

課題名 B-0901 風送ダストの飛来量把握に基づく予報モデルの精緻化と健康・植物影響  
評価に関する研究

課題代表者名 西川 雅高（独立行政法人国立環境研究所環境計測研究センター  
環境計測化学研究室 室長）

研究実施期間 平成21～23年度

累計予算額 191,744千円（うち23年度 63,722千円）  
予算額は、間接経費を含む。

#### 研究体制

- (1)ライダーを中心とする黄砂モニタリングネットワークによるリアルタイム動態把握と発生・輸送・沈着の定量的解析に関する研究（（独）国立環境研究所）
- (2)黄砂予報モデルの精緻化に関する研究（国土交通省気象庁気象研究所）
- (3)風送ダストによる健康影響評価に関する疫学及び動物実験学的検証研究（大分県立看護科学大学）
- (4)健康・植物影響評価のための風送ダスト中バイオエアロゾルの直接採集・分析に関する研究（金沢大学）

#### 研究協力機関

北里大学薬学部、東京都環境科学研究所、国立病院機構福岡病院内科・アレルギー科、  
東京慈恵会医科大学耳鼻咽喉科学講座、産業医科大学医学部、  
産業医科大学産業保健学部・環境マネジメント学科

#### 研究概要

##### 1. はじめに（研究背景等）

黄砂は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が長距離輸送されることによって生じる現象であるが、その規模や回数の増加による社会的な影響について日本のみならず韓国、中国でも懸念されているが、予報精度の向上は未だ途にある状況である。また、発生源地域の自然生態系の変化に伴う優先微生物種の変化や中国沿岸部の産業活動の進展に伴い発生量が増加している大気汚染成分の変動が、飛来する黄砂の随伴物質に反映している可能性があり、越境移流する黄砂や随伴物質による健康や生態系への影響についての関心が年々高まってきている。本研究プロジェクトは、そのような様々な黄砂問題の解明・改善を目指すものである。

##### 2. 研究開発目的

本研究プロジェクトは、風送ダスト（黄砂・バイオエアロゾル）の大気物理・大気化学的解析、気象学的解析とモデル技術開発、生物化学的検証、動物実験学的検証を基にして、深刻化する黄砂問題に関する社会的・行政的要求に答えることを基本目的とする。

##### (1)ライダーを中心とする黄砂モニタリングネットワークによるリアルタイム動態把握と発生・輸送・沈着の定量的解析に関する研究

北東アジアに展開する NIES（国環研）型ライダーネットワークで得られるリアルタイムデータや化学的解析データを基に、黄砂の発生・輸送・沈着量の定量的把握と相互共有可能なデータセットの確立を目指し、予報モデルとの融合を図る。

##### (2)黄砂予報モデルの精緻化に関する研究

発生源地域での発生パラメータの集積などによる黄砂飛来予測数値モデル（黄砂予報モデル）の改良・開発とライダー観測データの同化による改良・検証を行い、環境省／気象庁が配信する黄砂 HP 情報の精度向上にも資する。

##### (3)風送ダストによる健康影響評価に関する疫学及び動物実験学的検証研究

風送ダスト（黄砂・煤塵・微生物・アレルゲン）の健康影響評価を行うことを目的として、人の疫学調査と動物を用いた実験的研究の両面から取り組む。動物実験学的検証手法と疫学調査の両面から、その影響評価を行うことを目標とする。

##### (4)健康・植物影響評価のための風送ダスト中バイオエアロゾルの直接採集・分析に関する研究

発生源および日本において黄砂・バイオエアロゾルを捕集し、発生源および飛来ルート別に付着菌類の同定や分類学的な解析を行う。特に植物生態系影響の可能性のある菌類について、影響メカニズムの解明と評価を行う。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) ライダーを中心とする黄砂モニタリングネットワークによるリアルタイム動態把握と発生・輸送・沈着の定量的解析に関する研究

北東アジア地域に展開する NIES 型ライダーによるモニタリングネットワーク観測を通年にわたって実施し、日本に飛来する全黄砂の立体分布を把握するほか、主な黄砂観測事例について化学輸送モデル(CFORs)との統合的解析を行い、黄砂の発生、輸送、沈着の定量的な推定を行なった。また、サブテーマ 2 で実施する黄砂予測モデルへのデータ同化を目的とした、ネットワークデータのリアルタイム自動処理手法の改良を行なった。日本に飛来する黄砂を対象に、サブテーマ 3、4 の健康影響・環境影響調査に資するため、黄砂消散係数による濃度変換方法の妥当性検証も行った。

#### (2) 黄砂予報モデルの精緻化に関する研究

様々な黄砂モデルの基本的パラメータの中で、砂塵嵐発生時の飛砂跳躍にともなう黄砂の発生過程(サルテーションボンバードメント)の精緻化が重要課題である。その発生過程パラメータ検証のためのデータ集積を図るため、モンゴルのゴビ砂漠において、地上付近とモデル最下層高度の粒径別黄砂濃度と鉛直フラックスの集中観測装置の開発を行った。また、開発した 4 次元同化システム(気象庁予測モデル MASINGAR とアンサンブル・カルマン・フィルタを組み合わせた解析システム)に CALIPSO 搭載のライダーおよびサブテーマ 1 が提供する地上ライダーによって得られるリアルタイム観測データモデルを組み込みモデルパラメータの修正を試みた。さらに、その同化システムによる逆解析手法を用いた黄砂放出量解析、利用可能な観測データの有効性や感度実験なども行なった。

#### (3) 風送ダストによる健康影響評価に関する疫学及び動物実験学的検証研究

マウスを用いた動物実験(1 群 14~16 匹)に、黄砂濃度およびスギ花粉抗原濃度を変数とした何組かの投与実験を行い、スギ花粉症モデルによるアレルギー症状の変化を調べた。また、サブテーマ 4 との連携により、分離培養した黄砂付着細菌や微生物を無菌化した黄砂試料とともに動物投与実験も行った。さらに、北九州地域に居住する大学生とその家族 300 人を対象に、花粉症アンケート、黄砂日記(毎日)、アレルギー性鼻炎標準調査票を原データとし、サブテーマ 1 のフィールド観測データによる黄砂日と非黄砂日の区分ごとの疫学調査を行った。

#### (4) 健康・植物影響評価のための風送ダスト中バイオエアロゾルの直接採集・分析に関する研究

独自に開発した係留気球を用い、黄砂発生源(中国甘肅省敦煌市の砂漠地帯)と石川県珠洲市(能登半島先端付近)で、上空の黄砂バイオエアロゾルを直接捕集した。係留気球による捕集高度は地上約 900 m で、独自に考案した搭載サンプラーで 1 時間の捕集が出来る。日本国内では係留気球と同時並行して航空機観測も行った。飛行高度は約 2,900 m で、やはり独自開発したサンプラーにて 1 時間捕集が可能である。捕集サンプルの生物分析は、(i)分離培養・同定法、(ii)メタゲノム法、(iii)耐塩性細菌培養法で行なわれた。実試料中で優先的に特定された *Cladosporium* sp.、*Bacillus* sp.、*Methylobacterium* sp. を対象とした紫外線照射による生死判別実験を行い、黄砂輸送経路に関して生存領域のシミュレーションも行った。また、地上大気中のバイオエアロゾルの毎日連続モニタリングを金沢大学構内(自然科学 1 号館 4 階ベランダ、地上高約 15 m)で行い、上空試料との対比の他、新たに開発した DNA 直接抽出法により大気 DNA 濃度を測定した。そのほか、植物生態系影響実験として、黄砂観測日と松枯れとの年度別相関調査や検証的室内実験を行った。

### 4. 結果及び考察

#### (1) ライダーを中心とする黄砂モニタリングネットワークによるリアルタイム動態把握と発生・輸送・沈着の定量的解析に関する研究

ライダーネットワークでは、国内 12 カ所、国外 5 カ所において、2 波長(1064 nm、532 nm)偏光(532 nm)ライダー(レーザーライダー)による通年観測を行い、日本に飛来する全ての黄砂イベントにおいて高度プロファイルを得た。ライダーネットワークからのデータはインターネット経由で国立環境研究所に準リアルタイム転送された後、自動データ解析システムにより、非球形粒子(黄砂)消散係数、球形粒子(エアロゾル)消散係数などを算出する仕組みを確立している。これらのうち、黄砂消散係数データから換算した質量濃度は、環境省の黄砂飛来情報ホームページに提供されている。黄砂消散係数と球形エアロゾル消散係数の高度プロファイルは、国立環境研究所の環境 GIS に毎時表示されている。3 年間の連続観測において、各年で最も大きかった黄砂現象を上げると、2009 年は 3 月 16~17 日、2010 年は 3 月 20 日、2011 年は 5 月 1~4 日に観測したイベントである。この中で 2010 年 3 月 20 日の事例が最も高濃度であり、九州から北海道まで北上移動し日本全体で黄砂現象が観測された。図 1 に、この事例のライダーネットワーク観測で得られた黄砂消散係数(左)と国環研/九州大学が共同

稼働する CFORS モデルによる黄砂消散係数(右)を示した。この事例の黄砂発生源は、内モンゴルエジナチ南部付近を中心とするゴビ砂漠南側一帯と推定されている。CFORS による推定では、2010 年 3 月 18~23 日に北緯 25~50 度の間を通過して日本側に輸送された黄砂の総量は約 3.4 Tg でこのうちの 1.36 Tg(全量の 40%)は高度 1 km 以下を通過した。これは、2007 年 3 月 28 日~4 月 4 日のイベント(全輸送量 9.39 Tg、1 km 以下 0.98 Tg)に比べると総量で少ないが、1 km 以下の大気境界層内に入り込んだ量は大きかった。

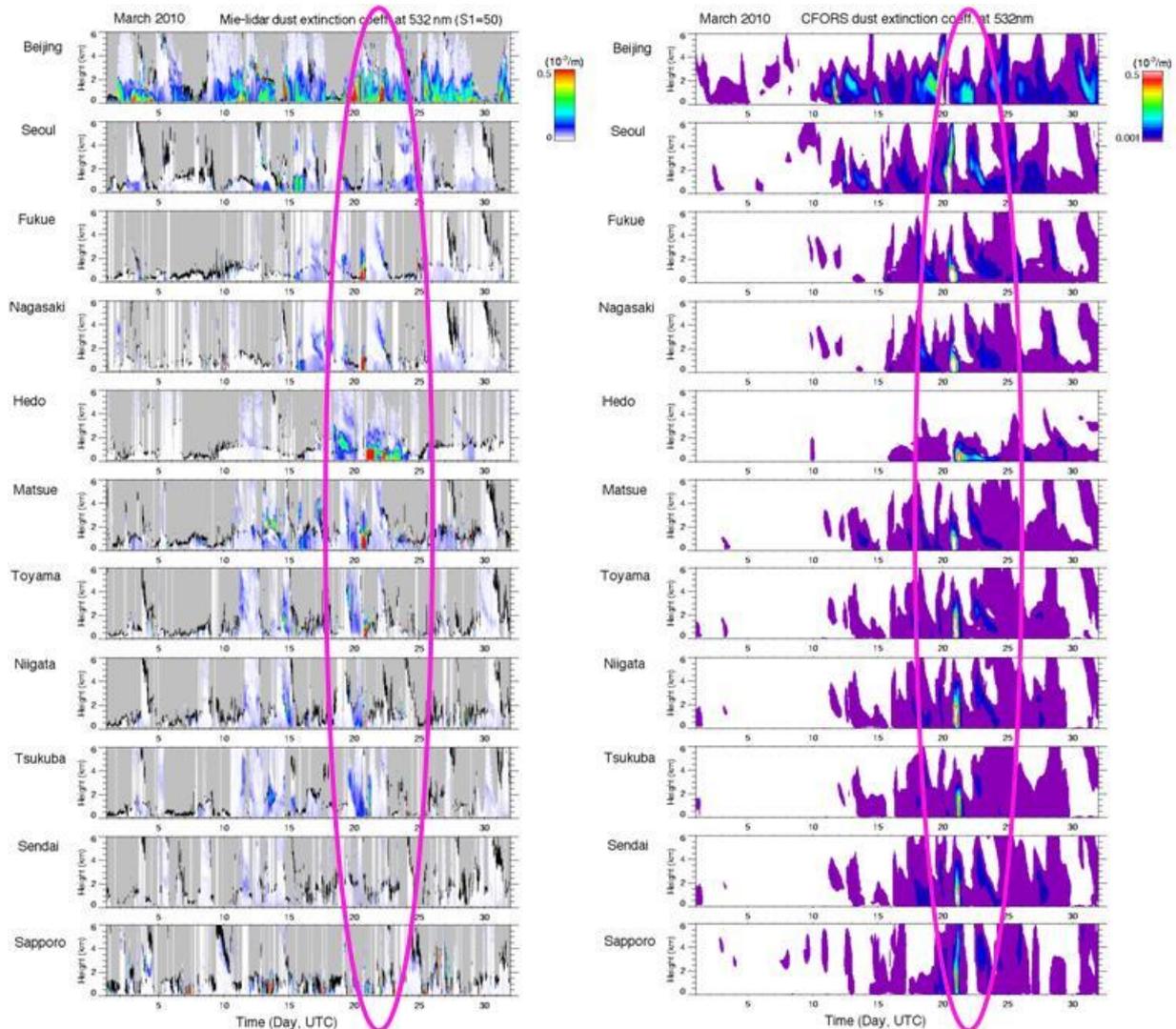


図 1 2010 年 3 月に、北京、ソウル、福江、長崎、辺戸岬、松江、富山、新潟、つくば、仙台、札幌で観測された地上から高度 6 km の黄砂消散係数(左)と CFORS で計算された黄砂消散係数(右)

## (2)黄砂予報モデルの精緻化に関する研究

これまでに多くのダスト発生過程モデルが発表されているが、それらには多くの不確実なパラメータが存在し、その結果、異なるダストモデル間の差も非常に大きい。この誤差原因を追究し、修正することは黄砂の数値シミュレーション精度向上において極めて重要な課題となっている。気象庁・気象研究所の黄砂シミュレーションモデル MASINGAR によって再現されたダスト濃度は 3 月に過小評価、5 月に過大評価となる傾向が見られる。黄砂シーズンである春季においてこのような系統的な誤差が現れることは他のダストモデルを用いた実験においても問題となっており、特に 3 月の過小評価は黄砂予報を行う上で最大の障害となっている。発生源におけるサルトレーションフラックスの観測実験から表面土壌の種類によって舞い上がり粒子量に大きな差が生じること、発源地域の積雪および土壌水分、枯れ草の影響も季節別の発生量推定に大きく影響することが明らかとなった。そのようなパラメータの変数評価を見直すことによってモデル精度の高精度化が可能となることが示唆された。それと並行し、サブテーマ 1 のライダーネットワークや衛星ライダーなどの観測データとアンサンブル・カルマン・フィルタ(EnKF)による MASINGAR の誤差情報やバイアス情報を評価し、その同化修正システムを開発した。図 2 に 2007 年 5 月 13 日におけるエアロゾル光学的厚さ(AOT)の比較を例示する。ライダーネットワークの観測値をアンサンブル・カルマン・フィルタによってデータ同化した結果と共に、CALIPSO 衛星搭載ライダーの観測値を同様

にデータ同化した結果も示した。また、比較対象として独立観測の MODIS/NASA からリトリーブされた AOT も掲げられている。ここで、データ同化無しモデル結果で見られる朝鮮半島根元付近の高い AOT 領域は MODIS 観測では見られず、不自然さを拭えない。一方、この不自然な AOT 領域はデータ同化の結果では消失しており、日本列島上空でも MODIS 観測値に近い AOT の分布がデータ同化で得られている。データ同化によって得られた黄砂の解析情報からモデルシミュレーションの誤差が定量的に見積もられ、その分布や時間変動が把握できた。これらの誤差情報はモデルの精度向上に役立てられる。図 3 は 2007 年 3 月における長崎県長崎市上空ダスト消散係数の比較である。(a)は国立環境研究所の NIES ライダーネットワークによって得られた観測値、(b)はデータ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(c)は CALIPSO 観測のデータ同化によって積雪および土壌水分量に関わるパラメータの最尤推定を行い、その推定結果を用いて黄砂シミュレーションを再度行った結果である。データ同化前は残念ながら黄砂の日本への到来がほとんど再現できていないが、データ同化後は多くの黄砂到来が再現されている。特に 3 月 6~15 日、19~22 日、27~30 日のプリウムは独立観測(NIES ライダーネットワーク観測)とデータ同化による修正結果が極めて良い一致を見せている。これはデータ同化によって黄砂放出量に関わるパラメータが最尤推定されて放出量再現精度が向上したため、発生域において現実に近い黄砂放出が再現できたからだと思う。この実験結果によって、早春におけるダスト濃度の解析誤差は積雪とその融雪による土壌水分量の不確実性に大きく起因することが確認できた。また、ここで得られたパラメータの最尤推定値によって黄砂シミュレーションモデルの改良を行うことができた。

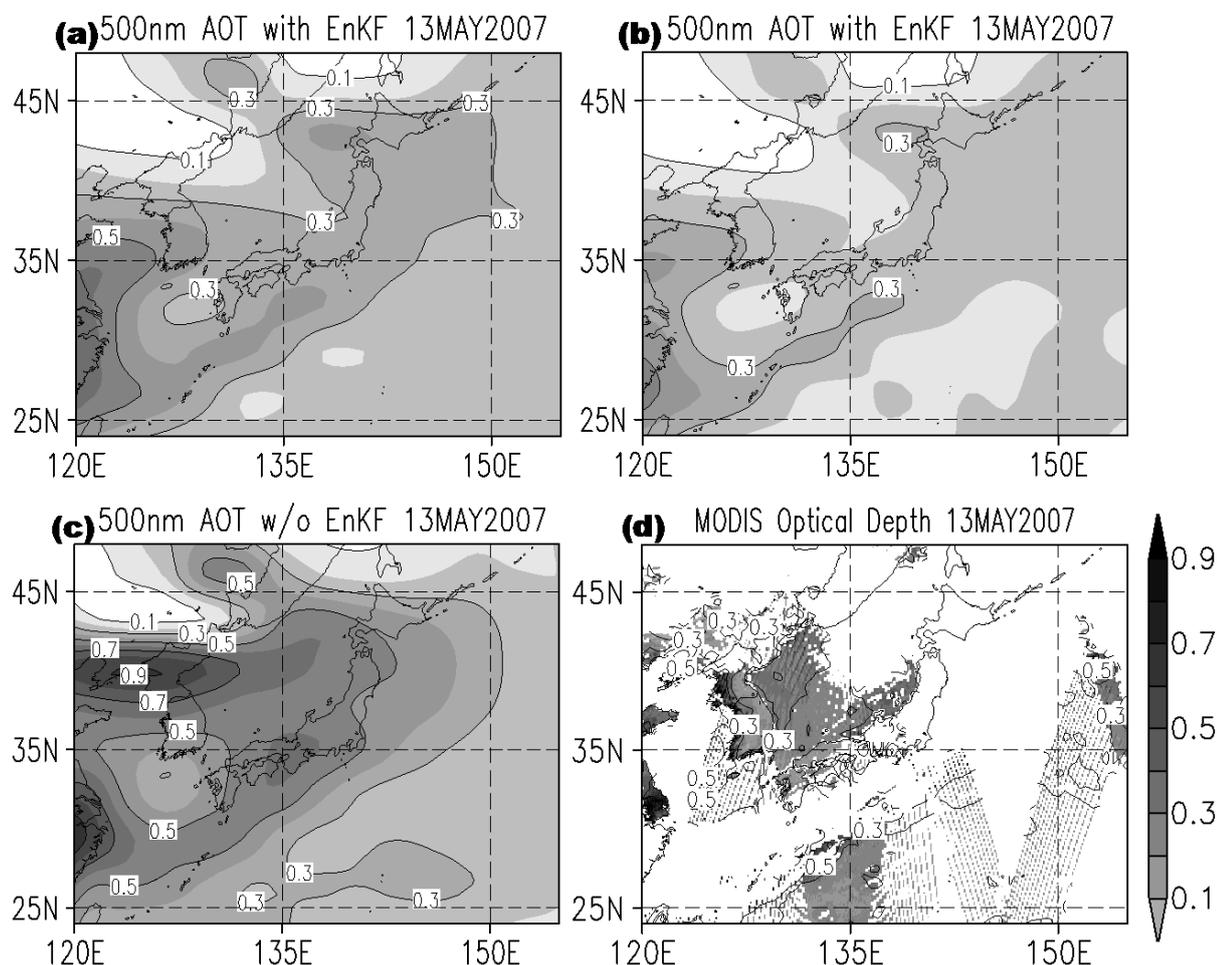


図 2 2007 年 5 月 13 日におけるエアロゾル光学的厚さ(AOT)の比較

(a)CALIPSO 衛星搭載ライダーの観測値をアンサンブル・カルマン・フィルタによってデータ同化した結果、(b)国立環境研究所の東アジアライダーネットワークの観測値を同様にデータ同化した結果、(c)データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(d)MODIS/NASA の観測値。濃淡が濃いほど AOT の値が高く、エアロゾルの鉛直積算量が多い。データ同化無し(c)で見られる朝鮮半島の根元付近の高い AOT 領域は実観測値(d)では見られず不自然なシミュレーション結果である。この不自然な領域はデータ同化の結果(a)および(b)では消失し、日本列島上空でも実観測値に近い AOT の分布が得られている。しかし、CALIPSO ライダーのデータ同化結果と国立環境研究所ライダーネットワークのデータ同化結果では、AOT の分布は類似しているが、その濃さに差が見られる。

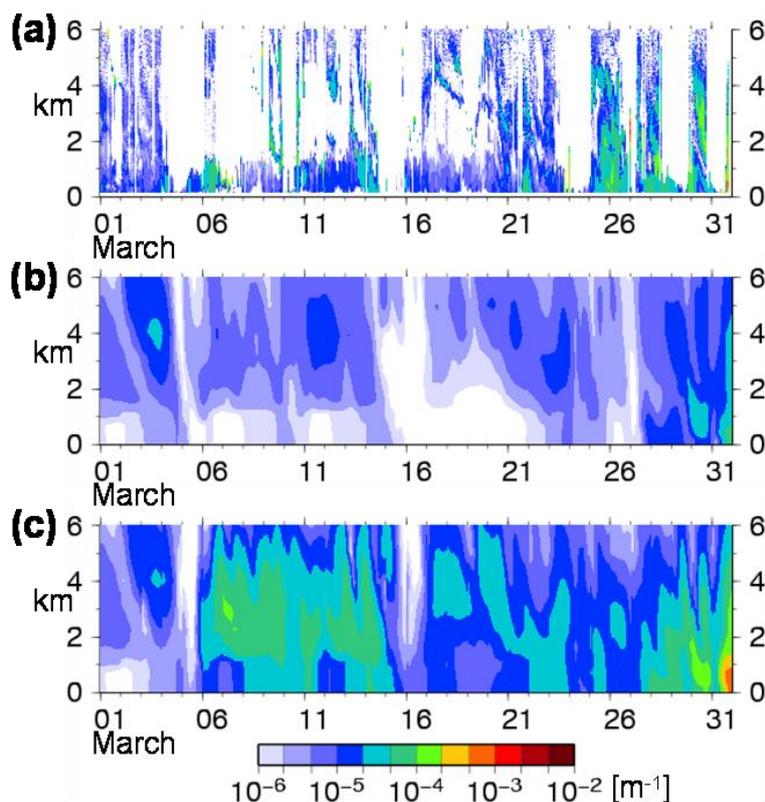


図3 2007年3月における長崎県長崎市上空ダスト消散係数の比較。(a)国立環境研究所のライダーネットワークによって得られた観測値、(b)データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(c)CALIPSO観測のデータ同化によって積雪および土壌水分量に関わるパラメータの最尤推定を行い、その推定結果を用いて黄砂シミュレーションを再度行った結果。横軸は日付、縦軸は高度である。(a)は偏光解消度を用いてダストのシグナルを取り出している。消散係数が大きいと一般的にダスト濃度が高い。データ同化前 (b)では黄砂の到来がほとんど再現できていないが、データ同化後 (c)ではほとんどの黄砂到来が再現されている(特に3月6~15日、19~22日、27日以降のプリユームの再現性向上で顕著)。初春の黄砂発生域は積雪や土壌水分量が多く、黄砂の発生をモデル単独で再現することが難しい。一方(c)では、データ同化によって黄砂放出量が逆推定されて放出量再現精度が向上したため、実観測値に非常に近い黄砂濃度が再現できている。

### (3) 風送ダストによる健康影響評価に関する疫学及び動物実験学的検証研究

風送ダストには黄砂のほかバイオエアロゾルが混在している。サブテーマ4で直接捕集・分離培養した黄砂付着微生物(*Nocardiosis* sp. *Bacillus* sp.)について、これら微生物によって惹起される肺の炎症が増悪するかどうか動物実験で調べた。この動物投与実験に使用した *Nocardiosis* sp.および *Bacillus* sp.は、肺炎やアレルギー炎症を増悪する作用が無いが非常に低いものであることが判った。黄砂は花粉症の症状を増悪することが懸念されている。スギ花粉症の増悪作用に関する動物投与実験を行った。Cryj(スギ花粉抗原)1+黄砂 2  $\mu\text{g}$  群のNCLF(鼻洗浄液)中の好中球数(図4)は、黄砂 2  $\mu\text{g}$  群、Cryj1 単独投与群と比べて有意な増加が見られた。しかしCryj 1+黄砂 10  $\mu\text{g}$  群では、Cryj 1+黄砂 2  $\mu\text{g}$  群と比べるとむしろ低下傾向を示していた。Cryj 1+黄砂 2  $\mu\text{g}$  群のNCLF中の好酸球数は、Cryj 1 単独群と比べて低下傾向にあり、Cryj 1+黄砂 10  $\mu\text{g}$  群ではそれよりさらに低い値を示していた。好酸球の遊走に関するNCLF中のEotaxin量は、NCLF中の好酸球数の変化と対応していた。花粉症の症状の指標である鼻かき回数は、むしろCryj1 投与群よりも対照群、黄砂単独投与群で増加が見られた。鼻の病理学的な観察では、Cryj 1 単独群、Cryj 1+黄砂 10  $\mu\text{g}$  群と比べてCryj 1+黄砂 2  $\mu\text{g}$  群における鼻粘膜下への好酸球浸潤が著しかったが、粘液細胞には変化が見られなかった。一方、生体内の炎症反応の亢進を示唆する脾臓の重量は、Cryj 1+黄砂 10  $\mu\text{g}$  群で最も増加していた。HE染色を施した鼻組織を観察した結果、対照群と黄砂投与群では、鼻粘膜下に好酸球の浸潤はほとんど認められなかったが、Cryj 1 を投与したマウスでは、粘膜下組織や粘膜上皮内に好酸球の浸潤が見られた。その中でも特にCryj1+黄砂 2  $\mu\text{g}$  群における鼻粘膜下への好酸球浸潤が著しかった。以上の結果より、Cryj1 +黄砂 2  $\mu\text{g}$  群に

において好中球や好酸球性の炎症が強く起こっていることが示された。以上の結果から、スギ花粉症を発症している時期に風送黄砂の曝露を受けると、病態がさらに悪化することが明らかとなった。動物実験と並行して、大学生とその家族を対象に黄砂飛来期間中の健康影響調査を行った。花粉症やアレルギー性鼻炎の見られる群と見られない群に分け、症状日記およびアンケートによるスコアで評価した。アレルギー無し群でも有り群と同様な症状スコア推移を示し黄砂による健康影響がうかがわれた。ただし、咽喉頭・下気道症状の推移は一定しておらず同様の調査結果の蓄積が望まれる。

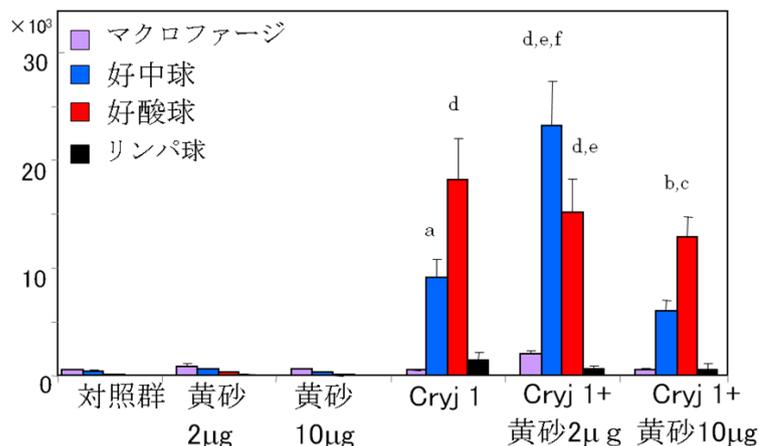


図4 鼻腔洗浄液中の炎症細胞数

a:p<0.05vs対照群 b:p<0.01vs黄砂10mg c:p<0.01vs対照群  
d:p<0.001vs対照群 e:p<0.001vs黄砂2mg f:p<0.001vsCryj1  
平均±標準誤差

(4)健康・植物影響評価のための風送ダスト中バイオエアロゾルの直接採集・分析に関する研究

1)風送ダスト中バイオエアロゾルの直接採集と生物分析

2008年5月と2009年4月の大陸からの気塊移流時に、係留気球を用いたサンプリングを行った。CFORS解析およびOMI-TOMS解析から、2008年のサンプリングは黄砂現象時の、2009年は非黄砂現象時に行われたことが判っている。分離培養・同定分析の結果、2008年サンプルからは *Nocardiosis*, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Bjerkandera* など多くの菌株が単離されたが、2009年のサンプルからは *Paraconiothyrium* の1菌株のみであった。黄砂が多くのバイオエアロゾルを運んできていると考えられた。また、航空機を用いた高高度サンプリングでは *Bacillus* 属菌株が単離され、航空機を用いたサンプリングも可能であることがわかった。メタゲノム解析からは、まずサンプルのDNA濃度は、黄砂現象時には  $0.125 \text{ g/m}^3$  であり、黄砂現象を伴わない時の約5倍であることがわかった。本解析からも黄砂がバイオエアロゾルを運んできてくることを実証している。*Variovorax* や *Bradyrhizobium* などDNAとして種々の菌が浮遊し、また新種の菌も3菌発見された。DGGE解析からは黄砂現象時には耐塩性細菌が増加し、多様性は減少し *Bacillus* 属が優先することがわかった。航空機を用いた直接採集と分離培養・同定結果では、西からの黄砂には *Bacillus* sp.が多く含まれ、黄砂ではない北からは *Bacillus* sp.ではなく *Methylobacterium* sp.などが含まれることがわかった。他にも、2010年度および2011年度の係留気球・航空機を用いたサンプルから分離培養・同定法によって *Methylobacterium* sp.や *Staphylococcus* sp.など21菌株以上が新たに発見された。各年の捕集試料のメタゲノム解析から、優占種である *Variovorax* sp., *Methylobacterium* sp.など107菌株が新たに発見された。また、耐塩性細菌分析では、航空機や係留気球サンプルの耐塩性細菌として単離された *Bacillus subtilis* グループの *gyrB* 遺伝子配列を用いた系統学的分類によると、黄砂とともに *Bacillus subtilis* が越境輸送された可能性があることがわかった。紫外線による死滅速度式を用いた黄砂輸送経路における生存領域のシミュレーションを検討した結果(図5)、黄砂発生源でみつかった *Cladosporium* sp.の生存時間は6.7日であり、日本に飛来しても生存している可能性がある。一方、*Bacillus* sp.の生存時間は1.5日であり、黄砂に付着し日本に飛来しても生存の可能性が低く、生菌で検出された場合は輸送経路の途中(中国東部から朝鮮半島)からの混入も考えられる。これらのシミュレートは、黄砂予報モデルに組み込む環境影響情報となり新たな研究融合に貢献できると考えられる。次に、生物分析結果から白色腐朽菌である *Bjerkandera* が単離されたことに着目する。枯

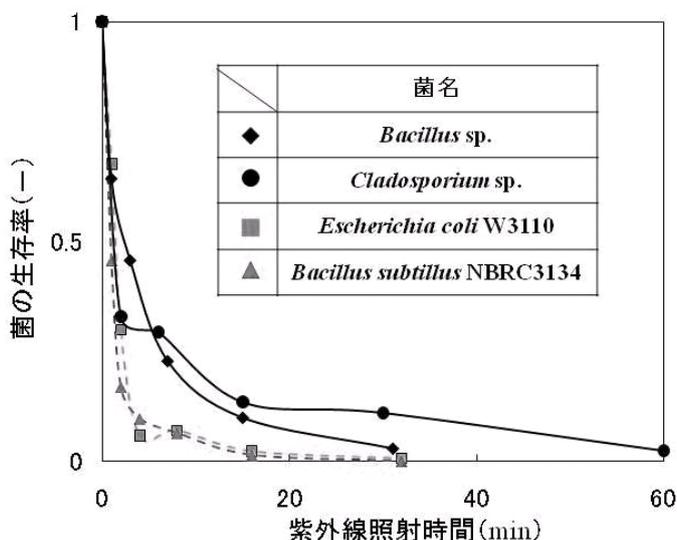


図5 紫外線耐性実験結果

死木の腐朽など植物生態系影響として「松枯れ(松材線虫病)」に着目し、黄砂観測日数と松枯れ被害量との相関を調査した。松枯れ被害量は、大気 SO<sub>2</sub> 濃度と同程度、黄砂観測日数と相関があることがわかった。金沢大学能登半島里山里海自然学校演習林で見つかった松枯れ木材をサンプリングし、枯れ木内の菌相調査を行った。数種類の菌が単離され、*Pseudomonas* sp.が最も多く検出された。これまで上空で採集された黄砂バイオエアロゾルにも *Pseudomonas* sp.が検出されており、DNA の相同性を検討中であるが、黄砂バイオエアロゾルが森林に沈着した可能性があることが明らかになった。松枯れ樹木から採取された松枯れの原因となる松材線虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)の黄砂バイオエアロゾル食餌実験を行った。黄砂バイオエアロゾルの中でも *Norcardiopsis* sp.は全く食餌とならないが、*Streptomyces* sp.や *Bjerkandera* sp.はやや食餌となり、*Bacillus* sp.に至っては増加率 10.8 倍とかなり有力な食餌となることがわかった。黄砂バイオエアロゾル *Bacillus* sp.が松に沈着し松材線虫がいた場合、松材線虫病(松枯れ)が発生する可能性が高いことがわかった。植物生態系における生物循環において、枯倒木の土壌への変換の際に黄砂バイオエアロゾルが沈着すれば、土壌への循環速度を大幅に増加することが考えられる。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

本プロジェクト研究の成果や遂行において得られた科学的意義を以下にまとめる。

- 1) ライダーおよび地上観測によるモニタリングネットワークデータが連続して得られ、黄砂現象の定量的な解析が可能となった。また、リアルタイムでデータ処理が行われ予報モデルの同化に利用できるデータの提供が可能になった。また、過去の長期間のライダー観測から地上付近の黄砂消散係数のデータセットが構築され、ライダーデータを疫学研究に利用することも可能となった。
- 2) ライダー観測で得られた減衰後方散乱係数や偏光解消度を直接データ同化することに世界で最初に成功した。また、本研究で技術開発した黄砂逆解析手法は、黄砂の放出源評価を通じて気象庁の黄砂予測精度向上に寄与できる。また、ここで開発された技術は黄砂だけでなく他の大気汚染物質にも応用可能なツールであり、モデルと観測を融合する基礎技術として非常に有用である。
- 3) 気管支喘息やスギ花粉症のモデルマウスを用いた動物実験により、風送黄砂にはこれらの I 型アレルギーを増悪させる作用があることが明らかとなった。また黄砂粒子自身に肺の細菌感染による炎症を悪化させる作用があることが明らかとなった。黄砂がアレルギー反応を高めることや感染症による炎症反応を高める作用を見いだしたことは科学的に非常に意義あるものである。
- 4) 航空機や係留気球による直接捕集法を確立し、これまでほとんど未解明であった黄砂バイオエアロゾル研究の扉を開いたことは非常に意義がある。*Bacillus* sp.をはじめとし100菌株以上の微生物種が発見され、黄砂バイオエアロゾルによるアレルギー増悪など健康影響との関連性を明らかにするための基盤的データバンクとして有用である。

### (2) 環境政策への貢献

日中韓およびモンゴルが関与する日中韓黄砂共同研究第1作業部会(DSS-WG1)会合に、科学的知見や観測データを提供した。黄砂予測モデル精度の大幅な向上を達成し、気象庁の黄砂予報モデル改良の技術基盤を確立したことにより、気象庁・環境省共同運営の黄砂情報ホームページの黄砂予報情報の質的向上に貢献できた。また、本研究で開発された逆解析手法による黄砂発生源・発生量情報の高精度化のためには、関係諸国の観測データ共有が有効であることの意義が示され、DSS-WG1会合における東アジア各国の黄砂データの共有化を図る上で大きな科学的根拠となる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Hara, Y., K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu and D. Winker: Atmos. Chem. Phys., 9, 1227-1239 (2009)  
“Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model”
- 2) Ichinose T, K. Hiyoshi, S. Yoshida, H. Takano, K. Inoue, M. Nishikawa, I. Mori, H. Kawazato, A. Yasuda, T. Shibamoto: Inhal Toxicol. Oct; 21(12), 985-993 (2009)  
“Asian sand dust aggravates allergic rhinitis in guinea pigs induced by Japanese cedar pollen”
- 3) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi: Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 39-49 (2010)  
“Data assimilation of CALIPSO aerosol observations”

- 4) Maki T., K. Aoki, S. Susuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, Y. Tobo, A. Matsuki, H. Hasegawa, and Y. Iwasaka: *Journal of Ecotechnology Research*, 15, 97-101 (2010)  
“PCR-DGGE analysis of Asian dust (KOSA) bioaerosol recorded in snow cover at Mount Tateyama, central Japan”
- 5) Maki T., S. Susuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, Y. Tobo, M. Yamada, T. Higashi, A. Matsuki, C. Hong, H. Hasegawa, and Y. Iwasaka: *Science of the Total Environment*, 408, 4556-4562 (2010)  
“Phylogenetic analysis of atmospheric halotolerant bacterial communities at high altitude in an Asian dust (KOSA) arrival region, Suzu City”
- 6) Sugimoto, N., B. Tatarov, A. Shimizu, I. Matsui and T. Nishizawa: *SOLA*, 6, 093-096 (2010)  
“Optical characteristics of forest-fire smoke observed with two-wavelength mie-scattering lidars and a high-spectral-resolution lidar over Japan”
- 7) Sugimoto, N., Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, M. Nishikawa, and J. Dulam: *SOLA*, 6, 125-128 (2010)  
“Dust emission estimated with an assimilated dust transport model using lidar network data and vegetation growth in the Gobi desert in Mongolia”
- 8) He, M., T. Ichinose, S. Yoshida, M. Nishikawa, I. Mori, R. Yanagisawa, H. Takano, K. Inoue, G. Sun, T. Shibamoto: *Inhalation Toxicology*, 22(12), 1012-1025 (2010)  
“Airborne Asian Sand Dust Enhances Murine Lung Eosinophilia”
- 9) Mori, I., M. Nishikawa, A. Shimizu, M. Hayasaki and T. Takasuga: *SOLA*, 7A, 5-8 (2011)  
“Solubility of iron in the aerosol collected during kosa (Asian dust) events in Japan”
- 10) Nishikawa, M., I. Mori, K. Takahashi, I. Matsui, M. Sugimoto, K. Kawamoto, Y. Wang and S. Dong: *SOLA*, 7A, 9-12 (2011)  
“Short-term variation in aerosol components during the same asian dust (Kosa) event observed in Nagasaki, Japan and Beijing, China”
- 11) Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, K. Yumimoto, I. Uno and M. Nishikawa: *SOLA*, 7A, 013-016 (2011)  
“Comparison of Surface Observations and a Regional Dust Transport Model Assimilated with Lidar Network Data in Asian Dust Event of March 29 to April 2, 2007”
- 12) Maki T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama and M. Mikami: *SOLA*, 7A, 21-24 (2011)  
“The Impact of Ground-Based Observations on the Inverse Technique of Aeolian Dust Aerosol”
- 13) Tanaka T. Y., T. T. S Sekiyama, T. Maki, and M. Mikami: *SOLA*, 7A, 36-39, (2011)  
“The effects of snow cover and soil moisture on Asian dust: I. A Numerical Sensitivity Study”
- 14) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, T. Maki and M. Mikami: *SOLA*, 7A, 40-43 (2011)  
“The Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation”
- 15) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, S. Yamamoto, K. Inoue, H. Takano, R. Yanagisawa, M. Nishikawa, I. Mori, G. Sun, T. Shibamoto: *Toxicology and Applied Pharmacology* 258, 237–247 (2012)  
“Asian sand dust enhances murine lung inflammation caused by *Klebsiella pneumoniae*”
- 16) Onishi K., Y. Kurosaki, S. Otani, A. Yoshida, N. Sugimoto, Y. Kurozawa: *Atmospheric Environment*, 49, 94-102 (2012)  
“Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan”
- 17) Jugder D., N. Sugimoto, M. Shinoda, R. Kimura, I. Matsui, M. Nishikawa: *Atmospheric Environment* 54, 231-241 (2012)  
“Dust, biomass burning smoke, and anthropogenic aerosol detected by polarization-sensitive Mie lidar measurements in Mongolia”
- 18) Kobayashi F., T. Maki, and Y. Nakamura: *International Biodeterioration and Biodegradation*, 69, 113-118 (2012)  
“Biodegradation of phenol in seawater using bacteria isolated from the intestinal contents of marine creatures”  
など、全 47 報

**(2) 主な口頭発表(学会等)**

- 1) Mikami M., M. Ishizuka, J. Leys, and Y. Shao: International Workshop on “Mineral Aerosol and Its Impacts on Climate and Environment” (2009)  
“Towards the improvement of dust model -Introduction to DEMI experiment-”
- 2) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa and Y. Hara: SPIE Asia-Pac.Remote Sens., Lidar Remote Sens. Environ. Monit.11, Abstracts, 7153, 7860-18 (2010)  
“Lidar network observation of tropospheric aerosols”
- 3) Nishikawa, M., I. Matsui, I. Mori, A. Shimizu, N. Sugimoto, D. Batdorj and D. Jugder: 2010 Int. Aerosol Conf. (IAC2010), Helsinki, P2K8 (2010)  
“Source estimation by chemical characterization for the urban aerosol in Ulaanbaatar”
- 4) F. Kobayashi, K. Kodaniguchi, M. Kakikawa, T. Maki, M. Yamada, Y. Tobo, C. Hong, A. Matsuki, Y. Iwasaka: 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2010), Honolulu, USA (2010) “Microbial isolation technique of bioaerosols in Yellow Dust (Kosa)”
- 5) Ichinose T., M. He: The 42 nd Annual meeting of Japanese Society of Occupational and Environmental Allergy. Environmental Air Contaminations Influencing on Airway Allergy - Especially Asian Sand Dust - (2011)  
“Asian dusts and allergy”  
など、全 208 報

**7. 研究者略歴**

課題代表者: 西川 雅高

1952年生まれ、東京理科大学大学院工学研究科修了、理学博士、  
現在独立行政法人国立環境研究所環境計測研究センター環境計測化学研究室長

研究参画者

(1) 1): 西川 雅高(同上)

2): 杉本 伸夫

1954年生まれ、大阪大学大学院基礎工学研究科修了、理学博士、  
現在独立行政法人国立環境研究所環境計測研究センター遠隔計測研究室長

(2): 三上 正男

1954年生まれ、気象大学校卒業、理学博士、現在気象研究所環境・応用気象研究部長

(3): 市瀬 孝道

1954年生まれ、麻布獣医科大学(現在麻布大学)卒業、獣医学博士、  
独立行政法人国立環境研究所勤務後、現在、大分県立看護科学大学、教授

(4): 小林 史尚

1968年生まれ、金沢大学工学部卒業、博士(工学)、  
現在金沢大学理工研究域自然システム学系、准教授

**B-0901 風送ダストの飛来量把握に基づく予報モデルの精緻化と健康・植物影響評価に関する研究**

**(1) ライダーを中心とする黄砂モニタリングネットワークによるリアルタイム動態把握と発生・輸送・沈着の定量的解析**

(独) 国立環境研究所

環境計測研究センター	環境計測化学研究室	西川雅高
	遠隔計測研究室	杉本伸夫・松井一郎・西澤智明・原由香里
地域環境研究センター	広域大気環境研究室	清水 厚

<研究協力者> 北里大学薬学部 公衆衛生学教室 井上健一郎  
 東京都環境科学研究所 分析研究科 森 育子

平成 21～23 年度累計予算額：103,576 千円（うち、平成 23 年度予算額：34,480 千円）

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 黄砂の環境影響を理解するためには、日本に飛来する黄砂を逃すことなくモニタリングし、発生、輸送、沈着を定量的に理解することが必要である。また、黄砂飛来予測モデルの検証やデータ同化による高精度化のための信頼性の高い観測データをリアルタイムで提供することが求められる。さらに、影響研究へのモニタリングデータの利用のために、定量的な解析データセットを構築することが必要である。本研究では、ライダーを中心とする黄砂モニタリングネットワークを用いて通年観測を行い日本へ飛来する全ての黄砂を 3 次元的に把握するとともに、黄砂輸送モデルの検証・同化のためのデータ処理をリアルタイムで行なった。主要な黄砂事例を抽出してデータ同化モデルを用いた解析を行い、黄砂の発生源、輸送経路、輸送量、沈着量等を推定した。その結果、データ同化によって黄砂現象がより定量的に再現できるだけでなく、植生の変化による季節内の発生量の変化など発生源の詳細な情報も解析できることが示された。一方、過去のデータも含む継続的な観測データから地上付近の黄砂および大気汚染性の球形粒子の消散係数の日データの長期間のデータセットを構築し、疫学研究に提供した。また、黄砂消散係数と重量濃度の関係を明確にするために、ライダー、地上観測、データ同化モデルを用いた考察を行った。その結果、ライダーで得られる黄砂消散係数と小粒子の黄砂の重量濃度（黄砂のみの PM2.5）と非常に良い相関関係があることが明らかにされ、黄砂消散係数（あるいはそれから変換した重量濃度）を健康影響研究に利用することが妥当であることが示された。

**【キーワード】** 黄砂、エアロゾル、ライダー、モニタリングネットワーク、データ同化

## 1. はじめに

黄砂の発生・輸送は、これまでに概略が理解され、化学輸送モデルでもかなり良く再現される

ようになった。また、ライダーネットワーク等を用いたデータ同化手法を開発し、事後解析については発生源の分布や発生量の定量的な推定が可能となった、しかしながら、黄砂飛来予測の観点からは、黄砂発生メカニズム等に関するモデルの改良や、観測データをリアルタイムでモデルに取り込むデータ同化手法の開発が必要とされる。さらに、健康影響においては黄砂の粒径分布や化学的な性状が重要であり、これらを正確に把握しモデル化するための研究が必要である。将来的には、大気汚染との相互作用も含むデータ同化した黄砂の解析データを構築し、これを用いて様々な影響研究や影響評価を行うことが期待される。

本研究では、以上の方向性に基づき、ライダーネットワークを中心とする観測と黄砂現象の詳細な解析、リアルタイムのデータ同化を実現するためのライダーデータの精度管理とデータ処理手法の確立を目指す。また、影響研究へのデータ利用のために、定量的解析データセットを構築するとともに、光学的パラメータと重量濃度の関係を明らかにし、ライダーから得られる黄砂消散係数を疫学研究に応用することを試みる。

## 2. 研究開発目的

ライダーを中心とするネットワーク観測によって、日本に飛来する全ての黄砂を捉え、主要な事例について発生、輸送、沈着を定量的に解析し理解することを第一の目的とする。また、データ同化手法を応用した正確な黄砂飛来予測のために、信頼性の高いライダーネットワークデータをリアルタイムで提供するための技術およびデータの精度管理手法を確立する。さらに、環境影響研究のための過去データを含む定量データセットを構築することを目的とする。

## 3. 研究開発方法

### (1) ライダーネットワーク観測およびリアルタイムのデータ解析

先行研究によって構築された日本、韓国、中国、モンゴルのライダーを中心とするモニタリングネットワークによる観測を通年にわたって実施し、日本に飛来する全ての黄砂現象について高度分布を定量的に把握した。ライダーネットワークデータを一時間毎に自動処理して提供するシステムを構築した。また、サブテーマ2のデータ同化による黄砂飛来予測の改良の研究に信頼性の高いライダーデータを提供するために、ライダーシステム、校正手法およびデータ処理手法を改良した。この他、観測された主要な黄砂事例のライダーネットワークデータは日中韓三国環境大臣会合の黄砂に関するワーキンググループ1 (TEMM WG1) に提供した。なお、TEMM WG1 では主要黄砂事例について日中韓およびモンゴルのPM10、SPM、PM2.5等のデータを共有し、黄砂予測モデルの改良を目標とする検討を行った。

### (2) 黄砂の発生、輸送、沈着の解析

ライダーネットワーク観測で捉えた黄砂事例について解析を行い、化学輸送モデルを用いて発生源、輸送経路、輸送量、沈着量の推定を行った。特にTEMM WG1で共有された2007年、2008年の事例を含む主要な黄砂事例(2007年3~4月、2008年5月、2009年3月、10月、12月および2010年11月の事例)については、ライダーネットワークデータと共有されたモンゴル、中国、韓国、日本のPM10、SPM等の地上データ、化学輸送モデルCFORS(あるいは4次元変分法によるデータ同化モデル(RC4))を用いて、発生源、輸送経路、輸送量、沈着量、輸送途上の粒径分布の変化、光学的パラメータと重量濃度の関係などを解析した。加えて、黄砂時に捕集した粉じん

試料の分析から、日本に飛来する黄砂の化学特性変化についても解析した。

### (3) 疫学研究のためのライダーデータセットの構築

過去のデータを含む継続的ライダー観測データから、地上付近の黄砂および大気汚染性エアロゾルの日毎の消散係数（光学的濃度）のデータセットを構築した。雲の誤判別等による異常値を排除するためのデータ処理方法を開発した。さらに、ライダーと地上データの両方が得られる地点の観測値と同化モデル（RC4）を用いて、黄砂消散係数と黄砂の重量濃度の関係を調べ、疫学研究へのライダーデータの利用の妥当性を検証した。

## 4. 結果及び考察

### (1) ライダーネットワーク観測およびリアルタイムのデータ解析

ライダーネットワークでは、札幌、仙台、新潟、富山、つくば、千葉、東京、大阪、松江、長崎、福江、辺戸岬、ソウル、北京、ウランバートル、サインシャンド、ザミンウドにおいて 2 波長（1064 nm、532 nm）偏光（532 nm）ライダーによる通年観測を行ない、日本に飛来する全ての黄砂イベントにおいて黄砂の高度プロファイルを測定した。（ただし、中国（北京の日中友好環境保全センター）については、2010 年 6 月以降観測が中断された）。ライダーネットワークからのデータはインターネット経由で国立環境研究所に準リアルタイムで転送される。転送されたデータから、自動データ解析システムにより、2 波長の減衰後方散乱係数、532 nm の体積偏光解消度、黄砂消散係数、球形エアロゾル消散係数を導出した。これらのうち黄砂消散係数データは、質量濃度に換算し、環境省の黄砂飛来情報ホームページに毎時、提供した。また、黄砂消散係数、球形エアロゾル消散係数の高度プロファイルを国立環境研究所の環境 GIS に毎時表示した。

2009 年は、3 月 16～17 日に日本に飛来した黄砂が最大の黄砂イベントで、全般に黄砂の飛来は少なかった。しかし、小規模の黄砂は、2 月中旬から 6 月の初めまでの長い期間にわたって観測された。最も早いのは長崎などの 2 月 11～12 日、最も遅いのは松江の 6 月 23 日であった。さらに、10 月 17、19、21 日と 12 月 26 日に長崎、松江などで黄砂が観測された。

2010 年春季は、3 月 20 日に関東を含む広い範囲で観測された黄砂現象が主要なものであった。長崎や松江では非常に高濃度（松江で消散係数で 2/km 以上）の黄砂が観測された。これは 2002 年の大黃砂にも匹敵する。発生源は、2002 年の大黃砂と同様、内モンゴルのエジナチの南側付近と推定されるが、気象状況は 2002 年のように北側に大きな低気圧を伴う典型的な黄砂とは異なり、黄砂発生域の西側に高気圧を伴うものであった。このため北風が強く、黄砂の本流は北京の西側を南東方向に南下した。南下した黄砂は南東の風とぶつかって日本列島に沿うような形で日本に飛来した。日本の関東地方に飛来した黄砂は山東省付近を、九州に飛来した黄砂はそれよりもやや南を通過したと推定される。この他、小規模な黄砂が、4 月 2～4 日、29 日、5 月 2～5 日、20～21 日などに観測された。また、タクラマカン砂漠を発生源として、日本上空を通過して北米大陸まで輸送されるような顕著な黄砂現象も地上ライダーネットワークと NASA の衛星搭載ライダー CALIPSO/CALIOP などで観測された。一方、2010 年 11 月 12～13 日には、秋季としては異例の大規模な黄砂が北海道を除く全国で観測された。CFORS による解析では、発生源はモンゴル南部から中国の内モンゴルにかけてのゴビ砂漠と推定される。なお、2002 年 11 月にもゴビ砂漠を発生源とする大規模な観測されている。

