

3) 多地点同時テープろ紙成分分析による PM_{2.5} 高濃度事例解析

ー全国初の注意喚起事例を対象にー

豊永 悟史 村岡 俊彦* 北岡 宏道

要 旨

2013 年 3 月 5 日に熊本県は全国初となる PM_{2.5} に係る注意喚起を行い、大きな注目を集めた。この事例について、PM_{2.5} の高濃度化要因を明らかにすることを目的として、県内 5 か所の大気汚染常時監視測定局から回収したテープろ紙の成分分析を実施した。その結果、県内全域で越境移流の影響を受けた事例だったと考えられたが、内陸部と九州西岸に位置する遠隔地ではその寄与が異なっていたことが明らかとなった。特に 3 月 5 日の午前中については、内陸部において地域汚染の影響もあったと考えられた。また、越境移流の寄与が異なった要因の一つとして、内陸部における地上付近の安定層形成が影響していた可能性が示された。

キーワード：微小粒子状物質 (PM_{2.5})，成分分析，越境移流，地域汚染

はじめに

微小粒子状物質（以下、「PM_{2.5}」という。）は疫学調査で死亡率等の有意な上昇を引き起こす可能性が指摘されており¹⁾、世界的に注目されている大気汚染物質である。日本でも 2013 年 1 月に中国北京市で大規模高濃度イベント²⁾が発生したことにより、社会的に大きな関心を持たれるようになった。これを契機として、2013 年 2 月末に環境省が主催した専門家会合が、短期的な高濃度時の対応策として注意喚起のための暫定的な指針値を示した³⁾。

熊本県は 2013 年 3 月 5 日に全国初となる PM_{2.5} に係る注意喚起を行っており、大きな注目を集めた。この事例においては、県内全域で越境移流の影響を受けた可能性があるものの、九州西岸に位置する遠隔地（天草地域沿岸部）と県内内陸部で PM_{2.5} 濃度の挙動が異なっていたことが確認されたことから、地域汚染の影響も指摘されている⁴⁾。

本研究ではこの全国初の注意喚起事例について、特

に遠隔地と内陸部における PM_{2.5} 濃度挙動の違いを明らかにすることを目的として、大気汚染常時監視データ及びテープろ紙成分分析を用いた解析を試みた。

調査方法

1 調査地点及び常時監視データ解析

PM_{2.5} 自動測定機が設置されている一般局のうち、県内の状況を広く把握できるように内陸部として、荒尾市役所局（以下、「荒尾」という。）、益城町役場局（以下、「益城」という。）、八代市役所局（以下、「八代」という。）、水俣保健所局（以下、「水俣」という。）の 4 地点を選定した。遠隔地としては、後述するように地域汚染の影響が小さく、九州西岸に位置する苓北志岐局（以下、「苓北」という。）1 地点を選定した。

常時監視データ解析として、この 5 地点で測定された PM_{2.5}、SO₂、NO_x の 1 時間値を解析に使用した。また、比較のため、長崎県の離島であり、地域的な汚染の影響がほとんどないと考えられる五島局（以下、「五

* 現熊本県環境局環境生活部環境保全課

島」という。)のSPMとSO₂の1時間値データも国立環境研究所と地方環境研究所の共同で行われているII型共同研究のメンバーサイト^{5) 6)}より入手して使用した。これらはすべて速報値である。図1に調査対象とした地点の位置関係を示した。

各地点の大気汚染の状況は2012年度の年平均値⁷⁾に基づき比較すると、次のように特徴づけることができる。PM_{2.5}濃度の年平均値は、測定日数不足のため評価対象外であった水俣以外について、荒尾、益城、八代の3局では21.0～19.3 μg/m³だったのに対して、苓北は15.3 μg/m³と低い値を示した。自動車排ガスなどの地域的に排出される大気汚染物質であるNO₂⁸⁾の年平均値は荒尾、益城、八代が0.08～0.011 ppmだったのに対して、水俣と苓北はそれぞれ0.003 ppmと0.002 ppmと低い値を示した。以上の比較から、荒尾、益城、八代の3地点は相対的に地域汚染の影響が強く、水俣と苓北は地域汚染の影響が小さいと考えられた。

2 気象解析

気象解析のため、天気図及び地上の気象観測データを解析に使用した。内陸部と遠隔地の気象条件の比較のため、内陸部の代表点として熊本地方気象台、遠隔地の代表点として牛深特別地域気象観測所(以下、「牛深」という。)の気温及び風向風速等の気象データを解析に使用した⁹⁾。また、高層気象との比較のため、高地の代表点として高度約1000 mに位置する阿蘇山特別地域気象観測所(以下、「阿蘇」という。)についても風向風速のデータを使用した。これら3地点については図1にその位置を示している。また、大気汚染物質の移流経路を求める解析手法として後方流跡線解析(NOAA HYSPLIT モデル)¹⁰⁾を使用した。

3 成分分析

1で述べた5局のPM_{2.5}自動測定器のうち、益城についてはAPDA-375(堀場製作所)であり、他4局についてはFPM-377(東亜DKK)であった。いずれの測定器もPTFEテープろ紙(APDA-375:TFH-01, FPM-377:AP-50)を使用しており、イオン成分と金属成分の分析が可能である。回収したテープろ紙のうち、2013年3月4日～5日までの計48時間分を成分分析に供した。

テープろ紙のPM_{2.5}捕集スポットの半分をイオン成分分析用に、残りの半分を金属成分分析用とし、6時間分を1試料とした。分析は大気中微小粒子状物質(PM_{2.5})成分測定マニュアル¹¹⁾を参考に次の手順で行った。

