三宅島における火山灰の表層土壌に対する酸緩衝力の 発現機構と地図化

戸田浩人¹⁾・花岡功大¹⁾・岸本和也²⁾・生原喜久雄¹⁾・亀谷行雄³⁾

1) 東京農工大学大学院農学府 Graduate School of Agriculture, Tokyo Univ.
of Agri. and Tech. todah@cc.tuat.ac.jp

2) 東京農工大学農学部 Fac. of Agri., Tokyo Univ. of Agri. and Tech.

3) 東京都農林総合研究センター Tokyo Met. Agri. and For. Res. Center.

摘要：三宅島の森林地域に17区の調査地を設け、2000年噴火の火山灰と火山ガス（SO₂ガス）による鉱質土壌表層の化学性への影響を調査し、地図化した。鉱質土壌のpH(H₂O)は、2004年に4.0～4.4であったが、2006年には堆積火山灰が厚いほど上昇し4.3～4.8となった。堆積火山灰を通過する降水にはCa²⁺とSO₄²⁻イオンが多量に付加されたことから、酸性の降水が鉱質土壌に直接浸透する場合に比べ、高い酸緩衝力を有していることを室内実験で確認した。この緩衝力によって堆積火山灰の厚さが10 cm以上ある雄山山頂の東～北側では、SO₂ガス濃度が0.2～0.5 ppmと高いにもかかわらず植生が回復していた。

キーワード：Caイオン、硫酸イオン、緩衝力、酸性土壌、火山灰、三宅島

TODA, Hiroto, HANAOKA, Koudai, KISHIMOTO, Kazuya, HAIBARA, Kikuo and KAMETANI, Yukio : Mapping and mechanisms of acid buffer effect in volcanic ash on surface soil in Miyake island

Abstract : We investigated the effects of volcanic ash and gas (sulfur dioxide) on chemical properties of the mineral soil surface in Miyake Island. The pH(H₂O) values of mineral soil increased from 4.0-4.4 in 2004 to 4.3-4.8 in 2006. Calcium and sulfate ion were washed out from the volcanic ash by acid rain water, so the mineral soil were protected by buffer effect of the ash. Though the sulfur dioxide concentrations were high (0.2-0.5 ppm), the vegetation were fast restored because of the thick ash sedimentation (upper 10 cm) in east and north area of the Oyama volcano.

Key words : calcium ion, sulfate ion, buffer effect, volcanic ash, Miyake island

1. はじめに

三宅島では2000年7月に雄山が噴火し、約170万tと推定される多量の火山灰が島全域を覆った¹³⁾。7年以上経過した2007年現在でも火山活動が続いており、島の生態系に大きな影響を与えている。噴火当初2～8万t/日であった火山ガスの噴出は、減少しつつもいまだに続いており、植生の被害も風下となる地域を中心に拡大している。多量の火山灰が降灰した地域では地表面の透水性が悪く、地表流を生じ、浸食された土砂は泥流を引き起こし、下流の人家や道路などに多大な被害をもたらした¹⁾。泥流の発生を抑制するためには破壊した森林植生を回復させなければならないが、復旧事業は難航し、島民は安心して生活ができない状況である。したがって、早急に三宅島の森林植生と森林土壌の現状を調査し、また、植生回復に影響を与える要因を把握することは、三宅島の早期緑化を考えていく上で重要である。

2000年噴火における植生への影響や緑化方法に関する研

究はなされているものの^{2,9,10)}土壌面に関しては堆積火山灰を対象とした研究が多く^{6,7,11,14,15)}、鉱質土壌表層の酸性化が懸念されている¹⁴⁾。しかし、森林域における鉱質土壌表層の化学性への影響を広範に調査した例はほとんどない⁴⁾。また、植生被害と土壌の良否などから、現状におけるおおまかな緑化のガイドラインが策定され図化されているが⁵⁾、土壌化学性の変化が植生に及ぼす影響を地図化し、今後の緑化の基礎情報とする必要がある。

本研究では、三宅島の森林地域に17区の調査地を設け、2000年噴火の火山灰と現在もつづく火山ガスの沈着が、鉱質土壌表層の化学性、特に酸性化に及ぼす影響を把握し、緑化の基礎情報として地図化を実施した。

