

黄砂に関する若干の統計的研究

荒 生 公 雄・牧 野 保 美*・永 木 嘉 寛**

長崎大学教育学部地学教室
(昭和53年10月31日受理)

Some Statistical Aspects of Yellow Sand

Kimio ARAO, Yasumi MAKINO and Yoshihiro NAGAKI

Department of Earth Science, Faculty of Education
Nagasaki University, Nagasaki 852

(Received Oct.31,1978)

Abstract

Yellow sand, that is, a heavy dust storm over the Far East is studied from a view-point of statistical and synoptic meteorology. Secular variation of annual number of days with yellow sand at Nagasaki is shown for the 62-year period between 1914 and 1975. The mean annual number of days is 5.3 days and 85 percent of them belong to spring.

The travelling velocity of dust particles estimated from the surface observations in Japan islands almost corresponds to the westerly wind at an altitude of 4 km. The size distribution of yellow sands collected at Nagasaki agrees with the power law distribution with the value of $\gamma = 3.0 \sim 3.5$, where γ is the radius exponent defined by $n(r) = Cr^{-\gamma}$.

1. ま え が き

黄砂は中国大陸の黄土地帯で風によって空高く舞い上げられた砂塵がひろがって空を覆い、ゆっくりと降下してくる現象をいうが、時として高層の風に運ばれて日本付近の大気をも著しく混濁させる。この現象に関する気象学的な記述は1930年代において既に小泉(1933)、岡田(1935)および淵(1939)らの総合的な報告や著述によってほぼ確立されている。また、第二次大戦後においても、一時、農業微生物学的見地から黄砂の研究が行なわれたり(たとえば、横尾, 1950)、高橋(1955)がその著書「動気候学」のなかで黄砂の拡散と運搬の機構を明らかにしている。しかしながら、戦後の気象資料の豊富な蓄積があるにもかかわらず、現象そのものの統計的研究はあまり示されていない。そこで、戦後の観測資料をとり込んでいくつかの観点から黄砂現象の洗い

