

## &lt;報文&gt;

奄美地域におけるPM<sub>2.5</sub>の発生源解析に関する調査研究\*

井料 良輔\*\*・山元 広大\*\*・繩手 雅宗\*\*・梅津 由季\*\*・長野 旬一\*\*・松岡 洋一郎\*\*

キーワード ①微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) ②奄美地域 ③大気環境 ④後方流跡線解析 ⑤諏訪之瀬島

## 要旨

奄美地域における微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) の発生源把握を目的とし、2022年度から2024年度に実施した奄美と霧島のPM<sub>2.5</sub>の質量濃度および成分分析の結果を解析した。その結果、奄美のPM<sub>2.5</sub>質量濃度は年間を通して霧島に比べて低く、春季に高く夏季に低い傾向があった。主要なイオン成分はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>であった。奄美の2022年度夏季はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が高かったことから、火山活動または大陸由来の二次生成粒子の影響が示唆された。Pb/Zn比やAs/V比の解析から、大陸起源の影響は夏季には弱く、冬季から春季にかけては強いことが分かった。また、奄美の自動測定機による連続測定から、諏訪之瀬島の火山活動がPM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度の上昇に影響を与えた事象や越境移流による高濃度事象が確認された。

## 1. はじめに

日本国内のPM<sub>2.5</sub>質量濃度は、国内外における人為的発生源対策の取り組みにより、近年全国的に低下傾向にあるが<sup>1)</sup>、依然として黄砂や大気汚染物質等の越境移流により一時的にPM<sub>2.5</sub>質量濃度が高くなる事例が見られる。また、火山の噴火による一時的・局所的なPM<sub>2.5</sub>高濃度事例も報告されている<sup>2)</sup>。

当県では、離島地域住民の健康への影響を未然に防止するため、奄美市に大気測定局を設置し2022年度から測定を開始した。さらに奄美地域のPM<sub>2.5</sub>の実態を把握するため、PM<sub>2.5</sub>のフィルタ捕集を行い、成分分析を実施している。本報では、2022年度から2024年度に実施した奄美の成分分析結果について、県本土の霧島との比較を行った。また、奄美の自動測定機によるPM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>2</sub>濃度の変動について考察した。

## 2. 調査方法

PM<sub>2.5</sub>の発生源把握を目的とした成分分析調査とPM<sub>2.5</sub>質量濃度のバックグラウンドレベルの把握を目的とした自動測定機による調査を実施した。

## 2.1 調査地点

調査地点は、図1に示す常時監視を行っている奄美局と比較対象として県本土の霧島局を選定した。奄美局は、県本土(桜島)から南に370kmに位置しており、北側には、諏訪之瀬島や桜島など現在も活発に活動を続ける複数の

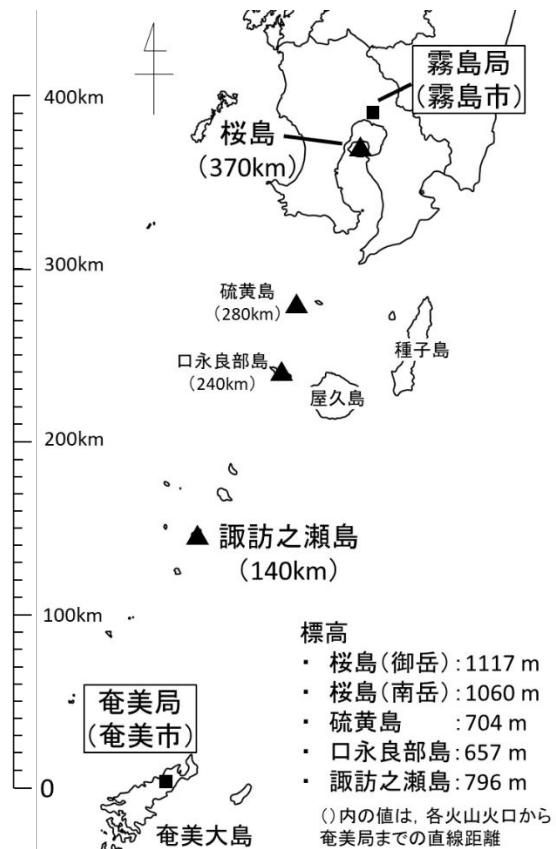


図1 調査地点と周辺の火山

火山が存在している。霧島局は、県中央部に位置しPM<sub>2.5</sub>成分分析の常時監視で2013年度から毎年度調査を実施している地点である。

\*A Study on the Sources of PM<sub>2.5</sub> in Amami Region

\*\*Ryosuke IRYO, Kodai YAMAMOTO, Masakazu NAWATE, Yuki UMEZU, Junichi NAGANO, Yoichiro MATSUOKA (鹿児島県環境保健センター) Kagoshima Prefectural Institute for Environmental Research and Public Health

