

薩摩硫黄島火山における空中赤外熱測定

京都大学防災研究所 井口 正人

東京大学地震研究所 鍵山 恒臣

1. はじめに

薩摩硫黄島は、硫黄岳の山頂火口において活発な火山ガス放出を続けている。硫黄岳には山腹でもいたる場所に噴気が見られる。また、山麓には東温泉や坂本温泉などの温泉が湧出しており、1934年の海底噴火により形成された昭和硫黄島では海底から火山ガスが噴出している。かつて、サンシャイン計画において火山発電方式のフィジビスタディ(社団法人日本電気工業会, 1975)¹⁾が行われたように熱的に活発な火山であるといえる。同計画では、硫黄岳の山麓において空中からの熱映像測定が行われた(関岡・湯原, 1975)²⁾。また、硫黄岳の山麓および火口内の噴気温度測定が繰り返されてきた(福岡管区气象台, 1986; 1993)^{3, 4)}。火口内の噴気の温度は約 800 に達し、高温部の場所も火口壁から火口底への移動している(地質調査所, 1997; 地質調査所・火山活動研究センター, 1997; 1998)^{5, 6, 7)}。1993年ごろから山頂火口内に形成された火孔は、その後拡大を続け、その直径は2000年10月には50m, 2001年2月には70m, 2001年10月には100m以上に達している。赤外線熱映像測定では、火口内噴気地からの放熱量は数十MW, ピトー管による噴気ガスの流量測定では、火孔からのガス放出により数千MWに及ぶ熱が放出されている(松島, 2001)⁸⁾。硫黄岳全体の放熱量の見積りとしてはランドサット TM データを用いたものがあり、放熱量が40~80MWと見積もられている(Urai, 2002)⁹⁾。2000年集中総合観測においては、空間分解能をあげて、硫黄岳全体の地熱異常域の調査を行うため、ヘリコプターによる上空からの赤外熱映像測定を行った。本稿ではその結果について報告する。

2. 観測

硫黄岳山頂付近の地形を図1に示した。硫黄岳の山頂火口の直径は約400mで、火口底の南東部には直径約100m(2001年10月現在)の火孔があいている。この火孔から火山灰混じりのガスを放出している(図2)。火口の南東側には1996年に新しい亀裂が生じ、1998年ごろまでさかんに火山ガスを放出した。また、硫黄岳の山腹には多数の噴気地帯がある。

赤外線走査装置を使用した上空からの熱測定は2001年2月2日の16時40分から17時12分にかけて行った。撮影範囲を図3に示す。ヘリコプターの床面の作業孔から鉛直に撮影し

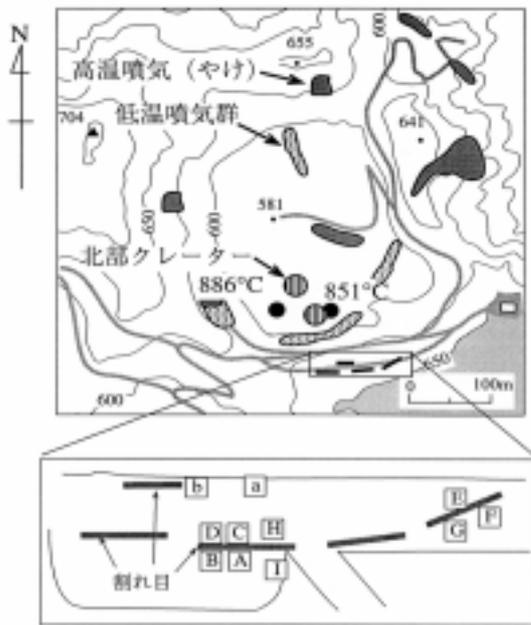


図 1. 硫黄岳山頂火口の地形(地質調査所・火山活動研究センター, 1997)。1996 年に火口の南東縁に割れ目が生じた。火口内の北部クレータは、直径 100m 以上に拡大している。

