

17. 大気化学輸送モデルを用いた日本の都市大気汚染に対する 東アジアからの長距離輸送の寄与推定

Estimation of the contribution of long-range transport of pollutants from East Asia
to the urban pollution in Japan by using chemical transport model.

倉田 学児*、北田 敏廣*

Gakuji KURATA, Toshihiro KITADA

ABSTRACT: The estimation of the contribution of long-range transport of the pollutants from East Asia to the urban pollution in Japan was performed by using the chemical transport model. Fine model domain which can resolve the urban emission area was nested within the coarse model domain which covers whole East Asia where the amount of emission is increasing rapidly with an economic growth. We investigated the seasonal variation of the contribution of long-range transport on the tropospheric ozone concentration during January to June, 2004 by comparing the calculation which includes all emissions over East Asia and the calculation with no emission except Japan. As a result, the contribution of the long-range transport on the clean region is larger than that on the urban polluted region. Average contribution on the ozone concentration was 5~8 ppb on the ground. This is 20~30% of the average background ozone concentration, and 10% of the environmental standard (60ppb). Especially, from March to May, contribution is large and there is a risk of increasing the damage to an ecosystem. If the NO_x emission in the Asian continent doubles by further economic development, the contribution of the long-range transport will become more severe.

KEYWORDS: long-range transport, chemical transport model, urban pollution

1 はじめに

東アジア地域の急速な経済成長に伴い、大気中に排出される汚染物質の量も飛躍的に増加して、長距離輸送による日本への影響が懸念されている。これまで、主に長距離輸送による大気汚染の研究は、酸性雨等の湿性沈着量の増加に関するものと、清浄大気中の汚染物質濃度の上昇に関するものが中心であり、日本の都市部のように、ローカルな排出源により既に汚染されている場所で、長距離輸送の影響がどの様に寄与しているのかは、あまり調べられていない。

近年、大陸起源の汚染物質の長距離輸送によって、清浄な場所でも、対流圏のオゾン濃度が上昇している事が指摘されている。また、日本の都市圏でのオキシダント濃度のトレンドは、1980年代まで減少傾向であったものが、1990年代以降再び増加傾向を示しており、光化学スモッグ注意報の発令件数も増加している。その原因としては、ローカルな排出源の影響、すなわち NO_x に対して非メタン炭化水素(NMHC)の排出量削減が十分でないために NMHC/ NO_x 比が増加しているためとする説や、ヒートアイランド現象によりオキシダントの光化学生成に係わる気温と日射量が増加しているが原因とする説、東アジアからの長距離輸送が主原因とする説など、いくつかの仮説がなされているが、いずれの仮説も単独でオキシダント濃度の上昇を説明するには至っていない。(東京都、2005)

本研究では、米国 EPA が開発・公開している 3 次元の大気化学輸送モデル CMAQ を用いて、東アジア地域の排出源を含む広領域と、日本の都市大気汚染を解像できる詳細領域の二つの領域をネスティング計算することで、中国や韓国などからの長距離輸送の影響が、都市汚染にどのように影響しているのかを調べた。

* 豊橋技術科学大学工学部エコロジー工学系 Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi, Japan, 441-8580

2 段階のネスティングを利用することで、東アジアからの長距離輸送と国内の都市起源汚染の両方の影響を捉え、都市汚染の中での長距離輸送の影響を定量的に評価することを可能とした。

2 方法

計算は、2004 年 1 月～6 月の 6 ヶ月間を対象とした。対象領域は、図 1 に示した領域で、広領域は、格子長が 54km×54km で 88×88 メッシュで東南アジアの大部分を含む東アジア地域をカバーした。詳細領域は、格子長が 18km×18km で 58×58 メッシュで関東平野、濃尾平野、大阪平野の三大排出源地域を含む日本中央部をカバーした。鉛直方向は 23 層で地形に沿った σ 座標系で、地表面近くでは格子間隔が 60～100m と細かく、上空約 15km の上端近くでは、約 2000m となる不均一格子とした。

気象場は、PSU/NCAR のメソスケール気象モデル MM5(version3.7)を用いて計算した。初期条件および境界条件には、気象庁の全球予報データ(JMA-GPV/GSM)を利用した。

