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

Monitoring Vegetation Damage Caused by the Year 2000 Miyake Island's Volcanic Eruption Using Satellite Data

山西 亜希* 上條 隆志** 恒川 篤史* 樋口 広芳*

Aki YAMANISHI Takashi KAMIJO Atsushi TSUNEKAWA Hiroyoshi HIGUCHI

Abstract : Vegetation in Miyake Island was severely damaged by the 2000 Miyake Island volcano eruption. Four satellite images were analyzed for the purpose of grasping the long-term and extensive effect on vegetation of Miyake Island. The first visible vegetation damage was extinction of vegetation on the top of the mountain along with a caldera formation. During the main phases of volcanic activity occurred from July 2000 to August 2000, almost all vegetation in the Island were damaged mainly by volcanic ash. The vegetation damage was extremely severe around the crater where volcanic ash deposit was thick. On the foothill of the mountain, vegetation damage caused by volcanic ash was gradually recovered. However, vegetation damage was spreading out to the eastern and southwestern area of the mountain since autumn 2000. The main possible factor of this vegetation is volcanic gas emitted since September 2000.

Keywords: Miyake Island, eruption, vegetation damage, satellite remote sensing

キーワード : 三宅島, 噴火, 植生被害, 衛星リモートセンシング

1. 研究の背景と目的

伊豆諸島の一島である三宅島は、東京から南へ約 180km のところに位置する活発な火山島である。2000 年 7 月に山頂で大規模な爆発が起き、以後、現在 (2002 年 10 月) に至るまで噴火活動は継続している。今回の噴火で、島の広範囲に大量の火山灰が降下し、世界でも類を見ない大量の二酸化硫黄ガスが火口から放出されている。今回の大規模な、また長期にわたる火山活動が三宅島の植生に与える影響は絶大なものであり、噴火による植生への影響と回復過程を継続的に把握していくことは重要である。

2000 年に三宅島が噴火してから、植生への影響についての継続的な現地調査が行われてきた¹⁾²⁾。しかし、噴火後、研究者が島に渡れる機会や滞在できる時間が限られてしまったため、地上調査による面的な把握は困難である。一方、リモートセンシングデータを用いて噴火後の植生被害を面的に把握する調査も行われてきた。例えばアジア航測株式会社³⁾は 2000 年 11 月に撮影された空中写真の判読によって三宅島の植生被害区分図を作成している。しかし、多時期のリモートセンシングデータを解析し比較検討することは行われていないため、噴火後半年以上たった植生被害状況とその変化は報告されていない。

そこで本研究では、噴火直後から 2002 年 3 月までの三宅島の衛星画像を 4 時期にわたって解析し、2000 年三宅島噴火による植生被害について考察した。本研究の目的は、三宅島の植生被害の時間的変化の把握および面的分布傾向の把握の 2 点である。

2. 方法

(1) 画像解析の方法

解析に使用した衛星データを表-1 に示す。今回解析に使用した衛星データは SPOT のマルチスペクトルセンサ (HRV-XS) 画像と、TERRA の ASTER 画像である。SPOT のマルチスペクトルセンサは、可視光から近赤外の波長域にバンド 1 からバンド 3 までの観測波長帯を持つ。空間解像度は、各バンドとも 20 m である。スペクトル植生指標の算出に必要な可視光域と近

赤外域の波長帯のバンドは、バンド 2 とバンド 3 に相当する。ASTER は可視バンドから熱赤外バンドまでの 14 スペクトラムチャンネルを有する光学センサで、可視光域と近赤外域の波長帯のバンドは、可視近赤外放射計のバンド 2 とバンド 3 N に相当し、空間解像度は 15m である。画像解析のためのソフトウェアは Erdas Imagine 8.4 を使用した。また標高データとして国土地理院の 50m メッシュ DEM、火山灰の堆積厚のデータとして東京大学地震研究所が作成した火山灰アイソパック⁴⁾を用いた。

解析手順としては、まず前処理として衛星データから解析に必要な範囲の切り取り、幾何補正などを行った。そして、対象域の NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) を算出し、画像化した。NDVI の算定式は以下のようになる。

