

桜島火山周辺の大気環境¹

坂本 昌弥・木下 紀正²

Atmospheric environment around Sakurajima volcano

Masaya SAKAMOTO and Kisei KINOSHITA

【要約】 桜島火山噴出物が周辺の大気環境に与える影響を考察するため、2014年～2015年における鹿児島県内各地のSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}地表濃度の変化を分析し、互いの相関について検討した。桜島南麓の有村局で発生するSO₂ガス及びSPMの高濃度事象は、桜島周辺で発生するそれら全体の多くを占め、かつ互いに強い正の相関が認められた。またSO₂ガス及びSPMは高濃度を保ったまま下流の鹿屋局へ強風により移流する場合があり、その際にはPM_{2.5}濃度も高い正の相関が見られた。島内西側の赤水局でもSO₂ガス及びSPMの濃度には強い正の相関が認められた。強い東風で高濃度事象が発生することが多い赤水局の傾向は、桜島の西側の海を隔てた鹿児島市役所局や鴨池局でも見られ、特に夏期に顕著であった。またその際にはPM_{2.5}濃度も高い正の相関を持つ場合がある。その他の測定局でもSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}濃度には正の相関が認められる場合があり、火山性ガス及び粒子状物質は、桜島周辺の大気環境に対して強い影響を与えている。この影響は、2015年後期の噴火活動の急激な低下とともに激減している。

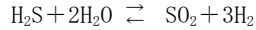
【キーワード】 二酸化硫黄、浮遊粒子状物質、微小粒子状物質、噴煙、高濃度事象

1 研究の背景と目的

三宅島雄山では2000年6月26日から地震活動が急激に高まり、7～8月には激しい噴火が見られた(中田, 2001)。その後強風下で火口から大気中に放出された二酸化硫黄(以下、SO₂と表記)は、環境基準を超える高濃度で地域住民の生活域へ吹き付けた。このSO₂高濃度事象により地域住民は長期間にわたる島外への避難を強いられることになった(飯野ほか, 2002 a ; 木下ほか, 2006)。長野・岐阜両県境に位置する御嶽山は、7年ぶりとなる噴火活動が2014年9月27日から始まり、突然の水蒸気爆発によって噴出した火山岩塊・火山礫等により、死者58人、行方不明者5人を出す戦後最大の火山災害となった(及川ほか, 2015)。火口からは火山ガスを主体とした噴煙が放出され、一時は最大高度7,000mまで上昇した(中野ほか, 2014)。その後11月8日に火山噴火予知連絡会御嶽山総合測定班の調査により、山頂付近で硫化水素(以下、H₂Sと表記)ガスが最大で4 ppm検出され(及川ほか, 2015)、また気象庁地震火山部火山監視・情報センター(2017)の測定

では、同年9月は御嶽山の火口からのSO₂ガスが一日あたり500トン～1,500トン程度の範囲で大気中に放出していたことが確認されている。

一般に活動的な火山の火口から大気中に放出されるさまざまな火山ガスのうち、SO₂ガスとH₂Sガスの関係は、以下の化学反応式で表現できる（下鶴ほか編，1995）。



マグマから脱ガスする際、高温で火口から放出されるSO₂ガスは、現在日本の火山では桜島・阿蘇・三宅島雄山等で比較的多くみられ、低温で発生するH₂Sガスは、箱根湯ノ花沢・草津白根山・安達太良山等で多くみられる。阿蘇火山の火口からは、近年SO₂ガスが日量平均1,000トン前後の範囲で大気中に放出されており、2004年と比較するとその活動が活発化しているといえる（斎藤ほか，2007；阿蘇山火山防災連絡事務所，2017）。2017年10月11日から霧島新燃岳は6年ぶりに噴火活動を再開したが、翌12日には大気中へのSO₂ガスの放出が1～2万トン程度測定されており（産業技術総合研究所，2017）、その風下周辺では植物の枯死も見られた。

SO₂ガスは、無色で刺激臭のある気体であり、吸い込むと呼吸器や眼、喉頭などの粘膜を刺激し、高濃度の状態では呼吸が困難になる。また気管支喘息等の呼吸器系疾患を持つ場合や新生児・乳児・妊婦等の場合、健康な人が認識することができない低濃度でも、健康被害が発生することがある（内閣府，2003）。具体的には人体におけるSO₂ガスの許容濃度は1時間値で5ppmとされ、致死濃度も500～1,000ppmの範囲であるとされている（平林，2003）。

鹿児島大学噴煙火山ガス研究グループは、1990年代から桜島火山の周辺におけるSO₂高濃度事象に関する研究を進め、同時に衛星画像や地上観測映像を用いた噴煙の挙動解析を行い、特定の気象条件下におけるSO₂高濃度事象の発生パターン（特に山麓の局所に強風下で吹き降ろすメカニズム）を明らかにした（木下，1992；木下ほか，1994；木下ほか，1998a；木下ほか，1998b；坂本・木下，2005）。さらに2000年以後の三宅島火山ガスの高濃度事象の解析に取り組み（例えば、飯野ほか，2002b；飯野ほか，2003；木下ほか，2006）、火山ガス災害に関する新たな知見を示した。そして現在、火山ガスの高濃度事象及びその移流・拡散現象については、長距離移流の解明（直江ほか，1993；石川ほか，1994；金柿ほか，1994；Kinoshita et al.，2001）、火山性の浮遊粒子状物質SPM(Suspended Particulate Matter)・微小粒子状物質PM_{2.5}(Particulate Matter 2.5)の変動を含めて研究され（坂本・木下，2015；坂本・木下，2017）、また放射性物質の拡散問題（木下・坂本，2008）への応用も考えられている。

本研究では、鹿児島県下の2014年～2015年のSO₂ガス濃度・SPM・PM_{2.5}濃度の相関を中心として、桜島火山周辺の大気環境への影響について検討した。

2 研究方法

本研究で使用した大気中のSO₂ガス濃度及びSPM・PM_{2.5}濃度は、鹿児島県環境林務部環境保全課及び鹿児島市環境局環境保全課が設置した大気環境測定局（図1・表1）によって測定された地表1.5mの値である。これまで鹿児島県内の大気環境データの経年変化は、藪ほか（2004）、東小菌ほか（2016）によってまとめられている。

SO₂ガス濃度は、溶液導電率法又は紫外線蛍光法によって自動測定が行われている（鹿児島県，2016）。データ解析にあたり、本研究では環境基準（環境庁，1973）に基づき、SO₂ガス濃度の1時間値が0.10ppm（=100ppb）を超える場合、これをSO₂高濃度事象とし、その回数を数値化した。SPM濃度は、濾過捕集による重量濃度測定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もしくはベータ線吸収法によって測定されている（鹿児島県，2011）。本研究におけるSPM高濃度事象の定義は、環境基準（環境庁，1973）をもとに、先行研究である小山田（2000）および小山田・木下（2000）等を参照し、「1時間値が100μg/m³以上であること」とした。PM_{2.5}についても濾過捕集による方法によって測定された質量濃度と等価な値が得られると認められる自動測定機によって測定されている（鹿児島県，2011）。PM_{2.5}の高濃度事象を定義する際、環境省の定めた環境基準（環境省，2009）には、1時間値の規定がないため、PM_{2.5}の環境基準である「1年平均値が15μg/m³以下であり、かつ、1日平均値が35μg/m³以下である」に準拠し、「1時間値が35μg/m³以上であること」を高濃度事象の基準とした。このPM_{2.5}の測定局は8局だけで、SO₂ガス及びSPMとは異なり、表1で示すように薩摩半島側で多く、桜島を含む大隅半島側で少ない。

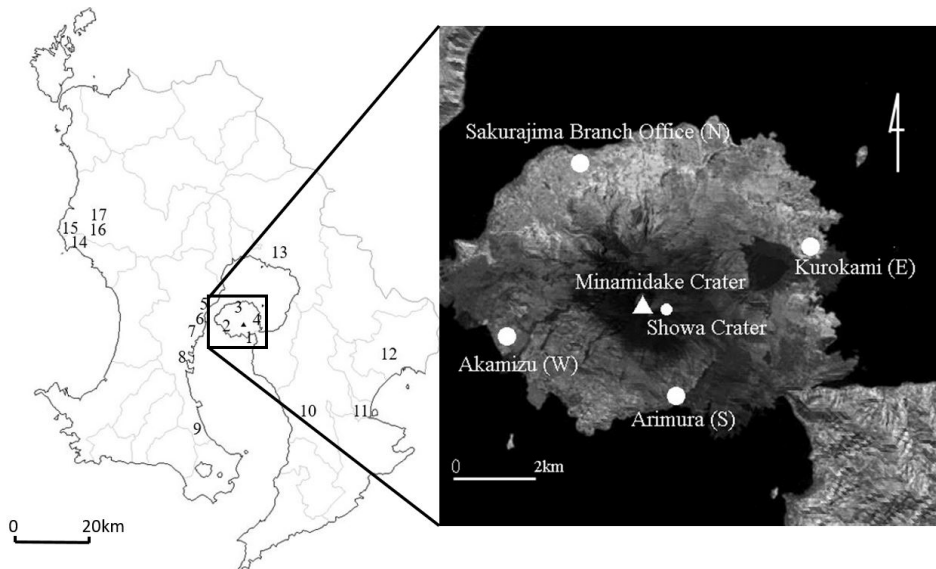


図1 鹿児島県及び桜島火山と大気環境測定局（番号は表1参照）の位置

表1 SO₂・SPM・PM_{2.5}の測定局と測定内容（測定局番号は図1と対応、○は測定実施を表す）

番号		SO ₂	SPM	PM _{2.5}	番号		SO ₂	SPM	PM _{2.5}
1	有村局 (S)	○	○	-	10	鹿屋局	○	○	○
2	赤水局 (W)	○	○	-	11	東串良局	○	○	-
3	桜島支所局 (N)	○	○	-	12	志布志局	○	○	-
4	黒神局 (E)	○	○	-	13	霧島局	○	○	○
5	鹿児島市役所局	○	○	○	14	羽島局	○	○	○
6	環境保健センター局	○	○	-	15	寄田局	○	○	-
7	鴨池局	○	○	○	16	薩摩川内局	○	○	○
8	谷山支所局	○	○	○	17	環境放射線監視センター局	○	○	-
9	喜入局	○	○	○					

