

PM_{2.5} 高濃度事例及び黄砂飛来事例の解析

松本弘子・辻井温子・佐野七穂・副田大介

福岡市保健環境研究所環境科学課

Analysis of cases of PM_{2.5} high concentration and yellow sand flying

Hiroko MATSUMOTO, Atsuko TSUJII, Nanaho SANO and Daisuke SOEDA

Environmental Science Section, Fukuoka City Institute of Health and Environment

要約

福岡市の PM_{2.5} 濃度は年々減少傾向であるが、黄砂飛来時等において一時的に PM_{2.5} が高濃度となる事例がある。そこで、本市における PM_{2.5} 高濃度事例の要因を把握することを目的として、2017 年度から 2020 年度における PM_{2.5} 高濃度事例及び黄砂飛来事例について、PM_{2.5} 成分分析結果（環境省自動分析装置）、気象データ（天気図、日射量、高層気象等）、大気予測・観測データ（後方流跡線、CFORS、ライダー等）を用いて解析した。市役所局及び元岡局で PM_{2.5} 濃度の日平均値が 35 µg/m³ 以上かつその前後で 1 時間値が 35 µg/m³ 以上であった日を PM_{2.5} 高濃度事例、気象庁の黄砂観測日を黄砂飛来事例として、25 事例を解析対象とした。PM_{2.5} 高濃度事例は 16 事例、黄砂飛来事例は 6 事例、両者の複合事例は 3 事例であった。PM_{2.5} が高濃度となる要因として越境大気汚染等の総観気象が多いものの、局地的な気象要因等による地域大気汚染や火山の影響も受けていることが分かった。

Key Words: 微小粒子状物質 PM_{2.5}, 成分分析 componential analysis, 黄砂飛来 yellow sand flying, 越境大気汚染 transboundary air pollution, 地域大気汚染 local air pollution

1 はじめに

福岡市の PM_{2.5} 濃度は年々減少傾向である^{1, 2)}が、黄砂飛来時等において一時的に PM_{2.5} 濃度が高濃度となる事例がある。九州北部は大陸からの越境移流による影響を受けやすいことが指摘されており^{3, 4)}、濃度上昇を引き起こす要因を明らかにすることは重要である。本市が参加した国立環境研究所と地方環境研究所とのⅡ型共同研究「光化学オキシダントおよび PM_{2.5} 汚染の地域的・気象的要因の解明」では、PM_{2.5} の成分自動測定機による高時間分解能の成分分析データを活用し、越境汚染や地域汚染による PM_{2.5} 高濃度の気象要因の解明を目的とした研究が行われており⁵⁾、これをふまえて、本市の PM_{2.5} 高濃度・黄砂飛来事例について解析を行った。

の PM_{2.5} 成分自動分析装置（ACSA-14, PX-375）による測定結果を使用した。ACSA-14（紀本電子工業製）については PM_{2.5} 質量濃度、SO₄²⁻、NO₃⁻、WSOC（水溶性有機炭素）、OBC（光学的元素状炭素）の濃度が 1 時間単位で測定されており、PX-375（堀場製作所製）については Al、Fe、Pb、Zn 等の金属成分 15 項目が 4 時間単位で測定されている。気象解析には気象庁の天気図及び福岡管区気象台の観測データを、移流経路解析には国立環境研究所地球環境研究センターが開発した METEX (<http://db.cger.nies.go.jp/metex/index.jp.html>) や、九州大学と国立環境研究所が共同で開発した化学天気予報システム CFORS (<https://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/index-j.html>)、九州大学応用力学研究所に設置されたライダー観測データ (<https://www-lidar.nies.go.jp/Fukuoka/index2.html>) を使用した。

2 方法

2.1 使用データ

PM_{2.5} 成分分析データは、福岡大学に設置された環境省

表1 PM_{2.5}高濃度事例

高濃度日	PM _{2.5} 最高濃度※ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	濃度上昇に寄与した成分	Pb/Zn比	総観気象			地域気象			補足事項 特記事項
				前線通過	移動性高気圧 高気圧からの 吹き出し	台風	黄砂	海陸風	逆転層 混合層 高度の 低下	
2017年7月27日	35	SO ₄ ²⁻	0.1~0.35							◎ 7/25桜島噴火
2017年9月19日 ~9月21日	52	SO ₄ ²⁻ , Al	0.4~0.65		◎	○	○		○	9/17台風通過 9/19気象庁煙霧観測
2018年2月23日 ~2月25日	44	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WSOC	0.4~0.6		◎				○ ○	
2018年3月24日 ~3月28日	57	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.2~0.4		◎			○	○ ○	
2018年4月29日 ~5月1日	46	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.2~0.4		◎				○ ○	
2018年7月17日 ~7月20日	51	SO ₄ ²⁻	0.2~0.4 0.7 (7/19)							◎ 7/16桜島噴火
2019年1月14日 ~1月16日	59	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WSOC	0.4~0.5	◎						
2019年1月22日 ~1月24日	35	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WSOC, OBC	0.2~0.4		◎			○	○ ○	
2019年2月25日 ~2月27日	29	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WSOC, OBC	0.2~0.4		◎			○	○	
2019年3月1日 ~3月2日	42	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.4		◎			○	○	
2019年3月22日 ~3月23日	49	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WSOC	0.4	◎	○					
2019年4月5日 ~4月7日	37	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.2~0.4 0.4~0.6 (4/7)		◎			○	○ ○	
2019年6月20日 ~6月22日	43	SO ₄ ²⁻	0.3 0.2~0.8 (6/22)		○			○	○	
2020年2月10日 ~2月12日	60	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.6~0.8 (2/10, 11)		◎			○	○ ○	2/5, 6, 10阿蘇山火山ガス観測 2/10桜島噴火
2020年8月2日 ~8月7日	82	SO ₄ ²⁻	0.2~1.0 0.1~0.2 (8/4~6)					○	○ ○	◎ 日本の南の高気圧に覆われる 西之島噴火
2021年2月7日 ~2月8日	39	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.2~0.6		○					

