阿蘇山起源のSO₂の高濃度時の気象状況

玉井 昌宏¹・國枝 桂子²

¹正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail:tamai@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大成建設株式会社 特殊構造設計室 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:knekik00@pub.taisei.co.jp

火山ガスの簡易なリスク評価法を開発することを目指して、ここでは九州の阿蘇山から放出される二酸化硫黄SO₂を対象として、外輪山西側の熊本平野における濃度変動特性と気象状況との関係を検討した。1日程度の時間スケールの変動成分が支配的であることから、24時間分の濃度時系列にクラスター分析を適用し、高濃度となった日を抽出し、各種気象観測データを分析した。その結果、東寄りの強い地衡風で地上風も昼間東寄りの強風となる東風連吹パターン、東寄りの比較的強い地衡風の下で、昼間の地上風が阿蘇山周辺では東寄り、熊本平野では西寄りになる地衡風補償流パターン、地衡風が弱く、広域海風が出現していると推測される海陸風パターンなど、SO₂の高濃度状況を発現させるいくつかの典型的な気象パターンを明らかにした。

Key Words : SO₂, Mt. Aso, volcanos, risk analysis, meteorological conditions, local winds

1. 目的

2014年の御嶽山や2015年の口永良部島新岳など火山の爆発的噴火が相次いでいるが、各地の火山活動が活発化しているように感じられる。爆発的噴火が生じるかどうかは別として、活動の活発化は火山ガスの噴出量を確実に増加させている。例えば、本研究において対象とする阿蘇山においても、2013年秋の活発化を境として、火山ガス噴出量は数倍に達しており、火口から20~30km程度離れた熊本市周辺地域においても、気象条件によっては環境基準値と同程度の二酸化硫黄SO₂濃度が観測されることもある。

火山噴出ガスの挙動に関する研究は種々実施されている。爆発的噴火を対象としたものとしては、1987年の桜島²⁾や2000年の三宅島³⁴⁾について、噴火に伴うガスの大量放出と各地で観測される濃度変動との関連性を検討したものがあつた。長く噴火活動が継続する桜島においては、火山周辺地域で観測されるSO₂の高濃度事象と気象状況との関連について検討したものもある。⁵⁶⁾しかしながら、こうした一過性の極端な事象や活発な活動が継続しているいくつかの火山を対象にしたものを除けば、研究成果は多いとは言えない。長らく目立った活動がなく、データの蓄積されていない火山も多く、そうした火山の様々な事象のリスクを評価しようという試み⁷⁾もない。

一方、大気汚染物質のリスク評価を目的とした研究も

極めて少なく、広く実用に供することのできる評価手法は皆無である。こうしたことから、筆者らは⁸⁹⁾地上風向の日変動特性により作成した気象シナリオを用いた、簡易な大気環境リスク評価法を提案している。この手法により種々の大気汚染物質の長期平均濃度が求められることを示している。加えて、瞬間的に放出された汚染物質の濃度期待値分布を計算して、この手法が原発事故のような一過性の極端事象に対しても利用可能であることを示している。¹⁰⁾

全国的な火山活動の活発化やそれに伴う火山ガスの噴出量の増加が見込まれることに鑑み、九州地域の阿蘇山の二酸化硫黄SO₂をターゲットにして、筆者らは上述の手法によりリスク評価を行うことを目指している。そのためには、噴火口からリスク評価対象地域に至るまでのSO₂の輸送シナリオ、中でも特に問題を引き起こす可能性のあるシナリオを明らかにしなければならない。本論では、大気汚染常時監視データやアメダスデータ等の各種気象観測データの分析により、阿蘇山外輪山西側の熊本平野においてSO₂が高濃度を示した時の気象状況を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

(1) 阿蘇山と周辺地形

図-1に阿蘇山とその周辺地形を示す。阿蘇山最高峰

図-1 阿蘇山周辺地形とアメダス観測点

の中岳は標高1506mであり、800～1000m程度の山々が連なる直径 20km 程度の外輪山に囲まれている。外輪山一帯を流域とする白川は外輪山西部を貫流し、熊本市街を通過して有明海に注いでいる。白川の河床の標高は外輪山からの流出地点で300～400m程度である。

本研究では、阿蘇中岳の西南西の方向約 27 km に位置する熊本県上益城郡益城町の益城町役場において観測された大気汚染常時監視データの SO_2 の濃度データを分析する。測定局の位置は図-1 の★印で示している。

