

草津白根火山における赤外線熱映像観測

井口 正人¹・平林 順一²・鍵山 恒臣³

1：京都大学防災研究所

2：東京工業大学火山流体研究センター

3：東京大学地震研究所

Thermal Image Observation by Infrared Scanner at Kusatsu-Shirane Volcano

Masato Iguchi¹, Jun-ichi Hirabayashi² and Tsuneomi Kagiya³

1: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2: Volcano Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

3: Earthquake Research Institute, University of Tokyo

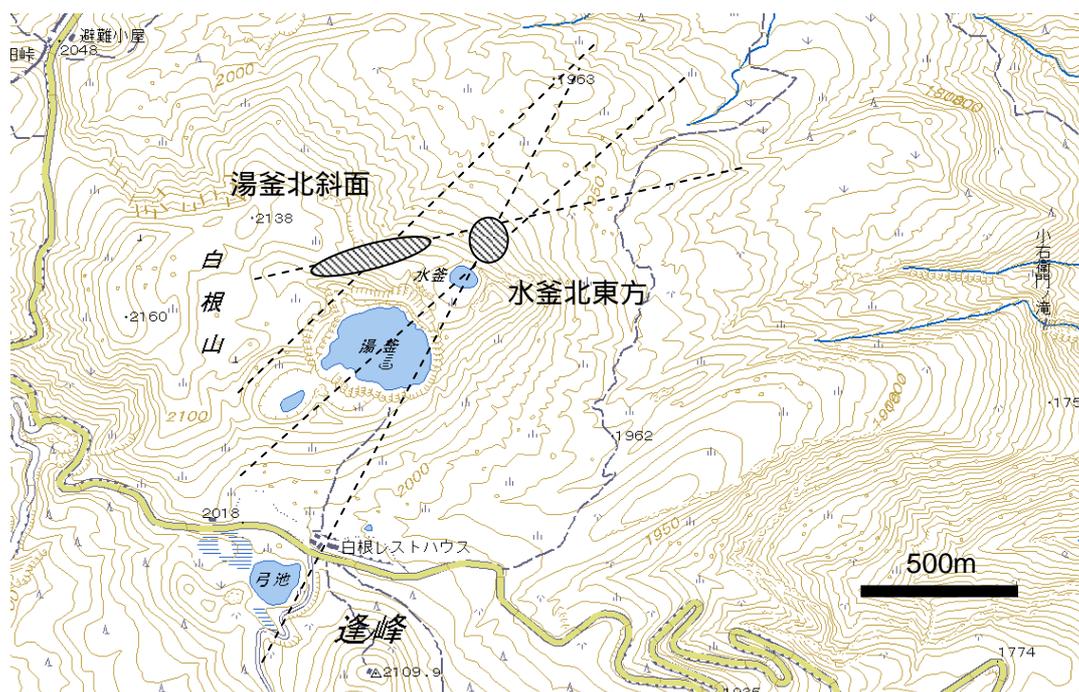
1．はじめに

草津白根火山には山頂火口の周辺をはじめ、万座、殺生河原、草津温泉など多くの地熱地帯が点在している。最近では規模の大きな噴火は発生していないが、観光客が湯釜火口周辺に多数訪れることを考慮すると、小規模な噴火といえども人的災害が発生する可能性は決して低くなく、火山噴火予知研究の一環として、草津白根火山周辺の地表面温度分布を繰り返し測定し、その熱的状态を把握しておくことは重要であると考えられる。これまでに赤外線熱映像装置を用いた地表面温度測定が数年おきに繰り返されてきた(鍵山・他、1978; 鍵山・辻、1985; 西・他、1985; 鍵山・他、1996)。そこで、平成15年度の草津白根火山集中総合観測の一貫として、2003年10月にヘリコプターおよび地上からの赤外線熱映像調査を実施したので、その結果を報告する。前回の空中からの熱映像測定は第3回の集中総合観測であり、今回は11年ぶりのことになる。

