

7 黄砂・煙霧日の PM2.5 濃度

黄砂は、PM2.5 の環境基準達成に大きな影響を与えていると考えられる。また、越境による煙霧の存在も、黄砂と同程度の影響を与える可能性がある。そのため、2018 年度の黄砂・煙霧時の PM2.5 濃度について検討した。

7.1 黄砂・煙霧時における PM2.5 環境基準超過

ここでは、全国の 1,082 箇所の測定局を評価対象とする。2018 年度における各測定局あたりの測定延べ日数（1 日あたりの測定時間が 21 時間以上であるような日数×局数）は 379,863（日×局）であり、平均濃度は $11.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。このうち、環境基準値である、1 日平均 $35.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた日数×局は、2,168（日×局）であり、全体の 0.57%であった。

測定局における黄砂観測日は、1,861（日×局）であり、黄砂時の平均濃度は $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、このうち環境基準値を超えた割合は、38（日×局）であった。これは黄砂観測日×局数全体の 2.0%にあたり、前年度の平均濃度 $22.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、環境基準値を超過した割合 7.7%に比べ減少したと言える。

また、測定局における煙霧観測日は 16,646（日×局）、煙霧時の平均濃度は $16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で、このうち環境基準値を超えた日数は 536（日×局）であった。これは、煙霧観測日×局数全体の 3.2%であり、前年度の平均濃度 $23.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、環境基準値超過割合 12.1%に比べ、ともに減少した。

以下の図 7-1-1 は、上記の結果を図示したものである。また、参考のため黄砂および煙霧の定義を再掲する。

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

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

（いずれも気象庁による）

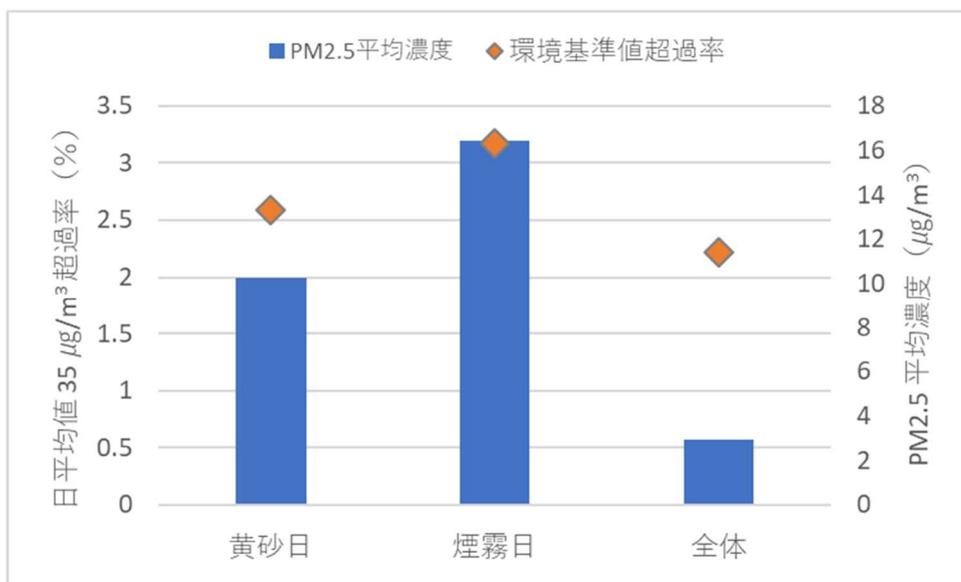


図 7-1- 1 黄砂日および煙霧日の PM2.5 平均濃度と環境基準値超過率 (2018 年度)

2018 年度の黄砂日観測日数と黄砂日の PM2.5 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 PM2.5 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、東西で大きな差は見られない。

図 7-1- 4 に、PM2.5 環境基準超過日数と、そのうちの黄砂・煙霧日数を都道府県別に示している。例年、PM2.5 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多いことが報告されているが、2018 年度においては、黄砂・煙霧以外の要因による PM2.5 高濃度が多くあったことが確認できた。

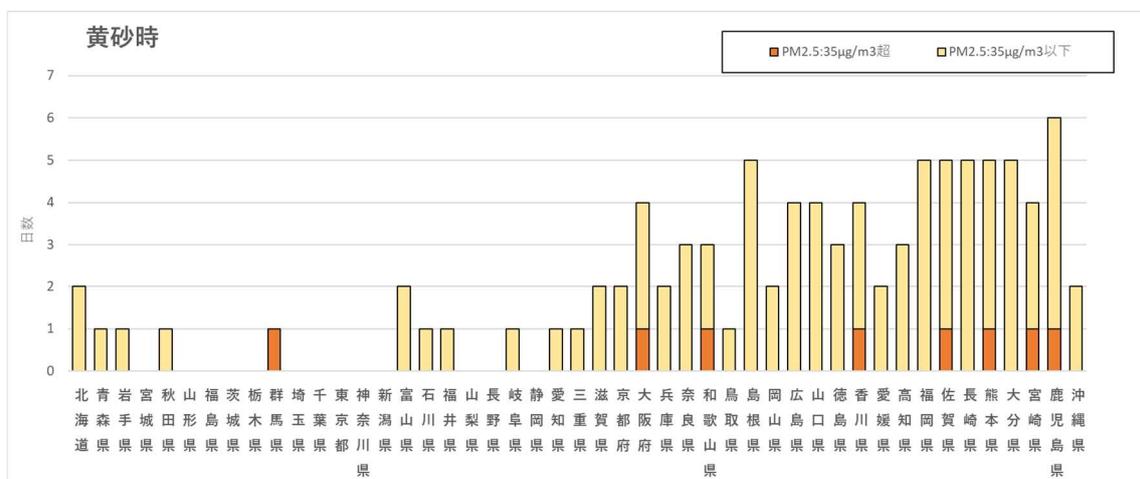


図 7-1- 2 都道府県別の黄砂日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2018 年度)

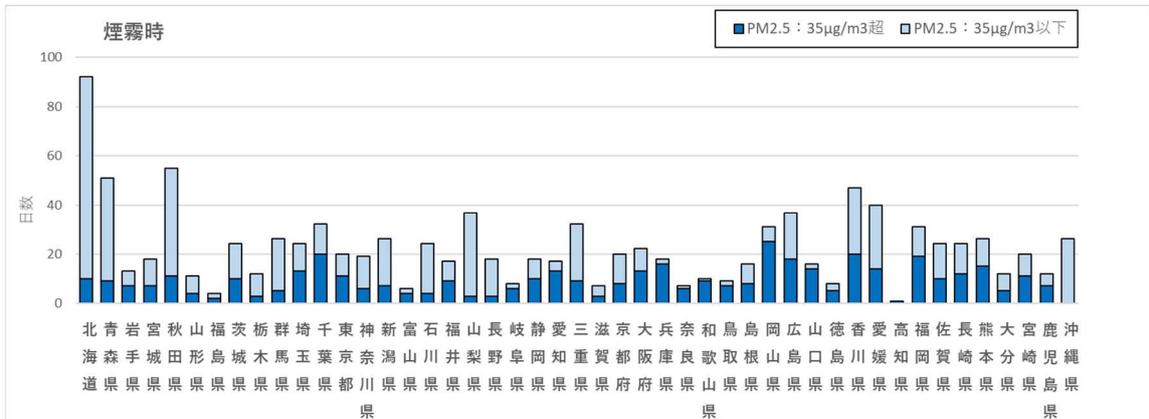


図 7-1-3 都道府県別の煙霧日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2018 年度)

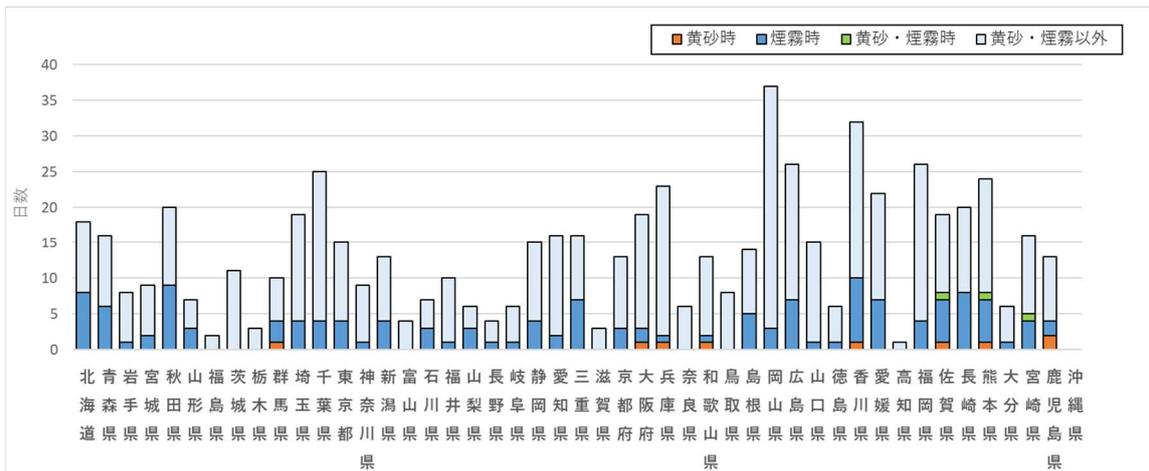


図 7-1-4 都道府県別の PM2.5 環境基準超過日を占める黄砂・煙霧の割合 (2018 年度)

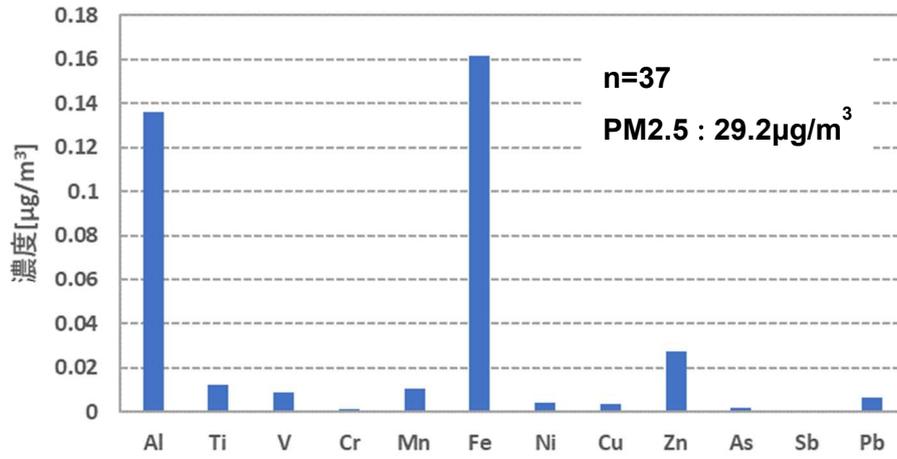
7.2 黄砂時・煙霧時におけるPM2.5成分濃度

全国の自治体では、毎年度、4季にわたってPM2.5の成分分析を実施している。ここでは、2018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、金属成分について項目別に黄砂日と煙霧日で比較した。

PM2.5の重量濃度が $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であり、かつ黄砂が観測された日の検体は、0検体である。一方で、PM2.5の重量濃度が $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上で、かつ煙霧が観測された日の検体は、37検体であった。

黄砂時および煙霧時における金属成分・イオン成分の平均とPM2.5中の含有率は、図7-2-1と図7-2-2のとおりである。金属成分に関しては、煙霧時にはAlとFeが顕著に高く、イオン成分などに関しては、硫酸イオンが高くなるほか、アンモニウムイオンがやや高くなる傾向がみられた。

煙霧時 金属成分 濃度



煙霧時 金属成分 含有率

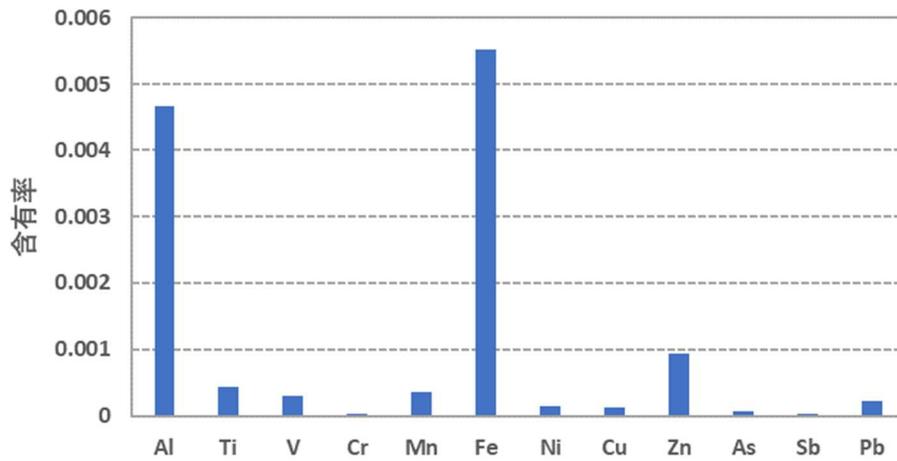
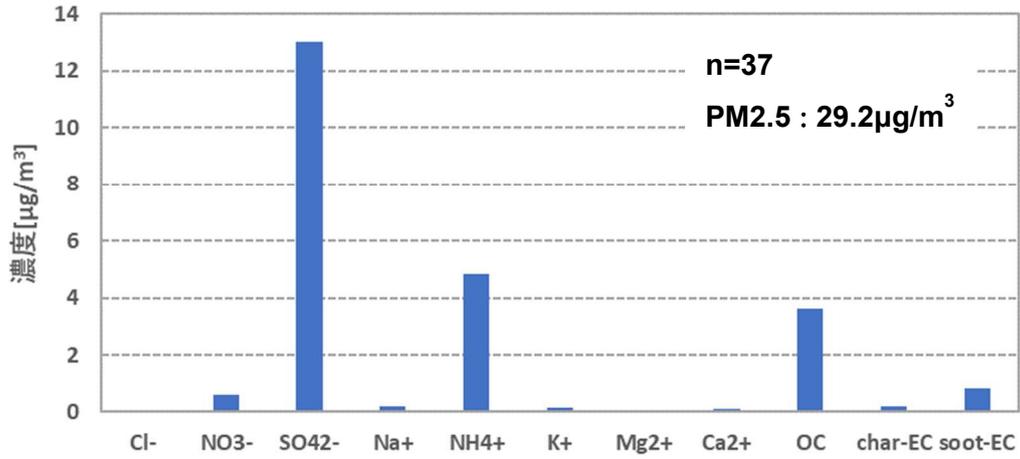


