

エアロゾル・黄砂：大気科学・気象学における居場所

—2010年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演—

岩 坂 泰 信*

はからずも日本気象学会藤原賞を受賞することになり、大変光栄に思っております。まずもって私と一緒に仕事をしてくれたたくさんの友人、同僚、若者に感謝します。大学院を終えて右も左もわからぬままにこの道に進みましたが、優秀な先輩や先見性のある指導者に恵まれ、ここまでやってきました。お世話になった先輩や先生方に深く感謝します。

本講演では、受賞対象になった「エアロゾル・黄砂に関する研究」の研究経過をなぞりながら、エアロゾル粒子の存在が気象学・大気科学のなかでどのような位置を占めるようになったのかを考えてみたい。研究を始めた頃は、エアロゾルという単語自身が気象学の学術用語としてなじみの薄い存在だったと思われる。その後学術の進展と社会の変化が、エアロゾルの存在を当たり前とする気象学になったと思われる。講演タイトルの「居場所」はそのようなことを思い返して使っている。

受賞記念講演の内容をまとめるに当たって、講演当日、時間の都合で触れることが出来なかった点についても記述したい。

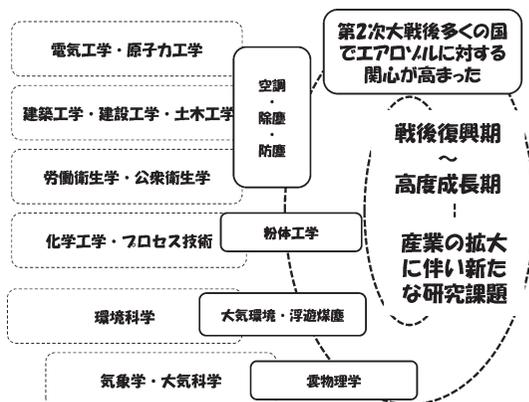
1. エアロゾルという言葉が生まれた頃

気相中に固体や液体の粒子が分散し、安定な状態にあるシステムをエアロゾルと呼んでいる。エアロゾルという言葉はシステムを表しているので「エアロゾルを採集する」などという表現は、本来ならありえない。「エアロゾル粒子を採集する」という表現は正し

い。というのは、「『エアロゾルというシステムの中の粒子状態のもの（物質）』を採集する」と、判断されるからである。

しかし、「エアロゾルを採集する」というような表現はしばしばというよりもしょっちゅう使用されている。今では、このような言い方が当たり前になってきている。もちろん、学術論文でもそのように記述する向きも増えてきており、よほどのことがない限り問題視されなくなっている。あまりにもルール違反が多く、立法趣旨を貫くことが出来なくなったので、現実に合わせてルールを変更したようなものである（例えば、Kondratyev *et al.* 2005など）。

エアロゾルが研究者の関心を引くようになったのは、第2次大戦後であり多くの学術分野の誕生がそうであるように、当時の時代背景がある（第1図）。産業が急速に復興・拡大し、いろいろな分野で粉体状の物質が登場してくる。また、古くから粉体を扱っていた分野でも、急速に取扱量が増加し取り扱い形態が多



第1図 エアロゾルに関する科学は第2次大戦後様々な社会的要請を背景に育ってきた。

* 金沢大学フロンティアサイエンス機構。

kosa@staff.kanazawa-u.ac.jp

—2011年6月1日受領—

—2011年9月2日受理—

様化するようになりそれまで問題とされなかった点が重要な問題になってきた。例えば小麦粉を扱う分野やセメントを扱う分野である。これらの分野では戦前にもかなりの規模の活動が見られるが、戦後急速に取扱量が増加した。と同時に、運搬・貯蔵法の改良が大きな問題となった。生産から使用までの期間が短い時代には顕在化しなかった品質の変化がこの時代には大きな問題になっている。粉体の品質の変化には、大気中の湿度や酸素が大きいかかわってくる。

産業の復興・拡大に伴い、使用されるエネルギー量は急増し、同時に化石燃料の使用に伴って大気中に排気される硫黄酸化物や窒素酸化物の量はうなぎ上りに増加していった。とりわけ石炭使用に伴って排出される二酸化硫黄 (SO_2) は、大気中で様々な反応を経た後小さい粒子に姿を変える。これらの粒子状物質が生成される際は、太陽放射によって進行する反応が関与していることから、しばしば光化学スモッグ (Photochemical Smog) とよばれた。精密機械や電子部品を扱う産業では高度の除塵を必要とする施設が急増してきた。医療施設でも厳重な空調を必要とするものが現れ始める。このようにして、日本だけでなくヨーロッパやアメリカでも、第2次世界戦後は多くの分野で大気中に浮遊する微小粒子への関心が高まっていったのである。

戦後の産業の拡大は石炭需要を著しく高め、多くの国で石炭の大規模な採掘が進められた。それに伴い石炭粉塵による炭鉱爆発事故もしばしば起きた。石炭や石油を大量に使う火力発電所からの排煙や巨大な石油化学コンビナートからの排煙などは、近隣の地域住民に深刻な健康被害を与えたこともあって、社会的な関心を高める大きなきっかけになった (例えば、庄司・宮本 1975)。

多くの分野で、「粒子それだけ」を見るのではなく、「粒子周辺の気相との物理的・化学的相互作用」を考慮して見る必要性に迫られていった。すなわち、粉体という見方からエアロゾル粒子という見方に視点を移す必要性が生じてきたのである。このような学術的社会的要請の高まりの中で、1960年代を過ぎるころから、世界各国でエアロゾルあるいは大気エアロゾルを主要な研究対象とする学術組織が生まれ始めたが、それらの多くは気象研究コミュニティーと重なり合う部分を持っていた。

一方で、日本をはじめヨーロッパやアメリカでは1950年代から60年代にかけて、人工降雨に対する強い

関心が生まれていた。気象学がエアロゾル科学と強いかかわりを持つきっかけの一つがこのあたりにある。この時期、世界の主要産業国では、日本と同様に (エネルギー源として火力発電が拡大してきたといえ) 水力発電の需要はまだ大きくあった。雲や降水を人工的にコントロールし、水力発電を効率よく行うことや、電力供給を安定的に行うことへの関心はきわめて高かった。この間、氷晶核や凝結核に関する実験が飛躍的に発展し、雲物理学と呼ばれる分野が気象学の中で育ってきた。我が国では、磯野謙治 (故人、当時東京大学助教授のちに名古屋大学教授) を中心に興味深い成果が数多く出されている (Isono *et al.* 1959)。この分野の研究では、氷晶 (固体粒子) や微水滴 (液体粒子) と粒子を取り巻く周辺空気中の水蒸気 (さらには気温) との関係が詳細に観察されており、氷晶や微水滴をエアロゾル粒子として見る視点に通じるものがある。また、雲をコロイド科学の立場から議論する試みもこの時期になされておられ、このような観点もまた気象分野の中でエアロゾルを議論する環境を作ったといえよう。

ライダー (Lidar) は、現在では、大気エアロゾルを観測する代表的な装置として知られ、商品化されて市場に出回っている。この装置は、当初、レーザレーダ (Laser Radar) と呼ばれ1960年代に登場してきた。レーザが1960年に発明され、その数年後にはレーザレーダが試作されている。第2次大戦中に急速に発展したレーダ技術を基盤に、マイクロ波よりもさらに波長が短く指向性に優れたレーザ光を使った雲などの試験的な観測がアメリカで行われ大きな関心と呼んだ (Collis 1966)。マイクロ波ではキャッチできない雲粒子やさらにエアロゾル粒子が検知できるというので、関係者は強い関心を寄せた。

とはいうものの、当時の技術レベルでは雲を (気象研究者を満足させるレベルで) 観測することは相当困難であった。当時の雲物理学の要求水準は相当に高いところにあり、開発間もないライダーではそれらに応えることはどだい無理な相談であった。例えば、パルス状のレーザ光が射出される繰り返し時間は、数十秒に1回と言う程度であり、一つのパルスが出て散乱光が得られたとしても、次のパルスが送りだされる頃には雲の晴れ間が頭上に来ているというような状況で、ダイナミックな雲の姿を捕まえること自体が不可能であった。また、レーザの出力もそれほど安定したものではなく、受光した散乱光の強弱が (散乱体の変化に

よるものでなく) 射出されるレーザー光が変動しているためではなからうかという不安が常に付きまとった(もちろんレーザーパルスの出力は常にモニターする必要がある、モニター技術自身が極めて開発要素の高い分野でもあった)。

研究対象は、おのずと水平方向に時間的・空間的にゆっくり変化するものが選ばれるようになった。

そのようなこともあり、ライダー観測にふさわしい領域として、地表面付近よりも動きが少なく(と想像されていた)しかも直接観測が困難な成層圏やその上に広がる中間圏、熱圏・電離圏が選ばれることが多くなった。1970年代の後半になると成層圏エアロゾル層のライダー観測が多く、多くの国で試みられるようになった。当時、成層圏エアロゾル層という言葉とともにユング層(Junge Layer)という単語も盛んに使われた(Hamill *et al.* 1977)。Jungeらは、気球観測や航空機観測で、硫酸塩から成る微小粒子の濃度が高い領域を対流圏界面の上部に見出し、その後引き続いて同様の事実をいくつかのアメリカの研究グループが見出した(Junge *et al.* 1961)。しかし、そのような領域が成層圏全体に広がっているものか?恒常的に存在しているのか?などについて議論が続いた。当時の風潮では、「オーストラリア上空とアメリカ上空で見ついているのだから地球全体に広がっていると考えて良いのでは」とされていたが、確たる証拠があつたのことはなかった。

ライダーによる成層圏観測は、航空機観測や気球観測にない強みをいくつか持っている。上下方向の観測が比較的たやすくできるので、「層」と呼ぶのにふさわしい構造を持っているのかどうかについて調べるにはうってつけの装置だった。また、層構造の地理的な変化などが見つければ成層圏エアロゾルについて一歩踏み込んだ理解が得られる可能性もあった。

このようにして、ライダー観測を志す者にとって、「成層圏エアロゾル層」は人気の高い観測対象の一つとなつていったのである。

この観測に用いられたライダーは、大気中のエアロゾル粒子のミー散乱を利用するものであった。当然のことながら、光と物質との間に生じる作用は極めて多様であり、各種の共鳴散乱、ラマン散乱や吸収を利用するタイプのライダーも盛んに提案された。Na等の金属蒸気の共鳴散乱を利用したものやオゾンや水蒸気の吸収を利用したライダー等は、その後まもなく実用段階に達し大気観測に利用されるようになった。ラマ

ン散乱を利用した水蒸気の観測も1990年代の後半には実用的に運用されるようになった。

ミー散乱では、散乱の角度依存性が散乱体の形状や物性によって変わるために、やかましいことを言えば一粒一粒の粒子の形状の違いが散乱光の特性に影響する。このあたりをどのようにさばくかは、使い手の考え方によって百人百様のやり方がありうるわけで、この状態はいまも変わっていない。

2. ライダーによるエアロゾル観測：成層圏エアロゾルの消長

時期が前後するが、私が磯野研究室の助手に採用された1971年、研究室ではライダーによる雲観測が構想され、ライダーの基本的な設計に携わる最初の機会がやって来た。当時、アメリカから最新の情報を持って日本に戻った稲葉文男教授(当時東北大学、現在東北大学名誉教授)を中心にレーザーレーダ研究会が組織され、関係者の間で盛んに情報交換がなされていた(研究会は現在も活動しており年に1度シンポジウムを開催している)。早々にこの研究会に参加し通信工学や電波工学などの専門家から技術上のいろいろな示唆を受けた。当時、公害問題が大きな社会的関心事となつていたことから、ライダーによる排煙のモニタリングなどもこの研究会の大きな話題であった。

2年ほどかけて基本的な設計が固まり、装置の制作にかかったものの、新米の助手の手にあまる事件が次々と発生した。それらの多くは大学の経理上の問題であった。まず、装置にかかる金額が途方もなく大きい(当時は、大掛かりな装置の開発は大きな研究所か国立機関でやるべしと考えられていた)、次にいろいろな部品のカタログがそろっていない(使用予定の部品は、試作を繰り返して最終的なものにしようと考えていたので、市場に出ていないものも多かった)など、経理する側から見ればおよそ訳のわからないものに映つたに違いなかった。極め付きの質問は「ライダーとはどんな商品で標準的な価格はどれほどであるのか?」というものであった。こんな素朴な質問に答えられないのであるから事務方も相当困惑したに違いない。備品番号を書き込んだシールをホトマル(光電子増倍管)に張り付けるとシールが大きすぎてホトマルを丸ごと包んでしまうことになる(当時、ホトマルは設備品)など、笑えぬ喜劇もあった。設計段階から、いろいろなメーカーの技術者と共同作業で開発していたことが、さらに事務方を困らせることになつ

た。

製作現場や打合せの様子を見てもらったりするうちに、経理担当者たちは事情を呑み込んでくれ、やがては作業のややこしさに大いに同情してくれるようになった。また、メーカー側でも窓口になる会社を決めて大学との折衝が円滑になるように配慮してくれて大いに助かった。

ライダーはレーザ光（あるいは散乱光）を導く光学系、レーザを発振させ光として取り出すレーザ部、レーザ部を冷やす冷却システム、散乱光を検出して電気信号に変えて電氣的に処理する装置等を組み合わせて作られる。それぞれの部分は従来の技術である程度のレベルのものが出来るのだが、システム全体としての完成度は低く小さなトラブルは日常的に発生すると想定された。例えば、光学系のレンズ一つとっても、レンズのごく限られた部分にだけエネルギーの高い光が通過することから生じるガラスの劣化や表面の薄膜の破損が生じる。これらはあらかじめ想像はされるのだが、対策となるとライダーの運用状態に左右されるので、決定的な対策はなく運用しつつ考えることになってしまう。万事がこんなことであったために、ライダーの作成にあたっては、まずメンテナンスのしやすさが重視された。それは、部品をコンパクトにまとめないと言うことにもつながり、装置は（手が入り易いように）大ぶりでなかはスカスカと言う状態になる。もちろん一目でトラブルの起きそうな場所がわかるような部品の配置がなされた。これらのこととも関係しているが、システムを長期間連続して運用することは、関心が高かったエアロゾル層の季節変化や経年変化を調べるためには最も大切な点と考えられ、経年的に劣化したり変形したりするとわかっている部品は交換が簡単に出来るように工夫した。例えば、いくつかの光学部品のホルダーには磁石が埋め込んであって取り替えて装置に戻す時に磁石の力で向きや方向が元通りに装着できるようにしてあった。

