

火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90 A) による  
北海道駒ヶ岳, 九重山, 阿蘇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 Hokkaido-Komagatake, Kuju Volcano and Aso Caldera

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.

Abstract

Surface temperature distribution was measured at three active volcanoes, Hokkaido-Komagatake, the Kuju volcano, and the Aso caldera in 1996, by using the air-borne multispectral scanner (MSS), VAM-90A. The MSS was designed by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention to provide nine wavebands of information from visible to infrared. At Hokkaido-Komagatake a small eruption occurred on March 5, 1996, after a 54-year-quiescence. MSS observation was performed on September 8, 1996, covering about a 4 km×4 km area around the summit crater. The temperature images obtained show high temperature areas along the 1996 crater. The highest temperature of 82.4°C was detected at the 1996 main crater. At the Kuju volcano an eruption began on October 11, 1995, and it continues to the present (1997). MSS observation was performed on November 24, 1996, and the highest temperature of 207°C was detected at the old geothermal area. At the new crater the highest temperature was 201°C. For the Aso caldera, MSS observation was performed on November 24, including the Nakadake volcano, the active central cone of the Aso caldera. The Nakadake volcano is going through a relatively quiet period at present. The highest temperature of 133°C was observed at the southern wall of the Nakadake 1st crater, and the temperature of water in the pond in the crater was about 50°C. For each observation, false color images from data of visible and near infrared bands were synthesized. These false color images are useful in identifying locations of high temperature areas on maps and also in obtaining information concerning conditions around craters. Data obtained through these observations will prove useful as basic data to be compared with temperature distributions at future eruptive activities.

**Key words:** Temperature measurement, Volcano, Air-borne MSS

1. はじめに

火山噴火の開始時期あるいは火山活動の推移を予測するためには、火山体表面の詳細な温度分布は欠くことのできない基礎的情報である。噴火に至るマグマの上昇過程において、移動速度がマグマより大きい火山ガス等の

\*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

流体が、マグマ本体から分離し、先に地表に到達する場合は多い。これらのマグマ本体から分離した流体により運ばれた熱により、噴火の前駆現象として地表において温度異常が観測されることが期待される。また、噴火中の火山や常時高い活動状態の火山においても、火山体表面の温度分布に基づいて推定される熱収支の時間変化は、噴火活動の推移予測のために重要である。

防災科学技術研究所では、火山体表面の温度分布を測定するため、1,500°Cまで測定可能な航空機搭載型のマルチ・スペクトル・スキャナー (MSS) を 1990 年までに開発し、火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90A) として運用している (植原ほか, 1991)。1990 年の雲仙普賢岳の噴火以降 1995 年までは、同火山を主たる観測対象として、山体表面温度測定を実施してきた。雲仙普賢岳を対象とした一連の観測では、噴火前の温度観測により溶岩の噴出する位置に温度異常を見出したり、噴出した溶岩の最高温度 750~800°C (熊谷ほか, 1993) を検出するなどの成果を挙げた。

火山体の温度観測では、時期の異なる複数の観測により温度変化を検出することが重要である。そのためには噴火後のみならず、静穏な時期の火山体温度分布も観測しておく必要がある。このため、防災科学技術研究所では VAM-90A を用いて、火山活動が活発化した火山を中心に、活動の活発化が懸念される火山も含め、年間 2~3 火山の温度観測を実施する計画である。平成 8 年度は 1996 年 3 月 4 日に北海道駒ヶ岳が 54 年ぶりに噴火したことと、1995 年 10 月 11 日に噴火活動を開始した九重山の噴煙活動が依然継続していることを考慮して、この両火山を観測対象とした。さらに阿蘇中岳は比較的静穏

な状態 (湯溜まり状態) にあるが、活動の変遷に伴う温度分布の変化検出の基礎資料とするため温度観測を実施することとした。ここでは、これら北海道駒ヶ岳、九重山、阿蘇山の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昭和 55 年度~平成 2 年度に設計、制作した火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90A) を用いた (植原ほか, 1991)。同装置は、航空機搭載型のマルチ・スペクトル・スキャナーで、可視光域から熱赤外域までの波長帯域を 9 バンドに分割して計測できる機能を有している。VAM-90A の観測波長帯域、測定温度、瞬時視野角を表 1 に示す。測定温度範囲はバンド 6 と 7 が -10°C~1,500°C、バンド 8 と 9 が -20°C~250°C である。瞬時視野角は、温度測定バンドである 6~9 は 1.5 mrad、可視光から近赤外帯域であるバンド 1~5 は 3.0 mrad である。実際の観測は運輸省航空局より VAM-90A 搭載の認可を受けた中日本航空 (株) 所有のセスナ 404 型機 (機番 JA 5264) に同装置を搭載して行っている。

VAM-90A を機体に取り付けた際の垂直方向の有効視野角は 60 度で、これは対地高度 1,000 m で飛行した場合、幅約 1,155 m に相当する。データは 14 ビットでデジタル化され、機上にて収録される。この際、機体に取り付けたジャイロにより機体のローリング角を検出し、ローリング補正を施している。

観測されたデータは、地表でのサンプリング間隔が飛行コース直下から観測領域の縁に向かって広がっていき影響や地形の標高差のために歪んでいる。このため、

表 1 VAM-90A の観測波長帯域と瞬時視野角

Table 1 Spectral bands and instantaneous field of view of VAM90-A.

バンド名	波長帯 μ m	測定温度 °C	瞬時視野角 mrad
BAND-1 (可視域)	0.51 ~ 0.59	---	3.0
BAND-2 (可視域)	0.61 ~ 0.69	---	3.0
BAND-3 (近赤外域)	0.80 ~ 1.10	---	3.0
BAND-4 (中間赤外域)	1.55 ~ 1.75	---	3.0
BAND-5 (中間赤外域)	2.08 ~ 2.35	---	3.0
BAND-6 (熱赤外域)	3.50 ~ 4.20	-10 ~ 1,500	1.5
BAND-7 (熱赤外域)	4.30 ~ 5.50	-10 ~ 1,500	1.5
BAND-8 (熱赤外域)	8.00 ~ 11.00	-20 ~ 250	1.5
BAND-9 (熱赤外域)	11.00 ~ 13.00	-20 ~ 250	1.5

歪みの小さい画像を得るには、観測データに対していくつかの補正を施さなければならない。ここでは概要幾何補正を実施した。具体的には北海道駒ヶ岳のデータについては、航空機の対地速度と高度を基に走査線の間引きを行う V/H 補正を行った。九重山と阿蘇山のデータについては処理にワークステーションを用いるようになったため、地形図上の標定点 (GCP) に合うように画像の地形歪みを修正する GCP 補正を施すことができた。なお、いずれの場合も観測地形が平面であるとの仮定の下でタンジェント補正を施した。

リモートセンシングによる温度測定の問題点は、観測値から算出される理論温度と実際の温度の相違である。VAM-90A では、20°C と 50°C の内部参照黒体を持ち、これによりミラーの回転毎に温度の補正を行っている。また、毎年 1 回、バンド 6 と 7 では 100~1,000°C の間で 100°C 毎に、バンド 8 と 9 では 10~250°C の間で 20~50°C 毎に、基準熱源との比較校正を行っている。これにより基準熱源との差はバンド 6, 7 では 4°C 以内、バンド 8, 9 では 2°C 以内に設定されている。今回表示する温度は、観測された電磁波の強度から、対象物の放射率を 1 と仮定し、さらに電磁波の大気での吸収を無視して算出された温度である。

今回観測した温度範囲は、すべて 250°C 以下であった。この温度範囲の温度推定にはバンド 8 と 9 を用いることができるが、より水蒸気の影響を受けにくいバンド 8 の温度を表示した。実際の地表面温度は、対象物の放射率が 1 以下であり、電磁波は大気での吸収を受けるので、この理論温度より高温であると考えられる。

### 3. 北海道駒ヶ岳

#### 3.1 観測

北海道駒ヶ岳は北海道の南端付近、渡島半島のほぼ中程に位置する安山岩質の成層火山である (図 1)。爆発的噴火が特徴で、火砕流 (軽石流) や泥流を生じやすいとされている (気象庁, 1996 a)。記録に残されている最大の噴火は、1640 年 (寛永 17 年) 7 月 31 日に発生した噴出物量が 1.25 km<sup>3</sup> と推定される噴火で、この噴火による山体崩壊が引き起こした津波による死者も含め、700

余名が犠牲になっている。その後、1856 年 (安政 3 年)、1929 年 (昭和 4 年) にも火砕流を伴った大噴火が発生している。1942 年の噴火以後、1954 年まで噴煙がたびたび観測されていたが、その後は地震活動は観測されるものの表面活動は静穏であった (気象庁, 1996 a)。

1996 年 3 月 5 日の噴火は、小規模な水蒸気爆発により昭和 4 年火口内に新たな火口 (96 主火口) とその南側に長さ約 200 m の割れ目が開き、火口列 (96 南火口列) が形成されるというものであった (図 2)。噴煙高度は 3 月 9 日には 1,000 m あったが、5 月下旬には 100~200 m まで低くなった (気象庁, 1996 b)。今回の噴火は、噴出量が約 3 万トンと推定され小規模なものである (宇井ほか, 1997)。しかし、昭和 4 年の大噴火では噴火に先立つ 10 年間に小噴火が散発したこと (北海道大学理学部附属有珠火山観測所, 1996) から、今後の火山活動の活発化が懸念されている。

防災科学技術研究所では、北海道駒ヶ岳の火山活動の活発化に備え、同火山を VAM-90A による温度観測の対象火山とすることにした。観測においては、今回の噴火により形成された火口列周辺の詳細な状況と、今後の噴火により噴出する火山噴出物の分布状況把握の基礎資料とするため、火口だけでなく火山体全体にわたる広範囲を測定することとした。このため、VAM-90A による測線は、対地高度 2,000 m (基準面高度 900 m)、測線長約 6 km を 2 コース、対地高度 1,000 m (基準面高度 900 m) で火口を含む測線長 4 km を 1 コースとした。図 1 に観測飛行コースと観測領域を示す。火口周辺の地形を図 2 に示す。

天候を考慮して観測は 8 月下旬~9 月上旬に実施するよう計画し、快晴となった 9 月 8 日に測定を行った。観測時刻等の観測条件を表 2 に示す。

#### 3.2 観測結果

対地高度 2,000 m のコース HK-96A と HK-96B の温度画像を図 3 に示す。観測位置を明確にするため、バンド 1, 2, 3 を青, 緑, 赤に対応させることにより合成した疑似カラー画像を図 4 に示した。温度画像は温度分布が明瞭に表示されるよう 10~50°C をレインボーカラー表示した。全体的には山体南西斜面の 40~45°C の比

表 2 北海道駒ヶ岳、九重山及び阿蘇山の温度観測条件

Table 2 Observation conditions for Hokkaido-Komagatake, Kuju volcano and Aso caldera.

項目	観測状況					
	北海道駒ヶ岳		九重山		阿蘇山	
観測日時	1996/9/8	11:46 ~ 12:18	1996/11/24	15:05 ~ 15:07	1996/11/24	11:28 ~ 11:51
基準面高度	900m		1,500m		1,250m	
対地高度	HK-96A	2,000m	KUJU-96	1,200m	ASO-1	1,000m
	HK-96B	2,000m			ASO-2	2,000m
	HK-96C	2,000m				
天候	晴れ~快晴		快晴		快晴	
気温	23.1 °C (1 2 時: 函館測候所)		9.9 °C (1 5 時: 阿蘇山測候所)		9.7 °C (1 1 時: 阿蘇山測候所)	
	21.4 °C (1 2 時: 森測候所)				10.1 °C (1 2 時: 同上)	

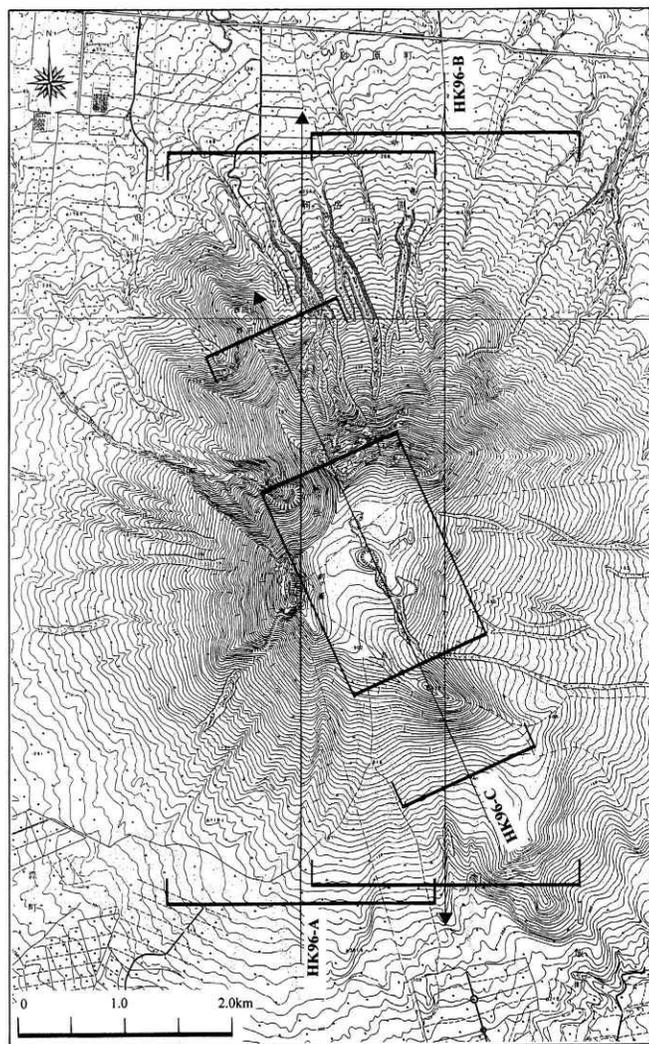


図1 北海道駒ヶ岳の温度観測領域と観測飛行コース(直線)

Fig. 1 Map showing the observational areas and flight courses (straight lines) for Hokkaido-Komagatake.