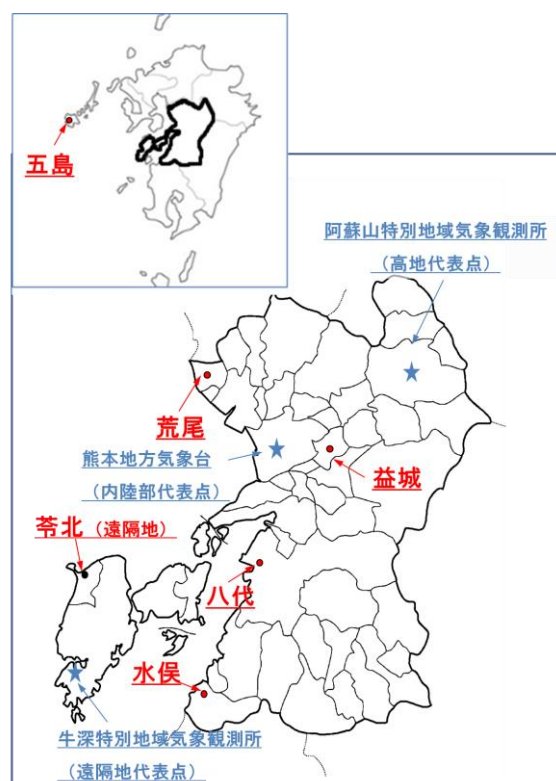


図1 調査地点及び気象官署

イオン成分分析は、超純水15 mLで20分間の振とうにより抽出を行い、孔径0.45 μmのフィルターでろ過後にイオンクロマトグラフ(DX-500, ダイオネクス)で分析を行った。分析対象イオンはNa⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻の8種である。

金属成分分析は、試料容器に短冊状に刻んだフィルターを入れ、HNO₃ 5 mL, H₂O₂ 1 mL, HF 1 mLを添加して、マイクロ波試料調製装置(Multiwave 3000, パーキンエルマー)により、概ね200℃で20分以上の分解を行った。試料容器を蒸発用ローター(EVAP8, パーキンエルマー)に再装填し、マイクロ波試料調製装置を用いて加熱・濃縮後、5% HNO₃で20 mLに定容した。試料溶液はICP-MS(7500ce, アジレント)で元素の定性・定量を行った。分析対象元素はBe, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Tl, Pb, Th, Uの25種である。

各分析において、ろ紙の未使用部分から試料と同面積を採取し、ブランク試料(各n=3)とした。ブランク試料は本試料と同様に分析を行い、標準偏差の3倍を検出下限値とした。

なお、分析に使用したテープろ紙は通常1ヶ月単位で交換・回収されているものであり、捕集後も長期間

常温で放置されることになるため、揮発性が高い NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- の分析結果については相対的な比較のための参考値として取り扱うこととした。

結果及び考察

1 常時監視データと気象データの解析結果

(1) 常時監視データ解析結果

3月3日～6日の $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , NO_x 濃度の経時変化を図2に、五島のSPMと SO_2 濃度を図3に示した。4日～5日の高濃度期間の $\text{PM}_{2.5}$ の挙動は既報⁴⁾ のとおり、遠隔地とその他の地域で異なる傾向を示した(図2a)。遠隔地の代表点である苓北は4日8時～12時頃(以下、期間①)、15時～22時頃(以下、期間②)、4日24時～5日5時頃(以下、期間③)にピークが見られる3つ山型の挙動が見られた。 SO_2 に関しても同様の挙動が確認できたが、 NO_x については増減が小さく、 $\text{PM}_{2.5}$ と一致した挙動は見られなかった(図2b, c)。 SO_2 は中国がアジア最大の排出国であり¹²⁾、長距離輸送される場合もある¹³⁾ ことから、これは越境移流の影響を示唆する結果だと考えられる。また、五島のSPM及び SO_2 について見ると、苓北よりも3～5時間程度早い時間で一致した挙動を示しており、期間①と期間③に対応するピークが確認できた(図3)。なお、期間②に対応するピークは欠測のため明確には確認できないが、前後の挙動は一致している。地域的な汚染の影響がほとんどない五島の挙動は越境移流によるパターンを示していると考えられることから、期間①～③の苓北の挙動は主として越境移流の状況を反映したものだ判断された。

内陸部4地点の $\text{PM}_{2.5}$ の変動を見ると、期間②については4地点ともに濃度上昇が見られたが、期間③については、濃度が高い状態が持続しているものの苓北のような明確なピークは見られず、その後5日6時～12時頃(以下、期間④)にピークが見られた。 SO_2 の変化を見ると、期間②については $\text{PM}_{2.5}$ も連動した上昇が確認できるが、期間③及び期間④についてこのような濃度上昇は見られなかった。 NO_x については、期間②では明確な変動は見られないものの、特に八代と益城においては期間③から断続的に濃度上昇しており、期間④でピークが確認できた。調査方法1で述べたように NO_x は地域汚染の指標となることから、期間③～④にかけての NO_x の上昇は何らかの地域的な汚染の蓄積を示している可能性がある。