なかなか苦労があったが、多数の部品を集積して一つの装置を作って行く工程を経験できたことは、その後の南極観測をはじめいろいろな野外観測で役立った。

ライダー観測を手がけた頃から、大型の火山噴火が立て続けに起きた。筆者が観測対象に選んだ火山だけでも、フエゴ噴火（1974年）、セントヘレンズ噴火（1980年）、エルチチオン噴火（1982年）、ピナツポ噴火（1991年）、等がある。これらの噴火のたびに「今

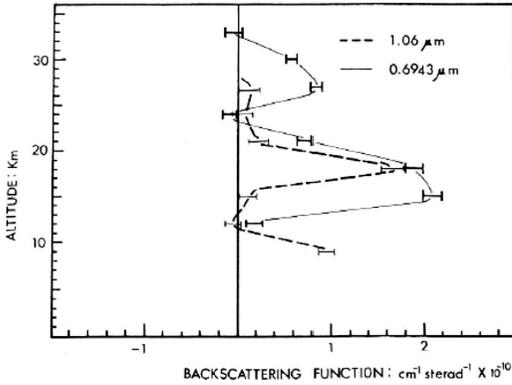
世紀最大の噴火」と言われ、火山噴火の気候や環境への影響がさかんに取りざたされた。大きな火山噴火が起きると、世界的な規模で成層圏エアロゾル（層）が増大（enhancement、粒子濃度が増大することと層の厚さが増大することの両方の意味がある）する。このことは、アグン火山噴火（1963年）の際に気づかれていて、アグン火山噴火後まもなくして極めて赤い夕焼けが観測されるようになり、その地域が東西方向に広がっていったことや太陽高度と夕焼けが観測される時間との兼ね合いから、太陽放射を散乱させる微粒子が成層圏高度にあることなどが推定されていた（Lamb 1970）。

かつては、火山灰が成層圏に入り込むことが成層圏エアロゾル層の増大の原因と考えられていた。1963年のアグン火山噴火後、気球や航空機によって採集された成層圏エアロゾルには火山灰らしきもののほかに硫酸液滴と考えられるものが見つかり、「成層圏に現れる火山雲は火山灰が主成分なのか否か？」が問われるようになってきた（例えば Cadle *et al.* 1976）。

当時、成層圏エアロゾルの観測で活躍していた高高度飛行用ジェット機 U2 や大型気球による直接採集では観測できる空間スケールが小さすぎて、一步引いて成層圏エアロゾル層の全体の様子を見ることは難しかった。火山噴火によってエアロゾル層の厚さは変化するのか？等の課題はそれらのプラットフォームを使って調べようとする膨大な労力と資金が必要になる。ライダー観測はそのような従来の研究手法の弱点を補う形で活躍を始めたのである。ライダーを使えば（当時の技術レベルであっても）一晩でエアロゾル層の高度プロファイルが得られるのである。第2図はそのような時代の観測例である（Iwasaka and Isono 1977；Iwasaka 1977）。

フエゴ火山が噴火した1974年頃には、成層圏まで探査できる出力を持ったライダーがアメリカや日本で何台も稼働するようになっており、これらがネットワークを作って火山噴煙のひろがりや消長が観測できる環境が整い始めていた。

日本では、九州大学の広野求和教授（故人）のグループが先陣を切ってライダーによる火山噴煙のモニタリングを始めた。その後を追うことになった名古屋大学グループでは波長の異なるレーザを二つ使ったライダーでモニタリングを始めた。一つは、ルビーレーザを光源とするもので0.6943 μm の光を射出し、もう一つのものが NdYAG（イットリウム-アルミ



第2図 名古屋上空，1976年4月7日－9日のライダーエコーを時間積算して作ったプロフィール (Iwasaka 1977)．ライダー (レーザーレーダ) が普及し始めた頃は時間分解能も空間分解能も悪く，成層圏エアロゾルなどがちょうど手ごろな標的として観測対象に選ばれることが多かった．

ニューム-ガーネットにネオジウムをドーピングした結晶) レーザを光源として1.064 μmの光を射出した。火山噴煙粒子の粒子径を推定してみようという目論みであった。しかし，1.06 μmの散乱光を検出するホトマル (光電子増倍管) はなかなか安定せず，試作段階に近いホトマルを次々にテストしながら観測する状態が続いた。結局，この波長で成層圏エアロゾル層を観測することは断念し，もっぱら地上付近のエアロゾル粒子を観測する際にのみ使うことになった。今でも，近赤外域の光の検出はなかなか難しいことが多い。それでも，成層圏のエアロゾル粒子のサイズ分布まで踏み込んだライダーによる観測例としては初めてのものだったことから，論文の評判はまずまずで，何とか格好が良かったが (Iwasaka 1977) その後が続かず，サイズ分布に関する問題を深めることはできなかった。

1970年代の終わりごろは，ファクシミリが広く普及し始めて，ライダーを運用しているグループ間ではファックスで観測結果を知らせ合うことが日常的になってきた。おかげで，噴火後数日して成層圏に火山性のエアロゾル層が形成され1週間程度で東西方向に拡散する姿や，その後数十日の時間スケールで南北方向に拡散しているらしいことが容易に捉えられるようになってきた。当時，成層圏における物質輸送プロセスは気象学分野においても大きな話題であったこと

から，火山雲の拡散状況にはこの分野の人たちも関心を持って見ていた。加えて，‘火山噴火と気候変動の関係’は古くから多くの研究者を引き付けてきた研究課題である。火山性の成層圏エアロゾル層の寿命・消長や光学的厚さなどは，当時もっとも関心もたれた観測対象であった。ライダー観測でも，それらに関する観測が最も重視されていた。

1959年に日本を襲った伊勢湾台風は，中部地方をはじめとした各地に甚大な被害をもたらした。この事件は，日本で災害科学を産み出した大きなきっかけになったと言われている。1960年には災害科学総合研究班が組織され極めて広い分野の研究者を組織して活動をはじめた。1980年のセントヘレンズ山噴火はふもとの町に大きな被害をもたらした，アメリカではこれを契機に被害に視点を置いた火山災害学が急速に拡大した。そのサイエンスは，成層圏エアロゾルへの火山噴火影響・気候変動・農業被害等を含む広大なものである。おそらく日本にもこのような研究の流れが影響したのであろう。火山分野の先生方から誘われて小さな研究班を作って活動する機会をもらった。この研究班の活動期間は，私にとっては噴火のタイプやら噴煙の化学組成など勉強する絶好の機会になった。勉強のためと，ほかの研究班の先生がたの阿蘇山の噴煙調査に同行することを志願したまでは良かったが，散々の旅行であった。噴火口に降りてガスをサンプリングするのを見学に行った時は，私が噴煙にむせて死ぬほど息苦しくなって咳き込んでいても，他の先生方は平気な顔をして作業されている。一人だけ退散するのもみっともないので，鼻水をたらし，涙を流し，見学を続けた。内心「さすが専門家は違う」と，感心させられた。後述するように，成層圏に長く滞在する火山性エアロゾル粒子の主たる組成は硫酸液滴であり，噴煙中の硫黄化合物の量が極めて重視されるようになるのはこの頃からである。

噴火直後に急増する成層圏エアロゾル層からの散乱光強度はしばらくすると徐々に減衰し始める。急増するのはもちろん火山灰が成層圏に吹きこまれるからであるが，そればかりではなく吹き込まれた二酸化硫黄，SO₂が成層圏のオゾンや水蒸気と反応し粒子化する (硫酸液滴を形成する) ことも大きな原因と考えられている。このために，噴煙が成層圏に届かなくなった後でも成層圏の火山雲の中ではSO₂を原料にしてエアロゾルが生まれている。それ故，噴煙が成層圏に吹き込まれた後，どの程度の時間がたってからエアロ

ゾル濃度の極大が現れるかは、粒子生成メカニズムを議論するうえで大変有用な情報になる。規模の大きな噴煙になると、成層圏に吹き込まれた SO_2 の大半がエアロゾル化するのに数十日程度かかると予想されている（例えば、Cadle *et al.* 1976；Pollack *et al.* 1976；Hamill *et al.* 1977）。

もちろん、サイズの大きな火山灰粒子や硫酸液滴は、新粒子が急増している時期にあっても、重力落下しているのだが、規模の大きな噴火では成層圏に吹きこまれた硫黄酸化物の大部分が粒子化するのに数十日程度かかり、しかも生成する粒子の量がきわめて多いことから火山灰の重力落下によってエアロゾル濃度が減る効果がほとんどキャンセルされてしまうタイプのももある（第3図）。

多くの巨大噴火は、初期の複雑な過程を伴いつつ地球規模で火山性エアロゾルを拡散させる。世界各地では、（やかましいことを言えば、それぞれ異なる段階を経過した）火山性成層圏エアロゾル層を観察することになる。そのような時期を過ぎると、エアロゾルの生成と粒子同士の合体で大きく育ったものがエアロゾル層から落下し消失するプロセスが拮抗し始める。その後は噴火で吹き込まれた SO_2 が粒子生成のために

消費しつくされると成層圏のエアロゾル濃度は減少の一途をたどる。その減少時期の間、南北方向への拡散や対流圏への落下（個々の粒子の落下や気塊の沈降運動等に伴って対流圏へ運ばれるプロセスをまとめてこのようにいうことにする）が優位なフェイズに移るので、世界各地で成層圏エアロゾル（層）の減衰（decay、粒子濃度の減少やエアロゾル層の厚みの減少）が始まる。減衰する様子を詳しく見ると、初期の重力落下が目立つ時期から拡散や対流圏成層圏交換現象によって徐々に減衰する時期へと、ステージが移ってゆくことが分かる（Hayashida and Iwasaka 1985）。

それぞれの研究チームが、工夫を凝らしてライダーデータを解析していたが、ガスからの新粒子生成、火山灰表面のエアロゾル物質生成、それらの粒子の重力落下、成層圏の大気運動に伴うそれらの粒子の拡散等が絡み合って生まれる成層圏エアロゾル濃度の時間変化は相当に複雑で、一地点での観測だけでそれらのプロセスの詳細を明らかにすることはできない。

ただ、うまく観測時期を選べば粒子の重力落下の詳細やガスからの新粒子生成の詳細を解析することが出来る。しかし初めから何時から何時がそのような時期に当たっているのかを推定することはできず、欠測のない長期間連続した良質の時系列データを得ることが眼目とされていた。つまり、息切れせずにひたすら注意深く何カ月も何年も頑張るといことになるのである。

さて、問題なのは、これまでの多くの観測研究では、火山灰と成層圏で二次的に生まれた硫酸液滴を区別して観測できずに火山噴煙の影響を議論してきた点である。前者は成層圏に注入されたのちは落下するだけであるが、後者は成層圏のいろいろな組成と反応しながら生まれてくる粒子であり、生成速度は火山によって成層圏にふきこまれ



第3図 ライダーで成層圏に出来る火山性エアロゾル層を観測した場合、噴火直後に濃度が急増しその後数カ月から数年かけてゆっくり減少してゆく。その間、固体の火山灰と SO_2 から生成される硫酸液滴が共存した状態でさまざまなプロセスが並行して進行する。

るSO₂濃度に依存することはもちろんであるが、水蒸気、オゾン、HO_xなどの濃度にも依存する。さらに、火山灰表面がSO₂の酸化反応の場としても働くために火山灰の濃度（より正確には表面積濃度）とSO₂濃度がたがいに関係し合っている。火山灰と硫酸液滴を区別して観測できれば、これらの問題の理解がかなり進展することが期待された。

このことに頭を悩ませている頃、向井 正さん（神戸大学名誉教授）が世話役になって「不規則形状粒子による光の散乱過程についての研究会」を組織しているのを知って早速仲間に入れてもらい、光散乱過程における偏光に関して勉強する良い機会をもらった。ライダーの光源はきれいな直線偏光していることから、受光装置に偏光検出機能を持たせることが出来れば非球形の火山灰と球形の硫酸液滴をある程度識別できる。理屈は、やや込み入ったものではあったが、技術的にそれほど難度の高いものではなかった（Iwasaka and Hayashida 1981）。ある程度と言うのは、エアロゾルの混合状態が関係してくるからである。異なる特徴を持つエアロゾル粒子が2種類以上混合している場合には常に問題になる（第4図）。火山灰と硫酸液滴がそれぞれどんな割合で混合しているのか、火山灰に硫酸液滴が付着した状態の粒子がどの程度の割合で存在しているのか、等相当にややこしい状況になっていると想像される。それらについて詮索することは止め

てとりあえず偏光解消度が有意に観測されたら火山灰粒子存在と判定することにした（Iwasaka 1986c）。

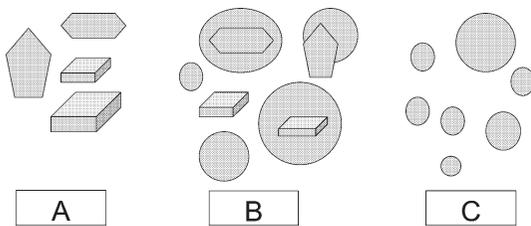
なにはともあれ、火山灰と硫酸液滴が区別して受信できるとあってちょっとした評判になった。偏光状態の変化を観察して観察対象物の性質を知ろうとする技術は広くある。例えば、たんぱく質の構造の研究に古くから旋光度計が使われていた。光が物体と何らかの作用する時、散乱する光は強度や波長特性のほか偏光特性も変化させる。ミー散乱では、比較的単純な取り扱いが出来ることから散乱の前後に生じる偏光状態の変化から散乱体の非球形性を推定することが可能であることがわかった。受光部分に偏光素子を使って射出したレーザー光の偏光面と直交した偏光面をもった光がどれだけ戻ってくるかを測ることによって、散乱体が球形かそうでないかを大雑把ではあるが判別することが出来る。球形であれば、偏光状態は散乱によって変わることがない。少しでも変化があれば、散乱体は非球形性を持っていることになる。

