

気象レーダー・衛星による火山噴煙観測

—2011 年霧島山（新燃岳）噴火の事例—

Observation of Eruption Clouds with Weather Radars and Meteorological Satellites:
-A Case Study of the Eruptions at Shinmoedake Volcano in 2011-

新堀敏基¹, 桜井利幸², 田原基行³, 福井敬一⁴

Toshiki SHIMBORI¹, Toshiyuki SAKURAI², Motoyuki TAHARA³, and Keiichi FUKUI⁴

(Received July 20, 2012; Accepted July 30, 2013)

ABSTRACT: Many eruption clouds from Shinmoedake in the Kirishima volcano group were observed by the ground-based weather radar network and meteorological satellites in 2011. We analyzed the echo height and the maximum radar reflectivity factor of all eruption clouds observed by the Japan Meteorological Agency (JMA) operational C-band weather Doppler radars at Tanegashima, Fukuoka and Kagoshima Airport. As a result, the time-series variation of these factors corresponding to the volcanic activity was revealed and their co-relation, that is, the *Z-H* relationship, was derived. We also analyzed the heights of all eruption clouds, which were estimated from the brightness temperature images of JMA's operational observations made by the MTSAT-2 geostationary meteorological satellite and of rapid-scan observations made by the MTSAT-1R satellite. From the comparison of these analyses we found that, for the purpose of detection of eruption clouds, radars are suitable for frequent observations around volcanoes, whereas, satellites are suitable for long-term observations across a wide area.

1 はじめに

火山噴火に伴う噴煙の状態をより精確に観測することは、その後の噴煙の輸送、特に噴煙内部に含まれる火山灰や小さな噴石（火山礫）の大気中での拡散や地上への降灰・降下火山礫予測の初期値を与えるために必要なだけでなく、噴火規模をできるだけ早く的確に把握し火山活動を監視・評価する上でも重要である。火山噴煙の状態は、マクロ的には噴煙柱の形状、到達高度、形成時間、総質量など、ミクロ的には噴煙中の火山灰、火山礫、ガスなどの噴出率、粒径分布、上昇速度、拡散比率など多くの要素によって特徴づけられるが、これらすべてを目視や遠望カメラなどの直接観測により捉えることは困難である。近年、気象分野では竜巻や局地的大雨（ゲ

リラ豪雨）といった突発的に短時間に発生する空間スケールの小さい現象の観測・予測が課題になっており、ドップラー気象レーダーや高頻度観測（ラピッドスキャン）可能な静止気象衛星などによる遠隔観測（リモートセンシング）は有効な観測方法である。同じく突発的な火山現象に対しても、これらリモートセンシングによる観測可能性を調べておくことは、今後の現業活用を考える上でも意味をもつ。

火山噴火に伴う噴煙や強い上昇気流により形成された火山灰を含む雲（火山灰雲）は、気象レーダーや衛星で観測できることがある。気象レーダーで検知された火山噴煙からの反射エコー（噴煙エコー）の観測事例はこれまで、国内火山では 1973 年爺爺岳を初め、1977 年有珠山、1984 年～桜島、1986 年伊

¹ 気象研究所震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

² 気象庁東京航空路火山灰情報センター, Tokyo Volcanic Ash Advisory Center, Japan Meteorological Agency

³ 気象衛星センター管制課, Satellite Control Division, Meteorological Satellite Center

⁴ 地磁気観測所観測課, Observations Division, Kakioka Magnetic Observatory

豆大島, 1991 年雲仙岳, 2000 年三宅島 (以上, 澤田 (2003b) およびその参考文献), 2004, 2009 年浅間山 (石森・他, 2007; 新堀・他, 2009) で報告されてきており, レーダー観測網の充実や観測間隔の高頻度化に伴い噴煙エコーの検知率も上がってきた (福井・新堀, 2010). また, 国外では 1970 年ヘクラ火山で初めて噴煙エコーが観測されて以降, 近年では 2000 年ヘクラ火山 (Lacasee et al., 2004), 2004, 2011 年グリムスボトン火山 (Witham et al., 2007; Bjornsson et al., 2012), 2010 年エイヤフィヤトラヨークトル火山 (Arason et al., 2011; Marzano et al., 2011; Bonadonna et al., 2011) などで観測されている. 他方, 静止気象衛星では, レーダーと比較して観測時間間隔は長い観測範囲はより広域であることから, 国内外で多数の火山灰雲の観測事例が報告されている. 例えば, 静止気象衛星ひまわり 1~5 号 (GMS-1~5) により 1977~1995 年に観測された火山灰雲については澤田 (2003a) に, 東京航空路火山灰情報センター (Volcanic Ash Advisory Center: VAAC) 設置後の 1997~2001 年については東京航空地方気象台・航空路火山灰情報センター (2003) にまとめられている. 衛星画像で火山灰雲が観測されると, その画像の特徴から火山灰雲の面的な拡散状況, 高度および移動速度の見積りが可能なことから (澤田 (2003a), 鎌田 (2006) およびその参考文献), 現在, ひまわり 7 号による 30 分ごとの通常観測の画像は, 東京 VAAC で現業利用している.

以上のようなリモートセンシングによる火山噴煙観測の状況下において発生した, 2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火では, 国内レーダー観測網で噴煙エコーが詳細に観測されるとともに, 運用中の気象衛星に加え待機衛星による高頻度観測も実施された. 本稿では, これらの観測データの解析結果について論じる. 次章では気象レーダーで観測された噴煙エコーについて, 3 章では高頻度観測を含む気象衛星で観測された火山灰雲について述べる (本稿で示す主な図表の一覧は, List of Figures and Tables を参照). 最後に気象レーダー・衛星による火山噴煙観測の今後の課題を挙げる. なお, 気象レーダー・衛星で解析した新燃岳の噴火活動の詳細については本特集号の「2011 年霧島山新燃岳の噴火活動」(福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2013) を, 遠望観測に基づく噴煙活動の解析結果との比較については飯野・他

(2011), 鬼澤・他 (2013a), 高木・他 (2013) などを参照されたい.

2 気象レーダーで観測された噴煙

本章では, 2.1 節で噴煙エコーを観測した気象レーダーの概要について述べた後, 2.2 節で火山噴火予知連絡会などに速報してきた (新堀・福井, 2011, 2012a, 2012b), 2011 年新燃岳の噴煙エコーの解析結果についてまとめて報告し, 2.3 節で以上の解析結果から噴煙の最大エコー強度とエコー頂高度の関係を調べる.

2.1 噴煙エコーを観測した気象レーダー

気象レーダーでは, 電波を発射して標的からの後方散乱を受信し, その往復時間や受信電力から標的の位置や運動を測定する. 標的までの距離を r とすると, 平均の受信電力は次のレーダー方程式により与えられる:

$$P_r = C \frac{|K|^2}{r^2} Z_e \quad (1)$$

ここで, C は送信電力やアンテナ利得, 送信電波の波長などレーダーの特性によって決まるレーダー定数, $K \equiv (\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2)$, ε は標的の誘電率, Z_e は標的からの後方散乱を特徴づける (等価) レーダー反射因子である. 現在, 気象庁の気象レーダーは波長約 5.6cm (C バンド) のマイクロ波を用いており, 主たる観測対象である大気中の降水粒子では, その粒径 D [mm] がレーダー波長に比べて十分小さいのでレイリー散乱で考えることができる. この場合, レーダー反射因子は,

$$Z_e \approx \sum D^6 [\text{mm}^6/\text{m}^3] \quad (2)$$

で近似され, この対数表現 $10 \log Z_e$ [dBZ_e] をエコー強度と呼ぶ (本稿では, \log は常用対数を表す). 次節の解析では (2) 式で定義したエコー強度を用いるが, 噴煙中の火山灰や火山礫は, 雨粒や氷粒子と比較して誘電率や粒径が異なるため, Z - R 関係 (R は雨や雪の場合, 降水強度) のようなより定量的な議論をする場合には注意を要する.

気象庁では、20 台の一般気象レーダー（うち 2011 年新燃岳噴火当時、16 台はドップラー化）を用いて日本全国の降水観測を行うとともに、主要 9 空港に空港気象ドップラーレーダー（Doppler Radar for Airport Weather: DRAW）を設置して空港周辺の低層ウィンドシア（マイクロバーストやシアライン）の検出を行っている。気象庁のレーダー観測網を Fig. 1 に示す（2011 年 12 月末当時）。このうち、2011 年に新燃岳の噴煙エコーを主に観測したのは、種子島気象ドップラーレーダー（新燃岳の S4° E, 141km, 以下種子島レーダー）、福岡気象ドップラーレーダー（N16° W, 176km, 福岡レーダー）および鹿児島空港気象ドップラーレーダー（S51° W, 20km, 鹿児島 DRAW）である⁵。DRAW は探知範囲が 120km のため、福岡空港気象ドップラーレーダーでは観測できていない。なお、二世代前の福岡レーダーや種子島レーダーでは 1991 年雲仙岳噴火に伴う噴煙エコーを検知しており、最近では桜島噴火に伴う噴煙エコーが主に種子島レーダーや鹿児島 DRAW で検知されている。また、本省河川局の釈迦岳および国見山 C バンド二重偏波レーダーで観測された 2011 年新燃岳の噴煙エコーの解析については、真木・他（2012）を参照されたい。

2011 年に新燃岳の噴煙エコーを観測したときの各レーダーの諸元表を Table 1 に、観測仰角の走査パターンを Fig. 2 に示す。種子島、福岡レーダーは、1 分間に約 4 回転し、Fig. 2 上に示すように 1 回転ごとに高仰角から低仰角に観測仰角を変えながら PPI（Plan Position Indicator）観測を行い、約 8 分で一連の走査を終え、2 分後に次の走査に入るパターンで 10 分ごとにボリュームスキャンしている。そして、全国合成レーダーエコー強度など、一部プロダクトは 5 分間隔で作成されている。他方、Fig. 2 下に示す鹿児島 DRAW は、通常は空域モードで、悪天時は飛行場モードで運用され、一般気象レーダーとは逆に低仰角から高仰角に約 6 分間隔でボリュームスキャンしている。

大気中の電波伝搬では屈折の影響により伝播経路が湾曲し、観測仰角間の高度差はレーダーサイトか

ら標的までの距離が遠くなるほど大きくなる。標準大気の屈折率を考慮した、各レーダーの観測仰角と観測高度の関係を Fig. 3 に示す。2011 年新燃岳の噴煙エコーは、種子島レーダーでは仰角 0.2~2.5°、福岡レーダーでは -0.7~1.9°、鹿児島 DRAW の空域モードでは 2.1~17.4°、飛行場モードでは 2.7~12.5° で観測された。種子島レーダーの低仰角 -0.3, 0.0° でエコーが観測されていないのは、レーダーサイトと新燃岳からの噴煙との間の地形障害による。また、福岡レーダーの仰角 1.2° では 150km レンジによる観測のため（Fig. 2）、150km 以上離れた新燃岳の噴煙エコーは検知できていない。各レーダーで噴煙エコーが観測された最大仰角のビーム中心の新燃岳上空における高度（海拔）は、鹿児島 DRAW の空域モードで約 6.4km、飛行場モードで約 4.7km に対し、種子島レーダーは約 7.6km、福岡レーダーは約 8.7km に達する。新燃岳からより遠方にあるレーダーほど高高度の噴煙エコーを観測しているが、同時に Table 1 に示した電力半値幅で定義されるビーム幅は垂直方向で、鹿児島 DRAW の空域モードで約 210m、飛行場モードで約 214m に対し、種子島レーダーは約 2600m、福岡レーダーは約 3100m まで広がる。このように新燃岳の噴煙エコーは種子島と福岡の一般気象レーダーで観測された反面、いずれのレーダーサイトからも新燃岳までの距離が遠く、ビーム幅の広がり大きいことに加え観測仰角間の高度に開きが生じることから、次節では合成レーダーの噴煙エコーを解析した。これはレーダーごとの PPI データから作成した定高度水平断面（Constant Altitude PPI: CAPPI）データを合成しており、解像度は水平・鉛直とも約 1km である。他方、新燃岳までの距離が近い鹿児島 DRAW は、ビーム幅の広がり小さく観測頻度も高いので噴煙エコーの解析に適していると考えられるが、先に述べたとおり空港周辺の降水観測、低層ウィンドシアの検出という本来の目的のため、エコー強度の一次データにしきい値（15dBZ_e 前後）が設けられていることから、次節の解析では参考値として用いた。

火山灰雲の雲頂に相当する噴煙エコーの頂高度 H_t は、エコー強度（(2)式）の鉛直分布から推定する。次節に示す種子島・福岡合成レーダー⁶によるエ

⁵ この他、広島（新燃岳の N31° E, 306km）と室戸岬（N63° E, 343km）の気象ドップラーレーダーで一部観測された。

⁶ 解析には全国合成 CAPPI データを使用した。本稿で

コー頂高度の解析にはレーダーデータ解析監視システム (Radar Data Analysis and Monitoring System: RaDAMoS) の推定方法を用いた。すなわち、雲頂判別しきい値 $Z_t = 12 \text{ dBZ}_e$ に対して、 $Z_d \geq Z_t$ を満たす最大仰角高度 H_d と、その一つ上の仰角高度 H_u およびそのときの反射因子 Z_u を用いて、反射因子が Z_t に相当する高度として

$$H_t = \frac{Z_t - Z_u}{Z_d - Z_u} H_d + \frac{Z_d - Z_t}{Z_d - Z_u} H_u \quad (3)$$

で決めている (熊谷, 2006)。他方、一次データにしきい値がある鹿児島 DRAW のエコー頂については、CAPPI データでエコーが検出されなくなったときの高度とした。なお、1993 年雲仙岳火砕流に伴う噴煙エコーの解析では、気象エコーと判別するために 15 dBZ_e 以上が対象とされた (荒生・他, 1996)。

解析した種子島、福岡レーダーおよび鹿児島 DRAW はいずれもドップラー化されているので、対象標的の移動速度を、レーダービームの視線方向成分 (動径風) v_r として観測することができる。すなわち、レーダーサイトから標的を見た仰角と方位角を (θ_e, φ) 、標的の位置における風速を (u, v, w) 、標的自身の落下速度を V_f と表すと、

$$v_r = (u \sin \varphi + v \cos \varphi) \cos \theta_e + (w - V_f) \sin \theta_e \quad (4)$$

で与えられる (石原, 2001)。落下速度が比較的大きい火山灰や火山礫の場合は、 θ_e が低仰角であっても (4) 式の右辺第 2 項は無視できない可能性に注意が必要である。なお、種子島、福岡レーダーによるドップラー速度観測は 150 km レンジと最下仰角の 250 km レンジによる観測のみのため、福岡レーダーで新燃岳の噴煙の速度観測ができるとしたら仰角 -0.3° のみである (Fig. 2 上)。ドップラー気象レーダーのデータ解析など、詳細については例えば深尾・浜津 (2009) を参照されたい。

は、新燃岳の噴煙エコーが主に観測されたレーダーサイトの地点名を取って、種子島・福岡合成レーダーと呼ぶ。

2.2 新燃岳の噴煙エコーの解析結果

本節では、2011 年新燃岳の噴火活動の推移に合わせて、各期間に種子島・福岡合成レーダーで観測された噴煙エコーについて、エコー頂高度 (海拔) とエコー強度を中心に解析する。噴煙エコーは、火口直上の分析 (新堀・福井, 2012a) ではなく、気象レーダーで観測された火山灰雲全体を対象とした。また、ドップラー速度の解析結果や鹿児島 DRAW との比較結果は必要に応じて示す。

2.2.1 1 月 26 日以前の事例

2011 年の最初の噴煙エコーは、1 月 19 日 01 時 27 分に発生した小規模な噴火に伴い、01 時 40 分に見え始め、02 時 10~50 分にかけて継続的に観測された。この間の最高エコー頂高度は 02 時 32~38 分に観測された 3.3 km 、最大エコー強度は同時間帯に 21.3 dBZ_e であった。

なお、新燃岳で噴煙エコーが検知されたのは、2010 年 7 月 10 日 05 時 36~38 分以来である。

2.2.2 1 月 26~27 日準プリニー式噴火の事例

(関連図表: Figs. 4-13)

次の噴煙エコーは、1 月 26 日 07 時 31 分にごく小規模な噴火が発生し、14 時 49 分頃から火山性微動の振幅が大きくなり高い噴煙を連続的に上げる準プリニー式噴火が始まった直後の 15 時から見え始め、27 日 05 時まで継続的に観測された。この連続的な噴火に伴い、東京大学地震研究所、産業技術総合研究所、気象庁機動調査班 (JMA Mobile Observation Team: JMA-MOT) などによる現地調査や聞き取り調査で、新燃岳の南東方向を主軸として広範囲に多量の降灰とともに、大きさ $7.8 \sim 7 \text{ cm}$ の火山礫が鹿児島県霧島市高千穂河原 (新燃岳の南東約 3 km 地点)、 $6 \sim 4 \text{ cm}$ の火山礫が宮崎県都城市御池町 (南東約 7 km 地点) まで落下したことが確認された (気象庁, 2011a)。その後、27 日 15 時 41 分に 2011 年 1 回目の爆発的噴火 (1959 年 2 月 17 日以来、遠望観測による噴煙高度: 火口縁上 2500 m 以上) が発生して再び噴煙エコーが見え始め、18 時頃まで継続的に観測された。これら一連の噴煙エコーについて、種子島・福岡合成レーダーによる海拔 2 km の CAPPI と各鉛

⁷ 火山礫の長径。以下同じ。

直断面図を Figs. 4-6 に、26 日 06 時～28 日 00 時の噴煙エコー頂高度の時間変化を Fig. 7 に、最大エコー強度の時間変化を Fig. 8 に示す。Figs. 4-6 に記した時刻は、ボリュームスキャンの観測終了時刻を表す（以後の図も同様）。この期間、新燃岳周辺に気象エコーは確認されておらず、気象レーダーで観測された一連のエコーはすべて噴煙によるものと考えられる。ただし、26 日 10 時 30 分～17 時 10 分、27 日 09 時 00 分～10 時 40 分の間、種子島レーダーは保守につき運用休止していたため、この間は福岡レーダーの観測結果である。

Figs. 4-6(a)を見るとこの期間、北西風により輸送された噴煙に対応して火口の南東方向にエコーが現れており、海拔 2km での風下方向の広がりには火口から最長 30～50km であった。噴煙エコーが観測され始めるときは、まず火口付近に強いエコー強度が出現する。しだいに水平方向に広がりをもつが、そのエコー強度は火口から離れるほど弱い。そして噴煙エコーが検知されなくなる前は火口周辺のエコー強度も弱まり、ある時刻に突然消滅する。しかし、3.2.1 節で見るように噴煙エコーが検知されなくなって以降も、気象衛星などでは引続き火山灰雲が観測されていることから、気象レーダーではすべての火山灰が常に観測できるわけではない。

また鉛直方向には、Figs. 4-6(b)を見ると 55dBZ_e 以上の強いエコー領域が 26 日 16 時 50 分～17 時 20 分、27 日 02 時 20 分～04 時 40 分、16 時 50 分～17 時 20 分に海拔 3km（火口縁上約 1500m）付近まで検出された（Fig. 8 の赤線）。これらの強いエコーが検出された期間に対応して、海拔 6.5km 以上の噴煙エコー頂高度は 26 日 16 時 00 分～18 時 40 分、27 日 01 時 50 分～04 時 40 分、16 時 20 分～17 時 40 分に観測され、各期間の極大値は 26 日 17 時 11 分～19 分に海拔 8.3km（火口縁上約 6800m）、18 時 21～29 分に 8.5km（約 7000m）、27 日 04 時 11～19 分に 8.4km（約 6900m）、1 回目の爆発直後の 15 時 42 分～49 分に 7.8km（約 6300m）、17 時 21～29 分に 8.4km（約 6900m）まで達しており、3 回の準プリニー式噴火が発生したことが明瞭に検出された（Fig. 7 の青線）。しかし高高度のエコー頂は火口から水平方向に 10～20km 程度まで広がり、それより離れると徐々に低くなることから、気象レーダーで捉えられる火山灰には条件があることが示唆される。他方、エコ

ー底は噴煙エコーが観測されている領域の大部分で地表まで到達していた。

以上の特徴は、(2)式で示したエコー強度が標的の粒径と数密度に依存することをふまえると、噴煙中の一定粒径（澤田（2003b）によると 0.5～0.1mm）以上の火山灰が数多く含まれている状態に対して噴煙エコーが返ってきていると考えれば説明できる。すなわち、火山灰の輸送シミュレーション（新堀・他、2010; Hashimoto et al., 2012）が示すように、噴火に伴い火口直上に持ち上げられた火山灰が、気象場の作用を受けながら大気中を輸送される過程において、風下側に向かうほど粒径の大きい火山灰から高度を下げ降灰していく現象が、気象レーダーによって観測されていると考えられる。

次にドップラー速度の観測結果を示す。今期間、福岡レーダーでは観測されず、種子島レーダーの仰角 1.4°（新燃岳上空におけるビーム中心海拔約 4.9km）と 0.2°（約 2.0km）のみ観測された。各仰角の結果を Figs. 9-11 に示す（ただし、26 日 16 時 22 分～17 時 06 分は保守モード）。保守モードの時間帯は不明であるが、ドップラー速度の観測され始める時刻がエコー強度（Figs. 5 and 6）より遅れるのは、動径風を観測しているために噴火直後に上昇する噴煙は捉えにくく、水平方向の輸送が支配的ではないためと考えられる。また、仰角が大きい方が検出される時間が短いのは、仰角別のエコー強度の PPI 観測と同様に、高高度ほど噴煙の濃度が希薄になりエコーを散乱する標的が少なくなるためと考えられる。

観測されたドップラー速度は今期間、いずれも一様に負の値を示しており、これは対象標的の動径風が種子島レーダーサイトに向かって吹いていることを意味する。鹿児島／市来のウィンドプロファイラ観測や数値予報 GPV（Grid Point Value、後出の Figs. 40, 49 and 57）などによると風の鉛直シアがある気象場で、噴煙自体は海拔 4～5km 付近より上層は新燃岳の東へ、それより下層は南東へレーダーサイトに近づく成分をもって流れていた。しかし、例えば仰角 0.2° で観測された動径風から噴煙の流線方向の速度に直すとそこで予想される気象場の風速より数 10m/s 大きい値を取る。これは、観測されたドップラー速度が気象場で流される噴煙表面の移動速度のみではなく、噴煙内部で流向を右回りに変えながらレーダーサイトに近づくセンスで降下してきた火

山灰の落下速度の加算 (4) 式の右辺第 2 項) も考えなければ説明できない。

一連の噴煙は、鹿児島 DRAW (空域モード) でも観測された。一例として、1 月 26 日 17 時 17 分 37 秒 (仰角 1.7°) ~ 21 分 09 秒 (28.5°) の PPI データから作成した CAPPI 画像とその鉛直断面を Fig. 12 に示す。種子島・福岡合成レーダー画像 (Fig. 4 の 17:20) と比較すると、水平方向の広がりには似ているが、鉛直方向は全体的に低く弱いエコーが出ていない。これは前節で述べたように、DRAW はエコー強度の一次データにしきい値があり、弱いエコーが解析できないためと考えられる。26 日 06 時 ~ 28 日 00 時の間に鹿児島 DRAW で観測された噴煙エコー頂高度の時間変化を Fig. 7 に橙線で重ねて示した。連続的に噴火していたこの期間は、種子島・福岡合成レーダーと比較してエコー頂高度によらず 800m 程度低い (新堀・福井, 2012b)、ボリュームスキヤンの時間間隔はより短いため、細かな時間変化が捉えられている。同じく鹿児島 DRAW で観測された最大エコー強度の時間変化を Fig. 8 に緑線で重ねて示した。鹿児島 DRAW 単体の方が強めに出ているのは標的までの距離が近いことによる空間分解能の違いのほか、前節で述べたように種子島・福岡合成レーダーでは、高度 1km ごとの全国合成 CAPPI から最大エコー強度を算出しているためと考えられる。例えば鹿児島 DRAW では、26 日 17 時 13 分 27 秒に仰角 4.3° で最大 68.9dBZ_e の噴煙エコーが解析したのに対し、種子島レーダーでは 17 時 11 分 38 秒と 16 分 28 秒に仰角 0.2° で 57.1dBZ_e 、福岡レーダーでは 11 分 39 秒と 16 分 29 秒に -0.3° で 60.0dBZ_e 、合成した結果は 56.5dBZ_e である。その後、この噴煙エコーは 17 時 21 分までの間に火口の東南東約 18.7km 地点の上空 8.5km まで達した (Fig. 12)。また鹿児島 DRAW で観測された、仰角 10.9° までのドップラー速度を Fig. 13 に示す。高度が下がる (同一地点では観測仰角が下がる、同一仰角では (この事例の場合) 火口に近づく) ほど、解析された動径風は正から負に転じており、風で流される噴煙と風の鉛直シアがある気象場で落下する火山灰が観測されていると考えた前述の解釈と合っている。なお同時に観測されたドップラーспекトルの標準偏差で定義される速度幅 (擾乱度) は $0.7\sim 4.0\text{m/s}$ であった。

目視や新燃岳の南約 7.6km 地点に設置されている

猪子石遠望カメラに基づく遠望観測の高度を Fig. 7 に黒線で重ねて示した。遠望観測ではこの期間、最高で 27 日 15 時 41 分に火口縁上 2500m 以上、17 時 28 分に 3000m を観測したが、種子島・福岡合成レーダーでは前述のとおり火口縁上 6000~7000m 程度の噴煙エコー頂を解析した。この開きは、当時の遠望観測ではカメラの画角に入った火口直上の噴煙の高さを測定しているのに対し、レーダーで解析した火山灰雲全体のエコー頂は風が強かったために火口から数 km ~ 10 数 km 離れた地点上空で最高高度に達したことが原因の一つとして挙げられる。

気象レーダーで検出された噴煙エコー頂高度の時間変化 (Fig. 7) は、グラントルースとして傾斜変動データから解析されたマグマだまり収縮率や現地調査結果から解析された堆積物の時間変化と相関が高いことが、それぞれ小園・他 (2011)、古川・他 (2011) により報告されている。

2.2.3 1 月 28 日 ~ 2 月 7 日噴火の事例

(関連図表: Figs. 14-16)

1 月 28 日以降、火口内溶岩蓄積期を経てブルカノ式噴火へ移行していった過程で噴煙の放出が一旦止んだ 2 月 7 日 18 時までの種子島・福岡合成レーダーの噴煙エコー頂高度の時間変化を Fig. 14 に、最大エコー強度の時間変化を Fig. 15 に示す。1 月 28 日 02 時 10 分から再び見え始めた噴煙エコーは、04 時 50 分以降 29 日 00 時まで新燃岳周辺に気象エコーがかかったため不明になった。ただし、28 日 12 時 47 分の 2 回目の爆発的噴火 (遠望観測による噴煙高度: 火口縁上 1000m 以上) では、12 時 52~59 分に海拔 5.0km の噴煙エコーが検知された。29 日 08 時 49 分を最後に連続的な噴煙エコーは観測されなくなり、2 月 1 日 07 時 54 分の 4 回目の爆発的噴火 (火口縁上 2000m) 以降は散発的な噴煙エコーが捉えられるようになった。なお、この 4 回目の爆発的噴火は新燃岳の南西約 2.6km 地点で年間最大となる空振 458.4Pa を観測したが、対応する噴煙エコー強度は最大 33.8dBZ_e に留まり (Fig. 15)、爆発のエネルギーとエコー強度に直接の関係は見られない。

今期間発生した 8 回の爆発的噴火では、6 回で噴煙エコーを検出した (Fig. 16)。検知できなかった 1 月 30 日 13 時 57 分と 2 月 3 日 08 時 09 分の爆発的噴火は鹿児島 DRAW でも捉えておらず、種子島、福岡

の両レーダーサイトと新燃岳の距離が遠いことにより低高度の噴煙が観測できなかったためではなく、噴出物の数密度がレーダーで検知できる量より少なかったためと考えられる。なお、種子島・福岡合成レーダーで検知できた新燃岳の噴煙高度は、Fig. 14 に黒線で示した遠望観測で火口縁上 2000m より高い場合であった。また、合成レーダーで新燃岳周辺に噴煙エコーが検知され始めるエコー頂の下限は、海拔約 3km であった。

2.2.4 2月7日～3月1日噴火の事例

2月7日18時以降の爆発的噴火は、最後に確認された3月1日19時23分までに4回発生し、うち3回で噴煙エコーを検出した。2月11日11時36分の10回目の爆発的噴火（遠望観測による噴煙高度：火口縁上2500m）は、種子島・福岡合成レーダーでは11時36～43分に海拔5.0km、鹿児島DRAW（空域モード）では38～44分に4.8kmの噴煙エコー頂高度が解析された（Figs. 17 and 18）。

2.2.4.1 2月14日05時07分爆発的噴火の事例

（関連図表：Figs. 19-23）

2月14日05時07分に発生した11回目の爆発的噴火では、新燃岳の南西約1.7km地点の地震計で2011年爆発的噴火のうち最大となる最大振幅16517 $\mu\text{m/s}$ を観測し、大きさ5～1.5cmの火山礫が宮崎県小林市周辺（新燃岳の北東最大約16km地点）まで落下した（気象庁，2011a）。この噴火は、降水時に発生したため（小林のアメダスでは06時までの1時間降水量2.0mm、高層天気図は3.2.4.1節Fig. 74で示す）、遠望観測による噴煙高度は不明であった。気象レーダーでは海拔5km付近より下層で層状エコーがかかっていたが、噴火発生直後の05時08分にまず福岡レーダーで爆発に伴うエコーが検知され、最大エコー強度は54.6dBZ_eと解析されたが、この時点のエコー頂は層状エコーより低く解析できなかった（Fig. 19左列）。05時12分から種子島レーダーでも見え始め、福岡レーダーと合わせて05時19分までに層状エコーを突き抜けた噴煙エコーは、新燃岳の東北東21.9km付近上空で年間最高となる海拔9.4kmの頂高度が解析され、同時時間帯に海拔3～4km付近で強いエコー強度が確認された領域は火山礫が落下した地域と概ね重なっていた（Fig. 19中列）。

この背の高い噴煙エコーの鉛直軸は東に傾いており、上層ほど西寄りの風が吹いていた当時の高層実況と対応している。また同時時間帯に種子島レーダーではドップラー速度の観測限界の150kmレンジ付近に、新燃岳から北東方向に移動する噴煙エコーに対応してレーダーサイトから遠ざかる動径風も検出した（Fig. 20）。その後、下層の噴煙エコーと層状エコーの違いは次第に不明瞭になり、05時23分以降、検知できなくなった（Fig. 19右列）。Fig. 21に示すように、この噴煙エコー頂高度は鹿児島DRAW（飛行場モード）では合成レーダーより早く、05時14分頃に新燃岳の北東10.4～11.3km地点上空で海拔8.7km、17分頃に東北東17.8～18.2km地点上空で海拔8.4kmを解析した（Fig. 22）。ただし当時、飛行場モードで運用されていたこと、噴煙が北東方向に移動したため新燃岳山体に遮蔽されたこと、降水による減衰などの影響により、DRAW単体では特に低仰角の噴煙下部が捉えきれなかった。またドップラー速度は、DRAWの方がレーダーサイトと噴煙の距離が近く、観測頻度が高いため、特に高仰角で新燃岳から北東方向への移動が検出された（Fig. 23）。

2.2.4.2 2月18日18時16分爆発的噴火の事例

（関連図表：Figs. 24 and 25）

2月18日18時16分に発生した12回目の爆発的噴火（遠望観測による噴煙高度：火口縁上3000m）では、新燃岳から宮崎県都城市、串間市に向かう南東方向と鹿児島県始良市、鹿児島市に向かう南西方向に降灰分布が分かれた（鬼澤・他，2013b）。このとき、鹿児島／市来のウィンドプロファイラや数値予報GPV（後出のFig. 79）では海拔5km付近より上層で西風、海拔2km付近より下層で東～北東風の鉛直シアが観測されており、2軸にわかれた降灰分布の方向と対応していた。その後、18時46分の遠望観測では噴煙高度は火口縁上1000mであり、19時55分まで噴火が続いた。これに対し、種子島・福岡合成レーダーでは18時18～19分に火口直上で海拔5.2km、21～29分に南東方向で海拔4.4kmの噴煙エコーを観測し（Fig. 24）、鹿児島DRAW（空域モード）では18時18～19分に火口直上で海拔4.4km、23～25分に南西から南東方向に高度を上げながら海拔5.4kmの噴煙エコーを観測した（Fig. 25）。鬼澤・他（2013b）によると、同じ鹿児島空港のレーダ

ータワーに設置された超高感度カメラでは 18 時 21 分頃に海拔 5.9km の噴煙高度が解析されている。ドップラー速度はいずれのレーダーでも検出されなかった。

なお 2011 年に新燃岳で発生した爆発的噴火としては最後となる、3 月 1 日 19 時 23 分の 13 回目の爆発的噴火（遠望観測による噴煙高度：不明）は、気象レーダーでも噴煙エコーが検知されなかった。このとき種子島レーダーは運用休止しており、福岡レーダー単体で検知できるほど噴火規模が大きくなかったと考えられる。

2.2.5 3 月以降の事例

爆発的噴火が発生しなくなった 3 月 2 日以降も散発的に噴煙エコーが観測された。

2.2.5.1 3 月 13 日 17 時 45 分噴火の事例

（関連図表：Figs. 26-30）

遠望観測で年間最高の火口縁上 4000m に達した 3 月 13 日 17 時 45 分の噴火では風の弱い気象場で噴煙が直上に上昇した後、新燃岳の南東方向に流れ、降灰とともに大きさ 4~1cm の火山礫が都城市夏尾町（新燃岳の南東約 9km 地点）まで落下した（気象庁、2011b）。その後も噴火は継続し、18 時 15 分の遠望観測による噴煙高度は火口縁上 1500m であったが、18 時 30 分から雲により噴煙が確認できなくなり、18 時 50 分に微動振幅が基準値以下になった。この噴火に対して、種子島・福岡合成レーダーでは 17 時 57 分頃に新燃岳の東南東 10.3km 付近上空で海拔 7.6km、鹿児島 DRAW（空域モード）では 56 分頃に東南東 11.1~12.0km（レーダーサイトのある鹿児島空港の東北東 28.5~29.4km）地点上空で海拔 8.8km のエコー頂高度を解析した（Figs. 26 and 27）。鬼澤・他（2013a）によると、このとき鹿児島空港の超高感度カメラでは少なくとも海拔 9.0km 以上の噴煙高度が解析されている。各レーダーで観測された噴煙エコー頂高度の時間変化を Fig. 28 に示す。1 月 26~27 日の連続的噴火の場合の場合（Fig. 7）と異なり、種子島・福岡合成レーダーと鹿児島 DRAW の間に系統的な差は見られず、この事例ではエコー強度のしきい値が高いにも関わらず鹿児島 DRAW の方が高い噴煙を捉えている。これは鹿児島 DRAW の方が観測間隔が高頻度であり、低仰角から高仰角にスキャン

しているため（Fig. 2）、上昇中の噴煙を一般気象レーダーより詳細に観測できていることを意味している。2.2.2 節で述べたようにレーダーでは噴煙すべてを観測できるわけではないため、そのエコー頂高度は噴煙をスキャンするタイミングに大きく依存することに注意する必要がある。またドップラー速度は、種子島レーダーで 17 時 56 分~18 時 02 分にかけて仰角 1.4° と 1.2° で（Fig. 29）、鹿児島 DRAW で 17 時 49 分~18 時 04 分にかけて仰角 1.7~17.4° で検出された（Fig. 30 に一部示す）。このときは風が弱かったため必ずしも噴煙の流れた方向に観測されておらず、大きな粒径をもつ粒子が落下していることが示唆される。

同様に、遠望観測による噴煙高度が火口縁上 1000m であった 3 月 23 日 08 時 23 分の噴火は、種子島レーダーでは捉えることができず、福岡レーダーでは 08 時 28 分 05 秒~54 秒に仰角 0.4~-0.7°（噴煙エコー頂高度：海拔 4.7km）、鹿児島 DRAW（空域モード）では 29 分 19 秒~54 秒に仰角 2.7~4.3°（海拔 3.5km）で観測された。背の低い噴煙観測についても仰角シーケンスの設定が重要になる。

2.2.5.2 4 月 18 日 19 時 22 分噴火の事例

（関連図表：Figs. 31-34）

4 月に入って降灰予報が発表された 2 回の噴火のうち、遠望観測による噴煙高度が火口縁上 3000m になった 4 月 3 日 08 時 41 分の噴火で観測された噴煙エコー頂高度と最大エコー強度は、種子島・福岡合成レーダーでは 08 時 47~49 分に海拔 7.0km（火口縁上約 5500m）、34.7dBZ_e、鹿児島 DRAW（空域モード）では 08 時 46~48 分に海拔 6.5km（約 5000m）、48.5dBZ_e であった。

2011 年に最後の降灰予報が発表された 4 月 18 日 19 時 22 分の噴火（遠望観測による噴煙高度：火口縁上 2000m）では、降灰とともに最大 2cm の火山礫が宮崎県西諸郡郡高原町（新燃岳の東約 9km 地点）まで落下した（気象庁、2011c）。その後も噴火は継続し、19 時 52 分の遠望観測による噴煙高度は火口縁上 600m、21 時時点で不明となったが、火山性微動は 23 時 53 分まで継続した。この噴煙に対して種子島・福岡合成レーダー（Fig. 31）と鹿児島 DRAW（空域モード、Fig. 32）で観測された噴煙エコー頂高度の時間変化を Fig. 33 に示す。種子島・福岡合成

レーダーの方が早く 19 時 26~29 分に海拔 7.1km(火口縁上約 5600m), 40.2dBZ_e, 鹿児島 DRAW では 19 時 29~30 分に海拔 5.2km (約 3700m), 46.7dBZ_e の最大値が解析されており, DRAW では同時間帯に仰角 2.1~6.8° でレーダーサイトから北東へ遠ざかるドップラー速度も検出された (Fig. 34). 4 月 3 日噴火の事例と比べると, 噴煙エコー頂高度は同程度か低いにも関わらず同程度以上の最大エコー強度が解析されており, 4 月 18 日噴火の方が噴煙中の粒径が大きかったことが示唆される.

