

第5図 黄砂の長距離輸送の2次元パターンシミュレーションで、発生後の経過日数(数字)における黄砂ダストプルームの鉛直断面分布を示す。A:重力落下のない粒子, B, C:それぞれ直径 $5\mu$ ,  $7\mu$ 粒子に相当(ダスト湧源470km 四方で発生継続1日を仮定)。

は粒径分布や光学的減衰の観測によるものとなっている。筆者ら(1983)は、境界層力学モデルに黄砂の発生および輸送時の気象条件を考慮に入れて、黄砂の長距離輸送のシミュレーションを行った。発生源を海拔1kmにおき、春分時の日射条件と乾燥地の地面湿潤度を考慮し、摩擦速度 $u_*$ の日変化を用いて、鉛直フラックス $F=0.73 u_*^{3.08} \text{ mg/m}^2 \cdot \text{s}$ として舞上りを発生させた。ここで粒子が地面から離れる過程は含まれておらず、バーストないしサルテーションの状態にあるものとしている。したがって高い高度までの舞上りの数値実験である。沈降は重力落下のみとし、輸送速度 $u=4+15z/5000(\text{m/s})$ として、ダストプルームの2次元輸送パターンを求めた。結果として、 $80\mu$ 粒子は高く上がらず、 $20\sim 30\mu$ 粒子は高度5kmまで上昇した。アジア大陸沿

岸から距離約1万kmまでのプルームの移動の鉛直断面を第5図(中央は $5\mu$ 粒子の場合である)に示した。5kmまで上昇した粒子について、日本に到達するのは大粒子の方が小粒子より早くしており、これは粒径分布の実測で確認されている。 $20\mu$ 粒子は2000km( $10\mu$ は3000km)まで運ばれる。約 $5\mu$ より小さな粒子は、約9日後にハワイまで達しており、これはShaw(1980)の観測報告に矛盾しない。サハラダストと黄砂の輸送を比較しよう。サハラダストはダスト層が海上1.5kmの逆転層に乗って偏東風で運ばれ、輸送速度は、サハラ上空で8m/s、海上で4m/sと報告されている。一方黄砂は顕著な逆転層がなく、舞上がり時の気象条件で決まる高さを偏西風によって、より速く(約12m/s)輸送されることが多い。

201 (黄砂; 物質輸送)

## 黄砂粒子の輸送と輸送途中で見られる物理・化学的变化\*

岩坂 泰信\*\*

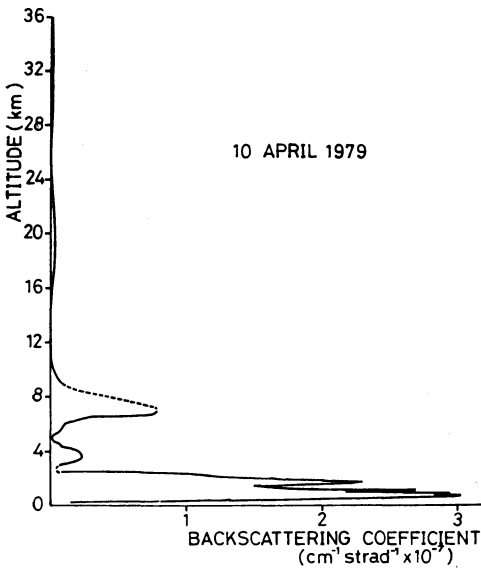
### 1. 序

大気物理学・気象学における黄砂の研究を振り返って

\* Chemical-physical processes of "KOSA" particle surface during long-range transport

\*\* Yasunobu Iwasaka, 名古屋大学水圏科学研究所

みると、いくつかの大きな山(ハイライトないしはトピックスが沢山でる時期)があった様に思われる。ひとつは、雲物理学の分野で黄砂が精力的に扱われた時期が挙げられる。この時期の黄砂に対する大きな関心は、この黄砂粒子が「氷晶核としての能力の有無を明らかにする



