平成 28 年度黄砂飛来状況調査報告書

平成 30 年 3 月

環境省

黄砂問題検討会委員名簿

(50音順)

	氏 名	所属・職名
委員	市瀬 孝道	大分県立看護科学大学 人間科学講座生体反応学研究室 教授
座長	岩坂 泰信	滋賀県立大学 理事
委員	植松 光夫	東京大学 大気海洋研究所 国際連携研究センター 教授
委員	鵜野 伊津志	九州大学 応用力学研究所 地球環境力学部門 教授
委員	大黒 俊哉	東京大学 大学院農学生命科学研究科 生圏システム学専攻 緑地創成学研究室 教授
委員	西川雅高	東京理科大学環境安全センター 副センター長
委員	三上 正男	一般財団法人気象業務支援センター 国際業務課 課長
委員	吉川	岡山大学 地域総合研究センター 特任教授

黄砂実態解明調査解析ワーキンググループ委員名簿

(50音順)

	氏 名	所属・職名
委員	清水 厚	国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター広域大気環境研究室 主任研究員
座長	西川 雅高	東京理科大学環境安全センター 副センター長
委員	早崎 将光	一般財団法人 日本自動車研究所 エネルギ・環境研究部 環境評価グループ 主任研究員
委員	原 由香里	九州大学 応用力学研究所 地球環境力学部門 助教
委員	森 育子	地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所 技師

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、2016 年度に飛来してきた黄砂についてその状況をとりまとめたものである。

2. 黄砂の飛来状況

2.1 黄砂の観測状況

黄砂の観測日数は2003年度から2005年度まで年々増加していたが、2008、2009年度と減少した。 2010年度に再び増加したが、2013年度はここ10年間で最も少ない日数であった。次に黄砂観測日数が少ない年度は2015年度であり、2016年度は3番目に少なかった。

2.2 黄砂日の SPM 濃度

黄砂日の SPM の平均濃度は、西日本の方が北・東日本よりも相対的に高濃度であった。

3. 煙霧の観測状況

煙霧の観測日数は 2005 年度から年々減少の傾向にある。2013 年度はやや増加したが、2014 年度は 2011、2012 年度と同程度になり、2016 年度は最も少ない日数となった。月変化では、5 月が最も 多かった。地点別では、関東と九州で多く観測されていた。

4. 2016 年度における黄砂日の事例解析

4.1 解析方法

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、硫酸イオン濃度時間値、 $PM_{2.5}/SPM$ の比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、小さな $PM_{2.5}/SPM$ の比などがその判断として有効と思われた。また、大気汚染物質の混在状況については、硫酸イオン濃度の上昇、中国沿岸部からの方向を示す後方流跡線、大きな $PM_{2.5}/SPM$ の比などをもとに判断した。

4.2 2016 年度の黄砂

2016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11日である。連続した日を1つの黄砂現象とすると、4事例になる。黄砂4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

2016年度の気象台黄砂日4事例について、各事例の概要は以下のとおりである。

(1) 2016年4月9日~11日

北海道から九州まで全国的に黄砂が観測され、また同時に関東や九州で煙霧が観測された。SPM 濃度の上昇は小さいが、福岡の硫酸イオン濃度が若干高く、大気汚染物質が黄砂とともに飛来したと考えられる。

(2) 2016年4月14日~15日

九州を中心に観測された黄砂であり、同時に四国で煙霧が観測された。ライダーの黄砂消散係数は低い値で SPM も低く、日本に与えた影響は小さいものと思われる。また福岡での硫酸イオン 濃度も低く、大気汚染物質の混在もみられなかった。

(3) 2016年4月23日~26日

本事例は 2016 年度で最も観測地点数が多かった黄砂事例である。東北から九州まで広い範囲で観測され、同時に関東などで煙霧も観測された。福岡での硫酸イオンが高濃度を示すなど大気汚染物質の混在がみられ、また全国的に $PM_{2.5}$ が高濃度となり、複数地点で環境基準値を超過するなどの状況がみられた。

(4) 2016年5月7日~8日

本事例は 2016 年度で 2 番目に観測地点数が多かった黄砂事例である。北日本から九州まで広い範囲で観測され、同時に近畿などで煙霧も観測された。 $PM_{2.5}$ が全国的に高く、環境基準値を超過した地点が多くみられた。またこの期間は、黄砂が観測された複数の地点で $PM_{2.5}$ の成分分析が実施されている。硫酸イオンの濃度は $2\sim7\mu g/m^3$ 程度で全国的に低い状況であった。

5. 2016 年度における煙霧日の事例解析

5.1 2016 年度の煙霧日

2016年度に気象台が日本国内のいずれかの地点で煙霧を観測した日は、合計で15日である。連続した日を1つの煙霧現象とすると、3事例になる。煙霧3事例について詳細にその状況を示した。

(1) 2016年5月24日~31日

5月24日~26日は関東を中心に3~4地点で観測された一方で、5月27日~28日は日本海側を中心に観測されている。本観測期間の前半と後半でその様子が異なっており、前半は関東を中心とした地域的な汚染によるもの、後半は大陸からの越境により日本海側を中心に影響が及んだ事例と考えられる。なお、この期間、岩手、神奈川、福岡で成分分析が行われた。福岡では、5月26日と27日でイオン成分が上昇しており、それぞれの硫酸イオン濃度は $12\mu g/m^3$ 、 $15\mu g/m^3$ であった。

(2) 2016年12月4日~6日

煙霧は、12月4日に関東で2地点、12月5日に九州北部で1地点での観測であったものが、12月6日には、近畿と九州の複数地点となった。

後方流跡線は、福岡では上海からの気流を示しており、この期間の Haze は大陸で非常に広い範囲で観測されている。このとき PM_{2.5} は関東と九州を中心に高濃度を観測し、複数地点で環境基準を超過する状況であった。

(3) 2017年3月5日~8日

煙霧は、3月6日には関東と九州を中心に12地点で観測された。後方流跡線は、福岡が上海や北京からの気流を示しており、この期間の Haze は大陸で非常に広い範囲で観測されている。PM_{2.5}は関東を中心に高濃度を観測し、いくつかの地点で環境基準を超過していた。

6. ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度による黄砂検出の検討

6.1 黄砂消散係数と SPM 濃度

黄砂飛来の判定方法として、ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の時間変動から、黄砂を検出する方法について検討した。気象台黄砂日でのライダー消散係数と SPM 濃度の相関係数などを参考に、相関係数 (0.6 以上)、SPM 濃度 (50µg/m³以上) などの条件を設定した。それをもとに、2016 年度の黄砂飛来の可能性がある日を抽出したところ、長崎で 7 日、松江で 2 日、富山で 1 日抽出された。

このうち、松江、富山で抽出された日は、いずれも気象台で黄砂が観測された日であった。長崎で抽出された日のうち、気象台で黄砂が観測された日は 4 月 10 日のみで、他の 6 日は気象台による黄砂の観測はなかった。

6.2 ライダーによる黄砂検出日の状況

長崎のライダーによる抽出は7日であり、このうち4月10日は気象台により黄砂が観測(黄砂事例1)されている。黄砂観測日以外で、長崎でライダーによる黄砂日とされた6日の状況について、後方流跡線などの解析を行った結果、2016年9月11日、2017年2月13日以外は概ね黄砂飛来の様子を示していた。

6.3 黄砂の検出条件の検討

SPM の条件のみを 40µg/m³、30µg/m³ と下げて、黄砂の検出の有無を検証した。その結果、このような条件でも、黄砂の様子が観察され、小規模黄砂検出への適用の可能性がみられた。

7. 黄砂・煙霧日の PM₂₅ 濃度

7.1 黄砂・煙霧時における PM_{2.5}環境基準超過

2016 年度の黄砂日における $PM_{2.5}$ 平均濃度は $23.9 \mu g/m^3$ 、日平均値 $35 \mu g/m^3$ の超過率は 6.1%で、煙霧日における平均濃度 $21.8 \mu g/m^3$ 、日平均値 $35 \mu g/m^3$ の超過率は 6.8%であり、黄砂・煙霧時の $PM_{2.5}$ 濃度上昇を示していた。しかし、前年度の黄砂時 21.0%、煙霧時 17.7%に比べると大幅に減少していた。黄砂では西日本の環境基準超過が多く、煙霧では関東と九州で日数が多い。

7.2 PM_{2.5}環境基準値を超過した日で黄砂もしくは煙霧が観測された地点の PM_{2.5}成分濃度

2016 年度の成分分析調査結果のうち、 $PM_{2.5}$ の日環境基準($35\mu g/m^3$)を超過しており、かつ黄砂もしくは煙霧が観測された地点を抽出し、成分の項目別に黄砂日と煙霧日で比較した。黄砂時に上昇した項目は、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、Al、Mn、Fe などで、煙霧時に上昇した項目は、 SO_4^{2-} 、Se、Zn、Cr、Cl、 NO^3 、OC、EC などであり、黄砂時と煙霧時で上昇の項目が異なっていた。

7.3 黄砂時・煙霧時 PM_{2.5}の PMF 法による発生源寄与推定

黄砂・煙霧時に PM_{2.5} 成分濃度調査が実施された期間に、黄砂・煙霧が観測された日、地点を選択して PMF 解析を行った。因子数を 7 としたところ、各因子は、それぞれ黄砂を含む土壌、重油燃焼、二次硫酸塩、鉄鋼・石炭、二次硝酸塩、バイオマス燃焼・自動車排ガス、海塩が想定された。黄砂時には土壌の上昇がみられた。煙霧時における PM_{2.5} 濃度別の寄与は、二次硫酸塩の割合が大きくなる場合と二次硝酸塩・バイオ自動車の割合が大きくなる場合に分かれた。

8. 砂塵嵐発生と黄砂観測日数の減少について

我が国における黄砂の観測日数は、近年減少傾向にある。ここでは、日本で黄砂が観測される条件について検討を行ったうえで、黄砂の減少の要因を探る。日本で黄砂が観測される条件として、黄砂の発生源とその輸送経路の観点から、砂塵嵐発生頻度と日本での黄砂観測の関係および、後方流跡線軌跡と日本での黄砂観測の関係について検討を行った。

8.1 条件の設定

解析の対象期間は2002~2016年とし、対象月は3~5月とした。後方流跡線の起点位置は、福岡、富山、札幌の3地点とした。砂塵嵐の発生は世界気象資料を用いて集計を行った。また砂塵嵐発生地域について、砂塵嵐の発生回数と日本からの後方流跡線の通過回数から、特に日本に影響を与えやすい地域を絞り、北緯40~50°、東経100~120°を「黄砂発生主要地域」として集計した。

8.2 集計結果

上記の条件に従って、砂塵嵐の発生、日本からの後方流跡線通過状況、日本の黄砂観測状況、日本の SPM について、表にまとめた。

8.3 日本での黄砂観測と砂塵嵐発生頻度の関係

黄砂発生主要地域における砂塵嵐の発生日数と、日本での黄砂観測日数の経年推移は、ある程度の 関連性がみられ、大陸で砂塵嵐が多いほど、日本で黄砂が観測される日数が多くなる傾向が示唆され た。

8.4 日本での黄砂観測と後方流跡線の関係

黄砂発生主要地域における後方流跡線は全体でみると、この 15 年間で大きく変動している様子は みられず、黄砂観測との明確な関連は確認できない。ただ、福岡、富山、札幌の地点別にみると、日 本の西側に位置するほど後方流跡線通過日数と黄砂観測日数がともに多い傾向がみられるなど、後方 流跡線通過日数と黄砂観測日数の関連性がうかがわれる。

8.5 砂塵嵐発生頻度および後方流跡線軌跡と日本での黄砂観測との関係

黄砂発生主要地域の中で、さらにどの地域がより強い影響を与えているかについて、後方流跡線の 通過と砂塵嵐の発生を関連付けて検討した結果、内モンゴル周辺(地域3)が示唆された。

日本での黄砂観測は、気流の流れの状況によっても変化するものの、その主要な要因として砂塵嵐の発生状況が大きく関与していると考えられる。環境省では、従来から日中韓の3カ国で黄砂の共同研究を推進しており、発生源対策として植生が発生源地域における砂の固定化や防風に有効な手段であるとし、植生の回復について検討を進めている。また中国でも積極的な植林が行われており、砂塵嵐発生地域における植生が回復している報告もある。日本の黄砂観測日の減少は、このような発生源エリアにおける植生の回復も一因と考えられる。

8.6 砂塵嵐及び気流の状況と日本での黄砂観測状況

大陸における砂塵嵐発生から日本の黄砂観測を一体的にみるために、特徴的な事例として3つの例を挙げ、砂塵嵐の発生状況と SPM 濃度別に色分けした福岡・富山・札幌の後方流跡線を同時に示す図を作成した。一つ目の例は、大陸における砂塵嵐の発生と後方流跡線の軌跡が一致する場合で、日本で黄砂が観測される最も典型的なものである。二つ目の例は、砂塵嵐が発生したとしても後方流跡線の軌跡が一致していない場合で、このとき日本で黄砂が観測されることは稀である。三つ目の例として、大陸における砂塵嵐の発生と後方流跡線の軌跡が一致し、かつ SPM の上昇が観測される場合でも日本で黄砂が観測されないことがある。これは、黄砂の現象が明確でなく見逃された場合であるが、事例としては少ない。

黄砂飛来状況報告書 目次

1. 調査目的 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1
2. 黄砂の観測状況 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2.1 黄砂の観測状況	1
2.2 黄砂日の SPM 濃度 ···································	2
3. 煙霧の観測状況 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
4. 2016 年度における黄砂日の事例解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
4.1 黄砂日の事例解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
4.2 解析方法	9
4.3 2016 年度の黄砂 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
4.4 黄砂日の解析結果	13
(1) 黄砂事例 1 2016 年 4 月 9 日~11 日 ······	13
(2) 黄砂事例 2 2016 年 4 月 14 日~15 日 ·····	19
(3) 黄砂事例 3 2016 年 4 月 23 日~26 日 ·····	25
(4) 黄砂事例 4 2016 年 5 月 7 日~8 日 ······	32
5. 2016 年度における煙霧日の事例解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
5.1 煙霧日の事例解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
5.2 2016 年度の煙霧日 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39
5.3 煙霧日の解析結果	40
(1) 煙霧事例 1 2016年5月24日~31日	40
(2) 煙霧事例 2 2016年12月4日~6日	48
(3) 煙霧事例 3 2017 年 3 月 5 日~8 日 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	52
6. ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度による黄砂検出の検討 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	56
6.1 黄砂消散係数と SPM 濃度 ·······	56
6.2 ライダーによる黄砂検出日の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
6.3 黄砂の検出条件の検討	61

7. 黄码	沙・煙霧日の PM _{2.5} 濃度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
7. 1 7. 2	黄砂時・煙霧時における PM _{2.5} 環境基準超過 PM _{2.5} 環境基準値を超過した日で	64
	黄砂もしくは煙霧が観測された地点の PM2.5 成分濃度・・・・	66
7. 3	黄砂日および煙霧日で PM _{2.5} 環境基準値を超過した日の PM _{2.5} 発生源寄与推定 · · ·	68
8. 砂屋	 塵嵐発生と黄砂観測日数の減少について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
8. 1	条件の設定	71
8. 2	集計結果	74
8.3	日本での黄砂観測と砂塵嵐発生頻度の関係	76
8.4	日本での黄砂観測と後方流跡線軌跡の関係	77
8.5	砂塵嵐発生頻度および後方流跡線軌跡と日本での黄砂観測との関係 ・・・・・・・・	78
8.6	砂塵嵐及び気流の状況と日本での黄砂観測状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	80
9. 今征	後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
会 孝 立	*献リスト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	85

1. 調査目的

黄砂は、従来から黄河流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が、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、黄砂の飛来と同時に、中国大陸における産業活動に伴う人為的発生源から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 1~11)に資することを目的として、2016 年度に飛来してきた黄砂についてその状況をまとめたものである。

2. 黄砂の観測状況

2002 年度から 2016 年度の気象台発表の黄砂の観測日数について経年変化、黄砂地点別の飛来回数などを整理した。

また、浮遊粒子状物質 (SPM) 濃度と黄砂現象の関係を比較検討するために、2001 年から 2016 年にかけて、気象台が発表している黄砂観測日において都道府県ごとの SPM 平均濃度、及び都道府県ごとの同平均濃度に気象台の黄砂観測日数を乗じて算出し、各都道府県における黄砂現象を被る概略的な量的指標の推移を示した。

2. 1 黄砂の観測状況

2002 年度から 2016 年度までの 15 年間について、気象台発表の黄砂日の年間延べ日数を図 2-1-1 に示している。2016 年度は、2015 年度に比べやや増加している。図 2-1-2 には、2016 年度の黄砂延べ日数の経月変化を示している。

2016年度の観測地点毎の黄砂日数を、多い順で図 2-1-3 に示している。上位は、北信越・中国・九州地方での出現が多い。

2002~2016 年度の黄砂日数の総計(図 2-1-4)でみると、上位は九州・中国地方で占められている。

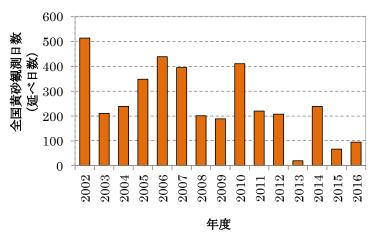


図 2-1-1 黄砂観測日数の経年変化

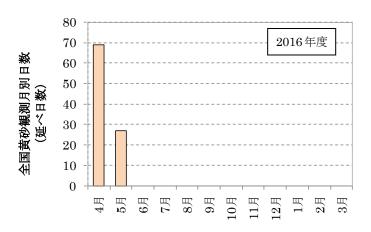


図 2-1-2 黄砂観測日数の経月変化(2016 年度)

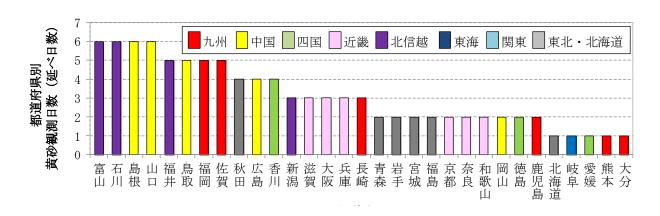
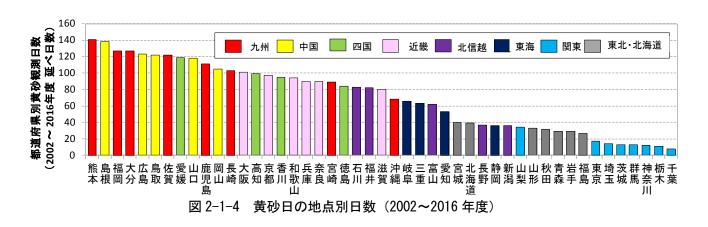


図 2-1-3 黄砂日の地点別日数 (2016 年度)



2. 2 黄砂日の SPM 濃度

SPM 濃度と黄砂現象の関係を比較検討するために、2003 年から 2016 年について、気象台が発表している黄砂観測日における都道府県ごとの SPM 平均濃度、及び都道府県ごとの同平均濃度に気象台の黄砂観測日数を乗じたものを、図 2-2-1(1)~(4)に示している。気象台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、また、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現象を被る概略的な量的指標を示すと考えられる。

2016年は、それ以前と同様に、黄砂日の平均濃度は全体的に西側が東側より、相対的に高くなっている。

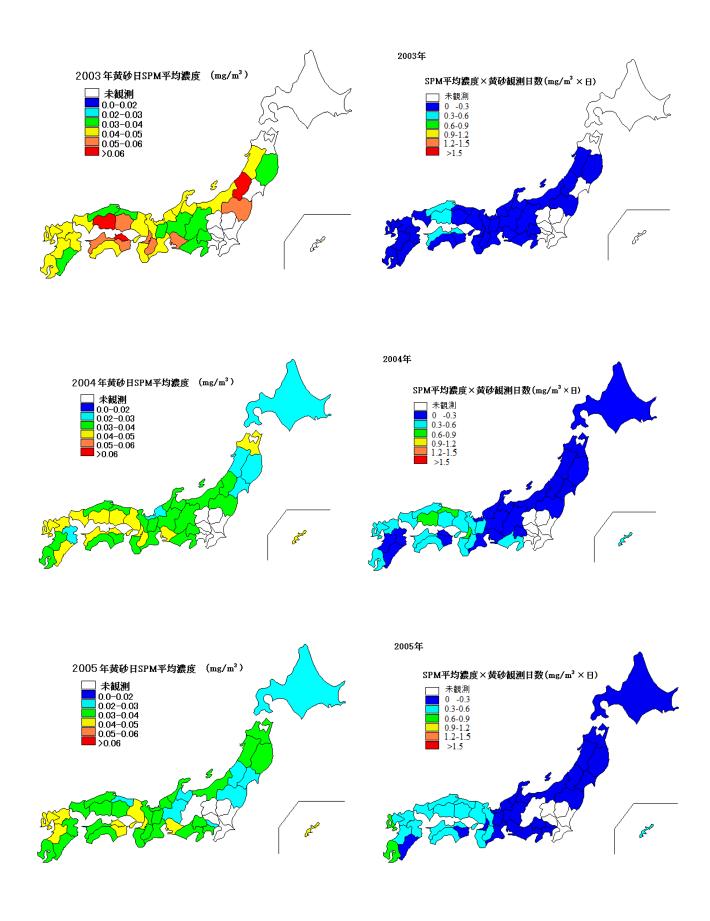


図 2-2-1(1) 黄砂日の SPM 平均濃度(左)と観測日数との積算値(右)

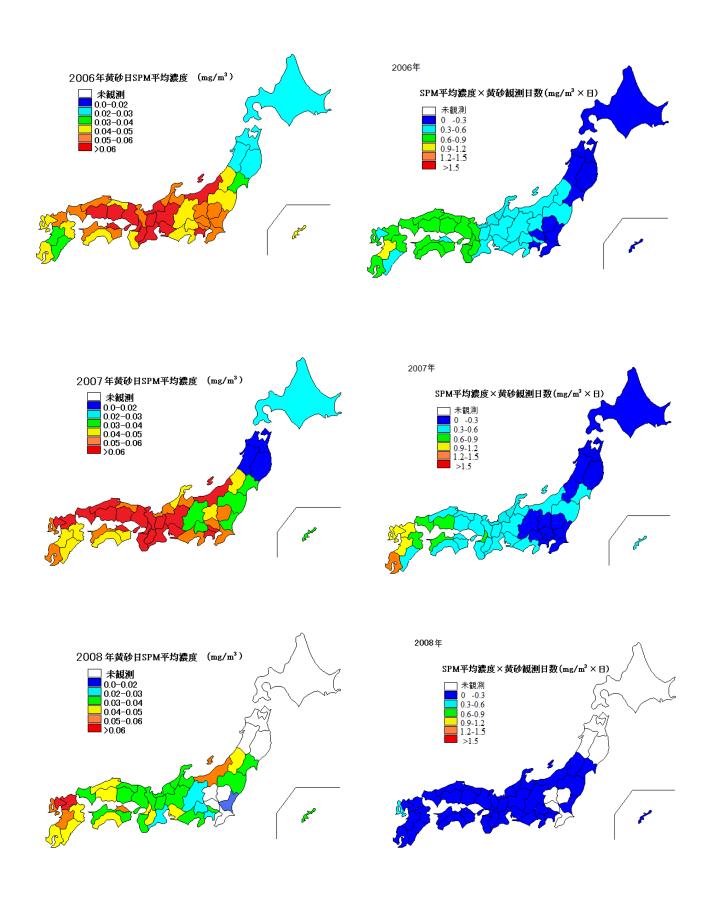


図 2-2-1(2) 黄砂日の SPM 平均濃度(左)と観測日数との積算値(右)

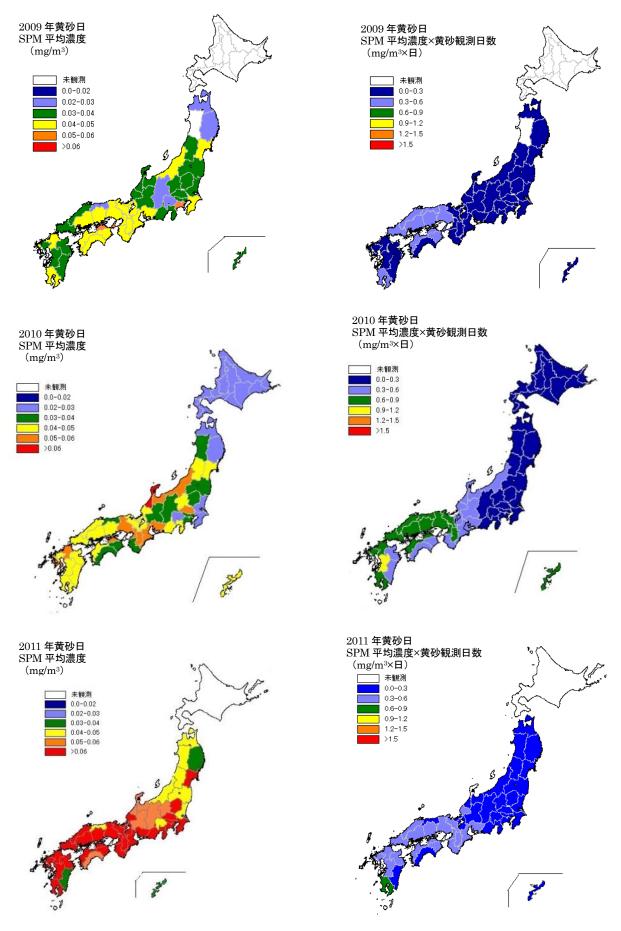


図 2-2-1(3) 黄砂日の SPM 平均濃度(左)と観測日数との積算値(右)

