

平成22年11月12日の黄砂飛来によるSPM高濃度

A Highly SPM Pollution caused by Asian Dust on 12 November 2010

仁平 明 佐藤 直樹 中村 栄一 菊地 秀夫
Akira NIDAIRA, Naoki SATO, Eiichi NAKAMURA, Hideo KIKUCHI

平成22年11月12日に飛来した黄砂は寒冷前線に伴う雨域が通過した後に到達し、移動性高気圧下の沈降性逆転層で鉛直拡散を押え込まれ、高度約2000m以下の大気下層を移動しているとみられた。到達が日没後など地表付近の大気が安定化している場合には黄砂は接地安定層より上を通過し、安定層内には侵入していなかった。なお、若狭湾岸において黄砂気塊が南下する様子が認められ、類似現象が発生した平成19年5月9日の大規模なOx越境汚染を解明する上で一つの手掛かりを得た。CFORSによる黄砂予測に関しては、一部課題があるもののSPM観測値をかなり良く再現していた。特に平成22年3月21日の黄砂では周辺海域の観測値が得られない沖縄のSPM濃度状況をよく説明しており、モニタリングに対して有用な情報が提供されると思われた。

キーワード：SPM；黄砂；寒冷前線；CFORS

Key words：SPM；asian dust；cold front；CFORS

1 はじめに

黄砂が飛来すると国内の広範な地域でSPM環境基準を超過することがあり¹⁾、その実態を把握しておくことが必要である。加えて黄砂は越境汚染である。大規模な黄砂は現象として比較的明瞭で、その際に生じる大気事象はOx等、他の汚染物質の越境汚染解明に繋がる。因みに輸送中に大陸の大気汚染物質排出域を通過した黄砂は人為起源の汚染物質を含む「汚れた黄砂」となる報告もなされている²⁾。更に、現在は膨大な計算資源を必要とする数値モデルの予測結果がWeb上で公開され、モデルの専門家でなくとも容易に活用できるようになってきた。予測精度の検証も試みられており²⁾、モデルの再現性が高ければ観測値を解釈する上で有用な情報が期待されることから、様々な場合について検証事例を増やすことは有意義と思われる。

従来から黄砂の観測は気象庁による東アジア域の目視観測網⁴⁾によって行われている。一方で都道府県・大気汚染防止法政令市が行う大気汚染常時監視のSPM観測値を用いた解析も報告されている¹⁾²⁾⁵⁾。特に後者の観測値は各自治体個々に管理されているが、国立環境研究所と地方環境研究所によるC型(現II型)共同研究⁶⁾においては、これに参加する自治体が保有する観測値を統一するデータベースの整備を進め、ほぼ全国を網羅するに至っている。本報ではこれを利用し、本県に飛来した黄砂時のSPM高濃度事例を全国規模で解析する。解析に際しては上述の背景を踏まえ、越境汚染の指標的観点から、また、数値モデルの妥当性を検証するデータ同化⁷⁾的観点からの考察をねらいとした。

2 解析方法

2.1 対象日

気象庁の観測によれば、平成22年に仙台で観測された黄砂は表1の4日である。表1には黄砂観測日に県内で観測されたSPM最大濃度とその測定局を併せて示した。3月21日は県北端部を除く全域でSPM濃度が増大し、環境基準200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を大幅に超過した。また、環境局、自排局を含め経年的にSPMを測定している35局中15局において測定開始以来の最大値を更新するなど大規模な汚染を引き起こしたものであり、東北地方における状況については既に報告している⁸⁾。5月5日及び5月21日の黄砂では県内でSPM環境基準超過は生じなかったことから、ここでは11月12日の高濃度事例を中心に解析する。

表1 平成22年の仙台における黄砂観測日

黄砂観測日	SPM最大濃度	
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	測定局
3月21日	878	柴田
5月5日	118	古川2
5月21日	107	高砂
11月12日	214	古川2

2.2 解析データ

- 1) 大気汚染常時監視データ
上記データベース(速報値)を使用
- 2) 気象データ
気象庁ホームページ(<http://www.jma.go.jp/jp/g3>)から引用
- 3) CFORS(化学天気予報システム)データ
国立環境研究所ホームページ(<http://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/index-j.html>)から引用
- 4) ライダーデータ
国立環境研究所ホームページ(<http://www-lidar.nies.go.jp/>)から引用

