

桜島火山ガスの挙動と防災

坂本 昌弥・木下 紀正

Behavior of Volcanic Gas and Disaster Prevention at Sakurajima Volcano**Masaya SAKAMOTO and Kisei KINOSHITA****Abstract**

The SO₂ gas concentration data on the ground surface at 21 stations around Sakurajima volcano in Kagoshima Prefecture during 2001-2012 were analyzed with respect to weather situation and correlation with the amounts of ash-fall and SPM. In recent years, there is a tendency to increase the high concentration events exceeding 100 ppb which is the environmental standard. The entire events of high concentration are dominated by the events at Arimura station, associated with the blow down of volcanic gas to the foot of the mountain. Other stations inside Sakurajima also suffer high concentration events according to the wind direction, and also outside Sakurajima to some extent. Quite different pattern of the high concentration events with a weak wind was confirmed. The convection current develops above the ground in the daytime owing to the sunshine in fine weather, and brings down the gas from plume height above the summit to the ground. Then the dispersion of the gas is governed by ground winds that change direction easily, resulting the detection of SO₂ at the stations inside and outside Sakurajima in different directions. Strong correlation of ash fall amount with high concentration events of SPM and SO₂ station was observed at Arimura. This indicates that, if Sakurajima volcano becomes very active, they will start to increase at the same time, possibly bringing a disaster complex. Therefore, for the disaster prevention or mitigation, comprehensive measures should be taken against volcanic ejecta around Sakurajima volcano.

キーワード : 1. 二酸化硫黄, 2. 風向・風速, 3. 浮遊粒子状物質, 4. 降灰量,
5. 高濃度事象

Key Words : 1. Sulfur dioxide, 2. Wind speed and wind direction, 3. SPM, 4. Ash fall amount,
5. High concentration event

日本語要旨

本研究では、2001年～2012年に鹿児島県および鹿児島市が桜島内外21カ所で測定したSO₂ガス濃度を環境省が定めている環境基準に照らし合わせ、これを超えるSO₂ガス高濃度事象と風向・風速との関連、およびSO₂ガス高濃度事象とSPM量高濃度事象および降灰量の相関について検討した。本研究で、近年この環境基準を超えるSO₂ガス高濃度事象が増加する傾向にあることがわかった。そして全体のSO₂ガス高濃度事象の月別・年別時数は、有村局のSO₂ガス高濃度事象のそれによって特徴付けられることもわかった。高濃度事象の主因は、強風によって山頂付近の火口から山麓へSO₂ガスが高濃度のまま吹き降ろされることである。その風向によって下流にある特定の測定局が

影響を受け、条件によっては島外の下流遠方で高濃度事象が見られる場合もある。また、弱風下で全方位的に SO₂ガス高濃度事象が測定される場合があることも明らかにした。これは桜島火山上空でゆっくりと拡散した SO₂ガスが対流混合によって地上付近に滞留し、変化しやすい地上風の風向に支配され、桜島火山周辺全域の測定局で高濃度事象が検出されるメカニズムであると考えられる。さらに近年、有村局で測定される SO₂ガス濃度高濃度事象・SPM 量高濃度事象・降灰量は、互いに高い相関が認められるようになってきた。それゆえ火山活動が盛んになると SO₂ガス濃度高濃度事象・SPM 量高濃度事象・降灰量は同時に増加し始め、複合的な災害になる可能性が高い。それゆえ桜島火山の周囲では火山噴出物に関して、それぞれ個別の対策だけではなく、総合的な防災対策を採るべきである。

目 次

1. はじめに
 2. データについて
 3. 各測定局における2001年～2012年の SO₂および SPM 量高濃度事象
 4. 2001年～2012年における SO₂ガスと SPM 量高濃度事象
 - 4.1 桜島火山 SO₂ガス高濃度事象の特徴
 - 4.2 有村局における SO₂ガスと SPM 量の高濃度事象
 - 4.3 赤水局とその周辺における SO₂ガスと SPM 量の高濃度事象
 - 4.4 黒神局における SO₂ガスと SPM 量の高濃度事象
 - 4.5 桜島支局における SO₂ガスと SPM 量の高濃度事象
 5. 桜島火山の SO₂ガスの島外移流
 6. 考察
 7. まとめ
- 謝辞
引用文献

1. はじめに

三宅島雄山および桜島火山から放出される火山ガスの移流に関する研究から、木下・坂本(2008)は、大気汚染物質や放射性物質が思わぬ事故で大気中へ放出された場合、その後どのように拡散・移流していくかは気象条件に大きく左右されるため、その時の気象条件をインプットして結果をすぐ引き出せるよう日頃から備えておく必要があると論じた。また同時に国内や近隣諸国の原発事故の備えとして、関係機関の速やかな通報・情報公開と、放射性物質の迅速な拡散予報が不可欠であることも論述した。しかし東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の放射性物質拡散による災害が発生した当初、政府は福島第一原子力発電所を中心とした半径2km以内に居住する地域住民に対して避難指示を出し、翌12日にそれを半径20kmへ広げ、同月15日には半径20km～30km間を屋内避難指示区域にするなど、結果的には避難指定区域を同心円状に徐々に拡大させていく方法を採用した。これには事故発生当時、

(財)原子力安全技術センターが運用していた緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) による拡散予測データは活用されることがなく、ようやくそれが公表されたのは事故から二週間近く経過した2011年3月23日であった。原発事故に対する拡散予測の公開と避難対策への活用は不可欠であることを再度ここで強調しておく。

ところで、この大きな災害となった東北地方太平洋沖地震をひとつの契機にして、これまで以上に自然災害やその防災・減災に関する国民的関心が高まりはじめた。城下 (2012) も言及しているが、これは国民が、防災に関して的確な知識・技能・判断力等を有するかどうかで、「釜石の奇跡」に代表されるように多くの人命を守られる場合と、石巻市立大川小学校の例のように「負の場合」に分かれることに気づいたためであろう。こうした防災への国民的関心の高まりを受け、文部科学省は、東日本大震災における学校等での経験を把握・分析し、その教訓を次代を担う子どもたちに伝えるとともに、防災教育・防災管理等を見直すため「防災教育・防災管理等に関する有識者会議」を2011年7月に設置し、2012年7月に最終答申を出した (東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議, 2012)。これは自然災害が多い国土を持つ日本にとって重要かつ必要な議論である。建築・土木等のいわゆるハード面に力点を置いた減災に関する政策を掲げるだけでなく、地震、津波、火山噴火、台風等の過酷な条件下で発生する複合的な災害に対して、多様な知識・技能を持ち、柔軟な判断・行動ができる国民を育成するという、いわゆるソフト面も重視した政策を今後掲げていくことは、大規模災害発生時において国民の生命・財産を守る上で欠かすことができない最重点事項のひとつだからである。

火山噴火において噴出された火砕物等が運動することによって発生する溶岩流・火砕流等は、その運動が痕跡として残りやすく、またそれを主因として発生した災害も多くの自然科学的な痕跡や、活動した時代によっては写真・日記といった記録として残る場合が多い (例えば、安井ほか, 2006)。それゆえ災害と被害の概要が後世にさまざまな記録 (石碑・口伝・物語・日記等) として伝承されている場合が数多くみられる。しかし火山ガスを主因とする自然災害は、これも地域社会に対して深刻な被害をもたらす可能性を有するが (中田ほか, 2001; 三宅島火山ガスに関する検討会ワーキンググループ, 2003), 火山ガスは火口から噴出後、周辺の植物などを枯らす場合を除いてその痕跡を留めることは少なく、また観察者は火山ガス自体を可視では認識できない場合も多いために、一般的に災害として伝承されにくい傾向にある。

大気中に放出される火山ガス (H_2O , CO_2 , H_2S , SO_2 等) に関する学術的研究は、火山の活動の程度や火山の性質を示す指標として、また人体に影響を与える有毒成分を含むガスとしてこれまで研究されている (平林, 2003)。その中でも近年の SO_2 ガスに関する研究は、COSPEC (相関スペクトロメータ) や DOAS (Differential Optical Absorption Spectrometer) の進歩に伴って、より詳細にその挙動が理解できるようになった (大和田・風早, 2005)。しかしこれまで火山ガスが引き起こす自然災害に関する研究は、ガス分子の人体への影響、または特定の地形条件下における局所的な拡散問題に重点が置かれ (小坂ほか, 1998; 平林, 2003), 広域に移流・拡散する火山ガスの挙動についてはなかなか言及されてこなかった。この火山ガスが火口から大気中に放出された後の挙動に関する研究は、例えば菱山・政春 (1998) をはじめいくつかの研究が散見できるが、それは数値シミュレーションに重点を置いたものが多く、実際の火

山ガスの挙動研究に適用できない場合も多い。火山ガスの移流・拡散と気象条件の相関研究は、鹿児島大学噴煙研究グループによって1990年代以降から取り組まれ（木下，1992；木下ほか，1994；木下ほか，1998a；木下ほか，1998b），三宅島火山ガス災害によって広く認知され始めた（木下ほか，2006）。そしてこの火山ガスの長距離を含めた移流・拡散現象と気象条件の相関研究は、先に述べた放射性物質の拡散問題や、さらに黄砂・浮遊粒子状物質 SPM（Suspended Particulate Matter）・微小粒子状物質 PM2.5（Particulate Matter 2.5）等の大気拡散・長距離移流問題等との関連もあるため、今後さらなる研究が必要であろう。

