

桜島噴煙の2点観測と火山ガス高濃度事象の解析

木下 紀正*・小山田 恵*・日高 耕一**

(1999年10月15日 受理)

Double Point Observation of Volcanic Clouds at Mt. Sakurajima and Analysis of High Concentration Events of Volcanic Gas

Kisei KINOSHITA*, Megumi KOYAMADA* and Ko-ichi HIDAKA**

Abstract : Continual observations of volcanic clouds at Mt. Sakurajima have been done from WSW and ESE directions from the crater by means of interval recordings of video cameras and digital camera. The high concentration events of sulfur dioxide and suspended particulate matter (SPM) at the foot of the volcanic mountain in December 1998 were analyzed by comparing with these records of the volcanic clouds. It was confirmed that strong winds around the mountain height are responsible for the most cases of the events.

1. はじめに

桜島は都市に近接している活火山であり、北岳 (1117 m)、中岳 (1060 m)、南岳 (1040 m) のうち、現在活動しているのは南岳である [1]。噴煙中の火山ガスは主に水蒸気であるが、二酸化硫黄 (SO_2) も多く含まれ、風向きによっては鹿児島市内で硫黄臭がすることもある。環境基準で SO_2 濃度は、「1 時間値の 1 日平均値が 0.04 ppm 以下であり、かつ、1 時間値が 0.1 ppm 以下であること」 [2] となっているが、桜島周辺では 0.1 ppm を越えることが月によっては 50 回以上ある。この高濃度現象への影響として、地形、気象条件など様々な要因が考えられ、それらの影響が目に見えて表れているのが桜島の噴煙の流れ方である。また、火山灰の中でも粒径の小さい浮遊粒子状物質 (SPM : Suspended Particulate Matter) は SO_2 と挙動を共にする傾向があり [3]、 SO_2 データと共に解析することが重要であると思われる。

前稿 [3] では、鹿児島市環境保全課の測定局 (市役所、谷山、有村、黒神、鴨池) のデータ [4] を用い、1993 年 4 月～1998 年 3 月までの市街地側の 3 局 (市役所、鴨池、谷山支所) についての SPM

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

** 名古屋大学太陽地球環境研究所附属鹿児島観測所

と SO_2 の関係, 1992年の黒神についてのSPMと SO_2 の関係について解析した。これより, 桜島の東山麓の黒神ではSPMと SO_2 は同様に強風の影響を強く受け, 両方ともよく似た挙動を示すこと, 市街地側でのSPMの高濃度事象の原因は強風によるものと対流混合によるものであることが分かった。他方, SO_2 高濃度事象の最も著しい桜島の南山麓の有村では, 強風による吹き降ろしの影響を確認したが, SPMと SO_2 の相関の検討は残されている。

噴煙の流れと桜島山麓におけるSPM, SO_2 高濃度事象の関係を確かむために, 市内側からのビデオカメラによる定点観測に加えて, 1998年12月2日から, 垂水側からのデジタルカメラによる観測を開始した。その後, ビデオ観測に切り替えた時期もある。本稿では, 桜島をほぼ西と南から観察できる2点観測の概要と, 映像データのデジタル処理について述べる。さらに, 1998年12月に絞って, 黒神・有村それぞれのSPMと SO_2 濃度変化を噴煙映像と照合して解析する。この時期には, 有村では SO_2 高濃度事象が頻繁に見られ, 多くのイベントについて解析することが出来る。

2. データと解析方法

2.1 噴煙の映像観測

新たな垂水からの映像観測は, 名古屋大学太陽地球環境研究所附属鹿児島観測所からデジタルカメラとビデオカメラを交互に使いながら行っている。それぞれの機材の期間などについては表1にまとめた。観測所の位置 (T点と記す), 市内側の観測点B, 桜島にある鹿児島市所管の測定局の位置を図1に示す。観測所は本城川堤防の内側の場所で, 桜島の方向の近くに工場の屋根があり視野の一部が遮られるが, 両方とも三脚を高く伸ばして広角で撮影した。また, 桜島を北側に臨むので太陽が視野に入る心配はない。

抽出する画像は, 風と SO_2 濃度の関係を見てわかるようなものを心がけた。例えば, 図2

(B) は市内側からの映像で, 図2 (T) では市内側からは見えないが, 黒神の方に少し灰が降っているのが分かる。図3

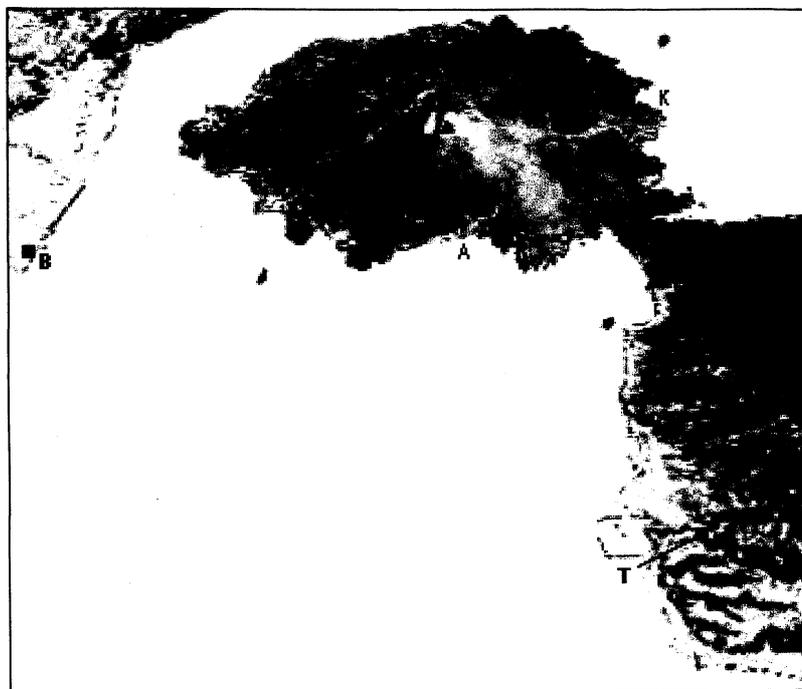


図1. 観測点B (鴨池港近傍)・T (垂水) と鹿児島市所管の環境大気測定局A (有村) とK (黒神)。

図はLANDSAT-5 / Bd. 2画像を国土地理院数値標高データにより, 桜島南岳の南方上空より立体視したもの。

(a, b) は垂水に流れていく噴煙を市内側から見たもの、図3 (c) は垂水でその噴煙を見上げたものである。ビデオ映像は日時が画像に入っているので、デジタルカメラの画像と区別がつく。最終的にデジタルカメラの画像もビデオ映像も CD-R に焼き付けて使用した。

表1. 垂水に於けるデジタルカメラとビデオカメラ（広角）の撮影期間

No.	期間	機材	時計	詳細
1	98.12.2~99.1.20	D	-	
2	1.20~1.26	V	-	
3	3.12	D	○	インターバル設定ミス。20秒に1回で撮影
4	3.18~3.26	V	○	停電または故障で止まる。
	3.28~4.4			
	4.6~4.10			
	4.13~4.14			
5	4.17~7.7	D	○	アルミホイルのレフ板
6	7.7~7.22	V	○	アルミホイルと白色の紙のレフ板
7	7.22~10.11	D	○	：

