

第 2 章 衛星搭載光学センサーを用いた西之島火山における噴煙活動評価*

II Monitoring of Nishinoshima plume activity using satellite optical sensors**

2.1 はじめに

2013 年 11 月 20 日、海上自衛隊が、東京の南約 1000 km にある小笠原諸島父島の西方約 130 km の西之島 (Fig. 2.1) の近傍で噴煙を視認し、同日海上保安庁により西之島の南東 500 m 沖に新たに陸地が形成され、噴火活動を行っていることが確認された (小野, 2015)。その後、西之島の火山活動監視のため、海上保安庁や自衛隊によって月 1 回以上 (2014 年 3 月までは月数回) の頻度で、航空機観測が行われ (海上保安庁海洋情報部, 2016)、島の面積や、火口位置や溶岩流出地点、噴火様式の変化、変色水の様子等が観察された。また、国土地理院によって、2016 年 8 月までに 10 回航空地形計測が行われている (国土地理院, 2016)。このように、アクセスが困難な海洋の無人島では、海上保安庁などにより航空機を用いた監視観測が行われているが、活動が長期化すると、その頻度は少なくなってくる。このような火山の、定常的な監視には、人工衛星の利用が有効であり、ALOS-2/PALSAR-2 や TerraSAR-X のようなマイクロ波センサーを利用した陸域面積や地表面被覆の把握、地殻変動の抽出、溶岩流出量の推定 (たとえば、第 4 章; Maeno *et al.*, 2016)、Himawari-8/AHI (Advanced Himawari Imager) や ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer)、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、ALOS-2/CIRC (Compact Infrared Camera) のような赤外線センサーを用いた熱活動の調査研究 (たとえば、第 3 章; 浦井, 2014; 東京大学地震研究所, 2016; 宇宙航空研究開発機構, 2016) など、多様な利用が可能である。本稿では、衛星搭載光学センサー画像を用いて噴煙の上昇形態を解析し、西之島から放出される熱エネルギーと H_2O 量を推定した結果を報告する。

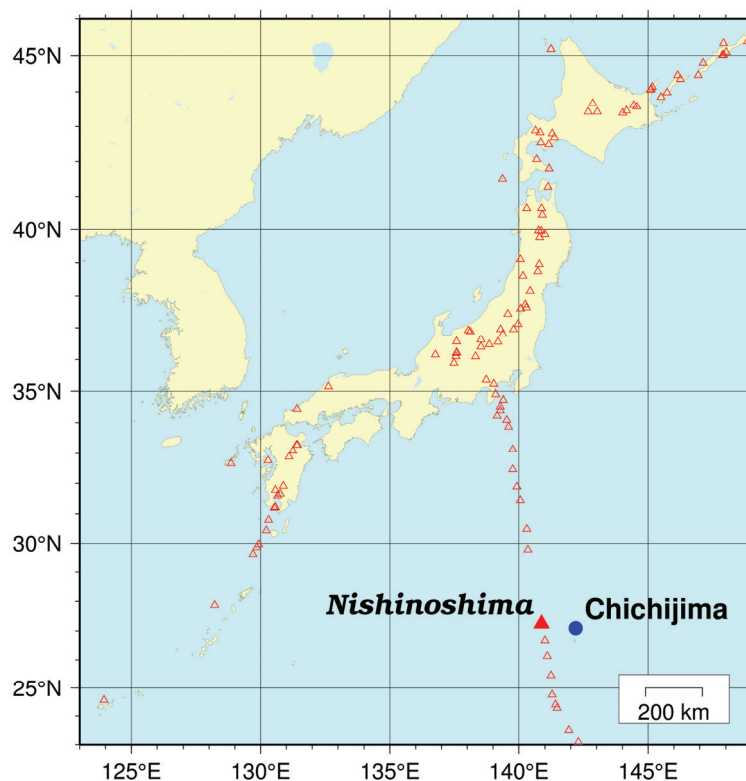


Fig. 2.1 Location map of active volcanoes in Japan (Δ), Nishinoshima volcano, and Chichijima.

図 2.1 西之島火山および父島の位置図 (Δ は活火山)。

* 福井敬一 (火山研究部) ** Keiichi Fukui

Table 2.1 Specifications of the satellites and sensors that acquired data used in this study.

(after http://www.restec.or.jp/knowledge/satellite_term.html and <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/>)

表 2.1 無償で利用可能な、空間分解能 15m 以上の光学衛星センサーの諸元。

Name	Landsat-8				EO-1				Terra				
Synonymous	Landsat-8 / LDCM (Landsat Data Continuity Mission)				Earth Observing-1				(formerly EOS/AM-1)				
Launch Date	February 11, 2013				November 21, 2000				December 18, 1999				
Nationality	USA				USA				Canada/Japan/USA				
Operation Agency	USGS/NASA				GSFC				NASA/CSA/METI				
Orbit Height	705 km				705 km				705 km				
Orbital Period	99 min.				99 min.				99 min.				
Inclination	98.2 degrees				98.7 degrees				98.5 degrees				
Local time on descending	10:00 AM				10:15 AM				10:30 AM				
Repeat Cycle	16 days				16 days				16 days				
Sensor Name	OLI (Operational Land Imager) & TIRS (Thermal Infrared Sensor)				ALI (Advanced Land Imager)				ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)				
Swath Width	185 km				37 km				60 km				
Sensor Characteristics	Band No.	Band Name	Wavelength (μm)	Ground Resolution (m)	Band No.	Band Name	Wavelength (μm)	Ground Resolution (m)	Band No.	Band Name	Wavelength (μm)	Ground Resolution (m)	Cross-track pointing
	1	New Deep Blue	0.433 – 0.453	30	PAN	VNIR	0.480 – 0.690	10	1	VNIR	0.52 – 0.60	15	±24° (±318 km)
	2	Blue	0.450 – 0.515	30	MS-1	VNIR	0.433 – 0.453	30	2	VNIR	0.63 – 0.69	15	±24° (±318 km)
	3	Green	0.525 – 0.600	30	MS-1	VNIR	0.450 – 0.515	30	3N	VNIR	0.76 – 0.86	15	±24° (±318 km)
	4	Red	0.630 – 0.680	30	MS-2	VNIR	0.525 – 0.605	30	3B	VNIR	0.76 – 0.86	15	±24° (±318 km)
	5	NIR	0.845 – 0.885	30	MS-3	VNIR	0.630 – 0.690	30	4	SWIR	1.600 – 1.700	30	±8.55° (116 km)
	6	SWIR 2	1.56 – 1.66	30	MS-4	VNIR	0.775 – 0.805	30	5	SWIR	2.145 – 2.185	30	±8.55° (116 km)
	7	SWIR 3	2.1 – 2.3	30	MS-4	VNIR	0.845 – 0.890	30	6	SWIR	2.185 – 2.225	30	±8.55° (116 km)
	8	PAN	0.50 – 0.68	15	MS-5	SWIR	1.200 – 1.300	30	7	SWIR	2.235 – 2.285	30	±8.55° (116 km)
	9	SWIR	1.36 – 1.39	30	MS-5	SWIR	1.550 – 1.750	30	8	SWIR	2.295 – 2.365	30	±8.55° (116 km)
	10	TIRS 1	10.3 – 11.3	100	MS-7	SWIR	2.080 – 2.350	30	9	SWIR	2.360 – 2.430	30	±8.55° (116 km)
	11	TIRS 2	11.5 – 12.5	100					10	TIR	8.125 – 8.475	90	±8.55° (116 km)
									11	TIR	8.475 – 8.825	90	±8.55° (116 km)
									12	TIR	8.925 – 9.275	90	±8.55° (116 km)
									13	TIR	10.25 – 10.95	90	±8.55° (116 km)
									14	TIR	10.95 – 11.65	90	±8.55° (116 km)

