

## 霧島新燃岳 2011 年噴煙の映像観測と移流解析

飯野直子\*1・金柿主税\*2・木下紀正\*3

### Ground Observation and the Advection Analysis of the 2011 Shinmoe-dake Eruption Clouds of Kirishima Volcano

Naoko INO \*1, Chikara KANAGAKI \*2 and Kisei KINOSHITA \*3

(Received October 3, 2011)

Shinmoe-dake, Kirishima volcano in Kyushu, Japan has started the magmatic eruption since the end of January 2011. Massive ejections of ash cloud during 26 January to 4 February were recorded by visible and near-infrared cameras located at 38-58 km away from the volcano. These large ash clouds were observed by the NOAA-APT MCIR images. The advection analysis of these ash clouds were performed by using the ground observation images, MTSAT images, and the NOAA HYSPLIT model. These results and the visible images taken with one-hour interval by a digital camera, installed at 9 km SSW from the volcano since 29 January, are displayed at Kumamoto University website.

**Key words :** satellite image, brightness temperature difference image, long-range transport, forward trajectory

#### 1. はじめに

2011年1月19日に霧島新燃岳(標高1421m)で小規模な噴火が発生した。同月26日14時49分からマグマ噴火が始まり,2月上旬まで頻りに爆発的な噴火が発生して風下の地域に多量の降灰をもたらした。その後,噴火の規模や頻度は低下したものの,2011年9月下旬現在も噴火警戒レベル3(入山規制)が継続している[1]。

著者らは,鹿児島県の桜島や離島火山,熊本県の阿蘇山から放出される火山噴煙や,各地の雲や大気現象を対象として連続自動映像観測網を展開してきた。新燃岳火山活動の活発化を受け,噴煙活動と火山活動の関係を調べたり,放出された噴煙をトレーサとみなして移流拡散について調べたりするための基礎資料を得る目的で2011年1月29日に霧島市田口に全天候型デジタルカメラを新規設置し,映像観測を開始した。得られた画像や解析結果などについては,研究用の資料提供及び学校教育用の教材・素材提供を目的としてホームページ[2]を立ち上げて公開している。ここでは,まず地上映像観測で捉えた2011年新燃岳噴煙活動を概括し,次に1月下旬の噴火に伴う大規模灰煙の移流拡散の解析結果を報告する。

#### 2. 使用データと解析方法

##### 2. 1 地上映像観測

地上映像観測カメラの設置場所と新燃岳,白髪岳の位置,大気環境測定が行われている都城高専(MIY-nct)の位置を図1に示す。図中の地点名は,Ag(あさぎりカメラ,可視):熊本県球磨郡あさぎり町岡原北(新燃岳の北約38km),B(鴨池カメラ,可視・近赤外):鹿児島市鴨池港付近(新燃岳の南西約50km),K(錦江台カメラ,可視・近赤外):鹿児島市錦江台(新燃岳の南西約58km),Tg(霧島カメラ,可視):霧島市田口(新燃岳の南南西約9km)を表わす。地点Tgには全天候型デジタルカメラ(Brinno GardenWachCam)を屋外に設置して1時間毎に撮影している。記録ファイルは動画のAVI形式であるため,データ回収後に静止画(jpeg画像)に変換する。地点Agと地点KではWindows搭載のパソコンに130万画素CMOSセンサ搭載のUSBカメラを接続し,データ回収の便宜上,外付けハードディスクに記録している。地点Kでは,30万画素USBカメラにIR-76フィルタを装着して近赤外画像も撮影している。近赤外撮影の利点は,粒径の小さなエアロゾルによる散乱光や海もやなどの影

\*1 熊本大学教育学部

\*2 熊本養護学校/鹿児島大学教育学部附属教育実践総合センター

\*3 鹿児島大学教育学部附属教育実践総合センター

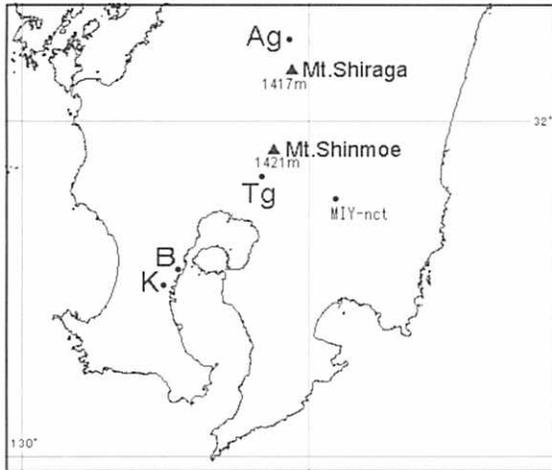


図1 地上映像観測地点と霧島新燃岳および白髪岳、都城高専（大気環境測定局）の位置。

響を軽減できること、溶岩流のような高温を捉えられること、植生や土地の起伏がわかりやすいことなどである。撮影及び画像保存は、定点観測用ソフトウェア ListCam [3]を使用して行っている。日中 10 秒毎に撮影し、VGA サイズ(640×480 pixel)の jpeg 画像を保存している。パソコンと USB カメラを用いた可視・近赤外連続撮影についての詳細は文献[4]で述べた。地点 B では、IR-84 フィルタを装着したデジタルビデオカメラのスムーズインターバル撮影機能を利用した連続撮影と著者の一人 (K.K) によりデジタルカメラを用いた可視・近赤外の随時撮影を行っている。

