

# 1章 黄砂現象——大陸からの小さな旅人たち

荒生 公雄

## 1節 春の風物詩

長崎県の人々は黄砂現象をよく知っている。黄砂現象に関するアンケート調査を行えば、長崎県民の正答率は間違いなくトップグループに入ることであろう。アジア大陸からの北西の寒気が弛み、春の足音を感じ始める頃、黄砂は春を告げる役割を担って日本列島にやってくる。冬の長崎県地方はやや曇天が多いものの、晴天時には清澄で美しい青空となる。それがひとたび黄砂現象ともなれば、空は白っぽく混濁し、空と下界の様相を一変させる。本来、黄砂とは「黄色い砂」であって、砂粒であるから、大気現象（天気）ではない。それゆえ、天空が黄砂（砂塵）によって著しく混濁する現象は正確には黄砂現象と言わなければならない。しかし、通常、その区別はかなりあいまいで、大気現象も単に黄砂と呼ばれる。同様のことは、雨や雪にも言える。雨や雪は大気現象の意味をもつとともに、雨粒や雪片の意味にも用いられる。雨粒や雪片は目に見えるが、黄砂粒子は小さいので、実際に降っている様子は見えないので、日常会話での「黄砂」はほとんどの場合黄砂現象の意味で用いられている。ただし、車の屋根や窓ガラスに堆積した土壌を指して、黄砂という場合は明らかに砂塵の意味である。なお『広辞苑』によれば、中国では「土の降るさま」を霾（ばい）という漢字で表し、黄砂現象と同じ意味をもつ。また、気象学では、大気中のさまざまなダストのことを総称してエアロゾル（aerosol）と呼ぶので、黄砂は「黄砂性エアロゾル」と呼ばれることもある。

「春一番」もまた春の前触れとしてよく知られる大気現象であり、黄砂現象と春一番とは無縁ではない。大陸で発生した早春の低気圧はしばしば日本海を経て、日本列島に到達する。その低気圧が日本海を東進するとき、雨を伴うこともあるが、日本列島には温暖な南風が吹き込み、突如として春めいた陽気となる。低気圧の南西側に連なる寒冷前線の背後に黄砂粒子が含まれているこ

とが多く、黄砂現象は低気圧に伴う寒冷前線の通過したあとに現われる。春一番に限らず、春の寒冷前線のあとに黄砂現象が現われのはごく一般的なことである。長崎県地方では、黄砂は春の風物詩として、テレビ報道や地方新聞をしばしば賑わし、県民は（本当は不快なはずの）黄砂を、季節の節目の一つとして結構楽しんでいるようにみえる。

## 2 節 黄砂現象の出現頻度

黄砂現象は、気象台や測候所における気象観測項目の一つで、その判定基準は「目視観測による視程（水平方向の視距離）が10km以下」と定められている。すなわち、原則として、天空が黄砂に覆われていても視程が10km以上の場合は黄砂現象として記載されない。ただし、気象官署の独自の判断により、視程が10～12km程度に限り黄砂と記載されることがあるようである。