風速・風向のデータは、気象庁がウェブ公開している高層気象データを使用した (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)。本研究において、特に断らない限り風向・風速は9時・21時の2回に測定された925hPaの値である。桜島では大きな爆発が発生した場合、噴煙が3,000~5,000mも上空に上昇する場合は観測される。しかし桜島山麓や周辺の地表濃度に直接影響するのは、おおよそ昭和火口の高度(海拔約850m)に対応する925hPaの風系が指標となることは、先行研究で確かめられている(木下ほか, 1994)。風向・風速については文章中では $D^\circ \cdot \text{Sm/sec}$ と示すこととする。風向 D° は北風を 0° とし、時計回りに何度の方角から風が吹いてくるかを表現した。例えば 180° の風は南風、 270° の風は西風となる。

SO_2 ガス濃度とSPM・ $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の相関については、その一つの1時間値をX、同日同時刻の他の一つの1時間値を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を用いて相関係数を算出した。そして得られた数値($-1 \leq r \leq 1$)によって、 SO_2 ガス・SPM・ $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の相関を判断した。

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

SPMについては火山起源のほかに黄砂の影響が見られる(小山田・木下, 2000)。同様に $\text{PM}_{2.5}$ についても遠方に起源をもつと推定されるものが報告されている(味喜ほか, 2014)。それゆえSPMと $\text{PM}_{2.5}$ については、背景事象として大陸起源や局所的な様々な起源の可能性があるが、本研究では桜島火山の火口から大気中に放出される SO_2 ガス濃度と相関して増減するSPMと $\text{PM}_{2.5}$ について議論した。なお、桜島噴出物の中で火山灰が生活環境に与える影響は大きい、降灰量の時間分解能の良い測定は困難であり、環境大気データと詳しく比較できるデータは整備されていないため、本稿では扱わない。

火山噴出物の地表濃度への影響をつかむため、噴煙の流れ方を調べるのが重要である。鹿児島大学・熊本大学噴煙研究グループでは、桜島噴煙の地上映像観測や衛星画像・レーダーデータの総合的解析を行っており、その2014、2015年の結果(木下ほか, 2015; 木下ほか, 2017)と各種高濃度事象との照合を行った。

3 大気環境データの概要と桜島火山の噴火活動

2014年1月1日~2015年12月31日の鹿児島県下17測定局における SO_2 ガス・SPM・ $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の測定時間、欠測時数、欠測率を表2に示す。測定局によって測定時数が異なるのは、測定機器の保守点検・故障等による欠測があるためである。次に表3に各測定局での最高値、高濃度事象の発生時数、発生割合を示す。

表3の中で、特に火口の南方3kmの山麓に位置する有村局及び西方4.3kmの海岸近くに位置する赤水局において SO_2 ガスの高濃度事象回数が多く、中でも2015年1月23日3時に測定された有村局の最高値5,260ppbは、2001年以降全測定局の中で最も高濃度であった。また赤水局で2014年11

月8日20時に測定された1,650ppbも同局における2001年以降の最高値であった。

有村局のSO₂高濃度事象は、全測定局で測定されたSO₂高濃度事象の59.6%を占める。先行研究により、この有村局でSO₂高濃度事象が発生する傾向は、①西高東低の冬型の気圧配置下、②風速8m/sec以上、③風向が310°以上30°以下である場合に多発することが明らかになっているが(坂本・木下, 2014)、本研究の期間においても同様の傾向を示している。赤水局のSO₂高濃度事象は、全測定局で測定されたSO₂高濃度事象の22.7%を占める。ここでは低気圧が鹿児島島の南の海上を移動する時の強い東風による吹き降ろしか、高気圧の勢力下の弱い東風で上空のSO₂ガスが地上付近の大气と対流混合することによって高濃度事象が発生する場合がある(木下ほか, 1998a ; 坂本・木下, 2014)。

表2 各測定局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}の測定時数・欠測時数・欠測率

番号	観測対象 観測局	SO ₂			SPM			PM _{2.5}		
		観測時数[h]	欠測時数[h]	欠測率[%]	観測時数[h]	欠測時数[h]	欠測率[%]	観測時数[h]	欠測時数[h]	欠測率[%]
1	有村局	17,450	70	0.4	17,497	23	0.1	-	-	-
2	赤水局	17,429	91	0.5	17,395	125	0.7	-	-	-
3	桜島支所局	17,437	83	0.5	17,425	95	0.5	-	-	-
4	黒神局	17,445	75	0.4	17,398	122	0.7	-	-	-
5	鹿児島市役所局	16,808	712	4.1	17,216	304	1.7	17,253	267	1.5
6	環境保健センター局	17,422	98	0.6	17,445	75	0.4	-	-	-
7	鴨池局	17,445	75	0.4	17,439	81	0.5	17,371	149	0.9
8	谷山支所局	17,452	68	0.4	17,497	23	0.1	17,438	82	0.5
9	喜入局	17,441	79	0.5	17,282	238	1.4	17,445	75	0.4
10	鹿屋局	17,398	122	0.7	17,422	98	0.6	17,447	73	0.4
11	東串良局	17,263	257	1.5	17,400	120	0.7	-	-	-
12	志布志局	17,408	112	0.6	17,437	83	0.5	-	-	-
13	霧島局	17,416	104	0.6	17,451	69	0.4	17,453	67	0.4
14	羽島局	17,338	182	1.0	17,374	146	0.8	17,377	143	0.8
15	寄田局	16,939	581	3.3	16,985	535	3.1	-	-	-
16	薩摩川内局	17,413	107	0.6	17,454	66	0.4	17,427	93	0.5
17	環境放射線監視センター局	17,397	123	0.7	17,426	94	0.5	-	-	-

表3 各測定局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度1時間値の最高値・高濃度事象発生時数・発生率

番号	観測条件 観測局	SO ₂ > 100ppb			SPM > 100µg/m ³			PM _{2.5} > 35µg/m ³		
		最高値 [ppb]	発生時数 [h]	発生率 [%]	最高値 [µg/m ³]	発生時数 [h]	発生率 [%]	最高値 [µg/m ³]	発生時数 [h]	発生率 [%]
1	有村局	5,260	753	4.3	943	369	2.1	-	-	-
2	赤水局	1,650	287	1.6	1,005	234	1.3	-	-	-
3	桜島支所局	411	18	0.1	268	26	0.1	-	-	-
4	黒神局	698	80	0.5	458	124	0.7	-	-	-
5	鹿児島市役所局	119	5	0	377	26	0.2	127	1,355	7.9
6	環境保健センター局	122	3	0	207	129	0.7	-	-	-
7	鴨池局	324	32	0.2	258	45	0.3	134	1,526	8.8
8	谷山支所局	203	17	0.1	273	31	0.2	112	1,091	6.3
9	喜入局	76	0	0	149	3	0	97	543	3.1
10	鹿屋局	172	57	0.3	227	31	0.2	148	1,370	7.9
11	東串良局	151	7	0	487	124	0.7	-	-	-
12	志布志局	99	0	0	136	14	0.1	-	-	-
13	霧島局	177	5	0	367	12	0.1	359	1,456	8.3
14	羽島局	72	0	0	174	22	0.1	128	1,244	7.2
15	寄田局	61	0	0	115	5	0	-	-	-
16	薩摩川内局	99	0	0	151	12	0.1	125	1,732	9.9
17	環境放射線監視センター局	79	0	0	167	15	0.1	-	-	-

