

# 衛星リモートセンシングによる三宅島 2000 年噴火後の植生回復過程の評価

The Vegetation Recovery Process in Miyakejima Island after the 2000 Volcanic Eruption Using Satellite Remote Sensing

高橋 俊守\* 加藤 和弘\*\* 上條 隆志\*\*\*

Toshimori TAKAHASHI Kazuhiro KATOH Takashi KAMIJO

**Abstract :** The vegetation of Miyake Island has been widely effected by the volcanic eruption in July 2000. This phenomenon is still going on and much of the vegetation cover has been changed. It is quite important to monitor the vegetation recovery process because of ecosystem study, prevention of disaster and rehabilitation of the Island. This study investigated an evaluation of the vegetation recovery process in Miyakejima Island after the 2000 volcanic eruption using satellite remote sensing and field vegetation survey. Multi temporal 12 satellite images of Terra/ASTER and JERS-1/OPS were selected and combined into three time series datasets such as the before eruption, the after eruption within two years and the after eruption more than three years. These three time series image datasets were analyzed into the seamless images of the maximum NDVI value. According to the unsupervised classification of these three images, Miyakejima Island was divided into six classes with vegetation change patterns. These results followed past works and field vegetation survey well. The classes were recognized with the vegetation change which shows the damage of trees and the recovery of vegetation after the volcanic eruption of the year 2000.

**Keywords:** Miyakejima, volcanic eruption, vegetation recovery process, satellite remote sensing

**キーワード:** 三宅島, 火山噴火, 植生変遷, 衛星リモートセンシング

## 1. はじめに

2000 年 6 月末から活発化した三宅島の火山活動は、同年 7 月に雄山が噴火し、山頂部の大規模な陥没や、水蒸気爆発に伴う火山灰の堆積、二酸化硫黄を含んだ火山ガスの大量放出が発生した<sup>1)</sup>。2007 年 6 月に発表された火山噴火予知連絡会拡大幹事会の見解によると、2000 年の噴火以降、三宅島では小規模な噴火が時々発生する火山活動が依然として継続しており、火山ガスの放出も当分続くことが予測されている。気象庁による最新の火山活動解説資料においても、今後も噴煙活動が活発で多量の火山ガスの放出が続いていることが報告されている (2007 年 8 月現在)。

2000 年の噴火及びそれ以降継続している火山活動に伴い、三宅島の植生は広範囲にわたって多大な影響を受けた<sup>2)</sup>。日本の特定植物群落に指定されていた山頂部の火山草原<sup>3)</sup>は、火口陥没によって生育地そのものが消失した。噴火に伴う降灰は、植物の埋没や倒伏、灰の付着による落葉を生じさせ、スグジイ、タブ等によるまとまった照葉樹自然林の多くも影響を受けた。植生を失い、火山灰の堆積した斜面では、大雨時に泥流やがけ崩れを生じやすくなり、これによって間接的な植生被害も発生した<sup>4)</sup>。噴火直後の植生被害について、現地の植生調査<sup>2)</sup>に加えて、衛星画像を用いた分析結果が報告されている。山西らは噴火直後の 2000 年 7 月から 2002 年 3 月にかけて観測された 3 種類 4 時期の衛星画像と現地調査によって植被率を推定し、これをもとに植生被害状況を評価した<sup>6)</sup>。さらに植被率の推定値をもとにして、火山灰の堆積や火山ガスによる影響と関連させた考察が加えられ、植生被害について分析と評価が行われている<sup>7), 8), 9)</sup>。

三宅島の火山活動が継続する一方で、2005 年 2 月 1 日には避難指示が解除され、住民が帰島し、島の復興が進みつつある。植生の回復は、三宅島の自然再生や泥流の発生による二次災害防止の観点からも重要な課題となる。噴火後 4 年以上が経過した現地において、当初被害を受けた植物の一部が胴吹きや埋没株から再生していることや、ハチジョウススキ、オオシマカンズゲ、ユノ

