

6 黄砂および煙霧時の PM2.5 濃度のデータ整理と解析

黄砂は、PM2.5 の環境基準達成に大きな影響を与えていると考えられる。また、越境による煙霧の存在も、黄砂と同程度もしくはそれ以上に大きな影響を与える可能性がある。そのため、2019 年度の黄砂・煙霧時の PM2.5 濃度について検討した。

6.1 黄砂・煙霧時における PM2.5 環境基準超過

ここでは、全国の 1,072 箇所の測定局を評価対象とする。2019 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 378,824（日×局）であり、平均濃度は 9.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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、806（日×局）であり、全体の 0.21% であった。

測定局における黄砂観測日は、8,318（日×局）であり、黄砂時の平均濃度は 15.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、このうち環境基準値を超えた割合は、26（日×局）であった。これは黄砂観測日×局数全体の 0.31% にあたり、前年度の平均濃度 16.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、環境基準値を超過した割合 2.0% 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 17,543（日×局）、煙霧時の平均濃度は 14.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、このうち環境基準値を超えた日数は 413（日×局）であった。これは、煙霧観測日×局数全体の 4.63% 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 6-1-1 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）

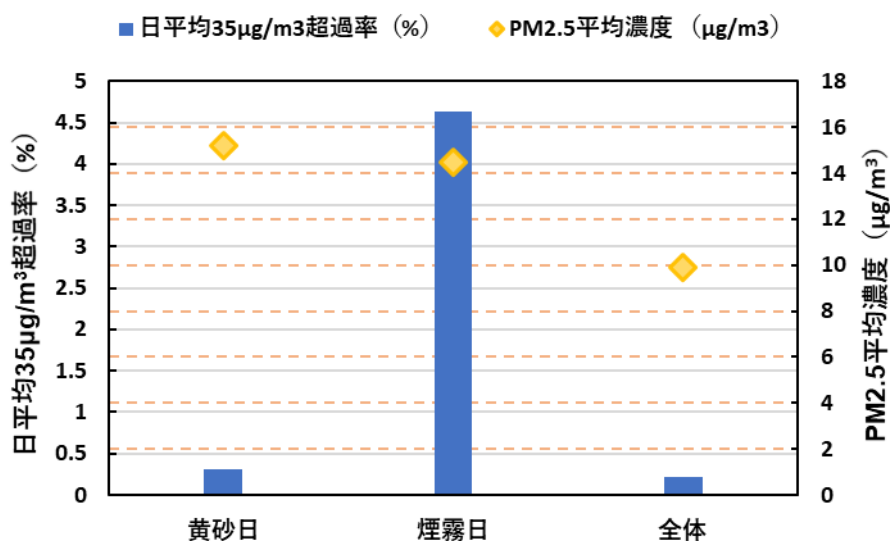


図 6-1-1 黄砂日および煙霧日の PM2.5 平均濃度と環境基準値超過率

2019年度の黄砂日観測日数と黄砂日のPM2.5環境基準超過に数を都道府県別に図6-1-2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6-1-3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、九州各県で多いが、全国的に環境基準値越えの煙霧が発生していることがわかる。

図6-1-4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、2019年度においては、黄砂・煙霧以外の要因によるPM2.5高濃度も多くあったことが確認できる。

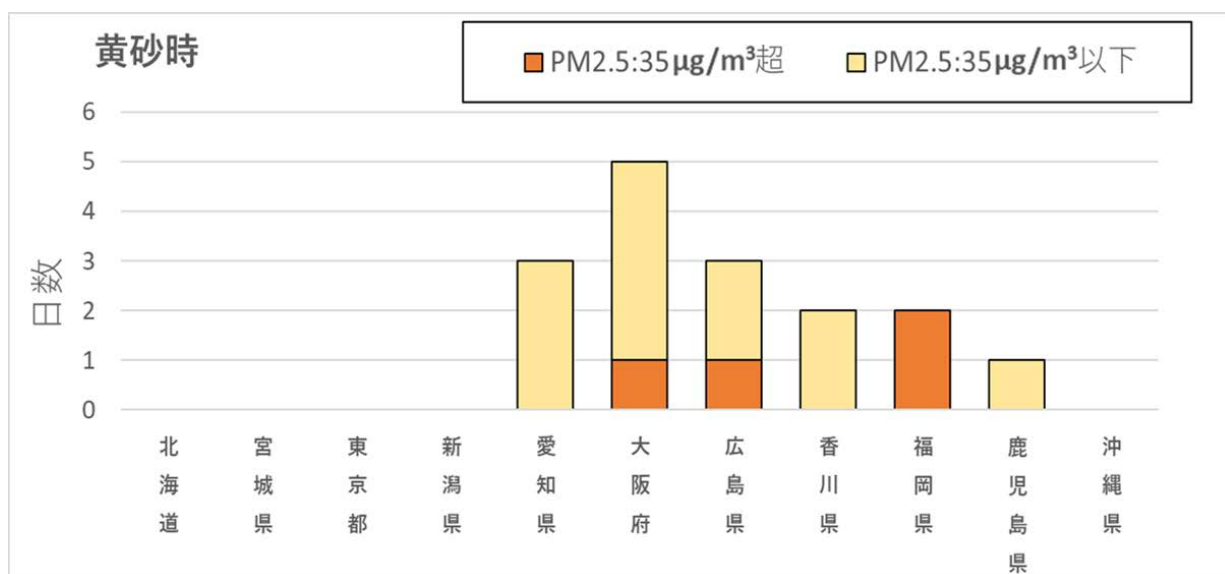


図 6-1-2 都道府県別の黄砂日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2019 年度)

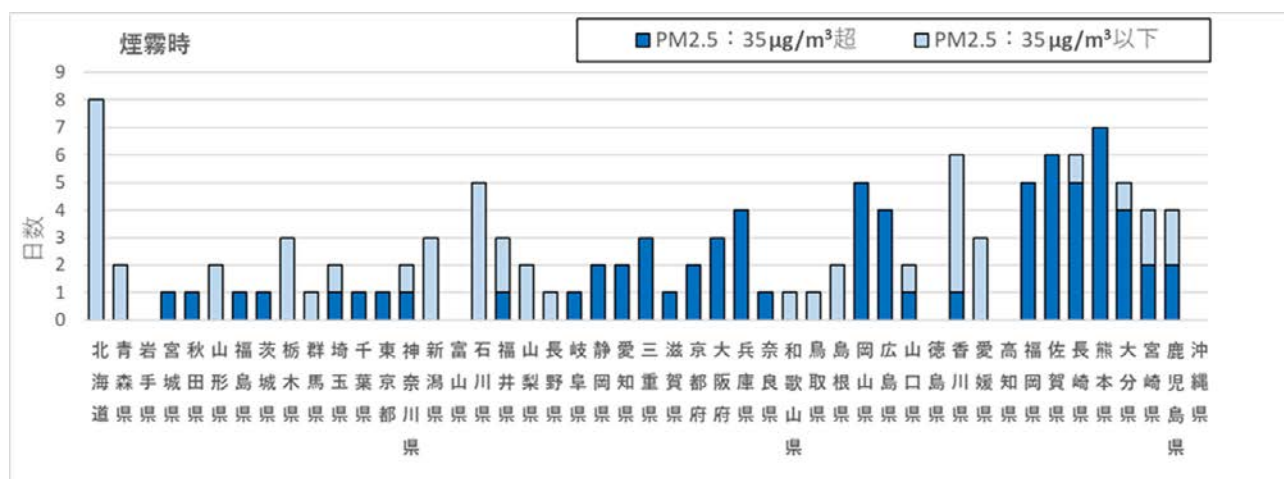


図 6-1-3 都道府県別の煙霧日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2019 年度)

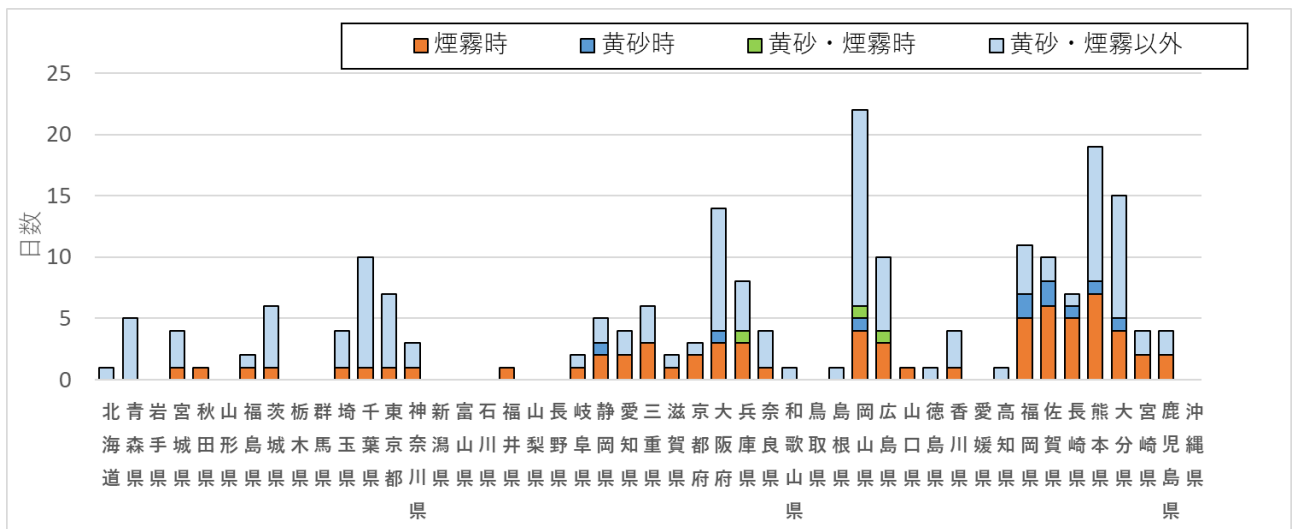


図 6-1-4 都道府県別の PM2.5 環境基準超過日を占める黄砂・煙霧の割合 (2019 年度)

6.2 黄砂・煙霧時におけるPM2.5成分濃度の解析

全国の自治体では、毎年度、4季にわたってPM2.5の成分分析を実施している。ここでは、2019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。また、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、45データが抽出された。

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、45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、0検体であった。

黄砂時における重量濃度の平均は $26.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、それぞれの金属成分・イオン成分の平均はPM2.5中の含有率は、図6-2-1と図6-2-2のとおりである。金属成分に関しては、黄砂時にはAlとFeが顕著に高く、イオン成分などに関しては、塩化物イオン(Cl^-)、カリウムイオン(K^+)、カルシウムイオン(Ca^{2+})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。

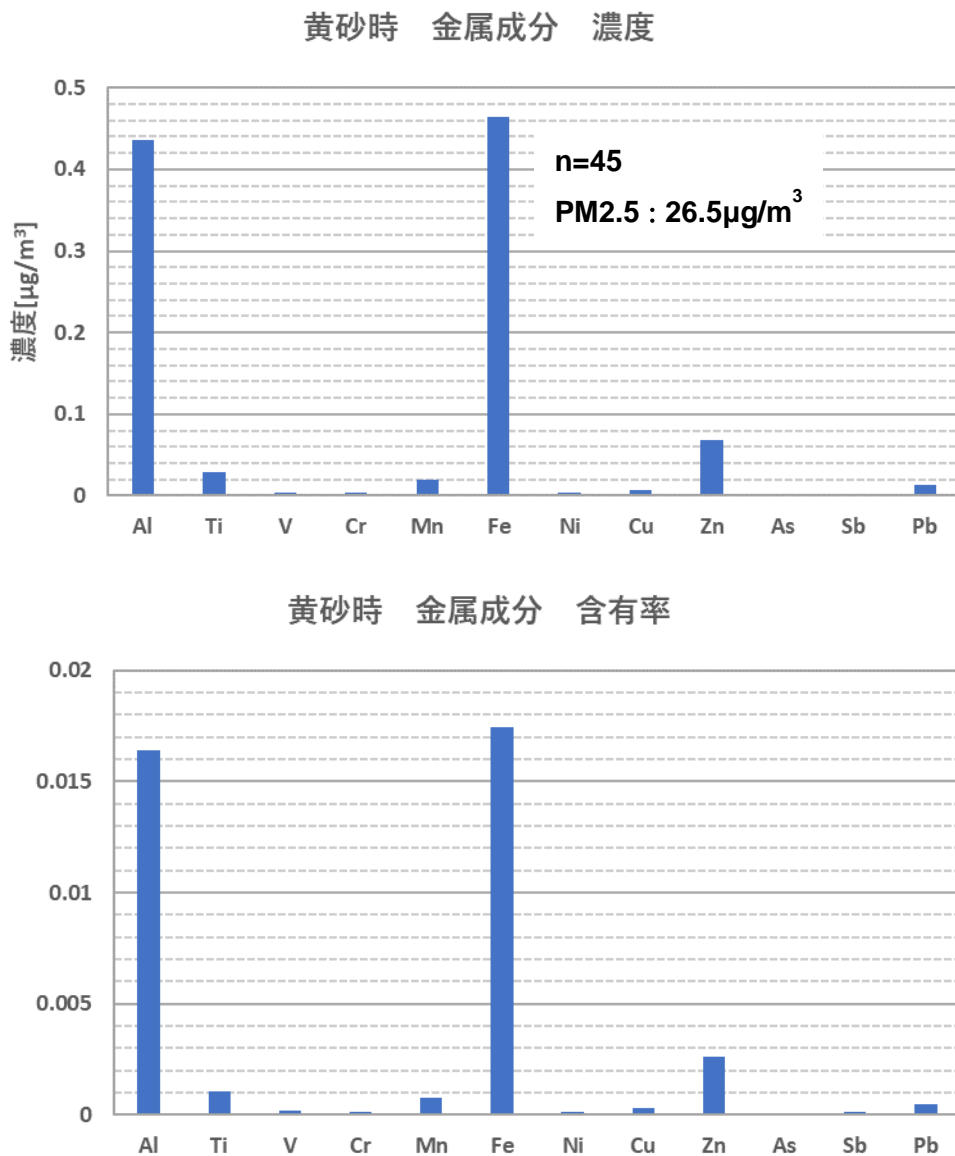
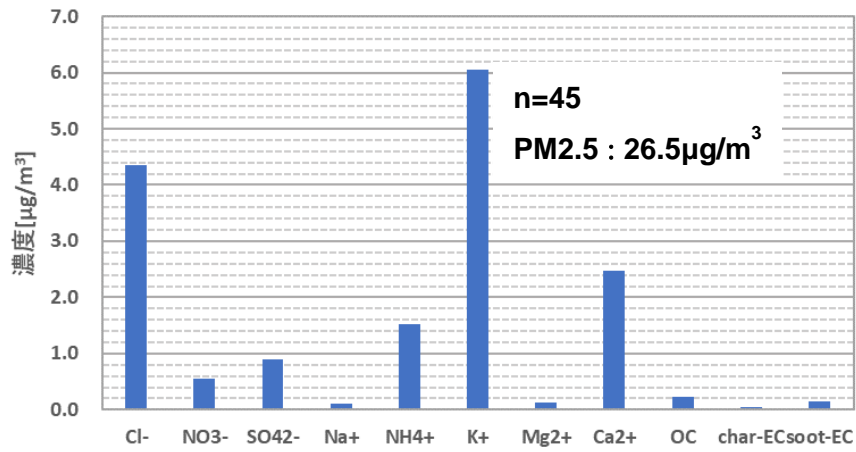


図 6-2-1 煙霧時におけるPM2.5金属成分 (上段：濃度、下段：含有率)

黄砂時 イオン成分等 濃度



黄砂時 イオン成分等 含有率

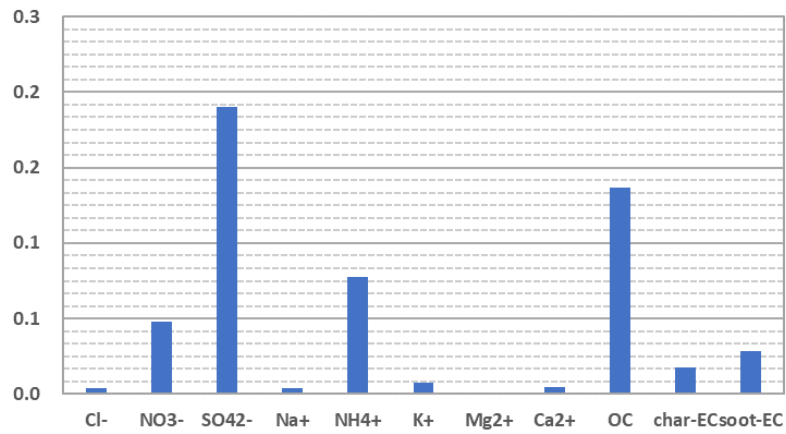


図 6-2-2 黄砂時における PM2.5 イオン成分等 (上段：濃度、下段：含有率)

6.3 黄砂・煙霧時における PMF 法を利用した PM2.5 の発生源寄与解析

PMF 解析を行うために、PM2.5 成分濃度調査が実施された期間に、黄砂が観測された日を選択した。その結果、黄砂が観測された 2019 年 10 月 30 日～11 月 2 日に調査を実施している自治体があった。また、この黄砂日の間では名古屋以西で黄砂が観測されたため、この期間に名古屋以西で観測を実施している全ての地点を選択した（沖縄県は除外）。この結果 114 データが抽出された。また、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、81 データが抽出された。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通りである。

PMF の計算の条件

【件数】 黄砂：81 件、煙霧：0 件
【成分数】 以下の全 22 項目 イオン成分：Cl ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、Na ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、K ⁺ 、Mg ²⁺ 、Ca ²⁺ 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】 5 因子

図 6-3-1 に因子数 5 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。

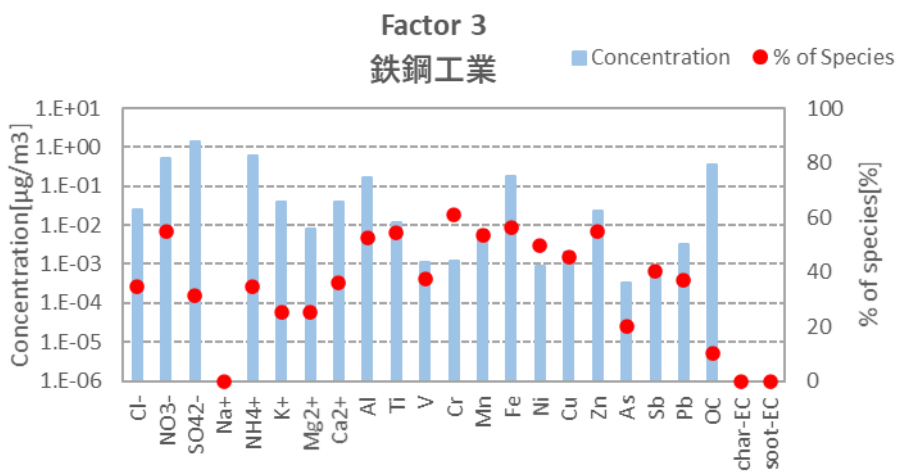
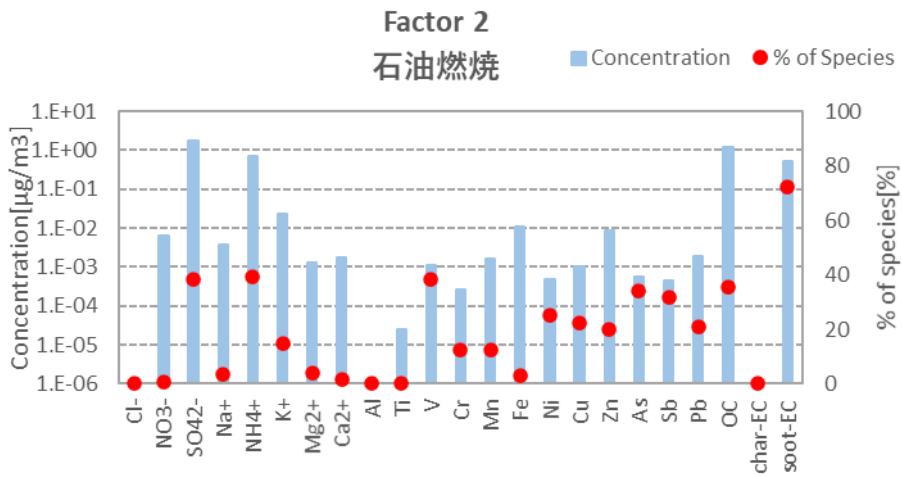
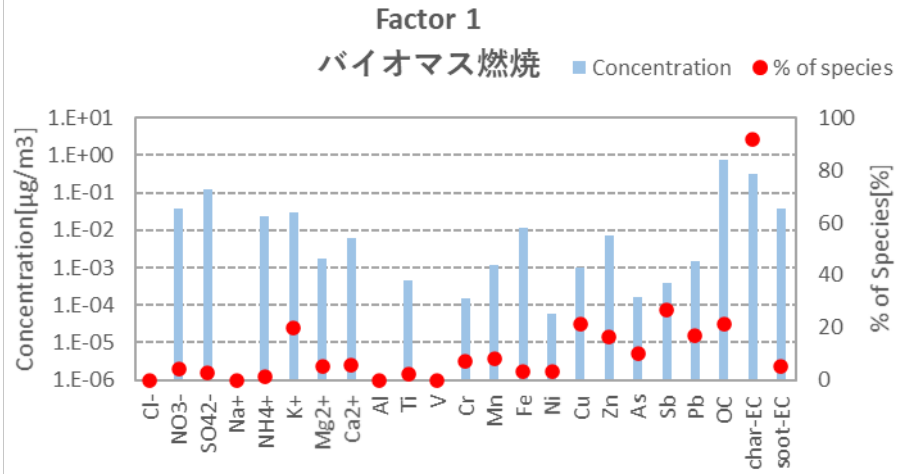
Factor1 は char-EC、K⁺などが高く、バイオマス燃焼を表す因子と思われる。

Factor2 は soot-EC、V の割合が高く、石油燃焼を表す因子と思われる。

Factor3 は Ti、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn が高く、鉄鉱工業によるものと想定される。

Factor4 は Na⁺が他の成分と比較し顕著に高く、海塩による因子と思われる。海塩の Mg²⁺ /Na⁺比は 0.11 とされており、ここでは 0.09 とやや低めであった。

Factor5 は Ca²⁺、Al、Ti、As、Sb が高く、黄砂に関する土壌を表す因子と思われる。



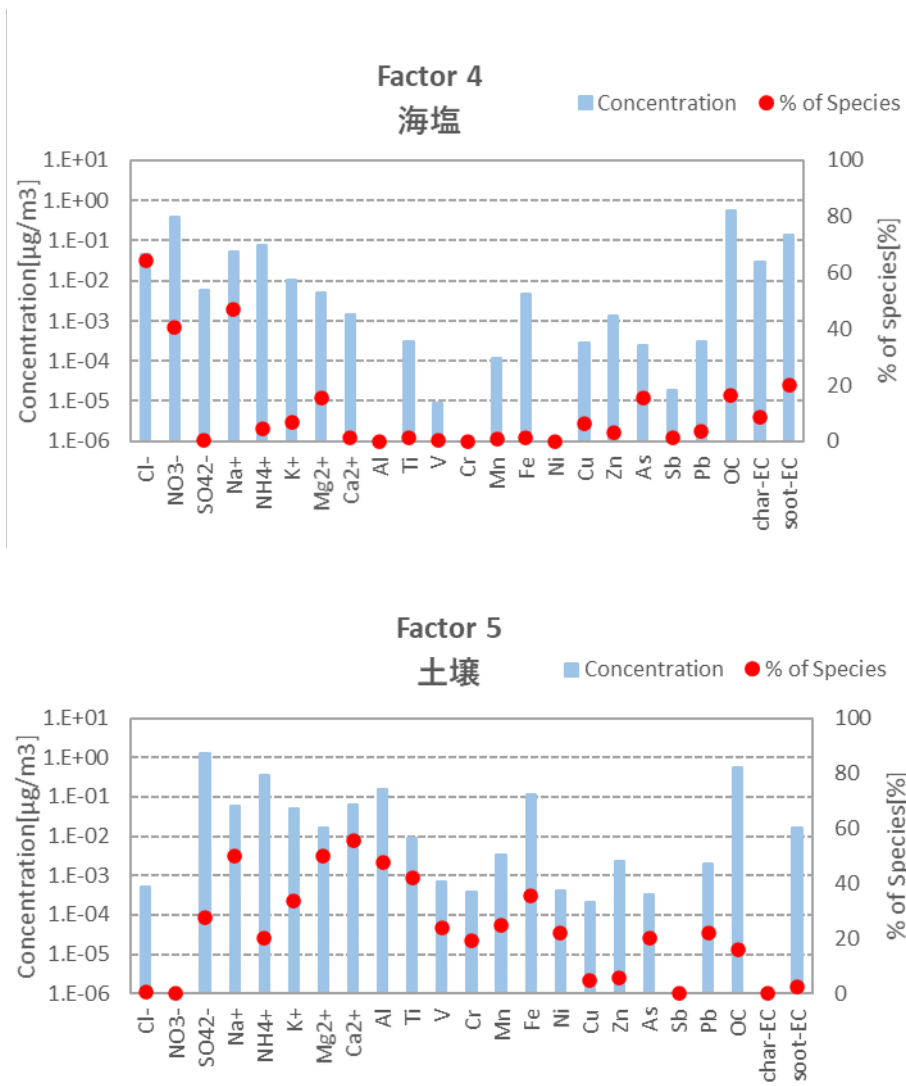


図 6-3-1 発生源プロファイル

2019 年度に観測された黄砂の期間と、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 114 件から、不整合なレコードを除いた 81 データを用い、PMF による発生源寄与平均組成を実施した結果は、図 6-3-2 に示すとおりである。

