

日本上空に飛来した砂塵の性状とその発源地*

石坂 隆** 小野 晃** 角脇 怜***

要旨

1979年4月中旬日本上空に飛来した砂塵について、その粒度分布と組成を調べた。その結果、砂塵は主にサブミクロンないしそれ以上の粒子から成るが、その重量の多くは直径1—30ミクロンの粒径範囲に分布し、4ミクロン付近に最多直径を持つ monomodal な分布であることが見出された。砂塵の負荷量は平均濃度で $182 \mu\text{g}/\text{m}^3$ にも及ぶ大きさであった。これらの砂塵は石英、長石、イライト（雲母）、緑泥石、カオリナイト、石膏、方解石などから成っていたが、これらの鉱物は、造岩鉱物も粘土鉱物もその量の多くが直径1—30ミクロンに分布し、4ミクロン付近に最多直径を持つ monomodal な分布に近いものであった。これは砂塵の性状、さらにその気象学的挙動を調べる上で多くの示唆を与えるであろう。また砂塵の鉱物組成さらに気象衛星の可視画像及び地上実況気象報をもとに砂塵の発源地を推定したところ、これはタクラマカンからゴビ、アラシャン砂漠さらに黄河上流域近辺であることが示唆された。

1. はじめに

近年、砂塵嵐 (Dust storm or Sandstorm) によって大気中に多量に供給される砂塵が、地球大気のエネルギ収支や氷晶核濃度に大きな影響を及ぼすことが報告されている (Isono *et al.*, 1959, 1971; Gagin, 1965; Bertrand and Baudet, 1973; Carlson, 1979; Carlson and Benjamin, 1980)。しかし砂塵の放射過程や氷晶核濃度に及ぼす影響の本質についてはほとんど知られていないのが実状である。砂塵の光学的性質や雲物理学的性質は砂塵の大きさ、個数濃度、物質構成によって大きく異なる。このため砂塵の光学的、雲物理学的役割をさらに詳しく調べるためには、砂塵の空間濃度、粒度分布さらに物質構成を知る必要がある。

砂塵の空間濃度や粒度分布については最近多くの研究が行なわれ、われわれの知見は増えつつある (Gillette *et al.*, 1972, 1978; Schütz and Jaenicke, 1974; Patterson and Gillette, 1977; Levin *et al.*, 1980)。これに対し、砂塵の物質構成については地表（あるいは雪面）に

積った砂塵降下物質あるいはナイロン・メッシュやフィルターで集めたパルクサンプルについての報告は多い (Delany *et al.*, 1967; 長谷川, 1967; Prospero and Bonatti, 1969; Ishizaka, 1972; 井上・吉田, 1978)。しかし、砂塵の大気中における光学的、雲物理学的挙動を調べるためには、このような砂塵の統計的な組成についての知見だけでは不十分で、砂塵の粒度別組成などについてのさらに詳細な知見が必要不可欠である。

このため、本研究では1979年4月14—16日の期間日本上空に飛来した砂塵を粒度別に採集し、主要鉱物の重量基準の粒度分布を調べた。そして大気中における砂塵の物質構成や起源についての考察を試みた。

2. 試料の採取

砂塵試料はアンダーセン 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取した。本実験で用いた試料は、名古屋 (愛知県公害センター屋上) でサンプラーをシェルター中に設置し、流量率 $28.3 \text{ l}/\text{min}$ で約1週間々隔で連続に採取したもののうち、1979年4月11日15時から17日9時までの期間 (空気吸引量 234 m^3) に採取したものをを用いた。なおサンプラーの分級特性は第1表に示したとおりである。この試料の1段目から5段目までのステージには黄褐色の粒子が多量に見出された。これはその色と存在状態から見て、あとで述べるように4月14日から16日にかけて日

* Size distribution and mineral composition of yellow sand in the air over Japan and its main origins.

** Yutaka Ishizaka and Akira Ono, 名古屋大学 水圏科学研究所.

*** Satoshi Kadowaki, 愛知県公害調査センター.

—1981年1月21日受領—

—1981年8月18日受理—

第1表 エアロゾル濃度の測定値と、これから求めた砂塵の負荷量及び砂塵現象時の全エアロゾル濃度。

ステージ	分級範囲* (単位: ミクロン)	dM/dlog D ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)			
		4月11—17日 エアロゾル濃度	4月20—26日 エアロゾル濃度	砂塵の負荷量	砂塵現象時の全 エアロゾル濃度
0 段	$30^{**} \geq d \geq 11$	29	10	46	56
1 段	$11 \geq d \geq 7.0$	52	13	95	108
2 段	$7.0 \geq d \geq 4.7$	101	24	188	212
3 段	$4.7 \geq d \geq 3.3$	187	35	374	409
4 段	$3.3 \geq d \geq 2.1$	110	20	219	240
5 段	$2.1 \geq d \geq 1.1$	42	13	71	84
6 段	$1.1 \geq d \geq 0.65$	25	23	4	27
7 段	$0.65 \geq d \geq 0.43$	29	27	4	31
B. F.	$0.43 \geq d \geq 0.08^{**}$	16	21	0	21
エアロゾルの空間濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		124	50	182	232

* 50%分離有効動力学的粒径による。

** ワットマン濾紙 No. 41 使用にて角脇 (1977) による。

本上空に多量に飛来した砂塵であると考えられる。試料中には、これらの黄褐色の粒子と共に名古屋大気中に通常見出される黒い粒子もかなりの量含まれていた。このため砂塵現象のなかった1979年4月20日9時から26日16時までの期間(空気吸引量 256 m³)に採取したものを比較試料として用い、砂塵以外の粒子の重量濃度と物質を評価した。

各段に分級採取したエアロゾル試料はシリカゲル デシケーター中に48時間放置後、直示天秤(メトラー社製, H51型)で秤量し、砂塵の重量基準の粒度分布を調べた。

さらに、名古屋で砂塵現象の著しかった1979年4月14日17時31分から21時21分の期間と砂塵現象がなく、かつ気象状況が4月14日と類似していた2月7日17時40分から21時20分の期間エイトケン粒子の数濃度をボラックカウンターで、また直径 0.5 μm 以上の粒子の数濃度を光散乱式粒子濃度測定装置(クライメット社製, C-208 A型)で測定し、砂塵の個数基準の粒度分布も評価した。

3. X線分析

3.1. 物質の同定(定性分析)

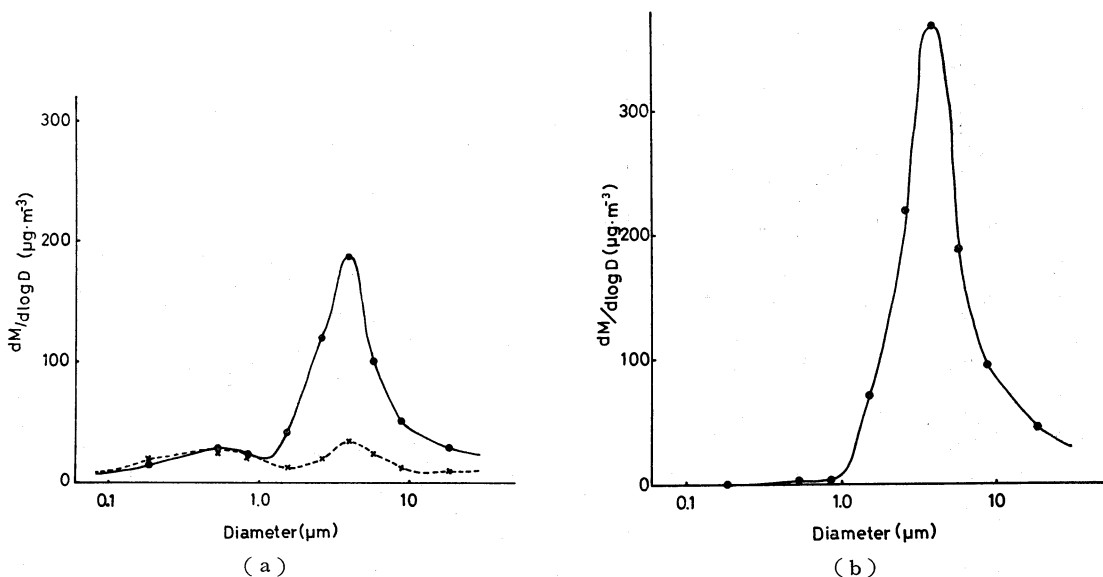
採取した試料は次のような手順でX線分析用ガラス試料板に移し替え、X線回折装置(日本電子製, GE-E型)で分析した。すなわち、各段のガラス試料板上に斑点状に分布する粒子を先を細く研いたスパークで少しずつ掻き集め、X線分析用試料板の中心部に移した。粒子

