

南極成層圏のエアロゾルの機能—オゾンホールと物質循環—*

—1990年度日本気象学会賞受賞記念講演—

岩 坂 泰 信**

1. はじめに

成層圏エアロゾルの研究が本格化したきっかけは、1960年代の Junge 等によって行われた気球や航空機による成層圏エアロゾルの観測であろう。彼らの研究は、成層圏エアロゾル層を構成しているエアロゾルは主に大粒子 (Large Particle) と呼ばれているサイズのものであることや、これらのエアロゾルの化学成分には硫黄化合物が多いことなどを明らかにした。この2点は、成層圏エアロゾル層の生成機構や維持機構を考えるうえできわめて重要な情報であり、その後の研究の方向を決める重要なものであった。しかし、なにぶんにも観測例が十分でなく、今後の研究に持ちこされた問題は多かった。

1970年代に入って、世界の各地にライダー (レーザレーダ) が建設されるようになってからは、エアロゾル層のグローバルな変動を明らかにすることも試みられるようになってきた。1974年に、フェゴ火山が噴火し世界各地のライダー基地で噴火に伴って成層圏エアロゾルが急増してゆく状況を捉えた。

火山噴火によって成層圏のエアロゾルの濃度がどのように増加するのか、また、どの程度その高濃度状態がつづくのか大きな関心を引いた。過去の地球寒暖の歴史は、火山活動と大変深い関連があるように予想されてきた。火山噴火によって強く乱された成層圏が悉さに観察できる時代がやってきたことで、火山と気候 (あるいは気温の寒暖) との関係をあらためて多くの人が取り上げはじめた。

1980年にセントヘレンス山が噴火を起こし、この時も

成層圏には多量のエアロゾルが生まれたことが観測された。この時には、ドイツで火山性エアロゾルを多量に含んでいる空気塊の亜硫酸ガス濃度が、航空機を使って測定された。観測結果は、火山性エアロゾルが多量に含まれている空気塊には、同時に亜硫酸ガスもきわめて多量に含まれていたことが確認された。火山噴火後に成層圏で急増するエアロゾルは、噴火によって直接持ち込まれたエアロゾル (たとえば火山灰等) のほかに、この亜硫酸ガスから2次的に生成されるエアロゾルを含むことが予想されるようになってきた。

このような背景の中で、中層大気国際共同観測計画 (Middle Atmosphere Program; MAP と略して書かれる事から、マップと我々は呼んだ) が実施された。MAPでは、南極の中層大気観測が、大きなテーマのひとつとして取り上げられた。幸い、1983年には筆者は、南極でライダーを建設し、成層圏エアロゾルを観測する機会を得ることが出来た。

南極中層大気は、グローバルな物質輸送という点でも、大気中の相変化が活発に起きているという点でも、さらには超高層大気からの荷電粒子に振込みが期待できる点でも、大変に興味の持てる場所である。