その後調べて見ると先覚者はどこにもいるもので、氷晶核生成実験に応用した例と、水雲と氷雲の判別に応用した例が既に報告されていた。しかし、当時のレーザーの繰り返し振振周波数の低さから、実験で使うのはともかく、現実の雲に対して使うことは雲の動きが速すぎて実用的な装置に育てられずその後の発展が見られなかったものと思われる。

この偏光解消度測定は、エルチチョン火山噴火を皮切りに大きく躍進した。林田佐智子教授（奈良女子大学）は、当時大学院生でこの火山噴煙の様子をライダー観測し、噴煙の消長と合わせて偏光解消度の時間変化を追いかけていた。予想されたように、火山噴火で増大した成層圏エアロゾルの正体は噴火直後は多量の火山灰が含まれている（＝高い偏光解消度を示す）ものの、時間がたつにつれて、吹きこまれた二酸化硫黄がもとになって生まれる微小の硫酸液滴が主体のもの（＝偏光解消度がゼロ）に変わって行くのであった。この研究は、偏光解消度が、粒子の組成を判定する上で極めて有用なパラメーターであることを世に示し、その後多くのライダー研究者が偏光解消度測定を行うようになった。早々にこの結果は、グループを代表して林田さんの手によってメキシコで開かれた国際会議で発表された（Hayashida *et al.* 1984）。

「先生、うまく行きました」が、帰国後の彼女の最初にした言葉であった。会議の様子を聞いているうちに、彼女は「ドイツのゲーミッシュのグループは『良

火山灰と硫酸液滴の混合状態



第4図 火山灰と硫酸液滴が共存した時の典型的な状態。Aは不定形の火山灰が圧倒的に主成分の状態、Bは球形の硫酸液滴や火山灰の周りを多量の硫酸液滴で覆っているために全体の形が球形になったものに混じって非球形の火山灰や少しの硫酸液滴をつけた火山灰が存在している状態、Cは硫酸液滴が主成分の状態。火山性エアロゾル層の主成分は、全体としてAからBをへてCのように変化する。

い結果だ』と言ってくれましたが、大変無念そうな顔をしてました」と語ってくれた。彼女は覚えているだろうか。私にとっては忘れられない出来事で、内心「してやったり」と思ったものである。それはそうだろう。一見ややこしそうな観測が、ひどく簡単な工夫で可能になるのであるから、手の内を見てしまえばシマッタと思うに違いない。ドイツのゲーミッシュにある大気科学研究所は、息の長い粘り強い観測で名を売っており我々のお手本となってきた研究所であった。

火山噴煙調査は、エアロゾル全般にわたる基礎勉強から始まり、ライダー技術の開発、さらには多くの民間の技術担当の方々との交流、等多くの多彩でしかも有益な経験と教訓をもたらしてくれた。

3. 中層大気観測計画 (Middle Atmosphere Program : MAP) : 南極とオゾンホール

成層圏の現象が多くの人々の関心を集めるに従い、超高層大気学と気象学が共同で中層大気圏の解明を目指そうとの機運が生まれていた。その研究プロジェクトは、MAP (Middle Atmosphere Program) と呼ばれ、1980年代を飾る国際事業として各国が以前から準備してきたものである。日本では加藤 進京都大学教授 (現京都大学名誉教授) が中心になって企画を練ってきた。このプログラムでは、各国ともライダー技術に大きな期待を寄せていた。

日本の MAP は、5つのサブプログラムで構成されていて、南極の中層大気観測もその一つであった。国立極地研究所では平沢威男教授 (現名誉教授) と川口貞夫教授 (現名誉教授) のもとで南極中層大気総合観測計画 (当時、南極 MAP と略称していた) が練られていた。「岩坂君、南極でライダーを動かすことができるかね?」と地球電磁気学会の会場で平沢さんに尋ねられたのが運のつきというものであった。その後、南極の昭和基地でのライダー観測を想定して、南極に持ち込むライダーの基本設計と派遣隊員の候補者探しが始まった。初期の案では、1981年から5年間連続して観測を続けようということになっており、少なくとも5、6名の南極観測隊員を見つけ出さねばならなかった。その当時、自分が南極に行くことは全く想定しておらず、若手の先生や大学院生を想定して候補者探しが始まった。

何かと制約の多い日本の南極観測事業であるが、大学院生の派遣が難しいというのが最も大きな障害に

なった。当時、ライダーを利用して大気の研究をしている研究室はいくつもあったが、装置自身に開発的要素が多く、研究室の教員はその中心になって装置の改良に取り組んでいるところが多かった。このため、大学の教員が出かけると研究グループに大きな影響が出てしまうという問題があった。越冬隊員として1年半近くも日本を離れることになる研究室が崩壊しかねないのである。また、当時どの大学も次第に「学生指導や授業をしっかりとやるように」と言うことをやかましく言い始めており、研究教育の現場では書式通りのやり方 (前年度に決められたカレンダー通りに授業を行う、など) が強く求められる風潮が出てきていた。「半年以上授業に穴をあけるなんてとてもできないよ」等の声が多く、人選は難航した。

おまけに、ライダー装置そのものが、先述したように、完成度の高い装置ではなく輸送面や運用面で不安材料が多々あった (当時の装置はすべてにおいて大ぶりで、輸送するために部品レベルまで解体しなければ運べなかった。現地では組み上げた時に元の性能が出るかどうかは神のみぞ知るという状態であった)。レーザー研究会の仲間内では、「ライダーを南極で動かすことなんてとても無理だろう」という声が圧倒的であった。

そうこうするうちに、次第に隊員を決定する時期が迫り、結局のところ、まずはじめに私自身が昭和基地に赴きライダーを設置し越冬観測をやってみせることになった (うまくいかなければ、そこで終了あるいはライダーに代わるものを使って観測は継続というわけである)。はじめの年はそれでよいとしても、MAP期間中の観測を続けるために継続して装置を運用する (あるいは代わりの装置を考えてくれる) 人材を探す必要があった。1982年のレーザーシンポジウムで、南極におけるライダー観測の計画を紹介した席上で、予想通り「岩坂さんやめとけ、うまくいくはずがない」の声が沸き起こった (第5図)。しかし、シンポジウムが終わって数日後、野村彰夫信州大学助教授 (現名誉教授) から電話があり、「あの席上では、岩坂さんの後に南極に行きたいなんて言える雰囲気じゃなかったけど、実は…」と言ってきた。あと数カ月後に南極に出発というタイミングであった。早々に極地研の先生方と相談し、私が24次隊に参加し、小野高幸さん (当時国立極地研究所助手、現東北大学教授) と野村さんが25次、26次南極観測隊にそれぞれ参加しライダー観測を継続する作戦を立てた。人選難の

第7回レーザ・レーダシンポジウム

浜名湖
1981年2月5-6日

特別講演 成層圏エアロゾルが見えてきた過程
小野 晃(第7回シンポジウム実行委員長・名大, 水圏研) (予稿 (952kB))

1. YAGレーザ・レーダによる成層圏エアロゾル層の観測 (I) 最近の観測結果とその理論的検討
柴田 隆, 久々宮成助, 藤原玄夫, 広野求和(九大, 理) (予稿 (488kB))

2. YAGレーザ・レーダによる成層圏エアロゾル層の観測 (II) SAGE衛星観測との比較
藤原玄夫, 広野求和, 柴田 隆(九大, 理) (予稿 (292kB))

3. 気象観測用大型ライダー その1. 装置
安田 升, 島 毅, 黒島大元, 佐竹公彦, 伊藤昇司, 磯部皖一(日電)
内藤恵吉, 高橋克己, 田端 功(気象研) (予稿 (904kB))

4. 気象観測用大型ライダー その2. 測定
田端 功, 内藤恵吉, 高橋克己(気象研)
安田 升, 島 毅(日電) (予稿 (978kB))

5. 南極域中層大気レーザ・レーダ観測計画
平沢威男, 福西 浩(国立極地研), 岩坂泰信(名大, 水圏研)
藤原玄夫(九大, 理) (予稿 (944kB))

6. 火山噴火の成層圏への影響
岩坂泰信, 林田佐智子, 小林愛樹智(名大, 水圏研) (予稿 (936kB))

7. 黄砂現象が局地的な放射エネルギー収支に与える影響
岩沢泰信, 箕浦宏明, 長屋勝博(名大, 水圏研) (予稿 (508kB))

第5図 第7回レーザ・レーダシンポジウム (1981年) で初めて南極でのライダー観測計画が紹介され、関係者から寄せられたコメントのほとんどは「心配と不安」であった。

現状を考えれば、これ以上の候補者をそろえることは難しく、結局3年間継続の観測に規模を縮小した。偏光解消度が計測出来るように準備したことは言うまでもない。

1982年暮れに日本を発ち、1983年の1年間越冬した。ライダー観測では小さなトラブルにたびたび見舞われた。原因は、建物の振動と放電である。ブリザード等で建物が振動する。いくつもの光学素子はそれぞれ光軸を合わせて設置してあるのだが振動でずれてしまう。また、いつの間にかいろいろな所に電荷がたまる(地面が凍っておりアースが設置しにくいのでアースは一見取れているように見えるのだが、実効は全く期待できない)。装置を調整するためにどこかに触れるとピシッと音がしてICが壊れていることが何回もあった。そんなことを繰り返しながら、装置をなだめすかして観測が出来るようになった頃はもう越冬が始まって4ヶ月ぐらいたっており、冬の手前であった。冬に入って間もなく成層圏エアロゾル層からの反射光が極めて強くなってきた。日毎に強くなり1週間ほどで最高値に達したまま安定してしまっ。おりしも多

発していた火山噴火の影響かとも考えたが偏光解消度がエアロゾル層全体にわたって極めて大きく今まで見たこともない構造をしていた。まず疑われたのは装置の不具合である。ひどい環境下での運用で、いつも様々な不安が付きまとった状態で観測しているのであるから当然である。しかし、想定出来る限りのことはテストしてみたが異常はなく、結果を素直に受け入れるしかなかった。越冬生活も後半に入る頃には、南極成層圏エアロゾルの異常なまでの濃度増大と高い偏光解消度をそのまま発表しても、とても受け入れられないだろうと心配になってきた。

この心配を一掃してくれたのは、藤原玄夫福岡大学

教授(現名誉教授)からのファックスであった。米国のNASA(National Aeronautics and Space Administration, 国立航空宇宙局)が運用する人工衛星でPolar Stratospheric Clouds(PSCs, 日本ではPSCとする例も多い)を発見したという論文(McCormick *et al.* 1982)を送ってくれたのである(この論文は私が日本を離れる時には、印刷が終わっていなかったのである)。人工衛星では、低緯度から高緯度にかけて同じ装置で連続的に測っており、中低緯度で正しい値を示しておれば(中低緯度では様々な観測で相互比較が出来ることからデータの検証は充分になされている)高緯度帯での観測値も信用に足ると結論できるわけである。この論文を見て、もうこんな報告が出ていたのかと少々がっかりしたが一方で「俺の観測結果は間違いじゃなかった」という安堵感が相当に大きかった。このことは30年ほどたった今でも鮮明に思い出す。

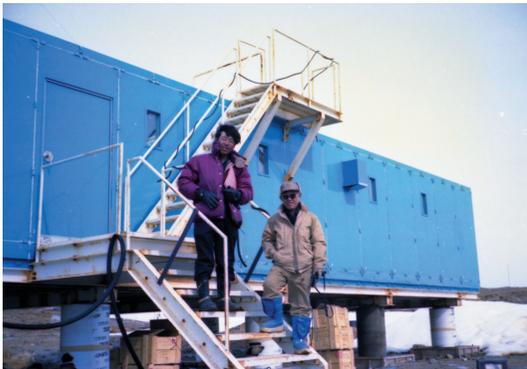
人間とは現金なもので、この知らせでようやく落ち着きを取り戻せ、やがて「ライダーではPSCsの垂直方向の構造が詳しくわかる」ので、気温分布などと詳

細な比較を通して人工衛星とは違う切り口で議論が出来るのではないかと知恵が回るようになった。

越冬生活もそろそろ終盤を迎える頃、東京から「迎いの船で永田 武極地研究所所長が昭和基地を訪問する」という連絡が入った。越冬隊では「とんでもない大先生が来る」と言うので受入れ体制をめぐってひと騒ぎが起きた。基地を訪れた先生は、1日に1、2か所の棟をめぐり、基地の様子を視察する毎日であった。私がライダー観測をしていた建物に来て、開口一番「どうかね、だいぶ高い金使ったようだが」の質問が飛んできた。簡単に結果を報告すると「ほう、そうか。フィールドサイエンスというものはそういうものだ」、そして続けてMAPを実現させるための苦労話などされた。親しく、先生と話を交わした最後になった(第6図)。

帰国後の1985年、アメリカのNASAの火山雲モニタリング衛星の運用チームと日本のライダー観測地上検証チームとの合同研究会が、故広野求和教授の尽力により福岡で開かれた。PSCsのライダー観測結果をアメリカの研究チームの前で初めて発表することになったのだが、NASAからやってきていたMcCormick等は「LidarではじめてPSCsを見たことになるのだな」と少々驚いた風であったが、後で肩をたたき合いながら、互いに望外のヒットを喜び合ったものである。

望外と言うことは、こういうことである。NASAのSAM II (Stratospheric Aerosol Measurement II)



第6図 筆者が参加した第24次南極観測隊を帰国させるための船で、南極基地視察のために故永田 武東京大学名誉教授が訪れた。写真は、ライダーが設置してある建物の入り口で取ったもの(右、永田武、左、筆者)。