化学輸送モデルには、EPA の Model-3/CMAQ(ver4.4)を利用した。気相の化学反応系には、SAPRC-99 を用いた。SAPRC-99 は、炭化水素・NO_x・SO_x などの主要な気相の汚染物質 72 種と 214 の化学反応を含んでいる。

化学輸送モデルには、EPA の Model-3/CMAQ(ver4.4)を利用した。気相の化学反応系には、SAPRC-99 を用いた。SAPRC-99 は、炭化水素・NO_x・SO_x などの主要な気相の汚染物質 72 種と 214 の化学反応を含んでいる。

汚染物質の排出源データには、D. Streets らの 2000 年を対象とした 1° × 1° の東アジアのエミッションインベントリ(Streets, 2003)を用いた。広領域については、モデル格子である 54km×54km に合わせて空間内挿した。日本域については、元データとしては同じ 1° × 1° のデータを利用したが、空間分布をモデルの解像度に合わせるために、工業統計および交通量統計データを用いてモデル解像度である 18km×18km に再分配した。大部分の化学種については、工業統計により再分配したが、CO の 7 割、NO_x の 5 割については、交通量統計に従って分配した。SO₂ については、三宅島および桜島のメッシュに一致するように調整した上で、三宅島からの排出量は 2004 年時点の推定排出量で調整した。なお、今回の計算では、すべての排出量について年間平均値を利用した。東南アジア域のバイオマス燃焼起源の排出量は、森林火災が活発な 3 月の値を用いたために、他の期間については過大評価になっている事が懸念される。また、森林火災からの排出については 2001 年の推計値を用いたため、2004 年の排出量との相違がある可能性がある。

また、広領域の境界条件には、緯度毎に想定される最小濃度を一定値として与えた。そのため、東アジア域外部からの長距離輸送は考慮できていない。

計算シナリオとして 2 つのケースを計算した。Case-1 は、すべての排出源を考慮したもので、標準ケースとして、観測データ等との比較には、Case-1 の結果を利用した。Case-2 は、日本以外の東アジアのすべての排出源をゼロに設定したものである。日本国内の排出源は、Case-1 と同様に与えている。Case-1 と Case-2 の差が東アジア域からの長距離輸送による影響と考える事ができる。

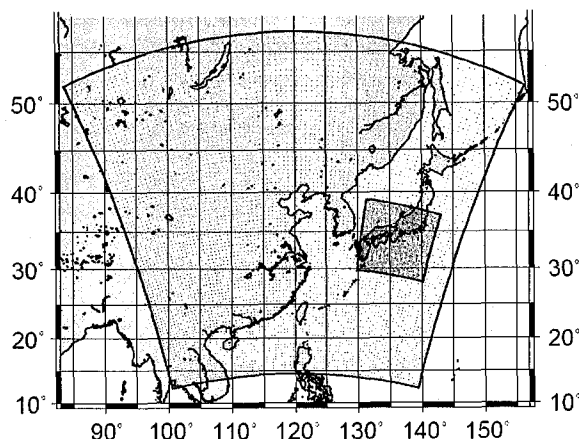


図 1. 計算対象領域(東アジア広領域と日本中央詳細領域)