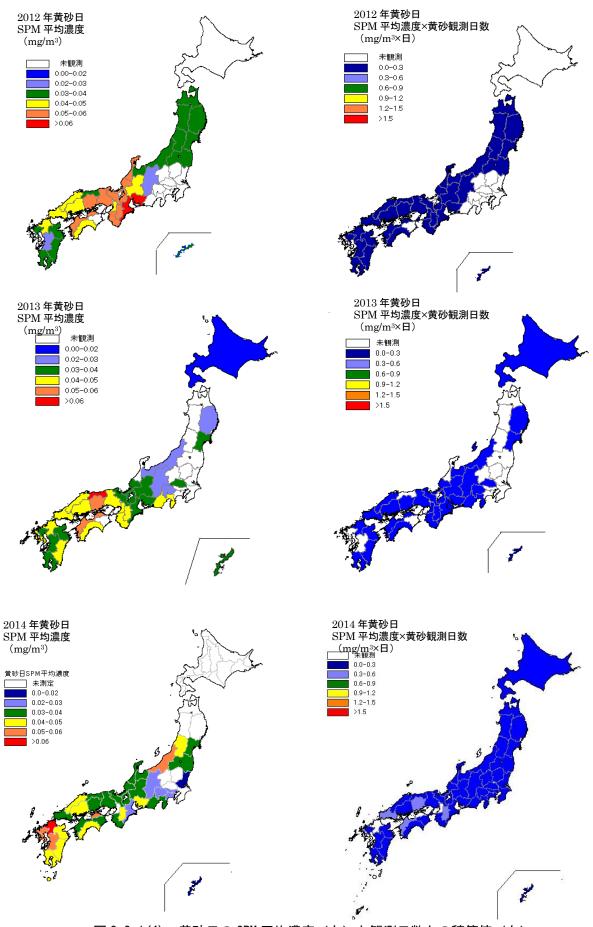


図 2-2-1(4) 黄砂日の SPM 平均濃度(左)と観測日数との積算値(右)

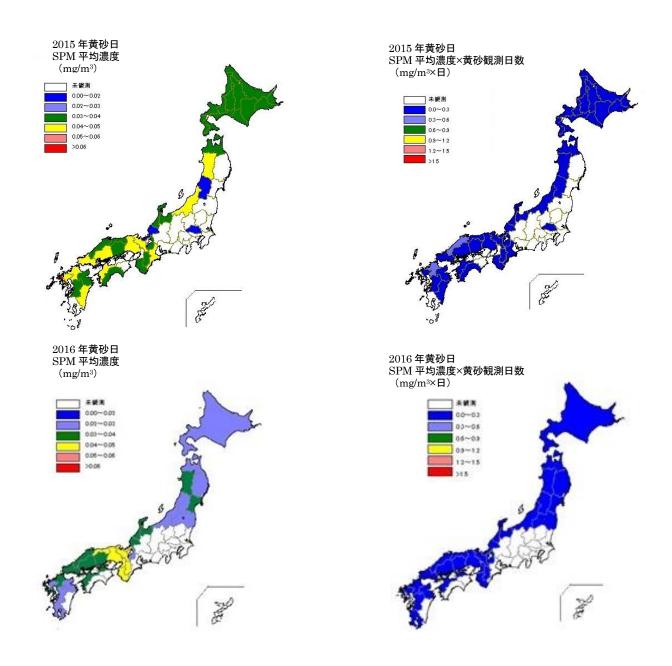


図 2-2-1(5) 黄砂日の SPM 平均濃度(左)と観測日数との積算値(右)

3. 煙霧の観測状況

黄砂と同様に、2003 年度から 2016 年度までの 14 年間について、気象台観測の煙霧日の年間延べ日 数を図 3-1 に示している。

図 3-2 には、2016 年度の煙霧延べ日数の経月変化を示している。



図 3-1 煙霧の経年変化



2016年度の観測地点毎の煙霧日数を、多い順で図3-3に示している。

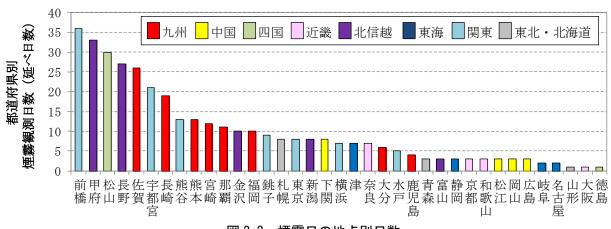


図 3-3 煙霧日の地点別日数

4. 2016 年度における黄砂日の事例解析

4. 1 黄砂日の事例解析

黄砂は、気象庁において「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り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な黄砂は記録されている。一般に、日本へ飛来してくる黄砂は、大陸の黄土地帯で低気圧が発生し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。これまでの調査において、年度別に各黄砂事例の解析を行っており、黄砂時には概ね次のような特徴がみられることが分かっている。

- ・後方流跡線がモンゴル付近からの大気の流れを示す
- ・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 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
- PM25/SPMの比が小さくなる(粗大粒子の割合が大きくなる)

ここでは、これまでの調査に引き続き、2016 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(Chemical weather FORecasting System)の予測結果、 $PM_{2.5}$ 日平均値全国分布、 $PM_{2.5}$ /SPM の比、硫酸イオン濃度などである。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による評価を実施した。

詳細は、次項のとおりである。

4. 2 解析方法

(1) 黄砂観測地点

黄砂観測地点は、気象台が黄砂を観測したと発表した地点を示した ¹³⁾。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」)を算出した。また、気象台から煙霧の観測が記録されている地点はそれを記している。

(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 14 。また、世界気象資料 $^{15)}$ 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 33,34,35 を Severe duststorm、 30,31,32 を Slight duststorm、 07,08,09 を Dust、 04 を Smoke、 05 を Haze、 06 を Widespread dust として分類した。

(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 12 から地域的に高濃度になっている時間の値を地図上に示した。

(4)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 19° 。起点は、 SPM 濃度が高くなった地点を考慮して決め、後方 72 時間とした。出発高度は、SPM 濃度との関連を 評価するため地表面に近い 500m とし、1 日の時間毎の流跡線を一括して地図上に表示した。表示した 計算結果のうち、地表付近のみを経由する流跡線については、解析に用いないようにした。

(5) 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。本報告書内の図は、国立環境研究所で定常運用を行っているバージョン ¹⁸⁾ (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 0~1km における平均重量 濃度の推定分布を表示している。

(6) ライダー

ライダー観測結果は、国立環境研究所公開のライダー観測結果でみることができる ¹⁷⁾。国立環境研究所ではライダー観測結果から球形粒子(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」)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。

(7) 硫酸イオン等の大気汚染物質

硫酸イオンは大気汚染物質の飛来を観察するために、硫酸イオンの1時間値を随時使用した。硫酸イオンの1時間値は、福岡県が太宰府市(福岡県保健環境研究所)で測定しているデータを提供いただいた(機種: SPA 5020i Thermo Fisher Scientific 社)。ただし、一部の期間は機器の故障により、欠測となったため、その期間については、九州大学応用力学研究所設置の ACSA のデータを提供いただいた。硫酸イオン以外の項目は、そらまめくんのデータを用いた。

(8) PM_{2.5} 日平均濃度

 $PM_{2.5}$ 日平均濃度による評価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。 $PM_{2.5}$ 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、 $PM_{2.5}$ 濃度、SPM 濃度及び $PM_{2.5}$ /SPM の比の経時変化をグラフで表し、粗大粒子と微小粒子の比をみることで、黄砂の影響を観察した。また、中国での $PM_{2.5}$ 濃度は、アメリカ国務省が公表しているデータを使用した 20 。

(9) PM_{2.5} 成分濃度

全国の自治体で測定されている $PM_{2.5}$ 成分濃度調査について、黄砂煙霧の時期・地点と重なっている 場合は、そのデータを解析に使用した。

(10) レーダーチャートによる評価

2016 年度黄砂飛来状況調査報告書で検討したレー ダーチャートによる黄砂の評価を行った。表 4-2-1 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 7 項目について、それぞれの満点 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、それぞれの指数とする。この指数が典型的な黄砂 の状況との差、及び汚染質混在の影響の大きさの程度 を測る目安になる30%。

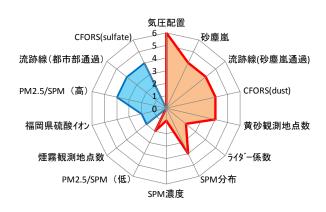


図 4-2-1 黄砂の特徴を示すレーダー チャート (例)

表 4-2-1 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	>30	20~30	15~20	10~15	5~10	0~5	0				
SPM 濃度	>300	200~300	150~200	100~150	50~100	0~50	0				
PM _{2.5} /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				
PM _{2.5} /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				
福岡県硫酸イオン	>30	25~30	20~25	15~20	10~15	5~10	0				

1五日 4	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)	〇(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)	〇(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)	○ (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)	O(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)	〇(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)	Δ (日本に sulfate 分布がわずかにある)	×(左記以外)					

備考)1. 項目名には、黄砂に関連するものは橙、大気汚染に関連するものは青で色分けしている。 2. 定性的な項目は、表中の目安に概ね従って、点数化した。

4. 3 2016 年度の黄砂

2016年度に日本で観測された黄砂は表 4-3-1 のとおりで、4 事例、計 11 日であった。

最も黄砂規模が大きいものは事例 3 の 2016 年 4 月 23 日から 26 日にかけて観測された黄砂で、次いで事例 4 の 2016 年 5 月 7 日から 8 日にかけて観測された黄砂である。なお、 $PM_{2.5}/SPM$ ($SPM_{2.0}/SPM$ 0 以上)は、いずれの黄砂観測日も 0.6 から 0.7 程度であった。

表 4-3-1 2016 年度の黄砂日一覧

(SPM および PM_{2.5} 濃度:µg/m³)

事 N-	NT.	期日			黄砂の規模					DM. JCDM	PM _{2.5} /SPM		
事例	No.	年	月	目	地点数	SPM 平均 濃度	県数	SPM 積算	SPM 積算 合計	平均 濃度	PM _{2.5} /SPM	(SPM20以上)	
	1	2016	4	9	4	26.8	3	80.4		16.4	0.70	0.63	
1	2	2016	4	10	12	28.8	12	345.6	478.6	21.3	0.75	0.73	
	3	2016	4	11	2	26.3	2	52.6		19.5	0.78	0.72	
2	4	2016	4	14	3	20.3	3	60.9	158.1	14.1	0.74	0.67	
2	5	2016	4	15	5	24.3	4	97.2	190.1	18.7	0.78	0.75	
	6	2016	4	23	7	33.4	7	233.8		23.7	0.73	0.73	
3	7	2016	4	24	18	41.2	18	741.6	1629.1	27.6	0.67	0.67	
3	8	2016	4	25	17	39.1	16	625.6	1029.1	26.2	0.67	0.67	
	9	2016	4	26	1	28.1	1	28.1		17.8	0.64	0.64	
4	10	2016	5	7	19	32.0	17	544.0	890.5	20.9	0.67	0.66	
4	11	2016	5	8	8	49.5	7	346.5	0.060	29.9	0.78	0.61	

[%]「 $PM_{2.5}/SPM$ 」は黄砂が観測された県の測定局毎に $PM_{2.5}/SPM$ を算出し、それを平均したものであり、表中の「SPM 平均濃度」と「 $PM_{2.5}$ 平均濃度」から算出したものではない。

^{※「} $PM_{2.5}$ /SPM(20 以上)」は、「 $PM_{2.5}$ /SPM」で抽出した測定局データのうち、SPM 日平均値が $20\mu g/m^3$ 未満のデータを除外したうえで、平均値を算出したものである。

4. 4 黄砂日の解析結果

(1) 黄砂事例1(2016年4月9日~11日)

本事例では、黄砂が3日間にわたって観測された。黄砂の観測地点は、4月9日は東北と北海道の4地点で、翌日の4月10日には東北から九州まで非常に広い範囲の12地点であった。また、同期間に煙霧が1地点から4地点で観測された。天気図では、前線が日本南岸に位置していた。

SPM は、特に4月10日で高濃度がみられ、日本海に面した地域を中心に上昇しており、大陸での砂塵嵐の状況は、日本で黄砂が観測される2日前の4月7日から数日にわたって発生している様子がみられた。この期間の後方流跡線について、4月9日における札幌からの後方流跡線は、大陸の砂塵嵐発生地域からの経路を示していたが、翌日には砂塵嵐発生地域から外れた経路を示していた。福岡の後方流跡線は、この事例の期間において大陸の砂塵嵐発生地域からの経路を示していた。

CFORSでは、dust、sulfate ともに大陸からの影響が日本全国に及ぼしている様子を示していた。また、ライダーは、黄砂消散係数がいずれの地点も 0.05/km 以上で黄砂の飛来を示した。本事例の 3 日間の黄砂消散係数の推移をみると、富山では 3 日間のうちの前半で、松江ではいずれも、長崎では後半で高い。

福岡県での大気汚染の状況について、4 月 10 日から 4 月 11 日にかけて、 $PM_{2.5}$ 、硫酸イオン、オキシダントが同期して上昇している様子がみられた。特に硫酸イオンは、 $10\mu g/m^3$ を超える高濃度であり、大気汚染物質が黄砂とともに飛来したと考えられる。

 $PM_{2.5}$ の日平均値は、この3日間、西日本を中心に高濃度が観測された。4月10日から11日では、九州で環境基準を超過した地点が複数でみられた。中国における $PM_{2.5}$ 濃度の1時間値をみると、本事例前の4月7日に北京で $200\mu g/m^3$ を超える高濃度が数時間にわたりみられた。

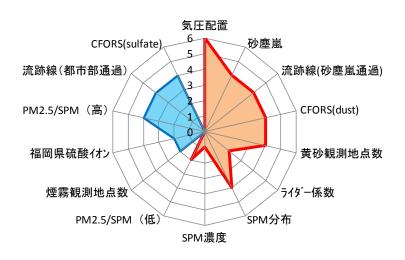
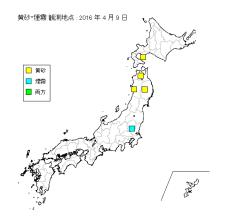


図 4-4-1-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-4-1-1 黄砂·煙霧観測地点

年月月	日	地点		黄砂観測地点名									
	Н	数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	9	4	室蘭	青森	秋田	盛岡							
2016	,	10 10	10	秋田	盛岡	山形	福島	新潟	金沢	富山	福井	岐阜	松江
2016 4 10	10	10 12	下関	福岡									
	11	2	下関	福岡									

年月	日	地点		煙霧観測地点名					
	Н	数	1	2	3	4			
		9	1	宇都宮					
2016	4	10	2	京都	佐賀				
		11	4	京都	松山	長崎	宮崎		



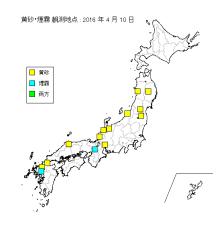
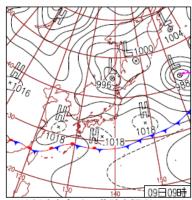
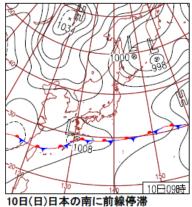




図 4-4-1-2 黄砂·煙霧観測地点



9日(土)今年初めて黄砂を観測 東日本〜東北は高気圧に覆われて晴れ。 盛岡、秋田、青森、室蘭で黄砂。沖縄・ 奄美は前線が停滞し雨で、沖縄県久米島 では61mm/1h。北海道は低気圧通過で雨 や雪。

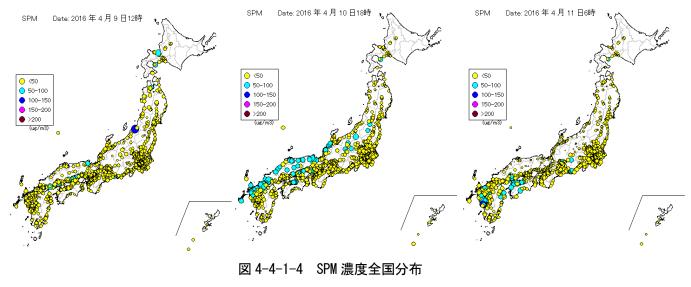


旧口(ロ)日本の附に削減停滞 上空の雲に覆われ、北海道を除き日照少 ない。沖縄や九州南部は雨が激しく、沖 縄県胡屋で55mm/1h。東北以南の日本海 側中心に各地で黄砂。山形市サクラ満開 は史上2位の早さ。

1002 1000 1002 1000 1002 1000 11002 1000

11日(月)北日本は雪 沖縄は前線による激しい雨。北陸~北日 本は強い寒気により雪や雨。青森では3 年ぶりの4月に積雪2cm。盛岡市でサクラ 開花。平年より10日早く、史上2位タイ。

図 4-4-1-3 天気図



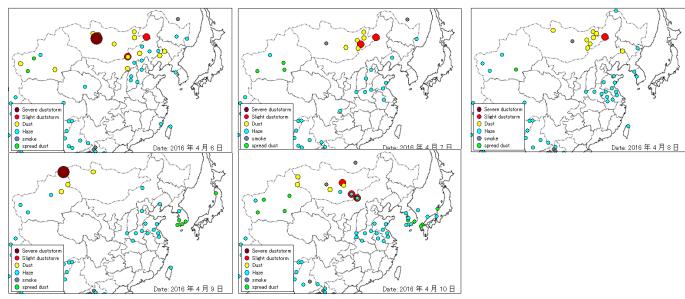


図 4-4-1-5 砂塵嵐発生状況

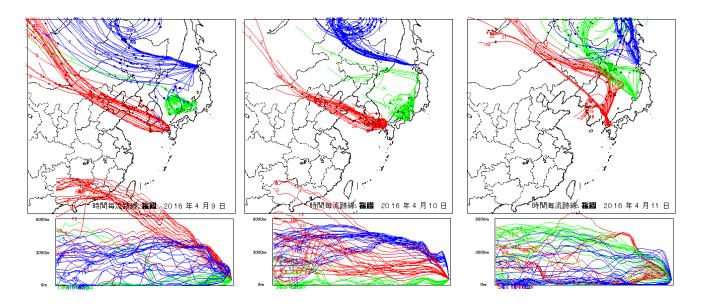


図 4-4-1-6 後方流跡線

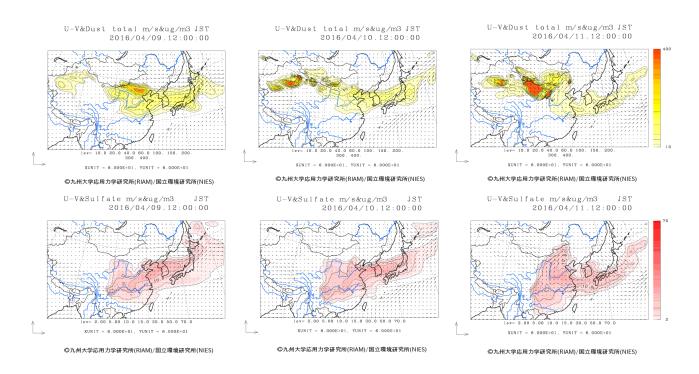


図 4-4-1-7 CFORS (dust · sulfate) 予測結果

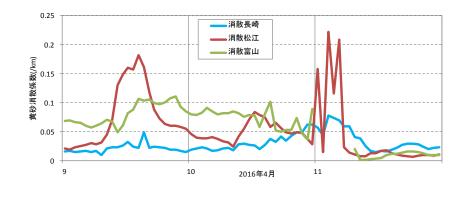




図 4-4-1-8(1) ライダー黄砂消散係数の経時変化

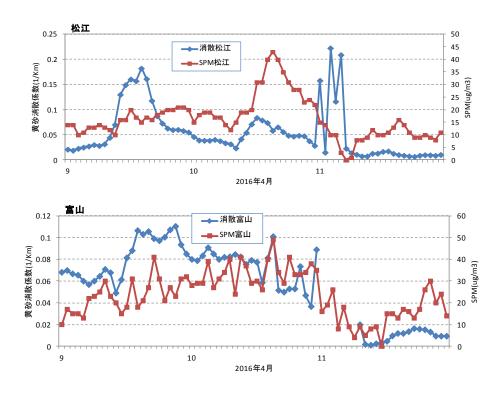


図 4-4-1-8(2) ライダー黄砂消散係数の経時変化

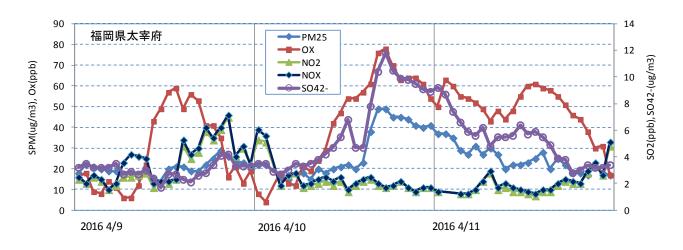


図 4-4-1-9 硫酸イオン濃度 (時間値)

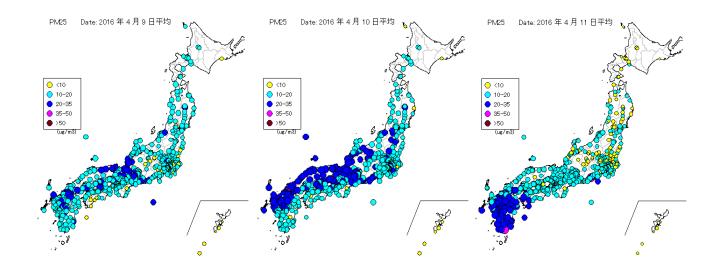


図 4-4-1-10 PM_{2.5} 日平均値全国分布

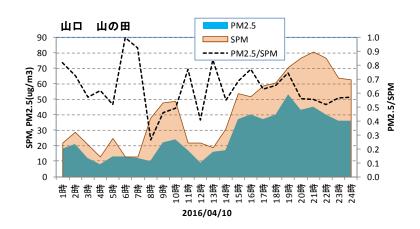


図 4-4-1-11 SPM、PM_{2.5}濃度と PM_{2.5}/SPM

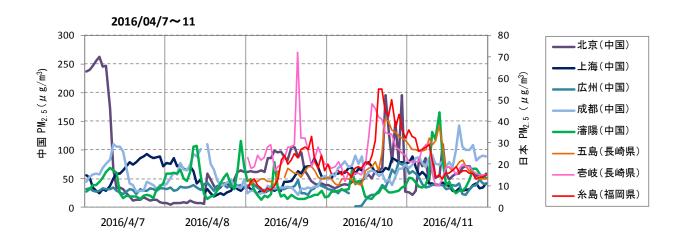


図 4-4-1-12 中国·離島·福岡での PM_{2.5} 濃度

(2) 黄砂事例2 (2016年4月14日~15日)

本事例では、黄砂が2日間にわたって観測された。黄砂の観測地点は、九州を中心に3~5地点であった。また、2日間ともに松山のみで煙霧が観測された。天気図では、前線が日本南岸に位置していた。 SPMは、全国的に高濃度になった様子はみられず、黄砂の影響は小さいものと思われる。

大陸での砂塵嵐は、本事例の 2 日前の 4 月 12 日から数日にわたって確認された。札幌の後方流跡線は、大陸の砂塵嵐発生地域からの経路を示しているものの黄砂は観測されなかった。一方、福岡の後方流跡線は、砂塵嵐発生地域とよく一致している。

CFORSでは、dust、sulfate ともに大陸からの影響が九州、中国、四国地方に及ぼしている様子を示していた。一方、ライダーは、長崎の黄砂消散係数が 0.05/km 前後で推移している程度で、特に松江、富山はともに黄砂消散係数が 0.05/km 以下の低い状態で推移しており、明確な黄砂の様子はみられない。福岡県の大気汚染物質をみると、顕著に高濃度を示したものはなく、大気汚染物質の混入は少ないと考えられる。

 $PM_{2.5}$ 日平均値は、九州、四国地方で若干高い程度で、環境基準を超過した地点はない。なお、北京における $PM_{2.5}$ 濃度の 1 時間値は、本事例の前日である 4 月 13 日に $200\mu g/m^3$ を超える高濃度が数時間にわたりみられた。

この期間、鹿児島で $PM_{2.5}$ の成分分析が行われている。結果は、図 4-4-2-13 のとおりでイオン成分が半分近くを占めていた。そのときの硫酸イオンの濃度は $3\sim7\mu g/m^3$ 程度であった。

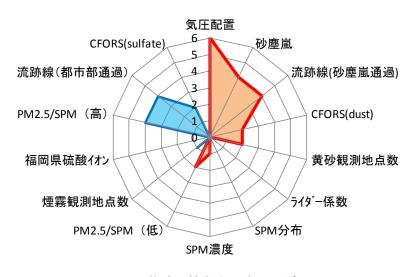


図 4-4-2-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-4-2-1	黄砂·煙霧観測地点	i
23 7 7 4 1	光 12 /生初 6儿(大) 20 小	۱

