

火山観測用航空機搭載型リモートセンシング装置

—装置の概要と浅間山の温度観測事例—

實 測 哲 也

防災科学技術研究所では、火山噴火の短期的予知や噴火災害状況の把握に役立てるため、火山体の表面温度や降灰分布を画像計測できる、独自の火山観測用航空機搭載型リモートセンシング装置の開発とその活用を1980年代より実施している。ここでは、防災科学技術研究所での最近の技術開発の成果と、同装置による火山観測結果を報告する。

キーワード：航空機、リモートセンシング、火山、噴火災害、表面温度、熱的活動

1. はじめに

日本には108の活火山がある。火山の噴火による被害を軽減する最善の手段は、的確な情報にもとづく適切な避難である。的確な情報は、火山の活動状況をできるだけ正確に評価するための指標となる現象を多角的に観測することで得られる。その代表的なものは、火山活動に由来する地震活動、地殻変動、電磁気的变化、温度、火山性ガス等の観測である。最近までの20年ほどの間、これらの観測技術は、着実に進歩している。実際、2000年の有珠山噴火、三宅島噴火、2004年、2009年の浅間山噴火等では、噴火の直前予知や、噴火活動の状況把握が、これらの観測情報をもとに行われ、被害の軽減につながっている。

本報文では、上にあげた火山活動状況評価に活用する代表的観測項目のうち、防災科学技術研究所（防災科研）で実施している、温度や火山性ガスの観測に関するリモートセンシング技術の開発に焦点をあて、その最近の進歩を報告する。またこの技術を用いた、実際の噴火活動の観測事例として、浅間山の温度観測事例を紹介する。

2. 火山観測用航空機搭載型リモートセンシング装置

火山は噴火すると地表からは近づけない場合もあり、火山の状況を把握するには、衛星や航空機を活用したリモートセンシング技術が役立つ。とりわけ、航空機によるリモートセンシングは、航空機の機動力を生かした観測が可能で、災害現場の情報を緊急に計測

することができ、災害時の状況把握手法として利用価値が高い。また、平常時の火山体表面温度分布を把握することで、異常時の火山体の熱的な活動状況把握が行え、噴火災害の推移の評価に役立てることもできる。

防災科研では、衛星による観測では達成できない、火山の熱的活動評価に役立つ高空間分解能（1～3m程度）熱画像データの取得や、噴火活動に対応した機動的な火山観測を実現する火山観測用航空機搭載型リモートセンシング装置の開発を、1980年代より継続的に実施しており、1990年に初代装置VAM-90A、2006年に2代目の装置ARTSを完成させた。

(1) VAM-90A

VAM-90A（火山専用空中赤外映像装置）は、火山体の表面温度観測、降灰状況把握およびその観測手法の開発を主目的に、防災科研が1990年に製作・開発した航空機搭載型のリモートセンシング装置である。

VAM-90Aは、図-1に示すWhisk broom動作で

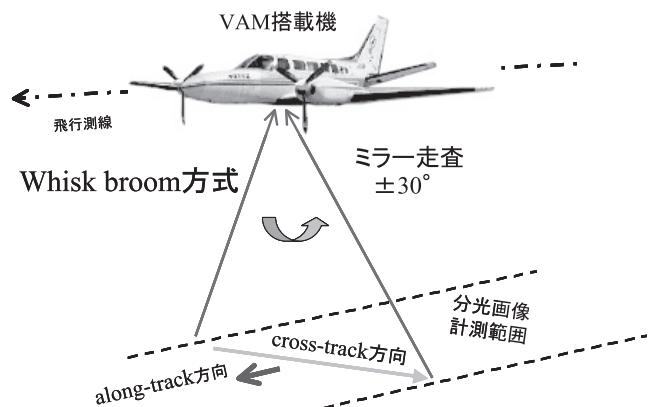
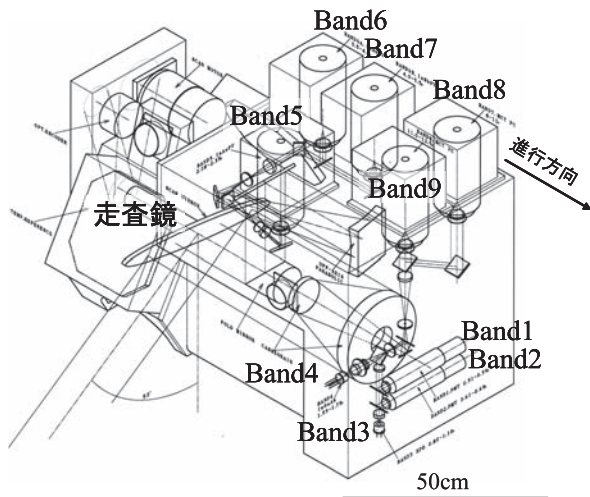