2.3 最大エコー強度と噴煙エコー頂高度の関係

2011 年一年間に種子島・福岡合成レーダーで観測された, 新燃岳からの火山灰雲全体の噴煙エコー頂高度(海拔)を Fig. 35 に, 最大エコー強度を Fig. 36 に示す. 出水期に入り降水の影響もあり, 6 月 29 日 11 時 50 分を最後に噴煙エコーは検知されなくなった(最後の噴火は 9 月 7 日). 年間のエコー頂高度の最高値は 2 月 14 日 05 時 07 分の爆発的噴火に伴う 9.4km であり (2.2.4.1 節), エコー強度は 2 回目の準プリニー式噴火にあたる 1 月 27 日 04 時 00 分に 57.8dBZ_e の最大値を記録した (2.2.2 節). 2011 年に発生した 13 回の爆発的噴火のうち, 噴煙エコーは 10 回検出した.

2011 年に種子島・福岡合成レーダーで解析された新燃岳噴煙の最大エコー強度 Z_m と火口縁上から測ったエコー頂高度 H_t の関係を Fig. 37 に示す. サンプル数は, 火口から離れたところで新燃岳の標高より低い噴煙エコーが解析された 3 事例を除く計 188 事例である. 準プリニー式噴火に伴う連続的な噴煙エコーを■, それ以外を□で印した. 準プリニー式噴火の期間中は Z_m , H_t ともに大きな値を取るが, ブルカノ式噴火では爆発した瞬間には同様に大きな H_t を取ることがあるがその後, H_t は高い値を維持しても Z_m は相対的に小さくなる傾向が見られる. ただし 2.2.5.1 節で調べた 3 月 13 日 17 時 48~49 分に観測された $Z_m = 53.9\text{dBZ}_e$, $H_t = 7.2\text{km a.s.l.}$ (火口縁上約 5.7km) の噴煙エコーは, 準プリニー式噴火のときに観測された強 Z_m , 高 H_t グループに属する. これらすべての解析値に対する回帰直線は,

$$Z_m = 8.1 + 46.3 \log H_t [\text{dBZ}_e] \quad (5)$$

と求めた (H_t の単位は km (火口縁上)). エコー強度 Z_e と噴煙の最高到達高度 H の理論的な関係はおおよそ以下のように考えることができる (福井・新堀, 2010): (2) 式のエコー強度のデシ・ベル表現は, 噴煙内部の火山灰の粒径 D が一定と仮定すると単位体積あたりに含まれる火山灰粒子数を n として,

$$Z_e \approx 10 \log \sum D^6 \approx 10 \log n + 60 \log D [\text{dBZ}_e] \quad (6)$$

となる. さらに, 噴煙内部の火山灰密度が一定で数密度が一様と仮定すると噴出物総質量は nD^3 に比例するから, 量的降灰予測で用いている Morton et al. (1956) に始まる総質量と H および噴火の継続時間 T の関係式 (例えば, 新堀・他(2010)の(A2)式)を用いると,

$$nD^3 \approx H^4 T \quad (7)$$

(7) 式を(6)式に代入することにより,

$$Z_e \approx \text{const.} + 40 \log H + 10 \log T + 30 \log D [\text{dBZ}_e] \quad (8)$$

となり, レーダー観測の解析結果から求めた(5)式の $\log H_t$ 依存性は(8)式と類似する. ただし, (5) 式の算出では火口から離れた噴煙エコーや降水減衰の影響を受け H_t に対して小さい Z_m も解析対象に含まれており, 他方(8)式の導出では多くの仮定を設定していることに注意する. 観測と理論の双方からより精密な Z - H 関係を求めることは今後の課題である.

3 気象衛星で観測された火山灰雲

本章では, 3.1 節で火山灰雲を観測している気象衛星の概要について述べた後, 3.2 節で東京 VAAC が 2011 年に 184 回の航空路火山灰情報 (VAA) を発表した新燃岳の火山灰雲の解析結果についてまとめて報告する.

3.1 火山灰雲を観測した気象衛星

(1) 気象衛星の概要

気象庁が現在, 運用している運輸多目的衛星ひまわり 6 号 (MTSAT-1R), 7 号 (MTSAT-2) は, それぞれ地球の東経 140 度, 145 度の赤道上空約 35800km の円軌道を地球の自転と同じ速度で周回する静止気

象衛星で、地球上の同じ範囲を連続して観測することが可能である。地球の撮像は東西方向に観測ミラーを動かしながら北から南へ行われる。

運用衛星である MTSAT-2 が 1 回の観測に要する時間は全球観測が約 30 分、半球観測が約 15 分である。通常スケジュールにおいては、全球観測が 1 日 24 回、北半球観測が 1 日 20 回、南半球観測が 1 日 4 回行われるため、北半球では、ほぼ 30 分ごとに画像を得ることができる。

待機衛星である MTSAT-1R は、2011 年度から航空機の安全な運行を支援するために、暖候期の主として日中に高頻度観測（日本領域を 5～10 分間隔で観測）が実施されている。2011 年新燃岳の噴火時には、臨時の高頻度観測が実施された。

(2) 搭載センサーの特徴

MTSAT-1R, MTSAT-2 には 5 つの波長帯を観測するセンサーが搭載されている。それぞれの波長帯および空間分解能を Table 2 に示す。

火山灰雲の観測には、これらの 5 つの波長帯の画像とともに、赤外画像 (IR1) と赤外 2 画像 (IR2) の輝度温度差を取った赤外差分画像 (SP) が広く利用されている。

なお、MTSAT-2 の赤外チャンネルには、イメージャの東西スキャン方向に沿って縞状のノイズ (ストライプノイズ) の発生があり、特にノイズが顕著に現れる IR1, IR2 および水蒸気画像 (IR3) には、ノイズを軽減するためにノイズ軽減処理が適用されている。ストライプノイズの影響を強く受ける赤外差分画像では、MTSAT-1R よりも火山灰雲の判別が難しい場合があるので、注意が必要である。

(3) 火山灰雲に対する衛星画像の利用

(7) 赤外画像 (IR1)

赤外画像では輝度温度の低いところを明るく (白く)、高いところを暗く (黒く) 表現しているため、火山から高く舞上がった火山灰雲が冷却されると画像に白く表現される。赤外画像の輝度温度のみで火山灰雲と気象の雲の判別は難しいが、火山灰雲の特徴を考慮して複数画像による動画を使うと判別できる場合がある。火山灰雲の特徴としては、①火口から発生すること、②突然発生すること、③時間が経つとともに拡散しながら風下へ流されていくこと

などがある (東京航空地方気象台・航空路火山灰情報センター, 2003)。

(4) 赤外差分画像 (SP)

赤外差分画像 (赤外画像と赤外 2 画像の輝度温度差を取った画像) は、火山灰雲の検出に最も利用されている画像である。赤外画像 (IR1) と赤外 2 画像 (IR2) は共に大気窓と呼ばれる水蒸気の吸収の少ない波長帯であるが、わずかに IR2 のほうが水蒸気の吸収の影響が大きいので、通常の水蒸気を含む大気を通過したときは IR2 のエネルギー量が IR1 より少なくなり、IR1 と IR2 の輝度温度差 (IR1-IR2) は正の値を取る。一般の気象の雲の場合、IR1-IR2 は正の値を取るが、石英質を含む火山灰雲の場合、途中の水蒸気などの影響を無視すれば、IR1 のエネルギー量は IR2 よりも少なくなるため IR1-IR2 は負の値を取り、気象の雲の場合と逆になる。一般的に赤外差分画像では、差分値が大きくなるほど暗く (黒く) 表現するため、火山灰雲は明るく (白く) 表現される。

火山灰雲の検知に関して、赤外差分画像は火山灰雲の下からのエネルギー量の差を利用しているため、下からのエネルギー量が観測できないような光学的に厚い火山灰雲の場合は、赤外差分画像で白く表現されない。赤外差分画像の白黒の濃淡は火山灰の濃度と比例していないことには注意が必要である。

また、水蒸気爆発や海底噴火などで火山灰に水蒸気が多量に含まれている場合は、水蒸気の影響を受けて赤外差分の輝度温度差が負の値にならず、赤外差分画像で判別が困難なことがある。

(4) 3.8 μ m 画像 (IR4)

3.8 μ m 画像では、火山の噴火や大規模な火災などによる地表の高温域が強調され、画像上で黒い点として観測される。この黒い点は、熱異常域やホットスポットと呼ばれている (気象衛星センター, 2005)。大規模噴火では、高温である火口周辺が 3.8 μ m 画像で黒く表現されることがあり、火山活動状況を把握するひとつの判断材料となる。

(5) 可視画像 (VIS)

可視画像は、対象物で反射した太陽光の強弱を画像化したもので、反射の強いところを明るく (白く)、

弱いところを暗く（黒く）表現している。一般的に火山灰雲は厚い雲や雪面よりも反射率が低いために、やや暗い灰色に見えることがあるが、可視画像の反射率のみで火山灰雲と気象の雲を判別するのは難しい。可視画像でも赤外画像と同様に火山灰雲の特徴を利用して動画で判別することが有効である。

MTSAT の可視画像は赤外画像よりも空間的な解像度が高いため、他の画像で検出が困難な場合でも可視画像で火山灰雲が観測されることがある。また、可視画像は太陽光の影響を受けるため、厚く高度が高い火山灰雲の場合には、地表面や下層の様な雲の表面上に火山灰雲の影が観測されることがある。

(オ) 火山灰雲の高度推定

衛星画像を利用して火山灰雲の高度を推定することができる。画像から高度を推定するために二つの方法が行われている。一つは、赤外画像により測定された輝度温度が火山灰雲の雲頂温度と同じであると仮定して、数値予報 (Numerical Weather Prediction: NWP) の GPV や高層観測による温度の鉛直プロファイルを参照することにより、火山灰雲の高度を推定する方法である（「輝度温度による高度推定」とする）。もう一つの方法は、複数時刻の衛星画像を使って火山灰雲を追跡して、その火山灰雲の移動方向と速度を算出し、NWP データや高層観測による風向・風速と比較することにより、火山灰雲の高度を推定する方法である（「移動による高度推定」とする）。

3.2 新燃岳の火山灰雲の解析結果

本節では 2.2 節と同様に、期間ごとに気象衛星で観測された火山灰雲について画像解析する。利用した衛星画像は、MTSAT-2 が全球観測（毎時 37 分）と北半球観測（毎時 06 分）の 30 分または 1 時間間隔の画像で、MTSAT-1R が高頻度観測の 5 分から 14 分間隔の画像である。一般に画像名には観測終了時刻に近い時刻が使われるが、本稿では、噴火時刻との比較を容易にするため、画像名として新燃岳上空の走査時刻を利用した。

また、本章では気象衛星の画像から火山灰雲の高度推定を行っているが、本解析では火山灰雲全体の最高高度を算出しているため、その推定高度は必ずしも火口直上周辺に限らないことに注意を要する。

3.2.1 1 月 26～28 日噴火の事例

(1) MTSAT-2 画像による火山灰雲の解析

（関連図表：Figs. 7, 38-66）

MTSAT-2 画像では気象レーダーよりも早く、1 月 26 日 12 時 06 分の可視画像から南東へ流れる火山灰雲が観測された。ただし、この火山灰雲は高度が低いことや気象の雲の影響のため赤外画像と赤外差分画像では観測できなかった。噴火の規模が大きくなった 15 時 37 分から赤外画像と赤外差分画像でも火山灰雲(A)が観測されるようになり、16 時 06 分の画像では、明瞭に火山灰雲(A)が確認できるようになった。Figs. 38 and 39 に 26 日 16 時 06 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

その後の画像でも火口から継続した火山灰雲(A)の噴出が観測された。火山灰雲(A)の最高高度は、17 時 37 分と 18 時 06 分の赤外画像の輝度温度 -27.1°C から海拔 6600m と推定された。Fig. 40 に最高高度観測地点付近の NWP を内挿した 26 日 18 時 10 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 41 and 42 に 26 日 18 時 06 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲(A)の移動は東 70kt で 500hPa 付近の風に対応しており、火山灰雲の高度は海拔 5800m と推定された。

26 日 19 時 06 分の画像から、新たに火口から噴出する火山灰雲(B)の輝度温度がやや高くなり、流向は東から南東に変化した。これは火口から噴出する火山灰雲の高度がやや低くなったことを示している。

この火山灰雲(B)の最高高度は、20 時 37 分の赤外画像の輝度温度 -8.9°C から海拔 3000m と推定された。Fig. 43 に最高高度観測地点付近の NWP を内挿した 26 日 20 時 40 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 44 and 45 に 26 日 20 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲(B)の移動は、南東 30kt で 740hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔 2800m と推定された。

26 日 22 時 06 分の赤外画像から、新たに火口から東南東へ流れるやや輝度温度が低い火山灰雲(C)の噴出が顕著となり、南東に流れる火山灰雲(B)と東南東に流れる火山灰雲(C)の 2 方向へ流れる火山灰雲が観測された。

東南東へ流れる新たな火山灰雲(C)の最高高度は、27 日 00 時 37 分の赤外画像の輝度温度 -14.1°C から、

海拔 4300m と推定された。Fig. 46 に最高高度観測地点付近の NWP を内挿した 27 日 00 時 40 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 47 and 48 に 27 日 00 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲(C)の移動は、東南東 45kt で 700hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔 3100m と推定された。

27 日 02 時 06 分の赤外画像から、火口から扇状に東から東南東の方向へ広がる輝度温度の低い火山灰雲(D)の噴出が観測された。

新たな火山灰雲(D)の最高高度は、27 日 04 時 37 分の赤外画像の輝度温度 -25.7°C から海拔 6300m と推定された。Fig. 49 に最高高度観測地点付近の NWP を内挿した 27 日 04 時 40 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 50 and 51 に 27 日 04 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲の移動は、東 50kt で 500hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔 5500m と推定された。

27 日 05 時 07 分の赤外画像から、新たに火口から噴出する火山灰雲(E)の輝度温度が高くなり、南東方向へ帯状に流れるようになった。これは火口から噴出する火山灰雲の高度が低くなったことを示している。

この火山灰雲(E)は、高度が低いことや気象の雲の影響で輝度温度から高度を推定することは難しい。Fig. 52 に新燃岳付近の NWP を内挿した 27 日 07 時 40 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 53 and 54 に 27 日 07 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像、Figs. 55 and 56 に 27 日 12 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲(E)の移動は、南東 35kt で 750hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔 2700m と推定された。なお、この火山灰雲は気象レーダーでは高度が低いため検知できていない。

27 日 16 時 06 分の赤外画像で新たな噴火を示す火山灰雲(F)が観測された。赤外差分画像では気象の雲の影響により火山灰雲は判別できなかった。

火山灰雲(F)の最高高度は、16 時 06 分の赤外画像の輝度温度 -17.8°C から海拔 5400m と推定された。Fig. 57 に最高噴煙高度観測地点付近の NWP を内挿した 27 日 16 時 10 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 58 and 59 に 27 日 16 時 06 分の赤外画像と赤外

差分画像を示す。

一方、火山灰雲(F)の移動は、東南東 60kt で 500hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔 5800m と推定された。移動速度から考えてこの孤立した火山灰雲(F)は、15 時 41 分の爆発的噴火によるものと考えられる。

27 日 16 時 37 分の赤外差分画像から、新たに継続性のある噴火を示す火山灰雲(G)が観測された。

火山灰雲(G)の最高高度は、17 時 37 分の赤外画像の輝度温度 -20.4°C から海拔 6000m と推定された。Fig. 60 に最高高度観測地点付近の NWP を内挿した 27 日 17 時 40 分の鉛直プロファイルを示す。Figs. 61 and 62 に 27 日 17 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲(G)の移動は、東南東 60kt で 500hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は 5800m と推定された。

27 日 19 時 09 分の赤外画像から、新たに火口から噴出する火山灰雲の輝度温度が高くなり、噴煙高度が低くなったことを示している。火山灰雲の高度は気象の雲の影響のため衛星画像の輝度温度や移動で見積もることは難しい。

その後も小規模な噴火が継続していたが、気象の雲の影響により、20 時 37 分の画像から火口から噴出する火山灰雲は観測されなくなった。Figs. 63 and 64 に 27 日 20 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。また、Figs. 65 and 66 に 27 日 23 時 37 分の赤外画像と赤外差分画像を示す。

ここまで衛星画像で観測された火山灰雲(A)~(G)の移動は、大野(2011)でも紹介されているように風向・風速の高度変化の影響を受けている。このことは気象レーダーの噴煙エコー頂高度の時間変化とも整合していた。すなわち、気象レーダーで解析されたエコー頂高度(Fig. 7)が低いほど(B, C)、火山灰雲は下層北西風により南東方向に輸送されたのに対し(Fig. 48)、高いとき(A, D, F, G)は強い偏西風によって東方向に輸送された(Figs. 42, 51 and 62)。衛星画像の解析より推定した火山灰雲の高度の時間変化を、Fig. 7 に点線で重ねて示した。衛星画像とレーダーエコーでは対象としている火山灰雲が完全に一致しているわけではないが、衛星検知はレーダー検知より遅れ、レーダーのエコー頂高度に比べて衛星の雲頂高度の方が低めに解析されるが、よ

り長時間追跡できており、時間変化の傾向は概ね似ていた。例えば、1回目の爆発的噴火に伴う火山灰雲(F)に着目すると、MTSAT-2の通常観測では種子島・福岡合成レーダーより19分遅れ、500~900m低く解析された。

(2) MTSAT-2 画像による火山灰雲の広がり

(関連図表：Fig. 67)

一連の噴火により噴出した火山灰雲は、四国の南から日本の南の広範囲に広がり、比較的長時間(26日15時37分~29日07時37分)にわたって赤外差分画像で観測された。上述のとおり、この間の噴火は高さが異なる継続的な噴火や爆発的噴火が断続的に発生し、火山灰が様々な高度に放出された。上層と下層で風向・風速の違いがあったため、火山灰雲の広がりも複雑な分布となった。Fig. 67に赤外差分画像(26日20時37分~29日02時37分)で観測された火山灰雲の6時間ごとの範囲を示す。画像中の多角形で囲まれた領域が衛星画像で解析された火山灰雲の範囲を示している。

(3) 熱異常域の観測

(関連図表：Figs. 68 and 69)

3.8 μ m画像では、太陽光の影響がない夜間帯を中心に火口周辺で高温域を示す熱異常域が観測されることがある。1月26~28日の一連の噴火においても、26日15時37分~27時08分と27日16時06分~27日23時37分の3.8 μ m帯画像で熱異常域が観測された。一例として、Figs. 68 and 69に27日02時37分と18時06分の3.8 μ m帯画像を示す(白矢印)。

(4) 南鳥島でのエアロゾル観測結果

(関連図表：Figs. 70 and 71)

気象庁が南鳥島で実施しているサンフォトメータによるエアロゾル観測によれば、火山灰雲が南鳥島を通過した1月28日07~09時にかけて、大気全層の濁り具合を示すエアロゾル光学的厚さ(Aerosol Optical Depth: AOD)が大きくなり、エアロゾルの粒子の大きさを表すオンゲストローム指数(α)が小さくなった(すなわち、エアロゾルの粒径が大きくなった)ことが報告されている(本庁環境気象管理官付エアロゾル観測系の事例解析による)。Fig. 70

に南鳥島におけるエアロゾル観測データを示す。エアロゾル観測データが変化した時間帯(28日07~09時)と、赤外差分画像で解析した帯状の火山灰雲が南鳥島上空を通過したタイミングが一致しており、火山灰がエアロゾルとして観測されたと考えられる。Fig. 71に28日02時37分、07時37分、14時37分の赤外差分画像を示す。

3.2.2 1月29~31日噴火の事例

(関連図表：Figs. 72 and 73)

MTSAT-2画像では、1月29日08時から31日16時まで火口から断続的に火山灰雲が噴出している様子が赤外差分画像で観測された。この間は気象の雲が広がっていたことや噴煙高度が低かったため、衛星画像による火山灰雲の高度推定は難しい状況であった。一例として、Figs. 72 and 73に29日20時37分の赤外画像と赤外差分画像を示す。噴煙高度が低いため、赤外画像では火山灰雲(多角形で囲まれた範囲)の判別がほとんどできないが、赤外差分画像では火山灰雲を示唆する白い領域が火口から南東へ広がっている。その後の衛星画像でも火山灰雲が継続して観測でき、31日15時37分の画像まで火山灰雲が継続して観測できた。

3.2.3 2月1~7日の衛星検知の状況

(関連図表：Table 3)

1月26日から続いた一連の噴火は2月1~7日まで継続した。2月1日~7日16時30分までの爆発的噴火および噴火の記録と衛星(MTSAT-1RとMTSAT-2)での検知状況をTable 3に示す。継続的な噴火が発生していたため、衛星画像でも断続的に火山灰雲が観測される状況であった。

3.2.4 2月7日以降の衛星検知の状況

(関連図表：Table 4)

2月7日16時30分~7月31日の爆発的噴火および噴煙高度2500m(火口縁上1000m)以上の噴火の記録と衛星(MTSAT-1RとMTSAT-2)の検知状況をTable 4に示す。衛星で検知されなかった噴火は、すべて気象の雲が多い状況であった。気象の雲の影響がなければ、噴煙高度が海拔2500m程度の火山灰雲は、ほぼ衛星で検知されていた。

3.2.4.1 2月14日05時07分爆発的噴火の事例

(1) MTSAT-1R 画像による初期の火山灰雲の解析

(関連図表：Figs. 21, 74-77)

05 時 07 分の爆発的噴火発生時、新燃岳上空は上層トラフ前面の上中層雲（輝度温度による高度推定では雲頂高度は海拔 4000~5000m）に覆われていた（このときのレーダー画像を Fig. 19 に、14 日 09 時の 500hPa 面天気図を Fig. 74 に示す）。05 時 13 分の赤外面像では、噴火の確認は難しいが、やや輝度温度の低い点（ -21°C ）が観測された。05 時 23 分の赤外面像と赤外差分画像では、小規模であるが火山灰雲が観測され、その高度は赤外面像の輝度温度 -32.7°C から海拔 6800m と推定される。この高度は、1 月 26~27 日の準プリニー式噴火のときに衛星画像から推定された最高高度よりも高く、気象レーダーの噴煙エコー頂高度でも同じ傾向が見られた。噴火開始から 120 分後までの火山灰雲の最低輝度温度に基づく推定高度の推移を Fig. 21 に点線で重ねて示す。火山灰雲の最高高度は噴火発生から 26 分後の 05 時 33 分に赤外面像の輝度温度 -34.2°C から海拔 7000m と推定された。Fig. 75 に最高高度観測地点付近の NWP を内挿した 05 時 30 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 76 and 77 に 05 時 13~53 分までの 10 分ごとの赤外面像と赤外差分画像を示す。10 分ごとの高頻度観測を利用すると、火山灰雲の赤外輝度温度の観測頻度が増えることから最高高度の精度が向上する。

一方、火山灰雲の移動は、東 100kt で 400hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は同じく海拔 7000m と推定された。

(2) MTSAT-1R 画像による火山灰雲の広がり

(関連図表：Fig. 78)

MTSAT-1R 画像によると、火山灰雲は上層の西風に流され、四国の南から東海道沖へ移動した。衛星画像では、低気圧前面の上中層雲の影響により火山灰雲が判別しにくい状況であり、12 時 13 分の画像で気象の雲と一体化して不明瞭となった。Fig. 78 に 14 日 06 時 13 分~09 時 13 分までの 1 時間ごとの赤外差分画像を示す。

なお、航空機からは 11 時 35 分に伊豆大島の南 10NM（約 19km）で海拔 6100m の火山灰雲が観測されたことが報告されている。

3.2.4.2 2月18日18時16分爆発的噴火の事例

(関連図表：Figs. 79-81)

18 時 16 分の爆発的噴火発生時、下層は冬型の名残の下層雲が散在し、上層はトラフ前面の上層雲により、火山灰雲が判別しにくい状況であった。噴火直後 18 時 23 分の MTSAT-1R 画像では噴火の確認はできなかったが、18 時 33 分の赤外面像では、やや輝度温度の低い点（ -20.0°C ）が観測され、 $3.8\mu\text{m}$ 帯画像では熱異常域が観測された。18 時 43 分の赤外面像でも、やや輝度温度の低い点（ -15.8°C ）が観測できるが、赤外差分画像で火山灰雲の領域を判別することは難しかった。18 時 56 分の赤外差分画像では、明瞭に火山灰雲が確認できるようになった。

火山灰雲の高度は 18 時 33 分と 18 時 43 分の画像で観測された輝度温度から海拔 5600~6100m と推定されるが、気象の雲により火山灰雲の領域の判別ができないため、誤差が大きい可能性がある。なお、航空機からは 18 時 23 分に新燃岳付近で東へ流れる海拔 5500m の火山灰雲が観測されたことが報告されている。Fig. 79 に新燃岳上空の NWP を内挿した 18 時 40 分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 80 and 81 に 18 時 33 分~19 時 43 分までの 10~17 分ごとの赤外面像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲の移動は、東 40kt で 500hPa 付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔 5600m と推定された。

その後の衛星画像では、東へ移動しながら南方向へ流れる火山灰雲が観測された。なお、遠望カメラによる噴煙観測では南へ流れる噴煙が報告されており、2.2.3 節で述べたとおり新燃岳の南西方向でも降灰が確認された。これに対応して、20 時 13 分~33 分の赤外差分画像では南西に移動する小規模な火山灰雲も観測されており、その後 20 時 53 分の画像から明瞭となり九州の西海上を西方向へ移動した。Fig. 79 の NWP による鉛直プロファイルでも 700hPa 以下は南寄りの風が予測されているため、南から南西へ流れる火山灰雲は中下層の火山灰雲で、東へ流れる火山灰雲は上層の火山灰雲であったと考えられる。その後、東へ流れた火山灰雲は 23 時 23 分の赤外差分画像で気象の雲との判別ができなくなった。

3.2.4.3 3月13日17時45分噴火の事例

(1) MTSAT-1R 画像による初期の火山灰雲の解析

(関連図表：Figs. 28, 82-84)

17時45分の噴火発生時、九州南部は日本の東に中心を持つ移動性高気圧縁辺の東寄りの風の影響による下層雲が散在する状況であった。噴火直後の17時53分のMTSAT-1Rの赤外面像では、画像からの噴火の確認は難しいが、やや輝度温度の低い点(4.6°C)が観測できた。18時03分の赤外面像と赤外差分画像では、明瞭に火山灰雲が観測され、その高度は赤外面像の輝度温度-26.2°Cから海拔7100mと推定された。

Fig. 28に噴火開始から110分後までの火山灰雲の最低輝度温度とそれに基づく推定高度の推移を点線で重ねて示す。火山灰雲の最高高度は噴火発生から18分後の18時03分の輝度温度-26.2°Cから海拔7100mと推定された。なお、航空機からは17時51分に新燃岳付近で海拔6100m、18時20分に海拔11000mの火山灰雲が観測されたことが報告されている。Fig. 82に最高高度観測地点付近のNWPによる18時00分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 83 and 84に17時53分～18時56分までの10～13分ごとの赤外面像と赤外差分画像を示す。噴火直後の噴煙高度のピークは、3.2.1節(1)で解析した連続的噴火に対する通常観測の場合(Fig. 7)や3.2.4.1節(1)あるいは次節で解析する爆発的噴火に対する高頻度観測の場合(Figs. 21 and 33)と同様に、レーダーのエコー頂の方が早く高い結果であった。この事例では、MTSAT-1Rの高頻度観測では種子島・福岡合成レーダーより6分遅れ、500m低く解析された。ただし、時間差は通常観測の場合より縮小している。また解析された高度はその後逆転してレーダーでは急速に検知できなくなった。

一方、火山灰雲の移動は、東100ktで370hPa付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔8300mと推定された。この高度は、種子島・福岡合成レーダーと鹿児島DRAWで解析された噴煙エコー頂高度の中間であった。

2.2.5.1節はじめに述べたようにその後も継続した噴火が発生していたが、18時33分の赤外面像から火口付近の火山灰雲は南よりに流れ始め、火口から噴出する噴煙高度が低くなったことを示していた。10分ごとの高頻度観測を利用すると、火山灰雲の精度よい追跡が可能となった。このように噴火が継続する場合には、火口周辺の細かい火山灰雲の流向の

変化が観測されるため、火山灰雲の高度変化が把握できるようになる。

(2) MTSAT-1R 画像による火山灰雲の広がり

(関連図表：Fig. 85)

衛星画像では主な火山灰雲は上層の西風に流され、四国の南へ移動した。四国の南には九州の南東海上の低気圧による上中層雲域があったため、この雲と一体化して火山灰雲は14日02時03分の画像で不明瞭となった。Fig. 85に13日19時13分～14日00時13分までの1時間ごとの赤外差分画像を示す。

3.2.4.4 4月18日19時22分噴火の事例

(1) MTSAT-1R 画像による初期の火山灰雲の解析

(関連図表：Figs. 33, 86-88)

19時22分の噴火発生時、九州南部は日本海に中心を持つ寒冷渦の影響による対流雲が散在していたが、新燃岳上空は雲の少ない状況であった。噴火直後の19時23分の衛星画像では火山灰雲は観測されなかったが、19時33分のMTSAT-1Rの赤外面像と赤外差分画像では、火口の東に火山灰雲が確認でき、その高度は赤外面像の輝度温度-6.0°Cから海拔3300mと推定された。

Fig. 33に噴火開始から140分後までの火山灰雲の最低輝度温度に基づく推定高度の推移を点線で重ねて示す。火山灰雲の最高高度は噴火発生から31分後の19時53分の輝度温度-5.7°Cから海拔3400mと推定された。なお、60分後以降は輝度温度が一時的に下がっており気象の雲の影響を受けている可能性がある。Fig. 86に最高高度観測地点付近のNWPによる19時50分の鉛直プロファイルを示す。また、Figs. 87 and 88に19時33分～20時13分までの10分ごとの赤外面像と赤外差分画像を示す。

一方、火山灰雲の移動は、東北東75ktで500hPa付近の風と対応しており、火山灰雲の高度は海拔5800mと推定された。

20時13分以降は火口から噴出する火山灰雲の赤外面像の輝度温度が高くなり、火口から噴出する火山灰雲低くなったことを示していた。その後、気象の雲の影響により20時53分の画像から火口からの火山灰雲の噴出は観測できなくなった。

(2) MTSAT-1R 画像による火山灰雲の広がり

(関連図表 : Fig. 89)