表 1. 計算ケース

ケース名	排出源 (日本以外)	排出源 (日本国内)
Case-1	有	有
Case-2	無	有

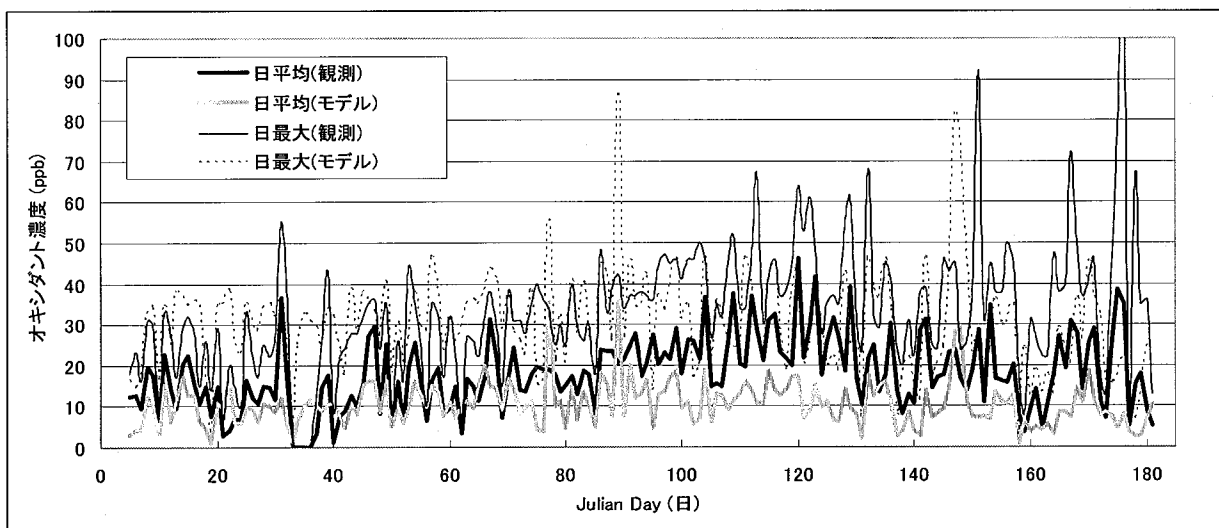
3 結果

3.1 観測データとの比較

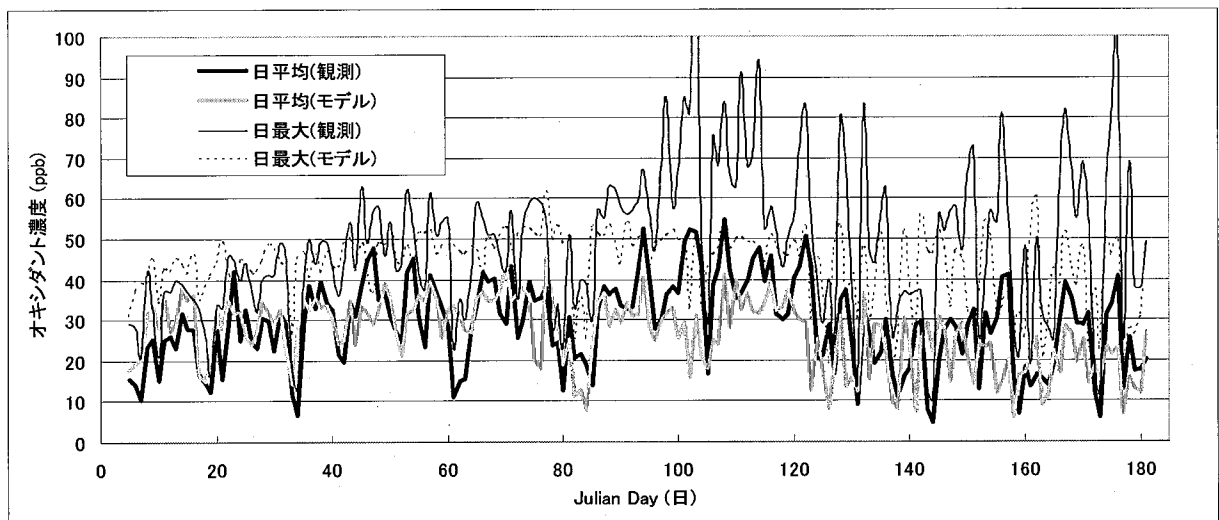
図 3 に東アジアの排出源を入れた Case-1 の計算結果と東京都環境局提供の大気汚染監視データ(東京都, Web)との比較を示す。観測されたオキシダント濃度と当該観測所を含むメッシュにおいてモデルで計算された地表面付近のオゾン濃度について、日平均値と日最大値をそれぞれプロットした。横軸は1月1日からの日数である。