図-1 VAM-90Aの観測の様子（Whisk broom動作）

データを取得する。航空機に搭載されたVAM-90Aは、対地高度1～6 kmから航空機の機首方向に垂直な面内で直下点を中心にcross-track方向に±30°の角度でミラーを走査し、可視光から赤外光までの光を9つの波長帯(Band1～9)で捉える。この走査と航空機の進行(along-track方向)を利用することで地表の分光画像情報を計測する。VAM-90Aの走査検出器部を図一2に、VAM-90Aの主な諸元を表一に示す。



図一2 VAM-90Aの走査検出器部

表一1 VAM-90Aの主な諸元

主な機器構成	性能	用途・特徴
可視光センサ		降灰域の分布把握、植生の活性評価、水域の濁度評価
Band1	0.51～0.59 μm	
Band2	0.61～0.69 μm	
最高空間分解能	3m	
近赤外線センサ		降灰域の分布把握、植生の活性評価
Band3	0.80～1.10 μm	
Band4	1.55～1.75 μm	
Band5	2.08～2.35 μm	
最高空間分解能	3m	
赤外線センサ		地表の温度分布把握 (-20～1500℃)
Band6	3.50～4.20 μm	
Band7	4.30～5.50 μm	
Band8	8.00～11.00 μm	
Band9	11.00～13.00 μm	
最高空間分解能	1.5m	
幾何補正関連装置	動揺補正装置 光ファイバージャイロ	手動幾何補正作業 (処理時間:2～3日)

VAM-90Aは、赤外センサ(Band6～9)の高空間分解能により、数m以下の空間スケールで出現する地熱由来の高温スポットの温度が、周囲の常温域と空間平均されずに計測可能である。また赤外センサの広い温度観測レンジ(-20～1500℃)と精度(NETD:0.2K@300K)により、通常地表面から溶融した溶岩(約1100℃)の温度分布まで計測可能である。さらに、緊急時の情報提供を想定した速報機能(電話回

線利用)により、着陸後20分以内に観測画像の一部を速報画像(1MB程度)として提供可能である。

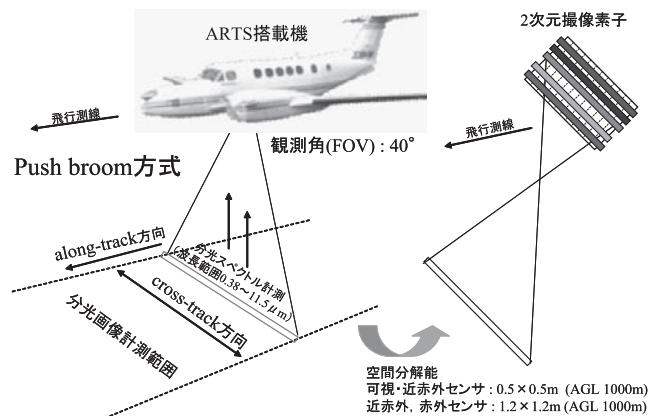
防災科研はVAM-90Aを用いて、1990年から2005年までに、日本の20の活火山を観測した^{1), 2)}。

(2) ARTS

防災科研は、2006年に、航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ(Airborne Radiative Transfer Spectral Scanner: ARTS)を開発した³⁾。ARTSは、VAM-90Aの後継機として開発された、高波長分解能・高空間分解能を有する最新鋭の火山観測用航空機搭載型リモートセンシング装置である。