三宅島火山は、2000年7月8日の雄山の山頂噴火以来、活発な噴火・噴煙活動を繰り返した。同年8月末からは、山頂からの SO₂ガス高濃度噴出が顕著になり、地域住民の生活に大きな影響を与え始めた（飯野ほか，2003；飯野ほか，2005）。この火山活動における大気中の火山ガス濃度測定によると、噴火発生からの1年間では、10,000～50,000 ton / day 程度の SO₂ガスが大気中に放出され（風早ほか，2002），この量は東アジア全域から人為的に放出される SO₂ガスの総量を日換算した値に匹敵するレベルであったとされる（松田・An，2003）。強風の下、噴出し続けた SO₂ガスは、環境庁（現環境省）の定めた環境基準を大きく超える高濃度で住宅地などへ吹き寄せた（飯野ほか，2002）。噴火により島外避難を余儀なくされた地域住民は、火山ガス噴出が継続したため避難先から容易に帰島することができず、災害は長期化することとなった。結果的に地域住民全員は、火山ガスの高濃度事象が減少するまでの4年5ヶ月もの間、全島避難を強いられたことになる。

井口ほか（2008）によると、桜島火山ではその北岸から始良カルデラの中央部を中心として地盤の顕著な膨張が測定されており、桜島は本格的なマグマ蓄積期に入ったと判断されている。増加し始めた降灰量や SO₂ガス高濃度事象などにより、農業や地域住民の生活等が大きな影響を受けており、このため火山ガス防災や火山防災マップ等に関する研究が急務となった（例えば、坂本ほか，2006）。これまでも桜島火山の噴煙活動に伴って発生する火山ガス高濃度事象に関する詳細な報告は、鹿児島大学噴煙研究グループを中心としてなされてきた（例えば、坂本・木下，2005）。おおよそ数ヶ月～1年という期間の火山ガスデータや噴煙映像解析によって、地上で観測された SO₂ガスの濃度と大気圧925hPaの高度における風向・風速の間には密接な関連があることが明らかになった。なお SO₂ガスの分子量は、空気の平均分子量よりも大きいのが、乱流拡散が卓越する現実の大気中では、分子量の違いによって分離する可能性は、無視できるほど小さいこともわかっている（木下ほか，1998a；小山田ほか，2003）。

本研究では、鹿児島県下での2001年～2012年（12年間）における SO₂ガス濃度と925hPaの大気圧を示す高度（ほぼ昭和火口の高度）での風向・風速データ、SPM量データ、降灰量等の関係を検討した。桜島火山は2001年～2008年は爆発・噴火回数ともに少なかった状況が続いたが、その後2009年～2012年は爆発・噴火活動が急増し始めた（鹿児島地方気象台，2013a；鹿児島地方気象台，2013b）。この活動の変化が、桜島火山周辺に設置してある SO₂ガス観測データにどのような影響を与えたのかも検討し、火山ガス防災の必要性について論じた。なお、本研究で得られた結果は、地上観測による噴煙映像と対比して確認しつつある（Kinoshita et al., 2013）。

2. データについて

鹿児島県および鹿児島市は、大気中に存在する SO_2 ガス濃度および浮遊粒子状物質 (SPM) を鹿児島県下広域に設置された環境大気測定局で連続測定している (図1)。本研究で使用した SO_2 ガス濃度および SPM 量は、鹿児島県環境林務部環境保全課および鹿児島市環境局環境保全課の環境大気測定局観測点自動測定データを用いた。 SO_2 ガスの濃度測定方法は、溶液導電率法又は紫外線蛍光法を用いて測定されており、また SPM は濾過捕集による重量濃度測定方法、またはこの方法によって測定された重量濃度と直線的な関係を有する量が得られる光散乱法、圧電天びん法もしくはベータ線吸収法によって測定されている。これらは環境省が示している測定基準に準拠しており (環境庁, 1973)、全国で広く用いられている。

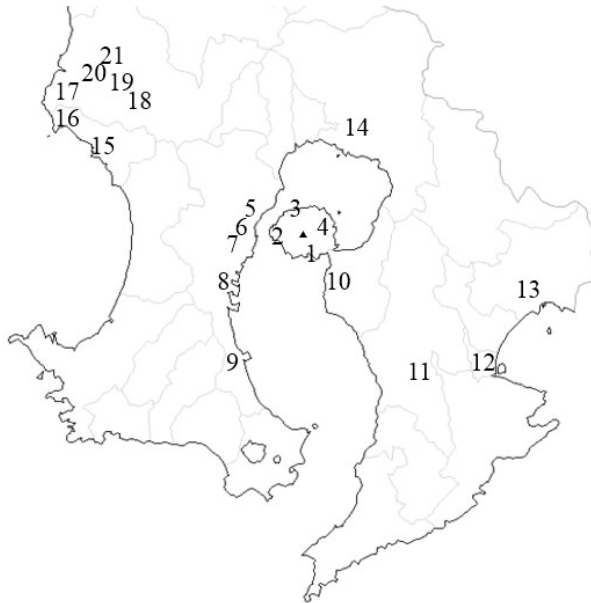


図1 SO_2 濃度および SPM 測定点の位置. 1. 有村局 (S) 2. 赤水局 (W) 3. 桜島支局 (N) 4. 黒神局 (E)
5. 鹿児島市役所局 6. 環境保健センター局 7. 鴨池局 8. 谷山支局 9. 喜入局 10. 垂水局
11. 鹿屋局 12. 東串良局 13. 志布志局 14. 霧島局 15. 郷之原第二公園局 16. 羽島局
17. 寄田局 18. 環境放射線監視センター局 19. 薩摩川内局 20. 川内保健所局 21. 高江局

環境省によって定められている SO_2 ガス濃度の環境基準は、短期的評価では「1時間値の1日平均値が0.04ppm 以下であり、かつ、1時間値が0.10ppm 以下であること」となっている。長期的評価では「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1日平均値0.04ppm を超える日が2日以上連続しないこと」となっている (環境庁, 1973)。データ解析にあたり、本研究では、この環境基準に基づき SO_2 ガス濃度の1時間値濃度が0.10ppm (=100ppb) を超える場合、これを高濃度事象とし、その回数を数値化した。

また浮遊粒子状物質 (SPM) について環境省は、「大気中に浮遊する粒子状物質であり、その粒径が10 μm 以下の物質のことを指す」と定義しており、そしてこれに対する環境基準は、

その質量が「1時間値の1日平均値で $0.10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であり、かつ1時間値が $0.20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であるもの」としている。この環境基準をもとに、先行研究である小山田（2000）および小山田・木下（2000）等の高濃度事象の定義に従い、本研究ではSPM量の高濃度事象を「1時間値が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であること」とした。

風速・風向のデータは、鹿児島地方気象台が測定したデータを使用した。特に断らない限り風向・風速は925hPaの値である。これらの測定時刻は9時、21時の2回である。そして風向D（°）と、風速S（m/sec）を用いて解析した。風向D（°）は北風を0°として時計回りに何度の方角から風が吹いてくるか表現してあり、例えば270°は西風となる。桜島上空の噴煙は、大きな爆発のときなどは3,000～5,000mも噴煙が上がるが、本研究では、おおよそ昭和火口の高度に対応する気圧と考えられる925hPaにおける風向・風速データを使用した。指定気圧面925hPaは海拔約850m程度に相当する。

SO₂ガス高濃度事象とSPM量高濃度事象の相関については、測定されたSO₂ガスの1日の積算値をXとし、同じくSPM量の1日の積算値をYとし、XとYの共分散をXの標準偏差とYの標準偏差の積で除したピアソンの積率相関係数rを用いて1年ごとの相関係数を算出した。

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

そしてこれにより算出された数値（ $-1 \leq r \leq 1$ ）によって、SO₂ガスとSPM量の相関の程度を判断した。また各測定局でのSPM量と降灰量の相関係数もSPM量の一ヶ月間の積算値と降灰量の一ヶ月の間の積算値を用いてピアソンの積率相関係数によって算出した。

降灰量に関しては、鹿児島県危機管理局危機管理防災課がウェブ上で公開している桜島降灰量観測結果を用いた（鹿児島県危機管理局危機管理防災課，2010；同，2013）。ここでは2010年までは県内59カ所分、それ以降は62カ所における 1m^2 あたりの降灰量(g)をPDFデータとしてウェブ上で公開しており、このデータを用いた。

3. 各測定局における2001年～2012年のSO₂およびSPM量高濃度事象

表1は、2001年1月1日～2012年12月31日までの4,838日、105,192時間（機器調整等による欠測日・時間を含む）における、各測定局で測定されたSO₂ガス濃度の1時間値をまとめたものである。ここでは全21測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、欠測率、SO₂ガス濃度最高値(ppb)・SO₂ガス高濃度事象発生時数・SO₂ガス高濃度事象発生率・SO₂ガス高濃度事象発生日数・SO₂高濃度事象発生日率を示した。測定時数が大きく異なる場合があるのは、測定機器の保守点検・故障等による欠測がある場合と、期間中に測定を中止した測定局が4局、測定を開始した測定局が1局あるためである。また1日のうちに1時間でも環境基準を超える高濃度事象が発生した場合、その日をSO₂ガス高濃度事象発生日として、その日数を合計したものがSO₂ガス高濃度事象発生日数としている。

表1 各測定局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガスに関するデータ

観測局	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
観測局	有村	赤水	桜島支局	黒神	鹿児島市役所	環境保健センター	鴨池	谷山支局	喜入	垂水	鹿屋	東串良	志布志	霧島	郷之原第二公園	羽島	密田	環境放射線監視センター	薩摩川内	川内保健所	高江
測定期間 (dar)	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	1,522	4,383	4,383	4,383	4,383	1,525	4,383	4,383	4,383	2,832	800	1,525
測定時数 (h)	104,150	103,664	103,846	103,582	100,691	104,352	102,988	104,012	104,218	36,105	104,244	104,194	104,348	103,824	36,251	104,421	104,344	104,441	67,525	18,857	36,201
未測定時数 (h)	1,042	1,528	1,346	1,610	4,501	840	2,204	1,180	974	423	948	998	844	1,368	349	771	848	751	443	343	359
欠測率 (%)	0.99	1.45	1.28	1.53	4.28	0.80	2.10	1.12	0.93	1.16	0.90	0.95	0.80	1.30	0.95	0.73	0.81	0.71	0.65	1.79	1.09
SO ₂ 最高濃度 (ppb)	4,530	1,590	379	798	361	305	330	198	205	137	268	138	222	172	99	183	80	75	79	40	46
高濃度事象発生時数 (h)	4,593	1,934	148	503	28	37	63	34	4	5	60	3	1	6	0	1	0	0	0	0	0
高濃度事象発生時数率 (%)	4.41	1.87	0.14	0.49	0.03	0.04	0.06	0.03	0	0.01	0.06	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
高濃度事象発生日数 (dar)	988	456	49	183	18	24	35	20	4	5	35	3	1	6	0	1	0	0	0	0	0
高濃度事象発生日率 (%)	22.54	10.40	1.15	4.18	0.41	0.55	0.80	0.46	0.09	0.33	0.80	0.07	0.02	0.14	0	0.02	0	0	0	0	0
その他											2005年3月 廃止					2005年3月 廃止			2004年4月 から観測	2003年3月 廃止	2005年3月 廃止