* 現在 長崎県東彼杵町立千綿小学校

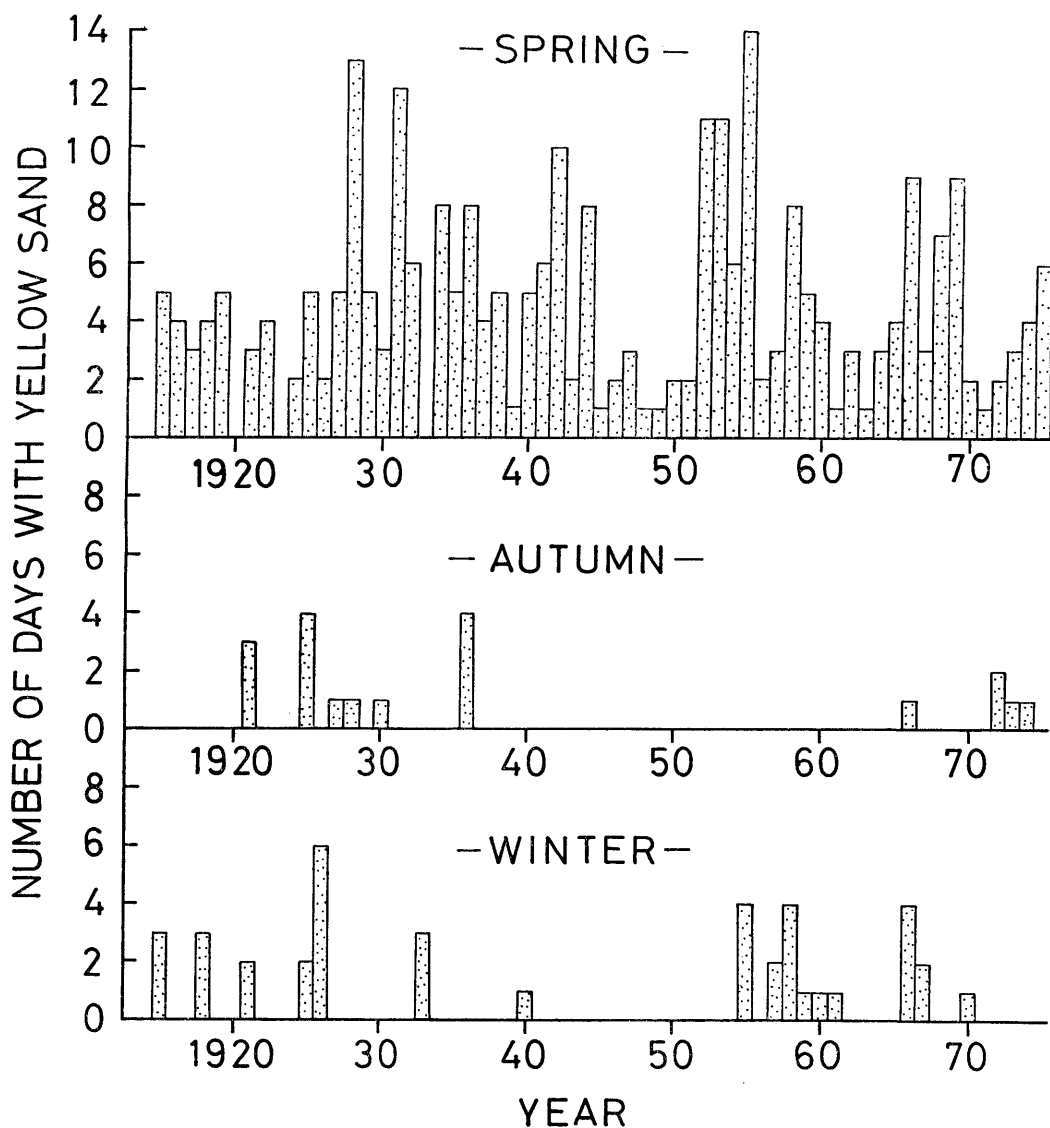
** 現在 大分県別府市立東山小学校校郷分校

直しを試みた。その結果をここに報告する。

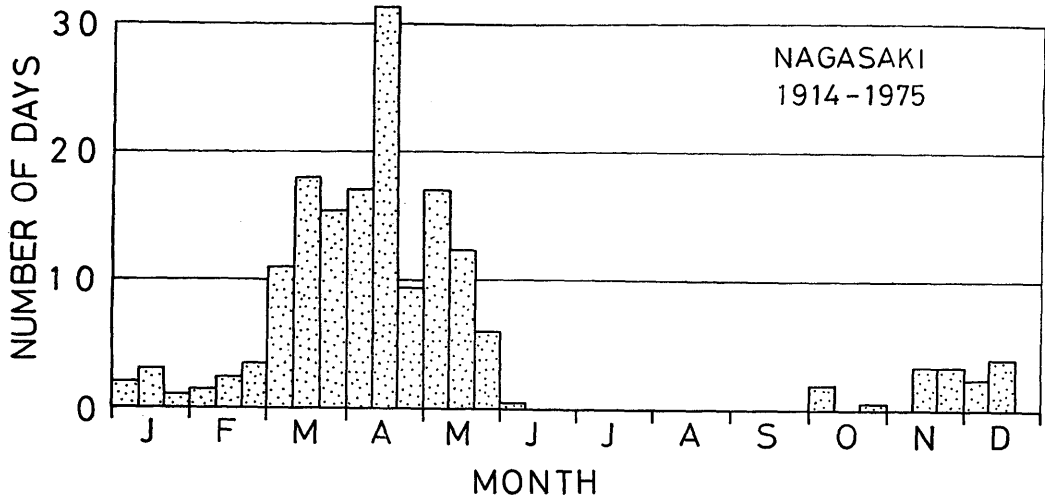
2. 長崎における黄砂出現の経年変化と季節変化

長崎海洋気象台の日原簿をもとに62年間(1914～1975)について黄砂の出現日数を整理した。長崎測候所としての設立は1878年にさかのぼるが、日原簿に黄砂の記録を明瞭に記すようになったのは1914年(大正3年)で、それより古い記録まではさかのぼることはできなかった。なお、この調査にあたり夏期の3ヶ月間(7月～9月)については調査対象から除外した。その理由は、この季節に黄砂はほとんど出現しないことがこれまでの報告(たとえば、淵, 1939; 横尾, 1950)により明らかにされているからである。

第1図は長崎における黄砂出現日数の経年変化である。図は上から順に春, 秋, 冬の3段に分



第1図 長崎における黄砂の季節別経年変化 (1914～1975)



第2図 長崎における黄砂の旬別出現日数 (1914-1975)

けて季節ごとの経年変化を示している。なお、季節区分は、3月～6月を春（ただし、6月は62年間で1日だけしか出現していない）、10・11月を秋、前年の12月と当年の1・2月を冬としている。図にみられるように、経年変化の振幅は割合大きく、黄砂の出現は多い年で年間18日、少ない年は0日であり、平均の年出現日数は5.3日である。なお、横尾（1950）は九州主要地点10ヶ所について20年間（1927～46）の黄砂日数を示したが、そのなかの長崎の日数を今回の結果と比較すると、今回得た日数は彼の日数の約1.5倍になっている。さらに、経年変化について根本（1975）は30年程度の長い周期性を示唆しているが、今回得られた資料を用いて時系列解析を行なった眞鍋ほか（1978）の結果によると、35年前後の Brückner 周期に対応すると考えられる成分がかなり強く含まれていることが明らかにされている。