以上のことから、特に期間③～④にかけての $\text{PM}_{2.5}$ 及び他の常時監視項目の挙動が遠隔地と内陸部で異な

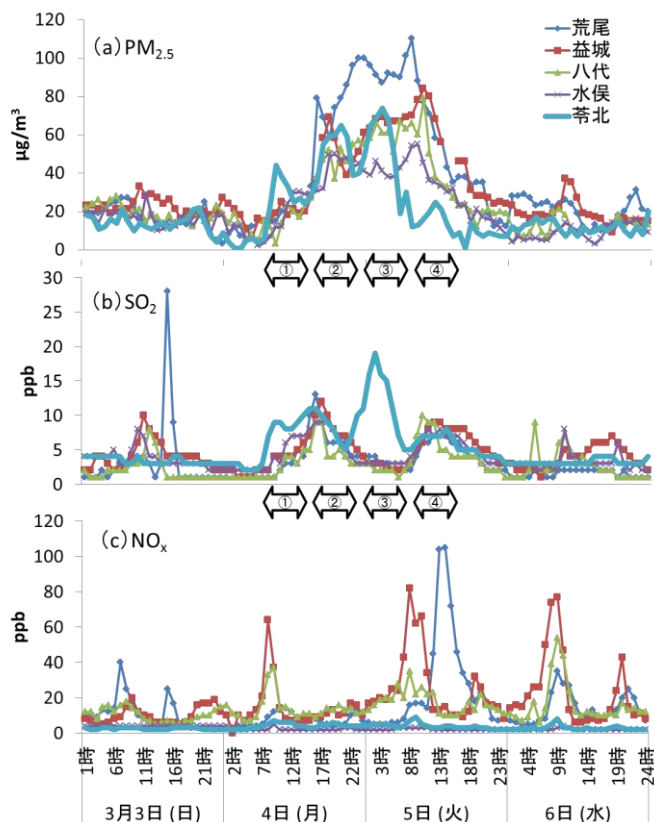


図2 県内5地点の $\text{PM}_{2.5}$ (a), SO_2 (b), NO_x (c) 濃度の経時変化

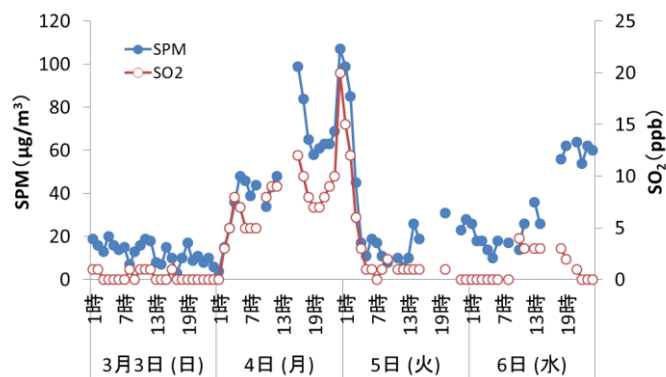


図3 五島のSPMと SO_2 濃度の経時変化

っており、それぞれの地域で高濃度化メカニズムが異なっていたことが示唆された。

(2) 気象解析結果

苓北の高度1000mを起点とした後方流跡線及び地上天気図を図4、図5に示す。

期間①と②に対応する4日9時及び18時の流跡線はいずれも大陸方向からの流入を示唆していた。気圧配置は高気圧が東進してきたことを示しており、大陸性高気圧の周辺流¹⁴⁾により大気汚染気塊が流入した可能性が考えられた。

期間③については、5日3時の流跡線は大陸方向からの移流を示しており、越境移流が生じていた可能性が高い。しかしながら、1で述べたように遠隔地と内陸部で高濃度化メカニズムが異なっていた可能性が考えられるため、気温等の地上の気象観測データによる解析を行った。

内陸部代表点の熊本と遠隔地代表点の牛深の気温と湿度の変化を図6に示した。熊本の気温は4日17時頃から5日7時まで一貫して下がり続け、7時には1.6℃と低い値を示した。湿度は気温の低下にともなって上昇を見せ、24時以降は80%以上の高い値を示した。これに対して牛深の気温は17時～20時まで一時的に減少するものの、21時よりまた上昇に転じ3時頃までは10℃以上を示した。また、湿度も20時から21時にかけて56%から40%とやや急激な減少を示したことから、21時ごろから遠隔地の気塊の性質が変化していたと考えられる。これは苓北において期間③のPM_{2.5}及びSO₂濃度の上昇が始まった時間とほぼ一致しており、後方流跡線の結果も考慮すると遠隔地に新たな汚染気塊が越境移流してきたことを示している。一方で内陸部については、典型的な夜間の気温低下及び湿度上昇が確認できることから、この汚染気塊の影響はほとんど受けなかったと推察される。

牛深、熊本に加えて高度約1000m地点の阿蘇の風向風速の変化を図7に示した。牛深においては気温・湿度の変化が見られた21時頃から、西北西の風が吹いており、その後も5日4時頃まで、西北西～北北西の風が卓越していた。熊本では風速が弱く、風向も一定方向を示していなかったことから、気温と湿度の変化で示されたように遠隔地とは異なる気塊の影響下にあったと考えられる。また、気温が低く、風速が弱かったことから地上付近に安定層が形成されていた可能性が高いと考えられた。これに対して、阿蘇の風向風速は牛深と一致した挙動が確認できたことから、内陸部においても高層では遠隔地と同じ気塊の影響を受けていたと考えられた。以上の結果から、期間③に大陸から輸送された汚染気塊は遠隔地に移流し、その後内陸部で形成されていた安定層の上層を通過したものと推察された。