ミネシダ等の一部の植物に関しては増加傾向にあることが報告されている。しかし一方で、火山ガスの放出によって、噴火直後の降灰や泥流の影響の無い地域にまで植生被害が拡大しつつある。一連の火山活動によって、三宅島の森林の 60% が影響を受けたとされる<sup>5)</sup>。

そこで本研究では、広域観測や反復観測を特徴とする衛星リモートセンシングを用いて、三宅島 2000 年噴火後の植生変遷パターンを現す地図を作成することを通じて、火山ガスによる植生被害の拡大状況及び三宅島の植生回復過程を評価することを目的とした。

## 2. 方法

### (1) 衛星画像の選定

三宅島 2000 年噴火の前後の期間を観測した衛星データとして、JERS-1/OPS 及び Terra/ASTER の可視近赤外バンド画像を用いた。Terra/ASTER は、JERS-1/OPS の後継機として開発された光学センサで、それぞれ可視近赤外の 0.52-0.86  $\mu\text{m}$  における同一の観測波長帯域に 3 バンドを有している。空間分解能は JERS-1/OPS が 18m, Terra/ASTER が 15m である<sup>10)</sup>。JERS-1/OPS は 1998 年に観測期間を終えたが、その後を 1999 年に打ち上げられた Terra/ASTER が引き継いで今日まで観測を続けていることから、三宅島 2000 年噴火前後で同水準の画像を継続して利用することができる。

利用可能な衛星画像を検索し、さらにできるだけ同一季節に観測された画像を絞り込んだ結果、1994 年 5 月、12 月、1995 年 8 月、1998 年 3 月の 4 時期の JERS-1/OPS データを選定し、2000 年 11 月、2001 年 4 月、8 月、2002 年 3 月、2003 年 4 月、2005 年 3 月、9 月、11 月の 8 時期の Terra/ASTER データを加えて、全体で 12 時期の衛星画像を用いることとした (表-1)。ここで、これらの画像を時系列的に並べると、表-1 に示すように 2000 年の噴火前、噴火後 2 年以内、噴火後 3 年以上以降の 3 時期のグループに大別することで、それぞれにおいてほぼ等しい季節に観測さ

