

解 説

大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染

秋 元 肇

大気汚染問題の発展として、大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染という視点がクローズアップされている。本項ではこうした視点が生まれてきた研究の経緯、これまでの研究から得られている知見の簡単なレビュー、これらを踏まえた政策面に関わるワークショップなどの経緯、大気環境政策への関わり、今後の研究の方向、我が国の大気環境行政に対する戦略的意味などについて解説する。

はじめに

越境大気汚染が地球環境問題の一つとしてクローズアップされてから久しいが、残念ながら我が国ではこの問題は、酸性雨と関連づけた議論はなされてきたものの、他の地球環境問題に比べても本格的に取り組まれて来たとは言いがたい。その理由として、研究者コミュニティの意識が成熟していなかったことと、政治的には中国に対する配慮が背景にあったことも否定できないであろう。しかるに最近になって越境大気汚染問題はオゾン・エアロゾルの大陸間輸送・半球大気汚染の国際的論議の枠組みの中で新たな問題提起がなされており、我が国としてもオゾンの環境基準未達成との関連でクローズアップされてきている。

1. 大陸間輸送・半球大気汚染とは

大陸間輸送 (intercontinental transport) とはアジア大陸から北米大陸へ、北米大陸からヨーロッパ大陸へ、そしてヨーロッパからアジアへと大陸をまたがる大気汚染物質の長距離輸送のことであり、それぞれ trans-Pacific, trans-Atlantic, trans-Eurasia transport と呼ばれている (図1)。大陸間輸送には一般に1週間程度の時間がかかるため、こうした大陸間輸送が問題となるのは、大気寿命が1週間以上あるような大気汚染物質が対象である。具体的に現在対象となっているのは対流圏オゾン、エアロゾル、水銀、残留性有機汚染物質

(POPs) の4種である。これらの中でも特にオゾン、エアロゾルに関しては各国の環境基準達成に及ぼす大陸間輸送の影響が無視し得ないことが次第に明らかになり、最近特に注目が集まっている。大陸間輸送がさらに結合された結果が半球輸送 (hemispherical transport) であり、これから半球規模大気汚染 (hemispherical air pollution) の視点が生まれている。

一方、近年の経済発展と人口増加に伴って、アジアからの大気汚染物質の放出量が1990年代の中頃に北米大陸、ヨーロッパ大陸からの放出量と横並びになり、今世紀に入ってこれらを凌駕する趨勢になっている (図2)。また人口の都市集中により、人口1千万人以上のいわゆるメガシティ (巨大都市) が増加し、大都市の大気汚染問題が世界中で深刻化すると共に、これらメガシティからの大気汚染物質の排出の影響が大陸規模・半球規模の大気質に影響を与えつつある。こうした情勢を踏まえて「グローバル大気汚染」という概念が生まれ (Akimoto, 2003)、この文脈の中でも半球大気汚染がクローズアップされてきている。なお大陸間輸送・半球規模大気汚染は南半球でも話題となりつつあるが、本稿では北半球についてのみ言及する。

