令和3年度黄砂飛来状況調査 報告書

令和5年3月

環 境 省

令和3年度黄砂飛来状況調査 報告書

令和5年3月

環境省

黄砂問題検討会委員名簿

		氏名	所属・職名
委員	植松	光夫	埼玉県環境科学国際センター 総長
委員	鵜野	伊津志	国立大学法人九州大学 応用力学研究所地球環境力学部門 特任教授
委員	大黒	俊哉	国立大学法人東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
委員	長田	和雄	国立大学法人名古屋大学大学院 環境学研究科地球環境科学専攻 教授
座長	清水	厚	国立研究開発機構国立環境研究所 地域環境保全領域広域大気研究室 主幹研究員
委員	西川	雅高	国立研究開発機構国立環境研究所 環境リスク・健康領域基盤計測センター 客員研究員
委員	眞木	貴史	気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部第三研究室 室長
委員	三上	正男	一般財団法人気象業務支援センター 振興部国際業務課 専任主任技師 研究推進部部長代理・国際業務課長
委員	吉川	貝	国立大学法人岡山大学 名誉教授 岡山大学・地域総合研究センター 特命教授

(50音順)



報告書の要旨 目次

1.	調査目	l的	i
		>観測状況	
	2.1	黄砂の観測状況	
	2.2	黄砂観測日の SPM 濃度	
3.	煙霧事	事例の観測状況	
		手度における黄砂日の事例解析	
	4.1	解析手法	
	4.2	黄砂の観測事例	
	4.3	黄砂日の解析結果	
5.	2021 ⁴	手度における煙霧日の事例解析	
	5.1	解析手法	
	5.2	煙霧の観測事例	
	5.3		
6.	黄砂·	· 煙霧事例におけるの PM2.5 濃度	
	6.1	黄砂・煙霧事例における PM2.5 環境基準超過についての解析	
	6.2	黄砂・煙霧事例における PM2.5 成分濃度	
7.	2021 ⁴	 	
	7.1	PM2.5/PM10 濃度比による弱い黄砂検出手法の検討	
	7.2	気象庁で観測されなかった黄砂事例	
	7.3	人工衛星を用いた黄砂給出手法の検討	

報告書の要旨

1. 調査目的

環境省では、2002年度から、我が国に飛来してきた黄砂について、その実態を科学的に把握するために黄砂実態解明調査を実施している。本報告書は、2021年度に飛来した黄砂について、その状況をとりまとめたものである。

2. 黄砂の観測状況

2.1 黄砂の観測状況

2021 年度は 2020 年度に比べ黄砂観測日が減少しており、2021 年 5 月と 2022 年 3 月に多く黄砂が観測された。都道府県別の黄砂日延べ日数を整理した結果、例年通り西日本で多く観測されているが、沖縄では約 9 年ぶりに黄砂が観測された。

2.2 黄砂観測日の SPM 濃度

黄砂日における黄砂観測時間を考慮し、SPM 濃度を整理した。その結果、2021 年度は計 6 事例の黄砂が観測されたが、6 事例とも SPM 濃度は低く、弱い黄砂であった。

3. 煙霧事例の観測状況

2021年度は煙霧事例として抽出された測定局数が、年間で158局あった。煙霧事例時の延べ日数の経月変化は、3月に多く見られており、例年通り九州・沖縄・中国地方で煙霧が多く観測された。

4. 2021 年度における黄砂日の事例解析

4.1 解析手法

黄砂を多角的に把握するため、天気図、砂塵嵐の発生状況、SPM 濃度全国分布、後方流跡線、CFORS 予測結果、ライダー黄砂消散係数、黄砂消散係数と SPM 濃度の関係、ACSA-14 による大気汚染物質濃度の時間値、PM2.5/SPM の比、湿度、中国における PM2.5 などのデータを比較して飛来状況を解析した。また、これらの結果から黄砂の状況と大気汚染物質の混在状況についてレーダーチャートにより評価した。黄砂の状況把握には、アジア中央部での黄砂の発生状況、日本南岸に前線が位置する気圧配置、モンゴルからの方向を示す後方流跡線、ライダーでの黄砂消散係数と SPM 濃度の同時上昇、PM2.5/SPM の比の低下などがその判断として有効と思われた。大気汚染物質の混在状況については、SO42の上昇、中国沿岸部からの方向を示す後方流跡線、PM2.5/SPM の比の上昇などをもとに判断した。

4.2 黄砂の観測事例

2021 年度に気象台が日本国内のいずれかの地点で黄砂を観測した日は、合計で12日であり、連続した日を1つの黄砂事例とすると、6事例になる。これら黄砂6事例について詳細にその状況を示した。

4.3 黄砂日の解析結果

2021年度の黄砂日6事例について、各事例の概要は以下のとおりである。

事例	年	月	日	地点数	観測地点	概要
1	2021	4	17	1	福岡	4月14日及び15日に発生したモンゴル南部に おける dust や duststorm が、人為起源汚染物質を
1	2021	4	18	1	那覇	おける dust や duststorm か、人為起源仍架物質を 含み、日本に飛来した弱い黄砂事例
	2021	5	8	5	札幌、新潟、東京、 福岡、高松	5月5日・6日に発生した中国東部やモンゴル中
2	2021	5	9	8	仙台、新潟、名古屋、 大阪、広島	部などにおける dust や duststorm が、人為起源汚 染物質を含み北日本・東日本に飛来、翌日以降
	2021	5	10	2	福岡、鹿児島	には西日本に広がる広範囲な黄砂事例
3	2021	5	25	4	広島、福岡、鹿児島、 高松	5月22日に発生したモンゴル南部における dust や duststorm と、人為起源汚染物質を含んだ黄砂
3	2021	5	26	1	鹿児島	が飛来した弱い黄砂事例
4	2022	3	5	4	広島、福岡、鹿児島、 高松	3月5日にモンゴル南部で発生したduststormと、 人為起源汚染物質を含んだ空気塊が、西日本に
4	2022	3	6	1	那覇	飛来した弱い黄砂事例
5	2022	3	17	1	福岡	モンゴルで発生した dust を含む空気塊が、人為 起源汚染物質を含みつつ、限定的な地域に飛来 した弱い黄砂事例
6	2022	3	27	1	福岡	3 月 24 日・25 日のモンゴルにおける duststormの影響を含んだ空気塊が、若干の人為起源汚染
U	2022	3	28	1	福岡	物質を含み、日本の限定的な地域に飛来した弱 い黄砂事例

5. 2021 年度における煙霧日の事例解析

5.1 解析手法

黄砂と同様に、粒子の影響で視程の低下をもたらしているものに煙霧がある。気象庁での煙霧の定義は、「乾いた微粒子によって視程が 10km 未満となった場合で、乾いたとは湿度 75%未満」としている。上記定義に従い、2021 年度に日本で観測された煙霧のうち、10 地点以上で同時に観測された事例を対象とし、解析を行った。解析項目は黄砂事例での解析項目の、(1) 煙霧観測地点、(2) 天気図、(3) 現在天気データ、(4) 後方流跡線、(5) CFORS、(6) ライダー黄砂消散係数・SPM 濃度、(7) PM2.5 濃度、(8) ACSA-14 データ、(9) 中国での PM2.5 データである。

5.2 煙霧の観測事例

2021 年度に日本で観測された煙霧のうち、10 地点以上で同時に観測された日を解析対象とすると、合計で10日間であった。連続した日を1つの煙霧現象とすると、8事例になる。これらの煙霧事例につ

5.3 煙霧事例の解析結果

2021 年度に 59 局の気象観測所で同時に 10 地点以上煙霧が観測された 8 つの煙霧事例について、各事例の概要は以下のとおりである。

事例	年	月	日	地点数	観測地点	概要
	2021	12	25	10	稚內、長崎、下関、大分、宮崎、室蘭、旭川、青森、秋田、福島	大陸から飛来した空気塊に、人為起
1	2021	12	26	11	雅内、秋田、新潟、金沢、広島、 網走、函館、福井、室蘭、札幌、 松江	源の fSO ₄ ² -が混合した弱い煙霧事例
2	2022	1	3	10	稚內、旭川、青森、函館、札幌、網走、帯広、室蘭、秋田、金沢	大陸から飛来した空気塊が人為起 源汚染物質を含み、日本に飛来した 弱い煙霧事例
3	2022	1	28	10	下関、宮崎、松山、大分、長崎、熊本、佐賀、仙台、札幌、秋田	大陸から飛来した空気塊に、国内で 発生したと考えられる人為起源汚 染物質を含んだ弱い煙霧事例
4	2022	2	2	11	秋田、稚内、福岡、長崎、佐賀、松江、下関、松山、熊本、大分、宮崎	大陸から飛来した空気塊に、国内・ 国外で発生した人為起源汚染物質 を含む弱い煙霧事例
5	2022	2	5	10	長崎、佐賀、熊本、稚内、松江、宮崎、新潟、秋田、網走、鳥取	大陸から飛来した空気塊に、国内で 発生したと考えられる人為起源汚 染物質を含んだ煙霧事例
6	2022	2	27	15	雅內、函館、網走、下関、長崎、 福岡、金沢、松江、松山、佐賀、 熊本、大分、鹿児島、札幌、名瀬	大陸から飛来した空気塊に、国外で 発生したと思われる人為起源汚染 物質を含んだ弱い煙霧事例
7	2022	3	2	16	長崎、大分、下関、福岡、宮崎、 鹿児島、京都、広島、徳島、高松、 岡山、名瀬、稚内、松江、神戸、 水戸	西日本:大陸から飛来した空気塊に モンゴルで発生した dust と人為起 源汚染物質を含んだ煙霧事例 東日本:大陸からの影響を受けてい るものの、dust、人為起源汚染物質 のどちらの影響も少ない煙霧事例
	2022	3	24	10	鳥取、福岡、下関、松江、長崎、 金沢、彦根、佐賀、富山、津	大陸で発生した dust、slight duststorm の影響を大きく受けた空気塊が、人
8	2022	3	25	14	岐阜、津、金沢、富山、神戸、和 歌山、福井、京都、奈良、岡山、 大分、新潟、彦根、高松	為起源汚染物質を伴い飛来した事 例であると考えられ、黄砂日と酷似 している事例

6. 黄砂・煙霧事例における PM2.5 濃度

6.1 黄砂・煙霧事例における PM2.5 環境基準超過についての解析

2021 年度の黄砂事例における PM2.5 平均濃度は 11.8µg/m³、日平均値 35µg/m³ の超過率は 0.20%で、前年度と比較して、大幅に減少していた。同様に、煙霧日における平均濃度は11.6µg/m³、日平均値35µg/m³ の超過率は 0.1%であり、黄砂事例時の PM2.5 と同様、前年度と比較して大幅に減少していた。

6.2 黄砂・煙霧事例における PM2.5 成分濃度

2021 年度の成分分析調査結果のうち、PM2.5 の重量濃度が $20\mu g/m^3$ 以上であり、かつ黄砂もしくは煙霧が観測された地点を抽出し、成分の項目別に濃度などを調べた。抽出の結果、黄砂時のデータは 5 データであり、煙霧日のデータは 23 データが抽出された。黄砂事例の重量濃度の平均は $30.0\mu g/m^3$ 、煙霧事例におけるその平均は $28.6\mu g/m^3$ であった。金属成分に関しては、黄砂事例時には Al と E が顕著に高くなっており、煙霧時には E が顕著に高く、次いで E が高くなっていた。イオン成分などに関しては、黄砂事例時には硫酸イオン(E が顕著に高く、次いで E が高くなっていた。イオン成分などに関しては、黄砂事例時には硫酸イオン(E が他のイオンなどと比較し非常に高くなっており、次いで、有機炭素(E のE のE のE が他のイオンなどと比較し非常に高くなっている。

7. 2021 年度における黄砂の飛来状況の評価、包括的解析手法の検討等について 7.1 PM2.5/PM10 濃度比による弱い黄砂検出手法の検討

ここでは弱い黄砂検出手法の検討のために、PM10 濃度は黄砂日には高い値となる傾向にあることから、PM10 に対する PM2.5 の比が 0.2 以下、かつ PM10 濃度が $80\mu g/m^3$ の日時を抽出しその日時を気象庁で観測されなかった黄砂日と仮定した。その結果、気象庁で観測されなかった黄砂日と仮定された事例を 2 事例抽出した。

7.2 気象庁で観測されなかった黄砂事例

7.1 の手法により抽出された気象庁で観測されなかった黄砂事例は 2 事例となり、各事例の概要は以下のとおりである。

事例	年	月	日	地点	抽出された時間	概要
1	2021	5	4	五島	20:00-22:00	東アジア域における duststorm により発生した黄砂が、5月4日に発生した若干の人為起源系汚染物質を含み飛来し、九州地方の狭い域で広がった黄砂事例
				赤穂	11:00	東アジア域で発生した slight duststorm、dust により3月26日0:00頃から、人為起源系汚染物質を多く含まない黄砂が飛来し、九州地方から近畿地方にかけ広がった弱い黄砂事例。
2	2022	3	26	五島	0:00-2:00	2022 年 3 月 26 日~27 日には福岡で黄砂が観測されており、福岡での観測に先立ち五島周辺に飛来した黄砂であった可能性が示唆された。

7.3 人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討

PM2.5/PM10 濃度比やライダーデータといった観測データに基づく黄砂検出手法を補足し、黄砂飛来 状況をより直接的に把握するため、人工衛星を用いた黄砂検出手法について調査を行った。本年度は、 昨年度の文献調査結果も踏まえて、中国により打ち上げられた静止衛星「風雲 4 号」(Fēngyún-4、略称 FY-4)による観測データを用い、特定の黄砂日について可視化することで、人工衛星を用いた黄砂検出 手法の検討を行った。

令和3年度黄砂飛来状況調査報告書 目次

内容

1. 調査	目的	1
2. 黄砂	の観測状況	2
2.1	黄砂の観測状況	2
2.2	黄砂観測日における SPM 濃度	4
(1)	2021 年度における黄砂観測時間と SPM 濃度平均時間	4
(2)	黄砂時における各都道府県の量的指標	5
(3)	過去の黄砂事例と 2021 年度の黄砂事例との比例	8
3. 煙霧@	の観測状況	10
3.1	煙霧日及び煙霧事例として抽出された測定局数の推移	10
3.2	煙霧日として抽出された日数における煙霧観測測定局数の割合	11
3.3	地域区分ごとの煙霧日として抽出された測定局数の変化	12
4. 2021	年度における黄砂日の事例解析	
4.1	黄砂日の事例解析	16
(1)	黄砂観測地点	17
(2)	気象概況	17
(3)	SPM 濃度全国分布	17
(4)	アジア域における気象状況	17
(5)	後方流跡線	19
(6)	CFORS (Chemical weather FORecasting System)	19
(7)	ライダー	20
(8)	PM2.5 日平均濃度	20
(9)	PM2.5 自動測定器 ACSA-14 の活用	20
(10)) 中国における PM2.5 の 1 時間値データ	21
(11)) レーダーチャートによる評価	21
4.2	黄砂の観測事例	22
4.3	黄砂日の解析結果	24
(1)	黄砂事例 1 2021 年 4 月 17 日~18 日	24
(2)		
(3)		
(4)	黄砂事例 4 2022 年 3 月 5 日~6 日	59
(5)		
(6)	黄砂事例 6 2022 年 3 月 27 日~3 月 28 日	77
4.4	各黄砂事例におけるイオン成分/PM10 の変化	
4.5	2021 年度に観測された黄砂事例のまとめ	90

5. 2021	年度における煙霧日の事例解析	92
5.1	解析手法	92
(1)	煙霧観測地点	92
(2)	解析項目	92
5.2	2021 年度の煙霧事例	92
5.3	煙霧事例の解析結果	94
(1)	煙霧事例 1 2021 年 12 月 25 日~26 日	94
(2)	煙霧事例 2 2022 年 1 月 3 日	102
(3)	煙霧事例 3 2022 年 1 月 28 日	108
(5)	煙霧事例 5 2022 年 2 月 5 日	121
(6)	煙霧事例 6 2022 年 2 月 27 日	128
(7)	煙霧事例7 2022年3月2日	135
(8)	煙霧事例8 2022年3月24日~25日	143
5.4	2021 年度煙霧事例のまとめ	151
6. 2021	年度における黄砂・煙霧事例の PM2.5 濃度のデータ整理と解析	154
6.1	黄砂・煙霧時における PM2.5 環境基準超過状況についての解煙	
6.2 j	黄砂・煙霧日における PM2.5 成分濃度の解析	157
7. 2021	年度における黄砂の飛来状況の評価、包括的解析手法の検討等について	166
7.1	PM2.5/PM10 濃度比による気象庁で観測されなかった黄砂日の検出手法の検討	167
7.2	気象庁で観測されなかった黄砂事例	169
(1)	気象庁で観測されなかった黄砂事例1:2021年5月4日	169
(2)	気象庁で観測されなかった黄砂事例 2:2022年3月26日	177
7.3	人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討	
8. 今後の	り課題	190

1. 調査目的

黄砂は、黄河地域や既存の砂漠等から発生する自然現象としてとらえられてきたが、近年では過放牧や農地転換などによる耕地の拡大も原因とされ、人為的影響による環境問題として再認識されつつある。黄砂は、植物や交通機関に影響を与えるほか、呼吸器疾患等の健康影響の可能性が指摘されている。しかし、飛来した黄砂の物理的、化学的な実態については必ずしも解明されていない。また、黄砂が中国大陸から飛来する際に混在する人為的発生源からの汚染物質の影響も懸念される。

本報告書は、わが国における黄砂エアロゾルの飛来状況を科学的に把握するとともに、わが国に飛来した黄砂の実態解明に資することを目的として、2021年度に飛来した黄砂の状況についてまとめたものである。

2. 黄砂の観測状況

2.1 黄砂の観測状況

黄砂の観測日数について経年変化、経月変化、地点別日数などの整理を行った。黄砂観測地点は、2020年2月3日に11地点(札幌、仙台、東京、新潟、名古屋、大阪、広島、高松、福岡、鹿児島、那覇)となったため、黄砂観測日数の経年変化は過去にさかのぼって11地点における黄砂観測日数として整理しており、地点別日数については観測地点の県毎に、観測日数の多い順に整理した。

年間を通じた黄砂観測地点数と黄砂観測日数の積(黄砂観測延べ日数)は、その年度における黄砂の規模のおおよその量的指標を表すと考えられる。ここでは、2021年度を含む、2002年度から20年間の過去の黄砂観測延べ日数について、その経年変化を図2-1-1にまとめた。2021年度の黄砂観測延べ日数は30日となっており、2020年度に比べ減少した。また、図2-1-2に2021年度の黄砂観測日数の経月変化を示しており、5月と3月に黄砂が多く観測されている様子が見られた。

図 2-1-3 に都道府県別の黄砂観測日数を、多い順に示した。2021 年度は黄砂観測を行っている 11 地 点全てで黄砂が観測されているが、例年通り西日本で多く観測された。また 2021 年度は 2012 年 12 月 以来、約9年ぶりに那覇で黄砂が観測された。

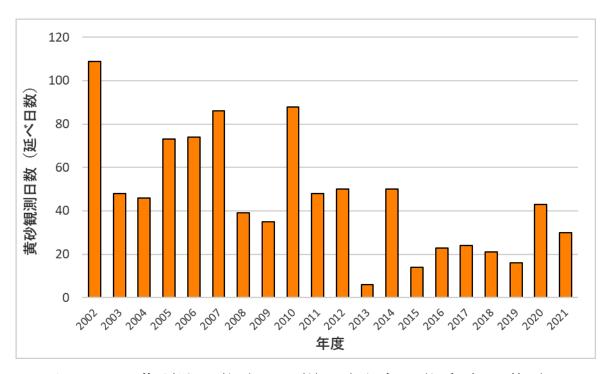


図 2-1-1 黄砂観測日数(延べ日数)の経年変化(年度ごとに整理)

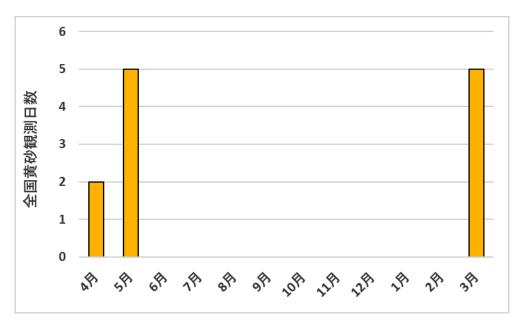


図 2-1-2 黄砂観測日の経月変化 (2021 年度)

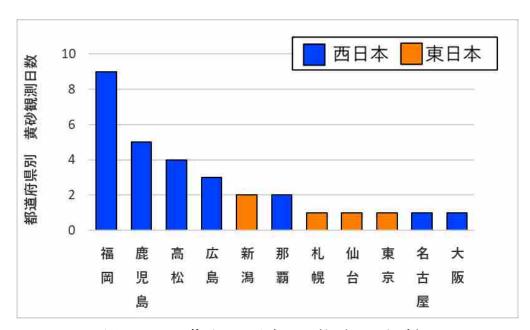


図 2-1-3 黄砂日の地点別日数 (2021 年度)

2.2 黄砂観測日における SPM 濃度

(1) 2021 年度における黄砂観測時間と SPM 濃度平均時間

2021 年度の黄砂観測日における黄砂が観測された時間(黄砂観測時間)及び SPM 濃度の平均の算出に使用した時間(濃度平均時間)を表 2-2-1 にまとめた。

表 2-2-1 2021 年度における黄砂観測時間及び濃度平均時間

	3 ₹ 2-2- 1		WOOD DEED	就例时间及UI及及下	THI DATE OF THE PARTY OF THE PA
黄砂事例	黄砂観測日	観測地点数	観測地点	黄砂観測時間	濃度平均時間
1	2021/4/17	1	福岡	16:00 ~ 22:00	16:00 ~ 22:00
1	2021/4/18	1	那覇	3:00 ~ 6:30	3:00 ~ 7:00
			札幌	11:00 ~ 17:00	11:00 ~ 17:00
			新潟	6:55 ~ 24:00	6:00 ~ 24:00
	2021/5/8	5	東京	15:30 ~ 17:45	15:00 ~ 18:00
			福岡	11:00 ~ 24:00	11:00 ~ 24:00
			高松	9:00 ~ 20:00	9:00 ~ 20:00
			仙台	8:50 ~ 17:50	8:00 ~ 18:00
			新潟	0:00 ~ 13:00	0:00 ~ 13:00
2			名古屋	9:30 ~ 16:30	9:00 ~ 17:00
	2021/5/9	8	広島	5:50 ~ 11:30	5:00 ~ 12:00
	2021/3/9	o	大阪	9:30 ~ 17:50	9:00 ~ 18:00
			福岡	0:00 ~ 14:00	0:00 ~ 14:00
			鹿児島	17:00 ~ 23:50	17:00 ~ 24:00
			高松	7:15 ~ 20:00	7:00 ~ 20:00
	2021/5/10	2	福岡	13:30 ~ 20:00	13:00 ~ 20:00
	2021/3/10	2	鹿児島	13:30 ~ 17:50	13:00 ~ 18:00
			広島	13:00 ~ 20:30	13:00 ~ 21:00
	2021/5/25	4	福岡	14:00 ~ 22:00	14:00 ~ 22:00
3	2021/3/23	4	鹿児島	14:50 ~ 24:00	14:00 ~ 24:00
			高松	16:30 ~ 23:00	16:00 ~ 23:00
	2021/5/26	1	鹿児島	0:00 ~ 5:30	0:00 ~ 6:00
			広島	11:10 ~ 18:30	11:00 ~ 19:00
	2022/3/5	4	福岡	11:00 ~ 15:30	11:00 ~ 16:00
4	2022/3/3	4	鹿児島	13:30 ~ 20:30	13:00 ~ 21:00
			高松	9:00 ~ 17:00	9:00 ~ 17:00
	2022/3/6	1	那覇	8:55 ~ 17:00	8:00 ~ 17:00
5	2022/3/17	1	福岡	16:50 ~ 20:50	16:00 ~ 21:00
6	2022/3/27	1	福岡	20:40 ~ 24:00	20:00 ~ 24:00
O	2022/3/28	1	福岡	0:00 ~ 5:30	0:00 ~ 6:00
6	2022/3/27	1	福岡	20:40 ~ 24:00	20:00 ~ 24

(2) 黄砂時における各都道府県の量的指標

黄砂観測日における SPM 平均濃度は、各都道府県における黄砂の強度を、その値に当該年の黄砂観測日数を乗じたものは、各年の各都道府県における黄砂時のおおよその量的指標を示すと考えられる。 2002 年~2021 年の 20 年間における黄砂観測日の地点別の SPM 濃度を、黄砂観測地点の位置する都道府県毎に平均化し、経年変化を示した(図 2-2-1)。併せて SPM 平均濃度に黄砂観測日数を乗じたものに対しても整理を行い、日本地図にプロットした(図 2-2-2、図 2-2-3、図 2-2-4)。

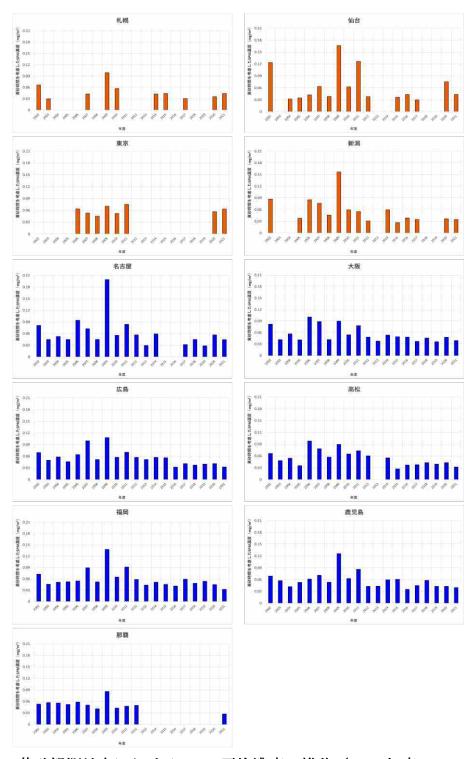


図 2-2-1 黄砂観測地点における SPM 平均濃度の推移(2002 年度~2021 年度)

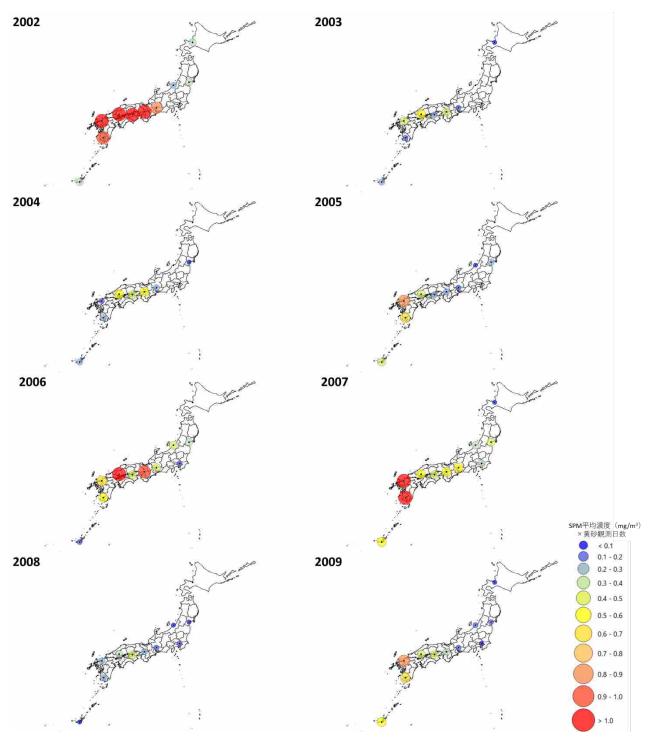


図 2-2-2 黄砂日の SPM 平均濃度と観測日数との積算値(2002 年度~2009 年度)

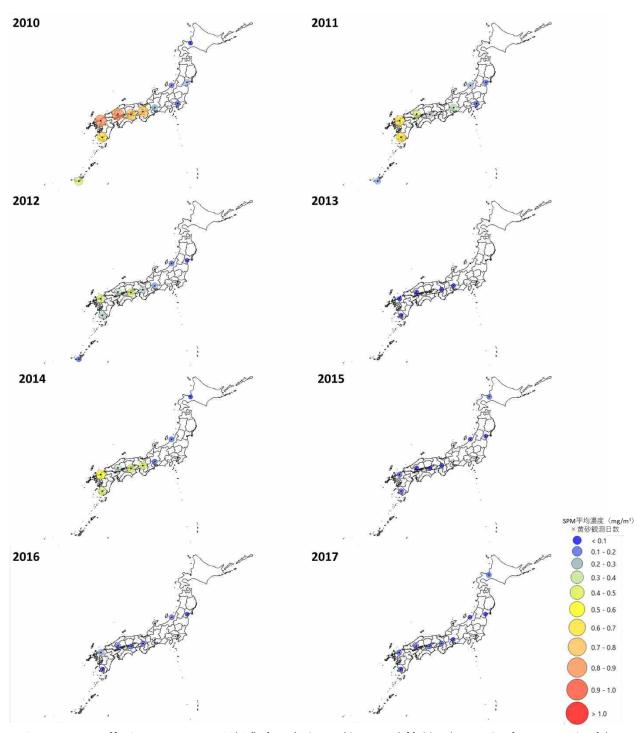


図 2-2-3 黄砂日の SPM 平均濃度と観測日数との積算値(2010 年度~2017 年度)

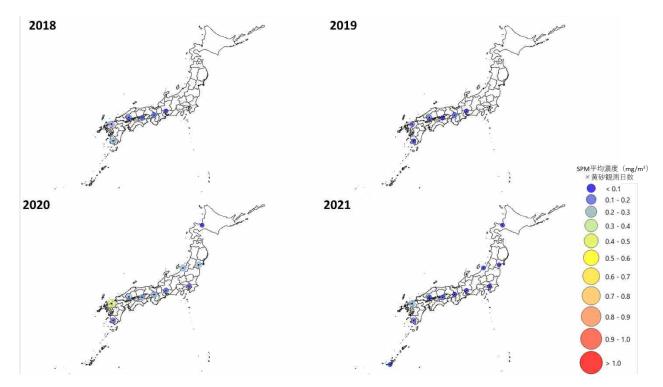


図 2-2-4 黄砂日の SPM 平均濃度と観測日数との積算値(2018 年度~2021 年度)

(3) 過去の黄砂事例と 2021 年度の黄砂事例との比例

2021 年度に観測された計 12 日の黄砂が、過去の黄砂事例と比較し、どの程度の強度であったかを確認するため、2002 年度~2021 年度における黄砂強度の散布図を作成し、図 2-2-5 に示した。データ整理の際には、黄砂が観測された日を 1 事例とし、連続して黄砂が観測された場合は数日間をまとめて 1 事例として整理した(表 2-2-1)。横軸には、黄砂事例ごとの SPM 平均濃度として、黄砂が観測された時間における SPM 濃度の合計値を黄砂観測時間の合計値で割った数値を取っている。縦軸には、事例ごとの黄砂観測地点数(全 11 地点)の平均を取っており、これにより横軸で黄砂強度、縦軸で日本における黄砂の広がりを読み取ることができる。

2021 年度に観測された黄砂の中で最も広範囲で観測され、SPM 濃度が高くなった黄砂事例は 2021 年 5 月 8 日~10 日に観測された黄砂であった。5 月 8 日は東京などの東日本で黄砂が見られ、翌 9 日には西日本の広い範囲で観測されているが、SPM 濃度が高くないことから、弱い黄砂であったことが読み取れる。他の 5 事例に関しては、平均観測地点数及び SPM 濃度平均値のどちらも値が小さいため、全国的に広がりの見られない弱い黄砂であったことが読み取れる。

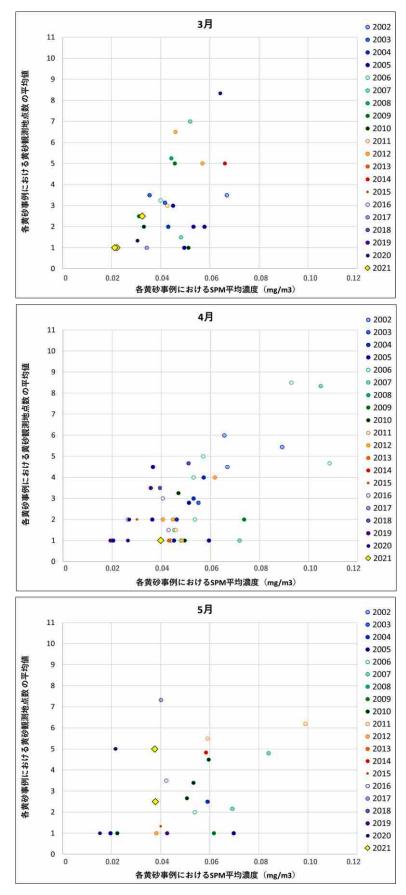


図 2-2-5 2002 年度から 2021 年度に観測された各黄砂事例の黄砂強度 (3,4,5 月)

3. 煙霧の観測状況

2021 年度には、全国の計 708 か所の測定局で煙霧が観測され、このうち、以下に記載する煙霧事例として抽出された場合に限定すると、計 158 局で煙霧が観測された。いずれの場合も、煙霧を観測した局数としては、2020 年度(西之島の噴火の影響を除いた場合)、2019 年度と同程度の局数となっていた。過去の煙霧に関する経年変化については、気象庁のホームページにて、管区等・地方気象台・測候所に分類されている計 59 局を対象に、煙霧に該当する測定局の抽出を行った。なお、煙霧日、煙霧事例については、それぞれを以下のように定義し、整理を行った。

● 煙霧日: 59 局のうち、1 局でも煙霧と判断された測定局がある場合

● 煙霧事例:煙霧日のうち、同日に10局以上観測された測定局がある場合

3.1 煙霧日及び煙霧事例として抽出された測定局数の推移

図 3-1-1 に、2001 年度~2021 年度における煙霧日として抽出された測定局数の推移を示した。図 3-1-1 より、2001~2007 年度までは 2,000 局を超えており、多くの測定局で煙霧が観測されているが、翌 2008 年度には大きく減少している様子が見て取れる。2008 年度は、中国にて北京オリンピックが開催された年であり、環境汚染の改善を目的とした「20 の目標」が設定された。このため、中国国内における環境汚染が改善され、日本においてもこの影響を受け、煙霧日が減少したと考えられる。2008 年度以降は緩やかな減少傾向が見られており、2015 年度にさらに減少している様子が見られる。2015 年度は、第 12 次 5 カ年計画(2011~2015 年)において、削減目標(SO2 は 2010 年比 8%、NOx は 10%の削減が目標)として設定された年であり、この影響を受け、中国国内における環境汚染が改善され、煙霧日が減少したと考えられる。2015 年度以降は再度減少傾向が見られており、2021 年度は計 708 局で煙霧が観測された。

図 3-1-2 には、2001 年度~2021 年度における煙霧事例として抽出された測定局数の推移を示しており、図 3-1-1 と同様に 2008 年度・2015 年度で減少している様子が見られる。また、近年は煙霧事例自体が非常に少なくなっているものの、2020 年度は計 477 局で煙霧が観測されている。そのうち、174 局は西之島の煙霧による影響、95 局は 3 月 29 日~31 日に観測された黄砂に伴い、抽出された煙霧であった。なお、2021 年度については計 158 局であった。

10

¹ 気象庁ホームページ (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/link/link1.html)

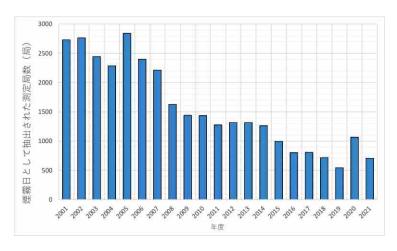


図 3-1-1 2001~2021 年度における煙霧日として抽出された測定局数の推移

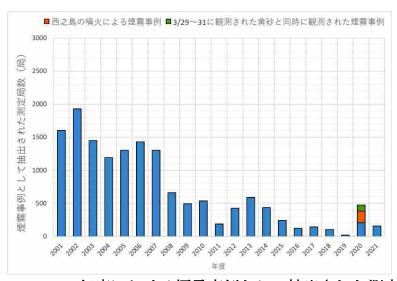


図 3-1-2 2001~2021 年度における煙霧事例として抽出された測定局数の推移

3.2 煙霧日として抽出された日数における煙霧観測測定局数の割合

3.1 より、日本における煙霧は、広域的に観測される煙霧事例が減少している様子が見られたため、各年における煙霧日として抽出された日数に対する煙霧観測測定局数の割合の推移を整理し、その結果を図 3-2-1 に示した。

図 3-2-1 より、2000 年度台は、10 局以上で煙霧を観測した割合が 30%程度を占めており、日本の広い範囲で煙霧が観測されていた様子が見られたが、2010 年度頃には 10%程度、近年は 5%程度まで減少している。10 局以上の広域で観測される煙霧の減少に伴い、1 局・2 局といった限られた測定局のみで観測される煙霧が増加しており、2015 年度以降は約 50%を占めている様子が見られた。

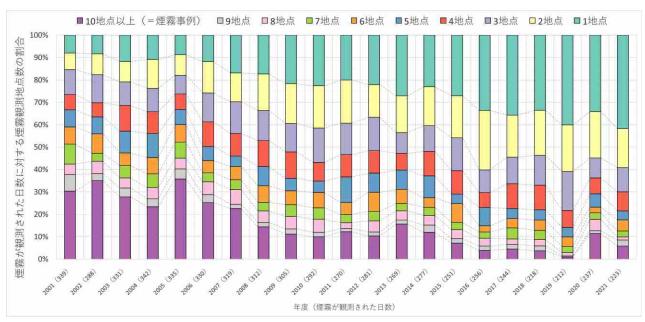


図 3-2-1 2001~2021 年度における煙霧日として抽出された日数における 煙霧観測地点数の割合の推移

3.3 地域区分ごとの煙霧日として抽出された測定局数の変化

3.1 及び 3.2 で示した結果より、広域的な煙霧(煙霧事例)が減少傾向にあることが確認できたが、その減少傾向は日本のどの地域で見られるものかを解析するために、図 3-3-1 に示す区分に従い、経年変化を整理した。なお、図 3-3-1 の区分については、昨年度検討会にて報告した過去 50 年間における黄砂観測日数の経年変化を整理する際の区分を用いており、日本への飛来の様子を把握するため、中部・東北については日本海側と太平洋側に分類している。

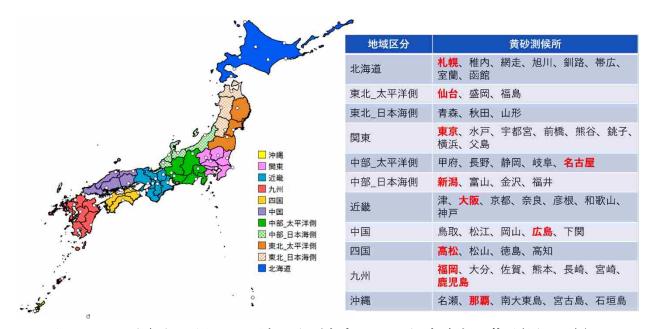


図 3-3-1 本解析で用いる地域区分(赤字:2021 年度時点の黄砂観測地点)

図 3-3-2 及び図 3-3-3 に東日本・西日本における煙霧日として抽出された測定局数の推移を示した。 全区分において、近年煙霧日として抽出された測定局数が増加している様子は見られず、多くの地域で減少傾向が見られた。また、2000 年度台では、関東・中部(太平洋側)・近畿・九州で多く煙霧が見られているが、近年は地域の差が小さくなっている様子が見られた。

東日本においては北海道・東北(日本海側)では、2001年度から2021年度にかけてほぼ横ばいであるが、東北(太平洋側)では緩やかな減少傾向、関東では大幅に減少している様子が見られた。西日本においては、中部(日本海側)・中国・四国・沖縄で緩やかな減少傾向、中部(太平洋側)・近畿では大幅な減少傾向が見られた。また、越境大気汚染の影響を大きく受ける九州では、2008年度に減少後、2014年度までは横ばいであり、翌2015年度には再度減少、以降は緩やかな減少傾向にある。

大幅な減少傾向が見られる関東・中部(太平洋側)・近畿においては、越境の影響を大きく受けている 九州よりも減少傾向にあることが読み取れることから、これら地域については、越境による煙霧の減少 ではなく、国内での対策等により大気汚染の改善が見られ、煙霧日が減少している可能性が考えられる。 一方、西日本では全地域で緩やかな減少が見られており、越境による煙霧が減少していると考えられ、 九州ではその傾向が顕著に表れていた。以上のことより、図 3-1-1 及び図 3-1-2 で示されている煙霧日 の減少傾向は、中国国内及び日本国内の環境汚染の改善に起因するものである可能性が示唆された。

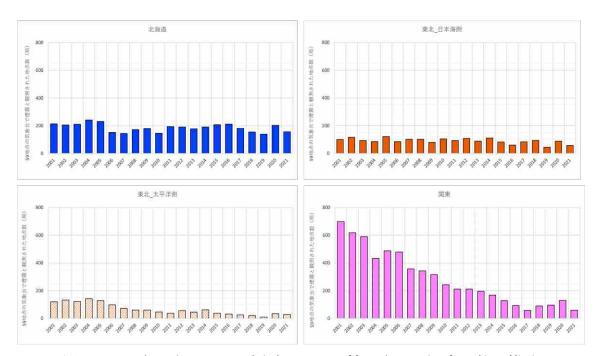


図 3-3-2 東日本における煙霧日として抽出された測定局数の推移



図 3-3-3 西日本における煙霧日として抽出された測定局数の推移

3.4 煙霧事例の経月変化及び地点別観測日数

図 3-4-1 に、2021 年度の煙霧事例延べ日数の経月変化を示した。煙霧事例は 2022 年 3 月に突出して多くなっており、西日本の広い範囲で煙霧が観測された。2021 年度の観測地点毎の煙霧事例数は、煙霧の多い地点順で図 3-4-2 に示している。2020 年度は全国的に広い範囲で煙霧が観測されており、特に中国地方で煙霧が多く観測されていたが、2021 年度は関東での観測が少ないものの、例年通り九州・沖縄、中国地方で多く観測された。

