

赤外カメラ画像による有珠 2000 年噴火活動の観測

金子隆之¹⁾・宗包浩志¹⁾・M.J. ウスター²⁾・鍵山恒臣¹⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

²⁾ ロンドン大学キングスカレッジ

Thermal observation of the Usu 2000 activity using infrared camera imagery

Takayuki Kaneko¹⁾, Hiroshi Munekane¹⁾, Martin J. Wooster²⁾ and Tsuneomi Kagiya¹⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

²⁾ King's College London, University of London

Abstract

Usu volcano, located on the northern island of Japan (Hokkaido) erupted on 31 March, 2000. Phreatic to phreato-magmatic eruptions occurred at two vent groups on the northwestern foot of the edifice (the Kompirayama and Nishiyama Craters). We observed the eruptive activity remotely using infrared (IR) thermal camera imagery taken from a helicopter, and filmed in the field and broadcast via the Internet supported by a television company. IR images taken from a helicopter showed that the temperature of the eruption plumes was about several tens of degrees Celsius at the base, which was lower than those observed during similar phreatic to magmato-phreatic eruptions at Usu in 1944 or the Miyakejima 2000 activity. Automated software was developed to monitor temporal variations in the number of IR image pixels showing high temperatures, which corresponded to the eruption plumes from each vent group. This measure acted as a proxy for the amount of eruptive material being released from the craters. The Kompirayama Craters showed gently varying levels of plume activity, mostly of greater magnitudes than that of the Nishiyama Craters. However, every few hours the Nishiyama Craters greatly increased their activity levels for a few minutes. At short time scales (a few tens of minutes) the two vent groups showed a negative relationship between their activity levels. Theoretical models are presented to explain the observed trends. The IR analysing system developed here is fully automated and could be used to remotely monitor and quantify activity variations at other volcanic locations.

Key words: Usu volcano, thermal monitoring, eruption plume, infrared camera

1. はじめに

有珠火山は 2000 年 3 月 31 日、20 余年ぶりに噴火を開始した。水蒸気爆発あるいはマグマ水蒸気爆発により、直径数 10 m 前後の火口が次々形成され、噴煙が最高約 3,200 m まで立ち上った（宇井ほか、2000; 朝日新聞、4 月 1 日）。噴火は最初山体北西麓（西山火口群）で起きたが、翌 4 月 1 日には洞爺湖温泉街南の金比羅山周辺（金比羅山火口群）でも始まった（Fig. 1）。火口からは、通常水蒸気を主体とする白色の噴煙が放出されることが多

かったが、時折火山灰を多く含む黒色の噴煙も上がった。この活動によって火口周辺に火山灰が堆積すると共に、一部の火口から泥流が溢れ出た。また、マグマの上昇に伴って、火口域一主に西山火口群一の周辺では地殻変動により最大 60 m におよぶ隆起（気象庁・火山噴火予知連 5 月 22 日発表）が起き、それに伴い断層群も形成された。噴火に伴う地殻の隆起は 5 月中旬にはほぼ沈静化した（気象庁・火山噴火予知連 7 月 10 日発表）が、噴煙の放出は衰えながらも現在も継続している（2000 年

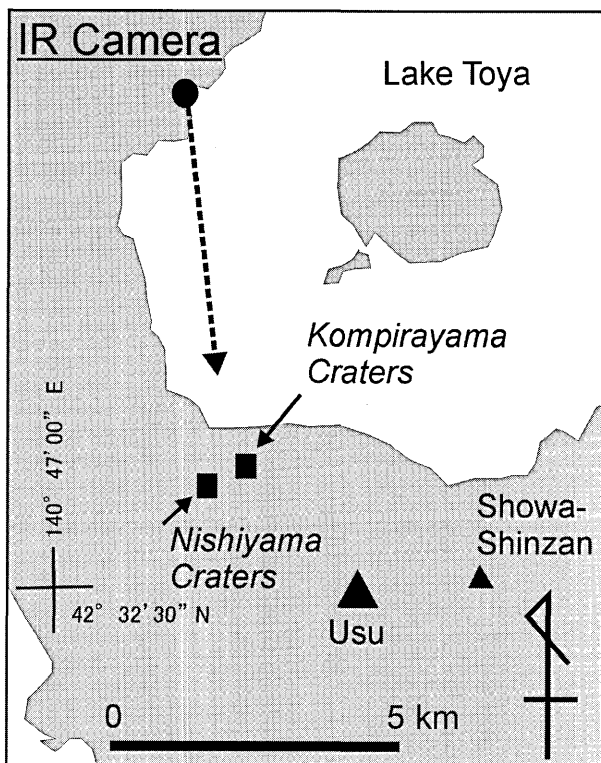


Fig. 1. Location of the summit of Usu volcano. The Kompirayama and Nishiyama Craters, site of the 2000 eruption, are indicated along with the location of the infrared camera installation.

11月現在).

火山噴火時における噴出物や火口部の温度とその拡がりは、熱源の構造や放出される熱エネルギーと密接に結びついており、噴火現象を解明するための重要な鍵となる(鍵山, 1986; Wooster *et al.*, 2000). 一般に、噴火活動が活発で多くの噴出物が放出されるとき、地表に運ばれる熱も多くなり、逆に活動度が低いときは少なくなる。このため、火山の熱的状態を連続観測することによって、間接的に活動度の変化を推定することも可能であり(例えば、Wooster and Kaneko, 1998; Kaneko and Wooster, 1999), これから噴火にかかわるマグマや高温物質の規模や構造に関する手がかりを得られる可能性がある。

火山の熱的状況を観測する道具の1つとして、赤外線熱映像装置がある。赤外線熱映像装置は地上からのみならず、衛星や航空機などに搭載され広く用いられている(Francis *et al.*, 1987; Rothery *et al.*, 1988). また、これを適当な装置と組み合わせることにより、動画として火山の熱的状況の変化を連続的に記録し、検討することも可能となる。

本論は、まず、赤外線熱映像装置を用いて空中から測

定した2000年有珠火山噴火の噴煙および噴出物の温度について報告する。ついで、報道機関によって定点に設置された赤外線映像装置からインターネットを通じてライブ放映された赤外画像を利用し、西山火口群と金比羅山火口群の相互の活動関係を時系列で比較した結果について述べる。