2.2 噴煙観測に利用可能な衛星搭載光学センサー

西之島の噴煙の規模は 1000 m 程度であり、衛星画像から噴煙の上昇形態を解析するには空間分解能 10 m クラスあるいはそれ以上の性能を有する光学センサーが必要である。商用衛星ならば、1 m あるいはそれ以上の空間分解能を有する光学センサーを搭載した衛星が運用されており（例えば、IKONOS や GeoEye, QuikBird, Worldview（内閣官

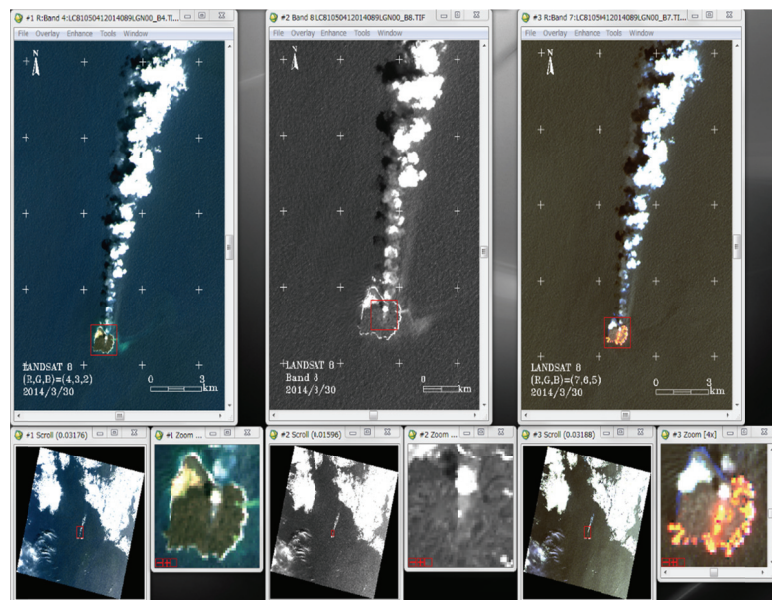


Fig. 2.2 Landsat-8/OLI image of Nishinoshima and its plume on 30 March 2014. Left column: natural color image, color composite (R,G,B) = bands (4,3,2). Middle column: panchromatic band 8 image. Right column: Shortwave infrared image, color composite (R,G,B) = bands (7,6,5).

図 2.2 Landsat-8/OLI で撮影された 2014 年 3 月 30 日の西之島とその噴煙。
 (左) ナチュラルカラー (バンド 4, 3, 2 を RGB に割り当てて表示), (中) パンクロマチックバンド, (右) 短波長赤外画像 (バンド 7, 6, 5 を RGB に割り当てて表示。橙色の領域は高温の新しい火山噴出部と思われる)。各列の左下の画像がフルシーン、上の画像はフルシーン画像中の赤四角の領域を拡大したもの、右下は上の画像中の赤四角の領域を拡大表示したもの。

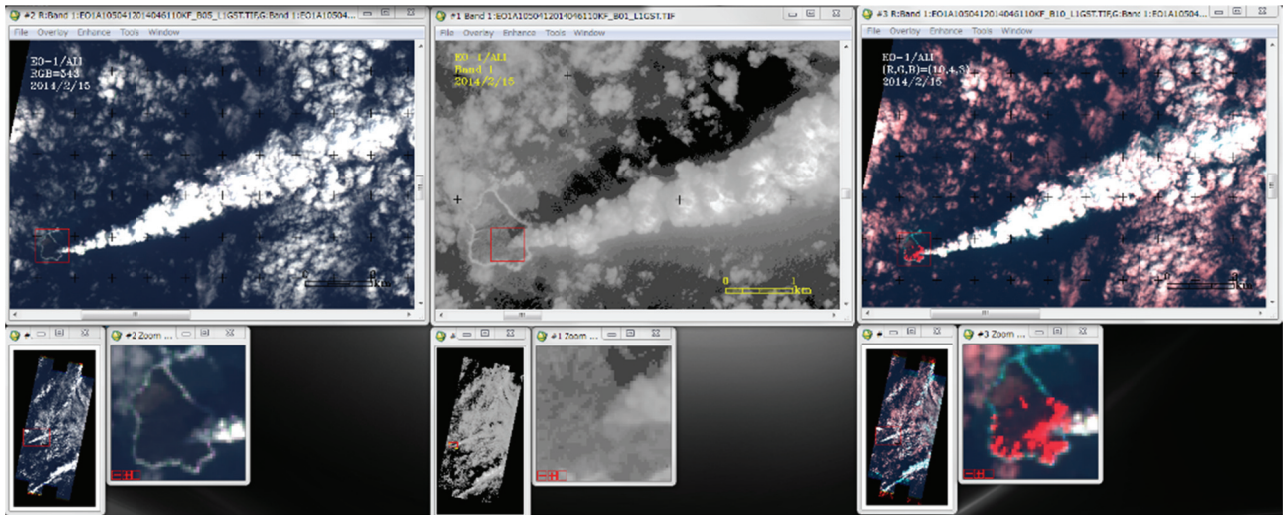


Fig. 2.3 EO-1/ALI image of Nishinoshima and its plume on 15 February 2014.
Left column: natural color image, color composite (R,G,B) = bands (MS-3,MS-2,MS-1). Middle column: panchromatic band image. Right column: Shortwave infrared image, color composite (R,G,B) = bands (MS-7,MS-2,MS-1).

図 2.3 EO-1/ALI で撮像された 2014 年 2 月 15 日の西之島とその噴煙。
(左) ナチュラルカラー (バンド MS-3, 2, 1 を RGB に割り当てて表示), (中) パンクロマチックバンド, (右) 短波長赤外を R に割り当てた画像 (バンド MS-7, 2, 1 を RGB に割り当てて表示. 赤色の領域は高温の新しい火山噴出物と思われる). 各列の左下の画像はフルシーン, 上の画像は左下の画像の赤枠を拡大, 右下は上の画像の赤枠を拡大.

