

桜島島内の火山ガス濃度解析と教材化

飯野直子^{*1}・今村唯^{*2}・金柿主税^{*3}

Analysis of volcanic gas concentrations at the foot of Sakurajima volcano and teaching material development

Naoko Iino^{*1}, Yui Imamura^{*2} and Chikara Kanagaki^{*3}

(Received September 29, 2017)

The Showa-crater of Sakurajima volcano has reactivated the eruptive activity since June 2006. The volcanic gas and the amount of the ash fall around Sakurajima volcano during five years before and after then were illustrated by using the geographic information system. In addition, in order to understand the mechanism of the high SO₂ concentration phenomena at the foot of Sakurajima volcano, we analyzed the SO₂ high concentrations observed during April 2013 to March 2014 with the upper air meteorological data. The clarified high SO₂ concentration mechanisms were summarized as teaching material for elementary school students. Furthermore, the results of this study were edited as digital contents for education, and we have provided them through the internet.

Key words : Sulfur dioxide(SO₂), Normalized Difference Vegetation Index(NDVI), upper wind, Froude number(Fr)

1. はじめに

近年、自然災害が頻発しており、防災教育の重要性がますます高まっている。防災教育において、教科理科は自然災害発生メカニズムの理解の部分を主に担ってきた。平成29年に告示された学習指導要領[1]でも、小・中学校の理科において、自然災害に関連する内容の取り扱いが充実している。小学校理科では第4学年に「雨水の行方と地面の様子」が新設された。現行の中学校理科では自然災害は最終単元「自然と人間」で扱われており、第3学年で学習されているが、改定後は第1学年の「大地の成り立ちと変化」および第2学年の「気象とその変化」でも扱うことになった。これにより、中学校理科の全学年において自然災害について学習されることになる。第1学年で火山活動や地震発生の仕組み、第2学年で天気の変化や日本の気象について基礎的事項を学習し、それぞれの単元内で自然災害との関連付けが明確になることによって、火山や地震、気象についての理解がさらに深まることが期待される。また、こうして自然災害発生メカニズムを確実に理解したうえで、第3学年において地域のハザー

ドマップや資料を用いて地域の自然災害について調べることによって、自分事として事象を捉えて理科以外の教科なども含めてそれまでに学習したことを総合的に活用して理解できるとともに、科学的根拠に基づいて防災・減災のために適切に判断したり行動したりする力が養われると考えられる。

ここでは、桜島火山を対象として、活発に活動する火山から放出される、火山灰や高温型火山ガス（二酸化硫黄 SO₂）濃度についての解析とその教材化について述べる。日本には111の活火山が存在しており、近年火山活動の活発化もみられている。1955年以降、長期にわたって噴火活動を継続している桜島から放出される噴煙や火山ガスの挙動についての理解は、その他の火山の活動が活発化した際に役立つと考えられる。また、火山噴煙・ガスの挙動は気象条件に大きく依存するため、気象学習との関わりが深い。さらに火山から放出された SO₂ は、島内だけでなく、広域の大気環境にも影響をおよぼすことから環境に関する学習とも関連している。そのため、事象を総合的に捉えて探究的に学習していく題材としても適していると考えられる。

*1 熊本大学教育学部理科教育

*2 熊本大学教育学部（現 福岡市立西長住小学校）

*3 熊本支援学校

2. 使用データと解析方法

桜島南岳と昭和火口、島内の大気環境測定局、桜島周囲の高層気象観測点、桜島映像観測点の位置を図1に示す。

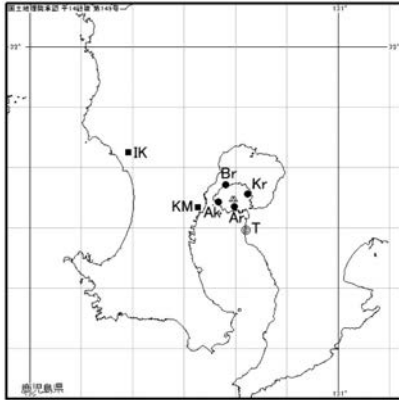


図1 観測局と火口の位置. 気象観測 (■ KM: 鹿児島地方気象台, IK: 市来局), 大気環境測定局 (● Br: 桜島支所, Kr: 黒神, Ar: 有村, Ak: 赤水), 映像観測 (◎ T: 垂水市役所). 火口 (△西: 南岳山頂, 東: 昭和).

2.1 高層気象データ

(1) ラジオゾンデデータ

鹿児島地方気象台 (図1中のKM) で観測されたラジオゾンデによる高層気象観測データを用いた [2].

