

# 東アジアにおける広域越境大気汚染と日本への影響

独立行政法人 国立環境研究所 大原利眞

## 1. はじめに

アジア地域では、火力発電所・工場・自動車などによる化石燃料の燃焼、家庭での木炭燃焼、農業残燐物の屋外焼却、焼き畑、森林火災などの様々な発生源から、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )や硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )、揮発性有機化合物(VOC)などの汚染物質が大量に大気中に放出されている。このような大気汚染物質の排出量は、燃料消費の増大に従って 1980 年代後半から急増しており、酸性雨、微小粒子や光化学オゾンの増加などの大気環境問題を引き起こしている。中でも中国やインドをはじめとするアジアの発展途上国では今後も著しい経済成長が予想され、問題が一層深刻化して、健康や食糧生産、生態系に影響を及ぼすことが懸念される。また、大気汚染物質は、地球大気の大気放射バランスにも影響を与え、気候変動の一因にもなる。一方、アジア大陸の風下に位置する日本には、中国などから大量の汚染物質が流れ込んでおり、その越境大気汚染の影響が問題となっている。特に昨春、九州北部地域などにおいて頻繁に光化学スモッグ注意報が発令されたことから、光化学オゾンに対する社会的な関心が高まっている。本講演では、中国を始めとする東アジアにおける大気汚染の現状と将来、並びに大陸から日本への越境汚染に関して、特に最近問題となっている光化学オゾンを中心とした研究結果について紹介する。

## 2. 日本で増加する光化学オゾン

地表近くのオゾンは、 $\text{NO}_x$  と VOC が大気中で光化学反応を起こすことによって生成される。光化学反応によって生成される酸化性物質が光化学オキシダント( $\text{O}_x$ )であり光化学スモッグの指標とされているが、この光化学  $\text{O}_x$  の大部分はオゾンである。

日本の光化学  $\text{O}_x$  濃度は上昇している。図 1 は日本全国の大気汚染測定局で測定された光化学  $\text{O}_x$

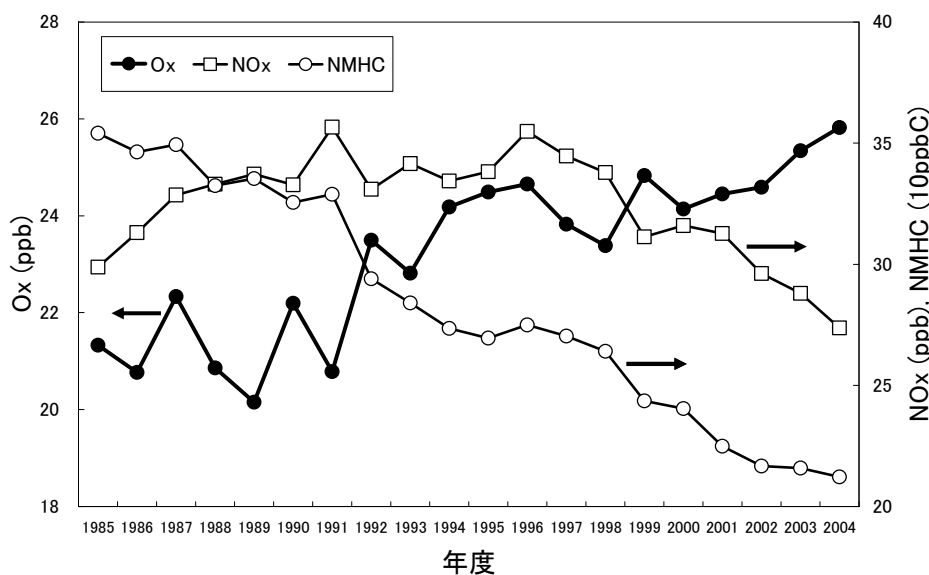


図1 全国の大気汚染測定局(一般局)における  $\text{O}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、NMHC の年平均濃度の経年変化