平均組成は、因子以外の「その他」を除き、石油燃焼の寄与が最も高く 21.25%を示し、次いで鉄鋼工業の寄与が高く 17.12%を示した。

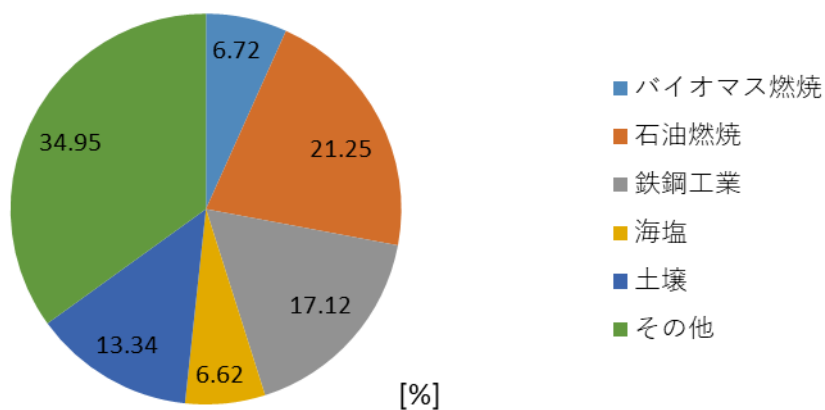


図 6-3-2 黄砂時の各寄与濃度の平均組成

7 2019年度を対象とした黄砂判定手法の検討

7.1 ライダーデータを用いた黄砂検出とその状況

黄砂の観測は全国の気象台で目視により実施されているが、この方法では、気象台で観測されないような弱い黄砂の飛来状況が把握されていない。このような現状に対し、過年度の黄砂問題検討業務において、ライダーとSPMを用いた黄砂日検出方法の検討が行われてきた。この手法は、以下に示すような4条件を満たす日を「弱い黄砂日」として抽出するものであり、必ずしも気象台観測により報告された黄砂日とは一致しないが、黄砂粒子の飛来が示唆される日として例年、情報を蓄積している。このような情報の蓄積は、将来における黄砂観測の定量的な指標の検討という観点から、特に黄砂観測を行う気象台が11地点に減少した現在、より重要となっている。

本手法による黄砂検出の概要、ならびに2019年度における検出結果は以下のとおりである。

(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時間平均値を算出したもの、及びライダー設置地点に最も近接する常時監視局におけるSPM濃度1時間値である。期間は2019年度の1年間とし、地点は札幌、仙台、東京、新潟、大阪、松江、福岡、長崎の8地点を対象とした。

(2) ライダーによる黄砂検出の方法

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濃度は相関関係にあると推測される。本方法は、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、両者の相関係数と回帰式について、24時間単位で計算を行い、その中から、次の条件に合致するものを抽出するものである。

検出条件

- ① 1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時間の場合は相関係数が0.7以上であること
- ③ SPM濃度の日最大値が $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であること
- ④ 黄砂消散係数が日最大値 $0.05/\text{km}$ 以上であること

(3) ライダーによる黄砂検出の結果

2019年度において、本方法で検出された日は、表7-1-1に示すとおりである。事例2、3の11月1日は、気象庁により福岡で黄砂が報告された日に該当する。また、表7-1-1における各事例について、SPM濃度ならびにライダー黄砂消散係数の経時変化を以下の図7-1-1~図7-1-3に示した。この3事例の中では、特に事例2の松江におけるSPM濃度とライダー黄砂消散係数の相関係数が0.9905と高い値を示

し、実際に図 7-1-2 より増減の時刻がよく一致していることが見て取れる。

表 7-1-1 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

NO.	年	月	日	地点	データ数 ⁽¹⁾	相関係数	SPM 最大値 (μg/m ³)	消散係数 最大値 (/km)	地点黄砂日 ⁽²⁾	全体黄砂日 ⁽³⁾	全体煙霧日 ⁽⁴⁾
1	2019	5	24	大阪	1	0.6495	51	0.0649			
2	2019	11	1	松江	1	0.9905	53	0.1379		○	
3	2019	11	1	東京	1	0.7065	62	0.0577		○	

備考

- (1) データ数： 1：データ数が 16 時間以上データ数のある場合 2：データ数が 12～15 時間の場合
- (2) 地点黄砂日：当該地点で気象台により黄砂が観測された日
- (3) 全体黄砂日：日本のいずれかの地点で気象台により黄砂が観測された日
- (4) 全体煙霧日：日本のいずれかの地点で気象台により煙霧が観測された日

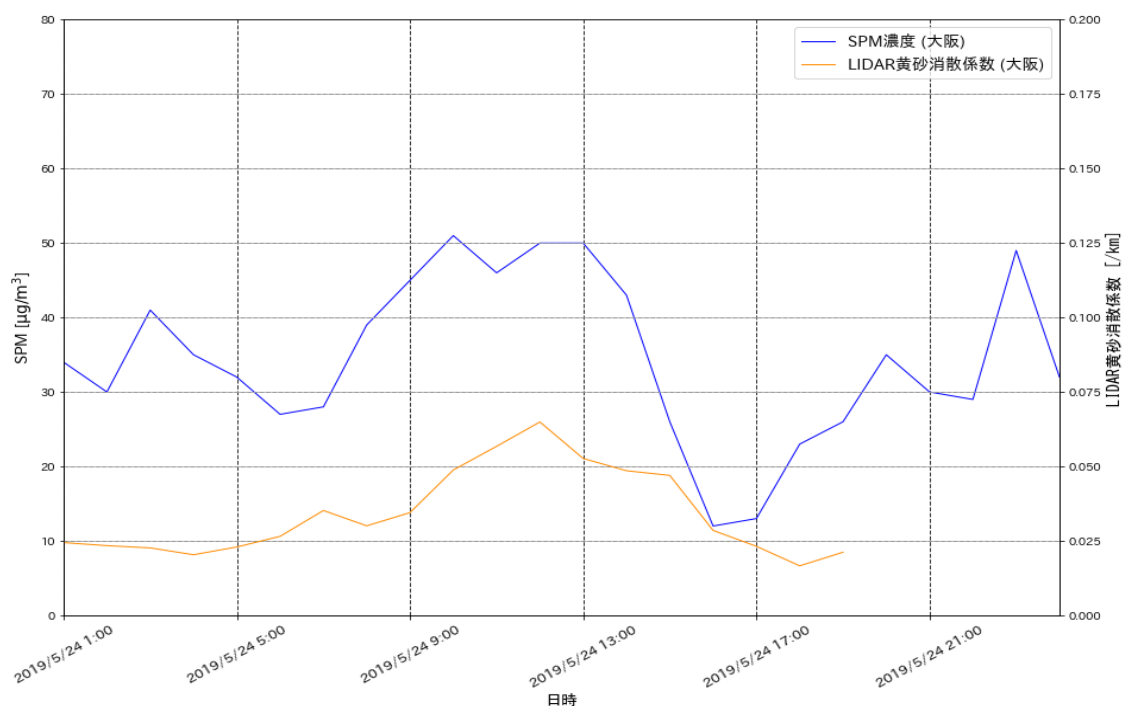


図 7-1-1 5 月 24 日の大阪における SPM 濃度及びライダー黄砂消散係数時間変化

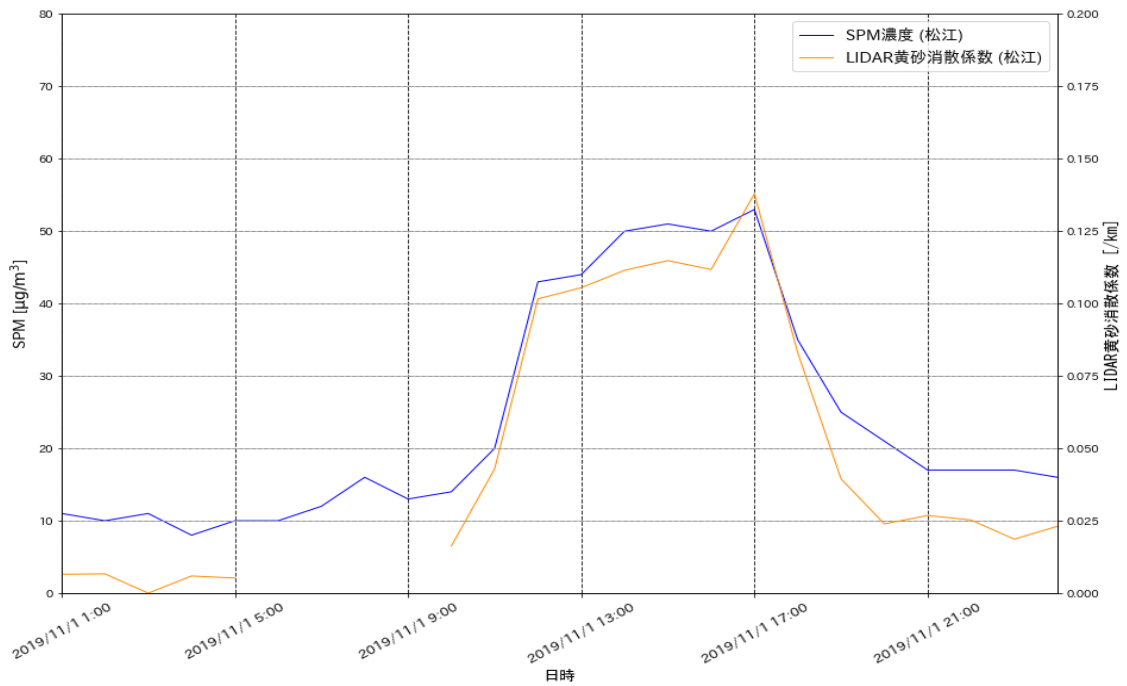


図 7-1-2 11月1日の松江におけるSPM濃度及びライダー黄砂消散係数時間変化

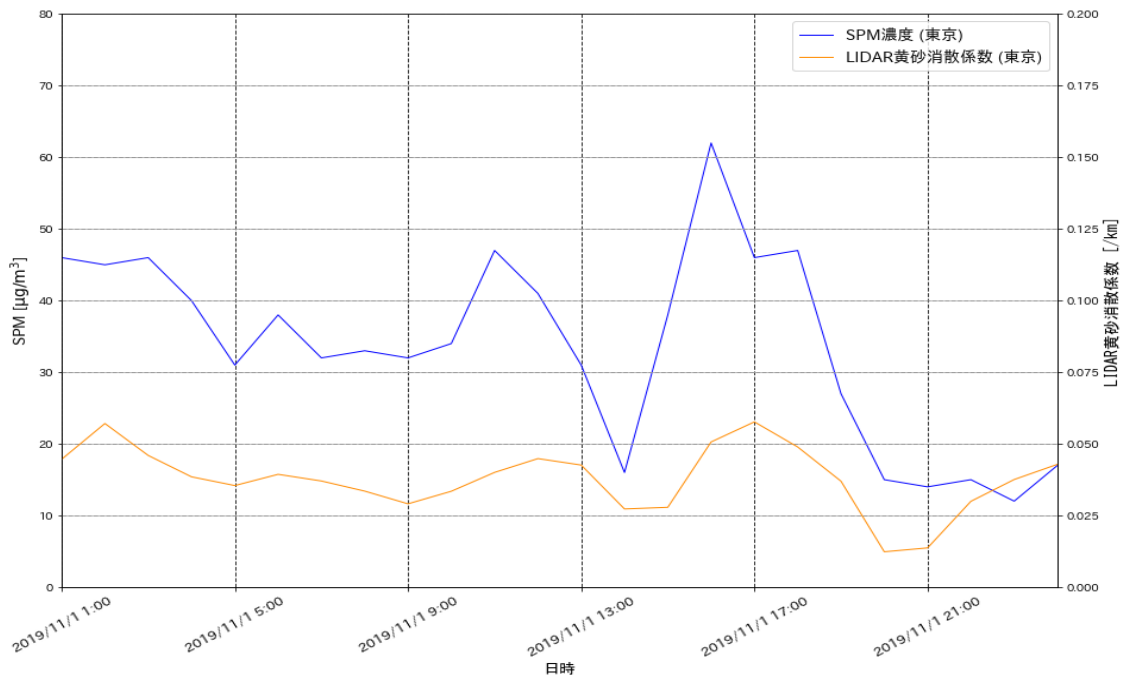


図 7-1-3 11月1日の東京におけるSPM濃度及びライダー黄砂消散係数時間変化

7.2 PM2.5/SPM の濃度比を利用した黄砂観測手法の検出

前節において見たように、ライダーと SPM 濃度に関する条件①～④により、気象庁により報告された黄砂日を含む計 3 事例が弱い黄砂日として検出された。以下では、上記 3 事例を対象に PM2.5/SPM 比の経時変化を調べることで、黄砂判定の指標として PM2.5/SPM 比の値が有効か否かについて検討を行う。このような試みは、黄砂観測地点の減少を補い、また天候不順等の理由によりライダー観測データが十分に得られない場合を想定して、過去のより多くの事例に対する分析結果の蓄積を目的とし、行うものである。

表 7-1-1 に基づいて、大阪、松江、東京の 3 地点を対象に、ライダー観測点に最も近い大気汚染常時監視測定局の測定データの中から、各事例の該当日の SPM、PM2.5 測定値を抜き出し、PM2.5/SPM 比の値とともに時間変化をプロットしたところ、以下の図の通りとなった。なお、3 事例すべてについて、値の変化の様子が確認できるよう、前後 1 日を含めた時間変化を図示した。

(1) 事例 1 : 2019 年 5 月 24 日 (大阪)

2019 年 5 月 24 日の大阪における、PM2.5、SPM、及び PM2.5/SPM 比の経時変化は、以下の図 7-2-1 の通りとなった。5 月 24 日から 5 月 25 日 1 時頃にかけて SPM の値の上昇傾向が見られるものの、PM2.5/SPM 比の値は細かな周期での変動が多く、変化の様子はあまり明瞭ではない。

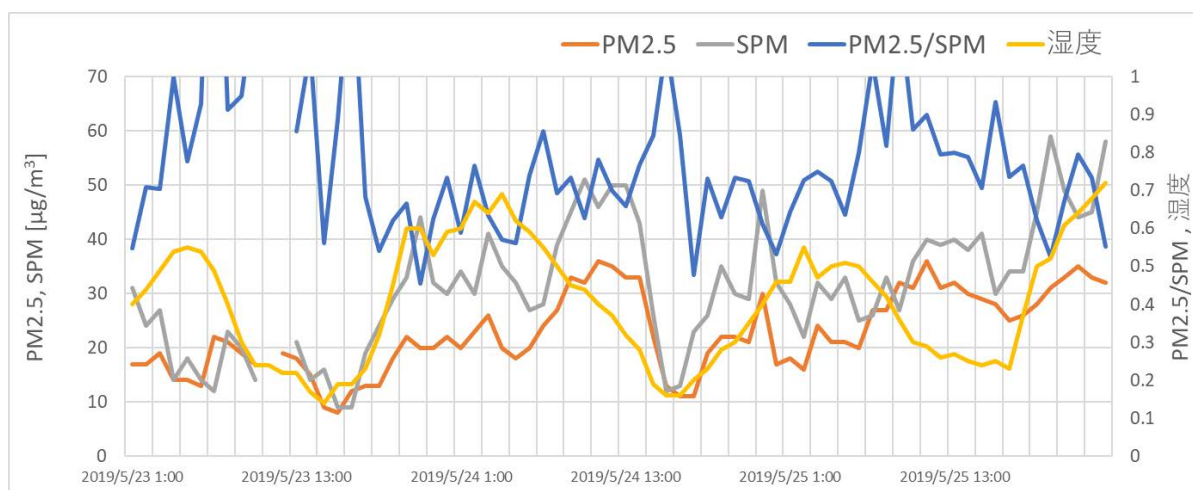


図 7-2-1 2019 年 5 月 24 日の大阪における PM2.5, SPM 及び PM2.5/SPM 比の時間変化

(2) 事例 2 : 2019 年 11 月 1 日 (松江)

2019 年 11 月 1 日の松江における、PM2.5、SPM、及び PM2.5/SPM 比の経時変化は、以下の図 7-2-2 の通りであった。10 月 31 日までは平均 0.8~1 付近の値であった PM2.5/SPM 比が、11 月 1 日の SPM の上昇に伴い極小値をとる様子が明瞭に表れている。ライダー黄砂消散係数との相関係数も、0.9905 と高い値を示していた。

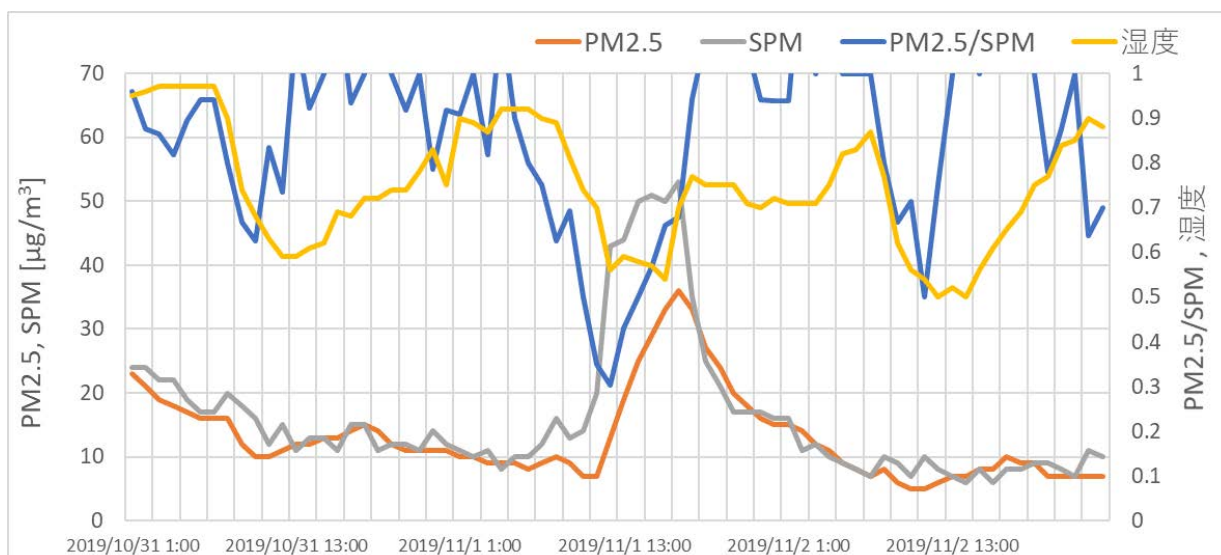


図 7-2-2 2019 年 11 月 1 日の松江における PM2.5, SPM 及び PM2.5/SPM 比の時間変化

(3) 事例 3 : 2019 年 11 月 1 日 (東京)

2019 年 11 月 1 日の東京における、PM2.5、SPM、及び PM2.5/SPM 比の経時変化は、以下の図 7-2-3 の通りであった。10 月 31 日から 11 月 1 日午前にかけて、SPM 濃度は断続的に高い値を示しているものの、PM2.5/SPM 比の値にはあまり明確な変化は見られない。

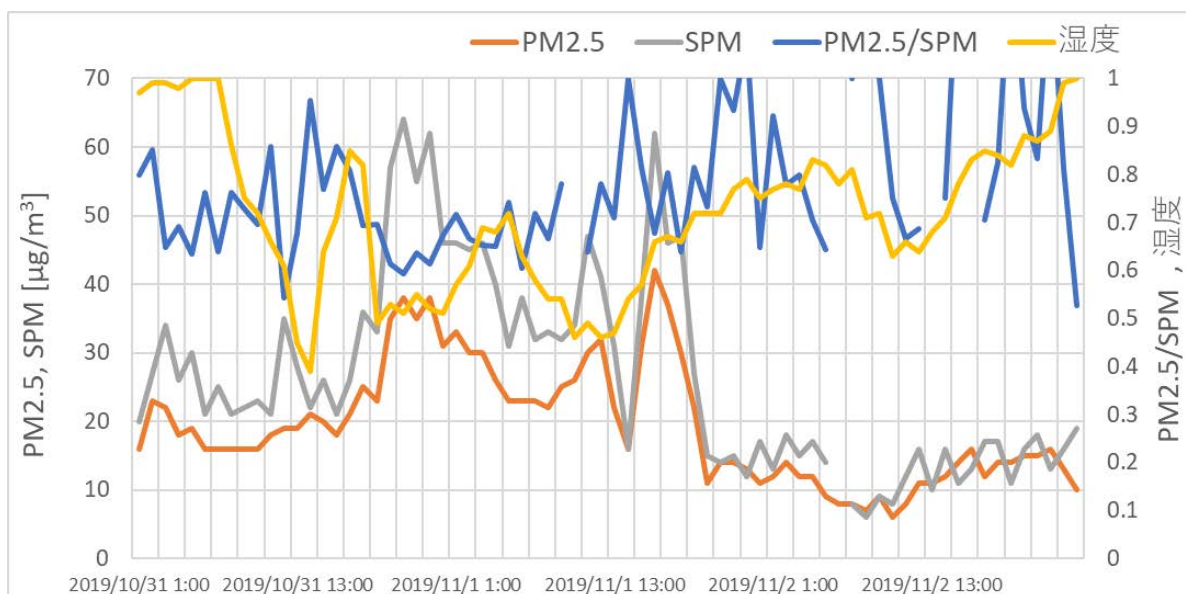


図 7-2-3 2019 年 11 月 1 日の東京における PM2.5, SPM 及び PM2.5/SPM 比の時間変化

以上 3 事例からは、SPM の増大に伴い PM2.5/SPM 比の値が極小値をとる様子が確認できたが、事例 1 及び 3 では比の値の増減が激しく、また極小値とそれ以外の値の差もわずかであった。対照的に事例 2 では、それまで増減の比較的小さかった PM2.5/SPM 比の値が、SPM 濃度の増大に伴って極小値をとる様子が明らかに確認できた。気象庁によれば、事例 2 の 11 月 1 日は福岡のみで黄砂が報告されているが、10 月 30 日には名古屋、広島、大阪、高松にて、10 月 31 日には大阪にて黄砂が報告されて

いる。特に事例 2 について、CFORS 予測結果や自動測定器 ACSA による PM2.5/PM10 比の時間変動の確認等、より詳細な検証が必要であると考えられる。

7.3 地球観測衛星

前節までに見たように、目視観測を補う定量的な黄砂検出手法として、ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の相関係数、SPM 濃度・PM2.5 濃度及びそれらの比を用いた 2 通りの手法を検討した。しかし、そのいずれも、単独で黄砂の飛来を示す指標として用いるには十分ではなく、より直接的に黄砂の飛来状況を把握できる手法と組み合わせる必要があると考えられる。本年度業務では、そのための手法として、地球観測衛星を活用した黄砂検出の可能性について検討を行った。残念ながら、今年度検討対象とした衛星からはデータを入手することができず、実際に衛星データを活用し前節までの手法と組み合わせる段階には至らなかったが、将来における定量的な黄砂検出手法の可能性の一つとして、本年度業務における検討内容を以下に示す。

7.3.1 気象衛星ひまわりの観測データを用いた黄砂検出

日本の気象衛星ひまわり 8 号は、日本域・機動観測域・フルディスクの 3 種類の観測範囲を備えており、それぞれ日本海までを含む日本周辺の固定域、観測対象に応じた機動的な観測域、全球の画像データを撮影・提供している。過年度の検討においては、日本域におけるひまわり画像の Dust-RGB 処理による黄砂飛来状況の把握が行われていたが、この方法では、飛来する黄砂の上空に雲がかかっているような状況下では黄砂が撮影されず、飛来状況の把握が天候に大きく左右されるという欠点がある。そこで今年度業務では、全球を観測範囲とするフルディスク画像の分析により、発生源域の状況を把握することが可能であるか検討した。フルディスク画像は、全球を 10 分割して撮影されており、セグメント 2 及び 3 に発生源域が含まれていることが確認できた。天候面に関しても、発生源域は日本海上空に比べ水蒸気量・雲量が少ないため、発生直後の黄砂の規模・移動方向を把握することができる可能性が高いと期待される。しかし、残念ながらフルディスク画像データは観測休止中でありデータの入手ができなかった。そのため、今年度はひまわり 8 号を用いた発生源域の解析を実施できなかったが、今後、観測が開始された際には、黄砂飛来状況の直接的な把握に活用できると考えられる。

また、ひまわり観測画像としては、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が提供する「ひまわりモニタ」により、エアロゾルの光学的厚さが画像で提供されている。フルディスク画像と同様、こちらも天候に左右される欠点があり、またその特性上観測が日中に限定されるが、前節までの手法と組み合わせることにより、将来の黄砂飛来状況の把握に活用できる可能性がある。