図 7-2-1 煙霧時における PM2.5 金属成分 (上段：濃度、下段：含有率)

煙霧時 イオン成分等 濃度



煙霧時 イオン成分等 含有率

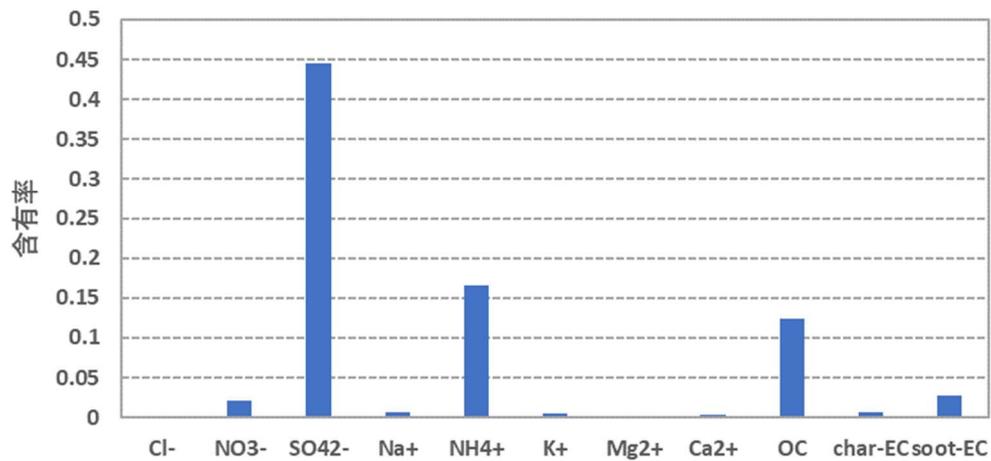


図 7-2-2 煙霧時における PM2.5 イオン成分等 (上段：濃度、下段：含有率)

7.3 黄砂・煙霧時 PM2.5 の PMF 法による発生源寄与推定

PMF 解析を行うために、黄砂・煙霧時で PM2.5 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、地点を選択した。利用したデータに関しては、欠測・検出限界未満以外のデータを確認し、イオンバランスが崩れているデータ、マスクロージャーモデルと不整合なレコードを除いた。上記の結果、59 データが抽出された。なお、地点については黄砂・煙霧が観測された地点の都道府県でのすべてのデータを抽出対象とした（東京都小笠原村は除外）。計算の条件は下記の通りである。PM2.5 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】

黄砂：0 件、煙霧：59 件

【成分数】

以下の全 22 項目

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

無機元素成分：Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Zn、As、Sb、Pb

炭素成分：OC、EC

EC については炭素成分を以下のように整理した。

char-EC：EC1-OCpyro

soot-EC：EC2+EC3 (EC1<OCpyro の場合は OCpyro-EC1)

【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 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ などで高く、二次生成された $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ と考えられる。 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ の $\text{SO}_4^{2-}/\text{NH}_4^+$ 比は 2.7 となるが、ここでも 2.7 となった。

Factor2 は Ca^{2+} 、Al、Ti の割合が高く、煙霧に関連する土壌を表す因子と思われる。

Factor3 は Na^+ 、 Mg^{2+} などで高く、海塩によるものと想定される。海塩の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比は 0.11 とされており、ここでは 0.18 と若干高めであった。

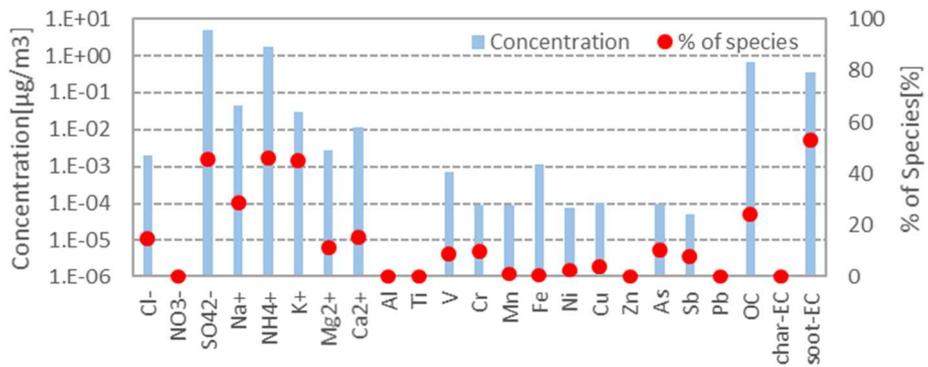
Factor4 は V、Ni などが高く、石油燃焼と思われる。石油燃焼の一般的な V/Ni 比は 2.1 ~ 3.1 とされており、ここでは 3.08 と範囲内であった。

Factor5 は K^+ 、Cr、Cu、As、Sb などが高く廃棄物燃焼と思われる。

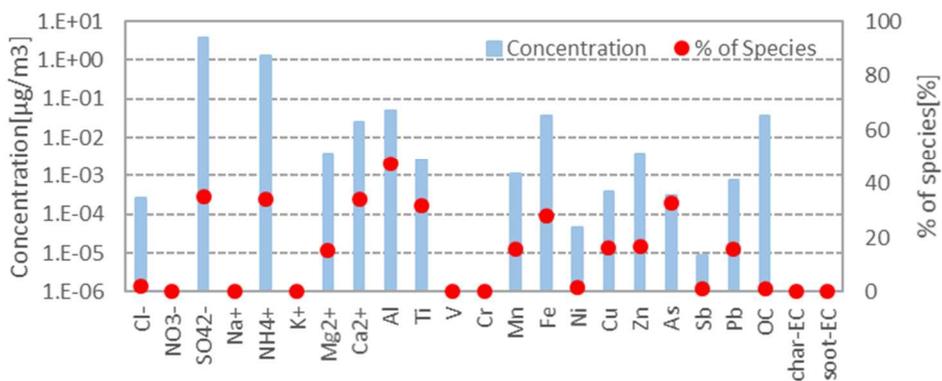
Factor6 は NO_3^- 、Cl⁻ で高く、二次生成された NH_4NO_3 などの粒子と考えられる。 NH_4NO_3 の $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 比は 3.4 であり、ここでは 1.6 と低い値を示した。