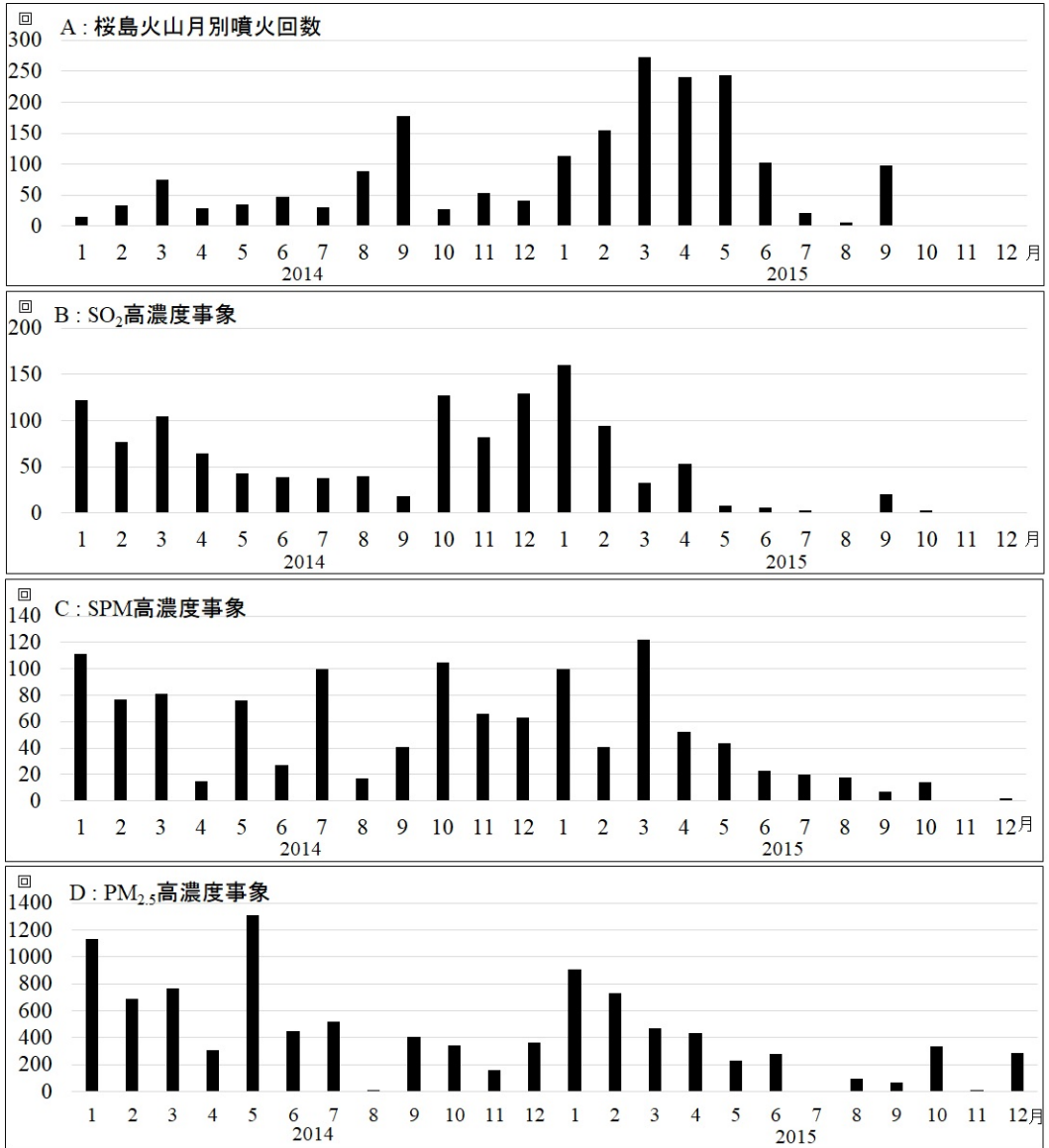


図2 2014年～2015年の桜島火山の月別噴火回数（鹿児島地方気象台，2016）及び鹿児島県下の大気環境高濃度事象（17局総計）（A：桜島火山月別噴火回数、B：SO₂月別高濃度事象回数、C：SPM月別高濃度事象回数、D：PM_{2.5}月別高濃度事象回数）

SPMに関しては、有村局で2015年5月21日に同局の最高値となる943 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ が測定された。この日の映像記録では、噴煙が強風で有村局に吹き降ろされる様子が確認された。同局の2014年及び2015年の高濃度事象発生率は2.8%、1.4%であり、2年間の平均では2.1%であった。また同局でのSPM高濃度事象は、全測定局の30.2%を占め、SO₂ガスの場合と同様に全体に占める割合が大きい。赤水局では2014年11月8日20時に1,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の高濃度事象が測定された（4-（5）参照）。これは2001年以降、2008年12月21日9時に測定された1,645 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に次ぐ高濃度事象である。

PM_{2.5}に関しては、桜島火山の北側に位置する霧島局で2015年10月17日19時に測定された359 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ が、

2011年以降の全観測局データの中で最高値であった。なお、この事象のメカニズムは不明で、桜島火山噴出物や黄砂の可能性は低いため、今後検討する必要がある。

2014年1月～2015年12月までの桜島火山の月別噴火回数及び鹿児島県下17測定局におけるSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}の各高濃度事象の月別発生合計回数を図2に示す。桜島火山は2014年には計656回、2015年には計1,252回の噴火を記録している（鹿児島地方気象台，2016）。いずれも昭和火口からの小規模噴火がほとんどであったが、このうち2015年3月の噴火回数は272回であり、これは1982年以降の月別噴火回数としては最多である。同年4月は241回、5月は244回と、小規模な噴火が多発する傾向は続いていたが、2015年10月～12月では噴火活動は記録されなくなる（鹿児島地方気象台，2016）。図2からはSO₂ガス・SPMの各高濃度事象もこの機を境に極端に減少する傾向がわかる。またPM_{2.5}の高濃度事象もかなり減少している。

桜島火山のSO₂ガス放出量の2年間の変化も、月別噴火回数に近い傾向が見られ、2015年8月以後は極端に減少している（鹿児島地方気象台，2016）。ただし月数回の随時観測のため、2015年9月の噴火回数の一時的回復とは対応していない。

4 各測定局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}の相関

(1) 桜島島内4局におけるSO₂・SPMの相関

桜島島内に位置する有村局・赤水局・桜島支所局・黒神局の4局で測定されたSO₂ガスとSPMの1時間値濃度の月別相関係数の推移を図3に示す。なお、PM_{2.5}は島内4局では測定されていない。

桜島南側の山麓に位置する有村局では、先行研究から特に冬期にSO₂高濃度事象の発生頻度が高くなり、夏期には低下することが明らかになっている（坂本・木下，2005；坂本・木下，2014）。これは強い北風によって、火口から大気中に放出されたSO₂ガスが風下に位置する有村局に吹き降ろされるためである。噴煙活動が活発であった2014年10月～2015年3月におけるSO₂ガスは、高濃度のSPMと強いもしくは高い正の相関を示しながら有村局に吹き降ろしている。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年では、SO₂ガスとSPMの間にはほとんど相関が出ないが、2009年以降は互いに高いもしくは強い正の相関が認められ（坂本・木下，2014）、本研究でも引き続き同様の結果が得られた。これは火山の噴煙活動が活発になることによって、SO₂ガスとSPMが火口から大量に放出されたためである。ただし、SO₂ガスとSPMの相関の強弱には、噴火回数の増減で表される噴煙活動の活発さだけでなく、噴出物が測定局に到達する気象条件の季節性にも依存する。

火口の西側の海岸近くに位置する赤水局においては、SO₂ガスとSPMの濃度に2014年6月から高い相関がみられるようになり、11月には0.83の強い正の相関がみられた。これはこの月に接近した台風20号や南の海上を通る低気圧による強い東風の影響によるものと考えられる。また黒神局では春期に高い正の相関があることがわかる。桜島支所局では月別相関がほとんど見られない。

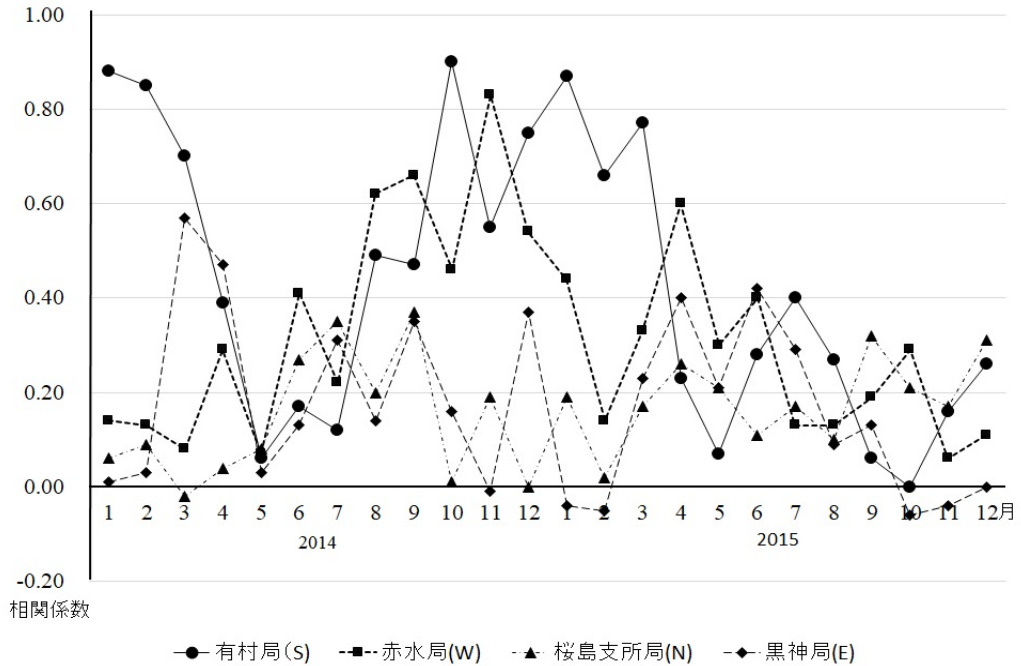


図3 桜島島内にある有村局・赤水局・桜島支所局・黒神局における2014年～2015年のSO₂・SPM濃度の月別相関係数の推移

(2) 鹿児島市役所局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の相関

火口の西側10.3kmの対岸に位置する鹿児島市役所局では、SO₂ガス・SPM濃度に加えてPM_{2.5}濃度が測定されている。これらの相関について示したものが図4(a)である。同じ粒子状物質であるSPM・PM_{2.5}の濃度は、互いに強い正の相関が認められる。特に2014年2月は相関係数が0.94であり、またこの24か月の平均でも0.74と強い正の相関が認められる。これは火山起源の粒子状物質ではなく、遠方に起源をもつものが西から東に向かって度々移流していたためであろう。