較的高温の領域が目立つが、これは日射による影響と考えられる。昭和4年火口の北方、砂原岳周辺も30~40°Cの比較的高温の領域が広がっているが、これも爆裂火口内部の南に面した斜面であるので日射による影響であろう。火山活動による高温部は、昭和4年火口内に数十m以内の規模で、また、昭和4年火口の北東側に40~50°Cの領域が幅200m程度の規模で広がっている。これらについては測線HK-96Cの画像をもとに詳述する。HK-96AとHK-96Bの両方に観測された山頂火口を含む南北の領域の温度分布は、それぞれのコースにより温度分布の様相が異なるが、これは航空機から見込む角度が異なるためである。

火口周辺部を見るために、対地高度1,000mの測線HK-96Cについて0~60°Cのレインボーカラー表示による温度分布と疑似カラー画像を図5に示す。さらに火口周辺部を詳しく見るために、HK-96Cによる火口付

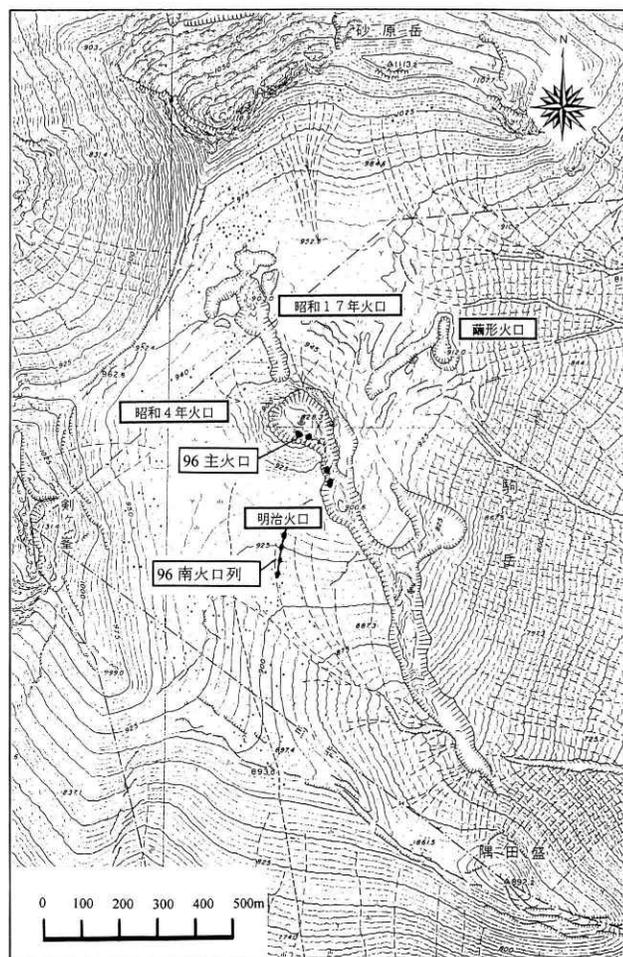


図2 北海道駒ヶ岳の火口周辺地形(気象庁, 1996b)

Fig. 2 Geographic map around the crater of Hokkaido-Komagatake.

近を含む領域(図1)の温度分布、疑似カラー画像、等温線図を図6に示す。温度分布の温度表示は0~60°Cのレインボー表示である。

1996年の噴火では、昭和4年火口内(96主火口)とその南側に形成された長さ約200mの新亀裂(96南火口列)が活動した。これに伴う熱異常域として、昭和4年火口内に50°Cを越える高温域が2カ所観測されている(図6c)。最高温度はそれぞれ82.4°Cと55.0°Cである。疑似カラー画像上で最高温度の観測された地点付近から、北北西方向に伸びる噴煙と考えられる白色の帯が確認できる。また96南火口列(図2参照)の中央部付近に最高温度59.3°C、北端近くに50.1°Cの高温域が認められる。疑似カラー画像上でこれらの高温域付近からも白色の領域が確認でき、噴煙と考えられる(図6b)。

このほか昭和4年火口の北東方向の高温域の広がりにおいても50°Cを越えていることがわかる(図6)。この領

域は昭和4年火口を扇の要として昭和17年火口と繭形火口に挟まれ(図2参照)，南北約300m，東西約200mの拡がりがあり，最高温度は56.8°Cである。昭和4年火口から南南東へ伸びる亀裂内(昭和17年噴火に伴う主亀裂)にも最高51.3°Cの高温域が検出された。

疑似カラー画像上(図6b)では，青灰色領域が昭和4年火口から南南東～東南東に，また新亀裂から東南東に広がっている。さらにこの青灰色の領域は，対地高度2,000mのHK-96A及びHK-96Bによる疑似カラー画像上(図4)で南東方向に伸びていることが確認できる。これは1996年噴火による降灰領域と考えられる。

## 4. 九重山の温度観測

### 4.1 観測状況

九重山は東西15kmにわたって分布する20以上の火山の集合で，星生山の北東側山腹は，従来から噴気活動等火山活動の活発な地域であった(気象庁，1996a)。1995年10月11日には星生山の東側で噴火活動が再開した。防災科学技術研究所ではこの火山活動に伴う温度分布の変化を捉えるため，1995年10月21日にVAM-90Aにより，また1996年2月28日には中日本航空(株)所有のMSSにより九重山の新火口列を含む山体表面の温度分布を測定してきた(鶴川・熊谷，1997)。九重山の噴火活動は，1996年に入っても継続しているので，防災科学技術研究所では平成8年度も九重山を温度観測の対象とすることとした。本報告では，平成8年度に実施した観測に関するものである。

観測領域と観測飛行コースを図7に示す。飛行コースは1995年10月21日とほぼ同じで，飛行高度は対地高度1200m(基準面高度1500m)である。観測は1996年11月24日，阿蘇山の観測終了後に測線長2.5kmで実施した。観測状況については表2に示す。

### 4.2 観測結果

温度画像及び疑似カラー画像を作成するにあたって，2万5千分の1地形図と疑似カラー画像上の双方で同定できる地上標定点(GCP)を基に，画像の歪みをアフィン変換により最適化した。ただし，ここでは標高の補正を施していないので便宜的な幾何補正といえる。15点のGCPにより最適化を行ったが，GCPの最小2乗残差は約50画素で，ほぼ100m程度の画像の歪みがあることになる。

得られた温度分布，疑似カラー画像，等温線図を図8に示す。図9は，図7に示した観測領域のうち噴火活動域を含む約1km×1.5kmの範囲を拡大したものである。温度分布は-10°C～60°Cの範囲をレインボーカラー表示し，地形図を重ねて表示した。主たる高温域は3カ所ある。このうち，南側の東西に伸びる高温域は1995年の噴火活動により形成された新火口列(通称D領域，以下同様)である。他の2カ所は従来から噴気活動を行っていた場所である(北側：A領域，中央：C領域)。等温線図に示すように南側(D領域)の最高温度は201.1°Cである。北側の高温域(A領域)では最高温度207.1°Cが得ら

れた。中央の高温域(C領域)は大きさも小規模で最高温度も118.0°Cである。

図9の温度画像と図8Cの等温線図より，新火口列(D領域)に201.1°C，116.6°C，54.4°Cのピークが東西に配列していることがわかる。疑似カラー画像(図8b)も参照すると，新火口列での最高温度である201.1°Cを記録した位置(新火口列)から北向きに噴煙が拡散していることがわかる。噴煙の温度は20～30°Cである。従来からの高温域であるA領域では，約40°C以上の温度域が約100m四方にわたり分布している。C領域の大きさは，約40°C以上の温度域が約50m四方と小さい。

1995年10月及び1996年2月に実施した九重山の温度観測では，新火口列(D領域)は噴煙に覆われ，観測された温度は100°C以下であった。今回の観測では，噴煙量が減少していたことと噴煙の立ち上がる位置が観測測線に対して障害となりにくい位置であったため，初めて100°Cを越える新火口列の温度分布を観測することができた。既に実施した2回の温度観測との比較は，別に報告する予定である。

## 5. 阿蘇山

### 5.1 観測状況

阿蘇山は，東西17km，南北25kmの大カルデラ内に主峰の高岳など玄武岩から流紋岩にわたる十数座の中央火口丘がほぼ東西方向に配列する火山で，中岳が有史以後も噴火を繰り返している(気象庁，1996a)。中岳は安山岩・玄武岩の成層火山であり，有史後の活動では玄武岩質安山岩を噴出している。中岳の山頂火口は，数個の火口が南北に連なる長径1,100mの複合火口で，近年は北端の第1火口が活動している。1996年現在では，非活動期の特徴である湯溜まりが形成されているが，1992年，1993年は活発な噴火活動が見られ，1995年には土砂噴出が発生した。今回の観測では，有史以後の噴火活動が中岳火口に限られていることから，非活動期中岳火口とその周辺部の詳細な温度分布測定を行うことを目的とした。

観測領域と観測飛行コースを図10に示す。中岳火口の長軸方向に飛行するASO-1(対地高度1,000m，基準面高度1,250m，コース長2km)とASO-2(対地高度2,000m，基準面高度1,250m，コース長3km)の2コースで測定を実施した。対地高度1,000mのASO-1により詳細な火口内の温度分布を観測し，対地高度2,000mのASO-2により火口を含むやや広い範囲の温度等の分布状況を観測する。

### 5.2 観測結果

温度分布画像，疑似カラー画像，等温線図を作成するにあたり，GCPを用いたアフィン変換により地形歪みを補正した。GCPとして，2万5千分の1の地形図とVAM-90Aにより取得されたデータによる疑似カラー画像の対応の明瞭な点を，ASO-1では10点，ASO-2では11点を用いた。各画像のGCPにおける変換残差の最小2乗残差はASO-1が16.6画素，ASO-2が16.3

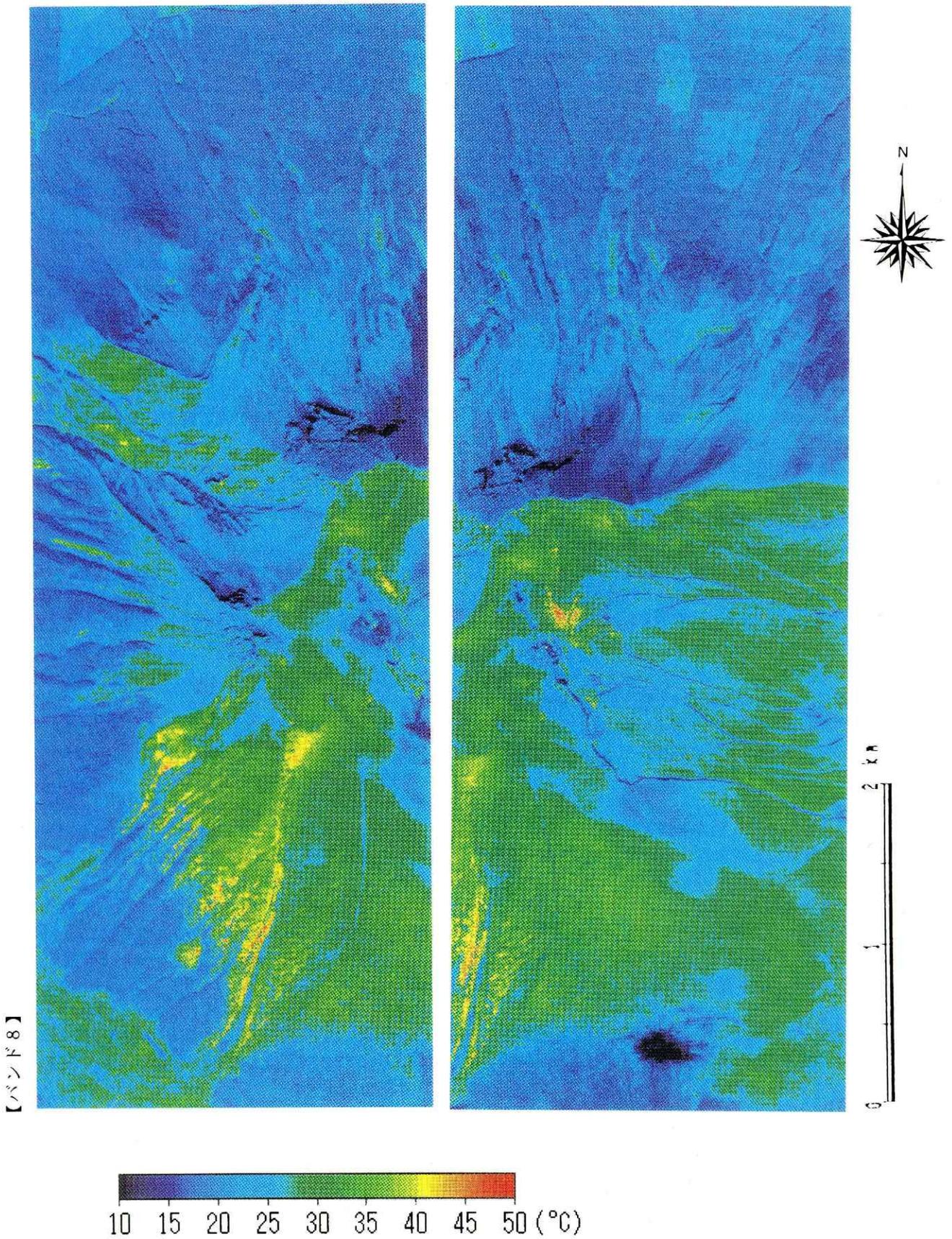


図3 HK-96A (左) と HK-96B (右) の温度画像

Fig. 3 Thermal images of HK-96A (left) and HK-96B (right).