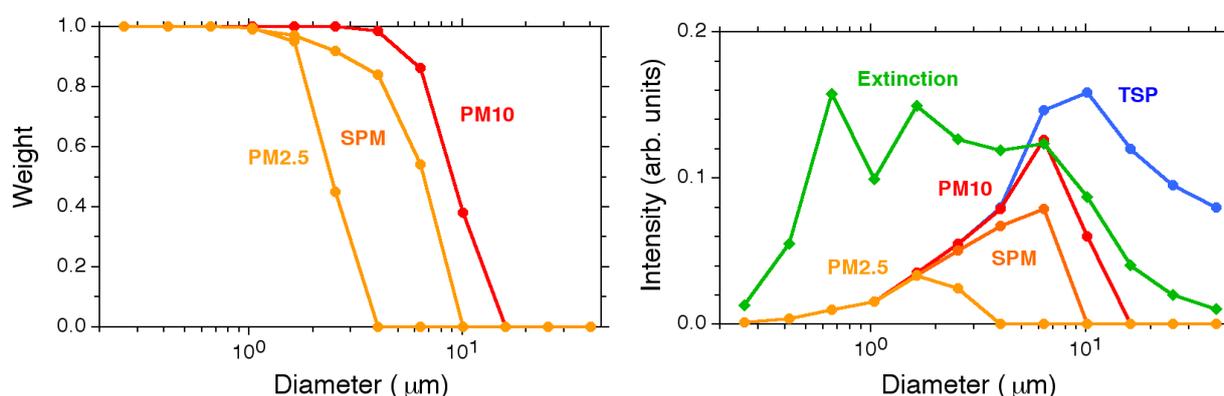
2011年春季は、2011年4月9～14日、5月1～4日、5月12～17日などに黄砂が観測された。このうち、5月1～4日は比較的規模の大きな黄砂であった。

ライダーネットワークデータのリアルタイム処理システムは先行研究により構築され、2008年以降、3～5月の黄砂飛来状況をリアルタイムで環境省黄砂飛来情報ホームページに提供している。これはライダーをリアルタイムで自動処理して得られる黄砂消散係数のプロファイルに基づくものである。このデータはリアルタイムデータ同化にも利用可能であるが、データ同化では高い信頼性が求められる。そこで本研究では、リアルタイム処理結果を事後解析結果と比較して問題点を検討し改良を行った。主な問題点は、データ処理における雲、雨、雪の検出と除去の精度と、偏光解消度測定 of 校正手法であった。これらについて改良を行ない、解析データの信頼性が向上した。

## (2) 黄砂の発生、輸送、沈着の解析

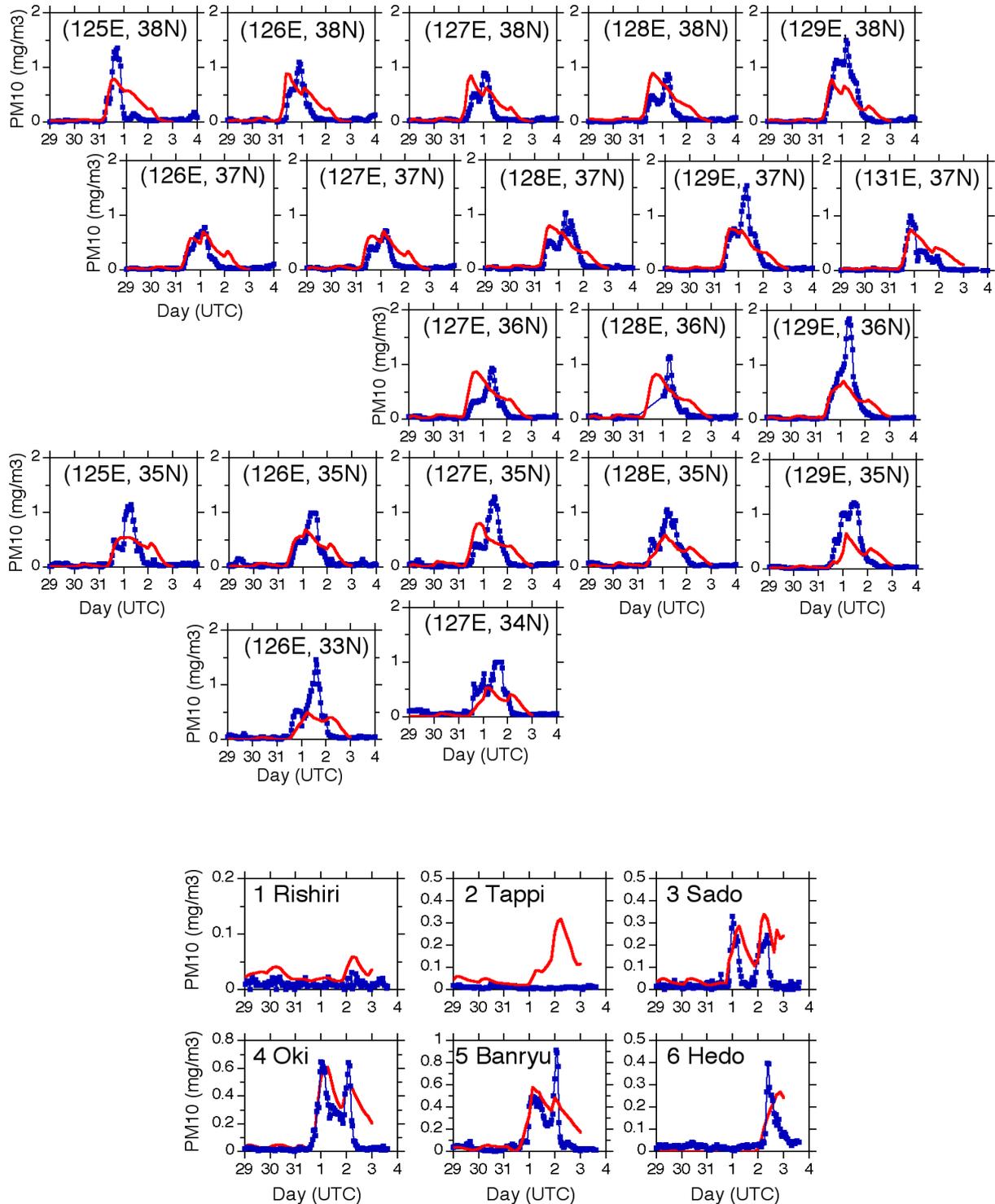
TEMW WG1 で主要な黄砂に選定された 2007 年 3～4 月、2008 年 5 月、2009 年 3 月、10 月、12 月および 2010 年 3 月、11 月の黄砂事例についてライダーネットワークと TEMW WG1 で共有されたデータを用いた詳細な解析を行なった。また、2011 年 5 月の黄砂についても CFORS と比較し考察した。

2007 年の黄砂については、ライダーデータで同化された CFORS (RC4) (Yumimoto et al. 2008) による解析を行い。データ同化によって、黄砂の発生源の同定と正確な発生量の評価が可能であることを示した (Sugimoto et al., 2010a)。さらに、ここでは、2007 年 3～4 月の事例について、WG1 で共有された地上観測データと、RC4 の結果を用いて、黄砂の粒径分布とその輸送途上における変化を考察した。RC4 は黄砂の粒径を 12 のサイズビンで表している。図(1)-1 (右) の TSP と示すプロットは、RC4 で仮定されている黄砂発生源におけるサイズビン毎の重量を表す。RC4 から PM10、SPM、PM2.5 を計算するために図(1)-1 (左) のような重み関数を用いた。図(1)-1 (右) の PM10、SPM、PM2.5 と表示したプロットは、この重み関数を TSP に適用したものである。一方、RC4 において光学特性はサイズ毎に計算される (Satake et al. 2004)。図(1)-1 (右) の Extinction は、消散係数におけるサイズビンの寄与を表す。



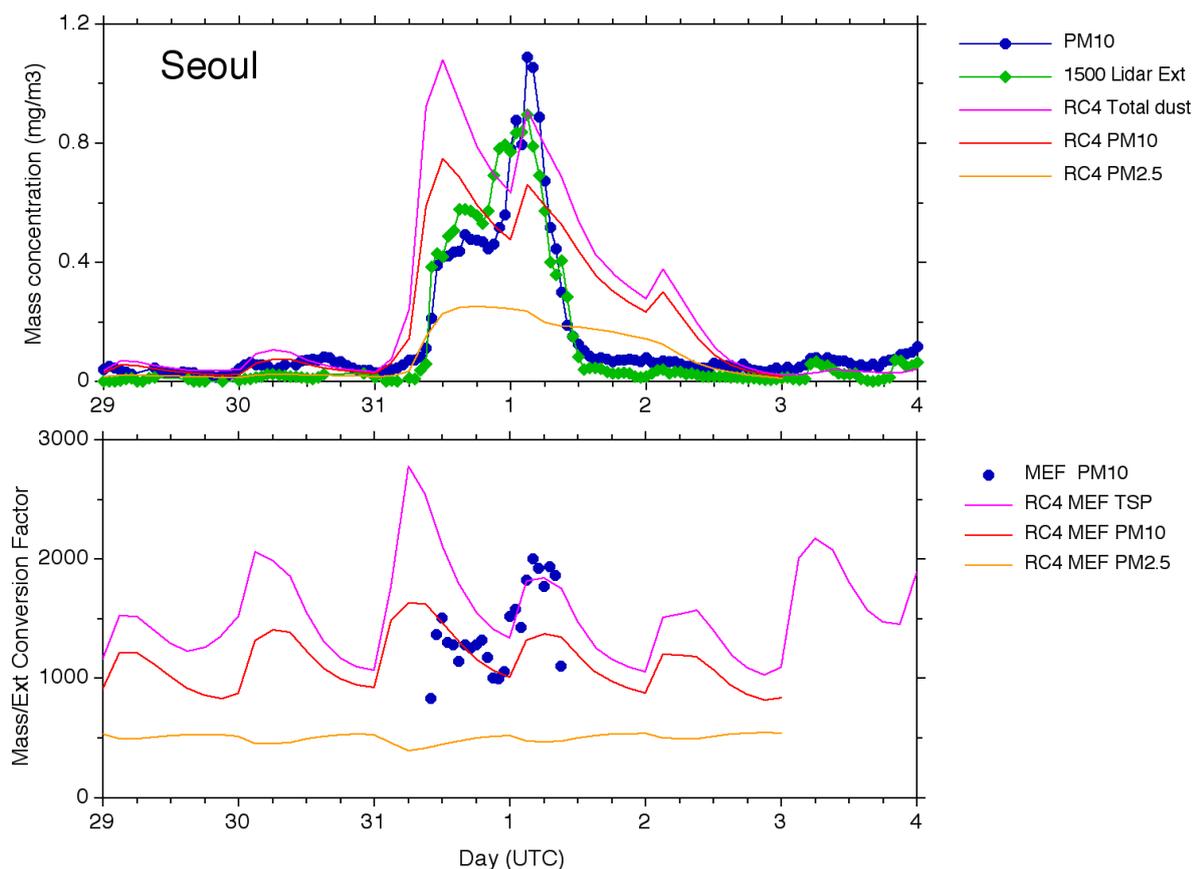
図(1)-1 データ同化した CFORS (RC4) において、PM10、SPM、PM2.5 を計算するために用いたサイズビンの重み関数 (左)。RC4 で仮定されている黄砂発生源における粒径分布 (右図の TSP) と、PM10、SPM、PM2.5 におけるサイズビンの寄与率 (右図の PM10、SPM、PM2.5) および黄砂消散係数におけるサイズビンの寄与率 (右図の Extinction)

RC4 で計算した地上の PM10 と韓国および日本で観測された PM10 を比較した結果を図(1)-2 に示す (Sugimoto et al. 2011)。降雨のあった利尻、竜飛以外では RC4 は実測を良く再現している。RC4 はライダーの黄砂消散係数で同化されているので、この結果は RC4 が、輸送された黄砂の粒径分布を黄砂消散係数と同時に良く再現することを示している。



図(1)-2 韓国（上）および日本（下）の PM10 データと RC4 の比較

重量濃度とライダーの黄砂消散係数の比（重量消散係数変換係数：ここでは MEF と呼ぶ）は、ライダーデータから黄砂濃度を推定するために必要な係数であるが、これは黄砂の粒径分布に依存する。すなわち、モード径が大きいほど MEF が大きい。逆に MEF は、実測から粒径分布を推定するパラメータとも言える。MEF の時間的、空間的な変化を調べるために RC4 を用いて、TSP、PM10、SPM、PM2.5 に対して MEF（重量濃度/消散係数）を定義し、重量濃度とライダーの両方のデータがあるソウルとつくばにおいて実測と比較した。



図(1)-3 ソウルにおける PM10、ライダーの黄砂消散係数、RC4 の比較（上）と RC4 で計算した重量消散係数換算係数（MEF）と実測値の比較（下）

図(1)-3 は、ソウルにおける PM10 とライダーデータの比較と、RC4 で計算した MEF と実測値の比較を示す。下図に示すように、RC4 で計算した TSP および PM10 に対する MEF は、時間変化（日変化）を示し、PM10 に対する MEF の実測値も似たような変化を示す。図には示さないが、TSP および PM10 に対する MEF は、空間的にも変化する。MEF の変化は、粒径分布の変化を反映し、モード径が大きいほど MEF は大きい。また、変化は TSP で最も大きい。しかし、大粒子に感度の低い PM2.5 では MEF に時間、空間的变化はほとんど無い。このことは、ライダーで得られる黄砂消散係数が黄砂の PM2.5 と良い相関を持つことを意味する。最近、黄砂ライダーネットワークの地上付近の黄砂消散係数を健康影響の疫学調査に用いる研究が行われ、小児喘息による入院との有意な相関が明らかにされた（Kanatani et al. 2010）が、黄砂消散係数と黄砂 PM2.5 の相関は、健康影響の指標として黄砂消散係数を用いることの正当性を裏付けるものである。

2008年5月の事例の解析結果はここには示さないが、モデルによる再現が難しい事例であった。RC4によるデータ同化によって韓国より風下の黄砂分布が良く再現された。しかし、発生源に近い北京ではRC4が過大評価になり、発生量のみを制御パラメータとするデータ同化の限界あるいは化学輸送モデル自体の更なる改良が重要であることが示唆された。

2009年3月16～17日の事例は、日本上空では浮かんだ黄砂層の好例で、大気混合層の発達に伴って黄砂が地上に輸送される現象が各地で見られた。ライダーネットワークによって初めて黄砂の輸送が把握可能であることを示す事例である。図(1)-4に示すように、地上のSPMデータ（あるいはライダーの地上付近のデータ）では、黄砂が大阪、東京、松江、長崎の順で観測され輸送経路が不明であるが、ライダーの上空のデータでは西から東の順に黄砂が観測された。

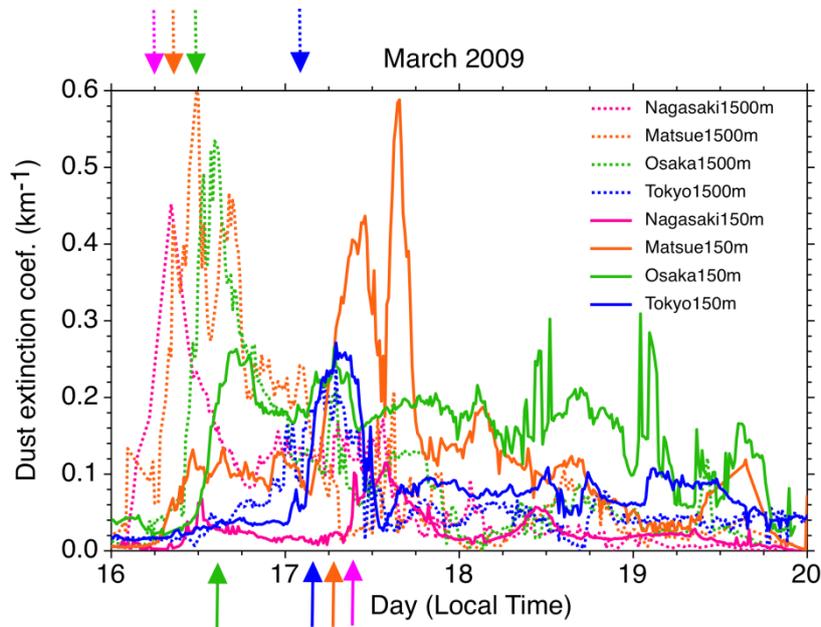
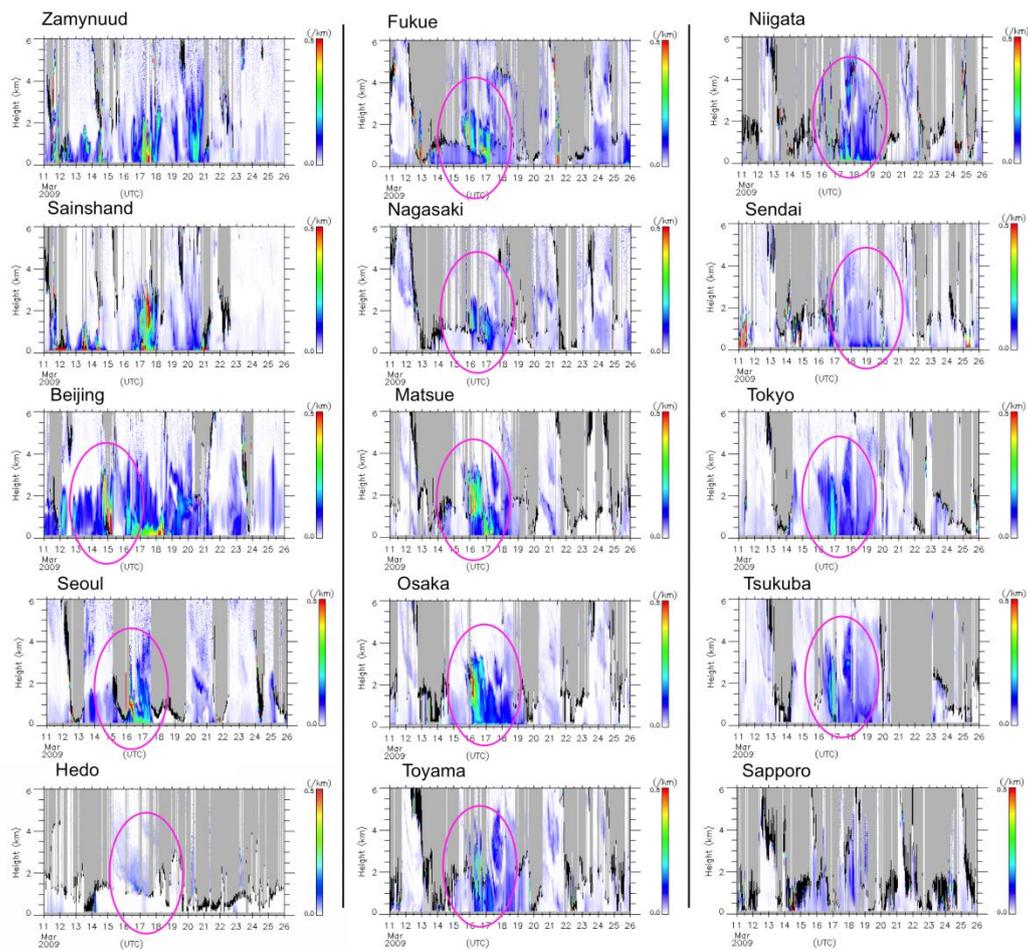
また、ここには示さないが、地上のPM10のピークの時間を見ると、どの地点でも16日あるいは17日の正午から午後に観測されており、上空の黄砂が大気の混合によって地上に輸送されたことを示している。さらに、ライダーによる地上付近の黄砂と大気汚染エアロゾルの時間変化を調べると、この事例では黄砂と大気汚染エアロゾルが比較的長時間にわたって共存したことが明らかになった。これは、上空に浮かんだ黄砂と下層の大気汚染層が共存し、大気混合によって混合されたためであると考えられ、3次元的分布が黄砂と大気汚染の混合においても重要であることが示された。

2009年10月、12月の事例は、それぞれ、秋季、冬季の黄砂事例である。後者は、12月25日にソウルに高濃度の黄砂現象をもたらしたが、いずれも日本への影響は顕著ではなかった。これらの黄砂事例は、オンラインモードのCFORS（気象庁の数値予報データを境界条件に用いた）で良く再現された。

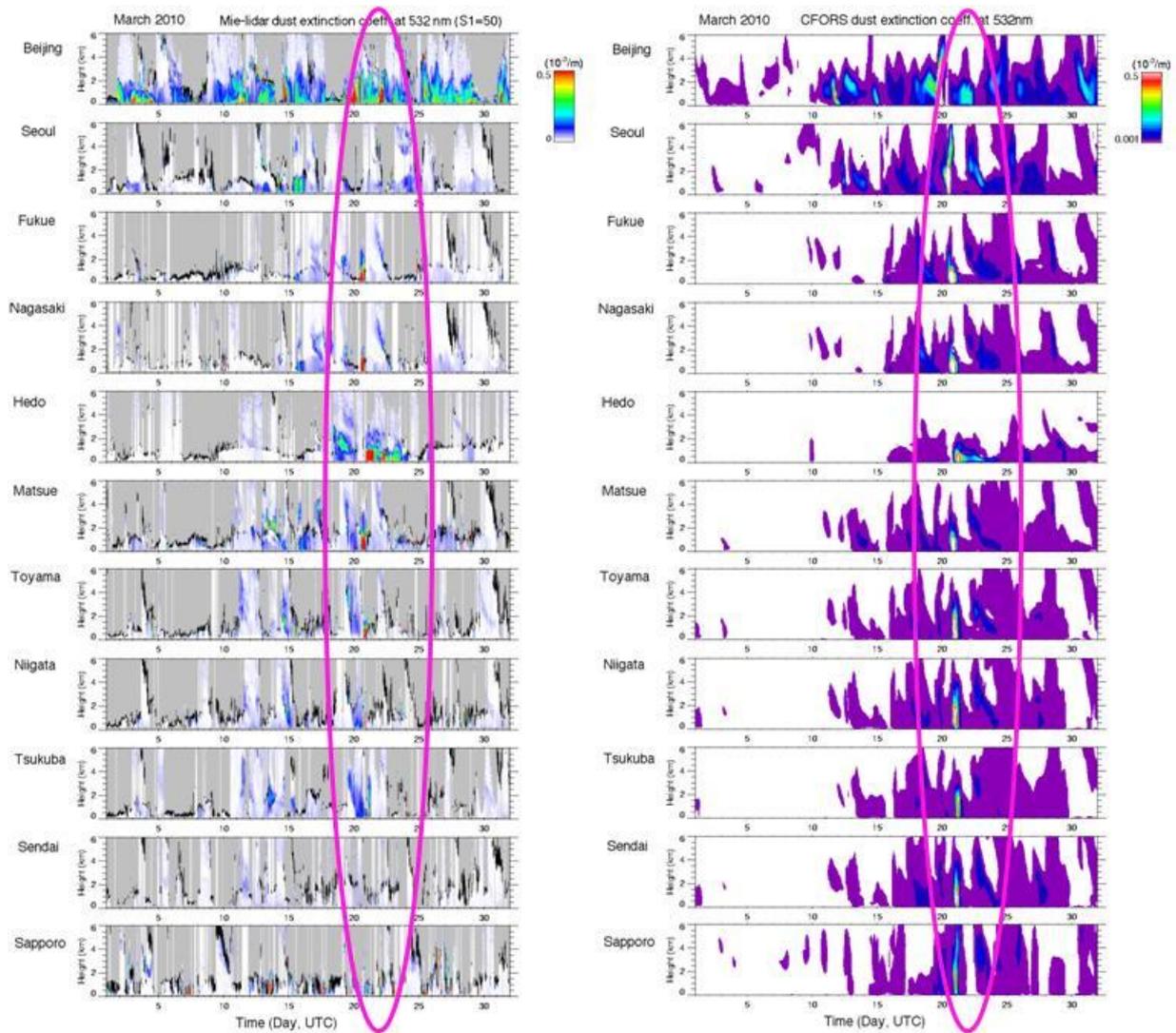
2010年3月の事例は、2002年の大黃砂にも匹敵する規模の黄砂現象であった。図(1)-5に、ライダーネットワークで観測した、2010年3月の黄砂消散係数（左）とオンラインモードのCFORSで計算した黄砂消散係数（右）を示す。ここでは、北京、ソウル、福江、長崎、辺戸、長崎、富山、新潟、つくば、仙台、札幌の11地点について表示している。図(1)-5（右）より、CFORSで黄砂現象が良く再現されていることが分かる。CFORSで計算された黄砂の分布（地上の黄砂濃度）を図(1)-6に示す。発生源は、内モンゴルのエジナチ南部付近と推定される。ライダーデータを見ると、つくば、富山、新潟、松江などでは、濃い黄砂が観測される前の3月20日にも弱い黄砂が観測されている。CFORSによると、これは、3月16日にやはり内モンゴルのエジナチ南部付近で発生した小規模の黄砂現象によるものと推定されるが、図(1)-5（右）を見るとこの部分は日本上空ではあまり良く再現されていない。

CFORSによる推定では、2010年3月18～23日に北緯25～50度の間を通過して日本側に輸送された黄砂の総量はおよそ3.4 Tgでこのうちの1.36 Tg（全量の40%）は高度1km以下を通過した。これは、2007年の3月28日～4月4日のイベント（全輸送量9.39 Tg、1 km以下0.98 Tg）に比べると総量では少ないが、1 km以下のみでは大きい。

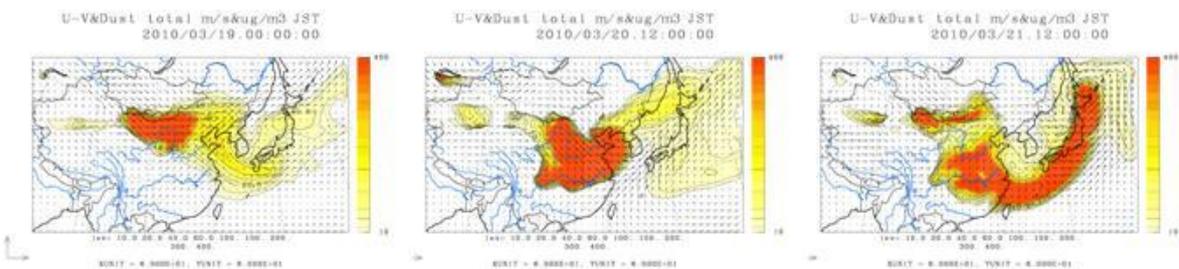
2010年11月の黄砂は秋の黄砂としては2002年11月の事例を凌ぐ規模の顕著な事例であった。図(1)-7、-8に黄砂消散係数の観測データとオンラインモードのCFORSの結果を示す。図に示すように、オンラインモードのCFORSは観測を良く再現され、発生源はモンゴル南部から中国の内モンゴルのゴビ砂漠であることが分かった。さらにRC4によりライダーネットワークデータの同化を行った結果、主要な発生源が中国、内モンゴルのトングリ沙漠であることが明らかになった。



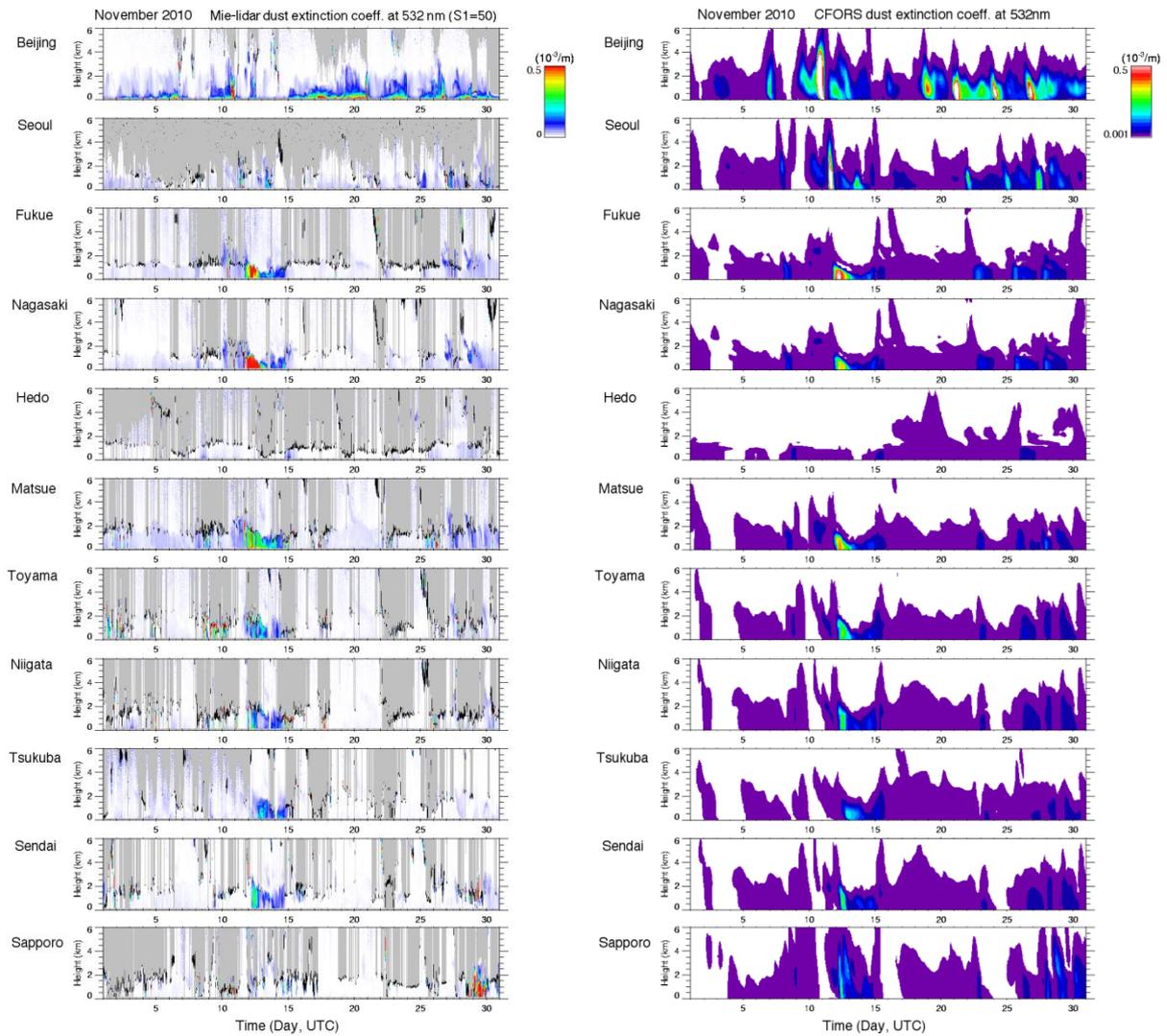
図(1)-4 (上) 2009年3月の事例の15地点におけるライダー黄砂消散係数  
 福江、長崎、松江などで浮かんだ黄砂層が見られる  
 (下) ライダーによる高度150mと1500mの黄砂消散係数の時間変化



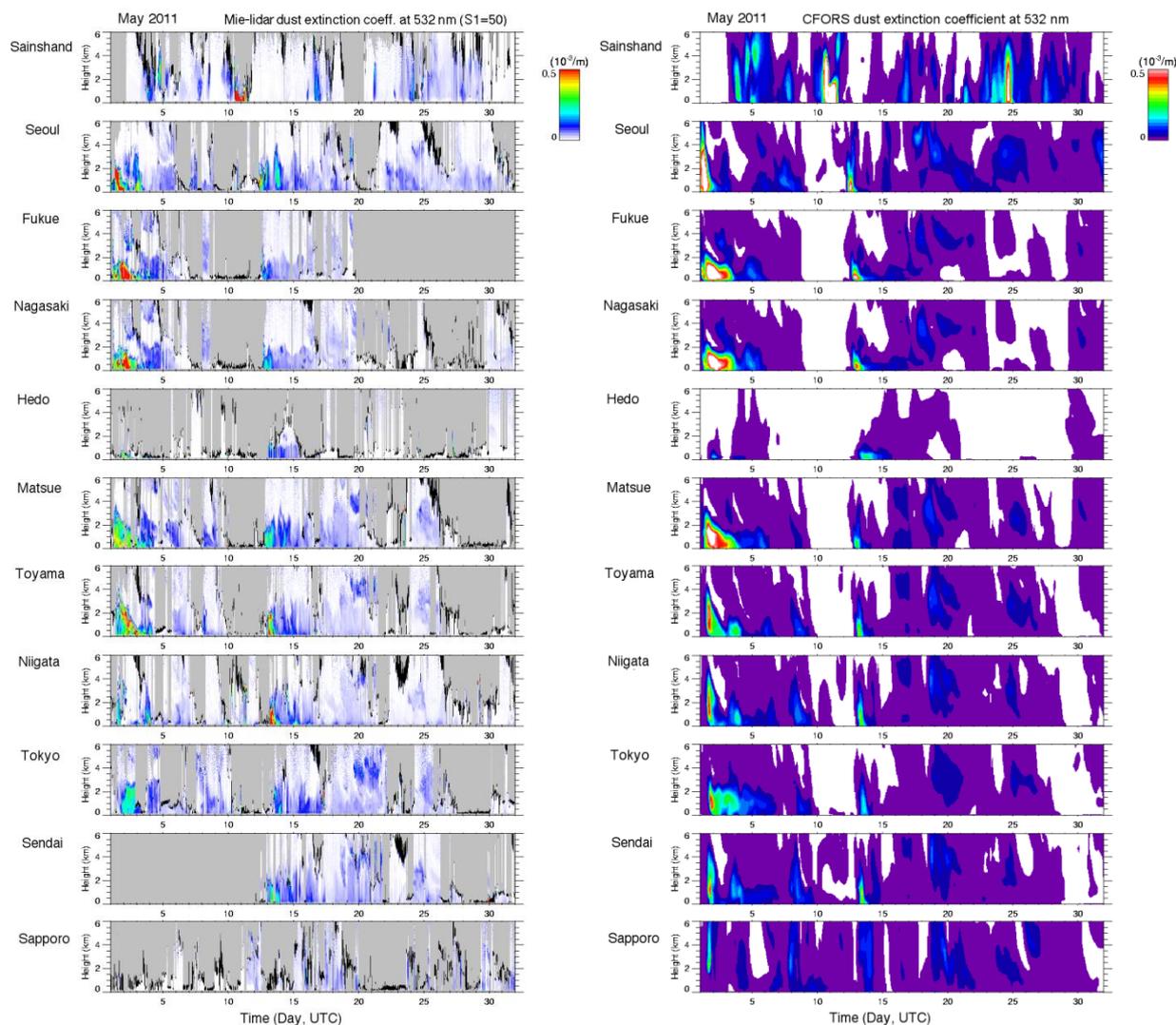
図(1-5) 2010年3月に、北京、ソウル、福江、長崎、辺戸岬、松江、富山、新潟、つくば、仙台、札幌で観測された地上から高度6 kmの黄砂消散係数（左）とCFORSで計算された黄砂消散係数（右）



図(1-6) CFORSで計算された黄砂の分布。2010年3月19日00:00JST（左）、3月20日12:00JST（中央）、3月21日12:00（右）



図(1)-7 2010年11月に、北京、ソウル、福江、長崎、辺戸岬、松江、富山、新潟、つくば、仙台、札幌で観測された地上から高度6kmの黄砂消滅係数（左）とCFORSの計算結果（右）



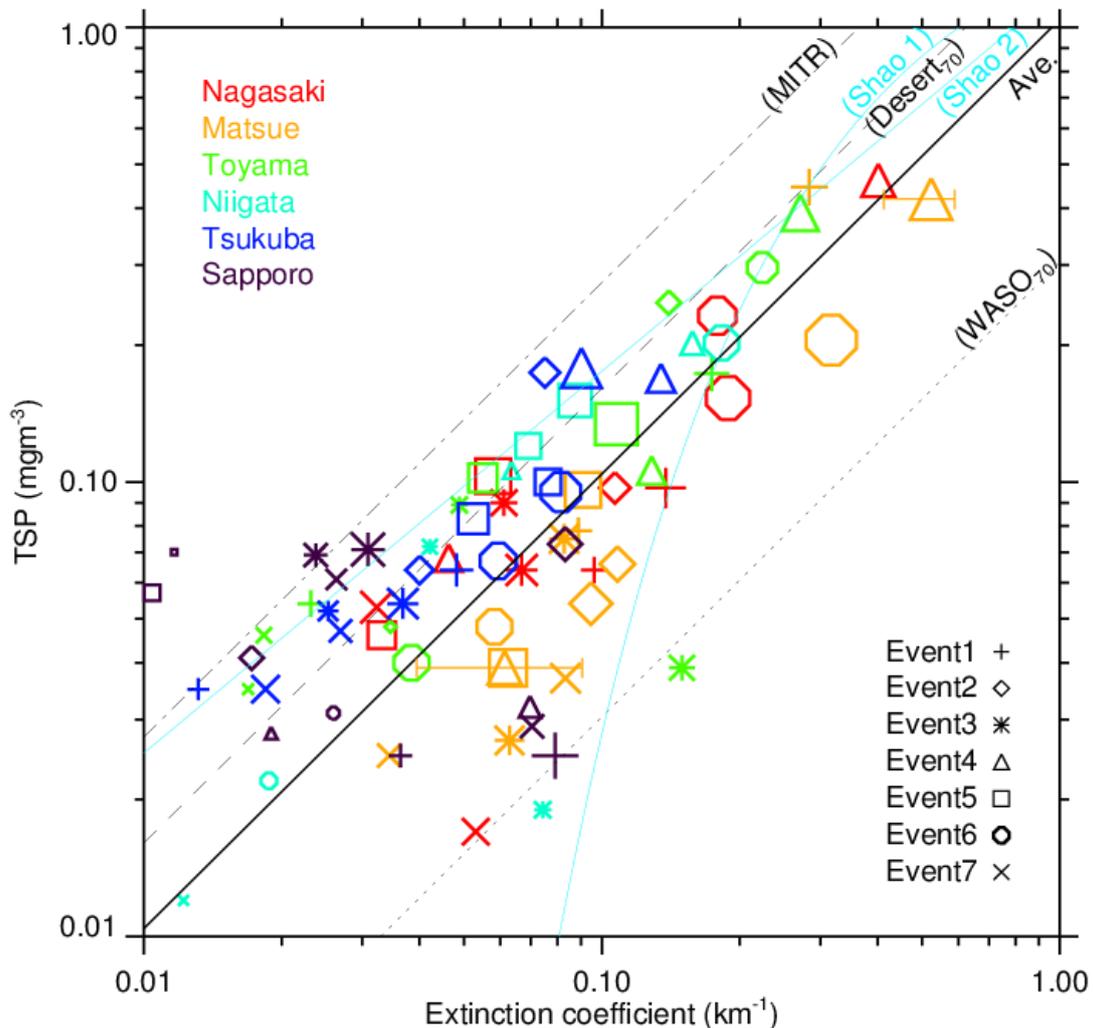
図(1)-8 2011年5月に、サインシャンド、ソウル、福江、長崎、辺戸岬、松江、富山、新潟、東京、仙台、札幌で観測された地上から高度6 kmの黄砂消散係数(左)とCFORSの計算結果(右)

### (3) 疫学研究のためのライダーデータセットの構築

富山、松江、長崎などの地点についてライダー観測から現在までのデータについて地上付近の黄砂および大気汚染エアロゾルの消散係数のデータセットを構築した。また、前節で述べたように、TEMM WG1で共有された地上データおよびライダーデータで同化したモデルを用いて、黄砂の重量濃度(TSP、PM10、SPM、PM2.5)と黄砂消散係数の関係を調べた結果、ライダーで得られる黄砂消散係数は小粒子の黄砂(黄砂PM2.5)と良い直線的な相関関係があり、黄砂の健康影響の指標としての利用が妥当であることが裏付けられた(2)に記述)。

図(1)-9は、黄砂飛来時の高度120~270 mの低層における消散係数(黄砂消散係数)とTSP(全エアロゾル)濃度の関係を表したものである。ライダー観測地点6カ所(札幌、新潟、富山、つくば、松江、長崎)において、ハイボリュームサンプラーによって得られたTSPの24時間平均濃度( $\text{mgm}^{-3}$ )とその捕集期間の平均消散係数( $\text{km}^{-1}$ )を異なる7黄砂事例についてまとめた(詳細は、Shimizu et al. 2011)。大気中の黄砂濃度は黄砂消散係数と良い比例関係が認められ、その変換

係数は平均で  $1.04 \text{ gm}^{-1}$  (範囲:  $0.5 \sim 2 \text{ gm}^{-1}$ ) を得た。TSP 濃度が濃い方がその係数範囲が狭く黄砂消散係数との関係の精度が上がる傾向を示した。図中に、OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds database, Hess et al.2003) を元に算出したダストや水溶性粒子との変換係数や Shao が報告した視程距離と TSP との変換係数などを参考表示したのだが、どの地点で観測した黄砂、大気汚染粒子と黄砂の混ざり度によらず、6 事例とも参考表示した係数範囲に入り妥当性を裏付けた。大気汚染粒子との混ざり度が高い黄砂ほど、健康への影響が懸念される動物実験結果が得られていることから、大気汚染粒子と混在飛来する黄砂についても、黄砂消散係数によって推定できる可能性があることがわかった。



図(1-9) 黄砂時のライダー消散係数と TSP の関係

Event1-7 : 6 観測点 (左上の地点名表示色とシンボル色が対応) の係数値、  
シンボルの大きさは黄砂と大気汚染粒子の混在率に比例

(参考) OPAC を元に計算した係数曲線 (MITR : 風送ダスト、WASO : 水溶性粒子 (湿度 70%)、および Shao1、Shao2 の係数曲線 : TSP と視程の関係) を例示した。

#### (4) 大気汚染物質と混合した黄砂の化学特性

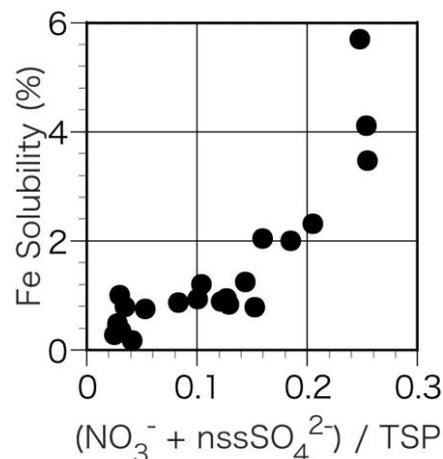
大気汚染粒子と混合した黄砂の飛来があることはライダー観測データの解析から明らかになっている。特に化石燃料由来である硫酸イオンや硝酸イオンが黄砂粒子表面に反応補足されることが顕著である。それらイオンの黄砂粒子表面補足量が多くなるとマウスへの投与実験から呼吸器疾患が増悪することが判っている。飛来沈着する黄砂の環境影響について、例えば、海域ではプランクトンの増殖現象や離島や半島の植物生態系の維持に寄与することが知られている。それら生物環境に影響を与える因子として Fe が注目されている。表(1)-1 は、TSP と Fe 濃度の関係を、黄砂、大気汚染粒子との混在黄砂、大気汚染粒子の 3 区分にまとめたものである。黄砂そのもの

表(1)-1 日本に飛来する黄砂と大気汚染粒子の混ざりと水溶性 Fe

Air mass	TSP ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Total Fe ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Soluble Fe ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Fe Solubility (%)
Kosa	404 (149-509)	16.2 (5.5-20.2)	0.061 (0.034-0.115)	0.46 (0.17-1.00)
Kosa + Pollutant	198 (66-298)	7.0 (1.9-9.6)	0.063 (<0.01-0.114)	0.88 (<0.1-1.24)
Pollutant	100 (83-122)	2.1 (1.7-2.4)	0.060 (0.033-0.126)	2.9 (2.0-5.7)

TSP 測定期間中の空気塊は、ライダー、SPM、SO<sub>2</sub> の観測結果をもとに 3 分類 (黄砂、大気汚染粒子と黄砂の混在、大気汚染粒子) した。

に含まれる Fe はほとんど水に溶けないが、大気汚染に由来する酸性イオン成分との混ざりが高くなると水溶性 Fe の割合が高まる。ただし、水溶性 Fe 濃度が高くなるわけではないため、水溶性 Fe 濃度が大気汚染との混在度の指標にはならない。図(1)-10 は、黄砂時に捕集した試料中の人為発生の割合が高い酸性イオン (硫酸イオンと硝酸イオン) の和が TSP 中に占める比率と水溶性 Fe の割合との関係を示したものである。言い換えると、黄砂中の大気汚染粒子との混在率と水溶性 Fe の割合の関係を示した図と見てもよい。大気汚染粒子との混在率が最も高かった TSP 試料では、Fe の水溶性の割合は黄砂のみのケースに比べ 10 倍近く上昇することが判った。大気汚染粒子と黄砂の混在率の変化がもたらす黄砂粒子の化学特性変化による環境影響について注目していく必要がある。



図(1)-10 黄砂時に捕集した TSP 試料中の Fe の水溶性率の変化と酸性イオン混在比の関係

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

ライダーおよび地上観測によるモニタリングネットワークデータが連続して得られ、黄砂現象の定量的な解析が可能となった。また、リアルタイムでデータ処理が行われ予報モデルの同化に利用できるデータの提供が可能になった。

ライダーネットワークを用いたデータ同化手法による過去の事例の解析により、モデルでは考えられていない季節内の植生の成長による黄砂発生量の変化が明らかにされた。これはモデルの高精度化につながる成果でもある。将来的には、大気汚染との相互作用を含む黄砂の健康影響研究や影響評価のためのデータとして、観測データで同化した解析データセットが必要となると考えられるが、本研究はそのための基礎を構成するものである。

ライダーデータで同化したモデルを用いて、ライダー観測から導出される黄砂消散係数と重量濃度（TSP、PM10、SPM、PM2.5）との関係が考察され、黄砂消散係数が黄砂のみの PM2.5 と高い相関を持つことが示された。一方、過去の長期間のライダー観測から地上付近の黄砂消散係数のデータセットが構築され、ライダーデータを疫学研究に利用することが可能となった。また、ライダーデータから PM2.5 に含まれる黄砂成分を推定する手法が得られた。

## （２）環境政策への貢献

黄砂飛来情報をリアルタイムで提供した。三国環境大臣会合の下の黄砂に関する三国環境局長会合の WG1 の活動に貢献し、日中韓およびモンゴルの黄砂モニタリングデータの共有、黄砂飛来モデルの高精度化を推進した。気象庁の黄砂予報モデルのリアルタイムの検証・同化にライダーモニタリングデータを利用するための手法、技術が確立された。

## 6. 国際共同研究等の状況

- （１）Joint Research on Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) of the Dust and Sandstorm (DDS) Monitoring Network System in Mongolia and the Data Analysis for early warning implemented by NIES and The National Agency for Meteorology, Hydrology and Environment Monitoring, Mongolia
- （２）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共同研究（2010年まで）

## 7. 研究成果の発表状況

### （１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Uno I., K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara and N. Sugimoto: NATURE GEOSCIENCE (2009) doi:10.1038/NGEO583.  
“Asian dust transported one full circuit around the globe”
- 2) Eguchi K., I. Uno, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, N. Sugimoto and Z. Liu: Trans-pacific dust transport: integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model, Atmos. Chem. Phys., 9, 3137-3145 (2009)  
“Trans-pacific dust transport: integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model”
- 3) Hara, Y., K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu and D. Winker: Atmos. Chem. Phys., 9, 1227-1239 (2009)  
“Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model”

- 4) Kim S-W., S-C. Yoon, J. Kim, J-Y. Kang and N. Sugimoto: *Science of The Total Environment* 408, 1707-1718, (2010) doi:10.1016/j.scitotenv.2009.12.018.  
 “Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: Analysis of transport and vertical structure of dust particles from lidar and surface measurements”
- 5) Sugimoto, N., B. Tatarov, A. Shimizu, I. Matsui and T. Nishizawa: *SOLA*, 6, 093-096 (2010)  
 “Optical characteristics of forest-fire smoke observed with two-wavelength mie-scattering lidars and a high-spectral-resolution lidar over Japan”
- 6) Sugimoto, N., Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, M. Nishikawa, and J. Dulam: *SOLA*, 6, 125-128 (2010)  
 “Dust emission estimated with an assimilated dust transport model using lidar network data and vegetation growth in the Gobi desert in Mongolia”
- 7) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, I. Mori, M. Nishikawa and M. Kido: *SOLA*, 7A, 001-004, doi:10.2151/sola.7A-001 (2011)  
 “Relationship between Lidar-derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentrations in Japan”
- 8) Mori, I., M. Nishikawa, A. Shimizu, M. Hayasaki and T. Takasuga: *SOLA*, 7A, 5-8 (2011)  
 “Solubility of iron in the aerosol collected during kosa (Asian dust) events in Japan”
- 9) Nishikawa, M., I. Mori, K. Takahashi, I. Matsui, M. Sugimoto, K. Kawamoto, Y. Wang and S. Dong: *SOLA*, 7A, 9-12 (2011)  
 “Short-term variation in aerosol components during the same asian dust (Kosa) event observed in Nagasaki, Japan and Beijing, China”
- 10) Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, K. Yumimoto, I. Uno and M. Nishikawa: *SOLA*, 7A, 013-016 (2011)  
 “Comparison of Surface Observations and a Regional Dust Transport Model Assimilated with Lidar Network Data in Asian Dust Event of March 29 to April 2, 2007”
- 11) M. Hayasaki, M. K. Yamamoto, A. Higuchi, A. Shimizu, I. Mori, M. Nishikawa, and T. Takasuga: *SOLA*, 7A, 032-035, doi:10.2151/sola.7A-009 (2011)  
 “Asian Dust Transport to Kanto by Flow around Japan's Central Mountains”
- 12) Jugder, D., M. Shinoda, N. Sugimoto, I. Matsui, M. Nishikawa, S-U. Park, Y-S. Chun, M-S. Park: *Global and Planetary Change* 78, 14-22, 2011, doi:10.1016/j.gloplacha.2011.05.003 (2011)  
 “Spatial and temporal variations of dust concentrations in the Gobi Desert of Mongolia”
- 13) Nishikawa, M., I. Matsui, D. Batdorj, D. Jugder, I. Mori, A. Shimizu, N. Sugimoto and K. Takahashi: *Atmospheric Environment* 45, 5710-5715, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.029 (2011)  
 “Chemical composition of urban airborne particulate matter in Ulaanbaatar”
- 14) 杉本伸夫 : レーザー研究、 39 (8), 579-584 (2011)  
 「偏光ライダーネットワークによる黄砂と大気汚染エアロゾルのモニタリング」
- 15) Uno, I., K. Eguchi, K. Yumimoto, Z. Liu, Y. Hara, N. Sugimoto, A. Shimizu, and T. Takemura: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (14), 7333-7341 (2011)  
 “Large Asian dust layers continuously reached North America in April 2010”

- 16) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, S. Yamamoto, K. Inoue, H. Takano, R. Yanagisawa, M. Nishikawa, I. Mori, G. Sun, T. Shibamoto: *Toxicology and Applied Pharmacology* 258, 237–247 (2012)  
“Asian sand dust enhances murine lung inflammation caused by *Klebsiella pneumoniae*”
- 17) K. Onishi, Y. Kurosaki, S. Otani, A. Yoshida, N. Sugimoto, Y. Kurozawa: *Atmospheric Environment*, 49, 94-102 (2012)  
“Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan”
- 18) D. Jugder, N. Sugimoto, M. Shinoda, R. Kimura, I. Matsui, M. Nishikawa: *Atmospheric Environment* 54, 231-241 (2012)  
“Dust, biomass burning smoke, and anthropogenic aerosol detected by polarization-sensitive Mie lidar measurements in Mongolia”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 杉本伸夫：大気環境学会誌、44 (6), 367 (2009)  
コラム「ライダー研究 30 年」
- 2) 杉本伸夫：ライダー（強光子場科学研究懇談会編 2009）  
「光科学研究の最前線 2」
- 3) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara and I. Uno: *Proc. SPIE*, 7860, 78600J (2010)  
“Lidar network observation of tropospheric aerosols”
- 4) 杉本伸夫：環境分析ガイドブック、丸善  
コラム「ライダーネットワークと黄砂モニタリング」
- 5) 西川雅高：日本分析化学会編、環境分析ガイドブック、412-414、丸善  
6.7 節「黄砂」
- 6) 杉本伸夫：分光研究、60 (4), 123-129 (2011)  
「ライダーによる環境計測」
- 7) 杉本伸夫：EICA 16 (4), 2-5 (2012)  
「ライダーネットワークによる黄砂と越境大気汚染エアロゾルのモニタリング」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Sugimoto N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, B. Tatarov, I. Uno, K. Yumimoto, Z. Wang, Y. Wang, et al.: *Int. Symp. Atmos. Light Scattering Remote Sensing*, Xian, China, 50-52 (2009)  
“Lidar network for observing tropospheric aerosols in East Asia”
- 2) Hara Y., K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, T. Ohara, N. Sugimoto: *Int. Symp. Atmos. Light Scattering Remote Sensing*, Xian, China, 35-36 (2009)  
“Seasonal variation of aerosols distribution in East Asia based on ground and space lidar observation and a chemical transport model”,
- 3) Sugimoto N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, I. Uno, K. Yumimoto, Z. Wang, Y. Wang, S. Yoon, J. Dulam: *Lanzhou, China*, 32 (2009)

