

[資 料]

2019 年 5 月 24-26 日に兵庫県下で発生した 広域的な高濃度光化学オキシダント事象の解析

久保 智子¹ 飯野 博夫² 山本 一巳² 中坪 良平¹ 瀧本 充輝¹ 高石 豊¹

¹ 兵庫県環境研究センター大気環境科 (〒654-0037 神戸市須磨区行平町 3-1-18)

² 兵庫県農政環境部環境管理局水大気課環境影響評価室 (〒650-8567 兵庫県神戸市中央区下山手通 5-10-1)

Analysis of severe ozone pollution during 24-26 May 2019 over Hyogo Prefecture

Tomoko KUBO¹ Hiroo IINO² Kazumi YAMAMOTO² Ryohei NAKATSUBO¹
Mitsuteru TAKIMOTO¹ and Yutaka Takaishi¹

¹ Atmospheric Environmental Division, Hyogo Prefectural Institute of Environmental Sciences,
3-1-18, Yukihiro-cho, Suma-ku, Kobe, Hyogo 654-0037, Japan

² Environmental Assessment Office, Water & Air Quality Control Division, Environmental Management
Bureau, Agricultural & Environmental Affairs Department, Hyogo Prefectural Government,
5-10-1, Shimoyamate-Dori, Chuo-ku, Kobe, Hyogo 650-8567, Japan

兵庫県下では 5 月 24-26 日に広域的な高濃度光化学オキシダント事象が発生した。同様に、全国でも広域的な高濃度光化学オキシダント事象が発生しており、5 月 22-27 日にかけて高濃度域が西から東へ移動した。当該事象を調べるため、2019 年 5 月 22-27 日の全国の大気汚染常時監視測定局（一般局）データ及び気象大気質モデル（WRF/CMAQ）によるシミュレーションモデル解析を行った。

5 月 22-27 日は全国的に晴れて気温が上昇し光化学オキシダントが生成され易い条件が整っていたため、国内各地で光化学オキシダントが生成された。さらに、日本の南海上を移動性高気圧がゆっくりと東進する際に、光化学オキシダント及び前駆物質等の大気汚染物質を引き連れてきたことが考えられる。これらの事象が重なり、広域で光化学オキシダント濃度が上昇したものと示唆される。また、シミュレーションモデル解析により、大陸においても高濃度光化学オキシダントが発生し、その気塊が、移動性高気圧の北側の強い西風によって日本へ輸送されたことが示された。

兵庫県においても、全国と同様、気象条件が整っていたことにより、県内各地で光化学オキシダントが生成され易い状態であった。また、夜間も前駆物質や PM_{2.5} の各濃度が高い状態が継続していたことから、大気汚染物質が県以西から流入し、さらに県上空に汚染気塊が滞留していたことが考えられる。

I はじめに

2019 年 5 月 24-26 日にかけて、兵庫県では広い範囲で高濃度の光化学オキシダント (Ox) が観測され、この 3 日間に予報及び注意報がそれぞれ延べ 22 地域及び 14 地域で発令された。今回の事象

のように、連続した日において、かつ広範囲に渡って広報等が発令される状況は過去 10 年間では見られず、これまでの高濃度 Ox 発生事例とは状況が異なっている。

5 月 22 日に九州地方で光化学スモッグ注意報が発令されたことを発端に、5 月 23 日には九州・中国

地方で、5月24日には四国・近畿・東海地方で、5月25日には関東地方でも発令され、全国的にも広域で高濃度O_xが出現した。また、観測史上初めて注意報が発令された自治体が現れるなど、広域的にわたった高濃度の出現が特徴的であった。

本報では、2019年5月22-27日に発生した全国的な高濃度O_xの発生事象について、日本全国の大気汚染常時監視測定局データと気象大気質モデルによる解析を行った。それにより、兵庫県下で発生した広域的な高濃度O_x事象について考察した。

II 方法

1. 実測データ解析

全国の大気汚染常時監視測定局(一般局1130局)の速報データ(そらまめ君; <http://soramame.taiki.go.jp>)から得られるO_x濃度の1時間値を用いて、2019年5月23日1時から27日24時の日本列島におけるO_x濃度分布の時間変化を解析した。なお、本研究で使用した速報データは、今後確定される段階で修正される場合があるので注意を要する。また、O_xの主要成分はオゾン(O₃)であることから、本報では以後O₃とみなして議論する。