(a)は都心での比較で、(b)はメッシュ内に大きな人為起源の排出源を含まない山間部の清浄な地点での比較である。まず、(b)の清浄な山間部で観測されたオキシダント濃度とモデルで計算したオゾン濃度を比較すると、日平均値は全期間に渡ってよく一致している事が分かる。しかし、日最大値を比較すると4月～6月にかけて観測値では、60ppbを越える日が多くあるのに対して、モデル計算は過小評価となった。それに対応して、日平均値も多少の過小評価となっている。

(a)の都心付近の観測値とモデル計算値を比較すると、1～2月は日最大も日平均もよく一致しているものの、3月以降は、日平均値・日最大値ともに、モデル計算が過小評価となった。これらの違いは、主にエミッションの空間分布がまだ不十分である事や、排出量・組成の季節変化を取り入れていない事などが原因であると考



(a) 国設東京と都心を含むメッシュのオキシダント濃度の比較



(b) 檜原観測所と近隣メッシュのオキシダント濃度の比較

図 2. オキシダント濃度の観測値とモデルのオゾン濃度の比較 (日平均・日最高)

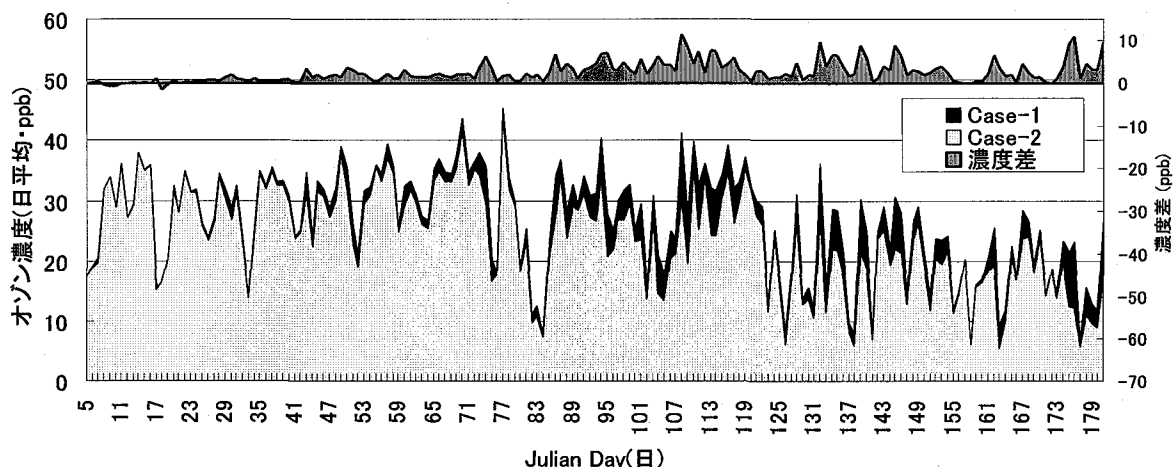
えられる。また、日最大値はローカルなオゾン生成によって支配されるので、気象モデルによって計算された太陽放射量や気温の予測精度にも左右される。以上のように多少の誤差は見られるものの、清浄大気中でのオゾン濃度の季節変化のトレンドはよく再現できたので、この計算によって東アジアの排出源の寄与を推定出来るものと考えられる。

