

201:204:402 (オゾン;エアロゾル;東アジア)

1. 東アジアにおけるオゾン・エアロゾル広域大気汚染

秋 元 肇*

1. はじめに

我が国ではかつての公害時代の大気汚染が克服されて以来、1980年代後半から90年代の一時期「大気汚染」という言葉が非常に色あせ、社会的にも研究面でも時代遅れに感じられた時代があった。そのような空気を反映して例えば「大気汚染学会」は1995年に「大気環境学会」へと名称変更している。この空気が再び変わり出したのは2000年代に入ってからであり、「グ

ローバル大気汚染」「アジア広域大気汚染」「大気汚染の半球輸送」「大気汚染の地球温暖化影響」などといった文脈の中で、「大気汚染」が国際的にも求心力を持った言葉として復権している。その理由としては、研究面では大気汚染が局所的な現象としてではなく、都市大気汚染についても「メガシティ」と言う新しいキーワードが生まれるなど、大気汚染が大陸規模、半球規模の視点から地球環境問題の一環として捉えられ、観測機器や化学輸送モデルの進歩と相まって新しい研究テーマが生み出されてきたことが大きい。一方、国際的な政策面では、特にヨーロッパにおいて「越境大気汚染条約」の下で科学的知見を活用した大

* (財) 日本環境衛生センター・アジア大気汚染研究センター。

© 2011 日本気象学会

気汚染対策が次々に成果を上げてきた。また、中国、インドという新興大国の経済発展が大気汚染・地球温暖化の両面で国際的に大きな関心を引き起こし、途上国の大気汚染問題を含めてアジアにおける統合的大気環境管理の国際枠組みをどう構築するかといった観点から、大気汚染が新たな視点で注目されている。

2. グローバル大気汚染と東アジア大気汚染

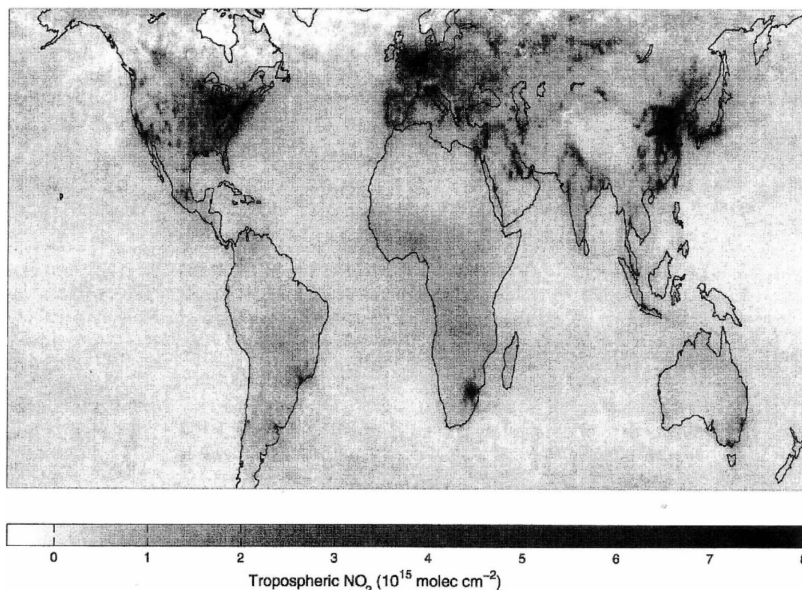
我々の眼をグローバル大気汚染という視点に向けさせる上で衛星観測が果たした役割は大きい。第1図は人工衛星搭載センサ

SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, <http://www.sciamachy.org/>) による対流圏の二酸化窒素 (NO_2) カラム密度の全球分布 (Martin *et al.* 2006) である。

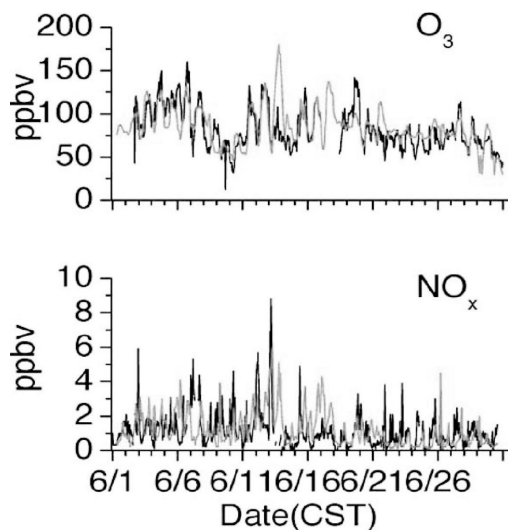
この図は、大気汚染が先進国・途上国を問わず普遍的な問題であり、グローバルな視点からの国際的な取り組みが必要であることを示唆すると共に、東アジア、特に中国中東部が広大な大気汚染地域であることを明らかにしている。しかしこれまで、この地域における大気汚染の実態は、北京市周辺の都市汚染が一部報告されている以外ほとんど知られていなかった。この地域は東アジア越境大気汚染の発生源地域としても重要である。

