

【報文】

群馬県における近年の光化学オキシダント汚染状況の変化

坂本祥一 熊谷貴美代 田子博

Recent Change of Photochemical Oxidant in Gunma.

Shoichi SAKAMOTO, Kimiyo KUMAGAI, Hiroshi TAGO

群馬県における Ox 汚染状況の変化を把握することを目的として、2009～2012 年度と 2016～2019 年度の 2 つの期間に分けて Ox 平均濃度や濃度別出現率等を計算し比較した。その結果、近年では Ox 平均濃度は上昇し、NOx 濃度低下に伴う NO タイトレーション効果の減少がその一因となっていた。季節別に見ると、5 月は NO タイトレーション効果低下による Ox 濃度上昇に加え、実質的な Ox 濃度も上昇した。一方で、8 月では NO タイトレーション効果以上の Ox 濃度減少が認められ、これは日中の光化学生成の低減によるものと考えられた。60 ppb 以上や 80 ppb 以上の Ox 濃度出現率でも、夏季が大幅に減少し、春季が増加する傾向が見られた。近年では Ox 濃度の季節性が変化し、夏季よりも春季の方が高濃度化しやすくなっている可能性が示唆された。

Key words : ポテンシャルオゾン Potential ozone, NO タイトレーション NO titration, 季節性変化 Seasonal change

1. はじめに

光化学オキシダント (Ox) は、オゾンを主成分とする酸化性物質の総称で、大気中の揮発性有機化合物 (VOC) と窒素酸化物 (NOx) が光化学反応を起こすことにより生成する。Ox は強い酸化性をもつため、高濃度化すると眼・咽頭の粘膜へ刺激症状を引き起こし、その健康被害が懸念される。日本においても Ox と死亡リスクに関連があることが示されている (上田ら、2012)。さらに、近年では長期的な影響も危惧されており、30 歳以上の成人に対する評価においてオゾンの長期暴露により世界で年間 100 万人以上が呼吸器疾患で死亡しているとの推計結果も報告されている (Malley et al., 2017)。

群馬県の大気環境について、SO₂ や NO₂、SPM、PM_{2.5} などの常時監視項目は健康保護・生活環境の保全の観点から望ましいとされる環境基準を全地点で達成し、改善している状況にある。しかし、Ox については環境基準が 1 時

間値 60 ppb 以下と定められているが、県内全地点で達成できていない (群馬県、2019)。全国においても同様の状況であり、Ox の環境基準達成率は極端に低い。さらに、120 ppb 以上の高濃度となった場合は急性影響を引き起こす可能性が高くなるため、Ox 注意報が発令されるが、群馬県では毎年、数日から 10 日程度注意報が発令されている。

原因物質の VOC、NOx 濃度については、大気汚染防止法や自動車 NOx・PM 法などに基づく発生源対策が行われてきたこともあり、減少傾向にある (環境省、2018)。しかしながら、Ox は改善したと言える状況には至っていない。これは Ox の濃度上昇が原因物質の濃度だけでなく、他地域からの移流の影響や気温・日射量・風速・風向といった気象条件などの要因と複雑に関連して起こることにあり、さらにその状況は地形や標高などの地理的条件、季節でも異なっている。例えば、東アジア大陸の VOC、NOx の排出量増加による越境汚染の増加が指

摘されており（光化学オキシダント調査検討会、2017）、2019年5月下旬には全国的に高濃度Oxが観測され、この要因として越境汚染の影響が大きかったとされている（久保ら、2019）。このとき、群馬県でも県内広域でOx最高濃度150 ppb程度を観測した。また、気候変動の関連として温暖化のOx濃度への影響も指摘されており（田村ら、2009）、近年の猛暑とOx高濃度化の関係も報告されている（米持、2019）。さらに、2013年以降の中国のデータを解析した結果ではあるが、PM_{2.5}濃度の減少によりエアロゾルによるOHラジカルの吸収が低下し、Ox生成が増大している（Li et al., 2019）との報告もあり、大気汚染の改善が進んでもOxの改善は容易ではないこともうかがえる。そのため、様々な観点からOx汚染の実態を把握し、対策に繋げることが必要になる。

群馬県のOxの状況については、既報（一条ら、2012、2013）により2011年度までのデータ解析結果が報告されている。本報では2009年度から2019年度の期間に焦点を当て、近年のOx汚染の状況と変化を解析したので、その結果について報告する。なお、環境基準の告示において、Oxとは「オゾン、パーオキシアセチルナイトレートその他の光化学反応により生成される酸化性物質（中性ヨウ化カリウム溶液からヨウ素を遊離するものに限り、二酸化窒素を除く。）」とされているが、Oxの大部分がオゾン（O₃）であり、現在の常時監視で用いられている紫外線吸収法ではO₃を測定対象としている。しかしながら、ここでは化学種としてO₃とする必要がある部分を除き、基本的にOxと表記する。