コース：HK-96A

コース：HK-96B

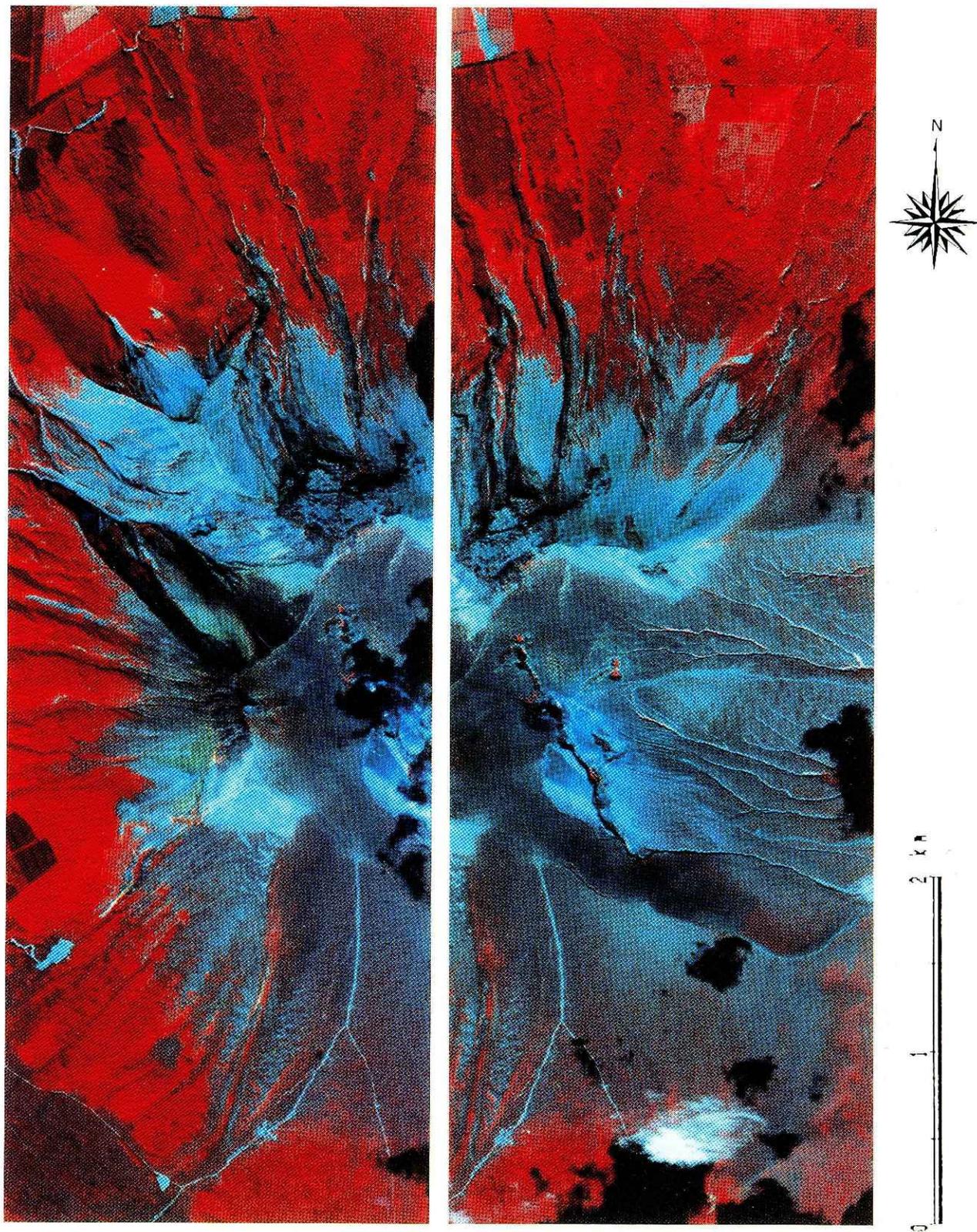


図4 HK-96A (左) とHK-96B (右) の疑似カラー画像

Fig. 4 False color images of HK-96A (left) and HK-96B (right).

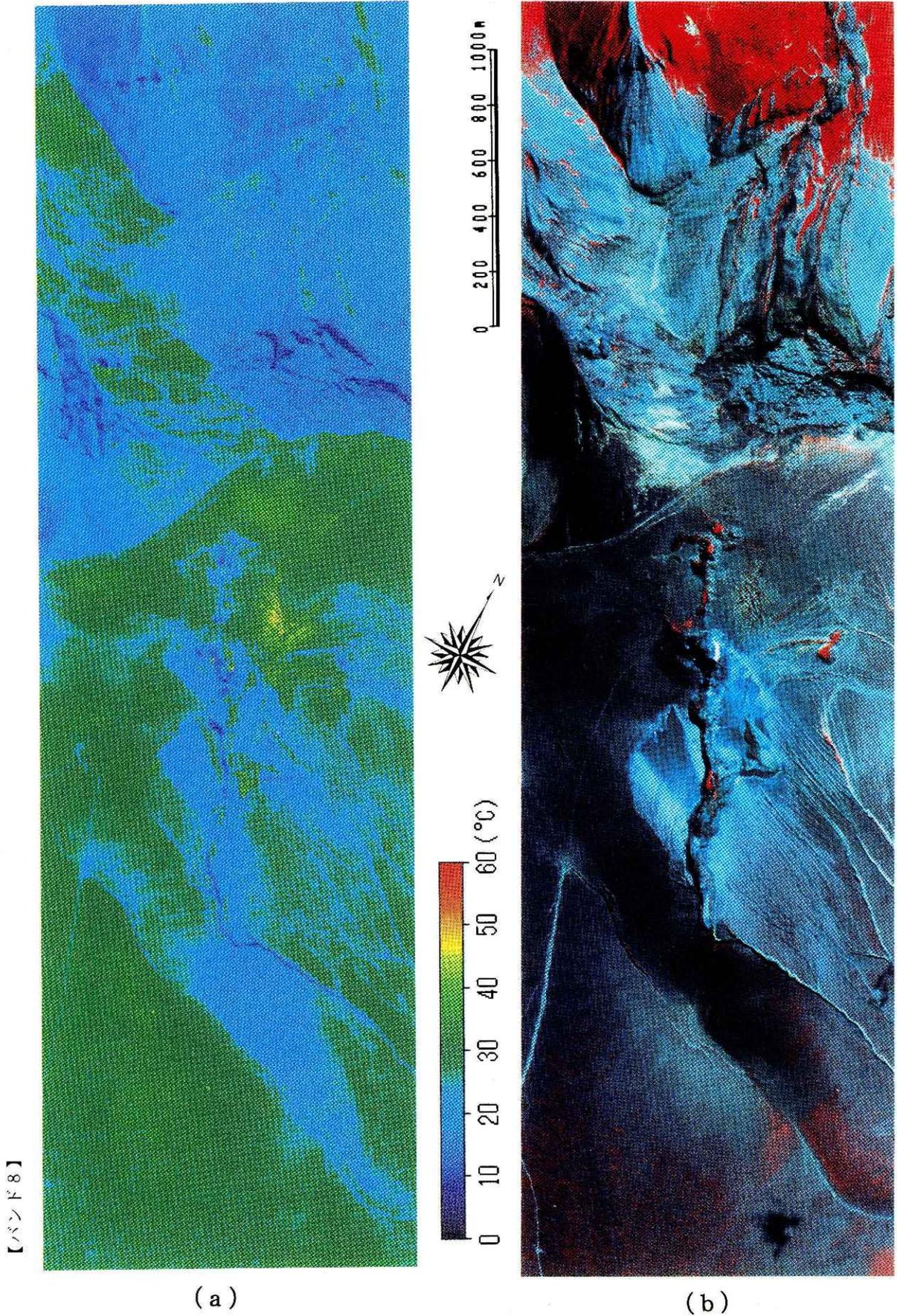


図5 HK-96Cの温度画像(a)と疑似カラー画像(b)

Fig. 5 Thermal image (left) and false color image (right) of HK-96C.

画素であった。対地高度 1,000 m と 2,000 m の 1 画素の幅はそれぞれ約 1.5 m と約 3 m であるので, ASO-1 での変換残差は約 25 m, ASO-2 では約 50 m に相当する。

ASO-1 と ASO-2 のそれぞれについて, 温度画像, 疑似カラー画像, 等温線画像を図 11 と図 12 に示す。また火口内の温度分布の詳細を見るために, ASO-1 のデータによる火口周辺部の温度分布をデジカラー表示により, 疑似カラーと併せて図 13 に示した。

ASO-1 での最高温度は 133.5°C, ASO-2 での最高温度は 104.3°C である。この最高温度の相違は, 対地高度の違いによる瞬時視野角の違いと考えられる。最高温度の観測された位置は第 1 火口の南壁で, 気象庁阿蘇山測候所の 11 月 10 日の観測によれば約 247°C, 12 月 15 日の観測によれば 202°C の温度が観測されていた (気象庁, 1997)。南壁の温度が阿蘇山測候所の観測より約 100°C 低く測定されたのは, 南壁が急峻であり, 航空機からの観測によると瞬時視野角以下の面積で周辺の低温領域と平均化されてしまった可能性が高い。

湯溜まりの温度は約 30°C~約 55°C の範囲に分布し, 50°C~55°C の領域が卓越している。図 13 により湯溜まり内の温度分布の概要が明瞭に分かる。低温部はリング状に見えるが, 疑似カラー画像を参照すると噴気が帯状に立ち上っている場所と一致しているようである。また, ASO-2 では低温部が湯溜まりの北部に現れ, 疑似カラー画像で認識される噴気の帯とほぼ一致する。疑似カラー画像による噴気的位置と温度画像の低温部位置の一致から, 湯溜まり内に温度の揺らぎが観測された主要因は, 噴気による放射エネルギーの吸収によって見かけ上現れたと考えるのが妥当であろう。

湯溜まり状態の火口の温度分布は 1982 年にも測定され, このときは湯溜まりが全面 50~55°C の温度範囲にあった (須藤ほか, 1984)。この温度分布は火山活動の活発な時期も含め 10 年以上経た今回の温度分布とほとんど変わらない。このことは静穏期の熱の放出量あるいは供給量がほぼ一定していることを示している。1982 年の観測から, 須藤ほか (1984) は熱放出量を  $1\sim 2 \times 10^{14}$  erg/s と見積もっている。

第 3 火口の火口壁南斜面にも 40°C 程度の高温部が観測されている。これは観測が晴天の正午直前に実施されたため, 日射により地表面温度が上昇した影響であろう。

## 6. 議論

MSS で測定される温度は, 対象物とセンサーの間の水蒸気等による放射エネルギーの吸収を受けるので, 真の温度より通常低い。この誤差を推定するために地表踏査を観測に合わせて実施する場合もある。1991 年から 1992 年にかけて実施した 6 回の雲仙普賢岳の温度観測では, 地表踏査と VAM-90A のバンド 9 による観測値との比較を行った (熊谷ほか, 1993)。毎回 10 カ所程度の測定点の温度 (ほぼ 10°C~80°C の範囲) を比較しているが, その差 (地表調査の温度-VAM-90A の観測値) の平均値は -9.9~1.5°C の範囲である。このうち等温領

