

## (8) 煙霧事例 8 2022年3月24日～25日

本事例は、2022年3月24日～25日に観測された煙霧で、3月24日に10地点、25日に14地点、主に日本海側から九州地方で煙霧が観測された（表 5-3-8-1、図 5-3-8-1）。

この期間の大陸の状況を見ると（図 5-3-8-3）、日本での煙霧観測日の前の3月22日～24日にかけて dust、slight duststorm が発生している。このときの気流を後方流跡線で確認したところ、ほぼ全ての流跡線で大陸からの経路となっており duststorm の発生域を通過している（図 5-3-8-4）。CFORS においても、dust 及び sulfate が中国東部から日本へ影響を及ぼしている様子が示されている（図 5-3-8-5）。

ライダー黄砂消散係数および SPM 濃度の経時変化の比較は、図 5-3-8-6 に示した通りである。長崎・松江・新潟の各地点で、24日正午から26日未明にかけて、SPM 濃度が上昇している様子が確認できる。黄砂消散係数については、変化は小さいものの、24日から25日にかけてやや上昇傾向にあり、新潟では25日午後にピークが見られる。PM2.5 濃度は、24日に北九州において、35～40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  と比較的高濃度となる地点が見られ、25日にも近畿地方などで20～30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  とやや高めの地点が多く見られた。（図 5-3-8-7）。

図 5-3-8-8 から PM2.5/PM10 比は五島において煙霧観測日の3月24日夜間から単調に減少している様子が顕著に見られ、その比は3月26日0:00頃には0.2を下回っていることがわかる。人為起源汚染物質の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>については隠岐以西では3月24日に、赤穂以東では3月25日に高い濃度値になっている傾向が見られる。特に隠岐における微小粒子の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超え、隠岐、赤穂における粗大粒子の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>は4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える濃度のピークとなっていることがわかる。

北京では、日本での煙霧が観測された煙霧観測日の3月27日昼頃と3月28日深夜に120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える高濃度の PM2.5 が見られる（図 5-3-8-9）。

以上から、本事例は、大陸で発生した dust、slight duststorm の影響を大きく受けた空気塊が、人為起源汚染物質を伴い飛来した事例であると考えられ、黄砂日と類似していると考えられる。

表 5-3-8-1 煙霧観測地点

日付	地点数	観測地点名									
2022/3/24	10	鳥取	福岡	下関	松江	長崎	金沢	彦根	佐賀	富山	津
2022/3/25	14	岐阜	津	金沢	富山	神戸	福井	京都	奈良	岡山	和歌山
		大分	新潟	彦根	高松						

2022年3月24日

- 未観測
- 黄砂観測地点
- 煙霧観測地点
- 黄砂・煙霧観測地点



2022年3月25日

- 未観測
- 黄砂観測地点
- 煙霧観測地点
- 黄砂・煙霧観測地点

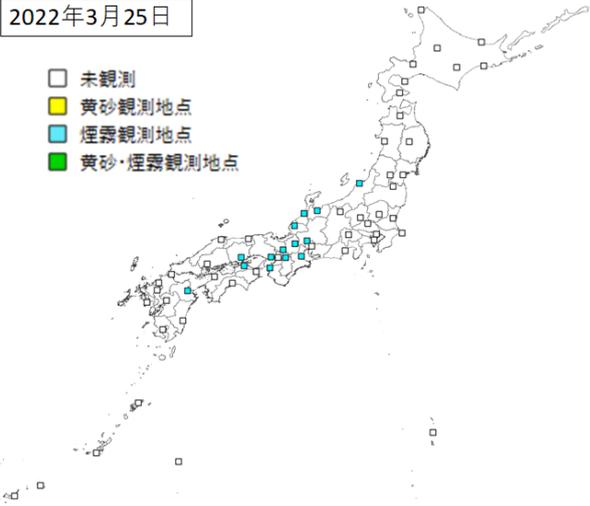
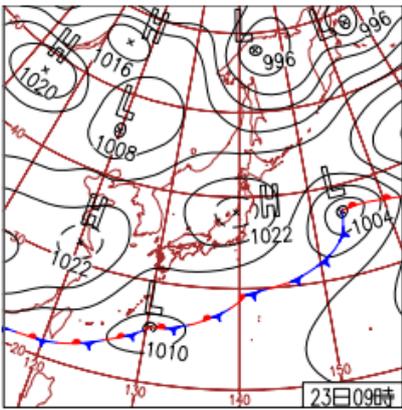
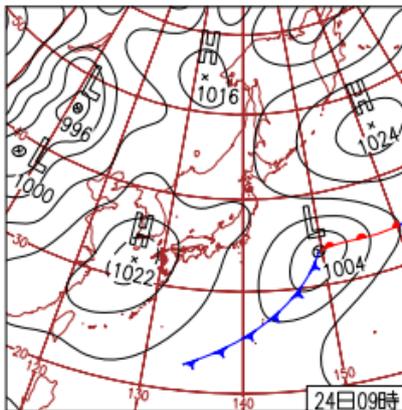


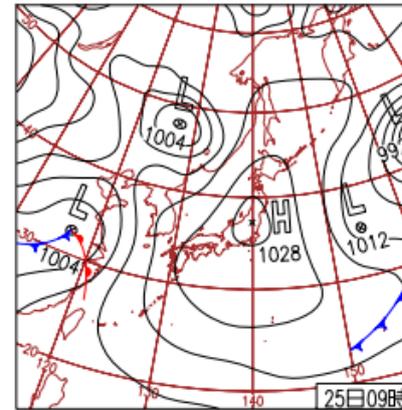
図 5-3-8-1 煙霧観測地点



**23日(水)西から次第に雨**  
 沖縄～西日本は雨。東日本も次第に雨や雪。北日本は日中晴れたが次第に曇り、夜は雪の所も。東日本～東北の最低気温は最も寒い時期を下回る。大分市と大阪市でサクラ開花。



**24日(木)京都市などでサクラ開花**  
 広く高気圧に覆われて日中は概ね晴れ。気圧の谷が通過したため、東日本～東北は明け方まで夕方以降に、所々で雨や雪。高松市、和歌山市、京都市、熊谷市でサクラ開花。



**25日(金)福島県で震度4**  
 高気圧は夜には日本の東へ。黄海に前線を伴った低気圧が北東進。西～北日本は概ね晴れ。熊本県八代の最大瞬間風速23.6m/sは3月1位。奈良市など4地点でサクラ開花。

図 5-3-8-2 天気図

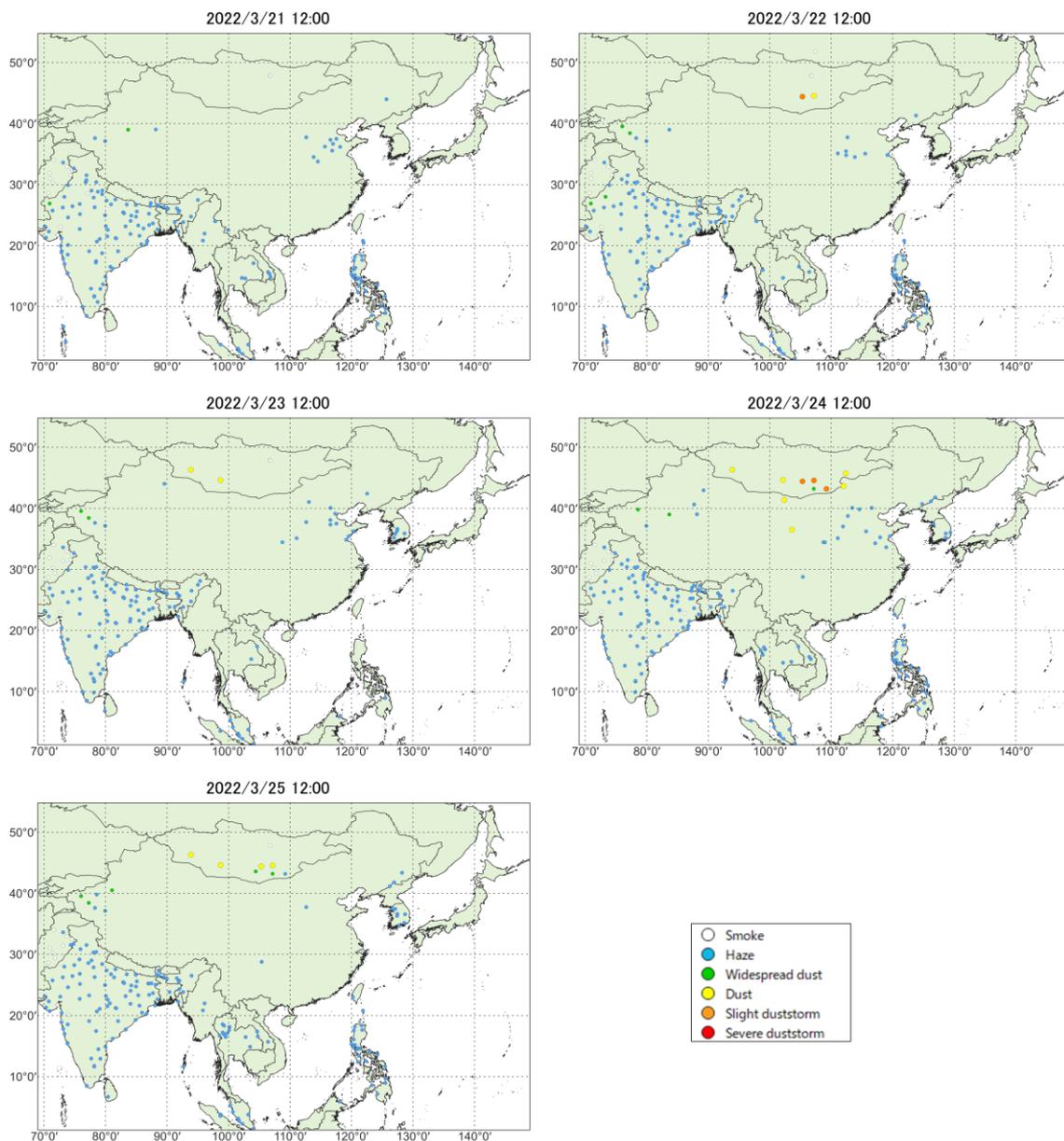


图 5-3-8-3 砂塵嵐発生状況

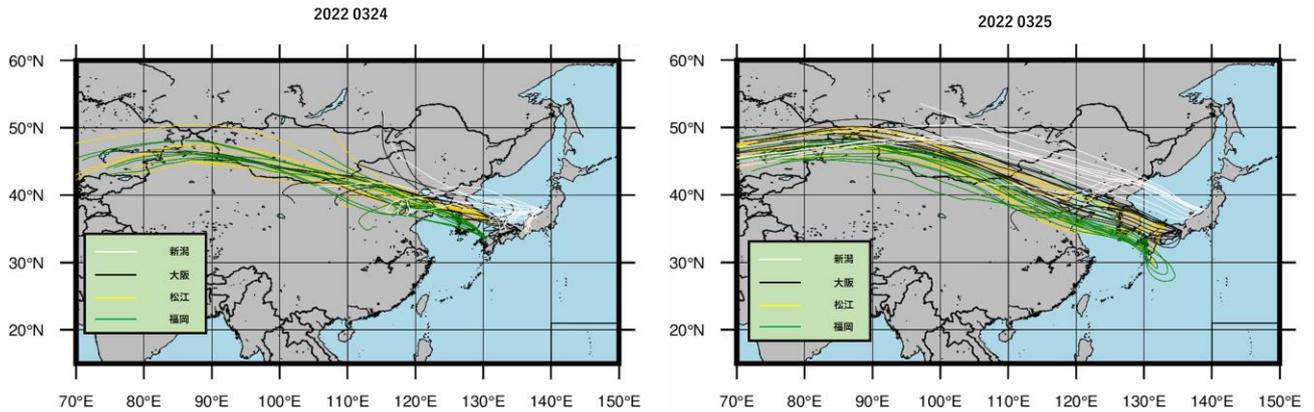


図 5-3-8-4 後方流跡線 (72 時間前より)

各地点、各煙霧観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある煙霧観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

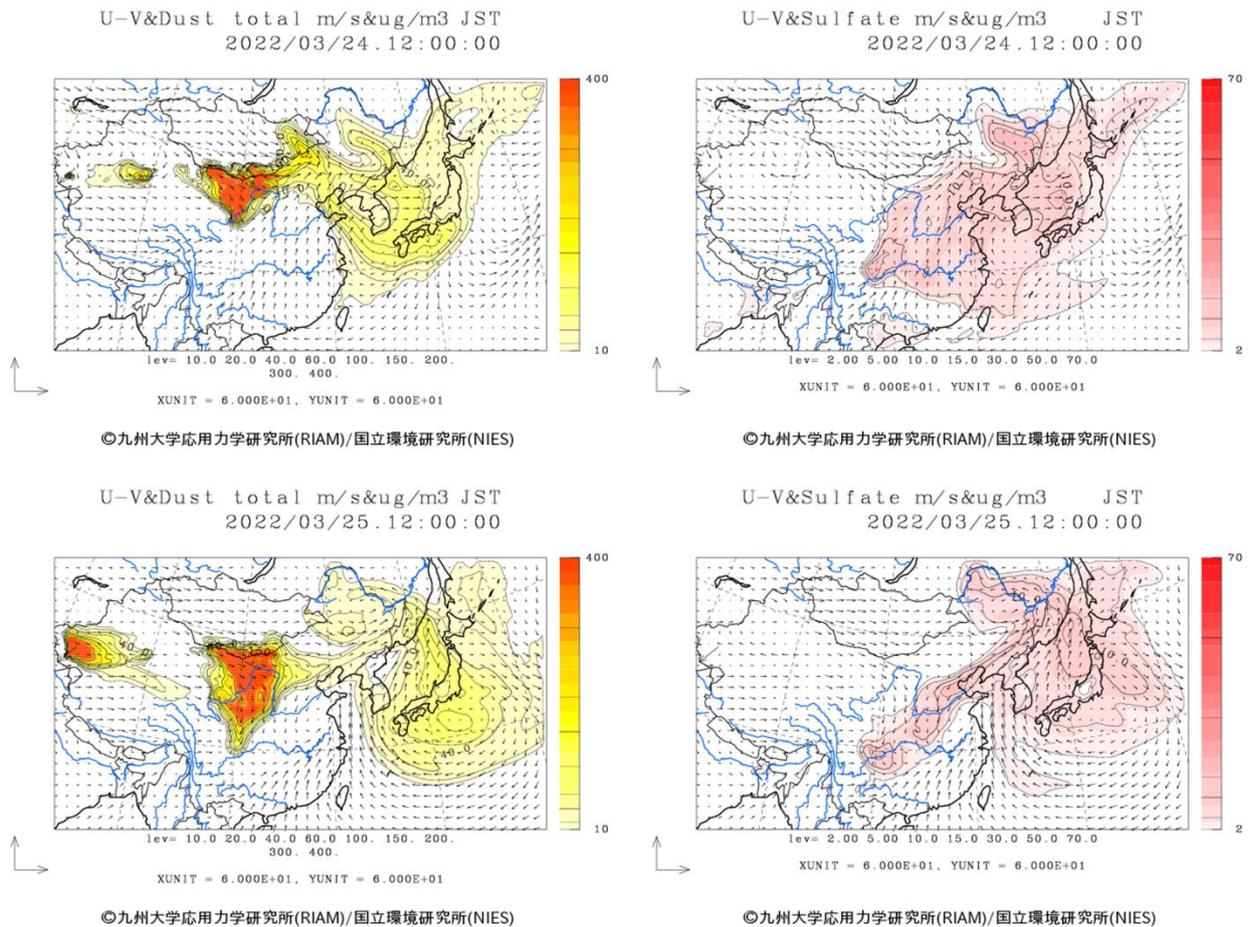
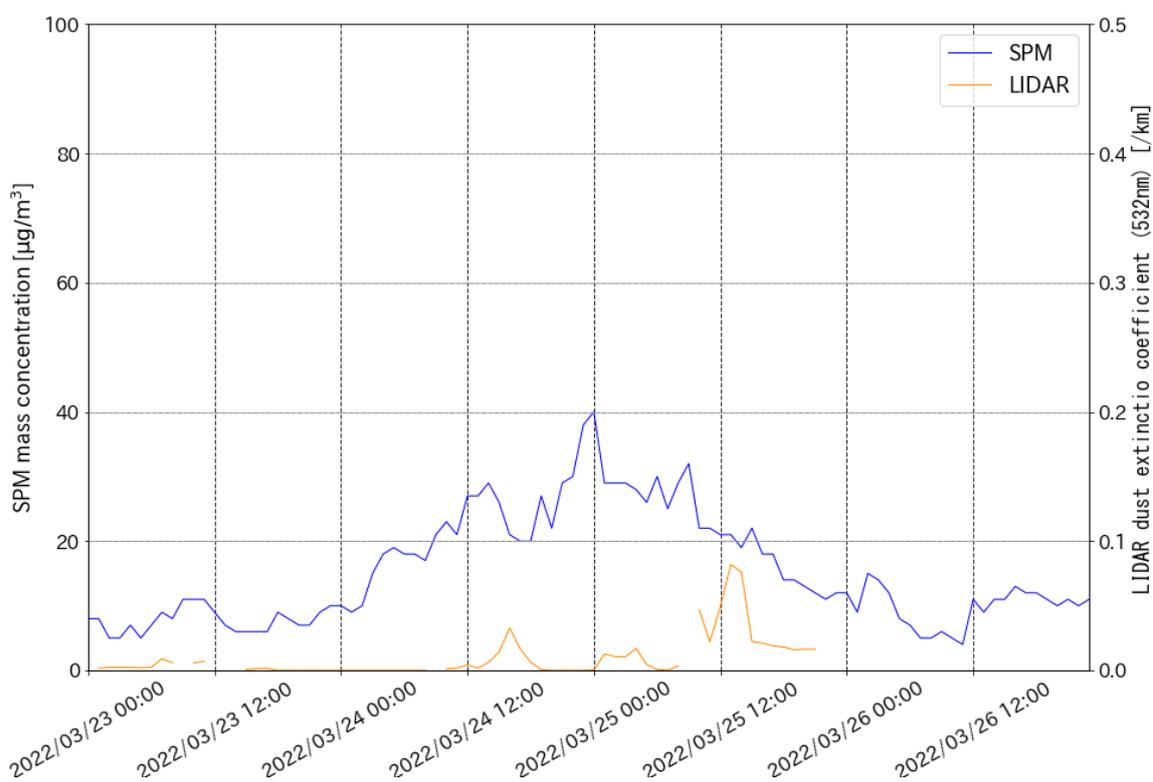
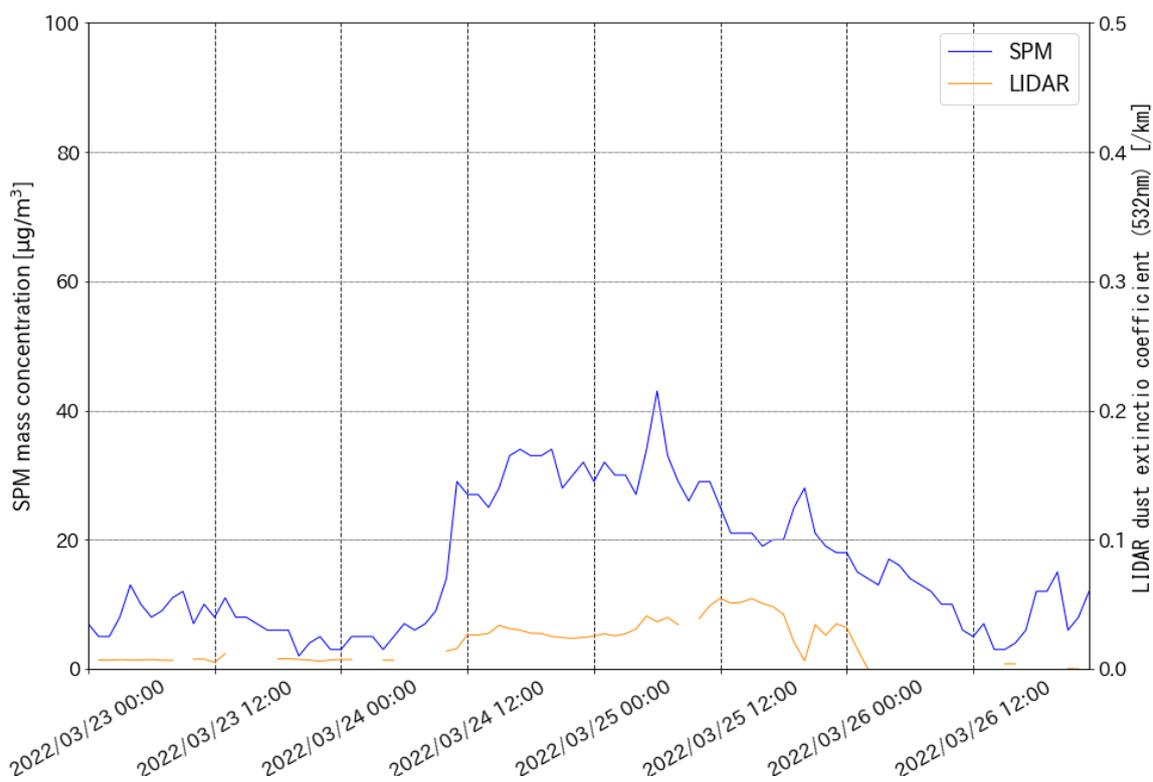


