

## 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

木下紀正\*・西之園雅靖\*\*・瓜生洋一郎\*\*・金柿主税\*\*\*  
(1998年10月15日 受理)

### Analysis of High Concentration Events of Aerosol and Volcanic Gas around Sakurajima Volcano

Kisei KINOSHITA\*, Masayasu NISHINOSONO\*\*, Youichiro URYU\*\*  
and Chikara KANAGAKI\*\*\*

#### Abstract

High concentration events of suspended particulate matter (SPM) and sulfur dioxide at the foot of Sakurajima volcano during 1992 and downtown of Kagoshima city for five years since April 1993 were analyzed in connection with the wind data at high altitudes, surface weather map and video records of the volcanic clouds. The SO<sub>2</sub> and SPM data were provided by the Kagoshima city office as one-hour values throughout the years. Strong winds around the altitude of the summit, blowing down the volcanic gas with the ash clouds, were confirmed to be responsible for the high concentration events of SO<sub>2</sub> at the foot of the volcano in the downwind direction. The SPM concentration there in such cases were found to be high exhibiting strong correlation with the SO<sub>2</sub> concentration. At the measuring stations located at the distances 10-15 km separated from Sakurajima by the sea, strong winds were also found to be an important cause of high concentration events of SO<sub>2</sub> and SPM. Another mechanism for the events at the latter stations was the convection mixing in the daytime of good weather with mild or weak upper winds around the heights of the volcanic plumes. These results indicate that SPM and SO<sub>2</sub> from the volcano behave quite similarly, in contrast to the ash-fall from the plume near the volcano. In the downtown, there exist a few candidates of the events not attributed to the volcanic ejecta.

---

\*鹿児島大学教育学部物理学教室 Physics Department, Faculty of Education,  
Kagoshima University, Kagoshima 890-0065

\*\*鹿児島大学工学部機械工学科 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Kagoshima University, Kagoshima 890-0065

\*\*\*熊本県 益城中学校 Mashiki Junior High School, Mashiki, Kumamoto 861-2233

## 1. はじめに

大気中には様々なエアロゾル粒子が浮遊しており大気汚染の大きな要因の一つとなっている。中でもSPM (Suspended Particulate Matter) と呼ばれる浮遊粒子状物質は人体に大きな影響を及ぼす恐れがある。SPMとは大気中に浮遊するエアロゾルの中で粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の粒子のことを言い、その発生源は焼却炉等での物質の燃焼に伴う粉塵や自動車の排気ガス、スパイクタイヤなどの摩耗による粉塵などの人為的なものと、地表面から飛散した土壌粒子、海水が波の飛沫などによって飛散した海塩粒子、火山灰などの自然発生的なものがある<sup>1)</sup>。

桜島火山は常時噴煙と共に大量の火山ガスを放出しており<sup>2)</sup>、その影響は、周辺地域はもとより九州各地の大気環境に影響を与え酸性雨の一因となっている<sup>3)~7)</sup>。火山ガスの主成分は $\text{H}_2\text{O}$ であり、 $\text{CO}_2$ もかなり含まれていると考えられるが、背景濃度との識別が困難であり今後の研究が待たれる。火山ガスの環境影響が問題になるのは主に二酸化硫黄  $\text{SO}_2$  であり、火口付近で急性中毒や喘息発作の誘因になると共に、大気中でゆっくり酸化されて硫酸エアロゾルに変わり、酸性降下物の重要な要素となる。一方、噴煙として認められるのは凝結した水分や火山灰であるが、それらは高濃度の火山ガスと一体となってガス成分を溶解・付着させながら大気中を移流・拡散していくと考えられる。火山灰のうち粗大な粒子ほど早く落下してしまうが、エアロゾルとして長く大気中に留まっている細かな灰粒子も多く、その中にはSPMとして分類される成分もかなり含まれている<sup>7)</sup>。

桜島の火山ガスの化学的特性、時間的な変動、空間的な分布については今まで様々な研究がなされており、これらの研究より火山ガスの濃度測定には、その放出の時期的、時間的な変動や、地形や気象条件が強く影響することなどが分かっている<sup>8)~11)</sup>。SPMに関しても様々な研究がなされており、鹿児島県では宝来らによって桜島による降灰時のエアロゾルの挙動やエアロゾル組成元素の粒径分布の解析などが行われている。宝来らは、火山灰に含まれるSPMと火山灰の降灰量はあまり密接な関係には無く、降灰量からSPM濃度を推定するのは困難であることを報告している<sup>8)</sup>。SPMは粒径が非常に小さく、粒径の大きな火山灰とは滞留時間なども異なるため、大気中での正確な挙動は把握されていない。本研究では、桜島の火山ガスに含まれる $\text{SO}_2$ と、火山灰に比べて粒径のはるかに小さいSPMが挙動を共にし、またこれらの $\text{SO}_2$ やSPMは気象条件つまり気圧配置や高層風の風速、風向に強く影響を受けるという仮説のもと、鹿児島市内の5つの測定局(有村, 黒神, 市役所, 鴨池, 谷山)のデータ<sup>12)13)</sup>を用いてその解析を行う。

## 2. 解析データ

### 2.1 $\text{SO}_2$ とSPMデータ

鹿児島市では、環境保全課によって鹿児島市内4ヶ所(市役所, 谷山, 有村, 黒神)の測定局が一般環境大気測定の目的でおかれているが、鴨池測定局が新たに自動車排出ガスの測定のため1996

年に開設された<sup>12)</sup>。5ヶ所の測定局の位置を図1に示す。また表1にそれぞれの測定局の測定項目、測定局と桜島南岳の方位、直線距離を示す。桜島南岳の方位は測定局を基準として北から東回りに求めた。これは各測定局が火口の下流に当たる場合の風向である。本研究においてはSO<sub>2</sub>とSPMのデータを使用した。それぞれのデータは、環境大気中の濃度が1時間毎の積算値として、それぞれppbと $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の単位で表されている<sup>13)</sup>。

本稿では、1992年の桜島山麓の有村と黒神におけるSO<sub>2</sub>データと黒神におけるSPM、SO<sub>2</sub>の相関について、3と4で検討する。さらに5で桜島対岸の市街地側3カ所における1993年4月から5年間のSO<sub>2</sub>高濃度事象と、それに伴うSPM濃度について報告する。

これらの解析において高濃度事象の基準を次のように設定する。SO<sub>2</sub>の値が100ppbを超える時の事象を高濃度事象として捉え、この事象をSO<sub>2</sub> peak 値、SPM peak 値、peak 値の時刻差、それぞれの事象の継続時間と開始時刻で特徴づける。また、それぞれの高濃度事象の開始時刻や継続時間は、SO<sub>2</sub>とSPMのバックグラウンド値をそれぞれ20ppbと60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満と設定して求めた。

表1. 各測定項目、測定局と桜島南岳の方位ならびに直線距離

| 測定局   | 設置年月     | 方位(°) | 距離(km) | 二酸化硫黄 | 浮遊粒子状物質 | 窒素酸化物 | オキシダント | 風向・風速 |
|-------|----------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| 1.市役所 | 1973年12月 | 101   | 9.7    | ○     | ○       | ○     | ○      | ○     |
| 2.鴨池  | 1996年3月  | 80    | 10.0   | ○     | ○       | ○     | ○      | ○     |
| 3.谷山  | 1977年12月 | 64    | 14.6   | ○     | ○       | ○     | ○      | ○     |
| 4.有村  | 1980年12月 | 350   | 2.8    | ○     | ○       |       |        | ○     |
| 5.黒神  | 1988年2月  | 266   | 4.6    | ○     | ○       |       |        | ○     |