## 2.2. 成分分析調査

調査期間を表1に示す。2022年度は夏季と冬季の2季節、2023年度、2024年度は4季節調査を行った。調査期間はおよそ14日間とした。

表1 調査期間

地点	季節	2022年度	2023年度	2024年度
奄美	春		5/14~5/27	5/9~5/22
	夏	7/22~7/28*	8/24~9/6	7/2~7/15
	秋		10/18~10/31	10/17~10/30
	冬	2/8~2/21	1/18~1/31	1/18~1/31
霧島	春		5/12~5/25	5/9~5/22
	夏	7/30~8/12	7/20~8/2	7/18~7/31
	秋		10/20~11/2	10/17~10/30
	冬	1/19~2/1	1/19~2/1	1/16~1/29

\* 台風による、捕集停止のため調査期間は7日間。

PM<sub>2.5</sub>の捕集および分析は、環境省が定める環境大気常時監視マニュアル第6版<sup>3)</sup>および大気中微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)成分測定マニュアル<sup>4)</sup>に従って実施した。

試料は、0時から24時の1日単位で、PM<sub>2.5</sub>サンプラー(Thermo Scientific社製、FRM-2025i)を使用して吸引流量16.7L/minでPTFEフィルタ(PALL社製、Φ47mm)に捕集した。分析までの間マイナス20°Cで冷凍保管した。質量濃度は、室温21.5±1.5°C、相対湿度35±5%の条件下で秤量した値から算出した。

イオン成分の分析には、PMP素材のサポートリングを除去したフィルタの半分を用いた。これを超純水10mLに浸漬し、20分間の超音波抽出を行った。この溶液をイオンクロマトグラフ(Thermo Fisher SCIENTIFIC社製、Integrion RFIC)により分析しCl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>の8イオン成分を定量した。

無機元素成分の分析には、同様にサポートリングを除去したフィルタの残り半分をPTFE製容器に入れ、硝酸7mL、過酸化水素1mL、およびフッ化水素酸2mLを添加した。これをマイクロウェーブ分解装置(Milestone社製、ETHOS EASY)を用いて加熱分解した後、フィルタを除去し、液量が約0.1mLとなるまで加熱蒸発させた。得られた残渣を5%硝酸水溶液15mLで回収し、最終的に50mLに定容した。この溶液をICP-MS(Agilent社製、Agilent 7900)により分析しPb、Zn、As、Vの4元素を定量した。

## 2.3 自動測定機による調査(奄美)

奄美における2022年4月から2025年3月までのPM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>自動測定機による連続測定データを使用した。PM<sub>2.5</sub>質量濃度測定はβ線吸収法自動測定機(紀本電子工業製、PM-712)、SO<sub>2</sub>濃度測定は紫外線蛍光法自動測定機(紀本電子工業製、SA-731)を用いて実施した。

## 2.4 後方流跡線解析

後方流跡線は、米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)のHYSPLIT Modelを使用して作成した。起点は高度1000mで24時間～72時間さかのぼって計算した。