\*宇都宮大学農学部 \*\*東京大学大学院農学生命科学研究科 \*\*\*筑波大学大学院生命環境科学研究科

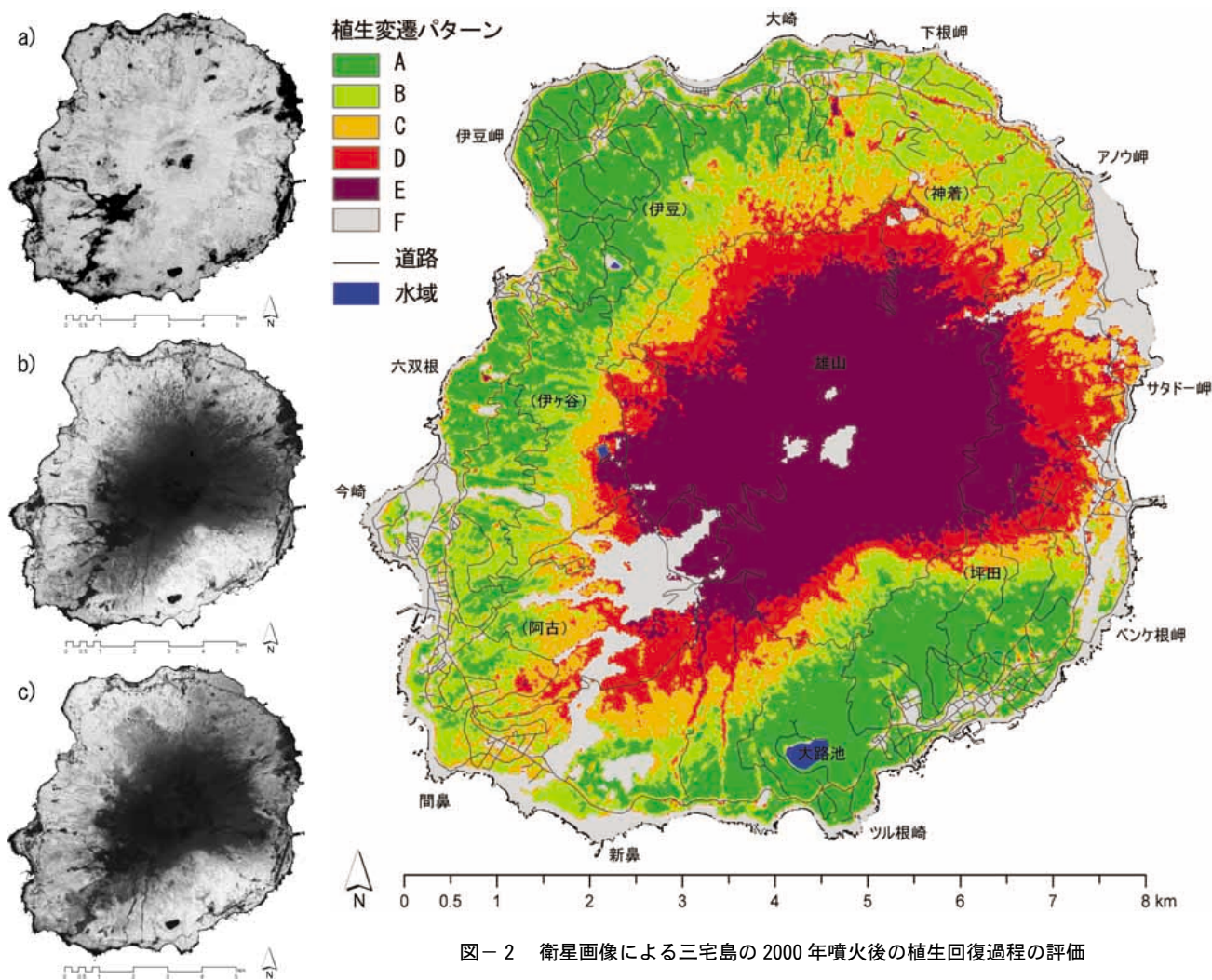


図-1 NDVI 最大値画像

- a) 噴火前, b) 噴火後2年以内,  
c) 噴火後3年以降

図-2 衛星画像による三宅島の2000年噴火後の植生回復過程の評価

A:噴火による被害が認められずに樹林地に覆われた地域, B:噴火により樹木が徐々に衰退し, 樹林地が草地に置き換わりつつある地域, C: 噴火直後に樹木が衰退したが, 樹林地が草地に置き換わって植生が回復する過程にある地域, D:噴火直後の植生被害が大きく, その後に草地として植生が回復する過程にある地域, E: 噴火直後に植生が失われ, その後も回復していない地域, F:噴火前から植生の乏しい地域

れた画像データの組み合わせができることが分かる。

## (2) 解析前処理

多時期の画像を空間的に分析するため, 画像を幾何補正した。さらに観測時刻の太陽の仰角と方位角に関する情報及び, 数値標高モデル (DEM) から求めた噴火前後の傾斜角と斜面方位に関する空間データを入力パラメータとして, TOPOCOR<sup>11)</sup>を用いた地形補正を行った。なお, DEMについては2000年11月の空中写真と2001年1月のSAR画像を用いて国土地理院が作成した「三宅島等GIS用データ<sup>12)</sup>」を用いた。

選定した画像には, 雲あるいは噴煙による影響によって部分的

に有効な情報を持たない画像が複数見られた。このため本研究では, 正規化植生指数 (NDVI)<sup>13)</sup> が雲あるいは噴煙による影響地域において相対的に低い値を示す性質を利用した最大NDVI法<sup>14)</sup>を用いて大気効果を除去し, 解析に必要な最適画像を得ることとした。ここでNDVI (正規化植生指数) とは, 植物が強い反射率を示す近赤外バンド及び, 低い反射率を示す可視赤バンドの二つの波長帯域を組み合わせ (1) 式によって算出される指数である。

