

に選定していく方向で議論が進められている。

欧州では、河川・湖沼の監視・評価のための国際共同計画（ICP Waters）による広域的な陸水のモニタリングが実施されてきた。欧州においては、排出量の削減により、河川・湖沼水中の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は年々減少しており、特にその減少率は 1990 年代に大きかったと報告されている。 $\text{SO}_4^{2-}$  の河川への流出は  $\text{SO}_4^{2-}$  沈着量により制御されている一方で、 $\text{NO}_3^-$  濃度は明確なトレンドを示さず、その流出プロセスがより複雑であることが報告されている。アルカリ度は 2/3 の地点で変化はみられず、1/3 の地点で上昇傾向がみられていた。1990-2001 年の期間には 14% の地点で酸性化が進んでいたが、酸性化がこれ以上進む地域はないと報告されている。このように、欧州では既に陸水は回復傾向にあるといえる。

一方、我が国においては、酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書で、酸緩衝能の低い山岳地帯の河川・湖沼における酸性化傾向や、融雪期における一時的な酸性化などが指摘されている。さらに、本報告書において、伊自良湖集水域だけでなく、新潟県、岐阜県等で広域に河川が酸性化している可能性が指摘されたことから、東アジア及び我が国の陸水における酸性沈着の影響については、今後も注意して監視していく必要があると考えられる。

（引用文献）

- 1) EANET, 2006. Periodic Report on the State of Acid Deposition in East Asia, Part I: Regional Assessment and Part II: National Assessment. <http://www.eanet.cc/product.html>
- 2) 全国環境研協議会、第 4 次酸性雨全国調査報告書(平成 15 年度)、全国環境研会誌、30(2)、19-37、2005
- 3) 全国環境研協議会、第 4 次酸性雨全国調査報告書(平成 16 年度)、全国環境研会誌、31(3)、13-33、2006
- 4) 全国環境研協議会、第 4 次酸性雨全国調査報告書(平成 17 年度)、全国環境研会誌、32(3)、3-31、2007
- 5) 全国環境研協議会、第 4 次酸性雨全国調査報告書(平成 18 年度)、全国環境研会誌、33(3)、2-72、2008
- 6) Network Center for EANET, Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) Data Report 2003, 2004, 2005, and 2006.
- 7) NADP, 2008. Data access. National Atmospheric Deposition Program (NADP), <http://nadp.sws.uiuc.edu/sites/ntnmap.asp?>
- 8) EMEP, 2008. EMEP measurement online. EMEP Chemical Coordinating Centre at NILU, <http://www.nilu.no/projects/ccc/emepdata.html>
- 9) Hallbäck & Tamm, 1986. Changes in soil acidity from 1927 to 1982-1984 in a forest area of south-west Sweden. *Scand. J. For. Res.* 1: 219-232.
- 10) Sase H., Bulgan T., Batchuhuluun T., Shimizu H., Totsuka T. 2005. Tree decline and its possible causes around Mt. Bogdkhan in Mongolia. *Phyton* (Horn, Austria) 45: 583-590.

## 4. 越境大気汚染の問題

### 4.1 世界からみた越境大気汚染と東アジアの状況

歴史的にみると「越境大気汚染」という言葉が生まれたのは、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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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長距離越境大気汚染条約（CLRTAP）である。以後、欧米では硫酸化物・窒素酸化物の排出規制が強化され、1990年代には酸性雨は環境問題の主役の座から退いている。

これに代わって注目されるようになったのがオゾン汚染である。欧米においては窒素酸化物対策やVOC対策が進んでいるにもかかわらず、オゾンの環境基準が達成されない一因として、大陸間輸送による北半球オゾンのバックグラウンド濃度の上昇があり、オゾンの環境基準の達成には、半球規模での国際的な取組が必要であるという議論が生まれてきた。そのような考え方に従って、CLRTAPの下に最近「大気汚染の半球輸送に関するタスクフォース（TF-HTAP）」（4.4.1参照）が設置されている。

一方、東アジアにおいては欧米に代わって1990年代以降、酸性雨に対する関心が高まり、「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）」が設立された。それに伴って東アジアにおける酸性物質の越境輸送にも関心が向けられ、我が国の硫酸化物沈着量の内、中国、韓国などからの寄与分についての計算結果が報告されている<sup>3)</sup>。それらの報告値にはかなり大きなばらつきがある一方、東アジアでは酸性雨の環境影響は差し迫った問題というよりは長期的リスクの問題として捉えられるようになってきている。