## 3 成分分析調査の結果および考察

### 3.1 PM<sub>2.5</sub>質量濃度、イオン成分濃度

PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびイオン成分濃度の季節別平均を図2に示す。

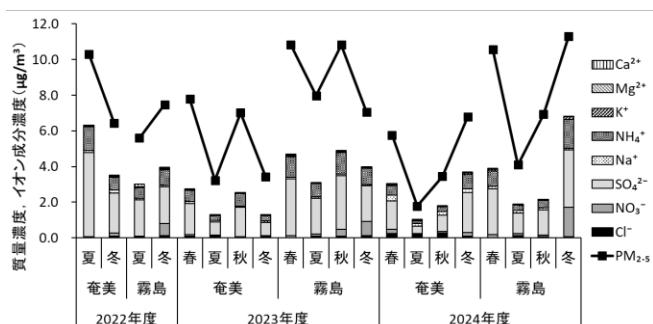


図2 PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびイオン成分濃度季節別平均

#### 3.1.1 PM<sub>2.5</sub>質量濃度

2023年度、2024年度におけるPM<sub>2.5</sub>質量濃度およびイオン成分濃度は、年間を通して奄美が霧島に比べて低く、同様の変動パターンを示した。また、両地点とも、春季に高く夏季に低い傾向があった。なお、奄美の2022年度夏季は台風到来により通常の捕集環境と異なることや調査期間が7日間と短いことから、霧島との比較は難しいが、冬季は2023年度および2024年度と同様に奄美が霧島に比べて低かった。

#### 3.1.2 イオン成分濃度

イオン成分は、両地点いずれの季節においてもSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>が大部分を占めていた。なお、海塩性SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は、無視できる値であった。特に奄美の2022年度夏季はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が高かったことから、二次生成による影響が考えられた。奄美地域には、影響を与える規模の人为的な二酸化硫黄の発生源が考えにくいため、自然由来(火山)または大陸由来の影響が示唆された。

また、奄美のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は、霧島に比べ季節間で大きな変動は見られなかった。硝酸塩は気温が高い夏季はガス態に分配し、気温が低い冬季は微小粒子態に多いといった季節変動がある<sup>5)</sup>。奄美の2022年度から2024年度の調査期間中における冬季の日平均気温は、それぞれ13.0°C～20.6°C、11.5°C～20.5°C、12.1°C～17.6°Cであったことから奄美においては、調査期間中の気温が高かった影響で硝酸塩がガス態に分配したと考えられる。

### 3.1.3 PM<sub>2.5</sub>のイオン成分割合

2022年度におけるPM<sub>2.5</sub>質量濃度およびイオン成分割合を図3に示す。奄美を解析するにあたり、霧島に加えて、九州北部の福岡（太宰府）と奄美の南に位置する沖縄（衛生環境研究所）を含めて解析した。福岡と沖縄のデータは、環境省が公表している最新の2022年度のデータ<sup>6)</sup>を使用した。

PM<sub>2.5</sub>質量濃度は、奄美の夏季を除き福岡が最も高く（夏季10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬季10.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），次いで、霧島（夏季5.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬季7.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），奄美（冬季6.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），沖縄（夏季5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬季6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）の順となっており、北に位置する福岡が最も濃度が高く、霧島、奄美、沖縄は同程度の濃度であった。

また、PM<sub>2.5</sub>のイオン成分割合は、夏季における奄美のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が45.9%と高く、沖縄（42.8%）と同程度であった。さらに冬季における奄美のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>は、2.8%と沖縄（4.4%）とともに、霧島（9.1%）および福岡（11.6%）に比べ低かった。のことから、奄美の大気環境は、県本土よりも沖縄に近いことが示唆された。

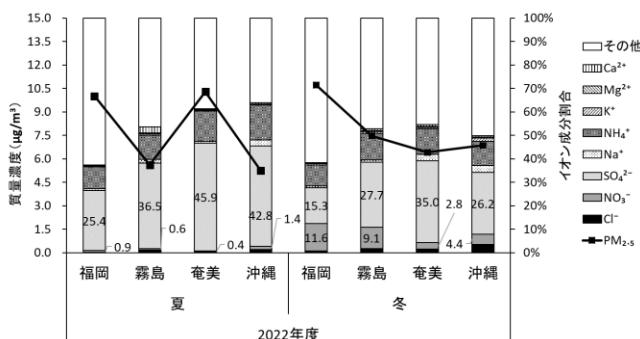


図3 PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびイオン成分割合

### 3.2 無機元素成分濃度比

無機元素成分は、他の成分より大気輸送中の変質が少ないため、発生源を特定する際の指標に用いられ<sup>4)</sup>、化石燃料の燃焼等に由来する粒子と、土壤に由来する粒子の無機元素比がわずかに異なることを利用してPM<sub>2.5</sub>の起源を推定することができる。本報では、一般的に用いられるPb/Zn比とAs/V比により解析を行った。

