

桜島火山噴出物の大気環境影響

坂本 昌弥¹・木下 紀正²

Effect of volcanic ejecta from Sakurajima on the atmospheric environment

Masaya SAKAMOTO* and Kisei KINOSHITA**

キーワード：二酸化硫黄，浮遊粒子状物質，微小粒子状物質，大気環境，噴煙

はじめに

火山の火口から大気中に放出されるさまざまなガスに関する学術的な研究は、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きた（例えば平林，2003）。2014年9月27日に噴火した御嶽山でも火口から一日あたり500トン～1500トンの二酸化硫黄ガスが大気中に放出され（気象庁地震火山部火山監視・情報センター，2014），救助活動に大きな影響を与えた。さまざまな火山ガスのうち、二酸化硫黄ガス（以下SO₂ガス）と硫化水素ガス（以下H₂Sガス）の関係は、生成される際の温度によって以下の化学反応式で表現できる（下鶴ほか編，1995）。



地下の高温高圧の環境下で存在するH₂Sガスが地表に向かって上昇する際、比較的高い温度のまま大気中に放出される場合はSO₂ガスとして、ゆっくりと冷却された後、大気中に放出される場合はH₂Sガスとなる（下鶴ほか編，1995）。現在、高温型火山ガスであるSO₂ガスは桜島・阿蘇・三宅島雄山等の火山で発生しており、低温型火山ガスであるH₂Sガスは箱根湯ノ花沢・草津白根山等で発生しており、これらの火山ガスはその大気中における濃度によっては大きな自然災害になるケースが想定できる（平林，2003）。SO₂ガスは無色で刺激臭のある気体で、その比重は2.26であり、これを吸い込むとSO₂が呼吸器や眼、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り、死に至る場合も発生する。またぜん息や心臓病などの疾患を持つ場合、健康な人が認識することができない低濃

度でも、発作を誘発したり症状を増悪させることがある（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であり、致死濃度も500～1,000ppmと極めて毒性が強い気体である（平林，2003）。

四日市大気汚染公害対策を契機として、環境行政の一環として工業地帯や道路交通による大気汚染を監視する測定局が全国的に展開された。鹿児島県ではこの機会を捉え、桜島火山周辺にも大気環境に関する測定局が配置された。その結果、桜島起源と推定されるSO₂ガス高濃度事象が県下で見出された（柳川ほか，1987；竹山ほか，1989）。さらに鹿児島大学教育学部物理学教室を中心とした鹿児島大学噴煙研究グループによって、1990年代から桜島火山の周辺におけるSO₂ガス高濃度事象と気象との関連研究が噴煙観測や衛星画像解析と結びつけて進められた。これまで弱風下においてSO₂ガスが凹地に滞留することによって発生すると考えられていた火山ガス高濃度事象であったが、ここでの研究により強風時に高濃度のSO₂ガスが火口から山麓の局所に吹き付けるメカニズムが新しい知見として得られた。さらにこの研究成果を基礎として、鹿児島大学噴煙研究グループは2000年噴火以来の三宅島火山ガスに取り組んだ（例えば、飯野ほか，2002；飯野ほか，2003；木下ほか，2006）。

1955年以来活発に続いた桜島南岳の噴火活動は、2000年代になって減少したが、新たにその側火口である昭和火口の活動が2006年に始まり、2009年からはその噴火活動が活発化し、再び周辺大気に大きな影響を与えている。坂本・木下（2014a）は、2001年～2012

¹ 鹿児島県立博物館 〒892-0853 鹿児島市城山町1-1

² 鹿児島大学教育学部 教育実践総合センター

年の鹿児島県下の環境大気データとして得られる SO₂ ガスと浮遊粒子状物質の地表濃度について解析し、桜島火山の火口から大気中に放出されるこれらの広域的な挙動や統計的な経年変化研究について新たな知見を得た。さらに坂本・木下（2014b）では、桜島火山の火口から大気中に放出される SO₂ ガスの広域的な挙動や統計的な経年変化研究についても新たな知見を得た。

大気中に存在する有効粒径10 μ m以下の粒子として定義される浮遊粒子状物質（Suspended Particulate Matter, 以下 SPM）は、SO₂ ガスとともに連続自動測定が行われ、桜島火山の影響が見られてきた（坂本・木下, 2014a および引用文献）。近年、粒径2.5 μ mの微小粒子状物質（Particulate Matter 2.5, 以下 PM2.5）の健康影響の研究が進化したのを受けて、環境省は2009年にその環境基準を告示した（環境省, 2009）。その後、行政機関による環境大気モニタリングでも PM2.5の測定が加えられつつある。鹿児島県では2012年度途中から幾つかの地点で PM2.5測定がおこなわれている。本稿では、前報（坂本・木下, 2014a）で述べた2001年～2012年の SO₂ と SPM の解析結果を踏まえ、通年の PM2.5 データが初めて得られた2013年についてこれらの濃度変動や相関などについて検討する。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）。また、近年には季節を問わず西からの移動性高気圧に覆われると視程が低下する現象が多く、大陸からの汚染気塊の影響が懸念される。五島列島福江島と福岡市・長崎市の PM2.5濃度変動の研究では、その高濃度事象に大陸からの汚染気塊の影響が推定されている（金谷ほか, 2010；兼保ほか, 2010 および 2011）。桜島の西側山麓の京都大学防災研究所における粒子状物質連続地上観測（2013年秋の2ヶ月）では、PM2.5高濃度事象に桜島火山起源とともに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）。このように、SPM と PM2.5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。なお、桜島噴出物の中で火山灰の生活環境に与える影響は大きいですが、降灰量の時間分解能の良い測定は困難であり、環境大気データとの詳しい比較は出来ないため、本稿では扱わない。降灰量と SPM 量の月別積算値の相関の経年変化については前報に述べた。

1 データと研究方法

鹿児島県および鹿児島市は、大気中に存在する SO₂

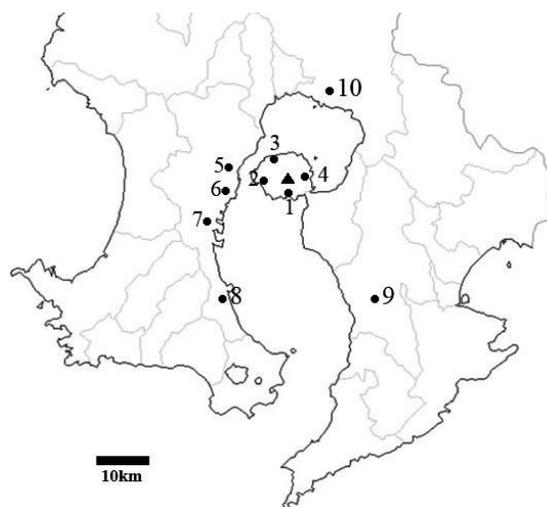


図1 SO₂ ガス濃度および SPM 量の測定局の位置。

1. 有村局(S) 2. 赤水局(W) 3. 桜島支所局(N)
 4. 黒神局(E) 5. 鹿児島市役所局 6. 鴨池局 7. 谷山支所局 8. 喜入局 9. 鹿屋局 10. 霧島局
- このうち PM2.5の測定局は、5. 6. 7. 8. 9. 10. である。

ガス濃度および SPM・PM2.5を鹿児島県下広域に設置された環境大気測定局において測定しているが、本研究では図1の測定局のデータを検討する。環境大気測定局は、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によって管理されている。

SO₂ 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いる（鹿児島県, 2011）。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時間値濃度が0.10ppm(=100ppb)を超える場合、これを火山ガス高濃度事象とし、その回数を数値化した。

SPM および PM2.5は、 β 線吸収法によって測定されている。本研究における SPMに関する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）等の SPM 量高濃度事象の定義を参照し、「1時間値が100 μ g/m³以上であること」とした。また PM2.5に関する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、PM2.5の環境基準である「1年平均値が15 μ g/m³以下であり、かつ、1日平均値が35 μ g/m³以下である」に準拠し、「1時間値が35 μ g/m³以上であること」を高濃度事象の基準とした。SO₂ ガス高濃度事象と SPM・PM2.5高濃度事象の相関については、測定された SO₂ ガスの1時間値を X とし、同日同時刻の SPM 量・PM2.5量の1時間値を Y とし、X と Y の共分散を X の標準偏差と

