

## 「日本における気象学研究に関する現状と将来」

### 第1回研究会報告

標記の研究会が日本学術会議気象学研究連絡委員会主催の下、気象学会秋季大会前日の11月5日午後、名古屋で開かれた。第1回は「気候」と「大気化学」がそのテーマであった。以下に研究会の内容を報告する。

#### 1. 「気候」

住 明正 (東京大学気候システム研究センター)

気候については、4名の人に話題を提供してもらった。まず最初に、沼口敦氏 (国立環境研究所) が「モデルを用いた気候研究」と題して「気候力学の建設にむけて数値モデルをどの様に用いてゆくか」について話題提供した。次いで、山中康裕氏 (東京大学 CCSR (気候システム研究センター)) が「気候と海洋物質循環」と題して、物質循環モデルの重要性、及びそれを用いることによって可能となる古気候・古海洋学の将来について言及した。阿部彩子氏 (東京大学 CCSR) は「気候温暖化と気候変動研究」と題して、CCSRの気候モデルによる温暖化予測などを紹介しながら温暖化研究が気候システム変動の研究といかに関連しているかについて語ってくれた。最後の早坂忠裕氏 (東北大学大気海洋変動センター) は、衛星によるリモートセンシングの現状について語り、特に、日本のリモートセンシングに関する取り組みの底の浅さを強調していた。

以上の話題提供を受けて、総合討論に移った。コンピナーとしての筆者が、今回の議論をまとめてみると、現在の状況は「気象学を研究していた人にとって、対象が拡大してきた」とまとめることが出来る。即ち、日々の気象現象を興味の対象としていた気象学から気候システムの現象を対象とする気象学に変貌しようとしているということである (その様な時に、依然として気象学という名前を用いるべきか否か、については疑問の残るところであるが)。具体的に本研究会で議論になった問題をまとめてみると、以下の4点である。

#### (A) 気候力学の建設—「気候とは何なのか」

この問題は、今後の研究のテーマと思われる。気候

システムと云う時には、必然的に物質循環も含み「物理+化学+生物」システムとならざるを得ない。その様な複雑なシステムの相互作用、その全体のふるまいを理解することが中心課題となるが、必ずしも、気象学会に集う全ての人を取り組めるテーマとは云えないような気がする。「化学や生物」になじみの薄い物理系の人にとっては、数値モデルによる予測の問題に取り組むこと、あるいは“複雑系の物理”として新しい概念を考えることや、“simple theory”を追求してゆくことが方向となろう。

#### (B) 気候の研究は科学足り得るか？

この問題提起は、気候の研究が、「仮説—検証」型の科学足り得るか、という視点からおこなわれた。答えは、十分なデータさえあれば、「仮説—検証」型の科学足り得る、というものであった。その意味で、最近急速に発展しつつある paleoclimatology (古気候学)、及び、satellite によるデータを用いた検証に大いに注意を払う必要があろう。データの増加とモデルの強化は、古気候学、気候システムの長期変動が、従来の地球物理的手法で射程距離に入ったことを示している。

#### (C) 社会との関わり

社会との関わりは、気象学にとっては、本質的な意味をもっている。気候に関連するその最たるものが、地球温暖化問題であろう。会場では、「出来れば余りかわりたくない」という雰囲気も感じられたし、また「温暖化の他にやる事はないのかと云われている」という発言もあり、現実の複雑さを受けとめる学問としての足腰の強さの必要性が痛感された。

#### (D) 地球史的、惑星科学的な認識

気候という認識、気候システムへの研究対象の拡大は、必然的に地球という惑星全体、太陽系全体への認識の拡大につながってゆく。その結果として、どの様な新しいサイエンスが登場するかは不明であるが、従来の「惑星科学」が、「かけ声ばかりで実態が余り発展していない」状況を考えると、やっと飛躍する時がきたのではないかと、思われるものがある。

以上、簡単に、議論をまとめてみた。時間が限られ

ていたので、それ程多くの意見を聞くことが出来なかったし、筆者の個人的な意見でまとめた点が多々ある。それ故に、本報告を材料に、各研究室、各職場で、友人・同僚と議論していただきたい。おそらく、それがこの研究会の意図であろう。