域が広い海面温度と比較した 2 例では -3.0°C と -5.8°C である。今回の観測においても, 80°C 以下の温度領域では数°C 程度の不確定さが混入していると考えなければならない。高温では, この温度の誤差はさらに大きい可能性がある。

今回の観測で得られた高温スポットのバンド 8 によるピーク温度とバンド 9 によるピーク温度を比較すると, バンド 8 の方が系統的に高い。その差は, 北海道駒ヶ岳では約 14°C (比較箇所 1 カ所), 九重山では 30~40°C (2 カ所), 阿蘇山では 23~40°C (2 カ所) で, 地表踏査から予想される不確定さよりはるかに大きい。この原因としては, 高温スポットのピーク温度を示す領域の面積が, 瞬時視野角に対応する面積より小さいことが考えられる。すなわち最高温度を含む 1 画素に対応する地表から放射される電磁波のエネルギーを平均して温度を算出しているため, 推定される最高温度は真の最高温度より低い。このとき算出される温度は, 波長の短いバンド 8 の方がバンド 9 より高温になるという特徴がある。高温域のピーク温度を比較する際には, 1 画素内の温度分布により波長帯域毎に推定される温度が異なることに注意が必要である。また, ランドサットを使用した火山の温度推定の研究では, この特徴を利用して, 1 画素内の高温部分の比率の推定もなされている (例えば, Oppenheimer *et al.*, 1993)。

火山の火口付近では地表踏査を行うことが困難な場合が多い。VAM-90A には対象温度範囲に 2 つの波長帯域を割り当てている。それぞれのバンドで大気中の吸収の影響や 1 画素内のエネルギーを平均化した際に得られる温度の特性が異なる。今後, このバンド毎の特性の違いを利用して, 地表踏査なしに真の温度により近い温度を推定する方法の開発が課題である。

リモート・センシングによる温度測定では, 位置同定の誤差も重要な問題である。今回の観測では, 疑似カラー画像により地上標定点を選定し, アフィン変換で歪みを最小にする事を試みた。ただし標高の補正は行っていないので, 温度画像, 疑似カラー画像ともに標高の差による歪みが残されている。実際には, 九重山の観測では GCP 残差は 100 m 程度と大きかったが, 地上構造物など標定点の明瞭な阿蘇山では 25~50 m に押さえることができた。

VAM-90A では可視光の観測も同時に行っているので, 今回画像化したような疑似カラー画像の表示も可能である。ここでは疑似カラー画像を主に地図上の位置との同定のために使い, その有効性が明らかになった。それ以外にも, 北海道駒ヶ岳の観測では火山灰の分布が明瞭に表現され, 九重山では噴煙の様子が把握でき, さらに阿蘇山では噴気を捉えることができた。今後, VAM-90A による火山噴出物の分布把握や噴煙・噴気活動状況の把握の手法も開発し, この装置をさらに活用することが必要である。

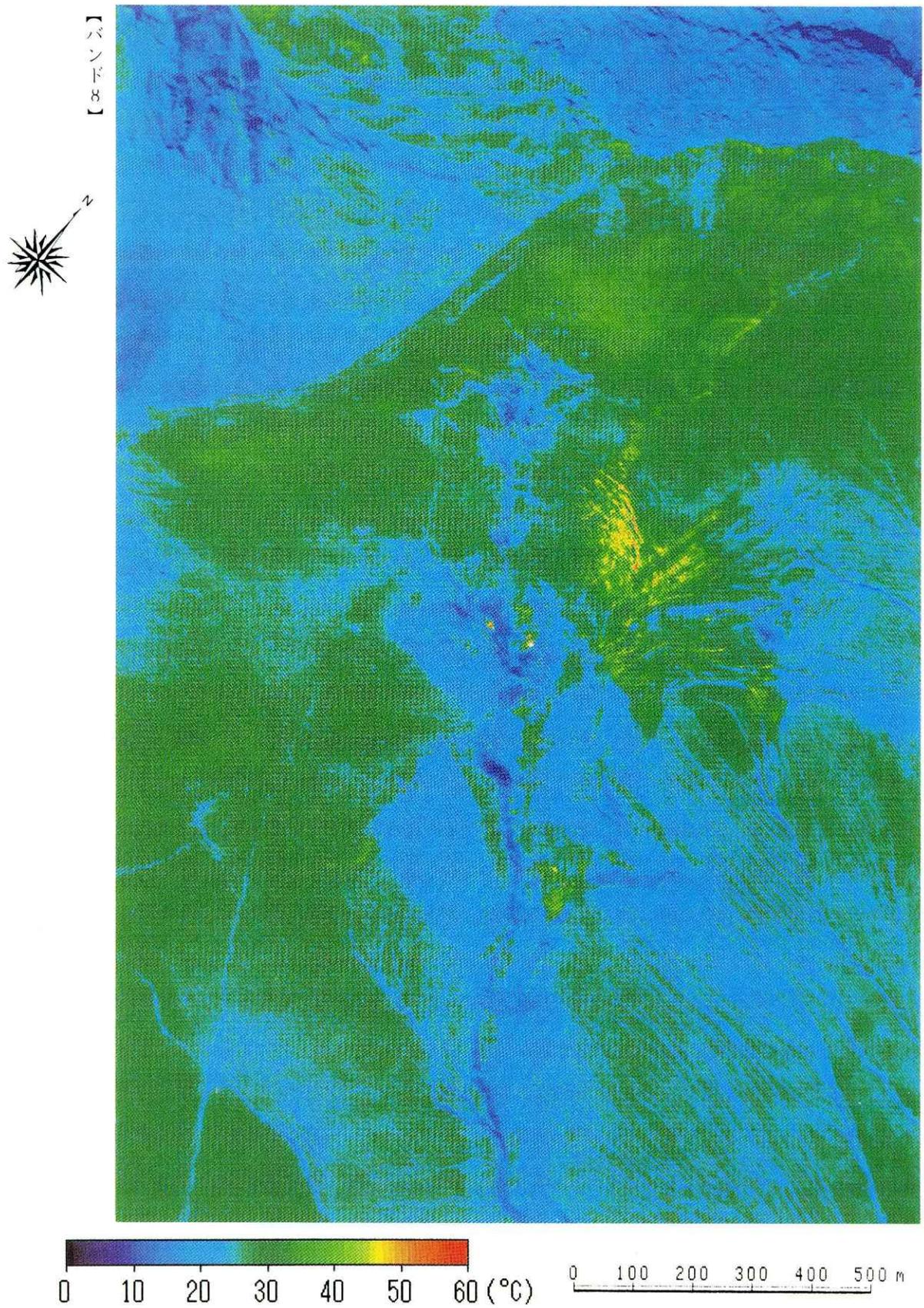


図 6(a) HK-96C のうち図 1 に長方形で示した火口周辺部の温度画像。

Fig. 6(a) Thermal image around the crater for the rectangular area indicated in Fig. 1.

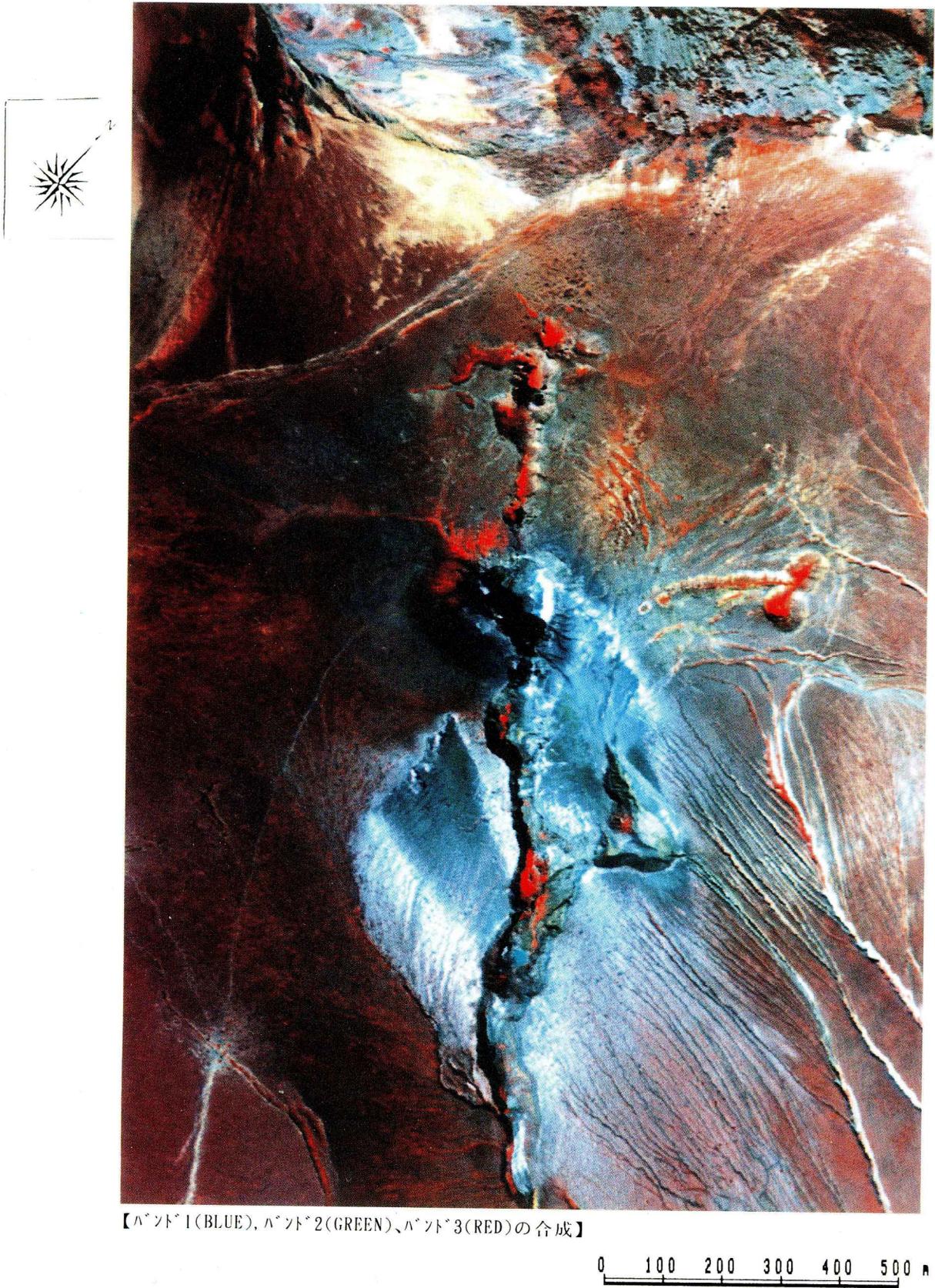


図 6(b) HK-96C のうち図 1 に長方形で示した火口周辺部の疑似カラー画像。

Fig. 6(b) False color image around the crater for the rectangular area indicated in Fig. 1.

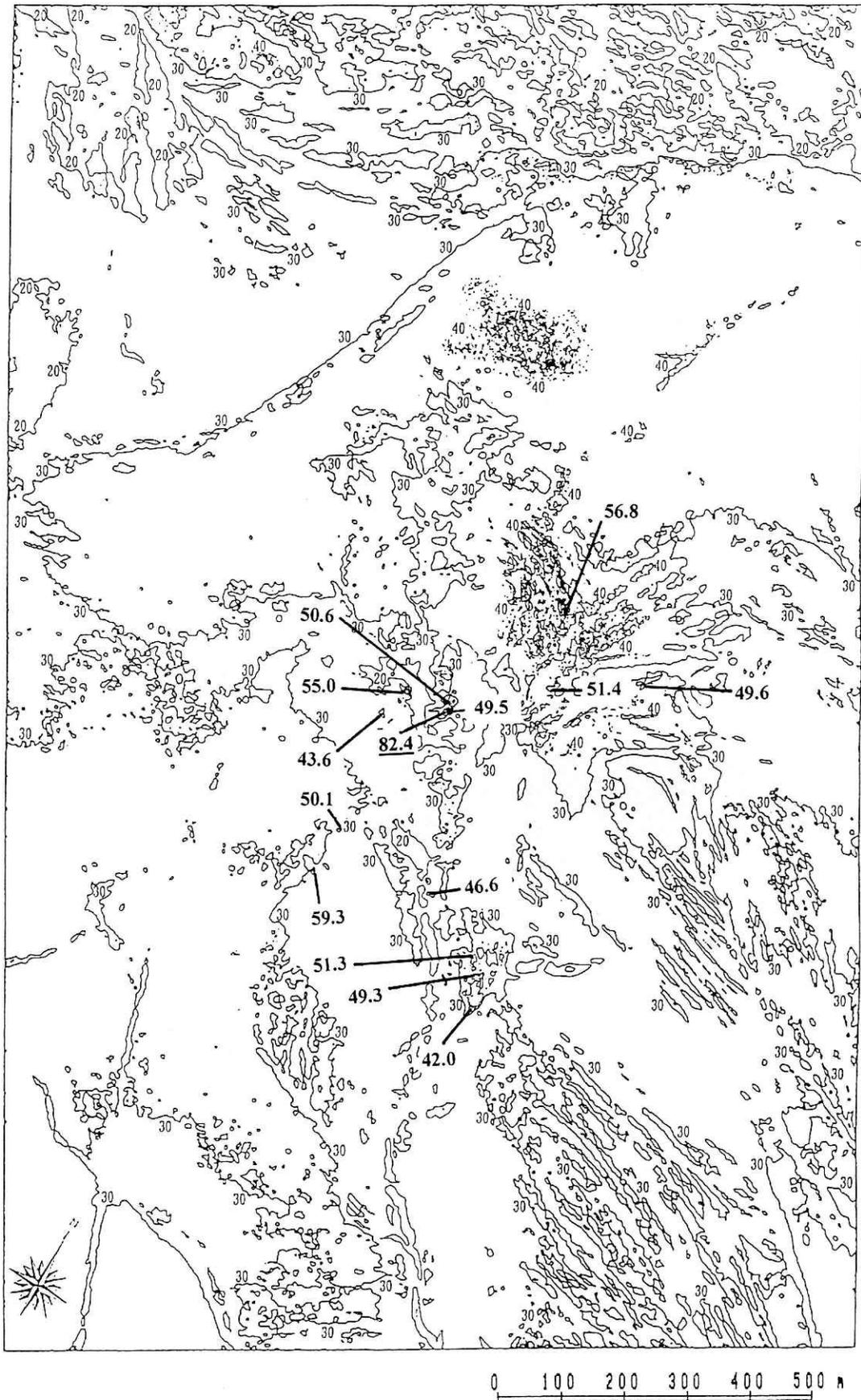


図6(c) HK-96Cのうち図1に長方形で示した火山口周辺部の等温線図。等温線の間隔は10°C。

Fig. 6(c) Isothermal contour map around the crater for the rectangular area indicated in Fig. 1. The increment of contours is 10°C.