期間④については、後方流跡線は大陸の汚染地域よりも北を通過しており、混合層のはるか上層である3000m以上の高度を通過していたことから、この時の

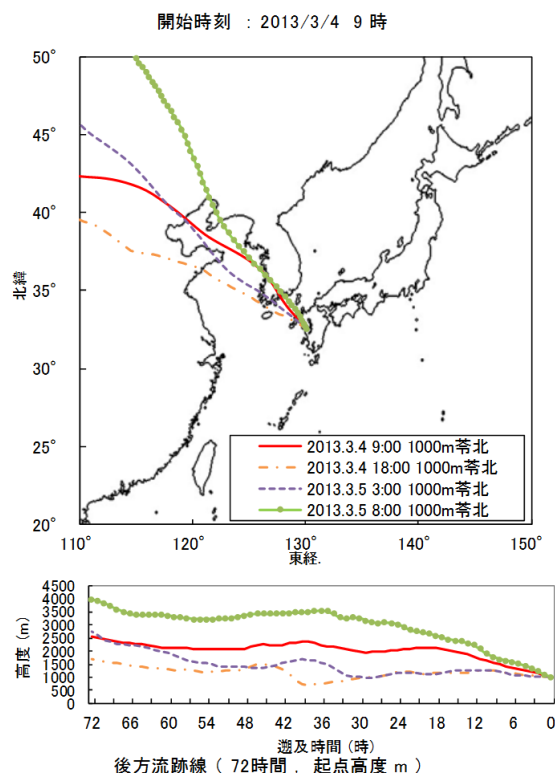


図4 後方流跡線図（苓北、高度1000m起点）

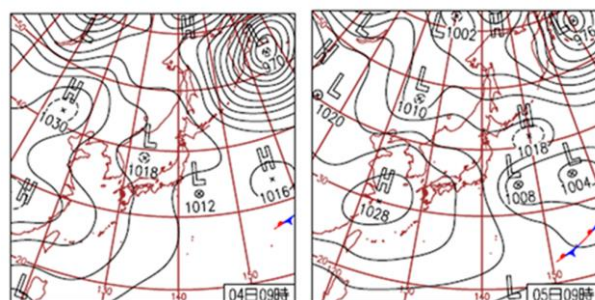


図5 地上天気図（3月4日(左)、5日(右)）

気塊が汚染されていたとは考えにくい。地上天気図ではこの期間高気圧が接近しており、高気圧中心部での大気の沈降が生じていたと考えられる。また、内陸部においては、既述のように気温は低く（図6）、気象庁の記録によると天気は快晴だったことから、放射冷却による接地逆転層が形成されていた可能性が高いと考えられる¹⁵⁾。接地逆転層内の大気は混合・拡散しにくい状態になるため、地域汚染の影響を受けやすくなる。一方で、期間④の遠隔地の気温は最低でも7.2℃と内陸部に比べて高く、接地逆転層が形成されていたとは考えにくいことから、上述の汚染されていない気塊の流入を受けてPM_{2.5}濃度が減少したものと推察された。

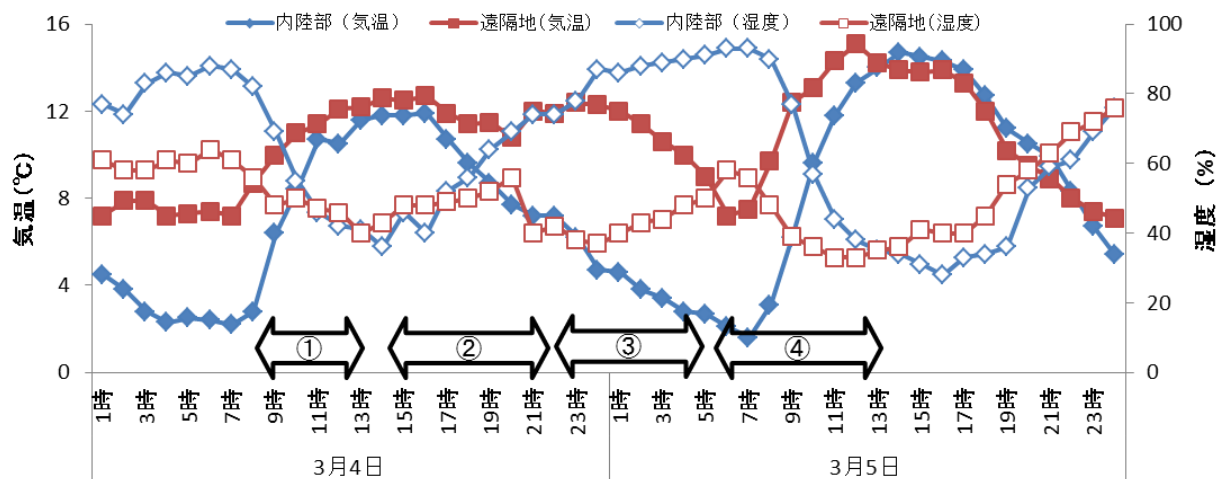


図6 内陸部と遠隔地における気温と湿度の経時変化

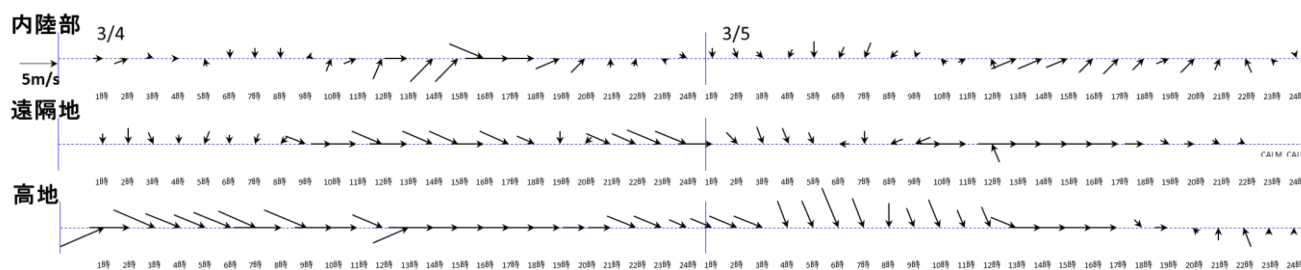


図7 内陸部、遠隔地及び高地における風向風速の経時変化

2 テーブル紙成分分析結果

(1) イオン成分濃度の変化

イオン成分のうち、 SO_4^{2-} と NO_3^- の濃度、6時間平均の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の経時変化を図8に示した。時間帯が完全に一致するわけではないものの、1で示した期間①～④に次のように対応させながら、各イオンの挙動を整理する。

期間①：4日7時～12時

期間②：4日13時～18時、19時～24時

期間③：5日1～6時

期間④：5日7時～12時

SO_4^{2-} について見ると、期間①は荅北が内陸部4地点よりも高い値を示しており、遠隔地のみが越境移流の影響を受けていた可能性が高いことを示している。その後期間②については全地点で濃度上昇が見られた。さらに内陸部では期間③、期間④と SO_4^{2-} 濃度はほぼ横ばいであったが、荅北については濃度が減少する傾向が見られた。

NO_3^- について見ると、荒尾、益城、八代について、期間②から濃度上昇が始まり、期間④で最大値を示す傾向が見られた。また、水俣と荅北については全て検出下限値未満の値であった。

