
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	鶴野 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 賢	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. 調査目的	i
2. 黄砂の観測状況	i
2.1 黄砂の観測状況	i
2.2 黄砂観測日のSPM濃度	i
3. 煙霧事例の観測状況	i
4. 2021年度における黄砂日の事例解析	i
4.1 解析手法	i
4.2 黄砂の観測事例	i
4.3 黄砂日の解析結果	i
5. 2021年度における煙霧日の事例解析	ii
5.1 解析手法	ii
5.2 煙霧の観測事例	ii
5.3 煙霧事例の解析結果	iii
6. 黄砂・煙霧事例におけるPM2.5濃度	iv
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	iv
6.2 黄砂・煙霧事例におけるPM2.5成分濃度	iv
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	iv
7.1 PM2.5/PM10濃度比による弱い黄砂検出手法の検討	iv
7.2 気象庁で観測されなかった黄砂事例	v
7.3 人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討	v

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、PM_{2.5}/SPMの比、湿度、中国におけるPM_{2.5}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、PM_{2.5}/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、PM_{2.5}/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含み、日本に飛来した弱い黄砂事例
	2021	4	18	1	那覇	
2	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
	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	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
	2021	5	26	1	鹿児島	
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、西日本に飛来した弱い黄砂事例
	2022	3	6	1	那覇	
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
	2022	3	28	1	福岡	

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

いて詳細に状況を解析した。

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
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	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
	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	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	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	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
8	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
	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	

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 $11.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均値 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $11.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均値 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $30.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、煙霧事例におけるその平均は $28.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。金属成分に関しては、黄砂事例時には Al と Fe が顕著に高くなっており、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 (SO_4^{2-}) 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。

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 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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
2	2022	3	26	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。 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。
				五島	0:00-2:00	

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。

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	16
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) 黄砂事例 2 2021 年 5 月 8 日～10 日	33
(3) 黄砂事例 3 2021 年 5 月 25 日～26 日	49
(4) 黄砂事例 4 2022 年 3 月 5 日～6 日	59
(5) 黄砂事例 5 2022 年 3 月 17 日	69
(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	86
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	154
6.2 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	186
8. 今後の課題	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。

