

C-061 広域モニタリングネットワークによる黄砂の動態把握と予測・評価に関する研究  
 (1) 東アジアモニタリングネットワークによる黄砂動態の実時間的把握とデータ精度管理・  
 利用法に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

環境研究基盤技術ラボラトリー	環境分析化学研究室	西川雅高・森 育子・高橋克行
大気圏環境研究領域	遠隔計測研究室	杉本伸夫・松井一郎・原由香里
大気圏環境研究領域	大気物理研究室	菅田誠治・早崎将光
アジア自然共生研究グループ	アジア広域大気研究室	清水 厚

<研究協力者>	中国、日中友好環境保全センター	黄 業茹、董 樹屏、王 燕鵬
	中国、大気物理研究所	王 自發
	モンゴル、NAMHEM	Dulam Jugder, Dashdondog BATDORJ
	大気圏環境研究領域 遠隔計測研究室	西澤智明

平成 18～20 年度合計予算額 189,602 千円  
 (うち、平成 20 年度予算額 64,246 千円)  
 上記の合計予算額には、間接経費 43,754 千円を含む

[要旨] モンゴル、中国、韓国、日本において合計 18 カ所のライダーシステムを中心とする広域モニタリングネットワークが構築された。そのモニタリングデータや日本各地の一般環境大気測定局のデータを元に、2006～2008 年春季における黄砂の広域的な輸送現象の特徴を明らかにした。この 3 年間わたる広域モニタリングネットワークデータから、2008 年は黄砂発生量も日本への飛来量も特異的に少ない年であった。大気汚染物質と黄砂の相互作用による「汚れた黄砂」と「汚れていない黄砂」という視点から、代表的な事例をあげ、気象学的解析や輸送モデルによる解析研究を行った。発生源からの飛来ルートよりも輸送速度や気象条件による違いに特徴的傾向が見られた。精度の高い黄砂予報モデルの構築にはライダーネットワークデータの同化が有効であり、モデルに組み込むためのデータ処理アルゴリズムを確立できた。雲と砂塵系ダストとの区別が大略できるようになり、環境省が公開する黄砂飛来情報ホームページの観測情報の精度向上にも貢献した。

[キーワード] モニタリングネットワーク、ライダー、黄砂動態、発生源、輸送量

## 1. はじめに

中国内陸部およびモンゴルの砂漠・乾燥地帯から発生する砂塵嵐現象の発生回数や発生地が拡大傾向にあると言われている。中国沿岸部、韓国、日本で観測される黄砂現象はその砂塵嵐の長距離輸送の結果生じる現象であるが、黄砂現象の発生もまた増加傾向にあることが気象庁の長期統計データから知ることができる。黄砂は、風下側地域に社会的影響を与える物質であるが、発生量の増減は発源地の環境変化に対応する影響反映物質でもある。しかし、発源地域の地勢学的変化や気象学的な変化に対応する黄砂の詳細な実態解明や予報予測のモデルの精度向上が充

分に確立されているとは言えない現状がある。日本の対外協力による様々な枠組みで、発生源地域をかかえるモンゴルに3カ所の黄砂観測地点が加わり、中国（北京）1カ所、韓国2カ所、日本12カ所のライダー観測地点を合わせた黄砂モニタリングネットワークが構築された。このネットワーク観測を基軸として、モデルとのリンクを行い、黄砂の予報・予測精度の向上や、近年注目されている大気汚染物質と黄砂の汚れメカニズムを含む詳細な動態を明らかにすること、さらには発源地域の絞り込みや砂塵舞い上がり低減化対策に役立つ様々な科学的基礎情報を蓄積することを目指した。

## 2. 研究目的

本サブテーマでは、ライダーを中心とする多点モニタリングネットワークの構築と化学天気予報モデル（CFORS）との融合（サブテーマ2との連携）、そのためのネットワークデータの精度管理手法やデータ処理システムの開発、既存の浮遊粒子状物質（SPM）常時監視ネットワークデータを利用した気象学的解析、また、黄砂と大気汚染物質との反応を捉えることを主とした物理的・化学的手法による詳細な動態変化の把握（サブテーマ2および3との連携）ならびに黄砂発生量や飛来量の推定などを目的として研究を実行した。

## 3. 研究方法

前述の様々な目的に対応するために、以下にあげる研究手法の採用／取組みを行った。

（1）北東アジア地域に構築した18カ所のライダー観測システムによる継続的な観測を行うとともに、開発した実時間のデータ解析処理手法を適用して、観測データの同化実験（サブテーマ2）を行った。また、特に黄砂濃度の導出に関わる偏光解消度の地点間の差異とその要因を精査し、地点間ばらつきを小さくすると同時に識別結果の改善に取り組んだ。ライダーネットワークデータにより、2006～2008年春季に観測した黄砂現象を総合的に解析するとともに、領域化学輸送モデル（化学天気予報モデルCFORSを利用）との比較を行なった。

（2）一般大気環境測定局のリアルタイムデータを使用した（便宜上、常時監視局と呼ぶ）。対象とする測定項目は、浮遊粒子状物質（SPM）、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、オキシダント（O<sub>x</sub>）とする。黄砂期間の特定のために、気象官署による現在天気報を使用した。

（3）黄砂発生量、輸送量の推計には、修正したCFORSを元として、全球客観解析（NCEP）境界条件2.5度（水平解像度）を用いて推計した。なお、東経130°における北緯20～55°の鉛直緯度断面を対象として計算した。ダストを発生させるゴビ砂漠領域を東経95～115°、北緯38～45°と規定し、発生量推定を行った。

（4）北京（日中友好環境保全センター屋上）および長崎（長崎大学屋上）に飛来した黄砂をステップサンプラー（グリーンブルー㈱製；KE-101、捕集フィルターはニュークリポア）を用いて、毎2時間の時間分解能による捕集を行った。得られた直径約1cmスポット各試料についてPIXE法による分析を行い、無機元素の時系列的変化を追跡した。特に、大気汚染物質の指標となる煤や硫黄分に注目して、黄砂時の濃度変化を追跡した。

#### 4. 結果・考察

(1) ライダーネットワーク観測で把握した北東アジア域における黄砂現象

##### 1) 2006年の黄砂現象

2006年3月、4月、5月にライダーネットワーク地点で観測された黄砂消散係数を図1に示す。2001年からデータのある北京を例にとると、地上で比較的規模の大きな黄砂が観測された回数は、2001年、2002年が4回、2003年から2005年は各1回と少なかったのに対して、2006年は再び3回(4月8~10日、17日、5月18~19日)と多かった。特に顕著なイベントは、2006年4月17日の未明に北京に大量の砂塵が降った現象であった。地上に降った砂塵の粒径は極めて大きく、北京地上の大気中浮遊粒子(PM10)の質量濃度ピークは $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度で、それほど大きな値を示していない。ライダーのデータを見ると黄砂の層はやや浮かんで北京上空を通過していることが分かる。この黄砂は4月18~19日に福江、松江、長崎、富山、つくば、仙台などに飛来した。4月8~10日、5月18~19日の北京の砂塵は日本には直接輸送されていない。

一方、ソウルでは4月8日に高濃度の黄砂が観測された。また、松江、福江、長崎、つくばなどでも黄砂が観測された。この時、北京ではこれに対応する黄砂現象が顕著に見られず、輸送経路が北京の東側にあったと考えられる。

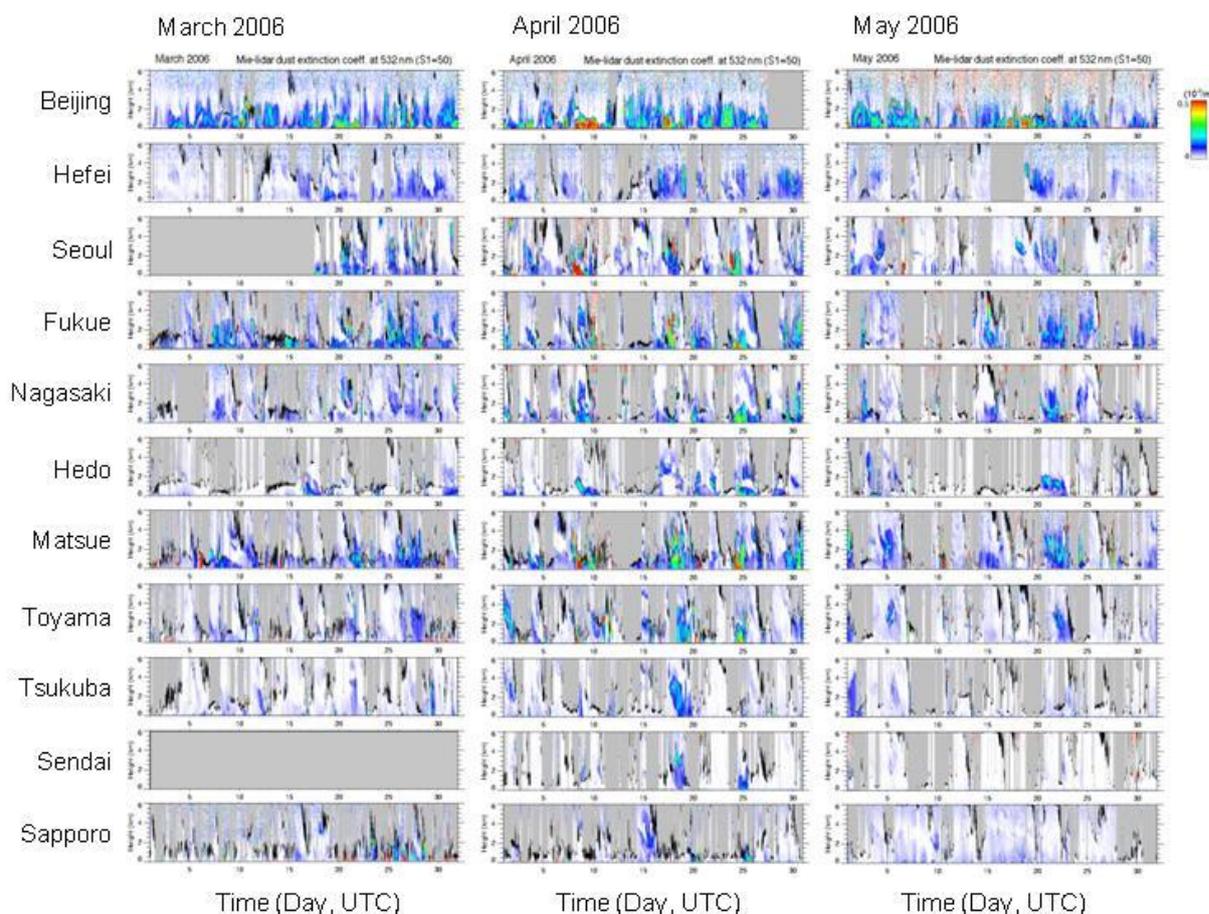


図1 2006年3月、4月、5月にライダーネットワーク地点で観測された黄砂消散係数

## 2) 2007年の黄砂現象

2007年春季の大きな特徴は、3月下旬まで北京、ソウル、日本各地において砂塵、黄砂の飛来がほとんどなかったことである。北京においては、3月31日、4月20日などに黄砂現象が見られたが、いずれも規模は中程度であった。日本では、4月1～3日にかなり濃度が高く、持続時間も長い黄砂現象が全国的に観測された。なお、この黄砂はソウルでも地上PM10最高濃度が1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える激しい黄砂現象(3月31日～4月2日)を引き起こした。2006年4月8日の激しい黄砂事例と同じように、この黄砂の中心塊は北京の東側を通過してきたと考えられる。この他、特徴的な現象として、4月16日に辺戸岬で、4月21日に札幌で黄砂が観測されている。

図2は2007年3月、4月、5月の10地点の黄砂消散係数(光学的な黄砂濃度)の時間高度表示である。北京については、2007年春の時点では日中友好環境保全センター(以下日中センター)の協力が得られず、日中センターでの観測データはない。一方、北京の大気物理研究所の協力によりライダーデータを入手することができたので、同様の解析処理を行いデータ同化実験に利用したが、ここにはデータを表示していない。2007年春季には、3月の末から4月の初め、5月初旬、5月下旬の3回の顕著な黄砂イベントがあったことが分かる(図中、□枠で囲んだ部分)。2007年は黄砂の発生時期が遅く、特に5月26日前後に観測された黄砂は異例に遅い黄砂であった。データ同化をしないCFORSと比較すると、CFORSはこれらの黄砂イベントを定性的に再現するが、4月の黄砂イベントではCFORSが過大評価、5月下旬の黄砂では過小評価していることが分かった。これらの3つのイベントについてはサブテーマ2でデータ同化実験が行われ、発生源、発生量の定量的な評価が行われたが、これらのイベントはライダーネットワークデータによる同化の有効性を示す良い例となった。

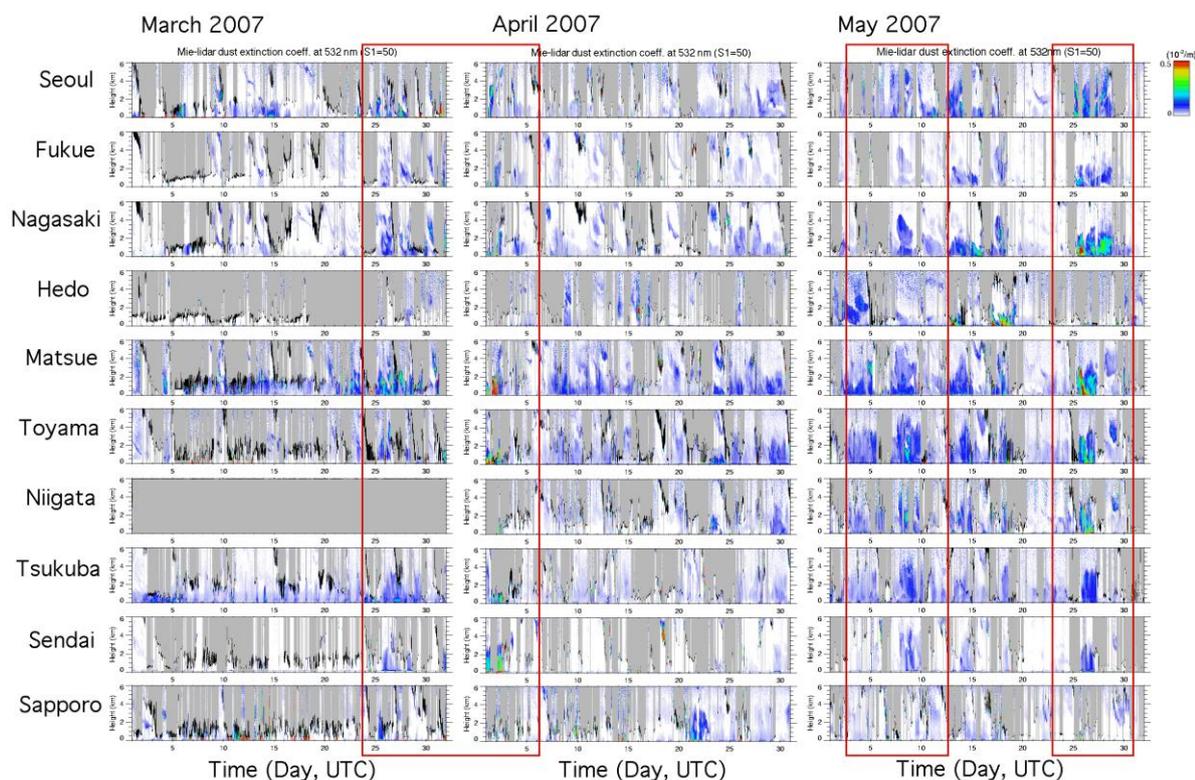


図2 2007年3月、4月、5月にライダーネットワーク地点で観測された黄砂消散係数

2007年は、4月24日、5月8～9日、5月27日など、越境大気汚染によると推定される光化学オキシダントが観測された。図2に2007年3月、4月、5月の10地点の球形エアロゾルの消散係数を示す。ライダーで観測される球形エアロゾルは、主に硫酸エアロゾルや人為活動をはじめとする物の燃焼に伴い発生する一次エアロゾルである。光化学スモッグ関連物質に直接対応するものではないが、各地点の時間高度表示には地域規模の現象を反映する時間変化と相関が見られる。5月8～9日の例では、黄砂も同時に観測されている。

