調査報告

東アジア規模の大気汚染広域移流の
大阪府域への影響について山本 勝彦*・和田 峻輔*
高見 勝重*・服部 幸和*

要 旨

2007年5月8日から9日にかけて、西日本を中心に発生した光化学オキシダントの広域的な高濃度は、東アジア規模の広域移流が寄与していると考えられている。大阪府でも、5月9日、南部の地域に高濃度が発生した。このうち最南部の泉南地域(低 NO_x 地域)では、9日の午後から10日の未明にかけて高濃度が持続する現象が起こった。これは、西日本の多くの局に共通して起こっており、同じ広域移流の影響が推測される。また、高 NO_x 局においては、昼間に高濃度を示すが、夜間には濃度が低下している。これらの局について、ポテンシャルオゾンの経時変化を見ると、泉南地域と同じパターンを示した。このことから、この大阪府でのオキシダント高濃度イベントは、東アジア規模の広域移流の影響を受けたものであると判断できる。これは、後方流跡線解析の結果とよく合致する。また、高 NO_x 地域については、移流によるオキシダントが、夜間に $\text{O}_3\text{-NO}$ 反応により O_3 が消失し、見かけ上濃度が低下したものと判断できる。

キーワード: 光化学オキシダント, 越境汚染

1. 緒 言

近年、中国、ベトナムなど、東アジア地域の経済活動の進展はめざましいものがある。これらの国々では、わが国などの過去の経験に学び、産業公害対策の導入を図っている。しかし、経済発展のスピードに対策が追いついていない現状が報告されている¹⁾。

わが国の日本海沿岸地域や九州では、東アジアからの酸性雨や SO_x の越境汚染が以前から報告されてきた^{2,3)}。近年他のエアロゾルやガス状物質についても移流があるとされ、特に2007年5月上旬の光化学オキシダントの全国的な高濃度を経て、広く国民の関心事となっている。同年5月に九州知事会が国に対し、光化学オキシダント高濃度現象の原因究明及び対策についての緊急要望を行っている。環境省では、こうした状況を踏まえ2007年7月に「光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会」を発足させ、現時点で收集整理した既存の最新の知見及び当面取り組むべき課題について光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会報告書

中間報告にまとめたところである⁴⁾。

こうした東アジア規模の大気汚染広域移流は、九州や日本海沿岸地域にとどまらず、西日本全域にも影響を及ぼしていると考えられる。ここでは、2007年5月上旬に見られた全国的な光化学オキシダント高濃度イベントについて、大阪府域で見られた現象を解析し、広域移流の寄与を見ることとした。

なお、本稿で用いた大気汚染常時監視局の時間値データは、「環境省大気汚染物質広域監視システム」(愛称「そらまめくん」)による速報値であり、測定値の品質管理を経て後日訂正される可能性があるものである。

2. 2007年5月上旬の光化学オキシダント高濃度イベント

2.1 全国的な状況

2007年5月8日午前から10日の未明にかけて、西日本を中心に、広域な光化学オキシダント高濃度が発生した。8日は、九州北部、中国地方を中心に濃度が

*大阪府環境農林水産総合研究所 Katsuhiko YAMAMOTO, Shunsuke WADA,
Katsushige TAKAMI, Yukikazu HATTORI

2008年5月30日受付
2008年10月9日受理

上がり、徐々に東へ移動するように広がり、9日には、関東、北陸を含む地域にも高濃度が発生した。2日間で光化学スモッグ注意報を発令した自治体は、計23都府県に及び、特に9日は、21都府県で発令がなされた。そのうち、新潟県と大分県では、観測史上初めての注意報発令となった。

2. 2 気象条件

5月9日の天気図を図1に示す。移動性高気圧が大陸から東シナ海をゆっくり東に進み、本州はその影響下にあり、気圧傾度がほとんどなかった。また気温が高く、西日本から東北地方南部にかけて真夏日となった。強い日照と弱風、高温で、光化学スモッグが発生しやすい日であると同時に、移動性高気圧の北辺を気流が東へ流れ、西日本が大陸からの移流の影響を受けやすい日であった。

2. 3 全国的高濃度の解析

この光化学オキシダント高濃度イベントの全国的な解析については、早崎らが詳しく行っている⁵⁾。8日は、五島、隠岐などの離島や日本海側で西側ほど早い時刻にオキシダントの極大が発生していること、後方流跡線解析でも大陸起源の気塊の移流が見られることから、西日本におけるオキシダント高濃度は、大陸からの移流が主な原因としている。9日については、日本海側で見られたオキシダント高濃度は広域移流の影響とし、大都市域については、関東平野でのオキシダントが通常の日風進入による内陸移流や日変動のパタ

