

短 報

黄砂粒子の輸送とその空間的ひろがり—1979年4月に みられた黄砂現象のレーザレーダ観測—*

岩 坂 泰 信** 箕 浦 宏 明***
長 屋 勝 博** 小 野 晃**

1. はじめに

黄砂現象は、すでになじみ深い現象のひとつであり、気象学的にも種々の観点から研究されてきた（例えば、Isono *et al.*, 1959; Ishizaka, 1973）。しかし、この現象の空間的な拡がりや、その時間的な変化については、地上からの目視観測にもとづくものがほとんどであったため、十分に情報が得られなかった場合が多かった。それ故、黄砂現象に関心が寄せられているながらも本格的な研究がなされずに来た点も多く残っている。太陽あるいは大気放射過程に与える砂塵嵐の影響に関する研究は、その例のひとつであろう。人工衛星によって砂塵嵐の様子（とりわけ、水平の規模や継続時間等に関して）が観測されるようになり、除々に研究がはじめられてきたといえよう（例えば、Carlson and Prospero, 1972; Carlson and Caverly, 1977; Jaemicke and Schütz, 1978; Yaalon and Ganor, 1979）。さらには、地球化学的分野が挙げられる。この分野では、砂塵嵐で大気中へまきあげられた土壌粒子が、物質のグローバルな循環や収支に大きな影響を与えていると考えられている。海底堆積物の化学分析を行う上で、大気から海洋へ輸送される土壌粒子の量や化学成分に関心を払うべきであると考えられるようになったのはごく最近のことである。当然のことながら、土壌粒子の輸送プロセスや空間的なひろがりには強

第1表 黄砂のレーザレーダ観測。

場所：名古屋 (35°N, 137°E).
時間：1979年4月10日 17:41~19:54
1979年4月14日 18:35~22:15
レーザの波長及び出力：0.6943 μm ~0.1 J/pulse
レーザパルスのくりかえし：0.2 sec ⁻¹
データ表示：対流圏中層と下層は、Aスコープ表示 (トランジェントレコーダへのとり込みは、50 nsecのゲート幅で行う)。対流圏上部から成層圏は、フォトンカウンティング法による。

い関心がよせられている（例えば、Duce *et al.*, 1980）。ここでは、レーザレーダ観測によって得られた結果と気象衛星「ひまわり」によって得られた可視画像をもとに、1979年4月中旬、日本各地で見られた黄砂について、その輸送過程や大気中への loading 量を検討してみる。すでに何人かの研究者によって、気象衛星の画像をもとに黄砂の輸送について議論されている（Ing, 1972; 石坂, 1979; 村山, 1980）。しかし、土壌粒子の大気中への放出量や輸送過程についてもっと立ち入った議論をするには、粒子の垂直方向の分布状態を知る必要がある。さいわい、良好な状態でレーザレーダ観測を行うことが出来たので、気象衛星の画像データと組み合わせることによって、三次元的な把握が可能となった。

1. “黄砂”時のレーザレーダ観測

1979年4月10日及び14日前後、日本各地で顕著な黄砂が見られた。名古屋大学水圏科学研究所では、4月10日及び14日の夜間、地上近くから成層圏高度までのレーザレーダ観測を行い、黄砂粒子の分布状態を観測した。

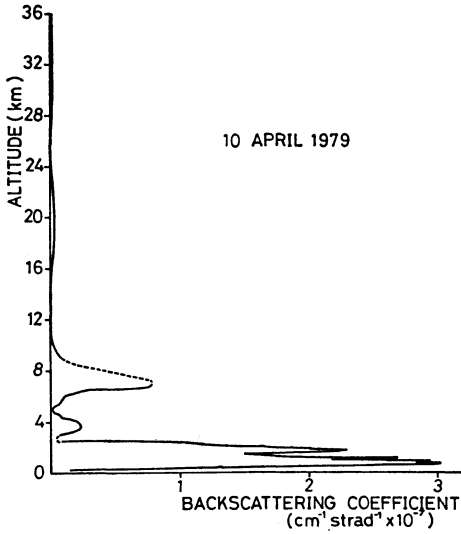
* The transportation and spacial scale of dust storm, KOSA. —A case study on the dust storm of April 1979 measured by lidar—