図 5-3-8-5 CFORS 予測結果

### 長崎



### 松江



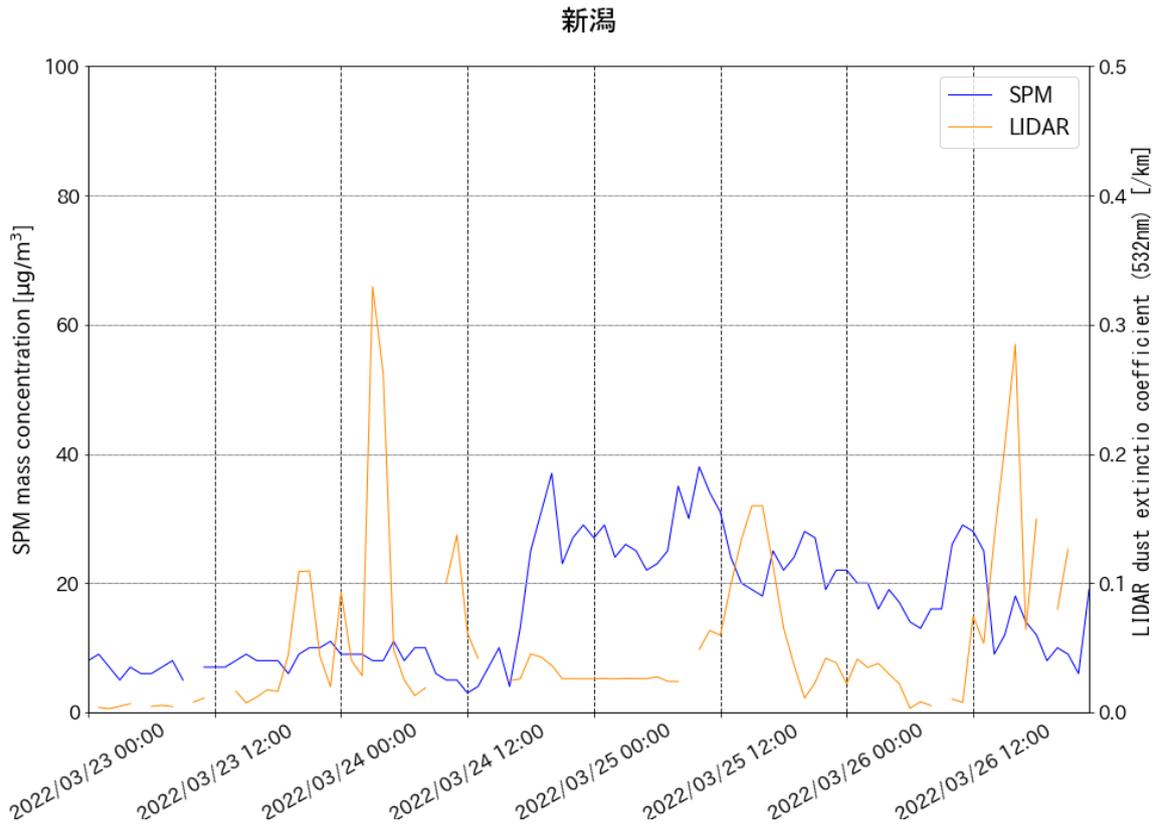


図 5-3-8-6 ライダー黄砂消散係数と SPM の経時変化 (長崎・松江・新潟)

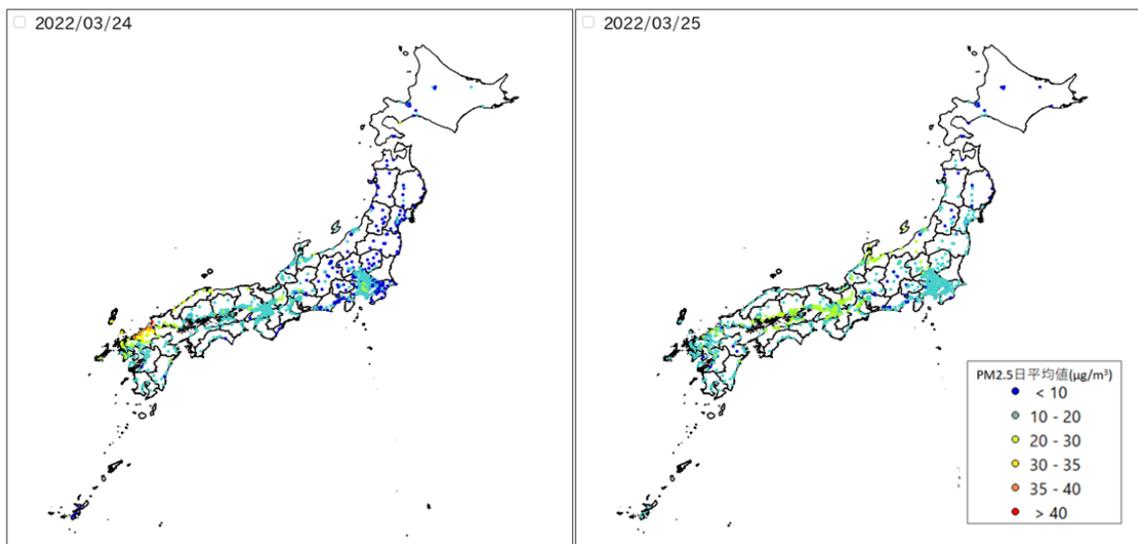


図 5-3-8-7 PM2.5 日平均値全国分布

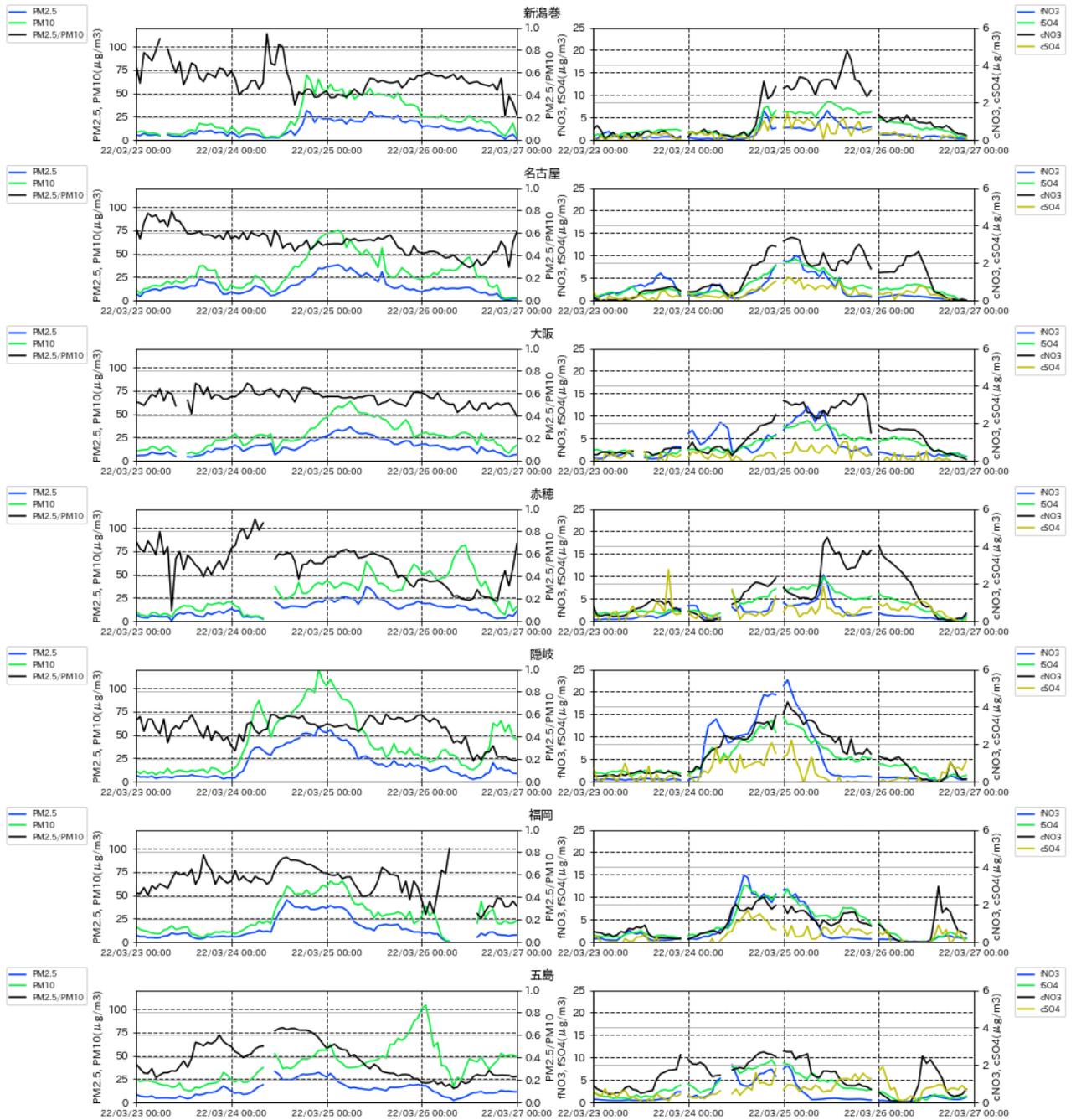


図 5-3-8-8 PM10 および PM2.5 とその成分の経時変化

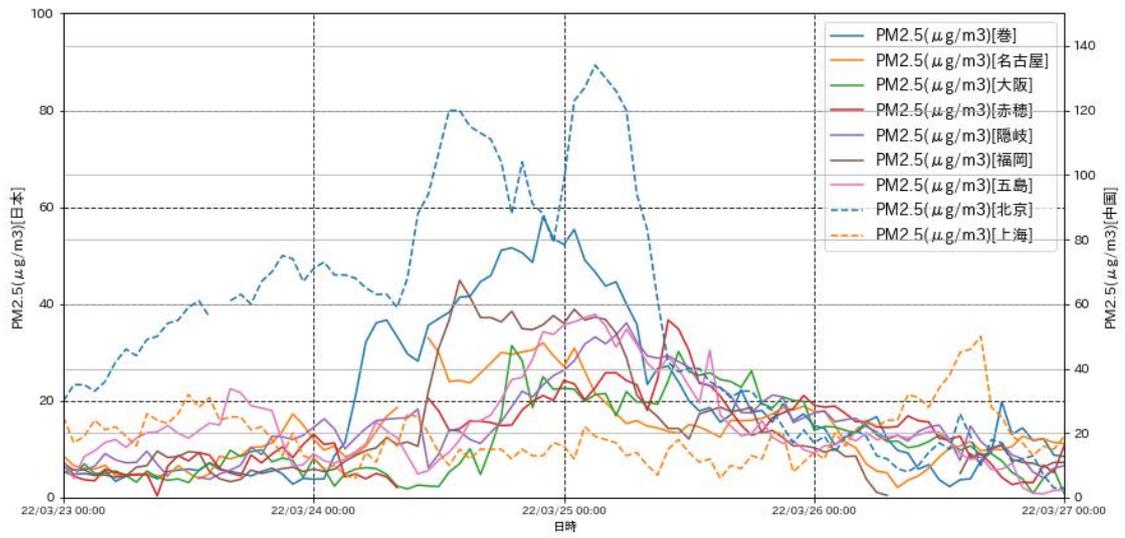


図 5-3-8-9 日本と中国での PM2.5 濃度

## 5.4 2021年度煙霧事例のまとめ

2021年度に観測された煙霧事例を表 5-4-1 に示した。

事例 1 は、12 月 25 日に 10 地点、26 日に 11 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、dust の発生はなく、25 日に sulfate が日本全域に影響を及ぼしている様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、人為起源汚染物質の  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  については  $\text{fSO}_4^{2-}$  に高い濃度のピークが見られ、 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える濃度を示していた。以上のことから、事例 1 は大陸から飛来した空気塊に、人為起源の  $\text{fSO}_4^{2-}$  が混合した弱い煙霧事例と考えられる。

事例 2 は、1 月 3 日に 10 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前の 12 月 31 日には、モンゴル南部で slight duststorm が発生している様子が見られたが、後方流跡線からは dust の発生源付近を通る様子が見られなかった。また、人為起源汚染物質については、札幌において 1 月 2 日昼頃に  $\text{fNO}_3^-$  が高い値となっているが、他の地点では顕著な上昇は見られない。以上のことから、事例 2 は大陸から飛来した空気塊が人為起源汚染物質を含み、日本に飛来した弱い煙霧事例と考えられる。

事例 3 は、1 月 28 日に 10 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、dust の発生は確認できなかった。また、人為起源汚染物質については、煙霧が観測された札幌、福岡、五島で  $\text{fNO}_3^-$  が高い値となっており、 $\text{fSO}_4^{2-}$  や  $\text{cSO}_4^{2-}$  の増加が顕著に見られた。以上のことから、事例 3 は、大陸から飛来した空気塊に、国内で発生したと考えられる人為起源汚染物質を含んだ弱い煙霧事例と考えられる。

事例 4 は、2 月 2 日に 11 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、dust の発生はごくわずかであった。また、人為起源汚染物質については、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  について煙霧観測前日で福岡、五島のいずれの成分も上昇している様子が見られ、中国では 2 月 1 日午前 PM2.5 濃度が  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上の高濃度となっていた。以上のことから、事例 4 は、大陸から飛来した空気塊に、国内・国外で発生した人為起源汚染物質を含む弱い煙霧事例と考えられる。

事例 5 は、2 月 5 日に 10 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、日本への dust の影響はない様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、福岡、五島において  $\text{fSO}_4^{2-}$ 、 $\text{fNO}_3^-$  が 2 月 5 日の 0:00 前後に高い値となっていた。以上のことから、事例 5 は、大陸から飛来した空気塊に、国内で発生したと考えられる人為起源汚染物質を含んだ煙霧事例と考えられる。

事例 6 は、2 月 27 日に 15 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。この期間の大陸の状況を見るとからは、dust などは発生しておらず、CFORS 予測結果からは、sulfate が日本へ影響を及ぼしている様子が示されているものの、dust に関してはほぼ影響がない様子が確認できる。また、人為起源汚染物質の  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  については福岡、五島で  $\text{cNO}_3^-$  の上昇が見られており、五島においては  $\text{fNO}_3^-$  濃度が  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える高濃度が見られた。以上のことから、事例 6 は、大陸から飛来した空気塊に、国外で発生したと思われる人為起源汚染物質を含んだ弱い煙霧事例と考えられる。

事例 7 は、3 月 2 日に 16 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、大陸において dust が発生している様子が見られず、CFORS 予測結果からも、日本への dust の影響は小さい様子が見られたが、sulfate については大陸から日本全域に影響を及ぼしている様子が見

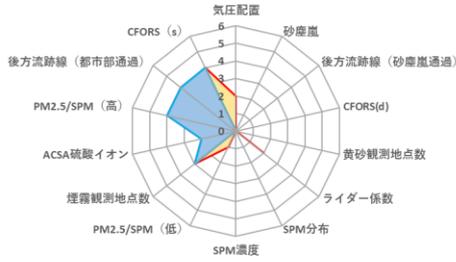
られた。また、人為起源汚染物質の  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  については赤穂、福岡、五島で煙霧観測日前日から当日にかけ  $\text{cNO}_3^-$  濃度が上昇しており、大阪では、 $\text{fNO}_3^-$  濃度が  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  まで上昇しており、その高濃度が継続している様子が見られた。以上のことから、事例 7 は、西日本では大陸から飛来した空気塊にモンゴルで発生した dust と人為起源汚染物質を含んだ煙霧事例と考えられる。一方、東日本では大陸からの影響を受けているものの、dust、人為起源汚染物質のどちらの影響も少ない煙霧事例であると考えられる。

事例 8 は、3 月 24 日に 10 地点、3 月 25 日に 14 地点で観測された煙霧を対象とした事例である。日本で煙霧が観測される前には、3 月 22 日～24 日にかけて dust、slight duststorm が発生しており、dust を含む空気塊の輸送が示唆された。CFORS 予測結果からも、dust 及び sulfate が中国東部から日本へ影響を及ぼしている様子が見られた。また、人為起源汚染物質については、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  については煙霧観測日においてどの地点においても各成分の上昇が見られ、特に隠岐における  $\text{fNO}_3^-$  は  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える値のピークが見られ、北京では 3 月 27 日昼頃と 3 月 28 日深夜に  $120\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える高濃度の  $\text{PM}_{2.5}$  が見られた。以上のことから、事例 8 は、大陸で発生した dust、slight duststorm の影響を大きく受けた空気塊が、人為起源汚染物質を伴い飛来した事例であると考えられ、黄砂日と類似している事例であると考えられる。

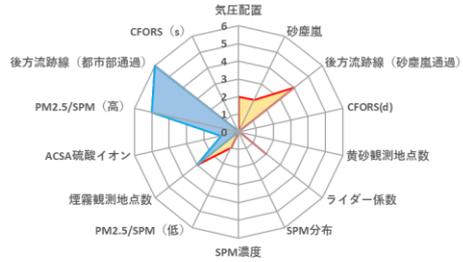
表 5-4-1 2021 年度における煙霧事例の一覧

事例	年	月	日	地点数	観測地点
1	2021	12	25	10	稚内、長崎、下関、大分、宮崎、室蘭、旭川、青森、秋田、福島
	2021	12	26	11	稚内、秋田、新潟、金沢、広島、網走、函館、福井、室蘭、札幌、松江
2	2022	1	3	10	稚内、旭川、青森、函館、札幌、網走、帯広、室蘭、秋田、金沢
3	2022	1	28	10	下関、宮崎、松山、大分、長崎、熊本、佐賀、仙台、札幌、秋田
4	2022	2	2	11	秋田、稚内、福岡、長崎、佐賀、松江、下関、松山、熊本、大分、宮崎
5	2022	2	5	10	長崎、佐賀、熊本、稚内、松江、宮崎、新潟、秋田、網走、鳥取
6	2022	2	27	15	稚内、函館、網走、下関、長崎、福岡、金沢、松江、松山、佐賀、熊本、大分、鹿児島、札幌、名瀬
7	2022	3	2	16	長崎、大分、下関、福岡、宮崎、鹿児島、京都、広島、徳島、高松、岡山、名瀬、稚内、松江、神戸、水戸
8	2022	3	24	10	鳥取、福岡、下関、松江、長崎、金沢、彦根、佐賀、富山、津
	2022	3	25	14	岐阜、津、金沢、富山、神戸、和歌山、福井、京都、奈良、岡山、大分、新潟、彦根、高松

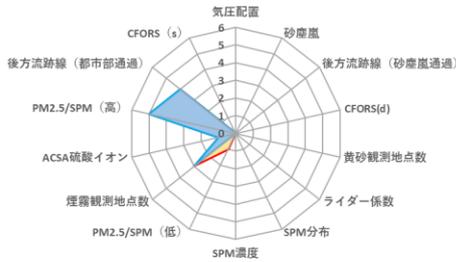
事例1



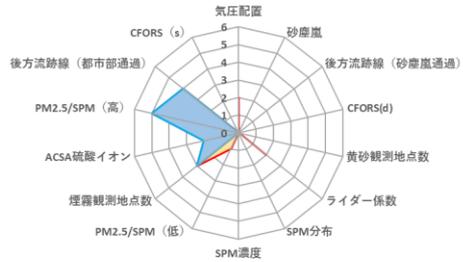
事例2



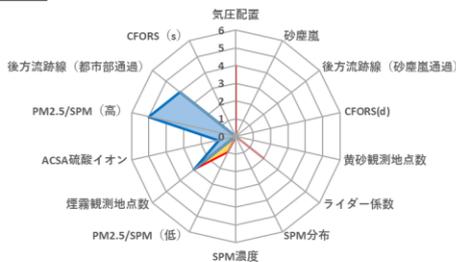
事例3



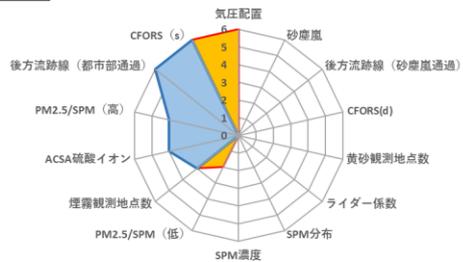
事例4



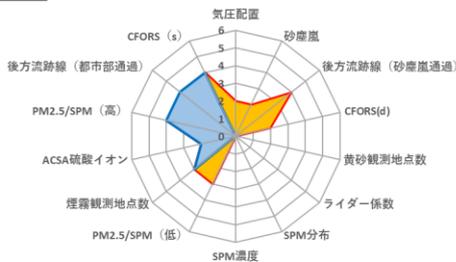
事例5



事例6



事例7



事例8

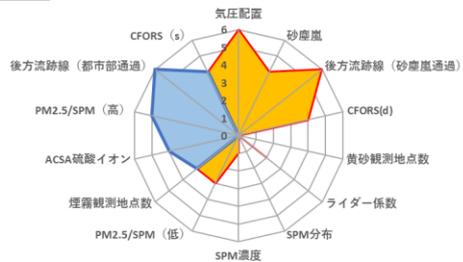


図 5-4-1 煙霧日におけるレーダーチャート

## 6. 2021年度における黄砂・煙霧事例のPM2.5濃度のデータ整理と解析

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、2021年度の実黄砂・煙霧事例の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環境基準超過状況についての解煙