7.3.2 気象衛星 GEMS の観測データを用いた黄砂検出

Ball Aerospace 社と韓国航空宇宙研究院により共同開発された人工衛星 GEMS は、2020 年 2 月に打ち上げが成功し、運用が開始された。朝鮮半島を中心に、エアロゾル・汚染物質の高解像度での観測が可能であるとされているが、有識者にヒアリングを行った結果、残念ながら、現時点ではデータは一般公開されていない模様である。今年度業務での活用はできなかったが、黄砂飛来状況の把握の有力な選択肢の一つとして今後の活用が期待される。

7.4 自動測定機による黄砂の把握

7.4.1 PM2.5 自動成分分析装置 PX-375 とその他のデータの比較による黄砂検出の可能性

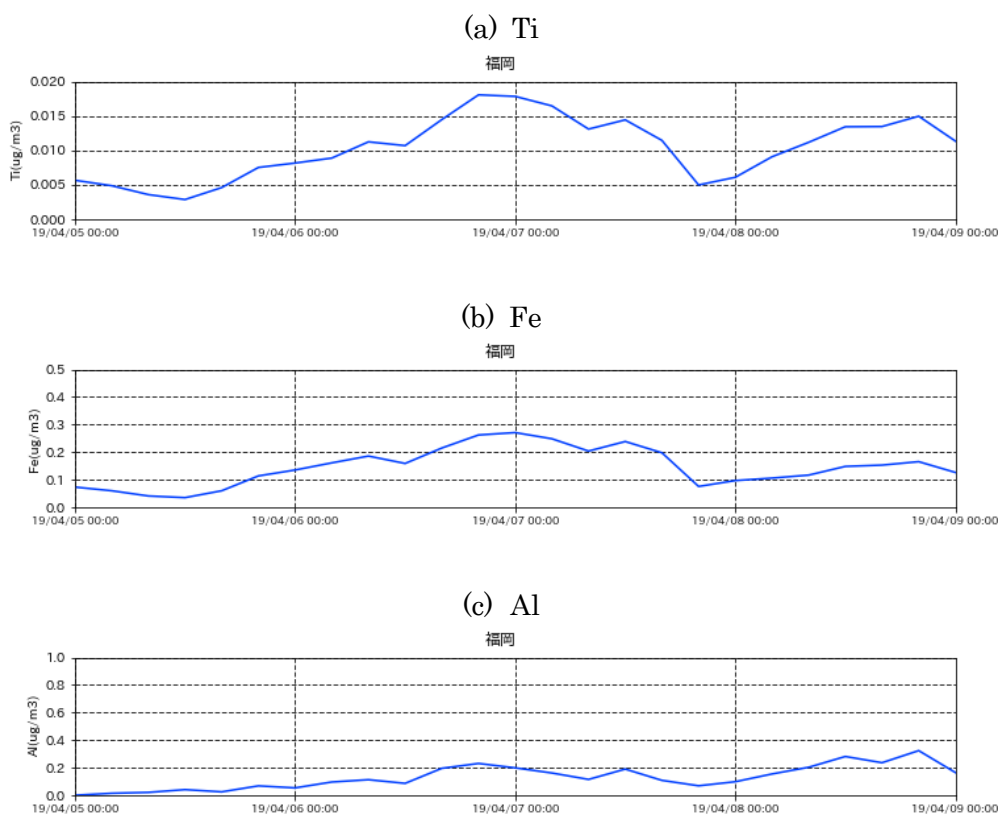
① 2019 年度の黄砂日における各金属元素の挙動

黄砂粒子には、カルシウムなど、金属成分として検出される成分もいくつか含まれている。そこで、五島、福岡、巻、東京の4地点において測定されているPM2.5自動成分分析装置PX-375のデータを活用し、これら地点の個々の成分濃度の整理を行い、SPMや大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置ACSA-14によるPM10、ライダーによる地上付近の消散係数(黄砂及び球形エアロゾル)、自治体の実施する4季のPM2.5成分分析データの時間変化との整合性について確認を行うことで、本データの黄砂検出の可能性について検討を試みる。測定されている元素はTi、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Al、Si、S、K、Caの15種であるが、ここでは黄砂起源に関わる代表的な元素Ti、Fe、Al、Si、Ca、と人為起源に関わる代表的な元素、Zn、Pb、Sの8種類の元素について調べる。

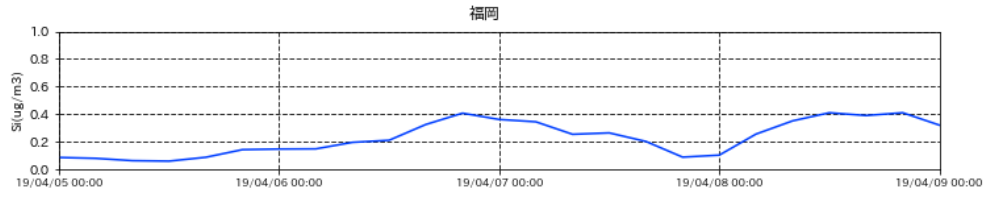
(1) 黄砂事例1：2019年4月6日～7日

本事例では名古屋以西の西日本で黄砂が観測されたため、PX-375のデータは福岡と五島での観測データを用いる。

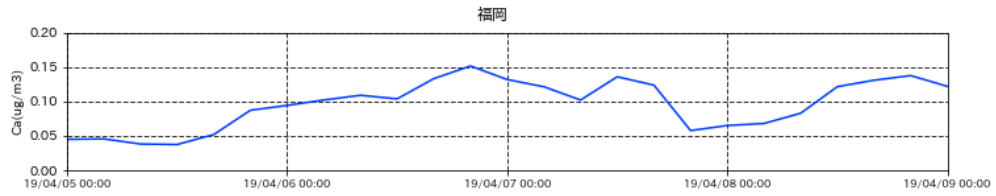
図7-4-1-1、図7-4-1-4はそれぞれ、福岡、五島における黄砂飛来時を含む各金属元素の時系列を示す。福岡、五島ともに多くの元素で黄砂飛来時の4月6日0時前後から増加し始め、その後、ピークを取り減少している。Ti、Si、Caなど、減少後、再び増加している元素も見られる。PM10、SPMにも同様な傾向が見られる(図7-4-1-2、図7-4-1-3、図7-4-1-5)。



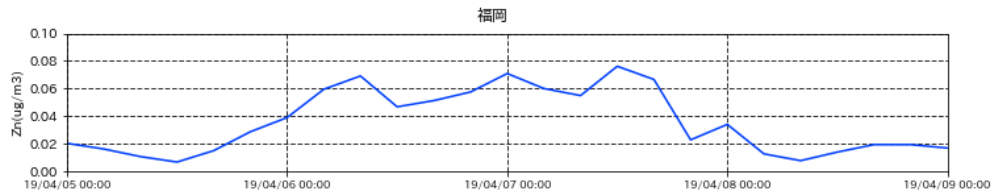
(d) Si



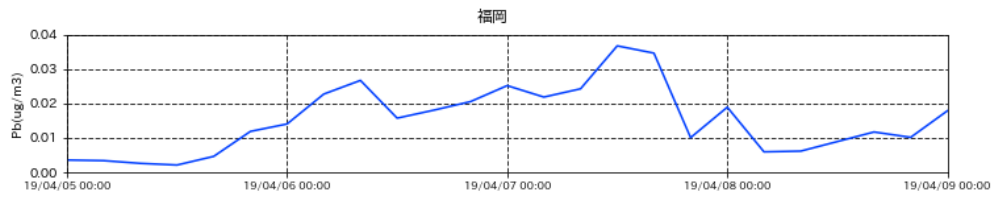
(e) Ca



(f) Zn



(g) Pb



(h) S

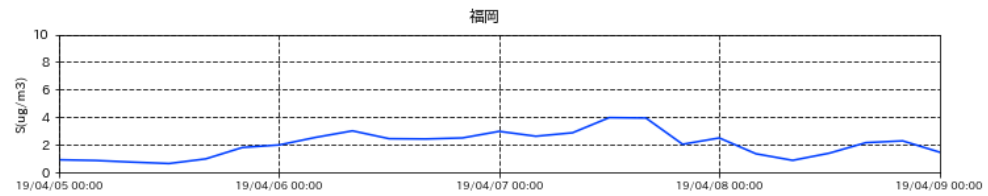


図 7-4-1-1 PX-375 による福岡における 2019 年 4 月 5 日 0 時～9 日 0 時の各金属成分の濃度

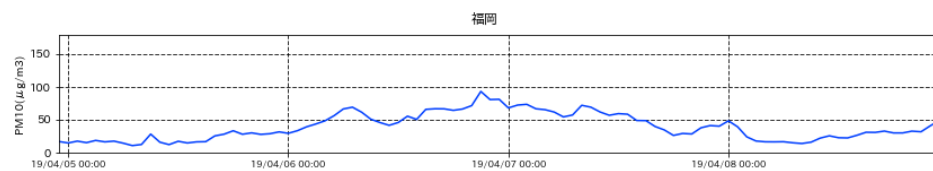


図 7-4-1-2 ACSA-14 による福岡における 2019 年 4 月 5 日 0 時～9 日 0 時の PM10 の濃度

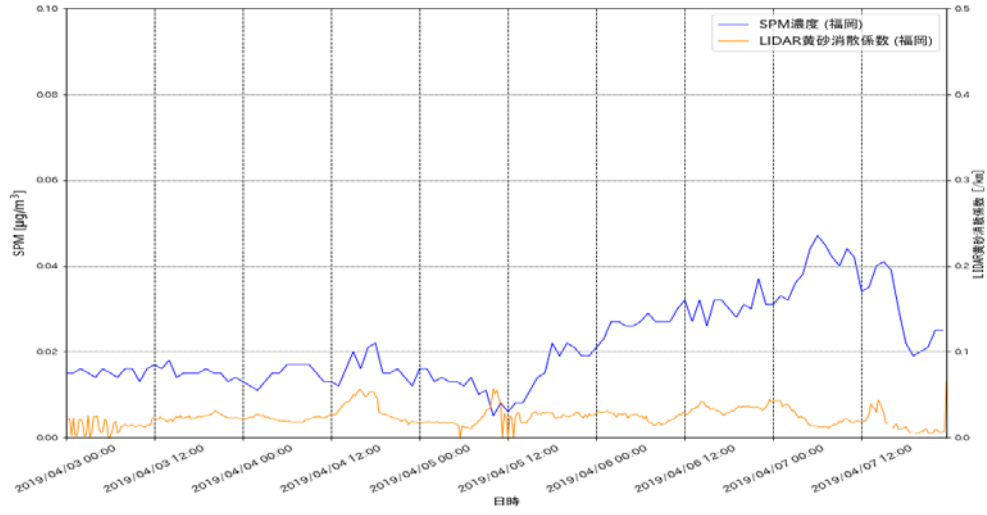
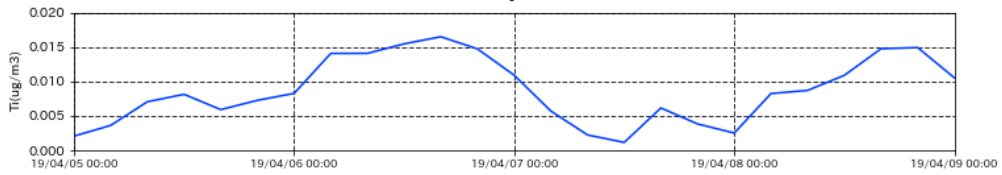


図 7-4-1-3 福岡におけるライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化

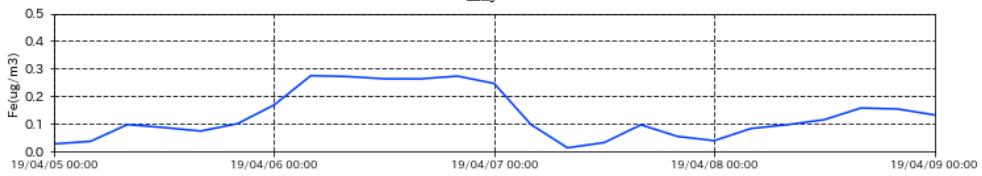
(a) Ti

五島



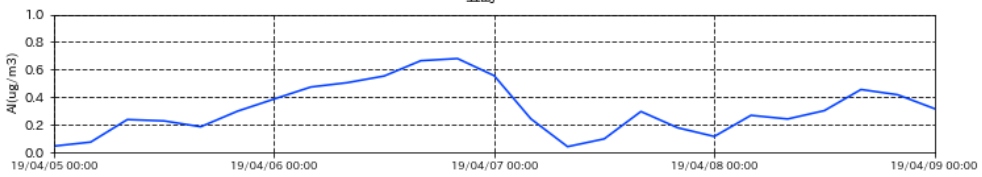
(b) Fe

五島



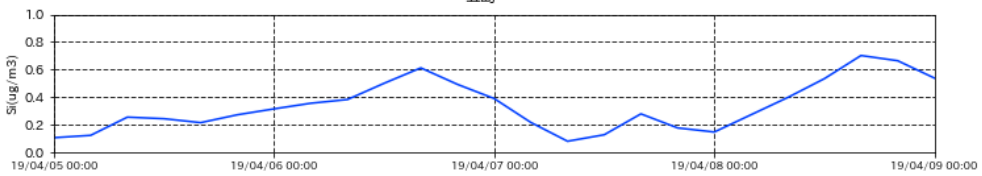
(c) Al

五島



(d) Si

五島



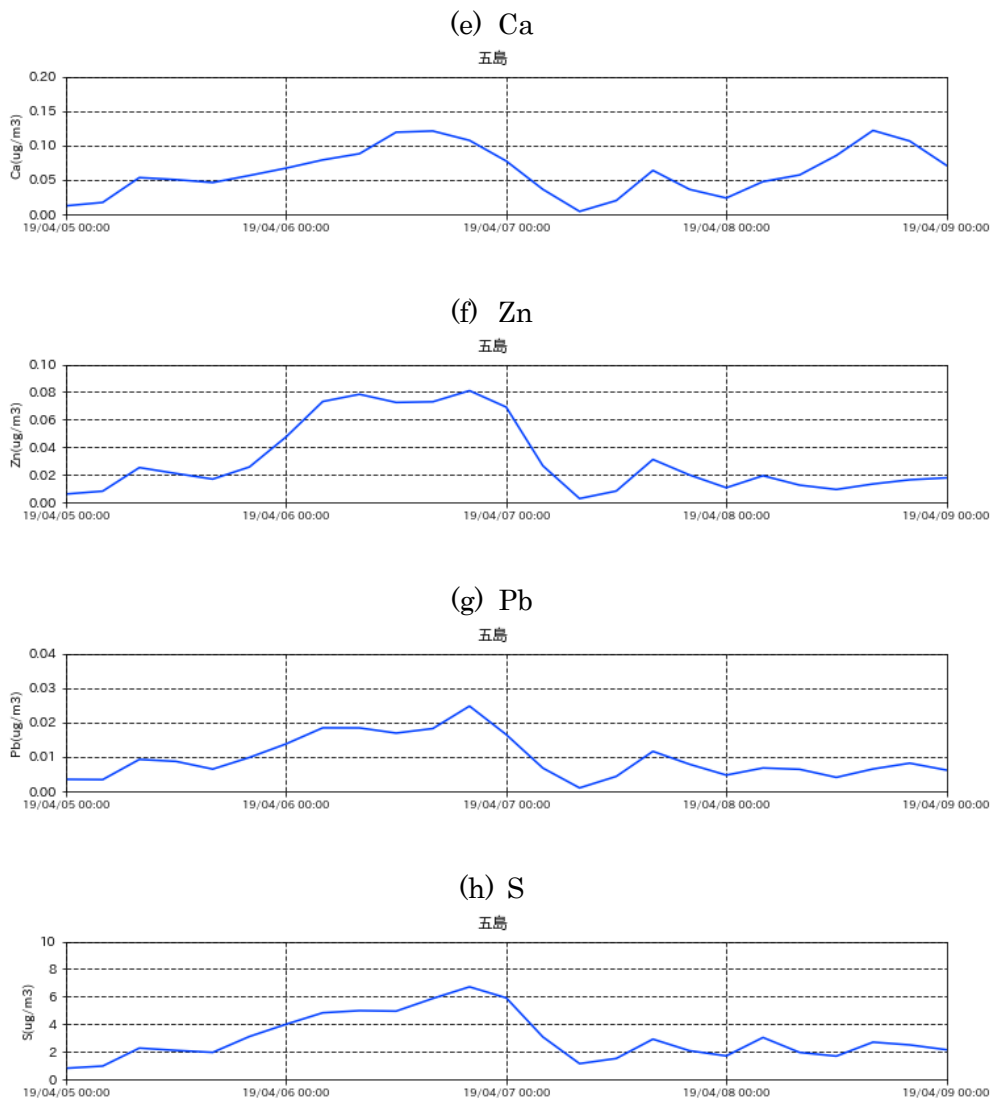


図 7-4-1-4 PX-375 による五島における 2019 年 4 月 5 日 0 時～9 日 0 時の各金属成分の濃度

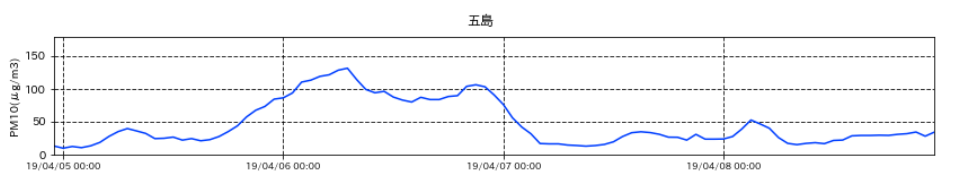


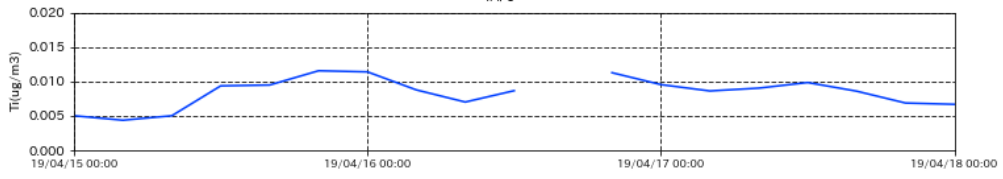
図 7-4-1-5 ACSA-14 による五島における 2019 年 4 月 5 日 0 時～9 日 0 時の PM10 の濃度

(2) 黄砂事例 2 : 2019 年 4 月 16 日

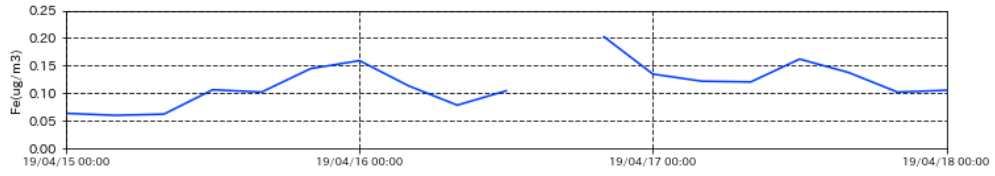
本事例では大阪のみで黄砂が観測されたため、PX-375 のデータは福岡と五島での観測データを用いる。

図 7-4-1-6、図 7-4-1-9 はそれぞれ、福岡、五島における黄砂飛来時を含む各金属元素の時系列を示す。福岡では黄砂観測日の 4 月 16 日に欠損値がありその傾向が明確には見えないが、Fe、Zn など増加傾向にあるように見える。五島においては明確な増加の傾向は見られない。PM10、SPM についても同様に明確な増加傾向は見られないがライダー黄砂消散係数は増加している（図 7-4-1-7 図 7-4-1-8 図 7-4-1-10）

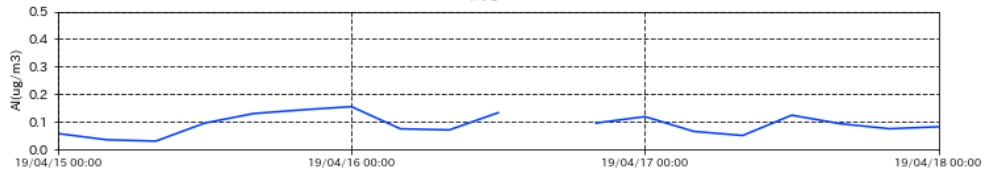
(a) Ti
福岡



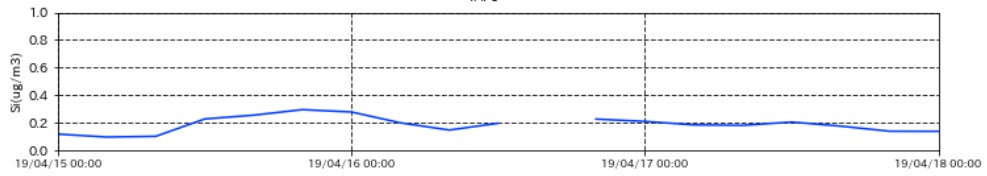
(b) Fe
福岡



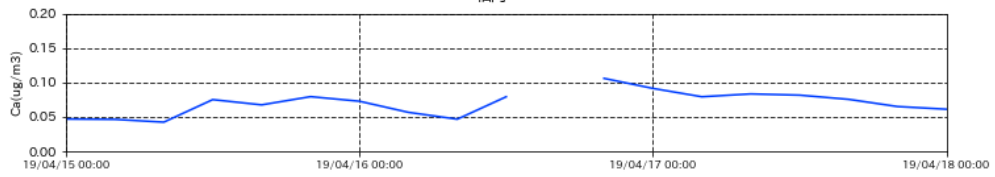
(c) Al
福岡



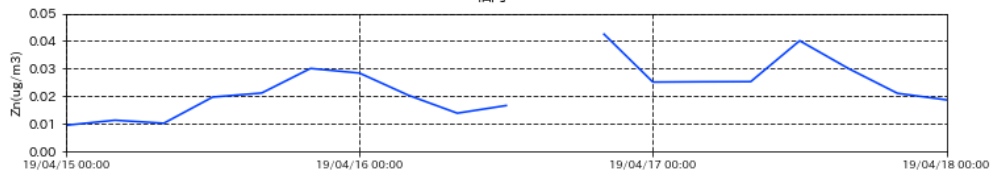
(d) Si
福岡



(e) Ca
福岡



(f) Zn
福岡



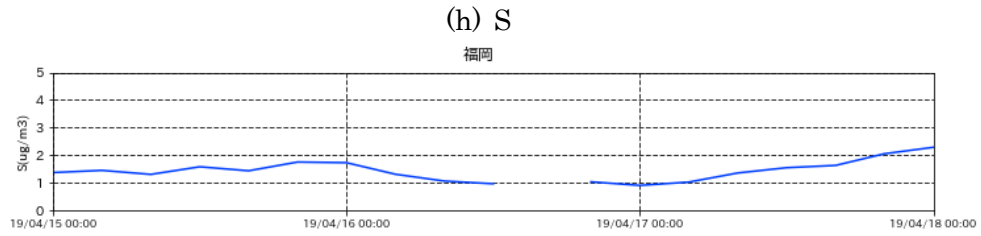
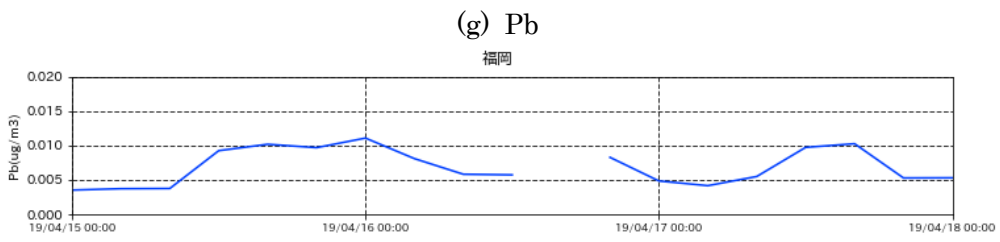