第1図 ライダーで観測された黄砂粒子の濃度分布(名古屋, 1979年4月)。2層になっているのが特徴的であるが、これは必ずしもいつもこのようになっている訳ではない。ハワイやマーシャル諸島で観測された鉛物粒子は、上の方の層に対応しているものと考えられる。

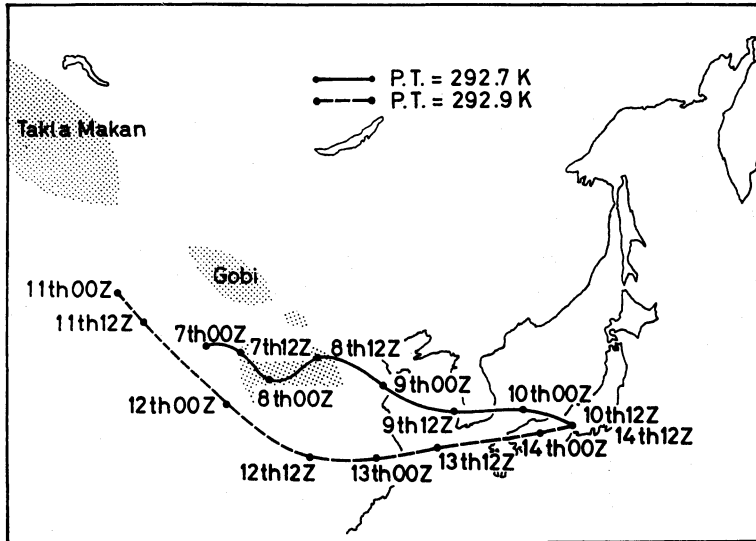
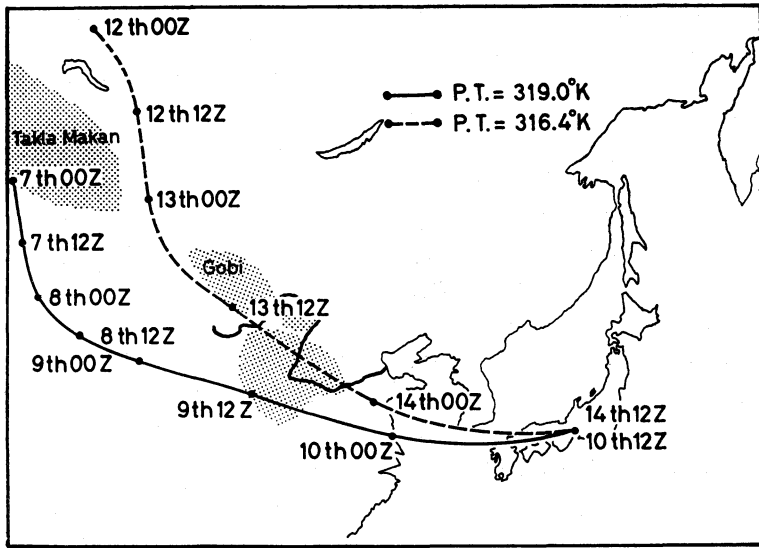
ことや、そのプロセスに物理的な、あるいは物性論的な解釈を与える」ことであった。もちろん、この時、黄砂の発源地や輸送について関心が大きいに払われてはいた。しかし、それはあくまで黄砂粒子の輸送であり、途中で様々な化学反応に注意が向けられることはなかった。

その後、研究の様子を変えた事件は、人工衛星の出現である。ただし、人工衛星によってさかんに研究されたのはどういう訳かサハラ砂漠ストームであった。人工衛星で砂塵嵐を見ることによって、その水平スケールが数1000 kmにも及ぶことがしばしばあること、さらに多くの人工衛星観測はダスト粒子による太陽光の散乱を観測していると言う事情が重なって、研究の方向に「砂塵嵐による太陽放射の散乱、砂塵嵐による大気温度場の変化、砂塵嵐が気候に与える影響」などの研究が行われる様になって来た。このような点からのアプローチでは、とりわけサハラダストストームであるとか黄砂であるとかを言うことは本質的ではないだろう。この時期の研究では、ダストの水平広がり、現象の持続時間、粒子の光学的特性に関心が向けられた。