3 結果および考察

3.1 SPM 濃度状況

黄砂が飛来した平成 22 年 11 月 12 日の状況として、SPM 分布図、CFORS 黄砂予測図、地上天気図及び降水量分布図を図 1 に示す。12 日 3 時に長崎県離島の対馬、壱岐で SPM が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となった。CFORS による黄砂高濃度域は九州・中国地方の日本海沿岸に接近している。SPM $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の領域に着目すると、9 時には九州北部から中国地方に拡大し、15 時は九州中部から瀬戸内地域まで南下するとともに、北は佐渡島まで日本海沿岸を北上している。この間の CFORS は黄砂高濃度域が弓状の形態を保ちながら北東に移動しており、SPM 観測値をよく再現している。ただし、15 時に黄砂を予測した東北北部の日本海側では SPM 高濃度はみられなかった。

21 時以降も弓状の CFORS 黄砂高濃度域は更に北東進を続け、北側の領域が東北地方を横断して太平洋に達するとともに、南側の領域は東北南部以南以西の地域をすっかり覆っている。SPM はこれらの地域で $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上が観測されている。ただし、中部山岳地域では $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上にならず、このことについては後に考察する。

図 1 で天気図及び降水量分布図と見比べると、12 日 3 時から 15 時の間は黄砂の高濃度域が寒冷前線の背後で前線に伴う降水域の後ろに形成され、寒冷前線の移動に伴って高濃度域も北東進している。21 時～翌日 9 時は寒冷前線が太平洋上に抜け、北海道・東北地方の日本海側で寒気の吹出しによる地形性の降水があった。この降水域では SPM 濃度の増加はみられない。

以上のとおり、平成 22 年 11 月 12 日に飛来した黄砂は、低気圧からのびる寒冷前線が日本列島を通過した際にその後方で発現しており、3 月 21 日の場合⁸⁾と同様な事例であった。

3.2 気象要素と大気質濃度の推移

黄砂飛来時の新潟地方気象台及び仙台管区気象台の気象要素と当該気象台近傍の大気汚染測定局における大気質濃度の時系列を図 1 に示す。左側の新潟の場合、寒冷前線が通過した 12 日 9 時前後に降水があり、前線が抜けた 15 時以降は雨が止んで西風になり、SPM 濃度が急増している。このとき NO_x 、NMHC 濃度は低く、PO は約 40ppb でほぼ一定であった。SPM はその後減少したが、13 日 10 時に再び極大を示した。このときは NO_x 、NMHC も同様に増加していることから、移動性高気圧下で安定層が形成され地域汚染が生じたとみられる。