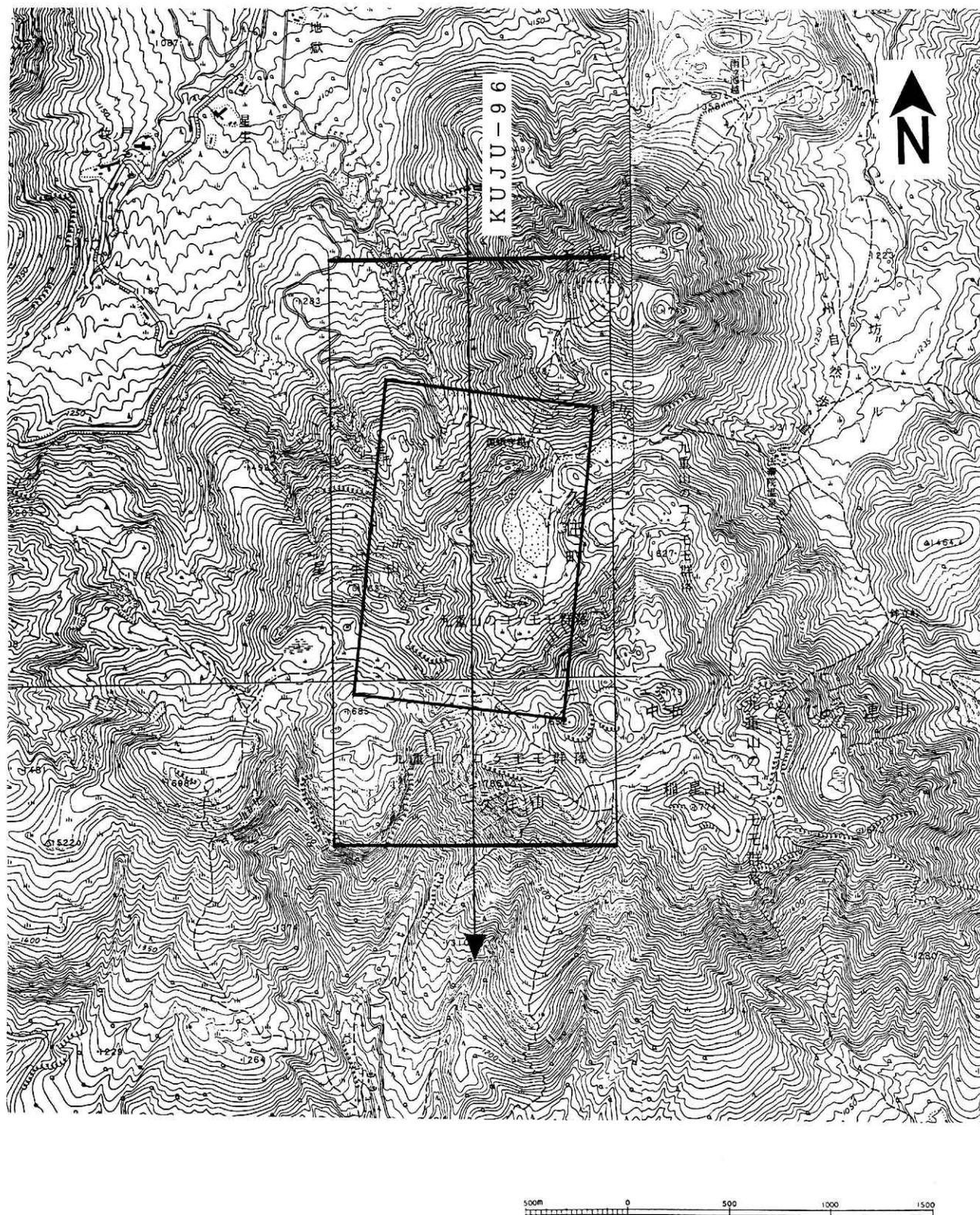


図7 九重山の温度観測領域（大きい長方形）と観測飛行コース（直線）

Fig. 7 Map showing the observational area (a big rectangular area) and flight course (straight line) for Kuju volcano.

コース：K U J U - 96

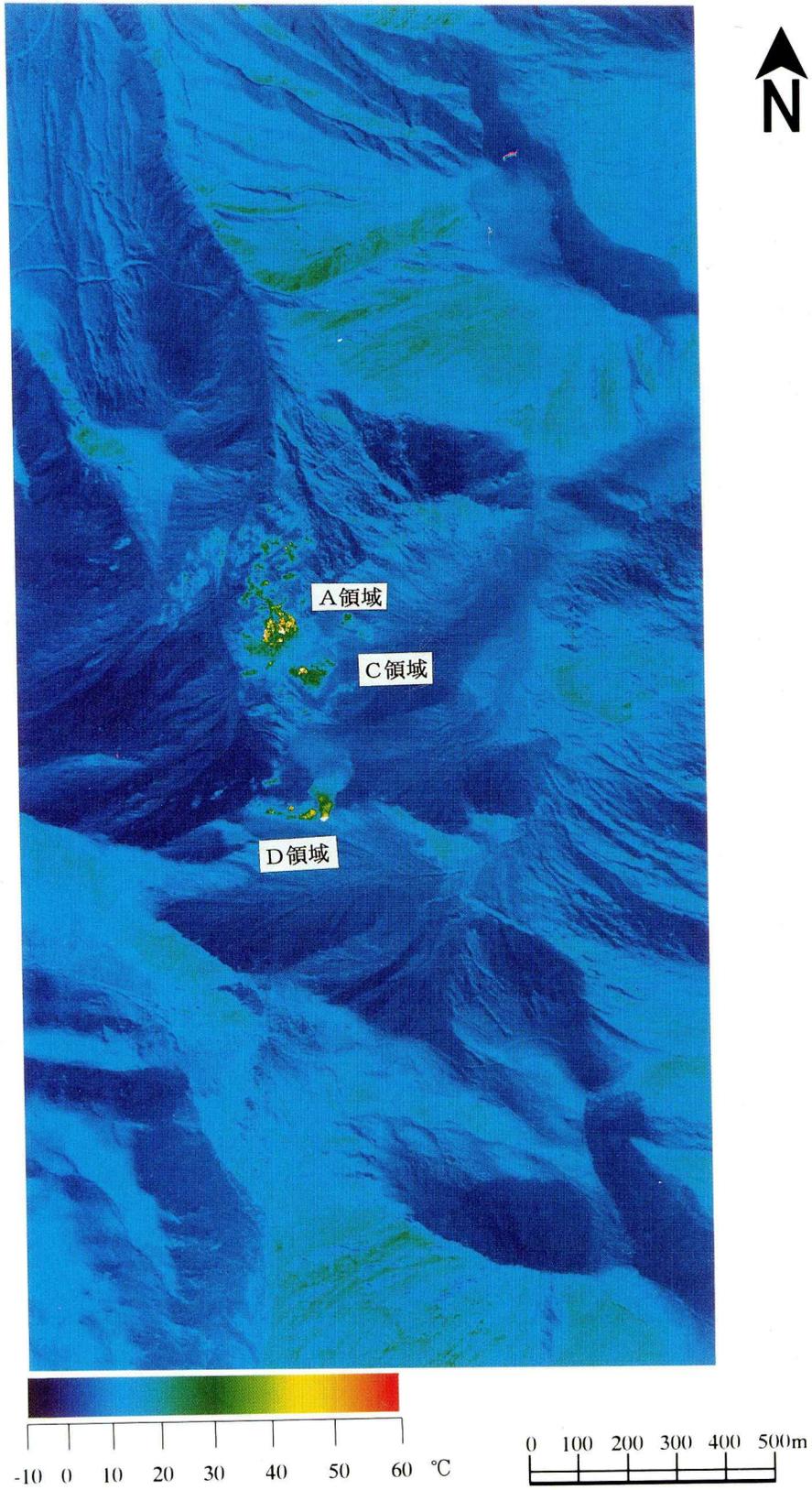
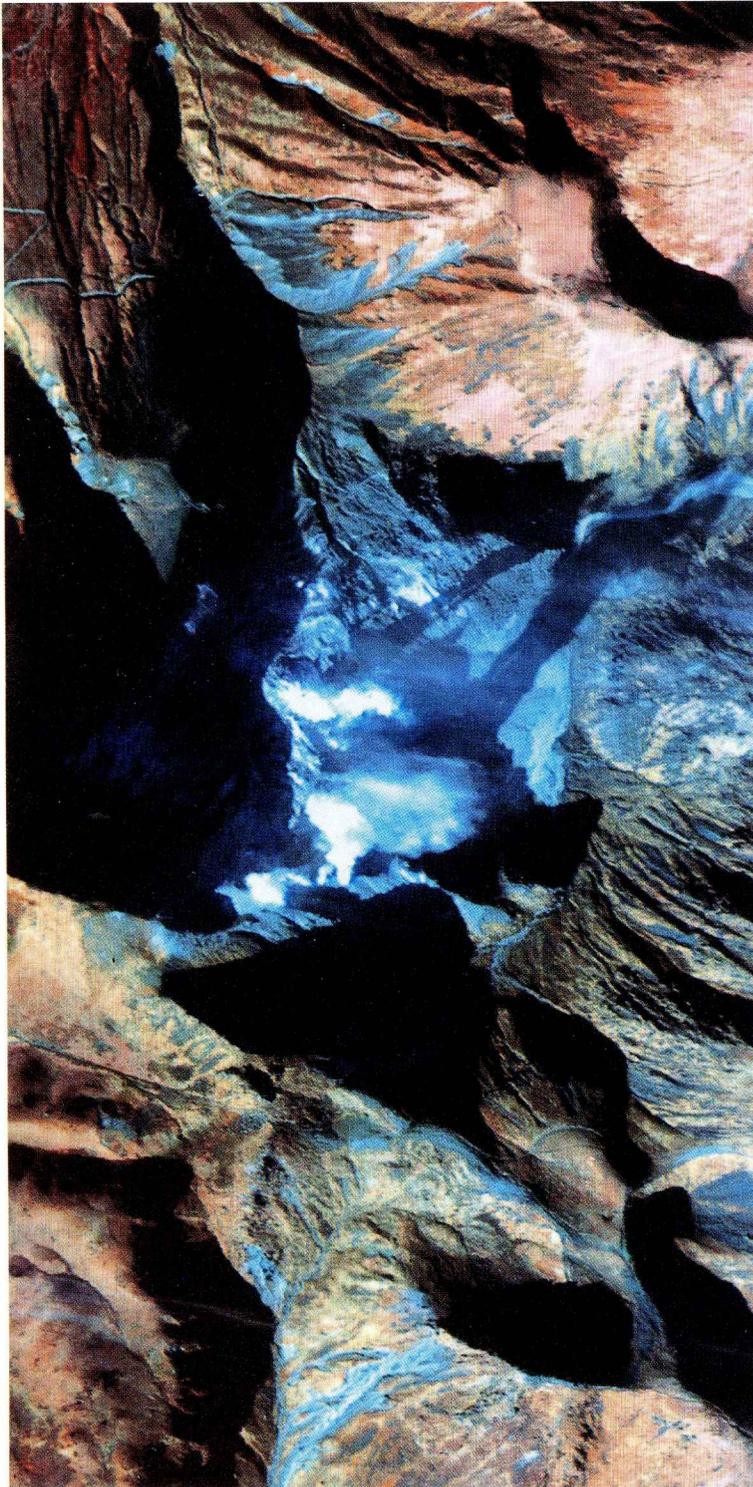


図8(a) KUJU-1による温度画像。表示範囲は図7に示す温度観測領域。

Fig. 8(a) Thermal image for KUJU-1. The area corresponds to the big rectangular indicated in Fig. 7.