Dはデジタルカメラ(1時間に1回), Vはビデオカメラ(60秒に0.2秒)を示す。「-」は時計のないことを示す。

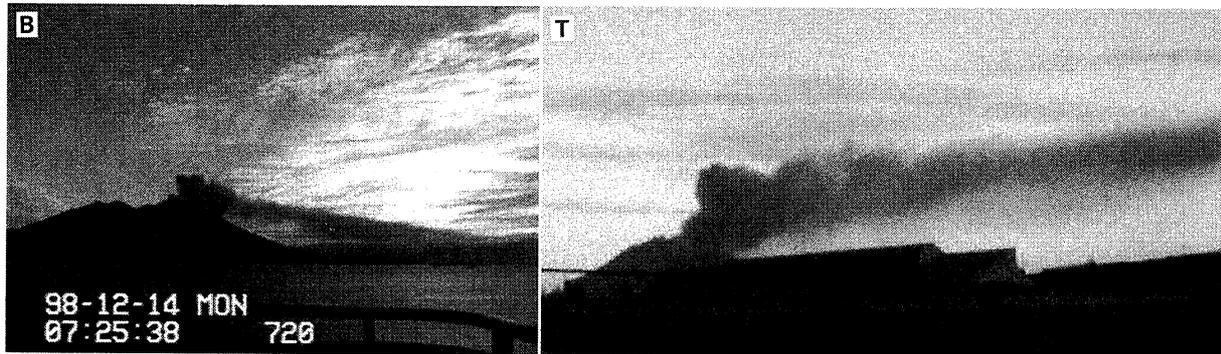


図2. 98. 12. 14 7:25頃のB(左)。T(右)からの映像。

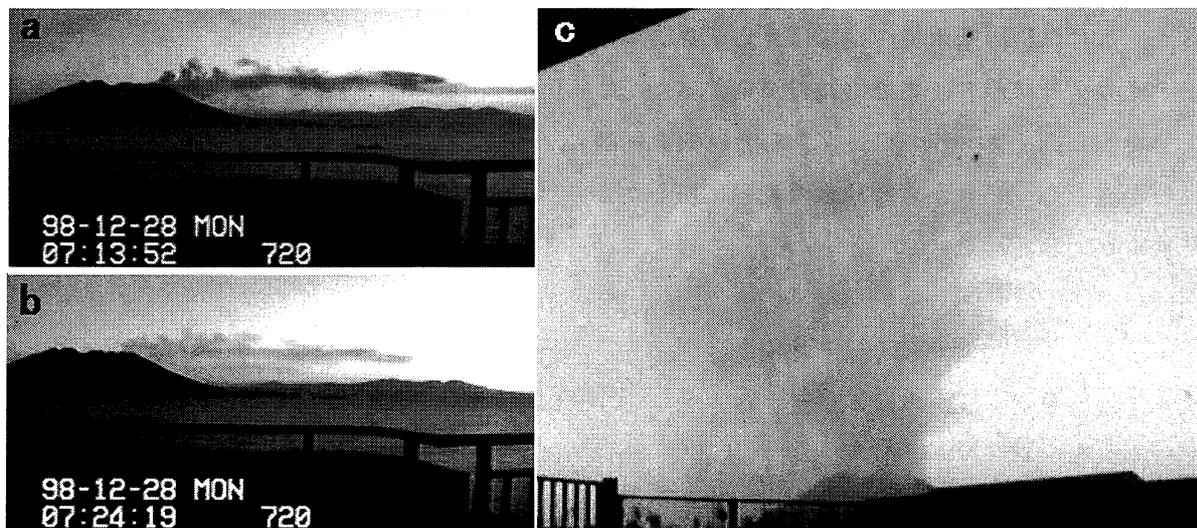


図3. 98. 12. 28 7:14, 7:24頃のB(左), 7:25頃のT(右)からの映像。

2. 1. 1 デジタルカメラ

使用したデジタルカメラはシャープMD-PS1で、薩摩硫黄島の噴煙観測に使用している機種である[5]。これはMDをメモリーにして、画素数640*480で1950枚を撮影することができ、1時間に1回のインターバル撮影で約3ヶ月の撮影を続けられる。また、日付や時間は画像内に記録できないので、JPEGに変換してパソコンにとりこむと日時を同定できない。そこで、時計を写しこむことにしたが、三脚で窓の上部に持ち上げてあるため時計を置く場所がなく、紐で時計をつるしてアルミサッシの天窓のふちにメガネクリップで固定した。しかし逆光になり、時計の表示は読み取れなかった。画像処理ソフトで明るさを強調してやると、なんとか日時を確認することが出来た。次回からは、白色の紙やアルミホイルなどをレフ板代わりに光を集めると、画像処理ソフトによる強調は必要だが、前回よりも簡単に日時を確認することが出来た。アルミホイルと白色の紙では、アルミホイルは直接反射するのでかえって時計の表面が光って見にくく、白色の紙の方が間接照明になり有効だった。

デジタルカメラの画像は、画像処理ソフトで必要なところだけを切りだし、画面に日時が写っていないので、ラベルの意味も含めてビデオ映像と一緒に示す。12月の画像は設置に時間がかかり定時から始められず、25分頃から1時間おきの画像になっている。

2. 1. 2 垂水側からのビデオ広角撮影

ビデオカメラ CCD-TR705 ($f=7.8\sim 62.4\text{mm}$) にインターバル機能は無く、リモコンのソニー RMT-155でビデオカメラを制御して撮影を行った。2時間テープの60秒に1回0.2秒のインターバル撮影で、25日間撮影できる。しかし、垂水はもともと停電が多く、また観測所は様々な電波も観測しているため、大きなアンテナがあり雷の影響を受けやすい。そして使用したリモコンは1度電気が止まると最初から起動しなおすことが必要で、梅雨時期は4~5日で止まってしまったこともあった。そこで、ノイズキャンセラがついている延長コードを通して電源を取り、観測所の無停電装置から電源を取ることになった。この無停電装置で10分はもつのであるが、その間に止まってしまうことが多いが、7月以後の垂水での撮影は専らデジタルカメラで行っている。

ビデオカメラはそのままでは視野が狭かったため、0.54倍のワイドコンバーターをつけて広角で撮影した。ビデオカメラでは、年月日と時間を同時に画像に写しこむことはできず、期間の最初に年月日を撮影し、それから時分秒の表示に切りかえ、年月日を同定するときは最初の日から何日たっているかで判断した。

2. 1. 3 市内側からのビデオ撮影

垂水港近くの定点Bからは、ビデオカメラ、ソニー CCD-V88 ($f=12\sim 72\text{mm}$) に0.5倍のワイドコンバータ(ケンコー VW-05)をつけた状態で、主に広角の映像をビデオレコーダー、ソニー SVT-5000に入力し、タイムラプス方式で撮影している。桜島を西側から観測しているため、朝の太陽が視野に入ることがあるが、夜明けには逆光で噴煙が強調され、日没時には噴煙が直接照らされるの

で、コントラストのある映像がとれている。また、海に面した高い建物から撮影しているので、視野が広く桜島全体を画面に収めることができる。

2. 1. 4 名古屋大学観測所の高感度ビデオ望遠撮影

観測所では高感度ビデオカメラ，ソニー CCD-M350に望遠レンズ DF28B-SNDS08 ($f=28\text{mm}$)をつけ、ビデオレコーダー，ソニー EVT-801を使って，8秒に1回のインターバル撮影を継続して行っている。観測所の映像はインターバルの間隔が短いので動きがよく分かる。図4の例の様に，桜島のクローズアップであるため山頂付近の様子を観察するのに使用した。なお，図4などの日付は日本標準時（JST）より9時間遅い世界標準時（UT）であるが，本稿の文ではJSTで説明することにする。白黒画像であるので噴煙と雲の見分け方が難しいが，火映や夜の爆発の瞬間を捉えた映像が写っていることもあり，意味深い。図5は1996年12月14日未明の大爆発である。爆発が起こり火山弾が散らばっていくのが光でわかる。また，赤熱した火山弾で桜島の稜線をたどることができる。爆発が起こり，火山弾が冷えて見えなくなるまでの間72秒である。このとき放出された噴煙が四国沖の洋上をのびて紀伊半島沖まで達するのが，気象衛星 NOAA や「ひまわり」5号の衛星画像に認められた[6]。