鹿児島県北西部（串木野・薩摩川内地域）に位置する測定局を除いて、ほとんどの測定局においてSO₂ガス濃度が環境基準を超える高濃度事象が測定されている。中でも有村局は、1時間値において100ppbを超える高濃度事象時数は4,593時間であり、これは有効な測定時数の4.4%を占め、この数値は他の測定局と比較すると突出して高い。また有村局で測定された最も高いSO₂ガス濃度値は4,530ppbであり、これは環境省の定めた環境基準の45.3倍という値である。全測定日に対して高濃度事象発生日が占める割合（以下、高濃度事象発生日率）を算出すると、有村局では22.5%となり、これも他の測定局と比較すると突出して高い数値となった。同様に赤水局ではSO₂ガスの高濃度事象時数が1,934時間測定されており、これから高濃度事象発生時数率が1.9%、高濃度事象発生日率が10.4%となった。次いで黒神局では高濃度事象時数が503時間測定され、高濃度事象発生時数率が0.5%、高濃度事象発生日率が4.2%という結果となった。

表2は、2001年1月1日～2012年12月31日までの4,838日、105,192時間（機器調整等による欠測日・時間を含む）における、各測定局のSPM量の1時間値をまとめたものである。ここでは表1と同様に、全21測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、欠測率、SPM量の最高値（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、SPM量の高濃度事象発生時数・SPM量の高濃度事象発生率・SPM量の高濃度事象発生日数・SPM量の高濃度事象発生日率を示した。測定時数が異なるのは、これも測定機器の保守点検・故障等による欠測がある場合と、期間中に測定を中止した測定局が4局あるためである。また1日のうちに1回でも1時間値が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える事象が発生した場合、その日をSPM量高濃度事象発生日として、その日数を合計したものがSPM量の高濃度事象発生日数としている。

すべての局において1時間値が $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える事象が発生した。有村局は $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度事象時数が1,405時間であり、これは有効な測定時数の1.4%を占める結果となった。

表2 各測定局で2001年～2012年にかけて測定されたSPMに関するデータ

観測局	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
観測局	有村	赤水	桜島支局	黒神	鹿児島市役所	環境保健センター	鴨池	谷山支局	喜入	重水	鹿屋	東串良	志布志	霧島	郷之原第二公園	羽島	寄田	環境放射線監視センター	薩摩川内	川内保健所	高江
測定回数 (回)	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	4,383	1,522	4,383	4,383	4,383	4,383	1,525	4,383	4,383	4,383	4,383	800	1,525
測定時間 (h)	104,152	103,880	102,689	103,913	103,608	104,276	101,808	103,965	104,340	36,091	104,313	103,799	104,386	103,844	36,250	104,359	104,277	104,464	104,528	18,917	36,187
未測定時間 (h)	1,040	1,312	2,503	1,279	1,584	916	3,384	1,227	852	437	879	1,393	806	1,348	350	833	915	728	664	283	413
欠測率 (%)	0.99	1.25	2.38	1.22	1.51	0.87	3.22	1.17	0.81	1.20	0.84	1.32	0.77	1.28	0.96	0.79	0.87	0.69	0.63	1.47	1.13
SPM濃度最高値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	972	1,645	513	1,965	715	747	1,165	557	622	340	841	836	626	684	319	857	727	669	804	345	896
高濃度事象発生時間 (h)	1,405	1,384	414	568	890	1,053	736	503	335	308	549	863	426	454	207	546	626	602	656	194	311
高濃度事象発生時間率 (%)	1.35	1.33	0.40	0.55	0.86	1.01	0.72	0.48	0.32	0.85	0.53	0.83	0.41	0.44	0.57	0.52	0.60	0.58	0.63	1.03	0.86
高濃度事象発生日数 (日)	492	452	110	194	373	310	251	165	100	106	195	343	137	140	64	151	213	159	194	47	120
高濃度事象発生日率 (%)	11.23	10.31	2.51	4.43	8.51	7.07	5.73	3.76	2.28	2.49	4.45	7.83	3.13	3.19	1.50	3.45	4.86	3.63	4.43	1.10	2.81
その他										2005年3月廃止					2005年3月廃止					2004年3月廃止	2005年3月廃止

また桜島西部にある赤水局も $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度事象が1,384時間測定された。SO₂ガス高濃度では見られなかった現象として、鴨池局で測定されたSPM量の最高値が $1,165 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と高い値を示しており、また、 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度事象の時間が736時間 (0.7%) と、SO₂ガス高濃度事象と比較すると極端に高い割合になる。これは小山田 (2002) でも示唆されているが、黄砂や自動車等の排煙の影響である可能性も高い。同様に環境保健センターも高い数値を示しており、これも鴨池局と同じ可能性が考えられる。

4. 2001年～2012年におけるSO₂ガスとSPM量高濃度事象

4.1 桜島火山SO₂ガス高濃度事象の特徴

各測定局において2001年～2012年にかけて測定された桜島SO₂ガス高濃度事象は、7,415回であった (全16局の合計；期間中測定を廃止した局および途中から測定を開始した局のデータは除く)。これを年別・月別に区分したグラフを図2に示す。

2005年における桜島火山の爆発回数は12回と比較的少なく、また2006年は爆発回数が15回とこれも少ないものであった。これらの年は桜島SO₂ガス高濃度事象も他年と比較して少なく、300回前後であった。しかし爆発回数が996回であった2011年の桜島SO₂ガス高濃度事象は1094回、爆発回数が885回であった2012年の桜島SO₂ガス高濃度事象は1257回と急増した (図2-A)。またこれらを月別に区分すると (図2-B)、桜島火山のSO₂ガス高濃度事象は冬期を中心に多く測定され、夏期に少ない傾向であることがわかる。この原因については後述する。

次に有村局、赤水局、黒神局、そして桜島支局の島内4局を例にして、それぞれのSO₂ガスの高濃度事象について検討し、その結果とSPMの測定量と降灰量との相関について述べる。

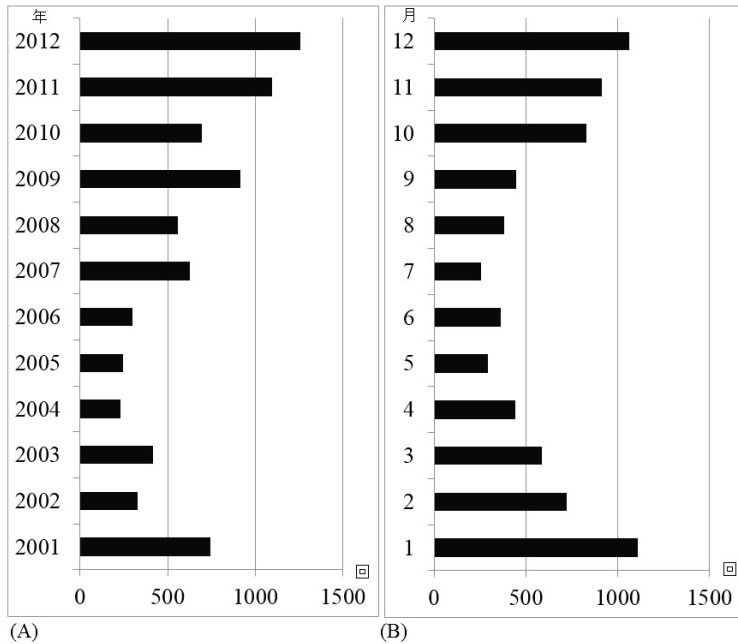


図2 各測定局で2001年～2012年にかけて測定された桜島火山 SO₂ガス高濃度事象の年別変化の合計 (A) と、月別変化の合計 (B) (全16局の合計；期間中観測を廃止した局および途中から観測を開始した局のデータは除く)

4.2 有村局における SO₂ガスと SPM 量の高濃度事象

桜島南側に位置する有村局 (図1) において2001～2012年にかけて測定された SO₂ガス高濃度事象は、総計で4,593回であった。その年別・月別合計グラフを図3に示す。

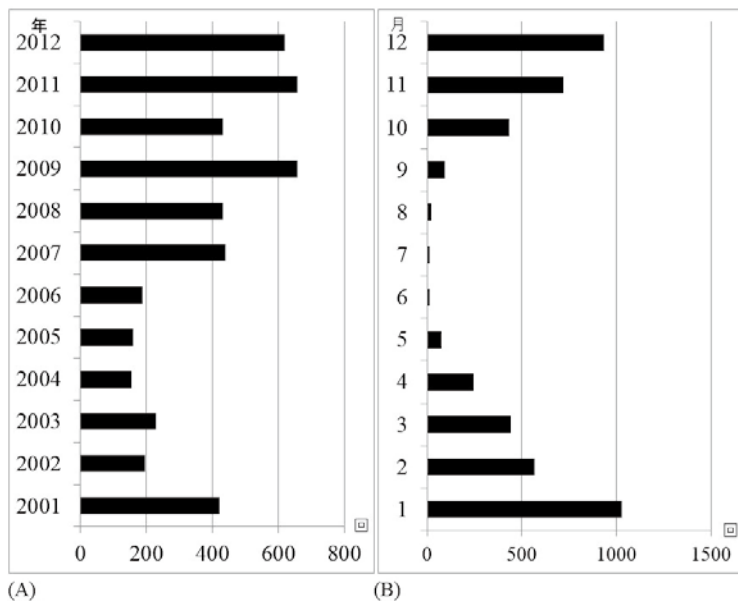


図3 有村局で2001年～2012年にかけて測定された SO₂ガス高濃度事象の年別変化 (A) と、月別変化 (B)