2007年はこの他、12月末にも北京で比較的大きな黄砂イベントが観測された。この黄砂は南に輸送され、日本では観測されなかった。

### 3) 2008年の黄砂現象

2008年は全般に黄砂の少ない年であった。図3に2008年3月、4月、5月の黄砂と大気汚染性エアロゾルの分布をライダーネットワークのうちの11地点について示す。

日本では、3月3日と17～18日、5月31日から6月2日に黄砂が観測された。このうち、6月2日（松江）の事例は、春季の最も遅い黄砂の記録を更新した。4月中旬の浮かんだ黄砂は、北京およびモンゴルでは観測されず、データ同化をしないCFORSでも再現されなかった。同じ時期にロシア東岸地域で発生した森林火災の煙の可能性も考えられたが、偏光解消度および波長比は明らかに黄砂の特徴を持つものである。再解析データを用いたモデル（CFORS）と、NASAの衛星搭載ライダーCALIPSOのデータを用いた解析の結果、モンゴル東部を発生源とすると推定された。

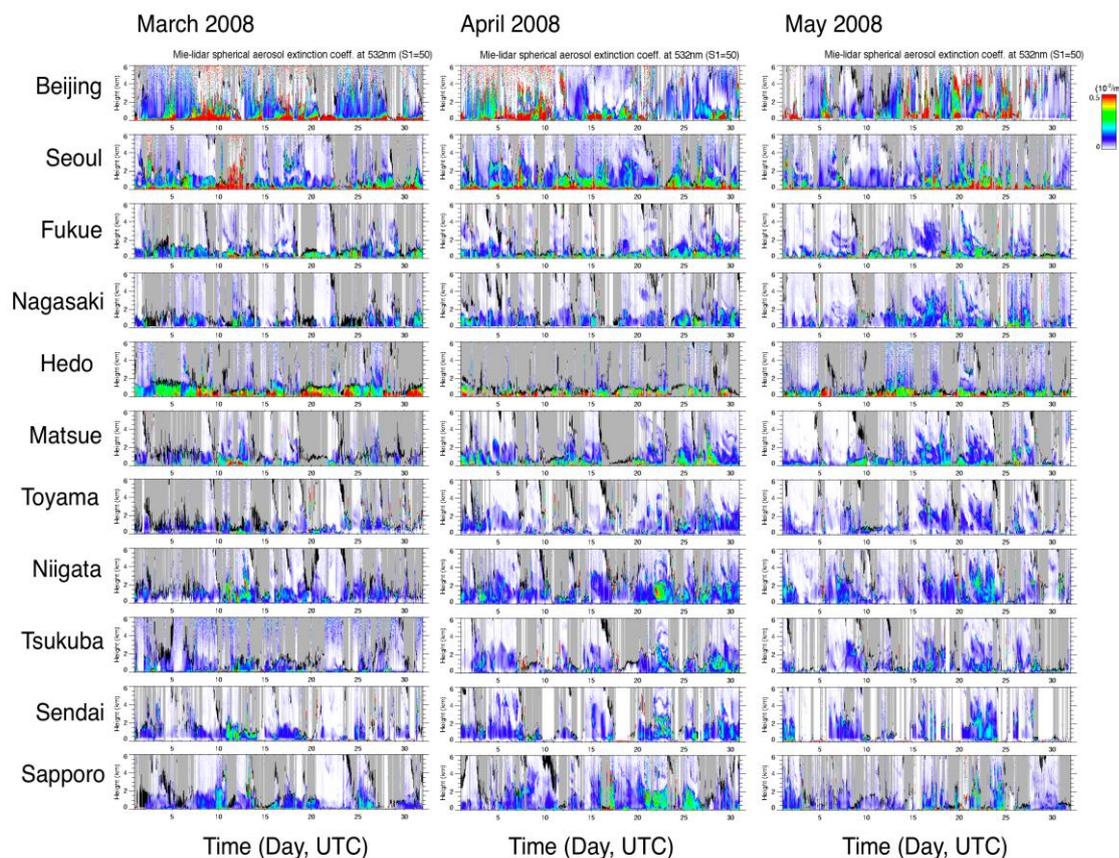


図3 2008年3、4、5月の大気汚染性エアロゾルの消散係数

一方、大気汚染性（球形）エアロゾルの時間高度表示では、局地的な汚染と地域規模の汚染の両方が見られ、全般に複雑であるが、地点間の相関から地域規模の汚染を特定することができる。後方流跡線解析の結果によると、4月21～23日頃と5月21～24日頃には、新潟、つくば、仙台、札幌などでロシア東部からの森林火災の煙が観測されている。

#### 4) これまでに観測された黄砂現象のまとめ

表1に、つくば、長崎、北京のライダーで捉えられた2001～2008年の主要イベントを掲げる。北京については、黄砂の観測される頻度が非常に高いので比較的規模の大きなイベントのみを掲げた。

表1 主な黄砂イベント

		2月	3月	4月	5月	その他
2001年	つくば		6-7日	14日(弱)		
	長崎		3, 7, 22, 26-27日	12-13日	16-17日	
	北京		1-3, 5-6日	<u>7</u> , 9-10, 30日	4, 15日	
2002年	つくば		16-22日	2-3, <u>10-11</u> , 4-15, 18-20日		11月 12-13日
	長崎		9-10, 20-21, 23-25, 31日	1-3, <u>8-14</u> , 17-18日	25-27日(弱)	11月 12-13日
	北京		<u>20</u> 日(大黃砂)	<u>6</u> 日(大黃砂), 15-16日		11月 11日
2003年	つくば			13日(弱)		
	長崎			13日		
	北京			11-12, 13-17日		
2004年	つくば		12-13日	17日(上空)		
	長崎		11-12, 14-15, 31日	3, 24日	4-5日	
	北京	13日	9-10, <u>28-29</u> 日	15, 25日	2, 6-8, 23-24日	
2005年	つくば		18日	7-9, 30, <u>31</u> 日-	<u>-1</u> 日(上空)	
	長崎	23日	2, 16, 18日	20-21, 23日	5, 10-12日	11月7日 (松江)
	北京		16, 19, 26-27日	4-6, 19, <u>29</u> 日	1-4日	
2006年	つくば		12, 22, 29日	<u>8</u> , 18-19, 28, 31日-	-2日	
	長崎		7-8, 15-16日	<u>8-9</u> , 17-18, 20, 24-25, 29-30日	2, 21-22日	
	北京		3-9, 17, 27日	<u>7</u> , 8-10, <u>17</u> , 19日	16, 18, 31日	
2007年	つくば			1-2日	<u>8-9</u> , 26日	
	長崎	14, 23日	31日-	-2日	<u>8</u> , 25-28日	
	北京		27日	17-19, 28-29日	4, 7-11, 15, 23-24日	
2008年	つくば		3, 17-18日	15-16日(上空)		
	長崎		3(雨), 17-18日		31日-	6月1日
	北京		1, 7-12, 16-19日		20-21, 27, 28, 31日	

2006～2008年の期間に着目すると、2001年、2002年に見られたような、シベリアの大きな低気圧を伴うような大規模な黄砂現象はみられなかった。

2006年は黄砂の発生頻度が比較的多く、特に北京では非常に高い頻度で黄砂が観測された。中でも特異な事例は4月17日で、夜間の数時間の間に大量の砂が北京に降下した。2006年は日本でも高い頻度で黄砂が観測された。4月8日の事例は、ゴビ砂漠からストレートに近畿、中部、関東地方に黄砂が輸送されたと考えられる。北京ではこれに対応する黄砂現象が顕著に見られず、輸送経路が北京の東側にあったと考えられる。

2007年は、規模は大きくはないが2月中旬から5月の下旬までの長い期間に渡って黄砂が観測された。2月14日には、ソウル、松江などで黄砂が観測された。4月1～2日の黄砂は、松江、富山で強く観測された。5月8日の黄砂は大気汚染と同時に飛来し、西日本で光化学スモッグ注意報が発令された。5月27日も北九州などで光化学スモッグ注意報が発令された。モデル結果によると、この時の黄砂は中国のかなり広範囲に広がった後に日本に輸送されている。5月25～28日に長崎などで観測された事例は記録的に遅い黄砂であった。この記録は2008年に更新された。

## (2) 黄砂モニタリングネットワークデータの精度管理とデータ処理システムの開発

モニタリングデータの精度管理は国際的にデータを共有し正確な黄砂動態を把握するために不可欠である。特に観測データに基づいて黄砂輸送モデルのデータ同化を行い、観測に基づいてモデルを改良するにはデータの信頼性は極めて重要である。

これまでに展開している黄砂モニタリング用ライダーは、2波長（532 nm と 1064 nm）で後方散乱信号を測定する機能の他、532 nm で偏光解消度（散乱に伴う偏光の乱れ）を測定する機能を持っている。後者は非球形な黄砂を判別する指標として非常に有効である。

ライダー測定における精度低下の要因には、まず装置に関するものとして、レーザー強度の低下、観測窓の汚れ、衝撃等による送受信光軸のずれ、検出系の感度の変化などが考えられる。また、観測室内の気温が許容範囲を越えたために、レーザーの2波長の出力の比や、検出器の感度に変化することもある。これらの問題は、測定データを注意深く観察することによって検知可能である。多くの場合は、日常的なメンテナンスにより解決可能である。本研究では、問題の検知と対応の手順、調整・校正手法、およびデータ処理における対応手法を検討した（表2）。

表2 ライダーデータの精度管理（測定精度低下の主な要因と対策）

測定精度の低下要因	発生する問題	対策	データ解析における可能な対策
観測窓の汚れ	信号対雑音比の低下	観測窓の掃除	強度変化は補正可能
レーザー出力低下	信号対雑音比の低下	フラッシュランプ交換等	強度変化は補正可能
送受信光軸のずれ	幾何光学形状因子の変化	送信光軸の再調整	大きなずれでなければ補正可能
検出系の感度変化	偏光解消度の精度低下	偏光測定の校正	校正データがあれば補正可能

一方、雲や雨など、気象状況によって、測定された信号を黄砂と誤判定するなどの問題も重要である。これについては自動データ処理システムの評価において検討した。

ライダーネットワーク観測データをモデル同化や動態把握研究に用いるためには、データ処理のアウトプットとなるプロダクトを定義することが必要である。これまでの研究の成果に基づいて、観測側およびモデル側の双方においてできるだけ誤差が少なく比較できるパラメータとして、黄砂消散係数を主要なデータプロダクトと定義した。これは、532 nm のライダー後方散乱信号と偏光解消度を用いて、混合したエアロゾルの中の非球形の黄砂のみの消散係数を推定したものである。この他、詳細な研究のために、球形エアロゾルの消散係数、2 波長の減衰補正なし後方散乱係数、信号偏光解消度も合わせてデータプロダクトと定義した。

黄砂消散係数の導出には、清水ら本研究で改良したアルゴリズムを用いるが、データに雲がある場合と雲のない場合で取り扱いが異なる。まず、データに雲が含まれるかどうかの判別を行う。雲からの散乱は一般に黄砂やエアロゾルに比べて強いので、これを利用して雲を識別した。532 nm に比べて 1064 nm の信号において、より高いコントラストで識別できるので、雲判別には 1064 nm の信号を用いた。雲のない場合は、532 nm の信号に Fernald の方法を適用して消散係数プロファイルを求め（ライダー比 50sr と仮定）、さらに偏光解消度を用いて黄砂の寄与を求めた。雲のある場合は、Fernald 法が適用できないため、雲の下の領域について減衰補正なし後方散乱係数から換算した消散係数を用いて黄砂消散係数を推定した。この他、雲のある高度領域や雨や霧、雲の上などのデータの使えない領域を判別し、それぞれ状況を示すマーカー値を挿入した。以上のアルゴリズムを基に自動処理システムを構築した。処理の概念的な流れを図 4 に示す。

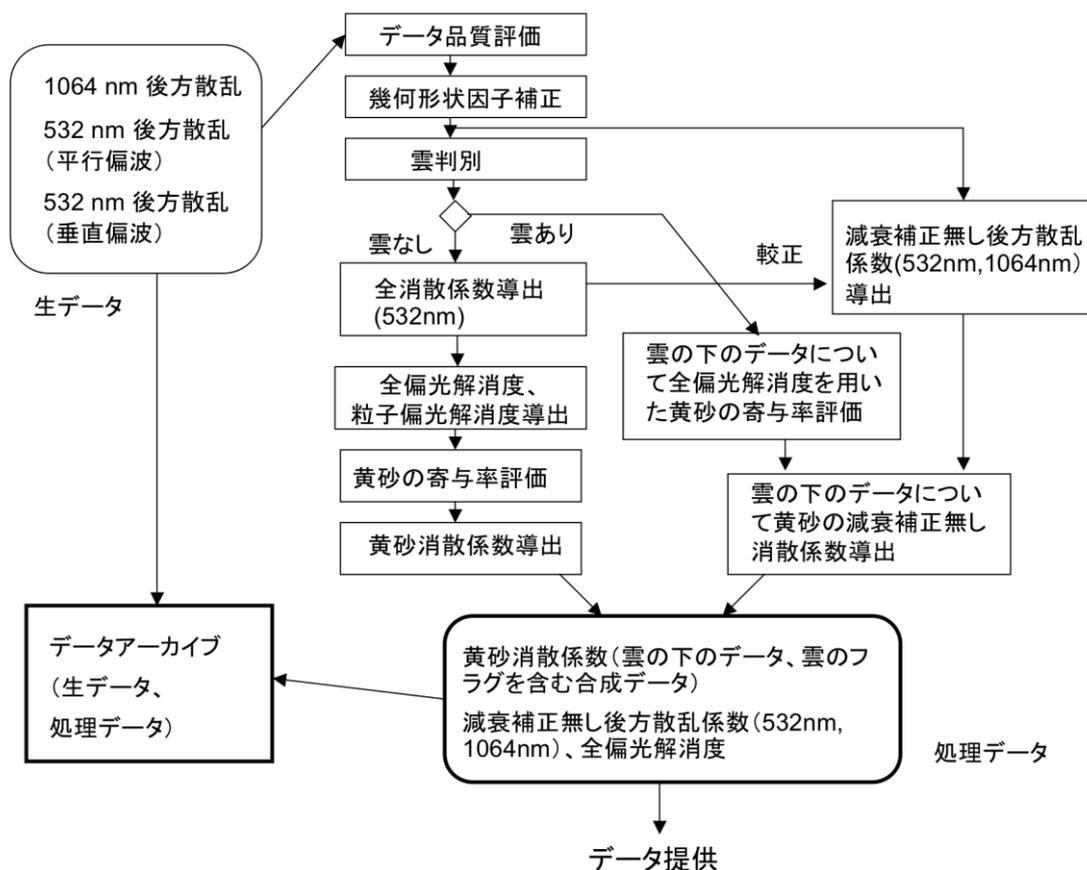


図 4 ライダーネットワークデータ自動処理の概念的な流れ

開発したデータ処理手法を、2005年4月末の黄砂現象時のデータに適用し、データ同化手法の研究のための数値データを提供した。この事例は仙台において非常に高濃度の浮かんた黄砂が観測された時のもので、フフホト、北京、札幌、仙台、富山、つくばで黄砂層が捉えられている。図5に黄砂消散係数の時間高度表示を示す。データ同化実験の成果はサブテーマ2で報告されるが、データ同化によりモデルで得られる各地点の黄砂の高度分布が改善される他、黄砂発源地域と発生量が正確に推定されることが示された。今後、リアルタイムのデータ同化が実現できれば正確な予報も可能となる。予報においては黄砂発源地に近い観測データが非常に重要であり、現在進められているモンゴルおよび中国のネットワークからのデータの役割が大きい。一方、データ同化の過程で得られる誤差信号（モデルと実測の不一致の情報）を詳細に解析することによって、沈着などの過程に関するより正確な情報が得られる可能性が期待される。

