

図 5-4-6 各地における SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、それらの比 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ の時間変化の煙霧事例 3 を中心とした拡大図。

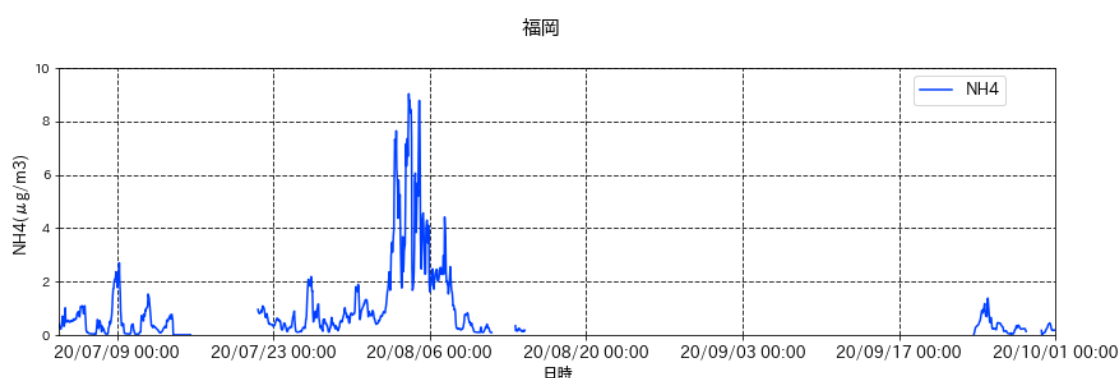


図 5-4-7 事例 3、4 を含む期間における URG900D によるアンモニウムイオン濃度の時間変化。

6 黄砂および煙霧日の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度のデータ整理と解析

黄砂は、 $\text{PM}_{2.5}$ 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、2020 年度の黄砂・煙霧日の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度について検討した。

6.1 黄砂・煙霧日における $\text{PM}_{2.5}$ 環境基準超過についての解析

ここでは、全国の 1,007 箇所の常時監視測定局を評価対象とし、 $\text{PM}_{2.5}$ の日平均値が環境基準値である $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた日を抽出し、その濃度や黄砂観測日×局数に対する抽出された日の割合などについて調べた。

2020 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 350,853（日×局）であり、平均濃度は $9.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。このうち、環境基準値である、日平均値が $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた日数×局は、1,976（日×局）であり、全体の 0.56% であった。

測定局における黄砂観測日は、13,545（日×局）であり、その平均濃度は $16.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、前年度の平均濃度 $15.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ と比較し高くなっている。また、このうち日平均値が $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ の環境基準値を超えた日数×局は、668（日×局）であり、これは黄砂観測日×局数全体の 4.93% にあたる。この割合は、昨年度の 0.31% に比べ非常に高くなったと言える。この割合の増加は、2021 年 3 月 29 日から 3 月 31 日に全国的に観測された強い黄砂により、 $\text{PM}_{2.5}$ も全国的に高い値が観測されたことによると思われる。

また、測定局における煙霧観測日は25,033（日×局）、煙霧日の平均濃度は16.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、このうち日平均値が35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の環境基準値を超えた日数1,678（日×局）であった。これは、煙霧観測日×局数全体の6.7%であり、前年度の平均濃度16.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、超過割合3.2%に比べ、平均濃度、超過割合の両者で増加した。

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6-1-2は2013年度から2020年度までのPM2.5黄砂日平均濃度とその濃度の35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超過率の経年変動を表す。ここで2020年度のデータは速報値であり、それ以外は確定値である。また、2013年度からのデータを用いたのは、2012年ころまで測定局数が現在と比較し少なかったため、比較の対象として除外したためである。期間が短いため、明確に経年的な傾向は見られないが、両者の増減は同期しているように見える。

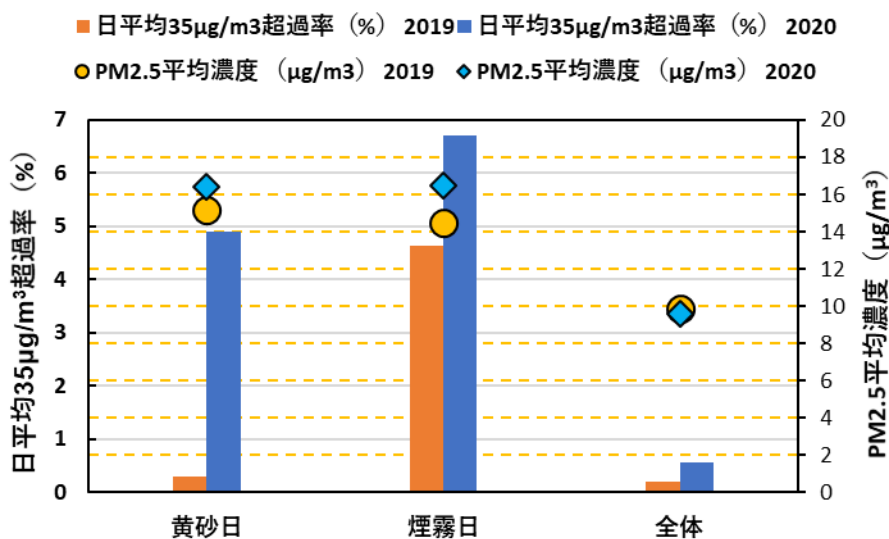


図6-1-1 黄砂日および煙霧日のPM2.5平均濃度と環境基準値超過率

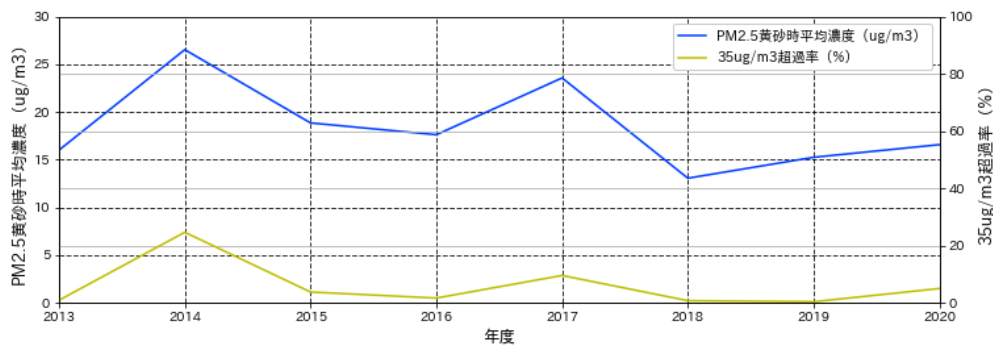


図 6-1-2 2013 年度から 2020 年度までの PM2.5 黄砂日平均濃度とその濃度の 35µg/m³ 超過率の経年変化

2020 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 6-1-3 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 6-1-4 に示す。黄砂日の環境基準超過日数及び煙霧日の環境基準超過日数は、例年通り西日本で多く見られた。

図 6-1-5 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、2020 年度においては PM2.5 環境基準超過日としては 8 月 2 日から 9 日に観測された煙霧と、3 月 29 日から 31 日に観測された黄砂によるものが大半を占めていた。

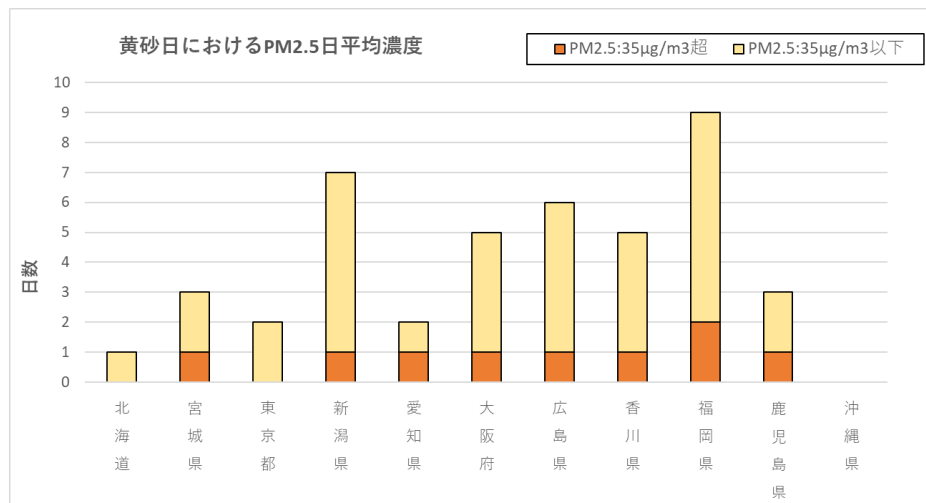


図 6-1-3 都道府県別の黄砂日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2020 年度)

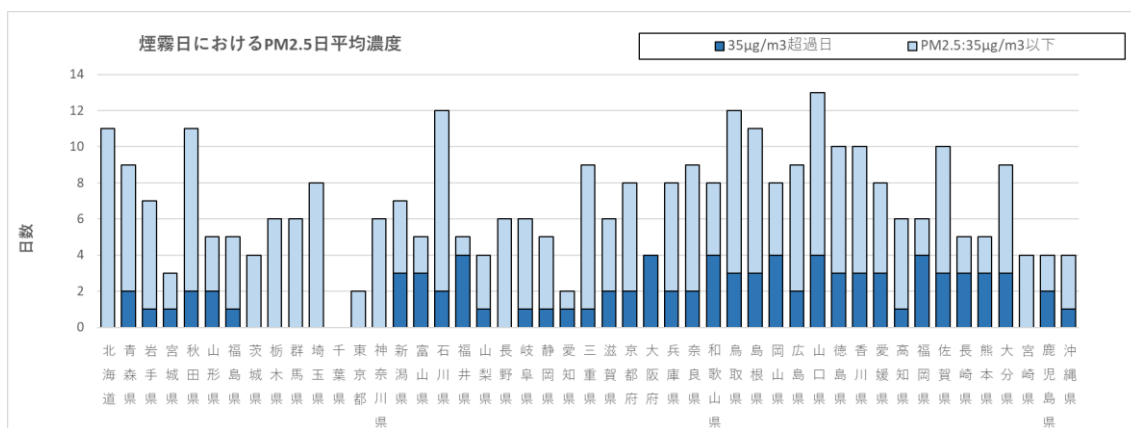


図 6-1-4 都道府県別の煙霧日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2020 年度)

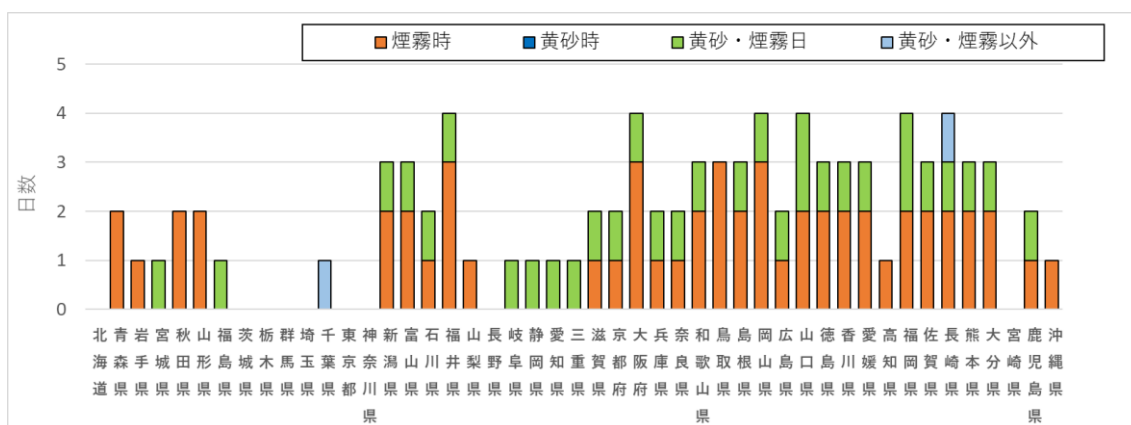


図 6-1-5 都道府県別の PM2.5 環境基準超過日を占める黄砂・煙霧の割合 (2020 年度)

6.2 黄砂・煙霧日における PM2.5 成分濃度の解析

全国の自治体では、毎年度、4 季にわたって PM2.5 の成分分析を実施している。ここでは、2020 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。2020 年度には、表 6-2-1 に示した期間で自治体による観測が行われた。

表 6-2-1 2020 年度における季節ごとの自治体データの観測期間

季節	観測期間
春	2020 年 5 月 13 日～2020 年 5 月 26 日
夏	2020 年 7 月 30 日～2020 年 8 月 11 日
秋	2020 年 10 月 22 日～2020 年 11 月 4 日
冬	2021 年 1 月 26 日～2021 年 2 月 8 日

*自治体によっては季節によって観測が行われていない期間もある。

利用したデータに関しては、欠測・検出限界未満以外のデータを確認し、イオンバランスが崩れているデータ、マスクロージャーモデルと不整合なレコードを除いた。上記の結果、黄砂日に関しては 15 データが、煙霧日に関しては 106 データが抽出された。

さらに 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 検体であった。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、61 検体であった。

煙霧日における重量濃度の平均は 33.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。それぞれの金属成分・イオン成分の平均、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、Al と Fe が顕著に高く、次いで Zn が高くなっている。イオン成分などに関しては、硫酸イオン (SO_4^{2-}) が他のイオンなどと比較し非常に高くなっており、これは西之島の噴火の影響が日本に到達した時期に自治体の観測が実施され、その時のデータが選定されたからだと思われる。次いで、アンモニウムイオン (NH_4^+)、有機炭素 (OC) の順に高くなっている。

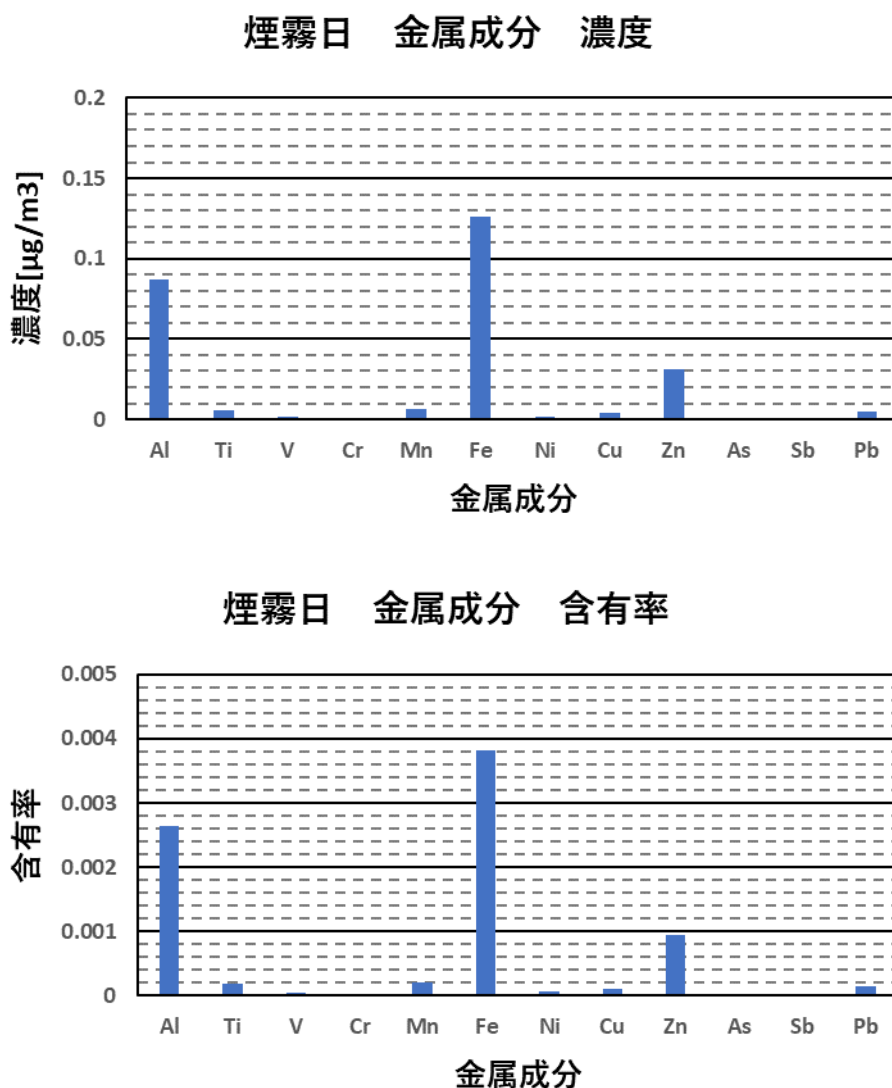


図 6-2-1 煙霧日における PM2.5 金属成分 (上段：濃度、下段：含有率)

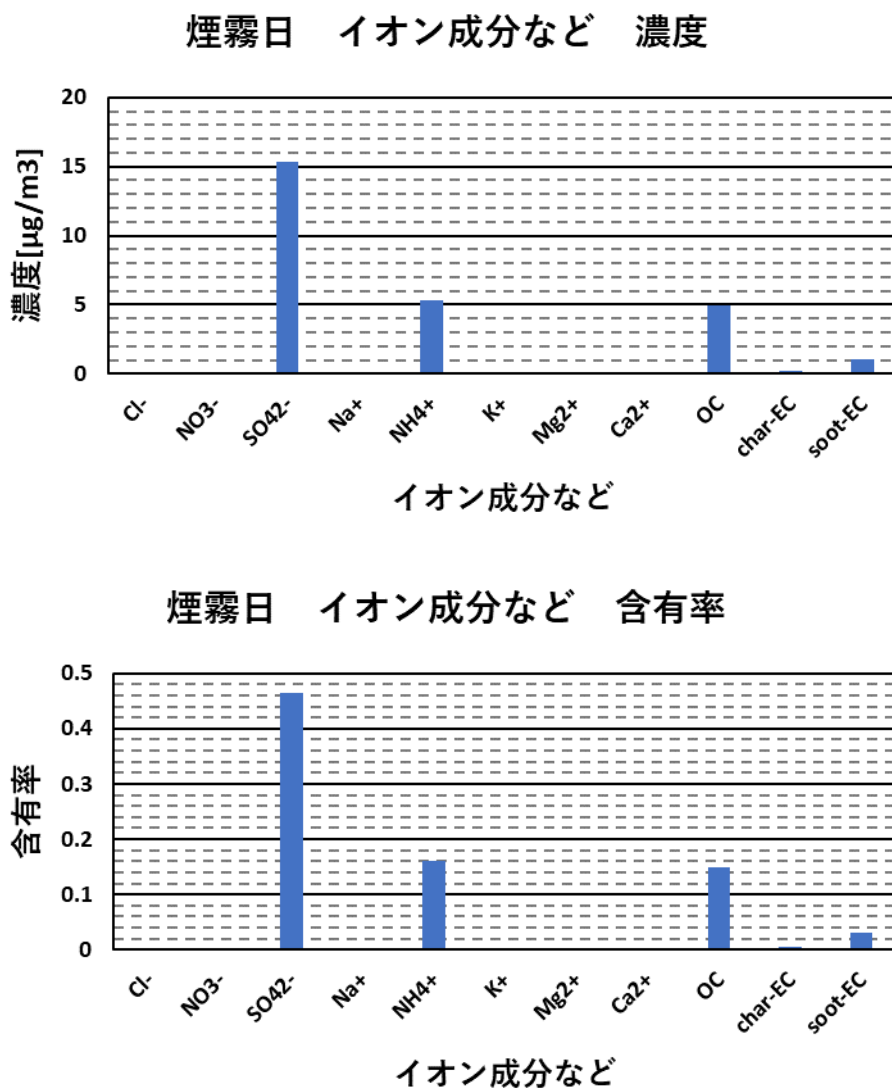


図 6-2-2 煙霧日における PM2.5 イオン成分など (上段：濃度、下段：含有率)