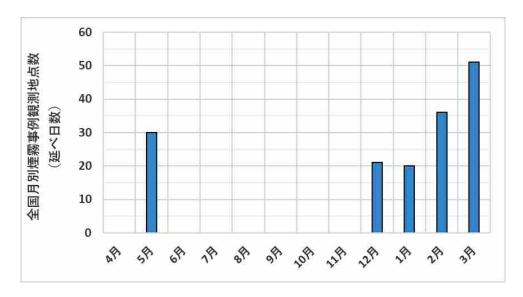


図 3-4-1 2021 年度における煙霧事例の経月変化

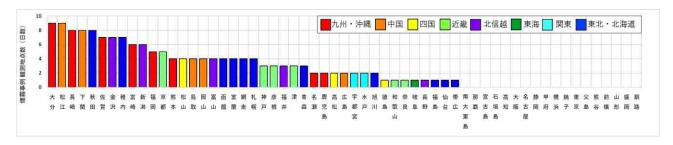


図 3-4-2 2021 年度における煙霧事例の地点別日数

4. 2021 年度における黄砂日の事例解析

4.1 黄砂日の事例解析

4.1.1 黄砂日の事例解析

黄砂は、気象庁によると「主として、大陸の黄土地帯で吹き上げられた多量の砂の粒子が空中に飛揚し天空一面を覆い、徐々に降下する現象」と定義されており、気象台では目視によって黄砂現象を判断している。以前は、視程が 10km 未満となるような黄砂現象を記録していたが、1989 年以降、視程が 10km 以上であっても明らかに黄砂と判定できる場合は黄砂と記録されている。一般に、日本へ飛来する黄砂は、大陸の黄土地帯で低気圧が発生して巻き上げられた砂塵が、日本付近にある前線の東への移動に伴って地上付近へ降下し視程の低下をもたらしているケースが多い。

黄砂は、個々の事例によって、発生位置、経路、拡がり、濃さ、成分など様々な形態が考えられる。 これらはそれぞれ異なった様相を呈しており、またその特徴にも違いがみられる。年度別に各黄砂事例 の解析を行っており、黄砂飛来時には、おおむね次のような特徴がみられる。

- ・後方流跡線がモンゴル付近から連続する大気の流れを示す
- ・日本で黄砂が観測される数日前に、大陸の黄土地帯で砂塵嵐の発生がみられる
- ・気圧配置で、日本南岸に前線が延びている
- ・ライダーの黄砂消散係数と SPM 濃度が同時に上昇する
- ・SPM 濃度が多地点で同時に上昇する
- ・CFORS (Chemical weather FORecasting System) の「土壌性ダスト(黄砂)」(dust)の予想分布で黄砂の飛来が予測されている
- ・PM2.5/SPM の比が小さくなる(粗大粒子の割合が大きくなる)

これまでの調査に引き続き、2021 年度における黄砂日の事例について、多角的に解析を行い、その状況を明らかにする。解析の項目は、黄砂観測地点、気象概況(天気図・大陸における砂塵嵐の発生)、SPM 濃度全国分布、後方流跡線、CFORS の予測結果、ライダー観測結果、PM2.5 日平均全国分布、PM2.5/SPM の比、 SO_4 2-濃度などである。また、これらの項目から黄砂の規模や大気汚染物質の混在状況などを視覚的に把握しやすいようにレーダーチャート(図 4-1-2)による評価を実施した。

4.1.2 解析手法

(1) 黄砂観測地点

黄砂は、2021年2月以降気象庁により計11地点で観測されている(図 4-1-1)。本解析で用いる黄砂観測地点は11地点のうち、気象庁ホームページにて黄砂を観測したと発表している地点を対象としている。また、黄砂現象の規模の相対的な比較の目安とするために、黄砂を観測した都道府県の全測定局の SPM 濃度日平均値を平均した値に、観測した都道府県数を乗じた積算値(以下、「黄砂規模」という。)を算出した。

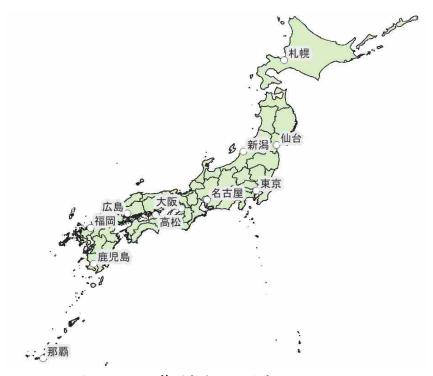


図 4-1-1 黄砂観測 11 地点

(2) 気象概況

気象概況(天気図)は、気象庁のホームページから天気図と天気概況を引用した。

(3) SPM 濃度全国分布

SPM 濃度全国分布は、全国で行われている常時監視局の SPM 測定データから黄砂観測日の濃度を地図上に示した。この際、SPM 濃度の時間的・空間的変化を確認するため、3 時間毎の地図を作成した。

(4) アジア域における気象状況

NOAA National Centers for Environmental Information²にて公開されている現在天気のデータ(WMO のコード)を基に、東アジアでの砂塵嵐の発生について地図上に表示した。有人観測地点における気象コード 04 を Smoke、05 を Haze、06 を Widespread dust、07,08,09 を Dust、30,31,32 を Slight duststorm、33,34,35 を Severe duststorm、と分類した(表 4-1-1)。

² NOAA National Centers for Environmental Information (https://www.ncei.noaa.gov/)

表 4-1-1 WMO 現在天気のコードと本資料における略称

コード	コードの定義	本資料における略称	
04	Visibility reduced by smoke, e.g. veldt or forest fires, industrial smoke or volcanic ashes	Smoke	
05	Haze	Haze	
06	Widespread dust in suspension in the air, not raised by wind at or near the station at the time of observation	Widespread dust	
07	Dust or sand raised by wind at or near the station at the time of observation, but no well-developed dust whirl(s) or sand whirl(s), and no duststorm or sandstorm seen; or, in the case of ships, blowing spray at the station		
08	Well-developed dust whirl(s) or sand whirl(s) seen at or near the station during the preceding hour or at the time of observation, but no duststorm or sandstorm	Dust	
09	Duststorm or sandstorm within sight at the time of observation, or at the station during the preceding hour		
30	Slight or moderate duststorm or sandstorm has decreased during the preceding hour		
31	Slight or moderate duststorm or sandstorm no appreciable change during the preceding hour	Slight duststorm	
32	Slight or moderate duststorm or sandstorm has begun or has increased during the preceding hour		
33	Severe duststorm or sandstorm has decreased during the preceding hour		
34	Severe duststorm or sandstorm no appreciable change during the preceding hour	Severe duststorm	
35	Severe duststorm or sandstorm has begun or has increased during the preceding hour		

(5) 後方流跡線

後方流跡線は、アメリカ NOAA の HYSPLIT により気象データ GDAS を使い計算した。起点は、黄砂が観測された地点を考慮して決め、後方 72 時間とした。また、各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。出発高度は地表面に近い 1500m とした。

(6) CFORS (Chemical weather FORecasting System)

CFORS は、九州大学応用力学研究所の鵜野らによって開発された化学物質輸送領域数値モデルであ

る。本解析内の図は、国立環境研究所で定常運用を行っているバージョン(RIAM/NIES· CFORS) による 黄砂イベント当時に予測された黄砂等土壌性ダストと硫酸塩の高度 $0\sim lkm$ における平均重量濃度の推定分布を表示している。

(7) ライダー

ライダー観測結果は、 国立環境研究所にて公開されているデータを用い解析を行った。国立環境研究所ではライダー観測結果から非球形粒子(黄砂)と球形粒子(大気汚染性エアロゾル)の消散係数を算出し、そのデータを公開している。これは、黄砂モニタリングのため、532nmの偏光解消度を利用して、非球形の黄砂と球形の大気汚染性エアロゾルを分離して、それぞれの散乱への寄与を推定したものである。数値データとして示されている消散係数(/km)は、光が物質に衝突し物質への吸収や散乱によって単位長さ当たりに消失する割合である。この非球形粒子の消散係数(以下、「黄砂消散係数」という。)のうち、下層である 150m~270m のデータを 1 時間毎に平均したものを経時変化グラフとして示した。さらに、下層での黄砂消散係数と SPM 時間値を経時変化グラフで表し、その類似性を検討した。

(8) PM2.5 日平均濃度

PM2.5 日平均濃度による評価には全国分布図を作成し、微小粒子による汚染の拡がりをみた。PM2.5 濃度は、全国の常時監視局で測定しているものを使用した。また、粗大粒子と微小粒子の比である PM2.5 日平均値/SPM 日平均値の比を測定局ごとに算出し、日本地図にプロットした。黄砂時には粗大粒子が多く飛来するため、PM2.5 日平均値/SPM 日平均値の値は小さくなる傾向が見られるが、例年黄砂が観測されていない地点でも値が小さくなる点が見て取れることより、そのような地点を抽出し、それぞれの値を確認した。

(9) PM2.5 自動測定器 ACSA-14 の活用

環境省では、PM2.5 成分自動測定機を全国の複数地点に配置し、2017 年 4 月から継続的な測定を開始している。PM2.5 成分自動測定機のうち、ACSA-14 では、全国 10 地点において、PM2.5 中の SO_4^{2-} (硫酸イオン)や NO_3^{-} (硝酸イオン)などの 1 時間値を測定している。さらに、本装置では PM10 も測定しており、粗大粒子(PM10-2.5)の成分も同時に出力される。

本調査では、ACSA-14 のデータのうち、PM2.5、PM10、SO₄²⁻、NO₃-を使用するものとし、微小粒子 (PM2.5) と粗大粒子 (PM10-2.5) の成分が区別できるよう、表 4-1-2 に従って表記する。

表 4-1-2 本調査で使用する成分

	硫酸イオン	硝酸イオン
微小粒子側の成分	fSO ₄ ² -	fNO ₃ -
(PM2.5)	(図表中では fSO4 と表記)	(図表中では fNO3 と表記)
粗大粒子側の成分	cSO ₄ ²⁻	cNO ₃ -
(PM10-2.5)	(図表中では cSO4 と表記)	(図表中では cNO3 と表記)

(10) 中国における PM2.5 の 1 時間値データ

日本と中国における PM2.5 の時間変化の比較や、日本への黄砂飛来前の中国での PM2.5 の変化を考察するために、在中国米国大使館が公開している中国における PM2.5 の 1 時間値データを用いた。地点は日本の緯度帯をできるだけ包括できるように北京、上海、瀋陽の 3 地点とした。

(11) レーダーチャートによる評価

図 4-1-2 に示すようなレーダーチャートによる黄砂の評価を行った。すなわち、表 4-1-3 に示すように、数値をもとに分類するもの 6 項目、図から分類するもの 8 項目について、それぞれ満点を 6 として点数化し、黄砂項目と大気汚染項目に分けて合計点数を算出する。さらに合計点数を満点で除し、それぞれの指標とする。この指標が典型的な黄砂の状況との差、および汚染質混在の影響の大きさの程度を測る目安となる。

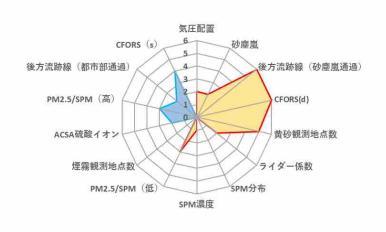


図 4-1-2 黄砂の特徴を示すレーダーチャート (例)

表 4-1-3 各項目の点数化一覧表

百日夕	点 数						
項目名	6	5	4	3	2	1	0
黄砂観測地点数	>6	5	4	3	2	1	0
SPM 濃度	>300	200~300	150~200	100~150	50~100	20~50	>20
PM2.5/SPM(低)	< 0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	>0.9
煙霧観測地点数	>30	20~30	15~20	10~15	5~10	0~5	0
PM2.5/SPM(高)	>0.9	0.8~0.9	0.7~0.8	0.6~0.7	0.5~0.6	0.4~0.5	< 0.4
ACSA 硫酸イオン (fSO ₄ ²-)	>30	25~30	20~25	15~20	10~15	5~10	<5

T I A	点 数						
項目名	6	4	2	0			
気圧配置	◎ (日本南岸近くに前線がある)			×(左記以外)			
砂塵嵐	◎(観測前に大陸で severe や slight が集中的に見られ る)	○(観測前に大陸で severe や slight が見ら れる)	△(観測前に大陸で slight が見られる)	×(左記以外)			
SPM 分布	◎ (全国で分布)	〇(日本海側で分布)	△(散発的に分布)	×(左記以外)			
CFORS(d)	◎ (日本に dust 分布の高 濃度帯がある)	〇(日本に dust 分布 がある)	△ (日本に dust 分布 がわずかにある)	×(左記以外)			
ライダー係数	◎ (複数地点で黄砂消散 係数が高く、SPM 変動と 同期)	○ (黄砂消散係数がや や高く、SPM 変動と 同期)	△ (黄砂消散係数が やや高い)	×(左記以外)			
後方流跡線(砂塵嵐通 過)	◎ (砂塵嵐発生地域を直線的に通過)	○ (砂塵嵐発生地域の 付近を通過)	▲ (砂塵嵐発生地域 からやや逸れて通 過)	×(左記以外)			
後方流跡線(都市部通 過)	◎ (中国沿岸部を直線的 に通過)	〇(中国沿岸部付近を 通過)	▲ (中国沿岸部から やや逸れて通過)	×(左記以外)			
CFORS(s)	◎ (日本に sulfate 分布の 高濃度帯がある)	〇(日本に sulfate 分 布がある)	▲ (日本に sulfate 分 布がわずかにある)	×(左記以外)			

4.2 黄砂の観測事例

解析対象は、2021 年度に気象台が観測した黄砂の 6 事例(計 12 日)である(表 4-2- 1)。PM2.5/SPM は、黄砂時に低い値を示す傾向にある。黄砂時の PM2.5/SPM の値をまとめる。また、PM2.5 成分自動測定機では、PM10 を測定しているため、上記に併せて、黄砂時の PM2.5/PM10 をまとめる。

PM2.5/SPM については、2021 年度の黄砂事例における値は 0.59 から 0.79 の範囲であり、4 月 17 日の値が最も低く、3 月 6 日の値が最も高かった。

これに加えて、ACSA による PM2.5/PM10 の値は、2021 年度の黄砂事例で 0.25 から 0.45 であり、黄砂日の半数以上で 0.4 以下と低い値になった。

表 4-2-1 2021 年度の黄砂日一覧 (SPM および PM2.5 濃度: μg/m3)

					## 6 19 1#				
		期日			黄砂の規模				
事	No.				地		PM2.5 平均濃度	PM2.5/SPM	PM2.5/PM10
例	110.	年	月	日	点	SPM 平均濃度	11112.3 115 版/文	平均	平均
					数				
1	1	2021	4	17	1	20.69	6.91	0.59	0.37
	2	2021	4	18	1	19.75	7.13	0.67	0.25
2	3	2021	5	8	5	26.00	16.93	0.68	0.40
	4	2021	5	9	8	34.03	21.60	0.65	0.38
	5	2021	5	10	2	17.88	11.70	0.70	0.34
3	6	2021	5	25	4	20.61	14.39	0.71	0.45
	7	2021	5	26	1	19.37	13.08	0.68	0.40
4	8	2022	3	5	4	22.37	14.85	0.68	0.35
	9	2022	3	6	1	9.73	7.60	0.79	0.28
5	10	2022	3	17	1	15.50	10.54	0.70	0.41
6	11	2022	3	27	1	7.65	4.90	0.71	0.34
	12	2022	3	28	1	10.68	7.61	0.74	0.32

※「SPM 平均濃度」、「PM2.5 平均濃度」、「PM2.5/SPM 平均」には常時監視データを用い、計算した。また、

「PM2.5/PM10 平均」には ACSA-14 のデータを用い、計算した。

%「PM2.5/SPM」は測定局毎に算出された値を平均したものであり、表中の「SPM 平均濃度」と「PM2.5 平均濃度」から算出したものではない。

※「PM2.5/PM10」について各日以下の平均をとった。

2021年4月17日:福岡での観測のため福岡の値

2021年4月18日:那覇での観測のため福岡の値

2021年5月8日:札幌、新潟、東京、福岡、高松での観測のため札幌、東京、福岡、赤穂の平均(新潟巻はデータ欠損のため利用できず)

2021 年 5 月 9 日: 仙台、新潟、名古屋、広島、大阪での観測のため札幌、名古屋、福岡、大阪の平均(新潟巻はデータ欠損のため利用できず)

2021年5月10日:福岡、鹿児島での観測のため福岡の値

2021年5月25日: 広島、福岡、鹿児島、高松での観測のため大阪、福岡の平均(赤穂はデータ欠損のため利用できず)

2021年5月26日: 鹿児島での観測なので福岡の値

2022年3月5日:広島、福岡、鹿児島、高松での観測なので赤穂、福岡の平均

2022 年 3 月 6 日:那覇での観測のため福岡の値 2022 年 3 月 17 日:福岡での観測なので福岡の値

2022年3月27日、28日:福岡での観測なので福岡の値

4.3 黄砂日の解析結果

(1) 黄砂事例 1 2021 年 4 月 17 日~18 日

本事例における黄砂の観測地点数は、表 4-3-1-1、図 4-3-1-2 に示すとおりである。4 月 17 日に福岡、18 日に那覇におけるそれぞれ 1 地点となった。

天気図(図 4-3-1-3)を見ると、黄砂観測の前日には日本の東に高気圧、西に前線を伴う低気圧が配置されていた。その後、西の低気圧が日本の南を東進し、さらに三陸沖へ移動している様子が見られる。この期間 SPM の 3 時間ごとの全国分布を見ると、4 月 17 日夜間に九州・瀬戸内海付近でやや高濃度の分布が見られ、翌 18 日にかけて拡散しながら東に移動してゆく様子が表れている(図 4-3-1-4、図 4-3-1-5)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると(図 4-3-1-6) 、黄砂観測前の 4 月 14 日、15 日にモンゴル南東部で slight duststorm や severe duststorm が発生している。この時の気流の状況について後方流跡線で確認したところ、福岡における 4 月 17 日の流跡線は上記 duststorm の発生した地域を通っているように見える(図 4-3-1-7)。 さらに CFORS 予測結果においても、大陸からの dust および sulfate が日本全域に影響を及ぼしている様子が示されていた(図 4-3-1-8)。

黄砂が観測された福岡を対象に、ライダー黄砂消散係数と、近接する常時監視局における SPM の経時変化を比較したところ、4月17日午後に黄砂消散係数・SPM 濃度が上昇する様子が見られた(図 4-3-1-9)。また、この2日間は、PM2.5の日平均値は低い値になっており、環境基準値を超える地点は観測されなかった(図 4-3-1-10)。

図 4-3-1-11 には、各測定局における PM2.5 日平均値/SPM 日平均値 (PM2.5/SPM 比) の全国分布を示した。黄砂が観測された福岡を中心に、SPM 日平均値が大きくなることに起因し、PM2.5/SPM 比の値が小さい地点が多く見られる。図 4-3-1-11 からは、黄砂が観測されていない地方にも PM2.5/SPM 比の値が 0.3 以下である地点が散見されるが、これらの地点のデータについては、SPM の日平均値及び PM2.5 日平均値がいずれも小さい値であることを確認した。

人為起源汚染物質については、微小粒子、粗大粒子の SO_4^{2-} 、 NO_3 -全ての成分で、黄砂観測日である 4月 17日の午後から夕方にかけて高い値の傾向となっていることがわかる。また、微小粒子の SO_4^{2-} 以外の成分では、高い濃度への上昇前の時間帯で濃度が低い状態となっている傾向が見られた。そのような変動傾向の中でピーク濃度に関しては、微小粒子の SO_4^{2-} 、粗大粒子の NO_3 -で $4\mu g/m^3$ と高い濃度をとっていることがわかる。また、PM10 に関しても同様の傾向が見られ、PM10 の急激な上昇とともに PM2.5/PM10 は急激に減少している(図 4-3-1-12)。

なお、北京では、黄砂観測前の4月16日に、PM2.5 濃度の1時間値が一時350 μ g/m³以上の値を示し、上海でも4月17日午前に100 μ g/m³以上と高い値を示していた(図4-3-1-13)。

また、本事例における湿度の時系列(図 4-3-1-14)には PM10 が急激に上昇する 17 日午後に湿度も下がっている様子が見られる。

以上の通り、本事例は、4月14日及び15日に発生したモンゴル南部における dust や duststorm が、人 為起源汚染物質を含み飛来した弱い黄砂の事例と考えられる。

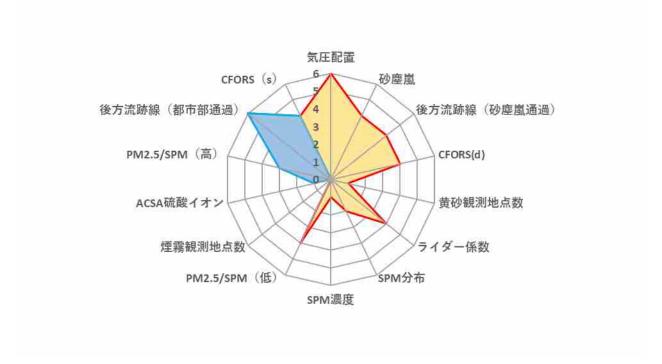


図 4-3-1-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-3-1-1 黄砂観測地点

	日付	地点数	観測地点名										
ſ	2021/4/17	1	福岡										
ſ	2021/4/18	1	那覇										

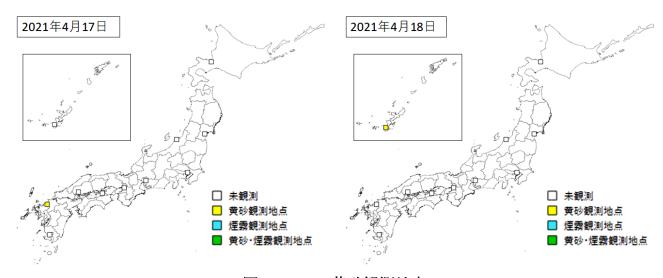
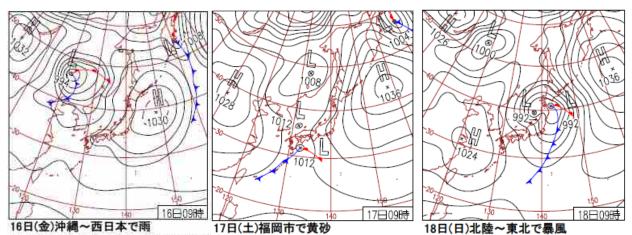


図 4-3-1-2 黄砂観測地点



日本の東を高気圧が東進。高気圧の縁を低気圧や前線が日本海と本州の南岸を東 低気圧が日本海と三陸沖を進み、西~東回る湿った空気の影響で、西日本太平洋進。全国的に曇りや雨となり、静岡県天 日本日本海側や北日本で雨や雪。新潟県 側中心に所々雨。気圧の谷の影響で南西城山で日降水量168mm。午後は西日本で 両津では最大風速24.3m/s。西~東日本諸島でも雨となり、沖縄県仲筋では晴れた所も。福岡市で黄砂を観測。青森 太平洋側は日中晴れた所が多い。那覇市40mm/1hの激しい雨。 市でサクラ満開。 で黄砂を観測。

図 4-3-1-3 天気図

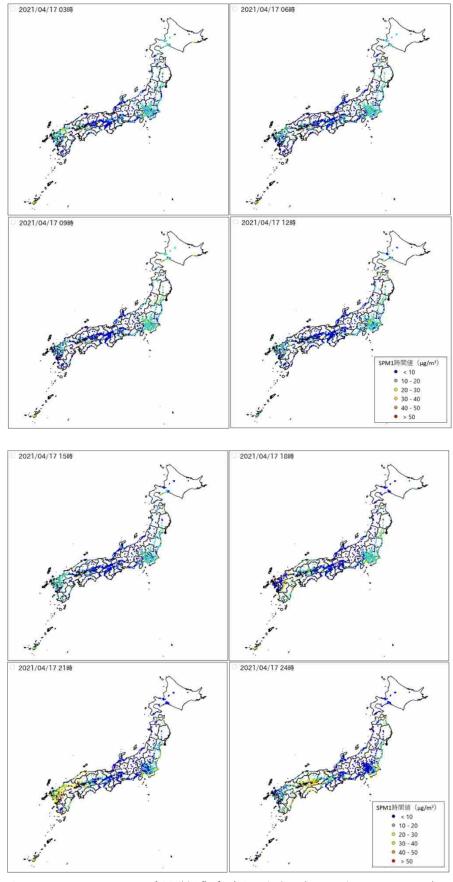


図 4-3-1-4 SPM1 時間値濃度全国分布(2021 年 4 月 17 日)

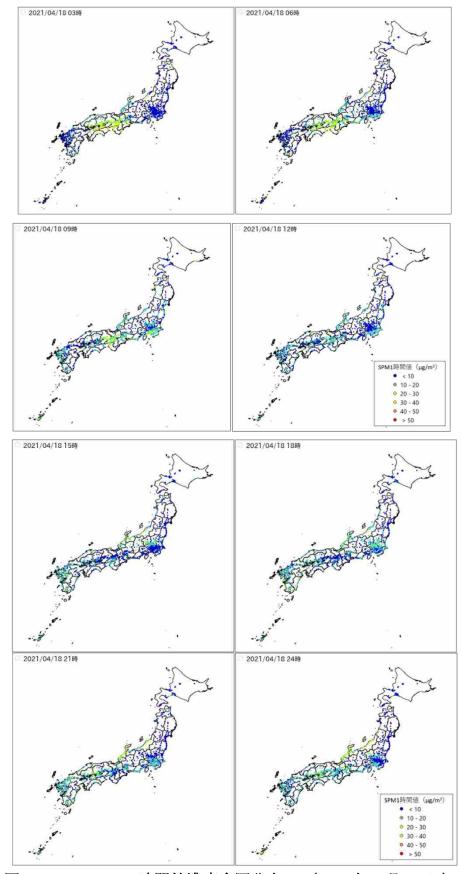


図 4-3-1-5 SPM1 時間値濃度全国分布(2)(2021 年 4 月 18 日)

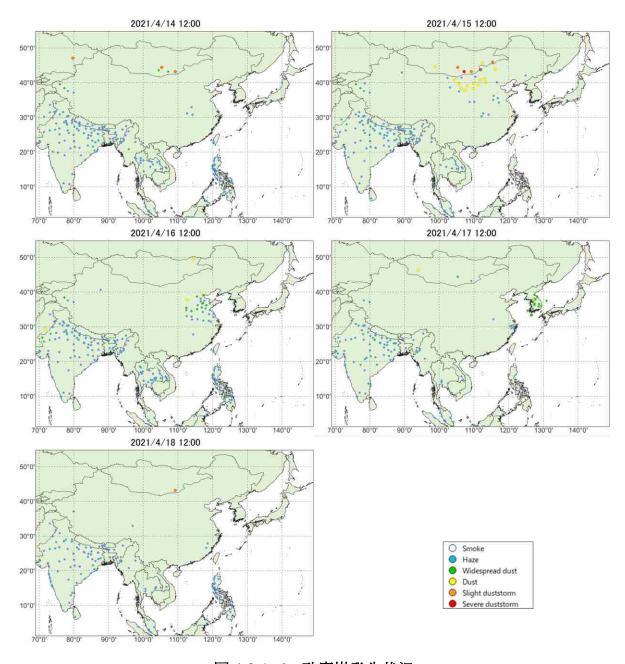


図 4-3-1-6 砂塵嵐発生状況

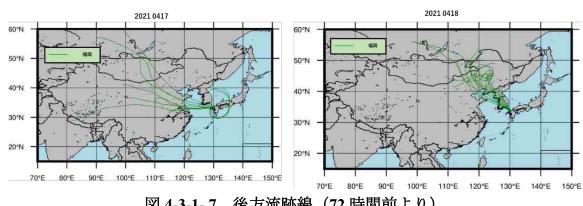


図 4-3-1-7 後方流跡線 (72 時間前より)

各地点、各黄砂観測日の0:00から23:00までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図 に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

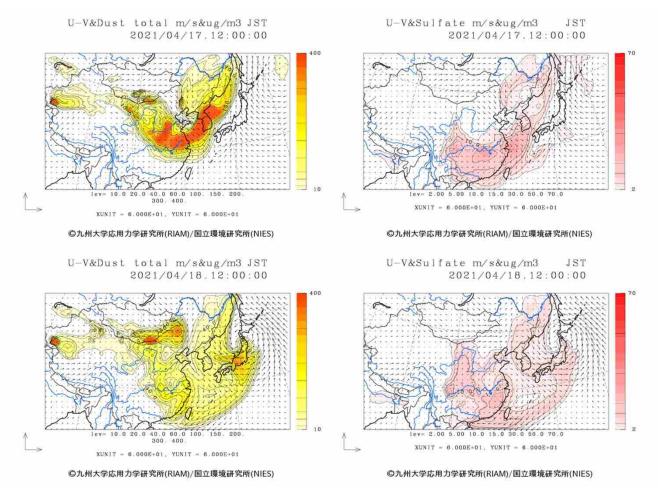


図 4-3-1-8 CFORS(dust (左図) - sulfate (右図))予測結果

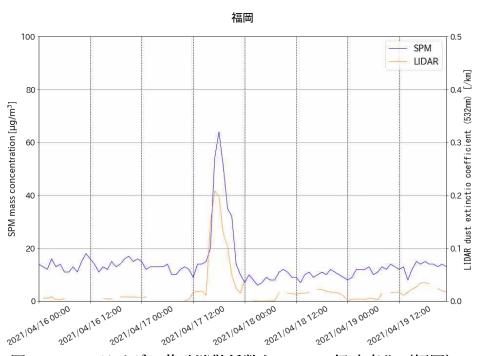


図 4-3-1-9 ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(福岡)

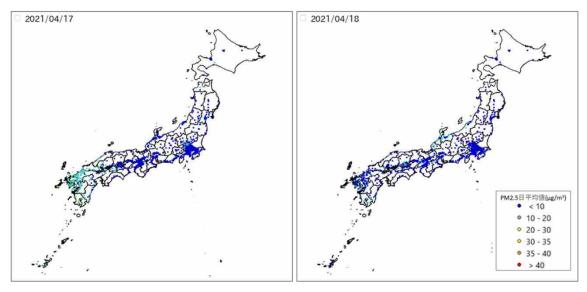


図 4-3-1-10 PM2.5 日平均值全国分布

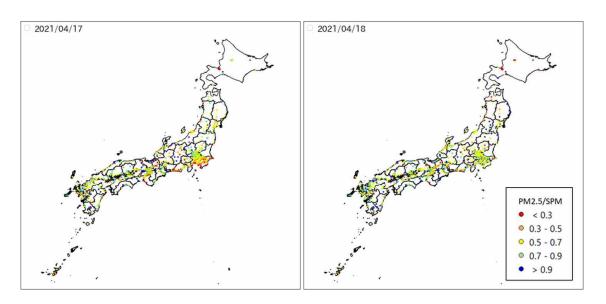


図 4-3-1-11 PM2.5 日平均值/SPM 日平均值全国分布

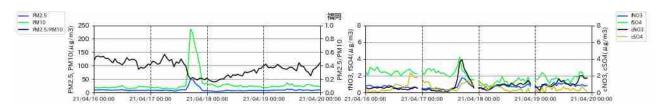


図 4-3-1-12 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

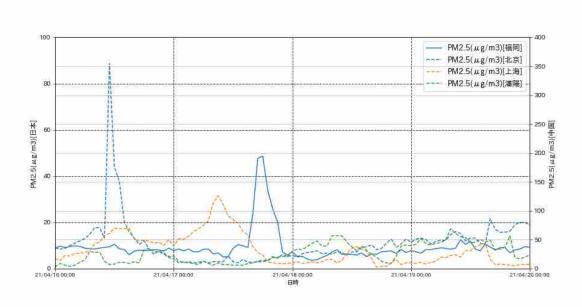


図 4-3-1-13 日本・中国での PM2.5 濃度

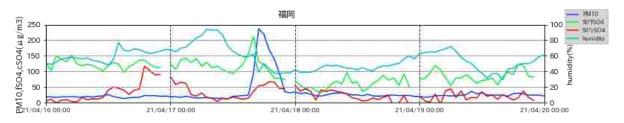


図 **4-3-1-14** PM10、fSO₄²⁻、cSO₄²⁻、湿度の経時変化 fSO₄²⁻、cSO₄²⁻は値を 50 倍にしてある。

(2) 黄砂事例 2 2021 年 5 月 8 日~10 日

本事例における黄砂の観測地点数は、表 4-3-2-1、図 4-3-2-2 に示すとおりである。5月9日に8地点での観測と比較的広い範囲で黄砂が観測された事例となった。

天気図(図4-3-2-3)を見ると、黄砂観測日を通し日本の南に前線が停滞していた。

この期間 SPM の 3 時間ごとの全国分布を見ると、5 月 8 日午後に、九州地方及び東北地方日本海側で SPM 濃度が 50µg/m³以上となる地点が現れ、翌 9 日には高濃度の範囲は西日本を中心とした広域に拡大した。9 日夜間には、関東でも SPM 濃度が高濃度となっており、翌 10 日には、全国的には濃度は低下したものの、九州地方は依然として高濃度の分布が残っていた様子が確認できる(図 4-3-2-4、図 4-3-2-5、図 4-3-2-6)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると(図 4-3-2-7)、黄砂観測前の 5 月 5 日~7 日に中国東部や、モンゴル中部などで dust、slight duststorm、severe duststorm が発生していた。この時の気流の状況について後方流跡線で確認したところ、多くの地点において duststorm などが発生していた地域を通っており、大陸からの移流があったことが示唆される(図 4-3-2-8)。さらに CFORS においても、比較的高濃度の dust 及び sulfate による大陸からの影響が、日本全域に及んでいる様子が現れている(図 4-3-2-9)。

ライダー黄砂消散係数と、近接する常時監視局における SPM 濃度 1 時間値の経時変化についても、 黄砂が観測された全国各地において、黄砂消散係数と SPM 濃度が顕著に上昇する様子が見られる(図 4-3-2-10)。PM2.5 の日平均値は、5 月 9 日から 10 日にかけて西日本の広い範囲で $20\sim30\mu g/m^3$ となっていた(図 4-3-2-11)。

図 4-3-2-12 には、各測定局における PM2.5 日平均値/SPM 日平均値 (PM2.5/SPM 比) の全国分布を示した。黄砂が観測された九州・中国地方・東北地方の一部で、SPM 日平均値が大きくなることに起因し、PM2.5/SPM 比の値が小さい地点が多く見られる。図 4-3-2-12 では、黄砂が観測されていない地方にもPM2.5/SPM 比の値が 0.3 以下である地点が散見されるが、これらの地点のデータについては、SPM の日平均値及び PM2.5 日平均値がいずれも小さい値であることを確認した。

人為起源汚染物質では名古屋、大阪、赤穂においては 5 月 8 日から 9 日にかけ微小粒子の NO_3 、 SO_4 ² 、粗大粒子の NO_3 に濃度上昇に伴う高い値が何度か見られたほか、福岡においてはそれらに加え、粗大粒子の SO_4 においても高い値が見られ、西日本で高い値となっている傾向にあった。また東京(北の丸)においては微小粒子の SO_4 に 5 月 9 日での高い値が見られた。その中でも福岡では濃度が高く特に、微小粒子の SO_4 と粗大粒子の NO_3 でそれぞれ、 $5\mu g/m^3$ 以上、 $10\mu g/m^3$ 以上のピークとなっていることがわかる。(図 4-3-2-13)。

なお、上海では黄砂観測日の前日 5 月 7 日から上昇し始め、5 月 8 日深夜 0:00 過ぎに $150\mu g/m^3$ 以上の値を示した。また瀋陽では、黄砂観測日の前日に $350\mu g/m^3$ 以上と非常に高い値を示した。(図 4-3-2-14)。

また、本事例における湿度の時系列(図 4-3-2-15)には、PM10 の上昇に伴い、湿度も急激に減少している様子が見られる。

以上の通り、本事例は、5月5日及び6日に発生した中国東部やモンゴル中部などにおける dust や duststorm が、人為起源汚染物質を含み北日本・東日本に飛来、翌日以降には西日本に広がる広範囲な黄砂事例と考えられる。

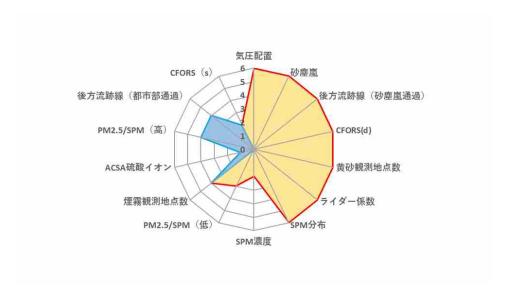


図 4-3-2-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-3-2-1 黄砂観測地点

日付	地点数		観測地点名										
2021/5/8	5	札幌	新潟	東京	福岡	高松							
2021/5/9	8	仙台	新潟	名古屋	広島	大阪	福岡	鹿児島	高松				
2021/5/10	2	福岡	鹿児島										

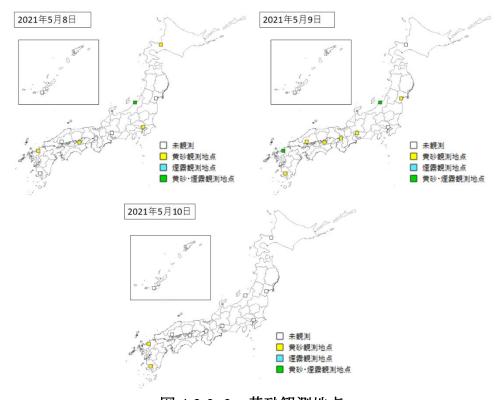
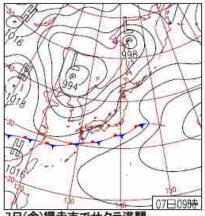
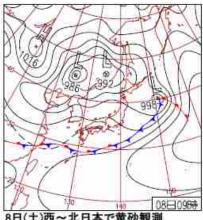


図 4-3-2-2 黄砂観測地点



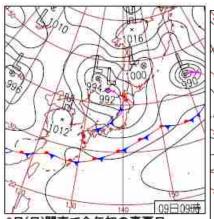
7日(金)網走市でサクラ満開

日本の南に前線が停滞し、西日本~東日 本で雨。鹿児島県中之島では79.0mm/1h の非常に激しい雨を観測、5月1位を更新。 北海道は晴れて最高気温が平年より 15.0℃高い所も。



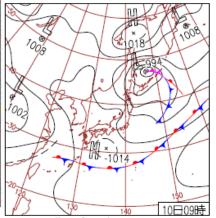
8日(土)西~北日本で黄砂観測

沖縄・奄美は前線の影響で雨。西日本~ 東日本は、気圧の谷の影響で西から次第 に曇りとなり、西日本は雨の所も。西日 本~北日本では黄砂を観測。釧路市と稚 内市でサクラ開花。



9日(日)関東で今年初の真夏日

日本海を低気圧が東進。北陸~北日本は 10日(月)北日本で強風 雨。この低気圧に吹き込む南風の影響にオホーツク海の低気圧に近い北日本では、 30.3°C.