2. シミュレーションモデル解析

気象モデルWRF (Weather Research and Forecast)

v3.6.1及び大気質モデルCMAQ (Community Multiscale Air Quality modeling system; Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006) v5.0.2を使用して作成したシミュレーションモデルを用いた。

計算対象領域は、Fig. 1に示すような東アジア域 (Domain 1: 64km格子) から日本域 (Domain 2: 16km格子) 及び近畿 (Domain 3: 4km格子) への3重ネスティング構造とした。鉛直層は上空100hPa (約16,500m) までを24層に分割し、最下層高度は約30mである。

排出量データには、国内はEAGrid2010-JAPAN(人為起源), JATOP (道路), OPRF(船舶), 気象庁の火山によるSO₂排出量及びMEGAN (植物起源VOC) を使用しており、東アジアはREASv2.1 (東アジア人為起源), ARCTAS (アジア外人為起源), FINN (バイオマス燃焼) 及びAEROCOM (火山) を使用した。

III 結果及び考察

1. O₃濃度分布の時間変化と気象状況

(1) 全国のO₃濃度分布の時間変化

5月23日1時~5月27日24時における全国の大気汚染常時監視測定局(一般局)で測定されたO₃濃度別測定局割合をFig. 2に示す。

24-26日の3日間は60ppb (環境基準値) 以上の測



Fig.1 Model domain and locations of the four O₃ monitoring stations (1: Naruo, 2: Inami, 3: Ako, 4: Sumoto).

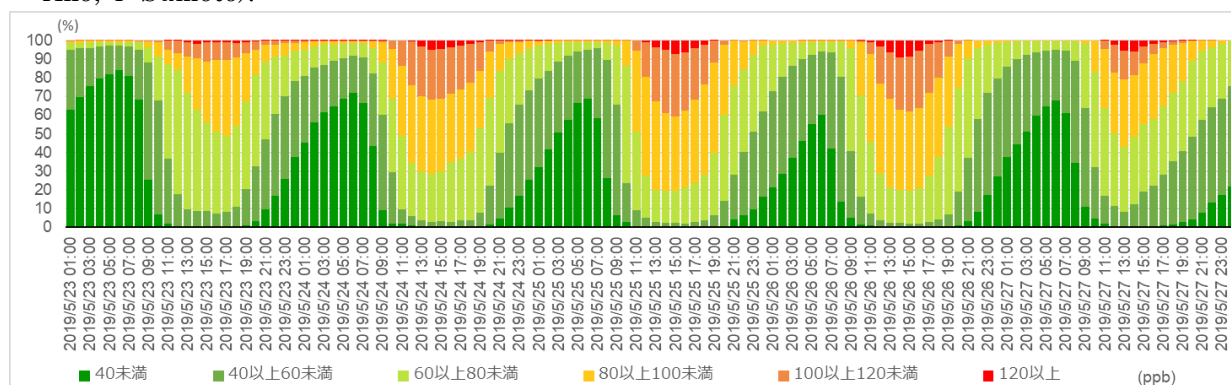


Fig.2 Changes in the ratios of monitoring stations categorized by O₃ concentration during 23-27 May, 2019

定局の割合が97%または98%にまで達し、その状態が2~3時間継続した。さらに、80ppb以上の測定局割合が増加しており、全国的にO₃濃度が上昇し、高濃度域が広範囲に及んだ。

長崎県対馬では、22日8時からO₃濃度が80ppb以上になり、同日16時には100ppb以上の高濃度O₃が記録された。その後も90ppb以上の高濃度O₃は25日7時まで継続した。また、山口県や島根県、高知県、さらには鹿児島県でも24日夜間から25日早朝にかけて90ppb以上の高濃度O₃を記録する等、22-25日は夜間にも高濃度O₃が存在していた。一方、25日以降はそのような状況はなかったことから、対象期間の前半(22-24日)と後半(25-27日)では、O₃濃度の分布状況が異なることが示唆された。

5月23~27日の9時、15時及び21時における全国のO₃濃度分布をFig. 3に示す。120ppb以上の高濃度域は、23日に九州~中国地方、24日に九州~近畿地方、25日に中国・四国~関東地方、26日に近畿~関東地方、27日に東海~北陸信越・関東地方で見られ、23-27日にかけて、O₃の高濃度域が西から東へ移動した。特に、24-27日は関西、東海及び関