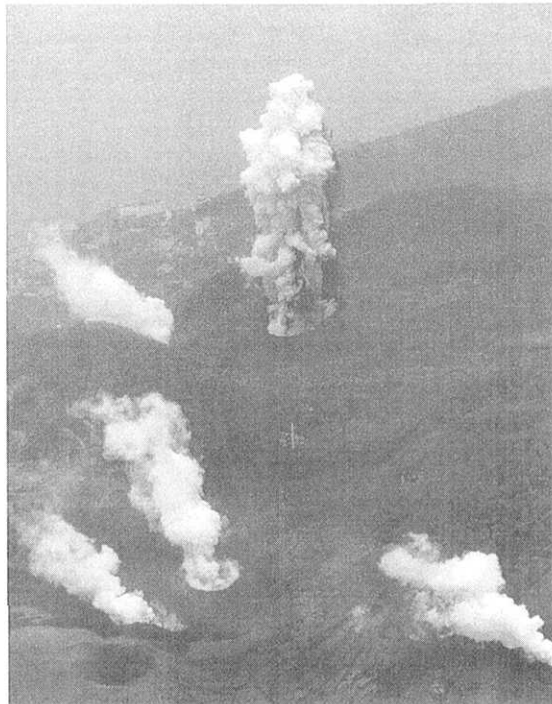
2. 赤外線熱映像装置による活動域の観測

噴火当初の2000年4月10日、日本アビオニクス赤外線熱映像装置 TVS-100 (波長: 3~5.4 μ m, 画素数: 120 \times 240, 瞬間視野: 3mrad) を使い、ヘリコプターから、西山火口群、金比羅山火口群周辺の熱観測を行った。その結果について簡単に紹介する。温度の算出にあたって放射率は一律に1.0と仮定した。

Fig. 2a に、噴火域を北東方向から撮った熱画像を示す(13時25分)。Fig. 2b はほぼ同じ時間に同じアングルから撮った写真で、噴煙が、西山火口群(手前)の3つの火口、金比羅山火口群(奥)の2つの火口から、それぞれ上がっている。とくに、金比羅山火口群の右側の火口からは、勢いよく火山灰を含む黒色の噴煙が上がっている。熱画像中央に写されているのは、この噴煙である。温度は、基底部でも30 $^{\circ}$ C程度である(図右側に温度スケールおよびA-Dのポイントの温度($^{\circ}$ C)が示されている)。

Fig. 3a は、洞爺湖上空から南西方向に向かって金比羅山火口群を撮影した熱画像である(13時36分)。Fig. 3b にほぼ同範囲を撮影した写真を示す。Fig. 2a で盛んに噴煙を上げていた火口は左上に位置するが、活動は停止し白色の湯気が火口内を漂っている。右側の火口から白い噴煙が上がっており、この基底部の温度は46 $^{\circ}$ Cを示す。画像中央部を上から下へ続く線状の高温域は、金比羅山山頂の火口から流れ出た泥流が流路溝を流れているところである。温度は40 $^{\circ}$ C程度と噴煙と同程度の温度を示す。

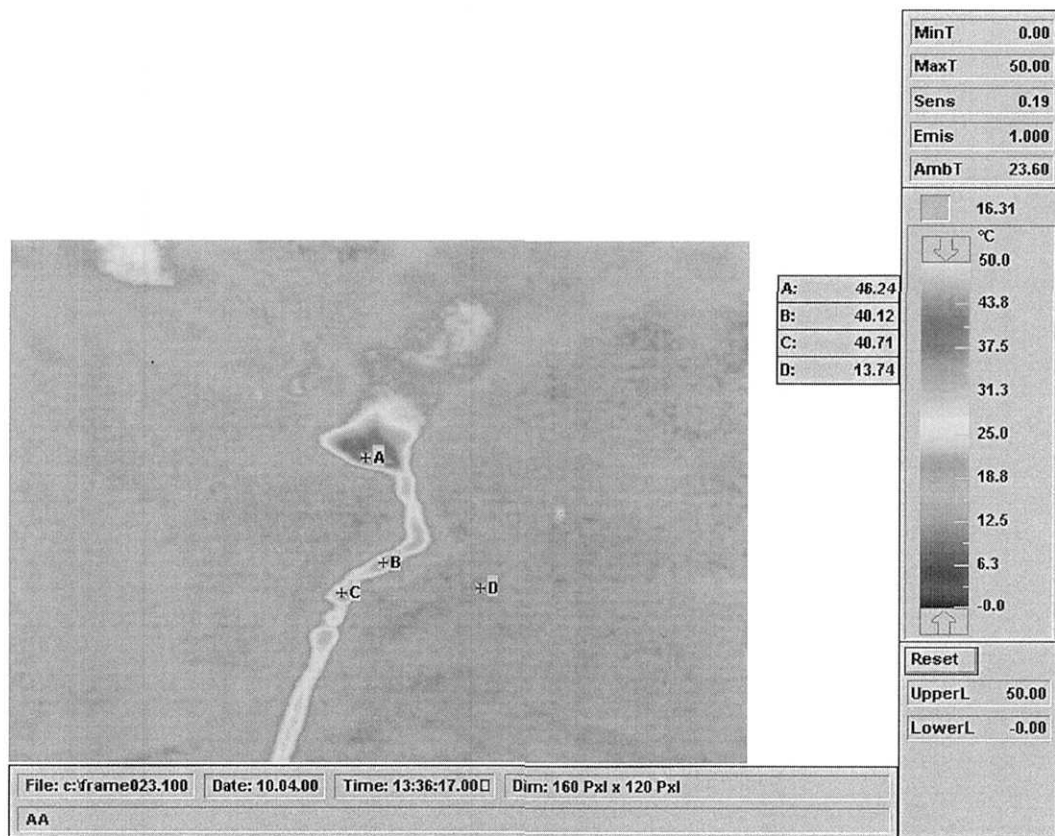
赤外線映像装置で測定された温度は、対象物の放射率、太陽光の反射光の影響(Oppenheimer *et al.*, 1993; Wooster and Kaneko, 2001)、大気による吸収・散乱や放射など複雑な要因が絡み、実際の温度を表しているとは限らない。しかし、噴火による熱的影響を受けていない地表面の温度が約14 $^{\circ}$ C、洞爺湖の湖面温度が10 $^{\circ}$ Cと、妥当な値が得られていることから、数10 $^{\circ}$ C以上の誤差があるとは考えられない。一方、ここで測定している噴煙の温度は、火口から地表面に噴出し、多少なりとも外気と混合した後の噴煙の、しかもその外縁からある程度内部までの温度(噴煙の主構成物である水滴や岩片は赤



