

課題名	C-061 広域モニタリングネットワークによる黄砂の動態把握と予測・評価に関する研究		
課題代表者名	西川雅高（独立行政法人国立環境研究所 環境研究基盤技術ラボラトリー 環境分析化学研究室）		
研究期間	平成18-20年度	合計予算額	215,639千円（うち20年度 70,506千円） 上記の合計予算額には、間接経費49,764千円を含む
研究体制	<p>（1）東アジアモニタリングネットワークによる黄砂動態の実時間的把握とデータ精度管理・利用法に関する研究（独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>（2）黄砂の発生・輸送モデルへのデータ同化手法の開発と応用（九州大学）</p> <p>（3）黄砂粒子と大気汚染ガス成分の反応機構解明に関する研究（埼玉大学）</p>		
研究概要	<p>1. 序（研究背景等）</p> <p>中国沿岸部、韓国、日本で観測される黄砂現象は、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。黄砂は北東アジア地域における春季の大気エアロゾルの大部分を占め、地域のみならず地球規模の大気環境に大きな影響を与えている。そのような黄砂現象の規模や回数の増加による社会的影響も懸念されている。最近、黄砂粒子表面に SO<sub>2</sub> などの大気汚染ガス成分が沈着することが指摘されている。北東アジア地域の今後の産業活動の変化を考慮すると SO<sub>2</sub> 以外の大気汚染成分による相互反応機構についても注目する必要がある。また、黄砂の発生・輸送の解明には数値シミュレーションが有効であるが、発生源の評価が難しく、数値誤差の大きな要因となっている。このような北東アジア地域の共通課題である黄砂問題に対処することを目的として、モンゴル、中国、韓国、日本にまたがる黄砂モニタリングネットワークが構築されてきた。本研究プロジェクトでは、そのようなネットワークにより得られるライダーや地上観測データと黄砂数値輸送モデルを同化融合する手法を確立し、黄砂の初期濃度分布や発生源強度・分布を推定することや黄砂予報モデルの予報精度向上を目指している。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本プロジェクトでは、①ライダーを中心とする多点モニタリングネットワークの構築と化学天気予報モデル（CFORS）との融合（サブテーマ 1、2 の連携）を行いモデル推定精度の向上に有効な手法開発を行うこと、②黄砂と大気汚染物質の同時輸送現象について、ライダーおよび浮遊粒子状物質（SPM）常時監視ネットワークデータを利用した気象学的解析とフィールド試料の化学成分分析に基づく解析および室内実験による検証（サブテーマ 1、2、3 の連携）を行うこと、を主目的とする。ならびに、黄砂飛来量や輸送量の年々変動について多点観測とモデルの両面から解析するほか、黄砂飛来情報に関する社会的貢献（環境省黄砂 HP への寄与）も目的としている。</p> <p>3. 研究の方法及び結果</p> <p>（1）モンゴル 3 局、中国 1 局、韓国 1 局、日本 12 局による、ライダーを中心とする多点ネットワークが構築できた。ライダー常時観測システムは、地上から高度約 10 km の対流圏内を輸送されるダストを高度別にモニタリングできる。このライダーシステムを中心とする黄砂の多点常時監視ネットワークによるモニタリング結果をベースに新しい科学的知見を得た。日本に飛来する黄砂の最も大きな発生源はゴビ砂漠であることが知られている。そのゴビ砂漠からの春季 3 ヶ月間の推定発生量を、CFORS を基に計算すると、2006 年（140 Tg）、2007 年（140 Tg）、2008 年（65 Tg）、また、東経 130 度の経線上で高度 1 km 以下の低層大気中に輸送される量は、2006 年（4.4 Tg）、2007 年（5.8 Tg）、2008 年（1.9 Tg）となった。2000 年以降の黄砂観測の中で、2003 年について 2008 年は日本への黄砂飛来が極端に少ない年であった。そして、3 年間にわたるプロジェクト研究の中では、2007 年が日本への飛来量が最も多い年で、典型的な黄砂が何例か観測できた。2006 年、2007 年の黄砂事例をもとに、大気汚染成分と黄砂の混合状態について、「きれいな黄砂」と「汚れた黄砂」という大括りの概念で分け、その代表例の特徴を明らかにした。</p> <p>気象庁管轄の気象官署による現在天気報を元に、2007 年春季（3～5 月）に日本に飛来した主な黄砂イベントを抽出した。浮遊塵を報告する気象官署が 5 地点以上の場合のみを「広域黄砂日」として、2007 年春季には 9 回の黄砂イベントが観測された。この 9 回のうち、積算黄砂日で 100 [地点・日] を上回る事例を大規模な黄砂イベントとみなせば、4 月 1～3 日と 5 月 8～9 日の計 2 回が</p>		

