

## 黄砂エアロゾルの降下量分布\*

—一般環境大気測定局の利用—

西川 雅高\*\*・溝口 次夫\*\*・笹野 泰弘\*\*  
金森 悟\*\*\*・金森 暢子\*\*\*

## 要旨

鹿児島, 長崎, 山口, 島根, 大阪, 岐阜, 石川, 富山, 新潟, 千葉, 秋田, 北海道の一般環境大気測定局の $\beta$ 線吸収法による浮遊粒子状物質測定結果を検討し, 次のようなことが明かとなった. 黄砂エアロゾルの定量的なモニタリングにこれらのデータが利用でき, しかも地上における黄砂エアロゾルの動きを1時間単位で捉えていることがわかった. また, 気象観測でわからないような弱い黄砂現象も感知できることがわかった. 黄砂エアロゾルに関する各地のモニタリング結果と気象観測結果との総合的な判断から, 1988年における黄砂エアロゾルの年間降下量は, 1-5 (ton/km<sup>2</sup>)と推定され, これは年間降下ばいじん量の数%程度に相当することがわかった.

## 1. はじめに

黄砂現象は, 春先にしばしば観測される. わが国の馴染み深い気象現象の一つである. この黄砂現象の原因物質である黄砂エアロゾルの研究は, 古くから行われており, 気象学, 地球化学などの分野で数々の報告がある(例えば, 溝畑・真室, 1978; Kadowaki, 1979; Duce *et al.*, 1980; 石坂ら, 1981; Uematsu *et al.*, 1983; Iwasaka *et al.*, 1983, 1988; 田中ら, 1986; Arao and Ishizaka, 1986). 黄砂現象は突発的に起きる現象であるため, いずれの報告においても黄砂エアロゾルを捉えることに非常な努力を必要としてきた. そのため従来の研究は, 個々の黄砂現象に関するものが多かった. 研究対象となったある黄砂現象が, 全黄砂現象のなかでどの程度の大きさなのかを把握できれば, それは非常に有力な

情報になると思われる.

環境分野において, 大気汚染物質を常時監視する目的で設置されている一般環境大気測定局は, 全国に千カ所以上もある(環境庁, 1989). 多くの一般環境大気測定局では,  $\beta$ 線吸収法か光散乱法あるいは圧電天秤法により浮遊粒子状物質の連続監視を毎正時ごとに行なっている. これら3法のうち $\beta$ 線吸収法は, 他の二法に比べて感度は低いけれども, 次のような利点を持っている.  $\beta$ 線吸収法は, ガラス繊維濾紙上に吸引通過方式(捕集面の直径は約1cmの場合が多い)で大気エアロゾルを1時間近く捕集した後, その捕捉エアロゾルに一定強度の $\beta$ 線(<sup>14</sup>Cや<sup>147</sup>Pmなどが密封放射線源として用いられている)を照射した時, その透過強度が捕捉エアロゾル重量に比例して減少する原理を利用した方法である. 捕集面にできるだけ均一に捕集されていれば, 捕捉エアロゾルの性状にあまり左右されない方法であることから, 平常時の大気エアロゾルと同様に, 黄砂エアロゾルにも鋭敏に反応する可能性がある.

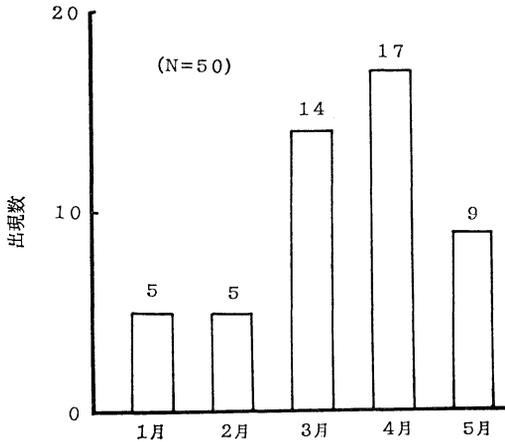
本研究では,  $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾルの観測結果が, 黄砂エアロゾルのモニタリングに利用できるかどうかを検討し, さらに, その解析結果の応用を試みた.