の年平均値の経年変化を示すが、1985～2004 年度の 20 年間に約 0.25 ppb/年(1 %/年)の割合で増加している(大原、2007)。このように光化学 Ox(光化学オゾン)が上昇しているのに対して、その原因物質である NO<sub>x</sub> と NMHC(非メタン炭化水素;非メタン VOC とほぼ同様)は発生源規制により減少している(図1)。さらに、わが国における光化学スモッグ注意報を発令した都道府県数は、2007 年には 28 都府県に達して観測史上最大の数となり、汚染が広域化していることを示している。特に、2007 年 5 月 8 日から 9 日にかけて、九州から西日本を中心とする広い範囲で光化学スモッグ注意報が発令され、近くに大きな発生源が無い九州北部の離島でも光化学オゾンが高濃度となり、大きな社会問題となった。さらに、国内の清浄地域の観測地点でも、2000 年から 2005 年の間に数 ppb～10ppb 程度のオゾン濃度の上昇が観測されている(<http://www.adorc.gr.jp/adorcjp/>)。何故、原因物質が減少しているのに、光化学オゾンが増加しているのであろうか? 何故、近くに発生源がない清浄地域でも光化学オゾンが増加し、汚染が広域化しているのであろうか? これには様々な要因が考えられるが(大原・坂田、2003)、以下において、大気汚染排出量が急増しているアジア大陸からの越境汚染による可能性が高いことを示す。

### 3. アジアと中国における大気汚染排出量の増加

国立環境研究所、海洋研究開発機構、九州大学、総合地球環境学研究所などは共同して、アジア地域における多種類の的大気汚染物質の排出量を 1980～2020 年について算定し、アジア域排出インベントリ REAS(Regional Emission inventory in Asia)を開発した(Ohara et al., 2007)。REAS は、アジア各国の燃料消費量や工業生産量、自動車走行量、人口などの統計データ、排出係数(排出原単位)、排出規制動向などのデータをもとに、人間活動によって発生する大気汚染物質の排出量を計算したものである。図 2 は、アジアにおける NO<sub>x</sub>、NMVOC(非メタン VOC)排出量の 1980～2003 年の経年変化を示す。2000 年におけるアジア全体の NO<sub>x</sub> 排出量は 2,511 万トンで、中国(45%)とインド(19%)の排出量が非常に多く、最大の排出国である中国では、石炭火力発電所(34%)、工場等の石炭燃焼(25%)、自動車等の石油燃焼(25%)が大きな割合を占める。1980 年から 2003 年における変化に着目すると、燃料消費量がこの間に大幅に増加したことに伴い、NO<sub>x</sub> 排出量もアジア全体では 2.8 倍、東アジアでは 2.6 倍に増加した。中でも、中国における増加は 3.8 倍(平均年率 6%)と非常に大きく、特に、2000 年以降は過去最高となっている(3 年間で 1.3 倍)。このような最近の増加傾向は、他の排出量推計結果(Zhang et al., 2007)や衛星観測(Richter et al., 2005)においても同様に示されている。一方、NMVOC の 2000 年におけるアジア全域の排出量は 4,024 万トンで、発生源種類別には工場・火力発電所などの燃焼施設(38%)と自動車などの輸送機関(33%)が大きな割合を占める。また、1980 年から 2003 年の間に NMVOC 排出量は東アジアでは 2.1 倍、東アジアでは 2.4 倍、中国では 2.5 倍に増加している。

