17

1979年4月の黄砂現象時のライダー観測と気象衛星データとの対比

Comparison of Lidar data to GMS 1 data in observing Duststorm in April 1979.

岩坂 泰信　　長屋 勝博　　箕浦 宏明　　小野 晃

Yasunobu Iwasaka　Katsuhiro Nagaya　Hiroaki Minoura　Akira Ono

名古屋大学　水圏科学研究所

Water Research Institute. Nagoya University

I. 序

レーザー・レーダの使用法が多様化するなかで，ひとつの方向にあげられるものに，“水平方向の観測に強い測器と地上からのレーザー・レーダ観測とを組合わせて大気環境を探る”と言うようなものがある。現在進行中のSAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiments) は，その代表的なものであり，その水平スケールは，全地球表面をカバーしている。[1] ここに発表するものは，1979年4月中旬に中国大陸に発生し日本列島を覆った黄砂現象 (Dust storm) の観測結果である。中国大陸に起源をもつ黄砂については，気象学上種々の観点から興味をもたれてきており，日本の気象学にとってはなじみ深い現象のひとつであった。[2),3),4)] しかし，この黄砂の空間的な構造や規模をとらえることは，従来の観測法ではむずかしく人工衛星や，レーザー・レーダの使用が可能になってはじめて現実的な研究課題となって来た。我々は，気象衛星“ひまわり”の画像（波長帯：10.5～12.5μm）と1979年4月14日のレーザー・レーダ観測（波長＝0.6943μm）によって得られた結果をもとに，黄砂の立体的構造の把握を試みた。この時の黄砂については，2層の構造をなしており（少なくとも名古屋上空では），水平の広がりは 10^3 kmのスケールをもっていた。

これらの立体的な構造をもとに種々の大気光学的な問題を考えることが出来る。この種の問題ではまず可視域におけるアルベードの問題がある。これは，なによりもまず人工衛星による測定値を吟味するという課題に直接的にむすびつくと同時に，短期，長期にわたる地上における太陽放射光の変動，さらには熱収支に対する影響を考察することにもつながる。

赤外域の放射関係の問題では，粒子とその周りの大気との平衡温度を問題にする上で興味ある素材になりうる（特にdust storm初期の様子）。[5)]

エアロゾルの大気中における収支を論ずる際，このような現象は，エアロゾルの源としてある程度有意なものであろうが，今回のような物質の空間的分布やその動態が明らかになってはじめて，ある程度の定量的な議論が行なえるものと考えられる。[6)]

黄砂時に得られた，日射量，視程，等の観測値をあわせて用い，黄砂現象に見られた大気光学的な側面をも合わせて議論する。

II. 観測結果とそれから予想される黄砂現象のイメージ

今回観測対象となった黄砂は，名古屋において14日15時～24時に見られ，その分布の鉛直プロファイルを調べるため，名古屋大学においてレーザー・レーダ観測が14日夜行われた。

観測はRuby (0.6943 μm) の波長を用い，フォ

トカウンティング観測(30 pulse 積算値)と，A-scope観測を併用して地上から30 kmまでの領域の観測を行った。またエアロゾルによる後方散乱係数の決定法は，matching method を用いて行った。

その結果として図1に表わされるようなエアロゾルの後方散乱係数(黄砂の鉛直プロファイル)が得られた。

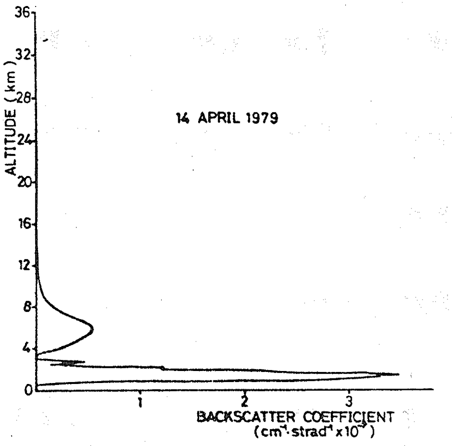

図1. 後方散乱係数の鉛直分布

図1を見て気づく事は，高度6 km付近にピークを持つ事である。観測時における雲の状況は，午後から快晴で絹雲も見られず，またピークの巾がかなり広がりを持っている事から，このピークが黄砂によるものと見てほぼまちがいないだろう。