## 2. 2 NOAA-APT 受信

熊本市において、極軌道気象衛星 NOAA からの FAX 信号のアナログデータ伝送である Automatic Picture Transmission (APT) 受信を行っている。受信画像の空間分解能は 4 km 程度であるが、市販の機材を使用して安価で簡便に受信できることが利点である。システムは自作アンテナ、Hamtronics R139 Weather FAX Receiver、Windows 搭載パソコンからなる。アンテナと受信機を図2に示す。NOAA-APT 信号のデコードはソフトウェア WXtoImg [5]の無料版を使用している。

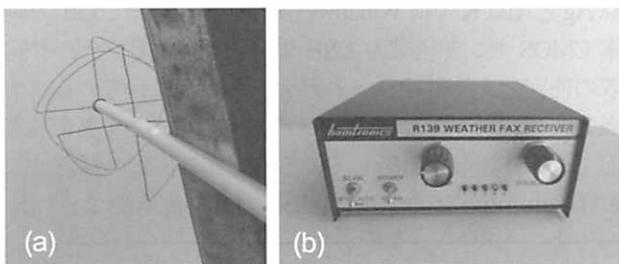


図2 NOAA-APT 受信システム。

(a)無指向性(QFH)アンテナ (b)低軌道気象衛星用受信機

## 2. 3 MTSAT 熱赤外差画像

運輸多目的衛星 MTSAT は静止気象衛星 GMS の後継機である。東経 140° の赤道 35,800 km の静止軌道上から 30 分毎(全球観測は毎時)の観測を行っている。固定視野で一定時間毎に広範囲を観測しているため、広域にわたる噴煙の移流・拡散状況を調べるのに適している。

2011 年 1 月 26 日から 29 日までの MTSAT データを東京大学生産技術研究所の WebGMS [6]から取得し、0 時から 3 時間毎の 11  $\mu\text{m}$  と 12  $\mu\text{m}$  の熱赤外差画像 (AVI 画像) を作成して噴煙を可視化した。AVI 画像は水蒸気・氷晶と石英との 11  $\mu\text{m}$  と 12  $\mu\text{m}$  における相反する吸収特性を利用した鉍物質エアロゾル検出手法であり、火山灰を含む噴煙 (灰煙) や黄砂の検出に非常に有効である。熱赤外画像を用いた検出手法であるため、夜間の噴煙検出も可能であり、火山活動や噴煙移流の監視やモニターに有用である。ここでは、輝度温度差  $-2.5 \sim 1.5$  °C の範囲で 8 ビットの白黒画像を作成した。噴煙領域は AVI 値が高く、白く表示される。MTSAT 解析領域を図3に示す。

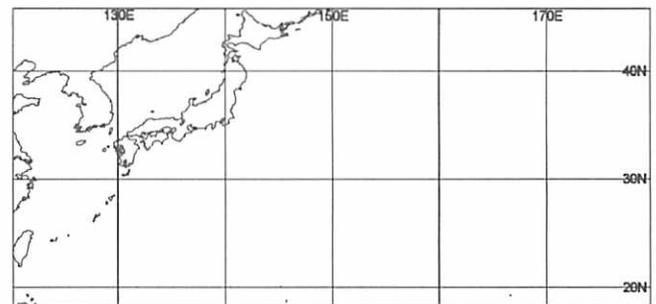


図3 MTSAT 解析領域。

## 2. 4 流跡線解析

2011 年 1 月 26 日と 27 日の噴火に伴って多量に放出された灰煙の移流を詳しく調べるために、米国海洋大気局 (NOAA) の HYSPLIT [7]を使用して前方流跡線を計算した。前方流跡線を計算することによって、放出源から放出された粒子がどこへどのように流れていくのかを時間を追って追跡できる。計算結果は水平方向と鉛直方向のトラジェクトリーが示される。噴煙の放出時刻や高度、計算時間は気象庁火山活動解説資料[1]や地上映像観測画像、MTSAT-AVI 画像から総合的に判断して設定した。

## 2. 5 浮遊粒子状物質濃度

浮遊粒子状物質 (SPM) とは浮遊粉塵のうち、10  $\mu\text{m}$  以下の粒子状物質である。SPM の環境基準は、1 時間値の 1 日平均値が  $0.10 \text{ mg/m}^3$  以下であり、かつ、1 時間値が  $0.2 \text{ mg/m}^3$  以下であることである。ここでは、新燃岳の南東に位置する都城高専局 (図1の MIY-nct) における 2011 年 1 月 26 日から 28 日までの 1 時間値の経時変化を環境省の大気汚染物質広域監視システム[8]より調べた。