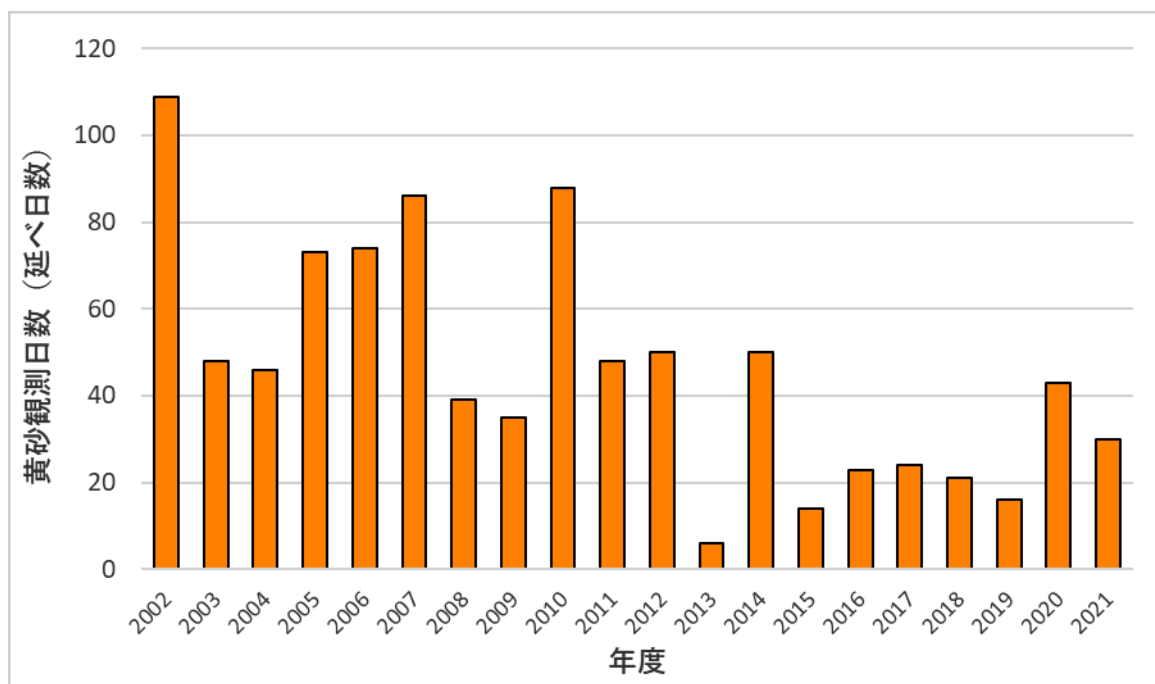


図 2-1-1 黄砂観測日数（延べ日数）の経年変化（年度ごとに整理）

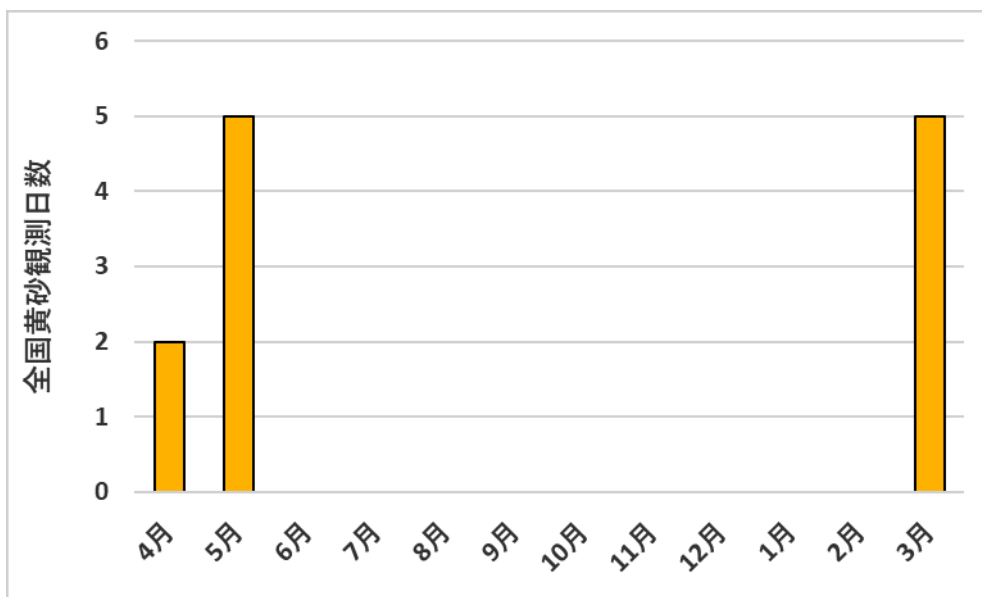


図 2-1-2 黄砂観測日の経月変化 (2021 年度)

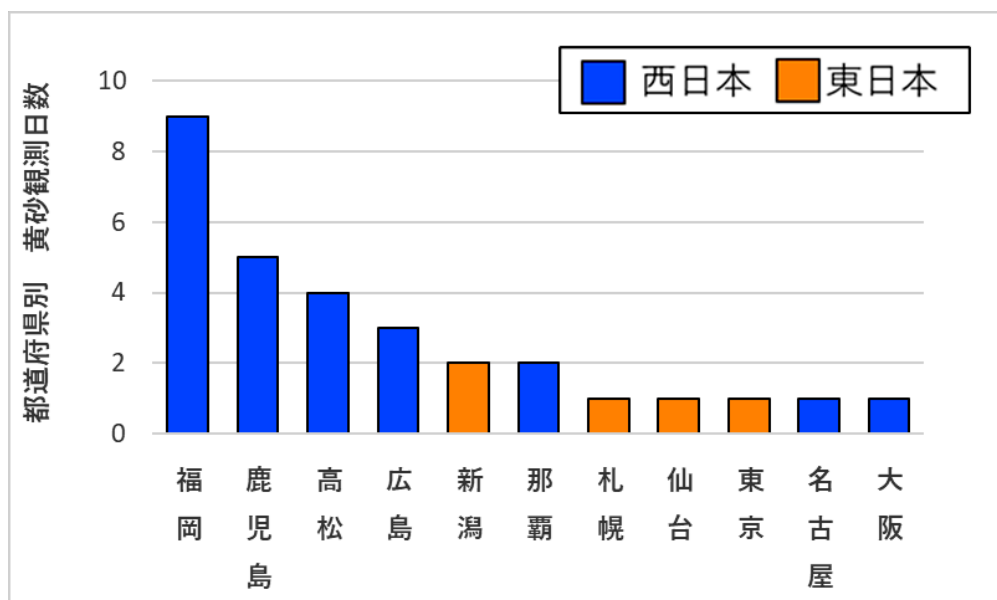


図 2-1-3 黄砂日の地点別日数 (2021 年度)

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

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
	2021/4/18	1	那覇	3:00 ~ 6:30	3:00 ~ 7:00
2	2021/5/8	5	札幌	11:00 ~ 17:00	11:00 ~ 17:00
			新潟	6:55 ~ 24:00	6:00 ~ 24:00
			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
	2021/5/9	8	仙台	8:50 ~ 17:50	8:00 ~ 18:00
			新潟	0:00 ~ 13:00	0:00 ~ 13:00
			名古屋	9:30 ~ 16:30	9:00 ~ 17:00
			広島	5:50 ~ 11:30	5:00 ~ 12:00
			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
	2021/5/10	2	高松	7:15 ~ 20:00	7:00 ~ 20:00
福岡			13:30 ~ 20:00	13:00 ~ 20:00	
3	2021/5/25	4	鹿児島	13:30 ~ 17:50	13:00 ~ 18:00
			広島	13:00 ~ 20:30	13:00 ~ 21:00
			福岡	14:00 ~ 22:00	14:00 ~ 22:00
			鹿児島	14:50 ~ 24:00	14:00 ~ 24:00
	2021/5/26	1	高松	16:30 ~ 23:00	16:00 ~ 23:00
4	2022/3/5	4	鹿児島	0:00 ~ 5:30	0:00 ~ 6:00
			広島	11:10 ~ 18:30	11:00 ~ 19:00
			福岡	11:00 ~ 15:30	11:00 ~ 16:00
			鹿児島	13:30 ~ 20:30	13:00 ~ 21:00
	2022/3/6	1	高松	9:00 ~ 17:00	9:00 ~ 17:00
5	2022/3/17	1	那覇	8:55 ~ 17:00	8:00 ~ 17:00
6	2022/3/17	1	福岡	16:50 ~ 20:50	16:00 ~ 21:00
	2022/3/27	1	福岡	20:40 ~ 24:00	20:00 ~ 24:00
	2022/3/28	1	福岡	0:00 ~ 5:30	0:00 ~ 6:00

