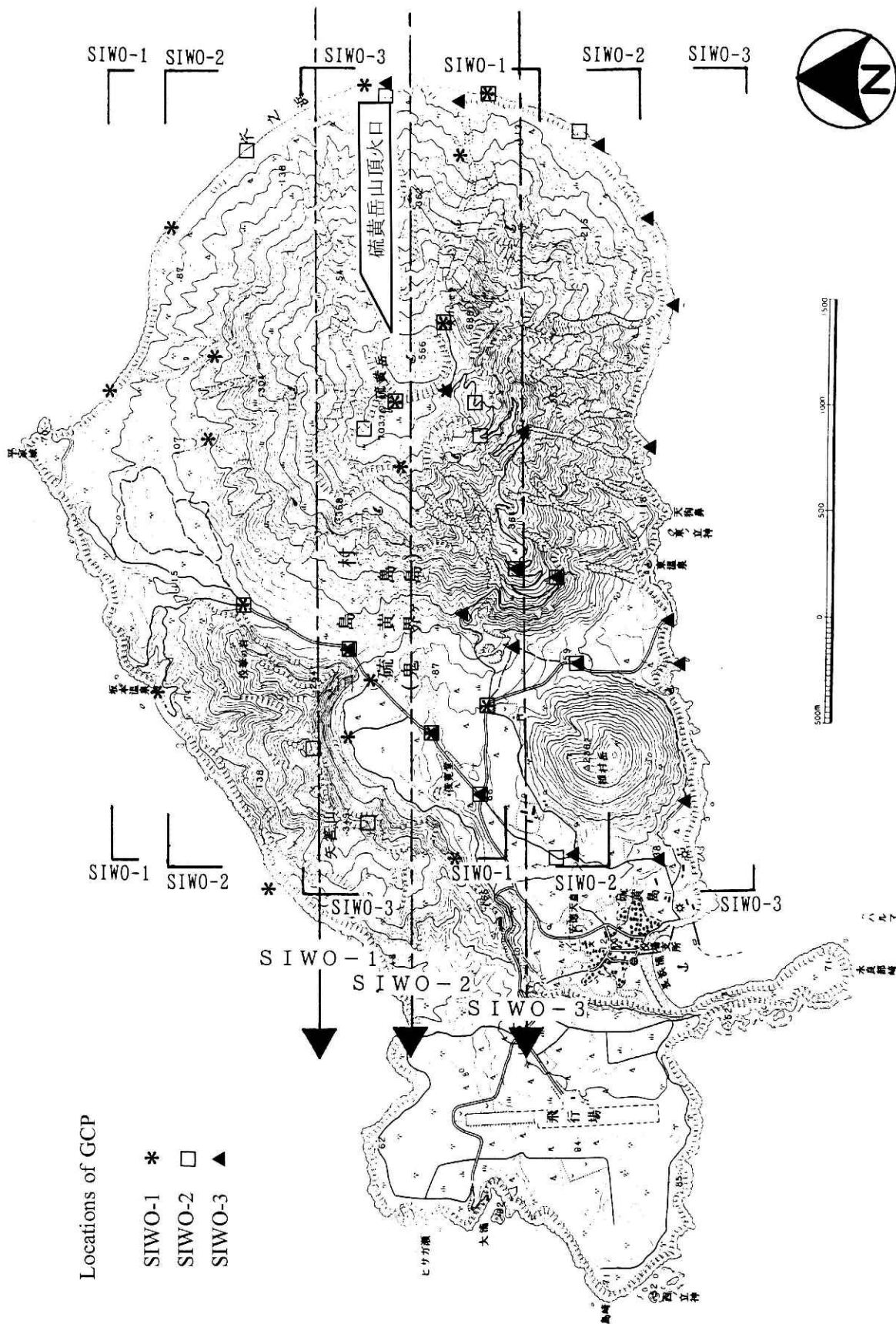


図1 薩摩硫黄島の位置と観測飛行測線、それぞれの測線についてのGCPを示した。

Fig. 1 Location of Satsuma Iojima and the observation areas. GCP locations are indicated by different symbols.

に活発化した際の基礎データとするため、1997年に火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90 A) による火山体表面の温度観測を実施することとした。ここでは、1997年10月に実施した温度観測結果について報告する。

## 2. 観測方法

観測には防災科学技術研究所が開発した火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90 A) を用いた (植原ほか, 1991)。VAM-90 A は航空機搭載型のマルチ・スペクトル・スキャナーで、表1に示すように可視域から熱赤外域を9バンドに分割し、9バンドの放射強度を同時に測定することができる。地表面温度は、バンド6及びバンド7を用いて1,500°Cまでの高温領域を、またバンド8及びバンド9を用いて250°Cまでの低温領域を推定する。瞬時視野角は熱赤外域のバンド6~9は1.5 mrad、可視域から中間赤外域のバンド1~5は3.0 mradである。これは、対地高度1,000 mで観測した場合、1画素が約1.5 m四方に対応する。観測においては、運輸省航空局よりVAM-90 A 搭載の認可を受けたセスナ404型機 (中日本航空株式会社所有、機番JA 5264) に同装置を搭載し、飛行高度を一定に保って、測定を行っている。