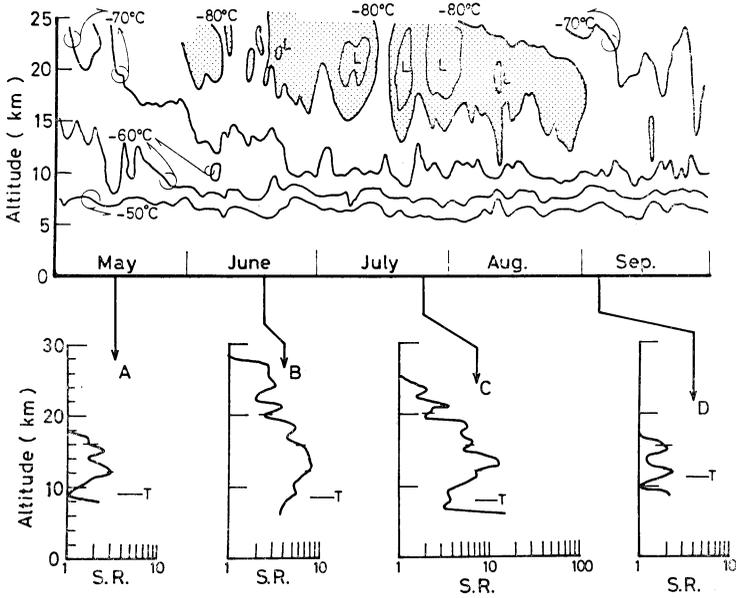
2. 南極成層圏のエアロゾル物質

MAP 期間の観測によって、南極 (あるいは北極) の成層圏では、冬期の寒冷な状態になると PSCs (Polar Stratospheric Clouds) と呼ばれるこの地域独特のエアロゾルが出現することが明らかにされた。この名前は、NASA (アメリカ航空宇宙局) の McCormick 等が人工衛星観測の結果にもとづいてつけたものである。この間の事情は、気象集誌の SAGE 衛星の特集号に詳しい。

第1図に示すように、このエアロゾルの発生はきわめて気温の低下と関連が深い。およそ -80°C の空気が15

* Atmospheric Effect of Antarctic Stratospheric Aerosol—Ozone Hole and Transport of Minor Constituents—

** Yasunobu Iwasaka, 名古屋大学太陽地球環境研究所。



第1図 南極昭和基地で観測された気温と、エアロゾルの散乱比 (Scattering Ratio). 散乱比は、観測された後方散乱係数(空気の散乱とエアロゾルの散乱を含む)と空気の後方散乱係数の比によって定義される。この比が1の場合には、エアロゾルが無いことを意味する。中低緯度での、静かな成層圏ではこの比は、1.5以上になることは滅多に無い。

km から 20 km の高度に出現すると、急速にエアロゾルの量が増加する。

このような低温の大気中では、硫酸のみならず、硝酸、塩酸や水蒸気も凝結する可能性がある。夏型の気温分布から、この状態に入るのに10~20日程度の時間がかかっていることや、この状態が維持される期間がおおよそ100日程度である点は、エアロゾルの状態を考えるうえで大事な点になっている。通常の成層圏の状態を考える場合には、このような急激な時間変化は、ほとんど大気の運動に伴って生じるエアロゾルの濃度の変化である。後でも触れるように、通常のエアロゾル層は硫酸液滴で構成されており、硫酸ガス濃度が極めて薄いためエアロゾルの成長は極めて緩慢な変化しか生まない。しかし、南極のこのような変化の激しい大気中では、中低緯度での定常状態にもとづく議論はあてはまらない。

エアロゾル物質の原料となる化学成分の多くは、成層圏での気体としての濃度はきわめて低く、微量気体と称されているものが多い。しかも、それらの気体の濃度は、それぞれに著しく異なっている。例えば、硝酸は ppb~10 ppb 程度であり、硫酸は ppt レベルであろう。

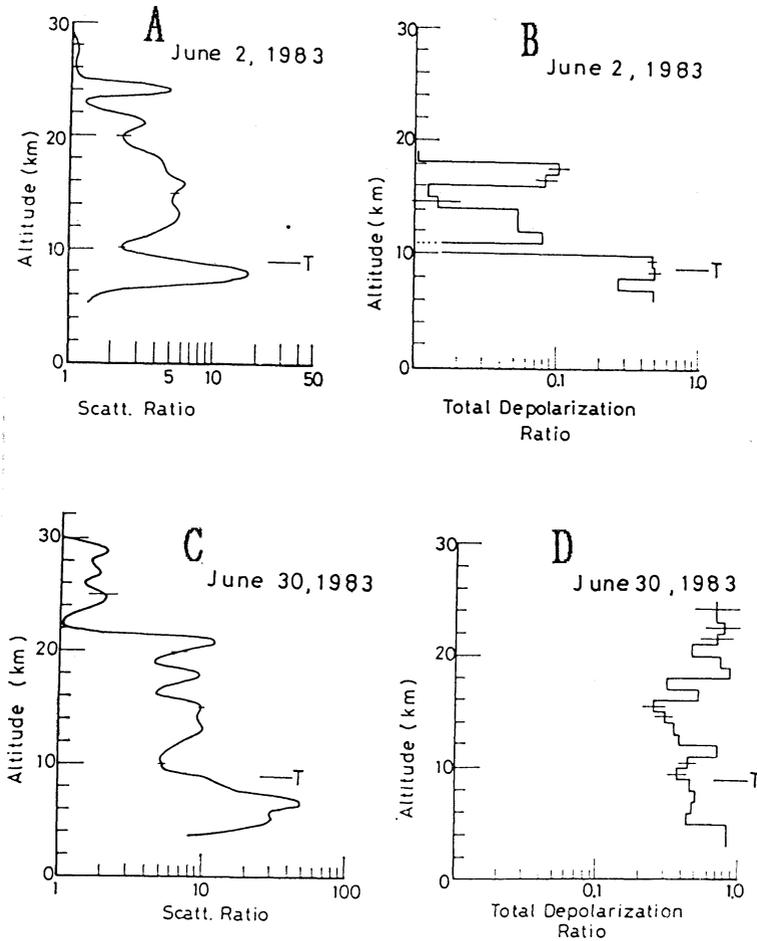
水蒸気は ppm レベルと考えられる。このようなことから、硫酸と水からなるエアロゾルを含んでいる空気が冷やされて新しく低温の環境に変わったとしても、硫酸エアロゾルが新しい平衡状態のサイズや濃度に達するにはかなり時間がかかるのに比べ、水や硝酸からなるエアロゾルは比較的早く新しい環境に馴染んでいく(例えば、Iwasaka, 1986)。