#### 3.2.1 Pb/Zn比

有鉛ガソリンを使用する地域では、普遍的に存在するZn濃度に対して相対的にPb濃度が高くなることから、Pb/Zn比は有鉛ガソリンの指標とされている。

有鉛ガソリンは日本では1970年代から使用が禁止されており、国内起源または大陸起源を問わず、エアロゾル中のPb/Zn比は減少傾向にあり、2009年の時点では日本国内起源の場合は0.2～0.3程度、大陸起源の場合は0.5～0.6程度と推定されることが報告されている<sup>7)</sup>。Pb、Zn濃

度およびPb/Zn比の季節別平均を図4に示す。なお、検出下限値未満の値は、空欄としている。

図4より、Pb/Zn比は0.09～0.42の範囲であった。2022年度、2023年度において、両地点ともにPb/Zn比が夏季に0.3以下を示したことから、大陸起源による影響は夏季に弱かったことが示唆された。

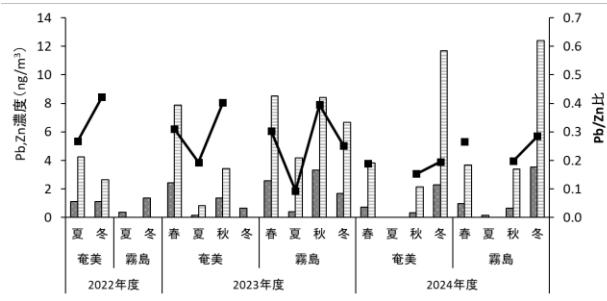


図4 Pb、Zn濃度およびPb/Zn比季節別平均

#### 3.2.2 As/V比

Asは石炭燃焼、Vは石油燃焼の指標として用いられており、As/V比は石炭使用量の多い中国で日本より大きい値を示すとされている<sup>7), 8)</sup>。As、V濃度およびAs/V比の季節別平均を図5に示す。

2023年度、2024年度において、両地点で夏季にAs/V比が小さく、霧島の2023年度秋季を除き、両地点ともに春季または冬季に、As/V比が高い傾向を示したことから、相対的に夏季は石油燃焼の影響が強く、冬季から春季にかけては石炭燃焼の影響が強かったと考えられる。奄美のAs/V比が霧島より低い要因の一つに、奄美のV濃度が高いことが考えられる。これは、奄美の調査地点が農業試験場の敷地内にあり、その事業活動や海岸にも近いことから船舶の排ガスによる影響など、地域特有の影響を受けているためと考えられる。また、霧島の2023年度秋季のAs/V比が4.8と高いが、2015年度から最新の2024年度までの調査結果を見ると、As/V比は0.23～4.2の範囲であった。Asは廃棄物焼却炉からも排出される可能性があるが、周辺には焼却炉はなく、他の影響が考えられるが発生源の推測は困難であった。今後も調査を継続し、原因を究明したいと考えている。

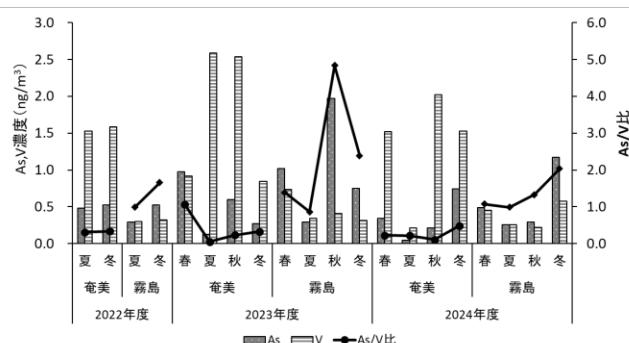


図5 As、V濃度およびAs/V比季節別平均

## 4 自動測定機による調査の結果および考察

### 4.1 PM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度上昇の要因について (事例1, 2)

奄美の連続測定結果をもとに、2022年4月から2025年3月までのPM<sub>2.5</sub>質量濃度の1日平均値とSO<sub>2</sub>濃度の1時間値をプロットした結果を図6に示す。SO<sub>2</sub>濃度が1時間値で30ppbを超過した事例が、図中の矢印で示されたとおり5回観測された。これらの時期には気象庁による諏訪之瀬島の火山活動発表等が行われている<sup>9)</sup>。

