

三宅島島内高濃度火山ガスハザードマッピング

鹿児島大学工学部 飯野直子

1. はじめに

東京の約 180 km 南に位置する三宅島では、2000 年 7 月 8 日の雄山 (814 m) の山頂噴火以来、活発な火山活動が続いている (図 1)。同年 7~8 月にかけて陥没カルデラが拡大し[1]、現在の最高標高は 775 m である。同年 8 月 10、18、29 日には噴煙高度約 8、14、8 km におよぶ大噴火が発生した。爆発的噴火や火砕流などの危険を避けるために、同年 9 月 1 日より全島避難が実施されたが、同年 8 月から始まった大量の火山ガス放出のため、2005 年 2 月の避難指示解除まで長期間の避難生活が続いた。2005 年 5 月からは観光客の受け入れも再開された。DOAS 観測による 2006 年 6 月頃の SO_2 放出量は、活発に活動していた頃の桜島のレベル (およそ 2 千トン/日) にまで落ちついてきている[2]。

鹿児島大学噴煙火山ガス研究グループは、2000 年 8 月の爆発的噴火から 2004 年 12 月まで、主に鹿児島大学受信の気象衛星 NOAA/AVHRR を用いて噴煙検出を行い、ホームページ[3]で公開している。2000 年 9 月中頃までの火山灰を多く含む噴煙については、 $11\mu\text{m}$ と $12\mu\text{m}$ 帯の熱赤外差画像によって検出が可能であったが、それ以降の灰をあまり含まない白っぽい噴煙については、可視域と近赤外域の差画像が有効である。また、短波長赤外域や中間赤外域のバンドも合せてカラー合成画像を作成すると噴煙と雲との識別がよくできる[4]。ただし、2002 年頃からは地上観測で確認される噴煙の勢いが次第に弱まり、衛星データによる噴煙の検出が難しくなってきた。

2000 年夏季に関東などにおいて“異臭騒ぎ”として問題となった火山ガスの長距離移流について、衛星データと高層風データおよび火山ガスデータを用いた解析・検討を行った。衛星画像では本土部まで達する噴煙がしばしば確認され、三宅島の南南東 110 km に位置する八丈島の高層風観測データを入力とする鉛直シャーモデルによって、衛星画像に示される噴煙のさまざまな形態を再現できることがわかった。また、環境省の大気汚染物質広域監視システムによる SO_2 観測値などとの照合から、メソスケールでの火山ガス輸送による高濃度 SO_2 発生メカニズムには、日中の対流混合と前線に吹き込む強風の二つがある。前者による高濃度は晴天日の日中にのみ発生し、後者による高濃度は昼夜を問わずに発生することがわかった[5]。

三宅島島内の火山ガスに関する問題に関して、それまでの火山ガスの危険性に関する解説が低温型火山ガスへの注意に偏っていることを危惧し、2000 年 9 月からは火山ガスのページ[6]や論文[7]など