ARTSは、図一3に示すPush broom動作で、データを取得する。ARTSは、対地高度0.7～6 kmから、航空機直下のスリット状領域(観測角:cross-track方向40°(FOV), along-track方向0.49～1.2 mrad)を、その幾何形状を保持しながら分光し、波長別のスリット状領域の形状を、2次元撮像素子上に投影、配置する。素子のフレームレート、積算時間を適切に設定し、航空機の移動にともない刻々と変化するスリット状領域のデータを取得することで、スペクトル別の帯状の画像を取得する。ARTSは中心感度波長が連続的に異なる狭い周波数帯域幅(バンド)の複数のセンサを有し、各バンドで地表の画像情報(空間情報)を得ると同時に、各画素についてスペクトル分布情報を計測する。ARTSは、可視光から赤外光までの光を最大421の異なる波長(超多波長)で観測できる。最高空間分解能は、可視域で0.3 m、近赤外～赤外域で0.85 mである。ARTSのセンサユニットを図一4に、主な諸元を表二に示す。

一般に、地表、大気、火山性ガスは、可視から赤外の電磁波(光)に対し、固有のスペクトル分布特性をもつ光学的特性(透過率、吸収率、反射率、放射率)を有する。ARTSの観測画像(超多波長データ)は、



図一3 ARTSの観測の様子(Push broom動作)

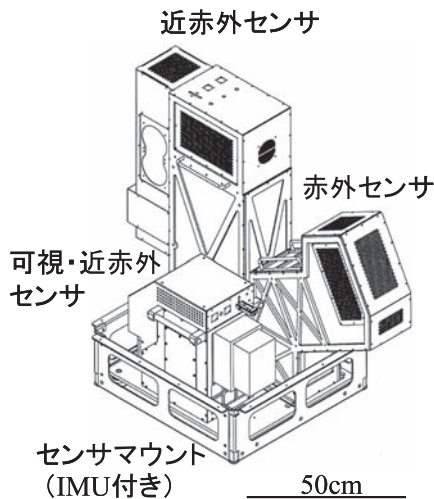


図-4 ARTSのセンサユニット

表-2 ARTSの主な諸元

主な機器構成	性能	用途・特徴
可視光センサ		
観測波長領域	0.38~1.05 μm	<ul style="list-style-type: none"> ・降灰域の分布把握、植生の活性評価 ・スペクトル波形による地表被覆物同定(地質、植生、水の物性) ・高温計測(900~1200°C)
band数	288	
band幅	2.4nm	
最高空間分解能	0.3m	
近赤外線センサ		
観測波長領域	0.95~2.45 μm	<ul style="list-style-type: none"> ・降灰域の分布把握、植生の活性評価 ・スペクトル波形による地表被覆物同定(地質、植生の物性) ・高温計測(300~1200°C)
band数	101	
band幅	15nm	
最高空間分解能	0.85m	
赤外線センサ		
観測波長領域	8.00~11.50 μm	<ul style="list-style-type: none"> ・温度計測(-20~1200°C) ・スペクトル波形による地表被覆物同定(溶岩の物性) ・SO₂ガスの濃度分布計測
band数	32	
band幅	110nm	
最高空間分解能	0.85m	
幾何補正関連装置		
空中直接定位 GPS/IMUシステム		<ul style="list-style-type: none"> ・自動幾何補正(2hr以内)、精度0.3m ・地図との重ね合わせ可

各画素について、連続的なスペクトル分布情報を計測できるため、画素を構成する観測対象物質の固有のスペクトル分布特性が推定可能である。

ARTSは、この超多波長データの活用によって、VAM-90Aよりも火山体の表面温度観測精度が向上し、さらに火山ガスの濃度分布計測もできるようになった。また植生の変化や溶岩流など火砕物の分布もこれまで以上の識別精度で観測できる。さらに観測データには空中直接定位装置(GPS/IMU装置)による位置情報が付加されており、地図に合わせた画像化も容易である。このようなARTSの性能は、火山活動の現況や噴火後の被災状況の迅速な把握に役立つと期待できる。