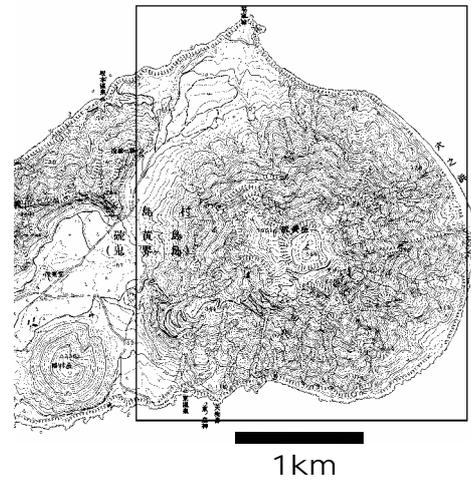


図 3. 空中赤外熱映像の測定範囲

た。使用した赤外線走査装置は日本アビオニクス社製 TVS2000MKII である。その仕様を以下に示す。

観測視野角	縦 10 度 × 横 15 度
瞬時視野角	2.2mrad
検知器	インジウムアンチモン 10 素子アレイ
検知波長領域	3 ~ 5.4 μ m
検知器冷却方式	スターリングクーラ
観測温度範囲	-20 ~ 120 , 70 ~ 350 , 150 ~ 950 (レンジ自動切換え)
温度分解能	0.1

飛行高度は、1550m で硫黄岳の山頂から 850m 上空になる。1 回の撮影による観測範囲は海岸線付近において約 410m × 270m、山頂付近では約 220m × 150m である。南北方向の 10 コースに沿って飛行し、2 秒ごとに測定した。また、日本アビオニクス社製 Neo Thermo TVS-600 を使用して斜め測定もあわせて行った。本装置は短い時間間隔の撮影には適さないが、検知波長が 8-14 μ m と日射の影響を受けにくく、瞬時視野角が 1.4 mrad であり、最小温度分解能 0.1 とより高精度の測定が可能である。