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 噴煙活動の経過

気象庁火山活動解説資料[1]をもとに、著者らの地上映像観測結果を示しながら、最近の新燃岳噴煙活動の経過をまとめる。

2011 年 1 月の噴火以前の新燃岳火山活動として、2008 年 8 月 22 日 16 時 34 分の水蒸気噴火が記録されている。その後、2010 年まで噴火は発生しなかったが、2009 年中も白色の噴煙・噴気が観測されており、新燃岳の南西 約 50 km の鹿児島市内の観測地点 B からの近赤外撮影でときどき捉えられていた。2010 年は 3, 5, 6, 7 月に小噴火が観測され、そのあと徐々に火山活動のやや高まった状態へと推移していったことが記録されている。2011 年 1 月 2 日と 13 日に地点 B から撮影された噴煙を図 4 に示す。

2011 年 1 月 19 日 1 時 27 分にマグマ水蒸気爆発と思われる小規模な噴火が発生し、新燃岳から南東の宮崎県都城市から日南市まで降灰が確認されている。22 日と 25 日には地点 B からの近赤外撮影により連続噴煙が捉えられた。22 日の連続噴煙を図 5 に示す。その後、26 日の 14 時 49 分からマグマ噴火が始まり、18 時 50 分には灰白色の噴煙が火口縁上 2000 m まで上がって南東方向に流れたこと、27 日 15 時 41 分には 1959 年以来 52 年ぶりに爆発的噴火が発生し、その噴火に伴う灰白色の多量の噴煙が火口縁上 2500 m まで上がって雲に入ったこと。同日 17 時 35 分には火口縁上 3000 m まで噴煙が上がっていたことが記録されている。

1 月 26 日と 27 日の噴火や爆発的噴火に伴う噴煙活動は、地点 B からの近赤外撮影により非常に鮮明に捉えられた。新燃岳から約 38 km 北に位置するあさぎりカメラ (Ag), 約 58 km 南西に位置する錦江台カメラ (K) の可視画像にも記録されていた。27 日の噴煙映像を図 6 に示す。地点 Ag からの画像 (図 6 (a)) に見られる山は標高 1417m の白髪岳であり、その南に位置する新燃岳の山体は映っていないが、新燃岳噴煙の上部が捉えられており、画面左の東側へ噴煙が流れていたことがわかる。地点 K からの可視画像 (図 6 (b)) では噴煙の輪郭が不鮮明であるが、動画にすると噴煙の挙動がよくわかった。なお、図中の黒矢印が新燃岳噴煙であり、白矢印は桜島昭和火口噴煙である。地点 B からの画像 (図 6 (c)) は近赤外画像である。地点 K からの可視画像と比較して、雲や散乱光の影響が少なく、コントラストが十分であるため、噴煙の輪郭や表面の様子がよくわかる。画面右の南東方向に多量の灰煙が流れていたことがわかる。また、降灰によって噴煙の移流高度よりも下層では大気混濁度が高くなっていたことがわかる。灰煙が連続的に放出されていた期間中、新燃岳から風下方向に位置していた都城高専局における浮遊粒子状物質 (SPM) 濃度の 26 日から 28 日まで

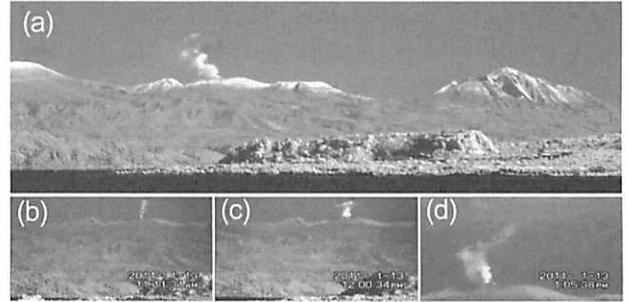


図 4 地点 B からの近赤外撮影による 2011 年 1 月新燃岳噴煙。(a) 2 日 10:18, 13 日(b) 11:11, (c) 12:00, (d) 13 : 05