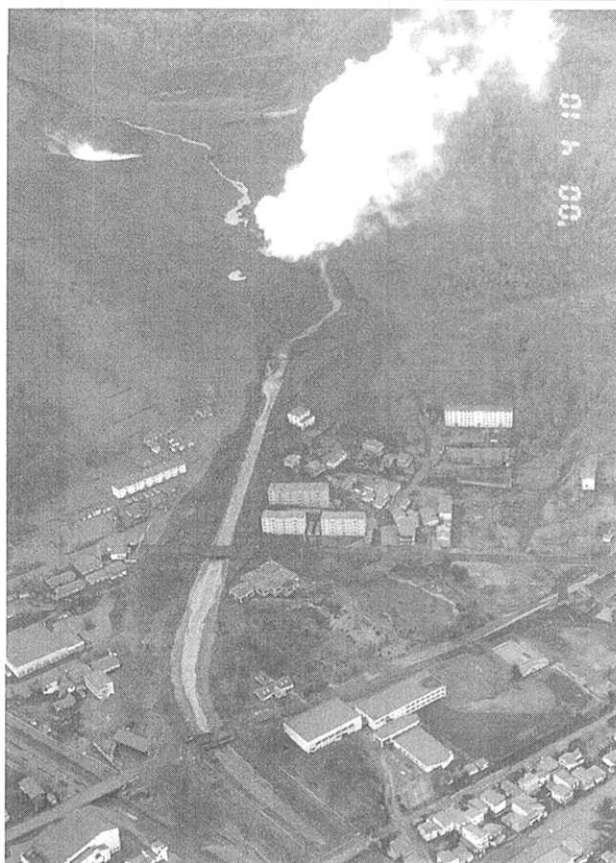
(a)

(b)

Fig. 2. (a) Thermal camera image of the eruptive activity at the Nishiyama (front) and Kompirayama (rear) Craters (taken on 10 April, 2000 (13 : 25 PM) by T.K.). Temperature scale and temperature of the points A-D are shown on the right in degree Celsius. (b) Photo taken at nearly the same angle as Fig. 2a (taken on the same day by T.K.).



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Thermal camera image of the eruptive activity at the Kompirayama (rear) Craters (taken on 10 April, 2000 (13:26 PM) by T.K.). Temperature scale and temperature of the points A-D are shown to the right in degrees Celsius. (b) Photo taken at nearly the same angle as Fig. 3a (taken on the same day by T.K.).

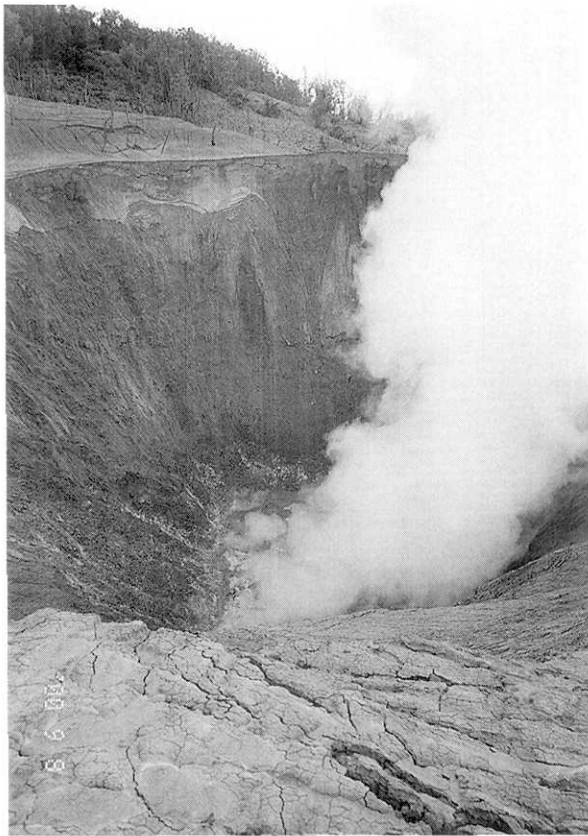


Fig. 4. One of the main vents of the Nishiyama Craters (taken on 8 September, 2000 by T.K.).

外線に対してほとんど不透明である)であり、噴煙中心部や火道内では、これよりも高いと思われる。時期な問題もあり単純な比較はできないが、2000年9月8日に実際に西山火口群の火口の1つ (Fig. 4) を火口底温度を赤外カメラ (TVS-100) で火口縁から測定したところ、 128°C を越えていた (金子・鍵山 未公表資料)。

このように、両火口群から発生している噴煙の温度は、マグマの温度と比べきわめて低い。この原因として、ここで起きている噴火は水蒸気爆発-マグマ水蒸気爆発であり、火道内の爆発や上昇の過程で地下水、基盤岩などが、放出物に大量に取り込まれているためと考えられる。ただし、昭和火山を生じた噴火では、1944年7月11日のマグマ水蒸気爆発により、発生した噴石により家屋が火災となり、横殴りに吹き付けた噴煙により、火口から1.5 km までの樹木の半面が焦げたことが報告されている (三松, 1962)。また、同様に水蒸気爆発-マグマ水蒸気爆発を起こした三宅島の噴煙基底を赤外カメラ (TVS-600, 波長 $8-14\mu\text{m}$, 画素数: 320×240 , 瞬間視野: 1.4mrad) により2000年10月に測定したところ、 150°C を越えていた (金子・鍵山 未公表資料)。今回の有珠噴火で観察された噴煙の温度は、このような水蒸気爆発-

マグマ水蒸気爆発と比べるとかなり低温である。

3. インターネット上の赤外ライブ画像の解析

今回の突然の噴火に際し、観測機材の確保が難しかった中、北海道放送 (HBC) が、噴火域より北へ約8 km の地点「サイロ展望台」に赤外線熱映像装置を設置し (Fig. 1)、インターネット上でその画像のライブ放映を始めた。本研究では、この画像をコンピュータに取り込み、活動状況の時系列の解析を行った。

Fig. 5a に、赤外カメラが設置されたサイロ展望台から見た有珠山の写真を示す。この地点は、ここより、金毘羅火口群と西山火口群を同一視野にとらえることができるため、両者の比較を行う上で都合が良い。

