

物質輸送*

—長距離越境大気汚染—

秋 元 肇**

1. はじめに

1970年代に大いに発展した成層圏化学が一息ついた頃、まだオゾンホールは発見されていなかったが、これからは対流圏化学の時代だと語られたのが、1980年代の中頃のことである。それまで対流圏の化学は大気汚染や降水化学などに関連して、部分的には研究はなされていたものの、サイエンスとして体系的に正面から掘り下げられたことがなかった。この時期に対流圏化学が新しい研究分野として取りあげられたのは、一部の大气科学研究者の間に、地球環境問題への意識が芽生えていたからである。こうした動きが先行していたところへ、1987年頃から地球環境問題が国際政治の舞台に踊り出るというタイミングがマッチして、大気化学は地球環境問題解明の基礎として重要な学問分野の1つであることが広く認識され、大きな広がりを持つに到った。以来約20年が経ち、大気化学は成層圏化学、対流圏化学を統合しつつ成熟期に入っている。

大気化学の体系は化学種の大気中への放出、その輸送・変質、沈着という物質輸送が基本にあり、従来の学問分野から観ると、気象学、化学、生態学などに広くまたがる学際的分野ということになる。本稿では、化学的変質を伴う大気輸送という意味での物質輸送をキーワードに、その研究の流れと、社会的・政策的イベントとの関わりを追ってみよう。

2. 酸性雨と物質輸送

大気微量成分の長距離輸送が初めて研究対象となったのは、まだ地球環境問題という概念が生まれるずっと前、1960年代に顕在化したヨーロッパにおける酸性

雨問題が契機である。スカンジナビア半島で湖沼が酸性化し、魚が死滅するなどの大きな環境問題となったとき、スウェーデンの気象学者によってその原因がヨーロッパ大陸、英国などの主要発生源地域からの酸性物質の長距離輸送によるものであることが示された¹⁾。この問題は1972年にストックホルムで開催された「国連人間環境会議」で取りあげられ、この年に「国連環境計画 (UNEP)」が誕生している。このように物質輸送に代表される大気化学の研究はその誕生の契機からして、宿命的に社会的な問題と表裏一体の関係にあるのが特徴である。「越境大気汚染」「生物地球化学循環」などというなじみ深い言葉も、当時の酸性雨研究から生まれてきている。酸性物質の長距離輸送の研究は、その後ヨーロッパにおける酸性雨問題のさらなる深刻化、また北米大陸における米国、カナダ間の酸性雨越境汚染の顕在化を受けて、1970年代から80年代に欧米における研究が飛躍的に展開された²⁾。この間に生まれたのが、1979年に締結された、旧ソ連を含むヨーロッパ諸国と米国、カナダが批准している越境大気汚染条約 (CLRTAP) である。以後特にヨーロッパでは、この条約の下での数々の議定書によって領域規模での大気汚染対策がなされ、その節目節目で大気化学研究の成果が取り込まれると共に、新たな研究を促進してきた。こうした流れの中で、欧米では硫黄酸化物の排出規制が強化され、1990年代後半には酸性雨問題は克服されたとの認識の下、酸性雨は大気化学研究の主役の座から退いている。

欧米に代わって1990年代以降、酸性雨問題はアジアに関心が移り、日本の環境省が主導して「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET)」が政府間で設立され、2001年以降本格稼働している。それに伴って東アジアにおける酸性物質の長距離輸送の問題も多く関心を呼んでいる。但しモデルによる東アジ

* Atmospheric transport of trace species.

** Hajime AKIMOTO, 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター。

© 2007 日本気象学会

ア越境輸送の研究に関しては、MICS-ASIA³⁾などで国際モデル比較が行われているものの、国際的合意が得られないためこれまでEANETの中では正式には取りあげられていない。例えば各国間の硫黄の授受に関するいわゆるソース・リセプター・マトリックスに関しても、いくつかの研究が発表されてはいるものの、まだ研究者間の合意に達しているとは言い難い。窒素に関しては、東アジアにおけるソース・リセプター関係はまだほとんど研究が進んでいない。これまでの研究成果から、今後酸性降水物に関する観測はアジアにおいては、当面の環境リスクに対処すると言うよりは、長期的環境監視の視点から、また研究としては炭素・窒素循環の視点から取り組まれることになるものと思われる。さらに最近、酸性雨研究はアジアに引き続き、アフリカでも活発に行われるようになってきている⁴⁾。