2．空中赤外線映像調査

群馬県防災航空隊所有のヘリコプターに赤外線映像装置(日本電気三栄製サーモレーサ TH7102)をヘリコプターの脚部に固定し、山頂火口部を北東-南西方向に繰り返し通過することで測定を行った(第1図)。本装置の特徴は検出波長が8-12 μ と長く、太陽光の影響を受けにくいことに加え、最高60フレーム/秒の高速サンプリングで撮影し、IEEE1394インターフェースを経由してパソコンに連続収録できることである。収録時間はパソコンのハードディスクがNTFSフォーマットであれば、ディスク容量のみに依存する。また、常温のレンジは-20から120までであり、14bitでデジタル化されるので、草津白根山のように温度異常域の温度が百度以下の火山ではオペレータはほとんど作業を要しない。測定は2003年10月24日14:30~14:50に実施し、視野角29度 \times 22度の範囲を10フレーム/秒で連続撮像した。飛行高度は海拔およそ2430m、対地高度はおよそ300m~500mとなるので、1枚の映像がカバーする領域は、およそ(110~190)m \times (150~250)mの範囲である。

解析は、Kagiya et al. (1981)に準拠して行い、ある範囲の温度データから有意に異常と



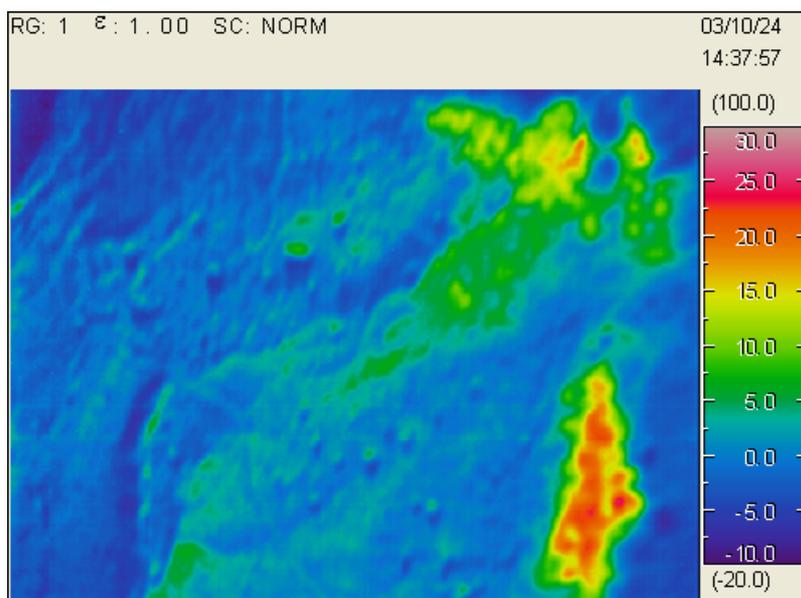
第 1 図．空中赤外熱映像の測定範囲．波線は飛行経路を，斜線で示した領域はこれまでに知られている熱異常域を示す．