表1 各測定局で2013年に測定されたSO₂ガスデータ集計結果

局番	観測局	測定時数 (h)	未測定時数 (h)	未測定率 (%)	最高値 (ppb)	最高値測定日時	高濃度事象時数 (h)	高濃度事象発生率 (%)	2001-2012年の高濃度事象発生率 (%)
1	有村局 (S)	8718	42	0.5	4810	4/30/18:00	561	6.4	4.4
2	赤水局 (W)	8713	47	0.5	1040	8/20/3:00	239	2.7	1.9
3	桜島支局 (N)	8492	268	3.1	287	10/8/13:00	7	0.1	0.1
4	黒神局 (E)	8678	82	1	918	7/30/16:00	124	1.4	0.5
5	鹿児島市役所局	8630	130	1.5	105	10/7/23:00	1	0.01	0.03
6	鴨池局	8665	95	1.1	379	5/18/21:00	14	0.2	0.06
7	谷山支局	7263	1497	17.1	176	10/23/16:00	12	0.2	0.03
8	喜入局	8380	380	4.3	64	10/20/14:00	0	0	0
9	鹿屋局	8701	59	0.7	151	4/26/24:00	7	0.08	0.06
10	霧島局	8705	55	0.6	278	5/8/17:00	3	0.03	0.01

表2 各測定局で2013年に測定されたSPMデータ集計結果

局番	観測局	測定時数 (h)	未測定時数 (h)	未測定率 (%)	最高値 (µg/m ³)	最高値測定日時	高濃度事象時数 (h)	高濃度事象発生率 (%)	2001-2012年の高濃度事象発生率 (%)
1	有村局 (S)	8743	17	0.2	965	10/25/17:00	273	3.1	1.4
2	赤水局 (W)	8724	36	0.4	808	10/4/13:00	243	2.8	1.3
3	桜島支局 (N)	8509	251	2.9	214	8/2/11:00	61	0.7	0.6
4	黒神局 (E)	8571	189	2.2	862	3/8/22:00	147	1.7	0.9
5	鹿児島市役所局	8679	81	0.9	211	6/15/13:00	11	0.1	0.4
6	鴨池局	8725	35	0.4	448	10/4/16:00	39	0.5	0.7
7	谷山支局	7539	1221	13.9	207	9/10/9:00	16	4.4	0.5
8	喜入局	8391	369	4.2	130	9/15/16:00	8	0.1	0.3
9	鹿屋局	8697	63	0.7	348	3/13/10:00	22	0.3	0.5
10	霧島局	8705	55	0.6	133	5/8/17:00 8/15/24:00	12	0.1	0.4

表3 各測定局で2013年に測定されたPM2.5データ集計結果

局番	観測局	測定時数 (h)	未測定時数 (h)	未測定率 (%)	最高値 (µg/m ³)	最高値測定日時	高濃度事象時数 (h)	高濃度事象発生率 (%)
5	鹿児島市役所局	8629	131	1.5	121	8/18/18:00	943	10.9
6	鴨池局	8642	118	1.6	93	3/8/10:00	960	11.1
7	谷山支局	7544	1216	13.9	77	9/10/9:00	623	8.3
8	喜入局	6710	370	5.2	85	9/15/16:00	266	4
9	鹿屋局	8713	47	0.5	109	1/25/5:00	830	9.5
10	霧島局	8701	59	0.7	106	5/8/17:00	815	9.4

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、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 ≤ r ≤ 1) によって、SO₂ガスとSPM量の相関の程度を判断した。

風速・風向のデータは、気象庁がHP上にて公開している過去の気象データ検索(高層)によるデータを使用した(<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 $D(^{\circ})$ と、風速 $S(m/sec)$ を用いて解析した。文章中では風向・風速を $D^{\circ} \cdot Sm/sec$ と示すこととする。風向 $D(^{\circ})$ 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。桜島上空では大きな爆発が発生した場合、噴煙が $3,000 \sim 5,000m$ も上空に上昇する場合が観測される。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。

2 2013年の桜島火山 SO_2 ガスおよびSPM量の高濃度事象

表1は、2013年1月1日～2013年12月31日までの365日、8760時間における、各測定局で測定された SO_2 ガス濃度の1時間値を集計したものである。ここでは全10測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、未測定率、 SO_2 ガス濃度最高値(ppb)とその測定日時・ SO_2 ガス高濃度事象発生時数・ SO_2 ガス高濃度事象発生率・2001年～2012年の SO_2 ガス高濃度事象発生率（坂本・木下, 2014a）を示した。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場合があるためである。

表1でわかるように、ほとんどの測定局において $100ppb$ を超える SO_2 ガス高濃度事象が測定されている。中でも有村局は、この高濃度事象時数が561時間発生しており、これは有効な測定時数の6.4%を占める。またこれは2001年～2012年の平均値を大きく越えている。さらに有村局で測定された最も高い SO_2 ガス濃度値は $4,810ppb$ であり、これは2001年以降の測定値の中で最も高いものであった。同様に赤水局では SO_2 ガス高濃度事象時数が239時間測定されており、 SO_2 ガス高濃度事象発生率が2.7%となった。次いで黒神局では SO_2 ガス高濃度事象時数が124時間測定され、 SO_2 ガス高濃度事象発生率が1.4%という結果となった。

表2は、2013年の365日、8760時間における、各測定局で測定されたSPM量の1時間値をまとめたものである。表1と同様に、全10測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、未測定率、SPM量の最高値($\mu g/m^3$)とその測定日時、SPM量の高濃度事象発生時数・SPM量の高濃度事象発生率・2001年～2012年のSPM

高濃度事象発生率（坂本・木下, 2014a）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ためである。SPM量についても、すべての局において1時間値が $100\mu g/m^3$ を超える高濃度事象が発生した。特に有村局は $100\mu g/m^3$ を超える高濃度事象が273時間であり、これは有効な測定時数の3.1%を占める結果となり、これも2001年～2012年の平均値を大きく上回る結果となった。桜島西部にある赤水局も $100\mu g/m^3$ を超える高濃度事象が243時間測定された。 SO_2 ガス高濃度事象では見られなかった現象として、島外に設置されている測定局である鹿屋局でSPM量の最高値が $348\mu g/m^3$ と測定され、また鴨池局でもその最高値が $448\mu g/m^3$ と、 SO_2 ガス高濃度事象と比較すると島外において高い数値が観測される。しかし鴨池局では小山田(2002)でも示唆されている通り、黄砂や自動車等の排煙の影響である可能性も高いため、今後詳細な検討が必要である。

表3は、2013年の365日、8760時間における、各測定局で測定された $PM_{2.5}$ 量の1時間値をまとめたものである。ただし喜入局は3月12日から測定を開始したため、他局と比べると測定時数が異なる。ここでも全6測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、未測定率、 $PM_{2.5}$ 量の最高値($\mu g/m^3$)とその測定日時、 $PM_{2.5}$ 量の高濃度事象発生時数・ $PM_{2.5}$ 量の高濃度事象発生率を示した。最近になって大きな環境問題とされてきた $PM_{2.5}$ は、各測定局での測定開始が近年であり、2001年～2012年の継続したデータは存在しないため、ここで他年との比較は示すことができない。表3における各局の測定時数が異なるのは、他の表と同じく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。 $PM_{2.5}$ 量については、すべての局において1時間値が $35\mu g/m^3$ を超える高濃度事象が発生した。特に鴨池局では高濃度事象が960時間発生しており、これは有効な測定時数の11.1%を占める。同様に鹿児島市役所局では高濃度事象が943時間であり、これは有効な測定時数の10.9%を占める。喜入局を除くと、各局の高濃度事象発生率が8%～11%以内に揃っており、 SO_2 ガスやSPMとは大きく異なる特徴であることがわかる。喜入局は、2013年3月12日から測定を始めており、高濃度事象が発生する機会が多い冬期のデータがないためにこのような低い結果になった可能性が考えられる。

3 有村局における SO₂ ガスと SPM 量の高濃度事象

図1に示すように、桜島南側に位置する有村局では、2001年～2012年にかけて測定されたSO₂ ガス高濃度事象が総計で4,593回であり、特に冬期を中心としてSO₂ ガス高濃度事象が頻発し、夏期に少ないことが明らかになっている(坂本・木下, 2014a)。これは日本上空の気圧配置がいわゆる西高東低の冬型となり、強

表4 有村局の2013年に測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

測定時間 (9:00 および 21:00)	727
SO ₂ ガス高濃度事象回数(9:00 および 21:00)	55
全測定時数(9:00 および 21:00)に対する高濃度事象の割合	7.6%
SO ₂ ガス高濃度事象が 8 m/sec以上で発生した回数	50
SO ₂ ガス高濃度事象が 8 m/sec以上で発生した割合	90.9%
SO ₂ ガス高濃度事象が(310° < D° 30° > D°)で発生した回数	50
SO ₂ ガス高濃度事象が(310° < D° 30° > D°)で発生した割合	90.9%
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec, (310° < D° 30° > D°)で発生した回数	48
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec, (310° < D° 30° > D°)で発生した割合	87.3%