3章の風配図は、指定気圧面 900hPa と 800hPa の高層風データを使用して、桜島昭和火口噴火再開前 (2001年6月~2006年5月) と再開後 (2006年6月~2011年5月) に区切って月ごとに5か年分を累計した。4章の高濃度 SO₂ 事象解析においては、900hPa および 925hPa の高層風を使用した。

4章の高濃度 SO₂ 事象発生時のフルード数は、風および気温・湿度データのうち、最下層からジオポテンシャル高度が 1000m を超えたすぐ上の層までのデータを用いて、以下の式を計算して求めた。

まず、温位を以下の式で計算した。

$$\theta(z) = T(z) \left(\frac{p_0}{p(z)} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (1)$$

ここで、 $p(z)$ は高度 z における気圧 [hPa], R_d は乾燥空気の気体定数 [J/kg K], c_p は定圧比熱 [J/kg K] である。標準気圧 p_0 は 1000hPa とする。

次にフルード数 Fr は以下の式で計算した。

$$Fr = \frac{U}{NH} \quad (2)$$

ここで、 U は山頂付近の風速 [m/s], H は桜島の高さ

1000m であり、 N のブラントバイサラ振動数 [rad/s] は以下の式で与えられる。

$$N = \sqrt{\frac{g}{T_0} \frac{d\theta}{dz}} \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度 [m/s²], T_0 は地表面を除く最下層の気温 [K], $d\theta/dz$ は最下層と山頂の間の温位勾配 [K/m] である。

風に対する地形効果を高精度に数値予測する局地的風況シミュレータを用いた研究によると、強い安定成層流のフルード数が 1 で風下波が形成され、流れの剥離が抑制されるため、ちょうど山肌に沿って火山ガスが吹き降ろして火山ガスの高濃度域が発生することが予想されている [3]。したがって、フルード数が 1 程度で、桜島山麓に位置する大気環境測定局付近に火山ガスが直接吹き降ろされるときの高濃度 SO₂ 事象が発生すると考えられる。

(2) ウィンドプロファイラデータ

ラジオゾンデによる観測は、9時と21時の1日2回しか行われていない。そこで、それ以外の時刻に発生した高濃度 SO₂ 事象の解析では、市来局 (図1中のIK) のウィンドプロファイラによる 1010m の風向・風速データを使用した。1010m のデータが得られていない場合は 898m のデータを参照した。市来局は桜島から北西に約 35km 離れているが、一般に高層風は空間一様性がよいと言われている。また、ウィンドプロファイラデータでは 10分ごとの風の情報が得られるという利点がある。

2.2 二酸化硫黄濃度と降灰量、噴火回数

桜島島内 4 か所に設置されている大気環境測定局 (図1の桜島支所 Br, 黒神 Kr, 有村 Ar, 赤水 Ak) において測定されている SO₂ 濃度の 1時間値を使用した。

3章では、桜島昭和火口噴火再開前 (2001年6月~2006年5月) と再開後 (2006年6月~2011年5月) に区切って、5か年中に SO₂ 日平均値が環境基準値 0.04ppm を超えた日数の割合を月ごとに計算した。また、桜島から 20km 圏内の地点の降灰量 [4] と噴火回数 [5] もあわせて表示した。なお、降灰量データには、2011年1月からの霧島新燃岳噴火による降灰も含めて取り扱われているが、鹿児島地方気象台の観測野帳 [6] によると、2011年1月26日のマグマ噴火による噴煙を含めて、ほとんどの爆発的噴火の噴煙の流向は新燃岳から東方へ向いていたため、今回の解析対象領域への新燃岳の降灰の影響はほぼないと考える。

4章では、2013年度のSO₂濃度1時間値データを国立環境研究所のサイト [7] からダウンロードし、まず島内4か所の月平均濃度の経月変化から、桜島島内のSO₂濃度環境の季節・地域特性を検討した。次に環境基準であるSO₂濃度1時間値が0.1ppmを超える場合を高濃度事象としてカウントし、高濃度SO₂事象が発生する気象条件について、高層気象データおよび地上天気図や噴煙の地上観測動画などを用いて詳しく検討した。

2.3 衛星データ

Terra/ASTER データを用いて、2006年6月の桜島昭和火口噴火再開前後の島内の植生分布の変化を調べるために、以下の式を計算して植生指数 (NDVI) を求めた。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (4)$$

ここで、VIS と NIR にはそれぞれ可視 (赤色) バンドと近赤外バンドを割り当てる。Terra/ASTER の場合は、それぞれバンド2と3N データを用いた。

NDVI 画像は、植物が可視光をよく吸収するのに対して近赤外域をよく反射する性質にもとづいて考案された画像である。NDVI が大きいと白く表示され、これは植物の量が多く、活性度が高いことを示す。NDVI が小さい場合は黒く表示され、これは裸地や水面を表す。

2.4 地上映像観測

噴煙活動を観測・記録するために、2006年から桜島の南南東約10kmに位置する垂水市役所 (図1のT) にパソコンとUSBカメラからなる映像観測システムを設置し、日中10秒ごとに撮影している。4章の高濃度SO₂事象解析において、適宜静止画やタイムラプス動画を用いた。

3. 桜島火山活動の活発化

3.1 最近の噴火活動

1982年から2016年までの桜島南岳と昭和火口の噴火回数 [5] を図2に示す。2002年頃から南岳の活動は低下している。南岳東斜面に位置する昭和火口が2006年6月4日に活動を再開して以降の噴火は主に昭和火口で起こっていることがわかる。特に2009年10月以降は噴火活動が活発化したため、噴火回数が年間1000回を超えた年が複数ある。なお、2016年は7月26日に発生した、噴煙高度が火口縁上5000mに達する爆発的噴火以降、翌年3月25日まで噴火が観