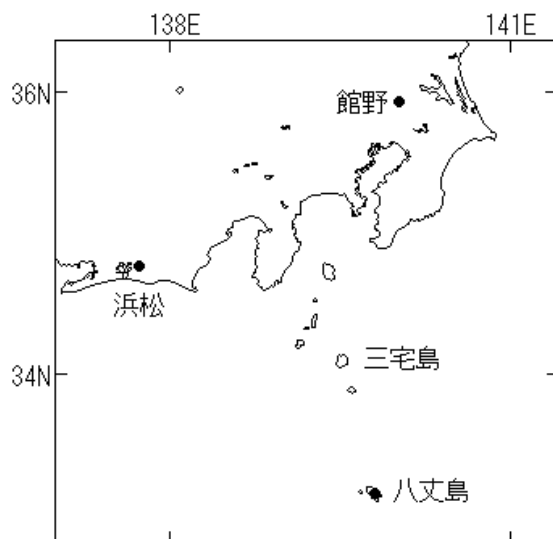


図 1 三宅島と周辺の高層気象観測点(●)の位置

で三宅島や桜島など活発な活動を行っている火山が放出している高温型火山ガスによる危険性について発言をしてきた。衛星画像や地上観測映像に捉えられている噴煙からガスの挙動を推測し、SO₂の三宅島島内地上連続測定や噴煙映像、高層気象観測データなどを用いて高濃度SO₂と風との対応について調べたり、高濃度SO₂の季節・地域特性を調べたり、地球観測衛星データを用いた火山ガスハザードマップ作成を提案してきた[8]。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 強風による吹き降ろしが山麓における高濃度SO₂発生 の主な原因である。(2) 高濃度SO₂の季節・地域特性は、八丈島における925hPa高層風とよく対応する。(3) 火口からのわずかな方向の違いによってSO₂濃度環境が大きく異なる。(4) 島全体の火山ガス環境評価のために地球観測衛星の植生指数差画像から作成したハザードマップは、山麓部の火山ガス観測局で測定された高濃度SO₂の発生頻度や植生の地上観測結果と矛盾しない。

本稿では、三宅島島内高濃度ハザードマッピングに関するこれまでの研究より、島内高濃度SO₂の季節・地域特性及び地球観測衛星の植生指数画像を用いて作成した火山ガスハザードマップについてまとめる。

2. 使用データ

2.1 三宅島におけるSO₂の連続測定データ

東京都等による火山ガス固定観測局は2000年12月の3局体制から始まり(A1:支庁局, A2: 空港局, A3:阿古局)、2001年9月に3局(B1: 逢の浜局, B2: アカココ局, B3:伊ヶ谷局)、2002年3月に4局(C1:三池局, C2:村役場局, C3:坪田局, C4:薄木1局)、2004年4月に4局(D1:美茂井局, D2:御嶽神社局, D3:薄木2局, D4:ふるさと局)増強されて14局体制となった。各観測局の位置を図2に示す。2000年12月は13日から観測が始まったので、解析には2001年1月のデータから使用した。2002年3月には10点観測体制が整えられたが、C2の村役場局では同年5月以降しかデータ取得が行われていないので、2002年5月~2003年4月をSO₂の年平均濃度算出期間とした。

2.2 高層風

三宅島の地表における火山ガス濃度は雄山の山頂高度付近の風に支配的な影響を受けていると考えられるが、山頂風の直接測定は行われていない。それゆえ、本稿では高層気象観測点のうち最も三宅島に近く、同じく海上孤島である八丈島(三宅島の南南東約110km, 図1)の指定気圧面925hPa(海拔高度で約830m)の高層風を三宅島上空の風として代用した。高層気象観測は3, 9, 15, 21時の6時間毎に行われている。

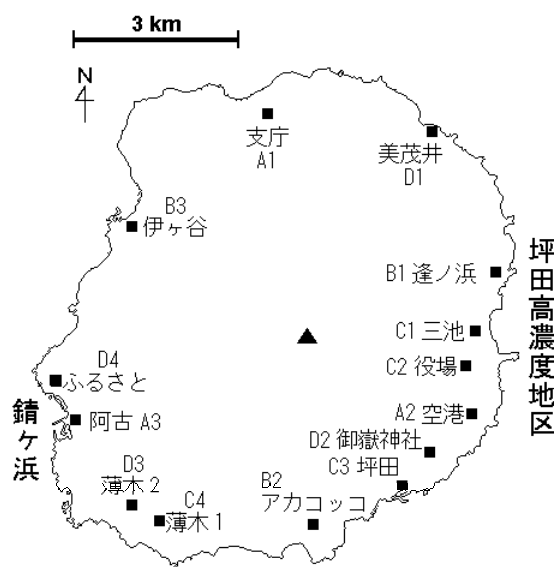


図2 三宅島山麓部の火山ガス観測局の位置

2.3 地球観測衛星データ

日本の JERS-1 衛星は 1992 年に打ち上げられ、1998 年 10 月まで運用された。JERS-1 に搭載された OPS センサにより、地上分解能 18.3×24.2 m で、可視から近赤外までの 4 バンドでの観測が行われた。ASTER は OPS の後継として開発されたセンサであり、可視から熱赤外領域までに 14 バンドを有する高性能光学センサである。可視・近赤外バンドの地上分解能は 15m であり、アメリカの地球観測衛星 Terra に搭載されている。