3.2 東アジアからの長距離輸送の寄与推定

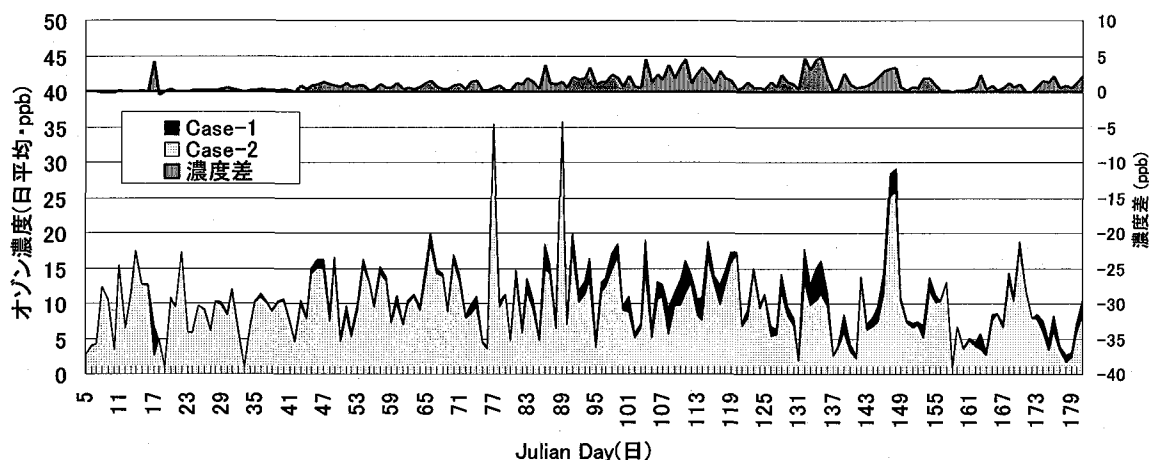
次に、日本以外の東アジアの排出源をすべて除いて計算した Case-2 とベースケースである Case-1 の比較を行った。図 3 は日平均オゾン濃度の 6 ヶ月間の変化を比較したものである。Case-1 から Case-2 を引いた差をグラフ上部に別途示した。(a) が清浄な山間部の場合で、(b) が都心での濃度である。都心では、主に自動車排ガスからの NO が大量に供給され昼夜を通してオゾンの分解が進むために、オゾン濃度は低くなっている。

図 3 (a) で、清浄な場所における東アジアの排出源からの寄与は、1 月～2 月は小さく、3 月以降、徐々に増加しており、最大で 10ppb 程度、平均でも 4～5ppb 程度、日平均オゾン濃度を上昇させているという計算結果になった。日最大値でも傾向はほぼ同様であったが、寄与が最大 18ppb、平均で約 5ppb であった(図なし)。

図 3 (b) の都心の場合も、季節的には、3～5 月の寄与が大きく、最大で 5ppb、平均では、約 2ppb の寄与があった。2 つの地点は、距離的には、数 10km しか離れていないので、広領域のモデルでは、一つのメッシュに収まる位置であり、長距離輸送の影響自体はほとんど変わらないはずである。都心部で東アジアからの長距離輸送の寄与が少なくなるのは、ローカルなエミッションによりオゾンの分解・生成のサイクルが早まり、オゾンの寿命が短くなるためと考えられる。ただ、この様な汚染気塊は、NO_x 濃度自体は高く、NMHC の存在下



(a) 清浄な場所での東アジアからの長距離輸送により寄与 (黒色部分)



(b) 都心域での東アジアからの長距離輸送の寄与 (黒色部分)