図 7-4-1-6 PX-375 による福岡における 2019 年 4 月 15 日 0 時～18 日 0 時の各金属成分の濃度

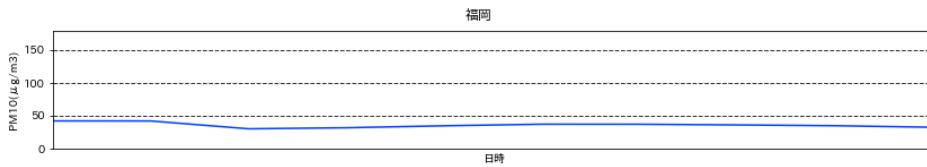


図 7-4-1-7 ACSA-14 による福岡における 2019 年 4 月 15 日 0 時～18 日 0 時の PM10 の濃度

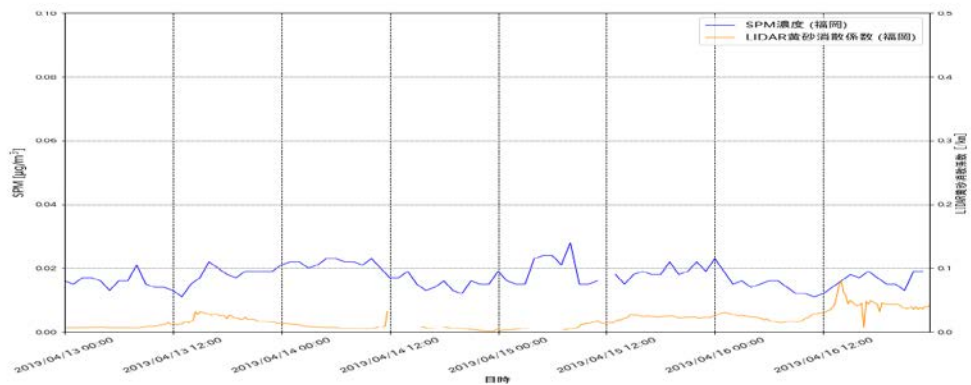
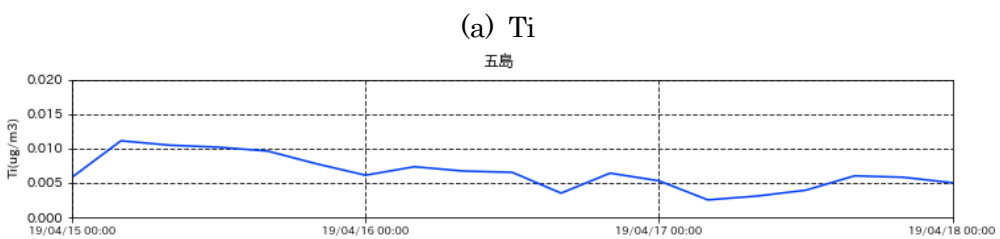
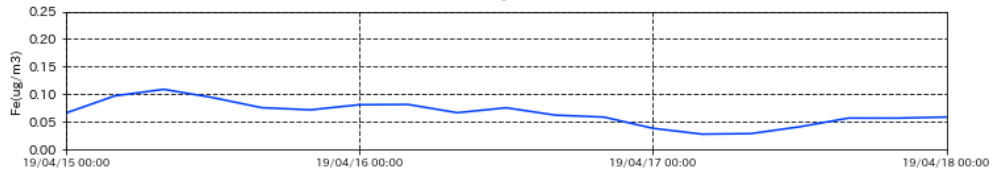


図 7-4-1-8 福岡におけるライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の経時変化



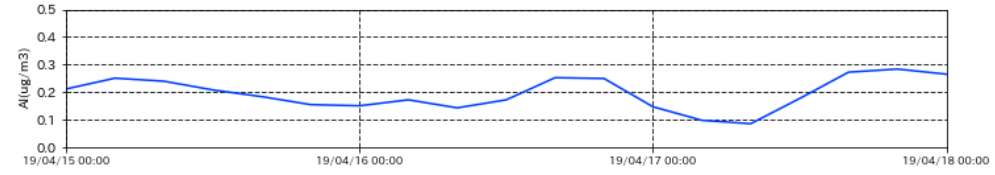
(b) Fe

五島



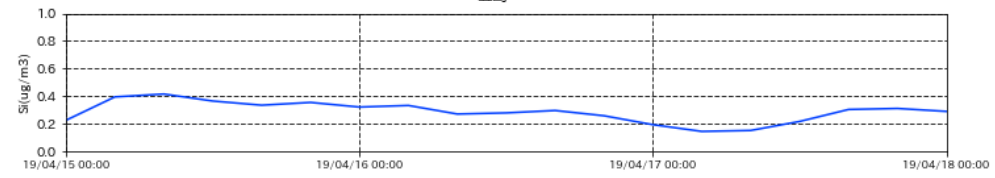
(c) Al

五島



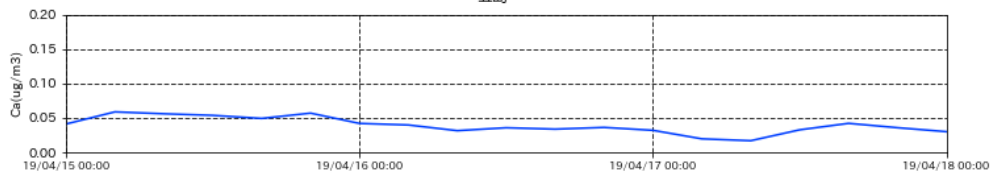
(d) Si

五島



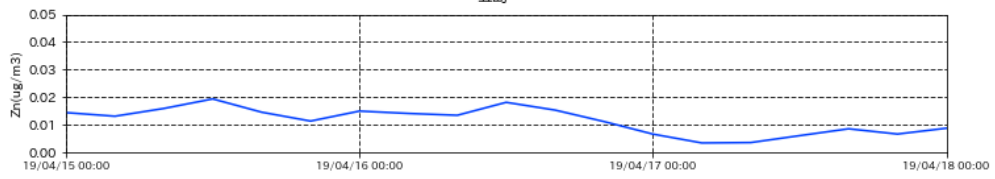
(e) Ca

五島



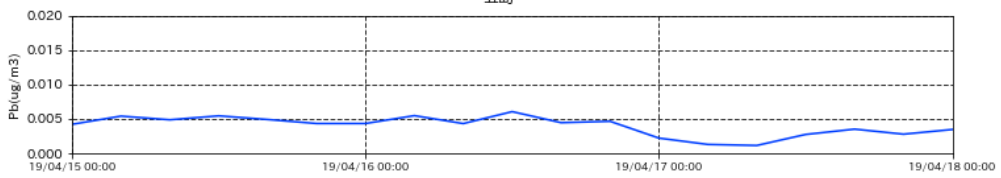
(f) Zn

五島



(g) Pb

五島



(h) S

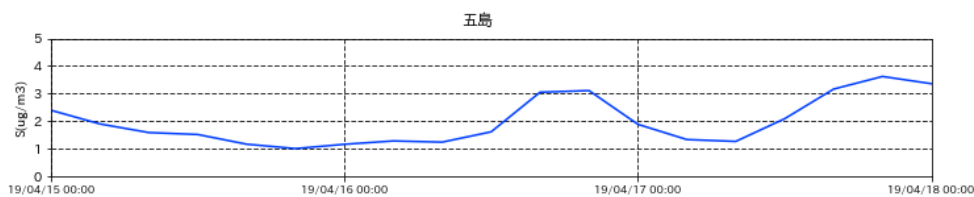


図 7-4-1-9 PX-375 による五島における 2019 年 4 月 15 日 0 時～18 日 0 時の各金属成分の濃度

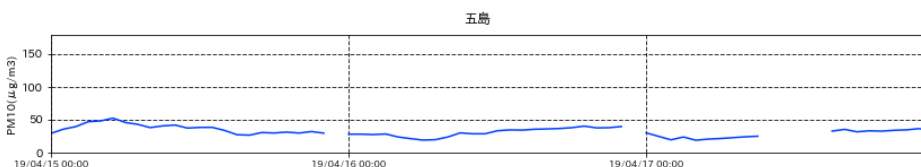


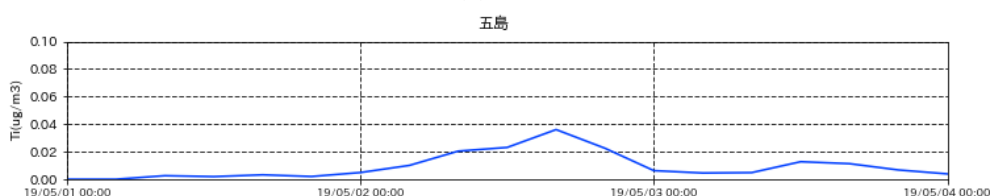
図 7-4-1-10 ACSA-14 による五島における 2019 年 4 月 15 日 0 時～18 日 0 時の PM10 の濃度

(3) 黄砂事例 3 : 2019 年 5 月 2 日

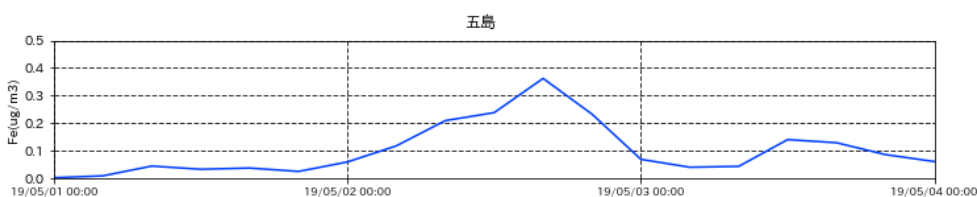
本事例では鹿児島のみで黄砂が観測されたが、この期間、福岡でのデータは欠損しているため PX-375 のデータは五島での観測データを用いる。

図 7-4-1-11 は五島における黄砂飛来時を含む各金属元素の時系列を示す。黄砂が観測された 5 月 2 日に、黄砂起源に関連した元素である Ti、Fe、Al、Si、Ca で明確な増加が見られた。PM10 についてもこれと同様な傾向が見られた (図 7-4-1-12)。これらは 5 月 2 日 16 時にピークとなりその後、減少しているが 5 月 3 日になり再び増加する元素も見られる。

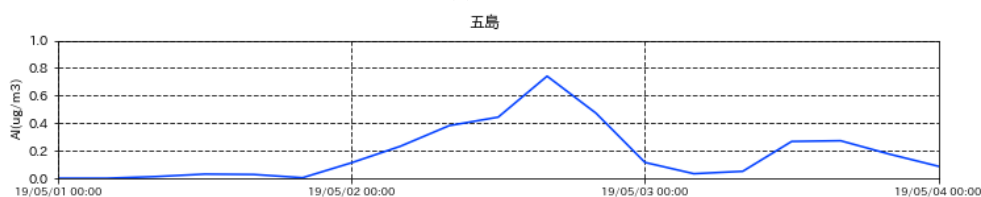
(a) Ti



(b) Fe



(c) Al



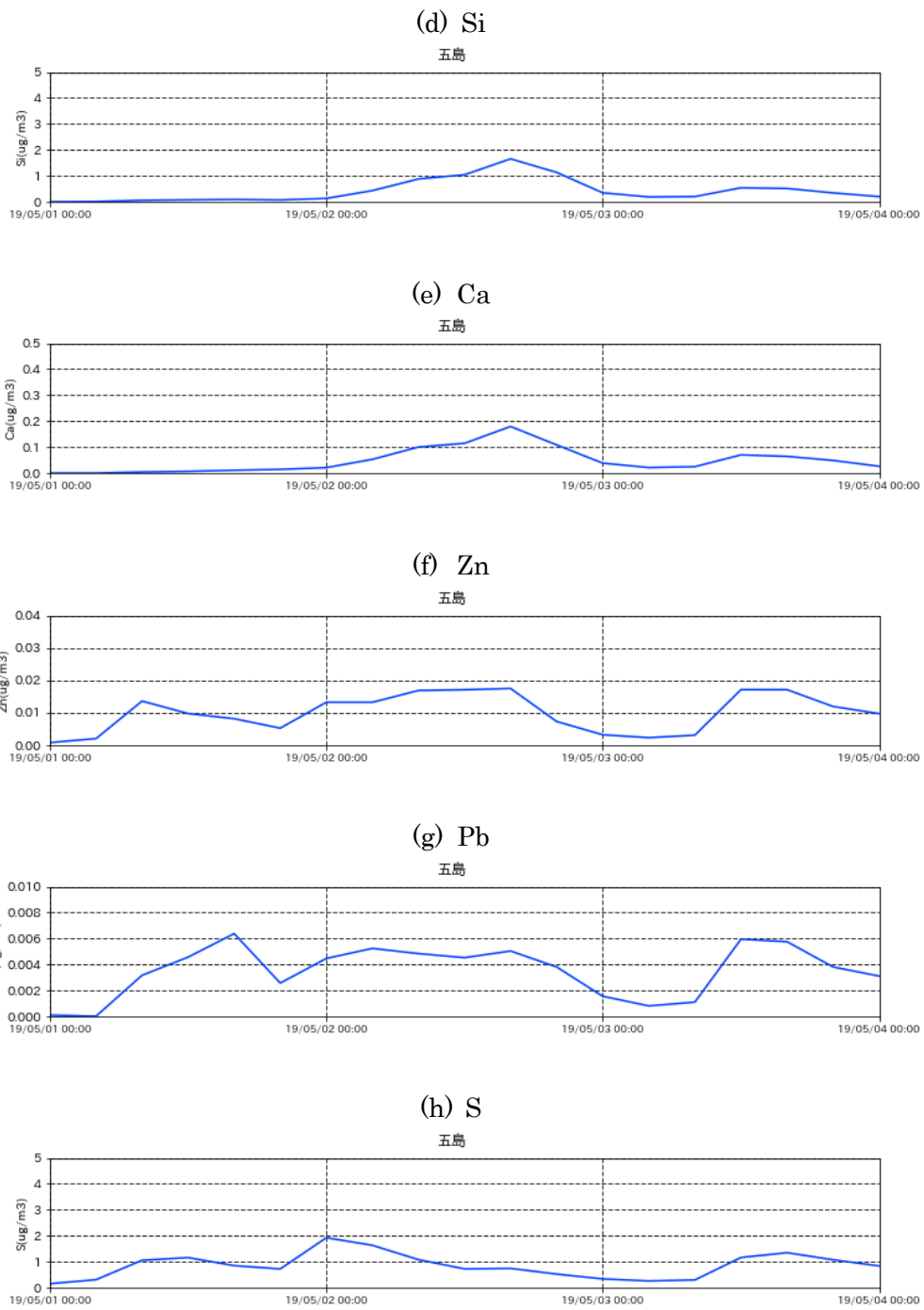


図 7-4-1-11 PX-375 による五島における 2019 年 5 月 1 日 0 時～4 日 0 時の各金属成分の濃度

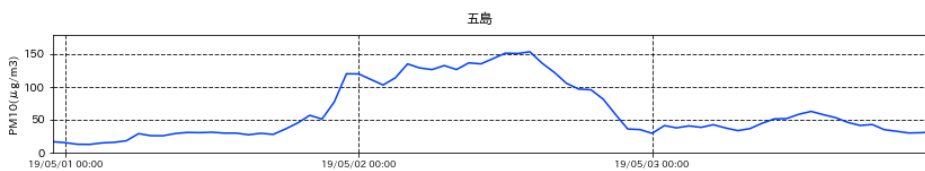
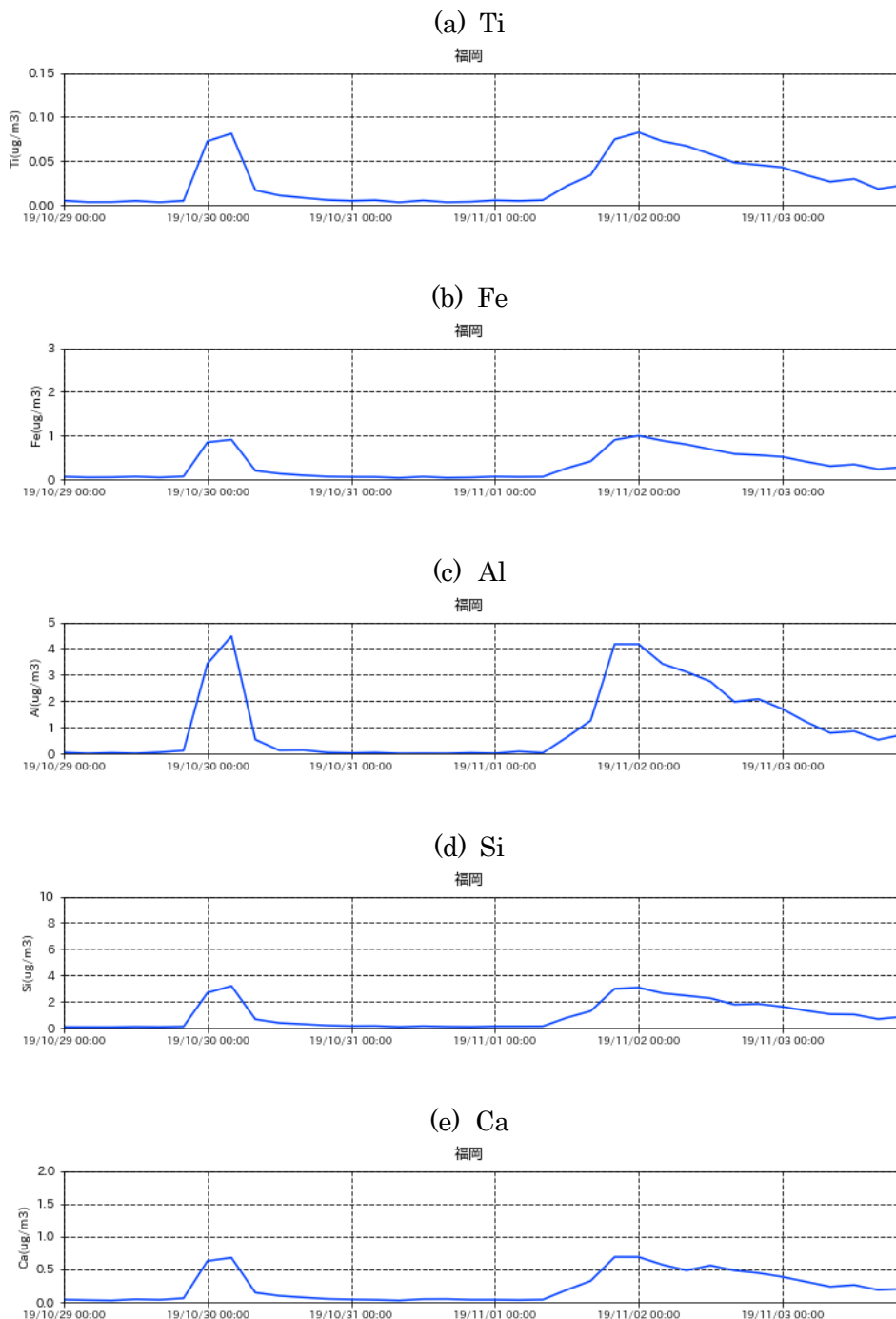


図 7-4-1-12 ACSA-14 による五島における 2019 年 5 月 1 日 0 時～4 日 0 時の PM10 の濃度

(4) 黄砂事例 4 : 2019 年 10 月 30 日～11 月 2 日

本事例では名古屋以西で黄砂が観測されたので、PX-375 のデータは福岡と五島での観測データを用いる。

図 7-4-1- 13、図 7-4-1- 16 はそれぞれ、福岡、五島における黄砂飛来時を含む各金属元素の時系列を示す。福岡では、Ti、Fe、Al、Si、Ca、Zn、五島では、ほぼ全ての元素で、黄砂が観測された 10 月 29 日 20 時から増加が始まり 30 日 0 時から 4 時ころにピークを取り、その後、減少する第 1 の増加と、11 月 1 日 8 時ころから増加が始まり 11 月 2 日 0 時から 4 時ころにピークを取り、その後、減少する第 2 の増加を示した。この 2 度のピーク傾向は PM10、SPM にも見られる (図 7-4-1- 14、図 7-4-1- 15、図 7-4-1- 17)。



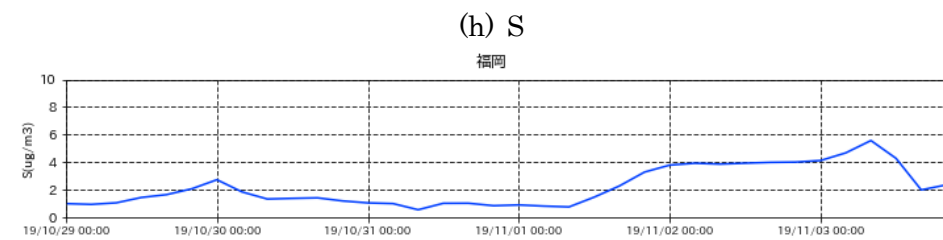
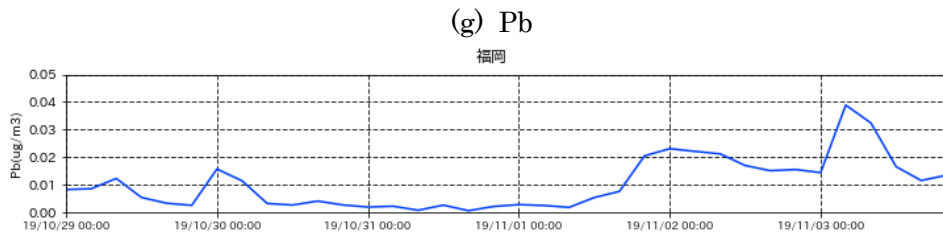
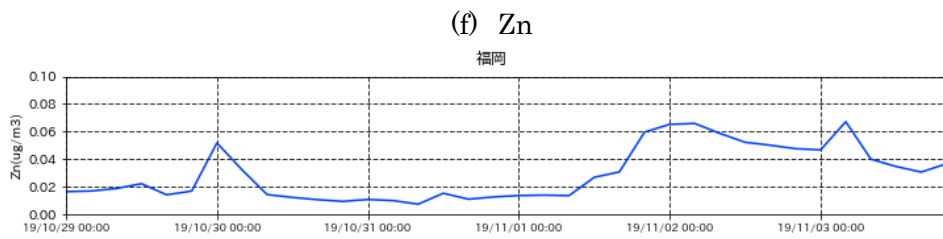


図 7-4-1-13 PX-375 による福岡における 2019 年 10 月 29 日 0 時～11 月 5 日 0 時の各金属成分の濃度

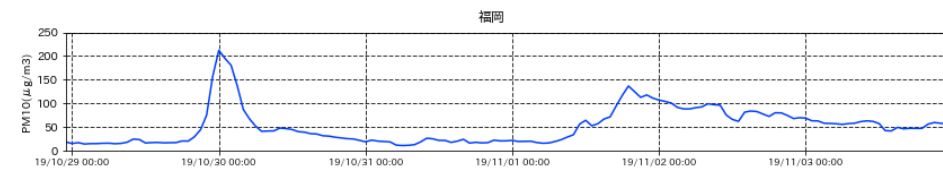


図 7-4-1-14 ACSA-14 による福岡における 2019 年 10 月 29 日 0 時～11 月 5 日 0 時の PM10 の濃度

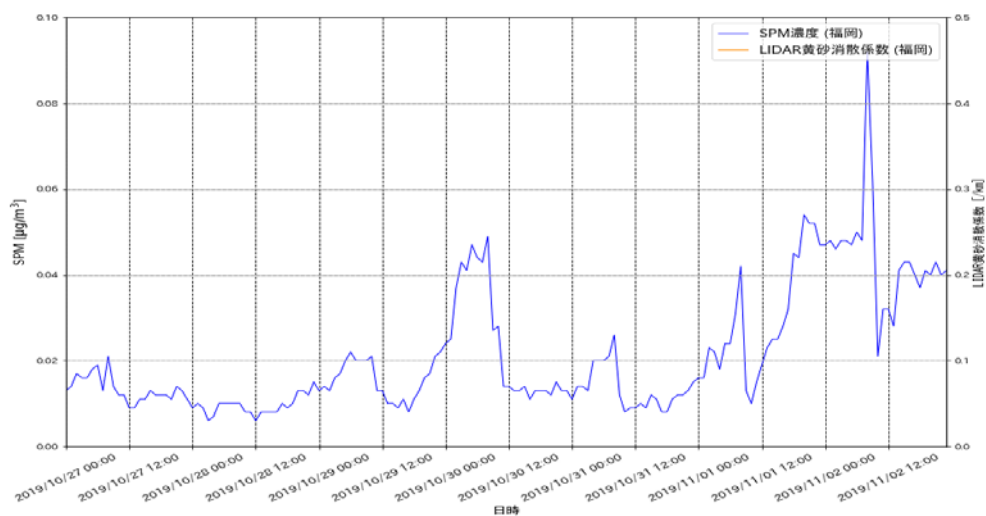
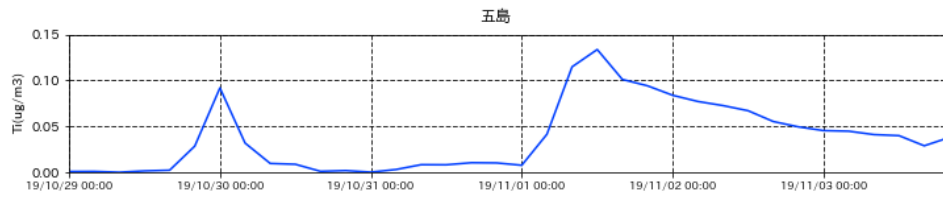
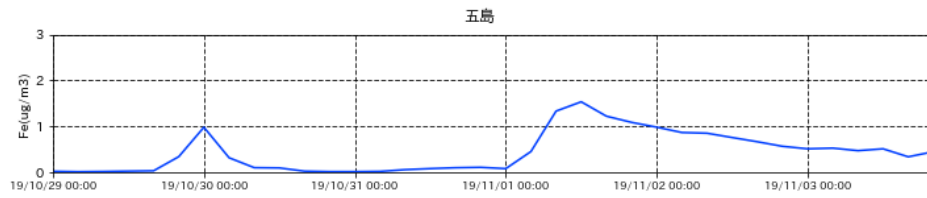