より、九州~開東にかけての広い範囲で風が強く所々で雨。岩手県川井の最大瞬 気温が上昇。群馬県上里見で最高気温間風速31.4m/sは5月1位。西日本~東日 本では概ね晴れたが日本海側では午後雨。

図 4-3-2-3 天気図

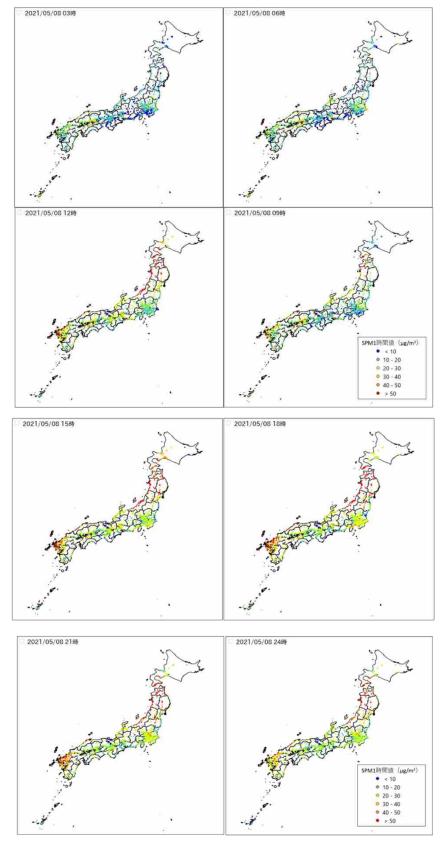


図 4-3-2-4 SPM1 時間値濃度全国分布(1) (2021 年 5 月 8 日)

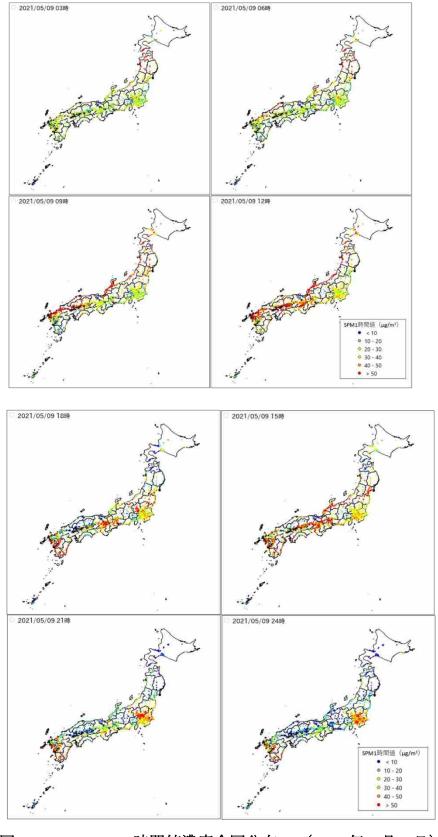


図 4-3-2-5 SPM1 時間値濃度全国分布(2)(2021 年 5 月 9 日)

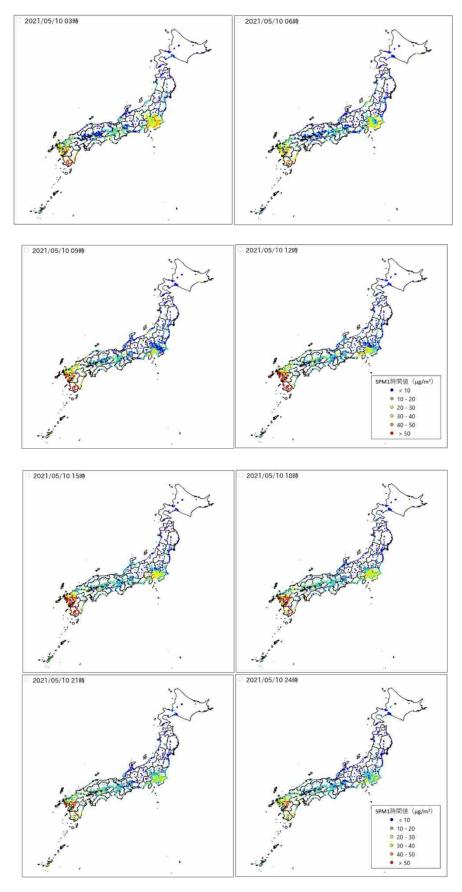


図 4-3-2-6 SPM1 時間値濃度全国分布(3)(2021 年 5 月 10 日)

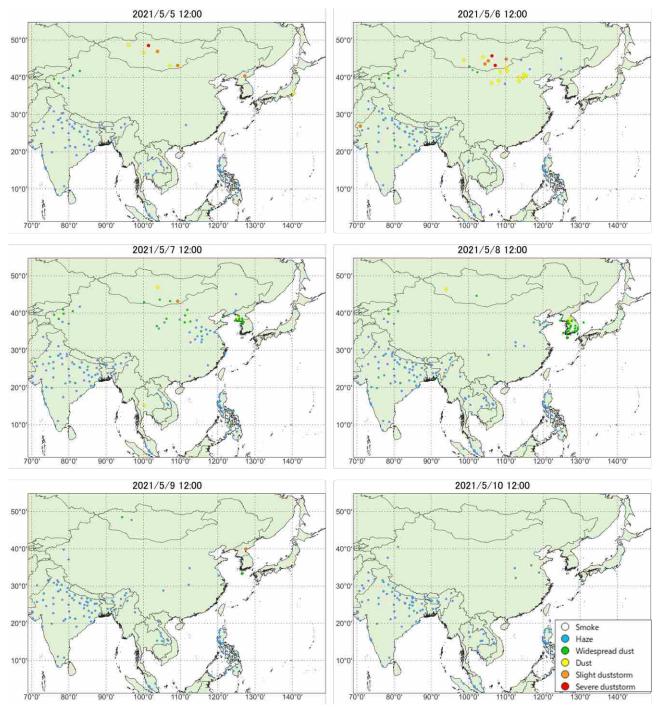
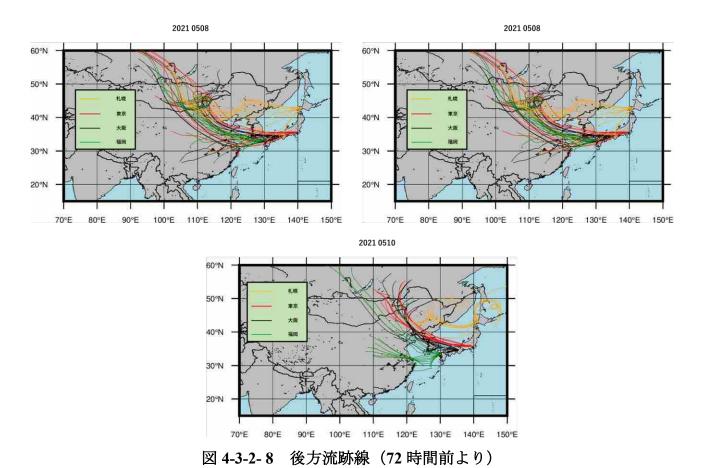


図 4-3-2-7 砂塵嵐発生状況



各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

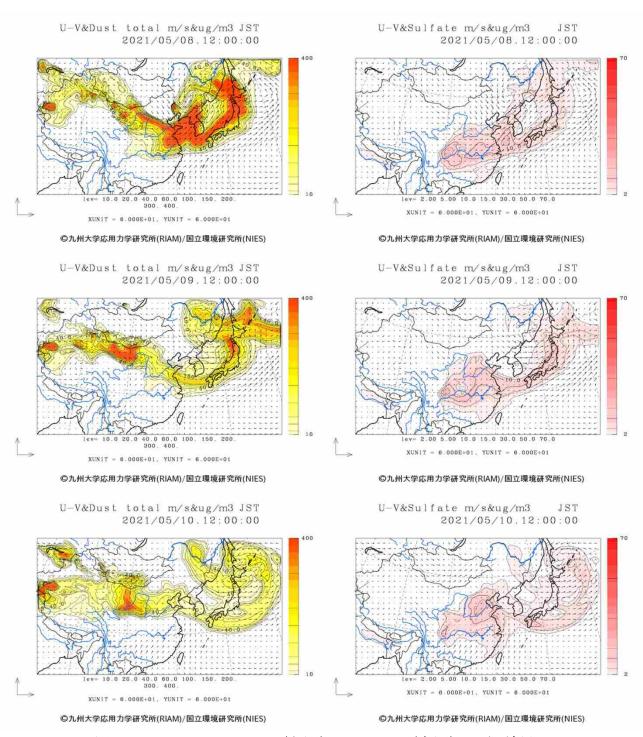
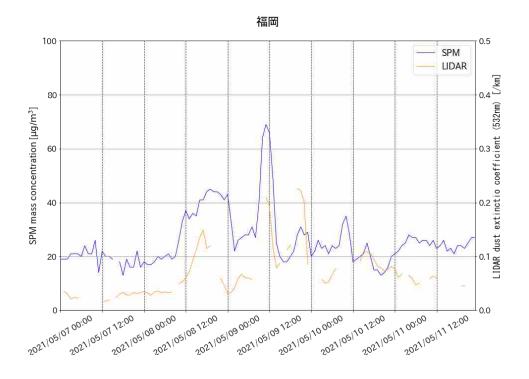
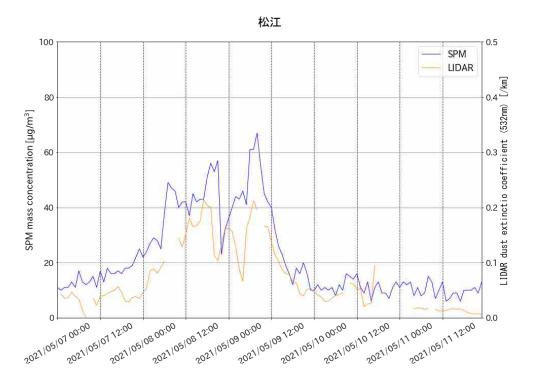
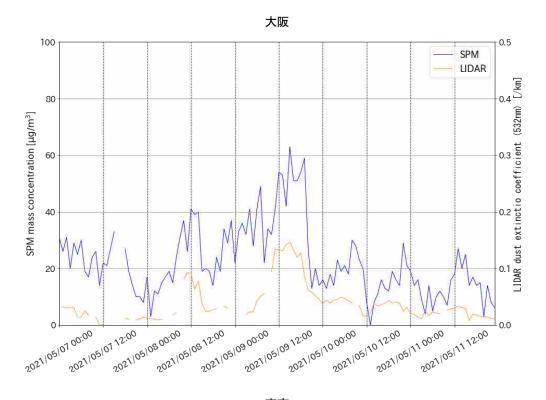
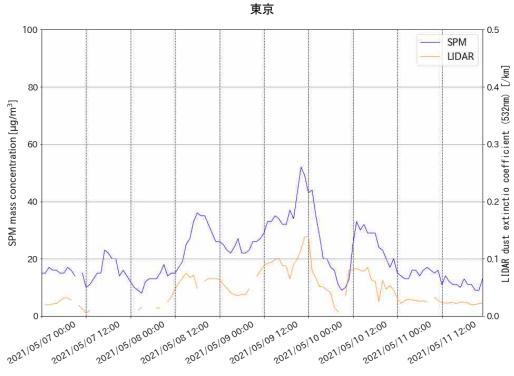


図 4-3-2-9 CFORS(dust (左図) - sulfate (右図))予測結果

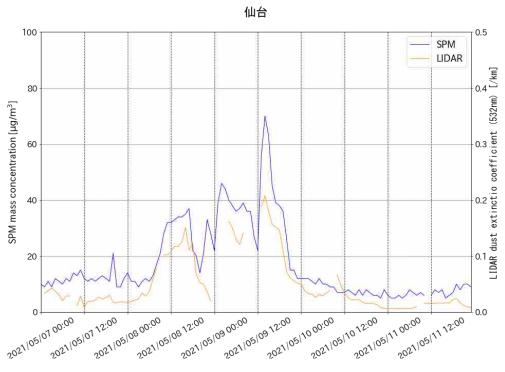














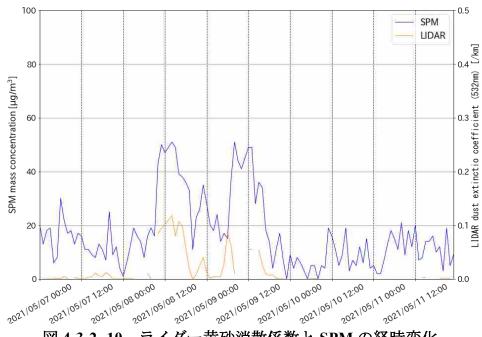
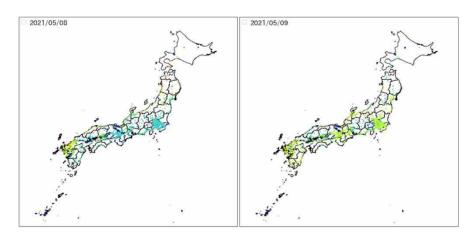


図 4-3-2-10 ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化 (福岡・松江・大阪・東京・新潟・仙台・札幌)



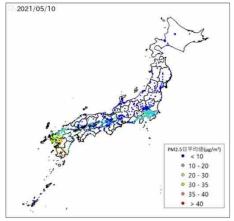


図 4-3-2-11 PM2.5 日平均值全国分布

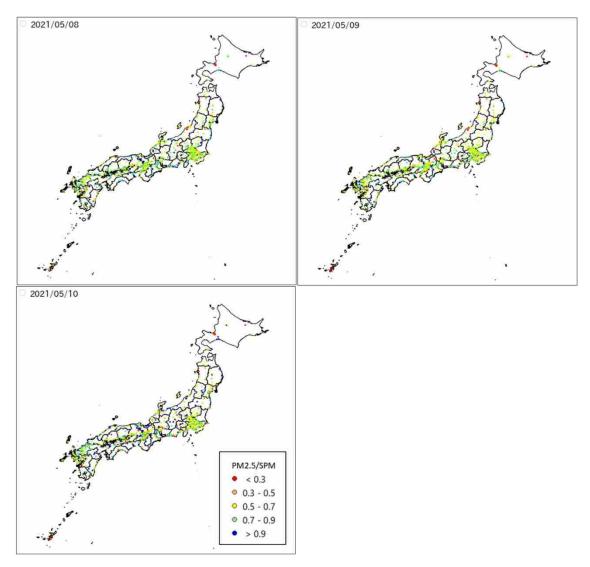


図 4-3-2-12 PM2.5 日平均值/SPM 日平均值全国分布

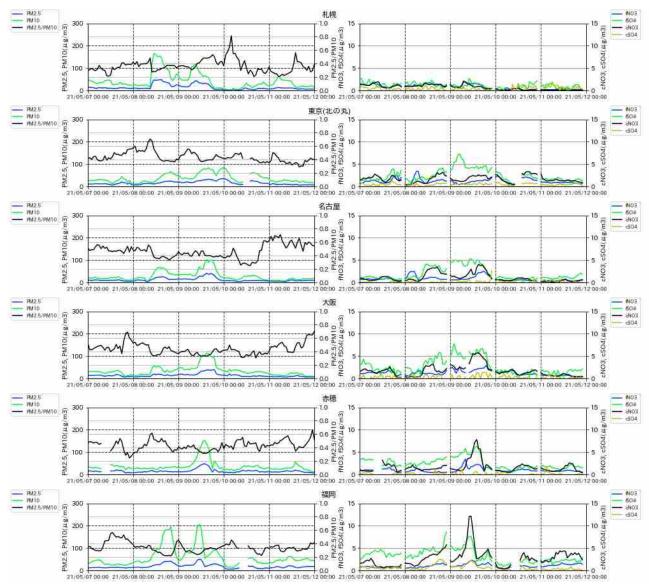


図 4-3-2-13 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

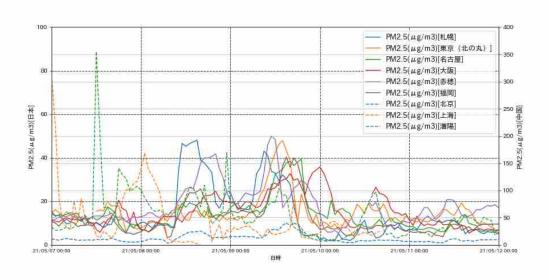


図 4-3-2-14 日本・中国での PM2.5 濃度

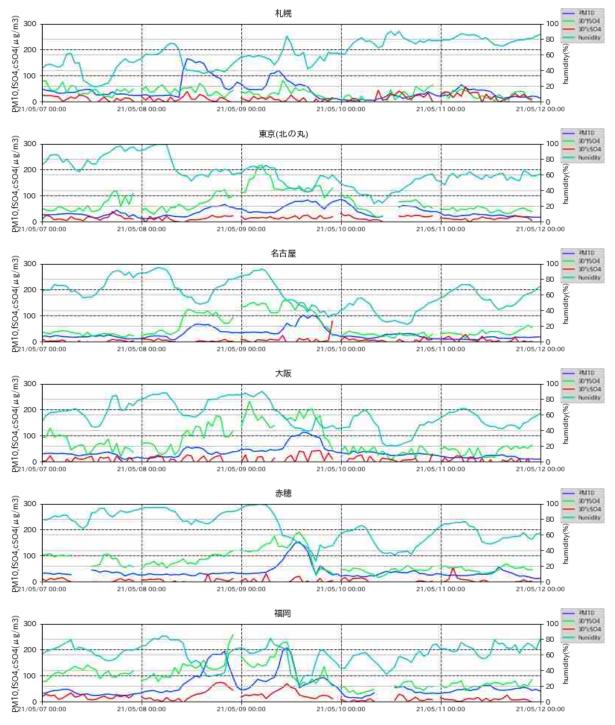


図 4-3-2-15 PM10、fSO₄²⁻、cSO₄²⁻、湿度の経時変化

fSO₄²、cSO₄²-は値を 30 倍にしてある。

(3) 黄砂事例 3 2021年5月25日~26日

本事例における黄砂の観測地点数は、表 4-3-3-1、図 4-3-3-2 に示すとおりである。5月 25 日に高松 以西の西日本の4地点で、26日には鹿児島の1地点での観測となった。

天気図(図 4-3-3-3)を見ると、黄砂観測の前日には大陸に低気圧が配置し、南には梅雨前線があった。

この期間 SPM の 3 時間ごとの全国分布を見ると、5 月 25 日 15 時に九州地方を中心に 40μg/m³以上の高濃度の分布が出現し、その後やや拡散しながら全国的に濃度が上昇してゆく様子が表れている(図 4-3-3-4、図 4-3-3-5)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると(図 4-3-3-6)、黄砂観測前の 5 月 22 日にモンゴル南部の比較的広い範囲で dust や duststorm が発生していた。この時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、大阪、福岡における流跡線は duststorm が発生していた地域を通るものが多く、大陸からの移流があったことが示唆される(図 4-3-3-7)。 さらに、CFORS 予測結果からも、dust 及び sulfate について、大陸からの影響が日本全域に及んでいる様子が見て取れる(図 4-3-3-8)。

ライダー黄砂消散係数は、黄砂観測地点に近い福岡・松江において、やや欠測が多いものの SPM 濃度に伴って上昇する様子が見られる(図 4-3-3-9)。PM2.5 の日平均値は、5 月 25 日に九州地方でやや高いものの、環境基準値を超える程ではなかった(図 4-3-3-10)。

図 4-3-3-11 には、各測定局における PM2.5 日平均値/SPM 日平均値 (PM2.5/SPM 比) の全国分布を示した。 黄砂が観測された九州地方並びに中国地方の一部で、SPM 日平均値が大きくなることに起因し、PM2.5/SPM 比の値が小さい地点が多く見られる。図 4-3-3-11 からは、黄砂が観測されていない地方であっても PM2.5/SPM 比の値が 0.3 以下である地点が散見されるが、これらの地点のデータについては、SPM の日平均値及び PM2.5 日平均値がいずれも小さい値であることを確認した。

福岡における PM2.5/PM10 は黄砂観測日の 5 月 25 日ころから減少し始め、PM10 がピークとなる 5 月 25 日の正午ころには 0.2 に近く低い値となっている。人為起源汚染物質の微小粒子、粗大粒子の SO_4^{2-} 、 NO_3 -全てのイオン成分において同様に、5 月 25 日に入り上昇し正午頃にピークなっていることがわかり、その後濃度は下降に転じている。福岡におけるそれぞれのピークの値は微小粒子の SO_4^{2-} では $8\mu g/m^3$ 以上、粗大粒子の NO_3 -では $6\mu g/m^3$ に近い値となっている。また大阪においては福岡より遅れ 5 月 25 日 夕方頃より上昇し始めている(図 4-3-3-12)。

なお、上海では、黄砂観測日前日の 5 月 24 日の午後、PM2.5 濃度の 1 時間値が $140\mu g/m^3$ 以上の値となった(図 4-3-3-13)。

また、本事例における湿度の時系列(図 4-3-3-14)に関して、大阪、福岡の双方において PM10 の上昇に伴い、湿度が低下している様子が見て取れる。

以上の通り、本事例は、モンゴル南部における dust や duststorm と人為起源汚染物質を含んだ黄砂が 飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

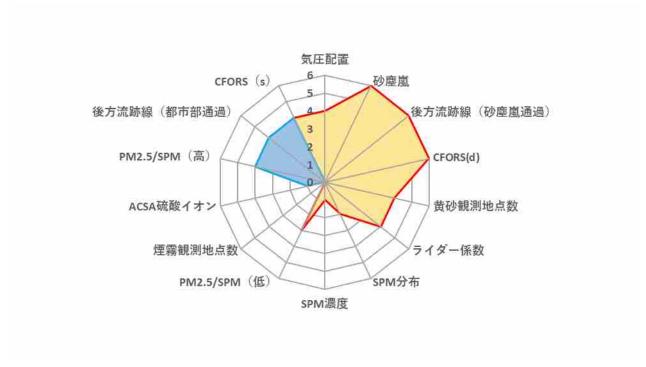


図 4-3-3-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-3-3-1 黄砂観測地点

日付	地点数		観測地点名										
2021/5/25	4	広島	福岡	鹿児島	高松								
2021/5/26	1	鹿児島											

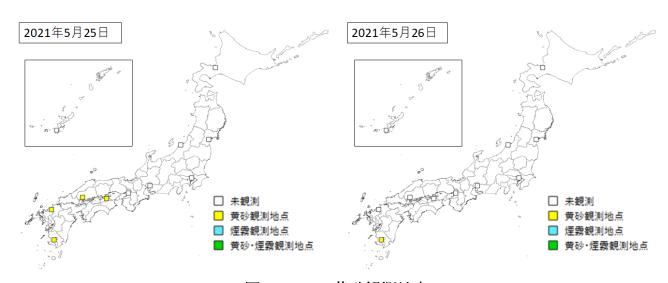
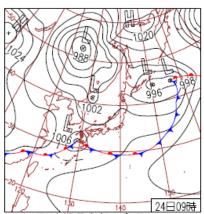
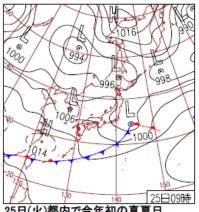


図 4-3-3-2 黄砂観測地点



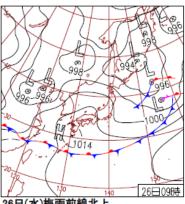
24日(月)沖縄県南部で高温

の先島諸島では晴れて気温が上昇。波照 雷雨。東日本太平洋側では晴れて気温が れた北日本を中心に、皆既月食が見られ間、伊原間では、最高気温が5月1位。 上がり、東京都練馬では最高気温30.0℃。た。



25日(火)都内で今年初の真夏日

梅雨前線の影響で全国的に雲が多く、低 上空に流れ込んだ寒気の影響で、北海道 気圧に近い九州〜東海では雨。前線南側 では朝から、西日本〜東北では夕方から



26日(水)梅雨前線北上

梅雨前線の影響で九州から四国にかけて 雨。北日本では日中晴れて気温が上昇し、 北海道で最高気温が7月並の所も。夜晴

図 4-3-3-3 天気図

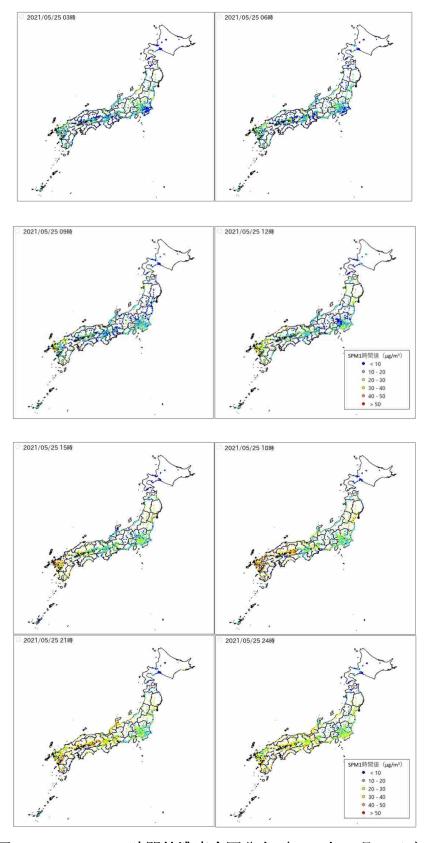


図 4-3-3-4 SPM1 時間値濃度全国分布(2021 年 5 月 25 日)

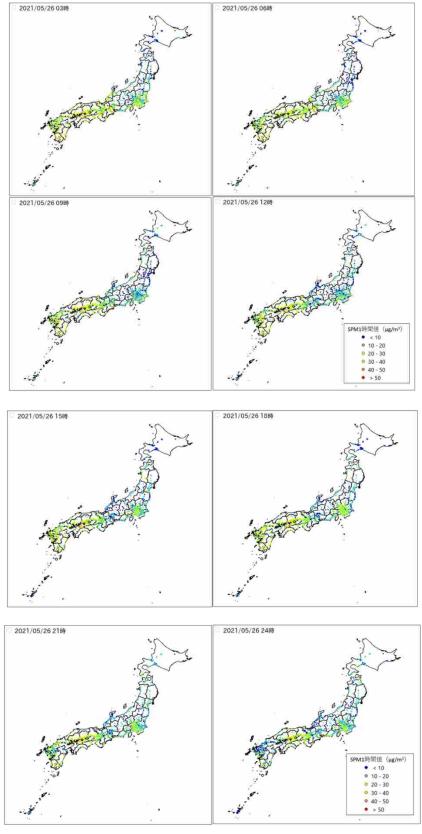


図 4-3-3-5 SPM1 時間値濃度全国分布(2021 年 5 月 26 日)

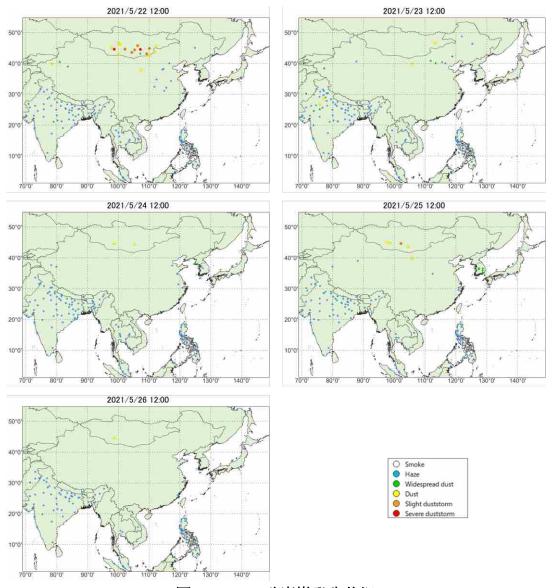
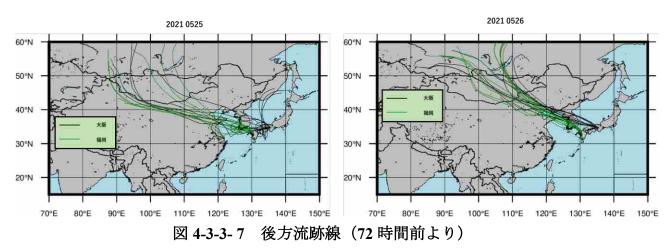


図 4-3-3-6 砂塵嵐発生状況



各地点、各黄砂観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

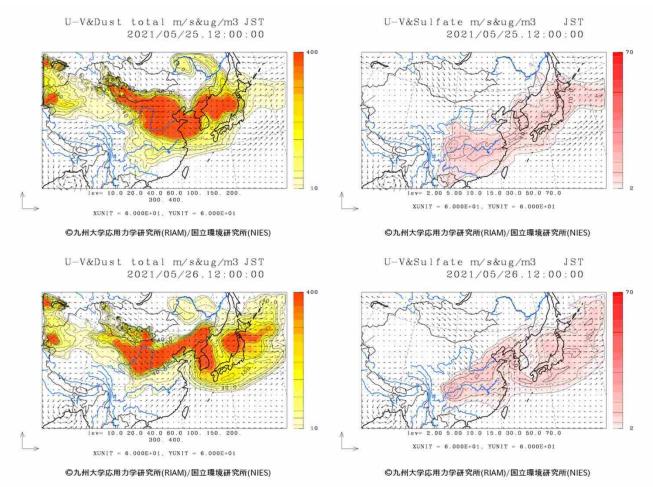
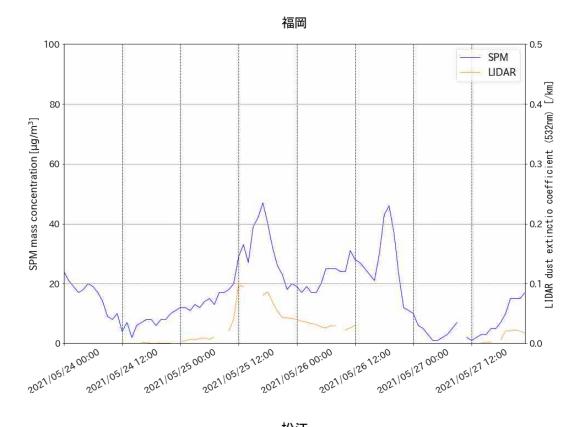
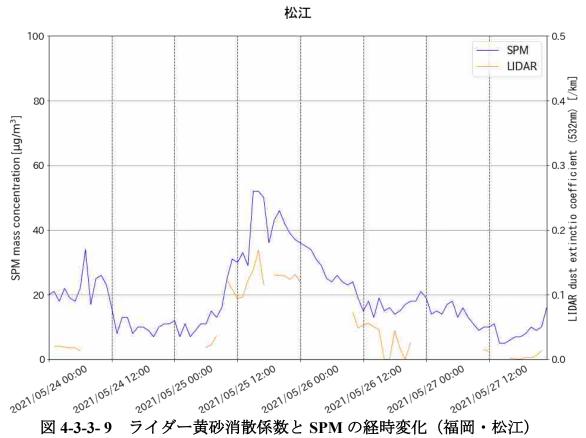


図 4-3-3-8 CFORS(dust (左図) - sulfate (右図))予測結果





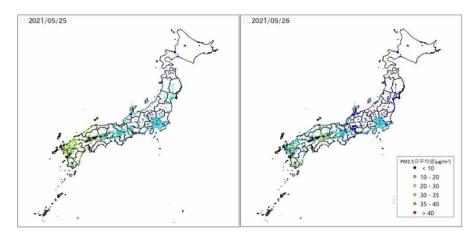
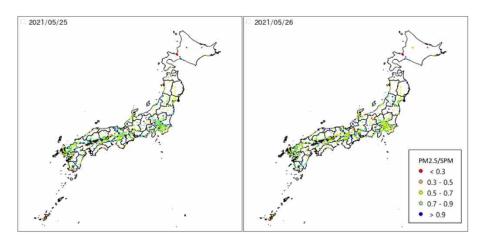


図 4-3-3-10 PM2.5 日平均值全国分布



PM2.5 日平均值/SPM 日平均值全国分布 図 4-3-3-11

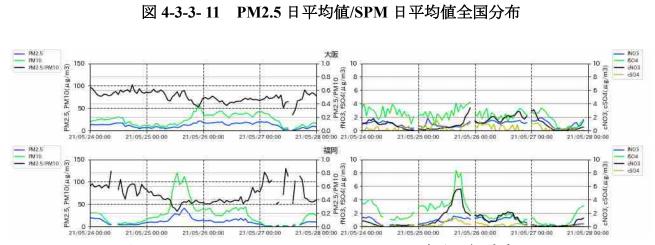


図 4-3-3-12 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

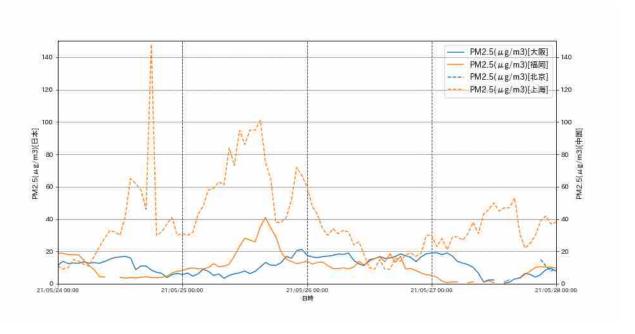


図 4-3-3-13 日本・中国での PM2.5 濃度

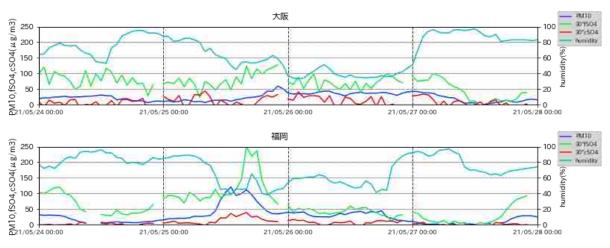


図 4-3-3-14 PM10、fSO₄²⁻、cSO₄²⁻、湿度の経時変化

fSO₄²、cSO₄²-は値を 30 倍にしてある。

(4) 黄砂事例 4 2022 年 3 月 5 日~6 日

本事例における黄砂の観測地点数は、表 4-3-4-1、図 4-3-4-2 に示すとおりである。3 月 5 日に高松以西の西日本での4 地点、6 日に那覇での1 地点となった。

天気図(図 4-3-4-3)を見ると、黄砂観測の前日、日本付近は広く高気圧に覆われていたが、黄砂観測日の3月5日から6日には大陸からの低気圧が前線を伴い東進している様子が見られる。

この期間 SPM の 3 時間ごとの全国分布を見ると、3 月 5 日に SPM 濃度が $30\sim40\mu g/m^3$ となる地域が 西から全国的に拡大してゆき、翌 6 日には濃度が低下した様子が見て取れる (図 4-3-4-4、図 4-3-4-5)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると (図 4-3-4-6)、黄砂観測前の 3 月 3 日にモンゴルの南部で dust、slight duststorm が発生している様子が見られる。この時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、大阪、福岡における流跡線は 3 月 5 日に duststorm が発生していた地域を通っているように見え、大陸からの移流による黄砂の輸送はこの slight duststorm による可能性が示唆される(図 4-3-4-7)。さらに、CFORS においても、特に 3 月 5 日に大陸からの dust 及び Sulfate が日本全国に影響を及ぼしていた様子が示されている(図 4-3-4-8)。

福江・松江におけるライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化は、共に 3 月 5 日正午頃に明確なピークが見られる(図 4-3-4-9)。PM2.5 の日平均値は、3 月 5 日に $30\mu g/m^3$ 以上の分布が広範囲に分布している様子が見られるものの、翌 6 日には濃度は全体的に低下した(図 4-3-4-10)。

図 4-3-4-11 には、各測定局における PM2.5 日平均値/SPM 日平均値(PM2.5/SPM 比)の全国分布を示した。黄砂が観測された九州地方を中心に、SPM 日平均値が大きくなることに起因し、PM2.5/SPM 比の値が小さい地点が多く見られる。図 4-3-4-11 からは、黄砂が観測されていない地方であっても PM2.5/SPM 比の値が 0.3 以下である地点が散見されるが、これらの地点のデータについては、SPM の日平均値及び PM2.5 日平均値がいずれも小さい値であることを確認した。

また、黄砂観測日である 3 月 5 日には赤穂、福岡共に PM10 が上昇し、どちらの地点においても $150\mu g/m^3$ に近いピークとなっている。それに伴い PM2.5/PM10 は 0.2 以下となる時間帯が見られる。人為起源汚染物質に関しては赤穂、福岡の両地点において微小粒子の NO_3 -で 3 月 4 日夕方頃からの上昇が見られ、福岡ではこの時間帯に同時に微小粒子の SO_4 -の上昇が見られる。これらの上昇は PM10 に先立ちピークを取り、両地点で $10\mu g/m^3$ 程度となっている。また粗大粒子の NO_3 -、 SO_4 -ともに微小粒子の上昇に遅れて上昇している傾向にあることが見られる(図 4-3-4-12)。

なお、北京では、黄砂観測日前日の3月4日に、上海では5日にPM2.5 濃度の1時間値が一時 $100\mu g/m^3$ 前後の値を示している(図4-3-4-13)。

また、本事例における湿度の時系列(図 4-3-4-14)に関しては他の事例と同様 PM10 の上昇とほぼ同時に湿度の低下が見られる。

以上の通り、本事例は、モンゴル南部における duststorm と人為起源汚染物質を含んだ空気塊が、西日本に飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

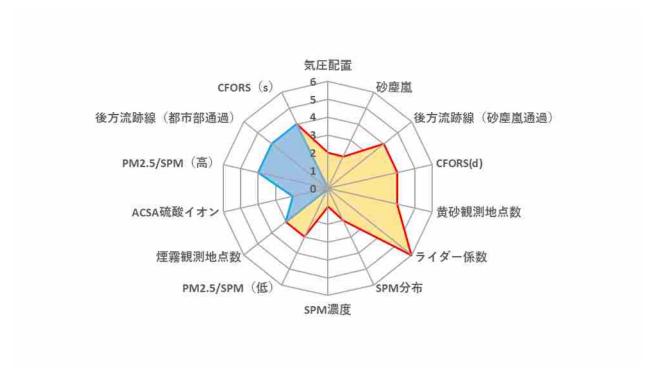


図 4-3-4-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-3-4-1 黄砂観測日

日付	地点数		観測地点名									
2022/3/5	4	広島	福岡	鹿児島	高松							
2022/3/6	1	那覇										

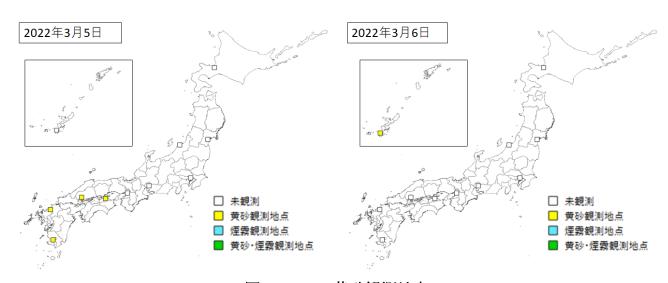
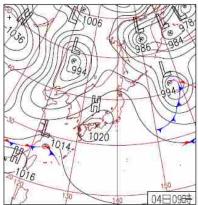
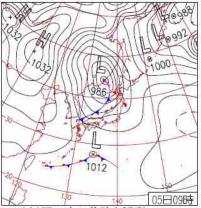


図 4-3-4-2 黄砂観測地点



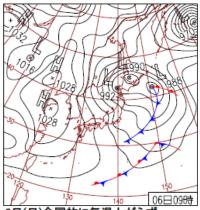
4日(金)高気圧に覆われる

高気圧に覆われ晴れた所が多かったが、 北日本では寒気の影響で日本海側を中心 りや雨の所も。



5日(土)西日本で黄砂を観測

前線を伴う低気圧が発達しながら沿海州 日本付近は冬型の気圧配置。山陰~北日付近を東進。北陸~北日本は前線や寒気 本の日本海側で雪や雨。本州の太平洋側 に雪。沖縄~西日本太平洋側は、東シナ の影響で雪や雨。西~東日本太平洋側は で概ね晴れ。全国66地点で最高気温が前海に発生した低気圧の影響で、次第に曇 概ね晴れ。東海、関東で春一番。岐阜市、日より10℃以上低く、各地で最も寒い時 金沢市ウメ開花。



6日(日)全国的に気温上がらず

期を下回る。

図 4-3-4-3 天気図

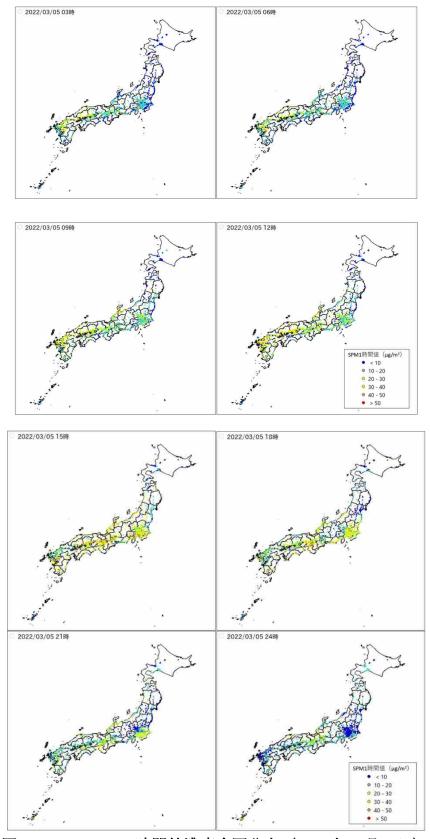


図 4-3-4-4 SPM1 時間値濃度全国分布(2021 年 3 月 5 日)

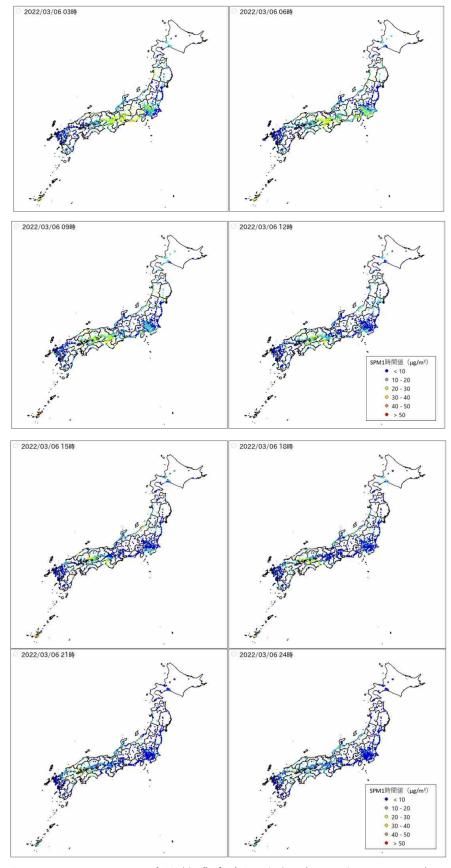


図 4-3-4-5 SPM1 時間値濃度全国分布(2021 年 3 月 6 日)

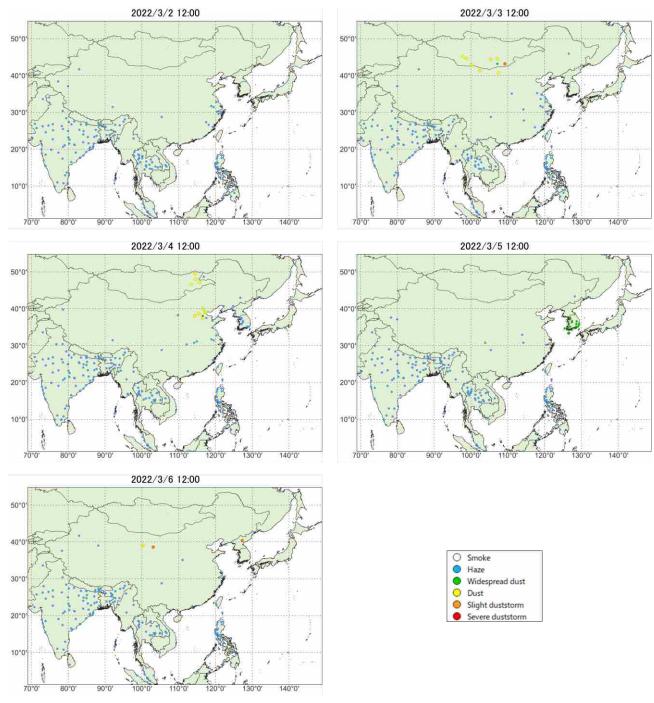


図 4-3-4-6 砂塵嵐発生状況

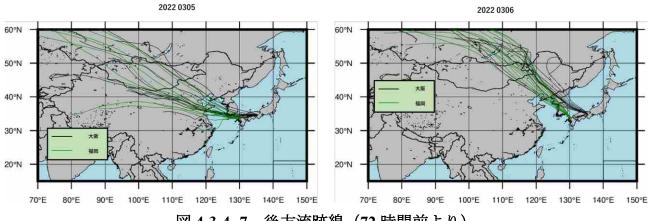


図 4-3-4-7 後方流跡線 (72 時間前より)