図 2 右側の仙台では、気象台近傍の榴岡にお

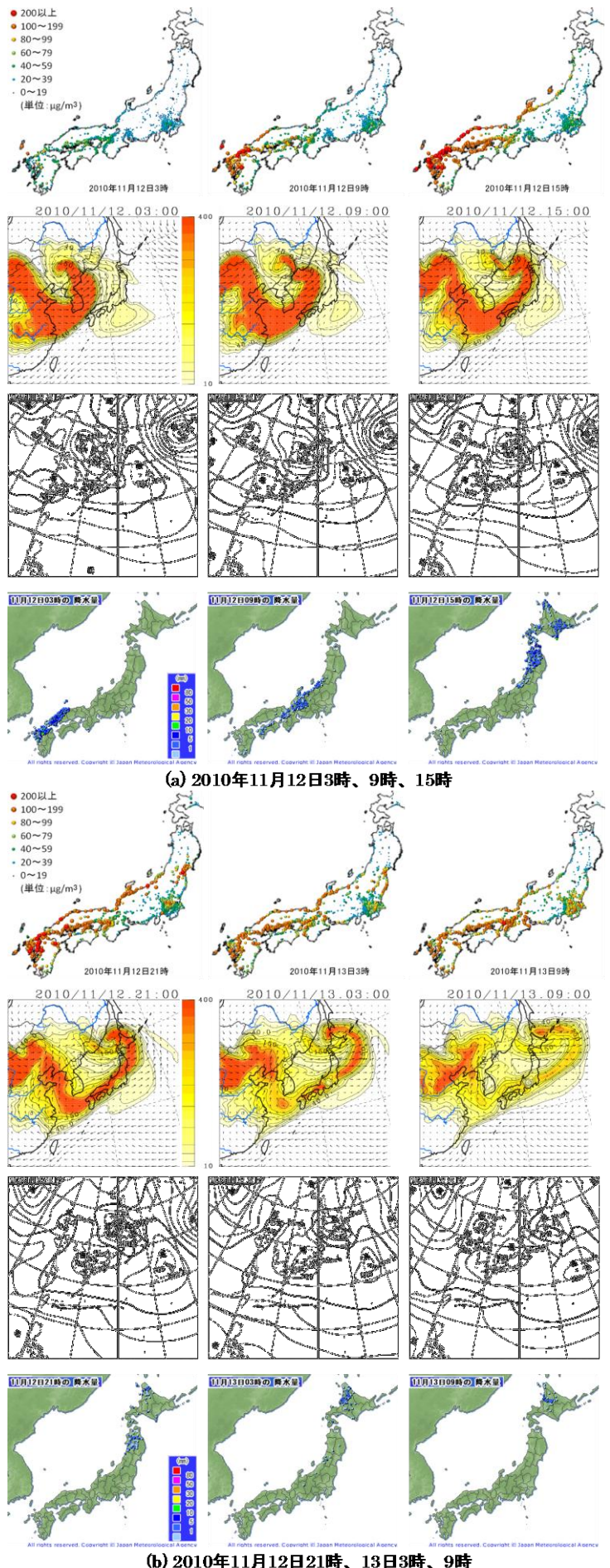


図 1 SPM 分布図と気象図
 1 段目：SPM 分布図、2 段目：CFORS 予測図
 3 段目：地上天気図、4 段目：アメダス降水量分布

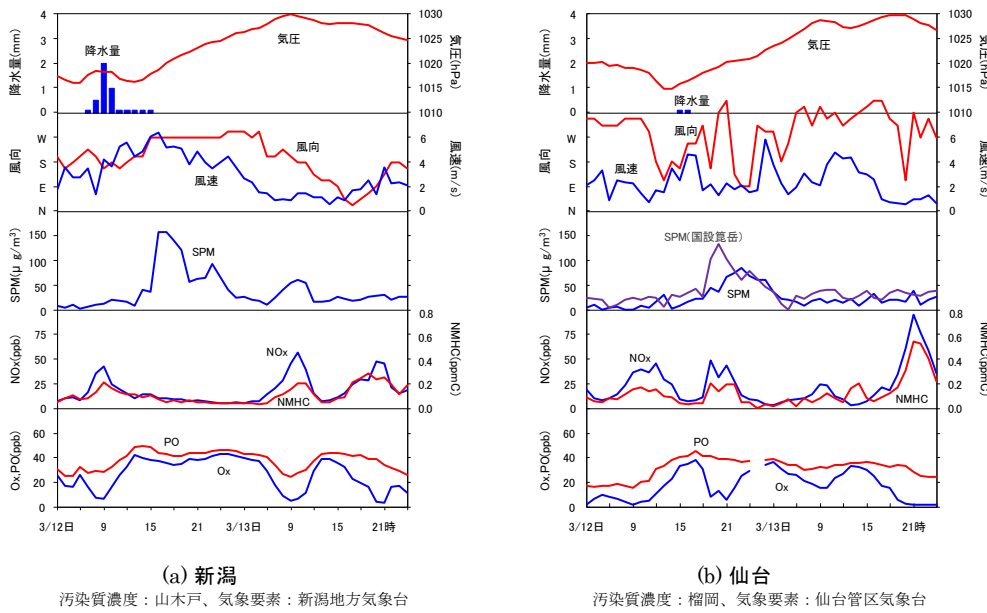


図2 黄沙飛来時の気象要素と大気質濃度変化図（2010年11月）
(注) 降水量0.1mmは0.5mm未満の感雨を表す

図3 エマグラム（館野）
2010年11月12日21時
青線は乾燥断熱直線

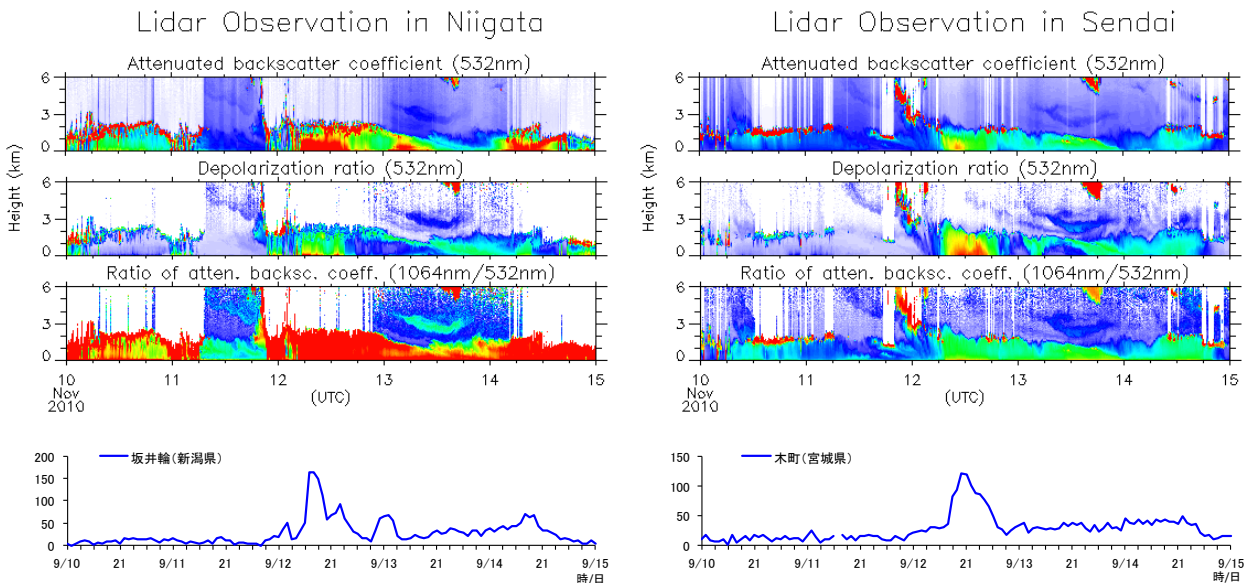


図4 ライダー観測とSPM濃度変化（2010年11月、新潟、仙台）
図の説明は本文参照

る SPM は新潟のように急激には増加していない。これに対し併せて示した標高 170m に位置する国設箕岳では SPM の急増が起きている。黄沙の到達は日没後の 18 時以降である。箕岳の SPM が増加したときに榴岡では風が弱まって NO_x、NMHC 濃度は増加しており、地表付近の大气は安定化していたとみられる。NO_x、NMHC 濃度が減少し安定層は解消したとみられる 23 時以降は、榴岡と箕岳の SPM は同様な推移をしていることから、黄沙が到達したときに地表付近に安定層が形成されている場合は、箕岳のように安定層より上を通過し、榴岡のように安定層内には侵入しないと解される。