図 7-4-1-15 福岡における SPM 濃度の経時変化

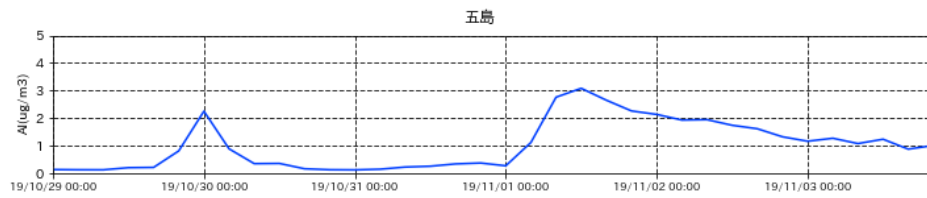
(a) Ti



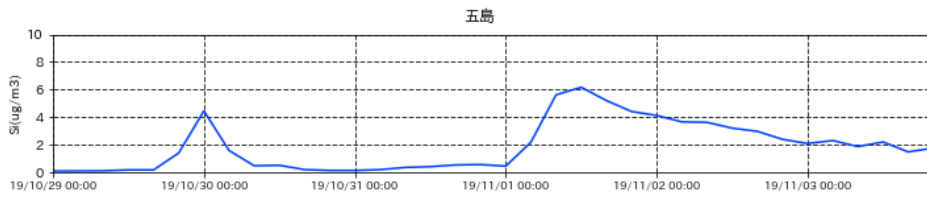
(b) Fe



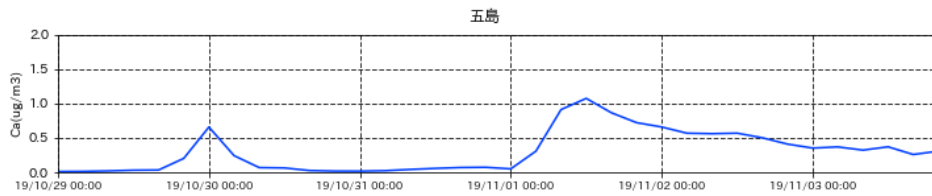
(c) Al



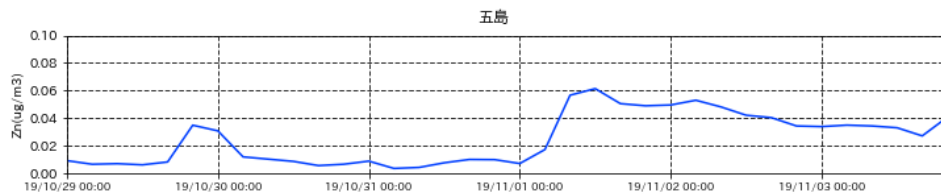
(d) Si



(e) Ca



(f) Zn



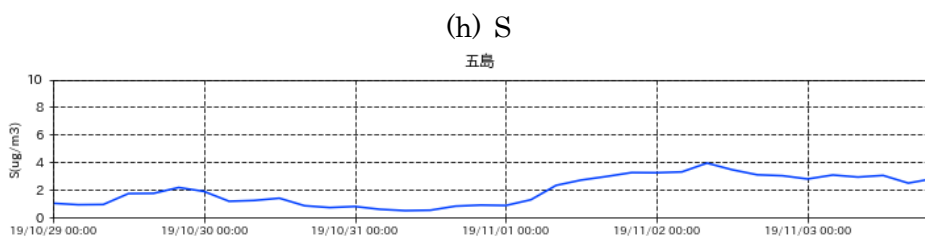
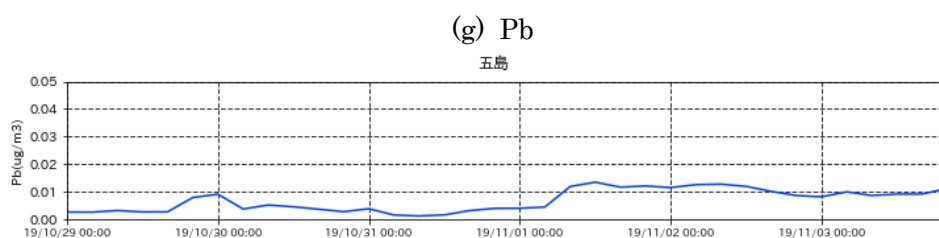


図 7-4-1-16 PX-375 による五島における 2019 年 10 月 29 日 0 時～11 月 5 日 0 時の各金属成分の濃度

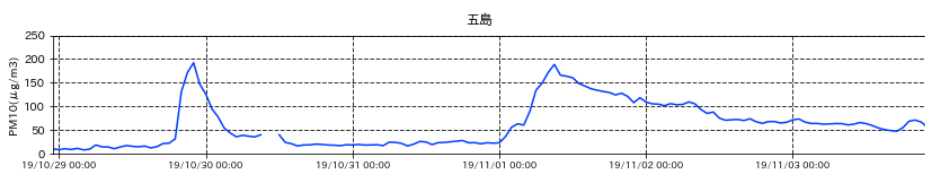


図 7-4-1-17 ACSA-14 による五島における 2019 年 10 月 29 日 0 時～11 月 5 日 0 時の PM10 の濃度

② 2019 年度の黄砂日における各金属元素の相関

表 7-4-1-1 に各元素間の相関係数を示す。黄砂起源に関わる元素同士の相関、人為起源に関わる元素同士の相関（表 7-4-1-1 の青い背景の相関）は高い値を示しており、異なる起源に関わる元素間の相関（表 7-4-1-1 のオレンジの背景の相関）は低い値になっていることがわかる。また、図 7-4-1-18 はそれぞれの元素間の散布図を示す。同起源に関わる元素同士の散布図と異なる起源に関わる元素同士の散布図の特徴には明らかな違いがあり、前者は後者に比べばらつきが小さいことが分かる。また、異なる起源に関する元素同士の分布には異なる二つの直線があるように見える。これは、使用したデータが実際、黄砂が観測された時間を考慮していないもののため、黄砂以外の要因を除外できていないことが一つの理由であると考えられる。しかし今年度のデータで黄砂が観測された地点（PX-375 のある福岡）、時間でデータを調べたところデータ数が 5 つと少なく、相関解析には適さなかった

表 7-4-1-1 各元素間の相関係数。黄砂、人為起源、それぞれに関わる元素間の相関係数は青、異なる起源に関わる元素間の相関係数はオレンジの背景で記してある。

	Ti	Fe	Si	Ca	Al	Zn	S	Pb
Ti	1.000	0.995	0.997	0.994	0.990	0.578	0.309	0.484
Fe	0.995	1.000	0.990	0.993	0.993	0.647	0.379	0.553
Si	0.997	0.990	1.000	0.995	0.990	0.541	0.279	0.447
Ca	0.994	0.993	0.995	1.000	0.993	0.579	0.324	0.486
Al	0.990	0.993	0.990	0.993	1.000	0.634	0.399	0.547
Zn	0.578	0.647	0.541	0.579	0.634	1.000	0.843	0.964
S	0.309	0.379	0.279	0.324	0.399	0.843	1.000	0.867
Pb	0.484	0.553	0.447	0.486	0.547	0.964	0.867	1.000

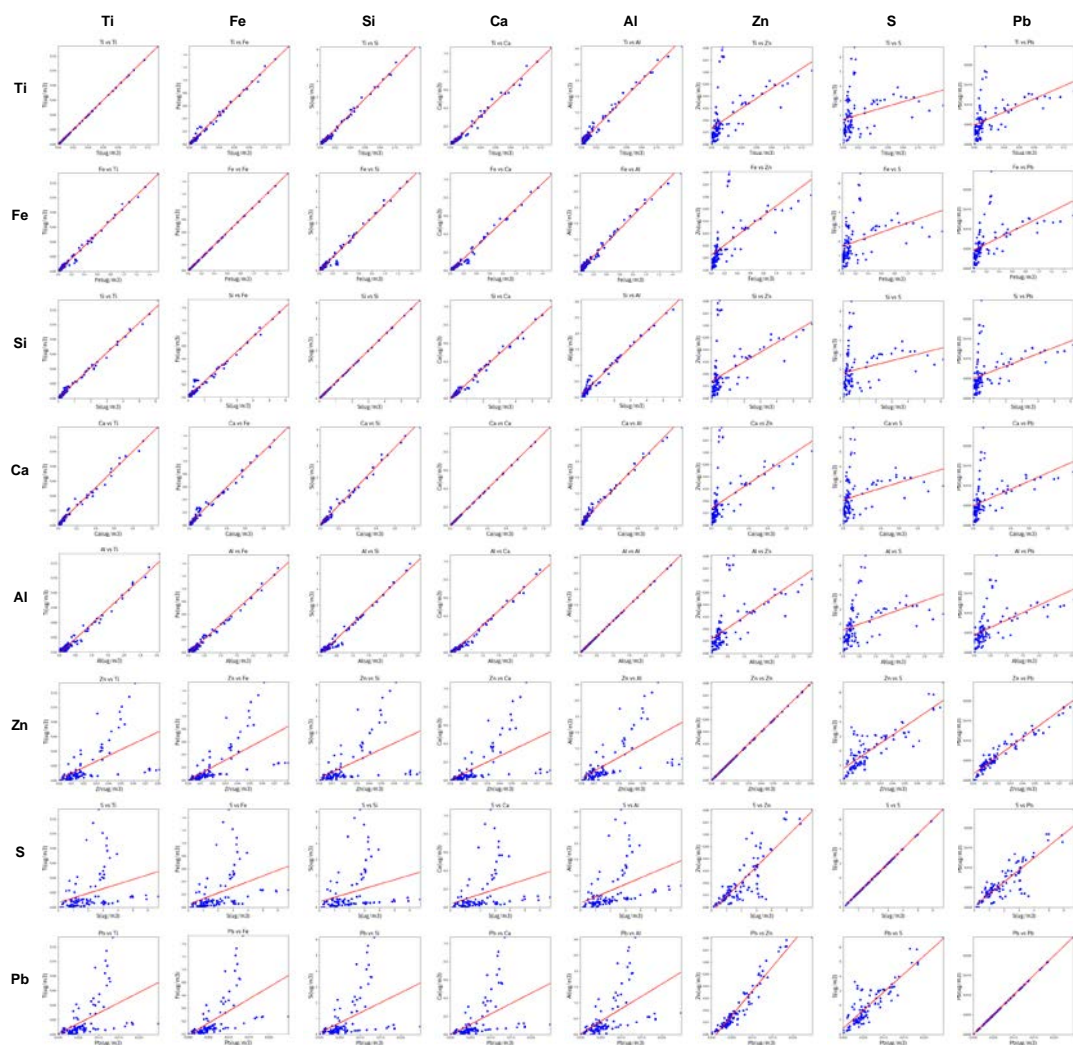


図 7-4-1-18 各元素間の散布図

③ 自治体データとの比較

図 7-4-1-1 に PX-375 と自治体データを用いた各金属元素の黄砂時における濃度を示す。自治体データは年 4 季に分けて測定されているが、2019 年度の黄砂日では 2019 年 10 月 30 日～11 月 2 日（黄砂事例 4）において測定が実施されている地点が多く、それ以外の黄砂日では測定はなかったため PX-375 においても同期間を用いた。両データでは濃度の値は PX-375 の方が、Al の濃度で高めとなっているが、Al、Fe の濃度が他と比較し高いこと、それに次いで Ti、Mn、Zn などの濃度が高くなっていることなど、元素による濃度の傾向は一致していると言える。

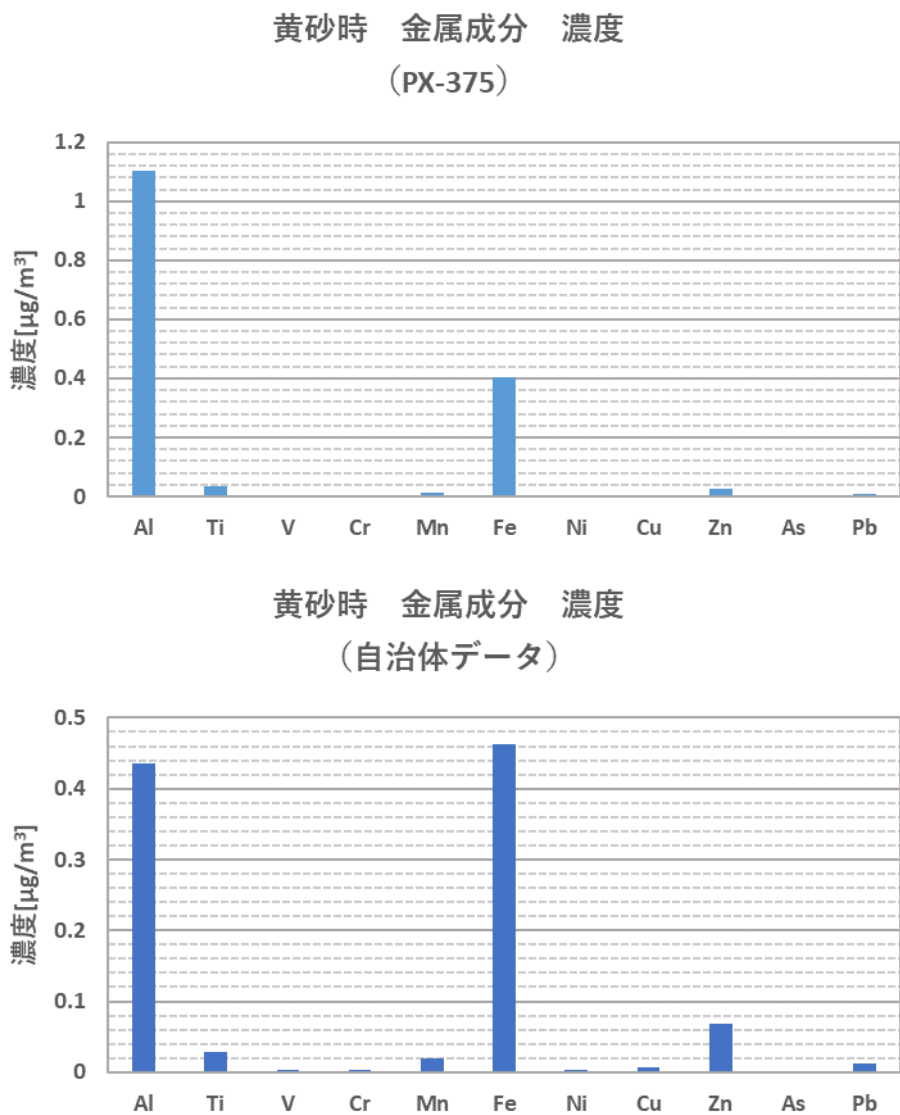


図 7-4-1-19 PX-375 と自治体データを用いた各金属元素の黄砂時における濃度の比較

7.4.2 黄砂及び煙霧時における PM2.5 と PM10 の濃度比の特徴

黄砂及び煙霧時における PM2.5 と PM10 濃度比を算出し、その特徴について解析する。黄砂時には比較的粒径の大きな粒子が、煙霧時には比較的粒径の小さな粒子が飛来している可能性が高いことから、各地点の PM2.5/PM10 比を算出することにより、そのような傾向が把握できるかについて確認する。またライダー観測や常監視 PM2.5/SPM 濃度比との整合性に着目して解析を行い、本データの黄砂検出

利用について検討する。ここでは、昨年度の報告書にもあるように PM10 濃度が高い時を考慮し、PM2.5/PM10 比を見ていく。

(1) 黄砂事例 1 2019年4月6日～7日

図 7-4-2-1 に黄砂が観測された地点に近い観測値での PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の経時変化を示す。黄砂が観測された名古屋、大阪において PM2.5/PM10 が低くなっている状態が数時間継続していることが分かる。PM2.5、PM10 とそれらの比、PM2.5/PM10 を比較すると、特に名古屋における 4 月 6 日の 12 時頃、4 月 7 日の 16 時頃に PM10 が増加しピークを迎える前後は、PM2.5 がやや増加している。そのため、その比の減少は PM10 の増加によるものだということが分かる。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が、特に 4 月 6 日の 12 時ころの比はほぼ約 0.2 と小さい値となっている。大阪においても黄砂時に PM2.5/PM10 の減少が見られるが、PM2.5 と PM10 はほぼ同期して増減しているため名古屋のような傾向は明確には見られない。そのほかの地点においてはその比の減少は見られなかった。

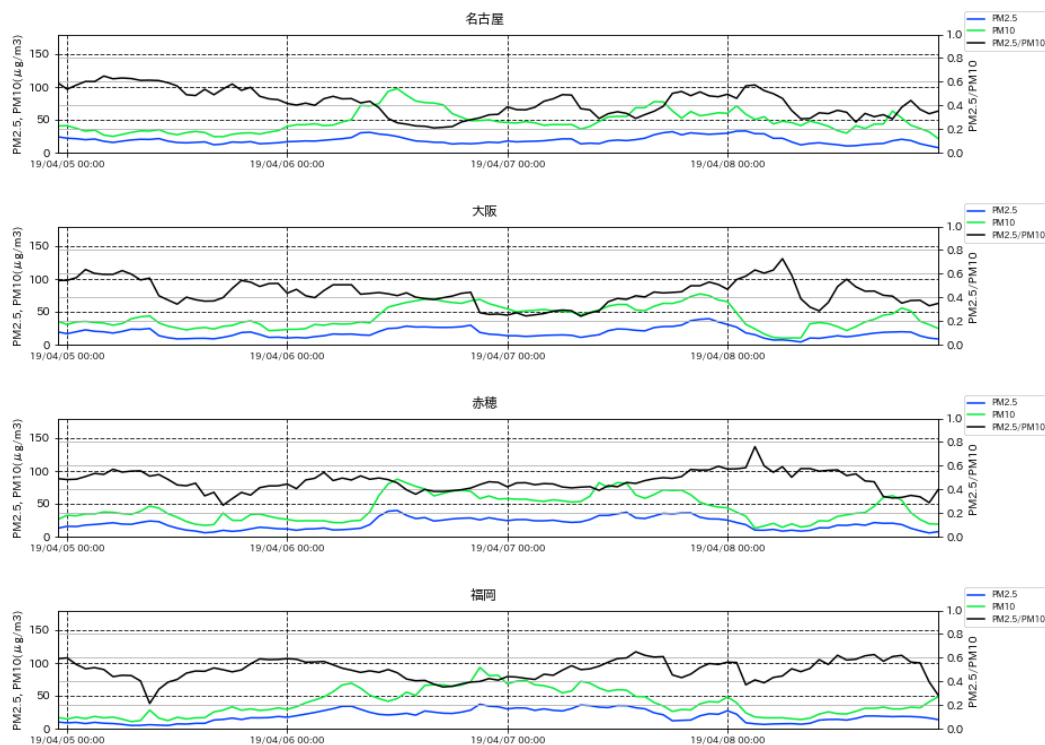


図 7-4-2-1 PM10 および PM2.5 と両者の比の経時変化

(2) 黄砂事例 2 2019年4月16日

図 7-4-2-2 に黄砂が観測された地点に近い観測値での PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の経時変化を示す。黄砂が観測された大阪において、PM2.5/PM10 が 4 月 15 日から減少傾向にある。PM2.5、PM10 とそれらの比、PM2.5/PM10 を比較すると、4 月 16 日の 10 時頃その比が極小値をとるが、PM2.5、PM10 共に減少しており、その日の減少が PM10 の増加によるものであると判断できない。一方、赤穂においては 19 時頃その比は極小値をとるがそれ以前からの PM10 は増加しており、PM2.5 は減少して

いないためその日の減少は PM10 の増加によるものと判断できる。名古屋においてはその比は増加していた。

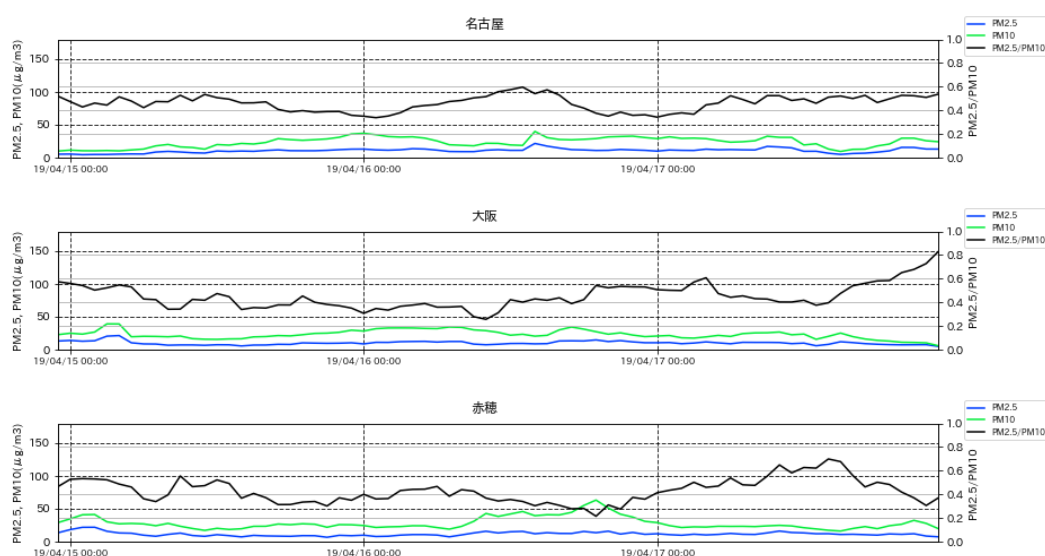


図 7-4-2-2 PM10 および PM2.5 と両者の比の経時変化

(3) 黄砂事例 3 2019年5月2日

図 7-4-2-3 に黄砂が観測された地点に近い観測値での PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の経時変化を示す。この事例では 5 月 2 日に鹿児島で黄砂が観測されているが、同じ九州の福岡、五島において、その日の前後に PM10 の増加に伴い PM2.5/PM10 が低くなっている状態が数時間継続していることが分かる。特に五島ではその比が 0.2 に近い低い値の状態が継続している。その時間帯の PM2.5 は両地点で減少傾向にないため、その比の減少は PM10 の増加によるものであることが分かる。

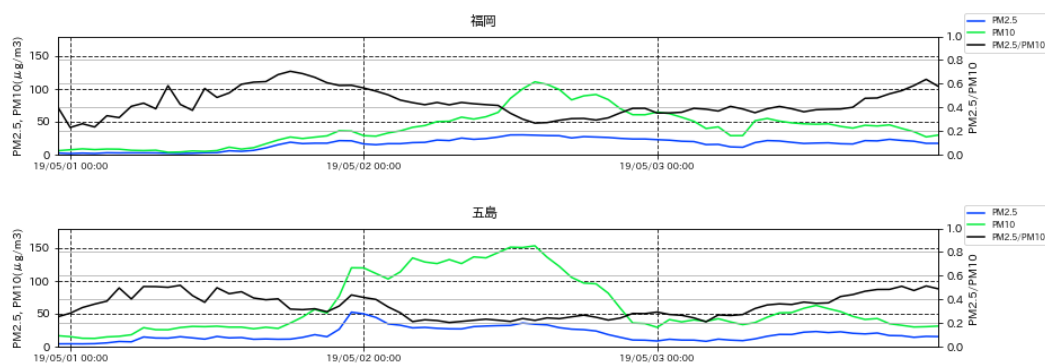


図 7-4-2-3 PM10 および PM2.5 と両者の比の経時変化

(4) 黄砂事例 4 2019年10月30日～11月2日

図 7-4-2-4 に黄砂が観測された地点に近い観測値での PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の経時変化を示す。ここで示す 4 地点すべてにおいて、大小はあるものの 2 度の PM10 の増加による PM2.5/PM10 の減少が見られる。名古屋、大阪、赤穂においては 1 度目の減少は 10 月 30 日の 9 時ころからの PM10 の増加に伴うその比の減少、2 度目は 11 月 1 日の 12 時頃からの PM10 の増加に伴うその比の減少である。これらの期間には PM2.5 は減少傾向にないため、それらの比の減少は PM10 の増加によるものであ

ることが分かる。一方、福岡、五島でも上記と同様な、2度のPM2.5/PM10の減少が見られるが10月30日に見られた減少は、名古屋、大阪、赤穂より早い時間帯で見られる。これらの減少は10月29日夜に急激に起こり、この時PM10、PM2.5ともに急激に増加し、これらはピークを迎えた後、急激に減少するが、それらの比は継続して低い値を保つ。このことは福岡、五島でも目視観測では観測できない深夜に黄砂が飛来した可能性を示唆する。