コース：K U J U - 9 6



1:12,000

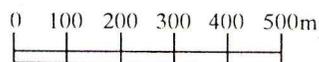


図 8(b) KUJU-1 による疑似カラー画像。表示範囲は図 7 に示す温度観測領域。

Fig. 8(b) False color image for KUJU-1. The area corresponds to the big rectangular indicated in Fig. 7.

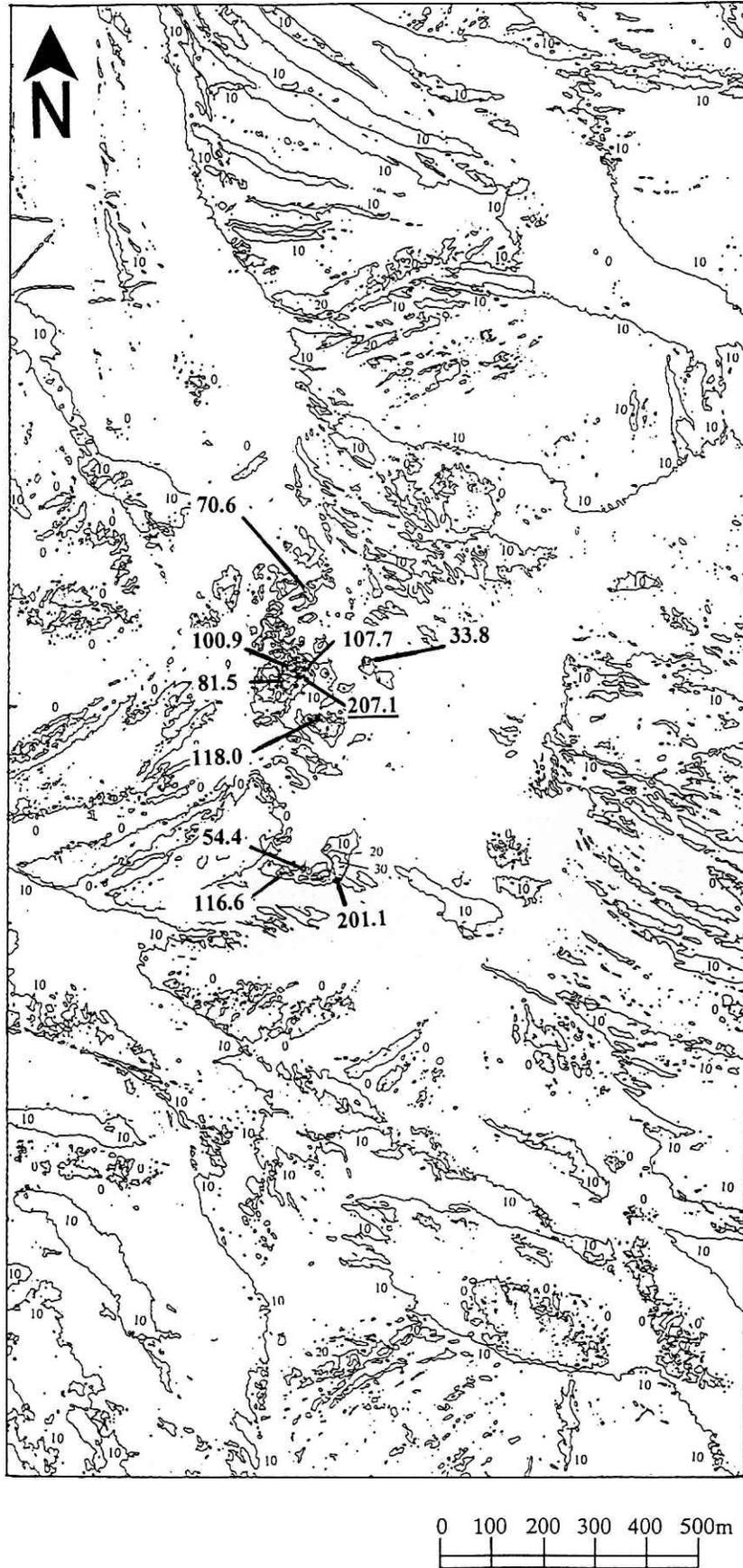


図 8(c) KUJU-1 による等温線図。表示範囲は図 7 に示す温度観測領域。等温線の間隔は $10^{\circ}\text{C}$ 。  
Fig. 8(c) Isothermal countour map for KUJU-1. The area corresponds to the big rectangular indicated in Fig. 7. The increment of contours is  $10^{\circ}\text{C}$ .

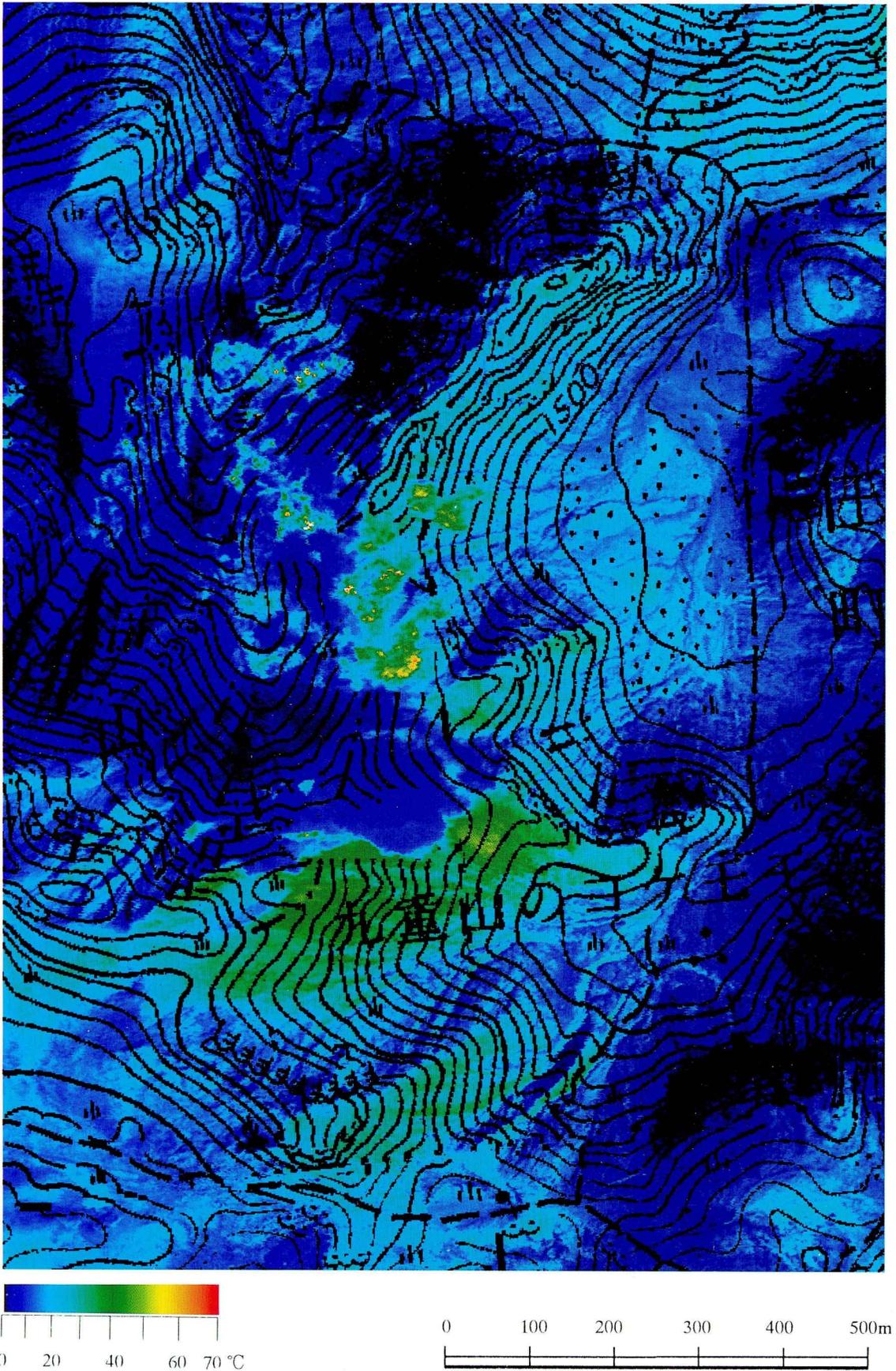


図9(a) 九重山火口周辺（図7に示す小さい長方形領域）の温度画像。

Fig. 9(a) Thermal image around the craters of Kuju volcano for the area indicated by small rectangular area in Fig. 7.

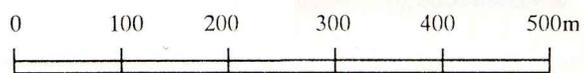


図 9 (b) 九重山火口周辺 (図 7 に示す小さい長方形領域) の疑似カラー画像。

Fig. 9(b) False color image around the craters of Kuju volcano for the area indicated by small rectangular area in Fig. 7.

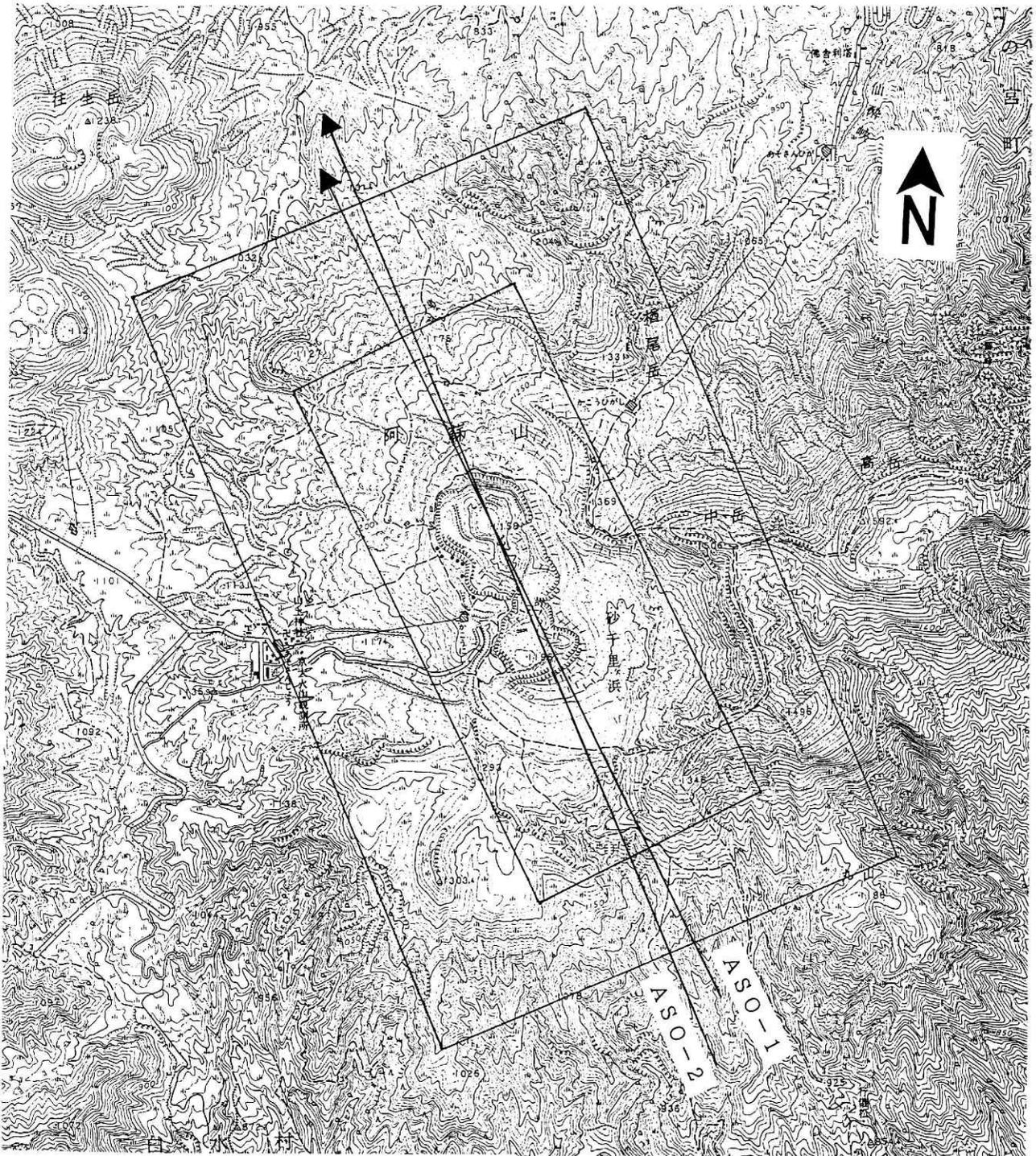


図10 阿蘇山の温度観測領域（長方形）と観測飛行コース（直線）

Fig. 10 Map showing the observational areas and flight courses (straight lines) for Aso Caldera.