開発したリアルタイムデータ処理システムを2007年、2008年春の黄砂期間に適用した。リアルタイムデータは2007年、2008年春の環境省黄砂飛来情報ページの試験運用に提供し、その妥当性を検討した。その結果、概ね良好であったが、雲と黄砂の誤判定などの問題も明らかになった。これに基づいて、処理アルゴリズムおよび判定のパラメータ等の再評価を行った。

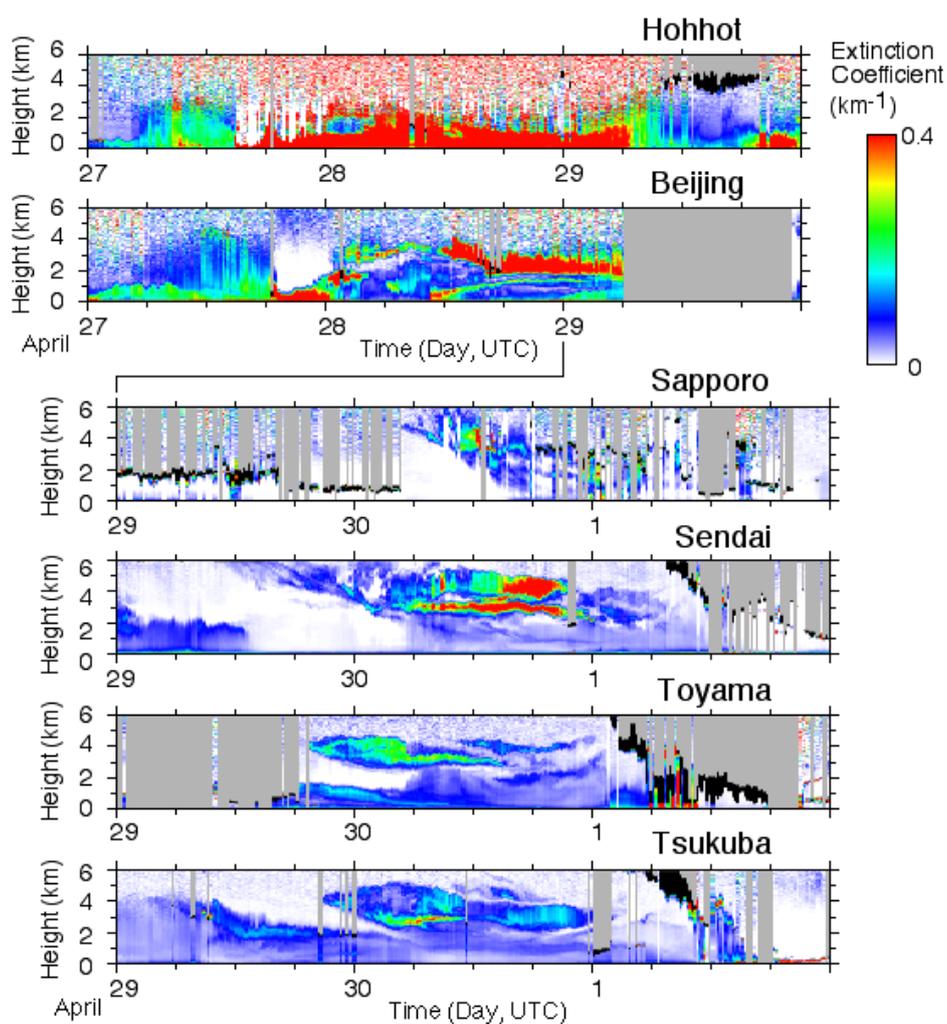


図5 データ同化実験に用いた黄砂消散係数の時間高度表示

### (3) 化学天気予報モデル (CFORS) の結果とライダーによる検証

国立環境研では CFORS による予報モードの計算 (気象庁の数値予報データを利用) を継続的に行ない、黄砂現象の解析に利用した。また、2006 年 4 月については NCEP 2.5 度再解析データを用いて再計算を行った。図 6 にライダーデータによる CFORS の検証例を示す。

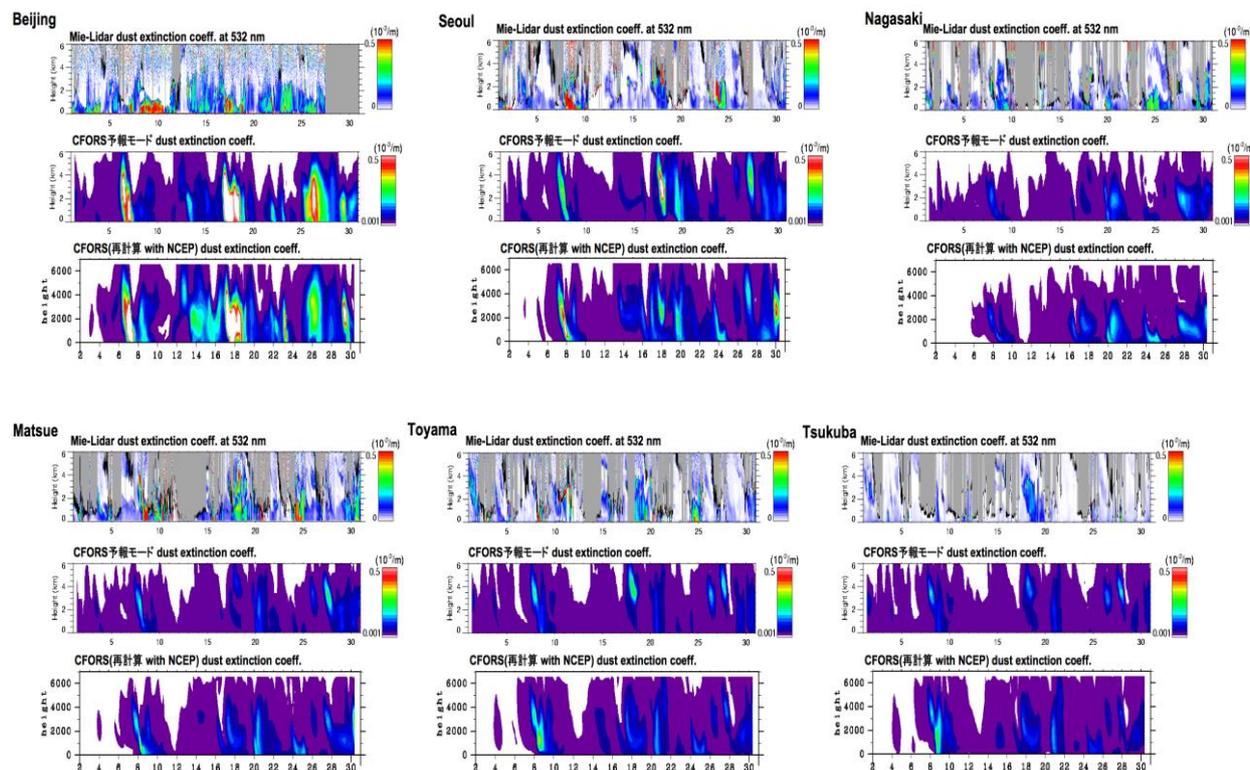


図 6 ライダーデータによる CFORS の検証例

それぞれ上からライダーデータ、CFORS 予報モード、NCEP データを用いた再計算による黄砂消散係数。横軸は現地時間の日付。

図にみられるように CFORS 予報モードは黄砂現象をおよそ再現するが、詳細に見ると合わない部分も多い。NCEP データを用いた再計算ではライダーデータとの一致が改善されている。前述に示した地上データの比較ではこの結果を用いた。一方、気象データの改善による黄砂分布の改善が輸送の違いによるか発生源の違いによるかは、今後、リアルタイムのデータ同化における気象データの妥当性を考える上でも重要であるので検討が必要である。

2007 年春季からは、日本の 8 地点と韓国の 1 地点のライダーデータについてリアルタイムで処理を行い、黄砂消散係数の時間高度表示データを 1 時間毎に作成した。また、地上から高度 6 km までの積分値、すなわち光学的厚さを計算した。これらのデータは環境省黄砂飛来情報 (ライダー黄砂観測データ提供ページ) のデータとして提供した。また、自動処理の結果について異常値等の問題を検討した。この結果、雲あるいは雨を黄砂と判定してしまうケースがみられることが分かった。これらの誤判定については、2 波長の利用や統計的な処理による改善を検討中である。

## (4) ゴビ領域からのダスト発生量と日本への飛来量

表 3 は、春季に東経 130° (九州域) の鉛直断面に輸送されたダスト量 (黄砂) につき、CFORS を基に計算したものである。また、表 4 は、日本で観測される黄砂の発生源として最も寄与の高いゴビ砂漠領域からの春期 3 ヶ月間のダスト推定発生量を同様の手法で求めたものである。ただし、いずれもライダーデータによる同化補正前の CFORS を利用しているので、推定精度の不確かさはかなり大きい。

2006、2007 年は、2001、2004 年について発生量の多い年であった。一方、2008 年は 2000 年以降最も発生量の少ない年であった。

高度 1 km を境界とし、境界層以下 (BL) と境界層上空 (FA) をそれぞれ通過した割合 (BL/FA) が、2006 年は 9.4 % で、2003 年 (9.3 %)、2008 年 (9.5 %) と同じく BL 域内へ輸送されてくる割合が低かった。2007 年は平年よりも高い 15.3% であった。2006~2008 年の 3 年間の全体概況をまとめると、黄砂の発生量も多く、日本まで輸送され地上付近まで達した量もその割合も大きかった年は 2007 年であり、2006 年は発生量の割に日本の地上付近までの到達量が少ない年であった。2008 年は発生量も飛来量も地上付近までの到達量も全て少ない年であった。輸送機構という観点から見ると、2006 年は非常に興味深い特徴がある。発生量および飛来量とも多い年であったが、地上付近に到達する量はその割には増えなかったため、黄砂現象として観測される日数が特别多い年ではなかった。

表 3 130°E 断面を通過した黄砂の月別輸送量

	Transport Mass Flux in BL (Tg)				Transport Mass Flux in FA (Tg)			
	Mar	Apr	May	Total	Mar	Apr	May	Total
2000	2.547	1.947	0.918	5.412	7.329	11.179	15.911	34.419
2001	2.800	3.070	1.186	7.056	17.737	18.759	14.208	50.704
2002	3.844	2.825	0.263	6.932	14.376	13.362	4.570	32.308
2003	0.434	1.282	0.264	1.980	3.960	11.186	6.218	21.364
2004	2.955	1.595	1.315	5.865	16.787	16.558	17.006	50.351
2005	0.801	1.711	0.355	2.867	4.878	14.880	7.966	27.724
2006	1.669	1.929	0.840	4.438	9.247	26.674	11.167	47.088
2007	1.371	0.743	3.720	5.834	7.881	7.760	22.611	38.252
2008	0.864	0.550	0.510	1.924	5.437	5.479	9.453	20.369

表 4 ゴビ領域(38~45°N、95~115°E)の月別ダスト発生量(Tg)

year	Mar	April	May	total
2000	27.416	51.419	42.690	121.525
2001	51.148	91.717	39.590	152.455
2002	56.250	50.859	14.934	122.043
2003	17.693	40.115	22.360	80.168
2004	63.236	37.354	50.354	150.944
2005	18.391	41.425	30.317	90.133
2006	31.615	63.016	41.137	135.767
2007	29.252	21.115	92.688	143.089
2008	16.367	10.896	37.238	64.501

## (5) 典型的黄砂現象に関する事例研究

## 1) 2006年4月8、9日の黄砂現象と4月18、19日の黄砂現象の違い

事例1(4月8、9日)は、寒冷前線通過後に日本列島を横断するようなSPM高濃度現象が観測された。一方で、事例2(4月18、19日)は、気象庁報告によれば、東京で6年ぶりに観測された黄砂として話題となった。しかしながら、事例2のSPM濃度は全国的に $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度で、SPM最高濃度で比較しても事例1の1/3以下に過ぎない。また、事例2は高気圧圏内で黄砂飛来が観測されており、事例1とは気象条件が大きく異なる(図7中の右図)。図8、9中の右図は、CFORSによる地上付近(モデル最下層)の推定黄砂濃度(土壌粒子濃度)を示したものである。CFORS計算値と同時刻の常時監視局の測定値とを比較すると、CFORS計算値で事例1の $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超過する高濃度域や事例2の $50\sim 100\mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度分布は、観測値とほぼ整合している。また、東経130度における黄砂の水平輸送量を比較すると(表5)、事例1と事例2の全輸送量には大きな差はないが、高度1km以下での輸送量は事例1の方が事例2の2倍近くに達しており、地上付近への飛来機構が異なっていたと考えられる。

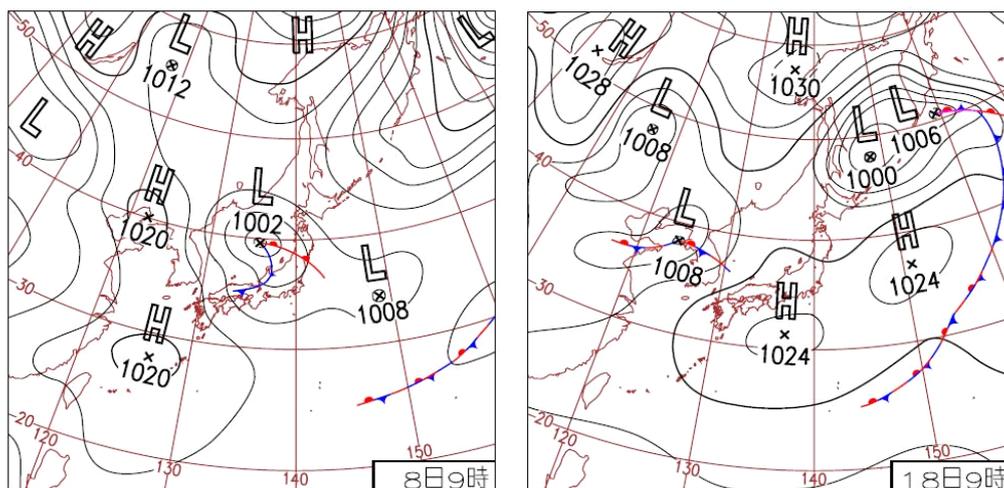


図7 黄砂飛来開始日の午前9時時点の天気図。4月8日(左)と4月18日(右)

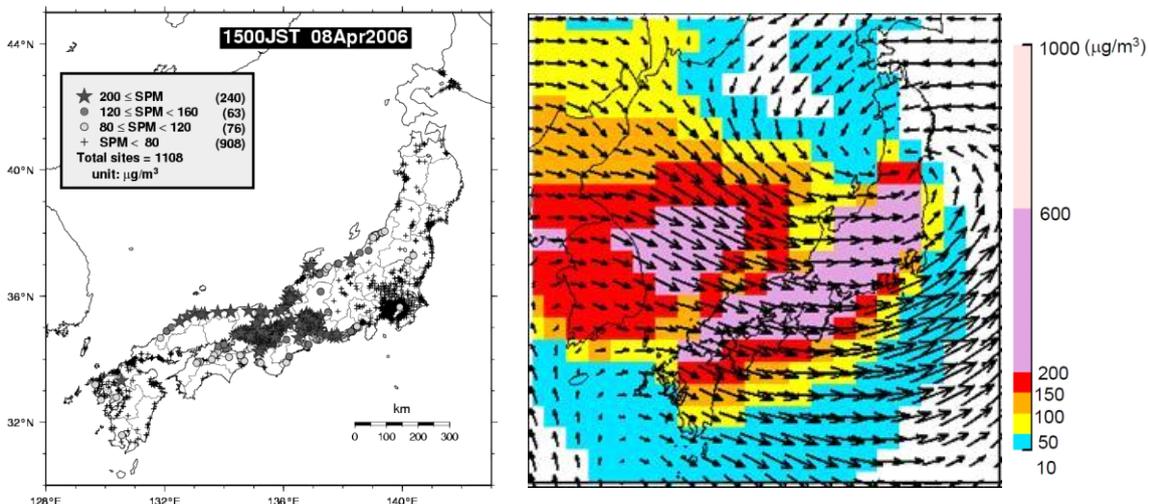


図 8 2006年4月8日15時(事例1)の常時監視局SPM濃度(左)とCFORSで計算されたモデル最下層(地表面付近)における土壌粒子濃度(右)