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$$

NIR: 近赤外域における反射輝度値 (バンド 3 または 3 N)

VIS: 可視域における反射輝度値 (バンド 2)

さらに植生の状況を多時期で比較するため、Gillies and Carlson⁵⁾に従って NDVI を植生率に変換した。この変換法は、各時期において裸地土壌および植生率 100% の各点の NDVI 値をもとにして植生率を推定する方法であり、NDVI が受ける衛星のセンサや気象条件の違いによる影響などを軽減することができる。変換式は次の通りである。

$$Fr = \{(NDVI - NDVI_0) / (NDVI_s - NDVI_0)\}^2$$

NDVI₀: 裸地土壌における NDVI

NDVI_s: 植生率 1.0 における NDVI

それぞれの時期において、NDVI₀には、火山灰の堆積により裸地化した地域の NDVI 値を用いた。NDVI_sには、噴火直後から植生被害が軽微である太路池周辺¹⁾の常緑樹林が示す NDVI 値を用いた。2001 年 10 月の NDVI 値から植生率を求めたときには、2001 年 9 月 12 日東京都撮影の空中写真により、太路池周辺に存在する森林の林冠が閉じていることを確認した。

(2) 現地調査の方法

三宅島での現地調査は 2001 年 6 月 16-17 日、7 月 14-16 日

*東京大学大学院農学生命科学研究科 **筑波大学農林学系

に行なわれた。南戸林道沿いに5ヶ所(N1-N5)、雄山林道沿いに6ヶ所(O1-O6)、計11ヶ所に10m×10mの固定調査区を設置し、全高等植物種について階層別に植被率を調べた。調査地点を図-1に示す。

(3) 植被被害の分布と要因の概略図の作成

植被被害の分布とその要因について把握するため、植被被害状況の概略図を作成した。2001年10月の衛星画像によって求められた植被率が20%以下の地域と、火山灰の堆積厚が128mm、256mm以上の地域⁴⁾、東京都が実施している二酸化硫黄濃度測定の結果⁶⁾による二酸化硫黄濃度状況(6地点)、国土地理院が作成した災害現況図による土石流発生地区をとともに表示した。

3. 結果

(1) 地上調査および画像解析による植被率

2001年6月および7月に実施した現地調査で調べられた高木の植被率と、2001年10月13日撮影の衛星画像を用いて計算された植被率との関係を解析した。調査地点N3については、近傍に存在する植被率の低い地域が、衛星画像において調査地点N3と同じピクセルに含まれてしまうため、画像解析によって推定される植被率は実際より低く推定されてしまい、現地調査の結果と対応しないことから、解析には使わなかった。2001年10月のSPOT画像から作成された植被率の図を図-3(c)に、地上調査における植被率との関係を図-2に示す。NDVIの値から計算された植被率と現地調査で調べられた高木の植被率が $y = x$ で回帰されるとしたときの直線との決定係数は0.862であった。

(2) 植被率の時間的変化

2000年7月から2002年3月までの4時期の衛星画像から求めた植被率の分布図を図-3に示す。

2000年7月10日(図-3(a))は初めて大規模な山頂噴火が起こった2日後であり、山頂にあった火山草原群落が消滅していることが画像から読み取れる。それ以外の地域では、火口の東側に降灰があり、植生を覆ったほかは、ほとんど植生被害はなかった。

2000年11月8日の図(図-3(b))を見ると、火口周辺から中腹部にかけての地域で植生が失われ裸地化していた。中腹部から山麓にかけても2000年7月10日と比べ植被率が大きく低下した地域が広く見られた。火山灰の堆積厚とこの時期の植生被害の関係をクロス集計してみると、火山灰の堆積厚が128mm以上の地域で植被率の低下が著しく、植被率が10%未満の面積が全体の約85%を占めた。さらに堆積厚256mm以上の地域ではほぼ全体が植被率10%未満となっている。火山灰の影響が比較的少なかった東部の三池地区と南西部の阿古地区において山麓部で植被率のとくに小さな地域が見受けられた。島の北西部に位置する伊豆地区や南の太路池周辺では他の地区と比較して噴火の影響の程度は低かった。