ここでは、全国の1,073箇所の測定局を評価対象とする。2021年度における有効測定日数（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388,941（日×局）であり、平均濃度は $9.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。このうち、1日平均 $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた<sup>3</sup>日数×局は、504（日×局）であり、全体の0.13%であった。

測定局における黄砂観測日は、12,814（日×局）であり、その平均濃度は $11.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、前年度の平均濃度（ $16.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）や前々年度の平均濃度（ $15.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）と比較しても低い値であった。また、1日平均 $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた日数×局は、25（日×局）であり、これは黄砂観測日×局数全体の0.20%にあたる。この割合は、昨年度の4.93%に比べ非常に低くなったと言えるが、前々年度の割合である0.31%と比較すると大きな差はない。前年度から今年度のこの割合の減少は、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、2020年度のPM2.5濃度が近年では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11,689（日×局）、煙霧事例の平均濃度は $11.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、このうち1日平均 $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた日数は22（日×局）であった。これは、煙霧観測日×局数全体の0.1%であり、前年度の平均濃度 $16.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均 $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超過割合6.7%、さらに前々年度の平均濃度 $14.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均値 $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超過割合2.35%に比べ、平均濃度、超過割合の両方で顕著に減少した。

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は2013年度から2021年度までのPM2.5黄砂時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。期間が短いため明確な経年的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、2017年度以降は減少傾向にあるように見える。

<sup>3</sup> 環境省から告知されているPM2.5の環境基準 $35.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ （日平均）を参考にしている。本解析では単純に時間毎のデータを日平均しているが、環境基準は98%パーセンタイル値となっている点に注意されたい。

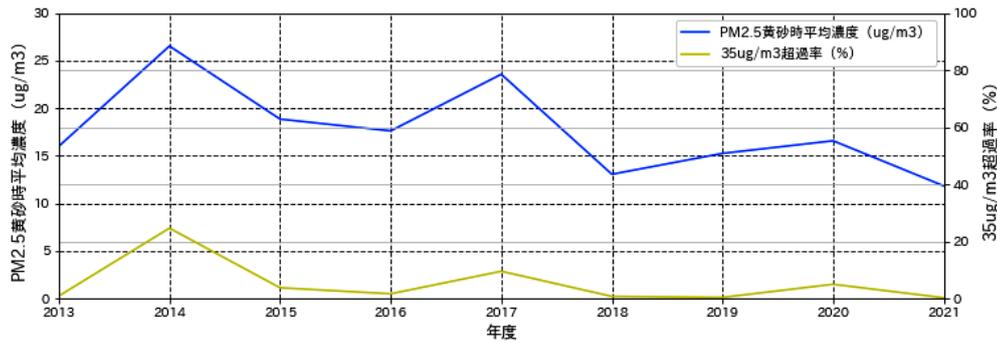


図 6-1-1 2013年度から2021年度までのPM2.5黄砂時平均濃度とその濃度の35µg/m3超過率の経年変化

2021年度の黄砂日観測日数と黄砂事例時の各測定局におけるPM2.5日平均値が、1局でも35.0µg/m<sup>3</sup>を超えた地点がある都道府県を整理し、図6-1-2に示し、同様の整理を、煙霧事例を対象とし整理した結果を図6-1-3に示す。黄砂事例時及び煙霧事例時の1日平均35.0µg/m<sup>3</sup>を超えた都道府県は、非常に少ないものの、例年通り西日本で多く見られた。

図6-1-4に、PM2.5日平均値が、1局でも35.0µg/m<sup>3</sup>を超えた地点がある日数と、そのうちの黄砂・煙霧事例に該当する日数を都道府県別に示している。例年、PM2.5日平均値が高くなる時において、黄砂あるいは煙霧が観測されることが多いと報告されているが、2021年度においては全体を通してPM2.5日平均値が35.0µg/m<sup>3</sup>を超過する日数が少なくなっており、PM2.5濃度が低かったことが読み取れる。

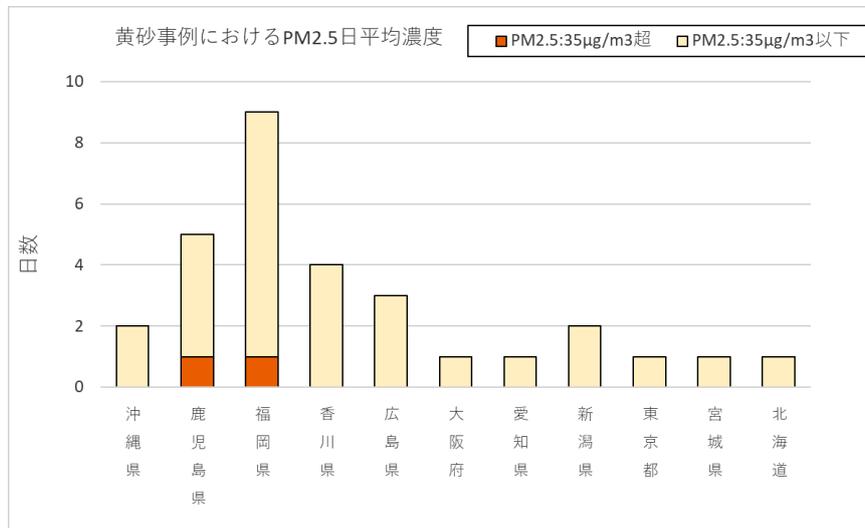


図 6-1-2 都道府県別の黄砂日数とPM2.5環境基準超過日数 (2021年度)

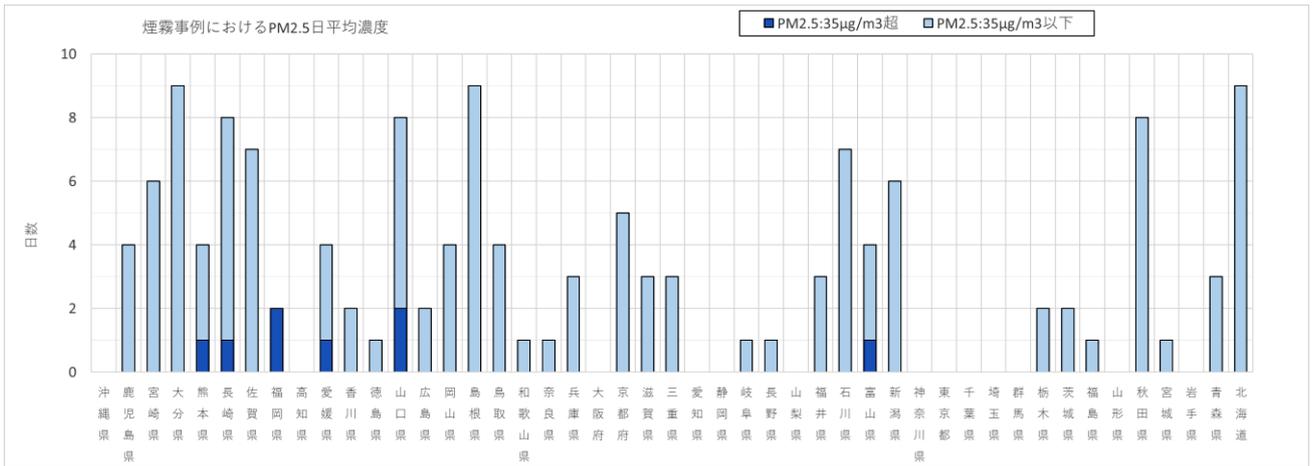


図 6-1-3 都道府県別の煙霧日数と PM2.5 環境基準超過日数 (2021 年度)

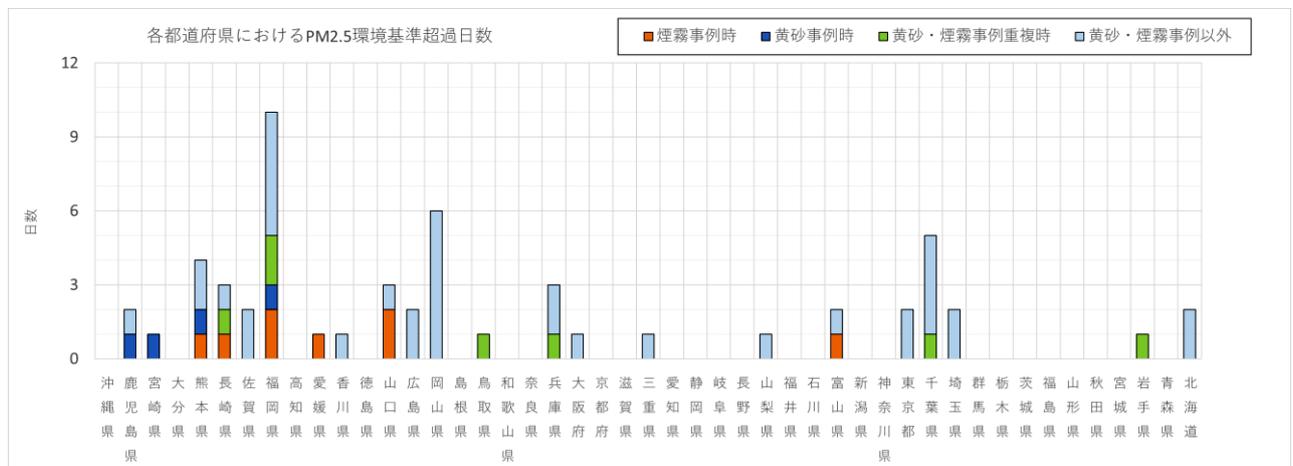


図 6-1-4 都道府県別の PM2.5 環境基準超過日に占める黄砂・煙霧の割合 (2021 年度)

## 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、2021 年度の成分分析調査結果のうち、PM2.5 の重量濃度が 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上であり、かつ黄砂もしくは煙霧が観測された地点を抽出し、金属成分について項目別に黄砂日と煙霧日で比較した。2021 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 2021 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	2021 年 5 月 13 日～2021 年 5 月 26 日
夏	2021 年 7 月 22 日～2021 年 8 月 4 日
秋	2021 年 10 月 21 日～2021 年 11 月 3 日
冬	2022 年 1 月 20 日～2022 年 2 月 2 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 5 データが、煙霧日に関しては 23 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、3 検体である。この 3 検体は全て 2021 年 5 月 25 日に観測されたもので黄砂事例 3 にあたるデータである。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、13 検体であった。このうち 2 検体が 2022 年 1 月 28 日（煙霧事例 3）、11 検体が 2022 年 2 月 2 日（煙霧事例 4）に当たるデータである。

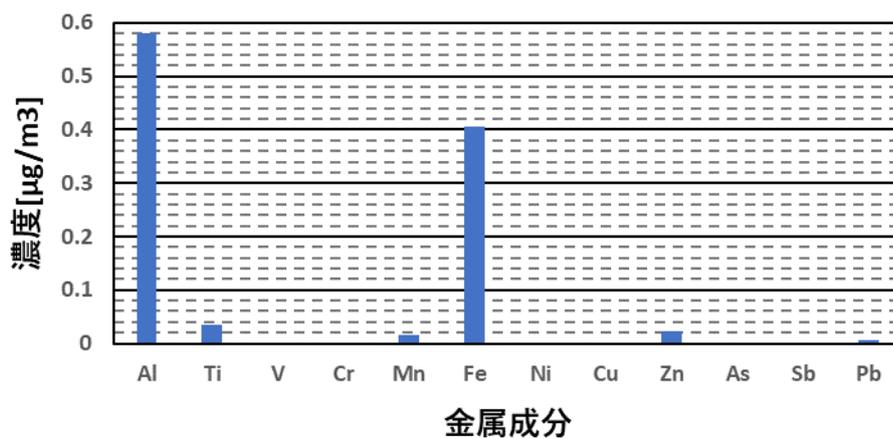
黄砂日における重量濃度の平均は 30.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、煙霧日におけるその平均は 28.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  であった。それぞれの金属成分・イオン成分の濃度平均、含有率は、図 6-2-1 から図 6-2-4 のとおりである。金属成分に関しては、黄砂時には Al と Fe が顕著に高くなっている（図 6-2-1）。煙霧時には Al と Fe が顕著に高く、次いで Zn が高くなっている（図 6-2-3）。イオン成分などに関しては、黄砂時には硫酸イオン（ $\text{SO}_4^{2-}$ ）が他のイオンなどと比較し非常に高くなっており、次いで、有機炭素（OC）、アンモニウムイオン（ $\text{NH}_4^+$ ）、硝酸イオン（ $\text{NO}_3^-$ ）の順に高くなっている（図 6-2-2）。

全ての 13 検体について、煙霧時には硫酸イオン（ $\text{SO}_4^{2-}$ ）、硝酸イオン（ $\text{NO}_3^-$ ）が他のイオンなどと比較し非常に高くなっており、次いで、アンモニウムイオン（ $\text{NH}_4^+$ ）、有機炭素（OC）の順に高くなっている（図 6-2-4）。

また、図 6-2-5、図 6-2-6 に煙霧事例 3 に相当する日のデータ（2 検体）による金属成分の濃度、含有率を示す。金属成分に関しては全体で見た時より Al の濃度が低くなっているのがわかる。イオン成分などを見ると、硫酸イオン、アンモニウムイオンの濃度が低くなっており、有機炭素の濃度が高くなっているのがわかる。

同じく、図 6-2-7、図 6-2-8 に煙霧事例 4 に相当する日のデータ（11 検体）による金属成分の濃度、含有率を示す。金属成分、イオン成分などともに全体で見た時と同様な濃度となっている。

### 黄砂日 金属成分 濃度



### 黄砂日 金属成分 含有率

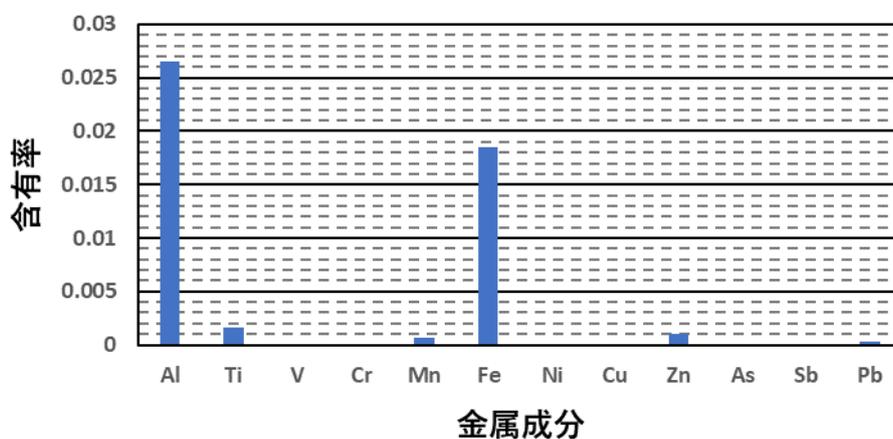
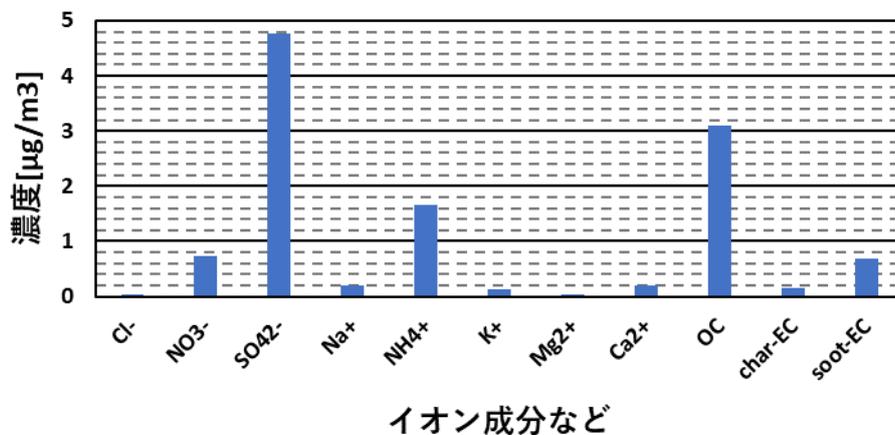


図 6-2-1 黄砂時における PM2.5 金属成分（上段：濃度、下段：含有率）  
黄砂事例 3 に相当する期間

黄砂日 イオン成分など 濃度



黄砂日 イオン成分など 含有率

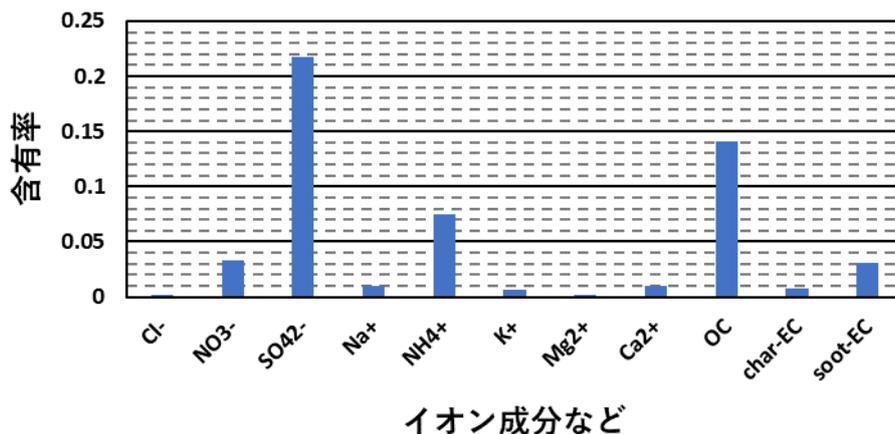
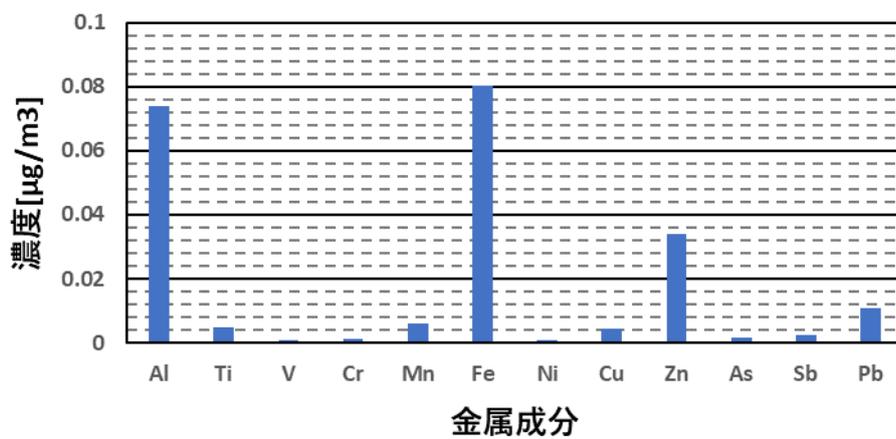


図 6-2-2 黄砂時における PM2.5 イオン成分（上段：濃度、下段：含有率）  
黄砂事例 3 に相当する期間

### 煙霧日 金属成分 濃度



### 煙霧日 金属成分 含有率

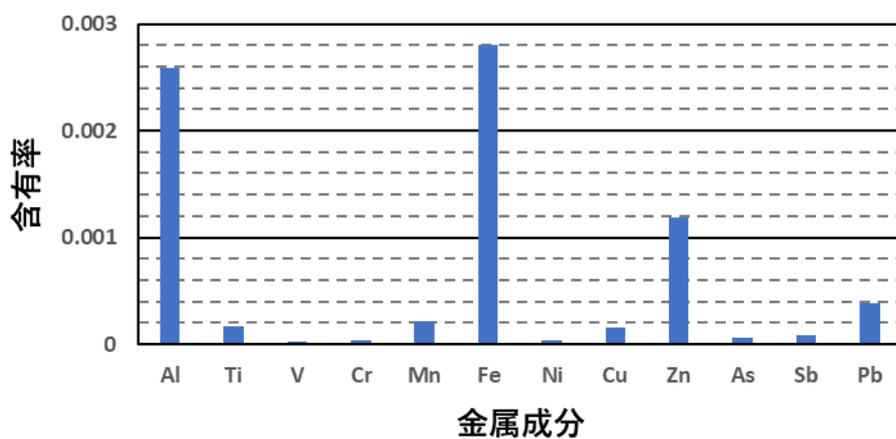
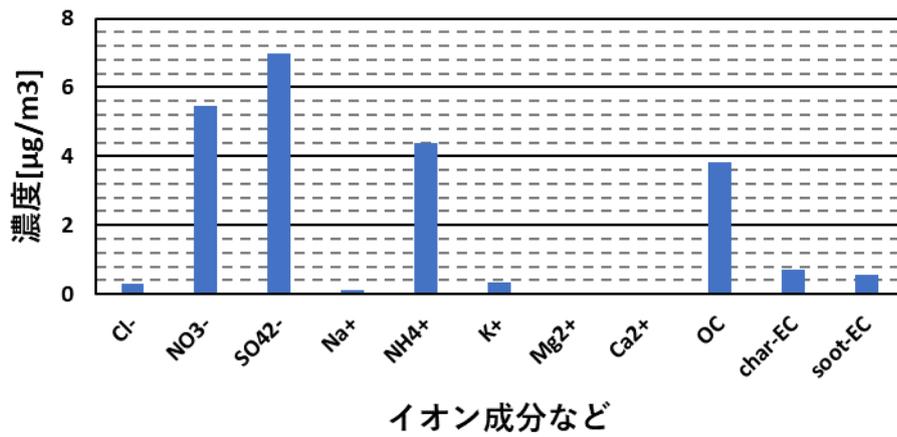