図1は、東アジアにおける4年間（1966～1969）の黄砂現象を観測した回数

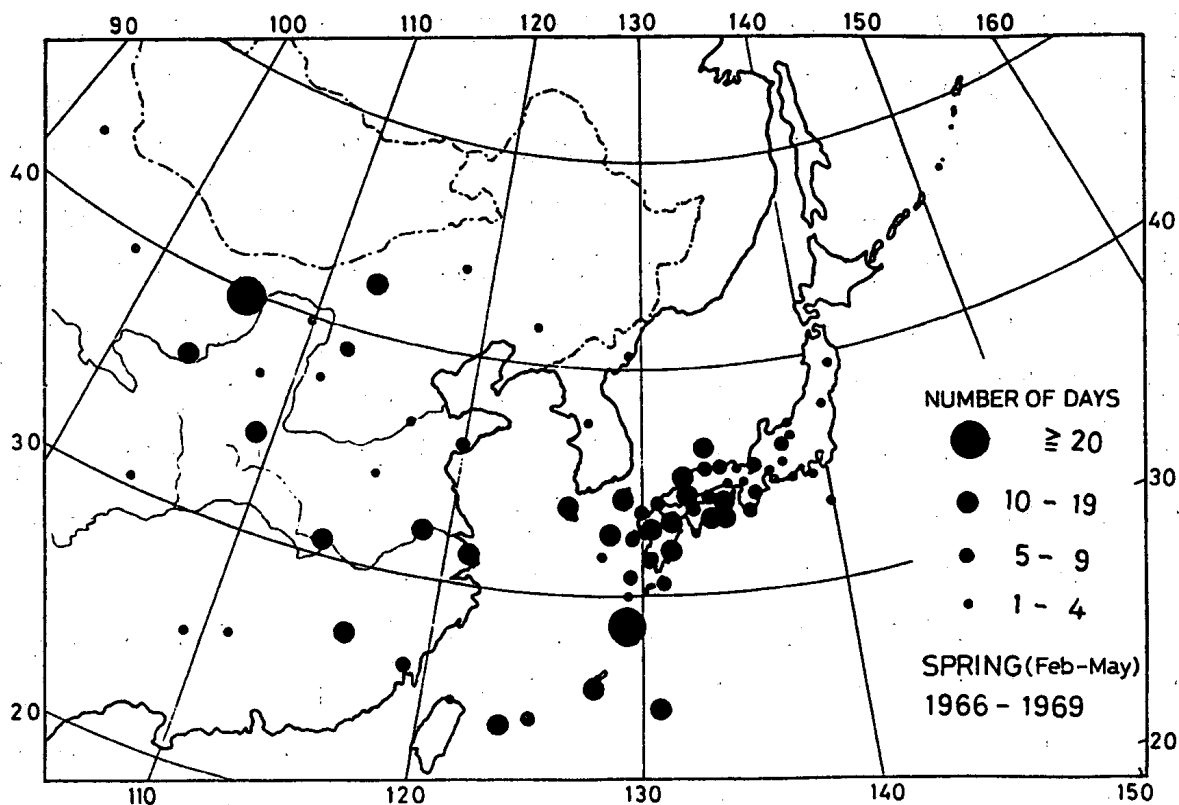


図1 東アジアにおける黄砂現象の出現頻度の分布（荒生ほか、1979）

## 1章 黄砂現象——大陸からの小さな旅人たち

を示す<sup>1)</sup>。黄砂の出現日数を4つのランクで示している。日本列島に注目すると、明らかに西日本側で出現頻度が高い。中部地方以東ではほとんど出現していない。大陸の出現分布にはかなり差異がある。図1のような結果になることには次のような事情があると考えられる。

- ① 大陸では、比較的頻繁に局地的に砂塵が舞い上げられているために、大規模な黄砂現象と局地的な砂塵嵐との区別がつきにくく、正確に記載しにくい状況にある。ただし、黄河の上流部では、黄砂現象の発源域であるため、かなり注意深く観測されていることが読み取れる。
- ② 西日本での春の空気は視程30km程度に澄んでいるので、黄砂の飛来は明瞭に識別でき、かなり正確に観測されている。
- ③ 東日本では、黄砂の濃度が薄く、視程が10km以下には低下しないために見逃されやすい。また、空の濁りが黄砂なのか、都市内の大気汚染なのか、あるいは局地的な土壌の舞い上がりなのかの区別がつきにくい。