2001年10月13日の画像(図-3(c))では、約1年前に非常に低い植被率を示していた火口周辺の植被率がほとんど変化しておらず、依然として裸地化して植生が回復していない。一方、約1年前には植被率が小さかった神着地区や伊ヶ谷地区などの低標高部で植被率の回復が見られた。三池地区と阿古地区では植被率の低い地域が広がっていた。標高と植被率の関係をみると、標高400m以上の地域では、植被率10%未満の面積が約84%を占めた。標高400m以下の地域では、約14%の地域が植被率10%未満であった。

2002年3月19日の画像(図-3(d))は2001年10月のものと大きな相違は見られないが、3月はまだ落葉期であったため、植被率は全体的に2001年10月の植被率より小さい傾向にある。三池地区では植被率の低下が顕著であり、火山ガスの影響によ

てほとんどの樹木が枯死していると考えられた。

(3) 植生被害の分布とその要因

衛星データを時系列で比較すると、少なくとも2001年10月以降には、火山灰によって完全に裸地化し、植生の早期回復が望めない地域と、火山ガスによる影響が大きく、樹木が枯死していたり植生の回復が妨げられていたりしている地域、火山灰により一時的に被害を被ったが、火山ガスの影響が少ないために植生が徐々に回復しているそのほかの地域の差がはっきりとあらわれていた。

図-4はその地域別の被害様式を示す概略図である。火口周辺は完全に裸地化しており、植生はほとんど回復していない。阿古、三池地区周辺では低標高部にまで被害が拡大しているが、これらの地域では高濃度の二酸化硫黄ガスが検出される頻度が高い。また、神着などで局所的に土石流が発生し、樹木が立ち枯れるなど大きな被害を受けた場所があった。その他の地域では、噴火前と可視的にはほとんど変わらない植被率を示していた。

4. 考察

(1) 画像解析による植被率と地上調査結果との関係

NDVIから植被率を推定する試みには多くの例がある^{7,8)}。今回使用したGillies and Carlson⁵⁾の変換式は放射伝達モデルに基づく簡便な方法である。

この方法で求めた植被率は、地上調査における高木の植被率と比較的高い相関を示したことから、この方法の有効性が一定程度示されたと判断した。両者の差の要因には次の三つがあると考えられる。ひとつは、NDVIから植被率を推定するとき生じる問題である。たとえば、NDVISとして太路池周辺が映っているピクセルを用いたが、4時期すべてにおいて林冠が本当に閉じているのかを空中写真で確認することは困難であり、文献の記述と限られた現地調査結果に頼らざるを得なかった。ふたつ目は、現地調査の実施時期と衛星画像の撮影時期の間に時間的な開きがあることである。三宅島では10月上旬はまだ落葉期ではなく、生物季節学的には比較的夏の時期に近いと考えられるが、新たな被害の拡大や回復によって、現地における植被率が変化しうる可能性はある。三つ目は、現地調査が10m×10mの調査区で行われているのに対し、衛星画像の1画素にはその他の樹木や林床植生、調査地の周辺の状況など多くの情報が含まれているという点である。

また、本研究では変換式を森林のNDVIの値から求めたが、2000年7月の画像において、植被率が100%に近い草地のNDVI値が森林のそれと大差ないことを確認し、この植被率の変換法は草地にも適用可能と判断した。また、三宅島において噴火活動により消滅していない草地の面積割合は5%以下と限られており、仮に森林と草地においてNDVIと植被率の対応関係に若干の差があったとしても、そうした誤差から生まれたものとは考えにくい大きな変化のみを抽出し結論を導くことは可能と考えた。

噴火後の三宅島において、地上調査を行うにはさまざまな制約があったため、限られた情報をもとに植生被害の状況を把握するには本研究の手法が妥当であると考えが、今後は衛星画像の撮影時期と同期させた地上調査の実施などによる、画像解析の精度向上が望まれる。