2. 大陸間輸送・半球規模大気汚染に関する研究の経緯

大気化学研究者の間で「大陸間長距離輸送」が研究テーマとして話題になったのは、私の知る限りでは、

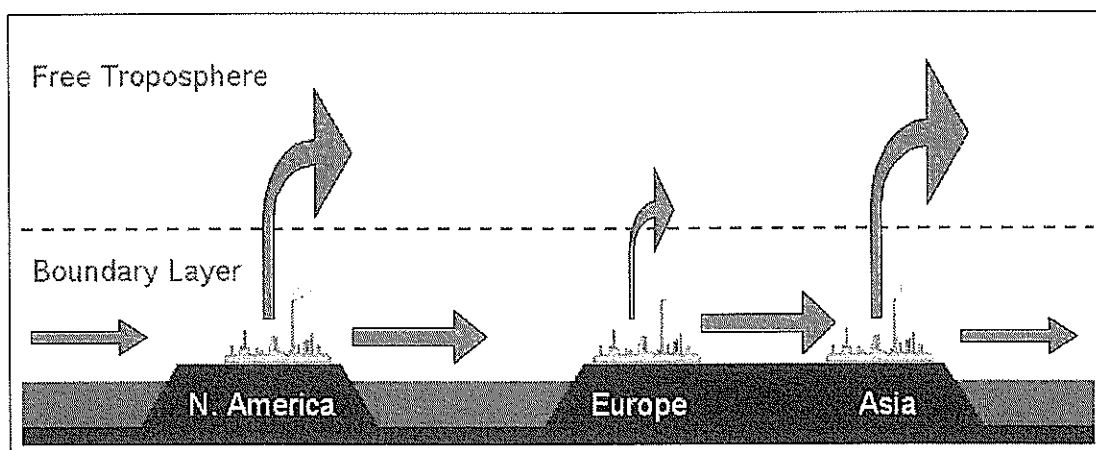


図1 北米からヨーロッパへ、ヨーロッパからアジアへ、アジアから北米へ渡る大気汚染物質の大陸間輸送の概念図 (Wild, 2005)。

IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) <<http://www.igbp.kva.se/>> のコアプロジェクトの一つである IGAC (International Global Atmospheric Chemistry Program) <<http://www.igac.noaa.gov/>> の Regional Meeting が我が国の名古屋で開かれた 1997 年頃ではないかと思われる。この国際会議の機会に IGAC-SSC (Science Steering Committee) の会合が持たれ、ここでこれまでの北大西洋域、北西太平洋域を対象とした地域的大気化学研究 (それぞれ NARE, APARE) の新たな発展として ITCT (Intercontinental Transport and Chemical Transformation) <<http://www.al.noaa.gov/WWWHD/pubdocs/ITCT/>> という新たな活動が提案された。ITCT はその後 IGAC で正式な活動として承認され、NASA の予算による trans-Pacific, trans-Atlantic を対象とした航空機キャン

ペーンが 2002, 2004 年に行われ (ITCT, 2004), これと同期する形で我が国でも NASDA の予算で航空機キャンペーンが行われている (Parrish et al., 2004)。一方、この間に化学輸送モデルを駆使した研究により、次節にも述べるようにアジアから北米へのオゾン・一酸化炭素・黄砂の大陸間輸送、北米からヨーロッパへ、ヨーロッパから東アジアへのオゾン・一酸化炭素などの大陸間輸送が研究され、特にオゾンの大陸間輸送に関しては、その環境基準に与える影響が定量的に議論されるようになった。

3. オゾン・エアロゾルの大陸間輸送に関する観測・モデル研究

大気汚染物質の大陸間輸送の研究としてはアジアから北米への trans-Pacific 輸送に関する研究が早くから注目された (Wilkening, 2000)。Trans-Pacific 輸送としては、アジア大陸からの黄砂が太平洋を越えて北米に達する現象が最初に着目され、地上観測と衛星観測によって大陸間輸送が捉えられ、モデルによる検証が行われている (Husar et al., 2001, Jaffe et al., 1999, 2003, McKendry et al., 2001, Park et al., 2002, Uno et al., 2001, Vaughan et al., 2001)。ガス状大気汚染物質についても観測からそのシグナルを捉える努力がなされ、CO についてはアジアから北米への大陸間輸送が検出されているが、オゾンに関しては観測による直接的シグナルは検出されていない (Jaffe et al., 2001)。他方、アジアから北米への大陸間輸送によるアジアに起因するオゾンの北米の地表オゾンへの影響がモデル研究により詳しく調べられ (Berntsen et al., 1999, Jacob, et al., 1999, Yienger et al., 2000, Fiore et al., 2002), Jacob ら (1999) はアジアに起因するオゾンが米国の地表オゾン数を数 ppb 増加させ、米国のオゾンの環境基準の達成に

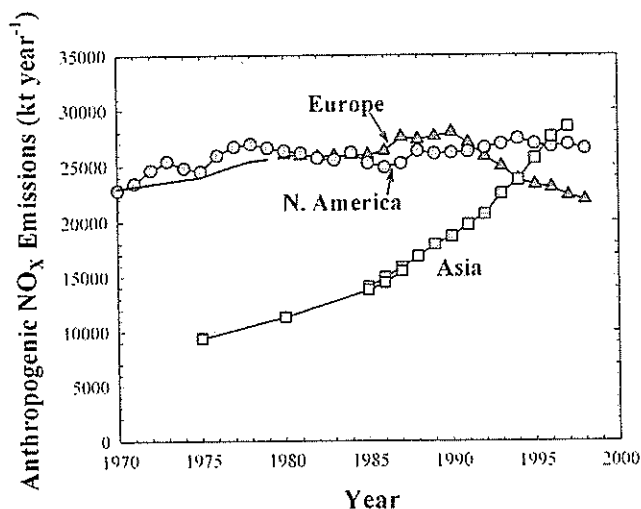


図2 人為起源 NO_x の各大陸からの放出量の経時変化。N. America (米国とカナダ), Europe (ロシア, 中近東を含む), Asia (東北, 東南, 南アジア) (Åkimoto, 2003)