図 3. オゾン濃度の日平均に対する東アジアからの長距離輸送の寄与

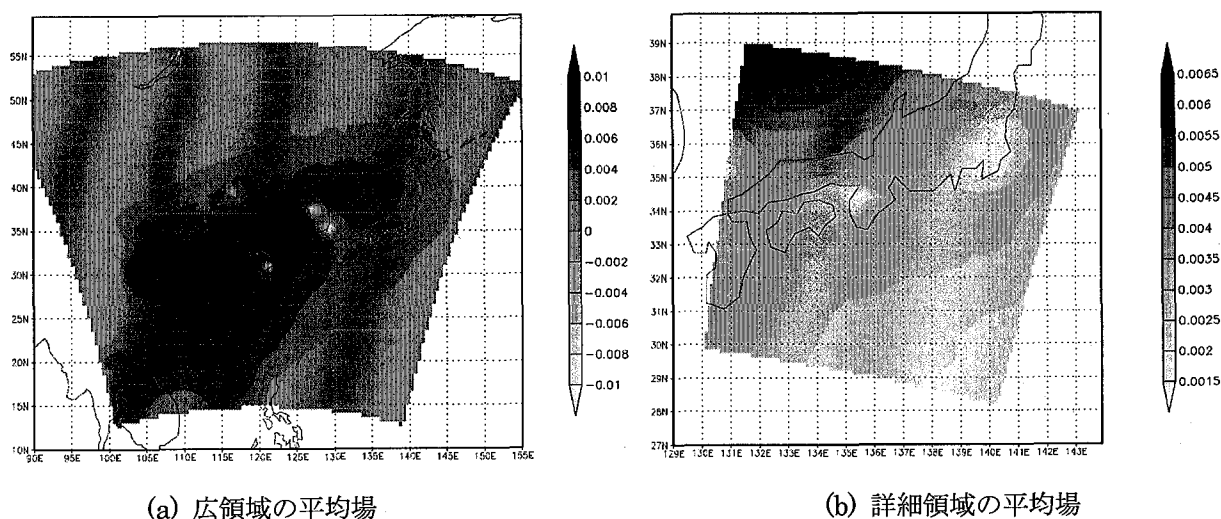


図 4. 1 月～6 月の地上高度 100m でのオゾンの平均濃度の差 [ppm] (Case-1 - Case-2)

でオキシダント生成能は高くなるため、内陸へ移流した際にオゾンの高濃度イベントに寄与しているが、今回の解析では、汚染気塊のトラジェクトリーを追った解析はしていないので、東アジア起源の排出源が高濃度イベントにどのように寄与しているのかは解析できなかった。

図 4 には、広領域と詳細領域での 1 月から 6 月を平均した地表面付近のオゾン濃度に対する日本以外の東アジアの排出源の寄与を示した。図 4(a)は広領域での寄与である。排出源の近傍では寄与が高くなっているが、北京・上海・ソウル・釜山などの NO の排出量が多い都市の風下では、オゾン濃度を低減する影響も見られる。図 4(b)の日本近傍の詳細領域に注目すると、日本海側や九州で寄与が高く、南東に向かうにつれて寄与が低下しているが、それでも 3～5ppb 程度の平均的な寄与があることが分かる。また、東京や大阪などの巨大都市付近では、NO の直接的な排出によって、オゾンの分解が進むなど、オゾン自体の寿命が短くなるために、大陸起源の寄与は 1.5～2ppb と周辺に比べて小さくなっている。

3.3 東アジアからの長距離輸送の寄与の季節変化

次に、東アジアの排出源からの寄与の鉛直プロファイル按月ごとに比べることで、1 月～6 月の間の季節変化を概観する。図 5 は、東京都心、東京都山間部、能登半島付近のメッシュを選んで、その場所での東アジアの排出源からの寄与 (Case-1 - Case-2)の鉛直プロファイルについて、1 月～6 月の各月および 1 月～6 月の平均をプロットしたものである。

まず、(a)都心と(b)山間部を比較すると、ほぼ近隣のメッシュであるために、上空の寄与の様子はほぼ同じであることが分かる。違いは都心部では地表面近くでオゾン濃度が急激に低下している点だけである。1 月はほとんど全高度に渡って寄与は小さい。これは、この季節には中国北部やシベリア上空からのあまり汚染されていない気塊がやってくるためである。2 月から 4 月にかけて、高度 1000～2000m のあたりの寄与が急激に大きくなり、最大で 5.5ppb になる。中国の黄河流域や長江流域の高濃度の汚染気塊が、断続的に日本上空へ輸送されてくるためである。5 月になると、1000～2000m の高度での寄与は変わらないものの、3000m 以上の上空での寄与が急激に増加する。これは、気温の上昇に伴って対流活動が活発になり、大陸上での汚染気塊が上空に運ばれやすくなるためと考えられる。6 月になると上空の寄与は変わらないものの、2000m 以下の高度の寄与が今度は低下する。これは、太平洋高気圧の勢力が強まることで、太平洋上の清浄な空気が日本上空へ流入する機会が増えるために、相対的に大陸からの寄与が低下するためである。今回は計算していないが、7 月～8 月も同様に大陸起源の寄与は相対的に小さくなるものと思われる。

一方、(c)の能登半島付近の鉛直プロファイルをみると、3000m 以上の上空の寄与は関東地方と変わらないのに対して、2000m 以下の寄与が全体的に大きくなっており、5 月の地表面付近への寄与は 8ppb を超えてい