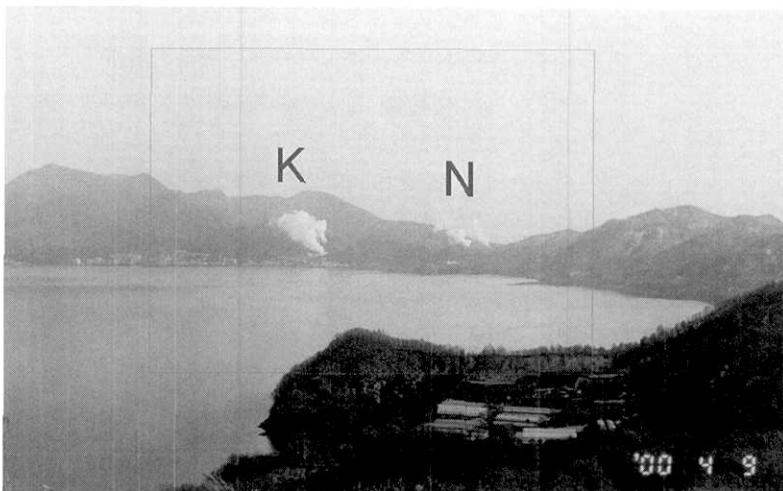
3.1 画像データ

本論で利用した有珠のライブ赤外画像は、ニコン赤外線熱映像装置 LAIRD 3A (波長: $3-5\mu\text{m}$) で撮影され、BNC 端子から出力された信号をデジタル化し、Real Player 形式でインターネット上で放映されたものである。この赤外線熱映像装置のオリジナルの有効画素数は 764×494 であるが、放映された画像は枠部を除くと 241×321 画素となっている。また、各画素は、元来は温度値 ($^{\circ}\text{C}$) を示すが、インターネット上の画像では8ビットグレースケール (0-255) で相対的な見かけ温度の高低が示されるのみとなっている。

赤外画像のインターネット放映は、噴火開始当初から数ヶ月以上に渡って行われたが、少なくとも4月24日以降から赤外線熱映像装置が自動輝度調整モードに変更されたことおよび天候不順により、実際に解析に用いることができたのは4月17-18日と4月19-20日の2夜分のみであった。Fig. 5b に Real Player で放映された赤外画像の例を示す。Fig. 5a の四角で囲んだ範囲が赤外画像の範囲に相当する。

3.2 解析方法

画像データの収集と解析のため、2つのソフトウェアを作成した。画像データ収集のためのプログラムでは、UNIX 上で、インターネット放映されている Real Player 画像を一定の時間間隔 (15 あるいは 30 秒) で自動キャプチャーできるようにした。このプログラムを夜間に連続運転し、一夜分の画像データを蓄積した。この後、これらを Windows 上に転送し、別途作成したプログラムにより解析した。解析プログラムでは、各画像について金毘羅山火口群と西山火口群周辺領域に分けてそれぞれスキャンし、各領域内の熱異常を示す画素の数をカウントした。この際、しきい値を150とし、これ以上の値 (150-255) をもつ画素を熱異常とした。この値で定義される領域は、赤外画像上で噴煙中心部の高い値を示



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Usu volcano and the Nishiyama (N) and Kompirayama (K) Craters. The waters of Lake Toya, a large caldera lake seen in the map of Fig. 2 b, are located at the front. (b) 3-5 μ m infrared image of the Kompirayama (K) and Nishiyama (N) Craters captured in Real Player format. The area shown corresponds to the rectangle in Fig. 5a.

す部分に相当する (Fig. 6). 150 というしきい値は、バックグラウンド変動の影響を避けるためできるだけ高く、かつ噴煙の活動度—画像上での拡大縮小—を敏感に反映するという2点を考慮し、いくつかの値で試行した結果から決定した。ただし、この値をある程度 (数 10) 変更しても、金毘羅山火口群、西山火口群の相対的な活動パターンを見る上でほとんど違いは生じない。一連のプロセスを Fig. 6 に示す。このようにして、一夜分の全画像について、金毘羅火口群、西山火口群ごとに熱異常画素数を求め、それらの時系列変化を調べた。

3.3 結果

結果を 4~5 時間および 1.5~2 時間程度の異なる時間スケールでプロットし、どのような変動が見られるかを

検討した。なお、観測中にバックグラウンドが変化している可能性がある。本論ではその変動の目安として、金毘羅山火口群と西山火口群の間にある地表面 (10 画素の平均値) をモニターした。この地表面の値は、Fig. 7, Fig. 9 に示した間、17-18 日は平均 46、標準偏差 12、19-20 日では、平均 45.9、標準偏差 14.9 で、ゆるやかな変動が認められた。しかし、これと金毘羅山火口群の間の相関係数は -0.75 (17-18 日) および 0.06 (19-20 日)、西山火口群との間の相関係数は -0.36 (17-18 日) および 0.12 (19-20 日) と、両者の相関は明瞭ではなかった。バックグラウンドを変化させる要因としては、噴火口周辺の外気の温度変化、火口基底部付近の地面の温度変化、赤外映像装置と火口域の間のパスにあたる領域の水蒸気量の変