- “Lidar network observations and Validation/Assimilation of dust transport models, Int. Workshop Miner. Aerosol Its Impacts Clim. Environ. (CAS-TWAS- WMO Forum 2009)
- 4) 原由香里、鵜野伊津志、清水厚、杉本伸夫：第 27 回レーザセンシングシンポジウム、98-101 (2009)  
「地上/衛星搭載ライダーと化学輸送モデルを用いた東アジア域における球形エアロゾル分布の季節変動に関する研究」
- 5) 杉本伸夫、松井一郎、清水厚、西澤智明、原由香里：第 27 回レーザセンシングシンポジウム、96-97 (2009)  
「NIES ライダーネットワークの現状と戦略」
- 6) Shimizu A., N. Sugimoto, I. Matsui: AOGS 6th Annu. Meet. 2009, Singapore (2009)  
“Data production in NIES lidar network”
- 7) 杉本伸夫、清水厚、松井一郎、西澤智明、鵜野伊津志、弓本桂也：第 50 回大気環境学会年会、158 (2009)  
「ライダーネットワークと CALIPSO 衛星搭載ライダーによる黄砂の観測」
- 8) Sugimoto N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, I. Uno, Z. Wang, Y. Wang, C. Xie, S-C. Yoon, et al.: 4th Jpn.-China-Korea Jt. Conf. Meteorol., 218, Tsukuba, Japan (2009)  
“Lidar network for observing tropospheric aerosols in East Asia”,
- 9) Sugimoto N., A. Shimizu, T. Nishizawa, I. Matsui, B. Tatarov, O. Uchino, H. Nakane: Fifth Workshop on Lidar Measurements in Latin America, Buenos Aires, Argentina (2009)  
“Recent studies on tropospheric and stratospheric aerosols and ozone using lidars”,
- 10) 早崎将光、森育子、清水厚、西川雅高、高菅卓三：第 50 回大気環境学会年会、横浜市、243 (2009)  
「2006, 2007 年の大規模黄砂期間における浮遊粒子状物質・汚染物質濃度の特徴」
- 11) 西川雅高、松井一郎、D. Jugder、D. Batdroji、森育子、清水厚、杉本伸夫：第 50 回大気環境学会年会、横浜市、248 (2009)  
「ウランバートルにおける都市大気粉塵の化学組成」
- 12) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa and Y. Hara: SPIE Asia-Pac.Remote Sens., Lidar Remote Sens. Environ. Monit.11, Abstracts, 7153, 7860-18 (2010)  
“Lidar network observation of tropospheric aerosols”
- 13) Shimizu, A., N. Sugimoto and I. Matsui: 25th Int. Laser Radar Conf., Abstracts, 911-913 (2010)  
“Detailed description of data processing system for lidar network in East Asia”
- 14) Hara, Y., I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, J. Kurokawa, T. Ohara, Z. Liu, Y. Zhang, X. Liu and Z. Wang: 25th Int. Laser Radar Conf., Abstracts, 64 (2010)  
“An integrated analysis of spherical aerosol distribution in Eastern Asia based on ground/space-based Lidar and a chemical transport model”
- 15) Huang, Z., N. Sugimoto, J. Huang, T. Hayasaka, T. Nishizawa, J. Bi and I. Matsui: 25th Int. Laser Radar Conf., Proceedings, 528-531 (2010)  
“Comparison of depolarization ratio measurements with Micro-Pulse lidar and a linear polarization lidar in lanzhou, China”

- 16) Sugimoto, N., Matsui, I., Shimizu, A., Nishizawa, T., Hara, Y., Yoon, S-C., T. Takamura: 3rd Asia Pac. Radiat. Symp., Abstracts, 94 (2010)  
“Lidar network for observing tropospheric aerosols in East Asia”
- 17) Satake, S., T. Hayasaka, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, C-H. Lee and I. Uno: 3rd Asia Pac. Radiat. Symp., Abstracts, 105 (2010)  
“Seasonal variation for relationship between aerosol optical thickness and its layer height over East Asia”.
- 18) Nishikawa, M., I. Matsui, I. Mori, A. Shimizu, N. Sugimoto, D. Batdorj and D. Jugder: 2010 Int. Aerosol Conf. (IAC2010), Helsinki, P2K8 (2010)  
“Source estimation by chemical characterization for the urban aerosol in Ulaanbaatar”
- 19) Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, M. Nishikawa, K. Yumimoto and I. Uno: Int. Nagoya-Workshop Asian Dust, Proceedings, 15-18 (2011)  
“Asian dust study using the NIES lidar network (AD-Net)”
- 20) 杉本伸夫、松井一郎、清水厚、西澤智明、原由香里：第 28 回レーザセンシングシンポジウム、プログラム (2010)  
「エアロゾル観測ライダーネットワークの展開と応用」
- 21) 原由香里、清水厚、杉本伸夫、松井一郎、鶴野伊津志：第 28 回レーザセンシングシンポジウム、同予稿集、70-73 (2010)  
「衛星/地上ライダーにより示された東アジア域における非球形エアロゾル分布の季節変動」
- 22) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎：第 28 回レーザセンシングシンポジウム、同予稿集、64-65 (2010)  
「ライダーによるダスト・球形粒子消散係数と OPC によるサイズ別粒子数との比較」
- 23) 原由香里、清水厚、杉本伸夫、松井一郎、鶴野伊津志：第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会、同予稿集、113-114 (2010)  
「地上／衛星搭載ライダーにより示されたアジアンダストの季節変動」
- 24) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、森育子、西川雅高、原由香里：第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会、同予稿集、231-232 (2010)  
「日本国内のライダーで観測された黄砂消散係数と重量濃度との対応」
- 25) 原由香里、鶴野伊津志、清水厚、杉本伸夫、松井一郎：日本気象学会 2010 年度秋季大会、同講演予稿集、62 (2010)  
「地上／衛星搭載ライダーにより示された東アジア域における非球形エアロゾル分布の季節変動」
- 26) 西川雅高、松井一郎、清水厚、森育子、杉本伸夫、D. Batdorj、D. Jugder、高橋克行：第 19 回環境化学討論会、春日井市、306-307 (2010)  
「ウランバートルにおける都市大気エアロゾルの化学成分的特徴」
- 27) N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, M. Nishikawa, K. Yumimoto, and I. Uno : Int. Nagoya-Workshop Asian Dust (2011)  
“Asian dust study using the NIES lidar network (AD-Net)”
- 28) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎：第 15 回大気ライダー観測研究会、同予稿集、1 (2011)  
「偏光ライダーによる地上付近の 2 成分消散係数と OPC 粒子数・SPM 等との対応」

- 29) Sugimoto, N. : The 2nd International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing, Lanzhou, China (2011)  
 “Role of ground-based lidar networks in global, regional and urban aerosol observations”
- 30) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、原由香里：第 29 回レーザセンシングシンポジウム (2011)  
 「ライダー観測による下層の消散係数と地上エアロゾル測定・大気現象との対応」
- 31) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、原由香里：日本気象学会 2011 年度秋季大会 (2011)  
 「ライダーによる地上付近の 2 成分消散係数と黄砂・煙霧等大気現象との対応」
- 32) Mori, I. and M. Nishikawa: EAC2011, Manchester, UK (2011)  
 “Relationship between water soluble calcium and anions in a kosa (Asian dust) aerosol”
- 33) 清水厚、杉本伸夫、松井一郎、西澤智明、西川雅高：第 52 回大気環境学会年会、174-175 (2011)  
 「ライダーを用いた環境大気のリモートセンシング」
- 34) 木戸瑞佳、相部美佐緒、近藤隆之、西川雅高、清水厚、杉本伸夫、松井一郎：第 52 回大気環境学会年会、433 (2011)  
 「黄砂飛来時に富山県で観測された大気エアロゾル粒子中の化学成分」
- 35) Nishikawa, M.: 第 5 回環日本海域の環境シンポジウム、36 (2012)  
 “Scientific Hints in the Activity of Working Group for Joint Research on Dust and Sandstorm, among North-eastern Countries”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) FM 青森 “エネルギーコミュニケーション” (2009 年 4 月毎金曜日放送、「黄砂」を考える)
- 2) 読売新聞 (夕刊) : 「黄色い雪、赤い雪」 (2012 年 2 月 23 日、1 頁)
- 3) TV 朝日 : “やじうまテレビ”で紹介(2012 年 4 月 30 日月曜日放送)

### (6) その他

モンゴル国との黄砂共同観測およびその成果に関する顕著な貢献によって、本研究グループの松井一郎が、モンゴル国気象環境庁から外国人として初受賞。(2012 年 4 月に授与)

## 8. 引用文献

- 1) Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu, and D. M. Winker, 2008: Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2869-2884.
- 2) Kanatani, K. T., I. Ito, W. K. Al-Delaimy, Y. Adachi, W. C. Mathews, J. W. Ramsdell, and Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team, 2010: Desert-dust Exposure is Associated with Increased Risk of Asthma Hospitalization in Children, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*,

doi:10.1164/rccm.201002-0296OC.

- 3) Satake, S., I. Uno, T. Takemura, G. R. Carmichael, Y. Tang, D. Streets, N. Sugimoto, A. Shimizu, M. Uematsu, J-S. Han, and S. Ohta, 2004: Characteristics of Asian aerosol transport simulated with a regional- scale chemical transport model during the ACE-Asia observation, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S22, doi:10.1029/2003JD003997.
- 4) Hess, M., P. Koepke, and I. Schult, 1998: Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 831-844.

## (2) 黄砂予報モデルの精緻化に関する研究

国土交通省気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部 部長

三上 正男

環境・応用気象研究部 第一研究室

関山 剛

田中 泰宙

眞木 貴史

平成 21～23 年度累計予算額：32,897 千円（うち、平成 23 年度予算額：10,930 千円）

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]** 黄砂現象の規模や回数の増加は社会的な影響の観点からも懸念されている。本研究では、北東アジア黄砂発生域の観測情報および分担課題 1 で収集する国立環境研究所（NIES）型ライダーネットワークデータを用いて、黄砂予測モデル MASINGAR の改良と検証を行い、黄砂の被害緩和に資する高精度な黄砂飛来予測モデルを開発することを目的とする。本研究では、①黄砂発生モデル検証のための観測システムを開発すると共に黄砂発生スキームの検証用データセットをまとめ、②観測情報に基づいて黄砂予測モデルの黄砂発生過程モデルを改良し、さらに③NIES ライダー網の観測値とアンサンブル・カルマン・フィルタ（EnKF）を用いて MASINGAR のモデル誤差情報を推定するシステムを構築するとともに④逆解析による黄砂の放出量解析を行った。得られた成果は以下の通りである。①モンゴルでの現地観測を行い、既存のオーストラリアでの観測データを併用して解析し、モデルの検証に必要な飛砂とダストのフラックスデータセットを作成し、モデルの検証を行った。これは世界で例がない高時間分解能の観測データセットである。②現地観測による知見を元に、従来十分考慮されてこなかったダスト発生に影響する過程として、積雪と融雪による土壌水分・土壌水分の凍結・前年の枯れ草が早春期のダスト発生過程に及ぼす影響についてモデルを改良し、事例解析によって検証を行った。③NIES ライダー網を利用して EnKF によるエアロゾルのデータ同化システムを開発した。これにより黄砂発生域から日本へかけての移流の様子を総観規模で正確に把握できるようになった。④逆解析手法によって黄砂放出量の推定に成功し、この手法が定量的な解析に有効な技術であることを示した。本研究の結果から、黄砂予測モデルの誤差の大きさ・分布・変動の特徴をつかむことが可能となりモデルの改良と予報計算の高精度化に貢献できた。

**[キーワード]** 黄砂、風送ダスト、黄砂予報、数値モデル、データ同化

### 1. はじめに

黄砂は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が長距離輸送されることによって生じる現象である。その規模や回数の増加による社会的な影響については、日本のみならず韓国、中国でも懸念されており、日本を始め韓国・中国においても黄砂の予測モデルが開

発され、黄砂情報の現業モデルとして役立てられつつある。しかしながら、黄砂による被害緩和・低減に資するような黄砂飛来予測は、各国の現行の予報モデルでは十分でないという認識がある。そのため最近の日中韓3カ国環境大臣会合（TEMM）においても、黄砂問題は緊急に対処すべき案件として取り上げられている。また、中国沿岸部の産業活動の進展に伴い発生量が増加している大気汚染成分が黄砂とともに飛来することが多くなっていることから、中国により近い韓国では、日本以上に越境移流する黄砂や随伴する大気汚染物質等による健康被害について強い関心もたれている。そのような社会的、行政的背景がある黄砂問題について迅速に対応するには、黄砂研究について先端的知見を有する機関が連携して取り組む必要がある。

## 2. 研究開発目的

本課題では、北東アジア黄砂発生域の観測情報、および分担課題1で収集するNIES型ライダーネットワークデータを用いて、黄砂シミュレーションモデルの改良と検証を行い、北東アジアにおける黄砂の被害緩和に資する高精度な黄砂飛来予測数値モデル（黄砂予報モデル）を開発することを研究目的とする。具体的には、気象研究所が開発し我が国の黄砂予報業務でもすでに利用されている黄砂予報モデル（MASINGAR）<sup>1),2)</sup>の改良と高度化を達成することにより、国内の黄砂情報（環境省／気象庁HP上の黄砂情報も含む）の精度向上とTEMM各国の黄砂予報モデルの精度向上への科学・技術的貢献を行うことを達成目標とする。

また、本研究の最終目的は北東アジアにおける黄砂の被害緩和に資する高精度な黄砂飛来予測数値モデル（黄砂予報モデル）を開発することであるが、そこに至る道筋は幾通りも存在する。その中の一つがデータ同化による黄砂解析値の作成を通じたモデル誤差の最尤推定である。黄砂を含むエアロゾルのデータ同化は大気物理学・大気化学における非常にチャレンジングな最先端の技術開発であるが、その副次的プロダクトにはモデルの誤差情報も含まれている。その情報を基にしてモデルのパラメータを修正することにより、モデル計算の精緻化を達成することが可能である。本課題では、黄砂予報モデルMASINGARによるアンサンブル黄砂シミュレーション計算を行い、その結果をアンサンブル・カルマン・フィルタによって分担課題1で収集するNIESライダーネットワークデータと融合させ、黄砂の客観解析値を作成するシステムを開発する。その解析値とモデルシミュレーション結果を比較してデータ同化による修正量、すなわちモデル自身の誤差を定量的に見積もる。

さらに、黄砂予測精度の精緻化を図るためには、黄砂放出量の正確な推定が極めて重要である。近年の黄砂予測モデルはその内部に大気モデルや陸面モデルを含んでおり、黄砂が発生する条件（土壌水分、植生、風速等）が満たされるとモデルの中で黄砂を舞い上がらせる。しかしながら、この黄砂の舞い上がり量の計算が経験的な方程式に留まることや、黄砂発生に必要な諸条件を正確に把握することが難しいことなどから、これまでのモデル相互比較においてもモデル間の黄砂放出量の違いは気象場の違いよりも一般的に大きい。そこで、炭素循環解析で現在よく活用されている逆解析の技術を黄砂放出量推定に応用し、黄砂発生域における黄砂放出量の推定が可能かどうかの調査研究を行う。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 黄砂（ダスト）発生モデルの実測データに基づく検証

砂塵嵐による黄砂発生 の 主要な発生過程はサルテーションボンバードメントと呼ばれる。これは、強風による摩擦応力によって発生する飛砂（直径 50~500  $\mu\text{m}$  の砂粒）の跳躍にともない、黄砂（直径数  $\mu\text{m}$  の鉱物粒子）が発生するという過程であり、これまでに黄砂モデルの発生過程に導入されるモデルの基礎となっている。そこで表現される全飛砂フラックス  $Q$  は、ある高さ  $z$  におけるサルテーションフラックス  $q(z)$  をサルテーション高さ  $h_s$  まで鉛直積分した量である。これは、モデルでは摩擦速度や地表面条件の関数として表現されているが、モデルの検証に用いられるデータはこれまで無かった。一方、サルテーションボンバードメントで発生する黄砂フラックスについての観測はこれまでに数多く試みられてきたが、多くの場合ポンプ吸引によるフィルタリングによる方法がとられてきた。この方法はある一定期間の総量としての黄砂フラックスを算定することができるが、モデルの検証に必要な時間変動や粒径特性を詳細に知ることができない。

そこで、本研究では、オーストラリア JADE 観測の SPC（飛砂計数器）を用いた飛砂フラックス  $Q$  のプロファイル観測データからモデル検証用の  $Q$  のデータセットを作成すると共に、摩擦速度依存性などのモデル化に必要な特性を解析した。また、黄砂（ダスト）フラックス  $F$  については、モデル最下層（高さ 10 m までを対象）の黄砂濃度とフラックスに関する観測がこれまでなく、モデルの予報値と直接検証できるデータが無いことが、モデルの改良上の問題であった。

そこで本研究では、ダスト発生モデル検証のために、①OPC（Optical Particle Counter）を用いた黄砂フラックス  $F(z)$  のプロファイル観測からモデル検証用の  $F$  のデータセットを作成し、飛砂のプロファイル観測から求めた  $Q$  と共に、既存の  $Q$  と  $F$  のモデルスキームとの比較検討を行うと共に、②植生のある半乾燥草地面上での黄砂フラックス  $F$  のスキームの検証のために、地上付近とモデル最下層高度の粒径別黄砂濃度と鉛直フラックスの同時集中観測装置をモンゴルの半乾燥草地上に設置し、予備観測を行い、手法の妥当性について議論を行った。

本研究では、サルテーション（飛砂）フラックスの数値モデルとして、Owen (1964)<sup>3)</sup> および White (1979)<sup>4)</sup> のモデルを比較対象とする。これはいずれもサルテーションフラックス  $Q$  を摩擦速度と臨界摩擦速度の関数として表すモデルである。これらをオーストラリア JADE 観測の SPC（飛砂計数器）を用いた観測によるサルテーションフラックス  $Q$  と比較した。サルテーションによって生じる鉛直方向のダストフラックスの発生過程モデルとして、ここでは、全球および領域ダストモデルでよく用いられている Marticorena and Bergametti (1995)<sup>5)</sup>、Lu and Shao (1999)<sup>6)</sup> および Shao (2004)<sup>7)</sup> の 3 つのモデルを扱い、その特性を調べた。

#### (2) 黄砂発生過程モデルの改良

黄砂シミュレーション精度向上の鍵となるのは、鉱物ダスト発生過程モデルの高度化である。これまでに多くのダスト発生過程モデルが発表されているが、それらには多くの不確実なパラメータが存在し、その結果、異なるダストモデル間の差も非常に大きい。この誤差原因を追究し、修正することは黄砂の数値シミュレーション精度向上において極めて重要な課題となっている。

現在我々が用いている気象庁・気象研究所の黄砂シミュレーションモデル MASINGAR によって再現されたダスト濃度は 3 月に過小評価、5 月に過大評価となる傾向が見られる。黄砂シーズ

ンである春季においてこのような系統的な誤差が現れることは他のダストモデルを用いた実験においても問題となっており、特に3月の過小評価は黄砂予報を行う上で最大の障害となっている。そこで、日中韓3カ国環境大臣会合（TEMM）における合意に基づいて入手した東アジアにおけるPM10観測値（大気中の微小粒子濃度）を用いてモデルの誤差原因を調べ、さらにそこで推定された誤差原因をデータ同化によって補正することにより黄砂解析精度が向上するのかどうかを検証した。このため、ここでは近年の数値ダストモデルで用いられるダスト発生過程モデルに、東アジアで重要となるプロセスを採り入れ、観測値と比較しその特性を把握した上でダスト発生過程モデルの改良に取り組んだ。

まず、ダスト発生源における現地観測に基づく経験から、東アジアの黄砂発生源におけるダスト発生量に影響を及ぼすプロセスとして、次の3つに着目した。

- ① 春季における積雪分布と、積雪の融解による土壌水分増加の数値モデルの再現性
- ② 冬季における土壌水分の凍結によるダスト発生の抑制
- ③ 前年の植生が枯れ草として残存し、春季のダスト発生を抑制する効果

これらのプロセスは、積雪や植生の影響が重要な東アジアのダスト現象には重要である可能性があるにも関わらず、これまでのモデルでは直接的には表現されてこなかったものである。そこで、本研究ではこれらのプロセスの影響を調査するための感度実験による研究を行った。

### 1) 積雪および土壌水分の影響

まず、黄砂の発源地となるモンゴルのゴビ砂漠では早春期まで積雪が存在する。積雪はそれ自体が地表面を覆ってダストの発生を防ぐこと、および融雪によって土壌水分を増加させることによって、ダスト発生臨界摩擦速度を増加させ、ダストを発生しにくくするという作用がある。しかしながら、数値モデル内の陸面過程モデルでの積雪や土壌水分の扱いには誤差が含まれるため、それに起因してダストの発生量に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、ここでは2007年の3月と5月の黄砂事例を対象とし、積雪および土壌水分の影響の有無を考慮したシミュレーション実験を行い、結果をPM10観測値との比較によって精査することによって積雪および土壌水分の影響を調査した。数値モデルには気象庁・気象研究所の全球エアロゾルモデル MASINGAR<sup>1),2)</sup>を用い、モデルの水平解像度は約1.125° (T106)、鉛直層は地表から0.4hPaまでの30層とし、現実の気象場に近づけるため、気象庁全球解析値GANALを参照値としたナッジング手法を用いた。

### 2) 土壌凍結の影響

東アジアのダスト発生域では冬季には土壌表面の温度は氷点下となり、土壌中の水分は凍結する。土壌水分が凍結するとその体積は増大し、その結果凍結した水分が土壌粒子間の空隙を埋め、粒子間結合力を増大させることによって、ダストの放出に必要な摩擦速度が増大する。そのため、氷点下となる土壌ではダスト発生は抑制される可能性がある。これまでに、Han et al. (2011)<sup>8)</sup>はModerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) および地上気象観測データを用いて、東モンゴルでのダスト発生に対する春の凍土の影響を検討し、凍土の条件でダストが発生する場合には、より強い風が必要なことを示している。しかしながら、このような土壌凍結の影響を数値シミュレーションで陽に扱った事例はほとんどない。

そこで本研究では、土壌が凍結する条件下でダスト発生が抑制される影響を数値シミュレーションによって調査した。このモデルでは、土壌粒子間の孔隙（Porosity）に対する土壌水分量の体積の割合、すなわち相対土壌水分

$$s = \frac{\text{Volumetric soil moisture}}{\text{Porosity}} \times 100[\%]$$

が閾値を超え、かつ土壌温度が氷点下を超えた場合に、ダストの発生が停止すると仮定した。ここでは感度実験の結果から、標準的な  $s$  の閾値を 40 % と設定し (Kang et al., 2012)<sup>9)</sup>、そこから  $\pm 10$  %、すなわち 36 % と 44 % としたときの感度実験を行った。感度実験において、土壌凍結を考慮しない実験を Control 実験、 $s$  の閾値を 40 %、36 %、44 % とする場合をそれぞれ FROZEN40、FROZEN36、FROZEN44 と記す。

この土壌凍結の効果のパラメタリゼーションを検証するため、2009 年冬季の黄砂現象のシミュレーションを通じてその妥当性を検証した。数値モデルには WRF/Chem (Grell et al., 2005)<sup>10)</sup> に Shao et al. (2004)<sup>7)</sup> のダスト発生スキームを取り入れたモデルを用いた (Kang et al., 2011)<sup>12)</sup>。モデルの水平分解能は 30 km、領域の水平方向のグリッドサイズは 190×120 の格子点、鉛直方向層数は 28 とした。気象条件の初期条件と境界条件には NCEP FNL 解析値を用いた。植生データには MODIS/ Terra センサーによる Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) プロダクトを、土壌テクスチャクラスのデータは LREIS (Laboratory of Resources and Environment Information System、中国科学アカデミー) と FAO/ UNESCO (国連食糧農業機関/国連教育科学文化機関) のデータを用いている。

### 3) 枯れ草の影響

東アジアにとって最も重要なダスト発生源領域の一つである中国・モンゴルの半乾燥地域は、草原で覆われる領域の多い地域でもある。Kurosaki and Mikami (2007)<sup>13)</sup> は、半乾燥地域で夏季に繁茂した植生は秋季にダスト発生を抑制することを報告している。さらに、我々のモンゴルでの現地調査では、この植生は冬季を超えても枯れ草として残留することが観測されている。この枯れ草が地表を覆うことによってダストを抑制する効果をもつならば、春季のダストストームによるダスト発生量のポテンシャルとその前年の植生量に関係があることになる。これまでの報告例では、Zou and Zhai (2004)<sup>14)</sup> は、中国北部において特定の年の正規化植生指数 (NDVI) とその翌年春季の砂嵐の頻度の間に有意な相関があることを指摘している。また、Kimura and Shinoda (2010)<sup>15)</sup> は、植物状況が夏季とその翌年の春季に NDVI を用いた季節つながりがあることを示している。Kurosaki et al. (2011)<sup>16)</sup> は、世界気象機関 (WMO) の地上気象観測データ<sup>11)</sup>を用い、前年からの枯れ草の効果が閾値風速の増加を引き起こす可能性があることを示唆している。

このように、観測および解析から前年の植生の残存が春季のダスト発生に影響を及ぼすことは指摘されているものの、数値モデルで直接的にこの効果を表現した例はない。これは植生の変遷を数値モデルによって精度良くシミュレートすることが難しいことや、NDVI のような衛星センサーでは枯れ草を検出することが難しいことに原因がある。本研究では、枯れ草によるダストの抑制効果を表現する NDVI データを用いた簡潔なパラメタリゼーションを開発し、事例解析によってその効果を検証した。数値モデルには (2) - 2) 同様に WRF/Chem に Shao et al. (2004)<sup>7)</sup> のダスト発生スキームを取り入れたモデルを用いる (Kang et al. 2011)<sup>12)</sup>。植生データには MODIS/ Terra センサーによる Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) プロダクトを用いる。

このパラメタリゼーションでは、春季に残存する枯れ草の量を推定するために、植生量が最大植生被覆の翌月から直線的に減少し、翌年 4 月に消えることを仮定した。衛星観測による 2001

年から 2010 年までの平均の植生被覆の最大値 ( $\overline{V_{\max}}$ )、植生被覆が最大となる平均月 ( $\overline{MO_{\max}}$ ) を、モデルの格子点ごとに次のように計算する。

$$\overline{V_{\max}} = \frac{\sum_{i=2001}^{2010} V_{\max,i}}{10}$$

$$\overline{MO_{\max}} = \frac{\sum_{i=2001}^{2010} MO_{\max,i}}{10}$$

ここで、 $V_{\max,i}$  が  $i$  年の植生被覆の最大値、 $MO_{\max,i}$  は  $i$  年で植生被覆が最大になった月である。これより、

$$DL_{i+1} = V_{\max,i} - R d$$

から、翌年 ( $DL_{i+1}$ ) の毎月の枯れ草の量を推定することができる。  $d$  が  $MO_{\max,i}$  月の 15 日から次の 4 月 15 日までの日数で、

$$R = \frac{\overline{V_{\max}}}{\text{\# days from } \overline{MO_{\max}} \text{ 15th to April 15th in the following year}}$$

$R$  は、一日あたりの植生量の減少率である。これにより、各年の月毎の枯れ草の量は、森林・都市・湿地の地域を除いて算出した。ダスト発生に関する臨界摩擦速度に対する植生の影響は、Frontal Area Index または粗密度 ( $\lambda$ ) として粗度要素補正係数に含める。粗度  $f_c$  の被覆率を用いて、Frontal Area Index は、 $c_\lambda = 0.35$  で

$$\lambda = -c_\lambda \ln(1 - f_c)$$

によって推定することができる。枯れ草の影響を含めるには、 $f_c$  は、本研究では枯れ草と通常の植生の間の最大値として設定する。

### (3) NIES ライダーデータを用いた黄砂モデル同化システムの開発

#### 1) NIES ライダーデータを用いた黄砂同化システムの開発

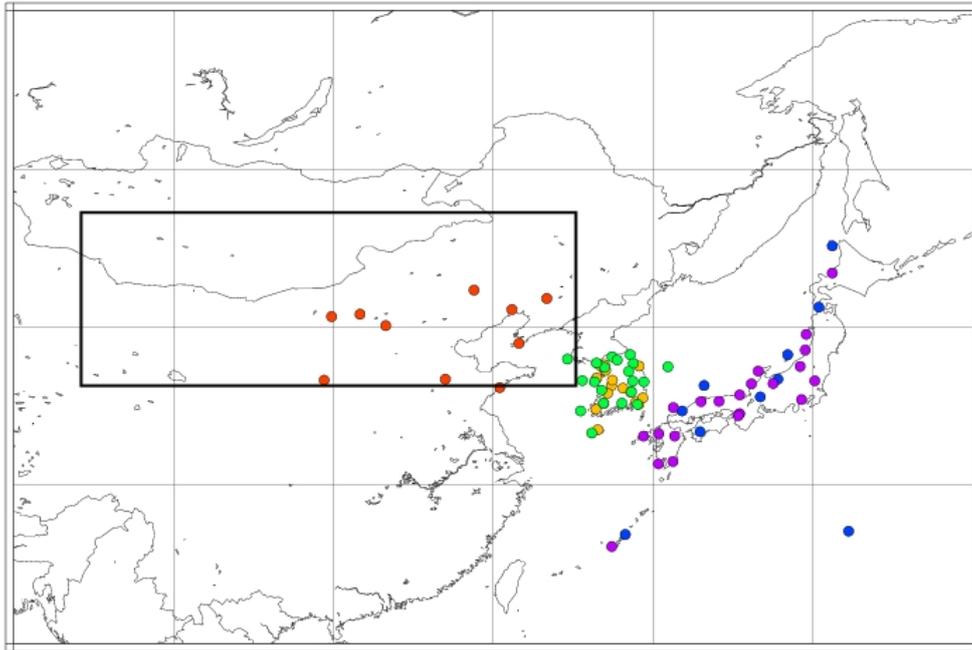
最新のデータ同化手法であるアンサンブル・カルマン・フィルタは古典的なデータ同化手法（最適内挿法・緩和法等）と異なり、モデル予報変数（黄砂濃度等）の解析値を作成できるだけでなく、時々刻々変化するモデルの誤差やバイアスを物理法則に沿って最尤推定することが可能である。そこで我々はアンサンブル・カルマン・フィルタを用いた独自のエアロゾルデータ同化システムの開発と改良を行い、黄砂に関するモデル誤差の統計推定を行う。このデータ同化システムで使用するシミュレーションモデルは気象庁の現業業務にも使われている MASINGAR である。したがって、算出したモデル誤差やバイアスの情報は直接的に MASINGAR の改良と精度向上へ利用することが可能である。データ同化に用いる観測データには分担課題 1 の NIES ライダーネットワークによって得られた 2 波長の減衰後方散乱係数と偏光解消度に加え、米国航空宇宙局 (NASA) の人工衛星 CALIPSO 搭載のライダーによって得られた観測も併用し、独自開発の観測演算子（データ同化においてモデル変数を観測物理量へ変換するプログラム）を用いて同化計算を行う。

## 2) 黄砂シミュレーションにおける誤差原因の検証

現在我々が用いている黄砂シミュレーションモデル MASINGAR によって再現されたダスト濃度は3月に過小評価、5月に過大評価となる傾向が見られる。黄砂シーズンである春季においてこのような系統的な誤差が現れることは他の研究グループでも同様に問題となっており、特に3月の過小評価は黄砂予報を行う上で最大の障害となっている。この誤差原因を追究し、修正することは黄砂の数値シミュレーション解析において極めて重要な課題となっている。そこで我々はその誤差原因をデータ同化によって推定し、補正することにより黄砂解析精度が向上するかどうかを検証した。具体的には2007年春季の黄砂事例を対象とし、データ同化システム(MASINGARとアンサンブル・カルマン・フィルタを組み合わせた解析システム<sup>17)</sup>)に衛星CALIPSO搭載ライダーによるエアロゾル観測値を入力し、ダスト発生強度の誤差を生んでいると推定されるモデルパラメータの修正を試みた。データ同化によって修正されたこのモデルパラメータを用いて再計算されたダスト濃度は、分担課題1のNIESライダーネットワークから提供された独立的な黄砂観測値と比較することによってその妥当性が検証された。

### (4) 逆解析による黄砂の放出量解析

黄砂予測精度向上の鍵を握っている黄砂放出量であるが、先に述べたように黄砂予測モデル間の違いはまだ大きい。加えて、黄砂放出量の直接測定も予算的、人的資源の制約からほぼ不可能である。一方、黄砂が発生した後は気象場によって輸送され、地表面に沈着していくが、これらの過程の方が比較的理解が進んでいる。そこで、黄砂予測モデルと実際に観測された黄砂の大気中の濃度から逆算して黄砂の発生量を推定するという試みが有効であると考えられる。主要な地球温暖化物質である二酸化炭素に関しても、同様の考え方から逆解析を用いて放出吸収量を推定する試みが盛んに行われている<sup>18)19)</sup>。この手法は一定の領域、期間にわたり二酸化炭素を放出させて輸送モデルで輸送過程をシミュレートし、得られた観測データ群を最もよく再現できる領域・期間の二酸化炭素フラックスを求める方法である。現在は亜大陸規模・月平均の解像度での二酸化炭素フラックスを推定可能である。二酸化炭素収支に関してはほぼ全球からの寄与を考慮する必要があり、計算機資源の制約などから時間・空間分解能を現状から大きく上げることは難しい。しかしながら黄砂の場合、放出源はかなり限定することが可能である(例えば海洋、森林等からは放出しない)。そこで、黄砂が発生すると見込まれる領域のみで黄砂予測モデルによる計算を行えばよいことから、二酸化炭素の場合よりも高い時間・空間解像度での解析が可能になると見込まれる。今回は日中韓黄砂共同研究で事例解析の対象となった2007年3月から4月にかけての黄砂事例を対象とし、解析対象範囲をゴビ砂漠周辺に限定することによって、空間解像度をモデル格子点(約300km)、時間解像度を3時間という高解像度での解析を試みた。黄砂予測モデルは気象研究所が開発を継続しているMASINGAR<sup>1)</sup>を用いた。観測データは日中韓黄砂共同研究第I作業部会のもので共有された3カ国のPM10観測値を用いた(図(2)-1)。観測データの品質管理として、黄砂放出の時間分解能に合わせて観測データも3時間の平均を取ることとした。また、一定値以下の観測データは黄砂以外のエアロゾルの寄与が大きいとして解析には用いないこととした。この解析の際に必要な第一推定フラックスの不確かさや、観測データの不確かさ、利用する観測ネットワークを変更した感度実験を多数行い、各パラメータが与える影響などを評価した。



図(2)-1 逆解析で用いた観測地点一覧と黄砂発生を仮定した領域（黒枠）、赤は中国環境監視センター、黄は韓国環境研究所、緑は韓国気象研究所、紫は環境省（日本）、青はアジア大気汚染研究センターの観測所を示す

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 黄砂（ダスト）発生モデル検証用データの作成

##### 1) 飛砂およびダストフラックスデータセットの作成

飛砂の鉛直分布は、これまでの風洞実験や野外観測で一次ないし二次の指数関数を取ることが知られている。

$$Q = \int_0^{h_s} q(z) dz = \int_0^{h_s} q_0 \exp(-az - bz^2) dz$$

両者を比較すると、最下層の2点から求めた一次の指数関数と3点から求めた二次の指数関数の結果は非常によい相関を示すが、一次式表現による $Q$ は $q_0$ を過小評価することになるため、二次式に比べ27%ほど小さな値を示した。以下の解析では、二次の指数関数系を採用した。

得られたデータセットを検討すると、従来のモデルでは $Q$ は摩擦速度 $u_*$ の3~4乗で表現されているが、1分積算と5分積算した $Q$ はいずれも、 $u_*$ が0.3~0.4 m/s付近よりも大きい場合に5乗に沿う分布を示した（図(2)-2(a)、図は1分値のみ示す）。フラックス算定の元になる高度別のフラックス $q(z)$ の粒径分布（図省略）は高度が高くなるにつれ大粒子の割合が減少する傾向を示し、小粒子の乱漣輸送と大粒子の重力効果を考慮した非一様飛砂飛散理論（Shao, 2005<sup>20</sup>）； Shao

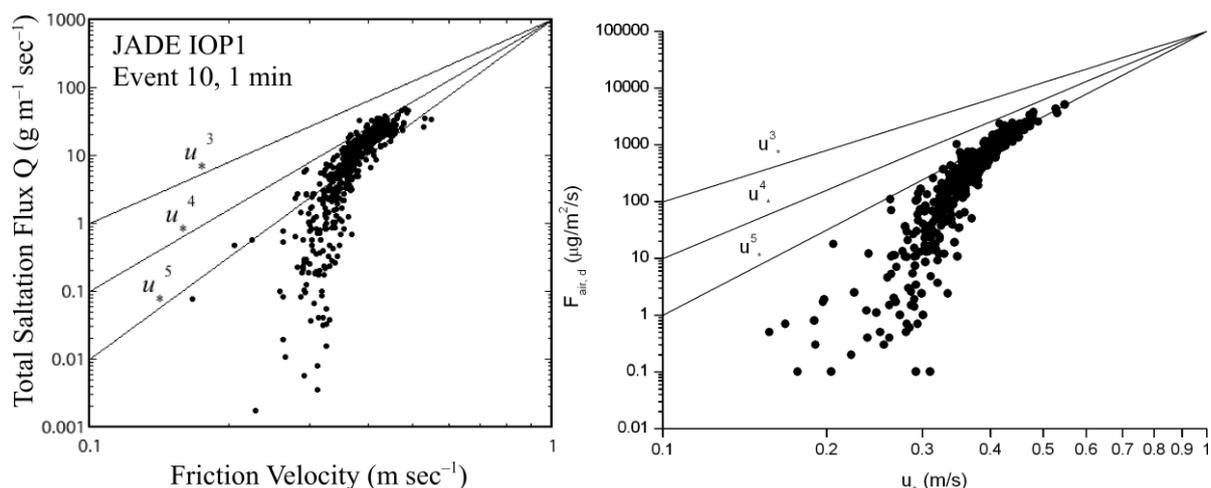
and Mikami, 2005<sup>21)</sup>) を支持する結果が得られた。地表面表層土壌の粒径分布と  $Q$  の粒径は、ピーク粒径が前者が 170~180  $\mu\text{m}$  前後、後者が 200  $\mu\text{m}$  とほぼ対応しており、 $Q$  の表層土壌粒径への依存性を示しているが、分布のずれについては今後の検討が必要だと考えられる。

一方、黄砂フラックスの観測データには、地表面から発生した拡散による鉛直上向きの黄砂フラックス  $F_{air,d}$  と重力沈降による黄砂フラックスの双方の影響が含まれる。本研究では、既存の観測結果と比較するために、黄砂フラックス  $F_{air,d}$  は次に示す濃度の鉛直勾配に比例する次式を用いて算定した（中立時）。実際の解析では設置層の安定度を考慮した計算を行った。

$$F_{air,d} = -K_p \frac{\partial c}{\partial z}$$

ここで、 $K_p$  は黄砂粒子に対する拡散係数 ( $K_p = \kappa u_* z$ ) である。

得られた結果によれば、摩擦速度  $u_*$  が 0.3~0.4 m/s 付近よりも大きい場合に、1分積算した黄砂濃度は摩擦速度のおおよそ 5 乗に比例する関係が明瞭にみられた (図(2)-2(b))。これまでに得られている観測結果や既存のモデルでは、摩擦速度の 4 乗に比例する関係が用いられているが (Gillette and Passi, 1988)<sup>22)</sup>、これよりも大きな値となった。また、Mari における観測データ (Nickling, 1983)<sup>23)</sup> を除くと、今回の結果ではフラックスが大きくなった (図省略)。この理由は、既往の観測とは異なる測定装置を用いたことによると考えられる。砂塵嵐発生時の粒子の粒径分布の観測結果は、2~7  $\mu\text{m}$  の粒子が卓越していることがわかった。また、高さ 1 m と 3.5 m において、粒径分布が変化しないこともわかった。この理由としては、黄砂粒子は粒径が小さいため、重力よりも乱流輸送による影響が強いことが考えられる。これらの粒径別飛砂フラックスと鉛直黄砂フラックスのデータを用いて Shao 黄砂発生スキームの検証を行い、発生域の地表面パラメータ (土壌粒径分布等) を用いることにより、モデルは粒径別の各フラックスを良く再現することが確かめられた。



図(2)-2 (a) 摩擦速度と飛砂フラックスとの関係、(b) 摩擦速度と黄砂フラックスとの関係

## 2) ダスト濃度の鉛直分布観測

全球規模や領域規模のダスト輸送モデルでは、地表面から発生するダストフラックスは最下層において摩擦速度の関数として与えられているが、モデル最下層の厚さは数十 m と大きい。一方、現地における観測では、地表ダスト濃度の鉛直プロファイル観測はこれまでに数多く行われてい

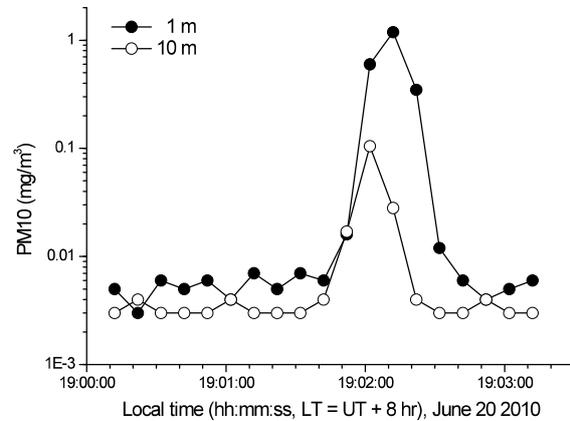
るが、地表面から数 m 高さまでの観測しか行われていない。そこで、ダスト輸送モデルのダストスキームの導入方法の妥当性を検証するための基礎データを提供することを目的として、10 m 高さの観測塔を設置し、ダスト濃度の鉛直分布の予備的観測を行った。

2010年6月20～23日まで、モンゴル国ウランバートルの南西約85 kmにある半乾燥草地のバヤンウンジュールで観測を実施した。ダスト濃度の測定にはダストトラック（TSI社製、DRX Model8533）を用いた。ダストトラックは5個のマルチチャンネルを有し、PM1、PM2.5、PM4、PM10、Total濃度を1秒毎に計測できる。測器の設置高さは1 mと10 mとして、10秒毎に記録した。また、観測を行う前に測定器の比較検定を現地で行った。

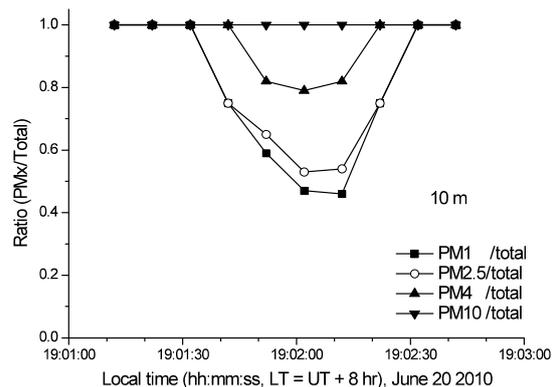
今回の観測期間中は、大きなダストイベントは無かったが、短時間の強風時（3 m 高さにおいて1分平均風速5.6～6.4 m/s）における観測データの取得に成功した（図(2)-3）。また、降水はなく地表面は乾燥しており、約十数 cm までの植生がまばらに分布する状態であった。図(2)-3より、1 m 高さと10 m 高さにおいて、同時にダスト濃度が増加する様子が観測された。高度によるダスト濃度の違いが得られたことでダストイベント時に鉛直フラックスを推定できることが示唆された。また、粒径別特性をみると（図(2)-4）、10 m 高さでは強風時に大きい粒子が増加し、1 m 高さにおいても若干の増加が観測された。また、1 m 高さでは10 m 高さと比較して、継続的に粒径の大きいダストが飛散していることがわかった。

### 3) サルテーションフラックスの比較

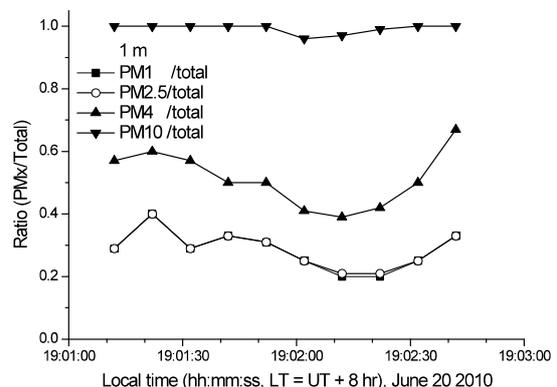
Owen (1964)<sup>3)</sup> および White (1979)<sup>4)</sup> の双方のモデルとも、観測されたサルテーションフラックスに対して線形係数を調整するのみで、観測されたサルテーションフラックスをよく表現することが示された。JADE 観測でのSPCを用いたサルテーションフラックスの観測値



図(2)-3 1 mと10m高さにおけるダスト濃度の時間変化（2010年6月20日、10秒間隔）



(a) 10 m



(b) 1 m

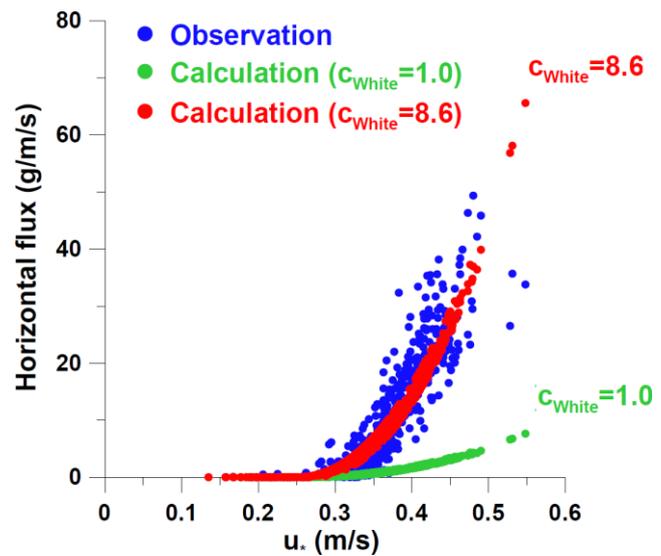
図(2)-4 Total濃度に対するPM1、PM2.5、PM4、PM10の比率の時間変化（高さ毎の比較）

と White (1979)<sup>4)</sup> モデルによるサルテーションフラックスの比較の例を図(2)-5に示す。JADE 観測との比較では、White (1979)<sup>4)</sup> モデルの場合、線形係数を 8.6 とすることで観測ともっとも近い結果となった。

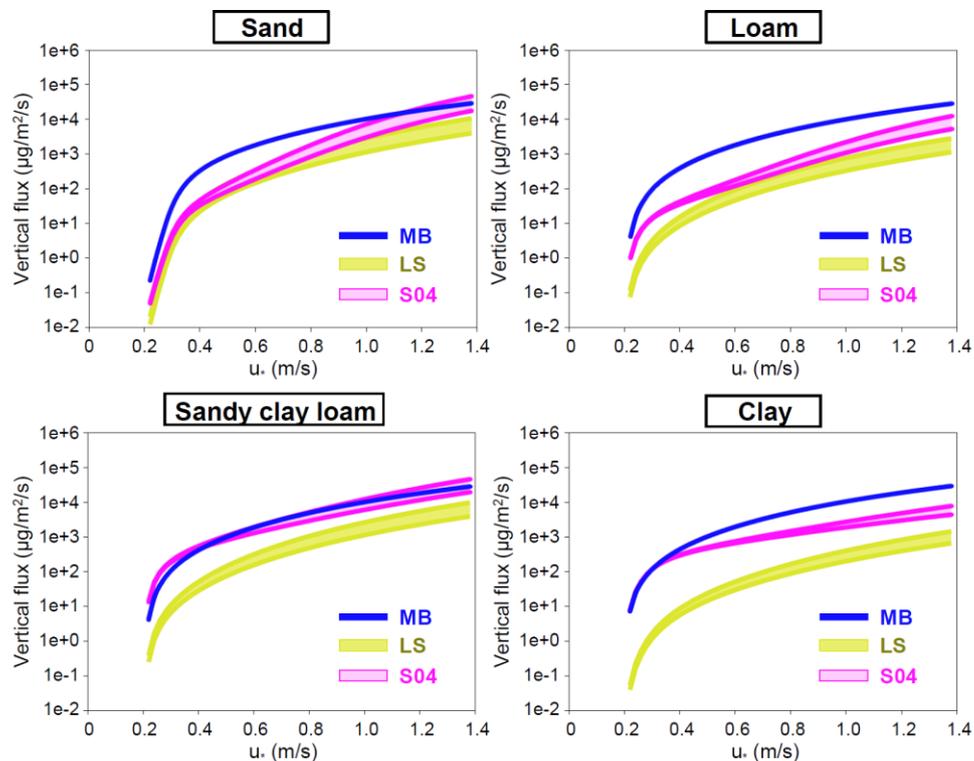
#### 4) ダスト発生モデルの比較

Marticorena and Bergametti (1995)<sup>5)</sup>、Lu and Shao (1999)<sup>6)</sup> および Shao (2004)<sup>7)</sup> の 3 つのモデル (以下、それぞれ MB、LS、S04 スキームと記述する) を比較すると、その振る舞いは大きく異なる (図(2)-6)。一般的に、MB スキームによるダスト発生量は LS、S04 スキームよりも非常に大きくなっている。また、土壌の種類によって各モデル間のダスト発生量の差は非常に異なり、特に粘土質 (Clay) の場合はその差は 100 倍のオーダーとなっている。

ダストの発生量は土壌中の微小粒子の含有量に依存する。このため MB スキームでは、サハラ砂漠の観測データを基にして土壌粒の粘土粒子の割合が多いほどサルテーションフラックスに対



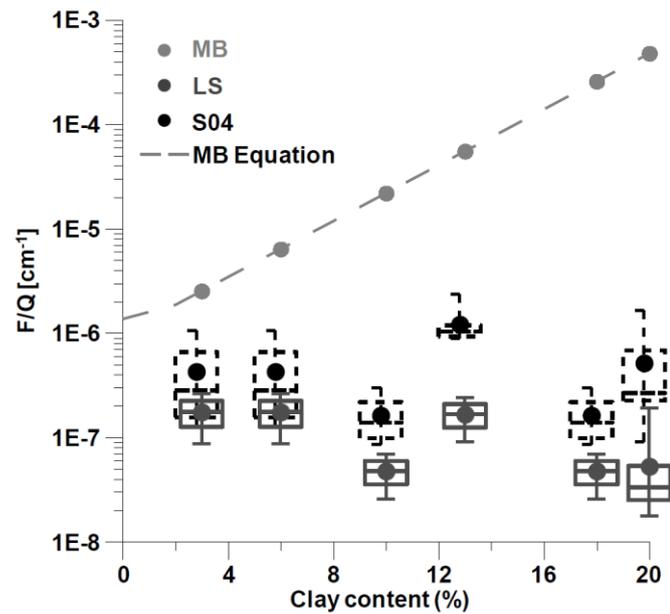
図(2)-5 オーストラリアJADE観測値とWhite (1979) によるサルテーションフラックスの比較



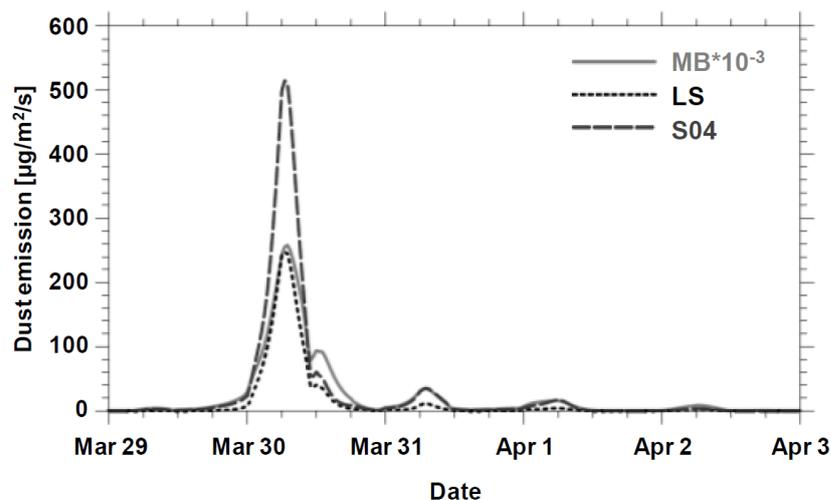
図(2)-6 各ダスト発生モデルにおけるダスト発生量と摩擦速度、土壌の粒度との関係  
MB: Marticorena and Bergametti (1995), LS: Lu and Shao (1999), S04: Shao (2004)