新しい環境に馴染んでいく特性時間を、次のような関係で評価することが出来る。

$$V/[dV/dt] \sim T_{\text{growth}}$$

ここに、 V は、エアロゾルの体積であり、体積の増加は過飽和状態にある蒸気の凝結成長(あるいは昇華成長)によると仮定する。比較的妥当と推定される水蒸気、硝酸や硫酸の濃度(これらの濃度については不明な点がきわめて多い)を使ってこの値を推定してみると、水蒸気ではせいぜい10秒程度で新しい状態に追従してゆくに、硫酸の場合は 10^{8-9} 秒程度になる。この時間スケールは、硫酸分子については数10日程度の緩和時間が必要であることを示唆している。

冬の期間の長さを考えると、水蒸気や硝酸蒸気は比較



第2図 ライダーによって観測された散乱比と偏光解消度の高度変化. AとBは、6月2日の観測, CとDは、7月30日の結果. 硫酸液滴で出来ている成層圏エアロゾル層は、偏光解消度がほとんど0である. 非球形粒子が存在するとこの値は大きく増加する. 巻雲のような氷の結晶で出来た雲に対しては、この値は1に近いものさえある. 今回の結果は、結晶性のものが多数浮かんでいることを暗示している.

的早く新しい状態に追従するが、硫酸蒸気に関しては常に強い非平衡状態が緩和されないうちにつきつぎに大気状態が変化し、冬の状態になじむ切らないうちに冬の期間を終えてしまうことを示唆している. 硫酸については新しい環境になじむ時間がきわめて長いので、水蒸気の振る舞いと比べるならほとんど停止していると考えられる.

こんなわけで、既存の硫酸粒子はたちまちほとんど水で出来た粒子に変質してしまう. もし気温が凍結温度以下にさがったとすると、この粒子は氷粒子としてふるま

う可能性もでてくる. さらには、硫酸粒子以外にも種になりうる粒子が存在するならそれらを足場にした氷粒子形成が進むであろう.

ライダー観測の結果は、冬期の成層圏エアロゾルはやや強い偏光解消度を示す場合ときわめて大きい解消度を示す場合とがあることを示している (第2図, Iwasaka, 1986). 我々が通常観測しているエアロゾルは、ほとんど0に近いほど小さい値しか示さない. 液状の粒子は、浮遊している時は完全な球にちかい形を取ることが予想されるが、小さい偏光解消度は、硫酸液滴モデルとよく

対応している。南極でのライダー観測の結果は、冬期に急増するエアロゾルは、非球形粒子から構成されていることを暗示している。

やがて、実験室での研究から、氷粒子のほかに硝酸の凝結物もあり得ることが示唆されるようになった。硝酸3水和物 (Nitric Acid Trihydrate; NAT と略している) が PSCs の有力な候補のひとつとして浮かび上がってきたのである (例えば, McElroy *et al.*, 1986, Wofsy *et al.*, 1986)。この硝酸エアロゾルの凍結点は、純粋の水蒸気の凍結点より数度高いことから、氷粒子に先立って形成されるのではないかと考えられている (例えば, Solomon, 1988)。