観測領域は、機体の下方、飛行コースに直行する方向の有効視野角は60度である。これは対地高度1000 mで飛行した場合、幅1,155 mに相当するが、通常、基準面高度を観測領域内の最高標高近くに設定するので、実際に観測される幅は、もう少し広い。

観測された地表からの放射強度は、14ビットでデジタル化され、機上において収録される。その際、機体に取り付けられたジャイロによる機体のローリング角データを基に、ローリング補正を施す。ヨーイング、ピッチングの影響と地形の起伏の影響で、観測されたデータをそのまま画像化すると歪んだ画像となる。このため観測終了後、幾何補正を施す。ここではデジタル標高データを用いた倒れ込みの補正及びGCP (Ground Control Point) を用いた地形補正を施した。

表1 VAM-90Aの各バンドの波長帯域・瞬時視野角。

Table 1 Spectral bands and instantaneous field of view of the VAM-90A.

バンド名	波長帯域 ( $\mu\text{m}$ )	測定温度範囲 ( $^{\circ}\text{C}$ )	瞬時 視野角 (mrad)
バンド1 (可視域)	0.51—0.59	——	3.0
バンド2 (可視域)	0.61—0.69	——	3.0
バンド3 (近赤外域)	0.80—1.10	——	3.0
バンド4 (中間赤外域)	1.55—1.75	——	3.0
バンド5 (中間赤外域)	2.08—2.35	——	3.0
バンド6 (熱赤外域)	3.50—4.20	-10—1500	1.5
バンド7 (熱赤外域)	4.30—5.50	-10—1500	1.5
バンド8 (熱赤外域)	8.00—11.00	-20—250	1.5
バンド9 (熱赤外域)	11.00—13.00	-20—250	1.5

## 3. 観測結果

### 3.1 観測条件

薩摩硫黄島は、硫黄岳山頂火口から15~30 kt/dayのマグマ起源の多量の $\text{H}_2\text{O}$ を放出し、また中央火口内の噴気孔では900°Cに達する高温が観測されている (風早・篠原, 1996)。また、島の中央部の海岸付近には温泉がある。今回の観測では、このような地熱地帯を含むように、観測領域に硫黄岳から島中央を含むように設定した。すなわち図1に示すように、対地高度1,000 m (基準面高度を700 m) の東西の平行な3飛行測線 (SIWO-1, SIWO-2, SIWO-3) によって、薩摩硫黄島の中央から東側を覆っている。

観測は天候条件の良い10月後半に実施するように計画した。快晴であった10月21日の12時から13時にかけて3測線の観測を実施することができた。さらに日照の影響の少ない午前中に観測する機会をえるため、10月24日まで鹿児島に待機したが、その後、天候が良好でなく、午前中に観測を実施することはできなかった。

各飛行測線の観測時刻及び観測コースに関する条件を表2に示した。観測はSIWO-1, SIWO-2, SIWO-3の順に12時25分から13時10分にかけて実施し、以下に示すように全く雲の影響のない画像を取得することができた。

### 3.2 観測データに対する補正

今回の薩摩硫黄島の観測データに対して、国土地理院による50 mメッシュのデジタル地形標高データを用いて、地形の起伏による倒れ込みの補正を実施した。標高の効果の補正は、図2に示すように、ある標高の観測データが基準となる標高に正しく投影されるように実施した。

標高の効果の補正しても、データには飛行中の揺れや偏流の影響が残っているので、そのままでは歪んだ画像となる。このため各飛行コースのデータについて、地形図と画像の一致が良くなるように最小二乗法を用いた歪みの修正を行った。地形図と画像の一致を見る代表点として、各飛行コースについてGCPを火口部付近を中心

表2 薩摩硫黄島の温度観測状況。

Table 2 Observation Conditions for the Satsuma-Iojima volcano.