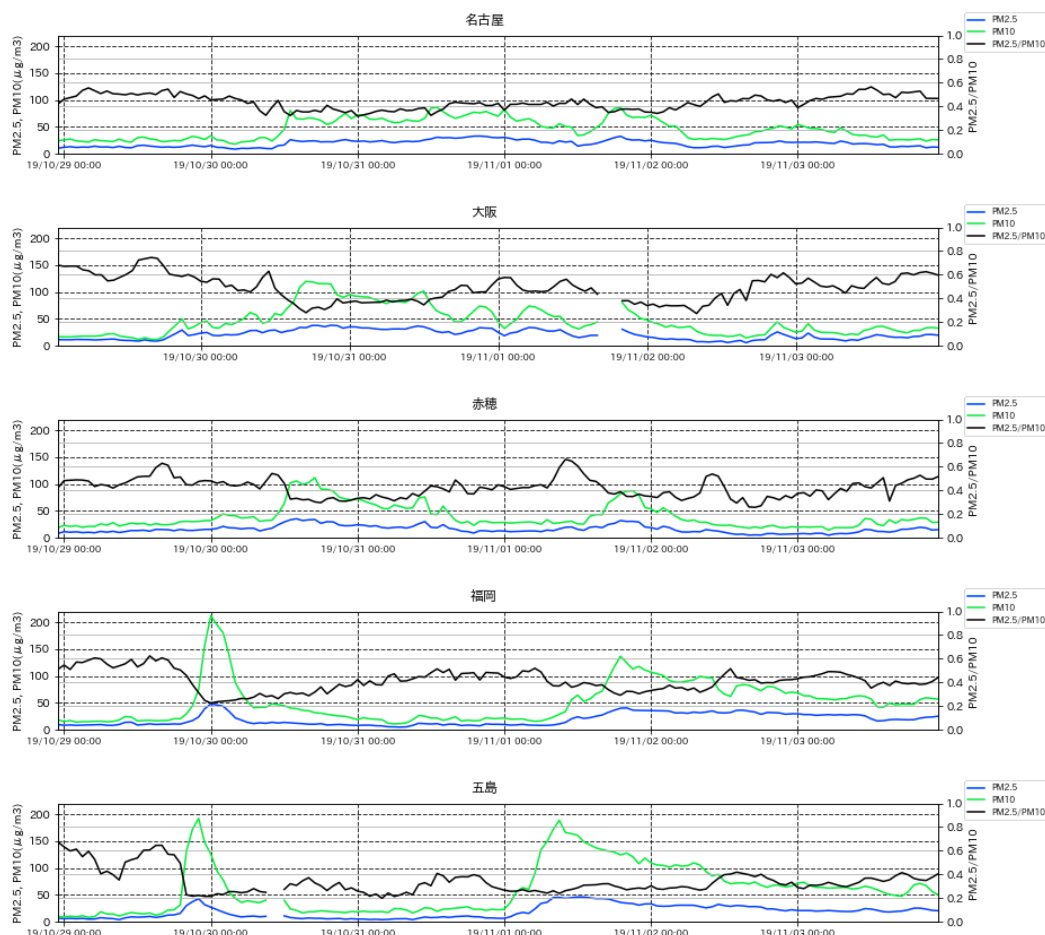


図 7-4-2-4 PM10 および PM2.5 と両者の比の経時変化

(5) 煙霧事例 1 2020年2月6日

図 7-4-2-5 に煙霧日と判定された地点に近い観測値での PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の経時変化を示す。煙霧日と判定された北海道、東北地方の広範囲と北陸地方の金沢であったが、札幌、篔岳の PM10 はどちらも増加傾向になく PM2.5/PM10 の減少も見られなかった。また、新潟巻においては煙霧日以前からその比の減少が見られており、PM10 濃度も増加しているが、PM2.5 もやや減少傾向にあるため、その比の減少が PM10 の増加によるかの判断は不明である。

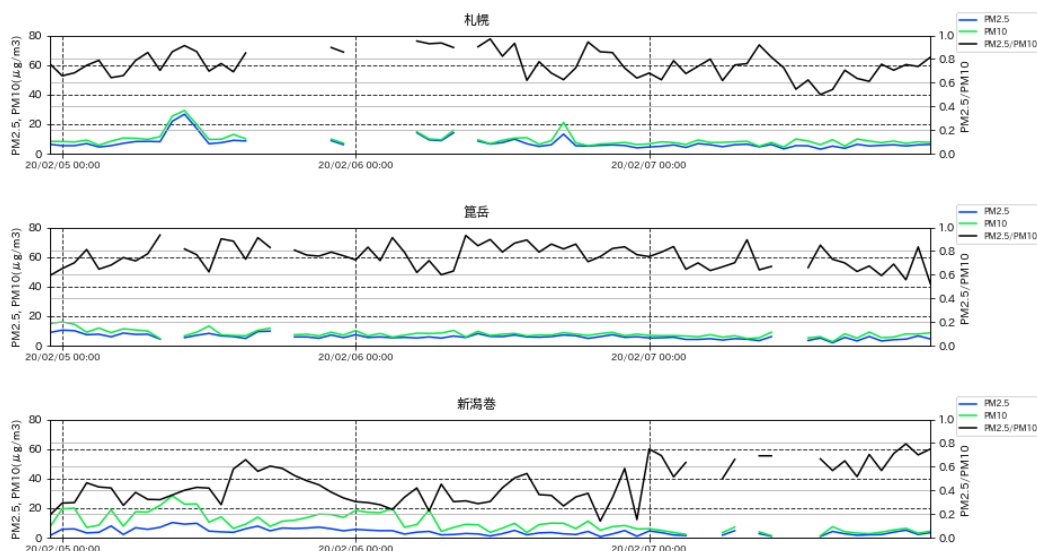
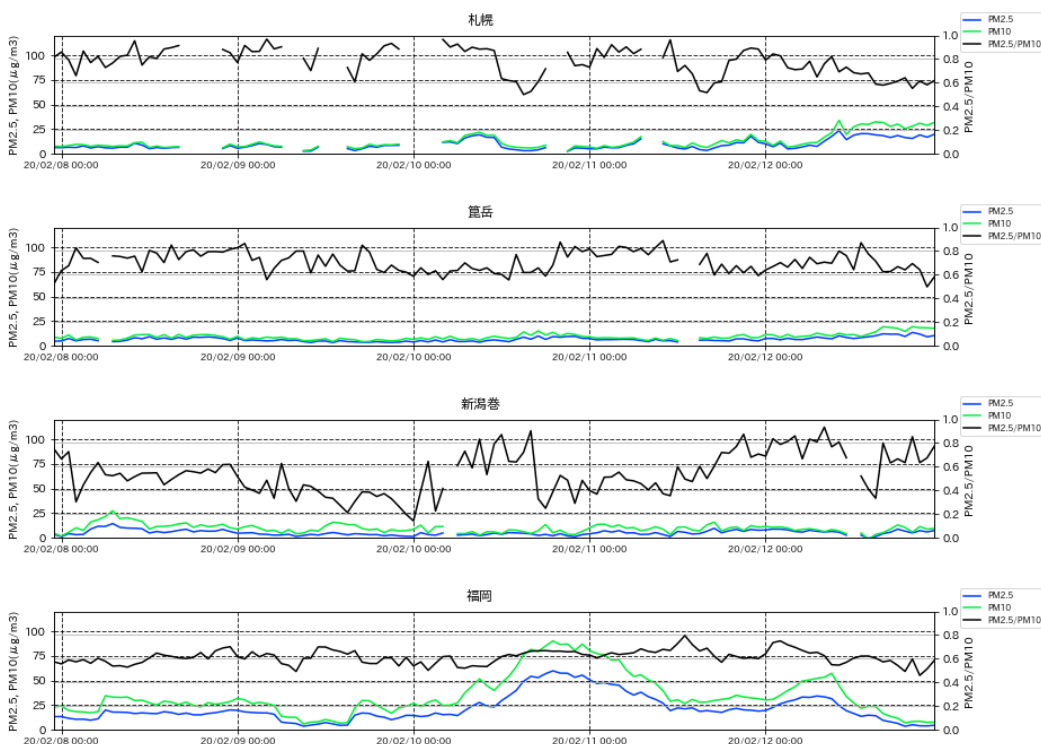


図 7-4-2-5 PM10 および PM2.5 と両者の比の経時変化

(6) 煙霧事例 2 2020年2月9日～11日

図 7-4-2-6 に煙霧と判定された地点に近い観測値での PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の経時変化を示す。煙霧日と判定されたのは、2月9日は北海道、東北地方と新潟、10日は北海道、九州地方と下関、11日は九州地方であった。この期間、札幌、籠岳においては PM2.5/PM10 比の減少は見られない。新潟巻では2月9日の0時頃から10日の0時頃までその比は減少傾向にあり、PM10の増加も見られる。PM2.5に関してはほぼ一定となっているので、その比の減少が PM10 の増加によることを示唆している。九州地方においては PM10 の増加が明確に見られるが、同時に PM2.5 も増加しているのでその比の減少傾向は見られない。



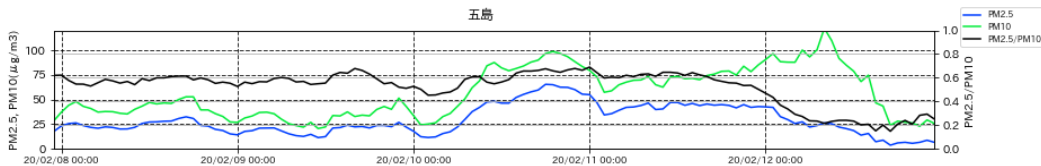


図 7-4-2-6 PM10 および PM2.5 と両者の比の経時変化

7.4.3 黄砂時における粗大粒子と微小粒子の成分濃度

ACSA-14 による観測では、PM2.5 質量濃度だけでなく、粗大粒子、微小粒子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いる。そのため、ここでは 2019 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。

ACSA-14 によるデータのうち、PM2.5、PM10、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 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 7-4-3-1 に従って表記する。

表 7-4-3-1 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)

(1) 黄砂事例 1 2019 年 4 月 6 日～7 日

本事例は名古屋と西日本の 3 地点での黄砂観測事例のため、名古屋、大阪、赤穂、福岡での fSO_4^{2-} 、 cSO_4^{2-} 、PM2.5、PM10 の濃度推移と fNO_3^- 、 cNO_3^- 、PM2.5、PM10 の濃度推移を図 7-4-3-1 に示した。また、図 7-4-3-2 には fSO_4^{2-} 、 cSO_4^{2-} とそれらの比の濃度推移、 fNO_3^- 、 cNO_3^- とそれらの比の濃度推移を示した。

SO_4^{2-} に関しては、どの地点においても、 fSO_4^{2-} 濃度が cSO_4^{2-} 濃度より高い値を示している。黄砂の観測された 4 月 6 日 0 時頃から、PM10 濃度、PM2.5 濃度の増加とほぼ同期し、 fSO_4^{2-} 濃度が増加している。しかし同日、午後からは黄砂の観測された名古屋、大阪で高い濃度を維持しているものの PM10 が減少する一方、 fSO_4^{2-} も減少し、 cSO_4^{2-} の増加が見られた。このことはそれぞれの比で明確に見られる。この PM10 濃度の高い状況は 4 月 8 日には黄砂飛来前の状況に戻っている。

一方、 NO_3^- については、黄砂の観測された期間において cNO_3^- 濃度が fNO_3^- 濃度より高い傾向を示している。いずれの粒子も硫酸塩と同様な経時変化を示しており PM10、PM2.5 と同期している地点が多い。また、粗大粒子と微小粒子の比も一時的に減少するときもあるが、黄砂観測期間に高い傾向を示している。このことは黄砂の PM10 に、人為起源の粗大粒子が付着して飛来したことを示唆するものである。

本事例は黄砂観測期間に粗大粒子の硫酸塩、硝酸塩が増加した例と言える。

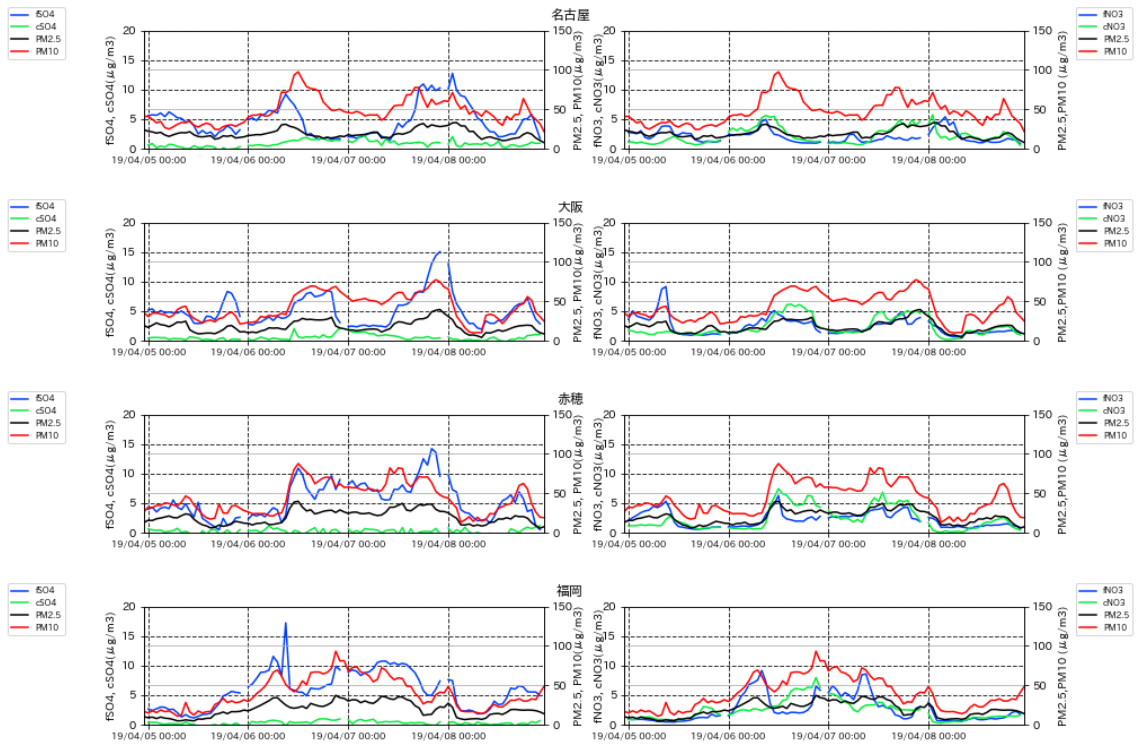


図 7-4-3-1 PM10 及び PM2.5 と微小粒子成分、粗大粒子成分の経時変化

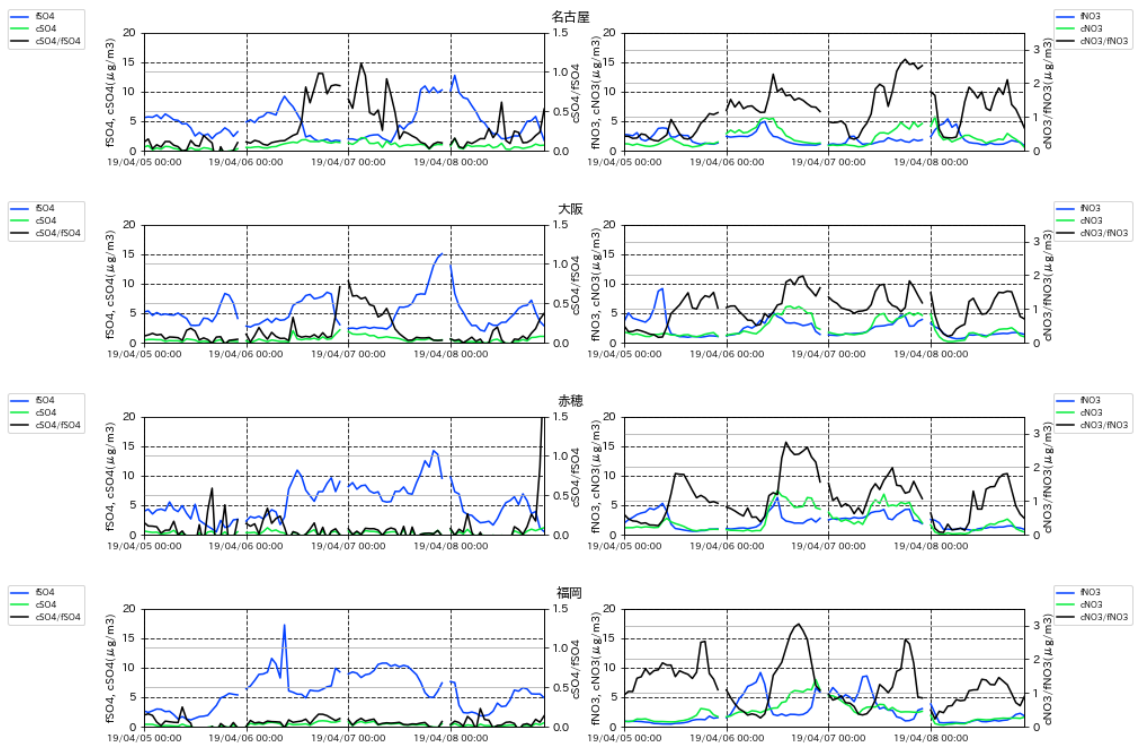


図 7-4-3-2 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4^{2-} と NO_3^- 及びその比

(2) 黄砂事例 2 2019年4月16日

本事例では大阪のみで黄砂が観測されたため、名古屋、大阪、赤穂でのそれぞれの濃度推移を図7-4-3-3に示した。また、図7-4-3-4には fSO_4^{2-} 、 cSO_4^{2-} とそれらの比の濃度推移、 fNO_3^- 、 cNO_3^- とそれらの比の濃度推移を示した。

SO_4^{2-} に関しては、どの地点においても fSO_4^{2-} 濃度が cSO_4^{2-} 濃度より高い値を示している。黄砂の観測された大阪では4月15日12時頃から、PM10濃度、PM2.5濃度が増加し始め、 fSO_4^{2-} の増加と、濃度が低いものの cSO_4^{2-} 濃度とほぼ同期している。その後、それらは4月16日には一時の減少を除き、高い値を維持し、17日には増加前の状況に戻る。この傾向は名古屋でも見られた。また、粗大粒子と微小粒子の比は名古屋と大阪で増加している。これは粗大粒子の cSO_4^{2-} 濃度の増加によると思われる。この増加は4月17日には黄砂飛来前の状況に戻っている。

一方、 NO_3^- については、大阪で黄砂の観測された期間において、名古屋、赤穂で cNO_3^- 濃度が fNO_3^- 濃度より高い傾向を示している。大阪ではその逆の傾向になっている。黄砂が観測された4月16日には粗大粒子の cNO_3^- 濃度が減少しており微小粒子の fNO_3^- 濃度は増加している。このことは粗大粒子と微小粒子の比で明確に現れており、黄砂粒子に付着している人為起源 cNO_3^- が少ないことを示唆する。

本事例は黄砂観測期間に微小粒子、粗大粒子の硫酸塩、濃度は低いものの微小の硫酸塩が増加した例と言える。

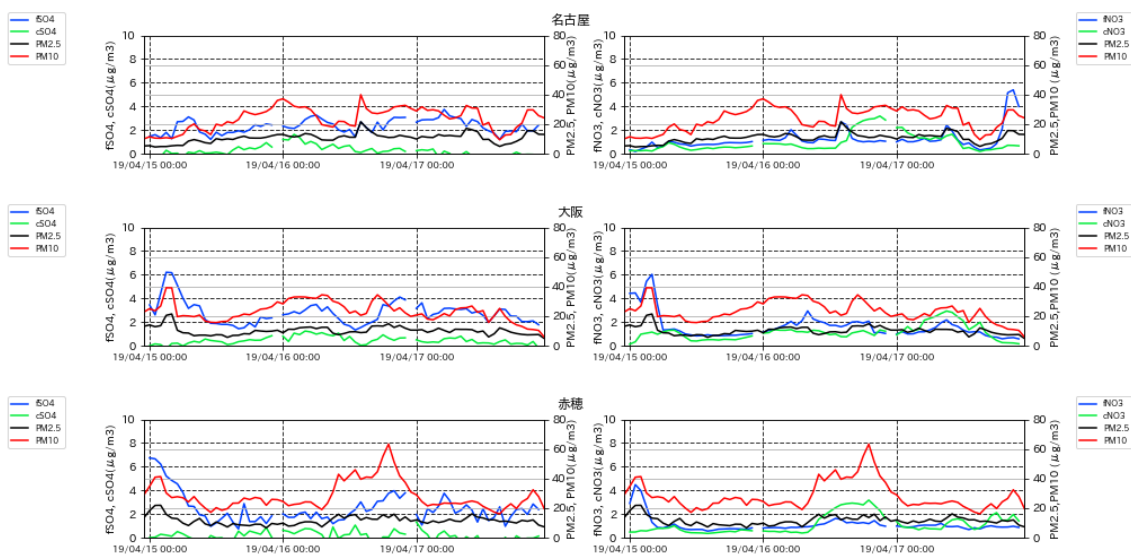


図 7-4-3 PM10 及び PM2.5 と微小粒子成分、粗大粒子成分の経時変化

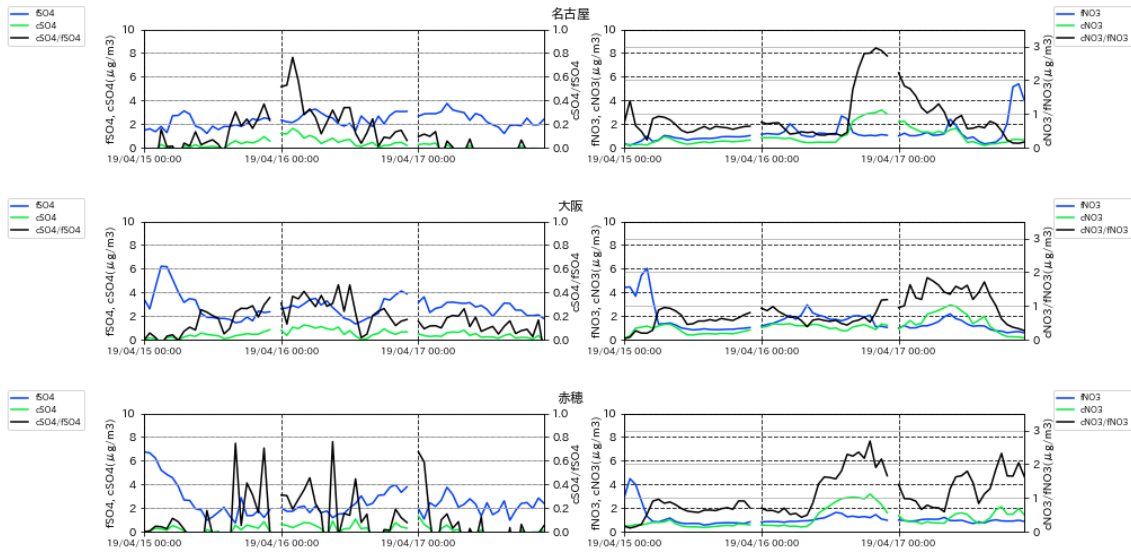


図 7-4-3-4 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4^{2-} と NO_3^- 及びその比

(3) 黄砂事例 3 2019年5月2日

本事例では鹿児島のみで黄砂が観測されたため、福岡、五島でのそれぞれの濃度推移を図 7-4-3-5 に示した。また、図 7-4-3-6 には fSO_4^{2-} 、 cSO_4^{2-} とそれらの比の濃度推移、 fNO_3^- 、 cNO_3^- とそれらの比の濃度推移を示した。

SO_4^{2-} に関しては、どの地点においても fSO_4^{2-} 濃度が cSO_4^{2-} 濃度より高い値を示している。両地点共に鹿児島で黄砂が観測される前日の午後から PM_{10} 、 fSO_4^{2-} 濃度の増加が始まっており、福岡ではその両者と、濃度は小さいものの cSO_4^{2-} も同期している。その後、福岡での PM_{10} 、 fSO_4^{2-} 濃度は 5 月 2 日の 12 時前後にピークを取ったあと減少傾向となる。一方、五島においては、5 月 1 日の濃度の増加時期は一致しているが、 fSO_4^{2-} のほうが先に減少傾向となり、5 月 2 日になると急激に濃度が減少している。 PM_{10} と cSO_4^{2-} は同期しているように見える。 fSO_4^{2-} 濃度と cSO_4^{2-} 濃度の比は 5 月 2 日に増加している。これは cSO_4^{2-} 濃度の増加によると思われる。

一方、 NO_3^- については、黄砂の観測された期間において、両地点においても、 cNO_3^- 濃度が fNO_3^- 濃度より高い傾向を示しており、粗大粒子の cNO_3^- 濃度が PM_{10} と同期している。 fNO_3^- 濃度と cNO_3^- 濃度の比は 5 月 2 日の PM_{10} と同期して増加し、5 月 3 日午前にかけて減少しているが、その後、3 日の午後にも上昇し高い値を示した。黄砂観測日の粗大粒子の cNO_3^- 濃度の増加は黄砂粒子に cNO_3^- が吸着して飛来したことを示唆する。