※ACSA-14によるPM_{2.5}1時間値の最高値

表2 黄砂飛来事例

黄砂観測日	PM _{2.5} 最高濃度※ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	濃度上昇に寄与した成分	Pb/Zn比	総観気象			地域気象			補足事項 特記事項
				前線通過	移動性高気圧 高気圧からの 吹き出し	台風	黄砂	海陸風	逆転層 混合層 高度の 低下	
2018年4月6日 ~4月7日	45	SO ₄ ²⁻ , WSOC, Si, Al	0.1~0.4	○	○		◎			4/6-7気象庁黄砂観測
2018年4月15日 ~4月17日	48	Si, Al, Fe	0.2~0.4	○	○		◎	○		4/15-17気象庁黄砂観測
2020年4月4日 ~4月5日	30	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	0.2~1.0	○			◎			4/4-5気象庁黄砂観測
2020年5月13日	18	SO ₄ ²⁻ , Si, Fe	0.2~0.3		○		◎			5/13気象庁黄砂観測
2021年1月16日	40	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Si, Al, Fe	0.3~0.5	○			◎			1/16気象庁黄砂観測
2021年3月17日 ~3月18日	20	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Si, Al, Fe	0.1~0.6		○		◎			3/17-18気象庁黄砂観測

※ACSA-14によるPM_{2.5}1時間値の最高値

表3 PM_{2.5}高濃度かつ黄砂飛来複合事例

高濃度日	PM _{2.5} 最高濃度※ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	濃度上昇に寄与した成分	Pb/Zn比	総観気象			地域気象			補足事項 特記事項
				前線通過	移動性高気圧 高気圧からの 吹き出し	台風	黄砂	海陸風	逆転層 混合層 高度の 低下	
2017年5月6日 ~5月9日	78	SO ₄ ²⁻ , Si, Al	0.3~0.5	○	○		◎		○ ○	5/6-8気象庁黄砂観測
2019年11月1日 ~11月3日	40	SO ₄ ²⁻ , Si, Al, Fe	0.2~0.4 0.3~0.8 (11/3)		○		◎	○	○ ○	11/1-2気象庁黄砂観測
2021年3月29日 ~3月31日	115	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Si, Al, Fe	0.2~0.4		○		◎			3/29-31気象庁黄砂観測

※ACSA-14によるPM_{2.5}1時間値の最高値

2.2 事例の抽出

市役所局及び元岡局で PM_{2.5} 濃度の日平均値が 35 μg/m³ 以上かつその前後で 1 時間値が 35 μg/m³ 以上であった日を「高濃度日」と定義した。黄砂飛来事例については気象庁が黄砂を観測した日を抽出した。また、ほぼ同一の要因と考えられる場合は、1 事例とした。なお、抽出期間は 2017 年度から 2020 年度の「高濃度日」とした。

2.3 解析方法

高濃度となったと推察される気象的な要因について星取形式で表にまとめた(表 1~3)。気象的な要因については総観気象要因によるものと地域気象要因によるものに分類した。その中で PM_{2.5} 成分分析データ、後方流跡線(METEX)、化学天気予報システム(CFORs)、ライダー観測データを総合的に判断し、高濃度の主要因となるものを「◎」、主要因ではないが高濃度の要因となっているものを「○」で示した。なお、後方流跡線の解析では、市役所局上空 500 m を起点とし、該当日の 12 時から 3 日間遡った。

した後、1 月 24 日の 12 時以降は減少した。PM_{2.5} 濃度の増加に伴い、SO₄²⁻、NO₃⁻、WSOC、OBC 濃度が増加しており、特に高濃度時に NO₃⁻ 濃度の割合が高くなっていた。天気図(図 3)によると、1 月 23 日に寒冷前線が本州を南下していた。気象データより夜間の気温の低下、相対湿度の上昇及び弱風といった条件が揃った際に NO₃⁻ 濃度が高くなる傾向があったため、高湿度下での不均一反応による NO₃⁻ の生成が促進されたものと考えられた。更に 9 時時点の高層気象(図 4)によると 1 月 23、24 日に逆転層が形成されていたため PM_{2.5} の滞留が考えられた。また、後方流跡線(図 5)より、期間中の大陸からの流れ込みが確認された。1 月 23 日の 9 時の CFORS データ(図 6)からは本市における黄砂の影響は確認されず、大陸から九州、四国さらには本州に跨る広範囲な SO₄²⁻ の移流が確認された。

以上の結果を踏まえ、本事例は越境汚染及び地域汚染の複合汚染事例と考えられた。

3 結果および考察

期間中の解析対象事例は 25 事例で、うち PM_{2.5} 高濃度事例は 16 事例(表 1)、黄砂飛来事例は 6 事例(表 2)、PM_{2.5} 高濃度かつ黄砂飛来の複合事例は 3 事例(表 3)であった。以下に代表的な事例の解析を示す。