## 2. 「大気化学」

田中 浩 (名古屋大学大気水圏科学研究所)

### 2.1 はじめに

大気化学は、大気中の諸物質の循環を化学的視点から研究する学問の一領域であり、近年発生した大気汚染、酸性雨、成層圏オゾン破壊など危機的な環境変化の出現とともにその重要性が認識されるようになった。それにもかかわらず、わが国の大学で大気化学を専門とする研究室が極めて少ないのは不幸な現実である。化学教室のなかにたまたま大気化学の研究者が現われても決して恒常的かつ組織的な研究体制に発展しない。わが国では、少数の大学の化学教室と地球物理学教室のさらにごく一部が大気化学の研究リーダーを生産しているにすぎない。

化学研究者は一般的にいって、その学問本来の性格から、あまりにも物質へのこだわりが強いために、あるいは物質とその変化に関する化学的概念があまりにもがっちりと確立されているために、気候や環境などといったむしろ漠然とした概念とのマッチングをとることに困難を感じるのは無理からぬことである。純粋化学(物理化学でも分析化学でも)と大気化学(あるいは地球化学)はある意味では別物であり、その間に存在する溝は決して浅くはない。この関係は物理学と地球物理学との間にも当てはまることであるが、実際、大気化学を気候変動とのからみで論じる段になると、大方の化学研究者はある種の戸惑いを感じるはずであり、それを的確に議論できる大気化学研究者となると決して多くはないのである。

この度の討論では、大気化学と気候変化や環境変化との相関性などといったテーマに関しては縦横無尽に議論を切結べる錬達之士、すなわち秋元肇(東京大学先端科学技術研究所)、岩坂泰信(名古屋大学太陽地球環境研究所)、近藤豊(名古屋大学太陽地球環境研究所)、中澤高(東北大学理学部)の4氏に問題提起をお願いした。秋元氏が物理化学(あるいは光化学)出身であることを除けば、他の3氏は地球物理学出身者であることも大気化学の現状を反映している。秋元氏によって、対流圏大気化学の最近の重要研究課題や、

その具体的事例が紹介され、それをもとに当面の問題点が集約された。岩坂氏により、エアロゾル研究の戦後の歴史とそれに対応する研究課題が対比され、エアロゾルと環境問題との浅からぬ関わりについて報告がなされた。近藤氏によって、成層圏化学とくにオゾン破壊のメカニズムを解明するための重要なポイントについて自己の研究と絡ませながら具体的な報告があった。中澤氏は、二酸化炭素やメタンなどの温室効果気体の研究を進めるうえで解決すべき重要ないくつかの取り組みについての提言を行った。これらについて私見を交えながらもう少し詳しく述べてみたい。

### 2.2 秋元提言(対流圏大気化学)

対流圏大気化学の研究課題は、(A)温室効果気体の変動と循環のダイナミクス、(B)大気光化学とオゾンの収支、(C)放射活性物質としてのエアロゾル、という三つのカテゴリーで議論されることが多いと秋元氏はいう。温室効果気体は海洋や植生との相互作用が大きいが大気中での化学反応は活発ではない。大気中の化学反応に興味を示す立場からは、(B)と(C)が中心課題となる。すなわち、対流圏大気化学は「オゾン化学過程」と「エアロゾル過程」に集約されるというのが秋元氏の論点(のよう)である。近年の対流圏オゾンの増加は温室効果気体として地球温暖化に無視できない効果を付加する。また、エアロゾルの増加は直接的、(あるいは雲の変化を通じて)間接的に太陽光を遮蔽することにより温暖化を抑制する。このように対流圏大気化学の主要な二つの研究課題はともにグローバルな気候変化と密接に結び付いていることは明白である。