図 5 地点 B からの近赤外撮影による 2011 年 1 月 22 日 10:55 の新燃岳連続噴煙。

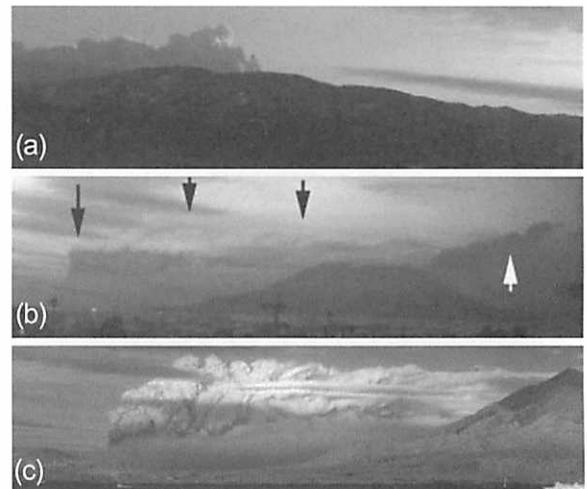


図 6 2011 年 1 月 27 日の新燃岳噴煙。

(a)地点 Ag 17 : 33 可視画像 (b) 地点 K 17:31 可視画像 (c) 地点 B 17:27 近赤外画像。(a),(b)の原画はカラー画像。

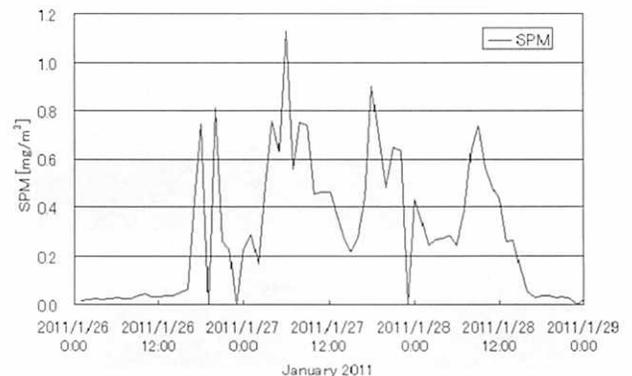


図 7 2011 年 1 月 26 日から 28 日までの都城高専局における SPM 濃度の経時変化。

の時間変化を図7に示す。26日15時41分のマグマ噴火後、同日17時のSPM1時間値(16時から17時までの値)から環境基準を超えた $0.425\text{mg}/\text{m}^3$ が記録されていた。マグマ噴火に伴う降灰によって地表面付近がSPM高濃度状態になったと考えられる。この後、28日14時まで環境基準を超える高濃度状態がほぼ継続していた。このことは、この期間中はほぼ連続的に灰煙が放出されていて、概ね東側に流れていたことや気象庁の降灰調査状況図に示される降灰分布と整合的である。また、26日と27日の大規模噴煙は、気象衛星NOAA-APTのMap Colour Infra Redray (MCIR)画像でも捉えられていた(図8)。図8(d)に示される扇状に広がった噴煙形態は、気象庁の調査による新燃岳の南東～南方向の広い範囲にわたる降灰分布図とよく対応している。

その後、爆発的噴火は1月30日を除いて2月3日まで連日発生し、灰煙や白色噴煙が東側へほぼ連続的に流れていた様子が地点B, K, Tgから撮影された。地点Bからの可視と近赤外撮影画像やスムーズインターバル撮影の動画はホームページ[9]に、その他の観測地点からの静