その範疇に入った。抽出した 9 イベントの中で、4 月 1～3 日の事例、5 月 8～9 日の事例の二つについて詳しく調べた。

前者では、寒冷前線を伴う低気圧の通過後に、南西諸島と北日本の一部を除く広範囲で SPM 高濃度を観測した。3 月 31 日夕方以降から  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を超過する SPM 濃度が観測され始め、翌 4 月 1 日午前から  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を超過する SPM 高濃度が観測され、2 日の日中には全測定局の 3 割以上が  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を超過した。各測定局における SPM 濃度の極大値は、近年の黄砂事例の中ではかなりの高濃度となった。高濃度 SPM の観測期間では、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  には濃度上昇は観測されず、気体状の大気汚染物質を伴わない、いわゆる「汚れていない黄砂」の特徴を示した。松江におけるライダー観測で、非球形粒子（黄砂）が下層大気で卓越していたことも裏付けとなる。

一方、後者（5 月 8～9 日）は、多くの気象官署では黄砂と報じていないが、新潟県・大分県で観測史上初の光化学オキシダント注意報を発令するなど、全国的なオゾン高濃度を観測した事例である。各測定局の SPM 濃度は  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  前後で、4 月 1～3 日の事例に比べて 1/2 から 1/3 程度である。高気圧の勢力圏下にあり、前者の事例とは気象条件が大きく異なる。時間の経過に伴い SPM 濃度上昇局数が増加した。全国的な  $\text{SO}_2$  濃度については、SPM よりも  $\text{O}_3$  と同期した時間変化を示した。 $\text{NO}_x$  に見られる  $\text{O}_3$  とほぼ逆フェイズの時間変化は、日中の光化学  $\text{O}_3$  生成と夜間における  $\text{O}_3$  と  $\text{NO}$  との消失反応サイクルが卓越したことを示している。長崎におけるライダー観測からは、高度約 2 km より下層では球形粒子（二次生成粒子）、それより上層で非球形粒子（黄砂）という 2 層構造がみられ、地上で観測された SPM 濃度は、二次生成粒子と黄砂が混合した粒子質量濃度を観測していた可能性が指摘された。以上により 2007 年 5 月の事例は、汚染気体を伴う「汚れた黄砂」的な濃度変化であることが示された。

既存のライダー観測システムによる継続的な観測を行うとともに、初年度および 2 年目に開発した実時間のデータ解析処理手法を適用して、実時間の黄砂情報の提供およびデータ同化実験（サブテーマ 2 へのデータ提供を行った。また、測定精度管理に関して、特に黄砂濃度の導出に関わる偏光解消度の地点間の差異とその要因、改善手法を考察した。精度管理確認したライダーネットワークデータにより、2007 年春季の黄砂現象を解析した。図 1 は 2007 年 3 月、4 月、5 月の 10 地点の黄砂消散係数（光学的な黄砂濃度）の時間高度表示である。2007 年春季には、3 月の末から 4 月の初め、5 月初旬、5 月下旬の 3 回の顕著な黄砂イベントがあったことが分かる（図中、□で囲んだ部分）。2007 年は黄砂の発生時期が遅く、特に 5 月 26 日前後に観測された黄砂は異例に遅い黄砂であった。