するダスト放出量 (F/Q) が多くなるように定式化を行っている。しかしながら LS スキームや S04 スキームでは土壌表面の硬度などのパラメータを考慮に入れるため、F/Q は必ずしも粘土粒子の存在量に依存しない。図(2)-7はこの3つのスキームにおける粘土粒子の割合と F/Q の値を示している。MB スキームでは粘土粒子の割合が大きくなるにつれて F/Q は数 100 倍のオーダーで変化しているのに対し、LS、S04 スキームでは粘土粒子の割合に必ずしも依存していない。

これらのダスト発生モデルを WRF-Chem モデルに組み込み、2007 年 3 月 30 日から 4 月 1 日にかけて発生したダストストーム事例のシミュレーションを行った。図(2)-8 はダスト発生領域での平均ダスト発生量を時系列で示したものである。この事例では LS、S04 スキームによるダスト発生量は同程度であるが、MB スキームは非常に大きな値を示している。ダスト発生の極大となる 3 月 30 日のダスト発生量を比較すると、MB スキームは LS スキームの 1000 倍以上となっており、各ダスト発生モデルの間での差が顕著である。シミュレーションの結果から、MB スキームは東アジアのダストストームにおいて大幅な過大評価が見られたことから、東アジアにおいては LS スキームや S04 スキームのように土壌の硬度など、より複雑な土壌条件に対応できるダスト発生モデルを使用することが重要であることが示唆された。



図(2)-7 サルテーションフラックスに対するダスト放出量比(F/Q) と土壌中の粘土成分の割合の関係

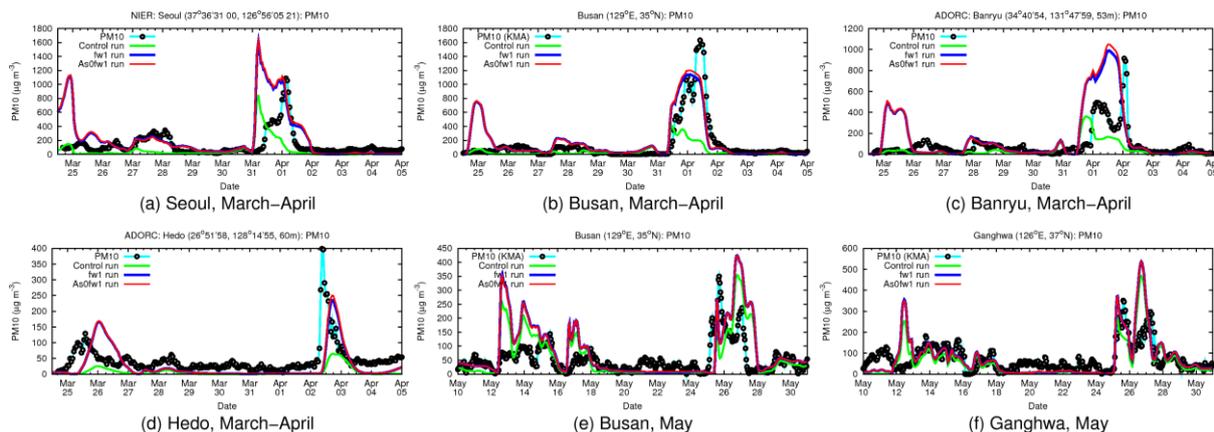


図(2)-8 2007年3月のダストストーム事例における平均ダスト発生量

## (2) 黄砂発生過程モデルの改良

### 1) 積雪および土壌水分の影響

図(2)-9 は、2007年3月および5月の黄砂イベントについて、韓国および日本の観測点でのMASINGARによるシミュレーションと観測によるPM10濃度を示したものである。MASINGARで積雪および土壌水分の影響を考慮した「Control実験」では、韓国および日本におけるPM10観測点において、3月は明らかにダスト濃度を過小評価しているのに対して、ダスト放出源である中国大陸上の積雪とその融雪による土壌水分量の影響を除いた実験ではダスト放出量が増加した結果、モデルシミュレーションとPM10観測値の不一致は大きく減少している。一方5月は、ダスト発生域における積雪はなくなるため、シミュレーションによるダスト濃度に対する積雪と土壌水分量の影響はほとんど見られなかった。2007年3月の事例において、シミュレーションでの積雪及び土壌水分の影響を受ける領域はモンゴル・内モンゴルおよび中国東北部に位置し、これは地上気象観測でダストを報告している地域とよく対応していた。この結果から、春先のモデルの誤差は、特にモンゴル・内モンゴルおよび中国東北部における積雪とその融雪による土壌水分量の不確実性に起因する可能性が高いという結論が得られた。



図(2)-9 韓国・日本で観測されたPM10（黒丸）とモデルシミュレーションで再現された地表面ダスト濃度の時間変化の比較（単位は $\mu\text{g m}^{-3}$ ）

(a), (b), (c), (d) は2007年3月に起きた黄砂事例、(e), (f) は2007年5月に起きた事例。

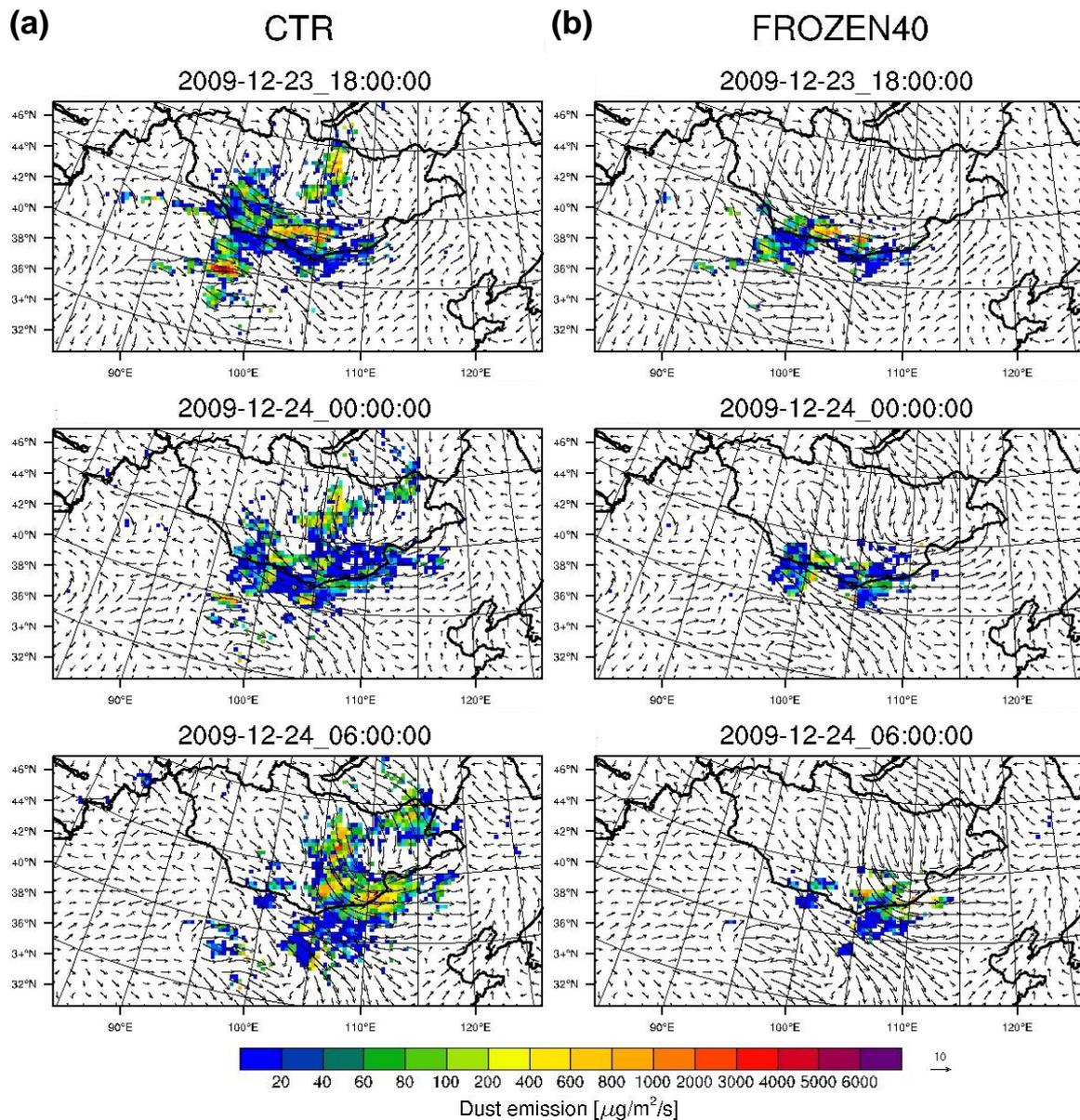
緑線は通常条件下のControl実験、青線fw1は土壌水分量の影響を無くした実験、

赤線As0fw1は積雪および土壌水分量の影響を無くした実験の結果。

### 2) 土壌凍結の影響

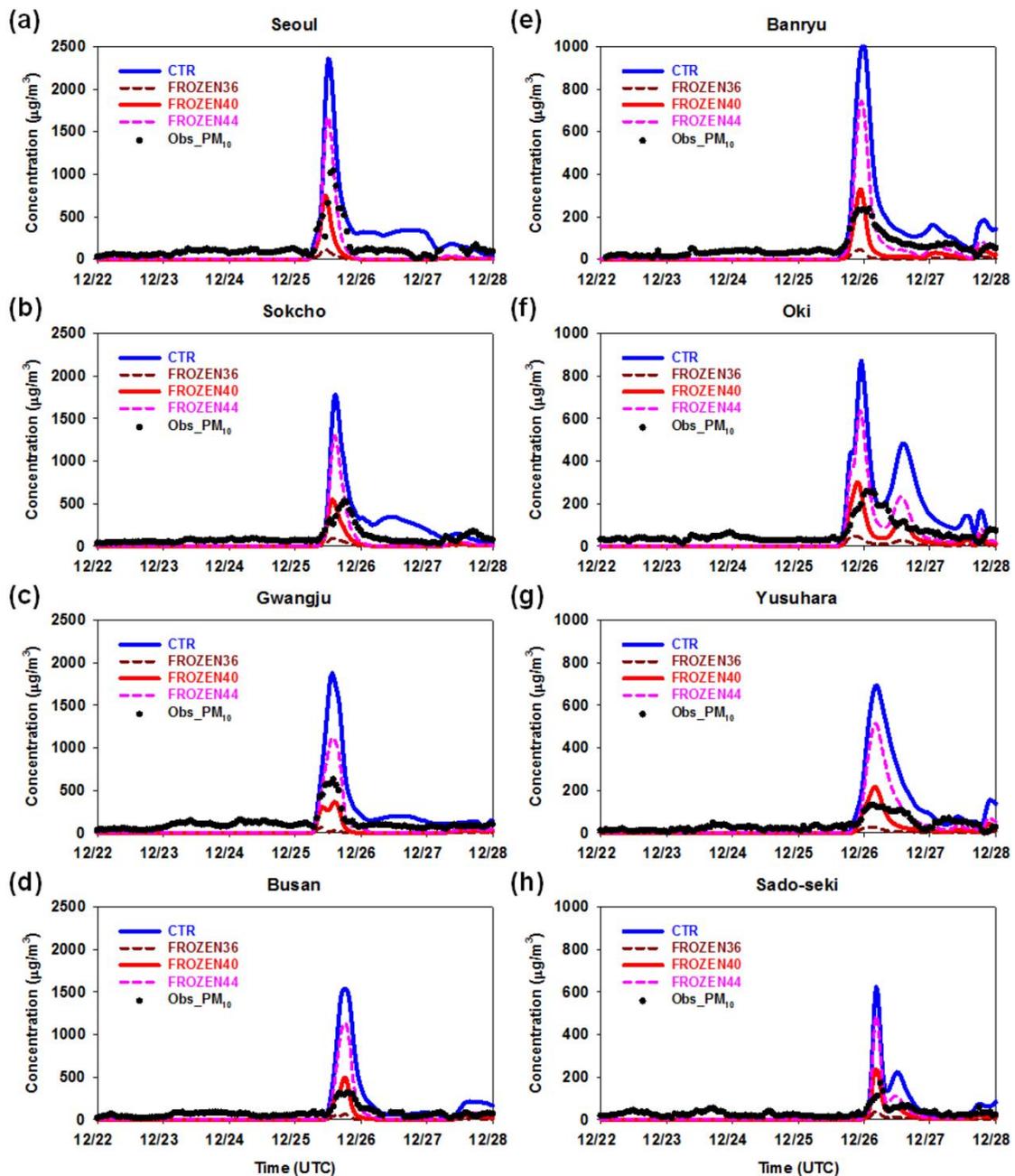
土壌凍結の影響を検証するための事例として、2009年12月25日～26日にかけて観測された黄砂イベントのシミュレーションを行った。この黄砂事例では、韓国気象局は黄砂警報を発令している。ダストは12月23日と24日にモンゴル・内モンゴル及び中国東北部地域で発達する低気圧の後面で、モンゴル・内モンゴルの南部で発生し、東に輸送された。そして、2009年12月25日～26日に韓国では激しい冬期ダストイベントとなった。

図(2)-10 に、ダストの発生期間の Control 実験および FROZEN40 実験によるダスト放出量の分布と地上 10 m 風速を示す。2009 年 12 月 23 日と 24 日に、モンゴルの東部地方の上を反時計回りの風速場で示される低気圧が存在し、その後面にある  $13 \text{ ms}^{-1}$  に達する強い風速によってダストが発生する様子が示されている。土壌凍結を考慮しない Control 実験では、モンゴルの南部・中部および東地域と内モンゴルの大部分で、強風によるダスト放出が示されている。一方、土壌凍結によるダスト放出の抑制を考慮した FROZEN40 では、低温による土壌凍結のためダスト放出量は減少し、北緯  $45^\circ$  以北では発生していない。このようにシミュレーション結果は、土壌凍結による大きな違いを示している。



図(2)-10 2009 年 12 月 23~24 日の (a) Control 実験および (b) FROZEN40 実験によるダスト放出量の分布と地上 10m 風速

図(2)-11 は、韓国および日本の観測点におけるシミュレーションと観測による PM10 濃度を示している。シミュレーション結果では Control 実験、FROZEN40 実験とともに、感度実験として、FROZEN36 と FROZEN44 による PM10 濃度も示されている。シミュレーションによるダスト濃度と観測による PM10 濃度データを比較すると、シミュレーションはダストイベントの開始時間を非常によく再現している。しかし、Control 実験によるダスト濃度は、観測と比較すると約 3 倍の過大評価となっている。これに対して、土壌凍結を考慮した FROZEN40 では、観測とより整合するものとなっている。また、FROZEN36、FROZEN44 の結果を比較すると、土壌凍結の効果は閾値の値に敏感であることが示唆されている。

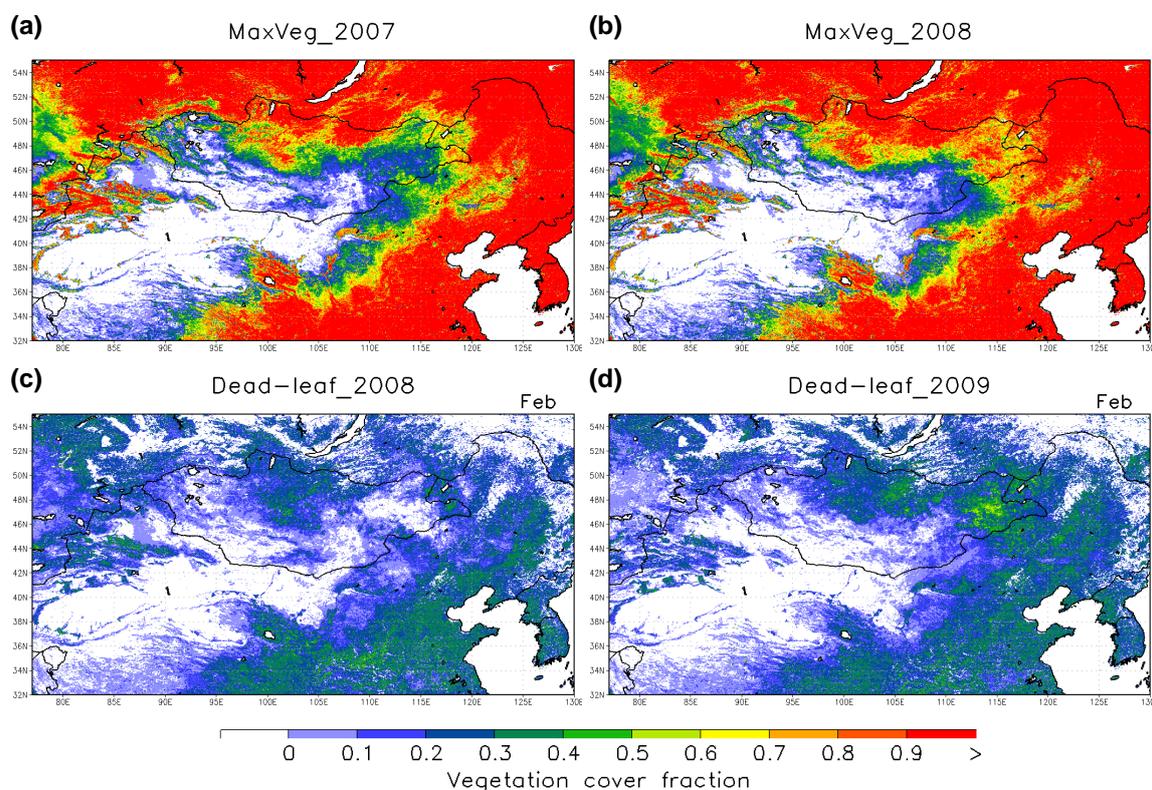


図(2)-11 韓国および日本の観測点におけるシミュレーションと観測による PM10 濃度の比較

### 3) 枯れ草の影響

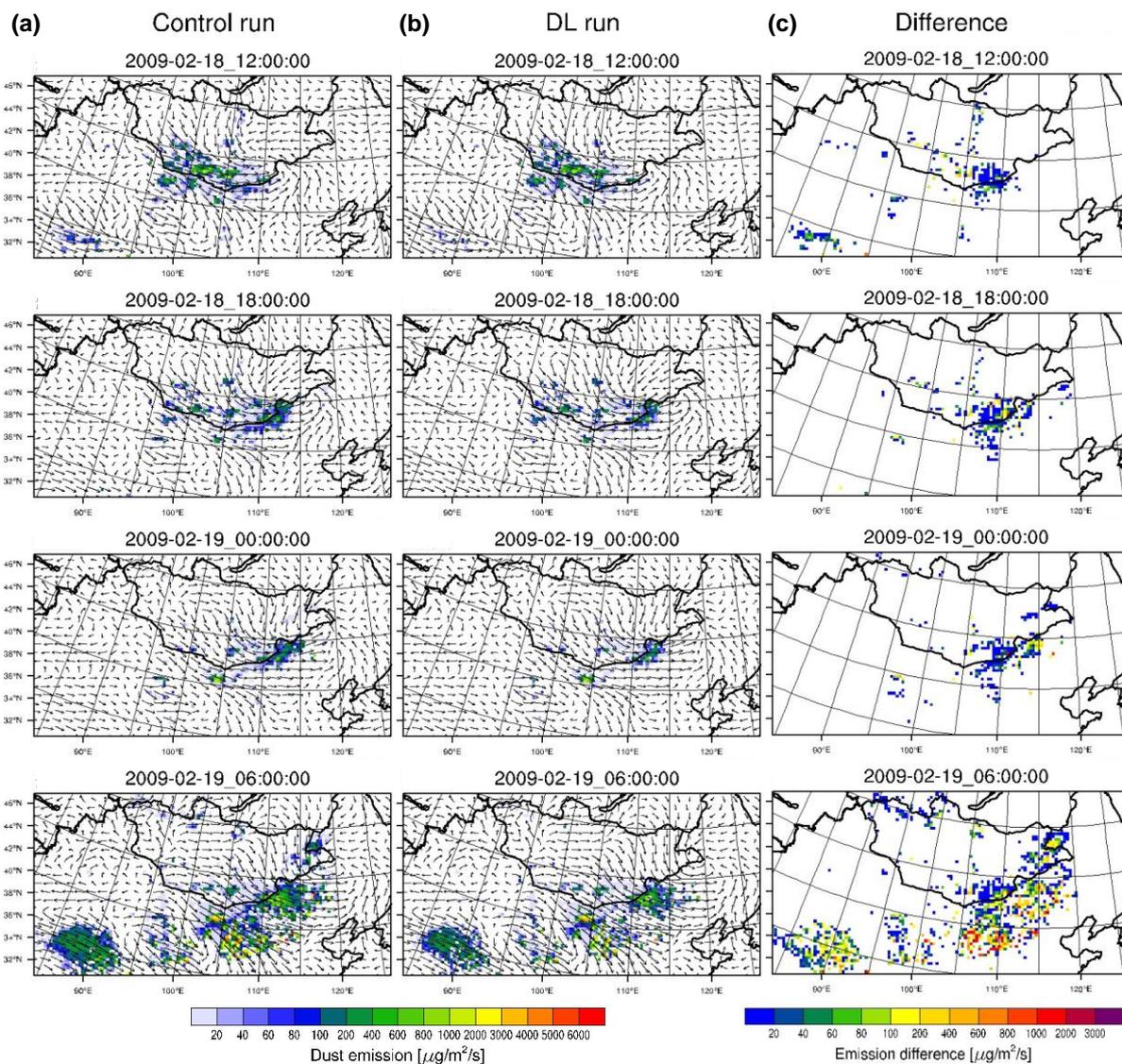
図(2)-12は、NDVIによる2007年と2008年の植生被覆の最大値と、それにより推定される2008年と2009年2月の枯れ草の被覆率割合を示したものである。2008年の植生被覆の最大値は2007年よりも大きく、従って2009年の枯れ草の割合は2008年よりも大きくなっている。この割合は特にモンゴル東部で顕著になっている。

ダスト発生量への枯れ草の効果を検証するため、2009年2月20日の黄砂イベントのシミュレーションを行った。シミュレーションでは、枯れ草の効果を取り入れた実験 (DL run) と、枯れ草の効果を取り入れない Control 実験とを行った。モデル領域はゴビ砂漠とモンゴルを含む水平解像度は30 kmの領域に設定した。



図(2)-12 NDVIによる(a)2007年と(b)2008年の植生被覆の最大値と、それにより推定される(c)2008年と(d)2009年2月の枯れ草の被覆率割合

図(2)-13(a), (b)は、Control実験とDL runのダスト放出量および地上10m風速の分布を示したものである。図中にはControl実験とDL runのダスト放出量と差分も示されている。ダスト放出は最高 $15 \text{ ms}^{-1}$ に達する強風のため、南モンゴル上に2月18日12 UTC頃に起こり始め、時間の経過とともにダスト発生域は東に移動した。Control実験とDL runのダスト放出量の空間分布はおおむね同様であるが、特にモンゴルと内モンゴル地域の南東部等のエリアにおいて、Control実験はDL runよりも $1000 \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上高いダスト発生量となっている。枯れ草量はモンゴル東部において多くなっているが、この事例では南部の強風域で大部分のダストが発生するため、枯れ草の影響は内モンゴル南部で重要となっている。



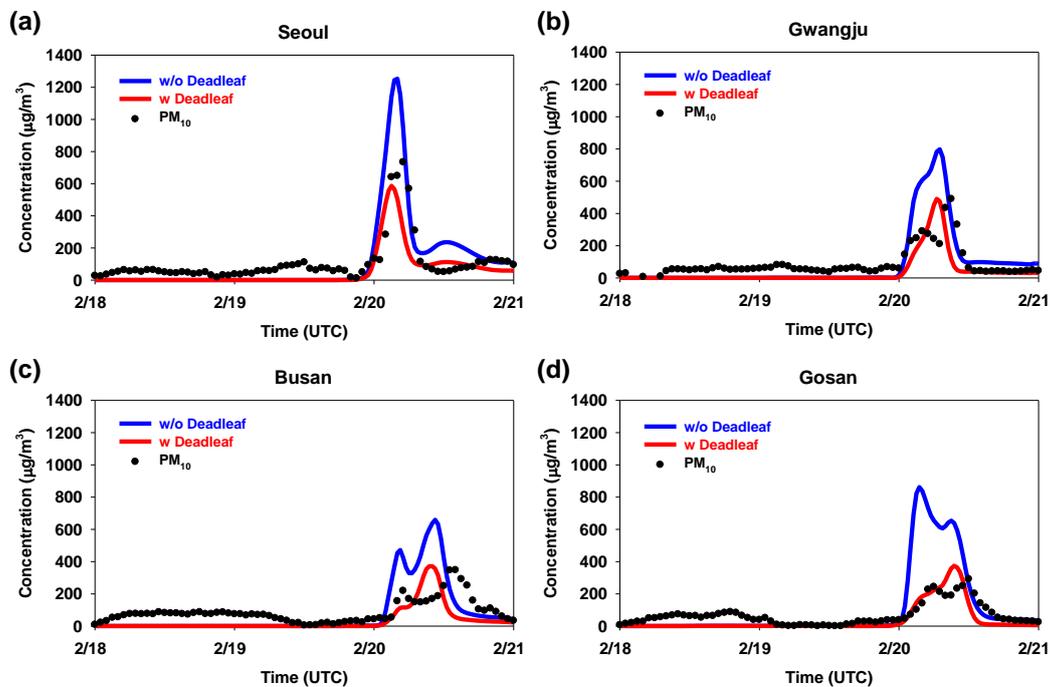
図(2)-13 (a)Control 実験と(b)DL run のダスト放出量および地上 10 m 風速の分布  
(c)Control 実験と DL run のダスト放出量と差分

図(2)-13(c) は、韓国における PM10 濃度観測データと、シミュレーションによるダスト濃度を比較したものである。シミュレーションでは、Control 実験および DL run とともに、ダストイベントの始まるタイミングをよく再現している。しかしながら、Control 実験は PM10 濃度を過大評価しているのに対して、DL run のモデル濃度は、観測データと非常によく一致しており、ダスト発生量モデルへの枯れ草影響のパラメタリゼーションがモデル結果を向上させることを示唆している。

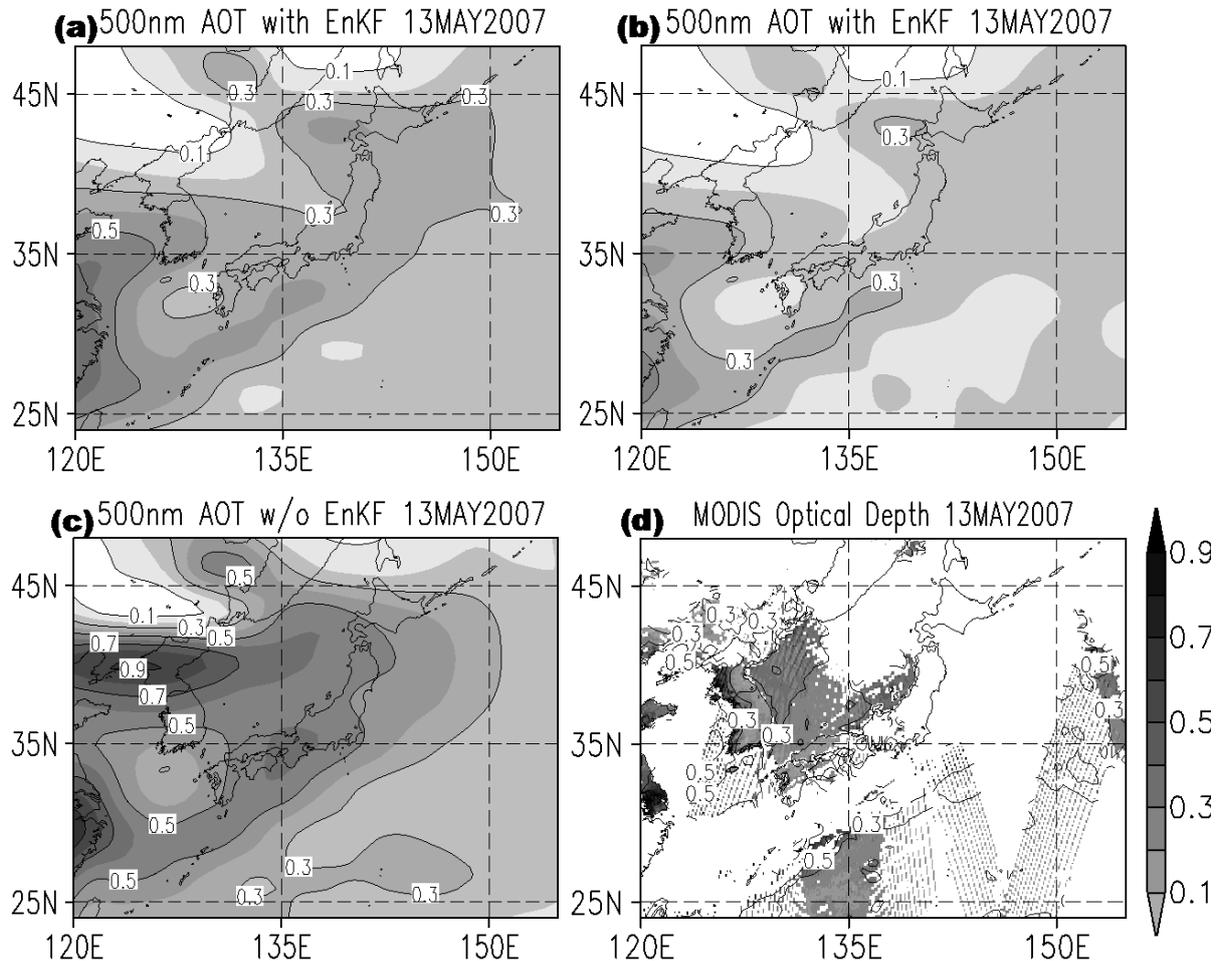
### (3) データ同化によるモデル改良

#### 1) NIES ライダーデータを用いた黄砂同化システムの開発

我々は日本での黄砂被害が多発した 2007 年春を再現するデータ同化実験を繰り返し、黄砂シミュレーションモデル MASINGAR の誤差情報およびバイアス情報を集めた。これらの解析結果はデータ同化を行わないフリーモデルによる予測結果に比べて大幅に精度が改善されていることが確認された (図(2)-14)。図(2)-15 は 2007 年 5 月 13 日におけるエアロゾル光学的厚さ (AOT) の比較を示している。国立環境研究所の東アジアライダーネットワークの観測値をアンサンブル・カルマン・フィルタによってデータ同化した結果と共に、CALIPSO 衛星搭載ライダーの観測値を同様にデータ同化した結果も示している。また、比較対象として独立観測の MODIS/NASA からリトリブされた AOT も掲げられている。ここで、データ同化無しのモデル結果で見られる朝鮮半島根元付近の高い AOT 領域は MODIS 観測では見られず、不自然さを拭えない。一方、この不自然な AOT 領域はデータ同化の結果では消失しており、日本列島上空でも MODIS 観測値に近い AOT の分布がデータ同化で得られている。ただし、CALIPSO ライダーのデータ同化結果と国立環境研究所ライダーネットワークのデータ同化結果では、AOT の分布は類似しているが、その濃さに差が見られる。現在のところ、国立環境研究所ライダーネットワークデータのみをデータ同化に使った場合、CALIPSO 搭載ライダー観測データを併用してデータ同化した場合に比べて黄砂濃度解析値にネガティブバイアスがかかってしまう傾向が若干であるが見られる。このようにデータ同化によって得られた黄砂の解析情報からモデルシミュレーションの誤差が定量的に見積もられ、その分布や時間変動が把握できた。これらの誤差情報はモデルの精度向上に役立てられる。



図(2)-14 枯れ草の効果を考慮したシミュレーション (赤) および考慮しないシミュレーション (青) と PM10 濃度観測データとの比較



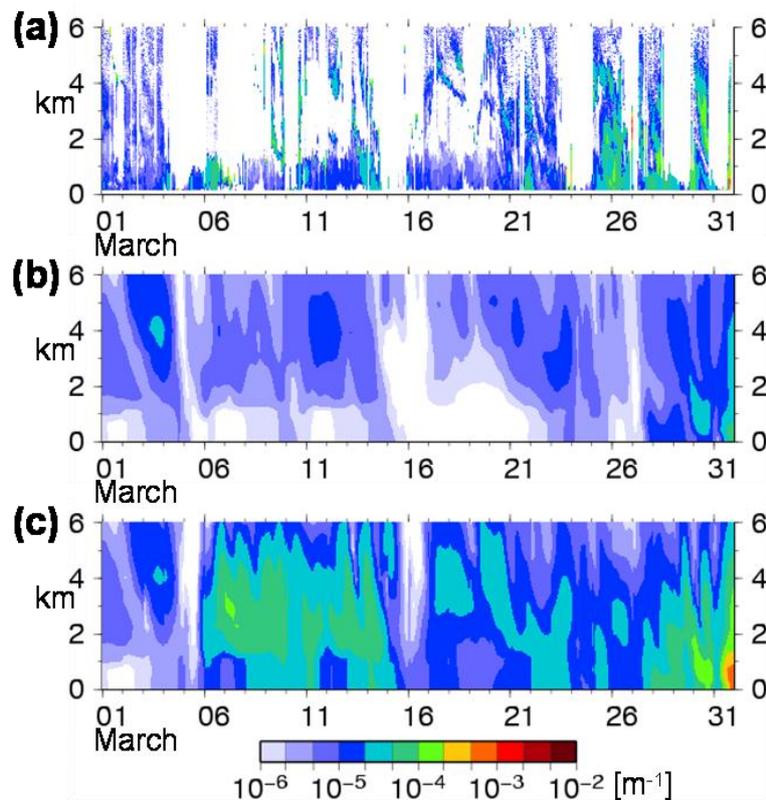
図(2)-15 2007年5月13日におけるエアロゾル光学的厚さ（AOT）の比較

(a)CALIPSO 衛星搭載ライダーの観測値をアンサンブル・カルマン・フィルタによってデータ同化した結果、(b)国立環境研究所の東アジアライダーネットワークの観測値を同様にデータ同化した結果、(c)データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(d)MODIS/NASAの観測値。濃淡が濃いほど AOT の値が高く、エアロゾルの鉛直積算量が多い。データ同化無し(c)で見られる朝鮮半島の根元付近の高い AOT 領域は実観測値(d)では見られず不自然なシミュレーション結果である。この不自然な領域はデータ同化の結果(a)および(b)では消失し、日本列島上空でも実観測値に近い AOT の分布が得られている。しかし、CALIPSO ライダーのデータ同化結果と国立環境研究所ライダーネットワークのデータ同化結果では、AOT の分布は類似しているが、その濃さに差が見られる。

## 2) 黄砂シミュレーションにおける誤差原因の検証

図(2)-16 は 2007 年 3 月における長崎県長崎市上空ダスト消散係数の比較である。(a)は国立環境研究所の NIES ライダーネットワークによって得られた観測値、(b)はデータ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(c) は CALIPSO 観測のデータ同化によって積雪および土壌水分量に関わるパラメータの最尤推定を行い、その推定結果を用いて黄砂シミュレーションを再度

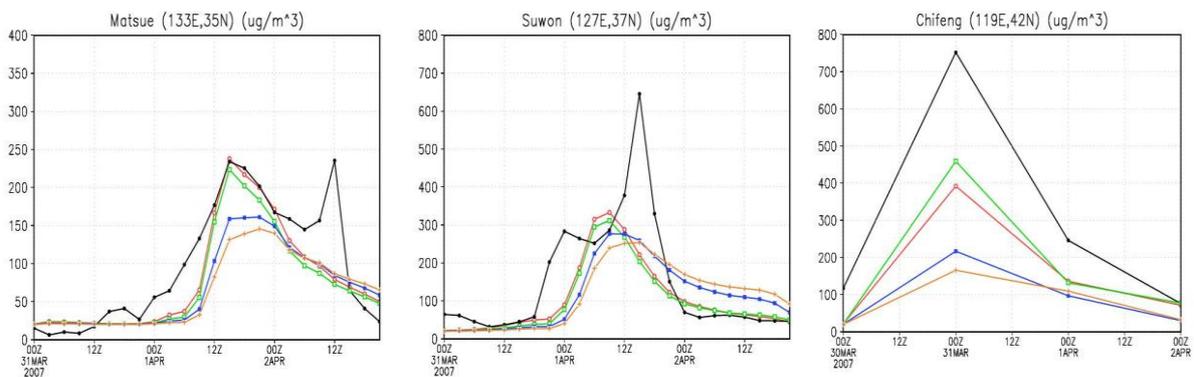
行った結果である。データ同化前は残念ながら黄砂の日本への到来がほとんど再現できていないが、データ同化後は多くの黄砂到来が再現されている。特に3月6～15日、19～22日、27～30日のプルームは独立観測（NIES ライダーネットワーク観測）とデータ同化による修正結果が極めて良い一致を見せている。これはデータ同化によって黄砂放出量に関わるパラメータが最尤推定されて放出量再現精度が向上したため、発生域において現実に近い黄砂放出が再現できたからと思われる。この実験結果によって、早春におけるダスト濃度の解析誤差は積雪とその融雪による土壌水分量の不確実性に大きく起因することが確認できた。また、ここで得られたパラメータの最尤推定値によって黄砂シミュレーションモデルの改良を行うことができた。



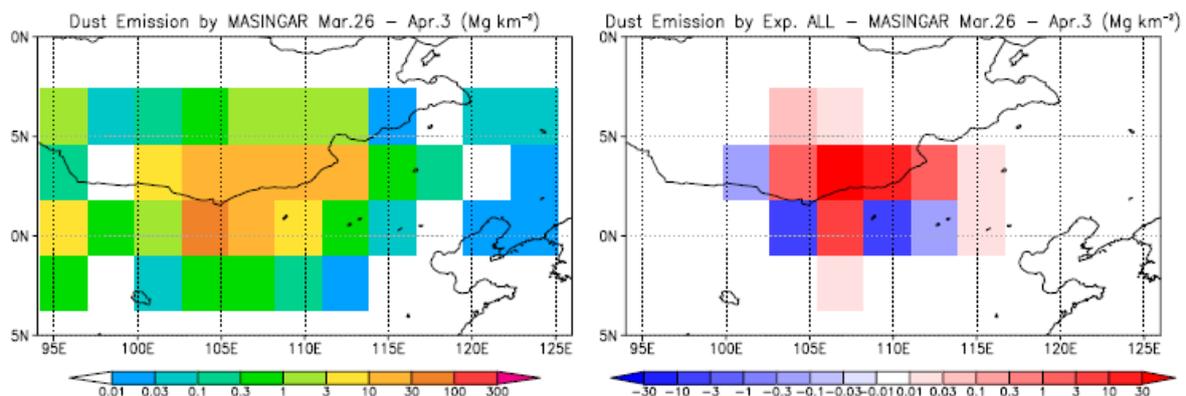
図(2)-16 2007年3月における長崎県長崎市上空ダスト消散係数の比較。(a)国立環境研究所のライダーネットワークによって得られた観測値、(b)データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(c)CALIPSO観測のデータ同化によって積雪および土壌水分量に関わるパラメータの最尤推定を行い、その推定結果を用いて黄砂シミュレーションを再度行った結果。横軸は日付、縦軸は高度である。(a)は偏光解消度を用いてダストのシグナルを取り出している。消散係数が大きいと一般的にダスト濃度が高い。データ同化前 (b)では黄砂の到来がほとんど再現できていないが、データ同化後 (c)ではほとんどの黄砂到来が再現されている（特に3月6～15日、19～22日、27日以降のプルームの再現性向上で顕著）。初春の黄砂発生域は積雪や土壌水分量が多く、黄砂の発生をモデル単独で再現することが難しい。一方(c)では、データ同化によって黄砂放出量が逆推定されて放出量再現精度が向上したため、実観測値に非常に近い黄砂濃度が再現できている。

#### (4) 逆解析による黄砂の放出量解析

逆解析後の各観測地点におけるPM10濃度を逆解析に用いなかった地点のデータを用いて検証した(図(2)-17)。その結果、逆解析に用いる観測データが増えることに応じて解析値も観測値に近くなる傾向が見られた。観測ネットワーク毎に考えると、韓国の観測データの寄与が大きかった。これは、観測値点数が比較的多かったことや黄砂発生源に近いことなどが理由として考えられる。次に、黄砂放出量の逆解析を行わなかった黄砂予測モデル(標準実験)に対する修正量を計算した(図(2)-18)。ゴビ砂漠中央から東部の中国・モンゴル国境付近で標準実験の放出量を大きく上方修正している。この傾向は利用する観測ネットワークや各種感度実験でもほぼ同様の結果が得られた。今回の観測データはゴビ砂漠以東の観測データが中心であったため(図(2)-1参照)、ゴビ砂漠中部以西の解析は難しかったものと推察できる。全期間(2007年3月26日~4月3日)のゴビ砂漠周辺の黄砂放出量は標準実験が19.5 Tgであったのに対して、全観測データを利用した場合23.4~42.7 Tgと放出量を上方修正している。一方、解析された総放出量は黄砂放出量の第一推定値や利用した観測ネットワークにも敏感であり、さらなる観測網の充実が必要であることも分かった。これらの結果は、同期間の黄砂放出量を衛星データとアンサンブル・カル



図(2)-17 PM10濃度の独立観測値(黒)との比較。オレンジが標準実験(逆解析なし)、緑がアジア大気汚染研究センター(日本)と韓国気象研究所(韓国)の観測データを用いた逆解析、赤が韓国のみ、青が日本をみの観測データを用いた逆解析の結果を示す。



図(2)-18 黄砂予測モデル標準実験における2007年3月26日から4月3日にかけての黄砂総放出量(左図、単位:  $\text{Mg km}^{-2}$ )と全観測データを利用した逆解析による修正量(右図、単位:  $\text{Mg km}^{-2}$ )

マン・フィルタで解析した結果とも整合的であり、本手法が黄砂放出量の定量的な解析に有効な技術であることを示すことができた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究は、気象庁の黄砂予測業務に用いられている全球黄砂予測モデル MASINGAR の黄砂予測精度の向上を目的とした研究であり、その目的に向け様々な研究アプローチを積み重ね、結果として着実な研究成果を挙げることができた。今後、NIES のライダーネットワークデータを準リアルタイムで利用することにより、気象庁の黄砂予測業務の高度化を可能とする技術的基盤を作った点で、本研究は意義深い。本研究の科学的意義は以下の通りである。

- 1) 黄砂発生モデルの境界条件である黄砂の鉛直フラックスのモデルを直接検証するデータは、世界的にもほとんど得られておらず、今回オーストラリアの砂漠で得られた飛砂と黄砂の鉛直プロファイル精密観測データから粒径毎の飛砂フラックスと黄砂の鉛直フラックスを気象要素と同時にデータセットとして整備した。
- 2) 今回、これらの検証用フラックスデータセットを用いて、黄砂発生モデル間の詳細な比較と観測との検証を行った結果、ダスト発生過程におけるパラメータ設定の改良の基となる基礎的データを得ることができた。また、ここで得られた黄砂シミュレーションの誤差情報すなわちダスト地表面フラックス補正に関する情報は黄砂研究における基礎データの一つとなる。また、モンゴルの半乾燥草地においても同観測システムを用いて、黄砂の飛散における植生の影響を評価できる黄砂と飛砂のフラックスを高い時間分解能で取得することが可能となった。
- 3) ライダー観測を直接データ同化するシステムの開発に成功したのは我々の研究グループが世界で最初であり、現在も唯一のグループである。ここで開発された技術は黄砂だけでなく他のエアロゾルの研究解析にも強力なツールとしてそのまま利用可能である。また、このデータ同化システムで得られた黄砂の大気中濃度解析値は黄砂予報における高精度な初期値として利用可能である。
- 4) MASINGAR の高精度化は、同モデルが地球システムモデルのエアロゾル過程モデルとして活用されるため、地球システムモデルの高精度化にも寄与する。

本研究成果として得られた全球エアロゾルモデルの輸送沈着過程の精度向上、および放出過程の高度化は、黄砂予報精度の向上に寄与すると共に、気候変動予測実験の精度向上においても重要である。また、ダストエアロゾルのデータ同化は本庁現業業務（黄砂情報提供）の精度向上に大きく寄与すると考えられる。ライダー観測で得られた減衰後方散乱係数や偏光解消度を直接データ同化することに成功したのは我々の研究グループが世界で最初であり、現在においてもデータ同化システムによってライダー観測のリトリブ処理を行うことのできる唯一のグループであり、本課題研究グループは ECMWF と並んで最先端の技術力を維持している。また、ここで得られた黄砂濃度の解析値は黄砂研究における基礎データとなるだけでなく、黄砂予報における初期値として利用可能である。

さらに、これまでに推定が困難であった黄砂放出量について、逆解析を用いても合理的な推定が可能であることを明らかにすることができた。黄砂放出量推定の高精度化には日中韓における観測データ共有の強化が必要であることも示された。本研究で技術開発した黄砂逆解析手法は、

黄砂の放出源評価を通じて気象庁の黄砂予測精度向上に寄与できる。また、ここで開発された技術は黄砂だけでなく他の大気汚染物質にも応用可能なツールであり、モデルと観測を融合する基礎技術として非常に有用である。また、本技術は放出源が比較的限定されている現象（原発事故、火山等）における放出量の推定にも有効であり、応用例として、国内ではまだ例がない福島原子力発電所からの放射性物質の数理統計解析を実施することを可能とする技術基盤をも本研究で確立することができた。

## （２）環境政策への貢献

本課題の研究成果やデータは TEMM 内で合意された黄砂国際共同研究に直接的な貢献ができる。NIES 型ライダーネットワークデータを用いた黄砂予報モデルのデータ同化技術は、黄砂問題に悩む中国、韓国のほかモンゴルにとっても有用な成果である。国内においても、本研究の成果である高精度黄砂予報モデルと影響被害に関する研究結果を活用し、今後、気象庁・環境省共同運営の黄砂情報ホームページの質的向上を通じて環境政策への貢献に努める。

本研究で得られたダスト発生過程モデルを基に、気象研究所の全球ダスト予測モデル MASINGAR のダスト発生過程の実装を現在進めている。このモデルは、気象庁において次期更新される黄砂予測数値モデルとして用いるため、現在気象庁本庁と共同して開発作業を開始する予定であり、気象庁・環境省共同運営の黄砂情報ホームページの黄砂予報情報の質的向上を通じ、黄砂に係わる我が国国民への高精度の予測情報の提供により、環境政策へ貢献する技術基盤を確立した。

本研究で開発された NIES 型ライダーネットワークデータを用いた黄砂予報モデルのデータ同化技術は、我が国国内の黄砂予報の精度向上のために活用されると共に、黄砂問題に悩む中国、韓国のほかモンゴルにとっても今後有用な技術として活用可能である。

また本研究成果によって得られたシミュレーションの誤差情報すなわちダスト地表面フラックス補正に関する情報は、モデルの再現性向上による黄砂予報精度の向上に活用可能であり、これにより気象庁および環境省における黄砂情報提供サービスの向上に寄与することができる。

さらに、本研究成果として得られた黄砂の発生源・発生量の解析値情報は、東アジア各国での黄砂被害対策・砂漠化対策などの基礎資料として用いることができる。また、本研究で開発された逆解析手法による黄砂発生源・発生量情報の高精度化のためには、関係諸国の観測データ共有が有効であることが示された。これは、TEMM の下における東アジア各国の黄砂データの共有化を図る上で大きな技術的背景となる知見であり、東アジア各国の環境施策の推進への間接的寄与となるものである。

## 6. 国際共同研究等の状況

（１）アンサンブル・カルマン・フィルタを用いたデータ同化の大気化学への応用に関する研究。

カウンターパート：三好建正（米国メリーランド大学准教授）。連携状況：データ同化システムの共同開発。国際的な位置づけ：研究者ベースでの共同研究。

（２）黄砂発生理論及びモデル化に関する研究。カウンターパート：Yaping Shao（ドイツ・ケルン大学教授）。連携状況：黄砂発生スキームの開発。国際的な位置づけ：研究者ベースでの共同研究。

- (3) エアロゾル予測のための国際協調 (International Cooperative for Aerosol Prediction, ICAP)。  
 カウンターパート：Jeff Ried (米国海軍研究所)、Angela Benedetti, Miha Razinger (ヨーロッパ中期気象予報センター)、Peter Colarco (NASA GSFC)、Sarah Lu (米国環境予測センター研究官・米国) ほか。連携状況：現業向けエアロゾル予報モデルの開発協力・エアロゾルの観測可能性・予測の検証・アンサンブル予測・モデル間相互比較に関する情報交換。国際的な位置づけ：研究者ベースでの共同研究。
- (4) 日中韓黄砂共同研究。カウンターパート：Y. S. Chun (韓国気象庁)、Wang (中国環境監視センター)、西川雅高 (国立環境研究所)。連携状況：観測データ共有ならびにこのデータを用いたデータ同化解析。国際的な位置づけ：日中韓環境大臣会合の合意を経て設置。
- (5) 世界気象機関 (WMO) 砂塵嵐警戒評価システム (SDS-WAS)。カウンターパート：Nickovic (WMO 事務局)、Zhang (中国気象局)、Park (ソウル大)、杉本信夫 (国立環境研究所)。連携状況：観測データ並びに予測データの共有システムの構築中。国際的な位置づけ：WMO の計画として承認。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi: Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 39-49 (2010)  
 “Data assimilation of CALIPSO aerosol observations”
- 2) Maki T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama and M. Mikami: SOLA, 7A, 21-24 (2011)  
 “The Impact of Ground-Based Observations on the Inverse Technique of Aeolian Dust Aerosol”
- 3) Tanaka T. Y., T. T. S Sekiyama, T. Maki, and M. Mikami: SOLA, 7A, 36-39, (2011)  
 “The effects of snow cover and soil moisture on Asian dust: I. A Numerical Sensitivity Study”
- 4) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, T. Maki and M. Mikami: SOLA, 7A, 40-43 (2011)  
 “The Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation”

<その他誌上発表 (査読なし)>

- 1) Mikami M., T. MAKI and T.Y. TANAKA : Earth and Environmental Science, 7, 1-6 (2009)  
 doi:10.1088/1755-1307/7/1/012010  
 “Dust forecasting system in JMA”
- 2) 三上正男：雪氷、71, 91-103 (2009)  
 「ウインドエロージョン研究の変遷と現状」
- 3) 岩坂泰信、西川雅高、山田丸、洪天祥 編：黄砂、古今書院、31-36 (2009)  
 「3.1 節 黄砂の予報 (執筆担当：田中泰宙)」
- 4) 日本気象学会第 44 回夏季大学「新しい気象学」講義テキスト(2010)  
 「大気微量成分のデータ同化 (関山剛)」
- 5) 日本気象学会関西支部第 33 回夏季大学「最新の衛星観測」講義テキスト(2011)  
 「エアロゾルを宇宙から観る (関山剛)」

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Tanaka T. Y., T. Sakami, S. Yukimoto and M. Deushi: 4th Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, 92 (2009)  
“DEVELOPMENT OF AN AEROSOL MODULE IN AN EARTH SYSTEM MODEL FOR GLOBAL WARMING PREDICTION”
- 2) Mikami M., M. Ishizuka, J. Leys, and Y. Shao: International Workshop on “Mineral Aerosol and Its Impacts on Climate and Environment” (2009)  
“Towards the improvement of dust model -Introduction to DEMI experiment-”
- 3) Sugimoto N. and M. Mikami: Proceedings of the workshop on the implementation of the WMO SDS-WAS Asia Node, 8 (2009)  
“Current aerosol observation network operated by Japan”
- 4) Mikami M.: Proceedings of the workshop on the implementation of the WMO SDS-WAS Asia Node, 20 (2009)  
“SDS-WAS user interface of JMA”
- 5) Mikami M.: Proceedings of Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, 91 (2009)  
“TOWARDS THE UNDERSTANDING OF ASIAN DUST : ITS PHYSICS, MODELING, AND ROLES IN THE ATMOSPHERE AND CLIMATE SYSTEM”
- 6) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi: Proceedings of Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, S3-22 (2009)  
“DATA ASSIMILATION OF CALIPSO AEROSOL OBSERVATIONS USING AN ENSEMBLE KALMAN FILTER”
- 7) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi: IAMAS-IAPSO-IACS 2009 Joint Assembly (MOCA-09), J21.11/24417 (2009)  
“Aerosol Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter Using CALIPSO and Ground-Based Lidar Observations”
- 8) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi: The Fifth WMO Symposium on Data Assimilation, 138 (2009)  
“Aerosol Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter Using CALIPSO and Ground-Based Lidar Observations”
- 9) 関山剛、田中泰宙、清水厚、三好建正：第15回大気化学討論会 (2009)  
「ライダーによるエアロゾル観測をアンサンブル・カルマン・フィルタでデータ同化する」
- 10) 眞木貴史、関山剛、柴田清孝、宮崎和幸、三好建正、岩崎俊樹：日本気象学会 2010 年度春季大会 (2009)  
「アンサンブルカルマンフィルタを用いた炭素循環解析システムの構築」
- 11) Mikami M.: 2010 Kochi International Workshop on Paleo, Rock and Environmental Magnetism -Asian Monsoon and Global Climate Change, 7 (2010)  
“Emission, Transport, and Deposition Processes and its Interaction with the Atmosphere and the Climate System, Aeolian Dust”