3.1 PM_{2.5} 高濃度事例

PM_{2.5} 高濃度事例について解析した結果、総観気象が主要因となっているものは 11 事例、火山汚染(地域気象)が主要因となるものは 3 事例であった。総観気象を主要因とする事例のほとんどの後方流跡線は大陸由来であることを示し、越境汚染であることが示唆されたが、成分分析結果及び気象データを解析することで地域汚染の影響も受けていることが示唆された。越境汚染と地域汚染の複合汚染として 2019 年 1 月 22 日~1 月 24 日の事例、火山汚染として 2020 年 8 月 2 日~8 月 7 日の事例の解析結果を以下に示す。

3.1.1 越境汚染と地域汚染の複合汚染事例(2019 年 1 月 22 日~1 月 24 日の事例)

ACSA-14 による測定結果及び気象データを図 1 に、PX-375 による測定結果を図 2 に示す。PM_{2.5} 濃度は 1 月 23 日の 1 時から上昇し、5 時に期間中の最大濃度 34.8 μg/m³ となった。1 月 23 日の 19 時には 12.3 μg/m³ まで減少したものの、再び濃度が上昇し、25 μg/m³ 前後で推移

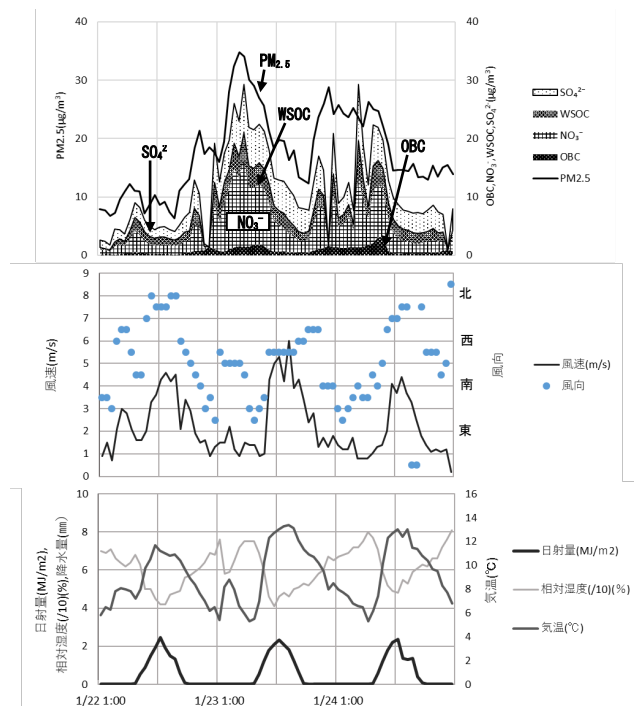


図 1 ACSA-14 測定結果及び気象データ (1/22~1/24)

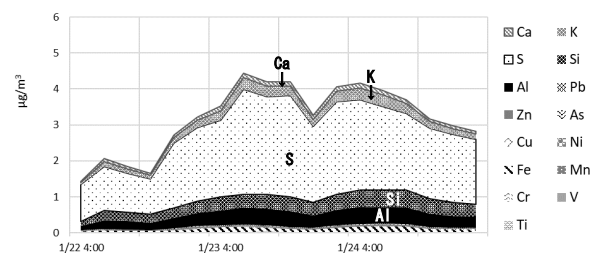


図 2 PX-375 測定結果 (1/22~1/24)

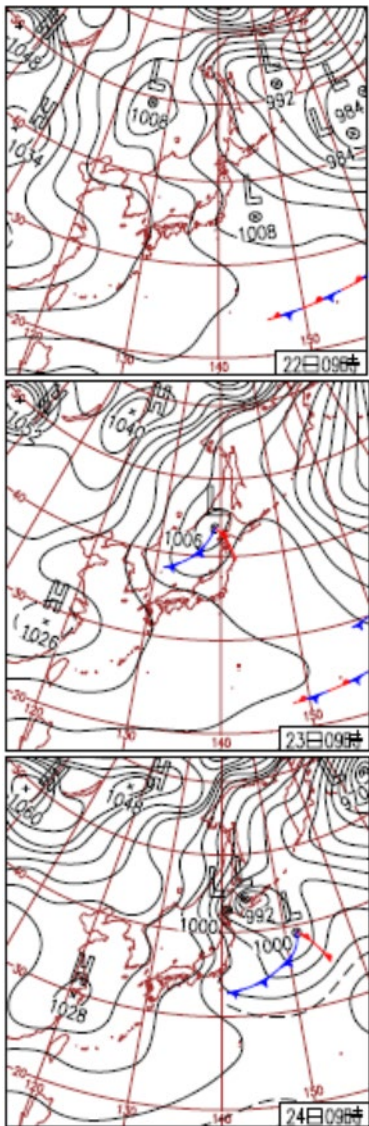


図3 天気図 (1/22~1/24)

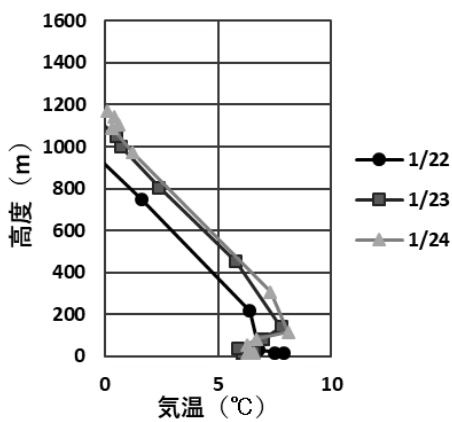


図4 高層気象 (1/22~1/24)