松山	月	日	地点数	黄砂観測地点名						
	Л			1	2	3	4	5		
2016	4	14	3	福岡	佐賀	長崎				
		15	5	広島	福岡	佐賀	長崎	鹿児島		

年	月	目	地点数	煙霧観測 地点名	
				1	
2016	4	14	1	松山	
	4	15	1	松山	

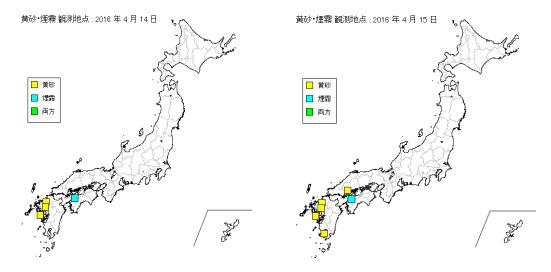
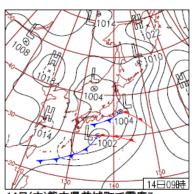
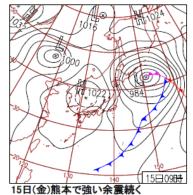


図 4-4-2-2 黄砂·煙霧観測地点



14日(木)熊本県益城町で震度7 九州は夜、M6.5の地震で激しい揺れ。日 本付近は気圧の谷の中で暖気入る。東日 本は午前、北日本は午後中心に雨。最 低・最高気温とも5~6月並の所多数。西 日本~東海では夏日も。



おけ(金)服本で強い示展権で 未明に震度6強。千島近海で低気圧発達 した影響で北日本は雨や雪で局地的に暴 風。北海道弟子屈で最大瞬間風速 35.9m/s。西・東日本は高気圧に覆われ 概ね晴れ。西日本で黄砂。

図 4-4-2-3 天気図

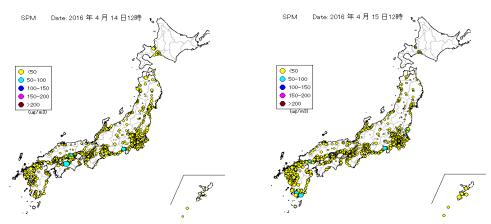


図 4-4-2-4 SPM 濃度全国分布

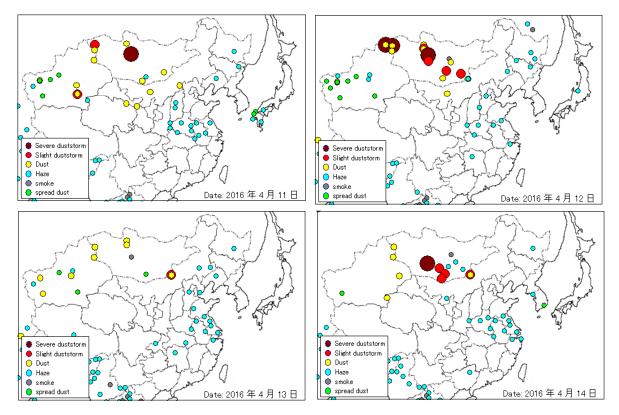


図 4-4-2-5 砂塵嵐発生状況

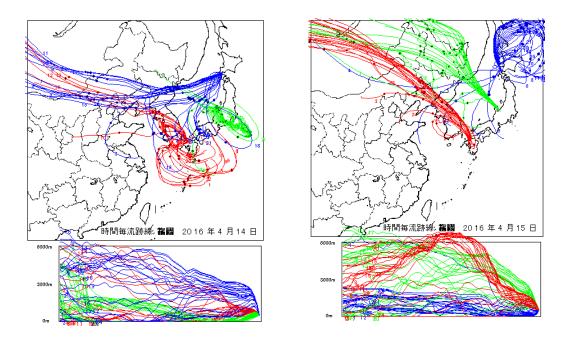


図 4-4-2-6 後方流跡線

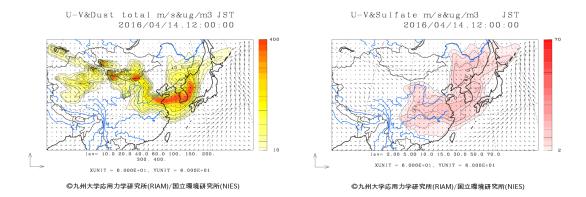


図 4-4-2-7 CFORS (dust·sulfate) 予測結果

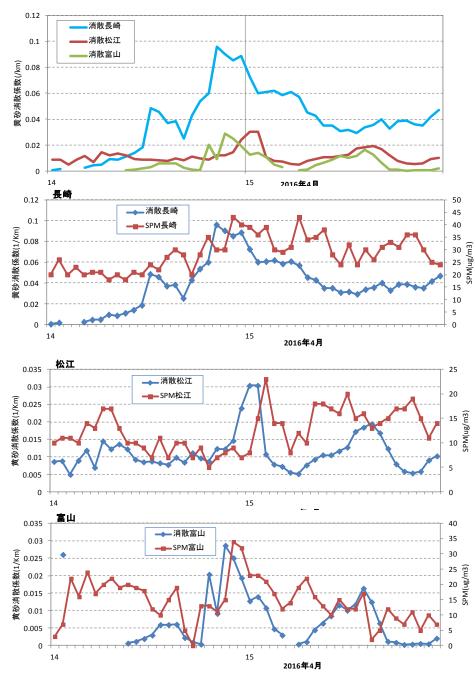


図 4-4-2-8 ライダー黄砂消散係数の経時変化

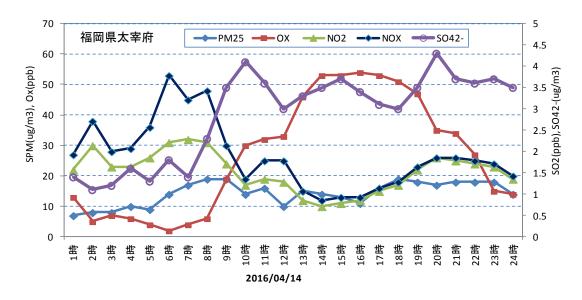


図 4-4-2-9 硫酸イオン濃度 (時間値)

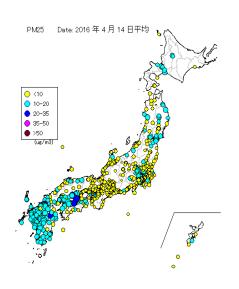


図 4-4-2-10 PM_{2.5} 日平均値全国分布

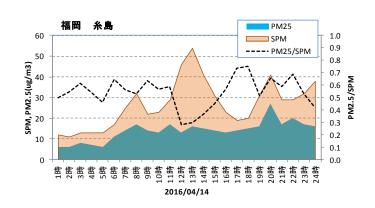


図 4-4-2-11 SPM、PM_{2.5}濃度と PM_{2.5}/SPM

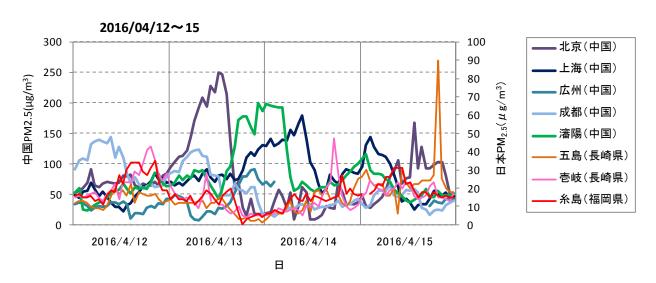
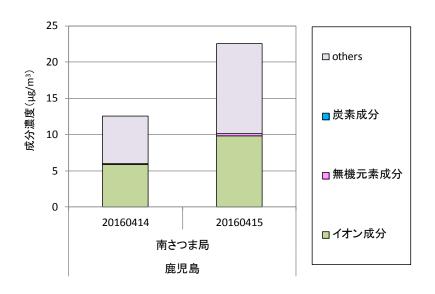


図 4-4-2-12 中国·離島·福岡での PM_{2.5} 濃度



備考)この期間に南さつま局で行われた成分分析では、 OC および EC の測定は行われていない。

図 4-4-2-13 PM_{2.5}成分分析結果

(3) 黄砂事例3 (2016年4月23日~26日)

本事例は、黄砂が 4月23日から26日の4日間にわたって観測されており、2016年度で最も観測地点数が多かった黄砂事例である。黄砂は、4月23日に中部から九州にかけて日本海側の7地点で観測され、4月24日および25日には北日本から九州まで広い範囲において17~18地点で観測された。また、4月23日から25日の3日間で煙霧も観測されており、観測地点は4月23日に関東3地点、4月24日は関東1地点と九州・四国4地点、25日は九州・四国2地点であった。天気図では日本南岸に前線が確認された。

SPM の時間値は、4月23日に日本海沿岸で高濃度、4月24日に全国的に高濃度がみられた。この2~3日前の4月21日に、大陸で砂塵嵐は確認された、後方流跡線について、4月23日から4月26日の4日間のうち、札幌の後方流跡線は、4月23日のみ砂塵嵐発生地域からの経路を示し、それ以降は発生源より北側を通過していた。富山の後方流跡線は、4月25日から砂塵嵐発生地域とよく一致している。また、福岡の後方流跡線は、4月23日~24日に砂塵嵐発生地域からの経路を示し、それ以降は発生源地域を通過しておらず、大陸南岸を通過していた。

CFORS では、dust、sulfate ともに大陸からの影響が日本全国に及ぼしている様子を示している。また、ライダーは、松江、富山はともに黄砂消散係数が高い状態で推移しており、両地点ともに一時 0.2/km を超える高い値を示した。さらに、いずれの地点も黄砂消散係数の推移が、SPM の推移によく一致していた。

福岡県の大気汚染状況について、本事例の期間中、硫酸イオンが高い濃度で推移しており、4月23日には一時14µg/m³を超える高濃度が観測された。

 $PM_{2.5}$ 日平均値は全国的に高く、環境基準を超過した地点が多くみられた。また、北京における $PM_{2.5}$ 濃度の時間値は、本事例の 2 日前の 4 月 21 日に一時 $200\mu g/m^3$ を超える高濃度が観測された。その後、 4 月 22 日 \sim 24 日に、五島(長崎県)、隠岐(島根県)、糸島(福岡県)で $50\mu g/m^3$ を超える高濃度が観測された。

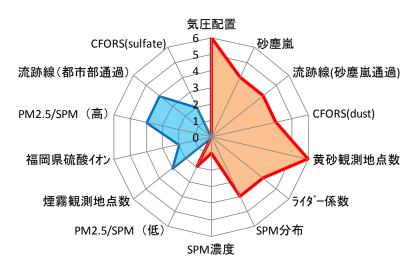


図 4-4-3-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

表 4-4-3-1 黄砂·煙霧観測地点

年	月	日	地点数	黄砂観測地点名									
	Л			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2016	4	23	7	新潟	金沢	富山	福井	松江	鳥取	下関			
		24	18	秋田	仙台	福島	新潟	金沢	富山	福井	松江	鳥取	京都
				彦根	下関	広島	岡山	神戸	大阪	奈良	高松		
		25	25 17	秋田	金沢	富山	福井	松江	鳥取	京都	彦根	下関	広島
				岡山	神戸	大阪	和歌山	奈良	高松	徳島			
		26	1	金沢									

年	月	日	地点数	煙霧観測地点名					
				1	2	3	4	5	
2016	4	23	3	熊谷	東京	横浜			
		24	5	前橋	松山	福岡	佐賀	大分	
		25	2	津	大分				

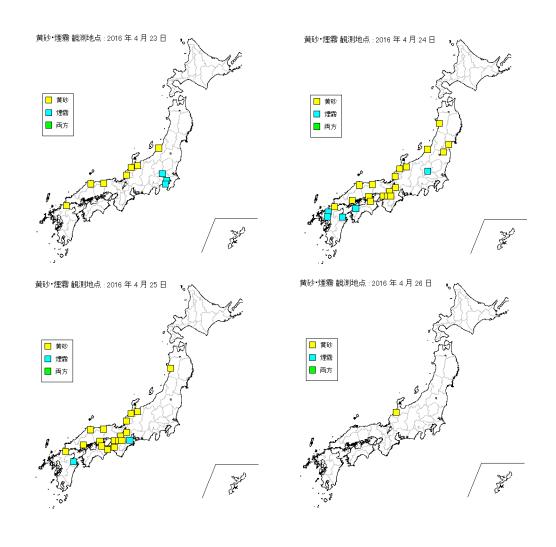
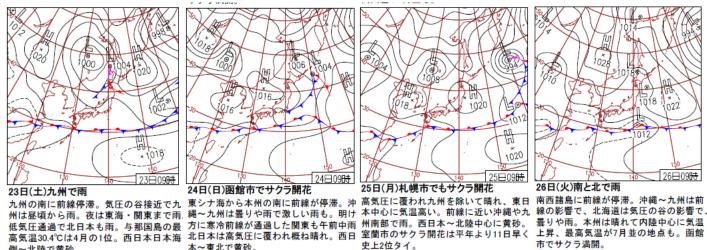


図 4-4-3-2 黄砂·煙霧観測地点



側~北陸で黄砂。

本~東北で黄砂。

史上2位タイ。

線の影響で、北海道は気圧の谷の影響で、 曇りや雨。本州は晴れて内陸中心に気温 市でサクラ満開。

図 4-4-3-3 天気図

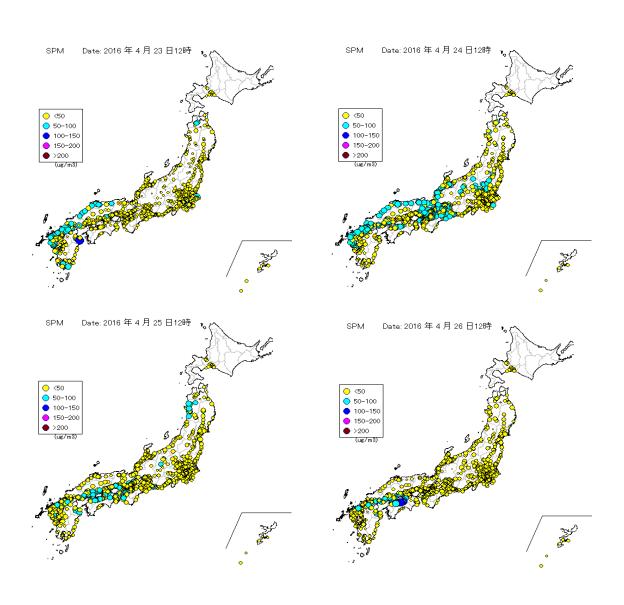


図 4-4-3-4 SPM 濃度全国分布

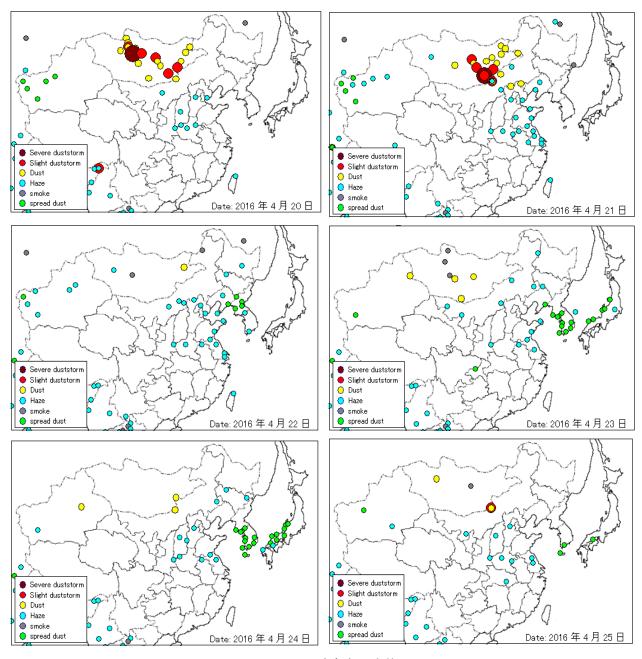


図 4-4-3-5 砂塵嵐発生状況

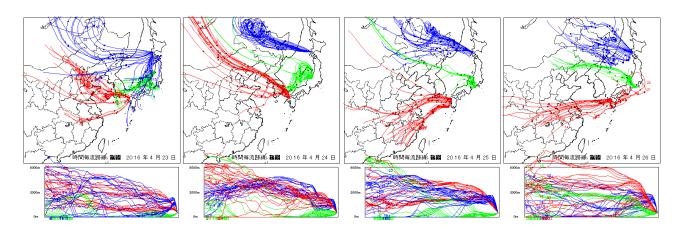


図 4-4-3-6 後方流跡線

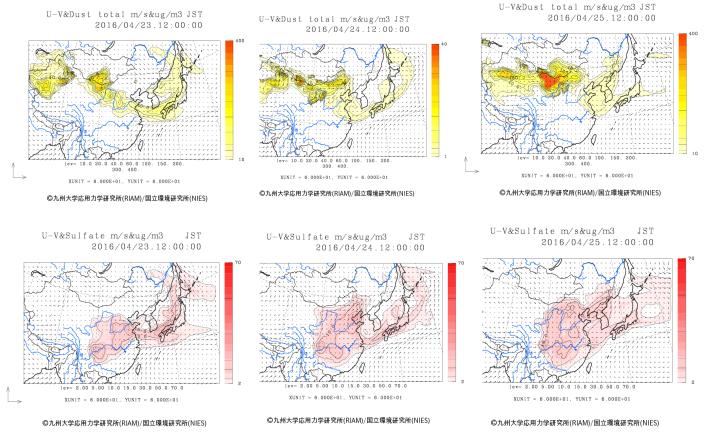


図 4-4-3-7 CFORS (dust • sulfate) 予測結果

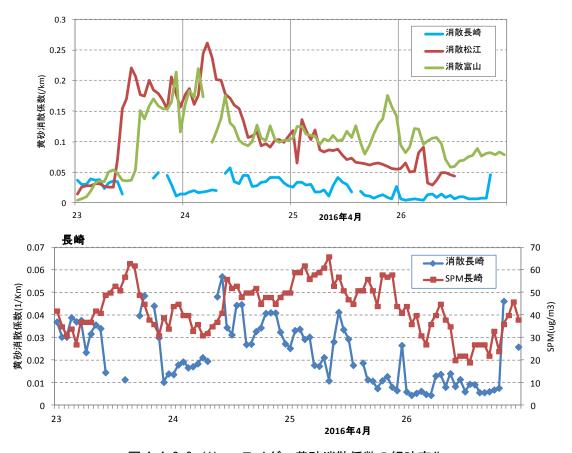


図 4-4-3-8 (1) ライダー黄砂消散係数の経時変化

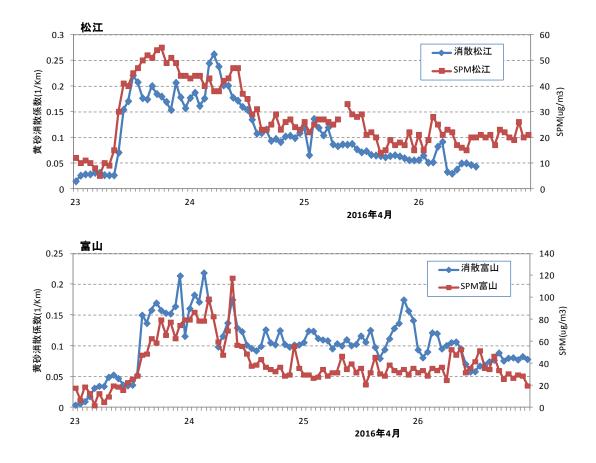


図 4-4-3-8(2) ライダー黄砂消散係数の経時変化

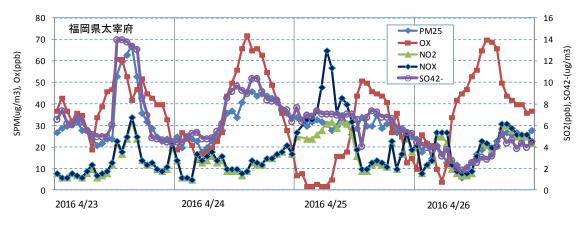


図 4-4-3-9 硫酸イオン濃度 (時間値)

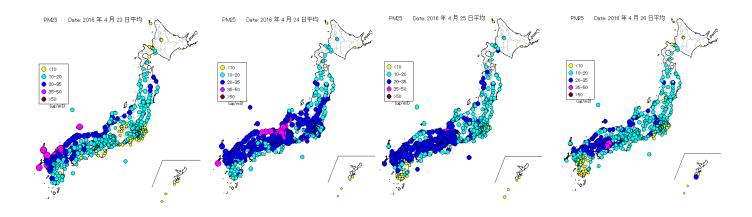


図 4-4-3-10 PM_{2.5} 日平均値全国分布

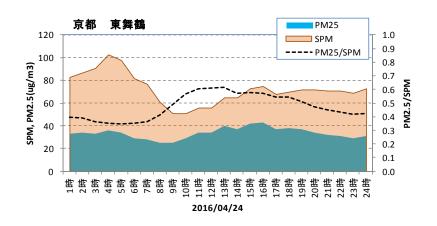


図 4-4-3-11 SPM、PM_{2.5}濃度と PM_{2.5}/SPM

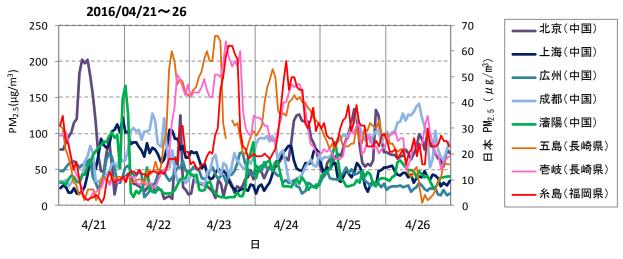


図 4-4-3-12 中国·離島·福岡での PM_{2.5} 濃度

(4) 黄砂事例4(2016年5月7日~8日)

本事例は、黄砂が 5 月 7 日から 8 日の 2 日間で観測されたもので、2016 年度で 2 番目に観測点数が 多かった黄砂である。5 月 7 日は北日本から九州まで広い範囲の 19 地点で観測され、8 日は近畿、中国、 四国を中心に 8 地点で観測された。また、同期間に煙霧も観測され、近畿や中部の 2~3 地点で観測された。天気図では日本南岸に前線が確認された。このとき SPM の時間値は、5 月 7 日に日本海沿岸、8 日に近畿地方を中心に高濃度がみられた。

大陸の砂塵嵐は、日本で黄砂が観測される2日前の5月5日に小規模でみられ、5月7日~8日にも確認された。これに対し、5月7日の後方流跡線は、札幌、富山、福岡のいずれも砂塵嵐発生地域からの経路を示した。翌日の8日は、札幌の後方流跡線が砂塵嵐発生地域より北側を通過していた。

CFORS では、dust、sulfate ともに大陸からの影響が日本全国に及ぼしている様子を示している。また、ライダーの黄砂消散係数はいずれの地点も高い値で推移している。とくに松江、富山は黄砂消散係数が高く、両地点ともに一時 0.2/km を超える高い値で推移した。さらに、いずれの地点も黄砂消散係数が SPM の濃度変動によく一致していた。

 $PM_{2.5}$ 日平均値は全国的に高く、環境基準を超過した地点が多くみられる。また、北京の $PM_{2.5}$ 濃度では、5 月 6 日に一時 $400\mu g/m^3$ を超える高濃度が観測された。その後、5 月 7 日に、五島(長崎県)で一時 $80\mu g/m^3$ を超え、また隠岐(島根県)では約 $70\mu g/m^3$ の高濃度が観測された。

この期間、黄砂が観測された複数の地域で $PM_{2.5}$ の成分分析が行われた。結果は、図 4-4-4-13 のとおりである。詳細は示していないが硫酸イオンの濃度は $2 \sim 7 \mu g/m^3$ 程度で、西側ほど濃度が高くなるが、全体的に低い状況であった。成分分析の詳細な結果は、「7.2 $PM_{2.5}$ 環境基準値を超過した日で黄砂もしくは煙霧が観測された地点の $PM_{2.5}$ 成分濃度」で後述した。

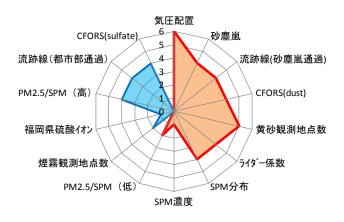


図 4-4-4-1 黄砂の特徴を示すレーダーチャート

耒	4-4-	4-	1	击石	小.	煙霧	観泪	ᆘᆊᅥ	5
1X		т .		77 L	~	八十 不会	吐刀./只	リンパス	7

年	月		地点					黄砂観測	則地点名				
+	月	П	数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		7	10	青森	山形	仙台	金沢	富山	福井	松江	鳥取	彦根	下関
2016	5	1	19	広島	福岡	佐賀	大分	長崎	熊本	鹿児島	松山	高松	
		8	8	富山	松江	鳥取	神戸	大阪	和歌山	高松	徳島		