ーンを示すことから、当該地域の光化学反応の影響が大きいとしながら、定性的には越境汚染により底上げされた可能性にふれている。

また、黒川らは⁶⁾、ネスト版RMAS/CMAQ連携モデルを用い、中国での発生量についてのいくつかのシナリオにわたって東アジア域の予測計算をしている。その結果、高濃度オキシダントが、8日はわが国の中国地方、九州、四国の北部、近畿地方の日本海側を覆い、9日にはさらに関東、東北北部、北陸、中部、近畿から瀬戸内海岸まで広がるとし、両日とも越境汚染の影響を強く受けたとしている。この中で、夜間のオキシダント濃度減少の実測値との再現がよくないのは、夜間NOによるO₃消失反応や、地表面での乾性沈着の再現性が十分でないためとしている。

3. 2007年5月上旬高濃度イベントの大阪での状況

3. 1 大阪での濃度変化

2007年5月8日、大阪では、午後から、大阪平野中央部の南よりを東西に横切り大阪湾に注ぐ大和川沿いに光化学オキシダント一時間値が90ppbを超える地点が現れ、東南方向に移流していくのが認められた。しかし、濃度は注意報発令レベル(120ppb)に至らず、金岡局(堺市)で16時に105ppbとなったのが最高であった。9日は、大阪府南部で広い範囲に高濃度域が出現した。最高濃度は、南海団地局(阪南市)で、14時に130ppbを記録した。その日の光化学オキシダント濃度分布を図2に示す。この日は、大阪府の南部一帯(「堺市及びその周辺地域」、「南河内地域」、「泉南地域」の3地域以下「5月9日発令地域」という)に、この年度初めての注意報が発令された²⁾。

3. 2 大阪における濃度状況の考察

この日の光化学オキシダント濃度の特徴は、夜間に至っても高濃度が持続したことである。最高濃度を記録した南海団地局などの泉南地域(大阪の南西地域)では、10日の未明に至るまで濃度が60ppbを下まわらなかった。9日から10日にかけての泉南地域の局でのオキシダント濃度経時変化を図3に示す。泉南地域は、大阪府域の中では人口が少なく、大きな発生源もなく、光化学オキシダント濃度が注意報発令レベルになることが比較的少ない(2005～7年で注意報7回)地域である。この地域で夜間にオキシダント濃度が

図1 2007年5月9日天気図(気象庁「日々の天気図」より)

図2 2007年5月9日15時大阪での光化学オキシダント濃度分布(単位ppb)

60ppbを超えたまま推移することはこれまで例がなく、今回の現象は、当該地域での光化学生成によるものではないと考えられる。また、この同じ時間に60ppbを上まわるオキシダント濃度が持続した局は、西日本の日本海側に多く見られた。図4にそのいくつかの局を示す。これらのことから、9日には、南海団地局、泉南市役所局(泉南市)などの泉南地域が、西日本、北陸におけると同様に、東アジア規模の広域移流の影響下にあったことが推察できる。

しかし、この現象は、5月9日発令地域に共通して

発生したわけではない。図3に臨海工業地帯から少し内陸の都市部に位置する金岡、若松台、登美丘の三局(いずれも堺市)の濃度推移をあわせて示す。これらの局では、昼間には高濃度を示すが、夜間には濃度が低下している。この経時変化を見る限り、通常の光化学オキシダント高濃度の日変動パターンであり、特に変わったことは見いだせない。

図5に、図3と同じ時刻の NO_2 濃度の経時変化を示す。泉南地域には NO_x の発生源は少なく、堺市には多い。濃度でも、泉南地域が低く、堺市の三局が高いことがわかる。ここで、堺市の三局の図3にある光化学オキシダント濃度経時変化と、図5にある NO_2 濃度経時変化を見ると、鏡面対称といったような関係にあることがわかる。すなわち、光化学オキシダントがピークを示すときには、 NO_2 が谷を示し、その逆の現象も現れている。これは、光化学オキシダントが、高 NO_x の条件下で、 O_3 - NO 反応により分解され、 NO_2 が生成したことをうかがわせる。