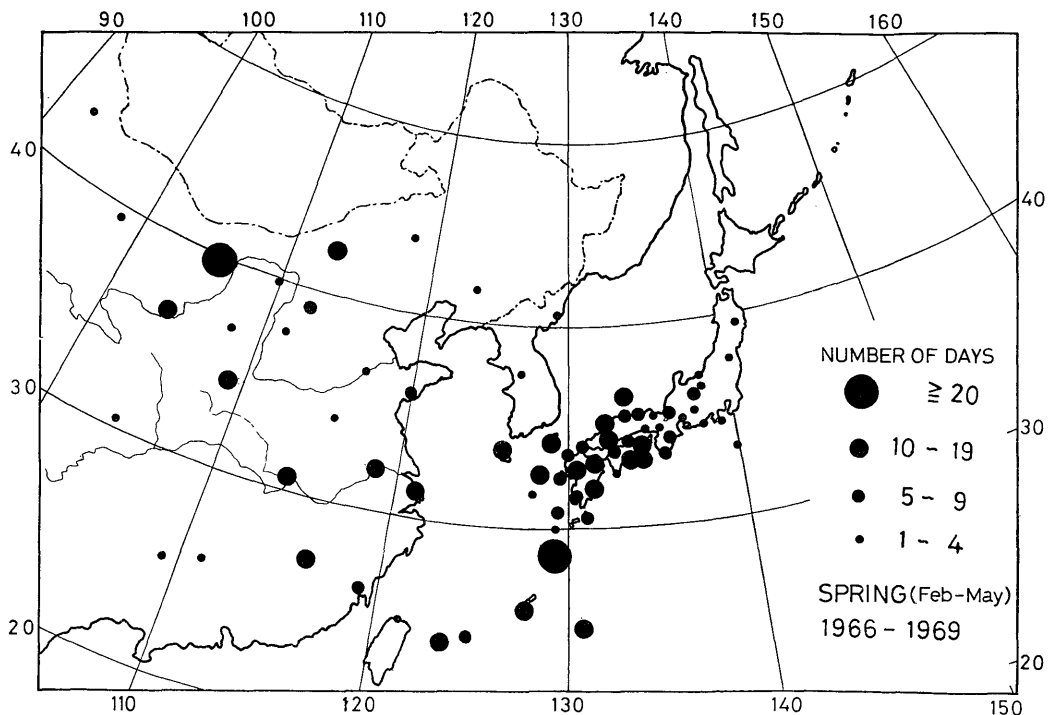
次に、黄砂出現の季節変化を第2図に示す。この図は上述の62年間における累積出現日数を旬別に表わしたものである。先に述べたように7月～9月の3ヶ月間は調査の対象からはずされているが、この図からもその期間に仮に黄砂が出現していたとしても、その回数は極くわずかであろうと考えられる。長崎での黄砂は全体として3月に入ると急速に出現数を増し、4月中旬頃に頻度が最大となる。月別の出現数でみると、3月よりも4月の方がほんのわずかだけ多い。黄砂は秋から冬にかけても若干の出現があるため、季節別にみると、春（85%）、冬（12%）、秋（3%）の順となる。年平均出現日数は5.3日であるから、長崎では平均して、春に4.5日、冬に0.6日、秋に0.2日の出現をみることになる。このような年変化の全体的な傾向は極東域全体のものではあるはずであるから、当然、これまでに得られた結果とよく一致している。

3. 黄砂の地理的出現分布

気象庁刊行の天気図（通称、印刷天気図）に掲載されている極東地域の気象通報地点から天気（通報記号ww）を手がかりに黄砂の出現地点を抽出し、その出現日数の空間分布を求めた。期間は1966～1969年の4年間とし、最も季節的に頻度の高い2月から5月までの4ヶ月間を対象とした。黄砂は ww=06 として記載されるから、この記号の通報日数を上述の期間について累積して出現回数として第3図に示した。ただし、この天気図には日本標準時で9時と21時の通報が載せ

られているから、いずれか一方の時刻に黄砂があれば黄砂の出現日とし、両時刻に出現があっても1日と数えた。モンゴルの気象情報が入って来ないために黄砂発源地付近の一部が空白になるものの、黄河上流域でゴビやオルドスの砂漠と接する地域で黄砂の出現が著しく、従来から示されてきた発源域とよく対応している。特に、内モンゴル自治区での出現が顕著にあらわれている。当然、この地方を低気圧の中心または前線が通過する際に黄砂粒子が舞い上げられることになる。

