

環境儀

No. 8

APRIL 2003



国立環境研究所の研究情報誌

黄砂研究最前線

科学的観測手法で黄砂の流れを遡る



戈壁砂漠で発生した黄砂の北京、長崎、つくばにおける観測状況 (2001年3月)

発生推定日時	北京	長崎	つくば	発生推定日時	北京	長崎	つくば
1日 9:00	2-3日	3-5日	-	18日 6:00	18-19日	-	-
4日 6:00	4-6日	6-7日	6-8日	19日 6:00	20日	22-23日	-
8日 0:00	8-9日	-	-	20日 9:00	21-23日	25-27日	-
10日 9:00	南下	-	-	23日 6:00	24日	25-27日	-
12日 6:00	14日	-	-	24日 6:00	南下	-	-
13日 3:00	南下	-	-	28日 6:00	南下	-	-
16日 9:00	17日	-	-				

※この表は、戈壁砂漠で発生した黄砂の北京、長崎、つくばにおけるライダー観測状況を示しています。黄砂は、気流によって運ばれる経路が変わります。黄砂の大部分は北京を通りますが、すべてではありません。その後日本まで飛来する回数は、北京と比べ大幅に減りますが、長崎、つくばなど場所によっても違うことがわかります。(発生地:主に戈壁砂漠南部)

独立行政法人

国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/index-j.html>

最先端観測手法による
中国の大気エアロゾルモニタリングは
東アジア地域の大気環境改善のカギになります。



昨年日本では、観測史上最多の黄砂の飛来が確認されました。今年も春先の3～5月にかけて、また黄砂のシーズンがやってきます。日本では旅客機の発着が遅れるなどの交通被害が報道されていますが、中国では農作物被害を始めさまざまな分野に大きな影響が出ており、その被害額は日本円に換算して毎年7000億円にも達しているといわれています。

この黄砂ですが、これまでは目視観測で行われてきたため、どこで発生し、どのように移動し、どこにどれだけの量が沈着するかなどの詳細な科学的データはまったくありませんでした。国立環境研究所では、黄砂問題を中国一国ではなく東アジア地域全体の問題として捉え、その科学的解明をめざし、平成8年度から日中友好環境保全センターと共同で研究に取り組んでいます。

本号では「大気エアロゾルの計測手法とその環境影響評価手法に関する研究」から端を発した、黄砂の化学的動態に関する基本的データや新手法による黄砂モニタリングやモデリングの話題などを中心に紹介します。

C O N T E N T S

黄砂研究最前線

科学的観測手法で黄砂の流れを遡る

INTERVIEW

研究者に聞く P4-P9

SUMMARY

「大気エアロゾルの計測手法とその環境影響評価手法に関する研究」の概要 P10-P11

黄砂の研究をめぐって P12-P13

「黄砂研究のあゆみ」の全体構成 ... P14

沙尘暴与黄砂研究成果

研究者に聞く

西川 雅高 化学環境研究領域
計測技術研究室主任研究員



「大気エアロゾルの計測手法とその環境影響評価手法に関する研究」から黄砂研究に取り組んできた西川雅高さんに、そして2000年から新たな黄砂プロジェクトを共同で推進している杉本伸夫さん、菅田誠治さんに加わっていただき、「中国北東地域で発生する黄砂の三次元的輸送機構と環境負荷に関する研究」について、研究のねらい、成果などをお聞きしました。

●研究の動機

——大気エアロゾルの研究が黄砂に絞られてきましたね。その経緯を含め、まず研究のきっかけからお願いします。

西川 大気エアロゾルは気体中に浮遊する微粒子のことですが、この特別研究を始めようと考えたのは1994年でした。当時から中国の大気汚染は世界的に有名なほど深刻で、それは2000年に発表された国連環境計画(UNEP)のWorld Resources 1998-1999によると、1990年代半ばの大気エアロゾルによる汚染が激しい世界の上位10都市のうち9都市が中国だったことから窺えます。研究を始めた当時、中国は高度成長が始まったばかりで、エネルギー源の約8割が石炭でした。

そこで大気汚染の原因究明は、石炭燃焼由来のエアロゾルがどのくらい出ているのかを調べればわかるのではないかと考えていましたが、実態はそんな単純なものではありませんでした。石炭燃焼だけではなく、自動車も増えていました。さらに、季節によっては土壌由来の汚染が非常に激しいという状況でした。

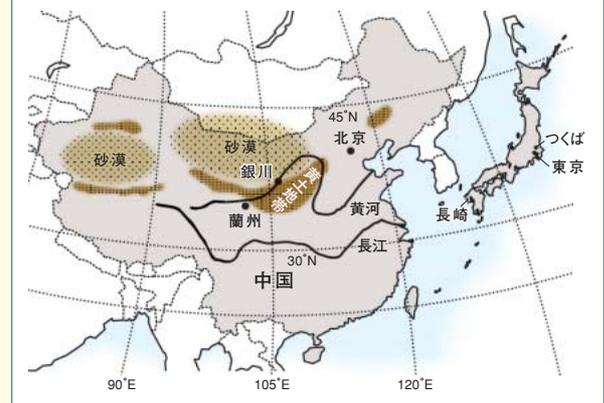
当時、北京の大気汚染について大気エアロゾルの濃度は世界的に知られていましたが、その化学組成や、季節や月単位の時系列変化データがほとんどあ

表1 CMB*法から推定した発生源寄与率 (1998-2000年)

	(%)	平均	中間値	範囲
北京乾性降下物	土壌	84	83	72 - 100
	フライアッシュ	15	17	0 - 27
	自動車排出物	1	1	0 - 2

*CMB(Cheical Mass Balance)法は、都市大気粉じんの発生源の推定に用いられる手法で1970年代に米国で開発されました。

図1 黄砂発生源である主な砂漠・黄土地帯の概略





りませんでした。ですから、研究はまずそれらを調べることから始まりました。

ところが、実際に研究を進めていくと、石炭燃焼由来よりも土壌由来の微粒子の割合が非常に高いことがわかってきました(表1)。

元々北京では春を中心に7カ月ほどの期間、黄砂が見られます。その時には大気エアロゾル濃度が高く、乾性降水物の量も多いなど、いわゆる大気汚染がより厳しくなることもわかりました。北京市内で