図3 (A) で示したように、有村局における2009年でのSO₂ガス高濃度事象は657回、2011年に658回となり、2002年～2006年と比較すると3～4倍程度多く測定された。これらを月別に区分すると(図3-B)、1月に1,028回、12月に936回測定されており、有村局では冬期を中心としてSO₂ガス高濃度事象が頻発し、夏期に少ないことがわかる。これは気圧配置がいわゆる西高東低の冬型になり、強風の北風が卓越する場合に火口の南に位置する有村局で高濃度事象が観測されるためである。こうした高濃度事象の発生メカニズムは、例えば坂本・木下(2005)によって詳しく論述されている。そして桜島火山の周囲に設置されている全測定局におけるSO₂ガス高濃度事象に対して有村局のSO₂ガス高濃度事象が占める割合は61.9%と大きい。そのため図2 (B) のように全体のSO₂ガス高濃度事象の特徴に、有村局のSO₂ガス高濃度事象の特徴が反映することになる。

表3は有村局で9時・21時に測定されたSO₂ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。9時・21時の高濃度事象に限定して議論するのは、鹿児島地方気象台がこの時刻のみ高層の風向・風速を測定しているためである。有村局において2001年～2012年にかけて測定されたこの9時・21時に限定したSO₂ガス高濃度事象は、合計で504回であり、このうち風速が8m/sec以上だった割合は77.4%であった。またその風向が310°以上30°以下であった割合が88.3%であった。そしてこの二つの条件を満たすSO₂ガス高濃度事象は74.4%であった。

表3 有村局で2001年～2012年にかけて測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

有村局	9時と21時の測定時数	8724
	9時と21時における高濃度事象時数	504
	全体に対する割合(%)	5.8%
	高濃度事象のうち風速 8 m/sec 以上の時数	390
	高濃度事象504時間に対する全体に対する割合(%)	77.4%
	風向が310°以上30°以下の高濃度事象時数(80°以内)	445
	高濃度事象504時間に対する全体に対する割合(%)	88.3%
	風向が300°以上30°以下で 8 m/sec以上の高濃度事象時数	375
	高濃度事象504時間に対する全体に対する割合(%)	74.4%

次に有村局において2001年～2012年にかけて測定された100 μg/m³を超えるSPM量高濃度事象の年別・月別データを表4に示す。この表からわかるように、桜島火山の活動が盛んになってきた2009年以降、SPM量高濃度事象も増加していることがわかる。またSO₂ガス高濃度事象同様、冬期を中心にSPM量高濃度事象が測定されており、夏期が少ないことがわかる。

表4 有村局で2001年～2012年にかけて測定されたSPM量高濃度事象(100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上)の年別・月別時間数。行が月、列が年

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2012	58	34	26	2	11	2	0	7	11	36	22	22	231
2011	18	17	29	6	68	0	1	0	20	24	16	78	277
2010	19	50	29	14	6	4	4	13	2	16	14	3	174
2009	15	4	10	14	0	0	9	3	6	17	19	44	141
2008	0	1	4	0	1	0	0	30	1	0	2	15	54
2007	1	0	0	14	26	2	41	4	3	0	0	1	92
2006	0	0	3	7	2	0	2	1	1	3	0	0	19
2005	0	0	0	3	2	1	13	2	0	0	5	2	28
2004	1	3	0	0	2	2	10	5	6	6	3	0	38
2003	1	2	2	2	1	1	3	5	11	8	0	0	36
2002	7	4	22	20	0	4	1	2	2	9	15	3	89
2001	63	16	67	13	6	0	10	39	7	3	2	0	226
計	183	131	192	95	125	16	94	111	70	122	98	168	1405

有村局において2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガスとSPM量の1時間値の日毎積算量の相関について、ピアソンの積率相関係数を用いて求めたものが図4である。

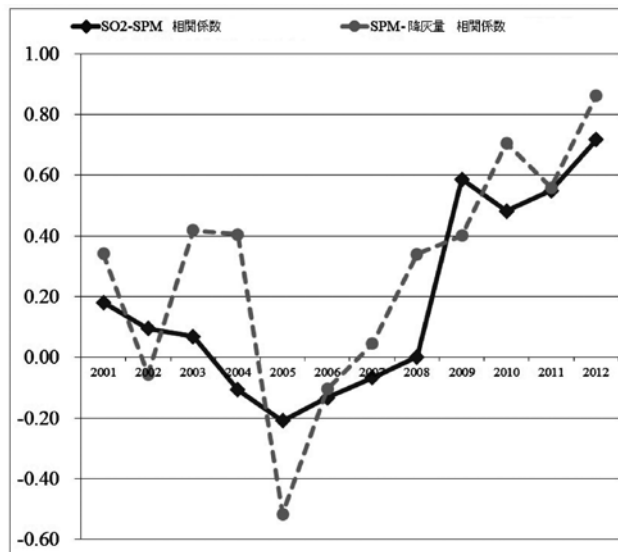


図4 有村局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値の日毎積算値とSPM量1時間値の日毎積算値の年別相関係数グラフおよびSPM量1時間値の月別積算値と有村局降灰量月別積算値の相関係数グラフ。縦軸は相関係数、横軸は年

この1時間値の日毎積算量におけるSO₂ガスとSPM量の間には、2009年から正の相関が認められるようになり、特に2012年には0.72と高い正の相関が認められた。また同様に有村局におけるSPM量1時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関係数を求めると、これも同様に2009年から正の相関が出はじめ、2012年では相関係数が0.86と非常に高い正の相関が認められた。SPMの発生源は、工場等の産業活動によるものだけでなく、ディーゼルエンジン等を

搭載している自動車の走行による排気ガス（DEP：ディーゼル排出微粒子）やタイヤの巻き上げによるもの、稲わら焼却の煙、黄砂や大陸からの大気汚染物質の移流によるものも含まれると考えられていた（小山田・木下，2000；山崎，2004）が、本研究により火山の噴煙活動が多くなることによって大気中のSPM量が増加することが明らかになった。

この有村局において2001年～2012年にかけて測定された1m²あたりの降灰量（g）を月別に積算したものを表5に示す。

表5 有村局の2001年～2012年における年別・月別降灰量を示した表。行が月，列が年。降灰量の単位はg/m²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
2001	1,251	736	307	258	986	212	307	189	109	133	56	18	4,562
2002	57	24	134	128	41	11	28	56	101	288	1,314	22	2,204
2003	84	189	31	17	9	9	6	4	204	89	21	33	696
2004	24	69	22	18	90	28	38	68	16	34	7	13	427
2005	36	9	9	8	5	8	4	3	5	10	13	52	162
2006	5	9	21	22	3	71	3	25	4	9	22	23	217
2007	343	11	81	35	59	17	3	5	2	2	1	11	570
2008	7	593	9	393	3,185	143	8	11	5	18	102	44	4,518
2009	170	276	2,220	569	83	383	142	264	1,072	717	2,014	6,145	14,055
2010	10,997	7,975	2,834	4,566	3,092	253	622	279	147	591	1,681	4,220	37,257
2011	8,456	4,839	2,257	979	743	418	447	1,092	2,760	4,574	1,920	9,269	37,754
2012	9,109	5,348	5,582	3,659	4,086	1,038	1,122	863	955	3,823	4,150	4,889	44,624
計	30,539	20,078	13,507	10,652	12,382	2,591	2,730	2,859	5,380	10,288	11,301	24,739	147,046

有村局では、2001年～2012年にかけて総計147,046g/m³の降灰量が測定されており、その量は桜島火山の活動が盛んになると急激に増加する傾向にある。

4.3 赤水局とその周辺におけるSO₂ガスとSPM量の高濃度事象

桜島西側に位置する赤水局（図1）において2001～2012年にかけて測定されたSO₂ガス高濃

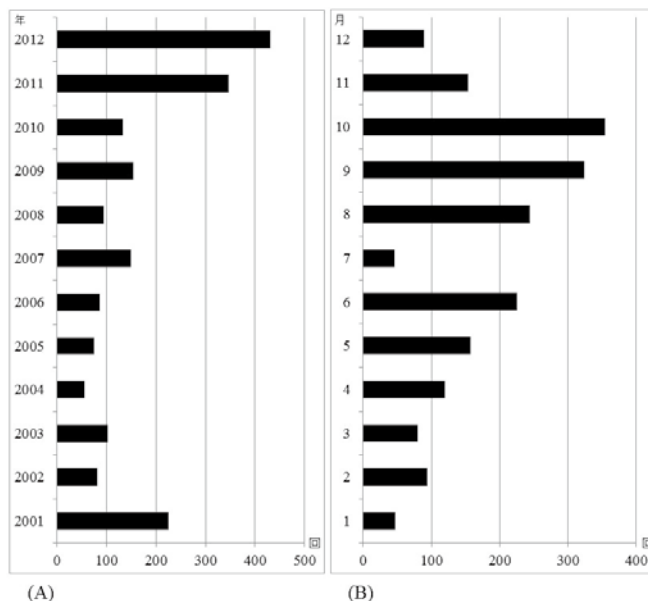


図5 赤水局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス高濃度事象の年別変化(A)と月別変化(B)