一連の噴火による火山灰雲は 500hPa~850hPa の風に流されて広がっており、火山灰が様々な高度に放出されたと考えられる。火山灰雲の先端は東北東 75kt (500hPa 付近) で移動し、足摺岬、室戸岬、紀伊半島南部を経て、東海道沖で不明瞭となった。一方で動きの遅い火山灰雲は東南東 20kt (850hPa) で移動し、四国の南で不明瞭になった。Fig. 89 に 18 日 21 時 13 分~19 日 05 時 13 分までの 2 時間ごとの赤外差分画像を示す。

4 まとめと今後の課題

2011 年新燃岳噴火に伴い、気象レーダーで観測された噴煙エコーと気象衛星で観測された火山灰雲を解析した。特に 1 月 26~27 日に発生したような連続的噴火に対して、気象レーダーでは従来の遠望観測で十分把握できなかった噴煙高度の詳細な時間変化を観測できることが明らかになった。この噴煙エコー頂高度の解析結果は、降灰の量的予測の初期値としても有効なことが示されている (Hashimoto et al., 2012 ; 新堀・他, 2012)。しかし、気象衛星で観測された火山灰雲の広がりとの比較から、特定バンドの気象レーダー単体では噴煙すべてを常に捉えきれていない。待機衛星で実施された高頻度観測では従来の通常観測より火山灰雲の詳細な追跡が可能になることが示されたが、その雲頂高度を輝度温度や移動による高度推定で噴火直後に解析することは難しい課題である。

本稿で解析した気象レーダーは、気象庁の降水観測や低層ウィンドシア検出などを目的とするレーダーであり、必ずしも噴煙観測用ではない。このため、観測データを用いてより定量的な噴煙解析を行うためには、(1), (2)式において火山灰用レーダー方程式を確立する必要がある。また噴火直後に上昇中の噴煙を観測するような場合、必ずしも PPI スキャンする必要はなく、種子島・福岡合成レーダーと鹿児島 DRAW の比較で見たように目的に適した仰角シーケンスの設定など観測方法の検討が必要である。方位角を火口方向に固定し仰角を変化させる RHI (Range Height Indicator) スキャンできれば、火山噴煙のような変化の激しい現象に対して高速スキャンすることができ、監視業務のみならず火山灰や火山礫の輸送過程を研究する上で重要な噴煙の発達機構

の解明 (鈴木・他, 2011, 2012) にも有効になると考えられる。さらに仰角シーケンスを最大エコー強度が観測される低仰角に限定すれば、時間分解能をより上げることができる。この場合、最大エコー強度の解析値のみから噴煙エコー頂高度を推定するには、(5)式のような Z-H 関係が有効になると考えられる。この関係式は、気象エコーの影響で最大エコー強度しか解析できないような場合にも有効になるかもしれないが、ここで導いた Z-H 関係はこれまで述べてきたとおり多くの仮定を含んでおり、理論と観測の双方からより精緻化することが課題である。同様に、レーダーデータから導出できる可能性のある重要な関係式として、ゾンデによる噴煙観測 (長井・他, 2011) や現地調査による降灰分布 (例えば、古川・他, 2011) などグラントルースに基づいた降灰版 Z-R 関係がある (真木・他, 2012)。これはエコー強度の解析値から地上降灰量を推定するもので、レーダー・アメダス解析雨量のような降灰観測網の十分でない状況下での実況監視や量的降灰予報の検証を行うためにも重要な解析値を与える。さらに、レーダーデータに基づく大気中の浮遊火山灰を計測する試みも行われている (安田・他, 2012)。

またドップラー速度については、火山礫の落下が確認された 1 月 27 日、2 月 14 日、3 月 13 日、4 月 18 日などの噴火事例ではいずれもどこかのレーダーで観測されていた。これは気象場で輸送される噴煙中の粒子の落下速度が大きかったことを示唆しており、すなわち比較的大きな粒径をもつ火山礫が高い高度まで持ち上げられていたことを意味する。初期値の噴煙柱において、火山礫がどのような拡散比率をもっていったかを解明する上でも、移流拡散モデルと組み合わせたドップラー速度の分析は今後の課題である。

現在の気象レーダーによる噴煙観測の限界として、真木・他 (2012) で指摘されているように、①レーダーサイトと火山噴煙の位置関係によっては背の低い噴煙が捉えられないこと、②降水時に気象エコーの影響で噴煙エコーが検出できないケースがあること、③C バンド波長帯を利用していることにより高高度に分布する小粒径の火山灰が検出できないこと、に加え上で述べた、④噴煙観測に対する時間分解能が粗くスキャンしたタイミングでは見逃しも生じること、などが挙げられる。これらの問題に対して、

①従来の遠望や既存のレーダーに加え、火山噴火時に火口に近いところから小さいビーム幅の広がりでも機動的に観測できる可搬型レーダー、②降水粒子と火山灰粒子の形状の違いで雨灰判別できる可能性のある二重偏波レーダー、③従来の気象衛星に加え、噴煙観測に適切なエコー強度のしきい値設定やより短波長の X, Ku バンドレーダー、④大気レーダーで用いられているようなフェーズドアレイレーダーによる観測が、今後の研究課題となるであろう。

気象衛星による火山灰雲の観測は、気象レーダーによる観測と比較して、解析対象が全く同一ではない点に注意が必要であるが、最初の検知および続いて噴煙の最高到達高度が検出される時刻が遅れ、その高度はエコー頂高度より低めに解析されること、検出時刻の遅れは通常観測より高頻度観測の方が改善することを示した。また、継続時間の短い単発的噴火では気象レーダーの噴煙エコーは噴火直後の短時間で検知できなくなるのに対し気象衛星の火山灰雲は長時間追跡できること、連続的噴火で観測された噴煙高度の相対的な時間変化の傾向は概ね似ていることを示した。しかしながら特に連続的噴火で解析された噴煙高度の絶対値は、気象レーダー>気象衛星>遠望観測であり、これらの差異を小さくして各々の観測精度を高めることが重要である(例えば, Tupper and Wunderman, 2009)。現在の気象衛星から推定する火山灰雲の雲頂高度については、水蒸気画像を用いた IR-WV インターセプト補正(徳野・土屋, 1990)が有効な場合があると考えられる。さらに、次期気象衛星(ひまわり 8 号, 9 号)では、空間分解能が可視 0.5km, 赤外 2km に倍増し、日本域の高頻度観測は現在の気象レーダーのボリュームスキャンの時間間隔を上回る 2.5 分間隔に強化、火山灰プロダクトに利用できる観測チャンネルも追加される計画である。これら新規機能の利活用が、今後の気象衛星による火山灰雲観測の課題である。

リモートセンシング技術を用いた火山噴煙観測は、気象レーダーによる狭域・短時間観測と気象衛星による広域・長時間観測の双方を組み合わせ、遠望観測を補完しつつ火山監視業務への活用を考えてゆくことが重要である。さらに、高木・他(2013)の噴火規模を即時的に把握するためのアプローチの一つとして研究を進めてゆく必要がある。

謝辞

本稿の一部は、科学技術振興調整費「平成 23 年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究」によって実施された。執筆に際しては、気象研究所地震火山研究部の横田 崇部長、第三研究室の山本哲也室長、高木朗充主任研究官、安藤 忍主任研究官、鬼澤真也研究官、予報研究部第一研究室の橋本明弘主任研究官、地磁気観測所の吉川澄夫前所長および防災科学技術研究所観測・予測研究領域の真木雅之前領域長(現:鹿児島大学)から有益な議論を戴いた。気象庁地震火山部火山課の山里 平課長、松森敏幸企画官、長谷川嘉彦調査官からは、文献の収集および有益な助言を戴いた。鹿児島 DRAW データは観測部観測システム運用室から提供戴き、気象レーダーの解析には「RISS」および田中恵信氏、鈴木 修氏、山内 洋氏により気象研究所で開発・改良された「Draft」を使用した。航空機の安全な運航を支援するために行っている MTSAT-1R による高頻度観測データは気象衛星センターから提供戴き、気象衛星画像の解析には同センターで作成された「SATAID」を使用した。また、南鳥島のエーロゾルデータおよび解析結果は地球環境・海洋部環境気象管理官付エーロゾル観測係から提供頂いた。さらに査読者である東京 VAAC の白土正明氏(現:鹿児島地方気象台)、杉浦 理氏および編集委員会の内藤宏人氏、坂井孝行氏、長岡 優氏、菅野智之氏、本間直樹氏からのご指摘により、本稿は改善された。記して感謝の意を表する。

List of Figures and Tables

| Dates in 2011 | Radar echoes | Satellite images |
|----------------------------|------------------------------------|--|
| 14JST- 21JST 26 Jan. | Figs. 4, 9, 12 and 13 (§ 2.2.2) | Figs. 38, 39, 41, 42, 44, 45 and 67 (§ 3.2.1) |
| 21JST 26- 15JST 27 Jan. | Figs. 5 and 10 (§ 2.2.2) | Figs. 47, 48, 50, 51, 53-56, 67 and 68 (§ 3.2.1) |
| 15JST 27- 00JST 28 Jan. | Figs. 6 and 11 (§ 2.2.2) | Figs. 58, 59, 61-67 and 69 (§ 3.2.1) |
| 00JST 28- | Fig. 16 (§ 2.2.3) | Figs. 67, 71-73 |

| | | |
|----------------------------|--|--------------------------------|
| 21JST 29 Jan. | | (§§ 3.2.1, 3.2.2) |
| 08JST 01- 16JST 02 Feb. | Fig. 16 (§ 2.2.3) | Table 3 (§ 3.2.3) |
| 11-12JST 11 Feb. | Figs. 17 and 18 (§ 2.2.4) | Table 4 (§ 3.2.4) |
| 05-10JST 14 Feb. | Figs. 19, 20, 22 and 23 (§ 2.2.4.1) | Figs. 76-78 (§ 3.2.4.1) |
| 18-20JST 18 Feb. | Figs. 24 and 25 (§ 2.2.4.2) | Figs. 80 and 81 (§ 3.2.4.2) |
| 17JST 13- 01JST 14 Mar. | Figs. 26, 27, 29 and 30 (§ 2.2.5.1) | Figs. 83-85 (§ 3.2.4.3) |
| 19JST 18- 06JST 19 Apr. | Figs. 31, 32 and 34 (§ 2.2.5.2) | Figs. 87-89 (§ 3.2.4.4) |

文献

荒生公雄・岩崎博之・福井敬一・早川由紀夫・武田喬男 (1996): 降水レーダを用いた雲仙岳火砕流に伴う噴煙の構造の時間変化に関する事例解析, 火山, **41**, 149-158.

飯野直子・金柿主税・木下紀正 (2011): 霧島新燃岳 2011 年噴煙の映像解析と移流解析, 熊本大学教育学部紀要自然科学, **60**, 69-76.

石原正仁 (2001): ドップラー気象レーダーの応用, ドップラー気象レーダー, 気象研究ノート, **200**, 39-73.

石森啓之・宮村淳一・横田 崇 (2007): 気象レーダーで捉えた 2004 年浅間山噴火の噴煙, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, V156-033.

大野滋規 (2011): 今月のひまわり画像-2011 年 1 月, 霧島山(新燃岳)の噴火による火山灰, 天気, **58**, 224.

鬼澤真也・新堀敏基・福井敬一 (2013a): 遠望カメラ画像による噴煙高度の把握とマグマ噴出率の推定-2011 年 3 月 13 日霧島山新燃岳噴火の事例-, 験震時報, **77**, 119-138.

鬼澤真也・新堀敏基・福井敬一・安藤 忍・弘瀬冬樹・木村一洋・吉田康宏・岩切一宏・吉田知央・山本哲也・吉川澄夫 (2013b): 2011 年霧島山新燃岳噴火における降灰観測と予測, 験震時報, **77**, 215-222.

鎌田靖宏 (2006): 火山灰検知-火山灰の検出と応用-, 衛星からわかる気象-マルチチャンネルデータの利用-, 気象研究ノート, **212**, 77-104.

気象衛星センター (2005): 3.7 μm 帯画像の解析と利用 運輸多目的衛星新 1 号 (MTSAT-1R), p. 88.

気象庁 (2011a): 特集 1. 2011 年 1 月からの霧島山(新燃岳)の噴火, 平成 23 年 2 月 地震・火山月報(防災編), 51-57.

気象庁 (2011b): 日本の主な火山活動, 平成 23 年 3 月 地震・火山月報(防災編), 41-54.

気象庁 (2011c): 日本の主な火山活動, 平成 23 年 4 月 地震・火山月報(防災編), 37-48.

熊谷幸浩 (2006): RaDAMoS (レーダーデータ解析監視システム)の開発, レーダー観測技術資料, **54**, II-1-9.

小園誠史・上田英樹・小澤 拓・小屋口剛博・藤田英輔・鶴川元雄・棚田俊收 (2011): 傾斜変動データに基づく 2011 年霧島山新燃岳噴火におけるマグマ噴出率の見積もり, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC070-P35.

澤田可洋 (2003a): 静止気象衛星「ひまわり」の画像による噴火噴煙の観測とその解析に関する研究, 気象庁研究時報, **55.4**, 57-152.

澤田可洋 (2003b): 気象レーダーで観測された噴煙エコーの記録, 測候時報, **70.4**, 119-169.

新堀敏基・福井敬一 (2011): 気象レーダーにより観測された 2011 年霧島山(新燃岳)の噴煙エコー, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC070-P15.

新堀敏基・福井敬一 (2012a): 種子島・福岡レーダーで観測された 2011 年霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー頂高度の時間変化, 火山噴火予知連絡会会報, **108**, 189-196.

新堀敏基・福井敬一 (2012b): 種子島・福岡レーダーで観測された 2011 年霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー頂高度の時間変化(その 2), 火山噴火予知連絡会会報, **109**, 173-178.

新堀敏基・福井敬一・橋本明弘・山里 平 (2009): 2009 年 2 月 2 日浅間山噴火に伴う量的降灰予測-気象レーダーにより観測された噴煙エコー頂高度の利用-, 日本火山学会講演予稿集, B29.

新堀敏基・相川百合・福井敬一・橋本明弘・清野直子・山里 平 (2010): 火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測-2009 年浅間山噴火の事例-, 気象研究所研究報告, **61**, 13-29.

新堀敏基・橋本明弘・鬼澤真也・高木朗充・福井敬一・相川百合・甲斐玲子・白土正明・平祐太郎 (2012): 2011 年霧島山(新燃岳)噴火に伴う量的降灰予測-気象レーダーにより観測された噴煙エコー頂高度の利用-, 日本気象学会講演予稿集, **101**, P226.

- 鈴木雄治郎・小屋口剛博 (2012): 火山噴煙の3次元数値シミュレーション: 周囲の風が噴煙高度に与える影響, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC54-P13.
- 鈴木雄治郎・小屋口剛博・武尾 実・大湊隆雄・市原美恵・中田節也・鈴木由希・金子隆之 (2011): 霧島山新燃岳の噴煙放出における噴出条件と噴煙高度の関係, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC070-P17.
- 高木朗充・新堀敏基・山本哲也・白土正明・平祐太郎・加藤幸司・福井敬一 (2013): 物理観測による新燃岳の噴火規模の即時的な推定の試み, 験震時報, **77**, 111-118.
- 徳野正己・土屋 清 (1990): MOS-1/VTIR 水蒸気チャネルと赤外チャネルによる半透明の巻雲の高度推定, 日本リモートセンシング学術誌, **10**, 203-217.
- 東京航空地方気象台・航空路火山灰情報センター (2003): 気象衛星画像による火山灰雲の検知と事例 (1997年~2001年, CD-ROM版).
- 長井雅史・鶴川元雄・棚田俊収・新堀敏基・橋本明弘・鬼澤真也 (2011): ゾンデによる霧島山新燃岳の噴煙観測, 日本火山学会講演予稿集, A1-17.
- 深尾昌一郎・浜津享助 (2009): 気象と大気のレーダーリモートセンシング (改訂第2版), 京都大学学術出版会, 502 pp.
- 福井敬一・新堀敏基 (2010): 種子島気象レーダーによる桜島噴火噴煙の検知率, 日本火山学会講演予稿集, 3-A05.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2013): 2011年霧島山新燃岳の噴火活動, 験震時報, **77**, 65-96.
- 古川竜太・下司信夫・中野 俊・星住英夫・宝田晋治・及川輝樹・田中明子・竹内晋吾・土志田潔・田島靖久・筒井正明・長谷中利昭・小林哲夫 (2011): 霧島新燃岳火山2011年噴火1月噴出物の緊急調査, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC050-05.
- 真木雅之・前坂 剛・小園誠史・長井雅史・古川竜太・中田節也・越田智喜・武中英好 (2012): 気象レーダによる火山噴火監視の可能性—2011年1月~3月の霧島新燃岳の噴火事例解析結果—, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SVC54-07.
- 安田成夫・梶谷義雄・國友 優 (2012): XバンドMPレーダによる浮遊火山灰計測の試み, 京都大学防災研究所年報, **55B**, 1-8.
- Arason, P., G. N. Petersen, and H. Bjornsson (2011): Observations of the altitude of the volcanic plume during the eruption of Eyjafjallajökull, April–May 2010, *Earth Syst. Sci. Data*, **3**, 9-17.
- Bjornsson, H., G. N. Petersen, and P. Arason (2012): Monitoring of plume height during the Grimsvötn 2011 eruption in Iceland, EGU General Assembly, 2012-9706.
- Bonadonna, C., R. Genco, M. Gouhier, M. Pistolesi, R. Cioni, F. Alfano, A. Hoskuldsson, and M. Ripepe (2011): Tephra sedimentation during the 2010 Eyjafjallajökull eruption (Iceland) from deposit, radar, and satellite observations, *J. Geophys. Res.*, **116**, B12202.
- Hashimoto, A., T. Shimbori, and K. Fukui (2012): Tephra fall simulation for the eruptions at Mt. Shinmoe-dake during 26-27 January 2011 with JMANHM, SOLA, **8**, 37-40.
- Lacasee, C., S. Karlsdóttir, G. Larsen, H. Soosalu, W. I. Rose, and G. G. J. Ernst (2004): Weather radar observations of the Hekla 2000 eruption cloud, Iceland, *Bull. Volcanol.*, **66**, 457-473.
- Marzano, F. S., M. Lamantea, M. Montopoli, S. Di Fabio, and E. Picciotti (2011): The Eyjafjöll explosive volcanic eruption from a microwave weather radar perspective, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 9503–9518.
- Morton, B. R., G. Taylor, and J. S. Turner (1956): Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proc. Roy. Soc. (London)*, **A234**, 1–23.
- Tupper, A., and R. Wunderman (2009): Reducing discrepancies in ground and satellite-observed eruption heights, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 22-31.
- Witham, C. S., M. C. Hort, R. Potts, R. Servranckx, P. Husson, and F. Bonnardot (2007): Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvötn eruption, *Meteorol. Appl.*, **14**, 27-38.

(編集担当 坂井孝行・長岡 優)

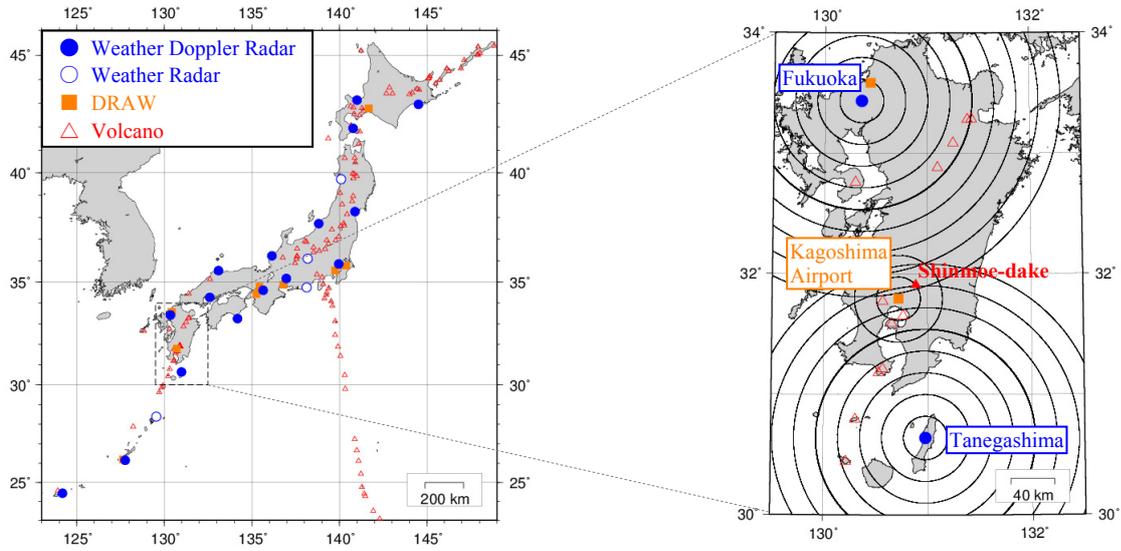


Fig. 1 Location map of JMA's operational weather radar network and volcanoes in Japan (as of December 2011). The concentric circles around each radar site represent the distance from the site in 20km intervals.

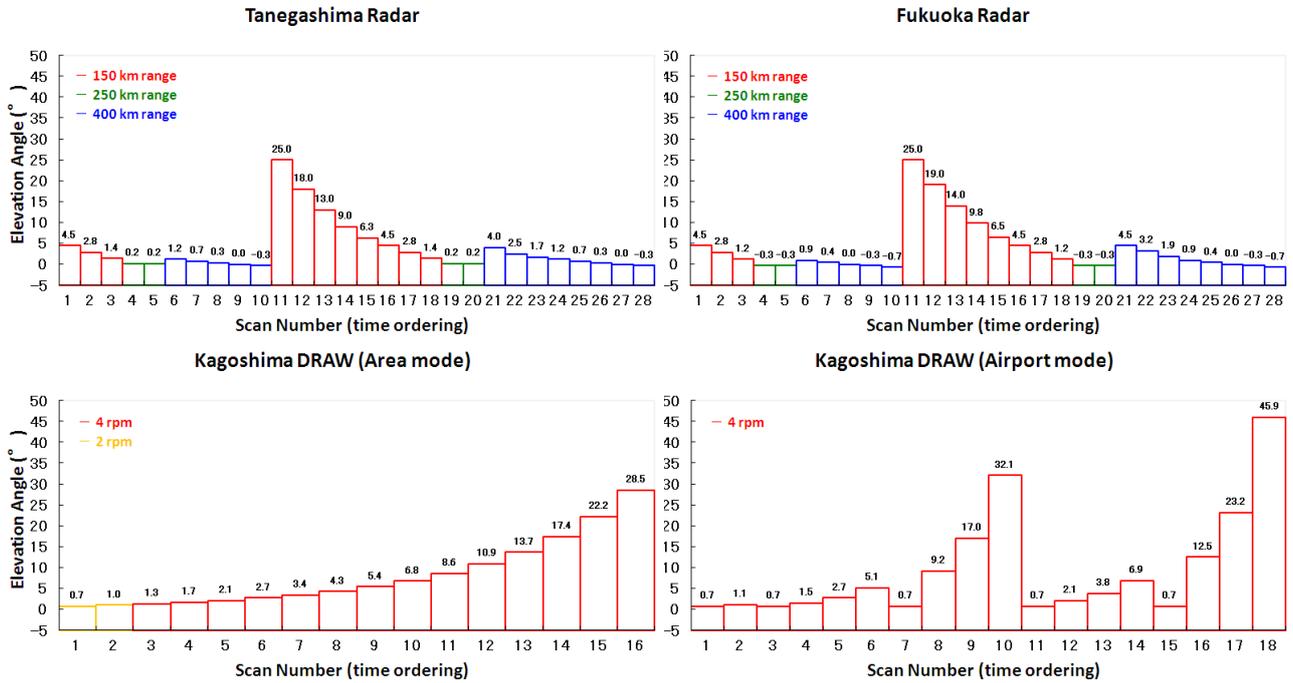


Fig. 2 Scan sequences of the weather Doppler radars at Tanegashima, Fukuoka and Kagoshima Airport.

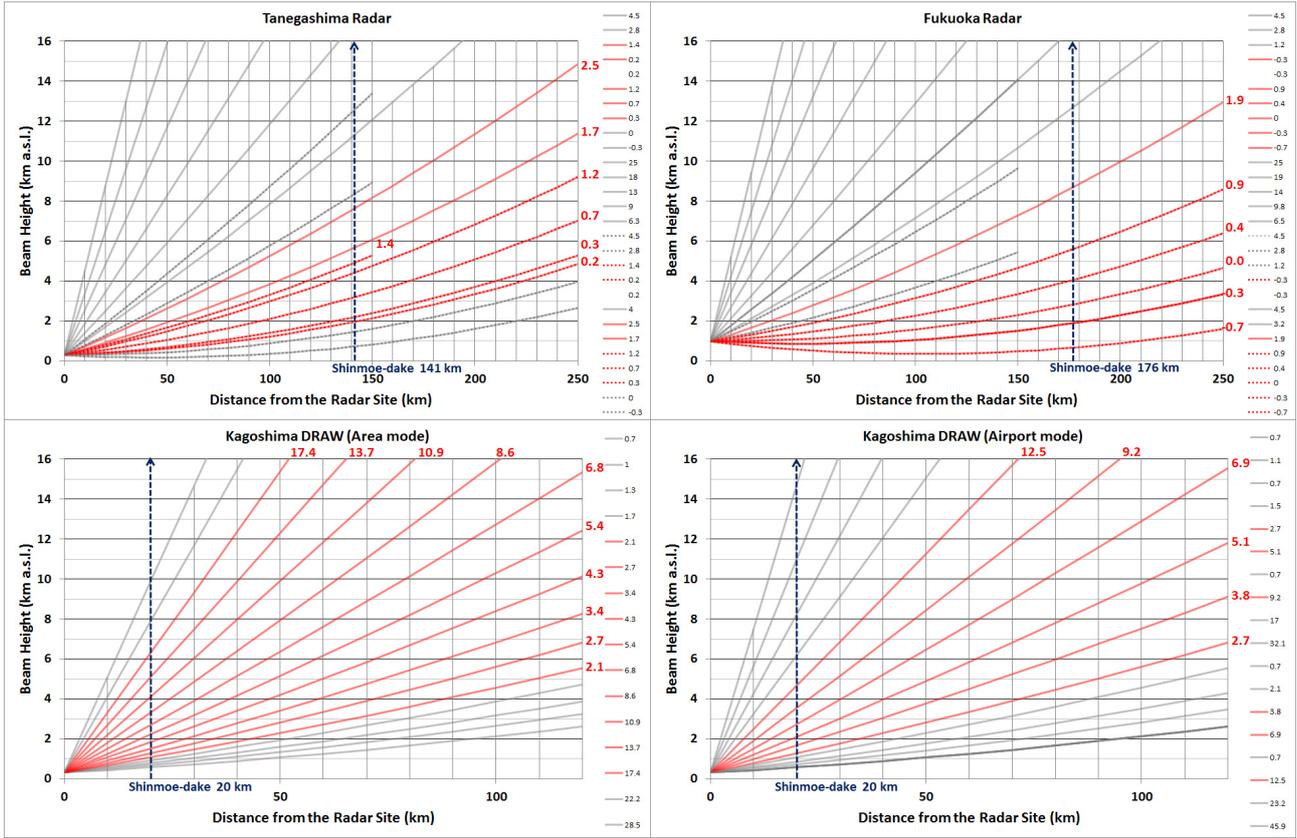


Fig. 3 Relations between elevation angles and beam height of the weather Doppler radars at Tanegashima, Fukuoka and Kagoshima Airport. Red lines indicate the elevation angles from which the eruption cloud echoes of Shinmoedake volcano were observed in 2011.

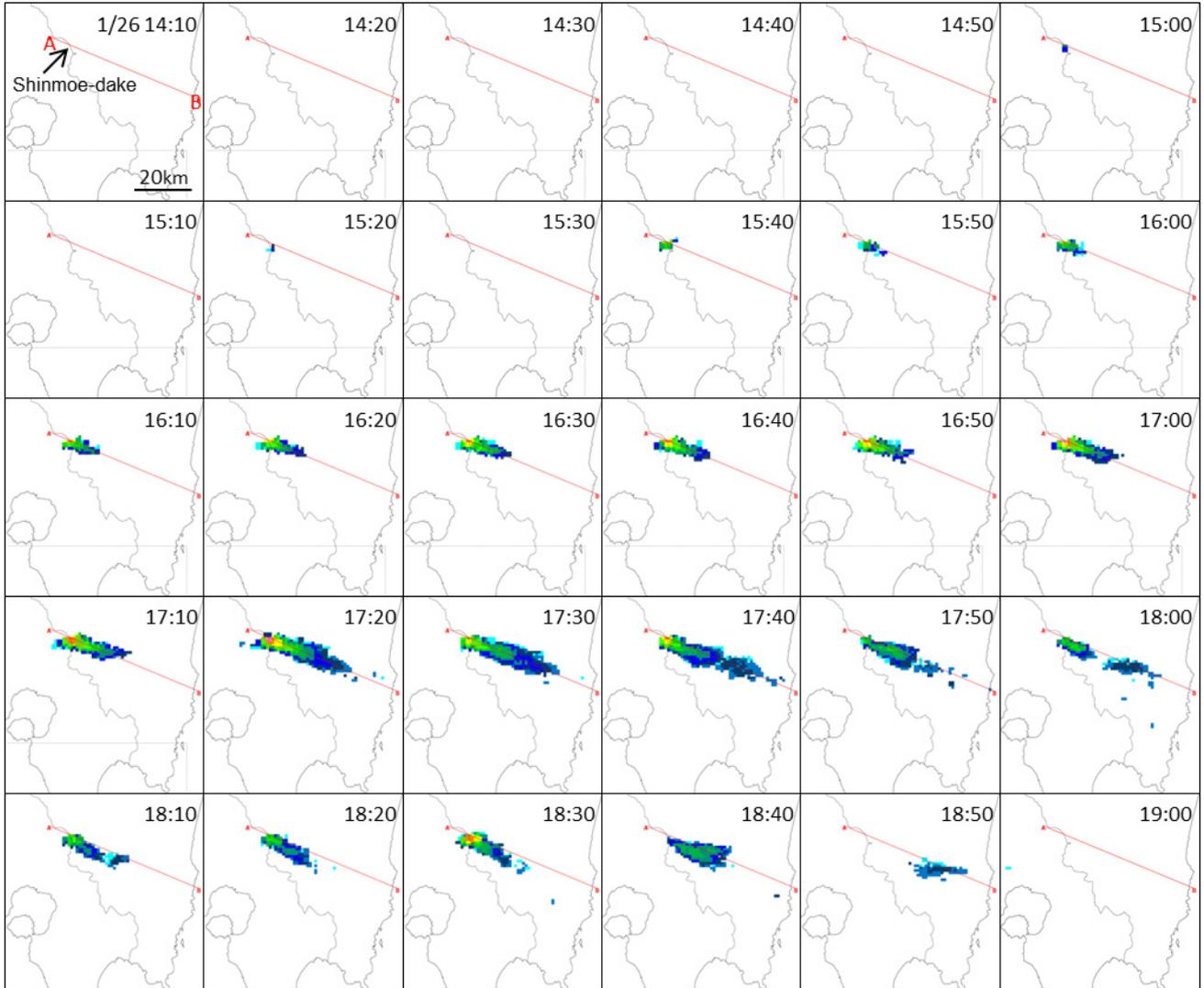


Fig. 4(a) Eruption cloud echoes at Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, 14:00–19:00JST, January 26, 2011). CAPPI images at 2km height at different observation times. Times denote the end of the volume scan.

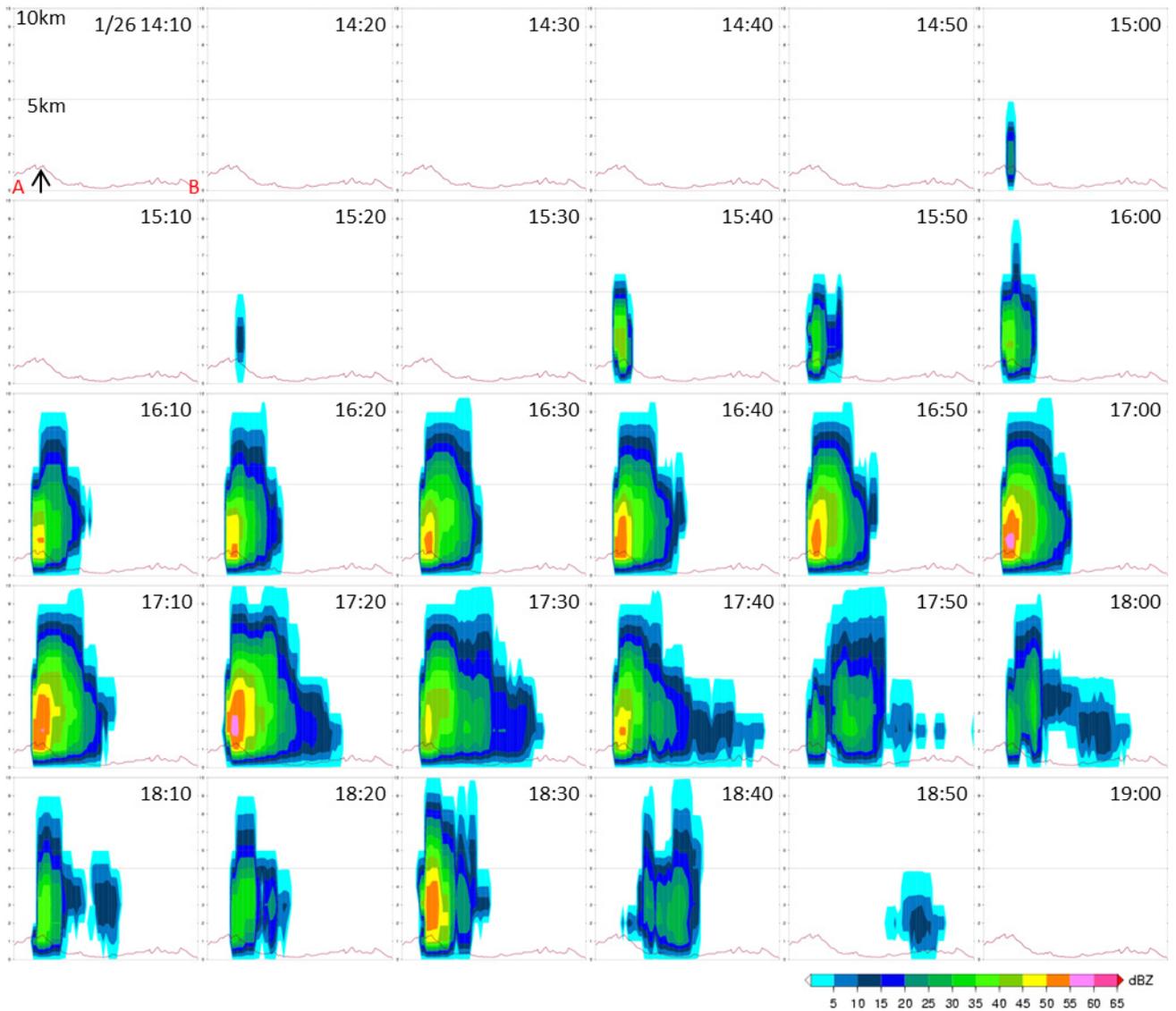


Fig. 4(b) Vertical cross-sections along the A-B line on each CAPPI image (14:00–19:00JST, January 26, 2011).