巻き上がる土壌もあるのですが、市外から飛んで来る土壌の割合を調べることが重要ということになり、少しずつ研究の中身もシフトしていきました。それが黄砂研究を始めるきっかけになりました。

——北京の大気エアロゾルは思った以上に土壌由来が多い。そこで、外部から来る土壌由来物質、これは黄砂だと思うのですがその割合が多いことがわかったのですね。

西川 外部から来るものと、北京市内で発生する

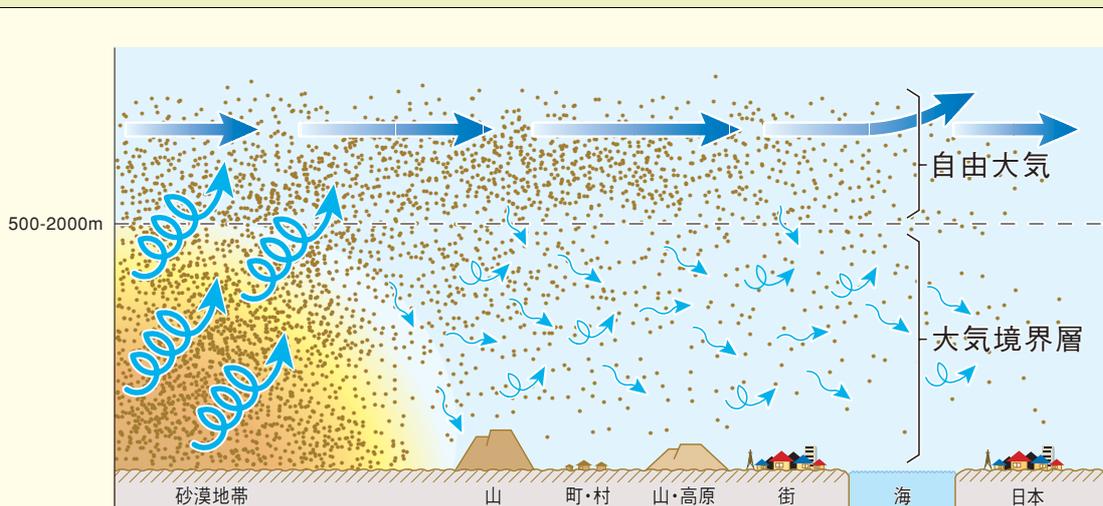
コラム「黄砂の話」

黄砂はタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、黄土高原などから砂嵐によって巻き上げられるもので、それが西風に乗りとくに3~5月にかけて日本にもやってきます。サハラ砂漠から発生するエアロゾルと合わせて、世界の二大鉱物性ダストといわれており、サハラのものはいくらか赤味が強く、黄砂の色は黄土色です。

砂嵐によって巻き上げられた黄砂は、太陽放射によって暖められた大気境界層の中で500~2000m以上の高さまで上昇し、風に乗って移動します。気象条件によっては一部の黄砂は境界層の上に出て自由大気の中でさらに移動を続けます。一旦自由大気に出た黄砂は、地表面の影響をほとんど受けることなく速やかに輸送されます。夜になると大気境界層は冷えて下がってきますが、エアロゾル状となった小さな黄砂はそのまま自由大気中に残り、さらに移動を続けます。こうして移動しながら3~4日で日本に到達します。この間、黄砂のうち粒径の大きなものは次第に落下しますので、平均粒径は北京では4~20 μ mの間になりますが、日本では4 μ m程度になります。

中国では、黄砂の度合いによって、それぞれ浮塵(ふじん)、揚塵(ようじん)、沙塵暴(さじんぼう)と呼び、その判定基準は表のように視程と瞬間最大風速とによって分けられます。日本に飛来する黄砂は、北京風といえばほとんどが浮塵です。黄砂塵の沈着量で見ると、1km²あたり北京では春先の黄砂シーズンで10~20トン/月、一方日本では1~5トン/年と見積もられています。

種類	強度	視程距離	瞬間風速(参考)
浮塵	——	10km以下	8m/s以下
揚塵	——	1-10km	8m/s以上
沙塵暴	弱	3級 (500-1000m)	10m/s以上
	中	2級 (200-500m)	17m/s以上
	強	1級 (200m以下)	20m/s以上
	特強	0級 (50m以下)	25m/s以上



「大気層の構造と黄砂の輸送」

地表面は、昼夜の加熱冷却が大気より速く、また摩擦があるために、その近くでは乱流の卓越した大気境界層と呼ばれる大気層

研究者に聞く

ものでは化学成分に違いはないのだろうかと思い、まず調べました。ところが、北京市内の土壌自体が黄砂に近かったため、その意味では化学成分だけでは区別の違いは見出せないことが今回の研究でわかりました。そうなると、どうやって違いを見分けるかになります。飛んでいる粒子を大きさで分ける方法、北京以外の地域で同時モニタリングを行って、その地域から発生して飛んで来る割合を調べる方法が考えられますが、黄砂の発生源といわれているタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、黄土高原は、合わせると日本の3~4倍の広さになり、調査も大がかりになってしまいます(P4, 図1)。しかし、これらの場所を含めて北京以外の内陸からの黄砂の飛来ルートや飛来量を明らかにすることがどうしても必要で、飛来する黄砂の大気動態を追いかけるためには、さらに多点ネットワーク化を図ることが欠かせません。

そのような調査を行えば、北京市外から来る黄砂の割合を出せると考えています。現在、そのために研究体制を固めながら進めているところです。

——そこまでして行う意義はどの辺にあるのでしょうか？

西川 北京の大気エアロゾル濃度は非常に厳しい状況にあり、そのうち土壌由来の割合が高いことは先に述べました。2008年のオリンピックを控えた北京の、そのような状況を改善するためには、科学的に「どこから発生する土壌由来エアロゾル(ほとんどが黄砂)が主原因か」を明らかにする必要性に迫られています。この目的では、海外協力版の地域密着型研究といえるかもしれません。