度事象は、総計で1,934回であった。年別に区分してみると（図5-A）、2011年に346回、2012年に431回と、近年急激に増加してきたことがわかる。

これらを月別に区分すると（図5-B）、9月が324回、10月が354回測定されており、9月・10月に高濃度事象が発生しやすいことがわかる。

赤水局で特徴的に見られるSO₂ガス高濃度事象は、2011年11月2日8時に測定した環境基準の15.9倍にあたる1,590 ppbであった。このときのSO₂ガス濃度1時間値の推移を図6に示す。

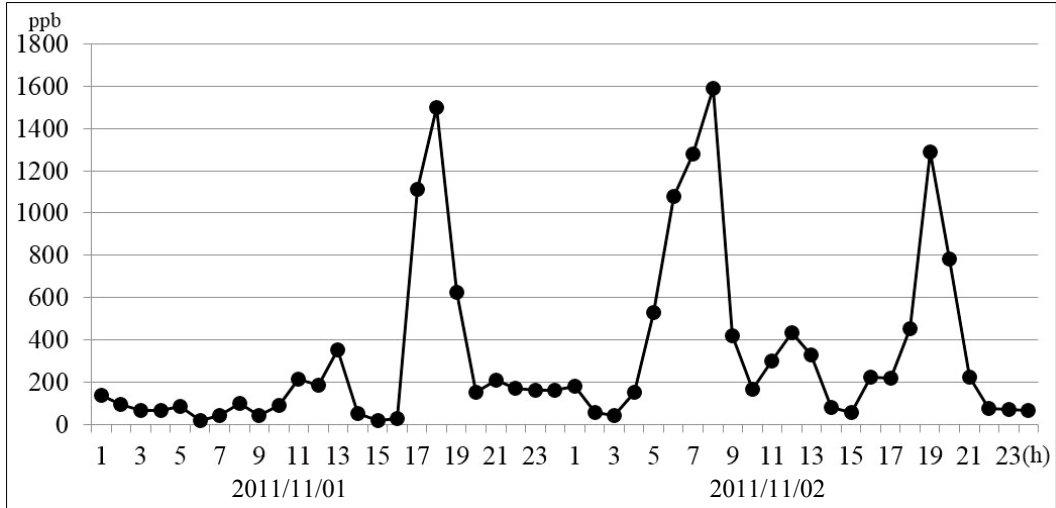


図6 赤水局で2011年11月1日～2日にかけて測定されたSO₂ガスの濃度変化の時間推移

赤水局で測定されるSO₂ガス高濃度事象の特徴は、SO₂ガスの高濃度が突発的に測定されることが挙げられる。これは坂本・木下（2009）でも論じられたとおり、低気圧が鹿児島島の南の海上を西から東に移動する際に発生する、南低北高の気圧配置時（気象庁、2013a）で生じる強い東風に起因する。2011年11月1日9時の風速は6m/sec、風向は102°、21時の風速は8m/sec、同年11月2日9時の風速は11m/sec、風向は116°、21時の風速は9m/sec、風向は118°であっ

表6 赤水局で2001年～2012年にかけて測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

赤水局	9時と21時の測定時数	8687
	9時と21時における高濃度事象時数	170
	全体に対する割合(%)	2.0%
	高濃度事象のうち風速 8 m/sec 以上の時数	79
	高濃度事象170時間に対する全体に対する割合(%)	46.5%
	風向が50°以上125°以下の高濃度事象時数(75°以内)	142
	高濃度事象170時間に対する全体に対する割合(%)	83.5%
	風向が 50° 以上 125° 以下で8 m/sec 以上の高濃度事象時数	73
	高濃度事象79時間に対する全体に対する割合(%)	42.9%

た。東からの強風によって風下の赤水局にSO₂ガスが吹き降ろされ、図6のようなSO₂ガス高濃度事象が測定された。

表6は、赤水局で9時・21時に観測されたSO₂ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。赤水局で2001年～2012年にかけて測定されたこの9時・21時のSO₂ガス高濃度事象回数は、総計で170回あり、このうち風速が8m/sec以上だった割合は46.5%であった。またその風向が50°以上125°以下である割合は83.5%であった。風速が8m/sec以上であり、風向が50°以上125°以下という二つの条件を満たすSO₂ガス高濃度事象の観測結果は全体の42.9%であった。

特に注目される事象として、弱風下において赤水局を中心として広範囲にSO₂ガス高濃度事象が測定されたケースを報告する。例えば2012年10月12日赤水局では、10時にSO₂ガス濃度が160ppb、12時に257ppb測定された。この高濃度事象と前後して、桜島火山周辺の他の測定局でもSO₂ガス高濃度事象が測定された(図7)。

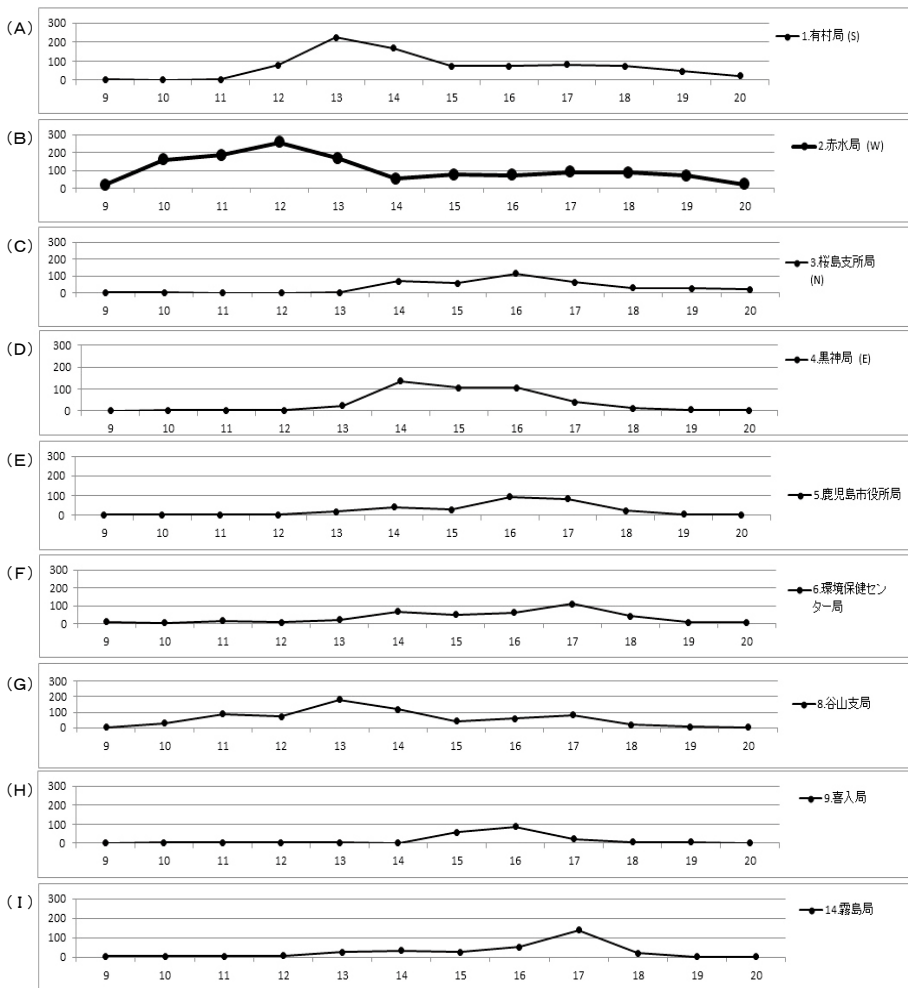


図7 赤水局と桜島火山周辺に設置されている測定局で2012年10月12日にみられた弱風下でのSO₂ガスの濃度変化。縦軸は濃度(ppb)、横軸は時刻

- (A) 1. 有村局, (B) 2. 赤水局, (C) 3. 桜島支局, (D) 4. 黒神局, (E) 5. 鹿児島市役所局, (F) 6. 環境保健センター局, (G) 8. 谷山支局, (H) 9. 喜入局, (I) 14. 霧島局

表7 鹿児島市における2012年10月12日8時~21時の地上風の方位と風速(気象庁, 2013b)

時間	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時
16方位	北	北北東	北	南南東	北北東	東	東北東	南南東	南南東	南	西北西	北西	北西	北東
風速(m/sec)	4	4	1	2	1	3	4	3	3	2	3	2	2	5

925hPaの高度における9時の風速は2m/sec, 風向は38°, 21時の風速は1m/sec, 風向は237°であった。当日9時の天気図(気象庁, 2013a)や表7で示す地上付近における気象条件(気象庁, 2013b)を用いてこの事象を考察すると, この時, 赤水局では鹿児島市の北方を西から東に移動する高気圧の勢力下にあり, 好天であった。山頂付近や噴煙が流れる高度の風速は弱く, SO₂ガスは桜島火山上空にゆっくりと広く拡散し, 地上付近の大気と入れかわったり混合する現象である対流混合が発生した(木下, 1996; 木下ほか, 1998a)。それゆえ地上付近で高いSO₂ガス濃度を示すことになるこの大気は, 変化しやすい地上風の風向に支配され, 桜島火山周辺全域においてSO₂ガス高濃度事象を発生させたと考えられる。

次に赤水局で2001年~2012年にかけて測定された100μg/m³を超えるSPM量高濃度事象の年別・月別データを表8に示す。赤水局の場合, 有村局とは異なり, 桜島火山の活動が盛んになってきた2009年以降においてもSPM量高濃度事象に急増傾向はみられない。また赤水局におけるSO₂ガス高濃度事象と異なり, 季節別の発生頻度も明瞭な差はないと思われる。