(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)

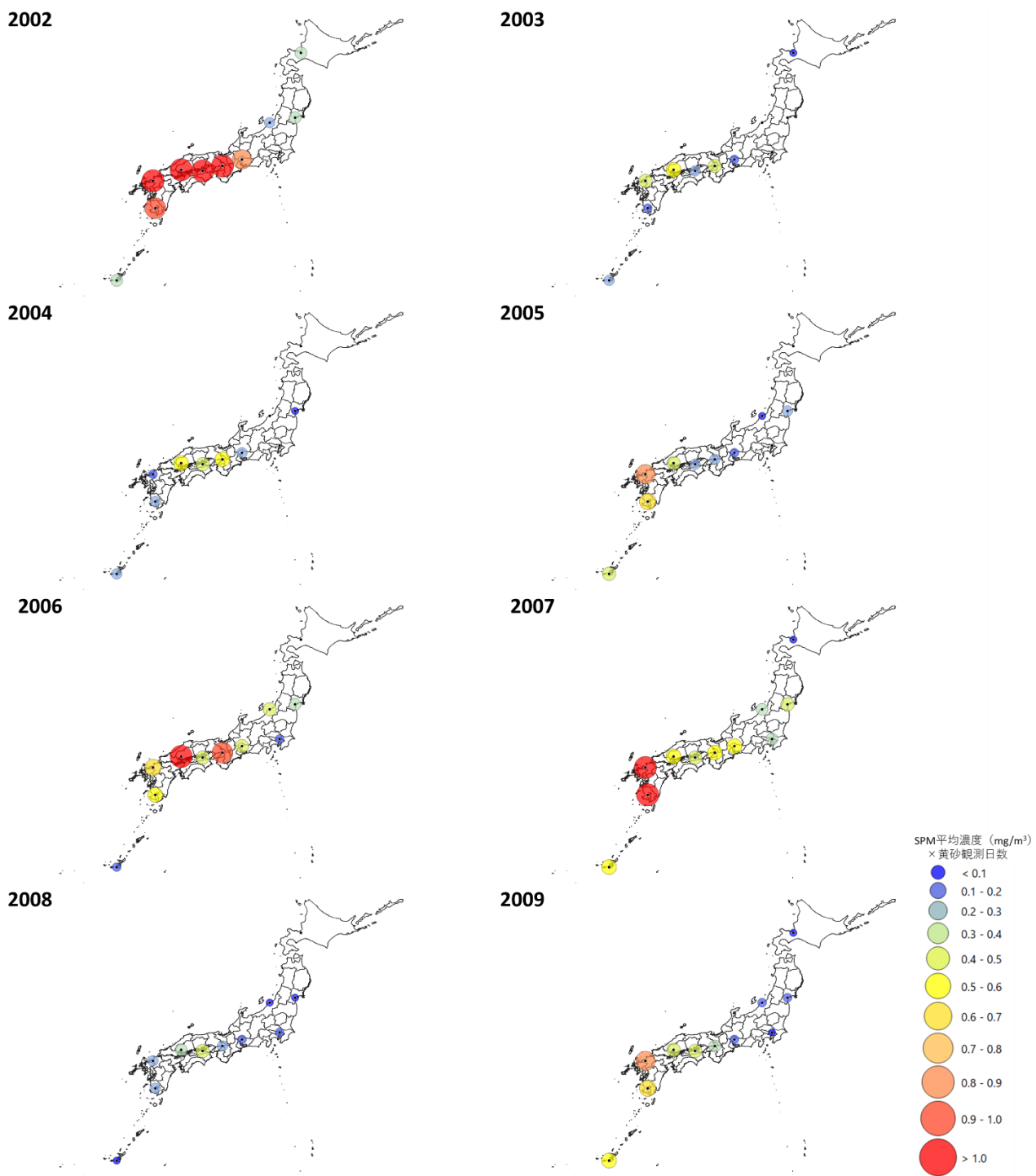


図 2-2-2 黄砂日の SPM 平均濃度と観測日数との積算値 (2002 年度～2009 年度)