無視し得ない影響を与えることを指摘している。大気汚染の北米からの移出と北米への移入に関しては Cooper and Parrish (2004) に総説がまとめられている。

北米からヨーロッパへの trans-Atlantic 輸送については、アイルランドのリモート・ステーションであるメースヘッドにおいて 1990-95 年に得られた観測データの解析がなされ、 O_3 、 CO について北米からの直接影響を捉えられたいくつかのエピソードが報告されている (Derwent et al., 1998)。一方、モデル解析によると、北米の大気汚染の影響はメースヘッドで約 5ppb、ヨーロッパ大陸で 2-4 ppb、イベント的には 5-10ppb に達するとされている (Li et al., 2002)。また北米の汚染の影響は、ヨーロッパの自由対流圏でより頻繁に観測されることがモデルシミュレーションで示されている (Stohl, 1999, 2002)。大気汚染のヨーロッパからの移出とヨーロッパへの移入に関しては Huntrieser and Schlager (2004) に総説がまとめられている。

Trans-Pacific, trans-Atlantic 輸送に比べ、ユーラシア大陸をわたるヨーロッパからアジアへの Trans-Eurasia 輸送の研究は少なく、我々のグループによる研究がほとんど唯一のものである。観測研究としては、バイカル湖南西に位置するロシア・モンゴル国境の山岳ステーション、モンディにおける通年連続観測データの解析から、Pochanart ら (2003) はヨーロッパの発生源地域を通過する気塊中の、 O_3 、 CO 濃度は春季～夏季に統計的にそれぞれ 4-5 ppb, 6-14ppb 高いことを示している。一方、我々のモデル研究によると、ヨーロッパからのオゾン汚染の影響は春 (4-5 月) に最大で地表付近で 2-3ppb、上空で 4-5ppb 程度である。これに対して北米からのオゾンの輸送量は、ヨーロッパより距離がずっと遠いにも関わらず、冬から春にかけてヨーロッパからの影響と同程度かそれ以上であることが明らかにされた (図 3)。ヨーロッパと北米からのオゾンは合わせて、我が国の地表付近のオキシダント濃度を春季に月平均で数 ppb 上昇させ、日本の環境基準値 (60ppb) に比べて無視し得ない量であることが報告されている (Wild and Akimoto, 2004)。大気汚染の東アジアへの移入と東アジアからの移出に関しては Pochanart et al. (2004b) に総説がまとめられている。

北半球における大陸間輸送に関しては、それぞれの大陸間輸送について上のような研究がなされているが、Wild and Akimoto (2001) は北半球全体について、アジア、北米、ヨーロッパ各大陸間の輸送の特質を明らかにしている。この研究によるとアジアから北米への大陸間輸送は、アジアで放出された汚染物質が自由対

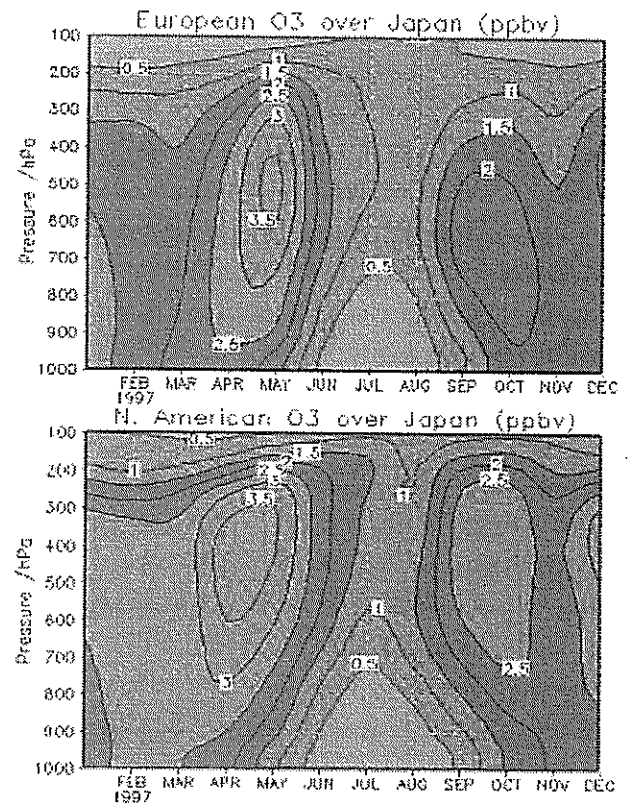


図3 日本 (八方) に対するヨーロッパ (上図) と北米 (下図) からのオゾンの影響。(Wild and Akimoto, 2004)