- 12) Sekiyama T. T. and T. Y. Tanaka: EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria (2010)  
“Dust aerosol analysis and prediction with 4D-EnKF data assimilation”
- 13) 三上正男、石塚正秀、Yaping Shao、山田豊、John Leys : 日本気象学会 2010 年度春季大会 (2010)  
「JADE IOP 期間中の休耕農地における飛砂フラックスデータの作成」
- 14) 石塚正秀、三上正男、山田豊、Yaping Shao、John Leys : 日本気象学会 2010 年度春季大会 (2010)  
「JADE IOP 期間中の OPC を用いた休耕地におけるダストフラックスの観測」
- 15) 関山剛、田中泰宙、清水厚、三好建正 : 第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2010)  
「大気エアロゾルのデータ同化」
- 16) 三上正男、石塚正秀、山田豊、John Leys、Yaping Shao : 第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2010)  
「オーストリア JADE IOP における休耕地上の飛砂飛散フラックス」
- 17) 石塚正秀、三上正男、山田豊、John Leys、Yaping Shao : 第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2010)  
「オーストラリア JADE IOP における休耕地上のダストフラックス」
- 18) 長田和雄、三上正男、的場澄人、青木一真、篠田雅人、黒崎泰典、林政彦、清水厚、田中泰宙、香川雅子、浦幸帆、植松光男 : 第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2010)  
「ダスト沈着量の季節変化と水平分布」
- 19) 田中泰宙、ダスト沈着ネットワークグループ : 第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2010)  
「ダストエアロゾル沈着ネットワークと数値シミュレーションの比較実験」
- 20) 関山剛、田中泰宙、清水厚、三好建正 : 第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会 (2010)  
「大気エアロゾルのデータ同化」
- 21) Ishizuka M., M. Mikami, Y. Yamada: Proceedings of ICAR7 (2010)  
“DEVELOPMENT OF NEW SAND PARTICLE COUNTER AND ITS CALIBRATION IN A WIND TUNNEL EXPERIMENT”
- 22) Shao Y., M. Ishizuka, M. Mikami, J. F. Leys: Proceedings of ICAR7 (2010)  
“SIZE-RESOLVED DUST EMISSION SCHEME AND VALIDATION WITH FIELD MEASUREMENTS”
- 23) Sekiyama T. T.: The Second GAW Aerosol Lidar Observation Network (GALION) Workshop at the WMO Headquarters in Geneva, Switzerland (2010)  
“Aerosol Data Assimilation with Lidar Observations and Ensemble Kalman Filter”
- 24) Sekiyama T. T. and T. Y. Tanaka: 9th AeroCom Workshop, University of Oxford, U.K. (2010)  
“Dust analysis and prediction with ensemble-based data assimilation”
- 25) Tanaka T. Y. and MRI Earth System Modelling Group: AeroCom 2010 workshop, Oxford University, U.K. (2010)  
“Development of an Aerosol Model in the Earth System Model of Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency”

- 26) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka: The Second International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) Workshop, University of Oxford, England (2010)  
“Overview – MRI/JMA - Asian Dust Simulation, Prediction, and Verification”
- 27) 三上正男、長田和雄、清水厚、関山剛、田中泰宙：日本気象学会 2010 年度秋季大会 (2010)  
「ダストの発生・輸送・沈着過程の観測・解析・モデリング」
- 28) 石塚正秀、三上正男、山田豊、E. Munkhtsetseg、篠田雅人：日本気象学会 2010 年度秋季大会 (2010)  
「モンゴル半乾燥草地における 10 メートル観測塔のダスト濃度の予備観測」
- 29) Kang J.-Y., M. Mikami, Y. Shao, S.-C. Yoon, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama: 日本気象学会 2010 年度秋季大会 (2010)  
“Comparison of different dust emission schemes by implementing them into WRF/Chem”
- 30) 田中泰宙、ダスト沈着ネットワークグループ：日本気象学会 2010 年度秋季大会 (2010)  
「乾性・湿性別観測との比較による全球ダストモデルの改良」
- 31) 眞木貴史、関山剛、柴田清孝、宮崎和幸、三好建正、山田和孝、岩崎俊樹：日本気象学会 2010 年度秋季大会 (2010)  
「炭素循環解析への GOSAT 観測データの利用について」
- 32) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi: AGU Fall Meeting 2010, San Francisco, USA (2010)  
“Dust Aerosol Analysis and Prediction with Lidar Observations and Ensemble Kalman Filter”
- 33) Maki T., T. T. Sekiyama, K. Shibata, K. Miyazaki, T. Miyoshi, K. Yamada and T. Iwasaki : AGU Fall Meeting 2010, San Francisco, USA (2010)  
“Constructing a Carbon Cycle Analysis System with the Local Ensemble Transform Kalman Filter and Online Transport Model”
- 34) 三上正男、眞木貴史、田中泰宙、関山剛：環境研究成果発表会 (2011)  
「黄砂予測モデルの高度化に向けて」
- 35) American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, USA (2011)  
“Modeling study of Asian dust: Assessment of various dust emission schemes using WRF/Chem”
- 36) Tanaka T. Y.: Fifth Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, Busan, Korea (2011)  
“Numerical simulation of the seasonal variation of elevated dust aerosol from Taklimakan desert”
- 37) Sekiyama T. T.: The Third International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) Workshop, University of Colorado, Boulder, CO, USA (2011)  
“Fundamentals of Ensemble Kalman Filter in an operational system”
- 38) Sekiyama T. T.: Seminar at the School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, South Korea (2011)  
“Data Assimilation of Lidar Aerosol Observations”
- 39) Maki T., T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, M. Mikami: Fourth Meeting of Working Group I for Joint Research on Dust and Sand Storms, Beijing (2011)  
“The Dust Modeling Research Activities in Meteorological Research Institute”

- 40) 田中泰宙、猪俣弥生、五十嵐康人、梶野瑞王、眞木貴史、関山剛、三上正男、千葉長：日本気象学会 2011 年度秋季大会 (2011)  
「気象研究所全球モデルによる放射性物質輸送シミュレーションの現状と課題点」
- 41) 眞木貴史、関山剛、田中泰宙：日本農業工学会第 27 回シンポジウム・日本学術会議公開シンポジウム「地球環境・気候変動と農業環境工学」 (2011)  
「数値モデルを用いた地球環境解析」
- 42) 眞木貴史、梶野瑞王、田中泰宙、関山剛、千葉長、五十嵐康人、三上正男：日本気象学会 2011 年度秋季大会 (2011)  
「逆解析を用いた放射線放出量推定システムの構築」
- 43) 三上正男：第 30 回混相流シンポジウム (2011)  
「砂塵嵐の観測・物理・モデリング」
- 44) 三上正男、眞木貴史、関山剛：環境観測衛星シンポジウム (2011)  
「数値モデル・衛星が一体となった大気環境の実況・予測の高度化」
- 45) Kang J.-Y., M. Mikami, Y. Shao, S.-C. Yoon, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama: Goldschmidt 2011 Conference, Prague, Czech Republic (2011)  
“Validation of saltation flux parameterization with observation”
- 46) Kang J.-Y., M. Mikami, Y. Shao, S.-C. Yoon, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama: 10th AeroCom workshop, Kyushu University, Fukuoka, Japan (2011)  
“Simulation of Asian dust aerosol using three different dust emission schemes”
- 47) Sekiyama T. T. and T. Y. Tanaka: 10th AeroCom Workshop, Kyushu University, Fukuoka, Japan (2011)  
“Object-Based Verification of Aerosol Simulations”
- 48) Sekiyama T. T., T. Y. Tanaka, T. Maki and M. Mikami: 5th Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, BEXCO, Pusan, South Korea (2011)  
“Asian Dust Emission Estimated by Ensemble Data Assimilation of Satellite-Borne Lidar Observation”
- 49) 田中泰宙、Jung-Yoon Kang、関山剛、眞木貴史、三上正男：日本気象学会 2011 年度春季大会 (2011)  
「全球エアロゾルモデルによる黄砂予測シミュレーションの精緻化」
- 50) 田中泰宙、関山剛、Jung-Yoon Kang、眞木貴史、三上正男：日本気象学会 2011 年度秋季大会 (2011)  
「次期全球エアロゾル予測モデルの開発：エアロゾル予測の高度化に向けて」
- 51) 眞木貴史、田中泰宙、関山剛、三上正男：日本気象学会 2011 年度春季大会 (2011)  
「逆解析を用いた黄砂放出量解析手法の開発」
- 52) 猪俣弥生、五十嵐康人、直江寛明、高橋宙、清水厚、杉本伸夫、田中泰宙：「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」シンポジウム (2012)  
「関東平野へのダスト流入に山岳遮蔽効果と局地前線が及ぼす影響」

**(3) 出願特許**

特に記載すべき事項はない。

**(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）**

特に記載すべき事項はない。

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

- 1) NHK 教育「サイエンス ZERO」（平成 21 年 5 月 30 日放送「黄砂 その知られざる素顔に迫る」三上正男：専門家ゲスト、田中泰宙：取材協力）
- 2) NHK 教育「サイエンス ZERO」（平成 21 年 7 月 4 日放送「ZERO スペシャル・砂 その不思議に迫る」三上正男：コメンテーター）
- 3) NHK BS プレミアム「体感！グレートネイチャー」（平成 23 年 6 月 11 日放送「“黒い嵐”を追跡せよ～モンゴル・ゴビ砂漠～」三上正男：出演、コメンテーター）
- 4) NHK BS1 「ワールド WAVE モーニング」（平成 24 年 4 月 9 日放送「黄砂研究 最前線」三上正男：コメンテーター）

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

- 1) T. Y. Tanaka, K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka: *Pap. Meteor. Geophys.*, 53(4), 119–138 (2003)  
“MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description”
- 2) T. Y. Tanaka and M. Chiba: *J. Meteor. Soc. Japan*, 83A, 255–278 (2005)  
“Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR”
- 3) Owen, P. R.: *J. Fluid. Mech.*, 20, 225–242 (1964)  
“Saltation of uniform grains in air”
- 4) White, B. R.: *J. Geophys. Res.*, 84, 4643–4651 (1979)  
“Sand transport by winds on Mars”
- 5) Marticorena, B. and G. Bergametti: *J. Geophys. Res.*, 100, 16415–16430 (1995)  
“Modeling the atmospheric dust cycle: 1. design of a soil-derived dust emission scheme”
- 6) Lu, H., and Y. Shao: *J. Geophys. Res.*, 104(16), 827–16, 842, doi:10.1029/1999JD900169 (1999)  
“A new model for dust emission by saltation bombardment”
- 7) Y. Shao: *J. Geophys. Res.*, 109, D10202, doi:10.1029/2003JD004372 (2004)  
“Simplification of a dust emission scheme and comparison with data”
- 8) Han, L., A. Tsunekawa, and M. Tsubo: *Geomorphology*, 129, 412–416 (2011)  
“Effect of frozen ground on dust outbreaks in spring on the eastern Mongolian Plateau”

- 9) Kang, J.-Y., S.-W. Kim, and S.-C. Yoon: *J. of Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(1), 1-11 (in Korean with English abstract) (2012)  
“Estimation of dust emission schemes and input parameters in wintertime Asian dust simulation”
- 10) Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock, and B. Eder: *Atmos. Environ.*, 39, 6957-6975 (2005)  
“Fully coupled “online” chemistry within the WRF model”
- 11) World Meteorological Organization: *Manual on Codes*. Vol. 1, WMO Publ., 306, 492pp (1995)
- 12) Kang, J.-Y., S.-C. Yoon, Y. Shao, and S.-W. Kim: *J. Geophys. Res.*, 116, D09202, doi:10.1029/2010JD014649 (2011)  
“Comparison of vertical dust flux by implementing three dust emission schemes in WRF/Chem”
- 13) Y. Kurosaki, and M. Mikami: *J. Geophys. Res.*, 112, D17202, doi:10.1029/2006JD007988 (2007)  
“Threshold wind speed for dust emission in east Asia and its seasonal variations”
- 14) Zou, X. K., and P. M. Zhai: *J. Geophys. Res.*, 109, D03104, doi:10.1029/2003JD003913 (2004)  
“Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China”
- 15) R. Kimura and M. Shinoda: *Geomorphology*, 119, 315-329 (2010)  
“Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia”
- 16) Y. Kurosaki, M. Shinoda, and M. Mikami: *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11702, doi:10.1029/2011GL047494(2011)  
“What caused a recent increase in dust outbreaks over East Asia?”
- 17) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi: *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 39-49 (2010)  
“Data assimilation of CALIPSO aerosol observations”
- 18) K. R. Gurney, R. M. Law, A. S. Denning, P. J. Rayner, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. H. Chen, P. Ciais, S. Fan, I. Y. Fung, M. Gloor, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, P. Peylin, M. Prather, B. C. Pak, J. Randerson, J. Sarmiento, S. Taguchi, T. Takahashi, C. W. Yuen: *Nature*, 415, 626-630 (2002)  
“Towards robust regional estimates of CO<sub>2</sub> sources and sinks using atmospheric transport models”
- 19) D. F. Baker, R. M. Law, K. R. Gurney, P. Rayner, P. Peylin, A. S. Denning, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. -H. Chen, P. Ciais, I. Y. Fung, M. Heimann, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, M. Prather, B. Pak, S. Taguchi, and Z. Zhu: *Global Biogeochem. Cycles*, 20(1) (2006)  
“TransCom 3 inversion intercomparison : Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO<sub>2</sub> fluxes 1988-2003”
- 20) Shao, Y.: *Bound. Layer Meteor.*, 115, 319-338 (2005)  
“A similarity theory for saltation and application to aeolian mass flux”
- 21) Shao, Y. and M. Mikami: *Bound. Layer Meteor.*, 115, 359-379 (2005)  
“Heterogeneous Saltation: Theory, Observation and Comparison”
- 22) Gillette, D. A., and R. Passi: *J. Geophys. Res.*, 93, 14,233-14,242 (1988)  
“Modeling dust emission caused by wind erosion”
- 23) Nickling, W. G.: *J. Sediment. Petrol.* 53:1011-1024(1983)  
“Grain-size characteristics of sediment transported during dust storms”

### (3) 風送ダストによる健康影響評価に関する疫学及び動物実験学的検証研究

大分県立看護科学大学

看護学部 人間科学講座 生体反応学研究室 市瀬孝道・吉田成一・定金香里

<研究協力者>

国立病院機構福岡病院 内科・アレルギー科	岸川禮子
東京慈恵会医科大学 耳鼻咽喉科学講座	今井 透
産業医科大学 医学部 名誉教授	嵐谷奎一
産業保健学部・環境マネジメント学科	秋山幸雄
大分県立看護科学大学 看護学部 人間科学講座	He Miao

平成21～23年度累計予算額：23,970千円（うち、平成23年度予算額：7,915千円）

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 風送黄砂のアレルギーへの影響を、マウスを用いた気管支喘息とスギ花粉症モデルにて検討した結果、これらの病態が風送黄砂によって増悪されることが明らかとなった。風送黄砂の肺炎桿菌による肺の炎症増悪作用調べた結果、風送黄砂は肺の炎症を増悪させたことから黄砂は自然免疫を活性化させることが明らかとなった。2010年と2011年に北九州地域において黄砂の健康影響調査を行った結果、黄砂飛来時に花粉症や気管支喘息等のアレルギーの有無を問わず、眼、鼻、咽頭や下気道に影響があることが明らかとなった。本研究において動物実験と疫学調査の両面から黄砂の健康影響を明らかにした。

**【キーワード】** 風送黄砂、スギ花粉症、アレルギー増悪、黄砂付着細菌、感染実験、疫学調査

#### 1. はじめに

中国内陸部・モンゴルを発生源とする黄砂現象は、今や東アジア一帯の経済・産業・農業・健康面で国境をまたぐ環境問題となっている。黄砂による目のかゆみや喉の痛み、更にスギ花粉症や気管支喘息等のアレルギー疾患の症状悪化を訴える人が年々増加していることから、黄砂による健康影響の解明の必要性が高まっている。一方、黄砂に生息する微生物が人の健康に及ぼす影響についての研究は行われていない。黄砂付着微生物によって呼吸器系の感染症（特に日和見感染）が起こる可能性が考えられ、また黄砂粒子によって感染症による炎症が悪化する可能性も考えられる。そこで本研究では風送ダスト（黄砂・煤塵・微生物・アレルゲン）の呼吸器系に係る健康影響評価を行うことを目的として人の調査研究と動物を用いた実験的研究の両面から取り組んだ。

#### 2. 研究開発目的

風送ダストによる健康影響評価に関する疫学及び動物実験学的検証研究

風送ダスト（黄砂・煤塵・微生物・アレルゲン）の健康影響評価を行うことを目的として、人

の疫学調査と動物を用いた実験的研究の両面から取り組む。動物実験学的検証手法と疫学調査の両面から、その影響評価を行うことを目標とする。

#### (1) 風送黄砂のアレルギー修飾作用に関する動物を用いた実験的研究

黄砂の気管支喘息やスギ花粉症、あるいは黄砂附着細菌による肺の炎症等の増悪作用を、動物を用いた実験的研究によって明らかにすることを目的とした。

#### (2) 風送黄砂の健康影響に関する疫学調査

北九州地域に居住する幅広い年代層を対象に疫学調査を実施し、風送黄砂の健康影響、特にアレルギーへの影響を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 風送黄砂のアレルギー修飾作用に関する動物を用いた実験的研究

##### 1) 風送黄砂の気管支喘息増悪作用に関する実験研究

これまでに風送黄砂のアレルギー修飾作用については明らかにされていない。本研究ではマウス喘息モデル用いて風送黄砂のアレルギー増悪作用を明らかにすることを目的とした。また、この実験では黄砂に附着した有機成分によるアレルギー増悪作用を調べるために、360 °C、30 分加熱した加熱黄砂と非加熱黄砂について気管支喘息モデルにおけるアレルギー増悪作用を比較した。

動物は ICR 系雄マウスを用いた。アレルギー喘息を惹起させるためのアレルゲンとして卵白アルブミン (OVA) を用いた。実験群は対照群、加熱黄砂群、非加熱黄砂群、卵白アルブミン (OVA) 群、OVA+加熱黄砂群、OVA+非加熱黄砂群の 6 群とし、1 群 16 匹 (肺洗浄用 8 匹/病理用 8 匹) とした。黄砂の 1 回投与量は 0.1 mg とした。これらをマウスの気管内に 2 週間間隔で 4 回投与して、最終投与翌日にマウスを屠殺して喘息病態増悪作用を比較した。炎症の指標としては肺洗浄液中の炎症細胞や炎症性サイトカイン・ケモカイン類調べ、また気道の病理学的な比較観察を行った。

##### 2) 肺炎桿菌による肺の炎症に対する黄砂の影響

本実験は「黄砂と感染症」の面から健康影響評価を行うことを目的に、黄砂粒子が日和見感染細菌 (黄砂附着微生物) によって惹起される炎症を増悪するのか否か、肺炎桿菌をモデルとして実験的に明らかにすることを目的とした。

本実験では壱岐で採取した風送黄砂を 360 °C、30 分加熱した加熱黄砂を用い、1 回投与量を 0.05 mg と 0.2 mg とした。肺炎桿菌 (*K. pneumoniae*) ATCC 9997 (KP) は American Type Culture Collection (ATCC) (Rockville, MD) から購入したのを用い、投与濃度は  $4.3 \times 10^6/\text{ml} \times 1/2$  濃度のものを 0.1 ml 投与した。実験群は対照群、黄砂 0.05 mg 群、黄砂 0.2 mg 群、KP 群、黄砂 0.05mg+KP 群、黄砂 0.2 mg+KP 群の 6 群とし、1 群 16 匹 (肺洗浄用 8 匹/病理用 8 匹) とした。黄砂を 2 週間間隔で 4 回マウスの気管内に投与し、肺炎桿菌は最終投与時 (4 回目) に黄砂と共に気管内に 1 回投与した。最終投与の翌日にマウスと屠殺して、肺の洗浄液中の炎症細胞を数えて、黄砂が肺炎桿菌によって惹起される肺の炎症を増悪するか否かを調べた。

##### 3) 風送黄砂のスギ花粉症増悪作用に関する実験的研究

これまでに風送黄砂のアレルギー修飾作用についてはマウス喘息モデルにて明らかにされている。しかし、マウススギ花粉症モデルを用いた風送黄砂のアレルギー修飾作用は十分に検討さ

れていない。そこで、本研究ではマウスにスギ花粉症を確立させて、風送黄砂がそのアレルギー修飾作用に係わっているのか否かを明らかにすることを目的とする。実験群は1群14匹（鼻洗浄用8匹／病理用6匹）として、対照（生理食塩水投与）群、黄砂2 µg 投与群、黄砂10 µg 投与群、Cryj1（スギ花粉抗原）投与群、Cryj1+黄砂2 µg 投与群、Cryj1+黄砂10 µg 投与群の計6群とした。スギ花粉抗原のCryj1の1回投与量は、マウス1匹あたり4 µg とし、左右の鼻に2 µg ずつ点鼻した。黄砂の1回投与量はそれぞれマウス1匹あたり2 µg と10 µg とした。対照群は生理食塩水を点鼻投与し、黄砂とCryj1は生理食塩水に懸濁したものを点鼻投与した。初期感作として、水酸化アルミニウム1.5 mg+Cryj1の5 µgを頸部皮下に1週間おきに2回投与し、その後Cryj1溶液を1週間おきに4回、その1週間後から1日1回6日間連続点鼻した。すべてのマウスは最終点鼻投与5時間後に、深麻酔下で心採血によって屠殺し、咽頭部より生理食塩水を注入して鼻腔洗浄を行い、鼻腔洗浄液中の炎症細胞数や炎症性サイトカイン類を測定すると共に鼻の病理標本を作成し形態学的変化を調べた。また、脾臓を採取し重量を測定した。実験期間中、溶液を点鼻した直後25分間、アレルギー性鼻炎の症状の1つである鼻搔痒感の指標として、個々のマウスの鼻かき動作、くしゃみ回数を測定した。

#### 4) 風送黄砂付着細菌 (*Bacillus sp.*) による肺の炎症に対する黄砂の影響

本実験では「黄砂と感染症」の面から健康影響評価を行うことを目的に、黄砂粒子が黄砂付着微生物によって惹起される炎症を増悪するのか否かを実験的に明らかにすることを目的とした。

分担課題4(金沢大学)において得られた黄砂付着微生物(*Nocardiopsis sp.* *Bacillus sp.* *Streptomyces sp.* *Bjerkandera sp.*)のうち、今回の実験には*Bacillus sp.*を用いた。黄砂は360 °Cで過熱した風送黄砂を用いた。実験群は1群16匹として、対照（生理食塩水投与）群、黄砂0.02 mg 投与群、黄砂0.2 mg 投与群、*Bacillus sp.*単独投与群、*Bacillus sp.*+黄砂0.02 mg 投与群、*Bacillus sp.*+黄砂0.2 mg 投与群の計6群とし、1群16匹（肺洗浄用8匹／病理用8匹）とした。風送黄砂の0.02 mg と0.2 mgを1週間おきに3回マウスの気管内に投与し、4回目の最終投与時に*Bacillus sp.*を過熱黄砂と共に気管内投与して、翌日に肺の洗浄液中の炎症細胞を数えて、黄砂粒子が黄砂付着細菌によって惹起される肺の炎症を増悪するか否かを調べた。

#### 5) 風送黄砂から分離培養した微生物菌体成分の生体への影響に関する研究

風送黄砂から分離培養した微生物菌体成分の生体への影響に関する研究：金沢大学の小林らが風送黄砂から分離培養した微生物のうち細胞培養実験において最も炎症性サイトカインの蛋白発現が最も高かったアルカリ放線菌の一種のノカルジア（肺化膿症の原因菌）について、マウスを用いて肺への影響とアレルギー喘息への影響を調べた。

培地から分離したノカルジア菌は1%ホルマリンにて1時間不活化後、リポポリサッカライド(LPS)フリーの蒸留水を加えてソニケーターにて粉碎後、12,000回転にて遠心、これらを3回繰り返して蒸留水で洗浄したノカルジア菌体成分(N sp)を得た。N spの投与量は0.1 µg と1 µg（黄砂に付着しているレベル）とし、黄砂投与量は360 °C 30分加熱処理した加熱黄砂(H-ASD)を0.1 mgとし、アレルギー喘息を誘導するための卵白アルブミン(OVA)は1 µgとした。各グループは対照群(Control)、N sp 0.1 µg 群、N sp 1 µg 群、H-ASD 群、H-ASD+N sp 0.1 µg 群、H-ASD+N sp 1 µg 群の6群、卵白アルブミン(OVA)群、OVA+N sp 0.1 µg 群、OVA+N sp 1 µg 群、OVA+H-ASD 群、OVA+H-ASD+N sp 0.1 µg 群、OVA+H-ASD+N sp 1 µg 群の合計12群とし、1群16匹（肺洗浄用8匹／病理用8匹）とした。これらを2週間に1回、4回投与して、最終投与

の翌日にマウスを屠殺して、これらの組合せによる肺への影響とアレルギー喘息への影響を調べた。炎症の指標としては肺洗浄液中の炎症細胞や炎症性サイトカイン・ケモカイン類を調べた。

(2) 風送黄砂の健康影響に関する疫学調査

北九州地域に居住する人を対象とした黄砂の健康影響調査 (2010~2011年)

中国大陸に近いわが国でも臨床的に気管支喘息やアレルギー性鼻炎・花粉症患者が悪化したと訴えており、黄砂による健康被害が憂慮されているが<sup>1)</sup>、Kanataniらは富山県の喘息児の発作入院が強い黄砂現象により明らかに増している事を報告し、欧米諸国においても関心が高まってきている<sup>2)</sup>。今回、通常的生活を送っている鼻・眼アレルギー症状があるか、アレルギーのない大学生とその家族で40歳以上の中高年を対象に黄砂飛来日における症状の変化の有無について症状日記から検討した。対象は福岡県北九州市及び宗像市にある看護大学2施設において通常の学生生活を過ごしている学生とその家族を対象とした。調査期間は2010年、2011年の2月1日~5月31日で黄砂飛来の頻度が高く、特に2月~4月初めはスギ・ヒノキ科花粉飛散時期である。

黄砂飛来日は気象情報より目視法による黄砂日と長崎に設置されたLight Detection and Ranging (LIDAR) 装置<sup>3-6)</sup>と北九州市環境局環境監視部環境保全課大気騒音係が測定したSuspended Particle Material (以下SPM)の積算濃度(μg/m<sup>3</sup>/日)のデータから特定した<sup>7)</sup>。スギ花粉、ヒノキ科花粉は福岡県医師会花粉情報網の宗像市の調査結果を代表して引用した(重力法:花粉数/cm<sup>2</sup>/日)。さらに黄砂飛来前後に上昇する光化学オキシダント(OX)について黄砂関連物質として調査しOX濃度を示した。

表(3)-1 症状日記とその記入例

日付	入る数字・記号	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
くしゃみ	0~4	2	くしゃみなし:「0」 1~5回:「1」 6~10回:「2」 11~20回:「3」 21回以上:「4」を記入												
水っぽさ	0~4	1	鼻かみ回数なし:「0」 1~5回:「1」 6~10回:「2」 11~20回:「3」 21回以上:「4」を記入												
鼻づまり	0~4	0													
涙目(なみだめ)	0~4	3													
目のかゆみ	0~4	3													
目が痛い・ごろごろする	0~4	2													
せきが出る	0~4	2													
痰が出る	0~4	0													
声がかれる	0~4	0	症状がない:「0」 症状が軽い:「1」 普通:「2」												
のどがげいげいする	0~4	0	ひどい:「3」 耐えられないほどひどい:「4」を記入												
のどが痛い	0~4	0													
のどがかゆい	0~4	1													
口が渇く	0~4	0													
皮膚がかゆい	0~4	0													
夜に咳・痰症状が強い	0~4	0													
息が苦しい	0~4	0													
日常生活に支障ある	0~4	2	支障なし:「0」 少し苦しい:「1」 苦しい:「2」 かなり苦しい:「3」 勉強等が手に付かない:「4」を記入												
鼻炎薬の服用	○か×	×													
点鼻薬の使用	○か×	×													
点眼薬の使用	○か×	○	薬を使用したら「○」 使用しなかったら「×」を記入												
ぜん息のお薬の使用	○か×	×													
その他のお薬の使用	○か×	×													
ここ2週間の具合に○をしてください:「非常に良かった」(良かった)「少し良かった」 「変わらなかった」 「悪かった」															

2010年の調査対象者は300人として、北九州地区に居住する看護大学とその家族に調査希望者を募集した。最終サンプル数は学生220人、家族61人、合計281人であった。学生と家族はアレルギー有り群とアレルギー無し群に分けて評価した。2011年では調査対象者数を250人とし、2010年同様に北九州地区に居住する看護大学とその家族に調査希望者を募集した。最終サンプル数は学生102人、家族89人、合計191人であった。2010年同様に学生と家族はアレルギー有り群とアレルギー無し群に分けて評価した。統計処理はWilcoxonの符号和検定を用いた。

対象者には2月1日～5月31日までの4ヶ月間症状日記を配布し、Japanese Rhinoconjunctivitis Quality of Life Questionnaire (以下JRQLQ)のNo.1<sup>8)</sup>を参考に作成した症状日記は各症状や生活行動について自己評価し、スコア化で表現した(表(3)-1)。症状日記、同じくJRQLQを参考にして作成したアレルギーの症状や家族歴に関するアンケート用紙(表(3)-2)を配布後、郵送で1か月毎に回収した。鼻炎・花粉症などのアレルギー性疾患の有無はアンケートで判断した。即ち、最近1年間の健康状態で鼻・眼症状について症状の種類、頻度、関連症状、生活への支障度、下気道症状、夜間症状、過去または現在治療中の疾患で鼻炎、副鼻腔炎、花粉症、気管支喘息既往歴と治療歴、家族歴などを調査し、症状の有無を含めて総合して判断した。症状の有無は日記で各人の日誌の症状点数ありの人を症状有りとした。

2～5各月の日誌では2週間毎の症状が記入された。原則として黄砂飛来日前7日間、黄砂日、黄砂飛来日後7日間について鼻症状総スコア(0～12)、眼症状総スコア(0～12)、咽頭・喉頭・下気道・口腔内症状総スコア(0～28)および、皮膚症状(0～4)・日常生活支障度(0～4)のスコアについて、黄砂飛来日から対象となった日数のうち症状スコアが記入されている場合を症状有りとして有症状者の頻度を調べ、各症状スコアで黄砂飛来日前と飛来後の対応するすべての症状スコアの日毎変動についての有意差を検討したさらに薬剤使用頻度についても検討した。統計はWilcoxonの符号和順位検定を用いた<sup>9)</sup>。この調査は大分県立看護科学大学、産業医科大学、国立病院機構福岡病院の各倫理規定委員会にて審議していただき、了承され、ヘルシンキ宣言に則って行った。

表(3)-2 花粉症・アレルギー性鼻炎の有無を問う  
アンケート調査用紙

A あなたの健康状態(最近1年)						
1	鼻がつまる	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
2	鼻みずがでる	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
3	濃い鼻汁がでる	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
4	透明な鼻汁がでる	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
5	鼻汁がのどにまわる	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
6	くしゃみがでる	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
7	鼻の中がかゆい	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
8	鼻血がでやすい	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
9	目がかゆい	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
10	なみだが出やすい	いいえ	はい	→	いつも	春だけ その他
11	上記の症状は程度の差はあってもほぼ1年中				はい	いいえ
12	その他の症状	頭痛・頭重、のどがいがいが、ぜいぜい、皮膚症状など				
13	鼻・眼症状が出たとき	症状なし、医療機関へ、市販薬、何もしない				
14	症状の程度	なし、ほとんど気にならない、仕事・生活影響なし、影響あり				
15	咳・痰ありますか	いいえ	はい			
16	安静時や労作時の息切れ(ぜいぜい)	いいえ	はい			
17	息切れやぜいぜいは明け方につよい	いいえ	はい			
B あなたの過去または現在治療中の病気について						
鼻	ちくのう症(副鼻腔炎)	いいえ	はい			
	鼻炎	いいえ	はい			
	「かぜ」をひきやすい	いいえ	はい			
	最近1年間に何回かぜをひいたか			回		
アレルギー	花粉症と医師から診断された	いいえ	はい			
	花粉症の症状はいつから	いいえ	はい			
	毎年起こる	いいえ	はい			
	現在、花粉症の治療中	いいえ	はい			
喘息	喘息と医師から診断された	いいえ	はい			
	喘息症状はいつから			年前から		
	季節性に悪化する	いいえ	はい			
	年中症状がある	いいえ	はい			
	現在、喘息治療中	いいえ	はい			
アトピー疾患既往の有無、治療歴の有無、原因検査の有無						
家族歴(アトピー疾患)に関する質問						喫煙に関する質問

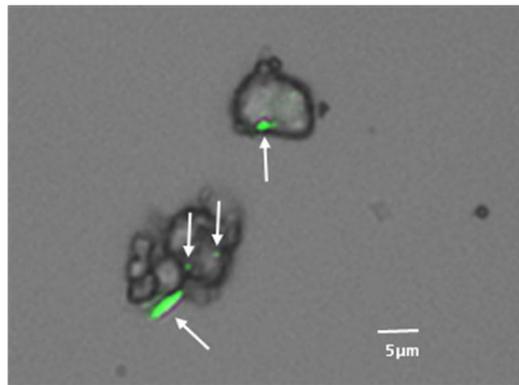
#### 4. 結果及び考察

##### (1) 風送黄砂のアレルギー修飾作用に関する動物を用いた実験学的研究

##### 1) 風送黄砂の気管支喘息増悪作用に関する実験研究

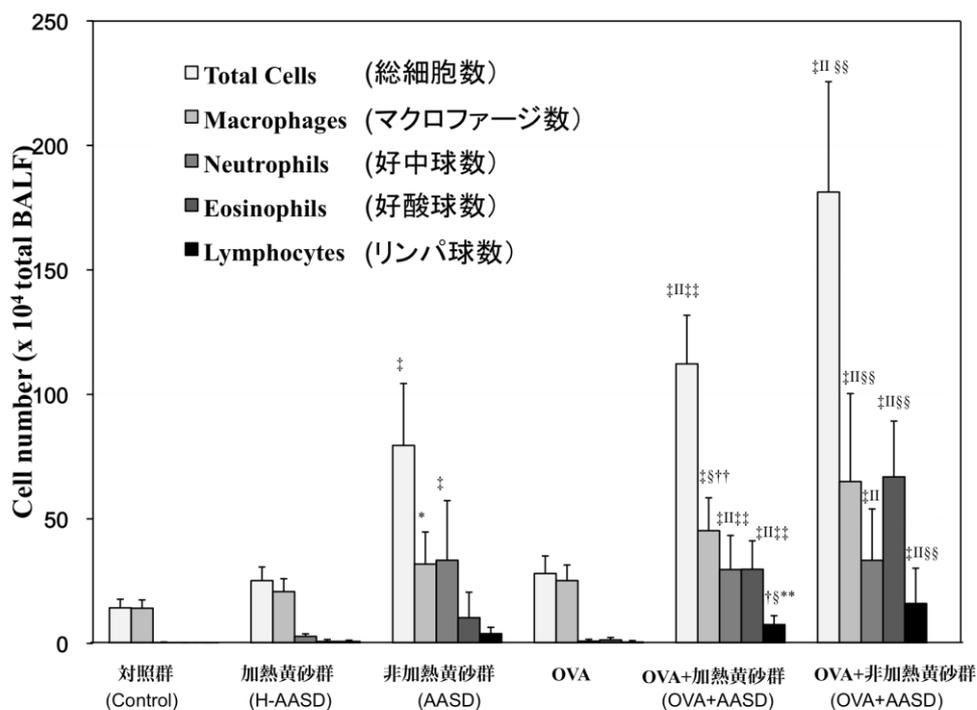
図(3)-1 に壱岐で採取した風送黄砂の蛍光顕微鏡写真を示す。矢印の緑色に染色された部分は黄砂に附着したカビの成分である  $\beta$ -glucan を示す。このように黄砂にはカビの成分や微生物が附着して運ばれてくる。

図(3)-2 は加熱黄砂、非加熱黄砂、卵白アルブミン (OVA)、あるいはこれらを併用投与した肺胞洗浄液中の炎症細胞数を示す。加熱黄砂 (H-AASD) はマクロファージが僅かに増加するほか、炎症細胞の好中球が若干増加したが、非加熱黄砂 (AASD) はマクロファージと共に好中球が増加し、いわゆる肺の炎症の惹起が見られた。OVA 投与では若干のマクロファージと共に僅かに好酸球の増加が見られたが、OVA+加熱黄砂群ではマクロファージと共に好中球、好酸球数とリンパ球数の有意な増加が見られた。いわゆるアレルギー炎症の増悪が認められた。



図(3)-1 壱岐の大気中から採取した黄砂  
矢印：黄砂に附着したカビ ( $\beta$ -glucan)

OVA+非加熱黄砂では更に好中球、好酸球、リンパ球数に著しい増加が見られた。この結果は加熱によって取除かれた部分にアレルギーを悪化する物質が含まれていることを示す。しかし、OVA+



図(3)-2 黄砂と卵白アルブミン (OVA) を投与したマウスの肺洗浄液中の炎症細胞

All values expressed as mean  $\pm$  SE. \* $p$  < 0.05 compared to Control, † $p$  < 0.01 compared to Control, ‡ $p$  < 0.001 compared to Control, § $p$  < 0.05 compared to OVA, ‖ $p$  < 0.001 compared to OVA, ‰ $p$  < 0.05 compared to H-AASD, †† $p$  < 0.01 compared to H-AASD, ‡‡ $p$  < 0.001 compared to H-AASD, §§ $p$  < 0.001 compared to AASD.

加熱黄砂によってもアレルギー炎症の増悪が認められることから、粒子自身の物理的刺激や、その主成分である二酸化ケイ素がアレルギーの増悪に係っているものと考えられる。図(3)-2 に肺洗浄液中のマクロファージ、好中球、好酸球等の炎症細胞を活性化する炎症性サイトカイン・ケモカインを示した。これらの炎症性サイトカイン・ケモカインの値は肺洗浄液中の炎症細胞数と平行であった。アレルギー炎症の主役である好酸球の遊走・活性化にあずかる IL-5 (表(3)-3) や Eotaxin, MCP-3 (表(3)-4) は OVA+非加熱黄砂 (AASD) 群で相乗的に増加し、好酸球数とよく対応していた。また好中球を遊走・活性化する KC や MIP-1 $\alpha$  は非加熱黄砂単独投与によっても増加しており、これに伴って好中球の増加も認められた。

表(3)-3 肺洗浄液中 (BALF) のサイトカイン発現

Group*	Animals(n)	Cytokines (pg protein/total BALF)					
		IL-1 $\beta$	IL-4	IL-5	IL-6	IL-12	IL-13
Control	8	11.1 $\pm$ 7.64	ND	ND	2.94 $\pm$ 1.81	6.71 $\pm$ 6.71	ND
H-AASD	8	50.7 $\pm$ 12.2	ND	2.39 $\pm$ 2.39	57.5 $\pm$ 19.1	311 $\pm$ 35.5	ND
AASD	8	245 $\pm$ 32.6 <sup>§</sup>	ND	6.76 $\pm$ 6.76	176 $\pm$ 21.4 <sup>§</sup>	693 $\pm$ 59.0 <sup>‡</sup>	3.38 $\pm$ 3.38
OVA	8	ND	ND	22.3 $\pm$ 6.67	1.82 $\pm$ 1.10	27.0 $\pm$ 14.3	ND
OVA + H-AASD	8	111 $\pm$ 34.9 <sup>¶¶</sup>	ND	152 $\pm$ 20.1 <sup>¶¶¶</sup>	70.1 $\pm$ 18.4 <sup>¶¶</sup>	467 $\pm$ 41.1	74.8 $\pm$ 17.2 <sup>¶¶¶¶</sup>
OVA + AASD	8	160 $\pm$ 21.8 <sup>§¶¶</sup>	4.67 $\pm$ 4.67	273 $\pm$ 69.3 <sup>§¶¶¶¶</sup>	92.8 $\pm$ 11.8 <sup>¶¶¶¶¶</sup>	1061 $\pm$ 300 <sup>§¶¶</sup>	108 $\pm$ 29.1 <sup>§¶¶¶¶</sup>

ND: not detectable. Data were shown M  $\pm$  SE

<sup>†</sup> $p$  < 0.05 vs. Control, <sup>‡</sup> $p$  < 0.01 vs. Control, <sup>§</sup> $p$  < 0.001 vs. Control, <sup>¶</sup> $p$  < 0.05 vs. OVA, <sup>¶¶</sup> $p$  < 0.01 vs. OVA, <sup>¶¶¶</sup> $p$  < 0.001 vs. OVA, <sup>§§</sup> $p$  < 0.05 vs. H-AASD, <sup>§§§</sup> $p$  < 0.01 vs. H-AASD, <sup>¶¶¶</sup> $p$  < 0.01 vs. AASD, <sup>¶¶¶¶</sup> $p$  < 0.001 vs. AASD

表(3)-4 肺洗浄液中 (BALF) のケモカイン発現

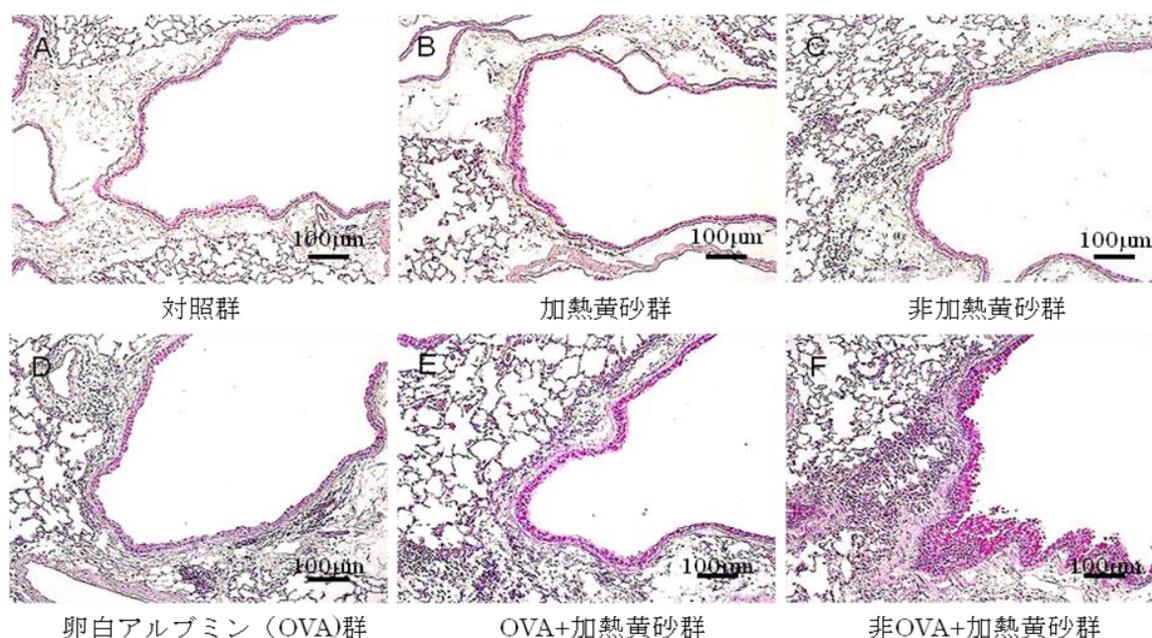
Group*	Animals(n)	Chemokines (pg protein/total BALF)					
		RANTES	KC	MIP-1 $\alpha$	Eotaxin	MCP-1	MCP-3
Control	8	ND	31.6 $\pm$ 12.5	ND	ND	ND	ND
H-AASD	8	13.5 $\pm$ 9.75	593 $\pm$ 89.0 <sup>‡</sup>	62.1 $\pm$ 7.29 <sup>‡</sup>	ND	267 $\pm$ 58.5	3.98 $\pm$ 3.98
AASD	8	73.0 $\pm$ 16.2 <sup>†</sup>	517 $\pm$ 63.1 <sup>‡</sup>	62.9 $\pm$ 4.31 <sup>‡</sup>	ND	342 $\pm$ 83.8	47.2 $\pm$ 24.6
OVA	8	ND	80.8 $\pm$ 18.7	ND	ND	ND	4.13 $\pm$ 4.13
OVA + H-AASD	8	16.9 $\pm$ 6.03	419 $\pm$ 32.9 <sup>¶¶</sup>	13.5 $\pm$ 4.11 <sup>¶¶</sup>	12.0 $\pm$ 6.11	1132 $\pm$ 302 <sup>¶¶¶</sup>	396 $\pm$ 165
OVA + AASD	8	77.1 $\pm$ 23.8 <sup>†§</sup>	583 $\pm$ 56.2 <sup>¶¶</sup>	21.7 $\pm$ 2.61 <sup>†§¶</sup>	45.9 $\pm$ 15.4 <sup>¶¶¶</sup>	1771 $\pm$ 340 <sup>¶¶¶</sup>	1012 $\pm$ 224 <sup>¶¶¶</sup>

All values were expressed as mean  $\pm$  SE (n = 8). ND: not detectable.