項目	観測状況
観測日	1997年10月21日
天候	快晴
気温	12時 24.9°C 13時 25.9°C (種子島測候所)
観測コース名	SIWO-1, SIWO-2, SIWO-3
観測時刻	SIWO-1 12時25分~12時28分 SIWO-2 12時34分~12時37分 SIWO-3 13時07分~13時10分
基準面高度	700m
対地高度	1,000m
測線長	約3,000m

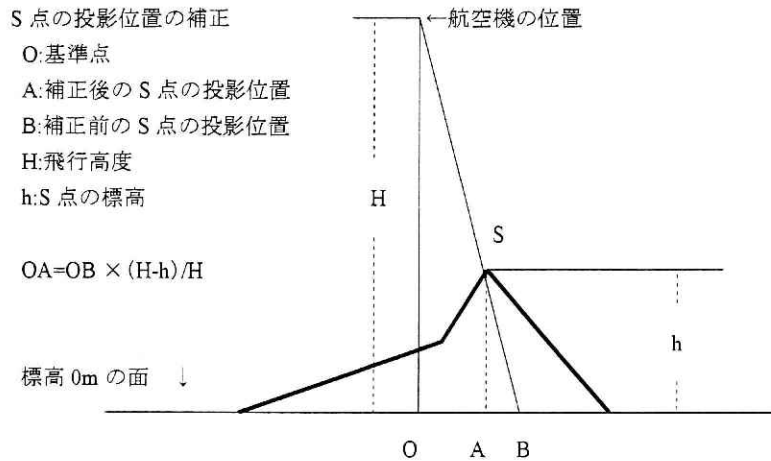


図2 標高の効果の補正概念図。

Fig. 2 Schematic diagram showing the correction method for the topographical effect.

にして20点選び、この点でのずれが最小になるようアフィン変換を施した。各コースについてのGCPを図1に示した。補正後のGCPでの残差のRMS平均値は約1秒、すなわち30m程度である。

今回の観測では、3測線で覆う領域が重なり合いながら、薩摩硫黄島の中央部から東側を覆っている。このため地形補正後の3測線の画像を1つに合成して、モザイク画像を作成した。

### 3.3 観測結果

図3aに疑似カラー画像を示す。この疑似カラー画像では、可視光であるバンド1とバンド2をそれぞれ青と緑に対応させ、また近赤外帯域であるバンド3を赤に対応させている。植物のクロロフィルが近赤外帯域を反射するため、植生のある領域は、疑似カラー画像で赤く発色している。これに対し、裸地は灰色に発色している。図3aにより、硫黄岳山頂火口周辺部の裸地の広がりを読みとれる。

図3bに温度分布図を示す。ここでの温度は地表面の放射率を1とし、電磁波の大気中での吸収を無視して算出した計算値である。表示する温度画像は、比較的水蒸気の影響を受けないバンド8から算出した温度である。ただしバンド8の温度範囲である250°Cを超える高温部の温度値は、バンド7の観測値から算出した。温度分布は10°Cを青色に、また100°Cを赤色に発色させ、その中間の温度は青から赤に漸移的に変化するいわゆるレインボーカラー温度分布画像で表示した。100°C以上の温度分布領域は、白色として表示されている。

図3b上で、黄色く表示されている80°C以上の高温域が、硫黄岳山頂火口部に広く分布している。また硫黄岳東斜面に小規模な高温スポットのあることが分かる。それ以外の領域には、明瞭な高温域は検出されなかった。後述するように今回の観測で得られた最高温度は、硫黄岳山頂火口北側での311.0°C(バンド7から算出)である。硫黄岳山頂火口内には200°Cを超える高温スポットが点在している。また硫黄岳東斜面の高温スポットの最

高温度は144°Cで、疑似カラー画像上で白色の領域であることから、変質域と考えられる。

硫黄岳山頂火口周辺の様子を詳しく見るために、火口周辺の拡大図を図4に示す。疑似カラー画像(図4a)から火口の北側を中心に白いもや状の広がりが認められるが、これは噴気活動と考えられる。また北部クレーターと呼ばれている直径20~30mの陥没孔(地質調査所, 1997)が灰黒色領域として明瞭に認められる。

高温部の分布状況を明瞭に表示するため、温度分布画像は10~100°Cのレインボーカラー画像(図4b)と10~200°Cのレインボーカラー画像(図4c)の2種類を示す。100°C以上の高温スポットは、直径が約300mの硫黄岳山頂火口内及び火口内壁に限られていることがわかる。この高温スポットは、火口北部及び中央部から南部にかけて、線状に連なって分布している。図4aの疑似カラー画像上で高温スポットの位置を見ると、北部クレーター及び火口内の亀裂と考えられる線状構造と一致していることが分かる。

高温スポットの最高温度値を図4cに示す。最高温度の311°Cが観測された硫黄岳山頂火口北壁は、地質調査所(地質調査所, 1997)により600°Cを超える高温噴気群が確認されている領域である。またその他200°C以上の最高温度が観測された高温スポットも1996年から1997年にかけて700°C以上の高温噴気が観測されている地点付近である(地質調査所, 1997)。

硫黄岳山頂火口の外側では、南側斜面に80~90°Cの比較的高温の領域が広がっている。100°C程度を示す画素もあるが、その範囲は狭い。北側斜面にも、70~80°Cの比較的高温の領域が分布している。特に硫黄岳山頂火口のほぼ真北に伸びる温度異常域は、疑似カラー画像上で薄いもや状の白色領域が認められ、噴気の噴出と考えられる。

火口外壁の斜面には50°Cから60°Cの温度域が広がっている(図3bと図4b)。疑似カラー画像と比較すると、温度の高い領域は日射を効果的に受ける南向きの斜面で



1:18,000  
0 200 400 600m

図3(a) 観測領域全体の疑似カラーモザイク画像。

Fig. 3(a) Mosaic false color image of the whole observation area.