2. 調査方法

2.1. 使用データ・解析方法

群馬県内の大気環境常時監視測定局の時間値データのうち、Ox濃度、NO濃度、NO_x濃度、非メタン炭化水素（NMHC、VOC濃度の指標）濃度を用いた。

近年のOx濃度がどのように変化しているかを解析するために、2013～2015年度の3年間を隔てて2009～2012年度を前期、2016～2019年度を後期としてそれぞれ4年間に区切った。時

間値データを基に前期と後期のそれぞれでOx平均濃度、ポテンシャルオゾン（PO、詳細は2.3参照）平均濃度、濃度別出現率（濃度別時間数/観測時間）等を計算した。なお、2018年度及び2019年度のデータは速報値である。

解析対象期間においてOx計は全て紫外線吸収法であった。Ox計の校正方法については2010年10月頃に変更が行われ（光化学オキシダント調査検討会）、校正方法の変更によるOx濃度への影響（上野ら、2015）や、校正法変更前の測定には誤差を含む可能性（泉川、2014、2015）が指摘されている。しかしながら、測定値への影響の適正な補正等は困難であるため、本報においてはこの点については考慮していない。なお、校正方法の変更の影響のない2011～2013年度を前期、2016～2018年度を後期として同様に解析を行い、その結果と校正方法変更前のデータを含んだ本報における結果を比較したところ、同様の变化傾向が確認されたことから、校正方法の変更による結果への影響はほとんどないと考える。

2.2. 解析対象地点

解析対象期間においてOx濃度、NO濃度、NO_x濃度のデータのある測定局のうち、代表地点として図1に示した前橋、渋川（県中部）、館林、伊勢崎（県南東部）、富岡（県西部）、沼田、吾妻（県北部）の7地点を選定した。NMHC濃度については、解析期間のデータが揃っている測定局は前橋、館林のみである。

群馬県の地理的特徴は、関東地方の内陸に位置し、南東部は関東平野、県北西部は山岳地帯となっている。平野部は比較的都市規模が大きく、産業も発展している。



図1 解析対象地点

各測定局の地点概況について、前橋は県央の市街地郊外にあり周辺は住宅地と農地である。渋川は県のほぼ中央（関東平野の北端）に位置し、周辺は住宅地である。館林、伊勢崎は県南東部に位置し、いずれも市街地にあり工業が盛んで人口密度も高い地域である。富岡は県西部（関東平野の西端）に位置する小都市で市街地にある。沼田、吾妻は県北部の山間地に位置し、周辺は沼田では小都市の市街地、吾妻では住宅と農地である。

2.3. ポテンシャルオゾン（PO）について

Ox の主成分である O₃ は NO₂ と O₂ の光化学反応によって生成されるが、生成した O₃ は NO との反応で分解され、O₂ と NO₂ を生じる。このように O₃ と NO_x が共存する環境では、生成した O₃ が NO と反応することで見かけ上、O₃ が減少する。このことを NO タイトレーション効果という。Ox 濃度の変化のみに着目した場合、その変化が Ox そのものの変化なのか、NO タイトレーション効果による変化なのか判断することができない。そのため、この効果による減少を補正した式 1 で示される PO 濃度も合わせて評価することで、Ox 濃度の変化が何に由来するのか推定することができる。ここでの α は発生源における NO_x 濃度に対する NO₂ の比率であり、本研究では一般的に日本で用いられている 0.1 とした。

$$[PO]=[Ox]+[NO_2]-\alpha\times[NOx] \cdots \text{式 1}$$

3. 結果および考察

3.1. 後期の Ox、PO、NO_x 濃度の状況

地点間の Ox 濃度等の比較のため、後期の Ox、PO、NO_x の平均濃度を図 2 に、Ox 濃度別出現率を表 1 に示す。Ox 平均濃度は前橋が 34.1 ppb と最も高く、吾妻が 29.6 ppb と最も低かった。

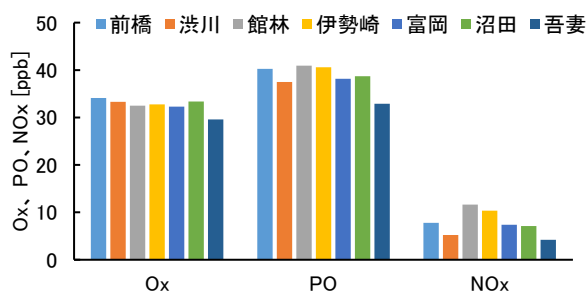


図 2 後期（2016~2019 年度）の Ox、PO、NO_x の平均濃度

表 1 後期の Ox 濃度ランク別出現率

(単位：%)