** Yasunobu Iwasaka, Katsuhiro Nagaya, and Akira Ono, 名古屋大学水圏科学研究所.

*** Hiroaki Minoura, 豊田中央研究所.

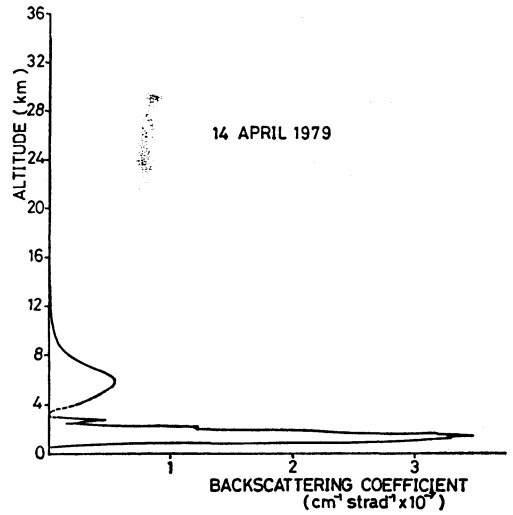
—1981年5月21日受領—

—1982年1月25日受理—



第1図 (a)

1979年4月10日及び14日の後方散乱係数の鉛直分布。フォトンカウンティング法によった分とAスコープ表示によった部分を接続して得た。



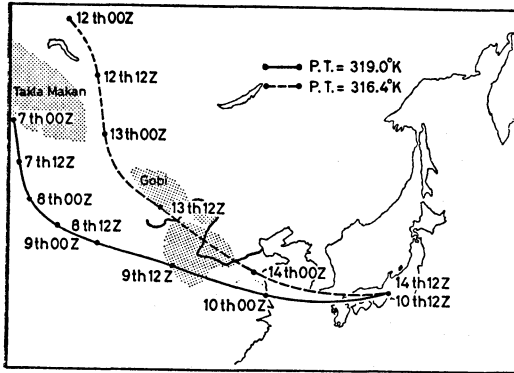
第1図 (b)

観測時の条件は第1表にまとめてある。レーザーレーダ観測から求められた後方散乱係数を、空気分子によるものとそれ以外のエアロゾルや黄砂粒子による成分に分離する際に、いわゆる“Matching Method”を用いた（例えば、Russell *et al.*, 1977）。そのようにして得られた粒子状物質による後方散乱係数の高度分布が、第1図（a）、（b）に示してある。この後方散乱係数には、黄砂粒子による散乱成分の他に、これらの高度に通常存在しているエアロゾル粒子の寄与も含まれている。ただし黄砂時以外では、エアロゾル粒子による後方散乱係数は約 $10^{-8} \text{ cm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ （2~3 km 高度）程度であり、この場合には十分無視出来る大きさである。観測中は、上空には雲がなかったことを目視等で確認した。第1図の結果には、地表近くと、高度約 6 km に粒子状物質による後方散乱係数のピークが示されている。このピークが黄砂現象に関係があるか否か、黄砂粒子の輸送を考える上で興味ある点である。今までに、高層風の解析等によって 5 km 以上の高度にまで黄砂現象が及んでいることが確かめられた例として、荒生等による 1973 年の黄砂（1979）、や大西洋上での Sahara ダストの観測（Gringel and Mühlisen, 1977）等が挙げられる。

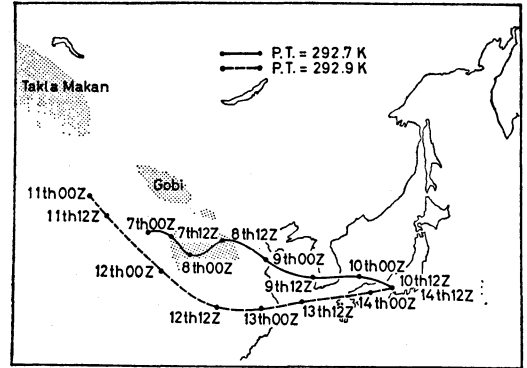
4月10日及び4月14日の観測の際、散乱係数の極大値を示した高度の気塊について、等温位面上の流跡線解