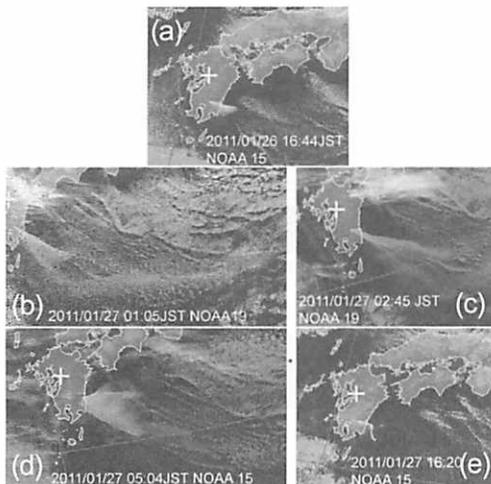


図8 2011年1月のNOAA-APT MCIR画像。

(a) 26日16:44, 27日(b)01:05, (c)02:45, (d)05:04, (e)16:20

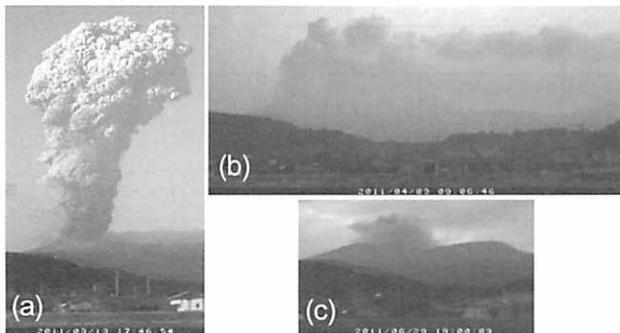


図9 地点Tgからの2011年新燃岳噴煙可視画像(原画はカラー画像)。(a)3月13日17:46 (b)4月3日09:06 (c)6月29日19:00

止画や動画、衛星画像はホームページ[2]において公開している。また、1月29日から観測を開始した霧島カメラ(Tg)の可視画像も全て掲載している。これらの霧島カメラの可視画像から2月6日以降は次第に白色噴煙が多く見られるようになったことや噴煙が見られる頻度や噴煙高度が低下していることがわかった。霧島カメラは日中1時間毎の撮影であるが、画像に観られる噴煙活動の推移は、2011年1月以降の気象庁の霧島山(新燃岳)の火山活動解説資料[10](以後、解説資料と記す)の活動状況と整合的である。噴煙活動が徐々に低下し始めた2月中旬以降に、地点Tgから撮影された日中の噴火に伴う顕著な噴煙の可視画像を図9に示す。2011年3月13日17時45分の噴火後に灰白色の噴煙がほぼ垂直に上がった様子が17時46分の可視画像に捉えられていた(図9(a))。このときの噴煙は火口縁上4000mまで上がり、南東に流れたことが解説資料に記録されている。4月3日は08時41分の噴火の約20分後の様子が捉えられていた(図9(b))。灰白色の連続噴煙が火口縁上3000m付近を東へ流れていたことがわかる。解説資料によると、6月29日10時27分に小規模な噴火が発生し、7月1日7時21分まで継続していた。10時27分の噴火に伴う噴煙は、11時00分に撮影された可視画像では雲と混ざっていて多少判別しにくい、19時00分に撮影された図9(c)と同様に北側へ向う様子が捉えられていた。気象庁によるこの日の噴火に伴う降灰の調査により、新燃岳から約50km北に位置する五木村まで降灰が確認された。

この他に、解説資料に記録されない小規模な噴火に伴う日中の噴煙や噴気についても地上映像観測画像によって噴煙・噴気の色や規模、移流高度および流向、火山付近における噴煙の鉛直方向の挙動などを調べることができた。

### 3.2 2011年1月爆発噴煙の移流解析

26日15時32分から28日18時32分まで3時間毎のMTSAT-AVI画像を図10に示す。期間内に発生した3回の噴火[11]に伴う噴煙移流が鮮明に捉えられていた。AVI画像に見られる噴煙の移流をより詳しく調べるために、NOAA HYSPLITモデルを用いて、それぞれの噴火に伴う噴煙の前方流跡線解析を行った。流跡線を計算する際の噴煙の放出時刻と高度は解説資料[10]および地上映像観測結果から、計算時間はAVI画像をもとに設定した。

1回目の1月26日14時49分の噴火に伴う噴煙は、26日15時32分のAVI画像で濃い白い領域(図10左の図中に1回目と示した領域)として明示されている。その後、東の方向へ移流し、27日15時32分のAVI画像の北緯30度、東経155度付近まで追跡できた。その後は雲と混ざって不鮮明になった。この噴火に伴う噴煙の前方流跡線を図11に示す。新燃岳の標高は1421mである。このとき