	Ox濃度別出現率						
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-
前橋	21	45	26	6.1	1.4	0.23	0.04
渋川	25	42	26	6.2	1.5	0.25	0.02
館林	29	38	24	6.6	1.8	0.49	0.10
伊勢崎	25	43	24	6.4	1.4	0.27	0.05
富岡	27	42	23	6.0	1.4	0.33	0.05
沼田	22	43	28	5.6	0.78	0.13	0.01
吾妻	32	41	20	4.8	0.98	0.19	0.01

地点間の濃度差は小さく、地点による特徴は見られなかった。PO 平均濃度では館林が 40.9 ppb、伊勢崎が 40.6 ppb と高く、吾妻が 32.9 ppb と最も低かった。PO では Ox に比べ地点間の濃度差がみられ、前橋、館林、伊勢崎で高かった。NO_x 平均濃度は館林、伊勢崎で高く、周辺の経済活動が盛んな地点で高い傾向であった。これらのことから Ox 平均濃度の地点差が小さい要因として NO_x 濃度の差による NO タイトレーション効果の大小が影響しているものと考えられた。

また、県北部に位置する沼田の NO_x 平均濃度については、渋川と比較しても高く、前橋や富岡と同じ濃度レベルであった。NO_x の季節変動は、渋川や吾妻が年間通して濃度が低く変化が小さいのに対して、沼田は前橋や富岡と同様に冬季に上昇する傾向があり、燃料燃焼の増加による変動とみられた。これらのことより周辺の発生源や交通量の影響により、沼田では NO_x 濃度が高くなっていると考えられた。

濃度別出現率では、80 ppb 以上の出現率が平野部（前橋、伊勢崎、館林、渋川、富岡）で高く、山間部（沼田、吾妻）で低いことが特徴的であった。80 ppb 以上の高濃度は暖候期（4~9 月）を中心に発生し、平野部ほどローカルな光化学生成の寄与に加えて、関東南東部からの移流による影響を受けやすいためと考えられる。また、吾妻は Ox、PO、NO_x 濃度ともに 7 地点の中で最も低く、今回の解析対象地点の中ではバックグラウンド濃度に相当すると考えられた。

3.2. 前後期の Ox 濃度等の変化

前期と後期の Ox 濃度等の変化を見るため、後期の平均濃度から前期の平均濃度を引き、その差分を計算した。Ox 濃度平均値の差分（ΔOx）と PO 濃度平均値の差分（ΔPO）を図 3 に、

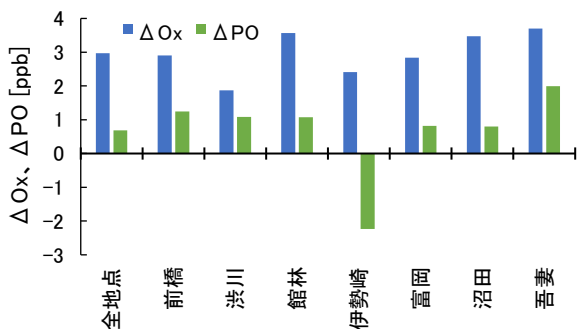


図3 前後期のOx及びPO濃度平均値の差分

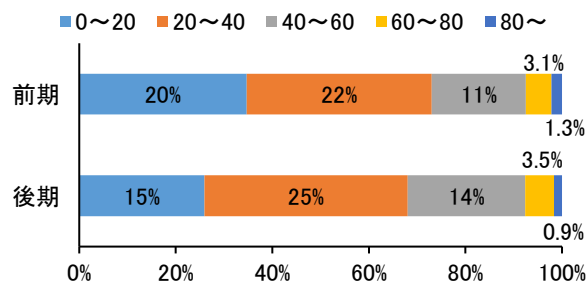


図5 Ox濃度ランク別出現率(7地点平均)

NO_x濃度平均値の差分(ΔNO_x)とNMHC濃度平均値(データがある前橋、館林のみ)の差分(ΔNMHC)を図4に示す。Oxは全地点平均値(解析対象7地点の平均値)で3.0ppb増加し、POは0.7ppb増加していた。ΔOxとΔPOを比較すると、ΔOxはΔPOより全地点平均で4倍ほど大きく、いずれの地点でもΔOx>ΔPOであった。そのため、近年のOxの増加は、NO_x減少に伴ってNOタイトレーション効果によるOxの減少が少なくなったことが一因であることがわかった。また、POも伊勢崎を除いて、増加幅は小さいものの増加が見られ、Oxそのものも増加していることがわかった。