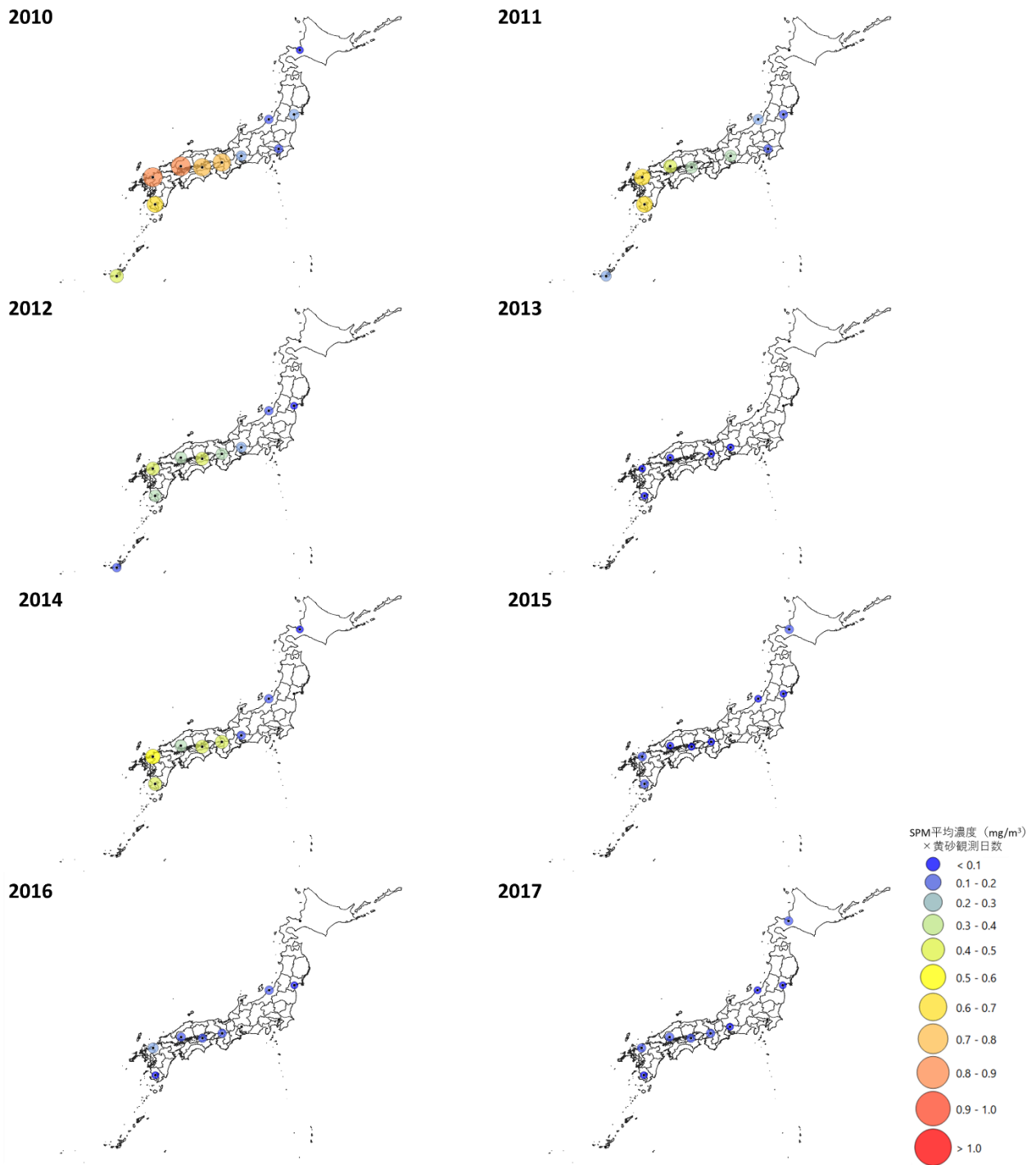


図 2-2-3 黄砂日の SPM 平均濃度と観測日数との積算値 (2010 年度～2017 年度)