判定される部分を抽出し、その面積と温度を調べることで熱エネルギー放出率を推定した。

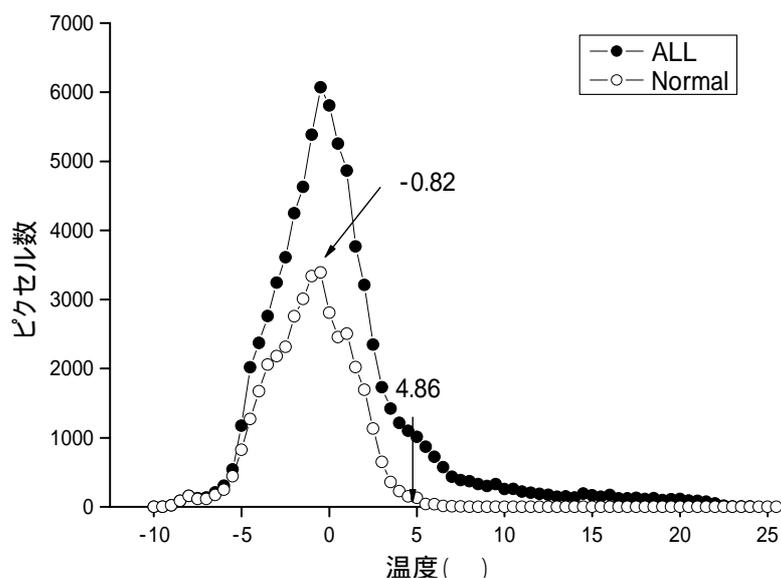
a) 水釜北東方の異常

水釜の北東約 300mには小規模な地熱活動が見られる。この地熱活動がいつどのようにして出現したかは不明であるが、この地点は、涸釜・湯釜・水釜の3火口の北東の延長上にあたる。第2図は、水釜北東方の熱映像である。図の右下に高温の熱異常域が、その上にそれよりはやや低い高温異常域が認められる。第3図に、第2図全体の領域における温度の画素数頻度、および熱異常がないと思われる図の左半分の領域における画素数頻度を示す。熱異常がないと思われる部分についてはおよそ-0.8 を中心とする正規分布になり、この分布から、熱異常のない平常な地表面温度の平均値 T_0 は-0.8、この映像データに含まれるデータのばらつき(σ_T)は1.89と評価され、熱異常は $T_0 + 3\sigma_T$ から計算される4.86以上の部分と考えられる。熱異常のない部分については4.86を超えるものは0.7%以下であるが、第2図の映像のすべての画素については12.1%が4.86を超えており、熱異常のない画素数の正規分布に高温部が重なり合った分布を示していることが見て取れる。

第4図は、有意に異常と判定された部分を地形図上に示したものである。表示される温度の数値は、観測された表面温度そのものではなく、平常な地表面温度を基準とした相対温度により異常値を表示している。熱異常は2つの部分からなり、それらの面積と熱エネルギー放出率は、第1表に示すように5800m²、および2.3MWと計算される。なお、この映像を撮像する飛行の際のヘリコプターの対地高度は、赤外映像と地形図との対比から平均500mであったと推定されるので、熱エネルギー放出率や熱異常域の面積は1画素が代表する面積を0.62m²(0.79×0.79m)と



第 2 図 . 水釜北東方の地熱異常域の熱映像 .



第 3 図 . 第 2 図の熱映像の地表面温度の頻度分布 . 黒丸は熱映像のすべての画素の頻度分布 . 白丸は熱異常のない左半分の頻度分布 .

して計算している。

前回 1992 年の測定では、異常域の面積が 3700m²、熱エネルギーの放出率が 1.2MWと求められている。今回の測定による見積り値は、これよりもかなり多い。水釜北東方の熱異常域は 2 つの部分からなるが、そのうち、北東側のもの (MN1) については平常な地表面温度を基準とした相対温度の最高温度は前회가 29、今回が 25 であり、大きな変化はなく、熱異常のパターンもよく類似しているので、地熱活動としては大きな変化はないものと考えられる。一方、水釜に近い南西側のもの (MN2) については、前回の相対最高温度が 9~14 であったのに対して、今

第 1 表 . 水釜北東方の地熱異常域の熱エネルギー放出率 .

領域	T_0 ()	σ_T ()	T_A ()	熱異常域の 面積(m^2)	Q(KW)	標高(m)	対地高度(m)
MNE (2003)	-0.82	1.89	4.86	5,817	2,339	1960	500
MNE (1996)	4.86	1.19	8.43	3,666	1,166	1960	720

第 2 表 . 湯釜北斜面の地熱異常域の熱エネルギー放出率 .

領域	T_0 ()	σ_T ()	T_A ()	熱異常域の 面積(m^2)	Q(KW)	標高(m)	対地高度(m)
YN(2003)	-4.76	1.43	-0.48	11,604	3,846	1960	500
YN(1996)*				4,500	893		
YN2	1.12	1.1	4.43	120	31	2070	650
YN3	1.84	1.24	5.55	732	127	2050	670
YN4	1.84	1.24	5.55	1,391	328	2020	700
YN5	2.22	1	5.22	1,522	264	2000	720
YN6	3.89	1.26	7.65	230	57	1990	730
YN8	4.44	1.1	7.72	420	73	1970	750
YN9	4.44	1.1	7.72	85	13	1970	750