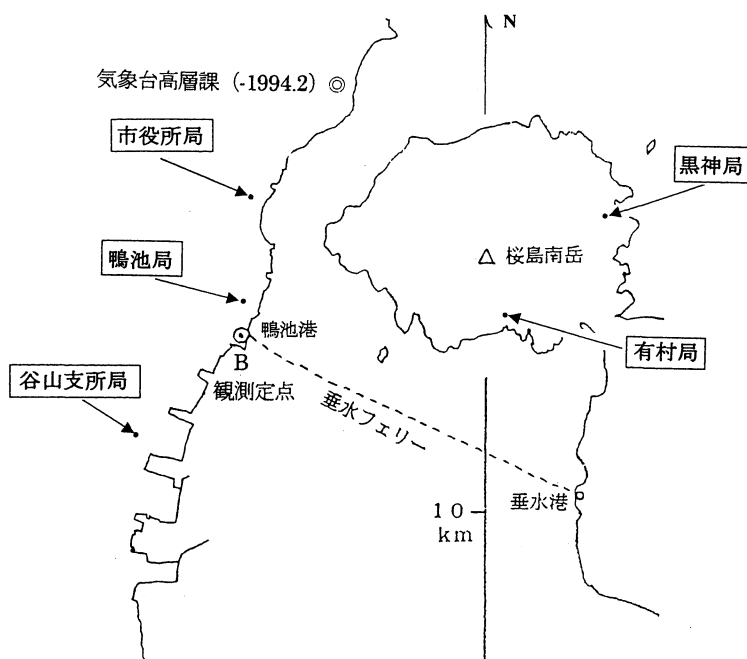


図1. 鹿児島市所管の測定局位置図

## 2. 2 風データについて

SO<sub>2</sub>とSPMの挙動は、風向や風速に強く依存していると考えられる。このSO<sub>2</sub>、SPMデータには、毎時の地上風データ(瞬時値)が付随しているが、地上風は局所的・時間的変動が著しいので、より上空の風向・風速が必要となる。そこで、今回の解析には、毎時間ではないが上空の風向・風速を与えてくれる1日4回の高層風データを使用する。

毎日の天気の変化を支配する高・低気圧など主要な大気現象のメカニズムを理解し予測するには、地上観測だけでなく上空の気象観測、つまり高層気象観測が不可欠である。高層気象観測の基本的な手段は、気圧、気温、湿度を計測するラジオゾンデと、風向、風速を計測するレーウィン、及び両者を組み合わせたレーウィンゾンデである。このような高層気象観測網は、現在約850の観測点が全世界に配置されている。高層観測点の間隔については、世界気象機関(WMO)は陸上300km、海上1000kmを勧告しているが、これは高・低気圧や前線のような大規模現象の解析と天気予報を目的としたものである。日本では9時と21時のレーウィンゾンデ観測、3時と15時のレーウィン観測を全国18ヶ所で行っている。九州においては福岡、鹿児島、名瀬の3ヶ所である。今回は鹿児島での高層気象観測データを使用した<sup>14)</sup>。

## 2. 3 天気概況と噴煙のビデオ映像

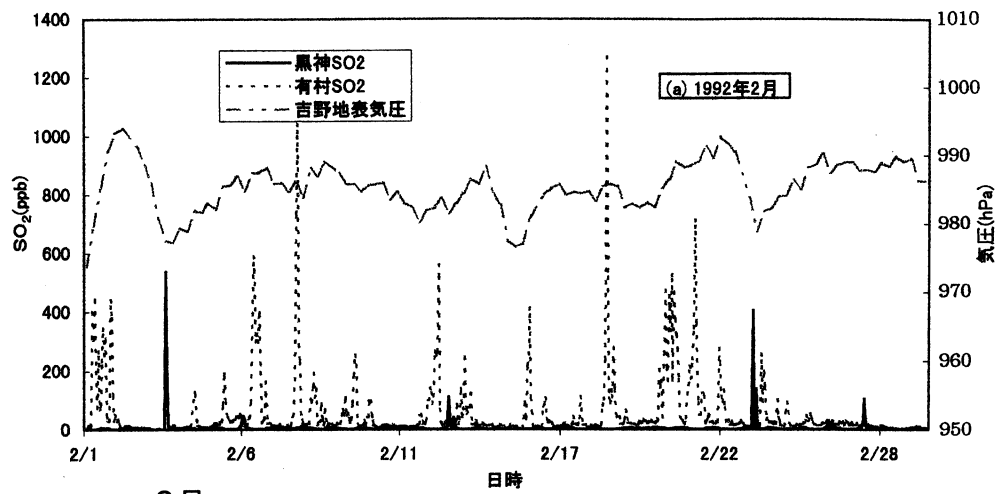
鹿児島市街地の測定局でSO<sub>2</sub>高濃度事象が起こった日とその前後の日の、天気図や雲の動きなどの天気概況のTV録画と噴煙のビデオ映像を、その事象の確認のために用いた。噴煙の映像は鴨池港付近の定点からタイムラプス方式で撮影されたものである<sup>15)</sup>。桜島の南山麓にある有村については、強い北風による吹き下ろしでSO<sub>2</sub>高濃度事象が発生し、噴煙の山岳波としての波打ちがしばしば見られることを前に報告した。他方、黒神の様子は定点撮影データからは見ることが出来ない。

# 3. 桜島山麓におけるSO<sub>2</sub>高濃度事象

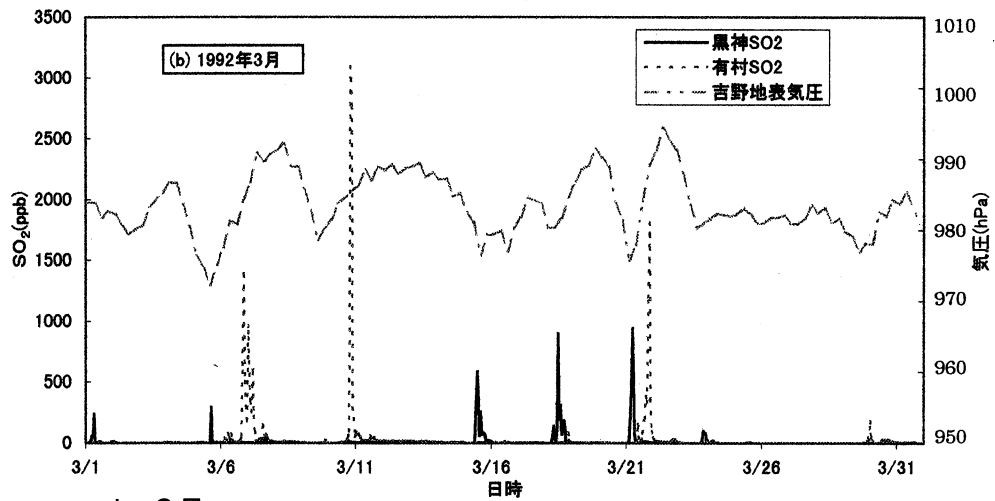
## 3. 1 SO<sub>2</sub>高濃度事象にかかわる風の影響

1992年の有村におけるSO<sub>2</sub>全データと地上風、高層風の解析により、高濃度が検出される場合の風向の平均値から、925hPaの風がもっとも北よりであり、高度が上がるとともに偏西風の影響で西よりにそれていくことがわかっている<sup>9)</sup>。また、有村の地上風のばらつきは大きい。気象台高層課のおかれていた吉野台地の地上風は高層風をある程度反映している。有村測定局は火口の南に位置するので、支配的なのは925hPaの北よりの強風である。また、このような強風は台風や低気圧との位置関係から理解される。なお、指定気圧面925hPaの高度は、海拔約830m程度である。

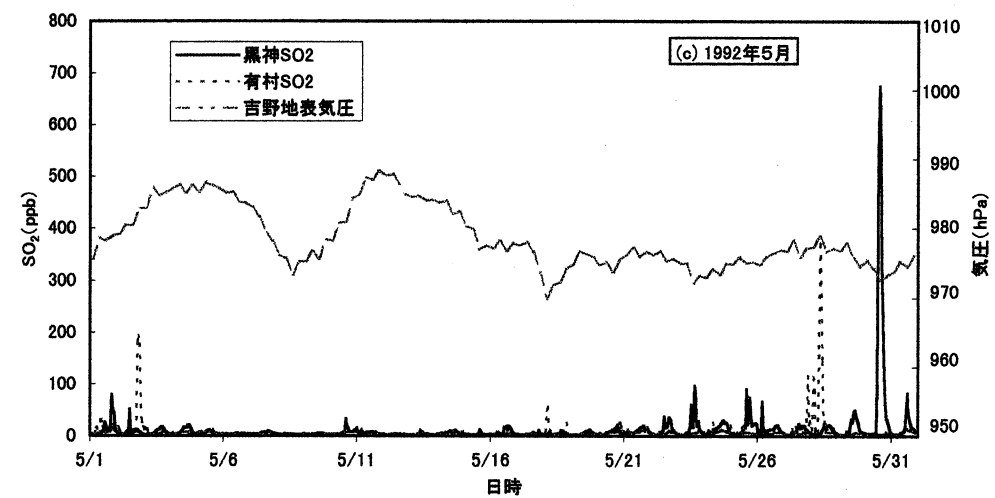
1992年の全データのうち、2月、3月、5月の有村と黒神のSO<sub>2</sub>濃度、ならびに吉野の地表気圧をそれぞれ図2a, b, cに示す。またそれぞれの高層風データの内、925hPaの風向、風速の2日間だけの例を図2dに示す。



a. 2月



b. 3月



c. 5月

図2. 有村と黒神の SO<sub>2</sub>濃度ならびに吉野地表気圧 (1992年)