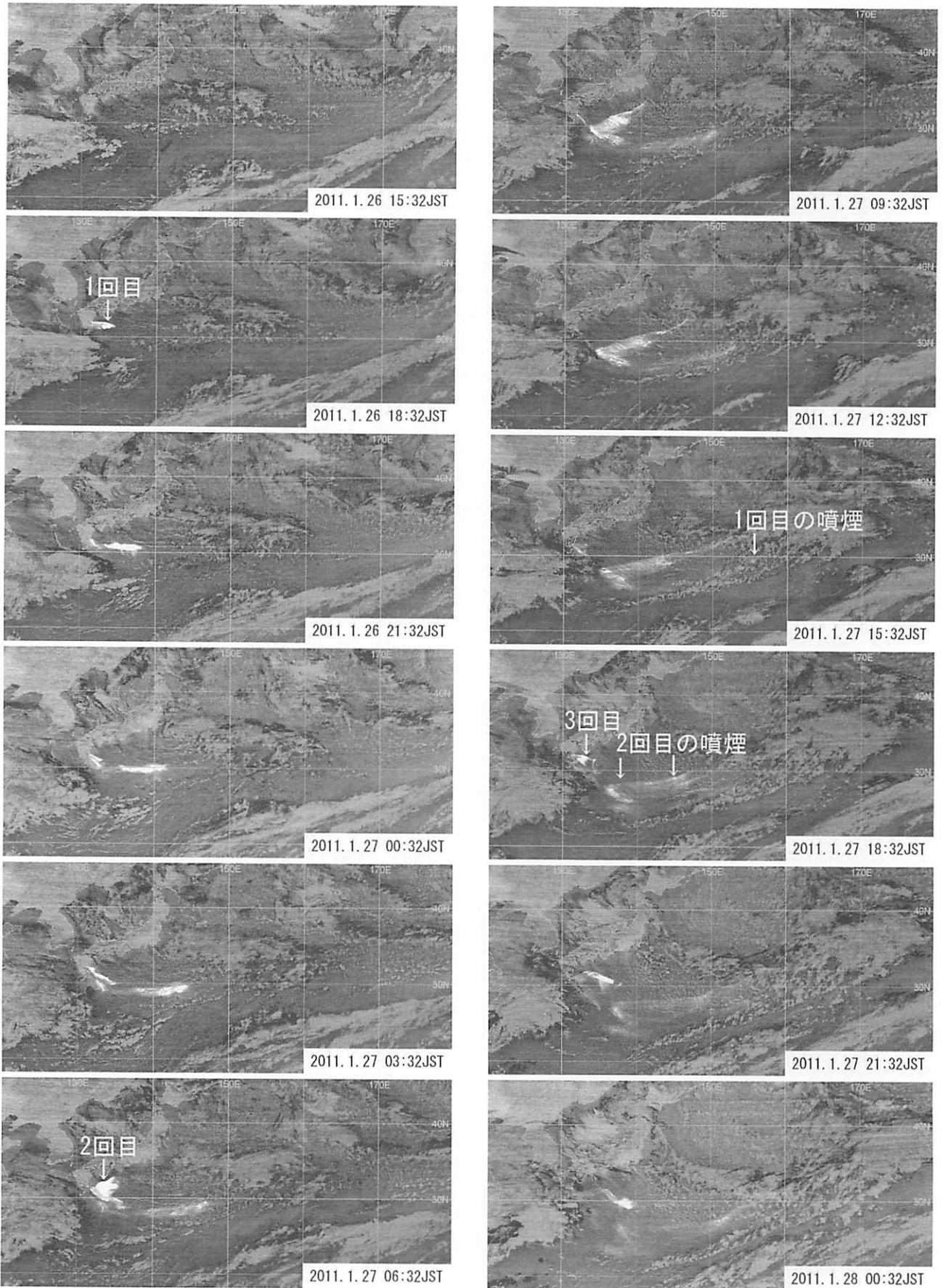


図10 3時間毎のMTSAT-AVI画像.