3. PSCs が引き起こした波紋

PSCs の存在が一般に認められる以前は、成層圏エアロゾル層の緯度的な変化といえば必ず使用された資料がある。Wyoming 大学の Hoffman 等のまとめた結果である。その結果は、いずれの緯度においても「対流圏界面の直上から濃度が急増しおよそ 3~5 km 上がったところで濃度の極大を迎える」特徴を持っており、極大濃度は赤道から極へ向けてやや減少している。

彼らの観測結果は多点の気球観測によったものであり、1975年に公表されてから10年弱の長い期間にわたって基本的な訂正を加えられる事無く使用されてきた裏には、観測がきわめて困難であり少々のことではこれに加えるべき価値を持った観測が出来なかつたことによる。

いまふりかえてみると、南極での気球観測といえば夏の期間に行うのが常識であった。季節変動の激しい地域での観測に、季節を限って観測しては大きなミスを犯しかねないが、いかにせん観測実施上の制限がつよく夏の観測値を以て代表値としてきた。

アメリカの NASA (航空宇宙局) が、ニンバス衛星に成層圏エアロゾル探査用のミッション SAM (Stratospheric Aerosol Measurement) を搭載して極域の成層圏エアロゾルの観測を1979年より開始した。観測初期のいろいろな測定器の点検、データの吟味を得て1982年頃から観測結果が公表されはじめる。日本では、1983年より昭和基地でレーザーダ観測が開始される。このようにしてようやく極地方の成層圏エアロゾルの本格的な観測体制が整備されていった。

南極の成層圏でのエアロゾル物質が冬期に著しく増大する事実は、年を通しての観測で初めて可能になった。このことから派生したいくつかの問題がある。

北極の成層圏にも同じようなことが見つかるのではないか?

このエアロゾル増大は何によってもたらされたか?

このエアロゾルはどのようにして作られたか?

このエアロゾルはどのような化学組成をもっているか?

である。現在の研究の到達点から見ると、やや踏み込みの足りない問題設定ではあったが、強い季節変動性と地域性については多くの人が高い関心を寄せた。

早々に指摘されたキーポイントは、気温の低下とエアロゾル量の増加との著しい対応の良さである。次のポイントは、増大期のエアロゾルは非球形であったことである。この2点といくつかの仮定をもとにして出された結果が、氷粒子および硝酸粒子モデルである。

この2種類のエアロゾルは、現在では、タイプ I の PSCs, タイプ II の PSCs と呼ばれている。ここまでくると、かなりのことが分かった様に受け取られかねないが、そうではない。まず最初に、これらの粒子状物質が形成される過程がさっぱり解らないのである。

通常の成層圏では、液体状の硝酸エアロゾルが層をなして浮かんでいることは、前にも触れた。PSCs とこの粒子とどんな関係があるのか? PSCs のタイプ I とタイプ II はどんな関係があるのか? などは今後おおいに検討されるべき課題である。

そのための観測や研究としては、これら3種類のエアロゾルの混合状態を明らかにすることであろう。同じ領域で PSCs I, II, 硫酸液滴が存在することがあるのだろうか? あるいはその混在している状況が時間とともにどのように変わるのであるだろうか? 興味のもたれるところである。

4. 新しい視点

オゾンホールが形成されるにあたって、エアロゾルの一種である PSCs が大きく関与していることが次第に明らかになるにつれて、大気化学過程に関心を寄せている研究者に大きなインパクトを与えはじめた。大気化学は、いまだ極めて未成熟な研究分野である。この分野を、化学の単なる一応用分野とみなしてきた人はおおい。そのような姿勢で研究を進め得る領域が、大気化学の一部にあることも否定できない。しかし、この不均一過程を含んだオゾンホール現象は、大気を理解するうえでそんな「やわ」な姿勢では極めて不十分であることを示している。オゾンホール形成に関わってくるエアロゾ

