

# 航空機搭載型光学スキャナーによる火山災害の観測

實 測 哲 也

## Observation of Volcanic Disaster Using Airborne Optical Scanner

Tetsuya JITSUFUCHI

Spectral image data that cover a spectral region with a large number of narrow, contiguous spectral bands is used for stand-off material identification. Such data can be used to retrieve the spectral signature of the Earth's surface. The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) has been developing airborne-imaging spectral systems for volcano observations. We developed our second-generation airborne hyperspectral scanner, the Airborne Radiative Transfer Spectral Scanner (ARTS), for hyperspectral volcano observations. ARTS is a push-broom imaging spectrometer covering wavelengths from 380 to 1100 nm (VNIR; 288 bands), 950 to 2450 nm (SWIR; 101 bands), and 8000 to 11500 nm (LWIR; 32 bands). We describe the ARTS system specifications and present some in-flight performance test and the volcano observation flight over an active volcano. We demonstrate how hyperspectral images can be used to detect geothermal activities correlated with eruptive activity.

**Key words:** airborne hyperspectral scanner, volcano, geothermal activity

火山では、地中の高温のマグマから熱エネルギーが供給され、地熱温度分布、噴煙、火山ガス、火山灰、溶岩流、火砕流等が生じる。これらは、火山の「表面現象」とよばれ、その観測により、火山の活動度や火山災害の状況把握が可能となる。ただし、火山活動が活発な場合は、火山に接近できないことが多い。そこで、火山から離れた場所から表面現象を計測する観測手法の開発が必要になる。

光学スキャナーによる(多波長)分光画像計測は、離れた場所から対象の形状や光物性を捉える有効な手法で、地球観測技術にも活用されている。われわれは、この技術を表面現象の観測に応用した火山観測用の航空機搭載型光学スキャナーの開発とその利活用を実施している。この装置は、上空から火山の表面現象を面的、同時に計測でき、噴火推移状況の把握のための有益な観測情報を提供する。

本稿では、まず、地表面の観測に用いられる航空機搭載型光学スキャナーの概要を述べる。次に、われわれの火山観測用の航空機搭載型光学スキャナー(1号機、2号機)の開発経緯にふれ、現行の2号機を中心にその特徴と構成を示す。また2号機の観測データに基づく装置性能評価と火

山観測への活用結果を紹介し、その有効性を示す。同時に当該技術の昨今の技術動向に関して概説する。

### 1. 航空機搭載型光学スキャナー

地表面の観測に用いられる航空機搭載型光学スキャナーは、航空機から地表面の形状(位置)情報と分光スペクトル(光物性)情報を同時に計測する分光画像計測装置である。図1に、一般的な2つの方式を示す。1つはWhisk-broom型とよばれる方式である(図1(a))。この方式は、スキャンミラーによって航空機の進行方向(along-track方向)と直交する方向(cross-track方向)にスリット像(瞬時視野:IFOV)を観測角(FOV)の範囲で走査することと航空機の進行によって、帯状の領域の情報を得る。スリット像のエリアからの光は分光器で分光され、検出素子(単素子orリニアアレイ)で計測される。もう1つはPush-broom型とよばれる方式である(図1(b))。この方式は、cross-track方向のFOVの範囲にあるスロット状のスリット像を航空機の進行によって走査し、帯状の領域の情報を得る。スリット像のエリアからの光は分光器で分光され、