をすべて試料板に移し終えた後、蒸留水1~2滴を落とし、スパークで直径約 10 mm の円内に均一に延ばし、電気ヒーター上でゆっくり蒸発乾固させた。これでX線分析用の試料の準備はできたことになるが、試料の中には室内の相対湿度で潮解する物質も含まれている可能性がある。このため試料を 100 W のランプで照射し、試料の囲りを相対湿度20%以下に保ちながら、X線分析を行った。さらに試料中のモンモリロナイトとハロサイトを判別するためにエチレングリコール処理(Walker, 1959)を、またカオリナイトと緑泥石の判別および方解石の同定を行うために塩酸処理(生沼・小林, 1965)を行い、X線分析を行った。これらの化学処理は物質の判別だけでなく、定量分析を行うために必要な各種物質のX線回折強度の測定においても非常に有用であった。

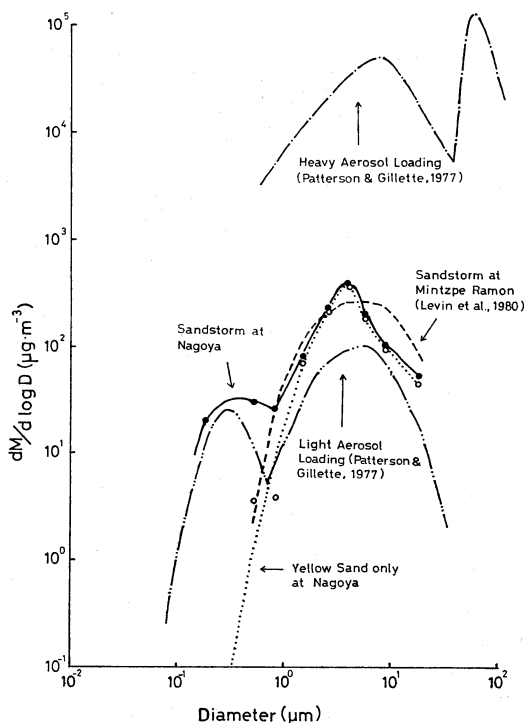
なお、X線分析の測定条件は次のとおりである: Cu K α , Ni フィルター, 35 KV, 20 mA, 計数率, 10³cps, 時定数 2 sec, スリット 1°-0.15-1°, 走査速度 1°/min.

3.2. 物質の組成(定量分析)

被測定試料が微量でかつ1検体しかないため、石英(7段目試料については硫酸アンモニウム)のみ既知量添加法でその絶対量を測定し、その他の鉱物については、石英に対する2成分の量比を半定量法(Sudo *et al.*, 1961)で求めながら主要物質(石英, 長石, イライト(雲母), 緑泥石, カオリナイト, 方解石, 石膏, 硫酸アンモニウム)の含有量を決定する方法を用いた。ここで用いた既知量添加法は Brindley and Udagawa (1960)



第1図 エアロゾルの重量基準の粒度分布 (a) と砂塵の重量基準の粒度分布 (b)。図(a)における実線は4月11~17日の期間について、点線は4月20~26日の期間についてのものである。



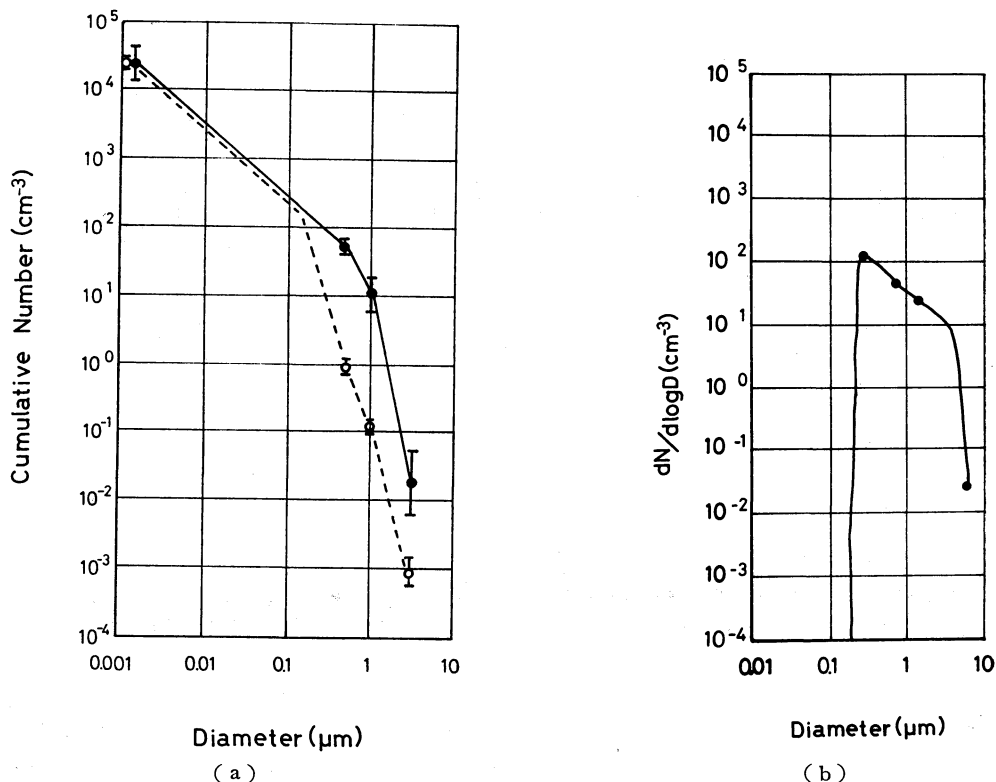
第2図 砂塵の重量基準の粒度分布の比較。

の方法に準じたものであり、被測定試料に被定量成分と同一の石英粉末試料を微量添加し、添加による石英からのX線回折強度の増加割合から、添加前の石英の重量濃度を導く方法である。しかしこの方法では、石英試料の添加による混合物の平均質量吸収係数の変化を考慮していないために、石英の含有量を近似的に求めうるに過ぎない。この方法の物質組成の分析精度は決して高いものではないが、X線分析法にかわるよい方法が現在見あたらなかったためにこれによった。なお、各種成分のX線回折強度は、X線回折曲線におけるX線反射強度の面積に等しく紙片を切り、その重量濃度を秤量し測定した。

2成分量比の半定量法による分析では、2成分を等量に混ぜた混合物のX線回折強度比、 $(I_p/I_q)_0$ の値が必要である。この資料の一部は先に求めた測定値 (Ishizaka, 1973) を用い、今回は石英、緑泥石、方解石、石膏の4成分についてのみ測定した。本実験に採用した $(I_p/I_q)_0$ の値は次のとおりである：

$$\begin{aligned}
 & I(3\text{\AA}-Q) : I(14\text{\AA}-Ch) : I(10\text{\AA}-It) : I(7\text{\AA}-K) : \\
 & I(3\text{\AA}-F) : I(3\text{\AA}-C) : I(7\text{\AA}-G) \\
 & = 1.00 : 0.27 : 0.27 : 0.32 : 0.38 : 0.28 : 0.33
 \end{aligned}$$

ここで、 $I(3\text{\AA}-Q)$ ： α -石英の(101)面の反射強度、 $I(14\text{\AA}-Ch)$ ：緑泥石の(001)面の反射強度、 $I(10\text{\AA}-It)$ ：イライト(雲母)の(002)面の反射強度、 $I(7\text{\AA}-K)$ ：



第3図 エアロゾルの個数基準の粒度分布 (a) と砂塵の個数基準の粒度分布 (b). 図(a)における実線は4月14日について、点線は2月7日についてのものである。