\* The estimation of fallout amount of Kosa aerosol in Japan—by the utilization of several environmental air monitoring stations' data—

\*\* Masataka Nishikawa, Tsuguo Mizoguchi, Yasuhiro Sasano, 国立環境研究所 Satoru Kanamori and Nobuko Kanamori 名古屋大学水圏科学研究所

—1990年5月14日受領—

—1990年12月21日受理—



第1図 最近10年間(1980-1989)における気象観測による黄砂現象の出現回数

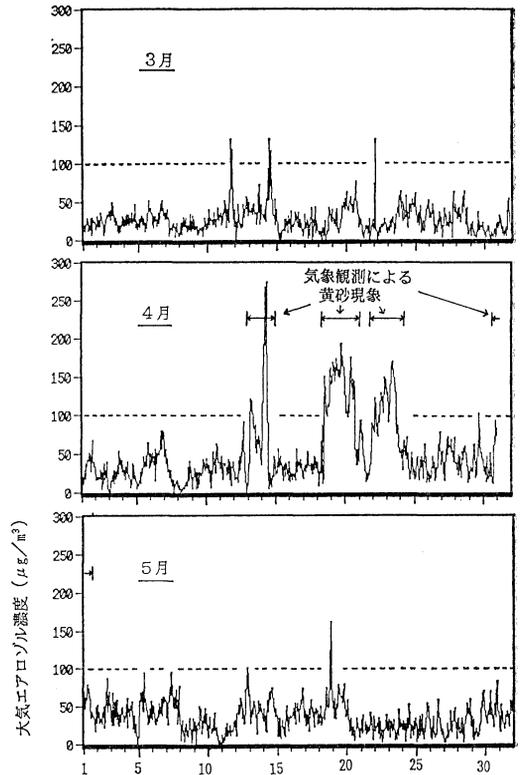
## 2. 黄砂現象の頻度分布

第1図は、1980年から1989年までの10年間に観測された黄砂現象の月別出現数を示したものである。もとななるデータは、日本気象協会発行の「気象」に記載されている「天気図日記」から拾い出した。最近10年間の黄砂現象の出現数は50回あり、1月から5月の期間にだけ出現し、最頻度月は4月であった。さらに、3、4、5月の3カ月間に全体の8割の黄砂現象がみられた。荒生らの報告(1979)によれば、秋期にも黄砂現象が少しみられるが、彼らの報告でも春先に全体の8割が出現しており、ほぼ同様の結果となっている。

## 3. 結果および考察

### 3.1 $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾルの観測結果について

九州地域は、黄砂現象が現れやすい地域である。そこで、鹿児島県串木野の環境大気測定局を例として、 $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾル濃度の観測が、黄砂エアロゾルのモニタリングに応用できるかどうかを検討した。第2図は、1988年における $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾル濃度の観測結果である。3、4、5月の大気エアロゾルの平均濃度は、それぞれ26, 50, 35( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )であり、日常の濃度変動は多くの場合10から70( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )の範囲にあった。したがって、100( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )を起すような高濃度の突然の出現は、地上大気中にエアロゾル濃度の増加を起すようななにか異常な現象が生じたことを意味している。



第2図  $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾルのモニタリング結果(鹿児島県・串木野)

約100( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )以上の高濃度の出現は、3月に3回、4月に4回、5月に3回認められた。一方、前述の「天気図日記」によれば第1表に示すようにこの期間の黄砂現象は、各地で5回観測されている。気象観測に基づく黄砂現象は、3月に山陰地方の一部地域でのみ1回観測され、4月の4回は、九州地域を含む広い範囲にわたって観測されたことが報告されている。串木野では、この4月の4回の黄砂現象時にはいずれの時も100( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )以上の異常に高い大気エアロゾル濃度を観測し、黄砂現象の出現を明確に感知した。このように $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾル濃度の観測は、黄砂現象のモニタリングにも有効であることが明らかとなった。

逆に、 $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾル濃度の観測から、黄砂現象の出現の推定を試みた。上述した黄砂現象時のモニタリング結果から、以下の「黄砂エアロゾルの判定基準」を作った。