と呼ばれていた衛星観測装置は、「火山噴煙が成層圏にまで広がりひいては気候変化に影響を及ぼしかねないことから、全地球的モニタリングが必要」という理由で運用が開始されたのであった。私が担当した「ライダーによる南極成層圏のエアロゾル観測」も同様に火山性のエアロゾル等の物質が赤道から極方向へ広がって行く状態を南極で監視しようということをやっていた文句としていた。いずれも研究企画段階では、大型の火山噴火が立て続けに起きていたために火山噴火に対する関心が高まっていたのでそのようなことになったのだが、実際に観測が始まって見ると思もかけぬ大きなこと(PSCsの発見)になってしまったというわけである。このようなことをどう考えればよいか、予算規模の大きな研究になると笑ってすまされる問題でもないような気がする。またフィールド研究において「見通しを立てる」ことの難しさを一面では示している。研究会で発表された論文のいくつかは気象集誌(J. Meteor. Soc. Japan, Vol.63, No.2, 1985)に収録された。今日広く使われているPSCsなる言葉がどのようにして考え出されたか、短いながらもMcCormick博士が気象集誌に公表した論文に述べている(McCormick *et al.* 1985)。この種の記述はほかの論文に見当たらず、SAM IIの地上検証観測に貢献のあった日本の研究者を十分に意識して書かれたような気がする。

越冬期間中、冬あけを迎えてオゾン濃度がやけに低いことが昭和基地で話題になっていた。ここでも、測定器がおかしいのではと日本に盛んに問い合わせていたが測器の異常は見当たらず、最後の安心材料は「去年もこの時期は濃度が低い。南極とはそんなところだ」で終わった。世に言うオゾンホールなのであるが、この値が異常であるかどうかは正常な値がわかっていたらこそ出来る判断である。

PSCsに関してはオゾンホールとの関わりが大きい。詳しいことは省くがPSCs粒子の表面での塩酸や硝酸塩素(これらの塩素はいわゆるフロンから生まれたものである)の反応がオゾン破壊に大きく効いていることがやがて明らかになってくる。後述するように、私自身はこのころから不均一反応(heterogeneous reaction)に強い関心を持つようになった。南極でのライダー観測の結果は、なんとかまとめることが出来た(Iwasaka and Kondoh 1987; Iwasaka 1985; Iwasaka *et al.* 1985, 1986)。この頃になると、南極成層圏オゾン破壊・PSCsの生成・成層圏低温域

の発生という3要素がからんでいることが広く受け入れられるようになり、ライダー観測値と気温の変化を対応させた観測結果はしばしば関係者に引用されるようになった。しかし、観測していた当時は思い出すと薄氷を踏むような不安感がよみがえってくる。多くの人に支えられた幸運としかいいようがない。

一方で、PSCsについて体系的に研究展開が出来なかったことは今でもある種の無念さが残っている。PSCsとオゾンホール結びつきは、成層圏オゾンに関する大気化学を一新するほど大きな視点を我々に与えてくれた。極域成層圏でのオゾン反応についての「PSCsをふくむ不均一反応が本質的である」という視点は、振り返って「中緯度や低緯度の成層圏オゾン反応ではどうなのか?」「火山噴火があって成層圏エアロゾル層が増大した時にオゾン層はどうなるのか?」を再度考えるきっかけを与えてくれた。しかし、PSCsの存在が我々に問いかけた問題は、単にオゾンホール形成の化学的過程の解明にとどまらず、PSCsの生成消滅と強く結び付いている水蒸気の大循環、地球からの水蒸気（もしくは水素）の離脱・散逸（一般的には、地球から宇宙空間に逃げだしている水素の起源はメタンや水蒸気が中層大気中で光分解して生じた水素とされている）過程と結びついている本質的な要素として地球史的な観点から取り扱われる問題ではなからうかと漠然と考えていた。そうであれば、赤道域から南極成層圏への水蒸気の供給、PSCsを発生させるときに種となるエアロゾルの存在量、PSCs発生に十分な低温状態の存在やその長期変動、PSCsの対流圏への落下量や南極氷床への沈着量の推定やその変動などを明らかにする研究に進む必要があると頭の中では妄想していたが、研究を始めるには至らなかった。

PSCsは、大きい氷晶になると数10 μm を超えるものも存在するのではないかとされており、もしそうであれば成層圏から対流圏に向かって極めて速い落下速度で落下することになる。極渦の内側でそのような降水過程が存在するとなれば、成層圏の水蒸気収支に大きな影響を与える可能性はある。成層圏水蒸気は、成層圏の様々な光化学反応やエアロゾル過程に関与しているため、水蒸気の収支は実に広い範囲に繋がりを持っている。PSCsには、硝酸三水和物が主成分になっているものが存在する。これらは、中層大気中の窒素循環に大きく関わっている可能性が高く、その窒素の発生源は微生物の窒素代謝に伴う N_2O の大気圏

への放出にまでつながっているものであり、「大気と微生物活動」をめぐる、興味深いことが多くある。筆者自身、研究環境をうまく整備できずそれらの課題に取り組むことがないまま今に至っている（Iwasaka 1986a, b; Iwasaka and Hayashi 1991）。まさしく「光陰矢のごとし」である。

4. エアロゾルの表面：PSCsからエアロゾル粒子へ

PSCs（またはPSC, Polar Stratospheric Clouds）に関する研究は多くの顔を持っている。なかでも、オゾンホール形成に関係する化学反応は高い関心を呼んだ。その化学反応の詳細は他に譲るが（例えば、Solomon 1999）、重要なことはPSCs粒子表面が一連の反応の場になって、安定な化合物を化学的に活性の高いものに変換する点や、PSCsを作る時に特定の物質のみを集中的に粒子状物質に変換し粒子の重力落下によって急速にその物質を対流圏に運ぶ点であった。

オゾンホールの出現は、人間活動が自然界に大きなストレスをもたらしていることを如実に示したが、一方では大気中で化学反応を考えるとガス状成分だけでなく粒子状物質（エアロゾル粒子）の存在を視野に置く必要を強く示唆した出来事でもあった。そのようにして大気をもう一度眺め直してみると、対流圏では成層圏に比べはるかに多様なエアロゾル粒子が浮遊しており、それらが関与する反応の高い多様性は容易に想像できた。しかし、そのような観点を強調して対流圏大気での反応が検討された事は、意外に少なく1990年代に入って本格化する。但し、水に関しては別で、氷晶核や凝結核の存在やその物性をめぐって研究の長い歴史がある。

1989年に、名古屋大学水圏科学研究所から名古屋大学空電研究所に職場を変えることになった。おなじ名古屋大学に属しているとはいえ空電研究所は豊川市内に本拠を置き（豊川キャンパス）、水圏科学研究所（東山キャンパス）との間を公共交通機関で移動しようとする2時間近くかかる。水圏科学研究所は、理学部付属水質科学研究施設にその源流を持ち、空電研究所は、工学部電気教室で行われていた空電研究を飛躍させるべく戦後早々に作られた研究所である。それぞれ、独自の文化を持っており、日常の会議の進め方や学生に対する対応方法まで微妙に違い、時には楽しい発見もあった。MAP期間中に、大気中のエアロゾ

ルの重要性についていささか感ずるところがあったので、この転任を機会に大気中の不均一反応と大気の性質との関係について本格的な観測をするべく研究環境を整備していった。

なお、赴任後1年してこの空電研究所は名古屋大学太陽地球環境研究所と名称を変えるとともに組織を大幅に変えた。

太陽地球環境研究所は、オーロラに代表される超高層物理の研究者が多数いて、何人かの人たちは北極での野外研究を本格化したいと考えていた。そんなこともあって、自身の研究フィールドの一つとして北極圏を構想する大きな機会になった。別のところで述べるが、オゾンホールが大きな話題を集めている中で、ヨーロッパの研究者たちが「北極のオゾン層研究」に向かって観測準備していたことも私の気持ちを北極に向かわせる原因でもあった。

今後の日本の状況を考えると中国抜きに環境の問題は語れないだろうと思われた。そんなことから、これまでに少々馴染んだ黄砂も力を入れて取り組むべき研究対象に加えた。

黄砂については、ライダーで黄砂粒子の高度分布を測った以前の仕事が足がかりになっていた。すこし時期は前後するが、1983年にライダーで黄砂の濃度分布を測った結果を報告 (Iwasaka *et al.* 1983) した。黄砂層が2層になっていたことや、粒子濃度（と言っても光の散乱の強さに換算した量であるが）が地表付近よりも上空の方が高いこと等が話題になり、南極から帰国後たくさんの問い合わせの手紙をもらった。余談ながら、この論文は私が南極に行く直前に投稿され、印刷公表されたのが越冬中であった。印刷された別刷りは、越冬も終る頃に、次に越冬する25次南極観測隊を運んできた観測船「しらせ」が届けてくれた。フロリダ大学の R. デュース教授一行がわざわざライダーを見に来てくれたのもこの頃である。彼らは、観測船や諸島を利用して太平洋のいろいろな地点で大気から海に沈着する物質を観測していた。海洋学では、陸から大洋へ（河川を通さずに）大気を介して運ばれる物質について強い関心もたれはじめ、私の研究もそのような雰囲気の中で海洋学者の目にとまったようである。

私が空電研究所に移る頃には、ライダーと航空機観測を組み合わせて黄砂観測が出来るぐらいに技術は進歩しており (Iwasaka *et al.* 1988), 黄砂表面が自由大気圏を移動している間に硫酸化合物に汚されている

過程等がわかり始めていた。この反応はアジアの特徴がよく出ていると思われ、空電研究所で新たにスタートを切る際の大きなモチベーションとなった。

ただ前にも述べたように、観測プラットフォームとしての航空機は、大気エアロゾル粒子を扱う場合に限って、なかなか厄介な乗り物なのである。一つの原因は、空気に対して相当のスピードでプラットフォームが移動することにある。誰しも容易に想像がつくことであるが、気体と気体中に分散している粒子とは極めて緩い流れの中では一緒になって流れてゆくが、早い流れの中では向きが変わったりすると粒子状のものはその変化に追従出来なくなる。大気エアロゾルをサンプリングするにあたって、このことからくる弊害を軽減する工夫はするものの完全になくすことは難しい。さらには、機内と機外の温度差などもややこしい問題を引き起こす。そのような難点を克服するには、むしろ気球や飛行船が手っ取り早い。航空機に関する話は、この後に詳しくする。

気球観測に本格的に携わるようになったのは南極観測が大きな契機になった。話が前後するが、これより以前に（名古屋大学に助手採用になった当時、研究室では気球による成層圏水蒸気の精密測定を目的としたプロジェクトを展開中であったことから）3年間ほど成層圏水蒸気の大気球観測に参加した経験があった。しかし、水蒸気センサーの感度向上と安定化が研究室の主たる仕事になっていて、その他のことは国立宇宙科学研究所の大気球グループにお任せであったことから、気球技術の全容を理解する機会にはならなかった。

南極では、自分自身がエアロゾルゾンデを扱わねばならなかったし、同じ隊の柴崎和夫さん（現國學院大学教授）が大気球を使った窒素酸化物の分光観測をすると言うので、あれこれ手伝ううちに少々学習が進んだ。

国内で大型の気球を使うとなると、東京大学宇宙科学研究所（現・宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所）の大気球観測施設を使うのが一般的である。宇宙科学研究所の大気球実験には多くの利用者が参加するために、放球観測の機会が制限されることが大きな障害になった。対流圏のエアロゾルを対象にするとすると、季節による大気構造の違い、種々の中規模擾乱の影響、などを考えタイムリーに観測することが極めて重要となる。こんなぜいたくが許されるはずがない。そんなとき、運よく中国から「気球を使った観測をや

らないか」と言ってきた。

1990年代初めの中国では大気球観測はこれからという段階にあり、利用者は極めて限られていた。放球施設も新たに整備したところであるという。二つ返事でこの話に乗った。ここでまた、幸運なことがあった。昔の知り合いたちが大気球観測班にたくさんいたのである。私が南極観測隊に参加することが決まってから、大気球の放球やテレメトリーに関する基礎的訓練を受けることになった。三陸の宇宙科学研究所の大気球観測施設に向くと、そこで気球観測技術を勉強するために中国政府から派遣されて来た一団と偶然一緒

になったのである。数日間寝食を共に過ごし、私は南極へ彼らは故国へという風に別れたのであるが、その後彼らは中国の気球実験グループの中心メンバーになっていたのである。言うなれば、彼らと私は「気球実験をともに勉強した同期の桜」だったのである。技術的な話がツーカーで通じるというのは実に痛快であった（第7図）。

私は南極観測で使用したのと同型のパーティクルカウンターと新たに作成したエアロゾル粒子採集器の搭載を中国側に提案した。この提案はすんなり受け入れられ、中国科学院大気物理研究所と中国科学院安徽精密機械光学研究所のグループが我々のパートナーを務めることになった。それぞれのグループをまとめる係は石 広玉教授と周 軍教授で、以前からの友人であり何かとありがたかった。ただこの観測は4年ほどで打ち切りとなった。いろいろな事情があらうと思われるが、中国科学院の組織改変があり気球の運用グループのメンバーが大幅に変わったことが大きいように見えた。ベテランの転出が続き、細かいトラブルが多発するようになり、気球回収が出来ないことが増えてきた。その時点で、石 広玉さんから「一時中止しよう」と提案がありそれに従った。

太陽地球環境研究所で新たに仕事を始めるにあたっ



第7図 中国の大気球を使った対流圏・成層圏のエアロゾル観測の様子。北京郊外の香河にある中国科学院大気物理研究所の気球実験場（現在は放球場に建物がたてられこのような施設はない）。

