

衛星リモートセンシングによる西之島の火山活動の観測*

加藤 芳信^{*1}

Observation of Volcanic Activity in Nishinoshima by Using Satellite Remote Sensing

Yoshinobu KATO^{*1}

^{*1} Faculty of Sports and Health Sciences, Department of Sports and Health Sciences

Nishinoshima is a small desert island in the Pacific, and is located in 27d 14m 49s north latitude and 140d 52m 28s east longitude. Nishinoshima began to erupt on November 20, 2013, and the eruptions ceased by November 2015. New eruptions occurred on April 20, 2017, and ceased by August 2017. As of January 2018, the island is about 2.95 km² in size and about 160 m in height. In this paper, true-color images (R,G,B= bands 4,3,2), high-temperature-detected natural-color images (R,G,B= bands 6,5,4) and band 10-temperature images are made by using Landsat-8 data from 2013 to 2017, and volcanic activities in Nishinoshima are observed. In the high-temperature-detected natural-color image, the lava flow is indicated clearly in red. A night image (R,G,B= bands 10,7,6) is also shown.

Key Words : Nishinoshima, Volcanic Activity, Landsat-8, True Color Image, High Temperature Detected Natural Color Image, Temperature Image.

1. 緒 言

西之島は東京の南約 1,000km, 父島の西約 130km の太平洋上に位置する無人島である (Fig. 1 参照). 西之島は海底比高約 4,000m, 直径約 30km の大火山体の海面上に現れた山頂部にあたる. 西之島の行政区画は東京都小笠原村であり, 座標は北緯 27 度 14 分 49 秒, 東経 140 度 52 分 28 秒である. 2013 年以降の火山活動について述べると次のようである⁽¹⁾⁽²⁾. 2013 年 11 月 20 日 10 時 20 分ごろ海上自衛隊が西之島の南南東 500m 付近で噴煙を確認し, 同日 16 時 17 分に海上保安庁航空機が直径 200m 程度の噴石の島の出現を確認した. その後も溶岩の噴出が続き, 12 月 26 日に海上保安庁は, 溶岩流が西之島の南岸に到達し, 2 か所で接続して一体化していることを確認した. 更に溶岩の噴出が続き, 溶岩は元の西之島のほとんどの部分を覆い, 2015 年 11 月中旬まで西之島の大きさの拡大が続いた. 2015 年 11 月下旬より 2017 年 4 月中旬まで噴火や溶岩流出はなかったので, その間の 2016 年 10 月 16 日から 25 日にかけて, 東京大学地震研究所他の研究チームが学術研究船「新青丸」(海洋研究開発機構所属)により, 西之島の火山活動と生物相の調査を実施し, そのうち上陸調査は 20, 21 日に溶岩流に覆われていない西之島旧島付近の西海岸で行っている⁽³⁾. 2017 年 4 月 20 日に再噴火が確認され, 噴火活動が続いていたが, 2017 年 8 月より噴火活動が収まり, 現在に至っている. 西之島の面積は噴火前の 0.29km² から現在の 2.95km² まで拡大した.

本論文では, 2013 年~2017 年の Landsat-8 衛星データ (可視・近赤外・中間赤外バンド: 30m 解像度, 熱赤外バンド: 100m 解像度) を用いて, 西之島の火山活動を観測する. まず, 火山の高温検出画像 (R,G,B) として最適なバンドの組合せを探すために (6,5,4), (7,6,5), (7,6,4), (10,3,2), (10,5,2) の画像を作成し, {R,G,B=band 6,5,4} (これを高温検出ナチュラルカラー画像と名付ける) が最適であることを示す. 次に, 各観測日においてトルーカラー画像, 温度画像, 高温検出ナチュラルカラー画像を作成し, 噴火, 噴煙, 溶岩の噴出と流れの観察, 西之島の周長, 面積, 温度の計測を行っている. なお, 本論文では Landsat-8 衛星の処理画像を多数掲載している.

* 原稿受付 2018 年 2 月 28 日

^{*1} スポーツ健康科学部, スポーツ健康科学科
E-mail: y-kato@fukui-ut.ac.jp

2. 西之島の火山活動について

西之島の有史以来の火山活動⁽¹⁾でいえば、1 回目の噴火活動は 1973 年 5 月 30 日の海底火山の噴火から 1974 年 5 月の火山活動収束までである。1999 年 1 月時点での西之島の新島部分の面積は 0.2501km^2 、標高 15.2m であり、旧島部分を含めた西之島全体の面積は 0.29km^2 、標高は 25m であった。2013 年 11 月 20 日からの噴火活動は、有史以来の火山活動でいえば 2 回目の噴火活動である。

海上保安庁の Web ページ⁽¹⁾の「西之島活動記録」の項には、海上保安庁、第 3 管区海上保安本部、海上自衛隊による 1990 年 7 月 23 日から 2017 年 7 月 11 日までの西之島の火山活動に関する記録がうまくまとめられている。本論文でも事象等はこれを参考にしているの、2013 年 11 月以降の火山活動事象の記載は省略する。

国土地理院の Web ページ⁽²⁾からは、航空機で撮影された空中写真に基づいた報道発表または情報がリンクされている。それによれば、(陸地面積、最高標高、噴出した溶岩等の海面上の体積) は、2013 年 12 月 4 日 (一, 27m , 30万 m^3)、2013 年 12 月 17 日 (一, 39m , 80万 m^3)、2014 年 2 月 16 日 (一, 66m , 790万 m^3)、2014 年 3 月 22 日 (一, 71m , 1130万 m^3)、2014 年 7 月 4 日 (1.30km^2 , 74m , 2220万 m^3)、2014 年 12 月 4 日 (2.27km^2 , 110m , 4970万 m^3)、2015 年 3 月 1 日 (2.55km^2 , 137m , 6446万 m^3)、2015 年 7 月 28 日 (2.74km^2 , 150m , 8511万 m^3)、2015 年 12 月 9 日 (2.71km^2 , 142m , 8801万 m^3)、2016 年 3 月 3 日 (2.73km^2 , 142m , 8721万 m^3)、2016 年 7 月 25 日 (2.75km^2 , 142m , 8722万 m^3)、2016 年 12 月 20 日 (2.72km^2 , 143m , 8978万 m^3)、2018 年 1 月 17 日 (2.95km^2 , 160m , 9992万 m^3) である。ここで「一」は記載されていないことを示す。



Fig. 1 Location of Nishinosima.
(Nishinoshima is located in the red circle.
This map is from
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_of_ogasawara_islands_ja.png)

3. 使用データと画像処理法

3.1 使用データ

産業技術総合研究所の LandBrowser (<http://landbrowser.geogrid.org/landbrowser/index.html>) より、次に示す噴火前の 2013 年 2 個、噴火後の 2013 年 1 個、2014 年 11 個、2015 年 14 個、2016 年 13 個、2017 年 34 個の Landsat-8 衛星データ (可視・近赤外バンド: 30m 解像度、熱赤外バンド: 100m 解像度) をダウンロードし、使用した。なお、Landsat-8 衛星は、高度 705km 、周期 99 分、軌道傾斜角 98.2° 、回帰 16 日の太陽同期準回帰軌道で飛行している。西之島の昼の観測は 10 時 5 分ごろになされる。

2013 年: 9 月 3 日 (噴火前)、11 月 6 日 (噴火前)、12 月 24 日 (噴火後)。

2014 年: 2 月 26 日、3 月 30 日、5 月 17 日、6 月 2 日、7 月 4 日、8 月 21 日、9 月 6 日、10 月 8 日、10 月 24 日、11 月 25 日、12 月 11 日。

2015 年: 1 月 12 日、2 月 13 日、3 月 1 日、3 月 17 日、4 月 2 日、4 月 18 日、5 月 4 日、5 月 20 日、6 月 5 日、6 月 21 日、7 月 7 日、7 月 23 日、8 月 24 日、9 月 25 日。

2016 年: 3 月 3 日、3 月 19 日、6 月 7 日、6 月 23 日、7 月 9 日、7 月 25 日、8 月 10 日、9 月 11 日、9 月 27 日、

10月5日, 10月8日, 10月29日, 12月4日.

2017年: 1月28日, 2月18日, 2月26日, 5月1日, 5月5日, 5月9日, 5月12日, 5月21日, 5月28日, 6月6日, 6月10日, 6月13日, 6月22日, 6月29日, 6月30日, 7月8日, 7月15日, 7月24日, 7月28日, 7月31日, 8月13日, 8月16日, 8月21日, 8月25日, 8月29日, 9月1日, 9月2日, 9月9日, 9月10日, 9月14日, 9月17日, 9月18日, 9月26日, 10月4日.

3.2 画像処理法

Table 1 に Landsat 8, Landsat7, Landsat5 のバンド構成とそれらの観測波長と解像度を示す⁽⁴⁾. Landsat-8 衛星の トルーカラー画像 (True-color image) は, {R,G,B=band 4,3,2} で作成できる.