Oxの原因物質であるNO_xとNMHC濃度については全地点で減少していた。NO_x減少幅は伊勢崎や館林といったNO_x濃度の高い地点ほど大きく、周辺の発生源が多い地点ほど対策効果が大きく現れているものと考えられた。

前後期のOx濃度ランク別出現率(解析対象7地点平均)を図5に示す。前後期を比較すると、後期は低濃度側の20ppb未満出現率が20%から15%に減少し、高濃度側の80ppb以上も1.3%から0.9%に減少した。一方で、中間的な濃度の20~40ppbは22%から25%、40~60ppbは11%から14%に増加した。すなわち、20ppb未満や80ppb以上のような極端な濃度は起こり

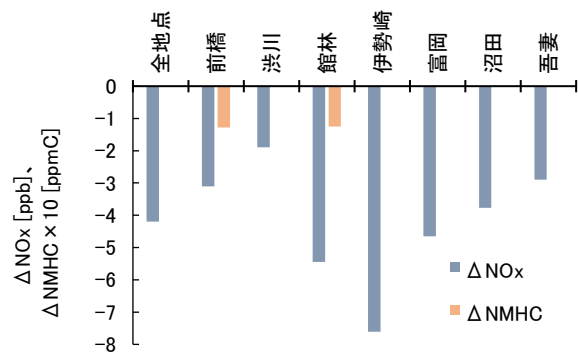


図4 前後期のNOx及びNMHC平均値の差分

にくくなっており、中間的な濃度の出現率が増加していた。特に20ppb未満は大きく減少し、この低濃度域出現率の低下がOxベース濃度(日中の光化学生成によるOx濃度上昇を除いた深夜から早朝付近の日最低レベルのOx濃度)を上昇させ、Ox平均濃度を増加させた要因として大きいと考えられた。NO_x濃度は図4に示したように前後期で4.2ppb減少しており、この濃度分布の変化はNOタイトレーション効果の低下による低濃度側のベース濃度の上昇と、NO_xやVOCの減少によりOx生成が抑えられ、高濃度ピークが低下したことによるものと推察された。NO_x排出の削減によりOx濃度分布が狭くなること(Simon et al., 2015)は報告されており、これと同様のことが起こっていると考えられる。高濃度Oxの減少についてはさらに後述する。

3.3. 前後期の月別Ox濃度等の変化

次に季節ごとのOx濃度の変化を見るため、Ox濃度の前後期の月別平均値の差分を図6に示す。月別でもほとんどの月で増加したが、前橋、伊勢崎、館林の7~8月、渋川、富岡、沼田、吾妻の8月は減少していた。