日本列島についてみると、近畿地方を境として明瞭に2つの領域に分かれ、東日本での出現が急激に減少していくことがわかる。しかし、同じ西日本とはいえ、比較的大気の清澄な半島や離島で出現頻度が高く、都市域ではそれより1ランク下位の出現数を示している。これは、都市ではその他の原因で大気が混濁している場合が多く、比較的希薄な黄砂を判別できないことによる、と考えられる。ところで、中国奥地の出現日数と日本の南西部での出現日数とはほぼ一致しているにもかかわらず、その経路上にある華北および朝鮮半島での出現は極めて少ない。これはいく分不思議であり、国情による黄砂の取扱い方の差異を推察させるようにも思える。しかし、済州島での出現日数は日本のその隣接地点とほぼ対応しており、単純に上述の理由で処理することには難点がある。図をよくみると、揚子江中・下流域での出現が割合多く、黄砂は全体的に発源域からやや南下しながら東進し、南西よりの風に乗って日本列島に到達することを示唆しているようでもある。黄砂は低気圧の前線帯で舞い上げられ、高層の西風に乗って飛来する。ところが、日本に黄砂が到達する頃には、その低気圧の中心も中国東北区から沿海州方面に移動している。従って、この間黄海付近の上空(約700mb)では気圧の谷を形成しやすく、高層風は経度125°付近で南東から南西へ風向を変える傾向にあり、出現分布とよく対応している。



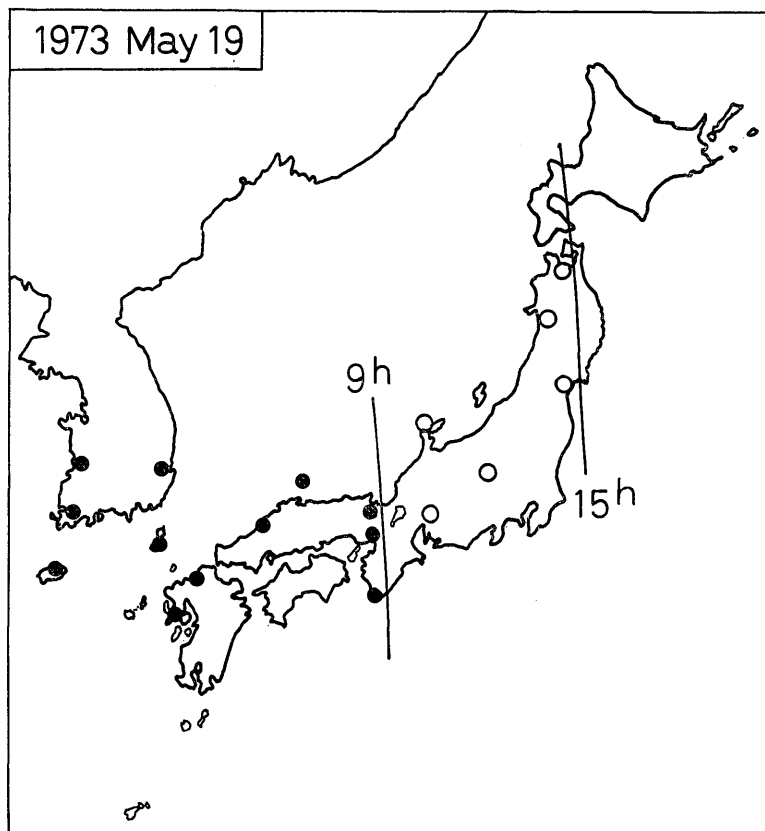
第3図 黄砂出現日数の地理的分布。1966—1969年の4年間の2月～5月における出現日数を4階級で示している。

また、低気圧中心に割合近い地域では黄砂が降水過程に取り込まれて、いわゆる黄砂として観測されない可能性も強くなる。このような2つの意味で、朝鮮半島付近に出現の少ない理由をあげることができる。