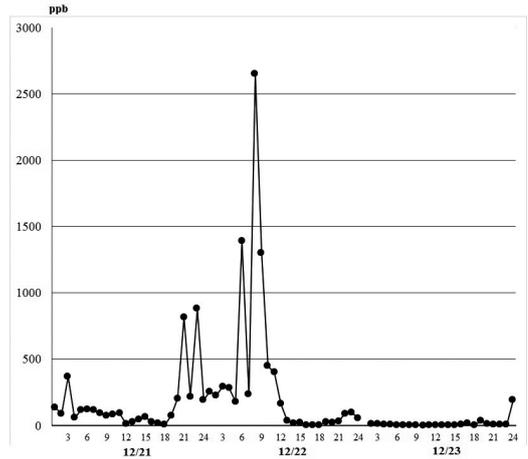


図2 有村局の2013年12月21日～23日におけるSO₂ガス濃度変化

風の北風が卓越する場合に火口の南に位置する有村局にSO₂ ガスが吹き付けるために高濃度事象が発生しているからである(坂本・木下, 2014a)。こうしたSO₂ ガス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。

表4は、有村局で9時・21時に測定されたSO₂ ガス

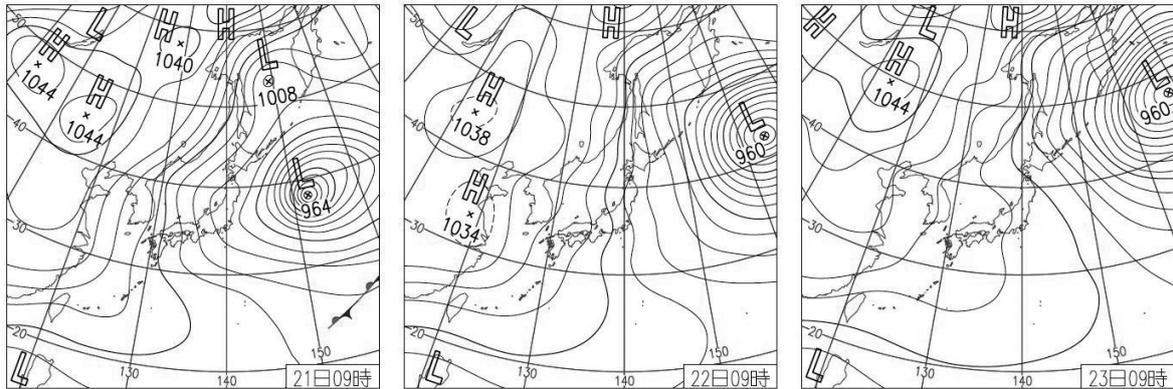


図3 2013年12月21日～23日の天気図(気象庁, 2015)

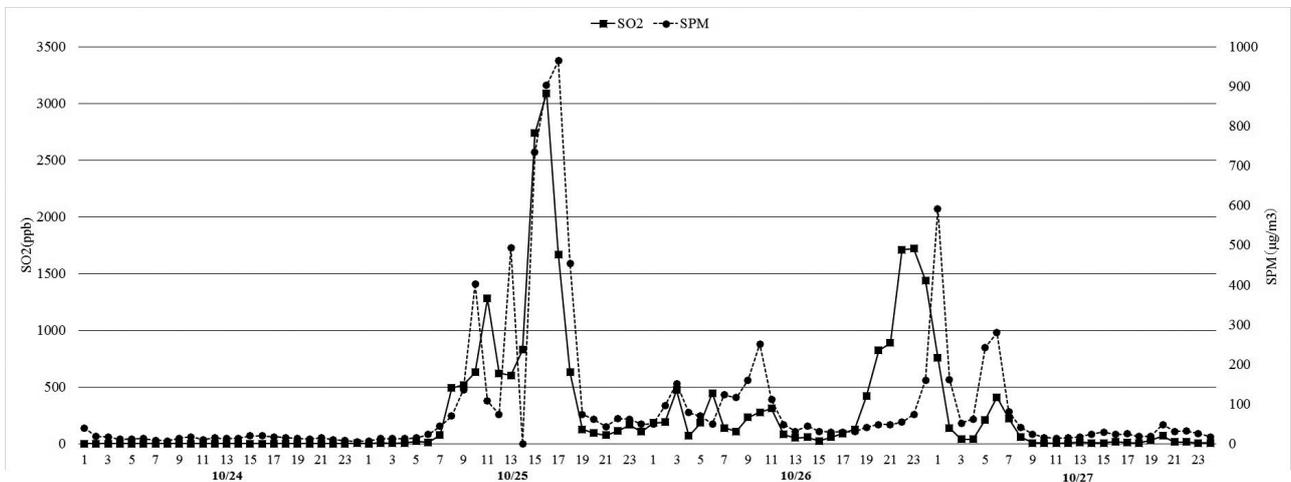


図4 2013年10月24日～27日の有村局におけるSO₂ガス, SPM量の変化。

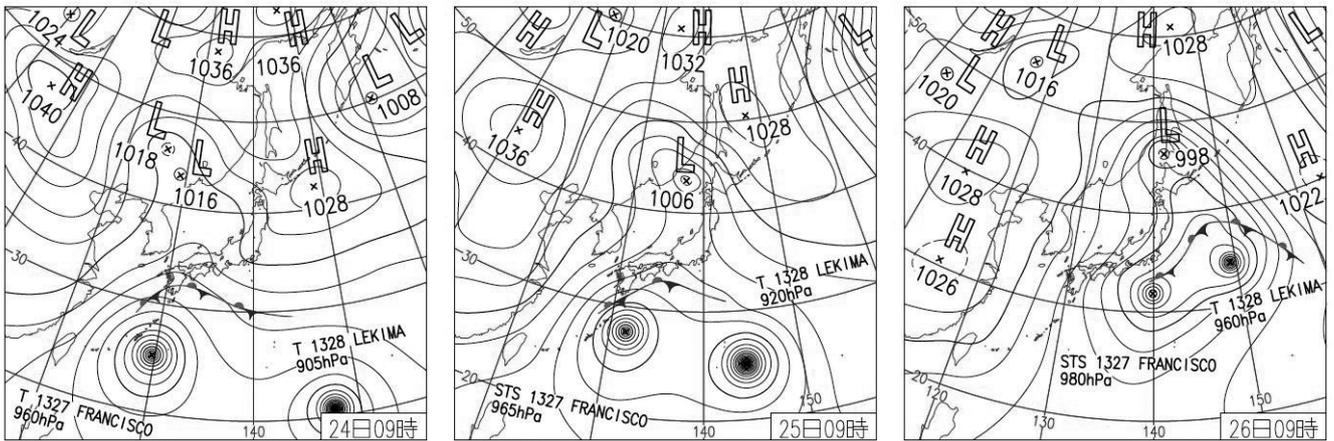


図5 2013年10月24日～26日の天気図（気象庁，2015）



図6 垂水市役所から2013年10月25日17時に撮影した桜島火山の噴煙画像



図7 鴨池港近くから2013年10月25日17時28分に撮影した桜島火山の噴煙画像

の高濃度事象の特徴を示したものである。ここで9時・21時の高濃度事象に限定して議論するのは、この時刻に鹿児島地方気象台が鹿児島市上空における高層の風向・風速を測定しているためである。2013年の9時・21時に限定した有村局におけるSO₂ガス高濃度事象は、合計で55回発生しており、このうち風速が8m/sec以上であった割合は90.9%である。またその風向が310°以上30°以下であった割合も同じく90.9%である。そしてこの二つの条件を満たすSO₂ガス高濃度事象の発生割合は87.3%であり、これらは2001年～2012年における同条件下での割合よりも高くなっている。

次に有村局における2013年12月21日～23日におけ

るSO₂ガス高濃度事象について述べる。図2に示すように12月22日8時から9時にかけて2650ppbの濃度を示している。この時の天気図を図3に示す。12月21日9時の風向・風速は318°・18m/sec，21時は353°・13m/sec，12月22日9時のそれは356°・9m/sec，21時は351°・4m/sec，そして12月23日9時は325°・5m/sec，21時は304°・9m/secであった。ここで示すように2013年においても西高東低の冬型の気圧配置における北から吹く強風下において火山ガスの高濃度事象が発生する機会が多いことがわかる。

2013年10月24日～27日における有村局の大気環境について述べると、図4に示すように、SO₂ガス濃度は

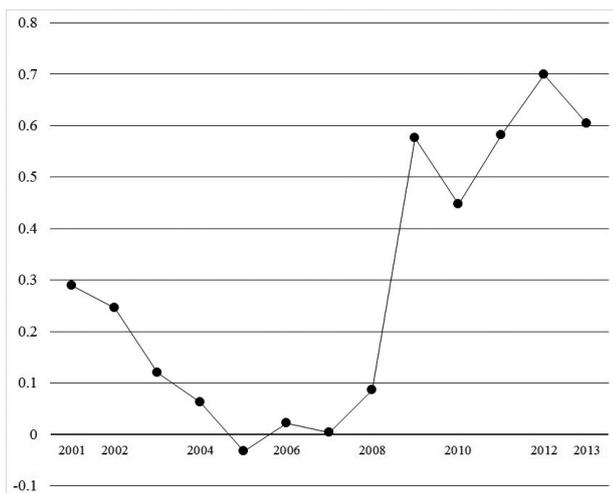


図8 有村局で2001年～2013年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値とSPM量1時間値の年別相関係数グラフ。縦軸は相関係数、横軸は年。