図 2. 硫黄岳山頂火口内の様子。火口底に直径 100m の火口が形成され、南東端(写真中央)から火山ガスを噴出している。

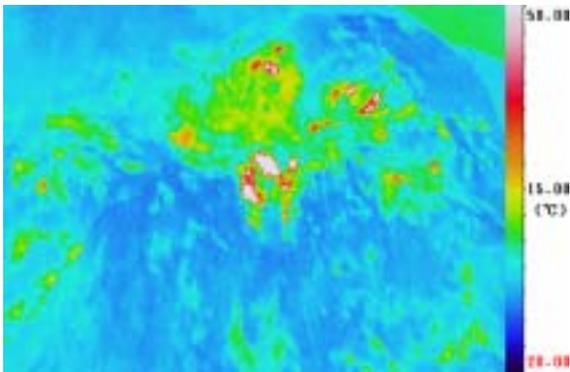


図 5. 硫黄岳山頂火口内の赤外熱映像。図 2 の写真とほぼ同じ画角である。高温部は、火口の東の縁に形成された噴気に対応し、温度は、112 であった。

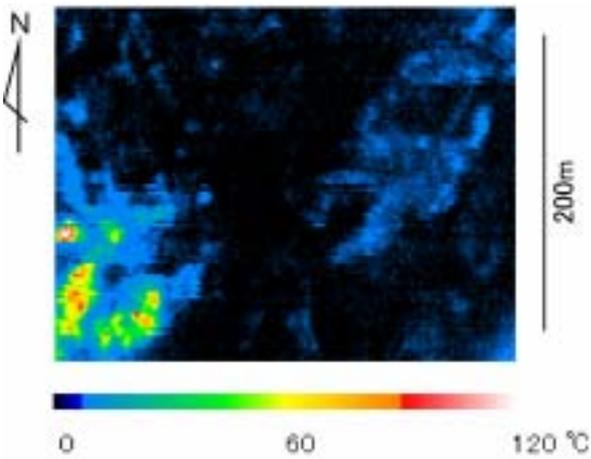


図 6. 硫黄岳山頂火口の東側における垂直赤外熱映像。左端の高温部は図 5 の高温部に対応する。

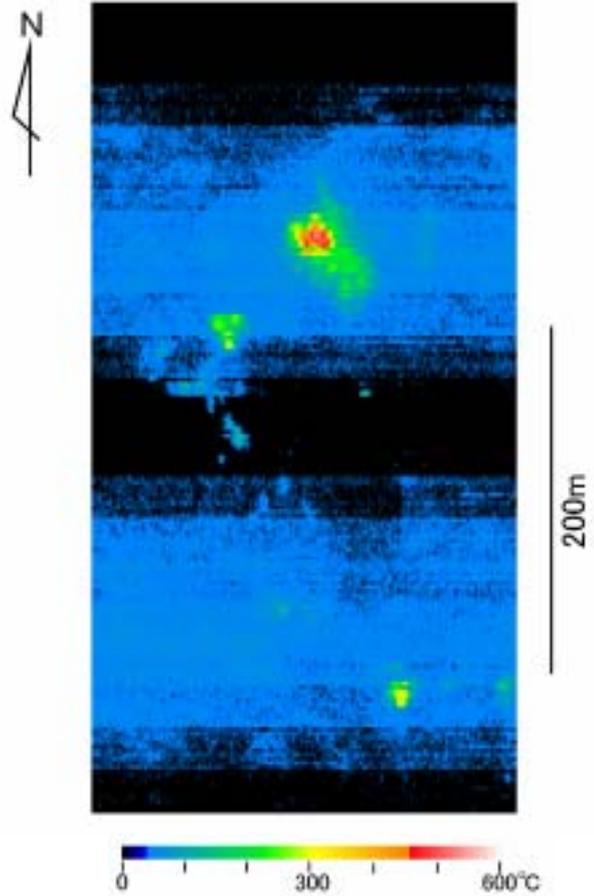


図 4. 硫黄岳山頂火口内における垂直赤外熱映像。右下の高温部は、火山ガスが連続的に放出される火孔に対応する。左上の高温部は、火口内の北西側に位置し、最高温度 525 であった。この映像は 150 ~ 950 のレンジによる測定により得られたものであり、黒 ~ 青 ~ 深緑色の部分の精度は保証されていない。

表 1. 熱異常域の最高温度と熱エネルギー放出率

	領域	最高温度()	異常域面積 ($\times 10^3 \text{ m}^2$)	熱エネルギー 放出率(MW)
A	南西山麓		30	1.4
B	南西側登山道		59	4.9
C	大谷平	27	>43	>17.1
D	モノクサ噴気	32	117	5.0
E	北西山腹		102	9.3
F	北山麓	22	164	8.1
G	東山麓	33	152	10.8
H	南東山麓	63	34	13.2
I	南山腹		153	10.2
J	荒山	>120	>48	>8.4
	山腹合計		902	88.4
K	山頂火口	525	72	61.3
	総計		974	149.7

領域の記号は図 7 の位置図に対応する。

3. 結果

山頂火口内の熱分布を図 4 および図 5 に示す。図 4 は垂直方向から測定したもの、図 5 は斜め方向から測定したものであり、図 2 の写真と同様の方向から測定された。硫黄岳の山頂火口内には、多数の熱異常が検出された。火口の南東部に形成された火山ガス放出孔に対応する地表面温度は 352 であったが、多量の火山ガスが放出されているため、温度が見かけ上低く測定されていると思われる。また、火口内の側壁には多数の熱異常が分布し、最大のものは火口内の北西部にあり、最高温度 525 を示した。山頂火口周辺にも熱異常が多数存在する。図 6 に山頂火口の北東の荒山から火口東縁における熱分布を示す。最高温度は 120 が測定されたが、熱映像装置の測定レンジが自動切換えであるため、追従し切れておらず、120 以上に達しているものと思われる。

山腹における熱分布を図 7 に示す。山頂に比べれば温度は低いものの山腹にも多数の熱異常が見られる。山頂の西南西山腹の標高 450m から 520m の谷には大谷平と呼ばれる噴気地帯がある(領域 C)。最高温度は 22 を示した。また、その北西側にも熱異常域が広く分布し(最高温度 32)、旧硫黄採掘後のモノクサと呼ばれる噴気地帯に対応する(領域 D)。

硫黄岳の北山腹の標高 420m から 500m 付近にも熱異常が見られる(領域 F)。熱異常域は線状に幾筋も分布する。最高温度は、22 である。東および南東の山腹にも熱異常がある。北東の熱異常域(領域 G)は、ナカノエの熱異常域から東北東に 600m 離れた標高 350m 付近に位置し、最高温度は 33 である。南東側には 2 箇所の熱異常が存在し(領域 H)、最高温度 63 に達した。これら山麓の熱異常は、すべて噴気地帯に対応する。