Fig. 2 に Rothery ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾による波長に対する熱放射のグラフと Landsat-5 の TM センサのバンドの位置を示す. これを見ると, ある地表温度 (例えば 600°C) の場合, バンド 7,5,4,3,2,1 (Landsat-8 ではそれぞれバンド 7,6,5,4,3,2 に対応) の順に検出値が大から小になることが分かる. また, 放射輝度値が同じであれば, バンド 7,5,4,3,2,1 (Landsat-8 ではそれぞれバンド 7,6,5,4,3,2 に対応) の順に地表温度が低から高になることが分かる. 従って, Landsat-8 衛星の場合, 例えば RGB 合成画像の R にバンド 6, G にバンド 5, B にバンド 4 を与えると, 地表の高温部を赤く表示できる. このバンドの与え方 {R,G,B=band 6,5,4} による画像が国土地理院⁽⁷⁾⁽⁸⁾に示されており, 高温部は赤く表示され, 高温部以外の場所はある程度自然な色に近い表示になる. 国土地理院⁽⁸⁾ではこれを

Table 1 Band constructions of Landsat-8, Landsat-7 and Landsat-5. (From Kato⁽⁴⁾)

Landsat 8 (OLI, TIRS sensor)			Landsat 7 (ETM+ sensor)			Landsat 5 (TM sensor)		
Band	Wave-length	Resolution	Band	Wave-length	Resolution	Band	Wave-length	Resolution
1 (Violet-Blue)	0.43-0.45 μ m	30m						
2 (Blue)	0.45-0.51 μ m	30m	1 (Blue)	0.45-0.52 μ m	30m	1 (Blue)	0.45-0.52 μ m	30m
3 (Green)	0.53-0.59 μ m	30m	2 (Green)	0.53-0.61 μ m	30m	2 (Green)	0.52-0.61 μ m	30m
4 (Red)	0.64-0.67 μ m	30m	3 (Red)	0.63-0.69 μ m	30m	3 (Red)	0.63-0.69 μ m	30m
5 (Near IR)	0.85-0.88 μ m	30m	4 (Near IR)	0.78-0.90 μ m	30m	4 (Near IR)	0.76-0.90 μ m	30m
6 (Middle IR)	1.57-1.65 μ m	30m	5 (Middle IR)	1.55-1.75 μ m	30m	5 (Middle IR)	1.55-1.75 μ m	30m
7 (Middle IR)	2.11-2.29 μ m	30m	7 (Middle IR)	2.09-2.35 μ m	30m	7 (Middle IR)	2.08-2.35 μ m	30m
8 (Panchromatic)	0.50-0.68 μ m	15m	8 (Panchromatic)	0.52-0.90 μ m	15m			
9 (Middle IR)	1.36-1.38 μ m	30m						
10 (Thermal IR)	10.60-11.19 μ m	100m	6 (Thermal IR)	10.40-12.50 μ m	60m	6 (Thermal IR)	10.40-12.50 μ m	120m
11 (Thermal IR)	11.50-12.51 μ m	100m						

IR=Infrared

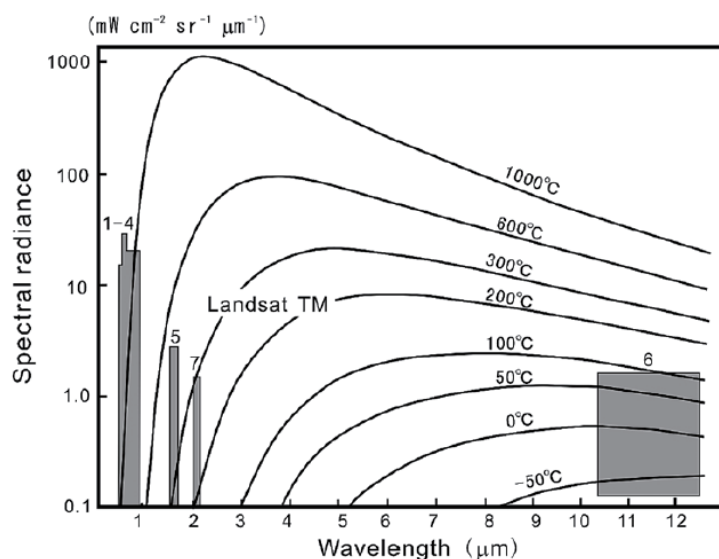


Fig. 2 Thermal radiance at various temperatures for surfaces from the visible to the thermal infrared (emissivity=0.8). The boxes indicate the operational range of the Landsat TM sensors. (From Rothery *et al.*⁽⁵⁾)

「赤外バンドを含む合成画像（解像度 30m）」と記し、2013 年 9 月 4 日～2014 年 11 月 25 日の 12 個の画像と 2015 年 1 月 12 日～2016 年 6 月 23 日の 18 個の画像を示している．本論文ではこれを「高温検出ナチュラルカラー画像（High-temperature-detected natural-color image）」と呼ぶことにする．なお、他の文献⁽⁹⁾では高温検出画像として {R,G,B=band 7,6,5}、{R,G,B=band 7,6,4} が紹介されている．また、文献⁽¹⁰⁾の図 1(c)には、陸域を自然な色に近く表示して、海域（福井県若狭湾）の原子力発電所の温排水を赤く表示する熱赤外合成画像 {R,G,B=band 6,2,1}（Landsat-7、2001 年 10 月 15 日）が示されている．Landsat-8 ではこの熱赤外合成画像は {R,G,B=band 10,3,2=熱赤外バンド,緑バンド,青バンド} に対応する．画像中の陸域に植物（山林等）が多い場合には熱赤外合成画像として {R,G,B=band 10,5,2=熱赤外バンド,近赤外バンド,青バンド} も有用である．

Fig. 3 に、どの組合せの画像が火山の高温検出画像として最適かを調べるために作成した 2013 年 12 月 24 日の (a) {R,G,B=band 6,5,4}、(b) {R,G,B=band 7,6,5}、(c) {R,G,B=band 7,6,4}、(d) {R,G,B=band 10,3,2}、(e) {R,G,B=band 10,5,2}、ならびに比較の基準となる(f) トルーカラー画像 {R,G,B=band 4,3,2} を示す．この日の画像を選んだ理由は、普通の温度の島（上側の旧島）と噴火中の熱い島（下側の新島）の両方が見え、画像中に海、雲、噴煙、噴火口、溶岩流があるためである．Fig. 3(a)(b)(c)(f)は ArcMap の画像合成機能を使って作成したが、Fig. 3(d)(e)は ER Mapper を使い、R,G,B のヒストグラム表示でセル値の下限值、上限値を調整して作成した．(a)では新島の溶岩流が赤くはっきりと見え、(f)のTRUEカラー画像と見比べても、島の輪郭や雲、噴煙も比較的バランスよく見えている．(b)(c)では新島全体が温かいので橙色になっており、溶岩流は黄色で表示されている．目的によっては(b)(c)でもよいのであるが、溶岩流だけを抽出したい場合には(a)の方がよい．(d)(e)では band10 の解像度が 100m と粗いため、新島の温かい及び熱い部分は赤く表示されるが、溶岩流は分からない．なお、(e)は植物がある場合に有効な方法であるので、西之島の場合、2014 年度中に新島（溶岩）が旧島を覆うため、使うべきではない．以上の検討により、火山の高温検出画像としては、(a)が最適と判断した．

Landsat-8 衛星の温度画像（Temperature image）は band10 の輝度温度の画像である．band10 のセル値 INPUT から輝度温度（絶対温度表示）AbT（単位はケルビン K）への変換式は次式である⁽¹¹⁾．log は自然対数である．

$$AbT = 1321.08 / (\log(774.89 / (0.000334 * INPUT + 0.1) + 1)) \quad (1)$$

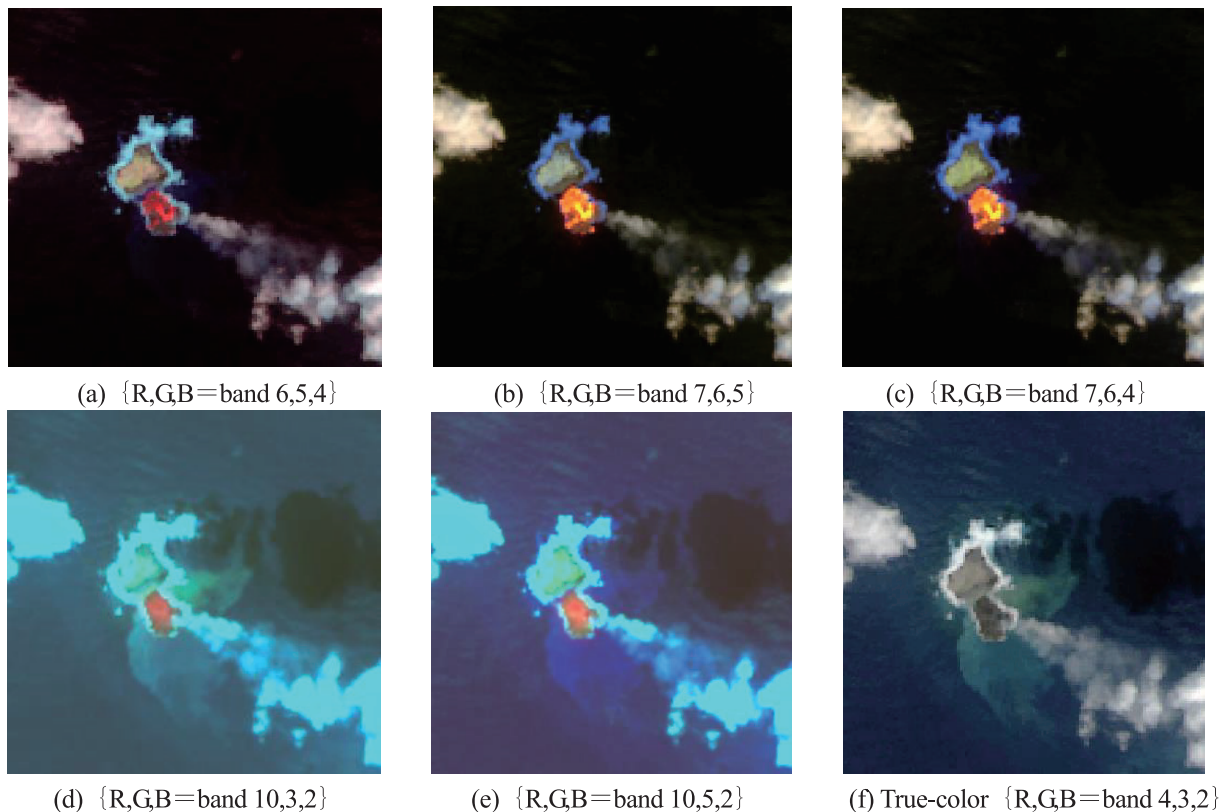


Fig. 3 Landsat-8 images of Nishinoshima on December 24, 2013 (North-South:4km, West-East:4km).