3. オゾンと物質輸送

1988年に国際気象学・大気科学協会 (IAMAS) 傘下の「大気化学と地球汚染委員会 (CACGP)」が地球大気化学国際協同研究計画 (IGAC)⁵⁾を提案、1990年に地球圏-生物圏国際協同研究計画 (IGBP) が発足すると、IGACはIGBPのコアプロジェクトの1つとして取り入れられる。IGACは2007年の現時点でまだ継続中であるが、その中では対流圏オゾンとエアロゾルが研究の柱として取りあげられてきた。但し、IGACの前半では対流圏オゾンに、後半ではエアロゾルにより研究の重点がおかれている。

対流圏オゾンの光化学的生成・消滅と長距離輸送の研究は、1990年代に精力的に行われ、地球規模での全貌がかなり明らかとなった。その一環として特筆すべきは、米国NASAが行った対流圏化学の大規模な航空機キャンペーンGTE (Global Tropospheric Experiment) シリーズである。特にPEM (Pacific Exploratory Mission)-West A & BはIGAC/APARE (East Asian/North Pacific Regional Study) とリンクして1991年秋季、1994年春季にキャンペーンが行われ、東アジア・西太平洋上における大気微量成分の分布と輸送・変質を初めて明らかにした^{6,7)}。PEM-Westの具体的成果としては、アジア大陸からの大気汚染物質の流出の季節特性、自由対流圏内でのオゾンの正味の光化学生成・消滅の定量化などがあげられる。アジアからの汚染の影響を受けた気塊中ではオゾンの正味の生成が、太平洋上の清浄気塊中

では正味の消滅が起こっていることが分かった。PEM-Westは我が国の研究者が積極的に参加した初めての大規模国際共同観測でもあり、我が国の大気化学研究に大きなインパクトを与えた。このシリーズにはその他に、PEM-Tropics (1996年; 熱帯太平洋上)、TRACE-A (1992年; 大西洋上) などがあり、後述のACE-Asiaと同期して行われたTRACE-P⁸⁾ (2001年: 東アジア太平洋周縁地域) へと引き継がれている。

一方、PEM-Westを契機として行われた地上観測からは、我が国周辺の東アジアリモート地点における地表オゾン濃度の変動が長距離輸送によって支配されており、東ユーラシア大陸性清浄気塊、中国などからの大陸性領域汚染気塊、太平洋海洋性清浄気塊などのカテゴリーが確立され、それぞれの気塊中の典型的オゾン濃度などが定量化された。特に、隠岐、八方などの我が国のリモート地点における地表オゾンデータの解析から、我が国に対する中国大陸起源のオゾンの寄与が春季から夏季に15-20 ppbと求められ、この結果は最近のモデルによる結果と良く一致している。

対流圏オゾンの長距離輸送に関連して、北半球リモート地域において広く見られる地表オゾンの4月頃の春季極大の原因について、多くの議論がなされてきた。かつてはその原因として、成層圏オゾンの降下が議論されたが、その後の全球化学輸送モデルによる解析では、成層圏オゾンの寄与は2~3月に極大、以下に見る大陸間長距離輸送が春季極大となり、その組み合わせで4月頃の極大がもたらされていることが分かってきた。これに夏季の海洋性清浄気塊の影響、地域的オゾン生成の夏季極大が組み合わせられて、各地の地表オゾンの季節変化がもたらされている。特に東アジアではアジアモンスーンによる夏季の海洋性清浄気塊の影響が強いので、オゾンの見かけの春季極大、秋季の第二極大に強く反映されている。

2000年以降、全球化学輸送モデルによる研究から対流圏オゾンについては大陸間輸送⁹⁾の寄与が無視できないことが明らかになってきた。ちなみに東アジアに対してはヨーロッパ、北米から地表でそれぞれ3-4 ppbの影響が計算されており、アジアから北米、北米からヨーロッパへの寄与も同程度である。こうした研究結果は、欧米でオゾンの環境基準が達成されない一因として北半球全域のオゾン濃度が上昇し、そのバックグラウンドの影響が無視できず、オゾンの環境基準の達成には、半球規模での国際的な取り組みが必要であ

るという議論を引き出している。そのような考え方に従って、上述の CLRTAP の下に最近 (2005年)「大気汚染の半球輸送に関するタスクフォース (TF-HTAP)」が設置され、数々のワークショップが持たれている。我が国をはじめアジア諸国は CLRTAP を批准していないが、半球汚染問題はアジアの国々を除いては解決できないのは明白であるので、事務局である国連欧州経済委員会 (UNECE)、米国環境保護庁 (USEPA) からアジア諸国の政府に対するタスクフォースへの参加の働きかけがなされて、我が国からも研究者や環境省が積極的に参加している。