各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

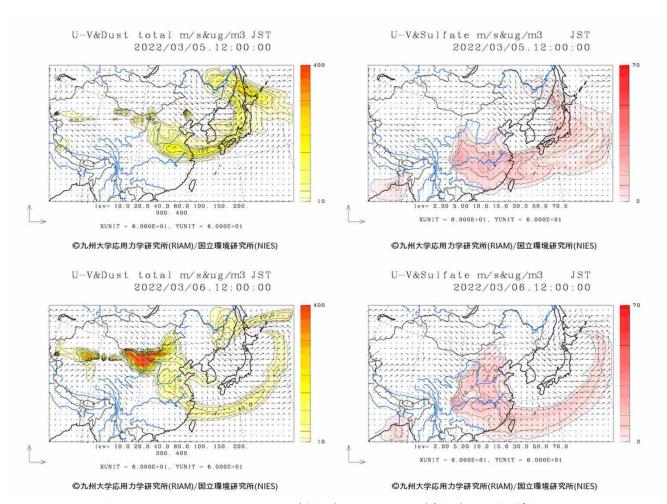
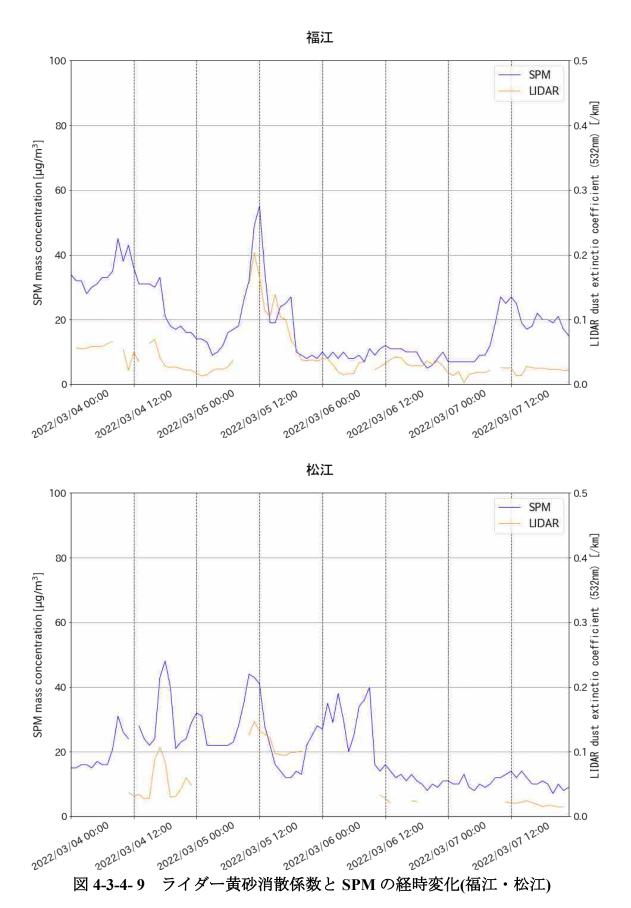


図 4-3-4-8 CFORS(dust (左図) —sulfate (右図))予測結果



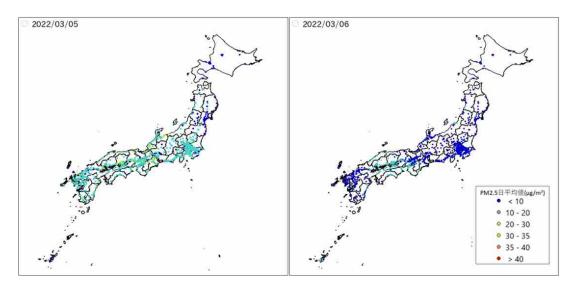


図 4-3-4-10 PM2.5 日平均値全国分布

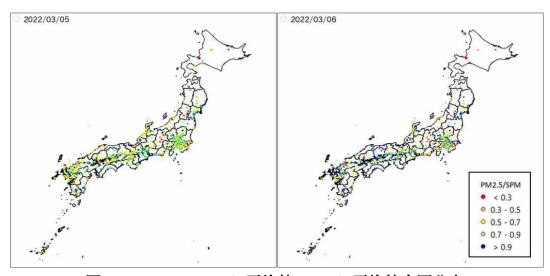


図 4-3-4-11 PM2.5 日平均值/SPM 日平均值全国分布

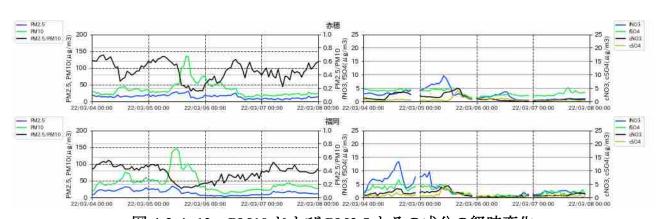


図 4-3-4-12 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

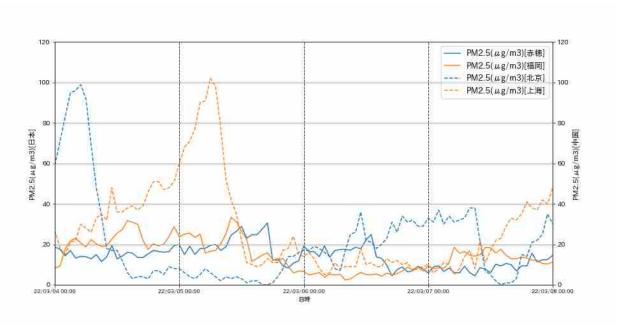


図 4-3-4-13 日本と中国での PM2.5 濃度

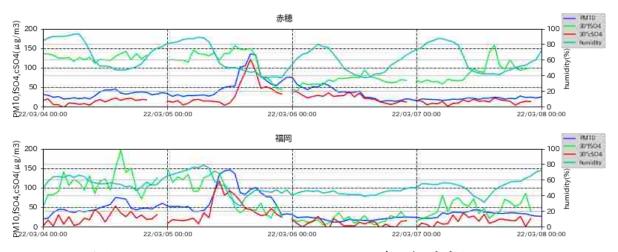


図 4-3-4-14 PM10、fSO4²⁻、cSO4²⁻、湿度の経時変化

湿度は新潟のデータを使用しており、 fSO_4^2 、 cSO_4^2 は値を 30 倍にしてある。

(5) 黄砂事例 5 2022 年 3 月 17 日

本事例における黄砂の観測地点数は、表 4-3-5-1 に示すとおりで観測日である 3 月 17 日に福岡における 1 地点のみで観測された。

天気図(図 4-3-5-3) を見ると、黄砂観測の前日、当日共に全国的に高気圧に覆われていた。

この期間 SPM の 3 時間ごとの全国分布を見ると、17 日午後にかけて、全国的に $20\sim30\mu g/m^3$ の SPM 濃度が広く分布したのち、濃度が低下してゆく様子が見て取れる(図 4-3-5-4)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると(図 4-3-5-5)、黄砂観測前の 3 月 15 日にモンゴルの南部で dust、slight duststorm が発生している様子が見られる。この時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、黄砂が観測された地点もしくはその近傍の地点における流跡線は duststorm が発生していた地域を通過していないように見える(図 4-3-5-6)。CFORS 予測結果からは、高濃度ではないものの、dust、sulfate いずれに関しても大陸からの影響が示されている(図 4-3-5-7)。

ライダー黄砂消散係数は、黄砂が観測された福岡では欠測であったため、長崎のデータを参照した。ただし、黄砂観測日である 3 月 17 日前後で、黄砂消散係数の変化は明瞭ではない。SPM1 時間値も、翌 18 日には低下したものの、黄砂日における大きな変動は見られなかった(図 4-3-5-8)。PM2.5 の日平均値も、全体的に $20\mu g/m^3$ 以下となっており、高濃度となる地域は見られない(図 4-3-5-9)。

図 4-3-5-10 には、各測定局における PM2.5 日平均値/SPM 日平均値 (PM2.5/SPM 比) の全国分布を示した。黄砂が観測された福岡を中心に、SPM 日平均値が大きくなることに起因し、PM2.5/SPM 比の値が小さくなる傾向が見られる。図 4-3-5-10 からは、黄砂が観測されていない地方であっても PM2.5/SPM 比の値が 0.3 以下である地点が散見されるが、これらの地点のデータについては、SPM の日平均値及び PM2.5 日平均値がいずれも小さい値であることを確認した。

また、3月17日の正午前から夕方にかけて PM10 が上昇し、それに伴い PM2.5/PM10 比が低下している様子が見られる。人為起源汚染物質の粗大粒子、微小粒子の SO_4^{2-} 、 NO_3 -に関しては全てのイオン成分において 3月17日午前6:00 頃から上昇が見られるが、その後、粗大粒子の SO_4^{2-} 以外は減少もするが、それ以外のイオン成分は PM10 の上昇とほぼ同じ時間帯に上昇し、特に fSO_4^{2-} で $4\mu g/m^3$ を超えるピークとなっている。(図 4-3-5-11)。

なお、北京では、黄砂観測日前日の 3 月 16 日に、PM2.5 濃度の 1 時間値が一時 $90\mu g/m^3$ 以上の値を示している(図 4-3-5-12)。

また、本事例における湿度の時系列(図 4-3-5-13)に関しては湿度の減少がほぼ見られない。

以上の通り、本事例は、モンゴルで発生した dust を含む空気塊が、人為起源汚染物質を含みつつ、限定的な地域に飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

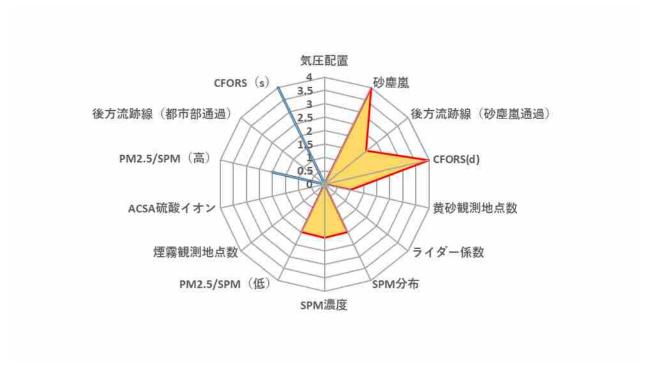


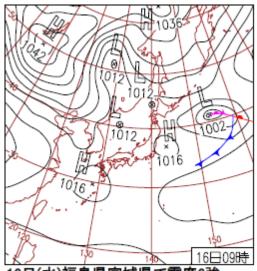
図 4-3-5-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-3-5-1 黄砂観測地点

日付	地点数		観測地点名									
2022/3/17	1	福岡										

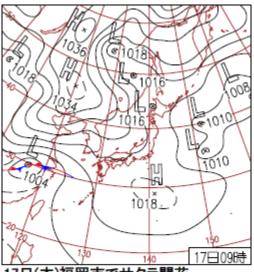


図 4-3-5-2 黄砂観測地点



16日(水)福島県宮城県で震度6強

九州付近と関東の東海上の高気圧に覆わ れ、南西諸島~東日本は晴れて気温上昇。概ね晴れて最高気温が5月並の所も。北 北海道付近の低気圧の影響で北日本では 日本は曇りで所々雪や雨。全国で最も早 曇りとなり、所々で雪や雨を観測。



17日(木)福岡市でサクラ開花

日本の南の高気圧に覆われ、太平洋側は く福岡市でサクラ開花。また、福岡市で は黄砂も観測。

図 4-3-5-3 天気図

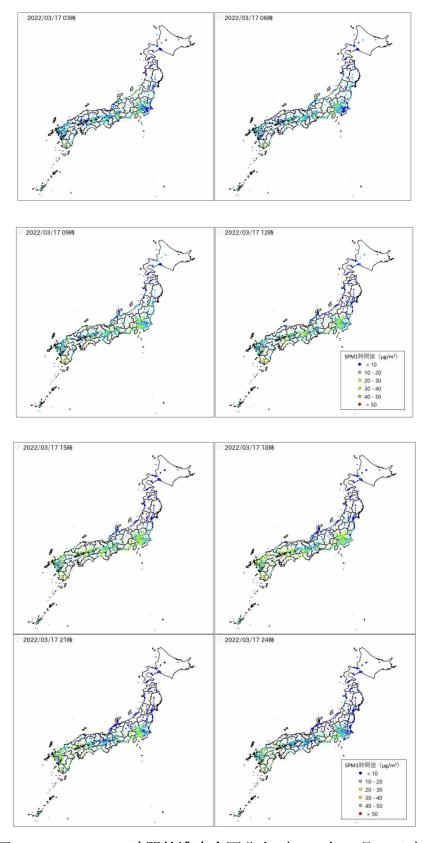


図 4-3-5-4 SPM1 時間値濃度全国分布(2022 年 3 月 17 日)

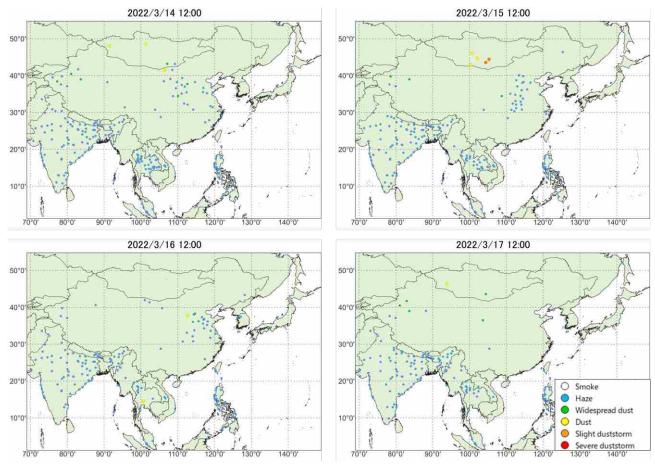
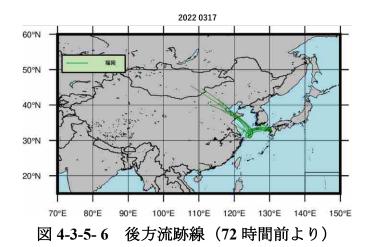


図 4-3-5-5 砂塵嵐発生状況



各地点、各黄砂観測日の0:00から23:00までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

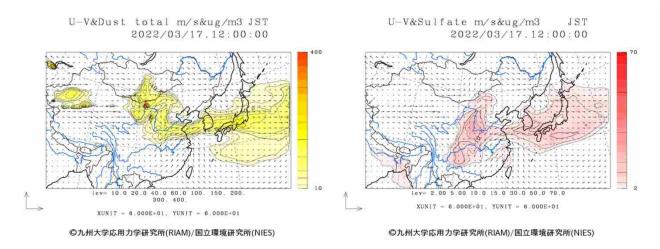
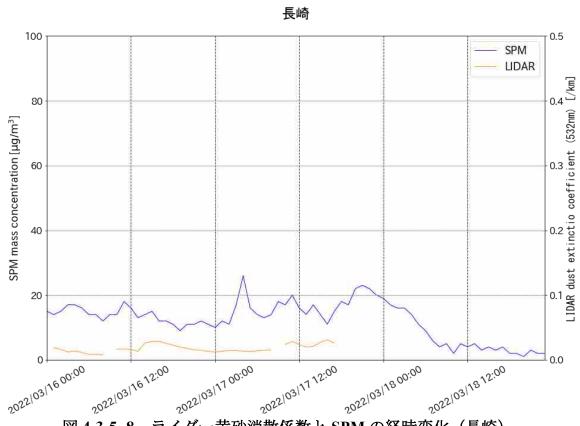


図 4-3-5-7 CFORS(dust (左図) - sulfate (右図))予測結果



ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(長崎)

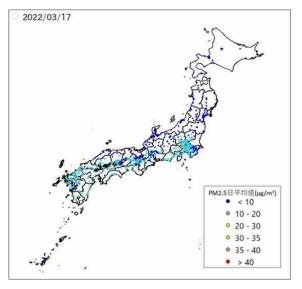


図 4-3-5-9 PM2.5 日平均值全国分布

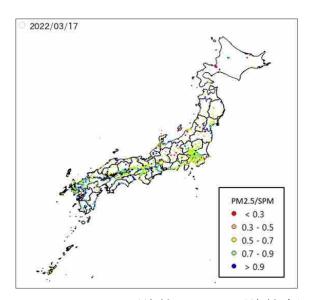


図 4-3-5-10 PM2.5 日平均值/SPM 日平均值全国分布

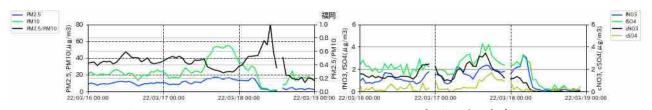


図 4-3-5-11 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

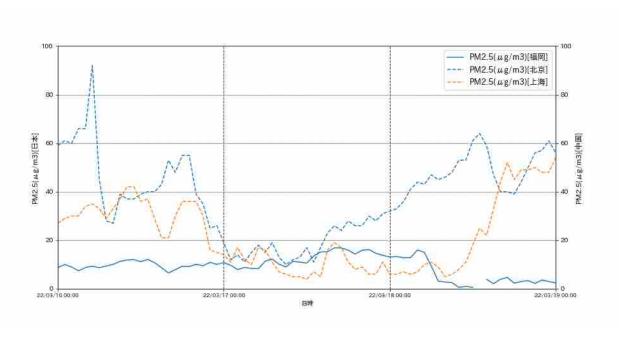


図 4-3-5-12 日本と中国での PM2.5 濃度

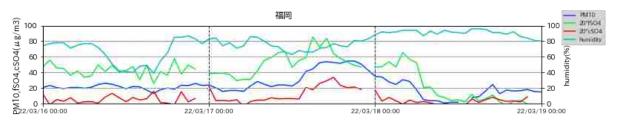


図 **4-3-5-13 PM10、fSO4²⁻、cSO4²⁻、湿度の経時変化** fSO4²⁻、cSO4²⁻は値を 20 倍にしてある。

(6) 黄砂事例 6 2022 年 3 月 27 日~3 月 28 日

本事例における黄砂の観測地点数は、表 4-3-6-1、図 4-3-6-2 に示すとおりである。3 月 27 日、28 日 共に福岡の1 地点でのみ観測された事例である。

天気図(図4-3-6-3)を見ると、黄砂観測期間中、前線が発達しながら北東へ進んでいる様子が見られる。

この期間における SPM の 3 時間ごとの全国分布からは、3 月 27 日夜間から 28 日にかけて、北九州を中心に SPM 濃度がやや上昇する様子が見られるものの、高濃度となった地域は見られない(図 4-3-6-4、図 4-3-6-5)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると(図 4-3-6-6)、黄砂観測前の 3 月 24 日、25 日にモンゴルで dust、duststorm が発生している。この時の気流の状況について後方流跡線で確認したところ、3 月 27 日、28 日の両日に黄砂が観測された福岡における流跡線が、duststorm が発生していた地域を通っており、大陸からの移流があったと考えられる(図 4-3-6-7)。CFORS についても、高濃度ではないものの、大陸からの dust 及び sulfate による全国的な影響が示されている(図 4-3-6-8)。

ライダー黄砂消散係数としては、福岡のデータが引き続き欠測であったため、長崎におけるデータを参照した。3月28日正午にかけて、黄砂消散係数及びSPM濃度が上昇している様子が確認できる(図4-3-6-9)。PM2.5の日平均値は、3月28日に九州・四国の一部で、27日と比べやや上昇しているものの、高濃度となった地域は見られない(図4-3-6-10)。

図 4-3-6-11 には、各測定局における PM2.5 日平均値/SPM 日平均値(PM2.5/SPM 比)の全国分布を示した。黄砂が観測された福岡を中心に、SPM 日平均値が大きくなることに起因し、PM2.5/SPM 比の値が小さい地点が多く見られる。図 4-3-6-11 からは、黄砂が観測されていない地方であっても PM2.5/SPM 比の値が 0.3 以下である地点が散見されるが、これらの地点のデータについては、SPM の日平均値及び PM2.5 日平均値がいずれも小さい値であることを確認した。

黄砂観測日 3 月 28 日 0:00 過ぎには PM10 がピークとなるが同時に PM2.5 もピークとなるため、この上昇に伴う PM2.5/PM10 の顕著な低下は見られない。また、人為起源汚染物質に関しても粗大粒子、微小粒子の NO₃-、SO₄²-全てのイオン成分で PM10 とほぼ同時ピークとなっている傾向が見られる。それらの時間の各イオン成分の濃度は粗大粒子、微小粒子の NO₃-で 6μ g/m³ 程度、微小粒子、粗大粒子の SO₄²-で 4μ g/m³ 程度、 2μ g/m³ 程度となっている。(図 4-3-6-12)。

なお、上海では、黄砂観測日前日の3月26日に、PM2.5 濃度の上昇が見られるが $50\mu g/m^3$ 以下と高い濃度とはなっていない(図4-3-6-13)。

また、本事例における湿度の時系列(図 4-3-6-14)に関しては PM10 の上昇時の湿度の低下は見られなかった。

以上の通り、本事例はモンゴルにおける duststorm の影響を含んだ空気塊が、若干の人為起源汚染物質を含み、日本の限定的な地域に飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

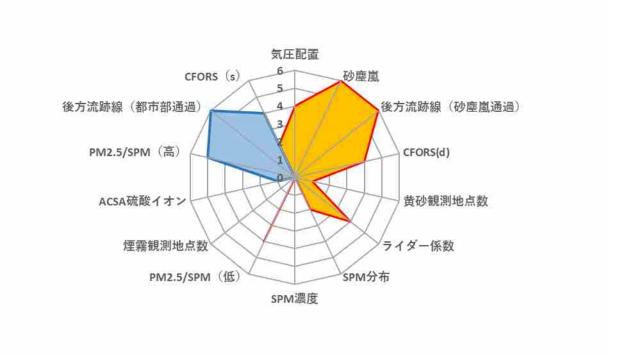


図 4-3-6-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-3-6-1 黄砂観測地点

日付	地点数		観測地点名									
2022/3/27	1	福岡										
2022/3/28	1	福岡										

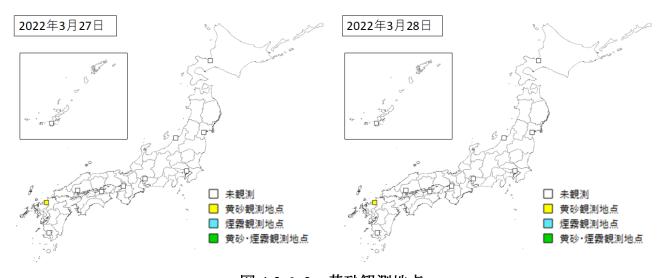
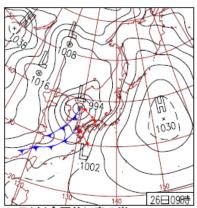
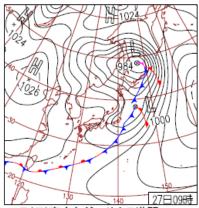


図 4-3-6-2 黄砂観測地点



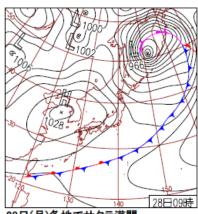
26日(土)全国的に春の嵐

大荒れとなった。



27日(日)東京などでサクラ満開

発達する低気圧が日本海と西日本を進む 発達中の低気圧は北東進。沖縄付近に前 沖縄~九州南部は前線や湿った空気の影 影響で雨や風が強くなり、鹿児島県屋久 線停滞。東~北日本中心に明け方まで雨、響で雨。北日本ははじめ雨や雪が降った 島で記録的短時間大雨情報発表。富山県 日中は概ね晴れ。東海~北日本で最高気 が次第に高気圧に覆われて晴れ。その他 八尾で最大瞬間風速35.7m/sなど各地で 温5月中旬並の所も。福岡市、高知市、 は晴れや曇り。松山市や横浜市など7地 東京でサクラ満開。



28日(月)各地でサクラ満開

点でサクラ満開。

図 4-3-6-3 天気図

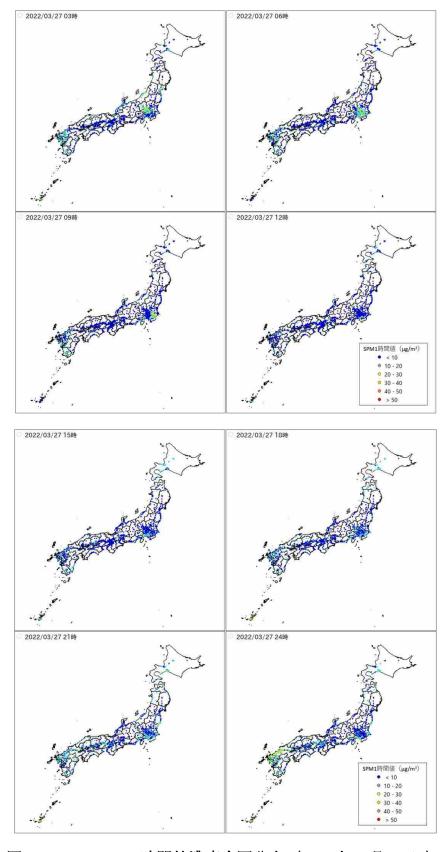


図 4-3-6-4 SPM1 時間値濃度全国分布(2022 年 3 月 27 日)

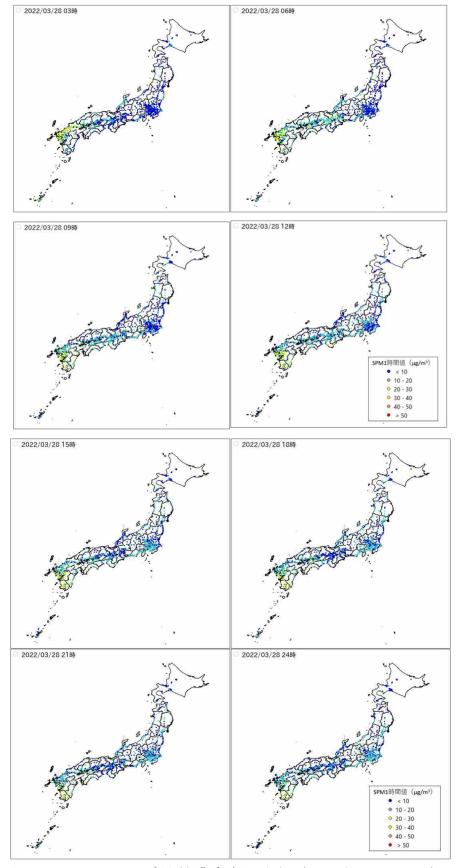


図 4-3-6-5 SPM1 時間値濃度全国分布(2022 年 3 月 28 日)

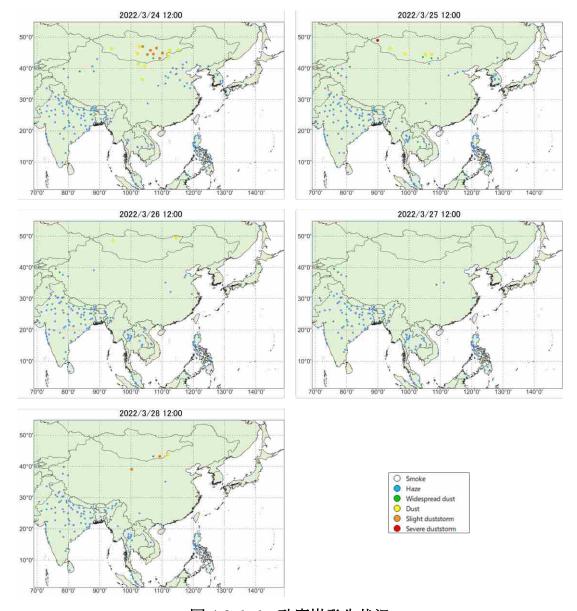
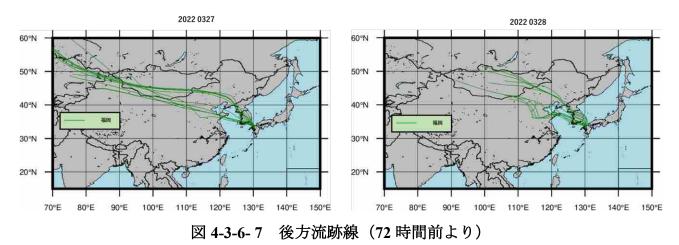


図 4-3-6-6 砂塵嵐発生状況



各地点、各黄砂観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

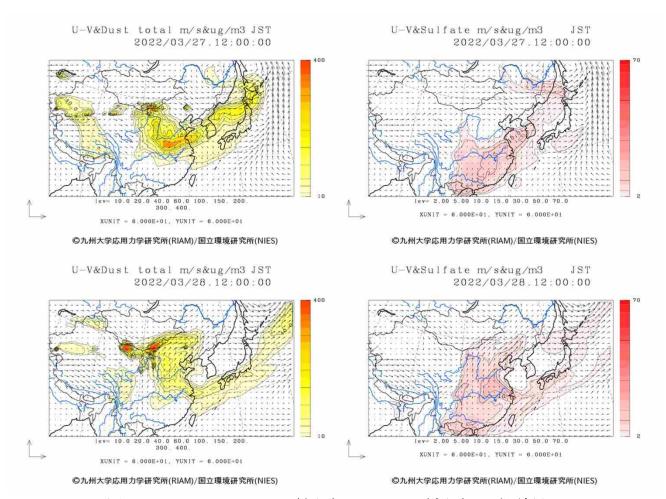


図 4-3-6-8 CFORS(dust (左図) - sulfate (右図))予測結果



図 4-3-6-9 ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(長崎)

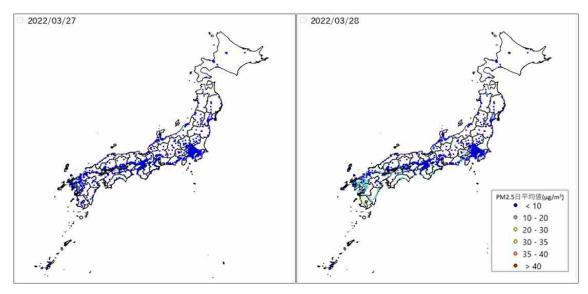


図 4-3-6-10 PM2.5 日平均值/全国分布

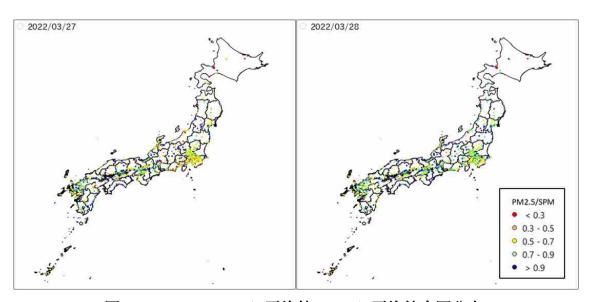


図 4-3-6-11 PM2.5 日平均值/SPM 日平均值全国分布

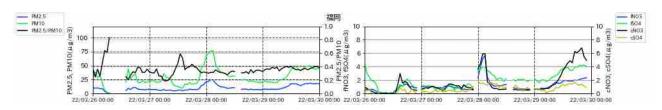


図 4-3-6-12 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

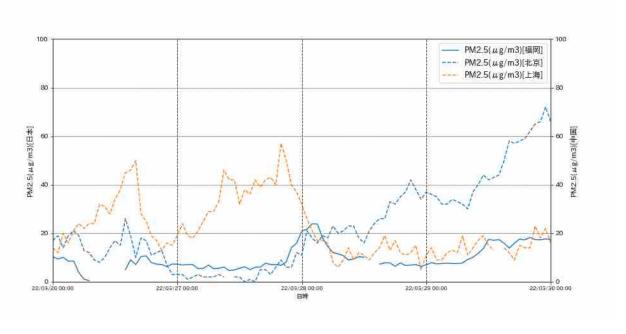


図 4-3-6-13 日本と中国での PM2.5 濃度

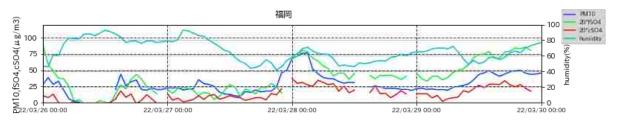


図 4-3-6-14 PM10、fSO4²⁻、cSO4²⁻、湿度の経時変化

fSO₄²⁻、cSO₄²⁻は値を 20 倍にしてある。

4.4 各黄砂事例におけるイオン成分/PM10 の変化

2021 年度の黄砂事例 1 では他の事例と比較し粗大粒子の濃度が低いように見えるため、比較的汚染物質を含まない黄砂の可能性がある。そこで黄砂粒子への汚染物質の付着について検討するためにイオン成分/PM10 を調べた。解析方法としては、粗大粒子のイオン成分/PMc (例えばここでは cSO_4 ²⁻は PMc (粗大粒子状物質濃度) 中の cSO_4 ²⁻のため PMc との比とする) を整理し、黄砂日前後の時系列を調べた。各黄砂事例に対する粗大粒子のイオン成分/PMc を図 4-4-4-1~図 4-4-4-6 に示した。これらの図より事例 1 の cNO_3 ⁻/PMc、 cSO_4 ²⁻/PMc の値が黄砂日の間で、他の事例と比較し低い値で推移しているように見える。例えば 4 月 17 日の福岡における黄砂時間の平均値は cNO_3 ⁻/PMc は 0.023、 cSO_4 ²⁻/PMc は 0.013 であった。事例 1 以外の事例における黄砂時間 (データのある範囲内で) での平均値では、 cNO_3 ⁻/PMc で 0.031 から 0.090、 cSO_4 ²⁻/PMc で 0.013 から 0.04 となっており、事例 1 は低い値を取っていることが読み取れる(事例 1、事例 2 での cSO_4 ²⁻/PMc はぞれぞれ 0.0128、0.0134)。以上より、事例 1 は汚染物質が黄砂粒子に付着した内部混合状態で飛来した黄砂事例であることが示唆される。

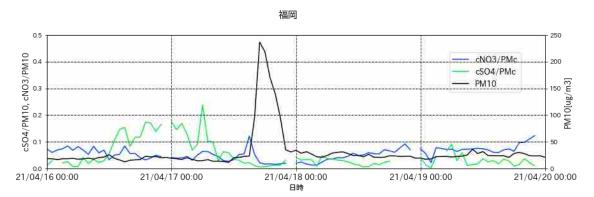
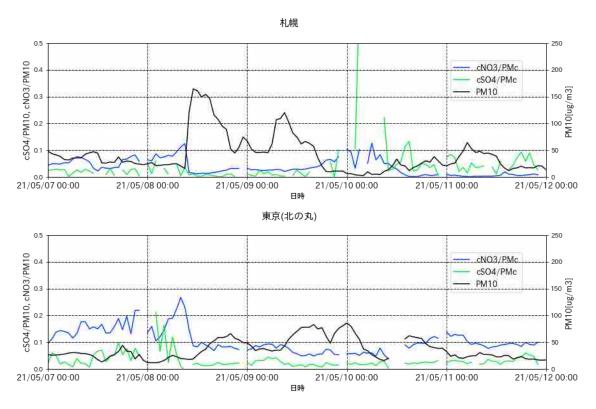
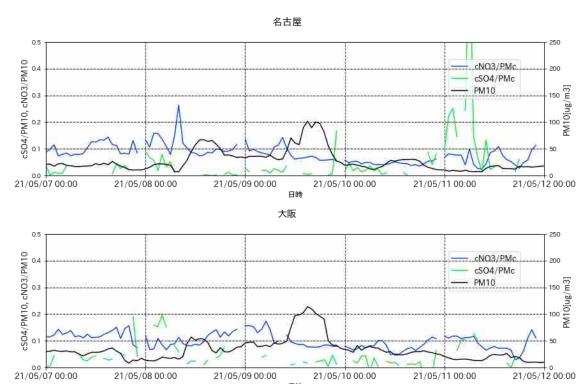


図 4-4-4-1 黄砂事例 1 におけるイオン成分/PMc の時系列変化





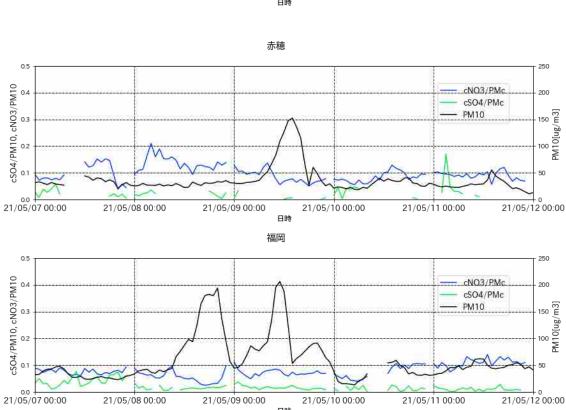


図 4-4-4-2 黄砂事例 2 におけるイオン成分/PMc の時系列変化

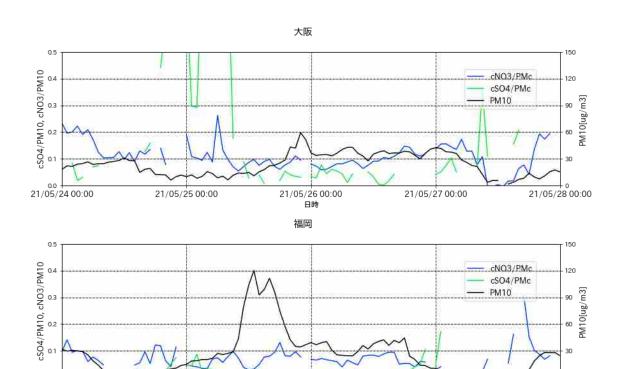


図 4-4-4-3 黄砂事例 3 におけるイオン成分/PMc の時系列変化

21/05/25 00:00

21/05/26 00:00 日時

21/05/27 00:00

21/05/28 00:00

21/05/24 00:00

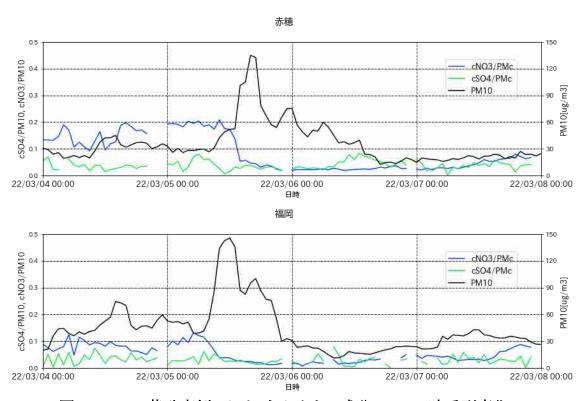


図 4-4-4-4 黄砂事例 4 におけるイオン成分/PMc の時系列変化



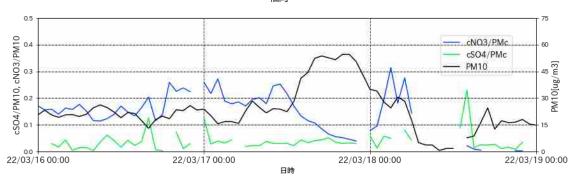


図 4-4-4-5 黄砂事例 5 におけるイオン成分/PMc の時系列変化

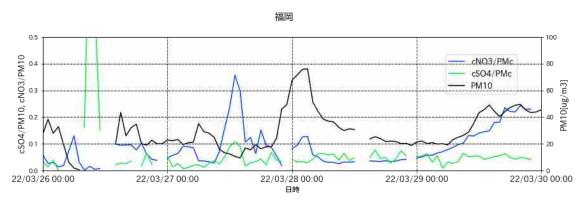


図 4-4-4-6 黄砂事例 6 におけるイオン成分/PMc の時系列変化

4.5 2021 年度に観測された黄砂事例のまとめ

第1回検討会にて報告した2021年度に観測された黄砂事例を表4-5-1に示し、解析から得られた黄砂事例を評価するレーダーチャートを図4-5-1に示した。

事例 1 は、4 月 17 日に福岡、18 日に那覇で観測された黄砂を対象とした事例である。日本で黄砂が観測される前の 4 月 14 日、15 日にはモンゴル南東部で slight duststorm や severe duststorm が発生している様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、黄砂観測日である 4 月 17 日の午後から夕方にかけて高い値をとっており、PM10 に関しても同様の傾向が見られた。なお、北京では、黄砂観測前の 4 月 16 日に、PM2.5 濃度の 1 時間値が一時 $350\mu g/m^3$ 以上の値を示し、上海でも 4 月 17 日午前に $100\mu g/m^3$ 以上と高い値を示していた。以上のことから、事例 1 は、4 月 14 日及び 15 日に発生したモンゴル南部における duststorm が、人為起源汚染物質を含み、日本に飛来した弱い黄砂の事例と考えられる。