最近現れた研究の方向は、「化学物質の収支や循環から見た黄砂現象」とでも言ったら良さそうな研究である。ここでは、そのような視点からの黄砂研究を議論してみたい。

## 2. 黄砂観測

ライダー(Lidar)を使って「黄砂粒子の濃度がどのような高さ分布を示しているか」を調べた観測がある(Iwasaka *et al.*, 1983)。以前から、黄砂粒子は一体どの高度を飛来してくるのに関心をもたれていたが、これといった簡便な(暇と人手とお金をかければ別であるが)手段がなかった。飛来高度を知ると言うのは輸送規模や機構を考察する上で極めて大切なことである。第1図に示したものは、ライダーの黄砂観測の例であり、これをもとに流跡線を描いてみると第2図のようになる。面白いのは、2つのピークが同一の源を持たない点である。いくつかの関連データから「高度の高いピークはタクラマカン砂漠付近、下のは黄河流域に起源を持つものではないか」と推定された。ちなみに、このときの黄砂は近年まれにみるほどの大きいもので、人工衛星ひまわりでもはっきり観察された。この黄砂こそ、私は、〈最近の黄砂研究の幕明けを促した〉ものと思っている。太平洋を舞台に、海洋の懸濁物の化学を研究しているグループがあった。彼等は、海底の沈殿物のなかにアルミニウムやシリカ等、土壌物起源と思われるものの濃度に季節変化がみられることから、彼等の言う所のアジアダストストームすなわち黄砂に注目した(Duce *et al.*, 1980)。はたせるかな、ハワイ諸島で大気中のエアロゾル粒子をサンプリングしてみると、春に鉛物起源と考えられるア



第2図 ライダーで得られた、黄砂粒子濃度の高い高温面の流跡線。2つのピークは、同じ所を移動していない。当時、「ひまわり」の写真からあたかもタクラマカン砂漠から吹き出したように見えたものは、上部のピークを作っている流れを見た可能性が高い。P.T. は温度。時間は GMT で示してある。

ルミニウム (Al) 等の濃度が極めて高いのだが、海洋起源と考えられるナトリウム (Na) 等は季節的な濃度変化を示さないのである。その後 Merrill 等の研究で、1979年春ハワイ諸島近辺で見られた強いヘイズあるいは、鉱

物起源エアロゾルは、われわれがおりしも観測した4月中旬の黄砂(すなわち、第1図に示してある結果)がはるかハワイまで運ばれたものであることが判明した(1985)。このようにして、黄砂が大気中を運ばれ、太平

洋に落下するやプランクトンの餌(?)になり排棄物と一緒に海底へ運ばれる、と言う誠に愉快な物質のサイクルが浮かびあがって来たのである。ここまでの話なら、ポイントは単に「黄砂の長距離輸送」というに留まるであろう(もちろん、輸送機構ひとつにとっても面白い話がいくつもあるのだが紙面の関係で省略する)。さてこの黄砂粒子を採集して電子顕微鏡で観察してみると、もしかしたら「黄砂粒子が大気中を飛んでいるときに黄砂粒子でなくなっている=粒子表面が大気中のガスと反応して生成物を回りにまとうため生の黄砂粒子でなくなる」のではなからうかと思わせる写真が得られた。黄砂粒子の電子顕微鏡の観察を中心になって進めたのは、現在気象研究所に居られる岡田菊男さんであるが、彼と顕微鏡写真を眺めながら「黄砂粒子の表面があたかも化学工のような働きをしながら、とうとうと、西から東へ流れて行き、その生産物を太平洋にばら蒔いているとしたらこれはひどく愉快なことではないか」と興奮したことを思い出す(なお、今年のサンプルについては講演予稿集を参照されたい)。