左：2011年1月26日15：32～27日6：32

右：2011年1月27日9：32～28日0：32分

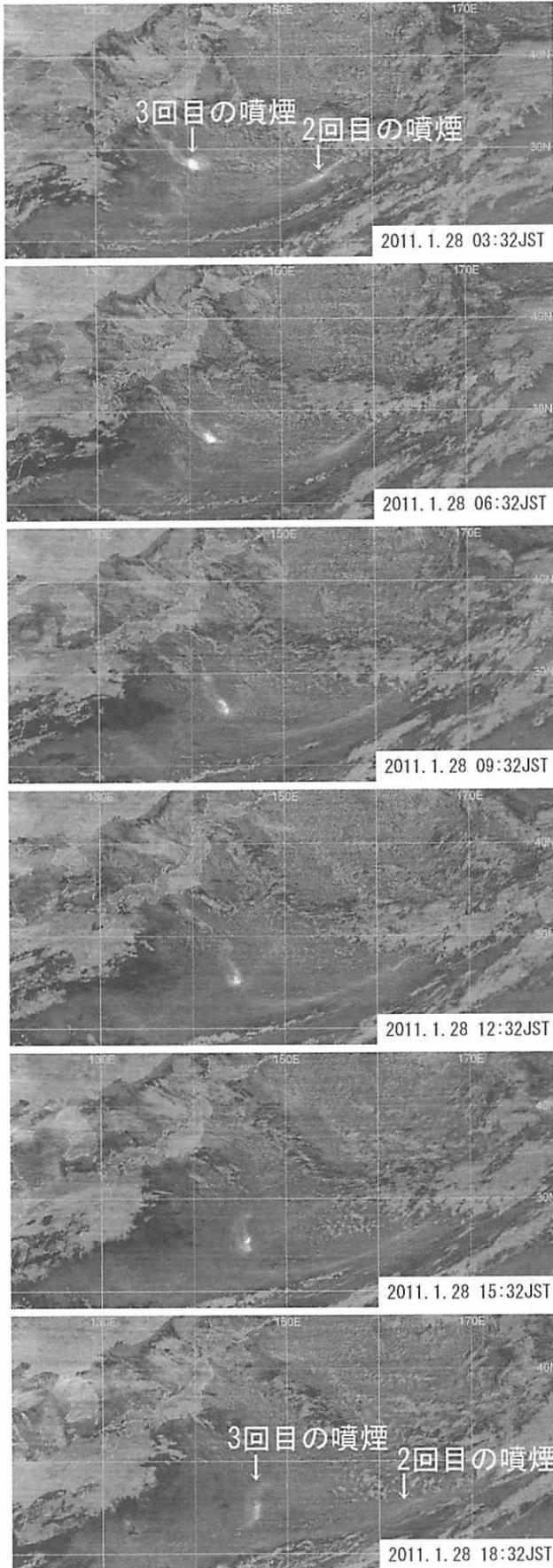


図10 3時間毎のMTSAT-AVI画像(つづき).  
2011年1月28日3:32~28日18:32

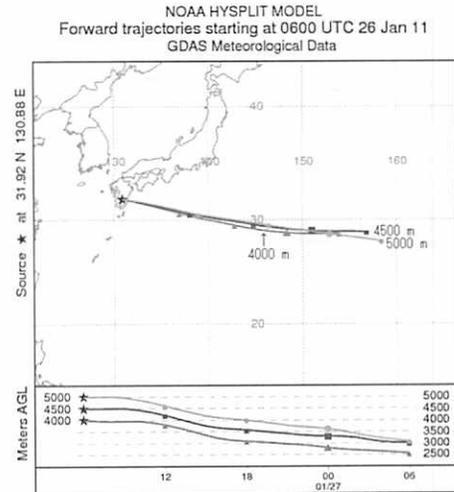


図11 2011年1月26日15時から24時間先までの新燃岳上空4000, 4500, 5000 mの前方流跡線。シンボルは6時間毎の通過位置を表す。

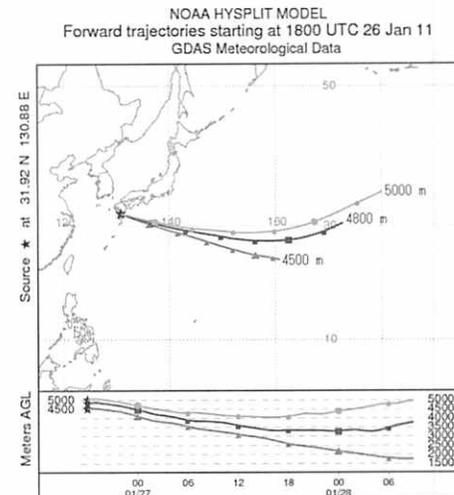


図12 2011年1月27日3時から39時間先までの新燃岳上空4500, 4800, 5000 mの前方流跡線。

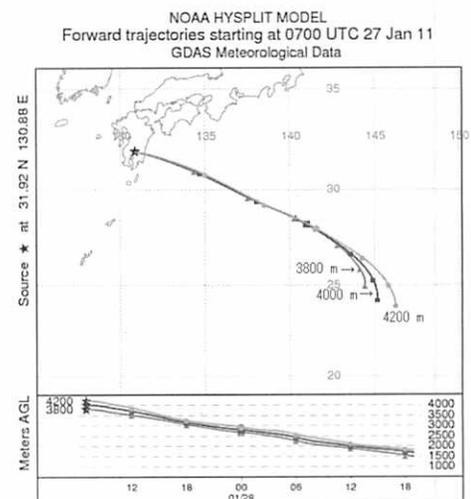


図13 2011年1月27日16時から36時間先までの新燃岳上空3800, 4000, 4200 mの前方流跡線。

の噴煙到達高度は火口縁上 2500 m 以上であったので、噴煙の放出高度は 4000, 4500, 5000 m (AGL: モデル地表レベル) に設定した。計算時間は 24 時間とした。流跡線に示されるシンボルは、6 時間毎に噴煙が通過した位置を表している。このときの高層風の鉛直シアは小さく、いずれの高度の計算結果も同様の流跡線を示している。6 時間毎のシンボルの位置から判断すると、4500 m の流跡線が最もよく AVI 画像に示された東の方向への移流状況を説明できるため、このときの噴煙は上空 4500 m 程度を移流していたと考えられる。

2 回目の 27 日 02 時 20 分の噴煙は、いったん北東～南東に扇状に大きく広がったのち、全体的に南へ流されつつ北東方向へ伸長していったことが AVI 画像からわかる。この噴火は夜間に発生しており、噴煙の到達高度が不明であるため、放出高度を 3000 m から 6000 m まで適宜変更して計算を行い、AVI 画像に示される噴煙移流と比較検討することにより放出高度を調べた。新燃岳上空 4500, 4800, 5000 m を起点とする 27 日 3 時から 39 時間先までの前方流跡線を図 12 に示す。放出高度 4800 m の流跡線が、AVI 画像に示される 2 回目の噴火に伴う噴煙移流と最もよく合っていた。このことから、2 回目の噴火に伴う噴煙は、1 回目の噴火に伴う噴煙よりも高い高度を移流していたと考えられる。その他に流跡線解析結果からわかることとして、図 11 に比べて図 12 の流跡線は高度毎に移流方向や距離の違いが大きいことがあげられる。このことは、このときの風の鉛直シアが大きいことを表しており、噴火直後の噴煙が扇状に大きく広がっていたこととよく対応する。なお、ここで注意しなければならないのは、前方流跡線は、ある時刻に放出された噴煙(塊)の放出後の軌跡を表しているのに対して、衛星画像に示される噴煙形態は、噴火後に連続的に放出された噴煙全ての衛星観測時刻におけるそれぞれの位置を表す流脈線であるため、流れ場が定常流とみなせない場合は、流跡線と流脈線(噴煙形態)は一致しないということである。