## 2月6~7日

|       |       |        |        |       |       |        |        |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 6, 3h | 6, 9h | 6, 15h | 6, 21h | 7, 3h | 7, 9h | 7, 15h | 7, 21h |
| -     | 0 *   | 6 ↗    | 12 ↘   | 14 ↘  | 11 ↘  | 3 *    | 0 *    |

## 3月20~21日

|        |        |         |         |        |        |         |         |
|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|
| 20, 3h | 20, 9h | 20, 15h | 20, 21h | 21, 3h | 21, 9h | 21, 15h | 21, 21h |
| 7 ↗    | 7 ↗    | 11 ↘    | 13 ↗    | 20 ↗   | 19 ↘   | 10 ↘    | 13 ↗    |

## 5月8~9日

|       |       |        |        |       |       |        |        |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 8, 3h | 8, 9h | 8, 15h | 8, 21h | 9, 3h | 9, 9h | 9, 15h | 9, 21h |
| 15 ↗  | 16 ↗  | 14 ↗   | 12 ↗   | 10 ↗  | 3 ↗   | 3 ↗    | 2 *    |

d. 2, 3, 5月の高層風(925hPa)の2日間の例. 数字は日時と風速(m/s).  
 図2. 有村と黒神のSO<sub>2</sub>濃度ならびに吉野地表気圧(1992年)

南岳火口に最も近い有村測定局において、SO<sub>2</sub>高濃度事象が頻繁に発生している2月(図2a)などのSO<sub>2</sub>濃度と鹿児島地方気象台の高層気象データ(925hPa)を対比すると、桜島の山頂付近が北風系の強風で噴煙が上昇せず、むしろ吹き降ろされているような状況で高濃度事象が起きていることがわかる。たとえば1992年2月7日3時に発生した399ppbの高濃度事象は、風速11~14 m/sの北よりの強風が吹いているときに発生している。有村で高濃度SO<sub>2</sub>が検出される場合、気圧配置は西高東低で、特に九州東方にある低気圧の影響が大きい。

次に、火口に対して東に位置している黒神測定局では、高濃度事象が発生する場合、桜島山頂付近で吹き降ろしの強い西風が吹いているときに起こっている。したがって桜島山頂付近の925hPaの風が最も指標性が高いと考えられる。たとえば3月21日6時(図2b)にSO<sub>2</sub> 945ppbの高濃度事象が発生しているが、19~20m/sの西よりの強風の影響を強く受けていることがわかる。この傾向は黒神の全高濃度事象に共通のものであった。この時の気圧配置は、ほとんどの場合、日本海や九州北部に低気圧がある南高北低である。これらの気圧配置から、高濃度事象は春と夏に多いことが92年のデータ全体からも読み取ることができる(4月, 6月, 7月のグラフについては次節参照)。つまり黒神データは、北方の低気圧による強い西風の影響を受けることが分かる。

これらのことから、桜島山麓(有村, 黒神)における100ppb以上のSO<sub>2</sub>高濃度事象は、上層が強風で噴煙や火山ガスが上昇せず、むしろ強制的に降下し観測点を直撃するような状況で狭い範囲に出現する。また、低気圧や台風の影響が重要であることが分かる。なお気圧配置から推測される上層の強風とSO<sub>2</sub>高濃度事象のこのような関係は、山麓の西側や北側の測定点についても成立している<sup>10)</sup>。

しかし桜島山麓ではごくまれではあるが、1992年4月2日16時の黒神(次節図5a)のように風がかなり弱い時にSO<sub>2</sub>高濃度事象が発生していることがある。この原因は、この事象が日中の弱風

時に起こっているため、対流混合であると考えられる。上昇した  $\text{SO}_2$  が大気の上下の混合によって測定局の地表付近まで鉛直方向に拡散してきたものと思われる。対流混合の影響は下流の平地での  $\text{SO}_2$  濃度上昇の重要な原因と考えられる<sup>6)</sup>。しかし火口から近距離の山麓では弱風時に限られると思われる。

また北よりや西よりの強風にもかかわらず、図 2c の 1992 年 5 月 9 日の黒神のように  $\text{SO}_2$  高濃度事象が発生していないときがある。これは桜島の  $\text{SO}_2$  ガスの放出が低レベルであったためと考えられる。

### 3. 2 $\text{SO}_2$ 高濃度事象と桜島の火山活動

$\text{SO}_2$  放出量の直接測定は紫外線吸収スペクトルから推定する相関スペクトル法 (COSPEC) によって行われ、1978~1989 年の結果ではおおよそ 2000 t/day の値が得られている<sup>2)</sup>。しかし、これは九大島原地震火山観測所による年 1 日から数日の出張観測の結果である。雲仙普賢岳噴火のためそれも中断したあと、1995 年にはこれまでと同程度の結果が得られ、1996 年 12 月には 5100 t/day というこれまでで最高の値が報告されている<sup>16)</sup>。

他方、桜島の火山活動の日安として、鹿児島地方気象台の常時観測による爆発記録がある。図 3 に 1993~1997 年の年度別の爆発回数を示す<sup>17)</sup>。鹿児島地方気象台では爆発地震と爆発音・体感空振・噴石の飛散・空振計の記録から爆発を定義し、爆発に達しない強度だが中量以上の噴煙を伴う場合を噴火と呼んでいる。1993、1994 年および 1996 年 4 月以後は非常に穏やかな時期とされている。但し、1996 年 12 月 14 日未明には火山雷を伴う激しい爆発があり、その噴煙は四国沖から紀伊半島に達したのが衛星画像で認められた<sup>18)</sup>。

このような火山活動の推移と  $\text{SO}_2$  放出量の関係は重要な問題である。COSPEC によるスポット測定を補うものとして、桜島山麓における  $\text{SO}_2$  濃度の連続測定データを用いることが考えられる。もっとも、一点のデータからの  $\text{SO}_2$  放出量の推定には、大気拡散の正確な情報が必要であり、濃度値はその時々風の影響を受けることは上の議論からも明らかである。そこで、ここでは、経年変

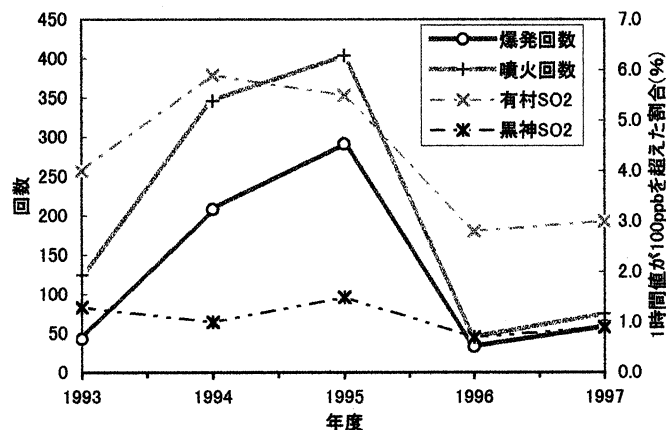


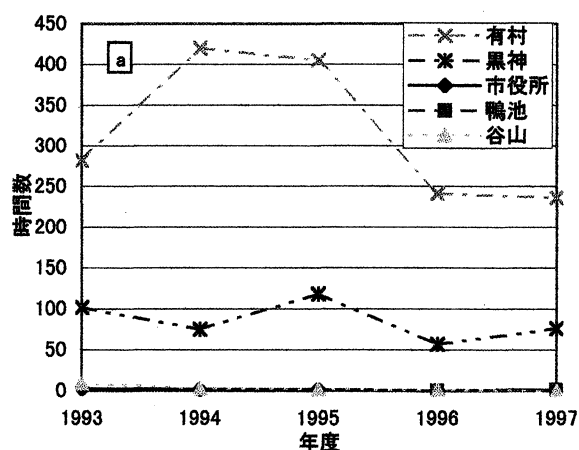
図3. 年度別の桜島の爆発回数および有村と黒神における  $\text{SO}_2$  1 時間値が 100ppb を越えた割合