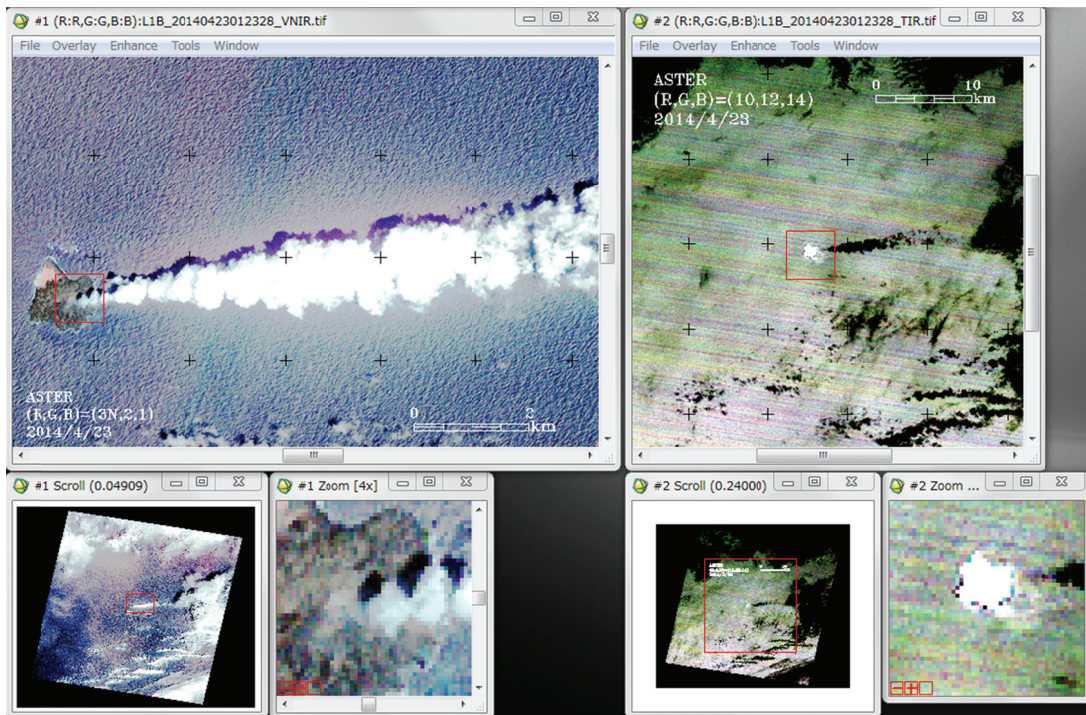


Fig. 2.4 Terra/ASTER images of Nishinoshima and its plume on 23 April 2014.
Left column: VNIR color composite, (R,G,B) = bands (3N,2,1). Right column: TIR color composite, (R,G,B) = bands (10,12,14).

図 2.4 Terra/ASTER で撮像された 2014 年 4 月 23 日の西之島とその噴煙。
(左) 可視画像 (バンド 3N, 2, 1 を RGB に割り当てて表示), (右) 熱赤外画像 (バンド 10, 12, 14 を RGB に割り当てて表示). 各列の左下の画像はフルシーン, 上の画像は左下の画像の赤枠を拡大, 右下は上の画像の赤枠を拡大.

房宇宙開発戦略本部事務局, 2011)), ステレオ観測や動画データの取得が可能な衛星もある。無償で利用可能な衛星データとしては, Landsat 8 号に搭載された Operational Land Imager (OLI), Earth Observing -1 衛星 (EO-1) に搭載された Advanced Land Imager (ALI), Terra 衛星に搭載された ASTER がある。ASTER の可視近赤外バンド (VNIR) は空間分解能 15 m を, OLI は空間分解能 15 m のパンクロマチック (PAN) バンド, ALI は空間分解能 10 m のパンクロマチックバンドを有している。衛星の回帰周期は 3 機とも 16 日であるが, ASTER は左右両向きのポインティング機能を有し, より短い時間間隔で撮像可能であり, ALI については観測幅は 37 km と狭いが, Landsat と同じ観測幅 (185 km) の中で撮像可能な機能を有しており, 16 日より短い間隔でデータを取得可能な時もある。西之島における昼間の観測時刻は, OLI で 10 時 06 分頃 (日本標準時。以下, 同様), ASTER で 10 時 24 分頃であり, ALI で 08 時 18 分～09 時 38 分であった。

本研究ではこれら無償で入手可能な衛星搭載光学センサーのジオコーディングされたデータを用いた。Table 2.1 に搭載衛星, センサーの諸元を, Fig. 2.2～2.4 に各センサーにより取得された西之島を含むフルシーンと, 噴煙, 陸域を拡大表示した例を示す。

2.3 解析方法

2.3.1 噴煙高の推定

衛星画像から火山噴煙の高度を推定するには噴煙の温度データから推定する方法や, 噴煙の移動方向から推定する方法, 複数の衛星や立体視センサーによる視差を利用した方法, 噴煙の影を利用した方法が用いられている (Prata *et al.*, 2015)。今回利用するセンサーや噴煙の規模に対しては噴煙の影を利用した方法を用いることができる。この方法は

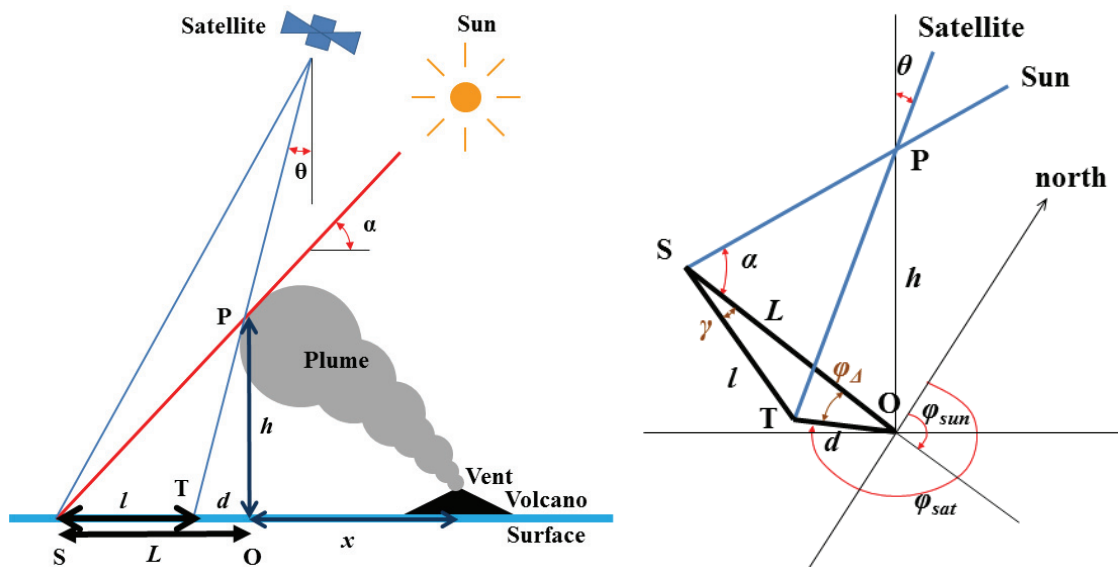


Fig. 2.5 Geometry of the image (T) and shadow (S) of a point (P) on the plume edge.

l : shadow length in satellite image

L : shadow length projected on the Earth's surface

d : shift of point (T) in the satellite image from point (P) on the plume edge.