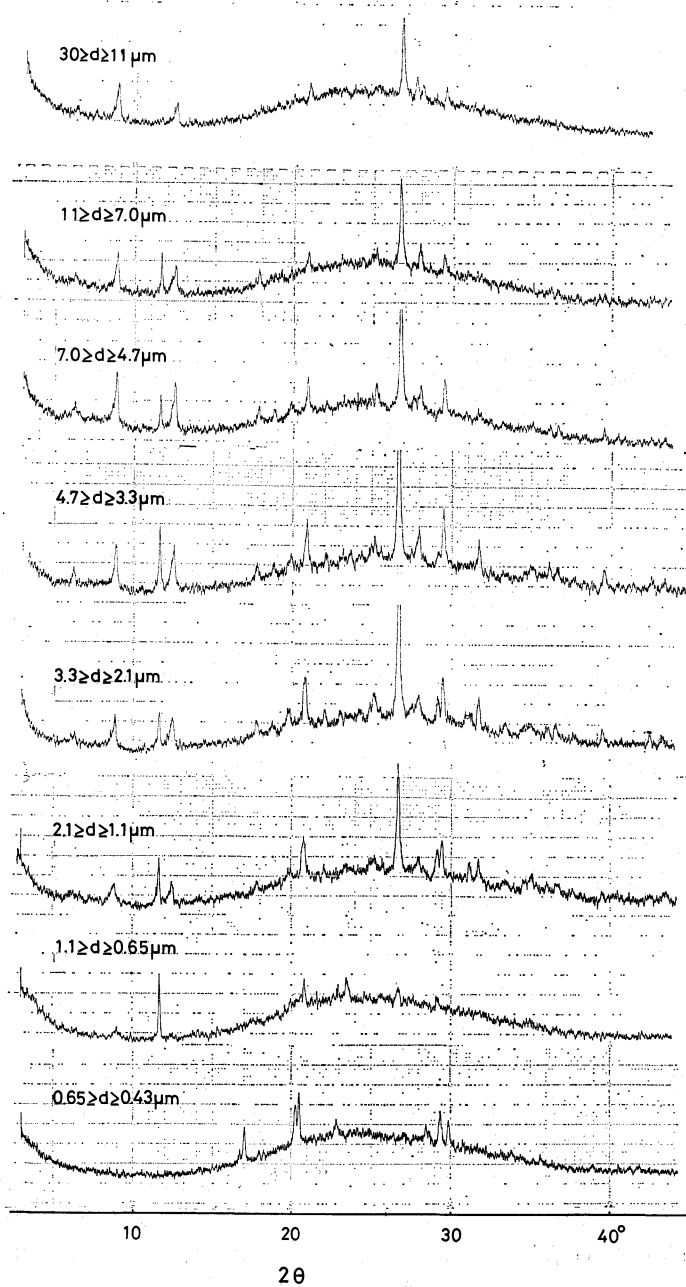
カオリナイトの (001) 面の反射強度, $I(3\text{\AA}-F)$: 長石の (202), (040) と (220) 面の反射強度, $I(3\text{\AA}-C)$: 方解石の (104) 面の反射強度, $I(7\text{\AA}-G)$: 石膏の (020) 面の反射強度.

4. 結果と考察

4.1. 砂塵の粒度分布

第1表はエアロゾルの粒度別重量濃度の測定値であり, 第1図 (a) はこれらの粒度分布曲線である. ここで各段の粒径値は50%分離粒径値の対数平均値で表わした. 4月20~26日の期間における粒度分布は, 通常名古屋で観測される分布に近いものであったが, 砂塵現象のあった4月11~17日の期間の粒度分布はこれと大きく異なり, 直径約1 μm以上の粗大粒子の濃度が非常に高かったことが特徴的である. これらの期間においては4月14日12時30分から16日20時30分にかけて名古屋で強い砂塵現象が観測された(名古屋地方気象台日原簿による)こと以外にエアロゾルの重量濃度に大きな影響を及ぼす気

象現象の変化は特に見出されなかった. このことは本大学で積分式ネフロメータによって観測された大気中のエアロゾルによる光散乱係数が砂塵現象時のみ $2.0-4.0 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ と高かったのに対し, その他の期間は $1.0-1.5 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 程度であったことから言えることである(岡田ら, 1980). 今4月11~17日の期間の4月20~26日の期間に対するエアロゾルの重量濃度の増分は砂塵の負荷によるものと見なすと, 砂塵の重量基準の粒度分布は4月11~17日の期間の採集時間(138時間)と砂塵現象の起った時間(56時間)を考慮することにより容易に見積ることができる(第1表). 第1図 (b) は砂塵の粒度分布曲線である. 今回の砂塵は直径0.43 μmから30 μmまでの粒径範囲において4 μm付近に最多直径を持つ monomodal な分布であったことが推定される. 直径30 μm以上の砂塵の粒度分布については, 本実験では調べていないが, 1977年春に日本で観測された砂塵の個数基準の粒度分布の測定結果(荒生ら, 1979)から調べる限り, もう1つの重量のピークが存在していたとは考

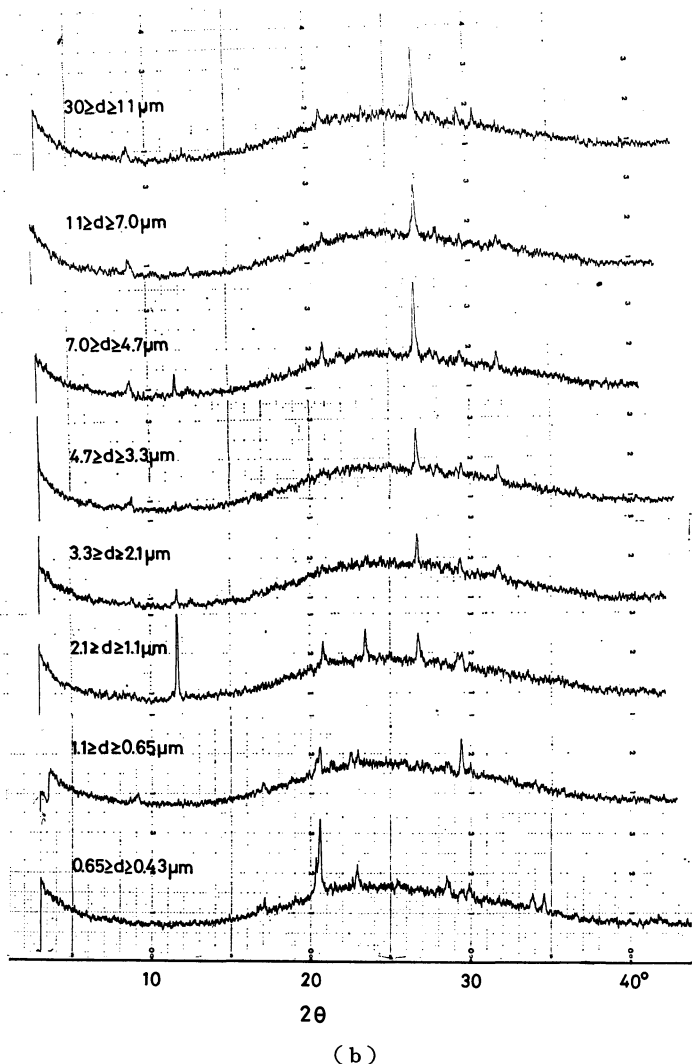


第4図(a)

え難い。

第2図は今回の砂塵現象時における砂塵と全エアロゾルの重量基準の粒度分布(第1表)を示したものである。この図には比較のために Patterson and Gillette

(1977) と Levin *et al.* (1980) が示した砂塵の粒度分布も示した。Levin *et al.* が示した Mintzpe Ramon における砂塵の粒度分布は、2000 km 以上も離れた北アフリカの砂漠から飛来した砂塵について調べたものである。