東の大都市圏周辺で特に高濃度になった。

(2) 気象状況

Fig. 4に、23-27日における気圧配置を示す(気象庁, 2019)。23日は東シナ海から高気圧が張り出し、ほぼ全国的に晴れて気温が上昇した。最高気温が平年より10℃以上高い所もあった。24-27日にかけてその高気圧が東進し、日本付近は広く高気圧の圏内となり全国的に晴れて各地で気温が上昇した。24日は全国174地点で真夏日、25日は全国425地点で真夏日、26日は真夏日566地点、猛暑日53地点、27日にも猛暑日23地点を記録する等、全国的に気温が高く特異な気象状況であった。

この特異な気象状況の要因は、この期間に日本列島を覆った高気圧の移動速度が遅かったことが考えられる。

5月末のこの時期の移動性高気圧は、通常、時速40~50km程度で比較的規則正しく東進するのが特徴的である(出典: 小学館 日本大百科全書(ニッポニカ))。一方、2019年5月22-27日の高気圧の動きは、22-23日はほとんど停滞し、24日から時速

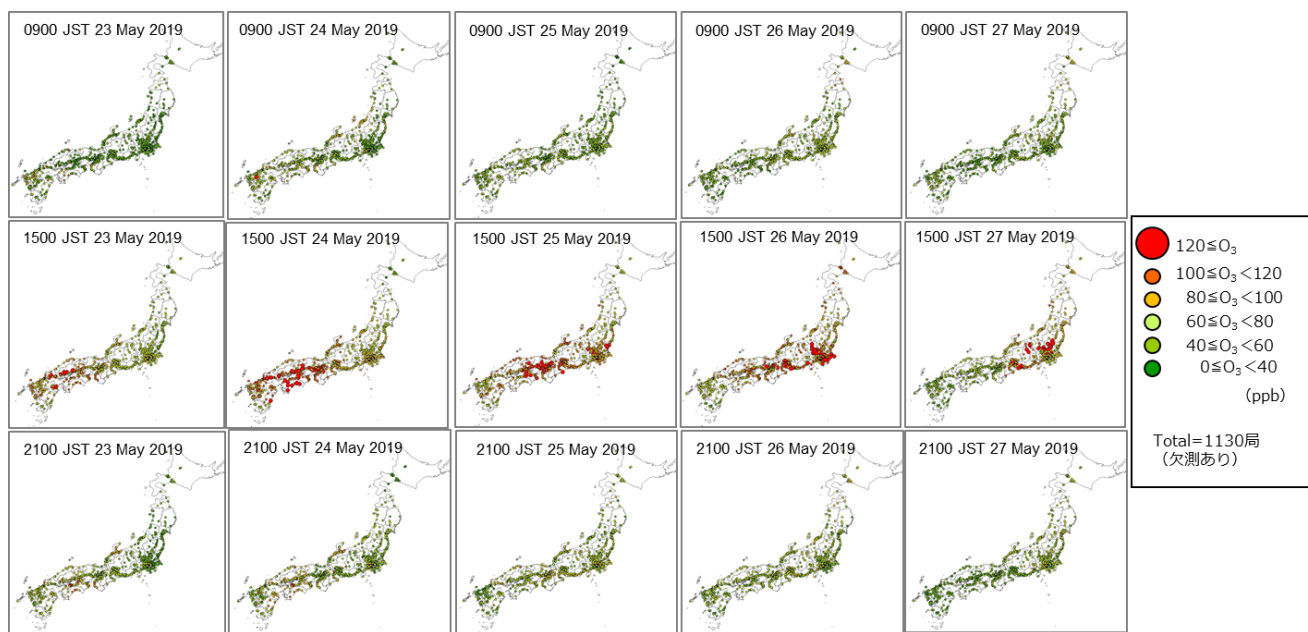


Fig.3 Spatial distributions of hourly concentration for surface O₃ observed at monitoring stations during 23-27 May, 2019