4. 西之島の衛星画像処理結果

トルーカラー画像、高温検出ナチュラルカラー画像は、ESRI 社の GIS ソフトウェア ArcMap 10.3 を使って作成し、さらに ArcMap の計測機能を使って周長、面積を計測した。温度画像は、衛星画像処理ソフトウェア ER Mapper 7.1 を使って band 10 のセル値を式(1)で絶対温度表示に変換して作成し、さらに ER Mapper の機能を使って最高温度を計測した。

以下に示す Fig. 4～Fig. 9 および Fig. 11 の表示範囲はすべて同じ位置で、縦 4km（北緯 27.227～27.264 度）、横 4km（東経 140.861～140.902 度）である。Fig. 4～Fig. 8 の左側の図(a)がトルーカラー画像 {R,G,B=band 4,3,2} である。右側の図(b)が高温検出ナチュラルカラー画像 {R,G,B=band 6,5,4} であり、赤い所が溶岩が噴出あるいは流れている所である。Fig. 9 は温度画像であり、Fig. 11 は夜の高温検出カラー合成画像 {R,G,B=band 10,7,6} である。

ここで、国土地理院 Web ページ⁽⁸⁾に載っている画像（トルーカラー画像、高温検出ナチュラルカラー画像）と本研究の関係を述べておく。本研究では、西之島の地表の様子をよく見えるようにするため、画像を明るく表示（具体的には ArcMap の合成画像作成で γ 値を大きく設定）している。従って、同じ日の画像であっても、本研究の処理画像と国土地理院⁽⁸⁾の画像では、画像の色合いが若干違っている。また、表示範囲も、国土地理院⁽⁸⁾の縦約 2.5km、横約 3.1km に対し、本研究では縦 4km、横 4km と広いので、島の周りの海色の变化（溶岩が海中に流れ落ちたり、噴火が海中で起きた場合など）の範囲も把握しやすい。国土地理院⁽⁸⁾になくて、本研究にある画像は、以下に示す画像（44 日分）のうち、Fig. 4(2), Fig. 5(11), Fig. 7(1)-(3), Fig. 7(5)-Fig. 8(6)の 17 日分である。

Fig. 9 の温度画像（12 日分）および Fig. 11 の夜の高温検出カラー合成画像は、他の文献には載っていない。

4.1 2013 年の Landsat-8 衛星画像の処理結果

西之島の噴火開始は 2013 年 11 月 20 日である。噴火前の画像として Fig. 4(1)(2)を示す。ArcMap による計測では、Fig. 4(1)で周長 2.01km、面積 0.248km²、Fig. 4(2)で周長 2.13km、面積 0.251km²となった。実際の面積は 0.29km²なので計測値は若干小さいが、Landsat-8 の解像度が 30m であり、満潮・干潮による海水面の上下もあることを考慮すれば、この程度の差は許容されるであろう。Fig. 4(3)は噴火後の 12 月 24 日の画像である。左図(a)（トルーカラー画像）で、噴火で出現した新島部分が西之島（旧島部分）に接続しており、新島から噴煙が出ていること、新島の周りの海に変色水があることを確認できる。右図(b)（高温検出ナチュラルカラー画像）では、溶岩の噴出と流れが赤く表示されている。周長は 3.03km、面積は 0.348km²と計測された。なお、この当時の旧島と新島を合わせた形がスノーピーに似ているので、スノーピー島と愛称されていた。

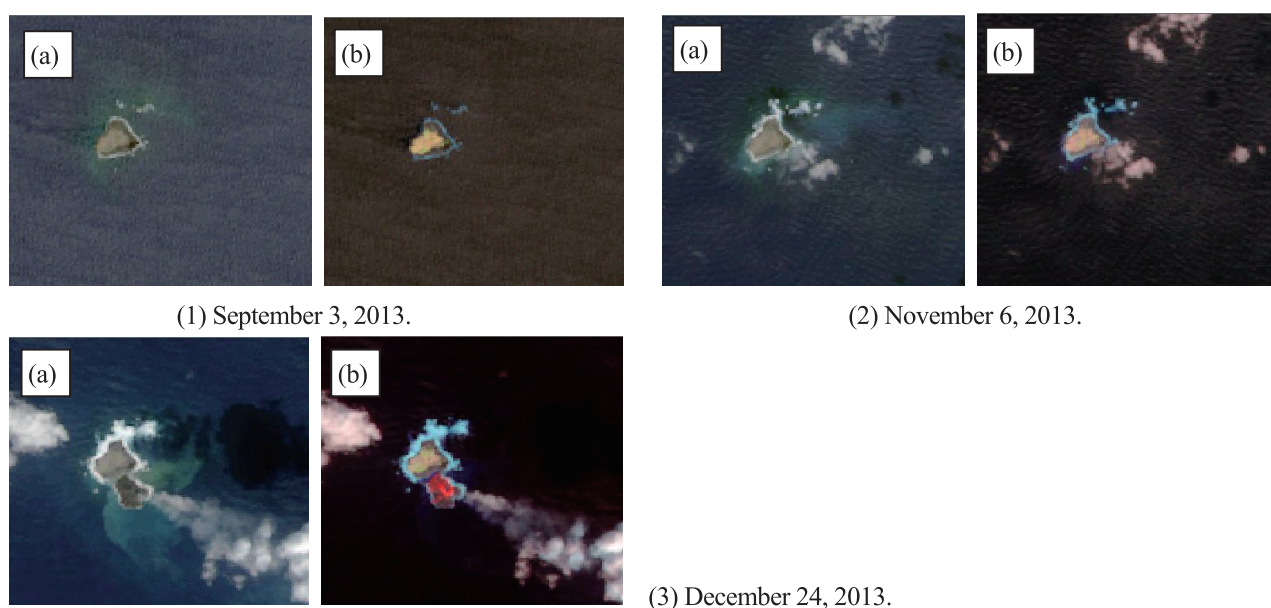
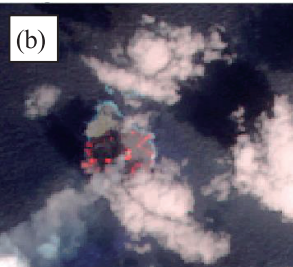
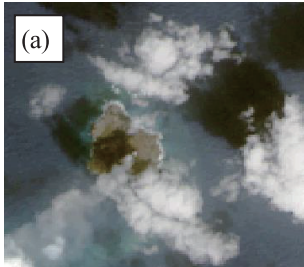


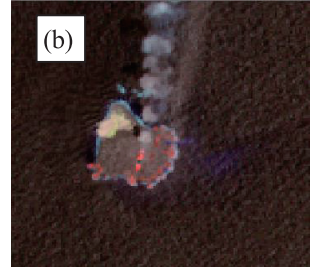
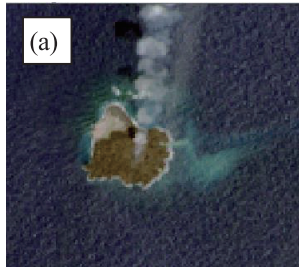
Fig. 4 Landsat-8 images of Nishinoshima in 2013: (a) True-color image, (b) High-temperature-detected natural-color image.

4.2 2014 年の Landsat-8 衛星画像の処理結果

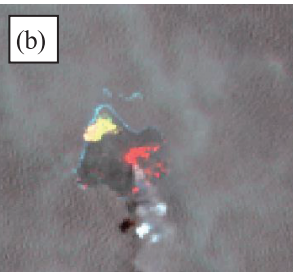
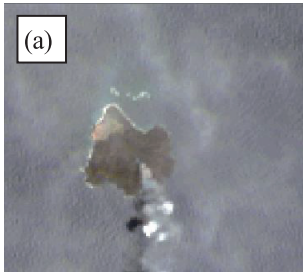
Fig. 5(1)-(11)では、溶岩噴出により新島部分が旧島部分を覆っていき、西之島全体の面積が増大していく様子が分かる。例えば Fig. 5(2)右図(b)で島の東側一面と南西に溶岩噴出が確認できるが、Fig. 5(3)ではその場所の面積が増えていることが分かる。Fig. 5(4)-(7)の左図(a)では島の北部に変色水（緑色）が見えるので、海中での火山活動が推測できる。実際、Fig. 5(8)では島の北部が陸地になっており、右図(b)ではそこから溶岩が噴出している。



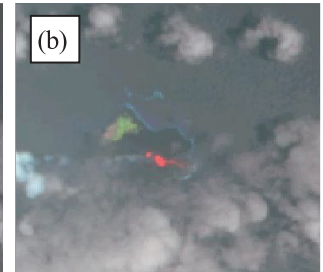
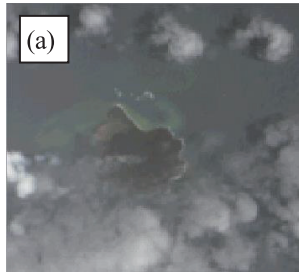
(1) February 26, 2014.