10月25日8時から濃度が高くなり始め、16時に3090ppbを示した。この時ほぼ同時にSPM量も多くなり始め、同時刻の16時に903 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、17時には965 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を示した。この時の天気図を図5に示す。10月24日9時の風向・風速は126°・12m/sec、21時は147°・5m/sec、25日9時は14°・10m/sec、21時は349°・14m/sec、26日9時は347°・15m/sec、21時は348°・11m/secであった。そして27日9時は54°・5m/sec、21時は71°、3m/secであった。この場合、台風27号が九州の東岸を北東へ進んだために、北からの強風が25日を中心に発生している。17時に垂水市役所から撮影した桜島の噴煙画像を図6に示す。また17時28分に鴨池から撮影した桜島火山の噴煙画像を図7に示す。画像からわかるように、桜島火山から大気中に放出された噴煙は、強風

で有村局に吹き下ろし、SO₂ガスとSPM量の高濃度事象が発生させた。このような垂水市役所からの噴煙画像は、熊本大学教育学部理科教育研究室の設置したウェブカメラのサイトで公開されているものである (<http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/volc/taru/>)。

有村局において2001年～2013年にかけて測定されたSO₂ガスとSPM量の1時間値の相関について、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 (坂本・木下 (2014a) に加筆)。この1時間値の日毎積算量におけるSO₂ガスとSPM量の関係は、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。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)。しかし有村局においては、桜島火山の火口から大気中に放出されるSO₂ガス濃度と大気中に存在するSPM量には、特に2009年以降から正の相関が出はじめ、関連性が認められるようになったことがわかる。

4 赤水局におけるSO₂ガスとSPM量の高濃度事象

表5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2013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20回あり、このうち風速が8m/sec以上だった割合は60.0%であった。またその風向が50°以上125°以下である割合は80.0%であった。風

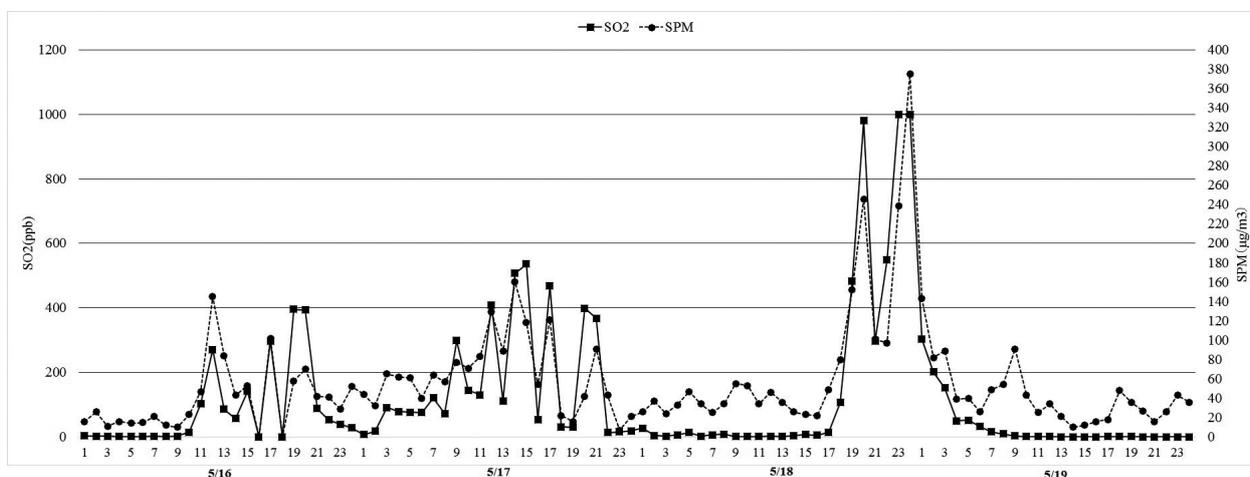


図9 2013年5月16日～19日の赤水局におけるSO₂ガス、SPM量の変化。

表5 赤水局の2013年に測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

測定時間 (9:00 および 21:00)	727
SO ₂ ガス高濃度事象回数(9:00 および21:00)	20
全測定時数(9:00 および21:00)に対する高濃度事象の割合	2.8%
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec以上で発生した回数	12
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec以上で発生した割合	60.0%
SO ₂ ガス高濃度事象が(50° < D° < 125°)で発生した回数	16
SO ₂ ガス高濃度事象が(50° < D° < 125°)で発生した割合	80.0%
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec, (50° < D° < 125°)で発生した回数	12
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec, (50° < D° < 125°)で発生した割合	60.0%

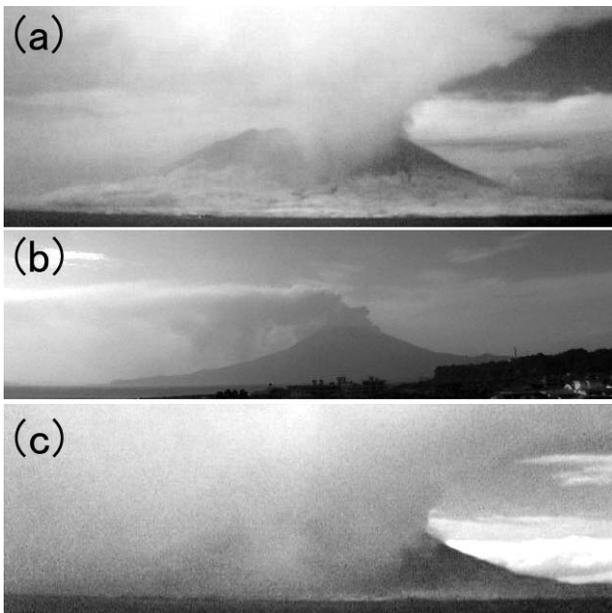


図10 2013年5月18日の桜島火山の噴煙画像。(a) ; 16時, 鴨池港付近から撮影。(b) ; 17時, 垂水市役所から撮影。(c) ; 18時, 鴨池港付近から撮影。

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60.0%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。2013年5月16日～19日の赤水局でのSO₂ガス濃度およびSPM量の1時間値の推移を図9に示す。SO₂ガス高濃度事象は, 5月16日に4回(校正及び調整を除く)測定され, 同17日は11回, 同18日午後から更に上昇をはじめ, 20時には980ppb, 23時・24時には1000ppbを示した。この時, 赤水局では同時にSPM量も増加しており, 同18日20時には246μg/m³, 23時には239μg/m³, 24時には375μg/m³を測定している。同16日9時の風向・風速は79°・9m/sec, 21時は98°・4m/sec, 同17日9時は111°・8m/sec, 21時は88°・14m/sec, 同18日9時は110°・6m/sec, 21時は125°・6m/secであった。そして同19日9時は169°・12m/sec, 21時は280°・9m/secであった。図10は18日午後の桜島火山の噴煙の様子であるが, ここでは火口から大気中に放出された噴煙が, 風下へあまり吹き降ろさず, ほぼ水平に移流していく様子が見られる。そして図11に示すように, この時は移動性高気圧が西日本を覆っており, 6m/secという比較的弱風の中でSO₂ガスとSPM量の高濃度事象が赤水局で測定されている。

これは弱い低気圧が西から東に移動する際に発生する東風に起因する。赤水局におけるこうした高濃度事象は, 坂本・木下(2009)でも報告されており, 今後更に検討が必要であるが, SO₂ガス高濃度事象と同時にSPM量高濃度事象が発生する場合も多いと思われる。