図 6-2-3 煙霧日における PM2.5 金属成分など（上段：濃度、下段：含有率）

煙霧日 イオン成分など 濃度



煙霧日 イオン成分など 含有率

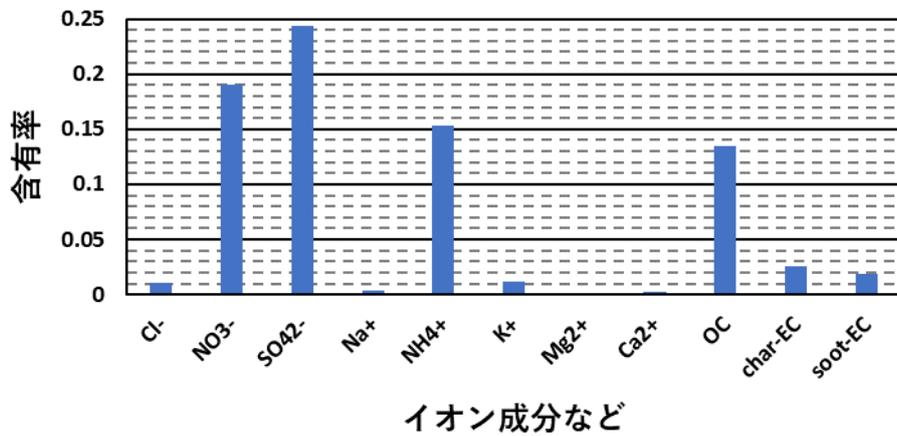
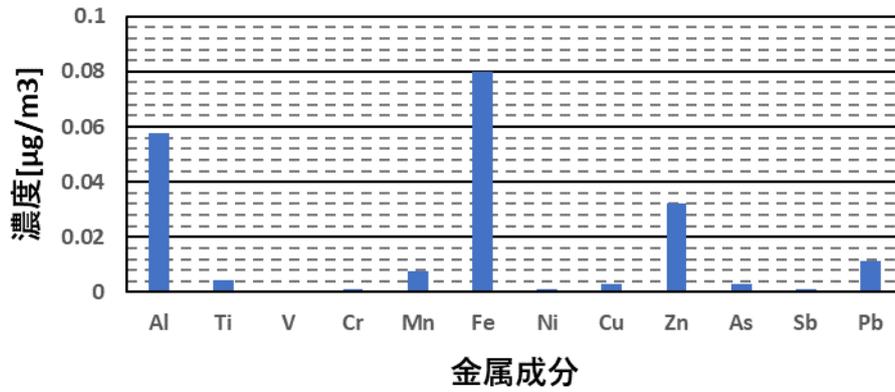


図 6-2-4 煙霧時における PM<sub>2.5</sub> イオン成分 (上段: 濃度、下段: 含有率)

煙霧日 金属成分 濃度  
事例3



煙霧日 金属成分 含有率  
事例3

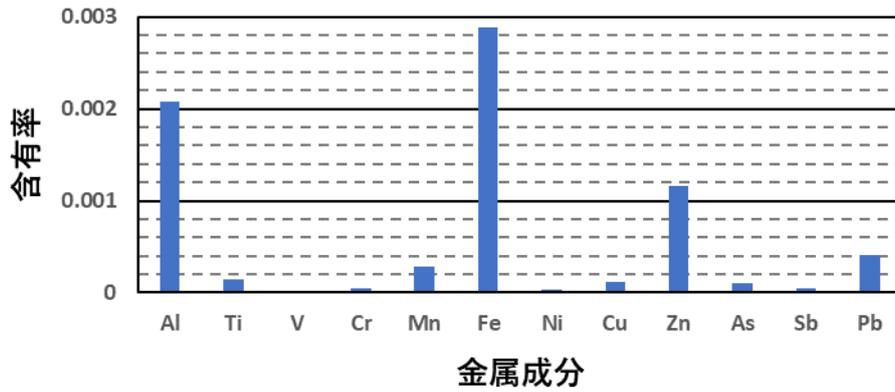
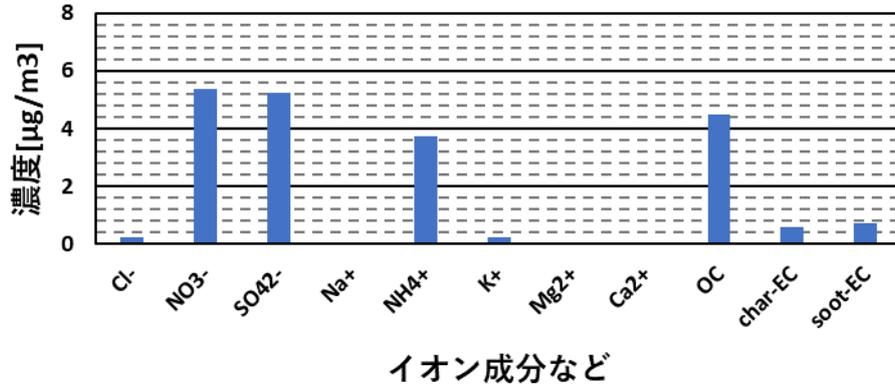


図 6-2-5 煙霧日における PM2.5 金属成分など（上段：濃度、下段：含有率）  
煙霧事例 3 に相当する期間

煙霧日 イオン成分など 濃度  
事例3



煙霧日 イオン成分など 含有率  
事例3

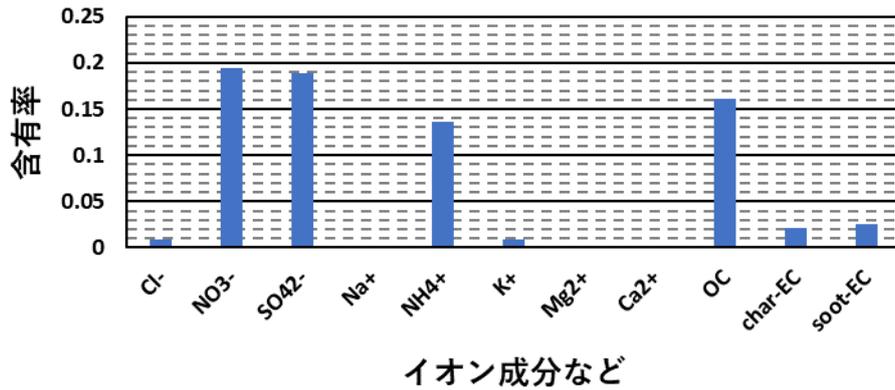
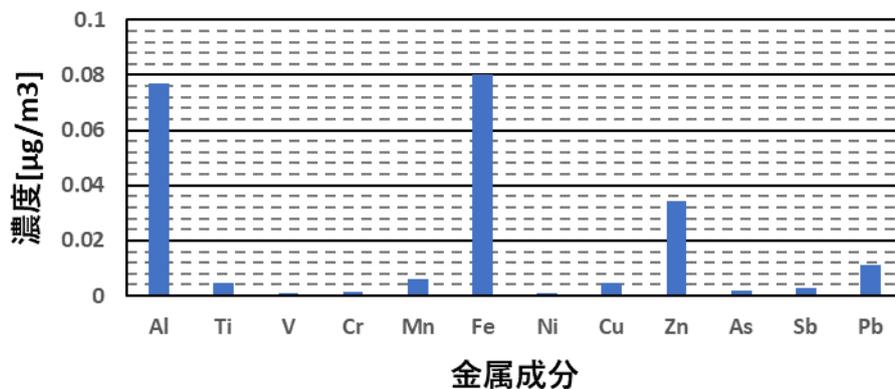


図 6-2-6 煙霧時における PM2.5 イオン成分 (上段：濃度、下段：含有率)  
煙霧事例 3 に相当する期間

煙霧日 金属成分 濃度  
事例4



煙霧日 金属成分 含有率  
事例4

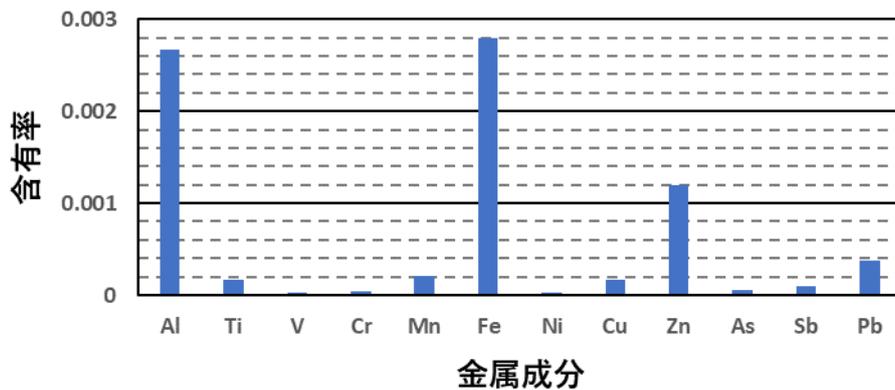
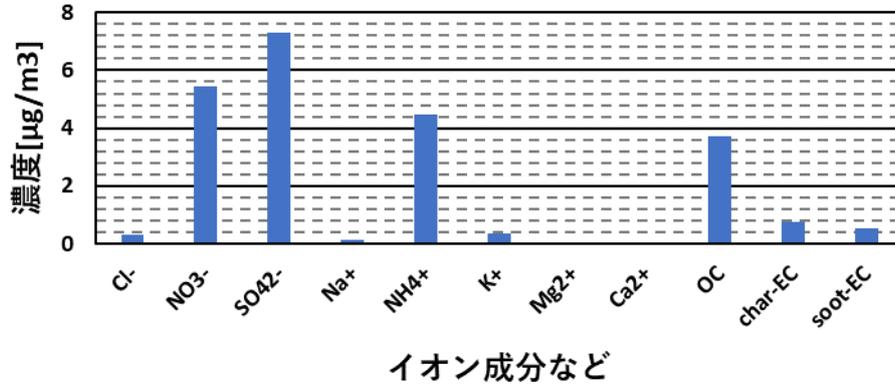


図 6-2-7 煙霧日における PM2.5 金属成分など（上段：濃度、下段：含有率）  
煙霧事例 4 に相当する期間

煙霧日 イオン成分など 濃度  
事例4



煙霧日 イオン成分など 含有率  
事例4

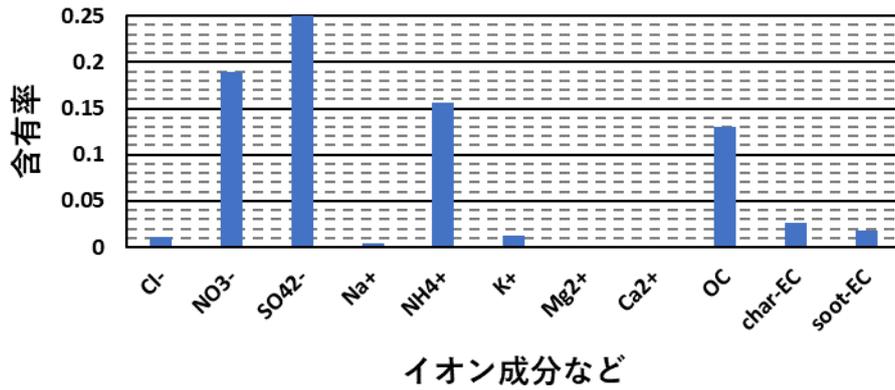


図 6-2-8 煙霧時における PM2.5 イオン成分（上段：濃度、下段：含有率）  
煙霧事例 4 に相当する期間

## 7. 2021年度における黄砂の飛来状況の評価、包括的解析手法の検討等について

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、一昨年度の業務では、黄砂観測地点が11地点に減少したことにより、気象庁で観測されなかった黄砂の検出を試みた。直近10年で多く黄砂が観測された2010年度を対象にライダーデータ、PM<sub>2.5</sub>/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による黄砂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。

そこで昨年度、黄砂飛来時にはPM<sub>10</sub>濃度が高くなる傾向にあるため、PM<sub>10</sub>を用いた黄砂の検出を試みた。具体的にはACSA-14の測定データを用いPM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>比が0.2以下でPM<sub>10</sub>の濃度が80 $\mu$ g/m<sup>3</sup>以上の時間を抽出し、その状況の継続時間や黄砂日と関連していると思われる事例を弱い黄砂日と定義し黄砂事例とほぼ同様な解析を行った。その結果、黄砂日と関連し上の条件を満たす事例、上の条件を満たす時間帯の長い事例のそれぞれ1例ずつを弱い黄砂日として仮定し解析を行った。解析の結果、それらの事例は砂塵嵐の状況、粗大粒子のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>や自然起源の金属元素の時間変化を考慮すると、気象庁で観測されなかった黄砂が飛来したことを示唆する事例であった。

そこで、今年度においても、2021年度に対し上記手法を適用し黄砂の検出を試みる。なお、昨年度までSPM濃度を用いた黄砂検出手法については、PM<sub>10</sub>に変更することで、黄砂検出が可能かを検討するが、的場ら(2005)<sup>4</sup>の手法を用いた検討については、PM<sub>10</sub>データを入手できる地点が限られているため、同手法での検討が難しいこと、且つ、昨年度検討会での指摘事項を踏まえ、除外した。また使用するデータがACSA-14のデータのため、気象庁の黄砂観測地点とは異なる地点のものもあり、実際、観測地点ではない地点に黄砂が飛来したとも考えられる。この点についての検討も行う。

---

<sup>4</sup> 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)

## 7.1 PM2.5/PM10 濃度比による気象庁で観測されなかった黄砂日の検出手法の検討

上記の通り、今年度においては、PM10 濃度に対する PM2.5 濃度の比を用いて、気象庁で観測されなかった黄砂の抽出・判定基準の確認を試みる。PM10 のデータとしては、ACSA-14 のデータを用いた。PM10 濃度は黄砂時には高い値となる傾向にある。そのためここでは PM10 に対する PM2.5 の比が 0.2 以下、かつ PM10 濃度が  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$  の日時を抽出した。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、比較的長時間に渡り抽出条件が満たされている事例であることなどを考慮し、気象庁により観測されなかった黄砂日として表 7-1-1 の 2 事例を解析対象とした。

表 7-1-1  $0 < \text{PM2.5}/\text{PM10} < 0.2$ 、 $\text{PM10} > 80\mu\text{g}/\text{m}^3$  の条件で抽出され時間的連続性などから気象庁により観測されなかった黄砂日と仮定された事例

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	2021/5/4-	五島	5/4 20:00-22:00
2	2022/3/26	赤穂	3/26 11:00
		五島	3/26 00:00-2:00

事例 1 に関しては五島において上記条件を満たす時間が 2021 年 5 月 4 日に 3 時間継続したため事例 1 とした。図 7-1-1 は事例 1 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列を示すが 5 月 4 日には PM10 の急激な上昇が見られ、それに伴い PM2.5/PM10 の減少が見られる。また 2022 年 3 月 26 日には赤穂で条件を満たす時間が 1 時間、五島で 3 時間見られた。本事例は 3 月 24 日、25 日に黄砂と類似した特徴を持つ煙霧が観測されていたこと、3 月 27 日、28 日が気象庁の観測した黄砂日であったことを考慮すると黄砂または気象庁の黄砂観測地点と異なる点で飛来した黄砂の可能性を示唆し、3 月 24 日～28 日での一連の現象であった可能性がある。2021 年 5 月 4 日の事例と同様、PM10 の上昇に伴う PM2.5/PM10 の減少が両地点で見られる（図 7-1-2）。

以下、表 7-1-1 の 2 事例を気象庁により観測されなかった黄砂日と仮定し、解析を実施する。

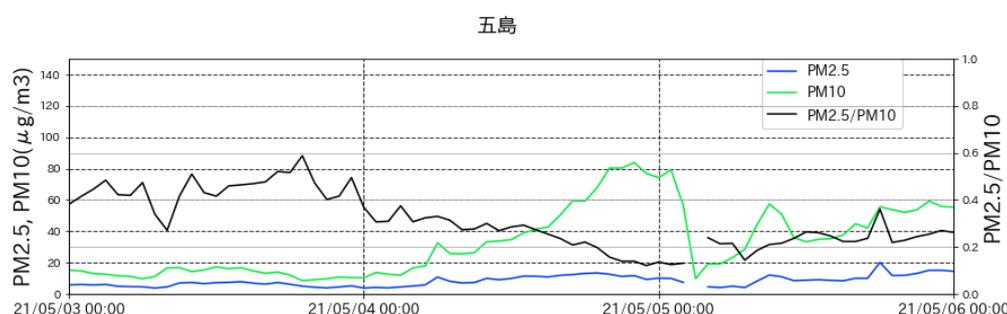


図 7-1-1 事例 1 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列

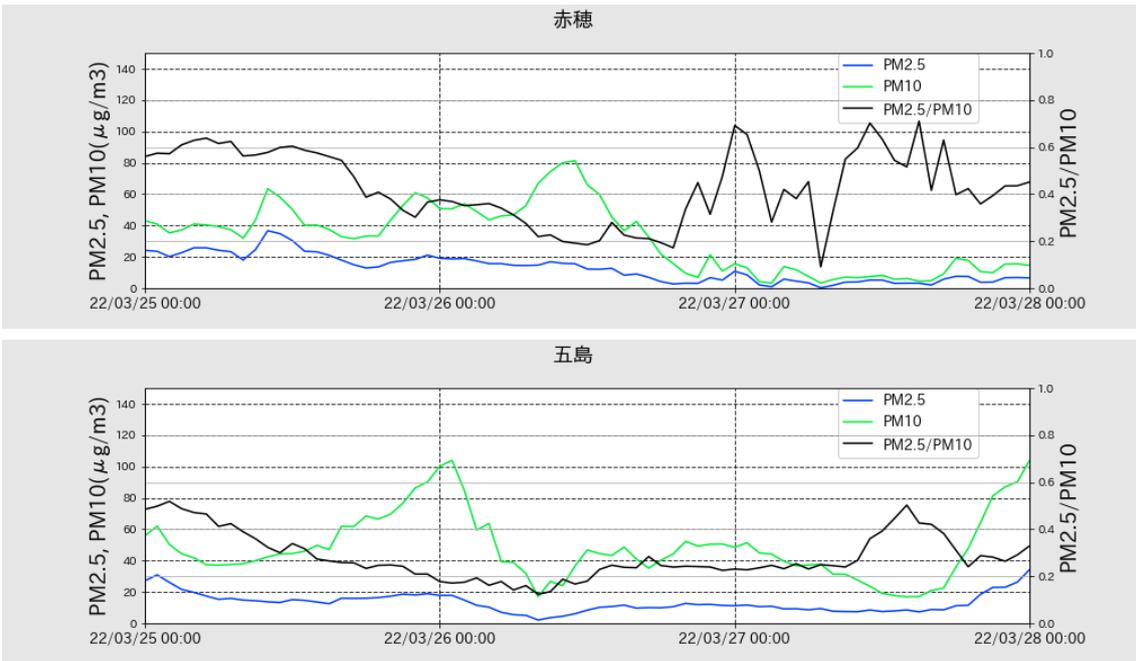


図 7-1-2 事例 2 における各観測地点の PM2.5、PM10、PM2.5/PM10 時系列

## 7.2 気象庁で観測されなかった黄砂事例

以下では、前節の手法により抽出された2事例（表 7-1-1）について、黄砂の特徴をどの程度有する事例であったか明らかにするため、4章における黄砂の事例解析と同様の項目による解析結果を示す。ここまでの解析と同様、PM10 濃度に関しては、自動測定器 ACSA-14 のデータを使用した。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、前後 1 日を含め図示した。