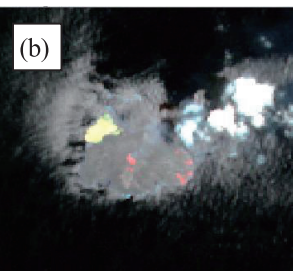
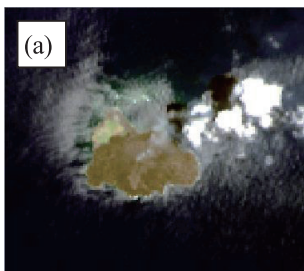
(2) March 30, 2014.



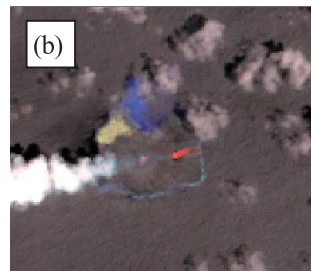
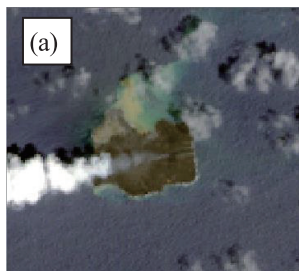
(3) May 17, 2014.



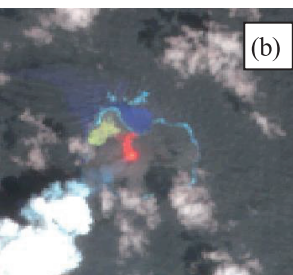
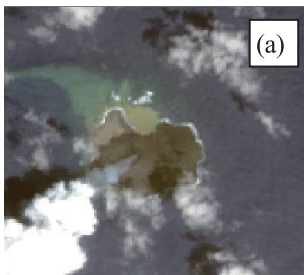
(4) June 2, 2014.



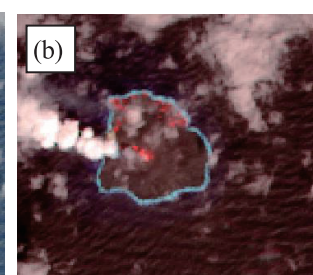
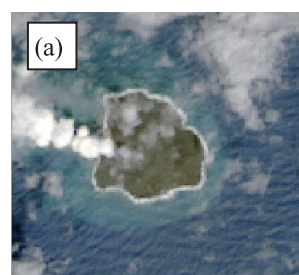
(5) July 4, 2014.



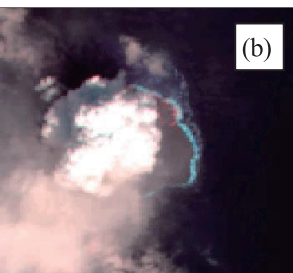
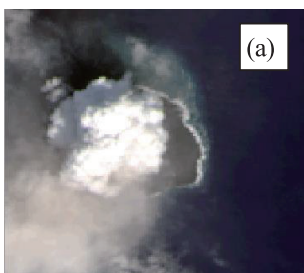
(6) August 21, 2014.



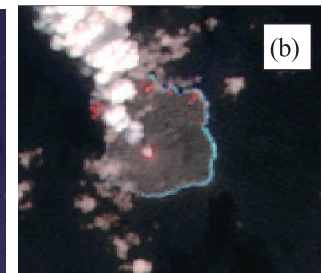
(7) September 6, 2014.



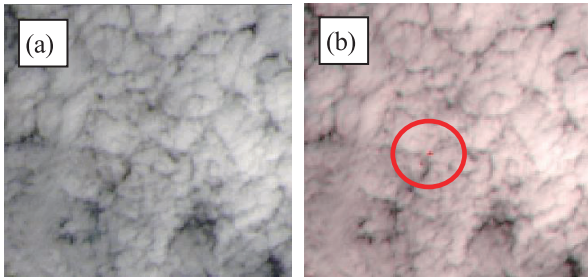
(8) October 8, 2014.



(9) October 24, 2014.



(10) November 25, 2014.



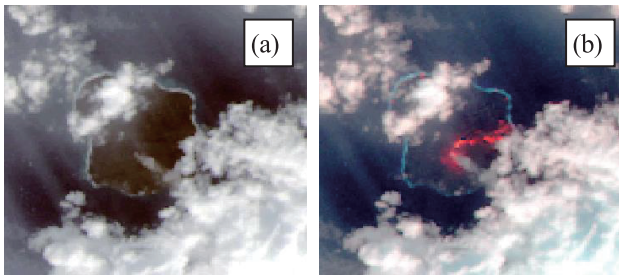
(11) December 11, 2014.

Fig. 5 Landsat-8 images of Nishinoshima in 2014: (a) True-color image, (b) High-temperature-detected natural-color image.

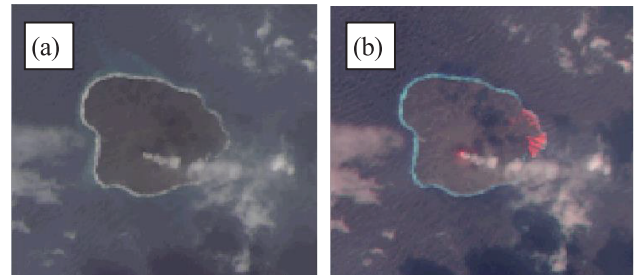
Fig. 5(11)は一面雲で覆われているが、右図(b)では火口と推定される場所に赤い点（赤丸の中心の所）が見えている。従って、高温検出ナチュラルカラー画像では、雲があっても、噴火しているなどの高温の場所が、ある程度分かるのである。

4.3 2015 年の Landsat-8 衛星画像の処理結果

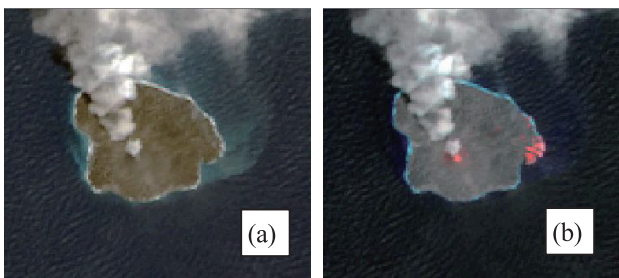
Fig. 6(1)-(14)に 2015 年の西之島の画像を示す。2015 年も西之島では噴火活動が続き、面積が増大していく。Fig. 6(1)の左図(a)と右図(b)では火口からの噴煙が見えるが、左図(a)では火口から海岸までの溶岩の流れは見えない。右図(b)ではそれが赤色で明確に表示されている。また、例えば、Fig. 6(2)の右図(b)で島の東側に溶岩噴出を表す赤い点が見えるが、その場所を Fig. 6(3)で見ると陸地面積が増大していることが分かる。同様に、例えば Fig. 6(9)右図(b)で島の南南東側に溶岩噴出を表す赤い点が見えるが、その場所を Fig. 6(10)で見ると陸地面積が増大していることが分かる。



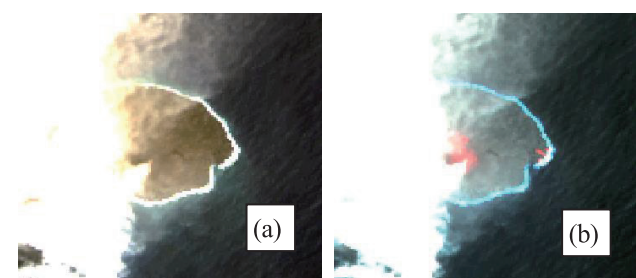
(1) January 12, 2015.



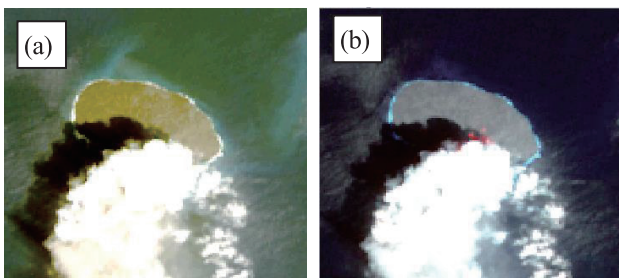
(2) February 13, 2015.



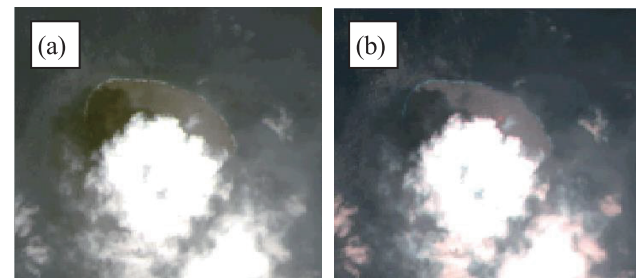
(3) March 1, 2015.



(4) March 17, 2015.



(5) April 2, 2015.



(6) April 18, 2015.