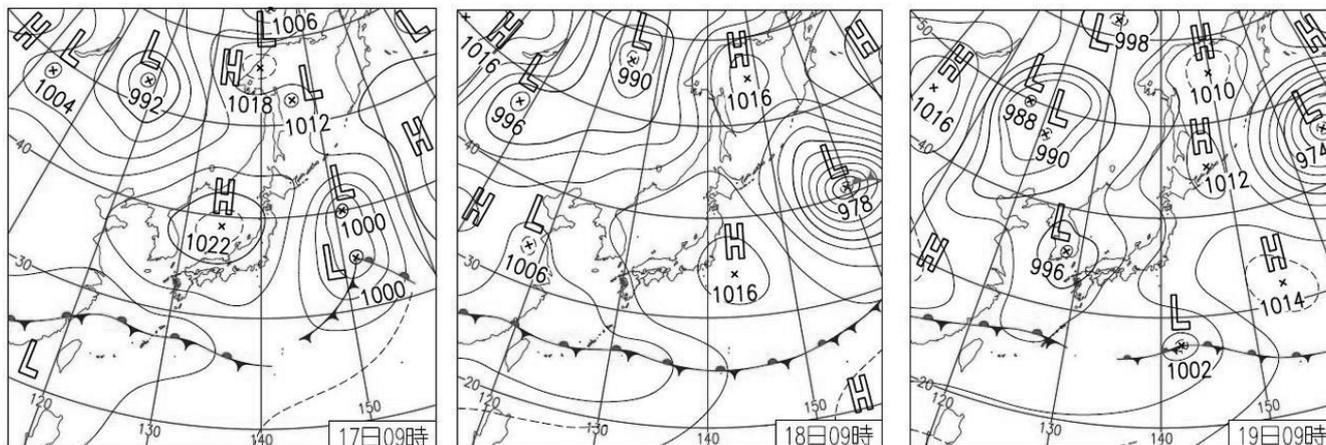


図11 2013年5月17日～19日の天気図(気象庁, 2015)

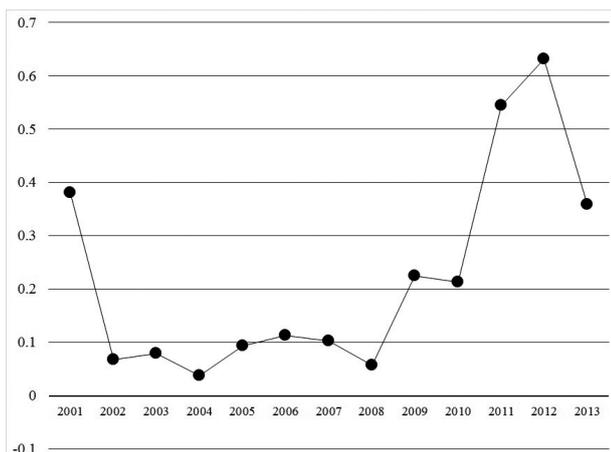


図12 赤水局で2001年～2013年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値とSPM量1時間値の年別相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は年。

赤水局で2001年～2013年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値とSPM量1時間値の年別相関が図12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どの年も高いものではないが、2001年と2009年以降に正の相関がみられる。

5 黒神局におけるSO₂ガスとSPM量の高濃度事象

表6は、2013年に黒神局で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2013年に測定されたこの9時・21時のSO₂ガス高濃度事象回数は5回であり、このうち4回が風速が8m/sec以上で測定されている。またそのすべてが風向250°以上280°以下という極めて狭い角度内で測定された。風速が8m/sec以上であり、風向が250°以上280°以下という二

表6 黒神局で2013年に測定された9時・21時でのSO₂ガス濃度高濃度事象の特徴

測定時間 (9:00 および 21:00)	723
SO ₂ ガス高濃度事象回数(9:00 および21:00)	5
全測定時数(9:00 および21:00)に対する高濃度事象の割合	0.7%
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec以上で発生した回数	4
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec以上で発生した割合	80.0%
SO ₂ ガス高濃度事象が(250° < D° < 280°)で発生した回数	5
SO ₂ ガス高濃度事象が(250° < D° < 280°)で発生した割合	100%
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec、(250° < D° < 280°)で発生した回数	4
SO ₂ ガス高濃度事象が8 m/sec、(250° < D° < 280°)で発生した割合	80.0%

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80%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。

黒神局において特に注目される事象として、2013年8月24日～27日のSO₂ガス濃度およびSPM量の1時間値の推移を述べる。図13に示すように、SO₂ガス濃度は8月25日10時から上昇しはじめ、12時には298ppb、13時には487ppb、14時には477ppbを示した。同時にSPM量も増加しており、13時には142μg/m³、14時には101μg/m³、16時にも101μg/m³を測定している。8月24

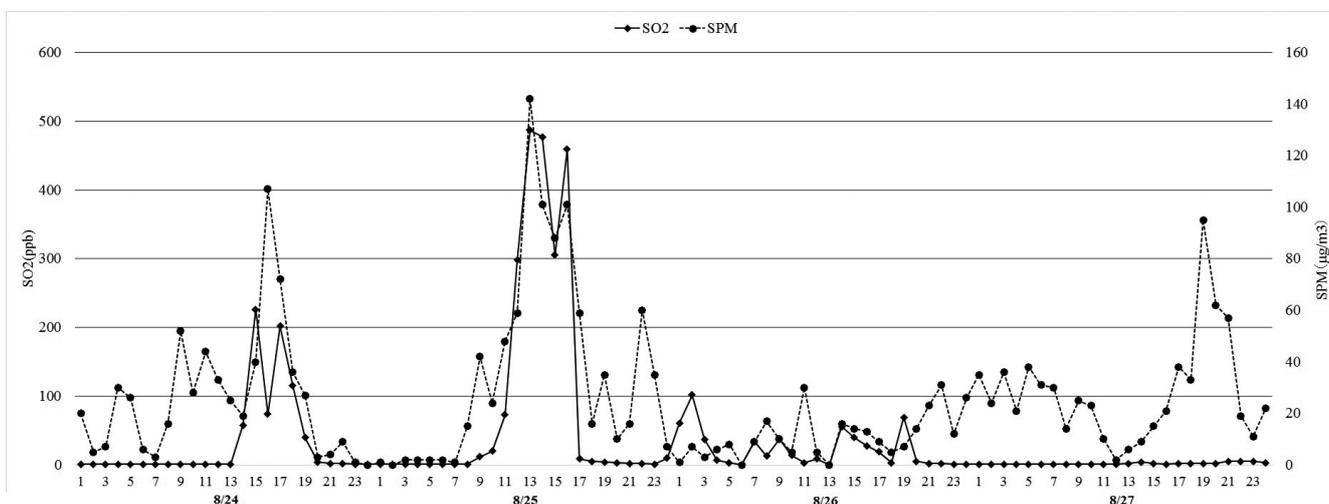


図13 2013年8月24日～27日の黒神局におけるSO₂ガス、SPM量の変化。

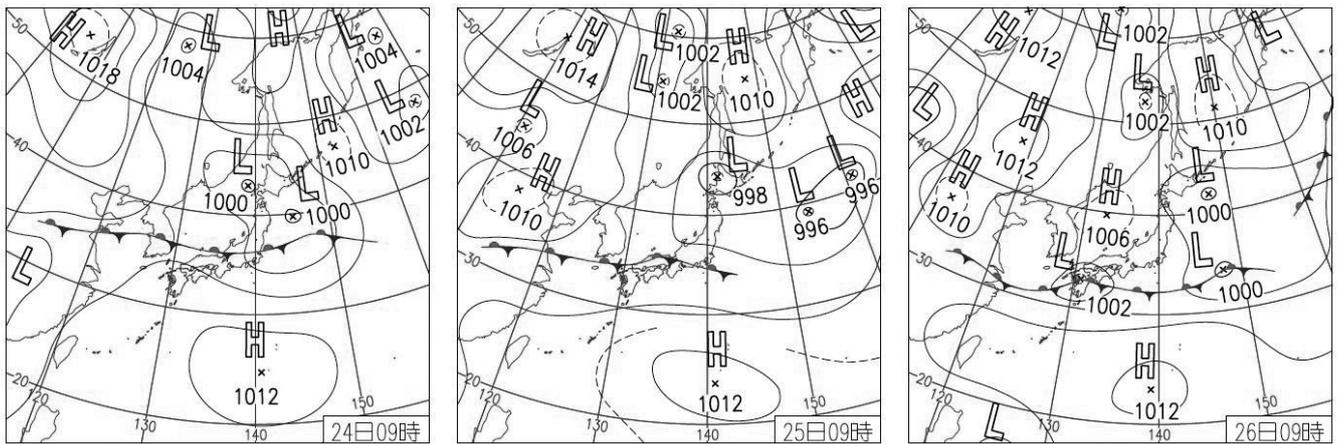


図14 2013年8月24日～26日の天気図（気象庁，2015）



図15 2013年8月25日15時に垂水市役所から撮影した桜島火山の噴煙画像

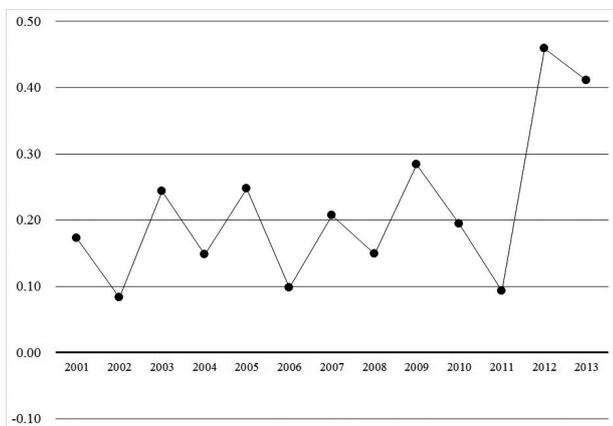


図16 黒神局で2001年 - 2012年にかけて測定されたSO₂ガス1時間値とSPM量1時間値の年別相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は年。