本事例は黄砂観測期間に濃度は低いものの粗大粒子の硫酸塩、粗大粒子の硝酸塩が増加した例と言える。

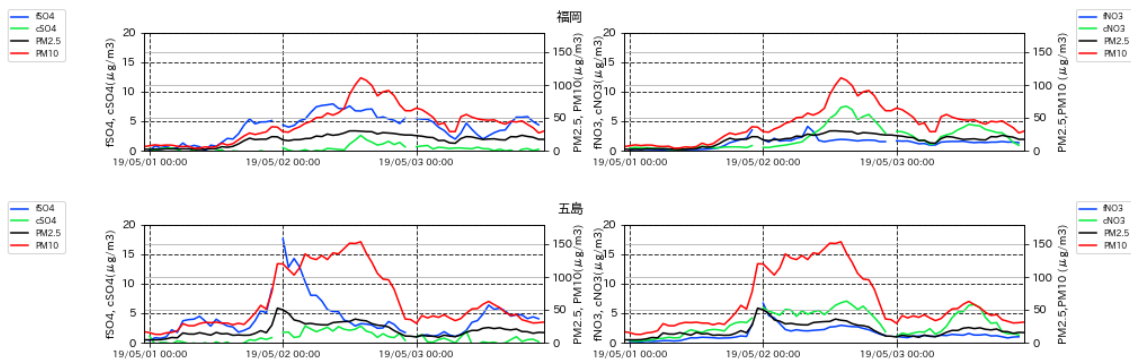


図 7-4-3-5 PM10 及び PM2.5 と微小粒子成分、粗大粒子成分の経時変化

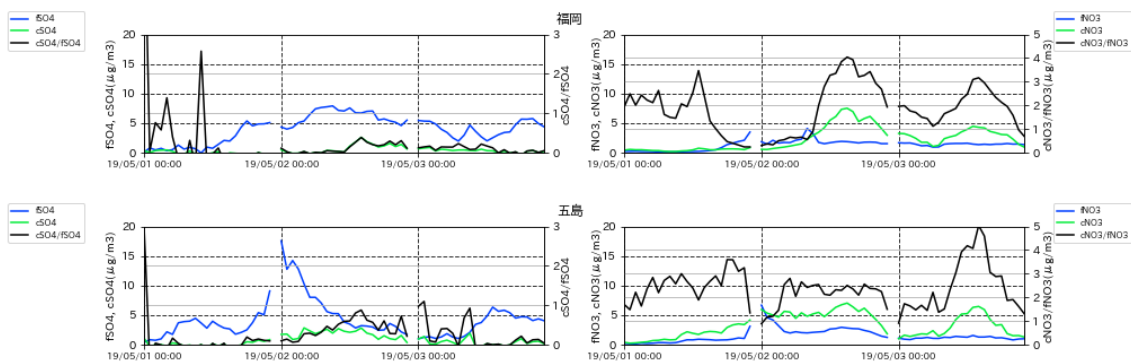


図 7-4-3-6 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4^{2-} と NO_3^- 及びその比

(4) 黄砂事例 4 2019 年 10 月 30 日～11 月 2 日

本事例は名古屋と西日本の 3 地点、福岡での黄砂観測事例のため、名古屋、大阪、赤穂、福岡でのそれぞれの濃度推移を図 7-4-3-7 に示した。また、図 7-4-3-8 には fSO_4^{2-} 、 cSO_4^{2-} とそれらの比の濃度推移、 fNO_3^- 、 cNO_3^- とそれらの比の濃度推移を示した

SO_4^{2-} に関しては、どの地点においても、 fSO_4^{2-} 濃度が cSO_4^{2-} 濃度より高い値を示している。大阪、赤穂においては黄砂の観測された 10 月 30 日 12 時頃から、 PM_{10} 濃度が急激に増加し始め、同日中にピークを迎え、その後、減少に転じる。その後、赤穂においては 11 月 1 日 13 時頃から再び増加に転じる、同日 21 時頃のピークを境に再び減少に転じる。 fSO_4^{2-} 濃度の経時変化は黄砂の観測された 10 月 30 日から、 PM_{10} の変化と同期している。また、 cSO_4^{2-} 濃度についても濃度は低いものの同様な傾向が見られる。大阪においてはデータ欠損のため、2 度目のピークは見えていないが、データ欠損期間の前後は赤穂と同様の傾向となっている。また、名古屋においてはこの二つのピークの傾向は不明確である。福岡、五島においては全ての粒子が同期している。 fSO_4^{2-} 濃度と cSO_4^{2-} 濃度の比には明確な傾向は見られなかった。

一方、 NO_3^- については、黄砂の観測された期間において cNO_3^- 濃度が fNO_3^- 濃度より高い傾向を示している。名古屋、大阪、赤穂においては PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 cNO_3^- 濃度が同期し、福岡、五島では全ての粒子が同期している。前者の 3 地点においては、黄砂が観測された期間、増加と減少を繰り返す少なくとも 3 度のピークが見られる。このことは fNO_3^- 濃度と cNO_3^- 濃度の比に明確に現れており、粗大粒子の

cNO₃が付着した黄砂粒子が断続的に飛来したともみられる。また、福岡、五島においては2度目のピークのcNO₃濃度が10μg/m³以上と、比較的高い濃度となっており、粗大粒子と微小粒子の比も比較的高くなっていることが分かる。

本事例は黄砂観測期間に微小粒子と、黄砂粒子に付着した粗大粒子の硝酸塩が断続的に飛来し、濃度が増加した例と言える。

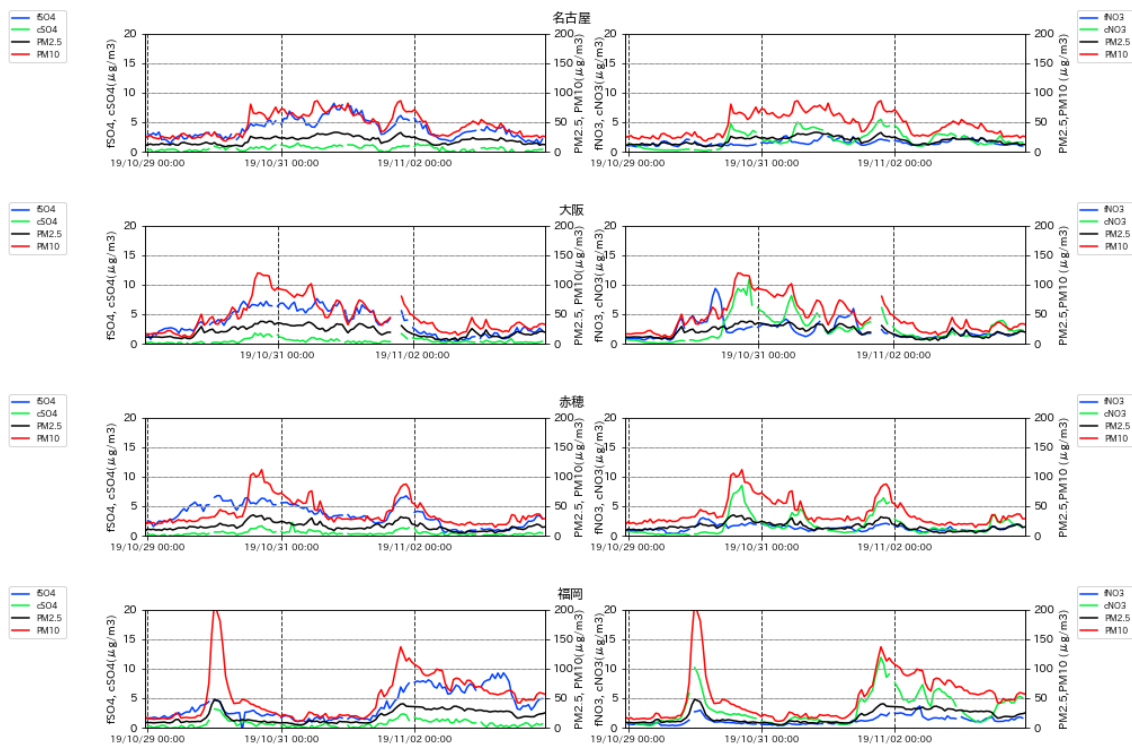


図 7-4-3-7 PM10 及び PM2.5 と微小粒子成分、粗大粒子成分の経時変化

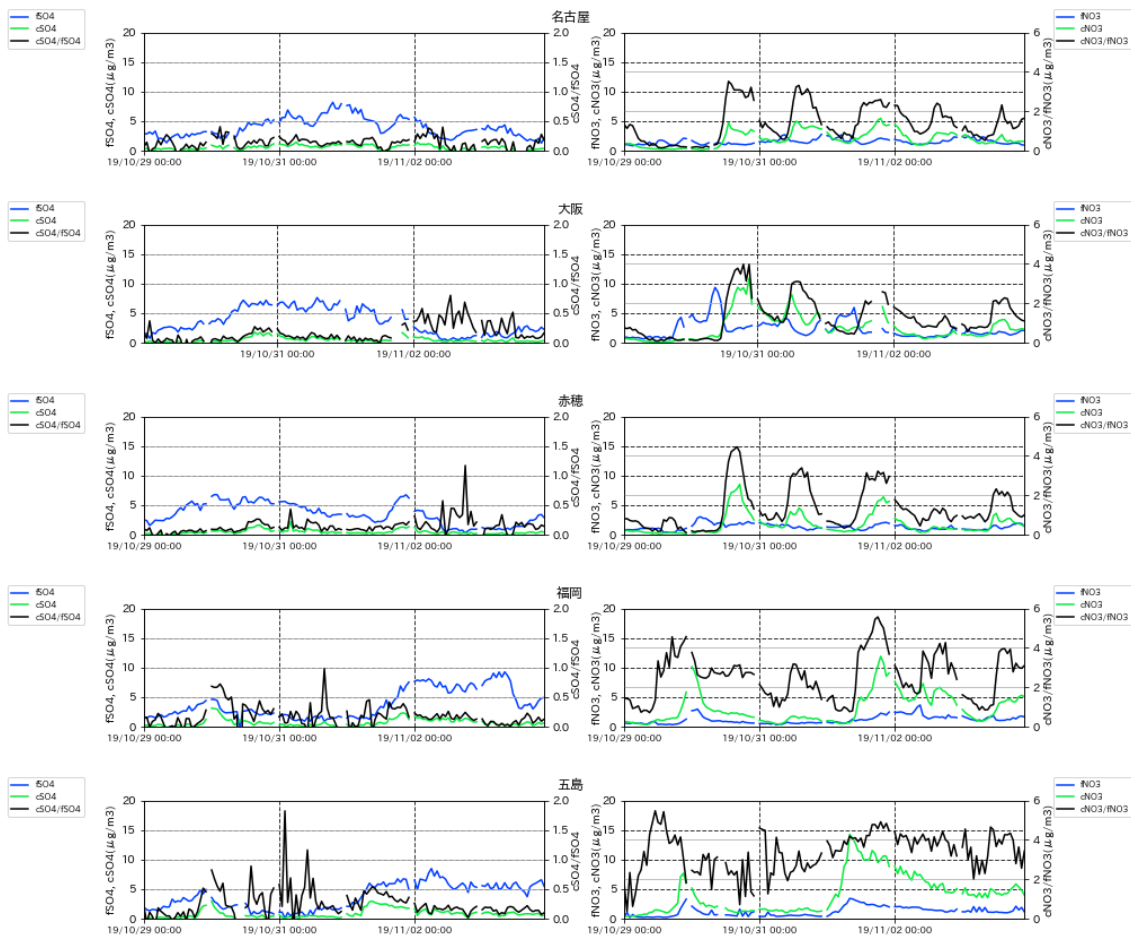


図 7-4-3-8 PM10 及び PM2.5 と微小粒子成分、粗大粒子成分の経時変化

7.4.4 海塩粒子の影響の検討

海洋大気中の粒子状硝酸塩は主に粒形の大きな (PM10) 海塩粒子の表面に吸着して存在する。そのため粗大粒子の硝酸塩から海塩粒子の影響を除去し、 cNO_3^- 濃度を検討する必要がある。しかし、吸着している粒子は硝酸塩のみでなく例えば硫酸塩も吸着している可能性があり、両者の吸着の割合はわからない。また、海塩粒子中の反応性や揮発性のある Cl^- は、他の汚染物質と反応し空気中では損失している可能性がある。

また、海水起源の $NaCl$ 濃度を得るためには Na を基に計算し求めることが適切であり、海水の場合、 $Cl/Na=1.80$ なので、これを基に Cl を計算することが可能である。しかし、ここでは ACSA-14 の実測データと、上の Cl/Na 比から求めた $NaCl$ 濃度の推測値を単純に比較することは適切ではない、そのため、ここでは、 Na^+ 、 cNO_3^- 、 cSO_4^{2-} 、 PM_{10} の濃度を比較する。

Na^+ のデータとしては空気中イオンモニター (URG9000D) により福岡で測定されたデータを用いる。2019年に観測された黄砂日のうち4月6日、7日と5月2日で URG9000D のデータが存在するのでこの期間で解析を行う。

(1) 黄砂事例1 2019年4月6日～7日

図 7-4-4-1 に黄砂事例1の期間における cNO_3^- 、 cSO_4^{2-} 、 Na^+ 、 PM_{10} の経時変化を示す。黄砂の観測された期間、福岡で測定された Na^+ の濃度は、若干高くなるものの、粗大粒子の cNO_3^- 濃度と比較し低く、海塩粒子の影響はあまり見られないものと思われる。

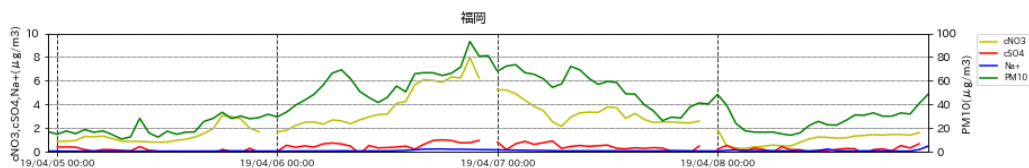


図 7-4-4-1 cNO_3^- 、 cSO_4^{2-} 、 Na^+ 、 PM_{10} の経時変化

(2) 黄砂事例3 2019年5月2日

図 7-4-4-2 に黄砂事例3の期間における cNO_3^- 、 cSO_4^{2-} 、 Na^+ 、 PM_{10} の経時変化を示す。黄砂の観測された期間、福岡で測定された海塩粒子の濃度は、黄砂事例1と比較し高いが、粗大粒子の cNO_3^- 濃度と比較し低くなっている。

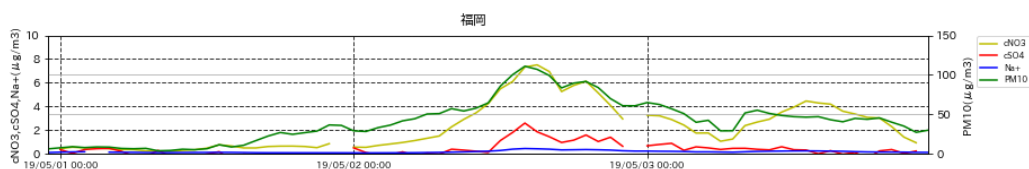


図 7-4-4-2 cNO_3^- 、 cSO_4^{2-} 、 Na^+ 、 PM_{10} の経時変化

自動測定機 PX-375、ACSA-14 のデータと、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SPM 、ライダー黄砂消散係数、自治体による測定データなど様々なデータを比較することにより、それらデータの整合性を確認し、本データの黄砂検出の可能性を検討した。 SPM データは黄砂飛来時に増加傾向にあった。また、自治体により測

定されているデータと PX-375 によるデータの比較により、黄砂時における各種金属元素の濃度の傾向は一致していた。それぞれの黄砂事例で、経時変化の濃度の増減などの傾向が、各金属元素、PM10、粗大粒子の硝酸イオン成分で同様な変化をしていることが分かった。また、黄砂日における PM2.5/PM10 の経時変化をみたところ、その値は黄砂飛来期間に小さくなる傾向にあった。PM10 とこれを比較すると黄砂飛来時には PM10 が増加し、PM2.5 はほぼ一定、または増加傾向にある時間帯が多く、その比の減少は PM10 の増加によることが示唆された。また、自動測定機 URG9000D の Na⁺濃度データを用い、その硝酸塩濃度への影響の検討を試みた。

上記の結果は、自動測定機データの黄砂検出への可能性を示しており今後のデータの蓄積と、さらなる詳細なデータの解析を通して、その可能性を高めていくことができることを示唆している。

8 2010 年度を対象とした黄砂検出手法の検討

8.1 黄砂観測地点数減少により、未観測となった黄砂日

黄砂による生活・健康への影響を把握するためには、国内の黄砂飛来状況を把握することが必須である。しかし、2020 年 2 月に、わが国の黄砂観測地点は全国 59 箇所から 11 箇所に減少した。それに伴い過去の黄砂日の中には、その日の黄砂観測地点に現在の 11 地点が含まれていた場合を除き、黄砂日として公開されなくなった例が存在する。ここでは、このような観測地点の減少に伴い公開されなくなった黄砂日に注目し、以下のような黄砂検出手法を適用することで、観測地点の減少を補うことが可能であるか検討を行った。そのため過去の黄砂日として、直近 10 年で最も黄砂が観測された 2010 年度を対象に、59 地点時と 11 地点時の黄砂観測日の比較をした（表 8-1-1）。

表 8-1-1 2010 年度における 59 地点時と 11 地点時の黄砂観測日の比較

年	月	日	59 地点時		11 地点時	
			黄砂観測の有無	観測地点数	黄砂観測の有無	観測地点数
2010	4	2	○	9	○	1
	4	3	○	5	○	1
	4	27	○	13	○	4
	4	28	○	5	○	2
	4	29	○	6	○	1
	4	30	○	23	○	6
	5	1	○	11	○	3
	5	2	○	1	○	1
	5	3	○	11	○	2
	5	4	○	31	○	6
	5	5	○	26	○	5
	5	6	○	6	×	—
	5	9	○	2	○	1
	5	11	○	1	×	—
	5	12	○	3	×	—
	5	20	○	2	×	—
	5	21	○	23	○	4
	5	22	○	21	○	5
	5	24	○	4	○	1
	5	25	○	21	○	6
	5	26	○	3	○	1
	11	12	○	36	○	9
	11	13	○	29	○	7
	11	14	○	28	○	4
11	15	○	14	○	4	
12	3	○	29	○	6	
12	4	○	5	○	1	
12	5	○	1	×	—	
12	11	○	13	○	3	
12	12	○	1	×	—	
12	23	○	6	○	1	
12	24	○	3	×	—	
2011	3	20	○	2	○	1

その結果、2010年度は、59地点時には34日黄砂が観測されていたが、11地点時には27日となり、計7日間の黄砂が観測されないこととなった。経年変化で見ると地点減少前後で傾向は変化していないものの、少なからず黄砂として観測されない日が存在していることは事実である。

このような観測地点の減少を補い、わが国に飛来する黄砂を正確に把握するためには、定量的な指標に基づいた黄砂判定基準の確立が重要と考える。これまでは、ライダー観測結果を用いて、黄砂飛来を示す手法の検討が行われてきたが、以下の3点が課題として指摘されている。

- ① 薄い黄砂層の探知に加え、ライダー観測の原理上、小雨や霧等が発生している場合には大気中の水滴が障害となり観測が行えない
- ② 荒天時の黄砂を探知に適用することができない可能性がある
- ③ 雲の上にあるような上空の黄砂の探知に適用することができない可能性がある

これら問題点を解消すべく、以下の3つの手法を用いて、11地点時に減少した際に黄砂として観測されなくなった7日間の検出可否について、検討を行った。

8.2 ライダーデータを用いた黄砂検出手法の検討

本報告書7.1において、ライダー黄砂消散係数とSPMの相関による条件①～④を用いて、弱い黄砂日の検出の検討を行った。ここでは同様の手法により、上記7日間の事例が条件①～④を満たしているか否かを調べた。2010年のライダーデータが入手できた東京・つくば・富山の3地点について、条件④であるライダー黄砂消散係数が0.05/km以上となるような事例を抜き出したところ、9事例抽出された。その中から、条件②を満たす、測定時間が16時間以上存在する場合は東京及び富山の2事例、測定時間が12～15時間存在する場合はそれぞれ東京及び富山の2事例存在した。ただ、これらの計4事例についてSPM日最大値を調べたところ、いずれも50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上とならず条件③が満たされなかった。そのため、上記7日間については、ライダー黄砂消散係数とSPMの相関による検出手法ではいずれも黄砂日とは判定されない結果となった。なお、富山における5月6日の事例については、SPM最大値を40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満という条件に緩和した場合に、黄砂日と判定された。

8.3 PM_{2.5}/SPMの濃度比利用した黄砂観測手法の検出

黄砂粒子は粗大であることから、飛来時にはPM_{2.5}/SPMの濃度比は極端に小さくなる。そこで、黄砂飛来時における典型的な濃度比を算出し、それを用いて、黄砂日の特定が可能か検討を行った。また、明らかに黄砂が飛来している瞬間の同濃度比を整理することで、ライダー観測が行われない上記の②荒天時においても、黄砂飛来を示すことが可能か否かについて検討を行う。

(1) 黄砂観測日及び黄砂日ではない日におけるPM_{2.5}/SPM比の時系列変化の比較

以下では、検討の方針について述べる。まず比較対象として、目視観測された過去の黄砂日について、黄砂観測地点におけるPM_{2.5}/SPMの比の経時変化を確認する。図8-3-1に、2010年4月の福岡にて、黄砂飛来前後の状況におけるPM_{2.5}/SPM比の経時変化及びPM_{2.5}、SPM濃度の時間値データを示した。気象庁によれば、2010年4月28日に広島及び那覇で、翌29日に那覇で、30日には福岡を始め、広島、大阪、鹿児島、高松、那覇の6地点で黄砂が観測されており、福岡では、30日の11時から20時

まで黄砂が観測された。その後も5月上旬まで断続的に黄砂が観測される日が続いたが、5月5日以降は11月まで観測されない期間が続いていた。

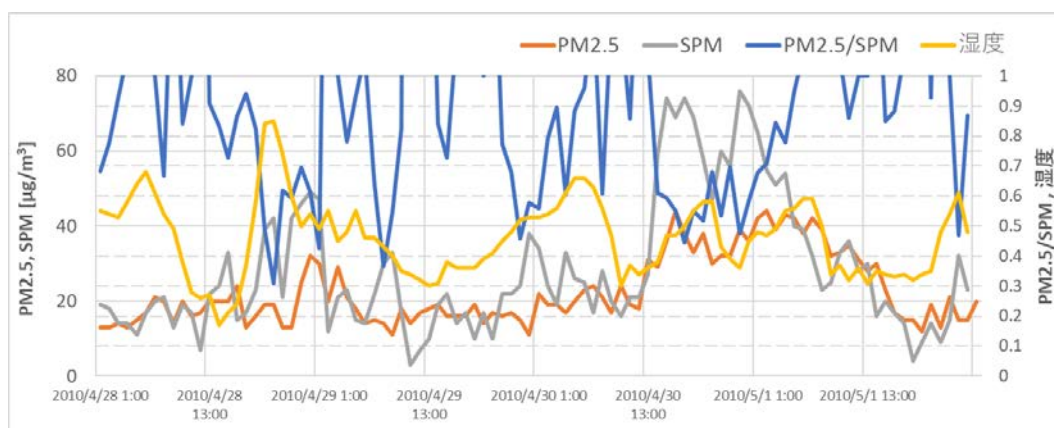


図 8-3-1 黄砂時における PM2.5/SPM 比 (2010 年 4 月、福岡)

図 8-3-2 に 5 月 9 日の福岡における PM2.5/SPM 比の時系列変化を示した。5 月 9 日は、大阪で黄砂が観測されており、福岡では黄砂が観測されていない日である。黄砂観測日である 4 月 30 日 (図 8-3-1) と、黄砂が観測されていない 5 月 9 日 (図 8-3-2) を比較することで、黄砂時の PM2.5/SPM 比の経時変化の傾向を読み取ることができると考えた。結果、黄砂が観測された 4 月 30 日は 13 時から午後にかけて、PM2.5/SPM 比の減少と PM2.5、SPM 濃度の上昇が確認できたが、黄砂が観測されていない 5 月 9 日は同様の変動は確認できなかった。このような変動は、他の黄砂日でも同様に表れており、PM2.5/SPM 比の減少と PM2.5、SPM 濃度の上昇が黄砂飛来時の傾向として考えられる。

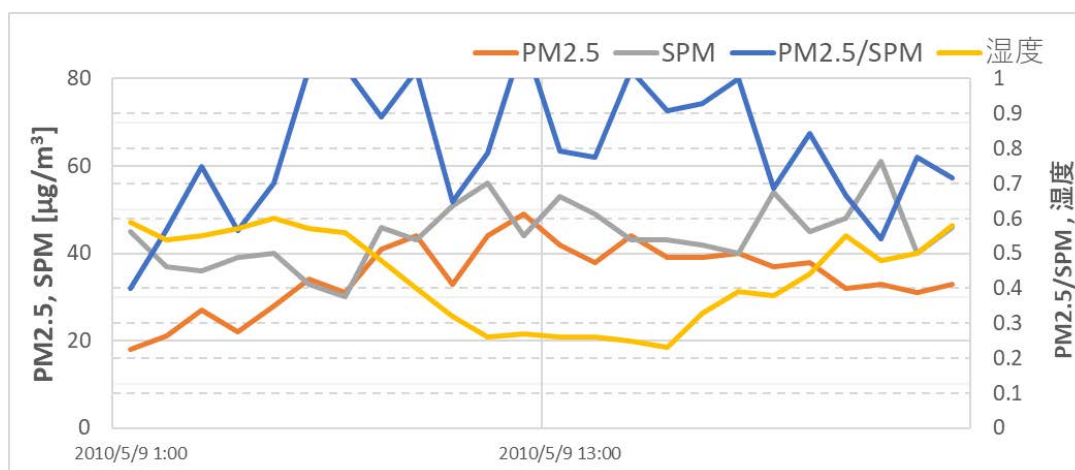


図 8-3-2 黄砂が飛来していない状況での PM2.5/SPM 比 (2010 年 5 月、福岡)