化を見る一助として、有村と黒神の  $\text{SO}_2$  1時間値が100ppbを超えた割合の変化を桜島の年度別の爆発回数とともに図3に示す。有村の  $\text{SO}_2$  は爆発回数、噴火回数とかなり似た傾向を示しているが、黒神ではあまり顕著ではない。これは桜島の火山活動が季節によって大きく違ったためであると考えられる。平均的にも気圧配置による季節変化が大きいことを留意して見ると、爆発回数の減少した時期には、これらの地点の  $\text{SO}_2$  濃度も低下する傾向がうかがえる。

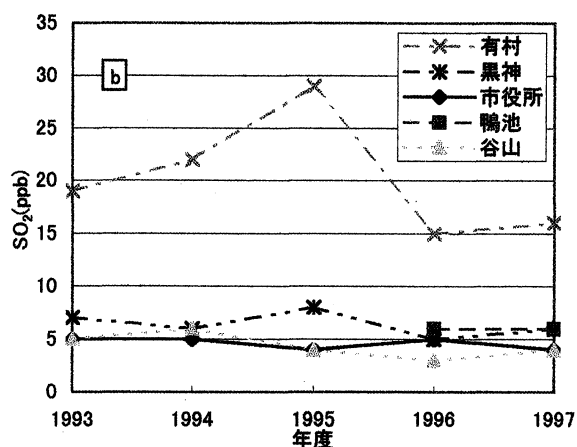
#### 4. 黒神におけるエアロゾルと $\text{SO}_2$ 高濃度事象

##### 4.1 桜島内外のエアロゾルと $\text{SO}_2$ の特徴

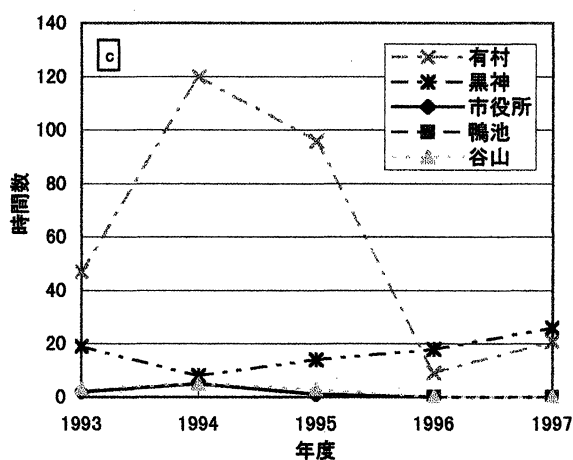
鹿児島市の各測定局で得られた  $\text{SO}_2$  データと SPM データにおいて、 $\text{SO}_2$  が100ppbを超えた時間数と年平均値の年度ごとの経年変化を図4a, 図4bに、そしてSPMの1時間値が $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えたときの時間数と年平均値の年度ごとの経年変化を図4c, 図4dに示す。図4a, 図4cにお



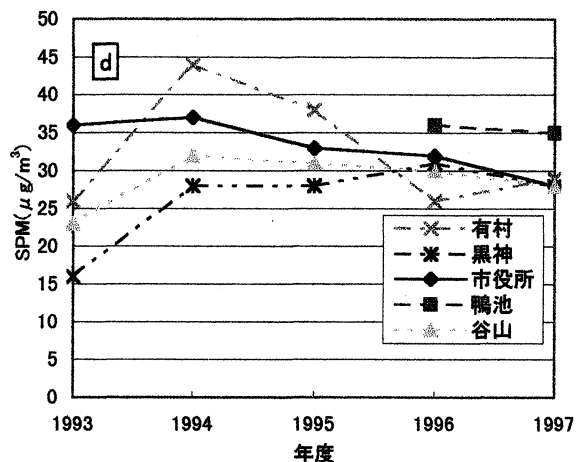
a.  $\text{SO}_2$ が100ppbを越えた時間数



b.  $\text{SO}_2$ の年平均値の経年変化(年度)



c. SPMが $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ を越えた時間数



d. SPMの年平均値の経年変化(年度)

図4.  $\text{SO}_2$ とSPMがそれぞれ100ppb,  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた時間数とそれぞれの年平均値の経年変化



いて、測定局別に出現回数を比較すると、やはり、有村、黒神測定局で出現回数が多く、鹿児島市街地の測定局では年に数えるほどしかない。また、桜島島内の2局を比較すると、1994年～1995年度の有村の出現回数が圧倒的に多いのに対して、黒神は比較的出現回数が少ない。これは桜島の爆発がこの時期、特に冬に活発になり、有村に強く影響を与えたものと思われる。しかし図4b、図4dにおいて、年平均値を比較すると、SO<sub>2</sub>は時間数に比べ市街地の平均値が若干高くなっているものの、比較的同じような傾向を持っている。しかしSPMは1994年～1995年の桜島の活動が活発だった時期を除けば、桜島島内の有村、黒神よりも市街地の平均値の方が高くなっている。このことから、SO<sub>2</sub>に関しては桜島島内、市街地ともに、桜島起源のSO<sub>2</sub>の比率が高いが、エアロゾルに関しては、桜島島内よりも市街地の方が慢性的に浮遊しており、市街地では火山性以外のエアロゾルの比率も高いことがうかがえる。

#### 4.2 1992年の黒神におけるエアロゾルとSO<sub>2</sub>高濃度事象の相関

1992年に黒神局でSO<sub>2</sub>高濃度事象が起こったときに、SPMがどのような動向を示すかを解析した。表2に1992年の全SO<sub>2</sub>高濃度事象に対するSPMのpeak値、peak時刻の差、継続時間ならびに開始時刻を示す。ほとんどの場合、peak時刻の差は±2時間以内である。また全SO<sub>2</sub>高濃度事象のうち典型的な92年4月、6月、7月の黒神でのSO<sub>2</sub>とSPMの時間変化を図5a、b、cに、高層風データの一部を図6a、b、cに示す。最初に4月のデータ(図5a)から、SO<sub>2</sub>高濃度事象が発生した日は5回あるが、いずれもSPMはSO<sub>2</sub>と同じように高い値を示している。この関係は、今回解析した1992年黒神の全データで同様の傾向を示した。しかし、SO<sub>2</sub>の高濃度が検出された時にはほとんどの場合SPMも高濃度であるのに対し、逆に図5bの6月2日のようにSPMが高濃度を示しているにもかかわらず、SO<sub>2</sub>はかなり低濃度であることがあった。この原因ははっきりとしていないが、火山性エアロゾル以外のものかもしれない。

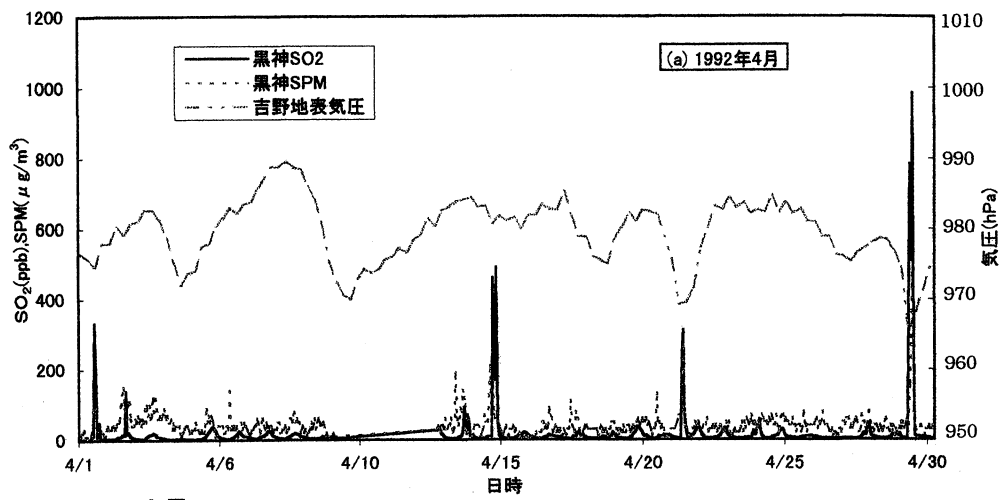
次に風との関係であるが、図5cの7月9日2時にSO<sub>2</sub>が895ppbという大きい値を示している。この時、図6bより、7月9日3時は風速19m/sの強い西風が吹いている。同時にSPMも330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ という強い値を示している。さらに、7月18日10時にSO<sub>2</sub>が1230ppb、SPMが1080 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ という黒神における1992年のそれぞれの最大値を示している。この時の高層風も図6cから7月18日9時に風速15m/sという強い西風が吹いている。これらより、黒神におけるSPMはSO<sub>2</sub>と同様に強い西風に大きな影響を受けており、SO<sub>2</sub>と似たような傾向を示していることがわかる。また、表2では7月18日10時のSO<sub>2</sub>peak値に対して、SPM peak値の時刻差が+4と大きい。これは一見、同一事象ではないように見えるが、SO<sub>2</sub>の継続時間内にSPMのpeakが起こっているため、継続時間の長い同一事象である。