植物への火山ガスの影響は、植物の活性度が高い夏季に顕著に観られると考えられるが、夏季には山頂などが雲に覆われており、雲や噴煙が島にかかっていない衛星データを得ることはできなかった。2000 年の噴火前については、三宅島が雲に覆われていない画像が ASTER データにはなかったため、1994 年 4 月 3 日の JERS-1/OPS のデータを用いた。噴火後については、2003 年 4 月 7 日の Terra/ASTER データを用いた。

2.4 三宅島島内の撮影

三宅島島内の可視・近赤外撮影には、SONY DCR-TRV30 を用いた。可視撮影は通常撮影を行った。近赤外撮影時には、840 nm 以下をカットするためにフジフィルムの IR-84 フィルタ、減光のために Kenko ND400 を装着し、ナイトショットモードに設定して撮影した。

3. 島内高濃度火山ガス発生の季節・地域特性

2002 年 5 月から 1 年間の八丈島 925 hPa 風について風速階級別の発生頻度を図 3a に示す。風速の階級は、弱風：0-3 m/s、並風：4-6 m/s、強風：7-9 m/s、疾風：10 m/s 以上の 4 段階に分類した。一般に太平洋高気圧が支配的な夏季には風は穏やかであると考えられるが、6～8 月でも 7 m/s 以上の風が 60～70 % の頻度で記録されている。例えば、内陸部にある館野では約 40 % の頻度でしか 7 m/s 以上の風が吹かないことを考慮すると、八丈島は海上孤島であるため、1 年を通して比較的風が強いことがわかる。

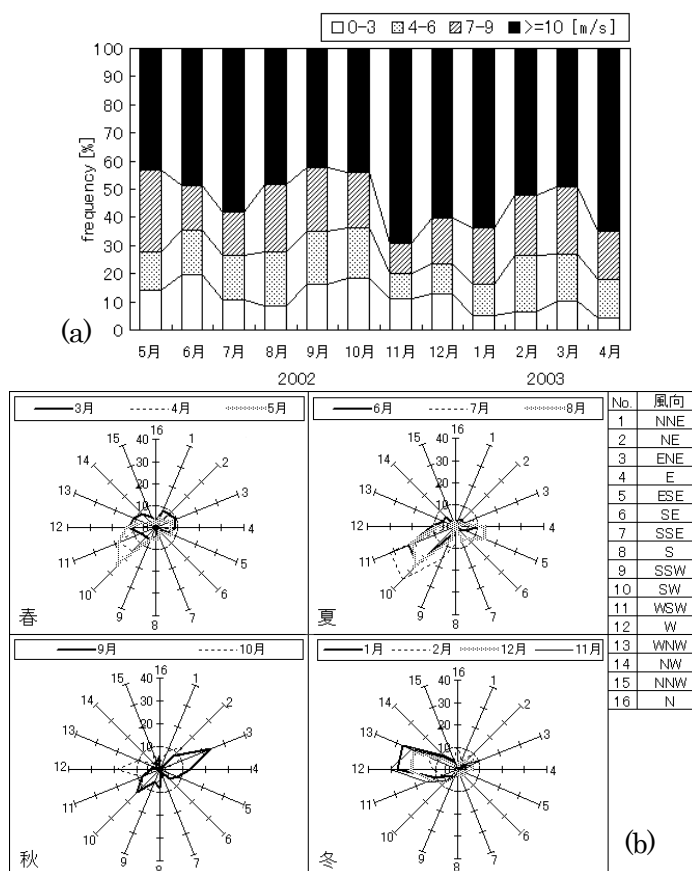


図3 2002年5月～2003年4月の八丈島925hPa高層風
(a)風速の階級別頻度 (b)風配図

風配図を図 3b に示す。風向の特徴から、季節を春：3～5 月、夏：6～8 月、秋：9～10 月、冬：11～2 月に分けた。高層風データの風向は 360 度表記で与えられるが、ここでは 16 方位で示した。

特徴的なのは、一年を通して北西と南東の風が吹くことはほとんどないことである。季節による風向の特徴としては、夏季は太平洋高気圧や台風による南西風が支配的であり、冬季は西高東低の冬型の気圧配置が安定しやすいため、ほとんど西よりの風が吹いている。春と秋には、高気圧と低気圧とが交互にやってくるため風向のばらつきが大きい。春は南西の風が多く、時には北東の風が吹いている。秋には東よりの風と西よりの風が同じ程度で吹いている。