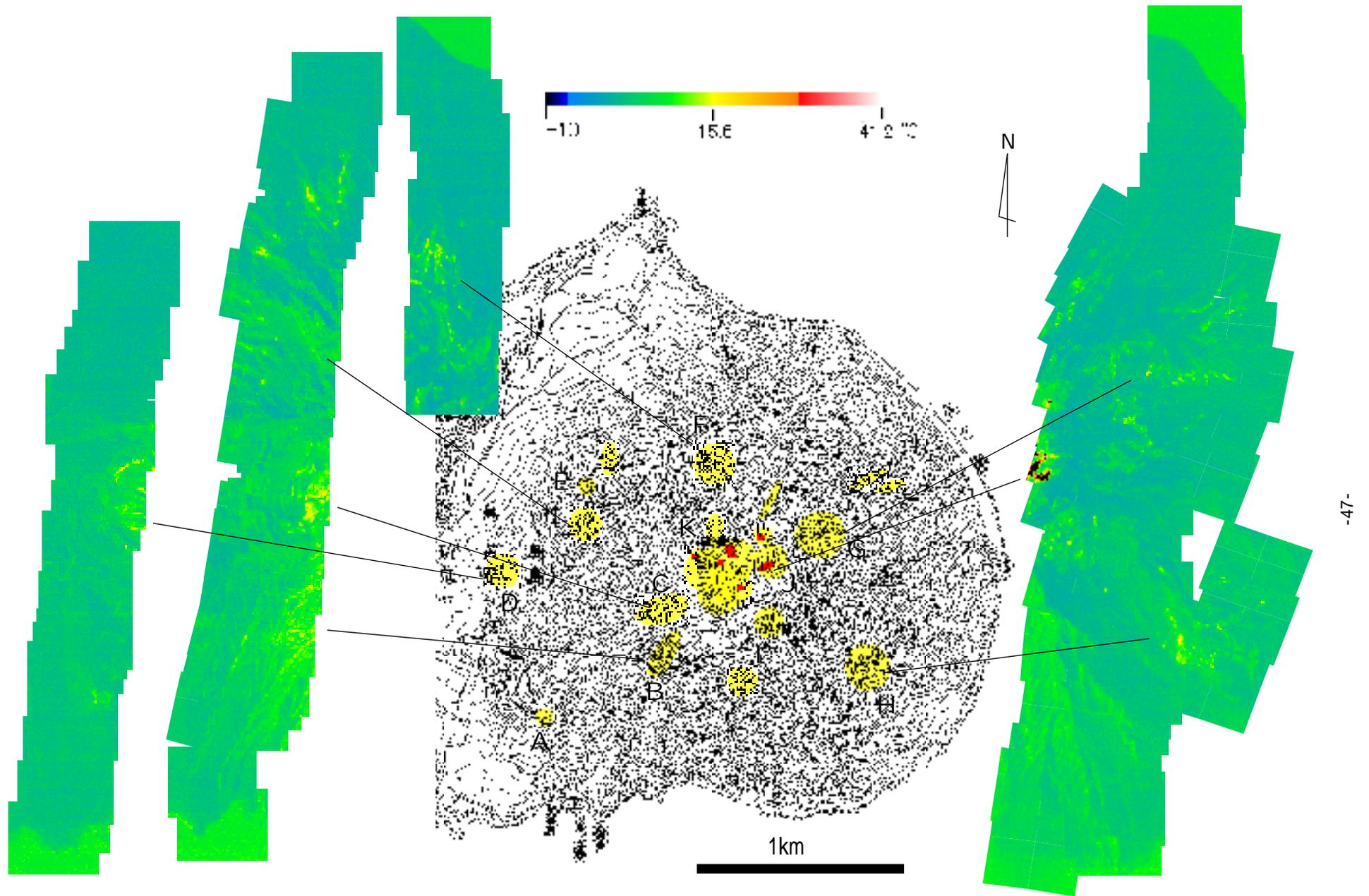


図7. 薩摩硫黄島硫黄岳における地熱異常域分布と赤外熱映像。黄色は地表面温度100 未満の熱異常域, 赤は100 以上の異常域を示す。異常域を示す記号は表1を参照。