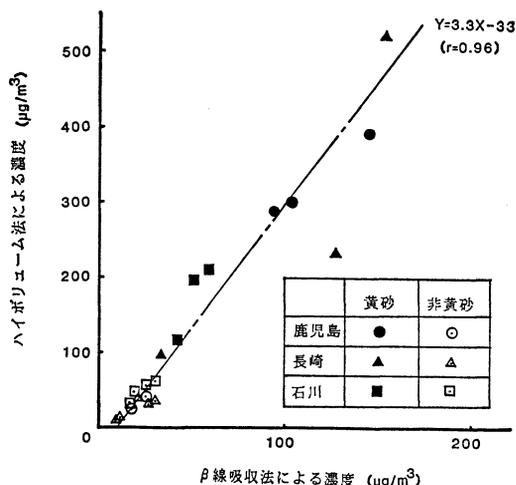
(1) 日常のモニタリング濃度の変動幅に照らしてみても、急激な高濃度を観測する。

第1表  $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾルのモニタリング結果—ピーク濃度と黄砂現象の関係(1988)年—

鹿児島県(串木野)

高濃度観測期間	ピーク濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	気象観測による黄砂現象	他局でも高濃度出現	*風速 (m/sec.)	
				平均	最大
	40	3/7-8		3.1	7.9
3/11	131	なし	あり	3.6	9.4
3/14	116	なし	あり	2.8	8.1
3/22	131	なし	なし	3.6	8.1
4/13-14	274	4/13-14	あり	3.3	7.8
4/18-21	194	4/18-19	あり	2.7	10.1
4/22-23	171	4/21-22	あり	3.0	8.0
4/29-30	102	4/30	あり	2.1	5.5
5/7	91	なし	なし	4.0	8.7
5/12-13	100	なし	あり	3.4	7.9
5/18	162	なし	あり	2.0	4.0

\*風速; 気象庁月報「全国気象表」(鹿児島観測所)から



第3図 ハイボリューム法と $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾル濃度の比較

第2表 黄砂現象時における各地の平均エアロゾル濃度と出現期間(1988年4月14日)

観測地点	発現時刻 (4/14)	終了時刻 (4/14)	期間 (hr)	平均濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	*非黄砂時の濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
北海道	高濃度出現せず				15
秋田	11:00	16:00	8	95	32
新潟	11:00	17:00	7	108	31
千葉	16:00	2:00(4/15)	11	76	29
富山	10:00	16:00	7	114	36
石川	9:00	15:00	7	111	33
岐阜	11:00	21:00	11	68	34
大阪	7:00	18:00	12	121	34
鳥取	3:00	11:00	9	174	29
山口	4:00	13:00	10	126	38
長崎	2:00	10:00	9	128	29
鹿児島	2:00	12:00	11	174	30

\*各地の4月における非黄砂時の平均エアロゾル濃度

(2) 50 km 以上離れた他の測定局(複数)でも同時にあるいは前後して同じ様に急激な高濃度を観測する。

(3) 前日および当日の天気図から判断して、大陸方面からの風が吹きやすい状態にある。

(4) 周辺土壌の巻き上げがあるほどの強風が地上で吹いていない。

(5)  $\beta$ 線吸収法による測定のための捕捉スポットが高濃度出現時に茶褐色から黄褐色であったことを確認する。

以上5項目がすべて満たされれば最もよいが、(5)を確認することが以外に困難なことが多いので、(4)まで

の項目が満たされることを最低条件とした。この最低条件で、第2図を検討した。串木野では、3月から5月の期間に10回の異常に高い大気エアロゾル濃度を記録した。第1表に示のように、鹿児島島の風速はこの10回の場合とも周辺土壌を大量に巻き上げるほど強くはなかった。このうち8回は、北九州地域から北陸にかけて、同時期に平常値よりも高い大気エアロゾル濃度を記録した。つまり、高いエアロゾル濃度の空気塊が、広範囲な地域を一時的に被ったと判断できる。この時の天気図から、いずれの場合も大陸方面からの風が吹いていた。したがって、この3カ月間に気象観測で認識されなかった黄砂現