表8 赤水局で2001年~2012年にかけて測定されたSPM量高濃度事象(100μg/m³以上)の年別・月別時間数。行が月, 列が年

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2012	2	11	2	12	4	34	2	36	12	35	11	2	163
2011	0	13	0	10	88	0	1	11	41	24	22	2	212
2010	2	2	13	4	3	10	3	40	2	11	15	3	108
2009	11	12	8	7	2	9	0	11	15	8	2	2	87
2008	15	3	5	0	2	0	1	29	70	0	5	12	142
2007	1	1	0	18	1	11	60	15	0	1	1	3	112
2006	0	1	12	17	3	1	2	3	0	9	0	0	48
2005	0	1	5	4	1	6	28	12	3	5	6	0	71
2004	2	7	1	1	0	5	20	7	6	5	0	3	57
2003	1	8	6	0	0	1	6	1	5	2	3	5	38
2002	8	1	33	43	0	5	5	0	3	6	13	3	120
2001	15	8	61	13	7	0	4	56	19	43	0	0	226
計	57	68	146	129	111	82	132	221	176	149	78	35	1384

赤水局で2001年~2012年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値の日毎積算値とSPM量1時間値の日毎積算値の年別相関, およびSPM量1時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関について, ピアソンの積率相関係数を用いて求めたものが図8である。

このSO₂ガスとSPM量の1時間値の日毎積算量の相関は, 赤水局においてはどの年も高いものではないが, 2011年および2012年には正の相関がみられる。また赤水局におけるSPM量1時間値の月毎積算値と降灰量の月毎積算値の相関では, 2009年および2010年, 2011年には正の相関がみられるが, 他の年は低い相関がみられるか, あるいはまったく相関はない。つまり赤水局では2001年を除いて, 桜島火山の噴火による降灰量が増加しても地上付近の大気中に存在するSPM量がそれに比例して増加するわけではないことがわかった。

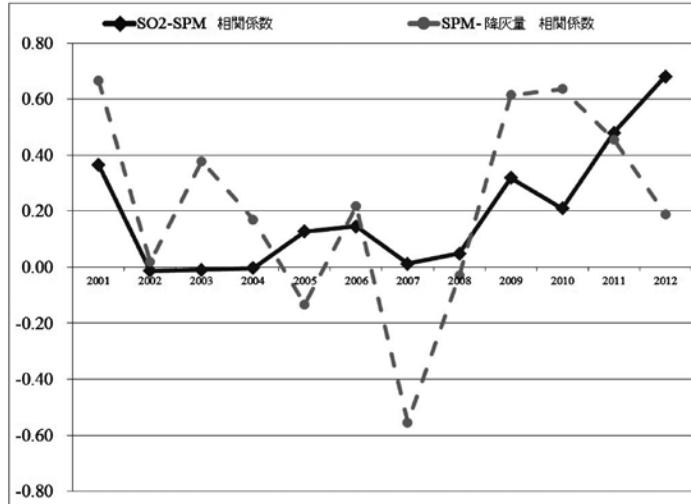


図8 赤水局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値の日毎積算値とSPM量1時間値の日毎積算値の年別相関係数グラフおよびSPM量1時間値の月毎積算値と赤水局降灰量月毎積算値の相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は年

4.4 黒神局におけるSO₂ガスとSPM量の高濃度事象

桜島東側に位置する黒神局（図1）で2001年～2012年に測定されたSO₂ガス高濃度事象の年別グラフをみると（図9-A），2001年に78回，2003年70回，2010年に75回，またその月別グラフ（図9-B）をみると，6月に85回，7月に162回と夏期を中心に測定されたことがわかる。

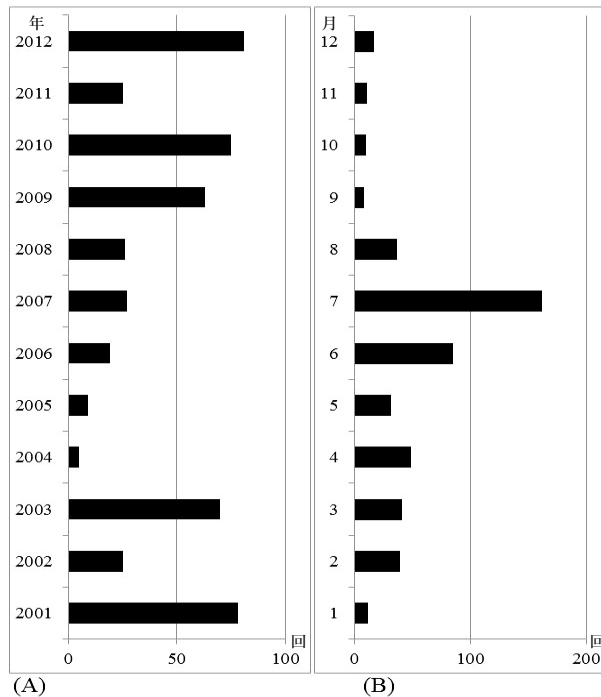


図9 黒神局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス高濃度事象の年別変化 (A) と月別変化 (B)

表9は、黒神局で9時・21時に観測されたSO₂ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。黒神局で2001年～2012年にかけて測定されたこの9時・21時のSO₂ガス高濃度事象回数は総計34回であり、このすべてが風速が8m/sec以上で測定されている。またその風向が250°以上280°以下という非常に狭い角度内で測定された割合は97.1%であった。風速が8m/sec以上であり、風向が250°以上280°以下という二つの条件を満たすSO₂ガス高濃度事象の測定結果も全体の97.1%であった。木下ほか(1994)は、黒神局で高濃度事象が発生するときは、南高北低の気圧配置であり、九州北部や日本海側を低気圧の通過する際に測定されるため、有村局のように高濃度事象が長時間続くことは少ないが、山頂からの吹き降ろしにより短時間に非常に大きな数値を示す可能性があるとして述べている。

表9 黒神局で2001年～2012年にかけて測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

黒神局	9時と21時の測定時数	8663
	9時と21時における高濃度事象時数	34
	全体に対する割合(%)	0.4%
	高濃度事象のうち風速8 m/sec以上の時数	34
	高濃度事象34時間に対する全体に対する割合(%)	100%
	風向が250°以上280°以下の高濃度事象時数(30°以内)	33
	高濃度事象34時間に対する全体に対する割合(%)	97.1%
	風向が250°以上280°以下で8 m/sec以上の高濃度事象時数	33
	高濃度事象34時間に対する全体に対する割合(%)	97.1%

次に黒神局で2001年～2012年にかけて測定された100 μg/m³を超えるSPM量高濃度事象の年別・月別データを表10に示す。SPM量高濃度事象(100 μg/m³以上)は期間中890回測定されており、2001年を除いて大きな変化は見受けられない。有村局でみられた2009年以降の急増傾向

表10 黒神局で2001年～2012年にかけて測定されたSPM量高濃度事象(100 μg/m³以上)の年別・月別時間数。横軸が月、縦軸が年

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2012	0	1	3	10	5	7	21	3	1	0	1	0	52
2011	0	17	4	6	49	1	5	0	0	0	2	1	85
2010	17	5	18	2	7	0	6	5	0	0	2	4	66
2009	1	14	1	1	0	0	8	7	7	1	2	7	49
2008	18	2	10	1	1	1	0	12	0	0	1	9	55
2007	1	6	0	14	26	3	31	1	0	0	2	1	85
2006	5	0	3	6	0	0	0	0	1	0	0	2	17
2005	0	0	0	1	0	0	13	0	0	0	1	0	15
2004	19	22	0	0	0	1	1	0	3	0	0	3	49
2003	11	11	7	2	0	3	14	31	8	2	3	16	108
2002	12	10	24	28	0	0	1	8	0	14	18	3	118
2001	10	10	55	17	3	8	16	61	6	0	4	1	191
計	94	98	125	88	91	24	116	128	26	17	36	47	890

向も、黒神局ではみられない。また夏期を中心に測定される黒神局のSO₂ガス高濃度事象と異なり、SPM量高濃度事象は季節別に明瞭な差はないと思われる。

黒神局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値の日毎積算値とSPM量1時間値の日毎積算値の年別相関、およびSPM量1時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関について、ピアソンの積率相関係数を用いて求めたものが図10である。

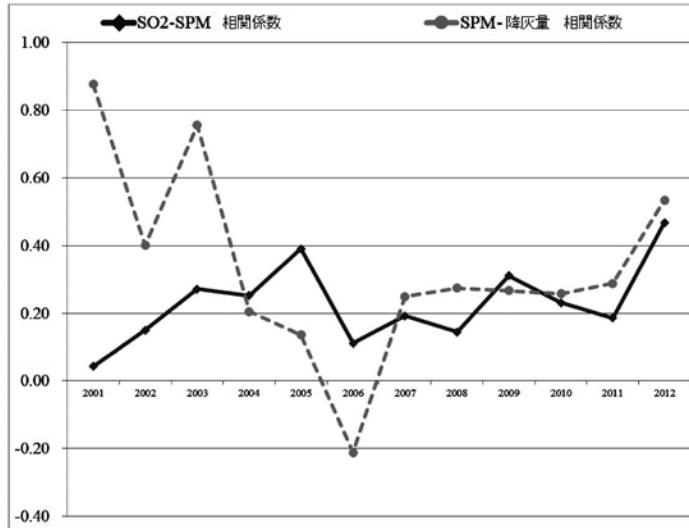


図10 黒神局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値の日毎積算値とSPM量1時間値の日毎積算値の年別相関係数グラフおよびSPM量1時間値の月毎積算値と黒神局降灰量月別積算値の相関係数グラフ。縦軸は相関係数、横軸は年

このSO₂ガスとSPM量の1時間値の日毎積算量の相関は、黒神局においては2012年に正の相関がみられる。また黒神局におけるSPM量1時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関を求めると、2007年から低い正の相関が見られるようになり、2012年には正の相関がみられるようになった。