同局のSPM・SO₂ガス濃度、及びPM_{2.5}・SO₂ガス濃度の相関については、夏期である9月に高い正の相関が出るが、1月や12月といった厳冬期には出ない。同局では好天の午後、火口から大気中に放出されたSO₂ガスを含む空気が、地上で暖められた空気と対流することによって高濃度事象を引き起こすことが先行研究によって明らかになっている(木下ほか, 1998b)。2014年と2015年の9月には台風や低気圧が相次いで南の海上を通過したため強い東風が支配的となり、同局において火山性のSO₂ガスの高濃度とともにSPM・PM_{2.5}が高い濃度で測定されたと考えられる。なお、2014年の9月には桜島が178回の噴火を記録しており(鹿児島地方気象台, 2016)、これにより同局では192g/m²の降灰量が測定された(鹿児島県, 2017)。噴火回数と降灰量は2015年の方が少ないが、SO₂ガスとSPM・PM_{2.5}濃度の月別相関係数はむしろ高くなっている。これは上空を通過する爆発噴煙や粒径の大きな降灰は火山ガスや微小粒子の地表濃度には直接影響しないためである(木下ほか, 1998b)。

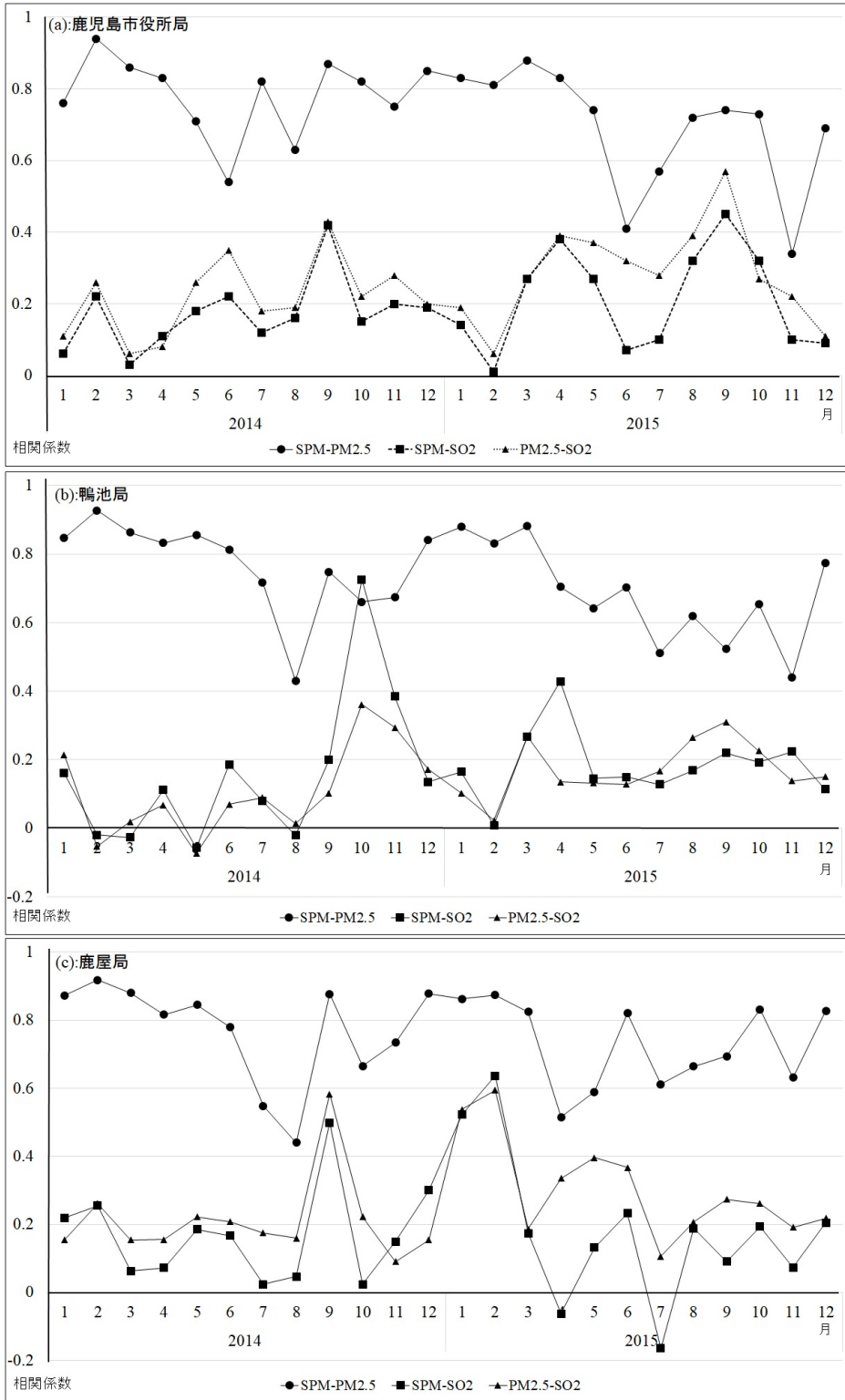


図4 2014年～2015年の3局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の月別相関係数の推移.
 (a) 鹿児島市役所局、(b) 鴨池局、(c) 鹿屋局.

(3) 7 測定局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の相関

PM_{2.5}濃度が測定される鹿児島県内の8局の位置を図5に示す。SO₂ガス・SPM・PM_{2.5}濃度の相関に顕著な変動が見られる鴨池局と鹿屋局の月別相関係数を図4(b)・(c)に示し、他の5局は図5の中に示す。このうち北部に位置する羽島局、薩摩川内局、霧島局では年間を通してSPM・PM_{2.5}濃度の相関係数が0.9を超える。これはSPMとPM_{2.5}の大気中の濃度がほとんど同じような挙動で増減していることを示しており、大気中の粒子状物質に対する火山噴出物の影響よりも遠方などにその起源を持つ場合が多いために生じると考えられる。これらのデータは粒子状物質に対する火山の影響を考える際の背景データとして用いることができる。これに対して鴨池局、鹿屋局ではSPM・PM_{2.5}濃度の相関の変動が大きく、谷山支所局、喜入局でも変動が少し見られる。これは火口から放出された粒子状物質の寄与があるためと考えられる。また、交通による大気汚染や乾燥した農地からの風塵など測定局毎の状況の違いがあり、その検討は今後の課題である。最近の研究では、鹿児島県で火山の影響の少ない所ではSPM・PM_{2.5}濃度の日平均値の相関は高く、地域間の相関も高く、黄砂や越境汚染の広域的影響が大きいことが結論されている(肥後ほか, 2014; 西中須ほか, 2016)。これは背景濃度の理解のために重要な参考になる。

(4) 有村局～鹿屋局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の相関

各局のSPM・SO₂ガス濃度とPM_{2.5}・SO₂ガス濃度の相関係数の全平均は、0.19、0.21と小さな値となるが、火口の南東29.1kmに位置する鹿屋局の2015年1月の相関係数は0.52と0.54、2月の相関係数は0.64と0.59と高い正の相関を示す値であった。

有村局及び鹿屋局において発生した特徴的な事例について図6～8で検討する。2015年3月23日には、噴煙が桜島から南々東方向へ線状移流していく様子が図6(a)・(b)のMODIS-AVI衛星画像で観察できる。同日9時の925hPaの風速は12m/sec、風向は339°、21時は13m/sec、351°であった。(c)の天気図では日本上空にあった低気圧が東へ進み、次第に冬型の気圧配置へ移行したため、卓越した北風が九州に強く吹いたことがわかる。

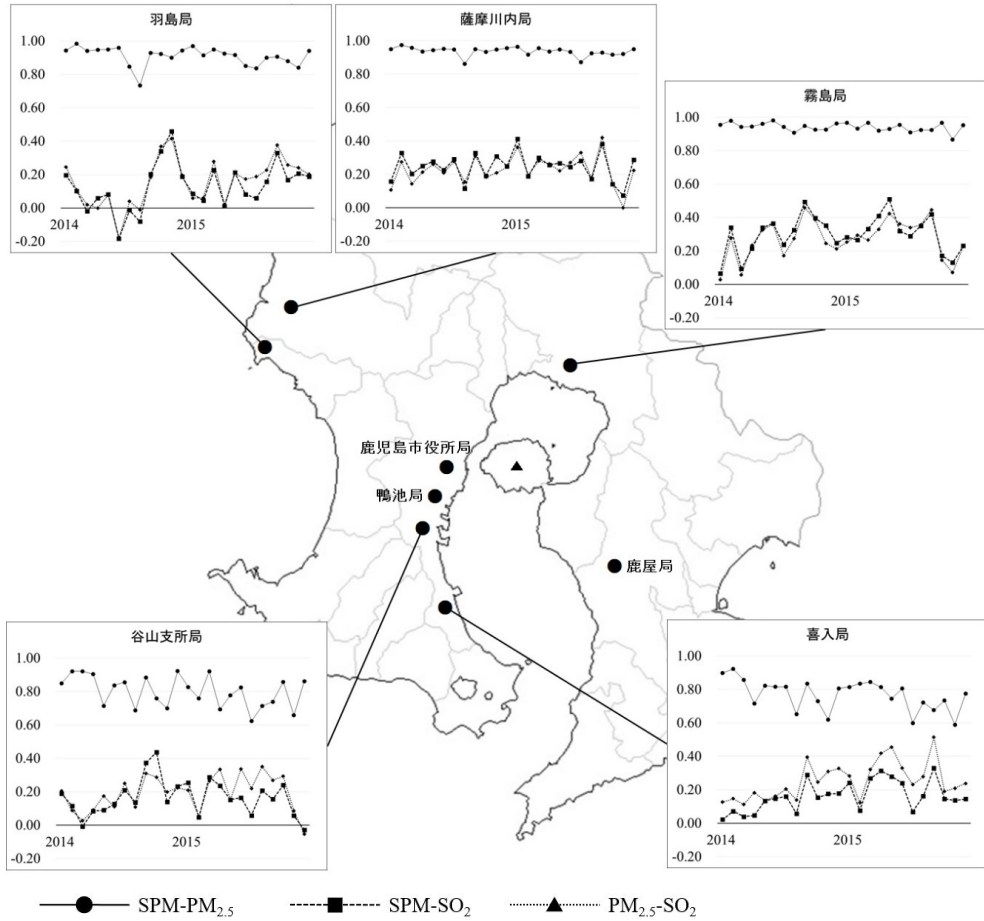


図5 鹿児島県内の各測定局の位置及び2014年～2015年のSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の月別相関係数の推移（図中グラフの縦軸は相関係数、横軸は時間）