因みに、茨城県館野においては図 3 のとおり 21 時に地上 130m までの強い接地逆転層が観測されている。

3.2 ライダー観測と SPM 濃度変化

図 4 に新潟と仙台におけるライダー観測結果を示す。ライダーはレーザー光線によるレーダーで、上空に浮遊する粒子状物質の鉛直分布を観測する。図の縦軸は高度、横軸は時間（UTC:世界標準時）で、一番上の図は散乱強度、水色から赤になるにしたがってエアロゾルが多く、青の部分は少ないことを表す。2 番目の図は偏光解消度で、水色から赤は土壌性の非球形粒子、青は大気汚染性の球形粒子、3 番目の図は粒子の大きさで、青が小さく、赤は大きい粒子を示す。また、下にはライダー観測地点近傍の大気汚染測定局における SPM 濃度変化（時間軸は JST:日本標準時）を示した。

左の新潟では SPM 濃度が増加した 15 時～翌日 3 時までの間、ライダー観測で地表から高度約 2000m まで黄沙粒子が認められる。この間は大陸由来の大气に置換

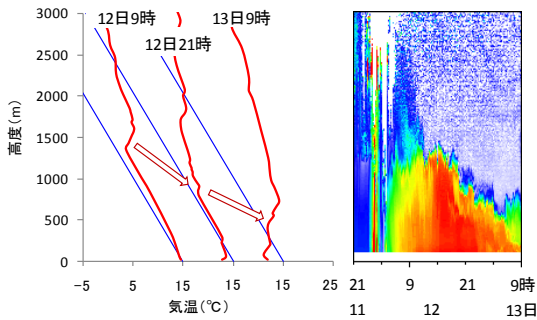


図5 福岡管区気象台高層観測と長崎ライダー観測結果

エマグラムは2010年11月12日9時、21時及び13日9時を表示。青線はそれぞれ地上気温15℃の乾燥断熱直線。ライダーは2010年11月11日21時～13日9時の偏光解消度。