また、東アジアにおいてもオゾン汚染が注目されるようになってきており、特に我が国においては、オゾン前駆体物質であるVOC、NO<sub>x</sub>の大気中濃度の減少にも関わらず、都市域のみならず日本列島全域でオゾン濃度の長期上昇傾向がみられており、中国の急速な経済発展に伴うオゾン汚染の悪化と、越境輸送による我が国への影響が議論され始めた。一方、大陸間輸送によるオゾンの半球規模汚染は、東アジアのバックグラウンドオゾン濃度も上昇させており、我が国の環境基準の全国的な未達成問題にも大きな関わりがあることが分かってきた。従って、今後我が国のオゾン抑止対策を論ずるに当たっては、東アジア全域におけるオゾン濃度の上昇に伴うアジア域内での越境輸送の問題と、大陸間輸送・半球規模汚染の問題とを結びつけた国際的な枠組みの中での議論が必要である。

## 4.2 東アジアにおける大気汚染物質排出量の増大

アジア域排出インベントリ REAS (Regional Emission inventory in Asia) <sup>4)</sup>の結果をもとに、東アジアにおける大気汚染物質排出量 (NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、NMVOC を対象とする。)の経年変化と将来動向について整理する。

### (1) 大気汚染物質排出量の経年変化

図 4-1 に、地域別排出量の 1980～2003 年の経年変化を示す。また、表 4-1 には東アジアにおける 1980、1990、2003 年の排出量を示す。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 年におけるアジア全域の変化に着目すると、燃料消費量がこの間に 2.3 倍増加したことに伴い、NO<sub>x</sub> 排出量も 2.8 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)。

SO<sub>2</sub> 排出量は 2000 年にはアジア全域で 4,149 万トンであり、工場・火力発電所などの石炭燃焼施設からの排出割合が 64% と高い。1980 年から 2003 年の間に排出量はアジアでは 2.2 倍、東アジアでは 2.1 倍、中国では 2.5 倍に増加している。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。

### (2) 大気汚染物質排出量の将来動向

将来の排出シナリオを設定し、東アジア地域における 2020 年の将来排出量を予測した結果を表 4-2 に示す。ここで、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ている。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<sup>5)</sup>に近い。また、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が設定されている。その結果、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、39%、128%増加するが、PSC シナリオではわずかに減少する。しかし、2000 年以降の排出量や燃料消費量の増加傾向、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、最も排出量の多い PFC シナリオの 2020 年予測値付近に達している可能性があり、シナリオを上回るペースで排出量が増加していると考えられる (図 4-2a 参照)。

また、アジア地域の SO<sub>2</sub> 将来排出量は、どの排出シナリオでも 2000 年より増加することが予測

されているが、中国においては、2000年に較べて-28% (PSC)、-3% (REF)、+163% (PFC) となっている (図 4-2b 参照)。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 (図 4-2c 参照)。

表 4-1 東アジアの1980~2003年の排出量

領域	1980	1990	2003
NOx			
中国	3.8	6.6 (1.7)	14.5 (3.8)
その他の東アジア	3.6	3.8 (1.1)	4.7 (1.3)
東アジア合計	7.4	10.4 (1.4)	19.2 (2.6)
SO <sub>2</sub>			
中国	14.9	21.6 (1.4)	36.6 (2.5)
その他の東アジア	3.9	3.8 (1.0)	2.4 (0.6)
東アジア合計	18.8	25.3 (1.3)	39.0 (2.1)
NMVOC			
中国	6.8	9.7 (1.4)	17.2 (2.5)
その他の東アジア	2.0	3.1 (1.6)	3.9 (1.9)
東アジア合計	8.8	12.8 (1.5)	21.1 (2.4)

単位は Mt yr<sup>-1</sup>、( ) は 1980 年に対する増加率

表 4-2 東アジアの排出量の将来変化

領域	2000	2020		
		PSC	REF	PFC
NOx				
中国	11.2	11.0 (1.0)	15.6 (1.4)	25.5 (2.3)
その他の東アジア	4.4	5.5 (1.3)	5.5 (1.3)	5.5 (1.3)
東アジア合計	15.6	16.5 (1.1)	21.1 (1.4)	31.0 (2.0)
SO <sub>2</sub>				
中国	27.6	19.9 (0.7)	26.8 (1.0)	40.9 (1.5)
その他の東アジア	2.6	3.6 (1.4)	3.6 (1.4)	3.6 (1.4)
東アジア合計	30.2	23.5 (0.8)	30.4 (1.0)	44.5 (1.5)
NMVOC				
中国	14.7	29.0 (2.0)	35.1 (2.4)	38.6 (2.6)
その他の東アジア	3.7	6.3 (1.7)	6.3 (1.7)	6.3 (1.7)
東アジア合計	18.4	35.3 (1.9)	41.4 (2.3)	44.9 (2.4)