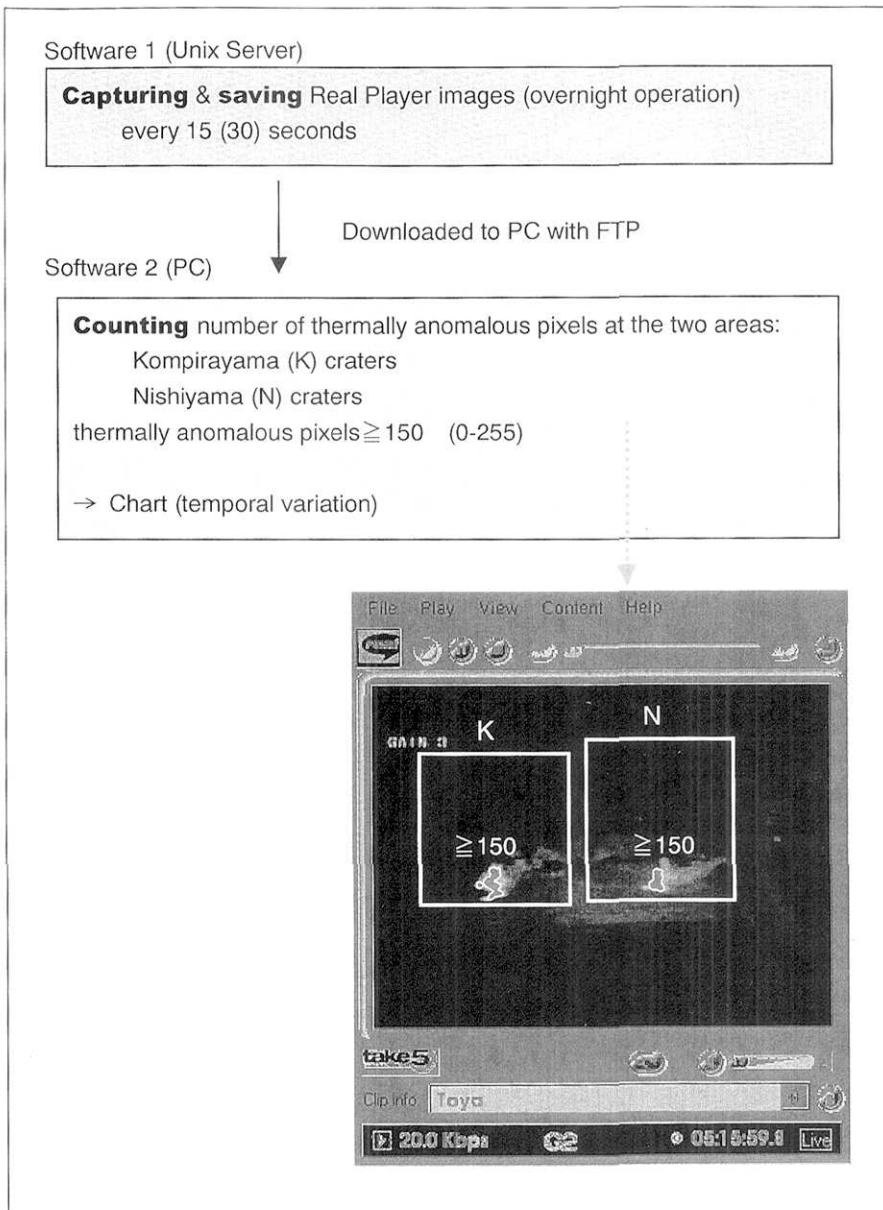


Fig. 6. Data-processing procedure used to capture and analyse infrared imagery broadcast live over the Internet.

化などが考えられる（赤外線映像装置の電気的変動は、ここで観測している現象よりはるかに小さいと推定され、ここでは考えない）。しかし、このような要因は、基本的には両火口群のレベルを同じように変化させるように働き、以下で議論するそれらの相対的な変化パターンにほとんど影響しないと考えられる。ここでは、このような両火口群の間の相対的な変化に主に着目して議論を進める。

(1) 中期的変動 (2~3 時間)

4月17-18日と4月19-20日（サンプリング間隔は、それぞれ30および15秒）の熱異常域の変化を4~5時間の中期的時間スケールでプロットした結果をFig. 7に示す（黒線は、4分間の移動平均を示す）。金毘羅山火

口群はばらつきが大きいながらも全体として、一定ではなく、2~3時間程度の時間スケールでゆるやかに変動が見られる（Fig. 7にピークと思われる点を“K”で示した）。それに対し、西山火口群は、全体に低いレベルにあるが、2~3時間に1度程度の割合で、パルス的に熱異常域が拡大している（Fig. 7にパルスと思われる点を“Np”で示した）のが認められる。また、金毘羅山火口群と似たゆるやかな変動もある。

金毘羅火口群と西山火口群の全体のレベルの差は、実際には、Fig. 7に示されているより小さいと考えられる。サイロ展望台からは、金毘羅火口群はほぼそのすべてを視野内にとらえることができるのに対し、西山火口群は手前に低い丘があり、噴煙の基底部分がわずかに（約

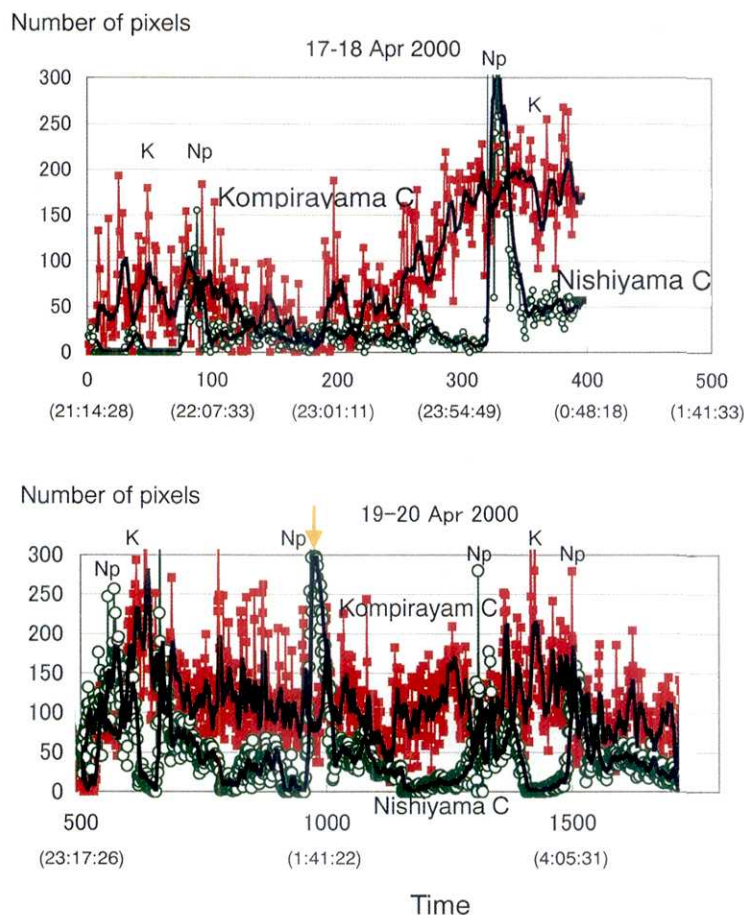


Fig. 7. Medium-term scale variation of the thermal anomaly of the Kompirayama and Nishiyama Craters on 17-19 and 19-20 April, 2000. Thermally anomalous pixels identified in each image are shown in red (Kompirayama Craters) and green (Nishiyama Craters), with black lines indicating a four-minute moving average. "K" shows a peak for the medium-term scale of the Kompirayama Craters. "Np" shows a pulse of the Nishiyama Craters.