図 4 に 2001 年 1 月から 2005 年 9 月までの全ての火山ガス観測局における高濃度 SO₂ 発生頻度を示す。ここでは SO₂ の環境基準である 1 時間値 0.1 ppm 及び、その 10 倍の 1 ppm を高濃度の基準とする。1 ppm も基準としたのは、三宅島では数 ppm の濃度が観測される場合があるためである。(a)～(n)の各図において、実線が 0.1ppm 以上、破線が 1ppm 以上の発生頻度を表す。

図 3a に見られるように、三宅島雄山付近の風は一年を通して強いので、風向の季節特性が各局における各月の高濃度 SO₂ の発生頻度に大きな影響を与えることになる。三宅島山麓部の火山ガス環境は以下の通り要約できる。(1)火口の東～南東部 (C1, C2, A2) では高濃度となる頻度が冬季に非常に高い。(2) 南西部 (C4, D3) では、一年を通して高濃度の発生頻度が比較的高い。(3) 東北東部 (B1) では冬だけでなく、夏季も高濃度発生頻度が高い。(4) 北東部 (D1) では春・夏季の高濃度発生頻度が高く、秋・冬季は低い。(5)北 (A1) と南東部 (C3) における高濃度発生頻度は高くない。(6) 南東部の A2 と C3 局の間に位置する D2 局では、高濃度発生の特徴は A2 局に類似であるが、発生頻度は約 1/3 と明らかに低く、1ppm 以上の高濃度の発生頻度は一年を通して高くない。(7) 西南西部の D4 局は、隣の A3 局と高濃度発生の傾向が類似であるが、頻度は 1/2 程度である。

4. 地上観測衛星によるハザードマッピング

植物が火山ガスの影響をよく反映するという仮定のもと、地球観測衛星の植生指数 (NDVI) 画像を利用してハザードマッピングを行うことにより、三宅島全域の火山ガス環境を示す。

NDVI 画像は、植物が可視光をよく吸収するのに対して近赤外域をよく反射する性質にもとづいて考案された、植物の量や活性度を調査するのに適した画像である。規格化することで地形の起伏による陰の影響や大気の影響を軽減することができる。NDVI 画像は次式から求められる。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

ここで、VIS と NIR にはそれぞれ可視と近赤外バンドの DN 値を割り当てる。Terra/ASTER の場合は、それぞれバンド 2 と 3N を、JERS-1/OPS の場合はバンド 2 と 3 を割り当てる。NDVI が大きいと白く表示され、これは植物の量が多く、活性度が高いことを示す。NDVI が小さい場合は黒く表示され、これは裸地や水面を表す。