単位は Mt yr<sup>-1</sup>、( ) は 2000 年に対する増加率

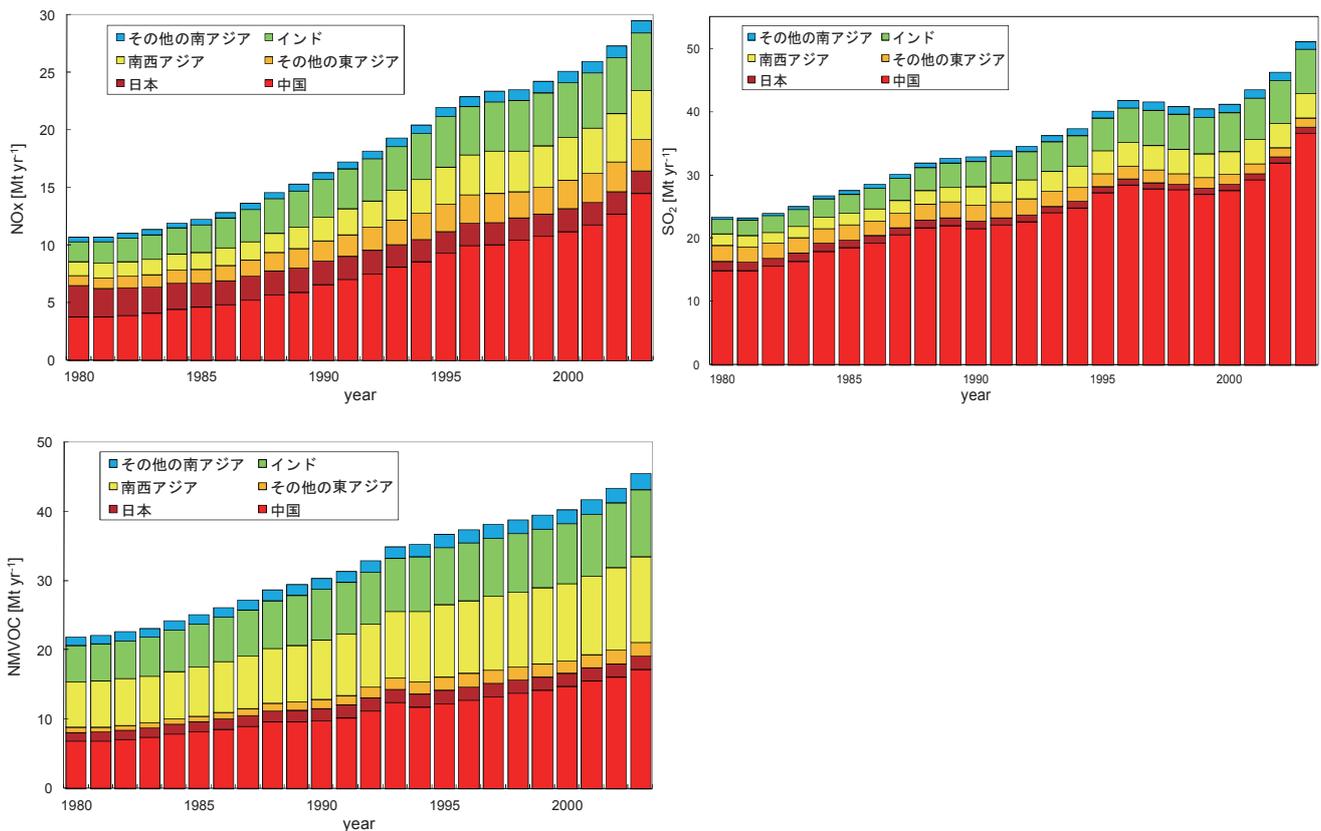