流圏へ効率よく運ばれるため、オゾンの生成・輸送は上部対流圏で活発に起こり、アジア大気汚染の影響は北半球全域に広がることを示された。これに対し、ヨーロッパからアジアへの大陸間輸送は、自由対流圏へは余り広がらず、オゾンの輸送も主として境界層内部から下部対流圏で起こる。北米からヨーロッパへの輸送はこれらの中間で、中部対流圏での輸送が主である。こうした大陸間輸送の差異はそれぞれの大陸における前駆体物質発生源地域の緯度の差によるところが大きいものと考えられる。図1に掲げた大陸間輸送の概念図はこの結果を定性的に反映している。

これらの研究以外に、北半球における大陸間輸送としては、アフリカのサハラ砂漠の土壌粒子が北米南部に達する現象が観測されている (Alpert and Ganor, 2001, Prospero, 1999)。また、大気汚染物質の大陸間輸送に関する最近の知見をまとめた書籍として "Intercontinental Transport of Air Pollution" (Stohl Ed. 2004) が出版されている。

4. 大陸間輸送・半球大気汚染問題の政策的経緯

こうした研究側の動きに対応して、半球大気汚染対策を視野に入れた政策的イニシアチブが欧米で始まっ

ている。これらをこれまでに開催されたワークショップの流れとしてまとめたのが表1である。大陸間輸送をテーマとしたワークショップとしては、2000年7月米国のシアトルにおいてUS EPAなどが関与して開催された「大気汚染のTrans-Pacific輸送」が初めてであり、これには我が国の環境省、国立環境研究所からも数名が参加している。次いで2001年にはUS EPA, Environment Canada, UN/ECE EMEPなどが参加して、trans-Atlantic輸送をテーマとしたワークショップがニューヨークで開催されている。さらに2002年にはドイツ環境保護庁とUS EPA, UN/CEC EMEPが主催して、trans-Pacific, trans-Atlantic輸送を半球規模に拡大した「光化学オキシダント・エアロゾルの半球大気汚染と大陸間輸送」をテーマとしたワークショップがドイツのバード・ブライシヒで開催され、我が国からも3人の研究者が参加している。

更に2005年になってブリュッセルでUN/ECE EMEP, US EPA主催の「大気汚染の半球輸送に関するタスク・フォース」が開催され、我が国から環境省地球環境局環境保全対策課の吉森係長、酸性雨研究センターの植田所長と私が参加した。越境大気汚染条約(LRTAP)の下でタスク・フォースが形成されたことは、条約事務局であるUN/ECEとして正式な活動に

入ったことを意味し、将来何らかの国際取り決めに視野に入れているものと考えられる。

大陸間輸送問題が将来の条約などへと発展する可能性については、Hollowayら(2003), Keetingら(2004)が論じている。

5. 大陸間輸送・半球汚染の大気環境政策との関わり

これら一連のワークショップを通じて大陸間・半球輸送が大気環境政策にもたらす意味が次第に明らかにされてきているが、ここでは2002年にドイツのバード・ブライシヒで開催されたワークショップの総括文書(EMEP, 2003)を参考に、その意味をまとめてみよう。

- (1) 現在の大気汚染物質の放出レベルは北半球の多くの場所で大気環境基準を超える結果をもたらしている。こうした大気環境基準の超過に対しては、局所的(ローカル)ないしは地域的(リージョナル)な大気汚染物質の放出がその主な原因であるが、大陸間ないしは半球規模での輸送も大気質に影響を与えている。
- (2) 大陸間・半球輸送に関してはオゾン、エアロゾル及びそれらの前駆体物質、並びに水銀、POPsについて多くの研究により実証がなされている。