<sup>†</sup> $p$  < 0.01 vs. control, <sup>‡</sup> $p$  < 0.001 vs. control, <sup>§</sup> $p$  < 0.01 vs. OVA, <sup>¶</sup> $p$  < 0.001 vs. OVA, <sup>¶¶</sup> $p$  < 0.05 vs. H-AASD, <sup>¶¶¶</sup> $p$  < 0.001 vs. H-AASD, <sup>¶¶¶</sup> $p$  < 0.001 vs. AASD

図(3)-3 は肺の病理組織学的変化を示した。加熱黄砂群 (図(3)-3B) では殆ど影響が見られないが、非加熱黄砂群 (図(3)-3C) では気道周囲に炎症細胞が見られ、いわゆる気管支炎の病態が認められた。OVA 投与群 (図(3)-3D) では軽度の気道上皮細胞の粘液細胞化と気道周囲にリンパ球等の炎症細胞浸潤が認められたが、OVA+加熱黄砂群、OVA+非加熱黄砂群ではこれらの変化が強く見られ、特に OVA+非加熱黄砂群 (図(3)-3F) で著し変化が観察された。このような OVA+非加熱黄砂群で見られた喘息様病態の増悪は炎症性サイトカインやケモカインの相乗的増加によって引

き起こされると考えられるが、黄砂に附着した有機成分、特に黄砂に附着したカビの成分（図(3)-1： $\beta$ -glucan）がその増悪に係っているものと考えられる。その裏付けとして、マクロファージを用いた細胞培養実験において、黄砂はカビなどに反応する炎症惹起センサーである Toll 様リセプター2（TLR2）の発現を高める結果を得た。TLR2 のリガンド（ $\beta$ -glucan）と抗原の同時投与は Th 2 へのシフトを促し、アレルギー炎症を悪化させることは既に報告されている。以上、本実験結果から風送黄砂は気管支喘息病態で見られるアレルギー炎症を悪化することが明らかとなり、その増悪には黄砂に附着したカビ等の成分に係っている可能性を示唆した。



図(3)-3 黄砂と卵白アルブミンを投与したマウスの肺の病理組織学的な変化

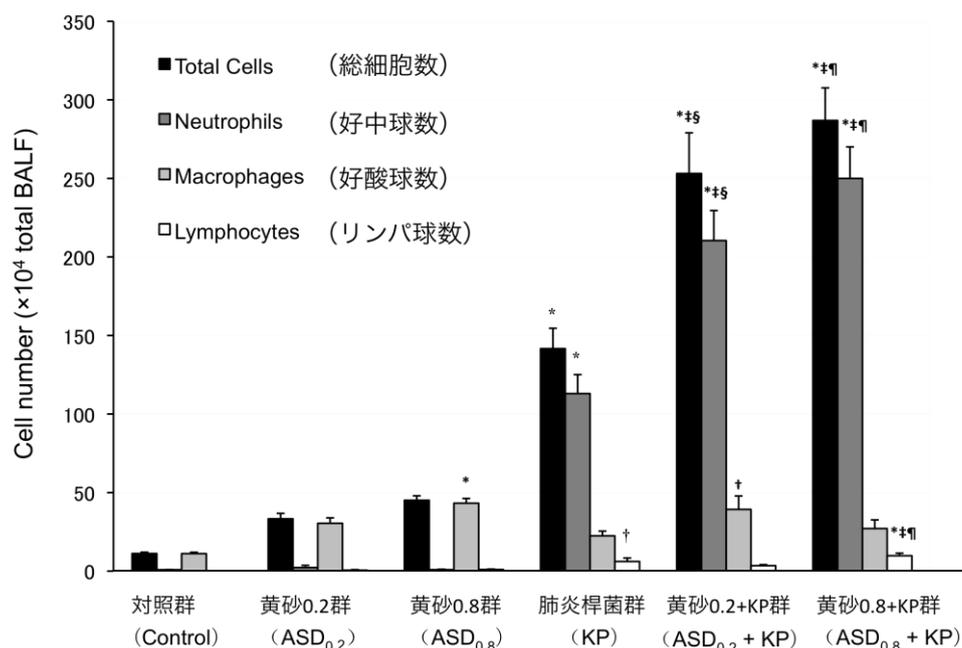
## 2) 肺炎桿菌による肺の炎症に対する黄砂の影響

図(3)-4 は加熱黄砂の 0.2 mg、0.8 mg、肺炎桿菌（KP）、あるいはこれらを併用投与した肺胞洗浄液中の炎症細胞数を示す。加熱黄砂 0.2 mg と 0.8 mg 単独投与ではマクロファージ数が増加したが好中球数の増加は軽微なものであった。肺炎桿菌単独投与群では好中球数が著しく増加し、いわゆる肺炎桿菌によるニューモニア（肺炎）の惹起が認められた。

肺炎桿菌に黄砂を加えた群の ASD 0.2 mg+KP 群と ASD 0.8 mg+KP 群では更に好中球数が増加し、特に ASD 0.8 mg+KP 群では肺炎の際立った悪化が認められた。

表(3)-5 に肺洗浄液中の炎症性サイトカイン、表(3)-6 に炎症性ケモカインを示した。

加熱黄砂 0.2 mg と 0.8 mg 単独投与では Th 1 サイトカインの IL-12、好中球遊走・活性化にあずかる KC、MIP-1 $\alpha$  に若干の増加が認められた。肺炎桿菌（KP）単独投与では IL-6、IL-12、IFN- $\gamma$ 、TNF- $\alpha$ 、KC、MCP-1、MIP-1 $\alpha$  等の炎症惹起性サイトカイン・ケモカインの増加が認められた（表(3)-5、(3)-6）。これらの炎症性サイトカイン・ケモカインは加熱黄砂が加わることによって更に増加し、その増加は黄砂濃度が高いほど際立っていた（表(3)-5、(3)-6）。この結果は肺洗浄液中の好中球とよく対応していた。これらの結果から、黄砂による好中球性の肺炎桿菌惹起ニューモニアの悪化はこのような炎症性サイトカイン・ケモカインの発現増加によって起こることが示唆された。



図(3)-4 黄砂と肺炎桿菌を投与したマウスの肺洗浄液中の炎症細胞  
 All values expressed as mean ± SE. \* $p < 0.001$  versus Control, † $p < 0.01$  versus Control, ‡ $p < 0.001$  versus KP, § $p < 0.001$  versus ASD<sub>0.2</sub>, ¶ $p < 0.001$  versus ASD<sub>0.8</sub>

表(3)-5 黄砂と肺炎桿菌を投与したマウスの肺洗浄液中のサイトカインの変化

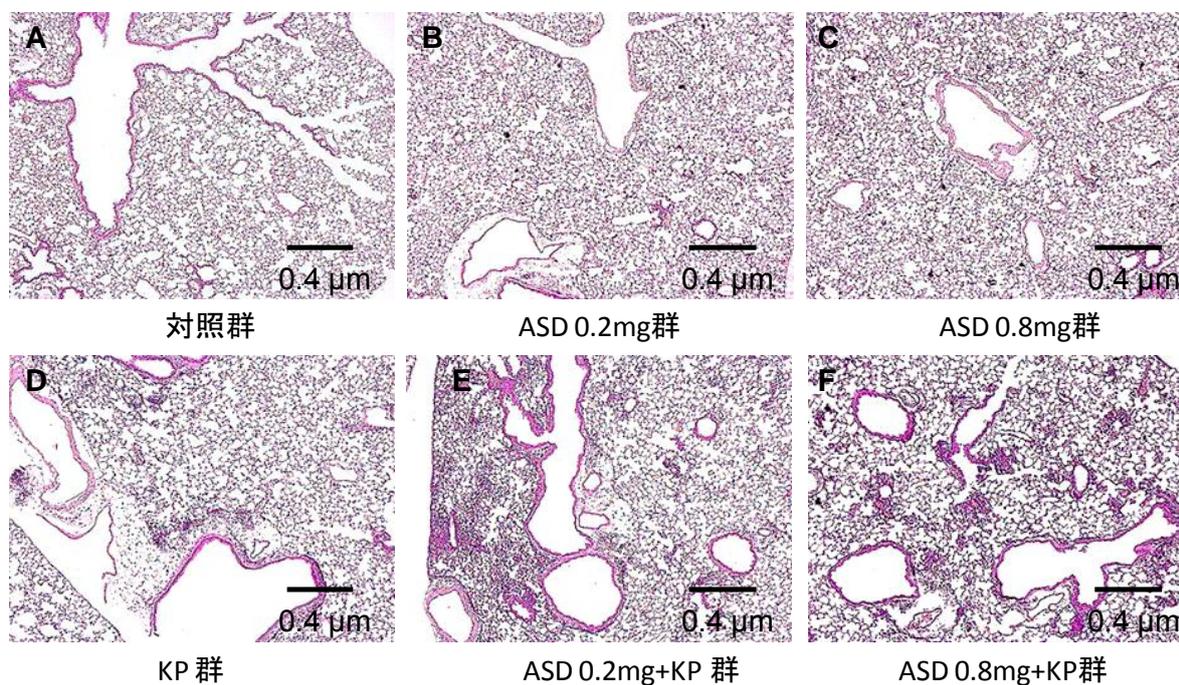
Group	Animal (n)	Cytokines (pg/ml)					
		IL-1 $\beta$	IL-2	IL-6	IL-12	IFN- $\beta$	IFN- $\gamma$
Control	8	ND	ND	ND	26.2±4.57	ND	ND
ASD <sub>0.2</sub>	8	ND	ND	ND	67.7±13.2	ND	ND
ASD <sub>0.8</sub>	8	ND	ND	ND	76.4±13.5	ND	ND
KP	8	52.2±7.01 <sup>†</sup>	ND	155±9.11 <sup>†</sup>	967±48.1 <sup>†</sup>	ND	104±25.1
ASD <sub>0.2</sub> + KP	8	88.0±12.1 <sup>†¶I</sup>	ND	239±32.0 <sup>†¶I</sup>	1080±97.6 <sup>†I</sup>	ND	149±40.9
ASD <sub>0.8</sub> + KP	8	121±10.5 <sup>†§II**</sup>	ND	286±31.6 <sup>†§II</sup>	1415±46.9 <sup>†§II¶¶</sup>	ND	854±355 <sup>†¶§§**</sup>

All values were expressed as mean ± SE. † $p < 0.001$  versus Control; ‡ $p < 0.01$  versus Control; § $p < 0.001$  versus KP; ¶ $p < 0.05$  versus KP; <sup>I</sup> $p < 0.001$  versus ASD<sub>0.2</sub>; <sup>II</sup> $p < 0.001$  versus ASD<sub>0.8</sub>; <sup>§§</sup> $p < 0.01$  versus ASD<sub>0.8</sub>; <sup>¶¶</sup> $p < 0.001$  versus ASD<sub>0.2</sub> + KP; <sup>\*\*</sup> $p < 0.05$  versus ASD<sub>0.2</sub> + KP

表(3)-6 黄砂と肺炎桿菌を投与したマウスの肺洗浄液中のケモカインの変化

Group *	Animal (n)	Chemokines (pg/ml)			
		TNF- $\alpha$	KC	MCP-1	MIP-1 $\alpha$
Control	8	ND	14.8 $\pm$ 1.73	ND	ND
ASD <sub>0.2</sub>	8	ND	46.2 $\pm$ 4.51	3.10 $\pm$ 2.24	13.0 $\pm$ 2.05
ASD <sub>0.8</sub>	8	ND	90.9 $\pm$ 11.4	8.27 $\pm$ 3.53	93.2 $\pm$ 25.6 <sup>†</sup>
KP	8	58.5 $\pm$ 8.29	123 $\pm$ 15.3 <sup>§</sup>	405 $\pm$ 87.9 <sup>§</sup>	58.7 $\pm$ 10.4 <sup>§</sup>
ASD <sub>0.2</sub> +KP	8	126 $\pm$ 26.2 <sup>‡¶</sup>	313 $\pm$ 44.9 <sup>†¶</sup>	585 $\pm$ 97.1 <sup>†¶</sup>	91.2 $\pm$ 8.45 <sup>†§§</sup>
ASD <sub>0.8</sub> +KP	8	226 $\pm$ 52.3 <sup>†¶††</sup>	418 $\pm$ 35.5 <sup>†¶††</sup>	866 $\pm$ 151 <sup>†¶††</sup>	157 $\pm$ 8.98 <sup>†¶**</sup>

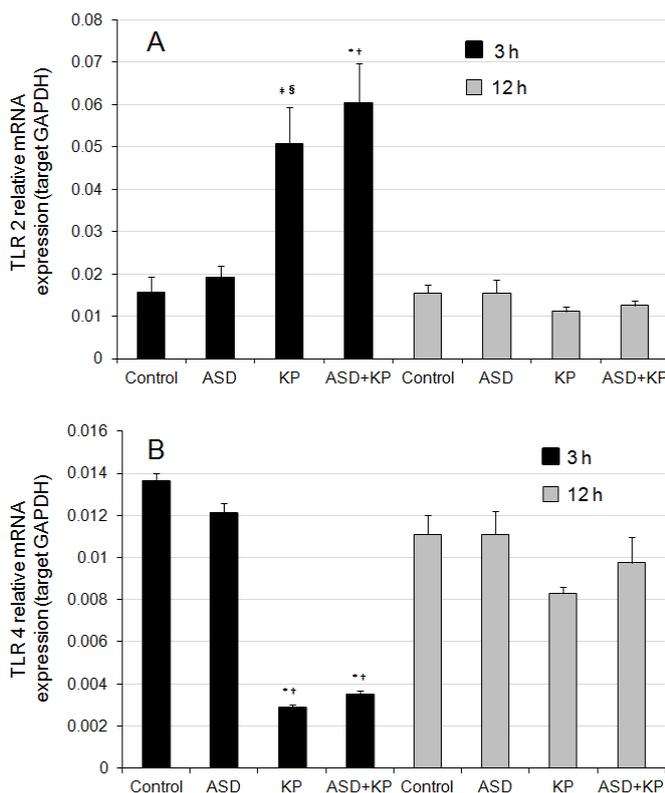
All values were expressed as mean  $\pm$  SE. <sup>†</sup> $p$  < 0.001 versus Control; <sup>‡</sup> $p$  < 0.01 versus Control; <sup>§</sup> $p$  < 0.05 versus Control; <sup>¶</sup> $p$  < 0.001 versus KP; <sup>†¶</sup> $p$  < 0.01 versus KP; <sup>†¶</sup> $p$  < 0.001 versus ASD<sub>0.2</sub>; <sup>§§</sup> $p$  < 0.01 versus ASD<sub>0.2</sub>; <sup>¶¶</sup> $p$  < 0.05 versus ASD<sub>0.2</sub>; <sup>†††</sup> $p$  < 0.001 versus ASD<sub>0.8</sub>; <sup>††</sup> $p$  < 0.01 versus ASD<sub>0.8</sub>; <sup>\*\*</sup> $p$  < 0.01 versus ASD<sub>0.2</sub>+KP



図(3)-5 黄砂と肺炎桿菌を投与したマウスの肺の病理組織学的変化

図(3)-5に肺の病理組織学的変化を示した。黄砂 0.2 mg、0.8 mg 単独投与群では黄砂粒子が点在して認められるものの炎症性変化はほとんど見られなかった(図(3)-5B, C)。肺炎桿菌(KP)群では肺胞領域や気管支周囲に好中球性の炎症がみとめられた(図(3)-5D)。ASD+肺炎桿菌群(図(3)-5E, F)群では肺炎桿菌(KP)群と比較すると肺胞領域や気管支周囲に好中球性の炎症は著しく悪化し、気管支粘膜上皮細胞の増生や肥大が強く見られた。このような病理組織学的変化は肺洗浄液中の好中球数や炎症性サイトカイン・ケモカインとよく対応していた。

このような黄砂による細菌感染による炎症の悪化、すなわち自然免疫の活性化が何故起こるのかは明からではないが、我々は感染における初期の生体防御細胞であるマクロファージを用いて、黄砂と肺炎桿菌を曝露して炎症惹起センサーである Toll 様リセプター2 (TLR2)、TLR4 の発現を細胞培養系によって調べた(図(3)-6)。肺炎桿菌は TLR2 の発現を高めるが、これに黄砂が加わると TLR2 の発現が更に高まり、細胞培養中の炎症性サイトカイン・ケモカインの放出量も TLR2 の発現量の増加とよく対応していた。このような結果から、肺炎桿菌惹起性の黄砂による悪化は TLR2 の発現増加によって起こると示唆されるが、黄砂粒子が加わることによって何故発現増加が起こるのか、そのメカニズムの解明は今後の課題である。以上、本実験で得られた結果は、黄砂に附着した感染菌による肺の炎症を黄砂粒子そのものが悪化することを示したものであり、黄砂の健康影響について警鐘すべき成果である。



図(3)-6 肺炎桿菌と黄砂を添加したマウスマクロファージ様細胞のTLR2, TLR4 mRNA発現

### 3) 風送黄砂のスギ花粉症増悪作用に関する実験的研究

表(3)-7に鼻かき回数の経時変化を示した。点鼻投与後25分間観察した対照群、黄砂 2  $\mu$ g 群、黄砂 10  $\mu$ g 群の鼻かき回数は、Cryj1 群、Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群、Cryj1+黄砂 10  $\mu$ g 群と比較して、むしろ鼻かき回数が高い傾向が見られたが統計的に有意差は見られなかった。対照群と黄砂 2  $\mu$ g 群、黄砂 10  $\mu$ g 群を比較すると3~5回目で黄砂点鼻(2  $\mu$ g、10  $\mu$ g)群の方が鼻かき回数が高い傾向を示した。Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群の NCLF (鼻洗浄液)中の好中球数(図(3)-7)は、黄砂 2  $\mu$ g 群、Cryj1 単独投与群と比べて有意な増加が見られた。しかし Cryj1+黄砂 10  $\mu$ g 群では、Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群と比べるとむしろ低下傾向を示していた。Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群の NCLF 中の好酸球数は、Cryj1 単独群と比べて低下傾向にあり、Cryj1+黄砂 10  $\mu$ g 群ではそれよりさらに低い値を示していた。好酸球の遊走に關与する NCLF 中の Eotaxin 量(図(3)-8)は、NCLF 中の好酸球数の変化と対応していた。花粉症の症状の指標である鼻かき回数は、むしろ Cryj1 投与群よりも対照群、黄砂単独投与群で増

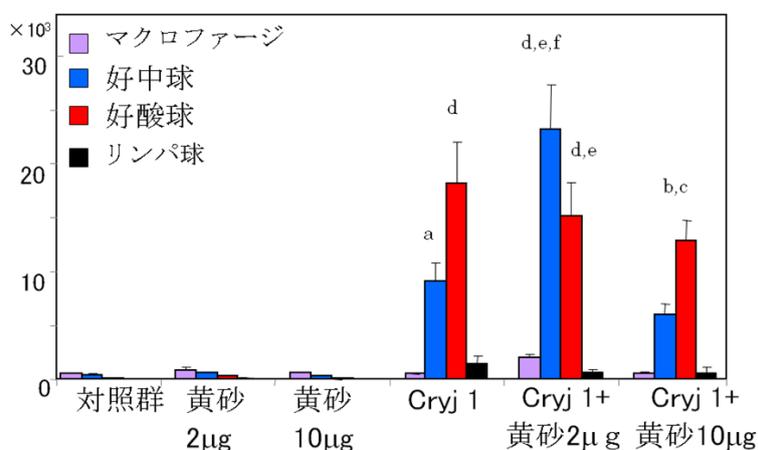
加が見られた。鼻の病理学的な観察では、Cryj1 単独群、Cryj1+黄砂 10  $\mu$ g 群と比べて Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群における鼻粘膜下への好酸球浸潤が著しかった。しかし粘液細胞には変化が見られなかった。

一方、生体内の炎症反応の亢進を示唆する脾臓の重量は、Cryj1+黄砂 10  $\mu$ g 群で最も増加していた。図(3)-9 の A~F は、HE 染色を施した鼻組織を示した。対照群と黄砂投与群では、鼻粘膜下に好酸球の浸潤はほとんど認められなかった（図(3)-9A, B, C）。これに対し、Cryj1 を投与したマウスでは、粘膜下組織や粘膜上皮内に好酸球の浸潤が見られた（図(3)-9D, E, F）。その中でも特に Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群における鼻粘膜下への好酸球浸潤が著しかった（図(3)-9E）。

以上の結果より、Cryj1+黄砂 2  $\mu$ g 群において好中球や好酸球性の炎症が強く起こっていることが示された。このことから、スギ花粉症を発症している時期に風送黄砂の曝露を受けると、病態がさらに悪化することが明らかとなった。また、Cryj1+黄砂 10  $\mu$ g 群では、鼻腔洗浄液中の炎症細胞数は低下傾向を示しているものの、脾臓の重量が最も増加していることから生体内でのアレルギー反応は高まっていることが示唆された。本実験では黄砂濃度の高い群よりもむしろ低い群の方が黄砂の影響が見られていることから更に黄砂濃度を低くして影響評価を行う必要があると考えられる。

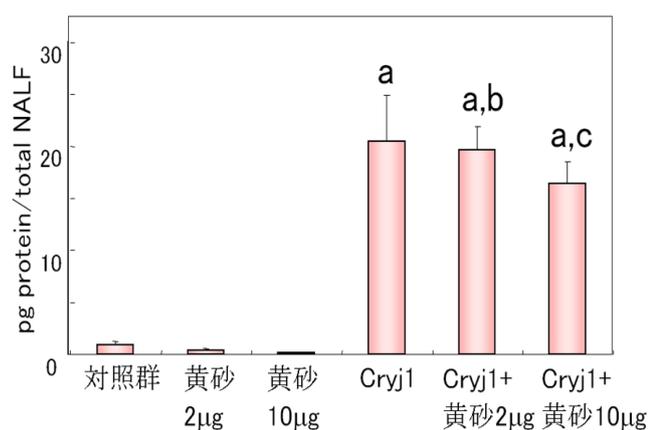
表(3)-7 鼻かき回数の経時変化

	鼻かき回数（回/25分間）					
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
①対照群	11	10	8	7	6	14
②黄砂 2 $\mu$ g	11	9	14	8	13	9
③黄砂 10 $\mu$ g	10	9	14	15	11	14
④Cryj1	8	3	9	1	3	3
⑤Cryj1+黄砂 2 $\mu$ g	9	4	1	2	2	2
⑥Cryj1+黄砂 10 $\mu$ g	5	3	4	1	3	3



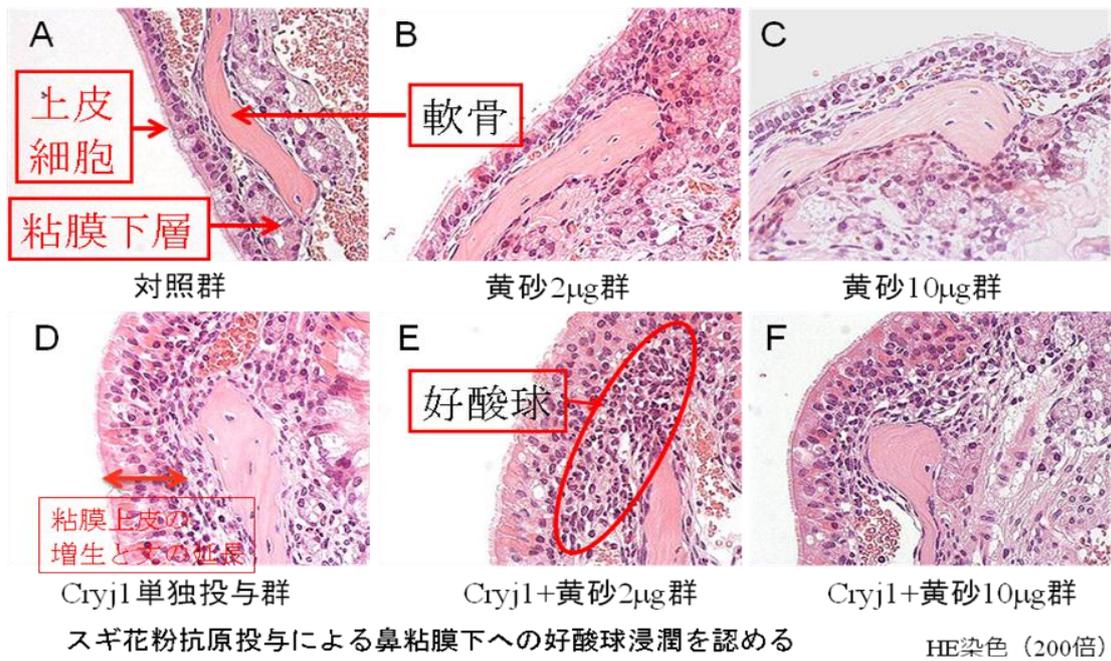
図(3)-7 鼻腔洗浄液中の炎症細胞数

a:  $p < 0.05$  vs 対照群 b:  $p < 0.01$  vs 黄砂 10 $\mu$ g c:  $p < 0.01$  vs 対照群  
d:  $p < 0.001$  vs 対照群 e:  $p < 0.001$  vs 黄砂 2 $\mu$ g f:  $p < 0.001$  vs Cryj1  
平均±標準誤差

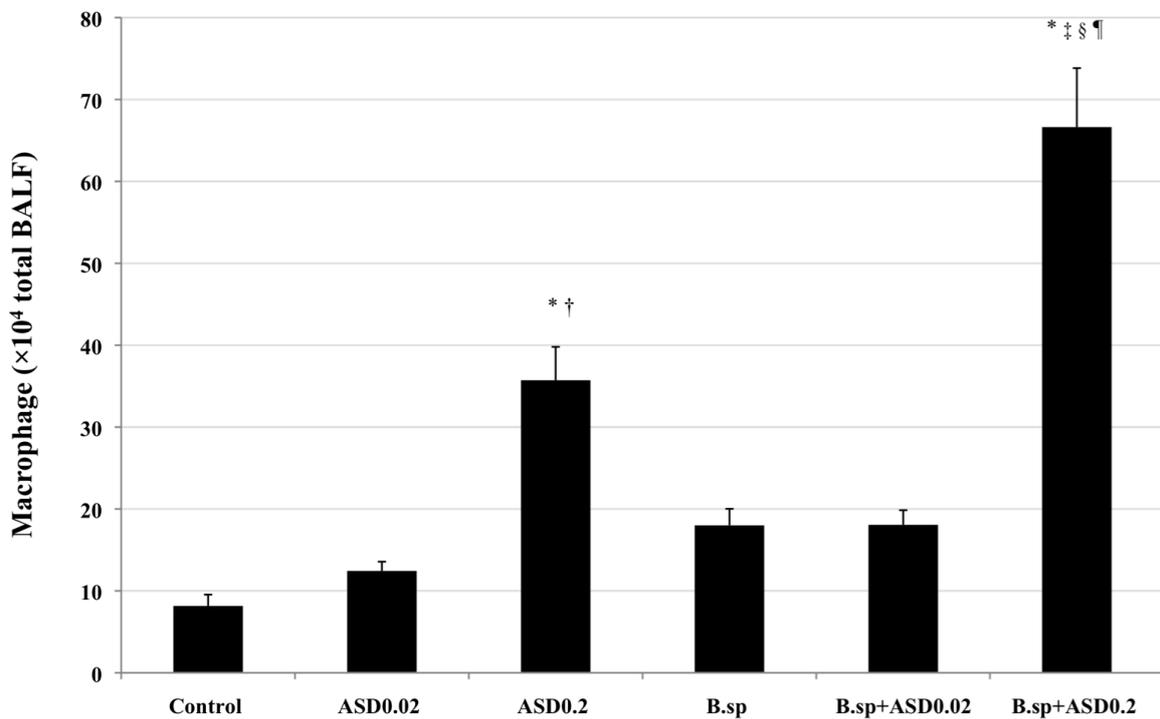


図(3)-8 鼻洗浄液中のEotaxin発現

値は平均±標準誤差で示す。a:  $p < 0.001$  vs 対照群;  
b:  $p < 0.001$  vs 黄砂 2mg; c:  $p < 0.001$  vs 黄砂 10mg



図(3)-9 黄砂とスギ花粉を投与したマウスの鼻の病



図(3)-10 黄砂付着最近の*Bacillus*生菌を気管内に投与したマウスの肺胞洗浄液中の細胞数 (マクロファージ数)

All values expressed as mean ± SE.

\**p* < 0.001 versus Control, †*p* < 0.001 versus ASD<sub>0.02</sub>, ‡*p* < 0.001 versus ASD<sub>0.2</sub>,

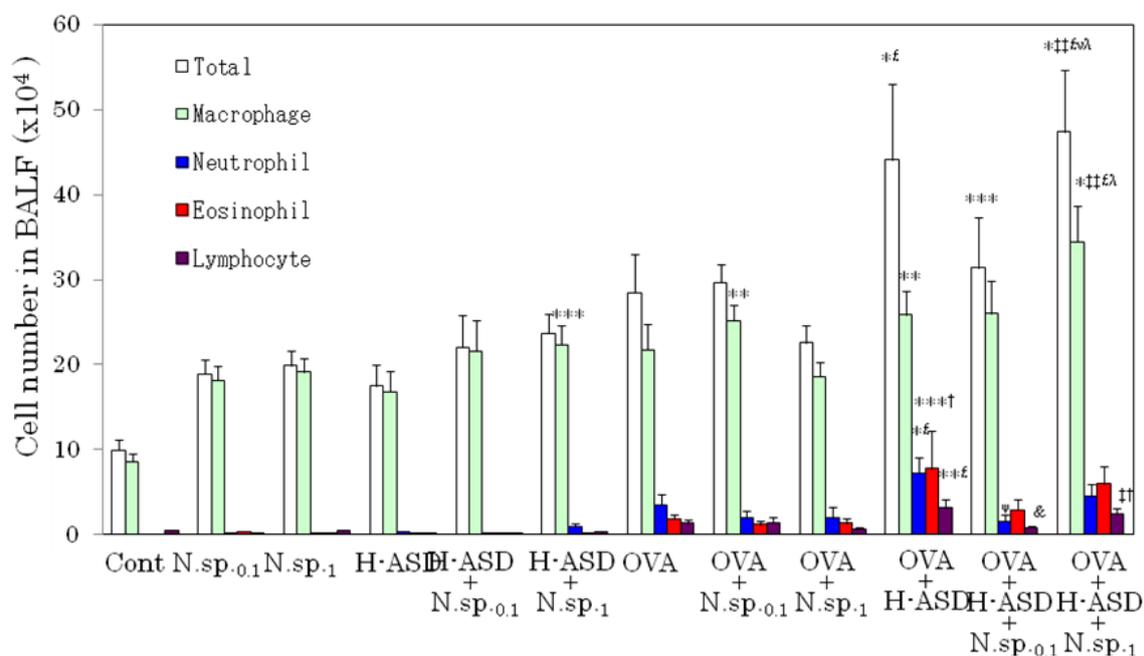
§*p* < 0.001 versus B.sp, ¶*p* < 0.001 versus B.sp+ ASD<sub>0.02</sub>

#### 4) 風送黄砂付着細菌 (*Bacillus sp.*) による肺の炎症に対する黄砂の影響

現在、対照 (生理食塩水投与)群、黄砂 0.02 mg 投与群、黄砂 0.2 mg 投与群、*Bacillus sp.*単独投与群、*Bacillus sp.*+黄砂 0.02 mg 投与群、*Bacillus sp.*+黄砂 0.2 mg の肺洗浄液中の炎症細胞数、サイトカイン・ケモカインの分析、肺の病理学的観察を行っている。解剖後に行った肺洗浄液中の総細胞数の測定では、図(3)-10 に示すように、黄砂の投与量に依存して総細胞数が増加した。*Bacillus sp.*の単独投与では対照群の 2 倍に総細胞数が増加したものの炎症細胞数 (好中球) の増加は軽微なものであった。*Bacillus sp.*と黄砂との併用投与では総細胞数の相加的な増加が認められた。この結果から、今回用いた *Bacillus sp.*は病原性は低いものと示唆された。

#### 5) 風送黄砂から分離培養した微生物菌体成分の生体への影響に関する研究

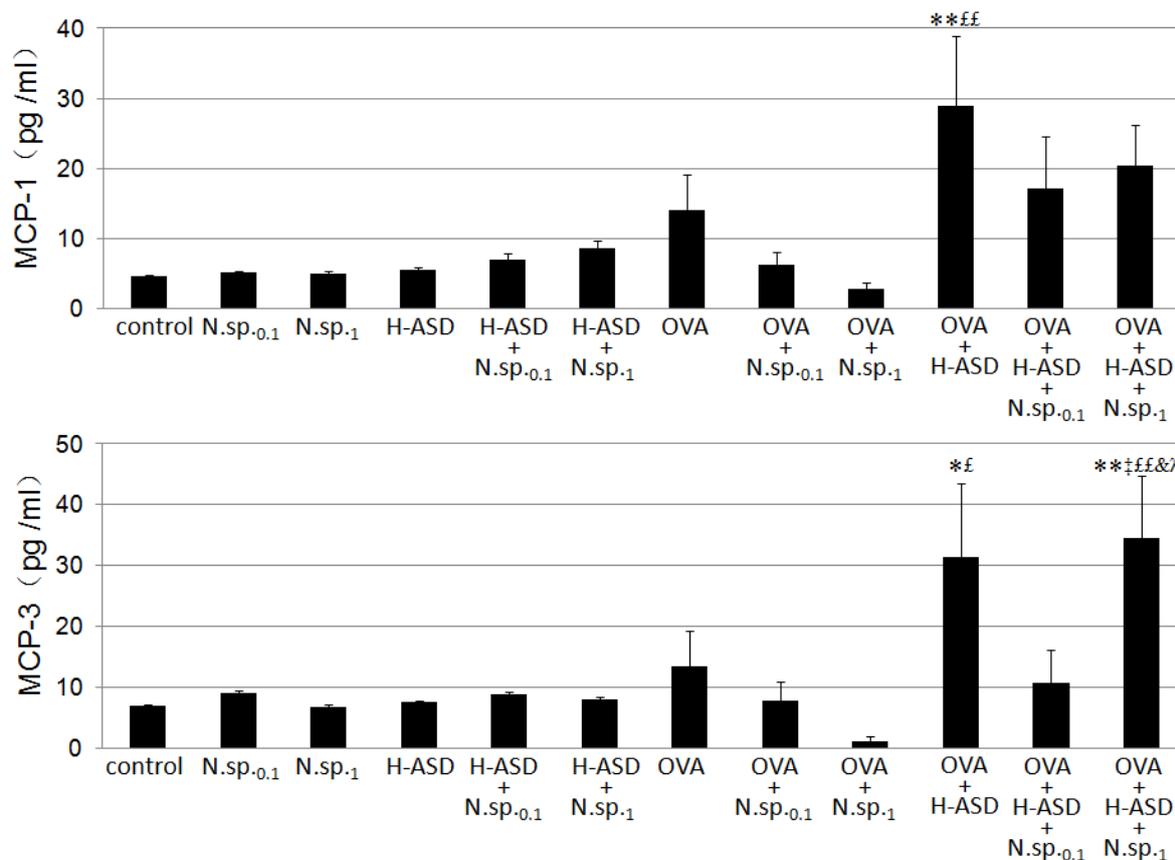
N sp 0.1 µg 群、N sp 1 µg 群、H-ASD 群、H-ASD+N sp 0.1 µg 群と H-ASD+N sp 1 µg 群の肺洗浄液中のマクロファージ数は対照群に比較して増加したが好中球等の炎症細胞数に増加は見られず、ノカルジアによる炎症惹起は見られなかった (図(3)-11)。気管支喘息への影響としては、OVA 群に比較して OVA+H-ASD 群で好酸球性炎症の増悪作用を認められるものの、これらにノカルジアを加えた OVA+H-ASD+N sp 0.1 µg 群と OVA+H-ASD+N sp 1 µg 群には好酸球性炎症の悪化は見られなかった。好中球や好酸球誘導に係る炎症性サイトカイン・ケモカイン発現量は肺洗浄液中の好中球、好酸球数の変化とよく対応しており、ノカルジア投与による誘導が見られなかった (図(3)-12)。これらの結果から本実験において投与したノカルジア菌体量では肺炎やアレルギー炎症を増悪する作用がないことが明らかとなった。



図(3)-11 ノカルジア菌体成分と黄砂、卵白アルブミン(OVA)を投与した肺の炎症細胞の変化

N.sp.: *Nocardiopsis sp.* All values were expressed as mean±SE.

\*p<0.05 versus Control; \*\*p<0.01 versus Control; ‡p<0.01 versus N.sp.<sub>1</sub>; †p<0.05 versus H-ASD; ††p<0.01 versus H-ASD; &p<0.05 versus H-ASD+ N.sp.<sub>1</sub>; †††p<0.001 versus OVA+ N.sp.<sub>1</sub>



図(3)-12 肺洗浄液中の炎症性ケモカインの変化

All values were expressed as mean±SE. N.sp.: *Nocardiopsis* sp. \*p<0.05 versus Control; \*\*p<0.01 versus Control; †p<0.01 versus N.sp.<sub>1</sub>; ‡p<0.05 versus H-ASD; £p<0.01 versus H-ASD; &p<0.05 versus H-ASD+ N.sp.<sub>1</sub>; λp<0.001 versus OVA+ N.sp.<sub>1</sub>.

## (2) 風送黄砂の健康影響に関する疫学調査

### 北九州地域に居住する人を対象とした黄砂の健康影響調査 (2010-2011年)

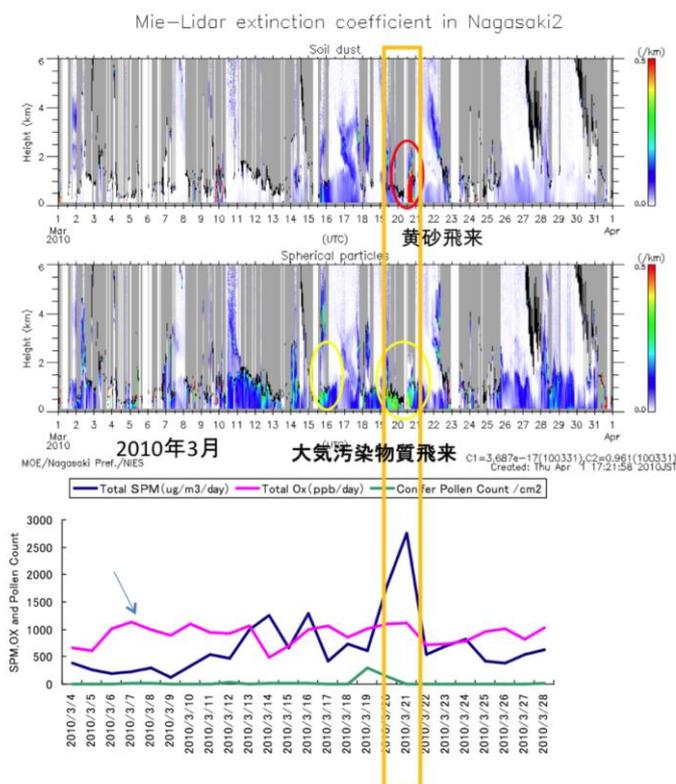
#### 1) 黄砂飛来日

黄砂飛来日は LIDAR が観測した不整形粒子 Soil Dust のデータ、SPM 濃度の上昇および視程距離の低下で判断する気象情報から特定し、とくに積算 2400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (平均毎時 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 以上の強い黄砂飛来日を調査対象日として特定した。2010 年は図(3)-13 に示すように 3 月 20 日、21 日が強い黄砂飛来日であったが、気象情報では 3 月 13 日、16 日も黄砂日と報告されていた。今回 LIDAR のデータから 20・21 日を特定した。13・16 日は LIDAR では観測されておらず、大気汚染物質による SPM 上昇であった。また 3 月 7 日から積算 1000 ppb/日以上の光化学オキシダント (OX) が測定され、黄砂飛来日の 19 日にヒノキ科花粉の捕集数が 500 個/cm<sup>2</sup>/日を超えるピークを示した。

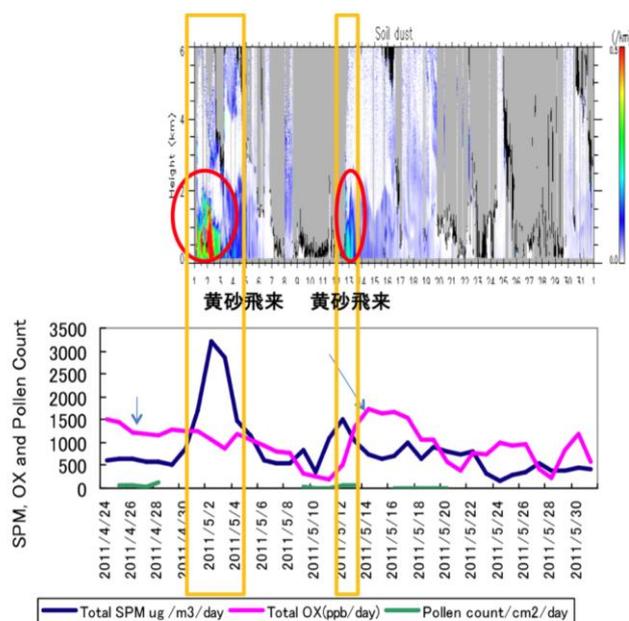
2011年は図(3)-14に示すように5月1～5日にかけて非常に強い黄砂飛来日があり、12日も黄砂飛来がLIDARで観測された。黄砂飛来日の前後の4月末と5年半ばにOXが1500～2000 ppb/日に上昇した日が観測された。スギ・ヒノキ科花粉飛散時期は過ぎており、少数の樹木花粉、イネ科花粉が捕集されていた。

## 2) 日記を回収できた学生とその家族の背景

2010年は表(3)-8に示すように学生220名、家族61名の日記を回収できた。大学生の平均年齢は19.9歳、家族は中高年で49.8歳であった。問診表を評価して花粉症・アレルギー性鼻炎有りのA群と無しのB群に分けると学生220名中92名(42%)、家族61名中51名(84%)がA群であった。2008年、2009年に同様に学生を対象に調査した結果、アレルギー有りのA群は約40%であったが、2010年も学生はほぼ同様な割合を示した。しかし、家族はこの調査に参加した人数も学生より少なく、アレルギー有りの家族が多く協力参加している可能性が考えられた。2011年では学生102名、40歳以上の家族は89名の日記を回収できた。学生の平均年齢は19.3歳、家族は54.7歳で、学生102名中A群は49名(48%)、B群は48名でほぼ同数を示した。家族89名中A群は29名(33%)、B群56名(63%)であった。また2010年では大学生8名、家族10名が定期的に治療しており、家族のアレルギーの有無に



図(3)-13 2010年3月のLIDARによるSoil Dust(黄砂)とSphericalparticle(大気汚染物質)の飛来日とSPM濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$ )、光化学オキシダント濃度(ppb/day)および空中花粉捕集数(福岡市)の推移



図(3)-14 2011年5月のLIDARによるSoil Dust(黄砂)とSphericalparticle(大気汚染物質)の飛来日とSPM濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$ )、光化学オキシダント

表(3)-8 日記を回収できた大学生とその家族（40歳以上の中高年）の背景

2010年	平均年齢	男/女/不明	A群	B群	不明	総数
大学生(青年)	19.9歳	42/178	92	126	2	220
家族(中高年)	49.8歳	21/38/2	51	10	0	61
大学生8名、家族10名が定期治療を行っていた						
2011年	平均年齢	男/女/不明	A群	B群	不明	総数
大学生(青年)	19.3歳	11/91	49	48	5	102
家族(中高年)	54.7歳	34/55	29	56	4	89
大学生5名、家族4名が定期治療を行っていた						

A群:花粉症・アレルギー性鼻炎有のアレルギー有群

B群:花粉症・アレルギー性鼻炎有のアレルギー無群

表(3)-9 2010年における3月の学生と家族における黄砂飛来後の有症状

学生(青年)	A群(N=92)	%	B群(N=126)	%
鼻症状	91	99	111	88
眼症状	84	91	94	75
咽喉頭・下気道炎症	81	88	101	80
日常生活支障度	36	39	21	19

家族(中高年)	A群(N=51)	%	B群(N=10)	%
鼻症状	49	96	10	100
眼症状	43	84	8	80
咽喉頭・下気道炎症	44	86	9	90
日常生活支障度	22	43	3	30

表(3)-10 2011年における3月の学生と家族における黄砂飛来後の有症状率

学生(青年)	A群(N=49)	%	B群(N=48)	%
鼻症状	41	84	40	83
眼症状	32	65	24	50
咽喉頭・下気道炎症	31	63	29	60
日常生活支障度	11	22	6	13

家族(中高年)	A群(N=27)	%	B群(N=55)	%
鼻症状	24	89	38	71
眼症状	22	81	27	49
咽喉頭・下気道炎症	21	78	31	56
日常生活支障度	10	37	3	5

バイアスがかかっていることが明らかであった。一方、2011年は大学生5名、家族4名が定期治療を行っていた。今回、定期治療を行っている例を含めて黄砂飛来時前後の解析を行った。

これらの対象者の黄砂飛来後の有症状率を調査した。2010年は3月20・21日の黄砂飛来後で表(3)-9に学生、中高年の家族におけるA群、B群の有症状率を示した。学生においてA群がB群より高い頻度で症状が出現していた。学生のB群では日常生活の支障度が最も低い頻度を示した。家族のA群では治療中が10例含まれているためか、症状の出現頻度は学生のA群よりわずかに症状出現率は低い、日常生活の支障度はわずかに頻度が高い結果であった。

2011年における学生のA群とB群は表(3)-10に示すように有症率がわずかにA群で高いが、鼻症状の出現率ほぼ同程度である。日常生活の支障度はB群がA群に比べて低頻度であった。中高年においても同じくA群有症状率がB群より高い頻度で見られた。B群における日常生活の支障度は学生のB群よりも低く、2010年の10例のみの検討では比較できないが、学生より外に出る頻度が少ないため外気を長時間吸入しないことも一因している可能性もある。2010年、2011年における黄砂飛来後は2年間、A群・B群ともに鼻症状の出現頻度が最も高く次いで、A群では眼症状、B群では咽喉頭・下気道症状の順に頻度が高く見られた。

次に図(3)-15に示すように2010年大学生の症状スコア日記をA群(92名)、B群(102名)における鼻症状、眼症状、咽喉頭・下気道症状の平均スコアおよび薬剤スコアを表した。

上段はアレルギー有のA群、下段はアレルギー無のB群で横軸は2010年3月の日付を表し、縦軸は症状と薬剤の平均スコアである。A群は0~3.0、B群は0~1.4でA群が高いスコアで経過している。グラフに示す鼻(Nasal Symptoms)・眼(Eye Symptoms)および下気道を含む咽喉頭症状(Pharyngeal symptoms)のうち両群ともにスコアの差はあるが、鼻症状が最も高く、次いでA群では眼症状が高いが、黄砂日はSPM濃度上昇とともに咽喉頭・下気道症状スコアが眼症状より上昇し、SPM濃度の低下によりスコアも低下した。

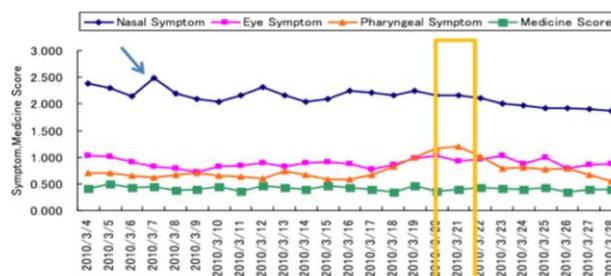
各症状を3月5日、9日と3月20・21日とそれぞれに平均スコアを比較検討した結果、A群では鼻水、眼のかゆみおよび咽喉頭・下気道総合スコアが有意に上昇した。B群でも同様に検討した結果、咳症状と咳症状が含まれる咽喉頭・下気道症状総合スコアが有意に上昇した。グラフ中の→は黄砂飛来日ではないのに症状スコアの上昇が認められ、光化学オキシダント(OX)上昇時に一致しており、今後さらに検討する必要がある。

図(3)-16は家族の中高年における黄砂日前後の各症状の平均スコアを示す。2010年の学生の家族である中高年の調査ではA群は学生と同じく鼻症状が最も平均スコアが高く、眼症状スコアが高く経過しながら3月13日にSPM濃度が上昇した時点で咽喉頭・下気道症状スコアが眼症状より上昇した。鼻症状は13日のSPM濃度上昇に伴い、グラフ中の→に示すようにスコアが上昇、20・21日の黄砂飛来日に特に有意差をもってスコアが上昇する現象は見られなかった。13・16日のSPM濃度上昇は気象情報では黄砂と報告されているが、LIDARでは記録されておらず、大気汚染物質(spherical particles)による症状スコアの上昇が強くうかがわれ、また積算 $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$ 以下の濃度でスコアが上昇して、 $2400 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$ 以上のSPM濃度上昇が見られてもさらにスコアが有意に上昇してはおらず、薬剤スコアの変動も認められなかった。黄砂物質と異なる粒子のためのSPM濃度上昇で症状スコアが上昇したのか、比較的高いSPM濃度ですぐに反応して症状スコアが上昇し、以後は症状を感じていなかったのか今後同じ状況になった場合を検討することが必要と思われた。しかし学生はA、B群ともに症状スコアの有意な上昇が見られており、やはり

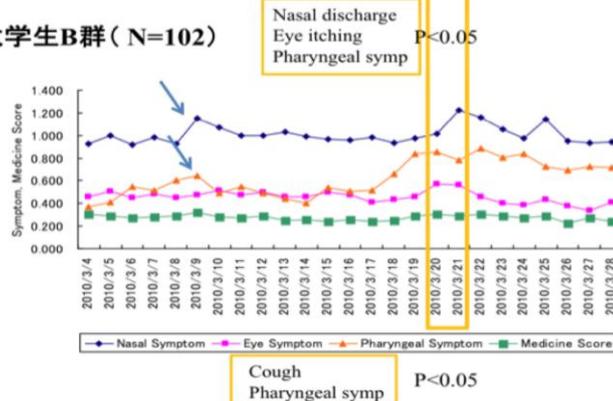
13・16日のSPM濃度上昇時にまず反応し、さらに20・21日の黄砂飛来日のSPM上昇に反応して有意に鼻症状・咽喉頭症状スコアが上昇しているため感受性の違いによることがうかがわれる。中高年のB群については10例のため今回のような検討はできなかったが、咽喉頭症状スコアが13・16日のSPM上昇時より急に上昇して、20・21日にはもとに戻っていることから、1～2名の感冒症状などの所見が大きく影響している可能性がうかがわれ、検討数を増やす必要があると思われる。

2011年は非常に強い黄砂が飛来した年で、図(3)-17は大学生の各症状の平均スコアの推移を示した。強い黄砂飛来日は5月1日～5日であったが、A、B群ともに黄砂飛来が報告される2～3日前から鼻症状、咽喉頭・下気道症状が上昇し始めているのが目立っている。またA群は鼻症状スコアが最も高く推移しているが、B群では鼻症状は黄砂飛来前からスコアが上昇しているが、咽喉頭・下気道症状スコアは鼻スコアを超えて上昇し、黄砂後まで続いているのがみとめられた。A群でも鼻症状に続いて咽喉頭・下気道症状、眼症状と2010年と比較して眼症状スコアは同程度であるが、咽喉頭・下気道の症状スコアの上昇が見られ、年によって影響される器官が異なることもうかがわれた。A群、B群のスコアは有意にA群が高く、薬剤スコアも高いことからアレルギー有の群は何らかの治療を行ってもアレルギー無の群に比べて症

### 大学生A群 (N=92)、2010年

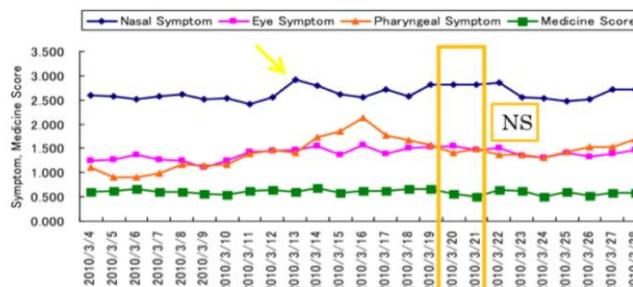


### 大学生B群 (N=102)

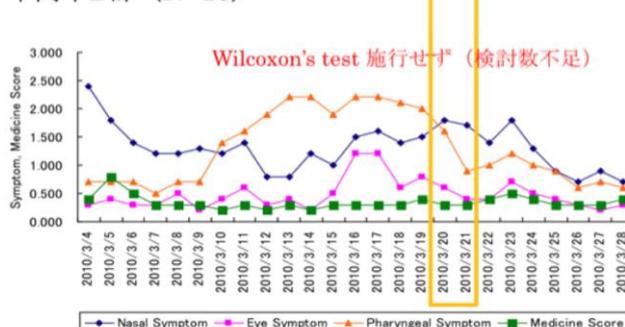


図(3)-15 2010年における黄砂を含むSPMの推移による大学生の鼻、眼、咽喉頭・下気道炎症および薬剤使用への影響

### 中高年A群 (N=51)

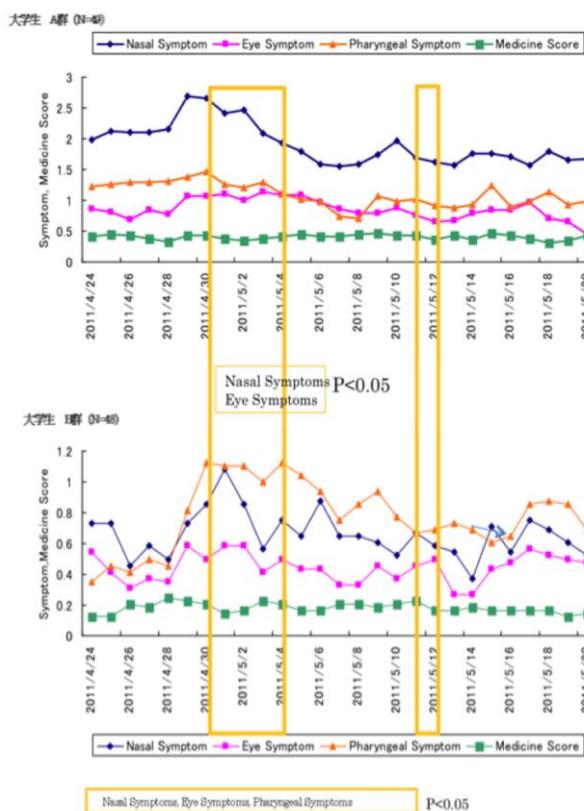


### 中高年B群 (N=10)

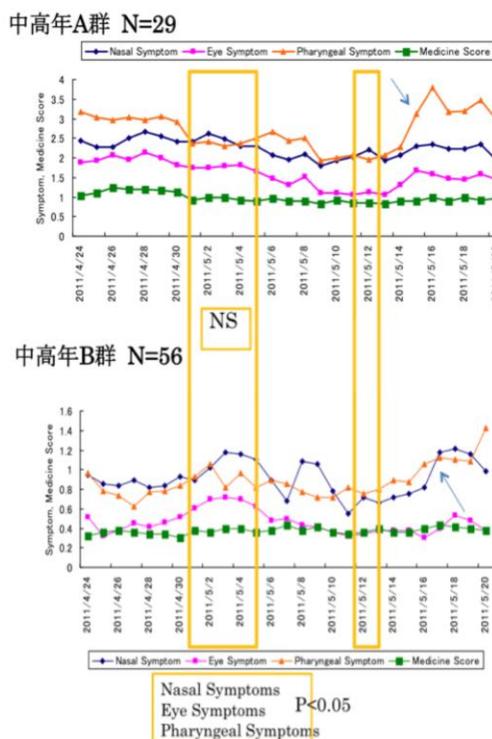


図(3)-16 2010年における黄砂を含むSPMの推移による中高年の鼻、眼、咽喉頭・下気道炎症および薬剤使用

状スコアが高く経過していることがうかがわれた。前述した日常生活の支障度の出現率も症状スコアの違いを反映している可能性がある。黄砂飛来日前から SPM 濃度が上昇しており、SPM 濃度が上昇する前の 4 月 24 から上昇し始める 30 日までの 6 日間各日と 5 月 1~5 日までの各日との症状スコアの差を検討した結果、24~28 日と 5 月 1 日との間に有意に鼻・眼症状が上昇した結果が得られたが、28 日から上昇し始めた症状スコアは 5 月 1 日頃より低下しはじめていた。B 群では鼻・眼・咽喉頭・下気道症状スコアが有意に上昇したが、A 群と同様に SPM 濃度の上昇に伴い鋭敏にスコアが上昇していることがうかがわれた。一方、図(3)-18 に示すように学生の家族で 40 歳以上の中高年の A 群では 4 月 24 日から、咽喉頭・下気道症状スコアが鼻症状より高く推移して、スコアも 3 点以上となっており、何らかの影響を受けている可能性がうかがわれた。学生は黄砂飛来で SPM 濃度が 28 日頃より漸増しているのに伴い、各スコアの上昇が見られたが、中高年では SPM 濃度と症状スコアの変化が一致せず、その理由の一つとして薬剤スコアが 1 点以上と最も高く経過しており、治療しているので症状スコアの変動が少ないことも考えられた。B 群では A 群と異なり、各症状スコアは有意に低いが鼻症状が最も高く、咽喉頭・下気道症状、眼症状の順に推移していた。黄砂飛来前から徐々に症状スコアが上昇し、鋭敏さに欠けるが有意に各症状スコアが上昇していた。12 日も黄砂が飛来したが、



図(3)-17 2011年における黄砂を含むSPMの推移による大学生の鼻、眼、咽喉頭・下気道炎症および薬剤使用



図(3)-18 2011年における黄砂を含む SPM の推移による中高年の鼻、眼、咽喉頭・下気道炎症および薬剤使用

とくに症状スコアは影響を受けていなかった。さらに A 群は 5 月 15～16 日にかけて、咽喉頭・下気道症状スコアが、眼症状スコアとともに急に上昇し、B 群でも鼻、咽喉頭・下気道症状スコアが上昇していた。黄砂飛来前の数日間と 12 日の黄砂飛来後の数日間光化学オキシダント (OX) が 1500 ppb/day 以上の上昇が見られ、症状スコアの上昇に大きな影響を与えていることがうかがわれた。

### (3) まとめ

2010 年、2011 年の黄砂飛来の頻度が高い 2～5 月の 4 か月間、通常健康な生活を送っている平均 19～20 歳の大学生とその家族で 40 歳以上の中高年を対象に、黄砂飛来による主に鼻、眼、咽喉頭・下気道症状の影響を調査した。

各症状スコアは花粉症やアレルギー性鼻炎のある A 群がアレルギーのない B 群より有意に高く経過していたが、症状は軽度から軽微と考えられた。アレルギー無の群でも症状スコアの推移がアレルギー有の A 群と同様な推移を示し、黄砂の影響が強うかがわれた。

2010 年は学生 A、B 群、中高年の A 群は鼻症状が最も高く経過したが、2011 年は鼻症状、咽喉頭・下気道症状スコアの高さが交錯しており、学生では A 群は鼻症状が最も症状スコアが高く、B 群では咽喉頭・下気道が鼻症状と同じ程度で経過した。中高年は咽喉頭・下気道症状が最も高いスコアを示して推移していた。咽喉頭・下気道症状の推移は一定しておらず、今回多くの症状因子を含めて検討しており、今後さらに症状を特定して検討する予定である。また下気道症状は気管支喘息、慢性閉塞性肺疾患、さらに慢性呼吸器疾患など呼吸器疾患への直接・間接影響や上気道から他臓器への間接的な影響などもさらに検討することが望まれる。

年齢が若い学生は SPM や OX に鋭敏に反応し、中高年は学生より症状スコアが高く、薬剤スコアも高い傾向で、黄砂飛来にともない徐々に症状スコアが漸増し、黄砂飛来後にスコアが上昇していた。年齢を問わず黄砂のみでなく黄砂以外の大気汚染物質 (spherical particles) などの SPM や OX なども健康に影響する重要な因子であることが強く示唆された。

今後も健康への影響調査を継続してヒトの保健に役立てる必要があると考えられる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