在	Н	П	地点	煙霧	關測地	点名
+	Л	Н	数	1	2	3
2016	E	7	2	奈良	長崎	
2016	5	8	3	長野	静岡	奈良

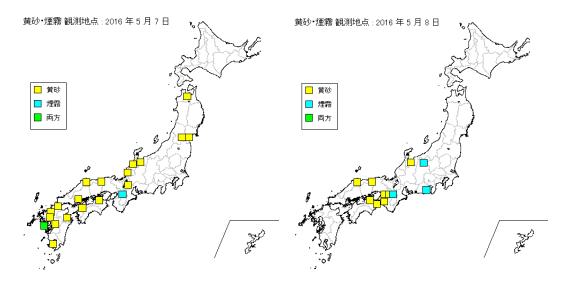
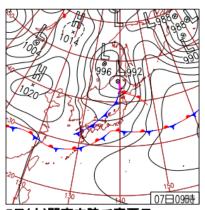
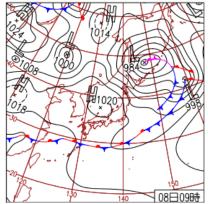


図 4-4-4-2 黄砂・煙霧観測地点



7日(土)関東内陸で真夏日

北日本を低気圧が進み、北日本や日本海側中心に雨。前線近傍の奄美で激しい雨。北海道宇登呂で最大瞬間風速33.5m/s。関東は日中晴れて気温上昇。西日本~北陸·東北で黄砂。



8日(日)九州に気圧の谷接近

本州付近は高気圧に覆われ概ね晴れ。 前線北上し九州は次第に雨。北日本 は千島近海の低気圧の影響で札幌の 最大瞬間風速26.7m/sなど風強く所々 雨。網走市エゾヤマザクラ開花。

図 4-4-4-3 天気図

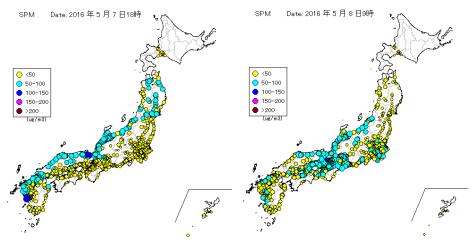


図 4-4-4-4 SPM 濃度全国分布

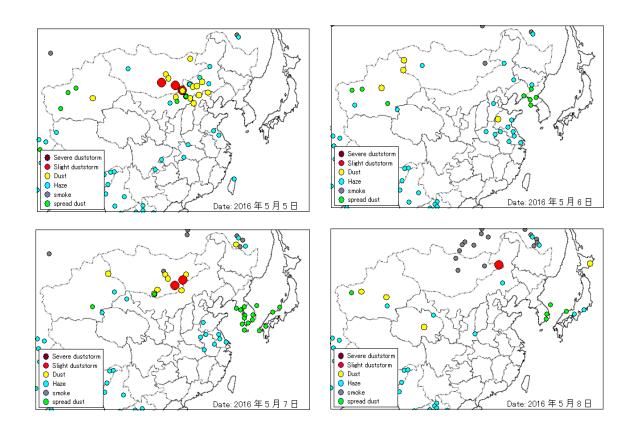


図 4-4-4-5 砂塵嵐発生状況

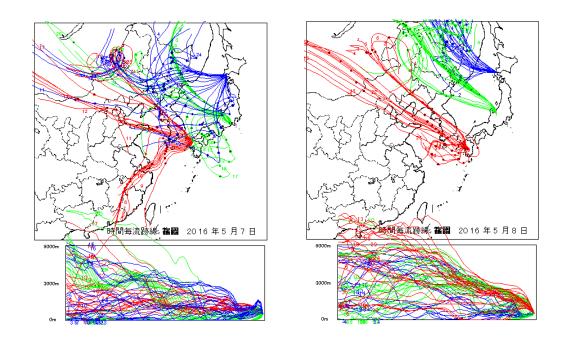


図 4-4-4-6 後方流跡線

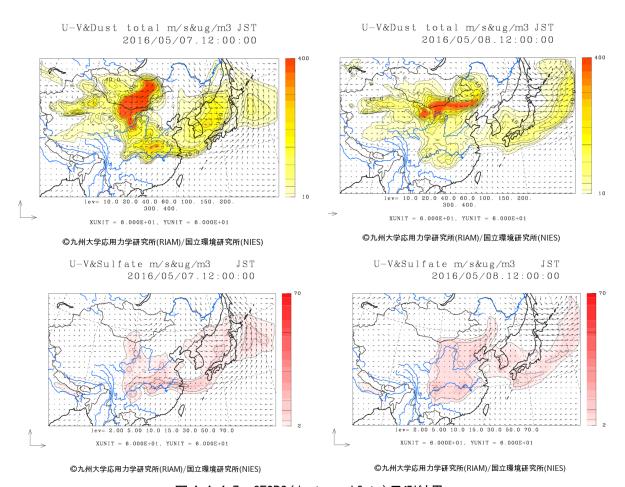


図 4-4-4-7 CFORS (dust · sulfate) 予測結果

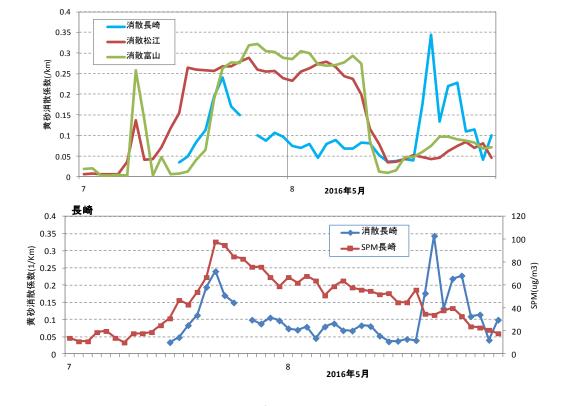


図 4-4-4-8 (1) ライダー黄砂消散係数の経時変化

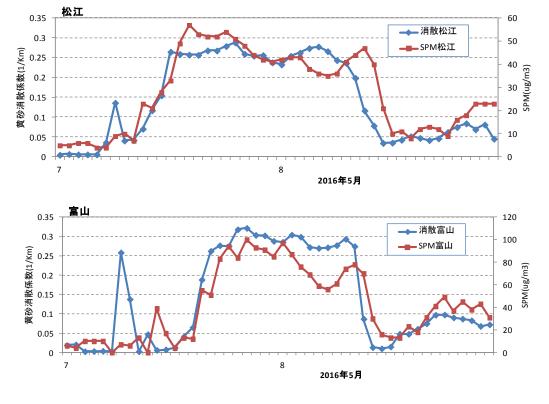


図 4-4-4-8(2) ライダー黄砂消散係数の経時変化

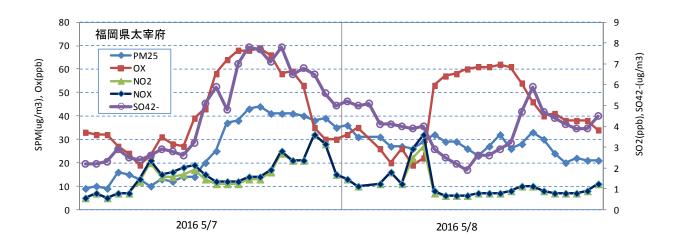


図 4-4-4-9 硫酸イオン濃度(時間値)

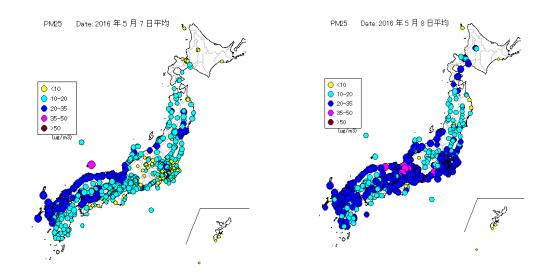


図 4-4-4-10 PM_{2.5}日平均值全国分布

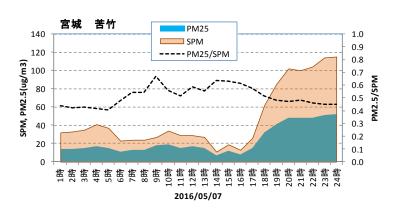


図 4-4-4-11 SPM、PM_{2.5}濃度と PM_{2.5}/SPM

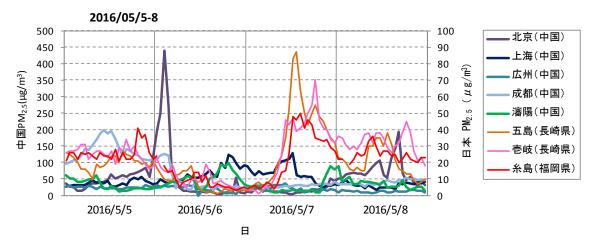


図 4-4-4-12 中国·離島·福岡での PM_{2.5} 濃度

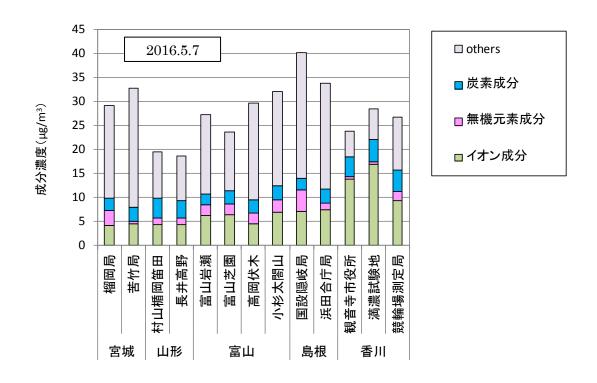


図 4-4-4-13 PM_{2.5}成分分析結果

5. 2016 年度における煙霧日の事例解析

煙霧日の事例解析

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。 煙霧は、黄砂時よりも微小粒子状物質 (PM_{2.5}) の割合が高くなる等、健康に対する影響も懸念され、 また今般では黄砂と並んで社会的な関心も高まっている。

そのため、本調査では黄砂と並び、煙霧の状況もまとめた。これまでの調査から長距離移流を原因と した煙霧の特徴としては、概ね次のようなことが考えられる。

- ・後方流跡線が中国沿岸部からの大気の流れを示す
- ・気圧配置で、移動性高気圧が日本を通過している
- ・硫酸イオンの濃度が上昇する
- ・CFORS の「硫酸塩エアロゾル(大気汚染物質)」(sulfate)の予想分布で、 硫酸塩の移流が予測されている
- ・PM2.5/SPM の比が大きい(粗大粒子の割合が小さい)

5. 2 2016 年度の煙霧日

2016 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は、表 5-2-1 に示す とおりである。なお、PM2.5/SPM (SPM20µg/m³以上) は 0.7 から 0.9 程度で、黄砂時(0.6 から 0.7) と比較し、若干高い値を示した。

表 5-2-1 2016 年度の煙霧日一覧

(SPM および PM_{2.5} 濃度: ug/m³)

		其	月日				煙霧0)規模		SPM		
事例	No.	年	月	日	地点数	PM _{2.5} 平均濃度	県数	PM _{2.5} 積算	PM _{2.5} 積算 合計	平均濃度	PM _{2.5} /SPM	PM _{2.5} /SPM (SPM20 以上)
	1	2016	5	24	3	30.8	3	92.4		35.7	0.84	0.84
	2	2016	5	25	4	29.5	4	118.0		38.7	0.77	0.77
	3	2016	5	26	4	24.1	4	96.4		31.2	0.77	0.76
1	4	2016	5	27	9	41.6	8	332.8	1163.0	48.9	0.84	0.84
1	5	2016	5	28	11	30.9	10	309.0	1100.0	40.3	0.78	0.78
	6	2016	5	29	7	23.3	6	139.8		32.8	0.74	0.72
	7	2016	5	30	2	12.2	2	24.4		31.0	0.56	0.48
	8	2016	5	31	3	25.1	2	50.2		31.6	0.81	0.81
	9	2016	12	4	2	20.4	2	40.8		22.8	0.90	0.89
2	10	2016	12	5	1	21.7	1	21.7	218.2	26.2	0.93	0.79
	11	2016	12	6	11	17.3	9	155.7		22.4	0.80	0.74
	12	2017	3	5	2	17.4	2	34.8	.8 .8 270.3	23.2	0.81	0.74
3	13	2017	3	6	12	18.4	12	220.8		25.7	0.83	0.79
0	14	2017	3	7	1	6.6	1	6.6		10.3	0.70	_
	15	2017	3	8	1	8.1	1	8.1		11.5	0.83	_

^{※「} $PM_{2.5}$ /SPM」は煙霧が観測された県の測定局毎に $PM_{2.5}$ /SPM を算出し、それを平均したものであり、表中の「SPM 平均濃度」と「 $PM_{2.5}$ 平均濃度」から算出したものではない。 ※「 $PM_{2.5}$ /SPM(20μ g/m³以上)」は、「 $PM_{2.5}$ /SPM」で抽出した測定局データのうち、SPM 日平均値が 20μ g/m³未満のデータを除外したうえで、平均値を算出したものである。 ※「 $PM_{2.5}$ /SPM(20μ g/m³以上)」の「-」は、煙霧が観測された県で SPM 日平均値が 20μ g/m³以上の測定局がなかった

5.3 煙霧日の解析結果

(1) 煙霧事例1 (2016年5月24日~31日)

煙霧は、5月 24日 \sim 31日で長期にわたって観測された。5月 24日 \sim 26日は関東を中心に $3\sim$ 4地点で観測された一方で、5月 27日 \sim 28日は日本海側を中心に観測されている。

天気図では 5 月 24 日に日本全国が高気圧に覆われるものの、低気圧と前線が東進し、前線が日本南岸に数日にわたって停滞していることが示される。また後方流跡線をみると、札幌は、中国北部からの流跡線を示すことが多い傾向にある。一方、富山と福岡は、5 月 27 日から北京や上海からの気流を示している。

 $PM_{2.5}$ 濃度は煙霧の観測地点と同様に、5月 24日 \sim 26日で関東を中心に環境基準値の超過地点がみられる。 さらに 5月 27日以降では西日本を中心に非常に広い範囲で $PM_{2.5}$ 環境基準値が超過した。

CFORS では、sulfate が大陸から日本全国へ影響を及ぼしている様子を示している。福岡県では、硫酸イオンが 5 月 26 日から上昇し、5 月 27 日には最大で $17\mu g/m^3$ を超える高濃度を示した。

この期間、岩手、神奈川、福岡で成分分析が行われたが、福岡以外の地域では煙霧の観測がなく、 $PM_{2.5}$ 濃度も低い状況であった。福岡の結果は、図 $5\cdot3\cdot1\cdot9$ のとおりであり、5 月 26 日と 27 日でイオン成分が上昇しており、それぞれの硫酸イオンの濃度は $12\mu g/m^3$ 、 $15\mu g/m^3$ であった。なお、成分分析の詳細な結果は、「7.2 $PM_{2.5}$ 環境基準値を超過した日で黄砂もしくは煙霧が観測された地点の $PM_{2.5}$ 成分濃度」で後述した。

以上のとおり、本観測期間の前半と後半でその様子が異なっており、前半は関東を中心とした地域的な汚染によるもの、後半は大陸からの越境により日本海側を中心に影響が及んだ事例と考えられる。

表 5-3-1-1 煙霧観測地点

年	月	日	日	地点					煙霧観	測地点				
+	Л	Ц	数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		24	3	前橋	銚子	津								
		25	4	宇都宮	前橋	熊谷	新潟							
		26	4	前橋	甲府	長野	長崎							
		27	9	青森	金沢	松江	下関	松山	福岡	長崎	熊本	鹿児島		
2016	2016 5	28	28 11	11	山形	宇都宮	前橋	熊谷	東京	新潟	富山	金沢	松江	岡山
			11	広島										
		29	7	宇都宮	銚子	東京	金沢	長野	名古屋	広島				
		30	2	下関	長崎									
		31	3	松江	長崎	鹿児島								

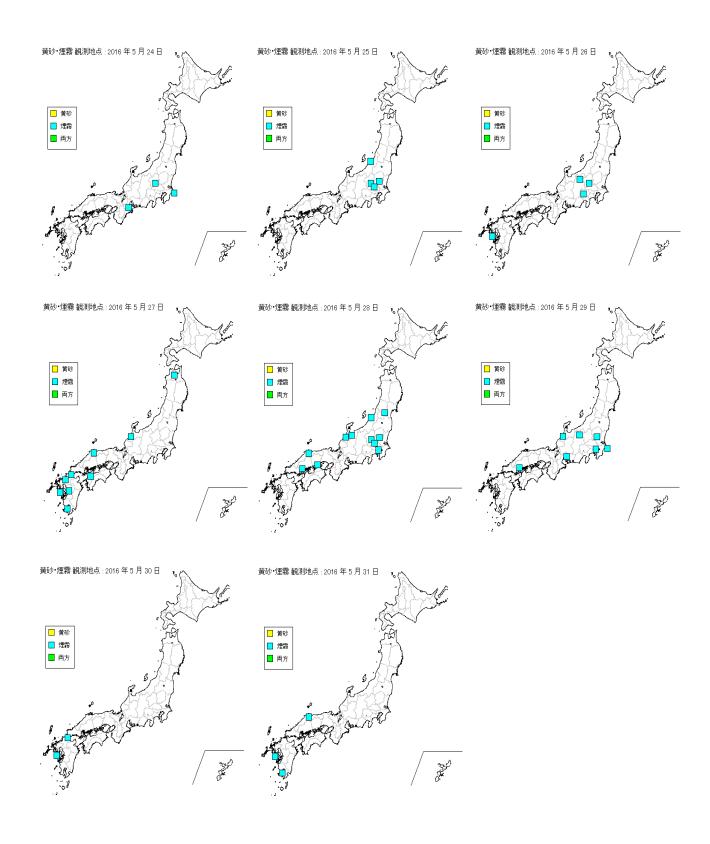
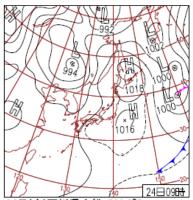
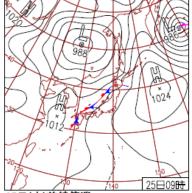


図 5-3-1-1 黄砂·煙霧観測地点



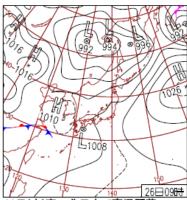
24日(火)石川県小松で33.8℃

高気圧は日本の東へ移動し東日本中心に 晴れたが、北日本や西日本は気圧の谷の 接近で次第に曇り、西から雨。関東や山 陰~北陸でも真夏日に。関東に今年初の スモッグ気象情報。



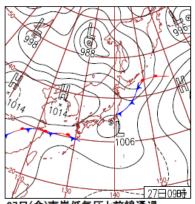
25日(水)前線停滞

前線が北海道~沖縄にかけて停滞し、全 国的に曇りや雨。九州~四国では激しい 雨。最高気温は北陸の沿岸~北日本で平 年差+6℃以上高く、北海道オホーツク海 側では+10°C以上も。



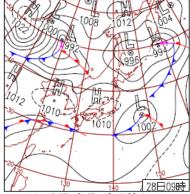
26日(木)東~北日本で高温顕著

日本海~北日本に前線が停滞し四国沖を 低気圧が東進。南から暖かい空気が流れ 込み、全国的に曇りや雨で7月並の暖か い朝。静岡県石廊崎では最高気温26.4℃ で5月の極値更新。



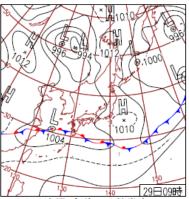
27日(金)南岸低気圧と前線通過

広範囲に雨域広がるが、日中は西日本や 北日本は晴れ。沖縄も晴れて気温上昇。 東日本は関東沿岸部を中心に、夕方まで 雨風強い。夜は気圧の谷の接近で西日本 は再び雨。



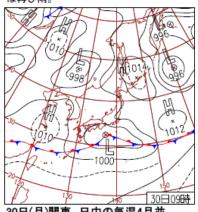
28日(土)沖縄・奄美、高温続く

九州の南から日本の南にのびる前線の影 響で西~東日本は曇りで九州・四国を中 心に雨。北日本は晴れたが夕方から雨。 沖縄・奄美と北日本は気温が上がり最高 気温は真夏並も。



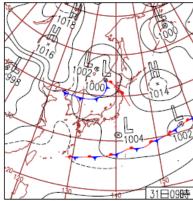
29日(日)沖縄・奄美では熱帯夜

華中~日本の南には前線が停滞し、前線 上の低気圧が九州付近へ進む。九州・四 国で激しい雨、夜には東日本も雨。東~ 北日本では日中は概ね晴れて東北南部も 真夏日に。



30日(月)関東、日中の気温4月並

前線・低気圧などの影響で曇りや雨の所 多いが、西・北日本は日中回復。関東の 最高気温は未明に出現し日中の気温は4 月並。北海道では冬日も。鳥取市・津市 でホタル初見。



31日(火)北日本で雷雨

高気圧に覆われ広く晴れたが、北日本は 寒気を伴った低気圧の接近で大気の状態 が不安定となり、局地的に雷を伴った雨。 1時間降水量は北海道名寄34.5mm/1hなど で5月の1位。

