

三宅島における高濃度火山ガス事象の地域特性

飯野直子*・木下紀正**・矢野利明*

Regional characteristics of high concentration events of volcanic gas at Miyakejima

Naoko Iino *, Kisei Kinoshita ** and Toshiaki Yano*

英文要旨

The purpose of this study is to clarify the regional characteristics of high concentration events of sulfur dioxide (SO₂) at Miyakejima and to provide basic information for volcanic gas disaster prevention based on the wind and synoptic chart, which might be useful for the returning of inhabitants. We discuss the continuous measurement SO₂ data at the foot and flank of Miyakejima volcano, in conjunction with upper wind data at Hachijyojima near-by, synoptic charts, atmospheric conditions and satellite images of volcanic clouds and of the distribution of vegetation. The following results are obtained. The regional characteristics of high SO₂ concentrations are summarized as follows. The winter monsoon wind brings high SO₂ concentrations for many hours to the stations located east of the volcano. At southwest stations, high concentrations of SO₂ are maintained considerably long due to stationary fronts, though the concentration level is lower than that for causes of stations located east. For other directional stations, the position of typhoon and deep low pressure system accompanying cold front, and the path of them and of travelling high pressure system dominantly affects the high SO₂ concentrations. The frequency distribution of high SO₂ concentration events corresponds well to the distribution of vegetation index shown in an image of Terra/ASTER.

キーワード：二酸化硫黄，山岳波，地上天気図，Terra/ASTER，植生指数

Key words: sulphur dioxide, mountain lee wave, synoptic chart, Terra/ASTER, NDVI

1. はじめに

2000年7月8日に爆発的な噴火活動を開始した三宅島(図1)は多量の火山ガスを放出しつづけている。これまでの桜島や阿蘇の研究より、活発な噴煙活動で放出される高温型火山ガスは噴煙と挙動を共にするとみなすことができる(木下・他, 1994, 1998, 1999, 2000, 2003, Kinoshita et al., 2001)。三宅島島内の高濃度火山ガスに関する問題に対して、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の地上連続測定や高層風データなどを用いて高濃度SO₂事象と風との対応について解析を行ってきた(飯野・他, 2002, 2003, 小山田・他, 2003a, b)。その結果、強風による吹き降ろしが山麓における高濃度SO₂事象の主な原因であることがわかった。このような結論は東京都災害対策本部の報告書(東京都, 2003)でも確認されている。

本研究は高濃度SO₂の地域的な特徴を明らかにし、高濃度SO₂時の気象状況を調べることで、帰島後の火山ガス災害を防ぐための基礎的情報を提供することを目的としている。山麓及び山腹におけるSO₂連続測定データを解析し、高濃度SO₂が記録されたときの八丈島高層風との関係や地上天気図に示される気圧配置のパターンを調べた。強風時以外の高濃度事象や風下方向と測定局方向のズレが大きい場合については噴煙の衛星画像や大気の状態なども調べた。また、Terra/ASTERによる島内の植生分布を調べることで、島内全域の火山ガス環境について考察した。

* 鹿児島大学工学部機械工学科

** 鹿児島大学教育学部物理学教室

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kagoshima University

** Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University

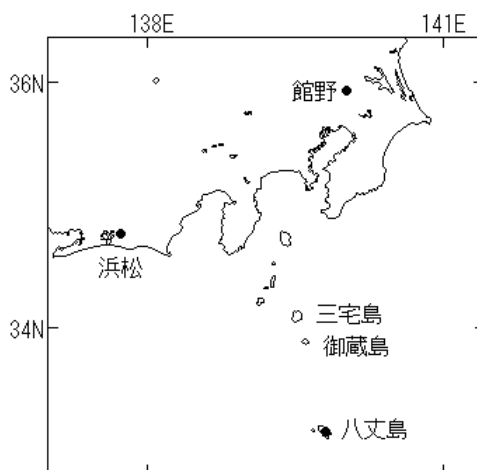


図1 三宅島および周辺の高層風観測点 (●) と web カメラが設置された御蔵島の位置.

2. 使用データと解析方法

2.1. 三宅島における SO₂ の連続測定データ

東京都等による三宅島島内の固定観測点での火山ガスの連続観測は、2000年12月の3点(A1:支庁局, A2: 空港局, A3:阿古局) から始まり、2001年9月には3点 (B1: 逢の浜局, B2: アカコッコ局, B3:伊ヶ谷局) が追加、2002年3月には4点 (C1:三池局, C2:村役場局, C3:坪田局, C4:薄木局) が追加された。各観測点の位置を図2に示し、各観測点の正式名称と本稿での略記名、図やグラフで使用する記号及び各観測局の観測開始時期を表1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の村役場局のデータが取られたのは同年5月以降なので、2002年5月～2003年4月を1年間を通しての詳細解析の期間とした。

2002年3月6日～同年6月19日には、内閣府により可搬型の観測器によるSO₂の連続観測が行われた。観測局の位置を図2に●で示し、各観測点の名称(3D～9A)を右側の四角形内に示した。なお、山腹局及び山麓局ではSO₂濃度データの5分値と1時間値が得られているが、本稿では1時間値のみを解析対象とした。SO₂に係わる環境基準は1時間値が0.1ppmであるが、三宅島島内では非常に高濃度となることが多いので、高濃度事象の基準として0.1ppm以上と1ppm以上を考えた。

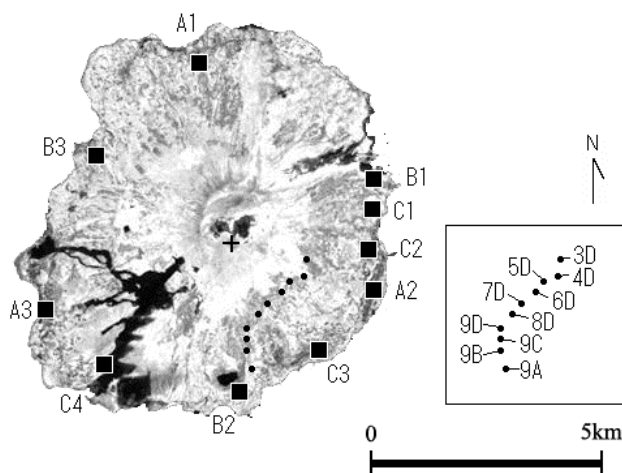


表1 三宅島山麓の火山ガス観測局と設置時期.

記号	観測局名	略記	観測開始時期
A1	三宅支庁	支庁	2000年12月
B1	逢の浜温泉	逢の浜	2001年9月
C1	三池消防器具置場	三池	2002年3月
C2	三宅村役場	村役場	2002年5月
A2	三宅島空港	空港	2000年12月
C3	坪田公民館	坪田	2002年3月
B2	アカコッコ館	アカコッコ	2001年9月
C4	薄木生コン工場	薄木	2002年3月
A3	阿古今崎	阿古	2000年12月
B3	伊ヶ谷老人福祉館	伊ヶ谷	2001年9月

図2 三宅島山麓 (■) と山腹 (●) の火山ガス観測局の位置 (山麓の局名は表1に示す。山腹の局名は四角の枠の中)。

2.2. 高層風

三宅島の地表における火山ガス濃度は雄山（814m）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、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 時間毎に行われており、風データは全ての観測時に得られる。温度と湿度は 9 時と 21 時の 12 時間毎に観測されている。