#### 1) 風送黄砂のアレルギー修飾作用に関する動物を用いた実験学的研究

気管支喘息やスギ花粉症のモデルマウスを用いた動物実験により、風送黄砂にはこれらの I 型アレルギーを増悪させる作用があることが明らかとなった。また黄砂粒子自身に肺の細菌感染による炎症を悪化させる作用があることが明らかとなった。黄砂がアレルギー反応を高めることや感染症による炎症反応を高める作用を見いだしたことは科学的に非常に意義あるものである。サブテーマ 4 の小林らによって能登半島珠洲市上空の航空機 (高度 3,000 m) と係留気球 (高度 1,000 m) より採取された黄砂から分離培養された黄砂付着細菌の一つとして生菌の *Bacillus* sp. を用いて感染実験を行った。マウスの気管内に投与したが肺に炎症は惹起されなかった。また黄砂から分離培養された肺化膿症を引き起こすノカルジア菌 (アルカリ放線菌) を用いてマウス喘息モデルにてアレルギー増悪作用を調べたが、この菌にはアレルギーを増悪する作用がないことが明らかとなった。今後は黄砂に附着したカビなどを中心としてアレルギー増悪との関連性を明らかにする必要がある。

## 2) 風送黄砂の健康影響に関する疫学調査

2010年と2012年に黄砂の健康への影響調査を行った結果、花粉症や気管支喘息等のアレルギーの有無を問わず、軽微～軽度の変化ではあったが眼、鼻、咽頭や下気道に影響があることが明らかとなった。動物実験に比較して黄砂飛来時の曝露濃度はかなり低いが、一般的に曝露を受ける濃度であってもヒトの気道に黄砂が影響を及ぼすことが明らかとなったことは非常に意義深いものである。今後、慢性呼吸器疾患などへの直接・間接影響や上気道から他臓器への間接的な影響などもさらに検討することが望まれる。

### (2) 環境政策への貢献

黄砂の健康影響に関しては社会的関心が非常に高いため、今後、学術雑誌や新聞等の報道を通じて、研究成果の広報に努め、社会的・行政的な面から東アジア一帯の環境政策、健康被害予防法の施策の必要性を提起したい。次年度も継続して黄砂の健康影響調査を行う予定であり、動物実験においても黄砂中のアレルギー増悪作用を起こす物質を特定する予定であり、黄砂の健康影響評価を行うにあたり今後の成果が期待される。また、本プロジェクトで得られた成果は気象庁の黄砂情報にも付加価値を付けるものであり、人の健康面からも黄砂ルートの解明、早期警報システムの構築事業のために期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

黄砂の健康被害のメカニズムや健康問題を解決するには中国側の協力が不可欠である。本サブテーマの分担責任者の研究室では中国瀋陽市にある中国医科大学公共衛生学院、院長の孫 貴范教授と黄砂の健康影響に関する共同研究を進めている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

< 論文 (査読あり) >

- 1) Ichinose T, K. Hiyoshi, S. Yoshida, H. Takano, K. Inoue, M. Nishikawa, I. Mori, H. Kawazato, A. Yasuda, T. Shibamoto: *Inhalation Toxicology*, Oct; 21(12), 985-993 (2009)  
“Asian sand dust aggravates allergic rhinitis in guinea pigs induced by Japanese cedar pollen”
- 2) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, M. Nishikawa, I. Mori, R. Yanagisawa, H. Takano, K. Inoue, G. Sun, T. Shibamoto: *Inhalation Toxicology*, 22(9):709-718 (2010)  
“Urban particulate matter in Beijing, China enhances Allergen-Induced Murine Lung Eosinophilia”
- 3) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, M. Nishikawa, I. Mori, R. Yanagisawa, H. Takano, K. Inoue, G. Sun, T. Shibamoto: *Inhalation Toxicology*, 22(12), 1012-1025 (2010)  
“Airborne Asian Sand Dust Enhances Murine Lung Eosinophilia”
- 4) 市瀬孝道：日本気象学会、*天気*、58(6)、511-516、(2011)  
「黄砂と中国大都市粒子状物質の健康影響（2009年度秋季大会シンポジウム「東アジアの大気環境」の報告）」
- 5) 市瀬孝道：THE UNIVERSITY OF TOKYO、*環境安全*、128、8-9 (2011)  
「黄砂のアレルギー増悪作用」

- 6) 市瀬孝道：健康教室、第725集、64-67 (2011)  
「黄砂による健康への影響」
- 7) 市瀬孝道：日本医事新報、4537、56-57 (2011)  
「黄砂のアレルギー疾患への影響」
- 8) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, S. Yamamoto, K. Inoue, H. Takano, R. Yanagisawa, M. Nishikawa, I. Mori, G. Sun, T. Shibamoto: Toxicol Appl Pharmacol, 15, 258(2), 237-247 (2012)  
“Asian sand dust enhances murine lung inflammation caused by *Klebsiella pneumoniae*”

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 市瀬孝道：第3回環日本海域環境シンポジウムー地球環境地域学の創成をめざしてー、金沢、12-13 (2009)  
「黄砂の健康問題と今後の課題」
- 2) 市瀬孝道：第5回全国環境研究所交流シンポジウム「PM2.5を考えるー実態、測定、モデル、影響」、つくば、26-27 (2010)  
「黄砂の健康影響」
- 3) 市瀬孝道：大気環境と気道疾患を考える会、米子 (2010)  
「黄砂とアレルギー」
- 4) 吉田成一、高野裕久、市瀬孝道：日本薬学会第130年会、岡山 (2010)  
「大気中に含まれる微粒子の胎仔期曝露が出生仔の免疫系に与える影響」
- 5) 市瀬孝道：第17回日本免疫毒性学会学術大会「免疫毒性を修飾する感受性要因」シンポジウム (2010)  
「黄砂とアレルギー」
- 6) 市瀬孝道：第41回日本職業・環境アレルギー学会 (2010)  
「黄砂のアレルギー増悪作用」
- 7) 岸川禮子、今井透、市瀬孝道、奥野由美子、嵐谷奎一、樺田尚樹、西川雅高、吉田成一、下田照文、岩永知秋：第22回日本アレルギー学会春季大会 (2010)  
「黄砂が健康に及ぼす影響調査」
- 8) 岸川禮子、下田照文、市瀬孝道、吉田誠、古森雅志、今岡通巖、麻生博史、岩永知秋：第64回日本呼吸器学会・日本結核病学会九州支部春季学会 (2010)  
「福岡市における黄砂現象の影響調査ー気管支喘息患者のPEF値の変動ー」
- 9) 今井透、岸川禮子、市瀬孝道、奥野由美子、嵐谷奎一、樺田尚樹、西川雅孝、吉田成一、下田照文、岩永知秋：第60回日本アレルギー学会秋季大会 (2010)  
「黄砂が健康に及ぼす影響調査 (第2報)」
- 10) 岸川禮子：日本職業・環境アレルギー学会 (2010)  
「2010年黄砂が健康に及ぼす影響調査ー青年と中高年層への影響の違いはあるか、大学生とその家族における調査結果ー」
- 11) Kishikawa R., T. Imai, T. Ichinose, Y. Okuno, K. Arashidani, M. Nishikawa, T. Shimoda, T. Iwanaga: American Academy of Allergy Asthma & Immunology (AAAAI), March 20<sup>th</sup>, San Francisco (2011)

- “Effects of Asian Sand Dust on Human Health and Allergic Symptom Fukuoka, Japan”
- 12) 市瀬孝道：大気環境学会シンポジウム「越境大気汚染の現状」(2011)  
「黄砂の健康影響」
  - 13) 市瀬孝道：第131回日本薬学会 (2011)  
「風送黄砂が気管支喘息病態に与える影響」
  - 14) 吉田成一：第131回日本薬学会 (2011)  
「日本で採取した大気浮遊粒子状物質（黄砂）がマウス精子性状に与える影響」
  - 15) He Miao：第131回日本薬学会 (2011)  
「黄砂は肺炎桿菌誘発性の炎症を増悪する」
  - 16) 市瀬孝道、賀森、吉田成一、定金香織、西川雅孝、森育子、高野裕久：第52回大気環境学会  
年会 (2011)  
「黄砂が卵白アルブミン誘発性の肺の好酸球性炎症に与える影響」
  - 17) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, M. Nishikawa: 第52回大気環境学会年会 (2011)  
“Effect of Asian sand dust on expression of cytokine and chemokine induced by Klebsiella  
pneumoniae in mouse macrophage”
  - 18) 岸川禮子、今井透、市瀬孝道、吉田成一、嵐谷奎一、奥野由美子、榎田尚樹、西川雅孝、下  
田照文、岩永知秋：第52回大気環境学会年会 (2011)  
「黄砂、煙霧、光化学オキシダントの健康影響」
  - 19) 吉田成一、小塩茂、西川雅孝、賀森、森育子、市瀬孝道：第52回大気環境学会年会 (2011)  
「風送黄砂によるマウス精子性状への影響」
  - 20) 岸川禮子、下田照文、市瀬孝道、吉田成一、岩永知秋、今井透、市瀬孝道、西川雅孝：第61  
回日本アレルギー学会秋季学術大会 (2011)  
「2010年黄砂における喘息など呼吸器疾患への影響調査」
  - 21) 市瀬孝道、高野裕久、井上健一郎、柳沢利枝：第61回日本アレルギー学会秋季学術大会 (2011)  
「黄砂の肺炎桿菌誘発性肺炎に対する増悪作用」
  - 22) Ichinose T., M. He: The 42 nd Annual meeting of Japanese Society of Occupational and  
Environmental Allergy. Environmental Air Contaminations Influencing on Airway Allergy -  
Especially Asian Sand Dust - (2011)  
“Asian dusts and allergy”
  - 23) Liu B., S. Yoshida, M. He, T. Ichinose: フォーラム2011 衛生薬学・環境トキシコロジー (2011)  
“Effect of microorganisms attached onto yellow dust on inflammatory cytokines and TLRs  
expression in mouse macrophages”
  - 24) Kishikawa R., T. Imai, T. Ichinose, S. Yoshida, Y. Okuno, K. Arashidani, M. Nishikawa, A.  
Shimizu, T. Shimoda, T. Iwanaga: American Academy of Allergy Asthma & Immunology (AAAAI),  
March 2<sup>nd</sup> Orando (2012)  
“Effects of Asian Dust and Spherical Particles Exposure on Human Health and Allergic Symptom,  
Fukuoka, Japan”
  - 25) He M., T. Ichinose, S. Yoshida, S. Yamamoto, K. Inoue, H. Takano, R. Yanagisawa, M. Nishikawa,  
I. Mori, G. Sun, T. Shibamoto: 51th Society of Toxicology (2012)

“Asian sand dust enhances murine lung inflammation caused by *Klebsiella pneumoniae*”

- 26) 賀森、劉博瑩、吉田成一、尾立翠、市瀬孝道：第132回薬学会（2012）  
「成分組成の異なる黄砂の気管支喘息増悪作用の比較」
- 27) 市瀬孝道、賀森、吉田成一：第132回本薬学会（2012）  
「黄砂のスギ花粉症増悪作用」
- 28) 市瀬孝道：第11回東海アレルギーフォーラム（2012）  
「黄砂アレルギーと微生物の役割」
- 29) 岸川禮子：第41回日本職業・環境アレルギー学会（2011）  
「2011. 2010年黄砂が健康に及ぼす影響調査—青年と中高年層への影響の違いはあるか、大学生とその家族における調査結果—」
- 30) 岸川禮子、市瀬孝道、下田照文、吉田誠、古森雅志、奥野由美子、嵐谷奎一、岩永知秋：  
第66回日本呼吸器学会・日本結核病学会九州支部春季学会  
「黄砂が健康に及ぼす若い年齢層への影響（第2報）」
- 31) 岸川禮子、今井透、市瀬孝道、吉田成一、嵐谷奎一、奥野由美子、樺田尚樹、西川雅高、下田照文、岩永知秋：第52回大気環境学会年会（2011）  
「黄砂、煙霧、光化学オキシダントの健康障害」
- 32) 岸川禮子、下田照文、吉田誠、岩永知秋、今井透、市瀬孝道、西川雅高：第61回日本アレルギー学会秋季学術大会（2011）  
「2011年黄砂における喘息など呼吸器疾患への影響調査」
- 33) 市瀬孝道：京都府立医科大学公開講座「子どもの健康と化学物質」（2011）  
「黄砂とアレルギー」
- 34) 市瀬孝道：福岡県保険医協会講演会（2011）  
「黄砂の健康影響」
- 35) 市瀬孝道：兵庫 Allergy Meeting 2012（2012）  
「黄砂アレルギーと微生物」

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない

### （4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

### （5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 熊本日日新聞（平成22年2月24日、熊本版朝刊、3頁参照）
- 2) 経済新聞（平成22年4月5日、全国版参照）
- 3) YAHOO! JAPAN ニュース（<http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20100405-00000054-san-soci>参照）
- 4) 毎日新聞（平成22年3月24日、東京朝刊、安心・安全ナビ参照）

## (6) その他

特に記載すべき事項はない

## 8. 引用文献

- 1) 岸川禮子：質疑応答、黄砂による健康被害、日本医事新報2010; No.4516(11):79-80.
- 2) Kumiko T. Kanatani, Isao Ito, Wael K. Al-Delaimy, Yuichi Adachi, William, C. Mathews, Joe W. Ramsdell, and the Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team: Desert Dust Exposure Is Associated with Increased Risk of Asthma Hospitalization in Children, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2010; 182: 1475-1481.
- 3) 杉本伸夫、清水 厚、松井一郎、鶴野伊津志、荒生公雄、陳 岩：連続運転、偏光ライダーネットワークによる黄砂の動態把握、地球環境、Global Environmental Research, 2002; 2: 197-207.
- 4) 西川雅高：黄砂研究最前線—科学的観測手法で黄砂の流れを遡る、2003; 8:14.
- 5) 安井元昭、周紀侠、水谷耕平、板部敏和、青木哲郎、劉立超：ライダーによる中国砂漠地域上空ダスト鉛直分布の観測、Global Environmental Research, 2002; 2: 149-158.
- 6) Simizu A, Sugimoto N, Mtsui I, Mori I, Nishikawa M and Kido M.: Relationship between Lidar - derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentrations in Japan, Scientific Online Letters on the Atmosphere (Special Edition: Typical Asian Dust); 2007: 74(2011): 1-4.
- 7) 環境省：平成22年度黄砂飛来状況報告書—平成21年度における黄砂実態解明調査—、2011; 9-12.
- 8) 鼻アレルギー診療ガイドライン作成委員会：第4章検査・診断法、鼻アレルギー診療ガイドライン—通年性鼻炎と花粉症—2009年版（改訂第6版）ライフサイエンス、東京、2009. 18-31.
- 9) 中野正博著：看護・保健・医療のための楽しい統計学、ヘリシテイ出版、2007年8月発行

#### (4) 健康・植物影響評価のための風送ダスト中バイオエアロゾルの直接採集・分析に関する研究

金沢大学 理工研究域 自然システム学系	小林史尚
理工研究域 物質化学系	牧 輝弥
環日本海域環境研究センター	柿川真紀子
医薬保健研究域 医学系	東 朋美
地域連携推進センター 能登半島里山里海自然学校	赤石大輔

平成 21 年度～23 年度累計予算額：31,301 千円（うち、平成 23 年度予算額：10,397 千円）

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]** 欧米では、サハラ砂漠から舞い上がる砂塵にバイオエアロゾル（生物粒子）が含まれているなど風送ダスト中のバイオエアロゾルについて研究が進んでいるが、日本を含む東アジアにおいてほとんど報告されていない。さらに、風送ダストである黄砂に含まれるバイオエアロゾルの人の健康や自然生態系などを含む環境評価に際しては全くないと言っている。本研究では、環境評価を目的とした黄砂バイオエアロゾルの直接採集・分析・同定解析を実施した。黄砂発生源である中国敦煌市および沈着地域として日本珠洲市において、係留気球と独自に開発したバイオエアロゾルサンプラーを用いて上空 400～800 m に浮遊している黄砂バイオエアロゾルを採集した。また、航空機を用いて高高度（3,500 m）の黄砂バイオエアロゾル採集も試みた。サンプルは、分離培養・同定、メタゲノム解析、DGGE 解析の 3 手法を駆使し、多角的に黄砂バイオエアロゾルを生物分析した。その結果、*Bacillus* 属菌株など、人の健康や植物生態系に及ぼす可能性のある菌が種々見つかった。黄砂現象時には DNA 量換算で  $0.125 \text{ g m}^{-3}$  飛来しており、黄砂現象を伴わない時の約 5 倍であることがわかった。また、メタゲノム解析から新種の菌も発見された。健康影響評価としては、サブテーマ 3（大分県立看護科学大学）に実際に採取した菌株をマウス実験のために提供した。植物生態系影響としては、松枯れと黄砂観測日との統計的相関を検討した結果、相関が高いことがわかった。松枯れの原因となりうる松材線虫の黄砂バイオエアロゾル食餌実験を行った結果、黄砂バイオエアロゾルを摂取し増殖することがわかった。黄砂バイオエアロゾルが松材線虫病（松枯れ）のきっかけとなる可能性が示唆された。

**[キーワード]** 黄砂、バイオエアロゾル（生物粒子）、生物分析、健康影響、生態系影響

#### 1. はじめに

近年、黄砂は地球環境に重要な寄与をする現象として多くの研究者によってその影響評価が行われている。黄砂の地球環境に及ぼす影響としては、太陽光の放射強制力の変化、酸性雨の中和作用や中国都市部で排出された有害物質の長距離輸送などがある<sup>1,2)</sup>。最近では、黄砂の健康影響についても報告されている<sup>3)</sup>。世界環境大臣フォーラムおよび第 8 回 UNEP 管理理事会特別会合において北東アジアの黄砂が 1950 年代と比較して 5 倍近くまで増加していることを報告しているよ

うに、年々急速に増加していることから、その影響評価が注目されている。一方、バイオエアロゾルとは、大気中に浮遊している生物粒子でウイルス、細菌、真菌などである。Kellogg と Griffin<sup>4)</sup> は、サハラ砂漠において舞い上がった砂塵の中に微生物が含まれていることを明らかにしている。欧米ではサハラ砂漠の砂塵を中心としたバイオエアロゾルの研究が進んできているものの、黄砂バイオエアロゾル研究は現在のところほとんどない。

本研究者らは、2007年から2008年において環境省地球環境研究総合推進費の受託研究により、黄砂発生源であるタクラマカン砂漠東端の敦煌市において係留気球を用いた上空の黄砂に含まれるバイオエアロゾルを直接採集し、種々の生物分析を実施し、健康に影響を及ぼす可能性のある微生物などを発見した<sup>5-11)</sup>。しかしながら、黄砂バイオエアロゾルの環境影響を検討するためには、沈着地域である日本における検討が必要であるが、ほとんど実施されていないのが実情である。

本研究では、黄砂発生源である中国甘粛省敦煌市および沈着地域である日本石川県珠洲市において係留気球を用いた黄砂バイオエアロゾルの直接採集を実施し、分離培養・同定、メタゲノム解析、DGGE 解析などの生物分析を行ったのでその結果を報告する。さらに、黄砂バイオエアロゾルの健康影響実験に関する菌株の提供（サブテーマ 3 と関連）および植物生態系影響を検討した。黄砂モニタリングに指向した DAPI 法や FISH 法を用いた解析、黄砂への混入限界を示したバイオプロセス解析、係留気球よりも高高度の黄砂バイオエアロゾルを採集するための航空機を用いた観測も試みたのでここに報告する。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマの最終目的は、黄砂バイオエアロゾルの中で人の健康や自然生態系に影響を及ぼすような菌類を同定し、その影響メカニズムの解明と評価を行うことにある。黄砂発生源である中国甘粛省敦煌市および沈着地域である日本石川県珠洲市において黄砂バイオエアロゾルの直接採集と生物分析を実施し、健康影響や生態系影響を含めた種々の検討を行った。

## 3. 研究開発方法

### (1) 採集地点、日時、および方法

#### 1) 採集地点

黄砂発生源としては、中国甘粛省敦煌市气象台（Dunhuang; 40.1° N, 94.7° E）において係留気球を用いて黄砂バイオエアロゾルを直接採集した。敦煌はタクラマカン砂漠東端に位置している。タクラマカン砂漠の周辺は 4000 m 級の山並みが連なり、東側だけが山の障壁がない。上空は一般的に偏西風が吹き、舞い上がった砂塵はこの風によって西から東へ運ばれる。黄砂沈着地域としては、石川県珠洲市の金沢大学里山里海自然学校のグランド（37.5° N, 137.4° E）において行った。石川県珠洲市は、日本列島における日本海沿岸のほぼ中央に位置する能登半島先端の沿岸付近であるので、日本海を渡ってくる黄砂を直接的に採集でき、日本列島起源のバイオエアロゾルによる影響が少ないことから、この地点をサンプリングポイントとした。

#### 2) 採集日時

黄砂発生源である中国甘粛省敦煌市における係留気球を用いた黄砂バイオエアロゾルのサンプリングは 2010 年 9 月 13～20 日に実施した。黄砂沈着地域である日本石川県珠洲市における係留気球や航空機を用いたバイオエアロゾルの直接採集は、2008 年 5 月 7～9 日、2009 年 4 月 27 日～

5月2日、2010年3月24～28日、2010年5月12～15日に実施した。中でも分析が進んでいる2008年5月と2009年4月のサンプリングについて述べる。係留気球を用いて上空400 mから800 mの大気混合層および対流圏の黄砂バイオエアロゾルを採集した（図(4)-1）。航空機を用いた高高度のバイオエアロゾルの採集は2009年11月20日に実施した。名古屋空港（旧小牧空港）から離陸し、約1時間能登半島上空を巡回してサンプリングを行った（図(4)-2）。サンプリング高度は地上3,500 mであった。



図(4)-1 係留気球を用いたサンプリング

(a)



(b)



図(4)-2 航空機サンプリング：(a)機体(b)飛行航路

### 3) 採集方法

係留気球を用いた黄砂バイオエアロゾルの直接採集は、充填ガスがヘリウム、容積 12 m<sup>3</sup> の魚型気球と著者らが開発したバイオエアロゾルサンプラーを用いて行った。バイオエアロゾルサンプラーには、吸引ポンプ、バッテリー、電波受信部、サンプリングチューブ開閉用シャッター、メンブレンフィルターユニットが搭載されており、滅菌状態を維持したまま目的高度まで上昇させ、

地上からの電波によってシャッターの開閉、ポンプの稼働などがコントロールでき、目的高度のバイオエアロゾル以外の雑菌汚染は完全に防ぐことができる。バイオエアロゾル採集用メンブレンフィルタは、孔径 0.45  $\mu\text{m}$  の滅菌済ポリビニリデンフロライド製親水性フィルタを用いた。吸引は 1 hr 行い、予備実験から本研究で使用したサンプラーでは約 0.7  $\text{m}^3$  の大気を吸引できる。バイオエアロゾルサンプラーの開閉など無菌状態を要する作業は、里山里海自然学校の実験室にあるクリーンベンチ内で行った。航空機サンプリングは、天井部分にサンプリング用（直径 20 mm）の穴があいている双発のセスナ 404 に搭乗し、上空に達してから滅菌済みのインレットおよびチューブを係留気球用バイオエアロゾルサンプラーに接続して目的高度以外の雑菌が混入しないように行った。また、気象データとしてサンプリング当日の CFORS 解析と OMI-TOMS 解析も行った。

## （2）生物分析

### 1）分離培養・同定法

回収したメンブレンフィルタは、すぐにニュートリエント寒天培地（Nutrient Agar 28  $\text{g L}^{-1}$ ）、血液寒天培地（Blood Agar 40  $\text{g L}^{-1}$ 、滅菌済羊血 7 % v/v）、ポテトデキストロース寒天培地（Potato Dextrose Agar 39  $\text{g L}^{-1}$ ）、サブローブドウ糖寒天培地（Sabouraud Dextrose Agar 65  $\text{g L}^{-1}$ ）のそれぞれのプレートにクリーンベンチ内の無菌状態でプリントし、その後プレートは 25  $^{\circ}\text{C}$  で 2~3 週間培養した。単離菌株からゲノム DNA を抽出し、16S rRNA あるいは 18S rRNA を増幅した。その後、PCR 産物をダイレクトシーケンスし、約 400 bp の部分塩基配列を決定した。16S rDNA あるいは 18S rDNA を用いた帰属分類群の推定には、BLAST により国際塩基配列データベース（GenBank/DDBJ/EMBL）に対し相同性検索を行い単離菌株を同定した。

### 2）メタゲノム解析（ゲノム分析）

本方法は分離培養法と異なり、フィルターに捕集されたバイオエアロゾルを培養過程を経ず、直接 DNA を抽出し、PCR で rDNA 領域を増幅後、クローニングし、rDNA 領域の遺伝子配列を調べ、その遺伝子配列をもとに生物情報データベース検索より生物種の同定を行った。バイオエアロゾル捕集したフィルターを緩衝液（10 mM Tris-HCl、pH 7.5 など）にフィルタを浸し、溶菌酵素 Lysozyme や Mutanolysin、タンパク質分解酵素 Proteinase K などの添加して細胞膜を溶解し、DNA を抽出した。バイオエアロゾルに含まれる DNA を精製し、DNA から 16S rRNA 遺伝子、18S rRNA 遺伝子領域を増幅し、大腸菌クローニングベクターにつなげ、大腸菌に遺伝子導入し、クローン化後、rRNA 遺伝子領域を ABI 310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems) により DNA の塩基配列を決定した。国際塩基配列データベースで類似配列を BLAST 検索し生物種の同定を行った。

### 3）DGGE 解析

大気中に浮遊する耐塩細菌に焦点を絞って集積培養するため、バイオエアロゾル試料の懸濁液を、NaCl 濃度を 0 %、3 %、10 % 及び 15 % に変えた細菌用（Trypticase-soy-broth : TS）液体培地に接種した後、14 日間培養し、微生物生長量を確認した。さらに、「生長の見られた培養」および「エアロゾル試料」に含まれる細菌種を同定するため、PCR-DGGE 解析を施行した。まず、培養からフェノール・クロロホルム処理を用いて抽出したゲノム DNA を鋳型として、DGGE 用プライマーを用いた PCR 法により 16S rDNA を増幅した。この PCR 増幅産物を、DNA 変性剤（尿素）で濃度勾配をつけたポリアクリルアミドゲル上に電気泳動した後、ゲル上に展開したバンドパ

ターンを確認した。バンドに含まれる核酸の塩基配列を用いて、微生物培養に含まれる細菌群の種組成を系統分類学的に解析した。

#### 4) DAPI・FISH 解析

細菌株の液体培養を、終濃度 1 %のグルタルアルデヒドで固定した後、細菌細胞を孔径 0.2  $\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルター上に濾過捕集し、フィルターごとマイクロチューブに入れた。エタノールでフィルター上の細菌細胞を洗浄し、ハイブリダイゼーション溶液 (Hybridization Solution:HS) に浸し、馴染ませた後、核酸プローブ 1  $\mu\text{L}$  を含むハイブリダイゼーション混合溶液を加え、20  $^{\circ}\text{C}$  で 4 時間ハイブリダイズした。今回使用した核酸プローブは、細菌株の全塩基配列を用いて、特異的に *B. subtilis* の DNA のみに結合するように設計した。ハイブリダイゼーション終了後、未反応のプローブを除去し、DAPI 溶液を加え、全細菌細胞を染色した。濾過によって乾燥させたフィルターを、イマージョンオイルを用いてプレパラートとスライドガラスの間に密閉し、落射型蛍光顕微鏡を用いて DAPI 染色された細胞は UV 励起で、核酸プローブ染色された細胞は B2 励起で観察した。

#### (3) バイオプロセス解析

現在の黄砂予報モデルは、黄砂粒子を対象としているが、バイオエアロゾルの場合生きているか死んでいるかが環境影響を考える上でも重要な項目となる。そこで、実際に沈着地域である日本上空で採集された微生物が、上空の環境条件でどれぐらい生きられるか、パラメータを推算し、死滅速度に関する数式モデルを用いてシミュレートを行った。使用菌株は発生源地域である敦陸市上空で採集された *Cladosporium* sp. と珠洲市上空で採集された *Bacillus* sp. である。*Cladosporium* sp. に関しては、日本に持ち帰ることができなかったため 18S rDNA 配列が全く同じ菌株を日本で購入して用いた。上空の環境条件としては、微生物の生死に最も影響を及ぼす紫外線に着目した。パラメータ推算実験としては、800  $\mu\text{Wcm}^{-2}$  の紫外線強度を最大 60 min、胞子に照射し、寒天重層法にて生菌を計測して行った。流跡線解析は NOAA HYPLIT モデル (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) を使用した。

#### (4) 健康影響評価

黄砂バイオエアロゾルの分離培養・同定・生物情報学の解析から得られた微生物の中で、ヒトに対して病原性を持つものについて、それらによる食中毒発生件数および感染症発生件数と黄砂観測日数との間に関係があるかどうか調査した。気象庁が発表している黄砂観測のべ日数と、厚生労働省による食中毒統計調査、感染症発生動向調査の統計資料を使用した。また、日本上空で同定された *Bacillus cereus* 株の食中毒毒素セレウリドの産生性を、Agata, Nらの方法により調べた。セレウリド合成遺伝子 (CRS gene) を PCR 法で増幅し、欠落の有無を解析した。

サブグループ 3 の市瀬らが作成した、風送黄砂暴露によるアレルギーモデルマウスの肝臓における遺伝子発現変化を解析した。新鮮な肝臓組織から total RNA を抽出し、リアルタイム PCR 法により、代謝解毒酵素 CYP1A1、CYP1A2 の発現を調べた。

さらに、健康影響を検討するために、金沢大学自然科学 1 号館 4 階ベランダにて (36 $^{\circ}$  32' N、東経 136 $^{\circ}$  42' E、海拔 125 m、地上からの高さ 15 m) 2011 年 3 月 17 日～6 月 15 日まで毎日 6 時間吸引ポンプと滅菌フィルターを用いて大気バイオエアロゾルを採集した。フィルターサンプル

は、黄砂バイオエアロゾルのメタゲノム解析のために開発した DNA 抽出法に従い直接 DNA を抽出され、大気 DNA 濃度を測定した。その DNA をテンプレートとし、リアルタイム PCR 法を用いたセレウリド産生性セレウス菌遺伝子やインフルエンザ菌、クラミジア菌、レジオネラ菌の各種毒素遺伝子の検出を行った。また、アレルギーに悪影響を及ぼすとされる菌体成分の  $\beta$ -グルカン濃度を測定した。

#### (5) 植物生態系影響調査

対象とする植物生態系としては、現在、能登半島において問題となっている「松枯れ（マツ材線虫病）」に注目した。松枯れ（マツ材線虫病）に注目した理由は、分離培養同定結果から、珠洲市上空に黄砂とともに *Bjerkandera* sp.が見つかったが、これら白色腐朽菌がマツ材線虫の食餌となる可能性がある、また、松枯れによる枯死木が白色腐朽菌の定着基質となっている可能性があることによる。黄砂現象と松枯れが関係があるかどうか調査するために、黄砂観測日数（金沢地方気象台）と松枯れ被害量（林野庁）について相関関係を検討した。比較として、気温（気象庁）、降水量（気象庁）、降水の pH 値（石川県環境大気調査報告書）、大気中の  $\text{SO}_2$  濃度（石川県環境大気調査報告書）についても検討した。

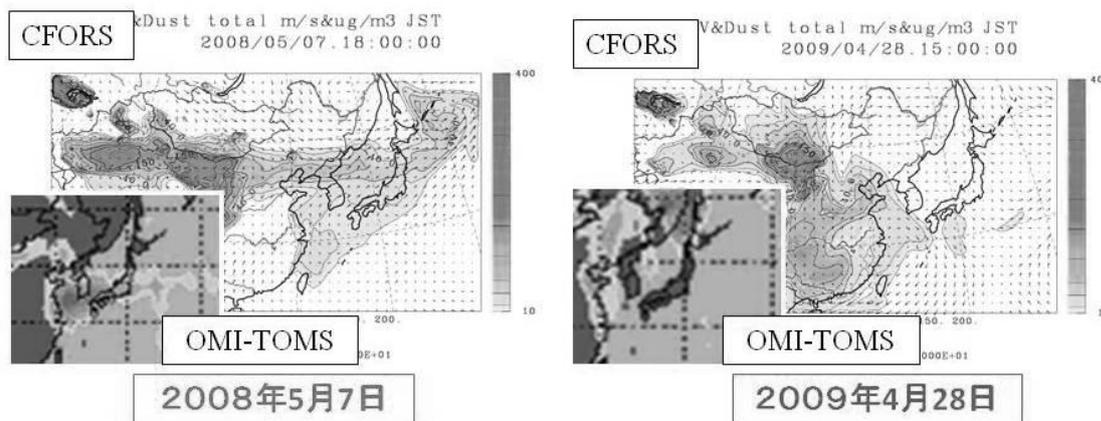
植物生態系影響に関して、松枯れの中でも生態系影響と考えられる「松材線虫病」に着目し、実験的に検討した。2010 年 7 月 22 日に能登半島珠洲市付近において松枯れ材サンプルを採取し、黄砂バイオエアロゾルに関する菌相調査、黄砂バイオエアロゾル食餌実験、木材分解実験を実施した。

### 4. 結果及び考察

#### (1) 採集日時の気象データおよび生物分析結果

##### 1) 気象データ

図(4)-3 は、2008 年および 2009 年に係留気球でバイオエアロゾルを採集したときの CFORS 解析と OMI-TOMS 解析結果を示す。2008 年の採集の時は、両解析結果とも黄砂が飛来してきていることを示した。2009 年の採集の時は黄砂があまり飛来しておらず、両サンプリングの生物分析結果から黄砂とともに飛来した（黄砂バイオエアロゾル）か否かを考慮する上で貴重なデータとなった。輪島測候所から出された高度別湿度では、2008 年と 2009 年いずれの場合も地上 400 m で急激に減少していることから、400 m 以上の大気は輸送されており、地上付近の影響はほとんどないことがわかった。本研究で採集した高度は 400、600 および 800 m であり、そのいずれもが地上の影響（接地層の影響）を受けずに採集できたと考えられる。



図(4)-3 黄砂・バイオエアロゾル採集日のCFORS解析とOMI-TOMS解析結果

## 2) 分離培養同定

黄砂現象が確認された 2008 年の直接採集から分離培養された単離菌株は、*Nocardiosis* sp. が 4 菌株、*Bacillus* sp. が 1 菌株、*Streptomyces* sp. が 1 菌株、*Bjerkandera* sp. が 2 菌株であった。一方、黄砂現象があまり確認されなかった 2009 年の直接採集からは、*Paraconiothyrium* が 1 菌株のみ単離された。黄砂がバイオエアロゾルを多量に運んできていることがわかった。また、航空機サンプリングでは、*Bacillus* sp. が 1 菌株分離培養された。航空機を用いた手法でも大気中のバイオエアロゾルを直接採集できることがわかった。

*Nocardiosis* sp. や *Streptomyces* sp. といった放線菌は、典型的なものでは気中に気菌糸を伸ばし胞子を形成することが知られており、この特徴が黄砂バイオエアロゾルとして大気に浮遊することを可能にしていることが考えられる。放線菌の中には病原菌もあり、人の健康に影響を及ぼしている可能性が考えられる。また、*Bacillus* sp. には、納豆菌もあれば人の健康に影響を及ぼすセレウス菌や炭疽菌もあり、沈着地域において環境に影響している可能性は高い。本研究で単離された木材腐朽菌である *Bjerkandera* sp. などが黄砂とともに沈着し、枯死木がこれら菌類の定着基質となっている可能性も考えられる。また、黄砂バイオエアロゾルがマツ材線虫病そのものと関係がある可能性も考えられ得る。マツ属樹木に被害を及ぼすマツ材線虫病の原因としてマツノザイゼンチュウが発見されている。本研究で単離された *Bjerkandera* sp. 等が食餌となり、松枯れ発生の引き金となっている可能性も考え得る。

黄砂発生源地域上空では *Rhodosporium sphaerocarpum* や *Bacillus cereus* が単離・同定され<sup>6)</sup>、本研究結果からの沈着地域と両地域において *Bacillus* 属菌株が見つかった。この理由は、*Bacillus* 属菌株の多くは芽胞を形成するので、芽胞が黄砂粒子とともに舞い上がりやすく、紫外線、温度や乾燥に耐性のあることから上空大気中を生きのまま長距離輸送されると考えられる。Hua ら<sup>7)</sup> は、黄砂発生源と沈着地域の砂や土壌から単離された *Bacillus* 属菌株について分子生物学的に比較検討し、黄砂によって *Bacillus* 属菌株が長距離輸送されていることを述べている。本研究の結果は、Hua らの *Bacillus* 属菌株の長距離輸送を示唆している。

航空機を用いた直接採集と分離培養・同定結果では、(a)2009年11月、(b)2010年3月、(c)2010年5月の3回のサンプリングから、それぞれ *Bacillus* sp., *Bacillus* sp., *Methylobacterium* sp. が単離された。それぞれ高度は(a)3,500 m、(b)2,900 m、(c)3,000 m であり、後方流跡線解析では、(a)ゴビ砂漠方面の西から、(b)ゴビ砂漠方面の西から、(c)シベリヤ方面の北からであった。黄砂現象の可否については、(a)非黄砂、(b)弱い黄砂、(c)ダストは多いが黄砂ではない、という結果であった。以上の結果から、西からの黄砂には *Bacillus* sp. が多く含まれ、黄砂ではない北からは *Bacillus* sp. ではなく *Methylobacterium* sp. などが含まれることがわかった。タクラマカン砂漠の砂から *Bacillus* sp. が単離されていることから、砂漠から舞い上がる黄砂など西からは *Bacillus* 菌（枯草菌）が飛来すると考えられる<sup>6)</sup>。なお、この *Bacillus* 菌には、病原菌であるセレウス菌や炭疽菌なども含まれるため、黄砂とともに健康影響に関連する菌が飛来している可能性がある。他にも、2010年度および2011年度の係留気球・航空機を用いたサンプルから分離培養・同定法によって *Methylobacterium* sp. や *Staphylococcus* sp. など 21 菌株が新たに発見された。

### 3) メタゲノム解析（ゲノム分析）

本方法の利点としては、分離培養法が環境微生物のうち約1%しか単離・同定できないのに対し、DNAを直接抽出し解析するので、難培養性の微生物を分析できる、また、環境中の生態系の全体像を明らかにできる点が挙げられる。バイオエアロゾルを捕集したフィルターから抽出したDNA量は、黄砂時は  $0.125 \text{ gm}^{-3}$ 、非黄砂時は  $0.025 \text{ gm}^{-3}$  であり、それぞれ微生物濃度に換算すると、菌類ゲノムサイズをもとに少なめに見積もって、黄砂時は  $2.5 \times 10^6 \text{ cell m}^{-3}$ 、非黄砂時に  $0.5 \times 10^6 \text{ cell m}^{-3}$  であると推定された。黄砂飛来時には珠洲上空の微生物濃度が5倍程度増加することが示唆された。

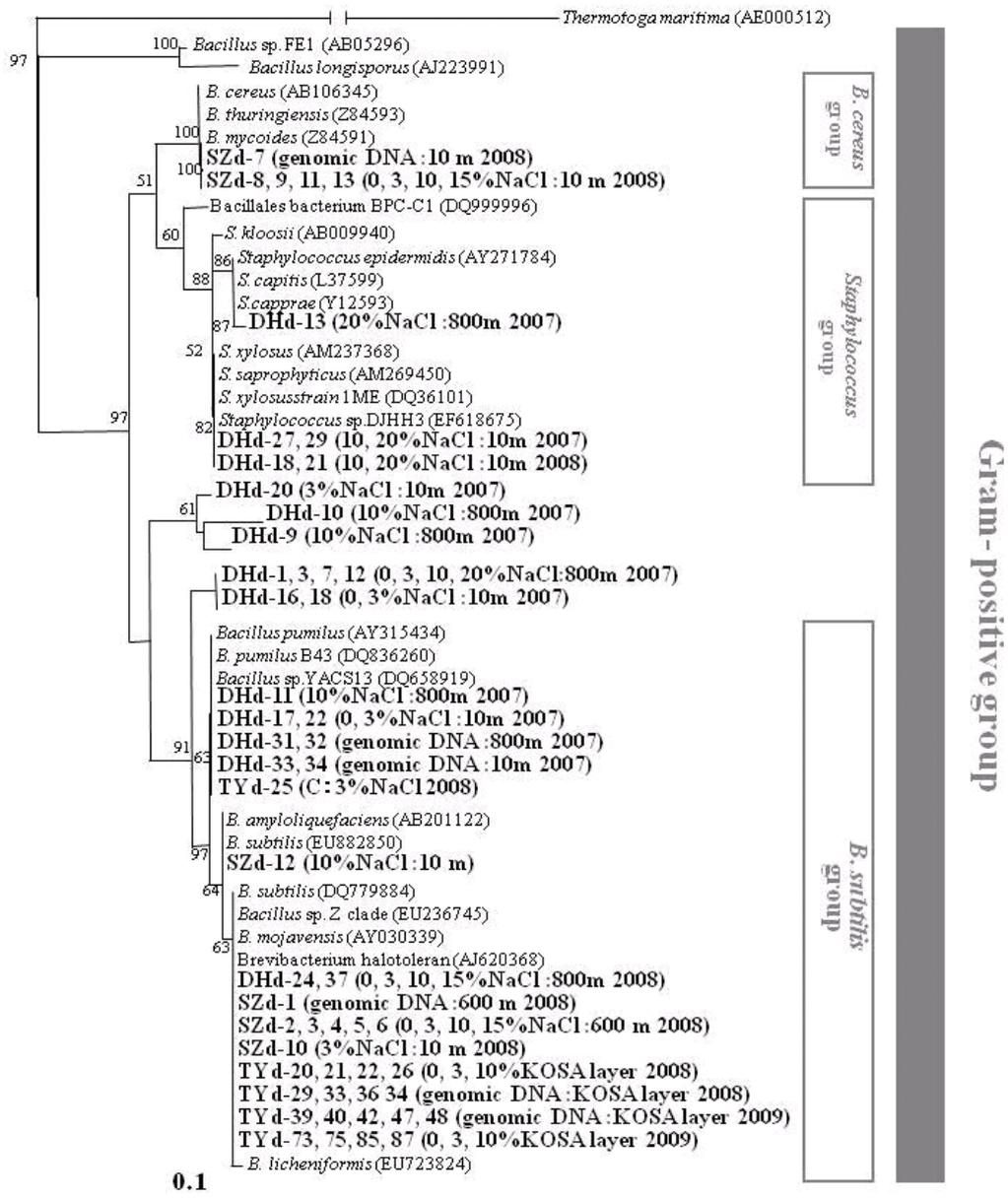
また、遺伝子配列解析結果から、黄砂時における珠洲上空には *Variovorax* sp., *Bradyrhizobium* sp. などバクテリア11種、カビ・キノコ2種 (*Tritirachium* sp., *Antrodiella semisupina*)、植物6種、新種の細菌3種が含まれることが判明した。一方、非黄砂時の珠洲上空には *Pseudomonas* sp., *Paenibacillus* sp. などバクテリア7種、新種の細菌2種を含み、黄砂時の菌種と一致するものが検出されなかったことから、黄砂時と非黄砂時では、珠洲上空エアロゾルに含まれる微生物種が異なることが判明した。

2010年5月の航空機を用いたサンプルのメタゲノム解析では *Variovorax* 属菌株が54%を占めることがわかった。優占種である *Variovorax* sp. の2種は2008年黄砂時の能登上空で検出された *Variovorax* の配列と100%一致した。*Methylobacterium* sp. など15種の細菌（3種の新種を含む）が検出された。航空機ではなく同日の係留気球を用いた約1,000 mのサンプルからは *Sphingomonas* sp. や *Brevibacterium* sp., *Ralstonia* sp. など17種の細菌（1種の新種を含む）が検出され、*Sphingomonas* と *Uncultured bacterium* の2種は、2009年非黄砂時の能登半島上空で検出された配列と100%一致した。同じ日でも上空1 kmと3 kmでは浮遊しているバイオエアロゾルの生物種は異なることがわかった。2010年度および23年度の係留気球・航空機を用いたサンプルからメタゲノム解析によって *Variovorax* sp. など107菌株が新たに発見された。

### 4) DGGE 解析

黄砂現象が顕著であった2008年のサンプリングにおいて上空600 mで採取したエアロゾル試料に含まれる微生物群は、0%から15%のNaCl濃度の培地中で顕著な増殖を示した。一方、黄砂現象の伴わない2009年サンプリングでは、0%及び3%のNaCl濃度で生長する微生物のみで、10%

及び 15 %の NaCl 濃度の培地での増殖に耐える微生物は検出されなかった。従って、黄砂飛来とともに耐塩細菌が大気中に増大したと考えられる。さらに、2007 年夏期および 2008 年秋期に敦煌市上空 600 m (黄砂発生源) および立山積雪中で採取した黄砂鉍物試料からも、0 %から 15 %の NaCl 濃度の培地で増殖する耐塩微生物が確認された。立山積雪中とは、立山室堂 (北緯 36.58 度、東経 137.6 度、高度 2450 m) において、積雪表面から地表表面まで深さ約 6 m の雪壁面における黄砂層をサンプリングし、同様に生物分析したものである。立山積雪中で黄砂が含まれない場合は、耐塩微生物は検出されなかった。従って、黄砂鉍物粒子とともに耐塩細菌が、大気中の厳しい環境ストレスに耐え、大気中で生残し続けていることが実証された。



図(4)-4 DGGE解析からの分子系統樹

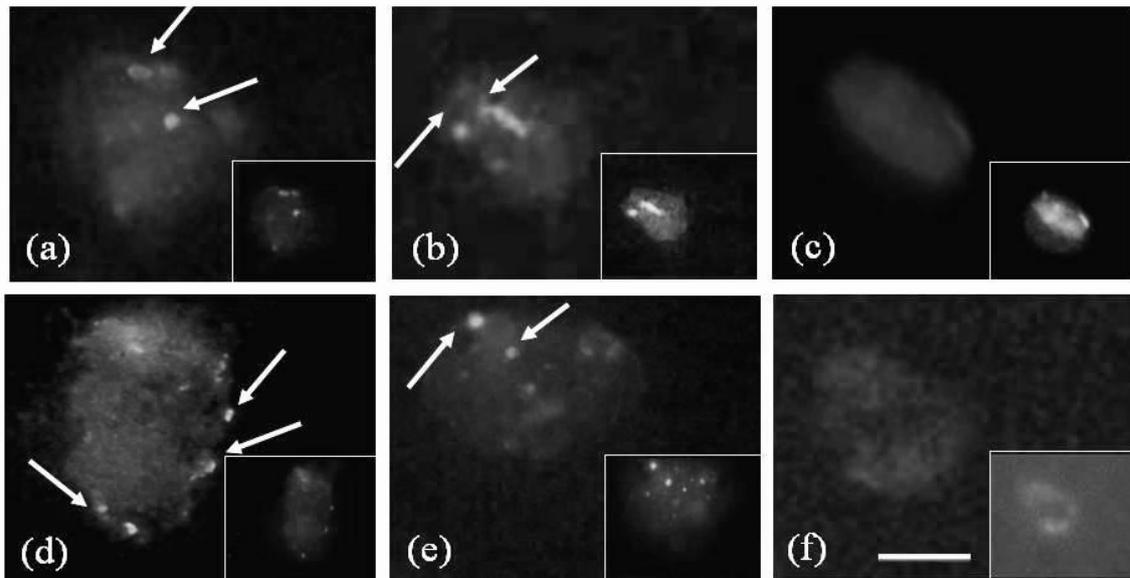
PCR-DGGE 解析の結果、黄砂鉍物粒子を含むいずれの試料からもグラム陽性の細菌群が優占して検出され、各調査地点での垂直混合も認められた（図(4)-4）。グラム陽性細菌は、芽胞を形成し、環境ストレスに強い耐性を持ち、一般的に大気中の優占細菌種として知られている。乾燥や紫外線照射等のストレスの多い大気中では、環境ストレスに耐性をもつ細菌群が選択的に生残でき、*Bacillus* 属あるいは *Staphylococcus* 属などの限られた細菌種が優占していると考えられる。特に、今回、それぞれの黄砂バイオエアロゾル試料から共通して検出された核酸塩基配列は、*B. subtilis* グループに属した。この細菌グループの細菌群は、砂塵が発生した大西洋海上や黄砂発生地の大クラマカン砂漠のエアロゾルからも分離された。黄砂発生地および黄砂飛来地から分離された *B. subtilis* 株の DNA gyrase の塩基配列は、既知細菌の中でも非常に近縁となり、地域間を移動したことを裏付けている。従って、*B. subtilis* グループの細菌種が、黄砂発生地域で鉍物粒子とともに巻き上げられ、黄砂鉍物粒子に付着し、長距離輸送されている可能性は高い。これらの細菌群は、日和見感染細菌であるため毒性は低いものの、アレルギーの増悪などの健康影響を及ぼす可能性がある。

DGGE 解析を駆使した耐塩性細菌の航空機や係留気球サンプルの耐塩性細菌として単離された *Bacillus subtilis* グループの *gyrB* 遺伝子配列を用いた系統学的分類によると黄砂とともに *Bacillus subtilis* が越境輸送された可能性があることがわかった。また、*Bacillus amyloliquefaciens* グループの *gyrB* 遺伝子配列を用いた系統学的分類結果から、珠洲上空には特有の細菌群が存在することがわかった。2010 年度および 2011 年度の係留気球・航空機を用いたサンプルから耐塩性細菌分析によって *Bacillus* sp. など 39 菌株が新たに発見された。

## 5) DAPI・FISH 解析

敦煌市上空で捕集したエアロゾル粒子試料を落射型蛍光顕微鏡で観察したところ、鉍物粒子は、青白く見え、直径 5 から 10  $\mu\text{m}$  程度の粒子状であった。一方、鉍物粒子表面に青く蛍光を発する粒子も確認され、直径 0.5 から 1 $\mu\text{m}$  程度であった。これらは、微生物粒子であると判断でき、大気中の鉍物粒子に細菌が付着している可能性が示唆された。また、黄砂粒子から分離された細菌株のうち、12 細菌株の 16S rDNA 全塩基配列は、*Bacillus subtilis* グループに属し、保存性の低い DNA gyrase の塩基配列であっても敦煌および立山から分離された *B. subtilis* 株が近縁となった。従って、黄砂発生地および飛来地の黄砂鉍物粒子上に、株レベルで近縁の *B. subtilis* 細胞が生存していたのは確かであり、黄砂による長距離輸送細菌種である可能性は極めて高い。

分離細菌株を用いて、核酸プローブを使用したハイブリダイゼーションを行ったところ、反応温度 20  $^{\circ}\text{C}$  および 30  $^{\circ}\text{C}$  において、*B. subtilis* の細菌細胞を蛍光顕微鏡下で特異的に観察できた。そこで、黄砂エアロゾル試料を用いて、同様のハイブリダイゼーションを試みたところ、鉍物粒子上に、核酸プローブ由来の強い黄色の蛍光を粒子状に確認できた（図(4)-5）。DAPI 染色で検出された細菌細胞の粒子の内、8 割程度が核酸プローブの蛍光を呈しており、黄砂鉍物粒子上に存在する微生物の大部分が *B. subtilis* であり、優占していると考えられる。FISH 法を用いることで、「黄砂鉍物粒子上の微生物」あるいは「環境に分散した混合微生物」の中から、長距離輸送される特定の細菌粒子(*Bacillus* 属の種)を遺伝子レベルで識別するのに大いに役立つであろう。また、この手法は、種類・数を測定できるモニタリング手法に応用することができる。



