

地域ごとの光化学オキシダントに関する
研究のレビューとそのとりまとめに関する調査研究

地域ごとの光化学オキシダントに関する研究のレビューと そのとりまとめに関する調査研究

研究代表者：高橋 克行

（一般財団法人日本環境衛生センター環境事業第二部次長）

研究要旨

光化学オキシダントの環境基準の達成率は極めて低い状況が続いている。その要因は地域や季節によって異なり、経年的に変化していることに加え、複数の要因が混在している可能性もあるため、地域ごとに適切なオキシダント対策が求められる。本研究では文献レビューを中心とした調査を実施して、地域の行政担当者が活用できるように、当該地域の前駆物質の排出状況に応じた光化学オキシダント汚染の特徴を、他地域との比較も交えて把握できるような取りまとめを行うことを目的とした。地域は関東、東海、関西、瀬戸内、九州を対象とした。

本研究は2ヵ年で計画しており、1年目である本年度（令和4年度）は以下の調査を実施した。

- (1) 過去 30 年程度のオキシダントに関する文献のレビューを実施し、地域のオキシダント汚染の特徴を取りまとめ、次年度に実施する予定の要因解析の対象や手法を選定した。
- (2) これまでに各地域で実施された大気汚染対策に関する情報収集を行った。
- (3) 各対象地域の研究者や行政担当者へヒアリングを実施した。
- (4) 文献レビューで得られた知見の補足情報として、過去 30 年のオキシダントやその前駆物質（VOC、NO_x）の濃度変化も整理した。

収集した文献を要因ごと・地域ごとに整理した結果、各地域のオゾン生成レジームの分布や前駆物質の排出量の削減効果等について、一定程度把握することができた。また、地域の行政担当者や研究者との意見交換の結果から、地方公共団体が必要としている情報はその地域でオキシダントの高濃度化に最も効いている要因であることが確認できた。本年度得られたこれらの知見に加えて、さらに効果的な地域比較や年代比較による取りまとめを行うことを目的に、次年度（令和5年度）は地域間や年代間で統一した解析手法を用いた検証を実施する。そのため、オキシダント汚染の要因のうち、地域単位での対策立案に有用な「オゾン生成レジーム」、「NO_x タイトレーション効果」、「前駆物質の排出量の削減効果」に焦点をあて、本年度整理した文献で示された解析の中から地域や年代を拡張することで有用な知見が得られるものを選定し、次年度に実施する解析の計画を検討した。

キーワード

光化学オキシダント、文献レビュー、大気汚染対策、地域比較

分担研究者

吉村 有史、遠藤 智美、塩手 文也

（一般財団法人日本環境衛生センター環境事業第二部環境調査課）

研究協力者

地域ごとの光化学オキシダントに関する研究調査検討会

浅川 大地(大阪市立環境科学研究センター)

早崎 将光(一般財団法人日本自動車研究所)

福崎 有希子(横浜市環境創造局環境科学研究所)

山地 一代(国立大学法人神戸大学)

山村 由貴(福岡県保健環境研究所)

Review of Literature on Photochemical Oxidants by Region and Investigative Research using the Compiled Data

Katsuyuki Takahashi[※], Yuji Yoshimura[※], Tomomi Endo[※], Fumiya Shiote[※]

[※] *Japan Environmental Sanitation Center*

Keywords:

Photochemical oxidants, Literature reviews, Air pollution countermeasures, Regional comparison

Abstract

The rate of attainment of the environmental standard for photochemical oxidants continues to remain very low. The causes of this lack of attainment differ depending on the region and season. In addition to circumstances changing over time, there may be a combined effect of multiple factors that requires appropriate measures for each region. This study performed a literature review with the goals of compiling data to facilitate understanding of the characteristics of photochemical oxidant pollution depending on the emission status of precursor substances in particular regions, comparing the findings with those of other regions, and making these data available for use by local government officials.

This year, in addition to the literature collected (in Japanese and English), literature provided by review committee members was also arranged by factor and region. As a result, it was possible to ascertain, to a certain extent, the distribution of ozone formation regimes and the reduction effect on the volumes of precursor substances. An exchange of opinions with local government officials and researchers confirmed that the information required by local public authorities is factors that are most pertinent to high oxidant concentrations in the region. Beyond the findings obtained this financial year, in the next year, the inter-regional and inter-era data will be verified using uniform analytical methods, with the goal of compiling more effective data based on regional and chronological comparisons. Therefore, the research will focus on oxidant pollution factors such as ozone formation regimes, the NO titration effect, and the reduction effect on precursor emission volumes, which are useful for planning countermeasures by region. Literature was selected from the literature organized this year, and useful findings from this literature obtained by expanding the regions and age of the present analysis were used to develop and examine the analysis plan to be implemented next year. In addition, we surveyed original initiatives implemented by each local public authority, such as measures for curbing emissions of oxidant precursors, and analyzed data on oxidants and oxidant precursors obtained over the past 30 years by continuous monitoring stations.

1. 研究目的

1.1. 目的

光化学オキシダント（以下、オキシダントまたは Ox とする）の前駆物質濃度は減少傾向にあるが、オキシダント濃度は高止まりの傾向にあり、環境基準の達成率は極めて低い状況が続いている。

その要因は下記のように複数あり、地域や季節によって要因が異なり、地域によっては高濃度の出現する季節が異なる。また、その要因は経年的に変化していることに加え、複数の要因が混在している可能性もあるため、光化学オキシダントの低減対策を困難にしている。

- ・オゾン生成レジームの時空間的な変化
- ・NO タイトレーション効果の低下によるオキシダント濃度の増加
- ・オゾン生成に影響する前駆物質の排出量
- ・VOC 組成の変化とオキシダント生成との関係
- ・海風による汚染物質の輸送
- ・汚染物質の地域内での滞留や循環
- ・越境汚染等の移流の影響

今後のオキシダント対策を検討するにあたり、過去の対策効果を検証することは重要である。これまでオゾンに対する VOC 削減効果を確認する研究が行われてきたが、上記の理由から地域ごとに効果が異なる可能性もあるため、地域の実情に応じた検証が必要である。

1.2. 方針

本研究では次のような文献レビューを中心とした調査を実施して、地域の行政担当者が活用できるように、当該地域の前駆物質の排出状況に応じた光化学オキシダント汚染の特徴を、他地域との比較も交えて把握できるような取りまとめを行う。さらに、効果的な地域比較による取りまとめを行うには、地域間で統一された手法で検証された結果が必要となることから、近年の常時監視測定データを利用して、文献に示された方法で全地域を対象に観測結果の整理を行う（以下、「既往研究のアップデート」とする）。

- (1) 対象とする地域は、予防事業対象地域を含む関東、東海、関西、瀬戸内、九州の地域全体とする。
- (2) 令和 4 年度は文献レビューを実施して、地域ごとに上記の要因とオキシダント濃度との関係を整理するとともに、要因ごとに研究事例の少ない地域、検証したデータの年代が古い地域等を把握し、アップデートの対象とする既往研究を選定する。
- (3) 令和 5 年度は、既往研究のアップデートを行い、地域や年代ごとのオキシダント汚染の状況を比較したうえで、令和 4 年度に整理した文献情報も含めて取りまとめを行う。
- (4) 前駆物質の排出量や濃度の変化がオキシダント濃度変化に与える影響は、地域ごとのオキシダント対策を考えるうえで重要であることから、前駆物質排出量が比較的短期間で変化した新型コロナウイルス感染症に係る緊急事態宣言期間前後を比較した研究事例に着目して、前駆物質濃度が異なる海外事例も参考にして整理する。
- (5) 国や地方自治体が実施してきた光化学オキシダント対策の事例を収集し、行政担当者の将来的な対策立案に役立てられるように整理する。

2. 研究対象及び方法

地域（関東、東海、関西、瀬戸内、九州）ごとのオキシダント対策の立案に役立てるため、本調査では、以下に示す手法により、オキシダント濃度に影響する様々な要因を地域ごと及び年代ごとに整理する。

2.1. 令和4年度の調査研究内容

過去30年程度の国内の文献を収集して、各地域のオキシダントに係る情報をとりまとめるとともに、既往研究のアップデートが必要となる「要因」や解析手法を検討した。また、文献調査以外にも以下に示す情報収集やヒアリングを行い、次年度実施予定の既往研究のアップデートを行う要因や解析手法の選定に必要な情報を整理した。

(1) 文献調査

本調査の中心となるもので、文献データベースを利用して過去30年程度を対象とした文献検索を実施し、地域ごとのオキシダント濃度に寄与する要因等を、地域間や年代の比較も交えて整理した。要因は1.1に示す7つに分類した。そのうえで、要因ごとに研究事例が少ない地域、検証したデータの年代が古い地域等を把握し、地域間で統一された手法による解析結果で比較できるように、アップデートの対象とする既往研究を選定した。

(2) 大気汚染対策に係る情報収集

地域の行政担当者の参考になるように、国や地域ごとに行われてきたオキシダント対策や前駆物質の削減等の大気汚染対策に係る情報を収集して、文献調査の結果と合わせて取りまとめた。とくに、地域の対策においては、他地域の参考となるよう、独自性のあるものを対象とした。

(3) 地域の研究者へのヒアリング

(1)、(2)を取りまとめた結果を基にして、各対象地域の研究者や行政担当者にヒアリングを実施した。具体的には、近年のオキシダント濃度に寄与する要因、これまでの対策の実施と効果などについてヒアリングを行った。

(4) 常時監視データ等の整理

(1)の取りまとめにあたり、各地域のオキシダントや前駆物質濃度の経年変化の情報も必要となる。しかし、既往研究が研究対象とした期間や地域等は限られることから、日本国内の経年的な変化を把握するために、対象地域の過去30年程度の大気汚染常時監視データからオキシダントや前駆物質濃度を整理した。

(5) 検討会の実施

有識者や地域の研究者を委員とした検討会を年2回開催した。

検討会委員（敬称略、五十音順）

氏名	所属	専門分野
浅川 大地	大阪市立環境科学研究センター	大気観測・解析
早崎 将光	一般財団法人 日本自動車研究所	気象要因の影響解析
福崎 有希子	横浜市環境科学研究所	大気観測(VOC)・解析
山地 一代	神戸大学大学院	大気環境モデリング
山村 由貴	福岡県保健環境研究所	大気観測・モデリング

2.2. 令和5年度の調査研究計画の概要

(1) 既往研究のアップデートによる地域や年代の比較

地域や年代によりオキシダント高濃度の出現傾向が異なっていることを踏まえ、2020年頃までに行われた既往研究と同様の方法で、最近の測定データを用いて各地域を対象に解析を実施し、地域や年代による傾向の違いを把握する。なお、ここで行う解析は、測定データを用いて行うもので、シミュレーションモデルを用いた解析ではない。

(2) 文献調査及び周辺情報の整理

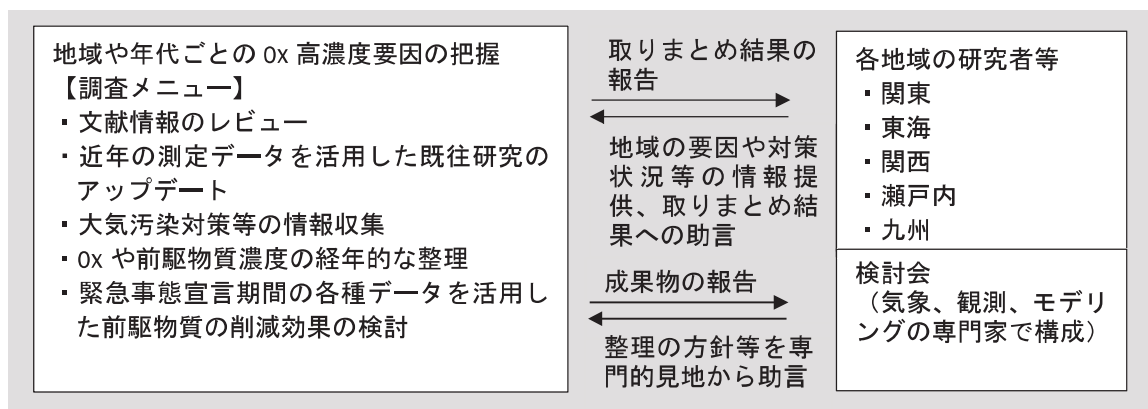
令和4年度の取りまとめ以降の新たな文献や研究の進捗から得られる情報を収集、整理する。また、発生源対策や大気汚染の状況が国内とは異なる海外における前駆物質の濃度変化とオキシダント生成（もしくは削減）との関係を比較整理することは、国内における前駆物質の削減効果を考えるための基礎資料となり得る。新型コロナウイルス感染症に係る緊急事態宣言や都市封鎖期間前後においては、比較的短期間に前駆物質排出量の変化が見られたことから、これらの事例に着目して海外と国内の事例を比較整理する。なお、国内地域において当該事例の既往研究が得られない場合には、大気汚染の常時監視データ等を活用した事例の整理も検討する。

(3) 地域の研究者へのヒアリング

(1)、(2)を取りまとめた結果を基にして、各対象地域の研究者等にヒアリングを実施する。

(4) 検討会の実施

有識者や地域の研究者を委員とした検討会を年2回程度開催する。



3. 研究成果

3.1. 文献調査による地域ごとの光化学オキシダントの要因の整理

文献の収集はそれぞれ次の方法で行い、和文文献と英文文献でそれぞれ 92 編と 16 編の文献を収集した。

- ・和文文献：文献情報データベース JDreamIIIにおいて「(((オキシダント or オゾン)and(タイトル ション or レジーム or 移流 or 越境 or バックグラウンド)) or (オキシダント and 高濃度)) and (JA/LA)」の条件で検索を実施、これらの文献のタイトルや抄録から有用と考えられた文献を選定し、文献の記載内容も考慮して、地域ごと・要因ごとに文献を分類した。
- ・英文文献：文献情報データベース JDreamIIIにおいて「(((オキシダント or オゾン)and(タイトル ション or レジーム or 移流 or 越境 or バックグラウンド) and 日本) or (オキシダント and 高濃度 and 日本))and(EN/LA)」の条件で検索を実施、これらの文献のタイトルや抄録から有用と考えられた文献を選定し、文献の記載内容も考慮して、地域ごと・要因ごとに文献を分類した。

その他に、検討会委員から情報提供された文献についても同様に地域ごと・要因ごとに文献を分類した。

委員提供文献を含め今年度収集した文献は 110 編であり、その一覧を資料編 1 に示した。それらの文献の中で、68 編が関東を対象とした解析を行っていた。一方、瀬戸内と九州を対象とした文献はそれぞれ 12 編、13 編であり、地域によって文献数に大きな差が見られた。

3.1.1. オゾン生成レジーム

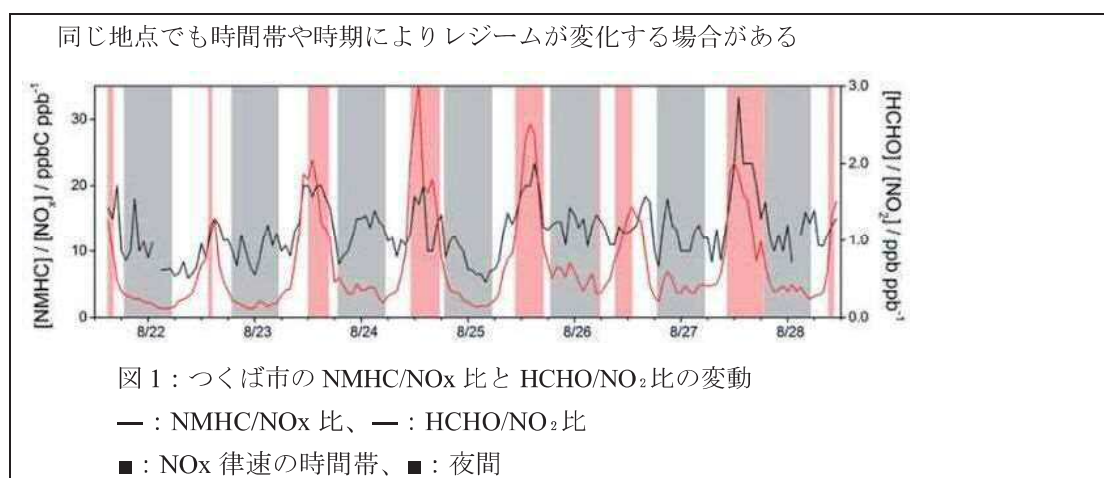
関東においてオゾン/全硝酸比からオゾン生成レジームを推定した研究では、都心部は VOC 律速となる一方、郊外は NOx 律速になると推定されていた(井上ら, 2010¹)。また、関西のオゾン生成レジームに関するモデルによる研究では西宮市と大阪市は VOC 律速、播磨町は NOx 律速と推定されていた(金ら, 2001²)。このようにレジームの分布が解明されつつある地域もある一方、瀬戸内(香川県)(勝間ら, 2019³)などレジーム解析が局所的な地域もあり、解析手法も様々であることから、統一された手法による広域なレジーム解析が望まれる。

各地域の「オゾン生成レジーム」に関する文献の概要

地域	概要
関東	・ 関東においてオゾン/全硝酸比からオゾン生成レジームを推定した研究では、都心部は VOC 律速となる一方、郊外は NOx 律速になる。(井上ら, 2010¹) ・ つくば市では、同じ地点でも時間帯や時期によりレジームが変化する場合がある。(Sakamoto et al., 2019⁴)
東海	・ 名古屋市で平成 17 年に観測されたある高濃度日について、NOx 及び VOC の排出削減効果をシミュレーションしたところ、市内のいずれの測定局でも NOx 排出量を 70%以下に削減することで効果が見られたのに対し、VOC 排出量の削減ではほとんど効果は見られなかった。(荒川ら, 2015⁵) ・ 静岡県において感度レジームの検証を行ったところ、7 局中 2 局がやや NOx 律速領域、1 局が VOC やや律速領域、残りの 4 局は遷移領域にあるという結果になった。(小田と結城, 2020⁶)

関西	・ 大阪・兵庫地域において HC と NO _x の排出削減効果をシミュレーションしたところ、西宮市と大阪市は HC の削減無しに NO _x を削減するとオキシダント濃度が増加するのに対し、播磨町では HC 削減の有無にかかわらず NO _x 削減によりオキシダント濃度は減少する。(金ら, 2001 ²)
瀬戸内	・ 香川県において、NMHC/NO _x 比によりレジームを推定すると NO _x 律速側となった。(勝間, 2019 ³)
九州	・ VOC 排出量削減が福岡県内の O ₃ 濃度変化に与える影響は小さく、NO _x 排出量削減は NO _x 排出量の多い都市を含む福岡県北側では O ₃ 濃度を増加させ、福岡市より南側のエリアでは減少させることが判った。(山村ら, 2020 ⁷)

「オゾン生成レジーム」の事例紹介 (Sakamoto et al., 2019⁴)



3.1.2. NO タイトレーション効果

近年の大気汚染防止対策により汚染物質の排出量は減少してきており、NO も同様に大気中の濃度が低下している。一方、NO には O₃ と反応することで見かけ上のオキシダント濃度を減少させる効果(NO タイトレーション効果)もあり、NO の排出量削減は光化学オキシダント濃度の増加につながる場合がある。実際に NO タイトレーション効果によるオキシダントの増減を算出した文献(吉門, 2019⁸)では NO の減少に伴いオキシダントの 2～6 時の平均値は経年的に増加しているという結果が得られている。また、同文献では NO タイトレーション効果の経年的な低下により見込まれるオキシダントの増加量($\Delta \text{Titr}(\text{O}_3)$)と実際のオキシダント濃度の増加量(ΔOx)の比較を行っている。春季は後者の方が高くなり、バックグラウンドオゾンの増加の可能性が示唆されている一方、夏季は反対の傾向が見られており、これはオキシダント対策の結果によるものと考えられた。この傾向は関東、東海、関西、九州の 4 地域で共通して見られた。

各地域の「NO タイトレーション効果」に関する文献の概要

地域	概要
関東	・ 8 月の川崎市では、Ox 濃度の日最高値と 5 時の NO 濃度の間にトレードオフの関係が認められた。(竹内ら, 2009⁹) ・ NO 濃度の低下による O₃分解の減少が原因となり、Ox の日最高値について埼玉県内の地域間の差が小さくなっている。(竹内, 2012¹⁰)
東海	・ 愛知県では、朝方に NO 濃度の上昇が起こることで朝方の Ox 濃度の平均値が低下する現象が局所的に見られている。(川上, 2009¹¹)
関西	・ 兵庫県内における O₃濃度の月平均値の空間分布は、局所的に排出された NO による O₃の消失反応によって決定される。(坂本ら, 2010¹²)
瀬戸内	・ 香川県では 1981 年から 2017 年までの光化学オキシダントの環境基準超過時間の漸増が NO タイトレーション効果の減少によるものであることが推察された。(勝間, 2019³) ・ 山口県内における Ox 濃度の年平均値の地域差について、北部地域には工場等の汚染発生源がないため、NO による Ox の消費が少ないことが考えられる。(隅本と長田, 2021¹³)
九州	・ 吉門, 2019(後述)以外に該当する情報なし。

「NO タイトレーション効果」の事例紹介 (吉門, 2019⁸)

オゾンの増加量について下記のように Δ Ox と Δ Titr(O₃)を定義したところ、春季と夏季では状況が異なった。

Δ Ox : I 期(2000~2005 年)から II 期(2010~2015 年)にかけての Ox の 2~6 時平均値の増加量

Δ Titr(O₃) : I 期から II 期にかけて NO タイトレーションの減少により見込まれる Ox の 2~6 時の平均値の増加量

Ox の増加が専ら NO タイトレーションの減少に由来するならば Δ Ox と Δ Titr(O₃)は同じ値になるはずだが、次のような結果が得られている。

春季 : Δ Ox > Δ Titr(O₃)となる地点が多い→バックグラウンドオゾンの増加の可能性がある。

夏季 : Δ Ox < Δ Titr(O₃)となる地点が多い→Ox 対策の効果が見られている。

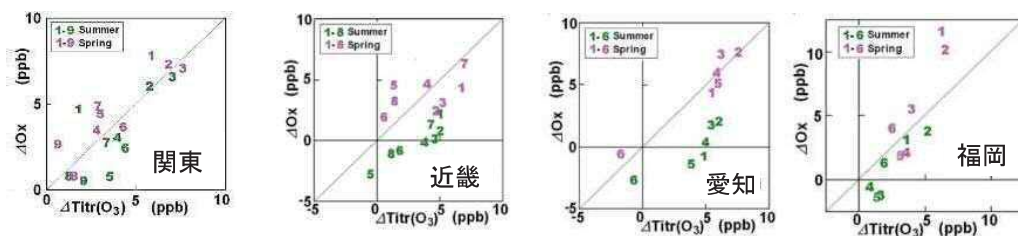


図2 各地域の Δ Ox と Δ Titr(O₃)

3.1.3. 前駆物質の排出量の削減効果

関東は国内でも前駆物質の排出量の多い地域であり、前駆物質の排出に対する規制も様々行われている(例:自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法(自動車 NOx・PM 法))。そのため、規制に伴う前駆物質の排出量削減がオキシダント濃度へ与える影響の調査も行われている。例えば、環境基準比＝環境中の濃度/環境基準、という指標により埼玉県内の前駆物質の排出量の削減効果を検証した文献(竹内, 2012¹⁰)ではオキシダントの環境基準比は横ばいであるものの高濃度の出現日は減少傾向であり、前駆物質の排出量の削減効果が表れていた。同様に自動車 NOx・PM 法の対策地域を含む東海でも削減効果の検証が行われており、山神, 2020¹⁴ではオキシダント濃度の日最高値と日最低値の差分を用いて排出量の削減効果が表れていることが示されていた。一方、今回の文献調査において関東と東海以外では前駆物質の排出量削減効果を検証した文献は見つからなかった。

各地域の「前駆物質の排出量の削減効果」に関する文献の概要

地域	概要
関東	・ 2002 年以降の 10 年間に於いて、関東平野中央部では NMHC 濃度の低下によりオキシダント高濃度日が顕著に減少した。(吉門, 2015¹⁵) ・ 川崎市において DPOx(日中の平均濃度と夜間の平均濃度の差分)という指標を過去 30 年にわたって算出したところ、2006 年以降 DPOx は減少傾向となり、対策の効果が見られた(Fukunaga et al., 2021¹⁶)
東海	・ ΔOx(日最高値と日最低値の差分)の経年変動を用いて名古屋市の前駆物質の排出量削減効果を検証すると、市内の測定局 14 局中 12 局で削減効果が見られていた。(山神, 2020¹⁴)
関西	情報なし。
瀬戸内	情報なし。
九州	情報なし。

「前駆物質の排出量の削減効果」の事例(Fukunaga et al., 2021¹⁶)

川崎市において DPOx(日中の平均濃度と夜間の平均濃度の差分)という指標(図 3)を過去 30 年にわたって算出したところ、2006 年以降 DPOx は減少傾向となり、対策の効果が見られた。

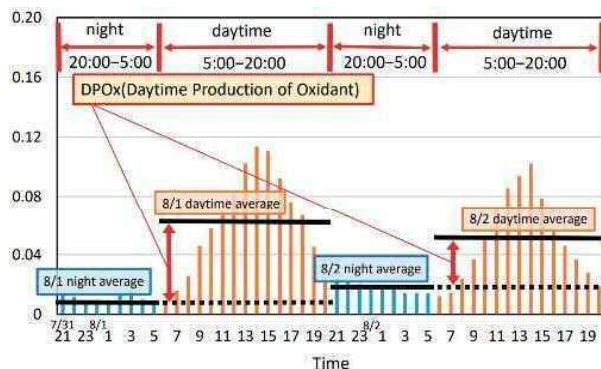


図 3 : DPOx の算出方法

3.1.4. VOC 組成とオキシダント生成の関係

VOC 組成に関する研究は主に VOC 排出量の多い関東と関西で行われており、いずれの地域でもアルケン類や芳香族炭化水素類が高濃度オキシダントの生成に大きく寄与しているという結果が得られている。しかし、VOC の調査結果からオキシダント生成能を示す文献では、下記の事例紹介(福崎ら, 2018¹⁷)のように大気中の移流前後の変化量とオキシダント濃度の変化を合わせて評価したものは限られていることから、オキシダント生成に寄与する VOC については、引き続き情報を収集して整理する必要がある。

各地域の「VOC 組成とオキシダント生成の関係」に関する文献の概要

地域	概要
関東	- 横浜市と東京都の 2 地点間の移流前後での VOC 成分ごとの最大オゾン生成能は、アルデヒド類では Ox とともに増加した一方、アルケンと芳香族炭化水素では低下した。(福崎ら, 2018¹⁷) - 東京都においてオキシダント生成に重要な VOC 発生源は、ガソリン車排出ガス、ディーゼル車排出ガス、ガソリン蒸気(給油ロス)、ガソリン蒸気(DBL)、塗装、植物由来のイソプレンの 6 種類であった。(上野ら, 2015¹⁸)
東海	情報なし。
関西	大阪府では、トルエン類やキシレン類の大気中濃度の減少に伴い光化学反応により生成されたと考えられるオキシダントの濃度も減少している。(中戸ら, 2012¹⁹)
瀬戸内	情報なし。
九州	福岡県では、オキシダント濃度の 2 時間平均値との負の相関が最も大きいのは 1,3-ブタジエン(自動車排ガス成分)であり、自動車排ガスがオキシダント生成に強く寄与していることが示唆された。(梶原ら, 2019²⁰)

「VOC 組成とオキシダント生成の関係」の事例(福崎ら, 2018¹⁷)

横浜市と東京都における観測で、2 つの測定局間の移流前後で Ox 濃度とアルデヒド類の最大オゾン生成能が増加し、アルケンと芳香族炭化水素類の最大オゾン生成能が減少した(下図)。とくに、*m,p*-キシレン、*m,p*-エチルトルエン、1,2,4-トリメチルベンゼン、1,2,3-トリメチルベンゼンの芳香族炭化水素類の減少率が高く、首都圏における高濃度 Ox 生成に寄与している可能性が示唆された。

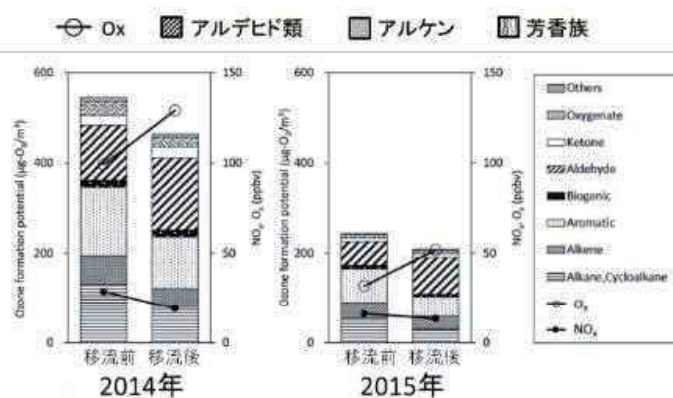


図 4：2 測定局間の移流前後のオゾン生成能の比較

3.1.5. 海風による内陸への輸送

汚染物質の主要な発生源となる工業地帯は沿岸部に位置することが多く、沿岸で排出されたオキシダントや前駆物質が海風によって輸送されることで、内陸で高濃度オキシダントが観測される場合がある。この現象は規模の違いはあるが今回の文献調査の対象 5 地域いずれでも報告されており、全国的に見られる現象と考えられる。

各地域の「海風による内陸への輸送」に関する文献の概要

地域	概要
関東	・ 関東北部と西部に発生した熱的高気圧が朝から夕方まで持続すると、海風により東京湾周辺の前駆物質が輸送され、関東内陸で高濃度オキシダントが観測される。(Hosoi et al., 2011²¹) ・ 東京都から埼玉県東部を対象とした解析では、強い海風が吹く日は対象地域の北部から中部にかけて、弱い海風が吹く日は南部から中部にかけてオキシダント高濃度日が出現しやすい傾向があった。(吉門と西田, 2014²²)
東海	・ 1992 年から 2009 年までの典型的な夏季静穏日の濃尾平野内の常時監視データについて解析を行うと、海風輸送の影響により内陸部ほど午後の Ox 濃度ピーク時刻の遅れが生じていた。(遠藤ら, 2013²³)
関西	・ 京都府南部において、大阪平野から海風により移流してきた汚染気塊が原因となり高濃度オキシダントが観測される事例が確認できた。(平澤ら, 2010²⁴)
瀬戸内	・ 岡山県において、地域的な汚染に加えて大陸から瀬戸内海に越境輸送されてきた NOx が海風により県北部に移流してきた結果オキシダントが高濃度化する事例が確認できた。(西村ら, 2020²⁵)
九州	・ 福岡県では、都市部で発生したオキシダントが上空で高濃度になり海風により輸送されることで、小郡で高濃度オキシダントが観測される現象が報告されている。(山村ら, 2020⁷)

「海風による内陸への輸送」の事例(Hosoi et al., 2011²¹)

関東北部（福島周辺）と西部（長野周辺）に発生した熱的低気圧が朝から夕方まで持続すると、海風により東京湾周辺の前駆物質が輸送され、関東内陸で高濃度オキシダントが観測される(図 5(a))。一方、西部のみに発生した熱的低気圧が東進してきた場合は関東内陸部からの陸風により東京湾周辺の前駆物質の輸送が抑制される(図 5(b))。

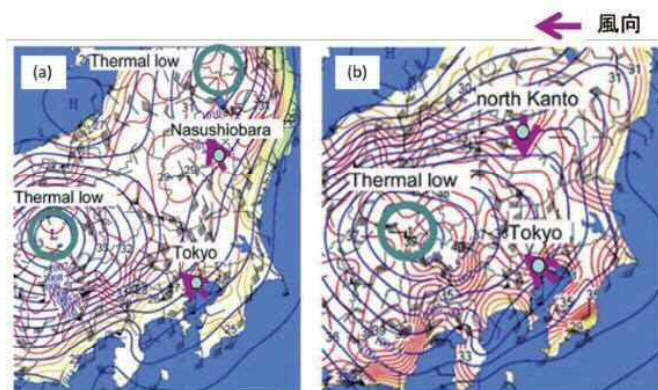


図 5：関東における熱的低気圧と風向の関係

3.1.6. 循環・滞留など

海上や上空等にオキシダントや前駆物質が滞留し、その後の光化学反応と地上部への移動により、地上部のオキシダント濃度の上昇を引き起こし、夜間に滞留する場合は翌日の地上部の濃度に影響を与える。関東や東海では広域的な規模で見られている。