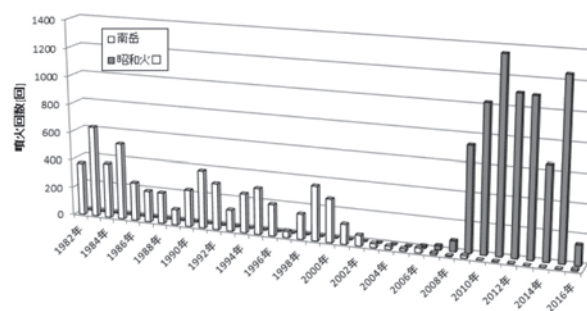


図2 桜島南岳と昭和火口の噴火活動。

測されなかったため、噴火回数が激減した。

3.2 桜島周辺の風況と降灰および火山ガス

桜島昭和火口噴火再開前後のそれぞれ5か年を累計して、高度約1000mの900hPa面と高度約2000mの800hPa面の月ごとの風配図を作成した。主に900hPaは火山周辺における火山ガス、800hPaは火口縁上数百~数千メートル上昇した噴煙・火山灰の挙動と高層風との対応を考察するために作成した。なお、900hPa面は桜島の山頂高度程度である。月ごとの風配図を検討した結果、桜島昭和火口噴火再開前後で風況に大きな変化はないことが確認できた。また、桜島周辺の風況を端的に理解するためには、月ごとに議論するよりも寒候期と暖候期に大きく分けて述べるのが妥当であることも確認できた。

寒候期の代表として1月から3月を累計した(a)800hPa、(b)900hPa、暖候期の代表として7月から9月を累計した(c)800hPa、(d)900hPaの風配図を図3に示す。桜島島内SO₂環境 (○) と桜島から20km圏内の降灰量 (□) を図4に示す。(a)が寒候期の代表として1月から3月の累計結果、(b)が暖候期の代表として7月から9月の累計結果である。

900hPaと800hPaの風の特徴を比較すると、800hPaの高層風は西風成分が多く、寒候期には10m/sを超える風速の割合が多い (図3)。季節特性をみると、寒候期は西から北西の風が支配的であり、10m/sを超えるような強い風が吹く割合が多い (図3a)。図4(a)の降灰分布に示されるように、この風によって寒候期には桜島島内に加えて、桜島島外の東から南東部の領域まで1平方メートルあたり1000gを超えるような多量の降灰がもたらされると考えられる。特に桜島に近い桜島口と海湯では1平方メートルあたり10000g以上を表す赤色表示になっている。一方、暖候期には強い風が吹く割合が減少するとともに、北風成分が減少して南風の成分が増加している (図3b)。図4(b)の降灰分布をみると、島内の北部 (園山)、東部 (黒神)、西部山腹 (湯之平) で1平方メートルあたり10000g以上を表す赤色表示になっており、800hPa高層風の

特徴とよく対応している。また、島外で降灰量が多い領域（1平方メートルあたり1000gから10000gを表すマゼンタ色）についてみると、桜島の東西近郊の鹿児島市役所や二川あたりまでとなっており、高層風の特徴からうなずける結果である（図4b）。

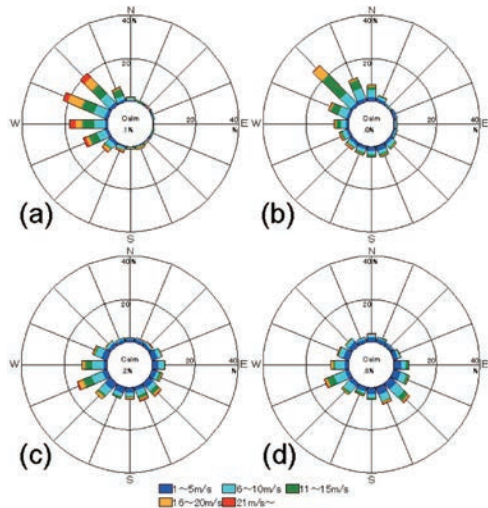


図3 昭和火口の活動再開後5か年の風配図。
上段：1月から3月 (a) 800hPa, (b) 900hPa
下段：7月から9月 (c) 800hPa, (d) 900hPa