また、東アジアあるいは地球規模スケールでは、黄砂による地球温暖化現象への影響や海陸での物質循環だけでなく、黄砂現象が見られる地域の生活環境への影響を考慮する時、「どの負荷レベルが本来のベースラインで、それを超えるとどんな影響が現われるのか？」あるいは「この地域の黄砂に対する環境負荷容量はどれだけか？」ということを知るための基礎的科学情報の提供、いい換えると将来の対策をにらんだ“初めの一步”として重要な意義があると考えています。

●ライダーの登場

——そのためにはどのくらいの量が、どのようなルートをたどって北京まで来るのか、という情報が

必要ですね。

杉本 はい。黄砂の動きや量的な三次元空間の観測には、ライダーという装置を使います。

——ライダーとは何ですか。

杉本 レーザーを使用したレーザーです。普通のレーザーとの違いは、電波

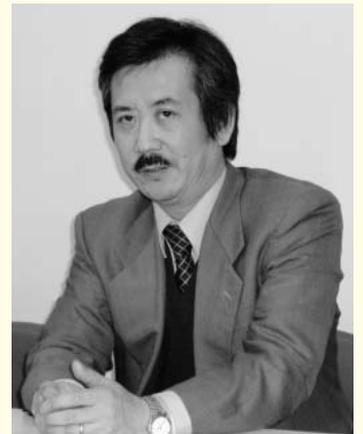
に比べて非常に短い波長の光を使うことです。このためエアロゾルのような微粒子もキャッチできます。たとえば気象レーダーでは雨は見えますが、エアロゾルは見えません。ライダーはそれが可能なわけです。

実際、「黄砂が発生した」「その頻度が高い」「非常に厳しい黄砂」などといわれますが、どのようなデータに基づいていたと思います？実は地上での目視つまり、目で見る観測で判断するしかなかったのです。目視では霧(もや)なのか黄砂なのか区別がつかないこともあります。また上空を通過する黄砂は捉えることができません。ライダーですと地上から高さ十数kmまでの濃度分布を定量的に出すことができます。確実かつ定量的に黄砂を把握するためには、どうしてもライダーのような測定装置が必要なのです。

——実際の観測は、どのように行われているのですか。

杉本 通常15分間隔で、5分測定、10分休止の運転を24時間繰り返しています。従来、ライダーは連続して運転できる装置ではなく、晴れた日に天窓を開けて観測するものでした。しかし黄砂の観測では時間的に連続することが非常に重要です。なぜかといいますと、たとえば北京では、黄砂現象が短ければ半日足らずで終わってしまうこともあります。連続観測を行っていないと観測のチャンスを逃す場合もあるからです。また、連続に加えて多点での観測も必要です。黄砂の流れをつかむためです。

小型の自動運転ライダーによる連続観測は、エアロゾルの温暖化影響の研究に関連して1996年からつくばで開始しました。この連続観測のノウハウを応用して、2001年3月から北京、長崎、つくばの



大気環境研究領域遠隔計測研究室長
杉本伸夫さん



3地点で黄砂の観測を開始しました。さらに、2002年からは奄美大島と協力サイトである韓国 Suwon(KyungHee大学)などを加えて、多点ネットワーク化を図ってきました。

——ライダー観測では巻き上げによる土壌と、飛来した黄砂の区別はできるのですか。

杉本 ライダーの信号そのものからは区別できませんが、輸送された黄砂と巻き上げられた土壌では分布の高さが違います。その時間的变化を見れば区別ができます。

北京の黄砂現象について、2001年春季のライダー観測結果を中国の研究者と共同で分類した結果、4つのパターンが見られました。黄砂飛来時間の経

過とともに高さ4000mくらいから徐々に黄砂が降りてくる「高空輸送沈降型」、上空を黄砂が通過し、地上にまで降りてこない「高空輸送通過型」、1000m以下の低高度に出現する「地元舞上がり型」、高空輸送沈降と地元舞上がり型の両方を重ねたような「高空輸送沈降/地元舞上がり型」です。

巻き上げられたものは高度は低く粗大粒子が多く、一方飛来した黄砂は高度が高く微小粒子が多いと考えられますが、ライダー観測と合わせて地上でサンプリングした粒径分布を見ると、確かに巻き上げられたケースは粒径が10 μ m近い粗大粒子が多いことがわかります。2001年春季到北京で観測された黄砂現象についていえば、遠方から輸送されたものが

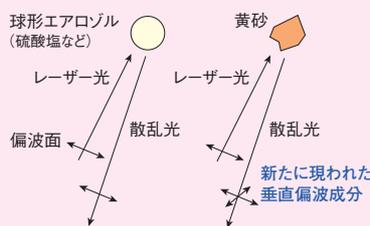
コラム「ライダー」

ライダー(レーザーレーダーともいう)は、電波ではなくレーザー光を使ったレーダーです。レーダー(Radar)はRadio Detection and Rangingの縮小語ですが、このRadioをLightに置き換えてLIDARと呼ばれます。サーチライトや暗闇に差し込む光線を見ることができ、これは光が大気中の塵で散乱されるためです。ライダーはレーザーを光源として、このような散乱光を高感度のセンサーで計測することによって大気中の塵(黄砂や大気汚染エアロゾル)の分布を求めます。ライダーではパルスレーザー(間欠的に非常に短い時間間隔で発光するレーザー)を用い、レーザーの発射から戻って来る時間遅れを利用して散乱体までの距離を計測します。また、その時間に対応する散乱の強度からその距離における散乱体の濃度を求めます。たとえば、ライダーによく用いられるヤグレーザーは約10ナノ秒(10⁻⁹秒)の瞬間的な光を発射します。光速で伝播するので、このパルス光の空間的な長さは約3mに相当します。つまり、3mの長

さの光の塊が光路上に分布するエアロゾルに散乱されながら光速で飛んで行く状況を考えればよいのです。この散乱光を望遠鏡で集めて時間応答波形を記録することによって、光路上のエアロゾルの分布が得られます。