各地域の「循環・滞留など」に関する文献の概要

地域	概要
関東	・ 東京湾で高濃度化した NO_x が相模湾に流入し、生成した高濃度 O_x が海風により内陸へ移動した。(2007 年 8 月) (松隈ら, 2012²⁶) ・ モデル解析では、早朝から日中にかけて発達する混合層内部に、上空に滞留している前日生成の O_x が取り込まれることで、関東内陸の濃度が沿岸部よりも先行して上昇した。(2010 年 8 月) (Kiriya et al., 2015²⁷) ・ 首都圏で見られた O₃ 高濃度事象は、日中の濃度上昇が継続したことで上空に滞留した高濃度の O₃ が、日中に混合層内に取り込まれたこと、さらには、前日の夜間に O₃ 濃度が下がらなかったため、日中は陸域や海域における O₃ のバックグラウンド濃度が通常よりも高かったことに起因するものと考えられた。(2018 年 7 月) (櫻井ら, 2020²⁸)
東海	・ 中部山岳上空に滞留したオキシダントが翌日に沿岸部上空に戻り、平野部のバックグラウンド濃度を高めた。(1995 年 7 月) (北田ら, 1998²⁹)
関西	・ 情報なし。
瀬戸内	・ 夜間に沿岸部沖に集積した一次汚染物資から、翌日の日の出後に O_x が生成し、海風循環に巻き込まれ地上に下降した。(1993 年 4～9 月) (二宮ら, 1994³⁰)
九州	・ 情報なし。

「循環・滞留など」の事例紹介 (松隈ら, 2012²⁶)

領域化学輸送モデル WRF/Chem により、高濃度 O_x が観測された 2007 年 8 月 11 日の関東近郊の O_x 及び NO_x の動態を再現すると以下のような結果になった。

8 時：東京湾内の NO_x が高濃度化する(反対に O_x は低濃度になる)

11 時：高濃度 NO_x を含む
気塊が相模湾に移動、相模湾内の O_x
が高濃度化する

14 時以降：相模湾の高濃度 O_x を含む気塊が
内陸へ移動、関東
広域での高濃度 O_x
の要因になる

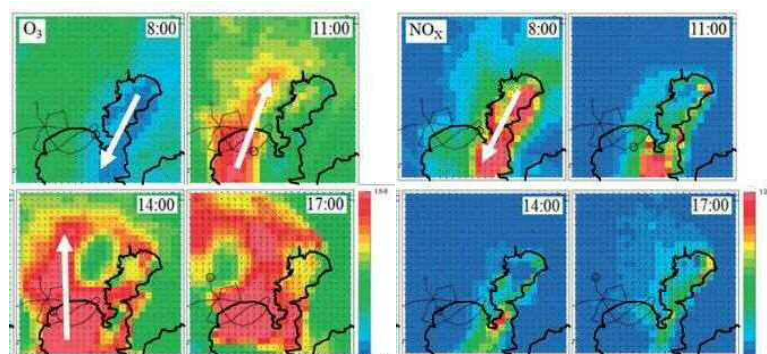


図 6：2007 年 8 月 11 日における関東近郊の O₃ と NO_x の濃度変化

3.1.7. 長距離越境輸送の影響

2007 年に観測された全国的なオキシダントの高濃度化事象について、中国からの越境輸送の影響を化学輸送モデルを用いて検証した文献(大原ら, 2008³¹、黒川ら, 2008³²)では、西日本の方が大きく影響を受けていることが明らかになった。この傾向は近年も継続している (Yoshino et al., 2021³³)一方、日本へ越境輸送されるオキシダントが 2020 年に減少したことを示した文献もある (吉野と高見, 2020³⁴)。

各地域の「長距離越境輸送の影響」に関する文献の概要

地域	概要
関東	・ 越境輸送の影響により全国的に高濃度オキシダントが観測された 2007 年の事例においても、関東ではオキシダント濃度の日最高値が観測された時間が内陸に向かうにつれて遅くなっており、関東では海陸風循環による都市汚染の蓄積の影響も大きいことが示唆された。(早崎ら, 2008 ³⁵)
東海	・ 名古屋市域におけるオキシダントの高濃度パターンは、4、5 月に大きなピークがある大陸からの「移流型」と、7・8 月にピークが出やすい NO _x 、SPM 等も絡んだ光化学反応による「都市反応型」の 2 つのパターンが存在する。(大野と山神, 2006 ³⁶)
関西	・ 兵庫県において、大陸で発生した高濃度オゾンが 2～4 日かけて移流してきた結果高濃度オキシダントが観測された事例がある。(久保ら, 2020 ³⁷)
瀬戸内	・ 広島県において 120 ppb 以上の高濃度オキシダントが観測されるのは、地上付近で海陸風が吹き、かつ上層の空気塊が日本国内で停滞する、あるいは大陸から飛来する時である。(瀬戸ら, 2007 ³⁸)
九州	・ 2007 年に観測されたオキシダント高濃度化事象では、九州における中国由来のオゾンの寄与率は 40%を超えた。(大原ら, 2008 ³¹) ・ 2018 年の福岡県では風向風速から越境輸送の影響を受けやすいと推定される日に実際にオゾン濃度が高くなる傾向が見られた(Yoshino et al., 2021 ³³)。

「長距離越境輸送の影響」の事例(大原ら, 2008³¹)

2007 年 5 月 8 日から 9 日に観測された全国的なオキシダントの高濃度化事象において、大気汚染測定データと東アジアスケールモデルを用いた解析によれば、関東では中国由来の O₃の寄与は 30%未満であるのに対し、九州では 40%を超えていると推定された。

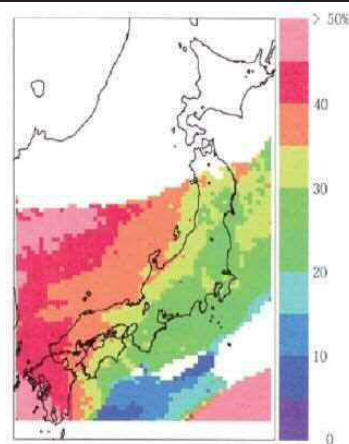


図 7:2007 年 5 月 8 日から 9 日における中国由来の O₃の割合

3.2. 大気汚染対策

3.2.1. 独自性が見られる地方公共団体の取り組み

光化学オキシダント及び前駆物質である窒素酸化物や揮発性有機化合物に対して地方公共団体が実施する大気汚染対策の状況を調べ、他の地方公共団体の参考となるよう独自性のある取り組みを整理した。

(1) 調査方法

1) 対象地域

公害健康被害予防事業の助成事業等の対象地域を含む次の都府県とする。

関東： 千葉県、東京都、神奈川県

東海： 静岡県、愛知県、三重県

関西： 大阪府、兵庫県

瀬戸内：岡山県

九州： 福岡県

2) 調査対象とした資料

各地方公共団体の環境白書、ホームページ等を調査した。また、3.3 で実施した地方公共団体の研究者や行政担当者へのヒアリングで取り組みの効果等について情報を収集した。

(2) 調査結果

1) 光化学スモッグ発生抑制に向けた取組（川崎市）

2022 年に策定した「川崎市大気・水環境計画」³⁹において、NO₂、PM2.5、光化学オキシダントについて以下の目標値を設定し、2030 年度の達成を目指している。

- ・NO₂ の対策目標値（環境基準）下限値（0.04 ppm）の達成（2030 年度の達成局数の割合が 77.8%）
- ・PM2.5 の環境基準の達成維持（2030 年度 100%）
- ・光化学スモッグ注意報発令 0 日
- ・光化学オキシダント高濃度の低減
（光化学オキシダント環境改善評価指標値⁴⁰0.0103 ppm）

光化学スモッグ発生抑制に向けて、周辺自治体と連携した調査等を行い、原因物質の一つである VOC の発生状況等を把握し、その知見を活用することで市民や事業者の自主的な原因物質の削減に向けた取組を促進する。

■ヒアリングで得られた情報：VOC 対策の一環として、横浜市、神奈川県、東京都、千葉市と連携した広域的な VOC 成分調査を実施した。調査及び取組の方向性確認は上記の光化学オキシダント環境改善評価指標値を用いて行っていく予定である。

2) VOC 対策アドバイザーの派遣（東京都⁴¹、川崎市⁴²）

印刷や塗装、脱脂洗浄など VOC を取り扱う中小事業者の排出量削減に向けた自主的な取組を支援することを目的に、地方公共団体が派遣する専門アドバイザーが、VOC 排出削減に向けて簡易測定や助言を行う制度である。東京都は 2005 年、川崎市は 2014 年から開始され、派遣費用は両地方公共団体でも無料である。

■ヒアリングで得られた情報：東京都と川崎市のいずれでも定量的な効果は把握されていない。ただし、東京都ではアドバイザーの指導のとおり対策を実施することで排出濃度が下がった等の報告がある。

3) Clear Sky 実現に向けた大気環境改善促進事業（東京都⁴³⁾

PM2.5 や光化学オキシダントなど大気環境対策の取組を行っている団体や個人を「Clear Sky サポーター」として登録する事業。SNS を活用したフォトコンテスト等も実施する。また、サポーターによる前駆物質削減に向けた取組事例がホームページ上で公開されている。

■ヒアリングで得られた情報：企業（団体）サポーターの登録数については、事業を立ち上げた2019年は伸びたものの、新型コロナウイルス感染症拡大の影響で対面のイベントが難しいこともあり、その後は伸び悩んでいる。2022年度からは個人サポーター制度も開始した。サポーターの登録数やフォトコンテストの投稿数・閲覧数の増加具合や、イベントの効果等を確認し、次の施策に活用している。

4) 光化学オキシダントを対象とした夏期の大気汚染防止対策（岡山県⁴⁴⁾

岡山県大気汚染防止夏期対策本部（本部長：副知事）を設置し、光化学オキシダントによる被害の未然防止に重点を置いた対策を実施している。岡山県では、オキシダントが高濃度になりやすい5月10日～9月10日を「大気汚染防止夏期対策」期間とし、対策期間中は、自動車排出ガス低減のために、ラジオスポット等により、マイカー使用自粛等の啓発を行っている。

■ヒアリングで得られた情報：オキシダント濃度が100 ppbを超えた時点で注意報(120 ppb)より先に「光化学オキシダント情報」という形で注意喚起を出すとともに、緊急時協力工場に対し大気汚染物質削減の協力要請を行っている（2022年度は、情報の発令回数は5回、注意報の発令回数は2回と、2012年度以降で最小であった⁴⁵⁾）。近県の香川県、兵庫県、広島県も同様に注意報より低いレベルで注意喚起を出している。笠岡など県境に近い区域では隣接する県と共同で協力要請を行うこともある。なお、夏期対策については、啓発活動としての意味合いが強いものとなっている。

3.2.2. NOx、VOCに係る国の規制等

国の大気汚染対策について、資料編2に整理した。固定発生源対策として、ばい煙に係る対策、小規模燃焼器対策、VOCの排出抑制対策等について、移動発生源対策として、自動車単体規制や車種規制について記載した。

3.3. 地域の研究者や行政担当者へのヒアリング

(1) 調査対象とした地方公共団体

関東：東京都（行政）、川崎市（行政及び地方環境研究所）

東海：愛知県（行政及び地方環境研究所）、名古屋市（地方環境研究所）

関西：大阪府（行政及び地方環境研究所）

瀬戸内：岡山県（行政及び地方環境研究所）

九州：福岡県（行政）

(2) 調査結果

① 事務局の取りまとめに対する意見交換(修正点、改善点)

- ・文献情報で扱う濃度レベルを分けて整理すると良い(120 ppb 以上、60 ppb 以上等)
- ・多くの文献の中で行政担当者が特に読むべき文献が分かると良い。
- ・行政担当者でも理解できるような報告書としてほしい。

② 取りまとめに期待する事項

- ・地域の高濃度の要因や Ox 濃度が下がらない要因が分かるような情報が欲しい。
- ・注意報等を出す際の判断に役立つ情報が整理されるとありがたい。

③ 近年のオキシダント濃度に寄与していると考えられる要因

- ・川崎市の過去 30 年の気象データを解析で、気温の上昇、風速の低下、日射量の増加といった Ox が高濃度になりやすい変動がみられた。夜間の Ox 濃度の増加は、NO 濃度の低下に伴うタイトレーション効果の低下によるものと考えられる。
- ・大阪府では、Ox 濃度の年平均値は増加している一方で、120 ppb 以上の高濃度日の日数は減少しているのは発生源対策が進んだ結果と考えられる。
- ・福岡県では高濃度の発生時期や時間から移流の影響が大きいと考えている。

④ 地域内で高濃度になりやすい地域、前駆物質の排出量が多い地域

- ・発生源直近の測定局ではなく、その周辺地域の測定局で高いことが多い。
- ・前駆物質の排出量が多いのは臨海部に多く、海風が吹いている場合はそこから内陸部に運ばれる。河川に沿って汚染物質が移流する現象がみられる。

⑤ これまでのオキシダント対策の実施と効果

3.2.1.「独自性が見られる地方公共団体の取り組み」に記載した。

⑥ NOx や VOC の経年的な排出量データ

- ・独自に集計を行っている地方公共団体もあるが、多くは環境省等の集計結果を活用してほしいとの回答であった。

⑦ まとめ

- ・地域ごとの主な前駆物質の発生源や高濃度オキシダントが観測されやすい気象条件など、オキシダント汚染の特徴についてはそれぞれの地域である程度把握されていた。
- ・一方、その地域でオキシダントの高濃度化に最も効いている要因など、地域のオキシダント対策を検討するために必要な情報については多くの地域で未解明であり、地方公共団体の担当者が求めている情報であった。
- ・そのため、次年度の調査研究ではそれらの情報を解明することを目的とする必要がある。

3.4. 光化学オキシダント濃度の経年変化

文献調査を実施するにあたって、地域ごとのオキシダント汚染の状況を把握するために、各地域の常時監視局で得られたデータを用いて、オキシダント及びその前駆物質濃度を整理した。

3.4.1. 光化学オキシダント(Ox)日最高 8 時間値 (資料編 4-1 参照)

Ox 日最高 8 時間値を都府県別・月別に 5 年ごとの平均値として整理した。ここでは春季は 5 月、夏季は 8 月を例として説明する。

5 月と 8 月のオキシダント濃度の長期推移は、1991～1995 年度にオキシダント濃度が低かった

都府県では近年にかけて上昇傾向を示し、オキシダント濃度が高かった都府県では概ね横ばいで推移した。関東の 8 月も 2001～2005 年度までは同様の傾向で推移したが、2006～2010 年度以降減少に転じた。

都府県間の濃度を比較すると、上記のように都府県間でのオキシダントの濃度差は 1991～1995 年度頃には大きかったが、2016～2020 年頃には小さくなった。この傾向は 5 月に強く、8 月は近年でも都府県間の濃度差が相対的に大きかった。

月別の濃度を比較すると、埼玉県と群馬県を除くいずれの都府県でも、30 年間を通して 5 月に高く、8 月に低い傾向が継続した。埼玉県と群馬県は 5 月と 8 月が 1991～2015 年度の間は同程度であったが、2016～2020 年度は他の都府県と同様に 5 月が高く、8 月が低くなった。

3.4.2. 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (資料編 4-2 参照)

注意報発令の濃度レベルである 120 ppb 以上の日数を整理した。

関東では 2000 年度以前は群馬県が最多であったが、2001 年度以降では埼玉県が最多、東京都が次に多く、いずれも、7、8 月の夏季に多かった。

東海では三重県、岐阜県、静岡県で多かったが、2011 年度以降は大幅に減少した。

関西では全期を通じて奈良県の日数が多く、次いで大阪府が多いが、経年的には減少傾向にあった。京都府と滋賀県は年代によって増減があり、この増減の傾向は同じであった。

瀬戸内では岡山県と広島県が多いが、広島県では 2011 年度以降に大幅に減少した。近年(2016～2020 年度)では、岡山県は 7、8 月が多いが、その他の 4 県は 5 月が多かった。

九州は全期間を通じて少なかった。また、2001 年度以降は、ほぼすべて春季に出現した。

3.4.3. 窒素酸化物(NOx)濃度 (資料編 4-3 参照)

窒素酸化物(NOx)濃度 1 時間値を都府県別・月別に 5 年平均値として整理した。

いずれの地域でも 2001～2005 年度以降は経年的に減少しており、近年(2016～2020 年度)では地域内の都府県間の濃度差は小さくなった。

地域内で年代や月によらず濃度が高い都府県は、関東では東京都と神奈川県、東海では愛知県と静岡県、関西では大阪府、九州では福岡県が挙げられる。瀬戸内では 4～7 月は香川県が最も高いが、8、9 月では岡山県や広島県が高くなった。

月別の濃度を比較すると、いずれの地域でも 4 月が高く、8 月が低い傾向であった。

3.4.4. 非メタン炭化水素(NMHC)濃度 (資料編 4-4 参照)

非メタン炭化水素(NMHC)濃度 1 時間値を都府県別・月別に 5 年平均値として整理した。

NOx と同様に経年的な濃度変化は減少かつ都府県間の濃度差が小さくなる傾向であった。

また、NOx に比べると都府県ごとの月別濃度の差は小さく、濃度が最大(または最小)となる月は都府県ごとに様々であった。

3.5. 検討会の開催

本調査研究の取りまとめについて有識者から助言をいただくための検討会を開催した。委員は 2.1 に示した 5 名で構成し、年 2 回開催した。

3.5.1. 第1回検討会

【開催日時】 2022年10月3日（月） 10:00～11:35

【議事】(1) 本調査について、(2) 調査研究の作業状況について（文献調査・大気汚染対策の情報収集）、(3) 今後の作業について、(4) その他

【指摘を受けての対応方針】（資料編 5-1 より一部抜粋）

■議事(1) 文献紹介について	①対象とした年代が異なる文献同士の結果の比較する場合には、Ox 汚染状況等を確認して取りまとめる。 ②常時監視データの Ox データを用いる際は測定法の入れ替え時期と校正法の統一時期に留意する。
■議事(2) 大気汚染対策の情報収集について	③SLCF 排出削減について気候変動適応センター等の独自プランの検討状況を確認する。（各自治体を確認したが、独自プランは見つからなかった） ④大阪府の VOC 規制撤廃及びガイドラインへの緩和について、答申や環境審議会の資料等も参考する。
■議事(3) 今後の作業について	⑤ヒアリングの対象に Ox 対策に力を入れている川崎市を追加する。 ⑥大阪周辺の移流について、大阪府の環境農林水産総合研究所の大気環境の担当者にヒアリングを行う。

3.5.2. 第2回検討会

【開催日時】 2023年1月19日（木） 10:00～11:35

【議事】(1) 調査研究の作業状況について(文献調査)、(2)次年度の作業について、(3)地方公共団体へのヒアリングについて、(4)成果発表会について、(5)その他

【指摘を受けての対応方針】（資料編 5-2 より一部抜粋）

■議事(1) 調査研究の作業状況について	①オゾン生成レジームや NO タイトレーション効果に関する海外の事例を、次年度の文献調査で必要に応じて情報を補強する。
■議事(2) 次年度の作業について	②NO タイトレーション効果に関する次年度の解析は最初5年単位で行い、その結果を見て必要に応じて解析期間を短くする。 ③細分化してもその地域の解析に使用できるデータ数が十分であるか等に留意しつつ、解析結果を都府県単位でまとめる。
■議事(3) 地方公共団体へのヒアリングについて	④次年度の取りまとめは、ヒアリング結果を踏まえて気象条件や移流・越境輸送に留意して行う。 ⑤短期間で交代する行政担当者のために、資料は分かりやすい表現となるようにする。
■議事(4) 成果発表会について	⑥対策立案の参考にできるような地域の特徴を次年度の取りまとめで整理する。 ⑦自治体向けに発信する情報であるとわかるように説明する。

4. 考察

3.4.では、常時監視局で得られた過去30年分の測定結果を用いて、都府県ごとにオキシダント

(Ox)及びその前駆物質(NMHC、NOx)の経年変化を整理した。その結果、多くの地域で前駆物質濃度が経年的に減少した(3.4.3.、3.4.4.)一方で、オキシダント濃度の日最高8時間値は近年の夏季に減少が見られた関東を除いて上昇傾向にあった(3.4.1.)。

前駆物質濃度が経年的に減少する中で、オキシダント濃度が上昇した理由として次が考えられる。

- ・NOタイトレーション効果の低下
- ・VOC律速条件下でのNOx濃度の減少
- ・越境汚染やバックグラウンド濃度の上昇

また、近年の関東の夏季のオキシダント濃度の減少の理由として、次の前駆物質の削減効果が考えられる。

- ・VOC律速条件下でのVOC濃度の減少
- ・NOx律速条件下でのNOx濃度の減少

吉門⁸は国内4地域(関東、近畿、愛知、福岡)でNOタイトレーション効果の低下とオキシダント濃度の上昇との関係を解析し、2003～2005年度に対する2010～2015年度のNO濃度が減少した測定地点ほど2～6時のオキシダント濃度が上昇したことを示した。3.4.で解析した5地域のうちの瀬戸内を除く4地域は吉門の解析地域と概ね一致する。吉門はさらに、春季にNOタイトレーション効果の低下よりもオキシダント濃度が上昇していたことはバックグラウンドオキシダント濃度の増加、夏季にNOタイトレーション効果の低下ほどにはオキシダント濃度が上昇していないことはオキシダント対策による削減効果も考えられると考察している。

前駆物質の削減効果については、Fukunaga¹⁶が川崎市を対象に日中のオキシダント生成量の減少を指標として解析した。川崎市の長期的な解析では2006年度まで上昇したオキシダント生成量は2006年度以降減少し、NOx濃度レベルが高いときに支配的であったNOタイトレーション効果の低下の影響が、NOx濃度の低下により支配的でなくなり、前駆物質の削減効果が表れたと推測している。3.4.1.で関東の夏季のオキシダント濃度が減少した時期と一致しており、川崎市に限らず関東の他の地域も同様の要因であったと考えられるが、検証が必要である。

前駆物質の削減効果は地域のオゾン生成レジーム(VOC律速、NOx律速)にも左右されるが、その変化を長期的に評価した文献はない。NOタイトレーション効果の影響も含めて、「6.次年度以降の計画」に示す解析で5地域を対象とした長期的な検証を行う計画である。

5. 結論

近年はオキシダントの前駆物質の濃度は経年的に減少しているにも関わらず、オキシダントの濃度は下がっておらず環境基準値の達成率も低いままである。その要因は地域や季節によって異なり、経年的に変化していることに加え、複数の要因が混在している可能性もあるため、地域ごとに適切なオキシダント対策が求められる。そこで本研究では、地域の前駆物質の排出状況に応じた光化学オキシダント汚染の特徴を、他地域との比較を交えながら、地域の行政担当者が対策立案に活用できるような取りまとめを行うことを目的として、文献レビューを中心とした調査を実施した。本研究は2年度にわたり実施予定のため、1年目である本年度は、次年度の解析対象とする要因及び解析手法の選定を目的とした情報収集を行った。次年度は、地域ごとのオキシダント汚染の特徴を統一した解析手法によって把握することを目的として、追加の文献調査やヒアリング、本年度に収集した既往研究の解析のアップデートを実施する予定である。

本年度の文献調査では、収集した文献(和文、英文)に加えて、検討会委員から情報提供された文献を地域ごと・要因ごとに整理した。その結果、各地域のオゾン生成レジームの分布や前駆物質の排出量の削減効果等について、一定程度把握することができた。ただし、関東を対象とした文献は68編収集出来たのに対し、瀬戸内や九州について解析を行った文献はそれぞれ12編、13編しか収集出来なかった。このように地域ごとの文献数には差が見られ、また、各地域を対象とした文献では異なる解析方法や評価基準が用いられていることもあった。経年的な変化の把握や地域間の比較をさらに効果的に行うために、前述のとおり令和5年度の計画では、5地域に対して統一的な手法を用いた解析を行うことを予定している。解析の対象とする要因には、地域単位での対策立案に有用な「オゾン生成レジーム」、「NOタイトレーション効果」、「前駆物質の排出量の削減効果」に焦点を当て、解析手法については、本年度の文献調査の結果から6.に示す方法を検討した。

また、地方公共団体へのヒアリングの結果から、高濃度オキシダントに関する要因解析が進められている自治体があることや、地域ごとの高濃度オキシダント出現パターンの把握が行われていることが把握できた。地域のオキシダント対策については、ヒアリングと情報収集の結果から、事業者だけでなく市民を対象とした対策事業や研究成果を対策効果の検証に活用する事例など、独自性の高い対策も見られるようになってきている。一方で、その地域でオキシダントの高濃度化に最も効いている要因の把握まではできておらず、これらの情報こそ地方公共団体が必要としている情報であることが確認できた。

本年度の研究では、地域ごとのオキシダント汚染の特徴について、地域ごとに一定程度解析が行われていることやその成果を自治体の方で把握できていることが確認できた。一方で、その結果は時間的、空間的に統一性が無いこと、具体的な対策を講じられるような結果は得られていないことが課題であることも分かった。次年度の本研究では、同一手法による全国的な解析を行うことで各地域のオキシダント汚染の特徴を相対的に把握できるようにする。

6. 次年度以降の計画（課題）

本年度の文献調査の結果、地域や年代によってはオキシダント汚染に関する文献が不足しており、文献調査のみでは地域ごとの特徴の把握や地域間の比較が十分にできないことが課題であると確認できた。そこで、本年度整理した文献に示された解析の中から地域や年代を拡張することで有用な情報が得られるものを選定し、次年度にそれらの解析を実施して、地域や年代の比較を実施する予定である。その際の解析項目としては、オキシダント汚染の要因のうち、地域単位での対策立案に有用な「オゾン生成レジーム」、「NOタイトレーション効果」、「前駆物質の排出量の削減効果」に焦点をあて、地域や季節における主要因を検討する。また、対象とした地域内でも前駆物質の発生源地域と移流を受ける地域が存在することにも留意した整理を行う。

以下にそれぞれの要因について予定している解析手法を示す。地方公共団体のオキシダント対策の担当者でも同様の解析を実施して地域の状況把握ができるように、一般的に入手可能な環境大気常時監視測定データを用いた解析を行う。

■オゾン生成レジーム

- 解析手法：NMHC/NO_x 比を算出し(Sadanaga et al., 2012⁴⁶,単位は ppbvC/ppbv)、その値が8以下なら NMHC 律速、10 以上なら NO_x 律速、その間なら NMHC 律速と NO_x 律速の中間と推

定する。また、週末効果の経年的な変化によりレジームの変遷を説明した文献(Perdigones et al. 2022⁴⁷)も参考に平日と週末のオキシダントと NO_x の関係に着目した解析も行い、NMHC/NO_x 比によって得られた推定結果と比較する。

- 対象とする測定局：1990 年から 2020 年にかけてオキシダントと NMHC、NO_x を測定している継続局を地域ごとにすべて抽出する。
- 使用するデータ：5 地域の常時監視データ(O_x 濃度、NO_x 濃度、NMHC 濃度)を用いて、NMHC/NO_x 比の 1 時間値の月平均値を測定局ごとに算出する。その際、月全体の平均値とは別に、平日のみの平均値、週末のみの平均値も算出する。算出は 1990 年から 2020 年にかけて 5 年ごとに行う。

※NMHC と NO_x の両方を測定している測定局は少ないことが想定されるため、該当する測定局の数によっては異なる測定局であっても地域ごとにデータを平均することも検討する。また、解析に際して、同じ地点でも時間帯や時期によりレジームが変化することがある点(Sakamoto et al., 2019⁴, Sadanaga et al., 2012⁴⁶)や、NMHC/NO_x 比による推定結果と、実際の O_x 濃度と NO_x, NMHC 濃度の関係性が一致しない場合がある点(Sadanaga et al., 2012⁴⁶)、に留意する。

■NO タイトレーション効果

- 解析手法： ΔO_x と $\Delta \text{Titr}(O_3)$ を算出し(吉門, 2019⁸)、夜間の O_x 濃度の経年変化が NO タイトレーション効果の減少によるものであることを確認する。さらに両者を比較することでバックグラウンドオゾンの状況や O_x の対策状況を評価する。 ΔO_x はⅠ期(2010～2015 年)からⅡ期(2016～2020 年)にかけての O_x の 2:00～6:00 の平均値の増加量、 $\Delta \text{Titr}(O_3)$ はⅠ期からⅡ期にかけて NO タイトレーションの減少により見込まれる O_x の 2:00～6:00 の平均値の増加量と定義する。 $\Delta O_x > \Delta \text{Titr}(O_3)$ となる場合、バックグラウンドオゾンの増加の可能性がある。一方、 $\Delta O_x < \Delta \text{Titr}(O_3)$ となる場合、O_x 対策の効果が見られていると考える。

- 対象とする測定局：関東、東海、関西、九州については、吉門(2019)⁸ で解析対象だった測定局と同じ局を対象とする。瀬戸内については、2010 年以降オキシダントと NO、NO_x を測定している局を都府県ごとにいくつか抽出する。測定局の抽出は、近傍の発生源や海からの距離など、濃度に影響する条件に偏りが無いよう考慮して行う。

- 使用するデータ：5 地域の 2010～2020 年の常時監視データ(O_x 濃度、NO_x 濃度、NO 濃度)を用いて、 ΔO_x と $\Delta \text{Titr}(O_3)$ を測定局ごと・季節ごと(春季、夏季)に算出し、値を比較する。

※本解析の対象期間(2010～2020 年)は日本国外の大気環境の変化が大きく、Ⅰ期とⅡ期の 5 年単位ではその影響を正確に捉えられない可能性がある。次年度の解析では、最初はⅠ期とⅡ期に分け、そこで得られた結果によってはより短い期間に分けた解析を検討する。

■前駆物質の排出量の削減効果

- 解析手法：DPO_x を算出し(Fukunaga et al. 2021¹⁶)、経年的に減少していれば削減効果が見られたと考える。同様にオキシダント濃度の日最高値と日最低値の差分(山神, 2020¹⁴)についても算出し、DPO_x と傾向を比較する。DPO_x とは日中に光化学反応により生成されたオゾンの量の指標であり、日中(5:00～20:00)の平均濃度から夜間(前日の 20:00～5:00)の平均濃度を差し引くことで算出する。

- 対象とする測定局：1990年以降オキシダントを測定している継続局を都府県ごとにいくつか抽出する。測定局の抽出は、近傍の発生源や海からの距離など、濃度に影響する条件に偏りが無いよう考慮して行う。
- 使用するデータ：過去30年の常時監視データ(Ox濃度)を用いて、DPOx及び日最高値と日最低値の差分を1年ごとに算出する。その際、用いるデータは暖候期(4～10月)のみとする。

本調査研究に関する学会及び論文発表等

令和4年度は発表等なし

引用文献

- 1 井上和也, 吉門洋, 東野晴行. 関東地方における夏季地表オゾン濃度のNOx,VOC排出量に対する感度の地理分布 第Ⅱ報 光化学指標の実測に基づく推定. 大気環境学会誌. 2010; 45(5): 195-204.
- 2 金道龍, 山口克人, 近藤明, 惣田訓. 大阪・兵庫地域における光化学オキシダント濃度と一次原因物質排出量の関係に関する研究. 大気環境学会誌. 2001; 36(3): 156-165.
- 3 勝間 孝. 香川県における新指標を用いた光化学オキシダント評価について. 香川県環境保健研究センター所報. 2019;18: 38-44.
- 4 Sakamoto, Y., Sadanaga, Y., Li, J., Matsuoka, K., Takemura, M., Fujii, T., Nakagawa, M., Kohno, N., Nakashima, Y., Sato, K., Nakayama, T., Kato, S., Takami, A., Yoshino, A., Murano, K., Kajii, Y.. Relative and absolute sensitivity analysis on ozone production in Tsukuba, a city in Japan. Environmental Science & Technology. 2019; 53: 13629-13635.
- 5 荒川翔太, 山神真紀子, 高柳聡子. 光化学オキシダントのNOx,VOC排出量削減による改善効果の推定, 名古屋市環境科学調査センター年報, 2015; 3: 36-41.
- 6 小田祐一, 結城茜. 静岡県における光化学オキシダントの濃度推移とオゾン感度レジーム. 静岡県環境衛生科学研究所報告. 2021; 63: 59-64.
- 7 山村由貴, 力 寿雄, 中川修平, 山本重一. 福岡県における地域汚染由来の高濃度オゾンに対するNOx,VOC排出量削減の効果. 全国環境研会誌. 2020; 45: 202-212.
- 8 吉門洋. 都市圏周辺のオゾン濃度変化とNOタイトレーション(首都圏を中心に). 大気環境学会誌. 2019; 54(5): 185-193.
- 9 竹内淨, 関昌之, 井上康明, 岩瀬義男. 川崎市田島局における光化学オキシダント濃度と一酸化窒素濃度に関する研究. 大気環境学会誌. 2009; 44(1): 52-57.
- 10 竹内庸夫. 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. 季刊全国環境研会誌. 2012; 37(4): 178-186.
- 11 川上七恵. 光化学オキシダント高濃度時のNO, NO2, NMHCに関する研究—愛知県における日ごと及び測定局ごとの解析—. 愛知県環境調査センター所報. 2009; 36: 1-6.
- 12 坂本美徳, 嶋寺光, 瀬戸文久, 近藤明, SHRESTHA Kundan Lal, 加賀昭和, 井上義雄, 平木隆年. 数値解析による兵庫県内の光化学オキシダントの濃度分布及び季節変動要因の検討. 大気環境学会誌. 2010; 45(2): 89-95.
- 13 隅本典子, 長田健太郎. 山口県における光化学オキシダント監視状況について. 山口県環境保健センター所報. 2021; 62: 54-58.
- 14 山神真紀子. 光化学オキシダント濃度の日内変動の推移. 名古屋市環境科学調査センター年報. 2020; 9: 15-18.
- 15 吉門洋. 首都圏周辺における非メタン炭化水素濃度低減の実態と高濃度オゾン低減効果の検証. 大気環境学会誌. 2015; 50(1): 52-57.
- 16 Fukunaga, A., Sato, T., Fujita, K., Yamada, D., Ishida, S., Wakamatsu, S.. Relationship between Changes over Time in Factors, Including the Impact of Meteorology on Photochemical Oxidant Concentration and Causative Atmospheric Pollutants in Kawasaki. Atmosphere. 2021; 12: 1072.
- 17 福岡有希子, 石倉淳士, 星純也, 小森陽昇, 志村徹, 上野広行. 横浜市と東京都における夏季の揮発性有機化合物(VOC)同時観測調査. 大気環境学会誌. 2018; 53(1), 13-24.