4. 黄砂の移動速度と高層の風

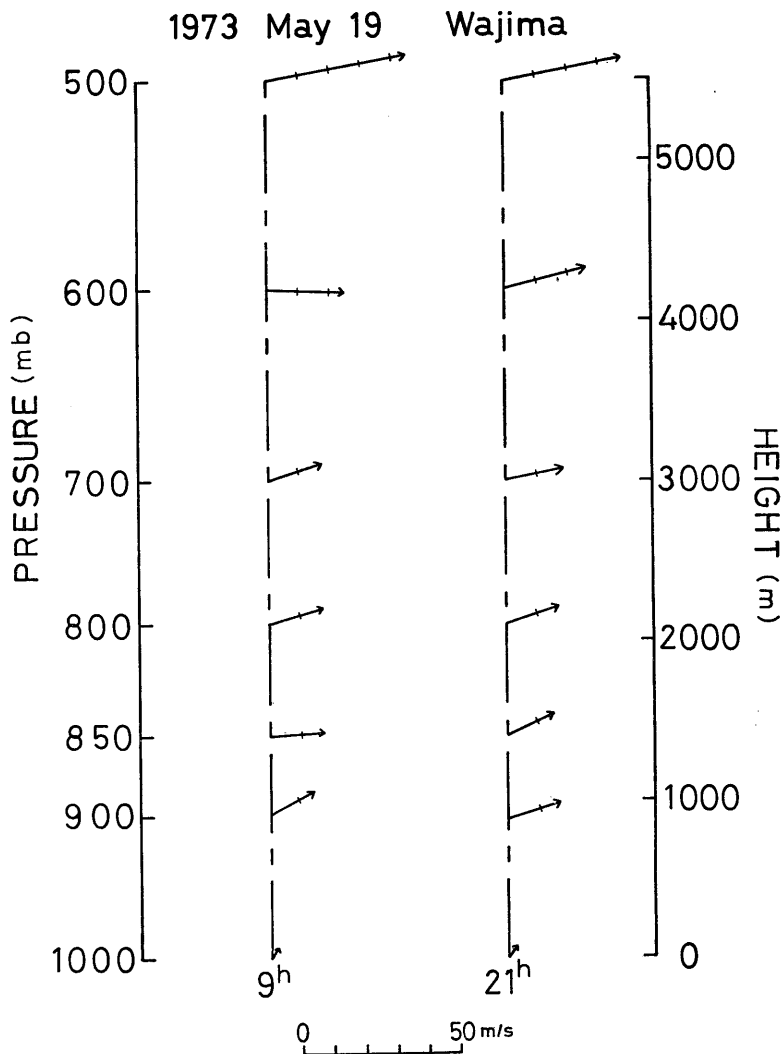
黄砂の飛来高度を推定する目的で、日本列島における地上での黄砂の移動速度を求め、そのときの高層の風向・風速との対応づけを試みた。移動速度の評価は9時と15時の地上天気図における黄砂出現の推移から各時刻における前面を設け、その間の移動距離により行なわれた。なお、地上天気図は長崎海洋気象台予報課で業務的に作成されているものを利用させていただいた。6時間における黄砂の移動距離を正確に評価するためには2つの時刻において出現の前面が明瞭でなければならない。9時に既に西日本に到達している黄砂を選び、しかも6時間後の前面もはっきり推定できるものでなければならないから、このような黄砂は割合に少ない。なぜなら、西日本では顕著でも東日本に移動するにつれて稀薄化し、15時の前面を推定できない場合が少なくないからである。このため、1973年から1977年までの5年間で、7例がこのように目的に適合するにすぎなかった。その7例は、当然、日本列島全域を覆うような大規模な黄砂と考えてよい。

第4図に1973年5月19日の例を示す。図で黒丸は9時における地上での黄砂出現地点で、前面は近畿地方を縦断している。また、白い丸は15時の出現地点を示すが、煩瑣を避けるために9時



第4図 地上観測による黄砂前面の移動（昭和48年5月19日）

の出現領域にある地点は記入されていない。15時の前面は仙台付近と推定され、地上で観測される黄砂は6時間のあいだに東に約520km移動したことになる。従って、その速度は秒速24mである。さて、このときの高層風を前面の移動域にあたる輪島の観測でみると、第5図のようになっている。この図で左側が9時、右側が21時の観測結果であるから、主として9時の観測値で対応させる必要があるが、時間に伴う変化の度合をみるには21時の資料も十分役立つ。各レベルからの矢印の方向は図の上を北とした場合の風下の方を示し、矢印上の毛羽は風速10m/sごとに印されている。9時の600mbにおける輪島の風向は西で、風速は25m/sであるから、地上での黄砂の移動の方向および速度とほぼ一致することがわかる。実際には、黄砂は地上に達するまでにゆっくりと降下してくることと上空ほど風速が大きいくことから、地上での前面よりも上空での前面の方が先行することになる。しかし、黄砂が天空を覆い、降下してくるまでに要する時間は場所によって変られいと考えられるから、黄砂の地上観測における移動速度と高層の風速が対応



第5図 輪島における高層の風向および風速の分布（昭和48年5月19日）

第1表 地上観測における黄砂の6時間の移動距離、移動の速度およびその速度に対応する高層風の高度

Date	Distance(km)	Velocity(m/s)	Height (m)
1973 Mar. 3	550	25	2500
1973 May 19	520	24	4000
1974 Mar. 10	550	25	4000
1976 Apr. 24	430	20	3800
1976 Dec. 18	800	37	4200
1977 Feb. 24	750	35	5500
1977 Mar. 15	530	25	3800
Mean	590	27	4000