(2) 11 地点時に減少時に黄砂日ではなくなった日における PM2.5/SPM 比の時系列変化

(1)で黄砂時の濃度推移傾向が確認できたため、黄砂観測地点減少時に黄砂日でなくなった7日間を対象に PM2.5/SPM 比の経時変化を確認したところ、以下の図 8-3-3 の通りとなった。また、今回はライダーデータとの整合も図るため、2010 年度のライダーデータが入手可能な富山県における常時監視データを使用している。

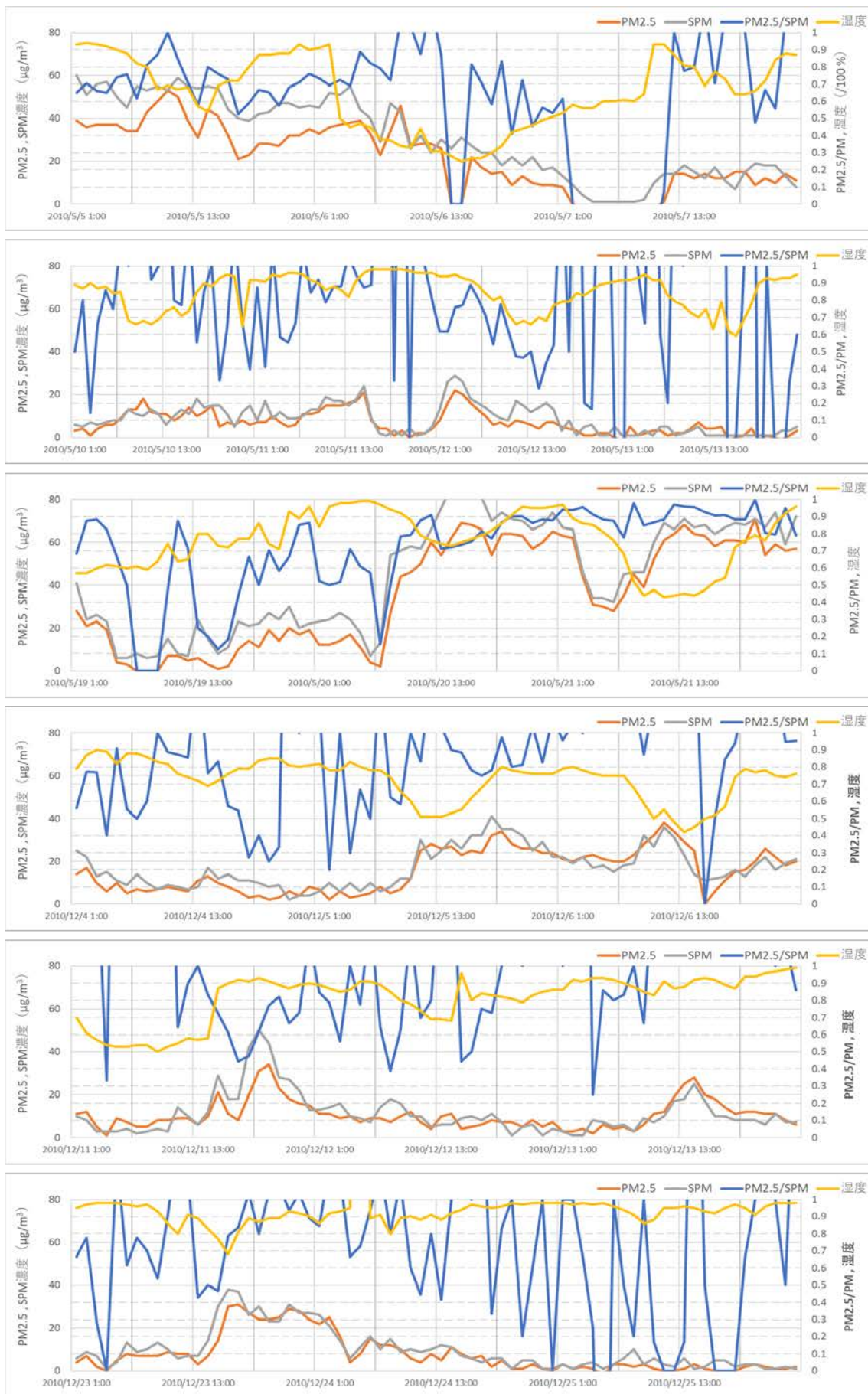


図 8-3-3 解析対象期間における PM2.5、SPM 濃度及び PM2.5/SPM 比の時系列変化

5月6日、11日及び12月5日は図8-3-3に見られるようなPM2.5/SPM比の変動は確認できなかった。一方、5月12日は2時頃と14時頃にPM2.5/SPM比の減少とPM2.5、SPM濃度の上昇が確認できた。PM2.5/SPM比の値としてはあまり小さくなっていないものの、黄砂時の変動と似た傾向を表すことから、黄砂が飛来している可能性が示唆された。5月20日も12日と同様に、7時頃にPM2.5/SPM比の減少とPM2.5、SPM濃度の上昇が確認でき、黄砂が飛来している可能性が示唆された。12月12日及び24日は、それぞれ前日に黄砂が観測されており、図8-3-3からもPM2.5/SPM比の減少とPM2.5、SPM濃度の上昇が見られたが、12日及び24日は同様の変動を確認できなかった。

以上の結果より、11地点減少時に黄砂日として観測されなくなった7日間のうち、5月12日と20日は黄砂が飛来している可能性があることが示唆された。だが、現段階では、黄砂検出の指標としてのPM2.5/SPM比の有効性を明確に示すことはできなかった。黄砂の判定手法としては、PM2.5/SPM比だけで判断するのではなく、他の指標値と組み合わせることで、黄砂判定の手法として用いることが可能であると考えている。

8.4 SPM濃度頻度分布を用いた黄砂検出手法の検討

的場ら(2005)では、SPM濃度の頻度分布は、黄砂が飛来していないときは正規分布に似た一山型であるが、黄砂飛来時には、二山型になることを報告しており、この傾向を用いることで黄砂日の特定が可能であると結論づけられている。この手法の利点は、頻度分布の形の確認が主体となるため、目視観測が難しい時間帯の黄砂に有効と考えられる。本作業では、この手法の適用可能性について検討を行った。

(1) 使用したデータ

的場ら(2005)では、SPM濃度をβ線吸収法で測定していること、低濃度時の測定値のばらつきが少ないこと、黄砂がよく飛来する西日本の日本海側を広くカバーすることの点から、京都府宮津市、兵庫県豊岡市、岡山県倉敷市、津山市、山口県山口市、福岡県小郡市、大牟田市を対象地点としている。本作業でも同様の地点を対象とし、2010年度に測定されたSPMの1時間値データを使用した。

(2) 閾値の設定

これまでの研究では、SPM濃度の環境基準値である $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を閾値とし、それを超えたときの黄砂現象の評価が行われてきたが、的場ら(2005)では、黄砂現象を判定するための閾値を一律で設定するのは適切ではないとし、閾値の設定方法を検討している。図8-4-1に1999年1月から5月に宮津市で測定されたSPM濃度の頻度分布を示した。図8-4-1より、頻度分布は、 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ を中心とする正規分布と、 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の分布が重なった二峰性の分布を示している。このような二峰性の分布は、 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下の濃度分布が通常環境条件下の分布であり、その高濃度側に通常とは異なる環境条件下の高SPM濃度の分布が表れていると的場ら(2005)では解釈しており、第一近似として二峰性分布の谷間の値を、黄砂を検出する閾値と設定している。本作業も同様の手法を用いて閾値を設定し、2010年度の各地点の閾値を表8-4-1にまとめた。なお、SPM濃度の頻度分布に二峰性を示さなかった年のデータは解析対象から除外した。

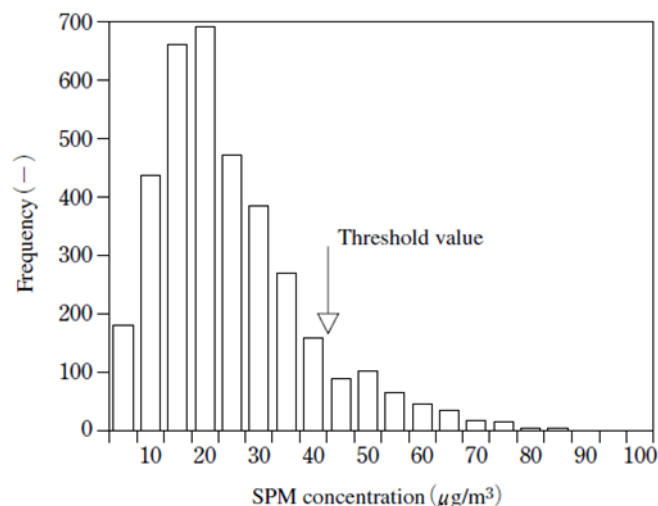


図 8-4-1 1999 年 1 月～5 月における宮津市で観測された SPM 濃度 (的場ら (2005))

表 8-4-1 2010 年度における SPM 濃度の閾値

観測地点	2010 年度閾値
宮津	—
豊岡	—
倉敷	90
津山	60
山口	95
小郡	100
大牟田	95

(3) 局所イベントの除去

(2)の条件で抽出された SPM 高濃度を示した日時は、黄砂が飛来した時だけではなく、様々な局所的、広域的な気象要因、気象イベントによって引き起こされた場合も含まれているため、黄砂以外の要因で SPM 濃度が増加した日時を除去する必要がある。黄砂飛来時には、県域を超える広域範囲で SPM 濃度の上昇が観測されているため、SPM 濃度の上昇が広域で観測されなかった場合は局所的なイベントである可能性が高いと、的場ら (2005) では述べている。局所的な要因によって SPM 濃度が上昇した場合を除く条件として、7 ヶ所の測定局を①宮津・豊岡、②津山・倉敷、③山口・小郡・大牟田の 3 ブロックに分け、あるブロック内で抽出された高濃度 SPM が他のブロックで前後数時間以内に抽出されない場合は、その日時を局所イベントと判断し除外した。

(4) 抽出結果の検討

(1)～(3)の手法により抽出された SPM 黄砂日を表 8-4-2 にまとめた。的場ら (2005) の手法により抽出された SPM 黄砂日は計 7 日間あり、うち 3 日間は気象庁の黄砂観測でも黄砂が観測されていた。また、5 月 21 日は、59 地点時には黄砂日として観測されていたが、11 地点に黄砂観測地点が減少したことにより、黄砂日として除外されていたが、この手法を用いることで、5 月 21 日を SPM 黄砂日として

抽出することが可能になった。

表 8-4-2 2010 年度における的場ら (2005) の手法で抽出された SPM 黄砂日

年	月日	気象庁での黄砂観測の有無 (○ : 気象庁で黄砂が観測された日)	
		11 地点	59 地点時
2010 年	5 月 4 日	○	○
	5 月 5 日	○	○
	5 月 20 日		○
	5 月 21 日	○	○
2011 年	2 月 4 日		
	2 月 5 日		
	3 月 15 日		

次に SPM 黄砂日として抽出されたが、気象庁で黄砂を観測していない 2011 年 2 月 4 日、5 日、3 月 15 日の 3 日間を対象に更なる解析を行った。Iwamoto ら (1993) では、SPM 濃度の日平均が環境基準を超えた日の気圧配置を、黄砂型、移動性高気圧型、夏型に分類している。図 8-4-2 に 2011 年 2 月 4 日、5 日、3 月 15 日における気圧配置を示したが、3 月 15 日は中国黄土地帯に低気圧が確認でき、黄砂型の気圧配置であったと考えられるが、2 月 4 日、5 日は中国の大陸上に高気圧があり、黄砂型の気圧配置に当てはまらないと考えられる。

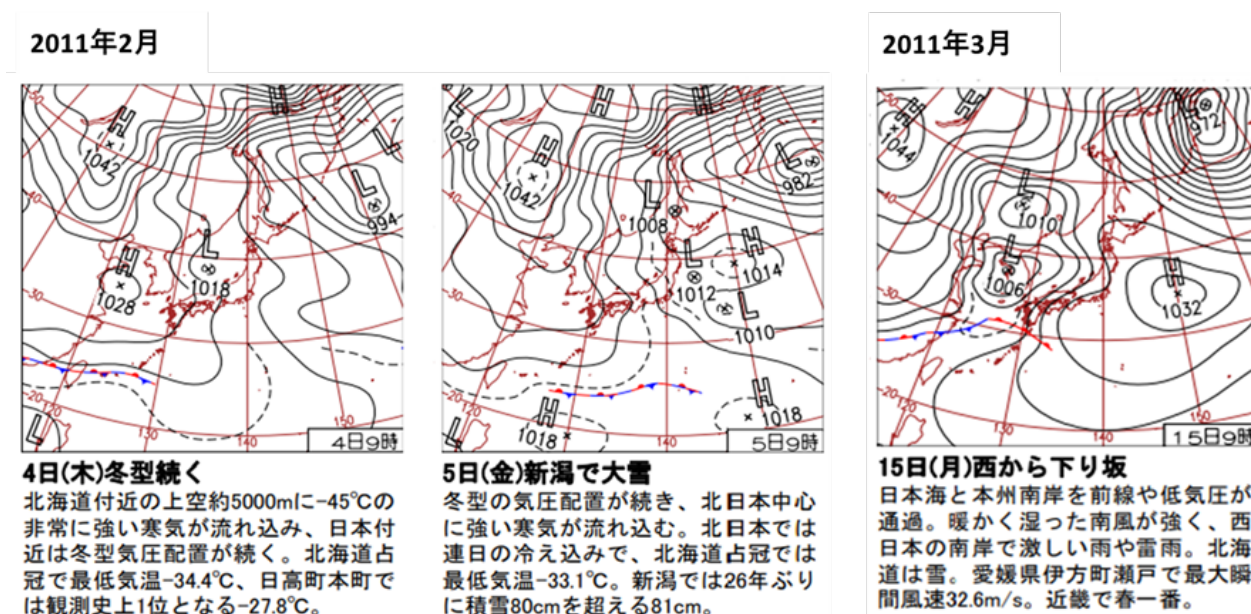


図 8-4-2 2011 年 2 月 4 日、5 日、3 月 15 日における気圧配置

気圧配置が黄砂型に当てはまらない 2 月 4 日、5 日について、日本に飛来した気塊の通過経路を確認するため、NOAA の HYSPLIT を用いて後方流跡線解析を行った。的場ら (2005) の手法に則り、対象地域のほぼ中間点に位置する隠岐島を起点とした後方流跡線を図 8-4-3 に示した。

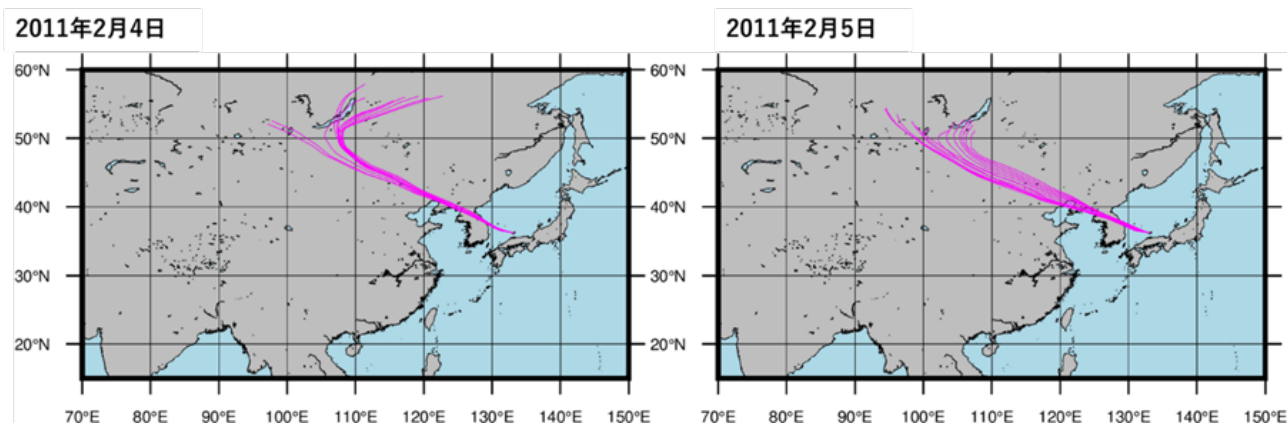


図 8-4-3 2011 年 2 月 4 日、5 日における後方流跡線解析（72 時間前）

図 8.4-3 より、2 月 4 日、5 日どちらも日本に飛来した気塊がアジア大陸から輸送されていたことを示した。この気塊は中国の工業地帯に長期間滞留するような流跡線を示していないことから、工業地帯から放出される人為起源物質によって SPM 濃度が上昇した可能性はなく、黄砂によって SPM 濃度が上昇した可能性が高いと考えられる。

8.5 2010 年度を対象とした黄砂検出手法の検討結果のまとめ

以上のように、わが国の黄砂観測の観測地点が 2020 年 2 月に全国 59 箇所から 11 箇所にまで減少した影響を、多角的な黄砂判定手法を用いて調査した。直近 10 年で最も黄砂が観測された 2010 年度を対象に、59 地点時と 11 地点時の黄砂観測日の比較をした結果、計 7 日間が 11 地点への減少に伴い黄砂として観測されないこととなった。正確にわが国に飛来する黄砂を把握するためには、観測地点の大幅な減少を補い、黄砂として検出手法が必要であると考えられるため、本解析では、2010 年度の黄砂日ではなくなった 7 日間を対象に黄砂日としての検出が可能かどうかの検証を行った。

検証手法として、①ライダーデータ、②PM2.5/SPM の濃度比、③SPM 濃度頻度分布の 3 つの手法を用いた結果、黄砂日としての検出可否のいずれかであるかを表 8-5-1 にまとめた。

表 8-5-1 2010 年度を対象とした黄砂検出手法の検討結果のまとめ

年	月	日	検討した黄砂検出手法（○：検出可 —：検出不可）		
			ライダーデータ	PM2.5/SPM の濃度比	SPM 濃度頻度分布
2010	5	6	— (*)	—	—
	5	11	—	—	—
	5	12	—	○（可能性有）	—
	5	20	—	○（可能性有）	○
	12	5	—	—	—
	12	12	—	—	—
	12	24	—	—	—

(*) SPM 日最大値に関する条件③を緩和した場合に黄砂日と判定

①ライダーデータを用いた検出手法としては、2010年のデータが入手できた東京、つくば、富山の3地点について、7.1の検出条件①～④により、表8.5-1の7日間が検出されるか否かを検証したが、結果としてこの手法では一件も検出できなかった。条件④を満たす、ライダー黄砂消散係数が0.05/km以上となるような事例が9事例あり、そのうち条件②を満たすものとして、測定時間が16時間以上ある場合が2事例、測定時間が12～15時間のものがそれぞれ2事例存在したが、そのすべてにおいて、SPM日最大値が $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上という条件③が満たされなかった。唯一、富山における5月6日の事例は、SPM最大値を $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満という条件に緩和した場合に、黄砂日と判定された。

②PM_{2.5}/SPM比を用いた検出手法では、2010年に黄砂日であった4月30日と黄砂が観測されていない5月9日を対象にPM_{2.5}、SPM濃度の時間値及びPM_{2.5}/SPM比の変化を確認した。これより、黄砂観測時にはPM_{2.5}/SPM比の減少とPM_{2.5}、SPM濃度の上昇する様子が確認でき、この変動が黄砂時の傾向であると考えた。次に黄砂観測地点減少時に黄砂日でなくなった7日間を対象に同様の解析を行った。その結果、7日間のうち5日間は黄砂観測時に見られるPM_{2.5}/SPM比の減少とPM_{2.5}、SPM濃度の上昇が見られなかったが、5月12日と20日はその傾向が確認でき、黄砂が飛来している可能性が示唆された。

③SPM濃度頻度分布を用いた結果、2010年度は合計7日間をSPM黄砂日として検出した。7日間のうち、3日間は気象庁で黄砂と観測されており、黄砂観測地点の減少とともに、黄砂日ではなくなった5月20日の検出をすることに成功した。残りの3日間においては、気圧配置及び後方流跡線解析を用いた結果、中国からの気塊の流入が考えられた。

今回検討した3つの手法は、それぞれ1日程度の黄砂日の検出に留まったが、1つの手法ではなく複数の手法を用いることで、7日間で3日が黄砂の可能性のある日として検出することに成功した。以上の結果より、今回検討した3つの手法は複数用いることで、黄砂日の検出に有効であると可能性が示唆された。しかし、今回用いた3つの手法はどれもSPM濃度を使用しており、①ライダーデータを用いた検出手法及び、③SPM頻度分布を用いた検出手法では、黄砂日を検出する際にSPM濃度が一定の値以上である必要があるため、SPM濃度が低い日を対象とした解析ができていない。今後は、SPM濃度が低い日でも黄砂が検出できる手法を検討していく必要がある。また、今年度は単年度（2010年度のみ）での解析となったが、より長期間のデータを用いて同様の解析を行うことで、黄砂飛来時の傾向が把握できる可能性があるため、引き続き検討していく必要がある。

9 今後の課題

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

今後の課題として、次の事項があげられる。

○黄砂は粒径が比較的大きい粒子の割合が大きいため、飛来時に SPM 濃度が上昇することが知られているが、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 ACSA-14、PX-375 等、自動測定機のデータにより、硫酸イオンや硝酸イオンが黄砂と混在していることや、成分等も混在していることを確認した。今後も、このようなデータの整理を継続していく必要がある。また、これまでは「黄砂日」における経時変化や相関関係を、「黄砂日」という条件で抽出したデータにより見てきたが、今後はより現実的に、実際、黄砂の観測された「黄砂時間」という条件で抽出したデータを見ていくことも重要である。

○ライダーデータと SPM 濃度最大値、ならびに両者の相関係数による条件により、弱い黄砂日の検出を行った結果、本年度は 3 事例が検出された。ただし近年は SPM 濃度が高い値を示す事例が減少していることから、今後は SPM 濃度の最大値に関する条件の検討と、それに伴う相関係数の条件設定の検討等が必要であると考えられる。

○黄砂観測地点が減少したことにより、これまでに黄砂と観測されていた黄砂現象を観測できなくなる可能性があるため、新たな黄砂検出手法を検討する必要がある。今年度は 2010 年度を対象にライダーデータ、PM2.5/SPM 比、SPM 頻度分布の 3 手法を用いて検討を行ったが、どの手法においても SPM 濃度が高濃度となる場合を抽出する手法のため、SPM 濃度が低い黄砂現象をとらえることができなかった。今後は、SPM 濃度を用いない黄砂検出手法の検討や、SPM が低濃度時にも検出可能である手法について検討していく必要がある。

○日本・中国・韓国が黄砂対策に関するモニタリング及び予測、発生源対策について共同研究等を行っているが、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。

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
13. 「環境省」2019：平成30年度黄砂飛来状況調査報告書
14. 「環境省」2020：平成31年度黄砂飛来状況調査報告書
15. 「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/>
16. 「気象庁」HP(地球環境のデータバンク黄砂)：
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/kosahp/kosa_data_indexdex.html
17. 「気象庁」HP（日々の天気図）：<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>
18. 「気象庁」HP（過去の気象データ検索）：
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=&block_no=&year=&month=&day=&view=
19. 「国立環境研究所」HP（ライダー（レーザーライダー））：<http://www-lidar.nies.go.jp/>
20. 「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>
21. 「アメリカ海洋大気圏局 NOAA」HP ARL HYSPLIT（後方流跡線）：
<http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajasrc.pl>
22. 「環境省」HP（PM2.5モニタリングデータ（海外））
<http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/index.html>
23. Sugimoto, N., A. Shimuzu, I. Matsui and M. Nishikawa (2016): A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using PM2.5-to-PM10 ratios, *Particuology*, 28, 114-120
24. ライダー観測によるダストの推定と地上観測によるエアロゾル質量濃度の比較
兼保直樹、杉本伸夫、清水厚、山本重一、河本和明 著、大気環境学会誌 第47巻 第6号 p.285 (2012)

25. SPM/PM2.5 からの黄砂判定の可能性-ライダー黄砂消散係数を指標として-
清水厚、杉本伸夫、松井一郎、西澤智明 著、第 33 回レーザセンシングシンポジウム予稿集 (2015)
26. NICT サイエンスクラウド ひまわり衛星プロジェクト ホームページ : <https://scweb.nict.go.jp/himawari/himawari-archive.html#tejun>
27. JAXA ひまわりモニタ ホームページ : https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html
28. 人工衛星 GEMS ホームページ : <http://gems1.yonsei.ac.kr/main.php>
29. Ball Aerospace 社ホームページ : <https://www.ball.com/aerospace/programs/gems>
30. Matoba, S., Mori, I., Hayakari, S., Nishikawa, M. (2005) : New Method of Detecting Kosa (Asian Dust) from SPM Data Measured by Environmental Air Monitoring Stations., J. Aerosol Res., 20 (3), 225-230 (in Japanese)
31. Iwamoto, S. and Shimohara, T. (1993) : Relationship Between High Concentration of SPM Meteorological Conditions –Comparison Within Three Cities in Fukuoka Prefecture–, J. Japan Soc. Air Pollut., 28, 330-340 (in Japanese)