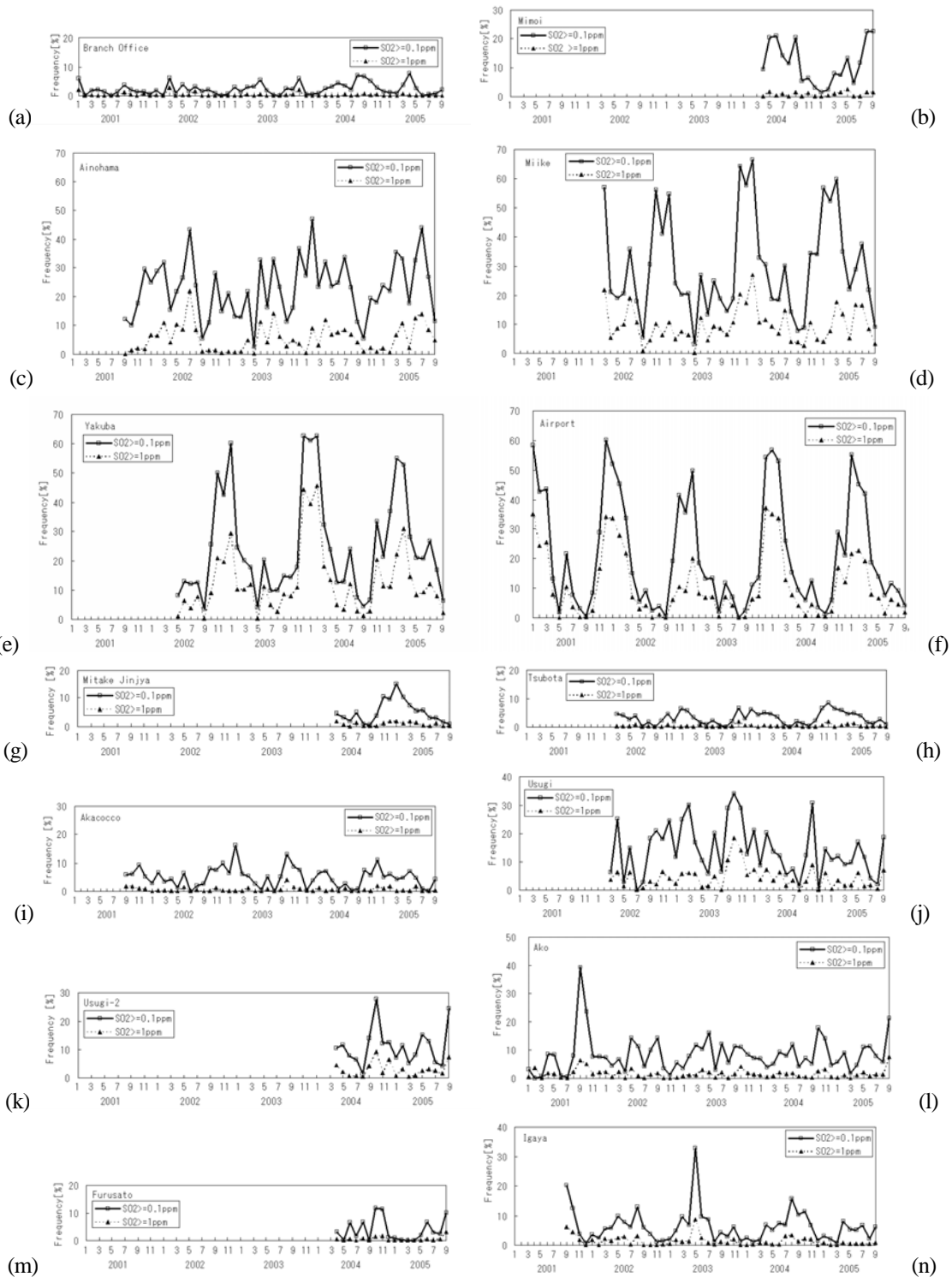


図4 2001年1月～2005年9月の各火山ガス観測局における高濃度SO₂発生頻度
 (a) 支庁 (b) 美茂井 (c) 逢の浜 (d) 三池 (e) 役場 (f) 空港 (g) 御嶽神社 (h) 坪田
 (i) アカコッコ (j) 薄木1 (k) 薄木2 (l) 阿古 (m) ふるさと (n) 伊ヶ谷

式(1)より求めた OPS(NDVI)画像を図 5a に示す。噴火後の ASTER(NDVI)画像を図 5b に示す。図 5a は 2000 年の三宅島噴火以前は島のほとんどが植物に覆われていたことを示している。黒く表示されている部分は、海や池などの水面や火口付近の裸地、南西部の溶岩流及び東側にある三宅島空港や道路などである。一方、図 5b の ASTER(NDVI)画像の島内の大局的な濃淡の分布をみると、島の東部と南西部では山麓まで暗い領域が広がっている。この NDVI が小さい領域は、高濃度 SO₂ が観測される割合の高い山麓局の位置と一致しており、火山ガスによる植生へのダメージが大きい領域であることが示されている。また、支庁局と伊ヶ谷局の間に位置する北西部や、アカコッコ局や坪田局がある南東部は明るく表示されており、他の方向に比べると植物へのダメージが少なく、植生の量や活性度が高いことがわかる。なお、植物の葉の表面が降灰に覆われると植生指数が低下するが、2000 年 9 月中旬以降の三宅島噴煙は白っぽい噴煙が主で降灰はほとんどみられないことや 2003 年 4 月 5 日に三宅島島内で降雨量 88 mm が観測されていることから、ここで使用した ASTER データには植物表面の火山灰の影響はないと考えられる。