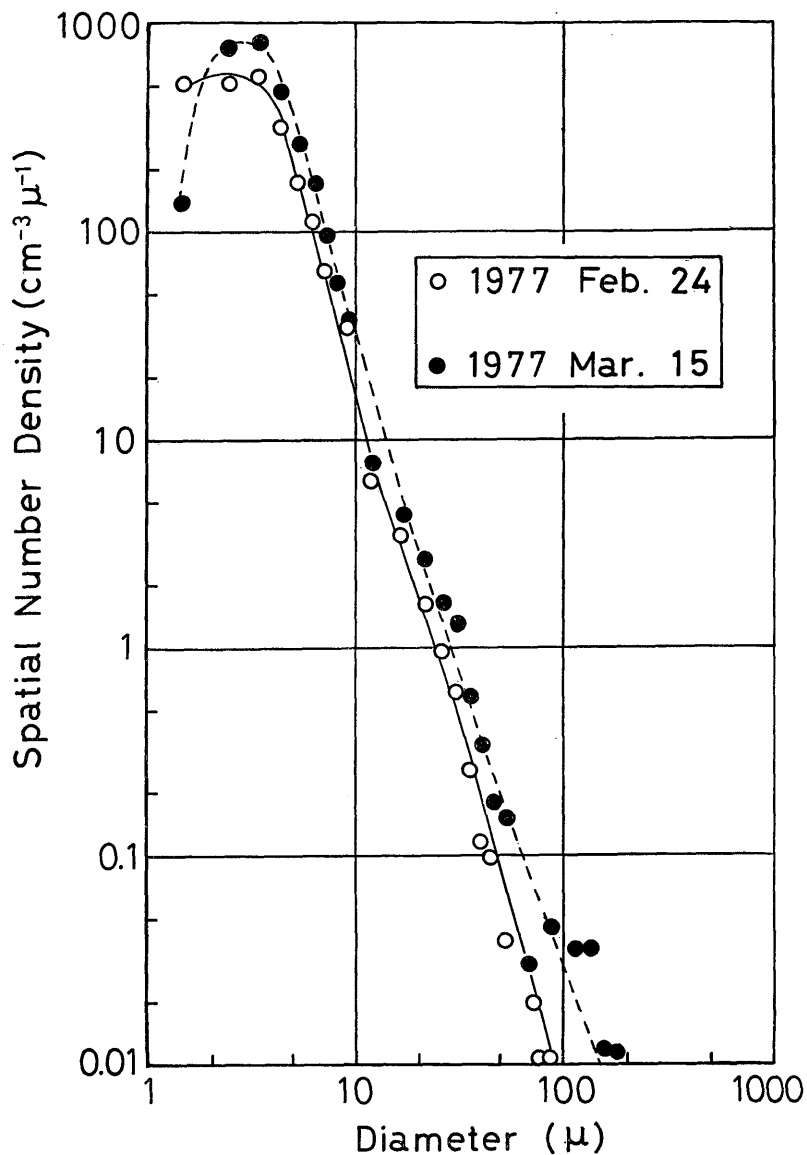
する高度で黄砂が運ばれるとみなすことができる。従って、第4図の場合、黄砂は高度約4000mの風に乗って移動しているものと考えられる。

このような手続きで、黄砂の移動速度から黄砂の飛行高度をまとめたのが第1表である。地上での黄砂出現分布は比較的まばらであるため、前面の引き方は一意的でなく、若干のあそびが生ずる。そのため、移動方向を16方位で明確に決めかねる場合があり、おおむね8方位で移動方向を推定している。この表より、黄砂の推定される平均飛来高度は約4000mであり、最も低いもので2500m、最も高いもので5500mあることがわかる。この平均高度は淵(1939)の記述とよく一致し、Idso(1976)の記述より1kmほど高い。