図 5-3-1-2 天気図

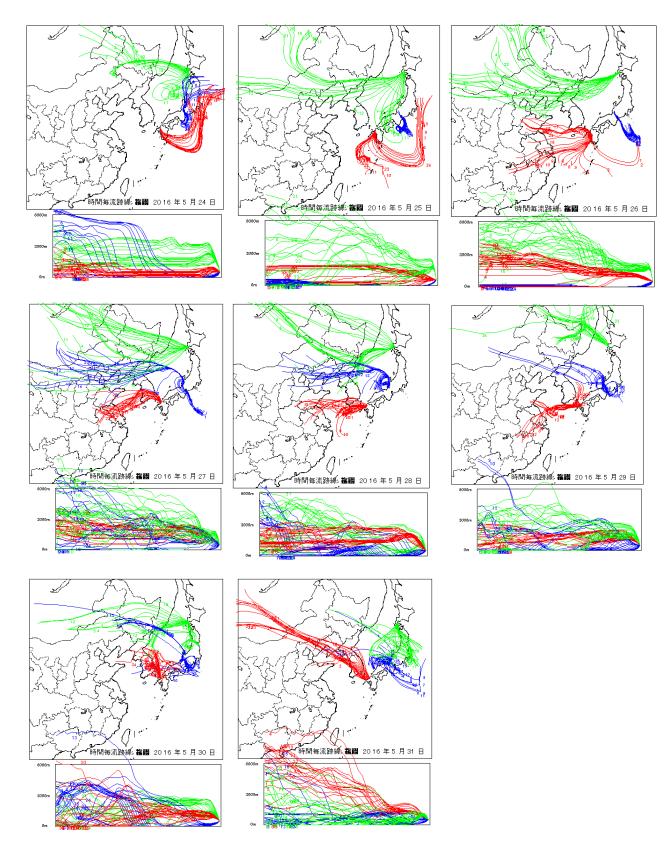


図 5-3-1-3 後方流跡線

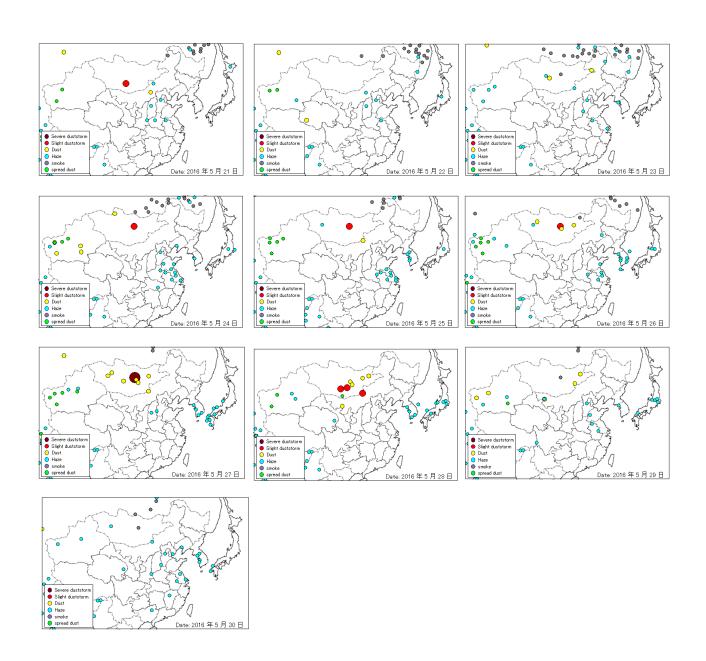


図 5-3-1-4 Haze の観測状況

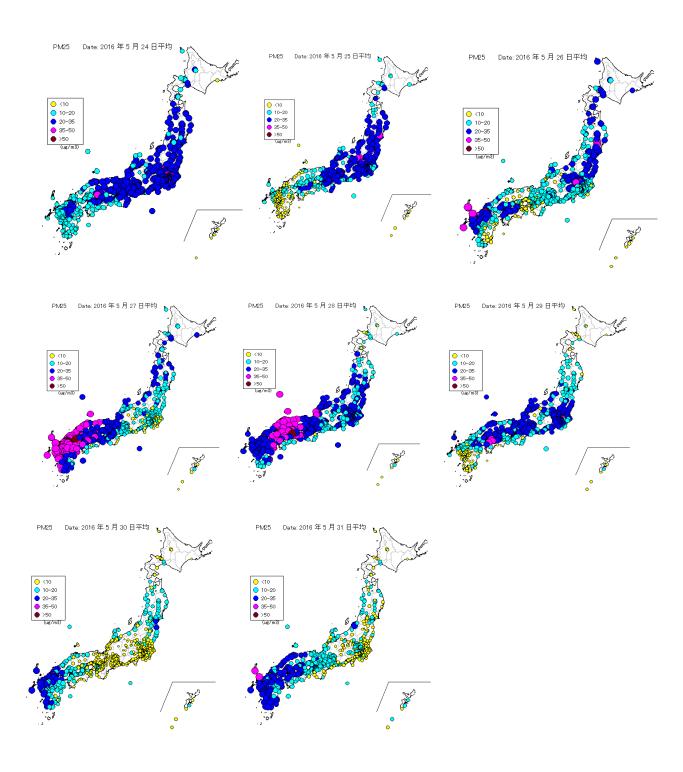


図 5-3-1-5 PM_{2.5}の日平均値全国分布

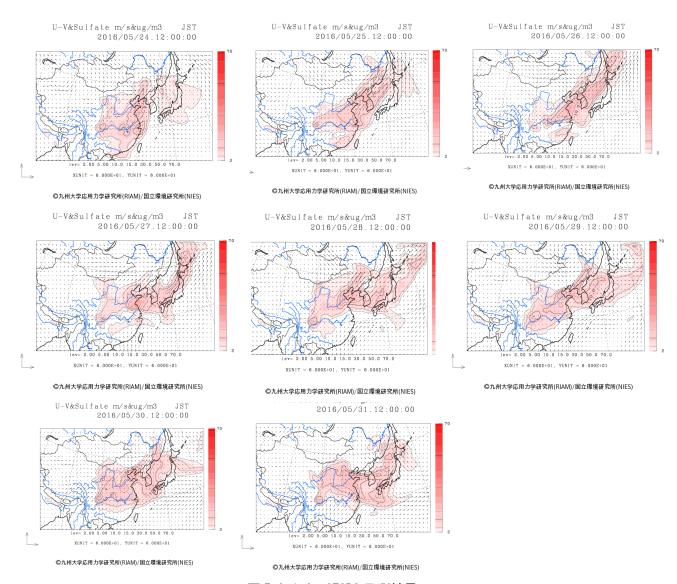


図 5-3-1-6 CFORS 予測結果

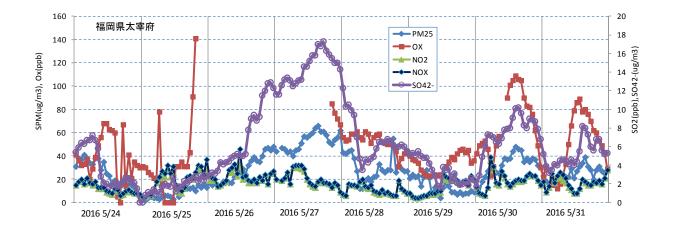


図 5-3-1-7 硫酸イオン濃度

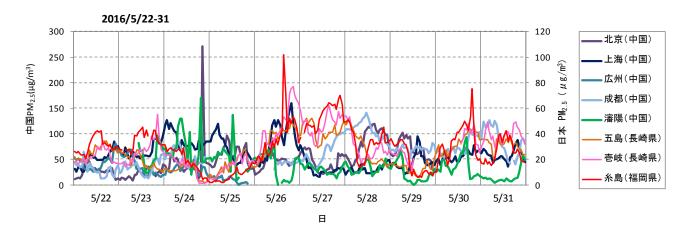


図 5-3-1-8 中国·離島·福岡での PM_{2.5} 濃度

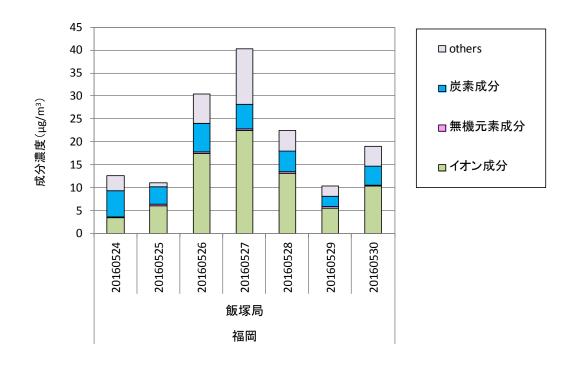


図 5-3-1-9 PM_{2.5} 成分分析結果

(2) 煙霧事例2 (2016年12月4日~6日)

煙霧は、12 月 4 日 \sim 6 日の 3 日間で観測され、12 月 4 日に関東で 2 地点、12 月 5 日に下関 1 地点での観測であったものが、12 月 6 日には、近畿と九州の複数地点となった。

天気図では、低気圧が東進し、12 月 6 日に西高東低の気圧配置であり、後方流跡線は、福岡では上海からの気流を示している。この期間の Haze は大陸で非常に広い範囲で観測されている。また 12 月 5 日~6 日では砂塵嵐も観測されている。

 $PM_{2.5}$ は関東と九州を中心に高濃度を観測し、複数地点で環境基準を超過している。CFORS では、sulfate が大陸から日本全国へ影響を及ぼしている様子を示している。なお、北京では、12 月 3 日 \sim 4 日に最大で $500\mu g/m^3$ を超える高濃度の $PM_{2.5}$ を観測した。

表 5-3-2-1	表 5-3-2-1	煙霧観測地,	늙
-----------	-----------	--------	---

				T 근 선기에서 느									
年	月	日	地点					煙霧観	測地点				
+	Л	H	数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		4	2	前橋	甲府								
2016	12	5	1	下関									
2016	12	C	11	甲府	津	奈良	下関	福岡	佐賀	長崎	熊本	宮崎	鹿児島
		6	11	那覇									

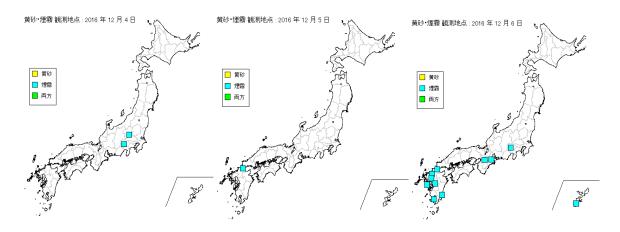
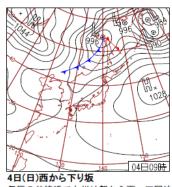
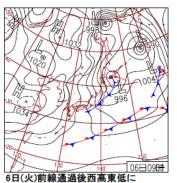


図 5-3-2-1 黄砂·煙霧観測地点



気圧の谷接近で九州は朝から雨。四国沖に低気圧発生し東進、夜は東日本まで雨。 北日本は太平洋側中心に晴れ一部で雪。 沖縄の最高気温は宮古島28.3℃、那覇 28.2℃など12月1位。





低気圧が発達しながら北日本から千島近海へ進み、西高東低の気圧配置に。北日本日本海側を中心に雨や雪で雷も。新潟で初雪。新潟県で突風被害も。松山市・京都市でカエデ紅葉。

図 5-3-2-2 天気図

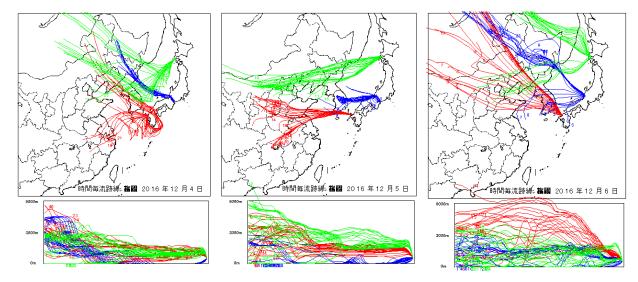


図 5-3-2-3 後方流跡線

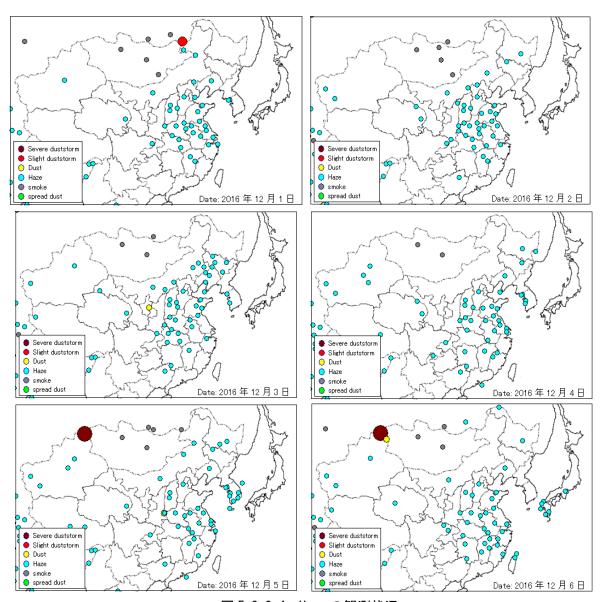


図 5-3-2-4 Haze の観測状況

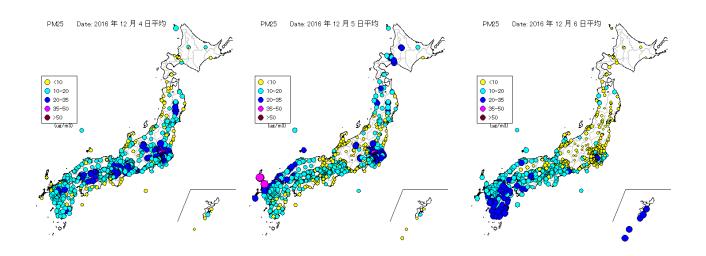


図 5-3-2-5 PM_{2.5}の日平均値全国分布

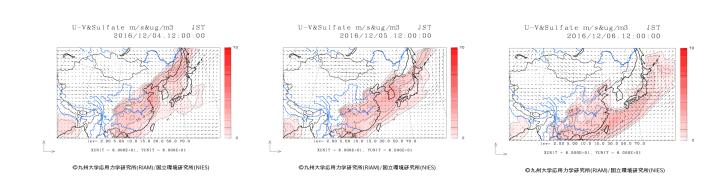
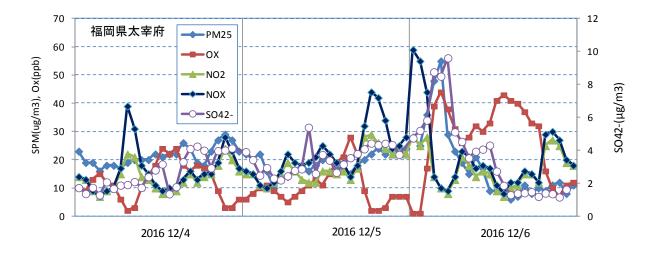


図 5-3-2-6 CFORS 予測結果



備考)この期間は太宰府の硫酸イオンが欠測していたため、九州大学のデータを使用した。

図 5-3-2-7 硫酸イオン濃度

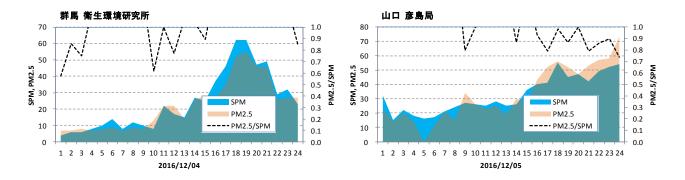


図 5-3-2-8 PM_{2.5}/SPM の推移

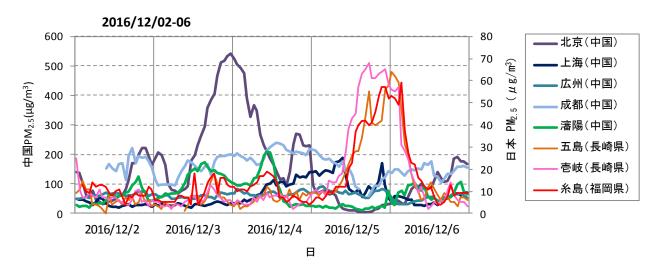


図 5-3-2-9 中国·離島·福岡での PM_{2.5}濃度

(3) 煙霧事例3(2017年3月5日~8日)

煙霧は、3月5日 \sim 8日04日間で観測され、3月6日には関東と九州を中心に 12地点で観測された。 その後3月7日 \sim 8日は宇都宮のみで観測されるものの、栃木県内の SPM 濃度の日平均値は $10\mu g/m^3$ と非常に低いものであった。

天気図では、低気圧が東進し、3月7日に西高東低の気圧配置となった。後方流跡線は、福岡が上海や北京からの気流を示しており、この期間のHazeは大陸で非常に広い範囲で観測されている。

 $PM_{2.5}$ は関東を中心に高濃度を観測し、いくつかの地点で環境基準を超過している。CFORS では、sulfate が大陸から日本全国へ影響を及ぼしている様子を示している。

 $PM_{2.5}/SPM$ は、栃木で $0.5\sim1$ 、福岡で $0.7\sim1$ の値を示した。また 3 月 4 日に北京で約 $160\mu g/m^3$ の $PM_{2.5}$ が観測された。

表 5-3-3-1	煙霧観測地点
1000	パエイガ モルノスコーじ ハハ

		•												
	年	月	日	地点					煙霧観	測地点				
	+	月	Н	数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			5	2	宇都宮	長野								
	2017	3	6	12	宇都宮	前橋 宮崎	熊谷	長野	名古屋	松山	福岡	佐賀	長崎	熊本
			7	1	宇都宮									
			8	1	宇都宮									

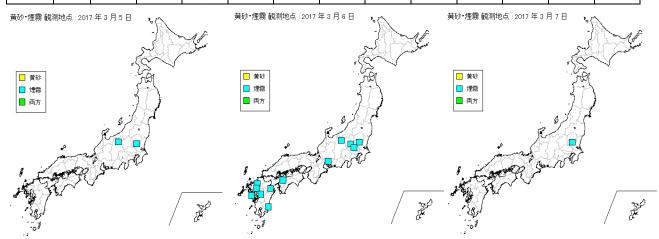
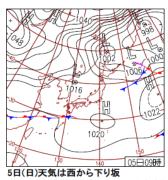


図 5-3-3-1 黄砂・煙霧観測地点



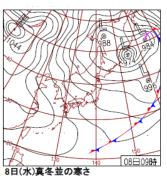
5日(日)大気は四からトり取 日本の南の高気圧は東に移動、前線が華 南〜東シナ海にのび出し夜には低気圧発 生。沖縄〜西日本太平洋側は次第に雨。 北日本日本海側は所々雪。関東〜北日本 太平洋側は晴れ。



0日(月) -- ノ玉版 ALT 日本付近は深い気圧の谷、南岸と日本海 〜北日本を低気圧が東進。沖縄〜西・東 日本太平洋側で雨。山陰〜北陸・北日本 も次第に雪や雨。東日本中心に気温高く 朝の冷え込み緩む。



7日大/冬至の水圧に配 日本海側は雪や雨。強い寒気により大気 の状態が不安定となり東日本で雪やあられ、雷も。東京都神津島で最大瞬間風速 26.2m/s。全国的に最高気温平年より低 く141地点で真冬日。



冬型の気圧配置が続き、山陰〜北陸〜北日本は雪。強い寒気の南下で太平洋側でも所々雪。日降雪量は北陸〜東北で50cm前後。最低気温は氷点下の所が多く、東京も0℃に冷え込む。

図 5-3-3-2 天気図

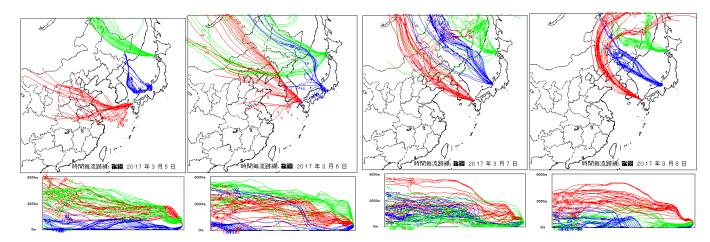


図 5-3-3-3 後方流跡線

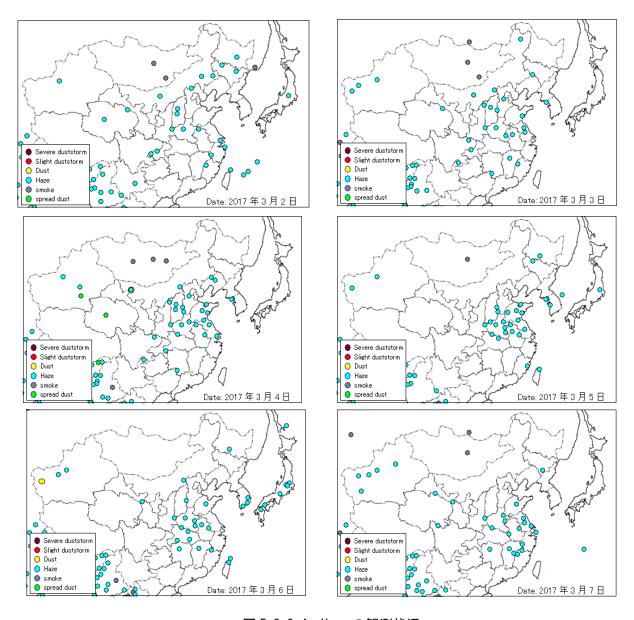


図 5-3-3-4 Haze の観測状況

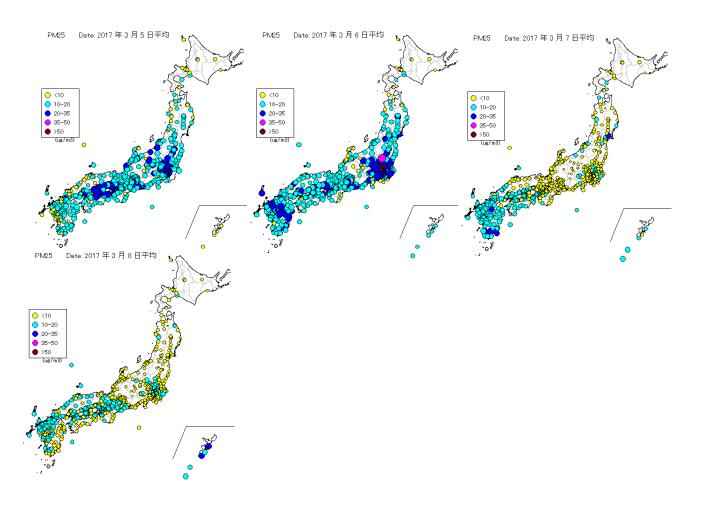


図 5-3-3-5 PM_{2.5}の日平均値全国分布

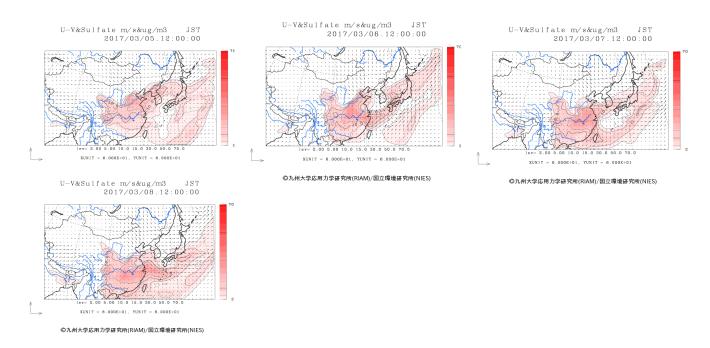
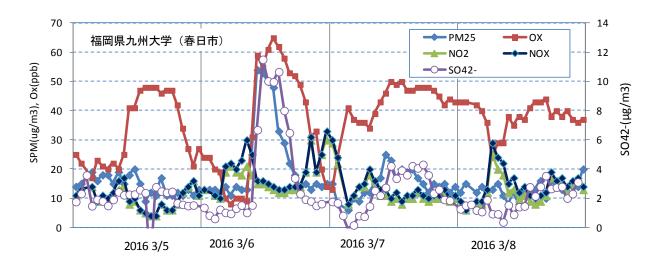


図 5-3-3-6 CFORS 予測結果



備考)この期間は太宰府の硫酸イオンが欠測していたため、九州大学のデータを使用した。

図 5-3-3-7 硫酸イオン濃度

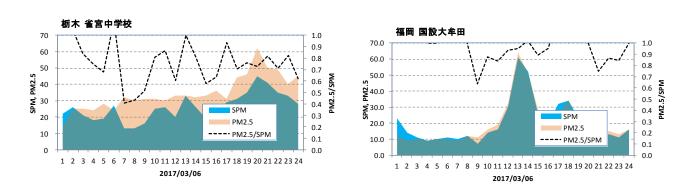


図 5-3-3-8 PM_{2.5}/SPM の推移

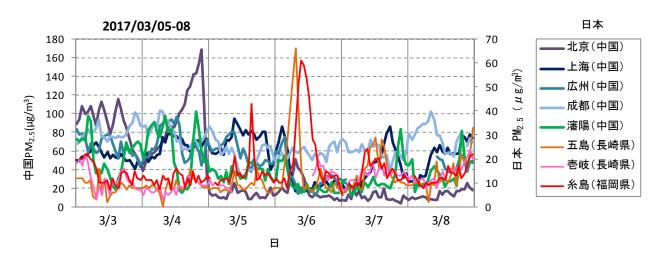


図 5-3-3-9 中国·離島·福岡での PM_{2.5} 濃度

6. ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度による黄砂検出の検討

6. 1 黄砂消散係数と SPM 濃度

黄砂は、PM_{2.5} のような微小な粒子が含まれているほか、都市部で発生した大気汚染物質が付着して飛来することもあることが知られている。黄砂の観測は全国の気象台で実施されているが、近年では気象台で観測されないような弱い黄砂による健康影響が懸念されている。弱い黄砂は大規模な黄砂に比べ、我が国への飛来頻度も多く、気象台での目視による観測が難しいため、その検出方法の検討は重要であると考えられる。

このような中、本調査において、ライダーによる観測では、気象台が観測した黄砂日(以下、「気象台黄砂日」という)でない日にも黄砂粒子の飛来を示唆するデータがみられた。そこで、ここではライダー観測データによって得られる下層での黄砂消散係数と SPM 時間値との関係を使って、黄砂を検出する方法について検討した。

(1) 使用データ

使用したデータは、国立環境研究所ライダー計測値から導き出された黄砂消散係数について、高度 150m~270m の 1 時間平均値(長崎、松江、富山)を算出したものと、ライダー設置地点に隣接する 常時監視局での SPM 濃度時間値である。期間は、2016 年度の 1 年間である。

(2) 気象台黄砂日における黄砂消散係数と SPM 濃度の関係

黄砂によって SPM 濃度が上昇した場合、ライダーにおける黄砂消散係数と SPM 濃度には、相関関係の存在が予想される。そこで、毎日の黄砂消散係数 1 時間平均値と SPM 時間値との関係をみるために、両者の相関係数、回帰式(傾き、切片)について、24 時間単位で計算を行った。その中から、次の条件に合致するものを抽出し、地点別に表 6·1·1 に示している。

- ①1日のデータが12時間以上揃っていること
- ②測定時間が 16 時間以上あるものは、黄砂消散係数と SPM 濃度時間値との相関係数が 0.6 以上、12~15 時間のものは相関係数が 0.7 以上であること
- ③SPM 濃度の日最大値が 50µg/m³以上であること
- ④黄砂消散係数が日最大値 0.05/km 以上であること

2016 年度で抽出された日は、表 6-1-1 に示すとおりで長崎 7 日、松江 2 日、富山 4 日である。 このうち、松江、富山で抽出された日は、いずれも気象台で黄砂が観測された日であった。長崎で抽出された日のうち、気象台で黄砂が観測された日は 4 月 10 日のみで、他の 6 日は気象台による黄砂の観測はなかった。

表 6-1-1 黄砂消散係数 1 時間平均値と SPM 時間値の相関等の条件による抽出日

単位) SPM: μg/m³、消散係数: km⁻¹

年度	地点	年	月	日	時間数	黄砂消散 最大	黄砂消散 平均	SPM 最大	SPM 平均	相関 係数	傾き	切片	消散 黄砂日	地点 黄砂日	全体 黄砂日
2016	長崎	2016	4	10	24	0.0624	0. 0311	55	35. 9	0. 684	422. 1	22. 8	•		0
2016	長崎	2016	4	19	24	0. 0763	0. 0386	58	31. 3	0.829	541.5	10. 3	•		
2016	長崎	2016	9	11	21	0. 1906	0. 0158	70	52. 0	0. 628	95. 9	50. 5	•		
2016	長崎	2016	11	28	24	0. 1232	0.0836	59	40. 5	0. 791	330. 2	12. 9	•		
2016	長崎	2016	12	1	23	0. 0551	0. 0228	63	33. 8	0.821	564. 5	20. 9	•		
2016	長崎	2017	2	13	24	0.0662	0. 0249	52	21. 9	0.732	475.5	10. 1	•		
2016	長崎	2017	3	30	24	0.0601	0. 0328	67	44. 0	0. 629	566.4	25. 4	•		