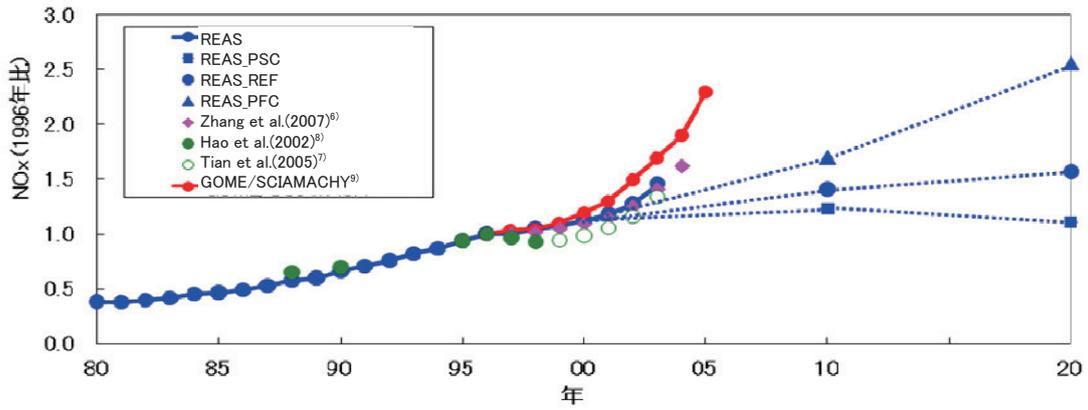
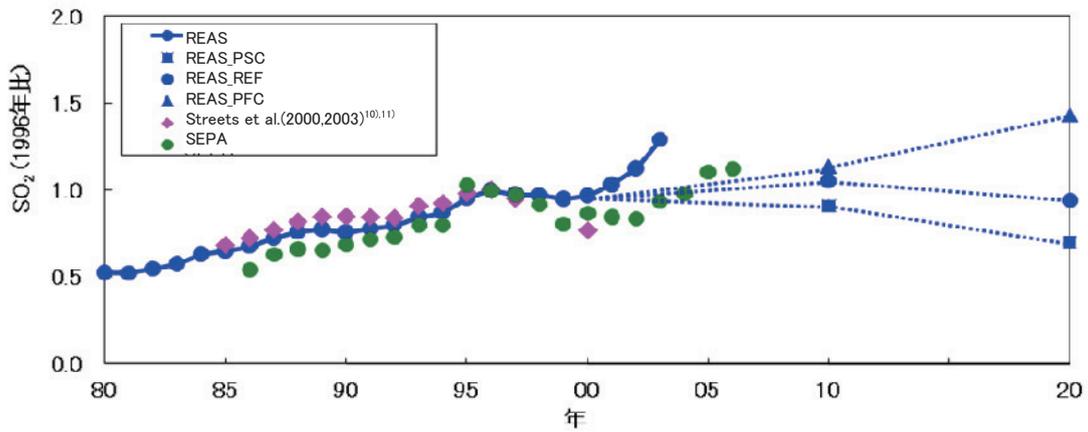