Ox濃度が上昇する暖候期では、全地点で5

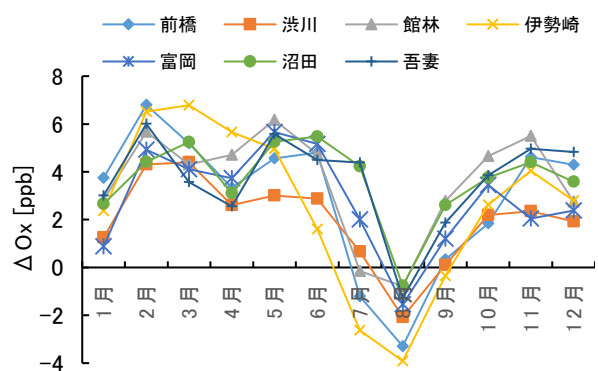


図6 前後期の月別Ox平均値の差分

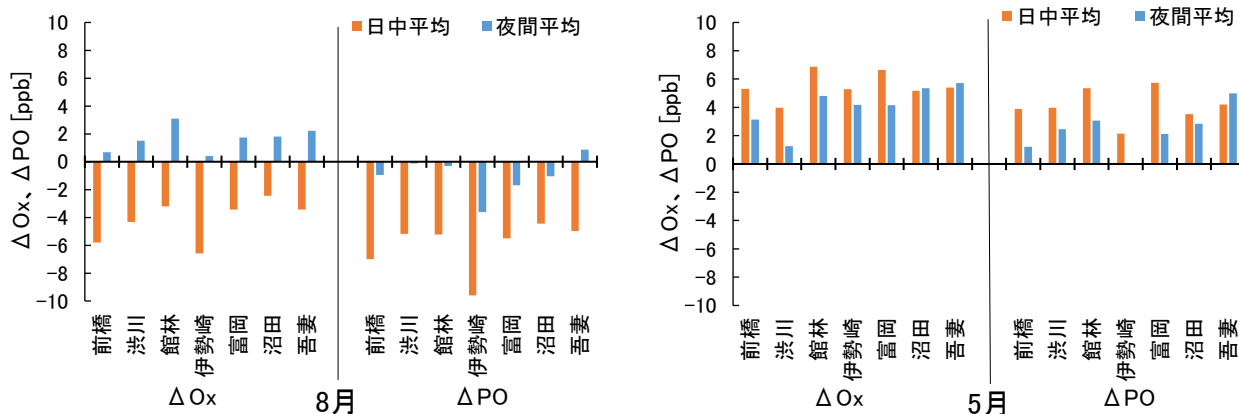


図7 前後期の昼夜別 Ox・PO の平均値の差分 (8月：左、5月：右)

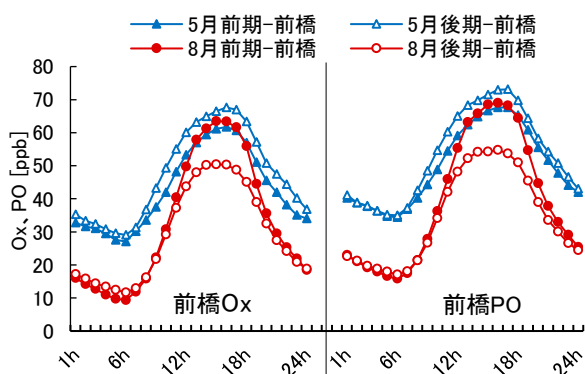


図8 前橋における Ox (左) と PO (右) の時間別平均値

月の増加と8月の減少が大きいことが共通していたため、以下ではこの5月と8月の変化に着目し解析する。まず、昼夜別に分けて Ox と PO の昼間平均値 (6時～20時の1時間値の平均値) 及び夜間平均値 (21時～5時までの1時間値の平均値) の差分を計算し、その結果をそれぞれ図7に示す。

8月 (図7左) は、昼夜別で見ると昼間が減少し、夜間は増加していた。特に伊勢崎と前橋では昼間の減少が大きかったが、地点間の特徴はいずれも見られなかった。PO でも昼間が減少していることは同じであったが、夜間は吾妻でわずかに増加していることを除き、その他地点は減少していた。すなわち、8月の昼間の Ox 減少は Ox そのものの減少の寄与が大きく、夜間の Ox 増加は NO タイトレーション効果の低下による寄与が大きいことがわかった。一例として、前橋の Ox と PO の時間別平均値を図8に示す。8月 (図8赤プロット) は、前後期を比較すると Ox と PO 共に 12～19時の濃度の減少が特に大きいことがわかる。群馬県では正午にかけて光化学反応により Ox 濃度が上昇し、

さらに関東南東部からの移流の影響により夕方の17時頃にかけても濃度上昇する機会が多い。このことから日中の減少は県内及び関東域内での光化学反応による Ox 生成の低減が示唆された。前述したとおり、県内の NOx と NMHC 濃度は減少しており、関東南部の東京都や埼玉県においても同様に減少傾向にある (東京都、埼玉県)。NOx・VOC 排出量を削減した場合のシミュレーション結果 (光化学オキシダント検討会, 2017) において、北関東では両者の削減が Ox 低減に有効なこと、東京湾周辺の南関東では NOx 削減により Ox 増加の可能性があるものの VOC 削減が Ox 低減に有効なことが示されており、その低減効果は夏季が大きいと報告されている。地域によって NOx と VOC 削減のバランスにより低減効果が異なるが、発生源対策による原因物質濃度の減少が群馬県の8月の日中 Ox 減少につながっている可能性が考えられた。また、夜間の Ox 濃度上昇は NO タイトレーション効果低下によるものが大きかったが、これによる Ox の増加量 ($\Delta Ox - \Delta PO$) は、全時間帯でプラス (全地点の8月平均で 2.1 ppb) であり、夜間に限らず Ox のベース濃度を全時間帯で上昇させていた。つまり、8月の日中は NO タイトレーション効果低下分を上回る実質的な Ox が大きく減少し、夜間では NO タイトレーション効果の低下分だけ Ox 濃度が増加したことがわかった。

5月 (図7右) では、8月と異なり、Ox は昼間及び夜間ともに増加した。昼夜の増加分を比較すると沼田と吾妻を除いて昼間の増加が大きかった。PO では伊勢崎の夜間はわずかに減少したが、その他地点は Ox と同様に昼夜共に増