- 18 上野広行, 内田悠太, 石井康一郎, 齊藤伸治, 秋山薫, 横田久司. 東京都における大気中揮発性有機化合物の組成と OH ラジカルとの反応による消失を考慮した CMB 解析. 大気環境学会誌. 2015; 50 (5): 207-225.
- 19 中戸 靖子, 宮本 弘子, 西村 理恵, 上田 真彩子. 大阪府における大気中揮発性有機化合物 (VOC) 濃度とオゾン生成への寄与について. 大阪府環境農林水産総合研究所. 2012; 5: 13-18
- 20 梶原佑介, 力寿雄, 馬場義輝, 山村由貴, 中川修平, 濱村研吾. 光化学オキシダント及び PM_{2.5} 生成に寄与する揮発性有機化合物(VOC)の発生源寄与解析. 福岡県保健環境研究所年報. 2019; 46: 77-82.
- 21 Hosoi, S., Yoshikado, H., Sekiguchi, K., Wang, Q., Sakamoto, K.. Daytime meteorological structures causing elevated photochemical oxidants concentrations in north Kanto, Japan. Atmospheric Environment. 2011; 45(26): 4421-4428
- 22 吉門洋, 西田由佳. 関東中央部における近年の高濃度オキシダントに関わる気候変化の解析. 大気環境学会誌. 2014; 49 (1): 59-67.
- 23 遠藤文倫, 早崎将光, 川村隆一. 中部日本の夏季静穏日における光化学オキシダントの日変化と関連する熱的局地循環. 大気環境学会誌. 2013; 48(5): 234-242.
- 24 平澤幸代, 谷口延子, 高倉尚枝, 河村秀一, 日置正, 藤波直人. 京都府南丹地域における大気環境調査結果. 京都府保健環境研究所年報. 2010; 55: 72-78.
- 25 西村佳恵, 平岡諒也, 山田克明, 赤木正章, 野村茂, 小川登, 林隆義. 岡山県における光化学オキシダント情報・注意報の広域発令の要因解析について(令和元年度). 岡山県環境保健センター年報. 2021; 44: 1-10.
- 26 松隈大亮, 板橋秀一, 鶴野伊津志, 若松伸司. 丹沢山地における高濃度オゾンの広域移流現象の数値解析. 大気環境学会誌. 2012; 47 (4): 173-178.
- 27 Kiriya, Y., Shimadera, H., Itahashi, S., Hayami, H., Miura, K.. Evaluation of the Effect of Regional Pollutants and Residual Ozone on Ozone Concentrations in the Morning in the Inland of the Kanto Region. Asian journal of atmospheric environment. 2015; 9: 1-11.
- 28 櫻井達也, 山谷柚香, 吉岡実里, 大森大悟. オゾンゾンデ観測に基づく首都圏光化学オキシダント高濃度事象の解析. 大気環境学会誌. 2020; 55 (5): 230-239.
- 29 北田敏広, 岡村聖, 中西秀樹, 森博明, 石坂隆. 中部地方の夏季局地風場におけるオゾンの生成と輸送の 3 次元特性数値シミュレーションと航空機観測結果を用いた推定. 地球環境シンポジウム講演論文集. 1998; 6: 97-102.
- 30 二宮久, 金子敏明, 野間そま子, 服藤峻, 新次美. 新居浜地区における高濃度オキシダント発生要因の検討. 愛媛県環境保全センター所報. 1994; 14: 7-16.
- 31 大原利眞, 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. 2008; 43: 198-208.
- 32 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. 2008; 43(4): 209-224.
- 33 Yoshino, A., Takami, A., Hara, K., Nishita-Hara, C., Hayashi, M., Kaneyasu, N.. Contribution of Local and Transboundary Air Pollution to the Urban Air Quality of Fukuoka, Japan, Atmosphere. 2021; 12(4): 431.
- 34 吉野彩子, 高見昭憲. 長崎福江島における大気質観測 - COVID-19 による越境大気汚染への影響 -. 大気環境学会誌. 2020; 55 (6): 248-251.
- 35 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. 2008; 43 (4): 225-237.
- 36 大野隆史, 山神真紀子. 名古屋市域における光化学オキシダント濃度の経年変化とその特徴. 名古屋市環境科学研究所報. 2006; 35: 11-20.
- 37 久保智子, 飯野博夫, 山本一巳, 中坪良平, 瀧本充輝, 高石豊. 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. ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター紀要. 2020; 10: 12-18.
- 38 瀬戸信也, 宇津正樹, 大原真由美, 砂田和博, 日浦盛夫. 広島県の瀬戸内沿岸域における夏季晴天時の光化学オキシダント日最高濃度と後方流跡線との関連性. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2007; 15: 5-9.
- 39 川崎市. 川崎市大気・水環境計画について.

-
- <https://www.city.kawasaki.jp/300/page/0000138183.html> (参照 2023-02-01)
- 40 川崎市.川崎市大気・水環境計画 付属資料. 2022.
https://www.city.kawasaki.jp/300/cmsfiles/contents/0000138/138183/7_keikaku_fuzokusiryou2.pdf
(参照 2023-02-01)
- 41 東京都環境局. VOC 対策アドバイザー派遣制度.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/voc/adviser/adviser.html (参照 2023-02-01)
- 42 川崎市. 川崎市 VOC 対策アドバイザー派遣制度について.
<https://www.city.kawasaki.jp/300/page/0000062800.html> (参照 2023-02-01)
- 43 東京都環境局. Clear Sky 実現に向けた大気環境改善促進事業.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/clearsky/index.html (参照 2023-02-01)
- 44 岡山県環境文化部環境企画課. 岡山県環境白書 2021. 2021.
- 45 岡山県環境文化部環境管理課. 令和 4 年度大気汚染防止夏期対策の結果について.
https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/804285_7552198_misc.pdf (参照 2023-02-01)
- 46 Sadanaga, Y., Sengen, M., Takenaka, N., Bandow, H. .Analyses of the ozone weekend effect in Tokyo, Japan: regime of oxidant ($O_3 + NO_2$) production. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012; 12(2): 161-168.
- 47 Perdignes, B. C., Lee, S., Cohen, R. C., Park, J. H., & Min, K. E. .Two Decades of Changes in Summertime Ozone Production in California's South Coast Air Basin. *Environmental Science & Technology*. 2022; 56(15): 10586-10595.

資料編目次

1.地域ごとの光化学オキシダントの高濃度要因に関する文献調査結果

1.1. オゾン生成レジーム	27
1.2. NO タイトレーション効果	30
1.3. 前駆物質の排出量の削減効果	32
1.4. VOC 組成とオキシダント生成の関係	33
1.5. 海風による内陸への輸送	36
1.6. 循環・滞留など	40
1.7. 長距離越境輸送の影響	42

2.大気汚染対策：NO_x、VOC に係る国の規制等（1991 年以降を中心に）

2.1. 固定発生源対策	45
2.2. 移動発生源対策	47

3.地域の研究者や行政担当者へのヒアリング

3.1. 調査対象	49
3.2. 調査内容	49
3.3. 調査結果	49

4.オキシダント及び前駆物質濃度の経年変化

4.1. 光化学オキシダント(O _x)日最高 8 時間値	53
4.2. 光化学オキシダント(O _x)日最高値が 120 ppb 以上の日数	63
4.3. 窒素酸化物(NO _x)濃度	68
4.4. 非メタン炭化水素(NMHC)濃度	78

5.検討会の開催概要及び検討委員の指摘事項

5.1. 第 1 回検討会	88
5.2. 第 2 回検討会	90

1. 地域ごとの光化学オキシダントの高濃度要因に関する文献調査結果

1.1. オゾン生成レジーム

表 1-1 オゾン生成レジームに係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東、関西	1990～2002年度 関東：1都6県 関西：滋賀県を除く2府3県	オゾン生成ポテンシャルの低い日ではほとんど全ての地点でOxの"週末上昇効果"がみられるものの、オゾン生成ポテンシャルが高くなるに従って、多くの地点で反転現象が見いだされた。類似した現象が空間的・体系的に生じており、比較的高いオゾン生成ポテンシャルの場合、発生源地域では"週末上昇効果"がみられるが、発生源地域から離れるに従って反転現象がみられた。オゾン生成レジームの時間・空間的变化があるものと推測された。	1
日本全域	2005～2019年 東アジア	2015年から2019年にかけて、NO ₂ の減少に伴い東アジア全域でHCHO(ホルムアルデヒド)/NO ₂ 比が増加しており、これはレジームがVOC律速からNOx律速に緩やかに移行していることを示唆するものである。	2
日本全域		NOx-limitedおよびVOC-limitedのO ₃ 生成に関する政策関連の議論に関するレビューから、NOx排出量の減少によるO ₃ の増加は、一般に光化学生産が少ない冬季および夜間に見られ、夏季のO ₃ の高パーセンタイルまたは日最高値はNOx排出量の減少に伴って減少する傾向があることが分かった。	3
関東	1990～2002年度 1都6県	NMHC/NOx比は時間空間的に多様であり、ダイナミックに変化していることがわかった。週末効果の反転現象を利用してHC-limitedとNOx-limitedの境界値をみつもり、関東ではNMHC/NOx=7～16(5-15時平均濃度による比)の間にあるものと推定した。	4
関東	1990～2011年度 関東1都6県	常時監視データを用いて前駆物質濃度とOx生成量との関係を解析した結果、関東地方は大局的にはVOC-sensitiveの状態にあった。	5
関東	2002年6月～8月 東京都、埼玉県、群馬県	オゾン高濃度日における地点ごとのオゾン日最高濃度に対する感度レジームの地理分布を推定した結果、都心部およびその周辺のわずかな地域ではVOC-sensitiveであるが、その他の地域は大部分がNOx-sensitiveであると推定された。	6

¹ 神成陽容. 関東・関西地域における光化学オキシダント濃度の週末効果に関する解析 第1報 二種類の週末効果反転現象の発見. 大気環境学会誌. 2006; 41 (4): 209-219.

² Itahashi, S., Irie, H., Shimadera, H., Chatani, S.. Fifteen-Year Trends (2005–2019) in the Satellite-Derived Ozone-Sensitive Regime in East Asia. A Gradual Shift from VOC-Sensitive to NOx-Sensitive. Remote Sensing. 2022; 14: 4512.

³ Akimoto, H., Tanimoto, H.. Rethinking of the adverse effects of NOx-control on the reduction of methane and tropospheric ozone—Challenges toward a denitrified society. Atmospheric Environment. 2022; 277: 119033.

⁴ 神成陽容. 関東・関西地域における光化学オキシダント濃度の週末効果に関する解析 第2報 ダイナミックに変化するオゾン生成レジームの検証. 大気環境学会誌. 2006; 41 (4), 220-233.

⁵ 上野広行, 齊藤伸治, 國領和夫. 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. 2015; 50 (6): 257-265.

⁶ 井上和也, 安田龍介, 吉門洋, 東野晴行. 関東地方における夏季地表オゾン濃度のNOx, VOC排出量に対する感度の地理分布 第I報 大小2種類の植物起源VOC排出量推定値を入力した場合の数値シミュレーションによる推定. 大気環境学会誌. 2010; 45 (5): 183-194.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	2005年4月～ 2008年3月 東京都	週末効果は夏季だけではなく冬季にも見られ、週末効果が見られた日はレジームが NMHC 律速になる。しかし、一般的に NMHC 律速の場合の NMHC/NO _x 比は NO _x 律速の場合の NMHC/NO _x 比より小さくなるはずだが、週末効果が見られた日にはその傾向は見られなかった。	7
関東	2006年7月、8月 東京都、埼玉県	夏季の晴天・高温日のオゾンが日最高濃度を示す時間帯において、東京都・埼玉県内の 5 地点で同時にオゾン/全硝酸濃度比を求めた結果、都心部の 2 地点を除くすべての地点で NO _x - sensitive であると推定された。	8
関東	2013年度 栃木県小山市	注意報発令日において NMHC/NO _x 比が高い傾向を示した。	9
関東	2017年8月21～28日 つくば市	オゾン発生量は朝と夕方は VOC 律速、日中は NO _x 律速になり、このレジームの変動は主に NO の枯渇によって引き起こされている。また、午前中の VOC 律速の時間帯の影響により、その日全体のレジームが決定されている。	10
関東	2030年の改善ケース 東京都、群馬県	オゾン生成量の等値線図を参考に NO _x 及び VOC の推計濃度をグラフにプロットすると、東京都は VOC 律速の状態、群馬県は混合律速の状態となる。	11
東海	2002～2006年度 岐阜県	O _x が 100ppb 以上の高濃度日は 60ppb 未満の環境基準を超えない日に比べて、NMHC 濃度が高く、逆に NO _x 濃度が低い傾向を示し、NMHC/NO _x 比が高い結果となった。	12
東海	2005年6月25日 愛知県名古屋市	高濃度日を対象としたシミュレーションモデルによる計算結果では、NO _x 排出量を 2005 年度比で約 70%以下に削減することで O _x 濃度の改善に効果が現れ、VOC 排出量の削減ではほとんど効果が現れないことが示唆された。	13
東海	2018年度 静岡県	感度レジームの状態は、2 局はやや NO _x 律速領域寄り、1 局はやや VOC 律速領域寄りにあるが、ほぼ遷移領域に近く、残る 4 局は遷移領域に位置していた。	14

⁷ Sadanaga, Y., Sengen, M., Takenaka, N., Bandow, H. Analyses of the ozone weekend effect in Tokyo, Japan: regime of oxidant (O₃+NO₂) production. *Aerosol and Air Quality Research*. 2012; 12: 161–168.

⁸ 井上和也, 吉門洋, 東野晴行. 関東地方における夏季地表オゾン濃度の NO_x, VOC 排出量に対する感度の地理分布 第 II 報 光化学指標の実測に基づく推定. *大気環境学会誌*. 2010; 45 (5): 195-204.

⁹ 齋藤由実子, 石原島栄二, 館野雄備, 篠崎絵美. 栃木県における光化学オキシダントの特性解析調査(第 3 報). *栃木県保健環境センター年報*. 2014; 19: 91-98.

¹⁰ Sakamoto, Y., Sadanaga, Y., Li, J., Matsuoka, K., Takemura, M., Fujii, T., Nakagawa, M., Kohno, N., Nakashima, Y., Sato, K., Nakayama, T., Kato, S., Takami, A., Yoshino, A., Murano, K., Kajii, Y. : Relative and absolute sensitivity analysis on ozone production in Tsukuba, a city in Japan. *Environmental Science & Technology*. 2019; 53: 13629–13635.

¹¹ 齋藤元, 朝日弘美. 発電時の大気汚染物質を考慮した電気自動車の環境影響評価. *日産技報*. 2021; 87: 101-106.

¹² 角田寛. 岐阜県における最近 5 ケ年の光化学オキシダントの状況. *岐阜県保健環境研究所報*. 2008; 27: 1-8.

¹³ 荒川翔太, 山神真紀子, 高柳聡子. 光化学オキシダントの NO_x, VOC 排出量削減による改善効果の推定. *名古屋市環境科学調査センター年報*. 2015; 3: 36-41.

¹⁴ 小田祐一, 結城茜. 静岡県における光化学オキシダントの濃度推移とオゾン感度レジーム. *静岡県環境衛生科学研究所報告*. 2021; 63: 59-64.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関西	1988～2008 年 大阪府	常時監視データによるレジーム解析の結果、NO _x 律速の局が多いため非メタン炭化水素(NMHC)濃度が低下しても、PO 濃度の低下はわずかにとどまった。また NMHC 濃度が低い局では、HC 対策の効果は顕れず、PO 濃度が上昇した。	15
関西	1990～2002 年度 滋賀県を除く 2 府 3 県	NMHC/NO _x 比は時間空間的に多様であり、ダイナミックに変化していることがわかった。週末効果の反転現象を利用して HC - limited と NO _x - limited の境界値をみつかり、関西では NMHC/NO _x =6～12 (5 - 15 時平均濃度による比)の間にあるものと推定した。	4
関西	1991～1995 年 大阪・兵庫	2 ボックスモデルにより大阪、阪神地域では HC 排出量の削減により O ₃ 濃度は減少するが、HC 排出量の削減が無く、NO _x の排出量削減率が小さいとオゾン濃度は増加することが示された。播磨地域では HC 排出量の削減により O ₃ 濃度はほとんど減少しないが、NO _x の排出量削減により O ₃ 濃度は顕著に低下した。	16
関西	2006～2008 年、 4～9 月 大阪府	平日 - 土曜間について NO _x と O _x (O ₃ と NO ₂ の和)濃度の変動からオゾン生成レジームについて推定すると 2006 年の平日から土曜にかけては境界領域、2007 年の平日は MMCs - limited、2008 年の土曜は NO _x - limited であるとされた。	17
瀬戸内	1974 年度～2018 年度 香川県	NMHC/NO _x 比を解析し、香川県での直近 10 年間の光化学オキシダントは NO _x 律速側の状態であった。	18
九州	2018 年 6 月～8 月 福岡県	高濃度日を対象に化学輸送モデルを用いて解析した結果、VOC 排出量削減が福岡県内のオゾン濃度変化に与える影響は小さく、NO _x 排出量削減は NO _x 排出量の多い福岡市・北九州市を含む福岡県北側ではオゾン濃度が増加させ、福岡市より南側のエリアでは減少させることが判った。	19

¹⁵ 山本勝彦. 大阪における光化学オキシダント生成レジームに関する考察. 大阪府立環境農林水産総合研究所研究報告(Web). 2014; 1: 9-14.

¹⁶ 金道龍, 山口克人, 近藤明, 惣田訓. 大阪・兵庫地域における光化学オキシダント濃度と一次原因物質排出量の関係に関する研究. 大気環境学会誌. 2001; 36(3): 156-165.

¹⁷ 藤原大, 定永靖宗, 竹中規訓, 坂東博. 大阪府におけるオゾンとその前駆物質の週内変動. 大気環境学会誌. 2012; 47(2): 75-80.

¹⁸ 勝間 孝. 香川県における新指標を用いた光化学オキシダント評価について. 香川県環境保健研究センター所報. 2019; 18: 38-44.

¹⁹ 山村由貴, 力 寿雄, 中川修平, 山本重一. 福岡県における地域汚染由来の高濃度オゾンに対する NO_x, VOC 排出量削減の効果. 全国環境研会誌. 2020; 45 (4): 51-61.

1.2. NO タイトレーション効果

表 1-2 NO タイトレーション効果に係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東 東海 関西 九州	2003～2005 年度、 2010～2015 年度	2003～2005 年度に対する 2010～2015 年度の夜間の O _x 濃度変化に関して、夏は O _x 増加幅が NO タイトレーションの減少幅を下回る傾向があり、春は逆に O _x 増加幅の方が大きい傾向があった。	20
関東	1985 年度、1995 年度、 2005 年度 川崎市田島局	8月の田島局では、O _x 日最高濃度は、NO による O _x 生成の緩和作用と NMHC による O _x 生成の促進作用が競合した結果に強く影響されると考えられた。	21
関東	1989 年度～2011 年度、 埼玉県	最近の地域間濃度差の減少には一酸化窒素濃度低下によるオゾン分解の減少が関与していると推定された。	22
関東	1995 年～2008 年	日曜日の早朝は NO を排出する大型トラックの走行量が少なくなるため、NO _x に占める NO ₂ の比率が増加する。オゾン発生を抑制する NO が少なくなると、NO ₂ から光解離したオゾンが蓄積するためと考えられる。	23
関東	2001 年度～2011 年度 群馬県	過去 10 年間の O _x 濃度の変動を解析した結果、O _x 濃度はほぼ全ての調査地点で増加傾向にあり、特に都市部で顕著であった。原因の一つとして低濃度側のボトムアップを示したが、その理由として他地域からの移流及び NO _x 濃度の低下に加えて O _x 濃度の測定法の変更及び成層圏オゾンの降下量増進が示唆された。	24
関東	2003 年 7～8 月 千葉県	船橋市印内における O _x 高濃度日における NO は O ₃ が高いときに非常に低く推移する。	25
関東	2009～2012 年度、 2016～2019 年度 群馬県	PO 濃度を比較した結果、O _x 濃度増加の要因の一つとして NO _x 減少による NO タイトレーション効果の低下が示唆された。	26
関東	2018 年 7 月 23～24 日	オゾンゾンデ観測データでは、O ₃ 濃度は放球時から高度が上がるにつれて徐々に上昇し、同時刻に上空 300 m 程度までは海風が卓越していたため、その範囲では海域から同一の空気塊が流入していたものと考え、その高度までの O ₃ 濃度の鉛直勾配には NO タイトレーション効果の関与があったと考えた。	27

²⁰ 吉門洋. 都市圏周辺のオゾン濃度変化と NO タイトレーション(首都圏を中心に). 大気環境学会誌. 2019; 54 (5): 185-193.

²¹ 竹内浄, 関昌之, 井上康明, 岩瀬義男. 川崎市田島局における光化学オキシダント濃度と一酸化窒素濃度に関する研究. 大気環境学会誌. 2009; 44 (1): 52-57.

²² 竹内庸夫. 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. 季刊全国環境研会誌. 2012; 37(4): 178-186.

²³ 石井康一郎, 上野広行. 東京都周辺における 1995 年から 2008 年の夏期高濃度オキシダントの出現状況の変化. 東京都環境科学研究所年報. 2011; 2011: 145-151.

²⁴ 一条美和子, 齊藤由倫, 熊谷貴美代, 田子博. 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. 2013; 45: 30-37.

²⁵ 押尾敏夫. 光化学オキシダントによる大気汚染に関する研究. 千葉県環境研究センター年報. 2007; 5: 68-69.

²⁶ 坂本祥一, 熊谷貴美代, 田子博. 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. 群馬県衛生環境研究所年報. 2020; 52: 35-42.

²⁷ 櫻井達也, 山谷柚香, 吉岡実里, 大森大悟. オゾンゾンデ観測に基づく首都圏光化学オキシダント高濃度事象の解析. 大気環境学会誌. 2020; 55 (5): 230-239.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
東海	1993 年度 愛知県名古屋市	NO、NO ₂ 、オゾンの連続観測から、オゾン生成消滅に関わる反応の内、NO _x が最も関与している点を実証できた。また、オゾン生成で NO _x がおおむね主体となるものの炭化水素の影響も重畳していることが把握できた。	28
東海	2007 年 5 月～9 月 愛知県	朝方の高濃度の NO は局所的な朝方の O _x 濃度を下げっており、朝方の高濃度の NO ₂ や NMHC が、広域的に O _x 濃度を上げていることが示唆された。	29
関西	2006 年～2008 年の 4 月～9 月、大阪府	NO による O ₃ 消失反応について週末を土曜と日曜に分けて考えると 2006 年の平日から土曜および 2008 年の平日から土曜、土曜から日曜のオゾン濃度増加については大きな寄与を示していると考えられた。	17
関西	2008 年 兵庫県	O ₃ 濃度の数値解析の結果、5 月は日本海側から流入した気塊が兵庫県下全域を覆い、地域的に排出された NO _x (NO)による O ₃ の消失反応により O ₃ 濃度の空間分布が生じていると考えられた。	30
瀬戸内	1974 年度～2018 年 度 香川県	1981 年から 2017 年までの光化学オキシダントの漸増が NO タイトレーション効果の減少によるものであることが推察された。	18
瀬戸内	2011 年～2019 年 山口県	北部地域が他の地域より高いのは、北部地域の測定局周辺には工場等の汚染発生源がないため、一酸化窒素による O _x の消費が少ないこと、地理的要因により越境汚染があった場合にはその影響を受けやすいためと考えられる。	31

²⁸ 竹川秀人, 箕浦宏明. 大気環境 都市大気の実態と挙動解析 汚染大気の光化学反応. 豊田中央研究所 R&D レビュー. 2000; 35 (1): 13-20.

²⁹ 川上七恵. 光化学オキシダント高濃度時の NO, NO₂, NMHC に関する研究—愛知県における日ごと及び測定局ごとの解析—. 愛知県環境調査センター所報. 2009; 36: 1-6.

³⁰ 坂本美徳, 嶋寺光, 瀬戸文久, 近藤明, SHRESTHA Kundan Lal, 加賀昭和, 井上義雄, 平木隆年. 数値解析による兵庫県内の光化学オキシダントの濃度分布及び季節変動要因の検討. 大気環境学会誌. 2010; 45 (2): 89-95.

³¹ 隅本典子, 長田健太郎. 山口県における光化学オキシダント監視状況について. 山口県環境保健センター所報. 2021; 62: 54-58.

1.3. 前駆物質の排出量の削減効果

表 1-3 前駆物質の排出量の削減効果に係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東、東海、近畿	2000 年 8 月 3 日（関東）、2000 年 7 月 19 日（東海、近畿）	光化学オゾン濃度および人口曝露を緩和するための VOC 排出削減の効果を日本上空で推定した。大気シミュレーションにより VOC を削減したエリアでは、効果が最大で 10 倍と大きく異なり、この効果の空間分布と産業の排出源位置データを用いて計算したところ、川上産業（石油製品、石炭製品など）は川下産業（プラスチック製品など）よりも高い削減効果を示した。	32
関東	1989 年度～2011 年度、埼玉県	2005 年度以降の高濃度出現の減少傾向には揮発性有機化合物対策の効果が現われていると推定された。	22
関東	1990 年から 2019 年 神奈川県川崎市	日中平均の Ox 濃度から前日の夜間平均の Ox 濃度を差し引いた値であるオキシダント生成量（ DPOx ）は、4 月から 10 月にかけては 2006 年頃から減少傾向にあり、この指標は川崎市の NOx や VOC の排出量削減の効果を反映していることが分かりました。	33
関東	2000 年～2005 年	NOx と VOC の削減は、東京都心周辺地域の日中の最大オゾン濃度の上昇に寄与しているが、関東地方の他の地域では減少していることが確認された。 NOx 削減のケースでは、平野部の広い範囲で日中の最大オゾンが増加した。一方、VOC の削減は関東全域でオゾン濃度の低減に効果的に作用した。	34
関東	2000～2011 年	検討対象である関東平野中央部の全体としては、 NMHC 濃度低減の効果により Ox 高濃度日が顕著に減少したと判定できた。	35
関東	2001 年～2021 年 東京都	ポテンシャルオゾンは夏季の昼間に減少が見られ、これは VOC 等の低減効果によるものと考えられた。	36
関東	2030 年の改善ケース	化学物質輸送モデルにより大気汚染物質の平均大気中濃度の 2030 年の増減を推定した結果、BEV 導入による NOx 濃度の減少を確認することができた一方で、オゾン濃度の僅かな上昇も確認することができた。	11
東海	2011～2018 年度 愛知県名古屋市	Ox の常時監視測定局における ΔOx （日最高値と日最低値の差分）の経年的変化は、14 局中 12 局で低下傾向にあり、排出量の削減効果が表れていた。	37

³² Inoue, K., Tonokura, K., Yamada, H. Modeling study on the spatial variation of the sensitivity of photochemical ozone concentrations and population exposure to VOC emission reductions in Japan. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019; 12: 1035–1047.

³³ Fukunaga, A., Sato, T., Fujita, K., Yamada, D., Ishida, S., Wakamatsu, S. Relationship between Changes over Time in Factors, Including the Impact of Meteorology on Photochemical Oxidant Concentration and Causative Atmospheric Pollutants in Kawasaki. *Atmosphere*. 2021; 12: 1072.

³⁴ Kiriya, Y., Hayami, H., Itahashi, S., Shimadera, H., Miura, K., Nakatsuka, S., Morikawa, T. Effect of NOx and VOC controls for surface ozone concentration in summertime in Kanto region of Japan. *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*. 2015; 50: 8–15.

³⁵ 吉門洋. 首都圏周辺における非メタン炭化水素濃度低減の実態と高濃度オゾン低減効果の検証. *大気環境学会誌*. 2015; 50 (1): 52–57.

³⁶ 齊藤伸治, 上野広行. 光化学オキシダント対策の効率的な推進に関する研究(2)—近年の窒素酸化物濃度の減少傾向の特徴と光化学オキシダント濃度に与える影響—. *東京都環境科学研究所年報*. 2013; 2013: 10–15.

³⁷ 山神真紀子. 光化学オキシダント濃度の日内変動の推移. *名古屋市環境科学調査センター年報*. 2020; 9: 15–18.