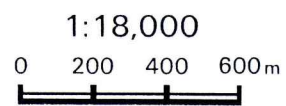
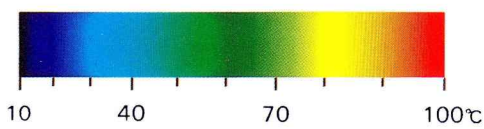
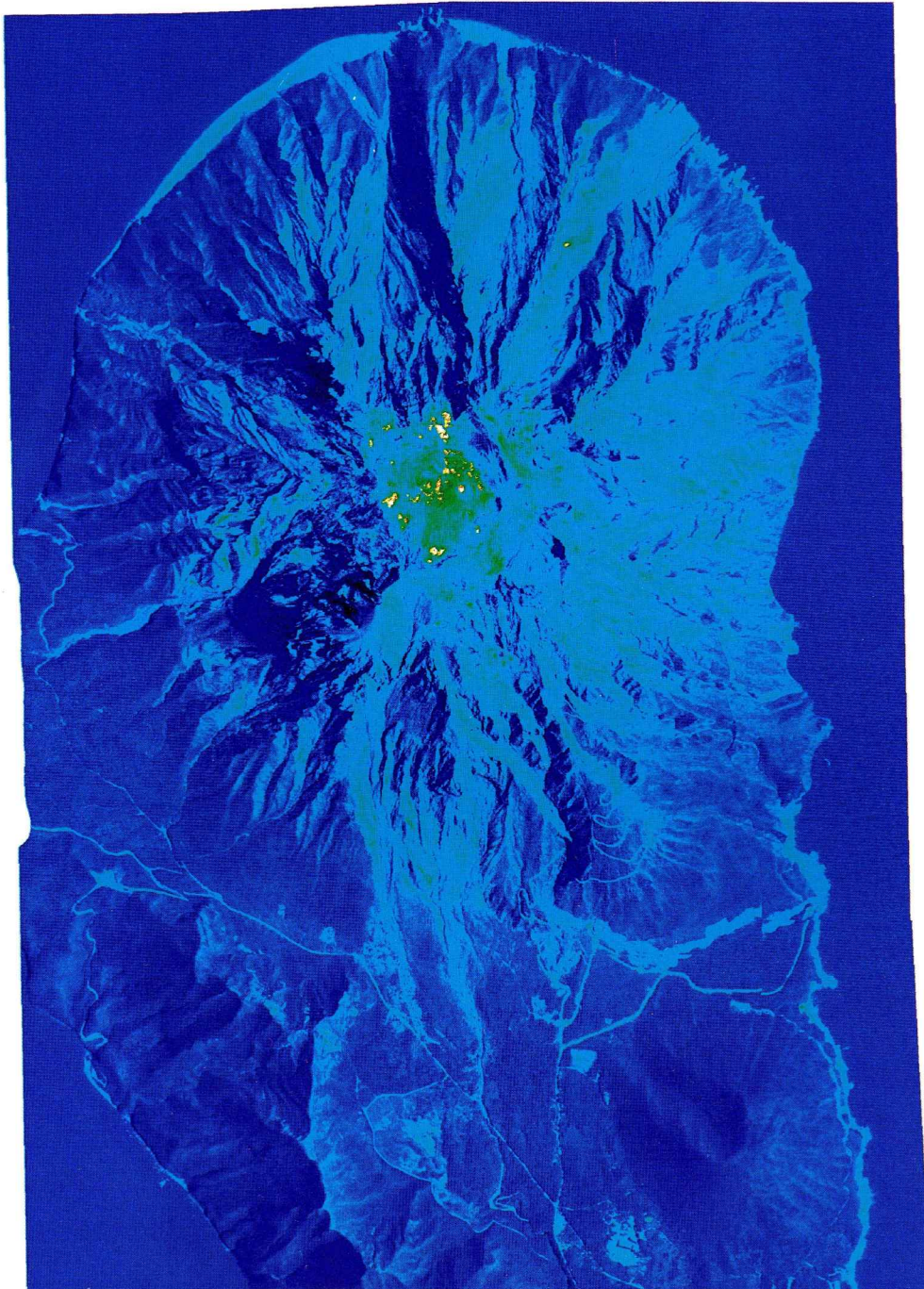


図3(b) 観測領域全体の温度分布モザイク画像。  
温度範囲 (10~100°C) をレインボーカラー表示。

Fig. 3(b) Mozaic temperature distribution image of the whole observation area. The temperature is indicated by using the rainbow color scale from 0 to 100 °C.