垂直撮影による地表面温度分布を用いて熱エネルギーの放出率を見積もって見た。Sekioka(1983)¹⁰⁾によれば、地表面温度から熱エネルギーの放出率 Q は次のように与えられる。

$$Q = (k1 + k2) \sum_{T_i > T_0 + 3\sigma_T} (T_i - T_0) S(T_i)$$

ここで、 T_0 は温度異常がない部分の平均温度、 σ_T はその標準偏差、 $S(T_i)$ は温度が T_i となる部分の面積である。また $k1$ 、 $k2$ はそれぞれ赤外放射の効果、顕熱および潜熱の放出効果を表す係数であり、平均的な気象条件下の値 2 および 35 を仮定した。標高により 1 画素の大きさは異なるので、各フレームでの平均的な対地高度および地表面の傾斜角から画素の大きさを算出した。硫黄岳の南西斜面では、日射の影響が強いが、東および北斜面では日射の影響はほとんど見られない。フレームごとに温度異常がないと思われる部分の地表面平均温度とその標準偏差を求め、温度異常の判定基準となる $T_0 + 3\sigma_T$ を計算した。 $T_0 + 3\sigma_T$ は、2 ~ 8 の範囲にある。

硫黄岳の各地域における熱異常域の面積と熱エネルギーの放出率を表 1 に示した。山頂火口内からの熱エネルギー放出率は 61MW と大きい。ただし、山頂火口の熱映像は、70 ~ 350、あるいは 150 ~ 950 のレンジを用いて測定されており、70 以下の温度を示す部分は熱異常域として取り扱っていない。したがって、山頂火口からは、更に多くの熱エネルギーが放出されているものと推定される。次に熱エネルギーの放出率が大きいのは大谷平である。山頂火口北東側の荒山から火口東縁にかけての熱異常域については、一部測定できていない場所があり、熱エネルギーの放出率は 10MW 以上に達する可能性がある。それ以外の異常域についても熱エネルギーの放出率はそれぞれ数 MW に達し、山腹での熱異常域の総面積は、 $9.0 \times 10^5 \text{m}^2$ 、熱エネルギーの放出率は合計すると 88MW となった。硫黄岳全体では熱異常域の面積は $9.7 \times 10^5 \text{m}^2$ 、熱エネルギーの放出率は 150MW となる。

Urai(2002)⁹⁾ は、LANDSAT からの熱映像データを用いて、1989 年から 1993 年の熱エネルギーの放出率を 40 ~ 80MW と見積もり、1996 年には著しく増加したことを示した。松島(2001)⁸⁾ は、硫黄岳火口縁に赤外線熱映像装置を設置して、硫黄岳山頂火口内の噴気地の熱エネルギーの放出率を見積り、1996 年以後低下傾向にあることを示した。これらの結果と今回の測定による見積りをあわせて硫黄岳火口内からの熱エネルギー放出率の変化を図 8 に示した。今回の空中からの測定による観測範囲は、松島(2001)⁸⁾による地上からの測定範囲よりも広い。両者の測定対象範囲を対応させることが困難であるため、試みに図 8 では、地上からの測定による熱エネルギー放出率の値を 4 倍にしてプロットしてみた。これら 3 つの測定結果は、観測位置が異なるため直接比較することはむずかしいが、傾向として熱エネルギー放出率は 1993 年以前において数十 MW のオーダーであったが、1996 年にピークに達し、以後低下傾向にあるようである。今