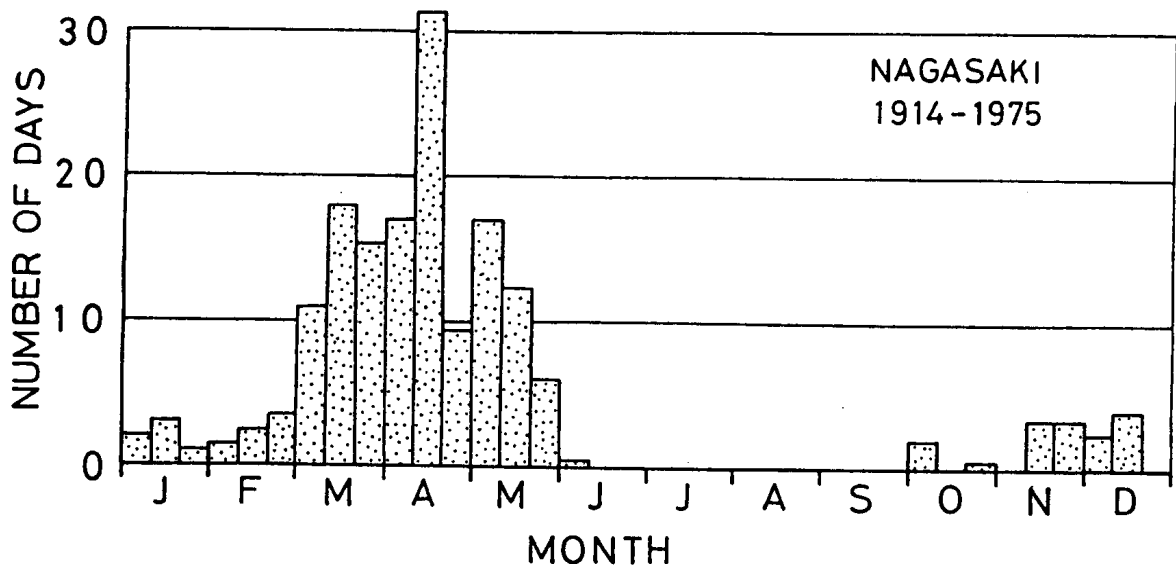


図2 長崎海洋気象台の観測による旬別の黄砂現象の出現回数（荒生ほか、1979）

このこととの関連でちょっと脱線すれば、昔の小学校唱歌「おぼろ月夜」は、明らかに「春がすみ」を詠った歌詞である。歌詞の状況から推察すると視程はそれほど悪くないので、西日本よりも東日本の春の夕空を描写したものと言えそうである。

図2は長崎海洋気象台における62年間（1914～1975）の黄砂の観測回数を旬

別に示したものである<sup>1)</sup>。黄砂は3月から急増し、4月中旬にピークを迎える。最近の10～15年の期間でみると、5月上旬に大規模な黄砂現象が多発し、4月末から5月上旬のゴールデンウィークのうちの数日は黄砂に覆われていることが多い。夏は太平洋高気圧の影響下にあるため、黄砂がほとんど発生しない。中秋から冬にかけては再び大陸の高気圧が優勢となるので、わずかながら黄砂が観測される。図2のデータによる長崎における黄砂の年間出現日数は平均5.3日、春季の出現日数は平均4.5日となる。これは平均値であり、最多となった1955年には年間18日（冬4日、春14日）に及んだ。

### 3節 黄砂の大気光学

#### (1) 黄砂粒子の大きさ

写真1は、1982年5月5日の黄砂現象のときに長崎大学においてインパクターによって採集された砂塵の電子顕微鏡写真である<sup>2)</sup>。撮影者の山野牧さん

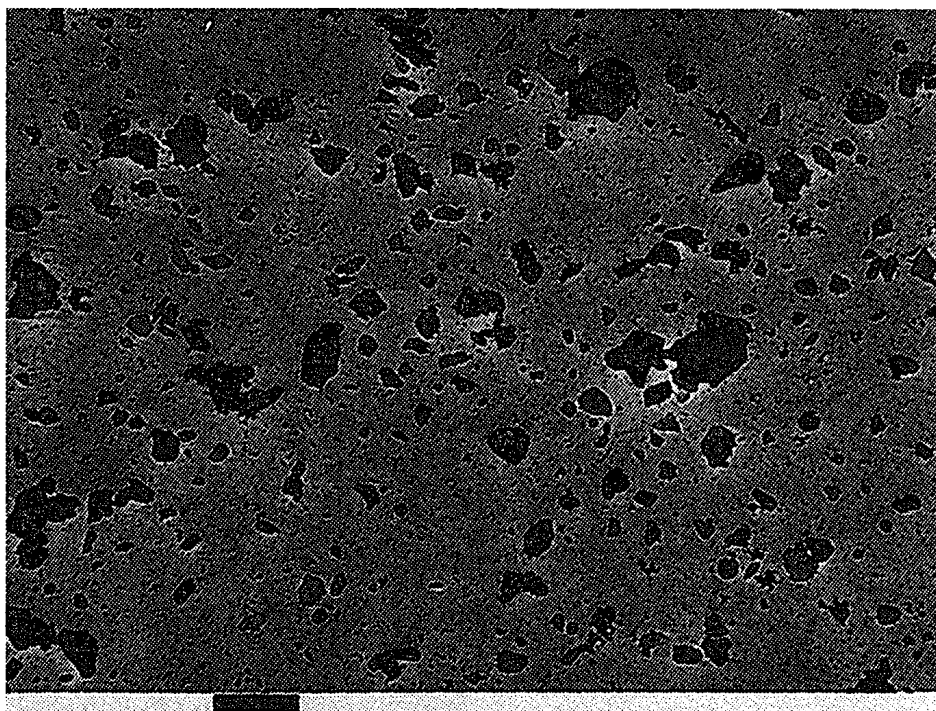


写真1 1982年5月5日に長崎で採集された黄砂の電子顕微鏡写真；黒い横棒の長さは10 $\mu$ m（撮影者：山野牧氏）

## 1章 黄砂現象——大陸からの小さな旅人たち

は、当時、東北大学の大学院学生で、観測班の一員として長崎大学に滞在中であった。写真の下にある横長の黒い太線の長さは $10\mu\text{m}$ <マイクロメートル>であるので、最大のもので $10\mu\text{m}$ 程度であり、平均的な黄砂粒子は直径 $2\sim 3\mu\text{m}$ であることがわかる。また、粒子の直径を $8\sim 9$ 段階に分級してその質量を測定するアンダーセンサンプラーによっても、直径数 $\mu\text{m}$ の黄砂粒子が多いことが明らかになっている<sup>3)</sup>。黄砂時のアンダーセンサンプラーのフィルターに積もったダストの色合いを観察すると、直径 $1\sim 10\mu\text{m}$ の数枚のフィルターの上のダストは明らかに黄色を呈し、黄砂であることが一目瞭然である。一方、小粒な粒子（サブミクロン粒子）はほとんど真っ黒色であり、黄砂ではなく、すすや煙の粒子であることがわかる。