木村は⁷⁾、 NO 、 NO_2 、 O_3 の反応モデルを作る中で、 $\text{PO}(\text{Potential Ozone}=\text{NO}_2+\text{O}_3)$ という指標を考案した。その後、一次排出の NO_2 が NO_x の約10%を占めるとして、 $\text{PO}=\text{NO}_2+\text{O}_3-0.1\text{NO}_x$ を提案している⁸⁾。ここでは、簡単のため、 $\text{PO}=\text{NO}_2+\text{O}_3$ として、図3~5と同じ時刻変化を5月9日発令地域の局について示したものが図6である。比較のため、例として、同じ地域で注意報が発令された日で、広域移流の影響を受けていないと考えられる2006年8月6日の同じ局の PO を図7に示す。通常の光化学オキシダント高濃度発生時の PO は、図7のように、オキシダントと同様の日変動を示し、かなりの地域差を見せるが、2007年5月9、10日の PO は、夜間も概ね60ppb以上で推移し、局間変動も少なく、同じ経時変化をしていることがわかる。

図3 2007年5月9~10日大阪府南部の局の光化学オキシダント経時変化

図4 2007年5月9～10日本海沿岸の局の光化学オキシダント経時変化

図5 2007年5月9～10日 大阪府南部の局の二酸化窒素濃度経時変化

図6 2007年5月9～10日大阪府5月9日発令地域の局のPO経時変化

図7 2006年8月6日における2007年5月9日大阪府注意報発令地域の局のPO経時変化

さらに、局間の変動を見るために、2007年5月9日から10日にかけてと、2005年～7年の間で5月9日発令地域に光化学スモッグ予報注意報^{注)}が発令された日(8日間)について、時間ごとのPO濃度の相対標準偏差をみた。5月9、10日は、相対標準偏差が0.03～

0.15であり、平均が0.08(他の発令日は0.13～0.20)と値が低く、0.1以下が9日で14時間、10日で23時間であり、他の発令日では、最大でも8時間であった。

これらのことから泉南地域と他の5月9日発令地域との光化学オキシダント経時変化の違いは、高NO_x

地域で光化学オキシダントが分解され、 NO_2 が生成されたことによる違いにすぎず、これらの地域は、同一の発生要因によるオキシダント移流の影響下にあることがわかる。

先に示したように(2.3)、黒川らは、5月8、9日のオキシダント高濃度が、中国からの越境汚染の影響が大きいとし、また、近畿地方は、9日午後には寄与のピークがあるとした⁶⁾。早崎らは、5月9日の大都市域でのオキシダントが通常の日変動を示すことから、越境汚染の寄与はあっても、都市内でのオキシダント生成の影響が大きいとした⁵⁾。しかし、この日変動は、 $\text{O}_3\text{-NO}$ 反応によるオキシダント消失によるものであって、POで見ると夜間であっても一定の高い(概ね60ppbを超える)濃度で推移していること、及びそれが共通の発生要因の影響と判断でき、しかも、それが当該地域での光化学生成によるものではないと考えられることから、大阪府域での同日発令地域でのオキシダントは、東アジア規模の広域移流の寄与が大きいものと判断できる。

3.3 後方流跡線解析

(独)国立環境研究所地球環境研究センターが開発、公開している、気象データの解析表示システムMETEX (METeological data EXplorer)のなかに、流跡線解析がある。これは、アメリカの環境予測センター(NCEP)及び気象庁のGPVデータ等により指定した時間、地点の気塊の流跡線を計算するものである^{9,10)}。ここでは、時間をさかのぼって流跡線を計算する後方流跡線(Back-Trajectory)解析を行う。すなわち、2007年5月9日15時に大阪周辺の上空500mにあった気塊が120時間前にあった地点と、そこからの流跡線を算出した。その結果を図8に示す。この流跡線では、中国の渤海沿岸から、黄海を通過してわが国の九州に至り、大阪に到達するとなっている。これと同様の結果は、着地点を緯経度方向に $\pm 1^\circ$ ずらした場合も、高さを750mとした場合にも得ることができた。渤海沿岸は、重化学工業が多く立地している地域であり、この気塊は、東アジアでも大気汚染物質排出の多い地域を通過して大阪に到達したと考えられ、前節で行った光化学オキシダント高濃度解析の結果とよく合致している。

図8 後方流跡線解析結果((独)国立環境研究所地球環境研究センターによる)