益城町から概ね北西から南西方向の範囲に有明海や八代海が広がる。同町から海岸線までの距離は最短で約 20km であるが、熊本市西区付近には標高 665m の金峰山を擁する山地があり、また熊本市南側の宇土市にも標高 400m 程度の山々がある。これらにより益城町に流入する海風の風向は真西ではなく、南西や北西寄りになることが予想される。

(2) 用いるデータ

SO_2 濃度データには、益城町役場（大気汚染常時監視測定局コード 43443010）において溶液導電率法（高感度型）で測定された 1 時間値を用いる。このデータは国立環境研究所の「環境数値データベース」からダウンロードしたものである。気象データとしては、アメダス益城（観測所番号 86146）の風向風速の 1 時間値、熊本气象台（86141）の日積算全天日射量、福岡(82182)、鹿児島(88317)、潮岬(65356)の各气象台における海面更正気圧から計算される地衡風風速ベクトル、福岡气象台の高層観測の気温と気圧から算出した温位勾配を用いる。

阿蘇山火山防災連絡事務所が観測した阿蘇山からの

SO_2 放出量の時系列¹⁾を見ると、既述の通り、2013 年 11 月頃から噴出量が増加していることがわかる。ここでは、 SO_2 放出量が概ね一定であると仮定できそうな、2009 年 4 月 1 日から 2013 年 3 月 31 日までの 4 年間を分析対象期間とした。対象期間の中で、各種気象データあるいは SO_2 濃度データが内挿困難な程度で欠損している場合は日単位で除外した。これにより評価日数は 1426 日間となった。

(3) SO_2 噴出量についての考え方

火山ガス噴出量の定期観測の主たる目的は、その変化から火山活動の程度を推測することにある。¹⁰⁾従って、観測頻度もその活動状況の変動の時間スケールとの関係で定められていると考えられる。阿蘇山の火山ガスの日噴出量の観測頻度は回数程度であり、他の火山についても同様である。火山ガス噴出量はそもそも時間単位で観測されていない。噴出量は、 SO_2 濃度と地上観測風速の積のフラックスとして求められる。その濃度は自然光中の紫外線の SO_2 による吸収量により推定されるが、周辺気流場により揺動する噴煙ブルームの流軸を追いかけながら観測するという方法が用いられる。¹²⁾このような観測方法の制約から、日中の数時間内に回数程度計測され、その平均値が当該日の噴出量として採用されることになる。参考文献 1 のデータの変動が極めて大きいのは、そもそも上述のような観測方法が時間変動や日変動を議論できるほどの精度を持たないからである。繰り返しになるが、観測の目的は火山活動度の変動を推測することであり、時間や日といった短時間スケールでの変動を表示できるような観測データではない。月に 1～2 回程度

の頻度で観測された噴出量が大きく変動していなければ、火山活動度がそれほど変化していないと解釈されるということである。

一方、噴出量の正確なデータがない状況で、周辺地域で観測された SO_2 濃度の 1 時間値を用いて、気流場による SO_2 の輸送について検討した研究例は少なくない。参考文献 2, 3, 6, 10 も同様であり、火山ガス研究の一つの常とう手段になっていると考えられる。こうした既往の研究に倣い、正確な噴出量は不明ながらも、概ね活動状況に変動がない期間を選択することによって、周辺地域において観測される SO_2 濃度の変動が、主として気流場の影響によるものであると仮定できると考えた。

総務省統計局の「世界の統計 2016」によれば、我が国の硫黄酸化物の 2012 年の年間排出量は 93.7 万トンであり、そのうちの概ね 3 分の 1 が移動発生源からのものである。平成 28 年度環境統計集¹³⁾の 6 章大気環境のデータを参照すると、熊本県内のばい煙施設数は全国のその 1.3% 程度である。また、一般財団法人自動車検査登録情報協会¹⁴⁾の県別の自動車保有台数データによれば、全国に対する熊本県の自動車保有台数の割合は概ね 1.6% 程度となっている。参考文献 1 より、本研究の対象としている期間の阿蘇山からの SO_2 日噴出量を 500t とすれば、年間噴出量は 18.3 万トンと計算される。これらの量の比較から、阿蘇山火口より 20km 程度に位置する益城町において観測される SO_2 については、その主たる発生源が阿蘇山であると仮定しても問題はないと判断した。