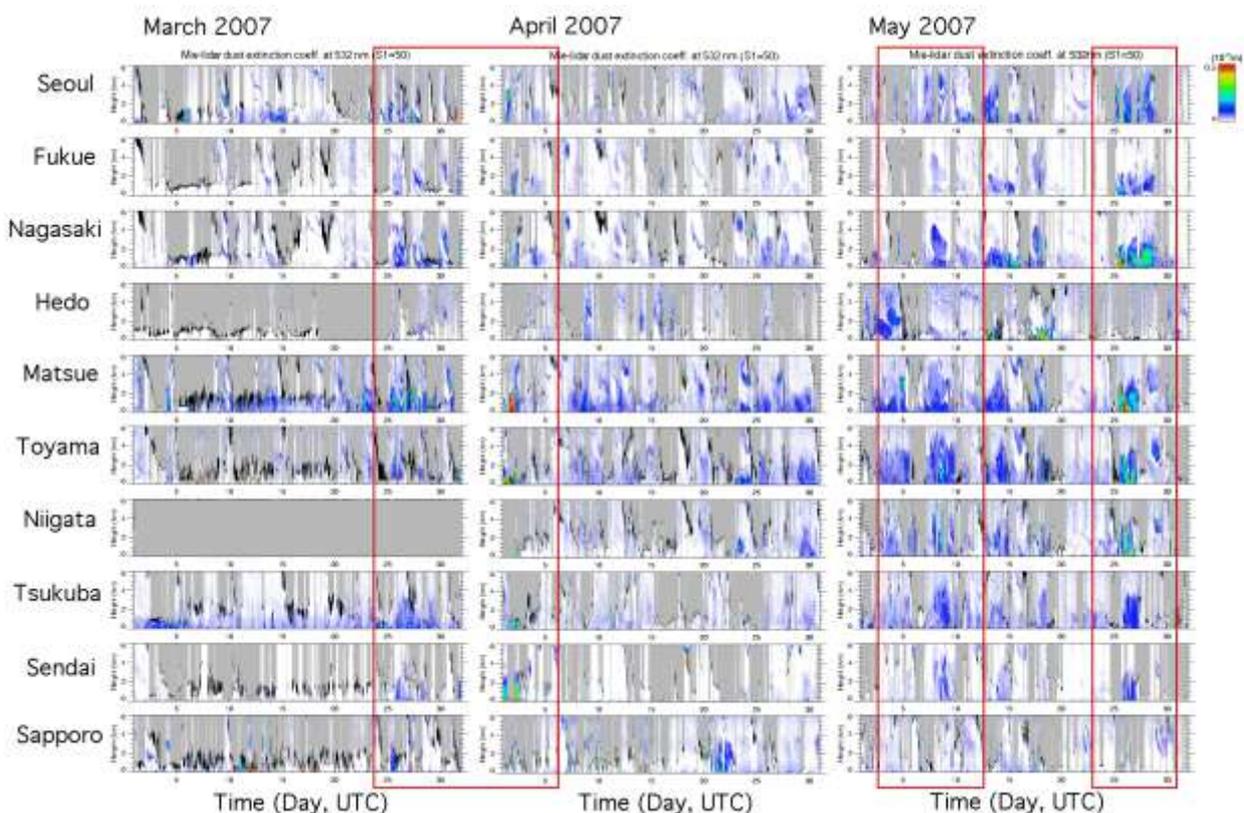


図 1 2007 年 3 月、4 月、5 月にライダーネットワーク地点で観測された黄砂消散係数

データ同化をしない CFORS と比較すると、CFORS はこれらの黄砂イベントを定性的に再現するが、4月の黄砂イベントでは CFORS が過大評価、5月下旬の黄砂では過小評価していることが分かった。これらの3つのイベントについてはサブテーマ2でデータ同化実験が行われ、発生源、発生量の定量的な評価が行われたが、これらのイベントはライダーネットワークデータによる同化の有効性を示す良い例となった。2007年は、越境大気汚染によると推定される光化学オキシダントの事例が報告されているが、ライダーで観測された球形エアロゾルにおいても、地域規模の現象の特徴を示す時間変化と地点間の相関が見られた。

(2) 土壌性ダストの発生・輸送モデル CFORS に4次元データ同化手法を新たに導入した。このモデルを用いてライダー観測データを利用したデータ同化手法のパフォーマンスを、2007年3月末から4月初めに中国から日本各地で観測された高濃度の黄砂現象について適用して調べた。図2に3月30日から4月2日までのモデルで同化されたダストによる光学的厚さ AOD の地域分布を示す。