### (2) レイリー散乱とミー散乱

大気中のエアロゾルによる可視光の散乱過程は、レイリー散乱とミー散乱に

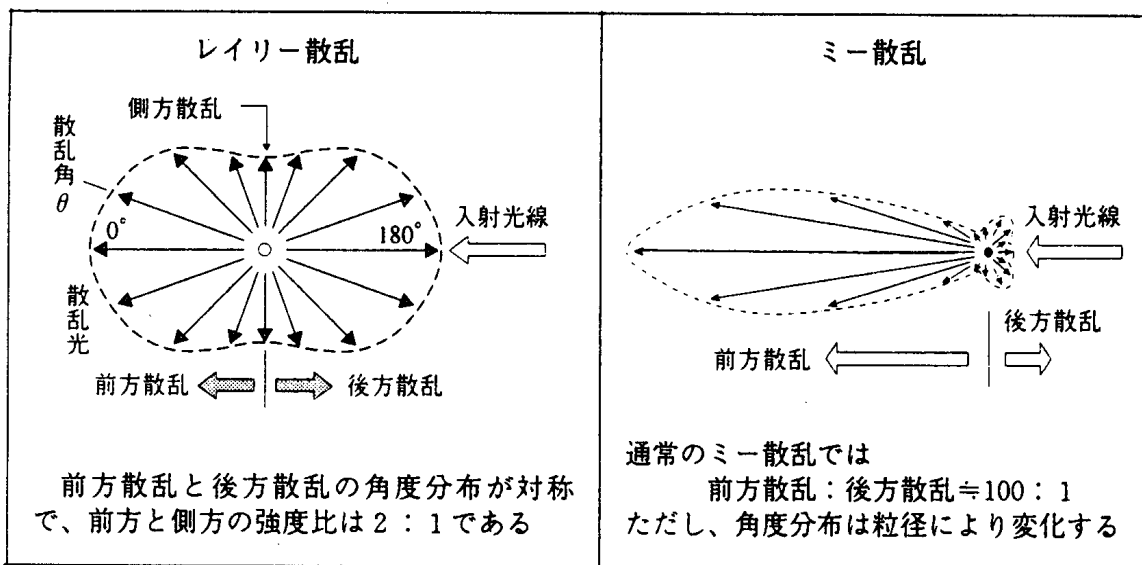


図3 レイリー散乱とミー散乱の概念図

大別される。図3に示すように、散乱とは微小粒子に光が入射したときに、入射光の一部が四方八方にまき散らされることを言い、光のまき散らされ方は粒子の大きさによって2種類に分類される。すなわち、

- ① レイリー散乱：空気の分子（ $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ など；直径 $0.1\text{nm}$ <ナノメートル>）またはそれと同程度の非常に小さなダストによる散乱を言う。前方散乱の強さと後方散乱の強さは等しいが、散乱の強さは波長の4乗に反比例するので、散乱光は青色側（短波長）で強く、赤色側で弱い。晴天の澄み

きった空が青く見えるのはレーリー散乱が優勢なためである。

- ② ミー散乱：ダストの直径が大きい場合 ( $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 程度)、散乱の波長依存性が弱まり (波長の4乗から、次第に、1乗 $\sim$ 0乗と反比例の関係が弱まる；0乗の場合には波長に無関係)、レーリー散乱よりも前方散乱が強くなる。ミー散乱の代表例は雲粒 (直径約 $10\mu\text{m}$ ) による散乱で、あらゆる波長がほとんど同じ強さで散乱するので、雲は白く見える。

直径 $2\sim 3\mu\text{m}$ の黄砂は大粒子の部類に属し、波長依存性の弱いミー散乱体である。そのため、黄砂が大量に存在すると、空の色合いはやや暗い白色を呈する。2種類の散乱過程にはかなりの違いがあるので、エアロゾルの大きさや濃度によって空の明るさや色合いは大きく変化するわけである。なお、1回の散乱で四方にまき散らされる光はごく一部に過ぎず、入射光の大部分はその粒子の影響を受けずに透過 (直進) する。しかし、大気中の気体分子もダストも大量に存在するので、全体としてはヒトの目に感じるような光学現象になるのである。