(4) 地衡風と温位勾配の計算方法

地衡風の計算方法を以下に示す。海面気圧が線形に変化すると仮定して、次式を用いて各気象台の海面更正気圧 p_i の空間勾配を計算する。

$$\begin{pmatrix} \Delta p / \Delta x \\ \Delta p / \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p_2 - p_1 \\ p_3 - p_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $(X_i, Y_i)(\text{m})$ ：第 i 気象台の第 53 UTM 座標の座標値である。地衡風風速成分は次式より算出される。

$$u = -\frac{1}{f\rho} \frac{\Delta p}{\Delta y} \quad v = -\frac{1}{f\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (2)$$

ここに、 $(u, v)(\text{m/s})$ ：地衡風ベクトル、 $\rho(\text{kg/m}^3)$ ：地表大気密度、 $f(=2\Omega \sin \phi)$ ：コリオリパラメータ、 Ω ：自転角速度 (rad/s)、 ϕ ：緯度である。ここで、緯度はアメダス益城ポイントの緯度を用いる。アメダス益城ポイントの密度は、上記の 3 つの気象台の海面高さの大気密度 ρ_i を線形内挿することにより求める。また、 ρ_i は次式より算出する。

$$\rho_i = \frac{1.239p_i}{1.0 + 0.00367t_i} \quad (3)$$

海面気温 t_i ($^{\circ}\text{C}$) は、各地点の 925 hPa 面の高度 $z_{925i}(\text{m})$ と

気温 t_{925i} ($^{\circ}\text{C}$) を用いて、次式により計算される。

$$t_i = t_{925i} + 0.0065z_{925i} \quad (4)$$

温位勾配の計算には、福岡気象台の毎日 21 時の高層観測データを用いた。温位勾配は地表付近から高度 1500m 付近までの温位 $\theta(\text{K})$ の回帰直線により求めた。

3. 結果と考察

(1) SO_2 濃度と気象要素の時系列特性

SO_2 濃度と各種気象要素の時間変動特性とそれらの関係を検討するために、図-2 に 2009 年 10 月 5 日から 26 日までの SO_2 濃度 $C(\text{ppb})$ 、アメダス益城の地上風向 WD、地上風速 WS(m/s)、熊本気象台の日積算全日射量 SR(MJ/m^2)、地衡風風速ベクトル UG(m/s)、VG(m/s)、温位勾配 TG(K/m) の時系列を示す。横軸は 5 日午前 0 時を 0hr とする時刻である。アメダス地上風向は北北東を 1、北を 16 とする右回りの 16 風向である。風向 0 は風速が小さく風向を決定できなかったことを示している。また、Time=48~72hr の間で SR が、また、Time=72hr 付近で UG、VG のデータが欠落しているが、これはそれぞれが欠測であったことを示している。

図中の長方形はいくつかの特徴的な SO_2 濃度変動や地上風向変動が観測された日を示している。④では SO_2 が昼間高濃度、夜間低濃度となる変動を示している。地上風向については、夜間に北東より、昼間に南よりの風が観測されている。また、地上風速についても夜間と昼間が比較的大きく、風向の変化する時間帯に風速が小さくなっている。この日の日積算全日射量が比較的大きく、地衡風が弱いことから、これらの時系列変動特性は海陸風交替を示していると推測される。風向が海風へと交替した時間以降に濃度が急激に増加しており、地上風の変動が SO_2 の輸送に強く影響していることがわかる。②も同様に地上風向に海陸風交替が観測されるが、濃度のピークは④より低くなっている。地衡風風速は④が東より 10m/s であるのに対して、②は弱風となっている。

①の Time=24~72hr の濃度上昇時において、地上では北東よりの風が連吹しており、風速値はピーク時で 10m/s 程度と大きい。地衡風ベクトルの風向は東であり、濃度がピークとなった時間帯には 20m/s と強い風になっている。日積算全日射量は比較的小さい。過去の天気図を参照すると、この日は台風 18 号の接近による荒天日であったことがわかった。②や④と異なり、2 日間程度の時間スケールを持つ変動であることがわかる。地上風向が阿蘇山の方角の北東であること、地衡風の風向が東よりであることなどから、台風の強い東よりの風により噴火口から益城町まで SO_2 が輸送されたものと推測される。⑤も地衡風は比較強い東風の連吹であったが、 SO_2 濃度の変動傾向は①と異なり、地衡風風速が 20m/s

図-2 SO₂濃度と各種気象要素の時系列 (2009年10月5日～26日)