2. 調査地の概要

調査地は調査地の三宅島は伊豆諸島の一つであり、東京の西南西約180 kmの北緯34°05′、東経139°31′に位置し、年間

降水量は2,800 mmである。東京から比較的近い距離にあるにもかかわらず、温暖な気候、豊富な降雨、強い卓越風、そして火山という自然環境にはぐくまれた、世界にも稀な植物世界が存在する地域である。森林植生の形態としては、低標高域にはスダジイ (*Castanopsis Sieboldii* (Mak.) Nakai), タブノキ (*Machilus Thunbergii* Sieb. et Zucc.) などが優占する照葉樹林が広がり、標高の高い地域にはオオバヤシャブシ (*Alnus sieboldiana* Matusm.), オオシマザクラ (*Prunus Lannesiana* (Carr.) Wilson var. *speciosa* (Koidz.) Makino), タブノキが多い。ハチジョウススキ (*Miscanthus condensatus* Hack), オオシマカンスゲ (*Carex osimensis* Nakai), ハチジョウイトドリ (*Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decr. var. *hachidyensis* (Makino) Yonek. et H. Ohashi) などの草本群集も発達している⁹⁾。

三宅島では1985～2000年の間に今回を含め15回噴火活動が起こり、伊豆諸島の他の島に比較して噴火活動の頻度が顕著に多い。最近では1983年に噴火活動が起こり、火山ガスは少ないものの、多量の溶岩流と降灰が発生した。過去の噴火時に生じた火山岩であるスコリアが、土壌断面のA層下に多量にみられる。雄山山頂から中腹にかけては特に火山灰が厚く堆積し、植生の被害が大きい。また、今回(2000年)の噴火活動の特徴として火山ガス噴出の量が非常に多く長期にわたることがあげられる。火山ガスの成分の中でも特に二酸化硫黄 (SO_2) が、噴火当初である2000年には2～8万t/日噴出し¹²⁾、火山ガス高濃度地区においてpH3.5の強酸性の降雨が観測されている⁹⁾。2006年末では、 SO_2 ガス量は1～4千t/日と減少したもののいまだに噴出は続いている¹²⁾。三宅島では北東および西からの風が多いため、風下である南西および東はガスの影響を受けやすく、植生の被害が拡大しており⁹⁾、土壌の酸性化が懸念される。

3. 調査方法

3.1 調査区の設定

三宅島全体を把握でき、植生被害の程度がさまざまで、できるだけ火山ガス (SO_2 ガス) 計測器付近に、17箇所の調査

図-1 調査区の位置図

Fig. 1 Study plots in Miyake Island.

区を設けた(図-1)。なお、1～8区の8箇所(20×20 m)は2003年6月に、A～I区の9箇所(10×5 m)は2006年6月に設置した。2004年6月に1～8区で、2006年6月には全調査区で植生調査および土壌調査を実施した。

3.2 土壌試料の採取

2004年6月の1～8区における土壌調査は、各調査区に3箇所ずつ土壌断面を作成し、堆積した火山灰と鉱質土壌の深さ0～10 cmを採取し分析に供した⁴⁾。2006年6月にも同様の土壌調査を行い、鉱質土壌を採取し分析に供した。また、堆積した火山灰の厚さの分布をより詳細に把握するため、17調査区に加え、さらに9箇所で堆積火山灰の厚さを調査した。

3.3 土壌への浸透実験

2006年6月に火山灰が厚く堆積している2区の火山灰、および火山灰の堆積や植生被害が著しく少ないB区の鉱質土壌深さ0～10 cmを採取し、以下の室内で浸透実験に供した。セミマイクロSchollenberger法³⁾の器具を用い、4 mmのふるいを通した火山灰10 gまたは鉱質土壌8 gをカラムに入れ、火山ガスの溶解した降水を仮想し、硫酸 (H_2SO_4) で調節したpH3, 5, 7の3種類の溶液を、雨量換算で時間あたり150～375 mm浸透し溶液を採取した。同様の操作を浸出液の電気伝導度 (EC) が安定するまで繰り返し行った後、浸透溶液をpHと溶存イオンの分析に供した。また、堆積した火山灰からの浸出溶液が鉱質土壌に浸透することを想定し、火山灰を浸出させた3種類の溶液を鉱質土壌へ同様の操作で浸透させ分析に供した。