### (3) ミー散乱理論による黄砂の解析

図4は長崎大学で観測された1988年4月の2日間における直達日射量と水平面日射量の記録である。上は清澄であった4月15日、下は一日中黄砂現象が観測された4月19日の記録である。太い実線は直達日射量、薄く細い線は水平面日射量の時間変化を示す。直達日射計は、太陽面からの放射エネルギーを光線に直交する平面で測定するので、受光器を内蔵する鏡筒は太陽を常に追跡するように方角が変化する。一方、水平面日射計は、水平に置かれた受光面が斜めから射し込む太陽光と天空全体の散乱光の両方を測定するもので、全天日射計とも呼ばれる。太陽高度が低いときは直達日射量の方が強く、太陽高度が高くなると (この日の南中時で約 $65$ 度)、水平面日射量の方が強くなる。もちろん、曇天のときの日射量は著しく低下するので、図4の場合は両日とも朝から夕方まで晴天であった。春の晴天はそれほど珍しくはないが、黄砂現象下での一日中の晴天は非常に珍しいケースである。

晴天時と黄砂時の日射量の変化は一目瞭然である。すなわち、太陽南中時 (12時20分頃) で両日の直達日射量と水平面日射量を比較すると、

1章 黄砂現象——大陸からの小さな旅人たち

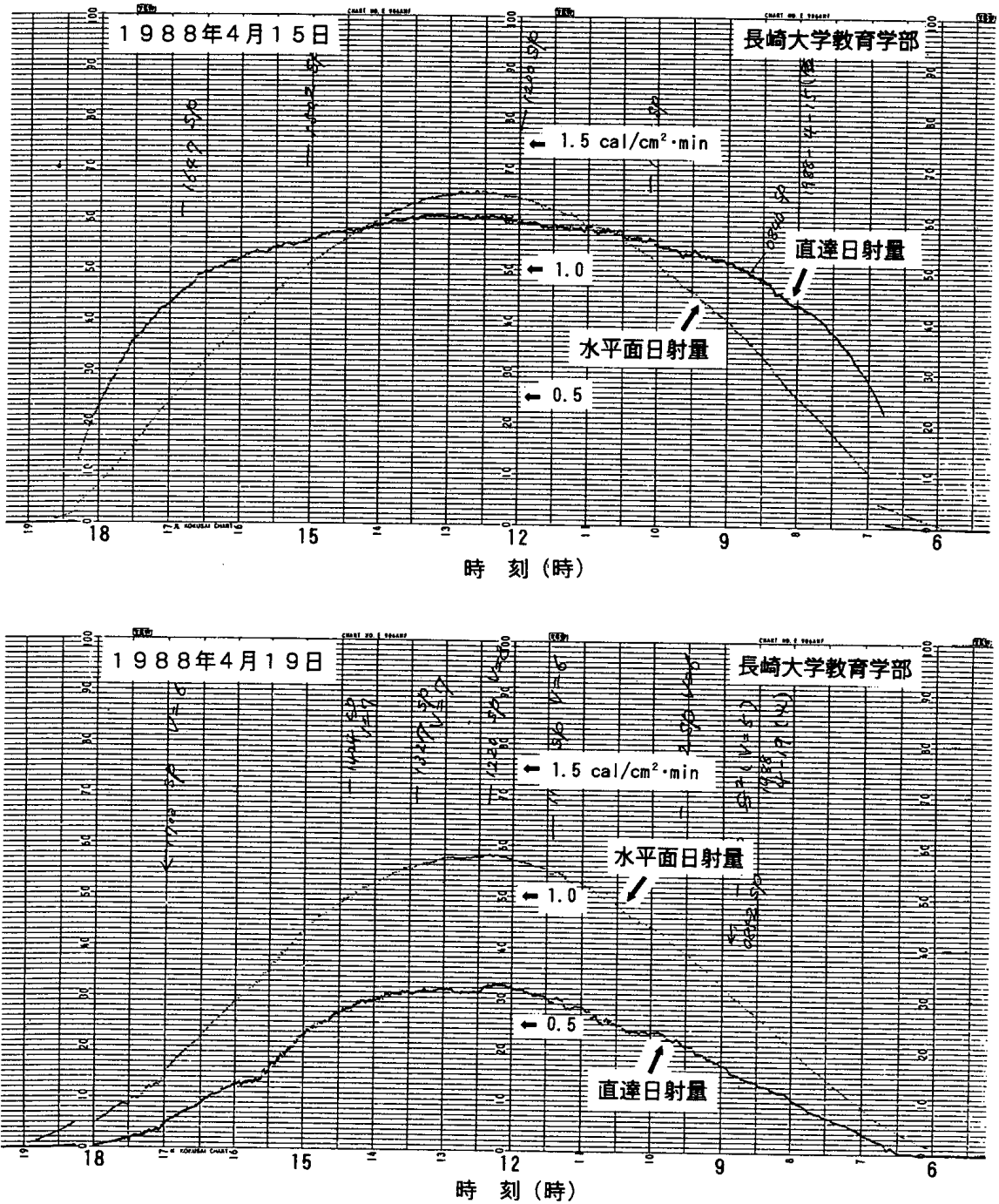


図4 長崎大学教育学部屋上で観測された直達日射と水平面日射の記録

4月15日 直達 1.22cal/cm<sup>2</sup>min 水平面 1.30cal/cm<sup>2</sup>min

4月19日 直達 0.63cal/cm<sup>2</sup>min 水平面 1.16cal/cm<sup>2</sup>min