て、不均一反応への関心とアジアの重要性が、研究対象の一つに黄砂を選ばせたことは既に述べた。ライダーを使った黄砂観測の結果（Iwasaka *et al.* 1983, 1988）は、発表当初はそれほど関心を引かなかった。しかし、その後中国の工業発展に伴い中国大陸起源の大気汚染物質の長距離輸送への関心が日本やアメリカで高まってきた。1990年を過ぎる頃からこの件に対する問い合わせが急増した。名古屋大学水圏科学研究所の北野 康教授（現名誉教授）から「黄砂のあの論文はおもしろいよ」と言われてびっくりしたことがあった。北野先生は地球化学の大家で海洋中の炭酸塩に關していくつも面白い成果を出していた。専門を異にする大先生がこの論文を見てくれたのかと驚きもしたが、広い分野の人が関心を持つトピックスなのだということがわかって大いに安心した。太陽地球環境研究所に転任後黄砂の勉強を本格化させるに当たって、こんなことも私の背中を押してくれた。

5. 中層大気観測計画（MAP）での夢、航空機観測

MAPが実施された期間（1981-1985）、気象分野の研究ツールとして航空機を常用する体制を準備しようという機運が盛り上がってきた。「中層大気の組成に

関する研究」も、日本 MAP の柱の一つでありこのサブプログラムにはきわめて多数の研究者が参加した。CO₂、オゾン、フロン、メタン、COS、NO_x、N₂O その他多くの化学組成が観測対象に挙げられていた。このサブプログラムには航空機による成層圏空気試料のサンプリングという魅惑的な企画が盛り込まれていた。名古屋大学水圏科学研究所の小野 晃教授（故人）をリーダーにこの計画が推進された。MAP 全体のことを考えると、ガス状の大気組成だけでなく大気エアロゾルや放射も同時に観測した方がよからうということで、私も航空機観測にかかわることになった。個人的には、この少し前から小型機を使った観測を始めていたので渡りに船というところがあった。

航空機は、細かく見ると一機ごとに構造が微妙に違い、同じタイプの飛行機でも機器の取り付け可能な位置が大きく違う。飛行性能についてもそれぞれ独特の癖がある。それゆえ、航空機観測に習熟するにはこれと決めた飛行機を様々に使い、ノウハウを集積すると同時にその航空機にふさわしい使い方や観測項目を絞り込んでゆく必要がある。一機の飛行機をあれにもこれにもと多様な観測をするよりも、複数機の航空機を使う目的に合わせて運用することが妥当なやり方と思われる。これらのことは、やはりやってみないとわからない点である。

MAP での機種選定では、「成層圏までサンプリング飛行する」が最優先され、昭和航空（株）が所有するフェアチャイルド・スウェリンジェン・マーリン 4（我々は、通常マーリン 4 と呼んでいた）が採用された。リモートセンシング・放射観測や反応性の低い気体のサンプリングなどでは極めて良好な結果を得たが、エアロゾルでは予想されたとはいえ苦労の連続であった。エアロゾルのサンプリングでは試料空気を取り込み口の工作や導入パイプ内で生じるエアロゾル変質に対する対策に圧倒的な時間がとられたのである。パイプを通して試料空気を機内の装置に導入する過程で、試料気体は機内温度の影響を受け多少なりとも昇温することが多い。このため、粒径の小さなエアロゾルが蒸発したり、湿度変化によるエアロゾル変質を起こしたりする。これに対する対策のかなめとなるのは、断熱と試料空気（装置内における）滞在時間の最適化に尽きるのだが、前者を完全に行うことは不可能であり、後者は取り込み口の形状や飛行速度と深く関係しており結果としては飛行プランそのものにも影響してくる。独立に決めかねるために、それらをフラ

イトごとに現場で調整しながらの観測であった。この航空機観測は、主に日本周辺域を調査範囲として何回ものフライトが計画されていたが、筆者は途中から南極に出かけることになった関係上、始めの時期と終盤のみの関わりとなった。

八尾空港の一室で、調査飛行に飛び出したマーリン 4 を待つ間、あちこちの機関から参加した皆さんと調査用の飛行機を持つことの大切さや飛行機観測にかかる夢をしゃべり合っただけの時を過ごすことが多かった。プロジェクトが終了してみると、個人的にはいろいろな技術を習得する良い経験となったものの、航空機使用を志向している全国の人達の「夢を叶える」という大目標に照らしてみると課題山積という感が大きかった。多様な観測対象に対応できる各種の飛行機の必要性から始まり、航空機を大学が所有することの是非まで、多くの課題が MAP の終盤には浮かび上がっていた。航空機観測を今後どうするか模索が続く中、音頭取りの小野 晃教授が体調を崩し入院を繰り返す生活に入った。

1988年1月に小野 晃教授逝去。航空機観測グループは取りあえず田中 浩教授（現名古屋大学名誉教授）を次のリーダーにたて事後を処置することになり、様々な残務整理と今後を睨んだ制度設計に入った。名古屋大学水圏科学研究所が中心になって、大学が専用機を保有する方向を探り始めたのはその数年後のことである。試験的な体制で航空機を多用した全国規模のプロジェクト研究が水圏科学研究所を世話役として実施されたが、その後の流れをみると、以前のスタイル（必要を感じた研究者グループがその都度航空機をチャーターする）に戻っているように見える。

その後、大きな組織が洞元になって飛行機をチャーターし複数のグループが参加するスタイルの観測等が試みられており、現状を打開しようとする努力は続けられているが、ノウハウを組織的に蓄積するにはいろいろな障害があり、20年以上が経過した今でも筆者にとっては積み残した感のある課題である。

6. 北極大気に向かう研究の流れ

南極成層圏のエアロゾルを観測相手にしたおかげで PSCs を勉強する大きな機会を得たのだが、前述したように、その経験はエアロゾル表面過程（不均一反応）が関与する大気現象に関心が向く大きなきっかけになった。1980年代の半ばを過ぎると、国際観測事業 MAP も華やかな観測の時はすぎさり、成果を発表す

る会議でも次第に速報的な発表は影をひそめ、研究の流れは幾つかの際立った話題に収斂されてくるようになりはじめた。

アメリカは南極の中層大気観測では出遅れていたとはいえ、オゾンホールが話題となるや即座に冬季の南極成層圏の飛行機観測をやったのけ、オゾンホール形成プロセスを解明する上で多くの有用な結果をもたらした。航空機を多用する観測研究スタイルは現在も続いており国際的な観測計画では圧倒的なアメリカの強みとなっている。

PSCsの分野では、ヨーロッパの研究者を中心に北極圏成層圏に照準を合わせた研究計画が盛んに提案されるようになってきた。PSCsと直結しているオゾンホールに関して言えば「オゾンホールはなぜ南極にしか発生しないのか?」「もし、北極圏にもそのようなことが起きればその影響は計り知れない(北極圏はたくさんの方が住んでいる)」などが研究者をして北極に関心を向けさせる大きなモチベーションとなっていた。そしてなによりも、ヨーロッパには北極の自然や文化・社会に関する長い研究の歴史があり、早晚ヨーロッパの研究者が北極圏成層圏オゾンの研究を本格化させることは目に見えていた。

名古屋大学空電研究所が太陽地球環境研究所に転換された直後、創設まもない熱気の中で、当時所長の職にあった故小口 高教授(名古屋大学及び東京大学名誉教授)を中心に北極研究構想が盛んに語られていた。すでに、超高層物理の分野ではノルウェーの研究者と一緒にスバルバル島でオーロラに関する観測研究を行っており、その実績を基盤に関連分野に呼びかければ、大気科学、環境科学、などの研究者から北極に関心を持ってくれる研究者が現れるかもしれないと期待されていた。一方で、国立極地研究所では数年前から南極研究をより深いものにせんとし、南北の両極での比較研究が重要であることを内外に喧伝してきた。

そんな状況の中で渡邊興亜教授(国立極地研究所、現名誉教授)が、「一緒に北極観測の拠点になる場所を探しに行こう」と声をかけてくれたのが私の北極観測のスタートになったのである。

太陽研に転じておおよそ2年の間に、研究室のスタッフも次々に赴任してきて、ある程度の規模の海外観測が行えるようになった(故松永捷司助教授、柴田 隆助教授、林 政彦助手、長田和雄助手、技術室の長谷正博技官、中田 滉技官などが観測の常連メンバーに

なる)。

私と渡邊興亜教授は、1990年にノルウェーに出かけスバルバル島のニーオールスンに手ごろな建物を見つけ、ノルウェーの国立極地研究所の助けを得ながらその建物を借りる契約をしてきた(このあたりの事情は、『北極圏の大気科学』(岩坂編 2000)にまとめてある)。我々がこの地に入る前から観測を始めていたノルウェーやドイツの研究陣と研究の重複や共同の仕方について打合せをしたが、いずれも好意的に我々の研究を受けとめてくれた。研究の重複をどのように考えるか、また先行グループの研究をどのように優先させ全体の調和をとるか、など各国の研究陣が類似的な研究課題を持ってひしめき合っているところに参入する場合の国際的慣行を身を以て学習することが出来た。

この観測地点はしばしば極渦の中に位置するため、極成層圏を観測するにはまたとない場所であった。早々に、日本からライダーや気球観測用の設備が持ち込まれ北極成層圏エアロゾルの観測が始まった。当初は、装置の状態をテストする程度の短期間の観測であったが、スタッフや大学院生が環境に慣れた2年目3年目になると極渦の発達する厳冬期に長期間滞在し、クリスマスや正月を現地のいろいろな国の人と祝いつつ観測する生活をする若者も次第に増えてきた。

北極成層圏で見られるPSCsは、高度分布からみると南極で観測されているものとはかなり変わっている。偏光解消度の著しく低い層が中心部にありその上下に高い偏光解消度の層がある3層構造をとることがしばしばあるのである。これをサンドイッチ構造と呼んで公表した(Shibata *et al.* 1997; Deneva *et al.* 2003)。この点について、大気科学的にはどのような意味を持ちオゾン破壊過程とどのようなつながりがあるのか(あるいは無いのか)を突き止めるには、さらに多くの項目について観測する必要がある。ライダーや人工衛星によるリモートセンシングのほかに、PSCs粒子を直接に採集することも必要と考えられる。このような大掛かりな観測は、もはや規模の小さな研究グループの研究ではやりおせない。国際的な規模で観測体制を組まねば望みえないレベルであり、期が熟すのを待っているうちに時が過ぎ今に至ってしまった。

北極では、成層圏観測とともに地表面付近の大気についても観測を行うことが出来た。対流圏のエアロゾルと言っても日本や中国で見かける鉱物質のエアロゾルの影響は相当に少なく、代わって海起源の海塩核と呼ばれているエアロゾルの存在が大きい。不均一反応

という目で大気を見ると、このことが極めて新鮮に映るのである。加えて、現地に入るのに南極ほどハードルが高くないためにある意味それほど緊張せずにフィールドに出かけることが出来る。たくさんの大学院生やポストクの若者が北極での観測に参加してくれた。なかでも原 圭一郎君（現、福岡大学助教）は、南極に行きたくて私の研究室にやってきたのだったが、機会を得ぬまま何年も過ごすことになった。その間もっばら北極に出かけて地表付近の大気中に見られるエアロゾル粒子を含む不均一反応を研究対象にした。いわば南極の代わりに北極をとということになったのであり、いささか気の毒でもあったし、指導教官として申し訳なさも感じていたが如何ともし難かった。北極は南極と異なり、かなりの高緯度地帯でも人間活動が盛んであることから、人間活動の影響が頻繁に見られる。暖流がヨーロッパ沿岸域を流れていることはよく知られているが、このようなことから海と大気との間の物質の交換過程においても南極とは異なった面白さがある（Hara *et al.* 1999）。

北極圏では、自然発生するエアロゾルとして海塩エアロゾル（海塩核）の占める役割は大きい。一方で人間活動が活発なヨーロッパ、ロシアがあり、海塩エアロゾルと人為起源物質とのかわりかは当然のことながら多くの研究者が目撃してきたテーマである。海塩エアロゾルがガス状窒素酸化物との間で引き起こしている一連の反応は、後述するように黄砂がガス状窒素酸化物との間で反応するプロセスに通じるところがあり、人間活動が周辺環境に与えるストレスがどのようにして現れどのようにして緩和されてゆくのかを示してくれている（Hara *et al.* 2004, 2005）。

その後、原 圭一郎君は南極観測隊に参加して、北極で仕事をしている時期に作り上げた航空機を使った研究構想を実現させることが出来た（Hara *et al.* 2003）。南極で航空機を使って地表面付近から自由大気圏まで、エアロゾルの混合状態、表面反応などを精査し（Hara *et al.* 2006）、ゆくゆくは極域大気圏での不均一過程を南極と北極で比較しようとする構想であり、彼が南極に出かける準備をしている間にもあれやこれや楽しい議論をした。

7. 黄砂研究の本格化

北極圏では海塩エアロゾルが重要な自然起源の大気エアロゾルであるように、北東アジアにおいては黄砂エアロゾルが大きな地位を占めている。大気中の粒子

状物質の重量濃度のなかにどのような物質が第1位を占めるかを見れば、多くの都市や地域で黄砂が第1位を占めている。IPCC第3次報告書（IPCC 2001）では、世界平均で考えると、大気中に浮遊する粒子状物質のなかでは鉱物粒子（日本においては黄砂と読み替えても大きな間違いはない）が最も大きい質量濃度を示している点を強調して、黄砂研究の重要性を指摘している。

2000年を迎えて、国際プロジェクトACE-Asia（Aerosol Characterization Experiment in Asia and Pacific）が実施されるようになると、俄然、黄砂をめぐる研究が大きな関心と呼ぶようになった。このプロジェクトは、アメリカのNASAの研究者らが中心になって提唱してきたもので航空機観測を多用する点が大きな特徴であった。当然のことながら、航空機による観測のみでは全体像が把握できず、さまざまな観測プラットフォームも併用する必要があり、国際的に呼びかけがなされていた。多くの内外の研究者が黄砂に触れることになったのは当然である。

この頃になると、国際的な共同研究を行う際の研究の進め方が大きく変わってきたことを実感せざるを得なかった。MAPの頃は、学術会議の決議をもらったり文部省の測地審議会の建議を出してもらったりして文部省に交渉し、それを受けて文部省が特別の予算を組むのが通例であった。当然、準備に膨大な労力と時間がかかる。しかし、ACE-Asiaでは、極端な言い方をすればやや大ぶりの資金を獲得している研究者がそれぞれのチームを率いて参加するという雰囲気であり、資金源もいろいろな機関や組織から調達されていた。「一緒にやりたい人この指とまれ」という雰囲気なのである。日本が豊かになったことを実感するとともに、機動性に富む研究組織作りが重要であることを痛感した。