6.3 黄砂・煙霧日における PMF 法を利用した PM2.5 の発生源寄与推定

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、煙霧が観測された日を選択した。その結果、黄砂が観測された日としては 2020 年 5 月 13 日と 5 月 15 日に、煙霧が観測された日としては、8 月 3 日から 9 日、2 月 2 日、3 日、7 日、8 日に調査を実施している自治体があった。また、観測地点としては黄砂が観測された県での地点を選定した。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、黄砂に関しては 15 データ、煙霧に関しては 106 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。PMF を用いた発生源寄与推定において各因子と各発生源を対応付けるためには指標元素の % of species sum を用いる。この割合が大きいものを選定し、各発生源を特徴づける indicator と呼ばれる重要元素により各発生源を推定する。ここでは indicator として「環境省 PM2.5 成分測定マニュアル無

機元素測定法」 iii ページの表と飯島(2011)の記載を用いた。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

<p>【データ数】</p> <p>黄砂：15、煙霧：106</p> <p>【成分数】</p> <p>以下の全 22 項目</p> <p>イオン成分：Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺</p> <p>無機元素成分：Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Zn、As、Sb、Pb</p> <p>炭素成分：OC、EC</p> <p>EC については炭素成分を以下のように整理した。</p> <p>char-EC：EC1-OCpyro</p> <p>soot-EC：EC2+EC3 (EC1<OCpyro の場合は OCpyro-EC1)</p> <p>【因子数】</p> <p>7 因子</p>

(1) 黄砂日における PM_{2.5} の発生源寄与推定

図 6-3-1- 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 Cl⁻、Na⁺が高く、海塩を表す因子と思われる。海塩の Mg²⁺ /Na⁺比は 0.11 とされており、ここでは 0.94 と高めであった。

Factor2 は、Na⁺、Cr の割合が高く、廃棄物焼却を表す因子と思われる。

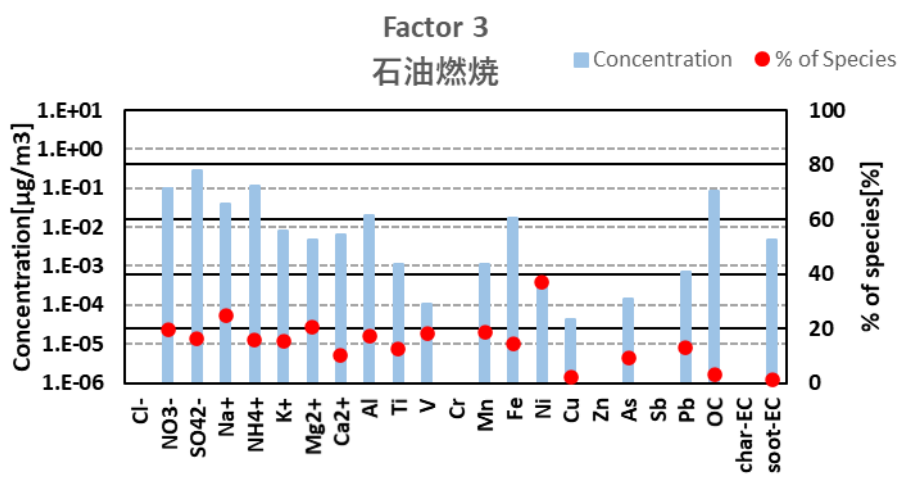
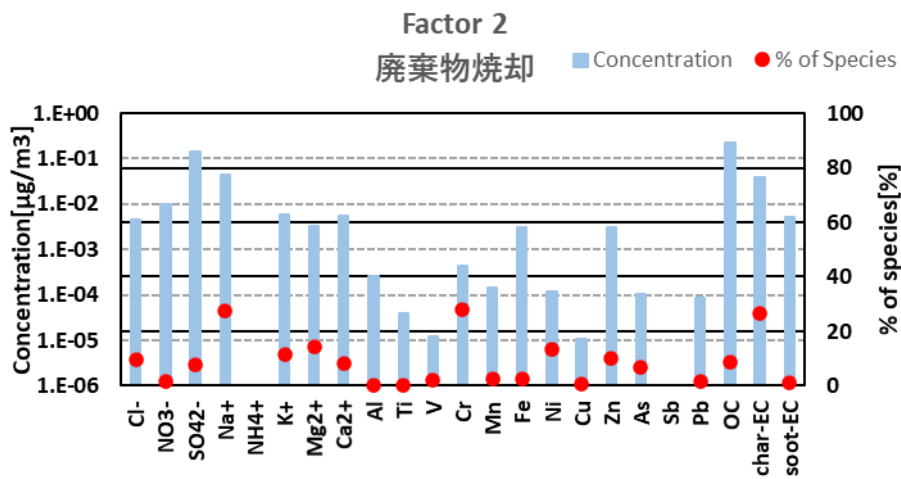
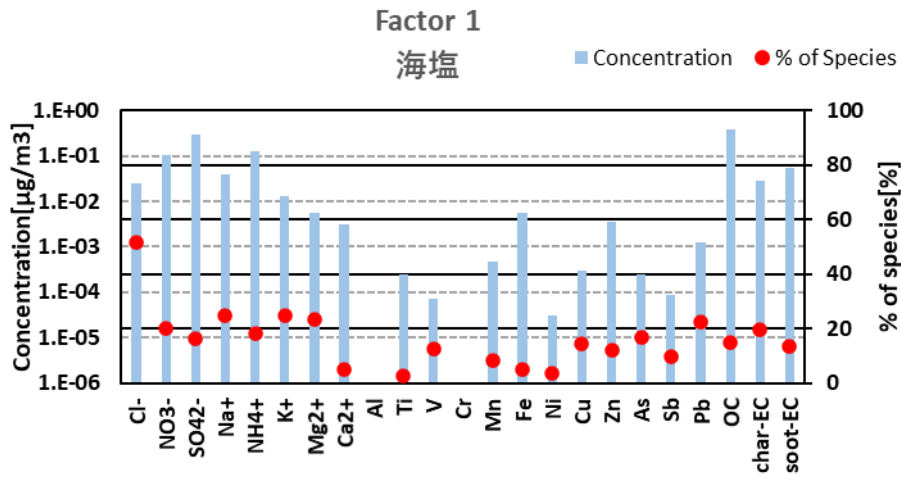
Factor3 は Ni が高く、石油燃焼によるものと想定される。

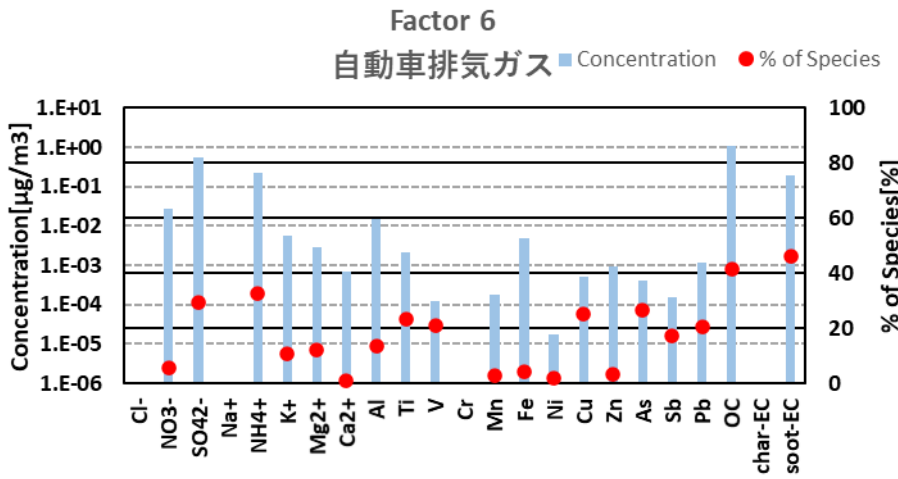
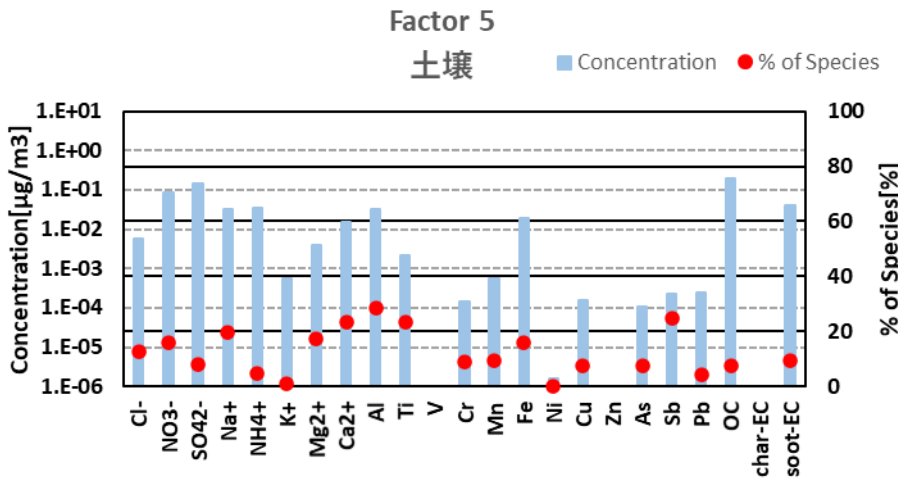
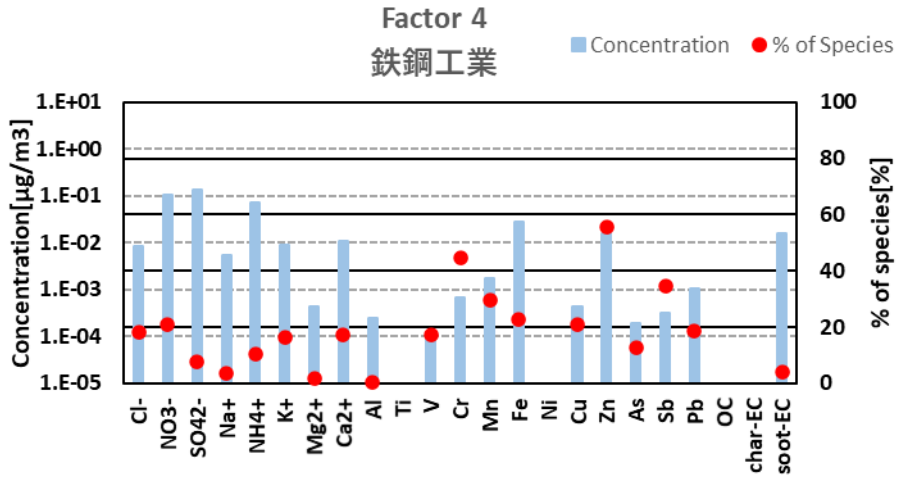
Factor4 は Cr、Mn、Fe、Zn が高く、鉄鋼工業による因子と思われる。

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

Factor6 は soot-EC が高く、自動車排気ガスによる因子と思われる。

Factor7 は Ca²⁺、Al、Fe が高く、道路を表す因子と思われる。





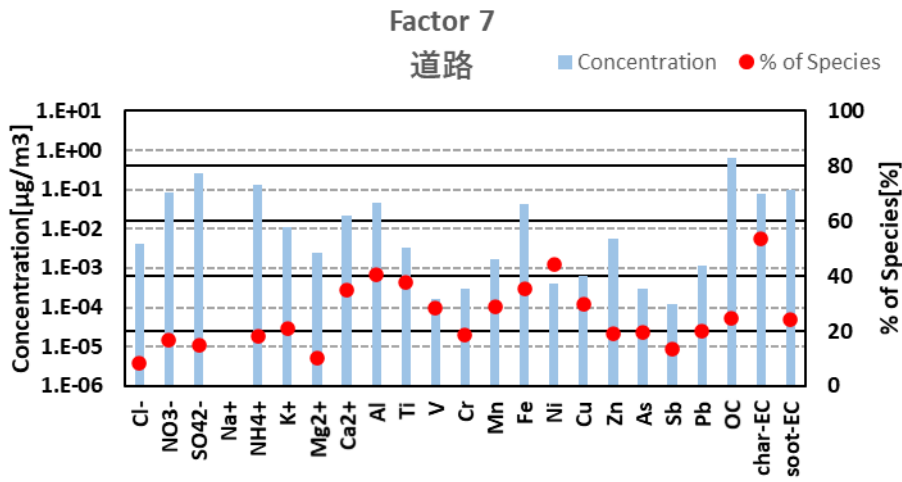


図 6-3-1-1 黄砂日の発生源プロファイル

2020 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のデータ 23 データから、不整合なレコードを除いた 15 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 6-3-1-2 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、自動車排気ガスの寄与が最も高く 20.69%を示し、次いで道路の寄与が高く 14.22%を示した。黄砂からの寄与に関する土壌は 6.08%となった。

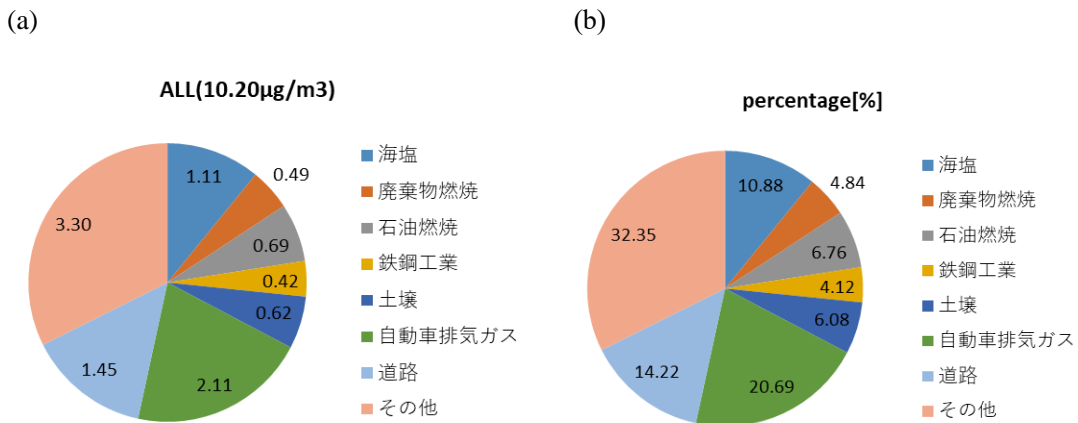


図 6-3-1-2 黄砂日の各寄与濃度の(a)平均濃度、(b)平均濃度の全体に占める割合

(2) 煙霧日における PM2.5 の発生源寄与解析

図 6-3-2- 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 が高く、道路を表す因子と思われる。

Factor2 は、soot-EC の割合が高く、発生源の指標成分で判断するとバイオマス燃焼を表す因子と思われ

るが、 SO_4^{2-} が他の成分と比較しはるかに高い値を示しており、データの抽出期間を考慮すると西之島の噴火による関連性も考えられる。

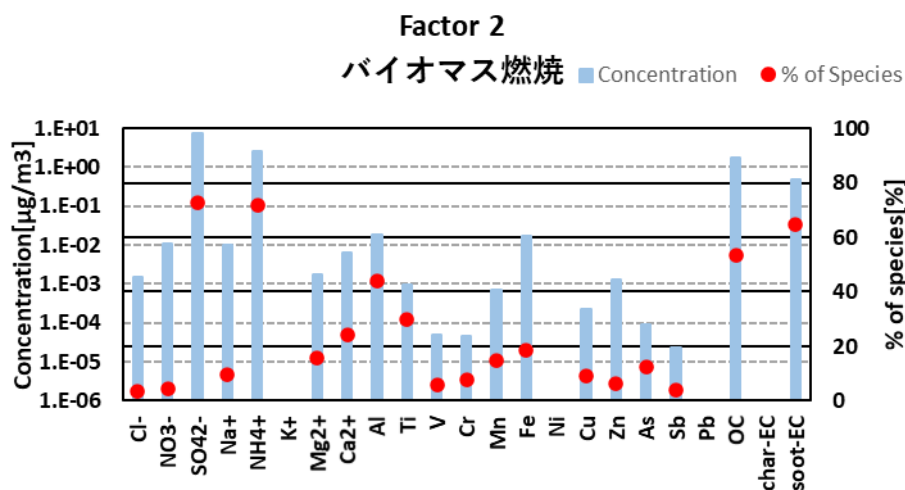
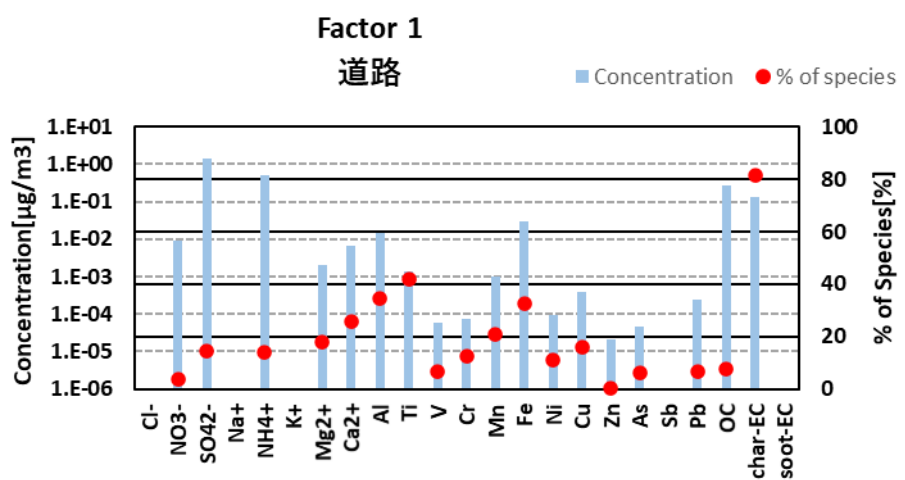
Factor3 は As、Pb が高く、石炭燃焼によるものと想定される。