### (1) 気象庁で観測されなかった黄砂事例 1：2021 年 5 月 4 日

本事例においては、5月4日 20:00~22:00 に五島で 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 7-2-1-1）。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると（図 7-2-1-1）、弱い黄砂として抽出された 5 月 4 日以前の 5 月 1 日~3 日にかけて、モンゴルの比較的広い範囲で dust や 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、5 月 4 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 7-2-1-2）。

また、福江島におけるライダー黄砂消散係数及び PM10 濃度の時系列変化は、図 7-2-1-3 の通りとなった。PM10 濃度がピークを示した 5 月 4 日午後には、ライダーデータは欠測となっているが、その後 5 月 5 日にかけて、PM10 濃度の増加に伴ってライダー黄砂硝酸係数も増大している様子が見られる。

図 7-2-1-4 は五島と福岡における粗大粒子成分、微小粒子成分の  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{NO}_3^-$  の時間変化を示すが、五島においては気象庁で観測されなかった黄砂と思われる時間帯である 5 月 4 日に午前から午後にかけて粗大粒子、微小粒子の  $\text{NO}_3^-$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  の全てのイオン成分の濃度が増加傾向にあることがわかる。一方、福岡においては、粗大粒子の  $\text{NO}_3^-$  と微小粒子の  $\text{SO}_4^{2-}$  で増加傾向が見られる。図 7-2-1-5 に湿度と PM10 の時間変化を示す。五島においては 5 月 4 日には PM10 が単調に増加しているが湿度には乾燥した空気塊を示す特徴的な傾向は見られない。逆に福岡においては 5 月 4 日には 1 日を通して低い値を示しているが PM10 には黄砂の傾向を示す特徴的な傾向は示されていない。

図 7-2-1-6 及び図 7-2-1-7 に福岡、五島における各金属元素の時間変化を示す。福岡、五島の両者においては 5 月 4 日に自然起源の元素において緩やかな増加が見られる。また、人為起源の元素については 5 月 4 日に硫黄の増加が見られる。

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 4 日に発生した若干の人為起源系汚染物質を含み飛来し、九州地方の狭い域で広がった黄砂事例とも考えられる。

表 7-2-1-1 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	2021/5/4	五島	5/4 20:00-22:00

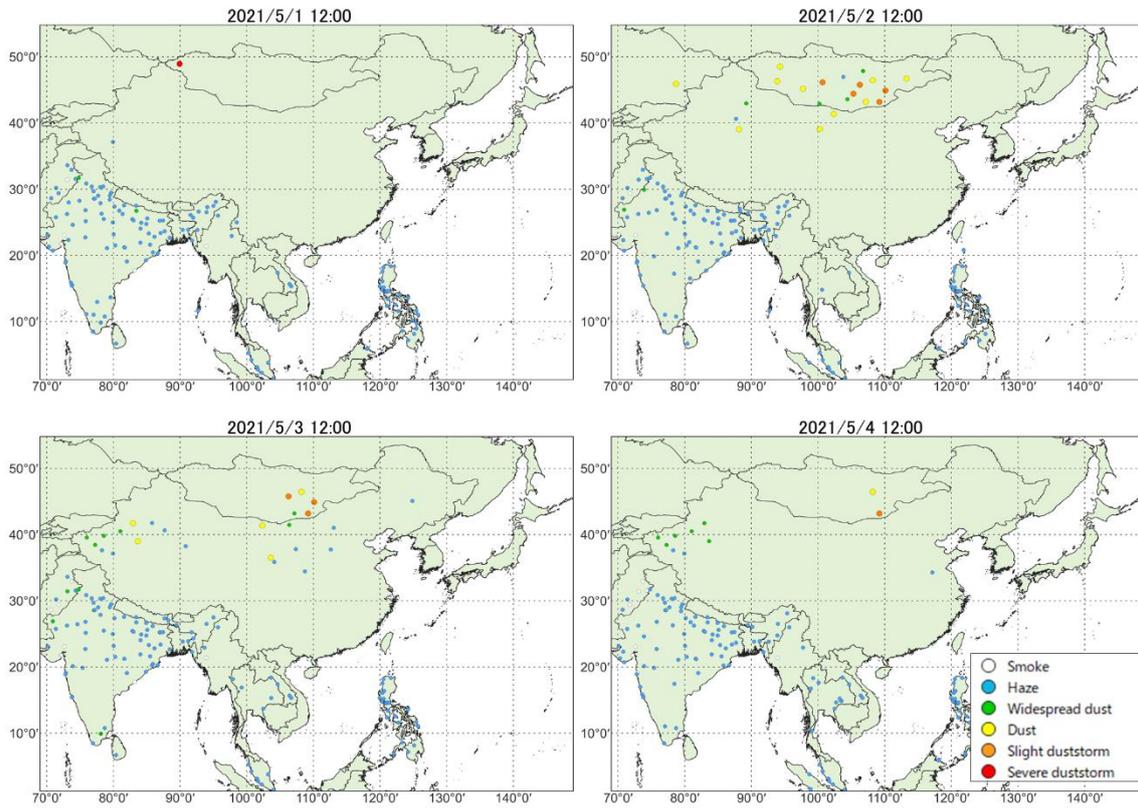


図 7-2-1-1 砂塵嵐発生状況

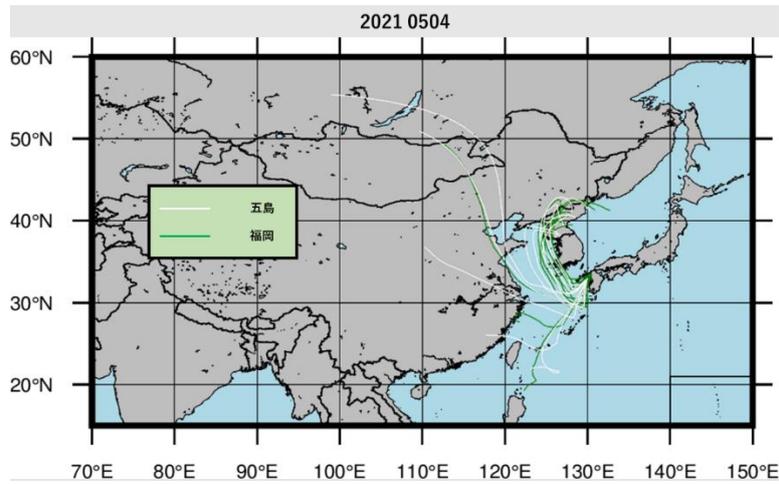


図 7-2-1-2 後方流跡線 (72 時間前より)

各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

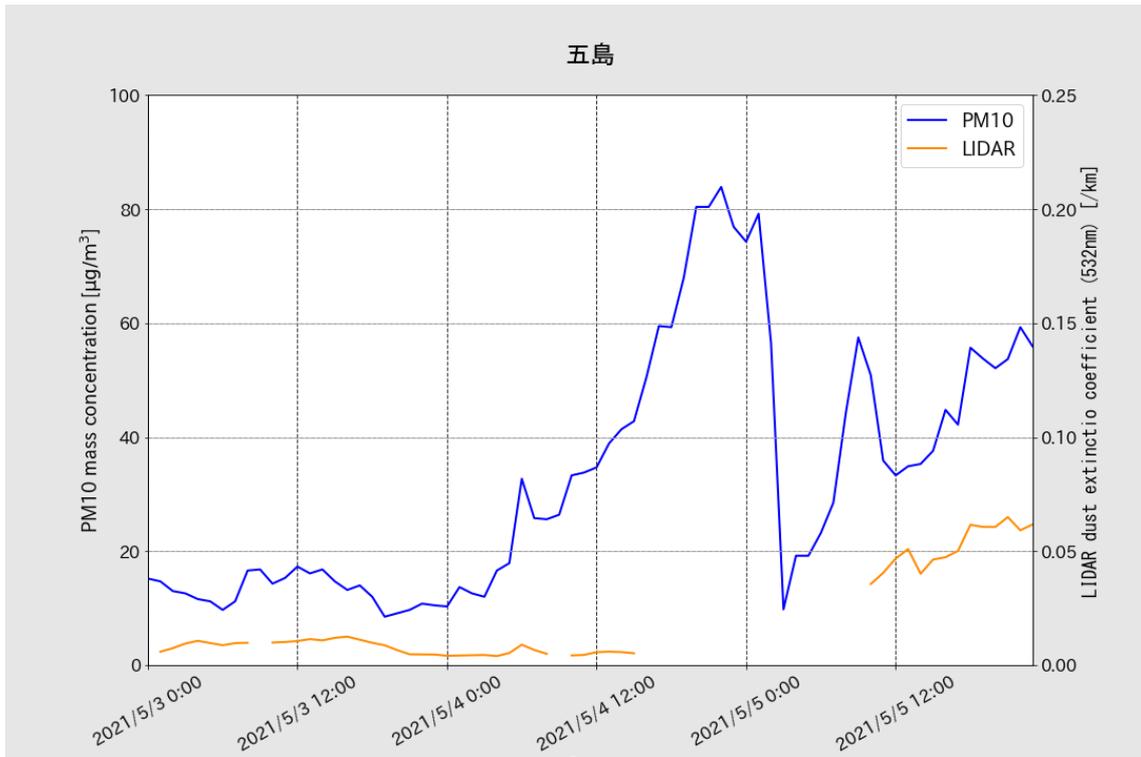


図 7-2-1-3 PM10 データ (五島) 及びライダーデータ (福江島) の時系列変化の比較

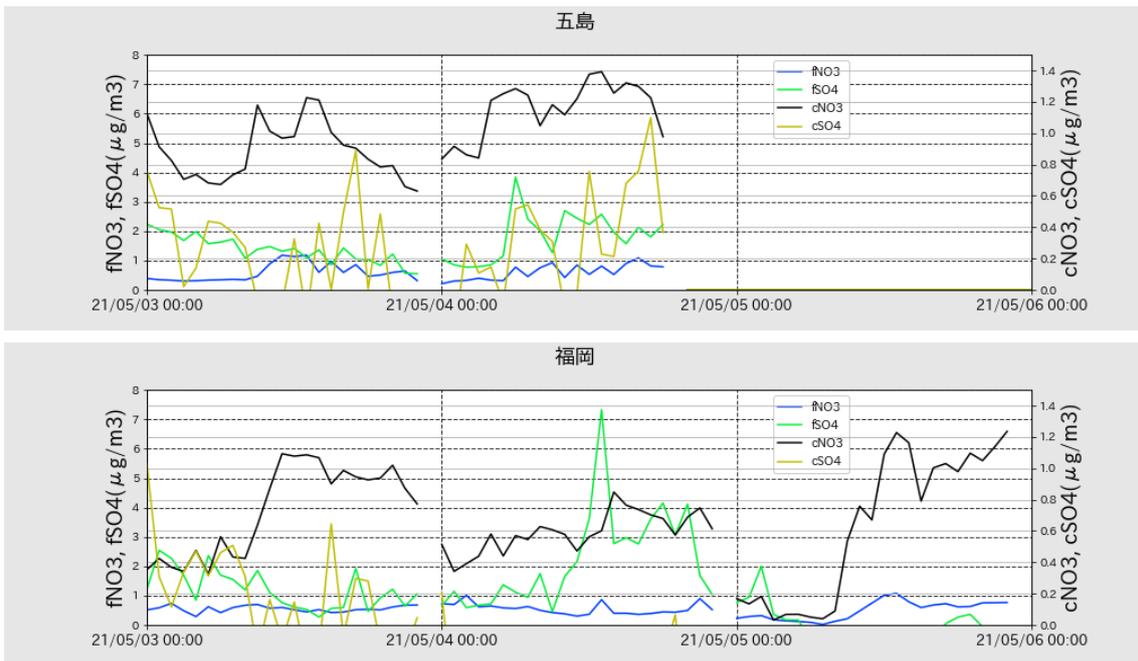


図 7-2-1-4 粗大粒子成分、微小粒子成分の  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{NO}_3^-$

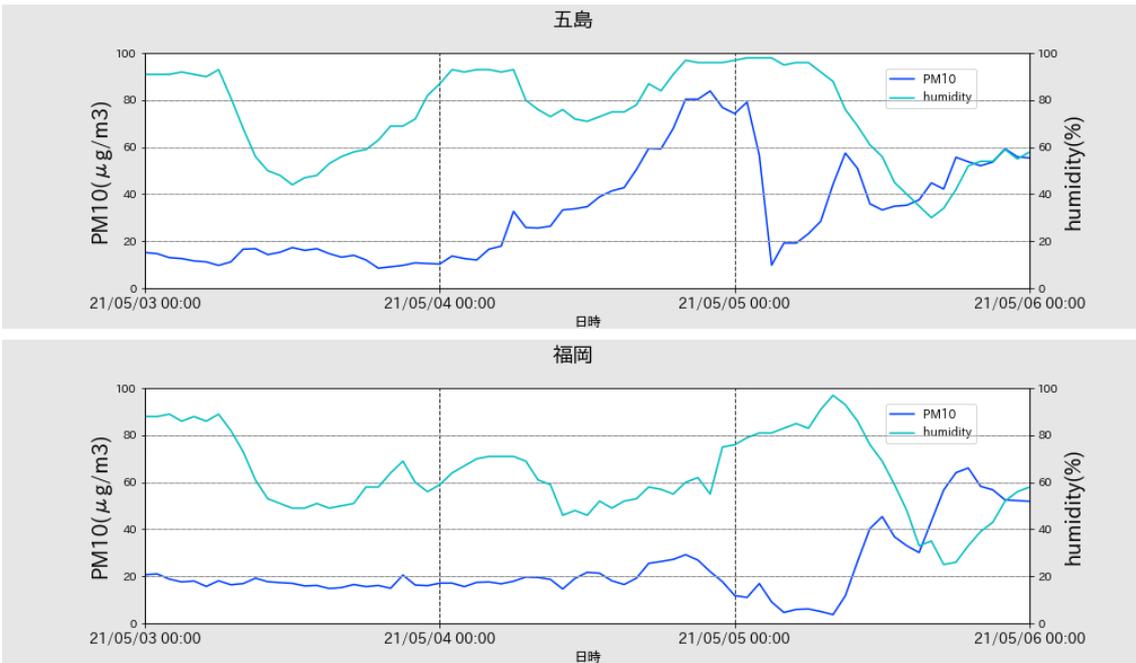
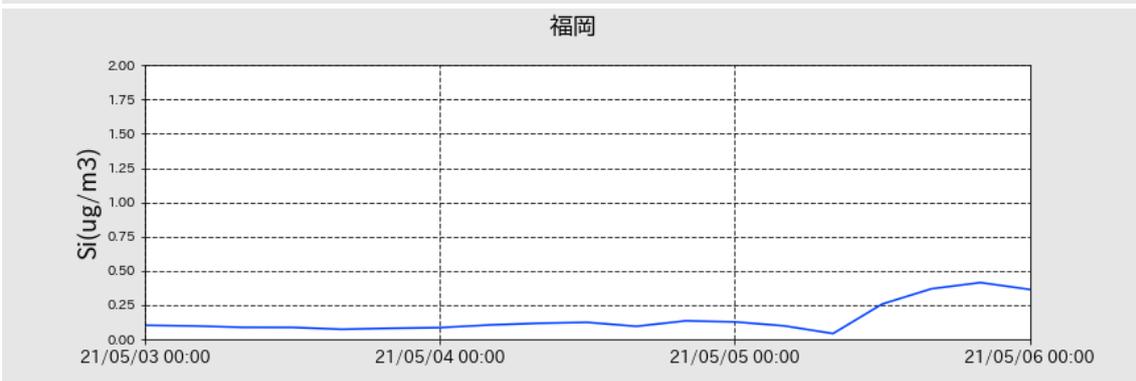
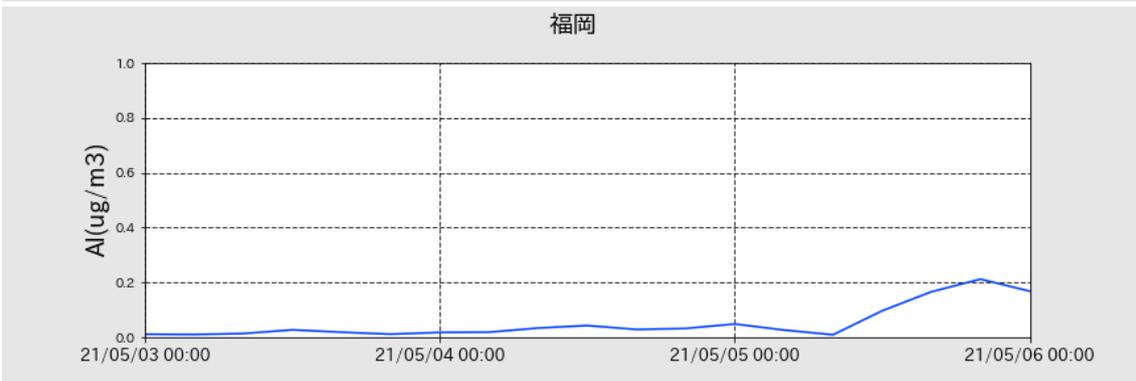
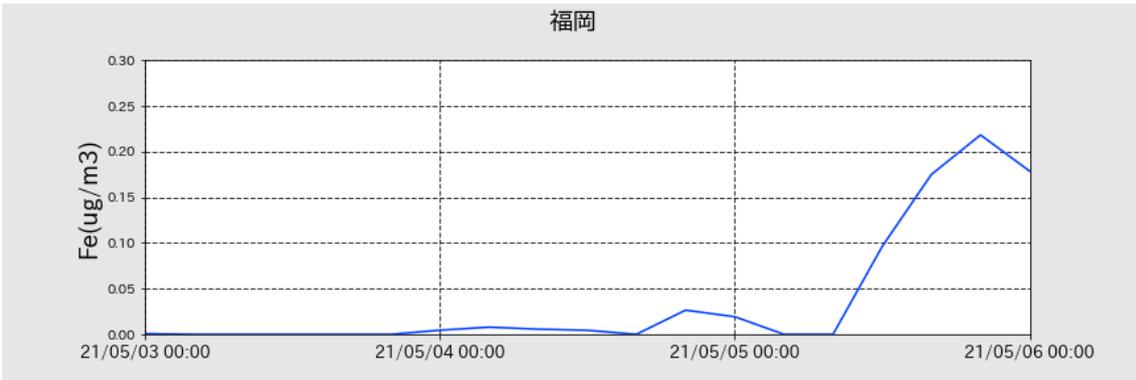
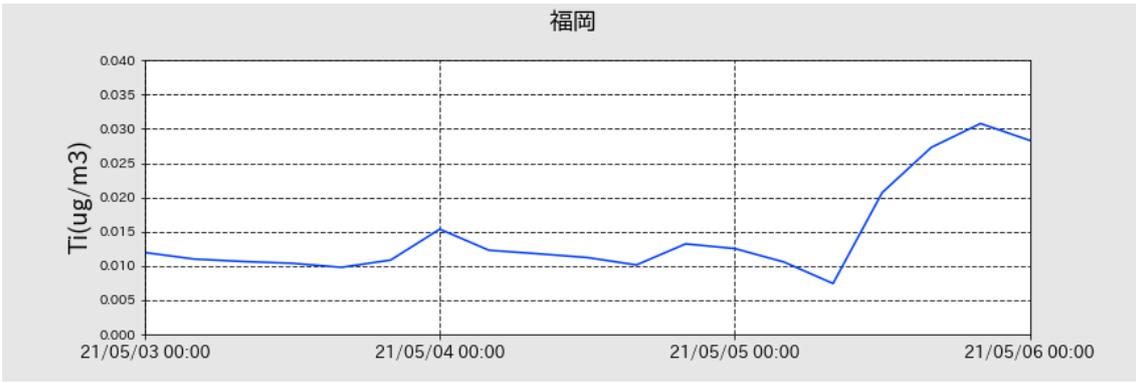