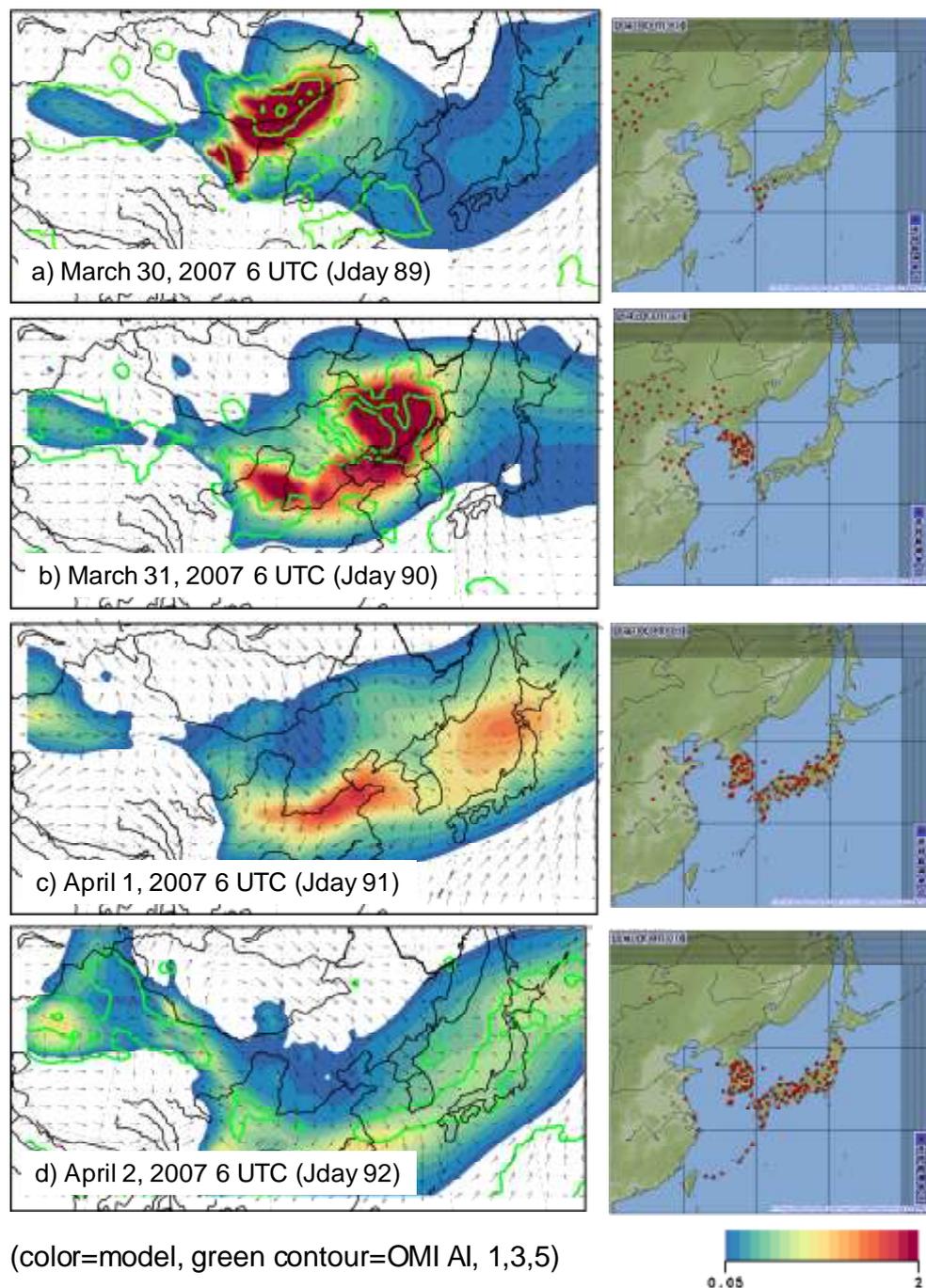


図2 (左) モデルの光学的厚さ (トーン) と OMI Aerosol Index (コンター) の比較、  
(右) 気象庁の黄砂観測点の分布

図には、NASA Aura 衛星に搭載された OMI (Ozone Monitoring Instrument) の Aerosol Index (AI) (コンター線；ただし 4 月 1 日は欠測) と気象庁の黄砂情報サイト (<http://www.jma.go.jp/jp/kosa/index.html>) に掲載された同日の観測地点も同時に示す。3 月 30 日に中国・モンゴル国境の東経 102～118 度、北緯 40～48 度付近でダストが発生し、低気圧とともに東進し、3 月 31 日に高濃度域は渤海湾・朝鮮半島北部・中国東北部に達している。その後、4 月 1 日には濃度は減少するが、東北地方から日本海・朝鮮半島南部の広範囲に AOD が 1 を越える領域が見られる。この高濃度域は AOD のレベルが更に低下するが、4 月 2 日は中国華北平野部から日本列島の広範囲に広がっている。3 月 30 日から 4 月 2 日にかけてのモデルの結果は、気象庁の黄砂観測の範囲と良く対応し、OMI AI の日変化とも良く一致している。これは同化モデルの結果が、今回対象としたダストの発生から輸送過程を良く再現していることを示している。総合的なモデル解析の結果、日本国内の 5 地点のライダー観測データをダスト発生・輸送モデルに同化することで、ダスト発生地域の発生量の最適化が可能となり、モデルと観測データの一致性が向上するとともに、データ同化前の発生総量 57.9 Tg に比較して 57.8 % (約 21.2 Tg) の発生量の増大が必要とされた。

同化モデル結果は、衛星センサー OMI Aerosol Index (AI) や地上気象通報による観測結果とも良く整合することが確認された。2007 年 5 月上旬の黄砂エピソードを対象に、環境研究所の地上ライダーネットワークのデータを同化したモデルを用いて黄砂の 3 次元輸送の解析を行った結果を図 3 に例示する。解析には NASA CALIPSO 衛星に搭載された宇宙ライダー CALIOP の計測結果も用いた。図には、データ同化ダストモデルで計算された黄砂の光学的厚さの水平分布と CALIPSO 衛星の軌道を同時に示した。このように黄砂の発生源域でのモデルと観測の比較が可能となり、両者に良い一致性があることを示すことができる。ライダーデータの同化は、アジア域のダストの発生・輸送モデルの予測可能性を大きく向上させることが明らかになった。