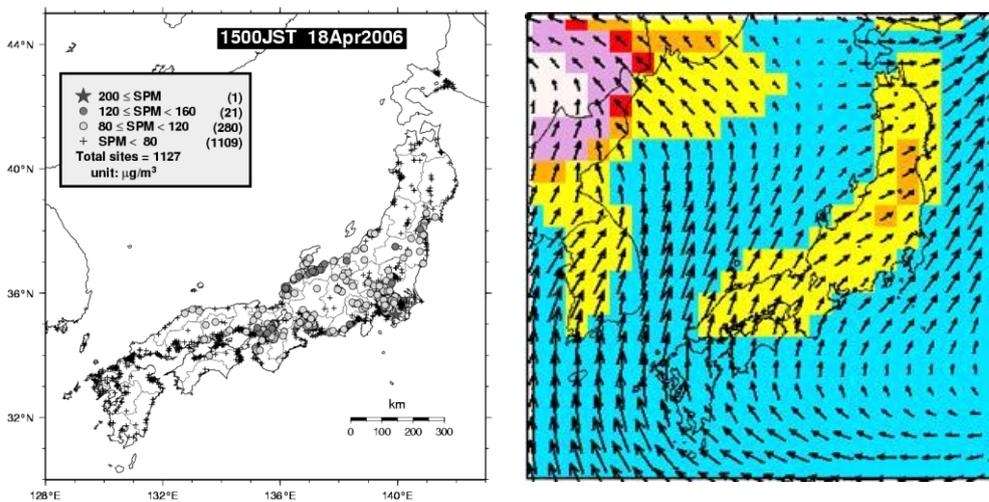


図 9 図 8 に同じ。ただし、2006年4月18日15時(事例2)

表 5 130°E を通過した黄砂輸送量 (25-55N)

	事例 1 (7日0時~10日0時)	事例 2 (17日0時~20日0時)
輸送量[Tg](z < 1 km)	0.43	0.24
輸送量[Tg](z > 1 km)	4.77	4.98

上段：高度 1 km 以下、下段：高度 1 km 以上。

図 10、11 に、この両黄砂イベント期間における大気汚染物質（SPM、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> および O<sub>x</sub>）濃度の全国的な時間変動を示す。全国的な大気汚染物質濃度の変動を調査するために、各時刻の日本国内の全ての常時監視局（測定物質および時刻による違いがあるが、800～1000 局程度）の測定値を濃度階級別に集計し、時刻別の全有効測定局に対する比率で表現した。

事例 1（図 10）では、4 月 8 日 6 時以後から 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超過する SPM 濃度が観測され始めた。同日 10 時以後、ほぼ 24 時間にわたって 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超過する SPM 高濃度が観測された。高濃度 SPM が観測され始めると同時に、NO<sub>x</sub> の濃度が全国的に低下しており、SPM 高濃度期間を通じて NO<sub>x</sub> は低濃度が維持されていた。一方、事例 2（図 11）では、SPM 濃度上昇とほぼ同時に SO<sub>2</sub> 濃度の上昇が観測された。濃度ピークを見ると、SPM ピークに先立ち SO<sub>2</sub> ピークが出現し、その後裾を引くような形で SO<sub>2</sub> の高い濃度（平常時に比して）で推移している。NO<sub>x</sub> は SPM > 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  となる測定局が観測され始める約半日前から濃度上昇が観測され、黄砂飛来期間中を通じて比較的高い濃度が維持された。事例 1 では黄砂を運んで来た気塊中のガス状汚染物質の濃度が低く「汚れていない黄砂」が飛来したのに対し、事例 2 では NO<sub>x</sub> や SO<sub>2</sub> の濃度が非黄砂期間と比べて高く、黄砂と大気汚染物質が混在した、いわゆる「汚れた黄砂」が飛来した可能性がある。なお、オキシダントについては、両事例とも、SPM が高濃度期間中（黄砂現象中）に高濃度となることはなかったが、日変動が大きく黄砂（あるいは輸送気塊）との関連性は今のところよく判らない。

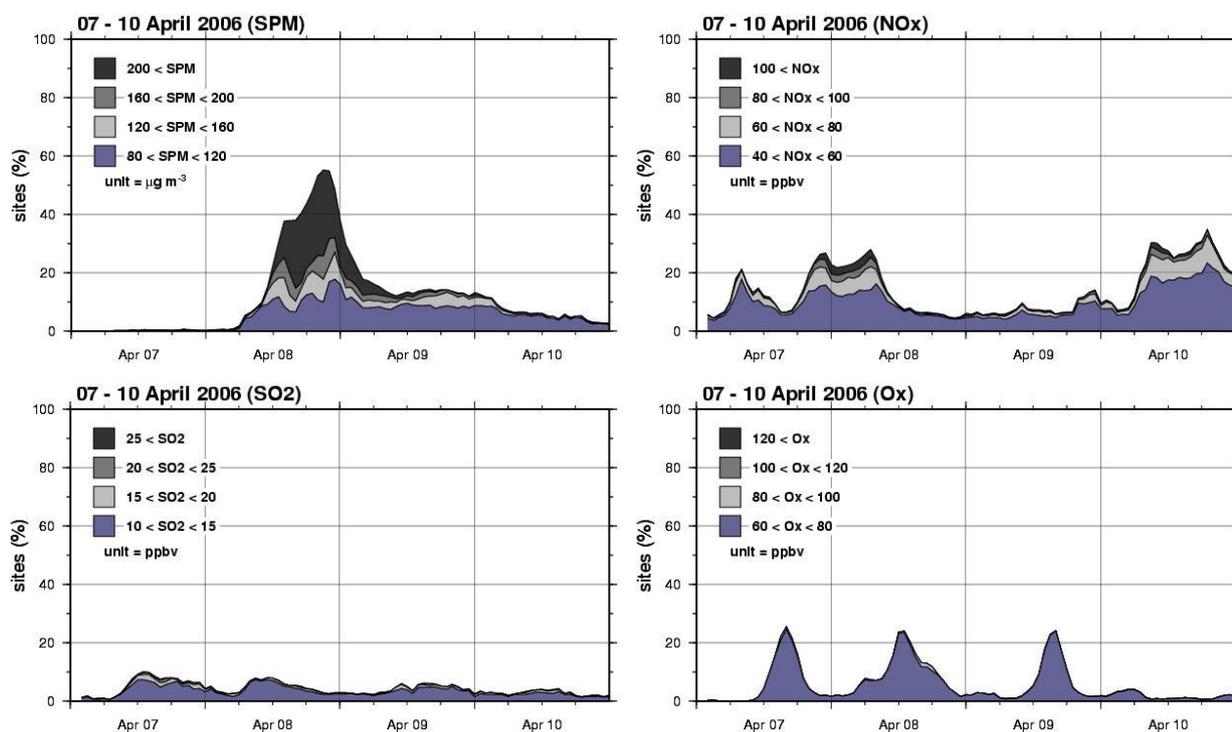


図 10 2006 年 4 月 7～10 日（事例 1）における大気汚染物質の濃度階級別測定局頻度。各時刻の有効測定局の総数に対する比率で表示。SPM（左上）、NO<sub>x</sub>（右上）、SO<sub>2</sub>（左下）、O<sub>x</sub>（右下）。濃度階級区分は図中の凡例を参照。

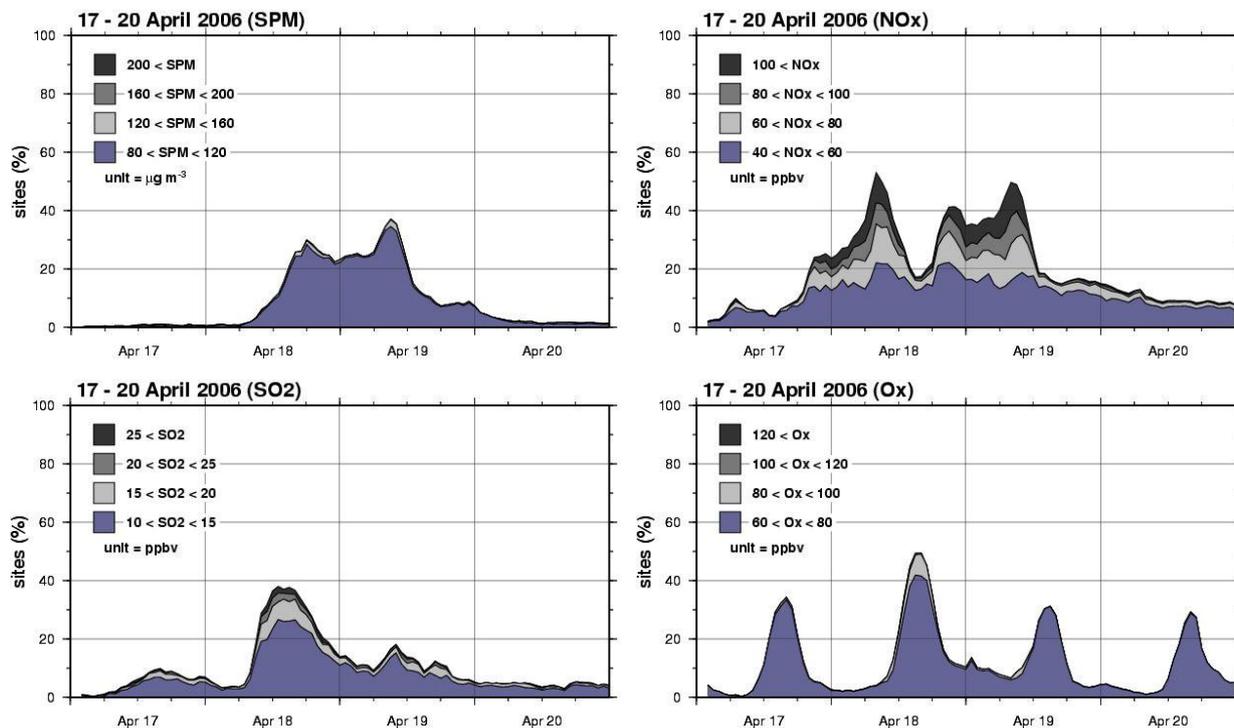


図 11 大気汚染物質の濃度階級別測定局数、2006年4月17～20日（事例2）。

## 2) 2007年4月1、2日の黄砂現象と5月8、9日の黄砂現象の違い

事例3（4月1、2日）は、寒冷前線を伴う低気圧の通過後に、南西諸島と北日本の一部を除く広範囲でSPM高濃度を観測した（図12左、図13）。各測定局におけるSPM濃度の極大値は、2006年4月8～9日の事例に匹敵し、近年の黄砂事例の中ではかなりの高濃度となった。

一方で、事例4（5月8、9日）は、多くの気象官署では黄砂と報じていないが、新潟県・大分県で観測史上初の光化学オキシダント注意報を発令するなど、全国的なオゾン高濃度を観測した。図14に示すように、事例4における各測定局のSPM濃度は $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 前後で、事例3のそれに比べて1/2から1/3程度である。また、事例4は、5月8日から9日にかけて高気圧の勢力圏下であり、事例3とは気象条件が大きく異なる（図12右）。