「黄砂粒子の化学工場としてのポテンシャル、工場で作られた物を運ぶ能力の2点に注目したとき黄砂粒子が大気に対してどの様な意味をもつであろうか?」と言う新しい問題が、出てきたといってよいだろう。もし、見込みどおり表面がいささかでも

1. 大気中の気体成分を液体や固体に変換させる
2. 気体の化学反応をなんらかの意味で促進させる(例えば、亜硫酸ガスの酸化を促進させるなど)

があれば、粒子の運動とあいまって大気の科学に面白い一面を提供してくれるはずである。

さて、そのように黄砂粒子の輸送と輸送中の化学反応、さらにそれが大気や海洋の化学物質の収支や循環に与える影響を研究のターゲットに据えらるとなると、それにふさわしい舞台が必要になる。すなわち、

ある程度「面として広がりをもつ」テストフィールド。

輸送途中の化学反応を追跡するラグランジュ的計測である。

### 3. 展望と結論

黄砂の発源地を抱えている中国大陸での観測は、必須条件のひとつである。幸いライダー仲間の協力を得て、お互いにささやかな情報交換や協力観測が中国科学院の大気物理研究所との間で始められつつある。日本は、世

界に冠たるライダー王国である。

ライダーコミュニティでの黄砂に対する関心も高く、黄砂時には日本列島すみからすみまでとは言わないがかなり密な共同観測が期待出来る。ちなみに今年の試験的な観測には、九州大学理学部・工学部、名古屋大学水圏科学研究所、信州大学工学部、郵政省電波研究所、環境庁公害研究所、山形大学工学部、八戸工業大学が手弁当で参加した。またアメリカのロードアイランド大学(University of Rhode Island)のDuce教授を中心としたグループとも連絡を取りあい(このグループの一員として働いておられる植松博士が専ら連絡窓口を務められている)。彼等からは、太平洋でおこなっている彼等の研究情報を逐一連絡してもらっている。ようやく、やる気のあるグループ同志の間に、細いながらも確実なパイプが通りつつある。ここで、提起された視点は、今まで積極的には取り上げられなかった「大気中での多相化学反応」に光を当てて大気を理解しようとするものであり、これからおおいに進展が期待出来る分野と思っている。時を同じくするように、「南極のオゾンホールを生ぜしめている原因の一つにエアロゾルの表面反応」が挙げられた(例えば、Solomon *et al.*, 1986; Iwasaka *et al.*, 1986)。筆者にとっては、エアロゾルとその回りの大気の間でおこなわれつつある化学反応の重要性をここでも知らされたとともに、新しい局面が迫りつつあるのを期待をもって迎えたいと覚悟の程を決めたものである。

終わりに当たり、シンポジウムで発表の機会を与えていただいた講演企画委員会や大会関係者各位に感謝する次第です。

### 文献

- Duce, R.A., C.K. Unni, B.J. Ray, J.M. Prospero, and J.M. Merrill, 1980: Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability, *Science*, 209, 1522-1524.
- Iwasaka, Y.H., Minoura, and K. Nagaya, 1983: The transport and spacial scale of Asian dust storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979, *Tellus*, B25, 189-196.
- , T. Ono, and A. Nomura, 1987: Changes in aerosol content and temperature in the Antarctic spring stratosphere: Lidar measurements at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E) in 1983, 1984 and 1985, *Geophys. Res. Lett.*, 1986, 13, 1407-1410.
- Merrill, J.T., R. Bleck, and L. Avila, 1985: Modeling atmospheric transport to the Marshall

islands, J. Geophys. Res., 90, 12927-12936.  
Solomon, S. R.R. Garcia, F.S. Rowland, and

D.T. Wuebbles, 1985: On the depletion of Ant-  
arctic ozone, Nature, 321, 755-758.