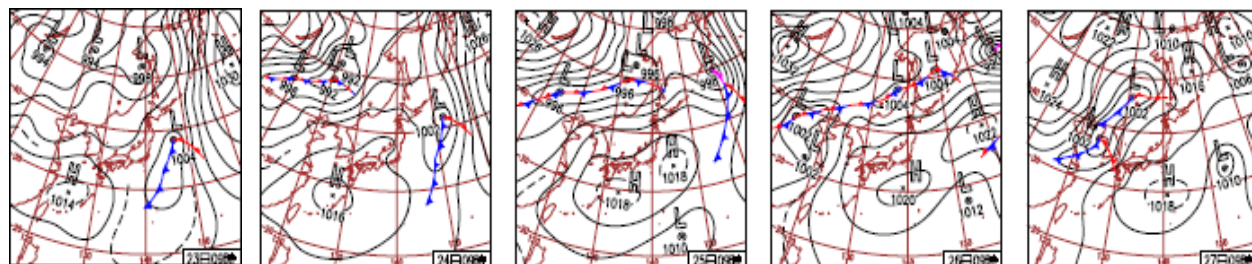


Fig.4 Surface weather charts during 23-27 May, 2019

20kmで東進しており、通常より移動する速度が遅かった。この移動性高気圧が日本を横断し、日本の東海上へ抜けるまでに約6~7日を要した。これは平年の移動日数より多かった。このため、日本列島が高気圧に覆われる期間が長くなり、全国各地で晴れて気温が上昇し、O₃が生成され易い条件が整ったことから、O₃濃度が高濃度となったものと示唆される。

2. O₃濃度分布のシミュレーション

(1) 実測値とモデル値の比較

24-26日に兵庫県内において、光化学スモッグ注意報が発令された市町のうち、Fig. 1で示した120ppb以上のO₃濃度が観測された4地点（西宮市鳴尾支所、稲美町役場、赤穂市役所及び洲本市役所）におけるO₃実測値及び大気質モデルで計算されたO₃計算値の比較をFig. 5に示した。なお、O₃計算値はDomain 3の出力値である。大気質モデルの再現性評価に使用する指標として、大原ら（2008年）¹⁾を参考に、相関係数（r）、平均バイアス（MB: Mean Bias）、正規化平均バイアス（NMB: Normalized Mean Bias）、平均二乗誤差（RMSE: Root Mean Square Error）、正規化平均誤差（NME: Normalized Mean Error）を用いた。MB、NMB、RMSE、NMEはそれぞれ以下のように定義される。

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$$

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \times 100$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}$$

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \times 100$$

ここで、M_iはモデル濃度、O_iは実測濃度、iは観測地点、Nはデータ数である。24-26日における相関係数（r）、MB、NMB、RMSE及びNMEをTable 1にまとめる。

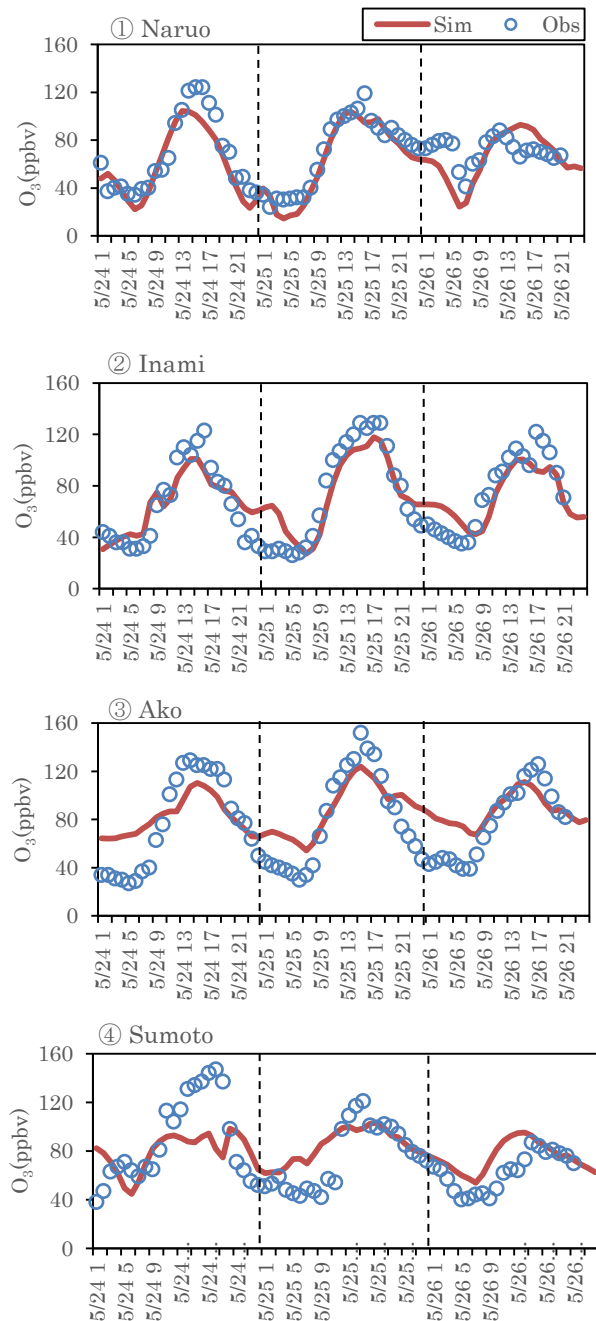


Fig.5 Hourly comparisons between observed O₃ and simulated O₃ at the 4 stations.