2.3. 衛星データ

(1) NOAA/AVHRR

鹿児島大学大学院連合農学研究科の衛星画像受信装置（ELM 社製）で受信した気象衛星 NOAA 搭載の AVHRR センサデータを噴煙検出に使用した。2000 年 9 月半ば以降の噴煙は、灰をほとんど含まない白色噴煙が主であるので、可視バンド（AVHRR-1）と近赤外バンド（AVHRR-2）の差画像が有効である。差画像では噴煙は白く、水雲は黒く表示される。これは火山性エアロゾルの粒径は水雲の粒径よりも小さいためであると考えられる。雲の種類によっては噴煙と同じように白く表示されることがある。しかし、この場合でも雲の種類の違いに敏感な短波長赤外バンド（AVHRR-3A）を含めて、Red: Green: Blue に AVHRR- 1: 2: 3A を割り当てたカラー合成画像を作成すると雲と噴煙とを区別できる（小山田・他, 2001, Kinoshita et al., 2003）。ただし、これらの波長帯は太陽光の反射を観測するため夜間には使用できない。2000 年 7 月 8 日の三宅島雄山山頂噴火以降、NOAA で捉えられた噴煙画像については、以下のホームページに掲載している。 <http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/miyake/index.htm>

(2) JERS-1/OPS と Terra/ASTER

JERS-1 は 1992 年に打ち上げられ、1998 年 10 月まで運用された。OPS センサでは可視から近赤外までの波長帯を地上分解能 18.3×24.2m の 4 バンドで観測していた。ASTER は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、地球観測衛星 Terra に搭載されている。可視・近赤外バンドの地上分解能は 15m である。

衛星画像を用いて 2000 年噴火前後の三宅島全体の植生分布を調べるためには、三宅島が雲や噴煙に覆われていない必要がある。また、季節変化による影響をさけるために、噴火の前後のデータは月日が近いことが望ましい。データ検索の結果、噴火前について 1994 年 4 月 3 日の OPS データを、噴火後については 2003 年 4 月 7 日の ASTER データを使用した。

これらのデータの可視バンドと近赤外バンドを用いて、近赤外と可視の差をそれらの和で割って規格化した植生指数（Normalized Difference Vegetation Index; NDVI）を計算した。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基づいて考案された、植物の量や活性度を調査するのに適した画像である。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 が小さい場合には黒く表示され、これは裸地や水面を表す。

3. SO₂ 濃度月平均値の 31 ヶ月間の変化と季節的特徴

2001 年 1 月から 2003 年 7 月までの山麓に位置する固定観測点 10 局における SO₂ 濃度 1 時間値の月平均値の推移を図 3 に示す。島内北部の支庁局（A1）及び東部の 4 局（B1, C1, C2, A2）の濃度は左軸で、その他の 5 局（C3, B2, C4, A3, B3）の濃度を右軸に示す。右軸のゼロ点は左軸の 1ppm の位置にずらしている。各観測局の観測開始時期は表 1 に示すとおりである。ここでは、SO₂ 濃度 1 時間値の時間変化と八丈島高層風の風向・風速の時間変化、9 時の天気図も参照しながら総合的に考察する。2001 年 1 月以降の SO₂ 濃度値及び高層風の時間変化のグラフは、NOAA 画像と合わせて 2.3 節で示したホームページに掲載している。また、2002 年 1 月から 9 月については小山田・他（2003b）で検討している。

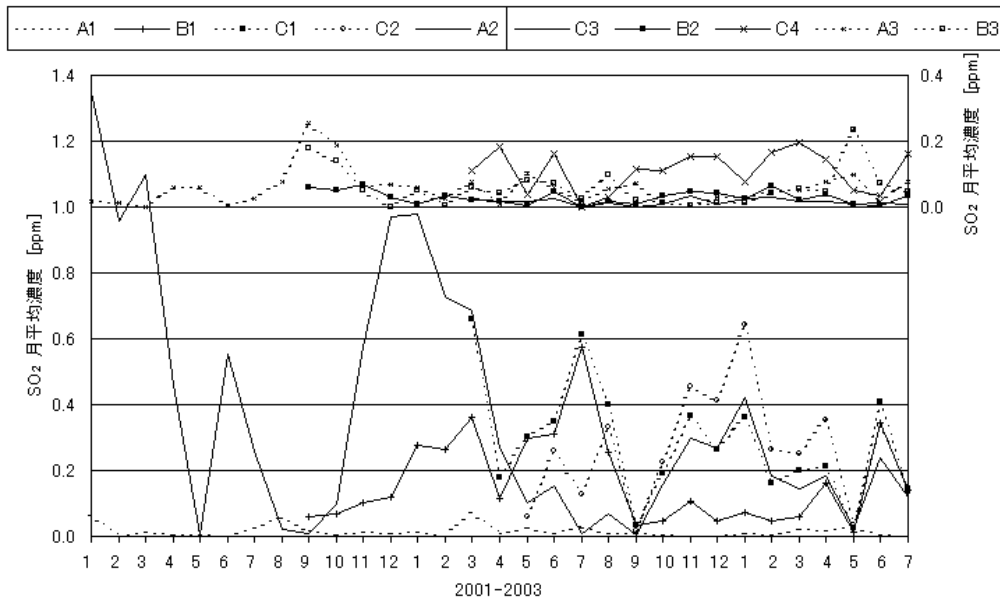


図3 三宅島山麓の火山ガス観測局におけるSO₂濃度月平均値の2001年1月～2003年7月の変化.

3.1. 東部の局

東部の4局(B1, C1, C2, A2)では、北西の季節風が卓越する冬季及び梅雨期や台風の通過時に強風による高濃度のSO₂が観測されている。月毎のSO₂濃度1時間値の変化から高濃度の継続時間をみると、冬季には1ppm以上の濃度が24時間以上継続する場合があります。軒並み継続時間が長いことがわかった。一方、梅雨期や台風通過時の高濃度事象は前線や低気圧、台風の動きによるため短時間で急激に高濃度となっていた。この場合の高濃度の継続時間はそれらの移動速度に依存する。SO₂濃度の長期的な傾向としては、空港局(A2)における31ヶ月間の月平均濃度の変化(図3)を見てわかるとおり、山麓で観測されるSO₂濃度の月平均値は季節変化を伴いながら年ごとに徐々に減少している。このことは風早・他(2003)のCOSPECを用いたSO₂放出量観測値の減少傾向と一致する。また、8月・9月、及び5月の月平均濃度は他の月に比べるとそれほど高くない。これは、8月・9月は太平洋高気圧に覆われると風が弱くなること、5月は移動性高気圧が次々に通過するため風向の変化が速く、高濃度SO₂になったとしても比較的短時間で終了するためであると考えられる。

3.2. 西部の局

島の西部に位置する薄木局(C4)・阿古局(A3)・伊ヶ谷局(B3)のうち、薄木局(C4)では、月平均値が0.1ppmを超える月が多く、期間を通して他の2局に比べて高い値を示している。SO₂濃度1時間値のデータより、薄木局(C4)では東部局ほどの濃度ではないが、高濃度の状態が継続する時間が比較的長いことがわかった。阿古局(A3)と伊ヶ谷局(B3)では春と秋に月平均値が0.1ppmを越える傾向がある。また、6章で述べるが、高気圧の移動に伴う風向変化によって、SO₂濃度のピークが観測される局が時計回り(C4→A3→B3)に移動する場合があった。

3.3. 北部及び南～南東部の局

北部の支庁局(A1)・南部のアカッコ局(B2)・南東部の坪田局(C3)の3局では、観測期間を通して低い濃度となっており、支庁局(A1)とアカッコ局(B2)では月平均値が0.07ppm以下、坪田局(C3)では0.03ppm以下である。SO₂濃度1時間値のデータから、これらの局では1ppm以上の高濃度となる時間数が他の7局に比べて少なく、継続時間もほとんど数時間程度で終了していることがわかった。