4.5 桜島支局におけるSO₂ガスとSPM量の高濃度事象

桜島北側に位置する桜島支局（図1）で2001年～2012年に測定されたSO₂ガス高濃度事象の年別グラフをみると（図11-A）、2002年に26回、2010年に20回、2011年に24回、2012年に36回測定されている。また月別グラフ（図11-B）をみると、7月に28回、8月に37回、9月に19回と夏期を中心に測定されたことがわかる。つまり桜島支局で発生した148回の高濃度事象のうち、7月が18.9%、8月が25.0%、9月が12.8%と、この3ヶ月間で全体の56.7%を占めることになる。10月・11月・12月・1月・2月・3月の6ヶ月間が占める割合は14.2%である。

表11は、桜島支局で9時・21時に観測されたSO₂ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。桜島支局で2001年～2012年にかけて測定されたこの9時・21時のSO₂ガス高濃度事象は、総計で10回あり、このうち風速が8m/sec以上であった割合は90%であった。またその風向が150°以上190°以下という40°という非常に狭い角度の中で測定されている割合は90%であった。風速が8m/sec以上であり、風向が150°以上190°以下という二つの条件を満たすSO₂ガス高濃度

事象の観測結果は、全体の80%であった。

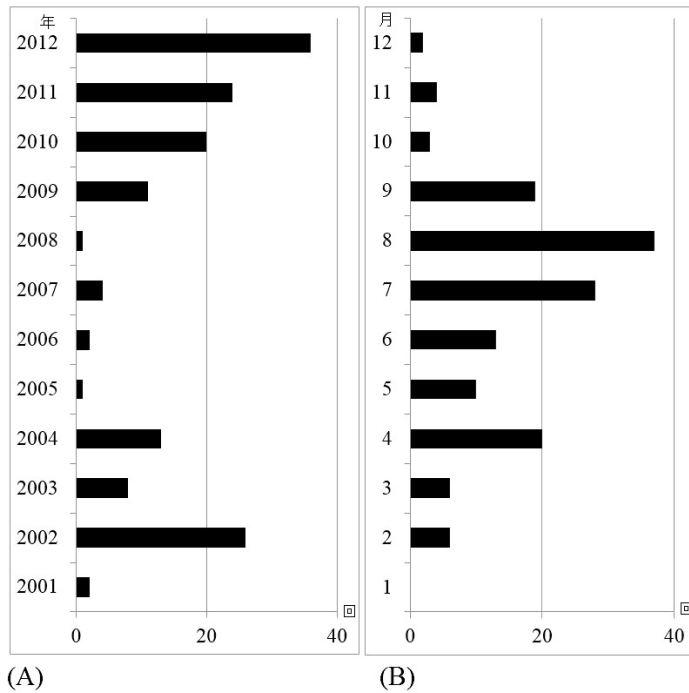


図11 桜島支局で2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ガス高濃度事象の年別変化(A)と月別変化(B)

表11 桜島支局で2001年～2012年にかけて測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

桜島支局	9時と21時の測定時数	8698
	9時と21時における高濃度事象時数	10
	全体に対する割合(%)	0.1%
	高濃度事象のうち風速8m/sec以上の時数	9
	高濃度事象10時間に対する全体に対する割合(%)	90%
	風向が150°以上190°以下の高濃度事象時数(40°以内)	9
	高濃度事象10時間に対する全体に対する割合(%)	90%
	風向が150°以上190°以下で8m/sec以上の高濃度事象時数	8
	高濃度事象10時間に対する全体に対する割合(%)	80%

5. 桜島火山のSO₂ガスの島外移流

4章で述べたように、桜島島内の各測定局で測定されるSO₂ガス濃度と風向・風速には明確な関連がある。しかし桜島火山SO₂ガスの長距離移流と島外の地表濃度の関係についてはこれまであまり議論されてこなかった。ただし視覚的に認識しやすい火山灰などについては、衛星画

像の解析から下流に向かって長距離移流するいくつかのパターンが明らかにされている（飯野・木下，1996）。

2009年12月18日～19日にかけて，有村局，鹿屋局，東串良局においてSO₂ガスの移流現象が測定された。この時，風速は18日9時で15m/sec，風向は322°であった。各測定局の位置を図12に示す。またこの3測定局のSO₂ガス濃度変化グラフを図13に示す。

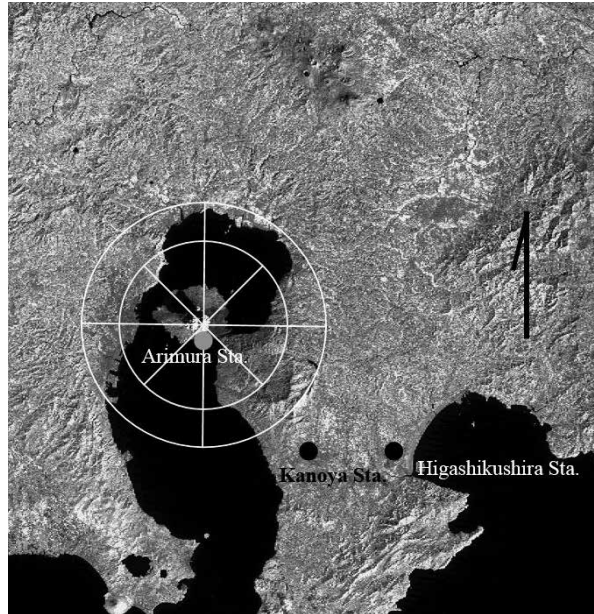


図12 桜島昭和火口から南東の方向に設置されている有村局，鹿屋局，東串良局

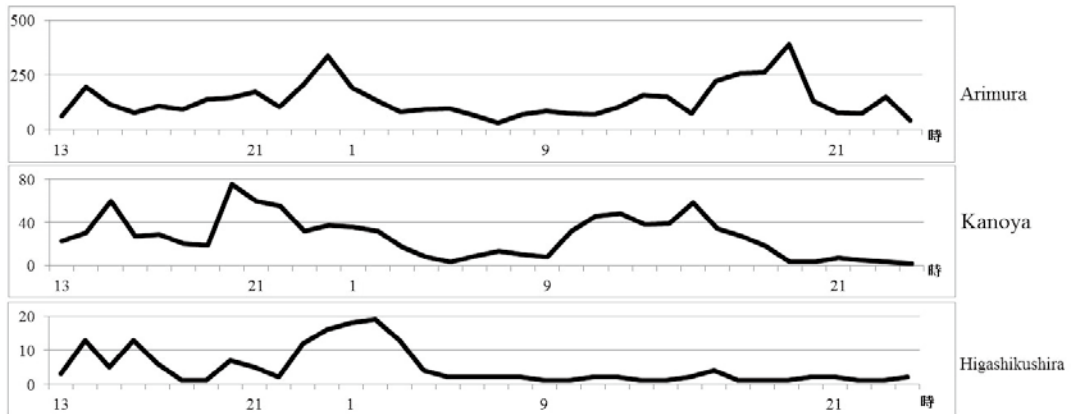


図13 桜島火山南東方向の3測定局（有村局・鹿屋局・東串良局）において2009年12月18日13時～19日にかけて測定されたSO₂ガスの濃度変化。縦軸の単位はppb

18日20時前後からこの3測定局のSO₂ガス濃度が高くなり始めた。同日21時の風速は18m/secという強風であり，風向は304°と桜島昭和火口から鹿屋・東串良方面へ向いていた。翌19日3時までこの事象は続き，同日9時の風速は17m/sec，風向は326°と変化し，これにより鹿屋局への移流は続くが東串良局への移流はなくなった。

木下ほか(2001)は、三宅島雄山から大気中に放出されたSO₂ガスによって、2000年8月に関東地方で異臭騒ぎが起こった問題を発端として三宅島雄山火山活動の影響を論じている。今回、強風下の桜島火山において大気中に放出されたSO₂ガスが拡散せず、下流の平地に高濃度のまま吹き付けたこの現象を例として、火口からの距離が大きくなることによって単純にSO₂ガス濃度が減少するわけではなく、SO₂ガスの濃度が高いまま維持される場合があることが明らかになった。

6. 考察

桜島火山防災は、鹿児島湾周辺の地域住民が早急に取り組むべき課題となっている。その中でも災害の痕跡が残りにくい火山ガス災害にどう対応するかは大きな課題である。三宅島雄山の火山ガス災害の例から考えてみても、多くの地域住民の避難を伴う可能性が出てくる複合的な災害であるだけに、早急に対策を講ずる必要性がある。

有村局について検討すると、SO₂ガス高濃度事象時数(4,593時間)は、今回測定された全SO₂ガス高濃度事象の61.9%を占める。またこのSO₂ガス高濃度事象のみならず、SPM量高濃度事象時数(1,405時間)や大量の降灰も高い相関を持つだけに対策を講じなければならない。本研究においてSO₂ガス高濃度事象とSPM量高濃度事象、そしてSPM量高濃度事象と降灰量の相関を論じたが、これにより有村局では桜島の火山活動が盛んになり、大量のSO₂ガスを大気中に放出するようになると、同時に大気中には大量のSPMが存在するようになり、また降灰も激しくなる可能性があることを示した。それゆえこれは個別に対応するのではなく、複合的な災害になる可能性があることを想定していく必要がある。

島内4測定局で測定されるSO₂ガス高濃度事象は、気圧配置と密接な関係があり、また火口や噴煙の流れる高度での風速が8m/sec以上であることが多い。さらに高濃度事象が発生する場合、風向の範囲が高い確率で絞れるために、防災情報として活用しやすい。特に黒神局では風向が250°以上280°以下でSO₂ガス高濃度事象がよく発生する。また弱風化で桜島火山が活発に活動する際、地上風の影響を受け、あらゆる方向でSO₂ガス高濃度事象が発生するケースがある。さらに強風下ではSO₂ガス高濃度事象は長距離の下流域でも起こることもあるため、島内だけでなく、広く南九州全域で警戒が必要であろう。

このように気象条件に左右されやすいSO₂ガス高濃度事象では、特に発生頻度の高い有村局での対策は早急に必要であり、さらに桜島の内外で、火山の活動状況と気象に注意を払い、的確に地域住民に情報を提供していく防災システムの構築が必要である。