Fig. 5より、4地点とも観測結果をおおむね再現しており、Table 1に示した相関係数からも観測値とモデル値の相関が高いことが分かる。ただし、赤穂市役所では、日中の高濃度の再現性は良いものの、夜間から早朝の低濃度を過大評価する結果となり、NMBが11.2となっていることから証明された。

なお、西宮市鳴尾支所では5月25日20時から翌26日4時まで70ppbから90ppbが継続して観測されており、夜間に濃度が低下しない現象が確認された。

Table 1 Quantitative performance statistics for the simulation model.

Sites	$r^{1)}$	Mean_Obs (ppbV)	Mean_Sim (ppbV)	MB (ppbV)	NMB (%)	RMSE (ppbV)	NME (%)
① Naruo	0.88	68.5	62.6	-5.9	-8.6	13.9	16.5
② Inami	0.90	70.5	70.2	-0.2	-0.4	15.5	18.6
③ Ako	0.89	77.1	85.7	8.6	11.2	23.2	26.1
④ Sumoto	0.57	75.3	79.6	4.3	5.7	23.6	23.6

1)r : correlation coefficient.

他3地点ではそのような現象は見られず、25日夜間に鳴尾近辺において O_3 を多く含む気塊が停滞していたことが示唆された。

(2) O_3 濃度分布のシミュレーション結果

5月22-27日の15時における O_3 濃度の水平分布図をFig. 6に示す。図には地表面における O_3 濃度分布、風向ベクトル及び移動性高気圧の中心位置を示している。

22日15時に、中国北東部において120ppb以上の高濃度 O_3 が計算され、この汚染気塊が、西風によって日本へ移流している様子が見られた。23、24日は22日よりさらに広範囲で O_3 が高濃度になっている様子が計算され、風向は日本列島の方へ向いていた。1. (1)で述べたとおり、長崎県対馬を始め、日本海側の島根県や太平洋側の鹿児島県、高知県において、夜間に O_3 が高濃度になった。 O_3 は光化学反応により生成するため、通常日射のあ

る昼間に高濃度となり、夜間には低濃度となる。22-24日は、夜間にも O_3 が高濃度であったこと、及び大陸から日本列島へは西風が吹いていたことから、大陸で発生した高濃度 O_3 気塊が扇状に日本列島へ移流し、九州～中国・四国地方の広範囲で高濃度になったものと考えられる。

一方、25日も大陸で高濃度 O_3 が見られたが、その地域付近は南風が吹いており、日本列島への移流は少なかったと考えられる。また、26日及び27日は、大陸では高濃度 O_3 は見られなかったが、日本列島では O_3 濃度が上昇し、近畿～関東地方まで高濃度域が拡大した。シミュレーション結果でも時間の経過とともに、 O_3 の高濃度域が西から東へ移動していく様子が確認できた。22-27日にかけて、日本列島では西風が吹いており、それにより高濃度 O_3 を含む気塊が西から東へ移動したものと示唆される。