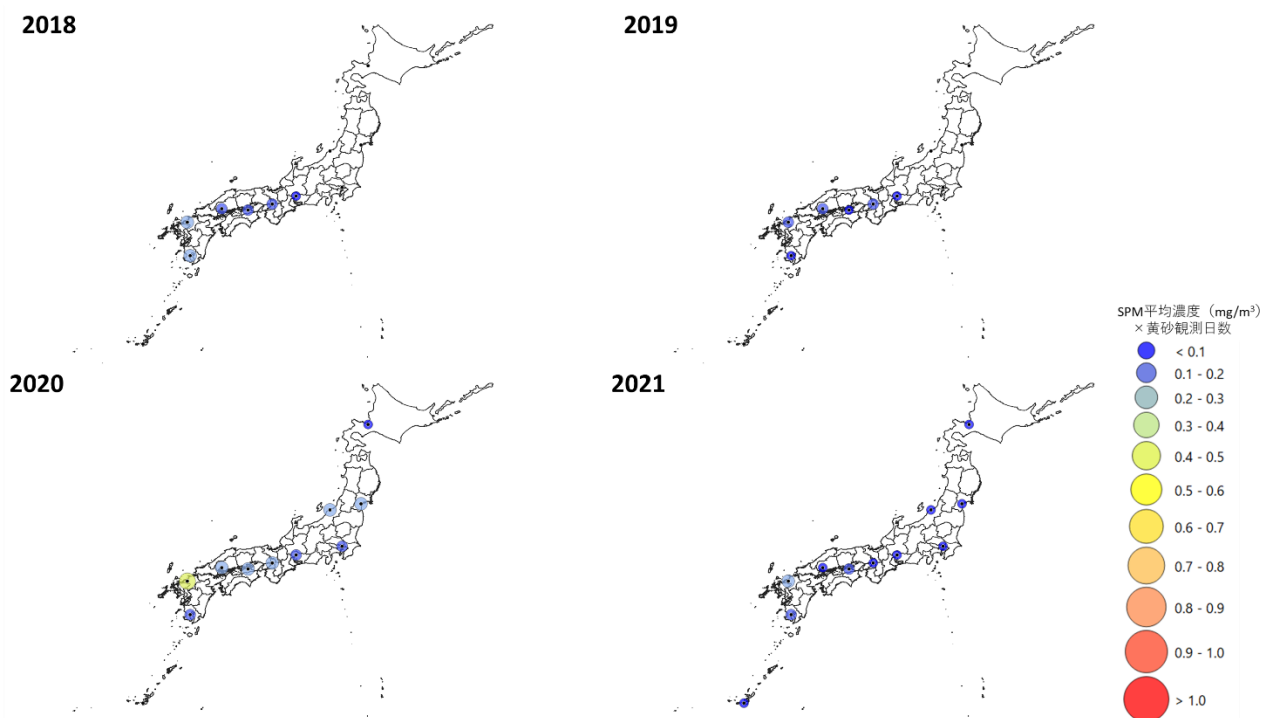


図 2-2-4 黄砂日の SPM 平均濃度と観測日数との積算値 (2018 年度～2021 年度)

(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、全国的に広がりが見られない弱い黄砂であったことが読み取れる。

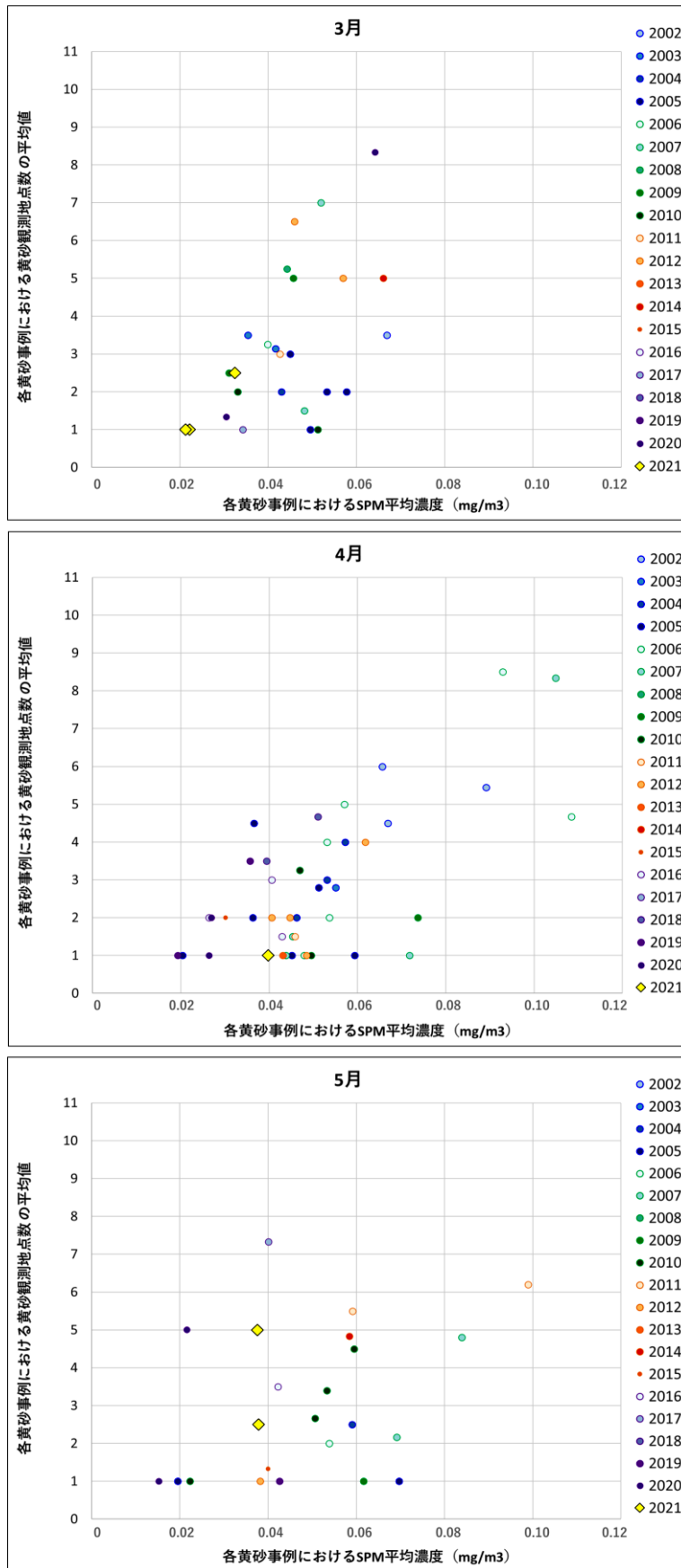


図 2-2-5 2002 年度から 2021 年度に観測された各黄砂事例の黄砂強度 (3,4,5 月)