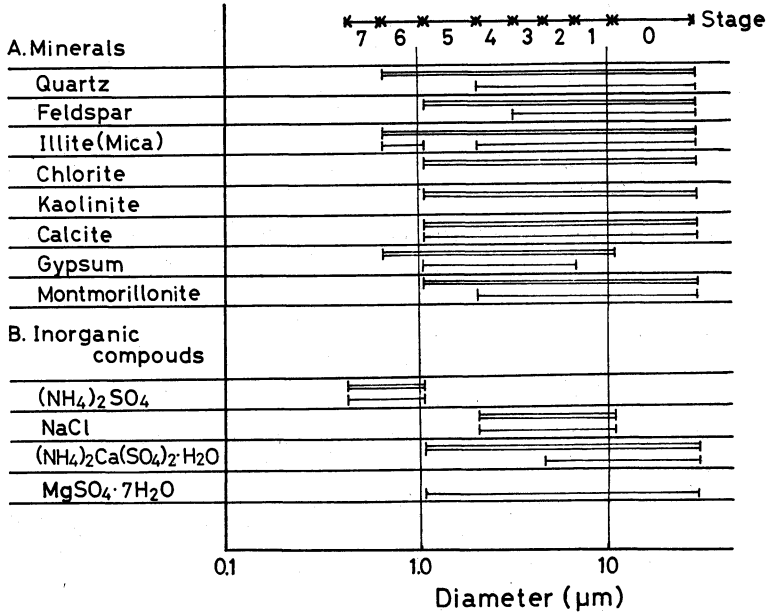


第4図 エアロゾルの粒度別のX線回折図。(a)は4月11~17日の期間について、(b)は4月20~26日の期間についてのものである。

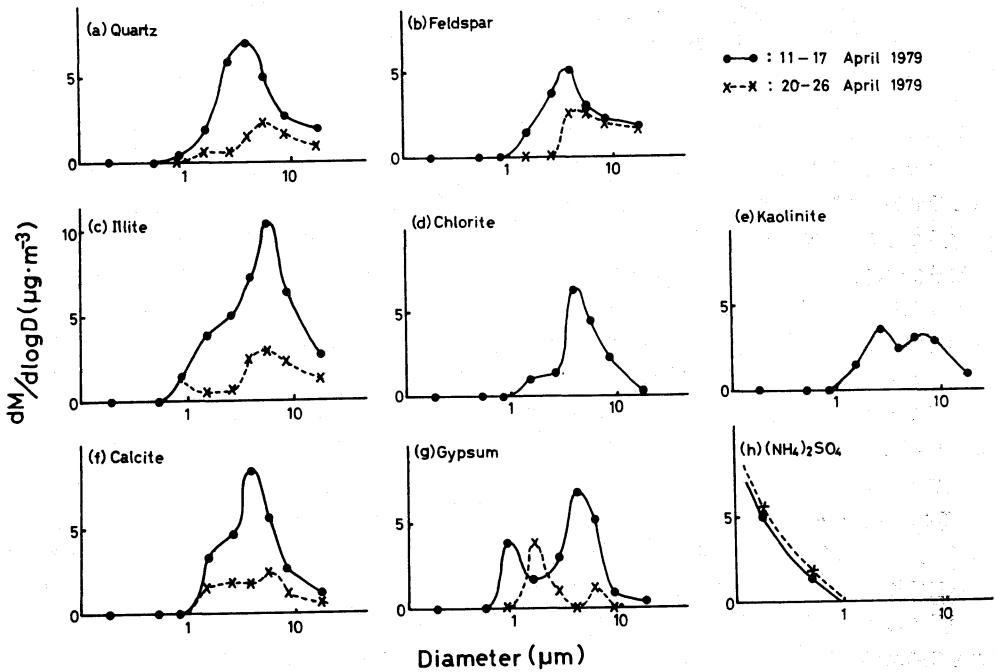
われわれが調べた砂塵も、あとで述べるように日本から約 3000 km 以上離れたタクラマカン、ゴビ、アラシヤンの砂漠、さらに黄河上流域から飛来したものであるが、この粒度分布も Mintzpe Ramon における分布と非常によく似ていた。これらの2点における砂塵の負荷の程度は Patterson and Gillette (1977) の分類によれば中規模と見積られる。また砂塵の発源地近くで観測された Heavy Aerosol Loading の砂塵の粒度分布と比較してみると、発源地で大気中に舞上った砂塵のうち多くの粒子は発源地近くで落下し、主に直径 30 μm 以下

の粒子の1部しか日本上空に飛来しなかったものと推定される。これまでは重量濃度の測定から、砂塵のエアロゾル濃度への寄与を論じた。次に数濃度の測定からこれを調べてみよう。

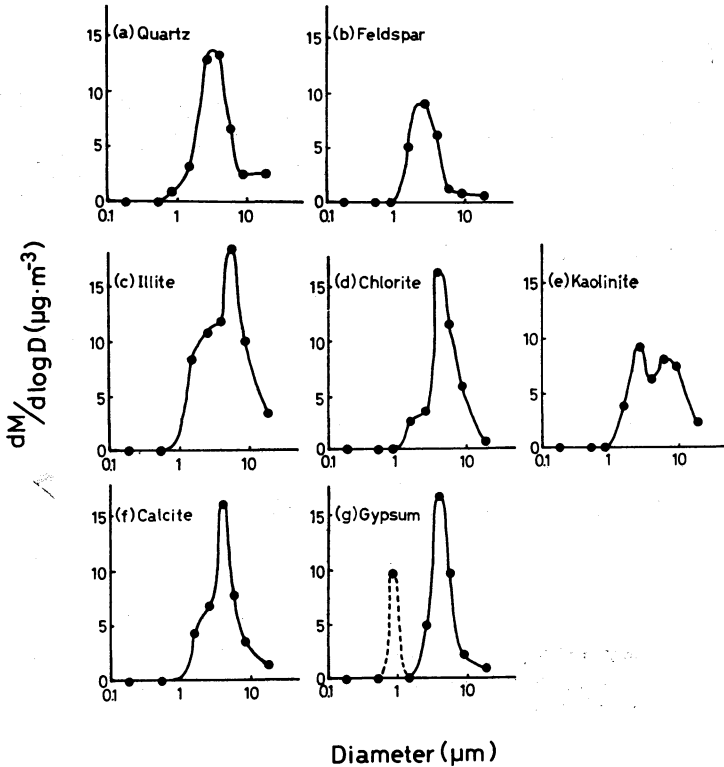
第3図(a)はエアロゾルの個数基準の粒度分布の測定結果である。これから砂塵のみの粒度分布を導出したところ、第3図(b)のとおりであった。2月7日の測定値が4月14日の砂塵以外のエアロゾルの粒度分布と同じであった保証は必ずしもないが、砂塵はミクロンサイズの粒子、さらにサブミクロンサイズの粒子の数濃度の



第5図 エアロゾル中の主要物質とその存在粒度範囲。上側の二重線は4月11~17日の期間について、下側の一本線は4月20~26日の期間についてのものである。



第6図 エアロゾル中の主要物質の重量基準の粒度分布。実線は4月11~17日の期間について、点線は4月20~26日の期間についてのものである。



第7図 砂塵中の主要鉱物の重量基準の粒度分布。主要鉱物の空間重量濃度は第2表のとおりである。

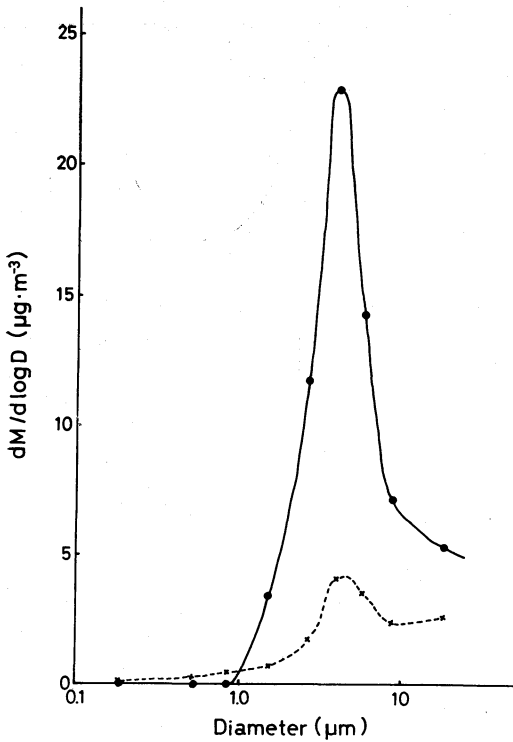
増加に大きく寄与するのに対し、エイトケンサイズの粒子の増加にはほとんど寄与しないことが推定される。これは砂塵の重量基準の粒度分布の結果ともほぼ一致し、興味ある結果である。砂塵がサブミクロンからミクロンサイズの粒子の数濃度の増加に大きく寄与することはこれまで多くの報告がある (Junge and Jaenicke, 1971; Schütz and Jaenicke, 1974; Levin *et al.*, 1980)。また砂塵がエイトケンサイズの粒子の数濃度にほとんど影響を及ぼさないことは、サハラダストについて大西洋上で詳細な観測を行った Junge and Jaenicke (1971) の結果とも一致するものである。