奄美の北側には、図1のとおり諏訪之瀬島、桜島など現在も活発に活動している火山があり、奄美市では、2002年8月に諏訪之瀬島からの降灰を観測している<sup>10)</sup>。

観測された5回の事例は、PM<sub>2.5</sub>とSO<sub>2</sub>の変動パターンから2つに大別された。以下に、特徴的であった2022年5月22日（事例1）と同年10月18日～19日（事例2）の事例について考察する。

事例1のPM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度の1時間値をプロットした結果を図7に示す。2022年5月22日16時には、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>ともに日最高値を記録し、両者ともに同じ一過性の変動が見られ、同時間帯には北東の風が多く観測された。同様の変動は2022年4月4日と2024年11月13日の事例でも見られた。

SO<sub>2</sub>からの硫酸塩粒子への二次粒子生成反応は、OHラジ

カルなどによるSO<sub>2</sub>の酸化反応が律速となり、粒子生成速度は、地域や季節、大気汚染状況により大きく変化するが、汚染都市大気中ではSO<sub>2</sub>から硫酸への転換速度はおよそ1～10%/時程度と見積もられている<sup>11)</sup>。このことから、火山ガスとともに、一部がSO<sub>2</sub>ガスから硫酸塩粒子へ二次生成したPM<sub>2.5</sub>が到達したと考えられる。

奄美を起点とした後方流跡線解析（図9左）では、奄美に到達した空気塊は、諏訪之瀬島方向から移流していたことが示された。一方、諏訪之瀬島と奄美のほぼ同一直線上に位置する桜島の5月22日の火山活動情報は、確認されなかった<sup>12)</sup>。ガス状物質は、①雨や雪など降水による除去、②拡散や沈着による除去、③湿潤表面での吸収によって除去される<sup>10)</sup>ため、海上を移流する際は特に吸湿の影響を強く受ける。したがって、桜島から370km離れた奄美において30ppbを超えるSO<sub>2</sub>ガスが到達する可能性は低いと考えられる。桜島の火山ガスの影響よりも、近傍の諏訪之瀬島の影響の方が大きいと考えられるが、桜島の影響を完全に否定することはできない。以上から、5月22日のPM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度上昇の要因は、諏訪之瀬島の火山活動によるものと推定される。これは、既報の霧島における桜島の噴火に伴うPM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度の変動と類似している<sup>13)</sup>。