1.4. VOC 組成とオキシダント生成の関係

表 1-4 VOC 組成とオキシダント生成の関係に係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	2000～2001 年度 東京都	都内自排局と一般局各 1 局の VOC 濃度をオゾン生成能で評価すると、光化学オキシダントの増加にはアルケン類や芳香族炭化水素類が重要な役割を果たしていることが示唆された。	38
関東	2005 年度夏季 埼玉県	ベンゼンと 1,3-ブタジエン、キシレンとエチルベンゼンでは、その光化学反応に起因する日中変化の違いを呈し、特に午後におけるベンゼンとエチルベンゼン濃度が O_x 最高濃度との相関が認められ、VOC 供給量の指標と考えてよいことがわかった。	39
関東	2005～2006 年 埼玉県	オゾン生成能としては、アルケン、芳香族炭化水素、アルデヒドが大きい寄与を示した。風上側の県南部地域における日中の VOC の高濃度化が、風下側である北部地域の O_x 高濃度への影響を示唆する事例が認められた。	40
関東	2005～2009 年度 千葉県	市原岩崎西一般環境大気測定局において、 O_x 濃度が 100 ppb を超える高濃度日に注目した結果、 O_x 濃度上昇に対する非メタン系炭化水素や M-VOC の影響が有意であることが判明した。	41
関東	2006 年度 東京都	大田区東糀谷一般環境大気測定局で一時間ごと観測を試行した。時刻変動や PRTR 届出排出量との比較から、物質ごとに自動車や塗装、金属加工等の事業所の影響が推測され、地域の VOC 排出状況を顕著に反映していることが明らかになった。	42
関東	2008 年度 東京都	江東、世田谷及び八王子での調査では、植物起源 VOC は夏季に高濃度を示し、八王子で最も高い濃度を示した。全 VOC に対する植物起源 VOC の割合は、大気濃度では約 5%であり、推定した O_x 生成能では 15～20%であった。	43
関東	2010 年度～2011 年 度 東京都	CMB 解析の結果、 O_x 生成に重要な VOC 発生源は、ガソリン車排出ガス、ディーゼル車排出ガス、ガソリン蒸気(給油ロス)、ガソリン蒸気(Diurnal Breathing Loss: DBL)、塗装、植物起源のイソプレンの 6 種であり、寄与の大きい VOC 成分は、ディーゼル車排出ガスではエチレン、ホルムアルデヒド、ガソリン車排出ガスと塗装ではトルエン等の芳香族化合物、ガソリン蒸気ガス(給油ロス、DBL)ではアルケンであった。	44

³⁸ 星純也, 天野冨子, 大橋毅, 佐々木裕子, 芳住登紀子. 大気環境 大気中 VOC モニタリングデータを用いた排出源およびオゾン生成能の評価. 東京都環境科学研究所年報. 2005; 2005: 93-101.

³⁹ 竹内庸夫, 唐牛聖文. 郊外地域における揮発性有機化合物の濃度変動解析. 埼玉県環境科学国際センター報. 2006; 6: 61.

⁴⁰ 竹内庸夫, 松本利恵, 唐牛聖文. 埼玉県における揮発性有機化合物の地域的・時間的濃度変動の特徴と光化学オキシダントとの関係. 大気環境学会誌. 2012; 47(3): 127-134.

⁴¹ 竹内和俊, 渡邊剛久, 石井克巳, 内藤季和, 中西基晴. 揮発性有機化合物の光化学反応に関する一考察. 千葉県環境研究センター年報. 2012; No.10: 167-174.

⁴² 名取雄太, 清宮隆治, 芳住登紀子, 鎌滝裕輝, 藤田進. VOC 連続測定データからみた大気中 VOC 濃度の特徴. 東京都環境行政交流会誌. 2008; 31: 1-4.

⁴³ 石井真理奈, 上野広行, 石井康一郎. 環境中の植物起源 VOC 濃度測定. 東京都環境科学研究所年報. 2009; 2009: 118-122.

⁴⁴ 上野広行, 内田悠太, 内田悠太, 石井康一郎, 石井康一郎, 齊藤伸治, 秋山薫, 横田久司. 東京都における大気中揮発性有機化合物の組成と OH ラジカルとの反応による消失を考慮した CMB 解析. 大気環境学会誌. 2015; 50(5): 207-225.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	2013年夏季 東京都	一般局 2 地点において、夏季 3 日間、3 時間ごとに大気を採取し、VOC 139 成分の測定を行った結果、ホルムアルデヒドが突出してオゾン生成能(濃度×MIR)が高く、続いてアセトアルデヒド、トルエン、エチレン等が高かった。	45
関東	2013年 8 月 8 日 神奈川県	PO との相関は、沿岸部ではアルケン類とアルデヒド類、内陸部ではイソプレンが高かった。沿岸部は内陸に比べ i-ペンタンと n-ペンタンの最大オゾン推計濃度が高い傾向であった。	46
関東	2014 年 東京都、神奈川県	夏季の Ox 高濃度日に、南側から北側にかけて Ox 濃度やホルムアルデヒド濃度の上昇とピーク時間の遅れがみられた。空気塊の移動を推測した結果、芳香族やアルケン類について移動前後での濃度の減少がみられた。	47
関東	2014 年 7 月～8 月 栃木県小山市	小山市をモデル地域とした Ox 濃度削減対策として、特に Ox が高濃度になる 7、8 月に、キシレン・トルエン・エチルベンゼンといった芳香族化合物の排出量を削減することが重要である。	48
関東	2015 年 東京都、神奈川県	空気塊が南から北側の調査地点へ移動するに従い、アルデヒド類や Ox の濃度が上昇し、またその移流時間が長い方がアルデヒド類及び Ox 濃度の上昇幅が大きく、芳香族類の濃度が減少する傾向を確認した。	49
関東	2015 年 7 月 21 日及び 8 月 6 日 神奈川県横浜市、東京都	海風による移流前後で Ox 濃度とアルデヒド類の最大オゾン生成能が増加し、アルケンと芳香族の最大オゾン生成能が減少し、とくに、m,p-キシレン、m,p-エチルトルエン、1,2,4-トリメチルベンゼン、1,2,3-トリメチルベンゼンの減少率が高く、これらの芳香族成分が首都圏における高濃度 Ox 生成に大きく寄与している可能性が示唆された。	50
関東	2017 年 東京都	23 区南部の工業地域の VOC 測定の結果、物質により地点間の差が大きいものと小さいものがあり、前者は近くにその発生源がある成分、後者は調査対象地域外からの移流の影響が大きい成分と考えられた。	51

⁴⁵ 石倉淳士，上野広行，星純也，松永壮，秋山薫，齊藤伸治，増田龍彦．都内 2 地点における大気中の揮発性有機化合物の濃度変動とその成分特性．東京都環境科学研究所年報．2014；2014：3-30．

⁴⁶ 福崎有希子，小森陽昇，志村徹．平成 25 年度光化学オキシダントに係る揮発性有機化合物(VOC)の調査．横浜市環境科学研究所報．2015；39：6-10．

⁴⁷ 石倉淳士，福崎有希子，星純也，松永壮，志村徹，小森陽昇，上野広行．夏季の海風による移流に伴う VOC 濃度及び組成変化の把握—横浜市環境科学研究所との共同調査—．東京都環境科学研究所年報．2015；2015：6-7．

⁴⁸ 齋藤由実子，石原島栄二，館野雄備，篠崎絵美．栃木県における光化学オキシダントの特性解析調査（第 4 報）．栃木県保健環境センター年報．2015；20：50-59．

⁴⁹ 石倉淳士，福崎有希子，星純也，上野広行，志村徹，小森陽昇．夏季の海風による移流に伴う VOC 濃度及び組成変化の把握—横浜市環境科学研究所との共同調査—(2)．東京都環境科学研究所年報．2016；2016：40-41．

⁵⁰ 福崎有希子，石倉淳士，星純也，小森陽昇，志村徹，上野広行．横浜市と東京都における夏季の揮発性有機化合物(VOC)同時観測調査．大気環境学会誌．2018；53（1）：13-24

⁵¹ 小林芳久，高橋和清，國分優孝，永岡保行．工業地域における多地点での VOC 濃度調査．東京都環境科学研究所年報．2018；2018：44-45．

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	2017年9月27日 茨城県	植物起源VOCのイソプレン及びピネンのオゾン生成能は常陸那珂東海で合計して $13.8\mu\text{g} - \text{O}_3/\text{m}^3$ で、VOC全体に対する割合は16.1%であった。	52
関東	2020年4月～10月 茨城県	東海、ひたちなか地域では植物起源VOCは10%未満で、オゾン生成への寄与は小さいと考えられたが、その他のVOC成分からオゾン生成能を評価し、大気中のVOCがオゾン生成に関与していることが示唆され、光化学オキシダント実態把握に繋がった。	53
関西	1991年～1995年 大阪府	2ボックスモデルを用いて、8月の晴天時を仮定した計算結果から、大阪ではHC排出量の削減によりオゾン濃度は減少するが、HC排出量の削減が無い場合には、NO _x の排出量削減率が小さいとオゾン濃度は増加することが示された。	16
関西	2004年度 四季各5日間 関西地域4地点	VOC濃度とOHラジカル反応速度定数の積をO ₃ 生成の指標とした場合、アルケン類やトルエン、キシレンが重要であり、夏季はイソプレンも反応性の観点から重要な役割を示すと考えられた。また、四季を通じてガソリン蒸気、ガソリン自動車排ガスが主要な発生源として寄与している可能性が示唆された。	54
関西	2005～2011年 大阪府	VOC32物質について算出した最大オゾン生成推計濃度は、トルエン、キシレン、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド及び1,2,4-トリメチルベンゼンが高い結果であった。	55
関西	2005年4月～2011年3月 大阪府	月1回24時間のVOC64物質の測定を行い、そのうちの32物質について最大オゾン生成推計濃度を算出した。いずれの地点も濃度はトルエン、アセトン、酢酸エチル、ノルマルブタンが高いのに対し、最大オゾン生成推計濃度では、トルエン、キシレン、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド及び1,2,4-トリメチルベンゼンが高い結果であった。	56

⁵² 茨城県霞ケ浦環境科センター．茨城県における光化学オキシダントの高濃度現象に関する研究．茨城県霞ケ浦環境科学センター年報．2019; 14: 141-143.

⁵³ 茨城県霞ケ浦環境科センター．茨城県における光化学オキシダントの高濃度現象に関する研究(第1報)．茨城県霞ケ浦環境科学センター年報．2016; 10: 144-148.

⁵⁴ 佐々木 寛介, 坂本 和彦. 関西地域における VOC 組成と発生源寄与の季節変動. 大気環境学会誌. 2007; 42(4): 219-233.

⁵⁵ 中戸 靖子, 宮本 弘子, 西村 理恵, 上田 真彩子. 大阪府における大気中揮発性有機化合物(VOC)濃度とオゾン生成への寄与について. 大阪府環境農林水産総合研究所. 2012; 5: 13-18.

⁵⁶ 梶原佑介, 力寿雄, 馬場義輝, 山村由貴, 中川修平, 濱村研吾. 光化学オキシダント及び PM_{2.5} 生成に寄与する揮発性有機化合物(VOC)の発生源寄与解析. 福岡県保健環境研究所年報. 2019; 46: 77-82.

1.5. 海風による内陸への輸送

表 1-5 海風による内陸への輸送に係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	1989～1991 年及び 1999～2001 年 東京都・埼玉県と 群馬県南東部	10 年間で海風の内陸進入パターンの速い日の頻度が増加しており、速い日は東京や埼玉南部の Ox 濃度レベルはあまり変化がなく、より内陸部で 90 年頃よりも高濃度になっている。遅い日のグループでは全域的に午後の Ox 濃度が大幅に増加した。	57
関東	1990～2010 年 東京都、埼玉県東部	Ox 高濃度の日数とともに海風日に限った出現率も 90 年代に比べ 2000 年以降は急増した。高濃度出現地域の傾向的变化に結びつく海風型の出現傾向の年代的变化は、東日本をとりまく夏季気圧配置傾向の 10 年スケールの変動と関連付けられ、より長いスケールの気候変動との関連も疑われる。	58
関東	1990 年から 2011 年	7、8 月の北関東において Ox 濃度が高くなる日には 9 時ごろに東京湾や相模湾からの海風が発達し、南関東において Ox 濃度が高くなる日には 13 時ごろに鹿島灘からの海風が発達していた。	59
関東	1994 年 9 月 神奈川県丹沢	京浜工業地帯から移送し相模湾上で生成した高濃度オゾンや酸性物質は海風により樹木の枯損が目立つ山頂近い南斜面地域まで移送されていることが確認できた。更に駿河湾風と混合希釈されて山梨県方面への移送、相模湾の二次汚染物質の相模湖方面への移送及び東京湾から大月方面への直接侵入等について報告した。	60
関東	1999～2006 年	夏の晴天時には、関東の西と北に 2 つの熱的低気圧が発生する傾向がある。これらの低気圧は南よりの海風を促進し、高濃度 Ox を北関東に運ぶ。低気圧が西側にしか発生しない場合、北関東の Ox は北風によって低く保たれる。	61
関東	2000 年度 埼玉県	オゾン濃度が高濃度になる場合、その日の午前中に風の収束域付近でオゾン濃度が上昇し始め、その後の海風流入により汚染気塊が内陸部へ進行し、さらにオゾン濃度が上昇する傾向であった。	62
関東	2000～2006 年前期(I)、2007 年～ 2012 年後期(II) 埼玉県、東京都	7～8 月の朝以降に海風輸送により高濃度オゾンが発生した日について VOC 規制前後の比較を行った結果、海風の内陸進入が早い日には東京湾岸の濃度上昇が緩和されたが、内陸では変わっていない。一方、海風の内陸進入が遅い日は東京湾岸でも内陸でも顕著な改善はないことがわかった。	63

⁵⁷ 吉門洋. 近年の光化学オキシダント濃度変化の一要因. 大気環境学会誌. 2004; 39 (4): 188-199.

⁵⁸ 吉門洋, 西田由佳. 関東中央部における近年の高濃度オキシダントに関わる気候変化の解析. 大気環境学会誌. 2014; 49 (1): 59-67.

⁵⁹ 中島虹, 高橋日出男. 関東平野南部における光化学オキシダント高濃度域と海風との関係. 大気環境学会誌. 2015; 50 (2): 92-99.

⁶⁰ 阿相敏明, 三村春雄, 須山芳明, 相原敬次, 牧野宏, 高橋照美, 清水源治, 若松伸司. 神奈川県西部地域における大気汚染発生機構の解明(2) 丹沢後背地への光化学オキシダントの流入過程. 神奈川県環境科学センター研究報告. 1995; 18: 7-16.

⁶¹ Hosoi, S., Yoshikado, H., Sekiguchi, K., Wang, Q., Sakamoto, K. Daytime meteorological structures causing elevated photochemical oxidants concentrations in north Kanto, Japan. Atmospheric Environment. 2011; 45(26): 4421-4428.

⁶² 武藤洋介, 梅沢夏実. 地球温暖化物質の精密モニタリングに関する研究. 埼玉県環境科学国際センター報. 2006; 6: 59.

⁶³ 吉門洋. VOC 規制はローカルなオゾン高濃度にどれほど影響したか—気象影響を排除した詳細な検討—. 大気環境学会誌. 2016; 51 (5): 230-237.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	2002年7月21日 ～2002年10月17日 栃木県奥日光	O ₃ が高濃度になるのは夏季の卓越した南風に加えて、強い日射により、市域で発生した一次汚染物質が光化学反応を起こしながら、域な海陸風循環によって輸送されてきた為であると考えられた。	64
関東	2002～2019年度 神奈川県川崎市	川崎市の光化学オキシダント高濃度現象は、朝方は陸風で日中に海風に変化する海陸風循環が起こった日に生じやすい。	65
関東	2010年7月	7月23日及び24日に確認された東京湾沿岸部及び神奈川県南部におけるO ₃ 高濃度は、ローカルな光化学生成に加えて海域から高濃度O ₃ が流入してきたことが要因の一つであると考えた。	66
関東	2010～2015年 埼玉県、東京都、 神奈川県	海風日と判定された日にはおおむねPM _{2.5} やOx濃度が上昇する傾向がある。Ox高濃度はおおむね海風が発生可能な気圧傾度のもとで起きる。	67
関東	群馬県	関東地域北部における夏のオキシダント高濃度現象は、海風がほぼ一日中南東の方向から地域内を吹き抜け、関東地域南部の首都圏の汚染大気が光化学反応によりオキシダントを生成しながら、北部に移流し高濃度オキシダントを生成すると推定される。	68
東海	1985～1986年度 濃尾平野及び その周辺地域	Oxの高濃度日は、前駆物質の主要発生源が位置する名古屋や衣浦の臨海部を風上として吹く海風との強い関連が認められた。	69
東海	1992～2009年 濃尾平野	典型的な夏季静穏日(35日)では濃尾平野の内陸部ほど午後のOx濃度ピーク時刻の遅れが生じ、沿岸部で排出された大気汚染物質が大規模海風によって岐阜県南東部へ輸送されていることが示唆された。また、中部山岳の飯田で見られた19時のピークは濃尾平野から輸送されてきた汚染気塊によるものと考えられる。なお、静穏日が継続する場合には、2日目の11、12時のOx濃度が高くなりやすいことが見出された。	70
東海	1997年8月21日 愛知県	午前中の伊勢湾海風によって内陸部へと汚染気塊が運ばれていく過程でOx濃度が上昇し、その後、午後から吹き始めた遠州灘海風が到達した地点でOx濃度が下がり始めることが考えられる。	71

⁶⁴ 畠山史郎, 片平菊野, 高見昭憲, 菅田誠治, LIU F. 北和之. 奥日光山岳域における夏季および秋季のオゾン濃度変動. 大気環境学会誌. 2004; 39(3): 158-170.

⁶⁵ 沼田和也, 山田大介, 福永顕規, 中村弘造. 川崎市の光化学オキシダント高濃度現象解明にむけた海陸風日の解析について. 川崎市環境総合研究所年報. 2021; 9: 16-21.

⁶⁶ 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. 2018; 53(4): 111-119.

⁶⁷ 吉門洋. 夏季PM_{2.5}高濃度事象の発生条件—首都圏を中心に—. 大気環境学会誌. 2018; 53(4): 120-129.

⁶⁸ 石沢静雄, 蜂須洋輔, 桜井美恵子, 国見均, 菅野博孝. 関東地域北部における光化学オキシダントの挙動. 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集. 1999; 9th: 303-306.

⁶⁹ 森博明, 北田敏広. 濃尾平野における高濃度日の出現状況と気象条件との関係. 大気環境学会誌. 1999; 34(5): 352-375.

⁷⁰ 遠藤文倫, 早崎将光, 川村隆一. 中部日本の夏季静穏日における光化学オキシダントの日変化と関連する熱的局地循環. 大気環境学会誌. 2013; 48(5): 234-242.

⁷¹ 丹羽文子, 竹内純一郎, 古田正次. 光化学オキシダント高濃度日の大気環境の特性について. 愛知県環境調査センター所報. 2001; 11: 226-234.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
東海	2017年4月～9月 愛知県	豊川下流域におけるオゾンの連続測定の結果、オゾン濃度が高濃度になる時は、三河湾からの豊川に沿って吹き込む海風の方に一致しており、川筋に沿って大気汚染物質も移動していると推定できた。	72
東海	2002～2006年度 岐阜県	Ox 高濃度日の昼間の気象条件は、岐阜中央局、羽島局では風速が3～4m/s以下で、南から南西或いは南東よりの風が卓越していた。また、中津川局、笠原局では、風速が2.5m/s以下で、南から南西よりと南西から西よりの風が卓越していた。	12
関西	1988～2001年度 京都府	大気常時監視データの解析から、光化学スモッグ注意発令日数は全体として減少しているが、発令時刻・解除時刻ともに遅くなる傾向があり、汚染物質の内陸地域への移流が示唆された。	73
関西	1990～1993年 兵庫県	内陸地域は臨海地域に比べて年間を通じて Ox の月平均値が高く、特に4～5月には高濃度 Ox の出現日が多い。風向・風速及び日内変化のパターンから、臨海地域から内陸地域への Ox の輸送が認められた。	74
関西	1991～2005年度 京都府	Ox が 120 ppb 以上となった時刻は、1991～2000年度は14時が最多であったが、2001～2005年度は16時が増加しており、高濃度の出現時刻が遅くなる傾向にあった。大阪からの Ox 汚染気塊の移流が明瞭な日と、明瞭でない日があった。	75
関西	1992-2001 年暖候期 滋賀県	長浜市での高濃度光化学オキシダントの発生には、夜間に陸域で生成される窒素酸化物の湖上への輸送と、日中の光化学反応による光化学オキシダントの生成および陸方向への輸送が一要因として示唆された。	76
関西	2007年4月1日～2010年3月17日 京都府	南丹地域において観測地点の大気環境は、発生源の影響は少ないが、光化学オキシダントについては大阪平野の方角からの移流の影響を受けている事例が見受けられた。	77
瀬戸内	2008年5月 岡山県	5月3日の倉敷市とその周辺地域のオキシダント濃度の上昇は局地的大気汚染であり、5月22日～23日の岡山県全域にわたるオキシダント濃度の上昇は大陸からの越境大気汚染に加え局地的大気汚染の影響もあると考えられる。	78

⁷² 河合孝枝. 豊川下流域における光化学オキシダント濃度. 愛知県環境調査センター所報. 2009; 36: 13-15.

⁷³ 水本美佳, 日置正, 山川和彦, 筒井剛毅. 京都府におけるオキシダント濃度の特性. 京都府保健環境研究所年報. 2003; 47: 65-70.

⁷⁴ 池沢正. 兵庫県の内陸地域における高濃度 Ox の出現について. 兵庫県立公害研究所研究報告. 1994; 26: 17-22.

⁷⁵ 平澤幸代, 河村秀一, 日置正, 田村義男. 京都府南部地域における光化学オキシダント高濃度事象の特性. 京都府保健環境研究所年報. 2008; 52: 20-27.

⁷⁶ 杉本志織, 上野健一. 滋賀県周辺での光化学オキシダントの輸送過程に関する気象学的解析. 環境学会誌. 2006; 41(4): 183-195.

⁷⁷ 平澤幸代, 谷口延子, 高倉尚枝, 河村秀一, 日置正, 藤波直人. 京都府南丹地域における大気環境調査結果. 京都府保健環境研究所年報. 2010; 55: 72-78.

⁷⁸ 片岡敏夫, 小川登. 平成 20 年度健康被害を伴った高濃度光化学オキシダントの主要因について. 岡山県環境保健センター年報. 2010; 34: 1-5.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
瀬戸内	2017年7月13日 岡山県	県南部の工場や自動車等から排出された NO_x や VOC が、梅雨明けの強い太陽光によって光化学反応を起こし、弱い南よりの海風に乗り、岡山市北区において局地的な O_x の高濃度の状態が生じたと考えられた。	79
瀬戸内	2019年5月25日 岡山県	前日の昼間から岡山県南部及び県中部を中心に O_x 濃度が高濃度であったことに加え、当日は、地域的な汚染と大陸からの越境汚染の影響も受けて高濃度となった県南部の O_x が、南寄りの風によって県南部から県中北部に移動した。そのほか O_x が生成しやすい条件等も重なった。	80
九州	1987年5月 福岡県福岡市	海風の進入経路に沿って、福岡の都市部から内陸部への汚染物質移流を確認し、春期内陸部における光化学オキシダント高濃度出現日に海風が進入していた久留米エリアでも高濃度を観察した。	81
九州	2018年6月～8月 福岡県	福岡県では、都市部で発生したオキシダントが上空で高濃度になり海風により輸送されることで、小郡で高濃度オキシダントが観測される現象が報告されている。	19

⁷⁹ 山田克明, 野村茂, 間野遼太, 小川登. 平成 29 年度健康被害を伴った高濃度光化学オキシダントの主要因について. 岡山県環境保健センター年報. 2019; 42: 9-12.

⁸⁰ 西村佳恵, 平岡諒也, 山田克明, 赤木正章, 野村茂, 小川登, 林隆義. 岡山県における光化学オキシダント情報・注意報の広域発令の要因解析について(令和元年度). 岡山県環境保健センター年報. 2021; 44: 1-10.

⁸¹ 松本源生, 宇都宮彬. 福岡都市圏における光化学反応シミュレーション. 福岡県保健環境研究所年報. 1993; 21: 7681.

1.6. 循環・滞留など

表 1-6 循環・滞留などに係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	1970 年から 2000 年	気圧傾度が弱い時には海陸風循環により日中は光化学大気汚染気塊が内陸地域に輸送され、これが夜間には陸風により再び海方向に戻される事、日中は混合層が発達するので高濃度は上空にまで拡がること、一方夜間には上空に日中に生成した二次汚染物質が残り、これが翌日の日中には混合層に取り込まれること等が解明された。	82
関東	1995 年 8 月 関東及び中部	航空機観測により高濃度の光化学オゾンが南海上と山地上空で観測された。太平洋上で観測された光化学オゾンは、上空の一般風によって内地から運ばれてきた。また、光化学オゾンが山岳地帯に侵入する過程も明らかになった。	83
関東	2005 年 8 月	地上のオゾン濃度は、主に上空からのオゾンに富む空気の鉛直混合によって上昇し、一方乾性沈着と化学的過程は主にオゾンを減少させることがわかった。また、移流によって練馬から熊谷に一部のオゾンが運ばれ、熊谷のオゾン濃度上昇に寄与している可能性があることがわかった。	84
関東	2007 年 7、8 月 神奈川県丹沢山地	日中に丹沢山地で O_3 濃度が高くなる場合は、陸風により東京湾岸などの都市部から排出された一次汚染物質が相模湾に流入した後、日中に光化学反応を起こして O_3 濃度の高くなった気塊が海風の影響を受けて丹沢山地の南～東南東側から移流して来ていた。	85
関東	2008 年 11 月 7 日 千葉県	この日の最高気温は $20^{\circ}C$ 前後で、 Ox の生成しやすい気象条件ではなかった。気象要因について解析した結果、なんらかの要因で上層にあった高濃度 Ox を含む気塊が下降流によって地上にもたらされたと推定された。	86
関東	2009 年 7 月 31 日 ～8 月 12 日 神奈川県	丹沢地域上空のオゾン観測から、汚染が滞留する混合層内部においては、地域ごとの他の汚染物質の影響や、地形による気象要因が反映されることで、様々なオゾン濃度分布を示すという結果が得られた。	87
関東	2010 年 7 月	東京以南において前駆物質が滞留したことで、 O_3 は比較的狭い範囲において多く生成され、結果として神奈川県及び東京都の東部に集中して $160ppb$ を超える濃度が生じたものと考えた。	66

⁸² 若松伸司. 都市・広域大気汚染の生成機構解明に関する研究. 大気環境学会誌. 2001; 36 (3): 125-136

⁸³ Wakamatsu, S.. High concentrations of photochemical ozone observed over sea and mountainous regions of the Kanto and eastern Chubu districts. Journal of Japan Society for Atmospheric Environment. 1997; 32(4): 309-314.

⁸⁴ Khiem, M., Ooka, R., Hayami, H., Yoshikado, H., Huang, H., Kawamoto, Y.. Process analysis of ozone formation under different weather conditions over the Kanto region of Japan using the MM5/CMAQ modelling system. Atmospheric Environment. 2010; 44 (35): 4463-4473.

⁸⁵ 松隈大亮, 板橋秀一, 鶴野伊津志, 若松伸司. 丹沢山地における高濃度オゾンの広域移流現象の数値解析. 大気環境学会誌. 2012; 47 (4): 173-178.

⁸⁶ 井上智博. 千葉県における 2008 年の光化学オキシダント高濃度事例. 千葉県環境研究センター年報. 2010; 8: Page.ROMBUNNO.4.1.1.6.

⁸⁷ 岡崎友紀代, 相原敬次, 阿相敏明, 福永明子, 高見雄佑, 國元浩平, 山下真生, 武智勝哉, 堀越信治, 酒井隆, 山根正伸, 若松伸司. 神奈川県丹沢地域における 2009 年夏季のオキシダント濃度分布観測. 愛媛大学農学部紀要. 2010; 55: 7-23.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東	2010年7月20日 ～8月8日	モデルの計算結果から、関東の非首都圏から排出される前駆体は、首都圏から排出される前駆体よりも内陸部のオゾン濃度に影響を与えることがわかった。さらに、残留オゾンの下降が示された。残留オゾンは、非大都市圏から排出される前駆体によっても影響を受けることが示された。	88
関東	2010年7月26日 ～8月6日 群馬県	赤城山におけるドップラーライダー観測と O_3 濃度の測定から、夜間山頂付近の O_3 濃度がほぼ一定でかつ風速が大きいという現象が観測された。関東地方北部の上空が濃度のほぼ等しいオゾンによって覆われており、その気塊が常に内陸へ輸送され続けることでオゾン濃度がほぼ変化しない状態が実現していると推察された。	89
関東	2018年7月23～ 24日 首都圏	首都圏で見られた O_3 高濃度事象は日中の濃度上昇の継続により上空に高濃度の O_3 が滞留し、それが 24 日日中に混合層内に取り込まれたこと、さらに 23 日の夜間に O_3 濃度が下がらなかったため 24 日日中は陸域や海域における O_3 のバックグラウンド濃度が通常よりも高かったことに起因すると考えた。	27
東海	1995年7月26日 ～28日 濃尾平野～中部 山岳	シミュレーションや航空機観測等の結果、濃尾平野で排出された汚染物質から化学反応で生成する汚染物質は中部山岳上空の広域に渡って滞留し、それらが翌日の上空の北風によって沿岸部上空に戻ってきて日中の混合層活動によって平野部のバックグラウンド濃度を高めることが明らかになった。	90
関西	2001年3月 大阪都市圏	航空機観測により、春季の O_3 の鉛直分布を調査した結果、停滞した気象条件のもとで O_3 濃度が高いエピソードが観測され、表層混合層における O_3 濃度の上昇は、局所的な光化学生成と東アジアから運ばれた越境大気汚染の結果であった。	91
瀬戸内	1981年5月12日 ～16日 広島県	春季の大竹市のゾンデ観測結果から、500m 高度以下の O_x 濃度は昼間に高く夜間に低いが、日変化の振幅は地表付近で大きく、高度が増すにつれて小さくなる傾向が認められ、夜間の消費、朝方の鉛直混合、昼間の光化学反応によりある程度説明できる。	92
瀬戸内	1993年4～9月 愛媛県	新居浜地区の高濃度オキシダント発生機構は、晴天日の風の弱い夜間に沿岸部沖に集積した一次汚染物質から、翌日の日の出後の光化学反応で O_x が生成し、陸地部上空の海風循環に巻き込まれて地上に下降したと推察された。	93
九州	2018年6月～8月 福岡県	O_x 排出量の多い県の北側エリアでは NO_x 排出量の削減によりオゾン濃度が増加し、北側エリアの上層で生成したオゾンが輸送される福岡市より南ではオゾン濃度が減少したと考えられる。	19

⁸⁸ Kiriya, Y., Shimadera, H., Itabashi, S., Hayami, H., Miura, K. Evaluation of the Effect of Regional Pollutants and Residual Ozone on Ozone Concentrations in the Morning in the Inland of the Kanto Region. Asian journal of atmospheric environment. 2015; 9: 1–11.

⁸⁹ 桐山悠祐, 速水洋, 速水洋, 阿波崎たかね, 三浦和彦, 熊谷貴美代, 山口直哉. 夏季の関東内陸部におけるオゾン濃度の上昇に対する混合層発達の影響. 大気環境学会誌. 2012; 47(2): 81–86.

⁹⁰ 北田敏広, 岡村聖, 中西秀樹, 森博明, 石坂隆. 中部地方の夏季局地風場におけるオゾンの生成と輸送の3次元特性数値シミュレーションと航空機観測結果を用いた推定. 地球環境シンポジウム講演論文集. 1998; 6: 97–102.

⁹¹ Itano, Y., Wakamatsu, S., Hasegawa, S., Kobayashi, S. Local and regional contributions to springtime ozone in the Osaka metropolitan area, estimated from aircraft observations. Atmospheric Environment. 2005; 40: 2117–2127.

⁹² 瀬戸信也. 瀬戸内沿岸域におけるオキシダント濃度の鉛直分布. 天気. 1992; 39: 347–354.

⁹³ 二宮久, 金子敏明, 野間そま子, 服藤峻, 新次美. 新居浜地区における高濃度オキシダント発生要因の検討. 愛媛県環境保全センター所報. 1994; 14: 7–16.