4.2. 砂塵中の主要鉱物の重量基準の粒度分布

第4図 (a) および (b) は分級採取したエアロゾル試料のX線回折図である。一見して分るように、4月11~17日の期間におけるX線回折線の数が4月20日~26日の期間のものに比べて多い。これは、あとで述べるように砂塵が多数の鉱物を含んでいるためである。また注意深く見ると粒子の粒度のちがいによってX線回折線の位

置や強度、すなわち物質の種類や含有量が少しずつ異なっていることも分る。第5図は2つの期間における粒子の粒度と物質の結果をまとめたものである。この図から主に次の3つの結果を見出しうる：(1) 石英、長石、イライト(雲母)、モンモリロナイト、方解石、石膏、 $(NH_4)_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$ は2つの期間に共通して含まれていたが、4月11~17日の期間に直径 $1.0 \mu m$ 前後の粒径まで広く、かつ多量に分布する傾向にあった。(2) カオリナイト、緑泥石は4月11~17日の期間にのみ存在していた。(3) $(NH_4)_2SO_4$ と $NaCl$ は2つの期間に各々同じ粒径範囲に共通して存在していた。

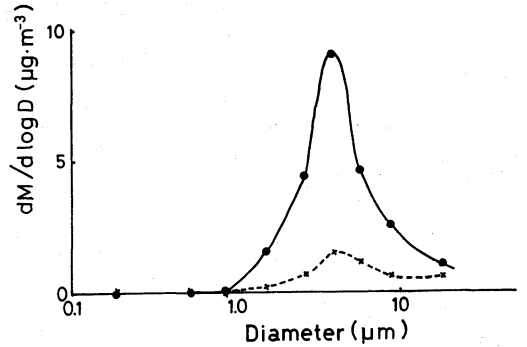
これらの結果から、4月11~17日の期間に急増した粒子は、4月20~26日の期間の物質と粒度や組成が全く異なるものではなく、平常日にもしばしば存在する土壌鉱物に由来する可能性が高い。したがって、2つの期間のエアロゾルの物質と存在粒径の比較だけでなく、物質の重量濃度も考慮し、比較検討する必要がある。従って次に2つの期間における主要な物質の重量基準の粒度



第8図 (a)

分布の結果について述べる。

第6図は、既知量添加法と2成分量比の半定量法によって求めたエアロゾル中の主要物質（石英，長石，イライイト（雲母），緑泥石，カオリナイト，方解石，石膏，硫酸アンモニウム）の重量基準の粒度分布である。硫酸アンモニウムは2つの期間において粒度分布がほとんど同じであったのに対し，石英，長石，イライイト（雲母），緑泥石，カオリナイト，方解石，石膏の粒度分布は4月20～26日の期間に比べて4月11～17日の期間に著しい増加が見出された。この結果から日本上空に飛来した砂塵中の主要鉱物の重量基準の粒度分布を評価してみよう。第7図は砂塵現象によって増加した石英，長石，イライイト（雲母），緑泥石，カオリナイト，方解石，石膏の粒度分布である。この図から今回の砂塵に関し，次の4つの重要な結果を見出しうる：(1) 砂塵中の主要鉱物の空間重量濃度の高い順はイライイト（雲母），石英，カオリナイト，緑泥石，石膏，長石，方解石であり，粘土鉱物の寄与割合が大きかった（第2表）。(2) 石英，長石の造岩鉱物は，直径約 1.0 μm から 30 μm の粒径範囲において，4 μm 付近に最多直径を持つ monomodal な粒度分布であっ



(b)

第8図 エアロゾル中のケイ素 (a) とアルミニウムの重量基準の粒度分布。実線は4月11～17日の期間について。点線は4月20～26日の期間についてのものである。

第2表 砂塵と比較試料中の主要鉱物の重量濃度とそれらの百分率。

試料	4月14-16日に飛来した砂塵		比較試料(4月20-26日)の物質	
	重量濃度	百分率	重量濃度	百分率
石英	8.1 μg/m³	4.5%	1.6 μg/m³	3.2%
長石	6.0	3.3	1.2	2.4
イライイト(雲母)	13.1	7.2	2.3	4.6
緑泥石	6.9	3.8	0	0
カオリナイト	7.3	4.0	0	0
方解石	5.3	2.9	2.9	5.8
石膏	6.9	3.8	1.5	3.0
未知物質	128.4	70.6	40.5	81.0
合計	182 μg/m³	100%	50 μg/m³	100%

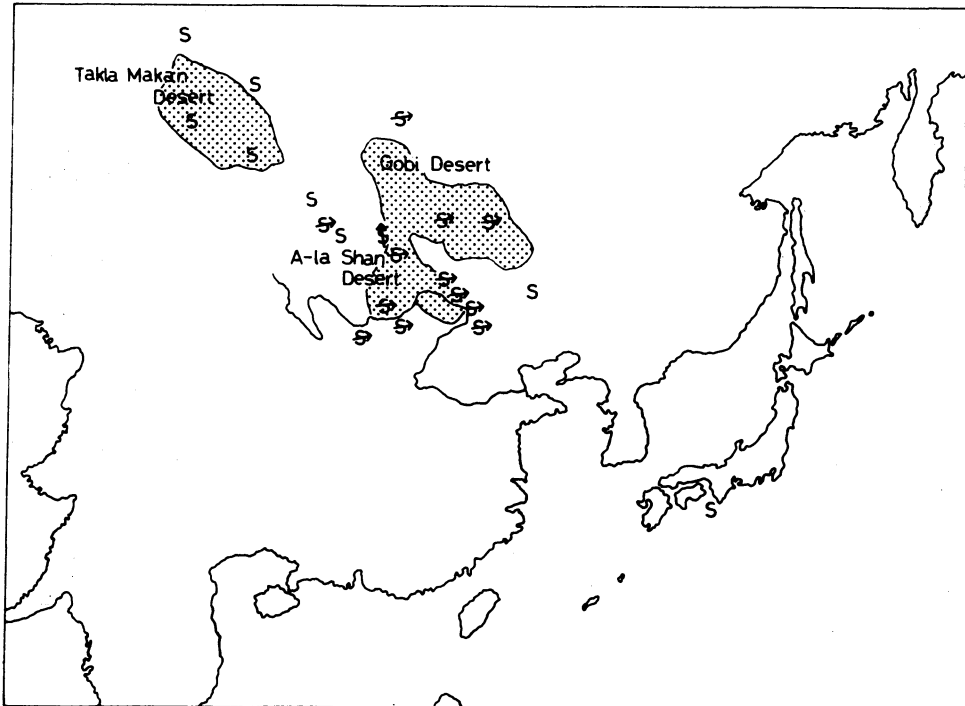
た。(3) イライイト（雲母），緑泥石，カオリナイトの粘土鉱物も主に直径 1.0 μm から 30 μm の粒径範囲に分布し，それらの粒度分布も 4 μm 付近に最多直径を持つ monomodal に近いものであった。(4) 方解石，石膏のカルシウム塩も黄砂中に多量に存在し，それらの粒度分布は石英や長石と類似な分布であった。

われわれはこれらの分析と平行して，4月11～17日の期間と4月20～26日の期間に，アンダーセン サンプラーで粒径別に採集したエアロゾル試料をアルカリ融解による前処理を行ったのち，土壌鉱物の指標とみなされるケイ素とアルミニウムを各々モリブデン青法とクロムア

第3表 砂塵と中国土壤の理化学的性質の比較.