ここで今回の場合，黄砂の鉛直構造がどの様にして図1に示されるような2層になったかを，黄砂の輸送経路及び当時の風の状況から予想される過程を以下に記す。

日本に運ばれてくる黄砂は，主に中国北西のタクラマカン砂漠(北緯40°，東経80°～90°)の砂塵あらしによって巻き上げられた土壌粒子に依存する。この地域での地上及び850 mb(高度約1500 m)の風は，風向が場所によってまちまちで，風速も5 knott/hour前後であるので，局所的な風による巻き上がりや移動は存在しても，地上付近の風によってすべて日本まで運ばれる可能性は少ない。一方，400 mb(高度約7000 m)では，地域全体で西北西の風が常時30 knott/hour前後で吹いており，図2に示される様な経路を通って日本上空に飛来する事が，高層天気図の流線解析からも説明される。図には，タクラマカン砂漠で12日に発生した黄砂の移動を示してあるが，その前

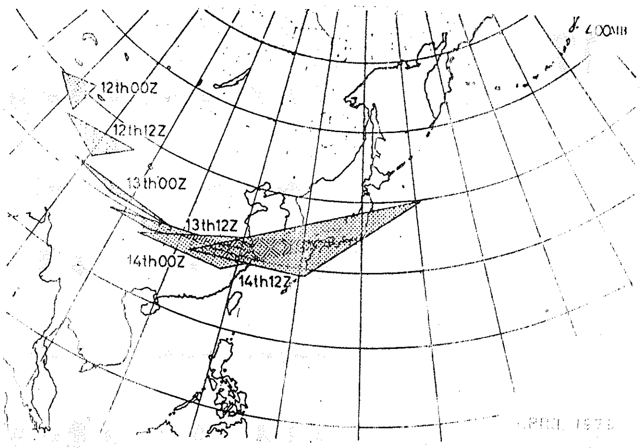

図2. 流線解析による黄砂の移動と変化

後で発生したものもほとんどこのコースを通り，日本付近でそのエリアを拡大させている事がわかった。またこうして高層の風に乗って運ばれて来た黄砂は，輸送途中で徐々に落下し，経路となっている地上では黄砂現象を見る事ができるのであるが，日本で黄砂が見られた14日には，低気圧が沿海州東部に見られ，経路の南に当たる東シナ海に高気圧が見られた。それらによって地上及び850 mbにおいて，50 knott/hourを越す強い北西風が観測されている事から，中国東部に落下した黄砂は，たまたまその経路の北を通過中の低気圧性擾乱によって再び日本へ運ばれる事になったのであろう。

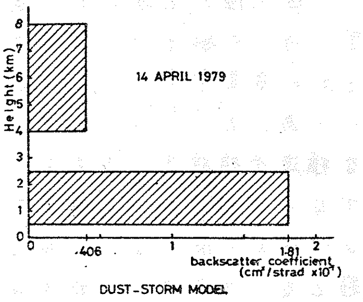

図3. 黄砂の鉛直モデル

次に図1をもとにして作った14日の黄砂モデル(図3)を使って黄砂を量的に表わす事にする。レーザー・レーダより得られた後方散乱係数を用い，さらに黄砂の粒径分布を

$$0.1\mu < R < 0.3\mu \quad \frac{dn}{dR} = AR^{-\alpha}_{(R=0.3)} = const. \quad (1)$$

$$0.3\mu < R \quad \frac{dn}{dR} = AR^{-\alpha} \quad where\ \alpha = 4 \quad (2)$$

と仮定し，各層中の密度を求める事ができる。その結果14日の黄砂では，

上層 —— 1.04×10^2 (コ/cm^3)

下層 —— 4.66×10^2 (コ/cm^3)

が得られた。これらの値は標準大気中に含まれているエアロゾルと比較すると，下層では名古屋の平常値に比べ1桁ないし2桁程度，上層ではそれ以上のかなり大きな密度で黄砂が来ていた事がわかる。また再び先に述べた粒径分布を用い空気 $1cm^3$ 当りの重量を求めると，

上層 —— 1.16×10^{2} （gr/cm^3）

下層 —— 5.20×10^{-10} （gr/cm^3）

［ただし，粒子一つ一つの密度をすべて 2.6（gr/cm^3）と仮定］

となった。

一方，気象衛星ひまわりから見た黄砂の移動の様子を図4に示す。この図は，図1からもわかる様に上層が光学的に見ると比較的薄い雲である事から，下層の雲の移動を表わしていると言える。14日06Zの写真よりこの下層雲の広がりを求めると，約 $1.34 \times 10^6 km^2$ である事がわかり，この広がりと図3に示すモデル化された下層の層厚（2km）を用いる事により日本に輸送されて来て下層を覆った黄砂のおおよその重量を見積る事ができる。それによると約 1.42×10^6 ton の黄砂があったと思われる。