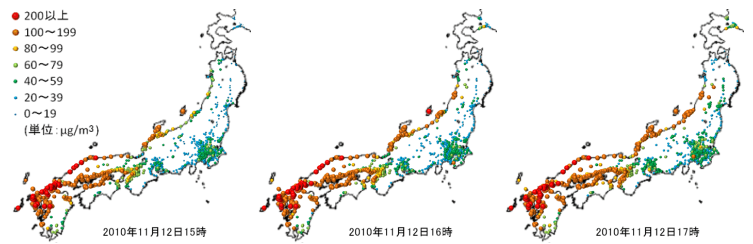
されていたのであり、図2のとおりNO_x、NMHC濃度は低く、POは約40ppbでほぼ一定であった。黄砂気塊が通過した後にSPMが極大を示した13日10時は地表付近で球形の大気汚染性エアロゾルを観測しており、図2の検討は妥当であると確認できる。

仙台のライダー観測は標高158mの東北大学青葉山キャンパスで行われている。近傍測定局として北東に約3Km離れた木町のSPMを示した。図2の榴岡の西方約3Kmに位置する分、黄砂の飛来時間が早く濃度の急増がみられる。更に西側の青葉山のライダー観測では木町より少し前から黄砂が確認され、その高度は概ね2000mであった。なお、県内において木町のような急増は内陸部の他の大気汚染測定局でも観測されている。

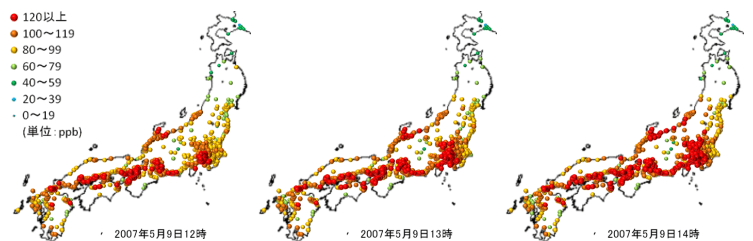
3.4 黄砂層の厚さ

九州北部は図1に示したようにいち早く黄砂が到達し、その後地表付近では継続して黄砂に覆われていた。図5の長崎におけるライダー観測の偏光解消度によれば、水色から赤で示される土壌性非球形粒子の層は12日9時頃に地表から1500m程度であったものが、次第にその厚さは減少し、13日9時には約700mになっている。この間は図1の地上天気図のとおり寒冷前線が通過した後、大陸からの移動性高気圧の圏内に入ったときである。図5に示した福岡管区気象台におけるエマグラムをみると、沈降性の逆転層が黄砂層の上端部分に形成され、その高度は時間の推移に伴って下降している。逆転層より上は沈降した清浄大気であり、黄砂は沈降性の逆転層によって大気下層に押え込まれている⁵⁾。この押え込みが働いて鉛直拡散を阻害するため、図1のCFORSの弓状の黄砂高濃度域はその形態を維持しながら移動すると考えられる。

ところで、図1(b)の中部山岳地域ではSPM100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の地点がみられなかった。図4で新潟及び仙台における黄砂層の厚さは約2000mである。2000m超の山々が連なる飛騨山脈の東側に位置する長野、山梨及び群馬



(a) 2010年11月12日黄砂 (SPM分布)



(b) 2007年5月9日Ox越境汚染 (PO分布)

図6 若狭湾における汚染気塊の南下

県では、黄砂層が飛騨山脈を越えられずに影響は生じなかったと理解され、CFORSでもそのような状況は表現されているといえる。

3.5 若狭湾における汚染気塊の南下

図6(a)のSPM分布を詳しくみると、12日15時に若狭湾入口では左岸以西の地域で、また、右岸から能登半島及び佐渡島で100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となっていたのに対し、湾の奥では80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に達していない。16時は北陸から山形県までの日本海沿岸で100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となり、佐渡島では200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上に濃度が増加した。若狭湾では入口の両岸から少し入った地点で濃度増加がみられるものの、湾奥部は80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満の状態が続いている。17時に湾奥部でも100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となり、濃度増加時間が湾の入口で早く、湾の奥では遅れ、南下の様子が認められる。CFORSによると黄砂気塊の形状は北東から南西方向に続く弓状のものであった。その形状によりこのような時間差が生じたと考えられる。