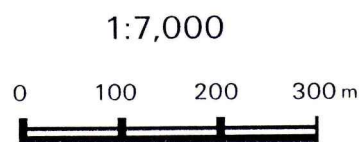
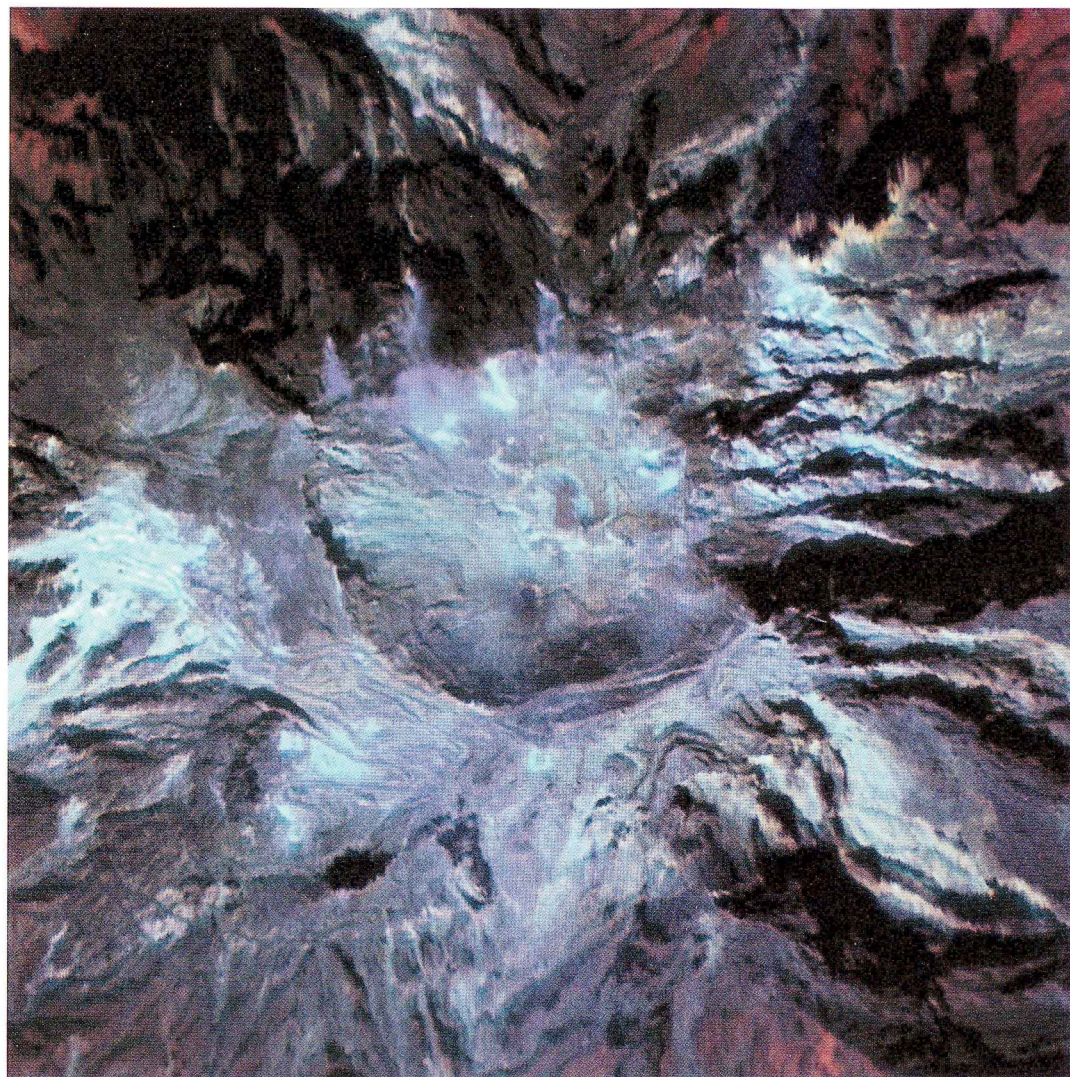


図 4(a) 硫黄岳山頂火口周辺拡大疑似カラー画像 (SIWO-2による).

Fig. 4(a) False color image around the crater of the summit of Iodake (SIWO-2).