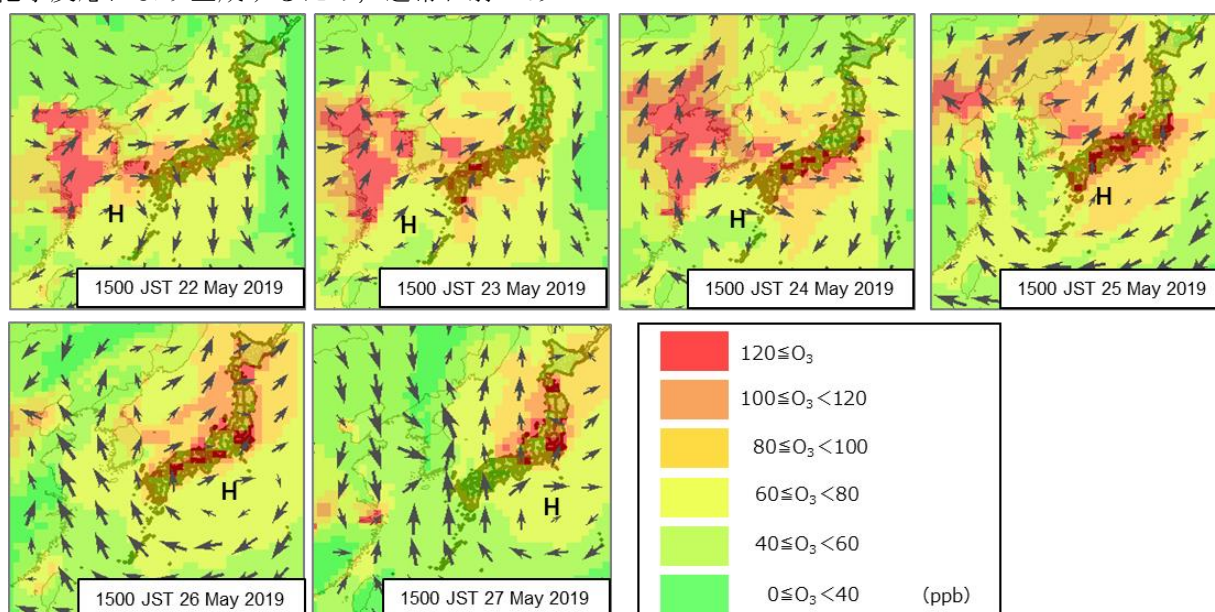


Fig.6 Horizontal distributions of simulated O_3 and wind directions on ground level at 15 o'clock between 22nd and 27th May 2019. Marked "H" denotes the position of the center of high pressure system in each day.

3. O₃濃度と前駆物質及びPM_{2.5}濃度との関係

(1) O₃濃度と前駆物質濃度の比較

2(1)で述べた、西宮市鳴尾支所におけるO₃濃度の変動について、前駆物質との関係性を考察するため、非メタン炭化水素 (NMHC) 及び窒素酸化物 (NO_x) を測定しており、西宮市鳴尾支所に近い尼崎市中部における5月24-26日のO₃、NMHC及びNO_xの各濃度の時間変化をFig. 7に示す。西宮市鳴尾支所と同様に、尼崎市中部においても、24日には見られなかったO₃濃度70ppb以上の状態が25日夜間に継続していた。24-26日の3日間とも、日中のO₃濃度上昇に先行して、午前8時頃にNMHC及びNO_xの濃度が上昇している。環境省のヒートアイランド対策マニュアル²⁾では、高濃度O₃出現時にはNO_xやNMHCが朝方を中心に高濃度となると報告されており、尼崎市中部においても同様の傾向が見られた。ただし、夜間に70ppb以上のO₃濃度が継続していた25日は、前日の24日からNO_x濃度、NMHC濃度ともに高い状態が継続していた。西宮市鳴尾支所で134ppbを記録し、注意報が発令された同年8月2日前後の尼崎市中部におけるO₃、NO_x、NMHCの各濃度の変動を見ると、NO_x濃度とNMHC濃度は夜間に減少していた。吉岡ら (2018年)³⁾は、2010年夏季に首都圏で発生した高濃度O₃の要因の一つとして、西日本で生成されたO₃が海域を通じて関東に流入したと考察している。夜間にNO_x濃度及びNMHC濃度が高い状態が継続していたことから、日中に地元で発生したもの以外に、県以西からの移流が考えられる。O₃も同様に県以西から運ばれたものと推測でき、地元生成成分に移流分が上乘せされ、夜間も分解されず大気中に滞留したため、O₃濃度が低下しなかったと示唆される。

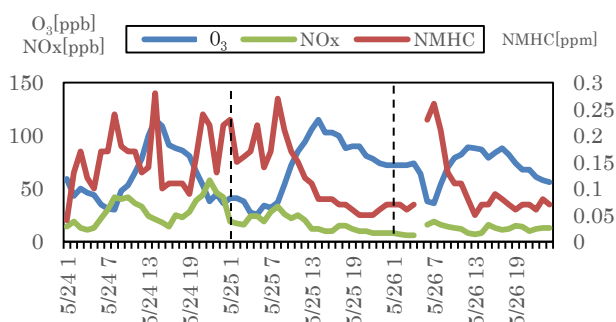


Fig.7 O₃, NMHC and NO_x concentrations observed at Amagasaki-Tyubu during 24-26 May 2019.