象を含めて8回の黄砂エアロゾルの飛来があったと推定できた。

### 3.2 $\beta$ 線吸収法による黄砂エアロゾル濃度の定量性について

黄砂エアロゾルは、時として100  $\mu\text{m}$ 以上の巨大粒子を含んでいることが知られている。 $\beta$ 線吸収法による対象エアロゾルは粒径10  $\mu\text{m}$ 以下の浮遊粒子状物質に限られることから、この方法による測定値は、黄砂エアロゾル濃度を正確に示していない可能性がある。そこで、4月14日、4月18日、4月22日の3回の異なる黄砂現象時に、ハイボリュームサンプラー（装置構造から、捕捉エアロゾルの上限粒径は約100  $\mu\text{m}$ といわれている）を用いてバルクの大気エアロゾル濃度を測定し、その同一捕集時間における $\beta$ 線吸収法による大気エアロゾル濃度との比較をした。測定結果の信頼性を高めるために、鹿児島県、長崎県、石川県の3カ所で並行試験を行った。また、非黄砂現象時にも同様の並行試験を行った。それらの結果をまとめたのが、第3図である。図より、ハイボリュームサンプラーにより測定したエアロゾル濃度と $\beta$ 線吸収法によるエアロゾル濃度との間には、大気エアロゾルの性状および観測地点の違いによらず良好な関係( $Y=3.3X-33$ , 相関係数=0.96)が認められた。ちなみに、黄砂時だけでは( $Y=3.3X-31$ , 相関係数=0.90)、非黄砂時だけでは( $Y=3X-29$ , 相関係数=0.75)であった。したがって、各一般環境大気測定局における $\beta$ 線吸収法による黄砂現象時のモニタリング測定値を約3倍することにより、黄砂エアロゾルのバルク濃度を推定することができると思われる。

### 3.3 $\beta$ 線吸収法による黄砂エアロゾルのモニタリング結果について

第4図は、1988年4月13日から14日の黄砂現象時に観測された各地の一般環境大気測定局における大気エアロゾル濃度( $\beta$ 線吸収法)のモニタリングで結果である。長崎のモニタリング結果から、4月13日3:00ころに小規模な黄砂現象があり、4月14日6:00ころに大きな黄砂現象があったことがわかる。4月14日の黄砂現象についてまとめたのが第2表である。等4図および第2表から、日本の西南域から東北域にかけて黄砂現象の出現時刻が徐々に遅れ、しかもピーク濃度もだんだんと小さくなっていくことがわかる。各地の黄砂現象の出現時刻についてマップ(第5図)をつつくと、その移動方向がさらに鮮明になる。図は、(a) $\beta$ 線吸収法による黄砂現象の発現時刻と(b)気象情報による黄砂発現時刻を比較したものである。(a)(b)両者とも、西南域から

関東東北域にかけて発現時刻の移っていく様子がよく対応し、黄砂エアロゾルを運ぶ空気塊は、第5図(a)に示す矢印方向に動いたと考えられる。事実、笹野、林田(1989)の行った、黄砂エアロゾルの空気塊が通ることが多いといわれる高度約2,000mと4,000mの等温位面による流跡線解析の結果は、当日、第5図の矢印方向に空気塊が流れていたことを示している。したがって、第4図のモニタリング結果は、中国大陸で発源した黄砂エアロゾルが、日本列島を西から東へ降下しながら風送されていく様子を定量的に捉えたものといえる。また、長崎、石川、秋田など日本海側に面している地点に比べて、山口、大阪、岐阜、千葉などの地点のモニタリング波形が少しブロードになるようであった。これは、黄砂エアロゾルを運ぶ空気塊が山岳地帯を通過するときに乱れることに因ると思われる。

### 3.4 黄砂エアロゾルの通過量

$\beta$ 線吸収法による大気エアロゾルのモニタリング結果から、黄砂現象の出現期間だけでなく、地上付近での黄砂エアロゾル濃度も推定できることがわかった。これらの結果をもとにして、各地の黄砂エアロゾルの通過量を次式から見積った。ここでいう通過量とは、地面に対して垂直にたち、黄砂エアロゾルの移動方向に対して直角な面(幅1km×高さ2km)を1黄砂現象中に通過した黄砂エアロゾル量と定義する。

$$Tw=3((Kc-B)\times 10^{-3})\times(Ht\times L)\times(P\times Vs)$$

ここで、

Tw; 通過量 (ton),

Kc; 黄砂エアロゾルの平均濃度 (kg/km<sup>3</sup>),

B; 大気エアロゾルのバックグラウンド濃度 (kg/km<sup>3</sup>)