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (1)$$

ただし,  $\rho$  は赤 (R) あるいは近赤外 (NIR) バンドにおける輝度値を示す。2000年の噴火前, 噴火後2年以内, 噴火後3年以降の3時期のグループに属するNDVIの最大値をそれぞれ求めた。

## (3) 植生変遷パターンの分類と評価

噴火前, 噴火後2年以内, 噴火後3年以降の3時期分のNDVI最大値画像 (図-1) を統合した3バンド画像を作成し, これをもとに植生変遷パターンを類型化した。クラスタリングには, 非階層型手法のISODATA法を用いた。ISODATA法では, 分類にあたって任意のクラス数を与えることができる。本研究では, 後述する現地踏査によって得られたデータと衛星画像による分類

表-1 使用した衛星データ

センサ	観測年	月	日	現地時刻	太陽仰角	太陽方位角
JERS-1/OPS (噴火前観測)	1994	5	17	10:33:00	69.00	136.00
	1994	12	24	10:40:05	30.00	163.00
	1995	8	1	10:44:06	67.00	132.00
	1998	3	26	10:51:44	55.00	158.00
Terra/ASTER (噴火後観測)	2000	11	8	10:47:09	38.46	168.22
	2001	4	1	10:44:15	57.03	150.82
	2001	8	23	10:41:11	62.90	143.67
	2002	3	19	10:35:10	51.25	149.86
	2003	4	7	10:34:28	58.33	145.99
	2005	3	2	10:39:09	45.11	152.63
	2005	9	10	10:38:59	57.74	150.33
	2005	11	22	10:32:58	34.27	164.50

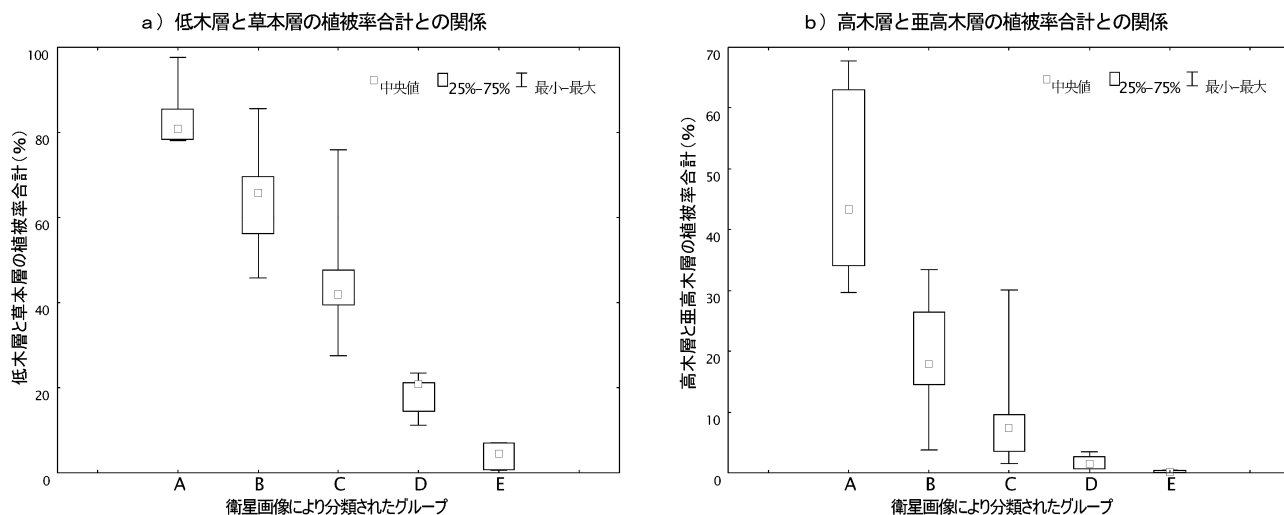


図-4 階層別の植被率と衛星画像により分類されたグループの対応関係

結果との対応関係を検証しながら反復して分類を実施し、最適クラス数を決定した。

次に、分類されたそれぞれの地域と、標高、面方位、植物群落との対応関係をクロス集計によって解析し、火山活動に伴う植生変化に関して考察を加えた。ここで、標高と面方位については国土地理院のDEMデータを用いて計算し、植物群落については環境省が作成した第2回から第5回までの自然環境基礎調査による植生調査の結果をとりまとめたGISデータを用いた。