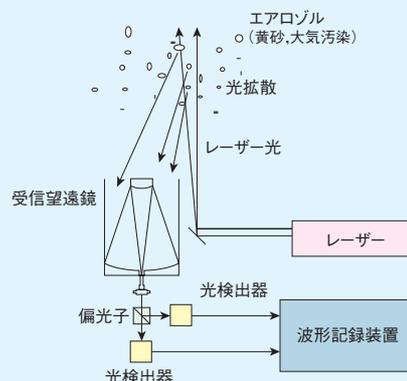
国立環境研究所で開発した小型ライダーでは、ヤグレーザーの基本波(1.06 μ m)と第2高調波(532nm)の2波長を用いて散乱光を測定します。2波長を用いることによってエアロゾルの粒径に関する情報が得られます。また、532nmでは、散乱強度と同時に散乱による偏光の変化(偏光解消度)を測定します。この偏光解消度は散乱体为非球形である度合いの指標です。大気汚染による硫酸エアロゾルのような液相のエアロゾルは球形ですが、鉱物粒子の黄砂は非球形なため偏光解消度が高く、黄砂を感度よく判別することができます。小型ライダーの測定方向は真上方向のみで、高度約15kmまでの対流圏のエアロゾルと雲の高度分布を昼夜、天候によらず継続的に観測しています。

ライダーで非球形を区別する原理図



散乱体が球形であれば散乱による偏波面は変わりません。黄砂のように球形でない場合、散乱光に垂直偏波成分が現われます。これを測ることにより黄砂を判別できます。

ライダーの原理図



ライダーによる観測の写真 (緑のレーザー光はイメージです)

研究者に聞く

多くて、地元舞上がり型はそれほど多くはありませんでした。

——なるほど、そうしたものがライダーによってわかっていたわけですね。

西川 ライダーにより得られた重要なことはもう一つあります。杉本さん製作のライダーでは、大気中に浮遊しているエアロゾルの中に黄砂が含まれているかどうかの判定、つまり「今日は黄砂日である」という宣言ができるのです。こうした共通の基準があって初めて、互いに離れたところからでも認識のズレがなく研究が進められるのです。

笑い話みたいですが、以前は北京に電話をしても黄砂状態の判断が異なることが多かったですし、内陸ではもっとひどかったのです。「今、黄砂が発生しているでしょう」というと「曇っているだけだよ」という返事が返ってきたりしました。そのため私たちは、1996年の研究の1期から地上モニタリングのチャンスは何回も逃してきました。地上サンプリングをする際、「黄砂日」の判断ができること、つまりライダーの存在、そしてモデルの存在というのは非常に重要です。

●モデルとは

——現在の研究では、モデルも登場していますね。ちょうど今モデルという言葉が出ましたが、具体的にはどのような役割を果たすのですか。

菅田 研究を行う上でモデルがなぜ大切かといいますと、黄砂現象全体を把握することができるからです。私たちが黄砂について知りたいのは、黄砂がどこから発生して、どう動いているのかという全体像をつかむことです。観測はどんなに規模を拡大しても点の情報でしかありません。その点同士をつなぎ、全体を再現するためにモデルを作ることが必要です。

——それはどのようにして作っていくのですか。

菅田 たとえば黄砂がどのように発生していくのかを見る場合は、発生と輸送の両方の計算が必要です。発生については、「ある一定の地上条件の時に一定以上の風が吹くと砂が舞い上がる」という観測や実験から得られた基本データを元に求めて行きます。風の強さに関しては天気予報と同じようなモデルがあり、これらを使って黄砂の放出量が計算されます。一方輸送については、大気を三次元に細分化し、水平方向には100km程度(将来的にはそれ以下に)、鉛直方向には



大気圏環境研究領域大気物理研究室
菅田誠治さん

上空に行くほど粗くなりますが、地上付近では100m程度に分割したたくさんの格子をつくり、動きや広がりについて各格子にそれぞれのデータを取って計算します。簡単にいえば以上のプロセスです。

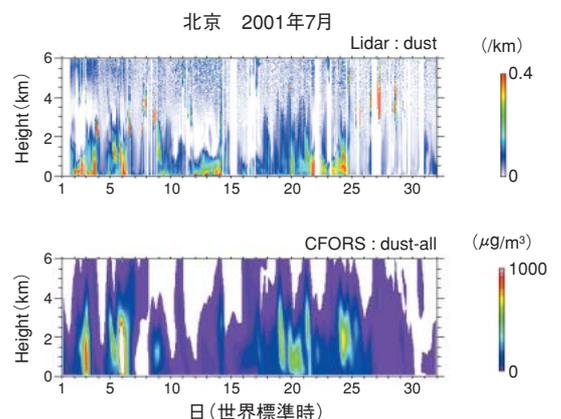
——計算されたモデルの成果はいかがですか。

菅田 一つの例ですが、2001年3月15日から23日にかけての黄砂のシミュレーションを行いました。その結果、北京では19日から20日にかけてと、21日に2回の大きなピークが観測され、ライダー観測の結果と定性的には大きくズレていないことが確認されました。今後はデータの改良を重ね、より現実に近いものを作って行きたいと思っています。また将来ですが、対策のモデルにまで発展できればと考えています。

——対策というとうどういうことが考えられますか

菅田 たとえば砂漠に草を植え、黄砂シーズンの

図2 ライダーで観測した2001年3月の北京の黄砂と化学輸送モデルCFORSの計算結果比較



2001年3月の北京における黄砂の鉛直時間分布についてライダー観測で得られた結果(上図)と化学輸送モデルCFORSで得られた黄砂濃度(下図)を比較した図。色の濃淡は黄砂濃度の大小に対応するもので、濃淡の調子が同じ傾向ということがわかります。



春に人工雨を降らし、表面土壌に湿り気を何%か与えるなどの条件を設定し、舞い上がる黄砂の量がどのくらい減るかを計算によって予測できればと思っています。このようにいろいろな要素を変えることによって結果が変化する面白さが、モデリングにはあります。