3.4. 桜島との比較

鹿児島市と東京都によって公表されている SO₂ 濃度測定結果の統計値を基に、桜島と三宅島の SO₂ 濃度を比較する。環境基準に基づく長期的評価は、1 日平均値の測定値につき、測定値の高いほうから 2% の範囲内にあるものを除外した値が 0.04ppm 以下であり、かつ日平均値が 2 日以上連続して 0.04ppm を超えないこととなっている。

桜島が活発に活動していた 1990 年度の統計値（鹿児島市,1991）では、桜島島内南部に位置する有村局の SO₂ 濃度の年平均値は 0.027ppm であり、1 時間値が 0.1ppm を超えた時間の割合は 5.7% となっている。年平均値は基準値より低くなっているが、日平均値 0.04ppm 以上が 2 日以上連続したことがあるため環境基準は非達成となっている。

一方、三宅島火山ガスに関する検討会報告書（東京都,2003）に掲載されている 2002 年 3 月から 2003 年 2 月までの統計値をみると、SO₂ 濃度の年平均値と 1 時間値が 0.1ppm を超えた割合は、三宅島南部に位置するアカコッコ局(B2)が 0.03ppm と 5.4 % で桜島有村局と同程度である。北部の支庁局(A1)、南東部の坪田局(C3)ではそれよりも低く、支庁局(A1)では 0.02ppm と 2.1 %、坪田局(C3)では 0.02ppm と 3.2 % である。ちなみに、三宅島南西部の阿古局(A3)と北西部の伊ヶ谷局(B3)では、0.04ppm, 6.8 % と 0.04ppm, 5.5 % でちょうど基準値のレベルである。それ以外の東部の 4 局と薄木局(C4)では年平均値が 0.1ppm を超えており、1 時間値が 0.1ppm を超えた時間の割合は 10% を超えている。これらの地域では SO₂ が高濃度となることが多いことがわかる。三宅島島内全ての局で日平均値が 0.04ppm を超えた日が 2 日連続したことがあるため長期的評価の環境基準を達成していない。なお、東京都（2003）の報告書では、短期的影響（急性影響）と長期的影響（慢性影響）の両方について、国内外の多くの文献に基づいて健康影響からみた SO₂ 濃度の目安を設定し、詳しく検討している。

4 高濃度 SO₂ 事象の地域的特徴と風系

高濃度 SO₂ 事象と高層風との関係を地域毎に考察するために、八丈島 925hPa 風データが取られた時刻について、各観測局で SO₂ 濃度 1 時間値が 1ppm 以上になる場合の割合と、そのときの風向・風速の平均と標準偏差を計算した。以下では 10 局での観測体制が整った 2002 年 5 月から 2003 年 4 月の 1 年間を解析期間とした。また、この期間の高濃度事象と高層風との対応について、0.1ppm 以上を高濃度事象と定めた場合についても計算した。

各観測局において高層風観測時に 1ppm 以上と 0.1ppm 以上の SO₂ 濃度 1 時間値を記録した割合及び風向と風速の平均と標準偏差、火口の方位を表 2 に示す。風速については 1ppm 以上と 0.1ppm 以上の場合で傾向に大きな違いは見られなかった。表 2 の 1 ppm 以上のデータを図 4a,b に、0.1 ppm 以上のデータを図 4c,d に示す。扇の面積は各観測局における事象の観測割合を表し、向きは火口上空からの風向の平均、角度は±標準偏差を表す。例えば、図 4a 中の村役場局（C2）の面積は観測割合 10 % であることを示している。

1 ppm 以上と 0.1 ppm 以上の場合を比べると、アカコッコ局(B2)と薄木局(C4)以外の 8 局では、0.1ppm 以上の場合で風向の標準偏差が大きくなる傾向があるものの、その他の値や傾向には特に大きな違いは見られない。以下では基本的な高濃度 SO₂ の地域的特徴を明らかにするために、個々の事例を考察する場合には 1 ppm 以上の場合に限定した。なお、アカコッコ局(B2)と薄木局(C4)では風向の平均は 1 ppm 以上と 0.1 ppm 以上とで両局とも 35 度異なっている。この違いについては地形の影響などまで含めて詳細に考察する必要があると思われるが、ここではこれ以上立ち入らない。

表 2 の結果や各観測局における SO₂ 濃度に対する風向と風速の散布図（図 5）を参考に、島の東部の局、南西部の局、その他の局に分けて論じる。東部の 4 局を除く 6 局は風向の標準偏差が大きな値を示すので、各事象に対応する 3 時間毎の天気図や他局での濃度の時間変化も参照しながら風系を考察した。

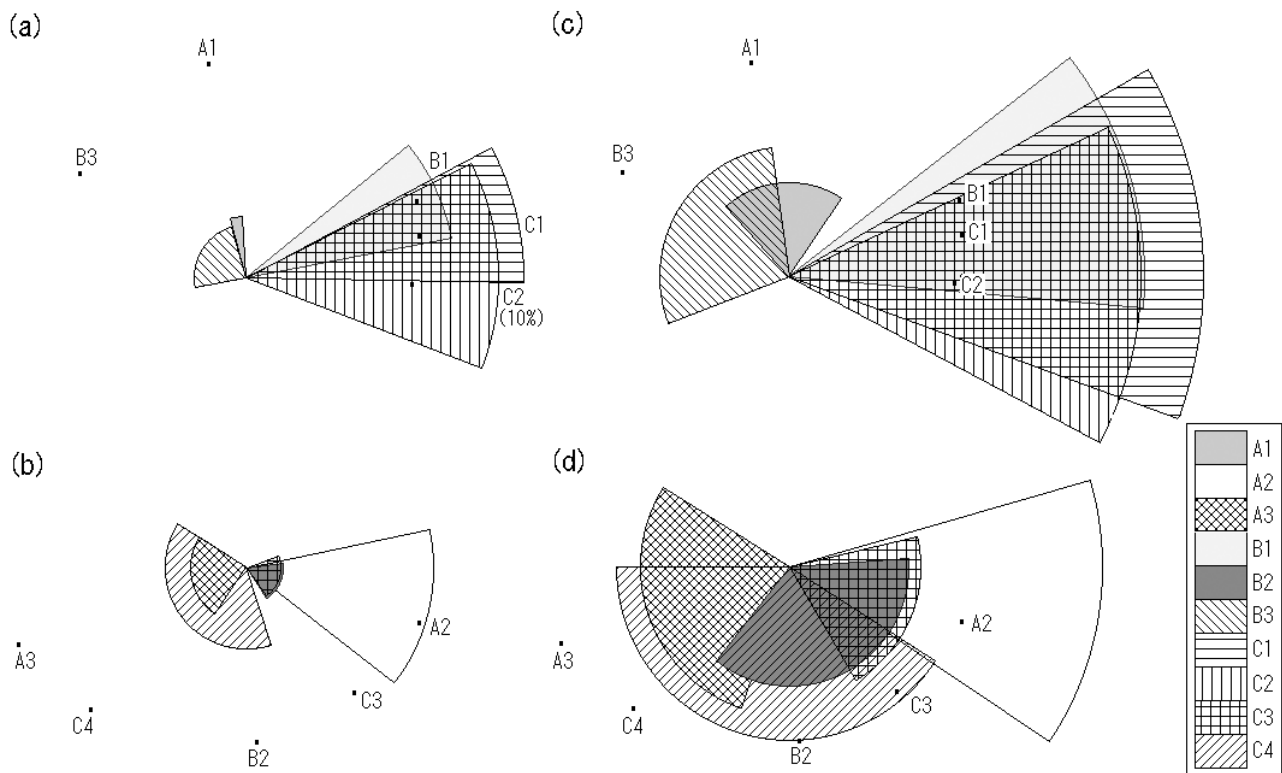


図 4 2002 年 5 月～2003 年 4 月の山麓の各観測局における高濃度 SO₂ 事象の発生割合と八丈島 925hPa 風との関係。1 年間の高層風・SO₂ データが共に得られた時間数に占める割合を面積で表す。(a)北半部の局での 1ppm 以上の割合, (b)南半部の局での 1ppm 以上の割合, (c)北半部の局での 0.1ppm 以上の割合, (d)南半部の局での 0.1ppm 以上の割合。