析を行った結果を第2図に示した。両日ともほぼ似たような傾向をもち、下層のピークを含む気塊は、Gobi 砂漠、黄河流域の上空を、上層のピークを含む気塊は、Takla-Makan 砂漠、Zungalia 盆地の上空を通過することがわかる。

石坂等によれば、1979年4月14日前後に名古屋で採集された Dust 粒子の X線折折像は、これらの粒子が黄河流域に起源をもつと同定され得ることを示している（1981）。このことは、レーザーレーダで観測された下層の粒子層を含む気塊が、黄河流域の上空を通過してきたと考えられることと対応している。これに加えて、気象衛星「ひまわり」の可視画像と地上実況からは、4月14日前後に日本へ達した黄砂は、黄河流域が起源ではなく Takla-Makan 砂漠に発生した砂塵嵐が起源になっているように見える（石坂, 1979）。一見矛盾するかのように見えるこの結果も、前述した流跡線解析の結果を合わせて考えると理解しやすい。Takla-Makan 砂漠で発生した砂塵嵐は、名古屋上空でとらえられた高度 6 km 近くに見られる後方散乱係数の極大値と対応しそうである。一方黄河流域でまきあげられた砂塵は、Takla-Makan 砂漠でまきあげられた砂塵の像と重なる（但し高度はちがう）ようにして人工衛星の画像にとらえられ、一見すると砂塵嵐は Takla-Makan 砂漠で発生し、



第2図 (a)



第2図 (b)

4月10日及び14日に飛来した dust についての 400 mb, 850 mb 面上での流跡線, 線上の各点は12時間ごとの気塊の位置を示す. トーンをつけた部分は主な砂漠の位置. P.T. は Potential Temperature (温度) の略.

その砂塵嵐によってまきあげられた黄砂粒子が直接日本上空へ飛来したが如く見えたと考えられる. この時期の風の場の解析結果も上述した結果を支持している. 即ち,

1) 4月7日より14日までの間, Takla-Makan 砂漠周辺の地上及び850 mb 面において風の場を検討すると, 流跡線が日本まで達するような風の場はなく, このような下層風によって直接的に Takla-Makan 砂漠から日本へ粒子が運ばれたとは考えにくい. 一方 400~500 mb 面では 30 kt 前後の西よりの風が定常的に吹いており, 何らかの擾乱によって黄砂粒子がこの高度まで運ばれた場合には, この風によって日本上空まで直接的に輸送される可能性がある.

2) 黄河流域から Gobi 砂漠にかけては, 地上付近から 850 mb 高度まで 20~30 kt の風が支配的であり, これより上空では 50 kt 以上の西風が吹いている.

レーザレーダ観測によって得られた, 粒子状物質の後方散乱係数の高度プロファイル, 流跡線解析の結果, 気象衛星「ひまわり」の画像解析の結果, 風の場の解析結果, 及び名古屋でサンプリングされた黄砂粒子のX線回折像の解析結果(石坂他, 1981)を総合してみると, 少なくとも1979年4月14日前後に日本各地で見られた黄砂現象は, 発生源の異なる粒子の集団が同時に日本に飛来して作られた現象であり, 各地に降下した粒子のほとんどは, 黄河流域に発生源をもつものであると考えられる. 加えて Takla-Makan 砂漠に発生したと考えられる砂塵嵐は, 何らかの機構で砂塵を 400 mb 面ぐらいまでまきあげ, 定常的にその高度で吹いていた西風によって

日本上空まで運ばれた可能性が高い.