日9時の風向・風速は247°・8m/sec，21時は248°・8m/sec，25日9時は245°・11m/sec，21時は238°・11m/sec，26日9時は269°・18m/sec，21時は138°・9m/secであった。27日9時は102°・5m/sec，21時は253°・2m/secであった。25日は11m/secの強風下であり，卓越した西風が吹いていた。この時の天気図を図14，垂水市役所から撮影した噴煙画像を図15に示す。

この事例でも同様であったが，黒神で高濃度事象が

生じる際には気圧配置が南高北低である場合が多く，九州北部を低気圧が通過する際に吹く強風下で発生するケースが多い（木下ほか，2000）。これは桜島火山の北方を移動性の低気圧が通過することによって生じた強い西風によって生じる高濃度事象である。これは移動性の低気圧によって発生する高濃度事象であるため，有村局のように継続的に高濃度事象が続くことは少ないが，山頂からの吹き降ろしに短時間に非常に大きな数値を示すケースがある。

次に黒神局で2013年に測定されたSO₂ガス1時間値とSPM量1時間値の年別相関を図16に示す。このSO₂ガスとSPM量の1時間値の相関は，黒神局においては2012年以後にかなり正の相関がみられる。火山性のSO₂ガスが高い濃度を示すようになると，SPM量が増加するという事は，大気中に増加するSPMも火山性であることを示唆している。

6 桜島島外の大気環境への影響

これまで述べたように，桜島島内の各測定局で測定されたSO₂ガス濃度およびSPM量と風向・風速には明確な関連がある。視覚的に認識しやすい火山灰などについては，衛星画像を解析することによって，風下には

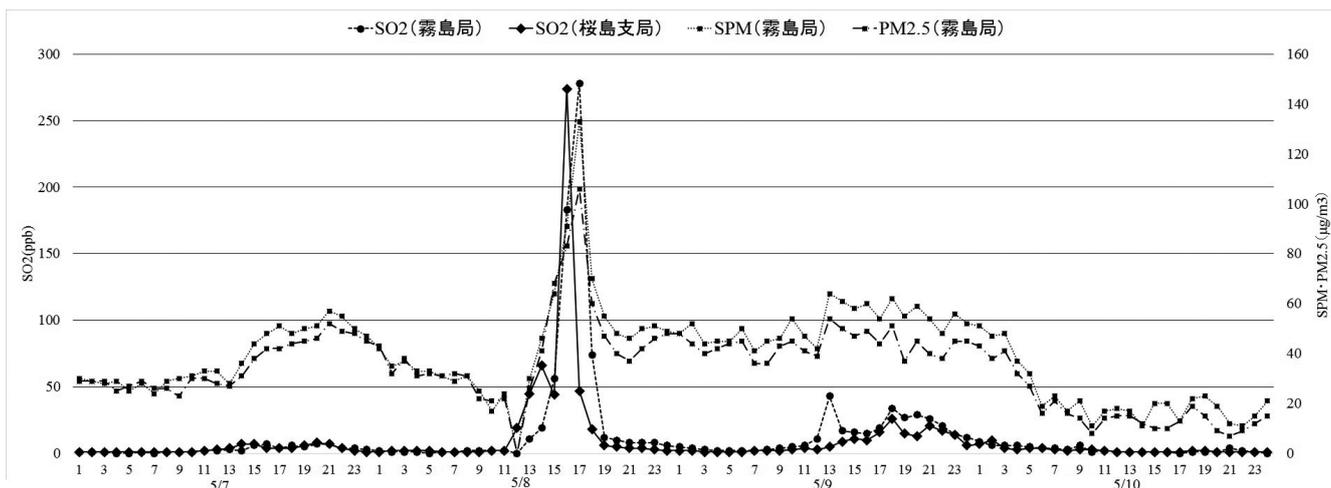


図17 2013年5月7日～10日の霧島局のSO₂ガス・SPM量・PM2.5量と桜島支所局のSO₂ガス量の変化。

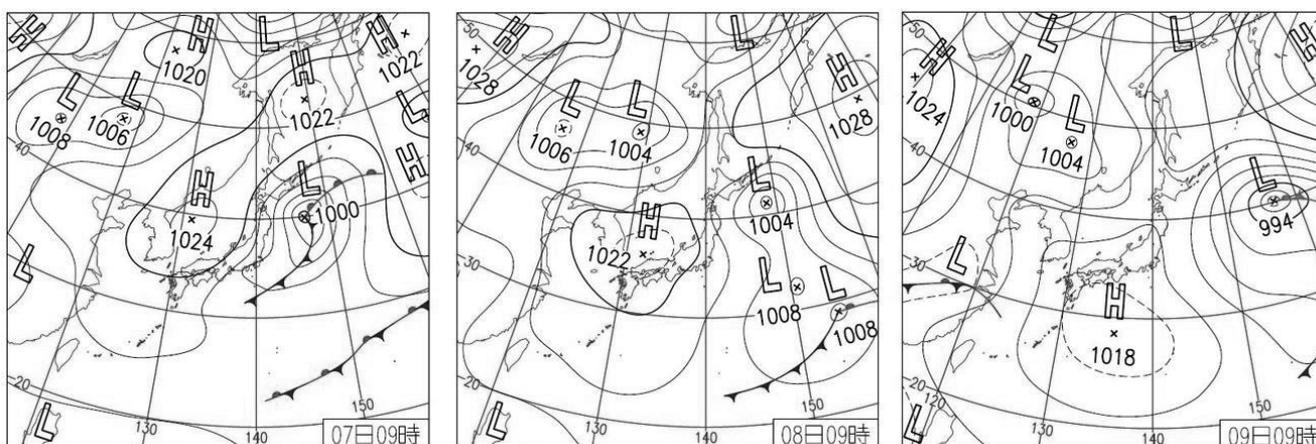


図18 2013年5月7日～9日の天気図（気象庁，2015）



図19 2013年5月8日15時16分に鴨池港付近から撮影した桜島火山の噴煙画像

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）。

鹿児島湾北側の国分平野にある霧島局で、SO₂ガス・SPM・PM2.5の3つの量の1時間値が2013年の最高値を示した5月8日の前後3日間の推移グラフを図17に示す。同図に示すように、北側の桜島山麓にある桜島支所局でも5月8日にはSO₂ガスのピークが見られた。この期間の風向風速は、5月7日9時は105°・7m/sec，21時は329°・5m/sec，同8日9時は288°・1m/sec，21時は275°・3m/sec，同9日9時は238°・2m/sec，21時は196°・5m/secであった。同10日9時は192°・14m/sec，21時は237°・11m/secであった。

SO₂ガス濃度は5月8日12時から少しずつ上昇しはじめ、16時には274ppbを示した。同時にSPM量も増加しており、同日14時には41µg/m³，16時には59µg/m³，17時に71µg/m³を測定している。またPM2.5量も増加しており、同日14時には41µg/m³，16時には83µg/m³

/m³, 17時に106 μ g/m³を測定している。これは2013年に霧島局で測定されたPM2.5量の最高値であった。この現象は、小山田(2000)によって述べられているように、図19に示すような大気中に大きく噴き上げられた噴煙が、弱風の南風によって霧島方面へ移流し、対流混合によって観測局にSO₂ガス高濃度事象を発生させ、同時に噴煙中に含まれていたSPM量やPM2.5量の高濃度事象も発生させたと考えられる。

7 鹿屋局・鹿児島市役所局におけるSO₂ガス・SPM・PM2.5の相関

図1の10局の中で、鹿屋局は桜島から最も遠方であり、中間には標高1000m～1200mの高隈山系が聳えている。しかし、表1、表2でSO₂ガスやSPMの高濃度事象が霧島局・喜入局よりも鹿屋局で多く見られるのは、北西の風が強い時に噴煙や火山ガスが高隈山系を越えて吹き降ろされるためと考えられる。このような事例は前報(坂本・木下, 2014a)でも検討した。表1、表2の集計で用いた高濃度事象1時間値の定義をもっと低くすれば、鹿屋局におけるこれらの高濃度事象の割合は増大し、その多くは桜島火山の影響であると示すことができる。