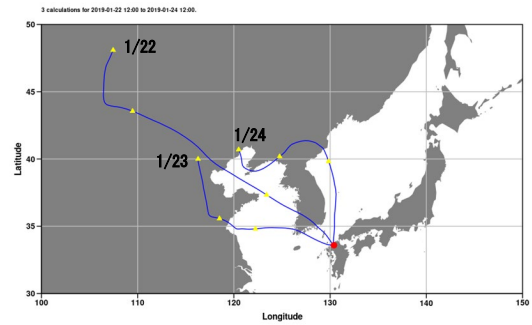
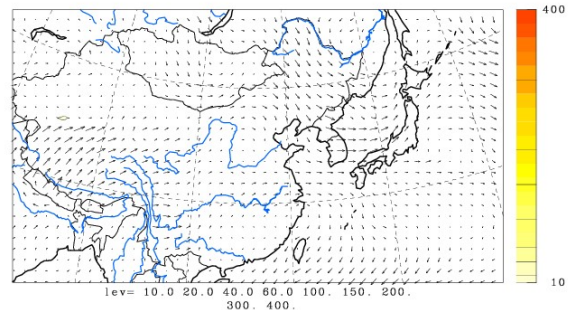


図5 後方流跡線 (1/22~1/24)

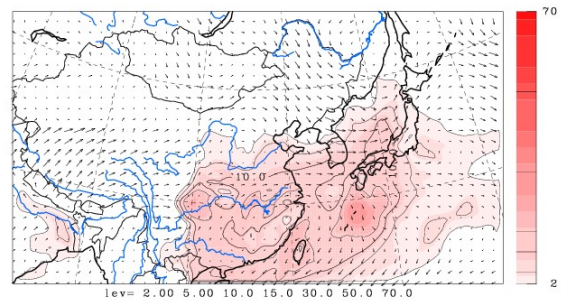
U-V&Dust total m/s&ug/m3 JST
2019/01/23.09:00:00



XUNIT = 6.000E+01, YUNIT = 6.000E+01

©九州大学応用力学研究所(RIAM)/国立環境研究所(NIES)

U-V&Sulfate m/s&ug/m3 JST
2019/01/23.09:00:00



XUNIT = 6.000E+01, YUNIT = 6.000E+01

©九州大学応用力学研究所(RIAM)/国立環境研究所(NIES)

図6 CFORS データ (上: 土壌性ダスト, 下: 硫酸塩エアロゾル)

3.1.2 火山汚染事例 (2020年8月2日~8月7日の事例)

ACSA-14 による測定結果及び気象データを図7に, P X-375 による測定結果を図8に示す. $PM_{2.5}$ 濃度は8月2日の14時から上昇し, 8月5日4時以降に減少した. 8

月6日10時から再び濃度が上昇し、最大 81.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を観測したのち、8月8日8時に減少した。PM_{2.5}濃度増加に伴い、SO₄²⁻濃度が増加していた。天気図(図9)によると、期間中は高気圧に覆われていた。最大風速は8月2日14時の6.3 m/sであったが、全般的には弱風で、期間中の逆転層の形成はなかった。後方流跡線(図10)によると、期間中日本列島の南の海上から流れ込みが確認された。Pb/Zn比は国内起源の場合は0.2~0.3程度、大陸起源の場合は0.5~0.6程度と推定されている⁶⁾。PX-375の測定結果からPb/Zn比を計算したところ、8月3日12時から8月6日16時はPb/Zn比が0.3未満であり、SO₄²⁻濃度上昇の要因は国内汚染の可能性が考えられた。越境汚染以外でPM_{2.5}濃度及びSO₄²⁻濃度上昇に寄与する要因として地域的人為起源によるものや火山からのSO₂がある⁷⁾。火山活動資料(気象庁)によると7月以降小笠原諸島西之島の活発な火山活動が報告され、西之島の噴煙が4~5日程かけて福岡に到達したという報告⁸⁾もあり、PM_{2.5}濃度とSO₄²⁻濃度の挙動が一致していることからこの期間における濃度上昇は火山汚染に起因すると考えられた。

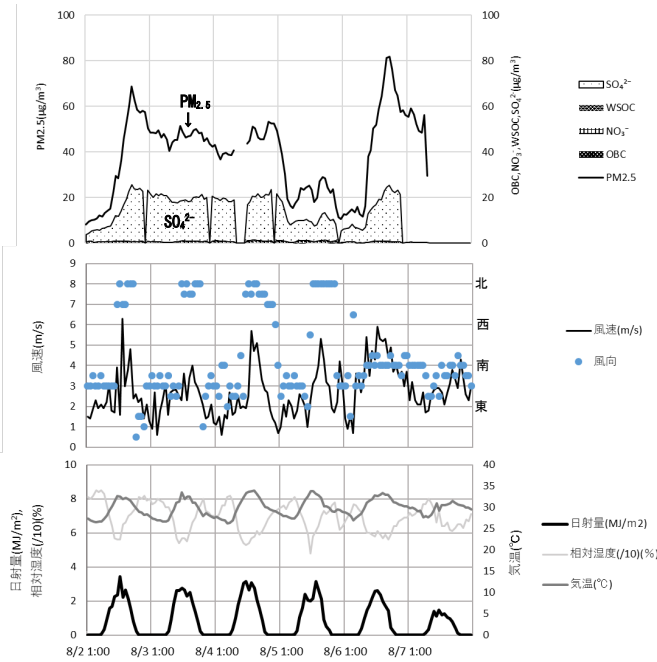


図7 ACSA-14 測定結果及び気象データ (8/2~8/7)