(2) 噴火の経緯と植生被害

2000年三宅島噴火の経緯については、中田ら⁹⁾によって詳しい解説がなされている。今回の噴火で初めて山頂噴火が起こった2000年7月8日には、火口の東側にわずかな降灰が認められ、火口にカルデラが出現した。その後、8月下旬まで4回の山頂噴火がおこり、大量の火山灰が島全域に降下した。山頂噴火が収まると火山灰の放出も収まったが、9月初めから徐々に二酸化硫黄ガスの放出量が増加し、日量数万トンのレベルにまで達した¹⁰⁾。

以後、放出量に減少傾向は見られるものの、現在に至るまで SO₂ ガスの放出は続いている。中田ら⁹⁾ は 7 月 8 日以降の噴火活動を「山頂陥没期」、「爆発期」、「脱ガス期」と 3 つのステージに分けて記述している。三宅島の植生被害の広がりや変化も噴火活動の変化に応じて記述できると考えられる。

2000 年噴火によって初めて植生が大規模な被害を被ったのは山頂にカルデラが出現した 7 月 8 日の噴火のときで、このとき山頂にあった火山草原群落と風衝低木林が生育地ごと消滅した。この火山草原群落は、環境庁¹¹⁾ の「日本の重要な植物群落」に指定されているほか、「植物群落レッドデータブック」でも風衝低木林を含めて保護すべき群落複合として指定されており¹²⁾、その生育基盤も含む完全な消滅は、2000 年三宅島噴火の植生への影響として最も大きいものだといえる¹³⁾。

その後 2000 年 7 月から 8 月にかけての、数回の山頂噴火により特徴付けられる「爆発期」に放出された大量の火山灰は、島のほぼ全域に降灰し、当初広葉樹の落葉等の被害を及ぼした。しかし 2001 年 10 月には伊豆地区や伊ヶ谷地区など火山ガスの影響の少ない地域で植生の強い回復が見られることから、堆積厚数 cm の降灰であれば、植生は十分に再生可能であり、可視的な被害は一時的で、比較的軽微だと考えられる。しかし、倒木や埋木、幹や枝折れの被害がでるほど火山灰が厚く堆積した場合は、土壌浸食が発達し、生物の生育基盤が失われ、植生の回復が困難になる²⁾。火山灰の堆積厚と 2000 年 11 月の植被率をクロス集計した結果から、およそ 20 cm 前後にその境が存在するのではないかと考えられる。

山頂噴火が収まり、火山灰の放出が収束して、それと入れ替わるように大量の火山ガスが火口から放出されるようになった「脱ガス期」には、火山ガスが多く流れ込む地域での植生被害の拡大と火山ガスの影響のほとんどない低標高部での植生の回復が同時に進行したと考えられる。木下ら¹⁴⁾ は、三宅島の場合 925 hPa (海拔約 800 m) の高層風が 8 m/s 前後であるときに、火山ガスの吹き下ろしが起こり高濃度の火山ガスが山麓部を直撃する恐れがあると述べている。東京都が三宅島の 6 ヶ所で実施している二酸化硫黄濃度測定の結果によると、1 日の濃度平均値が 0.04 ppm を超えた日数の全測定日数に対する割合が阿古、三池で高く (図-4)、これらの地域ではおもに火山ガスの影響によって植生が被害を受けたと考えられる。とくに吹き下ろしが起こるような強風は西風の場合が多いため、三池地区では高濃度の火山ガスが流入し、樹木の多くが枯死している可能性が高い。

また、この 3 時期を通して土石流が局所的に発生しているが、国土地理院が作成した災害現況図によると、土石流が植生に与えた影響は火山灰や火山ガスの影響に比べると面積的には限られたものであると言える。しかし、火山ガス等の影響により現在生存している樹木が完全に枯死すると、新たな土砂災害が発生する可能性がある²⁾。