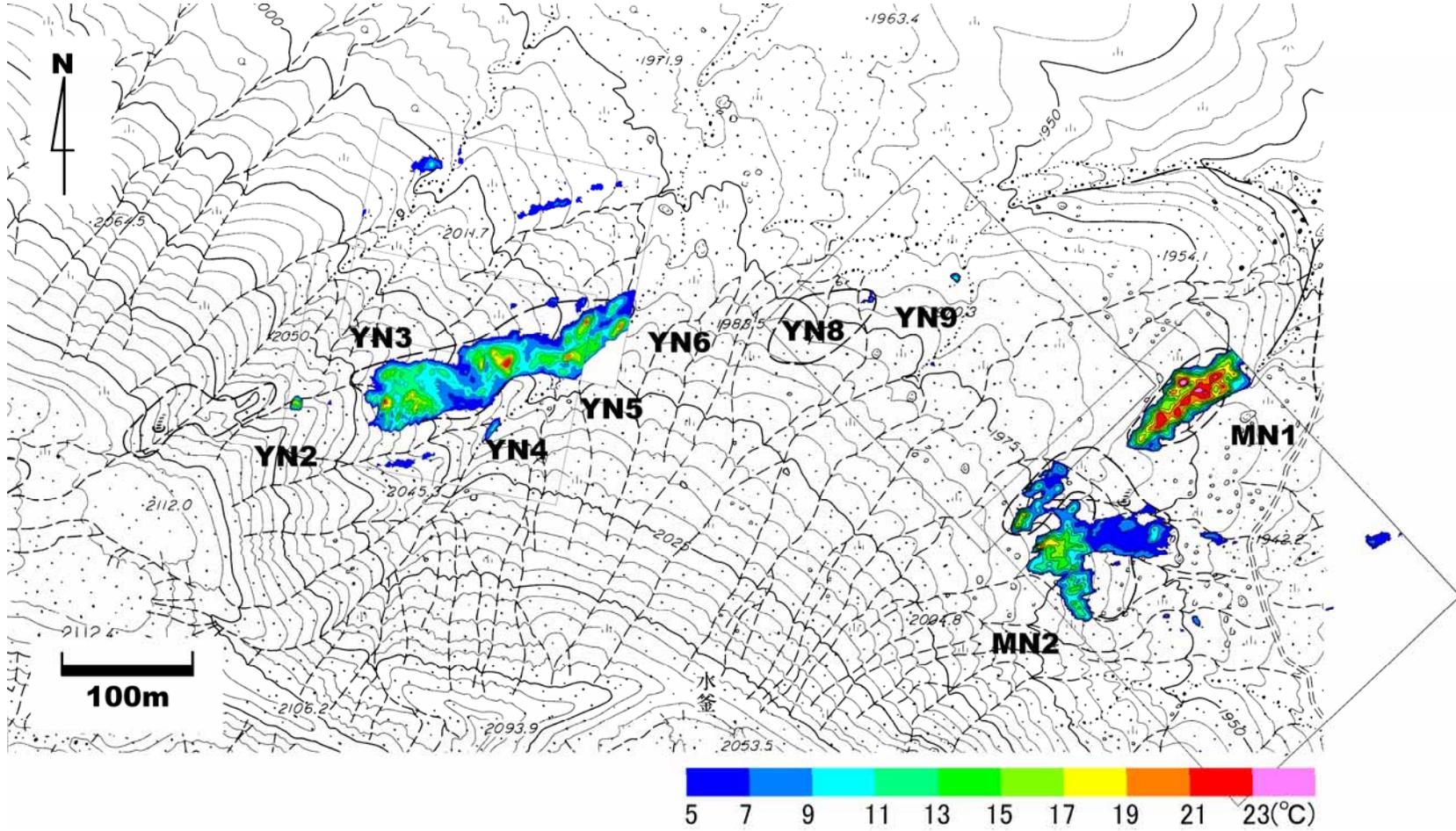
*YN1 , YN7 を除く

回の相対最高温度は 21 に上昇しており、熱異常域が前回よりも拡大しており、この部分だけで 3500 m^2 に達している。1992 年と比較してみると、撮像高度が 1992 年の方が若干高く、水蒸気の吸収の影響がやや大きいであろう。また、1 画素が代表する地表面は 1992 年の方が若干広くなっている。しかし、これほどの違いは出ないので、有意な変化と思われる。