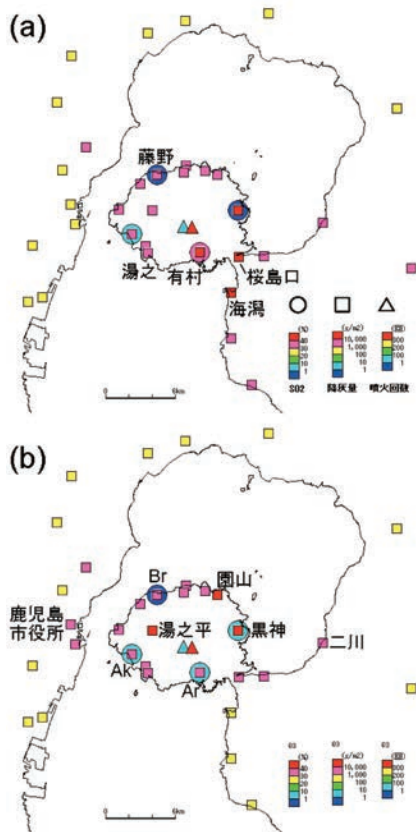


図4 昭和火口の活動再開後5か年の
○SO₂, □降灰量, △噴火回数。
(a) 1月から3月, (b) 7月から9月。

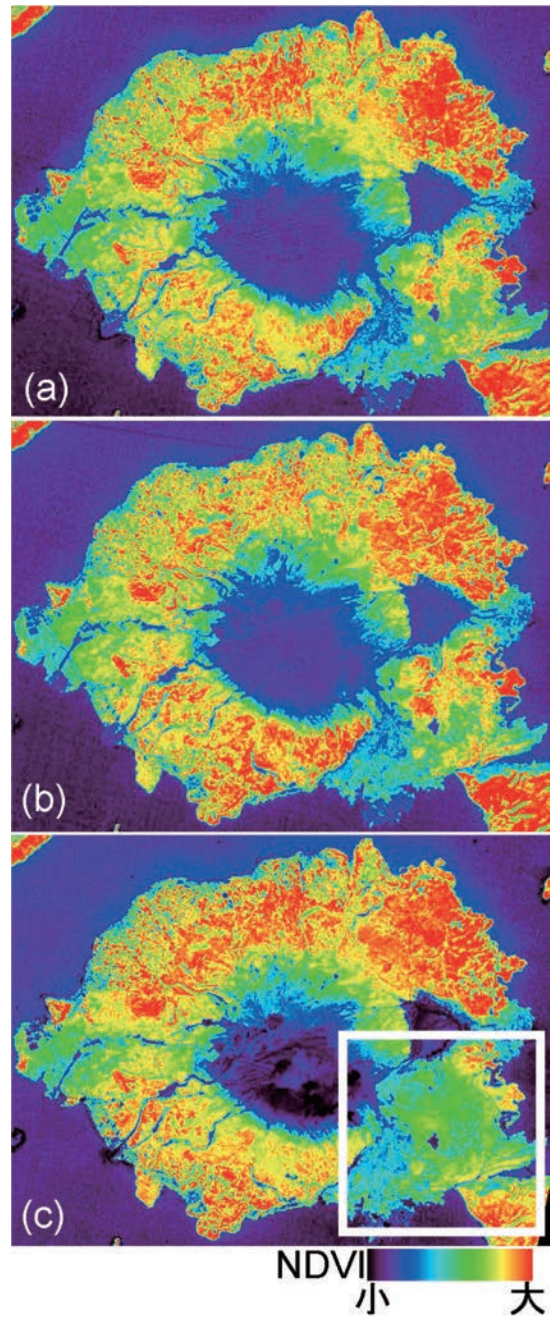


図5 Terra/ASTER 植生分布画像。(a) 2003年10月19日,
(b) 2006年11月12日, (c) 2010年10月6日。

なお、桜島昭和火口噴火再開前の降灰量については、1平方メートルあたり1000gから10000gのマゼンタ色レベルが桜島島内の湯之平、湯之、有村の3か所でみられた。それ以外の島内外の観測点は1平方メートルあたり1000g未満であった。島内であっても降灰量が少なかった桜島支所においては、最も少なかった1月から3月の累計が1平方メートルあたり1gから10gの水色レベルであった。

桜島島内のSO₂環境（図4の○）と900hPa高層風（図3b,d）との関係を見ると、寒候期については、有村において、SO₂日平均値が環境基準の0.04ppmを

超えた日数の割合が30から40%のマゼンタ色レベルになっており、北よりの強い風によって風下の領域でSO₂濃度が高くなりやすかったと考えられる(図3bと図4a)。一方、暖候期については、900hPaの風は800hPaと同様に、寒候期に比べて風速が弱まるとともに、北よりの成分が少なくなり、南風の成分が多くなっている(図3d)。しかし、図4(b)のSO₂濃度環境をみると、風下にあたる島の北部に位置する桜島支所(Br)のレベルが最も低く(青色：日平均値の環境基準を超える割合が0%から1%)、風上にあたる南部や西部に位置する有村局(Ar)や赤水局(AK)の方がレベルが高い(水色：日平均値の環境基準を超える割合が1%から10%)。このことは、強風で狭い領域に高濃度のままSO₂が直接運ばれる以外にSO₂濃度が高くなるメカニズムがあることを示唆している。2013年度のSO₂濃度1時間値、高層気象データ、噴煙の地上観測映像などを用いて、桜島島内における高濃度SO₂事象について詳細に解析した結果を4章で述べる。

3.3 桜島島内の植生の変化

Terra/ASTER データを用いて(4)式を計算して求めたNDVIによる植生分布画像を図5に示す。図5(a)が2003年10月19日、(b)2006年11月12日、(c)2010年10月6日である。2006年11月12日のヒストグラムを基準としてヒストグラムマッチングを行い、レインボーカラー表示した。暖色は植生指数が大きい領域、黒や寒色は植生が乏しい領域を表す。

桜島昭和火口は2006年から活動を再開したが、2006年はそれほど活動が活発化していないため(図2)、2003年と2006年の植生分布に大きな変化はみられない。一方で、昭和火口の活動が活発化した後の2010年には、島内南東部(図5(c)中の□の領域)で植生指数が低下した様子がみられる。火山ガスや降灰による影響を反映していると考えられる。