Ht; 黄砂エアロゾルの空気塊の厚み

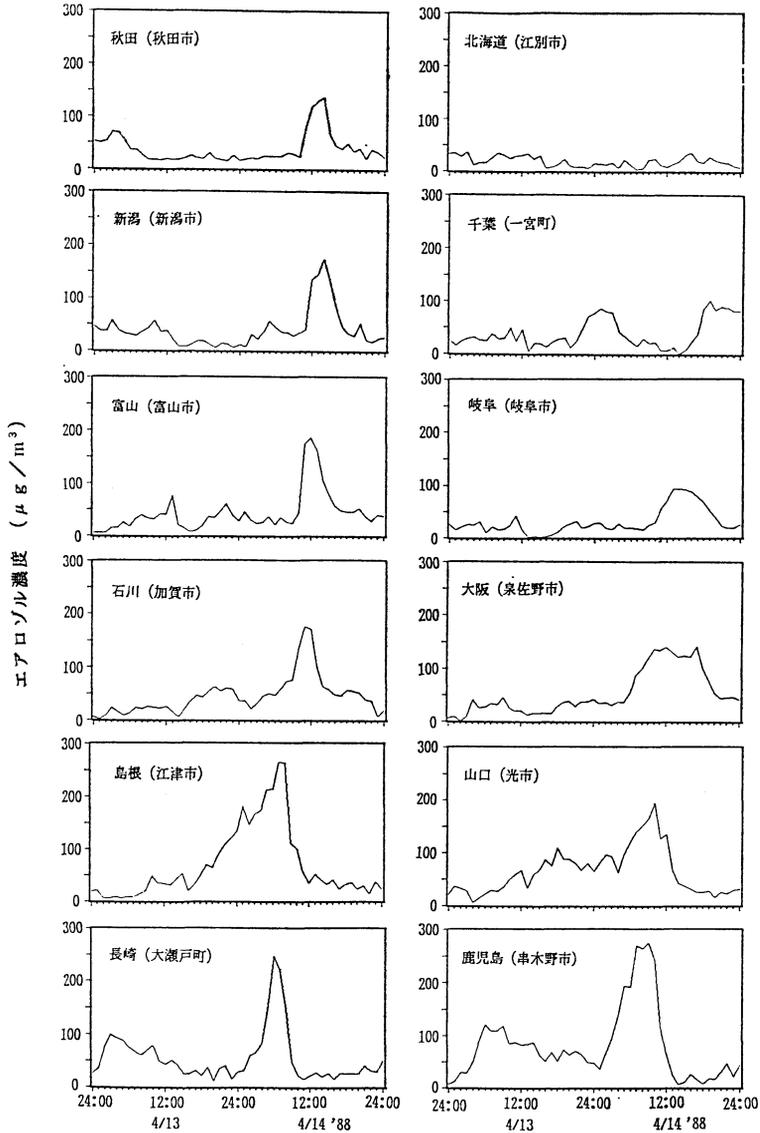
(Iwasakaら(1983)の値、笹野、林田(1989)のレーザーレーダーの観測結果を参考にして2kmとした)

L; 黄砂エアロゾルの移動方向に対する幅、1kmとした

P; 黄砂現象の出現期間 (hr),

Vs; 空気塊の平均移動速度 (km/hr)