b) 湯釜北方の熱異常

湯釜北方には、1942 年の噴火の火口列に対応し、現在も活発な噴気が東西 600m にわたり列をなしている。鍵山・他 (1996) では北側斜面に YN1 ~ YN9 までの熱異常域の存在を指摘しているが、今回の測定では YN1 および YN7 が測定できなかったため、YN2 から YN6、YN8、YN9 について報告する。第 5 図は、湯釜北方斜面の熱映像である。また、第 6 図は、画素の温度の頻度分布を示したものである。熱異常のない平常な地表面温度は、ほぼ -4.76 を中心とする正規分布をしており、その標準偏差 σ_T は、1.43 である。したがって、-0.48 以上の部分が熱異常と判断される。熱異常のないと思われる部分については 97% が $T_0 + 3 \sigma_T$ の範囲に収まる。熱異常を含むと思われる映像では、13% の画素が -0.48 を超えている。

有意に異常と判定された部分を地形図上に示した (第 4 図) 。熱異常の面積と熱エネルギー放出率は第 2 表に示す通りである。なお、この映像を撮像する際のヘリコプターの高度は、赤外映像と地形図との対比から 2530m と推定され、1 画素が代表する面積は、およそ 0.79m \times 0.79m である。今回取り扱った湯釜北側斜面の異常域の面積はおよそ 11500 m^2 、熱エネルギー放出率は 3.8MW と推定される。



第4図．水釜北東方および湯釜北斜面における温度異常分布．熱異常のない部分の平均温度からの相対値で示してある．

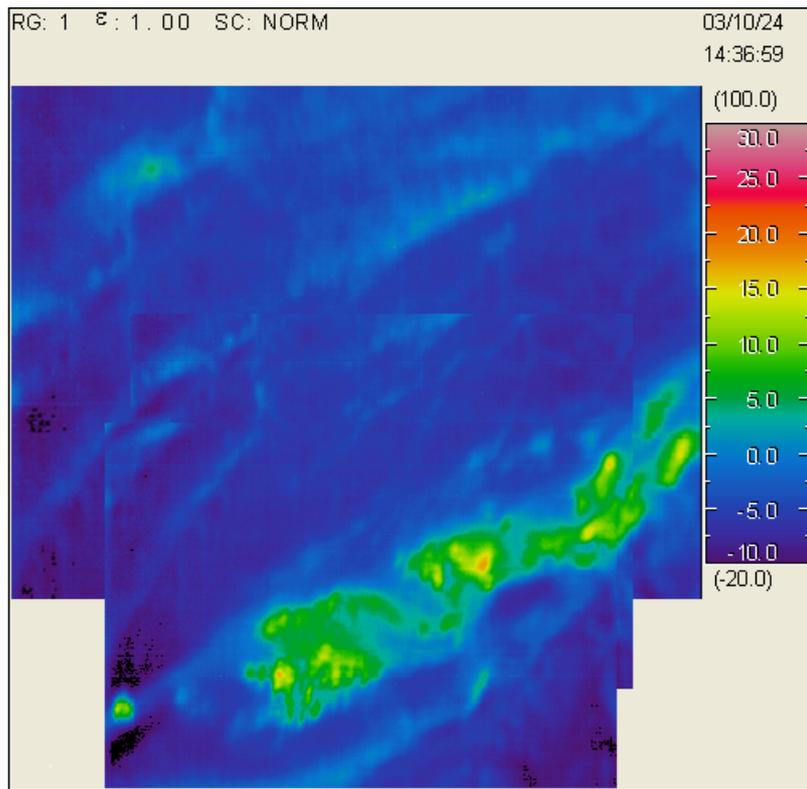
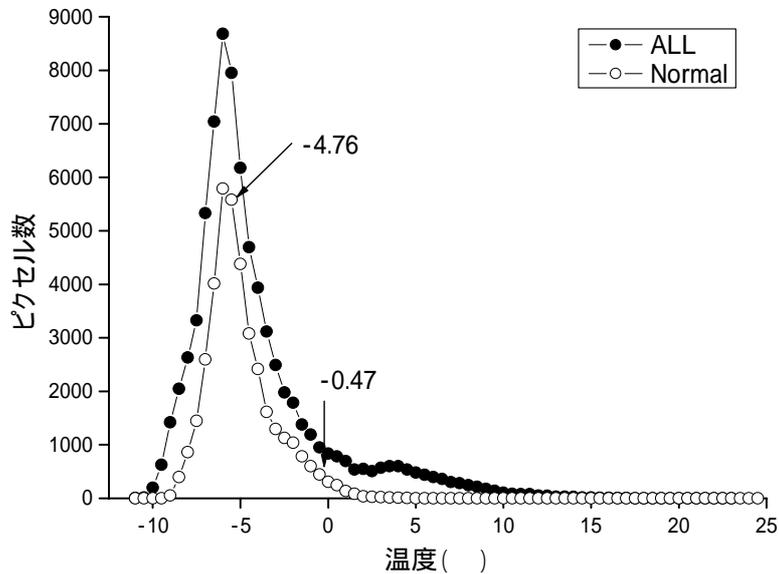