表 2 各山麓局からの火口の方位および高層風観測時の SO₂ 濃度 1ppm 以上と 0.1ppm 以上の観測割合と八丈島 925hPa 風の平均と標準偏差。

観測局名	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
観測局記号	A1	B1	C1	C2	A2	C3	B2	C4	A3	B3
火口の方位 [度]	170	245	256	272	288	320	357	47	71	123
有効観測時間 [hour]	1441	1338	1248	1415	1447	1409	1453	1225	1452	1455
SO ₂ 濃度が1ppm以上の観測時間数 [hour] (高層風欠測時は含まない)	2	53	88	142	82	4	4	37	13	11
SO ₂ 濃度が1ppm以上の割合 [%]	0.1	4.0	7.1	10.0	5.7	0.3	0.3	3.0	0.9	0.8
925hPa風向平均 [度]	171	245	256	267	283	287	296	52	78	122
925hPa風向標準偏差	5.7	14.0	14.1	24.2	25.0	38.9	32.3	70.3	44.3	42.5
925hPa風速平均 [m/s]	14.5	11.3	12.0	14.0	13.5	12.8	12.3	8.8	9.0	11.9
925hPa風速標準偏差	4.9	3.4	4.0	5.1	5.0	2.2	8.0	4.9	6.1	7.9
SO ₂ 濃度が0.1ppm以上の観測時間数 [hour] (高層風欠測時は含まない)	32	238	349	301	233	58	88	174	108	83
SO ₂ 濃度が0.1ppm以上の割合 [%]	2.2	17.8	28.0	21.3	16.1	4.1	6.1	14.2	7.4	5.7
925hPa風向平均 [度]	176	253	265	271	279	293	331	17	70	121
925hPa風向標準偏差	38.0	21.6	25.0	26.2	25.2	36.5	65.1	73.1	51.4	51.3
925hPa風速平均 [m/s]	11.3	11.7	12.8	13.1	13.3	9.3	10.3	9.2	9.8	8.0
925hPa風速標準偏差	6.7	4.8	5.1	5.3	5.2	4.8	5.7	5.8	5.2	5.5

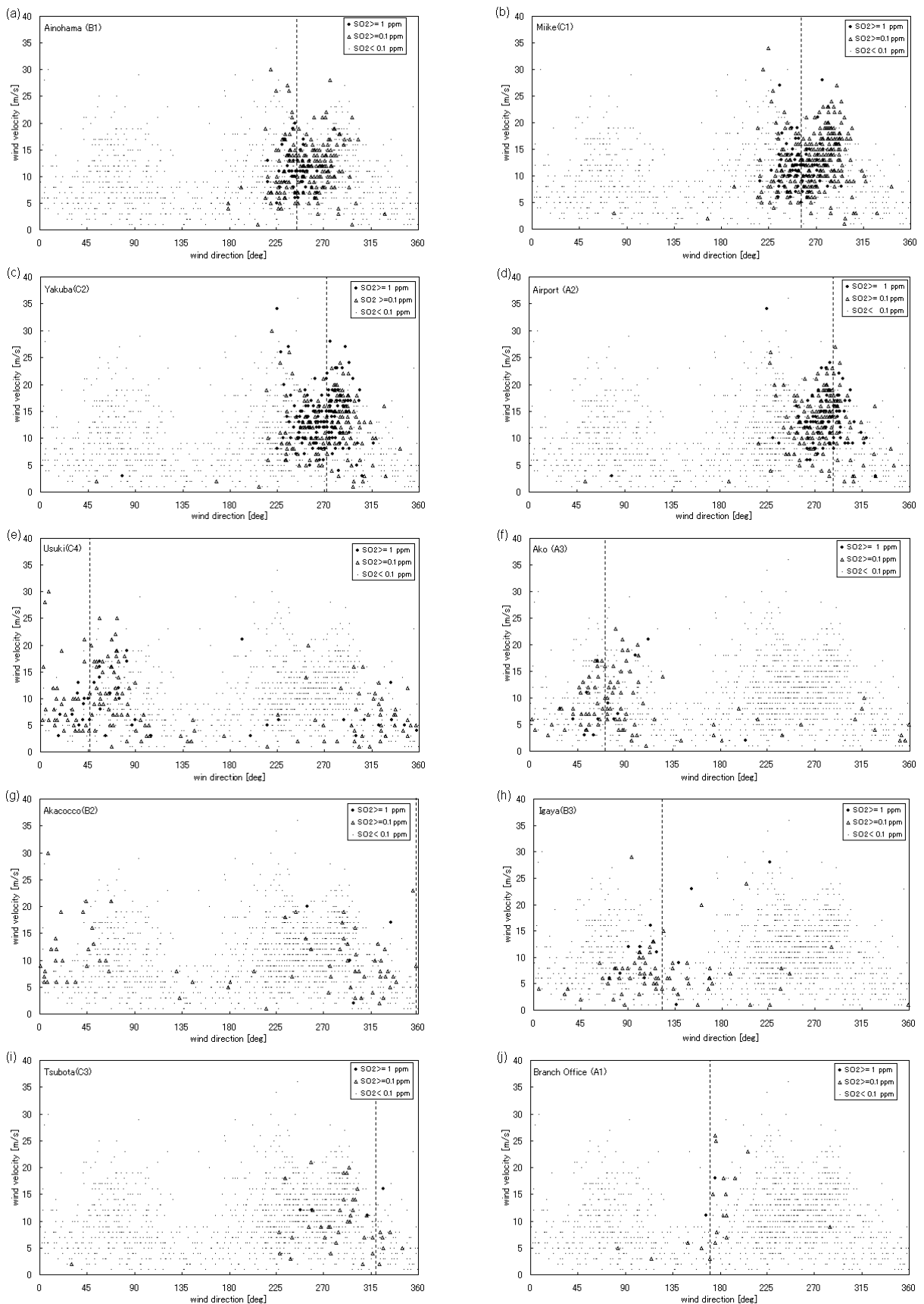


図5 高層風観測時に測定されたSO₂濃度に対する八丈島925hPa風の風向と風速の散布図。(a)逢の浜局(B1), (b)三池局(C1), (c)役場局(C2), (d)空港局(A2). (e)薄木局(C4), (f)阿古局(A3), (g)アカコッコ局(B2), (h)伊ヶ谷局(B3), (i)坪田局(C3), (j)支庁局(A1). ●: SO₂ ≥ 1ppm, ▲: 0.1ppm ≤ SO₂ < 1ppm, ×: SO₂ < 0.1ppm. 各局からの火口の方角を点線で示す.