Factor7 は soot-EC で高く自動車排気ガスと思われる。

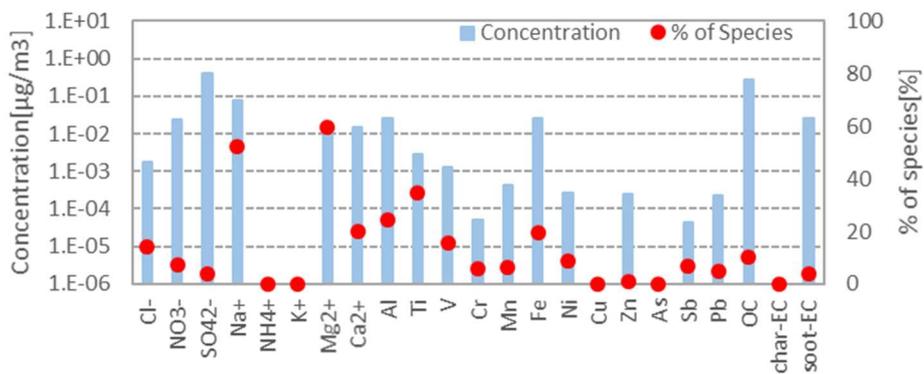
Factor 1
二次生成硫酸塩



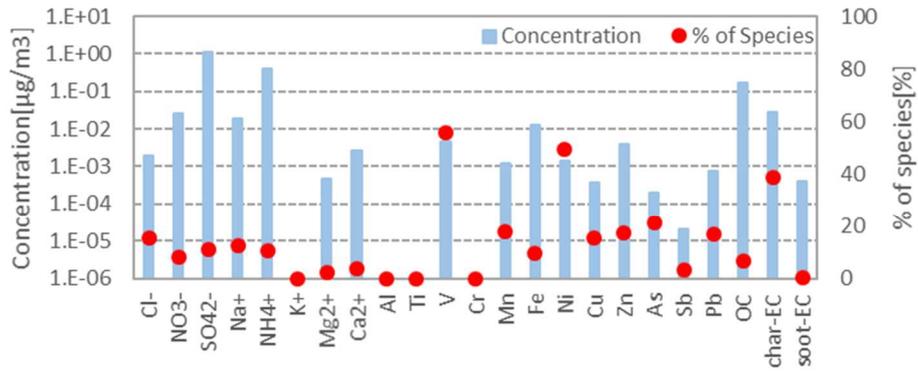
Factor 2
土壤



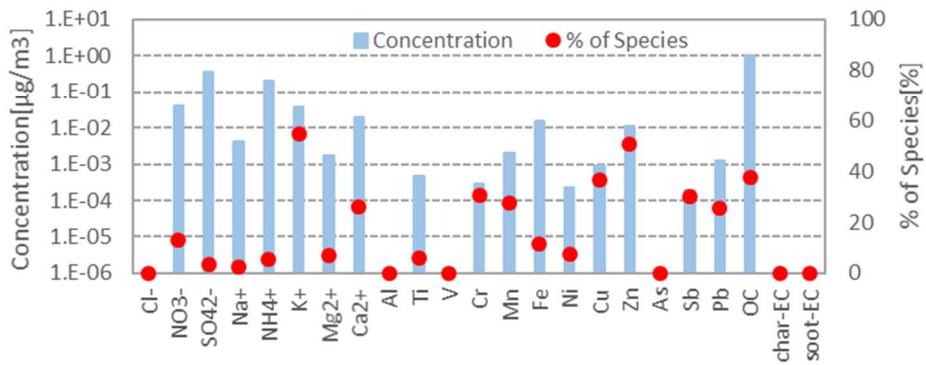
Factor 3
海塩



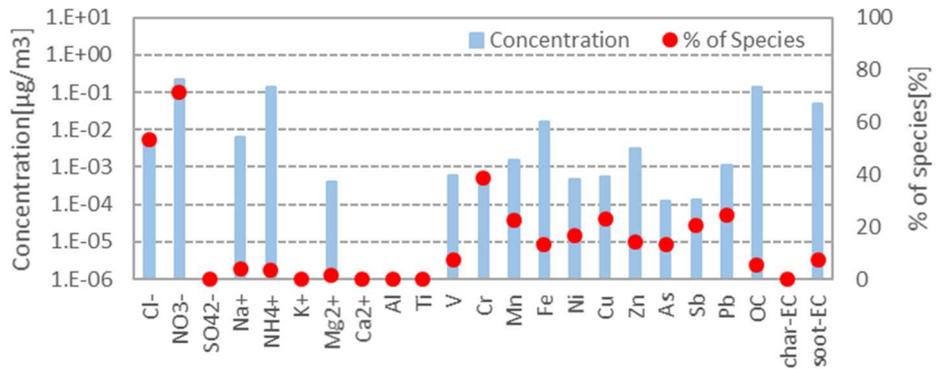
Factor 4 石油燃烧



Factor 5 废弃物烧却



Factor 6 二次生成硝酸塩



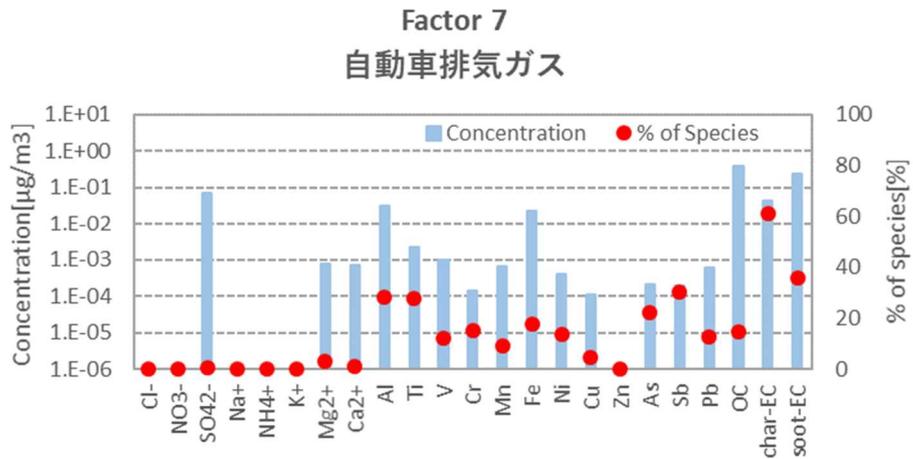


図 7-3-1 発生源プロファイル

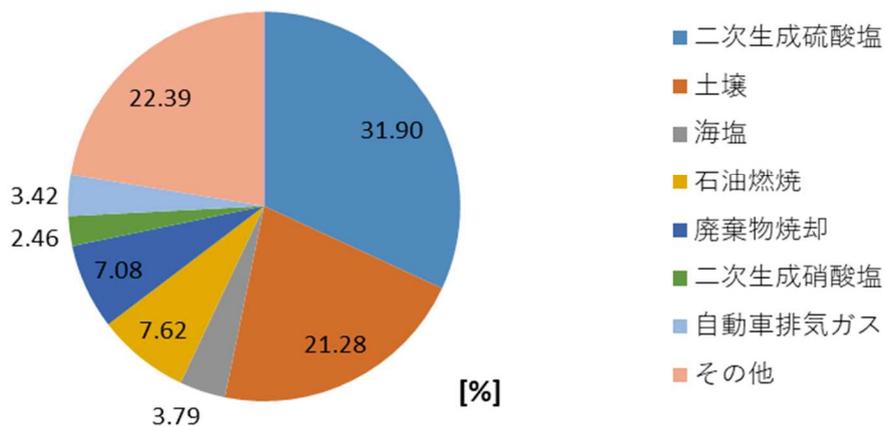


図 7-3-2 煙霧時の各寄与濃度の平均組成

2018 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 59 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、二次生成硫酸塩の寄与が最も高く 31.9%を示し、次いで土壌の寄与が高く 21.28%を示した。

8 PM2.5 成分自動測定機 ACSA-14 測定結果の利用

これまでの黄砂実態解明調査では、黄砂の成分濃度を把握するため、自治体による PM2.5 成分分析結果を利用していたが、自治体による PM2.5 成分分析は黄砂飛来時と時期が一致することが少なく、黄砂時の成分に関する情報が不足していた。また、福岡県の自動測定機(SPA)による PM2.5 中の SO₄²⁻ (硫酸イオン) 濃度の 1 時間値を利用して、黄砂と人為起源系汚染物質との混在状況を確認したところ混在状況は不明のままであった。

環境省では PM2.5 の発生源を推計するため、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た。このうち、PM2.5 自動測定機 (ACSA) は、全国 10 地点で PM2.5 及び粗大粒子中の SO₄²⁻、NO₃⁻ (硝酸イオン) などを測定している。ここでは PM2.5 中の成分のほか、粗大粒子の成分などの利用について検討を行った。

本検討では ACSA のデータのうち、PM2.5、PM10、SO₄²⁻、NO₃⁻ を使用し、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 8-1 に従って表記する。

表 8-1 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)

8.1 各項目の年平均

ACSA の測定項目について、黄砂時における PM10 及び PM2.5 中の成分濃度を評価するにあたり、各項目の年平均値を地点別にまとめた (表 8-1-1、図 8-1-1)。

PM10 は、西日本で濃度が高い傾向を示し、特に隠岐や五島などの離島で高い傾向がみられた。

fNO₃⁻ は、東京、名古屋、大阪、福岡などの都市部で高い傾向がみられた。

fSO₄²⁻ も PM10 と同様に西日本で高い傾向を示すが、特に福岡、五島で高い値であった。

表 8-1-1 年平均値

	札幌	巻	籠岳	東京	名古屋	大阪	赤穂	隠岐	五島	福岡
PM2.5	10.6	9.6	10.4	13.4	12.6	11.8	11.8	11.4	13.1	12.0
PM10	18.8	22.6	19.2	25.6	23.8	23.3	23.6	30.2	32.4	24.9
fNO3	1.1	0.6	0.7	1.6	1.2	1.4	1.1	0.9	1.0	1.2
fSO4	2.1	2.2	2.1	2.5	2.8	2.7	3.2	3.1	3.7	3.7