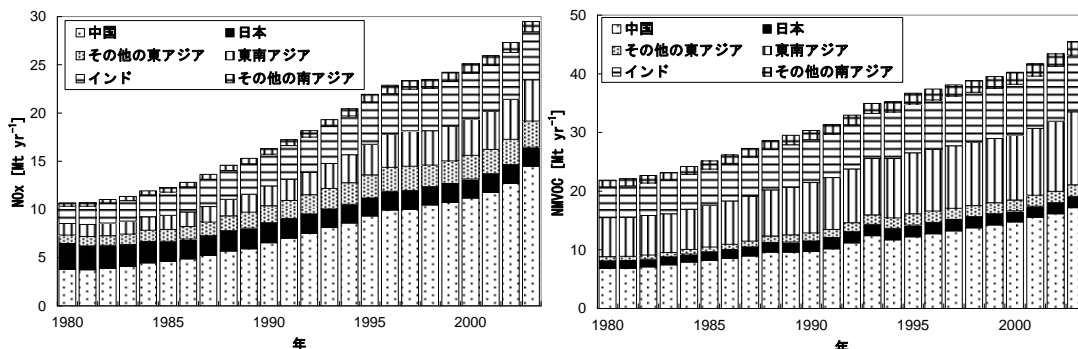


図 2 アジアにおける NO<sub>x</sub>、NMVOC 排出量の 1980～2003 年の変化

#### 4. 光化学オゾンの越境汚染

大陸で排出された NO<sub>x</sub> や VOC は光化学オゾンを生成し、それが長距離輸送され、アジア大陸の風下に位置する日本などに越境汚染を引き起こすと考えられる(図 3 参照)。対流圏化学輸送モデル(シミュレーションモデル)と 1980~2003 年のアジア域排出インベントリ REAS を使用したシミュレーション計算結果によると、日本の地上オゾンの年平均濃度は、この期間に約 0.2ppb/年の割合で上昇しており、図 1 で示された全国で観測された光化学 O<sub>x</sub> の結果とほぼ一致する(Uno et al., 2007; Ohara et al., 2008)。また、日本の地上オゾン濃度と中国の排出量の増加傾向は非常に類似し、中国国内での NO<sub>x</sub> の排出総量が年間 100 万トン増加すると北京・華北平原から上海にかけて地上オゾンの年間平均濃度は 1ppb 増加し、夏季の平均濃度は 1980 年から 2003 年に約 8ppb 増加することが示されている。また、風下に位置する日本の増加率は中国の 30-50%程度であるが、確実にオゾン濃度が増加している。これらのことから、中国国内での排出量の増加によってアジア大陸で生成されるオゾンが増加し、これが日本に越境輸送された結果、日本の地上オゾンが上昇したことを強く示唆している。

光化学 O<sub>x</sub> が全国的に高濃度となった 2007 年 5 月上旬の地上オゾン濃度分布のシミュレーション計算結果を図 4 に示す(大原ら、2008)。この図において、東シナ海に位置する高気圧の北側の西風で、中国東岸から流れ出した汚染気塊が、朝鮮半島南部を経て、九州北部から東日本の広い範囲に高濃度のオゾン域を形成する様子が表現されている。80ppb 以上の高濃度 O<sub>3</sub> を含む気塊は東西 500km 以上の大規模なもので、中国国内の汚染物質のみでなく、韓国や日本国内の寄与も受けていると考えられる。そのうち、中国からの越境大気汚染の影響は地域と期間によって異なるが、北日本を除くと 25~45%と見積られる。また、別のモデル計算結果によると、地上オゾンの 2000 年 4 月平均濃度は、本州を含む日本海周辺地域の広い範囲で環境基準 60ppb を超過しており、そのうちの 10-20%程度が中国・韓国起源であることが判明している(Tanimoto et al., 2005)。これらの結果は、アジア大陸における人間活動に伴って排出された大気汚染物質が、我が国の大気質に大きな影響を及ぼしていることを意味している。