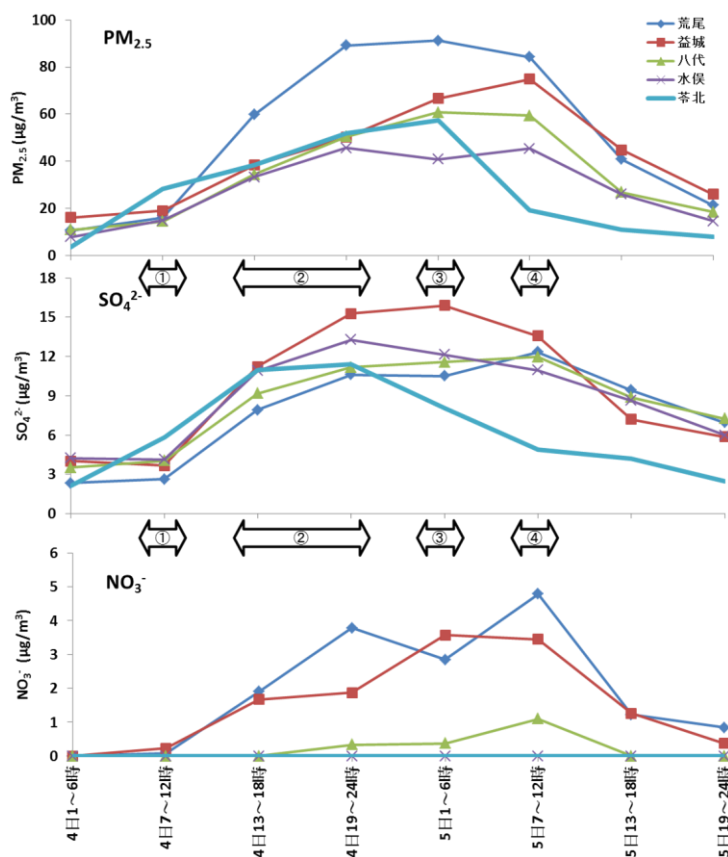


図8 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 濃度の経時変化

これは調査方法 3 で述べたとおり揮発の影響も考えられるが、相対的に見て益城、八代、荒尾の 3 地点に比べて苓北、水俣の NO_3^- 濃度が低かったことを示している。

SO_4^{2-} を越境移流の指標¹⁶⁾、 NO_3^- を地域汚染の指標¹⁷⁾として考えた場合、 SO_4^{2-} の挙動から、期間②に県内全域に越境移流した $\text{PM}_{2.5}$ は、内陸部では期間③～④にかけて滞留していたと解釈できる。一方で NO_3^- の挙動は期間③～④にかけての地域汚染の影響を示唆する結果であり、苓北と水俣については相対的にその影響が小さかったと解釈することができる。これは 1 の結果とも矛盾しない。

(2) 金属成分濃度の変化

金属成分濃度の経時変化

分析した金属成分のうち、概ね検出下限値以上の値が得られた V, Zn, As, Cd, Pb, Mn の 6 元素の濃度変化を図 9 に示す。なお、荒尾の Zn については分析結果から、コンタミネーションが疑われたため欠測扱いとした。

苓北においては期間③に対応する 5 日 1 時～6 時に 6 元素すべてで最大値を示しており、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の推移と一致していたが、元素間の挙動の違いは小さかった。一方で内陸部 4 地点についてみると、期間②と③に対応する 4 日 13～24 時と 5 日 7 時～12 時にピークを示す元素（荒尾、益城、水俣の V、益城の As 等）と 5 日 7 時～12 時に最大値を示す元素（益城、八代の Zn、

Cd, Pb）が多く見られたが、地点ごとに必ずしも一定の挙動を示すわけではなく、地域汚染の影響を受けている可能性が高いと考えられた。

金属成分濃度比

大気中粒子の発生源の指標として金属成分濃度比が多く用いられている^{18), 19)}。ここでは代表的な金属成分濃度比である Pb/Zn 比と As/V 比を用いた解析を試みた。

Pb は有鉛ガソリンの規制が進んでいる日本に比べて中国の排出量が多いと言われており、越境移流の指標とされている¹⁸⁾。Zn は鉄鋼工業や都市廃棄物焼却炉など多様な発生源から排出されており、一般的な大気汚染元素と考えられている^{20), 21)}。このため越境移流の影響を受けた場合、Pb/Zn 比が相対的に高くなると言われている^{18), 22)}。一方で As は石炭燃焼の指標となり、V は石油燃焼の指標となることから、As/V 比は石炭使用量の多い中国では日本より高い値を示すと考えられる²¹⁾。これらの元素比はいずれも越境移流の影響を受けた際に相対的に高い値を示すと考えられ、地域汚染と越境汚染の影響度合いの定性的な指標と考えることができる。

図 10 に益城、八代、苓北の Pb, Zn の濃度と濃度比を示した。県内全域で越境移流の影響を受けたと考えられる期間②の 4 日 19～24 時の Pb/Zn 比を各地点で比較すると、益城 0.76 (Pb : 31 ng/m^3 , Zn : 41 ng/m^3)、八代 0.80 (Pb : 25, Zn : 31)、苓北 0.83 (Pb : 31, Zn :

37) と比較的近い値を示していたが、その後の期間③から④にかけては異なる変化を示した。益城の Pb 濃度は 35 から 45 ng/m^3 (期間③から④) であるのに対して、Zn 濃度は 60 から 102 ng/m^3 と大幅な上昇を見せ、Pb/Zn 比は 0.58 から 0.44 と減少を見せた。八代と苓北の Pb/Zn 比は期間③から期間④にかけて、近い値 (期間③ 0.85, 0.88 ; 期間④ 0.78, 0.76) を示していたが、八代では両元素の濃度が上昇したのに対し、苓北では減少を示した。1 で述べたとおり、期間③以降の新たな越境移流の内陸部への影響はほとんどなかったと考えられることから、益城及び八代での Pb/Zn 比の変動は地域汚染の影響によるものと解釈できる。以上の結果から、益城においてはこの期間③～④にかけて Zn の寄与が大きい排