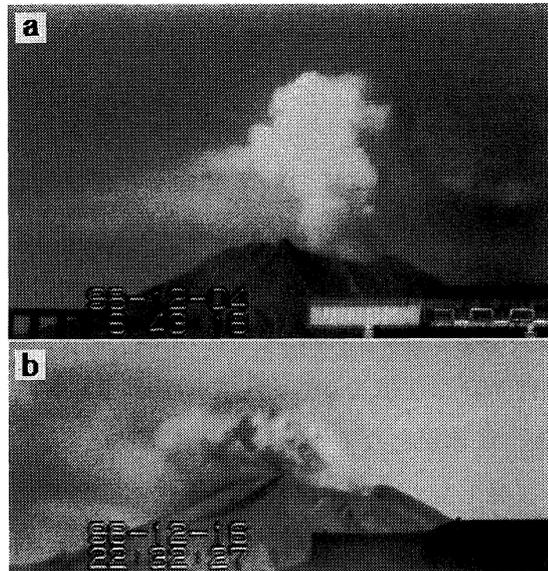


図4. T点からのビデオ遠望撮影。

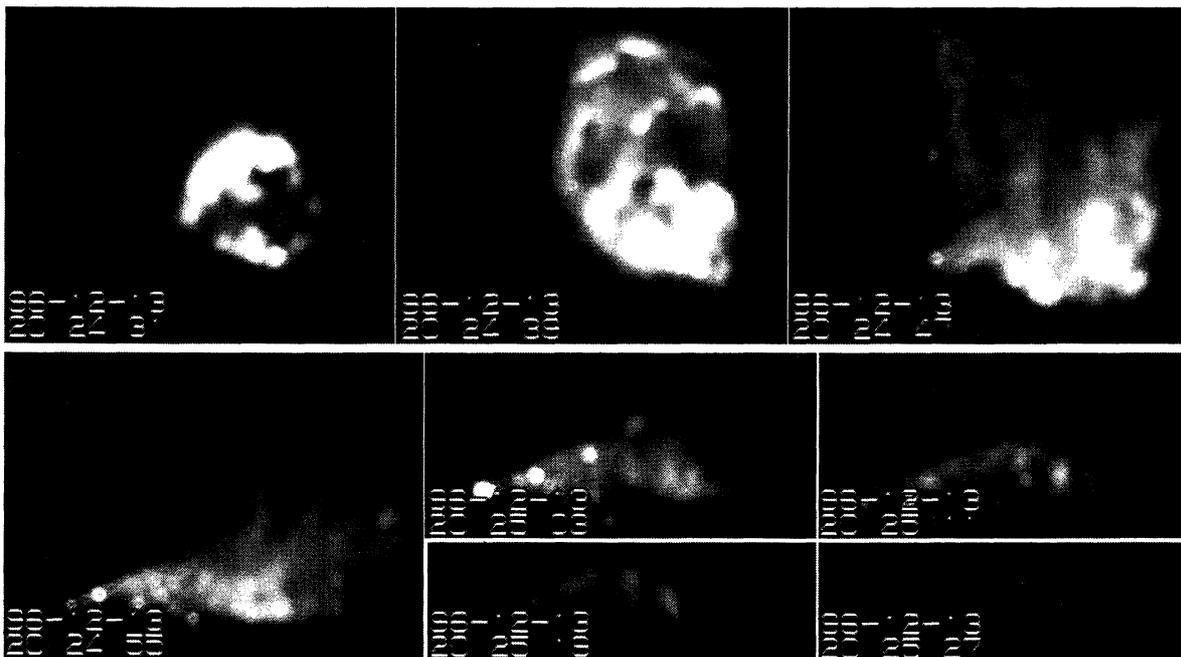


図5. 1996年12月14日未明の大爆発。画面表示の時刻は世界標準時。

2. 2 SO₂とSPMデータ

鹿児島市環境保全課の環境大気測定局の位置は図1に示してある[4]。そのうち有村, 黒神のSO₂とSPMのデータを使用した。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 (0.1ppm = 100ppb) と, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.1\text{mg}/\text{m}^3 = 100\mu\text{g}/\text{m}^3$) の単位で表わされている[4]。解析にあたり, 環境基準に基づきSO₂の値が100ppbを, SPMが $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えるときを高濃度事象とし, SO₂とSPMのバックグラウンド値をそれぞれ20ppb (但し, 4.3の有村データの解析では50ppbとした) と $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満とした。これは, Microsoft Excelで月別・測定局別のグラフを作り, 高濃度事象が起こっていないときの増減を目で見て決めたものである。グラフの縦軸は, SO₂・SPMについてそれぞれppbと $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で表わしている。また, 積算値なので, 例えば15時に示された値は14時から15時までの値であり, ビデオやデジタルカメラでは14時から15時までの間の画像と対応する。

2. 3 風データについて

気象庁が毎年出している高層気象観測年報が, 1996年からCD-ROM化され1988~1998年版が発行されている[7]。そのうち, 1998年12月鹿児島上空の風データをMicrosoft Excelで使用した。測定時間は3時, 9時, 15時, 21時の4回である。風向WD (°) と, 風速WS (m/s) を用いて解析した。風向WD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で表現しており, 例えば270°は西風となる。

桜島上空の噴煙の流れは, 海拔約1500mにあたる850hPaの風で理解される場合が多い。しかし, 山麓に火山ガスを吹き降ろす強風の時は, 900hPaと925hPaの風が有効であることが分かっている[8]。大きな爆発のときなどは3000~4000mも噴煙が上がるが, 今回解析する1998年12月ではそれほど大きな爆発はなく, 専ら925hPaの風データを使用した。指定気圧面925hPaは海拔約850m程度, 900hPaは1000m程度に相当する[3]。

2. 4 鹿児島地方気象台の遠望観測記録

鹿児島地方気象台の毎月の定期火山情報[9]に噴火や爆発回数がまとめられているが, 個々の爆発時刻や噴煙高度, 量, 移流方向と, 早朝および9時, 15時の噴煙の状態のメモは気象庁火山報告に3年遅れぐらいで掲載される。ここでは, その元になる遠望観測記録のコピーを頂いて参考にした[10]。

2. 5 天気図

桜島上空のおおよその風を把握するために, 天気図[11]を利用した。低気圧では, その中心を左回りに風が吹き, 高気圧ではその中心を右回りに風が吹く。天気図で, 低気圧が九州の東にあり, 高気圧が九州の西にある「西高東低」の気圧配置のとき, 桜島上空では, 北風成分が大きくなり, 南岳火口からほぼ南にある有村にピークが多く表れる。

3. 噴煙映像記録の検討

噴煙の放出と移流・拡散の諸形態と、それに与える高層風の影響については、これまで度々議論してきた[12]。この節では、1998年12月のB、T両定点からの映像記録のうち、典型的な事例について検討する。

3.1 映像データのデジタル処理

T点でのMDカメラの1時間毎のインターバル撮影は、天候や昼夜にかかわらず行われている。他方、B点のタイムラプスビデオカメラ記録は、朝の開始と夕方または適当な時刻での終了を手動で行い、雨天で桜島山頂が見えない時や噴煙が少ない時などは停止している。この方法は爆発の瞬間などの重要なシーンを逃す恐れがあるが、記録量を節約して検索とテープの全量保存を容易にする利点がある。ビデオ記録をパソコンPCV-S620専用のソフトMedia Bar VTRでデジタル化する場合、最も軽いVIDEO CD画質のMPEG1モードでも1分約10MBを要し、CD-R1枚の最長記録は約65分である。このような容量の制約に対しても、撮影の原データの段階から記録量を少なくすることは意味がある。さらに、デジタル変換の際に、定常的なシーンは早送りやカットして圧縮できるが、カットは避けるようにした。その結果、1日のデータが数MB～十数MBのMPEG fileとなり、1ヶ月で240MBあり、MDカメラのJPEG画像と共に、2ヶ月分を1枚のCD-Rに収録できた。

この稿の図を作成するには、MPEGの映像から解像度352×240のJPEG画像をキャプチャーし、画像の上下を一部カットする。水平線が傾いている場合は回転処理を行い、左右を僅かにカットする。

T点のMD画像は画素数640×480であるが、B点の画像と比較する場合は350×240程度のサイズを噴煙の全景が含まれる様に切り出し、B点の画像の右につなぐ。さらに、このフルカラーのJPEG画像をグレースケールに変換し、画像が荒れない範囲でコントラストを強調し、少し明るめに調整する。これらの処理はPhotoshop ver. 5.0で行った。

B、T両点の画像を比較する場合、同時刻または近い時刻になる様にB点の映像からキャプチャーした。T点でのMDカメラの設置に時間がかかったため、12月2日11時25分の開始であり、以後毎時25分の撮影である。B点の画像の左下には、年月日時分秒と、2時間テープで何分録画できるかのモードが表示されている。

噴煙が薄い時、カラーをグレースケールにすると背景との判別が出来なくなる場合がある。また、動画によってのみ読み取れる情報もあるので、ランダムアクセスできるMPEGファイルは大変便利である。但し、変換の手間と、動画再生に十分な余力のあるスペックのパソコンが必要である。

T点からのMD画像は1時間おきの瞬間のサンプリングであるが、1ヶ月で12MBほどであり、アルバムソフトを用いて全体を通覧するには便利である。さらに、連続記録が必要なときは、2.2.4に述べた望遠撮影のタイムラプスビデオデータがある。これは、夜のカットと桜島山頂の見えない時などの早送りやカットで短くなる様に編集して参照した。但し、夜のシーンで火映や爆発が写っている部分は残すように努めた。

3. 2 噴煙の上昇と移流・拡散

まず、移動性高気圧が近づき一日中快晴である12月17日の、典型的な3シーンについて、B、T対の画像を図6に示す。3シーン共、噴煙は山頂から500mあまり上昇して、水平移流や拡散に移行している。このうち、7:13の図6(a)ではNWへの線状移流であるが、煙流の上部近傍の風向の違いによって、最上部がSWへ広がる傾向がある。次の図6(b)では、煙流の上下の風向の違いが顕著になって、扇状拡散を始めている。さらに図6(c)では、無風に近い弱風となり、噴煙はバランスした高度で平盤状に滞留してゆっくり広がっている。この様な海拔1000~2000mの風の状態によって噴煙の拡散形態が異なるのは、2方向からの映像によって良く判る。

なお、1998年12月には8回の噴火があり、その一部はB点からのビデオ記録にあるが、1時間に1回撮影のMD画像には捉えられていない。噴火の後、噴煙は数分で最高点に達し、やがて定常的放出に戻るからである。T点からのクローズアップ撮影による12月12日の爆発噴煙の発達の様子を図7に示す。