年度	地点	年	月	日	時間数	黄砂消散 最大	黄砂消散 平均	SPM 最大	SPM 平均	相関 係数	傾き	切片	消散 黄砂日	地点 黄砂日	全体 黄砂日
2016	松江	2016	4	23	24	0. 2207	0. 1182	55	33. 0	0. 958	233. 4	5.4	•	0	0
2016	松江	2016	5	7	24	0. 2883	0. 1576	57	29. 3	0. 955	171.3	2. 3	•	0	0

年度	地点	年	月	Ш	時間数	黄砂消散 最大	黄砂消散 平均	SPM 最大	SPM 平均	相関 係数	傾き	切片	消散 黄砂日	地点 黄砂日	全体 黄砂日
2016	富山	2016	4	23	24	0. 2144	0. 0847	80	36. 7	0. 909	372. 9	5. 1	•	0	0
2016	富山	2016	4	24	23	0. 2191	0. 1283	118	56. 3	0.819	560.3	-15. 5	•	0	0
2016	富山	2016	5	7	22	0. 3217	0. 1415	100	40. 3	0.857	239. 2	6.5	•	0	0
2016	富山	2016	5	8	24	0. 3043	0. 1457	97	48. 1	0.873	191.6	20. 2	•	0	0

備考) 消散黄砂日:ライダーにより検出された黄砂日

全体黄砂日:日本のいずれかの地点で気象台により観測された黄砂日

地点黄砂日: 当該地点で気象台により観測された黄砂日

6.2 ライダーによる黄砂検出日の状況

長崎のライダーによる抽出は 7 日あり、このうち 4 月 10 日は気象台により黄砂が観測(黄砂事例 1)されている。黄砂観測日以外で、長崎でライダーによる黄砂日とされた 6 日の状況を日毎に図 6-2-1 に示している。このうち、2016 年 9 月 11 日、2017 年 2 月 13 日以外は概ね黄砂飛来の様子を示している。

2016年9月11日の事例については、条件を満たした地点は長崎のみであった。長崎における黄砂消散係数の日平均値は0.016/kmと低い。また黄砂消散係数の最大値は24時に検出されたものであり0.19/kmと高いが、長崎アメダス測定局によれば同時刻の24時に0.5mmの雨が観測されている。当時のライダーは2波長中の短波長側のみの稼働であり、降水の影響によるデータを除去することが難しい状況でもあった。したがって本事例は、ライダーが降水の影響を受け、黄砂消散係数が過剰に検出された可能性もある。

2017年2月13日の事例についても、条件を満たした地点は長崎のみであった。天気図では移動性高気圧が確認され、後方流跡線では北京からの流れを示し、大陸では砂塵嵐ではなく、Haze が広く分布している状態である。また CFORS では dust の影響が示されず、黄砂の様子はみられない。日本で観測された SPM は、1時間値の最大で $52\mu g/m^3$ を示すものの、日平均値は $21.9\mu g/m^3$ と低い状況であった。なお、この期間における長崎のライダーは正常に稼働していた。

2016年4月19日

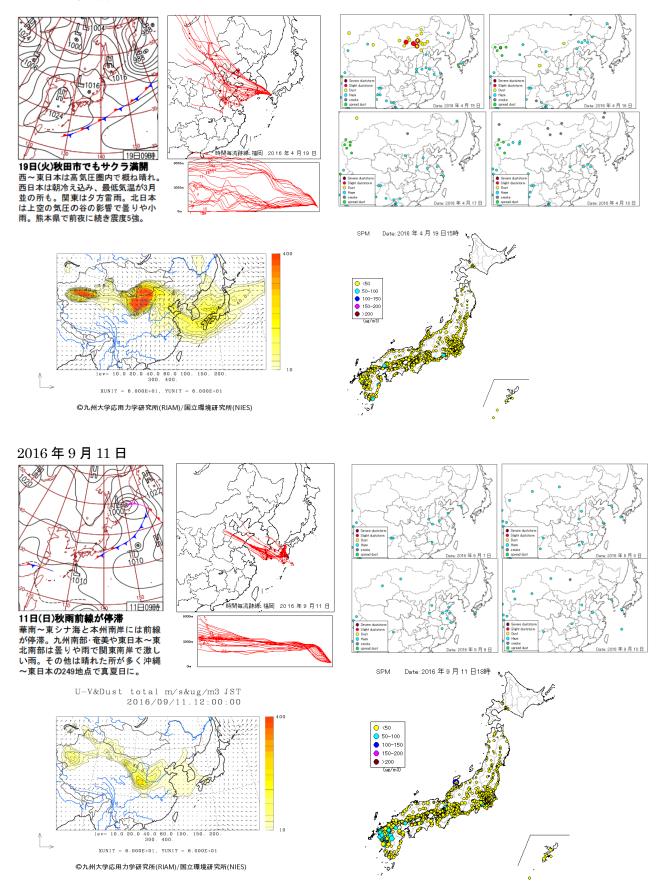


図 6-2-1(1) 長崎でのライダーによる黄砂検出時の状況

2016年11月28日

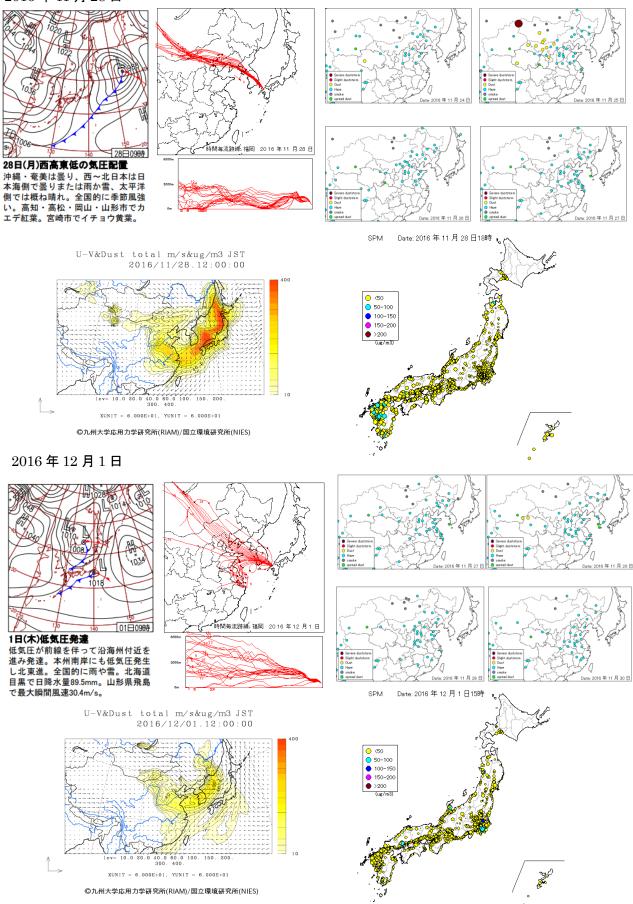


図 6-2-1(2) 長崎でのライダーによる黄砂検出時の状況

2017年2月13日

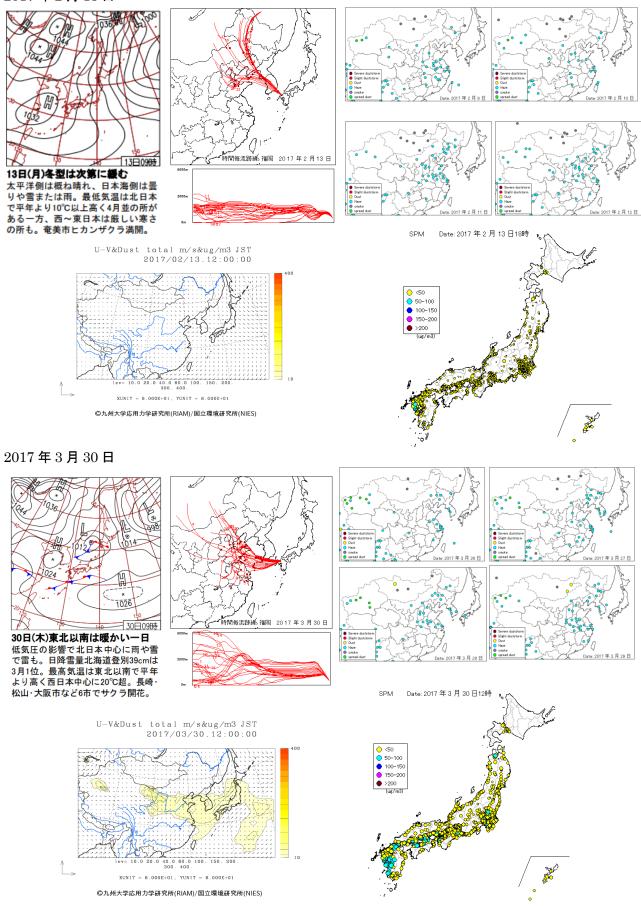


図 6-2-1(3) 長崎でのライダーによる黄砂検出時の状況

6.3 黄砂の検出条件の検討

気象台で黄砂が観測されていない状況でも、「6. 1 黄砂消散係数と SPM 濃度」に記載の設定条件で、ライダーによる黄砂の確認が可能であることが分かってきた。一方、黄砂については低濃度でも健康に影響を及ぼすとの報告もあることから、前述した検出条件「③SPM 濃度の日最大値が 50μg/m³以上であること」について、SPM 濃度の日最大値をさらに下げても黄砂の検出か可能であるか探る。

ここでは、「SPM 濃度の日最大値が $40\mu g/m^3$ 以上」と「SPM 濃度の日最大値が $30\mu g/m^3$ 以上」の条件で実施した。なお、黄砂消散係数が日最大値 0.05/km 以上であった延べ日数に占める SPM 濃度の日最大値が $50\mu g/m^3$ 以上の割合は $20\sim25\%$ 程度に対し、 $40\mu g/m^3$ 以上の割合は $42\sim50\%$ 程度、 $30\mu g/m^3$ 以上の割合は $65\sim75\%$ 程度である。

(1) SPM濃度の日最大値 40μg/m³以上の場合

本条件による検出は、表 6-3-1 に示すとおり 3 地点で 6 件あった。このうち、松江で検出された 3 件は、いずれも気象台により黄砂が観測されている。その他については、図 6-3-1 に示すとおり天気図、後方流跡線、砂塵嵐発生状況をみると、11 月 26 日(長崎)は、黄砂の飛来の可能性がうかがわれる。ただし、8 月 17 日(富山)、12 月 12 日(長崎)は黄砂飛来が明確ではなかった。

表 6-3-1 黄砂の検出条件の検討

単位)SPM: μg/m³、消散係数: km⁻¹

年度	地点	年	月	田	時間数	黄砂消散 最大	黄砂消散 平均	SPM 最大	SPM 平均	相関係数	傾き	切片	消散 黄砂日	地点 黄砂 日	全体 黄砂 日
2016	長崎	2016	11	26	23	0. 1122	0. 0259	47	21. 9	0. 6574	170	17. 5	•		
2016	長崎	2016	12	12	24	0. 5381	0.0949	42	21. 0	0. 7719	44	16.8	•		
2016	松江	2016	4	10	24	0. 0841	0.0490	43	24. 2	0. 6760	375	5.8	•	0	0
2016	松江	2016	4	24	24	0. 2618	0. 1528	47	34. 3	0. 7868	133	14. 0	•	0	0
2016	松江	2016	5	8	24	0. 2781	0. 1319	47	26. 8	0.8004	114	11.8	•	0	0
2016	富山	2016	8	17	16	0. 0592	0.0093	40	18. 3	0. 6940	335	15. 2	•		

備考) 消散黄砂日:ライダーにより検出された黄砂日

全体黄砂日:日本のいずれかの地点で気象台により観測された黄砂日

地点黄砂日: 当該地点で気象台により観測された黄砂日

2016年8月17日

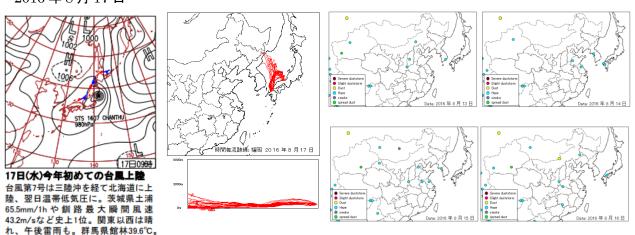


図 6-3-1(1) 長崎でのライダーによる黄砂検出時の状況(日最大値 40 µg/m³以上)

2016年11月26日

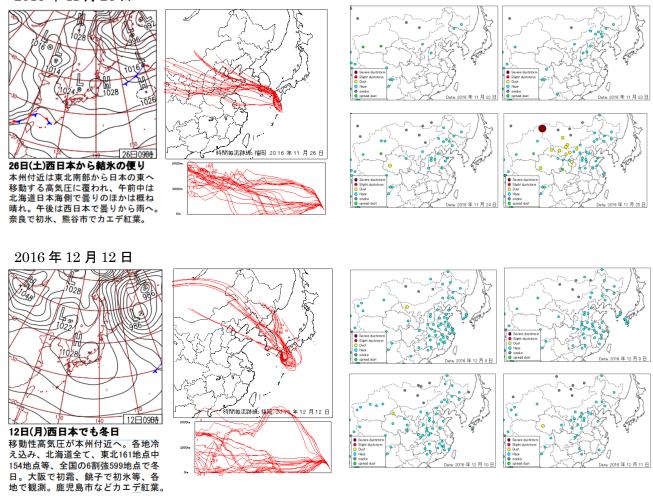


図 6-3-1(2) 長崎でのライダーによる黄砂検出時の状況(日最大値 40 μ g/m³以上)

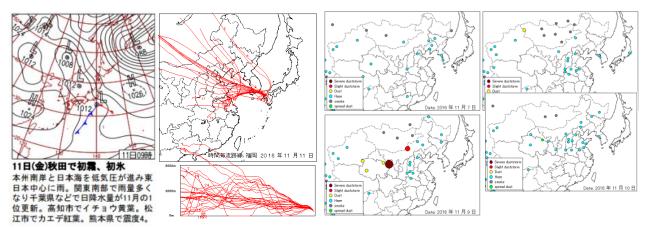
(2) SPM濃度の日最大値 30µg/m³以上の場合

本条件での検出は、長崎のみで 2 件であった。これらの天気図、後方流跡線、砂塵嵐発生状況をみると 11 月 11 日、11 月 12 日の両日ともに黄砂の飛来がうかがわれた。このように SPM 濃度の最大値が低い条件でも黄砂の様子が見られることもあり、検出条件については今後も検討を行う。

表 6-3-2 黄砂の検出条件の検討

年度	地点	年	月	日	時間数	黄砂消散 最大	黄砂消散 平均	SPM 最大	SPM 平均	相関係数	傾き	切片	消散黄 砂日	地点 黄砂 日	全体 庁黄 砂日
2016	長崎	2016	11	11	22	0.0668	0. 0262	37	21. 2	0.8972	356	11.8	•		
2016	長崎	2016	11	12	14	0.0669	0.0450	36	28. 7	0. 6525	149	22. 0	•		

2016年11月11日



2016年11月12日

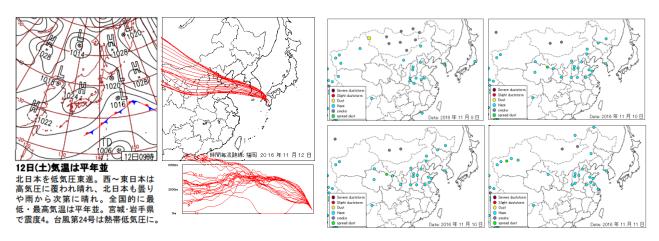


図 6-3-2 長崎でのライダーによる黄砂検出時の状況(日最大値 30 μ g/m³以上)

7. 黄砂・煙霧日の PM_{2.5} 濃度

黄砂は、 $PM_{2.5}$ の環境基準達成に大きな影響を与えていると思われる。また、越境による煙霧の存在も、黄砂と同程度かそれ以上に大きな影響を与える可能性がある。そこで、2016年度の黄砂、煙霧時の $PM_{2.5}$ 濃度との関係を検討した。

7. 1 黄砂時・煙霧時における PM_{2.5} 環境基準超過

評価対象測定局は、全国の1000局である。

2016 年度において環境基準値 1 日平均値 $35\mu g/m^3$ を超えた日数×局は 1715 (日×局) で、全体 341599 (日×局) の 0.5%である。図 7-1-1 には、全体と黄砂日および煙霧日での $PM_{2.5}$ 平均濃度と環境基準超過率をグラフで示している。測定局における黄砂観測日は 1483 (日×局)、黄砂時の平均濃度は $23.9\mu g/m^3$ で、このうち、環境基準値を超えた日数は 91 (日×局) (6.1%) である。2016 年度は、前年度に比べ黄砂の飛来は減っており、低い割合になっている。測定局における煙霧観測日は 5355 (日×局)、煙霧時の平均濃度は $21.8\mu g/m^3$ で、このうち、環境基準値を超えた日数は 363 (日×局) (6.8%) で、黄砂と同様に前年度に比べ減少している。

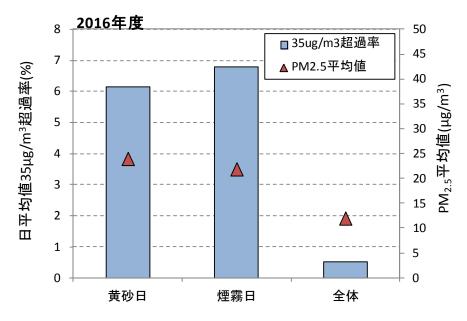


図 7-1-1 黄砂日、煙霧日の PM2.5 平均濃度と環境基準超過率(2016 年度)

2016年度の黄砂観測日数と黄砂日の PM_{2.5}環境基準超過日数を都道府県別に図 7-1-2 に示す。同様に、 観測日数と、煙霧日の PM_{2.5}環境基準超過日数を図 7-1-3 に示す。黄砂時の環境基準超過日数は、西日本で多い。一方、煙霧時の環境基準超過日数は、東西で大きな差はみられない。

図 7-1-4 に、 $PM_{2.5}$ 環境基準超過日数と、そのうちの黄砂・煙霧日数を地点別に示している。この図から、 $PM_{2.5}$ 環境基準超過時において、その際に黄砂あるいは煙霧が観測されることがあることが分かる。

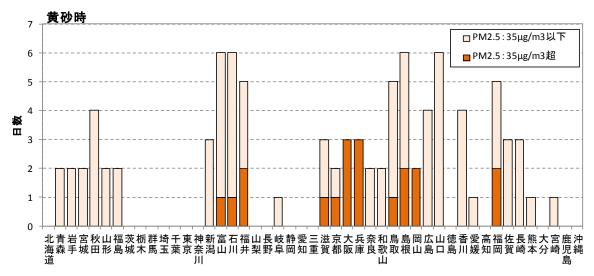


図 7-1-2 都道府県別の黄砂日数と PM_{2.5}環境基準超過超日数 (2016 年度)

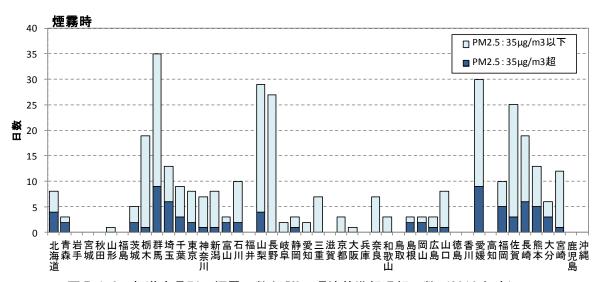


図 7-1-3 都道府県別の煙霧日数と PM2.5環境基準超過超日数 (2016 年度)

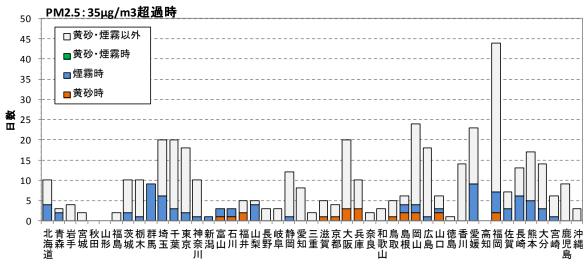


図 7-1-4 地点別の PM_{2.5}環境基準超過日に占める黄砂・煙霧の割合(2016 年度)

7. 2 PM_{2.5}環境基準値を超過した日で黄砂もしくは煙霧が観測された地点の PM_{2.5}成分濃度

全国の自治体では、毎年度、4季にわたって $PM_{2.5}$ の成分分析を実施している。ここでは、2016年度の成分分析調査結果のうち、 $PM_{2.5}$ の日環境基準($35\mu g/m^3$)を超過しており、かつ黄砂もしくは煙霧が観測された地点を抽出し、成分の項目別に黄砂日と煙霧日で比較した。

 $PM_{2.5}$ が日環境基準値を超過しかつ黄砂が観測された地点は、2016 年 5 月 7 日の島根県 1 地点(隠岐局)と福岡県 3 地点(北九州局、市役所局、元岡局)、5 月 8 日の鳥取県 1 地点(西町局)と徳島県 1 地点(徳島局)である。また、 $PM_{2.5}$ が日環境基準値を超過しかつ煙霧が観測された地点は、5 月 27 日の福岡県 1 地点(飯塚局)と 2017 年 1 月 27 日および 28 日の熊本県 1 地点(水道町局)である。

比較の結果は、図 7-2-1 および図 7-2-2 に示すとおりである。

黄砂時に上昇した項目は、Mg²⁺、Ca²⁺、Al、Mn、Fe などの土壌関連の項目であった。

煙霧時に上昇した項目は、煙霧が福岡県で観測されたときと、熊本県で観測されたときで異なっていた。煙霧が福岡県で観測されたときに上昇した項目は、 SO_4 2°、Cr、Cu、Zn などであった。なお、このときの煙霧は規模の大きな煙霧で、煙霧事例 1 (p.40) で前述しているとおり、大陸からの越境を受けていたと考えられる。一方、煙霧が熊本県で観測されたときに上昇した項目は、NO3°、Cl7、OC0、EC4 などであった。熊本県の成分分析調査地点である水道町局は道路近傍であり、また上昇した項目から自動車の排ガスを主とした地域的な影響によるものと考えられる。

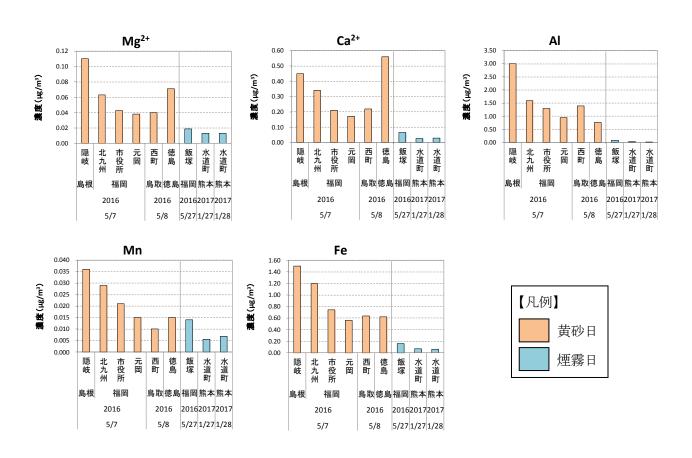


図 7-2-1 黄砂日に高濃度になった項目

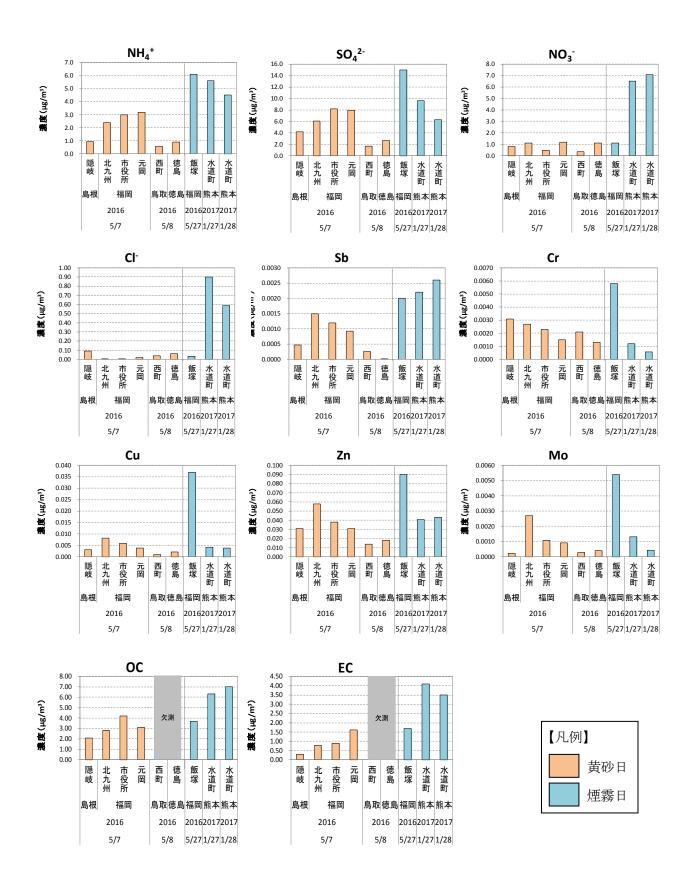


図 7-2-2 煙霧日に高濃度になった項目

7. 3 黄砂日および煙霧日で PM2 5環境基準値を超過した日の PM2 5発生源寄与推定

黄砂・煙霧の観測と $PM_{2.5}$ 成分濃度採取時期が重なったサンプルを抽出し、黄砂・煙霧時の発生源寄与にどのような違いがみられるかを検討した。 $PM_{2.5}$ の発生源寄与は、 PMF (Positive Matrix Factorization) 法により求めた。 PMF 法はリセプターモデルの一種であり、発生源の組成や特徴をもとにしたサンプルから発生源の寄与を定量化するものである。ソフトは、EPA-PMFv5.0 を使用した。