α : solar elevation

θ : look angle of satellite sensor

φ_{sun} : solar azimuth, from north

φ_{sat} : sensor imaging azimuth, from north

図 2.5 噴煙の影 (OS, 長さ L) と噴煙の高さ (h), 太陽高度 (α), 衛星のルック角 (θ) との関係。TS (l) は見かけの影の長さ, φ_{sun} は太陽方位角, φ_{sat} は撮像方位角。

Holasek and Self (1995) が St. Helens 火山 1980 年噴火に適用した事例など、静止気象衛星を用いたものが多い。静止気象衛星の場合、多くは直下視による観測と見なせ、影から噴煙高度を推定することは容易である。ポインティング機能を有する軌道衛星の場合、影から噴煙の高さを求めることはやや複雑になるが、Prata and Grant (2001) などで用いられている。西之島の場合、影が海面に投影されるため、地表面標高の影響を考慮しなくても良いことで、比較的簡単に適用することが可能である。

光学センサーで昼間に取得された画像から、噴煙の高さ (h) を、噴煙と噴煙の影の位置、太陽高度角 (α)、太陽方位 (φ_{sun})、衛星のルック角 (θ)、撮像方位 (φ_{sat}) から推定することができる (Fig. 2.5)。噴煙上のある点 P は衛星画像では点 T に、P の影は S の位置になり、TS が衛星画像上での影となる。影の長さ (OS) を L 、点 T から点 P の直下点 O までの長さ (PO) を d 、噴煙の影の見かけの長さ (TS) を l とすると、直下視 ($\theta=0$) で観測された場合、 $l=L$ であり、点 P の高度 (噴煙の高さ) h は

$$h = l \tan(\alpha) \quad (1)$$

から求められる。直下視でない場合は

$$\varphi_{\Delta} = \pi + \varphi_{\text{sun}} - \varphi_{\text{sat}} \quad (2)$$

と置くと、

$$d = h \tan(\theta) \quad (3)$$

$$\gamma = \sin^{-1}(d \sin(\varphi_{\Delta})/l) \quad (4)$$

$$h = l \sin(\pi - \gamma - \varphi_{\Delta}) \tan(\alpha) / \sin(\varphi_{\Delta}) \quad (5)$$

であり、(3)~(5)式を繰り返し計算して h を求めることができる。ここで、 γ は点 T, S, O がなす角度である。

OMI は直下視で観測しており、また、ASTER についても、今回使用したデータのルック角は-0.01~0.02 (Table 2.2 参照) で直下視と見なせる。従って、これらのセンサーデータについては(1)式で噴煙の高さを求めることができる。ALI データについては、フルシーンの形状から $\varphi_{\text{sat}} = 281^{\circ}$ として、(3)~(5)式から噴煙の高さを求めた。

2.3.2 Plume rise 法による放熱率推定

大気汚染を評価する際に用いられる、Briggs (1969) による煙の上昇形態と浮力との関係式を火山噴煙に適用し、火山から噴煙として放出される熱エネルギー量を推定した鍵山 (1978) の方法によって噴煙活動を評価した。すなわち、風速 u [m/s] の大気中に火口から噴煙が放出され、噴煙出口から水平距離 x [m] において高さ h [m] の噴煙が形成されている時、放熱率 Q [W] は

$$Q = 2.8 \times 10^4 h^3 u^3 / x^2 \quad (6)$$

から求められる。係数 2.8×10^4 は福井 (1992) に記されているように外気の鉛直構造に関係した値であるが、ここでは、標準的な大気 (1 気圧、気温減率 6.5 K/km) における値を使用した。噴煙上で何点か、 x と h を計測し、最小二乗法により(7)式の C を求め、この C と風速 u から(8)式により Q を推定する。

$$C = h^3 / x^2 \quad (7)$$

$$Q = 2.8 \times 10^4 C u^3 \quad (8)$$

ここで、風速は 5 km メッシュで 3 時間毎に作成されている気象庁メソ解析値を時間空間内挿して求めた風速の高

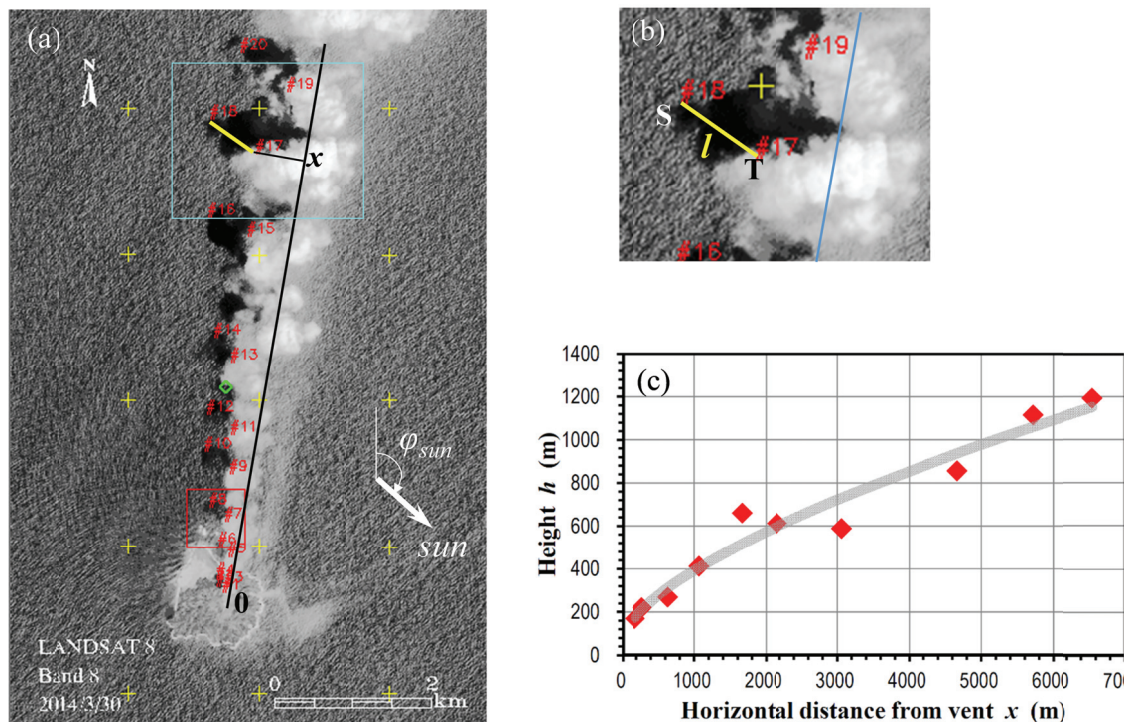


Fig. 2.6 Determination of plume drift from a satellite image.
 (a) Landsat-8/OLI image (panchromatic band 8) of the plume emanating from Nishinoshima on 30 March 2014.
 (b) Apparent length of shadow (l).
 (c) Relationship between the plume height h and the horizontal distance from vent x measured from image (a). The gray line shows the fitting curve of the plume rise method (Eq. 9). The heat discharge rate Q is estimated to be 962 MW. Wind speed is assumed to be 10.8 m/s from time-space interpolation of GPVs (Grid Point Values) of JMA's Meso-Scale Model (see Fig. 2.7).