●黄砂研究の今後

——黄砂はここ数年で増えている、とのことですが。

杉本 ライダーのデータから見ますと、2002年に日本に飛来した黄砂の回数は非常に多かったですね。ところが、北京ではさほど変わっていないのです。

——それは、どういうことですか。

杉本 2001年と2002年では飛来ルートが変わったのです。北京に飛来する黄砂の大半は外モンゴル南西部や内モンゴルで発生したもので、これらは約1日で北京周辺に到達、その後北上します。通常、強風を伴う黄砂の本流は日本へは到達しません。北東に流れる帯状の一部が南東に広がるような形で日本へ輸送されます。ところが北上するポイントが東側にズレると、黄砂の本流は韓国や日本へ直接飛来してきます。そのケースが2002年は目立ったのです。

西川 タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠、黄土高原で発生した黄砂が、どのようなルートで北京や日本に飛来するのか完全にはわかってはいません。そのような飛来ルートを明らかにし、モデリングによって再現できれば黄砂の発生原因の解明にも役立つと考えています。

——北京の黄砂状況は変わっていないのですか。

西川 回数に限れば変わっていません。ただ2002年は黄砂の季節が早くきており、量も違います。これは気候変化が関係しているのかどうかまだわかりませんが、連続モニタリングで明らかにしたいと思っています。

——ところで中国本土の黄砂は日本とは比べものにならないくらいすごいということですが、実際は、どんな感じなのでしょう。

西川 北京で一番すごい経験をしたのは、天安門前の大通りの向こう側が見えないぐらいの状態です。後は砂漠で発生した砂嵐、これは現地の人は黒風というのですが、車に乗ってそれに遭遇したときは視界が数mくらいでした。まるで、砂の壁に囲ま

れて走っている状態です。

たとえば、黄砂で視界が100mくらいですと、総粉じん量(TSP)は、 $10,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えている場合があります。これは、まさにギネスブック級です。私が知る限り、自然由来から来る世界のTSPのトップは、サハラ砂漠の砂嵐で $4,000 \sim 5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ くらいだったと記憶しています。これに対し、私たちのグループは2002年3月20日に北京で $12,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の値を観測しました。この数字は首都でのチャンピオンデータのはずです。

ただ、これまで観測データの重要性が理解されていない面があり、手法がまちまちで観測や測定条件なども曖昧なところがありました。これでは世界から信用されません。そこをしっかりクリアし、中国、韓国、日本、モンゴルでのモニタリング手法をきちんと統一した上で、黄砂の東アジア全体の評価をしなければならないと思っています。そこで昨年からは黄砂観測のネットワークを結び、動態を測るだけでなく手法の統一化も図っています。

●中国との共同研究について

——中国との共同研究について、苦労はありましたか。

西川 中国に限らず多国間で共同研究を進める上で大切なことは、テーマの善し悪し以上に相互理解が根底にないとうまくいきません。幸い、私たちの研究のカウンターパートは、日中友好環境保全センターの全浩先生という方で、20年前に中国から国立環境研究所へ来た第1回国費留学生です。その後も研究交流が続いていたので相互理解という面では非常にうまくいきました。

もう一つは日中友好環境保全センターで中国側研究チームを支援している国際協力事業団(JICA)の存在も非常に大きいものがあります。おかげで、現在も黄砂の研究は順調に進んでいます。黄砂問題は、中国政府の首脳も大きな関心を持っており、日中友好環境保全センターとの共同研究に対して高く評価していただいています。

——研究の体制づくりも充実して、本格的に黄砂の解明に乗り出すわけですね。今後が楽しみです。ありがとうございました。

「大気エアロゾルの計測手法とその環境影響評価手法に関する研究」の概要

北京の大気エアロゾル濃度は、最近では改善されてきたものの、世界の首都のトップクラスに入るほど高いのが現状です。こうした大気汚染は、中国国内の問題であると同時に東アジア全体の問題でもあり、研究が急務となっています。ここでは都市大気エアロゾル発生源の寄与として、乾性降下物量の経年変化、黄砂標準物質の作製、土壌由来(主に黄砂)エアロゾルの化学的性質を紹介します。なお、この研究は1996年から2000年にかけて、日中友好環境保全センターと共同で実施しました。

1. 大気エアロゾルと乾性降下物の同時モニタリング

1998年より2年間、乾性降下物のモニタリングを行いました。地点は北京、銀川、蘭州の3カ所です(図3)。

手法は、ハイボリュームエアサンプラー(日本などで標準モニタリングとして採用されている大気エアロゾル採取装置)の捕集面と同じ条件にしたステンレス製捕集装置を考案製作し、降雨中は蓋を閉じ乾性降下物のみを採取するようにしました(図4)。

乾性降下物とは、大気エアロゾル中の粗大粒子部分とほとんど同じと考えてよい物質です。乾性降下物の季節変動は冬季よりも春季に高い傾向を示しました。春季は黄砂エアロゾルが多く発生するところから、その寄与が高いことが推察されました。

その黄砂がどれだけ地表面に沈着するのか推定した結果、北京では月に15トン/km²にもなることが

わかりました。北京に飛来する黄砂の平均粒径は、およそ4~10μmの範囲内にあり(図5)、粒径に関しては日本の黄砂よりやや大きい程度でした。ハイボリュームエアサンプラーで1日サンプリングすると、中国の北京など都市域の平常時試料は真黒ですが、黄砂現象のときは黄土色をしています。日本の奄美大島で採取したものと比べると違いが面白いです(写真1)。

2. 黄土標準物質、黄砂エアロゾル標準物質の作製

北京や銀川などの都市大気エアロゾル中に含まれる土壌由来エアロゾルの割合を明らかにするためには、比較基準物質があれば便利です。また、発生直後の“汚れていない黄砂エアロゾル”があれば、都市大気内で生じている大気動態変化を実験室で検証することもできます。そこで、世界初の黄砂エアロゾルおよび黄土の標準物質の作製を試みました。原料となる表層