3.4 化学分析の方法

堆積火山灰および鉱質土壌の分析は以下のように行った。pH(H_2O)は土壌:水=1:2.5で攪拌し1時間放置後、pH(KCl)は土壌:1 mol 塩化カリウム溶液=1:2.5で1時間振とう後、ガラス電極法により測定した。交換性 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} は1 mol酢酸アンモニウム溶液 (pH7) で、交換性 Al^{3+} は1 mol塩化カリウム溶液で、風乾土:溶液=1:2.5で1時間振とう、抽出後、水溶性 Al^{3+} は生土:水=1:2.5で1時間振とう、抽出後、原子吸光法により測定した。また、100 ml採土円筒で採取した試料を飽水後、遠心分離機でpF3.8までの水を抽出し、飽和土壌水の溶存イオンとして Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} をイオンクロマト法(島津HIC-6A)により測定した。なお、浸透実験の浸出液のECはECメーターで、pHはガラス電極法で、溶存イオンは飽和土壌水と同様にイオンクロマト法で測定した。

4. 結果と考察

4.1 植生の現状

2004, 2006年ともに、木本では、オオバヤシャブシ、ヒサカキ (*Eurya japonica* Thunb.), ヤブツバキ (*Camellia japonica* L.), タブノキ、スダジイ、カジイチゴ (*Rubus trifidus* Thunb.) が多くの調査区でみられ、主要樹種となっていた。2004～2006年の樹高成長(1～8区)は、オオバヤ

シャブシが最も高く平均3mであった。草本とシダでは、ハチジョウススキ、オオシマカンサゲ、ユノミネシダ (*Histiopteris incise* J. Sm.) の3種が大部分を占め、特に、2006年では7つの調査区でハチジョウススキが出現していた。

植生の現状から、上木の枯死がみられない「被害なし」と、枯死がみられる「被害あり」に分け、さらに「被害あり」を木本本数が2,000本/ha以上の「被害小」、2,000本/ha未満の「被害大」に分け、計3グループに便宜的に分類した。17調査区の分類および調査区以外は道路上からの観察によって、図-2のような2006年現在における植生の現状地図が得られた。上条^④や石丸^⑤が報告している、2001年3月時点での植生被害地と比べ雄山山頂の東～北側で植生が回復していることがわかった。

17調査区を堆積火山灰の厚さとSO₂ガス濃度をデータが得られた1時間平均値(2000年11月～2005年9月)でプロットすると(図-3)、火山灰の厚さが15 cm未満でSO₂ガス濃度が0.05 ppm未満では植生の「被害なし」、SO₂ガス濃度が0.2 ppm以上では「被害大」が分布していた。一方、「被害小」は火山灰の厚さ10 cm未満でSO₂ガス濃度が0.05～0.2 ppmと、火山灰の厚さ10～30 cmでSO₂ガス濃度が0.2～0.5 ppmと高濃度地域にも分布していた。後述するが、雄山山頂の東～北側では堆積火山灰が厚く、SO₂ガス濃度が比較的高いに

図-2 植生被害の分布(2006年現在)
Fig. 2 Mapping of vegetation damages in 2006.

図-3 調査区の堆積火山灰の厚さとSO₂ガス濃度
Fig. 3 Thickness of volcanic ash and sulfur dioxide concentration in plots.

もかわらず植生が回復しているのは、堆積火山灰が影響していると推察された。

4.2 土壌酸性化の現状

2004年6月採取の1～8区における堆積火山灰および鉱質土壌の理化学性については、既報^④に詳述している。2004年6月時点点を概括すると、堆積火山灰が10 cm以上と厚い場所では、堆積火山灰の硬度が高く、粗孔隙が少なく、堆積火山灰の交換性Ca²⁺や鉱質土壌の飽和土壌水中のCa²⁺濃度が著しく高かった。しかし、堆積火山灰の厚さ、Ca²⁺濃度の高さにかかわらず、pH(H₂O)は堆積火山灰で3.7～4.1、鉱質土壌で4.0～4.4と著しく低く、pH(H₂O)と交換性Al³⁺濃度には負の相関性がみられた。