20 m) 隠されてしまう。このため、西山火口群のレベルが見かけ上全体として10-20%程度低くなっている可能性がある。ただし、西山火口群のレベルが全体として低いことに変わりはない。

熱異常域のサイズの変化は何を反映しているのであろう。今回の噴火活動は、水蒸気爆発あるいはマグマ水蒸気爆発によって起きていると考えられる(気象庁・火山噴火予知連 4月12日発表)。噴煙を構成する物質—マグマ由来の岩片、基盤の岩片、火山灰、水—の地下での温度は、せいぜい5-6時間という一回の観測期間中に変化するとは考えられない。従って、基本的には噴出量の違いを反映していると考えられる。噴出率が高いときは、高い(大きな)噴煙が生じるために熱異常域が拡大し、同時に、基底部分付近には周囲の空気とあまり混じっていない高温の部分が現れると考えられる。さらに、噴煙の噴出速度が高まるために境界層が薄くなり、噴煙外縁から赤外線透過厚さに相当する部分が高温になることも考えられる。金比羅山火口群、西山火口群の中期的変化はこのような噴出率の変動を反映しているのであろう。

西山火口群のパルスも、同様に、噴出率が突発的に高くなっているためと考えられる。このようなパルスの放出を生じる原因として、火道壁が崩壊し火道が一時的に目詰まりを起こし、内部の圧力が高まった所で、火道内の物質が一気に吹き飛ばされた可能性が考えられる。4月20日1時33分頃発生したパルス(Fig. 7の矢印)の前後の様子をFig. 8に示す。西山火口群は1時28分頃はきわめて低調であるが、徐々に熱異常域が拡大、6分ほどで最高値に達する。その後、同程度の時間をかけて低下する。この間、金比羅山火口群は少なくとも2箇所の噴煙からほぼ定常的に噴煙がでており、西山火口群のピークとはほぼ無関係に活動しているように見える。

金比羅山火口群は数分程度の短時間のばらつきが目立つ。これは金比羅山火口群のレベルが全体として高いために現れていると考えられる。西山火口群でもパルスの部分などレベルが高いときは同程度の短時間の変動を示す。活動が高まったときは、噴煙放出のゆらぎが大きくなり熱異常域の変動として観測される。あるいは噴煙が大きく立ち上がったときは風等の影響が強くなり、一時的に高温部が露出したり、逆に低温の噴煙に隠されたり

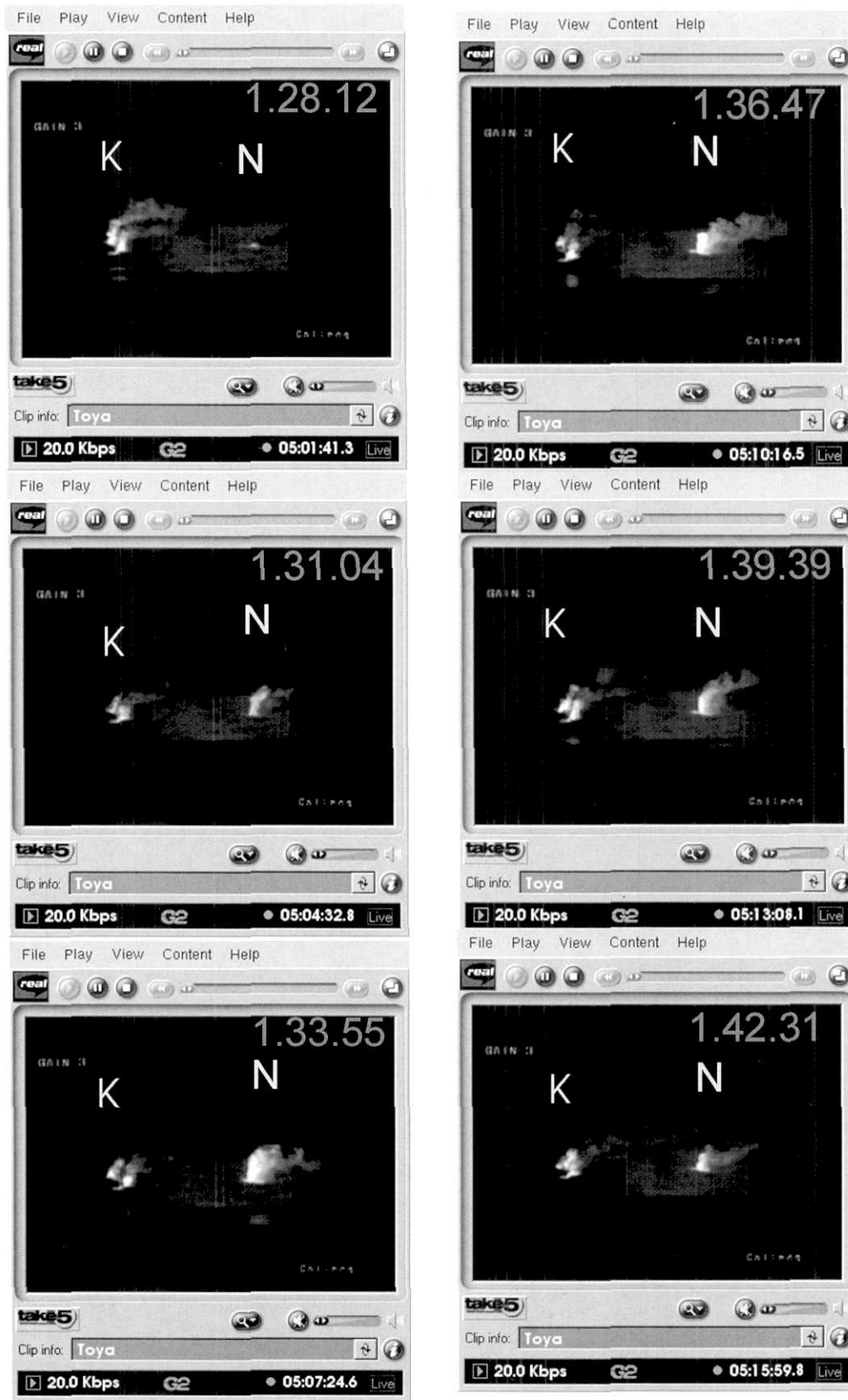


Fig. 8. A pulse-like emission of plume from one of the vents of the Nishiyama Craters (N) observed at around 1:33 AM on 20 April, 2000.