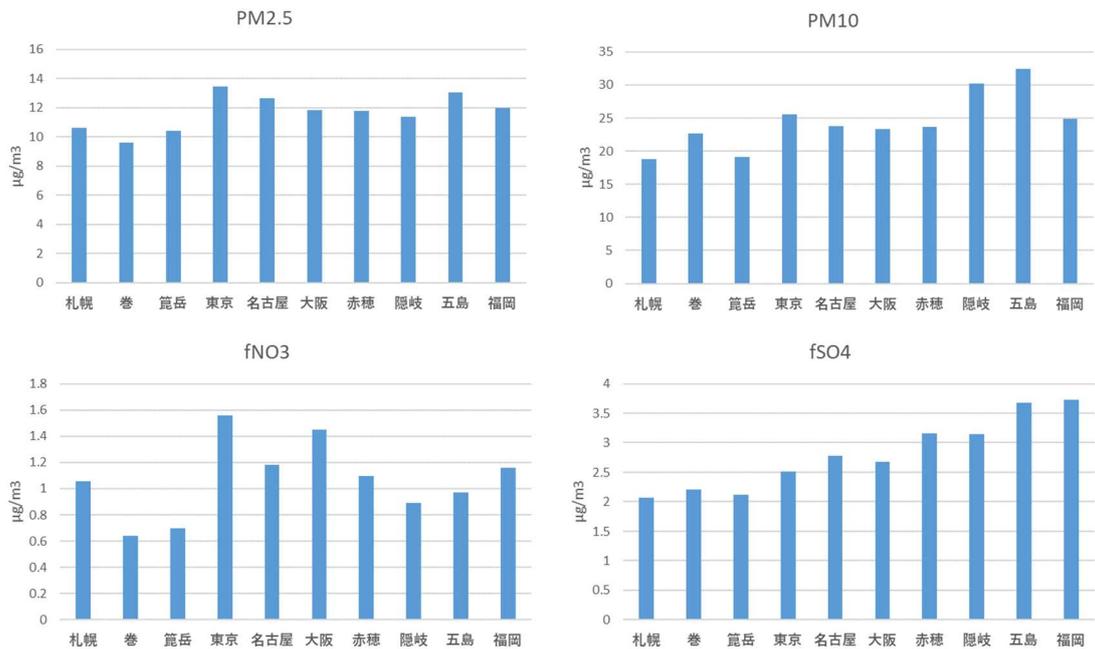


図 8-1-1 年平均値

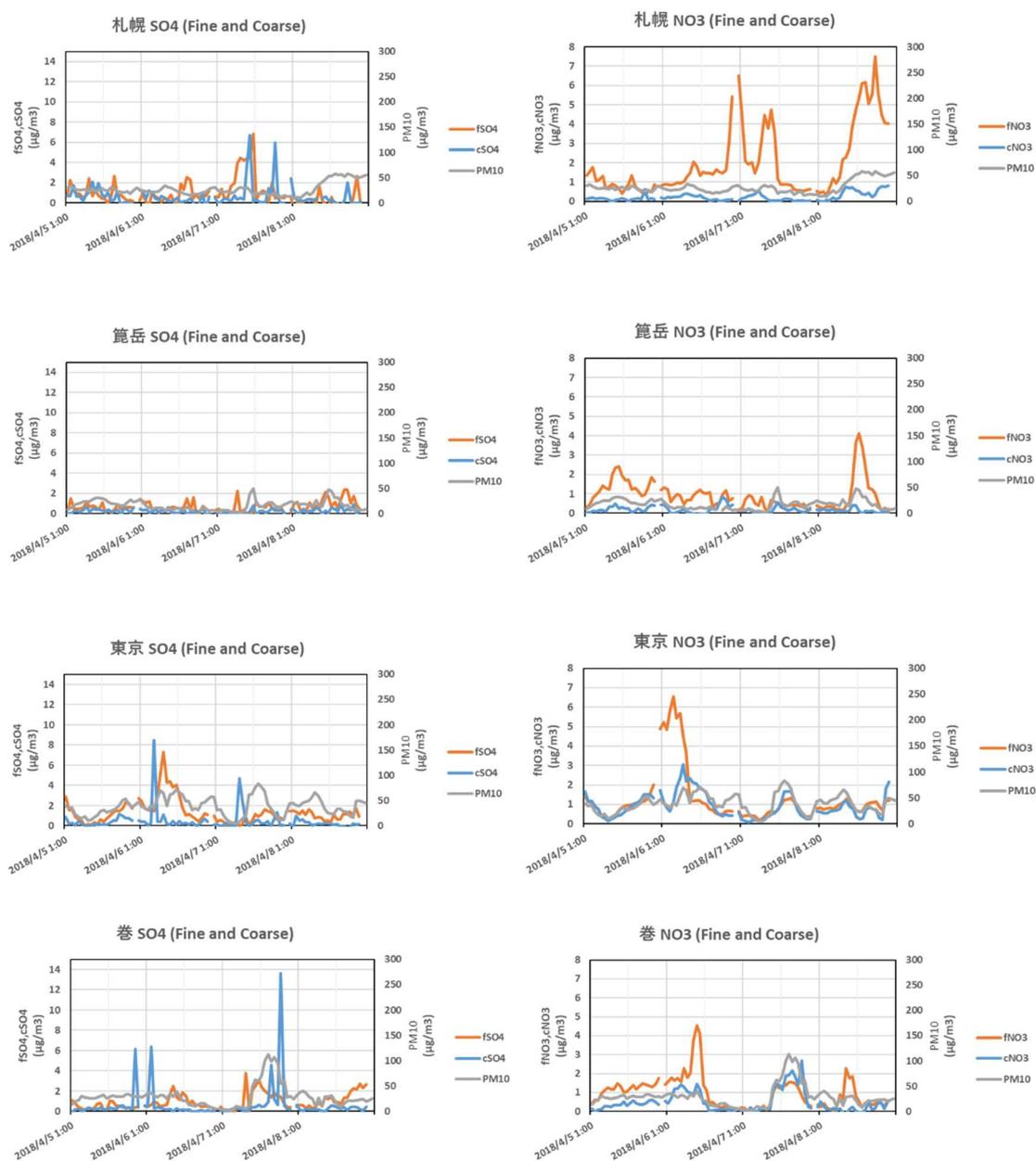
8.2 黄砂時における粗大粒子の成分濃度

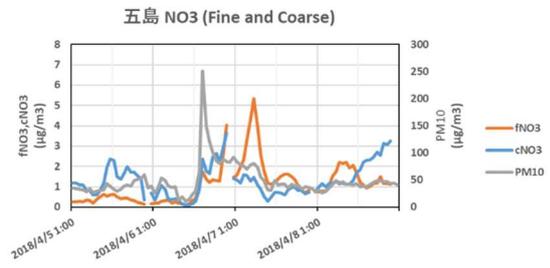
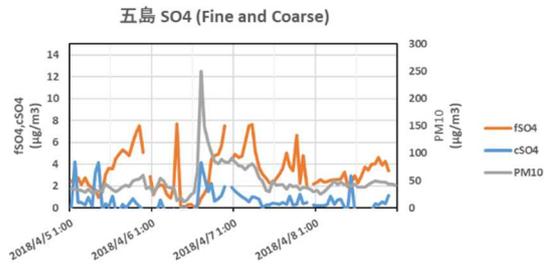
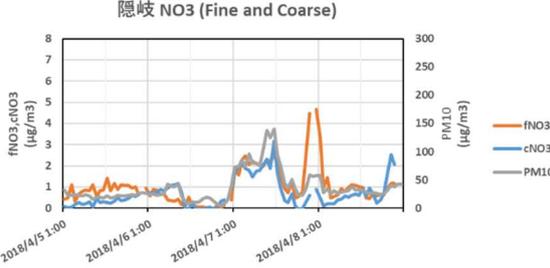
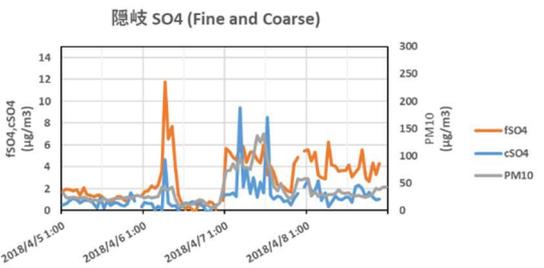
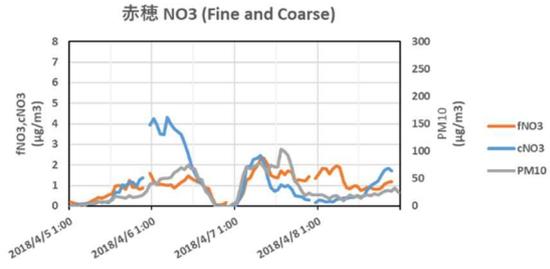
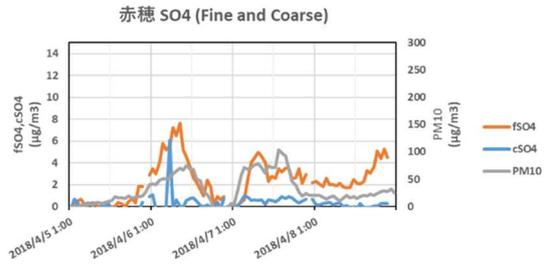
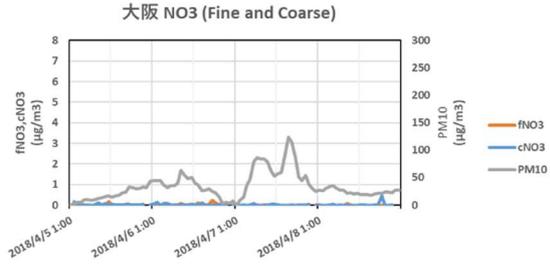
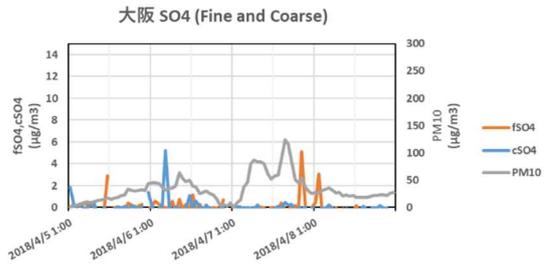
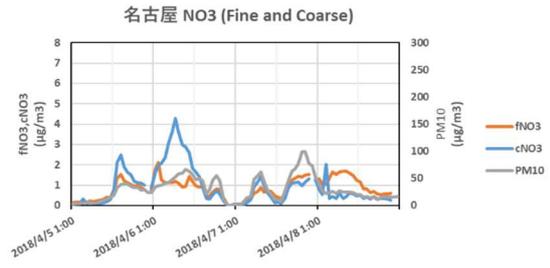
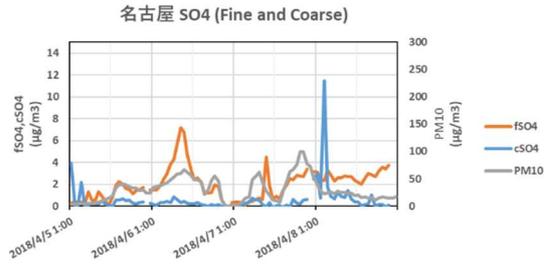
ACSA は、PM2.5 質量濃度だけでなく、粗大粒子側(PM10-PM2.5)の成分濃度も同時に測定している。黄砂飛来時には、粗大粒子の濃度が高くなることが知られており、2018 年度に気象台で観測された黄砂の 4 事例について、粗大粒子と PM10 の成分濃度を比較した。併せて PM2.5 の成分濃度も併記し、PM2.5 と粗大粒子の成分濃度比較も行った。

(1) 黄砂事例1 2018年4月6日~7日

4月6日の福岡及び五島で、4月6日にPM10が上昇する前の4月5日にPM2.5のfSO₄²⁻が上昇している。また、東京、名古屋、赤穂、隠岐では4月6日のPM10上昇とともにfSO₄²⁻が上昇している。これらの地点では、いずれもfSO₄²⁻は上昇した後、減少に転じており、4月7日は濃度が低下傾向であった。東京では粗大粒子のcSO₄²⁻も同時期に上昇傾向であった。

NO₃⁻については、いずれもPM10と同期している地点が多い。PM2.5のfNO₃⁻は、東京や巻で4月6日に大きな上昇がみられた。一方、粗大粒子のcNO₃⁻は、赤穂及び名古屋で4月6日に最大で4μg/m³程度に大きくなり、その後減少した。





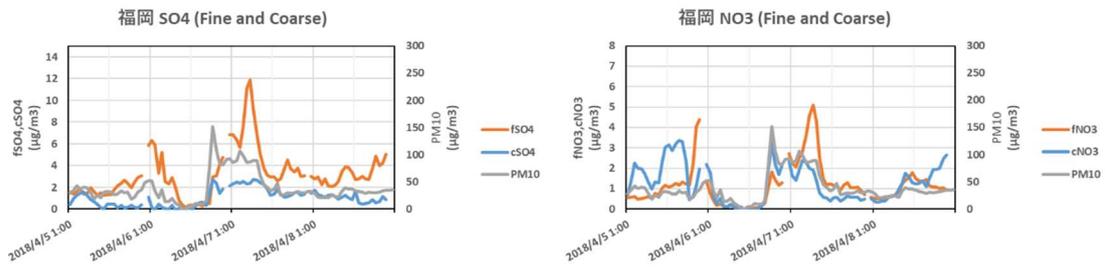


図 8-2-1-1 PM10 及び PM2.5 と粗大粒子の成分の経時変化

図 8-2-1-2 に黄砂が観測された地点に近い観測値での PM2.5/PM10 の経時変化を示す。ここでは、黄砂観測時における観測データに欠損がない地点を選んでいる。この図より、黄砂時には PM2.5/PM10 が低くなりその状態が数時間継続していることが分かる。Sugimoto et al. (2016)によると、アジア起源の輸送されたきたダストが微小粒子中に支配的であるならば、その比が 0.1-0.3 となっていることが言われている。これを参考に、図 8-2-1-2 からその比が 0.3 以下になっている時間を見積もると、隠岐においては約 30 時間、五島においては約 21 時間継続していることが分かる。この期間について気象庁の過去の気象データを見ると、長崎で 15 時間の黄砂が観測された。

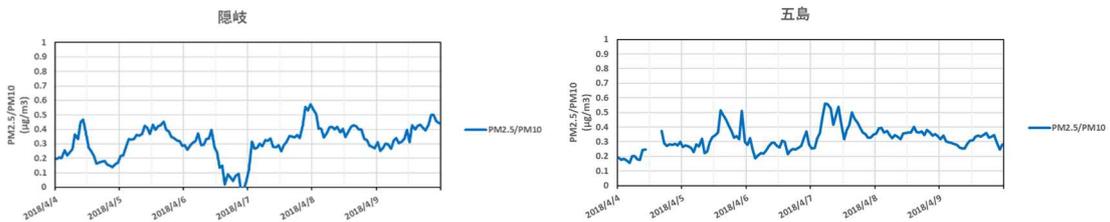


図 8-2-1-2 各地点における PM2.5/PM10

(2) 黄砂事例 2 2018年4月11日～13日

4月11日～13日の事例では黄砂の観測が北海道と東北地方のみであったので札幌、籠岳の濃度推移を示した。

この期間、黄砂が観測された4月11日から札幌、籠岳ともに fSO_4^{2-} の濃度上昇が見られる。これらの上昇は PM_{10} の上昇と同期していた。また、 cSO_4^{2-} に関して、濃度上昇は確認されなかった。

硝酸イオンは、札幌、籠岳ともに PM_{10} の変動と同期しており、 PM_{10} の最大値が現れた4月12日以前に fNO_3^- 、 cNO_3^- の最大値が現れてそれぞれ、 $2.5\mu g/m^3$ 以上の値となっていた。

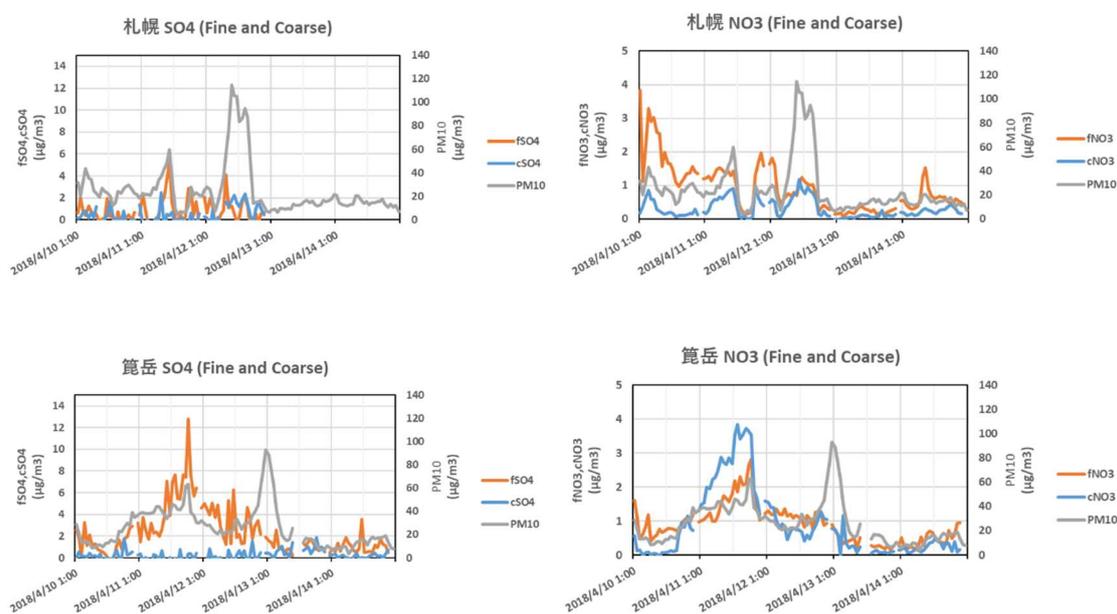


図 8-2-2-1 PM_{10} ならびに $PM_{2.5}$ と粗大粒子の成分の経時変化

図 8-2-2-2 に黄砂が観測された地点に近い観測地点での $PM_{2.5}/PM_{10}$ の経時変化を示す。ここでは、黄砂観測時における観測データに欠損がない地点を選んでいる。事例 (1) と同様、黄砂時には $PM_{2.5}/PM_{10}$ が低くなりその状態が数時間継続していることが分かる。図 8-2-2-2 からその比が 0.3 以下になっている時間を見積もると、札幌においては約 20 時間継続していることが分かる。この期間について気象庁の過去の気象データを見ると、釧路で 2 時間 10 分の黄砂が観測された。

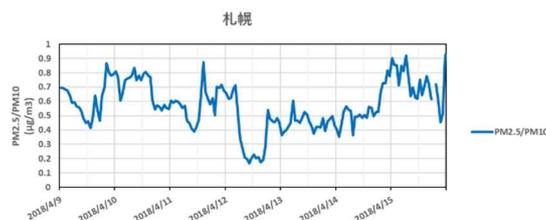
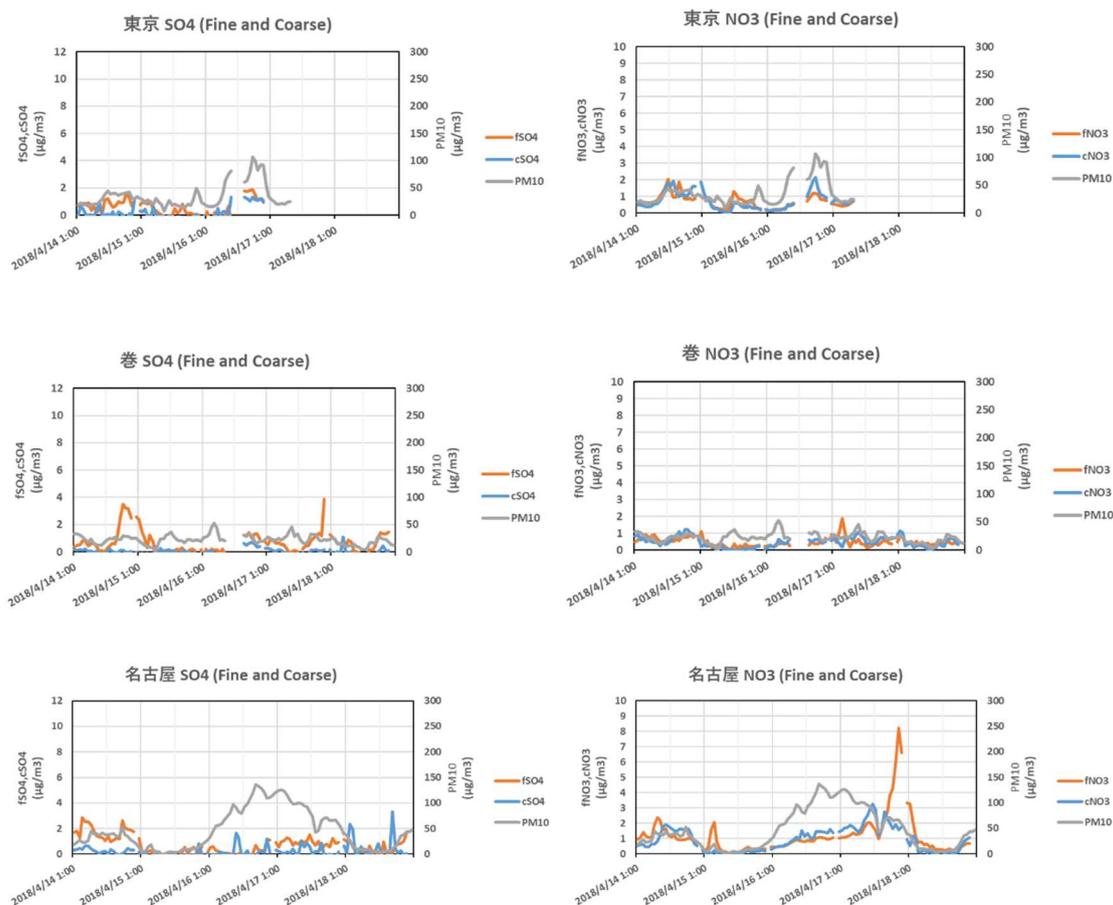