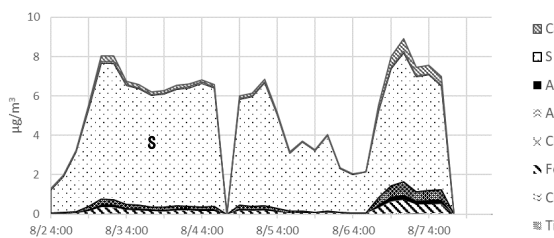


図8 PX-375 測定結果 (8/2~8/7)

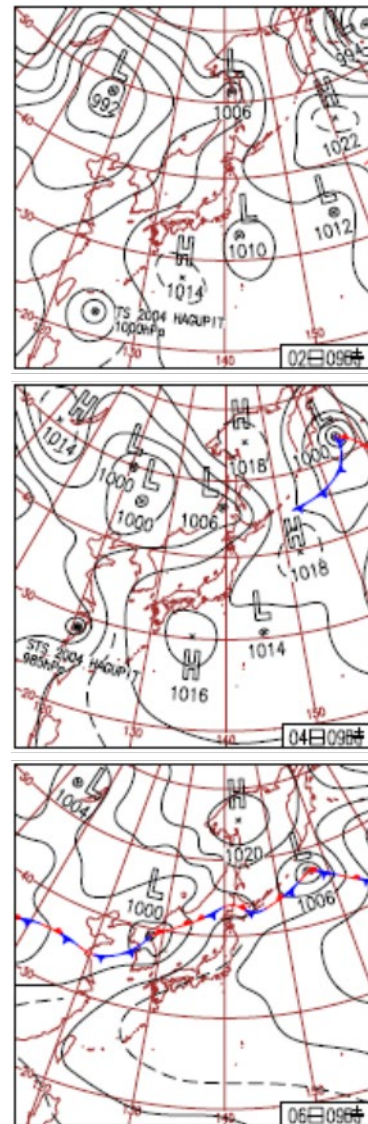


図9 天気図 (8/2, 8/4, 8/6)

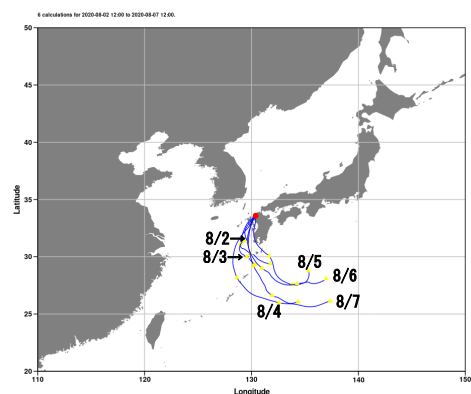


図10 後方流跡線 (8/2~8/7)

3.2 黄砂飛来事例 (2018年4月15日~4月17日の事例)

ACSA-14による測定結果及び気象データを図11に、

PX-375 による測定結果を図 12 に示す。PM_{2.5}濃度は4月15日3時から上昇し、4月17日の18時以降に減少した。PM_{2.5}濃度の増加に伴い、Si, Al, Fe, SO₄²⁻の濃度が増加していた。天気図(図13)によると、4月15日に寒冷前線が通過し、その後は高気圧に覆われ4月17日の降水に伴いPM_{2.5}濃度の減少がみられた。最大風速は4月16日15時の6.4 m/sで、期間中は風速3.0 m/s前後で推移し、逆転層の形成は見られなかった(図14)。後方流跡線(図15)によると、4月16、17日に大陸北西部からの流れ込みが確認された。黄砂由来の土壌性ダストの特徴的な成分としてSi, Al, Feが挙げられる⁹⁾が、PX-375成分データよりSi, Al, Feが増加しており、CFORS(図16)データからも大陸からの黄砂の影響が示唆された。また、黄砂の移流と同時に期間中SO₄²⁻の濃度は3μg/m³前後で推移しておりSO₄²⁻の寄与率は低いものの、黄砂の輸送経路上の影響を受け、人為汚染物質が若干混在していると考えられた。

以上の結果を踏まえ、本事例では黄砂の飛来により一時的にPM_{2.5}濃度が上昇したと考えられた。

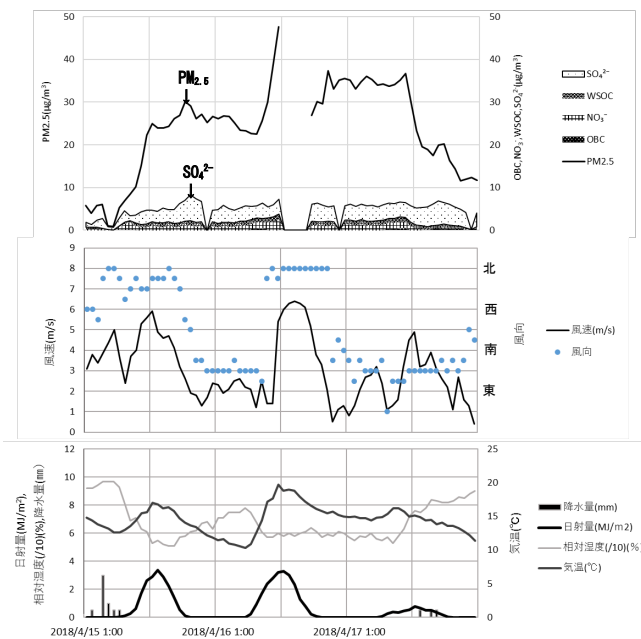


図 11 ACSA-14 測定結果及び気象データ (4/15~4/17)