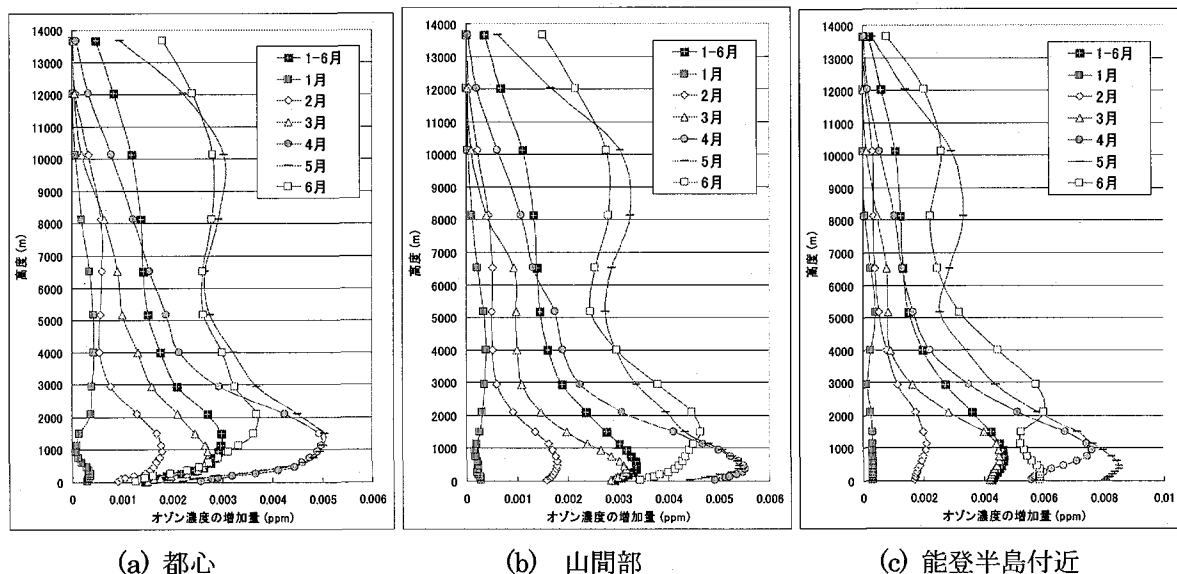


図5. 1月～6月の東アジアの排出源からの寄与の鉛直プロファイルの季節変化

る。これは、大陸からの輸送距離が短いことに加えて、日本海上を移流してくるために、新鮮なNOの排出源と接触せずに、オゾン消費されないこと、さらに太平洋からの距離が大きくなるために、清浄な気塊が流入する機会が少ないなどの、複合的な要因が考えられる。

4 まとめ

本研究では、東アジア地域の大部分を含む広領域モデルと都市排出源が解像できる詳細領域モデルをネスティングした化学輸送モデルを用いて、日本以外の東アジアの排出源を入れた場合と入れない場合の両方の計算によって、大陸起源の汚染物質の長距離輸送によって、日本上空のオゾン濃度がどの程度の寄与を受けているのかを、2004年1月～6月の半年間のモデル計算によって、季節変化を含めて調べた。

その結果、ローカルな都市起源の汚染物質の影響を受けない清浄な大気中の方が大陸の排出源からの寄与が大きく、地表面近くで最大5～8ppb程度の寄与を受けていることが分かった。これは、通常バックグラウンドと考えられている20～30ppbに対して、20～30%程度の寄与となっており、環境基準の60ppbに対しても10%程度の寄与となり、無視できないものである。今後さらにNO_xの排出量が倍増するという予測もあり、その場合には、大陸からの寄与もさらに増加する可能性がある。生態系へのオゾンの影響は、環境基準程度の濃度でも長期的な影響があるという研究もあり、将来的に影響の推移を予測することが重要である。

今後は、そのような将来シナリオをベースとして、大陸起源の長距離輸送の影響を定量的に予測・評価する必要がある。

謝辞

この研究の一部は、文部科学省の21世紀COEプログラム“未来社会の生態恒常性工学”による支援を受けて行われた。

参考文献

東京都光化学オキシダント対策検討会 (2005)、光化学オキシダント対策検討会報告、78page

東京都環境局、(Web) 大気汚染測定データ、<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/>

D. Streets. et. al., (2003), An inventory of gaseous and primary aerosol emission in Asia in the year 2000. J. Geophys. Res. 108(D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093