我が国における黄砂の大気科学的研究は、磯野謙治の研究に源流の一つがあると考えている。磯野らの黄砂の氷晶核能力に関する実験は（例えば、Isono *et al.* 1959）今でも引用されるほど、黄砂の面白いところを突いた仕事であるが、不思議なことに、黄砂に関する研究はその後しばらく空白時期を迎える。当時、黄砂が中国の乾燥地帯に源を持っていることは広く認識されていたが、大気中を移動・拡散してくるプロセスやその環境科学的意味についてはさほど関心と呼んでいなかった。しかし、大気エアロゾルが大気をどのように特徴づけているかを考える場合には、これらの

ことに関心を向けざるをえなくなる。例えば、太陽放射を散乱させる性質は大気中に浮遊している時に発揮される性質なのである。それゆえ、「どこ」に「どれだけ」浮かんでいるかを知ることは本質的な作業になる。浮遊している間に黄砂粒子表面で進行する化学反応を理解しようとするなら浮遊状態のほかに周辺大気の組成、温度なども含めて理解する必要も出てくるのである。

ここで黄砂研究が本格化する以前の状況を記しておきたい。

日本の公害研究があちこちの研究機関や大学で行われるようになり、それなりの研究体制が整った頃、関係者の間でしきりに中国のことが話題に上ようになってきた。中国が文化大革命の混乱から立ち直り重工業の振興に力を入れ始めるとかつて日本が経験した公害時代が到来するのではないのかというのである。中国の深刻な大気汚染の状況も盛んに報道されるようになってきた。黄砂は汚染気塊のトレーサと見なす空気が強くなってきた。

1970年代後半から中国は対外政策を一新する。解放政策を打ち出した中国からは多くの中国人研究者や学生が日本を訪れるようになった。私が石 広玉教授（中国科学院大気物理研究所）、林 海氏（元中国科学院）等と親交を結ぶようになったのはその頃である。黄砂を研究対象に選んだ者にとって中国の地を訪れることは何よりの願いである。中国では、黄砂対策（中国では砂塵嵐によってしばしば人的被害をも含む大きな被害が生じていた）のため日本からの観測技術の導入に極めて熱心であった。中国科学院ではライダーによる黄砂観測を計画しており、早々に共同研究をすることになった。しかし、この研究は当時の厳しい国際情勢に阻まれ、日本からの電子部品や光学部品の調達思うようにならず不本意な結果に終わった。その後、徐々にではあるがこの種の規制が緩和されたことや、中国側でも精密機械や電子機器の品質が上がってきたこと等から当時のようなことはなくなった。当時中国側の若手研究者として参加していた邱 金桓教授（中国科学院大気物理研究所）は、今では中国のライダーなど大気のリモートセンシング研究の中心的人物の一人になっている。

日本の大学院に留学する中国の若者も急増し、私と一緒に大気エアロゾルや黄砂の研究をする中国の若者もそれに伴って増えてきた。彼らの多くは、日本やアメリカに黄砂研究者がいることが大きな驚きのようで

あった（もちろん今はそのようなことはないが）。それに、石 広玉教授が放射の専門家であったことも大いに幸運であった。当時、放射の分野ではエアロゾル粒子が太陽放射や地球放射に与える影響について強い関心が寄せられるようになっていた。このような状況が、中国研究者との共同研究を進めるうえで大きな追い風になってくれた。

はじめて、中国で気球観測実験を行ったのは1990年であり、中国に観測に行くようになってからすでに6年が経過していた。この6年間は、ひたすら準備と試行に費やされ、それらが陽の目を見るのはいつのことやらと思うこともしばしばであった。ライダーの共同研究に続いて気球を使った共同研究も浮上してきた頃の事情はすでにふれた（第4節参照）。前述したように、中国側の気球運用グループに多くの知り合いがいたことは心強かった。とはいえ、気球観測がいささかの成果を出せるようになるまでやはりそれなりの準備時間が必要であった。

気球観測の初期には、大型気球を使った。中国での気球観測では、まだユーザが多くなく比較的我々の希望が通りやすかった。しかし、前述したように、装置の回収率は次第に低下して、個々の観測結果は集積されるものまよりの悪いものしか得られず機動性が高く安定して運用できる気球の開発が痛感された（Zhou *et al.* 1994； Xu *et al.* 2001）。「いつでも、どこでも、簡単に」放球できることが理想的であり、自分たちで気象ゾンデ並みに取り扱ひの簡単な小型気球の開発を決心せざるを得なかった。

1990年に新たにスタートした創成的基礎研究「東アジア太平洋域における地球環境変動の総合的研究」（リーダ田村三郎東京大学名誉教授）に参加させてもらい、小型気球に搭載するOPC（Optical Particle Counter）の開発・改良に本格的に取り組む機会がおとずれた。ポイントになるところは構造を大幅に単純化するために、多くのOPCが側方散乱を利用しているのに反して、前方散乱光を利用するようにした。直達光の除去などの手間はかかるがこのことによって振動などに強い構造の光学系が作れることや比較的強度の強い散乱光を得ることができる利点がある。また、市場に出回り始めた半導体レーザや光ダイオードのような固体の素子を使えば、大幅に重量を軽減し、しかも容量を小さくすることが出来た。林 政彦助手（当時、現在福岡大学教授）、長谷正博技官（当時）、中田 滉技官（当時）、土屋政義氏（当時シグマテック株式

会社社長、故人)などの皆さんと一緒にあって少しずつ手直しを加え、数年してメーカーに製造を全面的に委託できるようになった。その後、観測で使用する OPC は、この形を原型とし少しずつ実情に合わせて改良したのを使ってきた。南極での気象の定常観測の一部として使われたりしたのは望外の喜びであった。ごく最近、南極観測の気象定常部門で行われていた10年以上の OPC 気球観測のまとめがなされ、ピナツボ火山噴火の影響が1999年まで見られたことをはじめ経年変化や季節変化について興味ある事象が指摘されている(木津ほか 2010)。

小型化した OPC を使った最初の研究対象は「チベットのオゾン問題」であった。チベット上空で発生するオゾン極小域をチベットのオゾンの谷(Tibetan Ozone Valley)と呼んでいる。当然のことながら南極オゾンホールとの関連で、中国国内では特に関心が高かった。当然 PSCs に相当する役回りを演じる物質があるかどうかに関心が集まった。このチベットオゾンの谷間は、夏の期間に発生する。夏の強い上昇流がオゾン濃度の少ない空気を成層圏付近まで運んでいることから生じる単純な力学的現象なのか、それに伴って生じる寒冷な気塊の中での不均一反応が一役買っているのか、が焦点になった。

結果として、不均一反応がかかわっている積極的な証拠は得られなかった(Shi *et al.* 1996; Zheng *et al.* 2000; Bai *et al.* 2000; Zhang *et al.* 2001)。この観測は極めて限られた季節に行われたものである。気球こそ高い軽便性をもったものに出来上がったが、観測チームが思い立ったときにソレッと簡単に行ける場所ではない。おのずとチベットに入りやすい時に限られる(例えば、厳冬期は行動が難しいなど)。また、仮説を検討するための関連情報も極めて限られることから、結論にはある程度の甘さが付きまとった(Tobo *et al.* 2007a, b, 2008)。どの観測においても悔いは残る。この観測については、周辺情報の少なさには泣かされた。観測を始める時には簡単に入手できると想定していた情報が入手できないために肝心の観測値が十分生かせないなど、野外観測を成功させる上で致命的な障害がいくつも出てきた。不完全燃焼気味にキャンペーンは終わったが、小型気球用の OPC がシステムとしてほぼ仕上がったことが大きな救いであった。

このチベットでの観測結果は、妙なことが原因で再び関心もたれ始めた。Lawrence が Nature Geoscience の news & view でアジアの汚染大気の拡散と

アジアモンスーンの関係性を論じた際に、私どもの観測結果(Tobo *et al.* 2007a)を引用したのである(Lawrence 2011)。しかも、シンポジウムのプロシーディングス原稿までも、発表当時ほとんど関心を呼ばなかったが彼のおかげで論文が引用されたり質問を受けるようになったのだが、たくさんの読者を持つ雑誌の威力に感心するとともに学術情報のありようについて今更ながら考えさせられる出来事であった。

中国で気球観測が本格化する中で、次の世代の日の研究交流が少しずつ育ってきたことはうれしい出来事であった。かつて北京大学の大学院生であった張代洲さんは熊本県立大学にポストを得、その後、しばしば我々とキャンペーンをともにした。彼は今や熊本県立大学を代表する教授として活躍している。中国に留学して現地の大学院生と寮生活を共にする者も出てきた。いつの時代も人と人のつながりは研究活動に大きな役割を果たしている。次の世代では、さらに豊かな人のネットワークが育つことを願っている。

2000年、ACE-Asia プロジェクトが始まる頃には、黄砂の存在は広く知られるようになっており、黄砂発生源地での気球観測は多くの関係者が望むところとなっていた。チベットでの観測が一段落する頃から、敦煌での気球観測実験を石教授らと企画し始めた。観測に使う土地や実験室探しがはじまり、何回かの予備調査の結果、敦煌市気象局のキャンパスが実験観測場所としてよからうということになった。中国科学院大気物理研究所が仲介して実験室、ライダー観測用コンテナハウス1棟、気球放球場、その他の借用が決まり2000年早々から本格的な観測がはじめられた。小型気球用の OPC 開発に成功した勢いに乗って、小型気球に搭載できるエアロゾル粒子のサンプラーの開発も急ピッチで進められた。

気球を使った大気エアロゾルの直接採集は、これまでも多くの研究者が試みてきたがいずれも採集装置の提案と可能性を示すにとどまっていた。しかも、提案の多くは大型気球を使用したものであり我々が望むような軽便な装置にはなっていなかった。何回かの試作を繰り返してきわめてコンパクトな装置が作られ、2 kg ゴム気球で十分成層圏高度まで観測できるシステムが仕上がった(このあたりの事情は、一般向書籍‘黄砂その謎を追う’(岩坂 2006)に詳しい)。2 段式のインパクターを複数台搭載し、高度によって順に1台ずつ使っていく、すべてを使い終わった後パラシュートで緩降下させ落下したところを回収するもの

である。この観測はきわめて良好に推移し興味深い結果をもたらした。その一つは、バックグランド黄砂と呼ばれている現象の理解に決定的な結果をもたらしたことがあげられる (Iwasaka *et al.* 1988, 2003, 2004; Matsuki *et al.* 2002, 2003)。また、黄砂表面に大気汚染物質が付着していることを実証した気球観測結果等も、これまでのあれやこれやの議論に終止符を打つ結果として関心と呼ぶとともに、次の目標を構想する上で役に立った (例えば, Trochkin *et al.* 2002, 2003)。一連の結果はたびたび数値モデルの検証やほかの地点の結果との比較材料として引用されている。

日本列島の数 km 上空に黄砂層が頻繁に出現することは、ライダー観測が広く行われるようになった頃から関係者が一様に認めるところとなっていた。この黄砂層の出現は必ずしも (天気図に記載されるほどの) 低気圧活動に伴うものでもなく季節によって顕著な変化を示すわけでもない。飛行機観測では夏場にも見られることが確認されており (Matsuki *et al.* 2003)、年がら年中見られる現象と言ってもよい (第 8 図)。筆者らは、すでに「弱い黄砂 (weak KOSA)」の呼び名でこの現象の重要性を喚起していたものの、夏のライダー観測が難しかったことから決定的な結果が得られていなかった (Iwasaka *et al.* 1988)。夏の北太平洋の高気圧の張り出しが強い時期は、西寄りの風の影響が減少し (地上では) 大陸起源物質の輸送状態を議論するにはきわめて興味深い状態になる。しかし、頻繁に対流性の雲が発生する時でもある。このため、夏の期間に (それに先立つ梅雨の時期も含めて) ライダー観測で良好な結果を得るのは意外に難しい。おのずと、気球や航空機に頼らざるを得ないことになる。

筆者らはこのバックグランド黄砂が高頻度でタクラマカン砂漠方向からの気塊によってもたらされていることに強い関心を抱いていた。タリム盆地の風系を長年の記録によって論じた論文は、タリム盆地の地上風は東よりの成分を強く持っていることを明らかにしている。上空の偏西風と逆向きであり、しかもタリム盆地の東側にある唯一の開口部から吹き込んでいるため、タクラマカン砂漠からまきあがった黄砂粒子が開口部から流出しにくい状況を作っている。盆地の周縁は、開口部を除いて平均高度 4000 m の山々が連なっている。これらの地形は常に強い局地循環 (山谷風) を作り出しており、盆地全体としては、タクラマカン砂漠の砂塵を常に巻き上げ、山頂を超える高度あたり

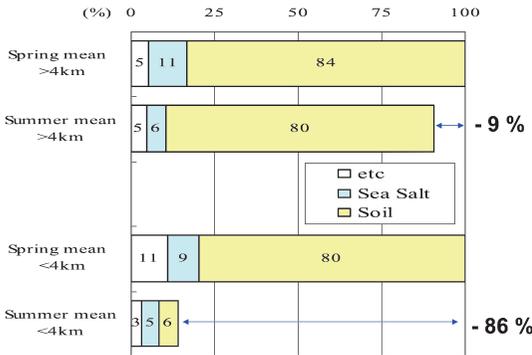
までまきあがった砂塵は偏西風で風下側に流されている。このようにして、強い低気圧活動がなくともこの砂漠からは季節にかかわらず砂塵が巻き上がっており、いわば砂塵のプールのような状態になっているのである (Iwasaka *et al.* 2003, 2004)。そして、山頂高度を超えたものから順に偏西風によって運ばれる。タクラマカン砂漠は、黄土高原やゴビ砂漠と並んで黄砂の発生源地とされることが多いが、そのこと自体間違った表現ではないものの、発生プロセスを支配する要因にそれぞれの地形の差異が深くかかわっており、砂塵嵐の特徴にも反映しているものと想像される。例えば、タリム盆地が低気圧活動の影響を受けて砂塵嵐が発生すると、ゴビ砂漠の砂塵に比べより長い期間黄砂エアロゾルの流出が続く (プールに多量にたまった砂塵がいつまでも流れだしている) など衛星画像を見ただけでも顕著な差がある。