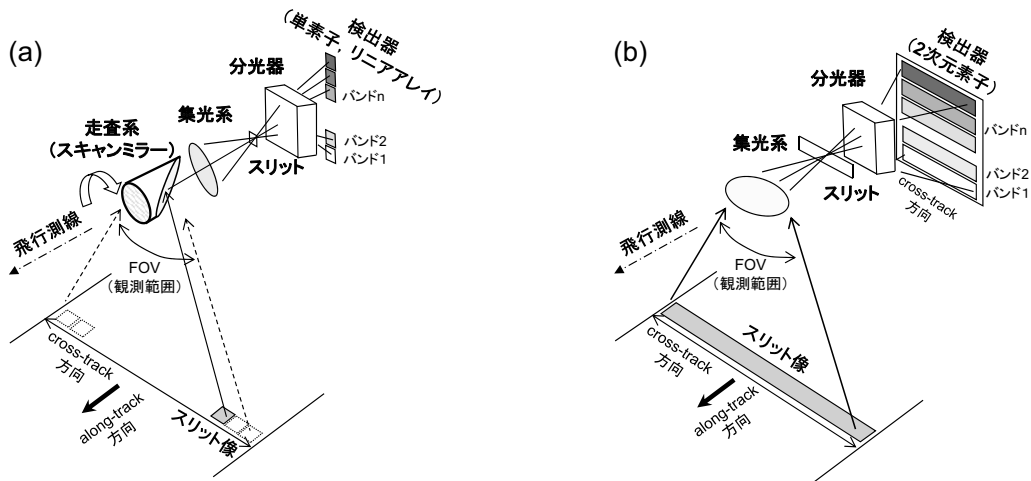


図1 航空機搭載型光学スキャナーの方式。(a) Whisk-broom型, (b) Push-broom型。

検出素子（二次元素子：FPA）で計測される。この方式では、地上のスリット像を cross-track 方向の空間的位置を崩さずに波長別の像として FPA に投影する。cross-track 方向の空間分解能は FPA の素子数が多いほど高い。地上の観測点からの光の FPA での積分時間は、Whisk-broom 型で数マイクロ秒、Push-broom 型で数ミリ秒まで設定できる。両方式とも分光性能の違いで、マルチスペクトルスキャナー（MSS）とハイパースペクトルスキャナー（HSS）に分けられる。MSS の観測バンド数は 10~30 程度で、各バンドは数百 nm 以上のバンド幅（FWHM）で構成される。HSS のバンド数は約 30 以上である。各バンドで波長域を連続的に分光し、その FWHM は 20 nm 程度より狭い。MSS や HSS の観測波長域は、可視~赤外域（太陽光の反射エネルギー計測では 400~2500 nm、地表の放射エネルギー計測では 400~14000 nm）である。

## 2. 火山観測用航空機搭載型スキャナーの開発経緯

### 2.1 火山観測用 MSS (1号機:VAM-90A)

日本では、1970年代、火山観測用の MSS の必要性が測地学審議会の火山噴火予知計画（現：地震及び火山噴火予知のための観測研究計画）に示され、1979年に火山観測用 MSS の開発が国立防災科学技術センター（現：防災科学技術研究所（防災科研））で始まった<sup>1-3)</sup>。

その中で、火山専用空中赤外装置（VAM-90A）が1号機として1990年に製作された<sup>4)</sup>。VAM-90Aは、Whisk-broom型（FOV：±30°）のMSSで、可視~近赤外域（0.51~0.59 μm, 0.61~0.69 μm, 0.80~1.10 μm, 1.55~1.75 μm, 2.08~2.35 μm, IFOV：3 mrad）、赤外域（3.5~4.20 μm, 4.30~5.50 μm, 8.00~11.00 μm, 11.00~13.00 μm, IFOV：1.5 mrad）の9バンドを観測する。VAM-90Aは、一般の

MSSでは観測できない常温からマグマの温度の地表面温度（-20~1200°C）を計測できる特徴を有する。VAM-90Aは、地熱分布に基づく短期的な噴火予知や降灰分布等の火山災害の状況把握に、2005年まで活用された。雲仙普賢岳（1991年）、有珠山、三宅島（2000年）の噴火では、数か月間にわたる連続観測を実施し、活動状況把握や災害推移把握のための情報を提供した<sup>5-7)</sup>。

### 2.2 地球観測用のMSSとHSS（1970~2000年）

VAM-90Aの開発の前後、地球観測用途の航空機搭載型光学スキャナーの開発が、アメリカ航空宇宙局ジェット推進研究所（NASA JPL）で継続して行われている。1980年代には、Whisk-broom型のHSSであるAVIRIS（Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer）が開発された<sup>8)</sup>。AVIRISは、IFOV 1.0 mrad, FOV±15°で、0.4~2.5 μmの波長域を224バンドで連続的に分光し、分光画像を得る。大気補正処理（光の放射伝達過程を推定し、地表と大気のスpekトルを分離する処理）を施すことで、実験室で計測した対象物のspekトルとAVIRISの観測spekトルの直接的比較（spekトル波形による物質同定）が可能で、HSSの有用性を実証した。また赤外域のWhisk-broom型のMSSとして、TIMS（thermal infrared multispectral scanner）が開発された<sup>9)</sup>。TIMSは、IFOV 2.5 mrad, FOV±38.3°で、8.2~12.2 μmの波長域を異なる6バンドで計測し、SiO<sub>2</sub>の含量推定やSO<sub>2</sub>ガスの濃度マッピング技術を実証した。

1990年代以降は、さらに高空間分解能、高波長分解能化が進み、可視~近赤外域を可視域（20バンド）・近赤外域（72バンド）のHSSで、赤外域を10バンドのMSSで観測するWhisk-broom型のセンサーMIVIS（multispectral infrared and visible imaging spectrometer）がDaedalus社