図7に92年の黒神SO<sub>2</sub>とSPMのpeak値の相関について示す。これらの相関係数は0.76であり、強い相関が認められた。以上のことから、黒神局におけるSO<sub>2</sub>とSPMは、酷似した行動をとることがわかる。ただし、SPMだけが高濃度の場合があるので、その詳細は今後の課題である。

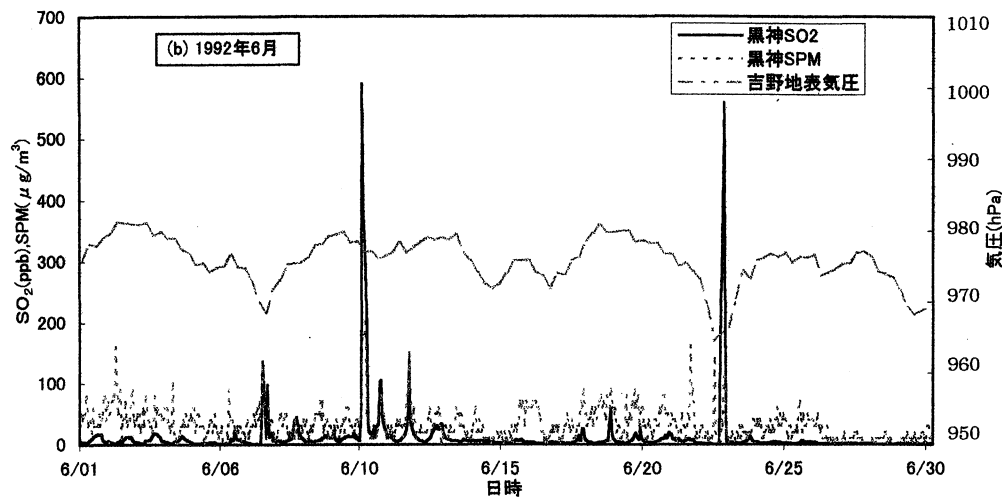
表2. 1992年黒神における全 SO<sub>2</sub>高濃度事象

| SO <sub>2</sub><br>ピーク時刻 | SO <sub>2</sub><br>ピーク値 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | SPM<br>ピーク値 | 時刻差 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|-------------|-----|----------|----------|
| 1/28 19h                 | 107                     | 4        | 18       | 180         | +1  | 5        | 18       |
| 2/3 21h                  | 539                     | 2        | 21       | 230         | +1  | 2        | 21       |
| 2/13 15h                 | 113                     | 2        | 15       | 90          | 0   | 4        | 13       |
| 2/23 24h                 | 406                     | 2        | 24       | 90          | 0   | 1        | 24       |
| 2/24 3h                  | 139                     | 1        | 3        | 60          | 0   | 1        | 3        |
| 2/27 19h                 | 105                     | 3        | 18       | 70          | +1  | 1        | 20       |
| 3/1 8h                   | 242                     | 3        | 6        | 80          | 0   | 1        | 8        |
| 3/5 16h                  | 294                     | 2        | 16       | 40          | 0   | 0        | -        |
| 3/15 12h                 | 588                     | 12       | 12       | 330         | 0   | 9        | 11       |
| 3/18 12h                 | 905                     | 12       | 7        | 490         | 0   | 10       | 9        |
| 3/21 6h                  | 945                     | 5        | 4        | 500         | 0   | 7        | 2        |
| 3/23 21h                 | 101                     | 5        | 20       | 110         | +1  | 3        | 21       |
| 4/1 14h                  | 332                     | 2        | 14       | 130         | +1  | 3        | 13       |
| 4/2 16h                  | 139                     | 1        | 16       | 150         | -2  | 10       | 11       |
| 4/15 18h                 | 491                     | 5        | 15       | 210         | -5  | 6        | 13       |
| 4/22 6h                  | 313                     | 4        | 5        | 270         | 0   | 6        | 2        |
| 4/30 6h                  | 984                     | 5        | 3        | 470         | 0   | 4        | 4        |
| 5/30 14h                 | 675                     | 11       | 12       | 910         | 0   | 21       | 11       |
| 6/7 12h                  | 136                     | 2        | 11       | 130         | 0   | 1        | 12       |
| 6/11 1h                  | 590                     | 8        | 24       | 200         | +3  | 4        | 1        |
| 6/12 17h                 | 142                     | 7        | 14       | 150         | 0   | 4        | 15       |
| 6/23 17h                 | 559                     | 5        | 14       | 110         | 0   | 2        | 17       |
| 7/9 2h                   | 895                     | 4        | 24       | 330         | -1  | 3        | 1        |
| 7/9 18h                  | 453                     | 6        | 14       | 270         | -2  | 9        | 11       |
| 7/10 19h                 | 231                     | 4        | 18       | 170         | 0   | 4        | 19       |
| 7/15 11h                 | 481                     | 13       | 8        | 210         | +4  | 7        | 14       |
| 7/18 10h                 | 1230                    | 14       | 7        | 1080        | +4  | 13       | 8        |
| 7/19 4h                  | 732                     | 7        | 3        | 120         | +1  | 7        | 4        |
| 7/19 13h                 | 203                     | 8        | 12       | 130         | 0   | 5        | 12       |
| 8/1 14h                  | 112                     | 4        | 13       | 160         | +2  | 3        | 15       |
| 8/8 13h                  | 289                     | 11       | 12       | 120         | +2  | 2        | 14       |
| 9/25 8h                  | 389                     | 5        | 7        | 欠損          |     |          |          |
| 10/23 22h                | 172                     | 2        | 22       | 50          | -1  | 1        | 21       |
| 11/20 4h                 | 134                     | 1        | 4        | 30          | 0   | 0        | -        |
| 12/10 21h                | 263                     | 2        | 21       | 110         | +1  | 1        | 22       |
| 12/13 12h                | 379                     | 3        | 11       | 110         | +1  | 1        | 13       |

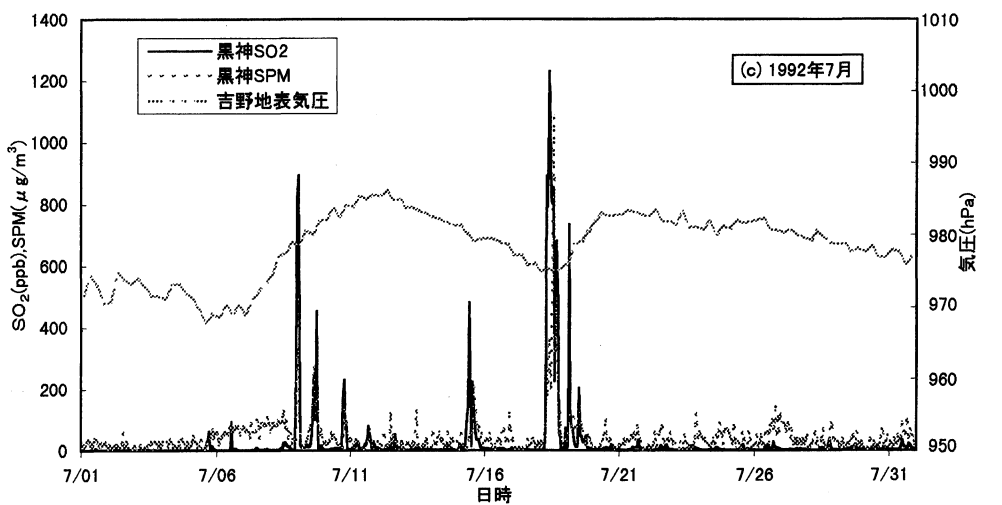
単位は SO<sub>2</sub> (ppb), SPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), peak 時刻の差 (hour), それぞれの継続時間 (hour) ならびに開始時刻 (o'clock). - は peak 値をとらなかった時, 欠損はデータ欠損.



a. 4月



b. 6月



c. 7月

図5. 黒神における SO<sub>2</sub> と SPM の時間変化 (1992年)