4.1. 東部の4局（逢の浜 B1・三池 C1・村役場 C2・空港 A2）

島の東部に位置する逢の浜局（B1）、三池局（C1）、役場局（C2）、空港局（A2）の4局において高層風観測時のSO₂濃度に対する風向と風速の散布図を図5a~dに示す。1ppm以上の濃度を示す黒丸に注目すると、ばらつきはあるものの、各局からの火口の方向（図中の点線）に集まっている。東部の局の高濃度事象は強風による風下局への吹き降ろしが主因であることがわかる。NOAA画像でも冬季に東部局方向に直線状の噴煙が流れている様子が数多く捉えられている。また、三宅島の南南東約20kmに位置する御蔵島に設置されたwebカメラでは強風による山岳波で噴煙が吹き降ろされる様子を捉えている（小山田・他、2003a）。3章でも述べたように、東部の4局では冬季に高濃度事象が長時間継続することが多いが、これは冬型の気圧配置は安定で、風のシャワーが小さく風向変化も少ないためと考えられる。表2に示したように、1ppm以上の場合の風向の標準偏差は14~25度程度と小さい。東部で高濃度事象が観測された具体例を山腹の濃度との関係を含めて5章で取り上げる。

4.2. 南西の2局（薄木 C4・阿古 A3）

南西部に位置する薄木局(C4)と阿古局(A3)では、1ppm以上のSO₂濃度が観測されたときの風向の標準偏差が70.3度と44.3度と東部の局に比べて2~3倍大きく、3m/sの風速でも高濃度となる場合があった。両局における高層風観測時のSO₂濃度に対する風向と風速の散布図を図5e,fに示す。なお、薄木局（C4）におけるSO₂濃度の最高値は3.36ppmで、東部に位置する三池局(C1)の半分程度の濃度である。風速の標準偏差は東部の三池局(C1)・村役場局(C2)・空港局(A)と同程度であるが、風向のばらつきが大きい。特に薄木局（C4）では、火口の方位にあたる45度以外に315度にも多くのデータ点が見られる。

風向の標準偏差がこのように大きくなる原因を調べるために、薄木局(C4)と阿古局(A3)で1ppm以上が記録されている50事例について、3時間毎の地上天気図から高濃度事象時の気圧配置を調べた。その結果、台風や発達した単独の低気圧の中心付近が三宅島の南西~西に位置していた場合以外は、三宅島の北を移動する高気圧が次の三つのパターンで関係することがわかった。それぞれのパターンの典型的な天気図を図6に示す。これらの気圧配置では、等圧線にそって北東の風が吹きやすい（図6の三宅島付近の矢印）。

1. 単独あるいは複数の高気圧が東進する過程でその中心付近が三宅島の北に位置し、その周りの風が観測局方向に吹く場合。
2. 前線を伴う低気圧が東に移動して三宅島の東~南に寒冷前線が位置し、後に続く高気圧が西に位置する場合。
3. 三宅島の東~南に停滞前線が位置し、北を高気圧が通過している場合。

薄木局(C4)で高濃度が記録された事例の場合は、停滞前線が関係する3番目のパターンの気圧配置が多く見られた。そのため高濃度事象の継続時間が長くなり、3.2節で述べた月平均値が大きくなると思われる。一方、1番目と2番目の気圧配置の場合は、高気圧の位置や移動に伴う風向の時間及び空間変化が大きくなる。本稿では三宅島の南南東約110kmに位置する八丈島上空の高層風を三宅島火口付近の風として使用しているが、高気圧の周辺部で等圧線にそった風が吹くとき、実際に三宅島上空で吹いている風の風向と八丈島上空の風向が異なる可能性がある。また、低気圧や前線が通過する時の風の時間変化は大きく、バルーンによる高層風観測は短時間計測なので、必ずしも高層風データが1時間平均値を表しているとは限らないことに注意が必要である。今後、気象庁の領域客観解析データなどを利用した解析結果との比較・検討も重要と考える。

図5に示したように、南西部の2局においては並風時の高濃度事象が多く見られた。噴煙が山麓部まで吹き降ろすのはフルード数が1を超えると起こると考えられるが（内田・大屋、2003a,b）、飯野・他（2003）の計算方法でフルード数を計算した結果、0.4程度でも1ppm以上の濃度を記録している場合があった。このときの大気の状態は安定で、風速は3~6m/s程度であった。噴出口が火口の南側

に位置することや火口南東部の壁の高さが低くなっているという火口の条件，図2の溶岩流跡から推測されるように，観測局地点が谷間地形で観測局方向へ風が収束しやすくなっているため，高濃度をもたらす風向の範囲が広がっていることも要因と考えられる．先に述べた三宅島上空の風を八丈島高層風で代用する影響も含め，これらの点を考慮した詳細な検討は今後の課題である．

なお，島内の高濃度事象のメカニズムを明らかにするために，気象場予測モデルとラグランジュモデルによる拡散パートからなる100mメッシュの拡散モデルによるシミュレーション研究がSasaki et al. (2002)によって行われている．このモデルでは地形の効果も考慮されており，特定の数事例の高濃度SO₂についての大体の再現性が得られている．今後さらに多くの事例解析が期待される．

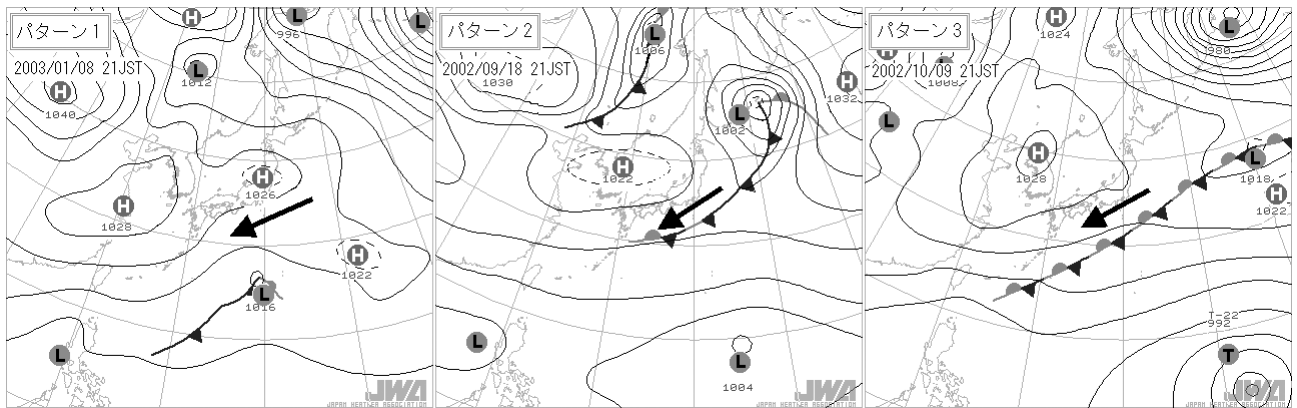


図6 南西部の局でSO₂濃度が高くなる気圧配置3パターンの典型例．(矢印は天気図から推測される三宅島周辺の風系．日本気象協会の地上天気図に基づく)．

4.3. その他の4局（支庁A1・伊ヶ谷B3・アカコッコB2・坪田C3）

北部，北西部，南部，南東部に位置する4局における1ppm以上の高濃度事象については，表2に示すように平均風速が10m/s以上となっている．これらの局でも強風時の風下に高濃度のSO₂がもたらされると考えられるが，図5に示すとおり，これらの局では1ppm以上のイベント数が少なく，1,2m/sで1ppm以上の濃度が記録された場合もあった．