となり、直達日射の違いが大きい。晴天時（15日）に比べて、19日の直達日射量は約0.6cal/cm<sup>2</sup>minも小さく、減衰した直達日射量の大部分は前方への散

乱光となって水平面日射量に変わっていた。このとき、携帯型の4波長サンフォトメーターによる観測も行っていった。図4の記録紙上にある数字とspの文字がサンフォトメーターの観測を示す。また、Vのあとの数字はその時の視程(km)を表しており、19日の最低視程は5kmであった。

上で述べたような直達日射の減衰は、大気中のダストの濃度にほぼ比例するので、「大気混濁係数」と呼ばれるエアロゾルによる「濁りの度合い」を求めることができる。直達日射計の観測からは「山本の混濁係数」、サンフォトメーターの観測からは「オングストロームの混濁係数」を求めることができる。

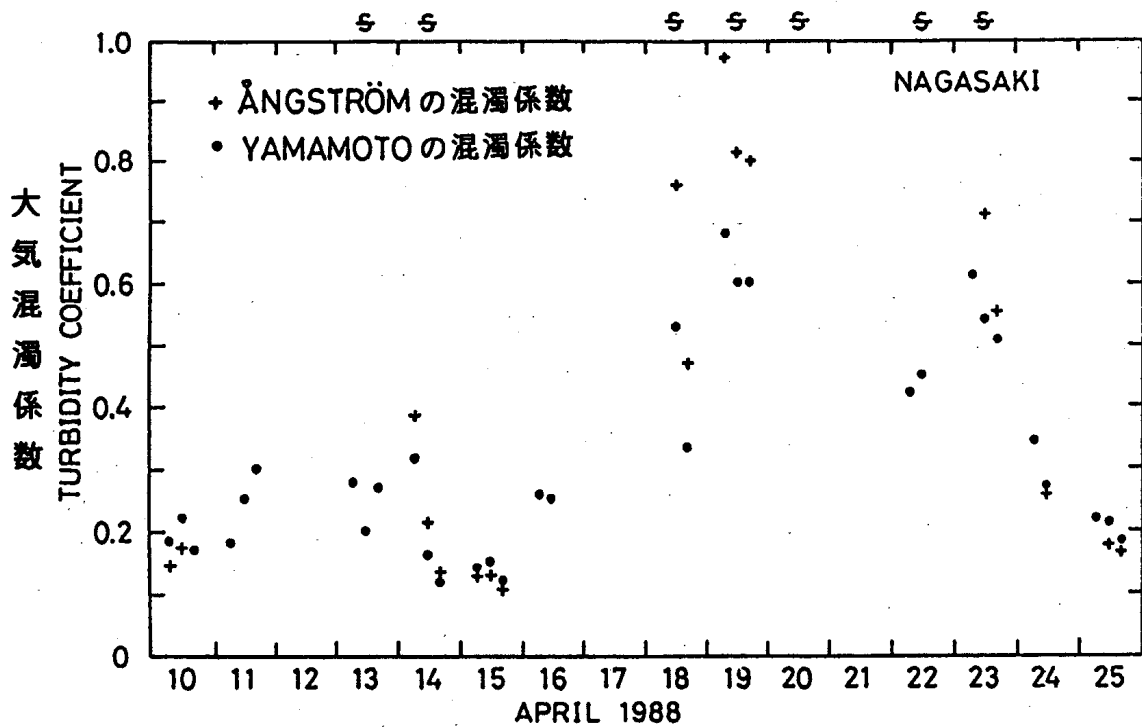


図5 1988年4月の長崎大学における2種類の大気混濁係数の日変化

図5は1988年4月10日～25日に長崎大学で観測された2種類の大気混濁係数の変化の様子を示す。図から明らかなように、2種類の混濁係数は同じ大気状態に対して数値は異なるが、黄砂のときには著しく大きな値(0.5～1.0以上)を示し、清澄なときには0.1～0.2程度の小さい値になっている。特に、19日の混濁係数は非常に大きい。図の上を示したSの文字に横線のついている記号は、長崎海洋気象台で黄砂現象が観測された日を意味する。幸いにして、2つの混濁係数の値の違いは理論的な仮定の違いに由来するので、数学的に両者の