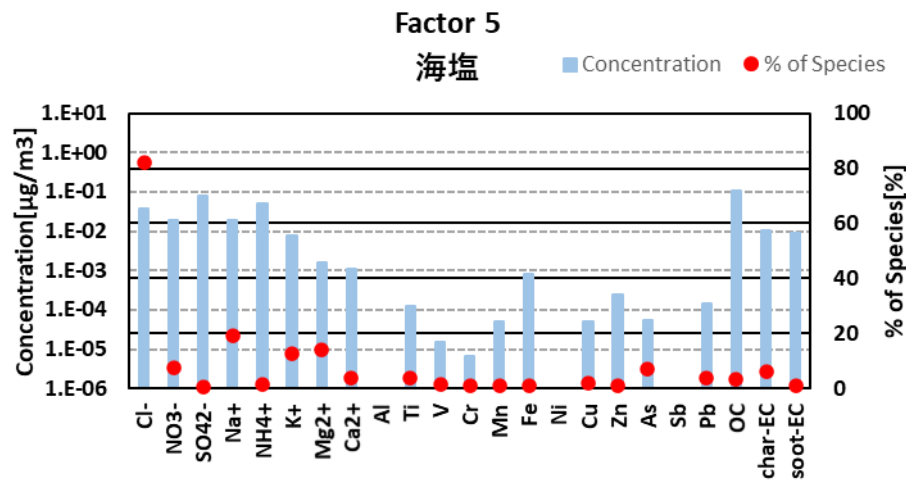
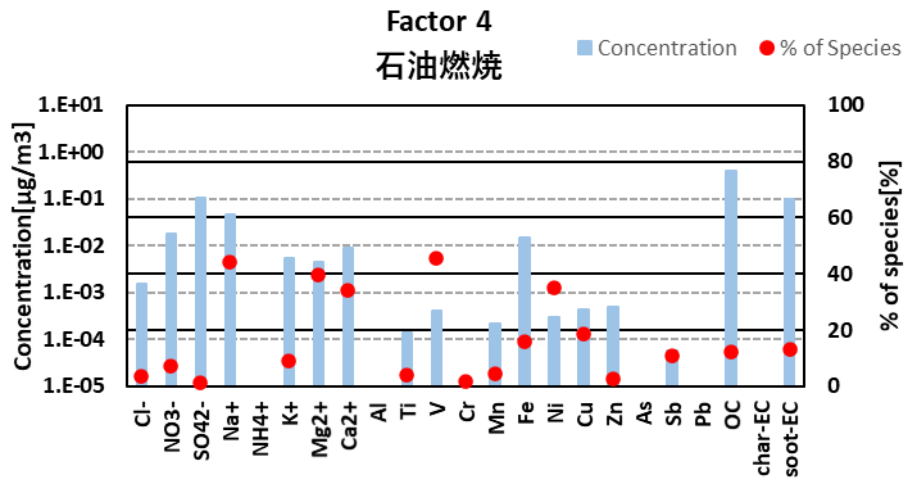
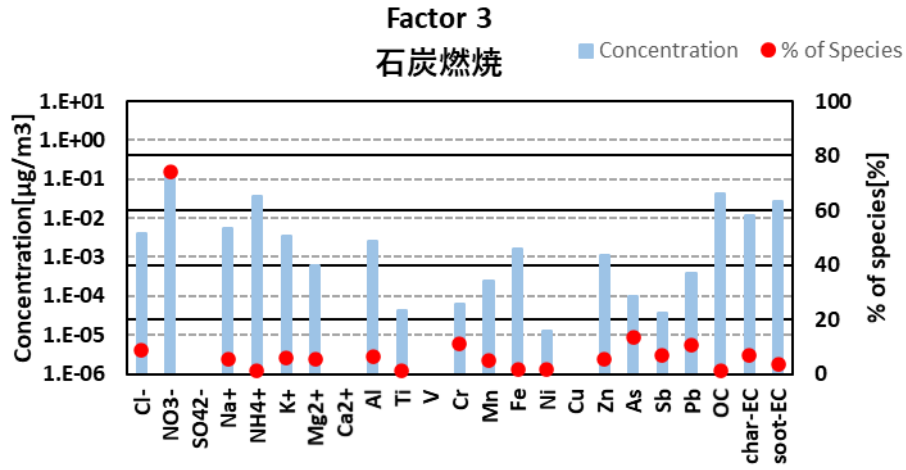
Factor4 は V、Ni が高く、石油燃焼による因子と思われる。

Factor5 は Na^+ 、 Cl^- がが高く、海塩に関する因子かと思われる。海塩の $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比は 0.11 とされており、ここでは 0.076 とここではかなり低い値となった。

Factor6 は K^+ 、As、Sb が高く、廃棄物燃焼による因子と思われる。

Factor7 は Cr、Mn、Cu、Zn が高く、鉄鋼工業を表す因子と思われる。





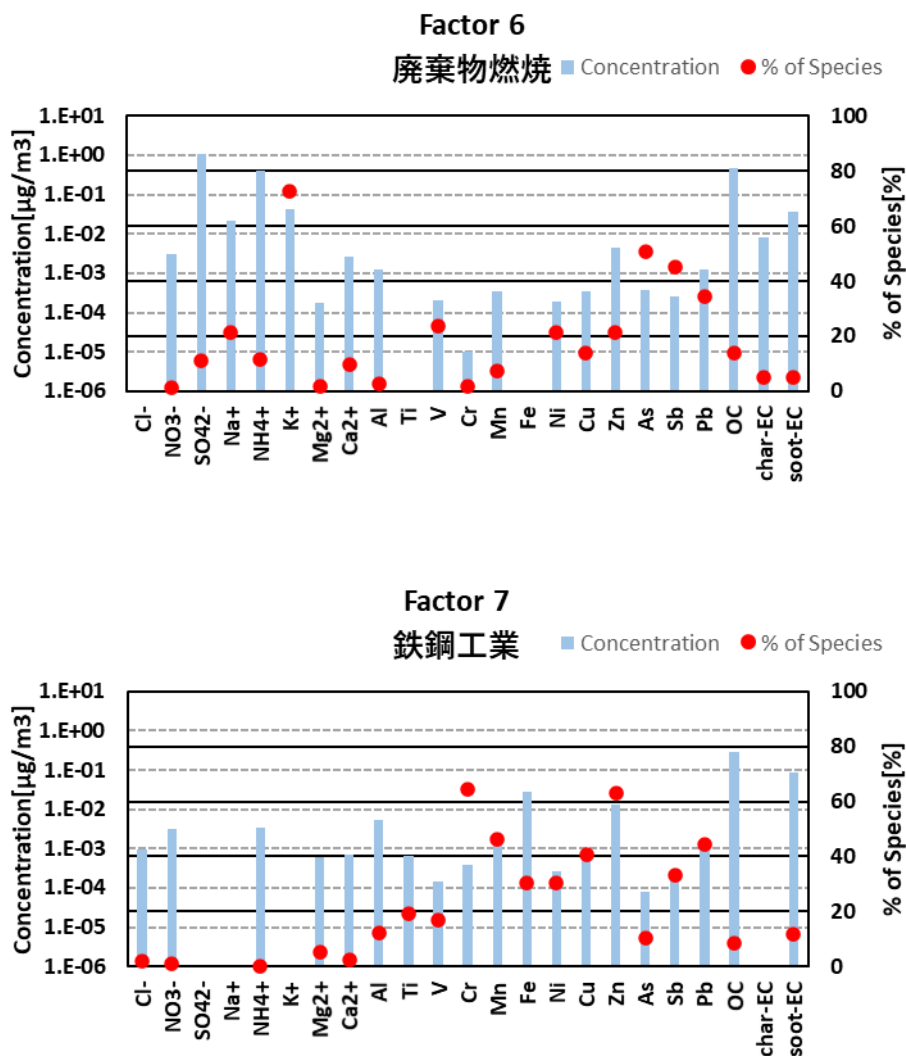


図 6-3-2-1 煙霧日の発生源プロフィール

2020 年度に観測された煙霧の期間と、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のデータ 299 データから、不整合なレコードを除いた 106 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 6-3-2-2 に示すとおりである。

平均組成は、バイオマス燃焼の寄与が最も高く 50.46%を示した。これは図 6-3-2-1 において西ノ島噴火の影響と示唆された因子である。このことは煙霧日において、西之島の噴火による影響が PM2.5 濃度に 5 割以上、寄与している可能性を示唆する。その他を除くと次いで高い寄与は道路の寄与が高く 10.05%を示した。

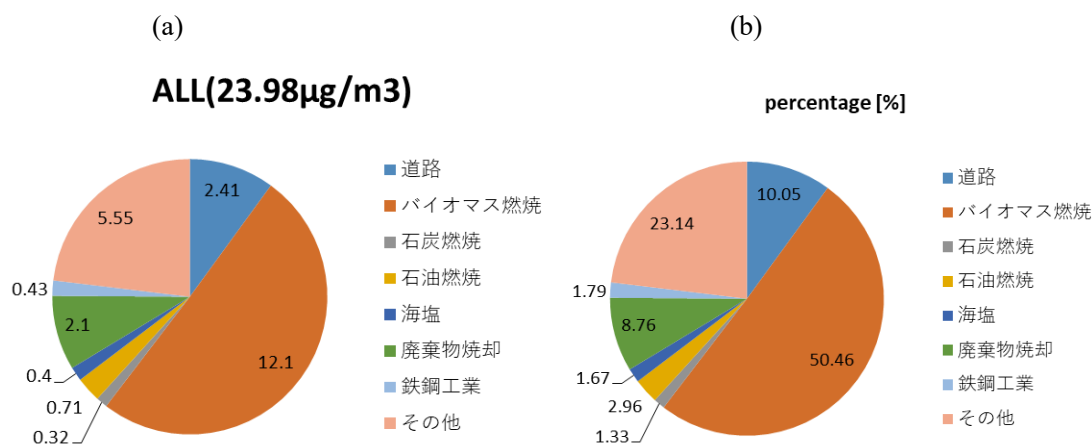


図 6-3-2-2 煙霧日の各寄与濃度の(a)平均濃度、(b)平均濃度の全体に占める割合

7 2020 年度における黄砂の飛来状況の評価、包括的解析手法の検討等について

過年度までの検討においては、ライダー観測結果と常時監視局の SPM 濃度データ等を用いて、黄砂飛来を示す手法の検討が行われてきたが、①薄い黄砂層の探知に加え、ライダー観測の原理上、小雨や霧等が発生している場合には大気中の水滴が障害となり観測が行えないことから、②荒天時の黄砂や③雲の上にあるような上空の黄砂の探知に適用することができない可能性が指摘されている。これら問題点を解消すべく、昨年度の業務では、黄砂観測地点が 11 地点に減少したことにより、観測されなかった黄砂の検出を試みた。2020 年度を対象にライダーデータ、PM_{2.5}/SPM の濃度比、SPM 濃度頻度分布を用いて解析を行った。その結果、複数の検出手法を用いることで黄砂日の検出の可能性が示唆されたが、SPM 濃度が低濃度時の黄砂飛来に関しては検出できない結果となった。

そのため今年度においては、新たに PM_{2.5}/PM₁₀ 濃度比に注目し、令和 2 年度における黄砂の検出を試みる。PM_{2.5}/PM₁₀ 濃度比は、昨年度検討において解析した PM_{2.5}/SPM 濃度比と同様、黄砂日に小さくなると考えられることから、黄砂検出の指標となることが期待される。また、PM_{2.5}/PM₁₀ 濃度比により検出された日を対象にライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の時系列変化を確認し、最大値及び相関係数を調査することにより、ライダーデータ及び SPM 濃度を用いた黄砂検出手法について考察する。加えて、気象観測衛星ひまわり以外の人工衛星を用いた観測手法についても調査し報告する。

7.1 PM_{2.5}/PM₁₀ 濃度比による弱い黄砂検出手法の検討

上記の通り、今年度においては、PM₁₀ 濃度に対する PM_{2.5} 濃度の比を弱い黄砂の判定基準とし、その抽出を試みる。使用するデータは ACSA-14 のデータである。また比較のため PM_{2.5}/SPM の時系列も示すが、ここで使用するデータは PM_{2.5}、SPM とともに常監視データを用いた。PM₁₀ 濃度は黄砂日には高い値となる傾向にあるが同時に PM_{2.5} も高い値になる可能性もある。そのためここでは PM₁₀ に対する PM_{2.5} の比が 0.2 以下、かつ PM₁₀ 濃度が 80µg/m³ の日時を抽出した。上記条件で抽出された事例数は ACSA-14 の観測地点ごとに異なるが、抽出された事例で比較的長時間続き抽出条件が維持されている事例、同じ観測地点で連続した日で抽出条件を満たす事例となっていることなどを考慮し、弱い黄砂として表 7-1-1 の 2 事例を解析対象とした。

表 7-1-1 0<PM2.5/PM10<0.2、PM10 濃度>80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の条件で抽出され時間的連続性などから弱い黄砂と仮定された事例

事例	期間	抽出条件を満たす観測地	抽出条件を満たす時間帯
1	2020/5/12-5/15	札幌	5/12 18:00-19:00、21:00
		隠岐	5/14 17:00-23:00
2	2021/3/23-3/24	福岡	3/23 10:00-21:00
		隠岐	3/23 22:00-23:00
		福岡	3/24 10:00-13:00
		隠岐	3/24 19:00-22:00

事例 1 に関しては気象庁黄砂観測日の 2020 年 5 月 13 日と 15 日を考慮すると連続黄砂観測日となるためこの期間で 4 日間連続観測された黄砂日と仮定した。図 7-1-1、図 7-1-3 に事例 1、事例 2 それぞれの期間における PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 の時系列を示す。参考に PM2.5/SPM の時系列もそれぞれ、図 7-1-2、図 7-1-4 に示した。PM2.5/PM10 と比較し PM2.5/SPM の比の減少は明確ではないように見える。

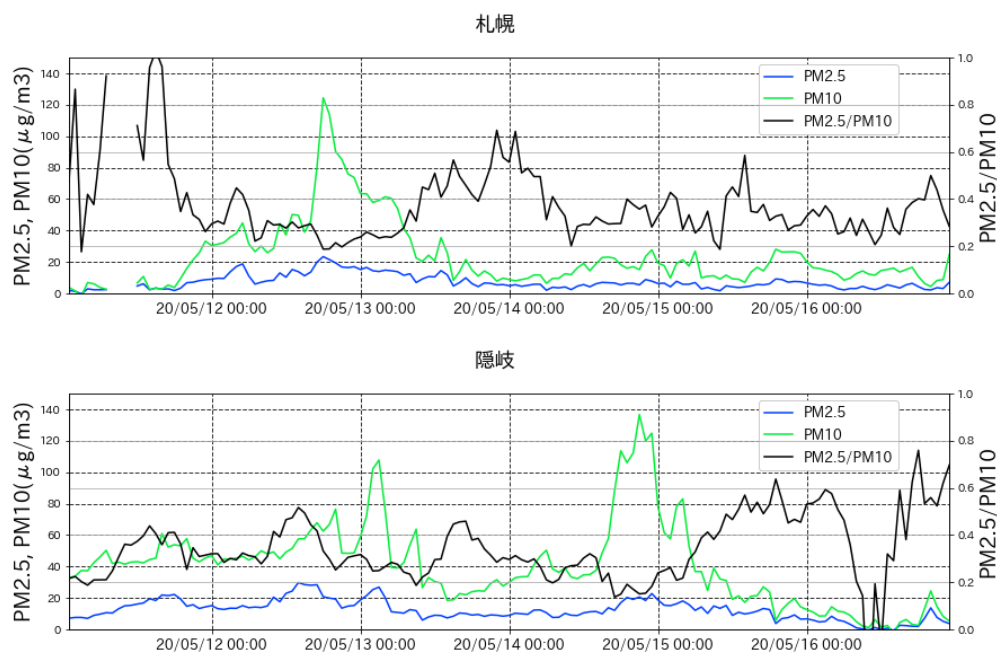
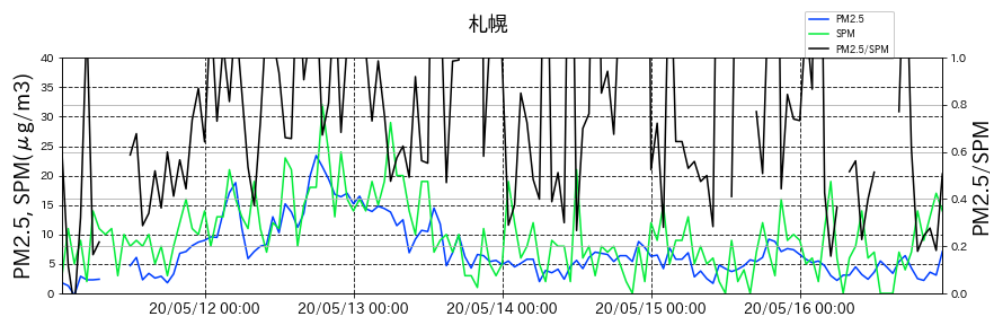