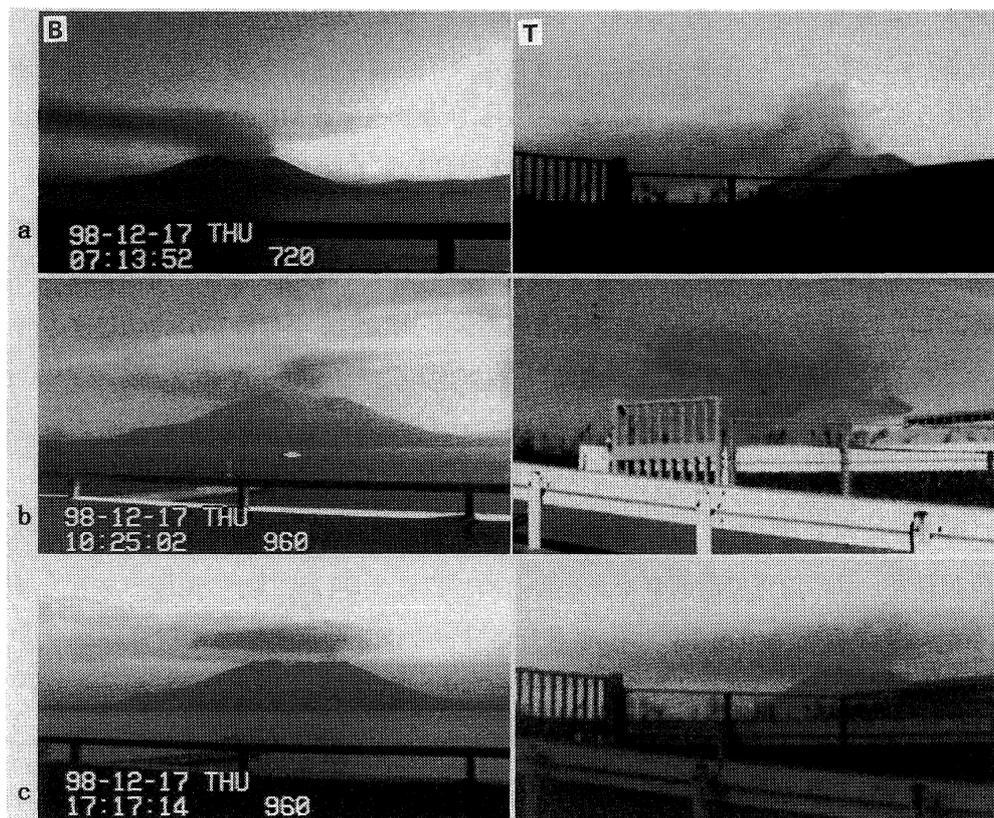


図6. 1998年12月17日の3シーン(左はB, 右はTから)。

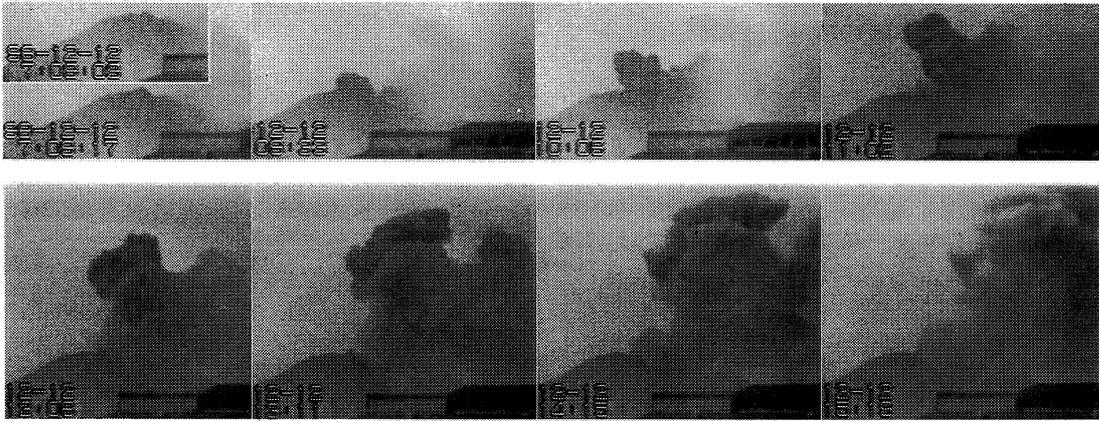


図7. 1998年12月12日16:08 JST 爆発の噴煙の発達。9分17秒から噴煙が見える。

3. 3 山岳波と地形性の雲

図8は、12月30日朝の映像で、この前後は強風で噴煙が吹き降ろされてから上昇する山岳波に沿った流れが見られる。この様にして噴煙と火山ガスが有村測定局を直撃すれば、 SO_2 高濃度事象が実現するが、この日の朝は、100 ppbに達していない。これは、噴煙が有村方向よりも僅かに東よりに流れているためであることが、T点からの撮影でわかる。同様に噴煙がT点の脇を流れている場合の映像があり、どれも水平方向にはあまり拡散していない。次節に述べる様に、 SO_2 濃度1時間値は急激な変動を示すが、これは風向のわずかの違いによって有村測定局を直撃するか否かが変わるからと理解できる。T点が南岳火口から出る噴煙の風下に当たると、下降し上昇する噴煙に遮られて、山頂部が見えなくなる場合に、有村局の SO_2 濃度が上昇していることが多い。これは、山頂火口、有村局とT点がほとんど同一直線状に並ぶことからうなずける。また、薄煙が吹き降ろされるのが見える場合もある。

噴煙が山岳波を示す様な強風が吹くとき、海上孤立峰と見なせる桜島の周囲や上空では、大気の流れが大きく影響され、露点近くの大気は笠雲や吊し雲など地形性の雲を生ずる。その様子はB点からのインターバル撮影の動画でよくわかる。図9に1998年12月11日、31日の例を示す。(a)では

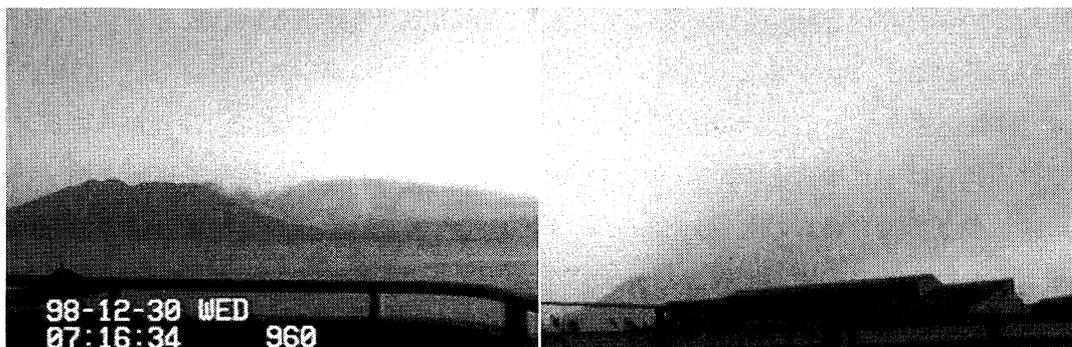


図8. 1998年12月30日朝の山岳波を示す映像（左はB，右はT点から）。

北岳の上空に3層の笠雲が出来かけており、山岳波に沿って、有村方向に2層の吹き降ろしが起こっているのが確認できる。(b)では(a)よりも規模が大きい。

また、T点からのビデオによる1998年12月19日の例を図10に示す。山頂クローズアップの動画ではしばしば笠雲が見られ、風は激しく流れるのに噴煙にも影響されず、雲は定常的に存在する事がよくわかる。

(a)では3層の笠雲ができていたが、(d)では規模が大きくなり1つの笠雲になっている。(e)はその6分後にB点から見た同じ笠雲である。

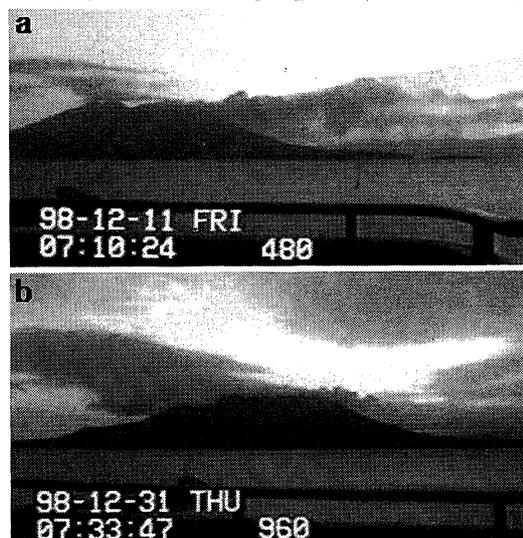


図9. 1998年12月11日, 31日各朝, 北岳上空の雲 (B点から)。

4. 桜島山麓における火山ガス高濃度事象と噴煙映像

4. 1 黒神と有村の位置関係による季節的特徴

有村は桜島の南岳火口からほぼ南の方向にあり、黒神はほぼ東の方向にあるので、有村は冬に、黒神は夏に SO_2 高濃度ピークの回数が増える。その裏づけに、 SO_2 が100 ppbを超えているときの回数を数えて、1996年4月～1998年3月までの月依存性を測定局別に図11に示す。1998年2月と3月は月の半分以上が欠測だったため使用しなかった。有村ではピーク回数が冬に多く夏に少ないため凹状に、黒神ではその逆の傾向を示して凸状に分布している。