1章 黄砂現象——大陸からの小さな旅人たち

あいだには互換性がある。また、筆者らが提案した方法<sup>3)</sup>により、粒径分布を仮定すれば、2つの混濁係数から単位気柱あたりの砂塵の体積を推定できる。

図6は同じ期間に得られた2つの混濁係数から黄砂の体積濃度を推定した結果である。図中の実線上の数字は気柱あたりの砂塵の体積を<リットル/km<sup>2</sup>>で示している。オングストロームの混濁係数が0.8以上であった4月19日には、450~500リットル/km<sup>2</sup>の砂塵が上空に存在していた。この質量は、日本国内で推定された砂塵の質量としては最大級のものであり、この日の黄砂現象は特筆に値する事例であったと言える。体積1リットルは水(密度1g/cm<sup>3</sup>)1kgに相当し、砂塵(平均密度2.6g/cm<sup>3</sup>)の1リットルは2.6kgに相当する。したがって、500リットルの砂塵は1300kg(1.3トン)である。すなわち、長崎地方の大規模な黄砂現象においては面積1km<sup>2</sup>あたりの上空に1トン程度の砂塵が含まれているわけである。ただし、そのために

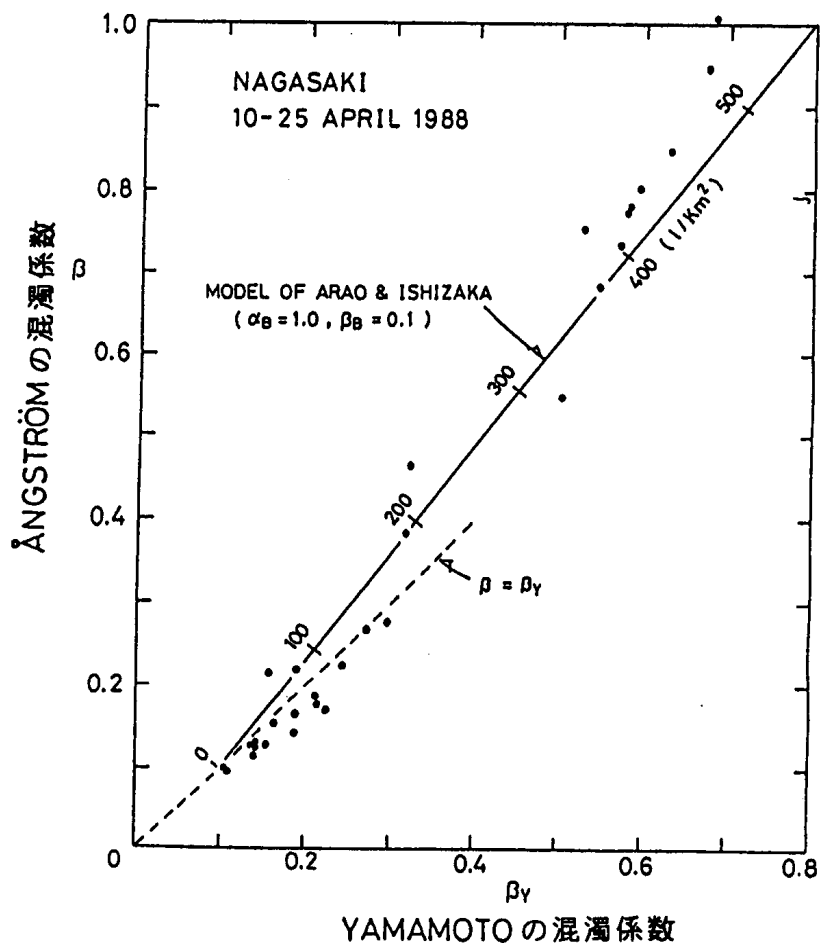


図6 1988年4月の長崎大学における大気混濁係数と砂塵の体積

気圧が著しく増加することはない。空気は1 km<sup>2</sup>あたり約1万トンにもなるからである（砂塵は空気の1万分の1）。それでも、九州全域約4万km<sup>2</sup>の上空にこの程度の砂塵が漂っていれば、質量は4万トンとなり、4トン積みトラックの1万台分に相当する。