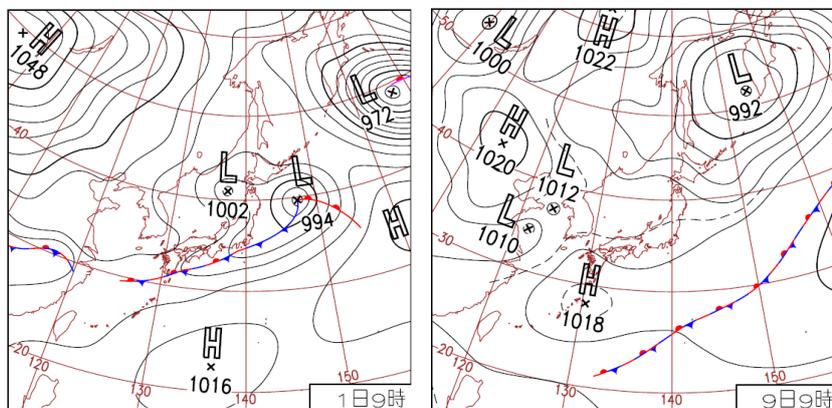


図 12 選択事例の天気図。2007年4月1日（左）と5月9日（右）、いずれも午前9時

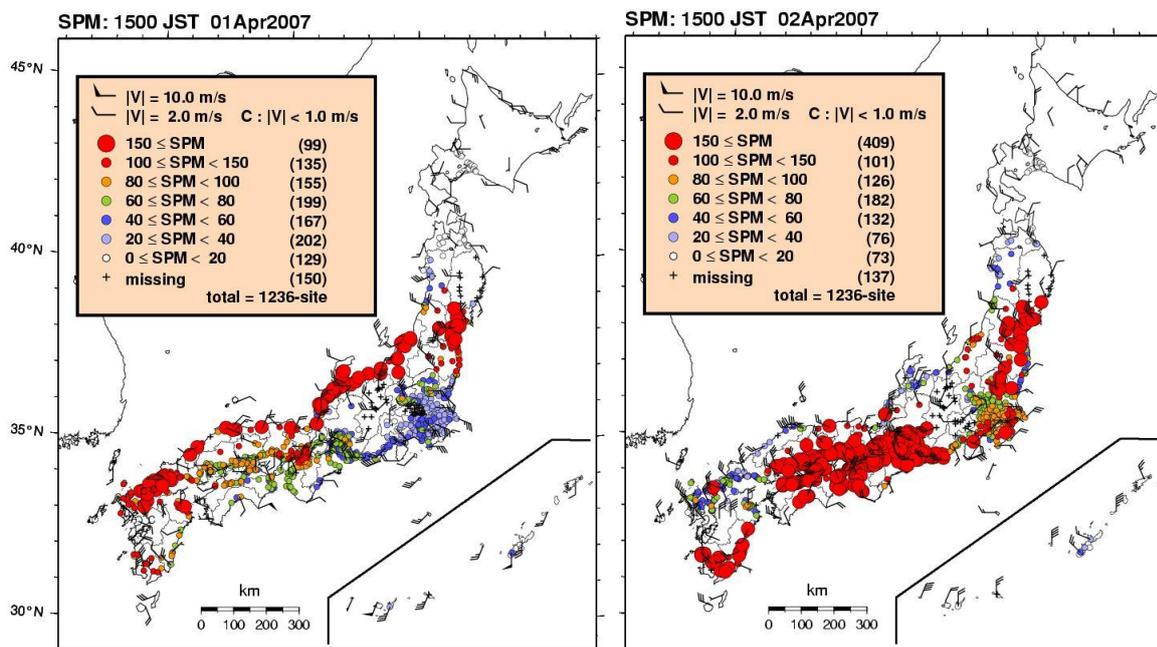


図 13 2007年4月1日および2日(事例3)の常時監視局 SPM 濃度 1 時間平均値、  
いずれも 15 時

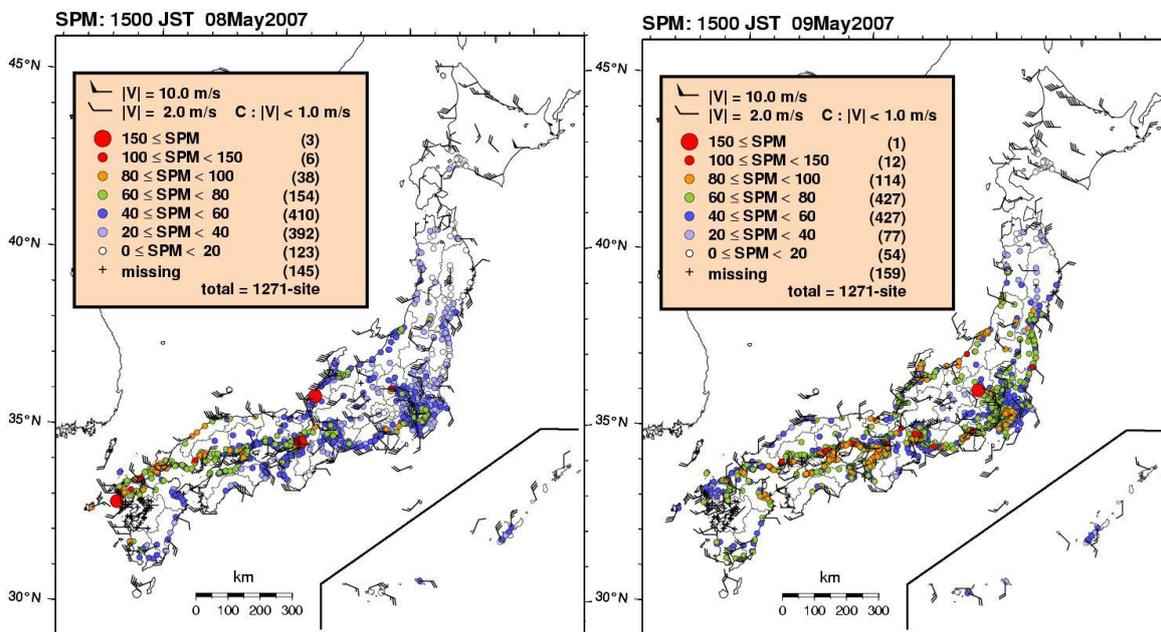


図 14 2007年5月8日および9日(事例4)の常時監視局 SPM 濃度 1 時間平均値、  
いずれも 15 時

図 15、16 に、この両イベント期間における大気汚染物質（SPM、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> および O<sub>3</sub>）濃度の全国的な時間変動を示す。全国的な大気汚染物質濃度の変動を調査するために、各時刻の日本国内の全ての常時監視局（測定物質および時刻による違いがあるが、800～1000 局程度）の測定値を濃度階級別に集計し、時刻別の全有効測定局に対する比率で表現した。

事例 3（図 15）では、3 月 31 日夕方以降から 100 μg/m<sup>3</sup> を超過する SPM 濃度が観測され始めた。翌 4 月 1 日午前から 150 μg/m<sup>3</sup> を超過する SPM 高濃度が観測され、2 日の日中には全測定局の 3 割以上が 150 μg/m<sup>3</sup> を超過した。高濃度 SPM の観測期間では、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub> には濃度上昇は観測されなかった。

一方、事例 4（図 16）では、SPM 濃度時間の経過に伴い SPM 濃度上昇局数が増加した。全国的な SO<sub>2</sub> 濃度については、SPM よりも O<sub>3</sub> と同期した時間変化を示した。NO<sub>x</sub> に見られる O<sub>3</sub> とほぼ逆フェイズの時間変化は、日中の光化学 O<sub>3</sub> 生成と夜間における O<sub>3</sub> と NO との消失反応サイクルが卓越したことを示している。

2007 年の黄砂事例と 2006 年のそれと比較すると、2007 年の事例 3 は 2006 年 4 月 8～9 日の大規模黄砂と同様に、気体状の大気汚染物質を伴わない、いわゆる「汚れていない黄砂」の特徴を示した。松江におけるライダー観測（図 17 左）からも、2007 年の事例 3 では非球形粒子（黄砂）が下層大気で卓越していたことが明らかである。その一方、2007 年の事例 4 は 2006 年 4 月 18、19 日と類似した、汚染気体を伴う「汚れた黄砂」的な濃度変化を示した。長崎におけるライダー観測（図 18 左）からは、高度約 2 km より下層では球形粒子（二次生成粒子）、それより上層で非球形粒子（黄砂）という 2 層構造がみられる。したがって、2007 年の事例 4 では、地上で観測された SPM 濃度は、二次生成粒子と黄砂が混合した粒子質量濃度を観測していた可能性がある。

4/1（事例 3）と 5/9（事例 4）のダストと硫酸塩粒子の輸送分布（光学的厚さ基準）をモデル推定した結果を図 19 に示す。人為起源系の代表的なエアロゾルである硫酸塩の分布（等濃度ラインと見なしてよい）と黄砂の中心塊を比較する。事例 3 は、黄砂中心塊が本州から南北海道にかけて分布し、硫酸塩の密な塊は認められない。一方、事例 4 は、硫酸塩の分布が 2 つある。1 つは北海道東岸域にあり、非常に密な塊が黄海から朝鮮半島に分布している。その両方にまたがって、光学的厚みの薄い（濃度が強くないということと同じ）黄砂塊が分布しており、黄砂塊の先頭と後方部分で硫酸塩とよく混ざっていたことを示した。上述の気象学的考察を裏付けるモデル解析結果となった。

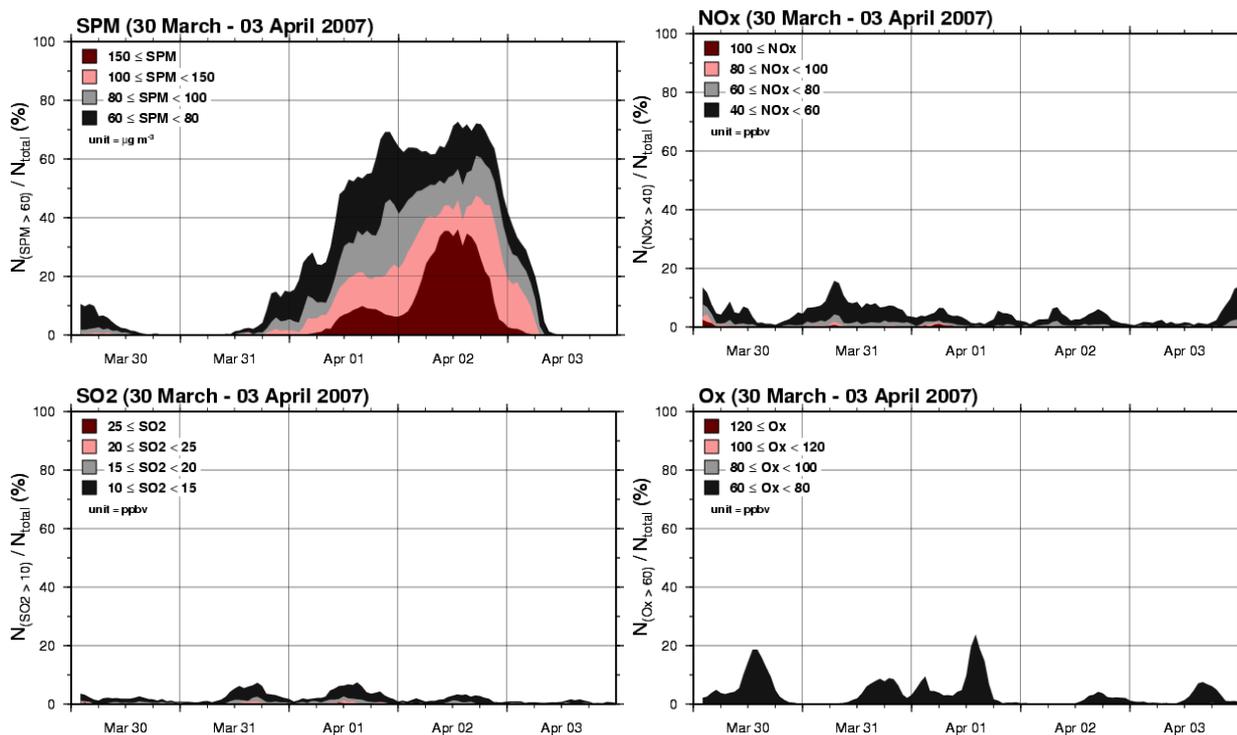


図 15 2007年3月30日～4月3日（事例3）における大気汚染物質の濃度階級別測定局の割合。各時刻の有効測定局の総数に対する比率で表示。SPM（左上）、NO<sub>x</sub>（右上）、SO<sub>2</sub>（左下）、Ox（右下）。濃度階級区分は図中の凡例を参照

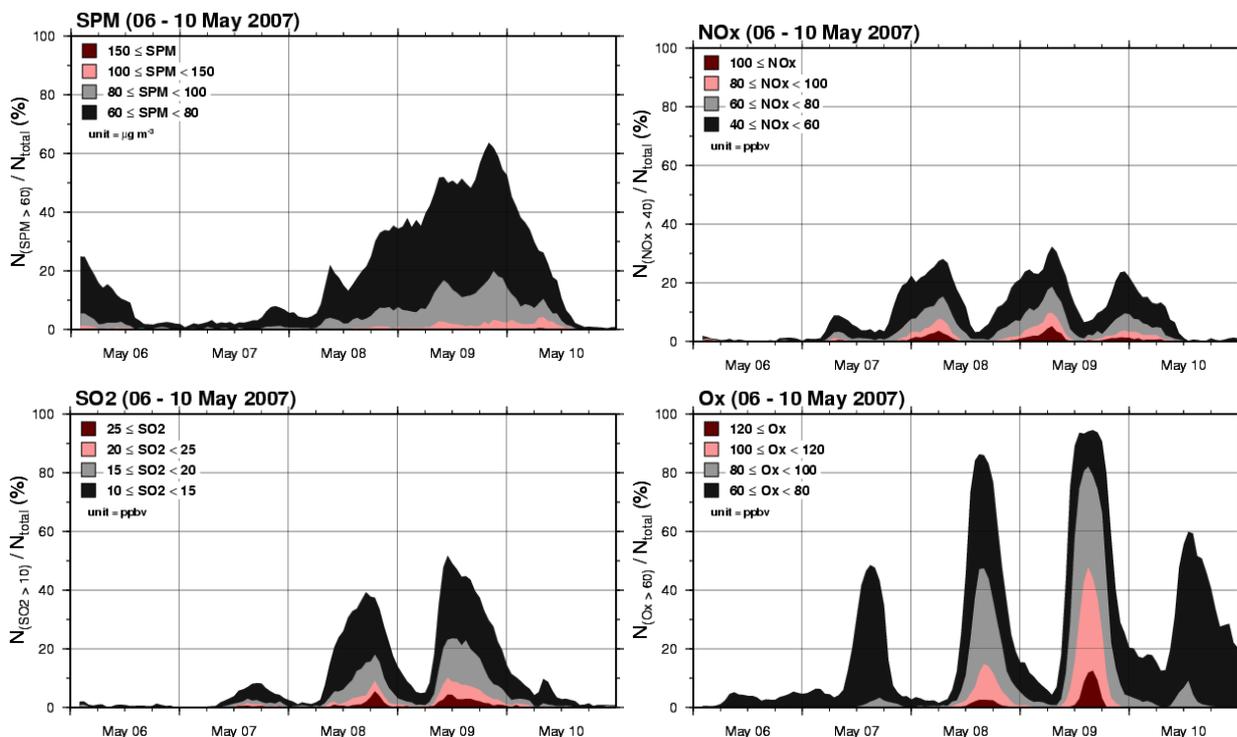


図 16 大気汚染物質の濃度階級別測定局数、2007年5月6～10日（事例4）

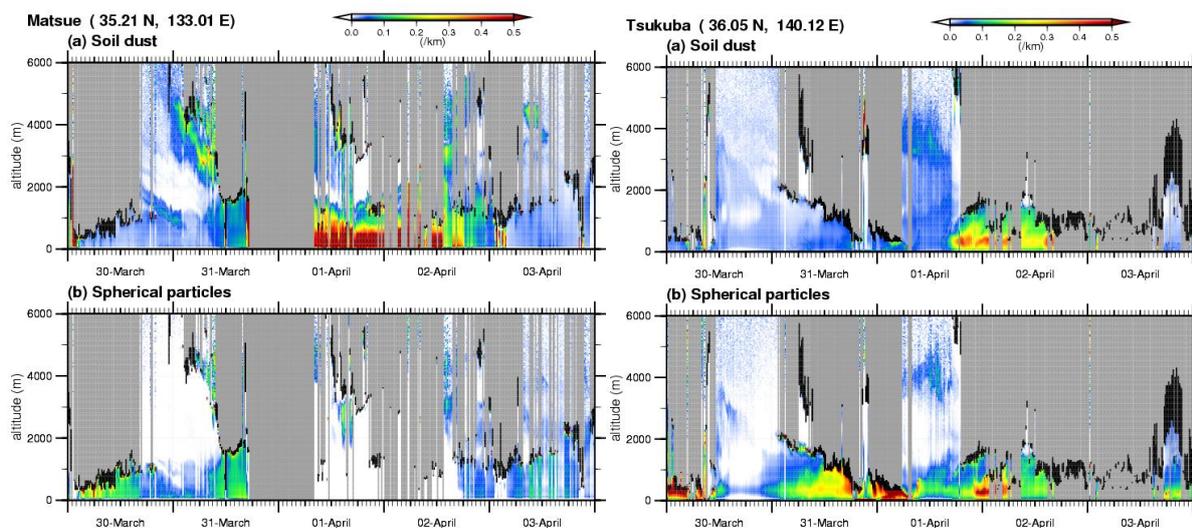


図 17 事例 3 期間（2007 年 3 月 30 日～4 月 3 日）のライダー観測（左：松江，右：つくば）  
 上段：非球形粒子、下段：球形粒子の消散係数。ここでは、非球形粒子は黄砂、  
 球形粒子は人為起源汚染気体からの二次生成粒子とみなす

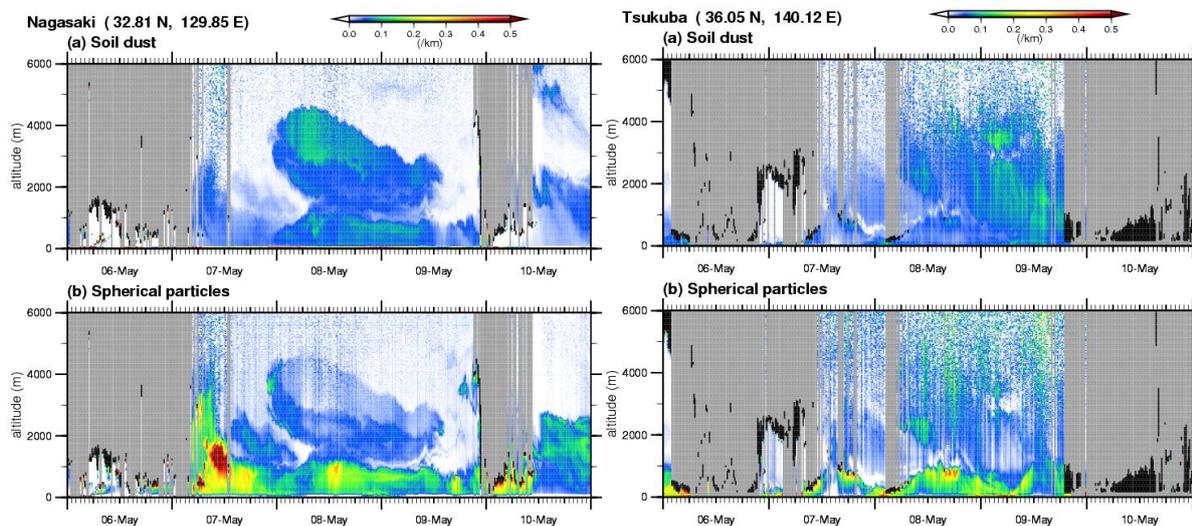


図 18 事例 4 期間（2007 年 5 月 6～10 日）のライダー観測（左：長崎，右：つくば）  
 上段：非球形粒子、下段：球形粒子の消散係数。ここでは、非球形粒子は黄砂、  
 球形粒子は人為起源汚染気体からの二次生成粒子とみなす