5. 黄砂粒子の粒径分布

1977年春に黄砂粒子を採集し、光学顕微鏡により写真撮影を行ない、その粒径分布を求めた。採集にはグリセリンを用い、外気をとり込んだ深さ17cmのガラス製デシケーターの底にこのガラスを置き、ふたを密閉して翌日まで放置した。この放置時間は20時間以上もあり、光学顕微鏡下で問題になる直径 1μ の粒子が17cmを静かに降下するに要する時間(約2時間)に比べて十分に長い。翌日そのスライドグラスにカバーグラスをかけたのち、大粒子は100倍で、小粒子は400倍で写真撮影を行なった。松平(1938)は神戸で同様のスライドグラスを用い、1~2分間風に直角に露出するという方法で粒径測定を行ない、直径 25μ のものが最も多いと報告している。しかし、このような方法では微小な粒子は気流とともに吹き流されて捕捉されない可能性が強いから、黄砂を沈降させる方法が有利である。実際の採集は1977年の2月24日と3月15日に行なわれた。この両日も第1表に掲げられていることから推察されるように、全国的な規模の大きい黄砂で、長崎では視程が1~2kmまでに低下した。採集された粒子が黄砂であることを確かめる目的で他日同様の方法で大気エアロゾルの採集を行なったが、通常の日には顕微鏡下で粒子がほとんど認められないことを確認した。従って、厳密にはスライドグラス上の粒子がすべて黄砂であると断言できないわけであるが、通常では起り得ないことからほとんどは黄砂とみなしてよいであろう。

第6図はこのようにして得られた粒径分布である。この図の横軸は μ 単位の直径を示し、縦軸は 1cm^3 当りの粒子密度で単位直径幅 1μ で計算されていることを表わす。両日の場合とも 1μ ~ 5μ の小粒子が圧倒的に多く、全粒子数の75%は 5μ 以下のものであった。また、スライドグラス上に現われた最も大きい粒子の直径は 200μ であった。直径1~ 2μ の粒径の小さい領域で粒子密度が落ち込んでいるが、これは光学顕微鏡および写真フィルムの解像力の限界によるものと考

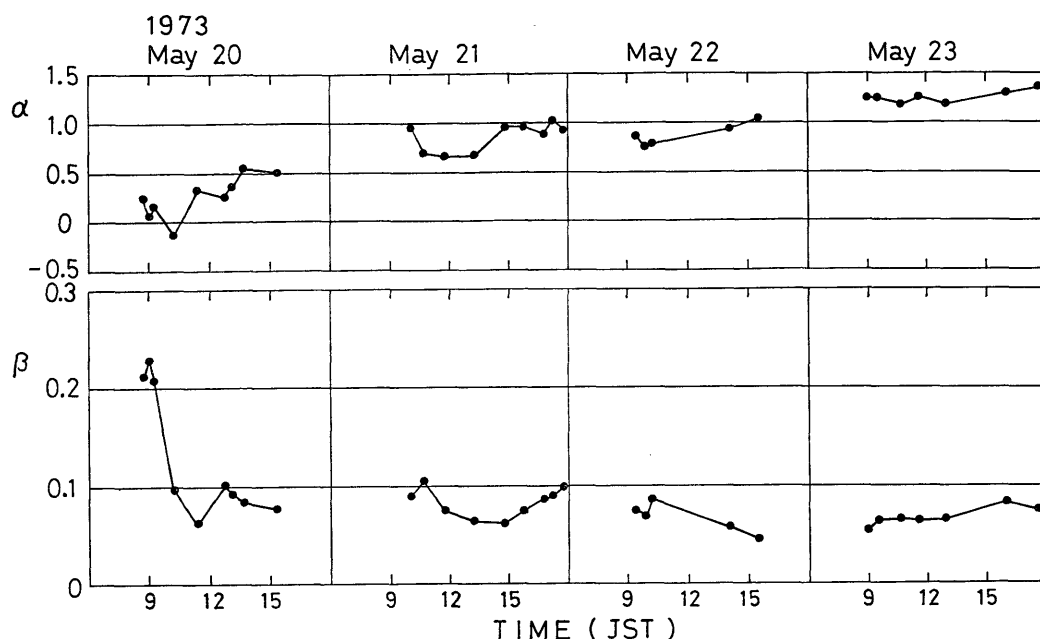


第6図 長崎で得られた黄砂粒子の粒径分布

える方が自然であろう。ところで、この図は黄砂の粒径分布が指数法則で近似できることを示唆している。すなわち、半径 r と $r+dr$ の間にある粒子の数を $n(r)dr$ とすれば

$$n(r) = Cr^{-\gamma} \quad (1)$$

と表わされる形は Junge の指数分布と呼ばれているが、半径で 2μ から 50μ の広い領域にわたって黄砂は γ が $3.0 \sim 3.5$ 程度の値で(1)式が成り立っている。ただし、 C は比例定数である。この γ の値は通常の大陸性エアロゾルの代表値 $\gamma = 4.0$ に比べるとやや小さく、黄砂は相対的に大粒の粒子が卓越していることをあらわしている。黄砂の機構を考慮すれば、大粒の粒子が多い分布になるのは当然のことと言える。



第7図 昭和48年5月20日から23日までの長崎における大気混濁パラメーターの変化

この事実を補強する資料として1973年5月における Epply 社製の 2 波長サンフォトメーターの観測結果を第7図に示す。この図の日付から判定できるように、この結果は第4図の黄砂が現われた翌20日から連続4日間にわたって Ångström の大気混濁係数 β と波長指数 α とを長崎で観測したものである。