4. 2013年度の二酸化硫黄の高濃度事象

4.1 桜島島内のSO₂濃度環境

桜島島内4局における、2013年度のSO₂月平均値を図6に示す。島内北部に位置する桜島支所局は1年を通して月平均濃度が低くなっている。3章で述べた風配図をみると、強風の南風が吹く頻度が低いことや、桜島支所局は南岳や昭和火口から最も離れていること、南岳(標高1040m)の北に北岳(標高1117m)があるといった地形的な理由もあって高濃度になりにくいのではないかと考えられる。一方、島内南部に位置する有村局においては寒候期に月平均値が0.04ppm

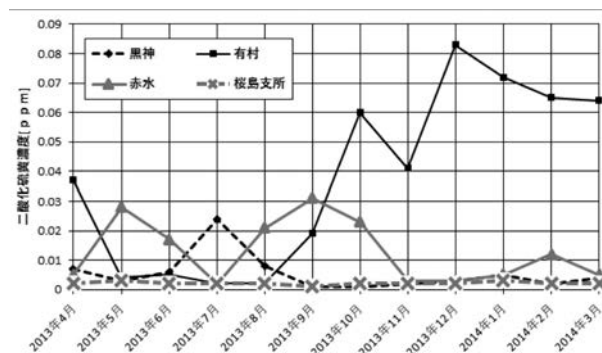


図6 桜島島内における二酸化硫黄濃度月平均値

を超えている。日平均値が0.04ppmを超えないことが環境基準とされていることから考えても、かなりの高濃度環境であることがわかる。これは西高東低の冬型の気圧配置下では、北西の季節風が支配的であるため、火口から風下にあたる狭い領域にSO₂が長時間にわたって運ばれやすいため高濃度になると理解できる。南西部に位置する赤水局では暖候期に濃度が高くなる傾向がみられる。ただし、寒候期の有村局に比べると濃度レベルは半分以下である。これは図3からもわかるように、冬季にくらべて夏季には風速が小さく、風向変化が大きくなるため、山麓付近の測定局に運ばれるSO₂の量や高濃度の継続時間が冬季よりも少なかったり短いためと考えられる。また、3章でも述べたように、冬季に多くみられる、強風によって測定局に高濃度のSO₂が直接吹きつけるのとは異なる輸送メカニズムによって高濃度となるためではないかと考えられる。この他に暖候期にみられる特徴として興味深いのは、7月は赤水局の月平均濃度が明らかに低くなっており、黒神局の月平均濃度が高くなっている点である。この7月に高濃度となる測定局が島内南西部の赤水局から島内東部の黒神局に変わるという特徴は、2001年から2012年までの12年間について高濃度事象の発生数を月ごとに調べた研究[8]でも同様の結果が示されている。また、3章で述べた、桜島昭和火口噴火再開後の2006年6月から2011年5月を対象として、日平均濃度が環境基準値を超えた割合を月ごとに調べた結果をみても、7月は黒神局が水色レベル(1%から10%)で、それ以外の3局は青色レベル(0%から1%)であった。これらのことから、7月に島内東部においてSO₂濃度が高くなる傾向は2013年だけにみられる特徴ではなく、桜島島内のSO₂濃度環境の特性のひとつであると考えられる。これまでの研究から、島内東部の黒神局でSO₂が高濃度になるのは、九州の北部に前線や低気圧がある南高北低の気圧配置で、西よりの強風が吹く場合であるといわれている[8]。2013年についても黒神局で高濃度となっ

たときの気圧配置は上述された気圧配置であった。このような気圧配置は梅雨明け後によくみられることが関係しているかもしれない。黒神局のすぐ近くには、保育園や小・中学校がある。島内の住民に SO_2 濃度環境の地域特性や季節特性について周知することは防災の観点からも意味があると考えられる。

4.2 高濃度 SO_2 事象の解析

日本における大気汚染に係る環境基準として、 SO_2 は、「1時間値の1日平均値が 0.04ppm 以下であり、かつ、1時間値が 0.1ppm 以下であること」と定められている [9]。ここでは、桜島島内の大気環境測定局4局において測定された SO_2 濃度の1時間値が 0.1ppm を超えた場合を高濃度事象とした。9時と21時のみが対象の、フルード数を用いた解析では、その時刻の SO_2 濃度が基準を超えているかどうかで高濃度事象の発生を判断した。ウインドプロファイラデータを用いた解析では、全時刻の SO_2 濃度が解析対象となる。高濃度が数時間継続している場合、 100ppb 以下の濃度が2時間以上続いた場合と風向が大きく変化したり風速が弱まったりすることによって 100ppb を下回ったと判断できる場合を除いて、継続した1つの高濃度 SO_2 事象としてカウントした。2013年度の高濃度 SO_2 事象の総発生数は、支所局、黒神局、有村局、赤水局でそれぞれ6回、35回、168回、79回であった。月平均濃度(図6)と同様の傾向であり、高濃度 SO_2 事象の発生回数からも地域によって SO_2 濃度環境が大きく異なることがわかる。