北西部に位置する伊ヶ谷局（B3）で高濃度が観測される時の天気図のパターンは，台風や発達した低気圧の中心が三宅島の南西に位置する場合と移動性高気圧の中心が三宅島の北～北東に位置する場合であった．図4に示したように，南部のアカコッコ局（B2）と南東部の坪田局（C3）の扇は観測局方向よりも東へずれている．これは，アカコッコ局（B2）で高濃度が観測されたときの天気図は台風や前線を伴う低気圧の中心が三宅島のすぐ東に位置する場合であることから，八丈島付近では三宅島付近に比べて西風成分が大きくなるためと考えられる．坪田局（C3）で高濃度が観測された4例については他の局のようなはっきりとした特徴がなく，気圧配置と等圧線による風の推測が困難であった．事例を増やして検討する必要がある．

支庁局（A1）で高濃度事象が観測される割合は，他局に比べて非常に少ない（表2，図5）．1ppm以上の濃度が観測されたのは，2002年7月10日の9時と2003年3月1日の9時のわずか2回で，0.1ppm以上の場合をみても32回（2.2%）と，2番目に観測が少ない坪田局の58回（4.1%）に比べて半分程度であった．

3章でも述べたとおり，支庁局(A1)・坪田局(C3)・アカコッコ局(B2)では環境基準で定められた長期的影響の目安を満たしていることから，これらの局の方向では，他の局に比べて火山ガスに覆われる時間が少ないと考えられる．これは5章の図7cに示すASTERのNDVI画像からも示唆される．

5. 植生分布と火山ガス濃度との関係

図 7a,b,c に Terra/ASTER の VNIR 可視域のバンド 2 (0.63~0.69 μm), 近赤外域のバンド 3N (0.78~0.86 μm), バンド 3N とバンド 2 の差をそれらの和で割って規格化して求めた植生指数画像 (以後 ASTER(NDVI)とよぶ) をそれぞれ示す. 三宅島 2000 年噴火以前の 1994 年 4 月 3 日の JERS-1/OPS の NDVI 画像 (以後 OPS(NDVI)とよぶ) を図 7d に示す. NDVI 画像は規格化を行うことで, 近赤外画像に比べて地形の起伏による陰の影響が大幅に緩和されている. また, 波長の短いバンドには大気効果の影響が大きい, 規格化によってその影響も抑制されることが知られている (小野・他, 2001).

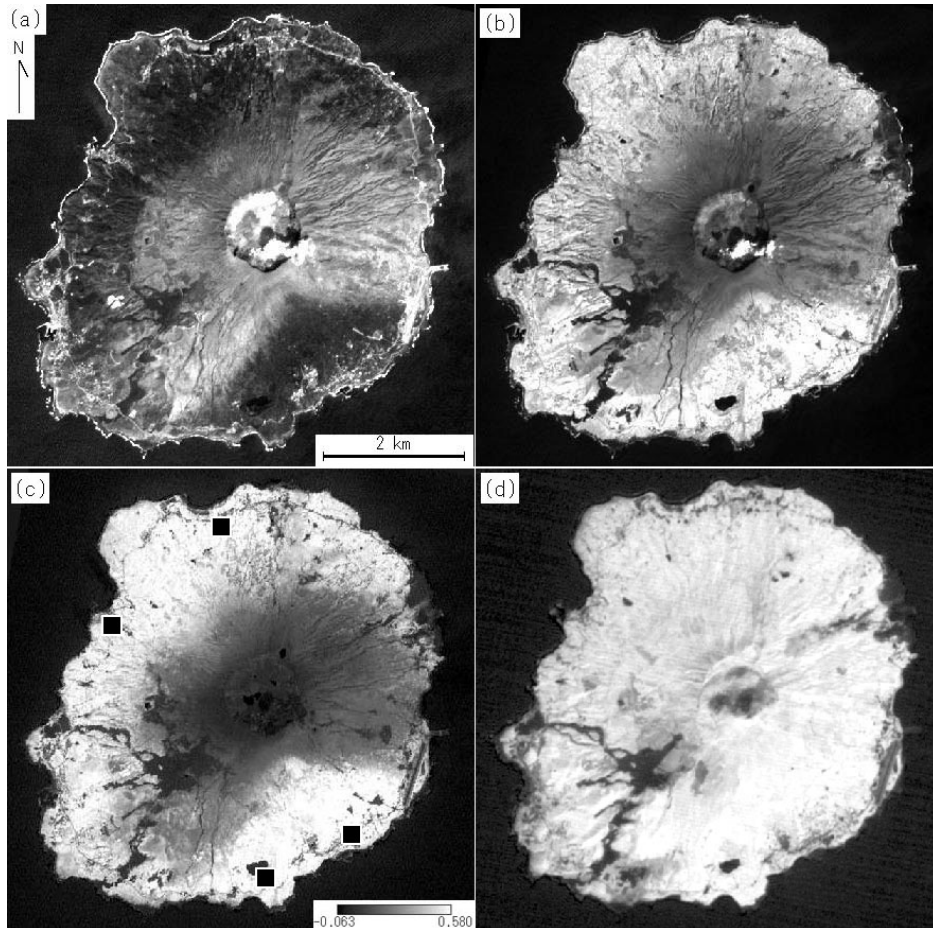


図 7 2003 年 4 月 7 日の Terra/ASTER 画像. (a)可視画像, (b)近赤外画像, (c)植生指数画像. (d)1994 年 4 月 3 日の JERS-1/OPS の植生指数画像.

ASTER の可視と近赤外画像には, 山頂付近に東へ流れている噴煙が白く表示されている. また, 島の周辺は打ち寄せる波による反射が大きいため, 白く縁取られて見えている. 水面は反射が小さいので暗く表示される. 可視画像では山頂付近の裸地や道路・空港などの反射が大きいため, それらが明るく表示され, 植物はこの波長域を吸収するため暗く表示されている. 一方, 近赤外画像では, 植物はこの波長域を良く反射するため明るく表示されている. 植生指数画像はコントラストがはっきりとしており, 加えて地形の効果が抑制されたため植物の分布が平面的に示されている.

OPS(NDVI)から, 噴火以前の三宅島はほとんどが植物に覆われていたことがわかる. ただし, 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の植生指数は低いと黒く表示されている. 一方, 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. これまでに述べてきた山麓で高濃度の SO_2 が観測される割合の高い局の位置と良く対応しており, これらの領域では火山ガスによる植生へのダメ

ージが大きいことが NDVI 画像からよくわかる。また、支庁局(A1)と伊ヶ谷局(B3)の間に位置する北東部や、アカコッコ局(B2)や坪田局(C3)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と考えられる。なお、植生指数は植物の葉の表面が降灰に覆われることで低下するが、三宅島噴煙は 2000 年 9 月中旬以降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 日には降雨量 88mm が三宅島島内で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ほとんどないと思われる。

6. 山腹と山麓の SO₂ 濃度値の関係

2002 年 3 月 6 日から 6 月 19 日まで三宅島南東部の山腹 3D~9A の 10 点 (図 2) において可搬型観測器で観測された SO₂ 濃度値 1 時間値と山麓の固定観測点の濃度値との関係を論じる。SO₂ 濃度 1 時間値のデータより、以下のことがわかった。3D~5D 局で高濃度が多く観測されていた。あまり強風が持続しない 5 月と 6 月でも 10ppm を超える濃度が月に 2 回ずつ観測されていた。最高値は 2002 年 4 月 2 日 2:00 に 3D 局で 20.47ppm が記録されていた。6~7D 局でも数 ppm の高濃度が月に数回見られた。強風時の風下の狭い領域で高濃度になることは山麓と同様で、山腹の方が山麓よりもはるかに高濃度となっていた。