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¹にて、管区等・地方气象台・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 年計画（2011～2015 年）において、削減目標（SO₂ は 2010 年比 8%、NO_x 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。

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

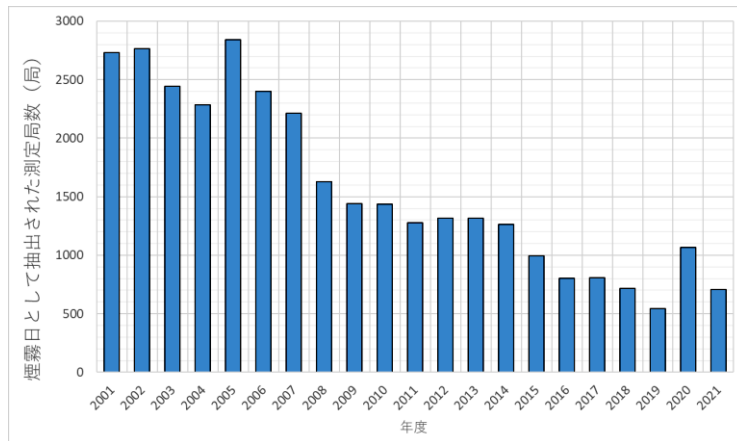


図 3-1-1 2001～2021 年度における煙霧日として抽出された測定局数の推移

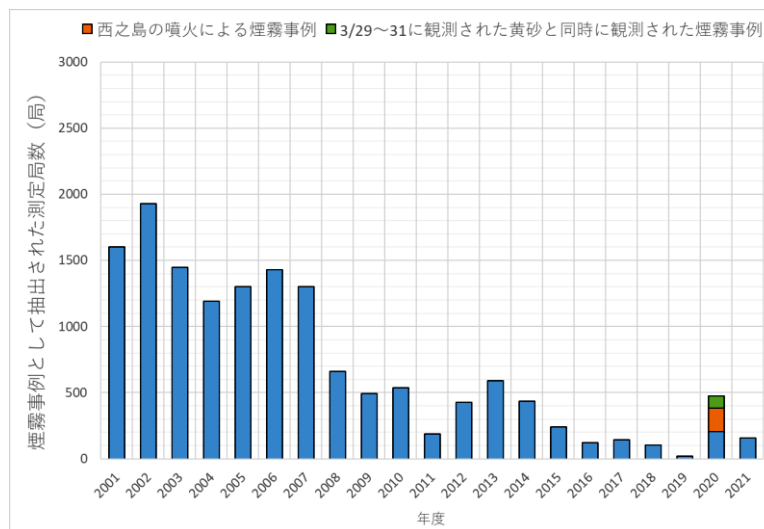


図 3-1-2 2001～2021 年度における煙霧事例として抽出された測定局数の推移

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。

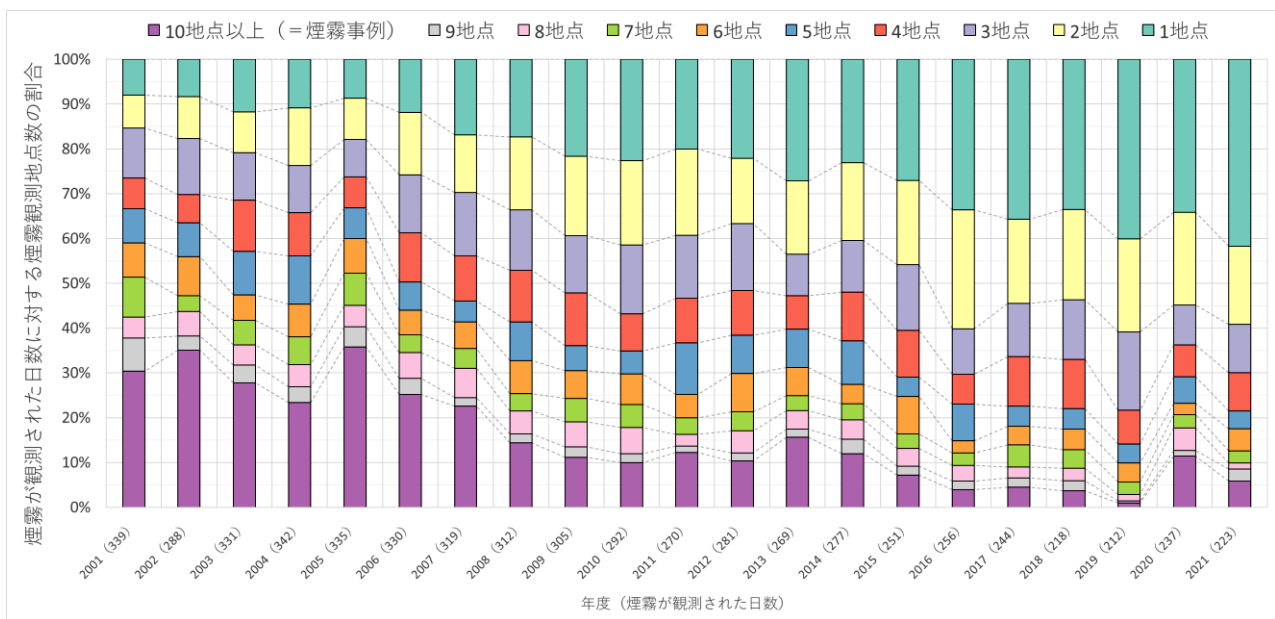


図 3-2-1 2001～2021 年度における煙霧日として抽出された日数における
煙霧観測地点数の割合の推移

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。

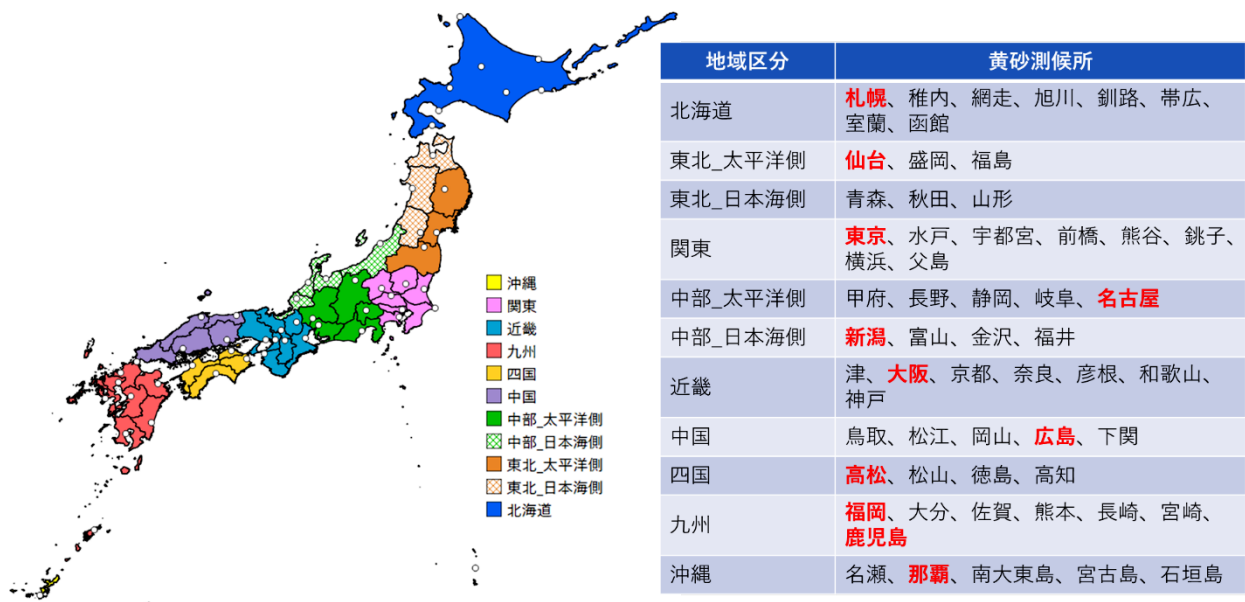


図 3-3-1 本解析で用いる地域区分（赤字：2021 年度時点の黄砂観測地点）

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。

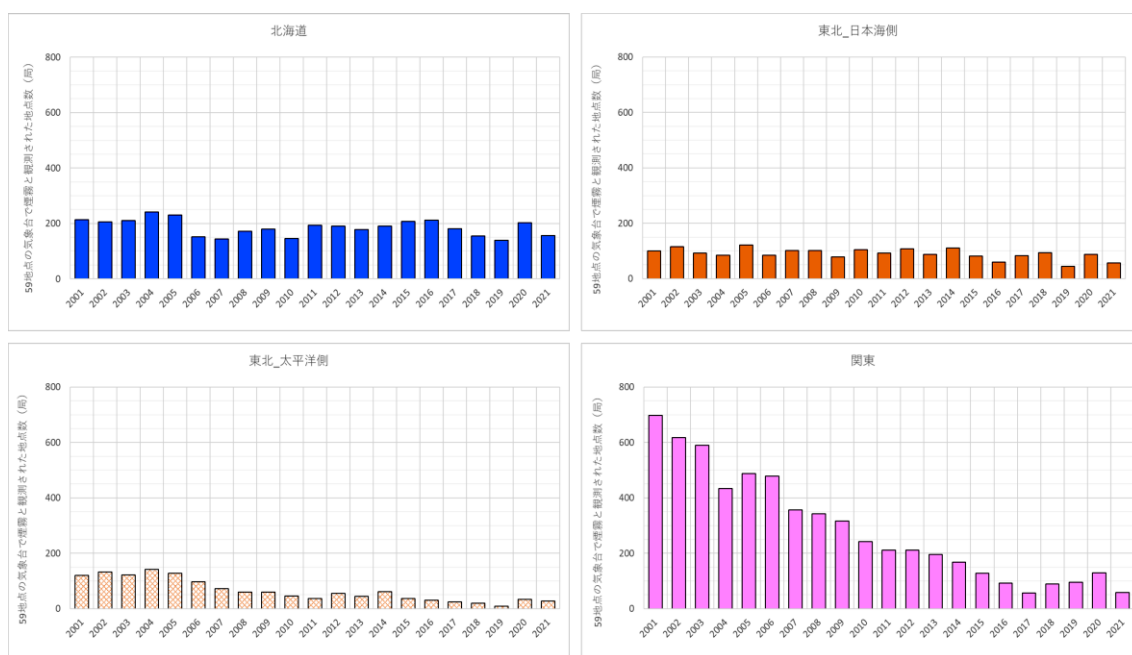


図 3-3-2 東日本における煙霧日として抽出された測定局数の推移



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