2. 黄砂の規模

砂塵嵐によって, どれぐらいの量の砂塵が大気中に放出されているのか, また現象のひろがりや持続時間がどの程度のものであるか等の問題に答えるには, 今後数多くのケーススタディを重ねる必要があるが, 多方面から観測された1979年の4月の黄砂現象にのみ的をしぼって考えてみたい. 4月14日の黄砂は広く日本上空にひろがって通過しており, 人工衛星「ひまわり」の可視画像から判断して, 名古屋におけるレーザレーダ観測値は黄砂が占めている水平の中心部に近い部分を見ていると考えてよさそうである. いい変えるなら垂直方向の構造を考える時の代表値とみなして良いであろう. 地表面近くの黄砂粒子の直接サンプリングが, 石坂等によって実施された. 採集地点は名古屋で, アンダーセン・エアロゾル・サンプラー(2000 INC 社製, 21-000型)を用いて粒径別に分級採集された. なお採集期間は1979年4月11日15時から17日9時までの間であり, この間に名古屋地方で最も強い黄砂現象を見た14日及び15日が含まれている. 名古屋地方で通常見られるエアロゾル濃度及び粒径分布を加味して評価された黄砂粒子の粒径分布は, 現在のところ類似の現象に対して粒径分布関数の高度依存性について情報がほとんどないため, この点は無視した. この結果及び荒生等によって得られた黄砂粒子の粒径分布に関する結果を参考にして, 次のような粒径分布関数で代表させた.

第2表

	China Dust Upper layer Lower layer	Sahara Dust		
		Gringel and Muhleisen (1977)		Prodi and Fea(1979)
Altitude of the layer	4-8 km 0.5-2.5 km	1.2-3.7 km	1.7-3.7 km	
Particle concentration	50.5/cm ³ 255/cm ³	in the order of 100/cm ³		100-500/cm ³
Mean mass concentration	1.36 × 10 ⁻¹⁰ g/cm ³ 6.08 × 10 ⁻¹⁰ g/cm ³	1.6 × 10 ⁻¹⁰ g/cm ³	1.2 × 10 ⁻¹⁰ g/cm ³	1.54 × 10 ⁻¹⁰ g/cm ³
Dust per cm ² , vertical air column	1.76 × 10 ⁻⁴ g/cm ²	4 × 10 ⁻⁴ g/cm ²	2.5 × 10 ⁻⁴ g/cm ²	0.833 × 10 ⁻⁴ g/cm ²
Total mass of dust	1.63 × 10 ⁶ ton per 1.36 × 10 ⁶ km ²	3.5-5.0 × 10 ⁶ ton per year		
Distance from source to observation site	2500-3500 km	1400 km	2200 km	2500 km

$$\frac{dn}{dr} = Ar^{-3.5} \quad (0.3 \mu\text{m} \leq r < 10 \mu\text{m})$$

$$= \text{constant} \quad (0.1 \mu\text{m} \leq r < 0.3 \mu\text{m})$$

但し、 n は黄砂粒子の個数空間密度、 r は粒子の半径である。なおこのような関数のべき数 -3.5 は、イタリアに降下した Sahara 砂漠の砂塵についても得られているのは興味深い (Prodi and Fea, 1979)。

このような粒径分布を仮定した上で、レーザレーダ観測、気象衛星「ひまわり」の可視画像の結果をまとめると第2表のようになる。第2表の結果を出すにあたっては、前述の粒径分布関数の他に、屈折率1.50、粒子密度2.6g/cm³を仮定した。

黄砂粒子の単位気柱あたりの密度について見ると、下層の粒子層の値は石坂等 (1981) の結果に近いものである。この時の黄砂の拡がりには、1.36 × 10⁶ km²程度と考えられ、この領域内に粒子がほぼ一様に分布しているとすると全重量として 1.63 × 10⁶ t という値が得られる。

3. 結語

1979年4月、中国大陸で発生した砂塵嵐によって大気中へまきあげられた土壌粒子は、その後日本上空を広範囲に覆い、各地で顕著黄砂現象が見られた。この時行われた、レーザレーダ観測、さらには気象衛星「ひまわり」の可視画像、地上付近でサンプリングされた粒子の粒径分布関数やX線回折角の解析 (石坂他, 1981) をもとにして、黄砂粒子の空間的ひろがり、輸送過程、大気