3. 中国中東部における大気化学観測とモデル解析

我々は第1図に見られる中国中東部の大気汚染地域の代表的な地点として山東省泰山 (Mt. Tai, 北緯 $36^{\circ}16'$, 東経 $117^{\circ}07'$, 標高1534 m) を選び、オゾン、エアロゾルとそれらの前駆体物質の観測を行ってきた。通年観測の結果からはこの地域では6月にオゾン濃度が最大になり、その月平均値は80 ppb に達することが分かった (日本における環境基準は60 ppb)。そこで2006年6月に泰山における大気化学集中観測



第1図 SCIAMACHY による対流圏 NO_2 カラムの全球分布 (2004年5月 - 2005年4月平均) (Martin *et al.* 2006)。



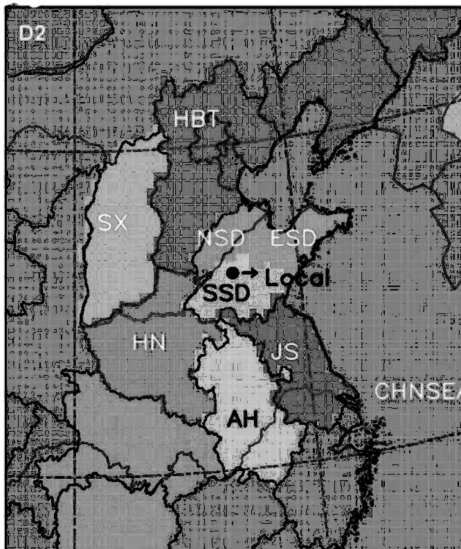
第2図 泰山における集中観測期間中の O_3 , NO_x の実測値 (黒色) とモデル計算値 (灰色) (Li *et al.* 2008)。

(MTX2006) を行った。ここでは、オゾン (O_3)、ブラックカーボン (BC) の観測とタグ付き (第3図で示すように各物質において発生領域毎に異なるマークを付ける) の領域化学輸送モデルによるオゾンの解析結果を紹介する。

第2図は集中観測期間中におけるオゾン (O₃) と窒素酸化物 (NO_x) の実測値とモデル計算値の比較

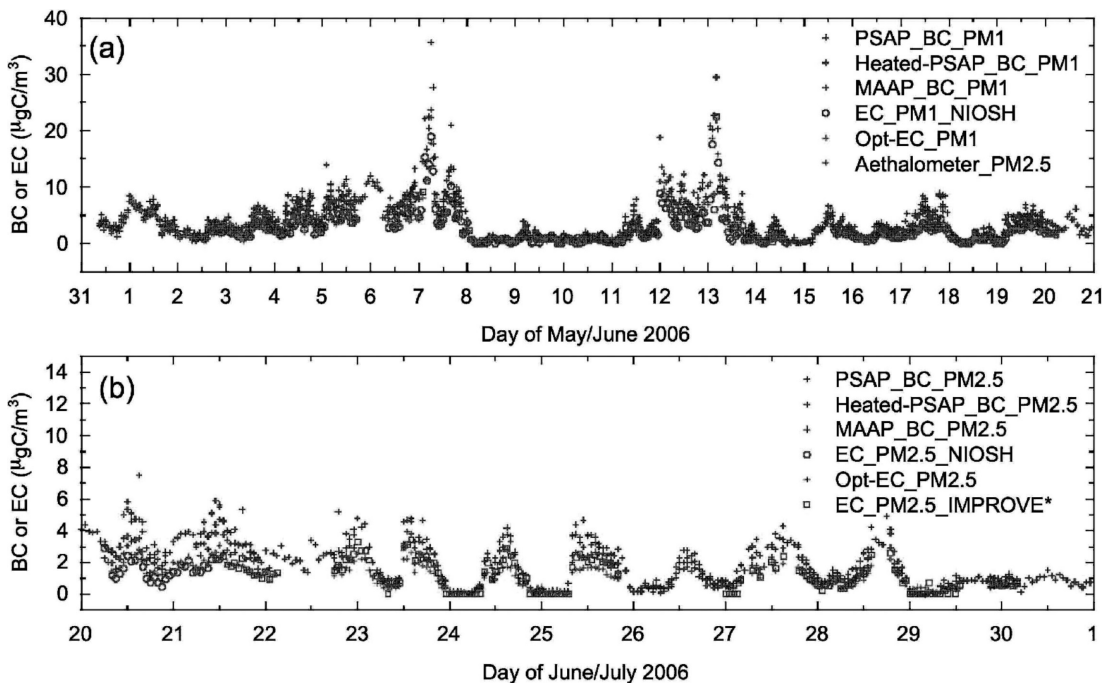
である。図に見られるように2006年6月のO₃最大値は160 ppb, 月平均値82 ppb, NO_xは最大値9 ppb,