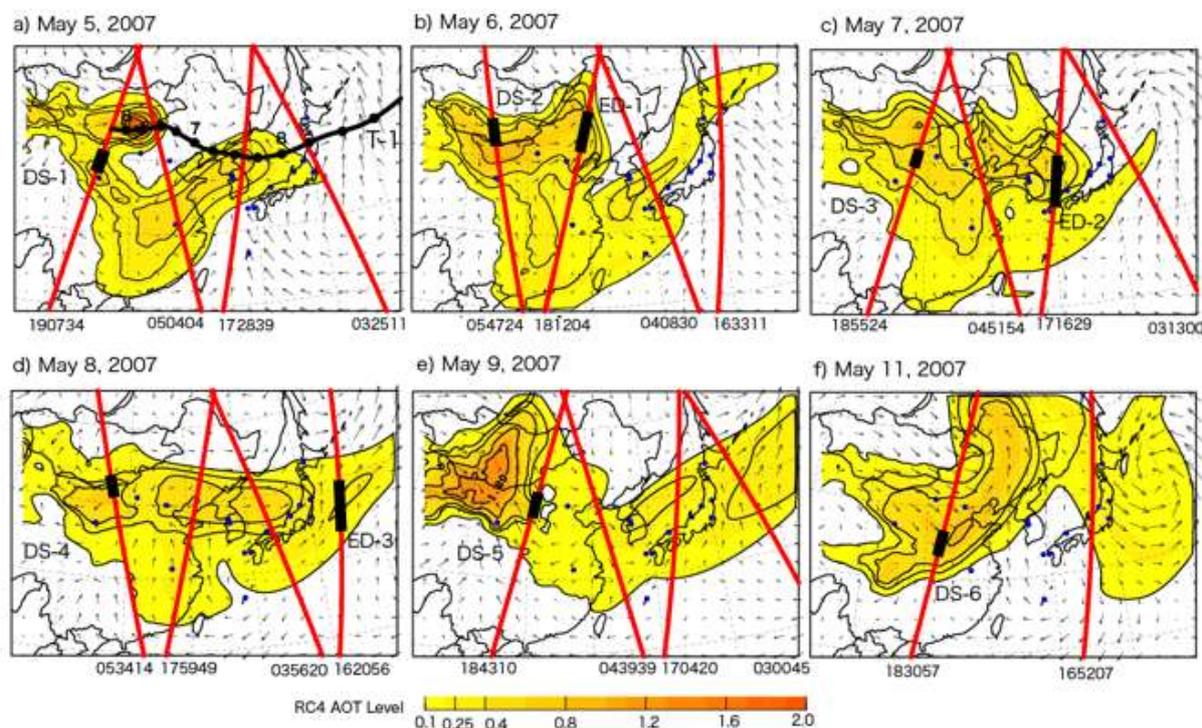


図3 データ同化ダストモデルで計算された黄砂の光学的厚さと CALIPSO衛星の軌道

(3) サブテーマ 1 の観測結果が示すように、黄砂は大気汚染物質と混在し輸送される場合がある。このいわゆる「汚れた黄砂」について、粒子表面にある種の大気汚染ガスが反応固定されることが明らかにできれば、沈着後の環境影響、例えば動植物への影響などを考えるときの重要な知見である。

黄砂が長距離輸送過程で汚染気塊と混合すれば、個々の黄砂粒子上に  $\text{SO}_2$  や共存する汚染物質が同時に沈着する可能性がある。HF、 $\text{O}_3$ 、 $\text{HNO}_3$ 、シュウ酸 ( $\text{COOH})_2$  などの共存汚染物質は、黄砂粒子上への  $\text{SO}_2$  の沈着・酸化に影響を与えるものと予測される。さらに、 $\text{SO}_2$  の沈着・酸化は、黄砂粒子表面の濡れ特性や吸湿性を大きく変化させ、雲粒形成能力を増大させ、地球冷却化を導く可能

性をもつ。

黄砂粒子表面に大気汚染物質が反応固定されるかどうか実験的検証を行った。実験用黄砂粒子として蘭州黄土（黄砂堆積土壌）の微粉末試料を用いた。SO<sub>2</sub>、HF、シュウ酸ガスへの黄砂粒子の暴露実験には、自作のガラス製円筒型流通反応器を用いた。円筒型流通式反応器の内側には必要に応じて 11 個までガラス製シリンダーを直列に配置出来るようになっており（図 4）、黄砂粒子をその内側に約 20 mg 塗布することが出来る。暴露実験では、反応器前後での成分ガス濃度の測定、または各シリンダー内側に塗布した黄砂粒子への成分ガスの沈着量を算出することにより、沈着速度や沈着係数を求めることができる。それぞれのガス成分の反応量を反応器の入口・出口におけるガス濃度差や、イオンクロマトグラフ法による反応固定量に基づいて分析定量し、沈着係数（ $U_{dep}$ ）、沈着した S の酸化率（ORS）を算出した。

SO<sub>2</sub> 沈着に与える湿度影響を詳細に調べるために、円筒型流通式反応器に設置するガラス製シリンダー数を変化させ、実験ガスと黄砂粒子の接触時間(反応時間)を変化させ、SO<sub>2</sub> の沈着係数  $\gamma(-)$  を以下の速度式から求めた。