事例 2 は、5 月 9 日に 8 地点での観測と比較的広い範囲で黄砂が観測された事例である。日本で黄砂が観測される前の 5 月 5 日~7 日に中国東部や、モンゴル中部、東部で dust、slight duststorm、severe duststorm が発生している様子が見られ、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。また、人為起源汚染物質の fSO_4^2 と cNO_3 -については、黄砂観測日である 5 月 9 日の午前から特に西日本で上昇しており、黄砂観測日の前日である 5 月 8 日に上海で $150\mu g/m^3$ 以上、瀋陽で $350\mu g/m^3$ 以上と非常に高い値を示していた。以上のことから、事例 2 は、5 月 5 日・6 日に発生した中国東部やモンゴル中部、東部におけるdust や duststorm が、人為起源汚染物質を含み北日本・東日本に飛来、翌日以降には西日本に広がる広範囲な黄砂事例と考えられる。

事例 3 は、5 月 25 日に西日本の 4 地点で、26 日に鹿児島の 1 地点で観測された黄砂を対象とした事例である。日本で黄砂が観測される前の 5 月 22 日にはモンゴル南部の比較的広い範囲で dust や duststorm が発生している様子が見られ、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。また、人為起源汚染物質の fSO_4^2 と eNO_3 -については、5 月 25 日に入り上昇し、正午頃に高い値を示していた。以上のことから、事例 3 は、5 月 22 日に発生したモンゴル南部における dust や duststorm と、人為起源汚染物質を含んだ黄砂が飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

事例 4 は、3 月 5 日に西日本で 4 地点、6 日に那覇で観測された黄砂を対象とした事例である。日本で黄砂が観測される前の 3 月 3 日にモンゴルの南部で dust、slight duststorm が発生している様子が見られ、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。また、人為起源汚染物質の fSO_4^2 については、PM10 に先立ち濃度が上昇していた。以上のことから、事例 4 は、3 月 5 日にモンゴル南部で発生した duststorm と、人為起源汚染物質を含んだ空気塊が、西日本に飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

事例 5 は、3 月 17 日に福岡で観測された黄砂を対象とした事例である。日本で黄砂が観測される前の 3 月 15 日にモンゴルの南部で slight duststorm が発生している様子が見られ、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。また、人為起源汚染物質の SO_4^{2-} 、 NO_3 -については、粗大粒子、微小粒子ともに上昇していた。以上のことから、事例 5 は、モンゴルで発生した dust を含む空気塊が、人為起源汚染物質を含みつつ、限定的な地域に飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

事例 6 は、3 月 27 日、28 日共に福岡で観測された黄砂を対象とした事例である。日本で黄砂が観測される前の 3 月 24 日、25 日には、モンゴルで dust、duststorm が発生している様子が見られ、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。また、人為起源汚染物質の SO_4 ²、 NO_3 -については、粗大粒子、微小粒子ともに上昇していた。以上のことから、事例 6 は、3 月 15 日にモンゴルにおける duststorm の影響を含

んだ空気塊が、若干の人為起源汚染物質を含み、日本の限定的な地域に飛来した弱い黄砂事例と考えられる。

表 4-	5-1 20	21 年度	こおける黄砂事例の一覧
н	_	141 141	ket Year of the

事例	年	月	日	地点数	観測地点
1	2021	4	17	1	福岡
1	2021	4	18	1	那覇
	2021	5	8	5	札幌、新潟、東京、福岡、高松
2	2021	5	9	8	仙台、新潟、名古屋、大阪、広島
	2021	5	10	2	福岡、鹿児島
3	2021	5	25	4	広島、福岡、鹿児島、高松
3	2021	5	26	1	鹿児島
4	2022	3	5	4	広島、福岡、鹿児島、高松
4	2022	3	6	1	那覇
5	2022	3	17	1	福岡
6	2022	3	27	1	福岡
U	2022	3	28	1	福岡

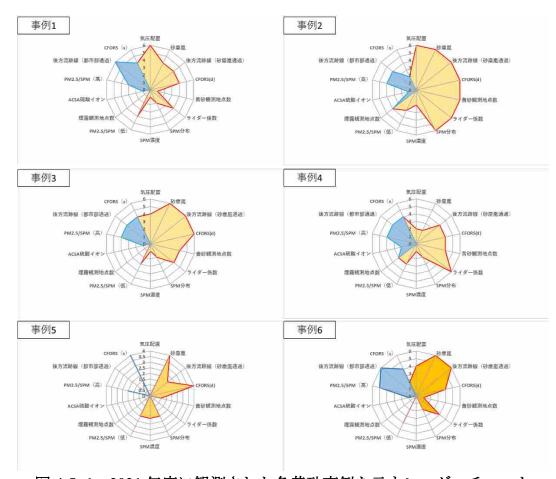


図 4-5-1 2021 年度に観測された各黄砂事例を示すレーダーチャート

5. 2021 年度における煙霧日の事例解析

5.1 解析手法

(1) 煙霧観測地点

黄砂と同様に、粒子の影響で視程の低下をもたらしているものに煙霧がある。気象庁による煙霧の定義は、「乾いた微粒子によって視程が 10km 未満となった場合で、乾いたとは湿度 75%未満」とされている。本報告書における煙霧観測事例としては、上記定義に従い、2021 年度に日本で観測された煙霧のうち、10 地点以上で同時に観測された事例を対象とした。

(2) 解析項目

煙霧日における黄砂の可能性を調査するため、解析項目は、黄砂事例における解析項目のうち、(1) 煙霧観測地点、(2) 天気図、(3) 現在天気データ、(4) 後方流跡線、(5) CFORS、(6) ライダー黄砂消散係数、SPM 濃度、(7) PM2.5 濃度、(8) ACSA-14 データ、(9) 中国での PM2.5 データの 9 項目とした。

5.2 2021 年度の煙霧事例

解析対象は、2021 年度に 5.1 で述べた方法で決定した 8 事例(計 10 日)である(表 5-2-1)。煙霧事例時の PM2.5/SPM の値は $0.68\sim0.87$ の範囲であり、黄砂時($0.59\sim0.79$)と比較してやや高い範囲の数値となった。また、ACSA-14 の PM2.5/PM10 は黄砂事例時($0.25\sim0.45$)と比較し、煙霧事例時は $0.49\sim0.66$ と高い値であった。

	3 3-2-1 2021 及○/庄勝中/! 元 (0111140 G 0 1112.3 版文: μg/mb/												
事		期日			黄砂	かの規模							
	No.	年月	П	П	116 F *4.	PM2.5	SPM 平均濃度	PM2.5/SPM	PM2.5/PM10				
例			月	日	地点数	平均濃度							
1	1	2021	12	25	10	6.73	8.84	0.79	0.56				
1	2	2021	12	26	11	2.29	3.16	0.86	0.49				
2	3	2022	1	3	10	7.82	9.48	0.85	0.66				
3	4	2022	1	28	10	10.86	12.75	0.87	0.65				
4	5	2022	2	2	11	12.77	14.94	0.86	0.65				
5	6	2022	2	5	10	4.55	5.95	0.82	0.56				
6	7	2022	2	27	15	11.18	14.20	0.79	0.53				
7	8	2022	3	2	16	13.01	17.15	0.76	0.54				
8	9	2022	3	24	10	14.85	22.37	0.68	0.55				
0	10	2022	3	25	14	14.40	17.20	0.84	0.50				

表 5-2-1 2021 年度の煙霧事例一覧 (SPM および PM2.5 濃度: ug/m3)

「PM2.5/PM10 平均」には ACSA-14 のデータを用い、計算した。

^{※「}SPM 平均濃度」、「PM2.5 平均濃度」、「PM2.5/SPM 平均」には常時監視データを用い、計算した。また、

[%]「PM2.5/SPM」は測定局毎に算出された値を平均したものであり、表中の「SPM 平均濃度」と「PM2.5 平均濃度」から算出したものではない。

^{※「}PM2.5/PM10」について各日以下の平均をとった。

2021年12月25日:北海道、東北、九州での観測のため札幌、箟岳、福岡、五島の平均

2021年12月26日:北海道、東北、北陸、中国での観測のため札幌、箟岳、新潟巻の平均。隠岐はデータ欠損のため 使用できず。

2022年1月3日:北海道、東北、北陸での観測のため札幌、箟岳、新潟巻の平均

2022年1月28日:北海道、東北、中国、九州での観測の札幌、箟岳、隠岐、福岡、五島の平均

2022年2月2日:北海道、東北、中国、四国、九州での観測のため札幌、箟岳、赤穂、隠岐、福岡、五島の平均

2022年2月5日:北海道、東北、北陸、中国、九州での観測のため札幌、箟岳、新潟巻、隠岐、福岡、五島の平均

2022年2月27日:北海道、北陸、中国、九州での観測のため札幌、新潟巻、隠岐、福岡、五島の平均

2022 年 3 月 2 日:北海道、関東、近畿、四国、中国、九州での観測のため札幌、東京、大阪、赤穂、隠岐、福岡、五島の平均

2022年3月24日:北陸、東海、中国、九州での観測のため新潟巻、名古屋、隠岐、福岡、五島の平均

2022 年 3 月 25 日:北陸、東海、近畿、四国、中国、九州での観測のため新潟巻、名古屋、大阪、赤穂、隠岐、福岡の平均

5.3 煙霧事例の解析結果

(1) 煙霧事例 1 2021年12月25日~26日

松江

本事例は、2021 年 12 月 25 日、26 日の 2 日間で、全国それぞれ 10 地点、11 地点で煙霧が観測された (表 5-3-1-1、図 5-3-1-1)。

図 5-3-1-4 より、大陸方向から気流の飛来が読み取れるものの、図 5-3-1-3 に示したように大陸では、dust などが発生している様子が見られない。同様に、CFORS 予測結果においても、dust の発生は見られず、25 日に sulfate が日本全域に影響を及ぼしているのみである(図 5-3-1-5)。

この期間におけるライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化を比較したところ、ライダー黄砂消散係数には、散発的なピークを除けば明確な数値の上昇は見られなかった。SPM についても、前日の 12月 24日にやや数値が高かったものの、翌 25日午前にかけてむしろ低下する傾向が見られた(図 5-3-1-6)。PM2.5 濃度に関しても、25日・26日ともに $10\mu g/m^3$ 以下の地点がほとんどであり、全国的に低い値を示している(図 5-3-1-7)。

また、図 5-3-1-8 より福岡で煙霧観測日の 12 月 25 日に PM10 の上昇が見られるが PM2.5 も上昇しているため、PM2.5/PM10 比は顕著には低い値となっていない。一方、新潟巻においては 12 月 24 日正午頃から 12 月 25 日正午頃まで濃度は低いものの PM10 の上昇から下降に伴い、その比が減少している傾向にある。五島における PM10、PM2.5 の濃度のピークは煙霧観測日に先立ち、12 月 24 日深夜にピークとなっている。また、人為起源汚染物質の SO_4^2 、 NO_3 -については PM10、PM2.5 の濃度のピークとほぼ同時にいくつかのイオン成分の濃度がピークとなる傾向にある。例えば箟岳では微小粒子の NO_3 -、新潟巻では粗大粒子の NO_3 -、微小粒子の SO_4^2 -、福岡では粗大粒子の SO_4^2 -以外の 3 成分に、その濃度のピークが見られる。特に福岡における微小粒子の NO_3 -濃度のピークは $10\mu g/m^3$ を超えていることがわかる。北京では、日本での煙霧が観測された日の前日、12 月 24 日に一時、約 $60\mu g/m^3$ を超える濃度の PM2.5 を観測している(図 5-3-1-9)。

以上から、本事例は、大陸から飛来した空気塊に、人為起源の fSO₄²が混合した弱い煙霧事例と考えられる。

日付 地点数 観測地点名 2021/12/25 10 稚内 長崎 下関 宮崎 室蘭 旭川 青森 秋田 福島 大分 稚内 秋田 新潟 金沢 函館 福井 室蘭 札幌 広島 網走 2021/12/26 11

表 5-3-1-1 煙霧観測地点

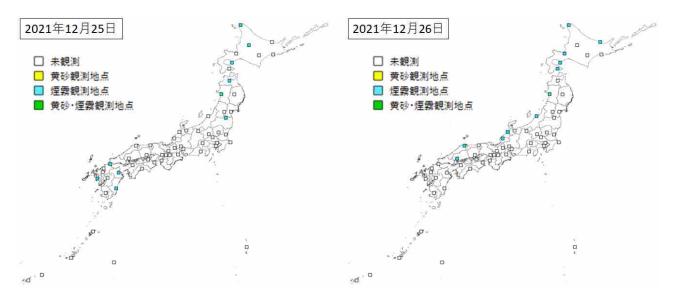
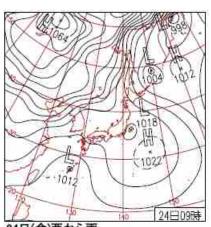
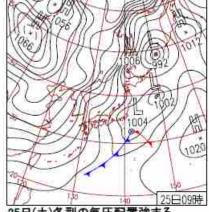


図 5-3-1-1 煙霧観測地点



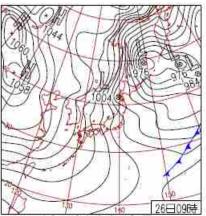
24日(金)西から南

沖縄・奄美と西~東日本太平洋側は、低 日本海側中心に雪。北海道声問では日降 心に雪。山形県肘折で日降雪量54cm。九 西〜北日本日本海側は大雪で太平洋側で雪量57cmとなり史上1位。横浜市でカエ 州や四国、関東では日中は概ね晴れ。奈 も所々で雪。沖縄・奄美では雨。 デ紅葉。



25日(土)冬型の気圧配置強まる

北陸の上空約1500mには-12°C以下の強 良と水戸で初雪。



26日(日)鹿児島と東京で初雪

北海道の上空約5000mには-45℃以下の強 気圧の影響で雨。北日本は寒気の影響で、い寒気が入り、山陰以北の日本海側を中 い寒気が入り、強い冬型の気圧配置継続。

図 5-3-1-2 天気図

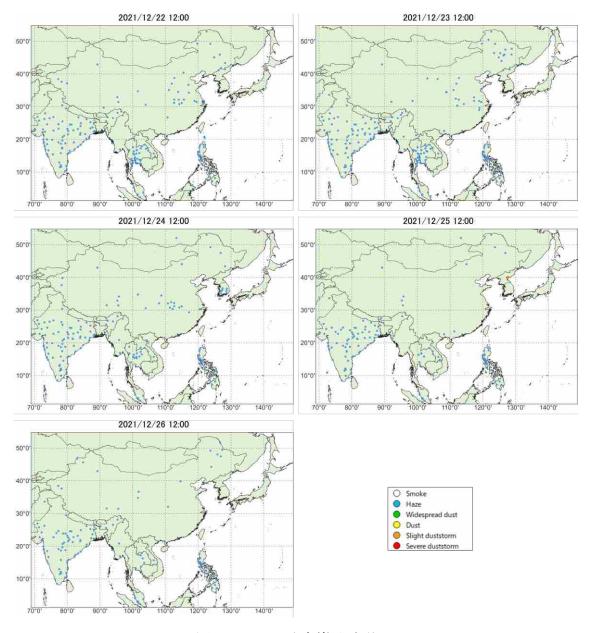


図 5-3-1-3 砂塵嵐発生状況

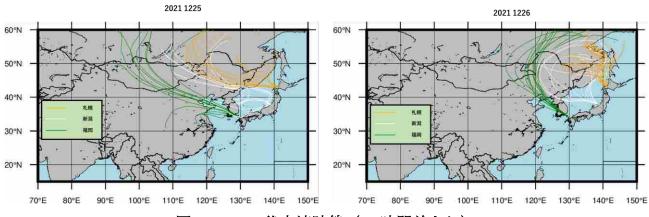


図 5-3-1-4 後方流跡線(72 時間前より)

各地点、各煙霧観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

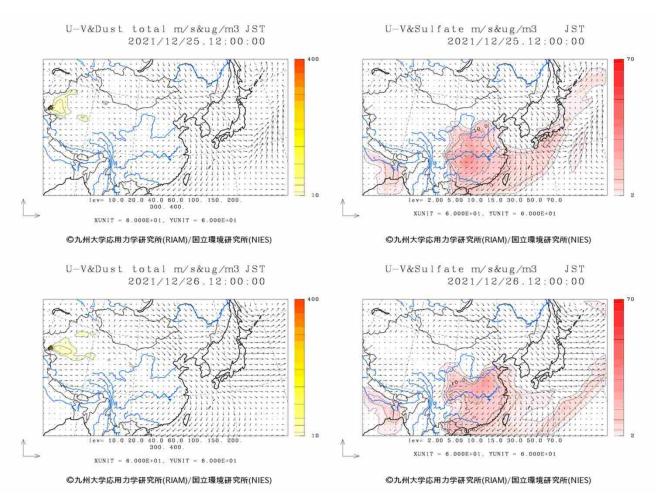
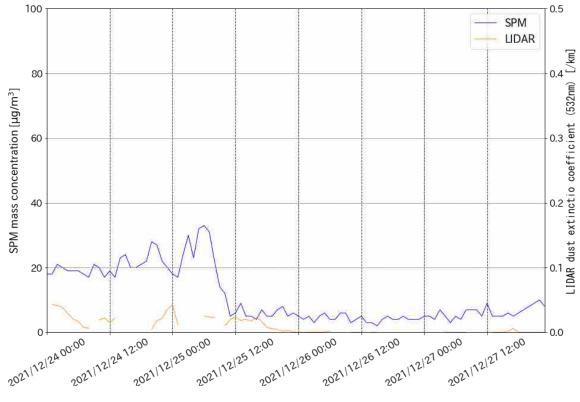
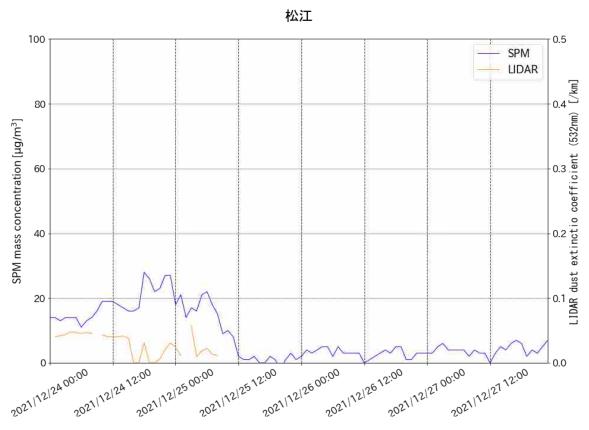


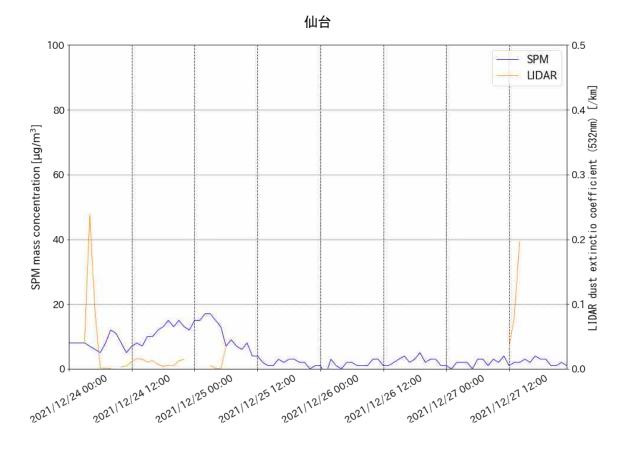
図 5-3-1-5 CFORS 予測結果

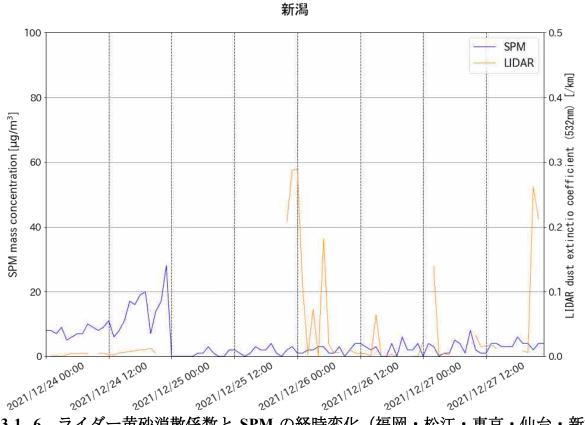












ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(福岡・松江・東京・仙台・新潟)

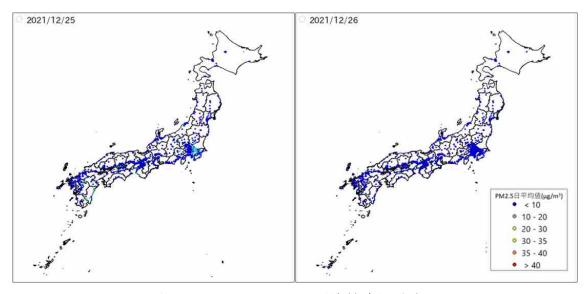


図 5-3-1-7 PM2.5 日平均值全国分布

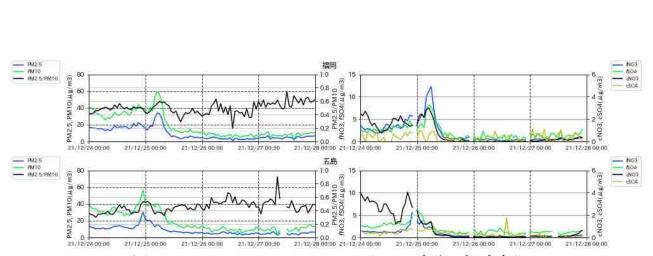


図 5-3-1-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

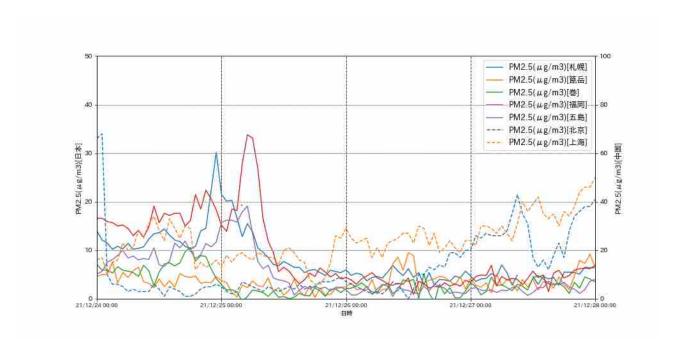


図 5-3-1-9 日本・中国での PM2.5 濃度

(2) 煙霧事例 2 2022 年 1 月 3 日

本事例は、2022 年 1 月 3 日に観測された煙霧で、全国 10 地点で煙霧が観測された(表 5-3-2-1、図 5-3-2-1 煙霧観測地点図 5-3-2-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-2-3)、12 月 31 日にモンゴル南部で slight duststorm が発生している様子が見られるものの、このときの気流を後方流跡線で確認したところ、duststorm が発生している地域を通っていない(図 5-3-2-4)。CFORS 予測結果(図 5-3-2-5)は、sulfate に関する結果は公開されておらず、dust に関する結果としては、dust の発生した様子は見られていない。

ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化からは、黄砂消散係数・SPM 濃度のいずれに関しても、 値に目立った変動はなく、小さい値を保っていたことが見て取れる(図 5-3-2-6)。

PM2.5 濃度は、九州・近畿地方では $10\sim20\mu g/m^3$ となる地点が見られるものの、それ以外は全国的に $10\mu g/m^3$ 以下となっていた(図 5-3-2-7)。

また、図 5-3-2-8 によると PM2.5、PM10 については、新潟巻において煙霧が観測される前日の 1 月 2 日夕方頃から上昇しており、その後 PM2.5/PM10 比が 3 日の昼頃までやや低い傾向となっていることがわかる。人為起源汚染物質の SO_4^2 、 NO_3 でについては札幌において煙霧観測日前日の 1 月 2 日昼頃に粗大粒子の NO_3 でが約 $8\mu g/m^3$ と高い値となっている。それ以外では新潟巻で煙霧日の前日 1 月 2 日 20:00 頃から全イオン成分で濃度の上昇が見られる。そのピーク時の濃度は微小粒子の SO_4^2 で約 $4\mu g/m^3$ 、粗大粒子の NO_3 で $1.3\mu g/m^3$ となっている。また箟岳においては顕著な上昇は見られない。

上海では、日本での煙霧が観測された日の前日、1月2日の昼頃と3日0:00 前後に $100\mu g/m^3$ を超える高濃度のPM2.5を観測している(図5-3-2-9)。

以上から、本事例は、大陸から飛来した空気塊が人為起源汚染物質を含み、日本に飛来した弱い煙霧 事例と考えられる。

 日付
 地点数
 観測地点名

 2022/1/3
 10
 稚内
 旭川
 青森
 函館
 札幌
 網走
 帯広
 室蘭
 秋田
 金沢

表 5-3-2-1 煙霧観測地点

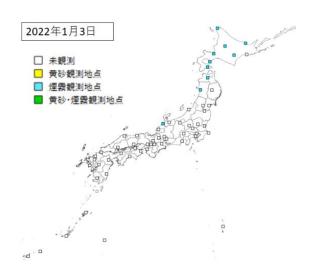


図 5-3-2-1 煙霧観測地点

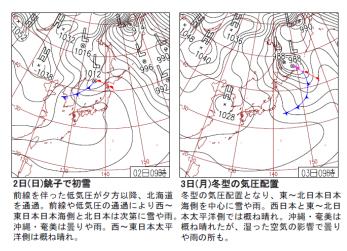


図 5-3-2-2 天気図

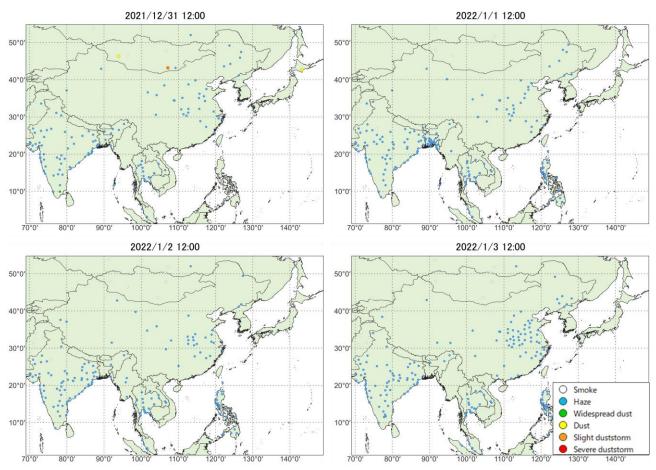
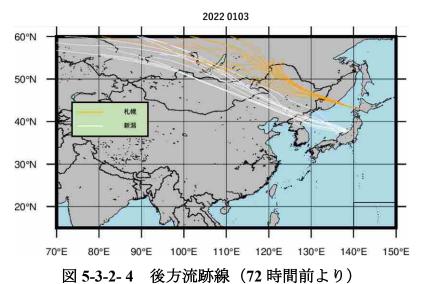


図 5-3-2-3 砂塵嵐発生状況



各地点、各煙霧観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図

日地点、日産務戦例日の 0.00 から 25.00 まての 2 時間 こと 12 時間力の、起点からはかりはるアークを下区に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

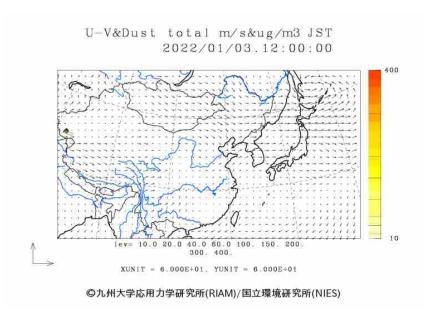
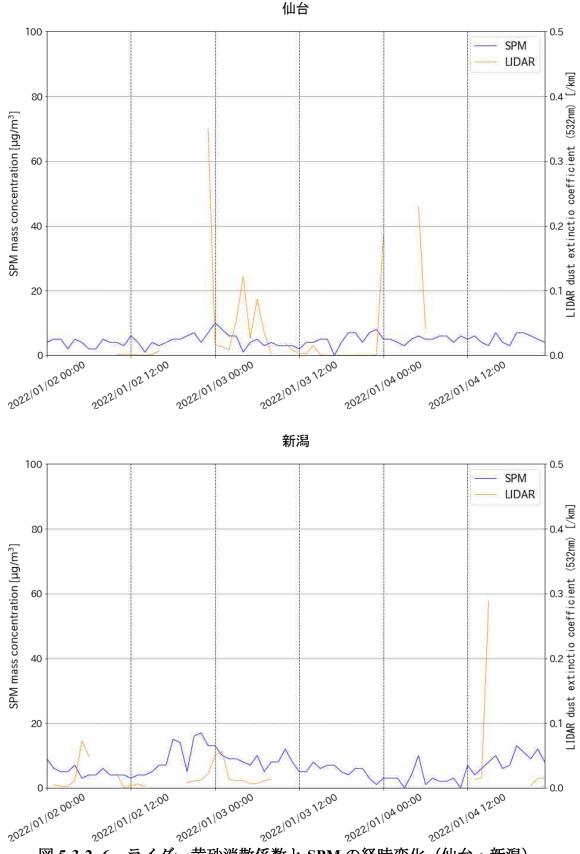


図 5-3-2-5 CFORS-dust 予測結果 (sulfate については予測画像なし)



ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(仙台・新潟)

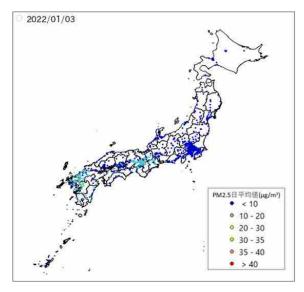


図 5-3-2-7 PM2.5 日平均值全国分布

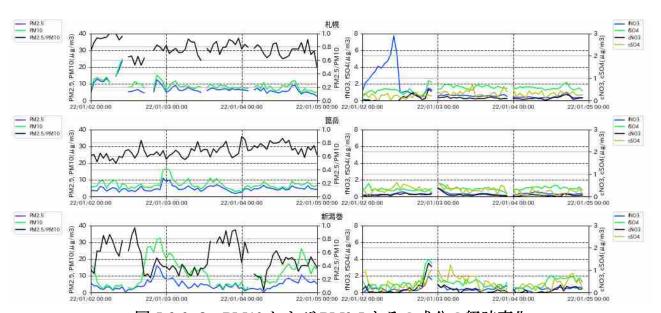


図 5-3-2-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

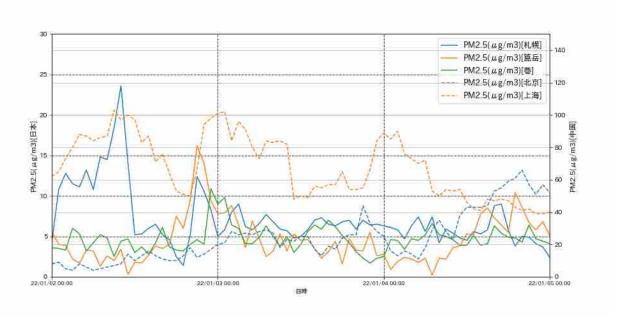


図 5-3-2-9 日本と中国での PM2.5 濃度

(3) 煙霧事例 3 2022 年 1 月 28 日

本事例は、2022年1月28日に全国10地点で煙霧が観測された(表 5-3-3-1、図 5-3-3-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-3-3)、dust などが発生している様子が見られない。この期間 における CFORS 予測結果は、dust は大陸でわずかに発生しているものの、日本には影響を及ぼしては いない (図 5-3-3-5) なお、sulfate に関する結果は公開されていなかった。

図 5-3-3-6 にライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化を比較した結果を示す。ライダー黄砂消散係数は、欠損が多く明確な変動は見られない。一方 SPM 濃度は、長崎で 28 日午前にかけて上昇している様子が確認でき、福江でも同様に増加する様子が見られたが、その他の地点では、SPM 濃度の上昇は見られなかった。PM2.5 濃度は、九州の一部地域で $20\sim30\mu g/m^3$ となっているものの、全国的に低い値となっていた(図 5-3-3-7)。

図 5-3-3-8 によると煙霧観測日の 1 月 28 日において、PM2.5/PM10 比は隠岐以外では低い値となっていない。また全ての地点で PM10 と PM2.5 が同期して変化している様子が見られる。人為起源汚染物質の SO_4^{2-} 、 NO_3 -については煙霧観測日または、その前日から隠岐以外の地点で、いくつかのイオン成分の濃度が上昇している傾向が見られる。例えば、札幌では微小粒子の NO_3 -と SO_4^{2-} 、箟岳、福岡、五島では全てのイオン成分で濃度が上昇傾向となっている。特に福岡での微小粒子と粗大粒子の NO_3 -でその濃度はそれぞれ、 $2.0\mu g/m^3$ 、 $13.4\mu g/m^3$ と高い値となっている。

中国では、日本での煙霧が観測された期間、顕著に高い PM2.5 濃度は観測されていない(図 5-3-3-9)。 以上から、本事例は、大陸から飛来した空気塊に、国内で発生したと考えられる人為起源汚染物質を 含んだ弱い煙霧事例と考えられる。

表 5-3-3-1 煙霧観測地点

日付	地点数	観測地点名										
2022/1/28	10	下関	宮崎	松山	大分	長崎	熊本	佐賀	仙台	札幌	秋田	

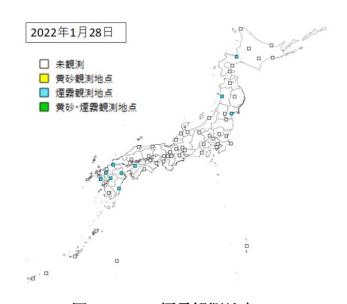
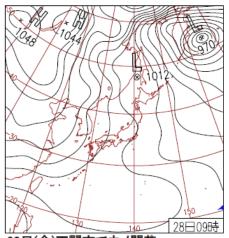


図 5-3-3-1 煙霧観測地点



28日(金)下関市でウメ開花

冬型の気圧配置が続く。西日本と東〜北日本太平洋側で概ね晴れ。北陸〜北日本日本海側を中心に雪。沖縄・奄美は湿った空気の影響で曇りや雨。南大東村でヒカンザクラ開花。

図 5-3-3-2 天気図

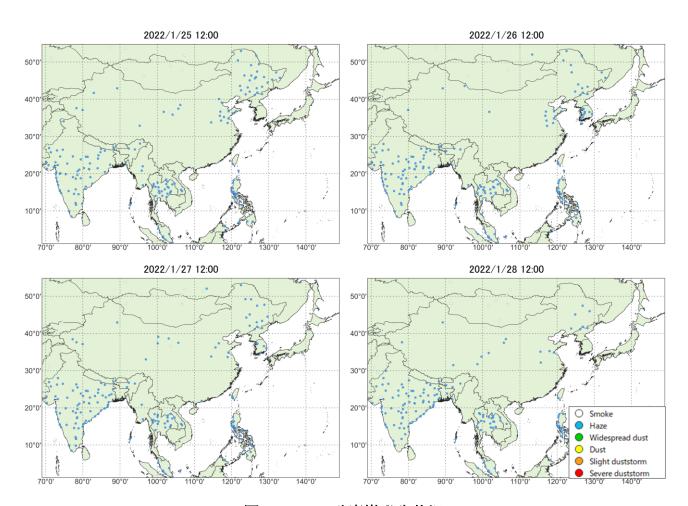


図 5-3-3-3 砂塵嵐発生状況

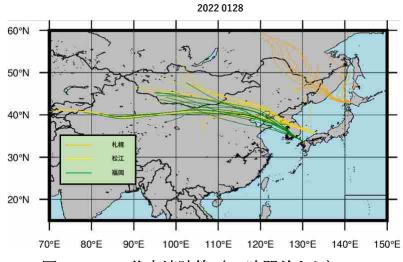


図 5-3-3-4 後方流跡線(72 時間前より)

各地点、各煙霧観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

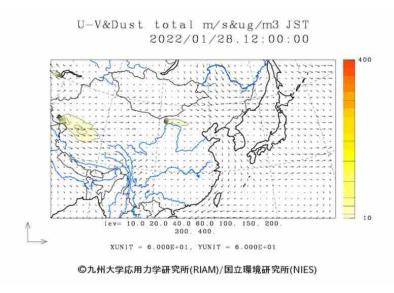
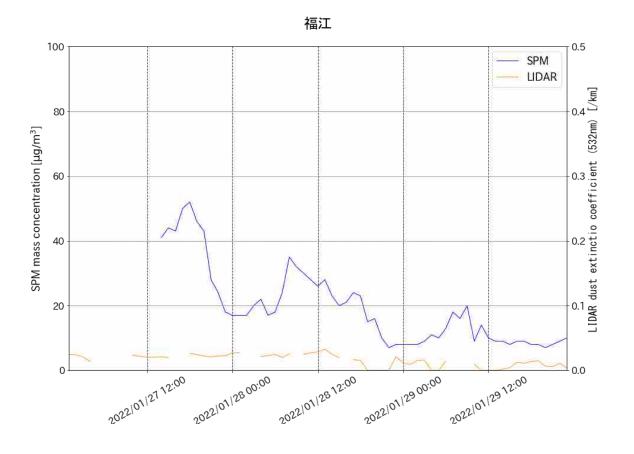
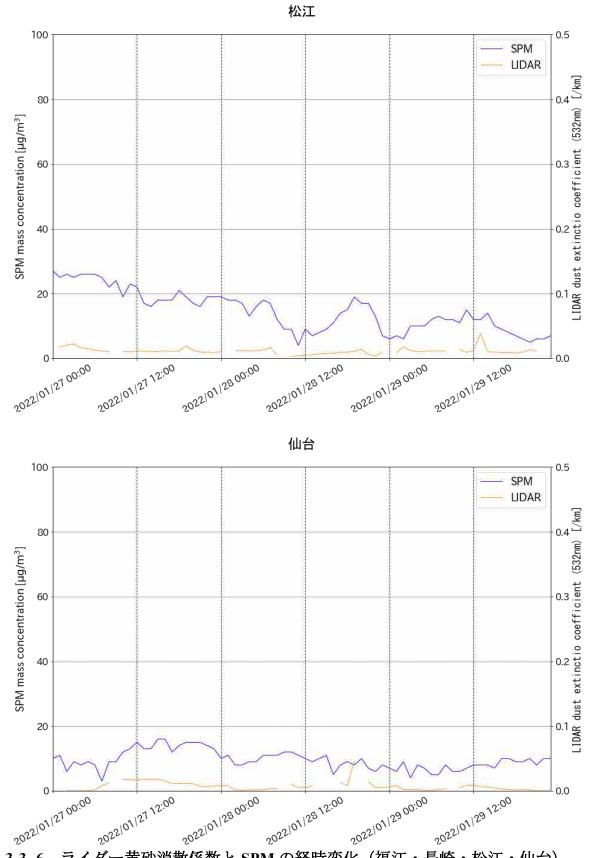


図 5-3-3-5 CFORS-dust 予測結果 (sulfate については予測画像なし)







ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(福江・長崎・松江・仙台)

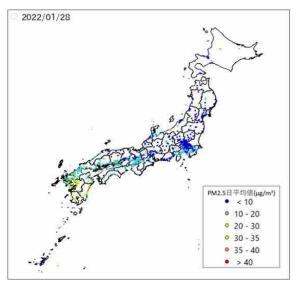


図 5-3-3-7 PM2.5 日平均值全国分布

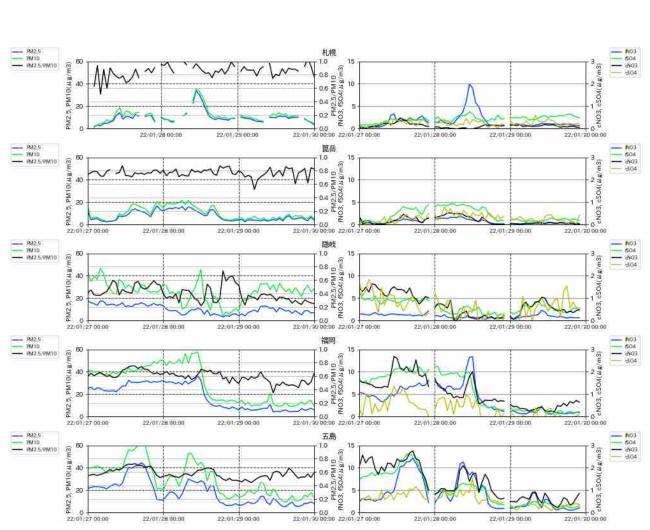


図 5-3-3-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

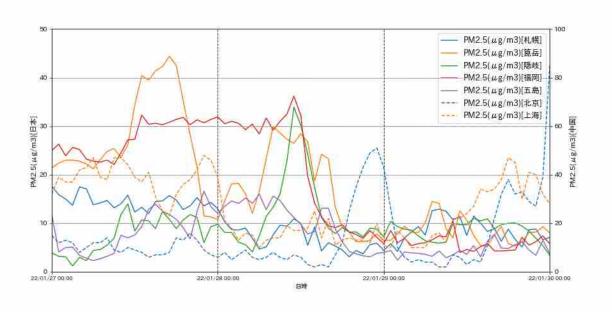


図 5-3-3-9 日本と中国での PM2.5 濃度

(4) 煙霧事例 4 2022 年 2 月 2 日

本事例は、2022 年 2 月 2 日に観測された煙霧で、全国 11 地点で煙霧が観測された(表 5-3-4-1、図 5-3-4-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-4-3)、dust が発生している様子が見られない。CFORS の予測 結果は dust のみ公開されていたが、dust の発生はごくわずかであり、日本には影響を及ぼしていなかったことが見て取れる(図 5-3-4-5)。

図 5-3-4-6 に示したライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化からは、ライダー黄砂消散係数には明確な変動は見られず、低い値を保っていたことが見て取れる。SPM 濃度は、福江及び松江において、1 日及び 2 日の午後にかけて上昇する様子が確認できる。PM2.5 濃度は、西日本でやや高い傾向を示しており、特に北九州の一部では日平均 $35\mu g/m^3$ を超える地点が見受けられた(図 5-3-4-7)。