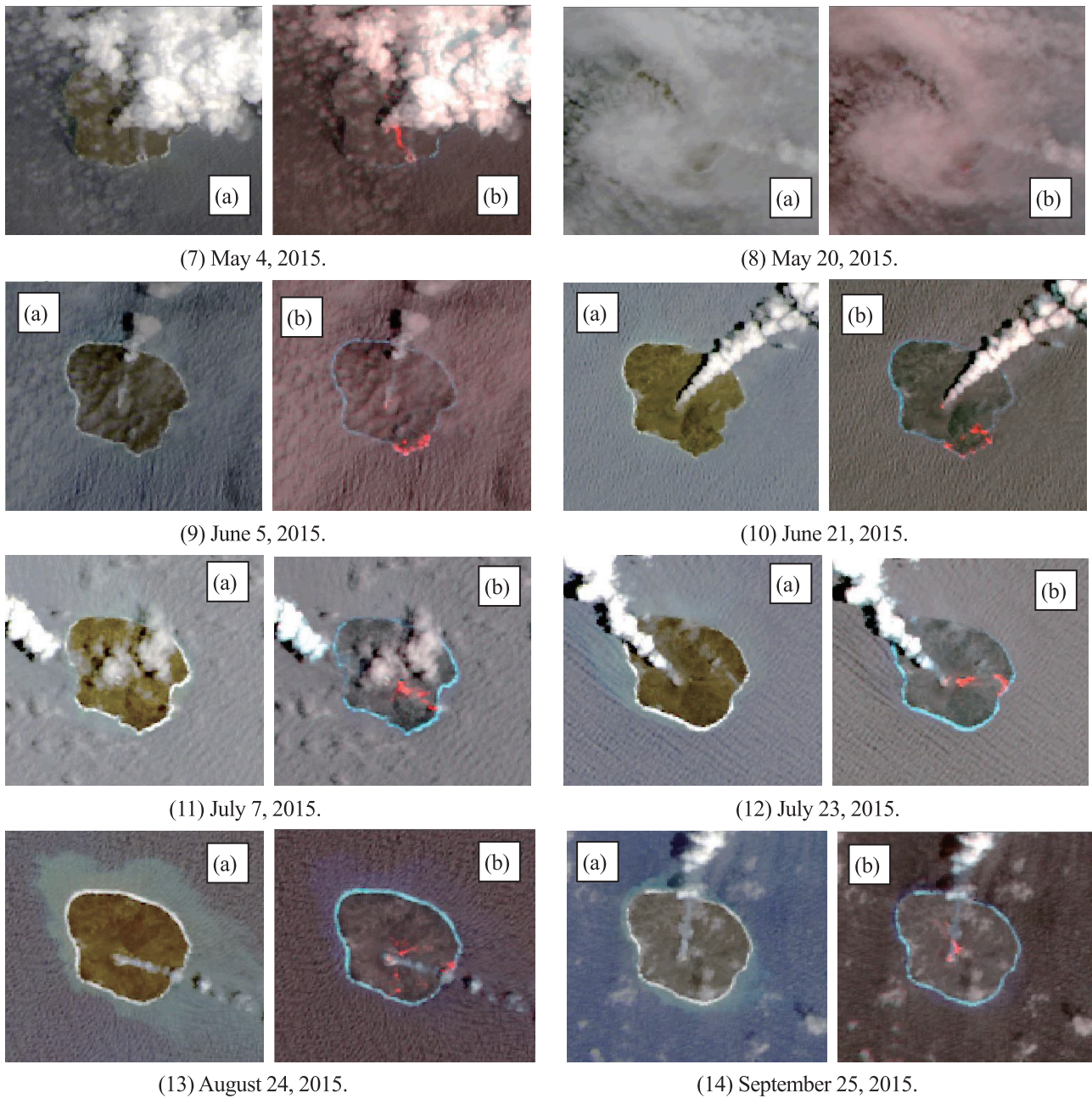
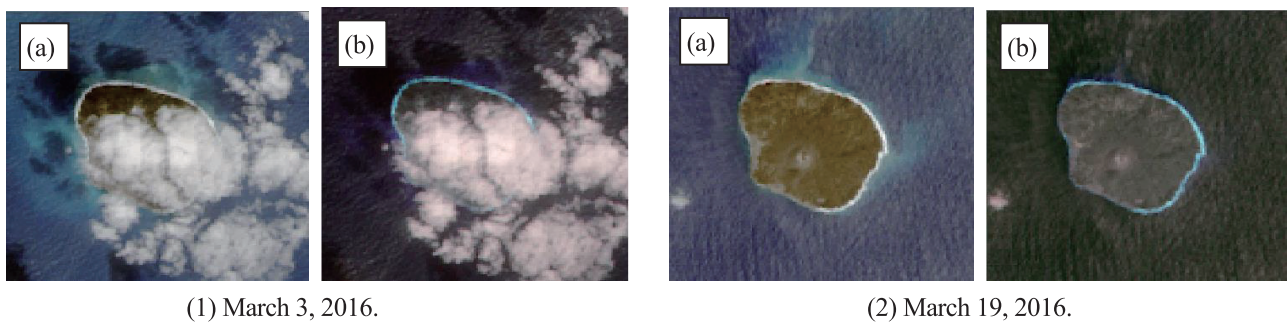


Fig. 6 Landsat-8 images of Nishinoshima in 2015: (a) True-color image, (b) High-temperature-detected natural-color image.

4.4 2016 年の Landsat-8 衛星画像の処理結果

文献⁽¹⁾によれば、2015 年 11 月 25 日の航空機による観測の時から 2017 年 4 月中旬まで噴火はなかったと記載されている。Fig. 7(1)-(10)に示す 2016 年の西之島の画像でも、噴火などの火山活動は見えない。時間の経過とともに、ほんのわずかではあるが島の形が変わっているように見える。これは波浪により島の海岸が侵食されたり、



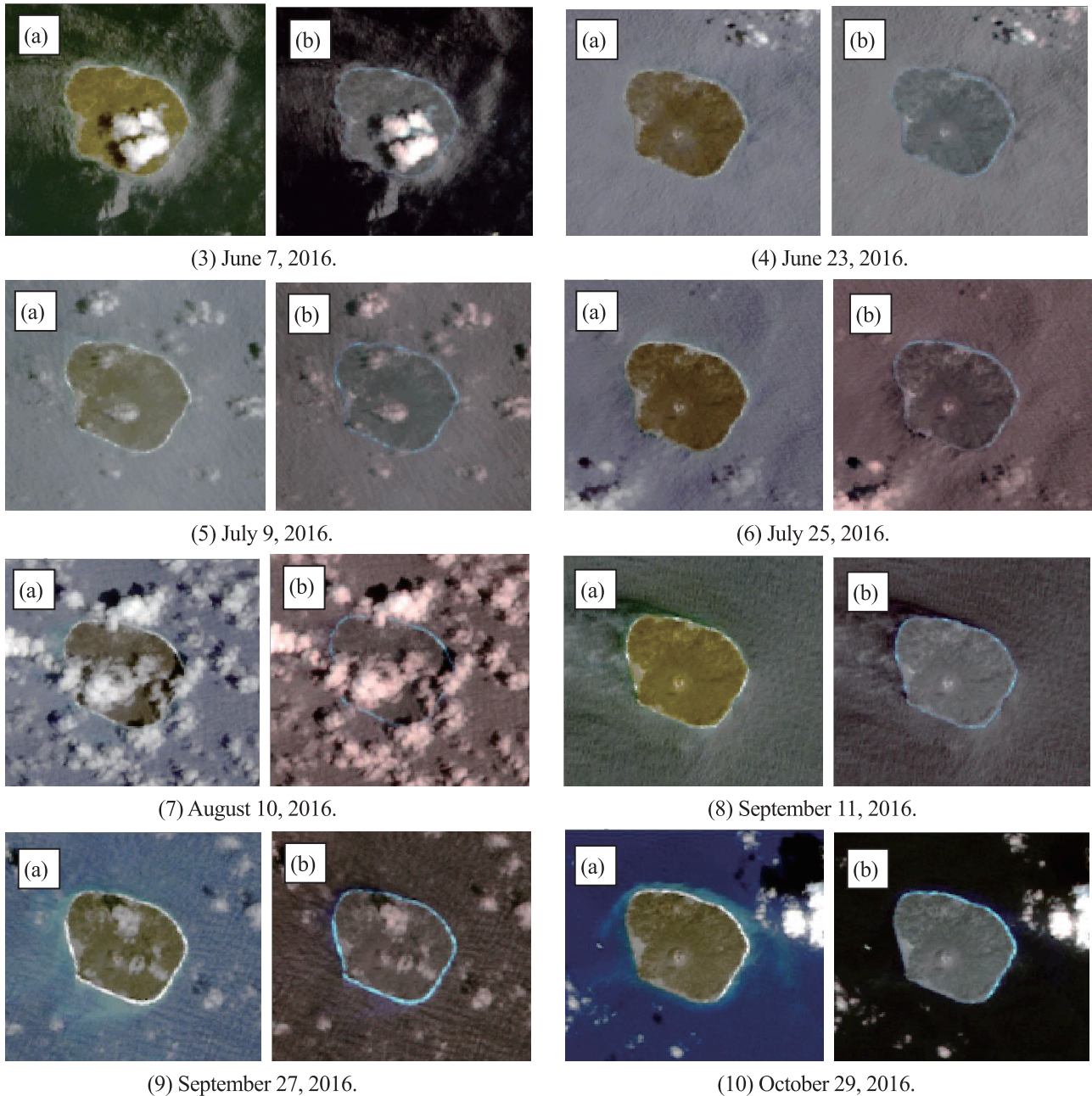


Fig. 7 Landsat-8 images of Nishinoshima in 2016: (a) True-color image, (b) High-temperature-detected natural-color image.