る、PSCs 粒子に関して言うなら、物質の相変化を含む形成されたエアロゾル物質が、現象の変化する時間スケールの中で落下する固相ないし液相を作るために使用された物質は、その気相での濃度を現象の時間スケールの中で著しく低下させる（少なくともエアロゾル形成が行われているところでは）などの段階が本質的な所を担っている。これらのステップは一つ一つが難問を抱えていること以上に、全体として考えなければオゾンホールへの関わりが見えてこないという点でも極めてやっかい(?)である。

ここでいう相変化とは、エアロゾル形成のことを指しているのだが、足場になるものが何かは、古来結晶成長や微粒子物理学の最大のターゲットになっている。さらに問題を難しくしている点は、大気が本来多成分の気体からなっている点である。実験室で扱われる単純な気体でないことは、当たり前だが問題を著しく困難なものにしている。

エアロゾル (PSCs) が落下する可能性は大変に高い。さて、この重力落下は、成層圏大気中の物質の輸送機構として極めて特異な(?)ものといえよう。重力落下によってエアロゾルが形成場所を離れるということは、粒子が新たに非平衡状態の環境に置かれることを意味する。その空間では、新しい平衡状態へ移行するためにエアロゾルの変質、蒸発、成長が進展する。場合によっては、その空間の気相の化学組成を変化させる可能性もある。

化学物質の輸送という点から見ても、粒子化することを通して下向きの流束を著しく増大させることになるため、大変興味のもたれる過程といえよう。

さらに、大きな問題は粒子形成によって周辺の大気の組成が大幅に変わることである。オゾンホール内では、気相からの脱水および脱窒が顕著に起こっている。これは、エアロゾル相へ大量に水蒸気や硝酸が移動したためと考えられているが、さらには、出来たエアロゾル粒子がどんどん下方へ落下していることがこのことを加速しているとみなされている。それでは、下方へ行ってこれらの物質はどうなったであろうか? まったくといっていいほど手がついていない。

筆者がひそかに暖めてきた妄想がある。「エアロゾル物質の下層への輸送の効果が、南極の氷床の中にとじこめられている」と、いうものである。時に、氷床コアの解析から過去の大きな火山噴火の痕跡が認められるこ

とがある。しかも、その火山噴火は南極以外の場所で起きたものなのである。南極上空の成層圏まで運ばれてきたと考えられている。その時代の PSCs が、これらの火山性物質を地表面まで運ぶのに一役買っていたと考えることは出来ないだろうか。太陽活動の変動に応じて、成層圏上部の窒素酸化物の濃度が著しく変動している。硝酸を含んだ PSCs の形成にこれらが影響することはないのだろうか、また、PSCs の落下を通して、このことが地表面付近のエアロゾルや氷床の化学組成になんらかの影響を及ぼしていないだろうか。

5. まとめ

時代によってエアロゾルに向けられる関心は、変化する。いま筆者が最も関心を寄せているものは、エアロゾルが大気に対してどんな物理化学的な影響を与えているか、そのことによって大気にはどんな性質が付与されているか、である。

大気の運動を知るためのトレーサとしての研究があった。もっぱら、大気放射との関係が追求されたこともあった。雲粒子形成の種としての役割が追求された。微小粒子形成の実験室として、成層圏がみなされたこともあった。時代が進むにつれて、エアロゾルを見る視点は増え、また、大気に付与している性質もたくさん見つかってくるに違いない。

このことは一見、ことがますます複雑になるのではないかと危惧を抱かせるが、そうではない。

私は、ものが解ったという状態には、2つの種類があるように思っている。お化けの理解と腑に落ちた理解である。

お化けの理解とは、個々の基本的と考えられる要素についてはこれ以上極められないぐらいに理解が進んだのに、さっぱりと解った気分にならないものである。例えば、「痛い」とはどんなことかと研究するために、人体をばらばらにして最後は神経細胞まで磨り潰して調べた結果、痛いときにはスルスル然々の化学反応が起きていることが解った、というのに近い。その時には、痛いと言っていた本人は磨り潰されて「痛い」ということが出来なくなっていた。部分が解っても全体像がつかめず、とうとう「これはお化けである」と結論することになる。