3 回目の 27 日 15 時 41 分の爆発的噴火に伴う噴煙は南東から南西へと途中向きを変えて移流した。27 日 18 時 32 分の AVI 画像では扇状に広がった噴煙が日向灘沖まで流れている様子が確認できた。その後、爆発噴煙塊は拡散して薄くなりつつも、28 日 18 時 32 分まで周囲に比べて AVI 値が高い白色領域として明示されていた。噴煙塊は 28 日 09 時 32 分までは南東方向へと移流し、北緯 26 度、東経 144 度付近で向きを変え、その後は等圧線に沿ってゆるやかにカーブしながら南方へ移流していた。この爆発噴煙について、新燃岳上空 3800, 4000, 4200 m を起点として 27 日 16 時から 36 時間先までの前方流跡線を計算した(図 13)。噴煙塊が南下していく成分が不足しているが、3800 m の流跡線がこの噴煙塊の移流を最もよく説明できた。

以上述べてきたとおり、衛星画像に示される 3 回の噴火に伴う噴煙の移流と前方流跡線の計算結果とは整合的であった。このことから、衛星画像からは水平方向の移流拡散情報しか得られないが、流跡線解析も併せて行うことにより、メソスケールでの噴煙の鉛直方向の挙動の理解も可能になること。夜間の噴火であったり、上空が雲で覆われていて地上から噴煙が確認できなかったといった理由によって、噴煙の到達高度が不明である場合でも、衛星画像にみられる移流と流跡線解析結果を比較検討することにより、噴煙の到達高度や移流高度を推定できることが示唆された。

#### 4. おわりに

東京大学地震研究所の観測によって衛星写真、空振データ、微動データで噴火の同調性を捉えたことが報告されている[11]。また、霧島カメラの映像に示される噴煙活動は気象庁の解説資料[10]に記録されている火山活動状況と整合的である。したがって、地上映像観測画像や衛星画像に示される噴煙活動は火山活動の指標のひとつとみなすことができ、これらの観測・解析結果は地域住民にとって身近で有用な防災情報となりうると思われる。また、噴煙は大気の運動を可視化するため、自由大気中を移流拡散する大気汚染物質のメソスケールの挙動を理解するうえでも有用な情報を提供している。すでに示したように、著者らは、2011 年新燃岳噴煙活動の観測結果の静止画や動画、衛星画像などをホームページ[2, 9]にて公開・提供している。これらの情報は、研究者向けの基礎資料や、小・中・高等学校における火山や防災、気象学習を活用して取り組む大気環境の学習教材としても有用であると考えられる。フクシマ原発事故によって、大気汚染物質の移流拡散に目が向けられるようになってきた。今後は、教材として利用しやすいようにホームページ[2]を整備したり、火山噴煙をトレーサとして、自由大気中の大気汚染物質の移流拡散を調べる教材開発などを行っていく予定である。

#### 謝辞

地上映像観測システムの設置について霧島市とあさぎり町立岡原小学校に感謝いたします。東京大学地震研究所/生産技術研究所において受信・処理された MTSAT データを使用させていただきました。心より感謝いたします。本研究は文部科学省科学研究補助金若手(B)21700791 の助成を受けて行った研究成果を使用しています。

#### 参考文献・URL

- [1] 気象庁 火山活動解説資料: [http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly\\_v-act\\_doc/monthly](http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly)

- y\_vact.htm
- [2] 新燃岳 (霧島連山) : <http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/volc/shinmoe/>
- [3] ListCam : [http://www.clavis.ne.jp/~listcam/index\\_j.ssi](http://www.clavis.ne.jp/~listcam/index_j.ssi)
- [4] 飯野直子・金柿主税, 桜島火山デジタルコンテンツの作成, 熊本大学教育学部紀要, 自然科学, 57, 33-41, 2008.
- [5] WXtoimg : <http://www.wxtoimg.com/>
- [6] WebGMS-MTSAT/ GMS (運輸多目的衛星/ひまわり) データサービスセンター : [http://webgms.iis.u-tokyo.ac.jp/index\\_j.php](http://webgms.iis.u-tokyo.ac.jp/index_j.php)
- [7] NOAA ARL HYSPLIT- Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model : <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- [8] 環境省大気汚染物質広域監視システム : <http://soramame.taiki.go.jp/>
- [9] Volc 霧島新燃岳噴火 2011 : <http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/volc/kiri/kiri11/kiri11top.htm>
- [10] 霧島山 (新燃岳) 噴火関連情報 (2011年1月~) : <http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/kirishimayama2011.html>
- [11] 東京大学地震研究所広報アウトリーチ室, 地震・火山の科学をもっと身近に : [http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201101\\_shinmoe/](http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201101_shinmoe/)

(URL は全て 2011/10/03 最終確認)