#### (4) 現地踏査による検証

類型化され、図示された植生変遷パターンは、島内各所で実施された、階層別植被率調査<sup>(15),(16)</sup>によって検証した。まず、島内7箇所の林道を対象として、それぞれに連続する4-10の区間を設置した。次に、それぞれの区間において20-25地点程度の植生調査を行って、高木層：8m以上、亜高木層：2-8m、低木層：0.5-2m、草本層：0.5m未満の階層別の植被率を、Braun-Blanquetによる被度階級<sup>(17)</sup>により記録した。得られた被度階級の中央値をとって百分率の植被率とし、高木層と亜高木層の植被率合計(0-175%)、低木層と草本層の植被率合計(0-175%)の2種類の変数に要約した。一方で、各調査区間に対応する衛星画像により分類されたグループの区分を読み取り、植被率で示した現地踏査結果との対応関係を分析した。

### 3. 結果

噴火前、噴火後2年以内、噴火後3年以降の三時期の最大NDVI値を指標として衛星画像の分類を行った結果、三宅島はAからFまでの6つの植生変遷パターンを示す地域に分類された(図-2)。それぞれの地域における最大NDVI値の三時期の平均推移を図-3に示した。

まず、噴火前の最大NDVI値を見ると、グループAからグループEまで違いが認められなかった。次に、各グループの推移の特徴を見ると、グループAの最大NDVIは高い値のまま変化が見られない。グループBは噴火直後にグループAよりも低い値を示し、その後は徐々に低下しつつある。グループCは噴火直後に値が低下したがその後は徐々に回復しつつある。グループDは噴火直後に値が大きく低下したがその後は徐々に回復しつつある。グループEは噴火直後に値が著しく低下し、その後も回復が見られない。そして、グループFの値は低い値のまま変化が見られなかった。

衛星による分類グループと現地踏査による植被率合計との対応関係を図-4に示した。高木層と亜高木層の植被率合計、低木層

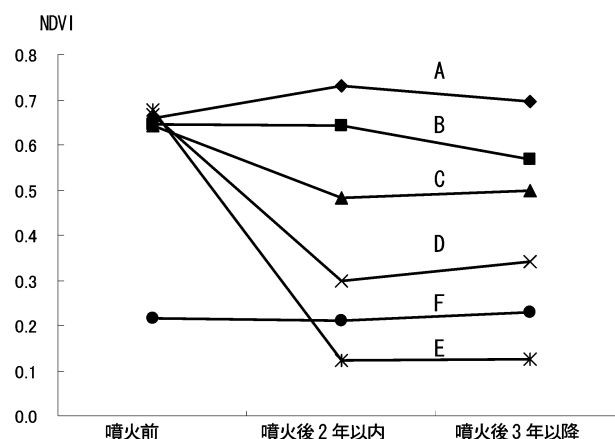


図-3 各時期におけるNDVI最大値の平均推移

と草本層の植被率合計ともに、グループAからグループEにかけて値が順に低下していた。Steel-Dwass法による多重比較によってグループ間の植被率の比較を全ての組み合わせで実施したところ、火口周辺の立入禁止区域を中心に分布するために十分な検証サンプル数を確保できなかったグループEを含む組み合わせを除いて、低木層と草本層の植被率、高木層と亜高木層の植被率のいずれの組み合わせにおいても有意差( $p < 0.05$ )が認められた。この結果、高木層と亜高木層が良く発達しているのはグループAに限られることが分かる。グループBとCについては、高木層と亜高木層が存在しても、その植被率はグループAに比べて著しく低い。グループDについては高木層と亜高木層をほとんど持たず、低木層と草本層がわずかに存在する。グループEには植生がほとんど見られない。