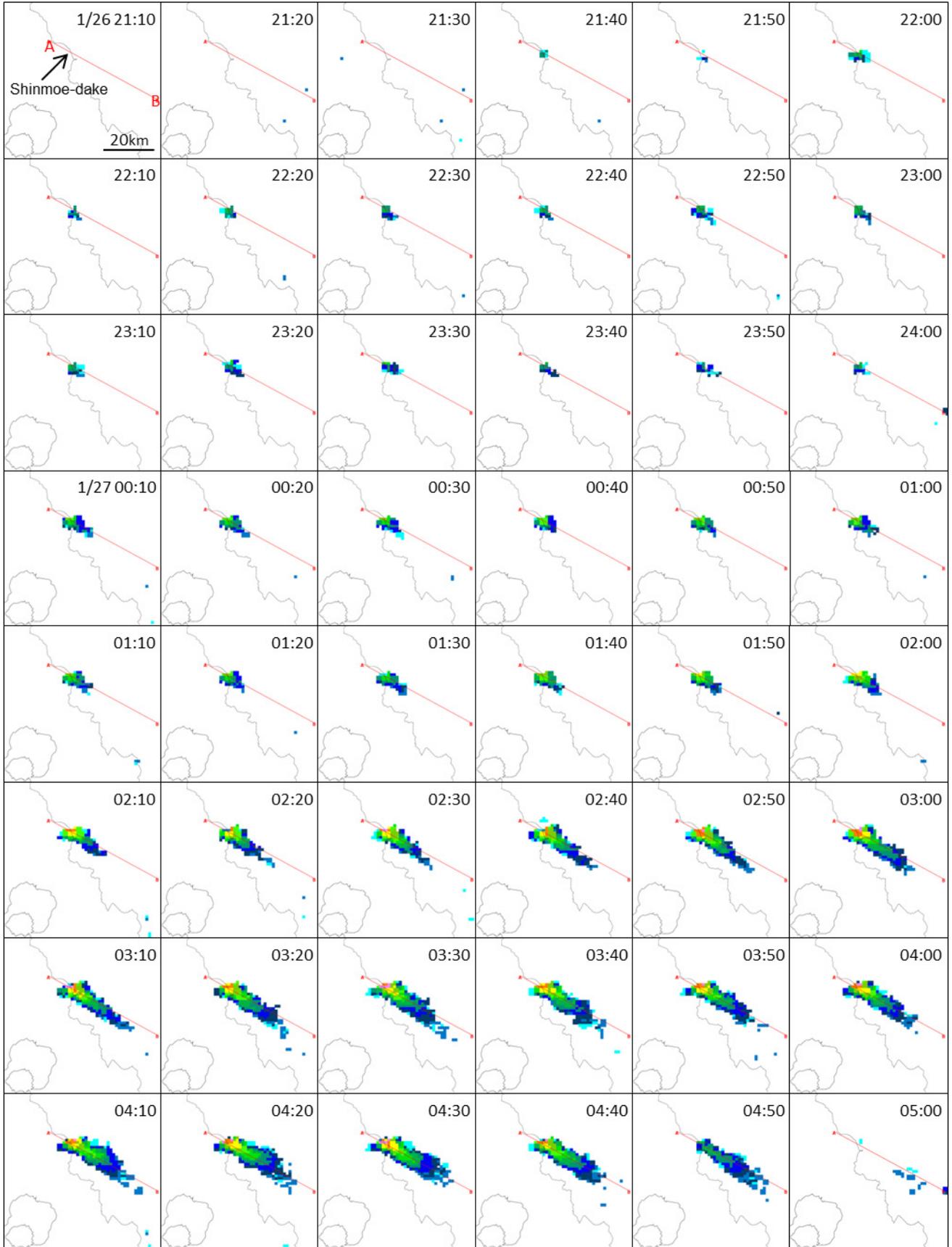


Fig. 5(a) Same as Fig. 4(a) (21:00JST, January 26 to 05:00JST, January 27, 2011).

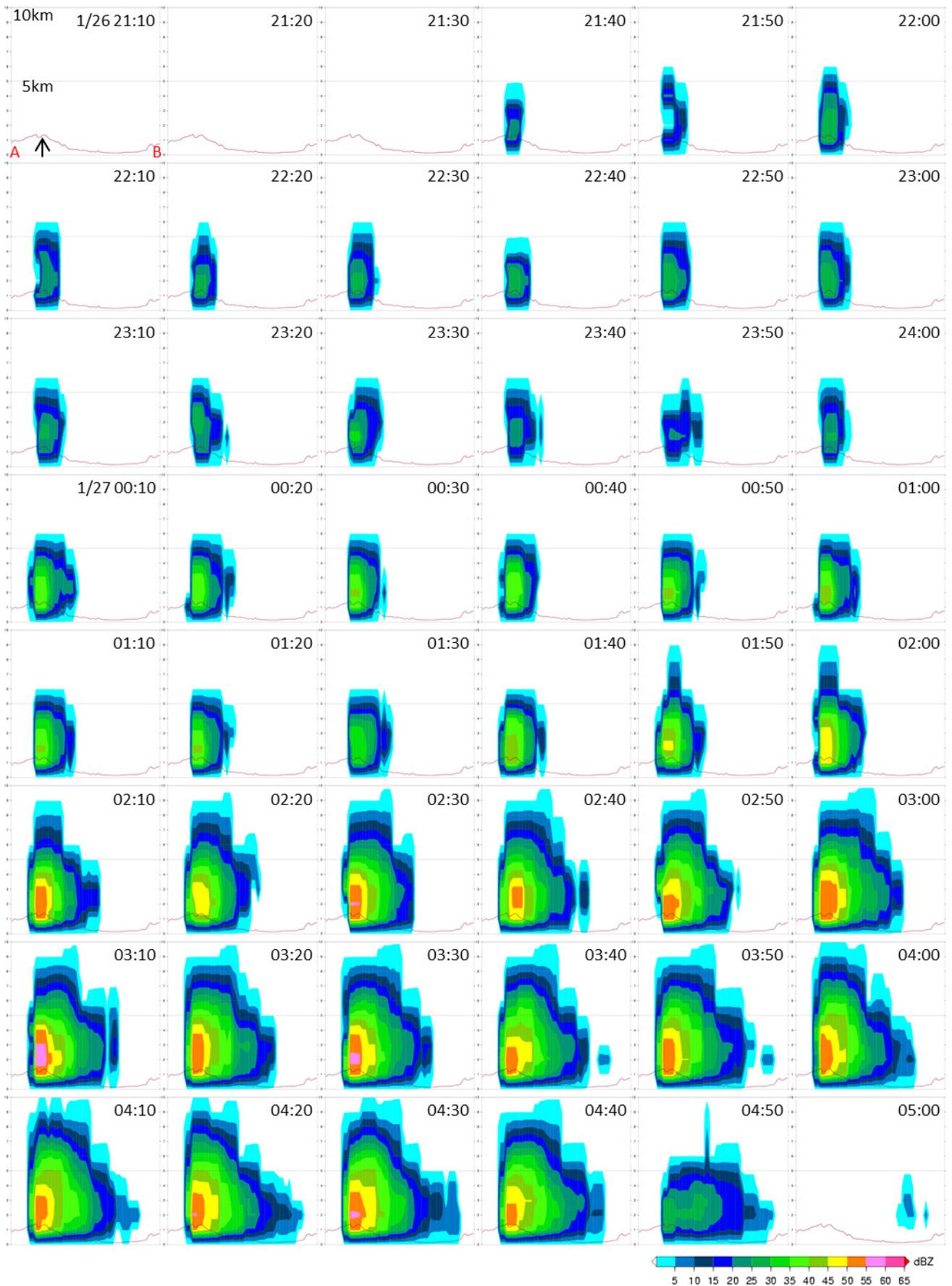


Fig. 5(b) Same as Fig. 4(b) (21:00JST, January 26 to 05:00JST, January 27, 2011).

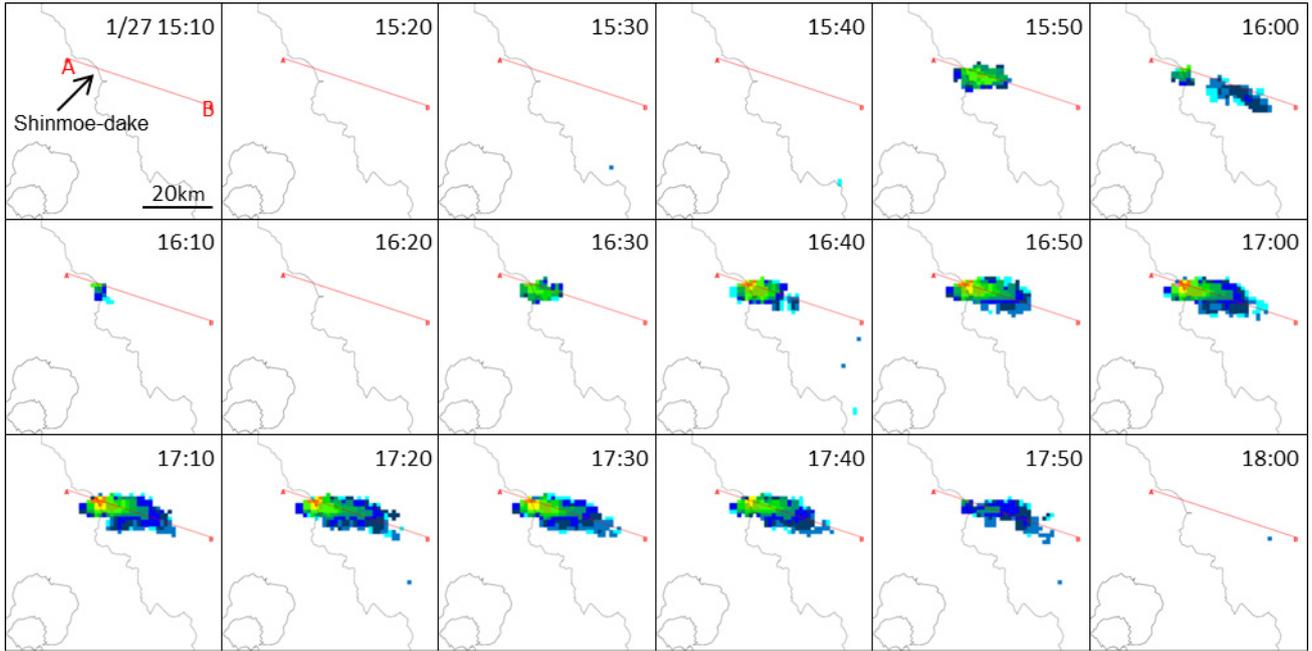


Fig. 6(a) Same as Fig. 4(a) (15:00–18:00JST, January 27, 2011).

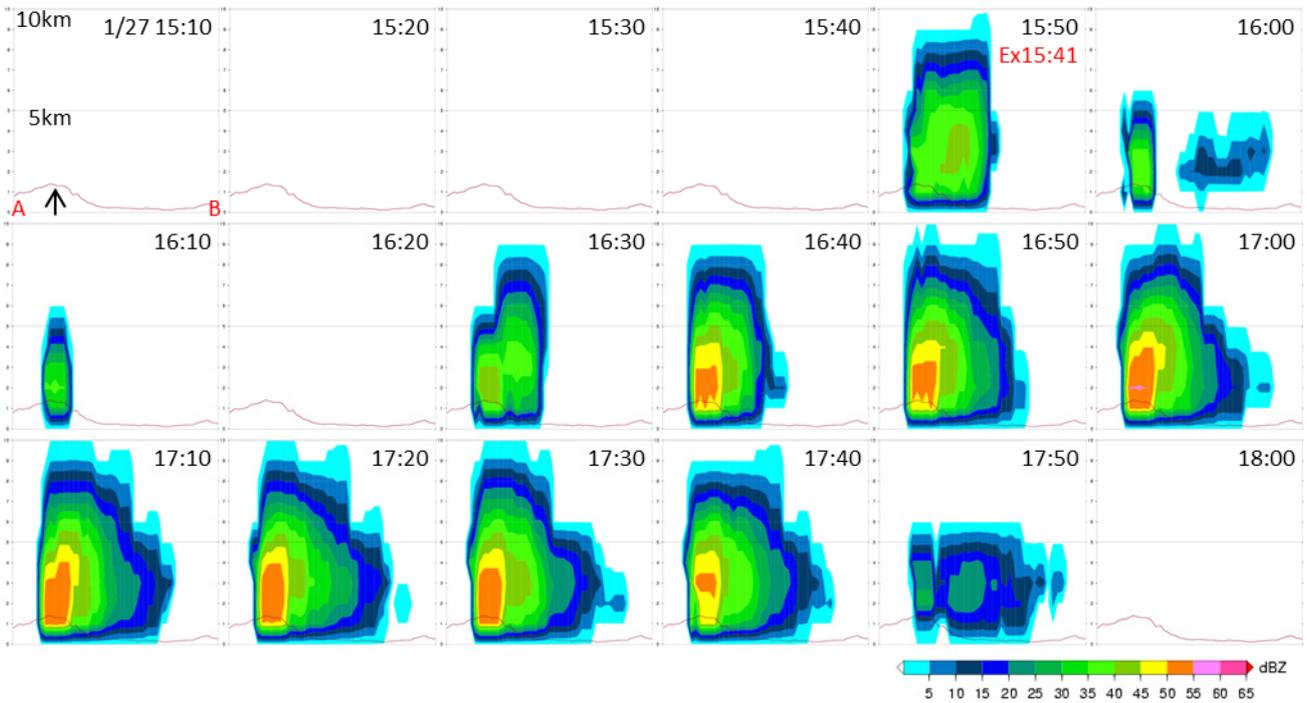


Fig. 6(b) Same as Fig. 4(b) (15:00–18:00JST, January 27, 2011).

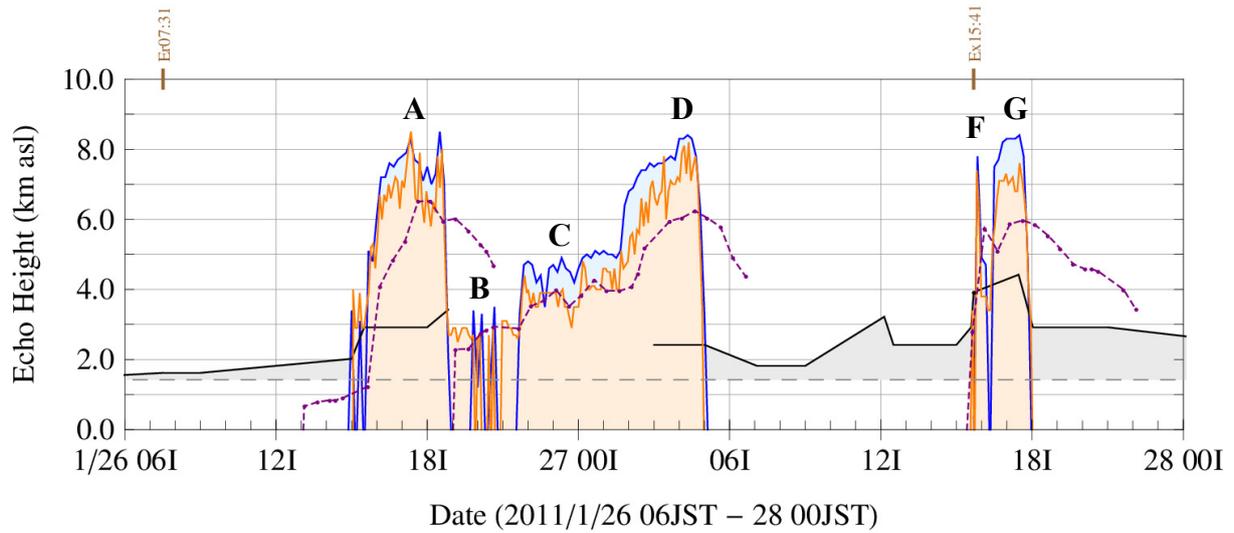


Fig. 7 Time-series variation of the echo height of all eruption clouds from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, blue line) and Kagoshima DRAW (orange line, 06:00JST, January 26 to 00:00JST, January 28, 2011). The black line shows the plume height under visual observation and the filled circle (at 15:41JST on 27 January) represents the plume height of over 2500m above the crater rim. The magenta dotted line shows the estimated height from MTSAT-2 images. The gray dashed line indicates the summit elevation of Shinmoedake volcano (1421m). Note that the coverage area is wider for the MTSAT series than for JMA's radar network.

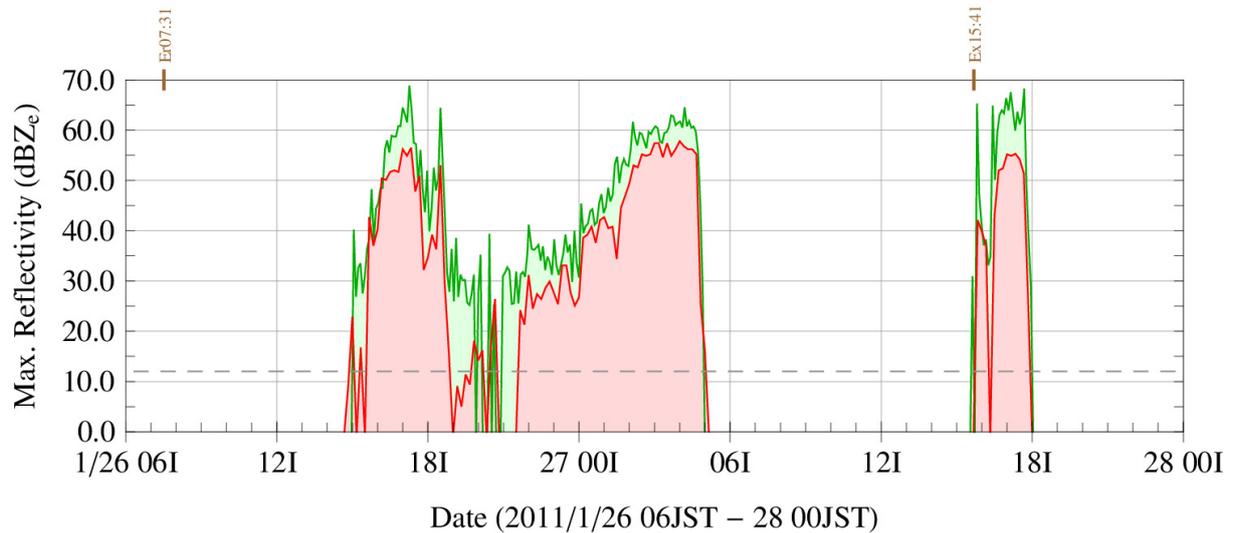


Fig. 8 Time-series variation of the maximum radar reflectivity factor of all eruption clouds from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, red line) and Kagoshima DRAW (green line, 06:00JST, January 26 to 00:00JST, January 28, 2011). The dashed line indicates the discrimination threshold of the echo top from the Tanegashima and Fukuoka radars (12dBZ_e).

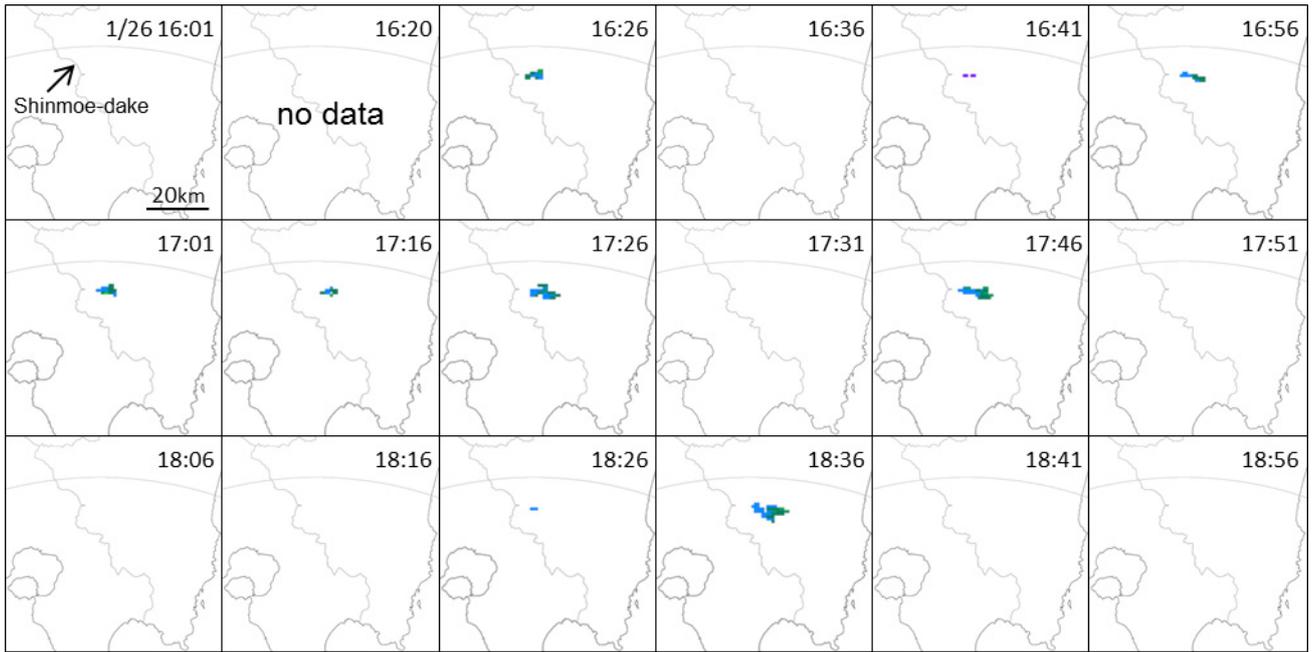


Fig. 9(a) Doppler radial velocities of the eruption cloud from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima weather Doppler radar (16:00–19:00JST, January 26, 2011. Elevation angle: 1.4°). The circle indicates the 150km range from the radar site.

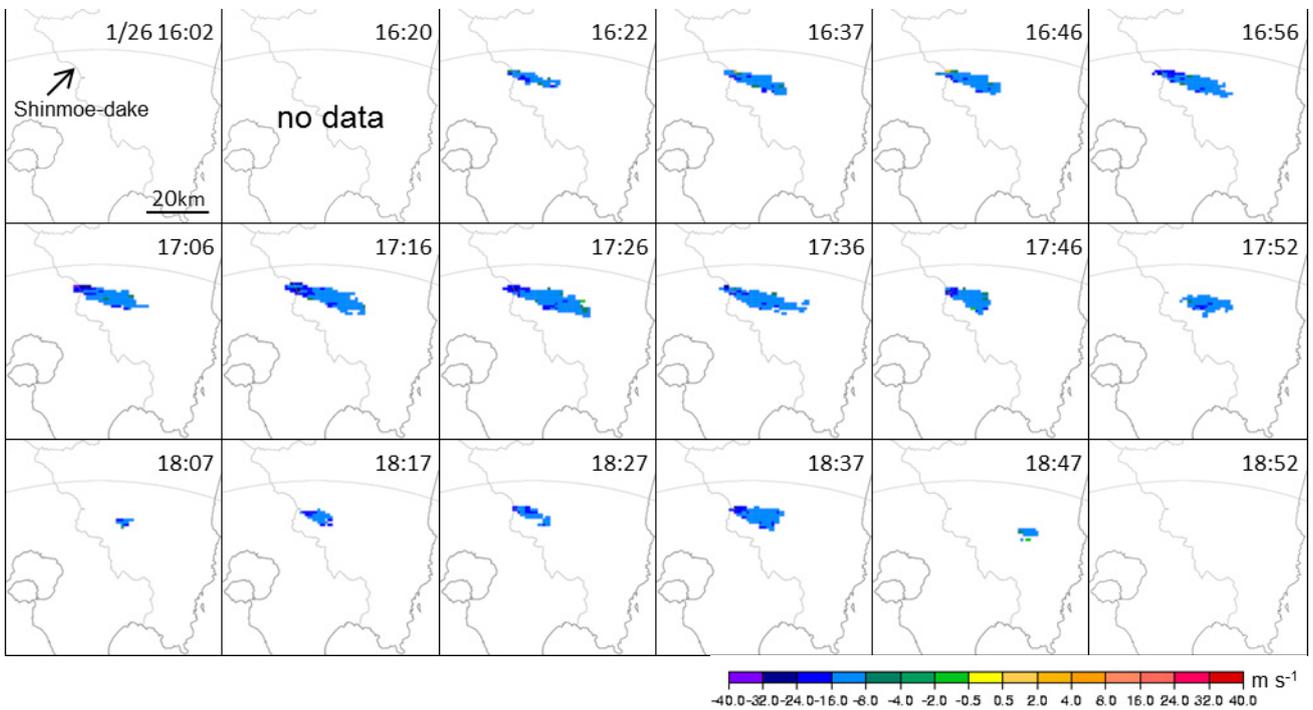


Fig. 9(b) Same as Fig. 9(a) (16:00–19:00JST, January 26, 2011. Elevation angle: 0.2°).

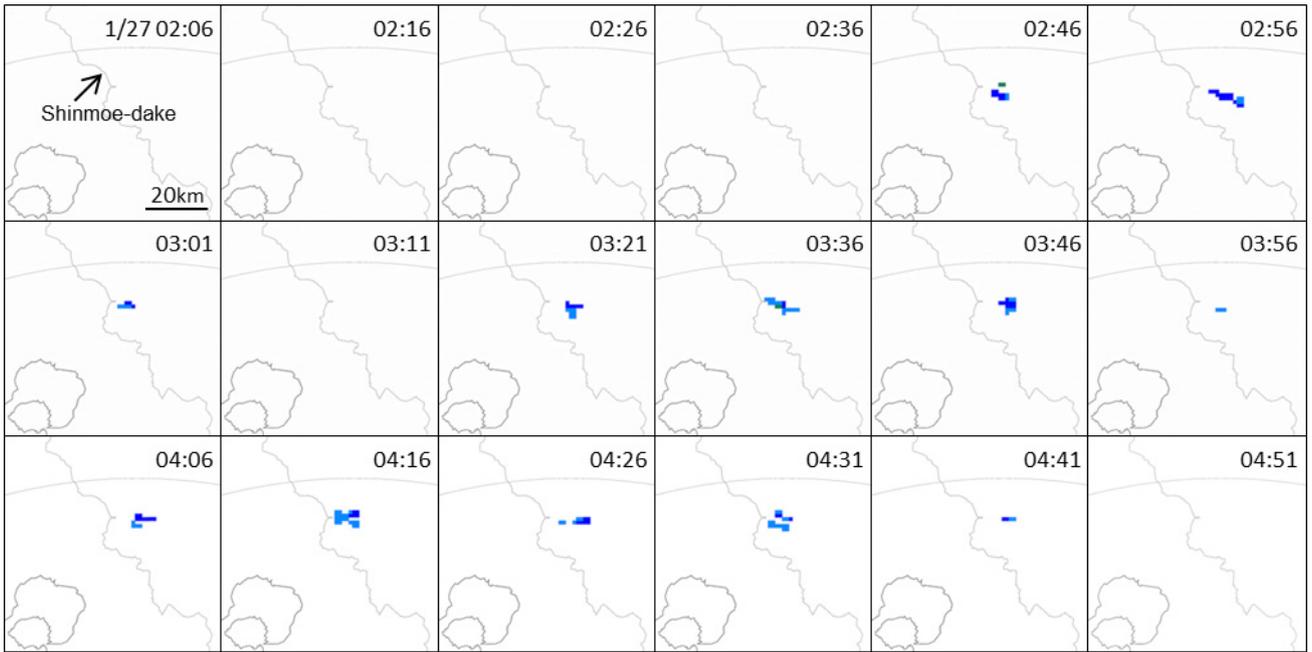


Fig. 10(a) Same as Fig. 9(a) (02:00–05:00JST, January 27, 2011. Elevation angle: 1.4°).

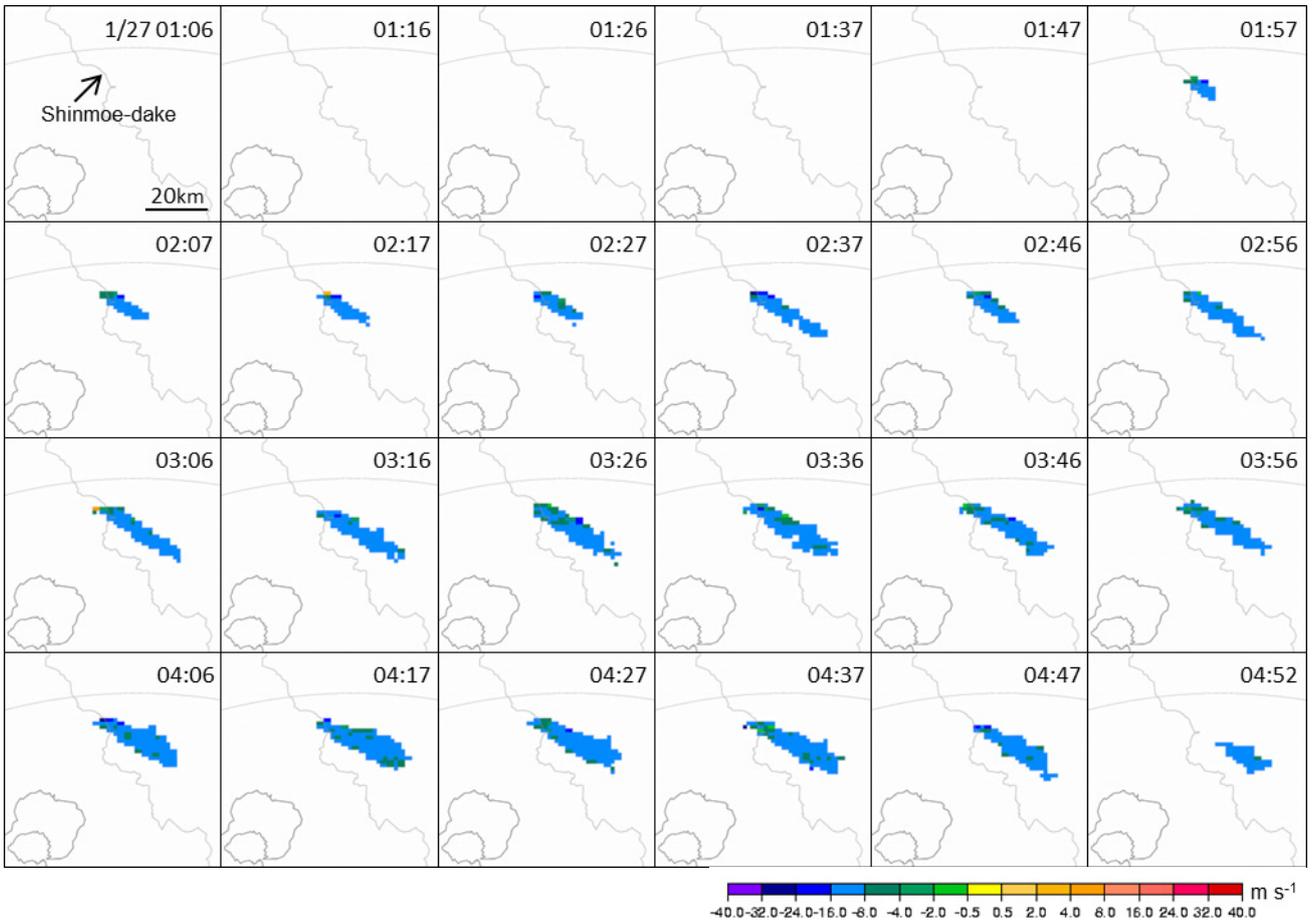


Fig. 10(b) Same as Fig. 9(a) (01:00–05:00JST, January 27, 2011. Elevation angle: 0.2°).

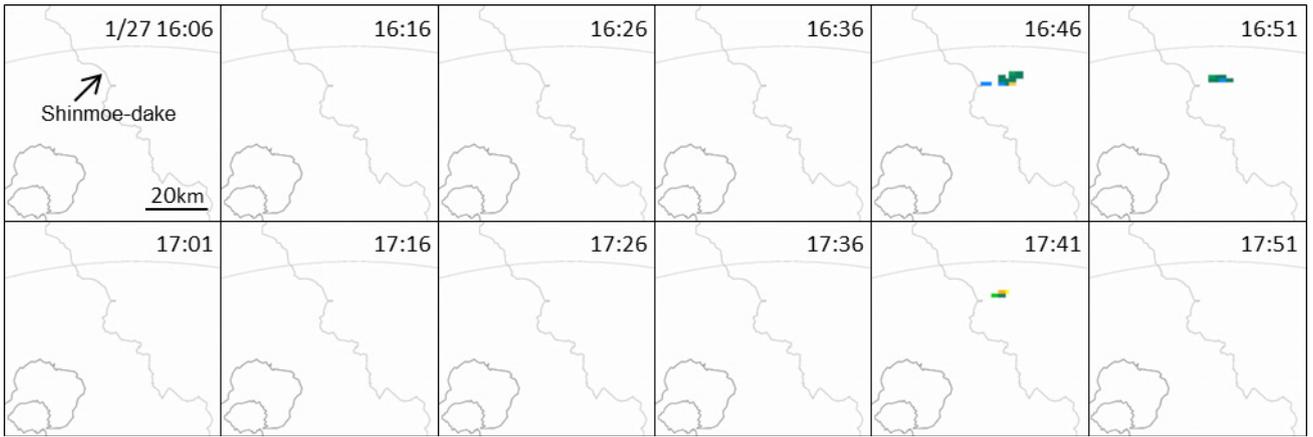


Fig. 11(a) Same as Fig. 9(a) (16:00–18:00JST, January 27, 2011. Elevation angle: 1.4°).