程度でピークとなった夜間に短期間高濃度が現れている。①と比較して温位勾配が大きいこと、地表付近の風速が5m/sと相対的に小さいことから、高濃度の気塊が地上付近にまで拡散されにくかったことが高濃度状況が短期間になった原因であると考えられる。③はSO₂濃度の日変動が小さかった日の一例である。日積算全天日射量も相対的に大きく、地衡風も微弱であったが、地上では北西よりの風が連吹したことで、濃度が終日低くなったと考えられる。①のように2日程度の時間スケールを持つ濃度変動も認められるが、総じて1日以内の変動が重要であることがわかる。以下では、1日単位の濃度変動時系列を対象として検討を進める。

(2) 日変動パターン

ここではクラスター分析を用いて、4年間の各日をSO₂濃度の24時間分の時系列によってグループ分けする。クラスター分析の変数は各日24時間分のSO₂濃度の1時間値である。同分析ではこの全ての変数を用いてクラスター中心と各データとのユークリッド距離を求める。各日の濃度ピーク値の大半は10ppb以下であり、高濃度日の頻度は低い。例えば、図-2の④のように60ppbを超えるような日は、調査対象期間で数回発生する程度である。そのため、日数が極端に少ないクラスターが生じることになる。そこで、本研究では日数が3日以下のクラスター

が発生した場合、それらの日を除外しながらクラスター分析を繰り返した。クラスター数を5として、この作業を行った結果、3回目以最も少ない日数が13日となった。そこまでに除外された日数は8日であった。

クラスター分析の結果を図-3と図-4に示す。図-3は各クラスターの平均値と標準偏差の24時間の時系列である。なお、同図では各クラスターの時系列がなるべく重ならないように、横軸の時間を若干ずらして示している。クラスター1から5の各クラスターの日数は、それぞれ413日、13日、831日、51日、110日であった。

クラスター1および3は1日を通して低濃度であり、この2つのクラスターで評価対象日の87%を占める。つまり大体の日は低濃度であり、なんらかの特異な気象条件が生じた場合にのみ高濃度となることが予想される。クラスター2は日変動が大きく、14～18hrにおいて相対的に高濃度が生じている。クラスター5では12～14hr頃に高濃度になっており、クラスター2より若干早い時間帯に高濃度の状況が発生している。クラスター4の平均濃度は1日を通して6～10ppbで高くないものの、他のクラスターに比べて1～10hrの時間帯に濃度が高い。

図-4は、除外した8日分のSO₂濃度の時系列である。2012年11月3日はクラスター2の変動に似ているがピークの濃度レベルが50ppb程度とクラスター2より大きくなっている。2012年9月4日は、クラスター2と同様な

図-3 各クラスターの濃度変動の時系列特性

図-4 除外された日の濃度変動特性

濃度レベルにあるが、ピーク濃度を示した時間帯が 12～13 hr とクラスター2 より早くなっている。2009 年 7 月 30 日、2009 年 10 月 22 日、2012 年 3 月 3 日、2012 年 10 月 8 日、2013 年 1 月 31 日についても 12～13hr にピーク濃度を示している。どちらかといえば、図-4 のクラスター5 の変動傾向に類似しているが、ピーク値のレベルが 60～75 ppb と、クラスター5 と比較して非常に大きい。2012 年 3 月 30 日については 21～24hr に濃度が増加しており、他の時系列とは異なる特徴を示している。このように、除外した 8 日分については濃度値の極めて大きい日が含まれていることから、これらを一つのグループとして扱い、以下ではクラスター6 と呼ぶこととする。

図-3、図-4 から、SO₂濃度が非常に高くなるのは、夜間低濃度で昼間高濃度となるクラスター2 や 6 のような濃度変動パターンであることがわかる。このことから、1 日単位で分析を行うことの意味が理解される。図-3 より、クラスター2 の Time=14～18hr の濃度値が、他のクラスターのそれらと比較して有意に大きいことがわかる。また、既述のとおり、クラスター6 には、ピーク

濃度が非常に高い日が多く含まれている。そこで、以下では、高濃度状況が発生した日として、クラスター2 と 6 について、これらに含まれる日の気象状況について検討する。

(3) 高濃度クラスターの気象状況

図-5 にクラスター6 に分類された日の SO₂ 濃度 C(ppb)、アメダスの地上風向 WD、地上風速 WS(m/s)の時系列、各日 9hr と 21hr の地衡風ベクトル UG(m/s)、VG(m/s)を示す。図-6 は熊本の日積算全日射量 SR(MJ/m²)の相対頻度分布とクラスター6 の各日の値を示している。この相対頻度分布は、クラスター6 の各日とその前後の日の過去 30 年間の日積算全日射量の相対頻度分布である。例えば、2009 年 7 月 30 日であれば、7 月 29～31 日の過去 30 年間の日積算全日射量の相対頻度分布となっている。また、図-7～9 は各種気象要素の分析対象期間全体の相対頻度分布とクラスター6 の各日の値を示している。図-7、8 は各日 9hr の地衡風風向と風速、図-9 は各日 9hr の温位勾配 TG(K/m)である。これらの図中のアルファベットは、