近年、我が国で光化学オキシダント濃度が再び上昇しており、1970年代に光化学スモッグが殷賑を極めた頃にも注意報の発令が見られなかった地方都市で、史上初の発令が相次いでいることから、東アジアにおける対流圏オゾンの長距離越境輸送の問題に関心が高まっている。この問題の定量化には、精度の高い化学輸送モデルによる解析によって、我が国自身の前駆体物質による光化学生成、アジア大陸からの越境輸送、ヨーロッパ・北米からの大陸間輸送、成層圏からの流入量を正確に定量化する必要がある、現在そのような方向の研究がなされているところである。

3. エアロゾルと物質輸送

エアロゾルに対する大気科学的関心は、エアロゾルが気候変動にフィードバックをもたらすという議論¹⁰⁾を契機に新たな大きな高まりを見せてきた。IGAC でもエアロゾル研究は大きな柱となり、Aerosol Characterization Experiment (ACE) シリーズが立ち上げられた。IGAC/ACE では ACE-I (1995年; オーストラリア周辺海域)、ACE-II (1997年; 大西洋) に引き続いて、2001年の春季に ACE-Asia が東アジア・太平洋地域に展開された¹¹⁾。ACE-Asia ではハワイから日本への航路、北西太平洋アジア周縁部における船舶による観測、東アジアにおける地上観測が中心であり、米国、日本の研究者以外に中国、韓国の研究者が大規模国際協同研究に初めて積極的に参加したのが大きな特徴である。東アジアのエアロゾルの特徴は硫酸塩・硝酸塩、炭素系エアロゾル (黒色炭素・有機炭素)、重金属類、海塩粒子、土壌粒子が渾然一体となっていることであり、ACE-Asia では東アジアの大気汚染物質流出領域におけるこれらエアロゾルの混合状態のキャラクタリゼーション、輸送に伴う変質過程などが明らかにされた。

また、1999年には欧米、インドなどの研究者を中心にインド亜大陸・インド洋を対象とした航空機・船舶を用いた国際協同観測 INDOEX が行われた¹²⁾。INDOEX ではエアロゾルによる褐色の層がこの地域で広く観測され、このエアロゾル層が海洋上で最大10%、陸上では10-20%太陽放射を散乱・吸収していることが見いだされている。

エアロゾルの長距離輸送で捉えやすいのは、黄砂やサハラ砂漠などの土壌粒子である。黄砂については古くからの観測があるが、2000年以降新たに日中協同研究の形で本格的研究がなされ、その発生源地域の特定や、輸送経路が明らかにされてきた。黄砂についてはさらに発生原因と対策を含めた環境問題として対処することが必要であるという認識が広まり、日中韓の政府間会合や砂漠化対処条約 (UNCCD) において議論され、国際共同研究としてさらに研究の継続が予定されている。

前述の TF-HTAP では対流圏オゾンに次いでエアロゾルの大陸間輸送が主要対象物質として挙げられている。エアロゾルの大陸間輸送の研究としては、黄砂粒子の米国西海岸への到達を衛星観測とモデルシミュレーションで示した研究がある。また、サハラ砂漠の土壌粒子がアジアにまで到達している大陸間輸送も報告されている。エアロゾルの大陸間輸送の特徴は、その現象が間歇的であることであり、対流圏オゾンのように半球全体のバックグランド濃度の上昇が、環境問題として重要という状況ではない。ちなみに TF-HTAP ではオゾン、エアロゾルの他に水銀、残留性有機汚染物質 (POPs) が対象物質として取りあげられている。

4. 大気汚染の気候・環境影響—UNEP/ABC—

このような物質輸送の研究の発展を踏まえて、2001年に UNEP から Atmospheric Brown Cloud-Asia (ABC) プロジェクト (ABC は当初 Asian Brown Cloud と呼ばれていたが、その後 Atmospheric Brown Cloud-Asia と改称された) が提案された¹³⁾。ABC は直接的には上記の INDOEX の発展として、エアロゾルの気候影響を核にして発想されたが、UNEP プロジェクトとしては「アジア大気汚染の気候・環境影響」を幅広くカバーしている。地域的には南アジアのみならず東南・東アジアなどを含むアジア全域を、研究対象物質としてはエアロゾルのみならずガス状大気汚染物質も、また影響としては物理的気候