表1 大気汚染物質の大陸間輸送をテーマとした行政関連国際会議

開催日	開催地	主催者	会議のタイトル	日本からの参加者
2000.7.27-29	Seattle, USA (約100名, 米国、カナダ、中国、日本、ロシア、韓国)	M.Engle (U.S.Environmental Protection Agency) K.E.Wikening (Nautilus Institute)	First International Conference on Trans-Pacific Transport of Air Contaminants	遠藤 肇 向井 人史 村野健太郎 柴田 康行 鶴野伊津志
2001.6.12-15	New York, USA	U.S.Environmental Protection Agency Environment Canada UN/ECE European Monitoring and Evaluation Program (EMEP) Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP)	EMEP Workshop on Photo-oxidants, Fine Particles and Haze across the Arctic and North Atlantic: Transport Observations and Models	なし
2001.12.3-5	Research Triangle Park, USA	U.S. EPA's Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS)	ICAP (Intercontinental Transport and Climatic Effects of Air Pollutants) Workshop	なし
2002.10.7-9	Bad Breisig, Germany (約100名, 20カ国)	German Federal Environmental Protection Agency U.S. Environmental Protection Agency UN/ECE European Monitoring and Evaluation Program (EMEP)	Hemispheric Air Pollution:Trends and Intercontinental Transport of Photo-oxidants, particles and their Precursors across the Northern Hemisphere (Observations, Models, Policy Implications)	戸塚 績 村野健太郎 秋元 肇
2004.10.21-22	Chapel Hill, USA	U.S.EPA's Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS)	Second ICAP (Intercontinental Transport and Climatic Effects of Air Pollutants) Workshop	オリバー・ワイルド
2005.6.1-3	Brussels, Belgium (約100名)	UN/ECE European Monitoring and Evaluation Program (EMEP) U.S.Environmental Protection Agency	First Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution (TFHTAP)	吉森 信和 植田 洋匡 秋元 肇

- (3) オゾンに関してはその地表付近の平均濃度は、オゾン自身及び前駆体物質の半球輸送によって左右されており、大気質にとっては半球規模の恒常的オゾンの負荷が間欠的な大陸間輸送より重要である。
- (4) エアロゾルとその前駆体物質に関しては、間欠的な大陸間輸送が大気質にとってより重要である。エアロゾルの空間分布はオゾンに比べ更に不均一であり、エアロゾルの輸送は半球規模の負荷よりも大陸規模での地域的負荷をもたらしている。
- (5) 大気汚染物質の局所的放出量と大気質との関係の非直線性を考慮すると、大気汚染抑止戦略は予測モデルを用いたシミュレーションに基づいて構築される必要がある。そのためのシミュレーションは局地、地域、半球スケールを繋ぐ統合モデルによってなされるのが理想的である。
- (6) 現在のモデルによる地表オゾン・エアロゾルの影響評価は、その非直線性のためまだ不確実性が大きく、観測によってさらに検証される必要がある。

6. 今後の研究と我が国の大気環境政策への意味

大気汚染物質の大陸間輸送・半球規模汚染は、当面我が国のオゾン（オキシダント）環境基準の未達成の問題に絡んで最も重要と思われる。図4はヨーロッパ及び最近の我が国の観測値を基に北半球中高緯度における19世紀末からの春季における地表付近オゾンの濃度トレンドをプロットしてみたものである（秋元、

2002）。図4にみられる19世紀末のヨーロッパにおける地表オゾン濃度の観測値約10ppbに関しては、オゾン前駆体物質の人為起源排出をゼロにしてもモデルでは20 ppb以上の値となってしまうことから、測定に問題があるのではないかとする議論が行われている。しかし、仮にこれを20 ppbとしたとしても、最近の北半球陸域リモート地点でのオゾン濃度は工業化以前の2倍以上に増加していることは明らかである。

図4には北米のデータは含まれていないが、近年の北半球リモート地点における地表オゾンの増加はヨーロッパ、アジア、北米の全ての大陸で同程度に起こっている。但し、オゾン濃度の上昇が各大陸で同程度に起こっていることが、大陸間輸送によるオゾン濃度の均一化の結果であるとするのは早計であろう。リモート地点におけるオゾン濃度は成層圏オゾン降下、大陸間輸送、大陸内輸送で決定されているが、図2に示されたように近年北半球3大陸におけるオゾン前駆体物質の放出量がほとんど同レベルになっていることが、大陸内輸送を含め3大陸の「バックグラウンド」オゾン濃度がほぼ同じ水準にあることの理由と考えられる。ここで大陸内輸送とはヨーロッパ、北米、アジア大陸内での輸送を意味し、ヨーロッパからアジアへの輸送はトランス・ユーラシア大陸間輸送と考えることにする。世界各地のリモート地点のオゾンに対し成層圏オゾン降下、大陸間輸送、大陸内輸送がそれぞれどれだけ寄与しているかの定量的評価は、なお今後の研究課題である。たとえば我が国では、我が国自身の大気汚染物質放出の直接的影響をほとんど受けていないと思