204 ; 206 (日射と黄砂)

## 日射観測からみた黄砂\*

荒 生 公 雄\*\*

### 1. 砂塵の大気混濁度への寄与

直達日射観測から得られる大気混濁度が、半球的な規模で春季に極大を示すことは古くから知られ、その主な原因は砂漠地帯の砂塵にあると考えられてきた (Ångström, 1961). そして、1960年代の後半には中国大陸における砂塵の存在と移動が人工衛星によってはっきりと検出された (Ing, 1972). サハラ砂漠から大西洋や地中海方面への輸送、および中国大陸から太平洋への輸送は特に顕著で、大気混濁度の観点からも注目を浴び、多くの研究がなされている。

ここでは、直達日射観測に基づく、黄砂の濃度と輸送量に関する Arao and Ishizaka (1986) の解析を中心に報告したい。なお、直達日射および大気混濁度に関する邦文の解説は村井 (1983) の総合報告によくまとめられているので、これを参考にされたい。

### 2. 黄砂の粒径分布モデル

長崎、岡山、名古屋の3地点でアンダーセンサンプラーによって実測された質量基準の黄砂の粒径分布を、砂塵の密度を  $2.6 \text{ g/cm}^3$  として個数基準の粒径分布に変換し、さらに、それをモデル化した。これら3地点間で、黄砂の粒径分布には著しい違いはなかったから、日本上空での粒径分布モデルを2つの Zold 分布の和による次のような式で表現した。

$$\frac{dN_k}{dr} = \sum_{i=1}^2 C_{ki} \exp \left\{ - \frac{(\ln r - \ln r_{mi})^2}{2\sigma_{ki}^2} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

なお、定数等は第1表に示す。本モデルは半径  $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$  に顕著なピークをもつ対数正規分布型であるが、第2モードの追加分だけ半径約  $3 \mu\text{m}$  以上の大粒子が対数正規分布よりも高濃度になっている。黄砂の粒径は、

第1表 粒径分布モデルの数値

	First Mode	Second Mode
Parameter	$r_{m1}=0.5\mu\text{m}$ $\sigma_{k1}=0.49$	$r_{m2}=1.0\mu\text{m}$ $\sigma_{k2}=0.63$
Relative Concentration	$C_{k1}:C_{k2}=1:0.0033$	
Volume and Mass	81.3%	18.7%

通常のエアロゾルに比べて、大粒子が非常に多いことが特徴である。

### 3. 黄砂の濃度と混濁パラメーター

この粒径分布モデルを用いて、黄砂を含む混濁した大気の光学的特性を理論的に考察し、Ångström (1961) の混濁パラメーターと砂塵濃度との間の関係を調べた。その際、大気中には、Junge 分布をもつバックグラウンドエアロゾルと黄砂とが球形で存在するものとし、それらの屈折率はともに  $1.50$  であるとした。Ångström の混濁パラメーターは、ミー散乱によるエアロゾル全体の光学的厚さを  $\tau_M(\lambda)$  とすれば、

$$\tau_M(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \dots \dots \dots (2)$$

と与えられ、 $\alpha$ ,  $\beta$  はそれぞれ波長指数、混濁係数と呼ばれる。多様な砂塵濃度について考察した結果、黄砂の濃度 (単位気柱内に含まれる砂塵の体積) は混濁係数  $\beta$  によって推定できることがわかった。ただし、黄砂の体積の評価は半径  $0.1$  から  $15 \mu\text{m}$  までの粒子について行った。

しかしながら、日本では組織的な直達日射の波長別観測が行われていないから、上の結果を直ちに应用することはできない。そこで、気象庁の直達日射観測データを活用するために、山本の混濁係数  $\beta_r$  (Yamamoto *et al.*, 1968) と Ångström の混濁係数  $\beta$  との関係を示す。

\* Yellow dust events as viewed from solar radiation measurements.

\*\* Kimio Arao, 長崎大学教育学部地学教室.