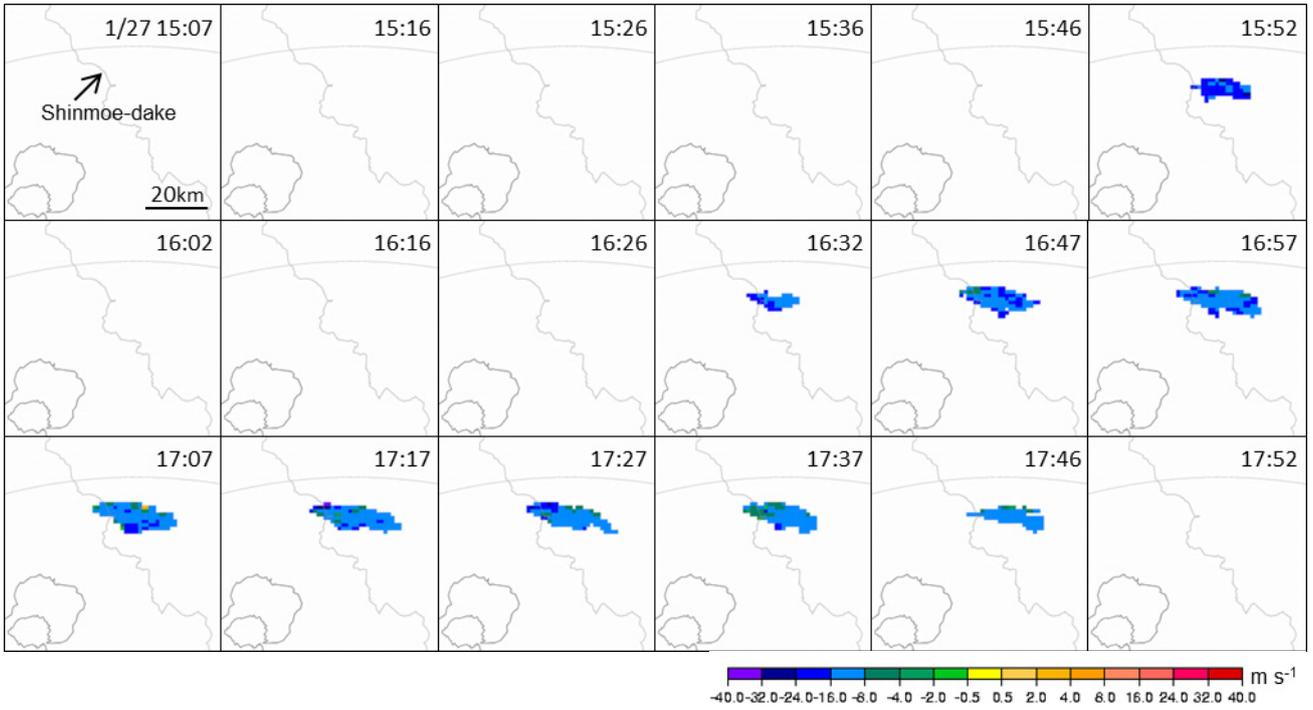


Fig. 11(b) Same as Fig. 9(a) (15:00–18:00JST, January 27, 2011. Elevation angle: 0.2°).

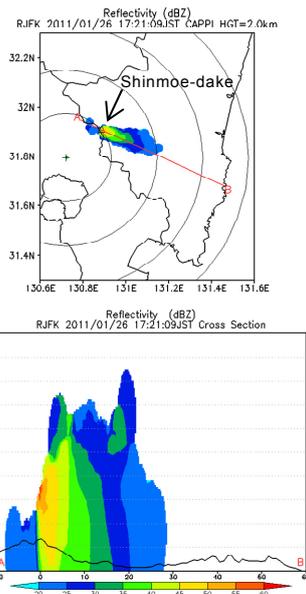


Fig. 12 Eruption cloud echo at Shinmoedake volcano observed by the Kagoshima DRAW (area mode, 17:18–17:21JST, January 26, 2011). The triangle denotes Shinmoedake volcano and the circles indicate the 20, 40, 60 and 80km ranges from the Kagoshima Airport radar site (+).

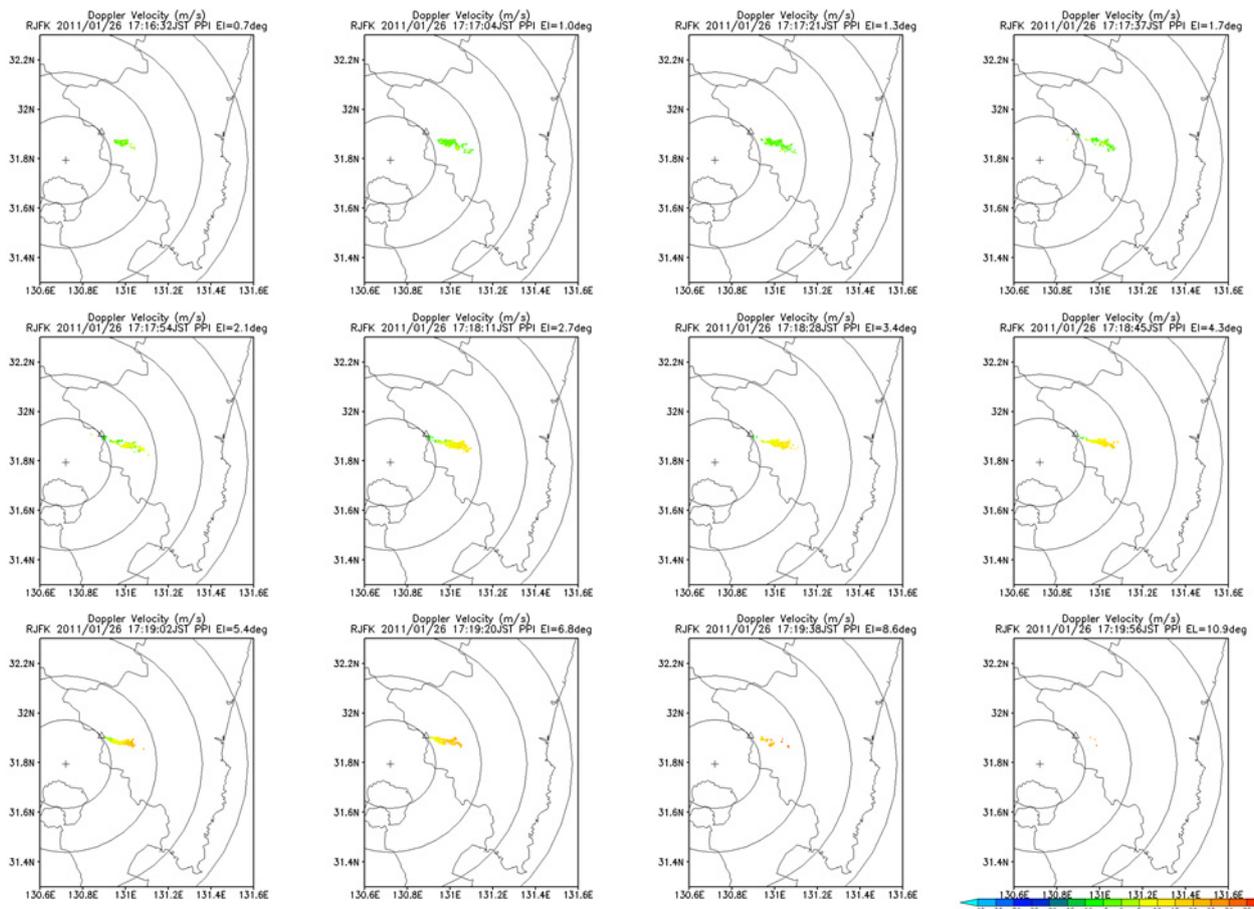


Fig. 13 Doppler radial velocities of the eruption cloud from Shinmoedake volcano observed by the Kagoshima DRAW (area mode, 17:17–17:20JST, January 26, 2011. Elevation angles: 0.7–10.9°). The triangle denotes Shinmoedake volcano and the circles indicate the 20, 40, 60 and 80km ranges from the Kagoshima Airport radar site (+).

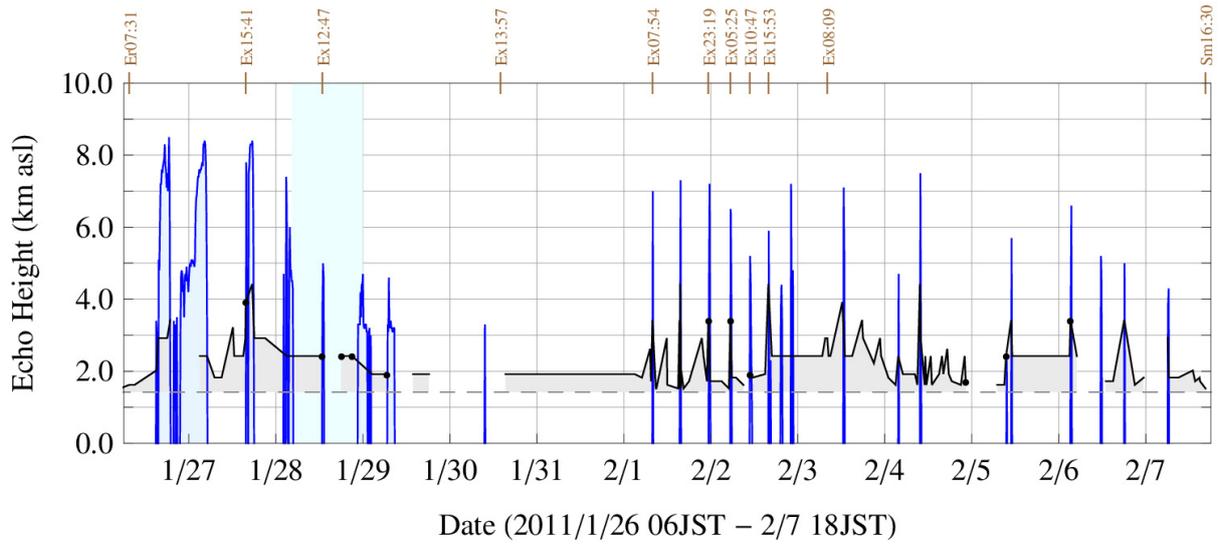


Fig. 14 Same as Fig. 7, but with the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, blue line) and visual observation (black line, 06:00JST, January 26 to 18:00JST, February 7, 2011). Light blue hatches show periods that are missing because of weather echo.

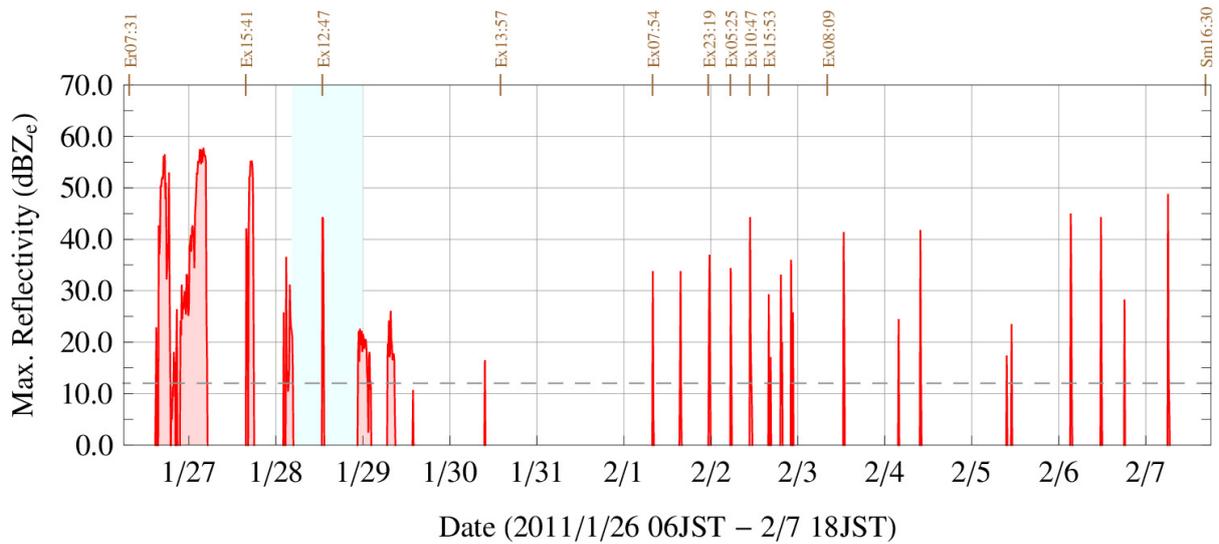


Fig. 15 Same as Fig. 8, but with the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, 06:00JST, January 26 to 18:00JST, February 7, 2011).

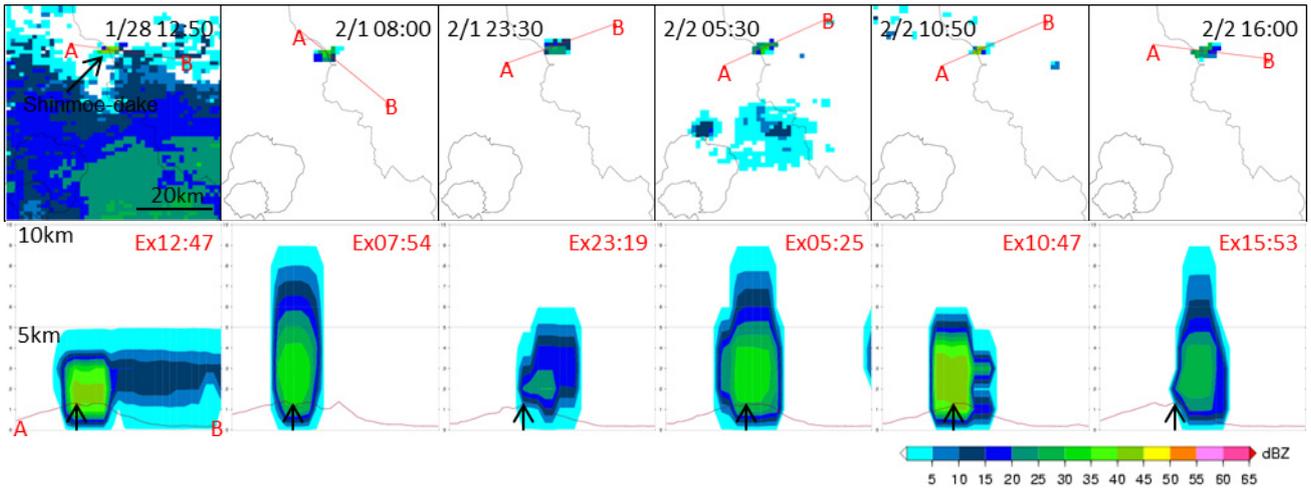


Fig. 16 Eruption cloud echoes at Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, 12:40JST, January 28 to 16:00JST, February 2, 2011). CAPPI images at 2km height and vertical cross-sections along the A-B line on each CAPPI image. Times denote the end of the volume scan.

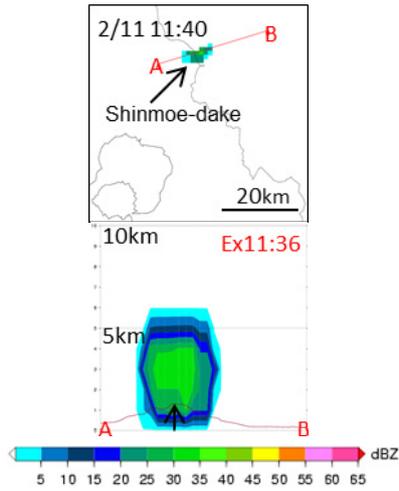


Fig. 17 Same as Fig. 16 (11:30–11:40JST, February 11, 2011).

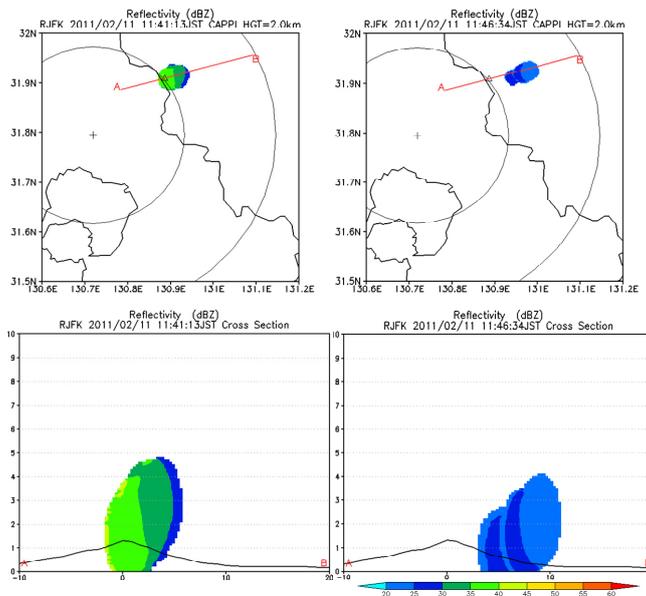


Fig. 18 Eruption cloud echoes at Shinmoedake volcano observed by the Kagoshima DRAW (area mode, 11:38–11:47JST, February 11, 2011). The triangle denotes Shinmoedake volcano and the circles indicate the 20 and 40km ranges from the Kagoshima Airport radar site (+).

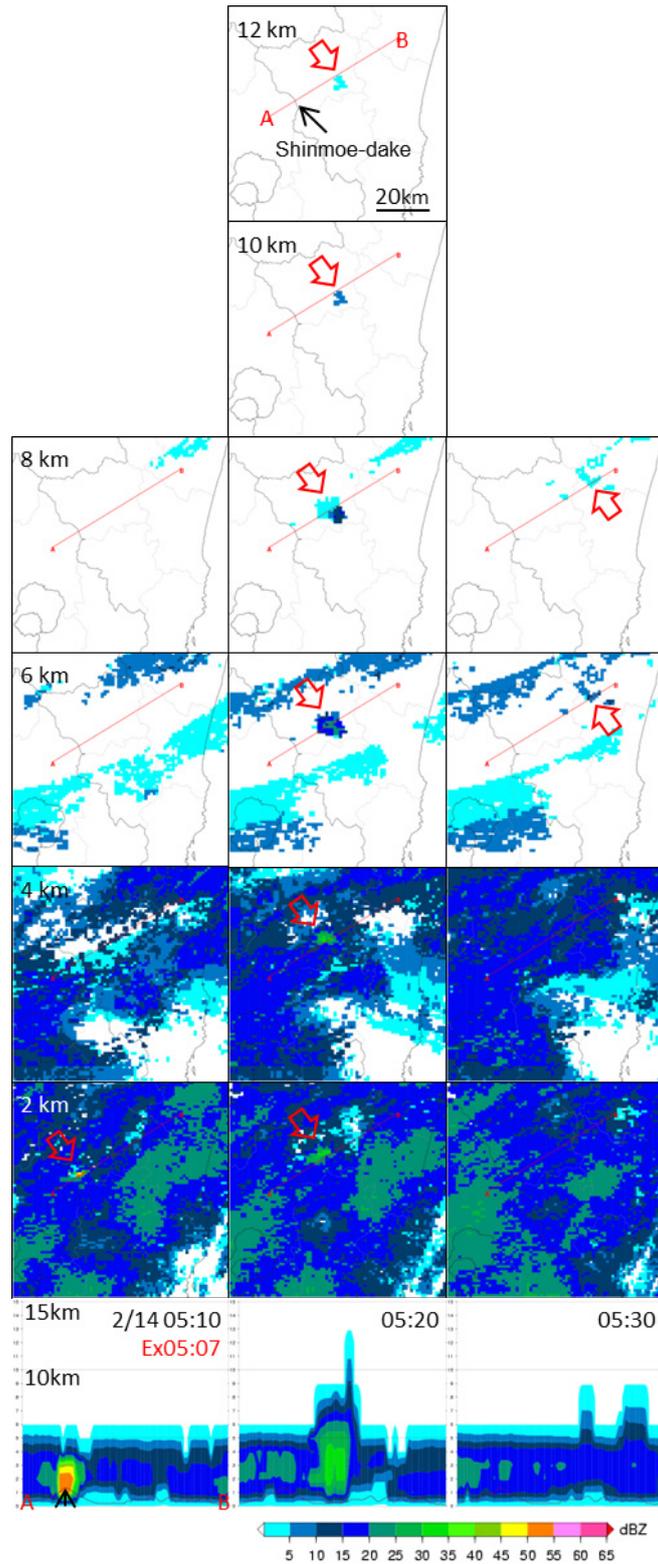


Fig. 19 Eruption cloud echoes at Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, 05:00–05:30JST, February 14, 2011). CAPPI images at 2, 4, 6, 8, 10 and 12km height with different observation times, and vertical cross-sections along the A-B line on each CAPPI image. Times denote the end of the volume scan.

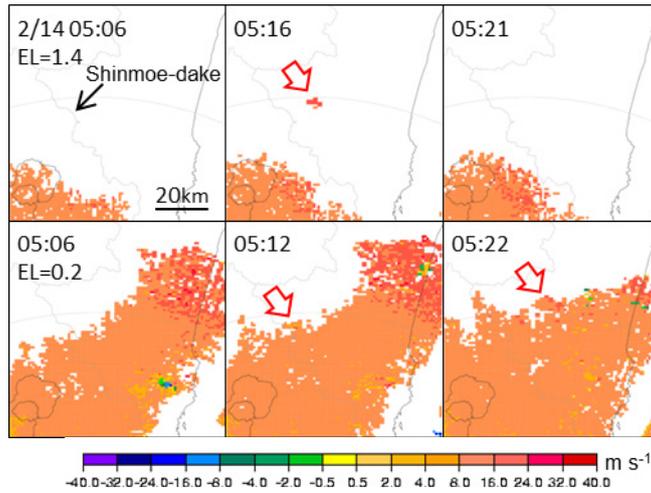


Fig. 20 Doppler radial velocities of the eruption cloud from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima weather Doppler radar (05:06–05:22JST, February 14, 2011. Elevation angles: 1.4°, 0.2°). The circle indicates the 150km range from the radar site.

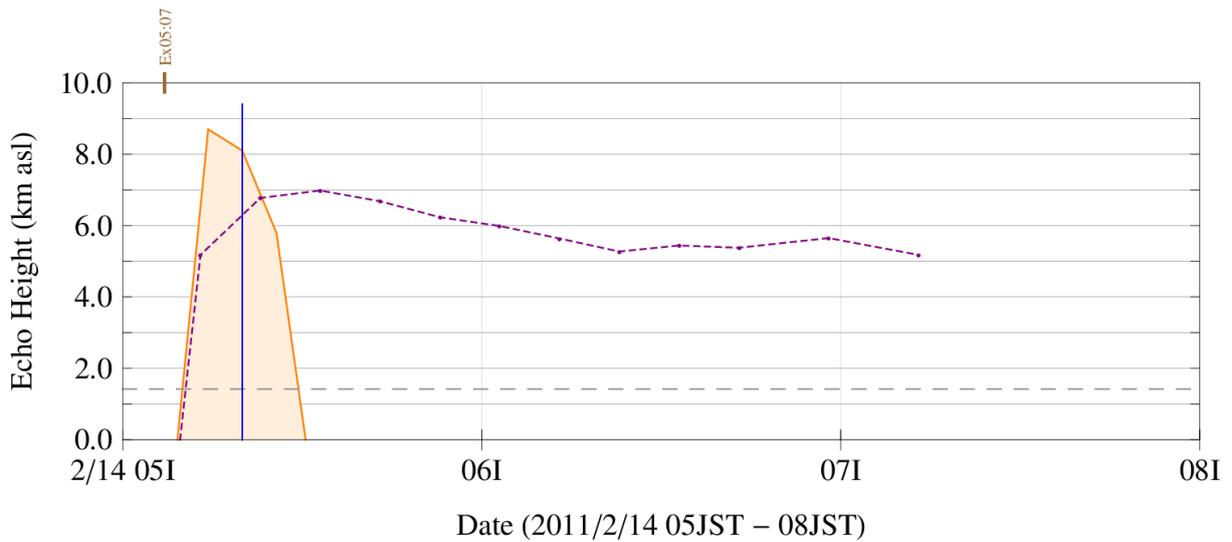


Fig. 21 Same as Fig. 7, but with the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite, blue line), Kagoshima DRAW (orange line) and the rapid-scan observations made by MTSAT-1R (magenta dotted line, 05:00–08:00JST, February 14, 2011).

気象レーダー・衛星による火山噴煙観測

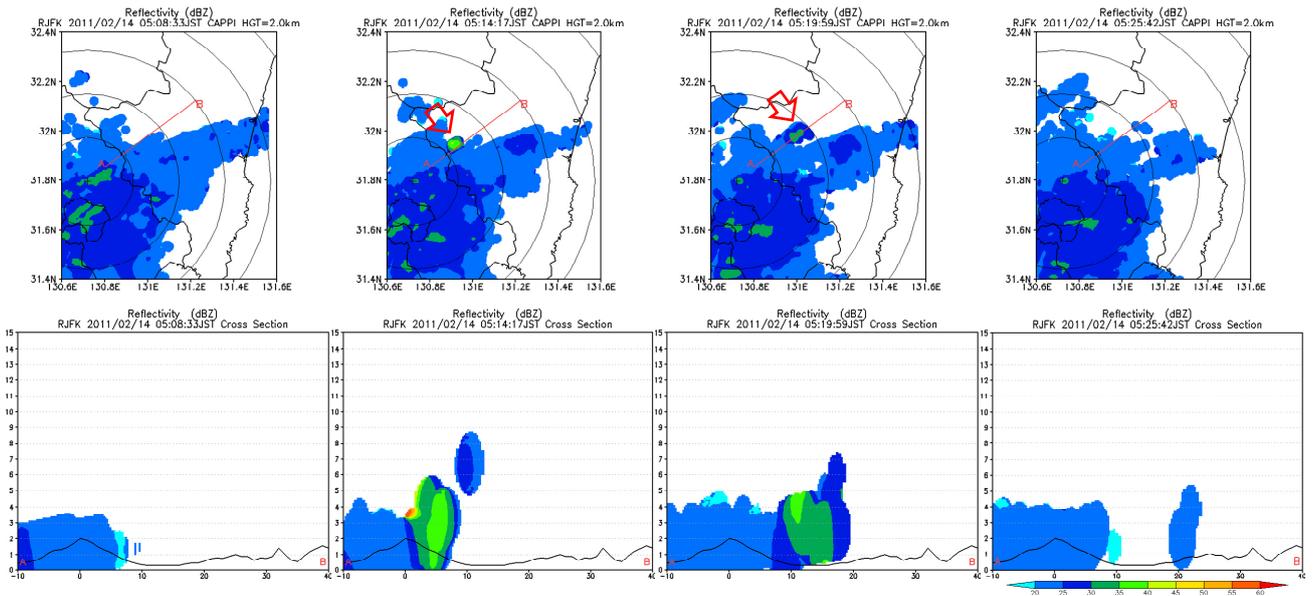


Fig. 22 Same as Fig. 18 (airport mode, 05:04–05:26JST, February 14, 2011).

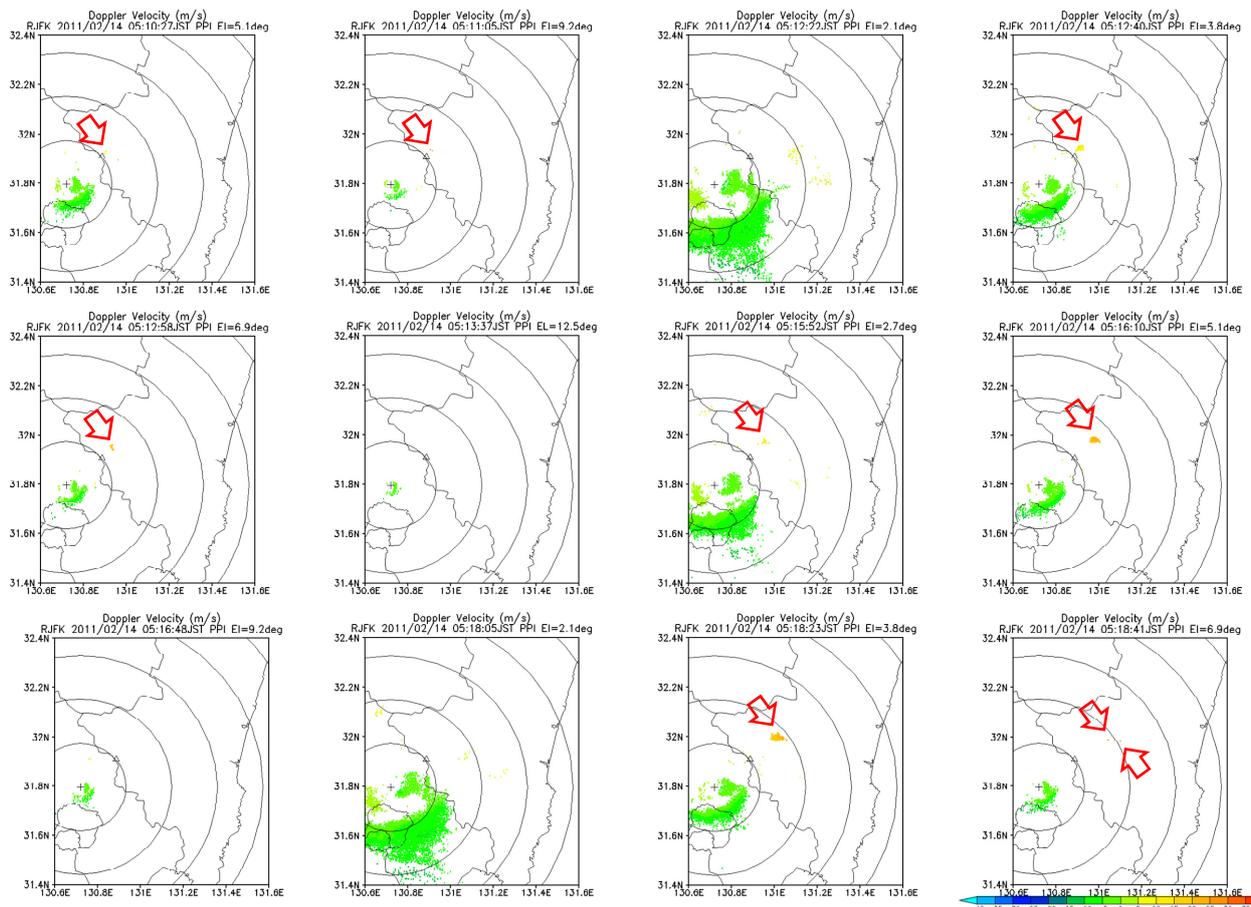


Fig. 23 Doppler radial velocities of the eruption cloud from Shinmoedake volcano observed by the Kagoshima DRAW (airport mode, 05:10–05:19JST, February 14, 2011. Elevation angles: 2.1–12.5°). The triangle denotes Shinmoedake volcano and the circles indicate the 20, 40, 60 and 80km ranges from the Kagoshima Airport radar site (+).

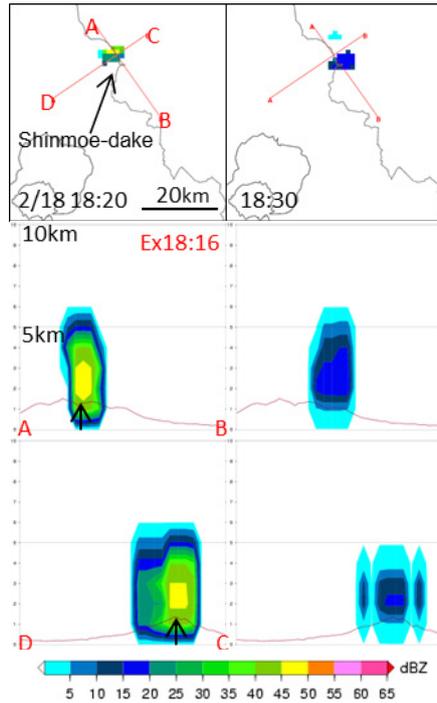


Fig. 24 Same as Fig. 16 (18:10–18:30JST, February 18, 2011).

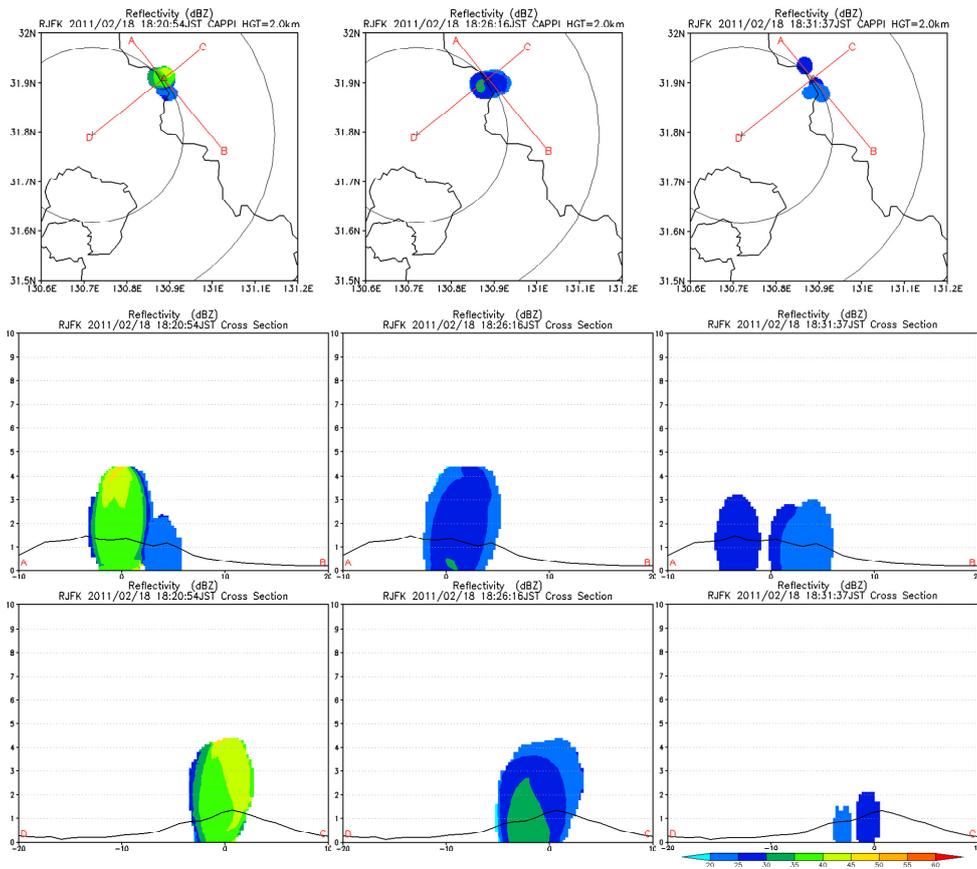


Fig. 25 Same as Fig. 18 (area mode, 18:17–18:32JST, February 18, 2011).