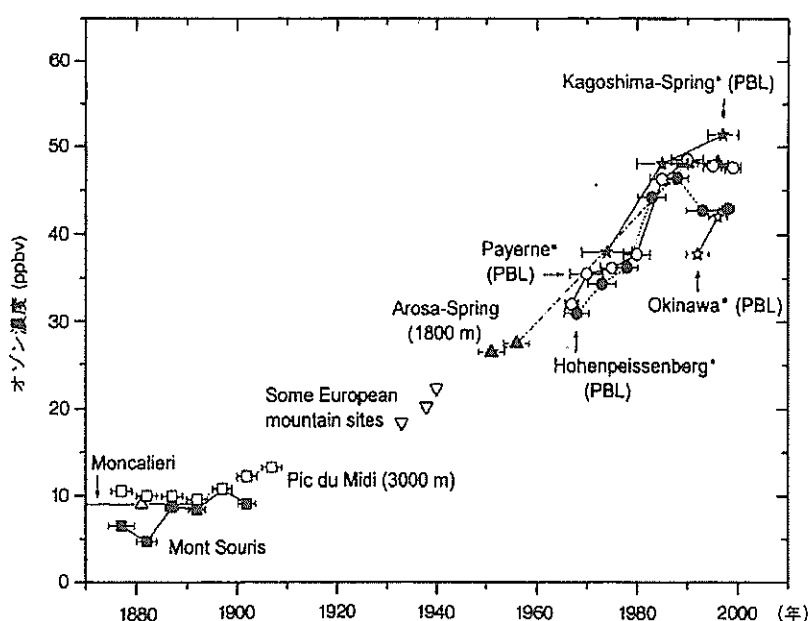


図4 北半球中高緯度における19世紀末からの春季地表付近オゾンの濃度変化。(秋元, 2002)

われる隠岐のような離島においても、春季のオゾンは月平均で55-60ppbに達し、環境基準60ppbを越えるケースもしばしば観測されている(Pochanart et al., 2002)。これに対する成層圏オゾン降下、大陸間輸送、大陸内輸送の寄与は、これまでのモデル計算と観測データ解析を合わせると、春季に月平均でそれぞれおよそ15, 5, 15ppb程度と推定出来るが、これらを合わせても40ppb以下にしかならず、実際に観測される60ppb近いオゾン濃度を説明出来ない。一方、東アジア地域スケール汚染に対し「バックグランド」濃度を規定すると思われる東シベリアリモート地点であるモンディにおけるオゾン濃度も春季には50ppb以上に達している(Pochanart et al., 2003)。ここでもモデル解析によると、ヨーロッパ、北米、東アジアからの直接的輸送の影響は10ppb以下であり、成層圏オゾン降下と合わせても観測されるオゾン濃度の半分しか説明出来ない(Wild and Akimoto, 2004)。

こうしたオゾンのミッシングソースについては、これまで考慮されてこなかったヨーロッパ、北米、東アジア以外の地域からの寄与も意外に大きい可能性もあり、その解明は今後の研究に残されている。さらに、都市域のオゾンに対しては、当然局地的な光化学生成の寄与がはるかに大きい。しかしながら都市域のオゾンに対しても、成層圏オゾン降下、大陸間輸送、大陸内輸送の寄与は無視出来ないものと思われ、今後のオゾン抑止戦略は、前節で述べられたように半球スケール、地域スケール、都市スケールの化学輸送モデルを統合した精度の高いモデル予測に基づく必要があるものと思われる。特にオゾン低減対策を議論するに当たっては、そのようなモデルの過去の多くの観測データによる厳密な検証が重要である。

このように見てくると、オゾンの大陸間輸送の直接影響は各大陸とも数ppb程度で、大陸内の長距離越境輸送に比べてその重要度は低いように思われるかも知れない。もちろん環境基準の未達成率の議論において、この数ppbは無視し得ない重要性を持っているものと思われる。しかしながらより重要なのは、北半球のリモート地点におけるオゾン濃度が現在既に50ppb前後に達し、地域スケール汚染に対し「バックグランド」として寄与していることである。このことは例えば我が国への中国などからのオゾンの越境汚染の議論において重要な意味を持つものと思われる。我が国のルール域、都市域のオゾン濃度の増加に対する中国からの直接影響は、春季から夏季において15-20ppb、間欠的には更に大きいものと思われる(Pochanart et al., 2004a)。従って我が国のオゾンの環境基準達成、ひい