加し、吾妻を除いて昼間の増加が大きかった。 ΔOx と ΔPO を比較すると、 $\Delta\text{Ox} > \Delta\text{PO}$ であり、5月の Ox 増加についても NO タイトレーション効果の低下が影響していた。しかしながら、 PO は伊勢崎の夜間を除いて昼夜共に増加していることから、5月の Ox 増加は実質的な Ox 増加も大きく影響し、増加幅は日中の方が大きかった。前橋の時間別平均値（図8青プロット）を見ても、5月は Ox と PO 共に全時間帯で増加側にシフトし、特に日中の増加幅が大きいことがわかる。5月においても NOx と NMHC 濃度は減少しているが、8月と異なり5月は Ox 低減に至っておらず、 PO は増加していた。

この5月の PO 増加の要因として、一つは気象条件による影響が考えられる。前橋気象台の観測データ（気象庁）より、前後期の月別平均気温及び月別平均日最高気温の差分を計算すると、5月の平均気温は $+1.6^{\circ}\text{C}$ 、平均日最高気温は $+2.0^{\circ}\text{C}$ であった。この結果の比較対象として、日本の5月平均気温の長期的な経年変化（1898~2020年）を見ると、 $1.67^{\circ}\text{C}/100$ 年の上昇傾向（気象庁）であり、解析期間の10年間あまりで平均気温が 1.6°C 上昇したことは大きな変化であったことがわかる。（8月の前後期

では平均気温は -0.2°C 、平均日最高気温は -0.5°C であり、長期変化 $1.08^{\circ}\text{C}/100$ 年と比較しても変化が小さかった。） Ox 最高濃度と、気温や日積算日射量といった気象条件には相関が見られること（東京都光化学オキシダント対策検討会、2005；竹内、2012）は報告されており、日中の PO 濃度の増加はこの影響が現れている可能性が考えられた。

また、春季は夏季に比べて関東地域内で生成した Ox の影響が小さく、越境汚染を含む域外からの流入影響が大きいと言われており（光化学オキシダント調査検討会、2017）、春季の Ox 濃度の8割程は国外からの発生源が寄与している（Nagashima et al., 2010）との報告もある。今回解析した前後期の期間でどの程度、越境汚染の影響が増減したか定かではないが、このことも PO 濃度増加の一つの要因かもしれない。

3.4. 月別の Ox 濃度別出現率の変化

3.3で述べたように Ox 濃度は5月の上昇と8月の減少による変化が大きかったが、高濃度側の Ox 出現率が月別に前後期でどのように変化したのかを見るため、1時間値 60 ppb 以上、80 ppb 以上の月別出現率をそれぞれ示す（図9、図10）。60 ppb 以上の出現率（図9）では、平野部に位置する地点（前橋、伊勢崎、館林、渋