図 7-1-1 事例 1 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列



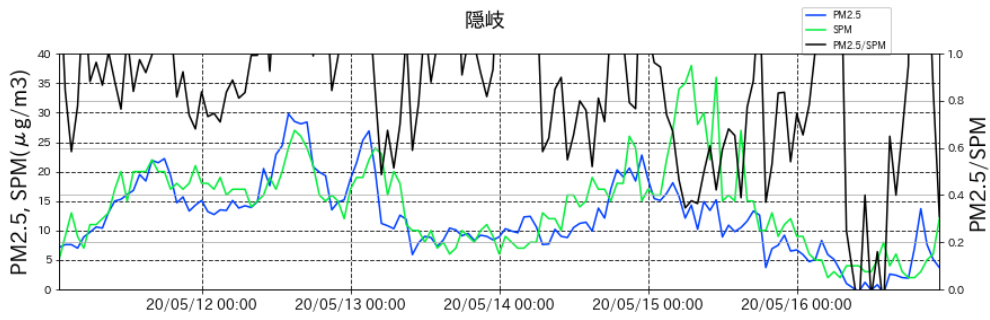


図 7-1-2 事例 1 における各観測地点の PM2.5、SPM、PM2.5/SPM 時系列

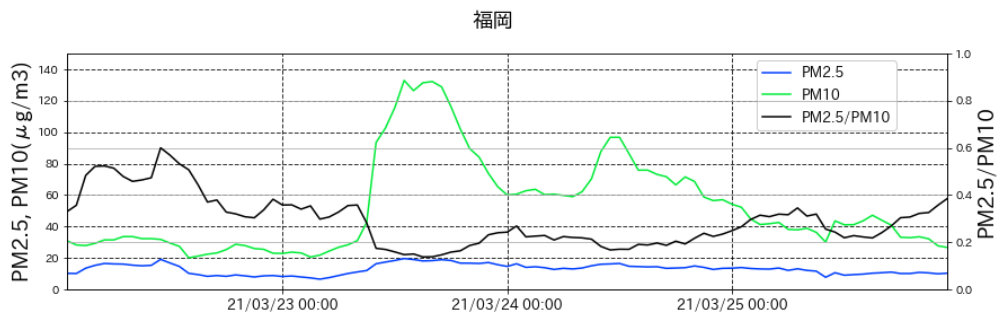
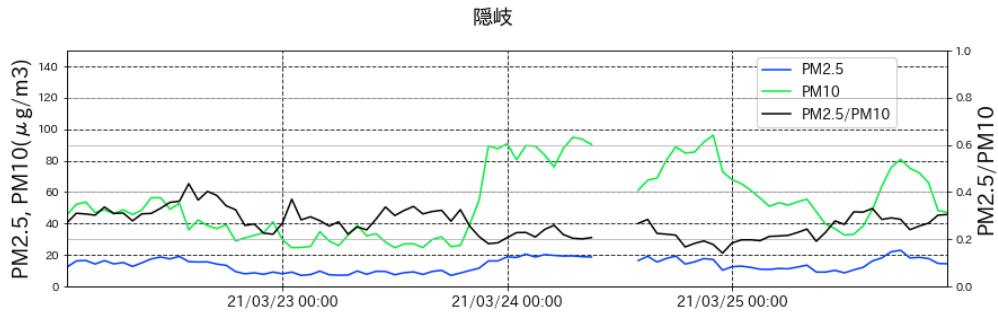
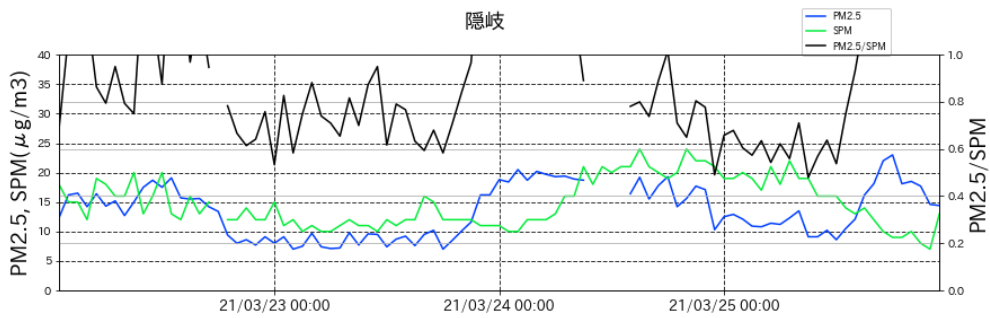


図 7-1-3 事例 2 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列



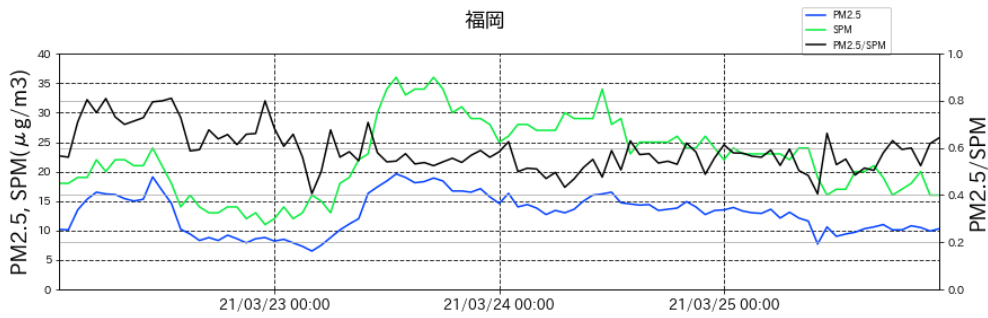


図 7-1-4 事例 2 における各観測地点の PM2.5、SPM、PM2.5/SPM 時系列

以下、表 7-1-1 の 2 事例を弱い黄砂と仮定し、解析を実施する。

7.2 ライダーデータ並びに SPM 濃度の時系列変化

ここでは、前節において表 7-1-1 に示した 2 事例について、それぞれライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度の時系列変化を確認することにより、ライダーデータを用いた黄砂検出手法の検討を行う。なお時系列は、いずれの事例についても表 7-1-1 に示した日の前後 1 日を含め図示した。また、ライダー黄砂消散係数については、150m～270m のデータを平均し、更に 15 分毎の測定値 4 つの中央値を取ることに より、1 時間毎の値として図示した。

まず、表 7-1-1 事例 1 の各地点におけるライダーデータ及び SPM 濃度の時系列変化は、以下の図 7-2-1 及び図 7-2-2 の通りとなった。図 7-2-1 からは、5 月 12 日 18 時頃に、ライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度のいずれも増大している様子が見られる。また図 7-2-2 からは、5 月 14 日午後から 15 日午前にかけて SPM 濃度が増加していることが見て取れる。ただし、この時間帯におけるライダーデータは欠損となっていた。これらの時系列変化は、表 7-1-1 に示されている時間とも整合している。

続いて、表 7-1-1 事例 2 の各地点におけるライダーデータ及び SPM 濃度の時系列変化は、図 7-2-3 及び図 7-2-4 に示す通りとなった。図 7-2-3 からは、SPM 濃度に関しては増減の様子はあまり明瞭ではないものの、ライダーデータに関しては 3 月 23 日 18 時頃に極大となったことが見て取れる。また 図 7-2-4 に示した通り、松江におけるライダーデータは 3 月 24 日 0 時頃から緩やかに増加し、正午頃に極大となったことがわかる。SPM 濃度もほぼ同時に緩やかに極大値をとり、その後も 25 日 6 時頃まで $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度の値をとっていた。

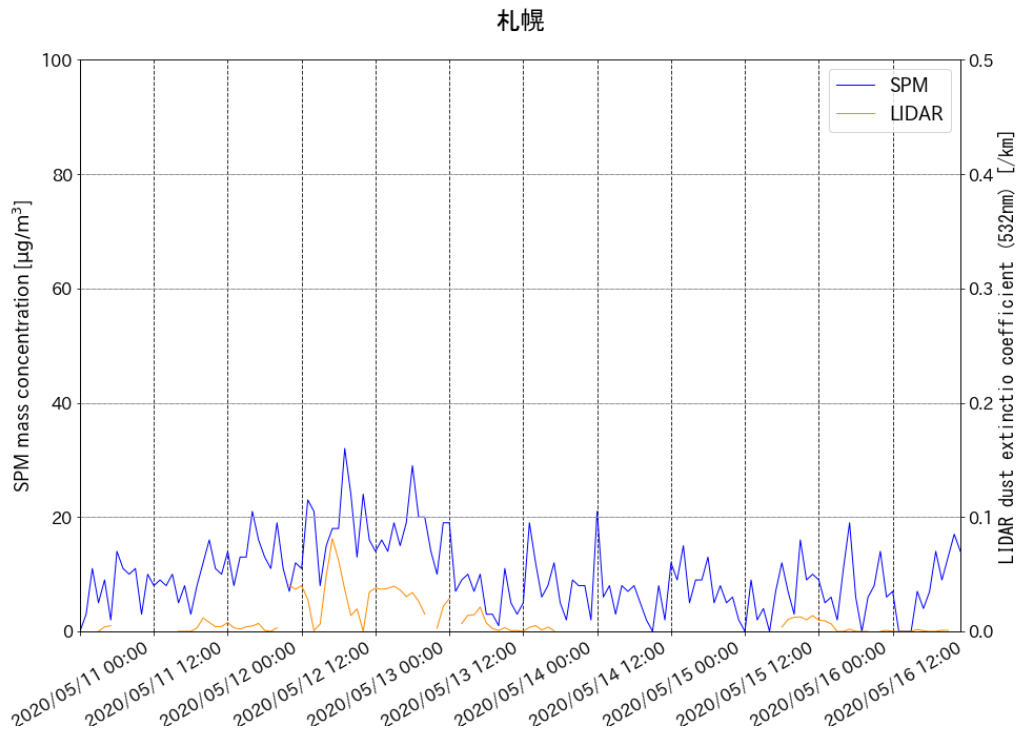


図 7-2-1 ライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度の時系列変化 (札幌)

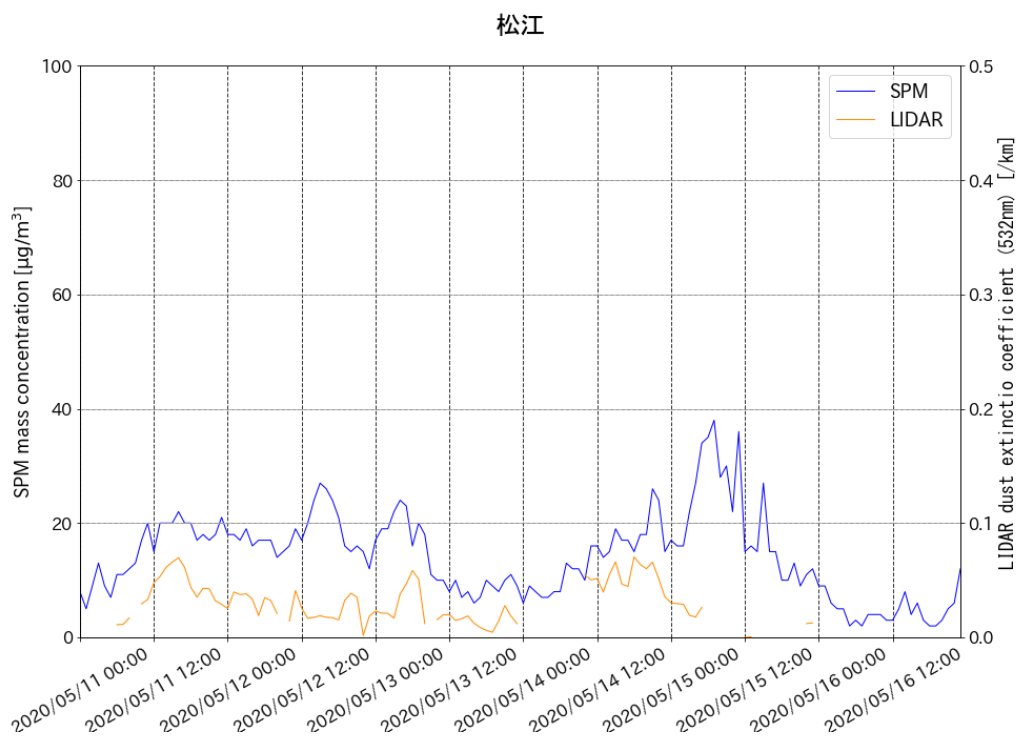


図 7-2-2 ライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度の時系列変化 (松江)

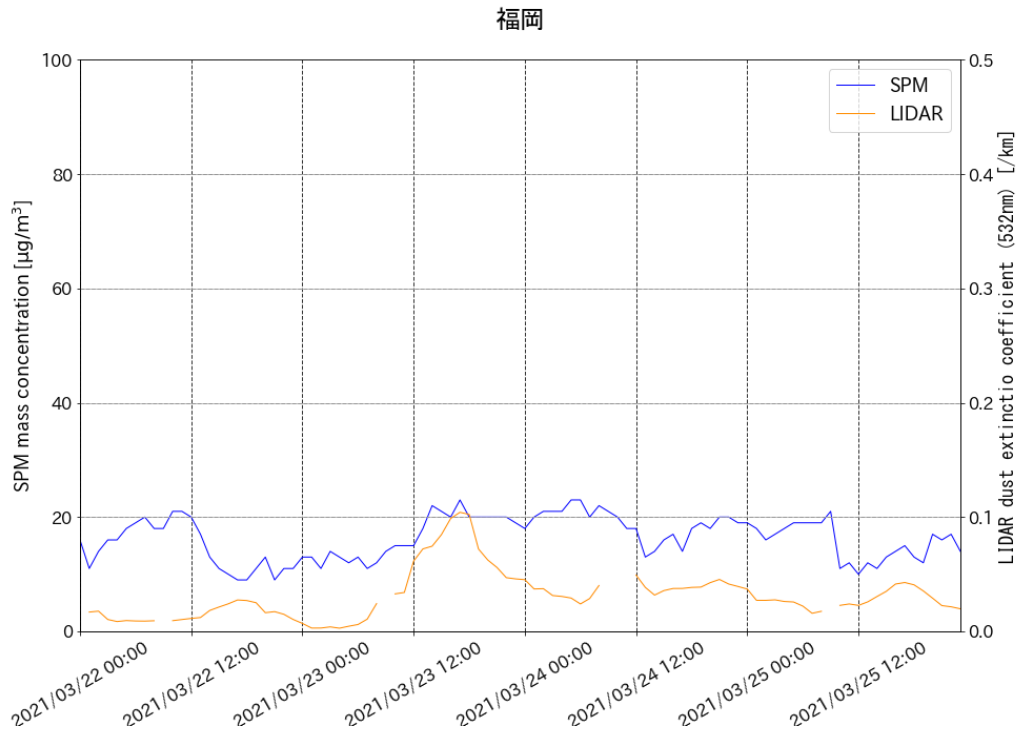


図 7-2-3 ライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度の時系列変化 (福岡)

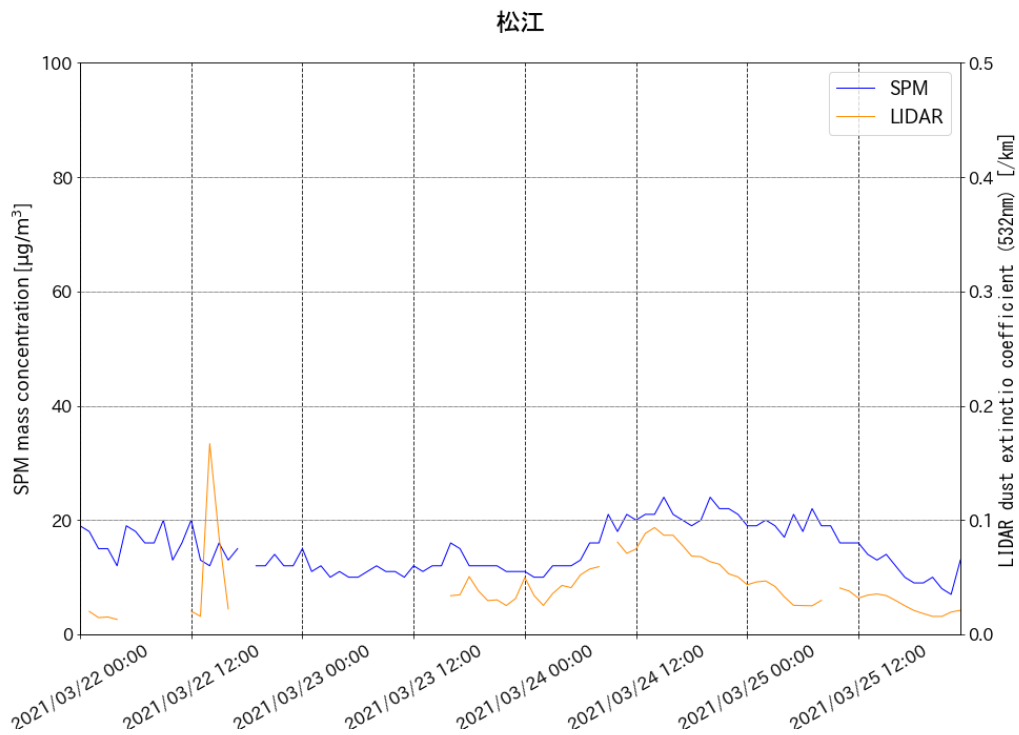


図 7-2-4 ライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度の時系列変化 (松江)

最後に、これらの事例について、ライダー黄砂消散係数と SPM 濃度の最大値・欠損割合及び相関係数を調べたところ、表 7-2-1 の通りとなった。

表 7-2-1 ライダー黄砂消散係数及び SPM 濃度の経時変化の最大値と相関係数

事例		1		2	
測定地点		札幌	松江	福岡	松江
SPM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	最大値	32	38	23	24
	欠損割合	0%	0%	0%	1%
LIDAR [$/\text{km}$]	最大値	0.08	0.07	0.10	0.17
	欠損割合	36%	38%	6%	32%
相関係数		0.47	0.35	0.44	0.43

過年度までに実施した、ライダーデータ及び SPM 濃度を用いた黄砂検出手法の検討においては、以下の①～④の条件に基づいて黄砂の可能性があると考えられる日を抽出していたが、表 7-2-1 の結果をこれらの条件と比較すると、①・④は満たしているものの、②・③は満たしていないことがわかる。今回の事例のように弱い黄砂の検出を目的とした場合について、今後、同様の解析を通じて情報を蓄積することにより、②及び③の条件に代わる定量的な基準の検討が必要となると考えられる。

【過年度における検出条件】

- 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 から 15 時間のものは相関係数が 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

7.3 SPM 頻度分布を用いた黄砂検出手法の検討

的場ら (2005)¹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、2020 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

¹ 的場澄人, 森育子, 早狩進, 西川雅高, SPM を利用した黄砂検出の新たな試み, エアロゾル研究/20 巻 3 号 (2005)

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 7-3-1 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 7-3-1 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的环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の的場ら (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、2020 年度の各地点の SPM 頻度分布図を図 7-3-2 に、設定した閾値を表 7-3-1 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ている。