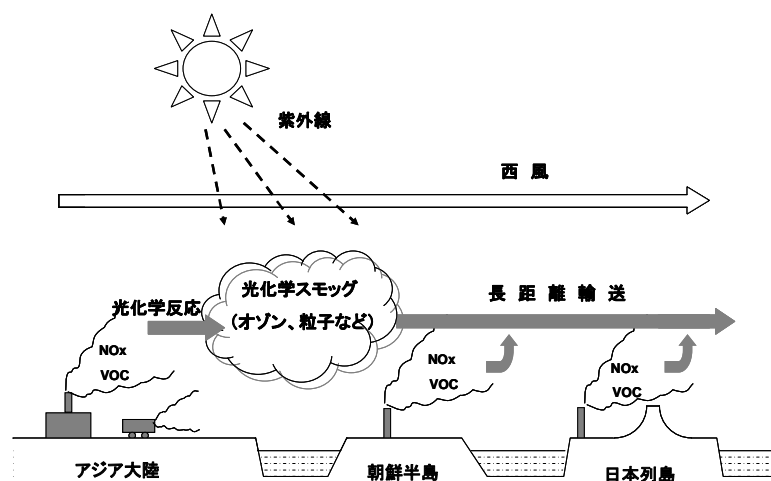


図 3 光化学スモッグの越境汚染の概念図

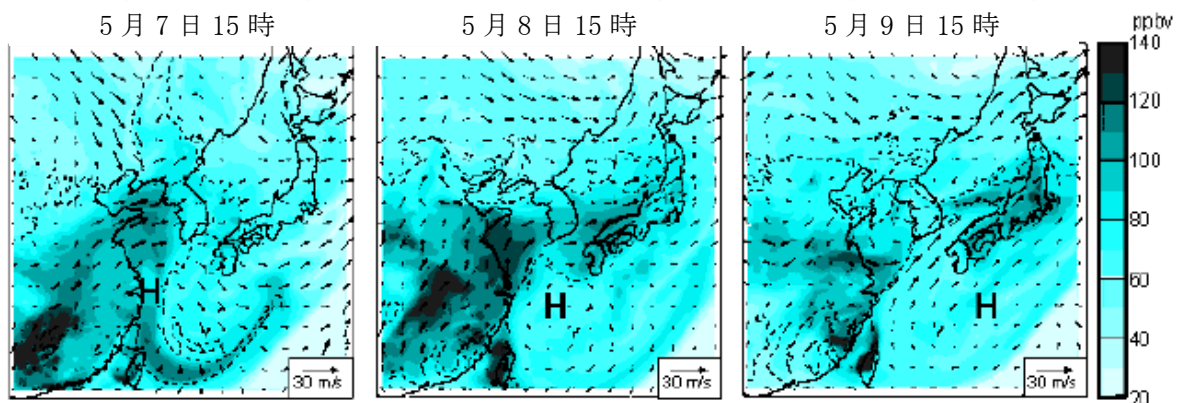


図4 2007年5月7-9日における地上近くのオゾン濃度と気流の時間変化(シミュレーション結果)。  
 “H”は当日9時における東シナ海上の移動性高気圧の中心位置を示す。

## 5. 排出量と光化学オゾンの将来予測

REAS では、将来の排出シナリオを設定し、2010年と2020年の将来排出量も予測した(Ohara et al., 2007)。中国については、将来のエネルギー消費と環境対策の動向を考慮して、現状推移型(燃料消費や環境対策が現状のまま推移し排出量が最も増加するシナリオ:PFC)、持続可能性追求型(エネルギー対策や環境対策を適度に進めたシナリオ。排出量は3種類のシナリオの中位:REF)、対策強化型(エネルギー対策や環境対策を強力に進めることにより、排出量が最も少ないシナリオ:PSC)の3種類のシナリオを設定した。これらの排出シナリオ PSC、REF、PFC のコンセプトはそれぞれ、IPCC の B1、B2、A2 シナリオに近い。中国以外の国については、国際エネルギー機関(IEA)のエネルギー需要予測に基づく排出シナリオを設定した。この予測結果によると、2020年における中国の NO<sub>x</sub> 排出量は、REF と PFC のシナリオでは、2000年に較べて、それぞれ、1.4倍、2.3倍に増加する。一方、PSC シナリオでは、2000年レベルに比べ、わずかではあるが減少する。しかし、2000年以降の排出量や燃料消費量の増加傾向や衛星観測結果などから判断すると、現在の NO<sub>x</sub> 排出量は既に PFC シナリオの2020年予測値付近まで達している可能性がある。また、2020年の中国における NMVOC 排出量は2000年に較べ、+97%(PSC)、+139%(REF)、+163%(PFC)と、いずれのシナリオでも大幅に増加することが予測される。