衛星画像に示される植物の状態は積算的な火山ガスの影響を反映しているので、火山ガス観測局における SO₂ 濃度の 2002 年 5 月～2003 年 4 月の年平均値を求めた (表 1)。環境基準では 1 時間値が 0.1 ppm を超えないことと定められていることから考えると、年平均値が 0.1 ppm を超えている逢の浜局、三池局、村役場局、空港局、薄木局は非常に高濃度の SO₂ が長時間観測される地域である。一方、環境基準の長期的評価で基準値として示されている 0.04 ppm 以下を満たしている支庁局と坪田局は火山ガスの影響をあまり受けない地域といえる。

表 1 火山ガス観測局における SO₂ 濃度年平均値 (2002 年 5 月～2003 年 4 月)

局名	支庁	逢の浜	三池	村役場	空港	坪田	アカコッコ	薄木	阿古	伊ヶ谷
SO ₂ [ppb]	11	143	279	280	166	17	29	120	46	40

2000 年の三宅島噴火前後の植生分布の変化からハザードマップを作成するために、図 5 に示した OPS (NDVI)画像と ASTER (NDVI)を利用した。これらは異なる衛星/センサのデータなので、海岸線や溶岩流など 8 点の基準点を指定して位置合わせを行った。その後、OPS(NDVI)画像と ASTER(NDVI)画像の差を dNDVI として計算した。火山ガスの影響がない部分の植生指数が OPS(NDVI)と ASTER(NDVI)とで等しいと仮定すると、火山ガスによる植物へのダメージが大きくて、ASTER 画像で植生指数がより小さくなるほど dNDVI が大きくなる。

ハザードマップは、火山ガスの危険が非常に高い地域を赤、高い地域をオレンジ、あまり高くない地域を藤色、危険はほとんどない、もしくはもともとの NDVI が小さかった領域を青となるように色分けした。水面や道路などの領域のマスク画像は JERS-1/OPS の近赤外バンドを用いて作成した。このようにして作成したハザードマップを白黒化したものを図 5c に示す。カラーの原画はホームページ[9]に掲載している。火口や溶岩流、空港などのマスクは不完全であるが、識別できる。山頂部の北西部付近のマスク領域は、OPS 画像で陰の領域である。島の東部と南西部