月平均値1.1 ppbを示し, モデルはこの地域の高濃度O₃, NO_x汚染を良く再現している (Li *et al.* 2008). こうした高濃度オゾンの発生源の帰属を求めるため, 第3図にはタグをつけた各地域とこれら各地域からの6月平均のO₃の寄与率を示す. 図中の表から月平均値85 ppbに対して山東省南部 (第3図のSSD) からの寄与が19 ppb (22%)と最も大きく, タグをつけた中国中東部全体からの寄与は51 ppb (60%)に達する. それ以外は大陸間輸送を含む領域外からの寄与が14 ppb (16%), 成層圏寄



Regions	Monthly mean
Local	9.8 (11.5)
ESD	1 (1.2)
SSD	18.5 (21.5)
NSD	2.2 (2.6)
HBT	1.5 (1.8)
SX	0.4 (0.5)
HN	2.8 (3.3)
AH	5.6 (6.6)
JS	8.3 (9.8)
CHNSEA	1.3 (1.5)
Inner ^b	51.4 (60.2)
Outer ^b	3.1 (3.7)
Boundary ^c	14.0 (16.4)
Upper ^c	16.7 (19.6)
Total	85.4 (100)

第3図 タグをつけた地域とそれぞれの地域からの泰山 (黒点) への6月平均オゾン寄与濃度 (ppb) と寄与率 (括弧内) (%) (Li *et al.* 2008).



第4図 集中観測期間中における複数の測定器による黒色炭素エアロゾル (BC) と元素状炭素エアロゾル (EC) 濃度の日変化 (Kanaya *et al.* 2008).

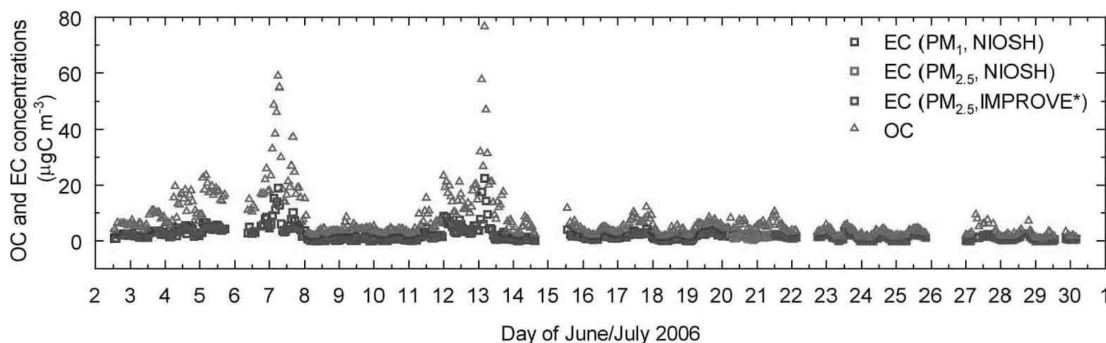
与が17 ppb (20%) となっている。

第4図はこの期間の各種測定器を用いた黒色炭素エアロゾル (BC) または元素状炭素エアロゾル (EC) の実測値を示したものである (Kanaya *et al.* 2008). MAAP (Multi Angle Absorption Photometer) で測定されたBCの値は、最大値 $40.8 \mu\text{gC m}^{-3}$ 、月平均値 $3.7 \mu\text{gC m}^{-3}$ である。6月5-7日、11-13日に見られる高濃度エピソードは、この時の気塊が華北平原における農業廃棄物燃焼のブルームを通過したためであることが分かった。また第5図はEC/有機炭素エアロゾル (OC) 測定器によるECとOC濃度の日変化を示したものである。第4図に示されたMAAPによるBCの値とEC/OC測定器によるECとの値との間には1.5倍ほどの差があることが分かった。BCとOCに対するモデルシミュレーションの結果からは、