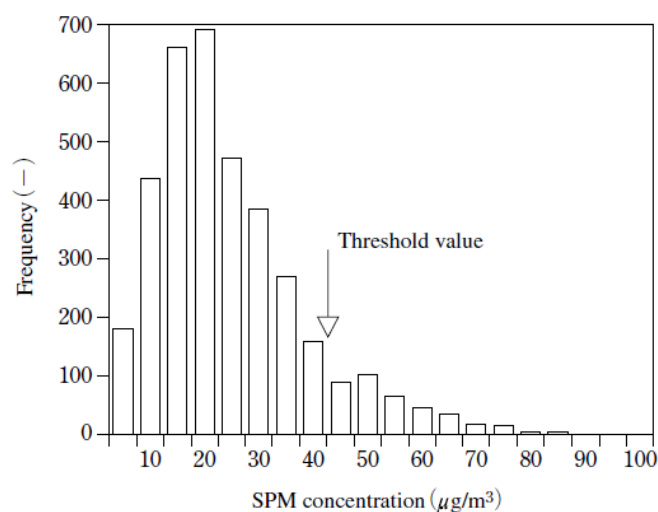


図 7-3-1 1999 年 1 月～5 月における宮津市で観測された SPM 濃度 (的場ら (2005))

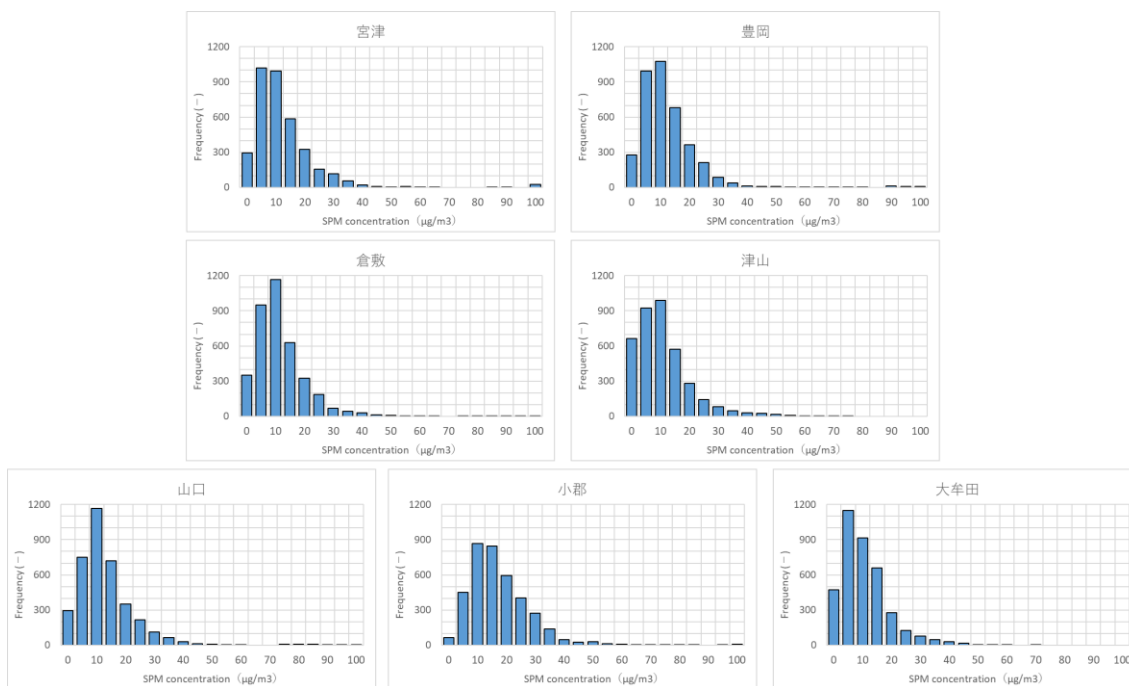


図 7-3-2 2020 年 1 月～5 月に観測された SPM 濃度

表 7-3-1 2020 年度における SPM 濃度の閾値

観測地点	2020 年度閾値
宮津	55
豊岡	80
倉敷	80
津山	65
山口	75
小郡	80
大牟田	70

(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カ所の測定局を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 7-3-2 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 8 日間あり、8 月 4 日から 8 月 9 日は煙霧が、3 月 29 日、3 月 30 日は気象庁の黄砂観測でも黄砂が観測されていた。一方、2.1 の PM_{2.5}/PM₁₀ で抽出された 5 月 12 日から 15 日及び 3 月 23 日から 24 日については、この手法では抽出できない結果となった。

表 7-3-2 2020 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
2020 年	5 月 30 日
	8 月 4 日
	8 月 5 日
	8 月 6 日
	8 月 7 日
	8 月 8 日
2021 年	3 月 29 日
	3 月 30 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 2020 年 5 月 30 日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 7-3-3 に 2020 年 5 月 30 日における気圧配置を示したが、中国黄土地帯に低気圧が見られたものの、前線が確認できなかったため、黄砂型の気圧配置ではないと考えられる。

5 月 30 日は倉敷と小郡の西日本において、SPM 濃度が高くなっており、黄砂日として検出された。九州では例年 5 月下旬から 6 月中旬にかけて収穫後の「麦わら焼き (野焼き)」が行われていたため、この影響により、SPM 濃度が高くなった可能性が考えられる。

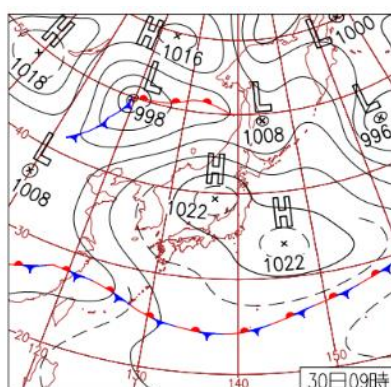


図 7-3-3 2020 年 5 月 30 日における気圧配置

7.4 人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討

本節では、黄砂飛来状況の評価・包括的解析手法として、人工衛星を用いた黄砂検出手法の可能性について検討結果を報告する。その目的としては、前節までに検討した黄砂検出手法の弱点、即ちライダー

一観測が荒天時に欠測となってしまうこと、及び大規模黄砂が減少している昨今において SPM 濃度が低下傾向にあることの二点を補うため、黄砂飛来状況をより直接的に把握できる観測手法が期待されていることによる。

過年度までの業務において、気象衛星ひまわり 8 号による観測結果が検討され、Dust RGB 画像処理を施すことにより、黄砂が識別できることが報告されていた。一方で、日本海周辺で雲が発生しやすいこと、国内においてライダー観測が不可能な荒天時にも観測可能であることを考慮すると、観測範囲は日本周辺ではなく、黄砂発生源域の方が望ましいと考えられる。以上の経緯から、本年度は、韓国・中国における人工衛星観測を対象に調査を行い、中国により打ち上げられた静止衛星「風雲」(Fēngyún、略称 FY) が有用であるとの結論が得られた。

風雲 4 号は、2033 年までに全 5 機の打ち上げが予定されている静止衛星であり、1 機目の FY4-A が 2016 年 12 月に、2 機目の FY4-B が 2021 年 6 月に打ち上げられ、現在 2 機とも稼働している。Advanced Geostationary Radiation Imager(略称: AGRI)と呼ばれる、可視光から赤外線までをカバーする 15 チャンネルの撮像素子が搭載されており、0.5km~4k 解像度による中国国内、及び全球についての観測データが提供されている。特に黄砂に関連するデータとして、砂塵嵐発生状況が Dust Storm Detection というデータとして公開されていることから、上記の目的に適う黄砂検出手法として期待される。

7.5 弱い黄砂事例

(1) 弱い黄砂事例 1 : 2020 年 5 月 12 日~5 月 15 日

本事例においては、5 月 12 日に札幌で、5 月 14 日に隠岐で PM₁₀ の値が 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となり、かつ PM_{2.5}/PM₁₀ の値が 0.2 以下となった(表 7-5-1-1)。また、この前後の 5 月 13 日、15 日には気象庁で黄砂が観測された黄砂日となっている。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況をみると(図 7-5-1-1)、黄砂観測前の 5 月 10 日、11 日に中国や内モンゴル自治区、モンゴルの比較的広い範囲で Dust や Duststorm が発生していた。また、弱い黄砂と思われる 5 月 14 日の前日、黄砂日であった 5 月 15 日の前々日の 5 月 13 日にはモンゴルで Slight Duststorm が発生していた。その後、5 月 14 日から 15 日にはモンゴル国内の広い範囲で Dust や Duststorm が見られた。この時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、5 月 13 日、14 日から遡る流跡線が砂塵嵐発生域の近くを通っていることがわかり、大陸からの移流があったことが示唆される(図 7-5-1-2)。

図 7-5-1-3 は粗大粒子成分、微小粒子成分の SO₄²⁻ と NO₃⁻ の時間変化を示すが、札幌においては弱い黄砂と仮定された時間帯である 5 月 12 日 19:00 頃から粗大粒子の濃度が増加し、黄砂日である 13 日の午後にかけて大きな値となっている。この傾向は新潟巻や大阪、福岡など他の地点でも見られる。また 5 月 14 日の隠岐のデータには弱い黄砂と仮定された時間帯で粗大粒子の NO₃⁻ 濃度にピークが見られる。この期間、札幌以外での他の観測地でも同様の傾向が見られる。図 7-5-1-4 に湿度と PM₁₀ の時間変化を示す。札幌においては 5 月 12 日の明け方ころから湿度が急激に下がり乾燥した空気塊が入ってきたことを示唆する。その後、時間が遅れて PM₁₀ の急激な上昇が見られた。これと同様な傾向は 5 月 14 日の隠岐でも見られる。

図 7-5-1-5 に新潟巻における各金属元素の時間変化を示す。自然起源、人為起源の元素全てで 5 月 11 日深夜から 13 日夜間にかけて他の期間と比較し濃度が高くなっている。図 7-5-1-6 は福岡における同様の図であるが、事例 1 の期間全体的に Ti、Fe、Si、Ca、Zn、Pb で高い値となっている。

以上と黄砂事例の結果を踏まえると、本事例は、東アジア域における Duststorm により発生した黄砂が、5月12日18:00頃から若干の人為起源系汚染物質を含み飛来し、北海道から北陸、西日本まで広がった比較的広範囲な黄砂事例とも考えられる。また、気象庁で観測された黄砂と弱い黄砂と仮定された黄砂日を統合すると比較的長期的な一連の黄砂事例である可能性を示唆している。

表 7-5-1-1 PM10 の値が 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となり、かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった観測地と時間帯

事例	期間	抽出条件を満たす観測地	抽出条件を満たす時間帯
1	2020/5/12-5/15	札幌	5/12 18:00-19:00、21:00
		隠岐	5/14 17:00-23:00

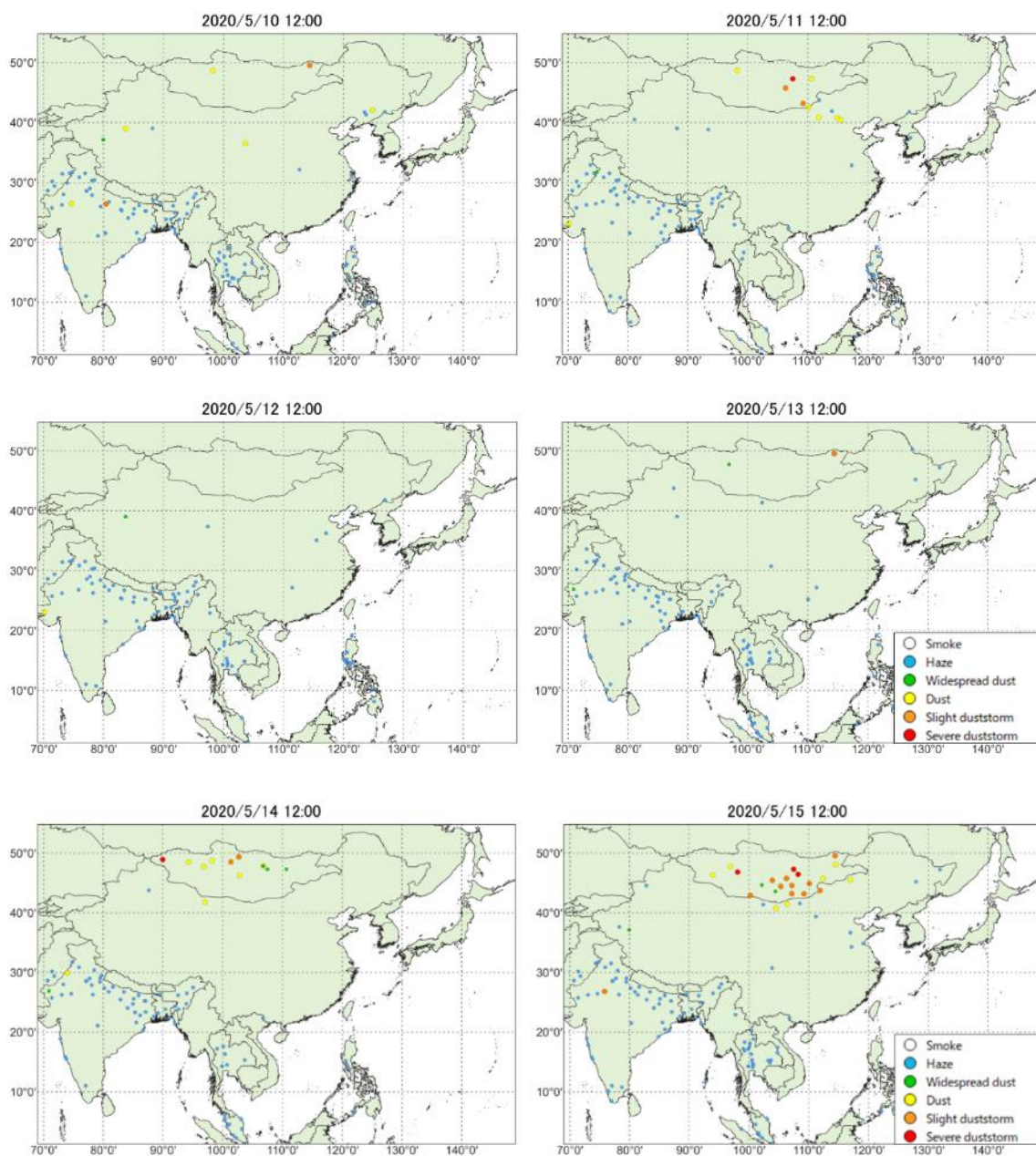


図 7-5-1-1 砂塵嵐発生状況

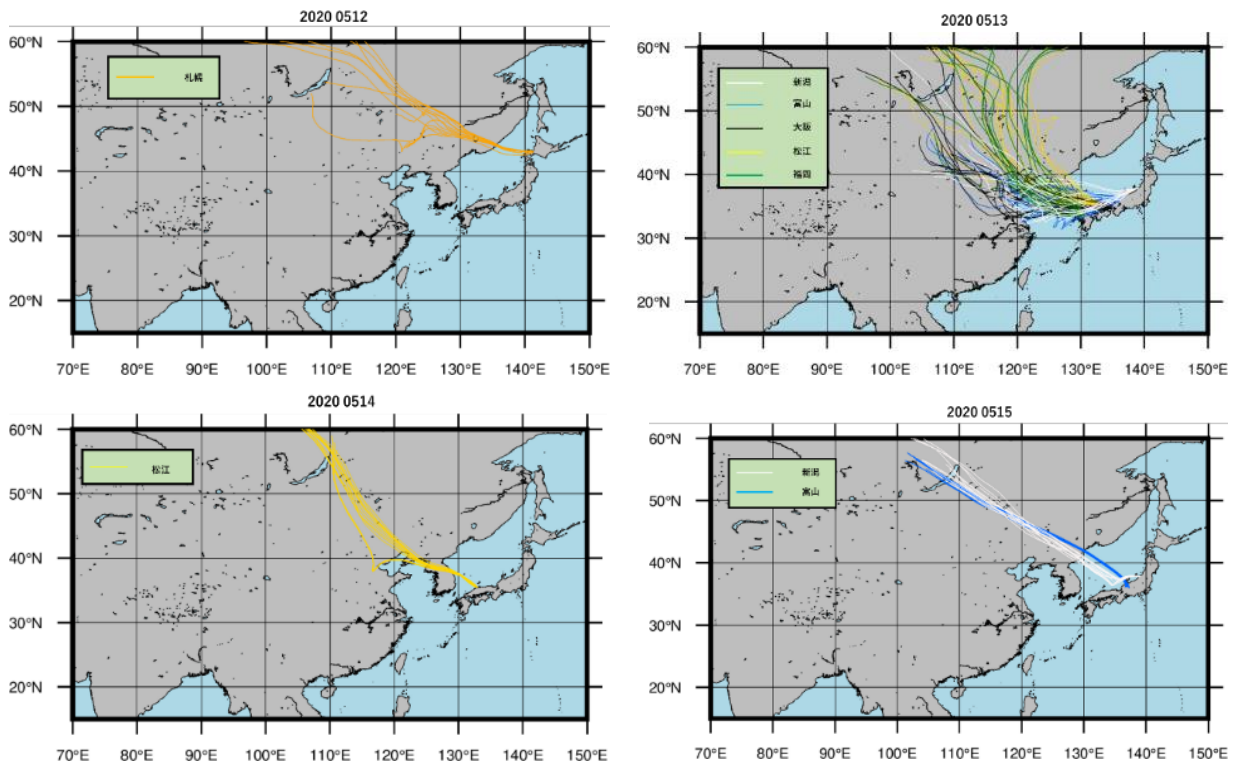
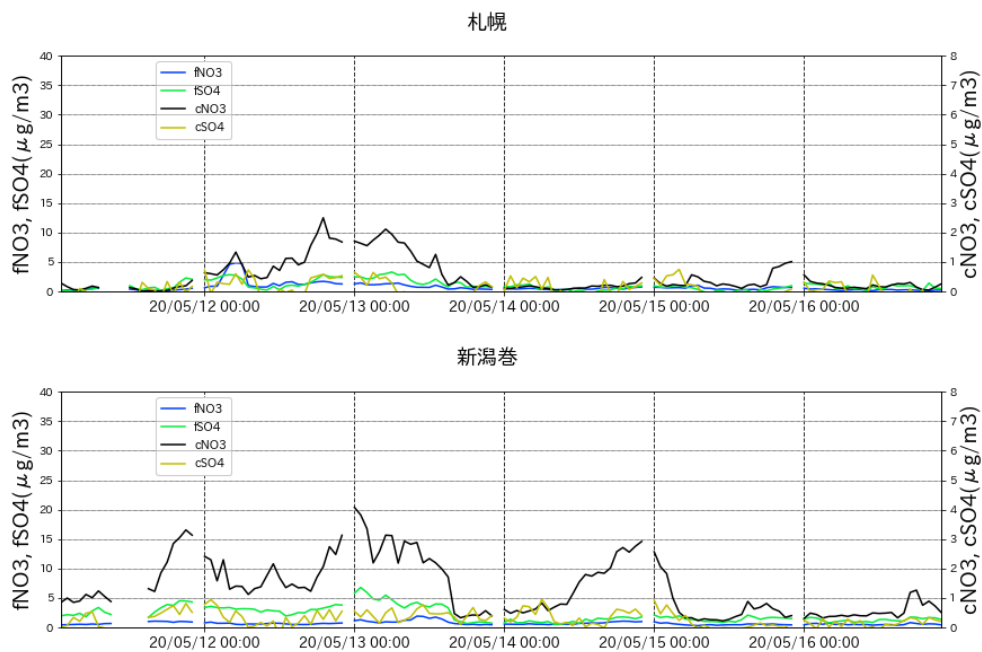