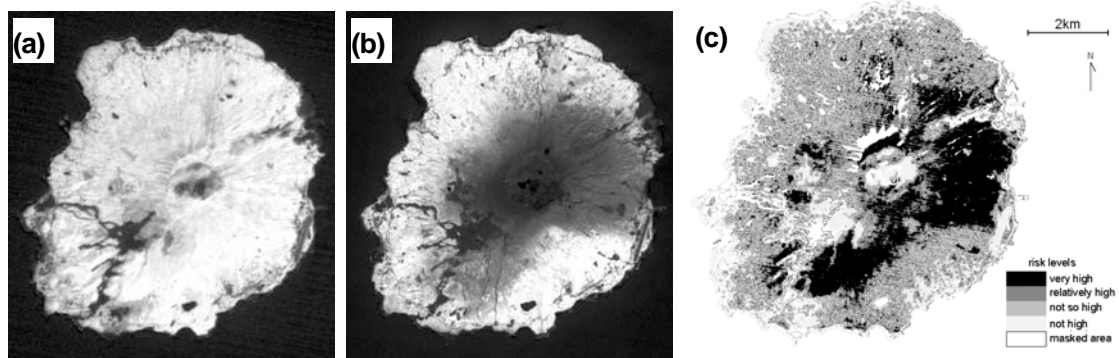


図5 (a) 1994/4/3 OPS(NDVI) (b)2003/4/7 ASTER(NDVI) (c)植生指数差画像による高濃度火山ガスハザードマップ

では、非常に危険なことを示す赤色の領域が海岸部まで達しており、高濃度 SO_2 の発生割合（図4）や SO_2 濃度の年平均値（表1）が高い局の位置とよく対応している。一方、島の北西部と南東部では、赤やオレンジの領域は火口から標高の高い位置までしか見られない。図3bの風配図に示したように、一年を通して北西と南東の風が吹くことは非常に少ないためであると考え。また、ハザードマップによって、ASTER(NDVI)画像だけからの判断では火山ガスの影響が比較的小さいと思われたアカッコ局の周辺も火山ガスの影響を受けていることがわかる。このように、地球観測衛星画像を用いて火山ガスハザードマップを作成することにより、島内全域の火山ガス環境を明示することができる。ただし、NDVI画像を用いて作成したハザードマップは、もともとNDVIが小さかった領域については周辺の状況（山腹側の植生が十分にあった領域）から外挿推測して判断する必要がある。また、NDVI画像は積算的な火山ガス環境を表していることに注意してはならない。今後、火山ガス濃度との定量的な関係づけや衛星画像同士の較正、元来植物に覆われていなかった領域の完全なマスク処理を行うことにより、さらに完成度の高いハザードマップとなりうる。なお、本ハザードマップは三宅村によって作成された三宅島防災マップ[10]の基礎資料として役に立った。

図6に2005年5月の三宅島現地調査時に撮影した映像を示す。図6a-dは東京都三宅環状線からの撮影映像であり、図6e-fは錆ヶ浜を出航した船から撮影した映像である。可視画像では植生は暗く写り（図6a-c）、近赤外画像では植物は近赤外光を良く反射するため白く写る（図6d-f）。裸地とのコントラストが大きいため、植生域を捉えやすい。東部の坪田高濃度地区（図6a）や南西部の阿古高濃度地区（図6b）では、山麓において下草は生えてきているものの、一面立ち枯れた木が多く見られた。一方、他の地域の山麓部では（図6c-f）、杉が立ち枯れている以外は通常の植生が見られた。また、比較的標高の高い位置まで植物に覆われていることがわかった。山麓部からの植生の観察によって、図5cに示す三宅島火山ガスハザードマップが現地の植生状況に矛盾しないことを確認した。なお、2005年5月の現地調査時に撮影した映像は、上述したホームページ[9]に掲載している。



(a) 坪田高濃度地区 (可視)



(b) 阿古高濃度地区 (可視)



(c) 伊豆—神着 (可視)



(d) C3 坪田局 (近赤外)



(e) 阿古—鏑ヶ浜 (近赤外)

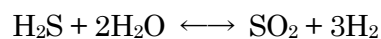


(f) 伊ヶ谷—伊豆 (近赤外)

図6 地上観測映像

5. おわりに

三宅島の火山ガスは活発な火山活動で放出される高温型ガスである。火山から放出される火山ガスの化学組成はマグマの上昇・結晶化における圧力と温度に依存する。火山ガスにもっとも豊富に含まれているのは水蒸気であり、そのほかに CO_2 , SO_2 , H_2S , H_2 , HCl , HF , He などを含んでいる。硫黄については、周囲環境（圧力と温度）によって化学平衡が移動する：



H_2S のモル分率は低温・大気圧の状態が増加するが、高温ではそれは支配的ではない。三宅島や桜島のような活発な火山から放出される高温型の場合、主な成分は SO_2 である。

SO_2 , H_2S の分子量は両方とも空気よりも大きい。大気中に放出されるまでに冷却される低温型ガスの場合、水蒸気は凝結して取り除かれ、結果として H_2S が高濃度となる。高濃度 H_2S を含む気塊は、もし風がなければ低い場所へと流れてくぼ地に溜り、中毒事故の原因となる。この低

温型火山ガスへの注意が、従来の火山ガスの危険性に関する解説では述べられてきた。

一方、ここで注意しなくてはならないのは、火山から放出されたガスの挙動はその温度に強く影響されるということである。三宅島や桜島、阿蘇のような活発な火山から放出される高温型ガスの場合、その温度は周囲大気よりも十分に高く、SO₂の混合比は比較的小さい。したがって、もしそれほど風が強くないならば、ガスは周囲空気を取り込みながら周囲温度とバランスする高度まで上昇する。このような状況下では、様々なスケールの乱流の方が分子拡散よりも支配的である。つまり、高温型火山ガスの場合に最も警戒すべきは強風による吹きつけ・吹き降ろしによる高濃度発生である。

