



天 気

1989年4月
Vol. 36, No. 4

204 (エアロゾル)

大気エアロゾルの物質組成に関する研究*

—昭和63年度故小野晃教授の日本気象学会賞受賞によせて—

田 中 浩**

1. はじめに

小野晃先生が56歳の若さで昭和63年1月26日急逝されましたことは誠に哀痛の極みであります。腎臓の機能障害のため週に三度の透析という大変な重荷を背負われながらも、それをあまり表面には出すことなく勤務に精励されておられた矢先のことでした。もしまえの責任感から、のんびり休養することなど思いもよらないことだったのでしょう。そのような状況にありながらも、研究意欲もますます旺盛で、エアロゾル研究の最先端を常に走り続けたいという強い意志が感じられました。

この度、気象学会から学会賞をいただき、万里子夫人をはじめとして御家族御親族の方々、また先生とゆかりの深かった方々、さらに私どもを含めて心から感謝致しております。必ずや小野先生にもこの知らせは届いていることと信じております。当日、学会賞は万里子夫人が受け取られ、記念講演は同僚の武田喬男教授が立派に代行されました。近くにおりましたも、他人の業績の真面を誤りなく伝える自信は私にはありません。論文などの表面に見える成果については、ある程度客観的に述べることはできますが、研究の動機、研究の真のねらい、研究のより大きな背景などとなりますと、どうしても主観的になる傾向があります。これを避けるため、本稿では若干従来の形式を変えて、私が目にしたこの10年間の小野先生の研究について、むしろオムニバス風に語ってみ

たいと思います。何人かの登場人物がきつと小野先生の思い出を深めてくれるものと思います。

2. 試薬薄膜法

小野先生のエアロゾル分析の基本は試薬薄膜法で、それによって個々のエアロゾルに含まれる化学成分を同定することです。大気中で気象学的に特に重要なエアロゾル粒子は「大粒子」と呼ばれる $1\mu\text{m}$ 以下の粒子であります。この粒子は一般に2次粒子と呼ばれガス状先駆物質の凝縮とその後の併合によって生成されます。この粒子は凝結核として雲粒を生成し、また太陽光でミ-散乱を起こし気候にも影響を及ぼすわけです。

試薬薄膜法に関しては、1970年代にビッグらによって SO_4^{2-} を検出するための塩化バリウム(BaCl_2)法がすでに開発されており、これによって成層圏エアロゾル粒子が硫酸根を含んだサルフェイト粒子であることがリーゼガングリングの析出により確認されていました。私は昭和53年に水圏研に赴任してきましたが、その少し以前に院生の井沢保夫さんとの共同研究で、 NO_3^- を含むナイトレート粒子の薄膜法による検出に成功していました。ニトロン薄膜にナイトレート粒子が付着すると特異な針状結晶を持つ析出物が電子顕微鏡で観察できました。この研究は、小野先生が気象研から水圏研に移られて最初の仕事で、それが成功しましたので大変喜ばれていました。これでサルフェイト粒子もナイトレート粒子も同定することができるようになったのです。

陰イオンに関しては同定に成功しましたが、しかし対

* Professor Ono's contribution to the research on composition of aerosol.

** H. Tanaka, 名大水圏科学研究所.

となる陽イオンに対してはまだ薄膜法では検出することができていませんでした。例えばエアロゾル粒子が硫酸(H_2SO_4)を含むのか、硫酸アンモニウム($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)を含むのかを判定することは、塩化バリウム法では不可能であり、ナイトレート粒子についても同様でありました。陽イオンについてはアンモニウムイオン(NH_4^+)が最も重要なものです。小野先生は昭和55年から院生の大和政彦さんと、 NH_4^+ を薄膜法で検出するための研究に積極的に取り組むことになりましたが、当時は必ずしもよい成果は得られなかったようでした。

硫酸は亜硫酸ガスなどから2次的に生成される主要な大気エアロゾルの成分であることはすでに理解されていました。しかし大気中のアンモニアと中和して硫酸アンモニウムにどの程度変質しているかについては議論の分かれるところでありました。アンモニウムイオンの直接同定が困難な以上、別の方法によってこれを判別しなければなりません。

当時、小野先生の頭には多くのアイデアが去来していたことだろうと思われそうですが、結局「カルシウム薄膜」の使用によって、硫酸と硫酸アンモニウムを識別することができるのではないかということになり、実験を繰り返した結果、エアロゾルを乾燥採集すれば、硫酸アンモニウムは固体であるためカルシウムとは全く反応せず、一方、硫酸は依然として液体で、カルシウムと反応して硫酸カルシウムの結晶の特異な反応リングを形成することが判ってきたのです。

道具立てはそろい、いよいよ観測に打って出る日がきたようです。

3. 成層圏のエアロゾル

成層圏エアロゾル層はユング層とも呼ばれ、多くの研究がなされてきました。しかしながら、このエアロゾル粒子の化学組成については研究者の間でも必ずしも一致した見解が得られてはいなかったのです。多くの人々は成層圏エアロゾルが主として硫酸アンモニウム粒子からなっていると述べています。