7. まとめ

次の(1)～(15)を本研究のまとめとする。

- (1) 環境基準を超える桜島火山SO₂ガス高濃度事象は、平穏期であった2008年までの300回～600回前後から2009年以降急増し始め、2011年は1094回、2012年は1257回測定された。
- (2) 桜島火山の周囲に設置されている全測定局が測定したSO₂ガス高濃度事象に対する有村局

の SO₂ガス高濃度事象が占める割合は61.9%である。そのため全体の SO₂ガス高濃度事象の特徴に、有村局の SO₂ガス高濃度事象の特徴が反映する。

- (3) 有村局で SO₂ガス高濃度事象が発生する場合は、以下の①～③に当てはまる傾向が強い。
 - ①西高東低の冬型の気圧配置であること、
 - ②風速が8m/sec 以上の強風下であること、
 - ③風向が310° 以上30° 以下であること。
- (4) 有村局では、桜島火山の爆発・噴煙活動が少なかった2001年～2008年は、SO₂ガスと SPM 量、そして降灰量はほとんど相関がないが、2009年以降は互いに高い正の相関が認められるようになった。
- (5) 有村局では火山の噴煙活動が多くなることによって SPM 量が増加する。
- (6) 赤水局の SO₂ガス高濃度事象は、総計で1,934回であり、年別に区分してみると2011年に346回、2012年に431回と、年々増加傾向にある。
- (7) 弱風下における桜島火山周辺において、SO₂ガス高濃度事象が明らかになった。弱風下ではゆっくりと桜島火山上空に拡散した SO₂ガスが、対流混合によって地上の大気と混合し、変化しやすい地上風の風向に支配され、桜島火山周辺全域の観測局で高濃度事象が見られた。
- (8) 赤水局において、2011年および2012年において SO₂ガスと SPM 量の1時間値の日毎積算量に正の相関がみられた。
- (9) 黒神局で SO₂ガス高濃度事象が測定できる場合は、以下の①～③に当てはまる傾向が強い。
 - ①南高北低の気圧配置であること、
 - ②風速が8m/sec 以上の強風下であること、
 - ③風向が250° 以上280° 以下であること。
- (10) 黒神局において、2012年の SO₂ガスと SPM 量の1時間値の日毎積算量には正の相関がみられる。また SPM 量1時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値には、2007年から低い正の相関が見られるようになり、2012年には正の相関がみられるようになった。
- (11) 桜島支局における2001～2012年における SO₂ガス高濃度事象は夏期に集中する。
- (12) 桜島支局で SO₂ガス高濃度事象が測定できる場合は、以下の①～③に当てはまる傾向が強い。
 - ①風速が8m/sec 以上であること。
 - ②風向が150° 以上190° 以下であること。
- (13) 島外の観測局での SO₂ガス高濃度事象は、火口から遠距離であっても強風であれば下流地域で発生する場合がある。また、好天時には火口から放出された SO₂ガスがある一定の高度を維持しながら流下する際、対流混合によって地上付近で高濃度事象を発生させる場合がある。
- (14) 火山活動が盛んになると SO₂ガス濃度高濃度事象・SPM 量高濃度事象・降灰量は同時に増加し始め、複合的な災害になる可能性が高い。それゆえ桜島火山の周囲では火山噴出物に対してそれぞれ個別の対策だけでなく、総合的な防災対策を採るべきである。
- (15) 桜島火山の活動状況と気象に注意を払い、的確に地域住民に情報を提供していく防災システムの構築が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、鹿児島県環境林務部環境保全課、鹿児島県危機管理局危機管理防災

課、鹿児島市環境局環境保全課には貴重なデータの提供を受けました。また鹿児島大学法文学部自然地理学研究室の森脇 広教授、熊本大学教育学部理科教育学研究室飯野直子准教授、熊本県立熊本支援学校金柿主税氏には有意義なご示唆を数多くいただきました。そして二人の匿名査読者の方にはたいへん有益なコメントを戴きました。この場を借りて深く謝意を申し上げます。

引用文献

- 東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議 (2012):「東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議」最終報告. 20p.
- 平林順一 (2003): 火山ガスと防災. *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.* **51**, 119-124.
- 菱山剛秀・政春尋志 (1998): 火山ガス災害危険箇所の地形条件. *国土地理院時報*, **90**, 79-85.
- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾 茂 (2008): GPS 観測から明らかになった桜島のマグマ活動. *京都大学防災研究所年報*, **51**, 241-246.
- 飯野直子・木下紀正 (1996): 桜島噴煙の衛星画像の鉛直シャーモデルによる検討. *鹿児島大学教育学部研究紀要*, 自然科学編, **47**, 1-17.
- 飯野直子・木下紀正・小山田 恵・金柿主税 (2002): 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概要集, 145-146.
- 飯野直子・小山田 恵・木下紀正・金柿主税 (2003): 三宅島の衛星画像と火山ガス高濃度事象. *南太平洋海域調査報告*, **37**, 66-75.
- 飯野直子・木下紀正・矢野利明 (2005): 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**, 505-520.
- 鹿児島地方気象台 (2013a): 桜島の月別噴火回数. (最終閲覧日: 2013年9月26日).
http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html
- 鹿児島地方気象台 (2013b): 桜島の月別爆発回数. (最終閲覧日: 2013年9月26日).
http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_exp_num.html
- 鹿児島県危機管理局危機管理防災課 (2010): 桜島降灰量観測結果 (H5～H19). (最終閲覧日: 2013年9月29日)
<http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/sakurajimakouhairyou.html>
- 鹿児島県危機管理局危機管理防災課 (2013): 桜島降灰量観測結果 (H20～). (最終閲覧日: 2013年9月29日)
<http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/sakurajimakouhairyou2.html>
- 環境庁 (1973): 大気汚染に係る環境基準について. 昭和48年5月16日, 環境庁告示35号, 平成8年10月25日, 環境庁告示73号.
- 風早康平・篠原宏志・宇都浩三・尾台正信・森 博一・中堀康弘・飯野英樹・平林順一 (2002): COSPEC による SO₂放出量測定. 第43回大気環境学会年会講演要旨集, 120-123.
- 木下紀正 (1992): 火山噴煙の観測と解析, *気象利用研究*, **5**, 51.
- 木下紀正 (1996): 火山噴煙の上昇と移流・拡散. *可視化情報*, **16**, 230-235.

- 木下紀正・今村和樹・金柿主税 (1994)：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論文集, 79-84.
- 木下紀正・池田伸一郎・金柿主税・直江寛明・今村和樹 (1998a)：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, **22**, 133-138.
- 木下紀正・西之園雅靖・瓜生洋一郎・金柿主税 (1998b)：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, **50**, 11-27.
- 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.
- 木下紀正・飯野直子・坂本昌弥・金柿主税 (2006)：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, 406-414.
- 木下紀正・坂本昌弥 (2008)：工場排煙・放射性物質と火山ガスの大気拡散問題. 日本科学者会議第17回総合学術研究集会予稿集, 216-217.
- Kisei KINOSHITA, Masaya SAKAMOTO, Chikara KANAGAKI, Naoko IINO (2013)：Mechanism of high concentration events of sulfur dioxide at the surface around Sakurajima Volcano. IAVCEI 2013 Scientific Assembly Program, 1094.
- 気象庁 (2013a)：日々の天気図. 気象庁 HP. (最終閲覧日：2013年3月10日).
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>
- 気象庁 (2013b)：過去の気象観測データ. (最終閲覧日：2013年9月25日).
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 小坂文予・平林順一・山本雅弘・野上健治 (1998)：わが国に於ける火山ガス人身災害の発生要因とその防止対策. 自然災害科学, 17-2, 131-154.
- 小山田 恵 (2000)：桜島噴煙の移流と火山ガスの研究. 鹿児島大学教育学部卒業論文.
- 小山田 恵・木下紀正 (2000)：環境大気データによる黄砂と火山ガスの検出. 平成11年度日本気象学会九州支部講演会講演要旨集, 13-14.
- 小山田 恵 (2002)：黄砂エアロゾルと三宅島噴煙の気象衛星データによる研究. 鹿児島大学大学院教育学研究科教科教育専攻理科教育専修, 修士論文.
- 小山田 恵・木下紀正・金柿主税・飯野直子 (2003)：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, **54**, 1-20.
- 松田和秀・An, Junling (2003)：硫黄酸化物の沈着量推計—三宅島雄山火山活動の影響—. Bulletin of JESC, **30**, 42-46.
- 三宅島火山ガスに関する検討会ワーキンググループ (2003)：三宅島火山ガスに関する検討会報告書, 81p.
- 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**, 168-180.
- 大和田道子・風早康平 (2005)：火山ガス観測のための小型 SO₂観測システムの開発. GSJ ニュースレター, **6**(3), 1-3.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2005)：2001年の桜島における火山ガス高濃度事象. 鹿児島大学教育学

- 部研究紀要, 自然科学編, **56**, 11-20. 及び引用文献.
- 坂本昌弥・木下紀正・八田明夫・森脇 広 (2006): 桜島火山防災マップを活用した防災教育. 日本理科教育学会九州支部発表論文集, **34**, 17-20.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2009): 2001年桜島火山ガスを教材とした気象教育. 日本気象学会九州支部発表会要旨集, 5-6.
- 城下英行 (2012): 東日本大震災と防災教育. 社会安全学研究, **2**, 44-45.
- 山崎 誠 (2004): アジア大陸から移流した硫酸塩エアロゾルの煙霧による高 SPM 事例の解析. 福岡市保健環境研究所報, **29**, 101-104.
- 安井真也・高橋正樹・石原和弘・味喜大介 (2006): 桜島火山大正噴火の記録. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **41**, 75-107.

原稿受領日: 平成25年10月2日; Received 2 October 2013

掲載受理日: 平成25年11月12日; Accepted 12 November 2013