(2) O₃濃度とPM_{2.5}濃度の比較

Fig. 8に兵庫県における5月22-28日のO₃とPM_{2.5}

の各平均濃度の関係を示す。O₃濃度が上昇した時間帯にPM_{2.5}濃度も上昇していた。

期間中、O₃濃度が特に高くなった24-26日は、20~40 μg/m³のPM_{2.5}濃度が継続しており、濃度が低下し始めたのは27日22時以降であった。これにより、汚染気塊が滞留していたことが示唆される。

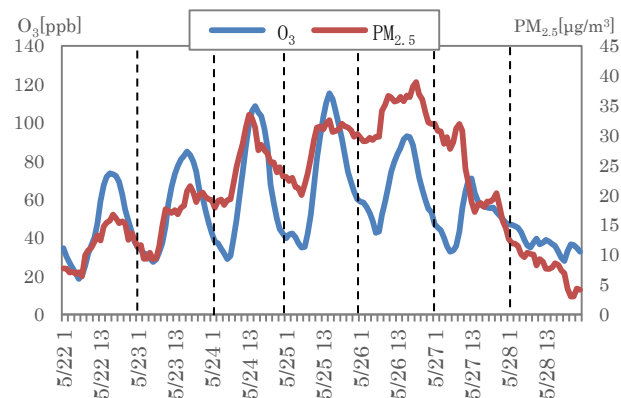


Fig.8 Average concentrations of O₃ and PM_{2.5} in Hyogo prefecture during 22-28 May 2019.

IV まとめ

2019年5月24-26日にかけて、兵庫県下ではO₃濃度が上昇し高濃度O₃が広域で観測された。この現象は、日本列島の西端にあたる長崎県対馬で100ppb以上の高濃度O₃が観測された22日から始まり、北海道でも28日に90ppb以上の高濃度O₃を記録するなど、28日頃までに日本列島全域に高濃度域が拡大した。

22日に大陸で生成した高濃度O₃が、前駆物質等と共に汚染気塊として移動性高気圧の北側の強い西風により日本列島へ輸送され、さらには移動性高気圧の動きに合わせて日本列島を横断するように西から東へ移動したものと考えられる。

関西、東海及び関東の大都市圏周辺では、24-27日にO₃濃度が特に高濃度になった。全国的に晴れて気温が上昇したことから、O₃が生成され易い条件が整い、国内において前駆物質が多い大都市圏周辺でO₃が生成されたことが要因と考えられる。しかし、各地域で発生する前駆物質には限りがあり、前駆物質の国内発生量は平年と変わらないと仮定すると、今回のように広範囲で高濃度になるには、当該地域以外で生成した前駆物質やO₃の存在が示唆される。3. (1)で前述した吉岡ら (2018年)³⁾の考察から、22-24日に大陸から移流したO₃や前駆物質に加えて、日本国内において生成されたO₃や前駆物質が東側の地域に影響を及ぼしたも

のと示唆される。

兵庫県においては、24-25日に前駆物質であるNO_xやNMHCの各濃度が夜間にも高い状態を継続しており、また、PM_{2.5}も24-27日にかけて増加していることから、県内生成成分以外に、大陸や県以西から流入した前駆物質及びPM_{2.5}の存在が考えられる。また、PM_{2.5}濃度が24-26日の3日間20 μg/m³以上を継続し、27日の夜になって低下し始めたことから、汚染気塊が県上空で滞留していたことが示唆される。

24-26日に兵庫県において高濃度O₃が広域で観測された要因は、平年に比べ気温が上昇し、O₃が生成され易い気象条件だったこと、O₃や前駆物質を含む大気汚染物質が県以西から流入したこと、汚染気塊が県上空に滞留していたことが考えられる。

文献

- 1) 大原利真, 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, 第43巻, 第4号, 198-208 (2008)
- 2) 環境省, ヒートアイランド対策マニュアル参考資料1「ヒートアイランド現象と光化学オキシダント等の大気汚染について」
- 3) 吉岡実里, 櫻井達也: 2010年夏季に首都圏で発生したオキシダント高濃度事象のモデル解析, 大気環境学会誌, 第53巻, 第4号, 111-119 (2018)