エーロゾルの大気全層での消散係数を τ_A とすると、 α と β は

$$\tau_A = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

と定義される (Ångström, 1961)。

さらに、エーロゾルの粒径分布を (1) 式で表わされるような指数分布であると仮定すれば、Bullrich (1964) により

$$\alpha = r - 3 \quad (3)$$

であることが示されている。

長崎では5月19日朝から著しい黄砂に見舞われ、20日10時までその名残りが続いた。20日朝の大きい β の値がそれをよく表わしているが、同時に α が 0.2 という小さな値を示していることも注目し値する。すなわち、(3)より、指数分布を仮定すれば20日朝の r の値は3.2となり、第6図の実測と極めてよく一致する。なお、その後の β と α の推移は、黄砂とともに気圧の谷が通過したのち、大陸高気圧の中心が長崎に到達するまでの時間変化を示すものである。優勢な大陸気団の張り出しとともに α が増加し、粒径分布が徐々に r の大きくなる方向に移行してゆくことが明瞭にあらわれている。

6. 考 察

比較的入手しやすい気象資料をもとに黄砂についていくつかの面から解析を行なったが、先人の業績を時間的に延長し追試を試みたものも少なくない。さらに、本研究の黄砂についての記述の一部には明瞭な証拠を欠くものがあり、厳密にはまだ推察の段階の議論も含まれている。たとえば、中国北部や朝鮮半島での黄砂出現数について若干の疑問を示したが、最近の気象衛星による観測はこの問題に明快な結論を与えてくれるものと期待できる。また、黄砂粒子群の移動速度も同様の資料からより正確に決定できるであろう。その意味で、濃密な黄砂だけしか同定できないものの、静止衛星による資料の蓄積は時間変化が明瞭に把握できる点で大いに期待される。

さらに、民間航空機の往来の多い今日においては、パイロットが行なう気象記録の中に黄砂の記録を発掘できる可能性も十分ある。このような記録は、特に、黄砂の上限を高層資料から得られるものと対比させることが出来るから、非常に有益なものとなる。従って、黄砂も本格的に立体的に追跡される時代に入ったと言える。

粒径分布については、他のエアロゾルと同じように指数法則に従うものと考えられるが、本研究では光学顕微鏡による観察のみであるから数 μ 以下の小粒子については明言できない。その意味でも、電子顕微鏡による観察を併用し、より広範な粒径の領域についてその分布を明らかにすることが残されている。その際、黄砂粒子と非黄砂粒子の判別が特に小粒径領域で問題になる可能性があり、十分な配慮が必要になるものと考えられる。

最後に、黄砂は大気混濁の極端な例として研究の対象になるばかりでなく、大気の大規模で立体的な運動を体験的に児童・生徒に説明できるから、気象教育上も有益な素材として活用できるものと考えられる。

謝 辞

本研究にあたり種々の便宜を計っていただいた長崎海洋気象台職員各位に厚くお礼申し上げます。特に、田畑七郎海上気象課長には有益な御助言と励ましを受けた。心から謝意を表します。2波長サンフォトメーターの結果は中上徹氏（現在、熊本県松島町立今津中学校）の卒業研究を利用させていただいた。

参 考 文 献

- Idso, S. B., 1976 : ダスト ストーム, サイエンス (日本経済新聞社刊), 6, No.12, 94-100.
- 岡田武松, 1935 : 気象学 (下巻), 第8章, 岩波書店, 530pp.
- Ångström, A. K., 1961 : Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, 13, 214-223.
- 小泉浩吉, 1933 : 黄砂ノ研究 (第一報, 黄砂ノ気象), 国民衛生, 9, 983-1026.
- 高橋浩一郎, 1955 : 動気候学, 第5章, 岩波書店, 316pp.
- 根本順吉, 1975 : 黄砂, 万有百科大事典, 第18巻, 小学館, 227.
- 淵 秀隆, 1939 : 黄砂に就いて, 気象集誌, 17, 473-486.
- Bullrich, K., 1964 : Scattering radiation in the atmosphere and the natural aerosol. *Advances in Geophysics*, 10, 99-260.
- 松平康男, 1938 : 神戸で観測した黄砂に就いて, 海洋気象台彙報, No.113, 1-5.
- 眞鍋大覚, 佐藤洋子, 荒生公雄, 1978 : 黄砂発現の周期, 日本気象学会九州支部講演要旨集, No.1, 24-27.
- 横尾多美男, 1950 : 九州に於ける黄砂と麦の黄錆病との関係に就いて (第1報), 西部管区気象研究会誌, 6, 47-52.