(a) 4月2~3日

2, 3h 2, 9h 2, 15h 2, 21h 3, 3h 3, 9h 3, 15h 3, 21h  
 10 ↘ 8 ↘ 6 ↘ 2 + 3 ← 9 ↗ 3 + 8 ↗

(b) 7月8~9日

8, 3h 8, 9h 8, 15h 8, 21h 9, 3h 9, 9h 9, 15h 9, 21h  
 7 + 6 + 12 + 14 + 19 + 11 + 13 + 7 +

(c) 7月17~18日

17, 3h 17, 9h 17, 15h 17, 21h 18, 3h 18, 9h 18, 15h 18, 21h  
 10 + 13 + 11 + 16 + 19 + 15 + 13 + 16 +

図6 高層風(925hPa)の1992年の2日間の例. 数字は日時と風速(m/s).  
 a. 4月2~3日 b. 7月8~9日 c. 7月17~18日

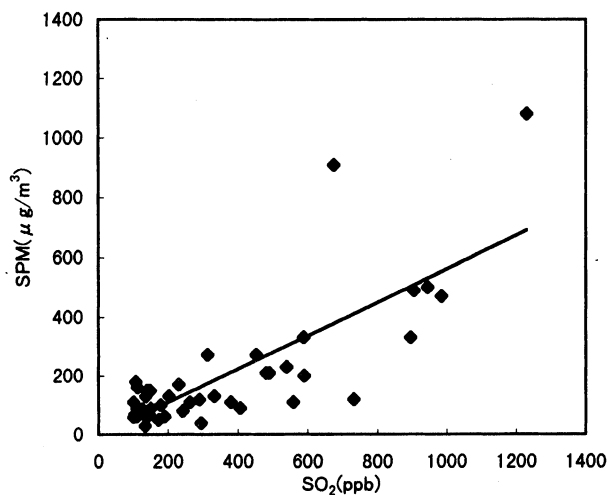


図7. 1992年の黒神 SO<sub>2</sub>と SPM の peak 値の相関(実線は回帰直線)

## 5. 鹿児島市街地におけるエアロゾルと SO<sub>2</sub>高濃度事象の関係

### 5.1 鹿児島市街地における高濃度事象の発生メカニズム

表3に1993年4月~1998年3月の5年間の鹿児島市街地における SO<sub>2</sub>と SPM 高濃度事象を示す。表3では SO<sub>2</sub> peak 時刻に最も近い時刻の925hPaと850hPa(海拔約1500m)の高層風データと高濃度事象を発生させたメカニズムを示してある。発生メカニズムは、天気概況や噴煙のビデオ映像により確認したもので、強風によるものと、対流混合によるものの2種類が確認できた。

表3. 鹿児島市街地の高濃度事象

## (1)市役所

| SO <sub>2</sub><br>ピーク時刻 | SO <sub>2</sub><br>ピーク値 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | SPM<br>ピーク値 | 時刻差 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | 925hPa |    | 850hPa |    | メカニズム |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|-------------|-----|----------|----------|--------|----|--------|----|-------|
|                          |                         |          |          |             |     |          |          | 風向     | 風速 | 風向     | 風速 |       |
| 93/06/08 04h             | 178                     | 3        | 3        | 100         | 0   | 1        | 4        | 97     | 16 | 141    | 11 | 強風    |
| 93/08/09 08h             | 101                     | 10       | 4        | 60          | +3  | 1        | 11       | 102    | 27 | 108    | 31 | 強風    |
| 94/08/17 20h             | 148                     | 3        | 18       | 150         | 0   | 1        | 20       | 96     | 10 | 100    | 9  | 強風    |
| 95/07/09 21h             | 190                     | 3        | 21       | 61          | 0   | 1        | 21       | 236    | 3  | 241    | 8  |       |
| 95/09/18 15h             | 124                     | 5        | 14       | 83          | +3  | 5        | 14       | 328    | 3  | 354    | 5  | 対流混合  |
| 97/08/17 21h             | 109                     | 7        | 17       | 61          | 0   | 1        | 21       | 107    | 16 | 112    | 19 | 強風    |
| 97/09/15 12h             | 105                     | 9        | 9        | -           | -   | -        | -        | 102    | 21 | 106    | 24 | 強風    |

## (2)鴨池

| SO <sub>2</sub><br>ピーク時刻 | SO <sub>2</sub><br>ピーク値 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | SPM<br>ピーク値 | 時刻差 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | 925hPa |    | 850hPa |    | メカニズム |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|-------------|-----|----------|----------|--------|----|--------|----|-------|
|                          |                         |          |          |             |     |          |          | 風向     | 風速 | 風向     | 風速 |       |
| 97/09/15 04h             | 126                     | 10       | 23       | 87          | 0   | 1        | 4        | 90     | 24 | 88     | 28 | 強風    |

## (3)谷山

| SO <sub>2</sub><br>ピーク時刻 | SO <sub>2</sub><br>ピーク値 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | SPM<br>ピーク値 | 時刻差 | 継続<br>時間 | 開始<br>時刻 | 925hPa |    | 850hPa |    | メカニズム |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|-------------|-----|----------|----------|--------|----|--------|----|-------|
|                          |                         |          |          |             |     |          |          | 風向     | 風速 | 風向     | 風速 |       |
| 93/04/14 13h             | 138                     | 5        | 11       | -           | -   | -        | -        |        |    | 313    | 3  |       |
| 93/07/21 11h             | 121                     | 8        | 9        | 80          | +2  | 5        | 12       | 72     | 11 | 35     | 2  | 強風    |
| 93/07/24 14h             | 150                     | 9        | 8        | 90          | 0   | 6        | 10       | 80     | 2  | 3      | 3  | 対流混合  |
| 93/11/11 17h             | 146                     | 6        | 14       | 70          | +1  | 1        | 18       | 82     | 10 | 327    | 1  | 強風    |
| 94/07/18 11h             | 111                     | 4        | 10       | 90          | 0   | 6        | 7        | 69     | 3  | 74     | 7  | 対流混合  |
| 94/10/24 17h             | 114                     | 8        | 12       | 70          | -4  | 1        | 13       | 71     | 1  | 71     | 3  | 対流混合  |
| 95/09/19 16h             | 139                     | 8        | 11       | 欠損          |     |          |          | 57     | 2  | 70     | 3  | 強風    |
| 96/05/13 12h             | 124                     | 3        | 11       | -           | -   | -        | -        | 65     | 5  | 32     | 5  | 対流混合  |

1993年4月～1998年3月の5年間の鹿児島市街地におけるSO<sub>2</sub>とSPM高濃度事象。  
単位は表2に準じ、風向風速はそれぞれ°, m/s。-はpeak値をとらなかった時、  
欠損はデータ欠損。

## 5. 1. 1 強風による高濃度事象

強風によって発生した高濃度事象のうち、市役所局での1993年6月8日4時、1993年8月9日8時、1994年8月17日20時、谷山支所局での1993年7月21日11時、1993年11月11日17時について、前後3日間のSO<sub>2</sub>とSPMの関係を図8a, b, c, d, eに示す。市役所の93年6月8日4時の事象(図8a)は南南西に低気圧があり、6月8日3時頃から市役所方向へ強風が吹き始め、時間が経過するにつれて風向が北東に変わっている。これらは開始時刻が3時で、継続時間3時間であることから理解できる。93年8月9日8時の事象(図8b)は台風16号が接近しており、8月9日の9時頃から長い間、市役所方向へ非常に強い風が吹いている。これらは継続時間や図によって非常に理解できる。谷山の93年7月21日11時の事象(図8d)も低気圧の影響を受けて谷山方向に強風が吹いている。93年11月11日17時の事象(図8e)は高層風の風向が谷山方向と一致していないように思えるが、その後の21時の高層風は風向66°, 風速18m/sであるので、問題はないと思われる。

いずれも、台風や低気圧の影響によって、桜島山頂付近(925hPa)でそれぞれの測定局に向かっ

て強い風が吹いており、その風に乗ってSO<sub>2</sub>とSPMが移動したものと思われる。高層風の風向、風速と比較すると強風の場合、風向のずれがSO<sub>2</sub>やSPMの濃度に大きく関係することがわかる。