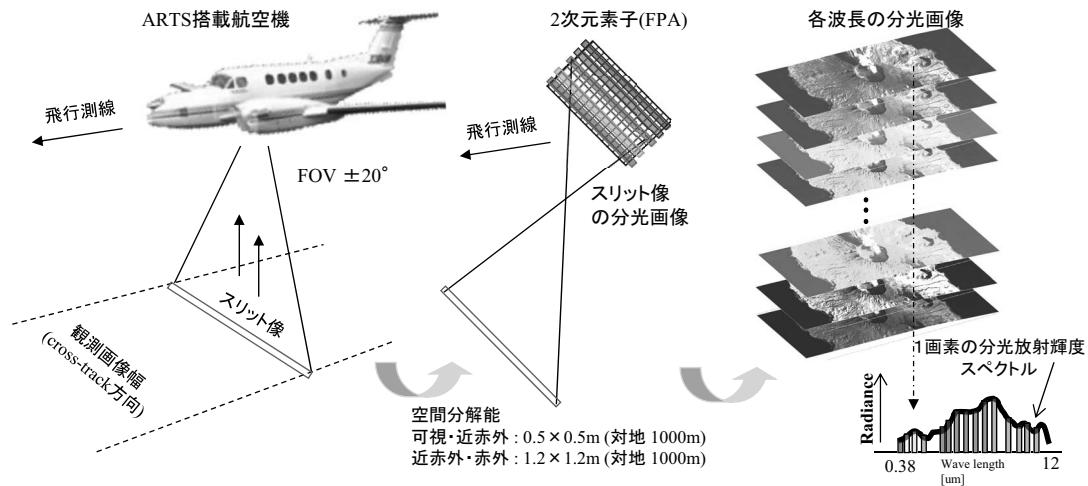


図2 ARTS のデータ取得動作と取得データの概要。

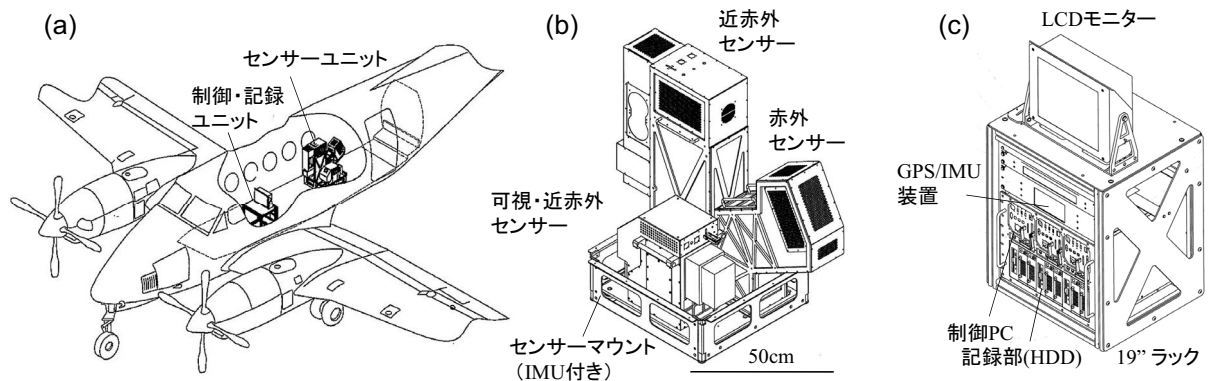


図3 ARTS の構成。(a) 機内レイアウト、(b) センサーユニット、(c) 制御・記録ユニット。

で開発された<sup>10)</sup>。また、Integrated Spectronics社で可視～近赤外域(126バンド)のWhisk-broom型HSSのHyMap(Hyperspectral Mapper)が開発された<sup>11)</sup>。

さらに、二次元素子(FPA)を用いたPush-broom方式のHSSが、CCD型のFPAが発展した可視・近赤外域で開発されるようになった。代表的なものとして、Itres社のCASI(可視・近赤外域:288バンド)がある<sup>12)</sup>。また、特殊なFPA(BIB[blocked-impurity-band]素子:128×128アレイ)を2枚使用した、中間赤外～赤外域を128バンドずつに分光するHSSであるSEBASS(spatially enhanced broadband array spectrograph system)がAerospace社で開発された<sup>13)</sup>。

### 3. 火山観測用HSS(2号機:ARTS)

上述の技術動向の中、2000年以降、VAM-90Aの後継機開発が検討された。われわれは、可視～赤外域の空間分解能とスペクトル分解能の向上を志向し、HSS型である2号機を2006年に完成させた。2号機の名称は、航空機搭載型放射伝達スペクトルスカナー(Airborne Radiative Transfer

Spectral Scanner: ARTS)である<sup>14)</sup>。ARTSは、火山の表面現象を岩石等の化学的組成に基づき解析することや、狭帯域な波長で吸収特性を示す火山性ガスを濃度分布画像としてとらえる等、VAM-90Aの火山活動度把握手法を質的に向上させた観測を実現する設計となっている。