4. 2 黒神における SO_2 高濃度事象

以下では、1998年12月に絞って、黒神・有村それぞれのSPMと SO_2 濃度変化を噴煙映像と照合して解析する。黒神と南岳火口の位置関係から1998年12月のピークは少ないが、図12の黒神のグラフを見ると14日22時にピークが見られる。12月の噴火は8回で、14日に噴火は無い。しかし、10 m/s前後の強風が吹いているため、爆発はしていなくても断続的に出ていた噴煙が吹き降ろされたためと考える。真冬の18時は日が暮れた後で、噴煙のデジタルカメラ画像は得られなかったが、17時のビデオ撮影記録では風が強くなって風下が黒神よりに変化しつつあることが窺えた。T点からのビデオによる動画では、14日は1日中西風で、噴煙も定常的に出ている。15時ごろから風が強くなっていることや、山岳波や笠雲らしいものも見えた。ピークは22時だが20時ぐらいまでは、暗くても南岳火口から噴煙が出ているのが高感度撮影のビデオ映像で確認できた。

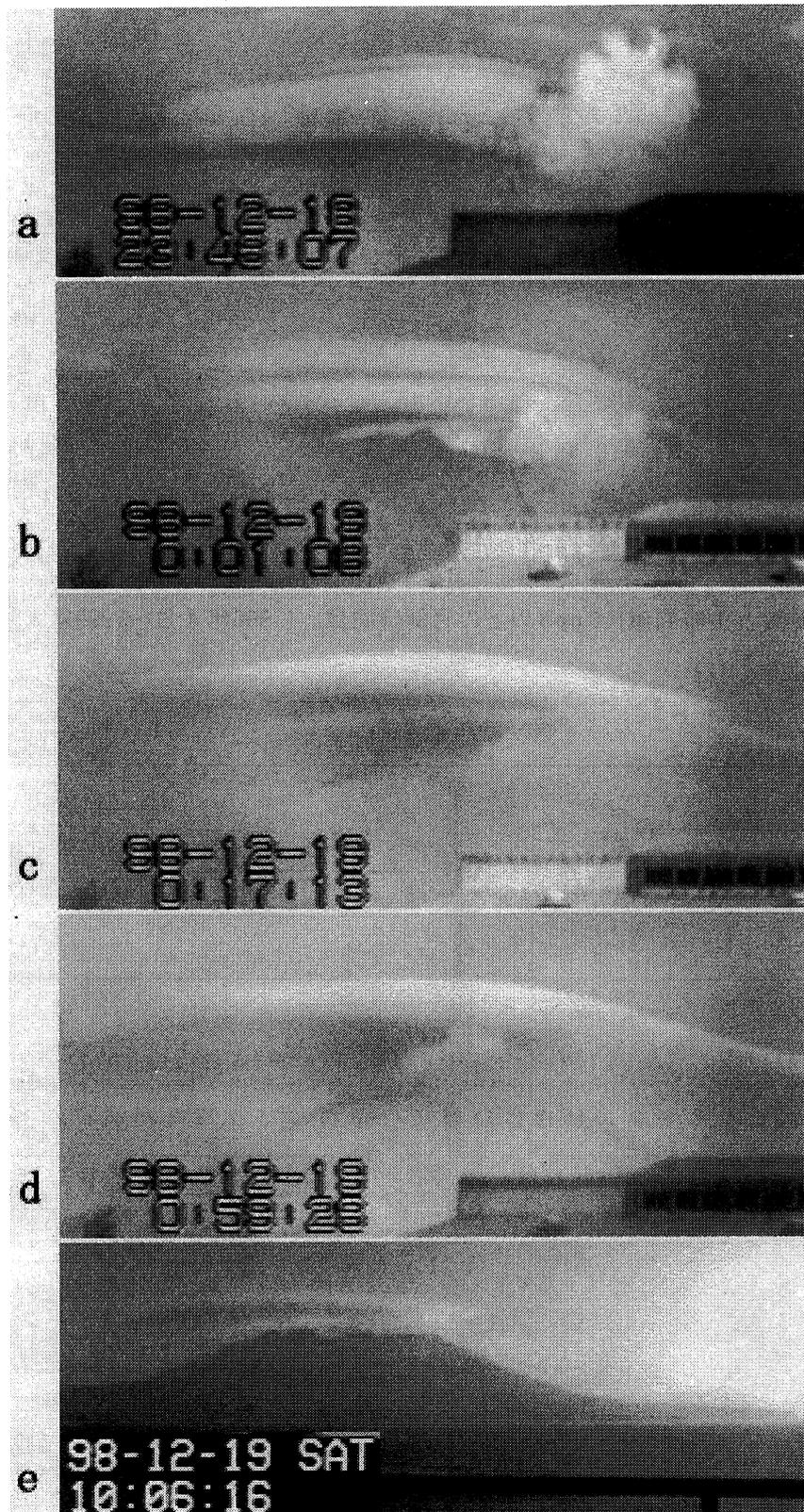


図10. 笠雲の例。(1998年12月19日 8 : 48~10 : 06JST, a~dはT, eはBから)