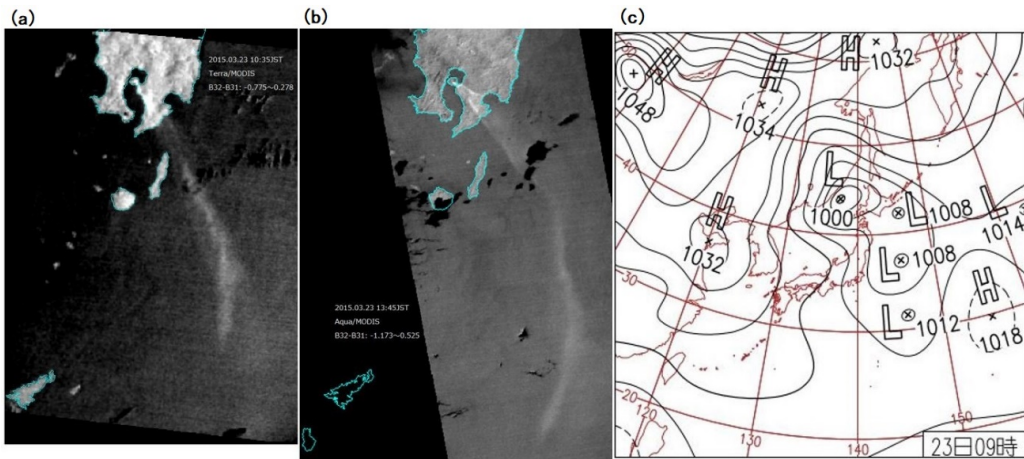


図6 (a)2015年3月23日10時35分Terra/MODIS AVI画像. (b)同日13時45分Aqua/MODIS AVI画像. (c)同日9時の天気図（気象庁，2017）。MODIS衛星画像と噴煙検出法は熊本大学教育学部のサイト <http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/sat/aso/> 参照

この時、火口の南麓に位置する有村局では、図7に示すように10時にSO₂濃度が環境基準の約11倍にあたる1,130ppbが測定され、同時にSPM濃度も288 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ という高い値であった。同日同所での5時から24時までのSO₂・SPM濃度は相関係数0.93の強い正の相関がある。つまり火口から大気中に放出されたSO₂ガスとSPMが同じような挙動を示しながら線状移流をしたため、有村局で高濃度事象が測定された。地上映像観測では、強風で噴煙が火口から吹き降ろされて有村局を直撃していることが確認された。

この1時間後の11時には、図8に示すようにSO₂ガスとSPMの高濃度のピークは南東約29.1kmの鹿屋局に移り、同局で57ppb、39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ として観測され、同時にPM_{2.5}濃度は23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。鹿屋局における同日5時から24時のSO₂・SPM濃度の相関係数は0.55、SO₂・PM_{2.5}濃度の相関係数は0.64、そしてSPM・PM_{2.5}濃度の相関係数は0.87であった。有村局と鹿屋局のSO₂ガスとSPMの濃度値は大きく異なるが、時間変化の関係は桜島火山噴出物による関連した事象である事を良く示している。なお、桜島と鹿屋局の間には海拔1,000m前後の高隅山系があり、SO₂ガスや粒子状物質の吹き降ろしが想定される。

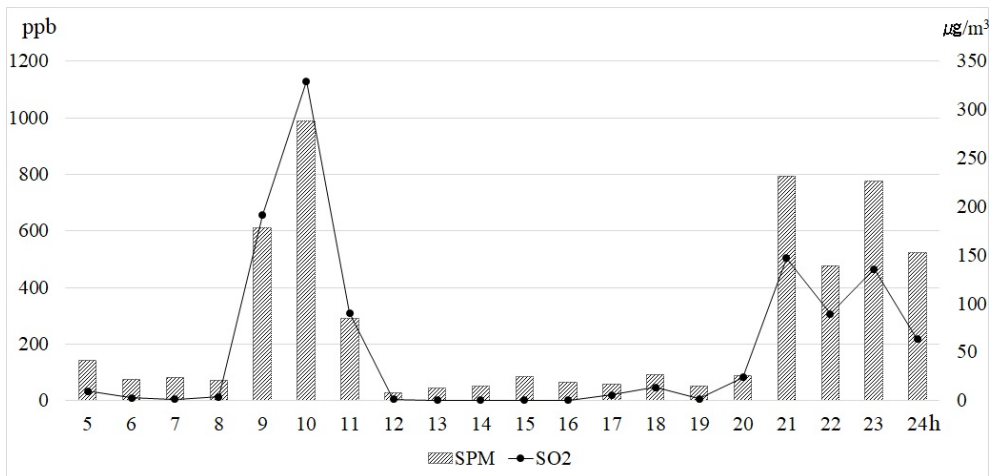


図7 有村局におけるSO₂及びSPMの濃度変化 (2015年3月23日5時~24時)

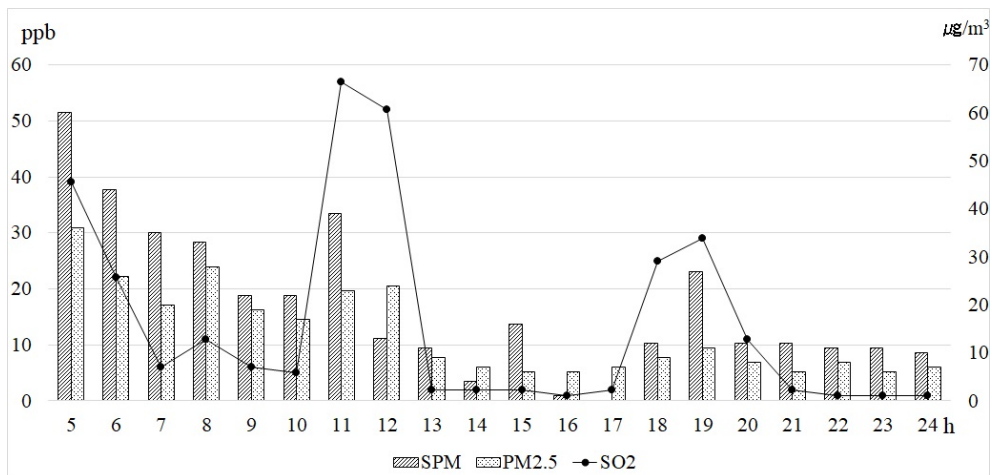


図8 鹿屋局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}の濃度変化 (2015年3月23日5時~24時)

2015年1月23日3時には、全測定局の2001年以降のSO₂ガス濃度のうち最高値となる5,260ppbが有村局で測定された。この時刻の映像は存在しないが、この日は朝8時まで4,000ppb以上の高濃度が続き、噴煙が有村局を直撃していることが確認された。時間差をにおいて鹿屋局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の上昇が見られたことは、上述の事例と同様である（坂本・木下，2017）。

(5) 赤水局～鴨池局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の相関

火口の西方に位置する赤水局及び鴨池局において2014年11月8日に発生した特徴的な事例を図9～12で検討する。9時の925hPaの風速は7m/sec、風向は127°、21時は9m/sec、109°であった。同日は日本列島上空の1030hPaの高気圧（図9）が東進し、桜島上空では徐々に東風が強くなり、火

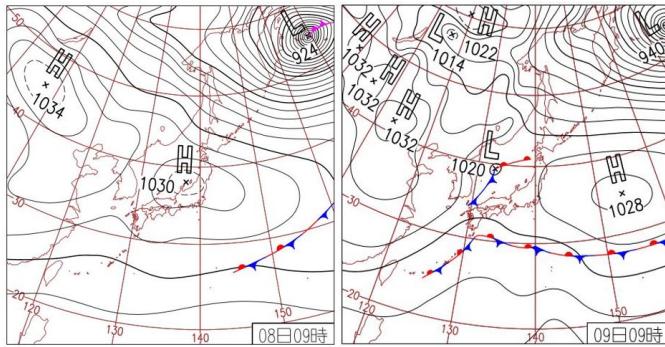


図9 2014年11月8日～9日の天気図（気象庁，2017）

口西側4.3kmに位置する赤水局に吹き降ろした。図10では、桜島上空から噴煙が赤水局及び鹿児島市方面に下降して移流していく様子がわかる。この時赤水局で測定されたSO₂ガスとSPMの濃度を図11に示す。両者の相関係数は0.85であり、極めて強い正の相関を示した。