図20は、鹿屋局で測定されたSO₂ガス・SPM・PM2.5の1時間値を用いて月ごとの相関性をピアソンの積率相関係数を用いて示したものである。SPM量とPM2.5量の1時間値には、6月・7月を除くと高い正の相関があることがわかる。もし桜島火山噴出物がSPMの主な供給源とすると、同時にPM2.5も大気中に放出されていることになる。他の供給源からの寄与の評価は残された問題である。また7月から10月にはSO₂ガスとSPM量にも正の相関があることがわかる。他方、SO₂ガスとPM2.5量の相関はかなり弱い。

図21は、桜島の西方に位置する鹿児島市役所局におけるSO₂ガス・SPM・PM2.5の1時間値の月ごとの相関係数の変化である。図20と同様に、SPM量とPM2.5量の1時間値には、6月を除くと高い正の相関があることがわかる。またSO₂ガスとSPM量の間では、8月には相関係数が0.4以上の相関があり、SO₂ガスとPM2.5量の間においても、7月と8月には、相関係数が0.4以上になる明らかな相関があることがわかる。

表1、表2では、鹿児島市役所局は桜島に近いにも関わらずSO₂ガスとSPMの高濃度事象は少なく、火口の風下になることが稀なことがうかがえる。集計で用

いた高濃度事象1時間値の定義をもっと低くすれば、鹿児島市役所局におけるこれらの高濃度事象の割合は増大し、桜島火山の影響を見出すことができるのは、鹿屋局に準じている。

火山噴出物の影響のかなり異なる鹿屋局と鹿児島市役所局で図20と図21に示される相関は類似しており、SPM量とPM2.5量にはかなり強い相関が見られる。他方、桜島の島内で火山噴出物の影響の最も強い有村とそれに続く赤水と黒神では、SO₂ガスとSPMの高濃度事象が多く見られる場合ほど強い相関が見られた。併せて考えると、PM2.5もSO₂ガスやSPMとともに火山から多く噴出すると推論される。ただしPM2.5とSPMは火山噴出物以外の影響もあるため、SO₂ガスとこれらの相関は鹿屋局と鹿児島市役所局では弱くなっている。

8 背景値としてのSPM・PM2.5の相関

谷山支所局および喜入局において5月7日～10日に測定されたSPM量・PM2.5量の1時間値の推移を図22に示す。同期間である図17とあわせてこの期間のSPM量・PM2.5量を考察すると、全体的には測定値の変化が同じように推移していることがわかる。しかし霧島局で5月8日16時前後に見られたSO₂ガス・SPM・PM2.5の1時間値の高い値は、谷山支所局と喜入局では見ることができない。これはこの時の霧島局での測定値が火山性によるものであることを強く示唆している。他方、谷山支所局と喜入局では、桜島火山の影響を受けていないと考えられる。またSPM量とPM2.5量の両者は同じような挙動を示しており、7日～9日には午後から夜にかけて緩やかな上昇が見られる。図18の気圧配置から、この時期は西からの移動性高気圧に覆われていたと思われ、垂水ウェブカメラなどの視程の低下もあり、大陸からの気団の影響が窺われる。このような状況は、桜島火山起源のSPM量・PM2.5量を考える際の背景値として、今後更に深い検討が必要である。

9 考察とまとめ

本研究では、2013年におけるSO₂ガス高濃度事象とSPM量高濃度事象、そしてPM2.5量高濃度事象の相関を検討した。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ることが多いことがわかった。個々の事例を詳しく見れ

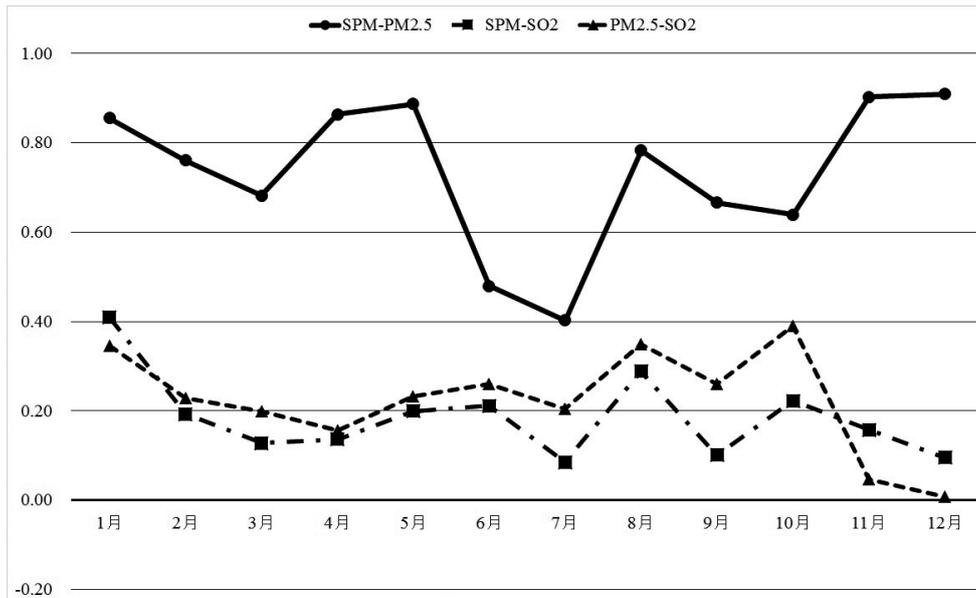


図20 鹿屋局における SO₂ ガス・SPM・PM2.5 の 1 時間値の月別相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は月。

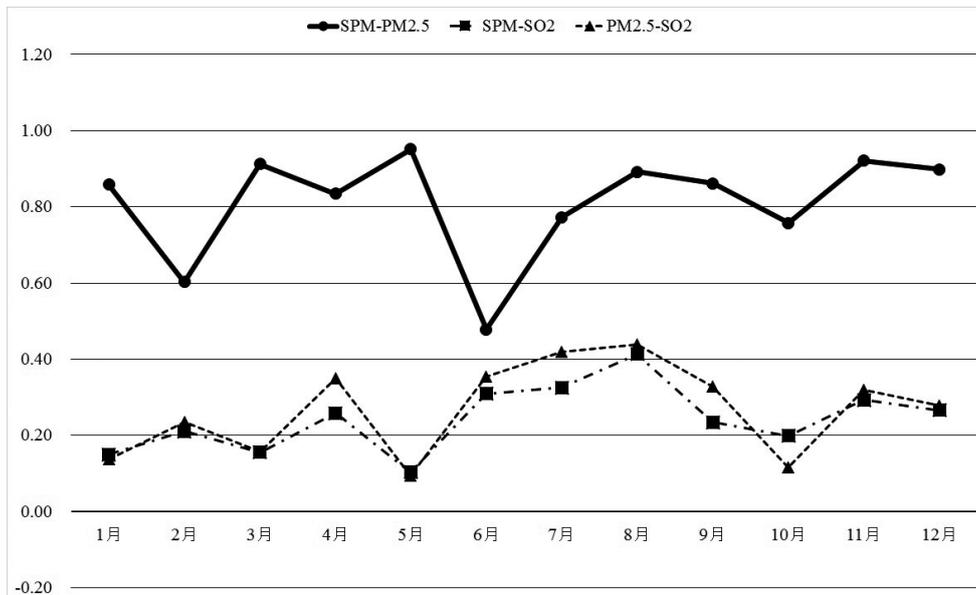


図21 鹿児島市役所局における SO₂ ガス・SPM・PM2.5 の 1 時間値の月別相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は月。

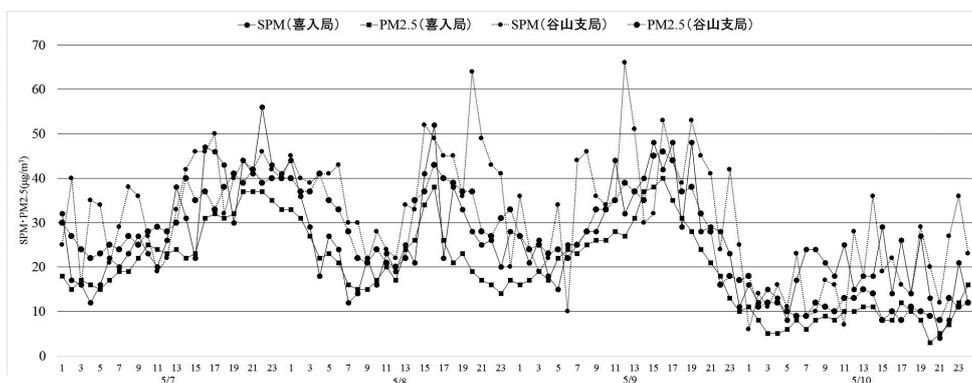


図22 5月7日～10日の谷山支所局および喜入局における SPM・PM2.5 の 1 時間値。

ば、SO₂ だけの高濃度事象もあり、灰粒子や固体エアロゾルの少ない白煙に対応すると考えられる。他方、少ない事例ではあるが、SPM だけの高濃度事象もある。多くの事例の一部は木下・坂本（2014）で報告したが、更なる検討が必要である。