平成19年5月9日に発生した大規模なOx越境汚染^{9)~11)}の際にも、図6(b)のように同様なことが起きており、類似現象として説明の手掛かりを得た。なお、このときは琵琶湖南岸まで南下する様子が観測されている。

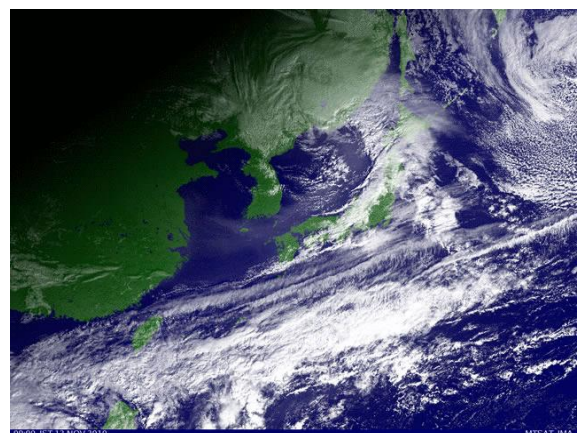


図7 気象衛星可視画像 (2010年11月12日9時)

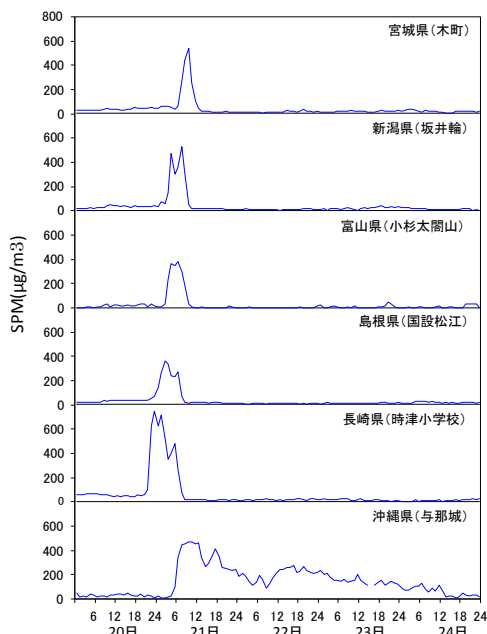


図8 黄砂時のSPM濃度変化
2010年3月20日～24日

3.6 CFORSの再現性

図1で検討したようにCFORS黄砂予測図の高濃度域は濃度値に差異はあるもののその形状はSPM観測値とほぼ対応していた。また、図7の12日9時の気象衛星可視画像には寒冷前線背後の日本海東部から朝鮮半島の南を経て東シナ海に通じる海上にベール状の半透明の領域が写っている。これは黄砂をとらえたもの¹²⁾で、図1(a)に示した同時刻のCFORS高濃度域の形状に相当していることから、CFORSの再現性は概ね妥当であるといえる。ただし、15時に高濃度黄砂を予測した東北北部の日本海側では降水がありSPMの増加はなかった。同じ状況は3月21日の黄砂でも生じており⁸⁾、降水の予測や降水による除去過程等の課題が残っていると思われる。

図8は大規模な黄砂に見舞われた3月21日前後の全国数地点におけるSPM濃度時系列である。長崎以北では10時間程度継続した急激な濃度増加が北の地域ほど遅れて発現し、黄砂の北上する様子が明瞭に現われている。これに対し沖縄では長崎の濃度が減少し始めた頃から増加し、環境基準を超える状態が数日間に及ぶなど、長崎以北とは様相が全く異なっている。ライダー観測によれば、沖縄の21日6時頃からの濃度増加は土壌性粒子によるものであった。図9のSPM分布をみると、20日24時に九州北部にあった高濃度域は、21日6時には九州・中四国全域から東北地方日本海側の地域まで広く拡大している。このとき沖縄では通常よりも濃度が増加し始めた。21日15時になると、環境基準を超える高濃度は房総半島付近と沖縄だけで、その他の地域はほぼ通常の状態に戻っている。