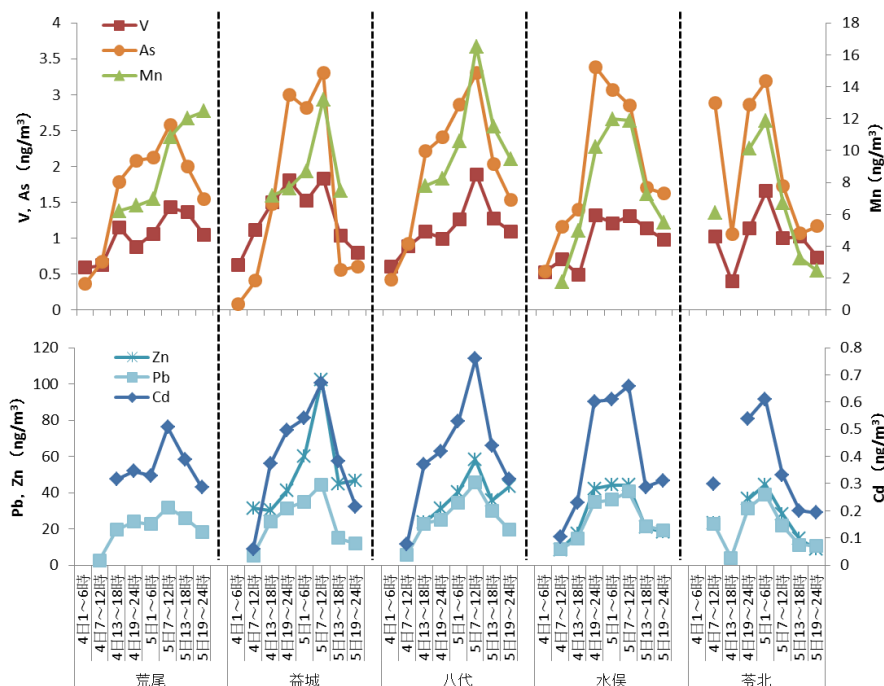


図 9 金属濃度の経時変化

注) 検出下限値未満は空白とした

出源の影響を強く受けていた可能性が高い。また、八代については、Pb/Zn 比だけをみると苓北に近い値を示していたが、苓北とは異なり期間④にかけて Pb, Zn 両方の濃度が上昇していたことから、越境移流の影響による濃度上昇ではなく、Pb と Zn を排出する地域的な発生源の影響だと推察された。

図 11 には益城、八代、苓北の As, V の濃度と濃度比を示した。期間②について見ると、4 日 19~24 時の As/V 比は、益城 1.7 (As : 3.0 ng/m³, V : 1.8 ng/m³), 八代 2.4 (As : 2.4, V : 0.99), 苓北 2.6 (As : 2.9, V : 1.1) と八代と苓北は比較的近い値を示していたが、益城に

ついては、他 2 地点よりも As/V 比が小さかった。この違いには地域的な特徴が影響していた可能性が考えられる。越境移流の影響を受ける前の 4 日 1~12 時は As と比較すると V の濃度が高くなっており (As/V : 0.14~0.37), 八代 (0.70~1.0) と比較しても顕著であった。このことから、益城は相対的に V 濃度が高い地域特性があるために、越境移流の影響を受けた場合にも他の地点と同レベルまで As/V 比が上昇しなかったと推察される。期間③についてみると、益城と八代は両元素ともに濃度はほぼ横ばいで As/V 比も 1.9 と 2.3 と期間②とほぼ同じであった。一方で苓北は V 濃度の上