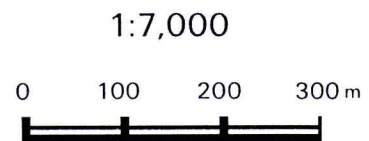
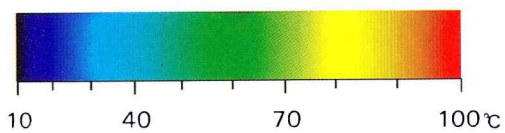
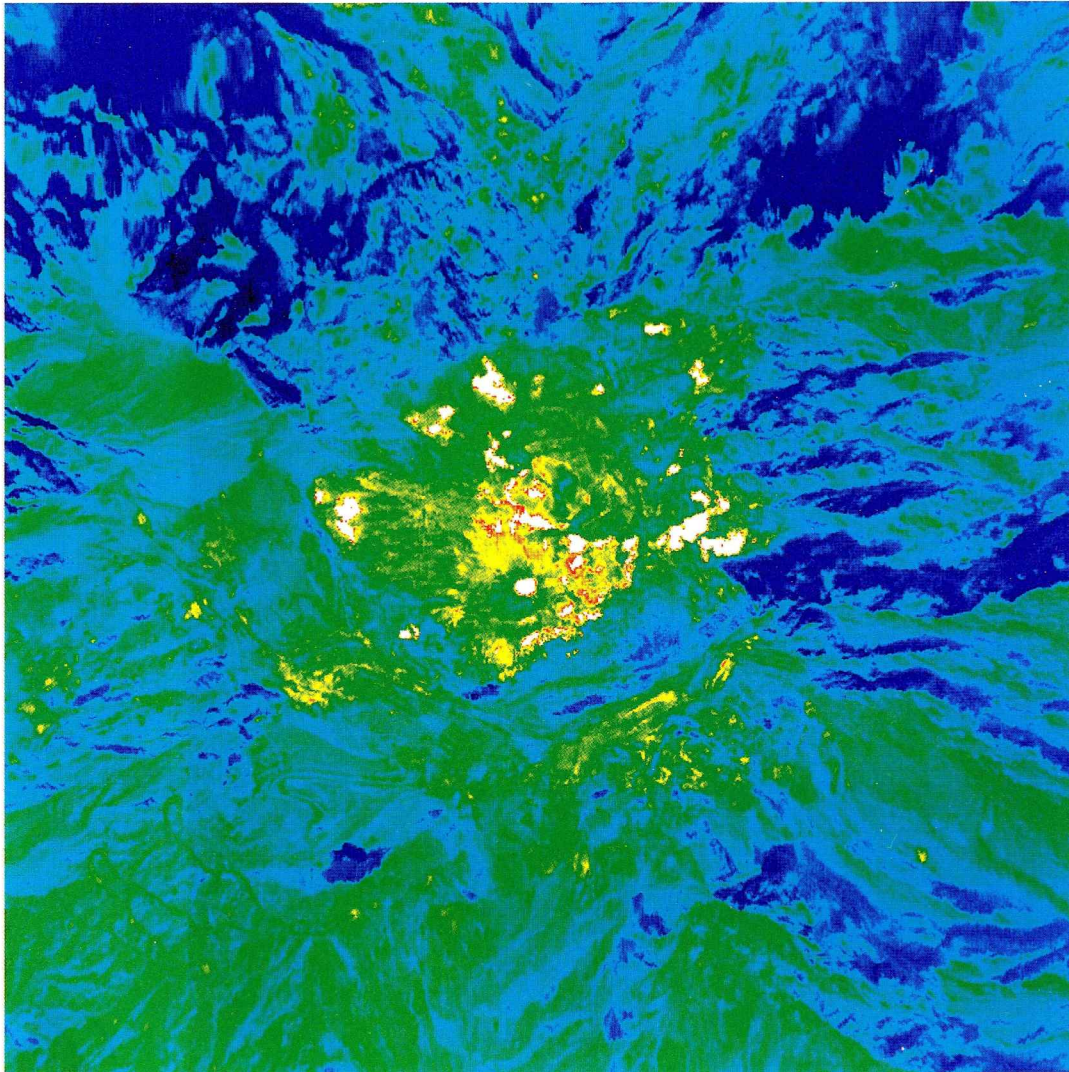