噴火後のDEMを用いて分類された地域に属する領域の標高平均を求めたところ、A：120m、B：148m、C：201m、D：284m、E：462m、F：77mであり、衛星画像によって分類された地域は、標高に従って分布していた。DEMを用いて作成した面方位データと衛星による分類グループとの対応関係を見ると、噴火直後に植生への影響が極めて大きかったと考えられるグループD及びEは、東、北東、南東、南西斜面と対応していた。

植物群落と衛星による分類グループとの対応関係についてみると、火山荒原植生・硫気荒原植生、ホシクサ・コイヌノハナヒゲ群団、ヤマグルマ・ユズリハ群集、フサザクラ群団は、噴火による被害が特に著しかったグループEに含まれる割合が高かった。

一方で、タブ群落、オオバヤシバシ群落、クロマツ植林については、徐々に最大 NDVI 値が低下しているグループ B に含まれる割合が高かった。

#### 4. 考察

高木層あるいは亜高木層における植被率が高く、噴火以前からの樹林地としての様相を維持しているのはグループ A のみであった。また、高濃度の二酸化硫黄を含んだ火山ガスの放出源となる山頂火口部付近に分布するグループ E では、噴火によって失われた植生の回復が認められなかった。

その他のグループでは、噴火直後とそれ以降で植生状況の変化が認められた。北東側と南西側斜面一帯では、噴火直後の植生被害は小さかったが、その後に樹木の衰退が進んでいた（グループ B）。これらの地域は、三宅島における卓越風の風下となる東部と南西部<sup>18)</sup>を中心に分布している。従って、噴火直後には火山灰の堆積によって、その後は火山ガスによって影響を受け続けていることによるものであろう。火山ガスの噴出は当分続くことと予測されていることから、今後の三宅島における植生回復を考える上で重要な制約になり得ると考えられる。一方で、噴火直後に被害が著しかったグループ C 及び D の地域では、その後に植生の回復が認められた。ただし、グループ C では樹木の衰退が著しく、グループ D においてはほとんど樹木が認められず、いずれのグループにおいても卓越していたのは草地であった。このように、噴火直後の植生被害が認められるグループ B,C,D においては、その後に植生の回復が認められたとしても、樹木については回復が遅れている。

以上の結果を総合すると、衛星画像によって分類された植生変遷パターンを示す各グループに対して、噴火直後及びそれ以降の植生回復過程に着目して、次のような解釈が成り立つものと考えられる。

- A: 噴火による被害が認められずに樹林地に覆われた地域
- B: 噴火により樹木が徐々に衰退し、樹林地が草地に置き換わりつつある地域
- C: 噴火直後に樹木が衰退したが、樹林地が草地に置き換わって植生が回復する過程にある地域
- D: 噴火直後の植生被害が大きく、その後に草地として植生が回復する過程にある地域
- E: 噴火直後に植生が失われ、その後も回復していない地域
- F: 噴火前から植生の乏しい地域

#### 5. まとめ

三宅島における 2000 年噴火後の植生の被害拡大及び回復過程を評価するため、衛星画像を用いた解析と現地踏査を実施した。噴火前、噴火後 2 年以内、噴火後 3 年以降に時期を区切り、それぞれの期間における NDVI 最大値画像を作成して統合し、クラスタリングを行った。この結果、三宅島における植生の変遷過程を 6 パターンに分類した評価図を得た。衛星画像の分類と現地踏査の結果をもとに、三宅島における植生の回復過程について考察を加えた。この結果、衛星画像の分類で示されたパターンは、噴火直後の植生被害の程度とその後の植生回復状況によって解釈することが可能であった。

2005 年 2 月には、4 年 5 ヶ月に及ぶ避難指示が解除され、三宅島では災害復旧事業が本格化している。植生の回復は、泥流の発生や土砂災害を防止するとともに、三宅島の自然再生にとって重要な課題となる。このため、三宅島緑化ガイドライン<sup>5)</sup>や三宅島緑化マニュアル<sup>19)</sup>が策定され、島の生態系や生物多様性に配慮した上で、緑化の取り組みが進められている。しかし一方で、火山ガスの放出は依然として続いており、本研究で示したように、樹