2006年6月採取の1～8区における鉱質土壌のpH(H₂O)は、2004年6月時点とくらべ、スコリアが多い2地点(3区と7区)を除くと、4.3～4.8に上昇しており、堆積火山灰が厚いほどpH(H₂O)の上昇率が高かった(図-4)。SO₂ガス濃度と2006年6月採取の全調査区におけるpH(H₂O)との関係を見ると(図-5)、SO₂ガス濃度とpH(H₂O)において負の相関がみられ、同じSO₂ガス濃度でも堆積火山灰の厚さ10 cm以上では、10 cm未満よりもpH(H₂O)が高い傾向にあった。pH(H₂O)と交換性Ca²⁺濃度との関係(図-6)では、堆積火山灰の厚さ10 cm未満において、交換性Ca²⁺濃度と正の相関がみられた。一方、堆積火山灰の厚さ10 cm以上の調査区では、pH(H₂O)の範囲は4.5～5.0であるにもかかわらず、交換性Ca²⁺濃度は10

図-4 堆積火山灰の厚さと鉱質土壌のpH(H₂O)
Fig. 4 Thickness of volcanic ash and pH(H₂O) of mineral soil.

図-5 SO₂ガス濃度と鉱質土壌のpH(H₂O)
Fig. 5 Sulfur dioxide concentration and pH(H₂O) of mineral soil.

～100 mmol/kgと大きな幅があり、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と交換性 Ca^{2+} 濃度の間には関係がみられなかった。飽和土壌水中の Ca^{2+} 濃度は、堆積火山灰の厚さ10 cm未満でほとんどが5 mmol/kg以下と低いのにに対して、堆積火山灰の厚さ10 cm以上では交換性 Ca^{2+} 濃度30 mmol/kg以上で交換性の濃度上昇に伴い上昇し（図-7）、土壌水に溶解した Ca^{2+} イオンの割合が高まるといえる。飽和土壌水中の Ca^{2+} 濃度は SO_4^{2-} 濃度とほぼ1:1の相関性がみられ（図-8）、堆積火山灰の厚さ10 cm以上の場所で高いことから、2000年噴火の火山灰に多く含まれる石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）^{11,15)}の溶出が示唆される。交換性、飽和土壌水中の Ca^{2+} イオン以外の塩基は、 Ca^{2+} に比べ濃度が低く、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ や SO_4^{2-} イオンと Ca^{2+} のような関係はみられなかった。

また、堆積火山灰の厚さにかかわらず、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が5.0以下で水溶性 Al^{3+} 濃度の急上昇、 $\text{pH}(\text{KCl})$ が4.5以下で交換性 Al^{3+} 濃度の急上昇がみられ（図省略）、 SO_2 ガスの沈着による H^+ イオンそのものよりも、酸性化した土壌では Al^{3+} の存在が土壌酸度に強く影響していると考えられた。

4.3 土壌化学性への堆積火山灰の影響

以上の現地調査の結果、堆積火山灰を通過した降水が鉱質

図-6 鉱質土壌の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と交換性Ca濃度

Fig. 6 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ and exchangeable Ca concentration of mineral soil.

図-7 鉱質土壌の交換性Caと飽和土壌水中Ca濃度

Fig. 7 Exchangeable Ca and soil water soluble Ca concentrations of mineral soil.

図-8 鉱質土壌の飽和土壌水中Caと SO_4 濃度

Fig. 8 Soil water soluble Ca and SO_4 concentrations of mineral soil.

土壌の化学性に影響を及ぼしていると予測された。この仮説を検証するため、室内における浸透実験を行った。

火山灰の浸透実験における浸出液は、浸透溶液の pH にかかわらず、雨量換算した浸透水量750 mm前後で、 $\text{pH}4.3$ 前後に収束した（図-9）。その後、浸出液の pH は、 $\text{pH}3$ 溶液では徐々に低下し、 $\text{pH}5, 7$ 溶液では $\text{pH}4.6$ でほぼ安定した。 Ca^{2+} と SO_4^{2-} イオンはいずれの pH 溶液でも、溶液の浸透直後、著しく高い濃度が溶出し、浸透水量の増加にともない溶出濃度は徐々に低下した（図-10）。なお、 Ca^{2+} と SO_4^{2-} 以外のイオンは、 Ca^{2+} と SO_4^{2-} と比較して著しく低濃度であった。

鉱質土壌の浸透実験における浸出液は、 pH 調節溶液を直接浸透した場合、浸透溶液の pH にかかわらず、初回浸透の375 mmで $\text{pH}6.0$ 前後となり、その後 $\text{pH}3$ 溶液では $\text{pH}4.1$ まで低下し、 $\text{pH}5, 7$ 溶液ではそのまま安定した（図-11）。火山灰浸透液では、いずれの溶液も浸透させた直後 $\text{pH}5.0 \sim 5.3$ まで上昇し、その後 $\text{pH}4.6 \sim 4.9$ で安定した（図-11）。