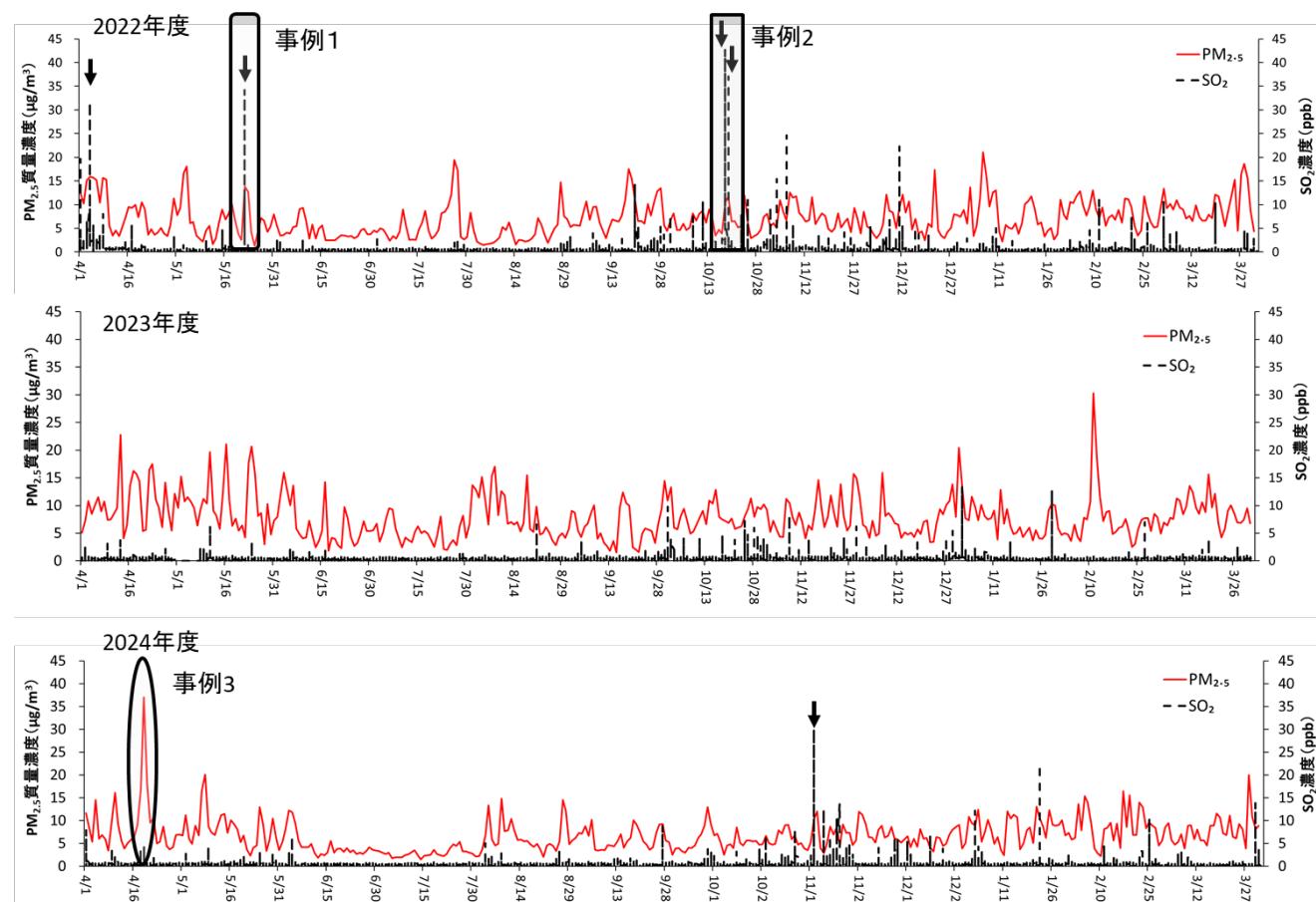


図6 PM<sub>2.5</sub>質量濃度の1日平均値とSO<sub>2</sub>濃度の1時間値（2022年4月～2025年3月）

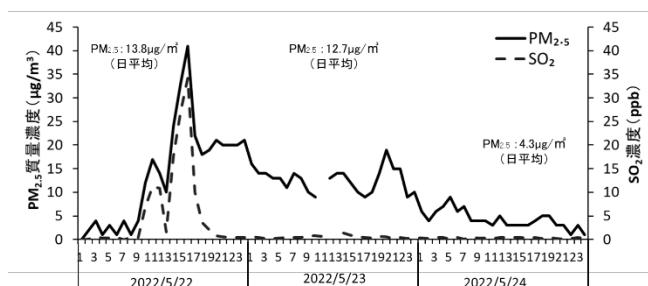


図7 PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>2</sub>濃度（奄美）  
(2022年5月22日～24日)

一方、事例1と同様にして、事例2をプロットした結果を図8に示す。2022年10月18日から19日かけてはSO<sub>2</sub>濃度のみに変動が見られた。また、高濃度のSO<sub>2</sub>が観測された時間帯には、事例1と同様に北風が多く観測された。

奄美を起点とした後方流跡線解析（図9右）では、諫訪之瀬島方向からの移流が示された。したがって、この期間のSO<sub>2</sub>濃度上昇も、諫訪之瀬島の火山活動によるものと考えられる。桜島の火山活動は、10月18日に4回、19日に2回の噴火情報<sup>12)</sup>があったが、前述のとおり高濃度のSO<sub>2</sub>ガスが奄美に到達する可能性は低いと考えられる。

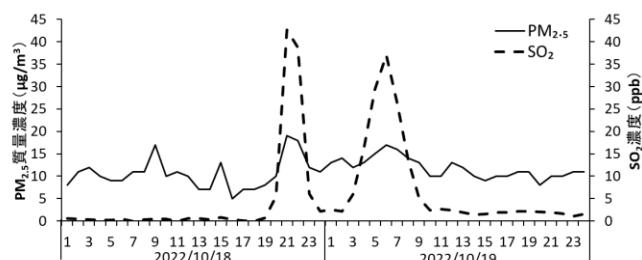


図8 PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>2</sub>濃度（奄美）  
(2022年10月18日～19日)