木の衰退が続いている地域も認められる。今後も植生の被害、回復状況を適切にモニタリングして、島の復興や生物多様性保全のための計画を効果的に進めていく必要がある。

謝辞：本研究の実施に当たって、東京都、三宅村、三宅島住民の皆様及び三宅島の研究者グループによる協力を受けた。本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)「三宅島 2000 年噴火後 8 年間の陸上生態系回復過程（研究代表者：上條隆志）」による研究成果の一部である。ここに記して、関係各位に厚く御礼申し上げる。

#### 引用文献

- 1) Ukawa, M., Fujita, E., Yamamoto, E., Okada, Y. and Kikuchi, M. (2000) : The 2000 Miyakejima eruption: Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network : Earth Planets Space, 52, xix—xxvi
- 2) Kamijo, T. & Hashiba, K. (2003): Island Ecosystem and Vegetation Dynamics before and after the 2000-Year Eruption on Miyake-jima Island, Japan, with Implications for Conservation of the Island's Ecosystem : Global Environmental Research, 7(1): 69-78
- 3) 環境庁(1980) : 第 2 回自然環境保全調査(緑の国勢調査)特定植物群落調査報告書 日本の重要な植物群落 南関東版 : 大蔵省印刷局
- 4) 上條隆志 (2006) : 植生への影響と回復 : 森林科学, 46, 7-10
- 5) 三宅島災害対策技術会議 緑化関係調整部会(2004): 三宅島緑化ガイドライン, 東京都, 18pp.
- 6) 山西亜希・上條隆志・恒川篤史・樋口広芳(2003): 衛星リモートセンシングによる伊豆諸島三宅島 2000 年噴火の植生被害の把握: ランドスケープ研究 66, 473-476
- 7) Yamanishi, A., Tsunekawa, A., Kiyohara, Y., Kamijo, T. and Higuchi, H. (2005): Monitoring of vegetation damage caused by the 2000 Miyake Island volcanic eruption using satellite remote sensing and field surveys: Journal of Agricultural Meteorology 60(6), 1183-1188
- 8) 恒川篤史・山西亜希 (2006): 人工衛星がとらえた三宅島噴火後の植生変動. 森林科学 46, 11-15
- 9) 山西亜希・加藤和弘・恒川篤史・樋口広芳 (2003): 衛星画像解析による 2000 年噴火後の三宅島の植生被害状況の把握と鳥類分布状況の推定: 環境情報科学論文集 17, 317-322
- 10) Yamaguchi, Y., Kahle, A., Tsu, H., Kawakami, T. and Pniel, M. (1998): Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36, 1062-1071
- 11) Richter, R.(2007): Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery, DLR German Aerospace Center, Wessling
- 12) 国土地理院 : 三宅島等 GIS 用データ : < [http://www1.gsi.go.jp/geowww/Volcano/GIS\\_web/miyake\\_web/miyake\\_gis.html](http://www1.gsi.go.jp/geowww/Volcano/GIS_web/miyake_web/miyake_gis.html)>, 2007.9.10 参照
- 13) Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. (1973): Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I 309-317
- 14) Holben, B.N. (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, International Journal of Remote Sensing 15(1), 145-161
- 15) 加藤和弘・樋口広芳(2003): 三宅島 2000 年噴火後の島の森林における鳥類群集: Strix21, 81-98
- 16) 加藤和弘・樋口広芳(2006): 三宅島 2000 年噴火・鳥類への影響と回復: 森林科学 46, 16-19
- 17) Braun-Blanquet, J. (1964): Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde: Springer, Wien
- 18) 上條隆志・清原諭高・松田深雪・加藤拓・星野義延・樋口広芳 (2005): 三宅島 2000 年噴火後のユノミネシダの分布拡大: 植物地理・分類研究 53(1), 83-89
- 19) 三宅島災害対策技術会議(2005): 三宅島緑化マニュアル : 東京都, 27pp.