図3 乾性降下物モニタリング地点と黄砂標準物質作成原料採取地点

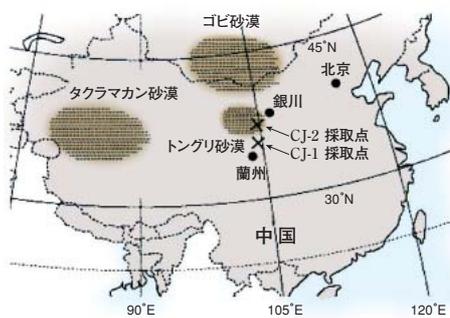


図5 黄砂エアロゾルの粒径分布

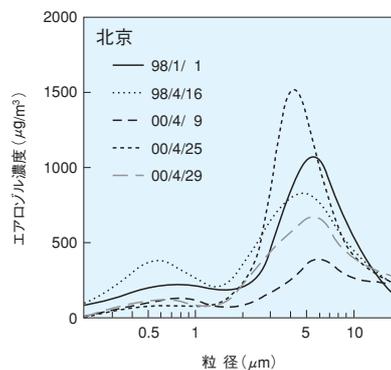


写真1 平常時と黄砂時の大気エアロゾルの色比較

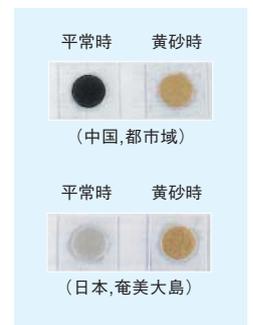
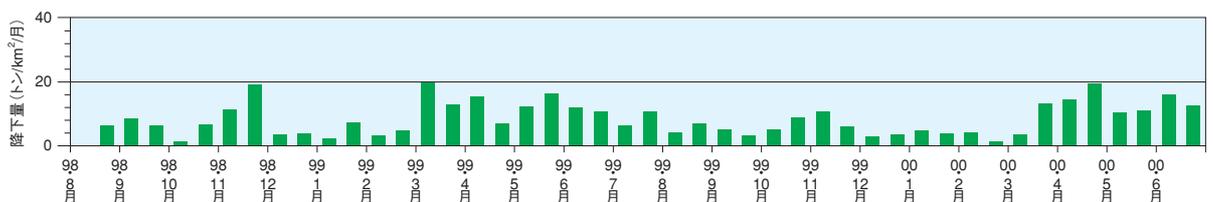


図4 乾性降下物量の経年変化(北京)





砂と黄土は、銀川、北京に飛来する黄砂発生源の一つである、寧夏回族自治区のトングリ砂漠(4万m²)と典型的な黄土推積層(厚さ約250m)が発達している甘肃省寧で採取しました(図3)。

作製後の黄土標準物質をCJ-1(China Loess), 人工の黄砂エアロゾル標準物質をCJ-2(Simulated Asian Mineral Dust)と名づけました(写真2)。

作製した試料の50%平均粒径はCJ-1が38.1 μm, CJ-2は24.1 μmです。CJ-2は、風成塵堆積土壌である黄土の粒径と大きく変わらないことが確認されました。また、CJ-2の化学組成値について、各元素濃度比は日本(大阪, 屋久島, 山口)の黄砂エアロゾル, 北京の黄砂エアロゾルの両方の相対濃度比とよく似ていることが確認されました(表2)。CJ-1とCJ-2は、中国の国家標準局によって、2001年春に国家1級標準物質として認定を受けました。

3. 土壌由来エアロゾルの化学的性質

土壌由来エアロゾルをいろいろな地点で捕集し、その化学成分を比較しました。黄砂発源地である砂漠地帯や黄土高原の試料と北京のような都会の試料を比較すると、硫酸イオンや鉛などの重金属類が都会で捕集した試料中に多く存在することがわかりました(図6)。

土壌由来エアロゾルは、自動車排ガス、石炭燃焼排ガス等の大気汚染物質と大気中で反応する可能性があります。そこでCJ-1とCJ-2を使い、中国都市大気中で濃度が高いSO₂ガスが現実的に黄砂と反応するのかを検証するための室内実験を行いました。その結果、SO₂ガスは非常に早いスピードで黄砂粒子表面にSO₄形態で取り込まれることがわかりました。黄砂粒子はこの酸化反応機構を一層促進する触媒効果を持っています。

中国の都市大気エアロゾルは写真1のように平常時は真黒で、硫酸アンモニウム粒子が日本よりも多く含まれてます。硫酸の源の多くは大気中のSO₂ガスです。SO₂が黄砂表面でSO₄に酸化し捕捉されることは述べましたが、それ以外に別のルートで黄砂表面に捕捉されることも見つけました。それは平常大気中に多く含まれている硫酸アンモニウム粒子が黄砂と大気中で混じったとき、黄砂中のカルシウムとアンモニアが置き換わる反応です。この反応は、湿度の高いときにゆるやかに進行します。エアロゾル同士の反応などは日本だけでの観測では思いもよらなかったことで、中国との共同研究を行って初めて発見したことです。この現象も黄砂標準物質を用いた室内実験で検証できています。

表2 CJ-2と黄砂エアロゾルの文献値との比較

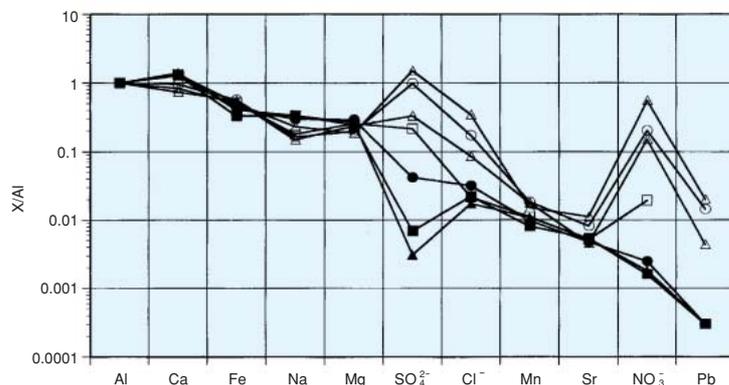
元素	CJ-2	屋久島 ¹⁾	北京 ²⁾
Al	1	1	1
Na	0.23	0.39	0.13
Mg	0.27	0.31	—
K	0.29	0.37	0.19
Ca	0.91	0.71	0.96
Fe	0.51	0.52	0.44
Mn	0.011	0.014	0.014
Ni	0.00058	0.00087	0.0007
Cu	0.00048	0.0029	0.0026
Zn	0.0013	0.0022	0.017
Sr	0.0041	0.0049	—
Ba	0.008	0.0077	0.013