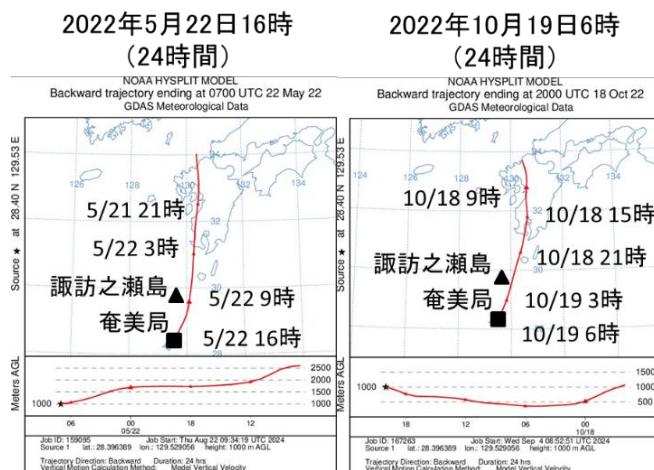


図9 後方流跡線解析（奄美）  
(左: 2022年5月22日, 右: 2022年10月19日)

#### 4.2 PM<sub>2.5</sub>質量濃度上昇の要因について（事例3）

奄美において、PM<sub>2.5</sub>質量濃度の1日平均値が環境基準の35μg/m<sup>3</sup>を超えた事例について解析を行った。

2024年4月18日から19日にかけては、図10に示すようにPM<sub>2.5</sub>質量濃度が高い値で継続的に推移し、SO<sub>2</sub>濃度の顕著な上昇は見られなかった。また、奄美を起点とする後方流跡線解析（図11）では、奄美に到達した空気塊は朝鮮半島から移流してきたことが示された。加えて、4月18日の1日平均値（速報値）が、東北の宮城県（石巻西）で52.1μg/m<sup>3</sup>、4月19日の1日平均値（速報値）が、九州北部の福岡県（太宰府）で39.9μg/m<sup>3</sup>、沖縄県（名護）で30.7μg/m<sup>3</sup>と東北から九州にかけてPM<sub>2.5</sub>質量濃度が高かった<sup>14)</sup>ことから、この期間には越境移流の影響があったと推察される。

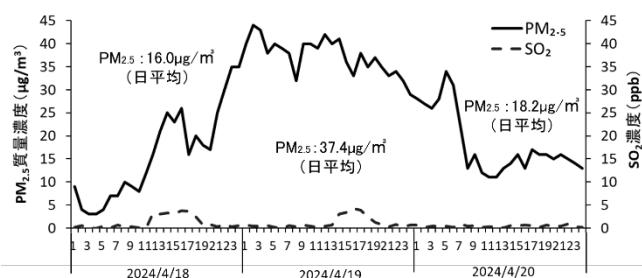


図10 PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>2</sub>濃度（奄美）  
(2024年4月18日～20日)

2024年4月19日1時  
(72時間)

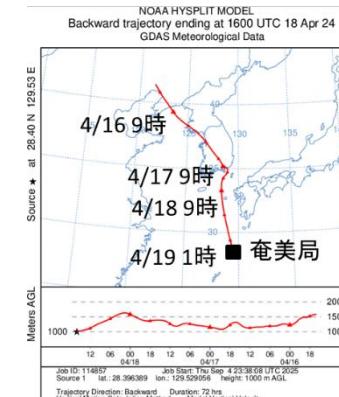


図11 後方流跡線解析（奄美）  
(2024年4月19日)

#### 5.まとめ

2022年度から2024年度に実施した奄美と霧島のPM<sub>2.5</sub>の質量濃度および成分分析の結果と、奄美の自動測定機によるPM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>2</sub>濃度について解析を行い、以下の知見を得た。