図 2.6 噴煙の高さ推定のための衛星画像計測と plume rise の式へのあてはめ例。
 (a) 噴煙の位置 (#1, #3, ..., #19) と影の計測点 (#2, #4, ..., #20) の例 (Landsat-8 2014 年 3 月 30 日)。
 (b) (a) 図の青四角部分の拡大図。噴煙の影 S と噴煙頂部 T, 見かけの噴煙の長さ l (図 2.5 参照)。
 (c) (a) 図の噴煙と影の位置, 太陽高度から推定した高さ (h) と火口からの距離 (x) との関係。曲線は(9)式に当てはめたもの。この例では $x_0 = 58$ m, $h_0 = 103$ m, $C = 27.36$ であり, $u = 10.8$ m/s (図 2.7) から $Q = 962$ MW となった。同じ画像に対し, 数回, 対応点を選定して, (x , h) について(6)式にあてはめて Q を推定し, これらを平均した値を最終的な推定値とした。

度分布を基に, 噴煙最高高度までのデータを平均した値を用いた。実際のデータに適用する際には, 噴煙出口の水平位置, 標高も未知数 (x_0 , h_0) として

$$Q = 2.8 \times 10^4 (h - h_0)^3 u^3 / (x - x_0)^2 \quad (9)$$

によって 放熱率 Q を推定した。

Fig. 2.6 に 2014 年 3 月 30 日の OLI 画像における計測点の例と(7)式に当てはめた結果を示す。噴煙の特徴的な位置 (#1, #3, ..., #19) と対応する影 (#2, #4, ..., #20) の座標を計測し, みかけの影の長さ l を求める。これと太陽高度を用いて, (1)式により噴煙の高さ h を求めるとともに, 噴煙の出口からの距離 x (噴煙が流れている中心軸上に投影した距離) を求める。Fig. 2.6 (c)の◆印はこのようにして求めた, x と h の関係であり, 太線は, これらの値を(7)式に当てはめた曲線であり, $C=27.3$ と推定された。風速は Fig. 2.7(left)に示したような気象庁メソ解析値から西之島上空での風速を空間内挿して 09h および 12h の鉛直分布を求め, これらを時間内挿して Landsat-8 の観測時刻 (10 時 06 分 JST) における西之島上空での風速高度分布を推定する (Fig. 2.7(right))。最下層から噴煙の上部の高度まで鉛直方向に平均することで, 噴煙が流れている高度の平均的な風速を求め, この値を(8)式における u として用いた。この事例では $u=10.8$ m/s であり, Q は 962 MW と推定された。なお, この事例では $x_0=58$ m, $h_0=103$ m であった。

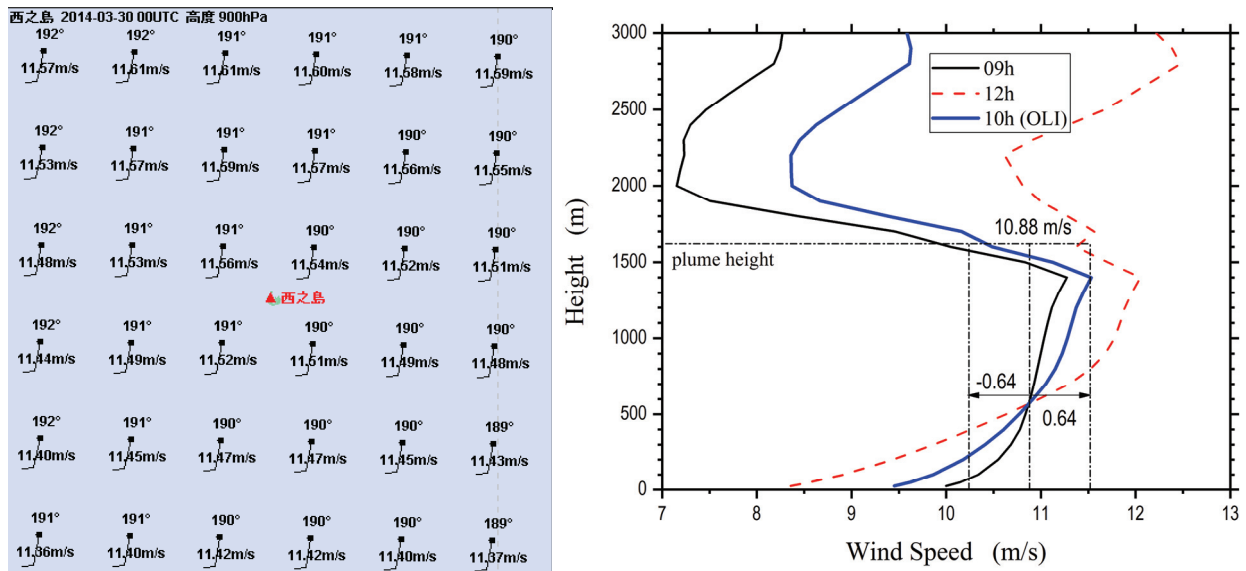


Fig. 2.7 Wind speed at Nishinoshima on 30 March 2014.
 (Left) Horizontal distribution of wind speed on a 5 km mesh; analysis was at 0900 JST at 900 hPa.
 (Right) Vertical wind speed profiles above Nishinoshima at 0900 JST (black line), 1200 JST (red dashed line), and 1000 JST (Landsat-8 OLI observation time, thick blue line).

図 2.7 西之島の風速推定例 (2014 年 3 月 30 日)
 (左) 気象庁 5km メッシュ解析値。00h JST, 900hPa 面 (本図は東京航空路火山灰情報センター開発ソフトを使用して作成)。
 (右) 左図のような GPV データを空間内挿して求めた, 09h JST (黒実線), 12h JST (赤破線) における西之島上空での風速の鉛直分布と, 時間内挿して求めた Landsat-8 観測時刻における風速分布 (青太線)。噴煙高度の平均風速は 10.8 m/s, 0.64 m/s は各高度の風速から求めた標準偏差。