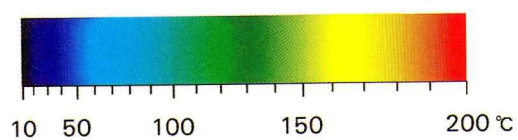
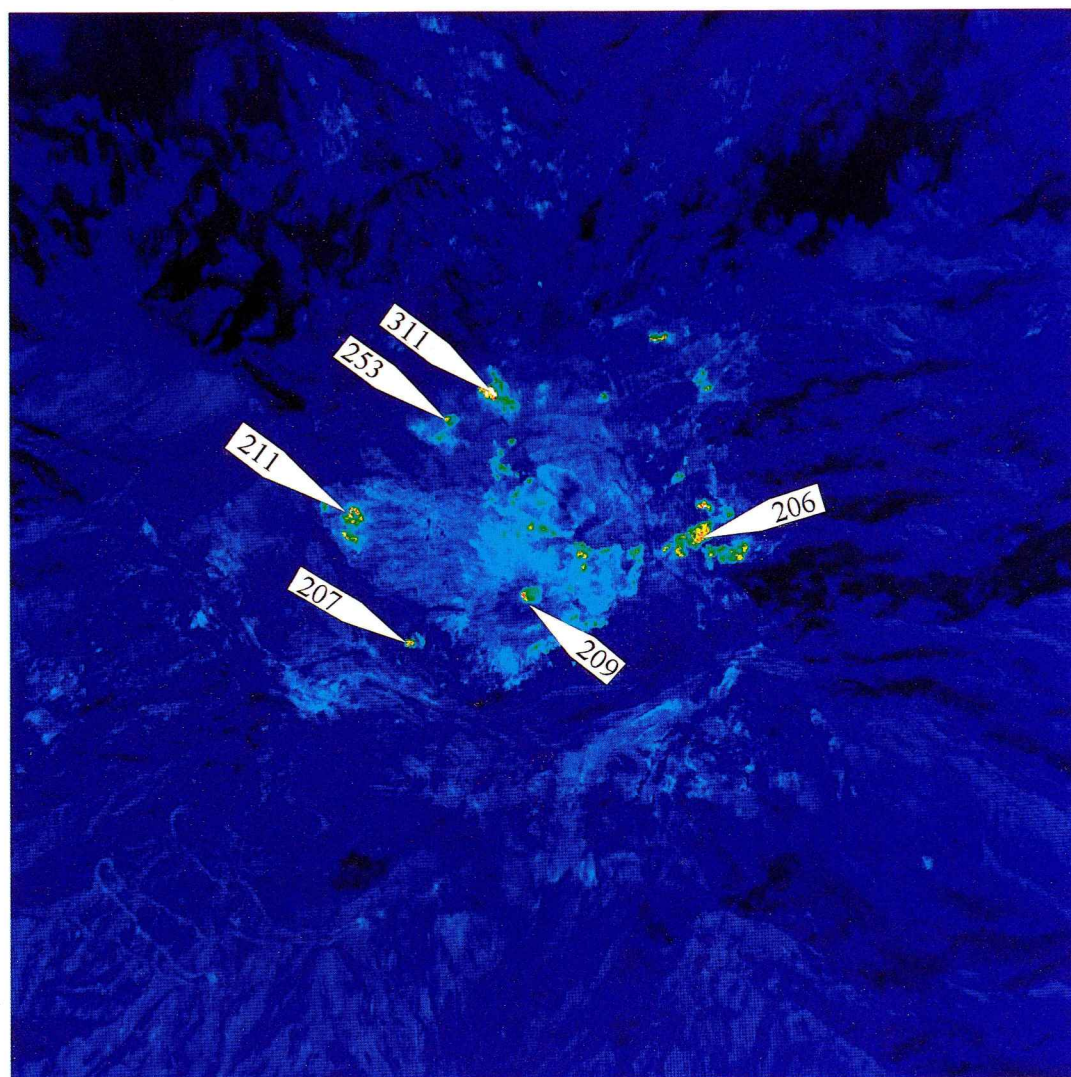