図-5 クラスタ6のSO₂濃度と風向風速時系列

図-6 クラスタ6の各日の日積算全日射量とその相対頻度分布

図-5のそれに対応している。

図-5の地衡風の風速ベクトルUGとVG、図-7から、地衡風風向によって、クラスタ6が大きく二つのグループに分類できることがわかる。すなわち、東寄りの地衡風となっているもの、つまり図-5の(a), (b), (c), (f), (g)とそれ以外である。前者はさらに地上風向WDの変動特性から、一日中東寄りであった(c), (f)と大きな風向変化の見られた(a), (b), (g)に分類できる。

図-5の中でSO₂が最も高濃度になったのは(c)2012年3月3日、次いで高濃度なのが(f)2012年10月8日であった。図-8より(c)の地衡風風速は20m/s程度であり、上位5%程度の相対的に大きい値であることがわかる。(f)の地衡

風風速は14m/s程度であり、上位10%程度である。図-9より(c)と(f)の温位勾配は、いずれも0.002K/m程度で相対的に小さい。このように、強い東北東の地衡風の連吹によって、地上風も東風になり、これによって高濃度状況が出現したと考えられる。図-10に図-5(c)の日の昼間の地上風の時間平均ベクトルを示す。このベクトルは、13～15hrの時間帯に図-1に示したアメダスポイントにおいて観測された地上風の風速ベクトルを、単純に平均化することにより求めた。同図より、アメダス益城周辺地域において北東寄りの強い地上風が観測されていることがわかる。しかしながら、海岸線付近では風速ベクトルは小さく、また風向もまちまちである。一方、阿蘇山外輪

図-7 地衡風風向の頻度分布とクラスター6の値

図-8 地衡風風速の頻度分布とクラスター6の値

図-9 温位勾配の相対頻度分布とクラスター6の値

山内の地域においては、中岳山頂付近の風速は小さく、カルデラ底部の観測地点において風速が大きくなっている。従って、平面的にも高度方向にも一様に強い風が吹いているわけではない。アメダス益城付近の強い東風が、上空の地衡風が乱れにより地上付近まで輸送されたものであるのか、あるいは阿蘇山の外輪山からのおろし風¹⁵⁾のようなものであるかはわからない。図-6より(c), (f)は $SR=15\sim17MJ/m^2$ 程度であり、同時期の日射量の上位20～30%の大きさとなっている。両日ともに、夜間には低濃度で昼間高濃度になっており、阿蘇山火口と益城町の間の1000m程度の標高差の鉛直方向輸送に日射が影響していることは明らかである。こうした気象状況を以下では東風連吹パターンと呼ぶことにする。

(a), (b), (g)も北東寄りの地衡風となっているが、(c), (f)より地衡風風速は小さく、また、温位勾配は(c), (f)よ

図-10 2012年3月3日 (図-5(c))

図-11 2012年11月3日 (図-5(g))

図-12 2012年9月4日 (図-5(e))

り大きくなっている。これらによって、上空の風の影響が変化して、地表付近で風向の交替が発生したと考えられる。(a)は早朝に地衡風が西寄りであったことから、この時間帯の地上風向も北西寄りになっている。Time=9hrに地衡風が東寄りの風に転換したことで、Time=6～12hrのWDは北東と北西の間で変動している。その後、午後の時間帯には北西寄り、夕刻以降には南西寄りに変化している。SO₂濃度は12hr頃にごく短時間に大きくなっているが、この時間帯の風向は北東と北西の間で変動して

図-13 クラスタ-2の SO_2 濃度と風向風速時系列

いる。(b)は北東の風から、日中に南寄りの風へと変化している。また、WSについても、北東と南寄りの風向の時間帯に風速が大きくなっている。(g)においては午前中北東寄り、Time=12~16hrに北西、その後北東寄りに戻っている。地上風向が北西寄りの時にピークが表れているが、それ以前の北東寄りの時間帯から濃度が増加している。図-11は、(g)の昼間の地上風の13~15hrの時間平均ベクトルである。海岸域では西寄り、熊本平野内では概ね2m/s程度の北西寄りの風となっている。一方、阿蘇山の外輪山内の地域では、地衡風に近い風向となっている。地衡風が東寄りで5~10m/sと大きいことから、