2.4 解析結果と議論

解析結果を Table 2.2 に, 解析に使用した衛星画像を Fig. 2.8 に, 放熱率と噴煙の高さの時間変化を Fig. 2.9 に示す。 Q の誤差 (Table 2.2 の Error in Q 欄, Fig. 2.9 のエラーバー) は噴煙, 影を選定し直して求めた x , h のデータセットから推定した 3~6 個の Q から求めた標準偏差で表している (2013 年 12 月 24 日の OLI による推定値の誤差欄については, 個々の h , x を(6)式に代入して求めた Q の標準誤差)。2015 年 2 月 13 日の非常に大きな放熱率は風速が大きいに関わらず, 火口付近の噴煙のみの計測値を使用した推定結果であり, 平均値などを求める際には使用しなかった。OLI による西之島噴火開始後の初観測は 2013 年 11 月 22 日であったが雲に覆われ西之島は識別できず, 陸域が判読できるものは次回帰の 12 月 8 日, 噴煙計測が可能なものはさらに次の回帰の 12 月 24 日であった。ALI は噴火後初回の観測 (2013 年 12 月 6 日) で噴煙解析も可能な画像が得られた。ASTER の噴火後初観測 (2013 年 11 月 23 日) は雲に覆われ, 解析可能なものは次の観測 (11 月 30 日) であった。2016 年 8 月 30 日までの期間で, 噴煙解析が可能であったものは 30 例 (「噴煙なし」を含む) で, 2013 年 11 月 20 日からの 666 日間での 3 衛星の回帰回数 125 回 (この期間の総観測回数は 122 回) の 25%にしか過ぎない。計測できなかった事例には, 雲や霧の影響で噴煙や噴煙の影が不明瞭なもの (噴煙の下層に雲がある時も計測不能) や影が生じる方向に噴煙が流れていて影の計測ができないものがある。ALI の場合には, 西之島が撮像領域の西端付近にあることが多く, 南風ないし東風の時には計測できない。

推定された放熱率のバラツキは大きく, その変化傾向は明瞭ではないが, 2013~14 年と比較し, 2016 年 6 月以降, 放熱率は減少しているように見え, 2015 年 9 月 25 日を最後に, 今回用いた衛星から噴煙は観測されなくなった。雲もなく観測条件が良い時に噴煙がまったく検知できない時 (2015 年 12 月 14 日) や, 火口上では噴煙は見えず, 島から離れた場所から噴煙状の雲列が認められる時 (2016 年 3 月以降の 3 例) がある。

Table 2.2 Estimated heat discharge rates and plume heights.

* A positive value indicates sensor pointing east, and a negative value indicates west.

** Wind speed measured at 500 m.a.s.l.

表 2.2 放熱率推定結果.

使用したセンサー名, 太陽高度, ルック角, 測定回数, 風速, 放熱率, 放熱率の誤差, 計測した噴煙の最高高度. 2015 年 2 月 13 日の放熱率は参考値. * 東向きが正, ** 海拔 500 m における風速.

Date (YYYY/MM/DD)	Sensor	Sun Elevation α (deg.)	Sun Azimuth φ_{sat} (deg.)	Look Angle θ (deg.)	number of measurements	Wind Speed u (m/s)	Heat Discharge Rate Q (MW)	Error in Q (MW)	Max Plume Height h (m)
2013/12/24	ALI	29.01	142.81	-14.30	3	5.9	2105	1005	1364
2013/12/24	OLI	34.98	155.02		1	6.5	1064	461	2180
2014/02/15	ALI	34.23	130.75	-16.35	3	10.6	1604	919	1202
2014/02/23	ALI	36.42	128.48	-15.26	3	6.7	353	365	938
2014/03/06	ASTER	51.25	144.86	-0.01	3	9.6	1732	536	1376
2014/03/30	OLI	57.27	132.00	-	6	10.6	856	444	1242
2014/04/07	ASTER	62.92	135.33	0.02	4	5.6	984	540	1313
2014/04/23	ASTER	67.45	127.67	0.02	3	10.4	122	24	741
2014/05/17	OLI	68.43	107.12		3	7.1	812	447	865
2014/05/22	ALI	56.87	94.35	-3.79	4	3.5	81	27	822
2014/05/25	ASTER	72.93	107.59	0.02	3	4.5	580	326	1386
2014/06/02	OLI	69.22	99.38		3	10.1	500	310	1202
2014/07/04	OLI	68.07	96.25		4	4.7	678	343	907
2014/08/21	OLI	63.37	119.87		6	6.0	595	228	1456
2014/09/03	ALI	47.91	110.30	-13.90	3	6.0	45	19	123
2014/09/06	OLI	60.40	130.44		3	6.6	1835	487	1219
2014/10/08	OLI	51.94	147.39		3	8.8	195	80	850
2014/10/21	ALI	37.23	130.56	-23.82	3	7.3	572	259	675
2015/01/02	ALI	27.00	139.01	12.81	3	9.1	308	70	1570
2015/02/13	OLI	41.92	144.73		2	13.3	(13743)	8	529
2015/06/21	OLI	68.71	95.21		3	9.8	224	31	746
2015/06/26	ALI	47.50	84.41	-20.12	3	9.5	3	3	176
2015/07/07	OLI	67.82	96.77		3	11.4	64	6	842
2015/07/23	OLI	66.65	102.45		3	9.4	246	212	898
2015/08/24	OLI	62.79	121.89		3	11.1	589	168	727
2015/09/25	OLI	55.62	141.42		3	8.8	162	17	776
2015/12/14	OLI	35.42	155.96			3.8**	0		
2016/03/19	OLI	53.43	135.60			7.8**	0		
2016/06/23	OLI	68.67	95.63			4.9**	0		
2016/07/09	OLI	67.71	97.94			7.6**	0		