防災科研では、2006~2007年度をARTSの性能検証期間とし、性能検証観測を完了した。これより、同装置の公称性能が達成されていることを確認し、2008年度からARTSによる火山観測を開始した。

3. 火山観測事例紹介：浅間山の温度観測

群馬・長野県境に位置する浅間山(標高2568m)は、活動が活発な活火山である。最近では、2003年、2004年、2008年、2009年に噴火活動が記録されている。

防災科研は、これまでにVAM-90A(2005年以前)とARTS(2007年以降)を用い、10回の観測を実施している。これらの観測により、火口内温度分布の推移をとらえることで、浅間山の熱的活動の推移を把握できている。以下では、その観測結果を紹介する。

(1) VAM-90Aによる観測(2000~2005年)

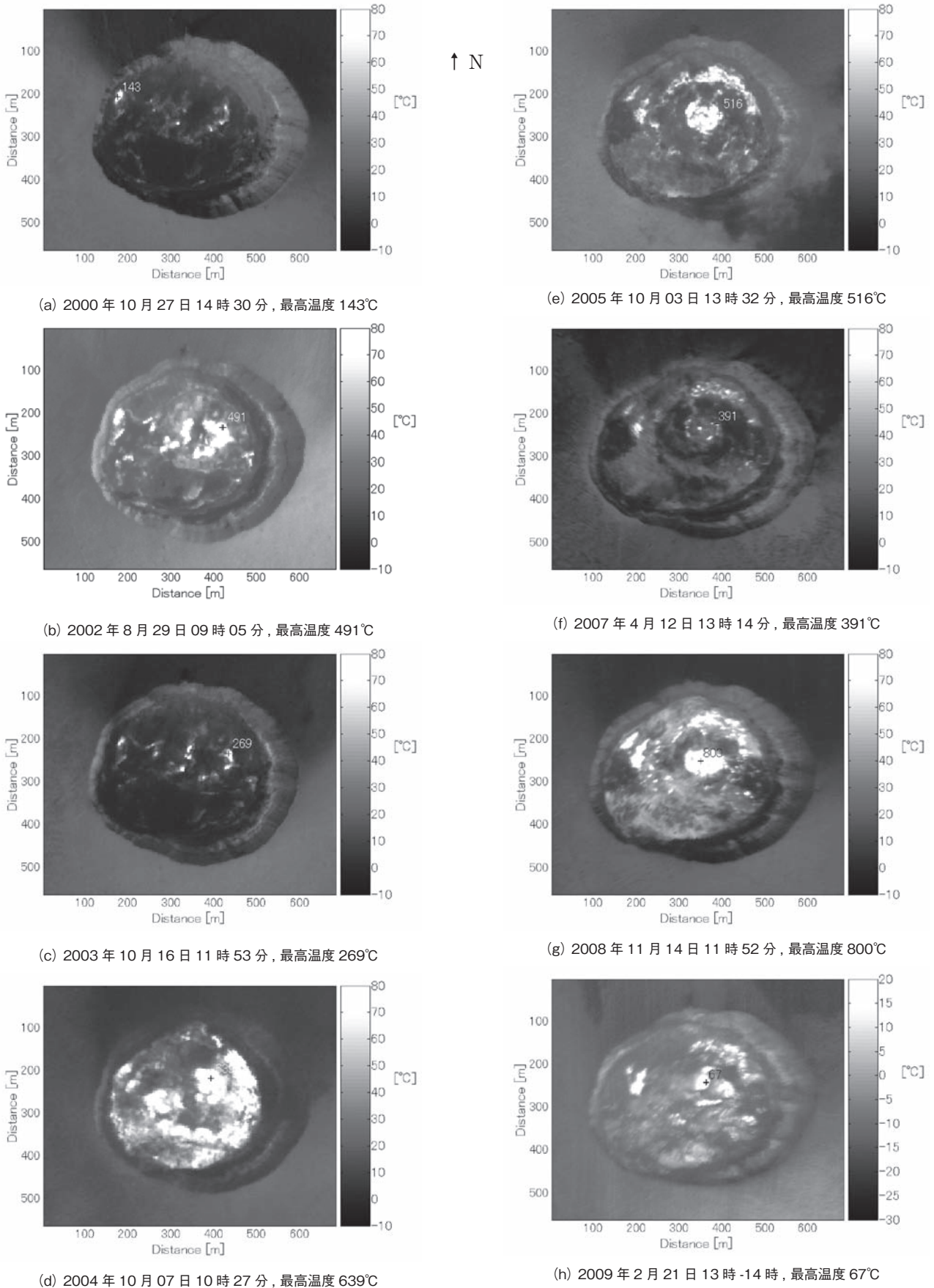
浅間山で火山性地震活動の増加が2000年夏頃より認められたことを受け、防災科研は、浅間山の山頂火口内温度分布観測を2000年9月より開始した。