このような各々の発生源の違いが気候や環境にどのように影響するのかが興味深い問題に思われる。すでに、数値モデルではゴビ砂漠起源の黄砂は地表面付近を輸送される傾向が強く、北京などで大きな被害をもたらすものはゴビ砂漠からのものが多いこと等が示唆されている (例えば, Satake *et al.* 2004)。

ACE-Asia 以降、ヨーロッパではあらためてサハラダストに焦点を当てた研究プロジェクトが実施されるようになった (例えば, SAMUM: Saharan Mineral Dust Experiment は、ドイツをはじめとするヨーロッパの研究者が 2004 年に進めたサハラダストに関する大気科学分野のプロジェクトである)。筆者の記憶する限り、1970 年代にサハラダストが大いにヨーロッパで関心と呼んで以来ではないかと思うが、アジアのダスト研究が新たな地平を開いたことが大きなきっかけになっているように見える。

ACE-Asia の熱気がまだ冷めやらぬ 2004 年 12 月に金沢大学に職を転じた。ここでは、日本海に面した土地柄を反映して、日本海や中国大陸の大気環境に関心を持つメンバーが中心になって 21 世紀 COE プログラム (リーダーは早川和一教授) を実施中で私はそのグループに参加させてもらうことになった。名古屋大学水圏科学研究所、名古屋大学空電研究所に続いて三度目の職場である (水圏研時代に小野研究室から武田研究室に移ったのを含めれば 4 回の職場変えということになる)。

日本上空での航空機観測(1997~2002)



(Matsuki et al., JGR 2003)

第8図 日本上空で行われた航空機観測の結果をまとめて、1 μm以上の粒子の種類と季節に分けて検討したもの(Matsuki et al. 2003)。高度4 km以上(上の2本の棒グラフ)では春も夏も濃度はあまり変わらず、砂塵(黄砂)が圧倒的な成分である点でも変わりはない。しかし、高度4 km以下(下の2本の棒グラフ)では、春と夏では全く様相が異なる。春は圧倒的に砂塵が主成分であるが、夏になると濃度は激減し相対的に海塩等の寄与も増えてくる。

8. 表面過程, 再び

黄砂観測の眼目は黄砂表面反応の解明であったが、飛行機観測や気球観測ではサンプリングできる量の少なさには常に泣かされてきた。このため、黄砂エアロゾルを一粒ずつ分析する個別粒子分析法(Single Particle Analysis)という手法に頼らざるを得ない。この手法では、粒子の一つ一つの形態や化学元素濃度について分かるにすぎない。化学的あるいは物理的な特徴を個々の粒子レベルから黄砂雲全体にわたって議論しようとするれば一つの技法だけに頼ると言うのはどだい無理な注文なのである。個別粒子分析法で得られる情報のうち、最も重要なものは、黄砂粒子の鉱物学・岩石学的なタイプと粒子の混合状態であろう。黄砂は単一の鉱物である場合もあればいくつかのものが混ざった状態になっているものもある。さらに、このように複雑な粒子が、(表面反応を通して)大気汚染起源の物質を付着させているか否かを議論するにはまた一段細かいレベルで混合状態を知る必要が出てくる。

全く異なった方向からのアプローチということで、

ライダーを使って黄砂粒子と水蒸気量を同時に測ることも試みた(Sakai et al. 2002)。この時点では、水蒸気量を地表面付近から15 kmあたりまでをルーチンベースで測るには相当にしんどい(長時間の積算データが必要なため)仕事であり、条件に合う光学部品などが容易く入手できる環境が整うまで一時お預けの仕事になった。

一般的に、黄砂粒子が発生源を離れて大気中を浮遊する間に何らかの原因で物理的あるいは化学的性質を変えてゆくことを変質と呼んでいる。しばしば問題になるのは、硫酸化合物や窒素化合物が黄砂粒子に取りつき粒子表面の状態を変えてしまう点である(時には粒子の形や相が変わることもある)。粒子表面にこれらの物質が取りつくに当たっては、それらの物質の濃度はもちろん、大気中の水蒸気、オゾンなど多くの大気組成が関与しているものと想像される。

水分の重要性については、多くの観測例が示しており、その水分の起源として日本海や東シナ海が注目されている(Matsuki et al. 2005a, b; Zhang et al. 2005)。とりわけ、相変化を起こして液相の粒子に変質したような黄砂は周辺大気との関係が固相であった場合と大きく変わり、多種類のガスと反応するようになる。また、海洋起源と考えられる塩酸の存在量が高いようなときには、一度窒素化合物で変質した黄砂粒子はさらに変質の度合いを進行させ、人為起源物質で汚染された痕跡が消えてしまうことすら予想されるのである。事実、そのようなことをうかがわせる事例が見つかっている(Tobo et al. 2010)。このような事例は、地球表層の物理化学的な多様性を通して浮遊する黄砂粒子の不均一反応やその影響を考えることの重要性や面白さを示唆している。

我々は、硫酸化合物などで汚された黄砂を見ると、単純に大陸起源の汚染物質が黄砂粒子に付着して日本にやってくるようなイメージを抱きやすいが、そう単純な場合ばかりではない。日本海や東シナ海が意外に強力な粒子変質のきっかけを作りうることを知らねばならない。多くの研究者は、大陸起源の気塊に含まれていた黄砂粒子が窒素化合物とともにやってきた(粒子の個別分析では粒子表面に硝酸塩を作っているなど)場合には、窒素化合物の起源として中国大陸沿岸部の人間活動の高い地域を想定することが多い。しかし、よく調べてみるとこのようなイメージはいささか単純に過ぎ、時に日本海の影響を考慮しなければならない事例も相当存在していると考えられるのである。

大気の質がこの狭い海を渡るときに大変わりすることは日本列島上の水循環（雲，降水，低気圧等）を見れば容易に想像できる。この大気質の変化に大気汚染物質も含まれていると考えればこの狭い海域の重要さをいささか感じてもらえるのではなかろうか。

環境問題の一つに大気汚染物質の越境問題がある。過去において、ヨーロッパ諸国間、あるいはアメリカ・カナダ間で越境する大気汚染物質に関して相当深刻な問題があった。これらの問題の場合、多くは陸続きの国々の間で生じた問題だったのである。日本が抱えている越境汚染物質に関する環境問題のややこしさは日本海や東シナ海をわたる時に、空気が海の影響によって大きく性質を変えることがあるという点にある。この因果関係や被害加害の関係を明らかにするためには、日本海や東シナ海が存在が大気の性質をどのように変えているかを充分に知っておかねばならぬのである。その知見を関係国や関係地域の共通認識とするには相当の工夫が必要であることは自明であろう。

ごく最近、黄砂が微生物の担体として機能している可能性を示唆する結果がたくさん出てきている (Iwasaka *et al.* 2009; Maki *et al.* 2010) (第9図)。黄砂に関して言えば、韓国や台湾では早くから黄砂の健康被害という観点から黄砂と微生物の関係に関心が

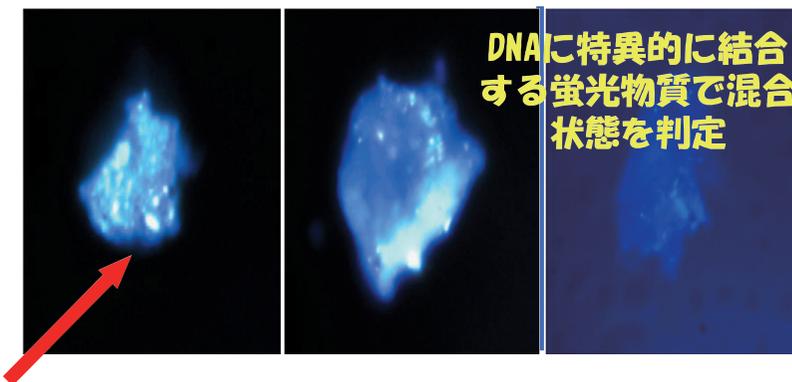
集まっていた。金沢大学に移って以来、黄砂と微生物の関係は私の強い関心事になっている。三井物産の支援を受けて能登半島の先端で観測サイトを経営する機会に恵まれた。砂塵とともに移動する微生物に関してはヨーロッパやアメリカでも強い関心を集めておりこの分野は一つのブームともなっている。空気中の微生物と言うと、即人への健康被害と関心が向くのであるがそのようなことばかりでなく、恐らく生命史あるいは地球史という観点からのアプローチや水循環との関わりからの探求がこの分野をさらに深いものにするのではなかろうか。また、発酵という技術との関係についても意外に興味深い研究課題が潜んでいそうな感じがする。

9. 本をかくこと

「論文をかけ！」研究や教育を生業とするものにとって耳にタコが出来るほど聞かされる言葉である。大学院生の頃「Publish, or Perish! (論文をかけさなければ大学から消え去れ!)」という恐ろしい言葉がアメリカの大学院生の間では当たり前になっている、と聞かされてこりゃ大変な時代だと感じたものである。さらに大学院時代の恩師の永田 武は「ちゃんとした本を英語で書いてこそ一人前なのだ」とつねづね言っており、論文に加え英語の本も書かねば大学の先生はつとまらんのかと何とも言えない気分になったものである。

大量の論文生産に走る傾向の強い昨今の状況の良し悪しはともかく、成果発表の方法が急速に多様化しつつあることは肝に銘じておく必要がある。すでに、オープンジャーナルと呼ばれる学術誌が多数登場し、査読の段階から多くの人の目にふれながら（時には不特定の読者からのコメントを受けながら）論文の改訂をするやり方もとられるようになってきている。研究成果が多くの人目に触れることそれ自体をよしとす

KOSA-Bioaerosol collected at Dunhuang: DAPI 染色



2007年敦煌(地上700 m: 海拔1900 m)

(Maki *et al.*, 2008; Iwasaka *et al.*, 2009)

第9図 DNAを試薬で特異的に染色して黄砂表面にDNAがあるかないかを調べた結果、蛍光顕微鏡で観察される白く輝いてみえるスポット上の光はDNAの存在を示している。

る流れは、論文の引用回数の多いことを持ってよしとする考えが強まるにつれ顕著になってきている。好き嫌いを言わず多様なやり方で成果発信に心がけねばならぬ時代と思っている。

何冊か書いた一般向けの本の中で「黄砂 その謎を追う」(岩坂 2006)は、大学入試の問題やさる教材会社の中学生向けの問題集に使われたりして、学術論文とは一味違う反応があって愉快的思いをした。今回の授賞理由の中に、本の出版も挙げて頂いており、大変うれしく感じたものである。

10. さいごに

私の仕事は多くの人に支えられ、そしてここに書いたように、多くの幸運が重なって出来たようなものである。

大学院時代にお世話になった永田 武先生や等松隆夫先生、そして名古屋大学の水圏科学研究所時代に指導頂いた磯野謙治先生、小野 晃先生や、武田喬男先生。お礼を申しあげようにも既に鬼籍に入られた。太陽地球環境研究所に移ってからは、小口 高教授に終始励ましをいただいていたが、この稿を書いている途中に訃報を受けた。仕事をともにした松永捷司名古屋大学助教授と土屋政義シグマテック社長は、若い歳をおしまれながら逝った。この道に入って多くの時間がたったことを思わずにはいられない。石 広玉教授(中国科学院大気物理研究所)には若い頃から世話になり、中国でのフィールド観測を支えてもらった。感謝この上ない。

名古屋大学時代、金沢大学時代を通して優れた多くの職場の同僚や研究室のスタッフと研究を進めることが出来た。また、元気ある多くの大学院生や研究生諸君と研究を進めることが出来た。ただただお礼と感謝あるのみである。それぞれの分野で今後ますます活躍されるよう願っている。

また、受賞にあたって推薦の労を取っていただいた皆様に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- Bai, Y.-B., G.-Y. Shi, K. Tamura, T. Shibata, Y. Iwasaka, S. Kaneta and T. Takamura, 2000 : Aerosol optical properties derived from simultaneous sun-photometer and aureolemeter measurements in Lhasa. *J. Environ. Sci.*, **12**, 439-443.
- Cadle, R. D., C. S. Kiang and J.-F. Louis, 1976 : The global scale dispersion of the eruption clouds from major volcanic eruptions. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3125-3132.
- Collis, R. T. H., 1966 : Lidar : A new atmospheric probe. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **92**, 220-230.
- Deneva, D., T. Shibata, Y. Iwasaka, M. Nagatani, K. Shiraishi, M. Hayashi, M. Fujiwara and R. Neuber, 2003 : The mixing state of polar stratospheric cloud particles in "sandwich structure" observed by lidar. 1. Determination of the mixing state of PSC particles. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 747-757.
- Hamill, P., O. B. Toon and C. S. Kiang, 1977 : Microphysical processes affecting stratospheric aerosol particles. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1104-1119.
- Hara, K., K. Osada, M. Hayashi, K. Matsunaga, T. Shibata, Y. Iwasaka and K. Furuya, 1999 : Fractionation of inorganic nitrates in winter Arctic troposphere : Coarse aerosol particles containing inorganic nitrates. *J. Geophys. Res.*, **104**, 23671-23679.
- Hara, K., S. Yamagata, T. Yamanouchi, K. Sato, A. Herber, Y. Iwasaka, M. Nagatani and H. Nakata, 2003 : Mixing states of individual aerosol particles in spring Arctic troposphere during ASTAR 2000 campaign. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4209, doi : 10.1029/2002JD002513.
- Hara, K., K. Osada, M. Kido, M. Hayashi, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, T. Yamanouchi, G. Hashida and T. Fukatsu, 2004 : Chemistry of sea-salt particles and inorganic halogen species in Antarctic regions : Compositional differences between coastal and inland stations. *J. Geophys. Res.*, **109**, D20208, doi : 10.1029/2004JD004713.
- Hara, K., K. Osada, M. Kido, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, G. Hashida and T. Yamanouchi, 2005 : Variations of constituents of individual sea-salt particles at Syowa station, Antarctica. *Tellus*, **57B**, 230-246.
- Hara, K., Y. Iwasaka, M. Wada, T. Ihara, H. Shiba, K. Osada and T. Yamanouchi, 2006 : Aerosol constituents and their spatial distribution in the free troposphere of coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res.*, **111**, D15216, doi : 10.1029/2005JD006591.
- Hayashida, S. and Y. Iwasaka, 1985 : On the long term variation of stratospheric aerosol content after the eruption of volcano El Chichon : Lidar measurements at Nagoya, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 465-473.
- Hayashida, S., A. Kobayashi and Y. Iwasaka, 1984 : Lidar measurements of stratospheric aerosol content and depolarization ratios after the eruption of El Chichon volcano : Measurements at Nagoya, Japan.