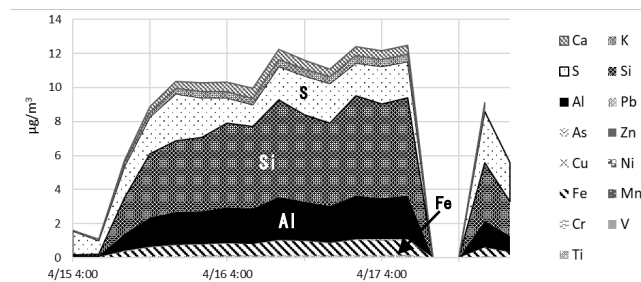


図 12 PX-375 による測定結果 (4/15~4/17)

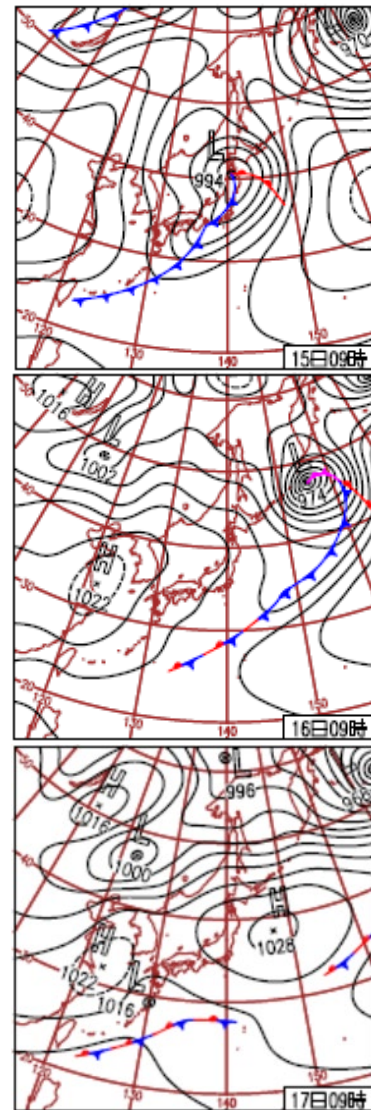


図 13 天気図 (4/15~4/17)

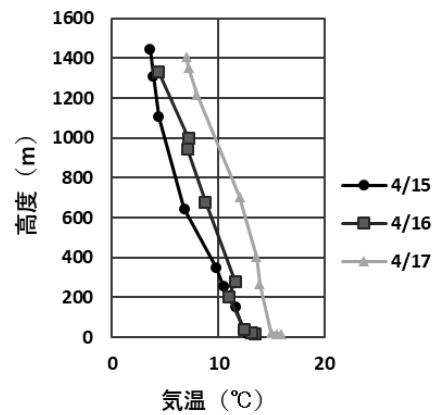


図 14 高層気象 (4/15~4/17)

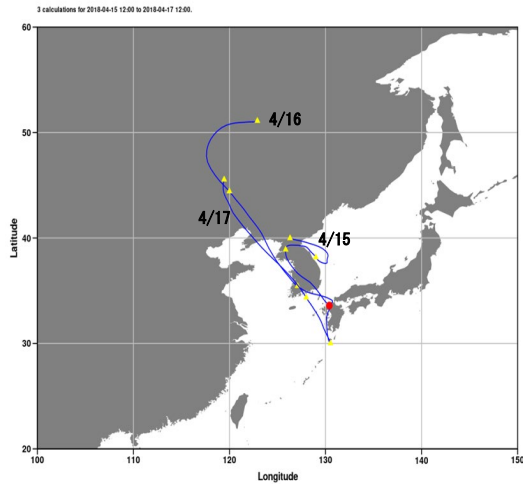


図 15 後方流跡線 (4/15~4/17)

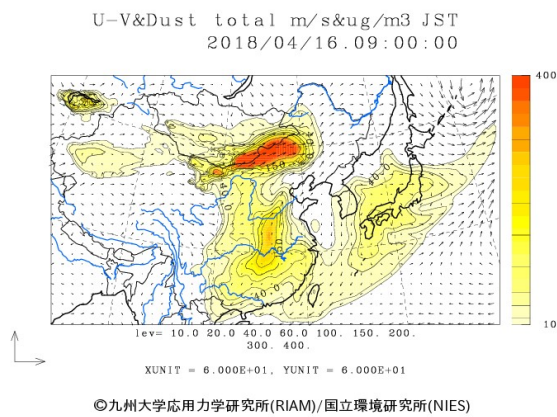


図 16 CFORS データ (土壌性ダスト)

3.3 PM_{2.5} 高濃度かつ黄砂飛来複合事例 (2017 年 5 月 6 日~5 月 9 日の事例)

ACSA-14 による測定結果及び気象データを図 17 に、PX-375 による測定結果を図 18 に示す。PM_{2.5} 濃度は 5 月 6 日 17 時から上昇し、5 月 7 日 3 時以降に減少した。5 月 7 日 13 時から再び濃度が上昇し、最大 77.7 µg/m³ を観測したのち、5 月 9 日 7 時に減少した。PM_{2.5} 濃度の増加に伴って SO₄²⁻、NO₃⁻、WSOC、Si、Al 濃度が上昇していた。天気図 (図 19-1、19-2) によると、5 月 7 日に寒冷前線が通過し、その後は高気圧に覆われ 5 月 8 日に大陸南部からのびてきた前線が 9 日に九州付近を東進していた。最大風速は 5 月 9 日 17 時の 7.8 m/s であったが期間中は風速 2.5 m/s 前後で推移し、5 月 8 日に逆転層の形成 (図 20) が見られた。後方流跡線 (図 21) によると、5 月 7 日から 5 月 9 日に大陸からの流れ込みが確認された。また、CFORS データ (図 22) より 5 月 7 日から 5 月 9 日に大陸からの黄砂の移流が確認された。5 月 6 日に SO₄²⁻ 濃度が 13.7 µg/m³ まで上昇し人為汚染物質の流入が