4. 結語と今後の課題

4.1 結語

これまでのことをまとめると以下のとおりとなる。

- ①2007年5月9日から10日の未明にかけて大阪府域で発生した光化学オキシダント高濃度イベントは、濃度の経時解析の結果、東アジア規模の広域移流の寄与が大きいものと判断できる。これは、後方流跡線解析の結果と合致する。
- ②広域を飛来した光化学オキシダントは、低 NO_x 地域ではそのまま光化学オキシダント高濃度をもたらしたが、高 NO_x 地域では、 $\text{O}_3\text{-NO}$ 反応により分解され、 NO_2 を生成したと考えることができる。
- ③広域移流による光化学オキシダント高濃度イベントの評価には、POが指標として適当である。

4.2 今後の課題

今回解析したような広域移流については、対流圏上層を飛来してくると考えられている¹¹⁾。この現象を観測するには、これまでのような地表での大気汚染常時観測網を活用するとともに、三次元的なモニタリングが必要になってくる。

環境省では、上空の黄砂や大気汚染物質のエアロゾルの飛来をモニタリングするツールとして、先にふれたライダー(Lidar)観測網の整備を行っている。これは、レーザー光線を上空に向けて照射し、その散乱光を解析することで、エアロゾルの存在や形状を観測する技術である。これまで、九州や日本海沿岸地域に設置されてきたが、最近では、東京や大阪などの都市域でも観測が始められている。経済発展が進む東アジア地域における NO_x 等の排出量は今後も増加すると予測さ

れており、これらの地域から移流する O_x や NO_x 等大気汚染物質の影響は今後さらに増加すると考えられる。こうしたデータを活用することで、大阪府域における広域移流のモニタリングを一層強化することができると思う。

謝辞：本調査は、(独)国立環境研究所と地方環境研究機関とのC型共同研究「光化学オキシダントと粒子状物質等の汚染特性解明に関する研究」の成果の一部を取り入れたものです。同研究を主宰されている(独)国立環境研究所広域大気モデリング室大原利眞室長および早崎将光氏(現千葉大学)に感謝いたします。また、大気汚染常時監視時間値データを使わせていただいた自治体のご担当の方々に感謝いたします。

注

・大阪府における光化学スモッグ注意報、予報の発令基準は、以下のとおりである。

注意報:当該地域の一点以上の測定点のオキシダント濃度が120ppb以上となり、その状態が持続すると認められるとき。
予報:当該地域の一点以上の測定点のオキシダント濃度が80ppb以上となり、気象条件から注意報発令に至ると認められるとき。

文 献

- 1) T.Ohara,H.Alimoto,J.Kurokawa,N.Horii,X.Yan,T.Hayasaka ; An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, Atmos. Chem. Phys.,7,4419-4444,2007.
- 2) 環境省;酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書,2004.
- 3) 藤田慎一;九州北西地域における硫酸酸化物の濃度と沈着量,大気環境学会誌,25,(2),155-162,1990.
- 4) 環境省;光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会報告中間報告書,2007.
- 5) 早崎将光,大原利眞,黒川純一,鶴野伊津志,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:観測データ解析,大気環境学会誌,43,(4),225-237,2008.
- 6) 黒川純一,大原利眞,早崎将光,鶴野伊津志;ネスト版RAMS/CMAQ連携モデルによる2007年5月8,9日に発生した広域的な光化学オゾン汚染の解析,大気環境学会誌,43,(4),209-224,2008.
- 7) 木村富士男;近似解法による NO 、 NO_2 、 O_3 の反応拡散モデル,大気汚染学会誌,13,(2),25-29,1978.
- 8) 木村富士男,相川光明;寒候期の大都市域における NO_2 の生成要因,天気,38,(5),61-69,1991.
- 9) Zeng,J.,Tohjima,Y.,Fujinuma,Y.,Mukai,H.,Katsumoto,M.; A Study of Trajectory Quality using Methane Measurements from Hateruma Island, Atmos. Environ., 37, 1911-1919, 2003.
- 10) Zeng, J., Katsumoto, M.,Ide, R., Inagaki,M., Mukai,H., Fujinuma,Y. ; Development of Meteorological Data Explorer for Windows, In:Y.Fujinuma (Ed.), Data Analysis and Graphic Display Systems for Atmospheric Research Using PC. CGER-M014-2003, Center for Global Environmental Research, NIES, Japan,19-72,2003.
- 11) 秋元肇;大気汚染物質の大陸間輸送と半球規模汚染,大気環境学会誌,41,(1),A1-A7,2006.