部分が理解されるとともに、次第に全貌が見えてくる気分になることもある。このような状態の時には、個別の理解が進めば進むほど全体像が明確になってくる。腑

に落ちる理解とはこのようなものであろう。エアロゾルの多様な側面の研究は、瞬に落ちるところへ行っていることを願うものである。

謝 辞

筆者がエアロゾル研究にたずさわる機会を得たのは、磯野謙治先生（当時名大教授）の指導による。ライダー観測の揺籃期は、ライダーが金食い虫と呼ばれた時代である。開発費を投入してもさっぱり成果の挙がらぬ時期を耐えることが出来たのは、武田喬男名大教授や故小野晃名大教授の励ましがあったからである。新しい局面を開く端緒となった南極観測では、国立極地研究所の平沢威男教授、川口貞男教授をはじめ超高層グループ、気水圏グループの先生方に多大なご支援を得た。南極での観測は、MAPの一貫として実施され、観測の全般にわたって加藤進京大教授や永田武先生（当時極地研所長）の教えと励ましを得た。研究をともにした大学院学生諸氏（既に官公庁や民間にある人も多い）とは、こまごまとした観測の準備からささやかな結果を得るまでの間、密度の高い時間を共有出来た。伊藤朋之高層気象台課長、森田恭弘氏（元名大助教授）、野村彰夫 信大教授ほかレ

ーザレダ研究会メンバー、前普爾北大教授はじめ24次南極観測隊メンバー等、南極観測実施にあたって心暖まる支援をいただいたかたは多い。記して感謝の意を表したい。

文 献

- McElroy, M.B., R. J. Salawitch, and S.C. Wofsy 1986: Antarctic ozone Chemical mechanisms for the spring decrease, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1296-1299.
- Iwasaka, Y., 1986: Non-spherical particles with antarctic polar stratosphere increase in particulate content and stratospheric water vapor budget, *Tellus*, **38B**, 364-374.
- Solomon, S., 1988: The mystery of the Antarctic ozone hole, *Rev. Geophys.*, **26**, 131-148.
- Wofsy, S.C., M. J., Molina, R. J. Salawitch, L.E. Fox, and M.B. McElroy, 1988: Interactions between HCl, NO_x, and H₂O ice in the Antarctic stratosphere: Implications for ozone, *J. Geophys. Res.*, **93**, 2442-2450.

なお、気象集誌の63巻(1985)2号の一部がSAGE特集号にあててある。この号には、人工衛星による極域成層圏エアロゾルの観測や、ライダーの成層圏エアロゾルの観測の速報が掲載してある。

日本気象学会1990年度秋季大会の報告

日本気象学会1990年度秋季大会は、大阪管区気象研究会との合同の形で、1990年10月24～26日、京都市の京都府総合見本市会館で行われた。管区研究会を含めた参加者総数は533名で、うち一般申込による大会参加者が407名、招待者が24名であった。講演申込は240件であったが、4件の取り消しがあり、最終的には236件（第1種講演123、第2種講演104、ポスター11）となった。第2日の午後には、3件の記念講演に引き続き、「集中豪雨」のテーマで恒例の大会シンポジウムが行われた。

口頭発表ではビデオの使用希望が数件（最終的には6件）あった。会場の都合上、ビデオの上映はポスター・セッションの時間に並行してまとめて行われたが、好評であった。ビデオの発表希望者は今後さらに増えると思

われるので、専用プロジェクターなどを確保し、これらの希望に対応できる体制を早く作るようにしたい。

なお、口頭発表の第2種講演申込の比率がやや増加の傾向があるが、これは第2種講演の趣旨にふさわしい予稿の書き方がなされていないものの増加傾向と関係がある可能性がある。そこで次回の大会では予稿集原稿をこれまでよりも厳しくチェックする必要があると思われる。

最後になりましたが、大会事務局として通常業務のかたわら大会準備・運営にご尽力頂き、秋季大会を盛会裏に終えられた大阪管区気象台の方々をはじめ、関西支部の皆様にご敬意を表し心から感謝します。

（講演企画委員会）