#### 3.1 ARTSの概要

ARTSは、Push-broom型のHSSで、高度600～6500mより可視～赤外域を最大421バンドで観測する。瞬時視野としてのスリット像は、cross-track方向は±20°、along-track方向は0.49 mrad(可視・近赤外)、1.2 mrad(近赤外、赤外)である。ARTSの動作とデータの概要を図2に示す。

#### 3.2 ARTSの構成

ARTSは、センサーユニットと制御・記録ユニットで構成される。図3(a)に航空機内のレイアウトを示す。

ARTSのセンサーユニットは、波長帯別に、可視・近赤外センサーユニット、近赤外センサーユニット、赤外センサーユニットの3つのユニットからなる(図3(b))。可視・近赤外センサーはFPAに電子冷却型S<sub>i</sub>-CCDを採用し、波長範囲380～1050nmを最大288バンドで計測する



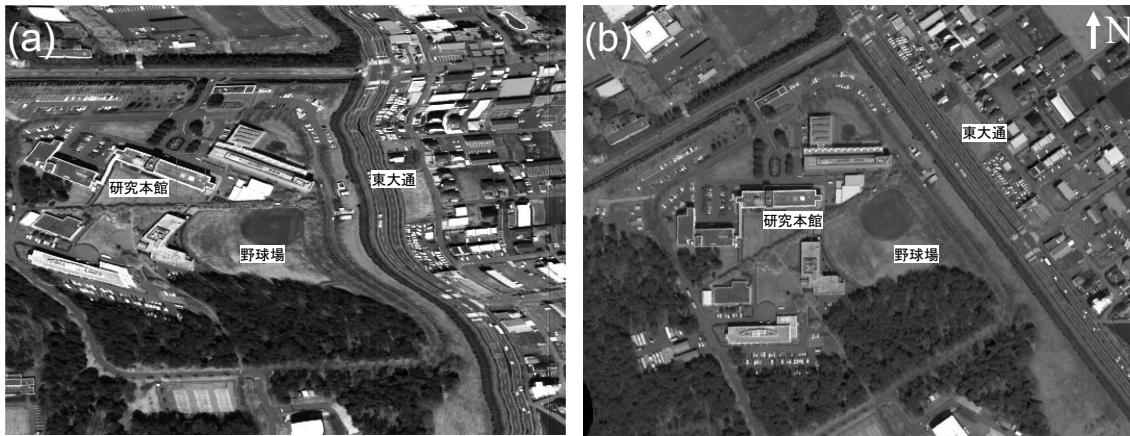


図4 自動幾何補正処理. (a) 処理前の生データ, (b) 処理後のオルソ幾何補正データ.

(バンド数は1~288可変, バンド幅2.3~670 nm可変). FOVは $\pm 20^\circ$ , cross-track方向のピクセル数は1500で, along-track方向のIFOVは0.49 mradである. 近赤外センサーはFPAに電子冷却型MCT (mercury cadmium telluride)を採用し, 波長範囲950~2450 nmを101バンドで分光する(バンド幅15 nm). 赤外センサーは, FPAにスターリング冷凍機冷却型MCTを採用し, 波長範囲8000~11500 nmを32バンドで分光する(バンド幅110 nm). 近赤外センサーおよび赤外センサーのFOVは $\pm 20^\circ$ , cross-track方向のピクセル数は600で, along-track方向のIFOVは1.2 mradである. 各ユニットで可能な昼間の温度計測範囲は, 可視・近赤外センサーが700~1200°C, 近赤外センサーが300~1200°C, 赤外センサーが-20~1200°Cである.

ARTSの制御・記録ユニットは, 制御PC, 記録部HDD (74GB  $\times$  6), 空中直接定位装置 (GPS/IMU装置) およびLCDモニターからなる(図3(c)). GPS/IMU装置は, 2000年以降活用され始めた装置で, センサーの位置(X, Y, Z)を10 Hzで, 動揺(ロール, ピッチ, ヨー)を200 Hzで記録する. 観測終了後, GPS/IMU装置のデータと地上の標高データ(DEM)を用い, 航空機の動揺による空間的形状のひずみを有する生画像データ(スリット像の集合)からオルソ幾何補正(地図投影可能な補正)データを生成できる. この幾何形状の復元は面積の計測を可能とし, 表面現象のエネルギー等の定量的推定に重要な貢献をする.