影響のみならず、農作物影響、健康影響など広く環境影響を視野に入れ、最終的には温暖化・環境対策につなげるのが UNEP の目的である。

過去5年間の ABC の具体的活動としては、東アジア、南アジアのそれぞれ1か所での集中観測、長期的観測ステーションの立ち上げ、影響関係のワークショップの開催などである。東アジアでは2005年春に日本、韓国の研究者が中心となりこれに台湾の研究者が参加して、韓国済州島の Gosan でエアロゾルの化学組成・放射影響、オゾン、一酸化炭素等大気汚染ガスの同時観測キャンペーン EAREX2005が行われた。特にアジアでは初めての多国間共同観測と言うことで、このキャンペーンではガス・エアロゾル測定機器の相互比較に重点が置かれた。一方、同じ年に南アジアでは米国の研究者を中心にモルジブでエアロゾルに特化した集中観測 APMEX が行われた。

一方、ABC では地域代表性のある地点での大気質と気候の継続的観測に重きを置き、観測地点を Super Observatory, Main Observatory, Complementary Site の3つのカテゴリーに分けて、アジア全域で20か所余りのサイトが提案されている。これらの中で、上記の Gosan とモルジブではエアロゾルの化学・物理・放射の同時観測が行われ、国際協同観測が可能な拠点として ABC の Super Observatory (スーパーサイト) に認定されている。ここで特筆すべきは、我が国の沖縄・辺戸岬ステーションが最近国立環境研究所の努力で整備拡張がなされ、アジアで唯一の大気汚染ガスと降水、エアロゾルの化学・物理・放射の全てをカバーするサイトとなったことである。

Gosan, モルジブ, 辺戸岬を含め ABC の多くの観測サイトは、いわゆるアジア大気汚染の流出領域に位置するものが多い。これに対し、今後は特に中国、インドなどアジアにおける大気汚染ガス、エアロゾルの主要発生源領域における観測が重要であるとの意見が出されている。このような考え方に沿ったものとして、海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターが中心となった中国華北平原での泰山キャンペーン、北京大学が中心となり我が国から東京大学などの研究者も参加した珠江デルタキャンペーンなどが2006年に行われている。これらの研究は ABC のコアプロジェクトには位置づけられていないが、同じ目的を指向した ABC 関連研究として重要である。これまでほ

とんど科学的データが報告されることの無かった中国本土内の大気汚染とその放射特性などの実態が論文として発表されることが期待されている。また同様のキャンペーンがインド内陸部でも行われることが望ましい。これら発生源領域と流出領域のデータがそろって初めて、アジアにおける大気汚染の気候・環境影響が高い精度で評価されることになるだろう。

これまで、大気汚染・大気質研究と放射・気候変動研究は、一般に別の研究コミュニティで行われてきた。

この2つを強く結びつけた UNEP/ABC は、これまでの物質輸送の研究の発展からしても、新たな方向性を与える国際プロジェクトとなりうるであろう。

参 考 文 献

- 1) Oden, S., 1976 : Water, Air and Soil Pollution, 6, 137-166.
- 2) Johnson, R. W., G. E. Gordon, Eds., 1987 : The Chemistry of Acid Rain, Sources and Atmospheric Processes, ACS Symposium Series 349, American Chemical Society, Washington, DC.
- 3) MICS-ASIA : <http://www.adorc.gr.jp/adorc/mics.html>
- 4) AMMA/IGAC : http://www.igac.noaa.gov/AMMA_AC.php
- 5) Galbally, I. E., Ed., 1989 : The International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Programme, A core Project of the International Geosphere-Biosphere Programme, Commission of Atmospheric Chemistry and Global Pollution of IAMAS.
- 6) Hoell, J. M. *et al.*, 1996 : J. Geophys. Res., 101, 1641-1653.
- 7) Hoell, J. M. *et al.*, 1997 : J. Geophys. Res., 102, 28223-28239.
- 8) Jacob, D. *et al.*, 2003 : J. Geophys. Res., 108(D23), 8781, doi : 10.1029/2002JD003276.
- 9) Stohl, A., Ed., 2004 : Intercontinental Transport of Air Pollution, Springer, Berlin, 325pp.
- 10) Charlson, R. J. *et al.*, 1992 : Science, 255, 423-430.
- 11) Hubert, B. J., 2003 : J. Geophys. Res., 108(D23), 8633, doi : 10.1029/2003JD003550.
- 12) Ramanathan, V. *et al.*, 2001 : J. Geophys. Res., 106, 28371-28398.
- 13) ABC Project Team, 2002 : The Asian Brown Cloud : Climate and Other Environmental Impacts, UNEP RRC.AP, Pathumthani, Thailand.