PM2.5/PM10 比を示した図 5-3-4-8 によると、PM2.5/PM10 比はどの地点においても低下は見られない。これは PM10 の増加とともに PM2.5 も増加しているためであると思われる。人為起源汚染物質の SO_4^{2-} 、 NO_3 -については煙霧観測日である 2 月 2 日に赤穂、隠岐、福岡、五島で高い濃度値をとる傾向にある。特に福岡、五島での微小粒子の SO_4^{2-} 、粗大粒子の NO_3 -のピーク時の濃度は高く、それぞれ $15\mu g/m^3$ 近く、 $2\mu g/m^3$ 以上となっていることがわかる。また、煙霧観測日前日で福岡、五島のいずれのイオン成分も濃度が上昇している様子が見られる。

中国では、煙霧観測日の前日 2 月 1 日午前に 150μg/m³以上の高濃度の PM2.5 が観測されている(図 5-3-4-9)。

以上から、本事例は、大陸から飛来した空気塊に、国内・国外で発生した人為起源汚染物質を含む弱い煙霧事例と考えられる。

日付 地点数 観測地点名 秋田 稚内 福岡 長崎 佐賀 松江 下関 松山 熊本 大分 11 2022/2/2 宮崎

表 5-3-4-1 煙霧観測地点

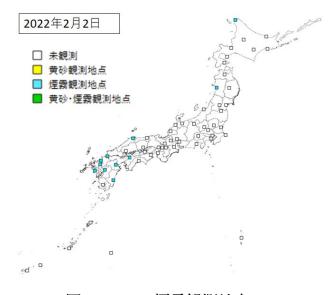
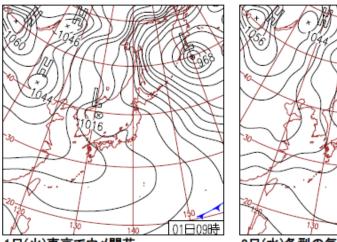


図 5-3-4-1 煙霧観測地点



1日(火)東京でウメ開花

日本付近は冬型の気圧配置が続き、日本 海の低気圧が夜に北陸へ接近。山陰から 北の日本海側は雪や雨で、西日本~東海 の太平洋側でも所々で雨や雪。那覇市で サクラ満開。

2日(水)冬型の気圧配置続く

日本付近は冬型の気圧配置が続き、山陰 から北の日本海側は雪や雨。太平洋側で は概ね晴れ。沖縄・奄美や九州南部は気 圧の谷や前線の影響で曇りや雨。

図 5-3-4-2 天気図

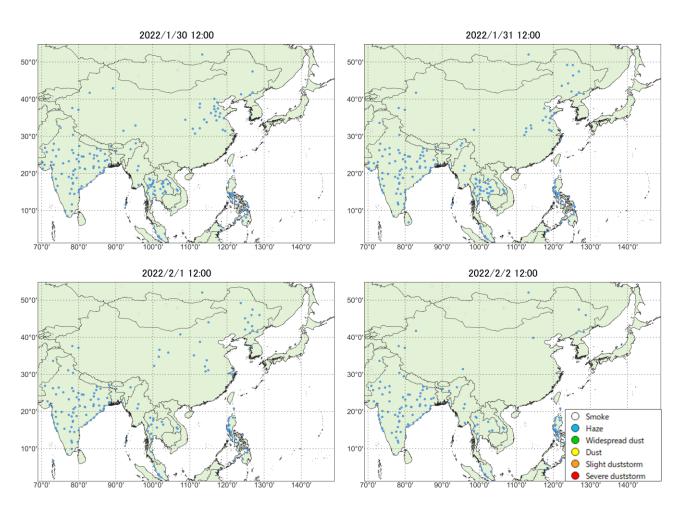


図 5-3-4-3 砂塵嵐発生状況

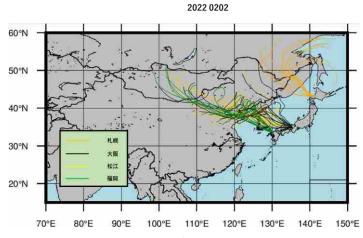


図 5-3-4-4 後方流跡線(72 時間前より)

各地点、各煙霧観測日の0:00 から23:00 までの2 時間ごと12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

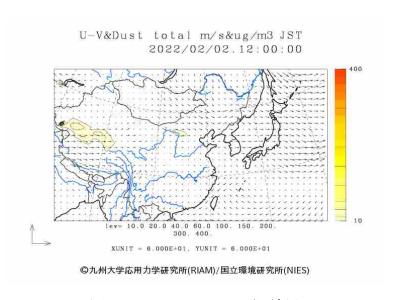
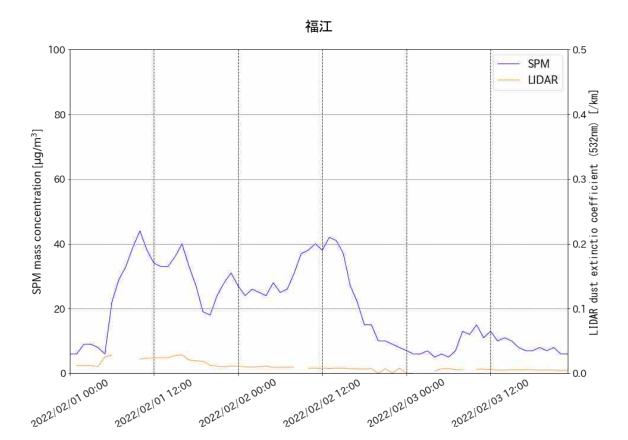
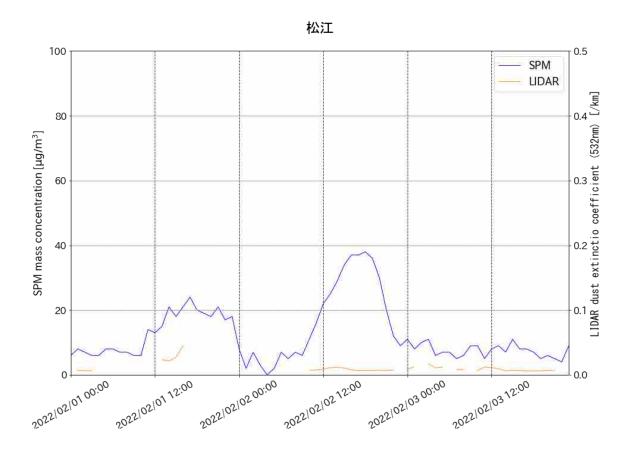


図 5-3-4-5 CFORS 予測結果





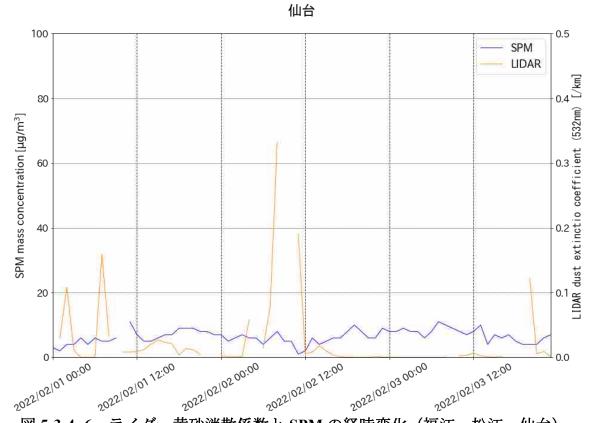


図 5-3-4-6 ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(福江・松江・仙台)

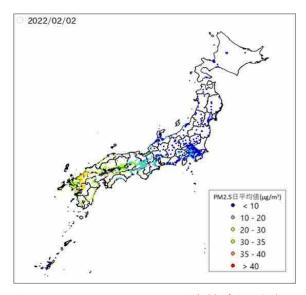


図 5-3-4-7 PM2.5 日平均值全国分布

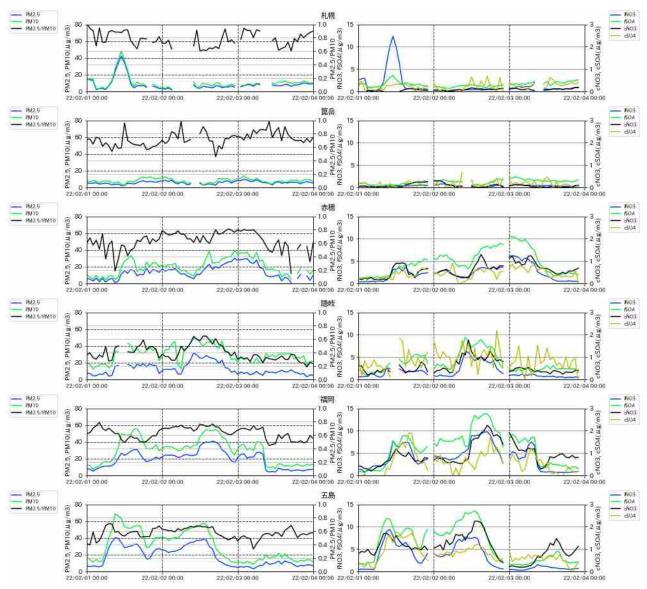


図 5-3-4-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

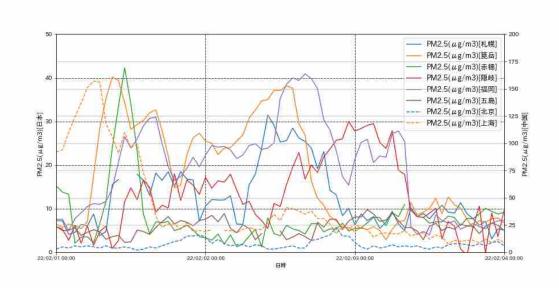


図 5-3-4-9 日本と中国での PM2.5 濃度

(5) 煙霧事例 5 2022 年 2 月 5 日

本事例は、2022 年 2 月 5 日に観測された煙霧で、全国 10 地点で煙霧が観測された(表 5-3-5-1、図 5-3-5-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-5-3)、日本での煙霧発生前に大陸では特に dust などは観測されていない。さらに CFORS においても、dust の日本への影響はないことが見て取れる(図 5-3-5-5)。 sulfate に関する結果は、先の事例同様、公開されていなかったため掲載していない。

図 5-3-5-6 にライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化を比較した結果を示す。5 日 0 時に長崎で SPM 濃度のピークが見られた。その他の地点では、ライダー黄砂消散係数・SPM 濃度のいずれも低い値 を保っており、目立った変動は見られなかった。PM2.5 濃度は、全国的に濃度が低く、 $10\mu g/m^3$ 以下の地点がほとんどであった(図 5-3-5-5-7)。

PM2.5/PM10 比の変化を図 5-3-5-8 に示したが、PM2.5/PM10 比はどの地点においても PM10 の上昇による低い値となっていない。これは事例 4 と同様、PM10 と PM2.5 が同期して変化しているためであると思われる。人為起源汚染物質の SO_4^{2-} 、 NO_3 -については、煙霧観測日において札幌での微小粒子の NO_3 -以外では、福岡、五島で微小粒子の SO_4^{2-} 、 NO_3 -、粗大粒子の SO_4^{2-} が 2 月 5 日 0:00 前後に高い値をとる傾向にある。特に福岡においては微小粒子の SO_4^{2-} 、 NO_3 -の濃度が $10\mu g/m^3$ を超えていることがわかる。中国では、上海において煙霧観測日の 2 月 5 日に $80\mu g/m^3$ 程度となるが、顕著に高い値は見られない(図 5-3-5-9)。

以上から、本事例は、大陸から飛来した空気塊に、国内で発生したと考えられる人為起源汚染物質を 含んだ煙霧事例と考えられる。

 日付
 地点数
 観測地点名

 2022/2/5
 10
 長崎
 佐賀
 熊本
 稚内
 松江
 宮崎
 新潟
 秋田
 網走
 鳥取

表 5-3-5-1 煙霧観測地点

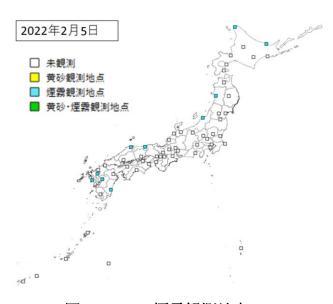


図 5-3-5-1 煙霧観測地点

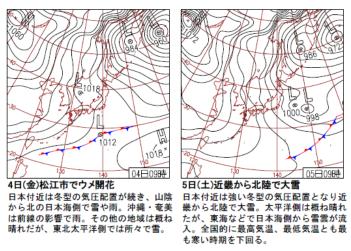


図 5-3-5-2 天気図

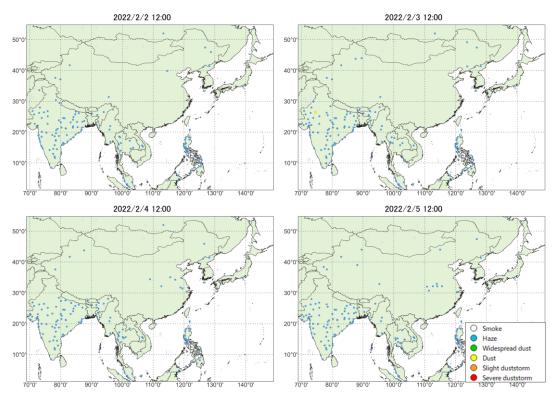


図 5-3-5-3 砂塵嵐発生状況

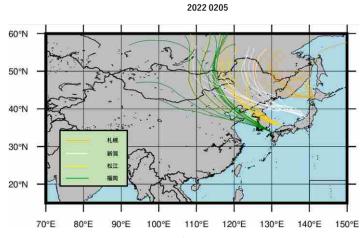


図 5-3-5-4 後方流跡線(72 時間前より)

各地点、各煙霧観測日の0:00 から23:00 までの2 時間ごと12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

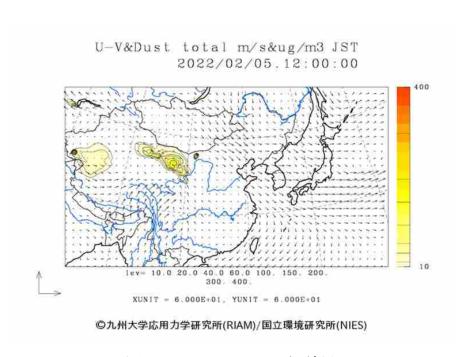
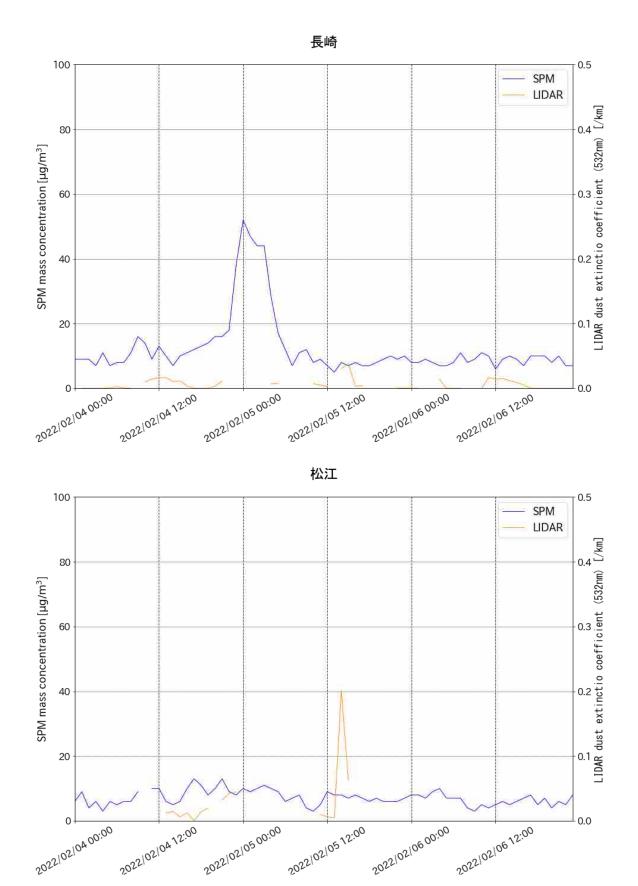


図 5-3-5-5 CFORS 予測結果



2022/02/05/12:00

2022/02/06/12:00

0.0

2022/02/04/00:00

2022/02/04/2:00

2022/02/05/00:00

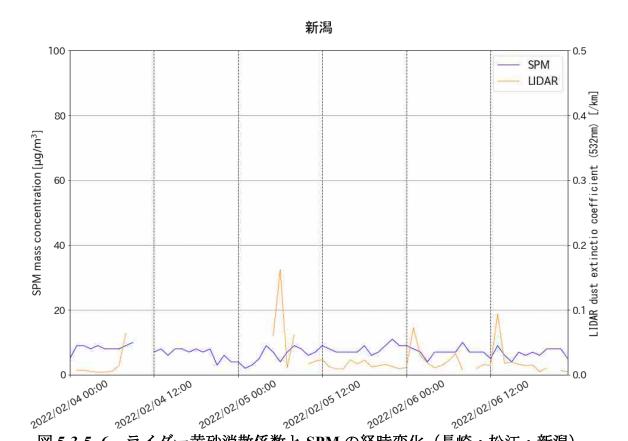


図 5-3-5-6 ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(長崎・松江・新潟)

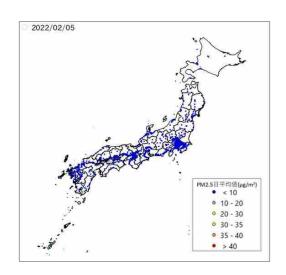


図 5-3-5-7 PM2.5 日平均值全国分布

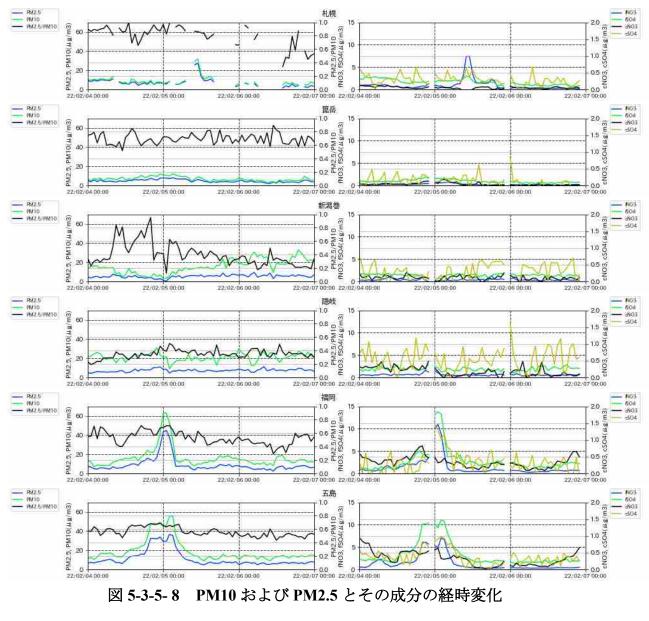


図 5-3-5-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

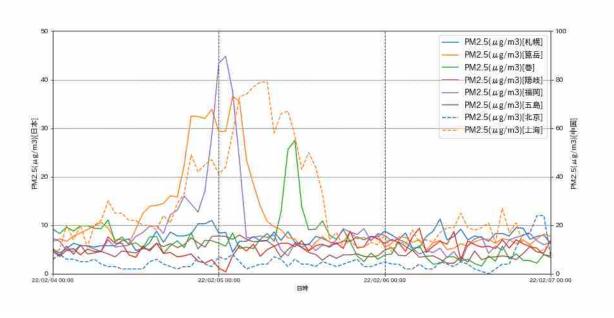


図 5-3-5-9 日本と中国での PM2.5 濃度

(6) 煙霧事例 6 2022 年 2 月 27 日

本事例は、2022 年 2 月 27 日に観測された煙霧で、全国 15 地点で煙霧が観測された(表 5-3-6-1、図 5-3-6-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-6-3)、dust などは発生していない。CFORS 予測結果からは、sulfate が日本へ影響を及ぼす様子が示されているものの、dust に関してはほぼ影響は見られない(図 5-3-6-5)。

図 5-3-6-6 にライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化の比較を示したが、黄砂消散係数には目立った変動は見られず、低い値を保っていた。SPM 濃度は、27 日午前に長崎及び福江において、急激に上昇し $80\mu g/m^3$ 近い値を示したが、それ以降は再び低い値となっている。新潟での SPM 濃度は、増減しながら、 $20\mu g/m^3$ 近い値をとる傾向が見られている。PM2.5 濃度は、西日本では $10\sim 20\mu g/m^3$ となっていたものの、東日本では $10\mu g/m^3$ 以下となる地点がほとんどであった(図 5-3-6-7)。

図 5-3-6-8 に PM2.5/PM10 の変化を示したが、PM2.5/PM10 比は煙霧観測日において顕著に低下している様子は見られない。人為起源汚染物質の SO_4^{2-} 、 NO_3 -については札幌、新潟巻において 2 月 27 日 0:00 前後に全てのイオン成分の濃度が高くなる傾向にある。また、福岡においては粗大粒子の SO_4^{2-} と NO_3 -、五島においては全イオン成分の濃度が 2 月 27 日 5:00 前後に高いピークとなっていることが見て取れる。特に福岡における粗大粒子の NO_3 -の濃度のピークは $5.4\mu g/m^3$ 、五島における微小粒子の NO_3 -の濃度ピークは $24.3\mu g/m^3$ と高い値となっている。

北京においては煙霧観測目前日の 2 月 26 日 0:00 ころ、上海においては 27 日 0:00 過ぎに PM2.5 濃度 が $100\mu g/m^3$ を超える値となっている。(図 5-3-6-9)。

以上から、本事例は、大陸から飛来した空気塊に、国外で発生したと思われる人為起源汚染物質を含んだ弱い煙霧事例と考えられる。

表 5-3-6-1 煙霧観測地点

日付	地点数	観測地点名									
2022/2/27	15	稚内	函館	網走	下関	長崎	福岡	金沢	松江	松山	佐賀
2022/2/21		熊本	大分	鹿児島	札幌	名瀬					

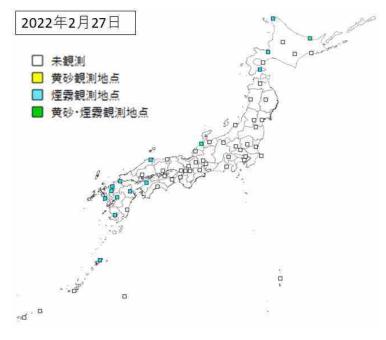
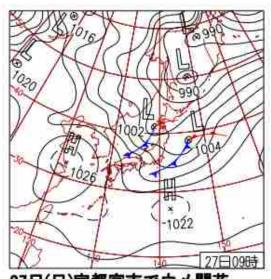


図 5-3-6-1 煙霧観測地点



27日(日)宇都宮市でウメ開花 低気圧が日本の東と北日本を東進。 東〜北日本の日本海側を中心に雪や 雨。その他の地域は東シナ海の高気

雨。その他の地域は東シナ海の高気 圧に覆われ概ね晴れ。東〜北日本は 最高気温が4月中旬並の所も。

図 5-3-6-2 天気図

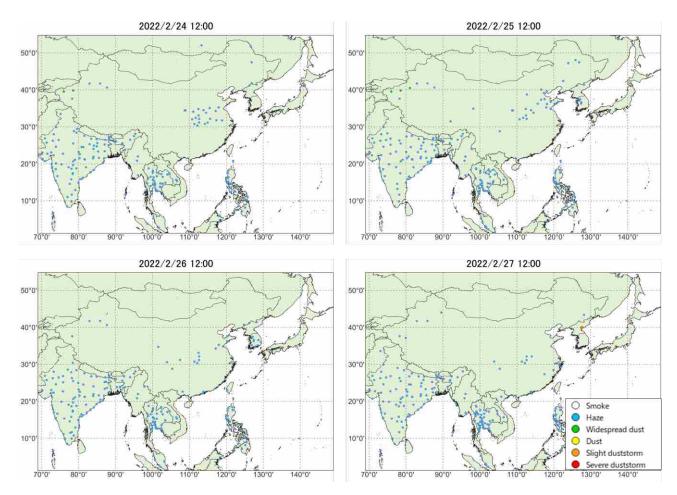
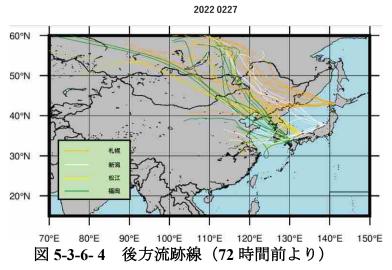


図 5-3-6-3 砂塵嵐発生状況



各地点、各煙霧観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

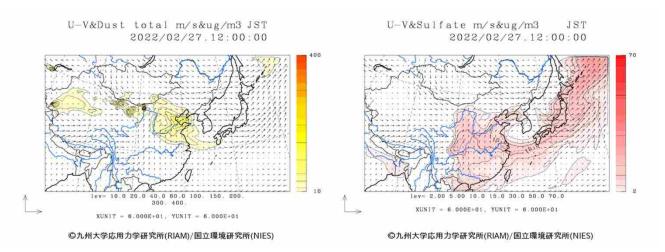
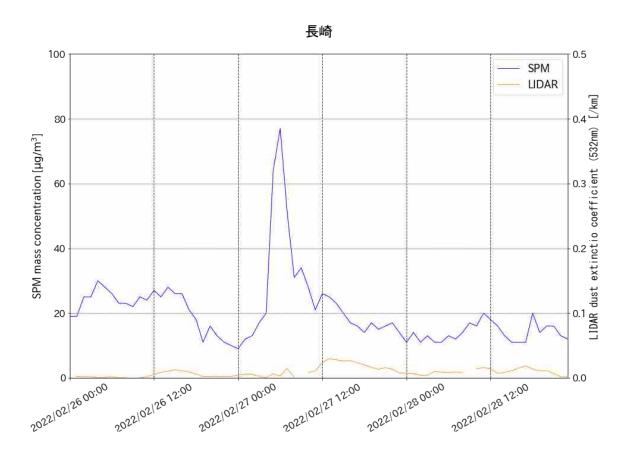
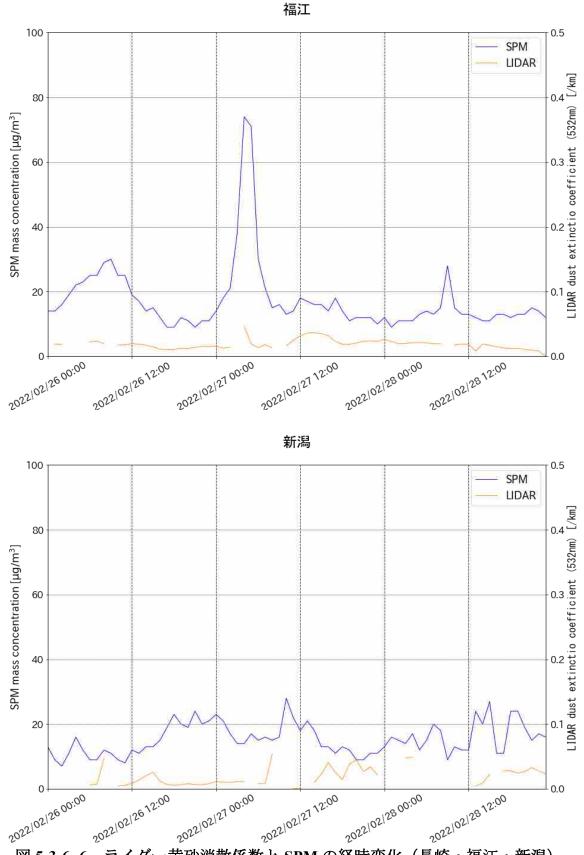


図 5-3-6-5 CFORS 予測結果





ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化(長崎・福江・新潟)

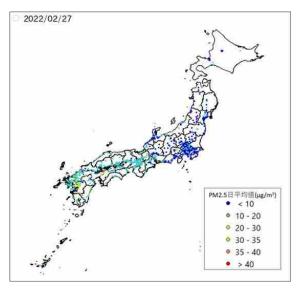


図 5-3-6-7 PM2.5 日平均值全国分布

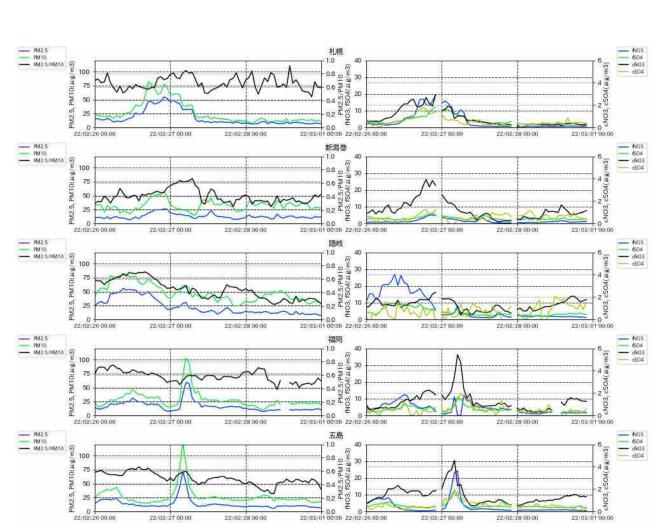


図 5-3-6-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

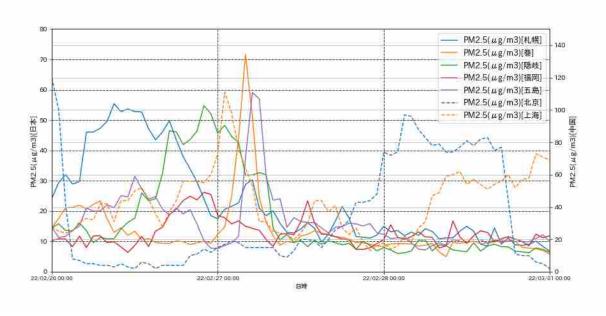


図 5-3-6-9 日本と中国での PM2.5 濃度

(7) 煙霧事例 7 2022 年 3 月 2 日

本事例は、2022 年 3 月 2 日に観測された煙霧で、全国 16 地点で煙霧が観測された(表 5-3-7-1、図 5-3-7-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-7-3)、dust などは発生していない。CFORS における予測結果からも、dust の日本への影響は小さいことが見て取れる(図 5-3-7-5)。一方、sulfate に関しては、大陸から日本全域に影響を及ぼしている様子が確認できる。

図 5-3-7-6 にライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化の比較を示す。黄砂消散係数には変動は見られず、低い値を保っていた。SPM 濃度も、福江において 2 日 0 時にやや値が上昇した他は、低い傾向であった。PM2.5 濃度は、近畿地方でやや高く、 $20\sim30\mu g/m^3$ となった地点があるものの、全国的には濃度は低い傾向にあった(図 5-3-7-7)。

図 5-3-7-8 から PM2.5/PM10 比はどの地点においても煙霧観測日の 3 月 2 日に PM10 の上昇による低い値は見られなかった。煙霧観測日における 3 月 2 日の人為起源汚染物質については大阪での微小粒子の NO $_3$ ⁻、隠岐での粗大粒子の NO $_3$ ⁻の濃度がそれぞれ、20 μ g/m³ に近い値、2 μ g/m³~3 μ g/m³ と高い値を維持している。それ以外では赤穂、福岡、五島で煙霧観測日の前日からまたは当日において全てのイオン成分で濃度のピークをとる傾向となっている。特にそれら 3 地点で粗大粒子の NO $_3$ ⁻濃度ピークが 4 μ g/m³ 以上となっている。また、全地点で見ると粗大粒子の NO $_3$ -濃度の変化が東進しているように見える。

また、上海においては、日本での煙霧が観測され前日の 3 月 2 日に PM2.5 濃度が約 $120\mu g/m^3$ とやや高くなっている様子が見られる(図 5-3-7-9)。

以上から、本事例は、西日本では大陸から飛来した空気塊にモンゴルで発生した dust と人為起源汚染物質を含んだ煙霧事例と考えられ、東日本では大陸からの影響を受けているものの、dust、人為起源汚染物質のどちらの影響も少ない煙霧事例であると考えられる。

観測地点名 日付 地点数 長崎 大分 下関 福岡 宮崎 鹿児島 京都 広島 徳島 高松 2022/3/2 16 岡山 稚内 松江 神戸 水戸 名瀬

表 5-3-7-1 煙霧観測地点

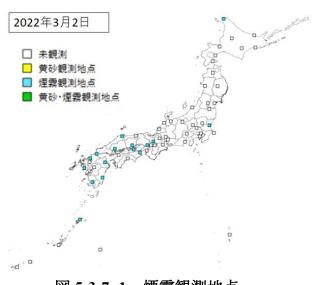
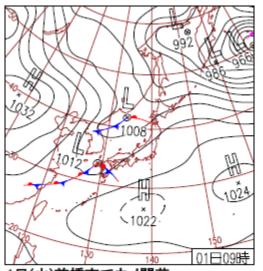
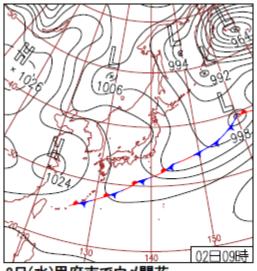


図 5-3-7-1 煙霧観測地点



1日(火)前橋市でウメ開花

西日本と日本海北部の前線を伴った低気 圧は東進。西から次第に曇って全国で雨 や雪。各地で最高・最低気温ともに最も 寒い時期を下回る。前橋市でウメ開花、 平年より23日遅い。



2日(水)甲府市でウメ開花

冬型の気圧配置となり、日本海側雪。北海道千歳で日最深積雪87cmと観測史上1位。日本海側を除いて概ね晴れ。沖縄~東日本の太平洋側では最高気温が4月上旬並の所も。

図 5-3-7-2 天気図

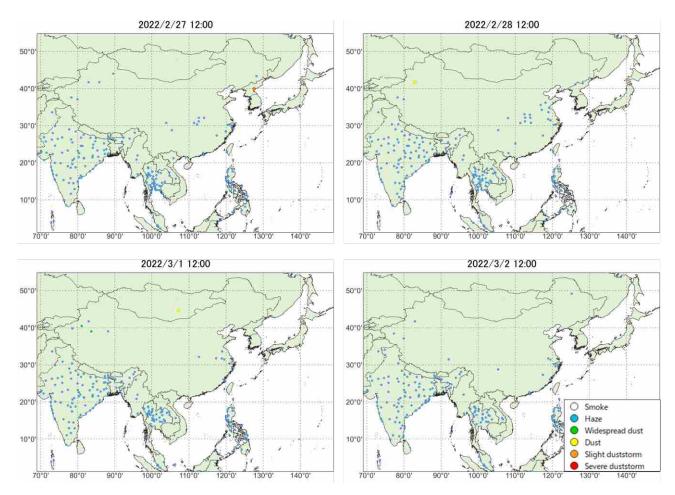
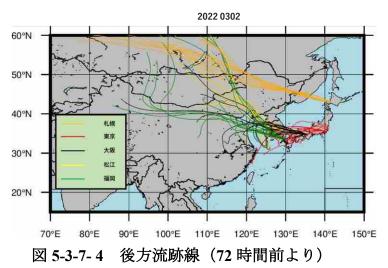


図 5-3-7-3 砂塵嵐発生状況



各地点、各煙霧観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

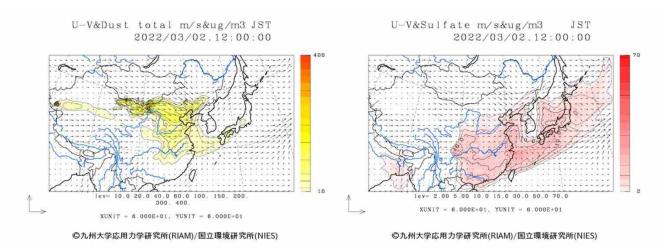
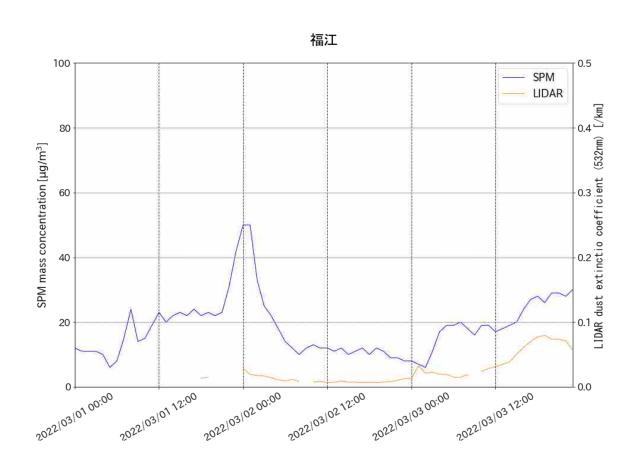
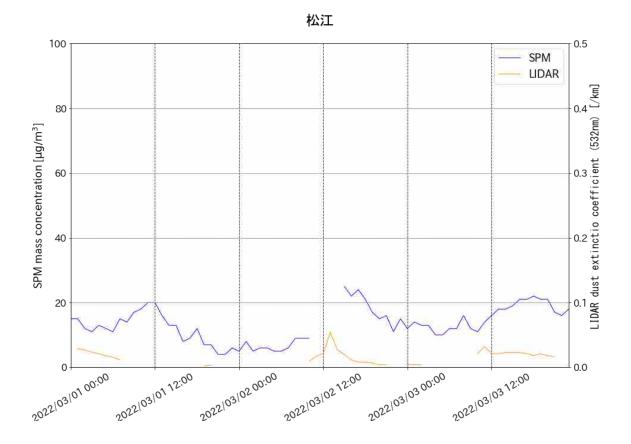
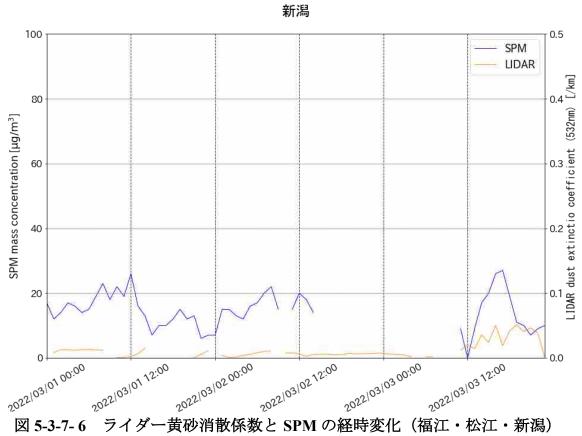


図 5-3-7-5 CFORS 予測結果







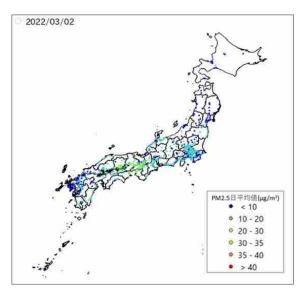


図 5-3-7-7 PM2.5 日平均値全国分布

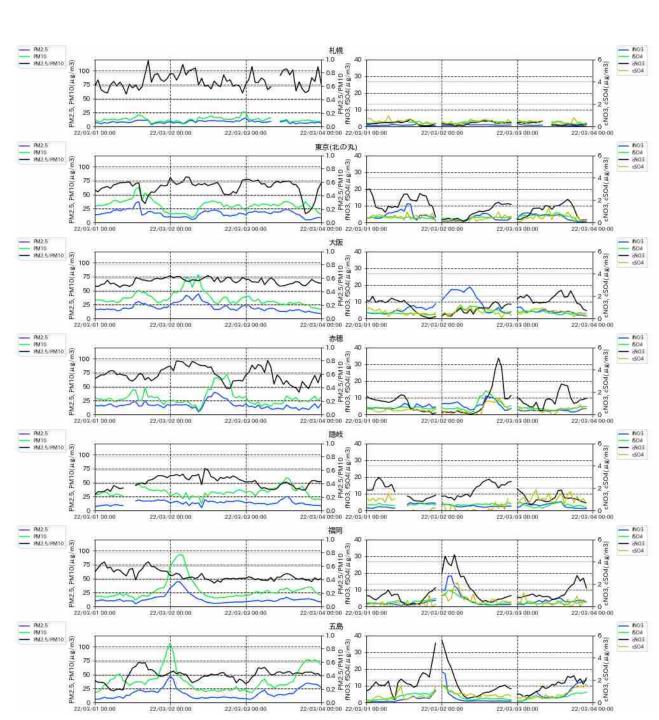


図 5-3-7-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

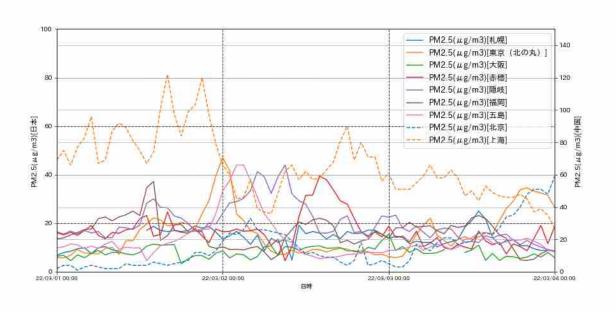


図 5-3-7-9 日本と中国での PM2.5 濃度

(8) 煙霧事例 8 2022 年 3 月 24 日~25 日

本事例は、2022 年 3 月 24 日 \sim 25 日に観測された煙霧で、3 月 24 日に 10 地点、25 日に 14 地点、主に日本海側から九州地方で煙霧が観測された(表 5-3-8-1、図 <math>5-3-8-1)。

この期間の大陸の状況を見ると(図 5-3-8-3)、日本での煙霧観測日の前の 3 月 22 日~24 日にかけて dust、slight duststorm が発生している。このときの気流を後方流跡線で確認したところ、ほぼ全ての流跡線で大陸からの経路となっており duststorm の発生域を通過している(図 5-3-8-4)。CFORS においても、 dust 及び sulfate が中国東部から日本へ影響を及ぼしている様子が示されている(図 5-3-8-5)。