図 7-5-1-2 後方流跡線 (72 時間前より)。各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 12:00 までの 1 時間ごと 13 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、13 の後方流跡線が作図される。出発高度は、SPM 濃度との関連を評価するため地表面に近い 1500m とした。



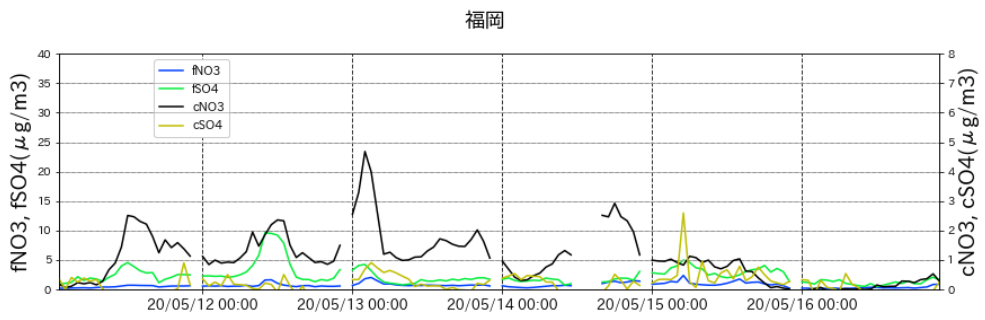
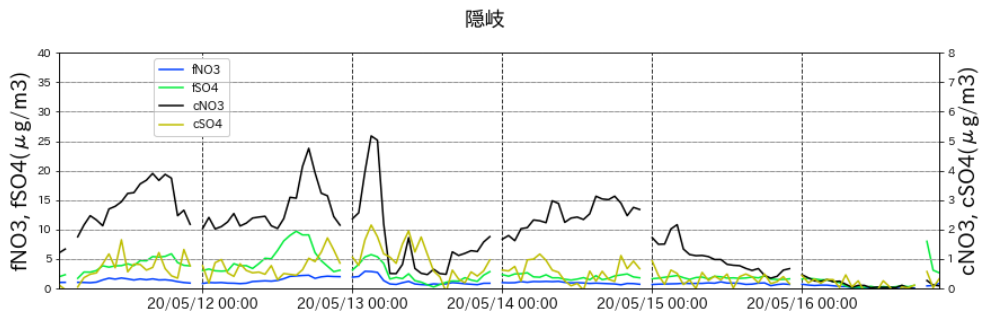
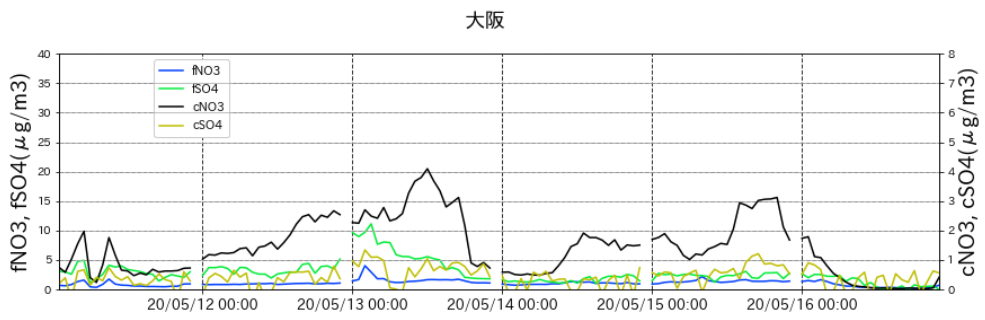
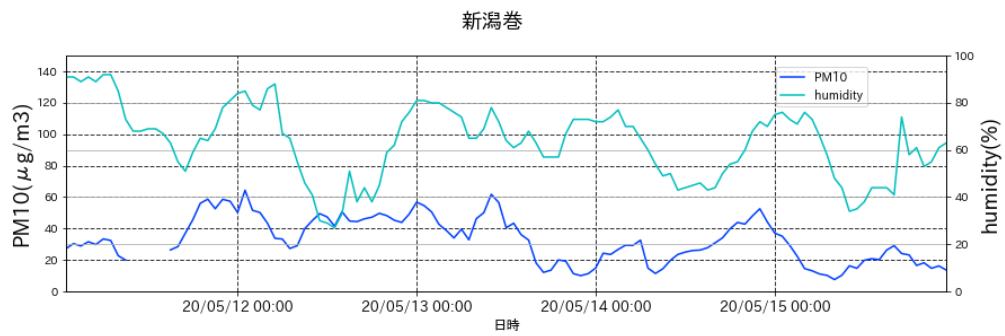
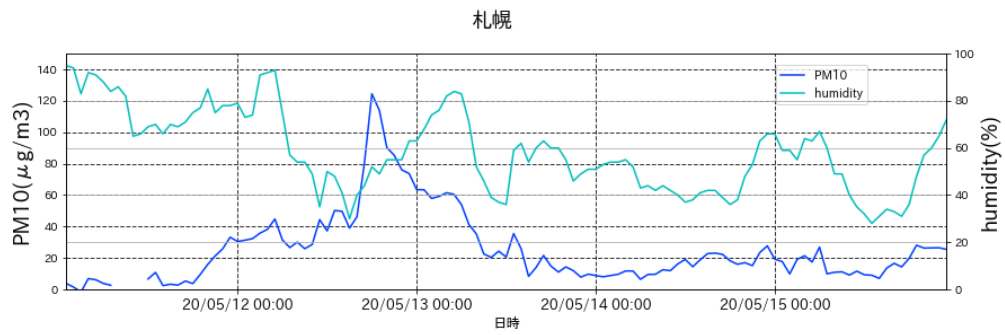


図 7-5-1-3 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO₄²⁻ と NO₃⁻



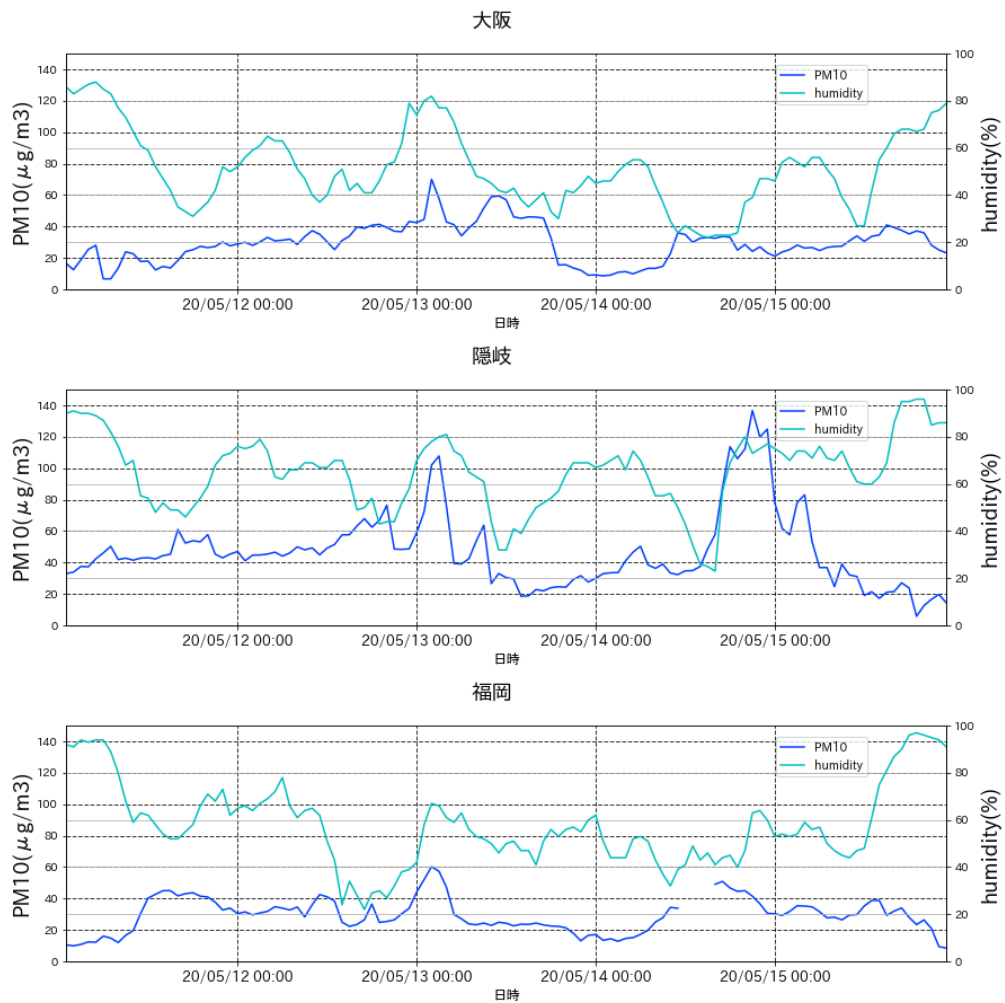
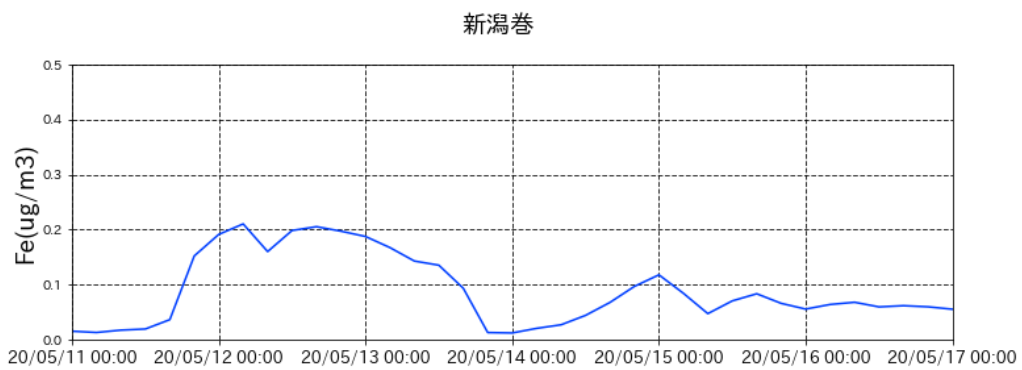
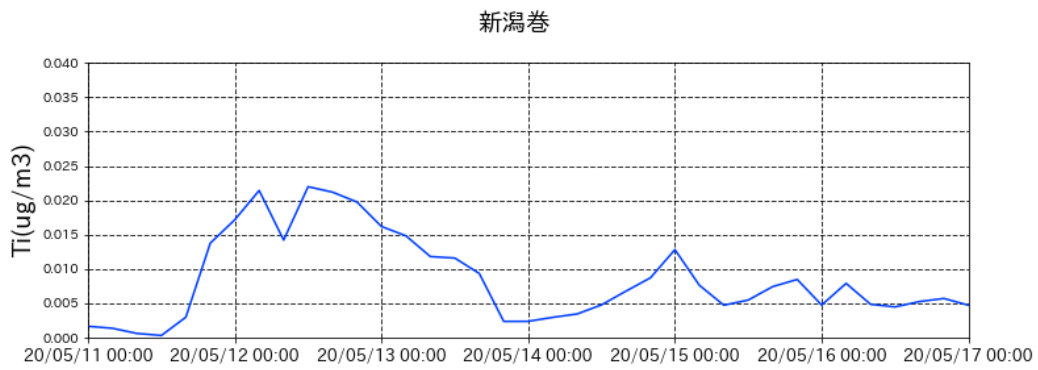
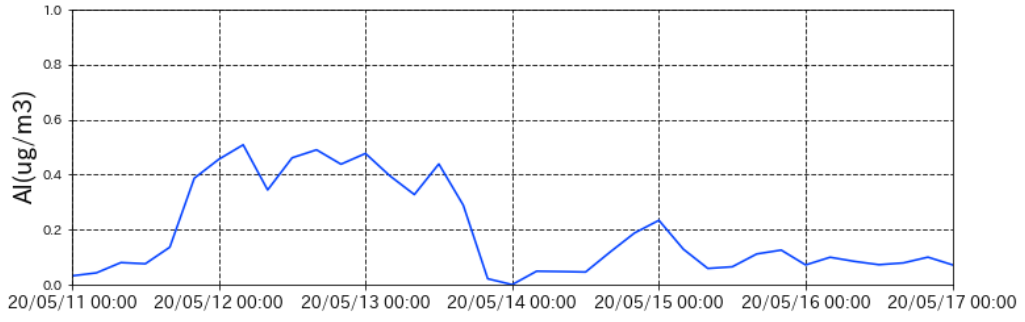


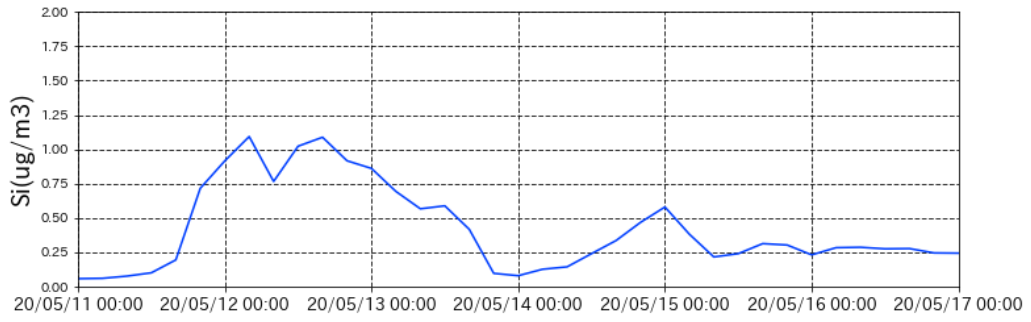
図 7-5-1-4 湿度と PM10 の時間変化。



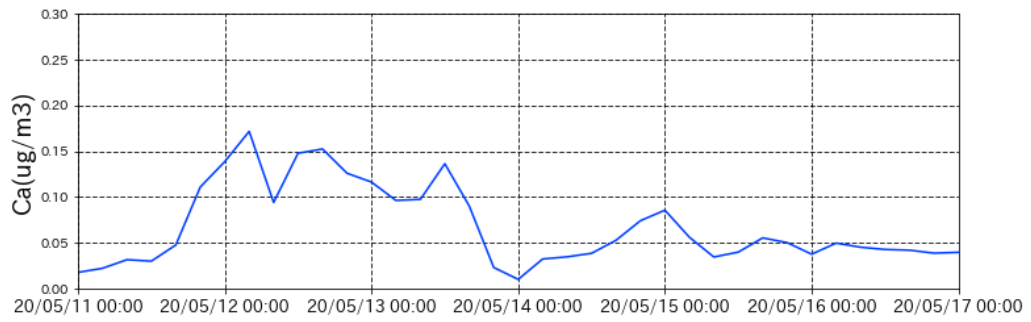
新潟巻



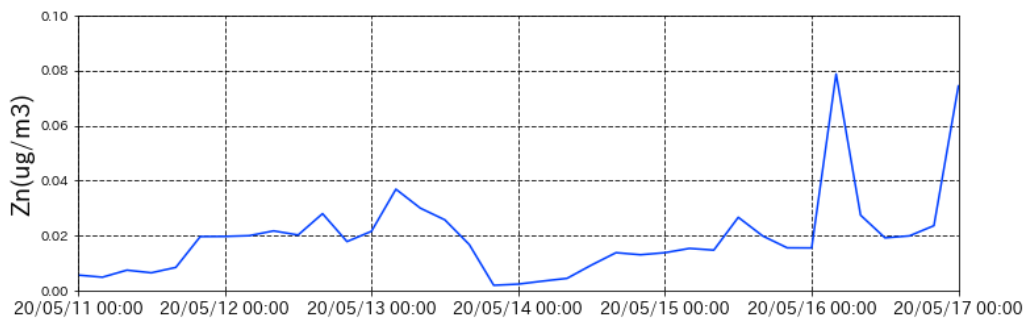
新潟巻



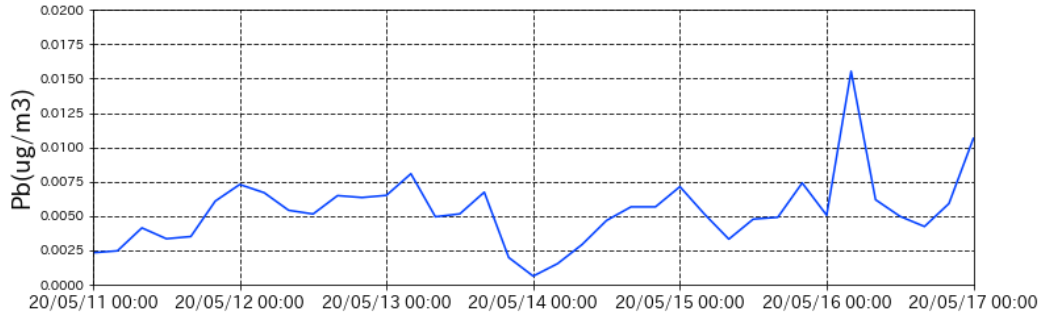
新潟巻



新潟巻



新潟巻



新潟巻

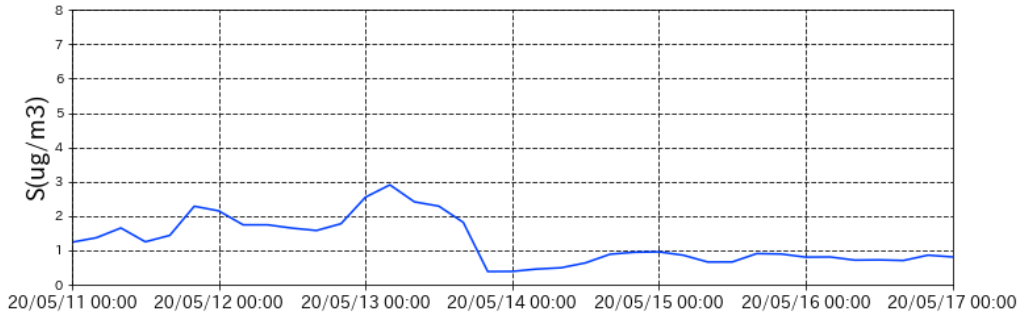
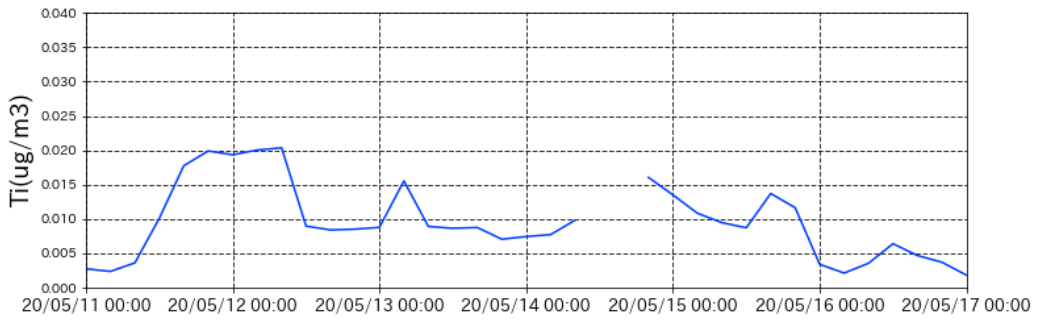
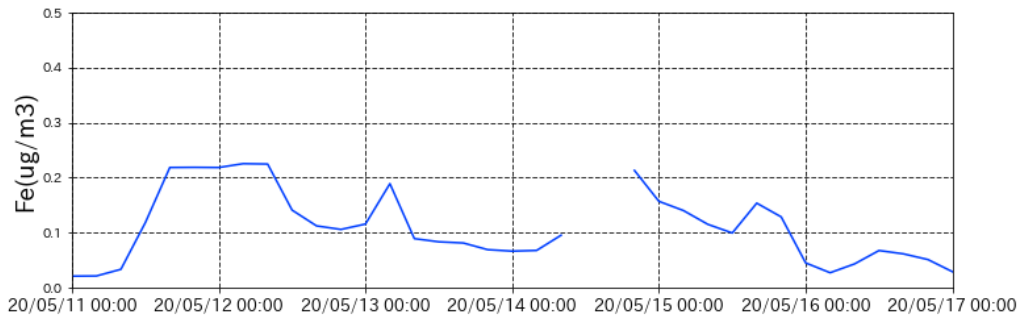