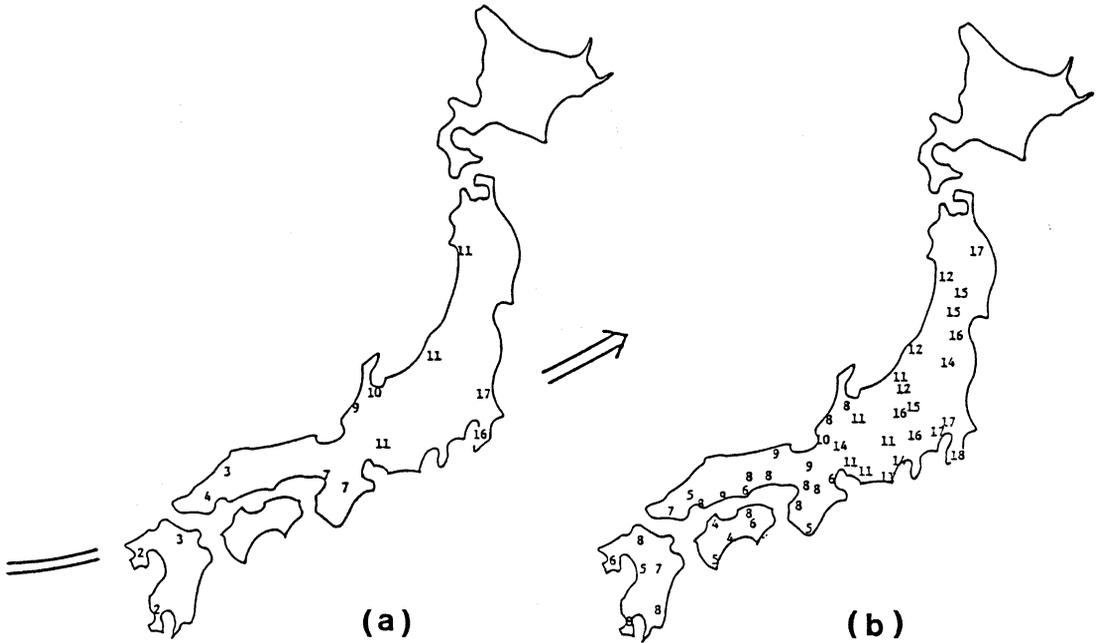
とした。黄砂エアロゾルの実際の空間濃度分布や移動速度を正確に把握することは困難であり、現状ではいくつかの仮定をしなければならない。そこで、黄砂エアロゾルを運ぶ空気塊は、(1)地上から2,000mまで上下方向に均一に分布していてそのまま水平に移動する。(2)黄砂現象の現れた地域の気圧850mbと700mbにおける平均風速で空気塊が移動する、という仮定をした。第4図に示した黄砂現象では850mbと700mbの各



第4図 β線吸収法による黄砂エアロゾルのモニタリング結果 (1988年4月13日-14日)

地の平均風速は、4月14日 21:00の天気図からそれぞれ約40と63(km/hr)であり、平均移動速度を52(km/hr)と仮定した。この移動速度で黄砂エアロゾルが、第5図の矢印方向へ移動したとすると、九州から関東へは約19時間で到達することになる。地上での黄砂現象もそれに応じて発現するとすれば、第2表に示したように長崎での発現時刻が2:00なので、関東での発現は21:00ころ

と予想される。実際には約14時間後の16:00ないし17:00ころから関東地方で発現が認められ、2割程度の時間誤差が生じたけれども、上空の空気塊の移動が地上現象に反映していることが確かめられた。したがって、これらの仮定のもとに第2表中の長崎での黄砂エアロゾルの通過量を推定すると、Kc: 128 (kg/km<sup>3</sup>), B: 29 (kg/km<sup>3</sup>), P: 9(hr), Vs: 52(km/hr) より、278(ton)



第5図 (a) β線吸収法によるエアロゾル観測結果から判断した黄砂現象の発現時刻  
 (注; 矢印は、黄砂エアロゾルを選ぶ空気塊の推定移動方向を示す)  
 (b) 気象官署からの報告による黄砂現象の発現時刻