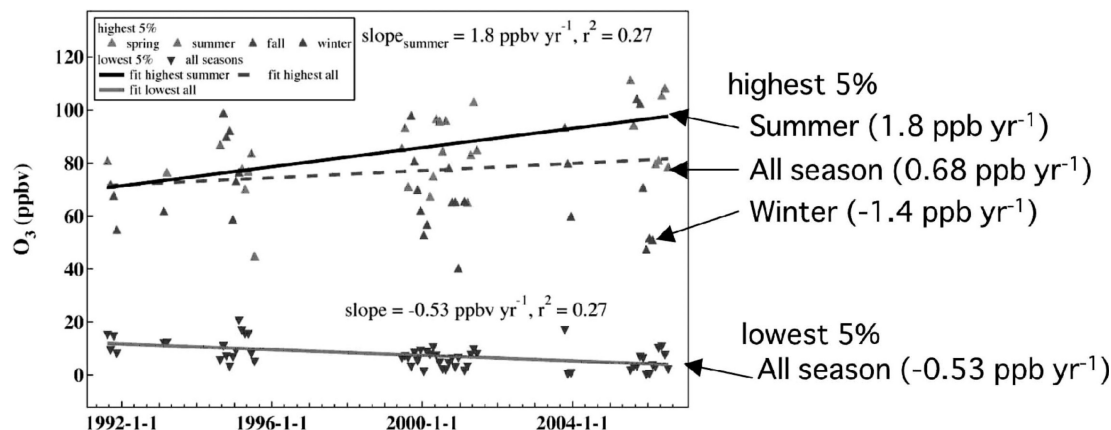
この期間のこれらエアロゾルについては化石燃料燃焼起源による影響に対して、焼き畑・森林火災起源による影響がより重要であることが分かった (Xu *et al.* 2006)。

4. 東アジアにおけるオゾン濃度の増加と越境汚染

1990年代以降、東アジアにおいては中国、日本などでオゾン濃度の増加が見られている。第6図は中国・臨安 (Lin'an, 北緯 $30^{\circ}18'$, 東経 $119^{\circ}44'$, 標高139 m) における1992-2004年の地表オゾンの増加トレンドであるが、特にこの解析ではオゾン濃度の時間的な変化を季節別・濃度階層別に分けることによって明確な濃度トレンドを示すことに成功している (Xu *et al.* 2006)。第6図に見られるように濃度の増加トレンドは夏期の高濃度5パーセンタイルに対して 1.8 ppb/



第5図 集中観測間中における元素状炭素エアロゾル (EC) /有機炭素エアロゾル (OC) 測定器によるECとOC濃度の日変化 (Kanaya *et al.* 2008)。



第6図 中国臨安 (Lin'an) におけるオゾンの季節別・濃度階層別増加トレンド (1992-2004) (Xu *et al.* 2006)。

yearと最も大きく、この濃度域では年間平均で0.68 ppb/yearの増加である。一方高濃度5パーセントイルでも冬期には-1.4 ppb/year、低濃度5パーセントイルに対しては年間平均で-0.53 ppb/yearと負のトレンドとなっている。このことはNO_xの排出量の増加によって、光化学活性の高い夏期の高濃度域のオゾン濃度が増加し、夜間など光化学活性の低い低濃度時や冬期には、NO titration 効果 (NO+O₃→NO₂+O₂の反応によってオゾン濃度が減少する効果)によってオゾンが減少していることを意味しており、理論的予測と良く一致している。第7図では日本・八方の1992-2006年について同様の解析がなされている (Tanimoto 2009) が、95%高濃度域では2.1ppb/year、50%平均値に対しては1.0 ppb/year、5%低濃度域に対してはほとんど増加傾向が見られないという、第6図と同様の傾向が得られている。我が国におけるオゾン濃度の増加トレンドは、八方のようなりモート局以外の常時監視局データの解析からも全国的に見られている (大原・坂田 2003)。

1990年以降、我が国のNO_xと揮発性有機化合物 (VOC) の大気中濃度がほとんど増加していないにもかかわらず、このようなオゾン濃度の増加が全国的に見られることから、中国からの越境輸送の影響が推測されている。中国中東部からのオゾンの越境輸送濃度は、隠岐・八方など我が国のリモート地点におけるオゾン観測データの解析から、春期から夏期に平均的に15-20 ppb という値が報告されている (Pochanart *et al.* 2004)。この値は最近のモデル解析の結果 (Yamaji *et al.* 2006) とも良く一致している。モデル計算の結果では、春期-夏期の中国中東部からのこの濃度レベルの越境輸送の頻度は、一般に月に2-3回