図 7-5-1- 5PX-375 による新潟巻における各金属成分元素

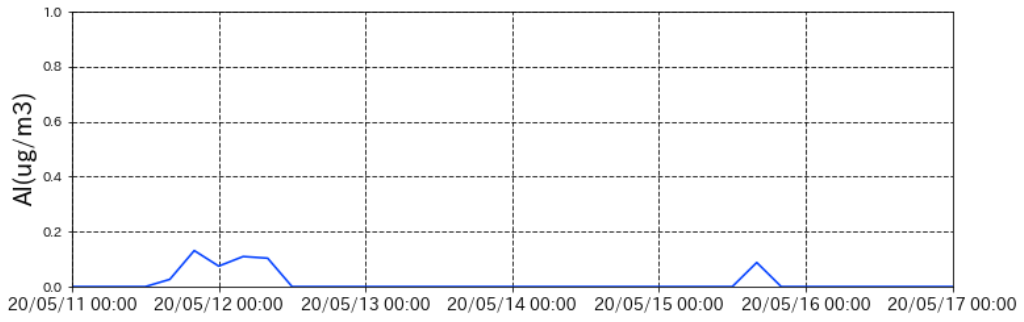
福岡



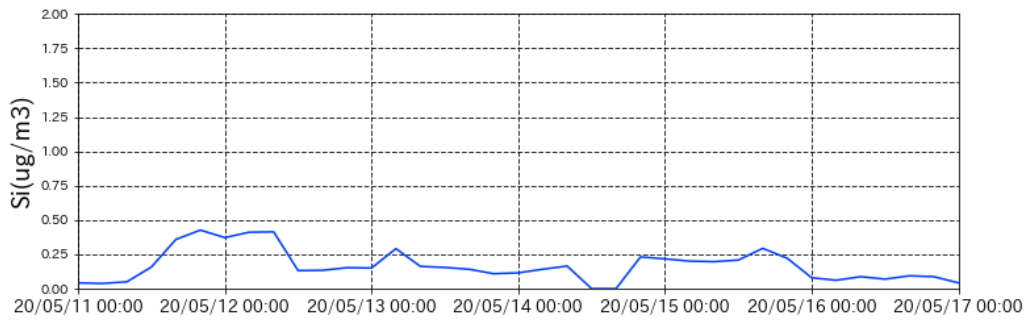
福岡



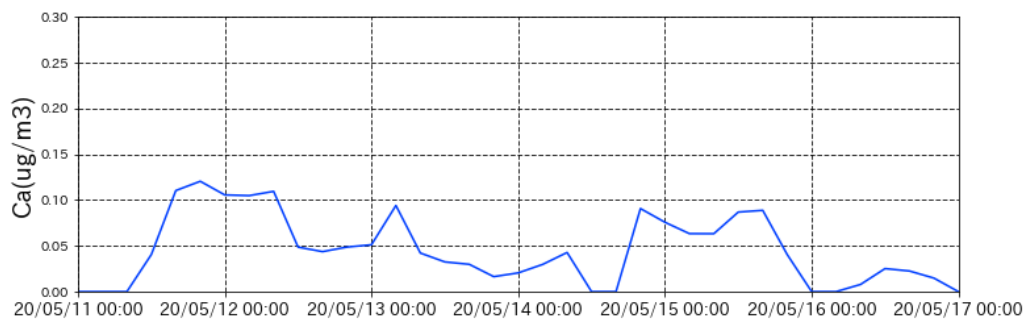
福岡



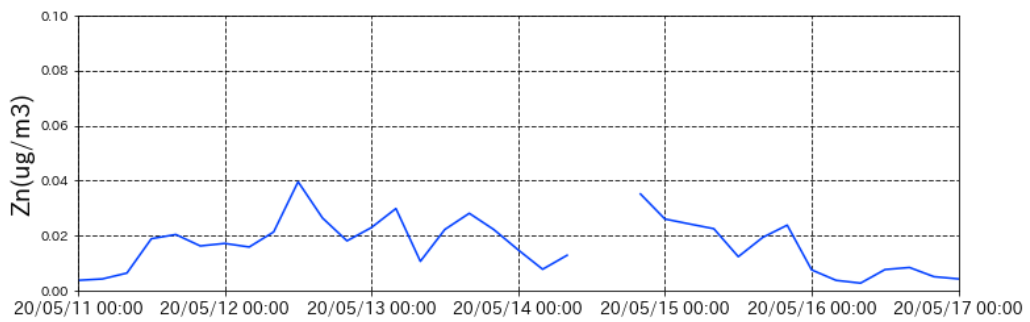
福岡



福岡



福岡



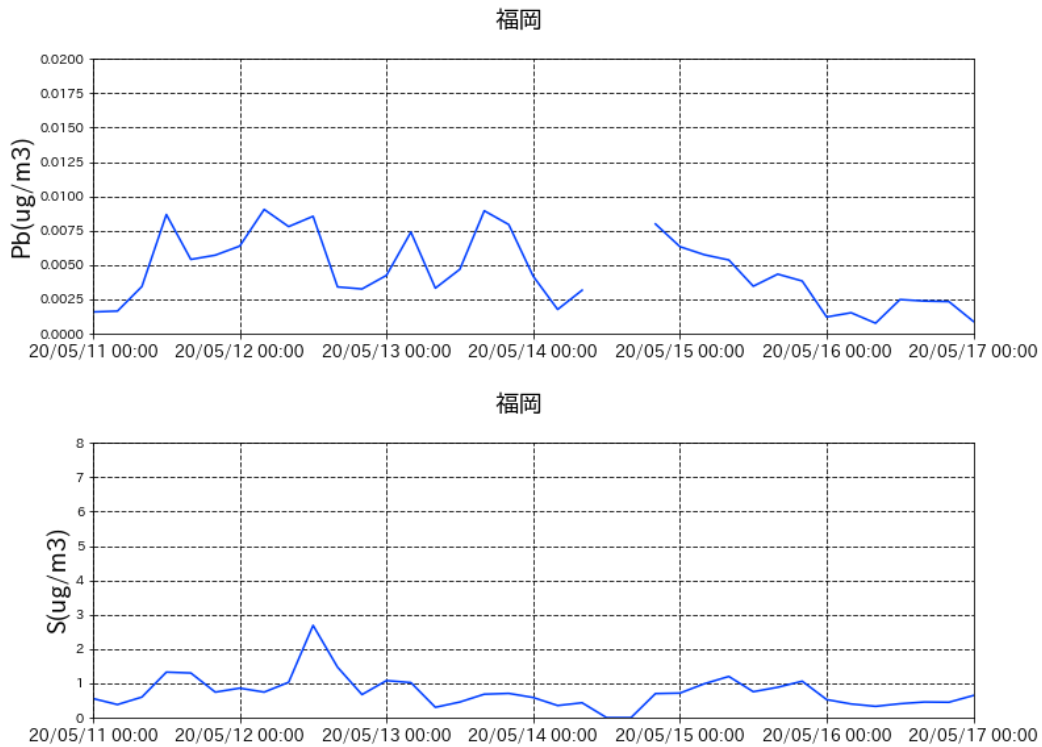


図 7-5-1-6 PX-375 による福岡における各金属成分元素

(2) 弱い黄砂事例 2 : 2021 年 3 月 23 日～3 月 24 日

本事例においては、3 月 23 日、24 日に隠岐、福岡で PM10 の値が $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となり、かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった (表 7-5-2-1)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると (図 7-5-2-1)、黄砂観測前の 3 月 21 日、22 日にモンゴルの数地点で Dust や Slight Duststorm が発生していた。この時の気流の状況について、後方流跡線で確認したところ、流跡線は砂塵嵐発生域の近くを通過していないように見える (図 7-5-2-2)。

図 7-5-2-3 は隠岐、福岡における粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4^{2-} と NO_3^- の時間変化を示すが、弱い黄砂と仮定された時間帯でどちらの観測地点においてもその時間帯には粗大粒子の NO_3^- が大きな値となっているのがわかる。図 7-5-2-4 に湿度と PM10 の時間変化を示す。隠岐においては 3 月 23 日午前から湿度の低い状態が継続している。また、湿度の低下に遅れて PM10 が急激に上昇している。福岡においては 3 月 23 日の午前中から夕方にかけて湿度の低い状態となっているが、その極小値と PM10 の極大値が一致しているように見える。その傾向は 3 月 24 日にも若干見られる。

図 7-5-2-5 に福岡における各金属元素の時間変化を示す。自然起源の全ての元素で 3 月 23 日深夜午前から 24 日夜間にかけて、それらの各濃度が高くなっており、少なくとも 2 つのピークが現れているが、そのピークは弱い黄砂と仮定された時間帯に含まれている。人為起源の金属については Zn、Pb に 3 月 23 日のピークが現れている。

以上より、本事例は、後方流跡線が砂塵嵐の発生域を通過していないものの、何らかの気流の影響により東アジア域における Slight Duststorm 起源の黄砂が、3 月 23 日 10:00 頃から、若干の人為起源系汚染物質を含み飛来し、九州地方から中部地方にかけ広がった弱い黄砂事例だったと示唆される。また、2021 年 3 月にはこの弱い黄砂と仮定された事例の他、気象庁で観測された 2 つの黄砂事例があった。2021 年 3 月は黄砂が比較的頻繁に飛来した月であった可能性がある。

表 7-5-2-1 PM10 の値が 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となり、かつ PM2.5/PM10 の値が 0.2 以下となった観測地と時間帯

事例	期間	抽出条件を満たす観測地	抽出条件を満たす時間帯
2	2021/3/23-3/24	福岡	3/23 10:00-21:00
		隠岐	3/23 22:00-23:00
		福岡	3/24 10:00-13:00
		隠岐	3/24 19:00-22:00

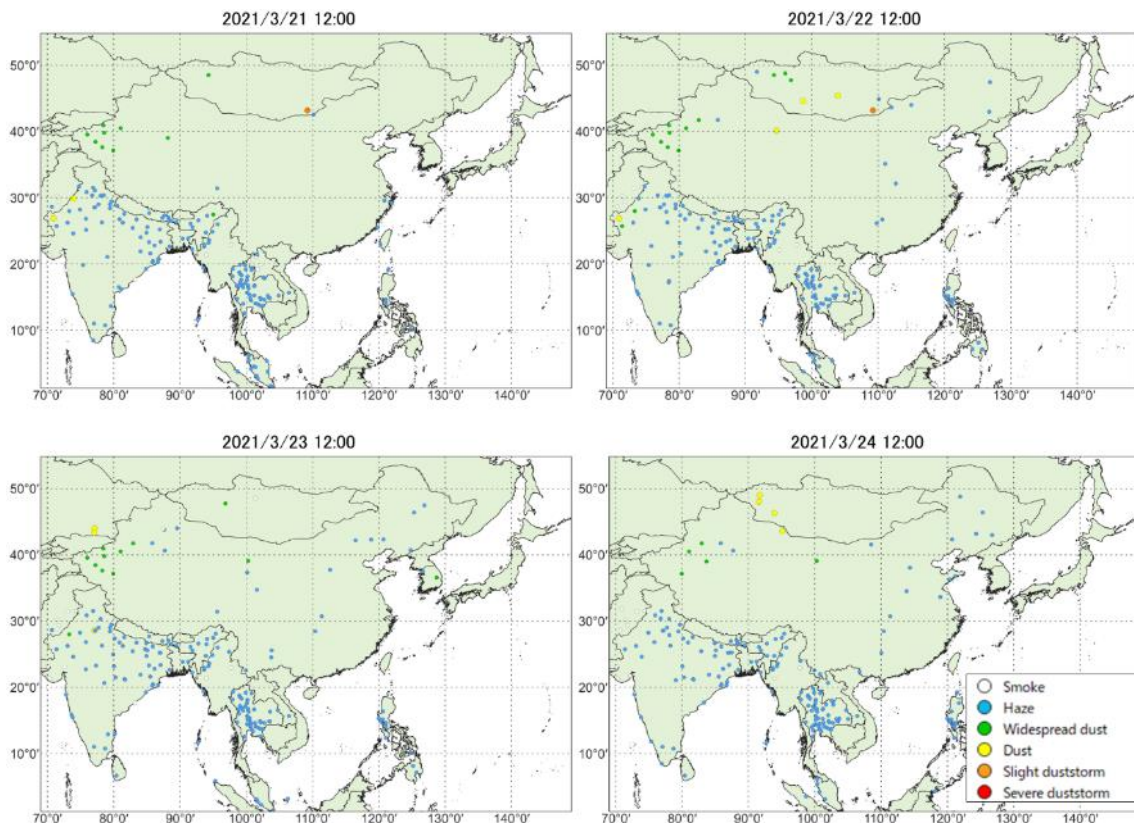


図 7-5-2-1 砂塵嵐発生状況

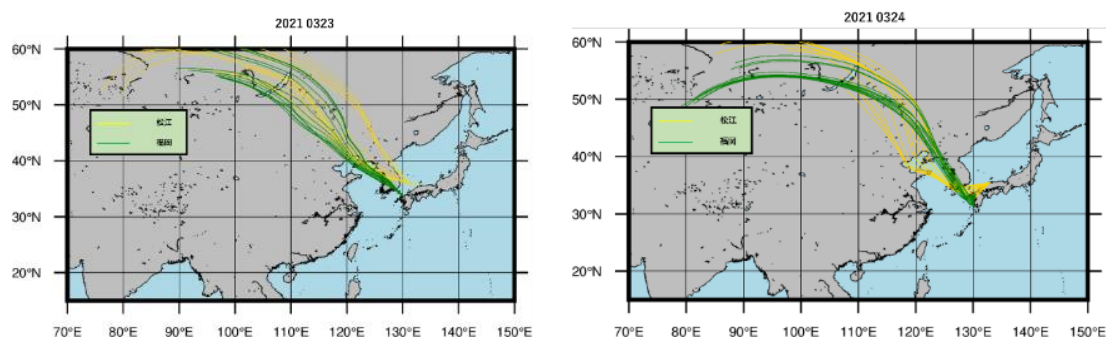


図 7-5-2-2 後方流跡線 (72 時間前より)。また、各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 12:00 までの 1 時間ごと 13 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、13 の後方流跡線が作図される。出発高度は、SPM 濃度との関連を評価するため地表面に近い 1500m とした。