昭和57年から、中層大気国際観測計画(MAP)が始まり、我国でも航空機を使った大気微量成分やエアロゾルの観測が毎年実施されました。小野先生はこの観測のリーダーとして大きな役割を果たされました。

昭和59年の観測では、ほぼ日本を縦断するような飛行コースをとり、その間に中上部対流圏、トロポポーズフォールディングおよび下部成層圏のエアロゾルを採集することができました。これらのサンプルの分析には

小野先生が努力して開拓してこられた各種の試薬薄膜法(BaCl_2 法、Ca法、ニトロン法、形態観察法など)が十分に威力を発揮しました。

成層圏エアロゾルは大粒の純度の高い硫酸の過冷却液滴であることが分析の結果わかってきました。またトロポポーズフォールディングの中を成層圏から粒子が対流圏に移動しており、対流圏の比較的小粒のエアロゾルの中に成層圏起源の大粒の粒子が混在していることもわかりました。これらの成果は大和政彦さんによって彼の博士論文の一部としてまとめられました。

4. 南極のエアロゾル

南極も人間活動から遠く離れた場所にあります。南極のエアロゾルの観測は小野先生と親しい伊藤朋之さんや岩井邦中さんによる通年観測があり、季節変化が顕著であることが知られていました。小野先生も南極越冬隊に採集を依頼して分析しました。

南極の夏は硫酸粒子が大部分を占めており、海塩粒子の存在は昭和基地では若干認められましたが、あすかキャンプではほとんどありませんでした。一方、冬期は硫酸アンモニウム粒子がむしろ卓越しており、季節的にエアロゾルの組成に大きな変化があることが判りました。夏期の硫酸粒子の卓越の原因として、成層圏から沈降してくる説、植物プラクトンが放出する硫化ジメチルの光化学的な酸化による説などありますが、いずれも確立したものではありません。いずれにしても夏期にはアンモニアは南極大陸に輸送されてきていないようです。

南極エアロゾルには岩坂泰信さんも興味を持っており、大和政彦さんを交えて共同研究も数多くあります。南極エアロゾルに関してはまだまだ未知の部分が多く、特に成層圏との関連が今後解明されなければならないと思われれます。

5. 海洋のエアロゾル

海洋のエアロゾルに関しても、小野先生は特別な興味を持っておられたようでもあります。南極観測船「しらせ」の航海によくエアロゾル採集を依頼しておられました。海洋エアロゾルが硫酸粒子なのか硫酸アンモニウム粒子なのかは今もってはつきりしません。航空機による海洋観測の結果をも総合して考えますと、海洋エアロゾルの組成は気団によって大きく異なるようでもあります。陸地の影響下にある気団がどの程度まで海洋に張り出しているかは季節によって異なるようです。

外洋での硫酸の起源は植物プランクトンの放出する硫

化ジメチルが大部分であろうとは小野先生も考えておられたようです。亜硫酸ガスの量は北半球の中緯度に多いにもかかわらず、過剰サルフェイト粒子は南北両半球でそれほど量的に変わらないという観測事実から、この過剰サルフェイト粒子は人為起源ではないことが強く示唆されるのであります。

大和政彦さんに突然3カ月間の「白鳳丸」によるメタンスルホン酸（硫化ジメチルが酸化されたもので、硫酸の前段階にある物質）のエアロゾルの採集を依頼したのも、生物起源の海洋エアロゾルの重要性を考えたためであろうと思われます。採集されたメタンスルホン酸を院生の古賀聖治さんが分析したところ、メタンスルホン酸は過剰硫酸に対して量的には10%程度であることが判りました。この値は世界中の海洋ではほぼ一定であり、外洋エアロゾルの主な起源は植物プランクトンであることが推察されます。

ラブロックが提出したガイアの一例が上に述べた循環系であります。小野先生が生物がらみの物質循環に対してどのくらい深く興味を持っておられたかは今となっては知るよしもありません。小野先生が逝去された後も、古賀聖治さんは硫化ジメチルの測定や化学反応の計算によって、植物プランクトンによる極めて巧妙な物質循環系、すなわち微生物が生存可能であるための条件づくりとしてのホメオスタシスを問題意識とした研究を続けており、興味ある成果が出始めています。

6. 小野先生と留学生

学会賞の記念講演からは若干脇道にそれますが、小野先生と中国からの留学生との関係は親密なものであります。今はすでに学位を取得して帰国している伍培明さんにはサルフェイト粒子とナイトレート粒子の混合形態についての研究を指導し立派な成果をあげさせました。また銭公望さんを指導して、塩化バリウムと窒素の複合薄膜法によるサルフェイトとナイトレートの同時検出法の開発を行わせました。銭公望さんも今春「修士」を取得することができました。

その他に、短期的に中国から来日する客員研究者に対しても献身的なサポートをされました。中国でもエアロゾル研究は今後最も必要な研究分野になることは確実で、そのためにも立派な研究者を育てておかねばならないとお考えからの実践と思われるのですが、昭和一ケタ世代の良心をまのあたりにみる思いでありました。