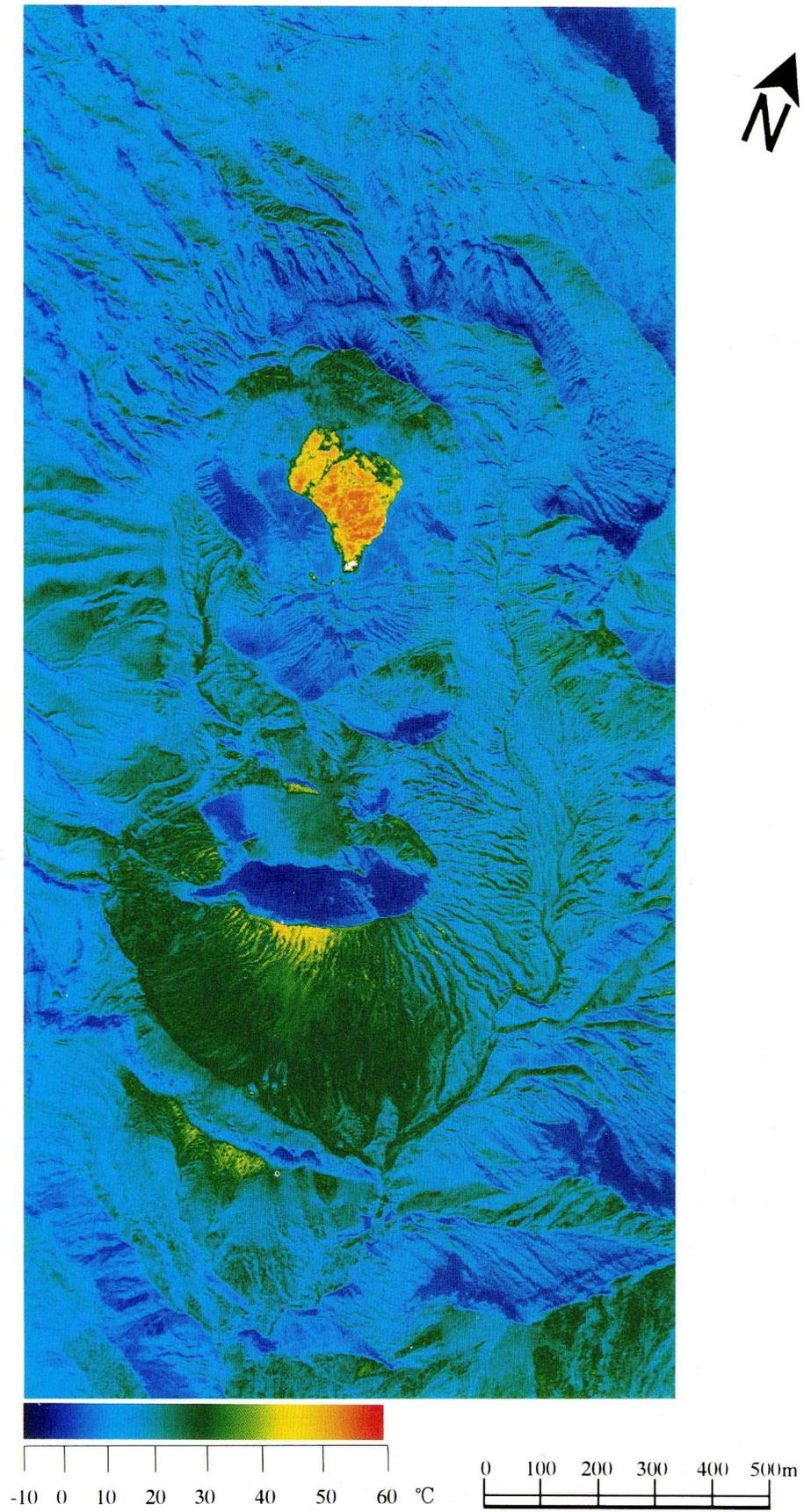


図11(a) ASO-1の温度画像.

Fig. 11(a) Thermal image of ASO-1.

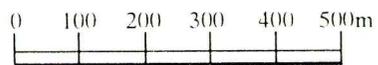


図11(b) ASO-1の疑似カラー画像。

Fig. 11(b) False color image of ASO-1.

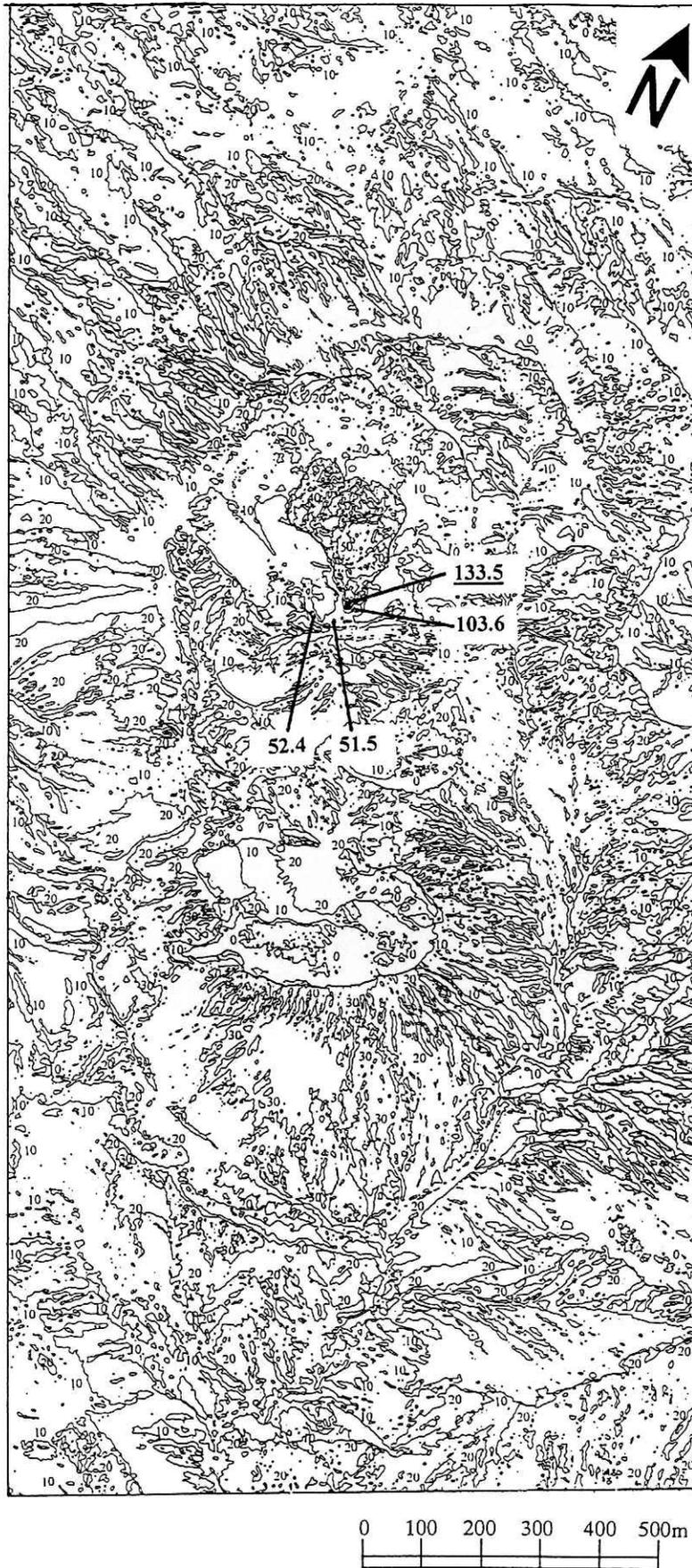


図11(c) ASO-1 の等温線図, 等温線の間隔は10°C.

Fig. 11(c) Isothermal contour map of ASO-1. The increment of contours is 10°C.

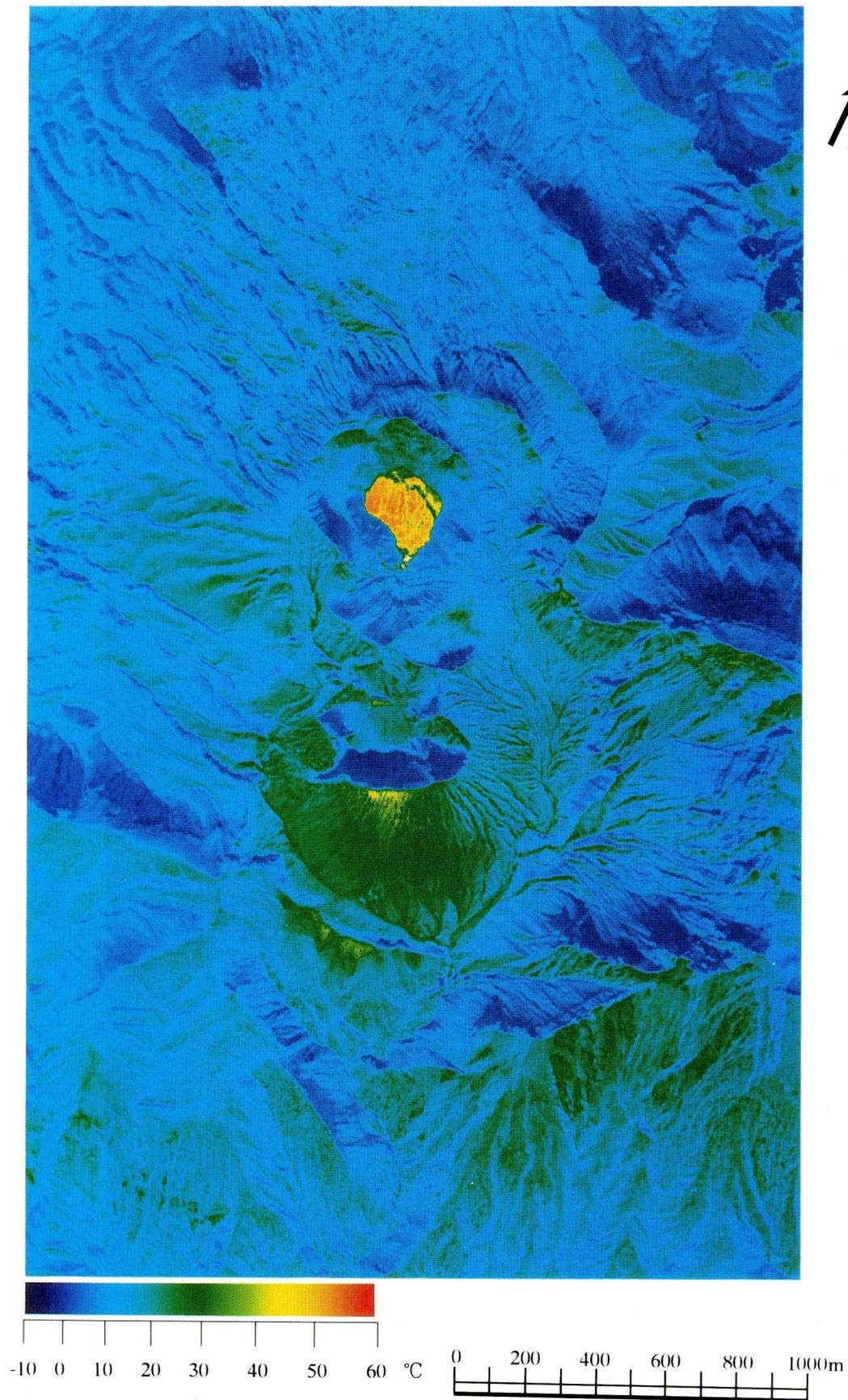


図12(a) ASO-2の温度画像。

Fig. 12(a) Thermal image of ASO-2.

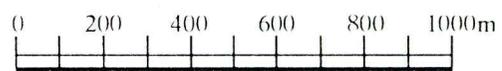


図12(b) ASO-2の疑似カラー画像。  
Fig. 12(b) False color image of ASO-2.



図12(c) ASO-2の等温線図。等温線の間隔は10°C。

Fig. 12(c) Isothermal contour map of ASO-2. The increment of contours is 10°C.