これまでに三宅島 [10] や桜島 [8] を対象にした研究によって、活発に活動する火山の山頂付近から放出される SO_2 による島内の高濃度 SO_2 事象の発生は、強風による吹き降ろしが主因であることが明らかになっている。しかし、両方の火山において、島内南西部に位置する測定局における高濃度 SO_2 事象は強風時以外にもしばしば発生していることが指摘されているが、詳細な解析は行われていない。そこでここでは、三宅島を対象に、局地的風況シミュレータを用いて中立成層流 ($\text{Fr}=\infty$) から強安定成層流 ($\text{Fr}=0.1, 0.5, 1, 3, 5$) にいたるまでの安定度に対して、三宅島まわりの風況パターンを明らかにし、山頂付近から連続放出したパッシブ粒子を火山ガスに見立ててその挙動を考察した研究 [3] を基に桜島島内の高濃度 SO_2 事象の解析を行った。

高層気象観測が行われている9時と21時に発生した高濃度 SO_2 事象は、桜島支所局、黒神局、有村局、赤水局が、それぞれ0回、2回、72回、22回の合計96回であった。このうち9事例では大気の状態が不安定であったり、高度1000m付近の風が静穏であっ

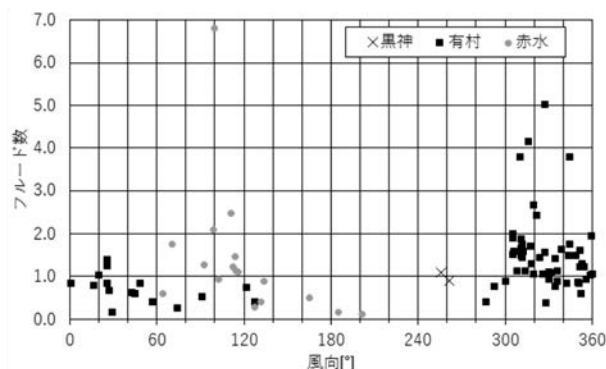


図7 高濃度 SO_2 事象時の風向別フルード数(9時21時)

たためにフルード数を算出できなかった。これらの事例を除いた87事例の高濃度 SO_2 事象時の風向とフルード数の関係を図7に示す。

フルード数が1以上のプロットをみると、黒神局、有村局、赤水局でそれぞれ、 255° 、 $305^\circ \sim 360^\circ \sim 26^\circ$ 、 $70^\circ \sim 116^\circ$ に分布している。各測定局から昭和火口の方向を、高層風の風向の表現にあわせて真北を 0° として時計回りの角度で表すと、桜島支所局、黒神局、有村局、赤水局が、それぞれ 147° 、 250° 、 358° 、 79° であることから、フルード数が1以上で高濃度 SO_2 事象が発生しているときの1000m付近の風は測定局方面へ向いており、 SO_2 が測定局付近まで直接吹き降ろされて高濃度 SO_2 事象が発生したと理解できる。このときのフルード数と風速の関係を調べると概ね 9m/s 以上の強風であった。以上のことから、上述した風向と風速が高濃度 SO_2 事象の主因である直接吹き降ろしの桜島山頂高度付近(約1000m)の風の基準となりうる。

一方、フルード数が1より小さな場合は風向のずれが大きい(図7)。このような場合の高濃度 SO_2 事象の発生要因は主因とは異なると考えられる。そこで主因以外の高濃度発生メカニズムについて検討するために、まずフルード数0.1から1.4までのタイムラプス動画を用いて噴煙の挙動を検討した。フルード数が0.6以上の場合に噴煙が山麓付近まで直接吹き降ろす様子を確認できた。しかし図7の分布なども考慮して、確実に山麓の測定局まで“直接”吹き降ろす条件をフルード数0.8以上とし、それより小さい場合を直接吹き降ろしでは説明できない事例として、タイムラプス動画、925hPa高層風データ、気温の鉛直プロファイル、天気図を用いて詳細に検討した。その結果、フルード数0.3以下の場合と0.4から0.7の場合に分けて考えるのが適切であると思われた。

フルード数0.4から0.7の場合の例として、2013年10月18日9時、フルード数0.5、高度1000mの風向 91° で有村局で9時に 130ppb が記録された事例につ

いて述べる。気圧配置は九州は高気圧の支配下のため強風は吹きにくく、また九州の北方に高気圧が位置しているため桜島のあたりは東風が吹いていたのがうなずける。7:30から9:30までのタイムラプス動画[11]より、主流の噴煙が風下波の下降流にのって南西斜面を中腹まで吹き降ろしたあと剥離して下流方向に流れると同時に、東斜面に位置する昭和火口付近から扇状に大きく広がりながら斜面に沿って流れる非常に薄く白っぽい霞のような噴煙が西向きに回りこむように流れていく様子が確認できた。このときの高濃度SO₂事象は、火口から大きく広がりながら下層まで斜面を流れ下ったSO₂が山体を回り込んで測定局方向へ向かう周回流によって運ばれたために発生したと考えられる。一方、噴煙主流の吹き降ろしは有村局に直接届いていないため高濃度の主因とは考えにくい。文献[3]でフルード数1に比べてより強く安定成層したフルード数0.5では、中腹から剥離した後の地形からすぐ下流にローターが誘起されて粒子が停滞していることや、下流において粒子の水平方向の拡散幅が他のフルード数の場合と比べて顕著に広がっているということが指摘されていることを考えると、主流の下流にあたる山麓あたりの上空に広く拡散したSO₂が測定局に到達した可能性は否定できない。そのため、フルード数0.4から0.7の場合の高濃度発生要因としては、周回流および直接吹き降ろしの両方が考えられる。