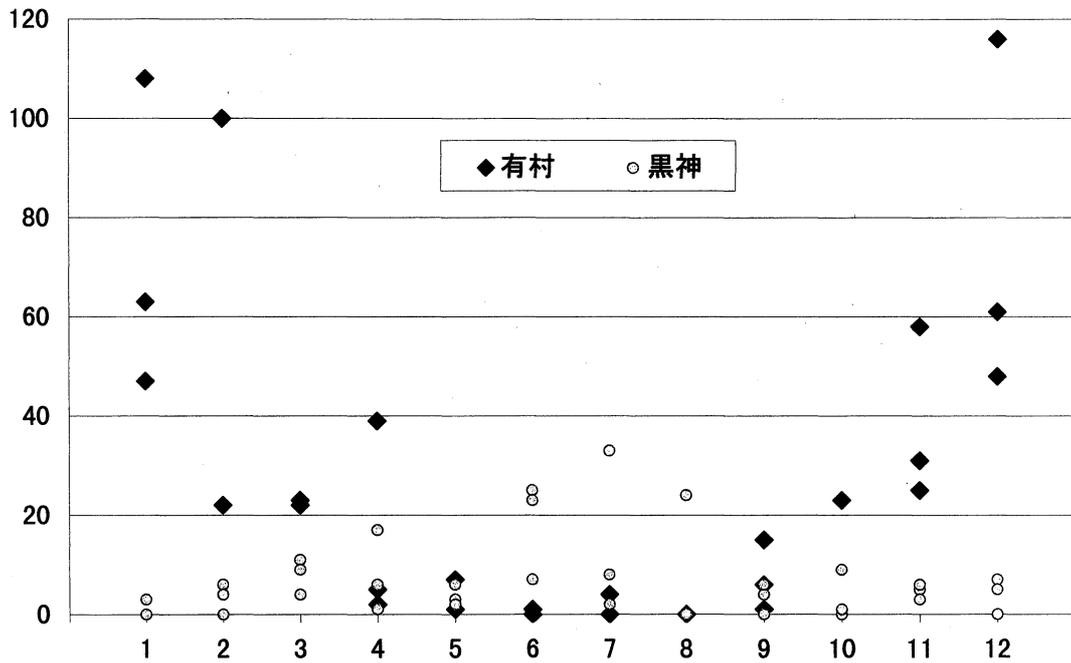


図11. SO₂と1時間値100 ppb以上の月別時間数。(1996年4月～1999年3月)。

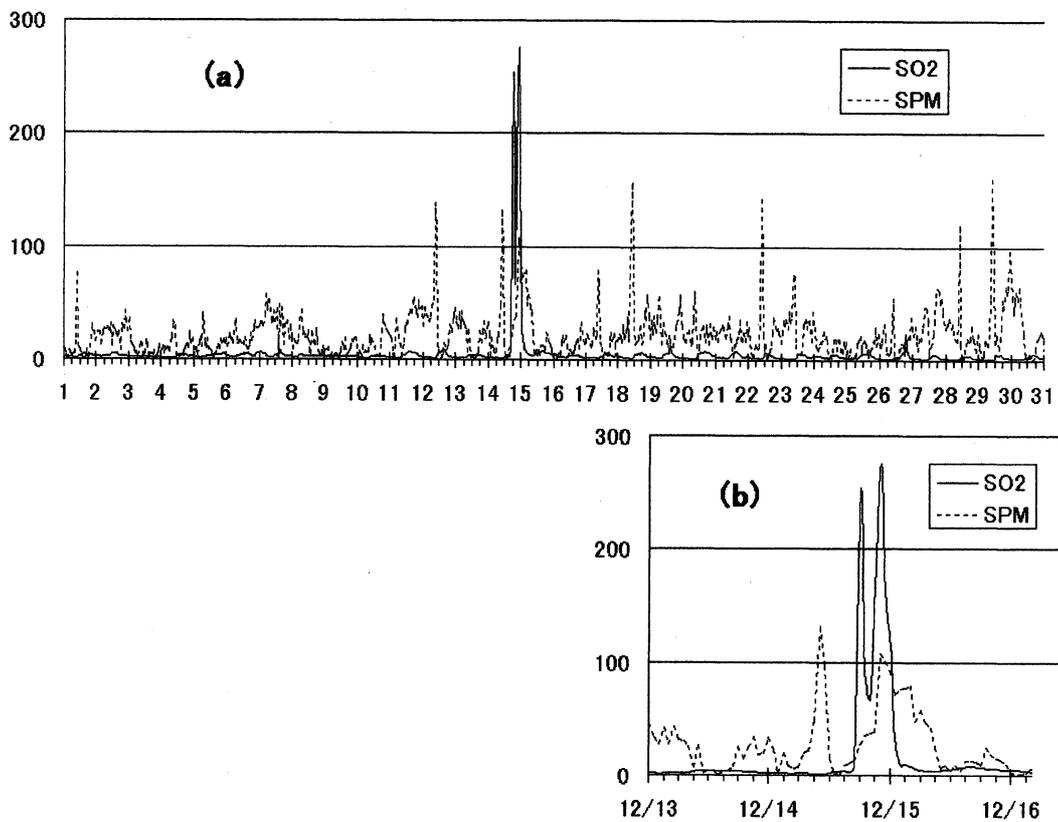


図12. 黒神における1998年12月のSO₂とSPMの1時間値。

表2. 黒神に於ける1998年12月14日15時～15日3時のSO₂・SPMと風向・風速

年月日	時刻	SO ₂ (ppb)	SPM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	風向(°)	風速(m/s)
1998/12/14	15	4	9	291	10
1998/12/14	16	3	11		
1998/12/14	17	8	13		
1998/12/14	18	253	27		
1998/12/14	19	93	35		
1998/12/14	20	67	37		
1998/12/14	21	165	38	278	12
1998/12/14	22	275	107		
1998/12/14	23	162	101		
1998/12/14	24	114	92		
1998/12/15	1	35	71		
1998/12/15	2	9	76		
1998/12/15	3	10	77	307	13

SO₂・SPMは1時間の積算値，風向・風速は3時，9時，15時，21時の定時観測。

4. 3 有村におけるSO₂，SPMと映像データ

有村と黒神を比べると，南岳火口との位置関係から1998年12月にも明らかに有村の方が活発である。SO₂のピークは夜間にも多く起こっており，多くは画像が得られないので比較が出来ない。しかし，垂水からの高感度ビデオカメラで夜間の噴煙映像がとれている場合もあり，そのときについては夜間のピークについても解析した。

1ヶ月を図13の3つのグラフに分けて示す。それぞれのピークは風の影響を大きく受け，いくつものピークが次々に起こっている。23日のピークは1460 ppbで98年4月～99年3月の1年間での最大である。その直前の6日間ほどのSPMは，0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ または1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の測定値である。しかし，1999年1月～2月にも同じような事象があり，この期間のSPMは欠測と同じ扱いにした。図13のグラフから，SO₂のピーク時にはSPMも高い値を示す傾向が読み取れる。しかし，SPMのピークはSO₂ほど顕著ではない。また，12月12日～14日にかけてのSO₂の低濃度のときにもSPMのピークが見られる。このうち，14日の朝は図2の様に噴煙は上空を流れており，この日の夜には強い西風で黒神で唯一のSO₂高濃度事象が見られる。その他の日も昼間の噴煙は上空を流れている場合が多く，SPMピークの原因は火山起源とは考え難い。なお，図12の黒神におけるSPM濃度の変動も，大部分は火山起源によらないものと考えられる。

有村における高濃度事象の解析について基準を次のように設定した。SO₂の値が100 ppbを超えるときを高濃度事象としてとらえ，この事象をSO₂ピーク値，SPMピーク値，ピーク値の時間差，それぞれの事象の継続時間と開始時刻で特徴づけた。また，これまでの解析ではSO₂のバックグラウンドを20 ppbに設定したが，この時期の有村については高濃度が連続して出現することが多いので，事例

の区別をするために環境基準の1日平均40 ppb よりも大きい50 ppb をバックグラウンドとした。ピークの継続時間は1時間の積算値が50 ppb 以上である回数を数えた。以上をまとめ表3に示す。表3ではひとまとまりの事例にNo.をつけ、噴火のあった日はNo.を○でかこむ。吹降しの欄は映像や画像でデータを裏付ける噴煙の吹降しが確認できたかどうかを4種の記号で表す。すなはち、◎：はっきりと確認できた、○：大体確認できた、?：確認しにくい、×：吹降しではない、-：写っていない、である。