図 7-2-1-5 湿度と PM10 の時間変化



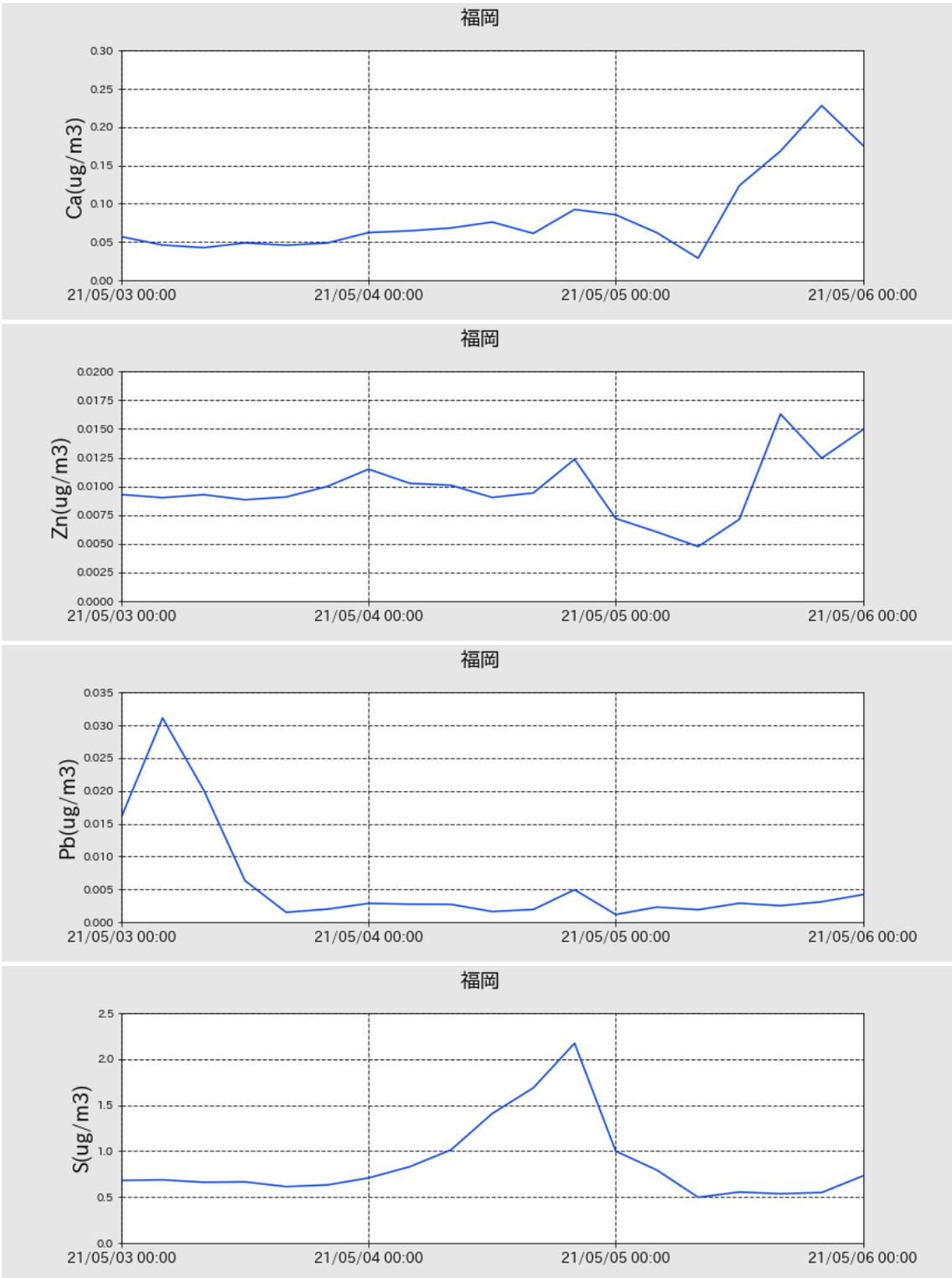
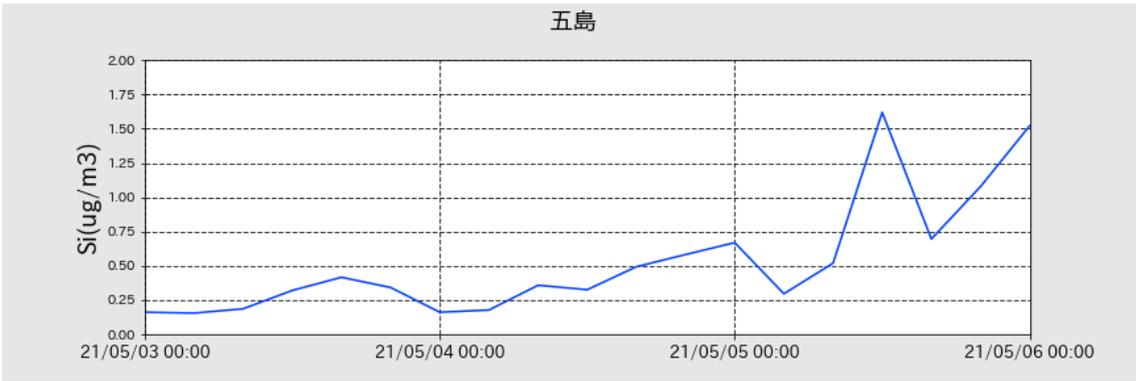
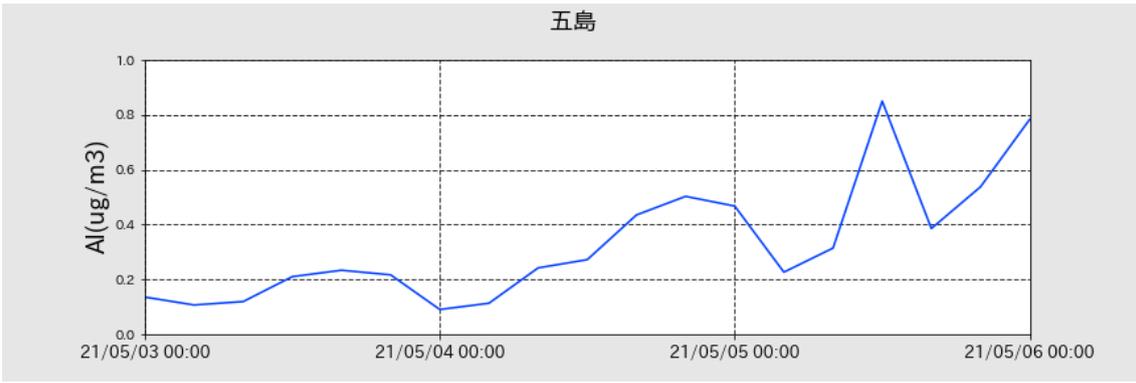
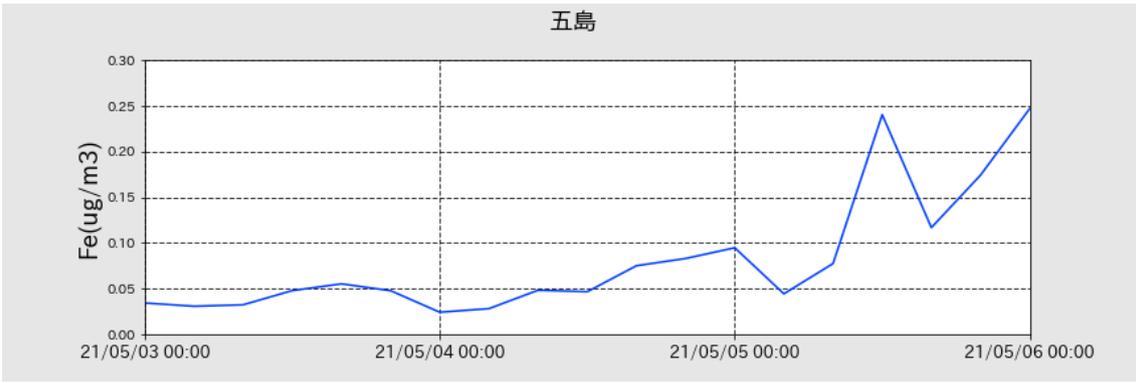
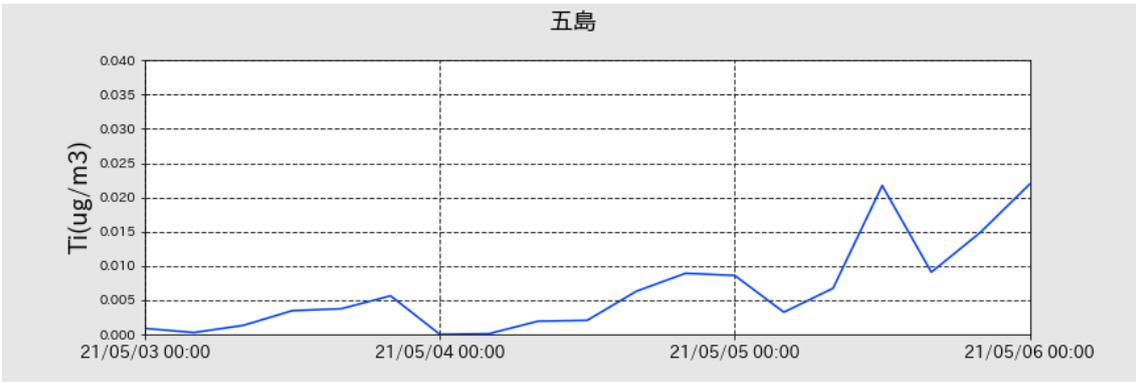


図 7-2-1-6 PX-375 による福岡における各金属成分元素



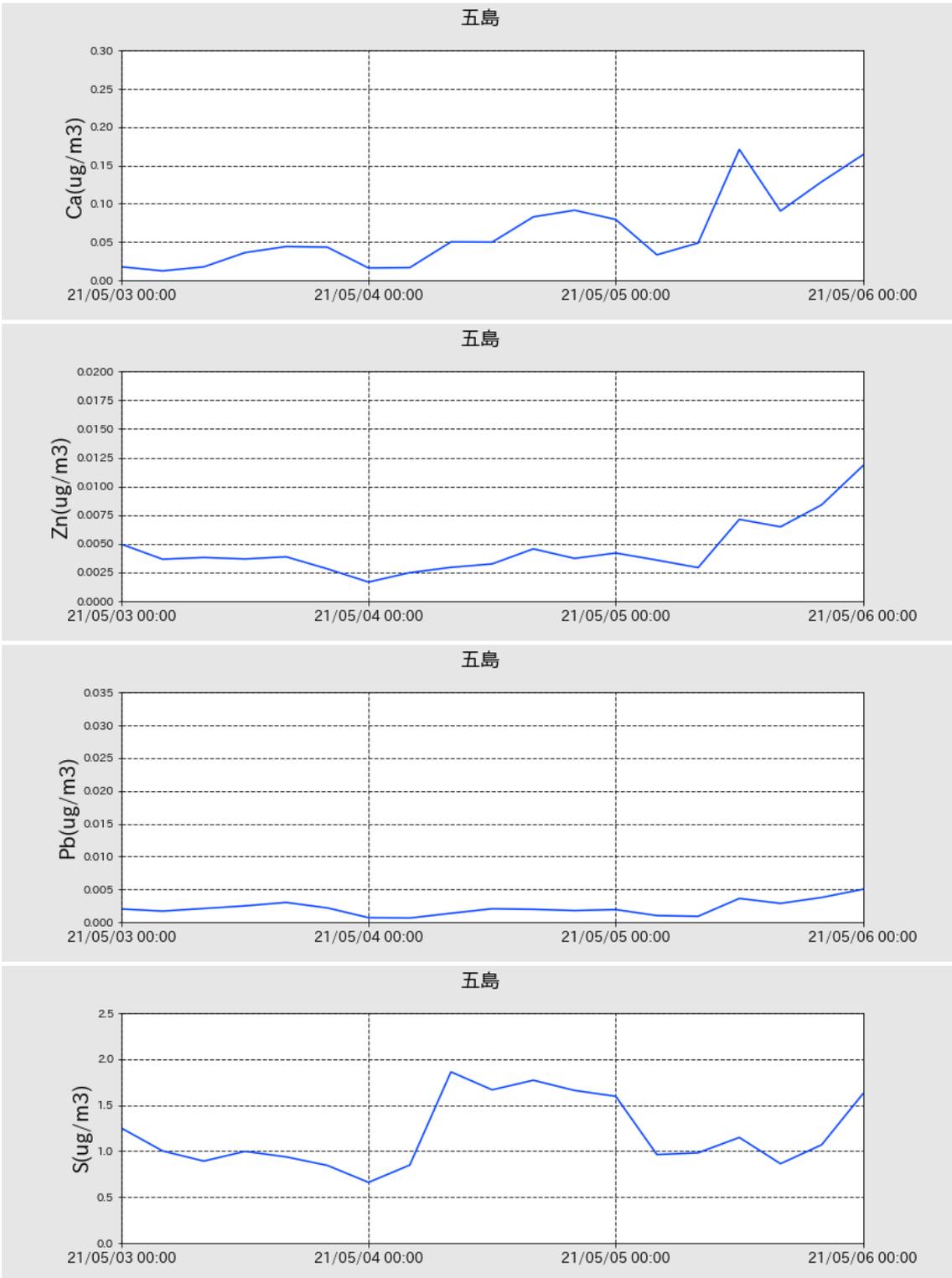


図 7-2-1-7 PX-375 による五島における各金属成分元素

## (2) 気象庁で観測されなかった黄砂事例 2 : 2022 年 3 月 26 日

本事例においては、3 月 26 日 11:00 に赤穂で、3 月 26 日 0:00~2:00 に五島で 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 7-2-2-1)。

日本で黄砂が観測される前の大陸の状況を見ると (図 7-2-2-1)、黄砂観測前の 3 月 24 日、25 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っているように見える (図 7-2-2-2)。

ライダー黄砂消散係数及び PM10 濃度の時系列変化は、図 7-2-2-3 及び図 7-2-2-4 の通りとなった。ただし、五島における事例では、福江島のライダーデータが欠測であったため長崎におけるデータを用い、また赤穂における事例では松江におけるデータを用いた。全体的にややデータの欠測が多いものの、図 7-2-2-4 における 3 月 25 日正午~26 日 0 時など、PM10 濃度の増減に伴ってライダー黄砂消散係数が変動している傾向が確認できる。

図 7-2-2-5 は赤穂、五島、福岡における粗大粒子成分、微小粒子成分の  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{NO}_3^-$  の時間変化を示す。気象庁で観測されなかった黄砂と仮定される 3 月 26 日に、赤穂ではそれらの成分で単調な減少傾向が見られる。また五島においては 3 月 26 日 0:00 前後で粗大粒子の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度が増加し、そこでのピークは約  $3\mu\text{g}/\text{m}^3$  となっている、その後、粗大粒子、微小粒子の全てのイオン成分濃度は減少傾向にあり、7:00 前後から増加傾向に転じている様子が見て取れる。特に粗大粒子の  $\text{NO}_3^-$  濃度の 12:00 頃のピークは、 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上とその他のイオン成分の濃度より高い値となっている。福岡において五島に遅れて粗大粒子の  $\text{NO}_3^-$  濃度のピークが見られる。図 7-2-2-6 に湿度と PM10 の時間変化を示す。赤穂においては 3 月 26 日 11:00 頃に PM10 のピークが見られるが、湿度に黄砂の飛来を特徴づける乾燥した状況は見られなかった。五島においても赤穂の状況と同様であった。

図 7-2-2-7 及び図 7-2-2-8 に福岡、五島における各金属元素の時間変化を示す。福岡では自然起源の全ての元素で 3 月 26 日の 0:00 前後にやや高い値となった。五島においては Al、Ca で 3 月 26 日 0:00 前後にやや高い値となった。また、人為起源の元素に関しては 3 月 26 日には低い値で変化している。

以上により、本事例は、東アジア域で発生した slight duststorm、dust により 3 月 26 日 0:00 頃から、人為起源系汚染物質を多く含まない黄砂が飛来し、九州地方から近畿地方にかけ広がった弱い黄砂事例だった可能性がある。また、2022 年 3 月にはこの弱い黄砂と仮定された事例の他、3 月 26 日~27 日にかけて気象庁で福岡における黄砂事例が観測された。本事例は福岡での観測に先立ち五島周辺に飛来した黄砂であった可能性を示唆する。

表 7-2-2-1 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	2022/3/26	赤穂	3/26 11:00
		五島	3/26 0:00-2:00

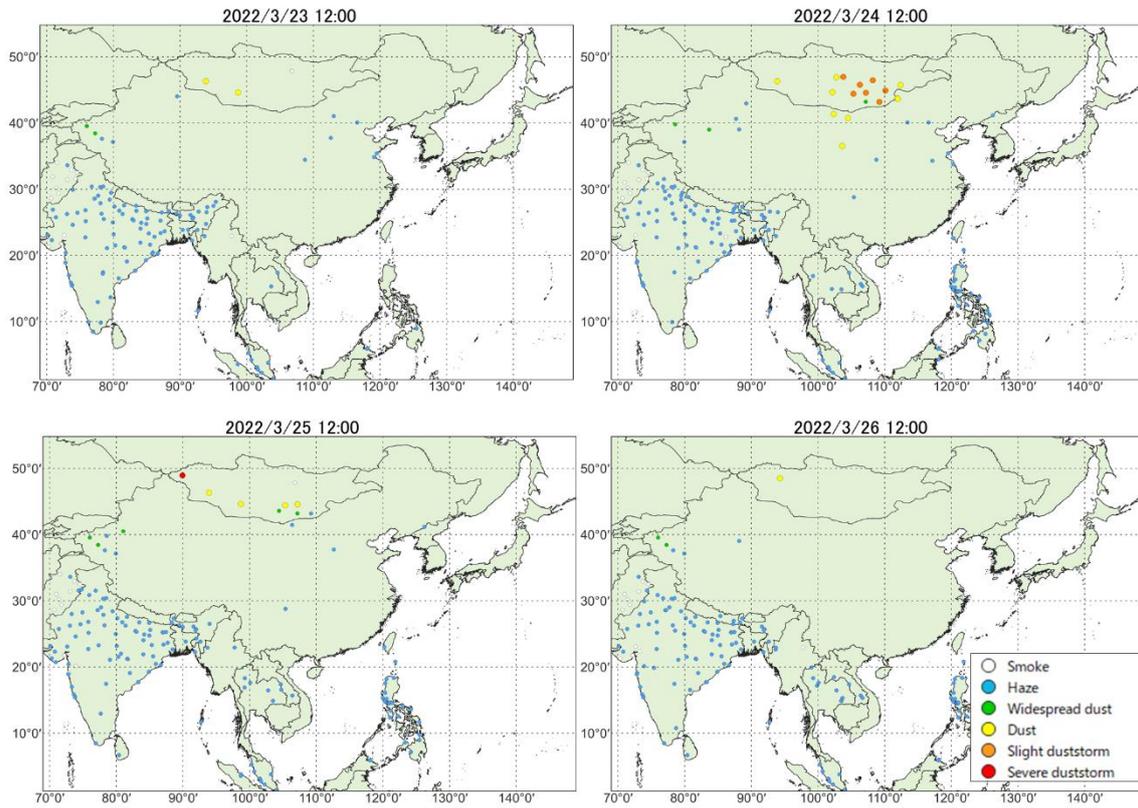


図 7-2-2-1 砂塵嵐発生状況

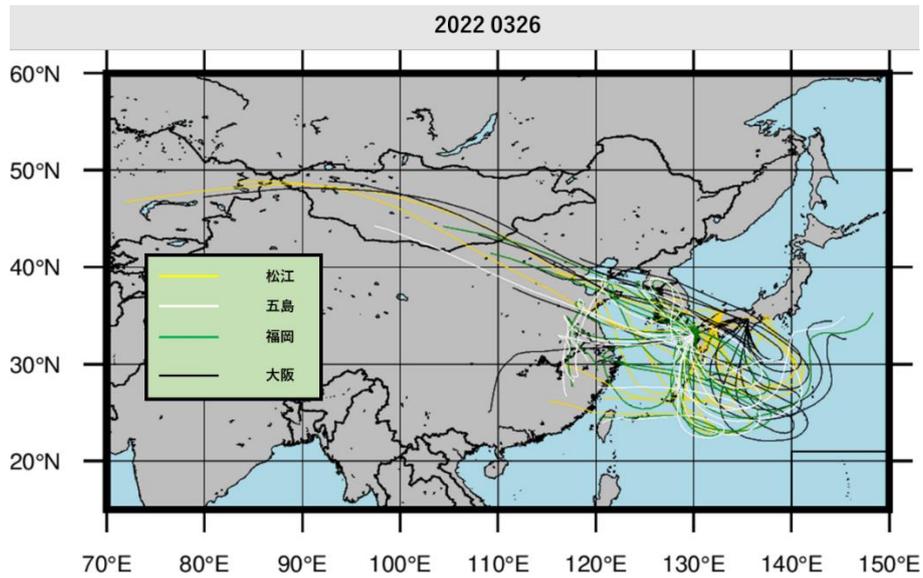


図 7-2-2-2 後方流跡線 (72 時間前より)

各地点、各黄砂観測日の 0:00 から 23:00 までの 2 時間ごと 12 時間分の、起点からさかのぼるデータを作図に利用した。これにより、ある黄砂観測日のある地点からは、12 の後方流跡線が作図される。