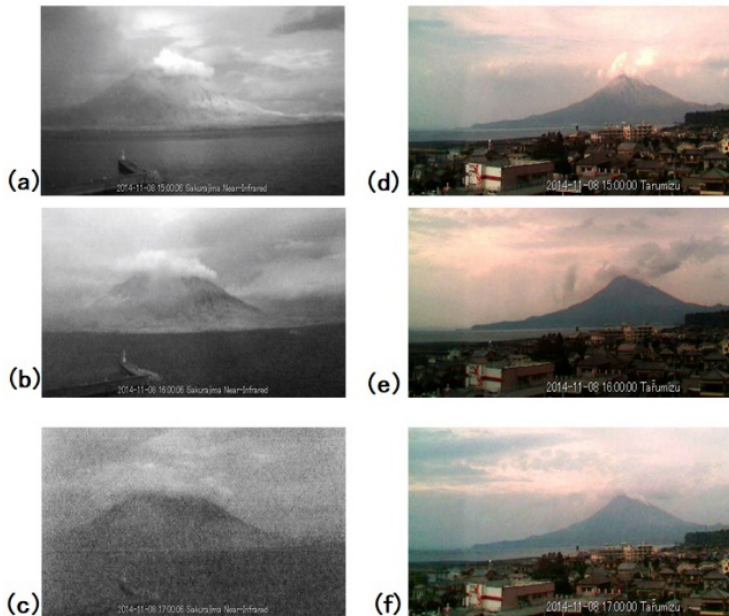


図10 (a)2014年11月8日15時鹿児島市鴨池から撮影した近赤外画像。(b)16時撮影、(c)17時撮影。(d)同年同日15時垂水市役所から撮影したRGB画像。(e)16時撮影、(f)17時撮影。垂水市役所からの1時間毎の画像は熊本大学教育学部のサイト <http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/volc/taru/> で公開されている。

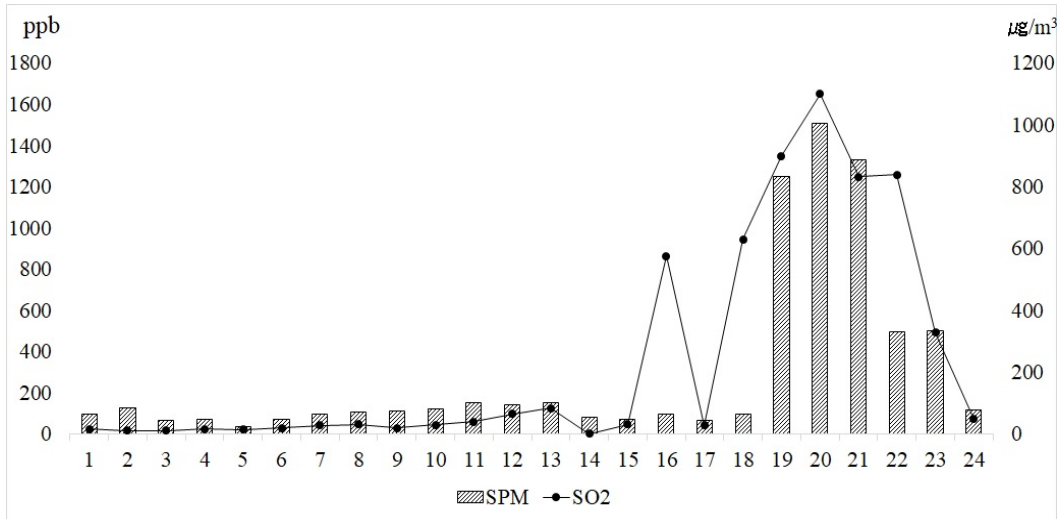


図11 赤水局におけるSO₂及びSPMの濃度変化（2014年11月8日1時～24時）

19時には1,350ppb、20時には1,650ppbと非常に高いSO₂ガスによる高濃度事象が発生し、同時にSPM濃度も19時に832µg/m³、20時には1,005µg/m³であった。

赤水局におけるSO₂ガス高濃度事象の場合は、低気圧が西から東に南の海上を移動するか、もしくは日本列島上空に高気圧が張り出す際に発生する東風に起因することがこれまでの研究によって報告されてきたが（Kinoshita et al., 2004; 坂本・木下, 2009）、本研究によって同時にSPM高濃度事象も発生する可能性があることが明らかになった。

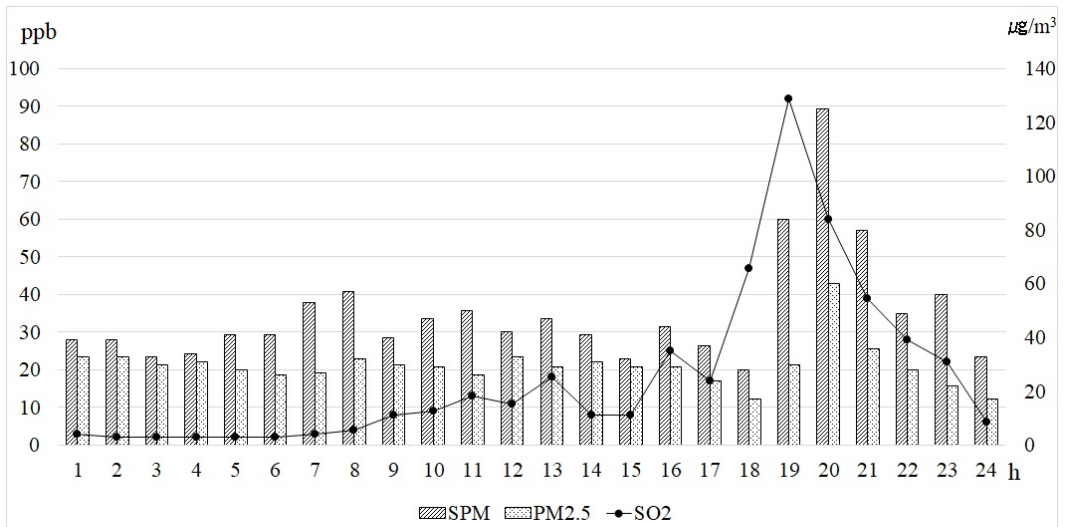


図12 鴨池局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}の濃度変化（2014年11月8日1時～24時）

昭和火口から西方へ約11.5kmの対岸にある鴨池局における同日のSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}濃度変化を図12に示す。SO₂ガス濃度は19時に92ppb、20時に60ppbとなり、同時にSPM濃度も19時に84µg/m³、20時に125µg/m³と、値は小さいが赤水局におけるSO₂ガスとSPMの濃度変化と同じような傾向がみられた。ま

た同局における同日1時から24時までのSO₂・SPM濃度の相関係数は0.68、同様にSO₂・PM_{2.5}濃度では0.28、そしてSPM・PM_{2.5}濃度では0.76であり、相関関係が認められる。

その他の測定局も含め1時から18時の粒子状物質の濃度は比較的高いことから、この日の大気中には非火山性の粒子状物質が多く存在していたが、これに火山性粒子状物質が混入してきたため、SO₂・PM_{2.5}濃度の相関は弱いと考えられる。この点は今後さらなる検討が必要である。

(6) 黒神局におけるSO₂・SPM濃度の相関

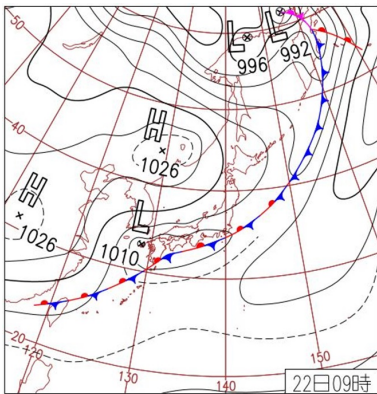


図13 2014年10月22日の天気図
(気象庁, 2017)

火口の東方4.1kmに位置する黒神局でSO₂高濃度事象が発生する場合は、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みられる。このため有村局のような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(木下ほか, 1994)。またこれに加えて、①風速が8 m/sec以上、②風向250°以上280°以下であるとき、SO₂高濃度事象が発生することが明らかになっている(坂本・木下, 2014)。



図14 2014年10月22日10時～18時、垂水市役所から撮影したRGB画像。

2014年10月22日には、図13に示すように、九州北部を低気圧が移動し、9時には9 m/sec、266°、21時には8 m/sec、1°の風が鹿児島市上空で観測されている。図14は桜島南方に位置する垂水市役所から桜島を定時撮影したものである。ここでは12時～14時に東方向へ噴煙が線状移流している様子が撮影されている。

図13から、九州北部を移動する低気圧のため、強風下の黒神局における風向が、西風から北風に変化することがわかる。この時のSO₂、SPMの濃度変化を図15に示す。黒神局では12時にSO₂ガス濃度が698ppb、13時には394ppbであり、そのときのSPM濃度は65μg/m³、90μg/m³であった。この日のSO₂・SPM濃度の相関係数は0.83となり、強い正の相関があることがわかる。