フルード数が0.3以下の強い安定成層下の例として、2013年12月25日、フルード数0.1、高度1000mの風向が201°で赤水局で9時に114ppbが記録された事例について述べる。タイムラプス動画[11]より、噴煙の主流は吹き降ろしたり、鉛直方向に大きく乱れたりすることはなく、火口上空に上昇して扇状に薄く水平方向に広がりながら東の方へ流れる様子がみられた。主流の吹き降ろしが高濃度の主因であるとは考えにくい。一方、下層では主流とは異なる、測定局方面に向かう山肌にそった噴煙流がみられた。この下層の噴煙流に含まれるSO₂が周回流によって測定局に運ばれたために高濃度事象が発生したと考えられる。このときの気圧配置を確認すると、大陸から張り出してきた高気圧の前面に九州が位置していた。高度1000mの高層風の風向および動画でみられた主流の噴煙の移流方向と測定局の方向のズレは大きい。地上天気図に示される気圧配置から測定局方面への風の流れがあることはうなずける。フルード数0.3以下の事例のフルード数と風速の関係を調べたところ、高度1000m付近の風速は概ね3m/s以下の弱風であった。なお、2013年度を対象とした本研究では6事例と事例数が少ないことや6事例中5事例は2m/s以下であったことを考えあわせると、今後、多年度の高濃度

SO₂事象を対象とした解析結果によっては、基準値が3m/sよりも小さくなる可能性がある。ちなみに、高濃度SO₂事象6事例中4事例が赤水局、2事例が有村局であった。SO₂濃度の最高値は191ppbであり、それほど高いレベルではなかった。

以上のフルード数に基づく解析・検討結果より、桜島島内における高濃度SO₂事象の発生要因は(1)直接吹き降ろし(2)周回流と直接吹き降ろし(3)周回流(4)その他・不明に分類できると考えた。そこで、9時と21時のラジオゾンデによる高層気象観測時刻以外も含めて、全高濃度SO₂事象の発生要因を分類するために風速と風向の基準を設定し、2013年度の高濃度SO₂事象の発生要因をウィンドプロファイルデータを用いて分類した。本研究で用いた高濃度発生要因の分類基準を表1に、そのなかで使用している風速と風向の基準・範囲を表2と3に示す。すでに述べたように、2013年度を解析対象とした本研究で9時と21時の高濃度SO₂事象の発生数は桜島支所局は0回、黒神局は2回であったため、風向の範囲を検討することができなかった。そこで、桜島支所局と黒神局の直接吹き降ろしの風向範囲は、12年分の9時と21時の高濃度事象を解析した結果[8]を引用して用いた。なお、発生要因(2)と(3)については、表3の風向範囲外の場合に気圧配置や下層風のデータの確認が必要である。2013年度の全時刻を対象とした、高濃度SO₂事象発生要因の分類結果を表4に示す。高濃度SO₂事象の約6割が強風による直接吹き降ろし、約1割が弱風時の周回流、約2割が並風下で周回流と直接吹き降ろしの両方の要素を含む、残りの約1割がその他・不明であることがわかった。特に高濃度SO₂事象の発生が多い有村局における高濃度発生の主因は強風による直接吹き降ろしであることが明らかである。有村局に次いで高濃度発生が多い赤水局については、これまでの研究から強風時以外にも多くの高濃度SO₂事象が発生していることが指摘されていたが、2割程度は弱風時の周回流が発生要因と考えられることがわかった。事例数の少ない桜島支所局と黒神局については、これまでの9時と21時のみの高濃度事象を解析して得られた、高濃度発生の主因は強風による吹き降ろしであるという結果[8]との整合性はあまりよくない。また、本研究では、主に強風で風向が表3の範囲外の事例が(4)その他・不明と分類されることになった。今後、事例を増やしてさらに検討する必要がある。

表1 高濃度 SO₂ 発生要因の分類基準

高濃度 SO ₂ 発生要因	高度 1000m の高層風
直接吹き降ろし	強風で表3の風向範囲内
周回流 + 直接吹き降ろし*	並風
周回流*	弱風
その他・不明	強風で表3の風向範囲外など

*表3の風向範囲外の場合は気圧配置や下層風の確認必要

表2 風の強さの基準

風の強さ	高度 1000m の風速
弱風	3m/s 以下
並風	4 から 8m/s
強風	9m/s 以上

表3 直接吹き降ろしの風向範囲

測定局	高度 1000m の風向
桜島支所*	150° ~ 180°
黒神*	250° ~ 280°
有村	305° ~ 360° ~ 30°
赤水	70° ~ 120°

*桜島支所局と黒神局は文献 [8] の風向範囲を引用

表4 2013 年度の高濃度 SO₂ 事象発生要因の分類結果

測定局	(1)	(2)	(3)	(4)
桜島支所	16.7%	16.7%	50.0%	16.7%
黒神	57.1%	22.9%	5.7%	14.3%
有村	67.9%	17.9%	6.6%	7.7%
赤水	36.7%	29.1%	20.3%	13.9%
全局	56.9%	21.5%	11.1%	10.4%