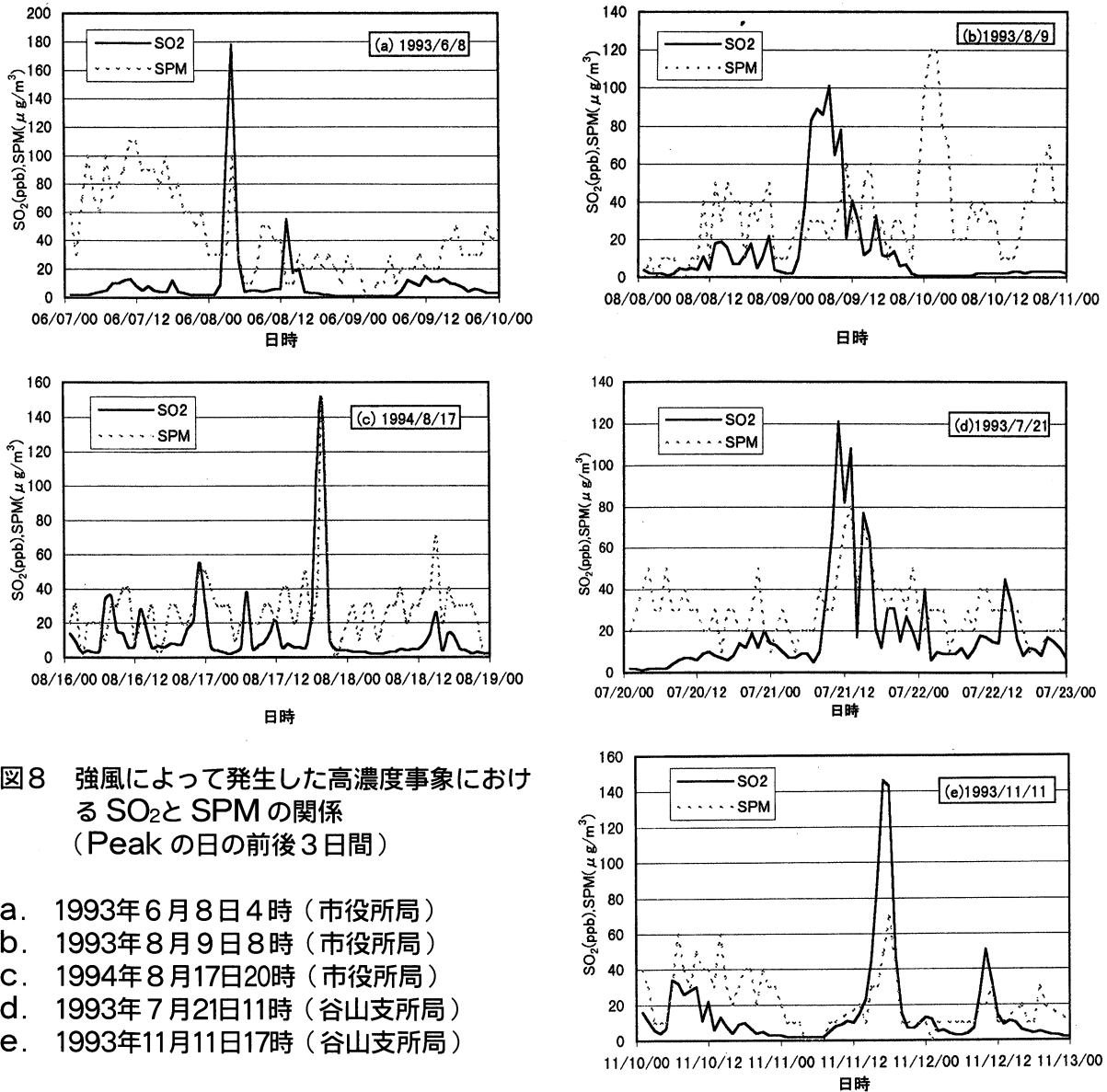


図8 強風によって発生した高濃度事象におけるSO<sub>2</sub>とSPMの関係 (Peakの日の前後3日間)

- 1993年6月8日4時 (市役所局)
- 1993年8月9日8時 (市役所局)
- 1994年8月17日20時 (市役所局)
- 1993年7月21日11時 (谷山支所局)
- 1993年11月11日17時 (谷山支所局)

### 5. 1. 2 対流混合による高濃度事象

対流混合によって発生したと推定される高濃度事象は、市役所局では1995年9月18日15時、谷山支所局では1993年7月24日14時、1994年7月18日11時、1994年10月24日17時、1996年5月13日12時である。強風の場合と同様に、高濃度事象の前後3日間のSO<sub>2</sub>とSPMの関係を図9 a, b, c, d, eに示す。これらは日中の弱風時に起こっているため対流混合によるものと考えられる。いずれも風向は測定局方向であるので、桜島が放出した火山ガスがそれぞれの測定局方向にゆっくり輸送され、その間に測定局付近の地表まで鉛直方向に拡散してきたものと考えられる。たとえば、市役所の95

年9月18日15時の事象（図9 a）は南東のはるか沖に台風13号があったが、この日にはあまり風の影響がなかった。9月18日の3時頃から市役所方面へかなり弱い風が吹いており、ゆっくり輸送されながら、対流混合によって測定局付近まで拡散されたものと思われる。なお混合層は好天の日中に陸上で良く発達するが、その影響が鹿児島湾にもおよぶと考えられる。

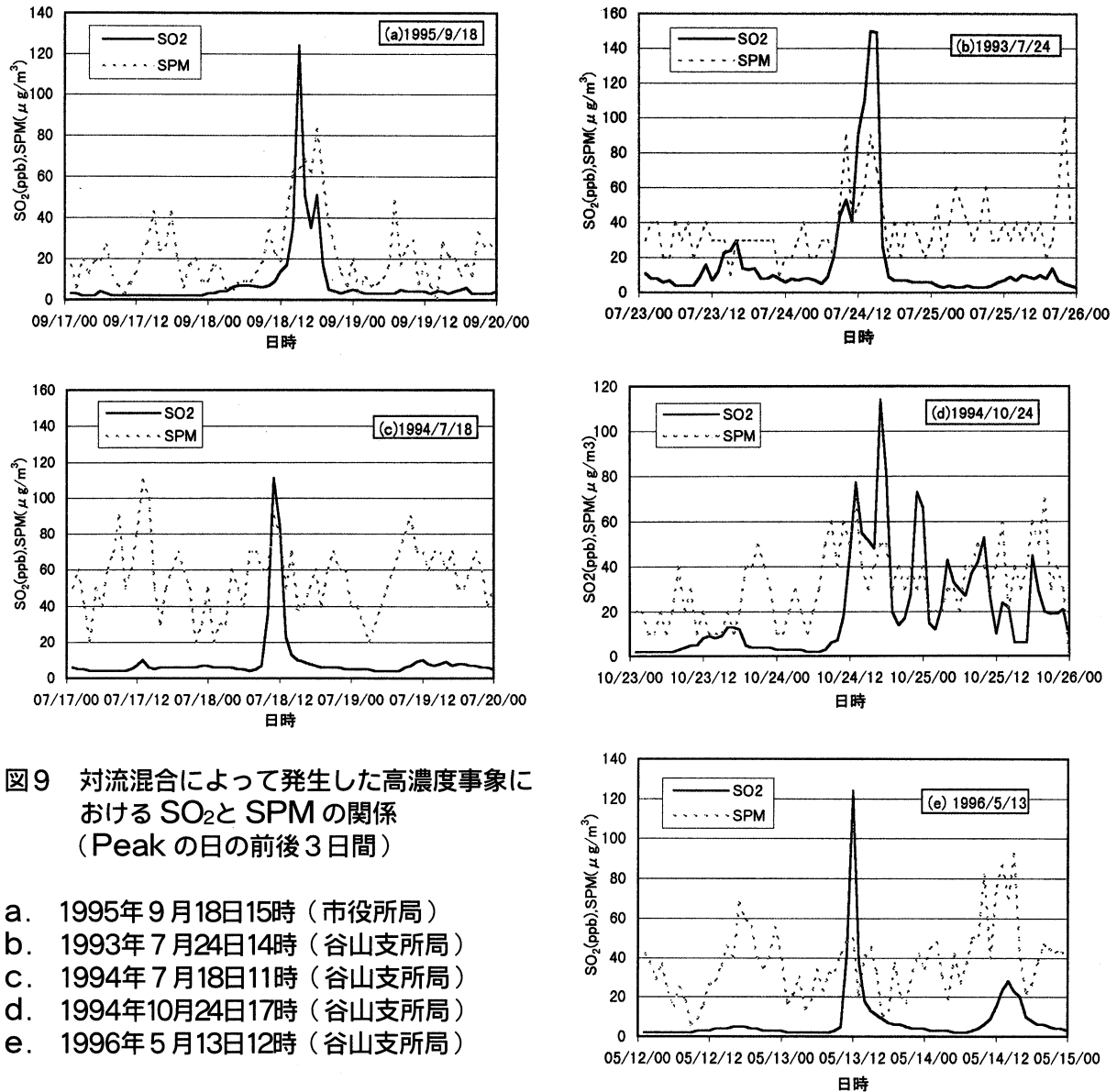


図9 対流混合によって発生した高濃度事象におけるSO<sub>2</sub>とSPMの関係 (Peakの日の前後3日間)