秋元氏はオゾン化学過程の研究において、HO/HO<sub>2</sub>フリーラジカル連鎖反応と、Br/BrO、Cl/ClOなどのハロゲンラジカル連鎖反応の重要性を指摘している。前者については理論的には誤りはないようではあるが、フリーラジカルの直接測定が困難であったために大気中での定量的な測定が十分行われていない。後者については、ハロゲン類(最近では臭素)がオゾンの消失などに重要な役割を担っていることが指摘されているが、ハロゲンラジカルの前駆体となる光化学活性ハロゲンの生成機構が解明されておらず、基本的に未知の部分が多い。北半球中高緯度では春にオゾンが増加する傾向が測定されているが、その理由についても不明な点が多い。対流圏オゾンは成層圏オゾンのように衛星観測が容易でないため、全球分布や季節変化のような基本データが極めて不足しているのが現状であ

る。現在、IGAC/WMOではITOY (International Tropospheric Ozone Year) というプロジェクトを作り、観測の乏しい熱帯・亜熱帯域を中心に観測を強化することを計画している。

秋元氏はエアロゾル化学過程については述べなかったが、この分野でもHO/HO<sub>2</sub>ラジカル反応は硫化ジメチルや二酸化硫黄などの硫黄化合物を硫酸にまで酸化するための重要な物質であることに違いはないのである。

### 2.3 岩坂提言 (大気エアロゾル)

岩坂氏は、大気エアロゾル研究の歴史の変遷と将来展望を述べた。エアロゾルは凝結核 (CCN) や氷晶核としてすでに1940年代以降雲物理的な関心から気象学で盛んに研究された。1960年代には人工降雨を実現するために氷晶化物質がしが行われたが、その効果が十分検証されず以後急速に衰退していった。1970年代以降はエアロゾル研究の目的が気候や環境問題との関わりに移行していった。火山噴火によって成層圏まで侵入したガスが多量のエアロゾルを発生し大気を一時的に冷却する可能性も指摘された。大気エアロゾルの重要性に鑑み、成層圏エアロゾルの分布や変動はライダー観測や衛星観測により追跡が技術的に可能になった。

南極成層圏のオゾンホール形成の過程で、超低温域に発生する極成層圏雲 (PSC) と呼ばれる特殊な化学成分のエアロゾルや氷晶がオゾンの消滅に決定的な役割を担っているという発見は画期的であり、成層圏におけるエアロゾル研究の重要性が増大した。岩坂氏はこれについてはあまり詳しく述べていないが、氏自身による南極でのライダー観測によるエアロゾルの冬季急増現象の発見は重要な貢献である。

地球温暖化への関心の高まりとともに、エアロゾルによる温暖化抑制効果にも目が向けられるようになった。多量の人為起源硫黄化合物の大気への放出は、対流圏でもエアロゾル濃度を増加させ、太陽光の透過率を減少させている。さらに、CCNの増加を通じて雲の構造を変化させ (すなわち降水になりにくい微小雲粒の増加のため) 間接的に太陽光を遮蔽する。前者を直接効果、後者を間接効果と呼ぶが、どちらも (とくに後者の) 定量的見積りはまったく不十分であり今後の大きな課題である。

このように、エアロゾルは大気現象に多面的に関与しているように見える。しかし、基本的には雲物理化学という言葉でくることができそうである。これは

成層圏エアロゾルでも同様である。大気エアロゾル学の中心は「粒子化の過程」と「核化の過程」にあることは今も昔も変わっていない。その意味では大気エアロゾル学は物理学に属する。しかし、前駆物質の複雑な酸化反応過程をも考慮することが現代の大気エアロゾル学であるならば、化学的側面を無視することは不可能である。大気エアロゾル研究はその複雑さのために基本的なところで依然として曖昧さを残している。

私見であるが、CCNでサルフェートが最重要物質であるという信仰があるように思えてならない。最近、水溶性有機物がサルフェートよりもさらに基本的なCCNの構成物質ではないかという仮説も出されており、もしこれが本当ならば画期的発見である。単にエアロゾルに含まれる物質の質量だけを測定するだけでは不十分で、たとえトータルな質量は小さくても水溶性有機物エアロゾルがサブミクロン領域に数多く存在すればCCNとしてより有効に働くはずである。