図4(b) 硫黄岳山頂火口周辺拡大温度分布画像 (SIWO-2による).  
温度範囲 (10~100°C) をレインボーカラー表示.

Fig. 4(b) Temperature distribution around the crater of the summit of Iodake (SIWO-2). The temperature is indicated by using the rainbow color scale from 0 to 100 °C.





1:7,000

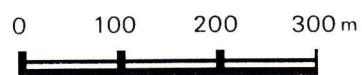


図 4(c) 硫黄岳山頂火口周辺拡大温度分布画像 (SIWO-2による).  
温度範囲 (10~200°C) をレインボーカラー表示.

Fig. 4(c) Temperature distribution around the crater of the summit of Iodake (SIWO-2). The temperature is indicated by using the rainbow color scale from 0 to 200 °C.

あることがわかる。周辺の陰の領域は $10^{\circ}\text{C}$ から $20^{\circ}\text{C}$ と比較的溫度が低い。観測実施時刻が正午直後であったことを考えると、裸地で火山噴出物に覆われた火口周辺部では、日射による地表面の溫度上昇が著しく、 $50^{\circ}\text{C}$ から $60^{\circ}\text{C}$ の地表面溫度が観測されたと推定される。

#### 4. 考察

今回の観測により、熱的に活発な活動を続けている薩摩硫黄島の面的な溫度分布が、初めて明らかになった。地質調査所による現地での溫度観測によれば、北部クレーターを中心に1990年代中頃以降、今回の観測を含む期間に $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ の高温噴気が観測されている。今回観測された最高溫度は、 $311^{\circ}\text{C}$ でこの噴氣溫度よりは、かなり低い。これは噴氣から放出されるエネルギーが同じ溫度の地表面から放出されるエネルギーより小さいためと考えられる。さらにVAM-90Aの1画素の溫度は、瞬時視野角 $1.5\text{ mrad}$ すなわち今回の観測では $1.5\text{ m}^4$ 方の地表面の平均的なエネルギーから算出される溫度であるため、たとえ噴氣溫度と同程度の地表面があってもその面積は $1.5\text{ m}^4$ 方よりかなり小さいことが推定できる。

火口内の高温領域は線状に分布していることが明瞭になった。疑似カラー画像との比較により、この線状構造は亀裂等の地表付近の構造の可能性が強いが、今後、薩摩硫黄島で行われている様々な観測結果と比較することにより、線状構造の実体を把握する必要がある。

今後、地表で観測された溫度と今回の観測値を比較することにより、溫度分布から放熱量の推定が可能になるであろう。薩摩硫黄島のように噴氣量の大きい火山においては、溫度推定に与える噴氣の影響も重要である(鶴川・宮坂, 1998)。バンド8とバンド9を用いて噴氣の影響を推定することは、今後の重要な課題である。

今回の観測では、観測が正午直後であったため裸地の溫度上昇が著しかった。火山地域の裸地では日射の影響を大きく受けることが、過去に実施した阿蘇山や九重山の観測でもわかっている。今後、火山噴出物に覆われた地域の日射による溫度上昇の定量的な実験を行う必要がある。

薩摩硫黄島では1998年から1999年にかけても活発な地震活動が継続し、小規模であるが降灰が観測されている(福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 1999)。今後の活動の推移をみて、再度観測を実施することができれば、今回の観測データと比較することにより、溫度異常域の

時空間変化や放熱量の時間変化を把握できる。

#### 5. 結論

VAM-90Aを用いて薩摩硫黄島の地表面溫度観測を1997年10月21日実施した。この観測により、薩摩硫黄島の中央部から東部にかけての領域の表面溫度を捉えることができた。硫黄岳山頂火口内を中心とした高温域及び硫黄岳東斜面の高温スポットを捉えることができた。火口内には $100^{\circ}\text{C}$ 以上の高温スポットが点在しているが、その配列は疑似カラー画像と比較すると、亀裂等の地表構造と考えられる地形と相関している。 $200^{\circ}\text{C}$ 以上の溫度が観測された場所は、高温噴氣が噴出している場所にほぼ一致する。観測された最高溫度は $311^{\circ}\text{C}$ であった。硫黄岳東斜面の高温スポットの最高溫度は $144^{\circ}\text{C}$ であった。薩摩硫黄島は1998年～1999年に入っても、活発な地震活動を示している。今後、活動の推移を見て再度観測した場合に、溫度異常域の時空間変化を検出する基礎データを得ることができた。

#### 謝辞

地質調査所の風早博士、篠原博士、松島博士には、薩摩硫黄島の活動状況について、教えていただいた。また匿名査読者のコメントは本論文の改善に役立った。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 地質調査所(1997): 薩摩硫黄島火山の硫黄岳の活動状況, 火山噴火予知連絡会会報, No. 67, 79-82.
- 2) 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台(1999): 薩摩硫黄島の火山活動—1998年10月～1999年1月, 火山噴火予知連絡会会報, No. 73, 106-107.
- 3) 風早康平・篠原宏志(1996): 活火山からの過剰な脱ガスについて—そのマグマ過程と機構. 地質学論集, 46, 91-104.
- 4) 植原茂次・熊谷貞治・矢崎 忍(1991): 航空機搭載MSSによる雲仙火山の熱観測. 日本リモートセンシング学会誌, 11-3, 49-55.
- 5) 鶴川元雄・宮坂 聡(1998): 航空機搭載型多波長走査放射計による2バンド法火山体溫度測定. 地球惑星科学学会1998年合同大会予稿集, 407.

(原稿受理: 2000年1月5日)

## 要 旨

防災科学技術研究所では、1997年10月21日に薩摩硫黄島の山体表面温度観測を火山専用空中赤外映像装置 VAM-90 A を用いて実施した。この観測装置は可視域から熱赤外域までを9バンドに分割し、同時に観測できる多波長走査放射計である。薩摩硫黄島は鬼界ヶ島カルデラの縁に位置し、1990年代中頃より地熱活動の活発化が指摘されていた。今回の観測では、硫黄岳山頂火口周辺及び東斜面で100°Cを越える温度異常域が検出された。観測された最高温度は、山頂火口北部での311°Cである。高温スポットは火口内に点在しているが、疑似カラー画像と比較すると、高温スポットは断裂等の地表構造に沿って分布しているようである。今回の観測により、地熱活動の時空間変化を把握するための第1回目の基礎データを得ることができた。

キーワード：温度測定，薩摩硫黄島，火山，MSS