- a. 1995年9月18日15時（市役所局）
- b. 1993年7月24日14時（谷山支所局）
- c. 1994年7月18日11時（谷山支所局）
- d. 1994年10月24日17時（谷山支所局）
- e. 1996年5月13日12時（谷山支所局）

## 5. 2 火山性と非火山性の識別

鹿児島市街地におけるSO<sub>2</sub>とSPMを比較すると、SO<sub>2</sub>高濃度事象とSPMの関係が黒神局と同じようなものや、それとは異なりSO<sub>2</sub>が100ppbを越えてもSPMのpeak値が60μg/m<sup>3</sup>を越えないような事象もあった。ここで新たに1995年7月9日21時のSO<sub>2</sub>高濃度事象に対するSO<sub>2</sub>とSPMの時間変化を図10として示し、1994年8月17日20時（図8 c）、1995年9月18日15時（図9 a）とともに

に検討する。図 8 c, 図 9 a においては、黒神局における  $\text{SO}_2$  と SPM の関係と同じように、それらの変動がかなり似ているため、火山性のものである可能性が高いと思われる。実際に噴煙のビデオで市役所方向に噴煙が流れていく様子が確認できた。しかし図10においては  $\text{SO}_2$  と SPM は全く挙動をともにしておらず、火山性の  $\text{SO}_2$  と SPM の関係とは異なっていることがわかる。また前後の時間の風向を調べてみても、風が全く市役所方向に吹いておらず、噴煙のビデオでも噴煙が市役所方向に全く流れないのが確認できた。これらは火山性以外の要因で生成されたものであることが推測される。

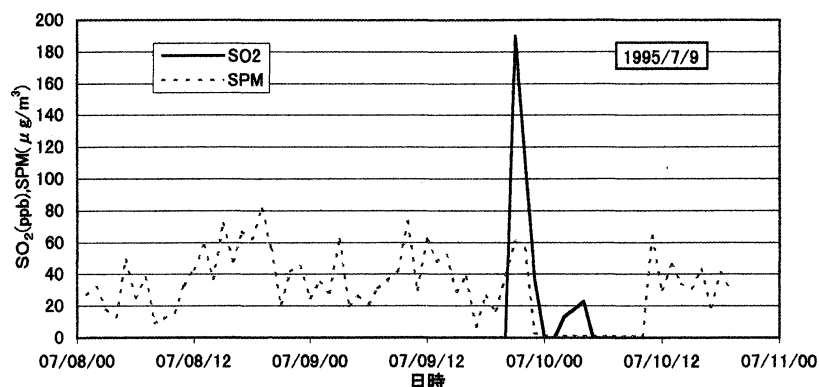


図10 1995年7月9日21時の  $\text{SO}_2$  高濃度事象に対する SPM の時間変化

## 6 おわりに

本研究において、1992年の黒神測定局と1993年～1997年までの鹿児島市街地（市役所測定局、鴨池測定局、谷山支所局）の  $\text{SO}_2$  高濃度事象に対する SPM 濃度の関係について解析を試みた。その結果以下のような結論を得た。

- ①桜島山麓の SPM は  $\text{SO}_2$  と同様に強風の影響を強く受け、桜島山麓では  $\text{SO}_2$  とかなり酷似した挙動を示す。
- ②鹿児島市街地における火山性 SPM 高濃度事象の発生原因は強風によるものと、対流混合によるものの2種類が確認できた。
- ③鹿児島市街地の SPM は強風や対流混合のメカニズムで起こった場合、桜島山麓と同様に  $\text{SO}_2$  と酷似した傾向を持つ。

今回の解析では  $\text{SO}_2$  が高濃度である時に SPM がどのような傾向を示すかを調べた。しかし、市役所、鴨池、谷山においては  $\text{SO}_2$  が低濃度であるにもかかわらず SPM が高濃度になる場合がある。そこで、3地域においては SPM 高濃度に対して  $\text{SO}_2$  がどのような値を示すかも解析していきたい。さらに、 $\text{SO}_2$ 、SPM の高濃度事象があらわれる日の人工衛星画像の解析も行ないたいと考えている。



## 謝 辞

環境大気の貴重なデータを提供して頂いた鹿児島市環境保全課の関係各位に感謝いたします。この研究のきっかけとなる議論をして頂いた宝来俊一氏（鹿児島県環境センター／現加世田保健所）・樋之口仁氏（鹿児島県立松陽高校）と、御指導・御助力を頂いた鹿児島大学工学部の矢野利明教授と飯野直子さんに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 高橋幹二, 改著基礎エアロゾル工学, 養賢堂, 1982;  
高橋幹二他, 応用エアロゾル学, 養賢堂, 1984.
- 2) 太田一也 他, 二酸化硫黄放出量観測による火山活動度の評価, 鹿児島国際火山会議報告, 1988, p.406.  
藤田慎一・外岡豊・太田一也, わが国における火山起源の二酸化硫黄の放出量の推計, 大気汚染学会誌, 27, 336, 1992.
- 3) 山下敬則, 森淳子 他: 長崎県における高濃度 SO<sub>2</sub>汚染の解析, 大気汚染学会誌, 26, 320, 1991.
- 4) 森淳子・山下敬則・本田雅幸・若松伸司・鶴野伊津志・村野健太郎, 雲仙野岳における大気観測-SO<sub>2</sub>およびエアロゾルの挙動-, 第31回大気汚染学会講演要旨集, p.246, 1990; 森淳子・鶴野伊津志・若松伸司・村野健太郎, 雲仙野岳で観測された SO<sub>2</sub>とエアロゾル組成, 投稿中, 1997.  
木下紀正・飯野直子・森淳子・鶴野伊津志, ノア画像による活動期の火山噴煙検出と大気環境データとの対比, 日本リモートセンシング学会第23回学術講演会論文集, 1997, p.122.  
K. Kinoshita, N. Iino, I. Uno, A. Mori, and J. Kohno, Day and Night Detection of Volcanic Clouds and Aerosol by NOAA/AVHRR Data, Proc. International Symposium on The Atmospheric Correction of Satellite Data and Its Application to Global Environment, Chiba 1998, p. 37.
- 5) 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, 671, 1993.
- 6) 石川誠一・大倉光志・富田雄一郎・斎藤信弘・藤田芳和, 宮崎県南部地域における SO<sub>2</sub>高濃度事象の解析, 宮崎大学工学部研究報告, 40, 1, 1994.
- 7) 竹山栄作, 宝来俊一, 右田譲: 桜島火山噴出物に関する研究 (第 I 報), 鹿児島県環境センター所報, 5, 61, 1989, 及び引用文献.
- 8) 宝来俊一, 竹山栄作, 右田譲: 鹿児島県における大気エアロゾルの動態に関する研究 (I), 鹿児島県環境センター所報, 9, 41, 1993.
- 9) 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, 1994, p.79.
- 10) 木下紀正・金柿主税・今村和樹, 桜島における火山ガス降下の気象条件, 気象学会1994年秋季大会予稿集, p. 231.
- 11) 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, 133, 1998.
- 12) 鹿児島市環境保全課, 鹿児島市の環境 (平成9年版), 1997.
- 13) 鹿児島市環境保全課, 大気環境データ月報, 1992-1998.
- 14) 気象庁, 高層気象観測年報, 1991-1997.
- 15) 木下紀正, 桜島の噴煙と地形性雲のビデオ観測, 可視化情報, 15, Suppl-2, 117, 1995.
- 16) 九大島原地震火山観測所, 桜島火山からの二酸化イオウの放出量, 火山噴火予知連絡会報, 67, 76, 1997.
- 17) 鹿児島地方気象台, 定期火山情報—桜島—, 1993-1998.
- 18) 木下紀正・桜井仁人・飯野直子, 準備中; 木下紀正, 衛星画像とそのデータベースをめぐって, 鹿児島大学総合情報処理センター広報, 12, 17, 1999.