図 4-1 アジアにおける NOx、SO<sub>2</sub>、NMVOC 排出量の経年変化

a)



b)



c)

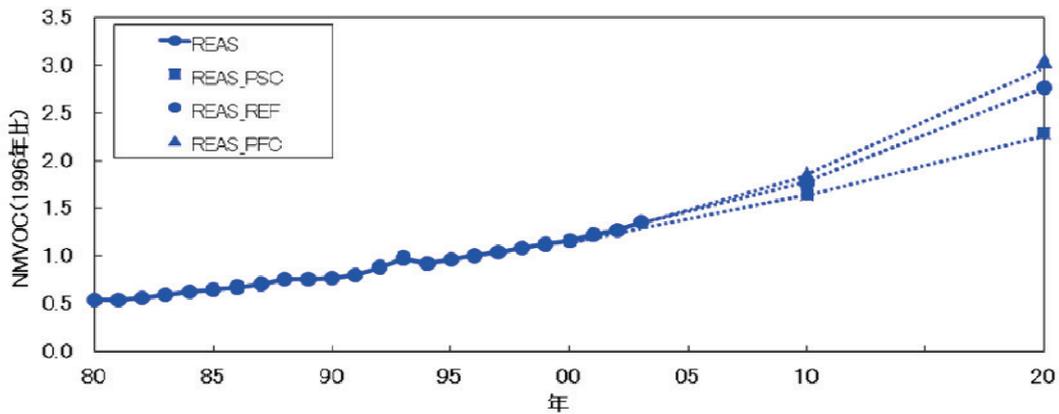


図 4-2 中国における NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、NMVOC 排出量の推移

注) 縦軸は 1996 年を基準とした大気汚染物質排出量比であり、同年を含む経年変化を推計している結果のみをまとめた。

REAS : アジア域排出インベントリ (Regional Emission inventory in Asia) の略

REAS\_PSC : 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

REAS\_REF : 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

REAS\_PFC : 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

GOME/SCIAMACHY : 対流圏衛星観測 GOME/SCIAMACHY による NO<sub>2</sub> カラム濃度<sup>9)</sup>

SEPA : 中国国家環境保護総局 (現在の中国国家環境保護部) による推計

### 4.3 越境大気汚染の我が国への影響

#### 4.3.1 我が国における越境大気汚染の状況

##### (1) オゾン

##### ①東アジア地域のオゾン汚染

東アジア地域のオゾン汚染の時・空間的な把握を目指して、アジア域の排出量データベース REAS<sup>13)</sup>と領域化学輸送モデル CMAQ<sup>14)</sup> (Community Multiscale Air Quality) を利用した東アジアオゾン濃度の解析を行った<sup>15)</sup>。図 4-3 に、2000 年の隠岐と対馬における、モデルと観測の日平均オゾン濃度の比較結果を示す。日本域のオゾン濃度は、気象因子(日射・気温・気流)の影響を受け、①春季から初夏にかけて日射と気温の増加とともに上昇、②清浄な海洋性気団の影響が強まる盛夏に減少、③海洋性気団の影響が弱まる秋季に再上昇、④日射・気温が低下する冬季に減少する。日射と気温はオゾンの光化学生成量を左右し、気流の変化は日本域が清浄気塊(海洋性気団)と汚染気塊(大陸性気団)のいずれの影響が強いかを左右するが、その結果は数値モデルからも確認できる。図 4-4 には、CMAQ モデルによって計算された 2000 年 5～6 月及び 7～8 月の地表オゾンの平均濃度(2ヶ月平均)を示す。5～6 月には、中国～朝鮮半島～日本(北緯 30°～45° 付近)にかけてオゾン濃度が高く、地表オゾンの 2 ヶ月平均濃度は、華北平原で 65-70 ppbv、中国北東部、朝鮮半島、及び日本の一部地域で 60-65 ppbv に達する。一方、夏季の 7～8 月には、海洋性気団の影響を受ける中国南部、朝鮮半島、日本では、オゾン濃度が減少するが、中国北東部(特に華北平原)では、60 ppbv 以上のオゾンに覆われる。

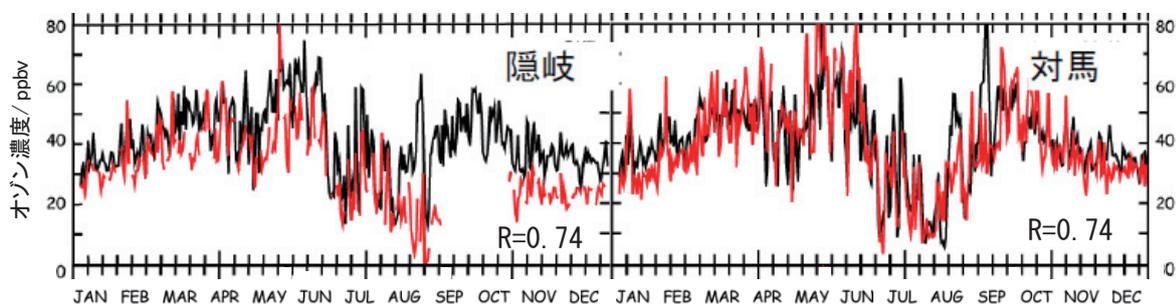


図 4-3 隠岐と対馬のオゾン濃度(黒色:モデルと赤色:観測)<sup>15)</sup>

図中の数字は相関係数を示す。

越境輸送されるオゾンの寄与を調べるために、排出量をゼロにしたモデル実験(排出量ゼロ実験)を行い、東アジアのオゾン汚染が、「モデル領域内(東アジア内)からのオゾン前駆汚染物質の排出」と「モデル領域外(東アジア以外)からの流入」のいずれに起因しているかを調べた<sup>15)</sup>。図 4-5 には、我が国を含む東アジアから排出された汚染物質によって生成された地表オゾンの平均濃度(2ヶ月平均)を示す。5～6月の我が国を含む東アジアの汚染物質起源のオゾン濃度は、関東以南の日本域で 20-35 ppbv に達し、7～8月には太平洋高気圧の影響により九州、四国及び本州南部では 10-20 ppbv に低下する一方で、本州北部は 20-25 ppbv であり、東アジアの汚染物質起源の寄与率は 50%以上にまで達する。日本を含む東アジアからの汚染物質の排出による影響は、日射や気温の増加に伴