しやすくなるのかもしれない。

金毘羅山火口群、西山火口群に見られるゆるやかな中期的変動は、噴火活動にバックグラウンドの変動が重なったものと考えられるが、観測期間が短くデータが十分でないため、ここでは議論しない。

(2) 短期的変動 (10 数分)

1~2 時間位の時間スケールで見ると、金毘羅山火口群と西山火口群の間には互いに負の活動関係があるように見える (Fig. 9a, b). すなわち、金毘羅山火口群の活動が活発になると西山火口群は不活発になり、西山火口群が活発になると金毘羅山火口群が不活発になるという関係が認められ、このような変動が 1 時間に数回程度起きているように見える。このことは、2つの火口群が全く無関係に独立して活動しているわけではなく、お互いに何らかの関連をもっていることを示唆している。

この原因として、例えば、両火口群の間で、地殻を媒介とした一種の圧力の振動が起きているのかもしれない。すなわち、西山火口群の活動が盛んで火道内の圧力が高いときは、この圧力により金比羅山火口群の火道の

一部が閉じ、噴煙の放出は押さえられる (Fig. 10a). このため火道内の圧力が次第に増加し始める。やがて、西山火口群の火道内ガスがひとしきり放出され圧力が低下し始めると、圧力が限界近くまで達して来た金比羅山火口群から、活発な噴煙の放出が始まる (Fig. 10b). そうすると今度は逆に、この火道内の高い圧力により、西山火口群の火道の一部が閉じ始め、噴煙の放出は押さえられるようになる。以降、同じプロセスが繰り返される。ただし、ここで火道と呼んでいるものは、単なる筒状のものではなく、実際には細かな割れ目系のようなものかもしれない。この割れ目系をガスが通過する際、地殻内の圧力変化によって割れ目が開閉するため、噴煙の放出率が変化すると考える。

一方、この現象を片方の火口の活動が時間遅れをもつてもう一方の火口の活動を誘発していると考えたと、次のような説明も可能である。まず、両火口は帯水層を通して互いに連結していると仮定する (ただし、オープンシステム)。金毘羅山火口群で噴煙の放出が起これると、大量の水が火口から逃げて行くために周囲の水はこの火

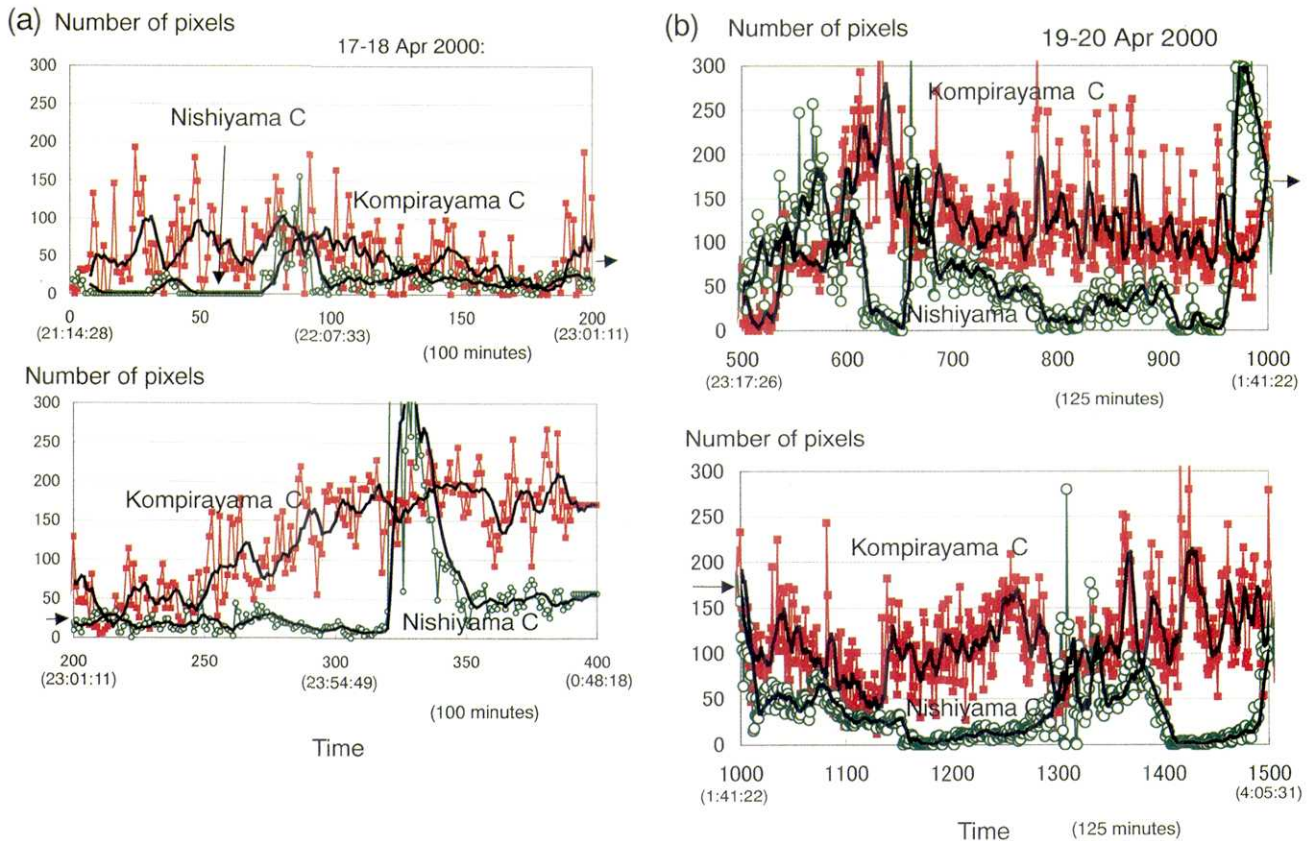


Fig. 9. Short-time scale variation of the thermal anomaly size associated with the Kompirayama (red) and Nishiyama (green) Craters on 17-19 April (a) and 19-20 April (b), 2000. Black lines again indicate the moving average.