それでは、将来、オゾン濃度はどの程度増加するのであろうか？ 2000年と2020年の PFC シナリオの排出量を用いて計算された地上オゾンの年平均濃度分布によると、2020年のオゾン濃度は、東アジアの広い地域で急激に上昇する(Yamaji et al., 2008)。日本への影響も増大し、西日本一帯で年平均濃度が環境基準レベルに近づき、九州における環境基準超過率は約40%にも達する。このように、近い将来、越境汚染によって日本のオゾン濃度が現在よりも高くなる可能性が高い。2章で示した光化学オゾンの上昇を示す観測事実は、このような越境汚染の影響が既に増大しつつあることを示していると考えられる。

## 6. おわりに

以上、見てきたように、日本の大気質は、中国からの越境汚染の影響を強く受けていると考えられる。しかし、未知の問題・課題も残されており、また、国際的な共通理解も充分には得られてないことから、さらに越境大気汚染に関する科学的な知見を集積することが重要である。同時に、東アジアの大気環境の将来は今後の施策に強く依存することから、中国国内の大気汚染と日本への越境汚染を同時に低減するための Win-Win 型解決への取組みを加速する必要がある、そのためには、越境大気汚染対策及び

その副次的効果としての地球温暖化対策を考慮しながら、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) のような既存の国際枠組みを活用しつつ、日本からの各種の協力・支援をも含む形での国際的な合意形成に向けた戦略を構築することが肝要である。

我が国の地上付近のオゾンには、アジア大陸由来の越境汚染のほかにも、成層圏からの流入、ヨーロッパ・北米からの大陸間輸送、わが国自身から放出される原因物質による局地的生成などが関わっている。特に夏季に大都市圏周辺で頻繁に発生する高濃度オゾンの主要な生成原因は都市大気汚染である。従って、国内の発生源対策が引き続き重要であることは言うまでもない。

## 参考文献

- 大原利眞、坂田智之、光化学オキシダントの全国的な経年変動に関する研究、大気環境学会誌、**38**、47-54、2003。
- 大原利眞編、日本における光化学オキシダント等の挙動解明に関する研究、国立環境研究所研究報告第195号 (R-195-2007)、2007。
- Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., and Hayasaka, T., An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 4419-4444, 2007.
- 大原利眞、鶴野伊津志、黒川純一、早崎将光、清水厚、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、**54** 2:9. 319-3119/
- Ohara, T., Yamaji, K., Uno, I., Tanimoto, H., Sugata, S., Nagashima, T., Kurokawa, J., Horii, N., and Akimoto, H., Long-Term simulations of surface ozone in East Asia during 1980-2020 with CMAQ, edited by C. Borrego and A.I. Miranda, NATO Science for peace and security series - C: Environmental Security, Air Pollution Modelling and its Application XIX, 136-144, ISBN: 978-1-4020-8451-5, Springer, 2008.
- Richter, A., Burrows, J. P., Nüß, H., Granier, C., and Niemeier, U., Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, **437**, 129-132, doi:10.1038/nature04092, 2005.
- Tanimoto, H., Sawa, Y., Matsueda, H., Uno, I., Ohara, T., Yamaji, K., Kurokawa, J., and Yonemura, S., Significant latitudinal gradient in the surface ozone spring maximum over East Asia, *Geophysical Research Letters*, **32**, L21805, doi:10.1029/2005GL023514, 2005.
- Uno, I., Ohara, T., Yamaji, K., and Kurokawa, J., Recent trends and projections in Asian air pollution, *Journal of Disaster Research*, **2**, 163-172, 2007.
- Yamaji, K., Ohara, T., Uno, I., Kurokawa, J., Pochanart, P., and Akimoto, H., Future Prediction of Surface Ozone over East Asia using the Models-3 Community Multi-scale Air Quality Modeling System (CMAQ) and the Regional Emission Inventory in Asia (REAS), *Journal of Geophysical Research*, **113**, D8306, doi:10.1029/2007JD008663, 2008.
- Zhang, Q., Streets, D. G., He, K., Wang, Y., Richter, A., Burrows, J. P., Uno, I., Jang, C. J., Chen, D., Yao, Z., and Lei, Y., NO<sub>x</sub> emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space, *Journal of Geophysical Research*, **112**, D22306, doi:10.1029/2007JD008684, 2007.