試料	番号	土壤の種類	土壤母材	各粒径画分の含量 (%)		CaCO ₃ %	CaSO ₄ %
				5 ≥ d ≥ 2 μm (4.7 ≥ d ≥ 2.1 μm)	(2 μm ≥ d) (2.1 μm ≥ d)		
砂塵	1	4月14-16日に飛来した砂塵		54.7 (4.7 ≥ d ≥ 2.1 μm)	6.8 (2.1 μm ≥ d)	2.9	3.8
中* 国 土 壤	2	Brown desert soil	Gravel	0.8	1.9	10.2	14.2
	1	Gray desert soil	Alluvial deposit	1.2	2.1	16.1	0.3
	5	Chestnut soil	Loess	4.5	23.0	12.9	—
	6	Dark chestnut soil	Loess	5.6	16.7	9.6	—
	7	Chernozem	Loess	5.1	15.6	3.4	—
	9	Noncalic gray brown soil	Loess	6.3	14.2	—	—

* Hseung and Jackson (1952) による

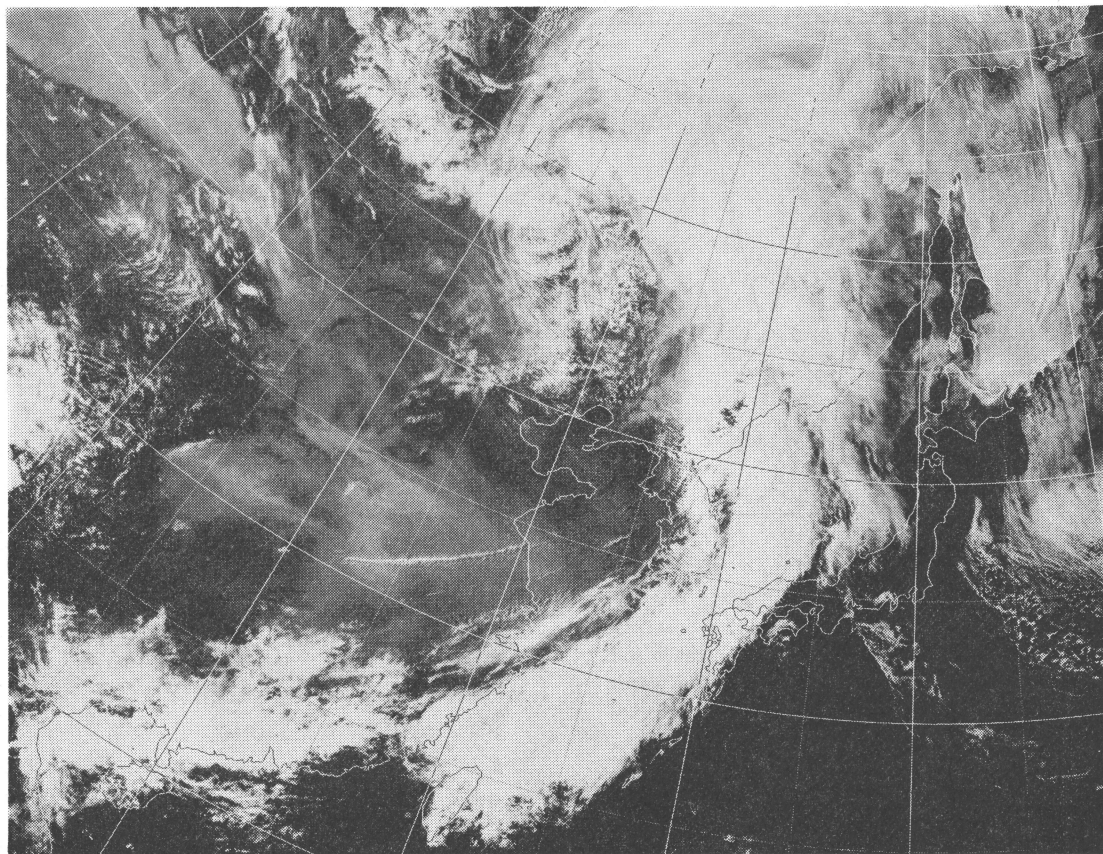


第9図 砂塵嵐の発生状況 (4月11日21時の印刷天気図による).

ズロールS-ヘキサデシルトリメチルアンモニウムニクロド法により分析してみた(角脇, 1977). 分析結果は第8図(a)および(b)のとおりである. 結果の詳細な解析についてはここでは述べないが, 重要なことは4月11~17日の期間に急増した粒子がX線分析の結果と一致し, 土壤をその生成源とする鉱物から成ること, さらにこれらの土壤鉱物が直径 0.65 μm 以下の粒子にはほ

とんど寄与しないことが確かめられたことである.

日本上空に飛来する砂塵が石英, 長石, イライト(雲母), カオリナイト, 緑泥石, モンモリロナイト, 方解石の土壤鉱物を含むことは多くの人々によって報告されている(三宅ら, 1956; 長谷川, 1967; 倉林, 1972; 吉井・井上, 1978). しかし三宅らが報告した電気石や角閃石, さらに倉林や井上・吉田が指摘したパーミキュラ



第10図 気象衛星「ひまわり」の可視画像（4月13日15時）。タクラマカンからゴビ、アラシヤン砂漠さらに黄河上流域近辺上空（左上方）に淡灰色に見えるものが黄砂である。

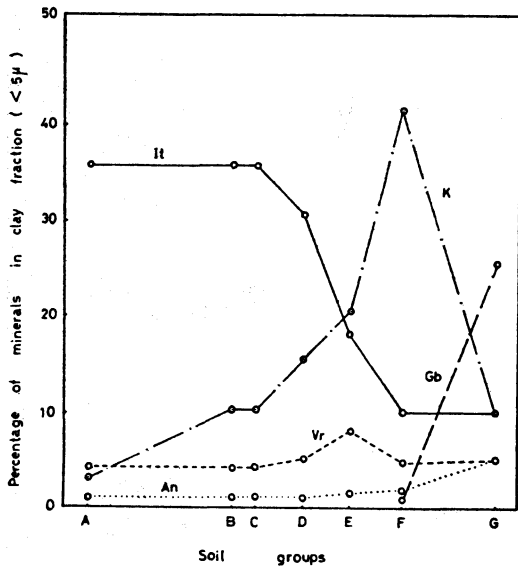
イト、ハロイサイト、ギブサイトの存在については、本分析では明らかでなかった。このように、これまで調べられた砂塵の鉱物の種類は必ずしも一致していない。これは試料の種類や分析法が同じでないために単純に比較できないが、砂塵の発生場所や発生強度が採集する時と場所によって異なるためかもしれない。

ここで特に重要な結果は、砂塵中の石英や長石の造岩鉱物さらにイライト、カオリナイト、緑泥石の粘土鉱物の多くが、共に直径 $1.0 \mu\text{m}$ から $30 \mu\text{m}$ の粒径範囲に分布し、 $4 \mu\text{m}$ 付近に最多直径を示す monomodal な粒度分布を持つということである。これは砂塵の雲物理学、光学的挙動さらに輸送に伴う各種鉱物の降下などを究明する上で非常に重要な知見を与えるものであろう。また粘土鉱物が元来直径約 $2 \mu\text{m}$ 以下の土壌構成粒子(粘土)中に含まれる特性を持つこと (Prospero and Bonatti,

1969; 石坂・本多, 1977) を考えると、大気における砂塵はその多くが純粋な鉱物粒子から成るのではなく、粘土鉱物の構成粒子が相互に凝集したのか、あるいは石英や長石などの粒度の粗い粒子の表面に付着した粒子から成るであろうと推定される。砂塵 1 個 1 個の粒子がこのように複雑な粒子の集合体から成ることは、砂塵の形態観察 (Gillette and Walker, 1977) あるいは土壌と砂塵の個数基準の粒度分布の比較 (Gillette *et al.*, 1972) からも十分考えられることである。しかし土壌粒子における粘土鉱物の存在粒径は厳密なものではなく、土壌の種類や存在状態によって多少異なる。このため砂塵 1 個 1 個の粒子の性状については今後さらに詳細な実験を行い、究明する必要がある。

4.3. 砂塵の起源

4月14日から16日にかけて、日本各地はかなり顕著な



第11図 中国の各種土壌群における鉱物含有量 (A: Desert soil, B: Light colored pedocal, C: Dark colored pedocal, D: Non-calcic soil, E: Podsolc soil, F: Red and yellow earth, G: Latosol). K: カオリナイト, It: イライイト, Gb: ギブサイト, Vr: パーミキュライト, An: 鋭錐石 (全 TiO_2). (Hseung and Jackson, 1952 による).