山腹の観測点の位置と NDVI 画像との関係を見ると、3D~5D 局までが東側の黒く表示されている領域内に位置しており、火山ガス濃度データとよく対応している。また、山麓よりも山腹の植生指数の方が低いため、火口から山麓にかけて濃灰色から中間灰色のグラデーションで示されていることから、山腹では山麓よりも高濃度の火山ガスの影響を受けていることがわかる。

以下では、強風時と風向変化が大きい場合の山腹局と山麓局における濃度変化の例を示し、高層風や天気図を参考にしながら、山腹局と山麓局の SO₂ 濃度の関連や高濃度事象の特徴を述べる。

6.1 強風時

2002 年 3 月 6 日から 8 日までの 3 日間について、山腹の 7 局 (9A~9C 局は全て 0 のため省略) の SO₂ 濃度 (左軸) と八丈島 925hPa 風の風向 (右軸) を図 8a に示す。期間内に 0.1ppm 以上の濃度を記録した山麓の 5 局 (逢の浜 B1・三池 C1・空港 A2・坪田 C3・アカコッコ B2) の SO₂ 濃度 (左軸) と八丈島 925hPa 風の風速 (右軸) を図 8b に示す。7 日の 15 時の高層風は測定されていない。図に示されるように、山腹の 4D 局と山麓の空港局 (A2) の SO₂ 濃度の時間変化が良く一致しているが、山腹では山麓の 2~3 倍程度の高濃度となっている。また、7 日までは低気圧が支配的で、15m/s を超えるような強風が吹き、火山ガス・噴煙が吹きつけられる範囲が狭く、隣り合う 4D 局と 5D 局とで SO₂ 濃度値が 1/3 以下に減少している。8 日には低気圧が東進し、移動性の高気圧が次第に近づいてきたため、風が西風から北西風に変化し、風速も 10m/s 程度まで低下した。風向のわずかな変化によって高濃度が観測された範囲が 7D 局まで広がっている。3D 局でも同程度の濃度が観測されている。風が多少弱まったことで上流部での火山ガスが拡がったためと考えられる。

6.2 風向変化が大きい場合

2002 年 5 月 2 日から 6 日の 5 日間の山腹と山麓の SO₂ 濃度値の時間変化及び 925hPa 八丈島高層風の時間変化を図 9 に示す。この期間の天気概況は、2 日に日本列島を覆っていた高気圧が 4 日にかけてゆっくりと東進し、その後、北海道の北にあった低気圧から日本列島に沿って伸びた寒冷前線が日本を東進した。6 日の 9 時にはその後ろの移動性高気圧が日本列島まで移動してきていた。この気圧配置の変化に伴う風向の変化は図 9a に良く示されている。図 9b からは、風向変化に対応して山麓で高濃度 SO₂ 事象を観測した局が時計回りに移動する様子が明らかである。2 日から 4 日かけて、SO₂ 濃度のピークが阿古局(A3)から伊ヶ谷局(B3)、支庁局(A1)と時計回りに移り、5 日からの前線の通過に伴い、通過前に逢の浜局(B1)、三池局(C1)で高濃度になりはじめ、通過後に村役場局(C2)、空港局(A2)

で高濃度になっている。その後、高気圧が支配的になるに従って、6日の午後から風向が大きく変化し、阿古局(A3)で高濃度が観測されている。山腹の10局は山麓局よりも火口近くに位置しているが、風下に観測局があるときにだけ高濃度が観測されている。

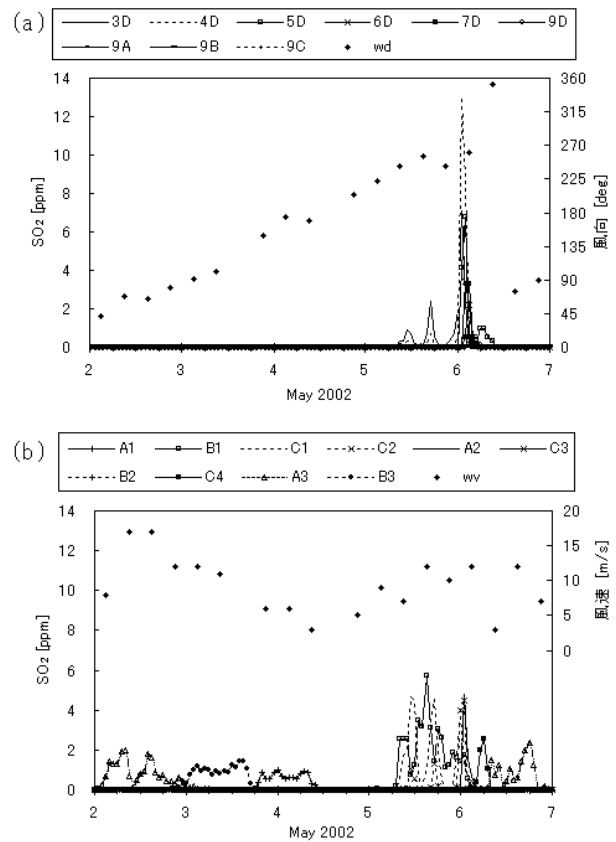
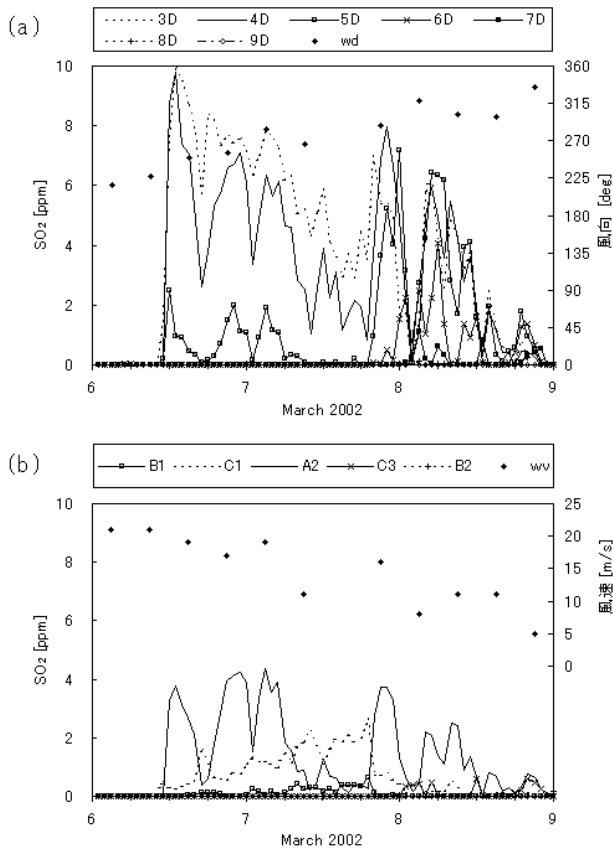


図8 2002年3月6～8日のSO₂濃度の時系列変化と八丈島925hPa風。(a)山腹局、(b)山麓局。

図9 2002年5月2～6日のSO₂濃度の時系列変化と八丈島925hPa風。(a)山腹局、(b)山麓局。

7 おわりに

2001年1月から2003年7月までの三宅島山麓部におけるSO₂濃度月平均値の変化や季節的特徴について述べた。山麓部における高濃度SO₂の地域的特徴を明らかにするために、2002年5月から2003年4月までの高濃度事象について高層風との関係や天気図に示される総観的な条件などを詳しく調べた。また、山麓と山腹のSO₂濃度の関係や衛星画像に示される植生分布と火山ガス濃度との関係についても述べた。結果を以下に要約する。

(i) SO₂濃度月平均値の最長31ヶ月間の変化から、SO₂濃度が徐々に低下していることがわかった。この傾向はCOSPEC観測による放出量の直接観測の結果ともよく対応していた。