鉱質土壌に pH 調節溶液を直接浸透した場合、浸出液の溶存イオン濃度は $\text{pH}3$ 溶液で最も高く（図-12）、陽イオンでは Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ の順に溶出が多く、陰イオンでは SO_4^{2-} が大部分を占めた（図-14）。しかし、 $\text{pH}3$ 溶液では、浸透水量の増加にともない主要な塩基性の陽イオン濃度合計が陰イオン濃度合計に比べて著しく低くなり（図-12）、酸性化の原因である Al^{3+} の溶出が示唆された。

鉱質土壌に火山灰浸透液を浸透した場合、いずれの火山灰浸透液も Ca^{2+} と SO_4^{2-} イオンを高濃度に含有するため、浸出液の溶存イオンも大部分が両イオンで占められた（図-13）。初回浸透の375 mmでは、火山灰浸透液中の Ca^{2+} と SO_4^{2-} イオン濃度よりも浸出液の濃度が低下し、鉱質土壌への吸着が示唆された。

以上のように、堆積火山灰を通過する降水は、 pH にかかわらず Ca^{2+} と SO_4^{2-} イオンが多量に付加され、酸性の降水が鉱質土壌に直接浸透する場合に比べ、高い酸緩衝力を有していることがわかった。また、浸透実験では火山灰を4 mmにそ

図-9 火山灰浸出液のpHの推移

Fig. 9 pH values of percolated solution from volcanic ash.

図-12 鉱質土壌浸出液のイオン濃度合計の推移

Fig. 12 Total ion concentration of percolated solution from mineral soil.

図-10 火山灰浸出液のイオン濃度の推移

Fig. 10 Ion concentration of percolated solution from volcanic ash.

●pH3, ▲pH5, ■pH7 open: Ca, close: SO₄

図-11 鉱質土壌浸出液のpHの推移

Fig. 11 pH values of percolated solution from mineral soil.

ろえているため、厚くかつ固結した堆積火山灰への降水の浸透を必ずしも再現できているとはいえないが、年降水量に満たない2,000 mm程度でCa²⁺とSO₄²⁻イオンの付加は頭打ちとなり(図-10)、pH3溶液ではpH3.4まで低下し(図-9)緩衝力が減少した。堆積火山灰の厚さ10 cm未満の地域では10 cm以上に比べて、火山灰が柔軟で粗孔隙も多いため、火山灰のCa²⁺イオンが低下し、酸緩衝力を減少させたと考えられる。

4.4 土壌化学性からみた緑化地図

堆積火山灰の厚さとSO₂ガス濃度が、ともに鉱質土壌表層の

図-13 鉱質土壌浸出液のイオン濃度の推移 (pH3硫酸溶液)

Fig. 13 Ion concentration of percolated solution from mineral soil. (treatment of pH3 SO₄ solution)●Ca, ○Mg, ▲Na, △K, ■NH₄, ◆Cl, ◇NO₃, ×SO₄

図-14 鉱質土壌浸出液のイオン濃度の推移 (pH3火山灰浸透液)

Fig. 14 Ion concentration of percolated solution from mineral soil. (treatment of pH3 percolated solution from volcanic ash). Legend is the same as Fig. 13.

化学性、特に酸性化へ影響を及ぼしていることが明らかとなった。そこで、三宅島における堆積火山灰の厚さの分布(図-15)とSO₂ガス濃度の分布(図-16)を示す。仮に、SO₂ガス濃度の分布のみで土壌酸性化と緑化の可能性が決まるならば、2006年時点での植生被害の現状は図-16と近似するはずであるが、雄山山頂の東～北側では、SO₂ガス濃度が0.2～0.5 ppm

図-15 堆積火山灰の厚さの分布 (2006年現在)

Fig. 15 Mapping of volcanic ash thickness in 2006.

図-16 SO₂ガス濃度の分布 (2006年現在)

Fig. 16 Mapping of sulfur dioxide concentration in 2006.