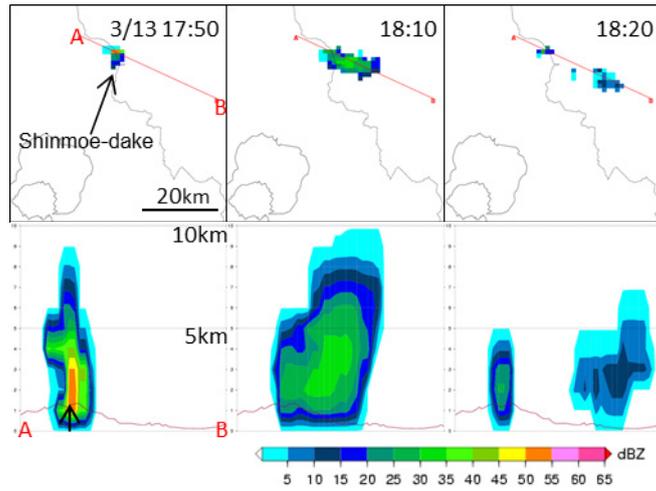


Fig. 26 Same as Fig. 16 (17:40–18:20JST, March 13, 2011).

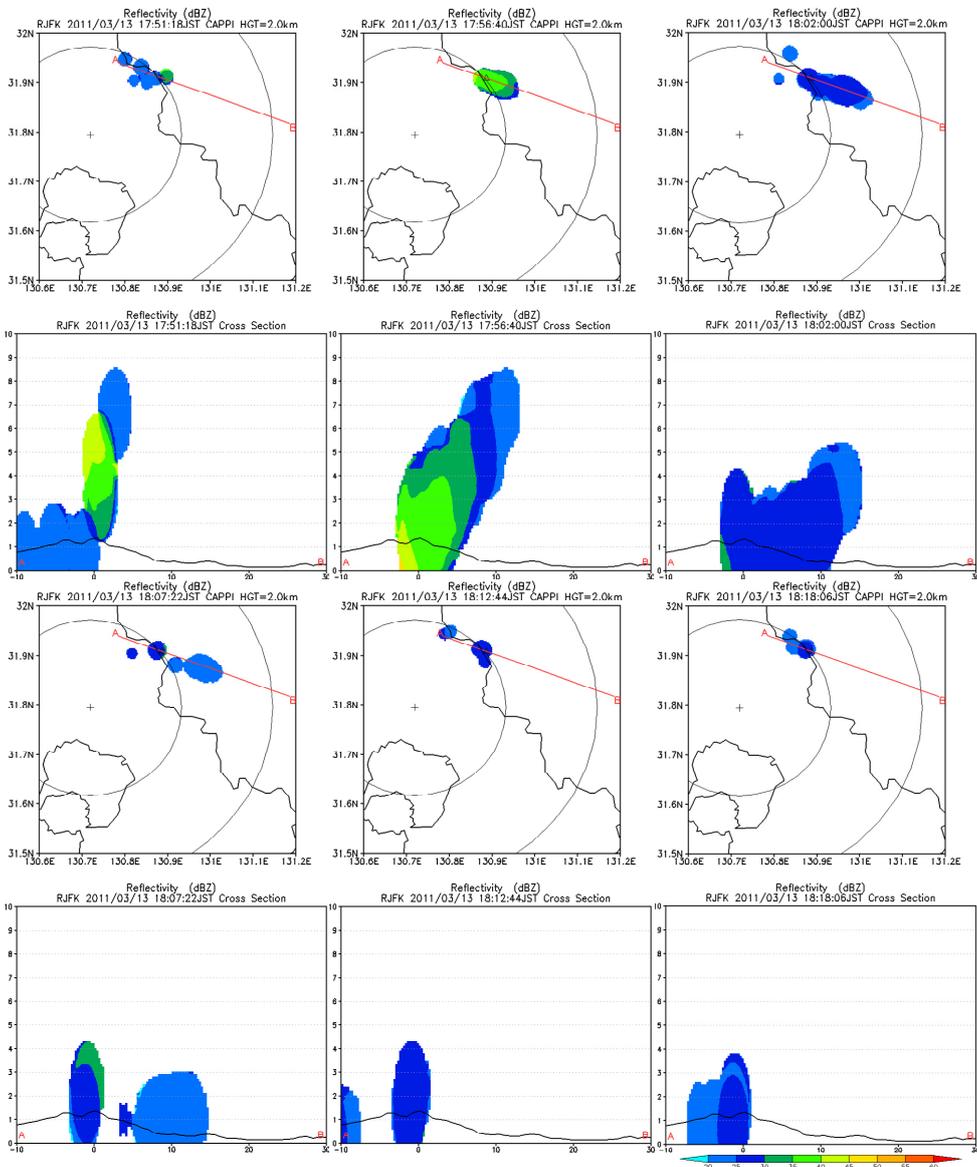


Fig. 27 Same as Fig. 18 (area mode, 17:48–18:18JST, March 13, 2011).

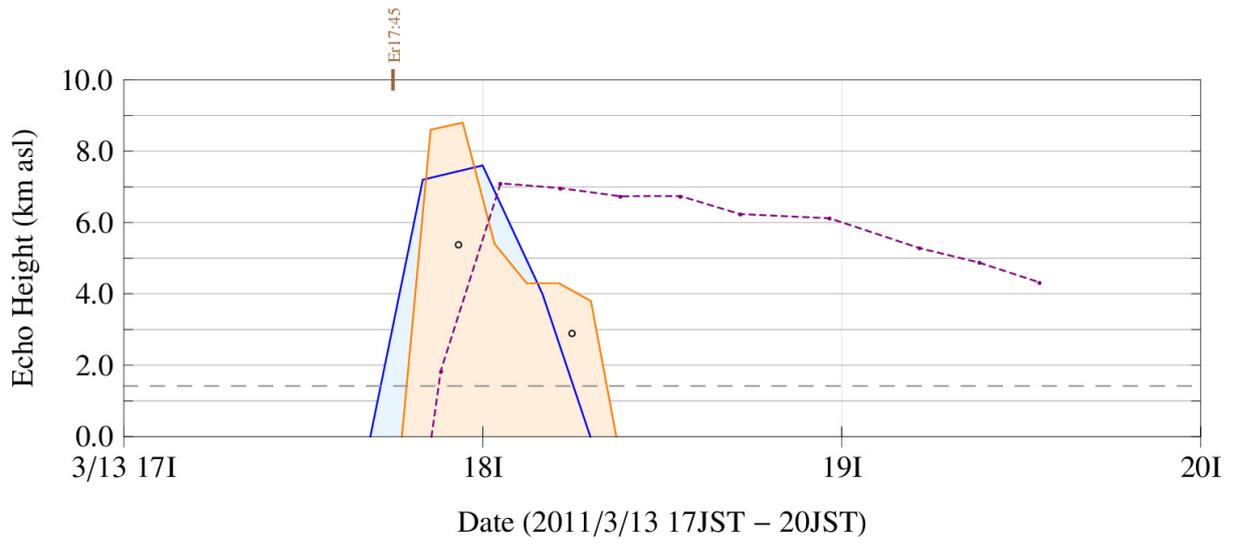


Fig. 28 Same as Fig. 21 (17:00–20:00JST, March 13, 2011). The empty circles show the plume height under visual observation.

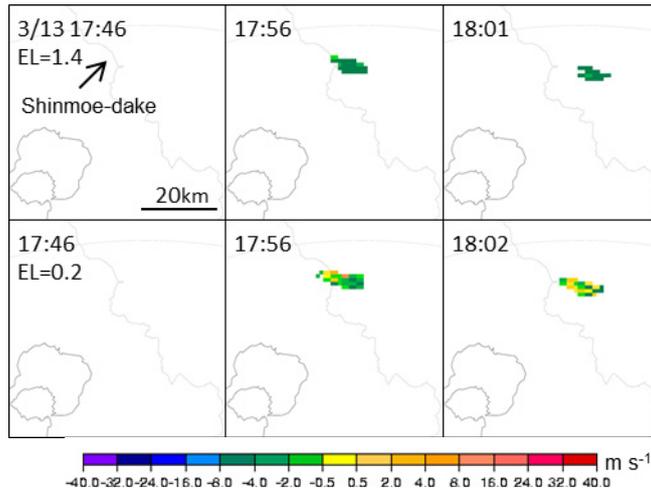


Fig. 29 Same as Fig. 20 (17:46–18:02JST, March 13, 2011).

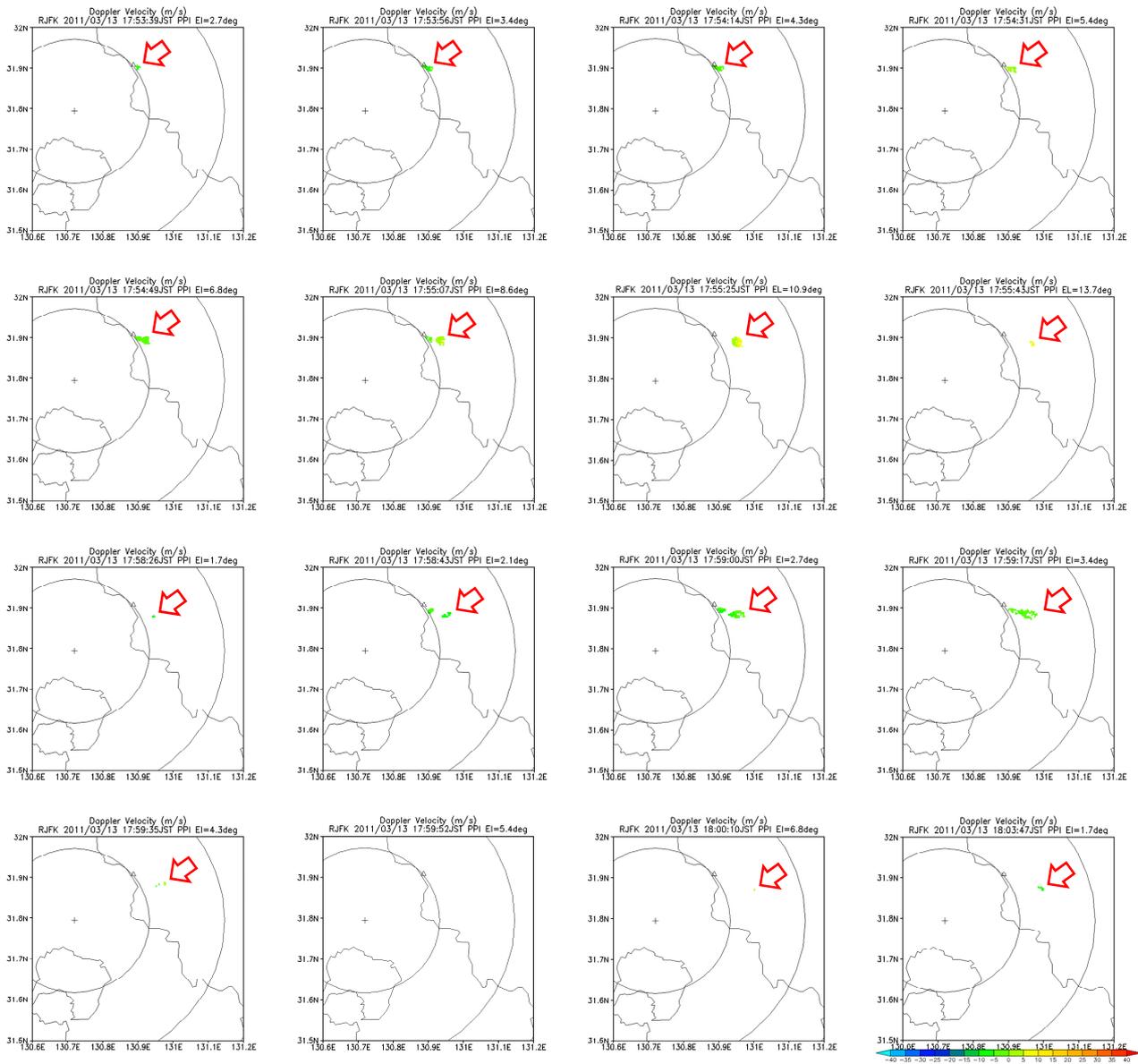


Fig. 30 Same as Fig. 23 (area mode, 17:54–18:04JST, March 13, 2011. Elevation angles: 2.1–13.7°).

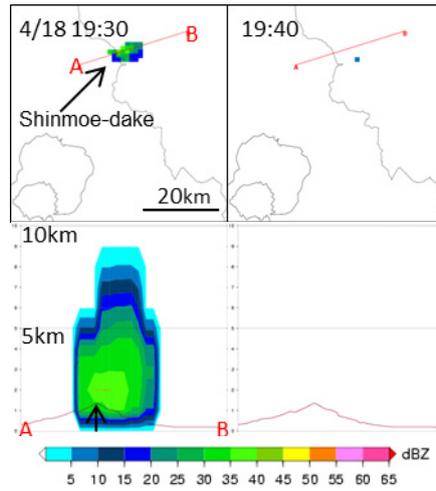


Fig. 31 Same as Fig. 16 (19:20–19:40JST, April 18, 2011).

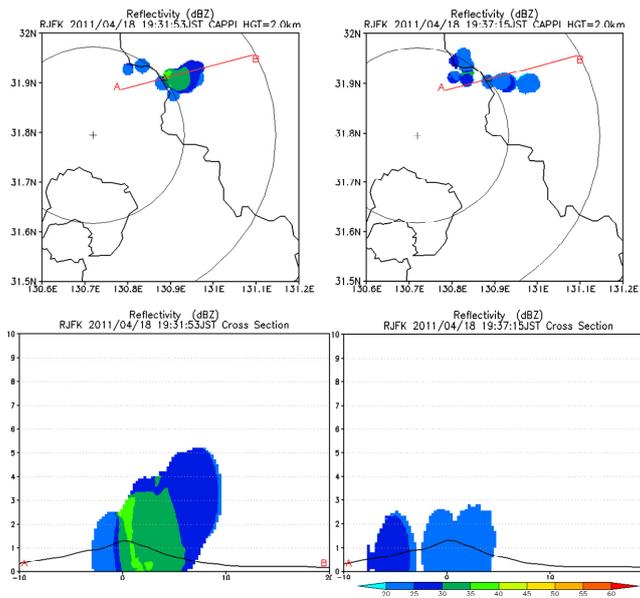


Fig. 32 Same as Fig. 18 (area mode, 19:28–19:37JST, April 18, 2011).

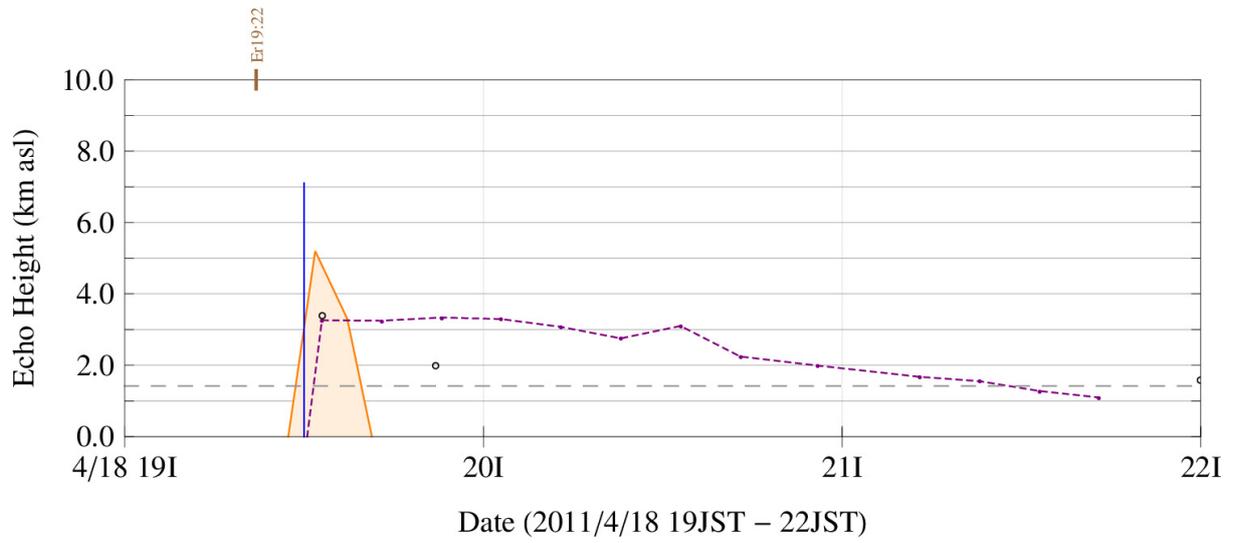


Fig. 33 Same as Fig. 28 (19:00–22:00JST, April 18, 2011).

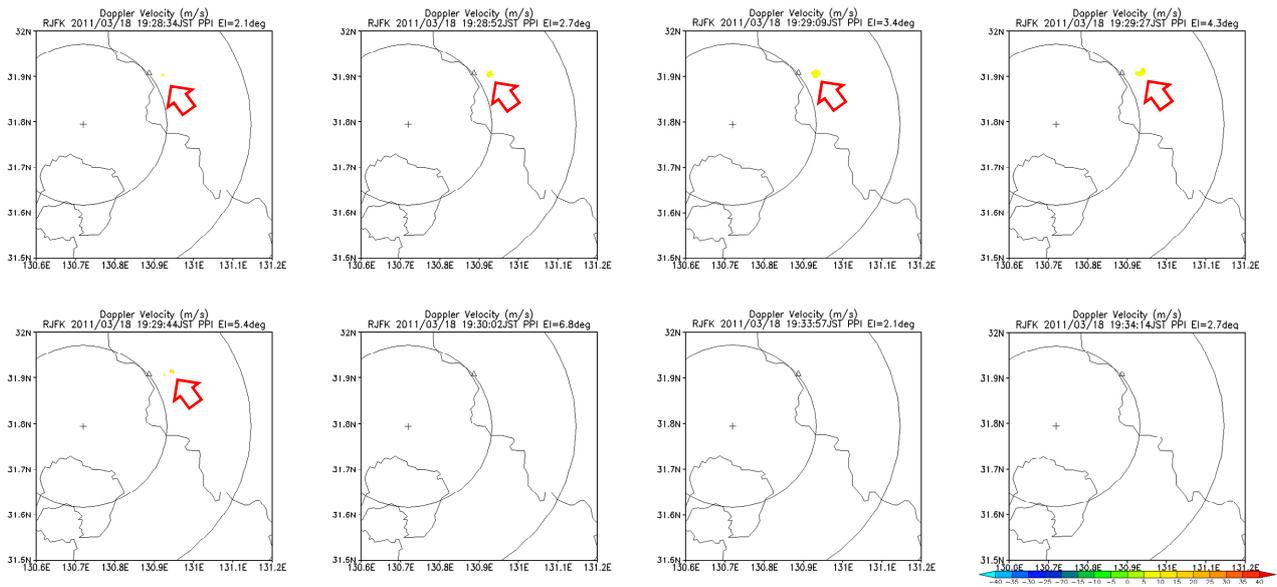


Fig. 34 Same as Fig.23 (area mode, 19:29–19:34JST, April 18, 2011. Elevation angles: 2.1–6.8°).

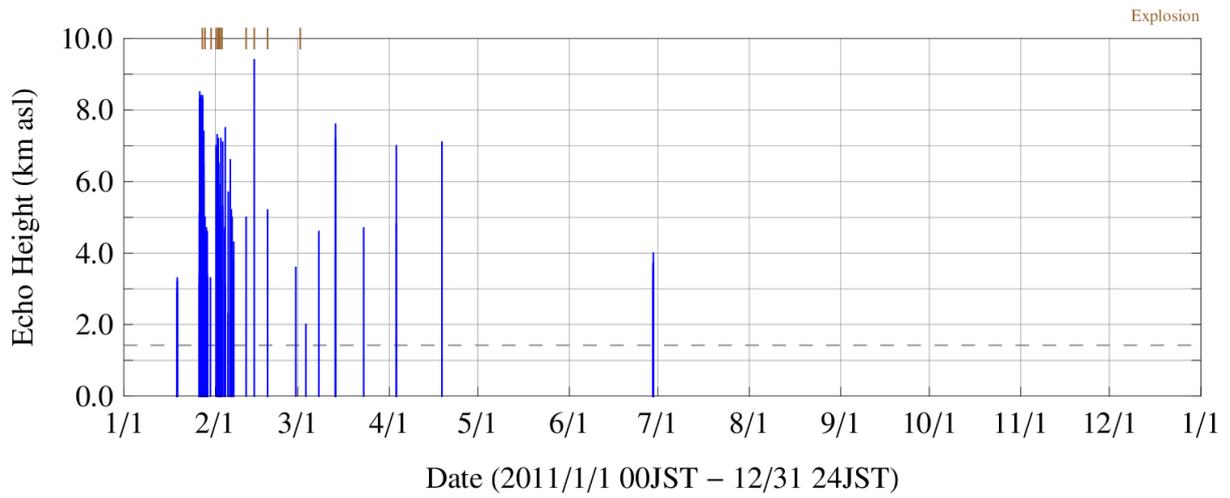


Fig. 35 Time-series variation of the echo height of all eruption clouds from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite) in 2011. The dashed line indicates the summit elevation of Shinmoedake volcano (1421m).

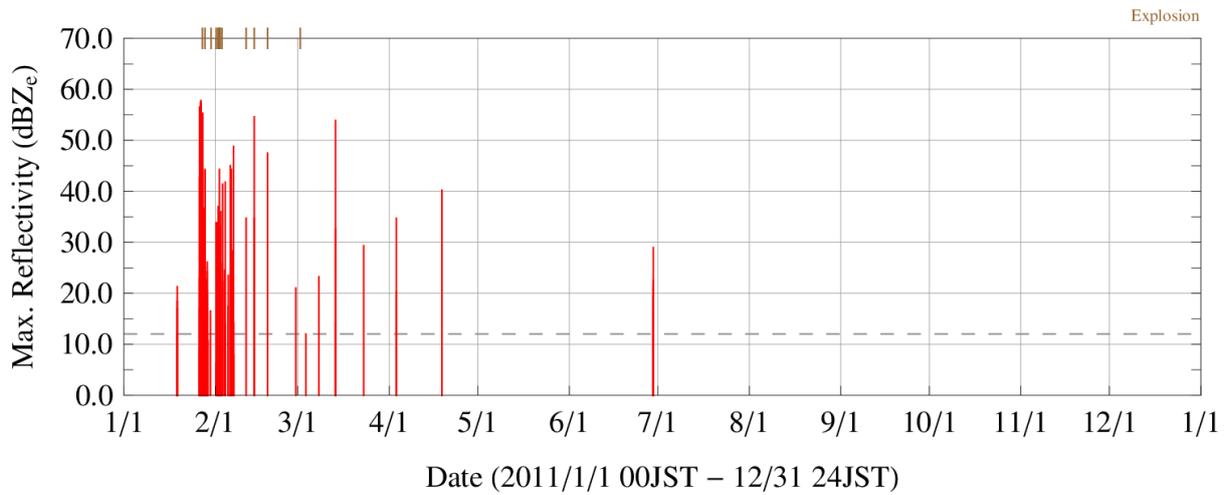


Fig. 36 Time-series variation of the maximum radar reflectivity factor of all eruption clouds from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite) in 2011. The dashed line indicates the discrimination threshold of the echo top (12dBZ_e).

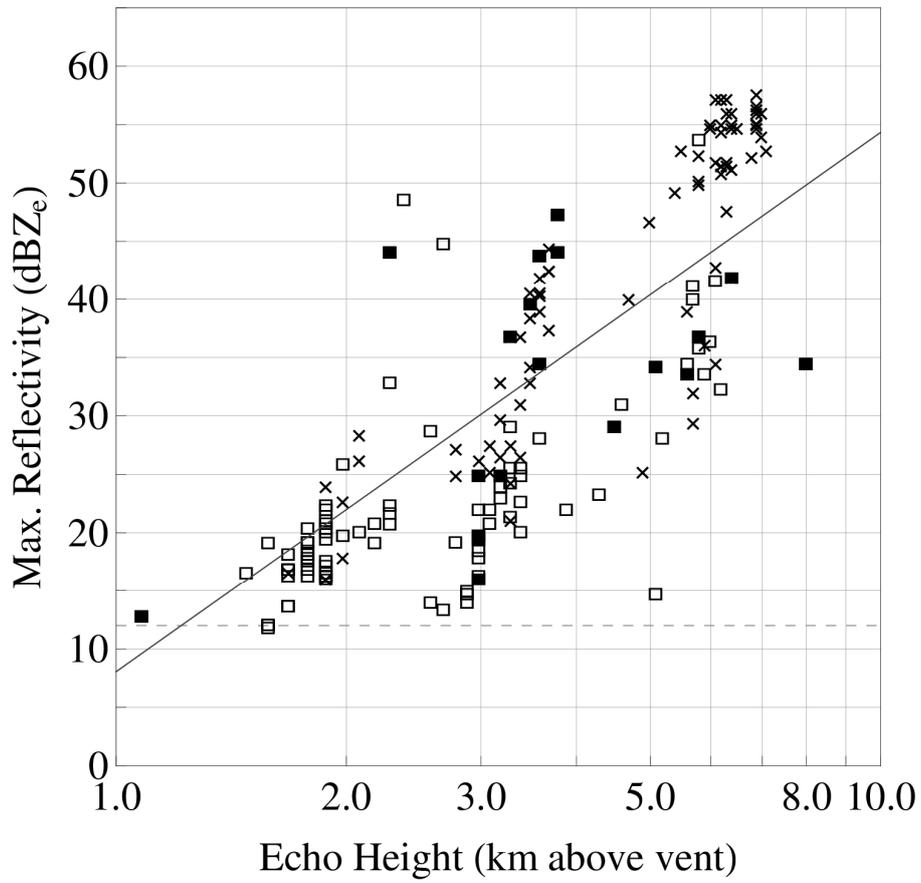


Fig. 37 Comparison between the maximum radar reflectivity factor and the echo height of all eruption clouds from Shinmoedake volcano observed by the Tanegashima and Fukuoka weather Doppler radars (composite). Crosses denote the subplinian eruptions from 15:00JST, January 26 to 18:00JST, January 27; filled squares denote the explosive vulcanian eruptions; and empty squares denote the other eruptions in 2011. The solid line shows the linear regression and the dashed line indicates the discrimination threshold of the echo top (12dBZ_e).

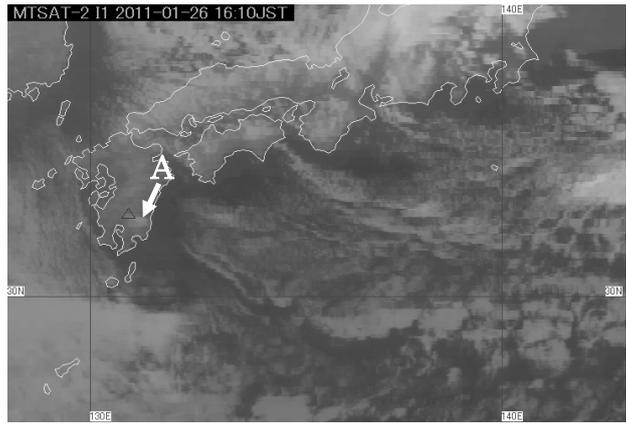


Fig. 38 MTSAT-2 IR1 image at 16:06JST, January 26, 2011.

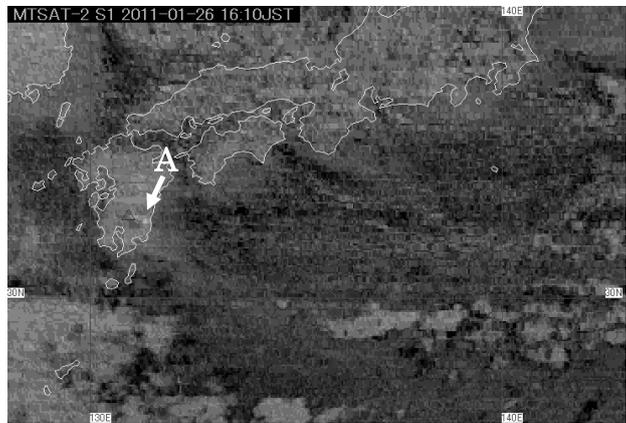


Fig. 39 MTSAT-2 SP image at 16:06JST, January 26, 2011.

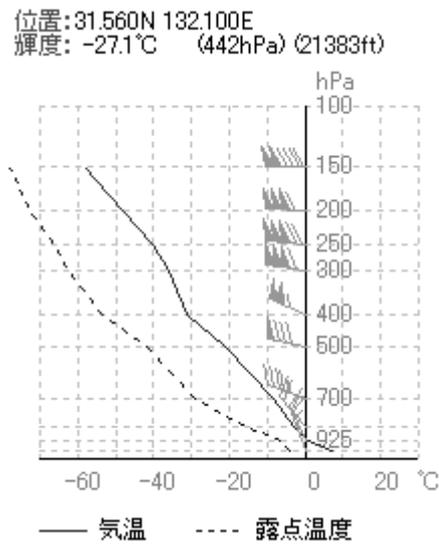


Fig. 40 NWP vertical profile at 18:10JST, January 26, 2011.

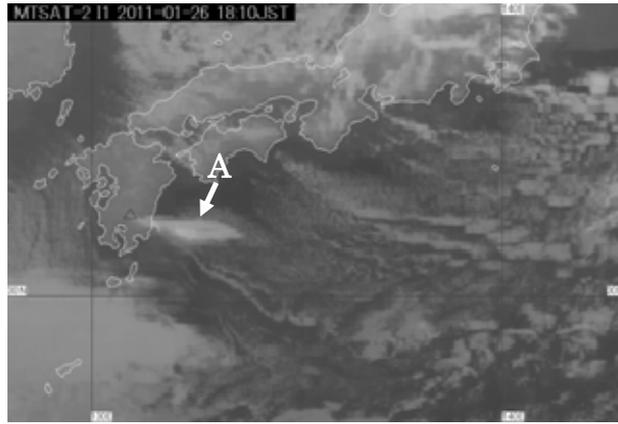


Fig. 41 MTSAT-2 IR1 image at 18:06JST, January 26, 2011.



Fig. 42 MTSAT-2 SP image at 18:06JST, January 26, 2011.

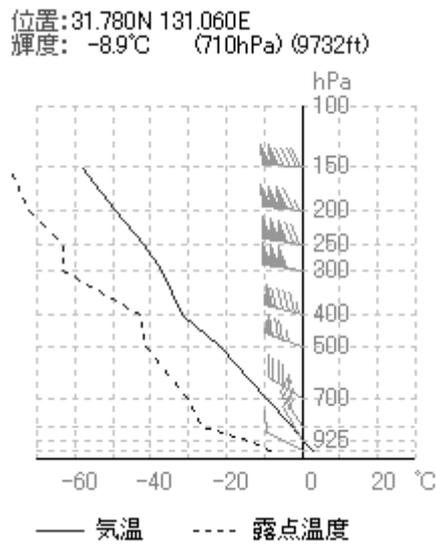


Fig. 43 NWP vertical profile at 20:40JST, January 26, 2011.

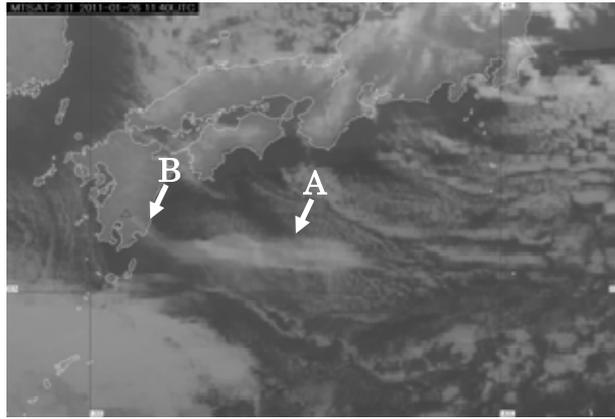


Fig. 44 MTSAT-2 IR1 image at 20:37JST, January 26, 2011.

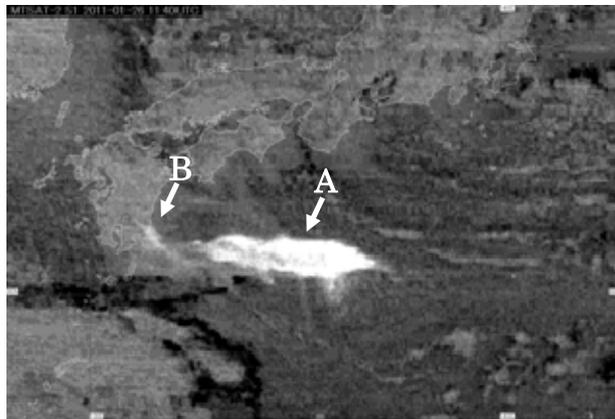


Fig. 45 MTSAT-2 SP image at 20:37JST, January 26, 2011.

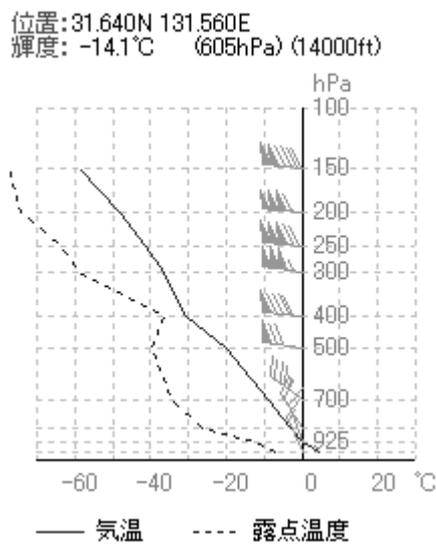


Fig. 46 NWP vertical profile at 00:40JST, January 27, 2011.