熊本平野の北西寄りの風が海風であるとは考えにくい。

(d), (e), (h)については、図-7より地衡風の風向は西寄りになっているが、図-8より(e), (h)についてはその風速はいずれも小さい。図-6の相対頻度分布の中での位置から、これら2日の日積算全日射量が相対的に大きいこともわかる。これらの条件から、図-5の(d), (e), (h)のWDの変化は、夜間東寄り、昼間西寄りとなる海陸風交替を示していると考えられる。図-12は図-5(e)の昼間の時間平均の地上風速ベクトルであるが、熊本平野中央部では西寄り、平野東部では北西寄りの風になっている。外輪山内の風速ベクトルが2m/s程度の西寄りの風

図-14 地衡風風向の頻度分布とクラスター2の値

図-15 地衡風風速の頻度分布とクラスター2の値

図-16 温位勾配の頻度分布とクラスター2の値

になっているのが、図-11 と大きく異なる点である。図-8 より(e), (h)の地衡風風速と、図-12 の地上風風速は同程度の規模であり、同図の地上風況が広域的な海風であるものか、地衡風の影響によるものかについては判断できない。しかしながら、少なくとも熊本平野内の昼間の地上風速ベクトル分布は海陸風によるものであると推測されることから、こうした状況を海陸風パターンと呼ぶことにする。このパターンでは、 SO_2 濃度は海風時に大きくなっているが、昼間に SO_2 を阿蘇山より益城町方向に輸送する東寄りの風の要素が見当たらないのが特徴である。

(d)の SO_2 濃度レベルはピークが 20ppm 程度とそれほど高くない。濃度変動特性が他のクラスターと全く異なることから除外されたと推測されることから、以下では検

討対象外とする。

図-13 は、図-4 においてクラスター2 に分類された日の SO_2 濃度 $C(\text{ppb})$ 、アメダス益城の地上風向 WD、地上風速 $WS(\text{m/s})$ の時系列、各日 9hr と 21hr の地衡風ベクトル $UG(\text{m/s})$ 、 $VG(\text{m/s})$ を示す。図-14~16 は各種気象要素の分析対象期間全体の頻度分布とクラスター2 の各日の値を示している。既述のクラスター6 の分析により、地衡風ベクトルが風況パターンに重要であることが明らかになったことを踏まえて、以下では UG 、 VG の時系列に注目しながら気象状況のパターンを検討する。

図-13 の(l)は、図-5 の(c), (f)と同様に東寄りの地上風が連吹しているが、地衡風も東北東 15m/s 程度、 $TG=0.003\text{K/m}$ と比較的小さくなっている。図-17 は、図-13(l)の 13-15hr の地上風ベクトルであるが、図-10 に類似していることが確認される。この日についても、既述の地衡風が東寄りの強風で地上風も日中東風となる東風連吹のパターンになっていると判断できる。このような地上風向ベクトル分布はクラスター2 の他の日には見られなかった。クラスター6 の(c), (f)とクラスター2 の(l)から、この地上風況パターンが形成されるのは地衡風風向 3~4、風速 14~20m/s、温位勾配 0.002~0.003K/m であることがわかる。

図-13(k)についても、10m/s 程度の東寄りの強い地衡風となっているが、アメダス益城の風向は昼間に西寄りになっている。この時の 13-15hr の時間平均された地上風ベクトル分布を図-18 に示す。阿蘇山外輪山内の地上風向は地衡風同様に北東寄りになっているが、熊本平野内では北西から西寄りの風となっている。また、両地域間の風速値に大きな差異がないこともわかる。この傾向は図-11 のそれと同様であるが、クラスター6 においては、図-5 の(a), (b), (g)がこのような地上風向ベクトル分布を示した。これらから、このパターンが生じるのは地衡風風向 3~4、地衡風風速 5~12m/s、温位勾配 0.002~0.003K/m 程度であると考えられる。このグループでは、既述の通り、地衡風ベクトルの方向が想定される海風の風向と逆になっており、その風速も比較的大きい。加えて、温位勾配も相対的に小さいことから、この状況下で海風は発生しにくいのではないかと推測される。従って、この地上風況が形成された要因として、阿蘇山外輪山を越えてきた東寄りの地衡風により、熊本平野内に地上付近は西寄り、上空に東寄りの風向となる停滞渦が形成されたこと、あるいは、地衡風による上空の強い東寄りの風への連行が生じて、その補償流として西寄りの地上風が形成されたことが考えられる。このパターンは、図-5(b)や(g)と同様であると考えられるが、これらを地衡風補償流パターンと呼ぶことにする。