以上黄砂モデルより求められた値は，Wolfgang Gringel and Richard Mühleisen（1977）[7] によるサハラ砂漠の dust を北大西洋で観測した時の値と比較すると，黄砂モデルの下層では黄砂の密度で4～5倍，$1cm^3$当りの重量で約3倍，またサハラ砂漠から輸送される dust の年間総量が，$3.5 \sim 5.0 \times 10^6$ton である事から，黄砂による dust の輸送もこれに劣らず膨大なものと言える。

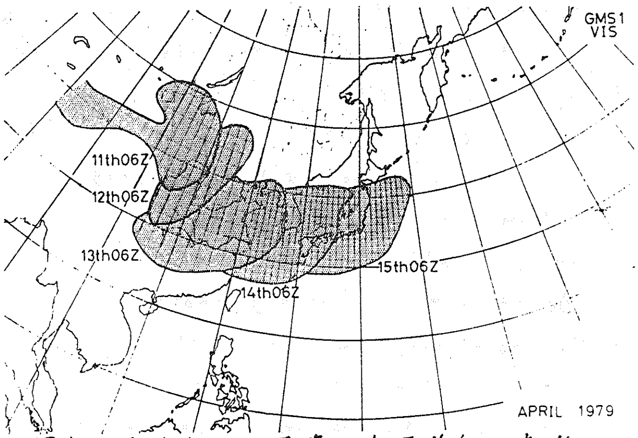

図4．ひまわりの画像による移動と変化
（気象衛星センター，石坂重次氏による）

Ⅲ 光学的影響

黄砂現象が起っている時，通常とどの位光学定数において差が出るか，直達日射計による観測とレーザー・レーダ観測より得られた後方散乱による受信電力をもとに，optical thickness について議論を進める。optical thickness とは，ある波長の光が大気を通過する間に，散乱，吸収をうけてどれだけ減衰するかを表わす量であり光学的には重要な量である。

太陽光は，大気層により減衰をうけながら地上に到達するが，一日のうちでは南中時に最も短く，日の出，日の入りに最も長い径路を通って来るので，その減衰の度合いも太陽高度によって異ってくる。大気層を有限で plane-parallel とし，また一様な濁度を持っていると仮定すると，(3)式を用いて大気の optical thickness を求める事ができる。

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\exp(-\tau(\lambda)/\cos\theta) \qquad (3)$$

$I(\lambda)$：地上で受ける太陽光 flux

$I_0(\lambda)$：大気層に入る前の太陽光 flux

$\tau(\lambda)$：optical thickness

θ　：天頂角

optical thickness を直達日射計のデータより求める方法は(3)式を変形する事により

$$\ln I = \ln I_0 - (\tau/\cos\theta)$$

となり，$\ln I_0$ を一定と仮定すると，optical-thickness は $\ln I$ と（$1/\cos\theta$）で表わされる。ここで，$(1/\cos\theta) = l(\theta)$ とおく事にすると，$l(\theta)$は太陽光が大気中を通る pass length を意味し，$l(\theta)$ と $\ln I$ との関係は図5のように表わされる。この傾きから1日平均の optical thickness

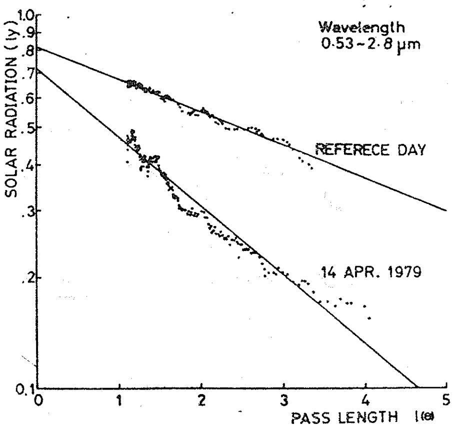

図5．pass length と直達日射量との関係

を求める事ができる。[8] その結果4月14日の optical thickness は τ(0.53～2.8μm)＝0.423，同様にして全波長帯では τ(all band)＝0.379，と得られた。図には参考として4月14日に比較的近い快晴の日についても表わされており，同様の計算を行った結果 τ(0.53～2.8μm)＝0.202，τ(all band)＝0.258 と言う値が得られた。従って両日を比較すると，黄砂により optical thickness が 0.53～2.8μm の波長で 0.221，全波長帯で 0.121 増加した事がわかった。