ては植物影響、人体影響にとって中国の影響は非常に大きな意味を持っている。しかしながら、この東アジアにおける地域スケール汚染の影響が我が国の環境に対して深刻な影響を与えるのは、半球汚染がすでに我が国の環境基準近くに達しており、これに大陸内輸送の分が付け加わるためであると解釈することも出来る。もし半球規模汚染レベルが今よりずっと低かったならば、東アジア地域汚染が付け加わったとしても、我が国の環境に対する深刻な負荷にはなっていないであろう。半球規模の高濃度汚染をもたらしているのは、我が国を含め全ての国がそれぞれ一因を担っているためである。従って、オゾン問題の解決には、先進国、途上国を含め全ての国がそれぞれの前駆体物質排出削減へ国際的取り組みをすべきであると思われる。単に中国などを我が国に高濃度オゾンをもたらしている汚染源と見なすより、半球規模汚染に対する認識を持ってこの問題に取り組む方がより論理的、生産的であると思われる。二酸化炭素削減の京都議定書においてなしえなかった、途上国、先進国を共に含む大気汚染物質排出削減の国際的取り組みを目指す方向に、欧米と共に我が国も方針を明確化すべきものと考えられる。

(受稿日 2005.8.23)

引用文献

- 秋元肇 (2002) 「オゾン」, 秋元肇・河村公隆・中澤高清・鷲田伸明編「対流圏大気の化学と地球環境」p.97, 学会出版センター;
- Akimoto, H. (2003) Global air quality and pollution, *Science*, 302, 1716-1719.
- Alpert, P. and E. Ganor, Sahara mineral dust measurements from TOMS (2001) Comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm, March 14-17, 1998, *J. Geophys. Res.*, 106, 18,275-18,286.
- Bernstein, T.K., S. Karlsdottir, D.A. Jaffe (1999) Influence of Asian emissions on the composition of air reaching the north eastern United States, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2171-2174.
- Cooper, O.R., D.D. Parrish (2004) Air pollution export from and import to North America: Experimental evidence, Stohl Ed., *Intercontinental Transport of Air pollution*, Springer, pp. 41-67.
- Derwent, R.G., P.G. Simmonds, S. Seuring, C. Dimmer (1998) Observation and interpretation the seasonal cycles in the surface concentrations of ozone and carbon monoxide at Mace Head,