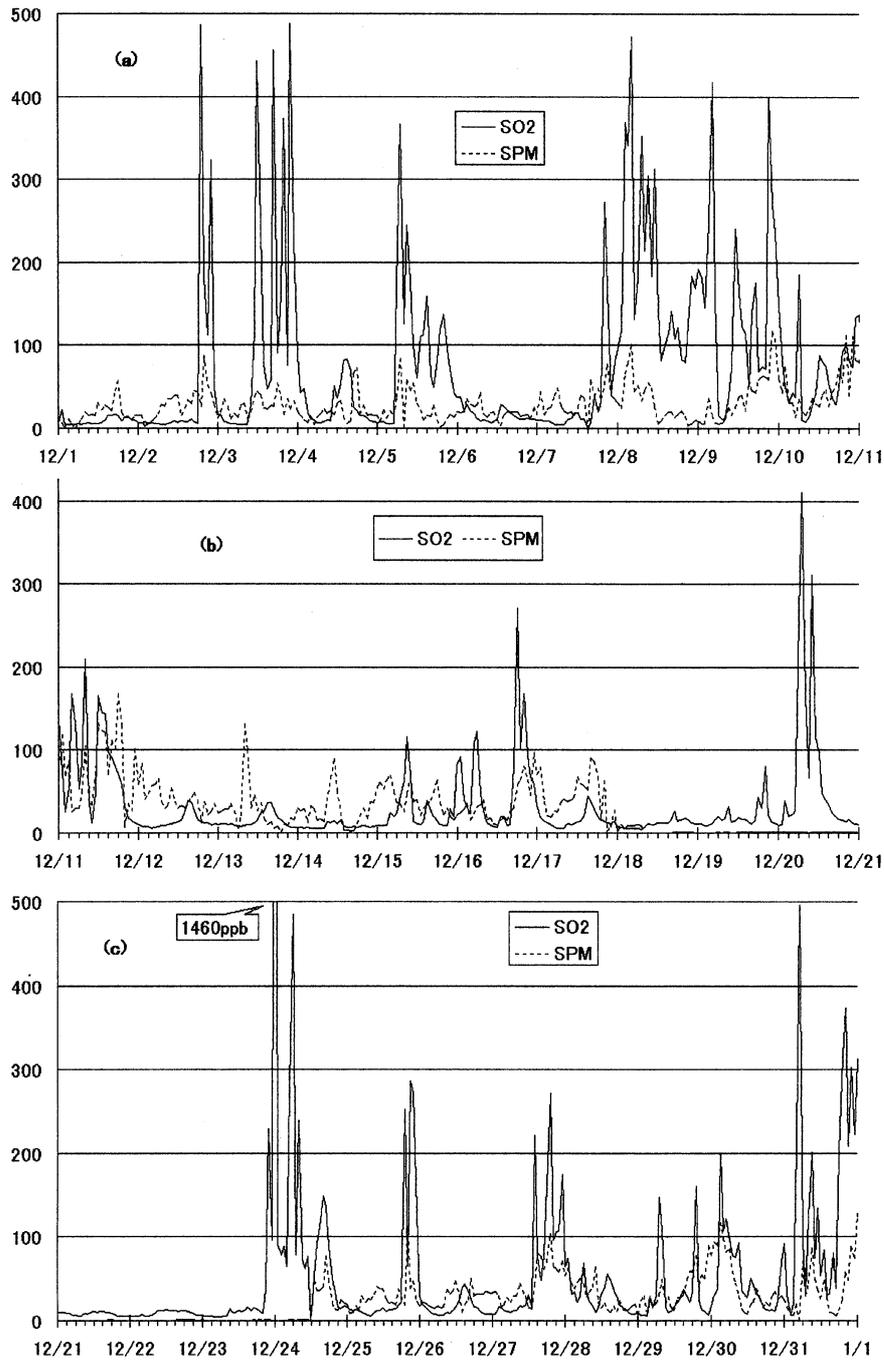


図13. 有村における1998年12月のSO₂とSPMの1時間値。

表3. 有村に於ける1998年12月のSO₂高濃度事象

No.	SO ₂ ピーク時刻	SO ₂ ピーク値	継続 時間	開始 時刻	吹降し	SPM ピーク値	時間 差	継続 時間	開始 時刻
1	12/2 19h	487	4	19h	○	87	+1	1	20h
2	12/3 12h	443	4	11h	?	44	0	0	
3	12/3 22h	488	9	16h	○	54	-5	1	18h
4	12/5 7h	366	17	6h	◎	84	0	1	7h
5	12/7 20h	273	2	20h	—	77	+1	1	21h
6	12/8 2h	369	21	12/7 23h	◎	101	+2	2	12/8 4h
7	12/9 4h	417	10	12/8 21h	◎	36	0	0	
8	12/9 21h	400	17	10h	○	117	+1	2	22h
9	12/10 6h	185	1	6h	?	35	0	0	
10	12/10 24h	137	8	18h	—	118	+1	4	12/11 1h
11	12/11 8h	210	6	3h	◎	105	0	1	8h
12	12/11 12h	166	9	12h	◎	168	+7	7	18h
⑬	12/15 9h	116	3	8h	?	67	+1	1	10h
14	12/16 6h	123	2	5h	◎	40	0	0	
15	12/16 18h	272	7	18h	○	97	+6	1	23h
16	12/20 7h	411	7	6h	○	欠測			
⑰	12/23 24h	1460	14	22h	◎×	欠測			
⑱	12/24 16h	149	6	16h	×	76	+1	1	17h
⑲	12/25 21h	286	5	19h	—	111	-1	1	20h
20	12/27 14h	222	2	14h	?	81	+1	1	15h
21	12/27 19h	272	9	18h	—	104	0	1	19h
22	12/29 7h	147	2	7h	○	31	0	0	
23	12/29 19h	160	1	19h	—	78	0	1	19h
24	12/30 3h	200	7	3h	◎	117	0	2	3h
25	12/31 5h	496	3	4h	○	71	+1	1	6h
26	12/31 9h	201	6	8h	◎	86	0	1	9h
27	12/31 20h	373	8	18h	○	128	+5	1	24h

No.の○付きは噴火のあった日。吹降しの欄は映像や画像でデータを裏付ける噴煙の吹降しが確認できたかどうかを表わす(◎：はっきりと確認できた, ○：確認できた, ?：確認しにくい, ×：吹降しではない, —：写っていない)。

No. 1. 2日の19時に突然SO₂が487ppbになり、100ppb以上が4時間続いている。夜間なのでMDの記録は使えないが、夕方強風が有村へまわりつつある傾向が見られる。さらに、21時の高層風はこれを支持している。T点からのビデオには、夜間なのではっきりとは見えないが、ピークの継続時間中に南岳火口から噴煙が出ているのが確認できた。

No. 2. 3日T点からの視界はよくないが、山頂が見える時があるとともに少量の噴煙が向かって来るのが見える時がある。窓に水滴がついていたので12時には雨が降っていたことが、T点のデジタルカメラ画像でわかる。

No. 3. 3日の夕方になるとT点からの視界が開けて雨も降っていない。ピーク継続時間は夜間なの

ではっきりとは見えないが、満月の光で桜島の稜線まで見ることができ、ピークの22時頃には南岳から噴煙が吹き降ろしていた。また、24時頃には活発に噴煙が出ており、しばらくすると高く吹き上げているのが確認できた。噴煙は4日まで活発に出続けるが、風向が東よりになっていった。

- No. 4. 5日は3時から9時の風速が3 m/sから14 m/sと急激に強くなっており、B点から見ると山岳波が出来ていた。それをT点から見ると活発な噴煙が北北西の風で吹き降ろされていた。ピークは7時で、それからは噴煙が薄くなっていった。しかし、風向は変わらず風速もそのまま21時まで強風を保っているため、継続時間は17時間に及ぶ。途中50 ppb程まで下がるが、そのときは薄い噴煙が上空に上がったり、風向がさらに北よりになったりしていた。
- No. 5. 7日の夜間の2時間のみのピークであるが、T点から確認することは出来なかった。7日21時の風向・風速は 330° 、17 m/sになっている。
- No. 6. No. 5のピークの後1時間だけ下がり、その後継続時間は21時間に及ぶ。風速は7日15時から24時間の間10~17 m/sの風が吹いている。T点からは噴煙が直撃していて桜島を見ることが出来なかった。夕方から視界が開けて、薄い噴煙が吹き降ろしているのが確認できた。
- No. 7. No. 6に続き、夜間も南岳火口から噴煙が強風で流されていくのが確認できた。明け方まで吹き降ろしは続き、それが終わるとピークは途切れた。
- No. 8. 時折薄い噴煙が吹き降ろされ、T点から見ると有村を直撃しているのが確認できた。B点でも強風であることが確認できた。18時間続いていた10~14 m/sの強風が、21時に7 m/sに弱まってピークが終わった。
- No. 9. 明け方の1時間だけのピークなので、風向が変わっていく途中で有村の観測点を通過したためと考える。しかし、T点から見ると、時間を過ぎても吹き降ろしは続いていた。
- No. 10. 夜間のピークでT点からも確認できなかった。10日21時の風向・風速は 339° 、3 m/sと風速が弱い。11日3時の風向・風速は 319° 、14 m/sとなっている。
- No. 11. B点からの映像で山岳波が観測できた。T点からのビデオ・デジタルカメラ共に濃い噴煙が直撃していたのが分かる。風速は3~9時の間14 m/sの強風を保っている(図9(a))。
- No. 12. B点からの映像で山岳波が観測できた。T点からの映像では濃い噴煙の直撃で桜島が見えないほどであった。
- No. 13. T点から見て有村に当たっているが少し西よりの風である。時々笠雲のような定常的な雲が見られる。9時の風向を見ると 318° であり、ピークの継続時間3時間のうち100 ppbを超えたのは1回だけであることから、風向が変わる過程で観測点を通過したのだと考える。風速は9 m/sと強風の域である。
- No. 14. T点から見て濃い噴煙の吹き降ろしが確認できた。継続時間後にも小噴火が起り吹き降ろされているが、風向が 300° と西よりであるためピークはない。しかし黒神にもピークは起こっていない。

- No.15. 継続時間のうちT点から見て夜間は確認できなかったが、日没前は有村に向かう吹き降ろしが確認できた。B点から見ても吹き降ろしが確認できている。
- No.16. T点から見ると明け方から吹き降ろしが確認できた。20日9時の風速は12 m/sと強風である。
- No.17. T点から見ると夜間の噴煙の動きは分からなかったが、24日3時の風向は360°，風速は16 m/sである。23日と24日の天気図を見ると、西高東低の気圧配置で、さらに東側には低気圧が二つあり、上空での北風成分が大きくなったと考えられる。夜が明けると噴煙が吹き降ろしているのが確認できた。しかし、7:30頃から風向が東よりになり始め、噴煙は市内のほうに流れていき、70 ppb程に下がった。何度か200 ppb程の小さなピークの後噴煙は上空に上がり、70 ppb程に下がった。ピークは14時間続いているが全て100 ppbを超えているわけではなく、風向が変わったり、噴煙が上空に上がったたりするなかで低くなっている。
- No.18. T点から見るとピークは起こっているが噴煙は上空に上がり南西に流れている(図14)。ピークは149 ppbとNo.17のピークに比べると小さく、大きな爆発の影響が出ているのだと考える。また、風向は東よりでも小噴火が数回起こっており、その影響も考えられる。
- No.19. 夜間のピークで確認することが出来なかった。ピークが起こっている25日21時の風向・風速は335°，11 m/sでこのときだけ強風になっている。
- No.20. T点から見るとかすんでよく見えないが噴煙が出ているのは確認できた。継続時間後1時間の16時ごろには吹き降ろしが確認できた。27日の15時は風向306° 風速12 m/sである。3時から15時まで10~12 m/sの強風である。
- No.21. T点から見ると日没前はかすんで見えず、夜間も確認できなかった。27日21時の風向・風速は319°，12 m/sである。
- No.22. B点から見て山岳波が出来ている。また、T点から見ても吹き降ろしが起こっている。2時間だけのピークで、その後噴煙は少し上空に上がったが、吹き降ろしているようにも見えた。29日9時の風向は322°である。
- No.23. 夜間のピークで確認できなかった。29日21時周辺の風向は328°，299°，314°と動いており、1時間だけのピークなので風向が変わるときに観測点を通過したのだと考える。
- No.24. B点から見て山岳波が出来ていた。T点から見て薄い噴煙の吹き降ろしが起こっていた。ピーク継続時間が過ぎると噴煙は上空に上がっていた(図8)。
- No.25. T点から見て夜間には確認できないが、明るくなると吹き降ろしが確認できた。継続時間を過ぎると、風向が西よりになっていった。
- No.26. B点から見ると山岳波が起こっていた。T点から見ると、小噴火と共に吹き降ろしが確認できた。31日9時の風速は13 m/sと強風である。継続時間が過ぎると噴煙は上空に上がっていった(図9(b))。
- No.27. T点から見るとほぼ北からの風に定常的な雲が見られ、吹き降ろしが確認できた。夜間になると確認できなかった。31日21時の風向・風速は352°，10 m/sである。