5. 結論

4 時期の衛星データを比較することによって、2000 年三宅島噴火が植生に与えた影響について以下のことが分かった。

- ① 時系列で比較すると、植生被害は 山頂にあった火山草原群落と風衝低木林の消滅 → 火山灰が厚く堆積した地域の裸地化と降灰のあった地域での植被率の低下 → 火山ガスの多く流れ込む地域における植被率の低下 のように推移している。火山灰の放出が収まった後は、火山ガスの影響の少ない地域で植生の回復も見られる。
- ② 地域別に被害を比較すると、火口周辺は陥没および火山灰の影響により完全に裸地化しており、植生はまったく回復していない状態にある。火山灰の堆積の少なかった標高の低い地

域では、火山灰の影響により一時的に植被率が低下したものの、その後徐々に回復しているところが多い。しかし、島東部の三池地区と南西部の阿古地区では植生被害が広がっており、特にその傾向は三池地区で顕著である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご支援を頂いた東京都環境局、三宅村役場ならびに社団法人日本動物学会の関係者に厚く御礼申し上げます。また、調査中様々なご助力を頂いた筑波大学の加藤拓氏に感謝申し上げます。また、火山灰に関するデータをご提供頂いた東京大学地震研究所の長井雅史氏に御礼申し上げます。なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金による研究 (研究代表者樋口広芳、課題番号 13440229) として行ったものです。

補注・参考文献

- 1) 上條隆志・樋口広芳 (2001): 2000-2001 年噴火が三宅島の植生に与えている影響に関する調査報告. 東京都委託 平成 12 年度三宅島動植物現況調査報告: 日本動物学会, 東京, 1-32
- 2) 上條隆志・樋口広芳・加藤拓・島田和則 (2002): 2000-2001 年噴火が三宅島の植生に与えている影響. 東京都委託 平成 13 年度三宅島動植物現況調査報告: 日本動物学会, 東京, 1-40
- 3) アジア航測株式会社 (2001): 環境庁委託業務 平成 12 年度富士箱根伊豆国立公園三宅島噴火に伴う自然環境等緊急調査報告書: アジア航測株式会社, 東京, 111pp.
- 4) 9) に掲載されている火山灰アイソパックを改変したもの。
- 5) Gillies, R. R. and Carlson, T. N. (1995): Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models: Journal of Applied Meteorology 34 (4), 745-756.
- 6) 東京都は 2002 年 10 月現在島の 9 ヶ所で二酸化硫黄濃度連続自動測定を実施している。本論文では島の 6 ヶ所における 2001 年 10 月から 2002 年 9 月までのデータを用いた。
- 7) Lu, H., Raupach, M. R. and McVicar, T. R. (2001): Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series: CSIRO Land and Water Technical Report 35/01, 38pp.
- 8) Purevdorj, T., Tateishi, R., Ishiyama, T. and Honda, Y. (1998): Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices: International Journal of Remote Sensing, 19 (18), 3519-3535.
- 9) 中田節也・長井雅史・安田敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001): 三宅島 2000 年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴—: 地学雑誌 110 (2), 168-180
- 10) 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 SO₂ 放出量から推測される脱ガス環境—: 地学雑誌 110 (2), 271-279
- 11) 環境庁 (1980): 日本の重要な植物群落 南関東版 (東京都): 大蔵省印刷局, 東京, 192-203
- 12) 我が国における保護上重要な植物種および植物群落研究会植物群落分科会 (1996): 植物群落レッドデータブック (植物群落レッドデータ): アボック社, 東京, 1344pp.
- 13) 木下紀正・小山田恵・金柿主税・飯野直子 (2001): 三宅島火山ガスの動態と気象条件: 自然災害科学研究西部地区部会報 25, 145-148

表-1 使用した衛星データ

観測日	衛星 / センサ
2000/07/10	SPOT - 2 / HRV-XS
2000/11/08	TERRA / ASTER
2001/10/13	SPOT - 1 / HRV-XS
2002/03/19	TERRA / ASTER

図-2 衛星データによる植被率と地上調査による植被率との関係

図-3 衛星データから推定された三宅島の植被率の変化

(a)2000年7月10日,(b)2000年11月8日,(c)2001年10月13日,(d)2002年3月19日

図-4 三宅島植生被害の分布と要因の概略図

図-1 地上調査地点および主要な地名