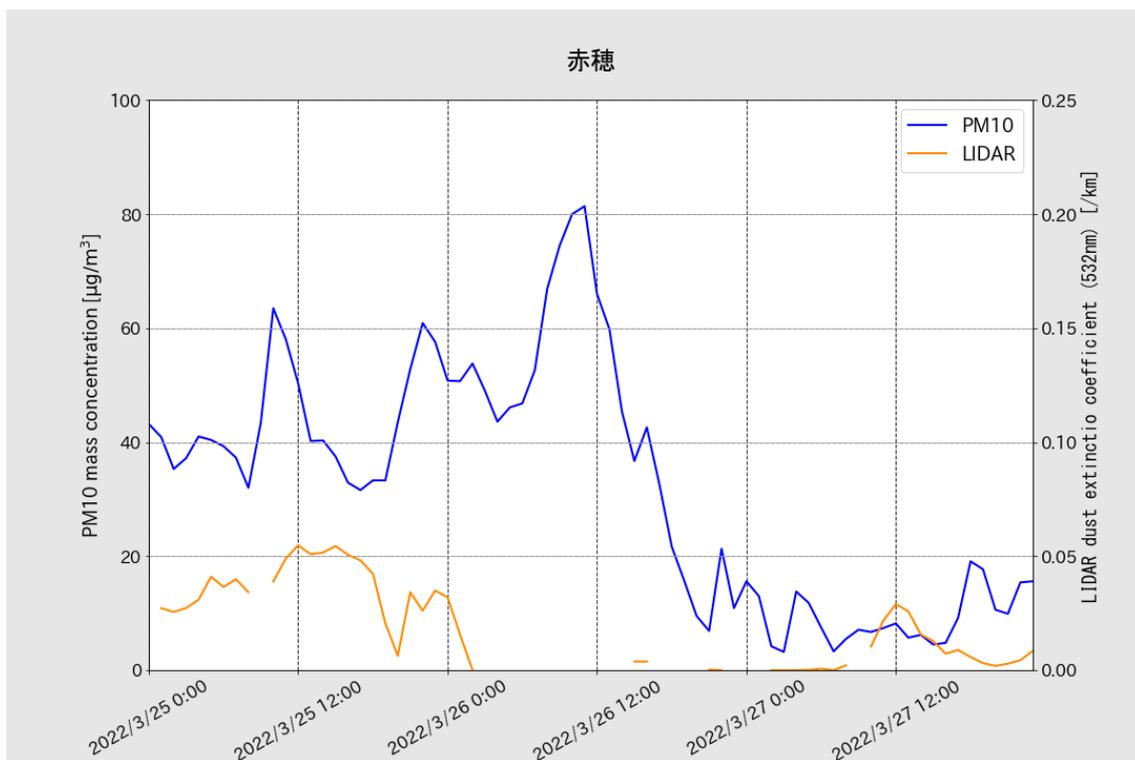


図 7-2-2-3 PM10 データ（赤穂）及びライダーデータ（松江）の時系列変化の比較

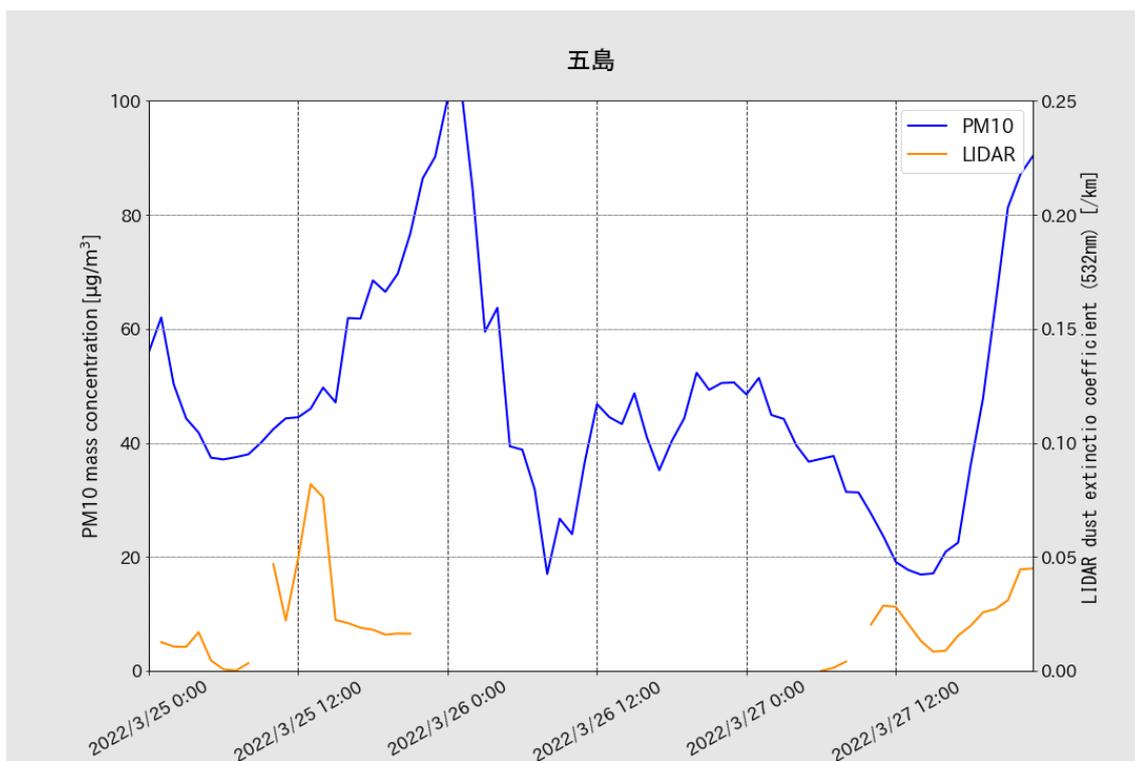


図 7-2-2-4 PM10 データ（五島）及びライダーデータ（長崎）の時系列変化の比較

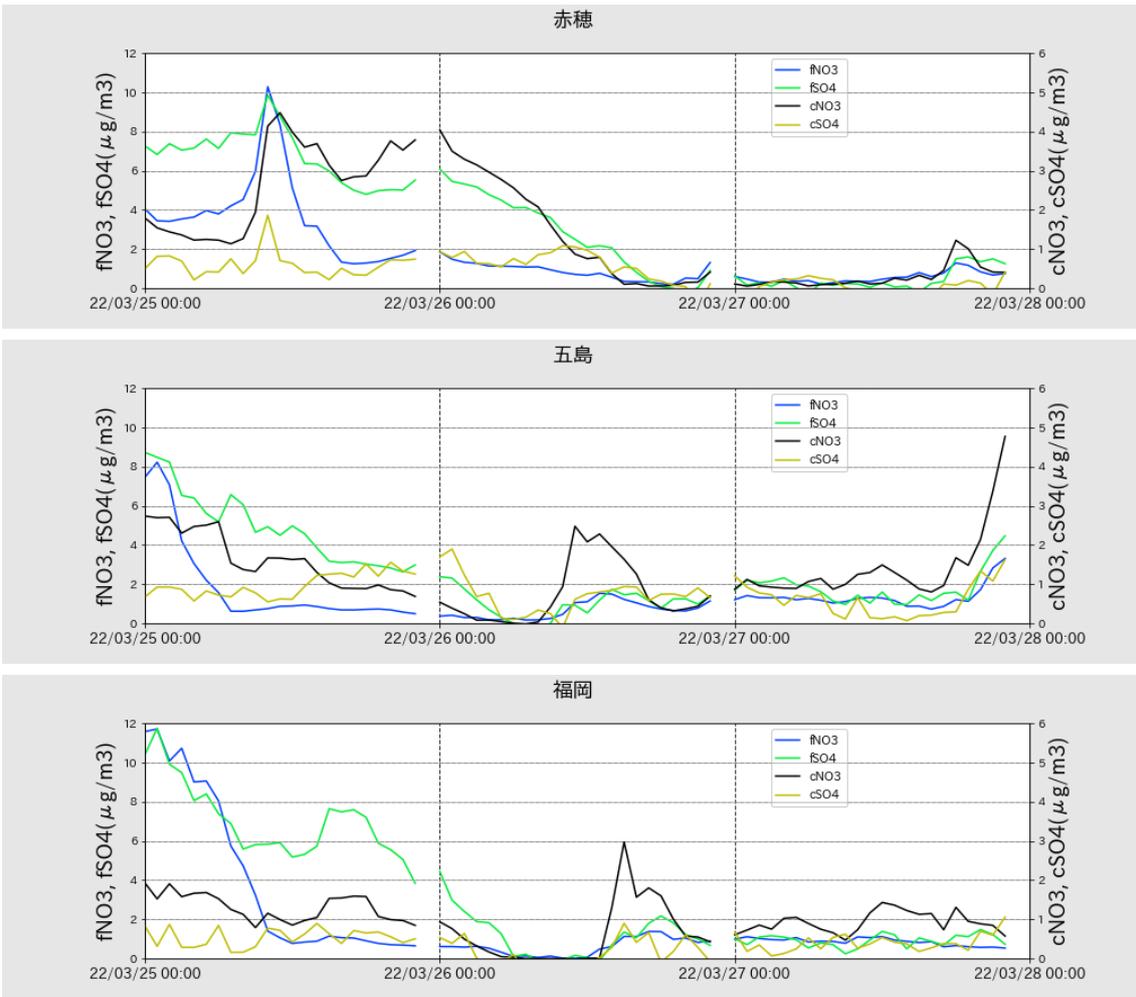


図 7-2-2-5 粗大粒子成分、微小粒子成分の  $\text{SO}_4^{2-}$  と  $\text{NO}_3^-$  及びその比

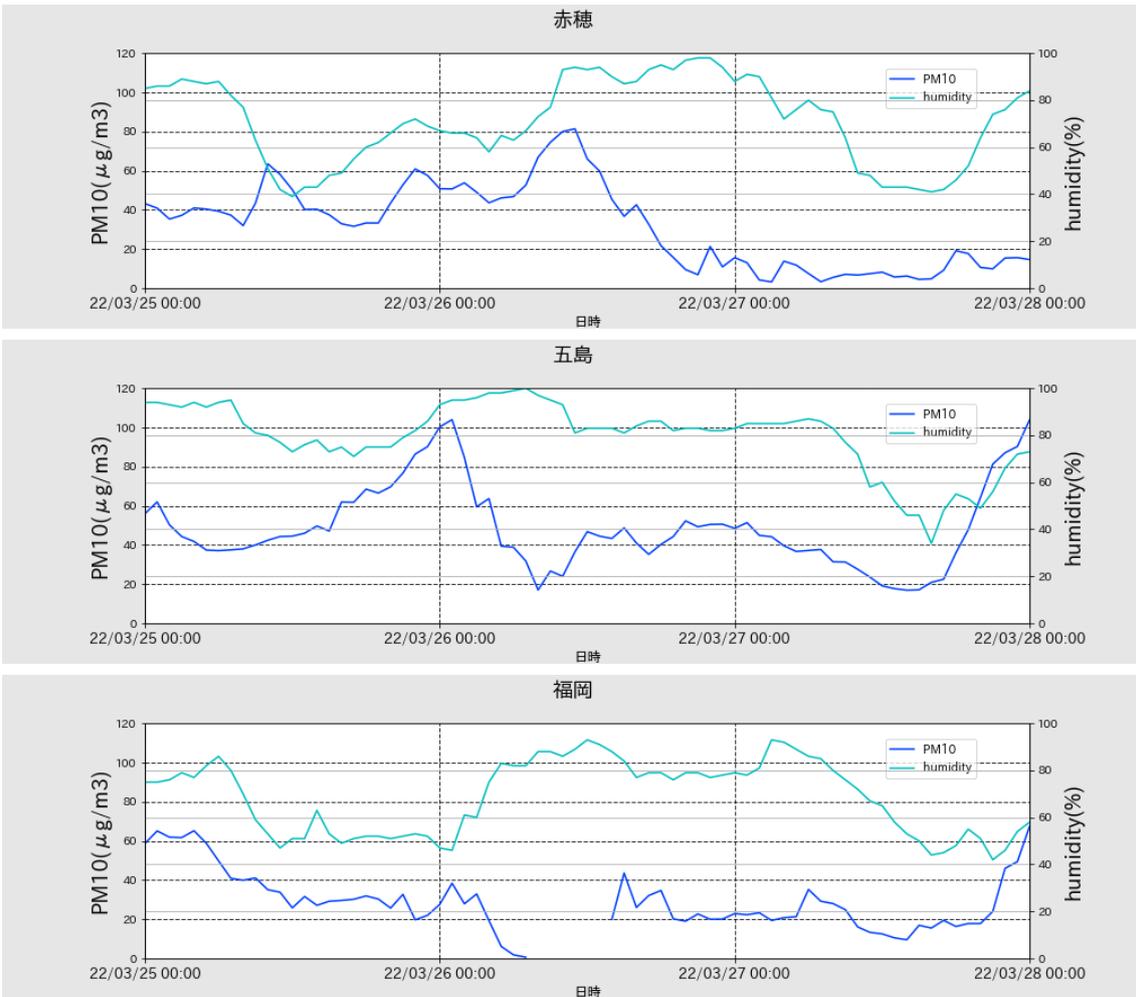
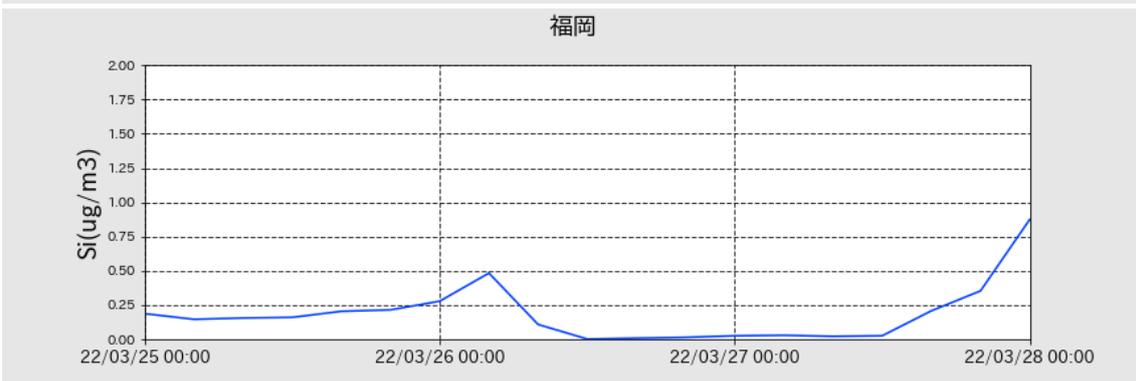
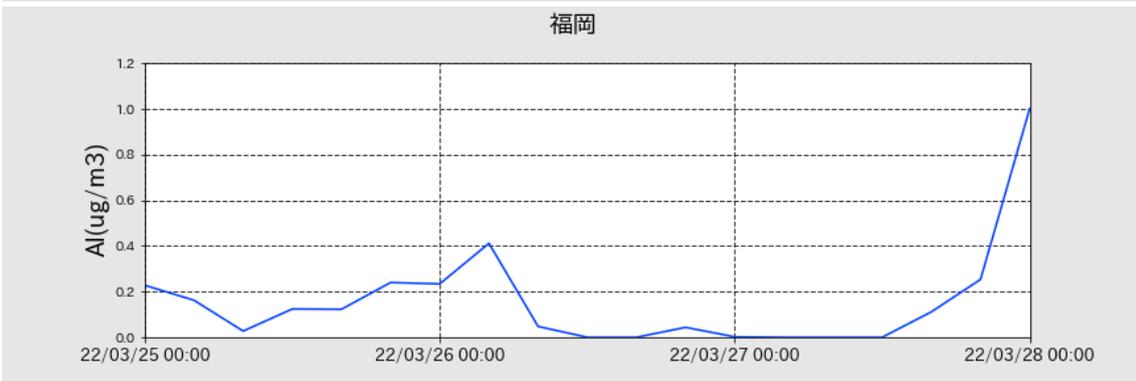
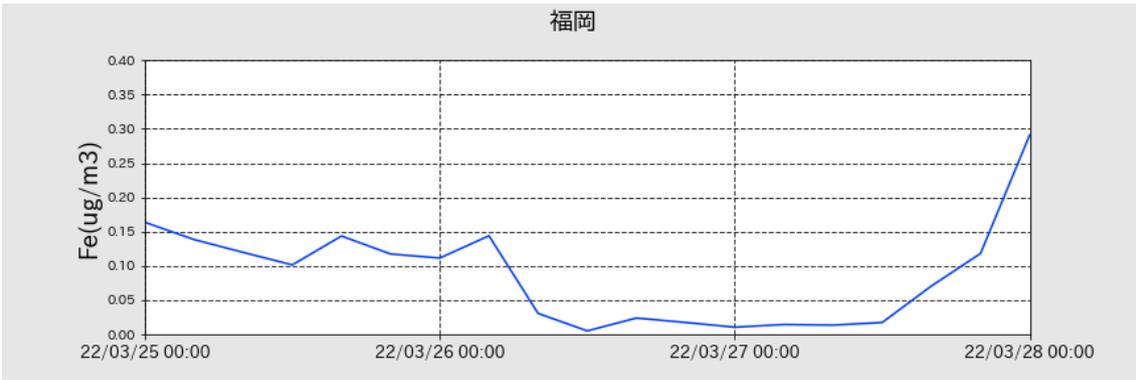
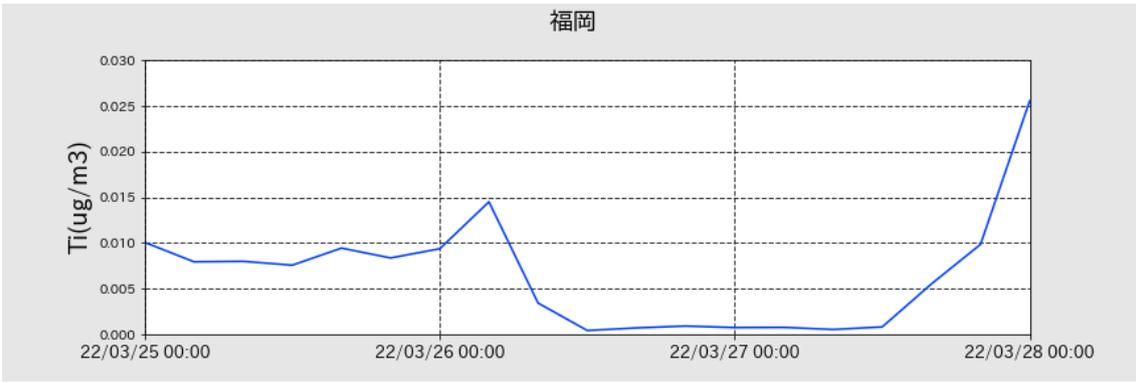