#### 4. ARTSの性能検証実験観測

ARTSの性能検証のため, 2007年4月に, 防災科研(茨城県つくば市)上空を対地高度1000 mで飛行し, 敷地内の大きさと光物性が既知のターゲットを観測する実験観測

を実施した. この観測では, 可視・近赤外のバンド設定は36バンド(380~1100 nmを36等分割, バンド幅19 nm)とした(近赤外は101バンド, 赤外は32バンド).

##### 4.1 形状, 位置情報の検証

可視・近赤外センサーの生画像データを図4(a)に, 幾何補正画像を図4(b)に示す. 航空機の動揺のために歪んだ生画像データが, 幾何補正機能によりオルソ補正され, 地物(地上にあるすべての物)の形状が復元されている. 他の2つのセンサーも同様の結果であり, この位置精度は2画素以内である<sup>14)</sup>.

##### 4.2 スペクトル情報の検証

防災科研の研究本館屋上に設置した, 3.6  $\times$  3.6 mの反射率既知の白色PE不織布シート(Tyvek®/タイベック®)と青色PEシートをターゲットとし, ARTSの観測画像から得たスペクトルと放射伝達コード(MADTRAN4.0: 米空軍が開発したコンピューターソフトウェア. 大気中での波長0.2~100  $\mu$ mの電磁波の伝搬をシミュレートできる)にシートの反射率を入れシミュレートしたARTSの観測スペクトルを, 図5(a)~(c)に示す. 図5(a)の可視・近赤外スペクトルでは青色(470 nm)のスペクトル形状やH<sub>2</sub>Oの吸収スペクトルがわかる. 図5(b)の近赤外スペクトルではCH<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>Oの吸収スペクトルがわかる. 図5(c)の赤外スペクトルでは白色PE不織布シートに反射した上空のオゾンのスペクトル形状がわかる. これらのARTSの実測値とシミュレーションとの誤差は, 可視・近赤外センサー, 近赤外センサーでは, 誤差 $\pm 5\%$ 以内, 赤外センサーでは誤差 $\pm 2\%$ 以内である(気体の強い吸収がある波長領域を除く). また, 水面の温度観測で検証した赤外センサーの温度推定精度は,  $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内を達成している<sup>14)</sup>. これらより, ARTSはHSSとして火山観測に活用できると考えられる.

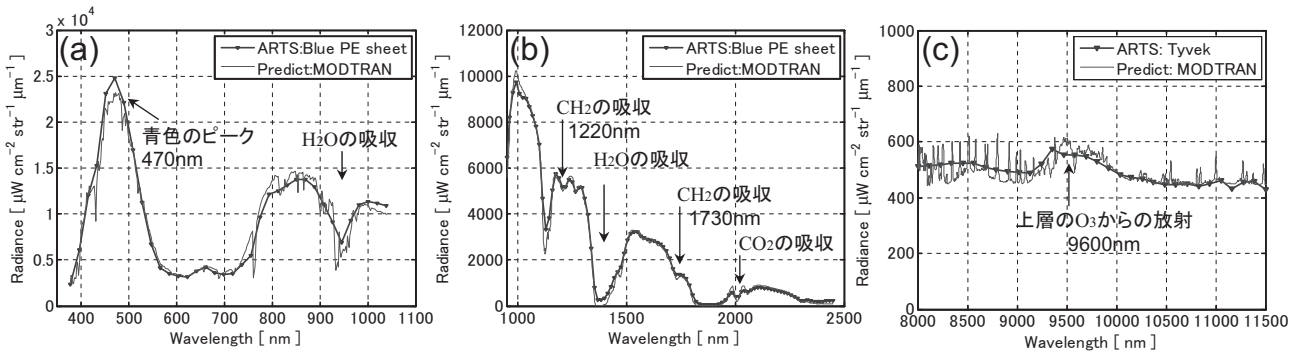


図5 ARTSの分光放射スペクトルデータ。(a)可視・近赤外：青色PEシート，(b)近赤外：青色PEシート，(c)赤外：白色PE不織布シート。

### 5. ARTSによる火山実験観測

ARTSを用い、2007年から2010年に活動が比較的活発な7火山(浅間山、桜島、阿蘇、九重、霧島山、伊豆大島、三宅島)について、合計59シーンの実験観測を行った。これらの観測データより、表面温度分布や放熱率の定量、複数観測波長による大きさがIFOV以下の高温領域の温度推定、火口周辺の火山性ガス(SO<sub>2</sub>ガス)の濃度マッピング技術等を開発した。同時に、気象庁等の関係機関に観測情報を提供し、ARTSが火山の表面現象把握に活用できることを実証した。このうち、桜島の観測例を紹介する<sup>15)</sup>。