ライダー黄砂消散係数および SPM 濃度の経時変化の比較は、図 5-3-8-6 に示した通りである。長崎・松江・新潟の各地点で、24 日正午から 26 日未明にかけて、SPM 濃度が上昇している様子が確認できる。 黄砂消散係数については、変化は小さいものの、24 日から 25 日にかけてやや上昇傾向にあり、新潟では 25 日午後にピークが見られる。PM2.5 濃度は、24 日に北九州において、35~40 μ g/m³ と比較的高濃度となる地点が見られ、25 日にも近畿地方などで 20~30 μ g/m³ とやや高めの地点が多く見られた。(図 5-3-8-7)。

図 5-3-8-8 から PM2.5/PM10 比は五島において煙霧観測日の 3 月 24 日夜間から単調に減少している様子が顕著に見られ、その比は 3 月 26 日 0:00 頃には 0.2 を下回っていることがわかる。人為起源汚染物質の SO_4^{2-} 、 NO_3 -については隠岐以西では 3 月 24 日に、赤穂以東では 3 月 25 日に高い濃度値になっている傾向が見られる。特に隠岐における微小粒子の NO_3 -は $20\mu g/m^3$ を超え、隠岐、赤穂における粗大粒子の NO_3 -は $4\mu g/m^3$ を超える濃度のピークとなっていることがわかる。

北京では、日本での煙霧が観測された煙霧観測日の 3 月 27 日昼頃と 3 月 28 日深夜に $120\mu g/m^3$ を超える高濃度の PM2.5 が見られる(図 5-3-8-9)。

以上から、本事例は、大陸で発生した dust、slight duststorm の影響を大きく受けた空気塊が、人為起源汚染物質を伴い飛来した事例であると考えられ、黄砂日と類似していると考えられる。

観測地点名 日付 地点数 下関 2022/3/24 10 鳥取 福岡 松江 長崎 余沢 彦根 佐賀 富山 津 岐阜 津 金沢 富山 神戸 福井 京都 岡山 和歌山 奈良 2022/3/25 14 新潟 彦根 高松 大分

表 5-3-8-1 煙霧観測地点

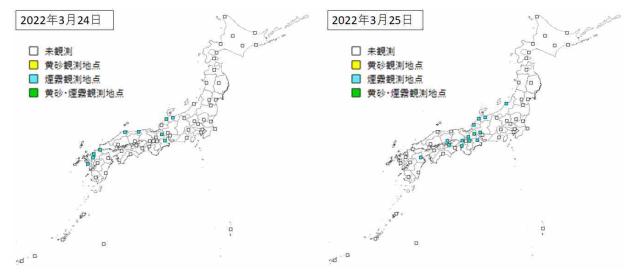
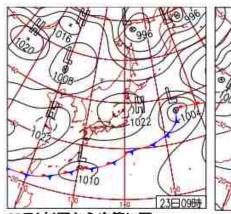
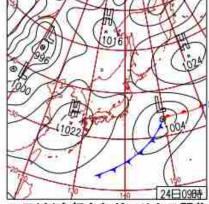


図 5-3-8-1 煙霧観測地点



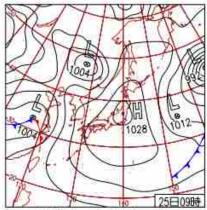
23日(水)西から次第に雨

沖縄~西日本は雨。東日本も次第に 雨や雪。北日本は日中晴れたが次第 に曇り、夜は雪の所も。東日本~東 北の最低気温は最も寒い時期を下回 る。大分市と大阪市でサクラ開花。



24日(木)京都市などでサクラ開花 広く高気圧に覆われて日中は概ね晴

れ。気圧の谷が通過したため、東日 所々で雨や雪。高松市、和歌山市、 京都市、熊谷市でサクラ開花。



25日(金)福島県で震度4

高気圧は夜には日本の東へ。黄海に 前線を伴った低気圧があって北東進。 本~東北は明け方までと夕方以降に、西~北日本は概ね晴れ。熊本県八代 の最大瞬間風速23.6m/sは3月1位。奈 良市など4地点でサクラ開花。

図 5-3-8-2 天気図

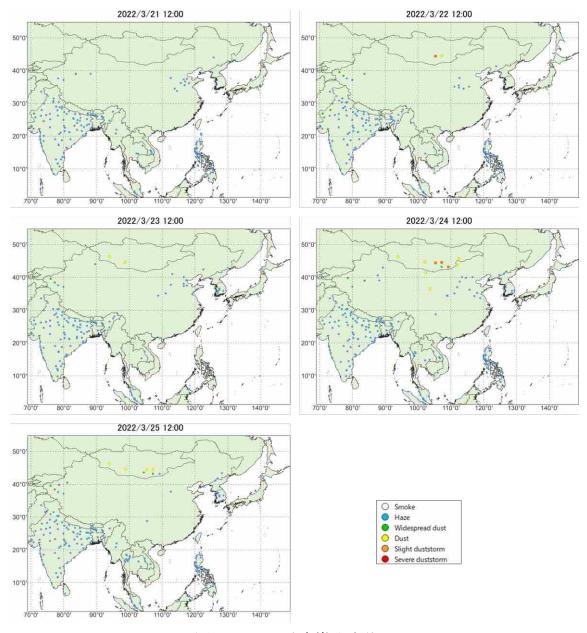


図 5-3-8-3 砂塵嵐発生状況

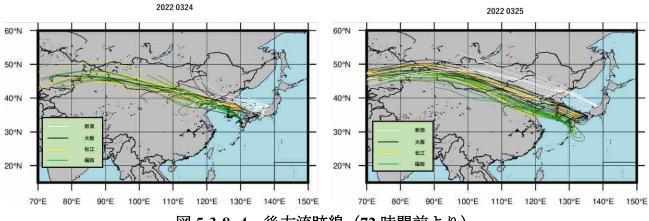


図 5-3-8-4 後方流跡線(72 時間前より)

各地点、各煙霧観測日の0:00 から23:00 までの2 時間ごと12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

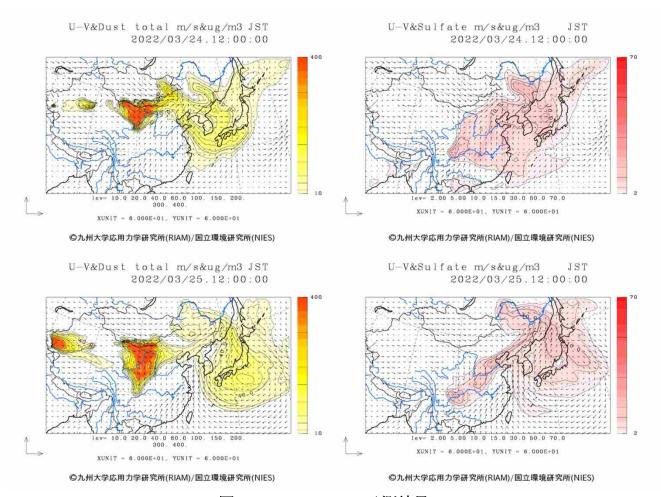
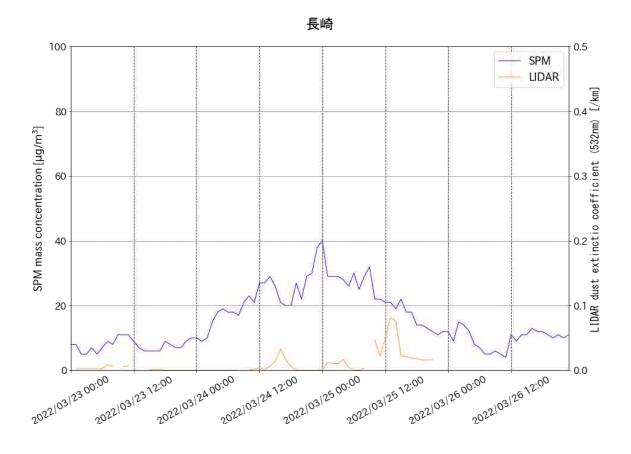
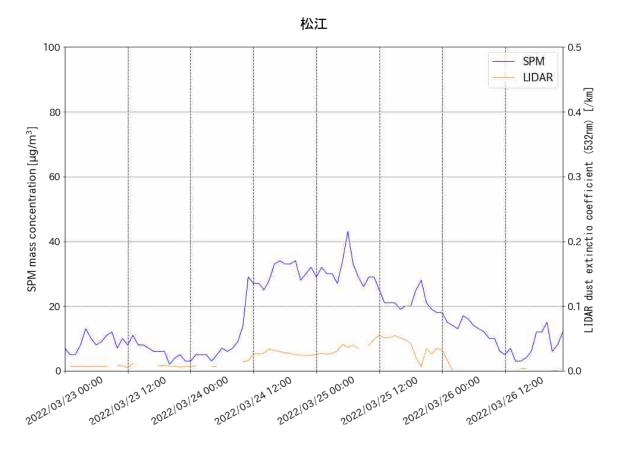
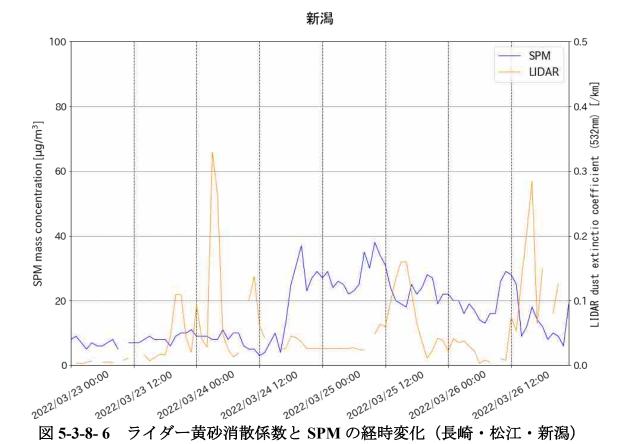


図 5-3-8-5 CFORS 予測結果







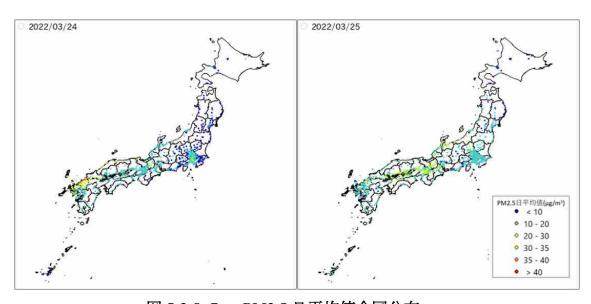


図 5-3-8-7 PM2.5 日平均值全国分布

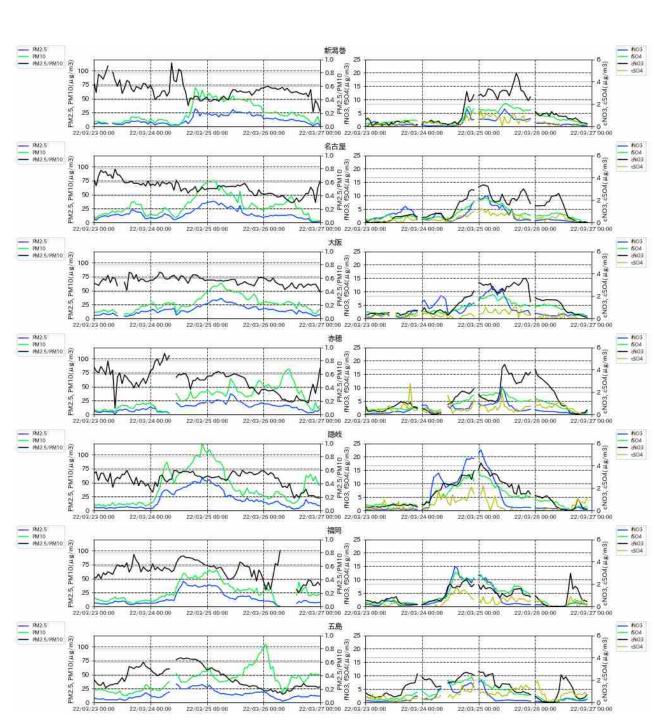


図 5-3-8-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

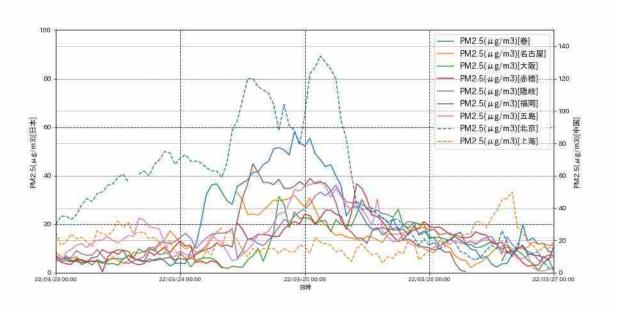


図 5-3-8-9 日本と中国での PM2.5 濃度

5.4 2021 年度煙霧事例のまとめ

2021 年度に観測された煙霧事例を表 5-4-1 に示した。

事例 1 は、12 月 25 日に 10 地点、26 日に 11 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、dust の発生はなく、25 日に sulfate が日本全域に影響を及ぼしている様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、人為起源汚染物質の SO_4^2 、 NO_3 -については fSO_4^2 -に高い濃度のピークが見られ、 $10\mu g/m^3$ を超える濃度を示していた。以上のことから、事例 1 は大陸から飛来した空気塊に、人為起源の fSO_4^2 -が混合した弱い煙霧事例と考えられる。

事例 2 は、1 月 3 日に 10 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前の 12 月 31 日には、モンゴル南部で slight duststorm が発生している様子が見られたが、後方流跡線からは dust の発生源付近を通る様子が見られなかった。また、人為起源汚染物質については、札幌において 1 月 2 日昼頃に fNO_3 が高い値となっているが、他の地点では顕著な上昇は見られない。以上のことから、事例 2 は大陸から飛来した空気塊が人為起源汚染物質を含み、日本に飛来した弱い煙霧事例と考えられる。

事例 3 は、1 月 28 日に 10 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、dust の発生は確認できなかった。また、人為起源汚染物質については、煙霧が観測された札幌、福岡、五島で fNO_3 が高い値となっており、 fSO_4 2-や cSO_4 2-の増加が顕著に見られた。以上のことから、事例 3 は、大陸から飛来した空気塊に、国内で発生したと考えられる人為起源汚染物質を含んだ弱い煙霧事例と考えられる。

事例 4 は、2 月 2 日に 11 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、dust の発生はごくわずかであった。また、人為起源汚染物質については、 SO_4^2 、 NO_3 -について煙霧観測前日で福岡、五島のいずれの成分も上昇している様子が見られ、中国では 2 月 1 日午前に PM2.5 濃度が $150\mu g/m^3$ 以上の高濃度となっていた。以上のことから、事例 4 は、大陸から飛来した空気塊に、国内・国外で発生した人為起源汚染物質を含む弱い煙霧事例と考えられる。

事例 5 は、2 月 5 日に 10 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、日本への dust の影響はない様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、福岡、五島において fSO_4^2 、 fNO_3 -が 2 月 5 日の 0:00 前後に高い値となっていた。以上のことから、事例 5 は、大陸から飛来した空気塊に、国内で発生したと考えられる人為起源汚染物質を含んだ煙霧事例と考えられる。

事例 6 は、2 月 27 日に 15 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。この期間の大陸の状況を見るとからは、dust などは発生しておらず、CFORS 予測結果からは、sulfate が日本へ影響を及ぼしている様子が示されているものの、dust に関してはほぼ影響がない様子が確認できる。また、人為起源汚染物質の SO_4 ²、 NO_3 -については福岡、五島で cNO_3 -の上昇が見られており、五島においては fNO_3 -濃度が $20\mu g/m^3$ を超える高濃度が見られた。以上のことから、事例 6 は、大陸から飛来した空気塊に、国外で発生したと思われる人為起源汚染物質を含んだ弱い煙霧事例と考えられる。

事例 7 は、3 月 2 日に 16 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、日本への dust の影響は小さい様子が見られたが、sulfate については大陸から日本全域に影響を及ぼしている様子が見

られた。また、人為起源汚染物質の SO_4^2 、 NO_3 -については赤穂、福岡、五島で煙霧観測日前日から当日にかけ cNO_3 -濃度が上昇しており、大阪では、 fNO_3 -濃度が $20\mu g/m^3$ まで上昇しており、その高濃度が継続している様子が見られた。以上のことから、事例 7 は、西日本では大陸から飛来した空気塊にモンゴルで発生した dust と人為起源汚染物質を含んだ煙霧事例と考えられる。一方、東日本では大陸からの影響を受けているものの、dust、人為起源汚染物質のどちらの影響も少ない煙霧事例であると考えられる。

事例 8 は、3 月 24 日に 10 地点、3 月 25 日に 14 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、3 月 22 日~24 日にかけて dust、slight duststorm が発生しており、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。CFORS 予測結果からも、dust 及び sulfate が中国東部から日本へ影響を及ぼしている様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、 SO_4^2 、 NO_3 -については煙霧観測日においてどの地点においても各成分の上昇が見られ、特に隠岐における fNO_3 -は $20\mu g/m^3$ を超える値のピークが見られ、北京では 3 月 27 日昼頃と 3 月 28 日深夜に $120\mu g/m^3$ を超える高濃度の PM2.5 が見られた。以上のことから、事例 8 は、大陸で発生した dust、slight duststorm の影響を大きく受けた空気塊が、人為起源汚染物質を伴い飛来した事例であると考えられ、黄砂日と類似している事例であると考えられる。

表 5-4-1 2021 年度における煙霧事例の一覧

事例	年	月	日	地点数	観測地点
1	2021	12	25	10	稚内、長崎、下関、大分、宮崎、室蘭、旭川、青森、秋田、福 島
	2021	12	26	11	稚内、秋田、新潟、金沢、広島、網走、函館、福井、室蘭、札 幌、松江
2	2022	1	3	10	稚内、旭川、青森、函館、札幌、網走、帯広、室蘭、秋田、金 沢
3	2022	1	28	10	下関、宮崎、松山、大分、長崎、熊本、佐賀、仙台、札幌、秋田
4	2022	2	2	11	秋田、稚内、福岡、長崎、佐賀、松江、下関、松山、熊本、大 分、宮崎
5	2022	2	5	10	長崎、佐賀、熊本、稚内、松江、宮崎、新潟、秋田、網走、鳥取
6	2022	2	27	15	稚内、函館、網走、下関、長崎、福岡、金沢、松江、松山、佐賀、熊本、大分、鹿児島、札幌、名瀬
7	2022	3	2	16	長崎、大分、下関、福岡、宮崎、鹿児島、京都、広島、徳島、 高松、岡山、名瀬、稚内、松江、神戸、水戸
8	2022	3	24	10	鳥取、福岡、下関、松江、長崎、金沢、彦根、佐賀、富山、津
	2022	3	25	14	岐阜、津、金沢、富山、神戸、和歌山、福井、京都、奈良、岡 山、大分、新潟、彦根、高松



図 5-4-1 煙霧日におけるレーダーチャート

6. 2021 年度における黄砂・煙霧事例の PM2.5 濃度のデータ整理と解析

黄砂は、PM2.5 の環境基準達成に大きな影響を与えていると考えられる。また、越境による煙霧の存在も、黄砂と同程度もしくはそれ以上に大きな影響を与える可能性がある。そのため、2021 年度の黄砂・煙霧事例の PM2.5 濃度について検討した。

6.1 黄砂・煙霧時における PM2.5 環境基準超過状況についての解煙

ここでは、全国の 1,073 箇所の測定局を評価対象とする。2021 年度における有効測定日数(各測定局あたりの測定延べ日数:1日あたりの測定時間が 21 時間以上であるような日数×局数)は 388,941(日 ×局)であり、平均濃度は $9.1\mu g/m^3$ であった。このうち、1 日平均 $35.0\mu g/m^3$ を超えた $35.0\mu g/m^3$ を超え $35.0\mu g/m^3$ $35.0\mu g/m^3$

測定局における黄砂観測日は、12,814(日×局)であり、その平均濃度は11.8 μ g/m³ で、前年度の平均濃度(16.4 μ g/m³)や前々年度の平均濃度(15.2 μ g/m³)と比較しても低い値であった。また、1 日平均35.0 μ g/m³を超えた日数×局は、25(日×局)であり、これは黄砂観測日×局数全体の0.20%にあたる。この割合は、昨年度の4.93%に比べ非常に低くなったと言えるが、前々年度の割合である0.31%と比較すると大きな差はない。前年度から今年度のこの割合の減少は、2021年3月29日から3月31日に全国的に観測された強い黄砂により、2020年度のPM2.5濃度が近年では全国的に高い値が観測されたことによると思われる。

また、測定局における煙霧観測日は 11,689(日×局)、煙霧事例の平均濃度は 11.6 μ g/m³で、このうち 1 日平均 35.0 μ g/m³を超えた日数は 22(日×局)であった。これは、煙霧観測日×局数全体の 0.1%であり、前年度の平均濃度 16.5 μ g/m³、日平均 35.0 μ g/m³超過割合 6.7%、さらに前々年度の平均濃度 14.5 μ g/m³、日平均値 35.0 μ g/m³超過割合 2.35%に比べ、平均濃度、超過割合の両者で顕著に減少した。

また、参考のため黄砂および煙霧の定義を再掲する。

黄砂:主として大陸の黄土地帯で吹き上げられた多量の砂じんが空中に飛揚し、天空一面を覆い、徐々に降下する現象

煙霧: 乾いた微粒子により視程が 10km 未満となっている状態。(注:湿度 75%未満)

(いずれも気象庁による)

図 6-1-1 は 2013 年度から 2021 年度までの PM2.5 黄砂時平均濃度とその濃度の 35.0µg/m³ 超過率の経年変動を表す。期間が短いため明確な経年的傾向は見られないが両者の増減は同期しているように見え、2017 年度以降は減少傾向にあるように見える。

³ 環境省から告知されている PM2.5 の環境基準 35.0μg/m³(日平均)を参考にしている。本解析では 単純に時間毎のデータを日平均しているが、環境基準は 98%パーセンタイル値となっている点に注意 されたい。

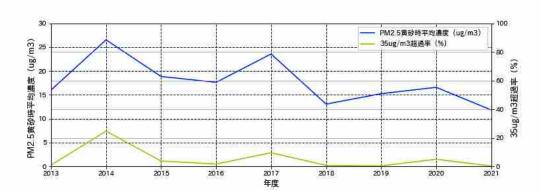


図 6-1-1 2013 年度から 2021 年度までの PM2.5 黄砂時平均濃度とその濃度の 35µg/m3 超過率の経年変化

2021年度の黄砂日観測日数と黄砂事例時の各測定局における PM2.5 日平均値が、1 局でも 35.0µg/m³ を超えた地点がある都道府県を整理し、図 6-1-2 に示し、同様の整理を、煙霧事例を対象とし整理した 結果を図 6-1-3 に示す。黄砂事例時及び煙霧事例時の 1 日平均 35.0 µg/m³ を超えた都道府県は、非常に 少ないものの、例年通り西日本で多く見られた。

図 6-1-4 に、PM2.5 日平均値が、1 局でも $35.0 \mu g / m^3$ を超えた地点がある日数と、そのうちの黄砂・煙霧事例に該当する日数を都道府県別に示している。例年、PM2.5 日平均値が高くなる時において、黄砂あるいは煙霧が観測されることが多いと報告されているが、2021 年度においては全体を通して PM2.5 日平均値が $35.0 \mu g / m^3$ を超過する日数が少なくなっており、PM2.5 濃度が低かったことが読み取れる。

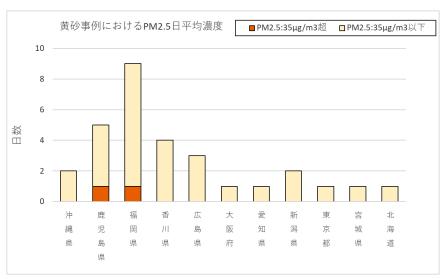


図 6-1-2 都道府県別の黄砂日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2021 年度)

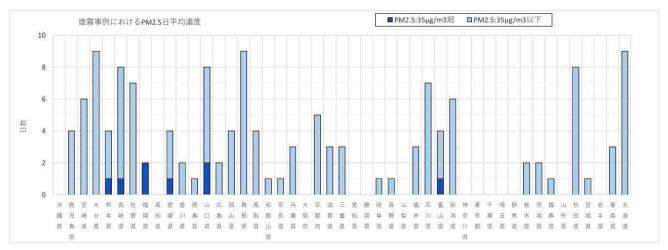


図 6-1-3 都道府県別の煙霧日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2021 年度)

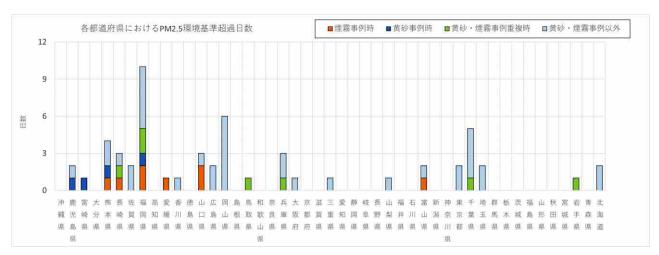


図 6-1-4 都道府県別の PM2.5 環境基準超過日に占める黄砂・煙霧の割合(2021 年度)

6.2 黄砂・煙霧日における PM2.5 成分濃度の解析

全国の自治体では、毎年度、4季にわたって PM2.5 の成分分析を実施している。ここでは、2021 年度の成分分析調査結果のうち、PM2.5 の重量濃度が $20\mu g/m^3$ 以上であり、かつ黄砂もしくは煙霧が観測された地点を抽出し、金属成分について項目別に黄砂日と煙霧日で比較した。2021 年度には、表 6-2-1 に示した期間で自治体による観測が行われた。

	2021 2021 201010	1 AP C C P LITTI / PERMINATION
季節	観測期間	
	春	2021年5月13日~2021年5月26日
	夏	2021年7月22日~2021年8月4日
	秋	2021年10月21日~2021年11月3日
	冬	2022年1月20日~2022年2月2日

表 6-2-1 2021 年度における季節ごとの自治体データの観測期間

利用したデータに関しては、欠測・検出限界未満以外のデータを確認し、イオンバランスが崩れているデータ、マスクロージャーモデルと不整合なレコードを除いた。上記の結果、黄砂日に関しては5データが、煙霧日に関しては23データが抽出された。

さらに PM2.5 の重量濃度が $20\mu g/m^3$ 以上であり、かつ黄砂が観測された日の検体は、3 検体である。この 3 検体は全て 2021 年 5 月 25 日に観測されたもので黄砂事例 3 にあたるデータである。一方で、PM2.5 の重量濃度が $20\mu g/m^3$ 以上で、かつ煙霧が観測された日の検体は、13 検体であった。このうち 2 検体が 2022 年 1 月 28 日(煙霧事例 3)、11 検体が 2022 年 2 月 2 日(煙霧事例 4)に当たるデータである。

黄砂日における重量濃度の平均は $30.0\mu g/m^3$ 、煙霧日におけるその平均は $28.6\mu g/m^3$ であった。それぞれの金属成分・イオン成分の濃度平均、含有率は、図 6-2-1 から図 6-2-4 のとおりである。金属成分に関しては、黄砂時には Al と Fe が顕著に高くなっている(図 6-2-1)。煙霧時には Al と Fe が顕著に高く、次いで Zn が高くなっている(図 6-2-3)。イオン成分などに関しては、黄砂時には硫酸イオン(SO_4^{2-1})が他のイオンなどと比較し非常に高くなっており、次いで、有機炭素(OC)、アンモニウムイオン(NH_4^+)、硝酸イオン(NO_3)の順に高くなっている(図 6-2-2)。

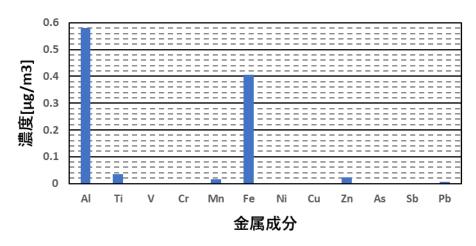
全ての 13 検体について、煙霧時には硫酸イオン(SO_4^{2-})、硝酸イオン(NO_3^{-})が他のイオンなどと比較し非常に高くなっており、次いで、アンモニウムイオン(NH_4^+)、有機炭素(OC)の順に高くなっている(図 6-2-4)。

また、図 6-2-5、図 6-2-6 に煙霧事例 3 に相当する日のデータ (2 検体) による金属成分の濃度、含有率を示す。金属成分に関しては全体で見た時より AI の濃度が低くなっているのがわかる。イオン成分などを見ると、硫酸イオン、アンモニウムイオンの濃度が低くなっており、有機炭素の濃度が高くなっているのがわかる。

同じく、図 6-2-7、図 6-2-8 に煙霧事例 4 に相当する日のデータ (11 検体) による金属成分の濃度、含有率を示す。金属成分、イオン成分などともに全体で見た時と同様な濃度となっている。

^{*}自治体によっては季節によって観測が行われていない期間もある。

黄砂日 金属成分 濃度



黄砂日 金属成分 含有率

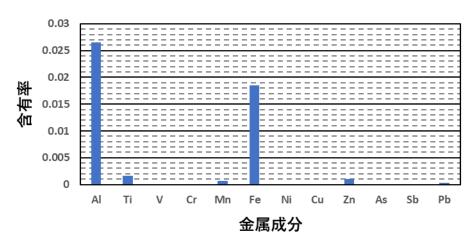
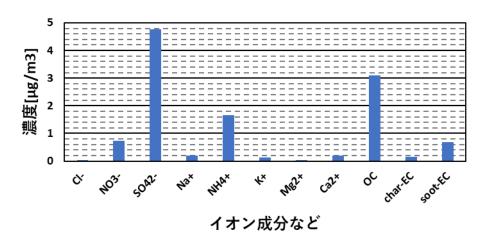


図 6-2-1 黄砂時における PM2.5 金属成分(上段:濃度、下段:含有率) 黄砂事例 3 に相当する期間

黄砂日 イオン成分など 濃度



黄砂日 イオン成分など 含有率

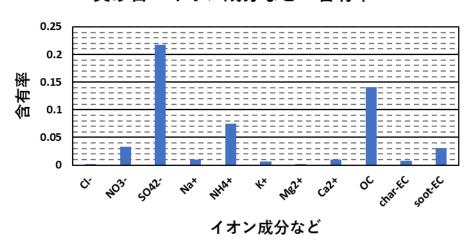
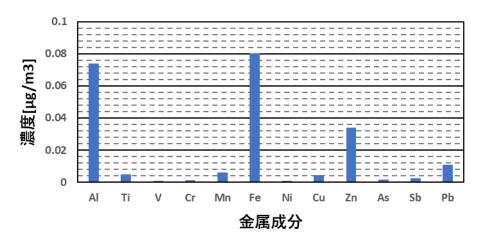


図 6-2-2 黄砂時における PM2.5 イオン成分(上段:濃度、下段:含有率) 黄砂事例 3 に相当する期間

煙霧日 金属成分 濃度



煙霧日 金属成分 含有率

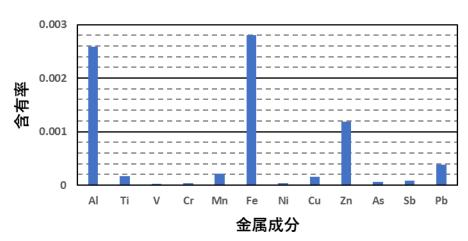
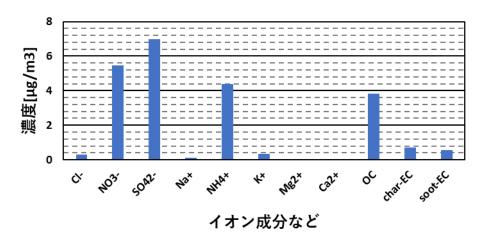


図 6-2-3 煙霧日における PM2.5 金属成分など(上段:濃度、下段:含有率)

煙霧日 イオン成分など 濃度



煙霧日 イオン成分など 含有率

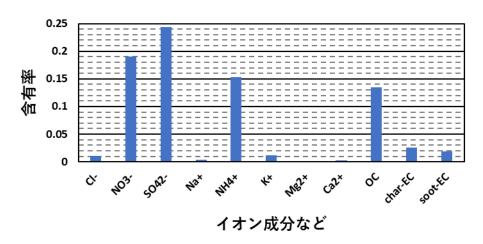
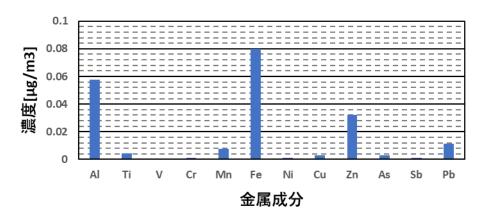


図 6-2-4 煙霧時における PM2.5 イオン成分(上段:濃度、下段:含有率)

煙霧日 金属成分 濃度 事例3



煙霧日 金属成分 含有率 事例3

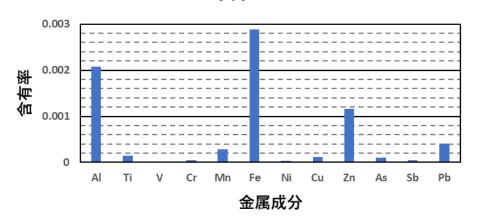
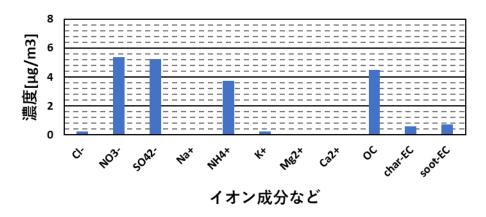


図 6-2-5 煙霧日における PM2.5 金属成分など(上段:濃度、下段:含有率) 煙霧事例 3 に相当する期間

煙霧日 イオン成分など 濃度 事例3



煙霧日 イオン成分など 含有率 事例3

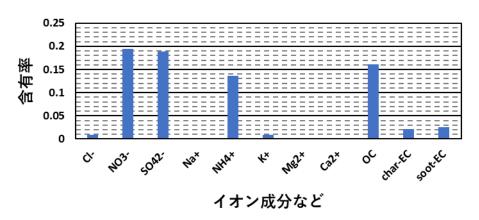
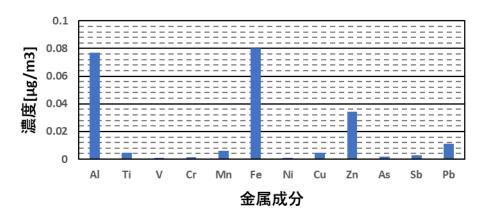


図 6-2-6 煙霧時における PM2.5 イオン成分(上段:濃度、下段:含有率) 煙霧事例 3 に相当する期間

煙霧日 金属成分 濃度 事例4



煙霧日 金属成分 含有率 事例4

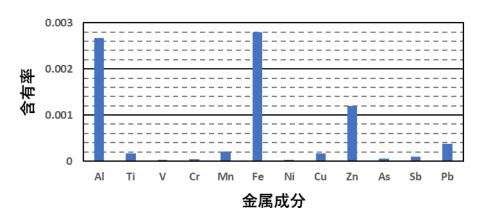
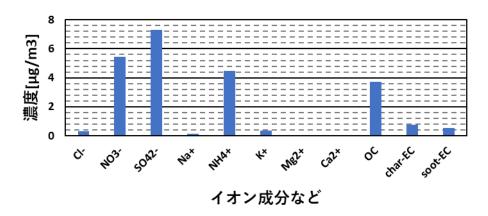


図 6-2-7 煙霧日における PM2.5 金属成分など(上段:濃度、下段:含有率) 煙霧事例 4 に相当する期間

煙霧日 イオン成分など 濃度 事例4



煙霧日 イオン成分など 含有率 事例4

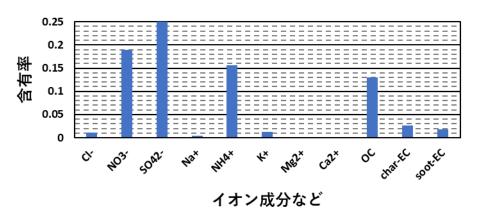


図 6-2-8 煙霧時における PM2.5 イオン成分(上段:濃度、下段:含有率) 煙霧事例 4 に相当する期間

7. 2021 年度における黄砂の飛来状況の評価、包括的解析手法の検討等について

過年度までの検討においては、ライダー観測結果と常時監視局の SPM 濃度データ等を用いて、黄砂飛来を示す手法の検討が行われてきたが、①薄い黄砂層の探知に加え、ライダー観測の原理上、小雨や霧等が発生している場合には大気中の水滴が障害となり観測が行えないことから、②荒天時の黄砂や③雲の上にあるような上空の黄砂の探知に適用することができない可能性が指摘されている。これら問題点を解消すべく、一昨年度の業務では、黄砂観測地点が 11 地点に減少したことにより、気象庁で観測されなかった黄砂の検出を試みた。直近 10 年で多く黄砂が観測された 2010 年度を対象にライダーデータ、PM2.5/SPM の濃度比、SPM 濃度頻度分布を用いて解析を行った。その結果、複数の検出手法を用いることによる黄砂検出の可能性が示唆されたが、SPM 濃度が低濃度時の黄砂飛来に関しては検出できない結果となった。

そこで昨年度、黄砂飛来時には PM10 濃度が高くなる傾向にあるため、PM10 を用いた黄砂の検出を試みた。具体的には ACSA-14 の測定データを用い PM2.5/PM10 比が 0.2 以下で PM10 の濃度が 80μg/m³ 以上の時間を抽出し、その状況の継続時間や黄砂日と関連していると思われる事例を弱い黄砂日と定義し黄砂事例とほぼ同様な解析を行った。その結果、黄砂日と関連し上の条件を満たす事例、上の条件を満たす時間帯の長い事例のそれぞれ 1 例ずつを弱い黄砂日として仮定し解析を行った。解析の結果、それらの事例は砂塵嵐の状況、粗大粒子の NO₃ や自然起源の金属元素の時間変化を考慮すると、気象庁で観測されなかった黄砂が飛来したことを示唆する事例であった。

そこで、今年度においても、2021年度に対し上記手法を適用し黄砂の検出を試みる。なお、昨年度まで SPM 濃度を用いた黄砂検出手法については、PM10に変更することで、黄砂検出が可能かを検討するが、的場ら(2005)4の手法を用いた検討については、PM10データを入手できる地点が限られているため、同手法での検討が難しいこと、且つ、昨年度検討会での指摘事項を踏まえ、除外した。また使用するデータが ACSA-14のデータのため、気象庁の黄砂観測地点とは異なる地点のものもあり、実際、観測地点ではない地点に黄砂が飛来したとも考えられる。この点についての検討も行う。

_

⁴ 的場澄人, 森育子, 早狩進, 西川雅高、SPM を利用した黄砂検出の新たな試み, エアロゾル研究/20 巻 3 号 (2005)

7.1 PM2.5/PM10 濃度比による気象庁で観測されなかった黄砂日の検出手法の検討

上記の通り、今年度においては、PM10 濃度に対する PM2.5 濃度の比を用いて、気象庁で観測されなかった黄砂の抽出・判定基準の確認を試みる。PM10 のデータとしては、ACSA-14 のデータを用いた。PM10 濃度は黄砂時には高い値となる傾向にある。そのためここでは PM10 に対する PM2.5 の比が 0.2 以下、かつ PM10 濃度が $80\mu g/m^3$ の日時を抽出した。上記条件で抽出された事例数は ACSA-14 の観測地点ごとに異なるが、比較的長時間に渡り抽出条件が満たされている事例であることなどを考慮し、気象庁により観測されなかった黄砂日として表 7-1-1 の 2 事例を解析対象とした。

表 7-1-1 0<PM2.5/PM10<0.2、PM10>80μg/m³の条件で抽出され時間的連続性などから 気象庁により観測されなかった黄砂日と仮定された事例

事例	期間	抽出条件を満たす観測地	抽出条件を満たす時間帯
1	2021/5/4-	五島	5/4 20:00-22:00
2	2022/3/26	赤穂	3/26 11:00
		五島	3/26 00:00-2:00

事例1に関しては五島において上記条件を満たす時間が2021年5月4日に3時間継続したため事例1とした。図7-1-1は事例1における各観測地点のPM2.5、PM10、PM2.5/PM10時系列を示すが5月4日にはPM10の急激な上昇が見られ、それに伴いPM2.5/PM10の減少が見られる。また2022年3月26日には赤穂で条件を満たす時間が1時間、五島で3時間見られた。本事例は3月24日、25日に黄砂と類似した特徴を持つ煙霧が観測されていたこと、3月27日、28日が気象庁の観測した黄砂日であったことを考慮すると黄砂または気象庁の黄砂観測地点と異なる点で飛来した黄砂の可能性を示唆し、3月24日~28日での一連の現象であった可能性がある。2021年5月4日の事例と同様、PM10の上昇に伴うPM2.5/PM10の減少が両地点で見られる(図7-1-2)。