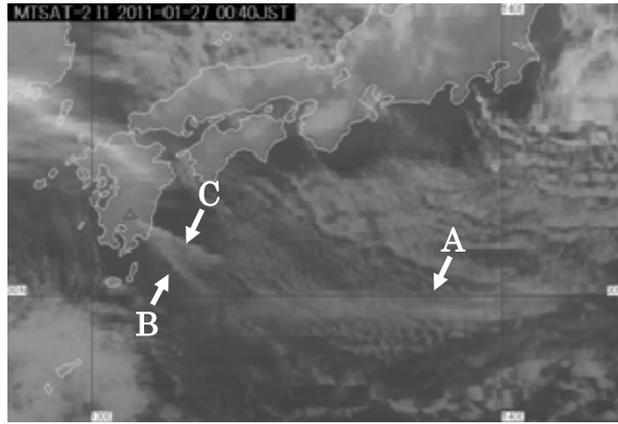


Fig. 47 MTSAT-2 IR1 image at 00:37JST, January 27, 2011.

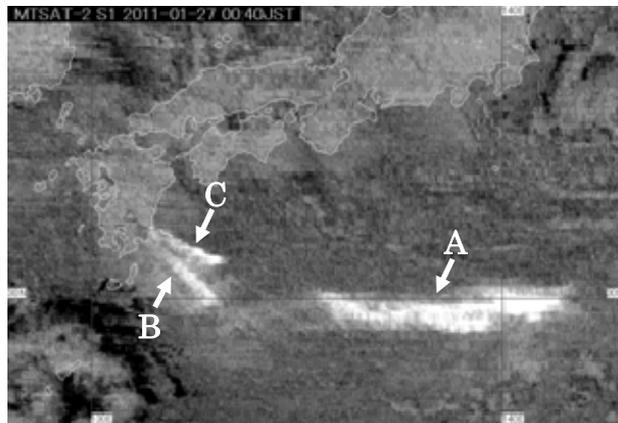


Fig. 48 MTSAT-2 SP image at 00:37JST, January 27, 2011.

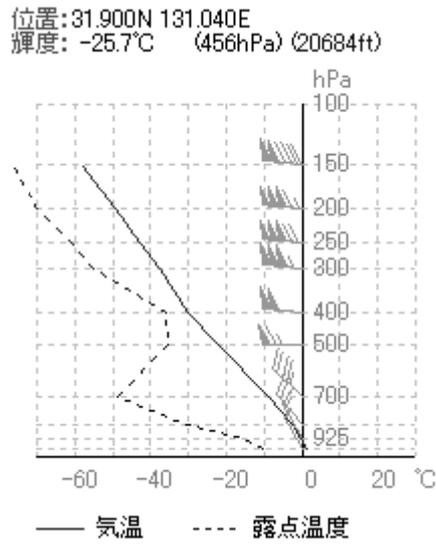


Fig. 49 NWP vertical profile at 04:40JST, January 27, 2011.

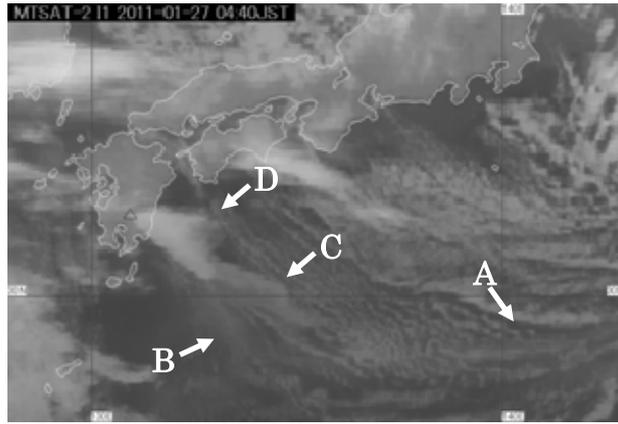


Fig. 50 MTSAT-2 IR1 image at 04:37JST, January 27, 2011.

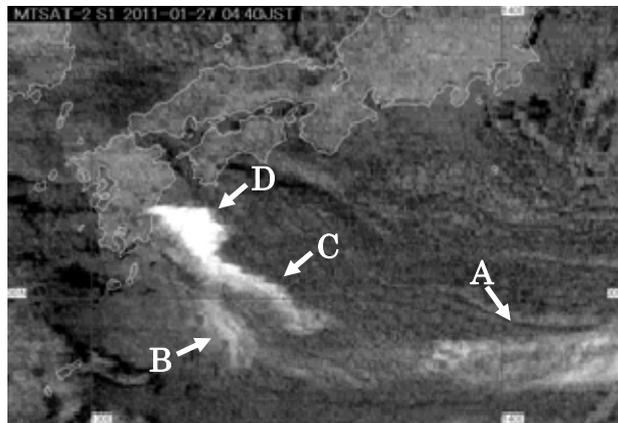


Fig. 51 MTSAT-2 SP image at 04:37JST, January 27, 2011.

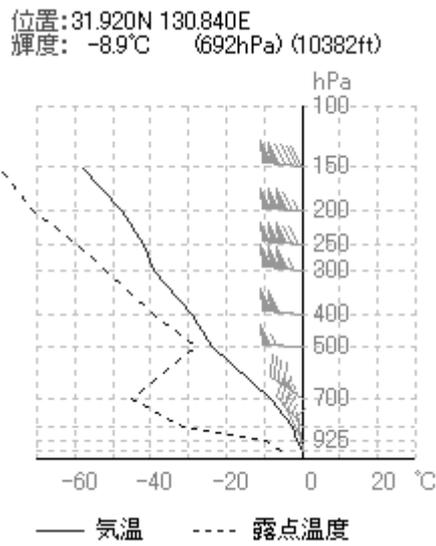


Fig. 52 NWP vertical profile at 07:40JST, January 27, 2011.

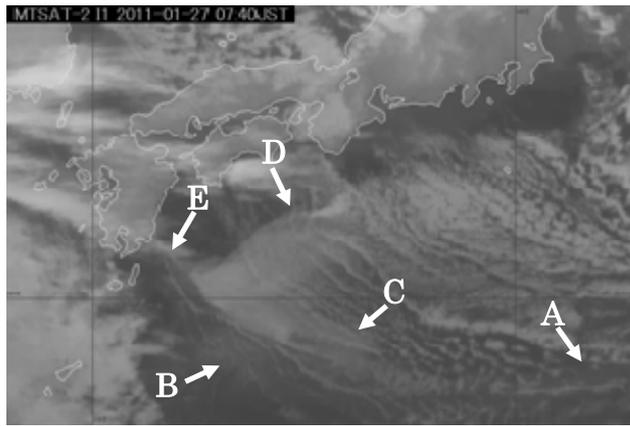


Fig. 53 MTSAT-2 IR1 images at 07:37JST, January 27, 2011.

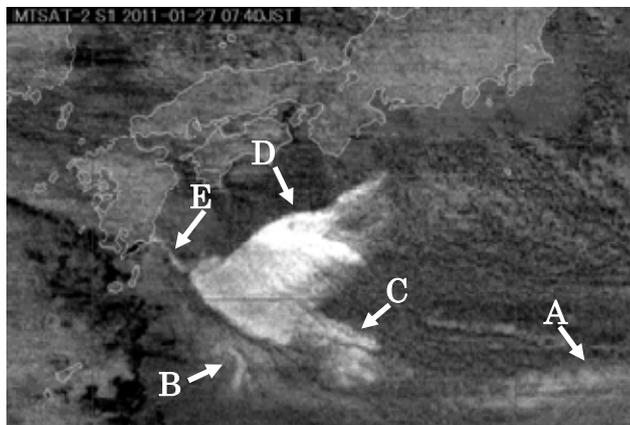


Fig. 54 MTSAT-2 SP image at 07:37JST, January 27, 2011.

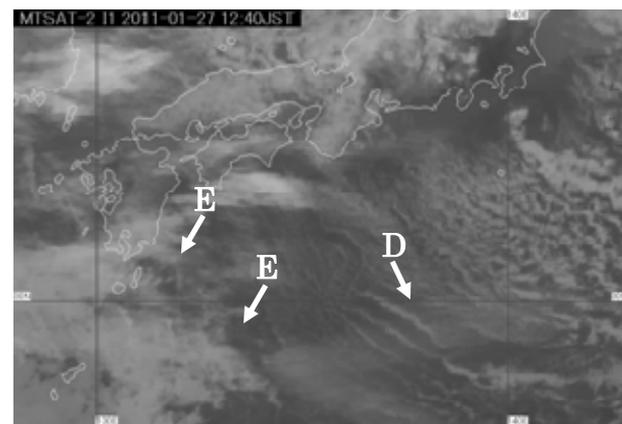


Fig. 55 MTSAT-2 IR1 image at 12:37JST, January 27, 2011.

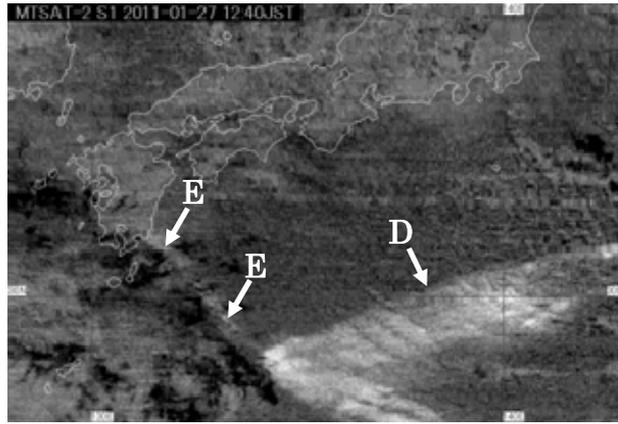


Fig. 56 MTSAT-2 SP image at 12:37JST, January 27, 2011.

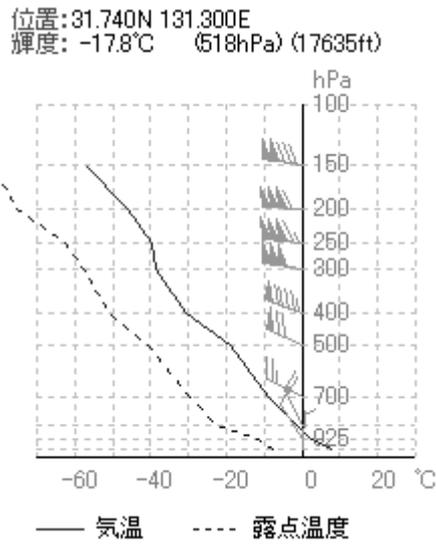


Fig. 57 NWP vertical profile at 16:10JST, January 27, 2011.

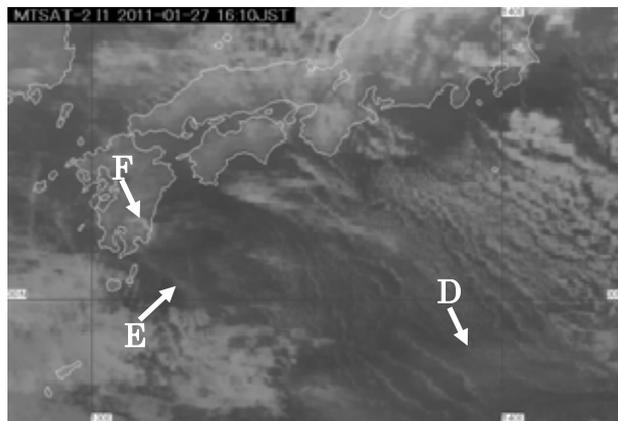


Fig. 58 MTSAT-2 IR1 image at 16:06JST, January 27, 2011.

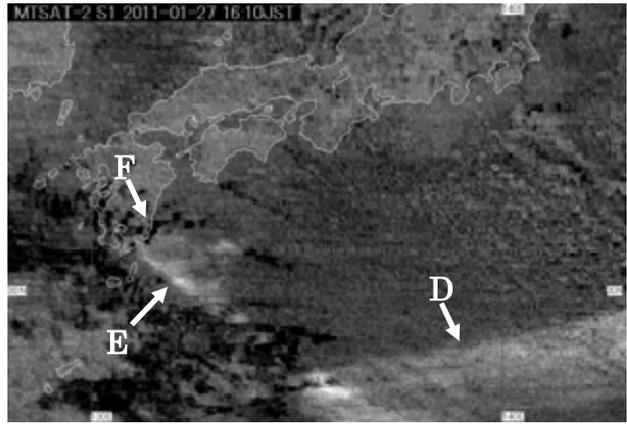


Fig. 59 MTSAT-2 SP image at 16:06JST, January 27, 2011.

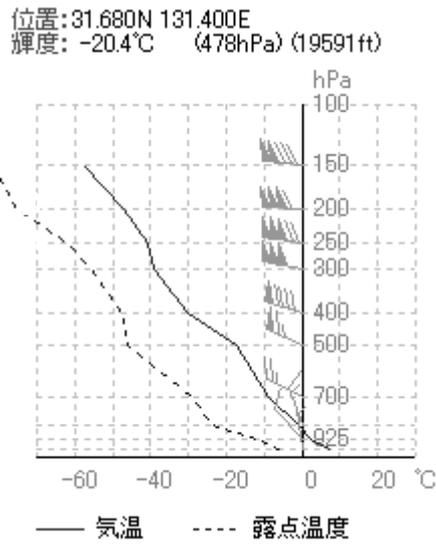


Fig. 60 NWP vertical profile at 17:40JST, January 27, 2011.

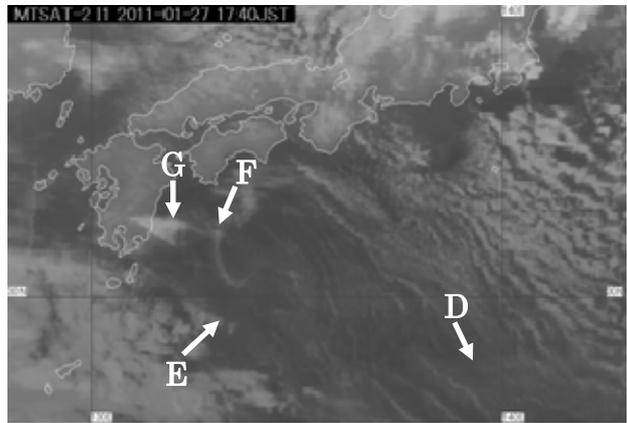


Fig. 61 MTSAT-2 IR1 image at 17:37JST, January 27, 2011.

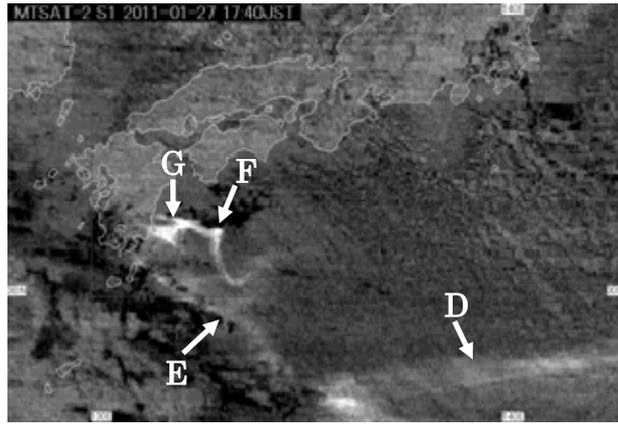


Fig. 62 MTSAT-2 SP image at 17:37JST, January 27, 2011.

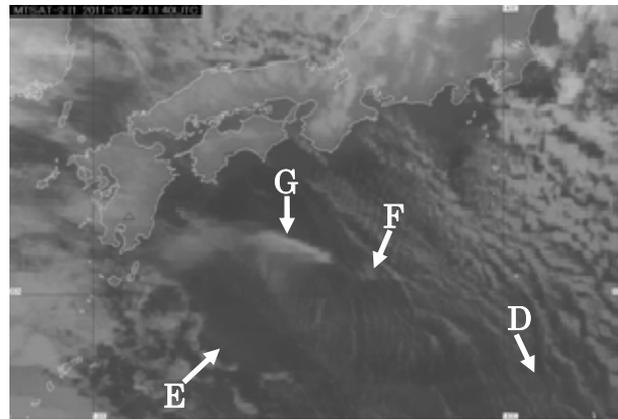


Fig. 63 MTSAT-2 IR1 image at 20:37JST, January 27, 2011.

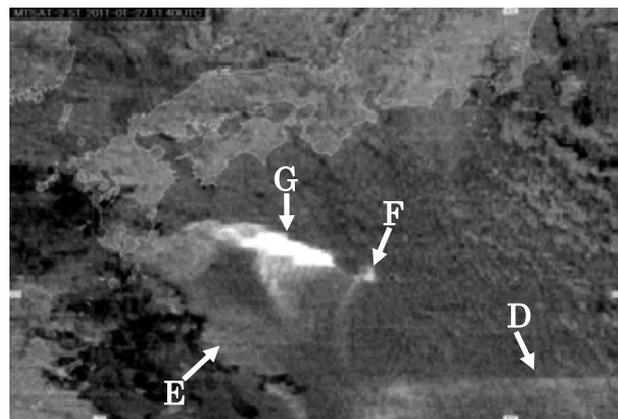


Fig. 64 MTSAT-2 SP image at 20:37JST, January 27, 2011.

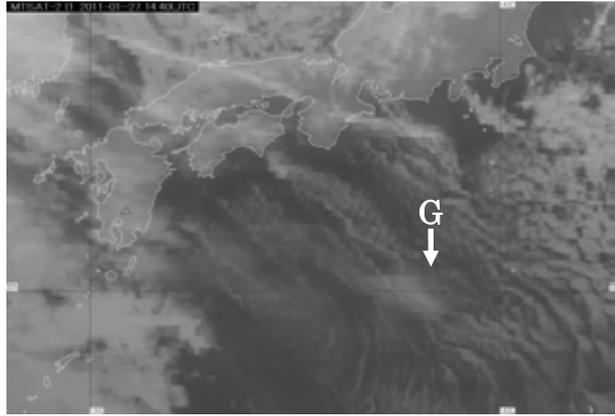


Fig. 65 MTSAT-2 IR1 image at 23:37JST, January 27, 2011.

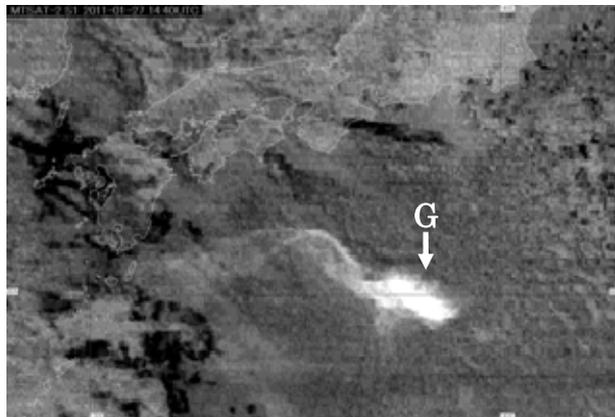


Fig. 66 MTSAT-2 SP image at 23:37JST, January 27, 2011.

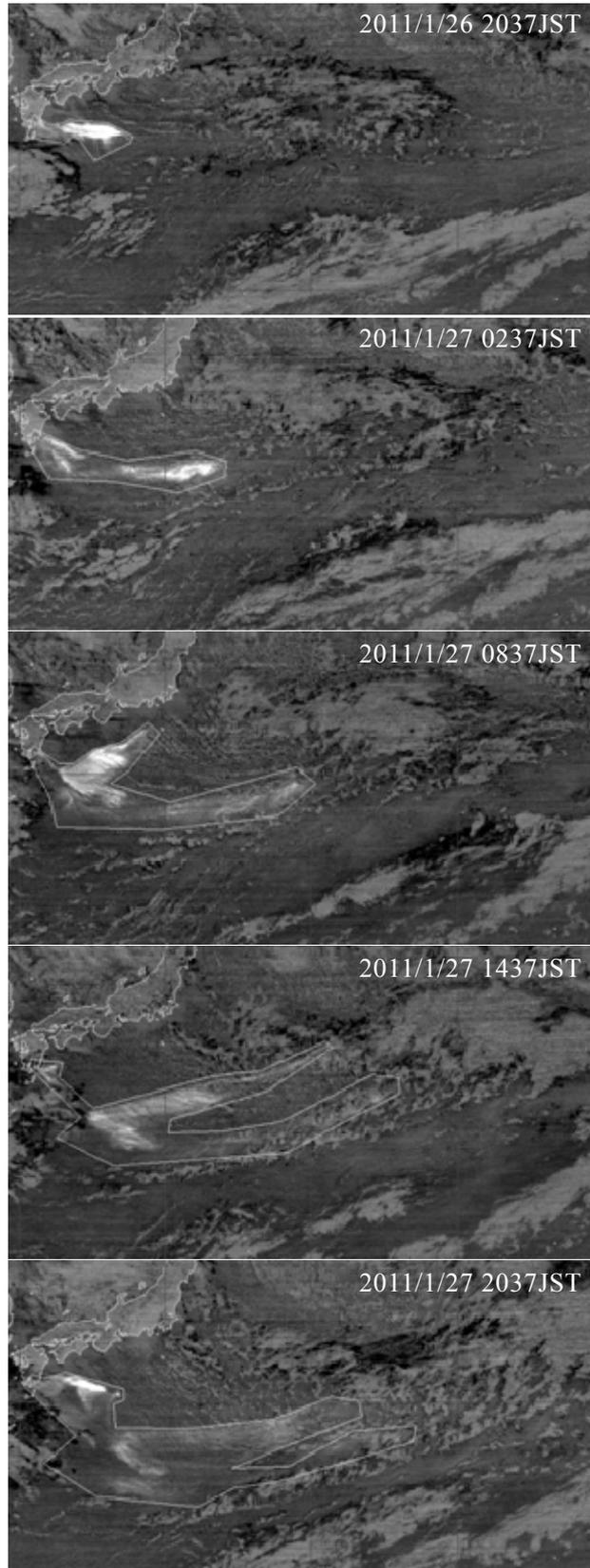


Fig. 67 MTSAT-2 SP images at 20:37JST, January 26 and 02:37, 08:37, 14:37 and 20:37JST, January 27, 2011.

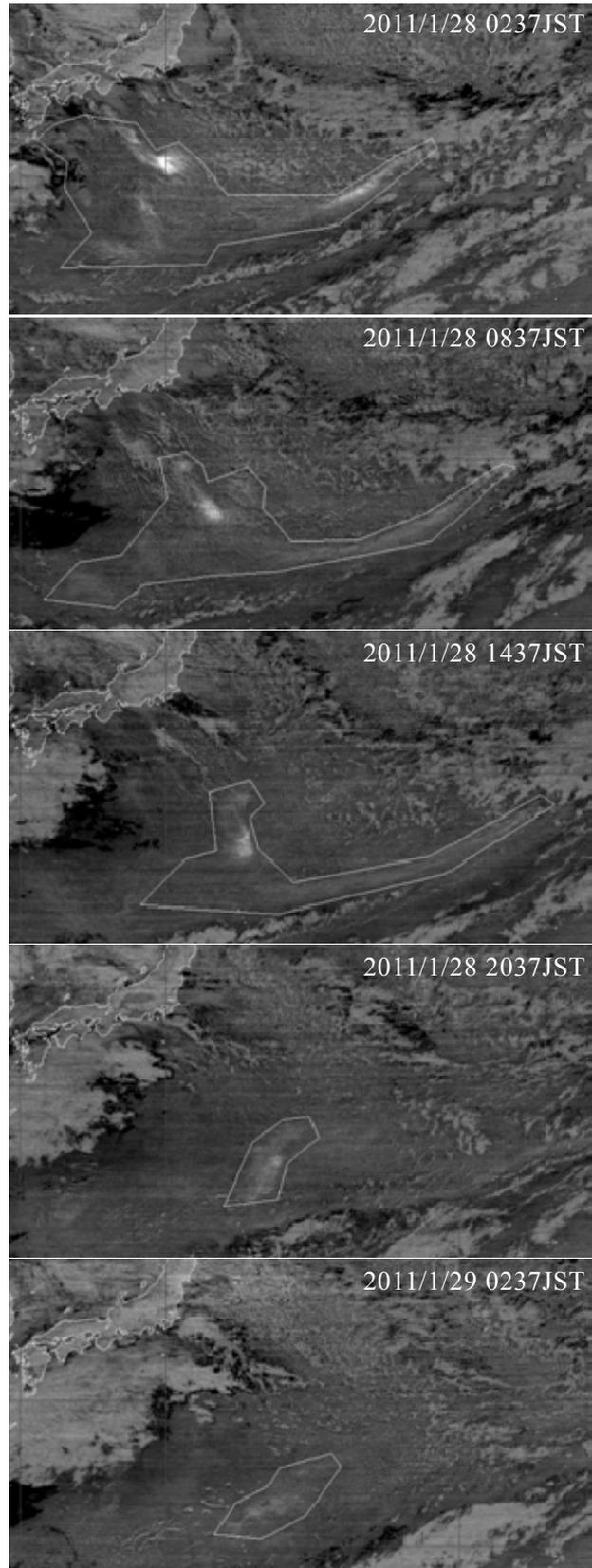


Fig. 67 (continued) MTSAT-2 SP images at 02:37, 08:37, 14:37, 20:37JST, January 28 and 02:37JST, January 29, 2011.

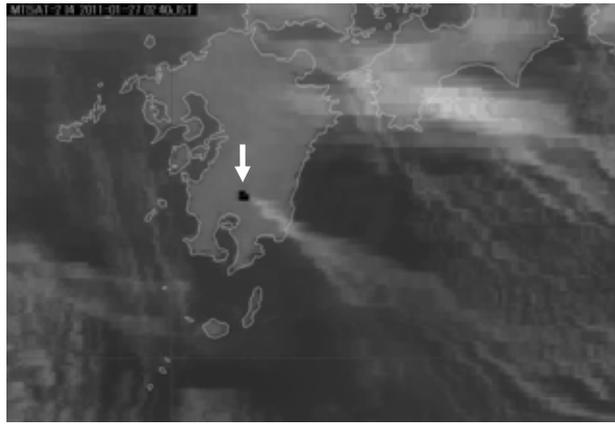


Fig. 68 MTSAT-2 3.8 μ m image at 02:37JST, January 27, 2011.

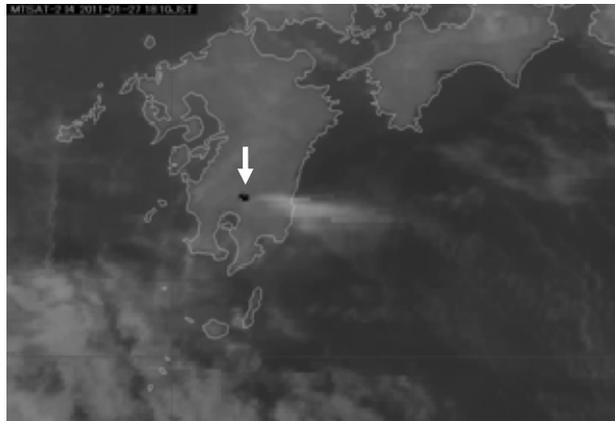


Fig. 69 MTSAT-2 3.8 μ m image at 18:06JST, January 27, 2011.

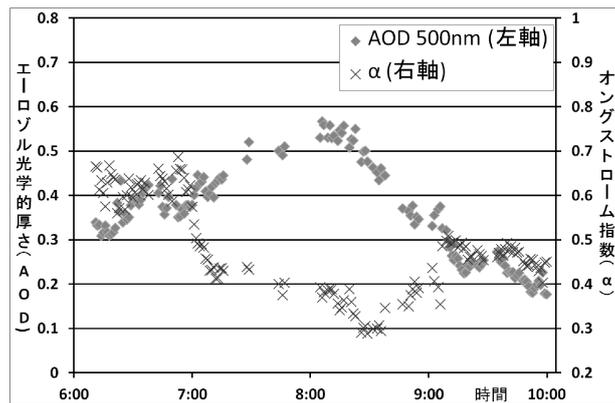


Fig. 70 Aerosol optical depth (AOD) at 500nm and the Ångström exponent (α) at Minamitorishima (06:00–10:00JST, January 28, 2011).

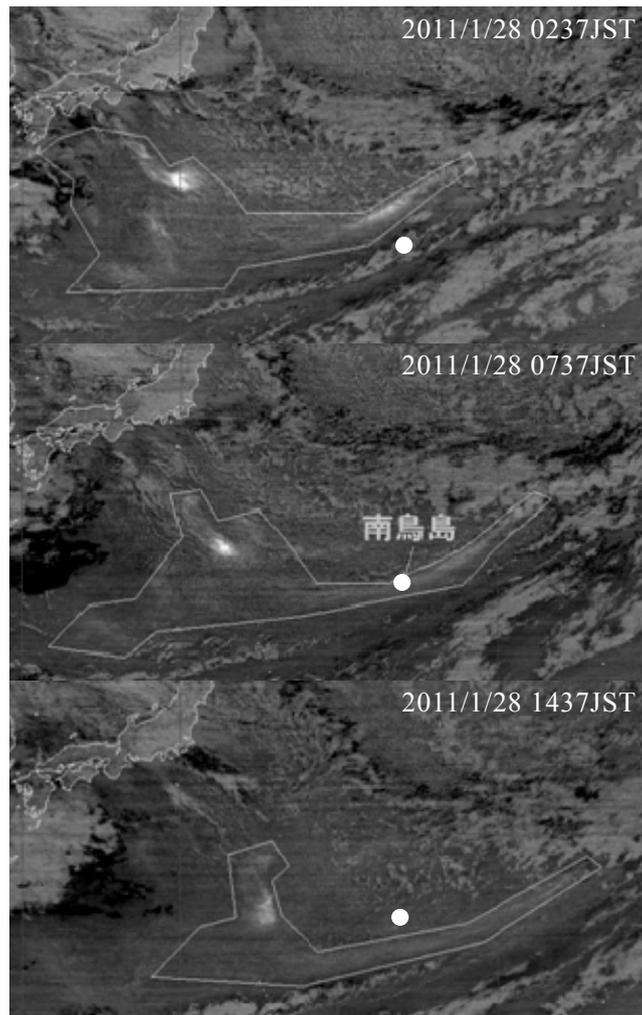


Fig. 71 MTSAT-2 SP images at 02:37, 07:37 and 14:37JST, January 28, 2011.

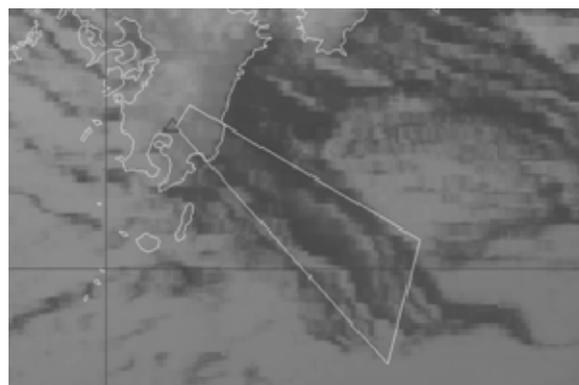


Fig. 72 MTSAT-2 IR1 image at 20:37JST, January 29, 2011.

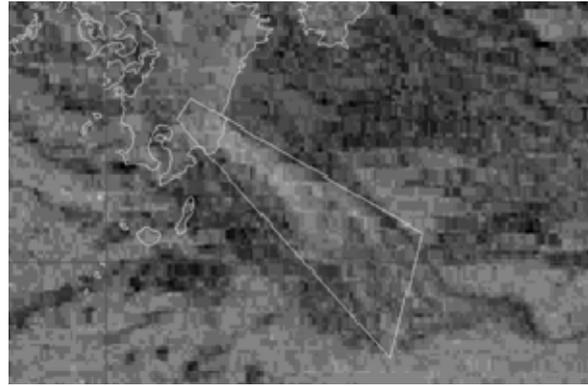


Fig. 73 MTSAT-2 SP image at 20:37JST, January 29, 2011.

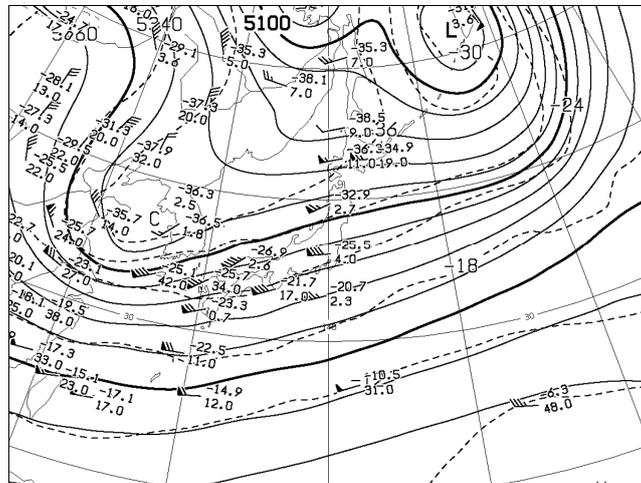


Fig. 74 Geopotential height at 500hPa (09:00JST, February 14, 2011).

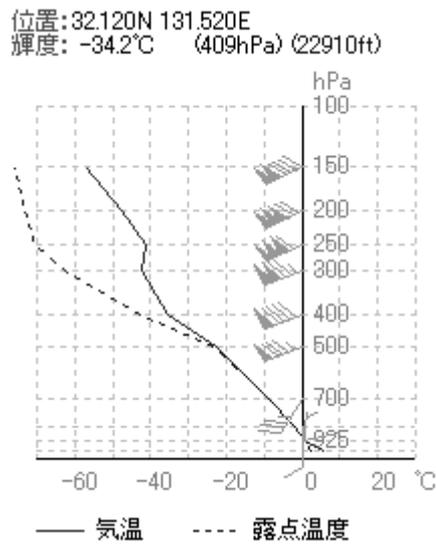


Fig. 75 NWP vertical profile at 05:30JST, February 14, 2011.