1) Nishikawa, M., et al.: Anal. Sci., 7(suppl.), 1127-1130 (1991)
 2) 関根嘉香, 他: エアロゾル研究, 7, 325-332 (1993)
 注) Al(アルミニウム)を1とした場合の相対濃度比



写真2 黄砂エアロゾル標準物質

図6 砂漠土壌および黄砂時エアロゾル中のAl相対濃度比



タクラマカン砂漠: 降下物(●), サルテーション粒子*(■), 表層土(▲)
 黄砂時エアロゾル: 蘭州(○), 銀川(□), 北京(△)
 *強風でも高く舞い上がらず、すぐに落ちてくる砂粒

黄砂の研究をめぐる

黄砂を始め、地球規模の温暖化や気候変動予測に重大な影響を及ぼしている全球的エアロゾルに関する調査研究を進めるため、1995年から国際共同研究として地球大気化学国際協同研究計画(IGAC)の中でエアロゾルの性状特性研究がスタートするなど、砂塵系エアロゾルに関する研究が今注目されています。



世界では

IGACの中で進められているエアロゾルの性状特性研究はACE(Aerosol Characterization Experiment)と呼ばれ、1995年にはACE-Iとしてオーストラリア周辺の海域上を、1997年からはACE-IIが大西洋上をフィールドとして行われました。砂塵系エアロゾルの代表格であるサハラダストもその対象物質でした。そして、黄砂を重要な対象物質としたACE-ASIAが1999年～2002年まで行われました。ACE-ASIAでは、米国NASAやNCAR(The National Center for Atmospheric Research)の観測用飛行機や観測船、衛星による組織的調査が黄砂の発生する春季を中心に行われたほか、中国、韓国、日本の研究者もそれぞれ独自の観測を行い、データの共有化を図りました。

飛来回数・量の増加傾向を示す近年の黄砂現象について、発生原因を含めた環境問題として対処することも必要であるという認識が各国政府レベルで広まり、黄砂対策も含めた大きな枠組み形成のための話し合いが日中韓三国環境大臣会合や国連のUNEP、アジア太平洋経済社会委員会(ESCAP)、砂漠化対処条約(UNCCD)において積極的に行われ、現在GEF(Global Environment Facility)プロジェクト

の重要課題として取り上げられるようになってきました。

日本では

黄砂現象は、視程障害を起こし交通網へ影響を及ぼす現象として、また雲核形成物質として、あるいは海底堆積物への寄与など、古くから気象学分野や地球化学分野で研究対象となってきました。しかし、環境科学的見地からの研究が始まったのは、世界的にもそう古くありません。

日本で黄砂を対象とした環境科学分野のプロジェクト研究が本格的に始まったのは2000年以降です。文部科学技術省科学技術振興調整費によるADEC(Aeolian Dust Experiment on Climate Impact)プロジェクト(2000～2004年度)が開始され、気象研究所が中心となってタクラマカン砂漠をフィールドとして風送ダストの舞上がり機構や大気中への供給量調査、風送時の放射強制力評価を行っています。また、文部科学技術省科学研究費による特定領域研究「東アジア地域におけるエアロゾルの大気環境インパクト」でも、黄砂を含む東アジア地域で発生するエアロゾル全体の放射収支や海域への影響評価の研究を進めています。黄砂問



題は地球規模での温暖化影響のほか、地域的大気汚染の観点や砂漠化問題とも関連しており、環境省でも黄砂に関するプロジェクトを推進しています。

その他、黄砂の発生源が中国およびモンゴルの砂漠・乾燥地帯であることから、従来から行われてきた政府間ベースあるいはNPOやNGO活動による砂漠化防止・植林活動等と関連する部分があります。最近そのような活動目的に黄砂発生の防止対策という考えが加わりつつあり、発生源対策に直結する技術開発の萌芽も見逃せません。

国立環境研究所では

国立環境研究所では、本環境儀で紹介した中国との環境技術共同研究のほかACE-ASIA等に参加し、研究者が個々に黄砂の研究を行ってきました。その成果は内外の学会誌に多数の黄砂に関する論文として発表され、黄砂研究の核となる研究機関として評価されています。そして、近年の黄砂現象の増加の究明のため、2001年から環境省地球環境研究総合推進費による大型プロジェクト「北東アジア地域の黄砂による環境影響の解明」を本格的に立ち上げました。このプロジェクトの特徴は、中国内陸部で発生する黄砂のうち、

- ①ゴビ砂漠と黄土高原地域から発生する黄砂を対象とし、
- ②大気環境基準値を超える黄砂現象がどのような輸送機構で地上にもたらされるのかを解明する

こと、および

- ③北東アジア地域の生活環境に影響を与える黄砂の発源地を特定し、対策につながるような情報提供やモデルを構築することを目的としています。

つまり、プロジェクト全体をあるテーマで括るのではなく、対象地域ごとに研究重点を変えて対応しようという地域密着型の研究方針を立てていることです。

それゆえ、北京に影響を及ぼす黄砂については、中国政府も身近な問題として共同研究成果に強い期待を寄せています。中国との共同研究では多点ネットワーク観測が重要で、国立環境研究所が持ち込んだ中国初のライダー連続観測が威力を発揮しています。そのような最新の共同観測体制の円滑な運営には観測手法の統一化が重要であり、本プロジェクトの側面としてJICA支援のもとモニタリング技術の移転など国際貢献も併せて行っています。もちろん、他プロジェクトと同じく地球規模の温暖化影響に有用なデータも多く得られており、世界の黄砂研究グループとの活発な交流を行っているのはいうまでもありません。