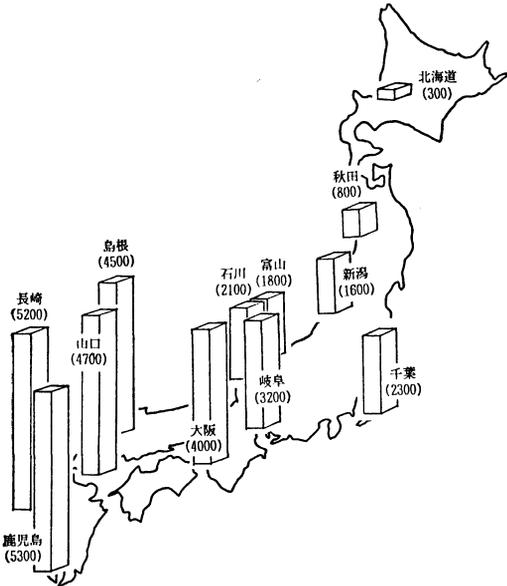
となる。同様に第2表中の各地の通過量 (ton) は、秋田 (118), 新潟 (168), 千葉 (147), 富山 (170), 石川 (170), 岐阜 (117), 大阪 (326), 島根 (407), 山口 (271), 鹿児島 (494) となった。さらに、黄砂エアロゾルを運ぶ空気塊の日本上空での広がり幅がわかれば、各地の通過量から黄砂エアロゾルの輸送量も推定できると考えられる。

3.5 黄砂エアロゾルの年間降下量

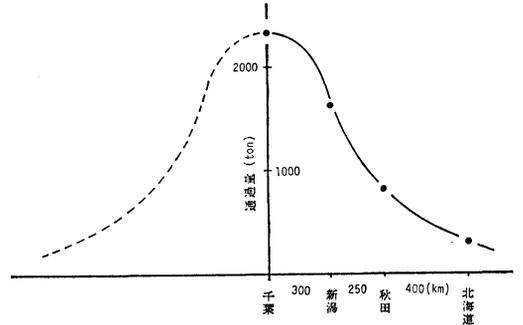
個々の黄砂現象時における黄砂エアロゾルの通過量を合算して年間通過量 (1988年) を求め、その結果を第6図に示した。年間通過量は、九州地域が最も多く緯度が高くなをにつれて徐々に少なくなった。つまり、(1) 黄砂エアロゾルの中心塊は九州地域に近い方を通過することが多く、緯度方向の広がりには北海道まで届くことが少ない、(2) 除去および拡散をしながら大気中を移動する、という2つの理由が合わさったためと考えられる。

第6図に示す年間通過量は、いくつかの黄砂エアロゾルの通過によるものである。年間通過量に寄与した黄砂エアロゾルの中心塊が、長崎—山口—大阪—岐阜—千葉方向に動いたと仮定する。なお、各地における年間通過

量の5割以上を占めた4月14日から24日までの黄砂エアロゾルを運ぶ空気塊の流れは、いずれも仮定方向に近い動きをした可能性が高く、この仮定を支持している。中国大陸の黄砂エアロゾルの発生源から長崎までの距離は2,000 km 以上あるが、拡散による濃度低下を無視するために長崎—千葉間の約1,000 km を長崎—山口 (200 km), 山口—大阪 (350 km), 大阪—岐阜 (150 km), 岐阜—千葉 (350 km) に分けた。つまり、各区間の通過量の差はその区間内に大気中から除去された量とみなし、その差を区間距離で割った値をその区間における平均降下量と見積った。その量は、長崎—山口間で2.5(ton/km<sup>2</sup>) となり、順に、2, 5.3, 2.6(ton/km<sup>2</sup>) となった。これは中心塊の通過地点での推定値であるから、この区間から離れるにしたがって推定降下量も小さくなっていくことになる。黄砂エアロゾルの移動方向に対して横方向に中心塊の通過量が半分となる石川, 富山, 新潟などでは降下量も半分約1(ton/km<sup>2</sup>) 程度に、秋田あたりでは1/3から1/4程度になるものと思われる。1988年の年間降下ばいじん量は、環境庁の大気測定局に関する測定結果報告 (1989) によると全国平均で約40(ton/km<sup>2</sup>)



第6図 日本各地における黄砂エアロゾルの年間通過量の比較 (ton)



第7図 東経140度付近の年間通過量分布 (ton)  
(年間通過量の推定に寄与した黄砂エアロゾルの東経140度付近における拡散幅に相当する。したがって、破線は、千葉を中心とする実線部分の線対称で示してある)

方々に心から感謝します。なお、この研究は、昭和63年度環境庁委託業務「黄砂エアロゾルに関する調査研究」(大気汚染研究協会)の中の一部を発展させたものである。

参考文献

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, 30, 65-74.