風雨による落石や山崩れなどがあったためと推測される。

4.5 2017年のLandsat-8衛星画像の処理結果

文献⁹⁾によれば、2017年4月20日に再噴火が観測され、7月11日の噴火の観測の後、8月より現在（2018年2月）まで噴火活動はおさまっている。従って、2月18日の画像 Fig. 8(1)では噴火は見えないが、5月9日の画像 Fig. 8(2)および6月10日の画像 Fig. 8(3)の左図(a)と右図(b)では島の中央部にある火口からの噴煙が見え、右図(b)では溶岩の流れが見える。7月28日の Fig. 8(4)の左図(a)と右図(b)では、島の西側に噴煙が見え、右図(b)では西側の海岸付近に溶岩噴出を示す赤点が見える。8月13日の Fig. 8(5)では噴火活動はないが、島の西側の陸地面積が Fig. 8(4)に比べ大きくなっていることが分かる。9月14日の Fig. 8(6)でも噴火活動はない。

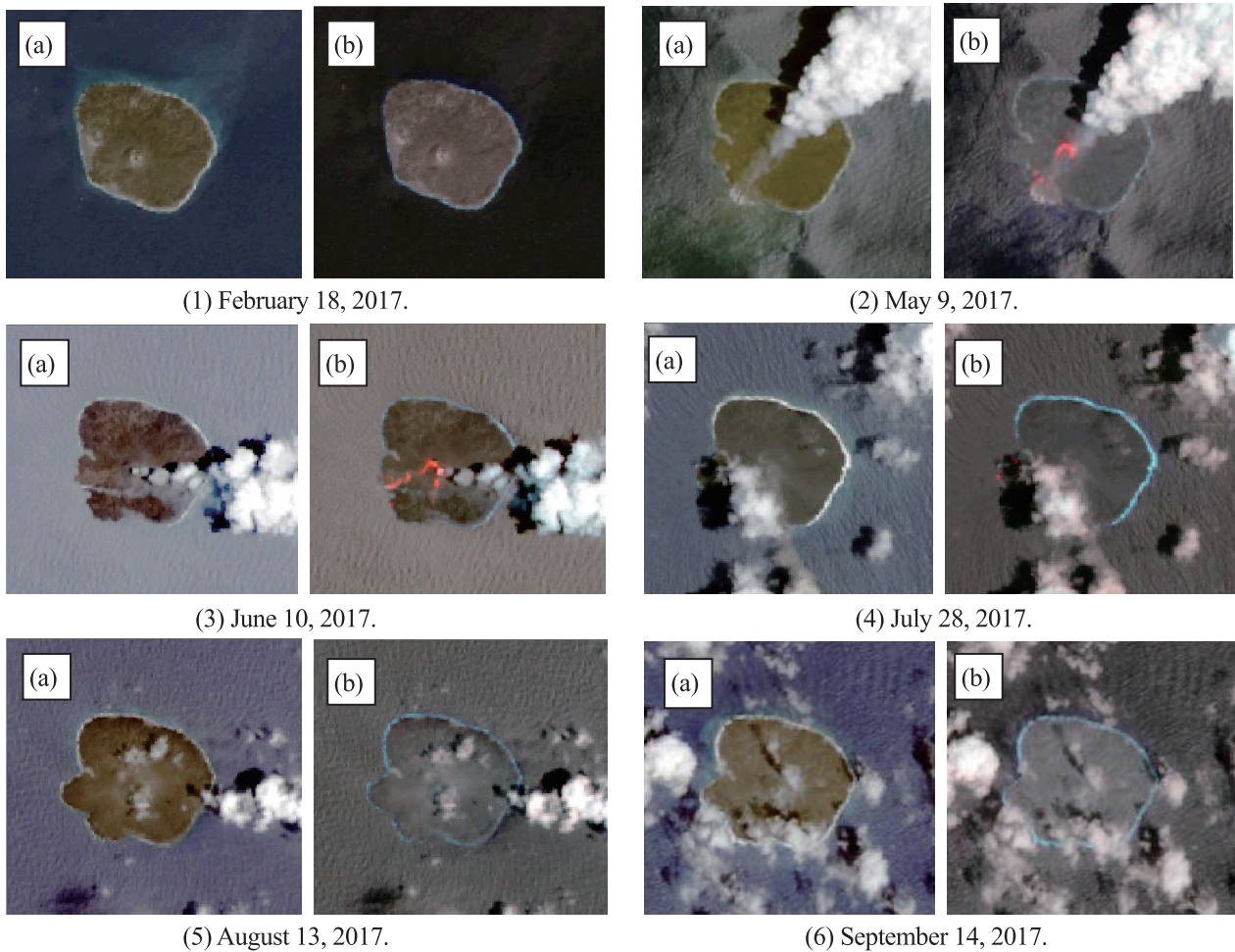


Fig. 8 Landsat-8 images of Nishinoshima in 2017: (a) True-color image, (b) High-temperature-detected natural-color image.

4.6 西之島の温度画像

Fig. 9 に、式(1)により band 10 のセル値を絶対温度（単位はケルビン：K）に変換して得られた温度画像（擬似カラー表示）のいくつかを示す。色分けは Fig.10 のカラーバーに示すように、270K～370K を紺～青～水色～黄緑～黄～橙～赤に割り当てている。

Fig. 9(1)は、噴火前の 2013 年 9 月 3 日の画像で、島の温度（約 302～307K＝平均約 32℃）と海の温度（299.3～299.8K＝平均約 26.4℃）が近いいため、島の形はそれほど明瞭ではない。Fig. 9(2)は、噴火後の 2013 年 12 月 24 日の画像で、Fig. 4(3)より雲、噴出中の溶岩、噴煙がある。雲は温度が低い（約 284～290K＝平均約 14℃）ので青く表示され、噴出中の溶岩は温度が高い（約 350～370K＝平均約 87℃）ので赤く表示されているが、噴煙は見えない。即ち、噴煙の温度は海の温度（295.8～296.2K＝平均約 22.8℃）とほぼ同じ（従って気温くらいの温度）と推定できる。旧島部分はぼんやりと見えている。Fig. 9(3)(4)では、新島は噴火活動により全体が温かいので黄緑色で表示され、海の水色とは明確に区別される。また、火口、溶岩流は熱いので赤～黄色で表示されている。

2014 年 12 月 11 日の Fig. 9(7)は、雲に覆われている（Fig. 5(11)参照）ときの温度画像である。雲は温度が低いので青色で表示されているが、地上の特に熱い所が雲を通して観測され、水色で表示されている。Fig. 9(7)の赤丸の所は Fig. 5(11)の赤丸の所に相当し、それは Fig. 9(6)の赤丸の所の火口に相当する。

Fig. 9(8)は 2015 年 6 月 21 日の画像で、島の東南が噴火により黄～赤で表示されている。島の大部分は温かいので黄緑色で表示されているが、島の中央部分から右上にかけて海の色と同じ水色になっている。これは Fig. 6(10)からも分かるように火口からの噴煙であり、噴煙の温度が海水の温度とほぼ同じであることを表している。

Fig. 9(9)は噴火活動がおさまっているときの画像、Fig. 9(10)(11)は再度噴火しているときの画像、Fig. 9(12)は再度噴火がおさまっているときの画像である。Fig. 9(11)では溶岩流も、解像度は悪いが見えている。即ち、温度画

像では、基となる band10 の解像度が 100m なので、解像度 30m のバンドを使った Fig. 4～Fig. 8 の高温検出ナチュラルカラー画像に比べ、熱い所の大体の場所は分かるが、溶岩の流れの詳細は分からないのである。