$v$  を平均分子速度 ( $\text{cm s}^{-1}$ )、 $S/V$  を反応容器表面積と体積の比、 $k$  を一次反応速度定数 ( $\text{s}^{-1}$ )、 $[X]$  を SO<sub>2</sub> 濃度とすると、次式が得られる。

$$-\frac{d[X]}{dt} = \gamma \frac{v S}{4V} [X] = k[X] \quad (1)$$

上式を時間  $t$  で積分すると、以下の式が得られる。

$$\ln[X] = -k t + \text{constant} \quad (2)$$

また、一次反応速度定数  $k$  と沈着係数  $\gamma$  との関係は、以下の式の通りである。

$$\gamma = 2r \frac{k}{v} \quad (3)$$

黄砂に SO<sub>2</sub> を曝露する際の相対湿度 ( $R.H.$ ) を変化させ、各々の  $R.H.$  における沈着係数  $\gamma_0$  を算出することが重要であると考えられるため、 $R.H.$  を < 5、10、20、30、40、50、60、70、80 % と変化させた時の沈着係数を算出した。表 1 に、算出した沈着係数  $\gamma_0$  の結果を示した。やはり  $R.H.$  60 % 付近の相対湿度が、沈着係数  $\gamma_0$  に急激な影響を及ぼしていることが確認された。

これらのことから、黄砂と SO<sub>2</sub> との反応において、 $R.H.$  は重要なファクターであり、 $R.H.$  によって、黄砂表面の状態が大きく変化することが確認された。そして、SO<sub>2</sub> の沈着に関しては、SO<sub>2</sub> 曝露の際の  $R.H.$  が黄砂表面の反応場状態を左右すると考えられた。

表 1 相対湿度の変化による SO<sub>2</sub> の初期沈着係数および反応速度定数の違い

Conditions( $R.H.$ )	5 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
Slope $k$	5.35	5.20	5.26	5.48	5.27	5.29	6.22	6.26	6.84
Uptake Coef. $\gamma_0 (\times 10^{-4})$	1.16	1.13	1.14	1.19	1.14	1.15	1.35	1.36	1.48

SO<sub>2</sub> とシュウ酸 (COOH)<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> と HF の 2 成分混合ガスによる暴露実験結果について説明する。低分子ジカルボン酸の中でもシュウ酸は比較的高い割合で都市大気中に存在することが知られている。(COOH)<sub>2</sub> 単独および SO<sub>2</sub> + (COOH)<sub>2</sub> 曝露実験との間で、シュウ酸ガスの沈着量に顕著な差が見られなかった。たとえば、相対湿度 5 % 以下での暴露実験において、(COOH)<sub>2</sub> の黄砂粒子への沈着係数は、SO<sub>2</sub> の約 2 倍程度の値を示した。両者の混合ガスへの暴露実験では、(COOH)<sub>2</sub> の沈着がほとんど影響を受けなかったのに対して、SO<sub>2</sub> の沈着は 24% 程度減少しており、SO<sub>2</sub> 沈着は (COOH)<sub>2</sub> の共存により抑制されることがわかった。

一方、シュウ酸ガスの沈着に対し SO<sub>2</sub> は影響を与えないことが明らかとなった。

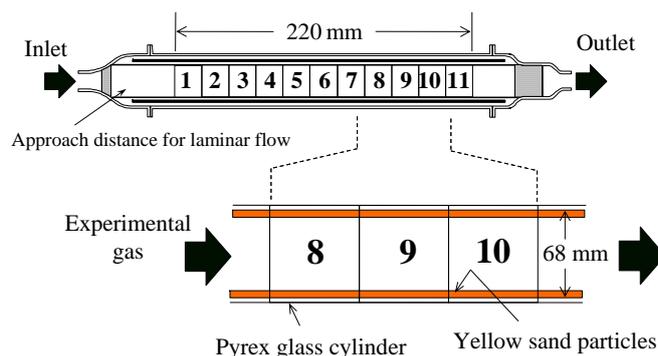


図 4 円筒型濾過反応器の概略図

#### 4. 考察

(1) 2007年春季に発生した黄砂は141百万トンであり、2006年(143百万トン)と同じレベルであり、平均よりもやや多い年であった。両年を比べると、2007年の方が大気境界層以下に進入してきた割合が多い年であった。気象官署で報告された日本への飛来黄砂は9回あり、その中で、4月1~3日と5月8~9日の2例が対照的事例であった。前者が大気汚染物質との混ざりが少ない、所謂、「汚れていない黄砂」、後者が大気汚染物質との混ざりが顕著な「汚れた黄砂」と区分できることが判った。空気塊の移動が遅い場合に、大気汚染物質と黄砂の混ざり度が高くなると推察された。また、ライダーネットワークデータによる空間的実態把握を行った。データ同化をしないCFORSと同化による解析結果とを比較すると、CFORSはこれらの黄砂イベントを定性的に再現するが、4月の黄砂イベントではCFORSが過大評価、5月下旬の黄砂では過小評価していることが分かった。サブテーマ2と連携しデータ同化実験が行われ、発生源、発生量の定量的な評価が行われたが、日本のライダーネットワークデータの精度がソウルや北京の輸送分布の推定に重要であることが判った。