(1) 直接吹き降ろし (2) 周回流 + 直接吹き降ろし
(3) 周回流 (4) その他・不明

5. 教材化

以上の研究成果を学校教育において利用してもらうために、桜島島内における高濃度 SO₂ 事象について小学生が理解しやすい教材として、図8のリーフレットを作成した。原図はカラーで、A3用紙に両面印刷して二つ折りにして使用する。リーフレットには桜島の静止画面中に噴煙流を矢印で示しているが、インターネットを介して提供している動画にアクセスして実際の挙動をみられるようにQRコードを載せている。小学生が3次元で事象をとらえやすいように、地形モデルを用いた写真も掲載している。最終ページには、この教材を使用する教員や保護者向けに少し詳しい解説を載せたり、関係資料を掲載しているホームページ [11] のQRコードも載せている。

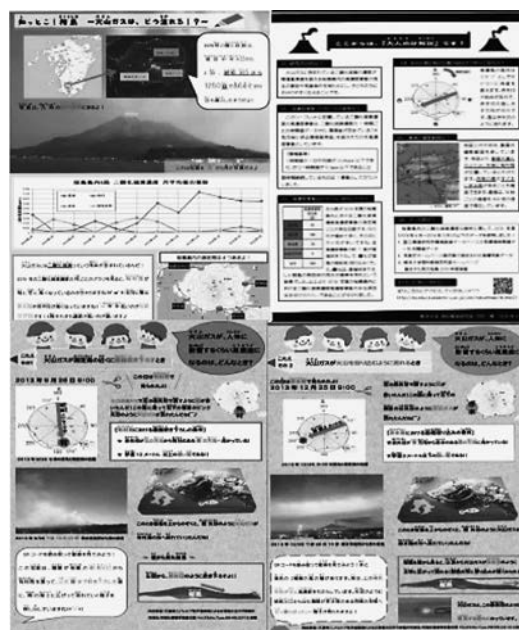


図8 桜島島内火山ガス防災教材リーフレット (上段表面、下段裏面としてA3用紙に印刷して、裏面を中折にする)

3章で述べた、2006年の桜島昭和火口噴火再開後の噴煙活動に関する解析結果の図面については、月ごとの風配図、降灰量や火山ガス濃度の分布図を教育用の素材として自由に使用できるように、ホームページ [12] を作成して、画像を提供している。今後、これらの素材を活用した教材や学習プログラムも提供していきたい。

6. おわりに

1章はじめに述べたように、火山の山頂付近から放出された高温型火山ガス (SO₂) の挙動は気象条件に大きく依存するため、作成したデジタルコンテンツやリーフレットは防災教育や火山の单元だけでなく、気象の单元でも利用可能である。また、酸性雨や微小粒子状物質 (PM_{2.5}) の主な原因物質である硫酸塩の排出源として、日本において火山は無視できない要因であることから、環境に関する学習との関連付けも可能である。また、本研究では桜島島内における高濃度火山ガスに着目したが、数十から数百 km のメソスケールの物質輸送を考えると火山ガスはよいトレーサとみなすことができる。大気汚染物質だけでなく、放射性物質が自由大気中に放出された場合の広域影響の理解にもつながると考えられる。メソスケールの火山噴煙・火山ガス輸送の解析と教材化については今後別報で報告したい。

謝 辞

桜島噴煙映像観測について垂水市役所にご協力いただきました。心より感謝申し上げます。2001年度から2011年度のSO₂濃度データを鹿児島県と鹿児島市よりご提供いただきました。関係各位にお礼申し上げます。本研究はJSPS科研費2450106および15K00924の助成を受けたものです。

参考文献・URL

- [1] 文部科学省：新学習指導要領（平成29年3月公示）
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/1383986.htm
- [2] 気象庁：過去の気象データ検索（高層）
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/>
- [3] 内田孝紀・大屋裕二：パッシブ粒子追跡方による三宅島火山ガス挙動の可視化，可視化情報学会論文集23, pp.58-65, 2003.
- [4] 鹿児島県：桜島の降灰に関する情報
<http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/>

- [5] 鹿児島地方気象台：県内の火山資料
http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/kazan_top.html
- [6] 鹿児島地方気象台：2011年（平成23年）霧島山爆発観測野帳 http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/sim_exp_2011.html
- [7] 国立環境研究所：大気環境時間値データのダウンロード https://www.nies.go.jp/igreen/tj_down.html
- [8] 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，Vol.11, pp1-25, 2014.
- [9] 環境省：大気汚染に係る環境基準
<http://www.env.go.jp/kijun/taiki.html>
- [10] 飯野直子・木下紀正・矢野利明：三宅島における高濃度火山ガス事象の地域特性，自然災害科学，Vol.23, No.4, pp.505-520, 2005.
- [11] 熊本大学理科教育研究室：桜島噴煙火山ガスに関する研究 <http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/volc/sakushowa/skjms02/>
- [12] 熊本大学理科教育研究室：GISでみる桜島噴火の活発化と防災 <http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/gis/sakurajima/>

URLは2017年9月28日に確認