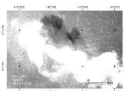
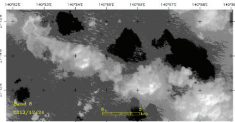
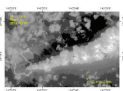
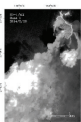
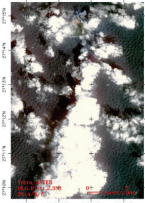
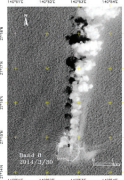
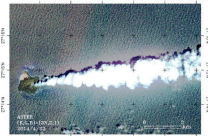
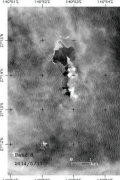
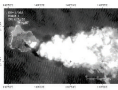
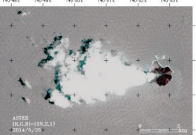
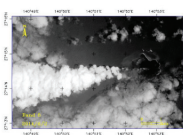
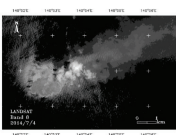
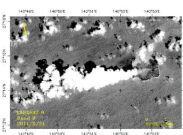
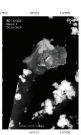
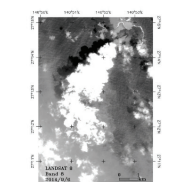
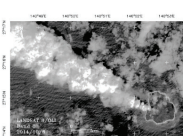
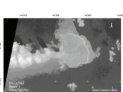
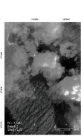
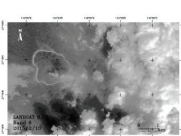
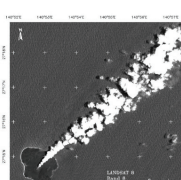
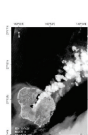
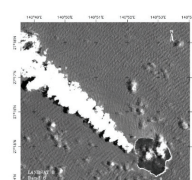
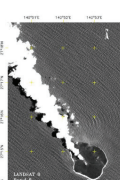
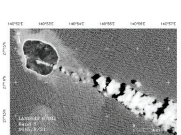
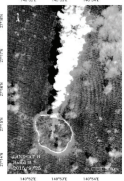
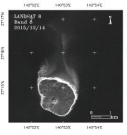
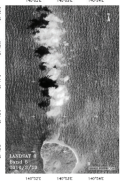
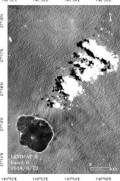
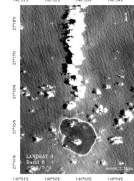
 2013/12/24 OLI 6.5 m/s 1060±460 MW, 2180 m	 2013/12/24 ALI 5.9 m/s 2110±1010 MW, 1360 m	 2014/2/15 ALI 10.6 m/s 1600±920 MW, 1200 m	 2014/2/23 ALI 6.7 m/s 350±370 MW, 940 m	 2014/3/6 ASTER 9.6 m/s 1730±540 MW, 1380 m
 2014/3/30 OLI 10.6 m/s 860±440 MW, 1240 m	 2014/4/7 ASTER 5.6 m/s 940±540 MW, 1310 m	 2014/4/23 ASTER 10.4 m/s 120±20 MW, 740 m	 2014/5/17 OLI 7.1 m/s 810±450 MW, 870 m	 2014/5/22 ALI 3.5 m/s 80±30 MW, 820 m
 2014/5/25 ASTER 4.5 m/s 580±330 MW, 1390 m	 2014/6/2 OLI 10.1 m/s 500±310 MW, 1200 m	 2014/7/4 OLI 4.7 m/s 680±340 MW, 910 m	 2014/8/21 OLI 6.0 m/s 600±230 MW, 1460 m	 2014/9/3 ALI 6.0 m/s 45±19 MW, 120 m
 2014/9/6 OLI 6.6 m/s 1840±490 MW, 1220 m	 2014/10/8 OLI 8.8 m/s 200±80 MW, 850 m	 2014/10/21 ALI 7.3 m/s 570±260 MW, 680 m	 2015/1/2 ALI 9.1 m/s 310±70 MW, 1570 m	 2015/2/13 OLI 13.3 m/s 13700±8 MW, 530 m
 2015/6/21 OLI 9.8 m/s 220±30 MW, 750 m	 2015/6/26 ALI 9.5 m/s 3±3 MW, 180 m	 2015/7/7 OLI 11.4 m/s 64±6 MW, 840 m	 2015/7/23 OLI 9.4 m/s 250±210 MW, 900 m	 2015/8/24 OLI 11.1 m/s 860±170 MW, 730 m
 2015/9/25 OLI 8.8 m/s 160±20 MW, 780 m	 2015/12/14 OLI 3.8 m/s 0	 2016/3/19 OLI 7.8 m/s 0	 2016/6/23 OLI 4.9 m/s 0	 2016/7/9 OLI 7.6 m/s 0

Fig. 2.8 Analyzed satellite images.
Date (JST), Sensor, and wind speed are provided with each image; heat discharge rate and plume height are indicated, where applicable.

図 2.8 解析した噴煙の衛星画像。
各画像は同じスケールで表示。撮像日（日本時刻）、センサー名、風速、放熱率、噴煙高度を付記した。

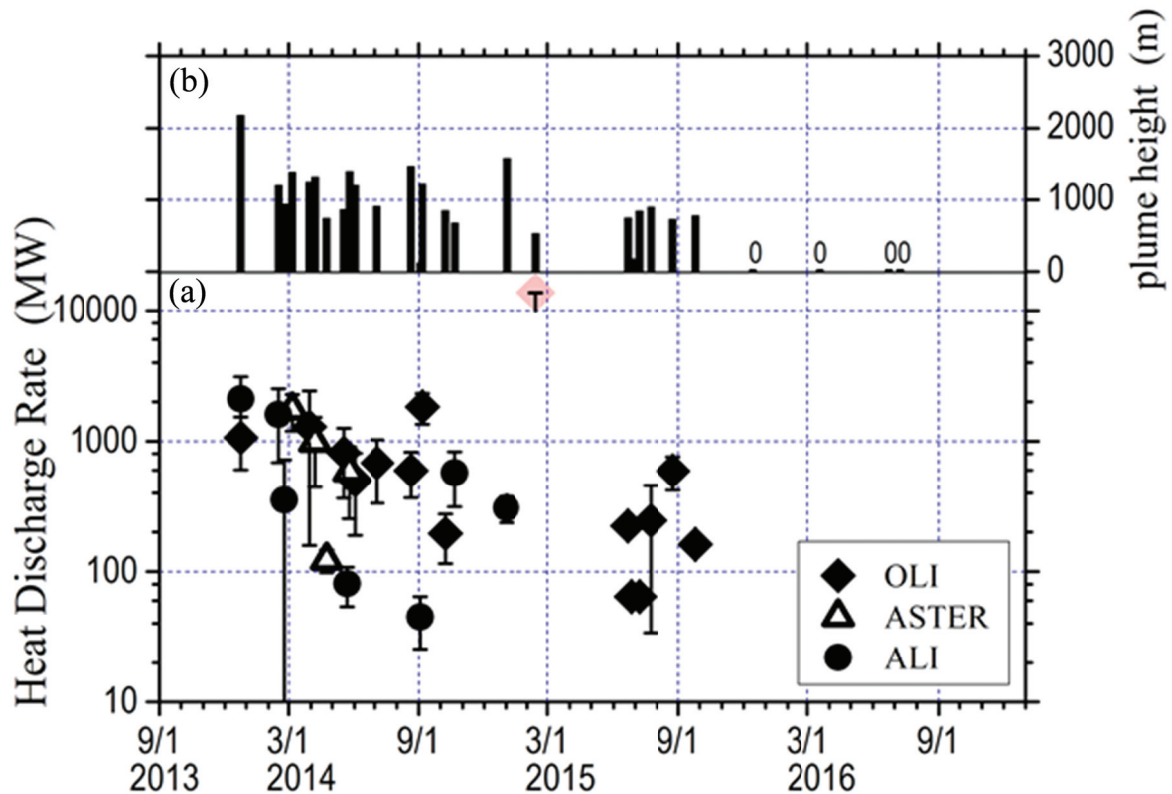


Fig. 2.9 (a) Thermal energy discharge and (b) maximum heights of plumes issued from Nishinoshima volcano during 24 December 2013 to 9 July 2016. The heat discharge rate on 13 February 2015 (pink shading) was not used in the calculation of the average value (670 MW).

図 2.9 (a)西之島からの噴煙による放熱率の時間変化, (b)放熱率を推定するために計測した噴煙の高さの最大値. 2015 年 2 月 13 日の放熱率 (◆印) は平均的な放熱率の算出には使用しなかった (本文参照).

Maeno *et al.* (2016)は X バンド SAR 衛星 TerraSAR-X データの解析などにより 2013 年 11 月から 2015 年 2 月までの溶岩流出率の時間変化を求めている. これによると, 当初, $2 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ m^3/day 程度あった溶岩噴出率は 2014 年夏 1.0×10^5 m^3/day 程度にまで減少した後, 2014 年 9 月頃に 5×10^5 m^3/day と今回の溶岩流出活動の中で最も大きな流出率となり, その後次第に減少していった. Fig. 2.9 の放熱率の時間変化を詳細に見ると, 2014 年夏頃に減少し, その後増大した後減少しており, 溶岩噴出率の時間変化とも整合している. この変化傾向は気象衛星ひまわりの赤外データの解析による溶岩流出に伴う熱活動 (第 3 章) と同じ傾向であった.