鹿児島県の桜島では、2006年に58年ぶりに昭和火口が噴火した。2009年以降、噴火活動が非常に活発で、2012年の爆発的噴火回数は1108回に及んでいる。われわれは、2008年に2回、2010年に1回の観測を実施した。図6に2008年4月に観測した桜島の南岳A火口と昭和火口を示す(地形図を重畳表示)。図6(a)は可視・近赤外の3波長を用い、火口からの放射物である火砕物分布が明るく強調表示されるように処理した結果である。火砕物は昭和火口から2kmほど流下していることがわかる。図6(b)は10260nmの分光放射輝度から、大気補正処理をして地表面温度を推定し、幾何補正処理を行い作成した温度分布画像である。火口内の高温部位の分布がわかる。他の波長のデータからは火口内の最高温度の推定も可能で、1001nmのデータより南岳A火口で854°C、1621nmのデータより昭和火口で435°Cが求められた。

この観測では、可視・近赤外センサーと赤外センサーの分光放射輝度情報と噴煙高度および放射伝達シミュレーションにより、SO<sub>2</sub>の濃度分布を推定するアルゴリズムも開発された<sup>15)</sup>。同手法により求めたSO<sub>2</sub>ガスの濃度分布図を図6(c)に示す。また図7に、南岳A火口の254°Cの地表からのSO<sub>2</sub>ガスの影響を受けた赤外分光放射輝度の実測データと、そのシミュレーションデータを示す。図7に示すように、SO<sub>2</sub>ガスは8650nm付近に吸収特性をもつ。

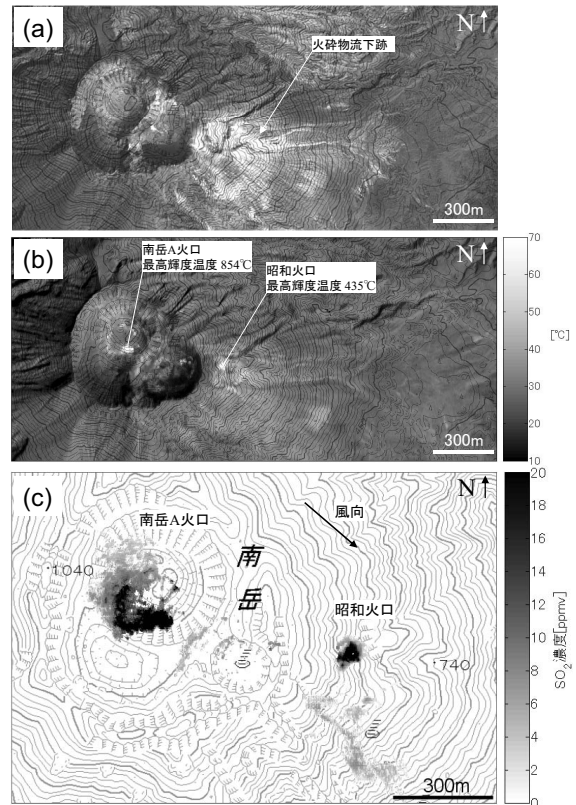


図6 桜島の観測例(地形図を重畳表示)。(a)可視画像による火砕物の強調、(b)地表面輝度温度(10260nmより)、(c)赤外データから求めたSO<sub>2</sub>ガス濃度分布画像。

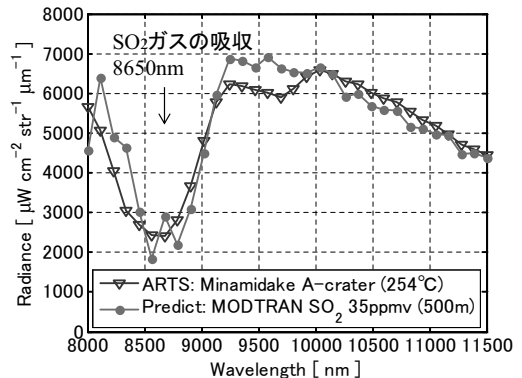


図7 桜島南岳A火口内のSO<sub>2</sub>ガス吸収スペクトル。



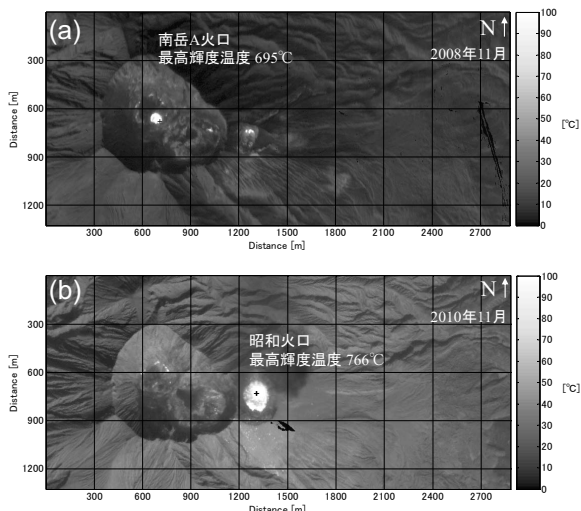


図8 桜島の地表面輝度温度 (10260 nm より) の変遷。  
(a) 2008年11月, (b) 2010年11月。

図6 (c) の SO<sub>2</sub> ガスの濃度分布図はこの特性を利用し求めたもので、背景放射と SO<sub>2</sub> ガスの温度コントラストが約 5°C 以上ある領域に適応できる手法である。