と比較的高いにもかかわらず「被害小」であった (図-2)。SO₂ガス濃度分布図に堆積火山灰の厚さ10 cm以上の範囲を重ねると、ちょうど雄山山頂の東～北側の地域がカバーされ、植生回復がすすんだ「被害小」となり、緑化が可能な地域に選別される。これは、検討してきたように、堆積火山灰の鉱質土壌に対する酸緩衝力が発揮されているためといえる。

今後、SO₂ガス濃度の推移と堆積火山灰におけるCa²⁺とSO₄²⁻イオンの減少速度を予測することで、鉱質土壌の酸性化の変化を描いて、効率的な緑化を進める基礎資料にしてい

5. おわりに

堆積火山灰の厚さが10 cm以上ある地域では、SO₂ガス由来の酸性降下物に対して鉱質土壌の酸性化を抑制する効果があることがわかった。しかし、SO₂ガス濃度が0.5 ppm以上の高濃度地域では、土壌酸性度以前に植物体がSO₂ガスの被害を直接受け、緑化が困難であると考えられる。また、SO₂ガスの噴出がさらに長期間に及べば、火山灰の酸緩衝力も衰え、鉱質土壌が酸性化する恐れがある。SO₂ガス濃度が0.2 ppmより高い状態では、堆積火山灰の除去や破砕は避け、SO₂ガス濃度の低下後、堆積火山灰に窪地 (バンカー) を掘って鉱

質土壌を露出させるバンカー工法²⁾や植穴による緑化が有効である。その際、火山灰に含まれる単体の硫黄 (S) が酸化して^{14,15)}鉱質土壌を酸性化させないように、火山灰の耕耘や土壌への混入には留意すべきである。

調査にあたり数々の便宜を与えて下さった、東京都三宅支庁産業課の皆様に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 阿部和時・小川泰浩・黒川潮・吉永秀一郎・岡本透・松山康治・趙炳薫 (2003) 三宅島火山降灰堆積地における緑化試験, 日本緑化工学会誌 29(1): 208-211.
- 2) 阿部和時・黒川潮・小川泰浩・岡部宏秋 (2006) 土砂流出と三宅島産植物による緑化, 公開シンポジウム「三宅島2000年噴火後の陸上生態系の変化」: 8-11.
- 3) 土壌環境分析法編集委員会 (1997) 土壌環境分析法, 博友社, 東京, 427pp.
- 4) 花岡功大・戸田浩人・生原喜久雄・亀谷行雄 (2006) 三宅島噴火災害地における火山灰層の科学性と森林土壌表層への影響, 日本森林学会関東支部大会論文集 57: 195-198.
- 5) 石原肇 (2006) 三宅島緑化ガイドラインの策定について, 植生情報 10: 1-8.
- 6) 石丸仁・服部憲一・松岡寿・黒羽公明・北野茂夫 (2001) 三宅島2000年噴火火山灰の植生回復への影響に関する調査, 東京都土木技術研究所年報 2001, 337-348.
- 7) 石丸仁・増田信也・黒羽公明 (2002) 三宅島2000年噴火の植生回復・緑化への影響に関する調査, 東京都土木技術研究所年報 2002, 365-372.
- 8) 鎌滝裕輝・早福正孝・辰市祐久・古明地哲人 (2001) 三宅島雄山の噴火における降水・堆積降灰の水溶性成分について, 大気環境学会年會講演要旨集 42: 341.
- 9) 上條隆志 (2002) 三宅島2000年噴火の植生の影響, 遺伝 56(5): 27-30.
- 10) 上條隆志 (2006) 噴火後の植生の自然回復, 公開シンポジウム「三宅島2000年噴火後の陸上生態系の変化」: 5-7.
- 11) 加藤拓・東照雄・上條隆志・田村憲司 (2002) 三宅島2000年噴火火山灰試料の化学的および鉱物学的諸性質について, ベトロジスト 46(1): 14-20.
- 12) 三宅島測候所 (2006)
<http://www.tokyo-jma.go.jp/home/miyakejima/>
- 13) 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・金子隆行・藤井敏嗣 (2001) 三宅島2000年噴火の経緯—山頂陥没口と噴火物の特徴—, 地学雑誌 110: 168-180.
- 14) 若杉幸子・田中美穂・前田勝 (2003) 三宅島火山灰から水に溶出する硫黄化合物の同定と定量及び環境に及ぼす影響, 分析化学 52(11): 997-1003.
- 15) 矢沢宏太・加藤哲郎・丸田里江・野呂孝史・益永利久 (2004) 三宅島2000年噴火火山灰の化学的特性, 東京都農業試験場研究報告 32: 101-107.

(2007.7.9 受理)