- Geofis. Int., **23**, 277-288.
- IPCC, 2001 : Climate change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the IPCC [Houghton, J. T. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, 881pp.
- Isono, K., M. Komabayasi and A. Ono, 1959 : The nature and the origin of ice nuclei in the atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **37**, 211-233.
- Iwasaka, Y., 1977 : The determination of the size distribution function of the stratosphere aerosols by two-color lidar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 457-464.
- Iwasaka, Y., 1985 : Lidar measurement of the stratospheric aerosol layer at Syowa station (69.00°S, 39.35°E), Antarctica. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 283-287.
- Iwasaka, Y., 1986a : Measurement of depolarization of stratospheric particles by lidar —A case study on the disturbed stratospheric aerosol layer by the volcanic eruption of Mt. El Chichon. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **38**, 729-740.
- Iwasaka, Y., 1986b : Non-spherical particles in the antarctic polar stratosphere —increase in particulate content and stratospheric water vapor budget. *Tellus*, **38B**, 364-374.
- Iwasaka, Y., 1986c : Lidar measurement on the Antarctic stratospheric aerosol layer : (II) The changes of layer height and thickness in winter. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **38**, 99-109.
- 岩坂泰信, 2000 : 日本の北極観測. 北極圏の大気科学 (岩坂泰信編), 名古屋大学出版会, 74-80.
- 岩坂泰信, 2006 : 黄砂 その謎を追う. 紀伊国屋書店, 228 pp.
- Iwasaka, Y. and M. Hayashi, 1991 : Nitric acid trihydrate particle formation in the polar stratosphere and its effect on nitric acid transport to the troposphere. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **43**, 667-675.
- Iwasaka, Y. and S. Hayashida, 1981 : The effects of the volcanic eruption of St. Helens on the polarization properties of stratospheric aerosols : Lidar measurement at Nagoya. *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 611-614.
- Iwasaka, Y. and K. Isono, 1977 : Lidar observation of the stratospheric aerosols at two different wavelength, 0.6943 μm and 1.06 μm . *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 117-120.
- Iwasaka, Y. and K. Kondoh, 1987 : Depletion of Antarctic ozone : Height of ozone loss region and its temporal changes. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 87-90.
- Iwasaka, Y., H. Minoura and K. Nagaya, 1983 : The transport and spatial scale of Asian dust-storm clouds : a case study of the dust-storm event of April 1979. *Tellus*, **35B**, 189-196.
- Iwasaka, Y., T. Hirasawa and H. Fukunishi, 1985 : Lidar measurement on the Antarctic stratospheric aerosol layer : [I] Winter enhancement. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **37**, 1087-1095.
- Iwasaka, Y., T. Ono and A. Nomura, 1986 : Changes in aerosol content and temperature in the Antarctic spring stratosphere : Lidar measurement at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E) in 1983, 1984 and 1985. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1407-1410.
- Iwasaka, Y., 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.
- Iwasaka, Y., T. Shibata, T. Nagatani, G.-Y. Shi, Y. S. Kim, A. Matsuki, D. Trochkin, D. Zhang, M. Yamada, M. Nagatani, H. Nakata, Z. Shen, G. Li, B. Chen and K. Kawahira, 2003 : Large depolarization ratio of free tropospheric aerosols over the Taklamakan Desert revealed by lidar measurements : Possible diffusion and transport of dust particles. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8652, doi : 10.1029/2002JD003267.
- Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, Y. S. Kim, A. Matsuki, D. Trochkin, D. Zhang, M. Yamada, T. Nagatani, M. Nagatani, Z. Shen, T. Shibata and H. Nakata, 2004 : Pool of dust particles over the Asian continent : Balloon-borne optical particle counter and ground-based lidar measurements at Dunhuang, China. *Environ. Monit. Assess.*, **92**, 5-24.
- Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, M. Yamada, F. Kobayashi, M. Kakikawa, T. Maki, T. Naganuma, B. Chen, Y. Tobo and C. S. Hong, 2009 : Mixture of Kosa (Asian dust) and bioaerosols detected in the atmosphere over the Kosa particles source regions with balloon-borne measurements : possibility of long-range transport. *Air Qual. Atmos. Health*, **2**, doi : 10.1007/s11869-009-0031-5.
- Junge, C. E., C. W. Chagnon and J. E. Manson, 1961 : A world-wide stratospheric aerosol layer. *Science*, **133**, 1478-1479.
- 木津暢彦, 林 政彦, 山内 恭, 岩坂泰信, 渡辺征春, 2010 : エアロゾルゾンデによる南極昭和基地上空の成層圏・対流圏エアロゾル濃度の季節・経年変化の観測. 南極資料, **54**, 760-778.
- Kondratyev, K. Y., L. S. Ivlev, V. F. Krapivin and C. A. Varostos, 2005 : *Stratospheric Aerosol Properties*. Springer, 606pp.
- Lamb, H. H., 1970 : *Volcanic dust in the atmosphere :*

- with a chronology and assessment of its meteorological significance. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **A266**, 425-533.
- Lawrence, M. G., 2011 : Asia under a high-level brown cloud. *Nature Geosci.*, **4**, 352-353.
- Maki, T., S. Suzuki, F. Kobayashi, M. Kakikawa, Y. Tobo, M. Yamada, T. Higashi, A. Matsuki, C. Hong, H. Hasegawa and Y. Iwasaka, 2010 : Phylogenetic analysis of atmospheric halotolerant bacterial communities at high altitude in an Asian dust (KOSA) arrival region, Suzu City. *Sci. Total Environ.*, **408**, 4556-4562.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, D. Trochkin, D. Zhang, K. Osada and T. Sakai, 2002 : Horizontal mass flux of mineral dust over East Asia in the spring : Aircraft-borne measurements over Japan. *J. Arid Land Stud.*, **11**, 337-345.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, K. Osada, K. Matsunaga, M. Kido, Y. Inomata, D. Trochkin, C. Nishita, T. Nezuaka, T. Sakai, D. Zhang and S.-A. Kwon, 2003 : Seasonal dependence of the long-range transport and vertical distribution of free tropospheric aerosols over east Asia : On the basis of aircraft and lidar measurements and isentropic trajectory analysis. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8663, doi : 10.1029/2002JD003266.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, D. Zhang, D. Trochkin, M. Yamada, Y. S. Kim, B. Chen, T. Nagatani, T. Miyazawa, M. Nagatani and H. Nakata, 2005a : Morphological and chemical modification of mineral dust : Observational insight into the heterogeneous uptake of acidic gases. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L22806, doi : 10.1029/2005GL024176.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, H.-B. Chen, K. Osada, D. Zhang, M. Kido, Y. Inomata, Y. S. Kim, D. Trochkin, C. Nishita, M. Yamada, M. Nagatani, T. Nagatani and H. Nakata, 2005b : Heterogeneous sulfate formation on dust surface and its dependence on mineralogy : Balloon-borne observations from balloon-borne measurements in the surface atmosphere of Beijing, China. *Water Air Soil Pollut. Focus*, **5**, 101-132.
- McCormick, M. P., H. M. Steele, P. Hamill, W. P. Chu and T. J. Swisser, 1982 : Polar stratospheric cloud sightings by SAM II. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1387-1397.
- McCormick, M. P., P. Hamill and U. O. Farrukh, 1985 : Characteristics of polar stratospheric clouds as observed by SAM II, SAGE and lidar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 267-276.
- Pollack, J. B., O. B. Toon, C. Sagan, A. Summers, B. Baldwin and W. Van Camp, 1976 : Volcanic explosions and climatic change : A theoretical assessment. *J. Geophys. Res.*, **81**, 1071-1083.
- Sakai, T., T. Shibata, Y. Iwasaka, T. Nagai, M. Nakazato, T. Matsumura, A. Ichiki, Y.-S. Kim, K. Tamura, D. Troshkin and S. Hamdi, 2002 : Case study of Raman lidar measurements of Asian dust events in 2000 and 2001 at Nagoya and Tsukuba, Japan. *Atmos. Environ.*, **36**, 5479-5489.
- Satake, S., I. Uno, T. Takeyama, G. R. Carmichael, Y. Tang, D. Streets, N. Sugimoto, A. Shimizu, M. Uematsu, J.-S. Han and S. Ohta, 2004 : Characteristics of Asian aerosol transport simulated with a regional-scale chemical transport model during the ACE-Asia observation. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S22, doi : 10.1029/2003JD003997.
- Shi, G.-Y., L. Xu, J. Guo, B. Zhang, B. Sun, Z. Gong, J. Zhou, K. Tan, Y. Iwasaka, M. Hayashi and M. Nagatani, 1996 : Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols. *Sci. Atmos. Sinica*, **20**, 401-406.
- Shibata, T., Y. Iwasaka, M. Fujiwara, M. Hayashi, M. Nagatani, K. Shiraishi, H. Adachi, T. Sakai, K. Susumu and Y. Nakura, 1997 : Polar stratospheric clouds observed by lidar over Spitsbergen in the winter of 1994/1995 : Liquid particles and vertical "sandwich" structure. *J. Geophys. Res.*, **102**, 10829-10841.
- 庄司 光, 宮本憲一, 1975 : 日本の公害. 岩波書店, 238 pp.
- Solomon, S., 1999 : Stratospheric ozone depletion : A review of concepts and history. *Rev. Geophys.*, **37**, 275-316.
- Tobo, Y., Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, Y.-S. Kim, T. Ohashi, K. Tamura and D. Zhang, 2007a : Balloon-borne observations of high aerosol concentrations near the summertime tropopause over the Tibetan Plateau. *Atmos. Res.*, **84**, 233-241.
- Tobo, Y., D. Zhang, Y. Iwasaka and G. Shi, 2007b : On the mixture of aerosols and ice clouds over the Tibetan Plateau : Results of a balloon flight in the summer of 1999. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L23801, doi : 10.1029/2007GL031132.
- Tobo, Y., Y. Iwasaka, D. Zhang, G. Shi, Y.-S. Kim, K. Tamura and T. Ohashi, 2008 : Summertime "ozone valley" over the Tibetan Plateau derived from ozonesondes and EP/TOMS data. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L16801, doi : 10.1029/2008GL034341.
- Tobo, Y., D. Zhang, A. Matsuki and Y. Iwasaka, 2010 : Asian dust particles converted into aqueous droplets under remote marine atmospheric conditions. *Proc.*

- Natl. Acad. Sci., 107, 17905-17910.
- Trochikine, D., Y. Iwasaka, A. Matsuki, D. Zhang and K. Osada, 2002 : Aircraft-borne measurements of morphology, chemical elements, and number-size distributions of particles in the free troposphere in spring over Japan : Estimation of particle mass concentrations. *J. Arid Land Stud.*, 11, 327-335.
- Trochikine, D., Y. Iwasaka, A. Matsuki, M. Yamada, Y. S. Kim, T. Nagatani, D. Zhang, G.-Y. Shi and Z. Shen, 2003 : Mineral aerosol particles collected in Dunhuang, China, and their comparison with chemically modified particles collected over Japan. *J. Geophys. Res.*, 108, 8642, doi : 10.1029/2002JD003268.
- Xu, L., K. Okada, Y. Iwasaka, K. Hara, Y. Okuhara, Y. Tsutsumi and G. Shi, 2001 : The composition of individual aerosol particle in the troposphere and stratosphere over Xianghe (39.45°N, 117.0°E), China. *Atmos. Environ.*, 35, 3145-3153.
- Zhang, D., Y. Iwasaka and G.-Y. Shi, 2001 : Soot particles and their impacts on the mass cycle in the Tibetan atmosphere. *Atmos. Environ.*, 35, 5883-5894.
- Zhang, D., Y. Iwasaka, G. Shi, J. Zang, M. Hu and C. Li, 2005 : Separated status of the natural dust plume and polluted air masses in an Asian dust storm event at coastal areas of China. *J. Geophys. Res.*, 110, D06302, doi : 10.1029/2004JD005305.
- Zheng, X., J. Tang, W. Li, X. Zhou, G.-Y. Shi and Y. Iwasaka, 2000 : Observational study on total ozone amount and its vertical profile over Lhasa in the summer of 1998. *J. Appl. Meteor. Sci.*, 11, 173-179.
- Zhou, J., K. Tan, S. Shao, Z. Gong, G. Shi, J. Guo, B. Wang, B. Zhang, B. Sun, Y. Iwasaka, M. Hayashi and M. Hase, 1994 : Balloon-borne measurements of aerosol vertical distributions over Beijing during the summer and autumn of 1993. *Acta Meteor. Sinica*, 8, 478-487.

Atmospheric Aerosols and Asian Dust Particles (KOSA) :
Importance of Researches of the Particulate Matter
in Atmospheric Science and Meteorology

Yasunobu IWASAKA*

* *Frontier Science Organization, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192, Japan.*

(Received 1 June 2011 ; Accepted 2 September 2011)