以下、表 7-1-1 の 2 事例を気象庁により観測されなかった黄砂日と仮定し、解析を実施する。

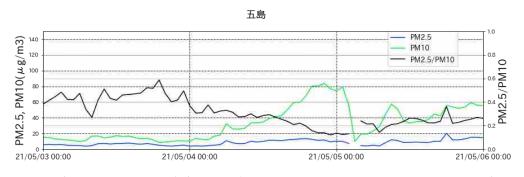


図 7-1-1 事例 1 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列

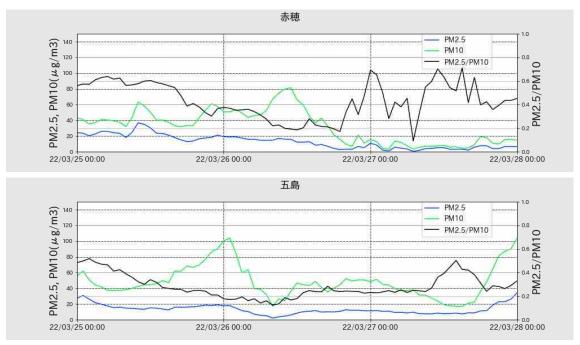


図 7-1-2 事例 2 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列

7.2 気象庁で観測されなかった黄砂事例

以下では、前節の手法により抽出された 2 事例(表 7-1-1)について、黄砂の特徴をどの程度有する事例であったか明らかにするため、4 章における黄砂の事例解析と同様の項目による解析結果を示す。ここまでの解析と同様、PM10 濃度に関しては、自動測定器 ACSA-14 のデータを使用した。ライダー黄砂消散係数については、 $150m\sim270m$ のデータを平均し、更に 15 分毎の測定値 4 つの中央値を取ることにより、1 時間毎の値として、前後 1 日を含め図示した。

(1) 気象庁で観測されなかった黄砂事例 1:2021 年 5 月 4 日

本事例においては、5月4日 20:00~22:00 に五島で PM10 の値が $80\mu g/m^3$ 以上となり、かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった(表 7-2-1-1)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況をみると (図 7-2-1-1)、弱い黄砂として抽出された 5 月 4 日 以前の 5 月 1 日~3 日にかけて、モンゴルの比較的広い範囲で dust や duststorm が発生していた。この 時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、5 月 4 日から遡る流跡線が砂塵嵐発生域の近 くを通っていることがわかり、大陸からの移流があったことが示唆される(図 7-2-1-2)。

また、福江島におけるライダー黄砂消散係数及び PM10 濃度の時系列変化は、図 7-2-1-3 の通りとなった。PM10 濃度がピークを示した5月4日午後には、ライダーデータは欠測となっているが、その後5月5日にかけて、PM10 濃度の増加に伴ってライダー黄砂硝酸係数も増大している様子が見られる。

図 7-2-1- 4 は五島と福岡における粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4 ²⁻と NO_3 ⁻の時間変化を示すが、五島においては気象庁で観測されなかった黄砂と思われる時間帯である 5 月 4 日に午前から午後にかけて粗大粒子、微小粒子の NO_3 ⁻と SO_4 ²⁻の全てのイオン成分の濃度が増加傾向にあることがわかる。一方、福岡においては、粗大粒子の NO_3 ⁻と微小粒子の SO_4 ²⁻で増加傾向が見られる。図 7-2-1-5 に湿度と PM10 の時間変化を示す。五島においては 5 月 4 日には PM10 が単調に増加しているが湿度には乾燥した空気塊を示す特徴的な傾向は見られない。逆に福岡においては 5 月 4 日には 1 日を通して低い値を示しているが PM10 には黄砂の傾向を示す特徴的な傾向は示されていない。

図 7-2-1-6 及び図 7-2-1-7 に福岡、五島における各金属元素の時間変化を示す。福岡、五島の両者においては 5 月 4 日に自然起源の元素において緩やかな増加が見られる。また、人為起源の元素については 5 月 4 日に硫黄の増加が見られる。

以上と黄砂事例の結果を踏まえると、本事例は、東アジア域における duststorm により発生した黄砂が、5月4日に発生した若干の人為起源系汚染物質を含み飛来し、九州地方の狭い域で広がった黄砂事例とも考えられる。

表 7-2-1-1 PM10 の値が 80μg/m3 以上となり、 かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった観測地と時間帯

事例	期間	抽出条件を満たす観測地	抽出条件を満たす時間帯
1	2021/5/4	五島	5/4 20:00-22:00

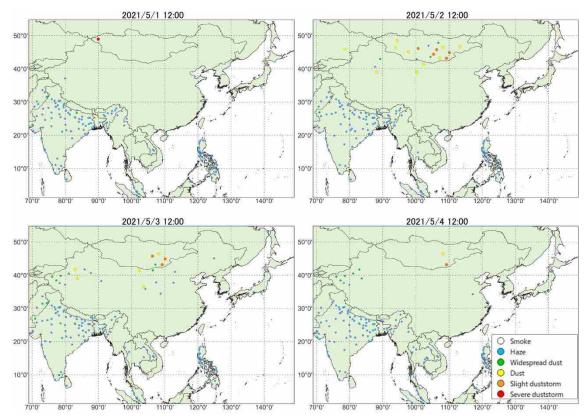
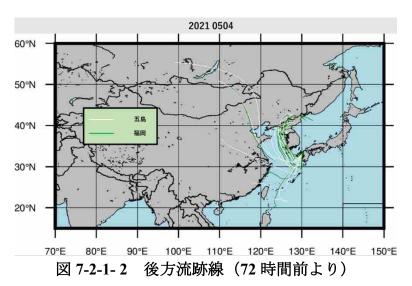


図 7-2-1-1 砂塵嵐発生状況



各地点、各黄砂観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

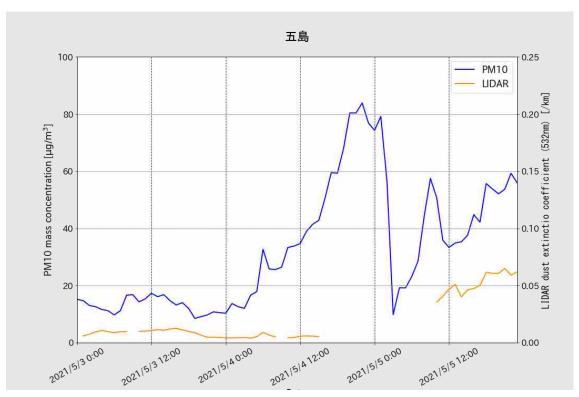


図 7-2-1-3 PM10 データ (五島) 及びライダーデータ (福江島) の時系列変化の比較

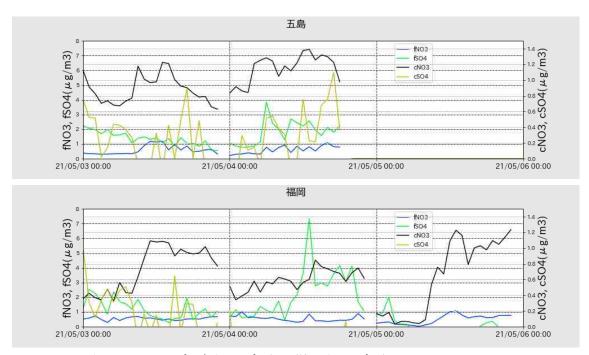


図 7-2-1-4 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO₄2-と NO₃-

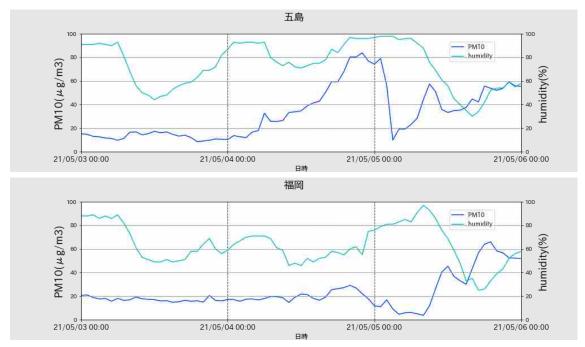
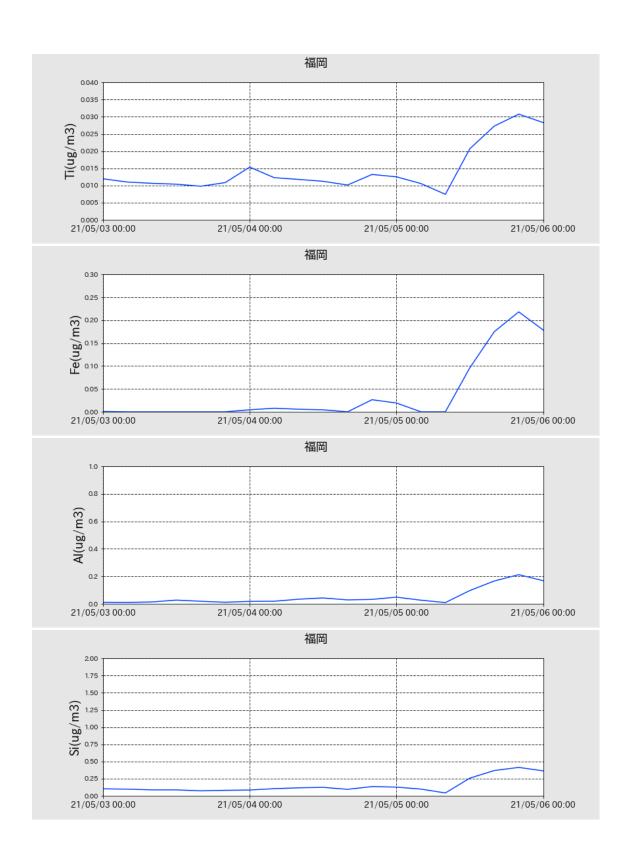


図 7-2-1-5 湿度と PM10 の時間変化



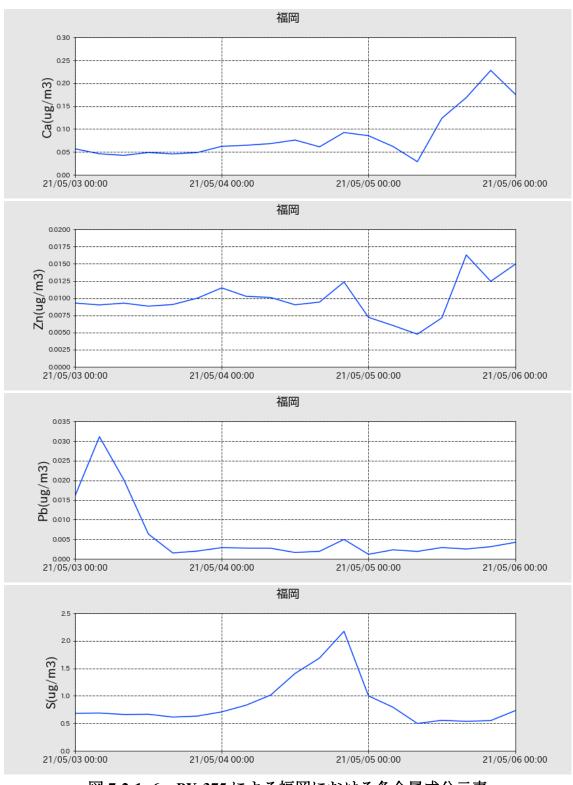
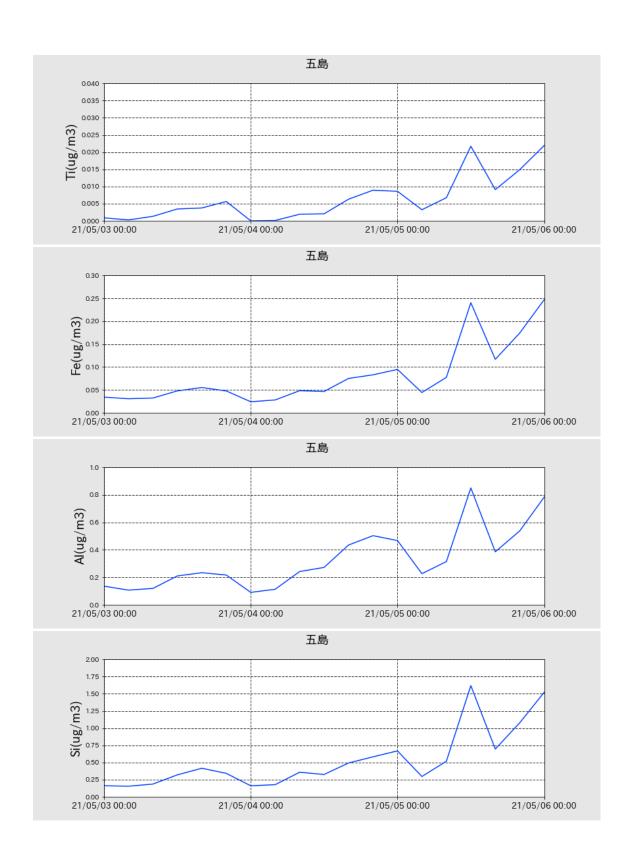


図 7-2-1-6 PX-375 による福岡における各金属成分元素



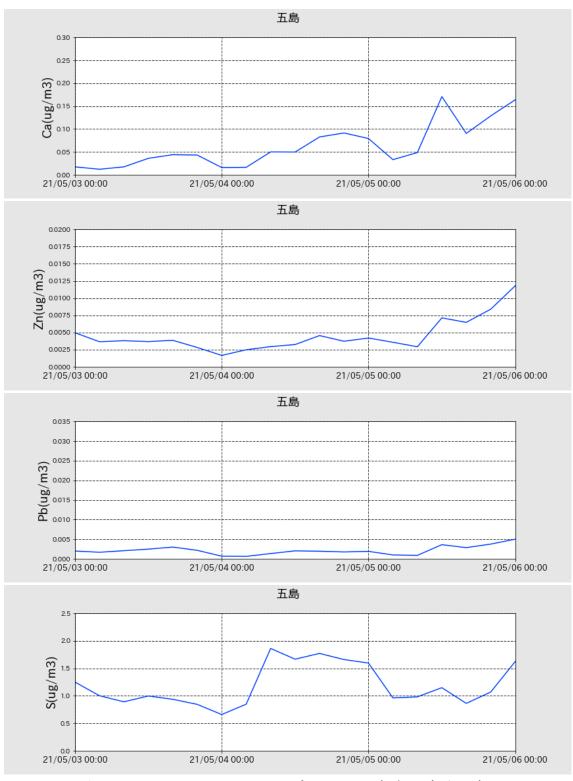


図 7-2-1-7 PX-375 による五島における各金属成分元素

(2) 気象庁で観測されなかった黄砂事例 2:2022 年 3 月 26 日

本事例においては、3月26日11:00 に赤穂で、3月26日0:00~2:00 に五島で PM10 の値が $80\mu g/m^3$ 以上となり、かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった(表 7-2-2-1)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況をみると(図 7-2-2-1)、黄砂観測前の 3 月 24 日、25 日にモンゴルの数地点で dust や slight duststorm が発生していた。この時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、流跡線は砂塵嵐発生域の近くを通っているように見える(図 7-2-2-2)。

ライダー黄砂消散係数及び PM10 濃度の時系列変化は、図 7-2-2-3 及び図 7-2-2-4 の通りとなった。 ただし、五島における事例では、福江島のライダーデータが欠測であったため長崎におけるデータを用い、また赤穂における事例では松江におけるデータを用いた。全体的にややデータの欠測が多いものの、図 7-2-2-4 における 3 月 25 日正午~26 日 0 時など、PM10 濃度の増減に伴ってライダー黄砂消散係数が変動している傾向が確認できる。

図 7-2-2-5 は赤穂、五島、福岡における粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4^2 と NO_3 -の時間変化を示す。気象庁で観測されなかった黄砂と仮定される 3 月 26 日に、赤穂ではそれらの成分で単調な減少傾向が見られる。また五島においては 3 月 26 日 0:00 前後で粗大粒子の SO_4^2 -濃度が増加し、そこでのピークは約 $3\mu g/m^3$ となっている、その後、粗大粒子、微小粒子の全てのイオン成分濃度は減少傾向にあり、7:00 前後から増加傾向に転じている様子が見て取れる。特に粗大粒子の NO_3 -濃度の 12:00 頃のピークは、 $2\mu g/m^3$ 以上とその他のイオン成分の濃度より高い値となっている。福岡において五島に遅れて粗大粒子の NO_3 -濃度のピークが見られる。図 7-2-2-6 に湿度と PM10 の時間変化を示す。赤穂においては 3 月 26 日 11:00 頃に PM10 のピークが見られるが、湿度に黄砂の飛来を特徴づける乾燥した状況は見られなかった。五島においても赤穂の状況と同様であった。

図 7-2-2-7 及び図 7-2-2-8 に福岡、五島における各金属元素の時間変化を示す。福岡では自然起源の全ての元素で3月26日の0:00前後にやや高い値となった。五島においては Al、Ca で3月26日0:00前後にやや高い値となった。また、人為起源の元素に関しては3月26日には低い値で変化している。

以上により、本事例は、東アジア域で発生した slight duststorm、dust により 3 月 26 日 0:00 頃から、人 為起源系汚染物質を多く含まない黄砂が飛来し、九州地方から近畿地方にかけ広がった弱い黄砂事例だった可能性がある。また、2022 年 3 月にはこの弱い黄砂と仮定された事例の他、3 月 26 日~27 日にかけ気象庁で福岡における黄砂事例が観測された。本事例は福岡での観測に先立ち五島周辺に飛来した黄砂であった可能性を示唆する。

表 7-2-2-1 PM10 の値が 80μg/m3 以上となり、 かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった観測地と時間帯

抽出条件を満たす時間帯	抽出条件を満たす観測地	期間	事例
3/26 11:00	赤穂	2022/3/26	2
3/26 0:00-2:00	五島		

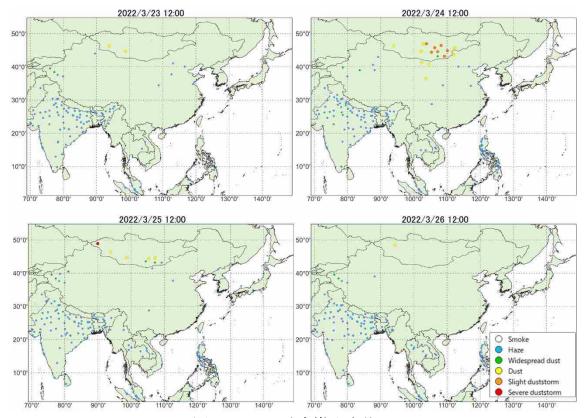
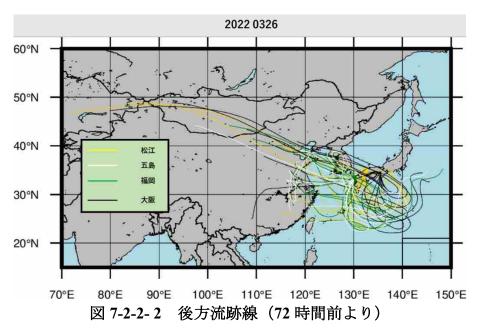


図 7-2-2-1 砂塵嵐発生状況



各地点、各黄砂観測日の0:00 から23:00 までの2時間ごと12時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12の後方流跡線が作図される。

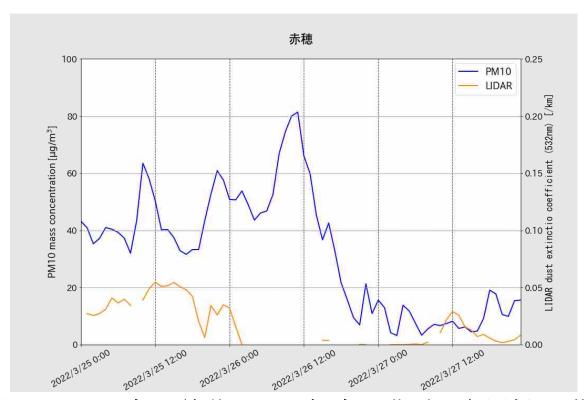


図 7-2-2-3 PM10 データ (赤穂) 及びライダーデータ (松江) の時系列変化の比較

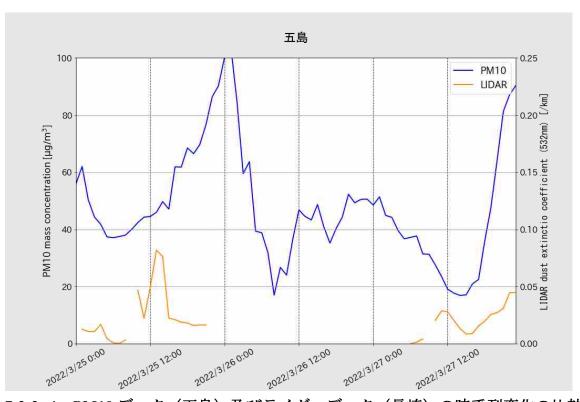


図 7-2-2-4 PM10 データ (五島) 及びライダーデータ (長崎) の時系列変化の比較

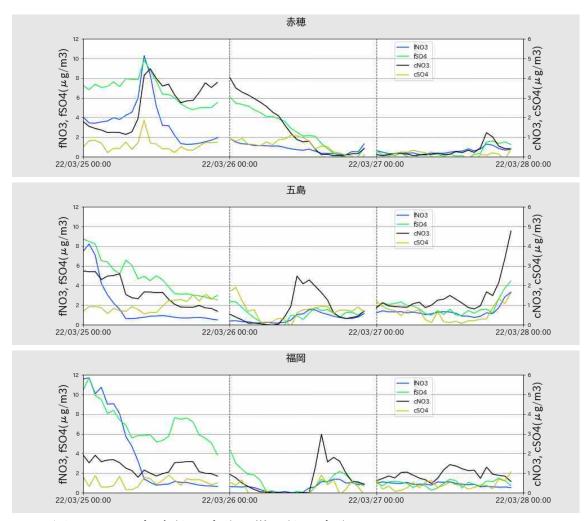


図 7-2-2-5 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO4²⁻と NO₃-及びその比

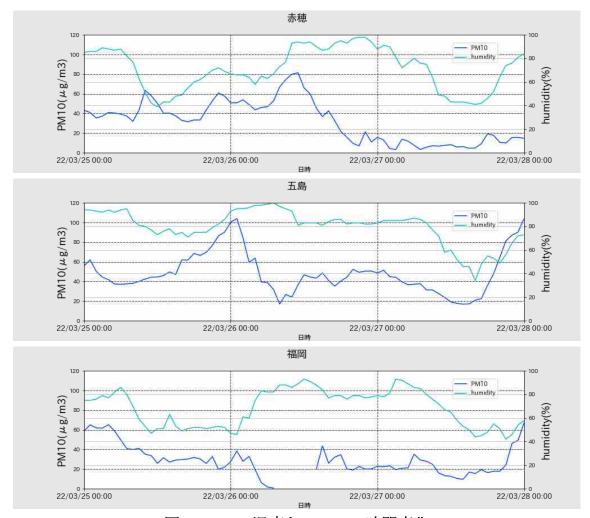
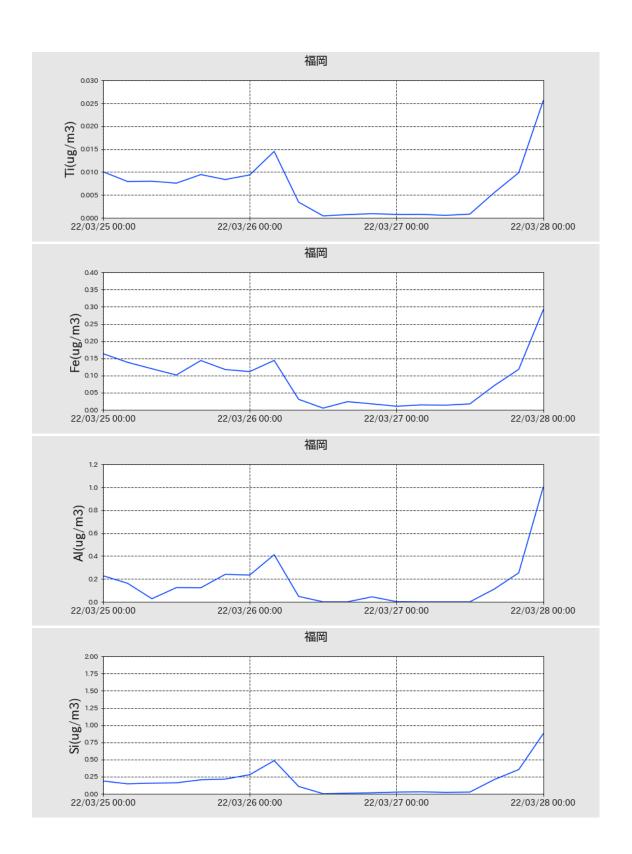


図 7-2-2-6 湿度と PM10 の時間変化



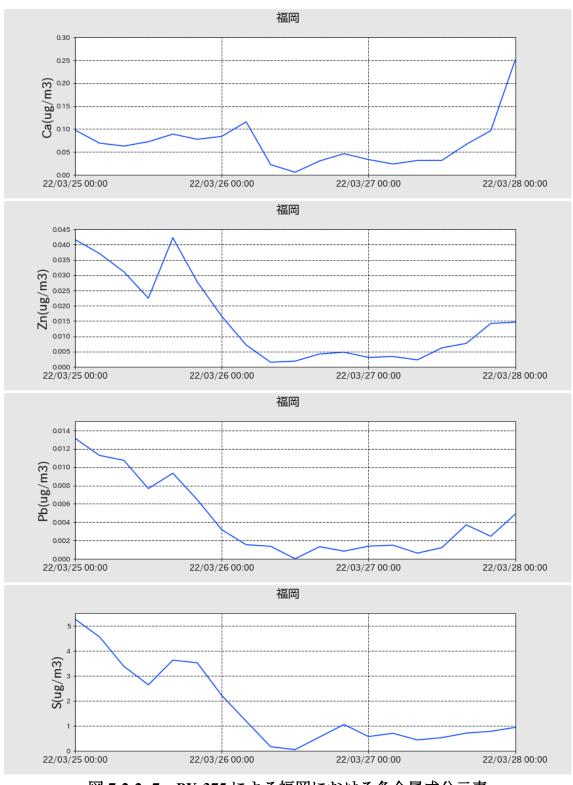
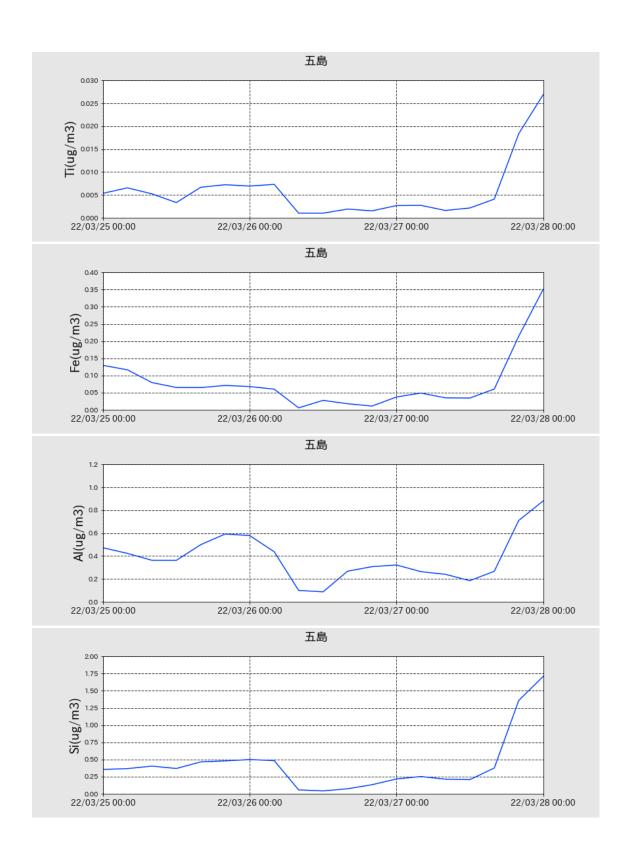


図 7-2-2-7 PX-375 による福岡における各金属成分元素



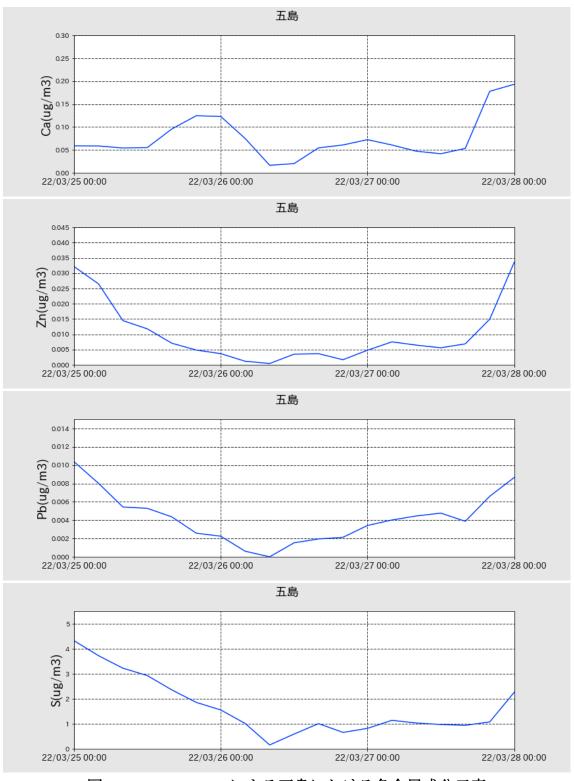


図 7-2-2-8 PX-375 による五島における各金属成分元素

7.3 人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討

本節では、黄砂飛来状況の評価・包括的解析手法の候補として、人工衛星による観測データを用いた 黄砂検出手法の可能性について、検討結果を報告する。その目的としては、前節までに検討した黄砂検 出手法における弱点として、ライダー観測は荒天時に欠測となってしまうこと、また大規模な黄砂が減 少傾向にあり SPM 濃度が低下傾向にあることの二点を補うため、黄砂飛来状況をより直接的に把握で きる観測手法が期待されていることによる。

過年度までの業務において、気象衛星ひまわり 8 号による観測結果が検討され、Dust RGB 画像処理を施すことにより、黄砂が識別できることが報告されていた。一方で、ひまわりの観測範囲を考慮すると、黄砂発生源域であるゴビ・タクラマカン砂漠周辺における砂塵嵐の発生状況の把握は十分とは言えない。そのため、より黄砂発生源域に近い地域の観測が可能であることが望ましいと考えられる。以上の経緯から本年度は、昨年度の文献調査結果も踏まえて、中国により打ち上げられた静止衛星「風雲 4号」(Fēngyún-4、略称 FY-4)による観測データを用い、特定の黄砂日について可視化することで、人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討を行った。

「風雲 4 号」は、中国初の静止衛星「風雲 2 号」の後継機であり、2033 年までに全 5 機の打ち上げが予定されている静止衛星である。1 機目の FY-4A が 2016 年 12 月に、2 機目の FY-4B が 2021 年 6 月にそれぞれ打ち上げられ、2023 年 1 月時点で共に稼働している状況である。

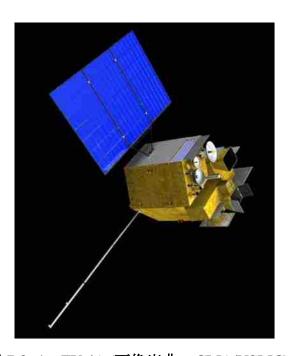


図 7-3-1 FY-4A (画像出典: CMA/NSMC)

表 7-3-1 FY-4A により提供されているデータ

		Product specifications						
		Temporal type					Spatial	
Type	Product name	Minutely	Hourly	Daily	Ten-Daily	Monthly	resolution	Format
Atmosphere	Aerosol optical depth	V	V	7.7	=		1 km	NetCD
	Atmospheric correction image	V	V	-	-	-	1 km	NetCD
	Atmospheric motion vector	-	V	-	-	+	64 km	NetCD
	Convective initiation	V	V	-	-	-	4 km	NetCD
	Fog detection	-	v.	-	- 3	+	4 km	NetCD
	Dust detection	V	¥ .		- 2	-	4 km	NetCT
	Total column precipitable water	-	V		- 2		4 km	NetCT
	Vertical moisture profile	-	V		- 2		16 km	NetCT
	Vertical temperature profile	-	V	-	- 2		16 km	NetCT
	Lightning detection	V	-		-		78 km	NetCT
	Liquid profile water	1	V	-		-	4 km	NetCT
	Rainfall rate		V	-	- 2		4 km	NetCT
	Tropopause folding	V	V	-	-		4 km	NetCT
Ocean	Sea surface temperature	-	V	CVINCVINCVINCVINCVINCVINCVINCVINCVINCVIN	2		4 km	NetCT
Cloud and	All sky radiation	-	V	-	-		4 km	NetCT
radiation	Clear sky masks	V	1	-	2	+	4 km	NetCT
	Clear sky radiation	-	V	-	2	-	4 km	NetCT
	Cloud optical depth	-	1	-	2		4 km	NetCT
	Cloud phase	V	V	-	2	-	4 km	NetCT
	Cloud top height	V	V	-	2		4 km	NetCT
	Cloud top pressure	V	1	-	- 2		4 km	NetCI
	Cloud top temperature	V	V	-	2		4 km	NetCT
	Cloud type	V	1	-	- 2		4 km	NetCT
	Downward long wave radiation: sur- face	-	V			*	4 km	NetCT
	Outgoing long wave radiation	100	V	177	75	-	4 km	NetCL
	Upward long wave radiation: surface	100	V	27	75	-	4 km	NetCL
	Reflected shortwave radiation: TOA		V	177	77	-	4 km	NetCE
	Surface solar irradiance		V	27	77	177	4 km	NetCE
Land surface	Fire/hot spot	√	V		-	177	2 km	NetCE
	Land surface temperature	.55	V		77	177	4 km	NetCE
	Land surface emissivity	-	V		200	100	12 km	NetCD

Note: The symbol $\sqrt{3}$ means this product is available.

(出典: XIAN et al. (2021))

FY-4 には、主要な光学的観測機器として、Advanced Geostationary Radiation Imager(略称:AGRI)と呼ばれる撮像素子が搭載されている。AGRI は、NASA/NOAA により運用されている人工衛星と同様、米国のハリス社によって開発された機器であり、可視光から赤外線まで 15 チャンネルのスペクトル帯をカバーしている。時間解像度は、中国国内域は約 15 分毎、全球は約 1 時間毎、空間解像度は $1\sim4$ キロメートルとなっている。黄砂検出に関連するデータとしては、Dust detection というデータにおいて、砂塵嵐の発生状況が $1\sim24$ の数値による Dust score として数値化されている。ただし数値化の基準等、詳細な説明は十分に提供されておらず、数値の妥当性については更に確認が必要であると考えられる。表 7-3- 1 に 示 し た デ ー タ は 、 FENGYUN Satellite Data Center の ウ ェ ブ サ イ ト (http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx)にて提供されており、登録後無償でダウンロードが可能となっている。

ここでは、特に広範囲で黄砂が観測された 5 月 9 日の黄砂事例(事例 2)を対象に、上記 Dust score を入手し可視化することにより、人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討とした。中国国内域のデータを可視化した結果は、以下の図 7-3-2 の通りとなった。 5 月 6 日から 9 日にかけて Dust score 数値の高い赤い領域が拡散していく様子が表れている。ただし、データに格納されている位置座標の変数は、(x,y) の

それぞれについて、FY4A fixed grid projection x-coordinate 及び FY4A fixed grid projection y-coordinate との み記載されており、この座標系の詳細及び緯度・経度への正確な変換方法については目下調査中である。 そのため、現時点では中国大陸や日本の位置はこのデータのみからは把握することができないが、格納 されているデータ数から考えると、図中の位置(1300,0)付近の点がおおよそ衛星直下点(東経 104.7 度、北緯 0 度)に相当すると考えられる。砂塵嵐の発生及び移流の状況を把握する目的のためには、今後、上記の位置座標を緯度経度に変換した上で、地図上にプロットする作業が必要となる。

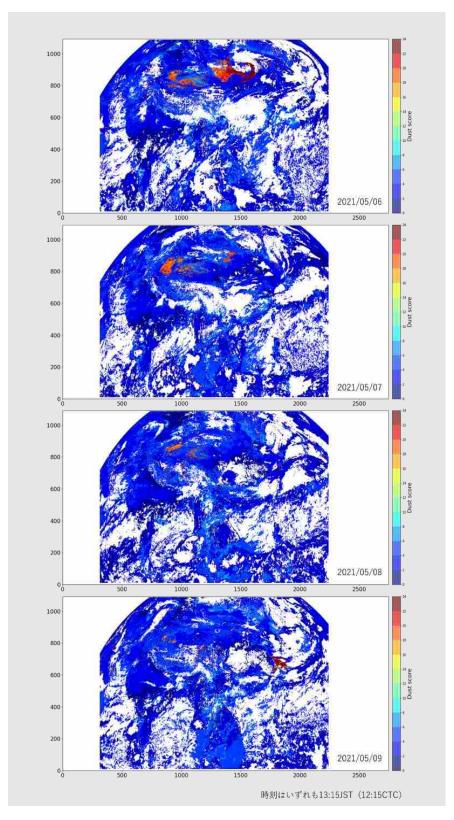


図 7-3-2 FY-4 A による Dust detection データ可視化結果 (5月9日の黄砂事例対象、カラースケールは 1~24の Dust score を表す)

8. 今後の課題

本報告書では、ライダーデータ、自動測定機により測定されているデータ、全国大気汚染常時監視局で測定されているデータ等により、黄砂飛来状況について把握するとともに、黄砂と大気汚染物質との混在について、全国的な状況を確認した。

今後の課題として、次の事項があげられる

- ○黄砂は粒径が比較的大きい粒子の割合が大きいため、飛来時に SPM 濃度が上昇することが知られているが、PM10、PM2.5 濃度も上昇し、健康影響が懸念される研究報告もなされているため、今後も黄砂飛来状況の事例解析を継続するとともに、さらなる状況把握が必要である。
- 〇今年度は粗大粒子の各イオン成分(cNO_3 -と cSO_4 -2)と PMc の比に着目し飛来した黄砂の性質を調べた。今後は黄砂が輸送された空気塊に汚染物質が含まれていた場合(外部混合状態)と、黄砂に汚染物質が付着していた場合(内部混合状態)を判断するために、これらの比の性質を黄砂事例解析に取り入れるとともに、微小粒子の各イオン成分(fNO_3 -と fSO_4 -2)と PMf の比にも着目して飛来黄砂の性質を調べていくことを検討するべきである。
- ○後方流跡線については地上または海上への着底(位置が高度 0m)についての詳細について触れることはなかった。今後はそれも含めた解析を行っていく必要がある。
- ○レーダーチャートの ACSA-14 の項目に関してはこれまで硫酸イオンデータのみ考慮して数値判断を してきた。今後、黄砂・煙霧の特徴を広く、詳細に把握するために、硫酸イオンデータに加え硝酸イオ ンデータも考慮した統計的な数値判断を検討していく必要がある。
- ○人工衛星による黄砂飛来状況の把握について、中国の人工衛星 FY-4 による dust detection データを用いる場合には、砂塵嵐の発生位置及びその移流の正確な位置の把握のため、データに格納されている位置座標を緯度・経度座標に変換した上で地図上にマッピングする必要がある。
- ○日本・中国・韓国が黄砂対策に関するモニタリング及び予測、発生源対策について共同研究等を行っているが、発生源及び日本におけるモニタリングについての情報共有などを通し、黄砂問題検討会と日中韓三カ国共同研究と連携をさらに深めることによって、黄砂発生の減少及び混在する大気汚染物質減少につなげる必要がある。

参考文献リスト

- 1. 「環境省」2022: 令和2年度黄砂飛来状況調査報告書
- 2. 「環境省」HP(環境省大気汚染物質広域監視システム): http://soramame.taiki.go.jp/
- 3. 「気象庁」HP(地球環境のデータバンク黄砂):

https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/kosahp/kosa data indexdex.html

- 4. 「気象庁」HP(日々の天気図): http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html
- 5. 「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?prec no=&block no=&year=&month=&day=&view=

- 6. 「国立環境研究所」HP(ライダー(レーザーレーダー)): http://www-lidar.nies.go.jp/
- 7. 「国立環境研究所」HP(東アジア域黄砂・大気汚染物質分布予測(CFORS):

http://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/index-j.html

8. 「アメリカ海洋大気圏局 NOAA」HP ARL HYSPLIT (後方流跡線):

http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajasrc.pl

- 9. 「環境省」HP PM2.5 モニタリングデータ (海外): http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/index.html
- 10. Sugimoto, N., A. Shimuzu, I. Matsui and M. Nishikawa (2016): A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using PM2.5-to-PM10 ratios, Particulogy, 28, 114-120
- 11. ライダー観測によるダストの推定と地上観測によるエアロゾル質量濃度の比較 兼保直樹、杉本伸夫、 清水厚、山本重一、河本和明 著、大気環境学会誌 第 47 巻 第 6 号 p.285 (2012)
- 12. SPM/PM2.5 からの黄砂判定の可能性-ライダー黄砂消散係数を指標として-清水厚、杉本伸夫、松井一郎、西澤智明 著、第 33 回レーザセンシングシンポジウム予稿集 (2015)
- 13. 「風雲 4 号」等衛星情報:https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/fy-4
- 14. WMO による「風雲 4 号」データベース: https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/fy 4
- 15. 中国気象局による「風雲 4 号」ホームページ:
 http://www.cma.gov.cn/en2014/news/Features/201509/t20150916 293082.html
- 16. Matoba, S., Mori, I., Hayakari, S., Nishikawa, M. (2005): New Method of Detecting Kosa (Asian Dust) from SPM Data Measured by Environmental Air Monitoring Stations., J. Aerosol Res., 20 (3), 225-230 (in Japanese)
- 17. Iwamoto, S. and Shimohara, T. (1993): Relationship Between High Concentration of SPM Meteorological Conditions—Comparison Within Three Cities in Fukuoka Prefecture—, J. Japan Soc. Air Pollut., 28, 330-340 (in Japanese)
- 18. 環境省 微小粒子状物質の成分分析 大気中微小粒子状物質 (PM2.5) 成分測定マニュアル 3. 向き元素測定方法
- Fengyun Meteorological Satellite Products for Earth System Science Applications, XIAN et al., ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES, VOL. 38, AUGUST 2021, 1267–1284
- 20. Fengyun-4 Weather Satellite, Fengyun-4 Spacecraft & Satellites (spaceflight101.com)