衛星から噴煙が観測されていた 2015 年 9 月までの平均放熱率は 670 MW (各日の推定値を単純平均) となる. 噴煙には火山灰が含まれていると思われるが, 水蒸気のみで構成されているとした場合, H_2O のエンタルピーとして 4.2 MJ/kg を用いると, H_2O 放出率は 160 kg/s (約 1.4 万トン/日), この期間 (2013 年 12 月 24 日～2015 年 9 月 25 日, 641 日間) の H_2O 放出量は約 880 万トンと推定される. Maeno *et al.* (2016)によると 2015 年 2 月までの 16 か月間の溶岩の噴出量は約 0.1 km^3 , 噴出率は約 20 万 $\text{m}^3/\text{日}$ と見積もられており, 同じ期間について, 噴煙による放熱率, H_2O 放出率を求めると各々, 810 MW, 1.7 万トン/日となる. 仮に噴出物の比重を 2.5 とすると, 火山噴出物の約 3wt%の水が噴煙として放出されていたことになる. 一方, 斉藤・他 (2014, 2016) によると, 2014 年 6 月 3 日および 2015 年 3 月 1 日, 6 月 26 日～7 月 6 日に採取された降下火砕物のメルト包有物中の水の含有率は 0.6～1.7wt% (2014 年) および 0.2～0.9wt% (2016 年) と求められている. 今回推定した値はこれよりも大きくなっている. これは, 噴煙位置の計測点が噴煙中心よりも高い場所におけるものであったため式 (7) の C が過大に推定されていることとともに, 噴煙が上

昇する過程で取り込む外気中の水蒸気が凝結する時に発生する潜熱が推定した放熱率に加算されていることによることも一因かもしれない。

2015 年 6 月 21 日、気象研究所により船上から小型紫外分光計 COMPUSS を用いた火山ガス観測が行われ、 SO_2 放出率が 900 トン/日（第 5 章）と求められている。今回求められた 2015 年 6～7 月の放熱率は約 134 MW、 H_2O 放出率は 2,800 トン/日となり、 $\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$ 重量比は約 3 となった。西之島と同程度あるいはそれより多量のマグマが関与したと考えられている三宅島の大規模脱ガス（例えば、風早・他、2001）時の $\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$ 重量比は 3 程度で（例えば、福井、2006）、マグマの性質や噴火形態は異なるが今回推定された値と同じ大きさとなっている。

謝辞

EO-1/ALI データは米国地質調査所 USGS が運用している各種衛星データ検索提供サービスである EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) から、Landsat-8 データは産業技術総合研究所の LANDSAT-8 直接受信・即時公開サービス (<http://landsat8.geogrid.org/>) もしくは EarthExplorer から、ASTER データはジェット推進研究所 JPL の ASTER Volcano Archive (<http://ava.jpl.nasa.gov/>) から入手した。ASTER 原データの所有権は経済産業省・米国航空宇宙局 NASA にある。衛星データ解析には ENVI を使用した。

参考文献

- Briggs, G.A., 1969: **Plume Rise**. US AEC Critical Review Series, TID-25075, National Technical Information Service, Springfield, VA., 81p.
- 福井敬一, 1992: 遠望観測資料の解析. **火山観測指針（参考編）**. 気象庁, 191-215.
- 福井敬一, 2006: 放熱量観測. 気象庁技術報告 128 号「平成 12 年（2000 年）三宅島噴火及び新島・神津島近海の地震活動調査報告」, 115-121.
- Holasek, R. E. and S. Self, 1995: GOES weather satellite observations and measurements of the May 18, 1980, Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.*, **100**, 8,469-8,487.
- 鍵山恒臣, 1978: 火山からの噴気による熱エネルギーと H_2O の放出量—Plume rise からの推定—. **火山**, **23**, 183-197.
- 海上保安庁海洋情報部, 2016: 海域火山データベース. 西之島. <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/kaiyo18-2.htm> (2016 年 8 月 30 日アクセス) .
- 風早康平, 平林順一, 森博一, 尾台正信, 中堀康弘, 野上健治, 中田節也, 篠原宏志, 宇都浩三, 2001: 三宅島火山 2000 年噴火における火山ガス—火山灰の付着ガス成分および SO_2 （二酸化イオウ）放出量から推定される脱ガス環境. **地学雑誌**, **110**, 271-279.
- 国土地理院, 2016: 「地理院地図」に掲載している西之島付近の噴火活動関連情報. <http://www.gsi.go.jp/gyoumu/gyoumu41000.html> (2016 年 8 月 30 日アクセス) .
- Maeno, F., S. Nakada, and T. Kaneko, 2016: Morphological evolution of a new volcanic islet sustained by compound lava flows. *Geology*, **44**, 259-262, doi:10.1130/G37461.1.
- 内閣官房宇宙開発戦略本部事務局, 2011: 我が国及び海外のリモートセンシングの現状と動向. <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/RSSkentou/dai1/siryou2.pdf> (2016 年 8 月 30 日アクセス) .
- 小野智三, 2015: 西之島火山の噴火活動. **水路**, 第 **172** 号, 6-14.
- Prata, A. J., and I. F. Grant, 2001: Determination of mass loadings and plume heights of volcanic ash clouds from satellite data.

CSIRO Atmospheric Research and Technology Papers, No. **48**, 39p.

Prata F., K. Dean, and M. Watson, 2015: Volcanic clouds, **Monitoring Volcanoes in the North Pacific** (Eds. K. G. Dean and J. Dehn), pp.101-144, Springer Praxis Books, doi:10.1007/978-3-540-68750-4_5.

斎藤元治, 中野俊, 下司信夫, 篠原宏志, 東宮昭彦, 宮城磯治, 2014: 西之島火山 2014 年噴火マグマの岩石学的特徴とマグマ脱ガス量. 日本火山学会講演予稿集 2014 年秋季大会, 159.

斎藤元治, 石塚治, 中野俊, 下司信夫, 田村芳彦, 森下泰成, 野上健治, 2016: 西之島火山噴火マグマの岩石学的特徴と揮発性成分濃度. 日本火山学会講演予稿集 2016 年秋季大会, 127.

東京大学地震研究所, 2016: MODIS 赤外画像による西之島の熱異常の変動: 2013 年 1 月～2016 年 5 月. 第 135 回 (2016 年 6 月 14 日) 火山噴火予知連絡会資料.

http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/135/135_04-1.pdf#page=4 (2016 年 8 月 30 日アクセス) .

宇宙航空研究開発機構, 2016: CIRC による西之島の観測. http://circgs.tksk.jaxa.jp/news/circ_volcano/#CIRC_nishinoshima (2016 年 8 月 24 日アクセス) .

浦井稔, 2014: 衛星リモートセンシングによる西之島海底火山活動の監視. 日本リモートセンシング学会第 56 回学術講演会論文集, 27-28.