1.7. 長距離越境輸送の影響

表 1-7 長距離越境輸送の影響に係る文献情報

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関東、東海、関西、九州	1990 年から 2010 年 首都圏、名古屋、大阪・京都、福岡	全オゾンの増加傾向は、春季と西日本で顕著であった。このことは、アジア大陸からの O ₃ の越境輸送の増加が、日本における O ₃ の長期的な増加のもう一つの要因であることを示唆している。	94
日本全域	2007 年 5 月 8、9 日 日本全域	シミュレーション結果は、5 月 8 日の九州北部、中国地方の高濃度ピーク時が最も中国からの影響が大きく、寄与率は約 40%であった。近畿地方より東側、北側の領域でも、高濃度ピークの現れる 5 月 9 日に中国からの寄与率が最も高い値を示していた。	95
日本全域	2007 年 5 月 8、9 日 日本全域	化学輸送モデルから、80ppbv 以上の高濃度 O ₃ に対する中国寄与率の期間平均値は、青森県以北を除く日本全国で 25%以上であり、九州地域では 40-45%に達すると見積もられた。	96
日本	2013 年から 2019 年	7 年間の衛星観測の結果、中国を含む東アジアの対流圏 NO ₂ 濃度が急激に低下していることが分かり、このことはアジア大陸を起源とする O ₃ の越境輸送が、この間抑制されたか、ほとんど変化していない可能性を示唆した。	97
関東	2007 年 5 月 8 日～9 日	越境輸送の影響により全国的に高濃度オキシダントが観測された 2007 年の事例においても、関東ではオキシダント濃度の日最高値が観測された時間が内陸に向かうにつれて遅くなっており、関東では海陸風循環による都市汚染の蓄積の影響も大きいことが示唆された。	98
東海	1990 年～2002 年	1990 年度以降(1990～2002)では、Ox 高濃度パターンは、4・5 月に大きなピークがある大陸からの「移流型」と、7・8 月の高温の時期にピークが出やすい、NO _x ・SPM 等も絡んだ光化学反応で誘導される「都市反応型」の 2 つのパターンに分類された。	99
関西	2004 年 5 月 8 日～9 日 京都府	O ₃ 濃度の上昇は、黄砂飛来によるものと推測され、黄砂飛来と同時に中国大陸の大気汚染物質に加え、大阪など国内の汚染物質が流入するためではないかと推測された。	100

⁹⁴ Akimoto, H., Mori, Y., Sasaki, K., Nakanishi, H., Ohizumi, T., Itano, Y.. Analysis of monitoring data of ground-level ozone in Japan for long-term trend during 1990–2010: Causes of temporal and spatial variation. Atmospheric Environment. 2015; 102: 302–310.

⁹⁵ 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. 2006; 43(4): 209-224.

⁹⁶ 大原利眞，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. 2008; 43: 198-208.

⁹⁷ Irie, H., Yonekawa, D., Damiani, A., Hoque, Hossain Mohammed Syedul, Sudo, K., Itahashi, S.. Continuous multi-component MAX-DOAS observations for the planetary boundary layer ozone variation analysis at Chiba and Tsukuba, Japan, from 2013 to 2019. Progress in Earth and Planetary Science. 2021; 8: 31.

⁹⁸ 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. 2008; 43 (4): 225-237.

⁹⁹ 大野隆史，山神真紀子. 名古屋市域における光化学オキシダント濃度の経年変化とその特徴. 名古屋市環境科学研究所報. 2006; 35: 11-20.

¹⁰⁰ 山田悦，梅村滋和，布施泰朗. パッシブサンプラー法による京都山間部における大気汚染物質濃度の経年変化観測(1996～2005). 分析化学. 2012; 61(4): 319-326.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
関西	2019 年 5 月 24～26 日 兵庫県	シミュレーションモデル解析により、大陸の高濃度 Ox 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。また、気象条件が整っていたことにより、県内各地で Ox が生成され易い状態であった。	101
瀬戸内	1985 年と 2004 年 愛媛県	Ox 濃度の増加傾向は、大陸からの移流によるバックグラウンドオゾンの上昇によるためと考えられる。	102
瀬戸内	2019 年 5 月 24 日～ 5 月 26 日 岡山県	後方流跡線解析の結果から、大陸方向からの越境汚染の影響を受け、それに地域的な汚染等複数の要因が重なったと推測された。	80
瀬戸内	2004～2006 年夏(梅 雨明け～8 月 31 日) 広島県	瀬戸内海沿岸域において、流跡線の解析から、Ox の高濃度のほとんどは対象地域の周辺部(日本国内及び朝鮮半島)で空気塊が停滞したときに発生することがわかった。Ox 低濃度日の流跡線の 88%は空気塊が北太平洋から北上するパターンであった。	103
九州	2003～2007 年 福岡県	常時監視データから、オキシダントの高濃度には、成層圏オゾンの降下、大陸からの移流、地域での生成が関係していると考えられる。高濃度日の発生要因を分類した結果、移流の影響が強いと思われる日が約 30%以上になることが推定でき、また、移流の割合は年々上昇していることが分かった。	104
九州	2007 年 4 月下旬～5 月末 九州北部	シミュレーションモデルにより、高濃度 O ₃ エピソード時の中国起源の O ₃ 前駆物質の寄与率は東アジア起源の約 30～50%に達し、アジア大陸を起源とする越境汚染が強く影響していることが示された。	105
九州	2008 年 熊本県	Ox 高濃度事象の要因分析の結果、大陸からの移流 43%、地域での生成が 21%、成層圏オゾンの沈降が 6%であり、長距離輸送の影響が顕著であることが判明した。	106
九州	2009 年 福江島	オゾン濃度観測の解析から、高濃度が続くエピソード時は中国大陸からの大気塊が運ばれる時であり中距離輸送の影響と思われる。本研究からさまざまな中国の寄与率が通年にわたり高いことが判明した。	107

- ¹⁰¹ 久保智子, 飯野博夫, 山本一巳, 中坪良平, 瀧本充輝, 高石豊. 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. ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター紀要. 2020; 10: 12-18.
- ¹⁰² 青木平八郎, 藤田慎二郎, 泉喜子, 二宮久. 愛媛県の東予地域における光化学オキシダント濃度の経年変化等について. 愛媛県立衛生環境研究所年報. 2006; 7: 42-46.
- ¹⁰³ 瀬戸信也, 宇津正樹, 大原真由美, 砂田和博, 日浦盛夫. 広島県の瀬戸内沿岸域における夏季晴天時の光化学オキシダント日最高濃度と後方流跡線との関連性. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2007; 15: 5-9.
- ¹⁰⁴ 岩本真二, 大石興弘, 田上四郎, 力寿雄, 山本重一. 福岡県における光化学オキシダントの高濃度要因の分類. 大気環境学会誌. 2008; 43 (3): 173-179.
- ¹⁰⁵ 板橋秀一, 弓本桂也, 鶴野伊津志, 大原利眞, 黒川純一, 清水厚, 山本重一, 大石興弘, 岩本真二. 2007 年春季に発生した東アジア域スケールの広域的越境汚染の化学輸送モデル CMAQ による解析. 大気環境学会誌. 2009; 44 (4): 175-185.
- ¹⁰⁶ 飯野直子, 平田達二郎, 金柿主税, 金柿主税. 熊本における 2008 年光化学オキシダント高濃度事象. 熊本大学教育学部紀要 自然科学. 2010; 59: 19-28.
- ¹⁰⁷ 横内陽子, 高見昭憲, 大原利眞. 九州北部地域における光化学越境大気汚染の実態解明のための前駆体観測とモデル解析 平成 20～22 年度. 国立環境研究所特別研究報告 SR. 2011; 95: 56P.

地域区分	対象期間、地域	内容	文献
九州	2020 年 長崎県	福江島において過去の観測結果と比較した。オゾン濃度を PM2.5 濃度が 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ より高濃度の場合のみ抽出すると、例年に比べ低下していた。2020 年は、中国から日本へ越境輸送される大気汚染物質の濃度が減少したと推測される。	108
九州	2018 年冬 福岡市	O ₃ は越境大気汚染の影響が強い期間に濃度が高く、O ₃ 濃度の変動は比較的小さかったことから、O ₃ は福岡市外で生成され輸送されてきたと考えられる。	109
	1980～2005 年	シミュレーションにより、日本上空の地表面オゾン (O ₃) の長期的な増加傾向に対する様々な発生源地域の相対的寄与を推定した。	110

¹⁰⁸ 吉野彩子, 高見昭憲. 長崎福江島における大気質観測 - COVID-19 による越境大気汚染への影響 -. 大気環境学会誌. 2020; 55 (6): 248-251.

¹⁰⁹ Yoshino, A., Takami, A., Hara, K., Nishita-Hara, C., Hayashi, M., Kaneyasu, N.. Contribution of Local and Transboundary Air Pollution to the Urban Air Quality of Fukuoka, Japan. Atmosphere. 2021; 12(4): 431.

¹¹⁰ Nagashima, T., Sudo, K., Akimoto, H., Kurokawa, J., Ohara, T.. Long-term change in the source contribution to surface ozone over Japan. Atmospheric Chemistry and Physics. 2017; 17: 8231–8246.

2. 大気汚染対策：NO_x、VOC に係る国の規制等（1991 年以降を中心に）

2.1. 固定発生源対策

2.1.1. ばい煙に係る固定発生源対策

- (1) 1981 年：大気汚染防止法施行令の一部改正；窒素酸化物総量規制の導入¹¹¹
窒素酸化物が総量規制の指定ばい煙に追加され、環境基準に照らし対策の実施が特に重要である東京、神奈川、大阪の 3 地域において総量規制を実施。
- (2) 2022 年：大気汚染防止法施行令の一部改正；「伝熱面積」の規模要件を撤廃¹¹²
伝熱面積の規模要件撤廃に伴いバーナーを持たないボイラーについては、バーナーを持つボイラーと同規模であるにもかかわらず規制対象外となることから、公平な規制にするため「バーナーの燃料の燃焼能力」から「燃料の燃焼能力」に改正。

2.1.2. 小規模燃焼機器対策

- (1) 1996 年：小規模燃焼機器の窒素酸化物排出ガイドラインの策定¹¹³
家庭や学校などに設置する小さなボイラーなどは法規制の対象ではないが、排出口が低く、また、居住空間の近くに数多く設置され、全体的な排出量は無視できないことから、小さなボイラーなどを対象として、大気汚染物質の排出量が少ない機器を優良品として推奨するためのガイドラインを策定。
- (2) 2009 年：低 NO_x 型小規模燃焼機器の推奨ガイドラインの策定¹¹³
(1)のガイドラインの策定から 10 年以上経過しており、技術開発の進展や世の中の環境への関心の高まりを踏まえ、改定を行ったもの。推奨ガイドラインとは、現在及び数年後の状況において、技術的・経済的に実現可能な最高水準の技術を用いた場合の NO_x 排出濃度を定めたもの。

2.1.3. VOC の排出抑制対策

- (1) 2004 年：大気汚染防止法の一部を改正する法律¹¹¹
- ・法規制と事業者の自主的な取組とを適切に組合せて（ベスト・ミックス）効果的に VOC 排出を抑制していくという考え方を法律に位置づけ。
 - ・法規制の対象となる施設は、VOC 排出量の多い次の 6 施設。
 - 塗装施設及び塗装後の乾燥・焼付施設
 - 化学製品製造における乾燥施設
 - 工業用洗浄施設及び洗浄後の乾燥施設
 - 印刷施設及び印刷後の乾燥・焼付施設
 - VOC（ガソリン等）の貯蔵施設
 - 接着剤使用施設及び使用後の乾燥・焼付施設

¹¹¹ 独立行政法人環境再生保全機構。日本の大気汚染の歴史,
<https://www.erca.go.jp/yobou/taiki/rekishi/index.html>

¹¹² 環境省。大気汚染防止法施行令の一部を改正する政令の閣議決定について（2021 年 9 月 24 日）,
<https://www.env.go.jp/press/110025.html>

¹¹³ 環境省。低 NO_x 型小規模燃焼機器の推奨ガイドラインについて,
<https://www.env.go.jp/air/osen/shokibo/index.html>

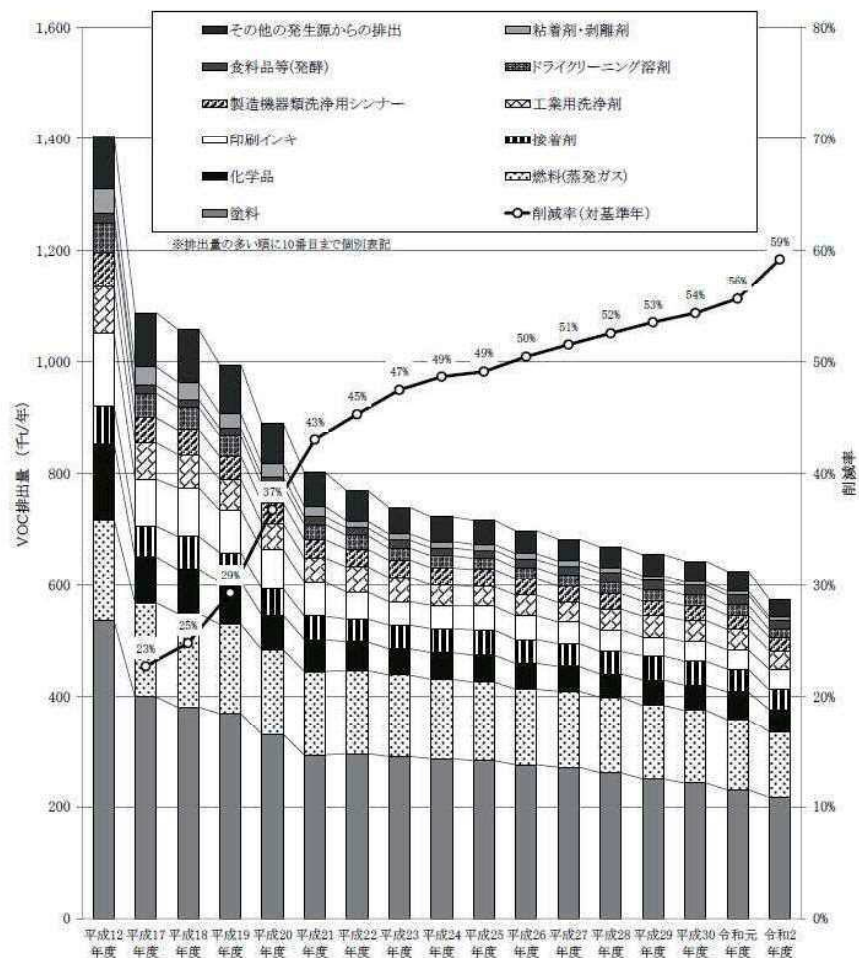


図 2-1 発生源品目別 VOC 排出量の推計結果 ¹¹⁴

(2) 2018 年：大気環境配慮型 SS (e→AS) 認定制度 ¹¹⁵

VOC の一種である燃料蒸発ガスを回収する機能を有する給油機 (Stage2) の普及促進のため、当該給油機を導入している給油所を大気環境配慮型 SS (e→AS) として認定する制度を 2018 年 2 月に創設し、2022 年 3 月末までに 439 件の給油所を認定。

2.1.4. その他

(1) 1996 年：大気汚染防止法の改正；有害大気汚染物質対策

事業者には有害大気汚染物質の自主的な排出抑制の取組、排出抑制基準、環境基準の設定等

(2) 1999 年：特定化学物質の環境への排出量の把握及び管理の改善の促進に関する法律

環境汚染物質排出・移動の登録が制度化 (PRTR 届出制度)

¹¹⁴ 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ検討会. 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリについて (2022 年 3 月)

¹¹⁵ 環境省. 令和 4 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書、第 2 部第 4 章、
https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r04/pdf/2_4.pdf

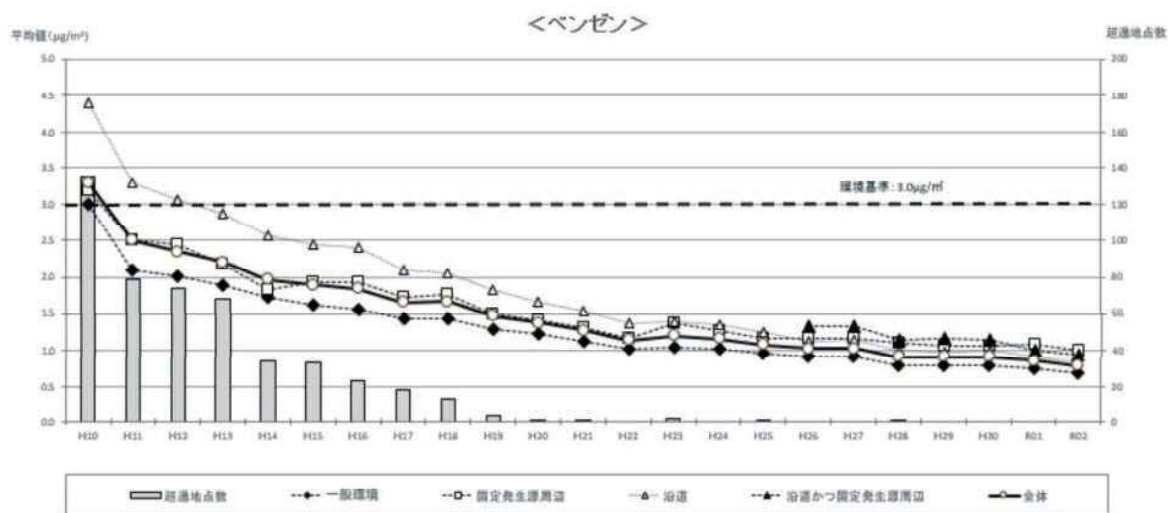
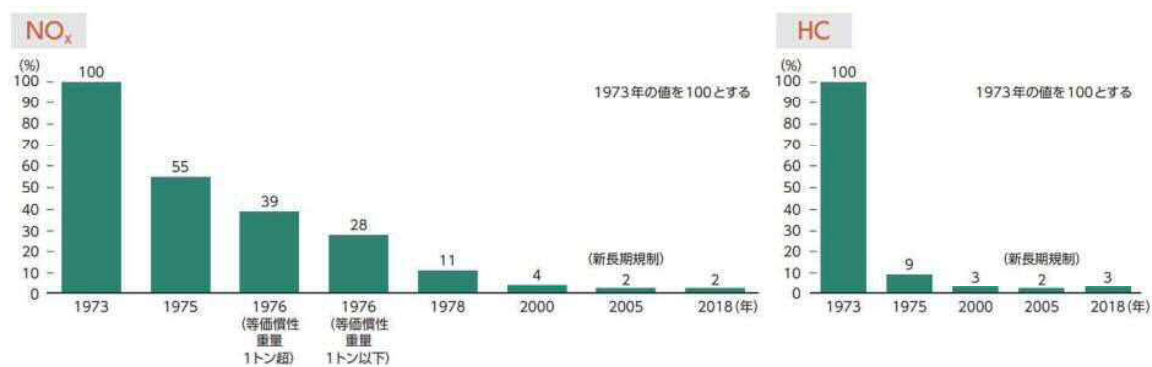


図 2-2 有害大気モニタリングにおけるベンゼンの平均値及び環境基準超過地点数の推移 ¹¹⁶

2.2. 移動発生源対策

2.2.1. 自動車単体規制

(1) 下図 ¹¹⁵ のように、自動車 1 台ごとの排出ガス規制の強化を継続的に実施。



注 1：等価性重量とは排出ガス試験時の車両重量のこと。

2：1973 年～2000 年までは暖機状態のみにおいて測定した値に適用。

3：2005 年は冷機状態において測定した値に 0.25 を乗じた値と暖機状態において測定した値に 0.75 を乗じた値との和で算出される値に適用。

4：2018 年は冷機状態のみにおいて測定した値に適用。

資料：環境省

図 2-3 ガソリン・LPG 乗用車規制強化の推移

¹¹⁶ 環境省. 令和 2 年度有害大気汚染物質等に係る常時監視結果,
https://www.env.go.jp/air/osen/monitoring/mon_r02/index.html

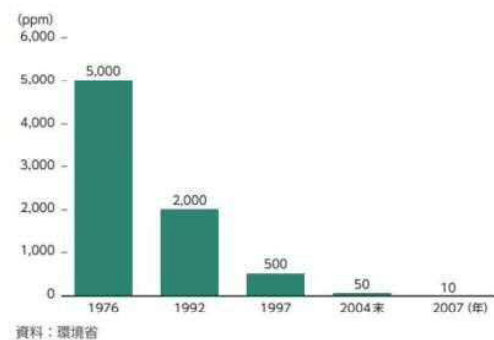


注1：2004年まで重量車の区分は車両総重量2.5トン超。

2：NO_xに係る規制は1974年から実施。図4-7-8は濃度規制から現在の質量規制に変更した1994年を基準として記載。

資料：環境省

図 2-4 ディーゼル重量車（車両総重量3.5 トン超）規制強化の推移



資料：環境省

図 2-5 軽油中の硫黄分規制強化の推移

(2) 2005 年：特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律（オフロード法）¹¹⁵

公道を走行しない特殊自動車への規制。2006 年 10 月から使用規制を開始し、逐次規制を強化。

2.2.2. 車種規制（自動車 NO_x・PM 法）¹¹¹

自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法（平成 4 年法律第 70 号）に基づき、自動車からの NO_x 及び粒子状物質（PM）の排出量の削減に向けた施策を実施。都市地域（埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、愛知県、三重県、大阪府及び兵庫県）において各都府県が「総量削減計画」を策定し、自動車からの NO_x 及び PM の排出量の削減に向けた施策を計画的に進める。

- (1) 1994 年：自動車 NO_x 法；特定地域の指定、車種規制、物流対策、人流対策等
- (2) 2001 年：自動車 NO_x・PM 法；SPM も対策の対象、東海地域が追加等
- (3) 2007 年：同法改正；局地汚染対策、流入車対策、建物の新設に係る届け出等

3. 地域の研究者や行政担当者へのヒアリング

3.1. 調査対象

表 3-1 対象とした地方公共団体

地域	地方公共団体	対象	実施日 (2022 年)
関東	東京都	行政(東京都環境局環境改善部計画課)	11 月 15 日
	川崎市	行政(川崎市環境局環境対策部環境保全課) 地方環境研究所(川崎市環境総合研究所環境研究担当)	11 月 17 日
東海	愛知県	行政(愛知県環境局環境政策部水大気環境課) 地方環境研究所(愛知県環境調査センター大気環境部)	11 月 25 日
	名古屋市	地方環境研究所(名古屋市環境科学調査センター)	11 月 25 日
関西	大阪府	行政(大阪府環境管理室環境保全課、事業所指導課) 地方環境研究所(大阪府立環境農林水産総合研究所)	11 月 7 日
瀬戸内	岡山県	行政(岡山県環境文化部環境管理課) 地方環境研究所(岡山県環境保健センター環境科学部大気科)	11 月 24 日
九州	福岡県	行政(福岡県環境保全課)	11 月 10 日

3.2. 調査内容

ヒアリングの主な内容を以下に示す。

■ 研究所の担当者

- ・ 事務局の取りまとめに対する意見交換（修正点、改善点）
- ・ 取りまとめに期待する事項
- ・ 今回事務局が取りまとめた以外の情報の提供
- ・ 近年のオキシダント濃度に寄与していると考えられる要因
- ・ 地域内で高濃度になりやすい地域、前駆物質の排出量が多い地域
- ・ 地域の気象条件の特徴

■ 行政の担当者

- ・ これまでのオキシダント対策の実施と効果
- ・ 今後考えられる前駆物質の排出状況の変化
- ・ NOx や VOC の経年的な排出量データ（データの有無と提供の可否）

3.3. 調査結果

3.3.1. 事務局の取りまとめに対する意見交換(修正点、改善点)

- ・ 高濃度かどうかの基準が、注意報レベル(120ppb 以上)の文献と環境基準レベル(60ppb)の文献が両方存在するので文献情報を整理する際はそこを分けた方が良い。(大阪府)
- ・ 多くの文献の中で行政担当者が特に読むべき文献が分かると良い。(愛知県)
- ・ 行政担当者にはこの資料は難しいと思うので、もう少しみ砕いた書き方にしてほしい。(川崎市、

愛知県)

- ・ 関東のレジームを「オゾン/全硝酸比」で推定した文献(井上ら,2010)を紹介しているが、全硝酸を測定している測定局が少ない日本では活用するのが難しい。行政担当者に役立ててもらうことを目的とするならば、日本で一般的にできる解析(VOC/NO_x 比等)を扱った文献を載せると良いと思う。(愛知県)

3.3.2. 取りまとめに期待する事項

- ・ NO_x や VOC の排出量は減少しているにも関わらず O_x 濃度は減少していない。気象条件やレジームなど過去と現在の違いが分かると行政でも活かせると思う。(大阪府)
- ・ シミュレーションを扱った研究が関東、関西を対象としたものが中心なので名古屋市についても情報が欲しい。(名古屋市)行政担当者としては、その地域のオキシダントの高濃度化に最も効いている要因は何かということが対策を考える上で最も欲しい情報だと思う。(愛知県、大阪府)
- ・ シミュレーションを活用した将来予測システムを作っているの、将来予測に役立つ情報がままと良い。(福岡県)注意報や情報を出す判断の一助とするため、過去の発令日で最も低い気温や早い風速等の気象条件が整理されるとありがたい。(岡山県)

3.3.3. 近年のオキシダント濃度に寄与していると考えられる要因

- ・ 第1回検討会の資料で紹介された荒川ら(2015)によるオゾン生成レジームの解析では、2005年の名古屋市は NO_x 律速と推定されていたが、近年の化学輸送モデルを使った調査では名古屋市は VOC 律速と推定された。(名古屋市)
- ・ 川崎市の過去30年の気象データを解析したところ、気温の上昇、風速の低下、日射量の増加が見られた。いずれもオキシダントが高濃度になりやすい変動である。夜間のオキシダント濃度の増加は、NO 濃度の減少に伴うタイトレーション効果の低下によるものと考えられる。(川崎市)
- ・ 大阪府では、O_x 濃度の年平均値は増加している一方で、120ppb 以上の高濃度日の日数は減少しているのは発生源対策が進んだ結果と考えられる(図 3-1)。(大阪府)
- ・ オキシダント濃度が 120ppb を超える事例が4~6月に限られることや真夜中に高濃度オキシダントが観測される場合があることから、福岡県では移流の影響が大きいと考えている。(福岡県)

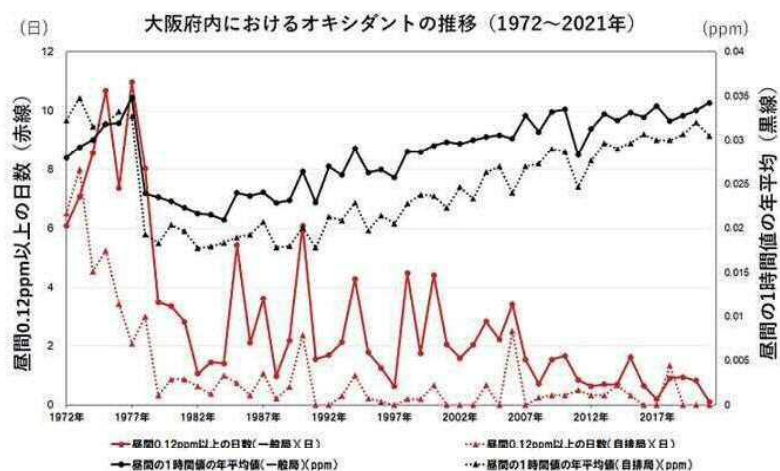


図 3-1 大阪府内におけるオキシダントの推移(1972~2021 年)(大阪府 HP より抜粋)

3.3.4. 地域内で高濃度になりやすい地域、前駆物質の排出量が多い地域

- ・ 倉敷市など発生源直近の測定局よりも、その周辺の市の測定局で高いことが多い。(岡山県)
- ・ 県南で生成したオキシダントが風に乗って、旭川や高梁川などの川沿いに上がっていった結果夕方に県北で高濃度オキシダントが観測される事例がある。(岡山県) 同様に河川に沿って汚染物質が移流する現象は関東地方、関西地方でもみられる。(川崎市,大阪府)
- ・ 前駆物質の排出量が多いのは臨海部であり、海風が吹いている場合はそこから内陸部に流れていくと考えられる。(川崎市)愛知県内で高濃度になる順番として、知多半島や海部地域でオキシダント濃度が上がり、海風で内陸に移流した後、尾張東部あたりで収束するかさらに内陸まで流れていくというパターンが多い。(愛知県)

3.3.5. これまでのオキシダント対策の実施と効果

① VOC 対策アドバイザーの派遣(東京都、川崎市)

開始年：2005 年(東京都)、2015 年(川崎市)

実施状況：VOC 対策アドバイザーの派遣回数は以下の表 1 の通りである。

表 3-2 近年の VOC 対策アドバイザーの派遣回数(年度ごと)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
東京都	7	4	5	9	8	9	3	4	4
川崎市	*	3	2	1	2	1	1	0	1

*：未実施

効果の検証：アドバイザー制度による VOC の定量的な効果測定は未実施。

東京都では、アドバイザーの助言に基づいて実際に取り組みをした場合、「事業成果報告書」の提出を依頼しており、これまでに排出源の特定、排水濃度の維持管理改善、悪臭抑制等の作業改善などが報告されている。カイゼン運動の推進のほか優良工場認定申請などモチベーションの向上にも貢献している。

② Clear Sky 実現に向けた大気環境改善促進事業(東京都)

開始年：2019 年

概要：PM2.5 や光化学オキシダントなど大気環境対策の取組を行っている団体や個人を

「Clear Sky サポーター」として登録する事業。SNS を活用したフォトコンテスト等も実施。

実施状況：企業サポーターについては、事業を立ち上げた 2019 年は伸びたものの、コロナ感染症の影響で対面のイベントが難しいこともありその後は伸び悩んでいる。今年度からは個人サポーター制度も開始。

効果の検証：サポーターの登録数やフォトコンテストの投稿数・閲覧数の増加具合や、イベントの効果等を確認し、次の施策に活用しているが、外部に見せる形にはなっていない。

③ 新たな環境政策の策定(川崎市)

概要：令和 4 年に策定した「川崎市大気・水環境計画」の中で NO₂、PM2.5、光化学オキシダントについて目標値を設定、令和 12 年度の達成を目指す。それぞれの目標値は、NO₂：環境基準下限値 0.04ppm の達成測定局が 77.8%、PM2.5：環境基準の達成維持、光化学オキシダント：光化学スモッグ発令 0 日

及び光化学オキシダント高濃度の低減(光化学オキシダント環境改善評価指標値として 0.0103ppm)。

実施状況：VOC 対策の一環として、横浜市、神奈川県、東京都、千葉県と連携した広域的な VOC 成分調査を実施した。

効果の検証：今年度から実施している計画のため、今後の調査及び取組の方向性確認は光化学オキシダント環境改善評価指標値を用いて行っていく予定である。

④ 光化学オキシダントを対象とした夏期の大気汚染防止対策(岡山県)

概要：オキシダント濃度が 100ppb を超えた時点で注意報(120ppb)より先に「オキシダント情報」という形で注意喚起を出している。

効果の検証：夏期対策については、啓発活動としての意味合いが強い。

3.3.6. NO_x や VOC の経年的な排出量データ

独自に集計を行っている地方公共団体もあるが、多くは環境省の大気汚染物質排出量総合調査、揮発性有機化合物排出インベントリ、PRTR 制度の集計結果を活用してほしいとの回答であった。

3.3.7. まとめ

- ・ 地域ごとの主な前駆物質の発生源や高濃度オキシダントが観測されやすい気象条件など、オキシダント汚染の特徴についてはそれぞれの地域である程度解明されている。
- ・ 一方、その地域でオキシダントの高濃度化に最も効いている要因やオキシダント濃度の将来予測に役立つ情報など、地域のオキシダント対策を検討するために必要な情報については多くの地域で不十分であり、地方公共団体の担当者が求めている情報である。
- ・ そのため、次年度の解析ではそれらの情報を解明することを目的とする必要がある。