(ii) 東部の局では季節風のため冬季に高濃度が長時間継続していた。南西部の薄木局では、東部の局ほどの濃度にはならないものの、停滞前線の影響で高濃度事象の継続時間が長くなる傾向があった。また、南西部の阿古局と薄木局では風が弱くても高濃度となる場合が比較的多くみられた。

(iii) 島の東部と南西部の方向は、ASTERのNDVI画像で山麓部まで植生指数の低い領域が広がっていることが示されていた。SO₂濃度データからの結果と整合的であった。

(iv) 北～北西部及び南～南東部に位置する局では、高濃度事象の発生頻度が低いため、環境基準で定められた長期的影響の目安をほぼ満たしていた。しかし、日平均値が0.04ppmを超えた日が2日連続したことがあるため、長期的評価の環境基準を達成していなかった。これらの地点では統計値のみでみた場合、住民が普通に生活している桜島の有村局とほぼ同程度の火山ガス環境であると思われる。

(v) 東部の局を除く 6 局における 1ppm 以上の SO₂ 高濃度時の気圧配置を調べた結果、高濃度発生は台風や発達した低気圧の中心部及び前線の位置や移動経路が大きく影響することがわかった。春季や秋季に多く見られる移動性高気圧による高濃度事象では、高気圧の動きに従って、高濃度の発生する局が時計回りに移動する例が比較的多く見られた。

(vi) 山腹における高濃度事象も風下の狭い範囲で起こることが確認された。山腹の SO₂ 濃度は山麓の数倍に達するため、火山ガスの直撃を避けなければ非常に危険である。

島民の帰島後の火山ガス災害防止のためには、直感的で入手しやすい高濃度火山ガス予測の情報が重要である。現在、メソスケールの火山ガス拡散シミュレーションは日本原子力研究所 (<http://des.tokai.jaeri.go.jp/incoming/miyake.html>) によって行われており、1 日分の予測がインターネットを通して提供されている。しかし、三宅島島内濃度分布のリアルタイム予測の提供はまだ見られない。鹿児島では島内外の住民に対して、主に降灰予測のための情報として、鹿児島地方の天気予報の一部に、850hPa の風を桜島上空約 1500m の風として実測と予測が提供されている。また、桜島では火山灰の進入を防ぐ目的で高気密住宅が普及しているが、この機能は火山ガスの侵入を防ぐ効果もあると考えられる。三宅島の場合は火山ガスへの対応のための情報として、山頂付近の風の情報が提供されれば、住民自身による火山ガスの挙動の把握に役立つと考える。気象庁から発表される風系予想が有効な情報となるだろう。

今後、島内火山ガスの高濃度事象に対するさらに詳しい事例研究や数値シミュレーション研究による弱風時の高濃度発生メカニズム及び火山ガスの動態解明の研究は、より正確な高濃度予測や安全な生活、防災の観点からも重要である。

謝辞：三宅島山麓の火山ガスデータをご提供くださいました東京都と、山腹の SO₂ データをご提供くださいました内閣府に心より感謝いたします。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いたものです。ここに記して感謝の意を表します。NOAA/AVHRR データのオンラインニュースについて、鹿児島大学大学院連合農学研究科に感謝します。北海道大学地震火山研究観測センターの寺田暁彦氏には、御蔵カメラによる噴煙観測画像の提供や、貴重なご助言・議論をいただきました。厚くお礼申し上げます。NOAA データの解析やホームページ編集に熱心に取り組まれた鹿児島大学大学院教育学研究科の元大学院生の小山田恵氏(現国分北小学校)、金柿主税氏(現御所浦北中学校)、同大学院院生の浜田智志氏に感謝します。

参考文献

- 飯野直子・小山田恵・金柿主税・木下紀正：三宅島山麓における火山ガス濃度変動と帰島問題，第 21 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.145-146, 2002.
- 飯野直子・小山田恵・木下紀正・金柿主税：三宅島噴煙の衛星画像と火山ガス高濃度事象，南太平洋海域調査研究報告，No.37, pp.66-75, 2003.
- 鹿児島市：鹿児島市の環境，平成 3 年版，p.29, 1991.
- 鹿児島市：鹿児島市の環境，平成 13 年版，p. 36, 2001.
- 風早康平・篠原宏志・斉藤元治・尾台正信・森 博一・中堀康弘・飯野英樹・平林順一：三宅島火山からの大量ガス放出，南太平洋海域調査研究報告，No.37, pp. 24-31, 2003.
- <http://staff.aist.go.jp/kazahaya-k/cospecj/>
- 木下紀正・今村和樹・金柿主税：桜島山麓における二酸化硫黄高濃度時の風系，第 13 回風工学シンポジウム，pp. 79-84, 1994.
- 木下紀正・池辺伸一郎・金柿主税・直江寛明・今村和樹：高濃度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・論文集第 22 号，pp. 133-138,1998.

- 木下紀正・西之園雅靖・瓜生洋一郎・金柿主税：桜島火山周辺におけるエアロゾルと火山ガスの高濃度事象の解析，鹿児島大学教育学部研究紀要，自然科学編，Vol. 50, pp. 11-27, 1999.
- 木下紀正・小山田恵・日高耕一：桜島噴煙の2点観測と火山ガスの高濃度事象の解析，鹿児島大学教育学部研究紀要，自然科学編，Vol. 51, pp. 37-56, 2000.
- Kinoshita, K., Iino, N., Uno, I., Mori, A., I kebe, S. and Kohno, J.: Satellite analysis of volcanic clouds and transport of acidic substances from Mt. Aso and Mt. Sakurajima, Water, Air & Soil Pollution, Vol. 130, pp. 385-390, 2001.
- Kinoshita, K., Kanagaki, C., Iino, N., Koyamada, M., Terada, A. and Tupper, A.: Volcanic plumes at Miyakejima observed from satellite and the ground, Proceedings of SPIE's Third International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium 2002, Vol. 4891, pp. 227-236, 2003.
- 木下紀正・金柿主税・後藤和彦・岩田志乃・小山田恵・日高耕一：桜島山麓における火山ガス高濃度事象と噴煙の挙動，地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集，V055-038, 2003.
- 小山田恵・木下紀正・飯野直子：2001 年夏季の NOAA/AVHRR に見る三宅島噴煙，日本リモートセンシング学会第 31 回学術講演会論文集，pp.149-150, 2001.
- 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，Vol. 50, pp. 553- 559, 2003a.
- 小山田恵・木下紀正・金柿主税・飯野直子：三宅島噴煙の NOAA 画像と火山ガス高濃度事象－2002 年 1 月～9 月－，鹿児島大学教育学部研究紀要，自然科学編，Vol. 54, pp. 1-20, 2003b.
- 小野朗子・藤原昇・小野厚夫：スペクトルの規格化による地形と大気効果の抑制 II，日本リモートセンシング学会第 31 回学術講演会論文集，pp.27-28, 2001.
- Sasaki, H., N. Seino, J. Sato and M. Chiba: Development of a dispersion model for volcanic gas over Miyake Island, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 80, pp. 1279-1288, 2002.
- 東京都災害情報：三宅島火山ガスに関する検討会報告書，2003.
<http://www.metro.tokyo.jp/SAIGAI/miyatop.htm>
- 内田孝紀・大屋裕二：種々の安定成層場における三宅島火山ガスの数値的考察，南太平洋海域調査研究報告，No.37, pp. 32-39, 2003a.
- 内田孝紀・大屋裕二：パッシブ粒子追跡法による三宅島火山ガス挙動の可視化，可視化情報学会論文集 23, pp. 58-65, 2003b.