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、SO₄²⁻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。

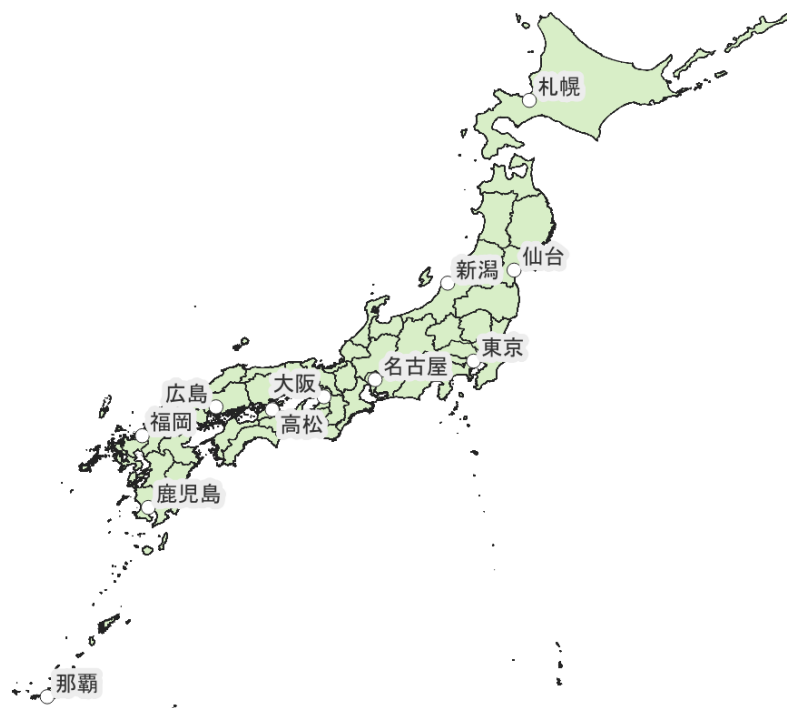


図 4-1-1 黄砂観測 11 地点

(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・空間的变化を確認するため、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詳細データ（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	Dust
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	
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	Slight duststorm
31	Slight or moderate duststorm or sandstorm no appreciable change during the preceding hour	
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	Severe duststorm
34	Severe duststorm or sandstorm no appreciable change during the preceding hour	
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鶴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ときに予測された黄砂等土壌性ダストと硫酸塩の高度 0~1km 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見た。