図 8-2-2-2 札幌での $PM_{2.5}/PM_{10}$

(3) 黄砂事例3 2018年4月15日~17日

黄砂が北海道、東北地方で見られなかったため、札幌、麓岳を除いた地点の濃度の推移を示した。ほぼすべての地点で4月16日にPM10が上昇しているが、その前の4月14日にPM2.5のfSO₄²⁻が上昇している地点が多い。また、福岡、五島ではそれぞれ、4月15日、4月16日のPM10上昇とともにfSO₄²⁻が上昇している。これらの地点では、いずれもfSO₄²⁻は上昇した後、減少に転じているが、その後も高い値を保っている。東京、赤穂、大阪、福岡では粗大粒子のcSO₄²⁻でも同時期に上昇した。それ以外でcSO₄²⁻の大きな増加は確認されなかった。

また、NO₃⁻については、東京、赤穂、隠岐、福岡、五島でPM10と同期している。PM2.5のfNO₃⁻は、ほぼすべての地点で黄砂飛来中に上昇がみられた。一方、粗大粒子のcNO₃⁻も地点によって大きさの違いはあるものの、黄砂飛来中に上昇がみられる。東京では急激に上昇した後、すぐに減衰、大阪では急激に減少するが上昇した後はしばらくその濃度を保つなど地域によって異なる傾向を示している。



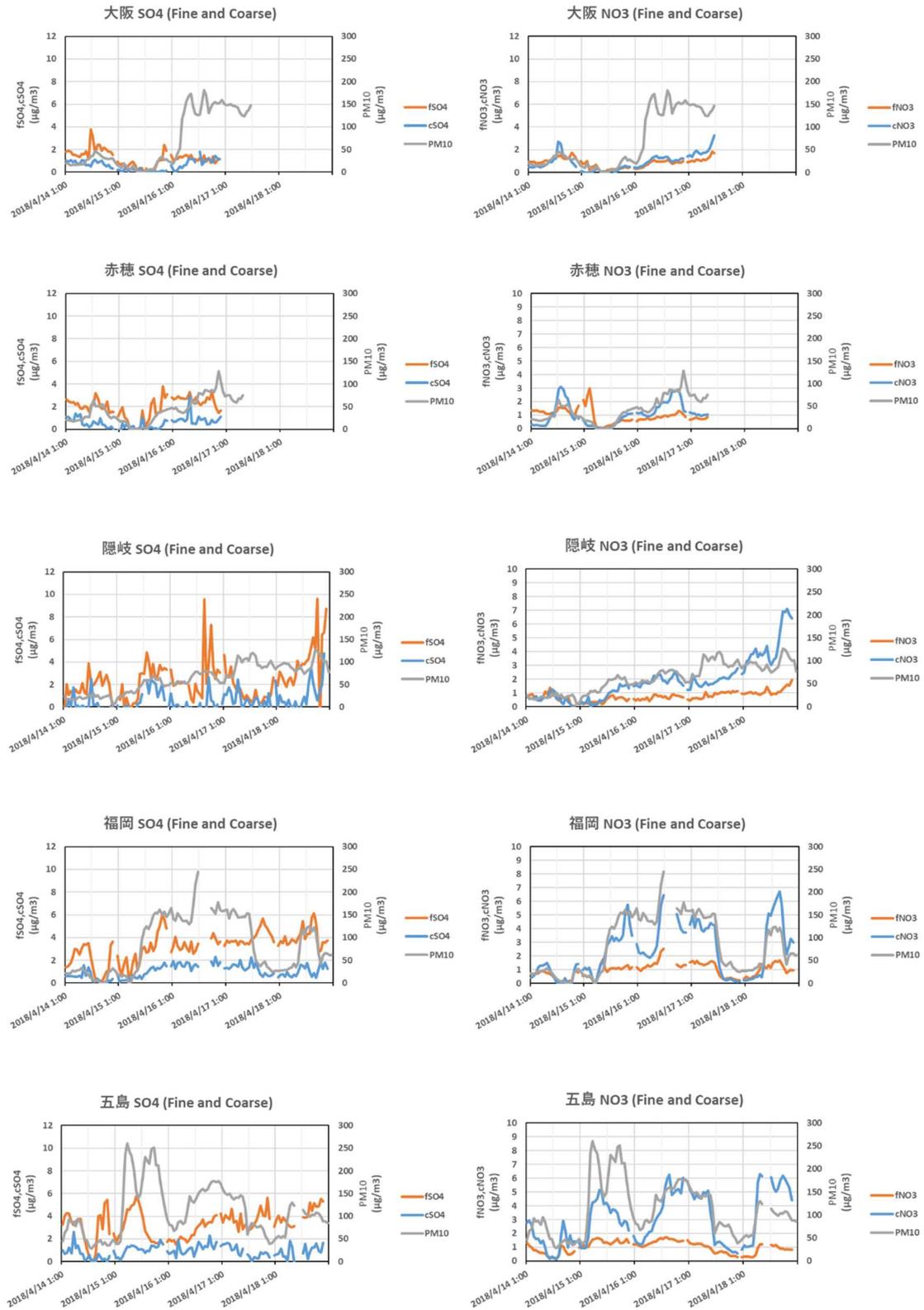


図 8-2-3-1 PM10 及び PM2.5 と粗大粒子の成分の経時変化

図8-2-3-2に黄砂が観測された地点に近い観測地点でのPM2.5/PM10の継時変化を示す。ここでは、黄砂観測時における観測データに欠損がない地点を選んでいる。これまでの事例と同様、黄砂時にはPM2.5/PM10が低くなりその状態が数時間継続していることが分かる。図8-2-3-2からその比が0.3以下になっている時間を見積もると、隠岐においては約86時間、五島においては約56時間継続していることが分かる。この期間について気象庁の過去の気象データを見ると、松江で約48時間、長崎で約42時間の黄砂が観測された。

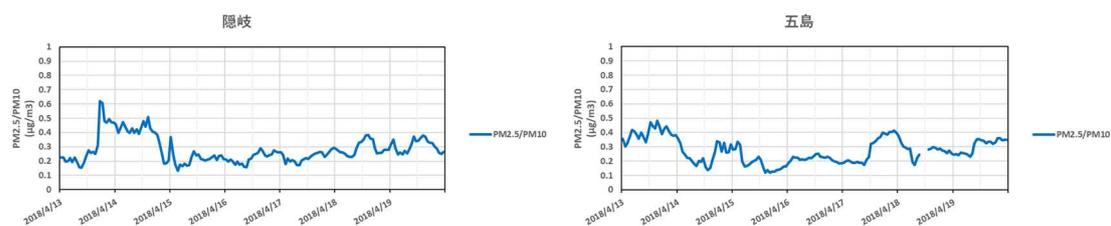


図8-2-3-2 各地点におけるPM2.5/PM10

(4) 黄砂事例 4 2018年5月25日

5月25日の黄砂事例では、松江でのみ観測されたので、隠岐の濃度の推移を示した。黄砂観測前での5月24日からPM10が上昇し濃度の高い状態を保っているが、その数時間前にPM2.5のfSO₄²⁻が上昇している。また、fSO₄²⁻は5月25日午後にも上昇が見られる。これらの上昇では、いずれもfSO₄²⁻は上昇した後、減少に転じている。粗大粒子のcSO₄²⁻でも5月25日1:00前後からの上昇が見られた。

NO₃⁻については、黄砂観測日前のPM10の上昇と同期していた。PM2.5のfNO₃⁻は、黄砂観測期間中に高い上昇がみられる。一方、粗大粒子のcNO₃⁻も黄砂観測日前からの上昇がみられた。

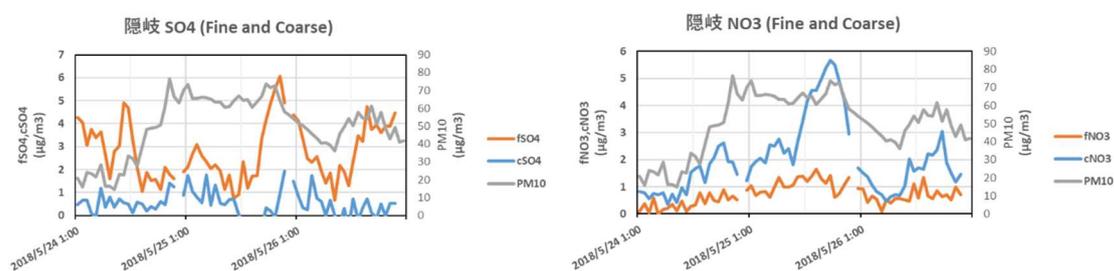


図 8-2-4-1 PM10 及び PM2.5 と粗大粒子の成分の経時変化

図 8-2-4-1 に黄砂が観測された地点に近い観測地点での PM2.5/PM10 の経時変化を示す。ここでは、黄砂観測時における観測データに欠損がない地点を選んでいる。これまでの事例と同様、黄砂時には PM2.5/PM10 が低くなりその状態が数時間継続していることが分かる。図 8-2-4-2 からその比が 0.3 以下になっている時間を見積もると、隠岐においては約 30 時間継続していることが分かる。この期間について気象庁の過去の気象データを見ると、松江で約 7 時間の黄砂が観測された。

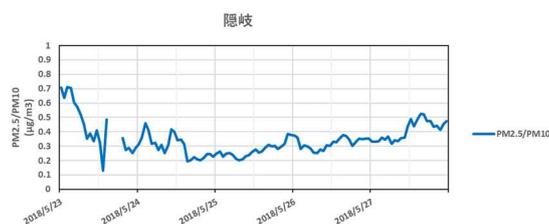


図 8-2-4-2 隠岐における PM2.5/PM10

8.3 PM2.5 と PM10 の比

これまでの黄砂飛来状況調査では、気象台で観測された黄砂日と大規模煙霧日について、日別に PM2.5/SPM をとりまとめていた。黄砂時には粗大粒子が多くなる傾向にあるため、PM2.5/SPM 比率が低くなり、一方で人為起源系の汚染物質が多くなると、比率は高くなる。

PM10 は SPM よりも粗大な粒子の量的指標となるため、黄砂時の PM2.5/PM10 は、PM2.5/SPM よりも顕著な変化となる可能性があるため、PM2.5/PM10 についてとりまとめを行う。なお、ここでは煙霧日の事例としてはアジア大陸のダスト起源と判断した事例について解析する。

(1) 年平均値との比較

PM2.5/PM10 の年平均値を算出し、黄砂時及び煙霧時の比率と比較した。それぞれの比率を日別に示したものを表 8-3-1 に示す。詳細は下記の①～③のとおりであるが、黄砂時の PM2.5/PM10 は、年平均よりも低くなった。一方、大規模煙霧時には、全体的に年平均よりも高くなる傾向にあった。

① 年平均

2018 年度における PM2.5/PM10 は、10 地点平均で 0.5 であり、地点別にみると 0.39~0.59 であった。

② 気象台で黄砂が観測された日

黄砂が観測された 9 日間をみると、10 地点平均が 0.32~0.45 となり全国的に年平均を下回った。

黄砂が観測された 4 月 6 日、7 日は、10 地点平均で 0.42、0.43 と全国的に低い状況であった。

4 月 11 日~13 日は、10 地点平均で 0.38~0.41 と年平均を大きく下回り、地点別でも全国的に低い状況であった。

4 月 15 日~17 日は、10 地点平均で 0.32~0.45 と年平均を大きく下回り、地点別でも全国的に低い状況であった。

5 月 25 日は、10 地点平均で 0.37 と年平均を大きく下回り、地点別でも全国的に低い状況であった。

③ 気象台で大規模煙霧が観測された日

気象台で大規模煙霧が観測された 15 日間をみると、10 地点平均が 0.40~0.55 となり、黄砂時より高い傾向がみられた。このうち最も高い値 (0.55) を示した日は、2018 年 5 月 15 日である。このとき、名古屋において 0.63 など全国的に高い値を示していた。ただし、煙霧日において 4 月 3 日の五島で 0.23 となるなど PM2.5/PM10 が低い日も見られた。