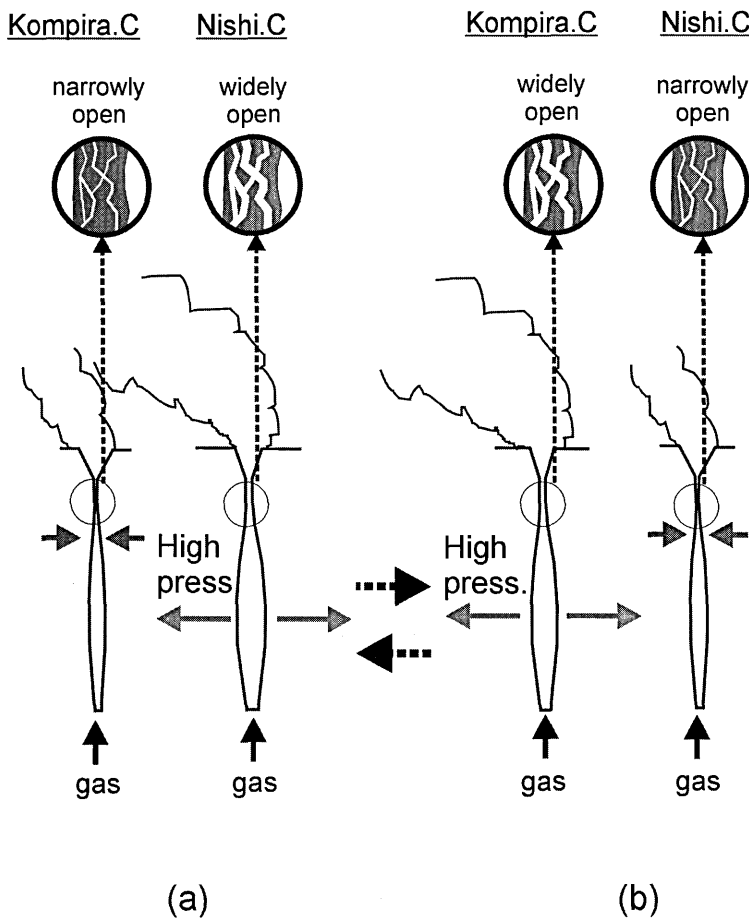


Fig. 10. A model explaining the short-term negative relationship in the activity observed at the Kompirayama and Nishiyama Craters.

口にすいよせられる。チャンバー内の熱水の放出が続くと、やがて流入する水により一時的にチャンバー内が冷却する。同時に、チャンバー内の水位が上昇することによって、静水圧が上昇し、活動は低下する。この間、もう一方の西山火口群では帯水層を通じて水位が減少し、チャンバー内の静水圧が低下する。減圧がある程度すすんだ時点で急速に体積膨張を起こして噴気の放出が始まる。このようにして片方の火口で活動が始まってしばらく時間をおいて別の火口で活動が始まるという現象を説明することが可能である。

以上の説明は定性的なものであり、どのプロセスが物理的に妥当であるかは、モデルを構築して定量的に議論するとともに、観測データから検証する必要がある。両火口群に見られる変動の詳しい周波数分析、ここで見出した両者の逆相関の具体的な相関係数およびモデルの定量的検討については、稿を改め報告する予定である。

4. まとめ

2000年3月末より始まった有珠の噴火に際して、赤外画像を使って噴火を観測し、その結果を検討した。ヘリコプターからの赤外線熱映像装置による観測では、噴煙の

温度は基底部で高々数10°Cと、比較的低温であることが判った。インターネット上でライブ放映された赤外画像の解析では、数時間程度の時間スケールを通して見ると、金比羅山火口群の活動が比較的緩やかに変動するのに対し、西山火口群では低いレベルからパルス的に放出率が增加することが明らかになった。また、10数分程度の短い時間スケールで見ると、金比羅山火口群と西山火口群は互いの活動が負の相関関係を示すような活動をしていることが判った。

ライブ画像の解析で示されたように、赤外線熱映像装置による定点からの連続観測は噴火活動をモニターする上できわめて有用な方法である。また、ほとんどの処理を自動で行うことができる利点もある。今回は、赤外線熱映像装置の運用上の問題で長期に渡る解析は不可能であったが、とくに長期間の変動を知る上では有効であろう。赤外線熱映像装置からデジタルデータのまま熱画像を連続的にコンピュータに取り出すことも可能になってきており、このようなシステムを使用すればより定量的な解析ができると思われる。さらに、通信回線を介してこれらの画像データをリアルタイムで得ることができれば、噴火監視に大いに役立つことが期待される。一方、

火山噴火を観測する上で適当な地点で電力が得られるとは限らない。このため、将来、赤外線熱映像装置に、省電力小型パソコンと携帯電話（現状では通信速度が不足）を組み合わせ、移動可能なシステムをつくることができれば、突発的な火山噴火にも敏速に対応することができる。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、北海道放送 (HBC)、高田亮博士 (地質調査所)、岡田 弘教授 (北海道大学)、大島弘光博士 (同左)、中田節也教授 (東京大学) から、ご助力、ご意見を頂きました。また、2名の査読者からのコメントは本稿を改善するのにきわめて有用でした。記して感謝いたします。著者の一人 (M.J.W) の日本滞在・現地調査は、日本学術振興会 (外国人招へい研究者、S-99060) からの援助によって行われました。

文 献

Francis, P.W. and D.A. Rothery, 1987, Landsat Thematic Mapper to detect and monitor volcanic activity: an example from Lascar volcano in Chile, *Geology*, **15**, 614-617.
鍵山恒臣, 1986, 火山の熱的活動, 火山, 2集, 30巻, 特別号,

S121-S136.

Kaneko, T. and M.J. Wooster, 1999, Landsat infrared analysis of fumarole activity at Unzen volcano: time-series comparison with gas and magma fluxes, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 57-64.

三松正夫, 1962, 昭和新山生成日記, 自費出版, 225 pp.

Oppenheimer, C., P.W. Francis, D.A. Rothery and R.W.T. Carlton, 1993 b, Infrared image analysis of volcanic thermal features: Lascar volcano, Chile 1984-1992, *Jour. Geophys. Res.*, **98**, 4269-4286.

Rothery, D.A., P.W. Francis and C.A. Wood, 1988, Volcano monitoring using short wavelength infrared data from satellites. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 7993-8008.

宇井忠英・中川弘光・吉本充宏・総合観測斑地質グループ, 2000, 有珠山2000年噴火, 火山, 2集, 45巻, 195-196.

Wooster, M.J. and T. Kaneko, 1998, Satellite thermal analyses of lava dome effusion rates at Unzen volcano, *Japan. Jour. Geophys. Res.*, **103**, B9, 20935-20947.

Wooster, M.J. and T. Kaneko, 2001, The accuracy of solar radiation corrections applied during satellite thermal analysis of active volcanoes. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 13381-13394.

Wooster, M.J., T. Kaneko, S. Nakada and H. Shimizu, 2000, Discrimination of lava dome activity styles using satellite-derived temperature structure. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **102**, 97-118.

(Received January 29, 2001)

(Accepted July 11, 2001)