図8に、2008年11月および2010年11月に観測した、桜島の南岳A火口と昭和火口の地表面温度分布 (10260 nm の分光放射輝度から計算) を示す。他の波長のデータからは、火口内の最高温度が南岳A火口で695°C (1001 nm より) (2008年11月)、昭和火口で766°C (1001 nm より) (2010年11月) と観測され、昭和火口では地表近くのマグマの存在が推定された。この2年の間で、桜島の噴火活動は南岳A火口から昭和火口へと推移したが、火口内の地表面温度も、南岳A火口での地熱域の衰退と昭和火口での地熱域の拡大として、その様子が計測されている。図9に南岳A火口と昭和火口の2008~2010年の放熱率と噴火回数のグラフを示す。熱エネルギーの指標となる放熱率と噴火回数の変化に正の相関が認められる<sup>15)</sup>。以上より、ARTSのさまざまな観測情報が火山活動評価に活用できることがわかる。

防災科研では、2号機となるHSS型の火山観測用航空機搭載型スペクトルスキャナーであるARTSを2006年に完成させ、2007~2010年にはARTSによる火山観測研究を行い、ARTSの有用性を実証した。

現時点で海外の装置開発も含め概観すると、可視・近赤外領域は、Push-broom型のHSS型の分光画像センサーが、高性能 (IFOV: 1 mrad, FWHM: 10 nm 程度) かつ

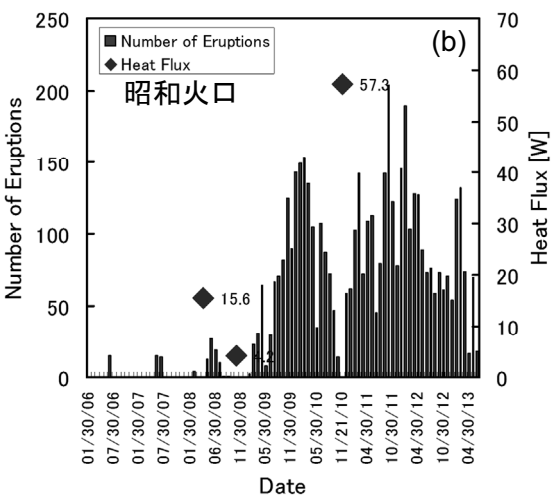
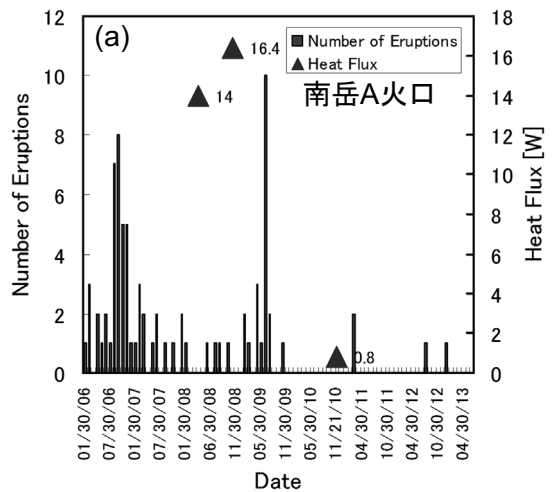


図9 桜島の放熱率と爆発回数の変遷 (2008~2010年)。  
(a) 南岳A火口, (b) 昭和火口。

実用的なものとなりつつある<sup>\*1,\*2</sup>。しかし中間赤外~赤外域 (3~12 μm) の装置は発展途上であり、多くの開発課題がある。最近、NASA JPLで、赤外領域のHSS (Push-broom型) であるHyTES (hyperspectral thermal emission spectrometer) が開発され、2012年に初観測飛行を行った<sup>16)</sup>。HyTESは、IFOV 1.44 mrad, FOV ±24.15°で、7.5~12 μmの波長域を256バンドで計測でき、従来のこの波長域のデータと質的に異なる情報を提供すると期待されている<sup>\*3</sup>。ただし、HyTESはスターリング冷凍機冷却の分光ユニットとFPA (quantum well infrared photodetector (QWIP); 1024×512) 等、特別な部品を必要とする。