4. オキシダント及び前駆物質濃度の経年変化

4.1. 光化学オキシダント(Ox)日最高8時間値

(1) 関東地域

1) 県別の Ox 日最高8時間値の経年変化

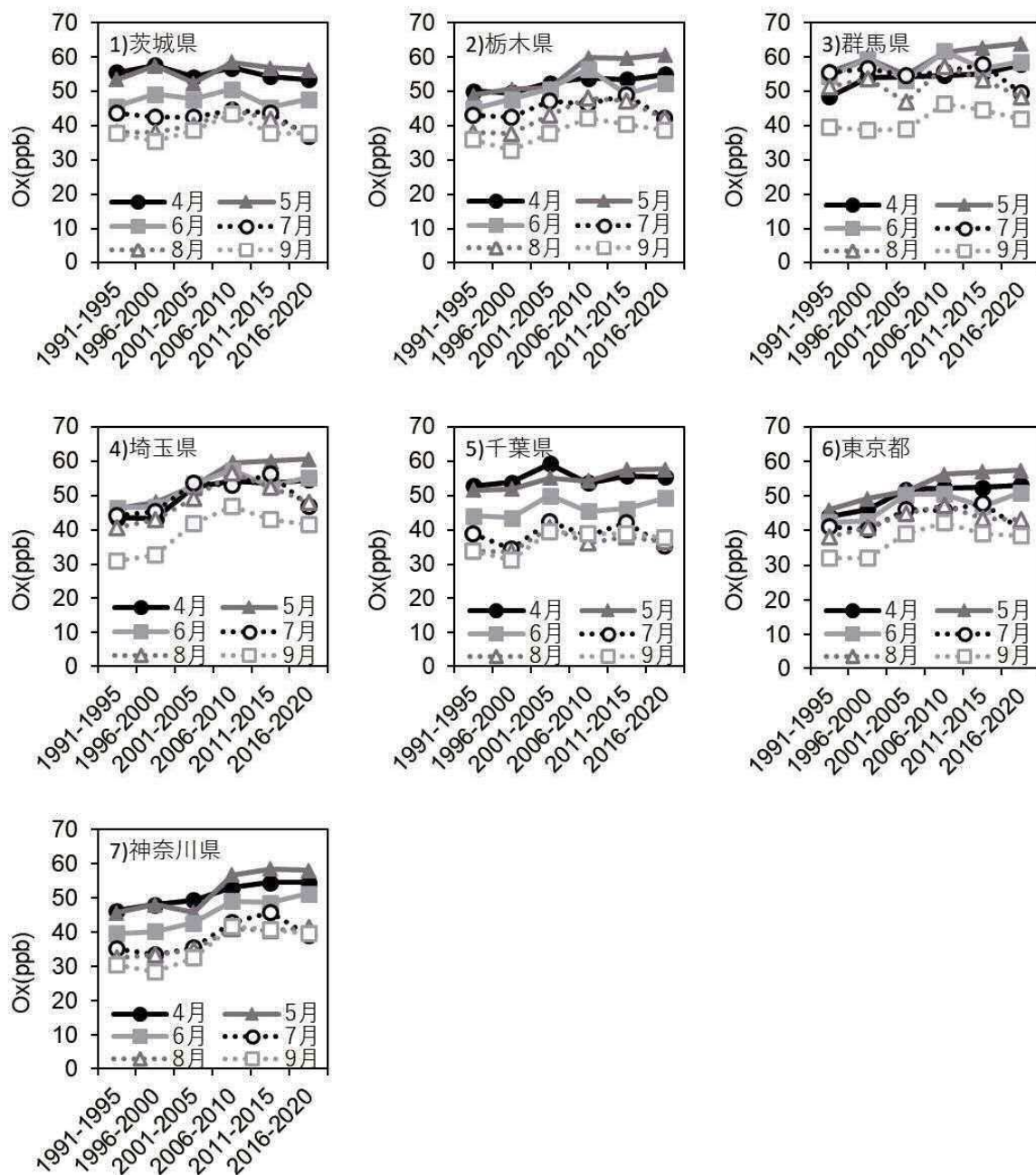


図 4-1 県別の Ox 日最高8時間値の経年変化（関東）

2) 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

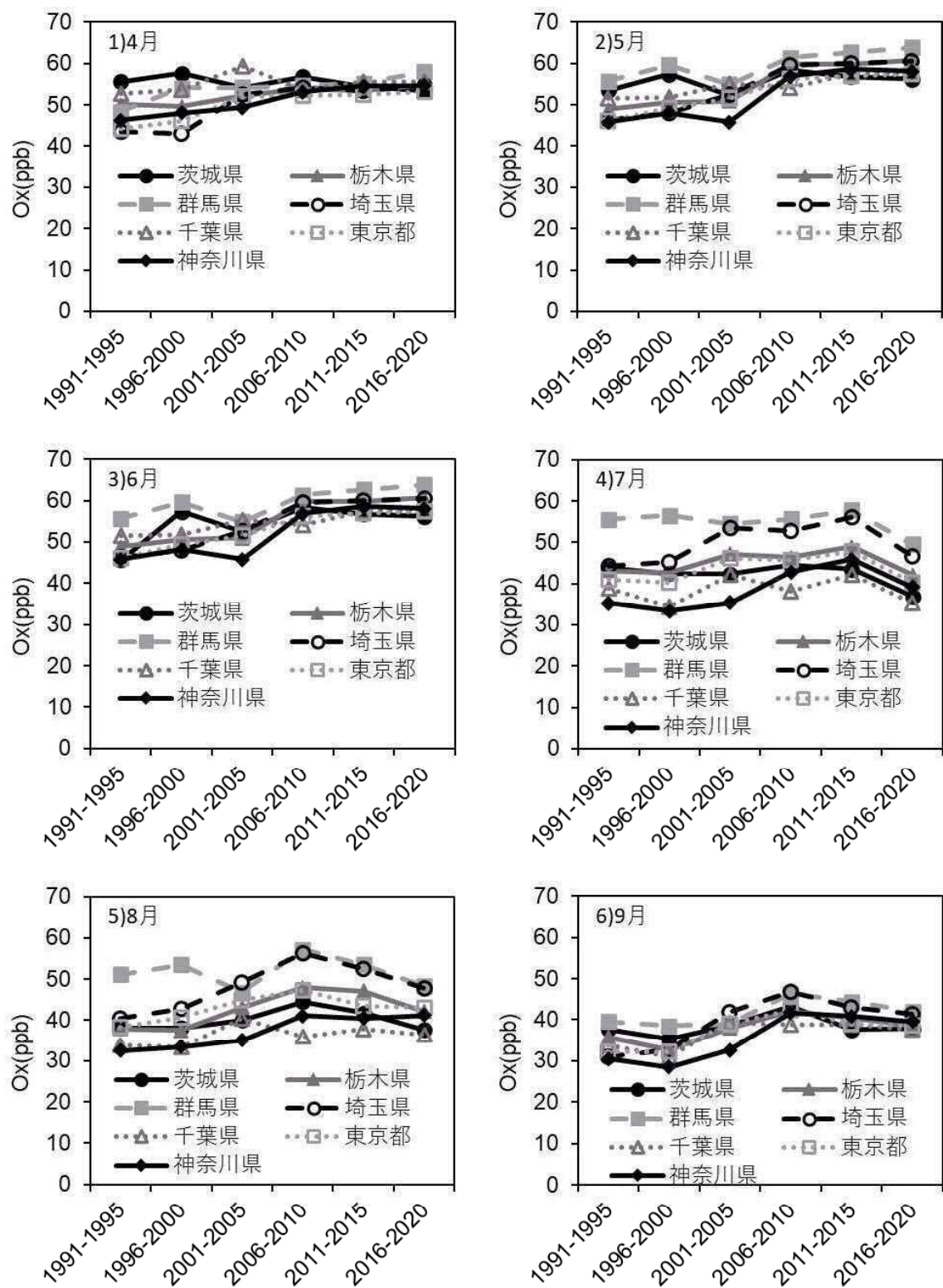


図 4-2 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (関東)

(2) 東海地域

1) 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

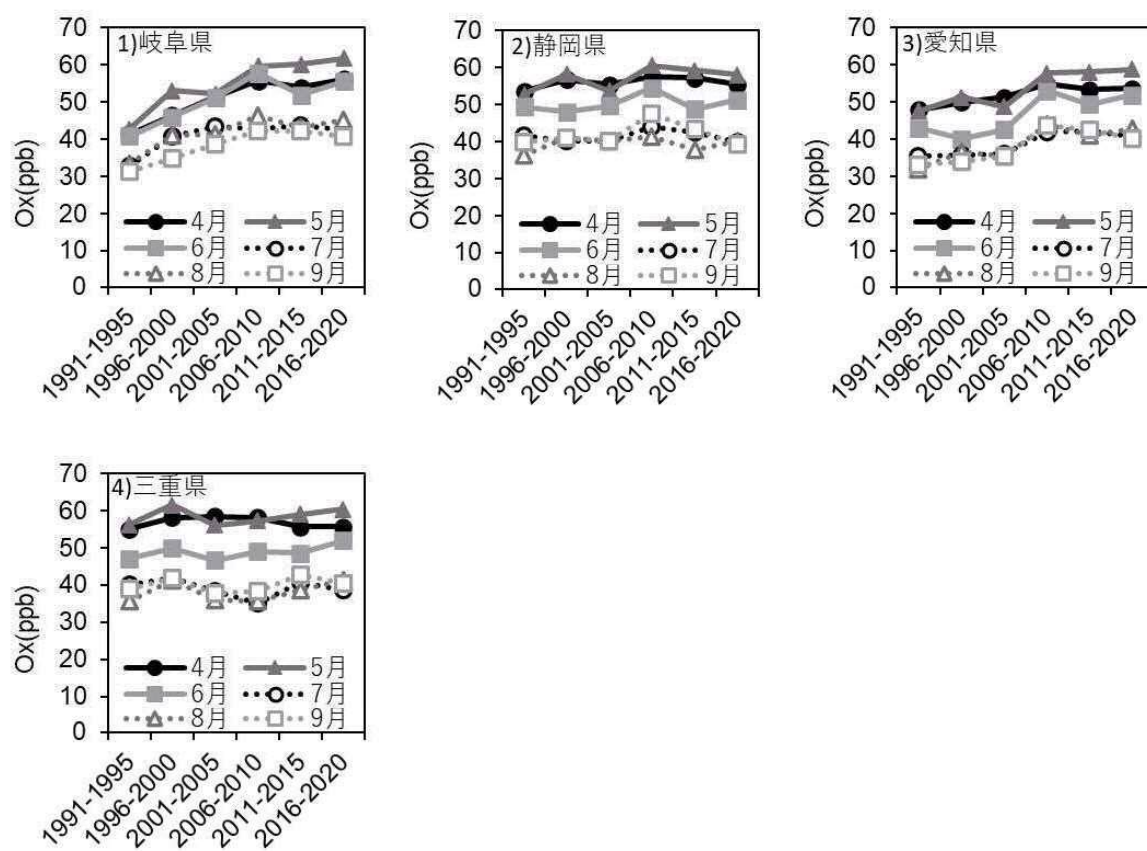


図 4-3 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (東海)

2) 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

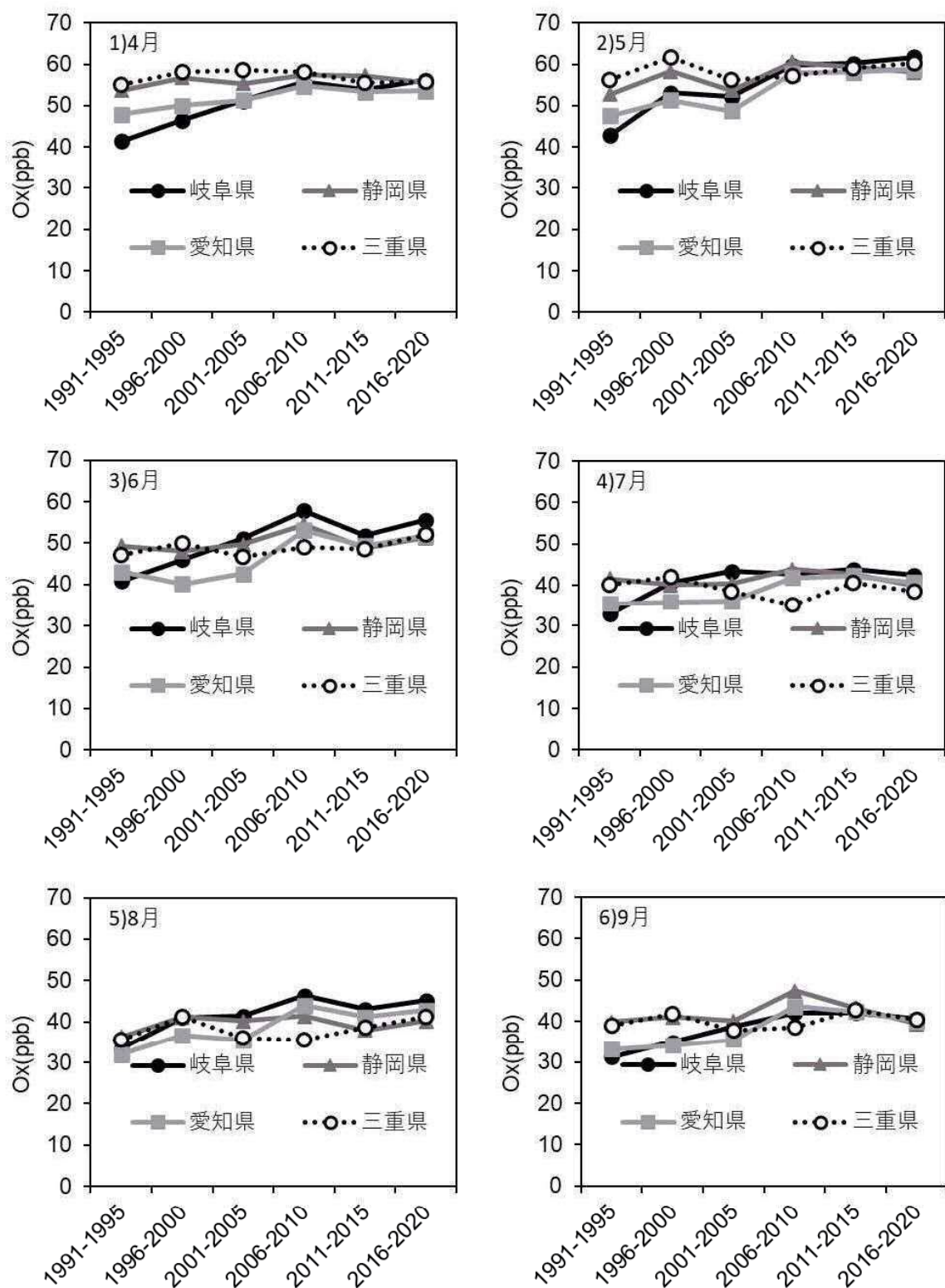


図 4-4 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (東海)

(3) 関西地域

1) 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

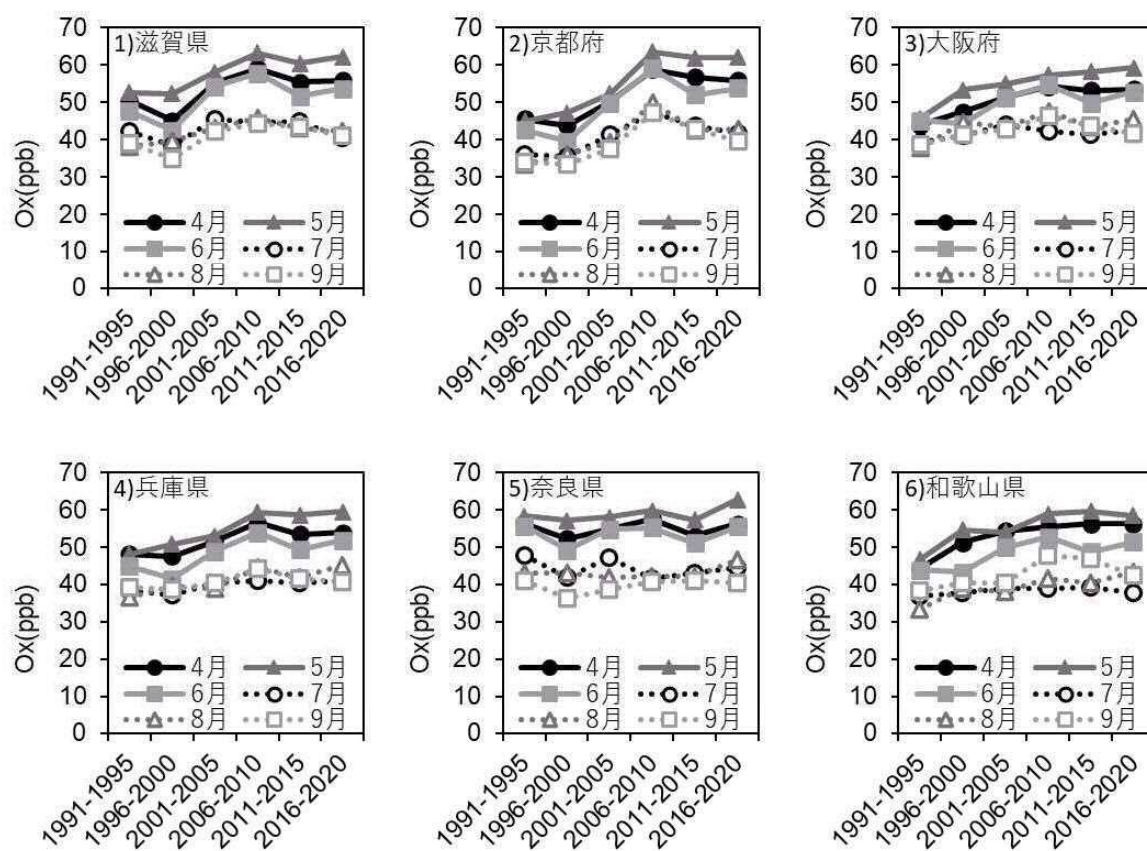


図 4-5 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (関西)

2) 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

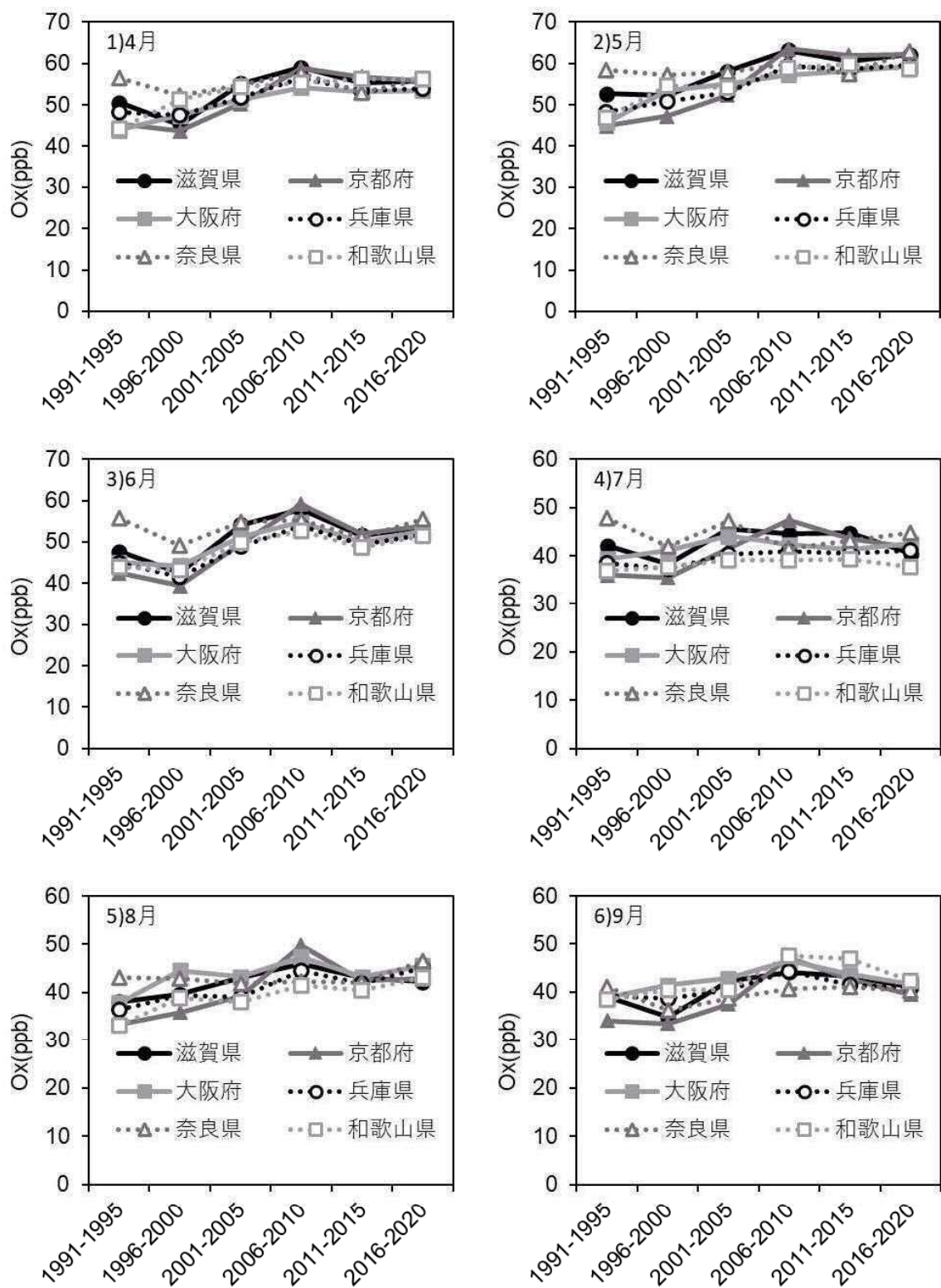


図 4-6 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化（関西）

(4) 瀬戸内地域

1) 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

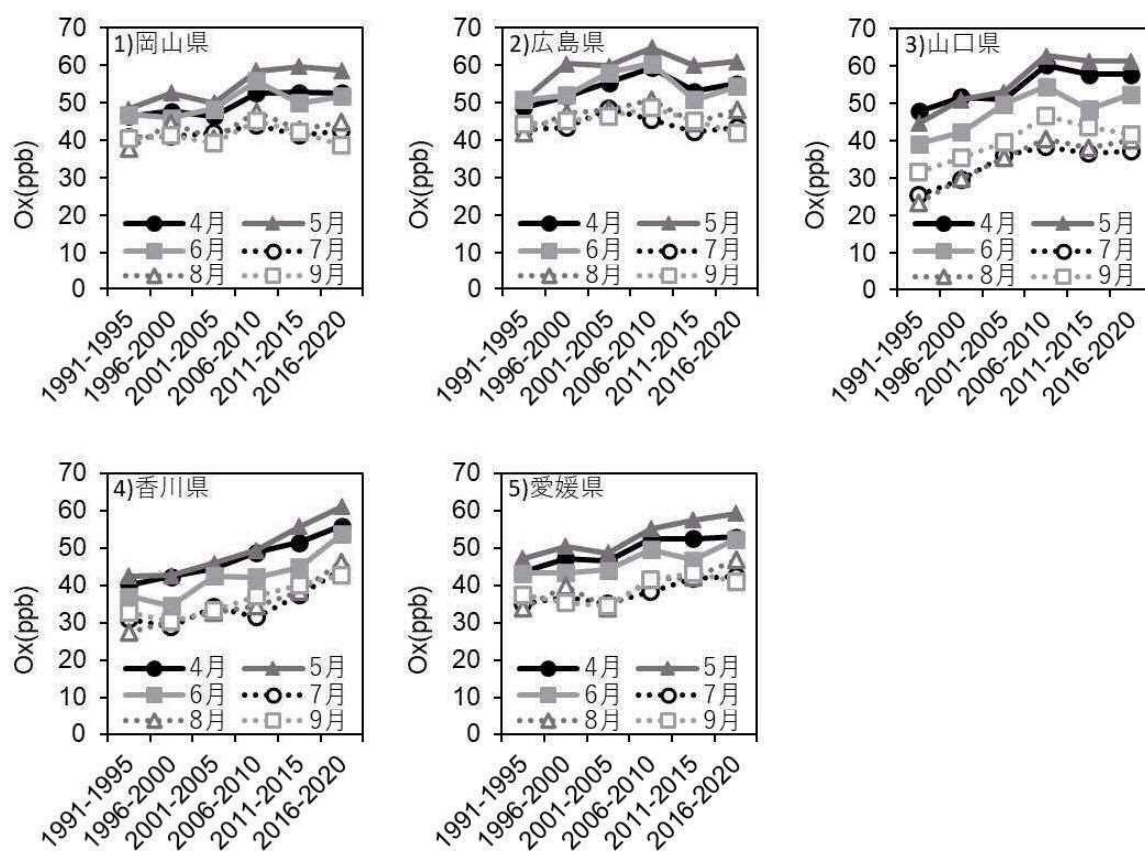


図 4-7 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (瀬戸内)

2) 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

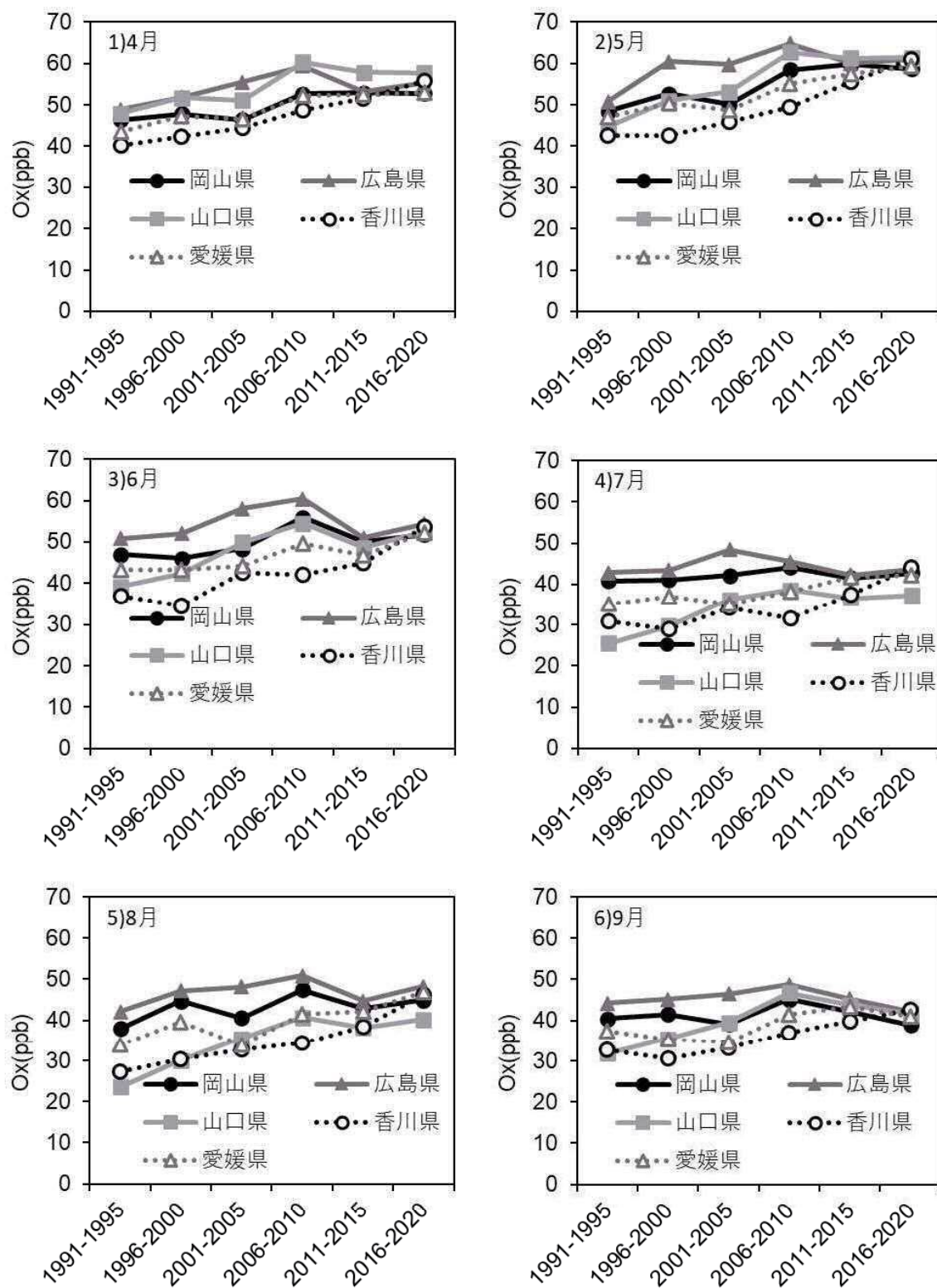


図 4-8 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (瀬戸内)

(5) 九州地域

1) 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

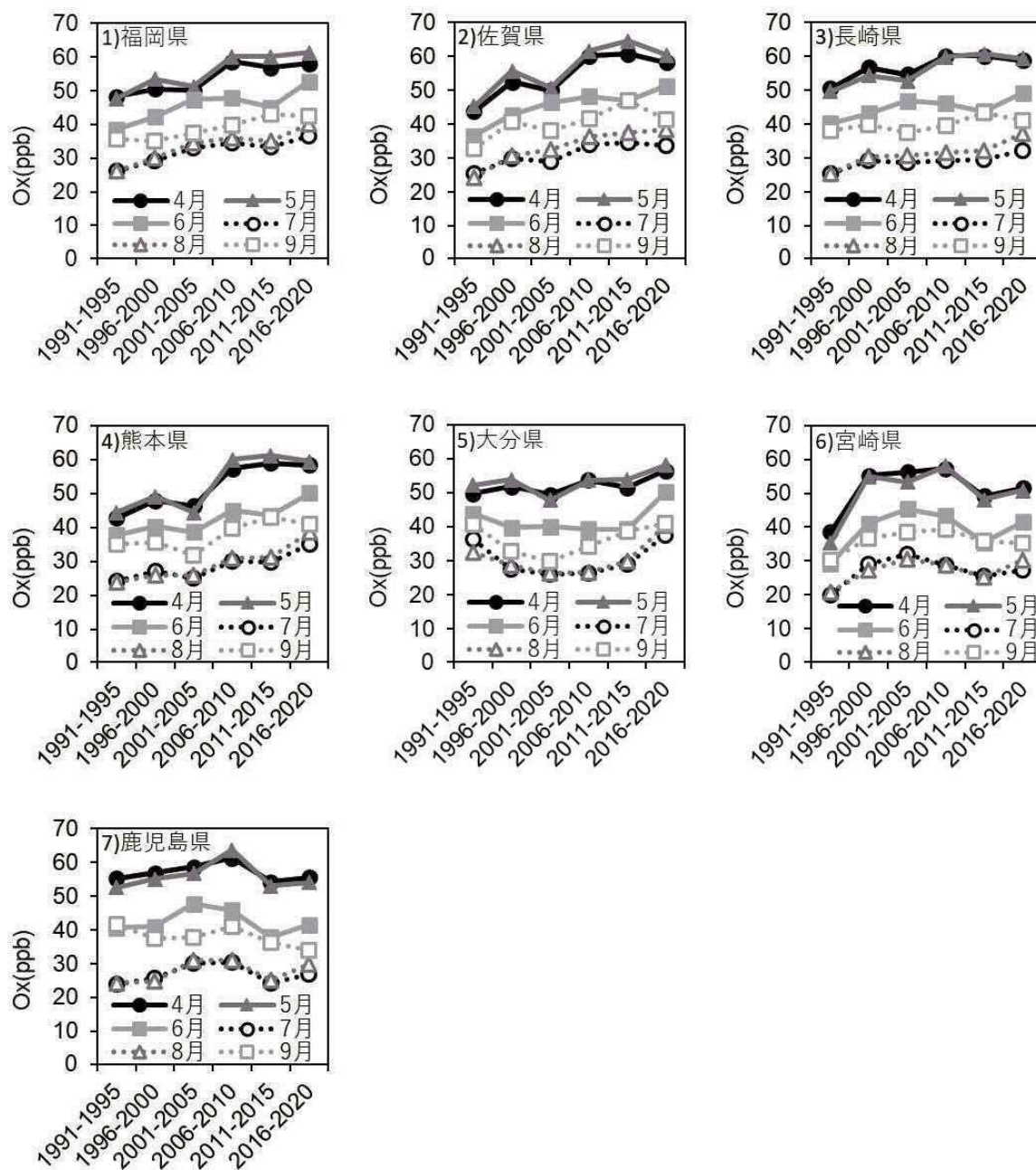


図 4-9 県別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (九州)