(2) ライダーネットワークデータを4次元同化変分法に組み込む方法を確認し、有効性の検証を行った。2007年3月31日から4月2日に日本に飛来した事例についてデータ同化計算した。日本の5地点のライダー観測データをもとに同化を実行し、ソウル、北京のライダー観測結果と同化解析結果を比較し、その両結果の一致性が良好であることを確認できた。ソウル、北京の観測データも同化することにより、ダスト発生量の推定精度が向上するものと考えられる。

(3) 各々のガスの沈着サイトは、金属酸化物ならびにその表面に形成された水膜の2種類が考えられる。黄砂に対するSO<sub>2</sub>の沈着を考えると、SO<sub>2</sub>には、沈着し易いサイト(局所的な水膜と数種の金属酸化物(CaCO<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO etc.))、ならびに沈着し難いサイト(SiO<sub>2</sub> etc.)が存在する。

一方、(COOH)<sub>2</sub>の沈着は、いかなるサイトであっても様に起こり得る。このことが、(COOH)<sub>2</sub>がSO<sub>2</sub>よりも沈着係数が高くなった理由であり、さらに、(COOH)<sub>2</sub>の存在によりSO<sub>2</sub>の沈着が抑制されたのに対し、SO<sub>2</sub>の存在が(COOH)<sub>2</sub>の沈着に影響を与えなかった理由であると考えられる。

また、黄砂粒子表面で、沈着したSO<sub>2</sub>の酸化過程は以下のように起こっていたと考えられる。金属酸化物表面には、水分の存在により、水膜が形成されることが示唆されており、本実験条件(R.H. < 5%)でも、少量の水分が存在していることから、水膜が形成していると考えられる。この水膜へのSO<sub>2</sub>溶解込みを考え、その水膜がバルクの液相として機能し、酸化が進行すると考えられる。R.H. 60%前後で、水膜の厚さが変極点を持って急激に増加し、SO<sub>2</sub>の沈着係数が増大したことは、他研究報告と同様の結果となった。また、黄砂表面に沈着したSO<sub>2</sub>の酸化は、(A) R.H. < 50%では、SO<sub>2</sub>の溶解により、黄砂表面上の水分が酸性であるために、金属イオン触媒効果による液相酸化が有利であり、R.H. 増加による表面水分量の増加が、金属イオンの溶存量の増加を引き起こし、酸化率が湿度増加とともに増加を引き起こした。一方、(B) R.H. ≥ 50%では、SO<sub>2</sub>沈着量がほぼ一定であったことから、黄砂表面上のS(IV)濃度は減少し、さらにアルカリ土類金属が水膜中の酸性度を上回り、金属イオン触媒効果による液相酸化を抑制したものと解釈できる。

#### 5. 本研究により得られた成果

##### (1) 科学的意義

ライダーネットワークデータを用いた輸送モデルの検証やデータ同化手法が確立され、黄砂現象の実時間の把握、発生地域と発生量の推定、正確な予報などへの応用が期待される。データ同化手法は、ライダー観測のみならず地上観測データや衛星観測データ等の同化も可能であり、今後の黄砂モデルへの総合的なデータ同化システムの構築の目処を与える成果を得た。大気汚染成分と輸送気塊中で混合し汚れた黄砂が飛来していることがネットワークデータにより明らかになり、実証的実験によりメカニズム解明ができた。たとえば、HFやシュウ酸による黄砂粒子表面におけるSO<sub>2</sub>の沈着抑制作用が明らかになったが、この作用は気相のまま長距離移流するSO<sub>2</sub>の割合を増加させ、結果として、地球冷却化への寄与が増す可能性がある。黄砂粒子上へのSO<sub>2</sub>の沈着・酸化が促進すれば、表面の濡れ特性が変化し、黄砂粒子が雲凝結核として働く可能性を高くする。

##### (2) 地球環境政策への貢献

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

## 6. 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研究基盤技術ラボラトリー  
環境分析化学研究室・室長

主要参画研究者

(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大気圏環境研究領域遠隔計測研究室・室長

(2) : 鶴野伊津志

1955 年生まれ、北海道大学大学院工学研究科修了、工学博士、  
現在、九州大学応用力学研究所・教授

(3) : 坂本和彦

1945 生まれ、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士、  
現在、埼玉大学大学院理工学研究科・教授