- 奄美のPM<sub>2.5</sub>質量濃度は年間を通して霧島に比べ低く、

春季に高く、夏季に低い傾向があった。

- 2) 奄美のイオン成分濃度は、いずれの季節でもSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>が大部分を占めていた。特に奄美の2022年度夏季においてはSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が高かったことから、自然由来（火山）または大陸由来の二次生成による影響が示唆された。また、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は、調査期間中における平均気温が高かったため季節間で大きく変わらなかった。
- 3) PM<sub>2.5</sub>のイオン成分割合から、奄美の大気環境は、県本土よりも沖縄に近いことが示唆された。
- 4) 無機元素のPb/Zn比が夏季に0.3以下を示したことから、大陸起源による影響は夏季に弱いことが示唆された。また、As/V比から夏季は石油燃焼の影響が、冬季から春季にかけては石炭燃焼の影響が強いことが考えられた。
- 5) 奄美のPM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度の変動および後方流跡線解析から、諏訪之瀬島の火山活動によりPM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度が影響を受けることが示唆され、PM<sub>2.5</sub>質量濃度とSO<sub>2</sub>濃度がともに上昇する場合と、SO<sub>2</sub>濃度のみが上昇する場合の2パターンが確認できた。
- 6) 奄美におけるPM<sub>2.5</sub>質量濃度のみ高い値が観測された事象は、越境移流の影響が示唆された。

## 6. 謝辞

PM<sub>2.5</sub>成分分析用試料の捕集にあたり、機器の設置および点検に御協力いただいております、大島支庁保健福祉環境部衛生・環境室環境係の皆様に深謝いたします。

## 7. 引用文献

- 1) 環境省：令和5年度 大気汚染物質（有害大気汚染物質等を除く）に係る常時監視測定結果、  
<https://www.env.go.jp/content/000315455.pdf>  
 (2025. 10. 1アクセス)
- 2) 山村由貴、新谷俊二、力寿雄、中川修平、王哲、鵜野伊津志：夏季の太平洋高気圧条件下における高濃度PM<sub>2.5</sub>に対する火山の寄与解析. 大気環境学会誌, **55**, 169-181, 2020
- 3) 環境省：環境大気常時監視マニュアル第6版, 2010
- 4) 環境省：大気中微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）成分測定マニュアル, 2019
- 5) 速水洋、藤田慎一：デニューダ・フィルタパック法により測定した半揮発性無機イオン成分の濃度の実態とガス・粒子分配. 大気環境学会誌, **39**, 77-88, 2004
- 6) 環境省：微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）の質量濃度および成分測定（手分析）結果、  
<https://www.env.go.jp/air/osen/pm/monitoring.html> (2025. 10. 1アクセス)
- 7) 日置正、紀本岳志、長谷川就一、向井人史、大原利眞、若松伸司；松山、大阪、つくばで観測した浮遊粉じん中金属元素濃度比による長距離輸送と地域汚染特性の解析. 大気環境学会誌, **44**, 91-101, 2009
- 8) 梶田奈穂子、加藤敦雄、尾崎聰、山神真紀子；2014年2月に観測された広域的なPM2.5高濃度現象の解析. 愛知県環境調査センター所報, **43**, 1-7, 2015
- 9) 気象庁：火山活動解説資料（諏訪之瀬島）,  
[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly\\_v-act\\_doc/monthly\\_vact\\_vol.php?id=511](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_v-act_doc/monthly_vact_vol.php?id=511)  
 (2025. 10. 1アクセス)
- 10) 気象庁：諏訪之瀬島 有史以降の火山活動,  
[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/fukuoka/511\\_Swanosejima/511\\_history.html](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/fukuoka/511_Swanosejima/511_history.html)  
 (2025. 10. 1アクセス)
- 11) 笠原三紀夫；大気中における粒子の挙動－生成・変質・除去－. 大気汚染学会誌, **29**, 93-101, 1994
- 12) 気象庁：火山活動解説資料（桜島）,  
[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly\\_v-act\\_doc/monthly\\_vact\\_vol.php?id=506](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_v-act_doc/monthly_vact_vol.php?id=506)  
 (2025. 10. 1アクセス)
- 13) 西中須暁子、東小薗卓志、田知行紘太、福田哲也、江下聰美、平瀬洋一：鹿児島県における粒子状物質などの地域特性に関する調査研究（第II報）. 鹿児島県環境保健センター所報, **17**, 43-50, 2016
- 14) 環境省：環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめくん）,  
<https://soramame.env.go.jp/download>  
 (2025. 4. 1アクセス)