### 2.4 近藤提言 (成層圏化学)

近藤氏は、氏自身が現在取り組んでいる成層圏オゾン破壊のプロセスについてより深く理解するためのいくつかのキーポイントを述べている。下部成層圏における化学研究の中心は「不均一反応」であるという。極域で重要な不均一反応は、冬季の低温下で発生する極成層圏雲 (PSC) 上で起きる一連の化学変化である。水蒸気、硝酸、硫酸といった原材料気体の濃度が固相・液相状態に対して飽和状態が達成されPSCが生成されるためには、気温が一定の「しきい値」以下に低下することが必要であるが、南極下部成層圏は (部分的には北極成層圏でも) この条件を満たしている。一方、中緯度成層圏では比較的暖かい硫酸エアロゾル上での不均一反応によりオゾン消失が起こることがわかってきた。ピナツポのような大規模火山噴火によって生成される成層圏硫酸エアロゾルの急激な増加の際にはとくに有効であると思われる。

成層圏オゾンの不均一反応については定性的には理解されるようになったが、定量的理解のためにはなおいっそうの努力が要求される。実際、モデルによる北極域でのオゾン破壊量が観測値をかなり下回っていることが指摘されている。また、気温のしきい値付近でのPSC生成のプロセスが従来考えられていた以上に複雑であることもわかってきた。まさに、雲物理化学の成層圏版として腰のすわった研究が必要となる。

成層圏オゾン研究の発展はこの10年目覚ましいものがある。数々の衛星によるオゾン観測による成果の集

積は、グローバルなオゾン動態の理解に大きく貢献してきたといえよう。わが国でも ADEOS 衛星に搭載されたオゾン観測装置により、多くのデータが得られることになる。今後の成層圏オゾン変動の研究は新しい段階に入り、モデルと観測の緊密な関係を保ちつつ定量的理解に向かうだろう。これによってオゾン変動の将来を予測することも可能になるはずである。現状ではオゾンホールがいつまで成長し、いつ成長が止まるかすら予測不可能である。さらに、成層圏オゾンの絶えざる減少によりグローバルな気候変動が誘起される可能性があるが、これについてはまったくわかっていない。このような研究は国際的には WCRP/SPARC で現在推進されている。

### 2.5 中澤提言（温室効果気体）

中澤氏は、二酸化炭素やメタンなどの温室効果気体のグローバル循環過程を大気ばかりでなく海洋や植生などを含めて研究する必要性を強調した。グローバルにみて陸上の植生が二酸化炭素を放出しているのか、それとも吸収しているのかという問題に関してこれまで少なからぬ混乱があったようである。熱帯の森林破壊によって大量の二酸化炭素が大気に放出しており、植生はグローバルにみてもむしろ二酸化炭素の発生源であるという議論が行われてきた。このため、グローバルな二酸化炭素の収支のつじつまをあわせるにはどこかに未知の吸収源すなわちミッシング・シンクを仮定せざるを得なかった。最近では北半球中高緯度の森林によって赤道域での放出と同等あるいはそれを上回る吸収が存在するという仮説も提出されている。

二酸化炭素循環に対する理解をいっそう深めるため、中澤氏はつぎのような方策を提言している。(A) 二酸化炭素の空間濃度ばかりでなく、炭素・酸素同位体比や酸素濃度の密な観測網をできるだけ均等に配置してデータを長期に渡って蓄積する、(B) 森林統計を見直し、植生と大気との二酸化炭素の交換量を正確に見積もる、(C) 海洋による二酸化炭素の吸収過程に見落としがなにか検討する、(D) 炭素循環モデルの高精度化とともに、関連する元素の同位体比や酸素濃度も取り込んだ総合的モデルを開発する、などである。

メタンの変動と循環には二酸化炭素よりもさらに不確定な部分が多い。メタンは対流圏においても HO などにより二酸化炭素にまでゆっくりと酸化される。その意味で大気化学的取扱が重要になってくる。メタンも一酸化二窒素も二酸化炭素の場合と同様に同位体解析が循環過程の研究に有効である。

さらに、わが国が南極で掘削中の深層氷床コアを分析することによって、過去20万年を越える温室効果気体の変動機構の解明に役立つことが期待されており、これも今後の重要な研究課題の一つである。