7. おわりに

小野先生の大気エアロゾル研究の特色は、個々の粒子を観察し分析することであり、バルク分析が主流である中であって異彩を放っていました。私の見るところ、エアロゾル研究も近年とみに大気汚染問題などの現実的な方向に進み、一方、純粋学問としては、「放射による気候の変動」とか「雲核や氷晶核」などという、どちらかといえば二次的な大義名分しか打ち立てられなかったような気がします。小野先生も、エアロゾル研究はこの二つが目的であるといつも言われてきたことでありますが、本心からそう考えられていたのでしょうか。

私は、小野先生の心底には、エアロゾルの物質循環に果たす深い意味合いが徐々に蓄積されていたように今では考えています。まずそのためには、現実の大気中にどのような組成をもつエアロゾルが、どのような状態で存在しているのかを地球的規模で知らなければならないと考えられたのだらうと思います。小野先生のやり方を「鋼鉄主義」と批判的に考えたこともありましたが、これは私の浅薄な考えだったようです。

大気中のエアロゾル粒子はほっておけば硫酸になるということはまことに興味あることです。アンモニアによる中和は陸地およびその周辺のむしろ限られた領域で卓越しており、酸に弱い人間や生物を守っているかのようであります。海洋の植物プランクトンはむしろ硫酸をその生理活動の一環として必要としているようで、エアロゾルが酸性であることはむしろ好都合のようです。硫酸は硝酸と較べてはるかに飽和蒸気圧の低い強酸物質で、容易に凝結して液滴となることができ、このため硫酸と硝酸は同一粒子中では存在することが困難であります。アンモニアによる中和が進む段階でナイトレート粒子が共存できるようになるわけです。このように自然界は実に調和のとれた状態であることがわかります。化石燃料を使い過ぎると、亜硫酸ガスが発生して陸上でも硫酸粒子が過剰に出現し、酸性雨が降るようなことがあります。これはアンモニアによる自然的な中和能力の限界が人間活動によって破られてしまったためであります。

大気エアロゾルの研究は気象学の中でも何か片隅に追いやられたようにむしろひっそりとして行われているようです。しかし実はエアロゾルを含む大気中の物質循環の研究こそ、今後の大気物理学の中心テーマとなる可能性を秘めているのであります。及ばずながら私自身もそのテーマを追求して行く必然性を感じとっています。エアロゾルの権威岡田菊夫さんもすでに水圏研から気象研に、

また岩坂泰信さんもこの4月から空電研に移られました。水圏研のエアロゾル研究もなんとなく寂しくなってきました。しばしば名前のでくる大和政彦さんもこの春めでたく「理学博士」になることができました。彼こそ

は小野先生のこの10年間の研究を体現した存在であり、小野先生の立派な後継者になるよう頑張ってもらいたいと切に祈っております。小野先生、今年も春がめぐってきました。

会員の広場

長期予報発展のために（根本順吉）を読んで

青木 孝*

「天気」の1989年2月号の「会員の広場」に、1988年の暖候期予報が大きく外れたことに関連して、どのような予報資料が原因となって見込み違いが生じたかを示してもらいたいという、根本順吉会員による「長期予報発展のために」が掲載されました。長期予報課で予報を担当している一会員としては、このことについて次のように考えております。

数日先までの天気を予報する短期予報では、予報の対象としている現象についての気象学的な理解が進んでおり、根本会員が指摘したとおり、イギリスにおける低気圧の予報についてのアフターキャストのように、アフターキャストが予報技術の改善に役立てられている場合が少なくありません。長期予報においてもアフターキャストは必要なことですが、短期予報と同じように扱えないところがあります。長期予報の場合には短期予報に比べると、予報の対象とする時間スケールの現象についての物理的基礎がまだ十分に解明されていません。現在の長期予報は主に過去のデータに基づく確率論的な手法を用いているため、予報作業における判断の適否についても決定論的な評価は困難です。

私どもも1988年の夏や1988/89年の冬の天候について、ケーススタディを行うことしております。その成果に

* Takashi Aoki, 気象庁予報部長期予報課。

については日本気象学会の講演会や学会誌などで発表し、会員の方々と意見を交換することによって、現象の理解をさらに深めていきたいと考えています。このような成果の積み重ねが、長期予報技術の向上につながると思います。

現在、私どもは長期予報に関する気候系の診断的解析や数値予報の長期予報への利用あるいは文部省の統計数理研究所との共同研究で予報技術の客観化と予報の定量的な表現などのための技術開発を進めております。こうした長期予報に関する技術開発の動向について、日本気象学会への紹介や報告がこれまで十分でなかったように思われますが、詳しくは機会を改めて議論していただきたいと思います。

なお、現在の暖候期予報や寒候期予報に使われている各種の資料や、予報に対する考え方などについては、気象庁予報部発行の「暖候期予報資料」や「寒候期予報資料」、日本気象協会発行の「気象」に印刷されており、いずれも気象庁の図書館で閲覧できます。

また、WCRPの計画の中では、1~2か月先までの長期予報の物理的基礎を明らかにすることも課題として取り上げられており、研究が進められています。この分野に対する多くの研究者の参加と積極的な議論の発展を期待しています。