示唆された。5 月 7 日から 5 月 9 日に Al、Si の濃度が上昇し、黄砂により PM_{2.5} 濃度の高い状態が続いたと考えられた。5 月 8 日から 5 月 9 日にさらに PM_{2.5} 濃度が上昇した理由としては同期間に Pb/Zn 比が 0.5 前後で推移していたため黄砂の飛来に加えて中国大陸南部からの移流の影響も受けていたことが示唆された。

以上の結果を踏まえ、本事例では越境汚染、黄砂の飛来による複合的な要因により PM_{2.5} 濃度が上昇したと考えられた。

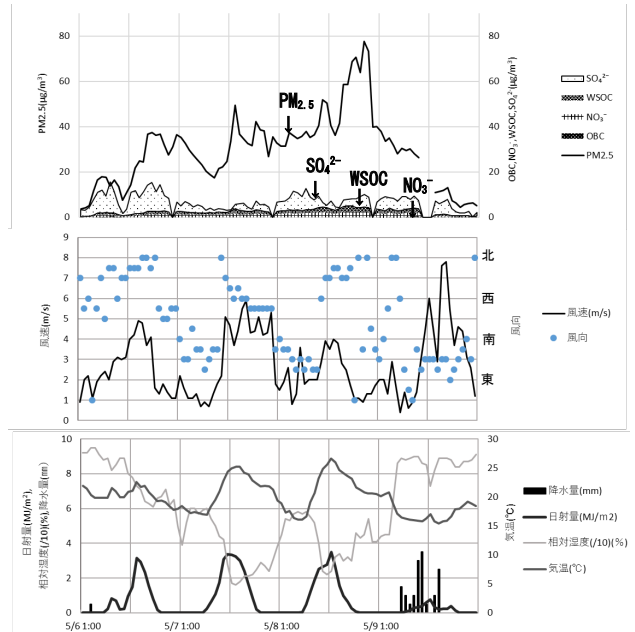


図 17 ACSA-14 測定結果及び気象データ (5/6~5/9)

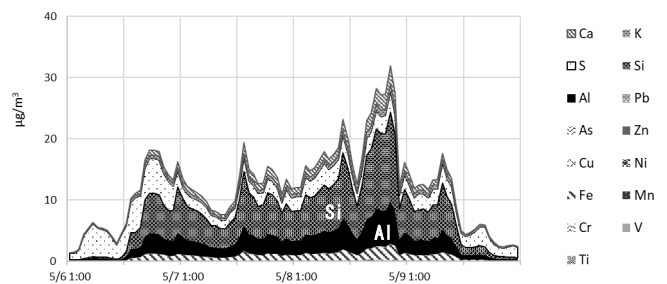


図 18 PX-375 測定結果 (5/6~5/9)

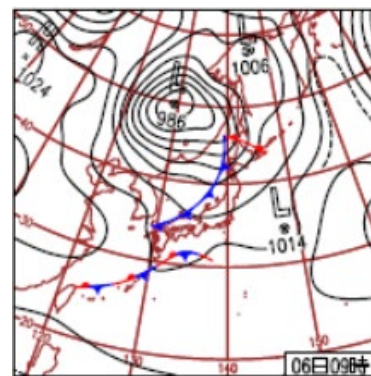


図 19-1 天気図 (5/6)

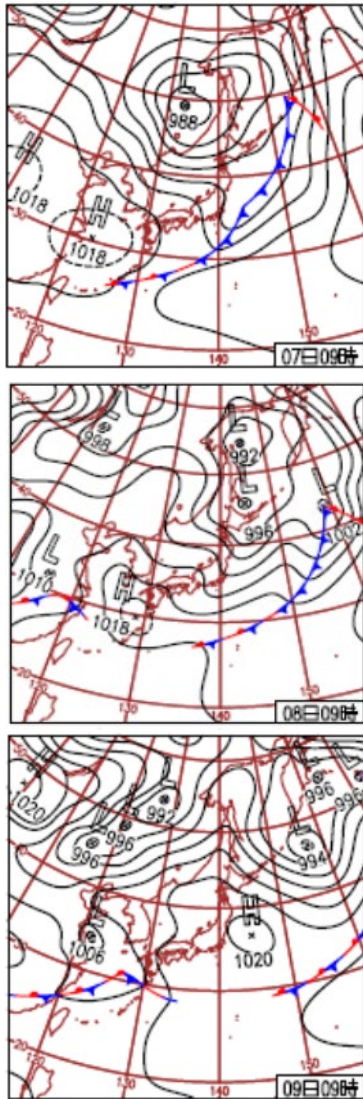


図 19-2 天気図 (5/7~5/9)

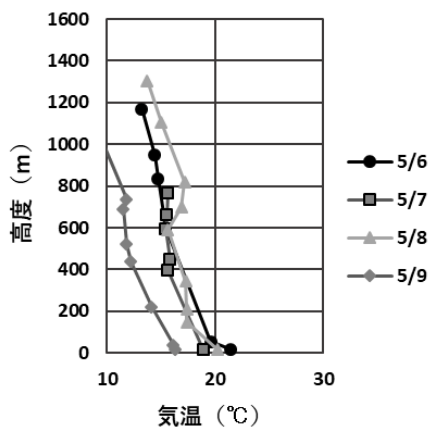


図 20 高層気象 (5/6~5/9)