[2000年9月~2003年10月の期間]:2000年9月、10月(図-5(a)),2002年8月(図-5(b)),2003年10月(図-5(c))に観測を実施した。図-5(a)(2000年10月)と図-5(b)(2002年8月)を比較すると、温度の上昇や噴気量、地熱分布域の増加が認められる。しかし、火口内の東部、中央部、西部に区別できる大局的な温度分布パターンが維持されている。2003年2月~4月に極小規模噴火があったが、火口内の大局的な温度分布パターンは、図-5(c)(2003年10月)にかけて大きくは変化していない。大きな噴火を伴わない場合、浅間山は比較的安定な熱分布形状を維持していることが推定される。

[2004年10月~2005年10月の期間]:2003年に低下した熱活動であったが、2004年の初夏頃から、浅間山の地震活動の活発化とともに、火口内の温度上昇が認められるようになり、浅間山は2004年9月1日に21年ぶりの爆発を伴う噴火をした。その後、9月~12月に複数回の噴火が記録された。我々は噴火活動中の温度分布形状の把握を目的として、2004年10月7日(図-5(d)),22日に観測を実施した。火口内の温度分布は噴火以前にくらべ図-5(d)のように大きく変化し、噴気や高温部が増加した。これは火口底に出現したマグマをとらえた結果である。この一連の噴火活動が終了した後、我々は、火口内の温度分布形状把握の為の観測を2005年10月3日(図-5(e))に実施し、噴出した溶岩が徐々に冷えていった様子をとらえた。この火口内の温度分布形状は、以後の熱的活動の推移を把握する上で、基準となる熱分布データとなった。

(2) ARTSによる観測(2007~2009年)

[2007年4月~2009年2月の期間]:2005年から



図—5 (a)～(e) 2000～2005年にVAM-90Aで観測した浅間山の山頂火口温度分布。(f)～(h) 2007～2009年に、ARTSで観測した浅間山の山頂火口温度分布。対地高度2000～3000mより観測、大気補正、オルソ幾何補正済み。2004年9月～12月には複数回の噴火活動があり、火口底の温度やその分布の変化が観測された。この噴火活動が低下し、2007年にかけて火口底が徐々に冷えていった様子や2008年に再び温度が上昇した様子等が一連の観測で把握できる。

2007年にかけて浅間山の活発な活動はなかった。我々はARTSの試験観測として、2007年4月12日に観測を実施した(図-5(f))。その結果、2005年の温度分布形状が保たれたまま、全体的に温度が低下していることを把握できた。その後、2008年夏頃より、再び地震活動が活発化したため、2008年11月14日(図-5(g))に温度観測を実施した。前回の2007年4月12日のARTSによる試験観測結果と比較すると、11月14日の輝度温度分布には、70℃以上の領域の拡大や噴気の増加が認められる。また、2005年10月3日(図-5(e))の観測結果と輝度温度分布の形状は類似しており、爆発を伴わない熱的な活動状況の増加を示している。