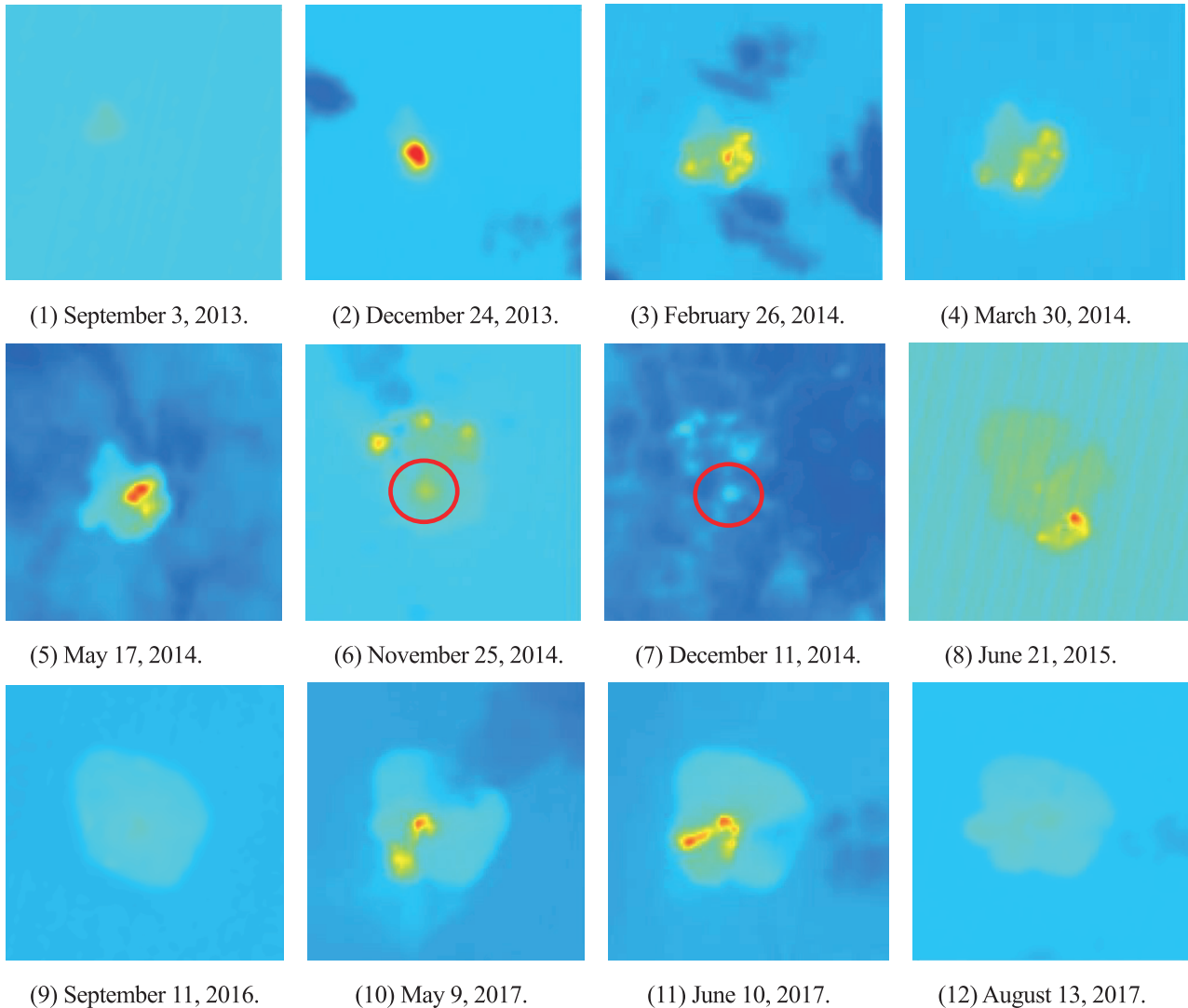


Fig. 9 Landsat-8 temperature images of Nishinoshima in 2013-2017.

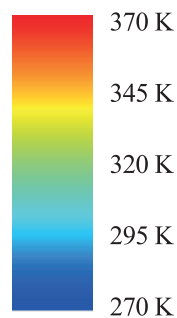


Fig. 10 Color bar for temperature images shown in Fig. 9.

4.7 夜の場合の高温検出カラー合成画像

国土交通省の Web ページ⁷⁾には夜の場合の高温検出画像として {R,G,B=band 7,6,none} が載っており、島の熱い部分が赤または黄色で表示されているが、島の形は見えない。Web ページ⁷⁾の夜の画像には島の外形が書かれているが、それは別の方法（例えば、昼の画像を使う、または SAR 衛星画像を使う）で求めた島の外形を使っているようである。そこで、本節では、夜の Landsat-8 衛星画像だけで、島の形もある程度分かる高温検出画像の作成法 {R,G,B=band 10,7,6} を以下で提案する。

Fig. 11 に、2017 年 6 月 6 日 12 時 28 分 UT=21 時 28 分 JST 観測の Landsat-8 衛星の画像を示す。夜の場合、一般に海よりも陸地の方が温度が低いので、(a) band 10 に示すように、島の通常の部分と雲は海より暗く（黒っぽく）表示され、火山活動で熱いまたは温かい所は明るく（白っぽく）表示される。(b) band 7 と(c) band 6 では高温部をよく検出できているが、島の形は分からない。(d) band 5 ではノイズ中に少しだけ高温部を検出している。(e) band 4 はノイズだけで高温部を検出してない。また、(d),(e)では島の形は分からない。従って、夜の場合、高温検出画像作成に使えるバンドは band 10, band 7, band 6 ということになる。このことを考慮して作成した「夜の場合の高温検出カラー合成画像」が、(h) {R,G,B=band 10,7,6}である。海は暗い赤で表示され、島の温度が低い部分および雲は黒く表示される。火山活動により島の温かい所は明るい赤色で表示され、高温の溶岩の噴出や流れは明るい黄色または薄紫色または白色で表示される。即ち、島の通常の温度の所は黒色、温度の高い所は赤～明るい黄または薄紫～白で表示されるので、島の形が分かる。なお、参考のために(f) {R,G,B=band 6,5,4}と(g) {R,G,B=band 7,6,5}を示すが、これらでは、高温部（溶岩）は分かるが、島の形は分からない。

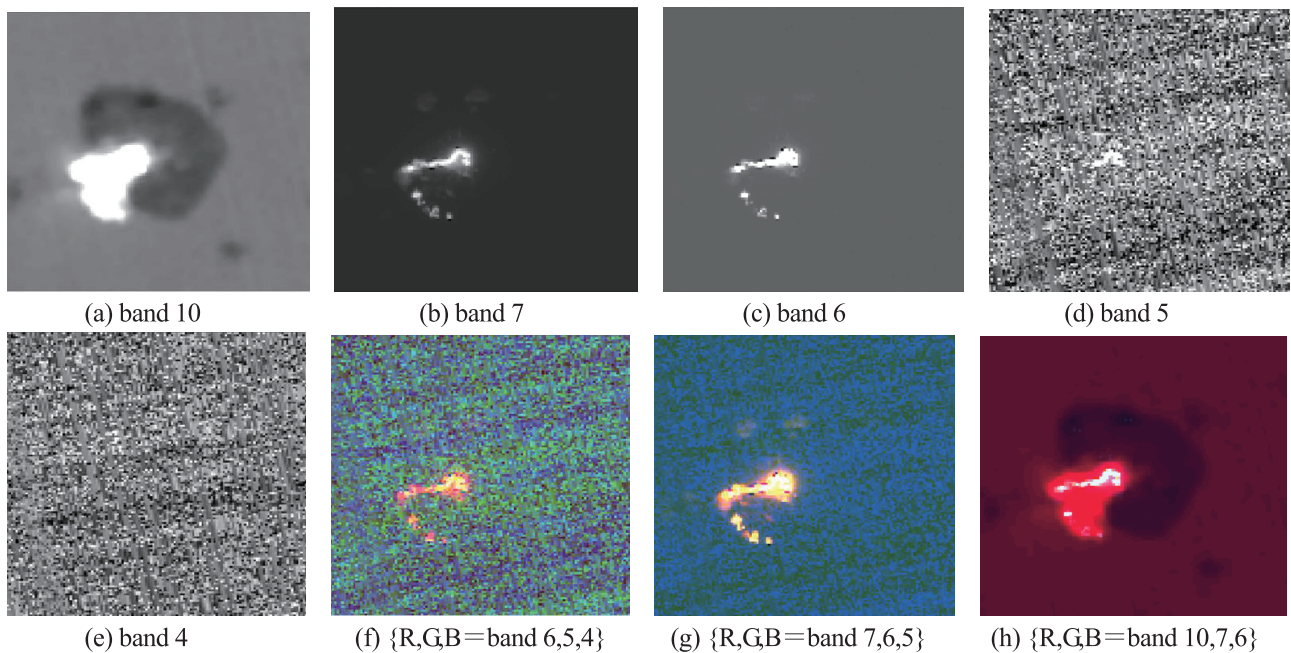


Fig.11 Night images of Nishinoshima at 12:28UT=21:28JST on June 6, 2017.

4.8 周長、最高温度の変化のグラフ

Fig. 12 と Fig. 13 に、トルーカラー画像で ArcMap の距離と面積の計測機能を使って計測した西之島の周長と面積のグラフを示す。周長、面積は、噴火前の 2013 年 9 月 13 日に 2.01km, 0.248km², 噴火後の 2013 年 12 月 24 日に 3.03km, 0.348km², 2014 年 3 月 30 日に 4.22km, 1.01km², 2015 年 6 月 21 日に 6.63km, 2.791km², 2016 年 10 月 29 日に 6.30km, 2.806km², 2017 年 9 月 14 日に 6.74km, 3.006km²であった。従って現在の周長は、噴火前と比べて $6.74/2.01=3.35$ 倍になったと計算される。同様に、面積は $3.006/0.248=12.12$ 倍になったと計算される。

Fig. 14 に、それぞれの観測日における西之島の温度画像で、ER Mapper の計測機能を用いて最高温度を計測した結果のグラフを示す。ただし、西之島の上空に雲があったり、噴煙がある場合には正確な温度が計測できないので、その場合の値は除外してある。Fig. 14 によれば、噴火前の 2013 年 9 月 3 日に 307.34K=34.19℃, 噴火中の 2015 年 7 月 23 日に 368.03K=94.85℃, 噴火がおさまっている 2017 年 8 月 13 日に 308.15K=35.00℃であった。

信州大学の火山研究の Web ページ⁽¹²⁾に載っているハワイ島キラウエア火山での溶岩流の温度測定の間では、溶岩流の表面が 600℃, 内部が 1200℃となっている。従って、西之島の溶岩流でも表面は 600℃くらいはあると思われるが、今回の Landsat-8 の band 10 による最高温度の計測では、Fig. 14 に示すように、いずれも 100℃ (= 373.15K) 未満であった。この原因は、band10 の解像度が 100m であるため、1 ピクセルの範囲内に溶岩流の他に普通の地表（その温度は気温程度である）も含まれてしまうためである。