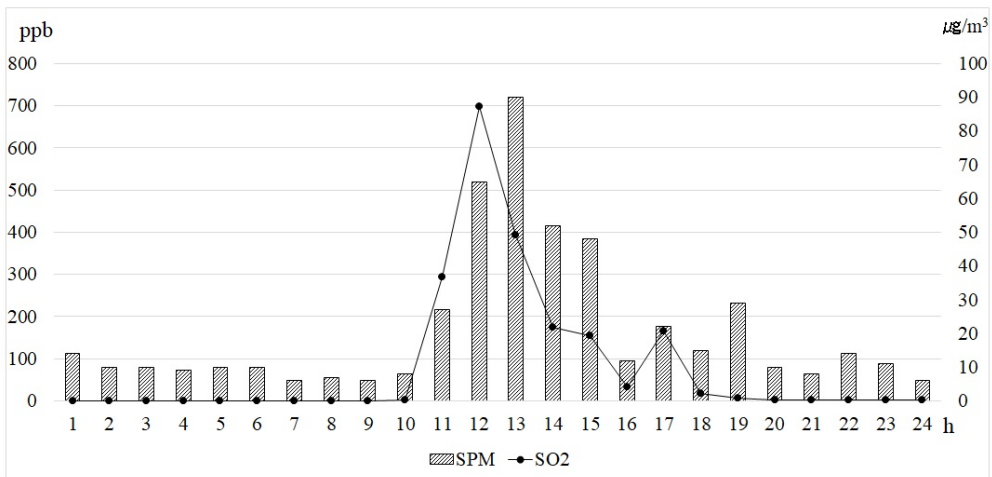


図15 黒神局におけるSO₂・SPMの濃度変化（2014年10月22日1時～24時）

(7) 桜島支所局・霧島局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度の相関

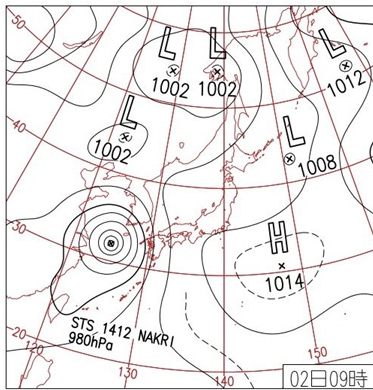


図16 2014年8月2日の天気図
(気象庁, 2017)

火口の北方4.5kmに位置する桜島支所局でSO₂高濃度事象が発生する場合は夏期であることが多いが、その際の気象条件は、①風速が8 m/sec以上、②風向が150°以上190°以下である傾向が強いことが明らかになっている（坂本・木下, 2014）。

2014年8月2日は図16に示すように台風12号による強風と厚い雨雲が鹿児島地方上空にかかり、この時の風速・風向は9時に20m/sec、170°、21時には18m/sec、168°であり、強い南風が桜島支所局に向かって吹いていたことがわかる。図17に桜島支所局のSO₂ガス及びSPM濃度の変化を示す。

桜島支所局では先に述べた2つの条件を満たしつつ、SO₂ガス濃度が2時に321ppb、3時に411ppbを示し、この高濃度事象は10時まで継続する。この411ppbは同局における2001年以降の最高値である。その際のSPM濃度は2時に34μg/m³、3時に60μg/m³を示し、9時には119μg/m³となった。この日のSO₂・SPM濃度の相関係数は0.63となり、高い正の相関があることがわかる。

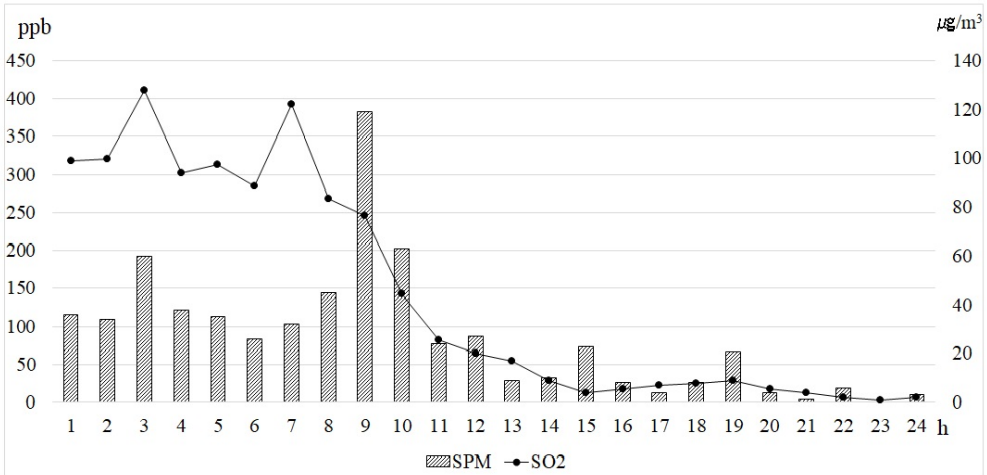


図17 桜島支所局におけるSO₂・SPMの濃度変化 (2014年8月2日1時～24時)

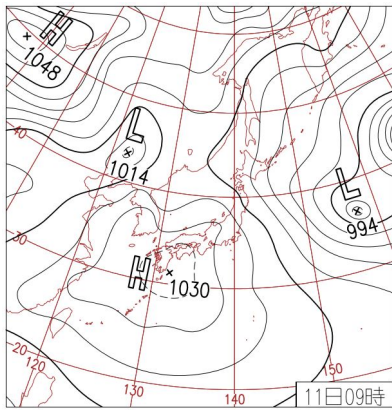


図18 2014年3月11日の天気図 (気象庁, 2017)

火口から北東へ20kmの位置にある霧島局でSO₂濃度が2年間の最高値177ppbに達した2014年3月11日の天気図及びSO₂・SPM・PM_{2.5}濃度変化を図18、図19に示す。日本列島は高気圧に覆われ、9時の風速は0であり、21時の風速・風向は8m/sec、172°であった。午後になると強い南風が吹くようになったために、霧島局ではSO₂高濃度事象が発生し、同時にSPM、PM_{2.5}も高い濃度を示した。この日のSO₂・SPM濃度の相関係数は0.80となり、強い正の相関があることがわかる。そしてSO₂・PM_{2.5}濃度の相関係数は0.73、SPM・PM_{2.5}濃度では0.93であり、互いに強い正の相関が認められる。

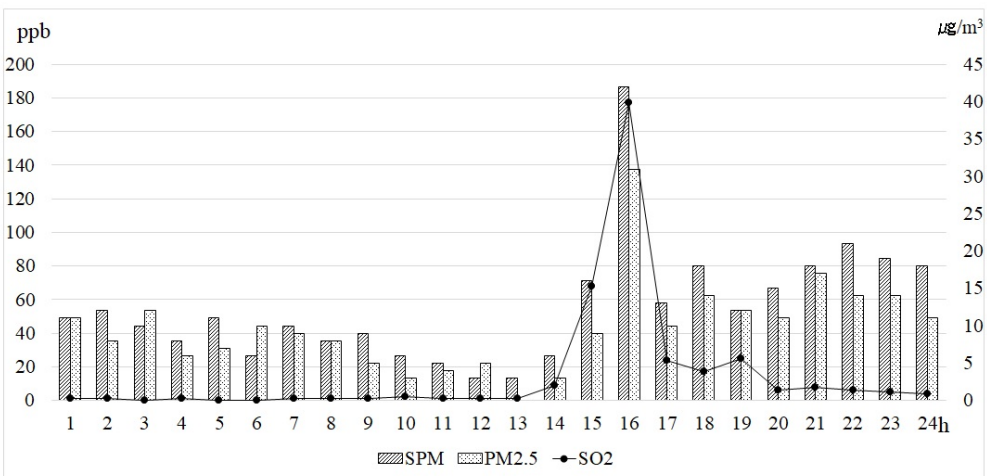


図19 霧島局におけるSO₂・SPM・PM_{2.5}の濃度変化 (2014年3月11日1時～24時)

なお、ここで挙げた2例では、桜島支所局と霧島局の高濃度事象の同期性は見られなかった。強風のもとで噴出物が狭い幅で移流する時、流向の僅かな違いが高濃度事象の出現に影響するからであろう。

5 考察とまとめ

本研究では、鹿児島県下17局の2014年～2015年における大気環境データの中で、特にSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}濃度の相関に注目して検討を行った。以下の(1)～(7)を考察とまとめとする。

- (1) 鹿児島市役所局では、東風が支配的になる9月にSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}濃度には互いに高い正の相関が認められる。
- (2) 桜島から比較的距離のある測定局(羽島・薩摩川内・霧島局)では、年間を通して大気中のSPM・PM_{2.5}濃度に強い正の相関が認められる。しかし近距離の測定局では、季節によって相関係数にばらつきがみられる。これは火山性の粒子状物質による影響と考えられる。
- (3) 有村局は鹿児島県下で発生したSO₂高濃度事象の多くの割合を占め、同時に強い正の相関を伴ってSPM濃度も上昇する。それらは噴火活動が多い冬期の強風下であることが多い。
- (4) 有村局の風下に位置する鹿屋局では強風時にSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}濃度には高い正の相関が認められる場合がある。
- (5) 赤水局では有村局に次いでSO₂高濃度事象が多く発生し、同時に強い正の相関を伴ってSPM濃度も上昇する。それらは火口から大気中に放出された高濃度のSO₂ガス及びSPMが強い東風で吹き降ろされる場合と晴天の弱風下で地上の空気と対流混合を起こす場合に発生する。この傾向は鴨池局でも同じようにみることができる。
- (6) 黒神局と桜島支所局では強風の風下にあたる時、急激にSO₂ガスの濃度が上昇することがある。同時に強い正の相関を伴ってSPM濃度も上昇する。
- (7) 桜島火山の噴火活動の急激な低下とともに、2016年後期のSO₂ガス・SPM・PM_{2.5}の放出の影響も激減している。ただし、SPM・PM_{2.5}については非火山性の背景濃度の影響を考える必要がある。

謝辞

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、鹿児島市市民局安心安全課から火山ガス・SPM・PM_{2.5}濃度等の貴重な測定データの提供を受けました。深く感謝申し上げます。また気象庁、福岡管区気象台火山監視・情報センター、鹿児島地方気象台から多くのデータの提供を受けました。厚く感謝申し上げます。熊本大学教育学部飯野直子准教授、熊本県立熊本支援学校金楠主税氏には、垂水サイト画像・MODIS衛星画像の提供と多くの示唆を戴きました。心から感謝申し上げます。