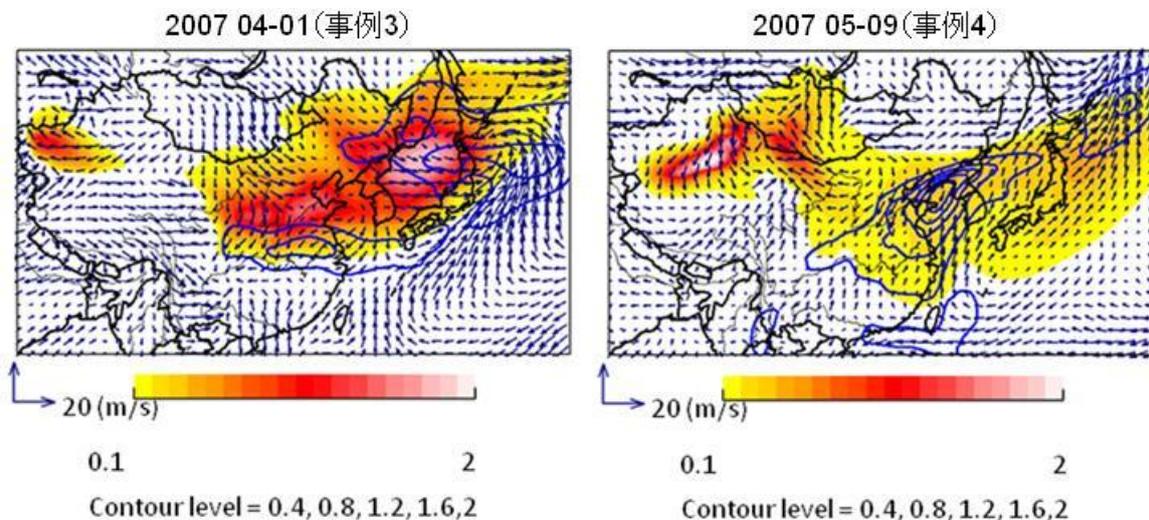


図 19 ダスト（コンター表示）と硫酸塩（ライン表示）の光学的厚さ（9JST）

2006～2008 年春季（3～5 月）における SPM 濃度階級別面積の時間変化を図 20 にまとめた。年ないし月により頻度は異なるものの、5 日から 10 日に 1 回程度の頻度で  $\text{SPM} > 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  になる面積の増加がみられる。SO<sub>2</sub> では、SPM に比べて日周期変動が卓越するものの、SPM と同様に数日～10 日程度の時間スケールでの面積変化もみられる結果も得られた。それらの一部は SPM における面積増加と同期する一方で、ほぼ同期しない場合も見られた。

この 3 年間で観測された大規模黄砂イベント（2008 年 12 月末日時点での目視観測継続気象官署 76 地点を使用。1 日あたり 20 地点以上）は、2006 年：5 回（3 月 23 日、4 月 8～9 日、4 月 18～19 日、4 月 24～25 日、4 月 30 日～5 月 1 日）、2007 年：3 回（3 月 28 日、4 月 1～3 日、5 月 26～27 日）、2008 年：1 回（3 月 3～4 日）、の計 9 回である。これら大規模黄砂イベントのうち、期間中の全国平均 SO<sub>2</sub> 濃度偏差が負となる事例を「汚れていない黄砂」、SO<sub>2</sub> 濃度偏差が正の事例を「汚れた黄砂」とすると、汚れていない黄砂は 4 回（2006 年の 4 月 8～9 日、4 月 24～25 日；2007 年の 4 月 1～3 日；2008 年 3 月 3～4 日）、汚れた黄砂は 4 回（2006 年の 4 月 18～19 日、4 月 30～5 月 1 日；2007 年の 3 月 28 日、5 月 26～27 日）、判定困難が 1 回（2006 年の 3 月 23 日）であった（図 21）。

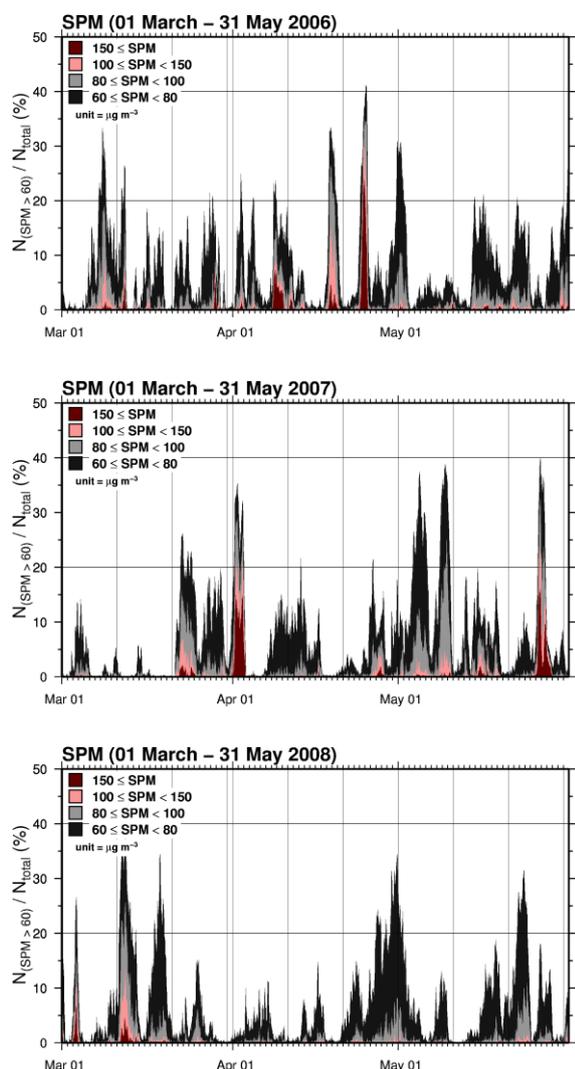


図 20 図 2 と同様。ただし、2006～2008 年の春季 3 ヶ月の SPM 濃度階級別の面積

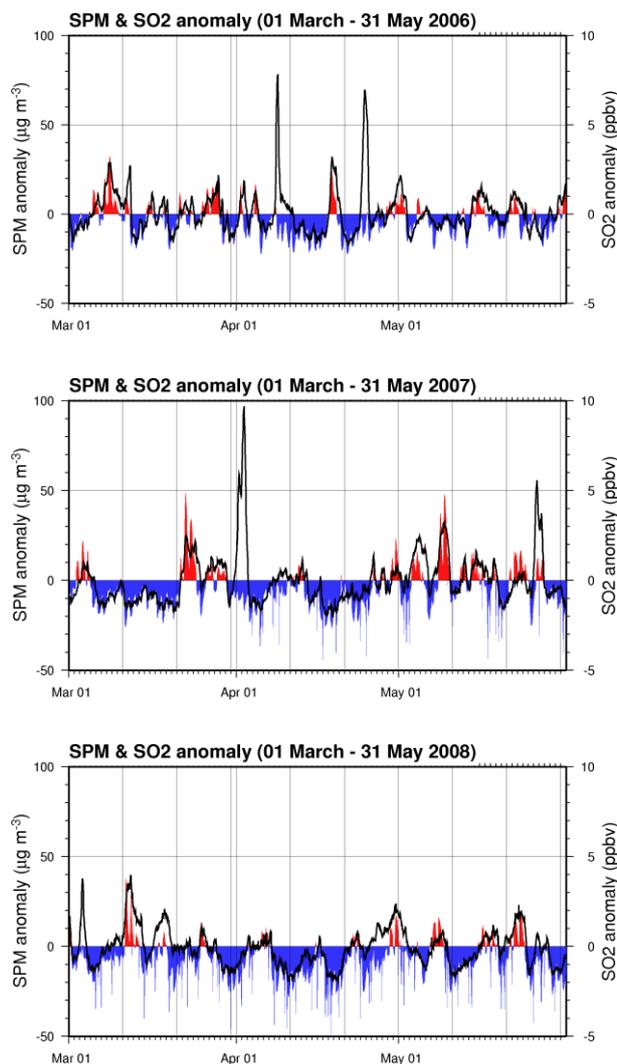


図 21 2006～2008 年春季における SPM (実線；左軸) および SO<sub>2</sub> (暗色塗りつぶし部分；右軸) の全国平均偏差

#### (6) 高時間分解能捕集試料による化学的動態変化

長崎における浮遊粒子状物質の毎時連続モニタリングの結果を図 22 に示す。1 時間値濃度が  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える回数は、2 ヶ月間で 7 回観測された。近年、北九州全域で越境大気汚染に起因するような微小粒子の数濃度の増加が懸念されており、7 回全ての SPM 濃度の高まりが黄砂に由来すると断定できない。そこで、SPM 高濃度現象に対応する粒子径基準の数濃度を調べた。それを基に、5 ミクロン以上の粗大粒子数増加に起因するもの、サブミクロン粒子数の増加に起因するもの、粗大粒子と微小粒子の両方の粒子数の増加に起因するものという 3 区分に分類した (表 6)。表中の黄砂とは「汚れていない黄砂」と同じことを指し、汚染および混合としたの

は程度の差はあれ「汚れた黄砂」と同じことを指す。NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>ガス濃度から見ると、汚染物質との混ざりがほとんどない黄砂が飛来したとき、その輸送大気は平常時の大気よりも清浄である。一方、微小粒子群の高い空気塊が輸送された場合、それらガス濃度は平常時よりも低いと言えない。特に SO<sub>2</sub> 濃度は、日本の現在の平常時の大気では非常に低く、わずかな濃度変化が明確に判るため良い指標となる。PM10 濃度が 100 μg/m<sup>3</sup> を超えるような高濃度現象について、表 6 中の 3 区分に該当する事例を図 23 に示した。黄砂型事例は、SO<sub>2</sub> 濃度が低いままで推移する。黄砂と汚染物質の混合型は、PM10 濃度のピークよりも明らかに早い時刻に SO<sub>2</sub> 濃度のピークが出現し、SO<sub>2</sub> 高濃度期間は PM10 高濃度期間よりも早く終了する。汚染型事例は、PM10 濃度のピークよりも若干早い時刻に SO<sub>2</sub> 濃度のピークが出現するものの、PM10 と SO<sub>2</sub> 濃度の高濃度期間はだいたい一致する。ただし、汚染事例も、程度の差はあるが混合事例と同じように黄砂を少し含んでいる。

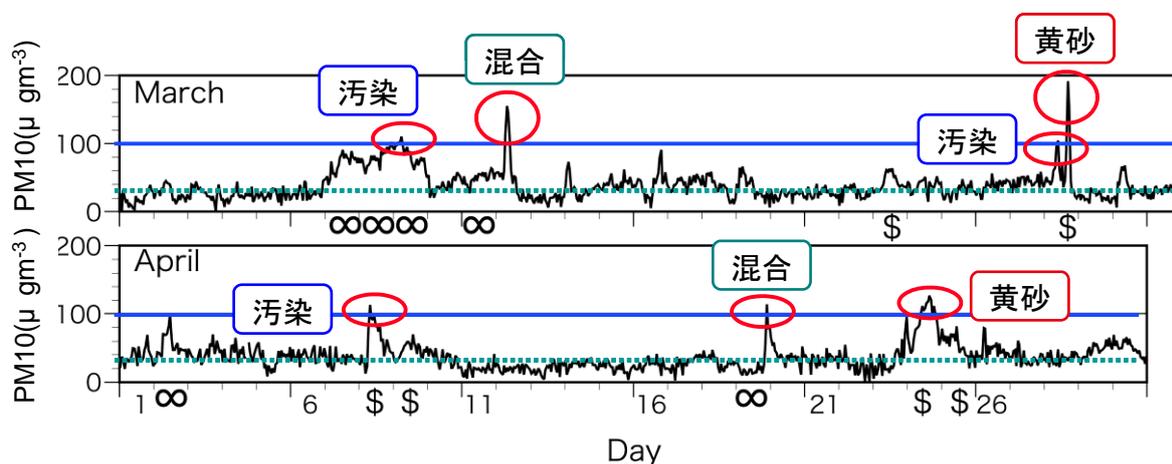


図 22 SPM 高濃度現象の要因

表 6 パターン別平均大気成分濃度

パターン (積算時間)		汚染型 (5 時間)	混合型 (5 時間)	黄砂型 (12 時間)	cf. 長崎市 (5 年間)
PM10	(μg/m <sup>3</sup> )	106	126	122	30 (spm 値)
N (0.3-0.5μm)	(1/L)	5.3X10 <sup>5</sup>	2.8X10 <sup>5</sup>	6.7X10 <sup>4</sup>	-
N (≧ 5μm)	(1/L)	3.0X10 <sup>1</sup>	2.6X10 <sup>2</sup>	3.6X10 <sup>2</sup>	-
SO <sub>2</sub>	(ppb)	4.9	1.6	0.4	2
NO <sub>2</sub>	(ppb)	10	6	6	18
NO	(ppb)	<1	<1	<1	6

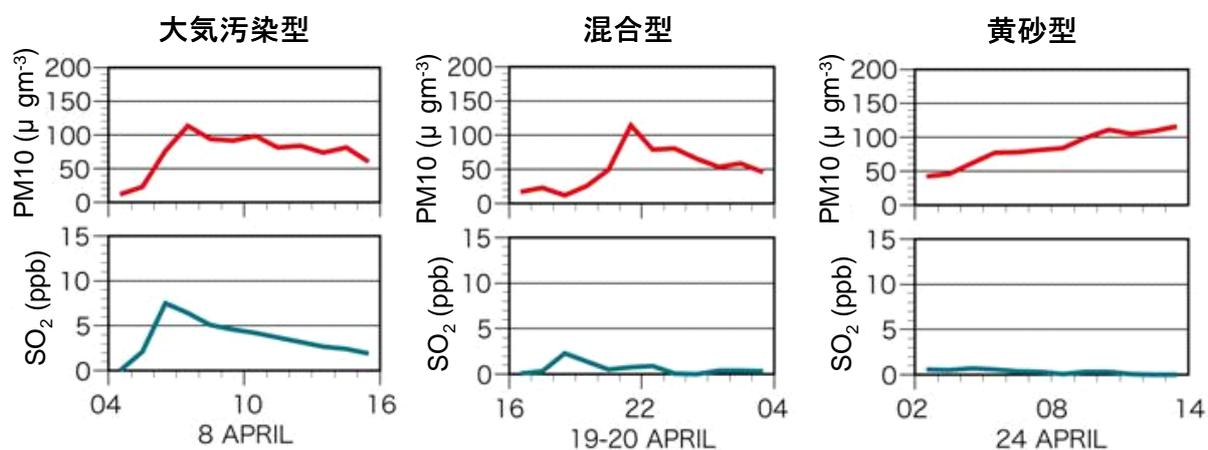


図 23 パターン別 PM10、SO<sub>2</sub> 濃度変化の特徴

前述の事例 1 を含む 4 月 18～20 日に大気エアロゾルの高時間分解能捕集を行った。長崎と並行して黄砂輸送ルート上の風上側である北京でも同様の捕集を行った。黄砂の指標成分である Al と主な大気汚染粒子の構成成分である S について、その変動を図 24 に示す。図 25 の期間中、北京の風向は 4 月 18 日、現地時刻 15 時付近を境にして東成分から西成分へと変化し、空気塊の入れ替わりがあったことが相対湿度変化からも判る。西成分の風が卓越するとともに Al 濃度が高くなった。この Al と同じ濃度変動をした元素に Si、Fe、Ti があり、土壌起源系元素グループであるこれら元素群を主元素として含むエアロゾル（黄砂）が飛来していたことが明らかである。S 成分は風が東成分の時に高く、黄砂飛来後は安定な低濃度で推移した。一方、同時期の長崎におけるモニタリングでは、風向の変化から 4 月 19 日、日本時間 15 時にゆるやかな空気塊の入れ替わりがあったと判断できる。北西成分が卓越している時に Al 濃度（図中に示していないが、Si、Fe、Ti も同様の変化）が高くなり、黄砂の飛来があったと判断できる。S 変動は Al とおおむね同期するような変動をした。この長崎に飛来した黄砂はライダーネットワークの観測結果や気象場データを基に飛来予測をする CFORS（化学天気図）の解析結果から、北京で 4 月 18 日に観測した黄砂と同一である可能性が高いと判断された。北京および長崎における大気エアロゾル中の Al/S 比の変化を図 24 の下図に併示した。北京の Al/S 比は、黄砂の飛来と共に高くなりピーク比は約 9 であった。一方、長崎の Al/S 比は約 2 で 8 時間にわたり一定の値となった。つまり、長崎で捕集した黄砂現象中の試料では、北京に比べ S の混在率が高いことを示し、汚れた空気塊であったことが判る。この S が黄砂粒子表面に付着していたもの（内部混合状態）か、空気塊中において外部混合状態で存在していたものかは今後の研究の進捗に期待される場所であるが、Al と S の濃度変動が激しいにもかかわらず、ほぼ一定値を示していたことは、両元素が連動していたと考えられ、内部混合状態にあったと見なすのが自然であろう。