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、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 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 (PM2.5)	fSO ₄ ²⁻ (図表中では fSO4 と表記)	fNO ₃ ⁻ (図表中では fNO3 と表記)
粗大粒子側の成分 (PM10-2.5)	cSO ₄ ²⁻ (図表中では cSO4 と表記)	cNO ₃ ⁻ (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。

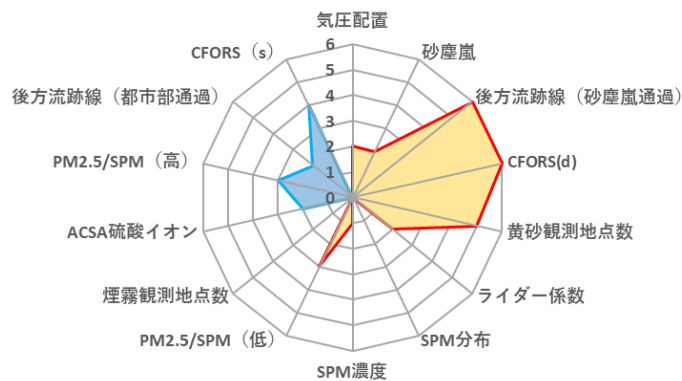


図 4-1-2 黄砂の特徴を示すレーダーチャート (例)

表 4-1-3 各項目の点数化一覧表

項目名	点 数						
	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

項目名	点 数			
	6	4	2	0
気圧配置	◎ (日本南岸近くに前線がある)	○ (日本南岸に前線がある)	△ (日本周辺に前線がある)	× (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)	○ (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)	○ (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)	○ (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)	○ (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 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

事例	No.	期日			黄砂の規模		PM2.5 平均濃度	PM2.5/SPM 平均	PM2.5/PM10 平均
		年	月	日	地点数	SPM 平均濃度			
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