計算の条件は下記のとおりとした。

PMF の計算の条件

【件数】

全 335 件

(2016年度に観測された黄砂・煙霧の期間と、環境省が実施した成分分析の調査期間が一致した全国のデータ)

【成分数】

以下の全19項目

イオン成分: Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²-、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺

無機元素成分: Al、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Zn、As、Pb

炭素成分: OC、EC

【因子数】

7因子

図7-3-1に因子数7での発生源プロファイルを示す。それぞれの因子については次のように想定した。

Factor1 は Al、Ti、Fe、Mn、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の割合が高く、黄砂を含む土壌を表す因子と思われる。黄砂時の Al/Fe 比は $1.15\sim1.75$ とされて $^{31)}$ おり、ここでは 1.76 とほぼ同程度である。

Factor2 は OC、EC で高く、バイオマスの燃焼によるものと想定される。バイオマス由来の OC/EC 比は 2^{-1} おり、ここでは 3.05 と範囲内であった。また、他の因子に比べ EC も高いことから、自動車排ガスもこの中に含まれると思われる。

Factor3 は Na+、Mg²⁺、Ca²⁺などで高く、海塩によるものと想定される。海塩の Mg²⁺/Na+比は 0.11 とされており、ここでは 0.26 と高い。

Factor4 は Zn、As、Sb、Pb などの金属類が卓越しており、一般的には鉄鋼・石炭とみなされる 28 。 鉄鋼・石炭の一般的な Pb/Zn 比は 0.8 とされており、ここでは 0.68 と近い。

Factor5 は NO₃、 Cl 、NH₄+で高く、二次生成された NH₄NO₃ と考えられる。NH₄NO₃ の NO₃/NH₄+ 比は 3.4 であり、ここでは 2.48 と若干低い。

Factor6 は $SO_4^{2^{-}}$ NH₄+などで高く、二次生成された(NH₄)₂SO₄²-と考えられる。(NH₄)₂SO₄²-の $SO_4^{2^{-}}$ /NH₄+比は 2.7 となるが、ここでは 2.66 とほぼ同程度である。

Factor 7 は V、Ni などが高く、重油燃焼と思われる。重油燃焼の一般的な V/Ni 比は $2.1\sim3.1$ とされて 2^{99} おり、ここでは 1.93 と範囲内であった。

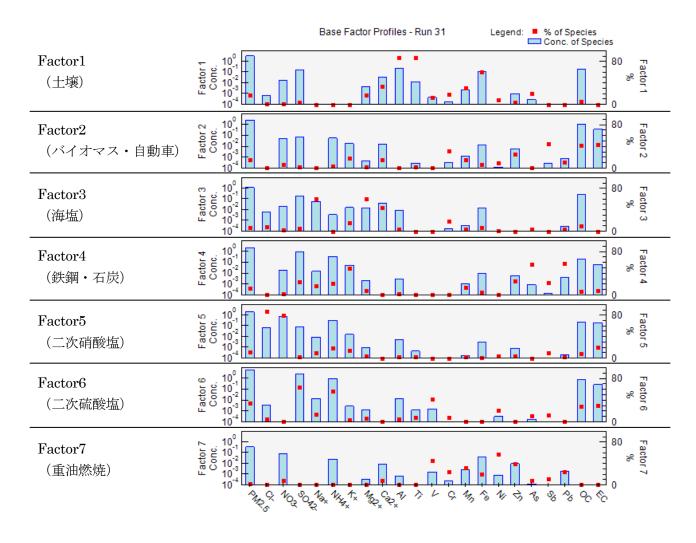


図 7-3-1 発生源プロファイル

2016年度に観測された黄砂・煙霧の期間と、環境省が実施した成分分析の調査期間が一致した全国の調査結果 335 件について、PMF による発生源寄与平均組成の結果は、図 7-3-2 に示すとおりである。

平均組成は、硫酸塩の寄与が最も高く 34.9%を示し、次いで土壌の寄与が高く 18.3%を示した。このほか、バイオマス・自動車 15.6%、鉄鋼石炭 12.1%、硝酸塩 10.6%などが寄与の高い項目である。

これと同様に、2016 年度の黄砂時の結果を図7-3-3、煙霧時の結果を図7-3-4 に示す。黄砂時は土壌、煙霧時は硝酸塩と鉄鋼・石炭が高くなる傾向にある。

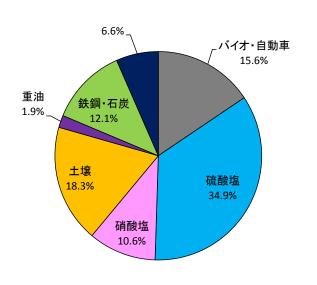


図 7-3-2 黄砂・煙霧時の各寄与濃度の平均組成

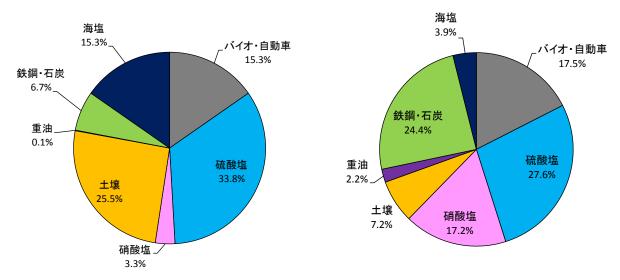


図 7-3-3 黄砂時の各寄与濃度の平均組成

図 7-3-4 煙霧時の各寄与濃度の平均組成

 $PM_{2.5}$ の日環境基準 $(35\mu g/m^3)$ を超過し、かつ黄砂もしくは煙霧が観測された地点の $PM_{2.5}$ について、その発生源寄与を項目別に黄砂時と煙霧時で比較して、図7-3-5のとおり地点別でまとめた。

黄砂時に上昇した寄与項目は、土壌が著しい。

煙霧時に上昇した項目は、成分濃度と同様に、福岡県と熊本県で異なっている。煙霧が福岡県で観測されたときに上昇した項目は、硫酸塩が主で、熊本県では、バイオマス・自動車、硝酸塩であった。これは、同じ煙霧でも、福岡の場合は大陸からの影響を、熊本の場合は地域の影響を主に受けていると思われる。

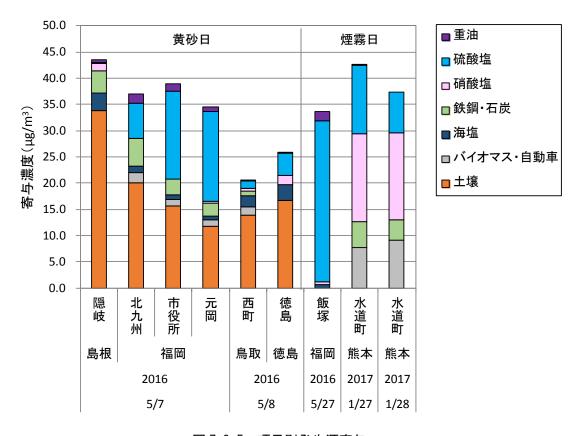


図 7-3-5 項目別発生源寄与

8. 砂塵嵐発生と黄砂観測日数の減少について

我が国における黄砂の年別観測日数は、気象庁で公表されており、図 8-1 に示すとおりである。黄砂は、増加傾向にあったものが 2002年(観測日数 47日)を境に減少傾向に転じており、近年の観測日数は $10\sim20$ 日、また 2017年の観測日数では 3日とこれまでで最も低い。ここでは、日本で黄砂が観測される条件について検討を行ったうえで、黄砂の減少の要因を探る。

一般に、日本へ飛来してくる黄砂は、大陸の黄土地帯で低気圧が発生し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すのがほとんどである。

そこで、日本で黄砂が観測される条件として、黄砂の発生源とその輸送経路の観点から、砂塵嵐発生 頻度と日本での黄砂観測の関係および、後方流跡線軌跡と日本での黄砂観測の関係について検討を行う。

大陸の黄土地帯で低気圧が発生し巻き上げられた砂は、現地では砂塵嵐として観測されるため、その情報を用いて日本での黄砂観測の関係性をみる。また、発生した砂塵嵐は気流により運ばれ、日本で黄砂が観測される。気流は後方流跡線で確認することができるため、後方流跡線の軌跡と日本での黄砂観測の関係性をみる。

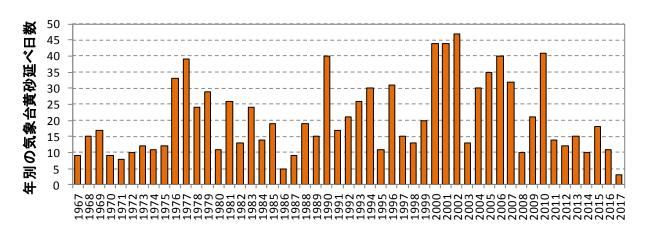


図 8-1 日本での黄砂観測日数の経年変化(年別集計)

8. 1 条件の設定

(1)期間

解析の対象期間は、2002~2016年の15年間とした。

図 8-1-1 に月別の黄砂観測日数を示しているが、 $3\sim5$ 月は日本での黄砂観測総数の約 85%を占める。 年毎での $3\sim5$ 月の割合をみても(図 8-1-2)その割合は高いことから、対象月を $3\sim5$ 月とした。

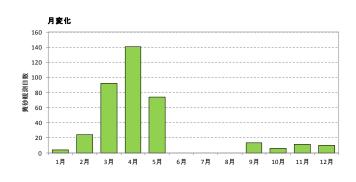


図 8-1-1 日本での黄砂観測日数の経月変化

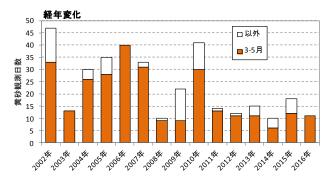


図 8-1-2 日本での黄砂観測日数に占める 3-5 月の割合

(2)後方流跡線

後方流跡線の起点位置は、日本全体への影響及び大陸に面していることを考慮して福岡、富山、札幌の3地点とした。なお、起点高度は1000m、遡及時間は72時間とした。

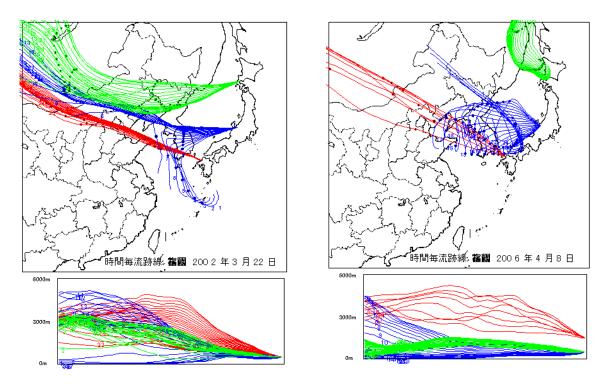


図 8-1-3 福岡、富山、札幌での後方流跡線の事例

(3)砂塵嵐の種類

砂塵嵐の発生状況は、世界気象資料を用いて集計を行う。ここでは、「Severe duststorm or sandstorm」(code:33~35)と「Slight or moderate duststorm or sandstorm」(code:30~32)を砂塵嵐として集計した。

表 8-1-1 世界気象資料での砂塵嵐等の表示

Severe duststorm or sandstorm
33 has decreased during the preceding hour
34 no appreciable change during the preceding hour
35 has begun or has increased during the preceding hour

Slight or moderate duststorm or sandstorm
30 has decreased during the preceding hour
31 no appreciable change during the preceding hour
has begun or has increased during the preceding hour

(4) 砂塵嵐の発生地域

前年度の報告書では、図 8-1-4 のとおり、砂塵嵐の発生地域として、北緯 $35\sim55^\circ$ 、東経 $80\sim120^\circ$ の 範囲を 5° メッシュで 32 地域に分割した。

地域毎の砂塵嵐(Severe・Slight)の発生日数は、図 8-1-5 に示すとおりである。また、日本で黄砂が観測された日の福岡・富山・札幌での後方流跡線が 32 地域のいずれかを通過した日数について、通過した地域別で示したものを図 8-1-6 に示す。

図 8-1-5 および図 8-1-6 から、地域 $13\sim16$ と $21\sim24$ は、他の地域と比較して、砂塵嵐の発生回数が非常に多く、かつ日本からの後方流跡線が通過する回数が多いことがわかる。これらの地域は、モンゴル東部から内モンゴルにかかる北緯 $40\sim50^\circ$ 東経 $100\sim120^\circ$ にあたり、特に日本に影響を与えやすい地域と想定できる。

以上から、対象エリアは、北緯 $40\sim50$ °東経 $100\sim120$ °(図 8-1-4 において黄色で表示したエリア(以下、「黄砂発生主要地域」とする。)とする。

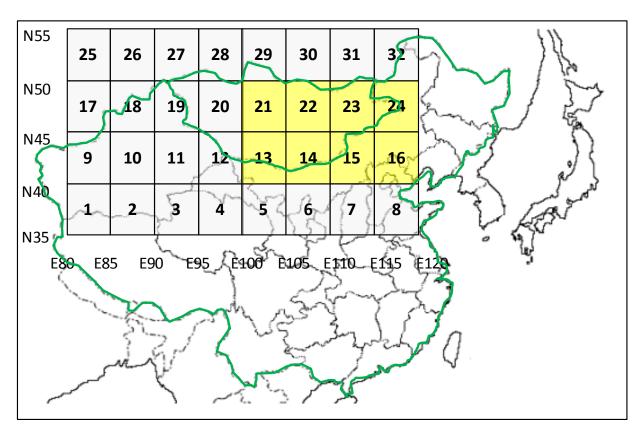
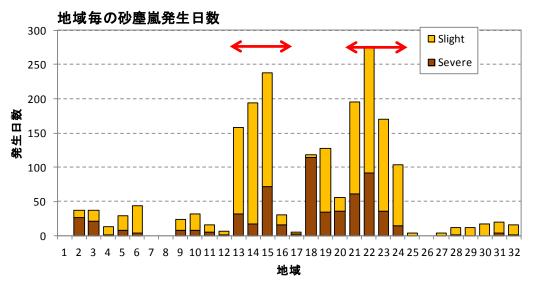
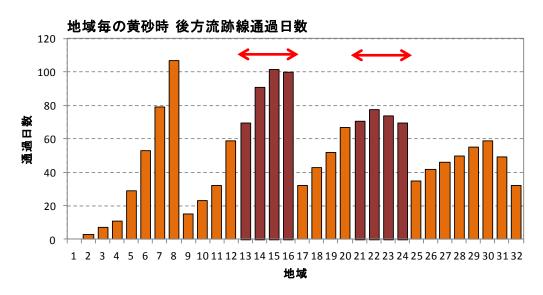


図 8-1-4 砂塵嵐発生地域の 5° メッシュ



備考) 図中の矢印は、砂塵嵐発生日数と後方流跡線通過日数がともに多い地点を示す。 図 8-1-5 地域別砂塵嵐発生日数



備考) 図中の矢印は、砂塵嵐発生日数と後方流跡線通過日数がともに多い地点を示す。 図 8-1-6 日本での黄砂時の地域別後方流跡線通過日数(福岡、富山、札幌)

8. 2 集計結果

大陸における砂塵嵐の発生、日本から砂塵嵐発生地域までの後方流跡線通過状況、日本における黄砂の観測状況、日本における SPM の状況について、前項に従って集計した結果を表 8-2-1 に示す。

15年間の3~5月のすべての日について、黄砂発生主要地域における砂塵嵐(Severe・Slight)の発生の有無、黄砂発生主要地域における後方流跡線(福岡、富山、札幌の後方流跡線のいずれか)の通過の有無、黄砂の観測地点数、SPM 日平均値が50μg/m³を超えた常時監視測定局の数をまとめた。

表 8-2-1 砂塵嵐の発生・後方流跡線通過・黄砂の観測・SPM 高濃度の日毎一覧

嵐	線観測 50	数嵐	流跡 黄線 観	則 数	砂塵嵐	流跡 黄花線 観光	砂 SPM> 50局 数	砂塵	2005 流跡 責線 崔	b砂 SPM	ᄁ	2006 流跡 黄花線 観波	沙 50局 數	砂壁	1 1	5P 黄砂 観測		少塵 流路嵐 線	斯 黄砂 観測	数		泉観測	SPM> 50局 数	少塵 流路嵐 線	外 更砂	SPM> 50局 数	嵐 紛	砂 更砂 泉 観測	SPM> 50局 数	線	12 黄砂 50 観測 50		線	13 黄砂 観測 50/ 数	局一砂壁	整 流跡 線		SPM> 50局 数		2015		砂塵湯	2016 流跡 黄 線 観
0	O 2		0	351 2		0	2 6		0	9		0	1		0		1 (0 0	1	2	<u> </u>			0 0 0 0	o	31 1	<u> </u>	5	1	0		3	0	1 9		0		168		0 1	5	0	
0	0 7	72	0	68 1		0	1	\rightarrow	0	15		0	1			12	72	0	25		0 0)	2	0 0 0		1	С)	3	0			0	19		0		_	(0	9	•	0
0	O 5 O 4 3		0	30		0	1	0		1		0	6 162	2	0	3		0			C		0	0		1	C)	1 0				0	15	1	0		1		0	3		0
0		2	0	3		0	1		0	28	7 O	0	920		0	_		- 0		8	○ C		1	0)	7	0	1:		0	18 44		0		_1		0	5 2		0
		34		1		0	90 169			483		0	272 152	2	0			0 0		19 57	C		4	0 0					1	0		2 0	0		37	0		_	(0	3		0
	0 1	12	0	1		O 24	4 337 5 210		0	82	7 0	O 3	135	5	0		(0 0		610	0 0		1	0					1	0			0		1	0		3	(0	7 9		0
	0	6 83		18			35		0	1		0	110		0		1 0			459 173	0 0		1	0 0		39	0 0		3 29	0			0	55		0		159	(0	9		0
Ŏ	0 7 2			192		0 13	3 369		0	8		1 -	3		0			0 0		3	0 0)		0 0	3	20	C		87 O	0		3	Ō	1		0		_	(0	4		0
0	O 16 2 O 24 4		0	312 4		O 10	0 461 280	0	0	365 594		0 1	7	5	0			0	8	84	0 0	27 46	9 601	0	3	34 1	0 C)	1	0	3	3 O 4 ©	0	1 5 15	j4 O	0		39 394	(0	153 64	0	0
0	O 44 4 O 16 5		0	21 4		0			0	93		O 10	86	i	0		2	0 0		361 402	С	41	294 142	0 0		0)	1 14	0	4	4 🔘	0	26 11	6	0		312 216		0	57 130		0
•	O 10 2 O 25 8	12	0	1 2		0 0	22	0	0	2 2	0	0 3	6		0	1		0 0 0 0		11	(a) (c)		1 2	OO	5 63	300 1099	0 0) 2	107 O	00		0	0	29 18 1	3	0		2		0	19 9	0	0
0	O 44 13 O 44 5	355		20 7		0	20	0	0	103		0 21	187	7	0	5	59 70		1	3	C		1 3	0 0	6	2	C) 10	1 0			1 © 5 O	0	2	,—	0		_	(O 23	3 332		0
	O 8	1 0	0 0	242		0	186		ŏ	2 2		0 11	1 14	Ö	Ö	53	31	0	2	24	C)	1	0		2	C			0	11 3	2	0	6		ŏ		126	(0 7	3		
	O 1 O 3	69	O 2	559 1 643	0	0	504 11		0	3	•	0 1	46	0	0	7 7	9 (0 0		148 6	0 0)		0		2)	1	0			0	2	_			67 147	0	#	10		0
	0	9 O	O 2	928		0	4	0	0	199	9	0 15	213 5 282	2 0	0	11 14 30 2	48 (15 (© 0 0 0		3	© C			0 0					1 0	0	1		0	87		0		10	0	2	16	ŏ	0
0	O 3	84 5 O	0 1	8 24	0	0 9	29	0	0	2 4	O ⊚	O 8	19	(((((((((((((((((((0	17 3 8 2	12 (◎ ○ ○		2				0 0			C)	11 © 23 O			_	0	32	2	0		_ 5	\rightarrow	0 1	12 37	0	0
0	O 19 3 O 27 5	28	0 1	544 248	0	O 26	6 1 15	0	0	26 4 69	0	0 1	1 21	0	0	3 1	2	0 0	_	1 3	C		4	0		22	C		0 28	0	3	3 0	0	1	+	0		\dashv		0	30 109	0	0
0	O 36 12			83	0	0 2	14	0	Ŏ	1 200	3 0	0 1	320	0	0	53 14	67	0 0		5			3 7	© 0		5	C	5	5	0	1	0	0	9	0	Ŏ		4		ŏ	8		0
0	0 14	3		164		0 5	5 222		0	2 1	, ,	0 14	1 304	4 0	0	29 2	.5	0		15			72	0		2	C)		Ö			0	1	#	0			0		2		0
i	0	6	0	5		0	16	0	0	7 296	6	0 1	3		0			0		59 26)	18 55	0		41 17)		0		0		1	۲	0			(0	12 83		0
•	6 7 O 15 9	31	0	102 60		0	99	0	0	1 120) <u> </u>	0 41	102	:6	0	7	2	•		33 1	0 0)	368	● O			0 0)	1 0	0		0	0	1	0	0		2	(0			0
		432 654 ©	0	13 6		0	7 161	0	0	184			267		0		i7 '8	- 0		6			158 71			3	0 0	0 1	5 © 1 O	0	11 2	4 32	0		+	0		97 47		0			0
0		463 © 84 O	0 1	68 77		0	537 588		0	1 5	0		425 63		0		37	0		3	0		56 78	00		4		7 7	5	0 0	7		0	1	+	0		23 26		0	1		0 0
0	O 27 6	53	0 3	637	0		162		0	3 19	0	0	339		0	20		0		13 20	0 0		61	0		1	0 0)	9 O			5 0		1	0	-	\Box	9	0 (0	1		0
o O	O 19 12	247 0	0 1) 419		0 1	58		0	28 254	1 0	Ö	7		Ŏ O	1	5	0		12)	3	0 0			0 0		122 O			0	Ŏ	1 1	i	0	ightharpoonup	115	0 (0	- 1		0
0	O 16 5	10 0	0 2	336	0	0 19	9 428	0	0	8 258	3 0	0 3	1	0	0	7 6	4	0 0		103	0 0)	12	0			0 0)	27 O				0	92	2	0	$\perp \perp$	465		O 8	21		0
0		40		523 406		0 16	6 301	0		23	5 0	O 43	784 2 921	1 0	0	1	1 (0		2	0 0	- ;	12	0 0		14	0 0)	2	0	1	0	0					3	(0	2 21		0
0		66 O	0	268 2	0	O 23	52 3 161	0	0	9 95 38 75	0	O 2	10 1	0	0	2 ;	3	0		3 18	C)	9			15 13	0		0)	1	2 0	0		0		$\pm \pm$	7		0	25 1		0
-		19 O	0	3 51	0	O 34	4 1071 7 489		0	25 10 4 8	0	0	43	0	0	3 1	8 (0		49 114	0 0		3)	13	0	10 4	9	0	1	+	0	+-+	8		0	12		0
_			0	416 291	0	0 1	1	0	0	3	0	0 42	1 919	6 0	0	;	5 (0 0		24 34	0 0		1	0			(a) (c)		1 0		22 6	39 O	0	14	4	0			0 (8 23		0
	0	3 O	0	38	ŏ	ŏ	8	0	0	82	ŏ	0 3	13		0	3 2	26	0	2	76		2	2	0 0	10	3	C)	75 ©		10 0	1	0	1	Ĭ	0		3	0 (0	11		0
0	2	27 O	0	55 306	0		1		0	153	3	0 4	13	0	0	2 1	8	0		410 365	0		2	0	5	4			2	0		3 0		0	,	0		2	0 0		59 110		0
0	1	48 24 O		146 2	0		75	0	0	3 230	5 0	O 9 O 25	88 247	7	0		2 1	0		842 842	0		2	0	23	7 15	OO)	1 O			7	0	2	2 0			7	0	士	11 5		0
0			0	61 91			84 50		0	2 89		O 24			0		9			354 58	0)	6 8	0 0		13 3		D 14 D 43	198 O)		2	0	1	1 0		+	6	0		2		_
0		4 O			0	0		0				O 2				69		0 0		16 15					11			38 29		0			0		-	0		13	0 (0	2 2		0
0		12 O		495 740	0		2	0	0		0	0 1		0		70	01	0 0		1	0		5	0 0		1057) 16		0		3 0	0		#	0		2	0 (O 10 O 5) 1		0
0	1	53 87			0	O 14	4 632	0			0		11	0	0	5	i7	Ö		8	0	-	1 34	O		6	0		2 O	0	11	93 O	ŏ			0		1		0 0	18		0
0		9	0	28		1	214		0	52			22	0	0	1 13	69	0			0		41	0 0	2	9	0 0		72	0	7	73 0			5	0			0 (0	10		0
0			0			0 2	112		0	15		0	16		0		1						501	0 0	1	5	0		172 O	0		3	0		08	0		1		0	3		0
		18 22		557 770		0						0		0				0 0		2	0)	752 118	0 0	3	4	C	39					0			0			0 (3		0
0		74 ©		286 92	0	0		0				0				7 4		- 0			0 0		3			1) 14	214 21 O	0	1			99		0		20 8	0 1		14 28		0
	4	46 68		121 323	0	0		0			0	0				6 15 10 6					0		5	O		3	0 0) 1	60 53 O		1 1			1 2		0		3 7	0 (0	55 3		0
0	1	18 76		294	0	0	208		0	35	0		149	9 0	0	6 8	17			114	0 0)	5	Ö		1	0 0		24	Ö		0 0		2	2	ŏ		20 7		0	2		ŏ
0		5 O		533	0		64		0	3		0	35	0				• 0		13	0 0		200	0	2	425	0		56 O			1	0	6	3			17	(0 1	7		
	5	39 O		224 551		0	162	0	0	66	0	0	193	5 3 ©			6	0 0		43 327	<u> </u>)	272	O	24	477	0		45 3 O			9 0	0	39	93 O	0		1 49		0	1		
	O 3	97 16 O		538	0			0		1		0	135	5			8			233	0 0		3	0	4	28	0					0 0	0	16	30	0			0		5 6		
	0 2	27 © 24		220 180	0	0		0								50 91					0		3 2	0	21				2	0	1-	3	0	17		0	5	24 32	0		7		0
0	0 5	15		235 109		Ō	302			17	0		16	0	0	50 90 46 10 12 7	046	0	+		0		9			1			11 O		1	4 O		1 3	1	0	6 20	86	-	\mp	9		0
_	3	32 22 O	\perp	35 10		0	97	0	0	35	6		159	9 0	0	2 1	1 (0		4 5	-			0		1 4	Ö	- 10)6	0	93	3 O	0	31 35	422	0	0	11 23		0
	0 1	53 O	40	1		0	12	0		144	4 0		476	6 O		1	1		3	67	00		9	00	37 0	0.0			2	00 -	3	6	0	11	1 0	0	36	1206	0 (4		0
12		90 24			4			13	78		15			15	j			10	ษ 96	95	6	υυ 133	5 54	26 (10	358		24 8	70 218	95 2	26 70 8	89 5		6 79 4	124 62		23 67	7 133	84	3	76 7		5 3	78
12 51		31 34		13 26	8 39		26	10 60	-	28 7	15 70		40	43		31		14	9	10	43	9	4	6	29	8	2 34	13	4 3	38	11	5 3	3	11 4		27	6	6	2 35		12	9	-+