2) 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化

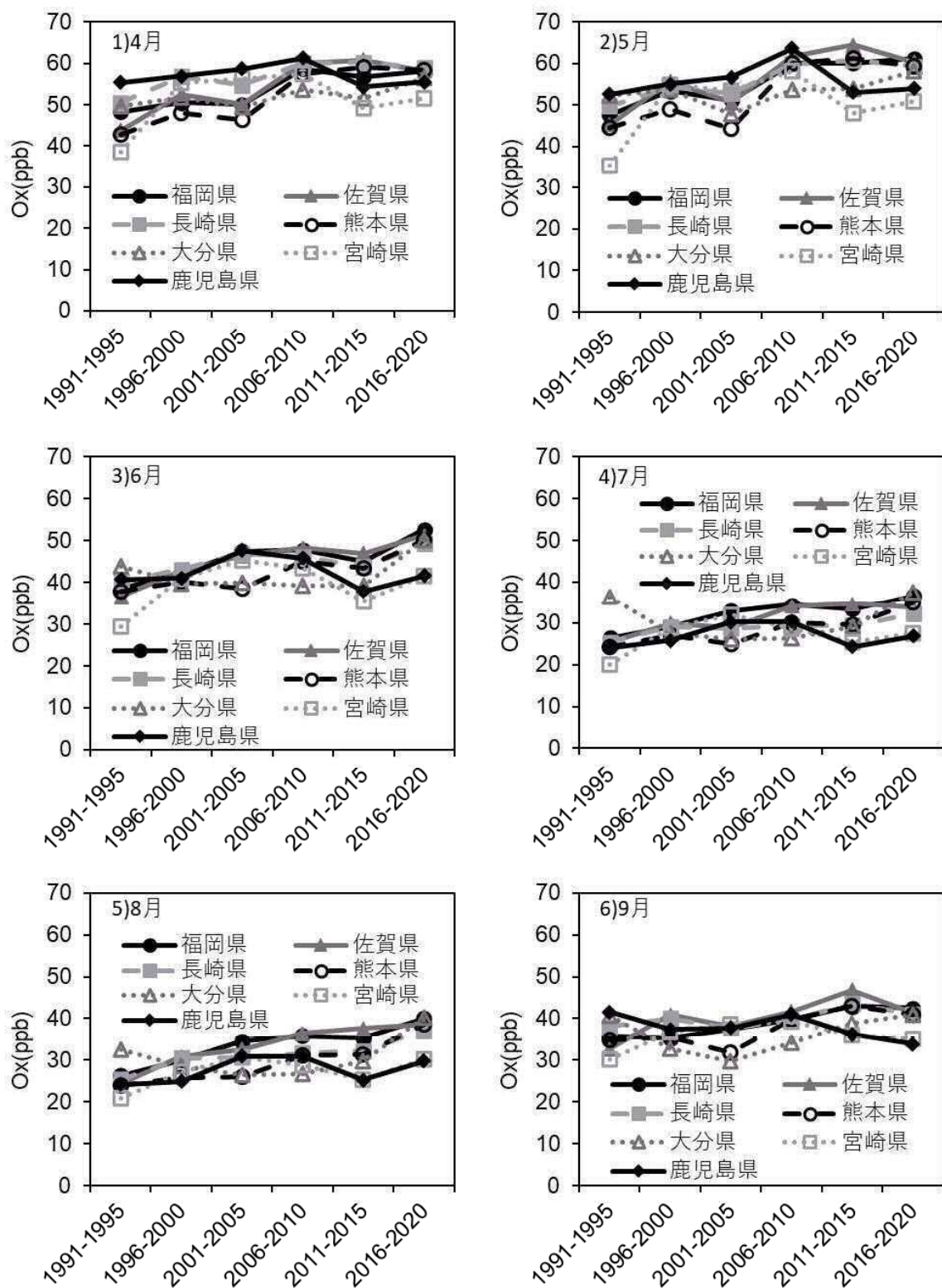


図 4-10 月別の Ox 日最高 8 時間値の経年変化 (九州)

4.2. 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数

(1) 関東地域

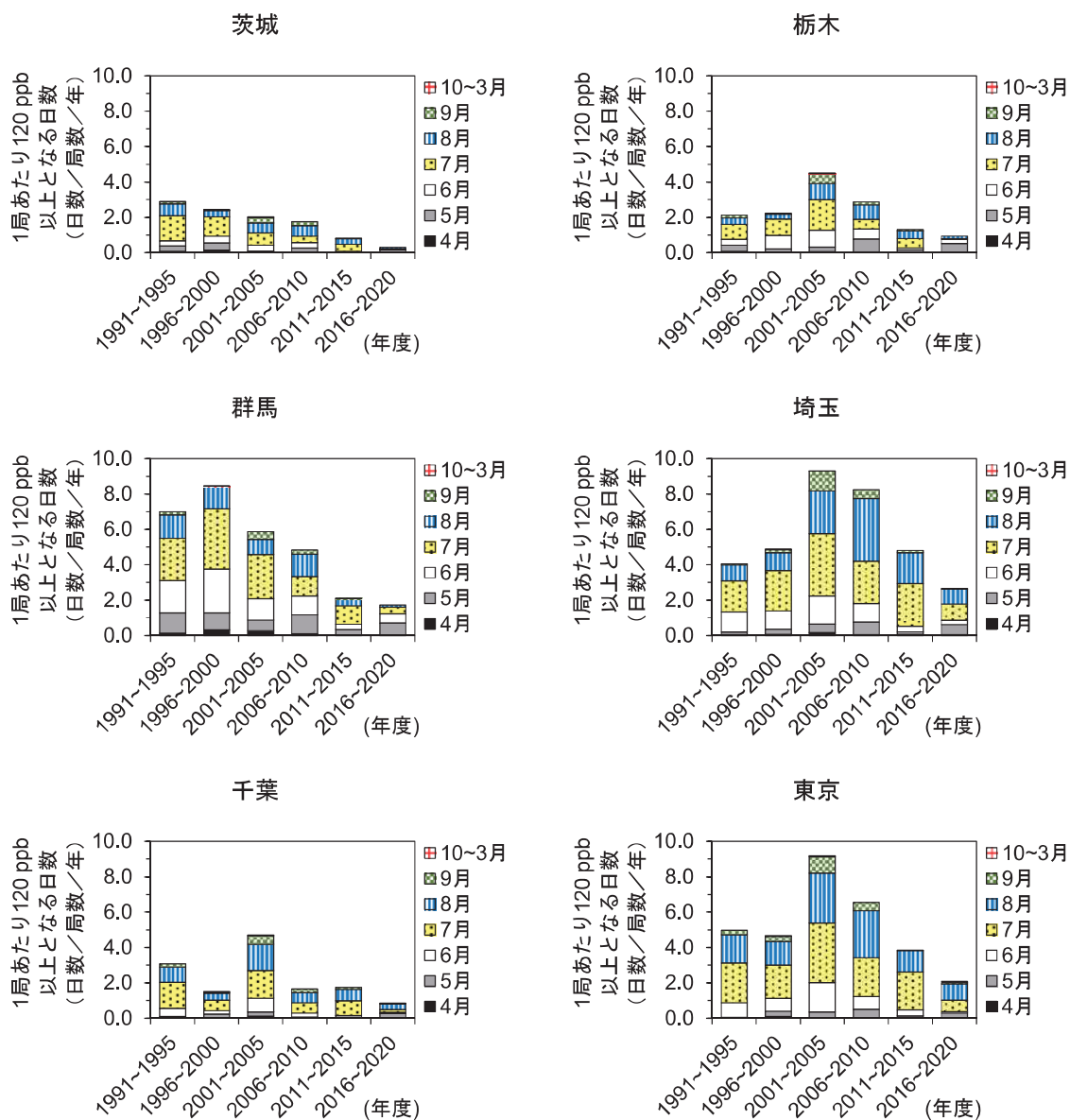


図 4-11 (1) 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (関東)

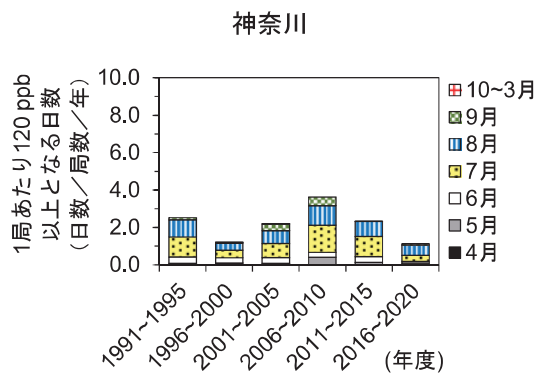


図 4-11 (2) 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (関東)

(2) 東海地域

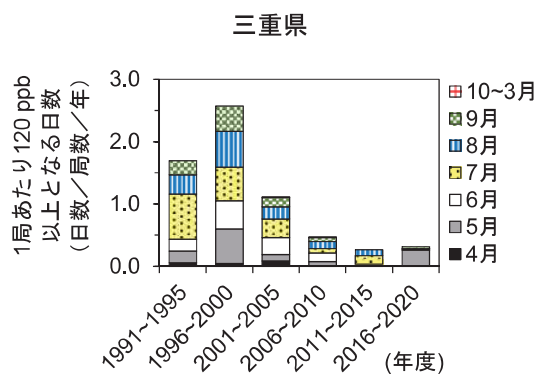
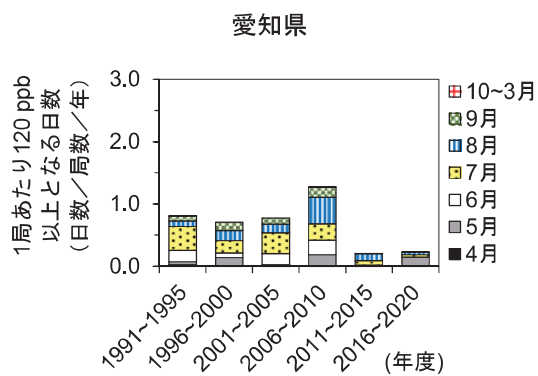
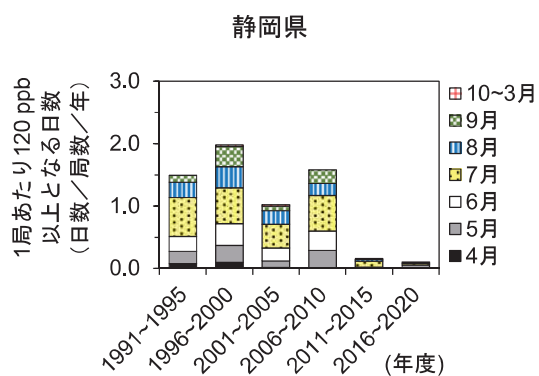
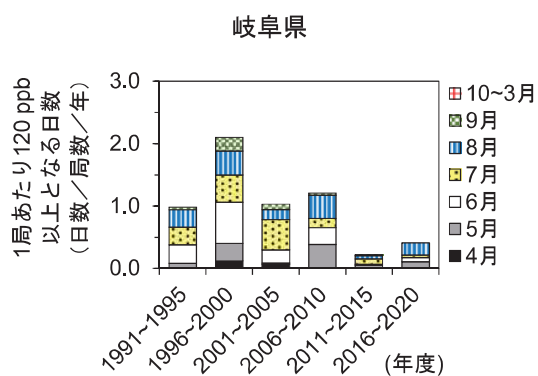


図 4-12 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (東海)

(3) 関西地域

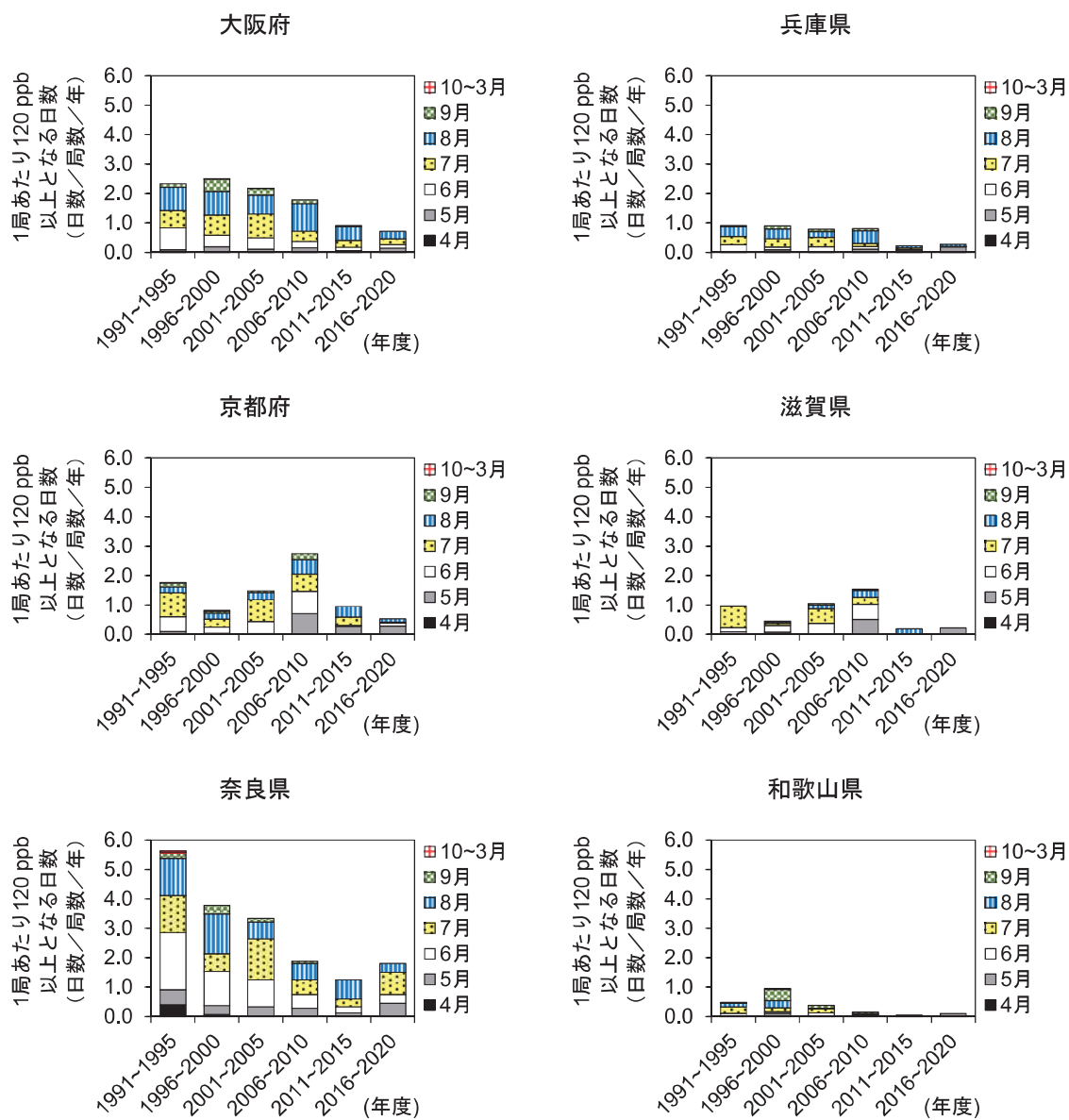


図 4-13 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (関西)

(4) 瀬戸内地域

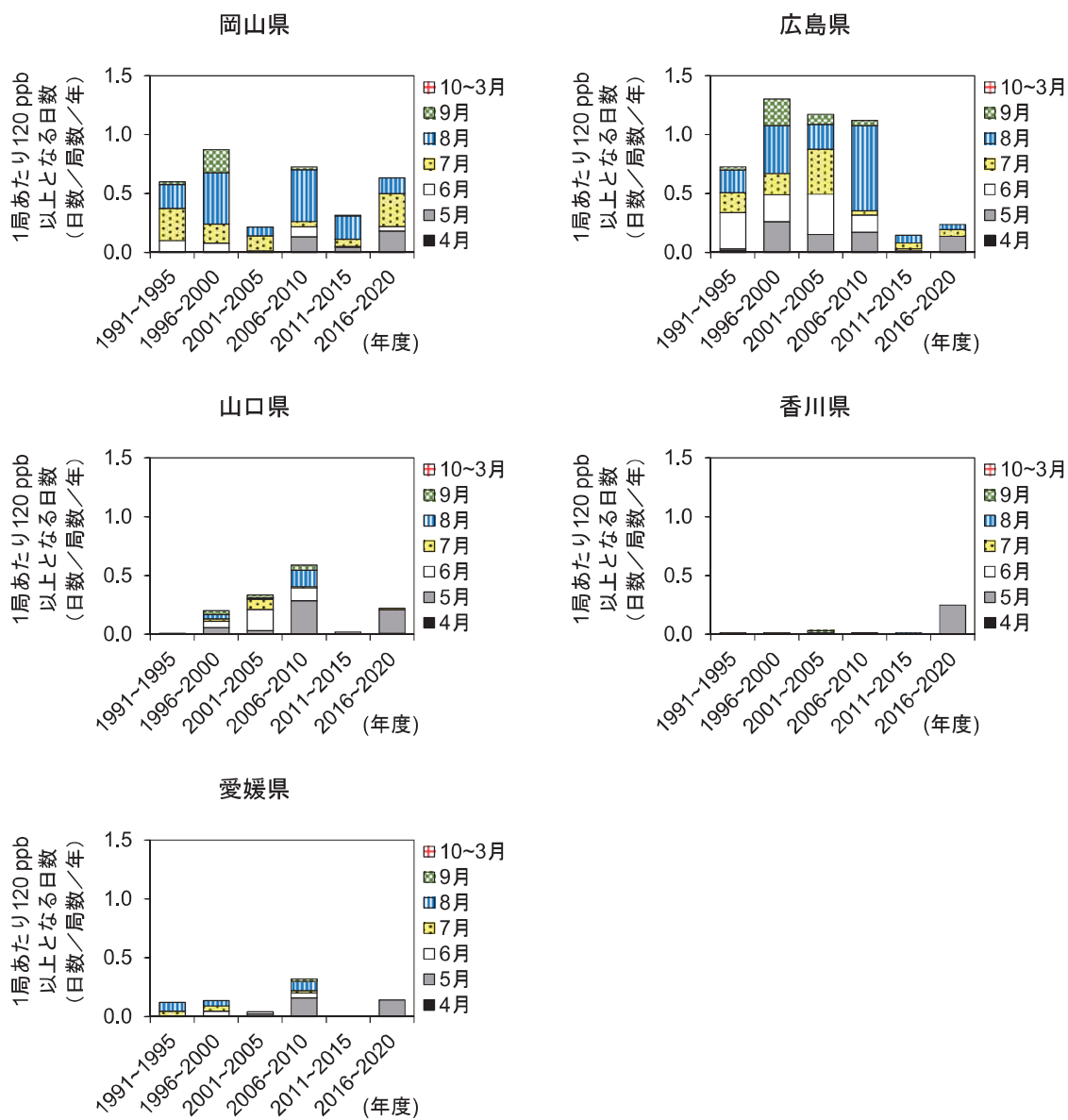


図 4-14 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (瀬戸内)

(5) 九州地域

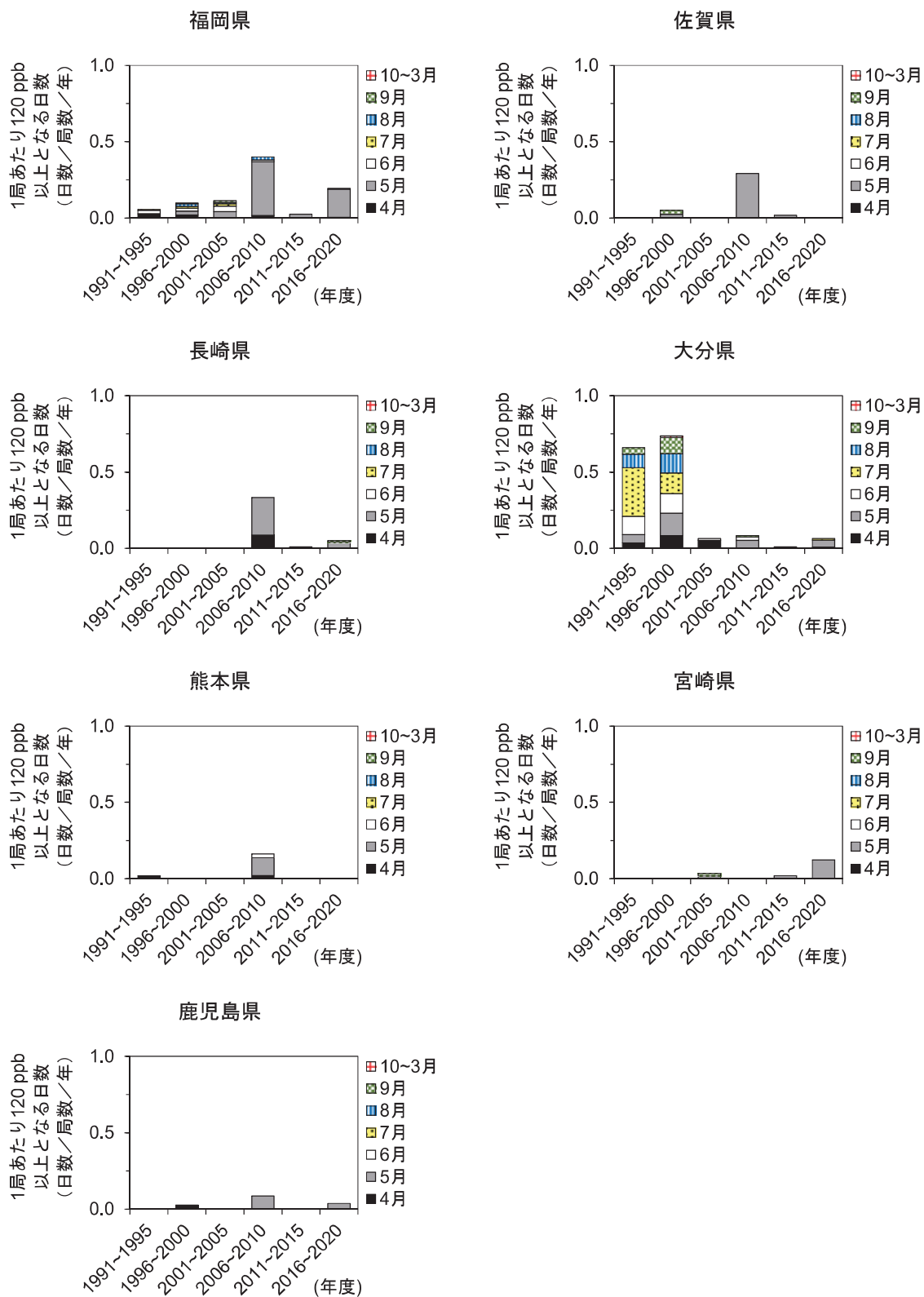


図 4-15 光化学オキシダント(Ox)日最高値が 120 ppb 以上の日数 (九州)

4.3. 窒素酸化物(NO_x)濃度

(1) 関東地域

1) 県別の NO_x 月平均値の経年変化

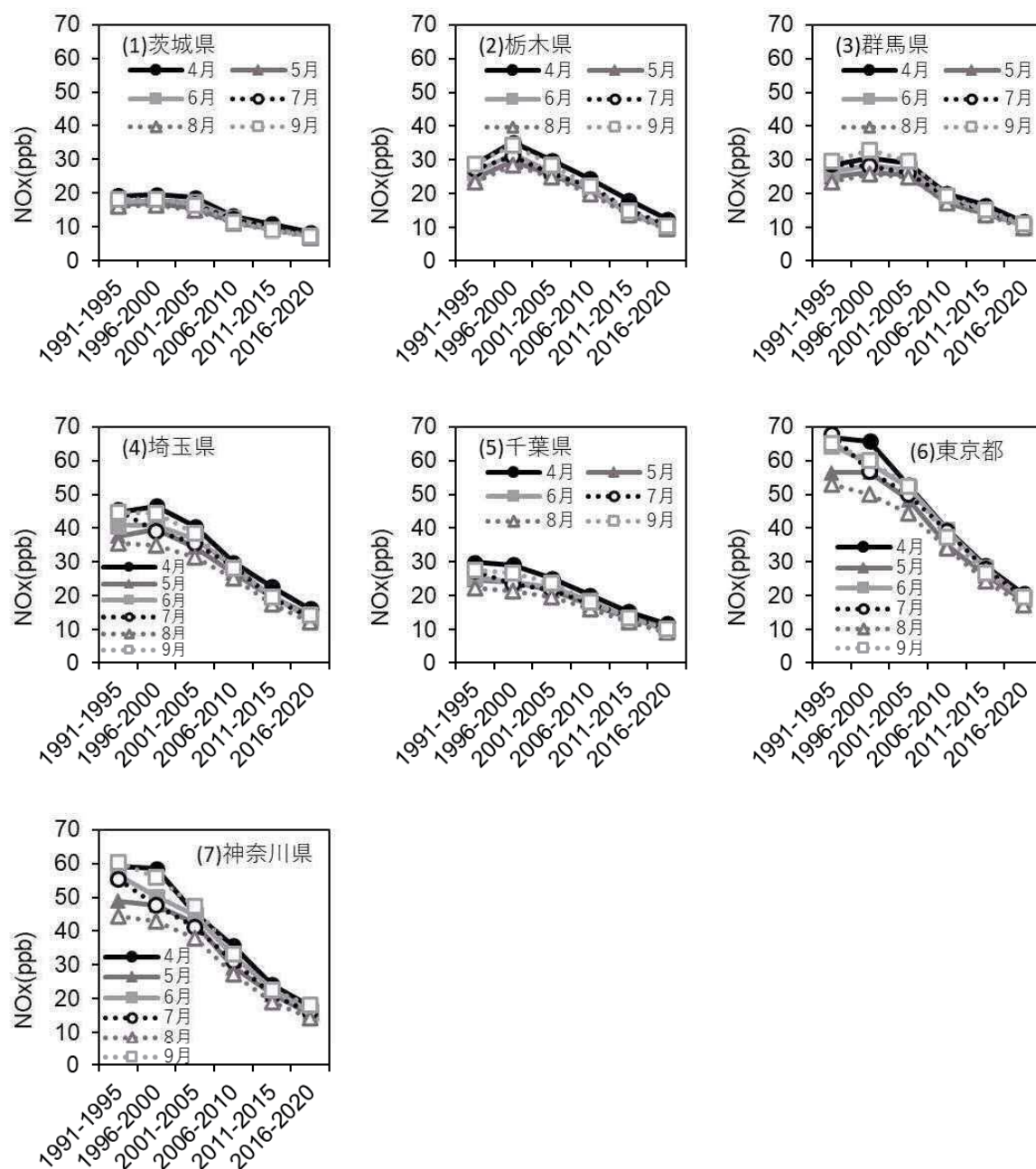


図 4-16 県別の NO_x 月平均値の経年変化(関東)

2) 月別の NOx 月平均値の経年変化

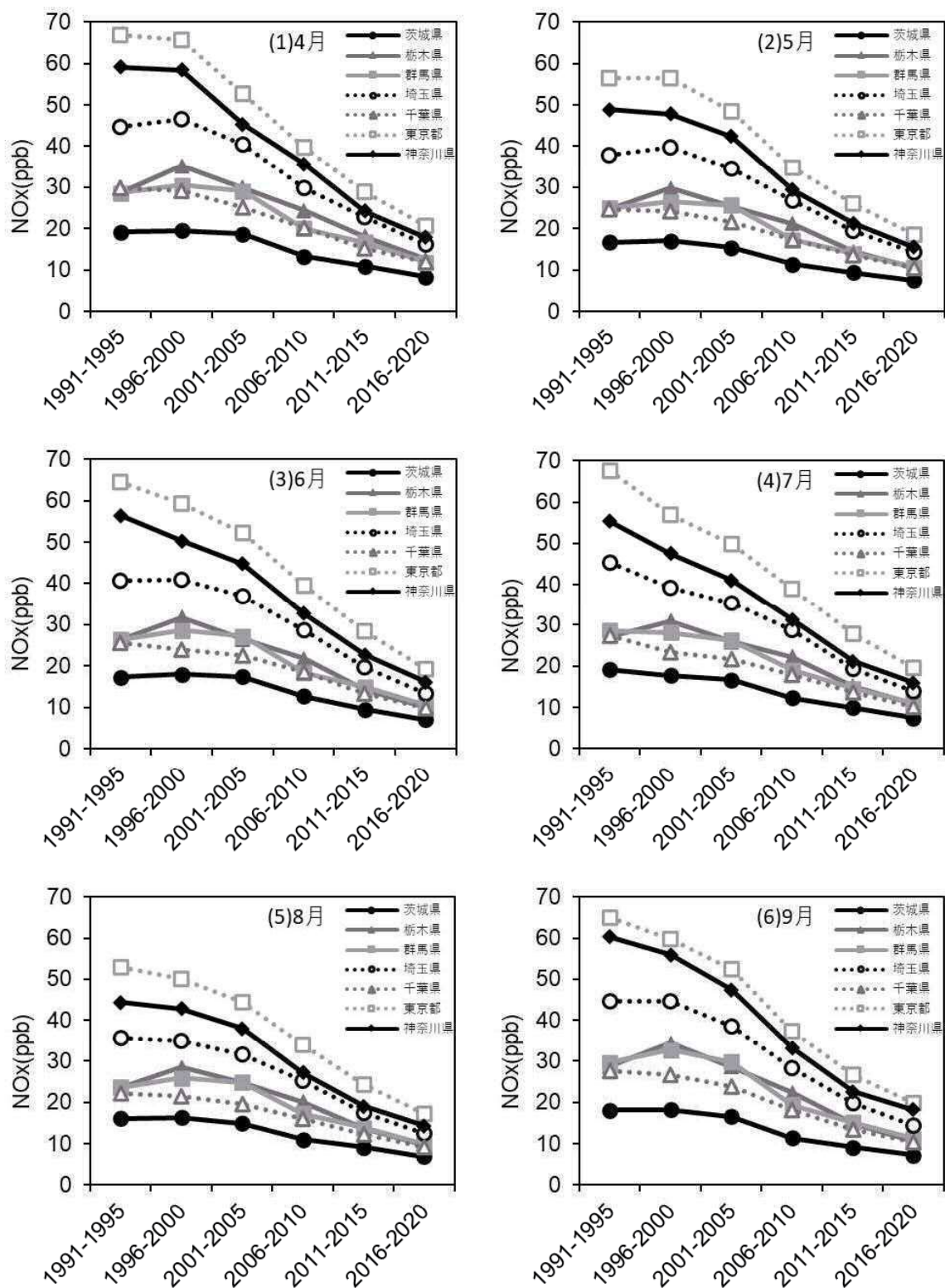


図 4-17 月別の NOx 月平均値の経年変化 (関東)