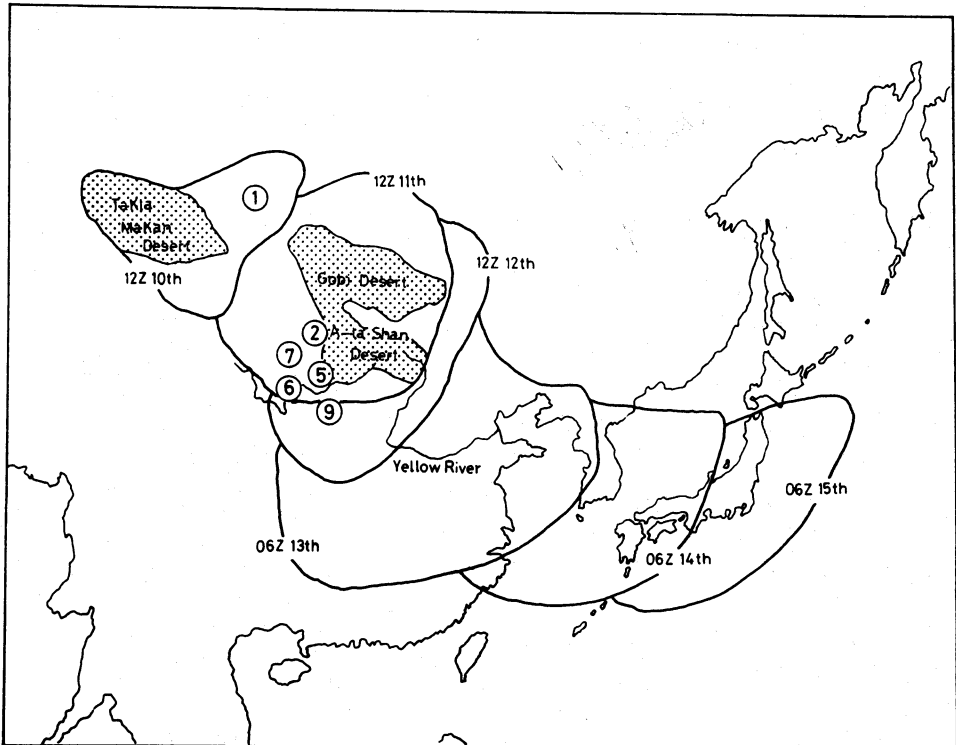
黄砂現象が観測された (気象庁地上実況気象報による)。黄砂が日本各地に大きな影響を及ぼしたことは、気象衛星「ひまわり」の可視画像の解析 (石坂 (重), 1979), 降下物質の粒度や組成の分析 (石井, 1980) などによっても報告されている。このためわれわれの調べた砂塵も黄砂そのものであったであろうことは容易に推定できることである。しかし、春さきには名古屋近辺の地面も乾燥し、砂埃の舞い上がりがることさえある。それ故、砂塵の起源を調べるにあたっては、まず名古屋近辺からの土壌粒子の砂塵への影響を調べておく必要があろう。第2表は砂塵と比較試料中の鉱物組成を比較したものである。砂塵の鉱物の種類とその量的割合が比較試料中のものと大きく異っていることから、今回の砂塵は名古屋近辺からの土壌粒子ではなく、この期間に日本上空に多量に飛来した黄砂であったとみなしてよいであろう。この黄砂の起源については、すでに気象衛星の可視画像さらに地上実況気象報の解析からゴビ、アラシャン砂漠であろうと報告されている (石坂 (重), 1979)。気象衛星の写真が得られるようになって、砂塵の存在を直接観察できる

ようになったことは飛躍的な進歩であるが、実際には濃密な砂塵についてその存在を観察できるにすぎないため、砂塵がどこで発生したのか、またどのように移動し広がったのかを知ることは、地上実況を考慮しても極めて困難な場合が多い。このため本研究では既存の資料に加えて、砂塵の鉱物組成を解析し、日本上空に飛来する砂塵の起源をさらに詳しく調べることを試みた。

先に述べたように、砂塵が日本上空に飛来する過程でその多くが重力沈降によって大気中から落下するが、特に直径約 $5 \mu m$ 以上の粒度の粗い粒子は、これより小さい粒子に比べて落下割合が大きいとみなしうる。石英、長石などの構成粒子は比較的粒度が粗く、イライイトやカオリナイトなどの構成粒子は粒度が小さいことから、これらの構成粒子の間には相互作用があるとしても、基本的にはイライイトやカオリナイトなどの粘土鉱物が石英や長石などの造岩鉱物に比べて降下割合は小さく、また種類による選別も小さいであろう。このため、砂塵中のイライイト (雲母)、カオリナイト、方解石、石膏、(ギブサイト、パーミキュライト) の組成割合を中国各地の土壌の鉱物組成と比較し、砂塵の起源を推定してみよう。

第3表は、砂塵の理化学的性質を中国の砂漠土壌および黄土の値 (Hseung and Jackson, 1952) と比較したものである。砂塵の $5 \sim 2 \mu m$ の粒径画分の含量が砂漠土壌や黄土に比べて著しく高いのは、砂塵の舞い上がり過程、さらにこれが日本にまで飛来する過程で粒度の粗い粒子が除去されるためであろう。この表で重要なことは、砂漠土壌 (第12図中の土壌①, ②) に特徴的な石膏が今回の砂塵中に含まれていたことである。また砂塵中にはイライイトが多量に含まれていた (第2表) が、これもあとで述べるように砂塵が砂漠土壌に由来することを強く示唆するものである。気象衛星「ひまわり」の可視画像および地上実況 (印刷天気図による) をもとに今回の砂塵の拡がりを見ると、10日にタクラマカン砂漠近辺に発生した砂塵が11日にはゴビ、アラシャン砂漠にまで拡がり、これらが華北、華中から黄海、東支那海を経て14日に日本付近に達したことが分る (第12図)。特に可視画像では11日から14日にかけて上述の砂漠上空で濃密な砂塵雲が観察され、これが東方へ移動しているように見える (第10図)。これらの結果から、砂漠土壌の重要な供給源はタクラマカンさらにゴビ、アラシャン砂漠近辺であったとみなしてよいであろう。

第11図は中国の土壌を土壌群に分けて、その鉱物組成の特徴を示したものである。これから分ることは砂漠土



第12図 砂塵の鉱物組成から推定した黄砂の発源地。数値を示した地点は Hseung and Jackson (1952) が報告した原土の番号で、砂塵の鉱物組成と類似していたもの。実線の領域は気象衛星「ひまわり」の可視画像と地上実況気象報から推定した黄砂の拡がり（4月10日21時～15日15時）。

壤(第12図中の土壌①, ②)にはイライト(雲母)は含まれているが、カオリナイトはほとんど含まれていないことである。これに対し今回の砂塵中には(第2表), イライト(雲母)だけでなくカオリナイトも多量に見出され、イライト(雲母)のカオリナイトに対する重量濃度比がほぼ1.8であった。このことから今回の砂塵は砂漠土壌だけでは説明できず、pedocal soil(第12図の土壌⑤, ⑥, ⑦)さらに non-calcic soil(第12図の土壌⑨)にも由来すると考えざるを得ない。これらの土壌は黄河上流域の黄土を土壌母材とするものである(第3表)が、これらの地域から砂塵嵐によって多量の砂塵が大気中に供給されたであろうことは可視画像さらに地上実況からも十分考えられることである(第9・10図)。一方砂塵中にはギブサイトやパーミキュライトがほとんど見出されなかった(第2表)が、これは華中や華南地域の Red and Yellow earth や Latosol(第11図)が今回の砂塵に混入していないことを示唆するものである。

1981年10月

以上の考察から、今回の砂塵は主としてタクラマカンからゴビ、アラジャン砂漠さらに黄河上流域近辺に起源を持つものと推定される。

5. まとめ

1979年4月14日から16日にかけて日本上空に飛来した砂塵、さらに砂塵を構成する主要鉱物の粒度特性について調べ、次の結果を得た：

(1) 砂塵の空間重量濃度は $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上にもおよび、その影響の程度は Patterson and Gillette (1977) の分類によれば中規模の大きさであった。

(2) 砂塵は日本上空においてサブミクロンより大きな粒子の濃度の増加に寄与し、その重量基準の粒度分布は直径 $0.43 \mu\text{m}$ から $30 \mu\text{m}$ において $4 \mu\text{m}$ 付近に最多直径を持つ monomodal なものであった。(3) 砂塵は日本上空に石英、長石、イライト(雲母)、緑泥石、カオリナイト、モンモリロナイト、方解石、石膏などの鉱物