最後に、2006年6月から活発化した桜島昭和火口付近の噴火活動に関して、ホームページ[11]を立ち上げました。SiPSEによる3D画像を用いた昭和火口付近の新しい火口や周囲の位置関係の説明、可視・近赤外撮影による噴煙映像、中間赤外バンドの衛星画像などをご覧いただけます。今後、映像や画像を随時追加していく予定です。このページには、鹿児島市立黒神中学校の出水澤孝洋校長先生が撮影・ご提供くださいました6月9日以降の噴煙映像・動画のアルバムや鹿児島県立博物館の桑水流淳二先生が撮影・ご提供くださいました6月4日の噴煙映像も掲載させていただきます。

謝辞

本稿執筆の機会を与えていただきました、鹿児島大学教育学部教授・八田明夫先生に心からお礼申し上げます。

三宅島島内の火山ガスデータをご提供いただきました東京都に感謝いたします。ASTER データは(財)資源・環境観測解析センターとの共同研究でご提供いただきました。

鹿児島大学産学官連携推進機構客員教授・木下紀正先生、熊本県天草市立御所浦北中学校教諭(鹿児島大学教育学部附属教育実践総合センター研究協力員)・金柿主税先生をはじめとする鹿児島大学噴煙火山ガス研究グループの皆様にご心より感謝いたします。地上観測衛星データによるハザードマップの作成について、鹿児島大学副学長・矢野利明先生および鹿児島大学工学部機械工学科の卒論研究として熱心に取り組まれた芝貴章氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 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, 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**, pp.168-180, 2001.
- [2] 三宅島火山の SO₂ 放出量 : <http://staff.aist.go.jp/kazahaya-k/SO2average.htm>
- [3] Sing Kagoshima : <http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/sing/>
- [4] N. Iino, K. Kinoshita, A. Tupper and T. Yano, Short-wave and mid-infrared imagery to distinguish silicate dusts and volcanic aerosols from meteorological clouds, Proc. SPIE **5652**, pp.48-56, 2004.

- [5] N. Iino, T. Yano, K. Kinoshita, M. Koyamada and S. Torii, Satellite analysis and mesoscale behaviour of advection of volcanic plumes and gas from Miyakejima, Japan, *Int. J. Environmental Technology and Management* **4**, pp.253-265, 2004.
- [6] 火山ガスのページ : http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/volc/gas/public/index_p.html
- [7] 木下紀正, 火山ガスの正しい理解を ―三宅島噴煙活動をめぐって―, *科学* **10**, pp. 1277-1279, 2001. : 木下紀正, 飯野直子, 坂本昌弥, 金柿主税, 三宅島火山ガスの動態と防災体制, 科研費特定領域「火山爆発のダイナミクス」2005年度研究成果報告書, pp.406-414.
- [8] 飯野直子, 衛星画像と気象データを用いた大気エアロゾルの輸送解析と高濃度火山ガスのハザードマッピング, 博士論文 (鹿児島大学、理工論第 32 号、2004 年 9 月) : 小山田恵, 木下紀正, 寺田暁彦, 飯野直子, 金柿主税, 三宅島島内の火山ガス高濃度事象と八丈島高層風の特徴, *天気* **50**, pp.553- 559, 2003 : N. Iino, K. Kinoshita, M. Koyamada, C. Kanagaki and A. Terada, Analysis of high volcanic gas concentrations at the foot of Miyakejima volcano, Japan, *J. Natural Disaster Science* **25**, pp.85-91, 2004 : 飯野直子・木下紀正・矢野利明, 三宅島における高濃度火山ガス事象の地域特性, *自然災害科学* **23**, pp.505-520, 2005 : N. Iino, K. Kinoshita, T. Yano and S. Torii, Estimation of Miyakejima volcanic gas hazards using vegetation index images, *Proc. 11th CEReS Int. Symp. Remote Sensing, Chiba, Japan*, pp.105-110, 2005.
- [9] 三宅島高濃度火山ガスに関する研究 : <http://ese.mech.kagoshima-u.ac.jp/miyake/>
- [10] 三宅村防災のしおり : <http://www.miyakemura.com/entry/bosai.htm>
- [11] 桜島昭和火口付近 2006 : <http://ese.mech.kagoshima-u.ac.jp/sakurajima06/saku06.htm>