Arao, K. and Y. Ishizaka, 1986: Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity, J. Meteor. Soc. Japan, 64, 79-94.

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.

石坂 隆, 小野 晃, 角脇 怜, 1981: 日本上空に飛来した砂塵の性状とその発源地, 天気, 28, 651-665.

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, 35B, 189-196.

———, M. Yamato, R. Imasu, and A. Ono, 1988: Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. Tellus, 40B, 494-503.

Kadowaki, S., 1979: Silicone and aluminum in urban aerosols for characterization atmospheric soil particles in the Nagoya area, Environ.

であったことから、この年の降下ばいじん量に占める黄砂エアロゾルの負荷は、数%程度と考えられる。

前述の年間通過量に寄与した黄砂エアロゾルについて、その水平方向の広がりを考えてみた。東経140度あたりの移動方向に対する広がりを、千葉(中心)―新潟―秋田―北海道(端)で近似する。したがって、東経140度付近での黄砂エアロゾルの年間通過量分布は第7図のようになり、これは年間に飛来した黄砂エアロゾルの拡散幅と見なすことができるので、千葉を中心としたガウス分布になると考えられる。よって、左側の破線部分の線対称として示した。その実線部分から破線部分までの面積を計算すると  $2.6 \times 10^6$ (ton) となった。この値は、東経140度付近で見積った場合の日本に飛来した黄砂エアロゾルの年間輸送量に相当する。当然、九州地域を横断する東経130度付近で見積った場合の年間輸送量は、東経130度と140度との年間降水量がこの値に加わるのでさらに多くなることが予想される。

謝辞

この研究をまとめるにあたり、有益な助言を頂いた国立環境研究所の林田佐智子博士に深謝致します。また、試料採取およびデータ提供などにご協力いただいた鹿児島県、長崎県、石川県をはじめ、各道府県の関係者の

- Sci. Technol. 13, 1130-1133.
- 環境庁大気保全局大気規制課, 1989: 昭和63年度一般環境大気測定局測定結果報告.
- 溝畑 朗, 真室哲雄, 1978: 黄砂エアロゾルに関する二, 三の知見, 大気汚染学会誌, 13, 289-297.
- (財)日本気象協会, 1980-1990: 天気図日記, 気象, No. 275-394.
- 笹野泰弘, 林田佐智子, 1989: レーザーレーダーによる黄砂粒子鉛直分布の観測, 昭和63年度環境庁委託業務結果報告書「黄砂エアロゾルに関する調査研究」, (社)大気汚染研究協会, 117-130.
- 田中 茂, 田島将典, 橋本芳一, 1986: 黄砂現象時の大気エアロゾルの化学組成の変化, 日本化学会誌, 5, 713-719.
- Uematsu, M., R.A. Duce, J.N. Prospero L. Chen, J.T. Merrill, and R.L. McDonald, 1983: Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean, J. Geophys. Res, 88, 5343-5352.

## 1991年度日本生命財団研究助成の募集のお知らせ

### 人間活動と環境保全との調和に関する研究 —自然と人間の共生への新しい道を求めて—

#### 助成の主旨

日本生命財団は、過去12年間にわたり環境分野の研究助成を行っており、本年度も標記の課題で公募を行います。

21世紀の豊かで調和のとれた環境づくりに貢献する独創的な研究、学際的な研究等ユニークな着想にもとづく研究計画をお持ちの研究者・グループのご応募を期待します。

#### 研究助成の概要

- 応募資格は問いませんが、意欲的に研究を遂行していただける個人・グループ

- 選考方法：当財団選考委員会で厳正な選考のうえ、9月の理事会にて決定

- 助成期間：1991年10月から1年間

- 助成金総額：1億円程度

#### 応募方法

- 「応募要項」「申請書」は下記あて 郵送用切手同封の上、ご請求下さい。

なお、「応募要項」「申請書」は5月中旬までに気象学会事務局宛ご請求下さい。

(1部～2部 250円, 3部～4部 360円)

- 「申請書」の提出期限：1991年5月24日(金)消印まで