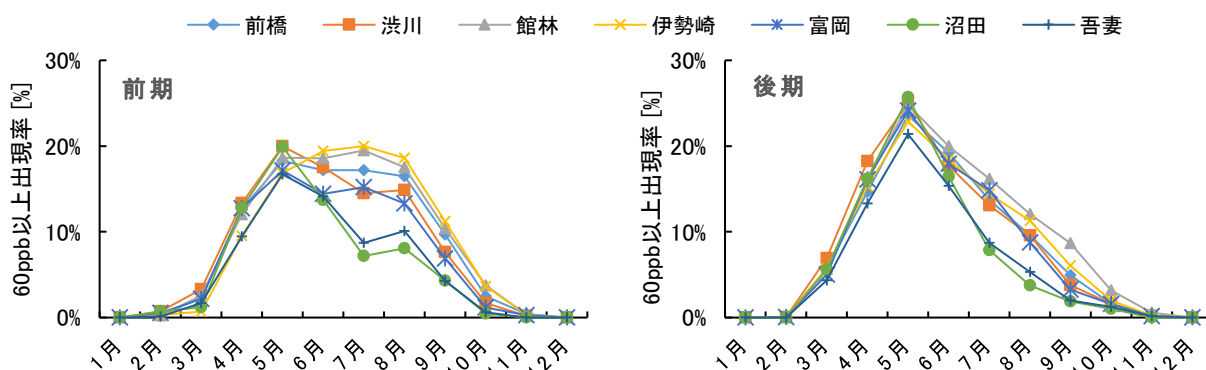


図9 Ox 濃度 60 ppb 以上の月別出現率（左：前期、右：後期）

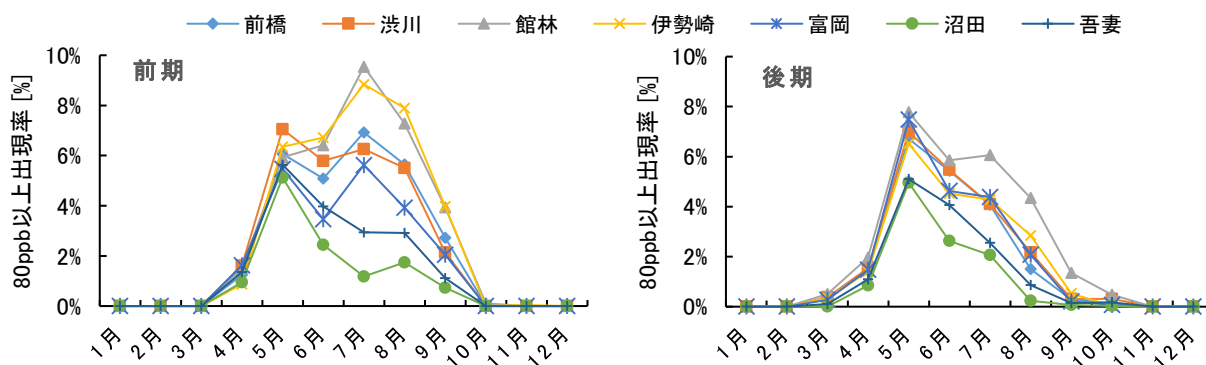


図10 Ox 濃度 80 ppb 以上の月別出現率（左：前期、右：後期）

川、富岡)の前期は5月～8月の期間で15～20%とほぼ一定の出現率であった。しかし、後期では、5月は増加して20%を超えた一方で、7月と8月は大きく減少した。山間部の沼田と吾妻については、夏の濃度上昇が小さいため、前期も5月が8月より高かったが、後期はさらにその傾向が強くなった。80 ppb以上の出現率(図10)についても同様の变化傾向がみられ、後期ではいずれの地点も5月の出現率が最も高かった。特に平野部の館林や伊勢崎で7～8月の減少が大きかった。このように、60 ppbや80 ppb以上となる高濃度は夏(7～8月)に抑えられて減少した一方で、春(5月)に起こりやすくなっていることがわかった。すなわち、近年では高濃度Oxの出現しやすい季節が変化し、春の方がより高濃度Oxに注意が必要と思われる。この変化は、3.2で述べた日中のOx濃度の変化によるものと考えられた。

今回の解析で比較した前期と後期は11年間のうち3年間で隔てたそれぞれ4年間の平均であり、気象条件等の年々の変化による影響も受けやすい。そのため、今回示した傾向が継続するかは、今後も解析をしていく必要があることは十分に考慮すべきである。その上で、今回の結果からは8月はOx濃度低減が見られ、一方で、5月は濃度上昇が確認された。5月のOxベース濃度は、8月と比較して、例えば前橋では図8からわかるように10 ppb以上も高い。さらに、5月は高気圧に覆われ晴天が多く、移動性高気圧により大陸由来の大気汚染が輸送されるなど、Oxが高濃度化しやすい条件が揃いやすい。そのため、仮にこの傾向が継続すれば、春季のOx高濃度化がより深刻となる可能性もある。今後は夏季だけでなく、春季のOx汚染の実態とその要因を詳細に把握していくことが必要と思われる。また、気候変動との関連付けは容易ではないが、気温上昇等の気象条件の変化がOx汚染状況を変化させていくことが予想され、より多角的な観点での解析も求められるだろう。

4.まとめ

群馬県における近年のOx濃度変化について2009～2012年度を前期、2016～2019年度を後

期として4年間に区切り、比較することで解析を行った。

前後期において、いずれの地点もOx濃度は増加し、NOx、NMHC濃度は減少した。PO濃度の変化と比較した結果、Ox濃度増加の要因の一つとしてNOx減少によるNOタイトレーション効果の低下の影響が大きいことがわかった。

月別に解析すると、暖候期では特に5月の増加と8月の減少が顕著であった。8月はNOタイトレーション効果低下による一定のベース濃度上昇が見られ、夜間はその影響によりOx濃度が上昇した。しかし、日中のOx濃度は大幅に減少し、県内及び関東域内での光化学反応によるOx生成の低減が示唆された。発生源対策による原因物質濃度の減少がその要因である可能性が考えられた。5月においても、NOタイトレーション効果の低下によるOx濃度上昇が見られたが、PO濃度の増加も見られ、実質的なOx濃度が上昇していた。その要因として気候変動を含む気象条件の変化や越境汚染の影響が考えられるが、今後もさらなる解析が求められる。

60 ppb以上、80 ppb以上のOx濃度出現率は、夏季(7～8月)が大幅に減少し、いずれの地点も春季(5月)が最も高くなった。近年では夏季よりも春季の方が高濃度化しやすくなっていることが示唆され、Ox濃度の季節性が変化している可能性がある。

今後はより広域的な地域のOx汚染状況を比較し、変化傾向やその地域差を把握していくと共に、気象条件との関連についても明らかにしていく必要がある。また、本研究のような解析を実施するには、同一地点における関連物質も含めた継続的なモニタリングデータが不可欠であり、今後も長期的なモニタリングが望まれる。

謝辞

本研究はⅡ型共同研究の一環として実施しました。

文献

群馬県森林環境部林政課. 2019. 令和元年版環境白書.