鹿屋局や鹿児島市役所局では、SPM 量と PM2.5 量の相関も大きい。桜島火山の噴煙活動によって、これらによる大気環境が大きく影響を受けるとされる。有村局には PM2.5 の測定局がないために、PM2.5 との相関を明らかにすることはできなかったが、有村局・鹿屋局の相関研究（坂本・木下, 2014a）から類推すると、両者は大きく関連すると考えられる。それゆえこの後の実証研究が必要である。

SO₂ ガス高濃度事象は気象条件と密接な関係があり、火口や噴煙の流れる高度での風速が 8m/sec 以上である場合に下流で発生することが多い。特に黒神局では風向が 250° 以上 280° 以下という 30° 以内の角度で SO₂ ガス高濃度事象が発生することから、高濃度事象の発生予測情報を自動化できるようになる可能もある。さらに強風下では SO₂ ガス高濃度事象は遠く離れた下流域でも起こる場合があり、同時にそこでは SPM・PM2.5 の高濃度事象も発生する可能性もある。

弱風下において桜島火山が活発に噴煙活動をする際、上空の大気中に放出された SO₂ ガスは、地上の空気と対流混合を起こし、SO₂ ガスが地上付近にゆっくりと降りてくる。同時に SPM・PM2.5 の高濃度事象も発生する可能性も考えられる。

大気中における桜島火山起源以外の SPM 量と PM2.5 量は、よく似た増減を繰り返す場合が多く、これらは桜島火山から大気中に放出される SPM 量と PM2.5 量を考える際の背景値となるため、よく注意しておく必要がある。時間変化が緩やかで測定点の違いの少ない SPM と PM2.5 の濃度の上昇は、気圧配置から黄砂や越境大気汚染物質の飛来に因る場合が主と思われるが、さらに検討を要する。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、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、鹿児島市市民局安心安全課のみなさまには、火山ガス・SPM・PM2.5 データ等の貴重な測定データの提供を受けました。感謝申し上げます。また京都大学防災研究所附属火山活動研究セン

ター井口正人教授、気象庁、福岡管区気象台火山監視・情報センター、鹿児島地方気象台のみなさまには多くのアドバイスやデータの提供を受けました。心から感謝申し上げます。

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柿主税氏には、多くのご議論や垂水サイト画像の提供を戴きました。感謝申し上げます。

引用文献

- 平林順一(2003): 火山ガスと防災. 日本質量分析学会誌, **51**:119-124.
- 飯野直子・木下紀正(1996): 桜島噴煙の衛星画像の鉛直シヤ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・寺田暁彦(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.
- 鹿児島県(2011): 大気・騒音調査結果. (最終閲覧日:2014年3月25日). <http://www.pref.kagoshima.jp/>
- 金谷有剛・竹谷文一・入江仁士・駒崎雄一・高島久洋・鶴野伊津志(2010):九州福江島における通年 PM2.5 質量濃度測定値の大気環境短期基準超過. 大気環境学会誌, **45**, 289-292.
- 兼保直樹・高見昭憲・佐藤 圭・畠山史郎・林 政彦・原圭一郎・Chang Lim-Serok・Ahn Joon-Young:(2010)九州北部における春季の高濃度 PM_{2.5} と長距離輸送. 大気環境学会誌 **45**, 227-234.
- 兼保直樹・高見昭憲・佐藤 圭・畠山史郎・林 政彦・原圭一郎・河本和明・山本重一(2011):九州北部の離島および大都市部における PM_{2.5} 濃度の通年での挙動. 大気環境学会誌, **46**, 111-118.
- 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8日, 環境庁告示25号.
- 環境省(2009): 微小粒子状物質に係る環境基準について(告示).(最終閲覧日;2015年1月17日). <http://www.env.go.jp/press/11546.html>
- 木下紀正・小山田恵・日高耕一(2000): 桜島噴煙の2点観測と火山ガス高濃度事象の解析. 鹿児島大学教育学部研究紀要, 自然科学編, **51**:37-56.

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・西之園雅靖・瓜生洋一朗・金柿主税(1998): 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・坂本昌弥(2014): 桜島2013年の噴煙活動と鹿児島の大気環境. 東大地震研共同利用研究会集「火山現象のダイナミクス・素過程研究」(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/TAK-LAB/meeting/2014ES/2014Kinoshita.pdf>) (最終閲覧日:2015年1月17日).

気象庁(2015a): 日々の天気図. 気象庁 HP. (最終閲覧日:2015年1月10日). <http://www.data.jma.go.jp/>

気象庁(2015b): 過去の気象観測データ. (最終閲覧日:2015年1月10日). <http://www.data.jma.go.jp/>

気象庁地震火山部火山監視・情報センター(2014): 御嶽山の火山活動解説資料(平成26年9月).(最終閲覧日:2015年1月17日). <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

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(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(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.

味喜 大介・吉谷 純一・Jonas ELEIASSON・井口 正人(2014): 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**:150-153.

内閣府(2003): 三宅島火山ガスに関する検討会 報告書. 81pp. 東京.(最終閲覧日:2014年3月15日). <http://www.g-investor.com/>

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.

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. 平成20年度日本気象学会九州支部発表会要旨集 :5-6.

坂本昌弥・木下紀正(2014a): 桜島火山ガスの挙動と防災. 地域政策科学研究, **11**:1-25.

坂本昌弥・木下紀正(2014b):2013年における桜島火山ガス高濃度事象. 日本地質学会第121年学術大会講演要旨 :144.

下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明・中田節也(1995): 火山の辞典 :575pp. 朝倉書店, 東京.

竹山栄作・宝来俊一・右田譲(1989): 桜島火山噴出物に関する研究(第1報). 鹿児島県環境センター所報, **5**, 61-67, 及び引用文献.

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.

柳川民夫・南園博幸・宝来俊一・中尾謙治・長井一文・大津陸雄・小磯 誠・内山 裕(1987): 桜島火山周辺における二酸化硫黄高濃度出現状況とその特徴. 鹿児島県環境センター所報, **3**:27-40.

桜島火山噴出物の大気環境影響

坂本昌弥・木下紀正

キーワード：二酸化硫黄, 浮遊粒子状物質, 微小粒子状物質, 大気環境, 噴煙

要旨：2013年における桜島火山の周辺や離れた地点における SO₂, SPM, PM_{2.5}の地表濃度1時間値について分析し, 互いの相関から火口から大気中に放出されたこれらの影響について考察した。SO₂ ガス高濃度事象は, 気象条件と密接な関係があり, 火口や噴煙の流れる高度での風速が8m/sec 以上である場合に下流で発生することが多い。特に黒神局では風向が250° 以上280° 以下という30° 以内の角度で SO₂ ガス高濃度事象が発生する。弱風下においては, 火口から大気中に放出された SO₂ ガスは, 地上の空気と対流混合を起こし, SO₂ ガスが地上付近にゆっくりと降りてくる場合があり, 晴天の午後に全方位的に高濃度事象が見られる場合がある。次に大気中の SPM 量と PM_{2.5}量は, 互いに高い相関性が認められる。また SO₂ ガス高濃度事象と SPM 量・PM_{2.5}量に相関が認められる場合もあり, 大気中に火山性の SPM・PM_{2.5}が存在すると考えられる。そしてこれらは相関を保ちながら島外へ移流することがある。大気中における桜島火山起源以外の SPM 量と PM_{2.5}量は, よく似た増減を繰り返す場合が多く,

桜島火山から大気中に放出される SPM 量と PM2.5 量を考える際の背景値となる。

Effect of volcanic ejecta from Sakurajima on the atmospheric environment

Masaya SAKAMOTO and Kisei KINOSHITA

Keyword: SO₂, SPM, PM2.5, air quality, volcanic plume.

Abstract: Ground surface concentrations of SO₂, SPM and PM2.5 in 2013 at the stations around Sakurajima Volcano with different directions and distances are studied. High concentration events of SO₂ are closely related to meteorological conditions. Namely, they tend to happen at the downwind directions when the wind speed around the vent height exceeds 8m/sec. Especially, at Kurokami station east of the vent, the events happen for the wind directions limited to 30 degrees between 250 and 280 degrees. In contrast, high concentration events also happen at almost all directions under weak winds, owing to the convection mixing to bring down the gas from the plume height to the ground especially in sunny afternoon. The correlation between SPM and PM2.5 concentrations is found to be generally high, while those between SO₂ and SPM (or PM2.5) turn to be notable in some cases, suggesting the latter with volcanic origin. They tend to drift together downwind outside Sakurajima half-island. In contrast to strong time dependence of SPM and PM2.5 concentrations supposed to be ejected from the volcano, the background values of them tend to exhibit similar behaviors with mild time dependence.