注

- 1 本研究の主な内容は、「2014-2015年における桜島火山ガスと大気粒子状物質の相関 (Correlation between Sakurajima volcanic gas and atmospheric particulate matter in 2014-2015)」『日本火山学会講演予稿集 2017年度秋季大会』p. 77として報告した。
- 2 鹿児島大学名誉教授

参考文献・WEBSITE

- 阿蘇山火山防災連絡事務所「これまでの火山ガス観測結果」2017.
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/fukuoka/rovdm/Asosan_rovdm/Asosan_rovdm.html (最終閲覧日 ; 2017年11月8日).
- 平林順一「火山ガスと防災」『日本質量分析学会誌』51, 2003, pp.119-124.
- 東小藪卓志・西中須暁子・田知行紘太・福田哲也・平瀬洋一「鹿児島県における大気環境(第II報)」『鹿児島県環境保健センター所報』17, 2016, pp.84-91.
- 肥後さより・四元聡美・東小藪卓志・福田哲也・満留裕己「鹿児島県における粒子状物質などの地域特性に関する調査研究(第I報)」『鹿児島県環境保健センター所報』15, 2014, pp.45-49.
- 飯野直子・木下紀正・小山田 恵・金柿主税・寺田暁彦「三宅島火山噴煙と火山ガスの移流拡散形態」『第48回風に関するシンポジウム講演要旨集』2002a, pp.9-10.
- 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概要集』2002b, pp.145-146.
- 飯野直子・小山田 恵・木下紀正・金柿主税「三宅島の衛星画像と火山ガス高濃度事象」『南太平洋海域調査研究報告』37, 2003, pp.66-75.
- 石川誠一・大倉光志・金丸正将・出口近士・木下紀正「桜島噴煙の衛星画像とSO₂地表濃度の関係—宮崎県地域の場合—」『日本リモートセンシング学会九州支部第2回研究発表会発表論文集』1994, pp.13-16.
- 鹿児島地方気象台「桜島の月別噴火回数」2016.
http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html (最終閲覧日 ; 2017年11月10日).
- 鹿児島県「大気・騒音調査結果」2016. <http://www.pref.kagoshima.jp/> (最終閲覧日 ; 2017年11月9日).
- 鹿児島県「桜島降灰量 平成26年」2017. <http://www.pref.kagoshima.jp/> (最終閲覧日 ; 2017年11月17日).
- 金柿主税・今村和樹・木下紀正・大倉光志・石川誠一「南流する桜島噴煙と火山ガスの降下・拡散」『日本リモートセンシング学会九州支部第2回研究発表会発表論文集』1994, pp.17-20.
- 環境庁「大気汚染に係る環境基準について」『環境庁告示25号, 昭和48年5月8日』1973.
- 環境省「微小粒子状物質に係る環境基準について(告示)」2009.
<http://www.env.go.jp/press/11546.html> (最終閲覧日 ; 2017年11月9日).
- 木下紀正「火山噴煙の観測と解析」『気象利用研究』5, 1992, pp.51-54.
- 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論文集』1994, pp.79-84.
- 木下紀正「火山噴煙の上昇と移流・拡散」『可視化情報』16, 1996, pp.230-235.
- 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』22, 1998a, pp.133-138.
- 木下紀正・西之園雅靖・瓜生洋一朗・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』50, 1998b, pp.11-27.
- K. Kinoshita, N. Iino, I. Uno, A. Mori, S. Ikebe and J. Kohno, Satellite analysis of volcanic clouds and transport of acidic substances from Mt. Aso and Mt. Sakurajima, "Water, Air & Soil Pollution", 130, 2001, pp.385-390.
- 木下紀正「衛星から見た火山と噴煙」『南太平洋海域調査研究報告』37, 2003, pp.12-23.
- K. Kinoshita, C. Kanagaki, S. Iwata, M. Koyamada, K. Goto, K. Hidaka, A. Tupper and N. Iino, Ground

- observation of volcanic plumes and high sulphur-dioxide concentrations around Sakurajima volcano, "South Pacific Studies", 25, 2004, pp.27-34.
- 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』2006, pp.406-414.
- 木下紀正・坂本昌弥「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回総合学術研究会集予稿集』2008, pp.216-217.
- 木下紀正・土田 理・眞木雅之・飯野直子・金柿主税「光学・レーダー観測と衛星画像による火山爆発噴煙の解析」『第17回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム資料集』2015, pp.10-13.
<http://wwwkav.mydns.jp/volc/Sa2014A/s14menu.htm> (最終閲覧日:2017年11月10日)
- 木下紀正・眞木雅之・土田 理・飯野直子・金柿主税「衛星画像と光学・レーダー観測による九州の火山噴煙の解析」『第19回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム資料集』2017, pp.17-20.
<http://wwwkav.mydns.jp/volc/Sa2015/sa15top.htm> (最終閲覧日:2017年11月10日)
- 気象庁 日々の天気図. 気象庁HP. 2017.
<http://www.data.jma.go.jp/> (最終閲覧日:2017年11月10日).
- 気象庁地震火山部火山監視・情報センター「御嶽山の火山活動解説資料(平成29年9月)」2017.
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (最終閲覧日:2017年11月7日).
- 小山田 恵「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』2000.
- 小山田 恵・木下紀正「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』2000, pp.13-14.
- 味喜大介・吉谷純一・J. Eleiasson・井口正人「桜島における粒子状物質連続地上観測」『京都大学防災研究所年報』57, 2014, pp.150-153.
- 内閣府 2003,「三宅島火山ガスに関する検討会報告書」内閣府, 81p. 東京.
<https://www.vill.miyake.tokyo.jp/bousai/kiroku/> (最終閲覧日:2017年11月7日).
- 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, 2001, pp.168-180.
- 中野 俊・及川輝樹・山崎誠子・川辺禎久「御嶽山, 2014年9月の噴火(速報) ―上空観察および報道映像から見る火口周辺の状況と火砕流の分布―」『GSJ地質ニュース』3, 2014, pp.289-292.
- 直江寛明・木下紀正・池辺伸一郎「九州における火山ガス長距離輸送の解析」『天気』40, 1993, pp.671-679.
- 西中須暁子・東小菌卓志・田知行紘太・福田哲也・江下聡美・平瀬洋一「鹿児島県における粒子状物質などの地域特性に関する調査研究(第II報)」『鹿児島県環境保健センター所報』17, 2016, pp.43-50.
- 及川輝樹・山岡耕春・吉本充宏・中田節也・竹下欣宏・前野 深・石塚吉浩・小森次郎・嶋野岳人・中野 俊「御嶽山2014年噴火」『火山』60, 2015, pp.411-415.
- 斎藤政城・松島 健・松尾のり道・清水洋「阿蘇中岳火山の二酸化硫黄および二酸化炭素ガス放出量の測定」『九大理研報(地球惑星)』22, 2007, pp.51-62.
- 坂本昌弥・木下紀正「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, 2005, pp.11-20.
- 坂本昌弥・木下紀正「2001年桜島火山ガスを教材とした気象教育」『平成20年度日本気象学会九州支部発表会要旨集』, 2009, pp.5-6.
- 坂本昌弥・木下紀正「桜島火山ガスの挙動と防災」『地域政策科学研究』11, 2014, pp.1-25.
- 坂本昌弥・木下紀正「桜島火山噴出物の大気環境影響」『鹿児島県立博物館研究報告』34, 2015, pp.49-64.
- 坂本昌弥・木下紀正「2014-2015年における桜島火山ガスと大気粒子状物質の相関」『日本火山学会講演予稿集2017年度秋季大会』2017, p.77.
- 産業技術総合研究所「2017年10月12日霧島新燃岳火山ガス観測報告」2017.
<https://www.gsj.jp/hazards/volcano/> (最終閲覧日:2017年11月8日).
- 下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明・中田節也 1995, 火山の辞典. 朝倉書店, 東京, 575p.
- 藪 平一郎・谷元エリ・上大園智徳・大西正巳・松留道雄・川元孝久「鹿児島県における大気環境」『鹿児島県環境保健センター所報』5, 2004, pp.70-77.

Atmospheric environment around Sakurajima volcano

Masaya SAKAMOTO and Kisei KINOSHITA*

Keyword: SO₂, SPM, PM_{2.5}, volcanic plume, high concentration events.

【Abstract】 In order to understand the effect of the ejecta from Sakurajima volcano on surrounding atmospheric environment, the surface concentrations of SO₂ gas, SPM and PM_{2.5} at 17 stations in Kagoshima Prefecture in 2014 and 2015 were analyzed and mutual correlations were discussed. High concentration events of SO₂ gas and SPM occurring at Arimura station at the southern foot of the volcanic mountain occupied much of the whole events, and there was a strong positive correlation between them. Furthermore, the advectations of SO₂ gas and SPM by strong winds to Kanoya station were seen maintaining high concentration, accompanied with high concentration of PM_{2.5}, resulting high positive correlations among these quantities. At Akamizu station at the west side of the volcanic mountain, a strong positive correlation of the concentration of SO₂ gas and SPM was also observed. High concentration events at the station often happened with strong easterly winds, especially in summer, accompanied with rather high concentrations of them at the stations located on the west side of Sakurajima beyond the sea such as Kagoshima City Hall station and Kamoike station. In such cases, the concentration of PM_{2.5} turned to be high with high positive correlation with the others. The effect of the volcanic ejecta of Sakurajima on the air quality at surrounding locations strongly decreased with the sudden decrease of the volcanic eruption activity after the summer in 2015.

*Prof. Emeritus, Kagoshima University