一方，レーザー・レーダより得られた受信電力Pと matching method より得られた大気のレーリー散乱分の受信電力 P_{Ray} との差より，エアロゾル（黄砂）のミー散乱分の受信電力 P_{Mie} が得られ，P_{Ray} に対する標準大気の extinction coefficient $\beta_{ext\text{-}Ray}$ より P_{Mie} に対する extinction coefficient $\beta_{ext\text{-}Mie}$ が求められ，これに黄砂の層厚で積分する事により optical thickness を求める事ができる。ここで図1において上層の黄砂は光学的にほとんど影響がないと思われるので，下層における optical thickness を計算すると τ(0.6943μm)＝0.453 が得られた。この値は上記の 0.53～2.8μm の波長帯の中に含まれており，τ(λ) がこの波長帯の中で変動している事がわかる。

次に，optical thickness の時間変化を考えて見る事にする。図5の横軸は太陽光の pass length であり，太陽が天頂に来た時 $\ell(0°)=1$ となり最小値を示すのであるが，図の $\ell(\theta)=0$ の時 $\ln I$ は大気のない時の直達日射量 $\ln I_0$ を意味する。従って，この点を基準として各測定点と

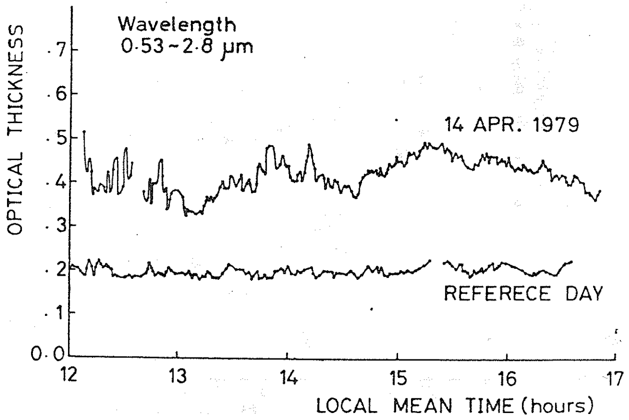

図6．optical thickness の時間変化

直線で結ぶと，その傾きが測定時における optical thickness となる。太陽の天頂角θは時間の関数θ(t)であるので，横軸に時間t，縦軸に optical thickness をとって表わしたものが図6である。この図より通常の値と比べると，その差が時間とともに変化している様子がわかる。つまり黄砂は一団となって optical thickness を単調増加させたのではなく，多集団で空間濃度に変化を持って来た事がわかる。さらに水平方向の濁度を表わす視程は，名古屋気象台によると14日（12^h-7^{km}，15^h-6^{km}，18^h-7^{km}），参考日（12^h-15^{km}，15^h-10^{km}，18^h-20^{km}）となっており，14日における黄砂現象は視程にもかなり影響を与えていた事がわかる。

Ⅳ．まとめ

今回はレーザー・レーダを用い衛星等の機器では測り得なかった光学的に薄い上層の雲まで存在を見る事ができ，また光学的には薄いがこれら2層により黄砂が膨大な dust を含む事がわかった。今後の研究課題は，二波長・連続観測により（二波長方式による粒径分布の算出や諸情報の時間変化により），より正確な黄砂の光学定数の決定と，黄砂等による光学的変化及び熱的影響をより定量的に表わす事にある。

REFERENCES

1) SAGE GROUND TRUTH PLAN, 1979
Russel, P.B. (edi), SRI Project 6590
2) Isono, K., M. Komabayashi and A. Ono, 1959
Journ. Met. Soc. Japan, 37, 211-233
3) Ishizaka, Y., 1973
Journ. Met. Soc. Japan, 51, 325-336
4) Ing, G.K.T., 1972
Weather, 27, 136-145
5) Fiocco, G., G. Grams and A. Mugnai, 1976
J. Atoms. Sci., 33, 2415-2424
6) Twomey S., 1977 : Atmospheric Aerosol.
Elsevier Scientific Publishing Company
7) Wolfgang G. and R. Mühleisen, 1977
Beitr. Phys. Atmos., 51, 121-128
8) Shaw, G.E., J.A. Reagan and B.M. Herman, 1973
J. Appl. Meteor., 12, 374-380