- Ireland from 1990 to 1994, *Atmos. Environ.*, 32, 145-157.
- EMEP (2003) Hemispheric Air Pollution: Trends and Intercontinental Transport of Photooxidants, particles and their precursors across the Northern Hemisphere (Observations, Models, policy Implications), Draft working summary report, Executive Body, 20th session, Information Documents. <http://www.physchem.uni-wuppertal.de/PC-WWW_Site/Bad_Breisig/breisig_welcome.html>
- Fiore, A.M., D.J. Jacob, I. Bey, R.M. Yantosca, B.D. Field, A.C. Fusco, and J.G. Wilkinson (2002) Background ozone over the United States in summer: Origin, trend, and contribution to pollution episodes, *J. Geophys. Res.*, 107 (D15), doi:10.1029/2001JD000982.
- Holloway T., A. Fiore, and M.G. Hastings (2003) Intercontinental transport of air pollution: Will emerging science lead to a new hemispherical treaty?, *Environ. Sci. & Technol.*, 37, 4535-4542.
- Huntrieser, H. and H. Schlager (2004) Air pollution export from and import to Europe: Experimental evidence, Stohl Ed., *Intercontinental Transport of Air pollution*, Springer, pp. 69-98.
- Husar, R.B., et al. (2001) The Asian dust events of April 1998, *J. Geophys. Res.*, 106, 18, 18317-18333.
- Jacob D.L., J.A. Logan, P.P. Murti (1999) Effect of rising Asian emissions on surface ozone in the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2175-2178.
- Jaffe, D., T. Anderson, D. Convert, K. Kotchenruther, B. Trost, J. Daneilson, W. Simpson, Bernstein, T.K., S. Karlsdottir, D. Blake, J. Harris, G. Carmichael (1999) I. Uno, Transport of Asian air pollution to North America, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 711-714.
- Jaffe, D., T. Anderson, D. Convert, B. Trost, J. Daneilson, W. Simpson, D. Blake, J. Harris, D. Streets (2001) Observation of ozone and related species in the northeast pacific during the PHOBIAC campaigns 1. Ground-based observations at Cheeka Peak, *J. Geophys. Res.*, 106, 7449-7461.
- Jaffe, D., I. McKendry, T. Anderson, H. Price (2003) Six 'new' episodes of trans-Pacific transport of air pollutants, *Atmos. Environ.*, 37, 391-404.
- Keating, T.J., J.J. West, A.E. Farrell (2004) Prospects for International Management of Intercontinental Air Pollution Transport, In: Stohl A. Ed. *Intercontinental Transport of Air Pollution*, Springer-Verlag, Berlin p 295-320.
- Li, Q., D. J. Jacob, I. Bey, P.I. Palmer, B.N. Duncan, et al. (2002) Transatlantic transport of pollution and its effects on surface ozone in Europe and North America, *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2001JD001422.
- McKendry, I.G., J.P. Hacker, R. Stull, S. Sakiyam, D. Mignacca, and K. Reid (2001) Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *J. Geophys. Res.*, 106, 18,361-18,370.
- Park, R.J., D.J. Jacob, M. Chin and R.V. Martin (2002) Sources of carbonaceous aerosols over the United States and implications for natural visibility, *J. Geophys. Res.*, submitted.
- Parrish, D.D., Y. Kondo, O. R. Cooper, C. A. Brock et al. (2004) Intercontinental Transport and Chemical Transformation 2002 (ITCT 2K2) and Pacific Exploration of Asian Continental Emission (PEACE) experiments: An overview of the 2002 winter and spring intensives, *J. Geophys. Res.*, 109, D23S01, doi:10.1029/2004JD004980.
- Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kinjo and H. Tanimoto (2002) Surface ozone at four remote island sites and the preliminary assessment of exceedances of its critical level in Japan, *Atmos. Environ.*, 36, 4235-4250.
- Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kajii, V.M. Potemkin, and T. Khodzer (2003) Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/ East Asia, *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 10.1029/2001JD001412.
- Pochanart P., S. Kato, T. Katsuno and H. Akimoto (2004a) Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia, *Atmos. Environ.*, 38, 1325-1336.
- Pochanart, P., O. Wild, and H. Akimoto (2004b) Air pollution import to and export from East Asia, in A. Stohl Ed., *Intercontinental Transport of Air pollution*, Springer, pp. 99-130.
- Prospero, J.M. (1999) Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the

- southeastern United States: Implications for regional air quality, *J. Geophys. Res.*, 104, 15,917-15,927.
- Stohl, A., and Trickl (1999) A textbook example of long-range transport: Simultaneous observations of ozone maxima of stratospheric and North American origin in the free troposphere over Europe, *J. Geophys. Res.*, 104, 30,445-30,462.
- Stohl, A., S. Eckhart, C. Forster, P. James (2002) Spichtinger, *J. Geophys. Res.*, 106, doi:10.1029/2001JD001396.
- Stohl, A. (Ed.) (2004) *Intercontinental Transport of Air Pollution*, Springer, Berlin.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui, , NN. Sugimoto (2001) Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, 106, 18331-18344.
- Vaughan, J.K., C. Claiborn, and D. Finn (2001) April 1998 Asian dust event over the Columbia Plateau, *J. Geophys. Res.*, 106, 18,381-18,402.
- Wild O., and H. Akimoto (2001) Intercontinental transport of ozone and its precursors in a three dimensional global CTM, *J. Geophys. Res.*, 106, 27,729-27,744.
- Wild, O., and H. Akimoto (2004) Trans-Eurasian transport of ozone and its precursors, *J. Geophys. Res.*, 109, doi:10.1029/2003JD004501.
- Wild, O (2005) Provided by personal courticy.
- Wilkening, K., L. Barrie, M. Engle (2000) Trans-Pacific air pollution, *Science*, 290, 65-67.
- Yienger, J. J., M. Galanter, T. A. Holloway, M. J. Phadnis, S. K. Guttikunda, G. R. Carmichael, W. J. Moxim, and H. Levy II (2000) The Episodic Nature of Air Pollution Transport from Asia to North America. *J. Geophys. Res.*, 105, 26,931-26,945.