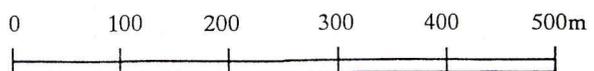
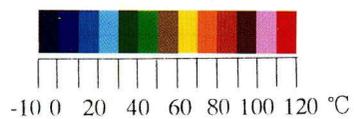
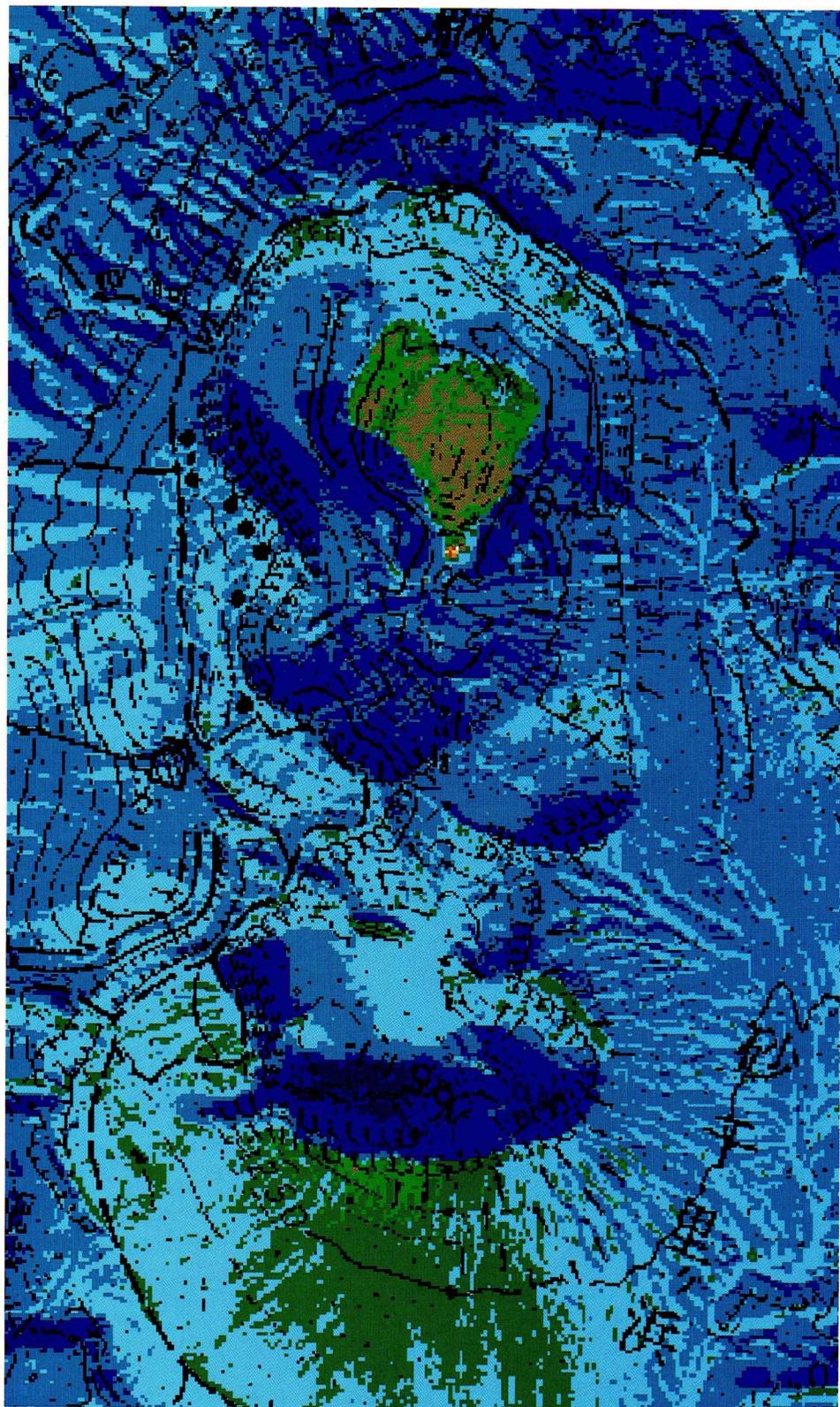


図13(a) ASO-2の中岳火口周辺のデジカラー表示による温度画像。

Fig. 13(a) Temperature image by discrete color mapping around the Nakadake crater for ASO-2.

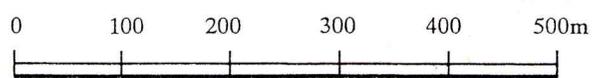
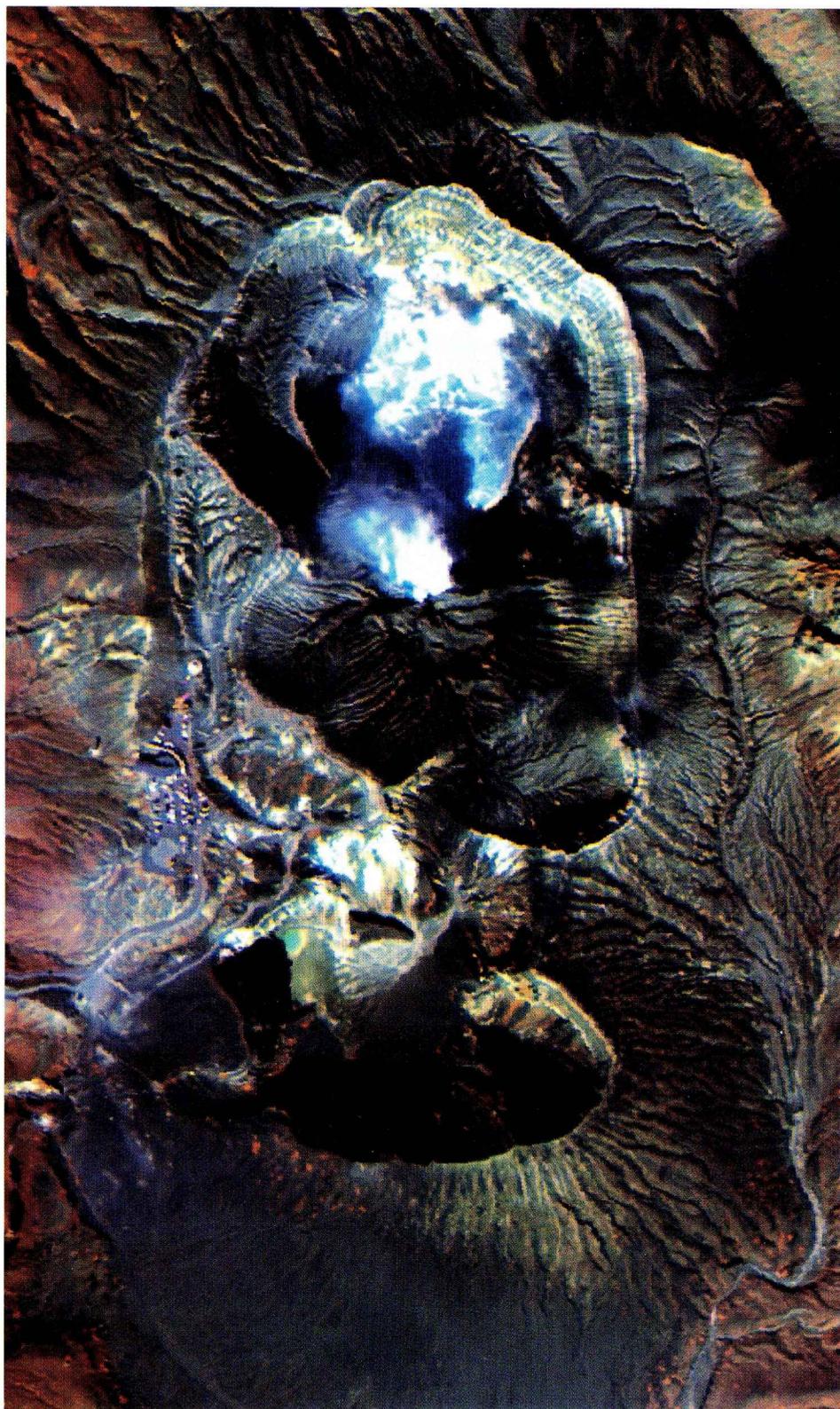


図13(b) ASO-2 の中岳火口周辺の疑似カラー画像。

Fig. 13(b) False color image around the Nakadake crater for ASO-2.

## 7. 結論

北海道駒ヶ岳、九重山、阿蘇山の3火山で、1996年に火山専用空中赤外映像装置(VAM-90A)を用いて実施した温度観測により、それぞれの火山の高温域分布や最高温度を把握することができた。北海道駒ヶ岳の観測は、噴火のほぼ半年後の9月8日に対地高度1,000mで1コース、2,000mで2コース実施し、昭和4年火口内の96南火口で最高温度82.4°Cを観測したのをはじめ1996年噴火に伴う高温域を把握することができた。九重山では対地高度1,200mで1コース、阿蘇山では対地高度1,000m及び2,000mで各1コースの観測を行った。九重山の観測では、新火口列に沿う高温域と従来からの噴気孔である旧噴火口周辺の高温域の分布を捉えることができた。観測された最高温度は旧噴火口の207.1°Cで、新火口列では201.1°Cであった。阿蘇山の温度異常域は中岳火口内に限られ、最高温度は火口南壁の133.5°C、また湯溜まりの温度は約50°Cであった。可視光波長帯域2バンドと近赤外帯域1バンドにより合成した疑似カラー画像は、温度異常域の位置の同定に有効であるとともに、観測領域の火山活動状況の把握にも役立つことが確認できた。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、岡田弘北海道大学助教授、江原幸雄九州大学教授、須藤靖明京都大学助教授、気象庁阿蘇山測候所の皆様には、現地の状況や温度画像の解釈について、いろいろとご助言を頂きましたことを感謝いたします。査読者のコメントは、本論文の改善にあたり大変役立ちました。

## 参考文献

- 1) 北海道大学理学部附属有珠火山観測所(1996):北海道駒ヶ岳の1996年3月の噴火。火山噴火予知連絡会会報, 66, 1-17.
- 2) 気象庁(1996a):日本活火山総覧(第2版), 500pp.
- 3) 気象庁(1996b):第72回火山噴火予知連絡会資料.
- 4) 気象庁(1997):第74回火山噴火予知連絡会資料.
- 5) 熊谷貞治・矢崎忍・植原茂次(1993):雲仙岳の温度分布, 雲仙岳の火山災害—その土質工学的課題をさぐる—, 社団法人土質工学会編, 105-114.
- 6) Oppenheimer, C., Rothery, D.A. and Francis, P.W. (1993): Thermal distribution at fumarole field: implications for infrared remote sensing of active volcanoes. *J. Volcanological Geothermal Res.*, **55**, 97-115.
- 7) 須藤靖明・山田年広・西潔・井口正人・高山鉄朗(1994):阿蘇火山中岳火口内の熱的調査—地上赤外熱映像装置による観測, 阿蘇火山の集中総合観測(第2回)報告(1981年8月~12月), 57-64.
- 8) 植原茂次・熊谷貞治・矢崎 忍(1991):航空機搭載MSSによる雲仙岳火山の熱観測. 日本リモートセンシング学会誌, **11**-3, 49-55.
- 9) 宇井忠英・吉本充宏・古川竜太・石塚 浩・吉田真理夫・宮地直道・勝井義雄・紀藤典夫・雁沢好博・野上健治(1997):北海道駒ヶ岳1996年3月の噴火. 火山, **42**, 141-152.
- 10) 鶴川元雄・熊谷貞治(1997):山体表面温度異常調査. 平成7年九重山噴火に関する緊急研究成果報告書(科学技術庁), 20-34.

(原稿受理:1997年12月18日)

## 要 旨

防災科学技術研究所では、1996年に火山専用空中赤外映像装置を用いて、北海道駒ヶ岳、九重山、阿蘇山において温度観測を実施した。北海道駒ヶ岳は、1996年3月5日に54年ぶりに噴火し、活動の推移が懸念されていた。九重山は1995年10月11日に噴火活動が始まり、1996年も噴煙活動を継続している火山である。阿蘇山は近年中岳第1火口が活発に活動しているが、1996年は比較的活動の静穏な湯溜まりの状態にある。北海道駒ヶ岳の観測では、噴火のほぼ半年後の9月8日に対地高度1,000mで1コース、2,000mで2コースの観測を実施し、1996年噴火に伴う高温域と従来からの高温域の分布を観測することができた。観測された最高温度は昭和4年火口内(96主火口付近)での82.4°Cである。九重山と阿蘇山は11月24日に観測を実施した。九重山では対地高度1,200mで1コース、阿蘇山では対地高度1,000m及び2,000mで各1コースの観測を行った。九重山の観測では、新火口列に沿う高温域と従来からの噴気孔である旧噴火口周辺の高温域の分布を捉えることができた。観測された最高温度は旧噴火口の207.1°Cで、新火口列では201.1°Cであった。阿蘇山の温度異常域は中岳火口内に限られ、最高温度は火口南壁の133.5°C、また湯溜まりの温度は約50°Cであった。これらの観測により温度分布から各火山の現在の活動状況が把握できるとともに、将来、火山活動が活発化した際に比較するための基礎データが得られた。また可視光波長帯域2バンドと近赤外帯域1バンドにより合成した疑似カラー画像により、観測領域の状況が明瞭にわかるとともに、温度異常域の位置の同定に有効であることが確認できた。

キーワード: 温度測定, 火山, 航空機搭載MSS