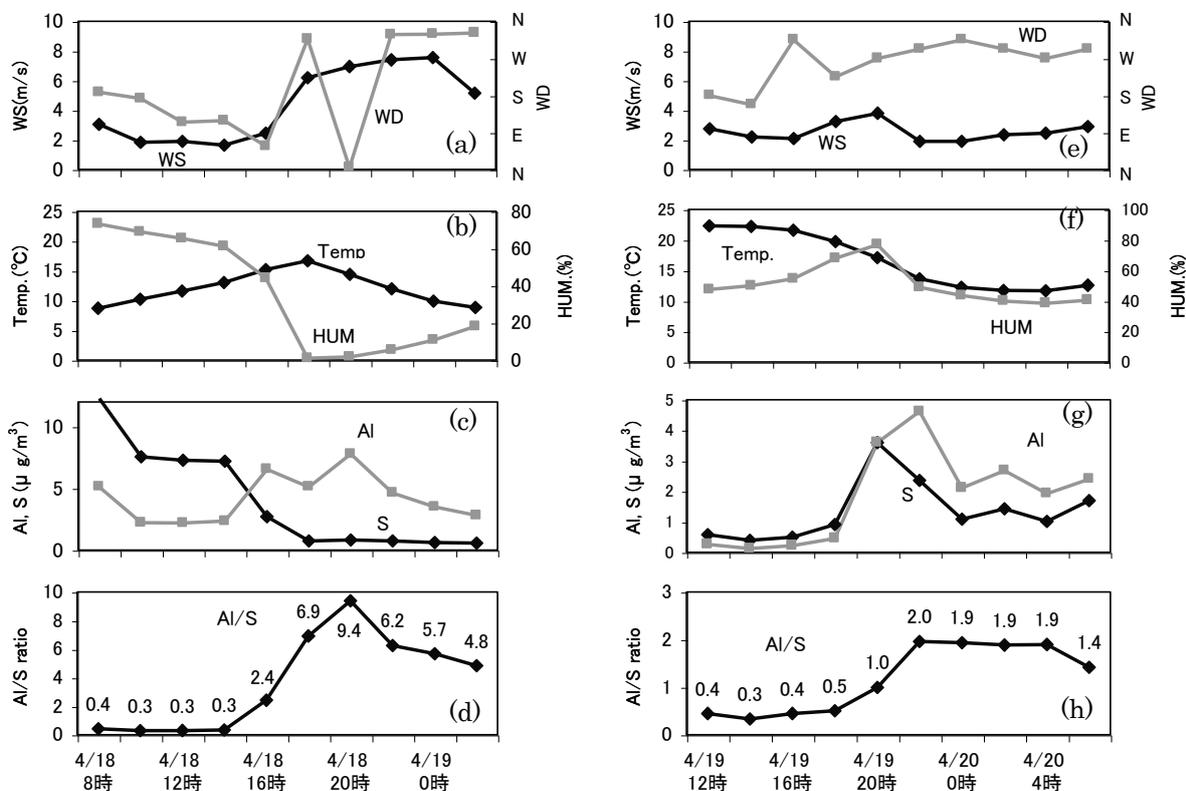


図 24 北京と長崎 Al/S 比の変動とそのときの気象要素(a)~(d)北京、(e)~(h)長崎

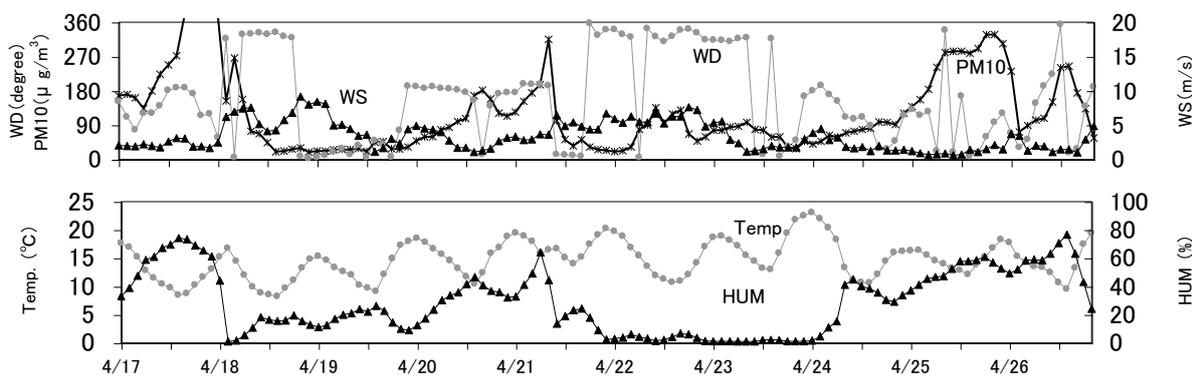


図 25 北京における PM10 と気象要素の時間変動

「汚れた黄砂」を解明するためには、汚れた空気塊の特徴について知る必要がある。特に、大気汚染空気塊中の煤は、非定形粒子であり活性炭と同じくさまざまな有害化学成分を吸着し、黄砂を運ぶ空気塊中に混入しており、その空気塊の汚れ度を示すよい指標となるはずである。黄砂を運ぶ気塊に着目し、越境大気中の汚れた度を表す煤粒子について調べることにした。併せて、粒子状炭素成分を大別する OC（有機系炭素成分）と EC（無機系炭素成分、都市大気中では主に煤）の割合変動を追跡することによって、中国の都市大気、ひいては大陸からの越境大気のよい指標となると考えられる。

都市大気中の煤の発生源としては、化石燃料由来の寄与が大きい。中国では一次エネルギーの 50%以上を石炭が支えていることから大気中の煤も石炭由来が多いものと考えられる。そこで、石炭および煤の安定同位体比を測定した。中国で使用されている 8 種類の石炭の  $\delta^{13}\text{C}$  値が  $-23.4 \pm 1.2 \%$ 、北京市郊外にある大規模石炭火力発電所をはじめ複数の火力発電所から排出されたフライアッシュ中の煤の  $\delta^{13}\text{C}$  が  $-24.4 \pm 0.1 \%$  であった。燃焼過程で 1 %前後のフラクシオネーションが生じると考えられる。一方、自動車排気ガス中の煤はディーゼル車の寄与が高いと言われている。そのディーゼル排気粒子中の煤の炭素同位体比は  $-25.8 \pm 0.3 \%$  であった。文献によれば、中東の原油の炭素安定同位体比は  $\delta^{13}\text{C}$  値が  $-24.8 \pm 1.0 \%$ 、ディーゼル排気粒子の  $\delta^{13}\text{C}$  値が  $-26.5 \pm 0.5 \%$  という報告もある。実測および文献値から、石炭や原油の値と比較すると燃焼によるフラクシオネーションで 1 %程度軽い同位体比となるが、それぞれの原料に応じて煤の同位体比が異なることが明らかである。つまり、石炭に依存する中国の都市大気中の煤の安定同位体比は石油に依存する日本に比べ重い可能性があることを示唆している。

北京市の都市大気中の煤の  $\delta^{13}\text{C}$  がどのような状況にあるかを調べるため、2007 年 3 月 12～26 日にわたり日間変動を調べた結果を図 26 に示した。また、4 月、5 月および 8 月の測定結果も併せて表 7 にまとめた。図 26 に示すように、2007 年 3 月の観測期間中において  $\text{PM}_{10}$  が  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を越える激しい大気汚染現象が観測された。この時の炭素成分濃度は OC が  $42 \pm 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、EC が  $32 \pm 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  であり、それら両成分の濃度変動は  $\text{PM}_{10}$  の濃度変動とよく一致していた。このことから現在でも炭素成分が北京市の粒子状物質の主要成分のひとつであることが確認された。この観測期間中の  $\delta^{13}\text{C}$  の変動を詳しく見ると、3 月 12 日あたりでは  $-24.0 \sim -24.5 \%$ 、3 月 26 日あたりでは  $-25.5 \sim -26.0 \%$  へ漸減傾向があり、エアロゾル中の煤に対する発生源寄与が変化したように見える。北京の暖房期から非暖房期への切り替えは原則として 3 月 15 日である。大気エアロゾル中の OC/EC のみに着目しては、3 月 15 日を挟む前後の粒子状炭素成分の質的变化を見つけることは難しい。この北京の連続観測に対応して長崎大学でもエアロゾルの連続観測を行った結果では、エアロゾル中の煤の炭素同位体比は 3/21～22 ( $-25.3 \%$ )、3/23～24 ( $-25.7 \%$ ) となり、3/20 前後の北京における煤の同位体比よりもいくらか軽い値であった。

表 7 は、北京で 4 月および 5 月、8 月に捕集したエアロゾルについて、その OC/EC 値と煤の  $\delta^{13}\text{C}$  をまとめたものである。どの月も約  $-26 \%$  とさらにディーゼル排気粒子（自動車由来）に近い値となり、日本の都市大気中のそれに近似していた。冬期から早春に飛来する黄砂とそれを運ぶ空気塊の炭素粒子から見た汚染の判定は可能と考えられるが、晩春から初夏にかけて飛来する空気塊の特徴を炭素粒子から探すことはなかなか難しいこともわかった。

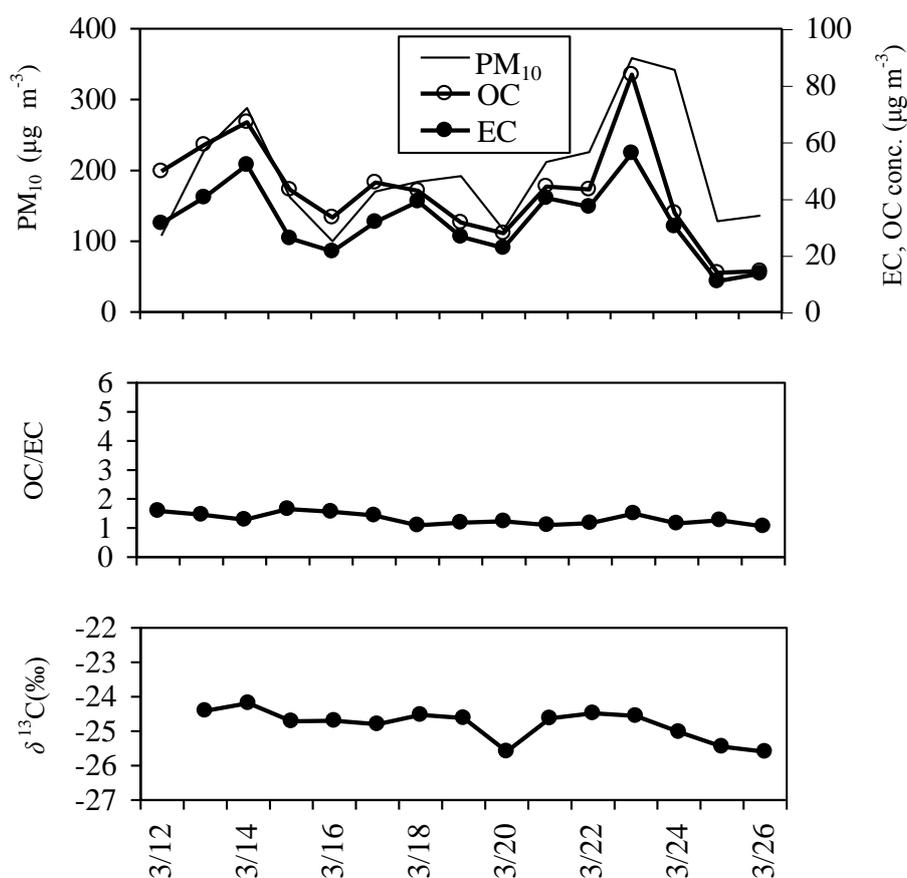


図 26 北京における PM<sub>10</sub>、粒子状炭素（OC、EC）濃度、煤の  $\delta^{13}\text{C}$  の観測例（3/12～26'07）

表 7 北京の都市大気粉塵中の炭素成分および煤の炭素安定同位体比（2007 年）

Sampling period	<i>n</i>	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	OC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	EC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	OC/EC	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
12 - 26 March	15	197 (100 - 358)	42 (14 - 84)	32 (11 - 56)	$1.3 \pm 0.2$	$-24.8 \pm 0.4$
28 - 30 April	3	258 (168 - 366)	70 (55 - 78)	36 (32 - 44)	$1.9 \pm 0.3$	$-26.0 \pm 0.9$
1 - 5 May	4	138 (62 - 182)	45 (22 - 63)	20 (12 - 25)	$2.3 \pm 0.6$	$-26.6 \pm 0.2$
9 - 11 May	3	135 (94 - 176)	36 (31 - 40)	19 (15 - 23)	$2.0 \pm 0.1$	-26.4 (9 May)
27- 29 August	4	—	—	—	—	$-26.5 \pm 0.8$

( - ) : 最大と最小値を示す。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

ライダーネットワークによる高度情報を含む多地点のデータから黄砂消散係数という輸送モデルと直接比較できる定量的な物理量を実時間で求めることが可能となった。また、多国間のネットワークデータの共有のためのデータ精度管理手法が開発された。これによって、ネットワークデータを、輸送モデルの実時間の検証やデータ同化に利用することが可能となり、黄砂現象の実時間の把握、発生地域と発生量の推定、正確な予報などへの道が開けた。さらに、データ同化における誤差信号を詳細に解析することによって、沈着などの過程に関するより正確な情報が得られる可能性が期待される。また、日本に飛来した典型的な黄砂の対照的な事例をあげて、SO<sub>2</sub> や NO<sub>x</sub> などの大気汚染物質で「汚れていない黄砂」と「汚れた黄砂」という視点で黄砂動態を広域モニタリングおよび定点モニタリングによって明らかにした。北東アジア地域の環境汚染や社会的影響を考える時に重要な基礎情報となるはずである。