図 7-2-2-6 湿度と PM10 の時間変化



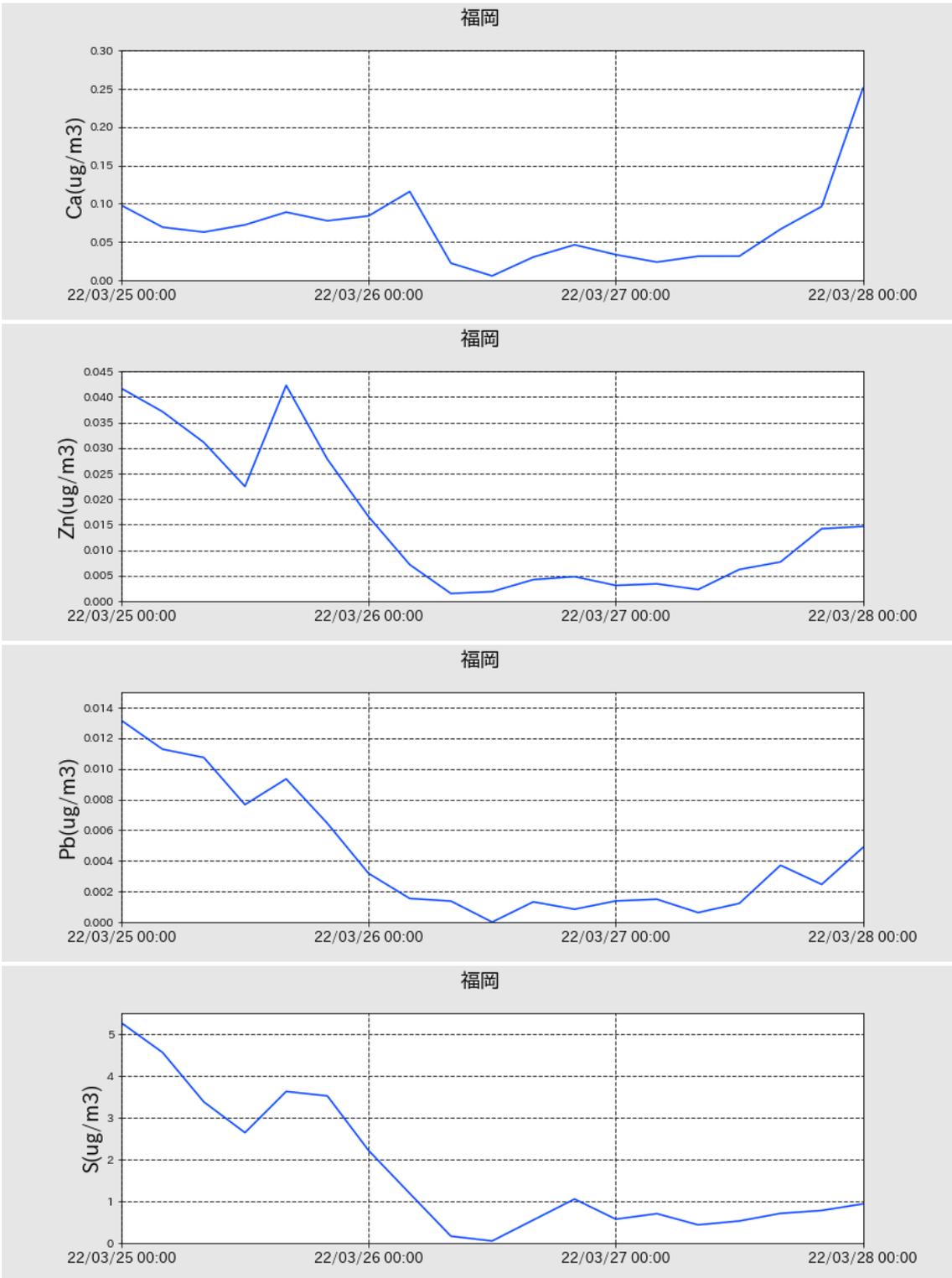
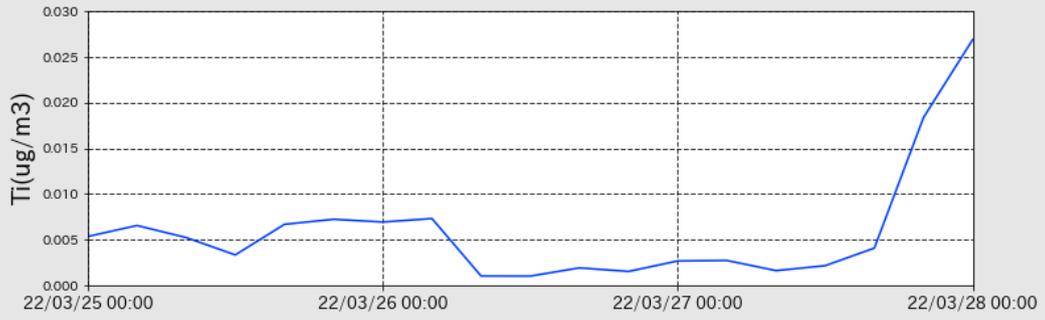
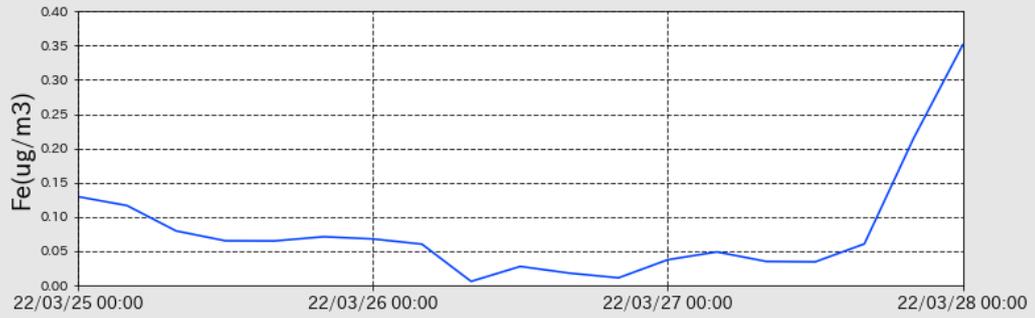


図 7-2-2-7 PX-375 による福岡における各金属成分元素

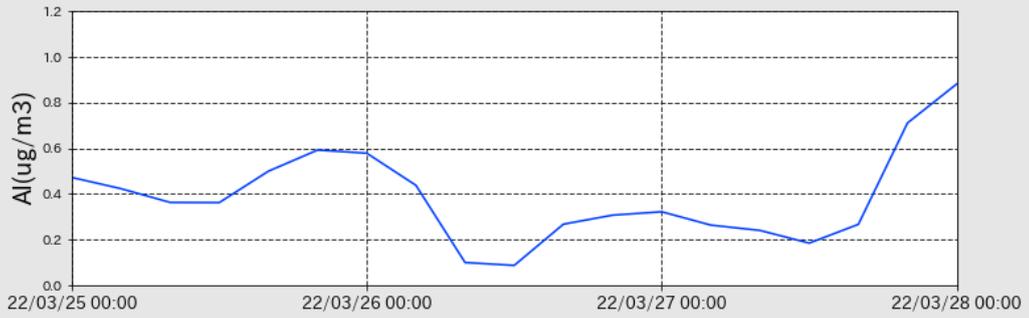
五島



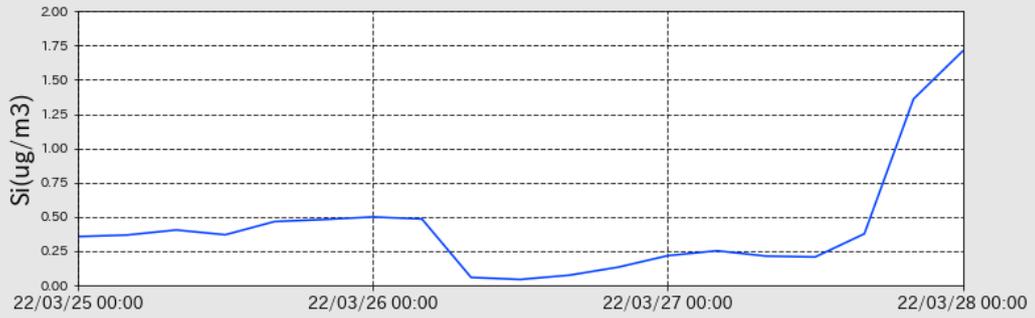
五島



五島



五島



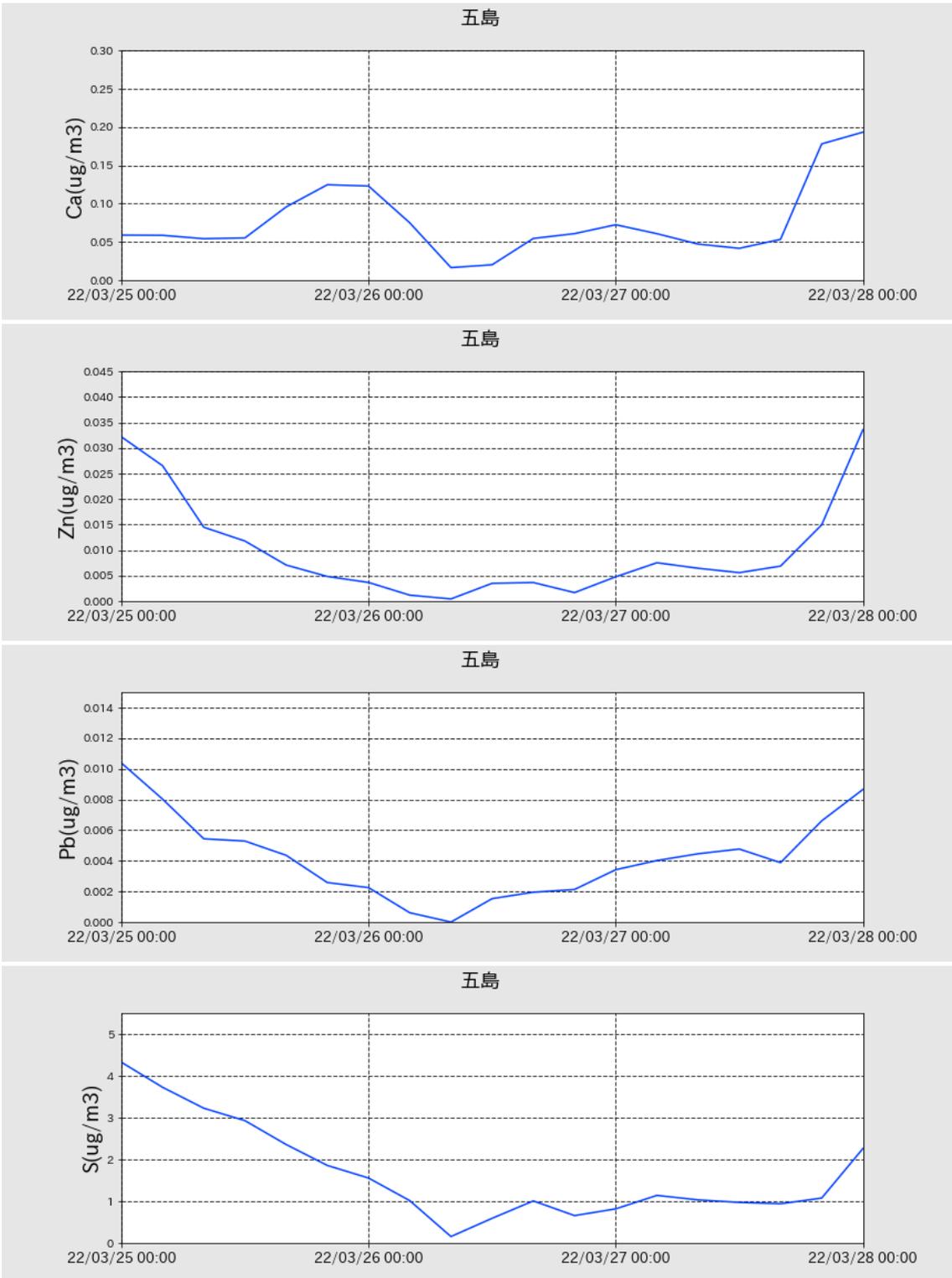


図 7-2-2-8 PX-375 による五島における各金属成分元素

### 7.3 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・包括的解析手法の候補として、人工衛星による観測データ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における弱点として、ライダー観測は荒天時に欠測となってしまうこと、また大規模な黄砂が減少傾向にあり 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、ひまわりの観測範囲を考慮すると、黄砂発生源域であるゴビ・タクラマカン砂漠周辺における砂塵嵐の発生状況の把握は十分とは言えない。そのため、より黄砂発生源域に近い地域の観測が可能であることが望ましいと考えられる。以上の経緯から本年度は、昨年度の文献調査結果も踏まえて、中国により打ち上げられた静止衛星「風雲 4 号」(Fēngyún-4、略称 FY-4) による観測データを用い、特定の黄砂日について可視化することで、人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討を行った。

「風雲 4 号」は、中国初の静止衛星「風雲 2 号」の後継機であり、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る。1 機目の FY-4A が 2016 年 12 月に、2 機目の FY-4B が 2021 年 6 月にそれぞれ打ち上げられ、2023 年 1 月時点で共に稼働している状況である。

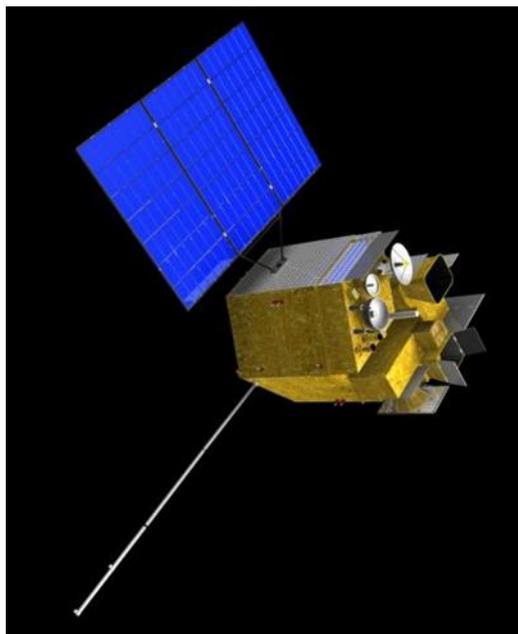


図 7-3-1 FY-4A (画像出典 : CMA/NSMC)

表 7-3-1 FY-4A により提供されているデータ

Type	Product name	Product specifications						Spatial resolution	Format
		Temporal type							
		Minutely	Hourly	Daily	Ten-Daily	Monthly			
Atmosphere	Aerosol optical depth	√	√	-	-	-	1 km	NetCDF	
	Atmospheric correction image	√	√	-	-	-	1 km	NetCDF	
	Atmospheric motion vector	-	√	-	-	-	64 km	NetCDF	
	Convective initiation	√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Fog detection	-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Dust detection	√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Total column precipitable water	-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Vertical moisture profile	-	√	-	-	-	16 km	NetCDF	
	Vertical temperature profile	-	√	-	-	-	16 km	NetCDF	
	Lightning detection	√	-	-	-	-	78 km	NetCDF	
	Liquid profile water	√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Rainfall rate	√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Tropopause folding	√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Ocean	Sea surface temperature	-	√	-	-	-	4 km	NetCDF
	Cloud and radiation	All sky radiation	-	√	-	-	-	4 km	NetCDF
Clear sky masks		√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Clear sky radiation		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Cloud optical depth		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Cloud phase		√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Cloud top height		√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Cloud top pressure		√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Cloud top temperature		√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Cloud type		√	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Downward long wave radiation: surface		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Outgoing long wave radiation		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Upward long wave radiation: surface		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Reflected shortwave radiation: TOA		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Surface solar irradiance		-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
Land surface		Fire/hot spot	√	√	-	-	-	2 km	NetCDF
	Land surface temperature	-	√	-	-	-	4 km	NetCDF	
	Land surface emissivity	-	√	-	-	-	12 km	NetCDF	

Note: The symbol √ means this product is available.

(出典 : XIAN et al. (2021))

FY-4 には、主要な光学的観測機器として、Advanced Geostationary Radiation Imager (略称 : AGRI) と呼ばれる撮像素子が搭載されている。AGRI は、NASA/NOAA により運用されている人工衛星と同様、米国のハリス社によって開発された機器であり、可視光から赤外線まで 15 チャンネルのスペクトル帯をカバーしている。時間解像度は、中国国内域は約 15 分毎、全球は約 1 時間毎、空間解像度は 1~4 キロメートルとなっている。黄砂検出に関連するデータとしては、Dust detection というデータにおいて、砂塵嵐の発生状況が 1~24 の数値による Dust score として数値化されている。ただし数値化の基準等、詳細な説明は十分に提供されておらず、数値の妥当性については更に確認が必要であると考えられる。表 7-3- 1 に示したデータは、FENGYUN Satellite Data Center のウェブサイト (<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>) にて提供されており、登録後無償でダウンロードが可能となっている。

ここでは、特に広範囲で黄砂が観測された 5 月 9 日の黄砂事例 (事例 2) を対象に、上記 Dust score を入手し可視化することにより、人工衛星を用いた黄砂検出手法の検討とした。中国国内域のデータを可視化した結果は、以下の図 7-3- 2 の通りとなった。5 月 6 日から 9 日にかけて Dust score 数値の高い赤い領域が拡散していく様子が表れている。ただし、データに格納されている位置座標の変数は、(x,y) の

それぞれについて、FY4A fixed grid projection x-coordinate 及び FY4A fixed grid projection y-coordinate とのみ記載されており、この座標系の詳細及び緯度・経度への正確な変換方法については目下調査中である。そのため、現時点では中国大陸や日本の位置はこのデータのみからは把握することができないが、格納されているデータ数から考えると、図中の位置 (1300, 0) 付近の点がおおよそ衛星直下点 (東経 104.7 度、北緯 0 度) に相当すると考えられる。砂塵嵐の発生及び移流の状況を把握する目的のためには、今後、上記の位置座標を緯度経度に変換した上で、地図上にプロットする作業が必要となる。

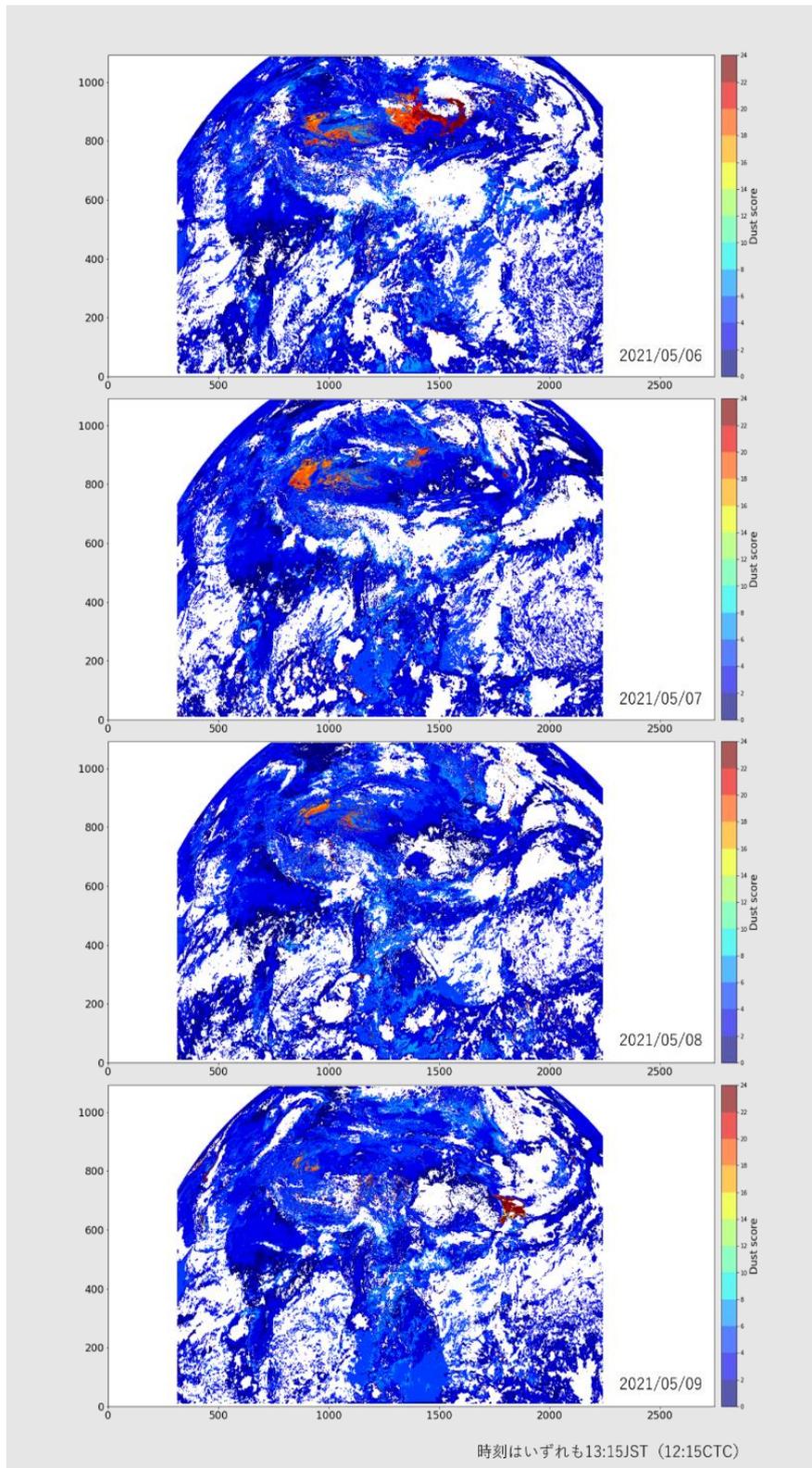


図 7-3-2 FY-4 A による Dust detection データ可視化結果  
 (5月9日の黄砂事例対象、カラースケールは1~24のDust scoreを表す)

## 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、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、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。

○今年度は粗大粒子の各イオン成分 ( $c\text{NO}_3^-$ と  $c\text{SO}_4^{2-}$ ) と PMc の比に着目し飛来した黄砂の性質を調べた。今後は黄砂が輸送された空気塊に汚染物質が含まれていた場合（外部混合状態）と、黄砂に汚染物質が付着していた場合（内部混合状態）を判断するために、これらの比の性質を黄砂事例解析に取り入れるとともに、微小粒子の各イオン成分 ( $f\text{NO}_3^-$ と  $f\text{SO}_4^{2-}$ ) と PMf の比にも着目して飛来黄砂の性質を調べていくことを検討するべきである。

○後方流跡線については地上または海上への着底（位置が高度 0m）についての詳細について触れることはなかった。今後はそれも含めた解析を行っていく必要がある。

○レーダーチャートの ACSA-14 の項目に関してはこれまで硫酸イオンデータのみ考慮して数値判断をしてきた。今後、黄砂・煙霧の特徴を広く、詳細に把握するために、硫酸イオンデータに加え硝酸イオンデータも考慮した統計的な数値判断を検討していく必要がある。

○人工衛星による黄砂飛来状況の把握について、中国の人工衛星 FY-4 による dust detection データを用いる場合には、砂塵嵐の発生位置及びその移流の正確な位置の把握のため、データに格納されている位置座標を緯度・経度座標に変換した上で地図上にマッピングする必要がある。

○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、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」 2022 : 令和 2 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](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=](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.eoportal.org/web/eoportal/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](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](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. 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
19. Fengyun Meteorological Satellite Products for Earth System Science Applications, XIAN et al., *ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES*, VOL. 38, AUGUST 2021, 1267–1284
20. Fengyun-4 Weather Satellite, [Fengyun-4 – Spacecraft & Satellites \(spaceflight101.com\)](https://www.spaceflight101.com/fengyun-4-weather-satellite/)