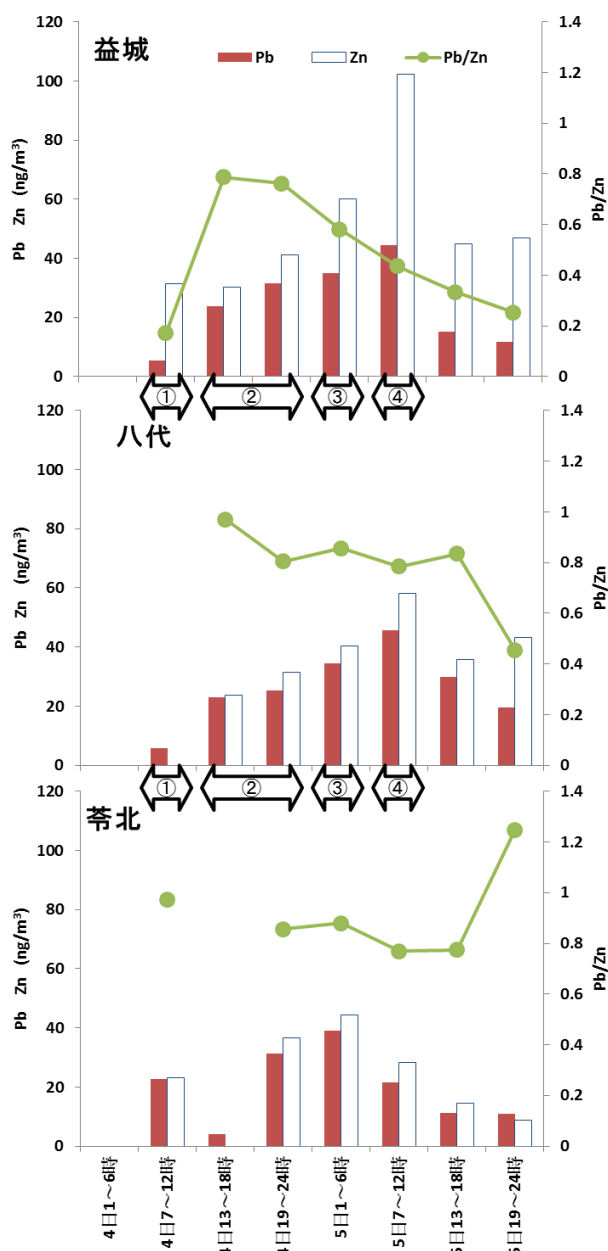


図 10 Pb/Zn 比の経時変化

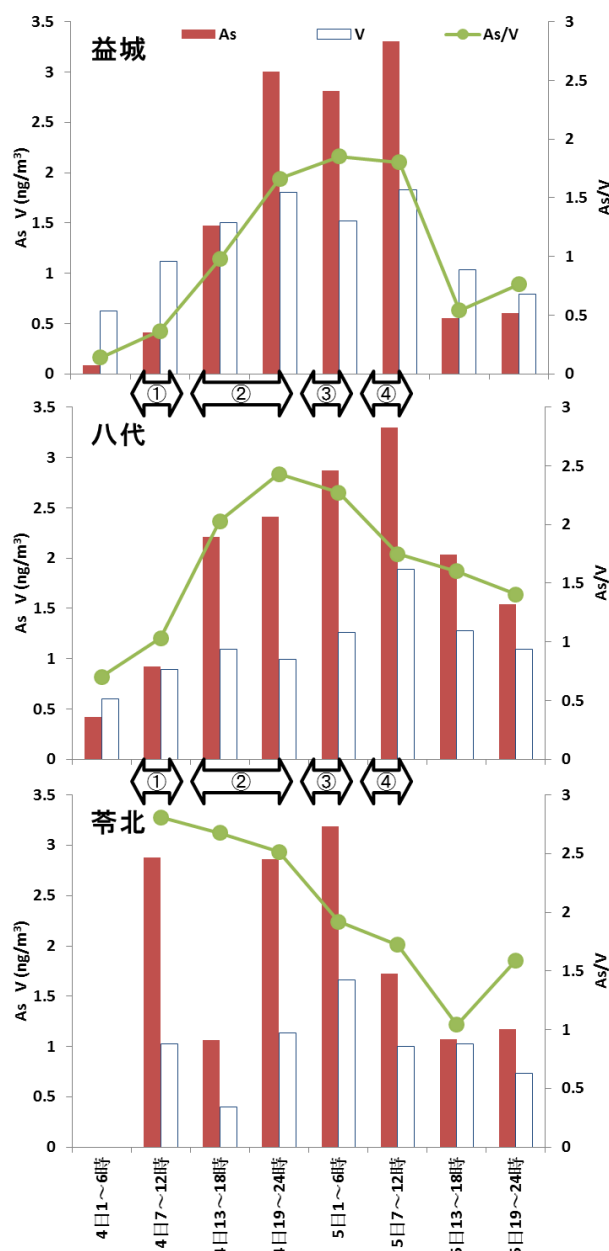


図 11 As/V 比の経時変化

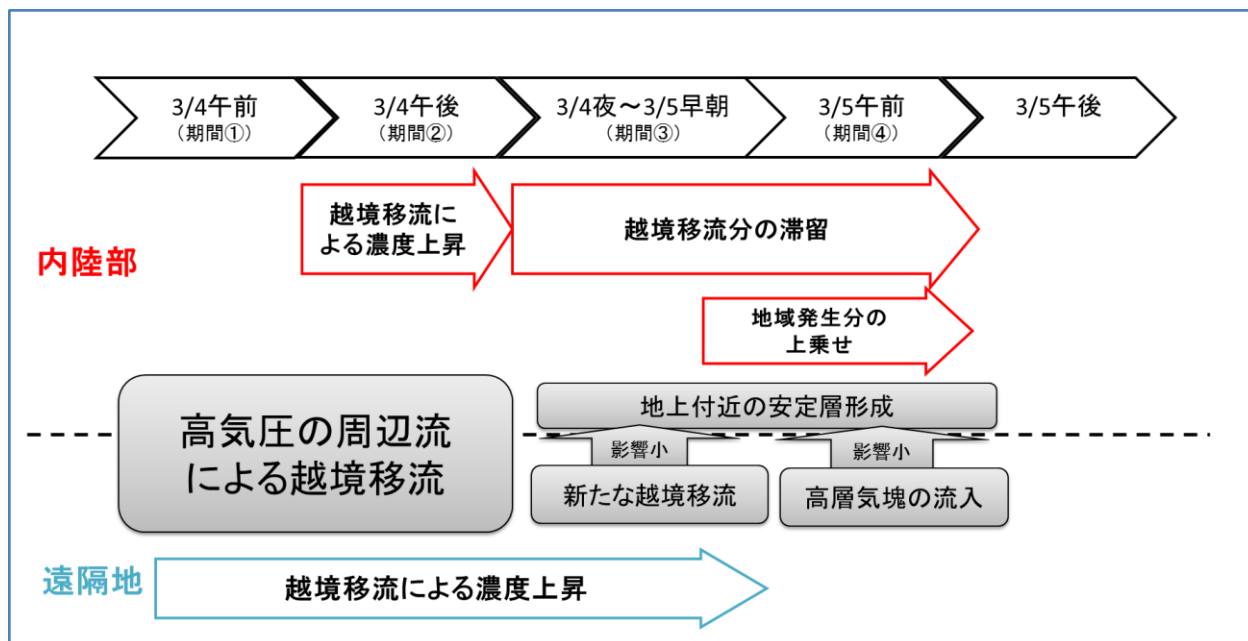


図 12 高濃度化メカニズム

昇幅が As よりも大きく、As/V 比は 1.9 に減少を示した。このように期間③において、苓北と内陸部で As/V 比の変動が異なるという結果は、遠隔地のみで新たな越境移流の影響を受けていたとする既述の解釈を支持している。さらに期間④では、益城は As、V とともに上昇、苓北は減少に転じるが、As/V 比はそれぞれ 1.8 と 1.7 と期間③からあまり変化がなかった。これに対して八代では、As、V 濃度ともに上昇するものの、その上昇幅は V が大きく、As/V 比は 1.7 と減少を見せた。この結果は八代において石油燃焼などの V の寄与が大きい排出源の影響を受けていた可能性を示唆している。

Pb/Zn 比と As/V 比からそれぞれ地域的な汚染の影響を受けていた可能性が示されたが、今回の事例だけでは特定の汚染源にまで言及することは難しいと考えられる。今後の成分調査による地域的な汚染源特性の解明が期待される。