### 2.6 まとめ

大気化学の研究は変化に富んだものではあるが、どれをとっても放射活性物質としてグローバルな気候変動と密接に関わっていることがわかる。二酸化炭素に代表される化学的に不活性な温室効果気体による地球温暖化の進行は当然であるとしても、化学的に活性な対流圏オゾンも温室効果気体として地球温暖化を加速する。一方、大気エアロゾルは直接間接に太陽光を遮蔽して温暖化を抑制する放射活性物質のひとつである。成層圏オゾンが気候に与える影響は定かではないが、少なくともその減少が成層圏を冷却することは確実であり、紫外線気候学という意味でも無関係ではない。

化学的に不活性な温室効果気体の循環の研究には炭素・酸素・窒素などの同位体解析が際立って有効であり、この点において化学的活性物質を扱う大気化学研究と大きく異なっている。元素の同位体比を質量分析計で測定するのに、現状ではかなりの量の安定なサンプルが必要であり、化学変化が激しい物質や少量しかサンプルできない物質の同位体比を測定することは困難がともなうためである。ましてリモートセンシングによって同位体比を測定するにはセンサーの精度が一桁向上しなければならない。しかし、酸素のように大量に存在する気体の微小な濃度変動がキーリング二世によってすでに十分な精度で測定され、HO のような一瞬の寿命しかもたないラジカル濃度の直接測定も可能になりつつあることをみても、一見不可能にみえることがちょっとしたきっかけで急速に可能性が開けるのが現代である。

大気化学はその重要さに比べて研究者の数が極めて少ないという現実、気候や地球環境の研究を推進するうえで不幸なことである。また、気象学には多すぎるほどのモデラーがいるのに、大気化学には理論家やモデラーがほとんどいないのも高度に日本の現象である。気象学の研究者は既存の化学反応を理解しモデル化することまではできるが、新しい化学反応の存在を予見し実証することはまさに化学の研究者の領域である。いまこそ気象学も大気化学にさらなる関心を示すとともに、化学と協力してその発展に組織的な努力を傾注すべき時である。

問題提起を賜った4人の方々には深甚の謝意を表すとともに、本稿の内容が方々の真意と異なり無用の誤解を与える場合があればお許しいただきたい。



## 酸性雨講演会 「酸性雨の化学と森林枯損解明の科学」

**主催**：大気環境学会酸性雨分科会，酸性雨研究会

**共催**：大気環境学会近畿支部，支部・大気の測定と反応部会，気象拡散部会，エアロゾル部会，生物影響部会，人体影響部会，環境文化研究会，近畿地方大気汚染調査連絡会，環境技術研究協会

**日時**：1997年7月23日(水)，13：10～16：50(開場：13：00)

**場所**：大阪府教育会館「たかつガーデン」8Fたかつ東中の間  
大阪市天王寺区高津町7-11  
近鉄上本町駅北東徒歩3分，  
大阪駅より東梅田駅乗換・地下鉄谷町線谷町九丁目駅東徒歩7分  
TEL：06-768-3911

### プログラム

**座長**：田口圭介（大阪府公害監視センター）  
村野健太郎（国立環境研究所）  
**挨拶**：中野道雄（大気環境学会近畿支部長）  
田口圭介（大気環境学会酸性雨分科会）

### 講演

- (1) 日本の森林地域での酸性雨調査の現状 —酸性雨と森林枯損解明の研究を支えてきた人々—  
玉置元則（兵庫県立公害研究所）
- (2) 谷川岳1275回登山で見た酸性雨・大気汚染の進行と自然環境の変化  
森 邦広（ナチュラリスト／登山家）
- (3) 酸性雨に関連する土壌調査法と日本の土壌の現状  
金子真司，鳥居厚志（森林総合研究所・関西支所）
- (4) 降水と森林流出水の水質 —降水と森林生態系の物質循環—  
岩坪五郎（京都大学名誉教授・近畿大学農学部教授）

講演終了後，懇親会を行います。

### 連絡先

〒654 神戸市須磨区行平町3-1-27  
兵庫県立公害研究所  
FAX 078-735-7817  
参加者は必ず事前に葉書かFAXで申し込んで下さい。先着150名