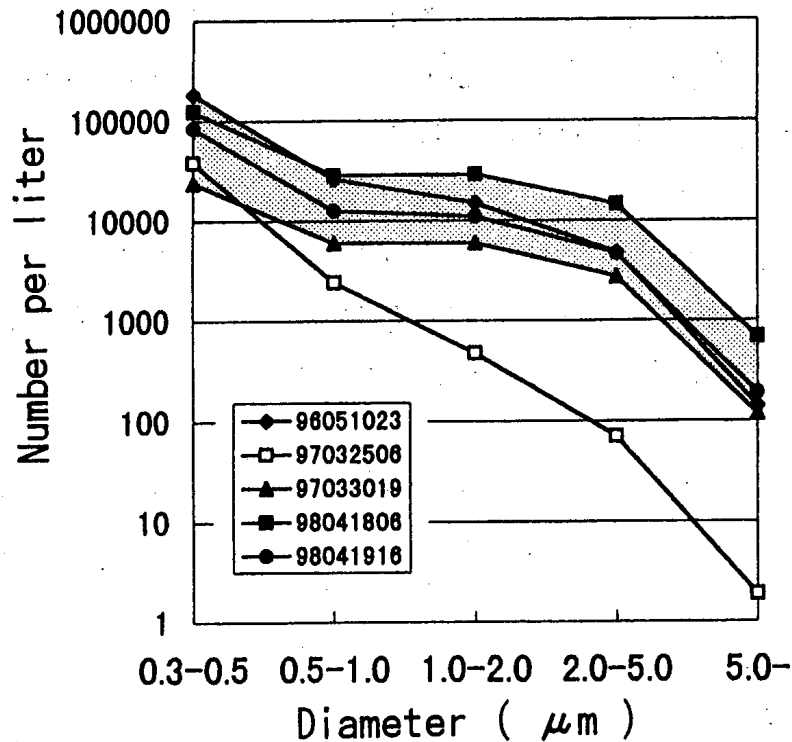


図7 長崎大学において光散乱式粒子測定器で測定されたエアロゾルの粒子濃度（荒生、坂口、1999）

日射量による推定は、晴天のときには可能であるが、曇天の場合は不可能である。そのため、曇天時の砂塵濃度や粒径分布の測定は光散乱式粒子測定器に頼らざるを得ない。長崎大学で測定された結果が図7である<sup>4)</sup>。横軸は粒子の直径、縦軸は粒子数（空気1リットル当たり）を示している。影の部分は黄砂現象時の測定値であり、横軸に最も近いラインは清澄時の粒径分布である。この図から、黄砂時の大粒子数は清澄時の100倍も多いことがわかる。図7の最上部にある1998年4月18日06時の視程は5 km（長崎海洋气象台）であったので、1988年4月19日の場合（視程5 km）も非常に濃密な黄砂であったと推察できる。

#### 4節 環境科学としての黄砂現象

黄砂現象にはさまざまな課題が残されている。今後の黄砂現象に関する環境科学的な課題や意義を個条書き形式で記して「結び」とすることにしたい。

- (1) 黄砂の輸送経路は、大陸からの大気汚染物質の経路でもあるので、黄砂の流れを追跡することは、酸性物質の輸送経路を推定する手がかりとなる。
- (2) 地球の温暖化傾向により、大陸内では砂漠化が進行すると予想されており、黄砂現象は砂漠化の進行を反映する指標として活用できる。
- (3) 黄砂粒子は氷晶核としても重要な役割を演じるので、地球温暖化による水蒸気の増加と豪雨多発との関連からも注目する必要がある。
- (4) 地上からの黄砂現象の光学的観測と、人工衛星からの観測とを結合することにより、温暖化予測の精度向上に必要な情報を得ることができる。
- (5) 黄砂のなかに含まれるカリシウムCaは酸性雨を中和する作用があるので、酸性雨の抑制に関する研究にも有用である。

#### 参考文献

- 1) 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、No.30、67—74。
- 2) Tanaka, M., T. Nakajima, M. Shiobara, M. Yamano and K. Arao, 1989: Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 at Nagasaki—Part I. Observations. J. Meteor. Soc. Japan, 67, 267—278.
- 3) Arao, K. and Y. Ishizaka, 1986: Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. J. Meteorological Society of Japan, 64, 79—94.
- 4) 荒生公雄、坂口千恵美、1999：光散乱式粒子測定器で観測された長崎の黄砂現象：1996—1998、長崎大学総合環境研究、第1巻、第2号、175—186。