このようなSPM高濃度出現の状態を同図下段のCFORS黄砂予測図はよく再現している。11月12日の

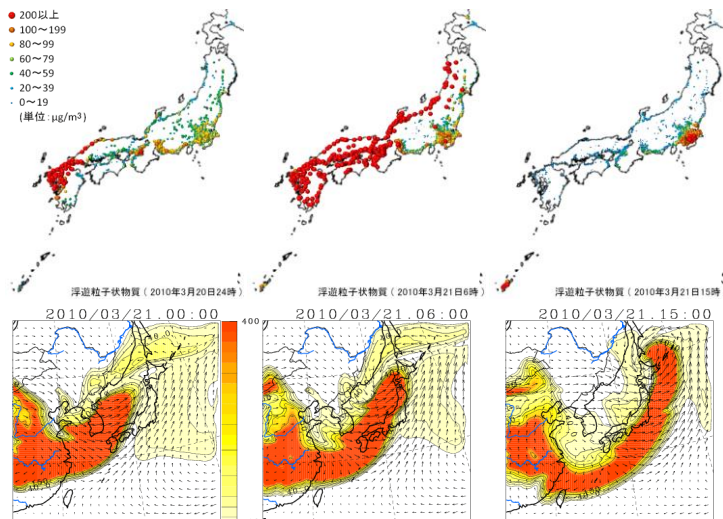


図9 SPM分布図とCFORS黄砂予測図
2010年3月20日24時、21日6時、15時

場合と同様に黄砂気塊が寒冷前線後面を移動したもので、その形状は寒冷前線に沿う弓状であった⁸⁾。図1との違いは、黄砂高濃度域の南端が沖縄にかかり、拡散されずに高濃度を保持していることである。そして、沖縄付近では高濃度域が東西にのびているため長時間に渡って沖縄上空を覆い、図8の濃度変化が現れたと解釈できる。海域に観測値がなく、いわんや図8のように沖縄と長崎以北で挙動が異なる現象を観測値のみで推察するのはなかなか困難であり、CFORS予測図を援用することにより、合理的な解釈が可能になった事例といえる。

4 まとめ

平成22年11月12日の黄砂事例を解析した結果、SPM広域汚染の把握の観点からは、①寒冷前線に伴う雨域が通過した後に黄砂が到達してSPMを高濃度化した。②黄砂層は寒冷前線後面の移動性高気圧下における沈降性逆転層で鉛直拡散を押え込まれ、高度約2000m以下の大気下層を移動しているとみられる。③このため2000m超の山々が連なる中部山岳地域では黄砂層がブロックされ、その直下流には影響が及ばない。④黄砂の到達が日没後など地表付近の大気が安定化している場合には黄砂は接地安定層より上を通過し、安定層内には侵入しない。

越境汚染の指標的観点に関しては、若狭湾岸において黄砂気塊が南下する様子が認められ、平成19年5月9日に発生した大規模なOx越境汚染を解明する上で一つの手掛かりを得た。

データ同化的観点については、①CFORSによる黄砂予測はSPM観測値をかなり良く再現しており、モニタリングに対して有用な情報が提供されると思われた。②特に平成22年3月21日の黄砂では、周辺海域の観測値

が得られない沖縄の SPM 濃度状況をよく説明していた。
③ただし、高濃度予測域通過時に降水のあった地域では観測値と大きく異なり、改善が必要と思われた。

5 謝 辞

本解析では国立環境研究所と地方環境研究所による C 型（現 II 型）共同研究において整備した大気時間値データベースを使用した。原データを提供いただいた共同研究構成自治体の皆様，並びにデータベースを構築された国立環境研究所の皆様に深謝します。

6 参考文献

- 1) 早崎将光，菅田誠治，大原利眞，若松伸司，宮下七重：大気環境学会誌，**42**，3，188（2007）
- 2) 早崎将光：第 51 回大気環境学会年会講演要旨集，74（2010）
- 3) 菅田誠治，大原利眞，黒川純一，早崎将光：大気環境学会誌，**46**，1，49（2011）
- 4) 木下篤哉，眞木貴史：天気，**56**，9，71（2009）
- 5) 西郷雅典：天気，**58**，1，63（2011）
- 6) 大原利眞編：国立環境研究所研究報告，203，4（2010）
- 7) 三好建正：天気，**57**，4，18（2010）
- 8) 仁平 明，高橋誠幸，中村栄一，木戸 一博：宮城県保健環境センター年報，**28**，103（2010）
- 9) 大原利眞，鶴野伊津志，黒川純一，早崎将光，清水厚：大気環境学会誌，**43**，4，198（2008）
- 10) 黒川純一，大原利眞，早崎将光，鶴野伊津志：大気環境学会誌，**43**，4，209（2008）
- 11) 早崎将光，大原利眞，黒川純一，鶴野伊津志，清水厚：大気環境学会誌，**43**，4，225（2008）
- 12) 西村修司：天気，**55**，5，66（2008）