である (Wild *et al.* 2004)。一方、気象条件によっては、中国中東部からこの2倍以上の高濃度オゾンが西日本に輸送されてくる事例が大原ほか (2008) によって報告されている。

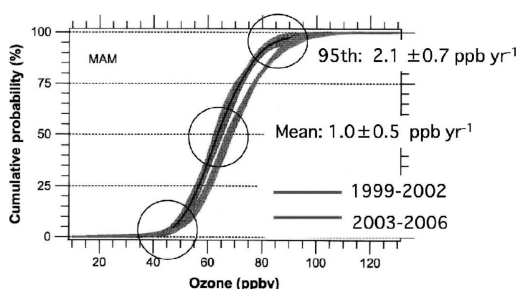
東アジアにおけるオゾンのソース-リーセプター関係に関する定量的なモデル研究は、現在緒に就いたところであり今後研究が進み、国際的な共通認識が得られる事が期待される。

5. おわりに

東アジア大気汚染は、地球温暖化・気候変動の視点からも関心が高まっている。気候変化の関心が地域的な気温・降水量変化に向かうにつれ、エアロゾルを初めとする大気汚染物質の気候影響の大きさが改めて認識されるようになった。一方、地球温暖化対策面でも、特に途上国に対して温室効果ガスの排出抑制を促す上で、大気汚染対策と地球温暖化対策を同時に推進する共制御・共便益の考え方の有効性が「コベネフィット」という名で浸透しつつある。大気汚染と気候変動を統合的に取り扱う「統合アセスメントモデル」は、ヨーロッパで先行しているが、今後我が国でも東アジア大気環境管理の国際枠組みの議論のなかで、このような考え方が重視されるのではないかと思われる。

参考文献

- Kanaya, Y., Y. Komazaki, P. Pochanart, Y. Liu, H. Akimoto, J. Gao, T. Wang and Z. Wang, 2008: Mass concentrations of black carbon measured by four instruments in the middle of Central East China in June 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 7637-7649.
- Li, J., Z. Wang, H. Akimoto, K. Yamaji, M. Takigawa, P. Pochanart, Y. Liu, H. Tanimoto and Y. Kanaya, 2008: Near-ground ozone source attributions and outflow in central eastern China during MTX2006. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 7335-7351.
- Martin, R. V., C. E. Sioris, K. Chance, T. B. Ryerson, T. H. Bertram, P. J. Wooldridge, R. C. Cohen, J. A. Neuman, A. Swanson and F. M. Flocke, 2006: Evaluation of space-based constraints on global nitrogen oxide emissions with regional aircraft measurements over and downwind of eastern North America. *J. Geophys. Res.*, **111**, D15308, doi:10.1029/2005JD006680.
- 大原利真, 坂田智之, 2003: 光化学オキシダントの全国的な経年変動に関する解析. *大気環境学会誌*, **38**, 47-54.



第7図 日本・八方におけるオゾンの濃度パーセントイル別増加トレンド (Tanimoto 2009)。

- 大原利眞, 鶴野伊津志, 黒川純一, 早崎将光, 清水 厚,
2008 : 2007年5月8, 9日に発生した広域的な光化学オ
ゾン汚染 —オーバービュー—. 大気環境学会誌, **43**,
198-208.
- Pochanart, P., S. Kato, T. Katsuno and H. Akimoto,
2004 : Eurasian continental background and region-
ally polluted levels of ozone and CO observed in
northeast Asia. *Atmos. Environ.*, **38**, 1325-1336.
- Tanimoto, H., 2009, Increase in springtime tropospheric
ozone at a mountainous site in Japan for the period
1998-2006. *Atmos. Environ.*, **43**, 1358-1363.
- Wild, O., P. Pochanart and H. Akimoto, 2004 : Trans-
Eurasian transport of ozone and its precursors. *J.*
Geophys. Res., **109**, D11302, doi : 10.1029/2003
JD004501.
- Xu, X., W. Lin, T. Wang, P. Yan, J. Tang, Z. Meng and
Y. Wang, 2006 : Long-term trend of surface ozone at
a regional background station in eastern China 1991-
2006 : enhanced variability. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**,
2595-2607.
- Yamaji, K., T. Ohara, I. Uno, H. Tanimoto, J. Kuroka-
wa and H. Akimoto, 2006 : Analysis of the seasonal
variation of ozone in the boundary layer in East Asia
using the Community Multi-scale Air Quality
model : What controls surface ozone levels over
Japan? *Atmos. Environ.*, **40**, 1856-1868.
-