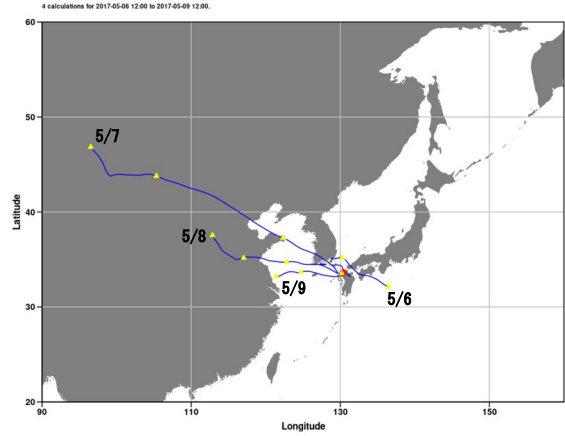
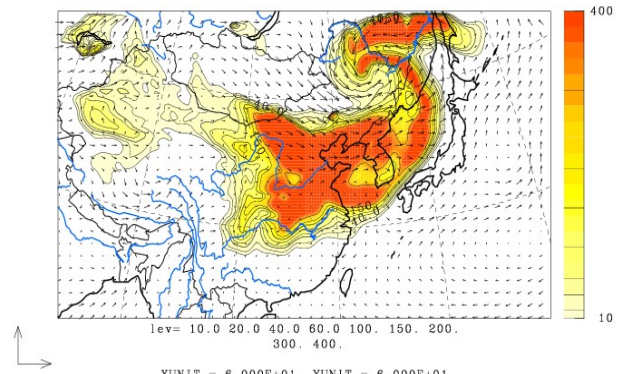


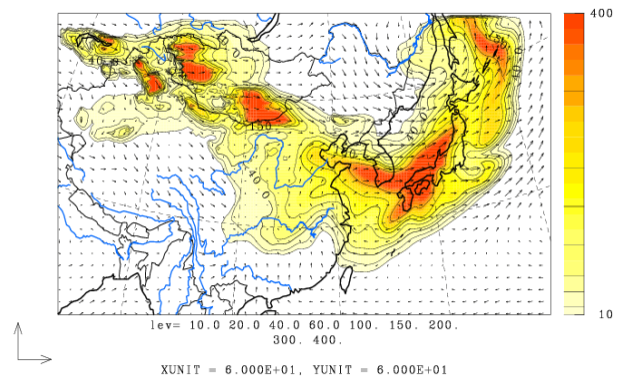
図 21 後方流跡線 (5/6~5/9)

U-V&Dust total m/s&ug/m3 JST
2017/05/06.09:00:00



©九州大学応用力学研究所(RIAM)/国立環境研究所(NIES)

U-V&Dust total m/s&ug/m3 JST
2017/05/07.21:00:00



©九州大学応用力学研究所(RIAM)/国立環境研究所(NIES)

図 22 CFORS データ (土壌性ダスト)

4 まとめ

本市の PM_{2.5} 高濃度及び黄砂飛来事例の解析を行った結果、解析対象とした 25 事例のうち PM_{2.5} 高濃度事例は 16 事例、黄砂飛来事例は 6 事例、両者の複合事例は 3 事例であった。対象事例の約 7 割が 1 月から 4 月にかけて出現しておりほとんどの後方流跡線は大陸由来であることを示し、越境汚染であることが示唆された。一方で、海陸風及び逆転層の形成といった局地的な気象条件による地域汚染や、夏季の太平洋高気圧による火山噴火の影響を受けている事例があることがわかった。また、黄砂飛来事例については、気象条件や輸送経路の影響により黄砂成分と連動して人為汚染物質が上昇する事象や黄砂飛来に加えて中国大陸南部からの移流が示唆される事象が確認された。今後も本市における PM_{2.5} 濃度の推移について注視していく必要がある。

文献

- 1) 鶴野 伊津志, 他: PM_{2.5} 越境問題は終焉に向かっていくのか?, 大気環境学会誌, 52 (6), 177~184, 2017
- 2) Uno, I. et al: Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China, Scientific Reports, 10, Article number 6450 (4月15日発行), 2020
- 3) 兼保 直樹, 他: 九州北部における春季の高濃度 PM_{2.5} と長距離輸送, 大気環境学会誌, 45 (5), 227~234, 2010
- 4) Kaneyasu, N., et al: Impact of long-range transport of aerosols on the PM_{2.5} composition at a major metropolitan area in the northern Kyushu area of Japan, Atmos. Environ., 97, 416~425, 2014
- 5) 国環研と地環研等との第Ⅱ型共同研究: PM_{2.5} の環境基準超過をもたらす地域的/広域的汚染機構の解明 (平成 28 年~平成 30 年度)
- 6) 日置正, 他: 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 (2), 91~101, 2009
- 7) 山村由貴, 他: 夏季の太平洋高気圧条件下における高濃度 PM_{2.5} に対する火山の寄与解析, 大気環境学会誌, 55 (4), 169~181, 2020
- 8) FUKUDAism: 九州地方8月上旬の煙霧は「西之島噴火」の噴煙が原因, 2020
- 9) 西川雅高: 黄砂エアロゾルのふるまいについて, 環境化学, 3 (4) 673~682, 1993