表 8-3- 1 黄砂時、大規模煙霧時における PM2.5/PM10

地点	札幌	巻	箕岳	東京	名古屋	大阪	赤穂	隠岐	五島	福岡	平均	
年平均	0.59	0.44	0.57	0.55	0.55	0.51	0.51	0.39	0.43	0.51	0.50	
気象台黄砂	2018/4/6	0.63	0.42	0.67	0.39	0.30	0.48	0.48	0.19	0.27	0.35	0.42
	2018/4/7	0.75	0.26	0.57	0.38	0.53	0.39	0.34	0.34	0.41	0.34	0.43
	2018/4/11	0.58	0.48	0.40	0.37	0.44	0.35	0.33	0.34	0.30	0.41	0.40
	2018/4/12	0.39	0.40	0.45	0.51	0.44	0.39	0.38	0.32	0.42	0.37	0.41
	2018/4/13	0.45	0.22	0.40	0.38	0.53	0.42	0.38	0.31	0.40	0.32	0.38
	2018/4/15	0.73	0.33	0.60	0.43	0.64	0.59	0.51	0.22	0.19	0.27	0.45
	2018/4/16	0.52	0.25	0.63	0.33	0.31	0.27	0.26	0.22	0.22	0.18	0.32
	2018/4/17	0.57	0.31	0.62	0.33	0.37	0.24	0.26	0.23	0.29	0.33	0.35
2018/5/25	0.39	0.26	0.49	0.44	0.47	0.40	0.42	0.27	0.28	0.30	0.37	
気象台煙霧	2018/4/1	0.56	0.55	0.56	0.43	0.44	0.41	0.37	0.37	0.30	0.44	0.44
	2018/4/2	0.59	0.38	0.49	0.40	0.39	0.39	0.41	0.34	0.26	0.42	0.41
	2018/4/3	0.57	0.39	0.43	0.40	0.46	0.44	0.46	0.29	0.23	0.38	0.40
	2018/4/4	0.46	0.36	0.61	0.43	0.52	0.52	0.39	0.24	0.24	0.30	0.41
	2018/5/14	0.55	0.37	0.49	0.59	0.63	—	0.57	0.52	0.46	0.52	0.52
	2018/5/15	0.55	0.42	0.56	0.61	0.63	—	0.60	0.53	0.48	0.53	0.55
	2018/5/16	0.49	0.43	0.51	0.61	0.63	—	0.57	0.47	0.39	0.50	0.51
	2018/5/17	0.37	0.38	0.56	0.55	0.59	—	0.49	0.46	0.33	0.61	0.48
	2018/5/18	0.45	0.41	0.45	0.50	0.61	—	0.46	0.37	0.30	0.46	0.44
	2019/3/20	0.48	0.56	0.55	0.57	0.60	0.59	0.52	0.40	0.35	0.47	0.50
	2019/3/21	0.54	0.47	0.43	0.35	0.34	0.47	0.26	0.33	0.30	0.54	0.40
	2019/3/22	0.53	0.42	0.61	0.34	0.62	0.57	0.62	0.46	0.53	0.54	0.52
	2019/3/26	0.51	0.38	0.49	0.53	0.59	0.56	0.52	0.40	0.48	0.52	0.50
	2019/3/27	0.64	0.25	0.39	0.43	0.52	0.49	0.53	0.40	0.49	0.50	0.45

(2) PM2.5/SPM との比較

PM2.5/PM10 と PM2.5/SPM との比較は、表 8-3- 2、表 8-3- 3 に示したとおりである。これまでの調査における PM2.5/SPM は、黄砂が観測された測定地点の平均で示していたため、PM2.5/PM10 も同様とした。

PM2.5/SPM は、黄砂時に 0.56~0.76、煙霧時に 0.66~0.87 が示された。

一方、PM2.5/PM10 は、黄砂時に 0.23~0.49、煙霧時に 0.40~0.55 であった。

PM2.5/SPM では黄砂時と煙霧時の最小値の差が 0.10、最大値の差が 0.11 であったが、PM2.5/PM10 では黄砂時と煙霧時の最小値の差が 0.17、最大値の差が 0.06 となり、最小値での差が大きくなった。このように黄砂時においては、PM2.5/SPM より PM2.5/PM10 で顕著な差が見られた。しかし、煙霧時においては、PM2.5/SPM で顕著な差があることから、黄砂と煙霧を検討する場合には、PM2.5/SPM と PM2.5/PM10 の両者を集計することが有効と考えられる。

表 8-3-2 2018 年度の黄砂日一覧

事例	年	月	日	PM2.5/SPM	PM2.5/PM10
1	2018	4	6	0.65	0.47
	2018	4	7	0.64	0.37
2	2018	4	11	0.74	0.34
	2018	4	12	0.74	0.49
	2018	4	13	0.76	0.39
3	2018	4	15	0.56	0.34
	2018	4	16	0.61	0.34
	2018	4	17	0.62	0.23
4	2018	5	25	0.73	0.23

表 8-3-3 2018 年度の煙霧日一覧

事例	年	月	日	PM2.5/SPM	PM2.5/PM10
1	2018	4	1	0.76	0.44
	2018	4	2	0.74	0.41
	2018	4	3	0.74	0.40
	2018	4	4	0.73	0.41
2	2018	5	14	0.79	0.52
	2018	5	15	0.80	0.55
	2018	5	16	0.87	0.51
	2018	5	17	0.72	0.48
	2018	5	18	0.66	0.44
3	2018	3	20	0.81	0.50
	2018	3	21	0.69	0.40
	2018	3	22	0.76	0.52
4	2018	3	26	0.81	0.50
	2018	3	27	0.79	0.45

上記のように、PM2.5 成分自動測定機 ACSA-14 のデータを利用して、黄砂飛来時における PM2.5 及び PM10 の硫酸イオン・硝酸イオン成分の経時変化をみたところ、黄砂日には PM10 の濃度が上昇する前に PM2.5 の硫酸イオンが上昇している地点が多くあった。また、PM10 濃度の上昇と併せて、PM2.5 及び PM10 の硝酸イオンが上昇していた。ただ、今後の課題として、さらに詳細に硫酸イオンの上昇と PM10 の上昇に係る空気塊が同一のもの

と判断するためには、湿度の高低を調べるのが良い方法であると思われる。

黄砂日における $PM_{2.5}/PM_{10}$ の経時変化をみたところ $PM_{2.5}/PM_{10}$ の値は年間平均と比べて小さくなる傾向になることが明らかになった。これは、黄砂に PM_{10} 程度の粒径の粒子が多く含まれ、 PM_{10} 濃度が高くなることによる。

また、1時間ごとの $PM_{2.5}/PM_{10}$ の値は黄砂飛来時にその比が小さくなり、数十時間継続していたことから、黄砂が数十時間継続していると推測された。

$PM_{2.5}/PM_{10}$ は場所によって大きく異なるため、全国一律に判断を行うには不適切な部分もある。このような理由のため、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ は黄砂を把握するために有効な指標となる可能性があるが、黄砂日のデータ量がまだ少ないなどの理由も含め、ライダー観測や $PM_{2.5}$ 成分自動測定機のデータと併せてさらにデータを収集し、解析する必要がある。また、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ のみでなく PM_{10} 濃度との相関係数なども黄砂の把握に取り入れていく必要がある。

9 人工衛星データの利用

黄砂は、中国大陸で発生した砂塵嵐が偏西風によって日本へ飛来するものである。日本へ飛来する際に様々な経路をとることで混在する大気汚染物質の質や量が異なる。黄砂の飛来経路については、現状では CFORS によるモデル計算や、後方流跡線による気流の流れで評価している。しかし、黄砂が到達するまでの実際の経路は不明であるため、人工衛星のデータを活用し、黄砂の捕捉について検討を行う。

9.1 国内外における地球観測人工衛星の概要

黄砂の捕捉に適用可能な国内外の地球観測用の人工衛星について、ひまわり 8 号、CALIPSO、MODIS の 3 種類を取り上げ、その概要をまとめた。

(1) ひまわり 8 号

ひまわり 8 号は気象庁で運用されている日本の気象衛星である。高度約 36,000 km の静止軌道にあり、分解能は 0.5~2 km で、1,000 km × 1,000 km の範囲を撮影することができる。ひまわり 8 号では、16 の観測バンドによる観測を実施しており、バンドを利用した RGB 合成による黄砂の検出について検討を行った。ひまわり 8 号の衛星データを黄砂の検出に利用する際、各バンドの差分を用いた Dust RGB を用いた。Dust RGB では、バンド 15 とバンド 13 の差分、バンド 13 とバンド 11 の差分、バンド 13 の画像を赤色、緑色、青色に割り当て、RGB 合成した画像であり、黄砂や火山灰の識別に有効である。図 9-1-1-1 では、気象庁のホームページで、人工衛星で黄砂をとらえたとして紹介された画像である。このように Dust RGB では、黄砂などの砂塵が赤紫色で示される。

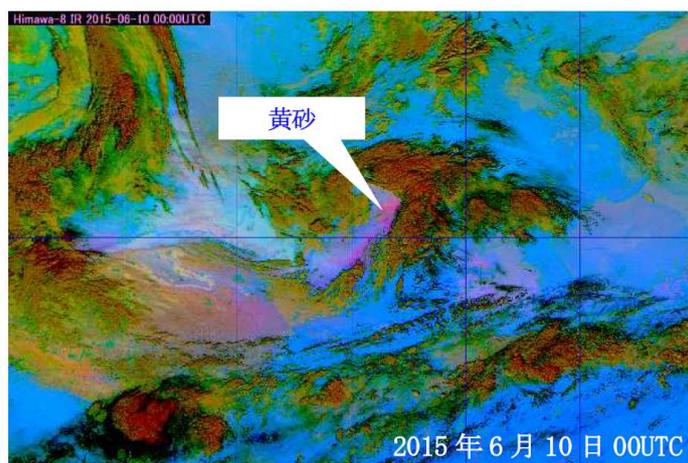


図 9-1-1-1 Dust RGB

(ひまわり 8 号 RGB 合成画像の基礎 (平成 27 年度 予報技術研修テキスト) より)

気象庁では、2019年1月から気象庁ホームページにおいて、「ひまわり黄砂監視画像」として、Dust RGB画像の公開を開始している。公開の目的は、画像をタイムリーに確認することによって、地方自治体や住民の方が効果的に黄砂対策をとることができることとしており、1時間ごとに画像を提供している。しかしながら、「ひまわり黄砂監視画像」は、直近3日間分の画像が確認できるものの、それ以前についての画像は公開されておらず、過去の黄砂事例を確認する場合には、別途画像処理を実施する必要がある。

(2) CALIPSO

CALIPSOは、アメリカ航空宇宙局とフランス国立宇宙研究センターとの共同による地球観測衛星であり、ライダーを搭載していることが特徴である。

CALIPSOは地球全体を把握できる軌道上を動いていることから、日本付近の状況を常に見ている訳ではないが、搭載されているライダーによって黄砂の判別が容易であり、黄砂の飛来高度も判定できる。図9-1-2-1は、日本で観測された黄砂事例であるが、モンゴル・ゴビ砂漠付近において広範囲で発生した黄砂が、韓国付近を經由し、日本へ飛来している様子がわかる。なお、CALIPSOは既に耐用年数を過ぎており、データ提供の停止が懸念される。

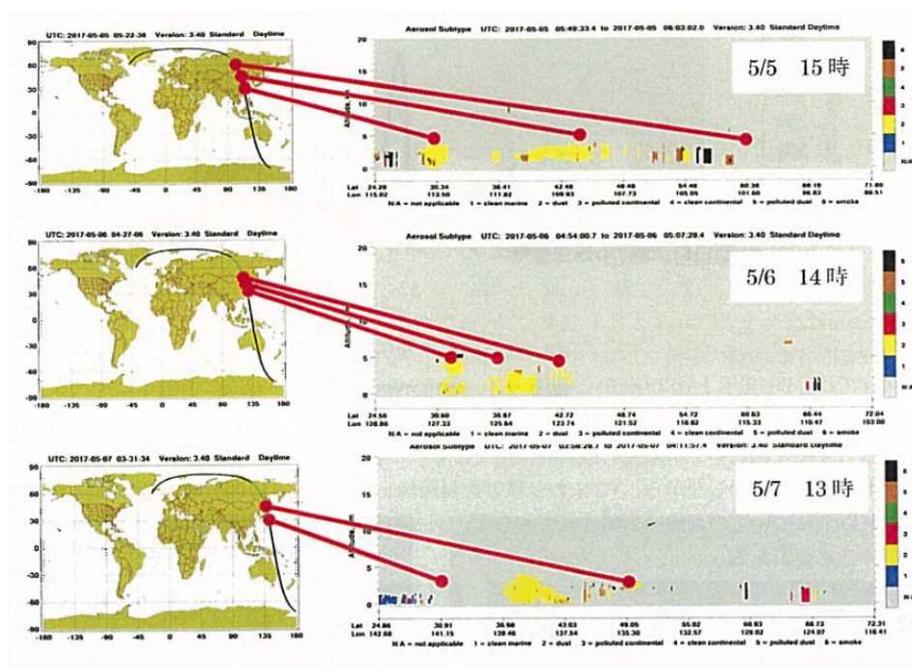


図9-1-2-1 CALIPSOのデータ（左：CALIPSOの軌道、右：ライダーデータ（黄：Dust））

(3) MODIS

MODISはアメリカ航空宇宙局で開発されたセンサーで、地球観測軌道衛星のTerraとAquaに搭載されている。観測波長帯は0.4 μm から14.4 μm の範囲に36バンドを有しており、汚

染物質を判別する手段として利用されているものの、黄砂への適用は見られない。MODIS を搭載した Terra と Aqua も CALIPSO と同様に、耐用年数を過ぎており、データ提供の停止が懸念される。