を多量にもたらしたが、特に緑泥石、カオリナイトの粘土鉱物は砂塵現象時に特徴的に見出された。(4) 砂塵を構成する主要鉱物の重量基準の粒度分布は第7図のとおりであった。石英や長石の造岩鉱物さらにイライト(雲母)、緑泥石、カオリナイトの粘土鉱物が大気中において直径約 $1.0\ \mu\text{m}$ から $30\ \mu\text{m}$ の粒径範囲に広く分布し、 $4\ \mu\text{m}$ 付近に最多直径を持つ monomodal に近い分布であったことは、砂塵の性状やその挙動を理解する上で非常に重要な結果であろう。(5) 砂塵の鉱物組成を中国各地の原土の鉱物組成と比較し、また気象衛星「ひまわり」の可視画像、さらに地上実況の資料を参照して砂塵の起源を推定してみた。その結果、これはタクラマカンからゴビ、アラシオン砂漠さらに黄河上流域近辺であることが示唆された。

日本上空に飛来した砂塵の気象学的挙動を理解する基礎として砂塵の性状さらにその起源を調べ、上に述べた結果を得たが、第2表から分るように砂塵の約70%が2, 3の物質を除いてはX線分析で組成の決定できない物質であった。砂塵の化学分析の結果(三宅ら, 1956; 長谷川, 1967; 吉田・井上, 1978)から、砂塵のほとんどが土壌鉱物であろうと推定されるが、未知物質がどのような化学結合状態を持つ鉱物であるかさらに究明する必要がある。また砂塵の塩酸処理の過程で黄色反応が見られ、さらにX線分析で赤鉄鉱に相応するX線回折線が検出された。これらから、鉄の金属鉱物が砂塵中に存在することが考えられるが、本研究ではその種類や含有量については調べなかった。赤鉄鉱などの金属鉱物は大気中で光を強く吸収することから、光学的に非常に重要視されている物質である。今後これらの点についても調べたいと考えている。

最後に、本研究で使用したボラック カウンターを借用させて頂いた名古屋大学工学部放射線安全工学教室に厚くお礼申し上げますと共に、本研究の経費の一部に文部省科学研究費を使用したことを付記する。

文 献

荒生公雄, 牧野保美, 永木嘉寛, 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, 65-74.
Bertrand, J. and J. Baudet, 1973: Seasonal variations and frequency distributions of ice nuclei concentrations at Abidjan, West Africa. *Jour. Appl. Met.*, 12, 1191-1195.
Brindley, G.W. and S. Udagawa, 1960: High temperature reactions of clay mineral mixtures and their ceramic properties: I, kaolinite-mica-

quartz mixtures with 25 weight % quartz, *Jour. Amer. Ceram. Soc.*, 43, 59-65.
Carlson, T.N., 1979: Atmospheric turbidity in Saharan dust outbreaks as determined by analyses of satellite brightness data, *Mon. Wea. Rev.*, 107, 322-335.
——— and S.G. Benjamin, 1980: Radiative heating rates for Saharan dust, *Jour. Atmos. Sci.*, 37, 193-213.
Delany, A.C., D.W. Parkin, J.J. Griffin, E.D. Goldberg and B.E.F. Reiman, 1967: Airborne dust collected at Barbados, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, 885-909.
Gagin, A., 1965: Ice nuclei, their physical characteristics and possible role on precipitation initiation, *Proc. Int. Conf. on Cloud Phys.* Tokyo and Sapporo, 155-162.
Gillette, D.A., I.H. Blifford and C.R. Fenster, 1972: Measurements of aerosol size distributions and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion, *Jour. Appl. Met.*, 11, 977-987.
——— R.N. Clayton, T.K. Mayeda, M.L. Jackson and K. Sridhar, 1978: Tropospheric aerosols from some major dust storms of the southwestern United States, *Jour. Appl. Met.*, 17, 832-845.
——— and T.R. Walker, 1977: Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of west Texas, *Soil Sci.*, 123, 97-110.
長谷川正, 1967: 新潟県高田市に降ったレスについて, *地質学雑誌*, 42, 463-467.
Hseung, Y. and M.L. Jackson, 1952: Mineral composition of the clay fraction: III. of some main soil groups of China, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 16, 294-297.
井上克弘, 吉田 稔, 1978: 岩手県盛岡市に降った“赤い雪”中のレスについて, *日本土壌肥科学雑誌*, 49, 226-230.
石井英二, 1979: 「ひまわり」と電子顕微鏡で見た“黄砂”, *気象*, 24, 22-25.
石坂重次, 1979: 1979年4月中旬の黄砂, *天気*, 26, 725-729.
Ishizaka, Y., 1972: On materials of solid particles contained in snow and rain water: Part 1, *Jour. Met. Soc. Japan*, 50, 362-375.
——— 1973: On materials of solid particles contained in snow and rain water: Part 2, *Jour. Met. Soc. Japan*, 51, 325-336.
石坂 隆, 本多朗郎, 1974: 1974年2月秋田地方に降った雪の中の物質について, *日本気象学会秋季大会講演予稿集*, 143 p.
Isono, K., M. Komabayasi and A. Ono, 1959: The nature and the origin of ice nuclei in the atm-

- osphere, *Jour. Met. Soc. Japan*, 37, 211-233.
- Isono, K., M. Komabayasi, T. Takeda, T. Tanaka, K. Iwai and M. Fujiwara, 1971: Concentration and nature of ice nuclei in the rim of the North Pacific Ocean, *Tellus*, 23, 40-59.
- Junge, C. and R. Jaenicke, 1971: New results in background aerosols studies from the Atlantic expedition of the R.V. Met. Spring 1969, *Aerosol Sci*, 2, 305-314.
- 角脇 怜, 1977: 大気浮遊粉じん中のケイ素およびアルミニウムの粒度分布と濃度比, *日本化学会誌*, 12, 1911-1916.
- 倉林三郎, 1972: 大山火山灰層の粘土鉱物学的特徴, *地質学雑誌*, 78, 1-11.
- Levin, Z., J. Joseph and Y. Mekler, 1980: Properties of Sharva (Khamsin) dust-composition of optical and direct sampling data, *Jour. Atmos. Sci.*, 37, 882-891.
- 生沼郁, 小林和夫, 1965: 堆積岩の粘土鉱物学的研究における二, 三の問題点, *粘土科学の進歩*, 5, 77-84.
- 岡田菊夫, 小林愛樹智, 原田奈遠美, 武田 喬男, 1980: 大気中のエアロゾルによる光散乱係数の変動(I), *日本気象学会秋季大会予稿集*, 189 p.
- 三宅泰雄, 杉浦吉雄, 葛城幸雄, 1956: 1955年4月旭川地方に降った放射性の落下塵, *Jour. Met. Soc. Japan*, 34, 226-231.
- Patterson, E.M. and D.A. Gillette, 1977: Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil derived composition, *Jour. Geophys. Res.*, 82, 2074-2082.
- Prospero, J.M. and E. Bonatti, 1969: Continental dust in the atmosphere of the eastern equatorial Pacific, *Jour. Geophys. Res.*, 74, 3362-3371.
- Schütz, L. and R. Jaenicke, 1974: Particle number and mass distributions above 10^{-4} cm radius in sand and aerosol of the Sahara desert, *Jour. Appl. Met.*, 13, 863-870.
- Sudo, T., K. Oinuma and K. Kobayashi, 1961: Mineralogical problems concerning rapid clay mineral analysis of sedimentary rocks, *Acta Universitatis Carolinae-Geologica Supplementum I*, 189-219.
- Walker, G.F., 1957: On the differentiation of vermiculites and smectites in clay, *Clay. Min. Bull.*, 3, 154-163.

(634頁より続く)

- Technical note, NO. 34.
- Conover J.H., 1964: The identification and significance of orographically induced clouds observed by TIROS satellites, *J. Appl. Met.* 3, 226-234.
- 気象庁, 1976: Aerological data of Japan (5-year period averages 1971-1975).
- Klemp, J.B. and D.K. Lilly, 1978: Numerical simulation of hydrostatic mountain waves, *J. Atmos. Sci.*, 35, 78-107.
- Lester, P.F., 1977: Waves and turbulence in the vicinity of Chinook arch cloud, *Mon. Wea. Rev.*, 105: 1447-1457.
- Lilly, D.K., 1971: Observations of mountain-induced turbulence, *J. Geo. Res.*, 27, 6585-6588.
- Ludlam, F.H., 1952: Orographic cirrus clouds, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 78, 554-562.
- Ludlam, F.H., 1952 a: Hill-wave cirrus, *Weather*, 7, 300-306.
- Nicholls, J.M., 1973: The airflow over mountains, W.M.O. Technical Note, NO. 127.