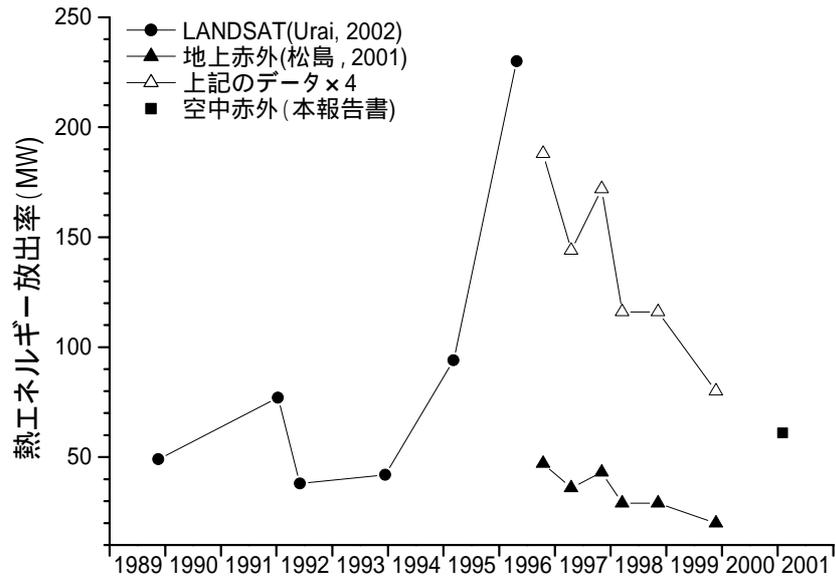


図 8. 硫黄岳山頂火口からの熱エネルギー放出率の変化

回の測定を Urai(2002)⁹⁾の結果と比較すると 1993 年以前の熱的状态に戻ったと解釈できる。しかしながら、松島(2001)⁸⁾の熱エネルギーの放出率に示されているように、山頂火口内に形成された火孔からの火山ガス放出による熱エネルギーの放出は、数千 MW と圧倒的に大きい。噴火活動の推移を熱エネルギーにより評価するには、火山ガス放出量の見積りがより重要であろう。一方で、1934 年の海底噴火のように薩摩硫黄島火山においては、硫黄岳の山頂火口以外の場所から噴火が発生することは十分にありうる。今回の測定により硫黄岳山麓部の熱分布がかなり詳細に把握できたので、硫黄岳山腹における噴火の可能性が生じた場合の判断資料になる。また、今回の測定で、硫黄岳山麓部からの熱エネルギーの放出率が約 90MW に達することがわかった。山頂火口よりも山麓部の方が面積は広いので当然のことであるが、steaming ground からの熱放出は、山麓部においてかなり大きいといえる。

4. まとめ

- 1) 薩摩硫黄島硫黄岳において空中赤外熱測定を実施し、山体に多数の熱異常域を検出した。これらの場所は、噴気地帯に対応する。
- 2) steaming ground からの熱エネルギーの放出率は、山頂火口において 60MW 以上、山麓において 88MW と見積もられた。
- 3) これまでの測定結果と比較すると、1996 年にピークに達した熱エネルギーの放出率はその後現象を続け、1993 年以前の熱的レベルに戻った。

謝 辞

空中赤外熱映像測定を行うにあたって、鹿児島県所有の防災ヘリコプター「さつま」を使用した。ヘリコプターの利用を快諾していただいた鹿児島県総務部消防防災課および運行していただいた防災航空センターの皆様にご礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本電気工業会(1975):火山発電方式に関するフィジビリスタディ, サンシャイン計画委託調査研究成果報告書.
- 2) 関岡満・湯原浩三(1976):ヘリボーン熱映像調査.火山発電方式に関するフィジビリスタディ, サンシャイン計画委託調査研究成果報告書, 103-114.
- 3) 福岡管区气象台(1993):鶴見岳・薩摩硫黄島,九州地域火山機動観測実施報告,第13号, 41 - 59.
- 4) 福岡管区气象台(1986):薩摩硫黄島火山,九州地域火山機動観測実施報告,第6号,1 - 21.
- 5) 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,67, 79-82.
- 6) 地質調査所・火山活動研究センター(1997):1997年4月までの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,68,97-99.
- 7) 地質調査所・火山活動研究センター(1998):1997年11月までの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,70,59-60.
- 8) 松島喜雄(2001):薩摩硫黄島硫黄岳の熱活動について,火山の浅部構造と火山流体,京都大学防災研究所研究集会12K-3(代表者鍵山恒臣),125-138.
- 9) Urai, M. (2002): Heat discharge estimation using satellite remote sensing data on the Iwodake volcano in Satsuma-Iwojima, Japan. Earth Planets Space, 54, 211-216.
- 10) 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, Memoirs Defense Academy, 23, 95 - 103.

(Received on March 28, 2002)