衛星リモートセンシングによる西之島の火山活動の観測

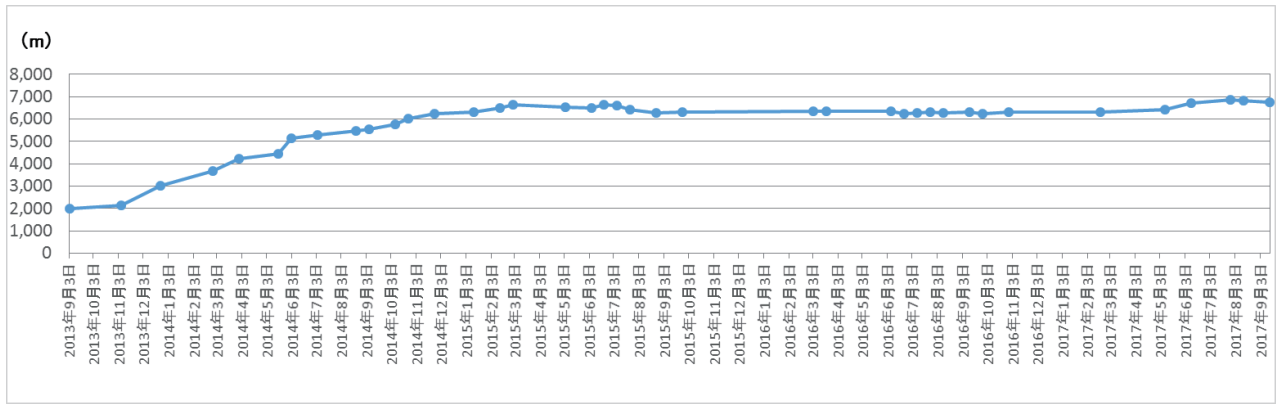


Fig. 12 Circumferential lengths of Nishinoshima obtained by Landsat-8 images of Figs. 4-8.

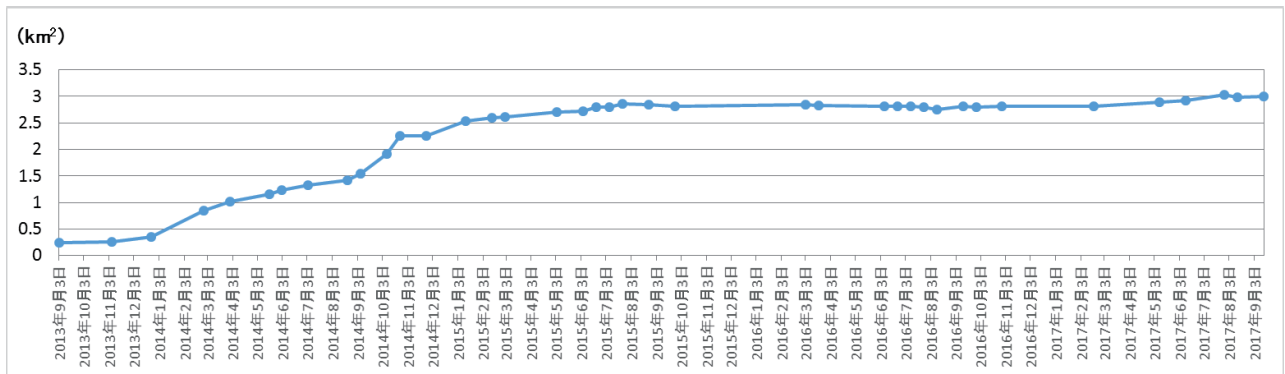


Fig. 13 Area of Nishinoshima obtained by Landsat-8 images of Figs. 4-8.

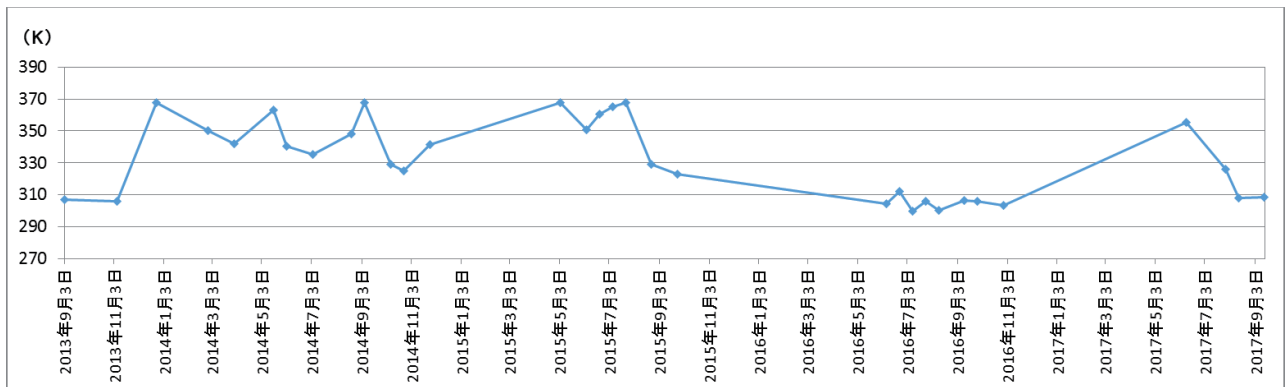


Fig. 14 Maximum temperatures of Nishinoshima obtained by temperature images of Landsat-8.

5. 結 言

本研究の成果は次のようにまとめられる．まず，Landsat-8 衛星データを使った場合の最適な高温検出画像を探すため，(a) {R,G,B=band 6,5,4}，(b) {R,G,B=band 7,6,5}，(c) {R,G,B=band 7,6,4}，(d) {R,G,B=band 10,3,2}，(e) {R,G,B=band 10,5,2} の画像を作成し (Fig. 3 参照)，(a)が最適であることを示した．(a)を高温検出ナチュラルカラー画像と名付けた．この画像は，噴火口の位置や溶岩の流れを赤色で明確に表示でき，高温以外の場所も自然な色に近いので，火山の場合の高温検出に有用である．また，高温検出の原理を，Fig. 2 を使って説明した．

次に，2013～2017 年の Landsat-8 衛星データを使って，トルーカラー画像，高温検出ナチュラルカラー画像 (Fig. 4～Fig. 8 参照)，温度画像 (Fig. 9 参照) を作成し，2013 年 11 月から続く西之島の火山活動を観測した．

さらに、夜の場合の最適な（島の形もある程度分かる）高温検出画像を探すため、まず、band 10,7,6,5,4 の単バンドの画像を示し、夜の高温検出画像作成に使えるバンドは band 10, band 7, band 6 であることを述べ、最終的に、夜の場合の高温検出カラー合成画像として {R,G,B=band 10,7,6} を提案した (Fig. 11(h)参照). この画像では、海は暗い赤、島の通常の温度の所は黒、火山活動で温かい所は明るい赤、高温の溶岩は明るい黄または薄紫または白で表示され、夜でも島の形がある程度分かることを示した。

最後に、西之島が火山活動により変化していく様子を、周長 (Fig. 12)、面積 (Fig. 13)、最高温度 (Fig. 14) のグラフとしてまとめることができた。

謝 辞

本研究は、文部科学省の平成 28 年度私立大学研究ブランディング事業「宇宙事業推進のために地域と協働するふくい PHOENIX プロジェクト」の支援を受けていることを記し、感謝する。

文 献

- (1) 海上保安庁・海上情報部, “海域火山データベース「西之島」”, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/kaiyo18-2.htm> (参照日 2018 年 2 月 10 日).
- (2) 国土交通省・国土地理院, “「地理院地図」に西之島付近の噴火活動関連情報を掲載しています”, <http://www.gsi.go.jp/gyoumu/gyoumu41000.html> (参照日 2018 年 2 月 20 日).
- (3) 東京大学地震研究所, “西之島調査の概要について”, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2016/10/7885529b08745f338dfb10ee9c653268.pdf> (参照日 2018 年 2 月 10 日).
- (4) 加藤芳信, “ArcGIS を用いた教育実践”, 福井工業大学研究紀要, No.45 (2015), pp.394-406.
- (5) D. A. Rothery, P. W. Francis and C. A. Wood, “Volcano monitoring using short wavelength infrared data from satellites”, *Journal of Geophysical Research*, Vol.93 (1988), pp.7993-8008.
- (6) 金子隆之, “衛星リモートセンシングによる火山の赤外観測”, 火山, Vol.50, 特別号 (2005), pp.S233-S251.
- (7) 国土交通省・国土地理院, “Landsat-8 が捉えた西之島付近の噴火 (2013 年 12 月～, 2017 年 4 月～)”, http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/eodas_nishinoshima_index.html (参照日 2018 年 2 月 10 日).
- (8) 国土交通省・国土地理院, “Landsat-8 が捉えた西之島付近の噴火—トルーカラー画像等(解像度 30m)”, http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/eodas_nishinoshima_true.html (参照日 2018 年 2 月 10 日).
- (9) ランドサットをたのしもう！倶楽部, <https://www.facebook.com/543052655744875/photos/pcb.1145892712127530/1145892542127547/?type=3> (参照日 2016 年 6 月 10 日).
- (10) 加藤芳信, 藤田裕介, “テラ・アクア衛星 MODIS 受信データによる原子力発電所温排水およびエチゼンクラゲ漂流に関する熱バンド画像処理”, 福井工業大学研究紀要, No.35 (2005), pp.325-332.
- (11) ESRI ジャパン, “ArcGIS で Landsat 画像を地表面温度画像に変換しよう”, <http://blog.esri.com/2014/08/26/arcgis-landsat-890b/> (参照日 2016 年 7 月 25 日).
- (12) 信州大学理学部, “火山研究への招待”, <http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/science/quest/sp/research/post-39.php> (参照日 2018 年 2 月 10 日).

(平成 30 年 3 月 31 日受理)