図(4)-5 FISH解析の蛍光顕微鏡写真：(a),(d)真正細菌；(b),(e) *B. subtilis*；(c),(f) 真核微生物

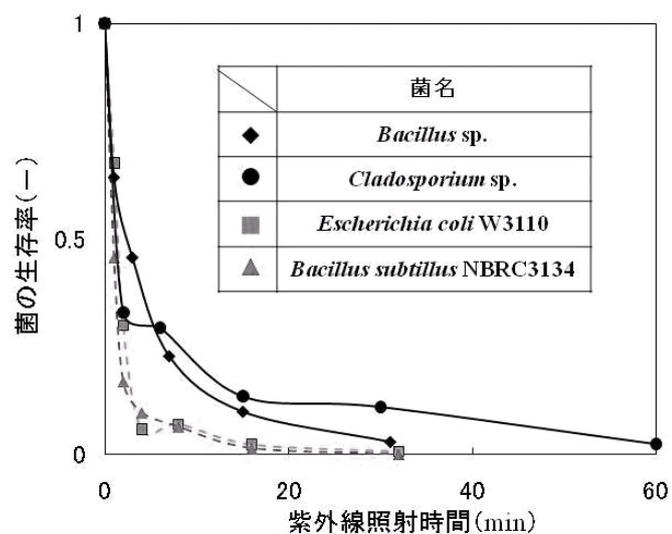
## (2) バイオプロセス解析

実際に採集された菌 *Cladosporium* sp. と *Bacillus* sp. を用いて紫外線照射実験を検討した(図(4)-6)。比較対象として土壌から採集された大腸菌 (*Escherichia coli* W3110) と枯草菌 (*Bacillus subtilis* NBRC3134) も同じ条件で行った。上空で採集された菌株は、土壌菌よりも紫外線耐性が高いことがわかった。紫外線死滅速度として以下のような数式モデルが提出されている<sup>13)</sup>。

$$dC/dt = -kI_{\text{eff}}C$$

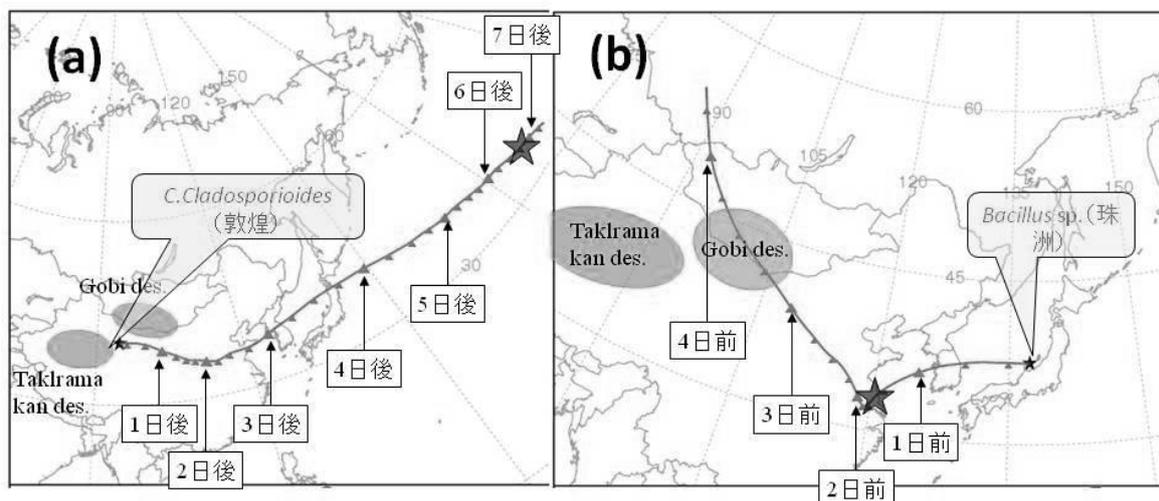
①

ここで、 $C$ 、 $k$  および  $I_{\text{eff}}$  はそれぞれ生菌体濃度 [ $\text{cells L}^{-1}$ ]、不活性化速度定数 [ $\text{m}^2 \text{W}^{-1} \text{h}^{-1}$ ]、有効光強度 [ $\text{W m}^{-2}$ ] である。図(4)-6 の紫外線照射実験から、黄砂バイオエアロゾル *Cladosporium* sp. と *Bacillus* sp. の  $k$  値は、それぞれ  $5.6 \times 10^{-2}$  と  $4.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{W}^{-1} \text{h}^{-1}$  であった。生菌率が1%を下回った時に全滅すると仮定し、生存時間をシミュレートした結果、*Cladosporium* sp. と *Bacillus* sp. の上空の生存時間はそれぞれ6.7と1.5日であることがわかった。この生存時間を流跡線解析にプロットすると図(4)-7 のようになった。



図(4)-6 紫外線耐性実験結果

黄砂発生源で採集された *Cladosporium* sp.は、どこで沈着したかはわからないが、生きたまま日本を越え太平洋に達していることがわかった。また、能登半島珠洲市上空で採集された *Bacillus* sp.は、黄砂粒子は発生源から日本まで到達した可能性があるが、菌の生存を考慮に入れると発生源ではなく黄砂が飛来する間、中国西沿岸部から朝鮮半島の上空で混入したと考えられる。



図(4)-7 生菌輸送限界シミュレート結果

### (3) 健康影響評価

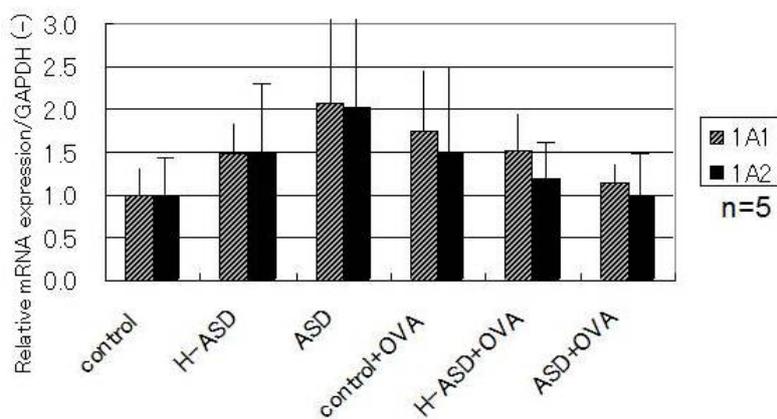
黄砂バイオエアロゾルの種々の生物分析結果から得られた微生物の中には、ヒトに対して病原性を持つものが多数含まれていた。黄砂バイオエアロゾルとして黄砂とともに日本に飛来して降下しているとすれば、黄砂観測日に食中毒や感染症件数が増加していることが考えられる。そこで、それら (*B.cereus*, *B.anthraxis*, *C.tetani*, *C.botulinum*) による食中毒 (セレウス、ボツリヌス) 患者数および感染症 (炭疽、破傷風) 患者数と黄砂観測日数との間に関係があるかどうか調査した。資料が得られた 1999 年から 2004 年までのデータからは、黄砂観測のべ日数とセレウス菌による食中毒患者数および破傷風患者数に関連は認められなかった。また、ボツリヌス、炭疽は例年ほとんど発生していないことがわかった。セレウス菌については、食中毒の発生と結びつかないセレウリド非産生株があるため、中国と日本のサンプルのセレウリド合成酵素 (CRS) 遺伝子の欠落の有無を調べた。その結果、中国で分離培養・同定された *B.cereus* はすべてセレウリド非産生株であることが明らかになった。したがって、日本に飛来しているかを食中毒の発生で判断できない可能性が示唆された。ただし、中国、日本ともに一部でセレウリド産生株も検出されており、さらに多くの株の解析が必要である。

サブグループ 3 の市瀬らにより、黄砂付着微生物がマウスの肺にアレルギーや炎症を起こすことが報告され<sup>12)</sup>、今回、壱岐の風送黄砂を暴露したマウスの肺や気管支では、アレルギー反応に特有の変化や局所的な炎症が起こることが明らかになった。そこで、サブグループ 4 ではアレルギー症状の全身影響を見るために、暴露マウスの肝臓における代謝解毒酵素の誘導を調べた。図(4)-8に示すように、未処理の黄砂 (ASD) を投与した群では対照群 (control) に比べて CYP1A1、CYP1A2 ともに、約 2 倍の発現が見られ、局所的だけでなく全身に対しても影響が出ることが示唆

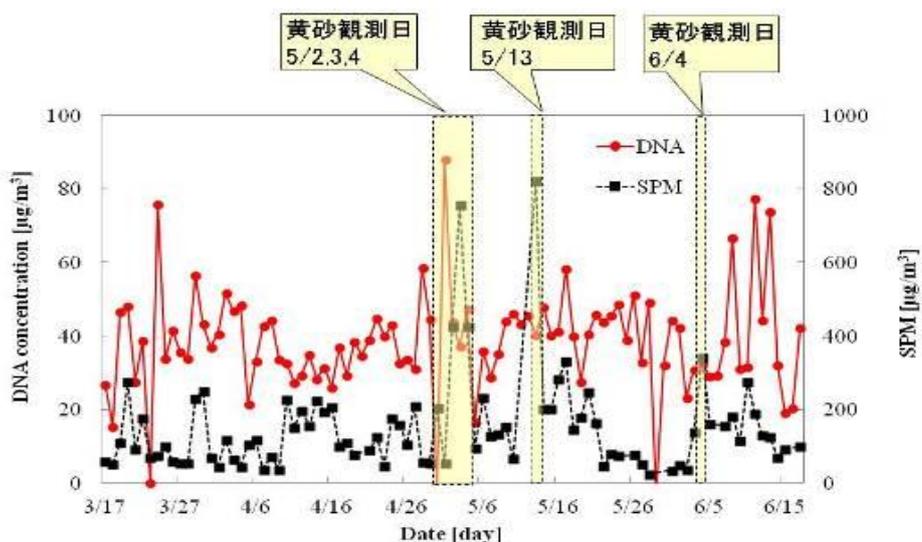
された。これらの遺伝子はディーゼル粒子を投与したマウスの肺で誘導されることから、今後、黄砂付着物のアレルゲン物質を突きとめることが課題である。

2011年3月17日～6月15日まで金沢大学で定点観測した大気DNA濃度を図(4-9)に示す。少しばらつきがあるものの、黄砂観測日(5月2、3、4、13日および6月4日)前後

には大気DNA濃度が増加することがわかった。大気DNA濃度の定量性についてはまだ検討する余地があると思われる。このDNAテンプレートからリアルタイムPCRを用いたセレウリド産生性セレウス菌の検出を試みたが、いずれの黄砂観測日のサンプルにおいても検出されなかった。インフルエンザ菌、クラミジア菌、レジオネラ菌についても同様の検出を実施したが、検出されなかった。現在のところ、2011年度に飛来した黄砂には、バイオエアロゾルによる毒性はないと判断されるが、この検出方法についてはまだ検討する必要があると思われる。黄砂観測日付近のサンプルからアレルギーを増幅させるといわれている微生物由来の $\beta$ -グルカン濃度を測定した結果、黄砂観測日に特異な濃度差がみられなかった。 $\beta$ -グルカンについては $0.4\ \mu\text{m}$ 以上のエアロゾル全てのサンプルを測定したので花粉や比較的大きい粒子に含まれる $\beta$ -グルカンが検出されてしまったと考えられる。まだ種々検討する必要があるものの、定点観測における大気DNA濃度およびそのサンプルからのDNA毒素遺伝子検出、 $\beta$ -グルカン濃度の測定が可能であることがわかった。



図(4-8) マウス肝臓における代謝解毒酵素の誘導



図(4-9) 大気DNA濃度定点観測結果

#### (4) 植物生態系影響

表(4)-1 に、黄砂観測日数、松枯れ被害量、気温、降水量、降水の pH 値、大気中の SO<sub>2</sub> 濃度の相関係数を示す。95 % 水準以上の有意性が認められたものは、松枯れ被害量、大気 SO<sub>2</sub> 濃度および黄砂観測日数であり、その相関の強さは中位から強いものであった。95 % 以上の有意性が認められたものに SO<sub>2</sub> 濃度と降水 pH 値があるが、大気 SO<sub>2</sub> が降雨に溶けたために低下したと考えられる。これらの調査データから、黄砂現象と松枯れに相関関係があることがわかった。

表(4)-1 黄砂観測日数と松枯れ被害量の相関係数

	気温 [°C]	降水量 [mm]	降水のpH [-]	SO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	黄砂 観測日数 [day]	松枯れ被害量 [m <sup>2</sup> ]
気温 [°C]	1					
降水量 [mm]	0.288 (P=0.420)	1				
降水のpH [-]	0.445 (P=0.198)	0.491 (P=0.149)	1			
SO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	0.5 (P=0.2)	0.4 (P=0.2)	0.7 * (P=0.02)	1		
黄砂観測日数 [day]	-0.08225 (P=0.820)	0.099332 (P=0.7848)	0.0416 (P=0.909)	0.3 (P=0.4)	1	
松枯れ被害量 [m <sup>2</sup> ]	0.028 (P=0.94)	0.047 (P=0.90)	0.36 (P=0.31)	0.7 * (P=0.02)	0.69 * (P=0.027)	1

金沢大学能登半島里山里海自然学校演習林で見つかった松枯れ木材をサンプリングし、枯れ木内の菌相調査を行った。数種類の菌が単離され、*Pseudomonas* sp.が最も多く検出された。これまで上空で採集された黄砂バイオエアロゾルにも *Pseudomonas* sp.が検出されており、DNA の同一性を検討中であるが、黄砂バイオエアロゾルが森林に沈着した可能性があることが明らかになった。松材線虫病は、松の樹幹に松材線虫 (*Bursaphelenchus xylophilus*) が入り込み、松材を摂取することではなく、生息することにより松の細胞が破壊され、松が枯死に至る病気である。松材線虫の伝播者としてはマツノマダラカミキリ (*Monochamus alternatus*) が言われているが、松材線虫の大増殖の原因の詳細はいまだ明らかになっていない。本研究では、黄砂バイオエアロゾルが松材線虫増殖の原因になると仮定し、サンプリング地点付近の里山実習林から松の枯死木から松材線虫を採集して黄砂バイオエアロゾルに関する食餌実験を行った。表(4)-2 は、食餌実験結果を示す。黄砂バイオエアロゾルの中でも *Norcardiopsis* sp.は全く食餌とならないが、*Streptomyces* sp.や *Bjerkandera* sp.はやや食餌となり、*Bacillus* sp.に至っては増加率 10.8 倍とかなり有力な食餌となることがわかった。黄砂バイオエアロゾル *Bacillus* sp.が松に沈着し松材線虫がいた場合、松材線虫病(松枯れ)が発生する可能性が高いことがわかった。今後、まだ検討する必要があるが、一部の黄砂バイオエアロゾルは松材線虫の餌になり得ることから、黄砂バイオエアロゾルが松材線虫病のきっかけになり得る可能性が示唆された。

表(4)-2 松材線虫食餌実験結果

菌名	増殖後の線虫数	増加率[倍]
<i>Nocardiopsis</i> sp.BASZUN0801	30	1.0
<i>Nocardiopsis</i> sp.BASZUN0802	30	1.0
<i>Nocardiopsis</i> sp.BASZUN0803	30	1.0
<i>Nocardiopsis</i> sp.BASZUN0804	30	1.0
<b><i>Bacillus</i> sp.BASZUB0801</b>	325	10.8
<i>Streptomyces</i> sp.BASZUB0802	45	1.5
<i>Bjerkandera</i> sp.BASZUP0801	44	1.5
<i>Bacillus</i> sp.BASZUHN0901	30	1.0
<b><i>Bacillus</i> sp.BASZUHR1001</b>	198	6.6
<i>Methylobacterium</i> sp.BASZUHR1002	30	1.0

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

黄砂沈着地域である能登半島珠洲市における直接採集と種々の生物分析結果から、これまで未解明であった人の健康や植物生態系に影響を及ぼす可能性のある黄砂バイオエアロゾルが明らかとなった。これらの成果は、日本エアロゾル学会の学術雑誌エアロゾル研究第25巻第1号において大気バイオエアロゾル特集が編集され、そのほとんどが本サブテーマの研究者が執筆者であることから、科学的意義が大きいことがわかる。

### (2) 環境政策への貢献

現在のところ、直接的には環境政策へ貢献する事項として記述できないが、人の健康や植物生態系に影響を及ぼす黄砂バイオエアロゾルが沈着地域である日本上空で見つかったことから、緩和策・防止策への啓発が示唆される。今後とも、7. 研究成果の発表状況にあるように、論文、学会発表やマスコミへの報道などを通じ、成果の広報・普及に努める。

## 6. 国際共同研究等の状況

黄砂発生源である中国北西部におけるサンプリングは、カウンターパートとして中国大気物理研究所の石廣玉教授と陳彬先生とともに機関レベルの国際協力協定の下で実施した。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 小林史尚、小谷口久美子、柿川真紀子、牧輝弥、山田丸、當房豊、洪天祥、松木篤、岩坂泰信：エアロゾル研究、25, 1, 23-28 (2010)

「能登半島珠洲市上空における黄砂バイオエアロゾルの直接採集および分離培養・同定」

- 2) 牧輝弥、小林史尚、柿川真紀子、鈴木振二、當房豊、山田丸、松木篤、洪天祥、長谷川浩、岩坂泰信：エアロゾル研究、25, 1, 35-42 (2010)  
「黄砂バイオエアロゾルに含まれる耐塩細菌群の種組成解析」
- 3) 柿川真紀子、岩坂泰信、小林史尚、牧輝弥：エアロゾル研究、25, 1, 29-34 (2010)  
「バイオエアロゾルのメタゲノム解析」
- 4) 山田丸、岩坂泰信、小林史尚、張代洲：エアロゾル研究、25, 1, 13-22 (2010)  
「黄砂発生源地域におけるバイオエアロゾル観測の試み：係留気球観測と個別粒子分析」
- 5) Maki T., S. Susuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, Y. Tobo, M. Yamada, T. Higashi, A. Matsuki, C. Hong, H. Hasegawa, and Y. Iwasaka: *Science of the Total Environment*, 408, 4556-4562 (2010)  
“Phylogenetic analysis of atmospheric halotolerant bacterial communities at high altitude in an Asian dust (KOSA) arrival region, Suzu City”
- 6) Maki T., K. Ueda, W. Hirota, H. Motozima, F. Kobayashi, H. Hasegawa, and M. A. Rahman: *Journal of Ecotechnology Research*, 15, 91-95 (2010)  
“PCR-DGGE analytical technique of bacterial community in the Lake Kahokugata water spiked with dimethylarsenic acid”
- 7) Maki T., K. Aoki, S. Susuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, Y. Tobo, A. Matsuki, H. Hasegawa, and Y. Iwasaka: *Journal of Ecotechnology Research*, 15, 97-101 (2010)  
“PCR-DGGE analysis of Asian dust (KOSA) bioaerosol recorded in snow cover at Mount Tateyama, central Japan”
- 8) Maki T., K. Aoki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, Y. Tobo, A. Matsuki, H. Hasegawa, and Y. Iwasaka: *Aerobiologia*, 27, 277-290 (2011)  
“Characterization of halotolerant and oligotrophic bacterial communities in Asian desert dust (KOSA) bioaerosol accumulated in layers of snow on Mount Tateyama, Central Japan”
- 9) Maki T., A. Ishikawa, F. Kobayashi, M. Kakikawa, K. Aoki, T. Matsunaga, H. Hasegawa, and Y. Iwasaka: *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5, 3, 157-163 (2011)  
“Effects of Asian dust (KOSA) deposition event on bacterial and microalgal communities in the Pacific ocean”
- 10) Kobayashi F., S. Morosawa, T. Maki, M. Kakikawa, M. Yamada, Y. Tobo, C.-S. Hon, S. Matsuki, and Y. Iwasaka: *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5, 3, 164-171 (2011)  
“Atmospheric bioaerosol, *Bacillus* sp., at an altitude of 3,500 m over the Noto Peninsula: Direct sampling via aircraft”
- 11) Chen B., F. Kobayashi, M. Yamada, Y.-H. Kim, Y. Iwasaka, and G.-Y. Shi: *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5, 3, 172-180 (2011)  
“Identification of cultureable bioaerosols collected over dryland in Northwest China: Observation using a tethered balloon”
- 12) 牧輝弥、青木一真、小林史尚、柿川真紀子、松木篤、木野恵太、長谷川浩、岩坂泰信：エアロゾル研究、24, 332-340 (2011)  
「立山積雪層に保存される黄砂バイオエアロゾルの集積培養と系統分類学的解析」
- 13) Kobayashi F., T. Maki, and Y. Nakamura: *International Biodeterioration and Biodegradation*, 69,

113-118 (2012)

“Biodegradation of phenol in seawater using bacteria isolated from the intestinal contents of marine creatures”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 牧輝弥：日本分析化学会解説 展望とトピックス、p.4 (2009)  
「黄砂は微生物を運ぶ箱船か」
- 2) 牧輝弥：海洋化学研究、23, p.70-74 (2010)  
「月例卓話：黄砂バイオエアロゾルに含まれる核酸塩基配列を用いた微生物の長距離輸送の検証」
- 3) 牧輝弥：フリーマガジン「Favo」、No.54, 10月号, p.10 (2010)  
「まちの発酵現場突撃レポ！ 石川県の空中で納豆菌を含む菌を発見」
- 4) 河原栄、佐久間大輔、赤石大輔：金沢大学資料館紀要、6, p.9-22 (2011)  
「四高のキノコ・ムラージュの謎」
- 5) 赤石大輔：すず里山里海ミュージアム エコナビ・いしかわの自然と環境、p.10 (2011)  
「奥能登の暮らしと生物多様性の伝え方」

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 鈴木振二、牧輝弥、島田孝志、小林史尚、柿川真紀子、山田丸、當房豊、東朋美、長谷川浩、岩坂泰信：第70回分析化学討論会(2009)  
「タクラマカン砂漠における大気エアロゾルと挙動をともしする細菌群のPCR-DGGE解析」
- 2) M. Yamada, F. Kobayashi, B. Chen, T. Maki, M. Kakikawa, D. Zhang, Y. Tobo, G. Shi, Y. Iwasaka: 18<sup>th</sup> International Conference on Nucleation & Atmospheric Aerosols (2009)  
“Microscopic Analysis of Individual Bioaerosols Collected in the Boundary Layer over Asian Dust Source with Tethered Balloon”
- 3) 小林史尚、柿川真紀子、牧輝弥、岩坂泰信：第61回日本生物工学会(2009)  
「黄砂バイオエアロゾルのサンプラー開発と生物分析」
- 4) 小谷口久美子、小林史尚、柿川真紀子、牧輝弥、岩坂泰信：第61回日本生物工学会(2009)  
「黄砂バイオエアロゾルの沈着地域における直接採集・同定および生態系影響調査」
- 5) 中野俊吾、小林史尚、柿川真紀子、牧輝弥、岩坂泰信：第61回日本生物工学会(2009)  
「黄砂バイオエアロゾルのプロセス工学的研究」
- 6) 牧輝弥、鈴木振二、青木一真、小林史尚、柿川真紀子、小林真理子、長谷川浩、岩坂泰信：日本分析化学会第58年会(2009)  
「立山積雪断面に含まれる黄砂バイオエアロゾルの核酸塩基配列を用いた細菌組成種組成の解析」
- 7) 牧輝弥、鈴木振二、小林史尚、柿川真紀子、當房豊、小林真理子、長谷川浩、岩坂泰信：日本分析化学会第58年会(2009)  
「能登半島上空で採取したバイオエアロゾルの細菌由来核酸断片を用いたPCR-DGGE解析」
- 8) 小林史尚：バイオテクノロジー研究講演会 招待講演(2009)  
「黄砂研究の最近の動向—黄砂バイオエアロゾルとは—」

- 9) T. Maki, S. Susuki, K. Kazuma, F. Kobayashi, M. Kakikawa, H. Hasegawa, Y. Iwasaka: 16th Asian Symposium on Ecotechnology (2009)  
“PCR-DGGE Analysis of Asian Dust (KOSA) Bioaerosol Recorded in Snow Cover at Mount Tateyama, Central Japan”
- 10) 小林史尚：第3回環日本海域環境シンポジウム(2009)  
「黄砂バイオエアロゾルの沈着地域における直接採集・同定および植物生態系影響調査」
- 11) T. Maki, S. Susuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, M. Yamada, T. Higashi, Y. Tobo, A. Matsuki, C. Hong, H. Hasegawa, Y. Iwasaka: Asian Aerosol Conference AAC09、(2009)  
“Comparison of atmospheric bacterial composition in Asian dust (KOSA) source region, Dunhuang city, and arrival region, Suzu city”
- 12) 小谷口久美子、小林史尚：第1回能登総合シンポジウム(2009)  
「黄砂バイオエアロゾルの能登半島珠洲市上空における直接採集・同定および生態系影響調査」
- 13) 鈴木振二、牧輝弥：第1回能登総合シンポジウム(2009)  
「能登半島上空で採取したバイオエアロゾルの細菌由来核酸断片を用いた PCR-DGGE 解析」
- 14) 柿川真紀子：第1回能登総合シンポジウム(2009)  
「珠洲上空バイオエアロゾルのメタゲノム解析」
- 15) 牧輝弥：京都化学者クラブ 234回(2009)  
「黄砂バイオエアロゾルに含まれる核酸塩基配列を用いた微生物の長距離輸送の検証」
- 16) 小林史尚：第4回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2010)  
「能登半島上空で採取した黄砂バイオエアロゾル：気象観測・分離培養」
- 17) 柿川真紀子：第4回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2010)  
「能登半島上空で採取した黄砂バイオエアロゾル：メタゲノム解析」
- 18) 牧輝弥：第4回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2010)  
「能登半島上空で採取した黄砂バイオエアロゾル：PCR-DGGE 解析」
- 19) 牧輝弥：第4回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2010)  
「大気バイオエアロゾル中に生残する耐塩細菌群の分散状態」
- 20) 東朋美：第4回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2010)  
「黄砂バイオエアロゾルの健康影響」
- 21) 牧輝弥：第4回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2010)  
「三重県沖の海洋調査と黄砂バイオエアロゾルに関する今後の展望」
- 22) F. Kobayashi：International Symposium on Aerosol and Radiation Studies, Zibo. China, (2010)  
“Sampling using tethered balloon, separated culture, and identification”
- 23) T. Maki：International Symposium on Aerosol and Radiation Studies, Zibo. China, (2010)  
“Epifluorescence observation technique from microbial particles included in Asian dust (KOSA) bioaerosols”
- 24) M. Kakikawa：International Symposium on Aerosol and Radiation Studies, Zibo. China, (2010)  
“Dustborne microorganisms in the atmosphere over an Asian dust arrival region, Suzu”
- 25) T. Maki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, S. Susuki, K. Aoki, Y. Tobo, H. Hasegawa, Y. Iwasaka：The

- 8<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Environmental Japan Monitoring, Sapporo, Japan (2010)  
 “Phylogenetic analysis of atmospheric bacterial isolates obtained from Asian dust (KOSA) bioaerosols”
- 26) 小林史尚、諸澤真治、柿川真紀子、牧輝弥、山田丸、當房豊、松木篤、岩坂泰信：第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会、名古屋 (2010)  
 「航空機を用いた黄砂バイオエアロゾル直接採集および分離培養・同定」
- 27) 牧輝弥、小林史尚、松木篤、當房豊、柿川真紀子、鈴木振二、長谷川浩、岩坂泰信：第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会、名古屋 (2010)  
 「能登半島上空で採取したバイオエアロゾル細菌種組成の黄砂発生時と非発生時の比較」
- 28) 柿川真紀子、小林史尚、牧輝弥、山田丸、當房豊、松木篤、岩坂泰信：第 27 回エアロゾル科学・技術研究討論会、名古屋 (2010)  
 「能登半島上空のバイオエアロゾルにおける DNA 濃度と生物種」
- 29) F. Kobayashi : Asia and Africa Science Platform Program International Seminar “Environment and Health”, Kanazawa, Japan (2010)  
 “Direct sampling of atmospheric bioaerosol using an airplane over the Noto Peninsula”
- 30) T. Maki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, K. Aoki, S. Susuki, K. Mariko, Y. Tobo, H. Hasegawa, Y. Iwasaka: IAC 2010 (2010)  
 “Phylogenetic analysis of long-range transported bacteria isolated from Asian dust (KOSA) bioaerosols”
- 31) A. Kitano, T. Shimasaki, Y. Chikano, M. Nakada, T. Higashi, Y. Ishigaki, Y. Endo, Y. Sai, K. Miyamoto, Y. Motoo, K. Kawakami, T. Minamoto : 69<sup>th</sup> Annual Meeting of the Japanese Cancer Association, Osaka, Japan (2010)  
 “Pathological role for deregulated glycogen synthase kinase (GSK) 3 $\beta$  in pancreatic cancer proliferation and invasion”
- 32) 牧輝弥、小林史尚、諸澤真治、柿川真紀子、長谷川浩、岩坂泰信：日本分析化学会第 59 年会、仙台(2010)  
 「航空機サンプリングにおいて捕集した大気微生物の核酸塩基配列の解析とその総観規模的移送の評価」
- 33) 牧輝弥、城戸耕介、石川輝、小林史尚、柿川真紀子、青木一真、長谷川浩、岩坂泰信：平成 22 年度日本水産学会秋季大会、京都(2010)  
 「黄砂鉱物粒子が及ぼす海洋微生物生態系への影響の外洋船上実験を用いた解明」
- 34) 小林史尚：気象研究所講演、つくば(2010)  
 「黄砂バイオエアロゾル研究の最近の動向」
- 35) 小林史尚：ロシヤ科学アカデミー招聘講演、金沢(2010)  
 “Bioaerosol in Asian dust over source and deposit regions”
- 36) F. Kobayashi : The 4<sup>th</sup> International Symposium on Environment of Rim of the Japan/East Sea, Jeju, Korea (2010)  
 “Atmospheric bioaerosol, *Bacillus* sp., at an altitude of 3,500 m over the Noto peninsula”
- 37) T. Maki : The 4<sup>th</sup> International Symposium on Environment of Rim of the Japan/East Sea, Jeju.

- Korea (2010)  
 “Effects of a KOSA deposition event on microbial abundance and structures in marine ecosystems”
- 38) M. Kakikawa : The 4<sup>th</sup> International Symposium on Environment of Rim of the Japan/East Sea, Jeju. Korea (2010)  
 “Airborne microorganisms in the atmosphere over Noto peninsula”
- 39) 小林史尚、諸澤真治、柿川真紀子、牧輝弥、岩坂泰信：第 62 回日本生物工学会大会、宮崎(2010)  
 「高高度黄砂バイオエアロゾル生物分析のための航空機を用いた採集方法の確立」
- 40) 牧輝弥、小林史尚、柿川真紀子、青木一真、松木篤、岩坂泰信：日本気象学会 2010 年度秋季大会、京都(2010)  
 「蛍光標識核酸プローブを用いた黄砂バイオエアロゾルの遺伝学的識別手法の確立」
- 41) 柿川真紀子、松木篤、小林史尚、牧輝弥、岩坂泰信：日本気象学会 2010 年度秋季大会、京都(2010)  
 「能登半島上空における黄砂時と非黄砂時の DNA 濃度および生物種比較」
- 42) 牧輝弥、小林史尚、柿川真紀子、松木篤、山田丸、岩坂泰信：第一回環境フォーラム、三井物産北陸支部、富山(2010)  
 「空中浮遊性微生物を見る目」
- 43) 小林史尚：平成 22 年度富山県立大学第 13 回地域連携公開セミナー、富山(2010)  
 「黄砂研究の最前線—黄砂バイオエアロゾルとは—」
- 44) F. Kobayashi, K. Kodaniguchi, M. Kakikawa, T. Maki, M. Yamada, Y. Tobo, C. Hong, A. Matsuki, Y. Iwasaka : 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2010), Homolulu.USA (2010)  
 “Microbial isolation technique of bioaerosols in Yellow Dust (Kosa)”
- 45) T. Maki, F. Kobayashi, K. Aoki, M. Kakikawa, M. Kobayashi, H. Hasegawa, Y. Iwasaka : 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2010), Homolulu.USA (2010)  
 “Phylogenetic analysis of the atmospheric bacterial communities at an Asian dust (KOSA) arrival region and a source region”
- 46) M. Kakikawa, F. Kobayashi, T. Maki, A. Matsuki, M. Yamada, Y. Tobo, C. Hong, B. Chen, G. Shi, Y. Iwasaka : 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2010), Homolulu.USA (2010)  
 “Analysis of bioaerosols in the atmosphere over an Asian dust arrival region, Suzu”
- 47) 小林史尚：第 2 回能登総合シンポジウム、珠洲(2011)  
 「黄砂バイオエアロゾルの植物生態系影響に関する萌芽的研究」
- 48) 牧輝弥：第 2 回能登総合シンポジウム、珠洲(2011)  
 「能登半島上空 3000m を漂うバイオエアロゾルの細菌種組成の解析」
- 49) 柿川真紀子：第 2 回能登総合シンポジウム、珠洲(2011)  
 「メタゲノムの解析による能登半島上空(3.5 km, 1.0 km)の生物種同定」

- 50) 牧輝弥、小林史尚、柿川真紀子、松木篤、山田丸、岩坂泰信：サイエンスカフェ 第2回能登総合シンポジウム、珠洲(2011)  
「空中浮遊微生物を食べる」
- 51) 小林史尚：バイオエアロゾル研究会、京都(2011)  
「黄砂バイオエアロゾルの植物生態系影響に関する萌芽的研究」
- 52) 牧輝弥：バイオエアロゾル研究会、京都(2011)  
「高度 3000 m を浮遊する耐塩細菌群の 16S rRNA 情報を用いた種組成解析」
- 53) 柿川真紀子：バイオエアロゾル研究会、京都(2011)  
「メタゲノムの解析による能登半島上空(3 km, 1 km)の生物種同定」
- 54) 牧輝弥：黄砂現象の環境・健康影響、微生物および化学物質の長距離移動、総合地球環境学研究所中国環境問題研究拠点、地球研プロジェクト(2011)  
「黄砂バイオエアロゾルに含まれる細菌種組成」
- 55) 東朋美：黄砂現象の環境・健康影響、微生物および化学物質の長距離移動、総合地球環境学研究所中国環境問題研究拠点、地球研プロジェクト(2011)  
「黄砂バイオエアロゾルの健康影響調査」
- 56) T. Maki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, M. Atsushi, Y. Iwasaka : 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (IUGG), Melbourne, Australia (2011)  
“Phylogenetic analysis of long-range transported bacteria isolated from Asian dust (KOSA) bioaerosols“
- 57) F. Kobayashi: 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials Development and Performance, Tokushima, Japan (2011)  
“Development of waste reduction system for production of useful materials from residue of wastewater treatment process using a moss”
- 58) 山田丸、吉田翔太、亀田貴之、小林史尚、諸澤真治、中村香耶、松木篤、築城寿長、檜垣誠吾、岩坂泰信、早川和一：第20回環境化学討論会(2011)  
「環境中の多環芳香族炭化水素および細菌の除去を目的とした機能性繊維の開発及び評価」
- 59) 小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、岩坂泰信：第63回日本生物工学会大会(2011)  
「黄砂バイオエアロゾルの植物生態系に及ぼす影響に関する萌芽的研究」
- 60) 牧輝弥、小林史尚、柿川真紀子、松木篤、山田丸、岩坂泰信：CIGR（国際農業工学会）国際シンポジウム2011、日本農業工学会第27回シンポジウム・日本学術会議公開シンポジウム(2011)  
「黄砂バイオエアロゾルに含まれる微生物群種組成の特徴とその食文化への影響」
- 61) 岩坂泰信、山田丸、小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、東朋美：CIGR（国際農業工学会）国際シンポジウム2011、日本農業工学会第27回シンポジウム・日本学術会議公開シンポジウム(2011)  
「黄砂とともに長距離輸送する微生物」
- 62) M. Kakikawa, S. Yamada: The 35<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism in Japan, Niigata, Japan (2011)  
“Enhanced potency of anticancer drugs by exposure to magnetic fields”

- 63) 中村翔太郎、鈴木峻、上野敏幸、柿川真紀子、山田外史：平成 23 年電気学会電子情報部門大会(2011)  
「超磁歪アクチュエータ駆動によるキャビテーションの発生と殺菌への適用」
- 64) 中村翔太郎、鈴木峻、上野敏幸、柿川真紀子、山田外史：第 35 回日本磁気学会(2011)  
「超磁歪アクチュエータ駆動によるキャビテーション発生と殺菌効果」
- 65) 河原栄、佐久間大輔、古畑徹、赤石大輔：日本菌学会第 55 回大会(2011)  
「四高時代キノコ蠟模型の再発見」
- 66) 小林史尚、岩坂泰信、牧輝弥、柿川真紀子、山田丸、東朋美、長沼毅、松木篤：第 5 回南極観測シンポジウム(2011)  
「南極域の風送バイオエアロゾル実相調査」
- 67) 岩坂泰信、松木篤、小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、東朋美、山田丸、定永靖宗：北陸地域における環境の計測と保全に関する研究拠点形成 第 1 回シンポジウム(2011)  
「東アジアの大気研究：地理的条件と研究活動」
- 68) F. Kobayashi, T. Maki, M. Kakikawa, M. Yamada, A. Matsuki, T. Naganuma, and Y. Iwasaka: The 2<sup>nd</sup> Symposium on Polar Science, Tachikawa, Japan (2011)  
“The research of atmospheric bioaerosols over Antarctica”
- 69) T. Maki, F. Kobayashi, and Y. Iwasaka: The 2<sup>nd</sup> Symposium on Polar Science, Tachikawa, Japan (2011)  
“Characteristics of cosmopolitan microbial communities transported by Asian desert dust (KOSA)”
- 70) T. Maki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, A. Matsuki, M. Yamada, Y. Iwasaka: The annual meeting of Sino-Japan S&T project, Hainan, China (2011)  
“Japanese fermented food produced by long-range transported bacteria in Asian dust (KOSA) bioaerosols”
- 71) M. Kakikawa, F. Kobayashi, T. Maki, M. Yamada, A. Matsuki, Y. Iwasaka,: The annual meeting of Sino-Japan S&T project, Hainan, China (2011)  
“The characteristics of airborne microorganisms in the atmosphere over an Asian dust arrival region, Noto peninsula, 2008 -2010”
- 72) 山田丸、福山厚子、陳彬、張代州、小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、松木篤、早川和一、石広玉、岩坂泰信：日本気象学会 2011 年度秋季大会(2011)  
「OPC ゾンデを用いた黄砂発生源上空の粒子数濃度 - 粒径分布の鉛直分布観測：2010 年 9 月 15 日の事例解析と過去の観測結果との比較」
- 73) 小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、山田丸、長沼毅、松木篤、岩坂泰信：第 6 回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2011)  
「南極域の風送バイオエアロゾル実相調査：気球等を使った先駆的生態系観測の展開」
- 74) 牧輝弥、小林史尚、青木一真、岩坂泰信：第 6 回大気バイオエアロゾルシンポジウム (2011.12)  
「黄砂によって長距離輸送される優占細菌種とその納豆発酵機能の解明」
- 75) 柿川真紀子、小林史尚、牧輝也、山田丸、松木篤、岩坂泰信：第 6 回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2011)  
「非培養法による能登半島上空の生物種同定」

- 76) 山田丸、小林史尚、諸澤真治、吉田翔太、亀田貴之、中村香耶、松木篤、築城寿長、檜垣誠吾、早川和一、岩坂泰信：第6回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2011)  
「環境中の細菌・有害有機化合物除去繊維の開発」
- 77) 松木篤、小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、山田丸、原和崇、岩坂泰信：第6回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2011)  
「能登スーパーサイトにおけるエアロゾル観測：UV-APSによる自家蛍光粒子測定」
- 78) 松永智樹、牧輝弥、石川輝、青木一真、斎藤佑樹、岩坂泰信：第6回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2011)  
「外洋船上実験を利用した黄砂が及ぼす海洋微生物生態系への影響の解明」
- 79) 植竹淳、三宅隆之、牧輝弥、松木篤、本山秀明：第6回大気バイオエアロゾルシンポジウム(2011)  
「降雪中の微生物濃度と種の変動」
- 80) 東朋美、神林康弘、藤村政樹、大倉徳幸、吉崎智一、中西清香、西條清史、早川和一、人見嘉哲、小林史尚、道上義正、朝倉大貫、山崎政美、三苦純子、岡田源作、中村裕之：東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト 第2回シンポジウム(2012)  
「黄砂による健康影響—慢性咳嗽の症状への影響—」
- 81) 神林康弘、東朋美、藤村政樹、大倉徳幸、吉崎智一、中西清香、西條清史、早川和一、人見嘉哲、小林史尚、道上義正、朝倉大貫、山崎政美、三苦純子、岡田源作、中村裕之：東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト 第2回シンポジウム(2012)  
「大気粉塵中多環芳香族炭化水素類と重金属の月変動および黄砂日の特徴」
- 82) F. Kobayashi, T. Maki, M. Kakikawa, M. Yamada, A. Matsuki, T. Naganuma, T. Higashi, Y. Iwasaka: 5<sup>th</sup> International Symposium on the Environment of the Rim-Japan Sea Regions (2012)  
“The research of atmosphere bioaerosol over Antarctica”
- 83) T. Maki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, K. Aoki, A. Matsuki, M. Yamada, Y. Iwasaka: 5<sup>th</sup> International Symposium on the Environment of the Rim-Japan Sea Regions (2012)  
“Japanese fermented food produced by long-range transported bacteria in Asian dust (KOSA) bioaerosols”
- 84) M. Kakikawa, F. Kobayashi, T. Maki, A. Matsuki, M. Yamada, Y. Iwasaka: 5<sup>th</sup> International Symposium on the Environment of the Rim-Japan Sea Regions (2012)  
“The characteristics of airborne microorganisms in the atmosphere over an Asian dust arrival region, Noto peninsula”
- 85) 小林史尚、牧輝弥、柿川真紀子、山田丸、松木篤、長沼毅、岩坂泰信：第3回能登総合シンポジウム(2012)  
「能登スーパーサイトの技術が南極観測に新たなページを」
- 86) 牧輝弥、小林史尚、柿川真紀子、諸澤真治、山田丸、松木篤、岩坂泰信：第3回能登総合シンポジウム(2012)  
「能登半島上空に風送される大気バイオエアロゾル～西からの旅人と北からの旅人～」
- 87) 柿川真紀子：第3回能登総合シンポジウム(2012)  
「非培養法で同定した能登上空に浮遊する微生物、2008～2010 春季」

- 88) 東朋美、神林康弘、藤村政樹、吉崎智一、早川和一、西條清史、人見嘉哲、小林史尚、道上義正、中村裕之：第 82 回日本衛生学会総会(2012)  
「黄砂による慢性咳嗽の症状への影響」
- 89) 神林康弘、東朋美、道上義正、大倉徳幸、藤村政樹、岡田源作、日比野由利、人見嘉哲、中村裕之：第 82 回日本衛生学会総会(2012)  
「大気粉塵中多環芳香族炭化水素類と重金属の月変動および黄砂日の特徴」

### (3) 出願特許

- 1) 山田丸、亀田貴之、早川和一、岩坂泰信、小林史尚、松木篤：金沢大学、築城寿長、檜垣誠吾：ダイワボウノイ株式会社；「砂塵飛来有害物質及び微生物除去剤、砂塵飛来有害物質及び微生物除去セルロース繊維及び繊維構造物」、特願 2011-155806、平成 23 年 7 月 14 日

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 第 3 回環日本海域環境シンポジウム（2009 年 10 月 28 日-29 日、石川県金沢市金沢大学、約 50 名）
- 2) 第 4 回大気バイオエアロゾルシンポジウム（2010 年 3 月 14 日、名古屋市名古屋港ポートビル、約 50 名）
- 3) 第 4 回環日本海域環境シンポジウム(2010 年 10 月 18 日-19 日、韓国済州島 SeogwipoKALHotel、約 50 名)
- 4) 第 1 回能登総合シンポジウム（2010 年 11 月 29 日-12 月 1 日、石川県珠洲市商工会議所、約 50 名）
- 5) 第 2 回能登総合シンポジウム（2011 年 1 月 21 日-22 日、石川県珠洲市商工会議所、約 50 名）
- 6) バイオエアロゾル研究会(第 5 回大気バイオエアロゾルシンポジウム)（2011 年 3 月 30 日、京都市ホテルセントノーム京都、観客 20 名）
- 7) 第 29 回レーザセンシングシンポジウム（2011 年 9 月 8 日-9 日、石川県七尾市ホテル海望、約 120 名）
- 8) 第 6 回大気バイオエアロゾルシンポジウム（2011 年 12 月 9 日-10 日、東京都立川市国立極地研究所、約 80 名）
- 9) 第 5 回環日本海域の環境シンポジウム(5<sup>th</sup> International Symposium on the Environment of the Rim-Japan Sea Regions)（2012 年 2 月 3 日-4 日、石川県金沢市金沢大学、約 70 名）
- 10) 第 3 回能登総合シンポジウム（2012 年 3 月 16 日-17 日、石川県珠洲市商工会議所、約 50 名）

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) フジテレビサキヨミ Live（2009 年 4 月 19 日、黄砂バイオエアロゾルの採集や分析について 1 分ほど紹介）
- 2) 熊本日日新聞（2009 年 4 月 25 日、朝刊社会面）
- 3) 北陸中日新聞（2009 年 4 月 29 日、石川総合面）
- 4) NHK教育 サイエンス ZERO「黄砂 その知られざる素顔にせまる」（2009 年 5 月 30 日、能登半島珠洲市におけるサンプリングや生物分析の成果について 3 分ほど紹介）

- 5) NHK教育 サイエンス ZERO スペシャル「砂 その不思議にせまる」(2009年7月4日、能登半島珠洲市におけるサンプリングや生物分析の成果について3分ほど紹介)
- 6) 科学新聞(2009年10月2日、全国版)
- 7) 北陸中日新聞(2009年10月29日、石川総合面)
- 8) 北國新聞(2009年10月29日、県内総合面)
- 9) NHK教育 サイエンス ZERO アンコール放送「砂 その不思議にせまる」(2010年3月13日、能登半島珠洲市におけるサンプリングや生物分析の成果について3分ほど紹介)
- 10) 北國新聞(2010年5月15日、23頁)
- 11) 北陸中日新聞(2010年5月15日、18頁)
- 12) 日本テレビ「news every」(2010年11月12日、バイオエアロゾルの捕集調査について10分ほど紹介)
- 13) 北國新聞(2011年1月22日、18頁)
- 14) 北國新聞(2012年3月1日、石川県版、28頁)
- 15) 北國新聞(2012年3月4日、一面)

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

#### 8. 引用文献

- 1) 岩坂泰信、西川雅高、山田丸、洪天祥：“黄砂”、古今書院(2009)
- 2) 三上正男：“ここまでわかった「黄砂」の正体”、五月書房(2007)
- 3) T. Ichinose, M. Nishikawa, H. Takano, N. Sera, K. Sadakane, I. Mori, R. Yanagisawa, T. Oda, H. Tamura, K. Hiyoshi, H. Quan, S. Tomura, T. Shibamoto: “Pulmonary toxicity induced by intratracheal instillation of Asian yellow dust (Kosa) in mice”, *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 20, 48-56 (2005)
- 4) C. A. Kellogg, D. W. Griffin: “Aerobiology and the global transport of desert dust”, *TRENDS in Ecology and Evolution*, 21, 638-644 (2006)
- 5) 環境省地球環境局総務課研究調査室：“環境省地球環境研究総合推進費終了研究課題報告集 地球環境研究革新型研究領域 平成19年度～平成20年度”、p.43-169(2009)
- 6) 小林史尚、柿川真紀子、山田丸、陳彬、石廣玉、岩坂泰信：“黄砂発生源におけるバイオエアロゾル拡散に関する研究”、*エアロゾル研究*、22, 218-227(2007)
- 7) N.-P. Hua, F. Kobayashi, Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, T. Naganuma: ”Detailed identification of desert-originated bacteria carried by Asian dust storms to Japan”, *Aerobiologia*, 23, 291-298 (2007)
- 8) T. Maki, S. Suzuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, M. Yamada, T. Higashi, C. Hong, Y. Toubou, H. Hasegawa, K. Ueda, Y. Iwasaka: “Ecophysiological analysis of halobacteria in bioaerosol”, *Journal of Ecotechnology Research*, 13, 309-313 (2008)
- 9) T. Maki, S. Suzuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, M. Yamada, T. Higashi, B. Chen, G.-Y., Shi, C. Hong, Y. Toba, H. Hasegawa, K. Ueda, Y. Iwasaka: “Phylogenetic diversity and vertical distribution of a halobacterial community in the atmosphere of an Asian dust (KOSA) source region,

- Dunhuang City”, *Air Quality Atmosphere and Health*, 1, 81-89 (2008)
- 10) M. Kakikawa, F. Kobayashi, T. Maki, M. Yamada, T. Higashi, B. Chen, G. Shi, C. Hong, Y. Tobo, Y. Iwasaka: “Dustborne microorganisms in the atmosphere over Asian dust source region, Dunhuang”, *Air Quality Atmosphere and Health*, 1, 195-202 (2008)
  - 11) Y. Iwasaka, G. Shi, M. Yamada, F. Kobayashi, M. Kakikawa, T. Maki, T. Naganuma, B. Chen, Y. Tobo, C. Hong: “Mixture of Kosa (Asian Dust) and bioaerosols detected in the atmosphere over the Kosa particles source regions with Balloon-bore measurements: Possibility of long-range transport”, *Air Quality Atmosphere and Health*, 2, 29-38 (2009)
  - 12) T. Ichinose, S. Yoshida, K. Hiyoshi, K. Sadakane, H. Takano, M. Nishikawa, I. Mori, R. Yanagisawa, H. Kwazato, A. Yasuda, T. Shibamoto: “The effects of microbial materials adhered to Asian sand dust on allergic lung inflammation”, *Arch Environ. Contam. Toxicol.*, 55, 348-357 (2008)
  - 13) 菅原靖、菅原勝康、菅原拓男：「浸漬発芽工程排液に含まれる微生物の薄層光触媒による不活性化に及ぼす光強度の影響」、*化学工学論文集*、35, 287-292 (2009)

## **Improving Kosa Forecasting Model with Assimilated LIDAR Monitoring Network Data and Assessing Human Health/Environmental Effects of Kosa due to Adsorbed Bioaerosols**

Principal Investigator: Masataka NISHIKAWA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

Cooperated by: NIES, Meteorological Research Institute, Oita University of Nursing  
and Health Sciences, Kanazawa University

[Abstract]

Key Words: Kosa, Bioaerosol, Lidar network, Forecast model, Environmental effect

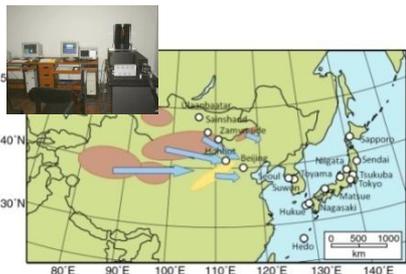
The number of kosa events occurring in Northeast Asia has increased significantly, as have the associated environmental and social effects for Northeast Asian countries. If a kosa monitoring network using a lidar system covering Northeast Asia would be completed, the benefits would include improvement in accuracy of early warning and forecast modeling systems. NIES-lidar network that were established in Northeast areas have been maintained under the QA/QC good level and also have been contributed to the Kosa Information Service Home Page of Ministry of the Environment/Japan Meteorological Agency. For the purpose of improvement in modeling system, we have conducted observations of dust emission processes at dust source regions and built up assessment system for evaluating model error information of MASINGAR using Ensemble Kalman Filter technique with NIES Lidar data. We also estimated dust emission flux at the source regions using inverse technique with dust observation data. We compared the dust emission flux estimated using data assimilation of the lidar network data and the vegetation growth in the Gobi desert in Mongolia. The dust emission in the event at the end of May was reduced, and that was qualitatively explained by the growth of vegetation and soil moisture. The results revealed the importance of developing a dust-emission model considering the seasonal variation of the threshold surface friction velocity. As there become to be concerns the improved forecast model as well as human health and the environment issues on account of increasing kosa events in Japan, we have basically studied on bioaerosols adsorbed onto kosa particles, animal their exposure tests and epidemiological survey. We have discovered and identified various microorganisms (*Bacillus* sp., etc.), including bacteria and fungi, by metagenomic and phylogenetic analyses of samples collected with the own developed balloon sampling system in the interior Chinese deserts and the Noto Peninsula, Japan. These results clarified not only the vertical distribution of bioaerosols but also the deposition of

microorganism influenced to a health and/or an ecosystem. We have experimentally demonstrated that kosa aggravates allergic symptom in the animal models of bronchial asthma and Japanese cedar pollinosis. We also have demonstrated the exacerbating effect by *Nocardiosis* sp. existed in the balloon sample on *Klebsiella Pneumoniae*-induced lung inflammation, that the effect was consequently obtained insignificant. In the epidemiological survey in the North Kyushu area, we have estimated kosa caused aggravating effects of nasal, eye and pharyngeal symptoms in allergic people.

# 【B-0901】

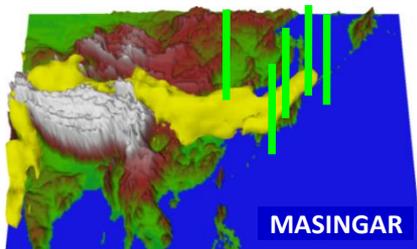
## 風送ダストの飛来量把握に基づく予報モデルの精緻化と健康・植物影響評価に関する研究

### 分担課題1



(黄砂モニタリングネットワーク)

### 分担課題2



(黄砂予報モデルの精度向上)

### 分担課題3

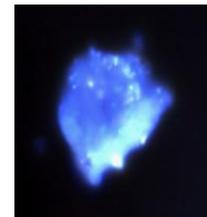


アレルギー疾患

花粉症 2~4月  
気管支喘息



### 分担課題4



黄砂付着微生物

- Aspergillus sp.  
アスペルギルス症菌
- Staphylococcus sp.  
日和見感染症
- Bacillus cereus  
食中毒原因菌



松枯れ



### 達成成果(アウトカム)

- 1)北東アジアに展開する観測網データを予報モデルへの同化技術手法を確立し、黄砂予報精度の向上のための技術的目処を確立した。
- 2)環境省・気象庁の共同運用HPに観測網ネットワークデータを恒常的に提供したほか、日中韓(TEMM)合意のDSS-WG1への科学的情報提供するなど環境行政への貢献した。
- 3)黄砂に付着する菌類などに関する動物実験的検証手法を確立したほか、疫学調査による黄砂の健康影響評価を実施した。
- 4)黄砂に付着する菌種を特定し、それらによる健康・環境影響の評価と有用資源活用を試みた。