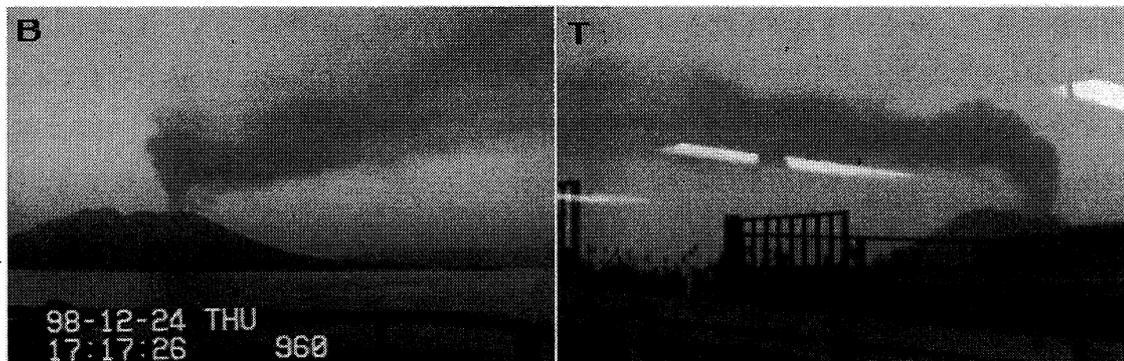


図14. 事例 No.17のシーン（有村のSO₂濃度が高い時間に、噴煙が上昇している）。

以上の事例の結果をまとめると、「強風による噴煙と火山ガスの吹き降ろしで、有村におけるSO₂とSPMの高濃度事象が生じる」という仮説が噴煙の観測から多くの場合について裏付けられた。確認できないのは、噴煙が見えないほど薄い場合や、雨や灰で視界が悪いとき、及び夜間である。しかし、これらの場合も6時間おきの高層風データから、強風による吹き降ろしが起こっていることが推測できるのがほとんどである。SO₂とSPMのピークが大きくずれている継続時間もあるが、ピーク継続時間内での最大値をピックアップしているからであって、その時間で対応するピークが存在する。SO₂だけがピークを示してSPMにはピークが見られないこともあるが、ピークの差は前後1時間の範囲であり、多くは同じ時間にピークが表れている。風が有村の方に吹いていることは必須であるが、風が弱く噴煙が上空を流れているときはピークが表れていないことから、吹き降ろしが起こるために強風であることがピークの有無を左右しているようである。

但し、例外はNo.17の終わり頃からNo.18にかけてである。図14の様に、噴煙は高く上がっているのに100 ppb前後のSO₂濃度が検出されている。ひとつの可能性は、吹き降ろされた高濃度の火山ガスが、弱風化で山麓に滞留したことが考えられる。前夜の1460 ppbも、非常に高濃度の気塊の存在を示唆している様にも思われる。今までの検討[3,8]では見られなかったこのようなケースがどれだけあるか、更に多くのデータの注意深い検討が必要である。

4. 4 噴火とSO₂ピークの関連性

12月の噴火回数は、1・12・15・19・21・23・24・25日の8回であり、23日には爆発地震が起こっている[10]。噴火のあった8回のうちで、ピークがあったのは15・23・24・25日の4回である。ピークのない日は1・12・19・21日であるが、有村だけでなく黒神でもピークは現れていない。しかし、噴火時刻とピークの継続時間には差があり、ただ唯一噴火時刻とピークの近い23日は1460 ppbを記録した日である。噴火が起こっている日でピークがあった日について、噴火時刻とその日のピークの差を表4に示す。ピークとの時間差は噴火時刻が基準である。「-」は「前」、「+」は「後」である。1460 ppbを記録したのは24時でデータは1時間の積算値である。3分前に爆発が起こっている

が噴煙はまだ上空に吹き上げていると考えられ、また「積算」を考えるとこの爆発は次の24日1時の積算値に影響すると考えられる。しかし、23日1時のSO₂は91 ppbであり、他の日は噴火時刻とピークの現れた時刻の差が大きいため、ピークに噴火・爆発は影響ないことを示している。24日24時のピークは、爆発前の活発な噴煙が強風で吹き付けられて1460 ppbものピークを記録したのだと考える。

表4. 噴火時刻と有村におけるSO₂ピークとの時間差

噴火の日時 JST	12/15 11:50	12/23 16:14	12/24 06:03	12/25 04:00
ピークとの時間差	-3 時間	+3 分	+10 時間	+17 時間

噴火は起こっているがSO₂が100 ppbを超えていない日について、表5にその日一日の風向・風速を示す。1日は15時、21時に風向が有村よりでも風が弱い。14:47に灰白色[10]の噴煙が出ているが、高さ700mと上空へあがっている。12日は16:08に灰色の噴煙が上がっているが、風向が異なり、風が弱い。21日は風向がまったく異なり、風も弱い。さらに16:14の灰白色の噴煙は、高さ900mの上空へあがっている。19日は、風向がやや外れている。強風ではあるが噴煙の色は終日ライトホワイトであったため、主に水蒸気の噴煙だったと考える。

表5. 有村におけるSO₂ピークのない噴火日の風向・風速(925 hPa)

噴火日時	風向(°)と風速(m/s)			
	3 時	9 時	15 時	21 時
12/01	48	156	295	267
19:50	5	1	3	2
12/12	175	200	-	127
16:08	2	3	-	1
12/19	232	290	288	306
04:32	7	7	-	11
12/21	169	201	61	107
16:14	3	1	1	3

風向・風速は3時、9時、15時、21時の定時観測である。上段は風向(°)、下段は風速(m/s)である。「-」は欠測である。

5. 終わりに

有村と黒神におけるSO₂高濃度事象は噴煙の吹き降ろしでおこっている。ピーク時の風は南岳火口からそれぞれの観測点の方向に吹いており、噴煙が山麓に吹き降ろされるために風速が10 m/s前後である。さらに鴨池・垂水2点からの映像や画像で、強風を裏付ける吹き降ろしや山岳波を観測できた。

噴火・爆発の時の噴煙は、上空高くに上がるのでSO₂高濃度事象にはならない。また、SO₂とSPMの関係について多くはピークの時間差は前後1時間以内である。

ここで解析した1998年12月のデータは、膨大なデータのごく一部である。大量のデータについて意味のある解析を効率的に行うために、まず適切な方法を確立する必要がある。この報告は、その試行の記録である。今後さらに方法の改善を図りながら、他のフィールドでは得られない貴重なデータの解析を進め、噴煙と火山ガスの動態についての理解を深める予定である。

謝 辞

データを提供して頂いた鹿児島市環境保全課と鹿児島地方気象台の関係各位と、ご協力いただいた戸越浩嗣氏（鹿児島大学教育学部大学院学生）に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 石川秀雄, 桜島-噴火と災害の歴史-, 共立出版. 1992.
- [2] 新版 大気環境の基礎知識, 東京教育情報センター, p.58, 1988.
- [3] 木下紀正・西之園雅靖・瓜生洋一郎・金柿主税, 桜島火山周辺におけるエアロゾルと火山ガスの高濃度事象の解析, 鹿児島大学教育学部研究紀要, 自然科学編, 50, 11, 1998.
- [4] 鹿児島市環境保全課, 鹿児島市の環境, 平成10年度版, 1999; 環境大気データ, 1992~1998年度
- [5] 木下紀正, 戸越浩嗣, 吉野真人, 町田晶一, 高原弘幸, 離島火山の噴煙自動観測とデータベース化, 日本リモートセンシング学会第26回学術講演会論文集, 1999, 655.
- [6] 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.
- [7] (財)気象業務支援センター, 高層気象観測年報CD-ROM, 気象庁監修, 1998年版
- [8] 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, 自然災害西部地区部会報・論文集 22, 133, 1998, および引用文献.
- [9] 鹿児島地方気象台, 定期火山情報第1号, 1999.
- [10] 鹿児島地方気象台, 桜島遠望観測データ 1998年12月.
- [11] 日本気象協会, 気象, 1999年2月号.
- [12] 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, および引用文献
K. Kinoshita, Observation of Flow and Dispersion of Volcanic Clouds from Mt. Sakurajima, Atmos. Env.30, 2831, 1996.
K. Kinoshita and T. Togoshi, Rise and Flow of Volcanic Clouds observed from the Ground and from Satellites, Journal of Visualization, 3, in press, 2000.