この後、2009年2月1日、浅間山は小規模噴火した。この噴火は、関東地方に降灰をもたらすものであった。この噴火直後の熱的活動の推移を評価するため、我々は2009年2月21日に浅間山の火口内温度観測を実施した(図-5(h))。この観測では火口内に噴煙が充満していたため、火口内の温度観測は、噴煙による減衰の影響を強く受けた。この影響を低減するため約15分間隔で5回の繰り返し観測を行い、各画素について5回の観測の最大温度を採用した温度分布画像を図-5(h)のように求めた。2008年11月14日の図-5(g)と図-5(h)を比較すると、火口底中心部、北側、南側、西側、東側の温度分布形状は、大きくは変化していない。火口底中心部の熱源の形状が3つに分裂したように見える。今回と同程度(やや多い)の噴煙の下で観測が行われた2004年10月7日の観測(火口底にマグマが出現)では、短時間の繰り返し観測(5回)を実施した結果、火口内の高温域は、噴煙の影響が小さい場合は600℃程度に観測され、噴煙の影響が大きい場合には300℃程度に減衰し観測されることを確認している。仮に、今回600℃程度以上の熱源が火口内に存在すれば、そのエネルギーは、2004年10月よりもやや少ない量である今回の噴煙を透過し、少なくとも300℃程度以上に計測されると思われる。しかし、今回の結果では、5回の観測いずれでも70℃以上の温度分布は計測されていないことから、火口内には少なくとも600℃程度を超える部分はなく、2004年の噴火時の様に、火口底にマグマは出現していないと推定される。以上より、2月の噴火後の浅間山の熱的活動は、噴火前と比較し拡大していないと推定された。この後、4月にかけて浅間山の火山活動レベルは低下し、現在にいたっている。

4. 浅間山の放熱率 (2000～2009年)

一連の観測結果から Sekioka らの方法⁴⁾により求めた浅間山の放熱率を図-6に示す。これより噴火に伴って放熱率の増加が認められることがわかる。

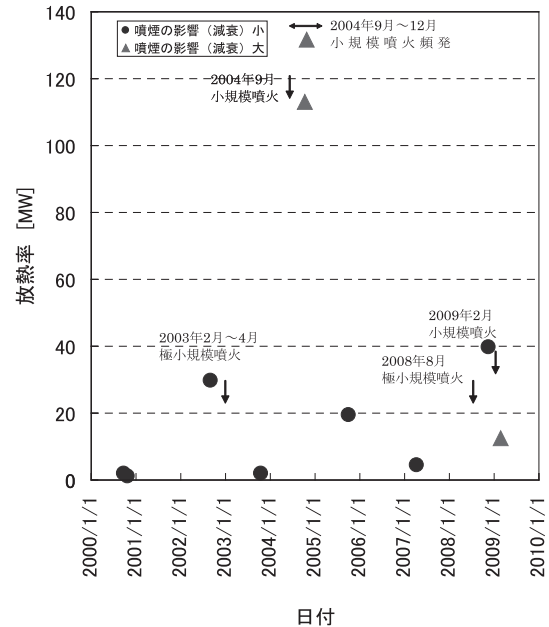


図-6 浅間山の放熱率の推移(2000年9月21日～2009年2月21日)。噴火に伴い、放熱率が大きくなる傾向が認められる。

5. おわりに

本報文で示した火山の熱的活動状況を推察できる観測情報は、衛星リモートセンシングでは取得できない航空機リモートセンシングならではの結果である。

防災科研では今後も火山観測用航空機搭載型リモートセンシング装置の技術開発とそれを活用した火山活動状況把握を実施し、火山の活動評価に資する有益な観測情報の取得のための研究開発を実施する予定である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 植原, 熊谷, 矢崎: 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, 487/493 (1991)
- 2) 實測, 鷗川, 藤田, 岡田, 宮坂, 赤池, 松岡: 航空機搭載型多波長走査計による有珠山2000年噴火の多次期観測, 火山, 47, 297/323 (2002)
- 3) Tetsuya Jitsufuchi: Airborne Radiative Transfer Spectral Scanner: A new airborne hyperspectral imager for hyperspectral volcano observations, AGU 2007 Fall Meeting, V11D-0812 (2007)
- 4) Sekioka, M. and Yuhara, K.: Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of the Ground Surface, J. G. R., 79 (14), 2053-2058, 1974

[筆者紹介]
實測 哲也 (じつふち てつや)
(独)防災科学技術研究所
火山防災研究部
主任研究員