- 一条美和子, 熊谷貴美代. 2012. 群馬県における光化学オキシダントの状況. 群馬県衛生環境研究所年報. **44**:19-27.
- 一条美和子, 齊藤由倫, 熊谷貴美代, 田子博. 2013. 近年における群馬県内の光化学オキシダントに関する考察. 群馬県衛生環境研究所年報. **45**:30-37.
- 泉川碩雄. 2014. 光化学オキシダント測定法の検討結果—湿式オキシダント自動測定器を中心に— (前編). 大気環境学会誌. **49(6)**:A74-A81.
- 泉川碩雄. 2015. 光化学オキシダント測定法の検討結果—湿式オキシダント自動測定器を中心に (後編) —. 大気環境学会誌. **50(1)**:A1-A7.
- 環境省. 2018. 平成 30 年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書
- 気象庁. 気象統計情報. <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (2020 年 7 月閲覧)
- 気象庁. 気温・降水量の長期変化傾向. <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/> (2020 年 7 月閲覧)
- 光化学オキシダント調査検討会. 平成 24 年度第 4 回光化学オキシダント検討会議事録 資料 1-2 データの多角的解析結果について (まとめ). https://www.env.go.jp/air/osen/pc_oxidant/conf/chosa/h24_04.html. (2020 年 7 月閲覧)
- 光化学オキシダント調査検討会. 2017. 光化学オキシダント調査検討会報告書.
- 久保智子, 飯野博夫, 山本一巳, 中坪良平, 瀧本充輝, 高石豊. 2019. 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. 公益財団法人ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター紀要. **10**:12-18.
- Li K., Jacob D. J., Liao H., Shen L., Zhang Q., Bates K.H. 2019. Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **116**:422-427.
- Malley C. S., Henze D. K., Kylenstierna J. C. I., Vallack H. W., Davila Y., Anenberg S. C., Turner M.C., Ashmore M. R. 2017. Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults ≥ 30 Years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure. *Environmental Health Perspectives*. **125(8)**:087021. <https://doi.org/10.1289/EHP1390>.
- Nagashima T., Ohara T., Sudo K., Akimoto H. 2010. The relative importance of various source regions on East Asian surface ozone. *Atmos. Chem. Phys.* **10**:11305-11322.
- 埼玉県環境部. 大気汚染常時監視測定結果報告書 (平成 29 年度). <http://www.pref.saitama.lg.jp/a0504/kikaku-kanshi/jyoujikanshihoukokusyo.html>. (2020 年 8 月閲覧)
- Simon H., Reff A., Wells B., Xing J., Frank N. 2015. Ozone Trends Across the United States over a Period of Decreasing NOx and VOC Emissions. *Environ. Sci. Technol.* **49**:186–195. <https://doi.org/10.1021/es504514z>.
- 竹内庸夫. 2012. 観測データから見た近年の埼玉県における大気環境の状況と光化学オキシダント濃度推移の要因. 全国環境研会誌. **37**:178-186.
- 田村憲治, 松本幸雄, 佐々木寛介, 椿貴博. 2009. 地球温暖化と大気汚染: 光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク. 地球環境. **14**:271-277.
- 東京都光化学オキシダント検討会. 2005. 光化学オキシダント検討会報告.
- 東京都環境局. 2017 (平成 29) 年度大気汚染常時測定結果のまとめ. https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/data/publications/air/300200a20180301163730638.files/2017_taikisokutei.pdf. (2020 年 8 月閲覧)
- 上田佳代, Ng C. F. S., 新田裕史. 2012. 光化学オキシダントの健康影響～20 都市研究の結果と海外の知見. 大気環境学会誌. **47(1)**: A9–A11.
- 上野広行, 齊藤伸治, 國領和夫. 2015. 関東地方の夏季高濃度 Ox の長期的濃度変動要因の検討と前駆物質濃度削減効果の予測評価. 大気環境学会誌. **5(6)**: 257-265.
- 米持真一. 2019. 近年の関東地域における夏季の大気汚染—2018 年・埼玉県の O₃ と PM_{2.5} の特徴—. エアロゾル研究. **34(2)**:65-72.