ここで取り上げた地球観測人工衛星 3 種類について、表 9-1-3-1 に特徴をまとめた。CALIPSO はライダーを搭載しており、黄砂の判別が可能であることから、有効性が高いが、打ち上げから 14 年経ち耐用年数が過ぎている。また、MODIS を搭載している Terra、Aqua も耐用年数を過ぎていることからデータの提供が停止される恐れがあることから、詳細な検討は行わないものとした。

一方、ひまわり 8 号は、耐用年数に問題はなく、Dust RGB により画像処理が可能のため、比較的黄砂の識別が容易と考えられることから、詳細を検討することとする。

表 9-1-3-1 国内外の地球観測人工衛星

人工衛星	(1) ひまわり 8 号	(2) CALIPSO	(3) MODIS (Terra,Aqua)
国籍	日本	米・仏	米
衛星の種類	静止衛星	極軌道衛星	極軌道衛星
打ち上げ年	2014	2006	1999,2002
耐用年	≥2022	≥2018	≥2018
データ	Dust RGB	消散係数	AOT
空間解像度	1000~2000m	333m	250~1000m
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ●黄砂の判別が容易。 ●画像による定性的評価。 	<ul style="list-style-type: none"> ●ライダー搭載で黄砂の判別が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ●汚染物質の判断で使用可能。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ●直近 3 日間より過去の衛星画像が公開されておらず、データから画像処理する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ●軌道衛星のため、黄砂の発生と経路がわかりにくい。 ●衛星の耐用年数が過ぎている。 	<ul style="list-style-type: none"> ●衛星の耐用年数を過ぎている。 ●黄砂検出の適用について報告が見当たらず検討が必要。

9.2 ひまわり 8 号による Dust RGB による黄砂事例の検証

2018 年度に観測された黄砂について、ひまわり 8 号の衛星データから Dust RGB 処理をした画像を用いて検証を行う。Dust RGB は、ひまわり 8 号の 16 の観測バンドのうち、バンド 11 からバンド 15 を使って差分したデータから画像処理したものである。

Dust RGB は、2019 年 1 月から気象庁ホームページにおいて、「ひまわり黄砂監視画像」として公開が開始されているものの、タイムリーに画像を確認して効果的に黄砂対策を実施できることを主な目的としているため、直近 3 日分を超える過去の画像は確認することができない。ここでは別途情報通信研究機構 (NICT) の「ひまわり衛星データアーカイブ」から衛星データをダウンロードし、画像処理を行った。

Dust RGB の画像処理は、気象庁の処理方法に従って行った。具体的には、ひまわり 8 号の観測バンド B15 と B13 の差分、B13 と B11 の差分、B13 の画像を赤色、緑色、青色に割り当て RGB 合成を行った。

次に 2018 年度に観測された黄砂 4 事例 (2018 年 4 月 6 日～7 日、4 月 11 日～13 日、4 月 15 日～17 日、5 月 25 日) について、ACSA による PM10 の経時変化と Dust RGB 画像 (日本時間の 12 時の画像) をまとめた。

(1) 黄砂事例1 2018年4月6日～7日

2018年4月6日は九州、7日は西日本で黄砂が観測された。本事例のPM10の経時変化とDust RGBを図9-2-1-1、図9-2-1-2に示す。

日本では福岡で4月6日20時50分～7日14時、長崎で6日17時30分～7日8時30分に黄砂が観測されていた。Dust RGBから、4月6日12時の時点で大陸に黄砂が発生している様子が確認でき、時間が経つにつれ日本に流れ込む様子が確認できた。7日は西日本の広い範囲で黄砂が観測されたが、日本海に濃い赤色が見られ、西日本を薄い赤色で覆っている様子が確認できた。Dust RGB上で赤色の濃淡を比較すると、島根県付近が最も濃度が高くなるように見えるが、ACSAのデータを見ると、隠岐の濃度は他地点と大きな差は確認できず、五島で最高濃度を観測した。

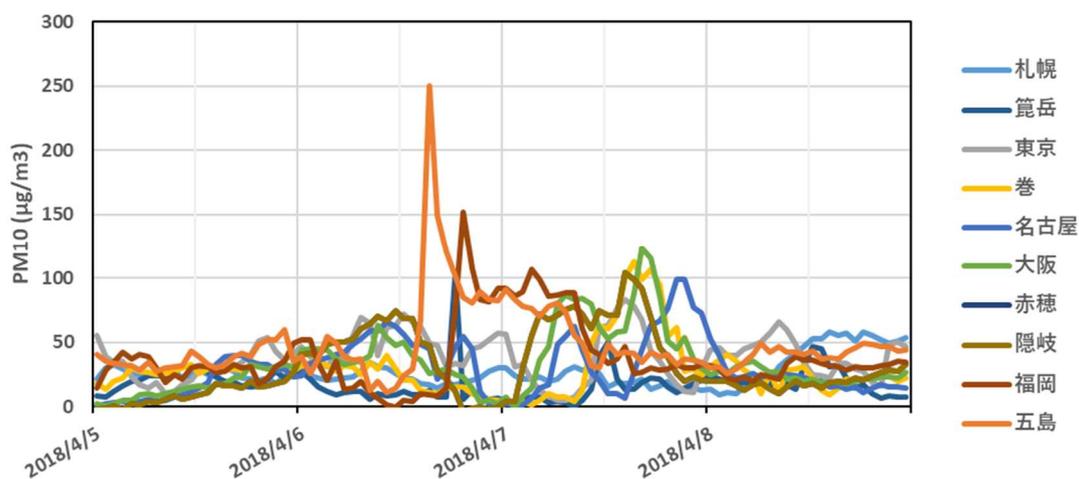
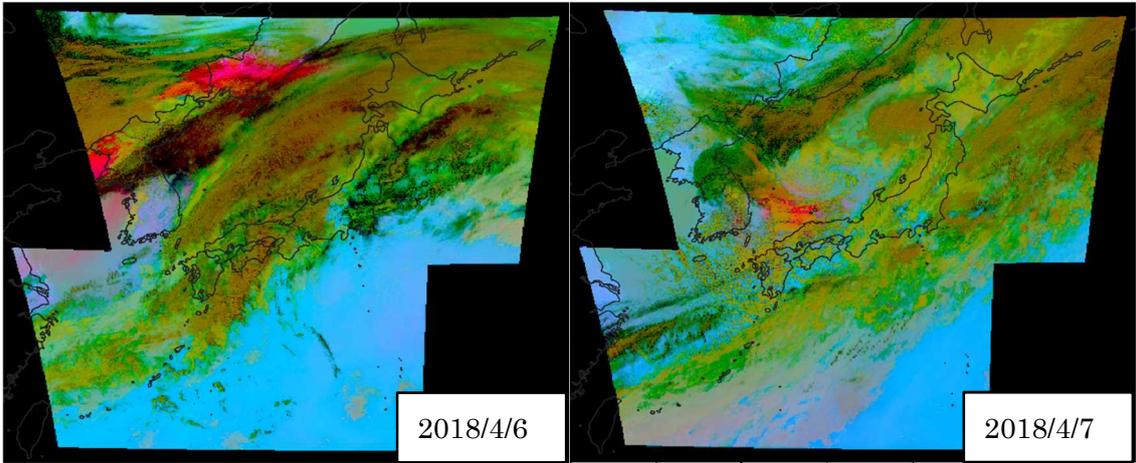


図9-2-1-1 PM10の経時変化



☒ 9-2-1-2 Dust RGB

(2) 黄砂事例 2 2018年4月11日～13日

2018年4月11日は島根県、12日～13日は北海道・東北地方で黄砂が観測された。本事例のPM10の経時変化とDust RGBを図9-2-2-1、図9-2-2-2に示す。

4月11日は松江で15時20分～20時50分、12日は釧路で16時～18時10分にかけて黄砂が観測された。11日のDust RGBでは、黄砂が観測された松江付近は雲に覆われており、黄砂を確認することはできなかった。12日は北海道の西の海上に黄砂が確認され、北海道・東北を覆う様子が見られた。ACSAのデータからの12日の北海道で濃度の上昇が確認でき、黄砂の影響であることが示唆される。しかし、13日は帯広で黄砂が観測されていたものの、Dust RGBでは帯広付近に黄砂を確認することはできなかった。

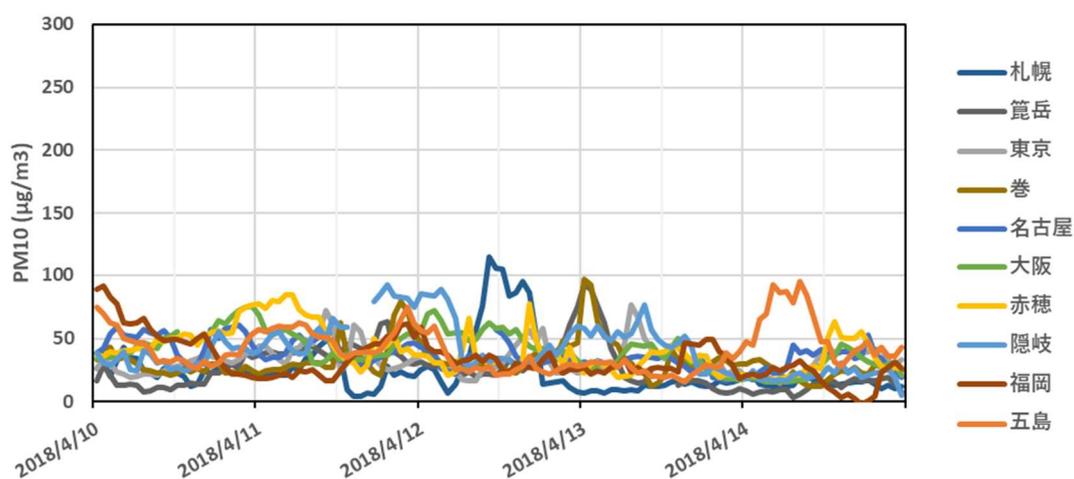
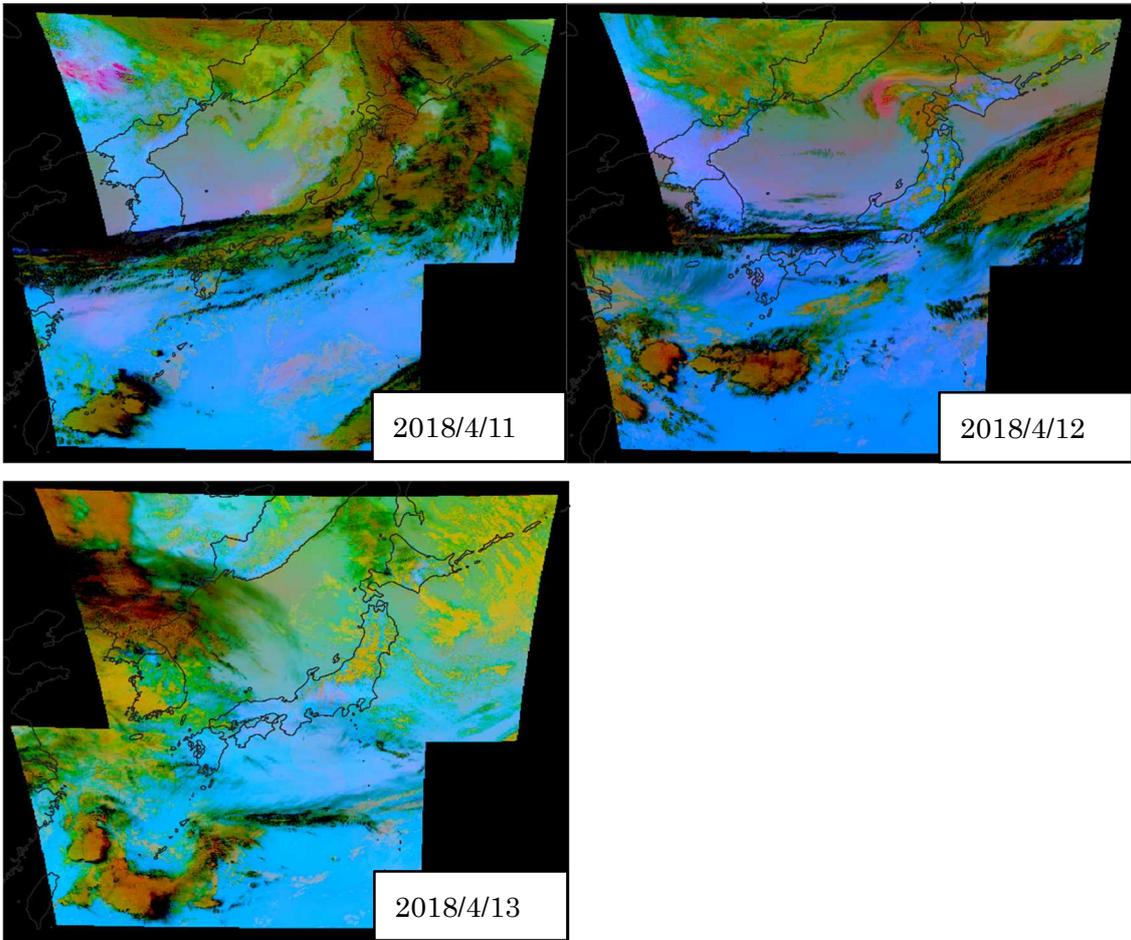