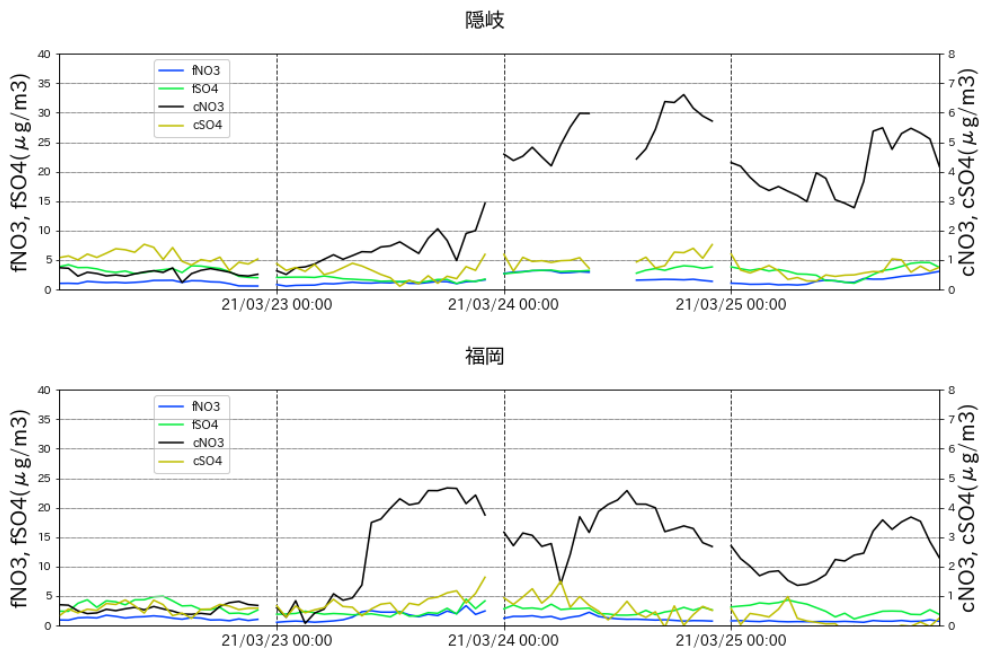


図 7-5-2-3 粗大粒子成分、微小粒子成分の SO_4^{2-} と NO_3^- 及びその比

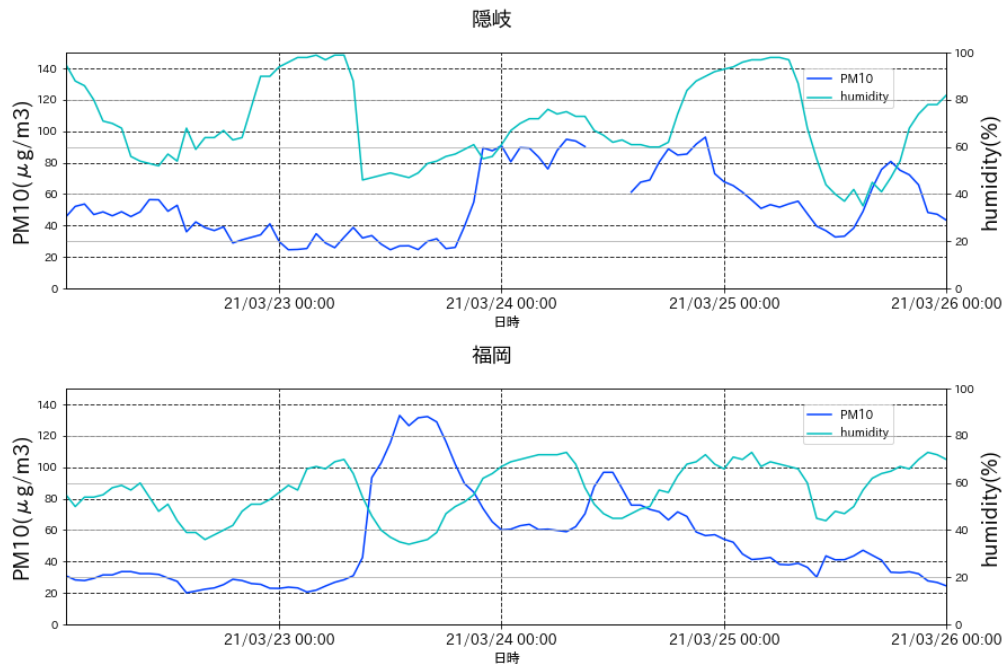
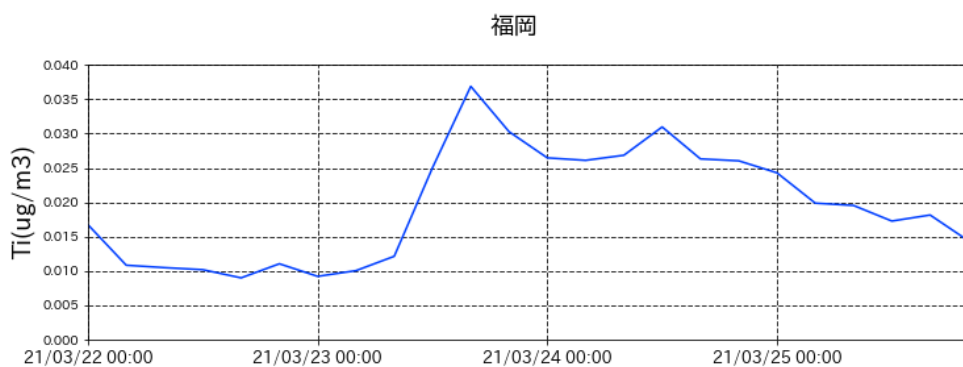
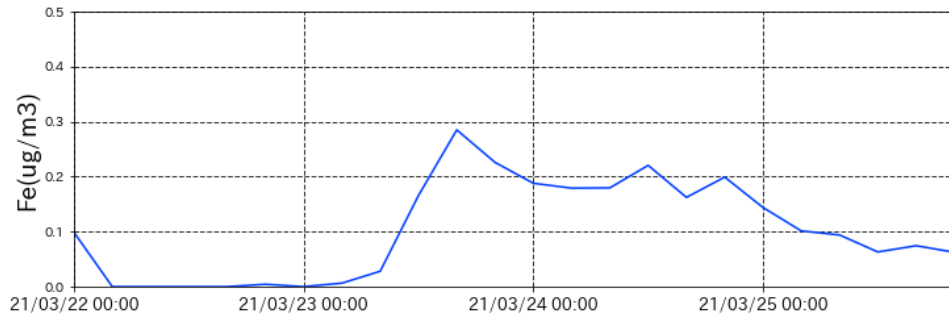


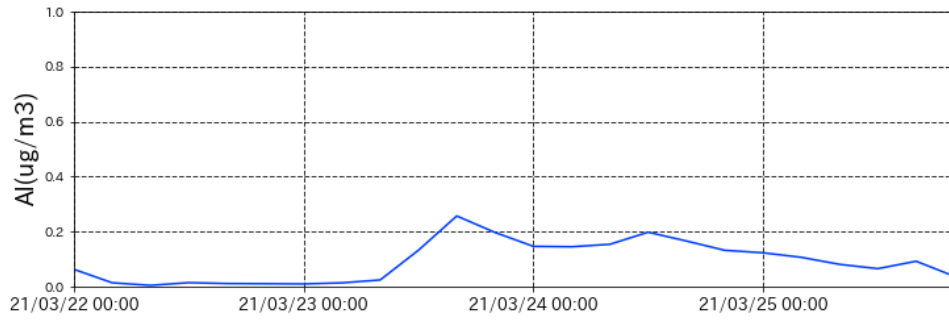
図 7-5-2-4 湿度と PM10 の時間変化。



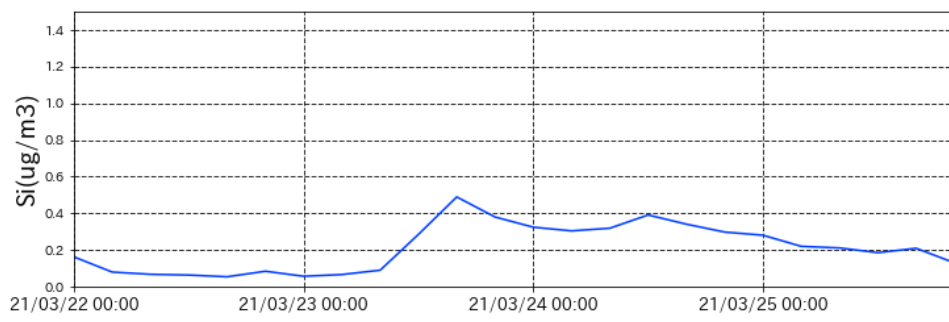
福岡



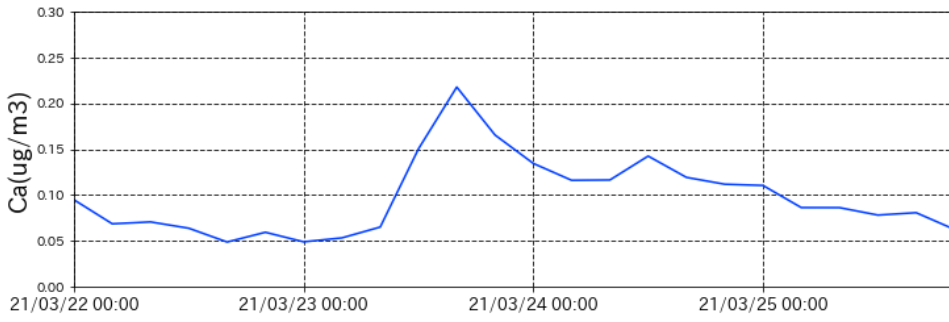
福岡



福岡



福岡



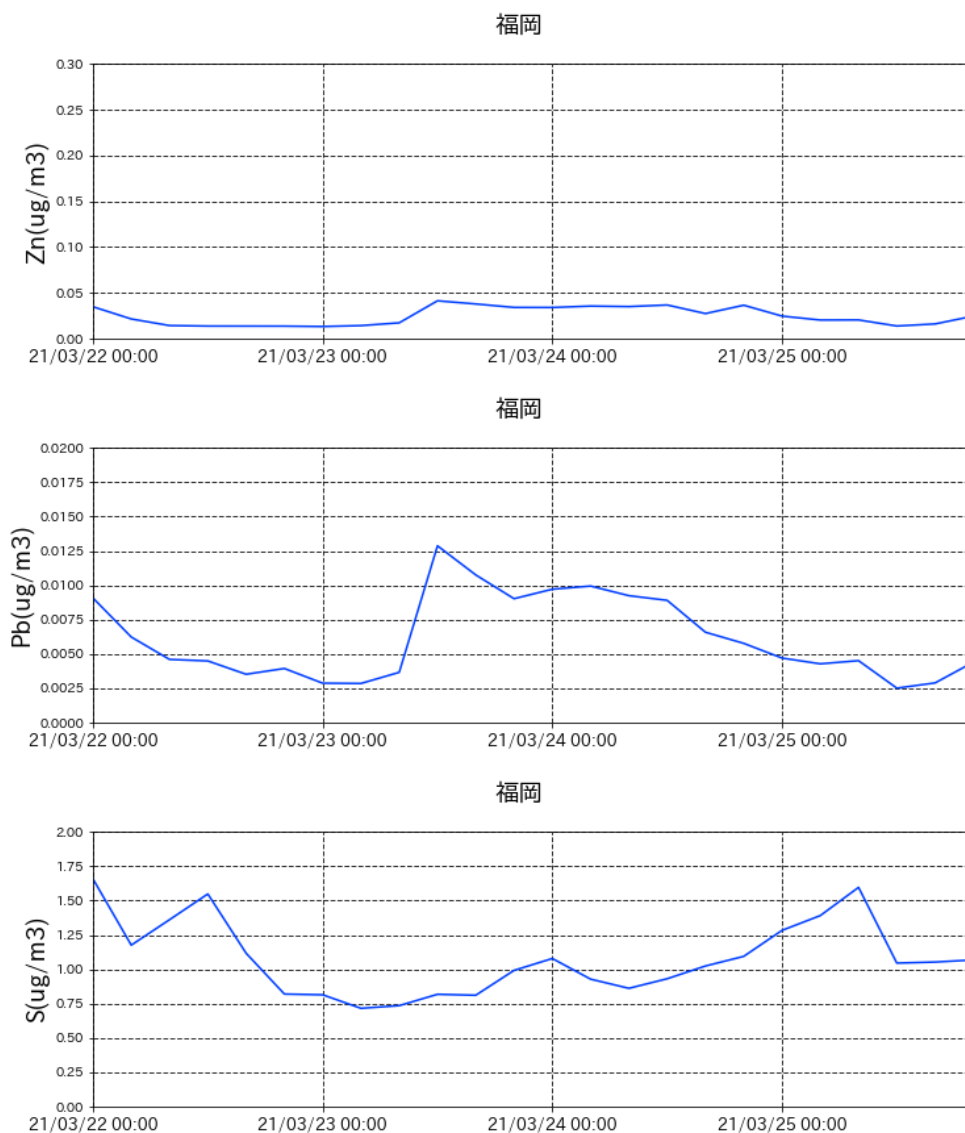


図 7-5-2-5 PX-375 による福岡における各金属成分元素

7.6 まとめ

ここでは、本年度の黄砂検出手法の検討として、PM_{2.5}/SPM 濃度比と PM_{2.5}/PM₁₀ 濃度比を比較し考察した。そのため PM₁₀ に対する PM_{2.5} の比が 0.2 以下、かつ PM₁₀ 濃度が 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の日時を抽出した結果、弱い黄砂と仮定された事例を 2 事例抽出した。また、同期間の PM_{2.5}/SPM 濃度比を調べた結果、PM_{2.5}/PM₁₀ 濃度比と同様な黄砂と思われる特徴は見取れなかった。

上記の 2 事例について、ライダー黄砂消散係数、及び SPM 濃度の経時変化を確認したところ、いずれの事例についても、抽出された日時前後において値が上昇する様子が見られた。その一方、上記 2 事例における SPM 濃度の最大値、及びライダーと SPM 濃度の相関係数は、過年度の調査における黄砂検出の基準には満たない値であった。これらの数値に関しては、同様の調査を通じた今後の情報の蓄積により、ライダー・SPM 濃度を用いた検出手法の定量的な指標の設定に有用となることが期待される。

また、的場ら(2005)の手法を用いて、黄砂日の検出を試みたところ、2020 年度は計 8 日間が抽出された。抽出された 8 日間のうち 2 日間は黄砂が、5 日間は煙霧が観測されており、的場ら(2005)の手法で新たに抽出された日は 1 日であった。また、PM_{2.5}/PM₁₀ を用いて抽出された弱い黄砂に関しては、抽出

することができない結果となった。

更に、人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討を行い、中国により打ち上げられた静止衛星「風雲4号」が有用であるとの結論を得た。風雲4号は、現在2機が稼働中で、中国域・全球の砂塵嵐発生状況の観測データが公開されている。これらのデータを、上述のライダーデータ・SPM濃度を用いた手法等と組み合わせることで、より多角的な観測が可能となると考えられる。

最後に、抽出された2事例について詳細に解析を行った結果、1事例は2020年5月13日、15日の気象庁黄砂日と一連の比較的長期的な黄砂事例であることが示唆された。また、2021年3月23日から3月24日の事例は、後方流跡線が明確ではないものの砂塵嵐の状況、粗大粒子のNO₃や自然起源の金属元素の時間変化を考慮すると弱い黄砂が飛来したことを示唆する事例であった。

8 今後の課題

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

今後の課題として、次の事項があげられる。

○黄砂は粒径が比較的大きい粒子の割合が大きいため、飛来時にSPM濃度が上昇することが知られているが、PM₁₀、PM_{2.5}濃度も上昇し、健康影響が懸念される研究報告もなされているため、今後も黄砂飛来状況の事例解析を継続するとともに、さらなる状況把握が必要である。

○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。今後はPX-375などのデータにより、金属成分が人為起源か否か元素比などを詳しく見て調べていくことも検討する。

○本年度のPM_{2.5}/PM₁₀比の解析により、弱い黄砂日の検出を行った結果、2020年度において弱い黄砂と思われる2事例が検出された。このように弱い黄砂の検出の際には、SPM濃度よりPM₁₀濃度を用いることで弱い黄砂を検出できる可能性が示されたため、ライダーデータ及びSPM頻度分布の検出手法においてもPM₁₀を用いた場合の検出可否について検討する必要がある。

○これまで活用してきた観測結果、モデル結果によるデータ解析のほかに、より直接的に黄砂飛来状況を確認する手法として、衛星データの活用による黄砂検出の検討も必要であると考えられる。そのため今後は、黄砂発生源のゴビ砂漠などのデータを含む中国の衛星（風雲4号）などの活用も検討する。その際、どのようなセンサーを搭載しているか等の情報も収集した上で、現在天気とのデータと比較しデータの品質を確認しながら活用していく方針である。

○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、発生源及び日本におけるモニタリングについての情報共有などを通し、黄砂問題検討会と日中韓三カ国共同研究と連携をさらに深めることによって、黄砂発生の減少及び混在する大気汚染物質減少につなげる必要がある。

参考文献リスト

1. 「環境省」 2021 : 令和元年度黄砂飛来状況調査報告書
2. 「環境省」 HP (環境省大気汚染物質広域監視システム) : <http://soramame.taiki.go.jp/>
3. 「気象庁」 HP(地球環境のデータバンク黄砂) :
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/kosahp/kosa_data_indexdex.html
4. 「気象庁」 HP (日々の天気図) : <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>
5. 「気象庁」 HP (過去の気象データ検索) :
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=&block_no=&year=&month=&day=&view=
6. 「国立環境研究所」 HP (ライダー (レーザーレーダー)) : <http://www-lidar.nies.go.jp/>
7. 「国立環境研究所」 HP(東アジア域黄砂・大気汚染物質分布予測(CFORS):
<http://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/index-j.html>
8. 「アメリカ海洋大気圏局 NOAA」 HP ARL HYSPLIT (後方流跡線) :
<http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajasrc.pl>
9. 「環境省」 HP PM2.5 モニタリングデータ (海外)
<http://www2.env.go.jp/pm25monitoring/index.html>
10. Sugimoto, N., A. Shimuzu, I. Matsui and M. Nishikawa (2016): A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using PM2.5-to-PM10 ratios, *Particuology*, 28, 114-120
11. ライダー観測によるダストの推定と地上観測によるエアロゾル質量濃度の比較 兼保直樹、杉本伸夫、清水厚、山本重一、河本和明 著、大気環境学会誌 第47巻 第6号 p.285 (2012)
12. SPM/PM2.5 からの黄砂判定の可能性-ライダー黄砂消散係数を指標として-清水厚、杉本伸夫、松井一郎、西澤智明 著、第33回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2015)
13. 「風雲4号」等衛星情報 : <https://directory.coportal.org/web/coportal/satellite-missions/f/fy-4>
14. WMOによる「風雲4号」データベース : https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/fy_4
15. 中国気象局による「風雲4号」ホームページ :
http://www.cma.gov.cn/en2014/news/Features/201509/t20150916_293082.html
16. Matoba, S., Mori, I., Hayakari, S., Nishikawa, M. (2005) : New Method of Detecting Kosa (Asian Dust) from SPM Data Measured by Environmental Air Monitoring Stations., *J. Aerosol Res.*, 20 (3), 225-230 (in Japanese)
17. Iwamoto, S. and Shimohara, T. (1993) : Relationship Between High Concentration of SPM Meteorological Conditions -Comparison Within Three Cities in Fukuoka Prefecture-, *J. Japan Soc. Air Pollut.*, 28, 330-340 (in Japanese)
18. 柳澤宏彰、飯野英樹、安藤忍、高木朗充、及川輝樹 (2002) : 西之島の2020年6~8月のバイオレント・ストロンボリ式噴火、火山、第65巻、p119-124
19. 九州地方8月上旬の煙霧は「西之島噴火」の噴煙が原因|研究|FUKUDAism (フクダイズム)|福岡大学 (fukuoka-u.ac.jp)

20. 環境省 微小粒子状物質の成分分析 大気中微小粒子状物質 (PM2.5) 成分測定マニュアル 3. 向き元素測定方法
21. 川端康弘、梶野瑞王、財前祐二、足立光司、田中泰宙、清野 直子 (2021) : 東京都心における視程の変化、天気、第 68 巻 1 号、p5-12