高性能な赤外域のHSSの実現は魅力的であるが、われわれの火山観測用途の装置には性能とコストを同時に考えた技術開発が必要とされる。このため、現時点 (2013年)

\*1 <http://www.itres.com/>

\*2 <http://www.specim.fi/>

\*3 <http://airbornescience.jpl.nasa.gov/instruments/hytes>

でわれわれは、観測コストの低減や装置の機動性を高める赤外域の観測装置の開発を進めている。しかし、革新的な赤外 FPA 素子開発（超格子型赤外 FPA 等）が進めば、小型、高性能、低コスト等、理想的な装置の実現も可能と考えている。今後の光学技術の発展に大いに期待するところである。

## 文 献

- 1) 植原茂次, 熊谷貞治, 高橋 博, 高橋末雄, 幾志新吉, 矢崎忍, 田中 厚, 北村慎一: “火山専用空中赤外映像装置の開発研究 (第 1 報)”, 国立防災科学技術センター研究速報, **62** (1984) 1-106.
- 2) 植原茂次, 熊谷貞治, 高橋 博, 高橋末雄, 幾志新吉, 矢崎忍, 田中 厚, 北村慎一: “火山専用空中赤外映像装置の開発研究 (第 2 報)”, 国立防災科学技術センター研究速報, **63** (1984) 1-40.
- 3) 植原茂次, 熊谷貞治, 高橋 博, 高橋末雄, 幾志新吉, 矢崎忍, 田中 厚, 北村慎一: “火山専用空中赤外映像装置の開発研究 (第 3 報)”, 国立防災科学技術センター研究速報, **70** (1985) 1-48.
- 4) 岡田義光 (編): 自然災害の辞典 (朝倉書店, 2007) pp 588-592.
- 5) 植原茂次, 熊谷貞治, 矢崎 忍: “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** (1991) 487-493.
- 6) 實測哲也, 鶴川元雄, 藤田英輔, 岡田義光, 宮坂 聡, 赤池勝明, 松岡滋治: “航空機搭載型多波長走査計による有珠山 2000 年噴火の多時期観測”, 火山, **47** (2002) 297-323.
- 7) 實測哲也: “航空機搭載 MSS (VAM-90A) で計測した三宅島の SO<sub>2</sub> ガス濃度分布”, 日本赤外線学会誌, **13** (2003) 12-13.
- 8) R. O. Green, M. L. Eastwood, C. M. Sarture, T. G. Chrien, M. Aronsson, B. J. Chippendale, J. A. Faust, B. E. Pavri, C. J. Chovit, M. Solis, M. R. Olah and O. Williams: “Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS),” *Remote Sens. Environ.*, **65** (1998) 227-248.
- 9) A. B. Kahle and A. F. H. Goetz: “Mineralogic information from a new airborne thermal infrared multispectral scanner,” *Science*, **222** (1983) 24-27.
- 10) M. J. Abrams, R. Bianchi and M. F. Buongiorno: “Next-generation spectrometer aids study of Mediterranean,” *Trans., Am. Geophys. Union*, **78** (31) (1997) 317-322.
- 11) T. Cocks, R. Janssen, A. Stewart, I. Wilson and T. Shields: “The HyMap airborne hyperspectral sensor: The system, calibration and performance,” *Proc. 1st EARS&L Workshop on Imaging Spectroscopy* (1998) pp. 37-43.
- 12) S. K. Babey and C. D. Anger: “Compact airborne spectrographic imager (CASI): A progress review,” *Proc. SPIE*, **1937** (1993) 152-163.
- 13) J. Hackwell, D. W. Warren, R. P. Bongiovi, S. J. Hansel, T. L. Hayhurst, D. J. Mabry, M. G. Sivjee and J. W. Skinner: “LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing,” *Proc. SPIE*, **2819** (1996) 102-107.
- 14) T. Jitsufuchi: “Development of a new airborne hyperspectral imager for volcano observations,” *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (2010) pp. 657-660.
- 15) T. Jitsufuchi: “Thermal infrared surveys for mapping surface temperature and sulfur dioxide plumes at SAKURAJIMA VOLCANO (MINAMIDAKE A-CRATER, SHOWA CRATER) using the airborne hyperspectral scanner,” *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (2013) pp. 715-718.
- 16) W. R. Johnson, S. J. Hook, P. Mouroulis, D. W. Wilson, S. D. Gunapala, V. Realmuto, A. Lamborn, C. Paine, J. M. Mumolo and B. T. Eng: “HyTES: Thermal imaging spectrometer development,” *Proc. of IEEE International Aerospace Conference* (2011) pp.1-8.

(2013 年 11 月 11 日受理)