クラスター2 において最も多く観られる地衡風風速ベクトルの変動パターンは、9hr において東寄り 5~10m/s

程度であるが、21hr ではそれが減衰あるいは西寄りの風に転換しているパターンである。図-13 の(b), (d), (e), (f), (m)がこれに相当する。アメダス益城の WD は、いずれも海陸風交替のような変動傾向を示していることがわかる。図-19 は、図-13 の(b)の昼間の地上風速ベクトル分布を示している。図-19 から標高の高い阿蘇山外輪山内の地域では 3m/s 程度の西寄りの風となっているが、熊本平野では 2~3m/s 程度の西寄りの風となっていることがわかる。このグループの他の日においても、地上風の風速値や阿蘇山付近の風速ベクトルに多少差異はあるものの、概ね類似した風速ベクトル分布を示した。地衡風の変動特性が類似しているにも拘らず、風速ベクトル分布に若干の差異が生じるのは、地衡風の算定方法に起因していると考えられる。既述の通り、地衡風ベクトルは、福岡、鹿児島、潮岬の各気象台の海面更正気圧から計算されており、分析対象地域周辺の局地的な気圧分布を反映しているわけでないからである。図-19 について、地衡風が弱くなって広域海風が発生しているとも解釈できるし、分析対象地域付近に西寄りの風が吹くような局所的な気圧配置となって、全体的に西よりの風になったとも考えられる。図-14~16 より、このグループの地上風況が発生した条件は、9hr における地衡風風向 3~4、風速 5~10m/s であるが、温位勾配が 0.005~0.008K/m と大きい。このグループのいずれの日も 9hr 前後には地衡風が東寄りであり、地上風も東寄りの時間帯がある。しかしながら、SO₂ 濃度の上昇は、午後の地上風が西寄りとなったときに生じている。東寄りの地衡風によって、上空を西へ輸送された SO₂ が昼間の海風循環によって地表付近に輸送されたと推測される。

図-15 より、クラスター2 において地衡風風速が相対的に小さいのは、(a), (c), (g), (h), (i), (j)の日であり、いずれも 4m/s 未満であることがわかる。地衡風変動の大きい(a)を除いて、地上風向 WD は海陸風交替が発生していることを示していると考えられる。また、地衡風風向は(a)が北北西、それ以外は南東から南西の間に分布している。TG はいずれの日も 0.003~0.005K/m となっている。図-20 は、図-13 の(i)の日の昼間の地上風ベクトル分布である。熊本平野には海風が発達しており、外輪山内の領域でも西風が吹いている。地衡風に西風成分がないにも拘らず、アメダス益城の風向は夜間にまで海風が継続していることから、広域的な海風が発生していると考えられる。(a)を除いて概ね同様の地上風況が観察された。SO₂ 濃度は昼間の海風期に増加しているが、SO₂ がどのような経路で輸送されたかについては不明である。(a)については、WD は北を中心に北東と北西の間を変動しているが、これは北寄りの地衡風の影響である。昼間に SO₂ 濃度が増加しているが、この日の輸送メカニズムについては不明である。

図-17 2012年9月25日 (図-13(l))

図-18 2012年9月1日 (図-13(k))

図-19 2010年2月23日 (図-13(b))

図-20 2012年7月9日 (図-13(i))

SO₂濃度と気象状況との関係を検討した既往の研究は、いずれも気圧配置や季節風といった比較的大きな空間スケールの気流場を検討したものである。²³⁵⁶¹⁰本論の分析により、様々な局地風がSO₂の輸送に強く関与していることが示唆された。

4. 結論

阿蘇山から噴出したSO₂のリスク評価法を開発するにあたり、局地風による輸送シナリオを明らかにするための前段階として、SO₂高濃度時の気象状況について検討した。主要な結果を以下に示す。

1) 益城町役場において観測された大気汚染常時監視データのSO₂濃度の1時間値データを用いて、阿蘇山からのSO₂の放出量が概ね一定とみなせる期間を対象として、濃度変動時系列と各種気象要素との関係を検討した。