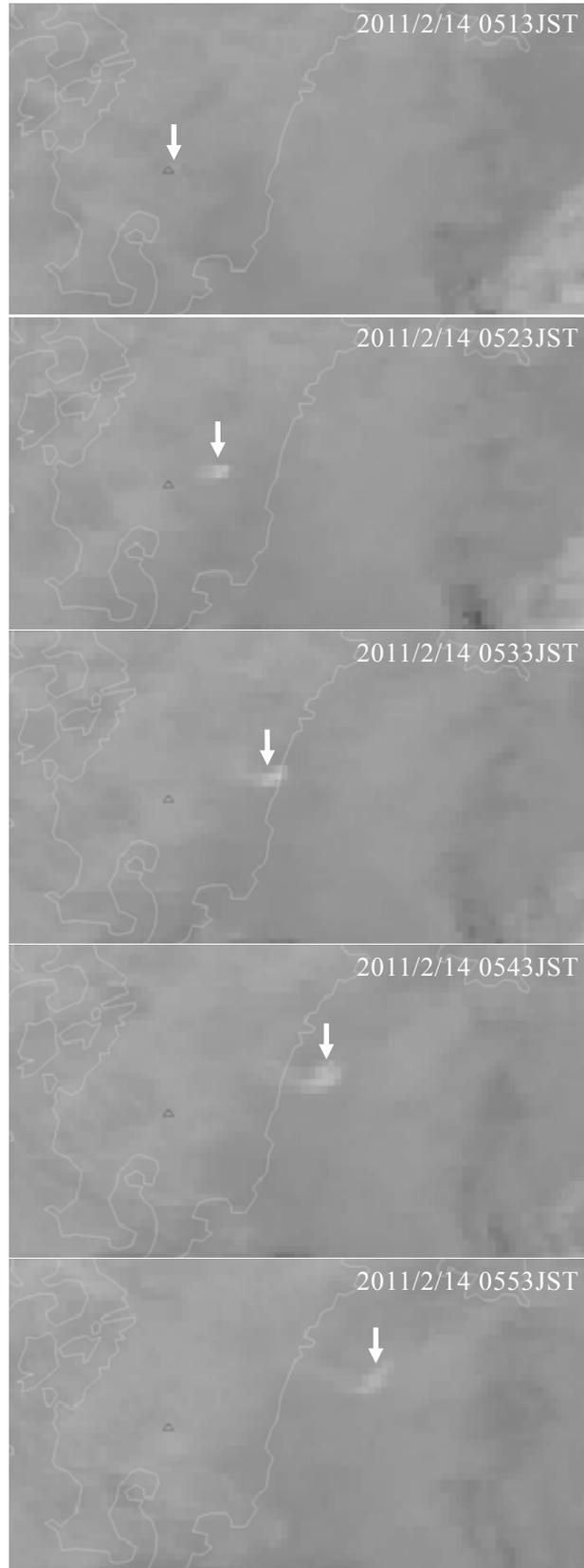


Fig. 76 MTSAT-1R IR1 images at 05:13, 05:23, 05:33, 05:43 and 05:53JST, February 14, 2011.



Fig. 77 MTSAT-1R SP images at 05:13, 05:23, 05:33, 05:43 and 05:53JST, February 14, 2011.

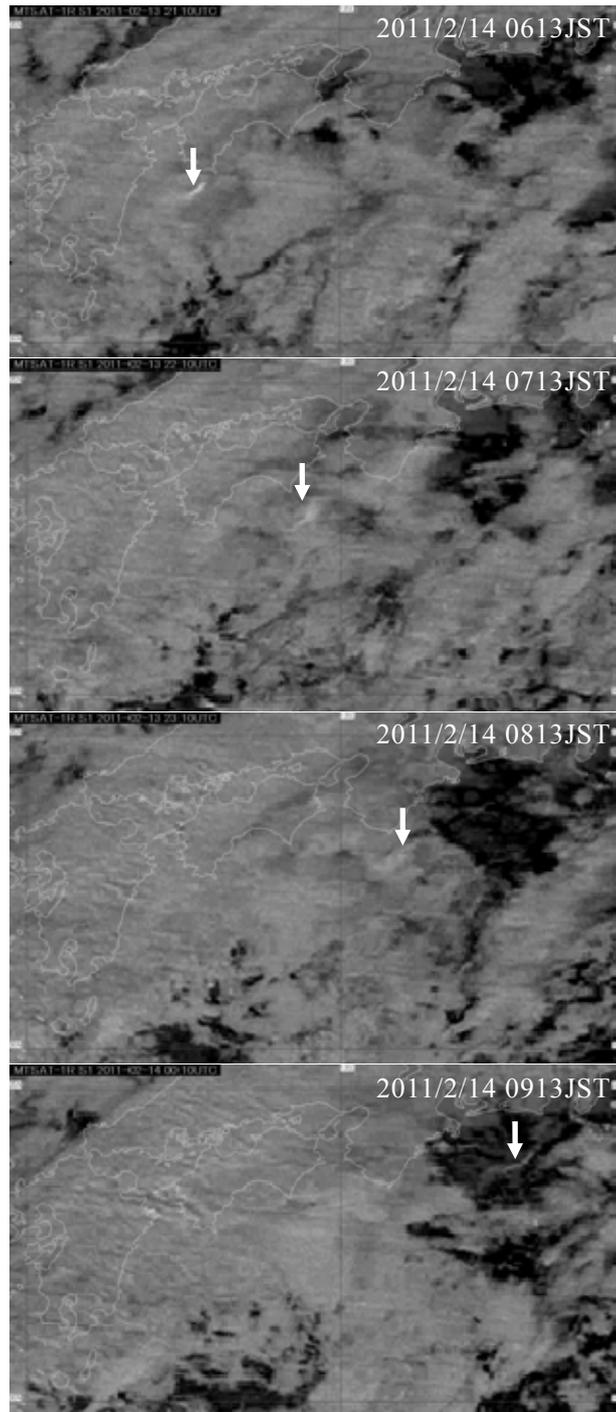


Fig. 78 MTSAT-1R SP images at 06:13, 07:13, 08:13 and 09:13JST, February 14, 2011.

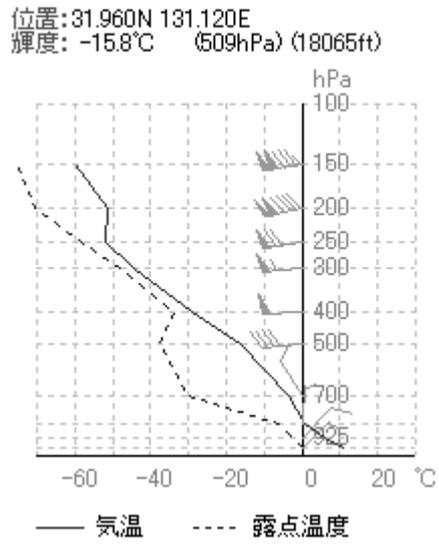


Fig. 79 NWP vertical profile at 18:40JST, February 18, 2011.

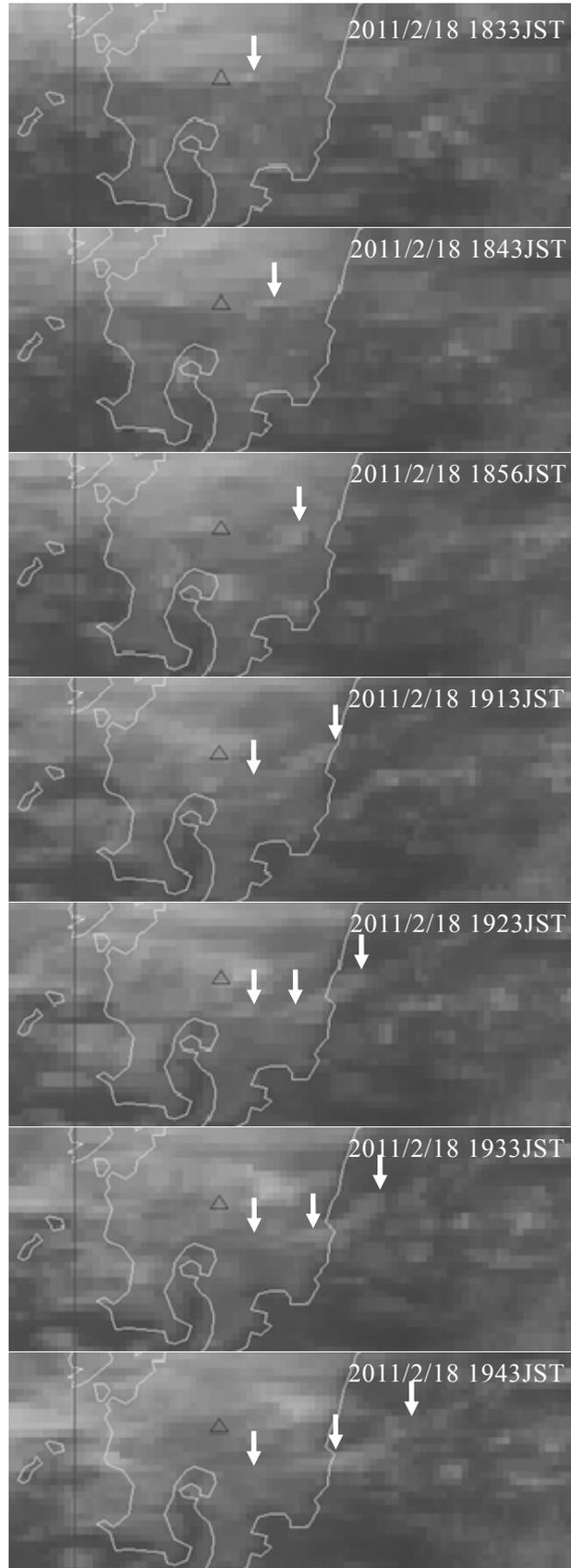


Fig. 80 MTSAT-1R IR1 images at 18:33, 18:43, 18:56, 19:13, 19:23, 19:33 and 19:43JST, February 18, 2011.

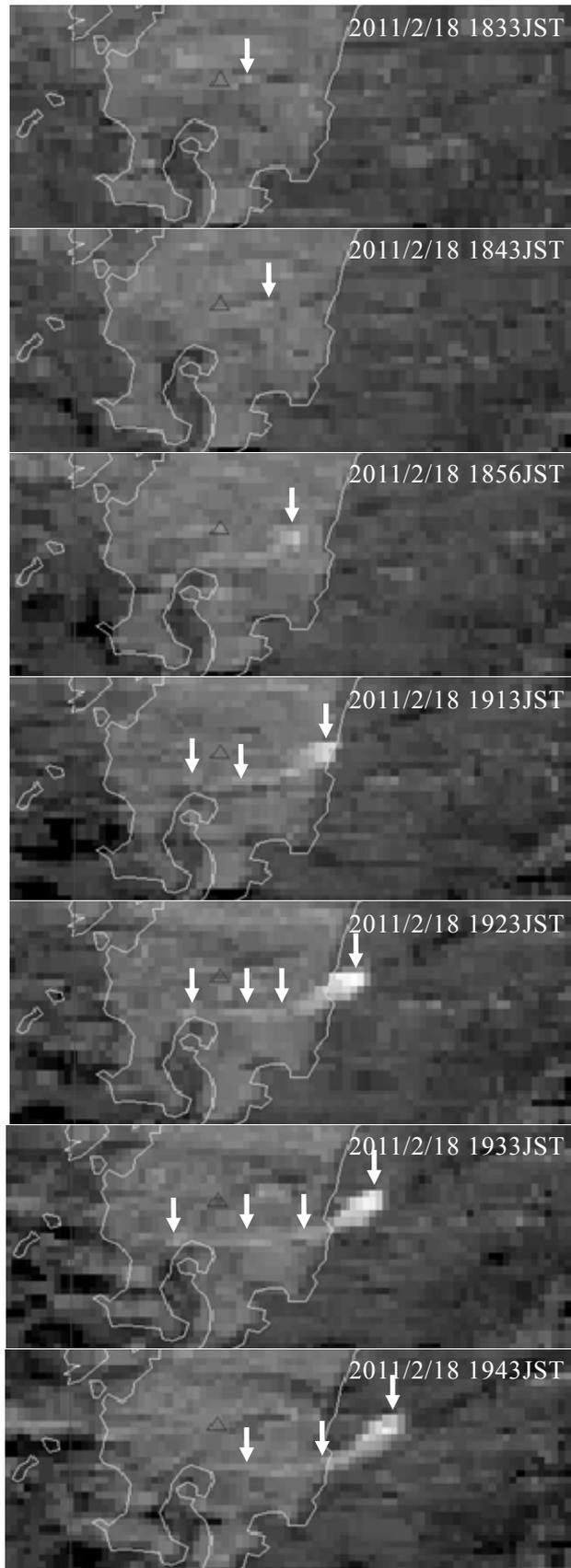


Fig. 81 MTSAT-1R SP images at 18:33, 18:43, 18:56, 19:13, 19:23, 19:33 and 19:43JST, February 18, 2011.

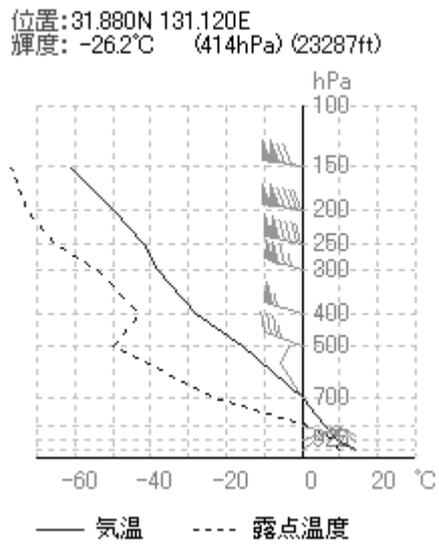


Fig. 82 NWP vertical profile at 18:00JST, March 13, 2011.

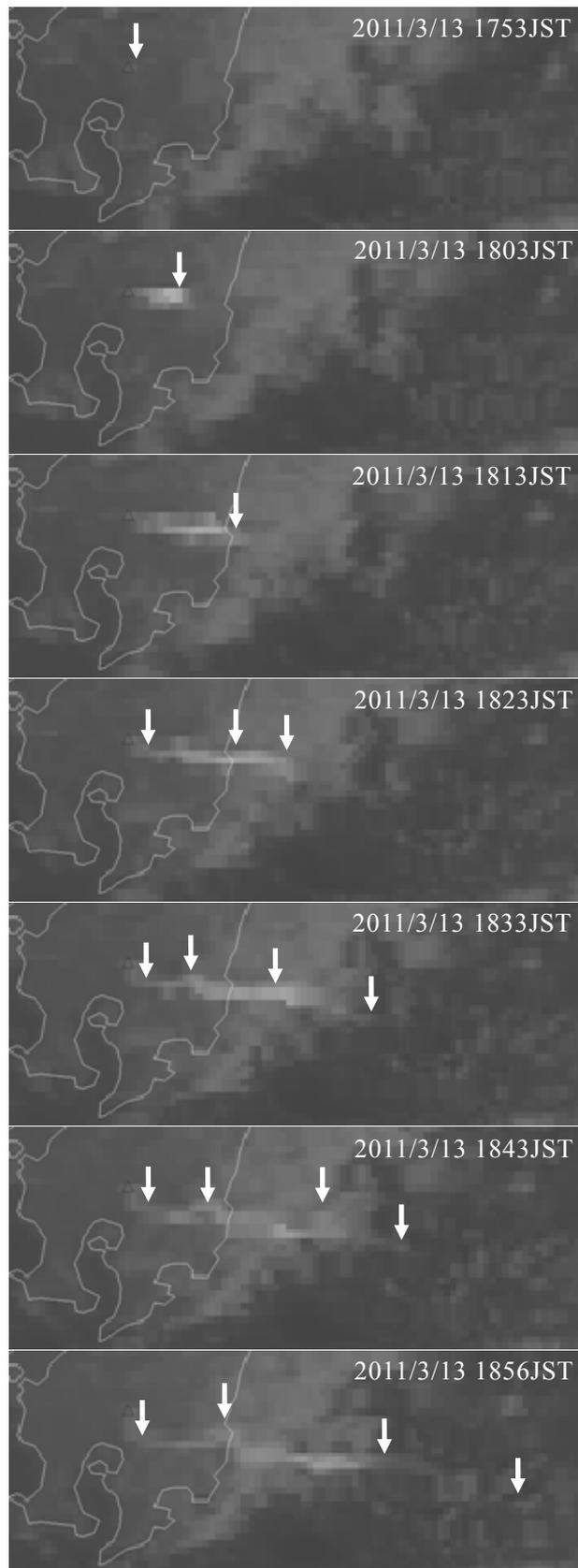


Fig. 83 MTSAT-1R IR1 images at 17:53, 18:03, 18:13, 18:23, 18:33, 18:43 and 18:56JST, March 13, 2011.

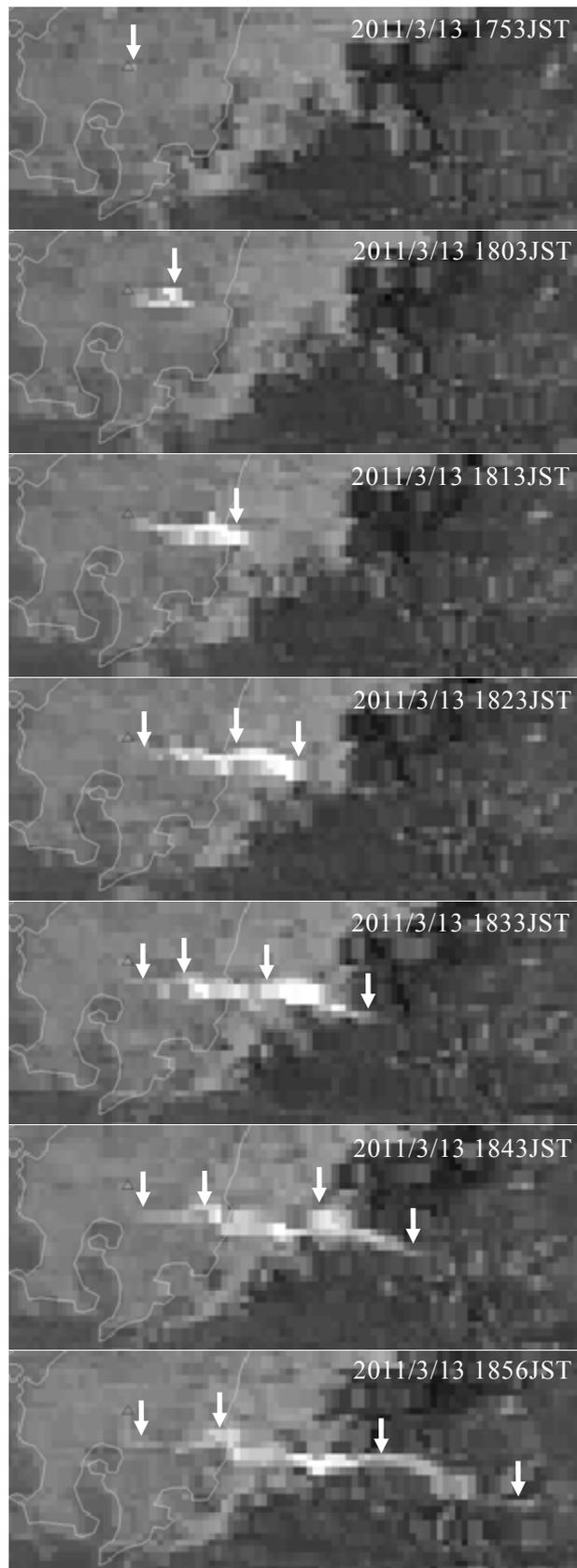


Fig. 84 MTSAT-1R SP images at 17:53, 18:03, 18:13, 18:23, 18:33, 18:43 and 18:56JST, March 13, 2011.

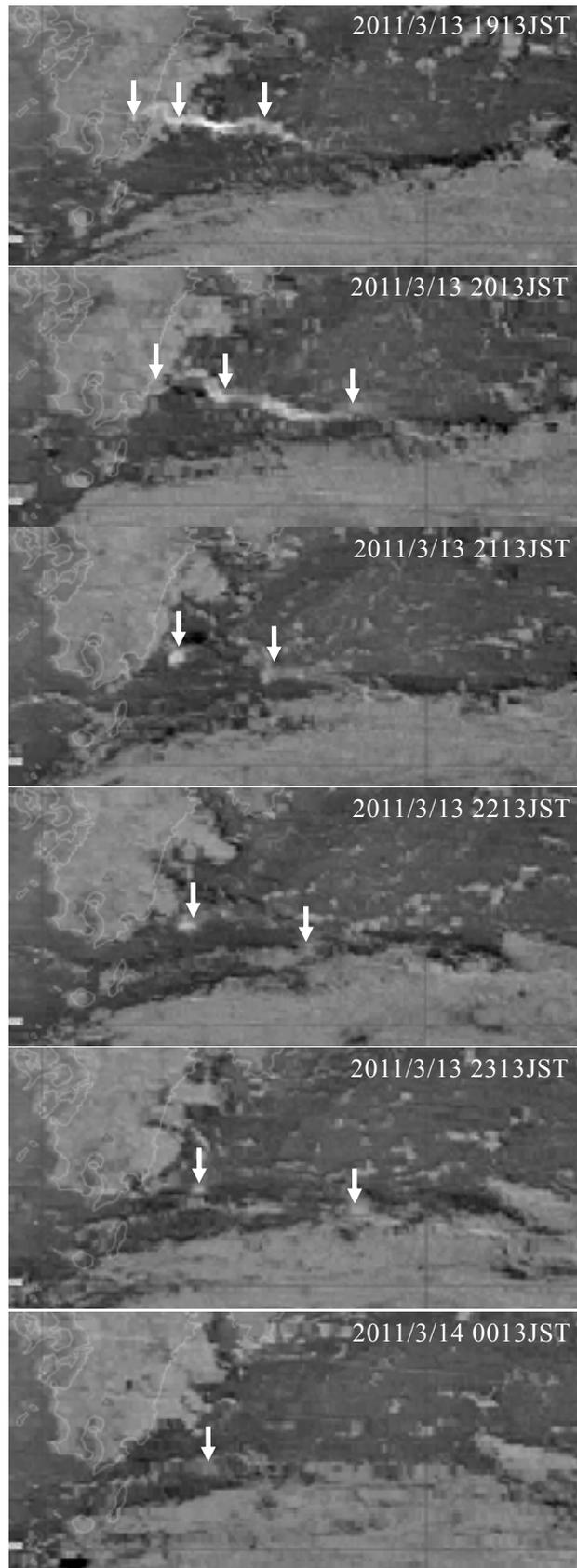


Fig. 85 MTSAT-1R SP images at 19:13, 20:13, 21:13, 22:13, 23:13JST, March 13 and 00:13JST, March 14, 2011.

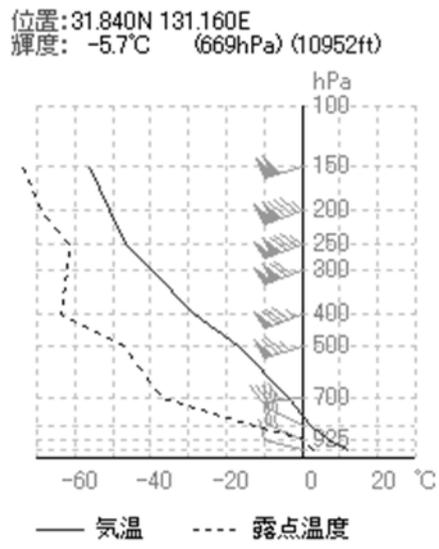


Fig. 86 NWP vertical profile at 19:50JST, April 18, 2011.

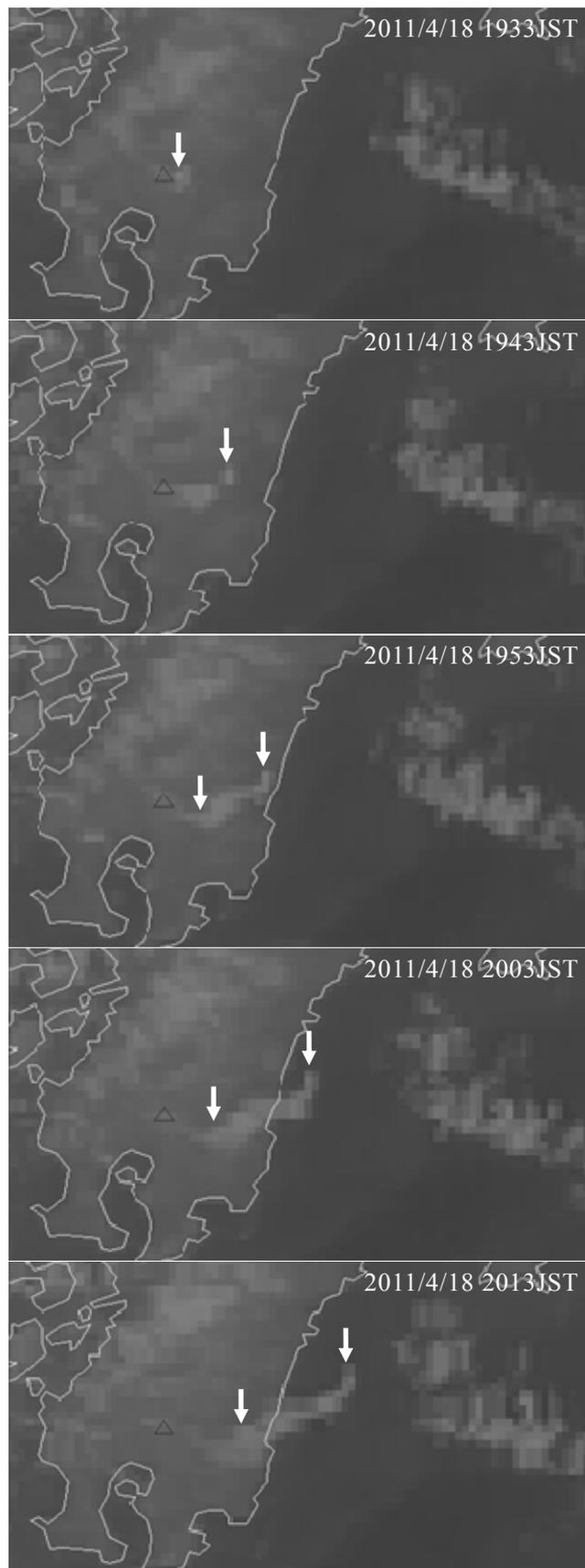


Fig. 87 MTSAT-1R IR1 images at 19:33, 19:43, 19:53, 20:03 and 20:13JST, April 18, 2011.



Fig. 88 MTSAT-1R SP images at 19:33, 19:43, 19:53, 20:03 and 20:13JST, April 18, 2011.

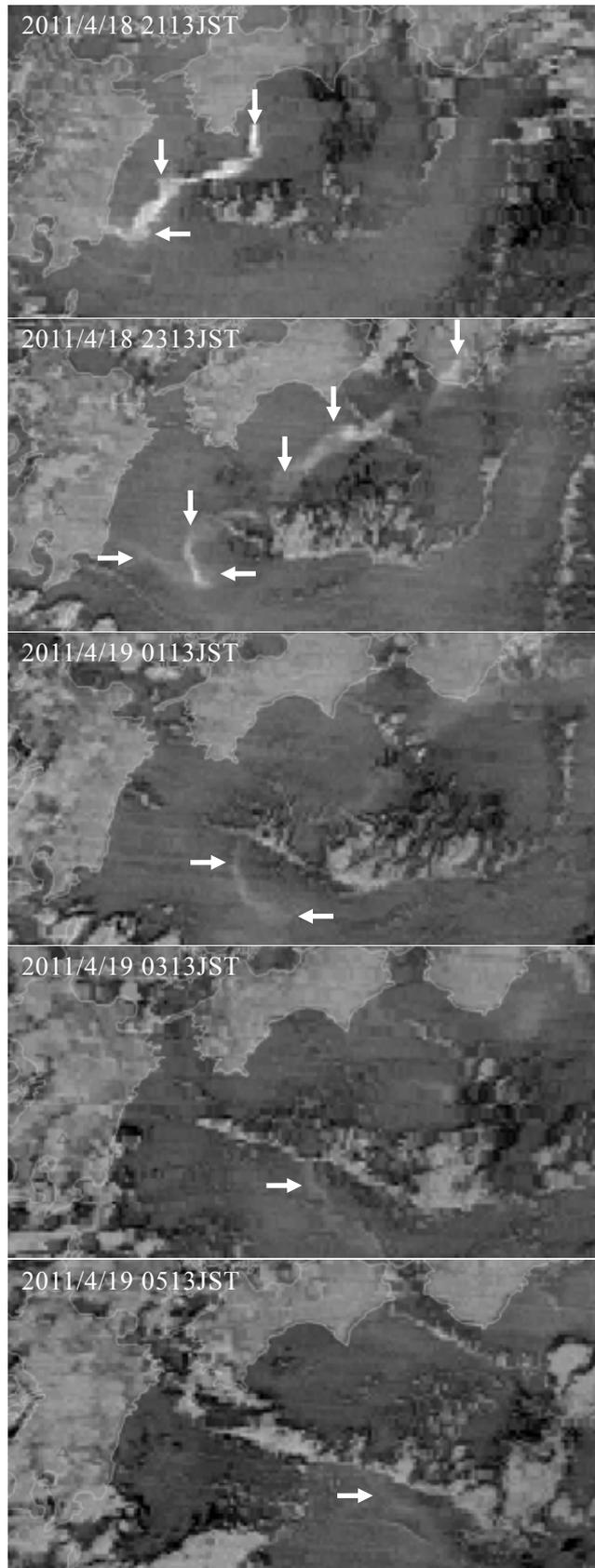


Fig. 89 MTSAT-1R SP images at 21:13, 23:13JST, April 18 and 01:13, 03:13, 05:13JST, April 19, 2011.

Table 1 Characteristics of the weather Doppler radars at Tanegashima, Fukuoka and Kagoshima Airport.

| | Tanegashima Radar | Fukuoka Radar | Kagoshima DRAW |
|--|---|---|----------------------------|
| Transmitted frequency (Wavelength) | 5350MHz (5.6cm, C-band) | 5355MHz (5.6cm, C-band) | 5370MHz (5.6cm, C-band) |
| Peak transmitted power | 250kW | 250kW | 200kW |
| Type | Klystron | Klystron | Klystron |
| Parabolic antenna diameter | 4.0m | 4.0m | 7.0m |
| Beam width | H 1.06°/ V 1.03° | H 1.01°/ V 1.01° | H 0.58° / V 0.62° |
| Pulse width, pulse repetition frequency (PRF) | 1.120μs, 940/752Hz (150km range) 1.120μs, 600/480Hz (250km range) 2.650μs, 330Hz (400km range) | 1.104μs, 940/752Hz (150km range) 1.104μs, 600/480Hz (250km range) 2.660μs, 330Hz (400km range) | 1.0μs, 1200/960Hz |
| Gain | 44.4dB | 44.7dB | 48.9dB |
| Minimum sensitivity | -108.27dBm (150 or 250km range) -111.68dBm (400km range) | -108.78dBm (150 or 250km range) -112.22dBm (400km range) | -111.0dBm |
| Rotation | 4rpm | 4rpm | 2 or 4rpm |
| Plane of polarization | H | H | H |
| Maximum range | 400km | 400km | 120km |
| Range resolution | 250m | 250m | 150m |
| Azimuth resolution | 1.5° | 1.5° | 0.7° |
| Duration of volume scanning | 10min (5min x2) | 10min (5min x2) | 6min |

Table 2 Characteristics of the MTSAT series imager.

| Channel | Wavelength [μm] | Resolution [km] |
|----------------|------------------------|------------------------|
| IR1 | 10.3 ~ 11.3 | 4 |
| IR2 | 11.5 ~ 12.5 | 4 |
| IR3 (WV) | 6.5 ~ 7.0 | 4 |
| IR4 | 3.5 ~ 4.0 | 4 |
| VIS | 0.55 ~ 0.90 | 1 |

Table 3 Record of eruptions at Shinmoedake and detection of ash by MTSAT (from February 1 to 16:30JST, February 7, 2011).

| Date [JST] | Event ^a | Height ^b [m] | Direction | Detection ^c |
|------------|--------------------|-------------------------|-----------|------------------------|
| 2/1 07:54 | Ex | 3500 | SE | ○ |
| 2/1 15:22 | Er | 3500 | SE | × |
| 2/1 15:33 | Er | 4500 | SE | ○ |
| 2/1 23:19 | Ex | >3500 | T | ○ |
| 2/2 05:25 | Ex | >3500 | NE | × |
| 2/2 10:47 | Ex | >2000 | E | × |
| 2/2 15:53 | Ex | 4500 | E | ○ |
| 2/3 08:09 | Ex | 3000 | E | ○ |
| 2/3 12:17 | Er | 4000 | E | ○ |
| 2/3 17:45 | Er | 3500 | E | ○ |
| 2/4 09:42 | Er | 4500 | E | ○ |
| 2/5 10:53 | Er | 3500 | E | ○ |
| 2/6 03:16 | Er | >3500 | NE | ○ |
| 2/6 18:05 | Er | 3500 | SE | ○ |
| 2/7 06:07 | Er | 3000 | SE | ○ |

a: Ex (Explosion), Er (Eruption)

b: above sea level

c: ○(Enable), × (Disable)

Table 4 Record of eruptions at Shinmoedake and detection of ash by MTSAT (from 16:30JST, February 7 to July 31, 2011).

| Date [JST] | Event ^a | Height ^b [m] | Direction | Detection ^c |
|------------|--------------------|-------------------------|-----------|------------------------|
| 2/7 18:09 | Er | 2700 | SE | ○ |
| 2/7 18:39 | Er | 3100 | SE | ○ |
| 2/11 11:36 | Ex | 4000 | SE | ○ |
| 2/14 05:07 | Ex | unknown | unknown | ○ |
| 2/18 18:16 | Ex | 4500 | S | ○ |
| 3/1 19:23 | Ex | unknown | unknown | × |
| 3/3 18:08 | Er | >3000 | SE | ○ |
| 3/8 02:50 | Er | 2500 | SE | ○ |
| 3/13 17:45 | Er | 5500 | T | ○ |
| 3/23 08:23 | Er | 2500 | SE | ○ |
| 4/3 08:41 | Er | 4500 | E | × |
| 4/18 19:22 | Er | 3500 | E | ○ |
| 6/29 10:27 | Er | 2500 | T | × |

a: Ex (Explosion), Er (Eruption)

b: above sea level

c: ○(Enable), × (Disable)