## 7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

## (1) 査読付き論文

- 1) Kimio Arao, Joji Ishizaka, Nobuo Sugimoto, Ichiro Matsui, Atsushi Shimizu, Ikuko Mori, Masataka Nishikawa, Kazuma Aoki, Akihiro Uchiyama, Akihiro Yamazaki, Hiroki Togawa, Jun'ichi Asano: SOLA, 2, 100-103, doi:10.2151/sola.2006-026 (2006)  
“Yellow Sand Dust Event on 13 April 2003 over Western Kyushu, Japan”
- 2) Kimio Arao, Masataka Nishikawa, Shiro Hatakeyama, Akinori Takami, Shigeo Matsuyama and Tadahiro Hayasaka: Journal of Environmental Studies, Nagasaki University, 9(1), 23-30 (2006)  
“Atmospheric Turbid Conditions due to Fine Particles in Recent Years at Nagasaki, Japan”
- 3) Y. Hara, I. Uno and Z. Wang: Atmos Environ, 40, 6730-6740 (2006)  
“Long-term variation of Asian dust and related climate factor”.
- 4) K. Yumimoto and I. Uno: Atmos Environ, 40, 6836-6845 (2006)  
“Adjoint inverse modeling of CO emission over the East Asian region using for dimensiononal variational data assimilation”.
- 5) Katsuyuki Takahashi, Motohiro Hirabayashi, Kiyoshi Tanabe, Yasuyuki Shibata, Masataka Nishikawa, Kazuhiko Sakamoto: Water Air Soil Pollut., 185, 305-310 (2007)  
doi:10.1007/s11270-007-9454-5  
“Radiocarbon Content in Urban Atmospheric Aerosols”
- 6) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake: Geophys. Res. Lett., 34, 8, L08806 (2007) doi:10.1029/2006GL028551  
“Adjoint Inverse Modeling of Dust Emission and Transport over East Asia”
- 7) A. Sorimachi and K. Sakamoto: Water Air and Soil Pollution: Focus 7, 181-186 (2007)  
“Laboratory measurement of dry deposition of ozone onto northern Chinese soil samples”
- 8) A. Sorimachi and K. Sakamoto: Atmospheric Environment, 41, 2862-2869 (2007)  
“Laboratory measurement of the dry deposition of sulfur dioxide onto northern Chinese soil samples”
- 9) Y. Hara, I. Uno, K. Yumimoto, M. Tanaka, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu: Geophys. Res. Lett., 35, L23801 (2008) doi:10.1029/2008GL035630  
“Summertime Taklimakan dust structure”
- 10) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto and A. Shimizu: SOLA, 4, 89-92 (2008)  
“MODIS AOT Based Inverse Modeling for Asian Dust”
- 11) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Liu and D. M. Winker: Atmos. Chem. Phys., 8, 2869-2884 (2008)  
“Numerical Modeling of Asian Dust Emission and Transport by Adjoint Inversion using Lidar Observation Network”
- 12) I. Uno, K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu and D. M. Winker: Geophys. Res. Lett., 35 (2008) doi:10.1029/2007GL032329  
“3D structure of Asian Dust Transport revealed by CALIPSO Lidar and a 4DVAR Dust Model”
- 13) 鶴野伊津志、弓本桂也、杉本伸夫、清水厚：大気環境学会誌、43 (4), 191-197 (2008)  
「随伴モデリングを用いた東アジア域のダストの発生・輸送の逆推定」

- 14) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu, D. M. Winker: *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8715-8742 (2008)  
“Asian Dust Outflow in the PBL and Free Atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated Dust Transport Model”
- 15) 高橋克行、森育子、西川雅高、全浩、坂本和彦：エアロゾル研究、23(3), 194-199 (2008)  
「北京と東京における都市大気エアロゾル中の炭素成分の特徴」
- 16) Ikuko Mori, Zijie Sun, Miyuki Ukachi, Kimiyo Nagano, Cameron W. McLeod, Alan G. Cox, Masataka Nishikawa: *Anal Bioanal Chem*, 391, 1997-2003 (2008),  
doi: 10.1007/s00216-008-2076-y  
“Development and certification of the new NIES CRM 28: urban aerosols for the determination of multielements”
- 17) 早崎将光、大原利眞、黒川純一、鶴野伊津志、清水厚：大気環境学会誌、43(4), 225-237 (2008)  
「2007年5月8-9日に発生した広域的な光化学オゾン汚染：観測データ解析」
- 18) 杉本伸夫：大気環境学会誌、43(5), 295-300 (2008)  
「大気汚染指数 API から見た中国の大気環境の変化」
- 19) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu and D. M. 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”
- 20) I.Uno, K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara and N. Sugimoto: *Nature Geoscience*, 2( 8), DOI:10.1038/NCEO0583(2009)