2) SO₂濃度変動の時系列が夜間低濃度、昼間高濃度という1日以下の時間スケールの変動成分が支配的であったことから、24時間の濃度変動時系列に対して、クラスター分析を適用して、相対的に高濃度なる日を抽出した。

3) SO₂が高濃度となるいくつかの典型的な気象パターンがあることがわかった。第1に地衡風が強い北東よりの風であり、熊本平野内の昼間の地上風ベクトルが東寄りになる東風連吹パターン、第2に地衡風が比較的強い東風で、熊本平野の昼間地上風ベクトルが西寄りになる地衡風補償流パターン、第3に東寄りの地衡風が衰退する状況下で、昼間地上風が海風となるパターン、第4に地衡風が弱く、海陸風交替が発生、昼間は広域海風が形成されたと考えられる海陸風パターンの4つである。

4) SO₂が高濃度となる日の気象観測データの状況は概ね明らかとなったが、気流構造が明らかになったわけではなく、SO₂の輸送メカニズムも推測の域を出ない。こうした問題については、今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究は平成28年度科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究、課題番号16K14330）の補助を受けた。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 阿蘇山火山防災連絡事務所、最近のガス観測
<http://www.jma-net.go.jp/aso/gas/gas.html>
- 2) 鶴野伊津志、若松伸司：桜島からの火山ガスブリュームの輸送・拡散過程の解析、土木学会論文集、No.552/VII-1, p.53-63, 1996.
- 3) 松本利恵、唐牛聖文、米持真一、村野健太郎：三宅島火山ガスによる高濃度二酸化硫黄および硫酸性強酸性雨の観測、大気環境学会誌 37(6), pp.357-373, 2002.
- 4) 西沢匡人、茅野政道：メソスケール気象モデルと結合した大気化学物質輸送モデルの開発と三宅島火山ガスの大気拡散への適用、大気環境学会誌, 39(1), pp.31-42, 2004.
- 5) 木下紀正、西之園雅靖、瓜生洋一朗、金柿主税：櫻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明、鹿児島大学教育学部研究紀要、自然科学編, 50, pp.11-27, 1999.
- 6) 坂本昌弥、木下紀正：2001年の桜島における火山ガス高濃度事象、鹿児島大学教育学部研究紀要、自然科学編, 56, pp.11-20, 2005.
- 7) Jenkins, S. F. et al.: Rapid emergency assessment of ash and gas hazard for future eruptions at Santorini Volcano, Greece, J. of Applied Volcanology, 4:16, 2015.
- 8) 玉井昌宏、川原大典、有光剛：大気環境リスク評価のための気象シナリオ日の選択方法、環境工学研究論文集、第47巻, pp.515-525, 2010
- 9) 玉井昌宏、澤井健志：瞬間的に排出された大気汚染物質の気象シナリオ日を用いた長期平均濃度評価、土木学会論文集G(環境), Vol.69, No.7, III_195-III_204, 2013.
- 10) 今村修、鶴田雄二、山野耕一：熊本県下のSO₂高濃度出現の原因について、熊本県衛生公害研究所報第15号, pp.32-34, 1985.
- 11) 飯野秀樹、小山寛、内田東、佐藤孝久、高松政美、後小路義弘、山下隆丞：阿蘇山の二酸化硫黄放出量算定における地形の影響を受けた風特性について、第4回阿蘇火山の集中総合観測報告書, 2009.
- 12) 齋藤政城、松島健、松尾綱道、清水洋：阿蘇山中岳火山の二酸化硫黄および二酸化炭素ガス放出量の測定、九大理研報（地球惑星）、22巻2号, pp.51-62, 2007.
- 13) <http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/>
- 14) <https://www.ainia.or.jp/publish/statistics/number.html>
- 15) 黒瀬義孝、大場和彦、丸山篤志、真木太一：局地風「阿蘇おろし」の特徴、農業気象, Vol.58(2), pp.93-101, 2002,

(2016.5.20 受付)

METEOROLOGICAL CONDITIONS WHEN CONCENTRATION OF SO₂ ERUPTED FROM MT. ASO IS HIGH IN SURROUNDING AREAS

MasahiroTAMAI and Keiko KUNIEDA

In order to develop a simple risk evaluation method for SO₂ erupted from Mt. Aso in Kyushu district, west Japan, relationships between SO₂ concentration variations observed at a point 20km east from the crater of the mount and some meteorological observation data were examined. By using cluster analysis, days when observed SO₂ concentration were relatively high, were selected from the target period and the meteorological data of the days were analyzed. Some typical meteorological patterns which can cause high SO₂ concentrations were clarified.