って春から夏にかけて増大するが、東アジア起源のオゾンのみでは、図 4-4 の地表オゾン濃度に達せず、東アジア外からの影響も十分に大きいといえる。

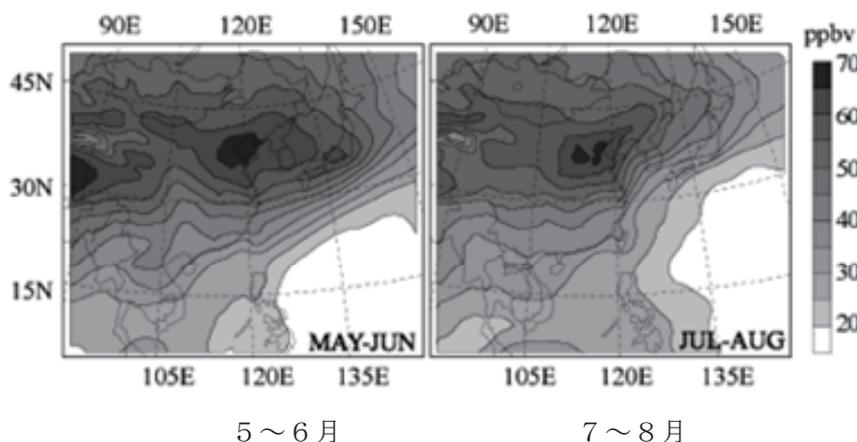


図 4-4 2000 年 5～6 月と 7～8 月における地表オゾン濃度<sup>15)</sup>

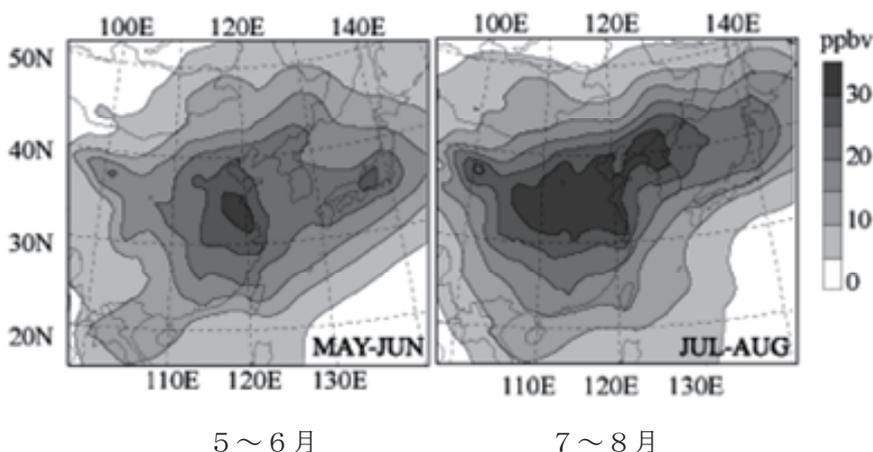


図 4-5 2000 年 5～6 月と 7～8 月における東アジアの汚染物質起源の光化学生成地表オゾン濃度<sup>15)</sup>

## ②アジア域外からの影響

全球化学輸送モデルを用いて、ヨーロッパ・北米大陸のオゾン前駆汚染物質排出量ゼロ実験を行ない、アジア域外の影響を調べた結果<sup>16)</sup>、ユーラシア大陸を横断する大気は東アジアへの入口に位置する東シベリアのモンディにおけるオゾン濃度は、ヨーロッパから 0.5-3.5 ppbv、北米から 1.2-3.3 ppbv、それぞれ影響を受けていることを示した。その影響は冬から春にかけて増大してピークを迎えた後、夏季に減少（ヨーロッパ：1.8 ppbv、北米：1.4 ppbv）する季節変動を示し、春季におけるヨーロッパと北米からの寄与は、東アジアの清浄地域のオゾン濃度に対して合わせて約 15%であることが示された。一方、全球規模で輸送されるオゾンの起源を調べるため、全球モデルを用いたタグ付きトレーサー実験を行なった結果<sup>17)</sup>、ヨーロッパから東アジアへの影響は、例えば、鹿児島県の境界層内