黄土(黄砂の堆積層)のサンプリング現場

トピック

TOPIC 日中友好環境保全センター

今回の共同研究の中国側の研究機関である日中友好環境保全センターは、1988年の日中平和友好条約締結10周年記念事業の一環として設立され、中国の環境分野の中核機関の一つとして位置づけられています。環境分野の日中間交流・協力を総合的、包括的に実施する総合機関の役割も期待されています。

日中協力の活動としては「日中友好環境保全センター計画」があります。これまでプロジェクト方式技術協力が行われ、中国側に環境分野の研究・研修・モニタリングに関する基礎技術の移転を目的としたフェーズⅠ(1992~1995年)、同センターが中国の環境分野で指導的な役割を果たせるように、環境観測技術の標準化や実情にあった公害防止技術の研究開発、環境情報ネットワークの確立、環境管理に係わるシステムの構築を目的

としたフェーズⅡ(1996~2001年)が実施され、その後1年かけてフォローアップを行った後、現在これらの成果をベースとして相互協力をめざすフェーズⅢが2006年まで行われる予定です。

なお、同センターは、中国国家環境保護総局(日本の環境省にあたる)の直轄行政・研究・実施機関でもあり、環境保全に関するさまざまな活動を行い、中国国内で高い評価を受けています。



日中友好環境保全センター外観

「黄砂研究のあゆみ」全体構成

第一期

大気エアロゾルの計測手法と その環境影響評価手法に関する研究 (平成8～12年度)

中国の首都北京における大気エアロゾル汚染の実態解明を主目的とした研究であり、その中でも、寄与分が不明であった土壌由来のエアロゾル(主に黄砂)に注目して行いました。

その研究構成は、

課題1) 都市大気エアロゾルの化学成分別挙動に関する研究

北京の人為起源系粒子と土壌起源系粒子の混合割合を推計するため、化学成分から見た特徴を明らかにした。

課題2) 都市大気エアロゾルの評価手法に関する研究

従来から行われてきた化学成分濃度による評価の他、バイオアッセイ法による大気エアロゾルの質的評価手法の導入を試みた。

課題3) 土壌起源系エアロゾル特定のための標準物質の作製と高度測定手法の開発

砂漠表面土壌から乾式分級法だけで微粒子分を取り出し、世界初の黄砂標準物質を作った。完成した標準物質は、中国国家1級標準として認定された。

課題4) 都市大気中における土壌起源系エアロゾルの化学動態に関する研究

黄砂標準物質を使って、黄砂が自然環境中で関与する現象を室内実験で検証した。黄砂粒子表面に蓄積する硫酸イオンと硝酸イオンの取り込み機構を調べた。

課題5) 土壌起源系エアロゾルの寄与率および沈着量の推定に関する研究

北京の都市大気エアロゾルでは、人為起源の割合よりも土壌起源の割合が圧倒的に高く、特に、春季、冬季には、その寄与が大きかった。

第二期

中国北東地域で発生する黄砂の 三次元的輸送機構と環境負荷に関する研究 (平成13～15年度)

主にゴビ砂漠、黄土高原地帯で発生した黄砂が北京を経由し、日本に風送されていく現象について、発生源の絞り込み、輸送機構の解明、現象のモデリングを目指して、現在プロジェクト研究を進展中であり以下の3課題から構成されている。

課題1) 黄砂の三次元的動態把握に関する研究

課題2) 黄砂の輸送過程中的での化学的動態変化に関する研究

課題3) 黄砂の三次元的輸送モデルの構築と負荷量推定に関する研究

第一期は平成8～12年度特別研究として、第二期は平成13～15年度地球環境研究総合推進費研究として、以下のスタッフにより、実施されています。

<研究担当者>

●第一期

地域環境研究グループ 森田 昌敏, 西川 雅高, 吉永 淳
化学環境部 瀬山 晴彦, 久米 博, 白石 不二雄
大気圏環境部 福山 力, 内山 政弘
国際室 植弘 崇嗣
科学技術特別研究員 森 育子

共同研究機関

名古屋大学, 埼玉大学, 大阪府立大学, 東海大学, 熊本県立大学,
石川県農業短期大学, 日中友好環境保全センター (中国)

●第二期

化学環境研究領域 西川 雅高, 森 育子 (NIESポスドクフェロー),
的場 澄人 (重点研究支援協力員)
大気圏環境研究領域 杉本 伸夫, 菅田 誠治, 松井 一郎,
清水 厚, 早崎 将光 (重点研究支援協力員)

共同研究機関

筑波大学, 埼玉大学, 東京商船大学, 九州大学, 長崎大学,
日中友好環境保全センター (中国)

環境儀既刊の紹介

- NO.1 環境中の「ホルモン様化学物質」の生殖・発生影響に関する研究
(2001年7月)
- NO.2 地球温暖化の影響と対策—AIM：アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル
(2001年10月)
- NO.3 干潟・浅海域—生物による水質浄化に関する研究
(2002年1月)
- NO.4 熱帯林—持続可能な森林管理をめざして
(2002年4月)
- NO.5 VOC—揮発性有機化合物による都市大気汚染
(2002年7月)
- NO.6 海の呼吸—北太平洋海洋表層のCO₂吸収に関する研究
(2002年10月)
- NO.7 バイオ・エコエンジニアリング—開発途上国の水環境改善をめざして
(2003年1月)

『環境儀』

地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように『環境儀』という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すしるべとしたいという意図が込められています。『環境儀』に正確な地図・航路を書き込んでいくことが、環境研究に携わるものの任務であると考えています。

2001年7月

理事長 合志 陽一

(環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)

環境儀 No.8

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

2003年4月30日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当WG：鈴木 茂，西川 雅高，杉本 伸夫，菅田 誠治，内山 政弘，唐 艶鴻，
清水 英幸，滝村 朗)

発行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 (出版物の入手)国立環境研究所情報企画室 029(850)2343

(出版物の内容) // 企画・広報室 029(850)2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

編集協力 (社)国際環境研究協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-1-13



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字N.I.E.Sで構成されています。N=波(大気と水)、I=木(生命)、E・Sで構成される○で地球(世界)を表現しています。ロゴマーク全体が風を切っただけに進もうとする動きは、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。



本誌は再生紙を使用しております