- ※1 砂塵嵐の〇は Slight、⓪は Severe(規模小)、lacktriangleは Severe(多地点で観測)を示す。いずれも当日に大陸で発生したものである。 ※2 後方流跡線の〇は福岡、富山、札幌からのいずれかの後方流跡線が北緯 $40{\sim}50^\circ$ 、東経 $100{\sim}120^\circ$ を通過した日であることを示す。
- ※3 黄砂観測は、気象台が黄砂を観測した地点数を示す。
- %4 SPM>50 局数は、全国の常時監視局で SPM の日平均値が $50\mu g/m^3$ を超えた局数を示す。

8. 3 日本での黄砂観測と砂塵嵐発生頻度の関係

黄砂発生主要地域における砂塵嵐(Severe+Slight)の発生日数と、日本での黄砂観測日数の経年推移は、図 8-3-1 に示すとおりであり、これらの相関図が図 8-3-2 である。砂塵嵐(Severe+Slight)と黄砂観測日数の \mathbf{R}^2 は約 $\mathbf{0.5}$ で、ある程度の関連性がみられた。 $\mathbf{2008}$ 年に黄砂が少ない原因は不明であるが、この $\mathbf{2008}$ 年を除いた Severe との関係では \mathbf{R}^2 は約 $\mathbf{0.8}$ を示し、大陸で砂塵嵐が多いほど、日本で黄砂が観測される日数が多くなる傾向にある。

ただし、図 8-3-3 に示すように、日本での黄砂観測日の減少と、砂塵嵐発生頻度の減少における回帰式の傾きは異なっており、黄砂観測日数の減少幅が大きい。清水ら 340も、ライダーによる黄砂消散係数の高度 6km までの積分値(黄砂光学的厚さ)について、2007 年から 2016 年にかけて日本国内平均では-2.5%/年のトレンド、モンゴル国内平均では-0.7%/年のトレンドを検出した。即ち、黄砂の発生源近傍より下流にあたる日本上空で黄砂濃度の減少傾向が強く、要因としては気象要素(移流・沈着)の変動が考えられる、としている。

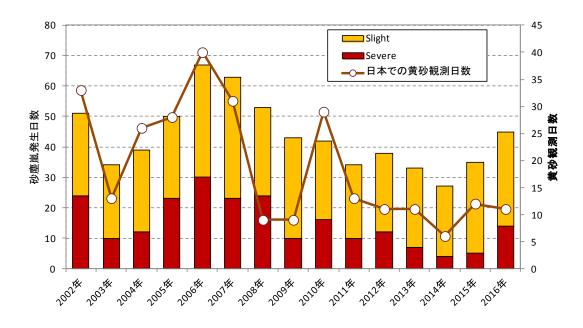


図 8-3-1 砂塵嵐発生日数と日本での黄砂観測日数の経年変化

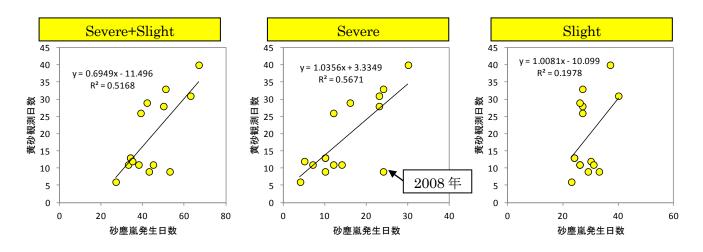


図 8-3-2 砂塵嵐発生日数と日本での黄砂観測日数の散布図

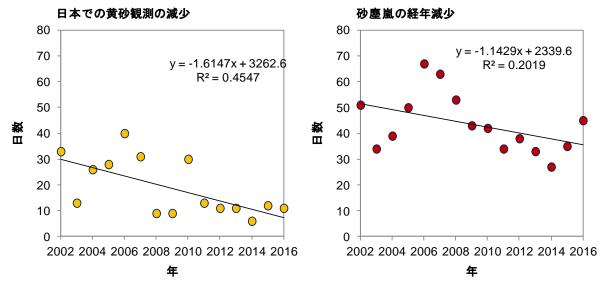


図 8-3-3 砂塵嵐と黄砂の経年減少

8. 4 日本での黄砂観測と後方流跡線軌跡の関係

福岡、富山、札幌いずれかからの後方流跡線の黄砂発生主要地域通過日数と、日本での黄砂観測日数の経年推移は、図 8-4-1 と図 8-4-2 に示すとおりである。後方流跡線の軌跡はこの 15 年間で大きく変動している様子はみられず、黄砂観測との明確な関連は確認できない。このことから、日本での黄砂観測の年別の推移は、黄砂発生源地域からの気流よりも黄砂発生源地域における砂塵嵐の発生と強く関係していることがいえる。

次に、各地点(福岡、富山、札幌)の黄砂観測日数の 15 年間総計と、各地点からの後方流跡線の黄砂発生主要地域通過日数の 15 年間総計は、図 8-4-3 に示すとおりである。日本の西側に位置するほど後方流跡線通過日数と黄砂観測日数がともに多い傾向がみられることから、地点別の差異は黄砂発生源地域からの気流と強く関係していることがいえる。

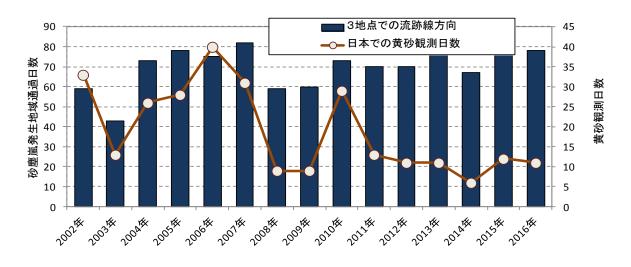


図 8-4-1 後方流跡線の砂塵嵐発生地域通過日数

3地点での流跡線方向

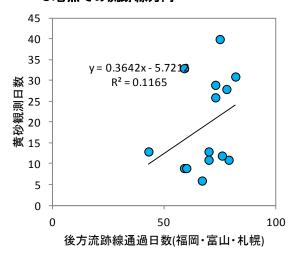


図 8-4-2 日本での黄砂観測日数の経年変化と散布図

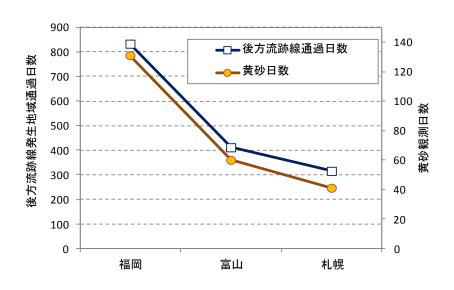


図 8-4-3 砂塵嵐発生地域からの後方流跡線の通過日数と黄砂観測日数の地点別集計

8. 5 日本の黄砂の由来となる砂塵嵐発生地域における黄砂発生源対策

前章から、日本の黄砂観測日の年別の推移は黄砂発生源地域における強い砂塵嵐発生数との相関が高いこと及び日本の黄砂観測日の観測地点別の差異は黄砂発生源地域からの観測地点への気流の多さとの相関が強いことがデータからも裏付けることができた。そこで、本章では、日本の黄砂の由来となる砂塵嵐発生地域の絞り込みを行うとともに、同地域における黄砂発生源対策の状況を整理する。

図 8-5-2 に黄砂発生主要地域(図 8-5-1、再掲)の地域毎に示した砂塵嵐の発生日数を示している。砂塵嵐の発生日数は、地域6が最も多く、次いで地域3が多い。これに対して、図 8-5-2 には、日本で黄砂が観測された日に黄砂発生源地域において砂塵嵐が発生して、同地域からの気流が福岡、富山、札幌いずれかを通過した日の 15 年間総計を、黄砂発生主要地域の地域毎に示したものを示している。これをみると、地域3が最も多く、次いで地域6、7、2となっている。地域3、6、7、2はモンゴル及び内モンゴル周辺である。黒崎ら 35 は、黄砂の輸送経路、輸送高度などを調べなければ結論付けられないとしたうえで、コビ砂漠、タクラマカン砂漠、黄土高原など砂塵嵐が発生しやすい地域よりも内モンゴル周辺が日本への黄砂飛来に大きく影響していることを示唆している。

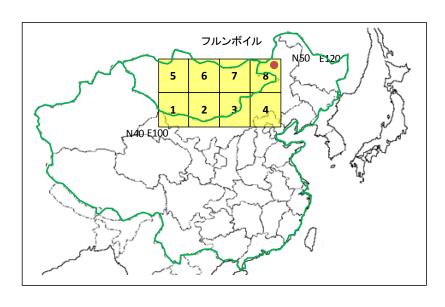


図 8-5-1 砂塵嵐の発生が多い地域

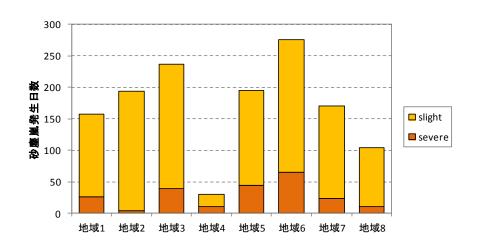


図 8-5-2 地域別の砂塵嵐発生日数

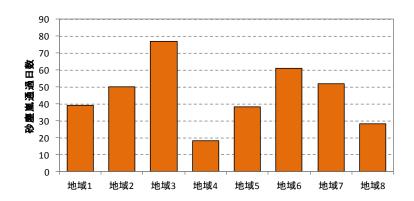
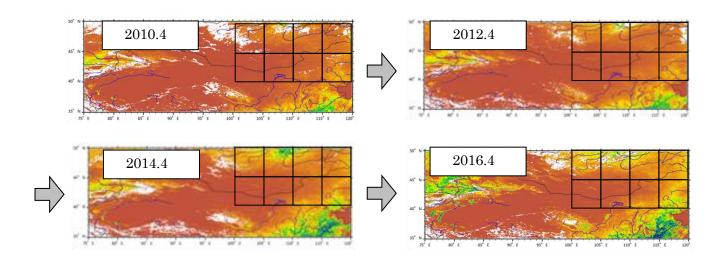


図 8-5-3 全国黄砂時に砂塵嵐発生地域からの気流が福岡・富山・札幌の いずれかを通過した地域別日数

内モンゴル地域では、中国政府により植生等の対策が進められている。第五次中国荒漠化と砂漠化状況公報 (2015 年 12 月国家林業局公表) によれば、中国政府では、植生による対策として退耕還林 (1999~2010 年)、退牧還草 (2003~2020 年)、天然林保護 (2000~2050 年)、風砂対策 (2000~2010年)、保護林建設 (1978~2050 年)、速生・豊産用材林基地建設 (2001~2015年)の6つの工程を実施されており、この結果、2014年の中国全土の砂漠化面積は172.12万 $\,\mathrm{km}^2$ で、2009年から9902 $\,\mathrm{km}^2$ 減少している。また、中国ではさらに2016年から2020年にかけて10万 $\,\mathrm{km}^2$ の砂漠化対策を実施する予定である。

中国政府によるこれらの植生等の対策を技術的に支援するため、日本国環境省では、日中韓三カ国環境大臣会合(TEMM)の合意の下、2008年から日中韓三カ国で黄砂共同研究を実施している。共同研究分野はモニタリング・早期警報システム(ワーキンググループ1)と黄砂発生源対策(ワーキンググループ2)がある。ワーキンググループ2では、2013-2014年に地元政府により植生等の対策が行われた中国内モンゴル自治区フルンボイル市の砂漠化地域において、毎年夏に、日中韓三カ国の専門家が現地調査を実施している。現地調査では、発生源対策後の砂丘の移動状況、植生の定着具合等を調査・分析して、植生毎の適応性等の対策効果評価を実施している。今後、パンフレットの配布、ワークショップの開催等を通じて、地元政府・住民に対する成果の周知が図られる見込みである。

砂塵嵐の発生の減少の要因は、強風の発生頻度、積雪の状況や土壌中の水分の保持量など様々なものが考えられるが、植生の回復もその一因と思われる。参考に、大陸中央部における緑化の指標として、「鳥取大学東アジア黄砂発生モニタリングシステム」で公開されている植被率の2010年から2016年の4月について、図8-5-3に示す。図中の囲いは、黄砂発生主要地域の8地域であり、これらの地域において徐々に植生が回復している様子がみられる。



鳥取大学 東アジア黄砂発生モニタリングシステムより

(http://www.alrc.tottori-u.ac.jp/staff103/thresholdwindspeed/ja.html)

植被率: 2m×2m の正方形の枠を緑化地に設定し、その枠内を植物が覆っている割合

図 8-5-3 黄砂発生主要地域における 2010 年~2016 年 4 月の植被率

8. 6 砂塵嵐及び気流の状況と日本での黄砂観測状況

大陸における砂塵嵐発生から日本の黄砂観測を一体的にみるために、表 8-2-1 (p.75) から特徴的な事例を抽出し、砂塵嵐の発生状況と SPM 濃度別に色分けした福岡・富山・札幌の後方流跡線を同時に示す図を作成した。

図 8-6-1 の事例は、大陸における砂塵嵐の発生と後方流跡線の軌跡が一致する場合で、日本で黄砂が観測される最も典型的なものである。

図 8-6-2 のように砂塵嵐が発生したとしても後方流跡線の軌跡が一致していない場合には、日本で黄砂が観測されることは稀である。

一方、図 8-6-3 のように大陸における砂塵嵐の発生と後方流跡線の軌跡が一致し、かつ SPM の上昇が観測される場合でも日本で黄砂が観測されないことがある。これは、黄砂の現象が明確でなく見逃された場合であるが、事例としては少ない。

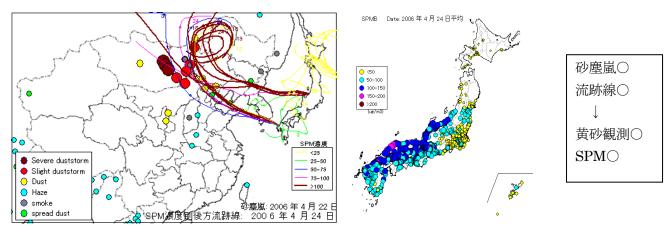


図 8-6-1 砂塵嵐が大規模で発生し、日本で広範囲で黄砂が観測された事例

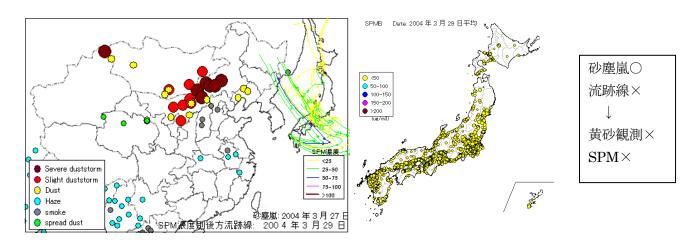


図 8-6-2 砂塵嵐が大規模に発生しているが、後方流跡線が通過せず黄砂が観測されなかった事例

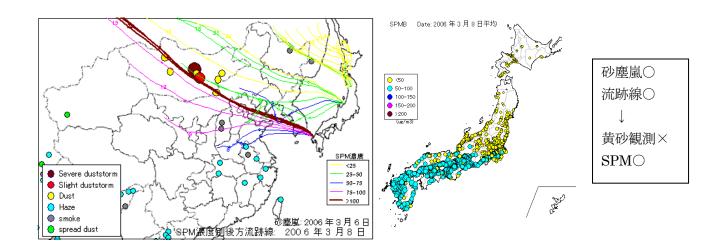


図 8-6-3 砂塵嵐が発生し、後方流跡線も通過し SPM 濃度も上昇しているが黄砂が観測されなかった事例

9. 今後の課題

本報告書では、2016年度に観測された黄砂及び煙霧の実態について観測情報や数値モデルを組み合わせ総合的な解析をした。その他、ライダーによる黄砂検出の検討、PM2.5成分分析結果による煙霧時と黄砂時の比較などを行った。また、黄砂観測日の減少についての検討を行い、砂塵嵐の発生と日本に到達する黄砂との関係などについてこれまでの知見をまとめた。

今後の課題として、次のような事項があげられる。

<本報告書第6章関連>

○大黄砂に比べ我が国への飛来頻度が多い弱黄砂による健康影響が懸念されており、そのような黄砂がいつどこで発生しているのかを把握する高感度検出手法の確立が望まれる。そのために、地上のライダーのデータに衛星のデータを加えて解析するなどの検討を行う必要がある。また、黄砂に付着して飛来する化学物質やバイオエアロゾルによる複合的な健康影響も指摘されており、黄砂とともに飛来する化学物質の状況を継続して把握していく必要がある。

<本報告書第7章関連>

 \circ 黄砂現象や煙霧現象時に $PM_{2.5}$ 濃度が上昇し、環境基準値である日平均値 $35\mu g/m^3$ を超過する観測事例が例年報告されている。 $PM_{2.5}$ の化学成分分析データの蓄積を進めることにより、 $PM_{2.5}$ の組成成分に対する黄砂や煙霧の寄与を解明していく必要がある。

<本報告書第8章関連>

○近年では黄砂の日本への飛来回数が減少傾向にあり、その要因は黄砂発生主要地域における植生の回復状況、積雪量や表面土壌中の水分量、強風の発生頻度、輸送経路などの変化が考えられる。その中で、日本に飛来する黄砂に影響のある地域の絞り込みとその地域における植生状況や回復対策の進捗を把握し、飛来黄砂の減少要因に及ぼす植生因子の大きさを調べるとともに、その対策支援を継続的に行っていくことが必要である。

<国際協力活動との連携>

○日本・中国・韓国でのモニタリング・予測、発生源対策に関する黄砂共同研究について、黄砂問題検 討会と日中韓三カ国黄砂共同研究(ワーキンググループ1)との連携を深め、海外情報の取り込みや、 日本の状況の反映など情報共有を進める必要がある。このような研究が、アジア地域全体の黄砂発生 源対策、さらには大気汚染物質との混在型黄砂の飛来率を低減化できるような公害防止型の技術協力 に寄与することも期待される。

参考文献リスト

- 1. 「環境省」2007: 黄砂実態解明調査中間報告書
- 2. 「環境省」2008: 黄砂実態解明調査報告書
- 3. 「環境省」2009: 黄砂飛来状況報告書
- 4. 「環境省」2010: 平成22年度黄砂 飛来状況報告書-平成21年度における黄砂実態解明調査
- 5. 「環境省」2011:黄砂実態解明調査中間報告書-平成20~22年度-
- 6. 「環境省」2012:平成23年度黄砂飛来状況調査報告書
- 7. 「環境省」2013: 黄砂実態解明調査報告書(平成15~24年度)
- 8. 「環境省」2014:平成25年度黄砂飛来状況調査報告書
- 9. 「環境省」2015:平成26年度黄砂飛来状況調査報告書
- 10. 「環境省」2016:平成27年度黄砂飛来状況調査報告書
- 11. 「環境省」2017:平成28年度黄砂飛来状況調査報告書
- 12. 「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/
- 13. 「気象庁」HP(地球環境のデータバンク黄砂)

http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/kosahp/kosa_data_index.html

- 14. 「気象庁」HP(日々の天気図): http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html
- 15. 「気象業務支援センター」: 世界気象資料、気象庁月報
- 16. 「気象庁」HP(過去の気象データ): http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php
- 17. 「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/
- 18. 「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

19. 「アメリカ海洋大気圏局 NOAA」HPARL HYSPLIT(後方流跡線)

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

- 20. 「アメリカ国務省 Mission China」 http://www.stateair.net/web/historical/1/1.html
- 21. 日下部正和他:日本における黄砂飛来の影響-平成 25 年度黄砂実態解明調査結果概要 (10 年間のまとめ 、第 55 回大気環境学会年会講演要旨集、475 (2014)
- 22. 後藤隆久、岩本真二、日下部正和:日本に飛来する黄砂の分類について、第53回大気環境学会年会講演要 旨集、487 (2012)
- 23. A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, I. Mori, M. Nishikawa. M. Kido: Relationship between Lidar-derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentration in Japan, SOLA, Vol7A, 1-4,2011
- 24. 日下部正和、後藤隆久、岩本真二: ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度による黄砂検出の検討、第 53 回大 気環境学会年会講演要旨集、488 (2012)
- 25. 原由香里、佐竹晋輔、鵜野伊津志、竹村俊彦:領域ダスト輸送モデルを用いた黄砂現象の年々変動シミュレーション、天気、51 (10) 719-728 (2004)

- 26. 日下部正和、岩本真二: 黄砂・煙霧時における PM_{2.5} の環境基準超過について、第 54 回大気環境学会年会 講演要旨集、491 (2013)
- 27. Cohen, D., David., Crawford, Jagoda., Stelcer, Eduard., Atanacio, J., Armand. (2012) Application of positive matrix factorization, multi-linear engine and back trajectory techniques to the quantification of coal-fired power station pollution in metropolitan Sydney, Atmospheric Environment 61, 204-211.
- 28. 辻昭博: 大気エアロゾル中のイオン成分および無機元素成分の粒径別高時間分解能観測による黄砂と人為 起源物質の越境汚染輸送の詳細解析、大気環境学会誌、48 (2) 82-91(2013)
- 29. Bressi, M., Sciare, J., Ghersi, V., Mihalopoulos, N., Petit, J.-E., Nicolas, J. B., Moukhtar, S., Rosso, A., Féron, A., Bonnaire, N. Poulakis, E., Theodosi, C. Sources and geographical origins of fine aesols in Paris (France), Atmos. Chem. Phys., 14, 8813–8839. (2014)
- 30. 岩本真二他:日本に飛来する黄砂の分類方法、第57回大気環境学会年会講演要旨集、2B0930(2016)
- 31. 西川雅高他: 日本で捕集した典型的な黄砂エアロゾルの化学組成、大気環境学会誌、51(5)218-229(2016)
- 32. 鵜野伊津志他: 九州北部で 2014 年 5 月下旬から 1 週間継続した黄砂期間の硝酸塩の越境輸送のモデル解析、大気環境学会誌、51(4) 181-189 (2016)
- 33. R.Kimura: Effect of the Strong Wind and Land Cover in Dust Source Regions on the Asian Dust Event over Japan from 2000 to 2010, SOLA, 8, 77-80 (2012)
- 34. A. Shimizu, N. Sugimoto, T. Nishizawa, Y. Jin, D. Batdorj: Variations of Dust Extinction Coefficient Estimated by Lidar Observations over Japan, 2007-2016
- 35. 鳥取大学乾燥地研究センター: 黄砂ー健康・生活環境への影響と対策ー、丸善出版、pp1·150 (2016)