図 5 . 湯釜北斜面の地熱異常域の熱映像 .



第 6 図 . 第 5 図の熱映像の地表面温度の頻度分布 . 黒丸は熱映像のすべての画素の頻度分布 . 白丸は熱異常のない上半分の頻度分布 .

前回の測定値ではYN2 からYN6 までの熱異常の面積は 3525 m²、熱エネルギー放出率は 807 kWであり、今回の測定値による見積りの方が約 3 倍多い。YN3 について見てみると前回の測定値では、平常な地表面温度を基準とした相対温度の最高温度は 8 程度であったが、今回は 21 に達しており、8 以上の高温部が拡大している。同様にYN4 でも、平常な地表面温度を基準と

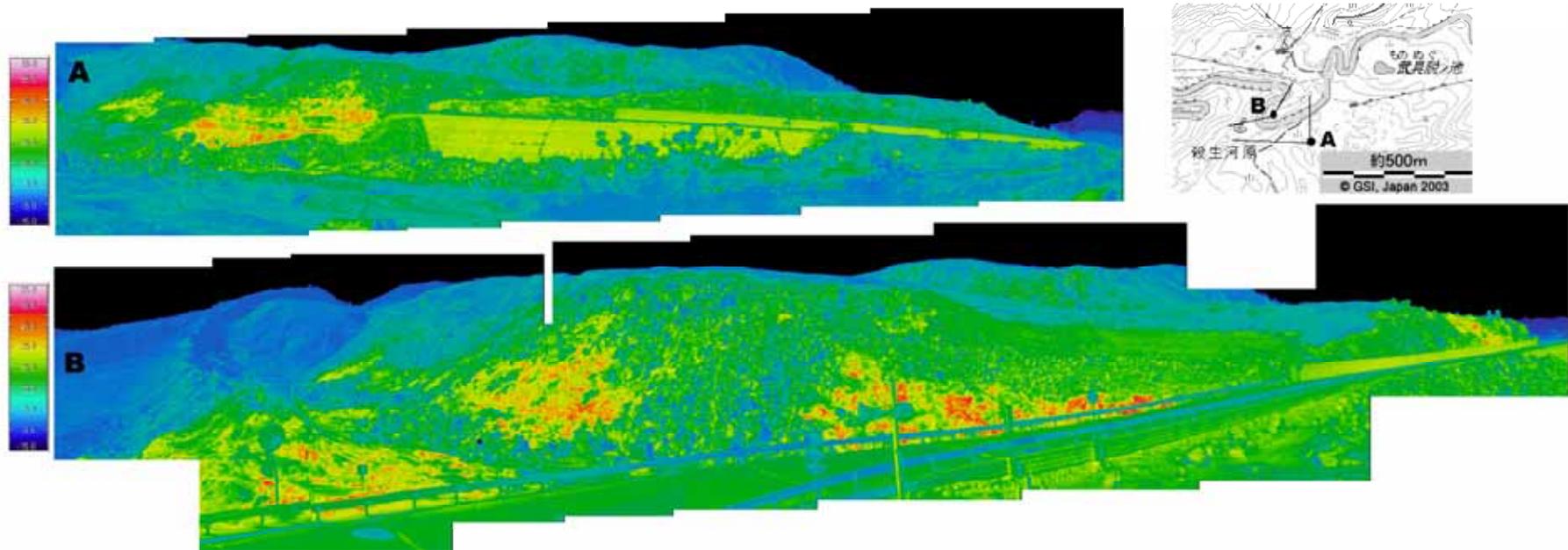
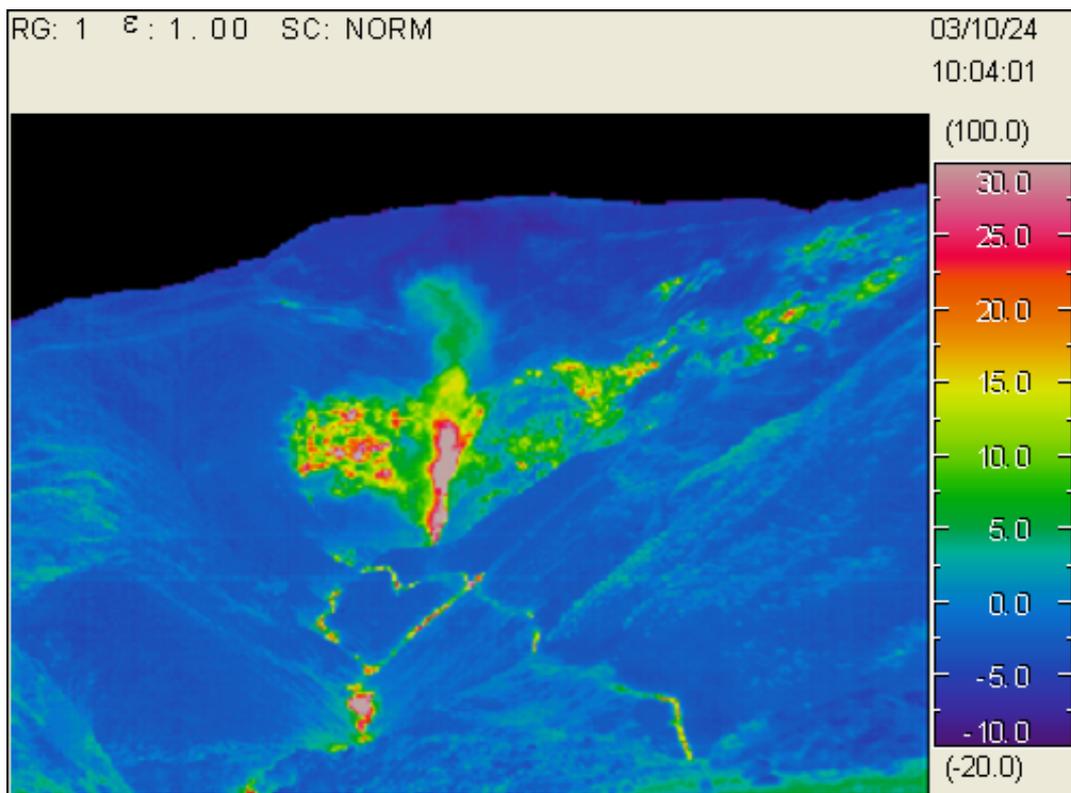


図7．殺生河原の熱映像



第 8 図 . 万座における熱映像 .