3 高濃度化メカニズム

1 及び 2 の解析結果から推定された高濃度化メカニズムを図 12 に示した。詳細は以下の通りである。

- ・ 4 日午前（期間①）に越境移流してきた汚染気塊は遠隔地にのみ影響し、内陸部には影響しなかった。
- ・ 4 日午後（期間②）に再び越境移流が生じ、県内全域に影響を及ぼした。
- ・ 4 日夜～5 日早朝（期間③）においては新たな越境移流が生じ、遠隔地に影響を及ぼした。この越境移流気塊は、内陸部の地上付近に形成されていた安定層の上層を通過したと考えられ、内陸部では 4 日午後に移流してきた汚染気塊が滞留していたと考えら

れた。また、 NO_3^- や金属成分濃度の挙動から、地点によっては地域汚染の影響が強くなっていた可能性が高いと考えられる。

- ・ 5 日午前（期間④）では、高層から汚染されていない気塊が流入したことで遠隔地の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度は減少したが、内陸部においては接地逆転層が形成されていたため、この気塊の影響は受けずに期間②に移流してきた汚染気塊の滞留分に期間③から蓄積された地域汚染が上乗せされる形で影響し、高濃度状態が持続したと考えられた。

ま と め

2013 年 3 月 4 日～5 日にかけての高濃度事例について、常時監視データ及びテープろ紙成分分析結果により、内陸部と遠隔地で越境移流の寄与割合が異なっていたことが明らかになった。

遠隔地では地域汚染の寄与は小さかったと推察されたが、内陸部で地点によっては特に 5 日午前においては越境移流の滞留分に上乗せする形で地域汚染の寄与があったと考えられた。金属成分濃度比から益城において Zn、八代においては V を指標とする発生源の影響が示唆されたが、今回のデータだけで発生源の特定は難しいと考えられた。今後の成分調査により各地域の汚染特性を明らかにしていく必要がある。

越境移流の寄与割合が異なった要因の一つとして内陸部における地上付近の安定層形成が影響していたと考えられた。一般的に沿岸部に比べて内陸部の方が地上付近に安定層が形成されやすいとされており²³⁾、越境移流の寄与が異なる事例は普遍的に生じている可能

性がある。遠隔地と都市部の同時観測により、越境移流の寄与を評価する試み^{17), 24)}が行われているが、遠隔地は沿岸部に位置することが多いと予想される。より正確な評価のためには本研究で明らかになったような地域的な気象条件の違いを考慮すべきだと考えられる。

文 献

- 1) 武林亨, 朝倉敬子, 山田睦子: 大気環境学会誌, **46** (2), 70-76 (2011).
- 2) S. Yonemochi, X. Chen, P. Miao, S. Lu, K. Oh, N. Umezawa: *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, **43**, 140-144 (2013).
- 3) 微小粒子状物質 (PM_{2.5}) に関する専門家会合: 最近の微小粒子状物質 (PM_{2.5}) による大気汚染への対応 (平成 25 年 2 月).
http://www.env.go.jp/air/osen/pm/info/attach/rep_20130227-main.pdf
- 4) 豊永悟史, 村岡俊彦, 北岡宏道: 第 54 回大気環境学会年会要旨集, 222 (2013).
- 5) 国立環境研究所 HP: 平成 25 年度地方環境研究所等との共同研究応募課題一覧
<http://www.nies.go.jp/kenkyu/chikanken/kadai/h25.html>
- 6) II 型共同研究メンバーサイト
<https://project.nies.go.jp/c-ox/forum/>
- 7) 熊本県環境生活部: 大気・化学物質・騒音等環境調査報告書第 48 報, 3-21 (平成 25 年 10 月).
- 8) 環境庁大気保全局大気規制課監修: 浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル (1997).
- 9) 気象庁 HP: 過去の気象データ検索
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 10) NOAA HYSPLIT model :
<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- 11) 環境省: 大気中微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 成分測定マニュアル (平成 25 年 6 月).
- 12) T. Ohara, H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan, T. Hayasaka, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7** (3), 4419-4444 (2007).
- 13) T. Nagatani, M. Yamada, T. Kojima, D. Zhang: *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **6** (1), 41-52 (2012).
- 14) 鵜野伊津志, 若松伸司, 植田洋匡, 村野健太郎, 酒巻史郎, 栗田秀實, 薩摩林光, 寶来俊一: 大気環境学会誌, **32** (6), 404-424 (1997).
- 15) 小倉義光: 一般気象学, 75-77 (1984).
- 16) 岩本真二, 大石興弘, 田上四郎, 力寿雄, 山本重一: 大気環境学会誌, **43** (3), 173-179 (2008).
- 17) 兼保直樹, 佐藤圭, 高見昭憲, 秀森丈寛, 松見豊, 山本重一: エアロゾル研究, **29** (S1), 82-94 (2014).
- 18) 日置正, 中西貞博, 向井人史, 村野健太郎: エアロゾル研究, **21** (2), 160-175 (2006).
- 19) 畠山史郎, 新垣雄光, 渡辺泉, 張代洲: エアロゾル研究, **29** (S1), 95-109 (2014).
- 20) 溝畑朗, 真室哲雄: 大気汚染学会誌, **15** (5), 198-206 (1980).
- 21) 日置正, 紀本岳志, 長谷川就一, 向井人史, 大原利真, 若松伸司: 大気環境学会誌, **44** (2), 91-101 (2009).
- 22) 辻昭博, 日置正: 大気環境学会誌, **48** (2), 82-91 (2013).
- 23) 森口實, 千秋鋭夫, 小川弘: 環境汚染と気象—大気環境アセスメントの技術—, 43-66 (1990).
- 24) 山本重一, 下原孝章, 濱村研吾, 山本勝彦, 谷口延子, 山崎敬久, 長谷川就一, 三田村徳子, 長田健太郎, 田村圭, 家合浩明, 小林優太, 菅田誠治, 大原利真: 第 54 回大気環境学会年会要旨集, 226 (2013).