図 9-2-2-1 PM10の経時変化



☒ 9-2-2- 2 Dust RGB

(3) 黄砂事例3 2018年4月15日～17日

2018年4月15日～17日は、西日本の広い範囲で黄砂が観測された。本事例のPM10の経時変化とDust RGBを図9-2-3-1図9-2-3-2に示す。

松江では4月15日20時50分～17日20時、長崎では15日15時20分～17日9時30分にかけて長時間黄砂が観測された。Dust RGBから、15日12時の時点で韓国・北朝鮮に黄砂があることが確認でき、16日にかけて日本に流れ込んでくる様子が確認できた。16日は西日本の広い範囲が薄い赤色で覆われており、観測結果及びACSAで見られた濃度上昇と同様の結果が得られた。一方、17日は16日と同様、西日本広域で黄砂が観測されたが、Dust RGBからは黄砂を確認することはできなかった。17日は沖縄～東日本にかけて曇りや雨が観測されており、広い範囲が雲で覆われていた。Dust RGBでも雲に覆われている様子が表されており、雲の影響により17日の黄砂は確認できなかった。

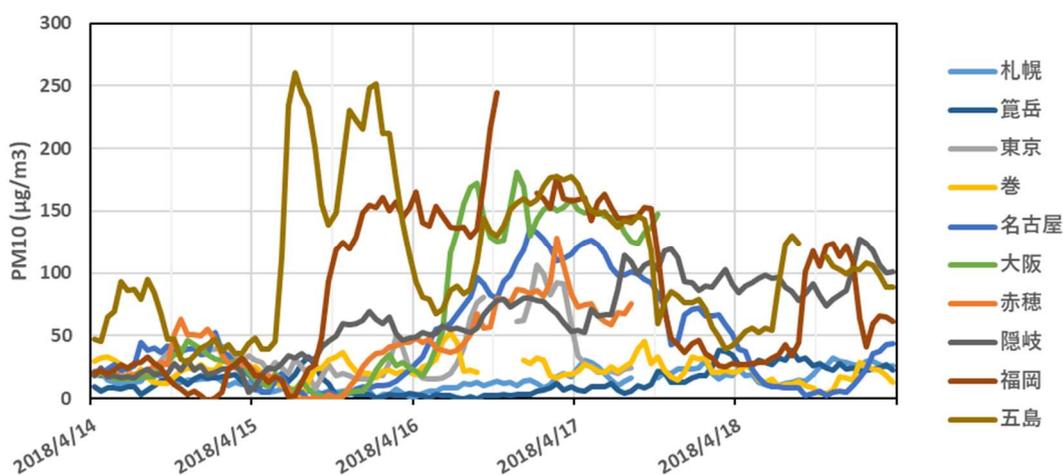


図 9-2-3-1 PM10の経時変化

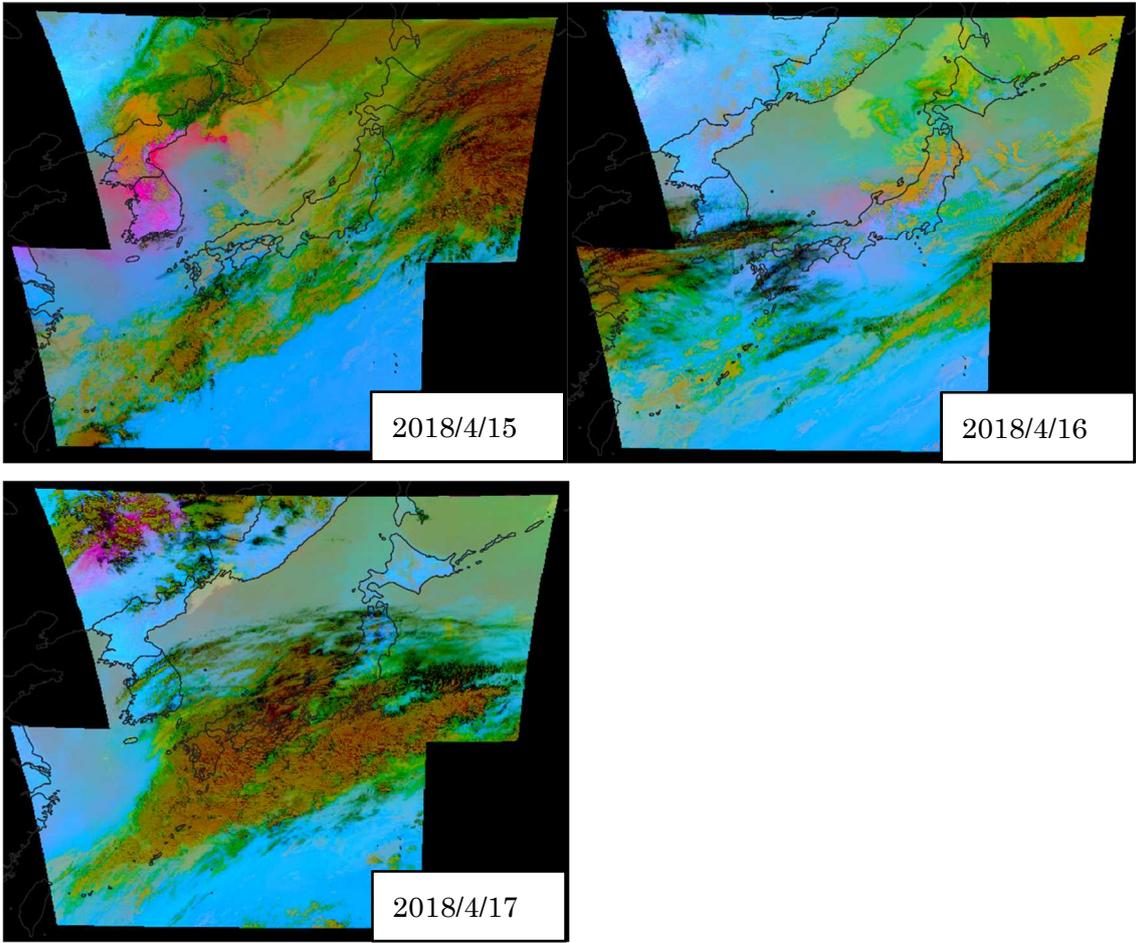


图 9-2-3-2 Dust RGB

(4) 黄砂事例 4 2018年5月25日

2018年5月25日は島根県松江市で黄砂が観測された。本事例のPM10の経時変化とDust RGBを図9-2-4-1、図9-2-4-2に示す。

日本では、松江にて25日13時20分～20時にかけて黄砂が観測されたDust RGB上では、日本海が薄い赤色で覆われており、黄砂を確認することができた。しかし、ACSAのデータからは隠岐での濃度上昇は確認できず、5月24日の午後に上昇した後の濃度はほぼ横ばいであった。一方、巻では25日に濃度が上昇しており、巻での濃度上昇は黄砂以外の影響であることが示唆される。

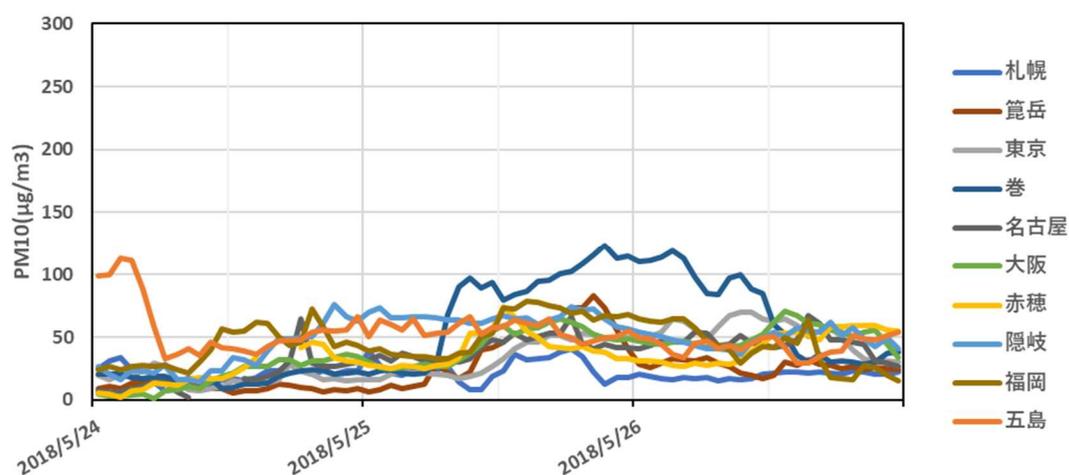


図 9-2-4-1 PM10の経時変化

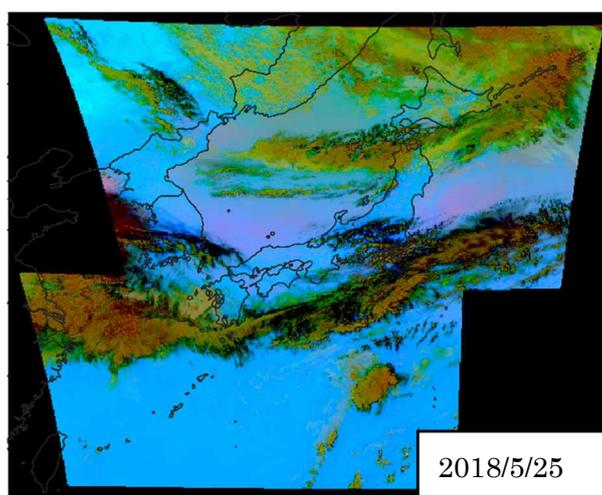


図 9-2-4-2 Dust RGB

2018年度に観測された黄砂4事例について、人工衛星のデータを活用した黄砂の感知について検討を行った。Dust RGBの結果、黄砂が大陸から日本へ飛来している様子を確認することができ、範囲についてもある程度特定することは可能であった。しかし、衛星画像は水蒸気を多く含む範囲での撮影には適していない。一方で、大陸で発生したダストや大陸上の移流を表すことに長けている。そのため、日本への黄砂飛来状況を確認するために用いるのではなく、モデルの初期値設定のためのデータ同化として活用することで、より正確な黄砂飛来予測が可能となる可能性がある。また、ここでは日本時間の12時のみで評価を行ったが、ひまわり8号のデータは10分毎に公開されているため、様々な時間のデータを用いることでより詳細なモデルの計算等に活用できる可能性が示唆される。

10 今後の課題

本報告書では、ライダー及び PM2.5 成分自動測定機（ACSA）等のデータにより、黄砂飛来状況について把握するとともに、黄砂と大気汚染物質との混在について、全国的な状況を確認した。

今後の課題として、次の事項があげられる。

○黄砂は粒径が比較的大きい粒子の割合が大きいため、飛来時に SPM 濃度が上昇することが知られているが、PM2.5 濃度も上昇し、健康影響が懸念される研究報告もなされているため、さらなる状況把握が必要である。

○黄砂は大気汚染物質が混在していることが多いことから、大気汚染物質を把握するために成分分析を行う必要がある。今年度は PM2.5 成分自動測定機（ACSA）により、硫酸イオンや硝酸イオンが黄砂と混在していることを確認したが、その他の成分等も混在していると考えられることから、金属成分の測定が可能な PM2.5 成分自動測定機（PX-375）等のデータも合わせた解析が望まれる。また、今年度は黄砂時において微小粒子の硫酸イオンの上昇の後、PM10 の上昇が見られたが、これらは別の空気塊である可能性がある。同一の空気塊か判断するためには湿度の解析も必要である。これに加えて黄砂の判断には PM2.5/PM10 の比のみでなく、それと PM10 濃度との相関を調べてみることも有効である。

○日本・中国・韓国が黄砂対策に関するモニタリング及び予測、発生源対策について共同研究等を行っているが、黄砂問題検討会と日中韓三カ国共同研究と連携をより深めることによって、発生源及び日本におけるモニタリングについて情報共有を深めることによって、黄砂発生の減少及び混在する大気汚染物質減少につなげる必要がある。

○全国の黄砂観測日については、各気象台が観測した黄砂日の延べ日数で把握されていたが、黄砂観測を中止する気象台が出てきたため（昨年度は 59カ所から 51カ所に減少）、過去の黄砂観測結果との継続性について確保する必要がある。

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」2018：平成29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）：
https://www.data.jma.go.jp/gmd/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、鶴野伊津志、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 PM2.5 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., Gherzi, 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 aerosols 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. 鶴野伊津志他：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. Uematsu, M., A. Yoshikawa, H. Muraki, K. Arao and I. Uno: Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a Kosa event over East Asia, J. Geophys. Res., 107, No.D7, 10.1029/2001JD000333 (2002).
 34. Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui and M. Nishikawa: A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using PM2.5-to-PM10 ratios, Particuology, 28, 114-120
 35. 森育子他：2018 年 7 月における PM2.5 高濃度事象の解析、第 60 回大気環境学会年会

講演要旨集、P-47(2018)

36. 池森文数：2019年2月下旬から3月上旬の北海道におけるPM2.5高濃度事例解析－テープろ紙の有機トレーサー成分測定とその特徴－、第60回大気環境学会年会講演要旨集、2A10145(2018)