中へ放出された粒子量について議論した。レーザレーダによる垂直方向の粒子の分布観測と同時に、気象衛星による水平方向の拡がりを知ることは、これらの議論を行う上できわめて有効であった。しかし今後さらに精密な議論を行うには、それらの観測手法の限界をおさえておく必要があろう。筆者等が今回特に感じたもののひとつに、気象衛星画像の処理があげられる。粒子の空間濃度分布、太陽—ダスト層—気象衛星の位置関係、地表面の状態、粒子の粒径分布関数等が、衛星画像の明るさなどのような関係にあるか、系統的な調査が必要と思われる。

近年、Shaw (1980) が、日本通過後の黄砂を Hawaii の Mauna Loa で観測したことを報告しており、輸送範囲のひろさをうかがわせる。Duce *et al.* (1980) は、太平洋の海底堆積物の分析結果から、黄砂粒子の大気から海中への輸送の重要性を指摘しており、同様に輸送規模の大きさを想像させる。

謝辞

この研究をはじめににあたって、磯野謙治 名古屋大学名誉教授、小平信彦 気象衛星センター所長(当時)に、いろいろな面で力添えをいただいた。気象衛星「ひまわり」の画像を検討する際に、気象衛星センターの石坂重次氏、山下喜弘氏(現在、気象研究所)にさまざまな便宜をいただいた。解析結果については、武田喬男 教授をはじめ水圏科学研究所の多くの人に討論の相手をしてい

ただいた。深く感謝の意を表したい。なおこの研究は、文部省科学研究補助費の援助を得て行われた。

文 献

- 荒生公雄・牧野保美・永木喜寛, 1979: 黄砂に関する若干の統計的研究, 長崎大学教育学部自然科学研究報告第30号, 67-74.
- Carlson, T.N. and J.M. Prospero, 1972: The large scale movement of Sahara air outbreaks over the northern equatorial Atlantic, *J. Appl. Met.*, 11, 283-297.
- , and R.S. Carverly, 1977: Radiative characteristics of Sahara dust at solar wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 82, 3141-3152.
- Duce, R.A., C.K., Unni, B.J. Ray, J.M. Prospero, and J.T. Merrill, 1980: Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical north Pacific: Temporal variability, *Science*, 209, 1522-1524.
- Gringel, W. and R. Muhleisen, 1977: Sahara dust concentration in the troposphere over the north Atlantic derived from measurements of air conductivity, *Beitr. Phys. Atmosph.*, 51, 121-128.
- Ing, G.K.T., 1972: A dust storm over central China, April 1969, *Weather*, 27, 136-145.
- Ishizaka, Y., 1973: On materials of solid par-

- ticles contained in snow and rain water: Part 2, *J. Met. Soc. Japan*, 51, 325-336.
- 石坂重次, 1979: 1979年4月中旬の黄砂, *天気*, 26, 725-729.
- 石坂 隆・小野 晃・角脇 怜, 1981: 1979年4月中旬日本上空に飛来した黄砂中の主要鉱物の粒度分布, *天気*, 28, 651-665.
- Isono, K., M. Komabayashi, and A. Ono, 1959. The nature and the origin of ice nuclei in the atmosphere, *J. Met. Soc. Japan*, 37, 211-233.
- Jaemicke, R. and L. Shutz, 1978: A comprehensive study of physical and chemical properties of surface aerosols in the Cape Verde Island region, *J. Geophys. Res.*, 83, 3585-3599.
- 村山信彦, 1980: 気象衛星から見た洋上の風じん, *海と空*, 55, 149-168.
- Prodi, F. and G. Fea, 1979: A case of transport and deposition of Sahara dust over the Italian Peninsula and southern Europe, *J. Geophys. Res.*, 84, 6951-6960.
- Shaw, G.E., 1980: Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands, *J. Appl. Met.*, 19, 1254-1259.
- Russell, P.B., W. Viezee, R.D., Hake, Jr. and R.T.H. Collis, 1976: Lidar observations of the stratospheric aerosol: California October 1972-March 1974, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 102, 619-639.