した相対温度の最高温度は 8 程度であったが、今回は 22 に達しており、8 以上の高温部は明らかに拡大している。YN5 の領域の南半分については、相対最高温度は 19 程度で大きな変化は見られないが、北側の部分には新たな高温部が検出されており、パターンの変化が見られる。水釜北東方の節で述べたように、今回の測定では、気温が低く、また、対象地域が日射の影響を受けていなかったため、熱異常の判断基準とされる $T_0 + 3 T$ に近い温度の部分が鮮明に温度異常として検出できたために多くなっていることが 1 つの理由とは考えられるが、相対最高温度が上昇していることや新たな熱異常があることなどから、湯釜の北斜面では地熱活動が活発しているものと判断される。逆に YN8 の領域については今回の測定ではほとんど熱異常が検出できなかった。

c) 湯釜・水釜・酒釜火口内

白根山頂の 3 つの火口内の表面温度分布を解析した。水釜および酒釜の 2 つの火口には熱異常が検知されなかった。湯釜でも火口壁には異常は見られなかったが、火口湖の表面温度は 8.5 ~ 11.5 の範囲にあり、同じ標高にある酒釜や水釜の湖水の表面温度 (-2.2、-2.9 ~ -5.2) に比べると有意に高温を示す。しかし、湖水面の全域にわたってほぼ均一な温度分布を示し、過去の噴火地点での高温異常や深部湖水の湧昇に特徴的な同心円状の低温異常のパターンなどは確認されなかった。測定当日は火口周辺では霧氷が見られるほどの低温であり、酒釜や水釜の湖水の表面温度は赤外線熱映像装置では、氷点下を示し、氷結している可能性がある。仮に酒釜や水釜の湖水の表面温度を 0 としても湯釜の湖水の表面温度は平均 10.3 高い。この温度差から鍵山・

他(1996)にならって湯釜の水面からの熱エネルギー放出率を求めると、23.6MW と推定される。これらの3火口以外の周辺域の表面温度分布についても解析した。湯釜火口の南などに0.2MW程度の微小な熱異常が数箇所あるが、1MWを超えるものは検出できなかった。

3. 地上赤外映像

以前に熱異常があり、今回の空中からの調査で熱異常が確認されなかった地域については地上からも調査を行った。

a) 殺生河原

第7図に殺生河原の地表面温度分布を示す。これまでの測定と比較して大きなパターンの変化はなかった。

b) 万座

第8図に殺生河原の地表面温度分布を示す。噴気が勢いよく出ているために中央部分の温度変化が大きい。最高温度は約70度に達した。地熱異常域の面積は2400m²、熱エネルギーの放出率0.9MWと推定される。

4. まとめ

2003年の草津白根火山集中総合観測の一貫として、山頂火口周辺の赤外線熱映像調査をヘリコプターおよび地上から行った。

その結果、熱異常はこれまでと同様に水釜北東方、湯釜北側斜面、湯釜火口内の3ヶ所に検出できた。それぞれの異常域の面積と熱エネルギー放出率は、水釜北東方の熱異常が、5800m²、2.3MW、湯釜北側斜面の熱異常域が、11600m²、3.8MW、湯釜火口内の異常域の面積は湖水に覆われているため明らかではないが、熱エネルギー放出率は、24MWであり、山頂火口域からの熱エネルギーの放出率は30MWを超えるものと推定される。1992年の測定値と比較すると湯釜北斜面において熱異常域の拡大が見られる。

謝辞

本調査を行うにあたり、群馬県消防防災課および防災航空センターにはヘリコプターからの調査にご協力をいただいた。また、草津町の関係者の方々にご協力、ご支援をいただいた。記して謝意を表します。

引用文献

Kagiyama, T. and Hagiwara, M. (1981) 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 (1985) 草津白根火山の熱的調査. 第2回草津白根火山集中総合観測報告書, 85-97 .

鍵山恒臣・小山悦郎・行田紀也・下鶴大輔 (1978) 草津白根火山の地熱調査. 震研彙報, **53**, 581 - 605 .

鍵山恒臣・平林順一・大場 武・井口正人 (1996) 草津白根火山の赤外映像調査. 第3回草津白

根火山の集中総合観測報告書，37-44.

西 潔・中村貞美・須藤靖明・平林順一（1985）草津白根火山の熱的調査．第2回草津白根火山集中総合観測報告書，69-84．