### (2) 地球環境政策への貢献

- 1) 日中韓環境大臣会合 (TEMM) の合意事項である、黄砂の共同観測に関する実務者会議に貢献。
- 2) 環境省が運用を開始した黄砂飛来情報 HP (ライダー黄砂観測データ提供ページ) 中の、ライダーネットワーク観測データ (光学的厚さデータと黄砂消散係数の時間高度表示データ) を実時間 (1 時間毎に) で提供することに貢献。
- 3) モンゴルの気象に関する JICA 技術協力プログラムにおいて実施した黄砂モニタリングネットワークの構築に貢献。

## 6. 引用文献

なし

## 7. 国際共同研究等の状況

国立環境研究所と中国、モンゴルの研究機関と以下の共同研究に合意した。

- 1) 中国北方地区における砂塵嵐の汚染特徴に関する独立行政法人国立環境研究所と日中友好環境保全センターとの間の協同研究に関する実施協議書 (2008 年 4 月～)
- 2) 「モンゴル国における砂塵系ダスト (黄砂) の観測ネットワークシステムの精度管理と早期警報のためのデータ解析」に関する日本国国立環境研究所とモンゴル国気象水文環境監視庁の共同研究に関する覚書 (2007 年 11 月～)

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Kimio Arai, Joji Ishizaka, Nobuo Sugimoto, Ichiro Matsui, Atsushi Shimizu, Ikuko Mori, Masataka Nishikawa, Kazuma Aoki, Akihiro Uchiyama, Akihiro Yamazaki, Hiroki Togawa, Jun'ichi Asano: SOLA, 2, 100-103, doi:10.2151/sola.2006-026 (2006)

“Yellow Sand Dust Event on 13 April 2003 over Western Kyushu, Japan”

- 2) Kimio Arao, Masataka Nishikawa, Shiro Hatakeyama, Akinori Takami, Shigeo Matsuyama and Tadahiro Hayasaka: *Journal of Environmental Studies*, Nagasaki University, 9(1), 23-30 (2006)

“Atmospheric Turbid Conditions due to Fine Particles in Recent Years at Nagasaki, Japan”

- 3) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake: *Geophys. Res. Lett.* 34, L08806, doi:10.1029/2006GL028551 (2007)

“Adjoint Inverse Modeling of Dust Emission and Transport over East Asia”

- 4) Katsuyuki Takahashi, Motohiro Hirabayashi, Kiyoshi Tanabe, Yasuyuki Shibata, Masataka Nishikawa, Kazuhiko Sakamoto: *Water Air Soil Pollut.*, 185, 305-310 (2007)

doi:10.1007/s11270-007-9454-5

“Radiocarbon Content in Urban Atmospheric Aerosols”

- 5) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu, D. M. Winker: *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8715-8742 (2008)

“Asian Dust Outflow in the PBL and Free Atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated Dust Transport Model”

- 6) 高橋克行、森育子、西川雅高、全浩、坂本和彦：エアロゾル研究、23(3), 194-199 (2008)

「北京と東京における都市大気エアロゾル中の炭素成分の特徴」

- 7) Ikuko Mori, Zijie Sun, Miyuki Ukachi, Kimiyo Nagano, Cameron W. McLeod, Alan G. Cox, Masataka Nishikawa: *Anal Bioanal Chem*, 391, 1997-2003 (2008), doi:

10.1007/s00216-008-2076-y

“Development and certification of the new NIES CRM 28: urban aerosols for the determination of multielements”

- 8) 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), 225-237 (2008)

「2007年5月8-9日に発生した広域的な光化学オゾン汚染：観測データ解析」

- 9) 杉本伸夫：大気環境学会誌、43(5), 295-300 (2008)

「大気汚染指数 API から見た中国の大気環境の変化」

<その他誌上発表（査読あり）>

- 1) Nobuo Sugimoto and Choo Hie Lee: *Applied Optics*, 45 (28), 7468-7474 (2006)

“Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 早崎将光、黒崎泰典、樋口篤志、足立幸穂、菅田誠治、西川雅高、大原利眞、若松伸司：天  
気、53(11), 843-844 (2006)

「MODIS 可視画像と SPM 時間値で捉えた 2006 年 4 月 8 日の帯状黄砂」

- 2) 日本化学会編：第 5 版 実験化学講座 20-2 ー環境化学ー、丸善株式会社、東京、p.77-79、  
pp.519+, ISBN978-4-621-07806-8 C3343 (2007)

「2.1.4d 黄砂（執筆担当：杉本伸夫）」

- 3) 日本化学会編：第5版 実験化学講座 20-2 -環境化学-、丸善株式会社、東京、p.231-234、pp.519+, ISBN978-4-621-07806-8 C3343 (2007)  
「3.1.11 黄砂（執筆担当：西川雅高、森 育子）」
- 4) 西川雅高、杉本伸夫：環境技術、36(4)、240-243 (2007)  
「黄砂観測手法と環境科学的ふるまい」
- 5) 大気と微粒子の話—エアロゾルと地球環境、学術選書 033、監修：笠原三紀夫、東野達、京都大学出版会、126-130 (2008)  
「4章5節、ライダーの項（執筆担当：杉本伸夫）」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Ichiro Matsui, Nobuo Sugimoto and Atsushi Shimizu: International Workshop on Regional Ecology and its Environmental Effect- Dust Sand Storm, its Impact and Mitigation Countermeasure -, Beijing (2006)  
“Development of Lidars for Dust Monitoring Network”
- 2) Nobuo Sugimoto, Atsushi Shimizu, Ichiro Matsui, Xuhui Dong, Jun Zhou and Soon-Chang Yoon: International Workshop on Regional Ecology and its Environmental Effect- Dust Sand Storm, its Impact and Mitigation Countermeasure -, Beijing (2006)  
“Movement of Asian Dust Revealed by Network Observations Using Two-wavelength Polarization Lidars”
- 3) Nobuo Sugimoto: 2nd Asia-Pacific Radiation Symposium (APRS2006), Kanazawa (2006)  
“Lidar observations of aerosols and clouds: Validation of chemical transport models and aerosol climate models”
- 4) Choo Hie Lee, Nobuo Sugimoto, Chan Bong Park: Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference, Nara, Japan (2006), (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) 837-840 (5P-30)  
“Lidar Depolarization Measurement at Two Wavelengths (532nm and 1064nm) in Asian dust event”
- 5) N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, J. Zhou, X. Bai, J. Zhou, C.-H. Lee, S.-C. Yoon, H. Okamoto, I. Uno: Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference, Japan (2006), (23ILRC, ISBN 4-9902916-0-3) 851-854 (6P-1)  
“Network Observations of Asian Dust and Air Pollution Aerosols Using Two-Wavelength Polarization Lidars”
- 6) 杉本伸夫、松井一郎、清水厚、西川雅高、董旭輝、鵜野伊津志：第47回大気環境学会年会、特別集会「東アジア地域の大气環境問題:研究の現状と今後の展開」、東京 (2006)  
「黄砂の発生と輸送の動態」
- 7) 杉本伸夫：気象学会専門分科会「雲・エアロゾルの新しい地球環境観測システム」、つくば (2006)  
「ライダー手法による雲・エアロゾルの観測」
- 8) 杉本伸夫：富山県環境科学センター研究成果発表会、富山 (2006)  
「(基調講演) 東アジアの大气環境:黄砂と大气汚染エアロゾルのライダーネットワーク観測」

- 9) 早崎将光, 足立幸穂, 菅田誠治, 西川雅高, 大原利眞, 若松伸司: 第47回大気環境学会年会 (2006)  
「2006年春季の黄砂飛来時における高濃度SPMの空間分布と時間変動」
- 10) 早崎将光, 黒崎泰典, 樋口篤志, 足立幸穂, 菅田誠治, 西川雅高, 大原利眞, 若松伸司 : 日本気象学会2006年秋季大会 (2006)  
「2006年4月8日の黄砂をもたらした前線の空間構造と時間発展」
- 11) 高橋克行, 肥後桂子, 森 育子, 西川雅高 : 第 15 回環境化学討論会、184-485 (2006)  
「国立環境研究所大気モニター棟での大気質成分の長期観測結果」
- 12) 森 育子, 佐野友春, 高木博夫, 宇加地 幸, 高久雄一, 孫 自傑, Slimming Lee C., 西川雅高 : 第 15 回環境化学討論会、710-711 (2006)  
「都市大気エアロゾルを対象とする新環境標準試料について」
- 13) 森 育子, 西川雅高, 高橋克行, 荒生公雄 : 第 23 回エアロゾル科学・技術研究討論会、83-84 (2006)  
「2006 年春季長崎のエアロゾル濃度」
- 14) 高橋克行, 森 育子, 佐々木淳一, 藤村 満, 荒生公雄, 董 旭輝, 全 浩, 西川雅高 : 第47回大気環境学会年会、3H1048 (2006)  
「越境大気エアロゾルの日中同時観測」
- 15) Nobuo Sugimoto, Xingang Liu, Xuhui Dong, Ichiro Matsui, Atsushi Shimizu, and Tomoaki Nishizawa: International Workshop on Mega-city and Regional Air Pollution, Guangzhou, China (2007)  
“Lidar Observations in Guangzhou and Beijing”
- 16) N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, J. Zhou, J. Zhou, S-C. Yoon, C-H. Lee, D. Batdorj, J. Dulam, and I. Uno: Third China-Korea-Japan Joint Conference on Meteorology, Beijing (2007)  
“Network observations of Asian dust using polarization lidars”
- 17) N. Sugimoto and B. Tatarov: The 7th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics, Seoul, Aug. (2007)  
“Lidar Methods for Studying Asian Dust Phenomena”
- 18) N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, J. Zhou, J. Zhou, S-C. Yoon, C-H. Lee, D. Batdorj, J. Dulam, and I. Uno: Asia Oceania Geosciences Soc. 4th Annual Meeting, Bangkok (2007)  
“Lidar network for Asian dust monitoring”
- 19) N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, I. Uno: The EarthCARE Workshop, Noodwijk, The Netherlands (2007)  
“Movement of Mineral Dust and Air-pollution Aerosols in the East Asian Region: Ground-Based Lidar Network Observations and the Use of CALIPSO Data”
- 20) N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, J. Zhou, J. Zhou, S-C. Yoon, D. Batdorj, J. Dulam, and I. Uno: The 4th International Workshop on Sandstorms and Associated Dustfall, Ulaanbaatar, Mongolia (2007)  
“Dust sandstorm (DSS) monitoring with a network of polarization lidars”
- 21) C. Xie, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu: 第25回レーザセンシングシンポジウム、仙北市

- (2007)
- “Measurement of Aerosols and Clouds with Combined Raman Elastic-Backscatter Lidar”
- 22) 杉本伸夫、松井一郎、清水 厚、西澤智明：第25回レーザセンシングシンポジウム、仙北市(2007)  
「NIESライダーネットワークと世界のネットワークの動向」
- 23) 亀山、平野、上野、杉本、木村：第25回レーザセンシングシンポジウム、仙北市 (2007)  
「衛星搭載 CO<sub>2</sub> モニタ用 1.6 $\mu$ m 帯 CW 変調 DIAL に関する検討」
- 24) 杉本伸夫：日本気象学会2007年度春季大会、東京都 (2007)  
「ライダーによるエアロゾルの定量測定について」
- 25) 高橋克行、西川雅高、荒生公雄、河本和明、董樹屏、郭婧：第 24 回エアロゾル科学・技術研究討論会、和光市、67-68 (2007)  
「2007 年春季に観測された黄砂現象」
- 26) 早崎将光、西川雅高、菅田誠治：第 24 回エアロゾル科学・技術研究討論会、和光市、145-146 (2007)  
「黄砂飛来時の SPM 濃度と視程の関係」
- 27) 高橋克行、河本和明、荒生公雄、佐々木淳一、藤村満、董樹屏、郭婧、西川雅高：第 48 回大気環境学会年会、岡山市、364 (2007)  
「中国北京市における都市大気エアロゾルの炭素安定同位体比」
- 28) 高橋克行、河本和明、荒生公雄、佐々木淳一、藤村満、西川雅高：第 48 回大気環境学会年会、岡山市、365 (2007)  
「越境大気エアロゾルの日中同時観測 (2)安定同位体比の変動」
- 29) 西川雅高：環日本海域の環境シンポジウム、金沢市、6-7 (2007)  
「これまでの黄砂問題への科学的対応と今後：推進費黄砂プロジェクトの成果と将来展開」
- 30) N. Sugimoto, X. Liu, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, C. Xie, Y. Zhang, R. Li, J. Liu, and Z. Wang: The 2<sup>nd</sup> Workshop on Mega-City and Regional Air Pollution, Guangzhou, (2008)  
“Continuous observations with two-wavelengths polarization lidars in Guangzhou and Beijing”
- 31) 西川雅高、森育子、高橋克行、黄砂実態解明調査参加機関：第 17 回環境化学討論会、神戸市、830 831 (2008)  
「日本に飛来した黄砂の特徴」
- 32) 森育子、西川雅高：第 24 回エアロゾル科学・技術研究討論会、金沢市、319-320 (2008)  
“Characteristics of the new NIES CRM No.28 Urban Aerosols”
- 33) M.Nishikawa, K.Takahashi and I.Mori: E Aerosol Conference 2008, Thessaloniki, T06A213P (2008)  
“Characteristics of Urban Aerosols in Beijing”
- 34) 高橋克行、森淳子、荒生公雄、森育子、西川雅高：第 49 回大気環境学会年会、金沢市、213 (2008)  
「2006 年春季の長崎における微小粒子状物質の炭素成分濃度と炭素安定同位体比の変動」
- 35) Masataka Nishikawa, Katsuyuki Takahashi, Ikuko Mori, Dong Xubei and Quan Hao: 6<sup>th</sup>

Aegean Analytical Chemistry Days (AACD), Denizli, 398 (2008)

“New discrimination method by carbon stable isotope ratio and carbonaceous ratio for long-range transport aerosols from China to Japan”

- 36) 杉本伸夫、西川雅高：第2回環日本海域環境シンポジウム 地球環境地域学の創成をめざして、金沢市、13-14 (2008)  
「黄砂研究ネットワークの維持と国際行政としての黄砂対策」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHK 総合テレビ：おはよう日本（2006年4月26日）
- 2) TBS テレビ：イブニングニュース（天気予報）（2006年5月）
- 3) 日本テレビ：今日の出来事（2006年5月）
- 4) テレビ朝日：スーパーJチャンネル（2006年5月）
- 5) 朝日新聞 Be：今さら聞けないー黄砂ー（2007年2月11日）
- 6) テレビ朝日：報道 STATION（2007年4月2日）
- 7) フジテレビ：スーパーニュース（第一部）（2007年4月3日）
- 8) フジテレビ：めざましテレビ（2007年4月4日）
- 9) フジテレビ：とくダネ！（2007年4月4日）
- 10) 日本テレビ：NEWS ZERO（2007年4月9日）
- 11) NHK：おはよう日本（2007年4月11日）
- 12) 中日新聞：黄砂のヒミツ（2007年4月15日）
- 13) 福井新聞：「黄砂アレルギー」じわり（2007年4月17日）
- 14) 朝日新聞（夕刊）：黄砂の実態調査 本格化（2007年5月2日）
- 15) 読売新聞：緩話急題「黄砂アレルギー」（2007年6月19日）
- 16) TBS テレビ：報道特集「中国が隠す気象情報 脅威増す黄砂」（2007年10月14日）
- 17) RKB：ムーブ 2007「ゴビ沙漠からの風」（2007年10月28日）
- 18) テレビ朝日：報道ステーション（2008年3月）
- 19) 関西テレビ：スーパーニュース ANCHOR ”めっちゃ知りたい”（2008年4月3日）
- 20) 朝日新聞（大阪）：黄砂、変化の旅 能登は大気観測の最前線（2008年11月30日）
- 21) 毎日新聞（夕刊）：黄砂 500万トン（2009年4月17日）

(6) その他

なし