(2) 東海地域

1) 県別の NOx 月平均値の経年変化

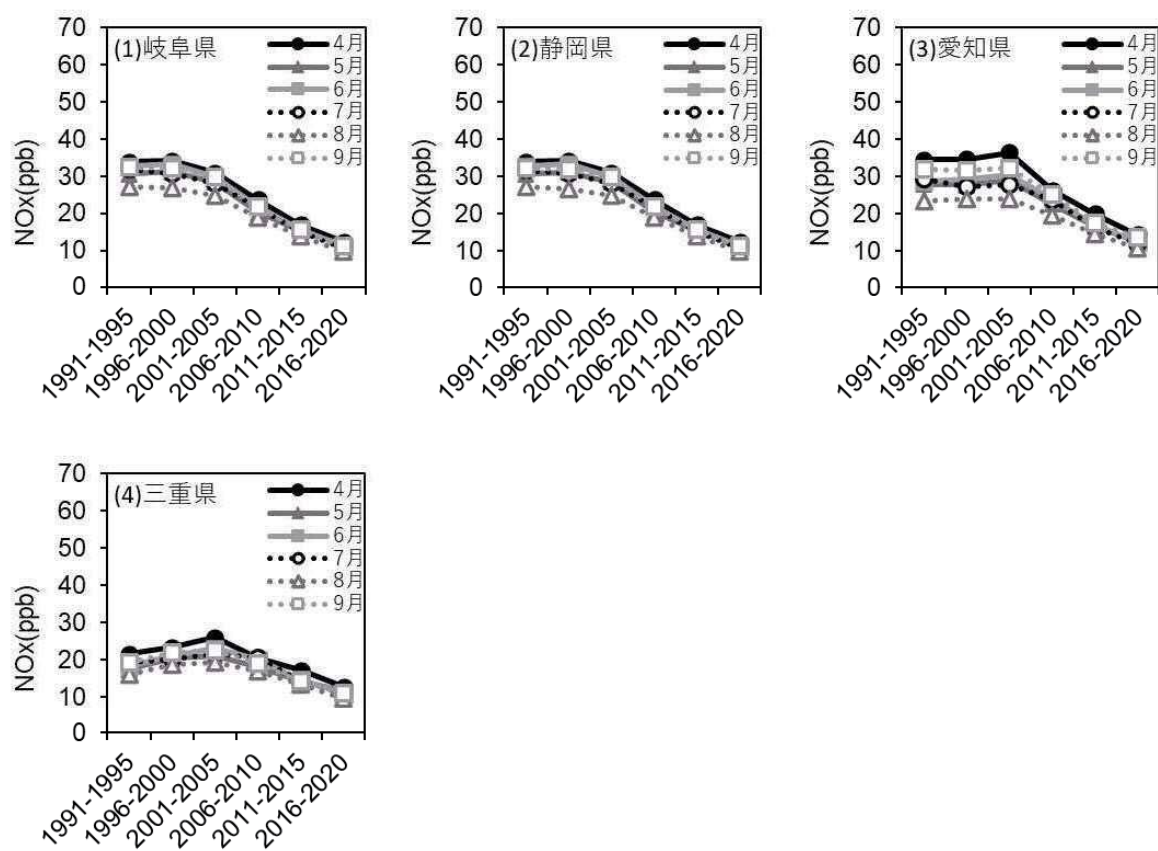


図 4-18 県別の NOx 月平均値の経年変化(東海)

2) 月別の NOx 月平均値の経年変化

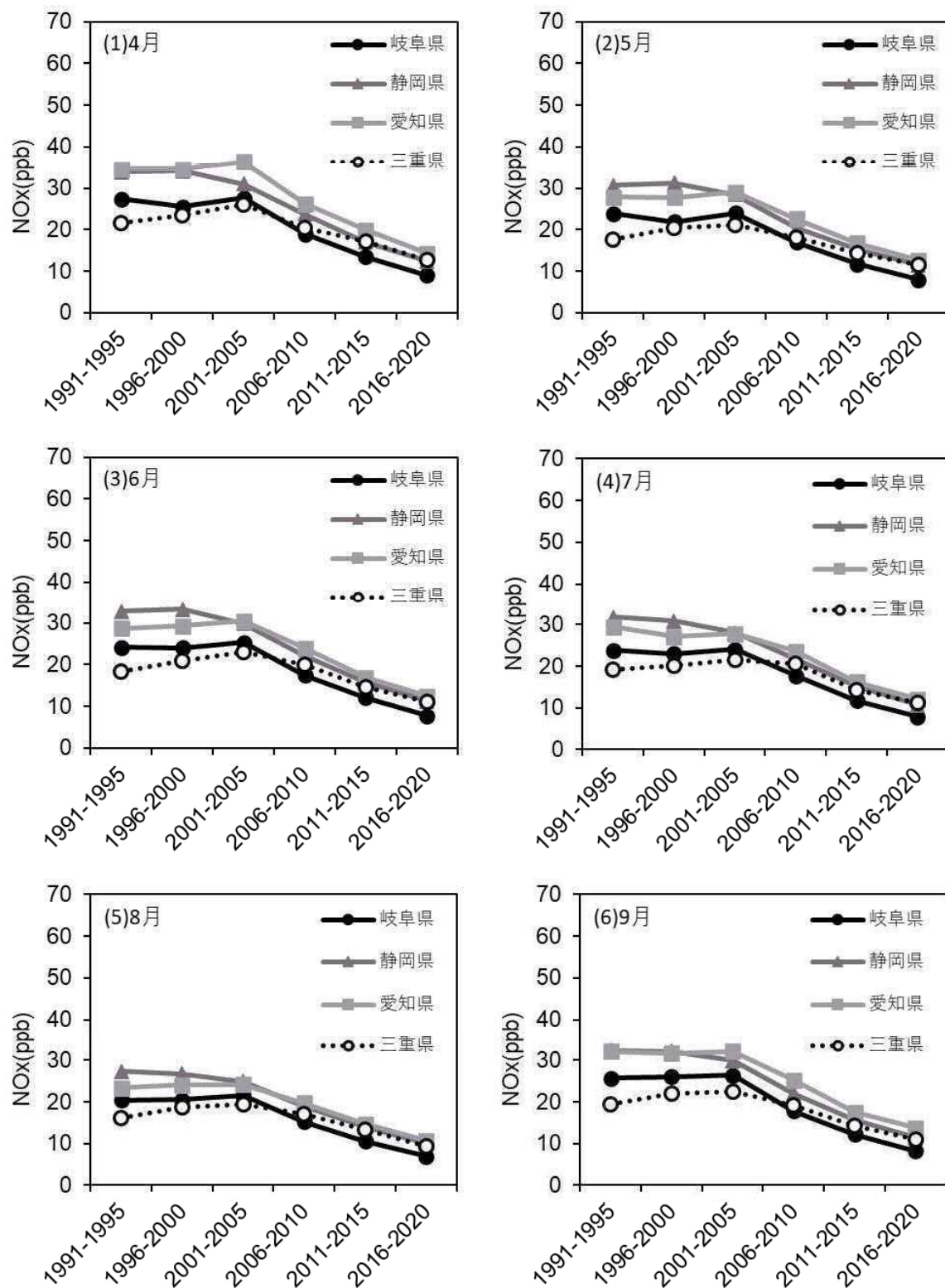


図 4-19 月別の NOx 月平均値の経年変化 (東海)

(3) 関西地域

1) 県別の NOx 月平均値の経年変化

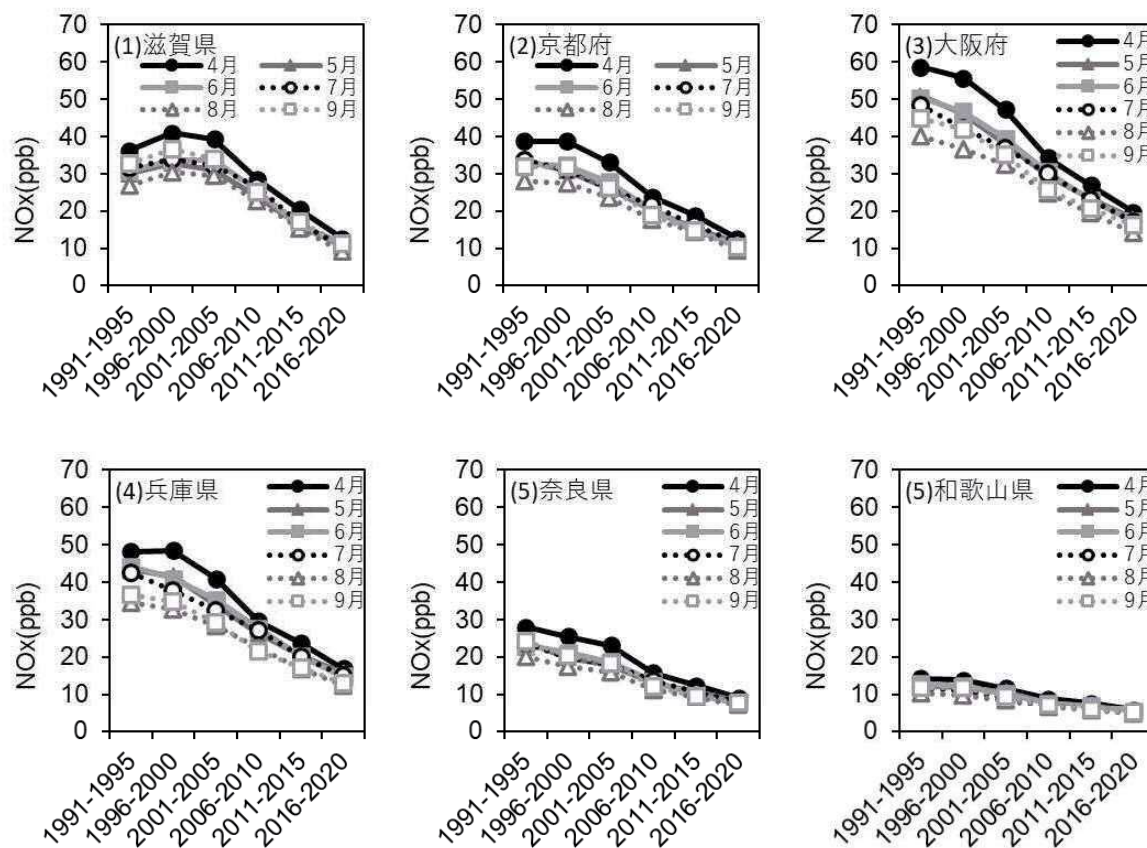


図 4-20 県別の NOx 月平均値の経年変化(関西)

2) 月別の NOx 月平均値の経年変化

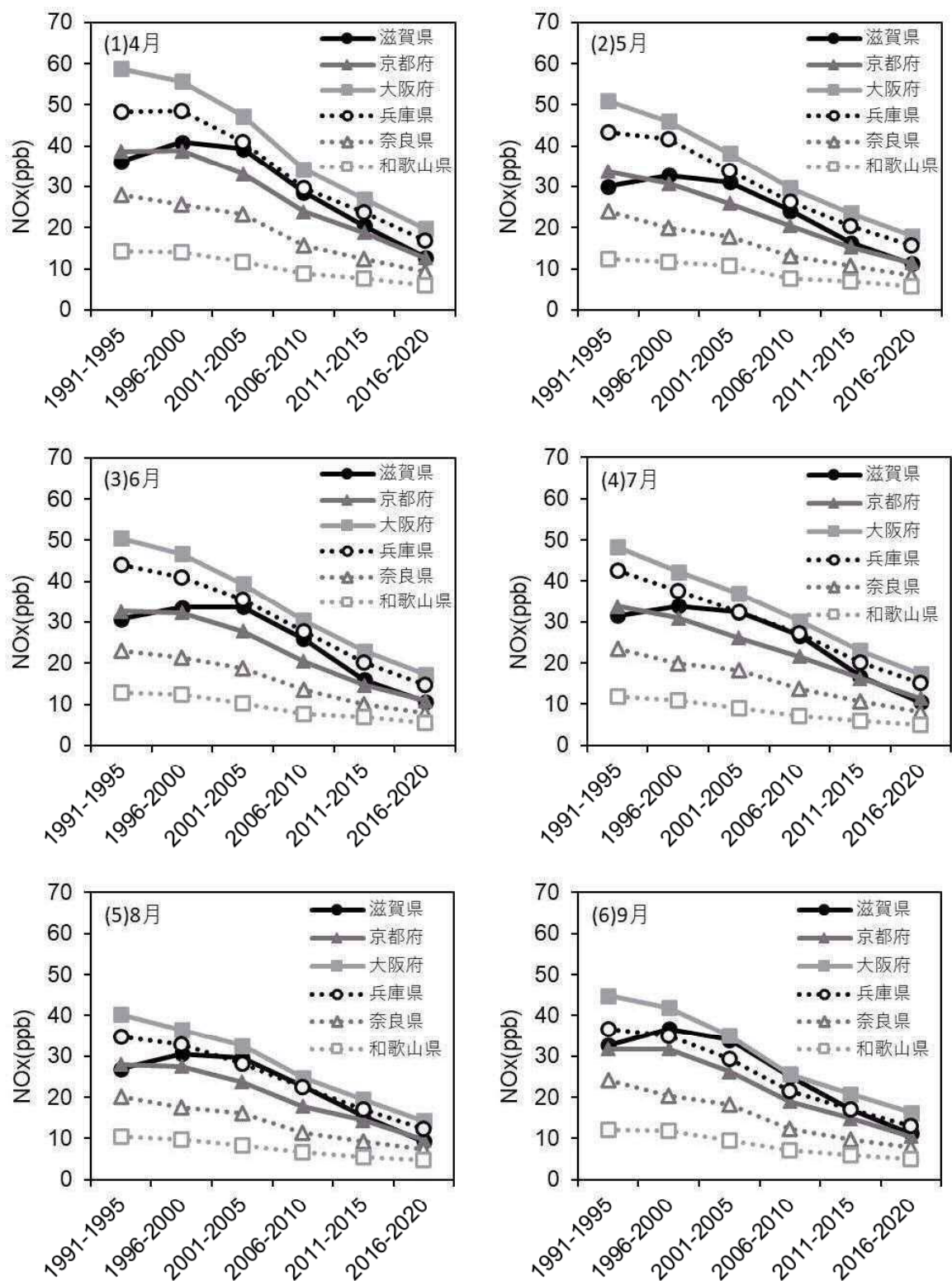


図 4-21 月別の NOx 月平均値の経年変化（関西）

(4) 瀬戸内地域

1) 県別の NOx 月平均値の経年変化

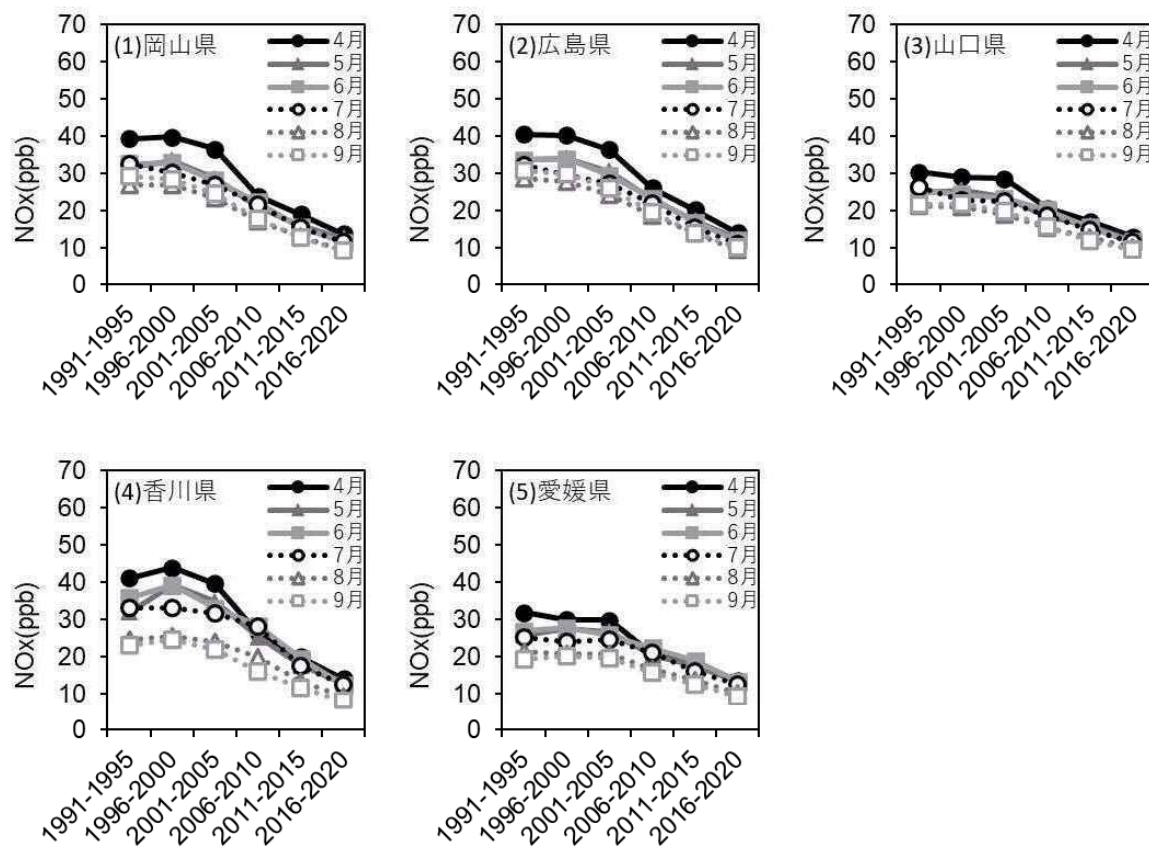


図 4-22 県別の NOx 月平均値の経年変化(瀬戸内)

2) 月別の NOx 月平均値の経年変化

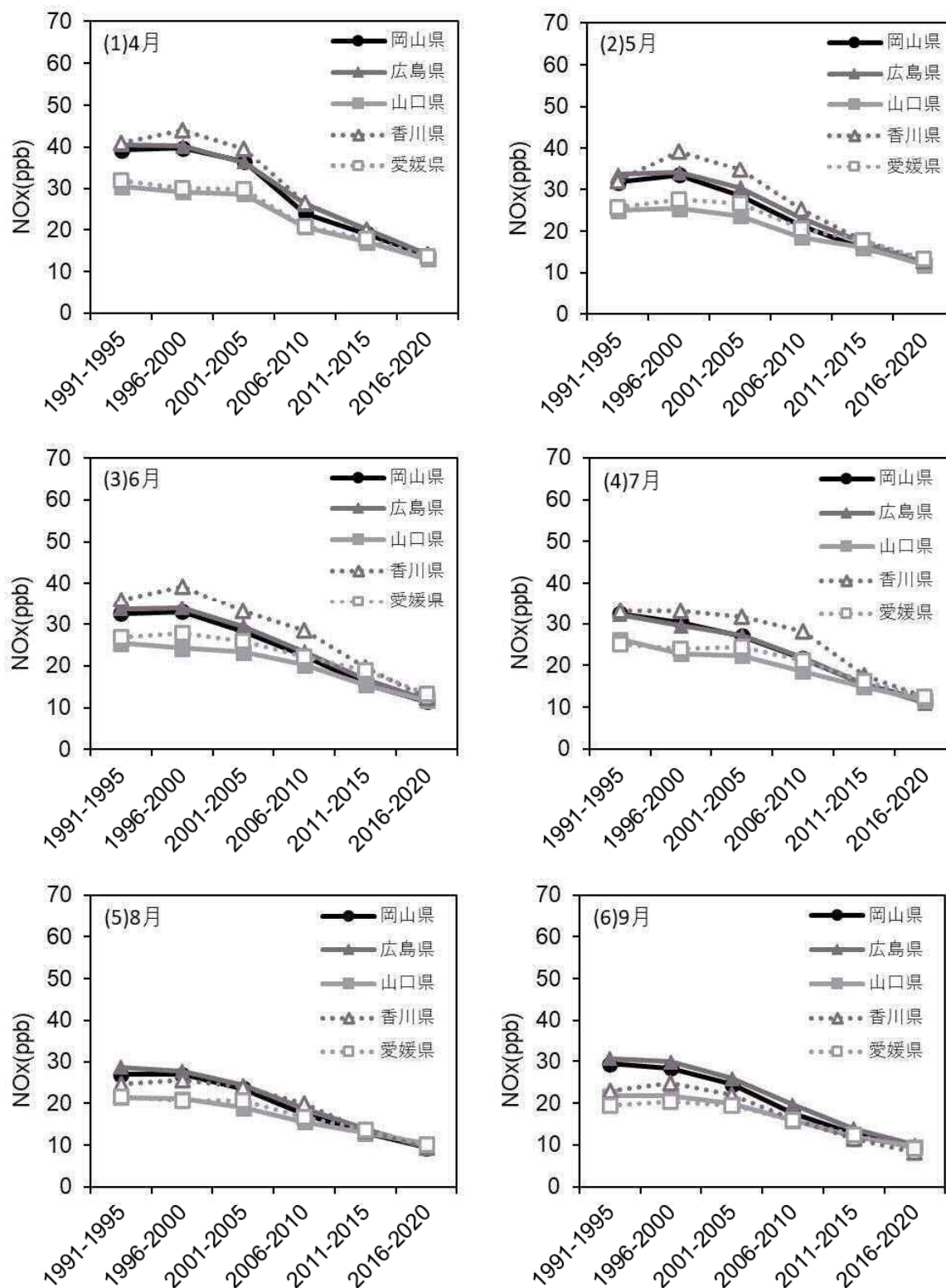


図 4-23 月別の NOx 月平均値の経年変化 (瀬戸内)

(5) 九州地域

1) 県別の NOx 月平均値の経年変化

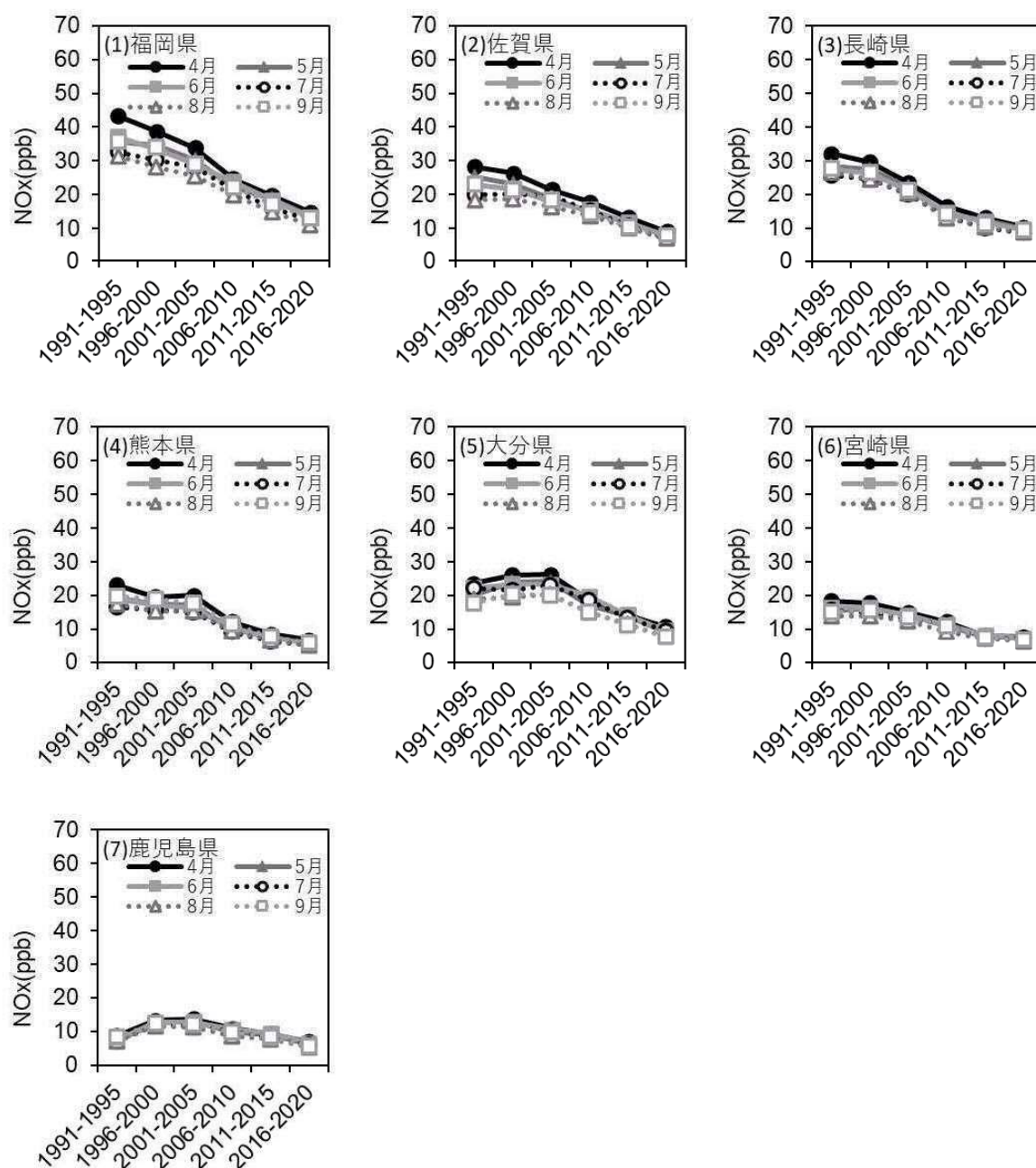


図 4-24 県別の NOx 月平均値の経年変化(九州)

2) 月別の NOx 月平均値の経年変化

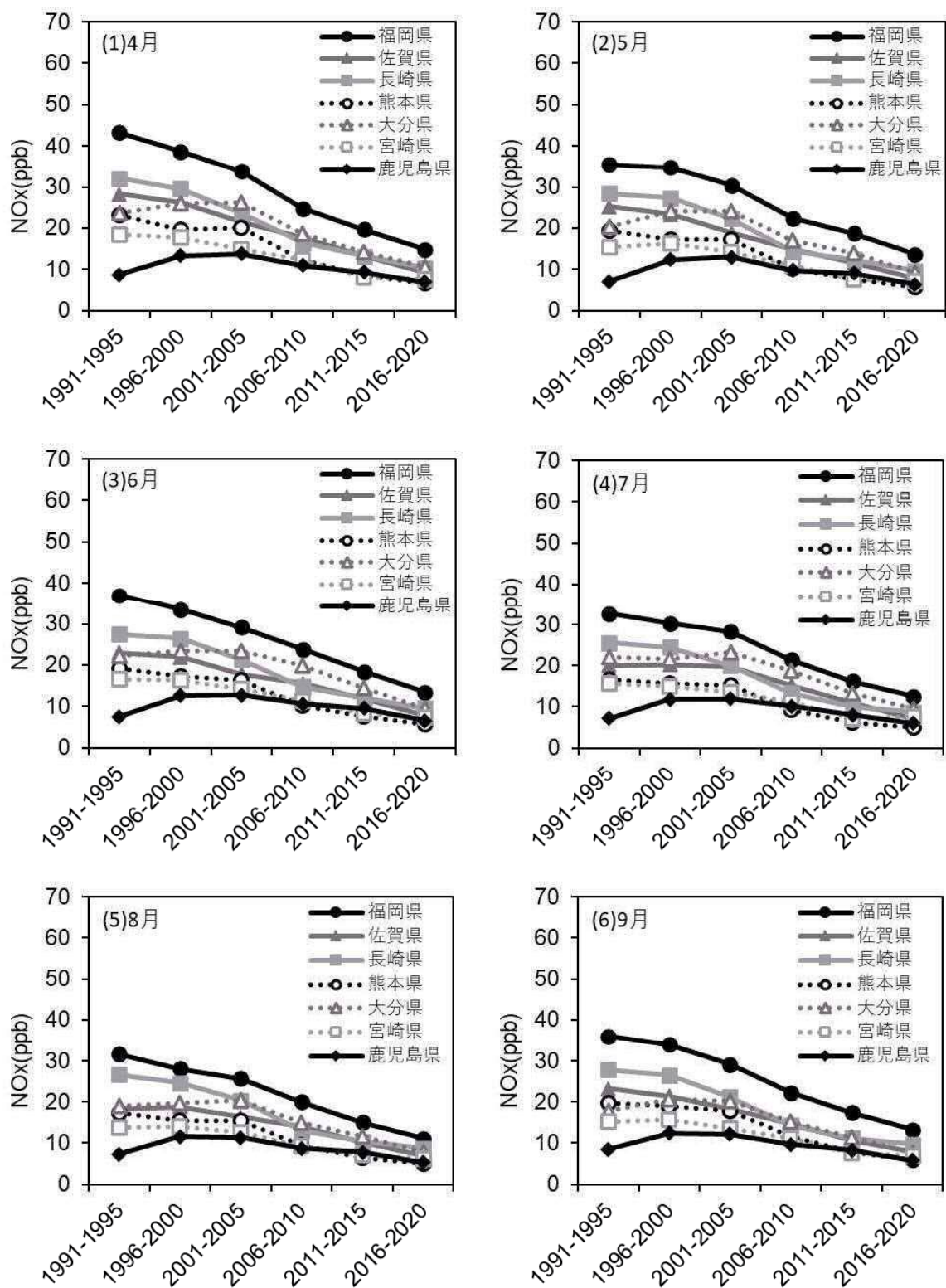


図 4-25 月別の NOx 月平均値の経年変化 (九州)

4.4. 非メタン炭化水素(NMHC)濃度

(1) 関東地域

1) 県別の NMHC 月平均値の経年変化

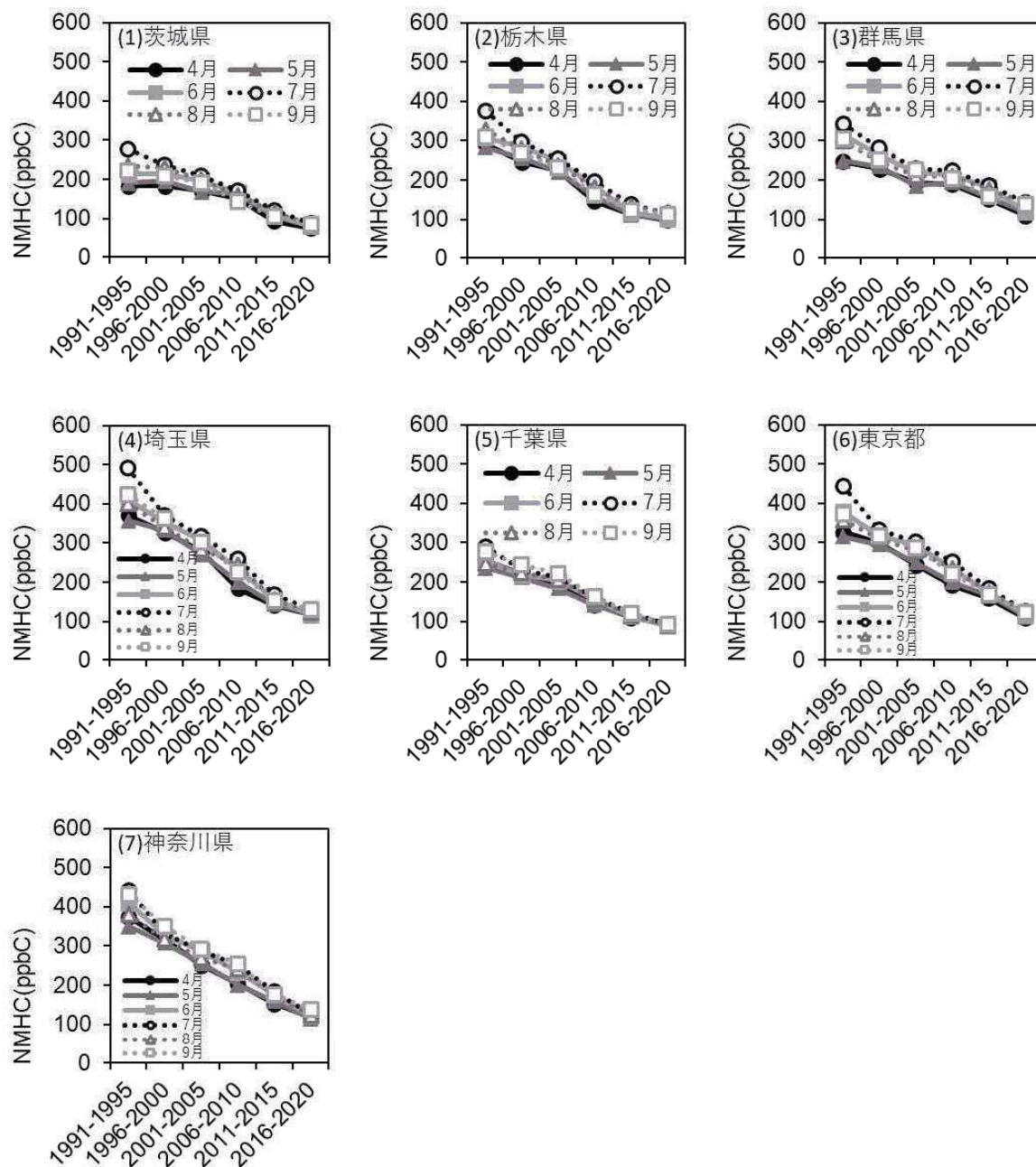


図 4-26 県別の NMHC 月平均値の経年変化（関東）

2) 月別の NMHC 月平均値の経年変化

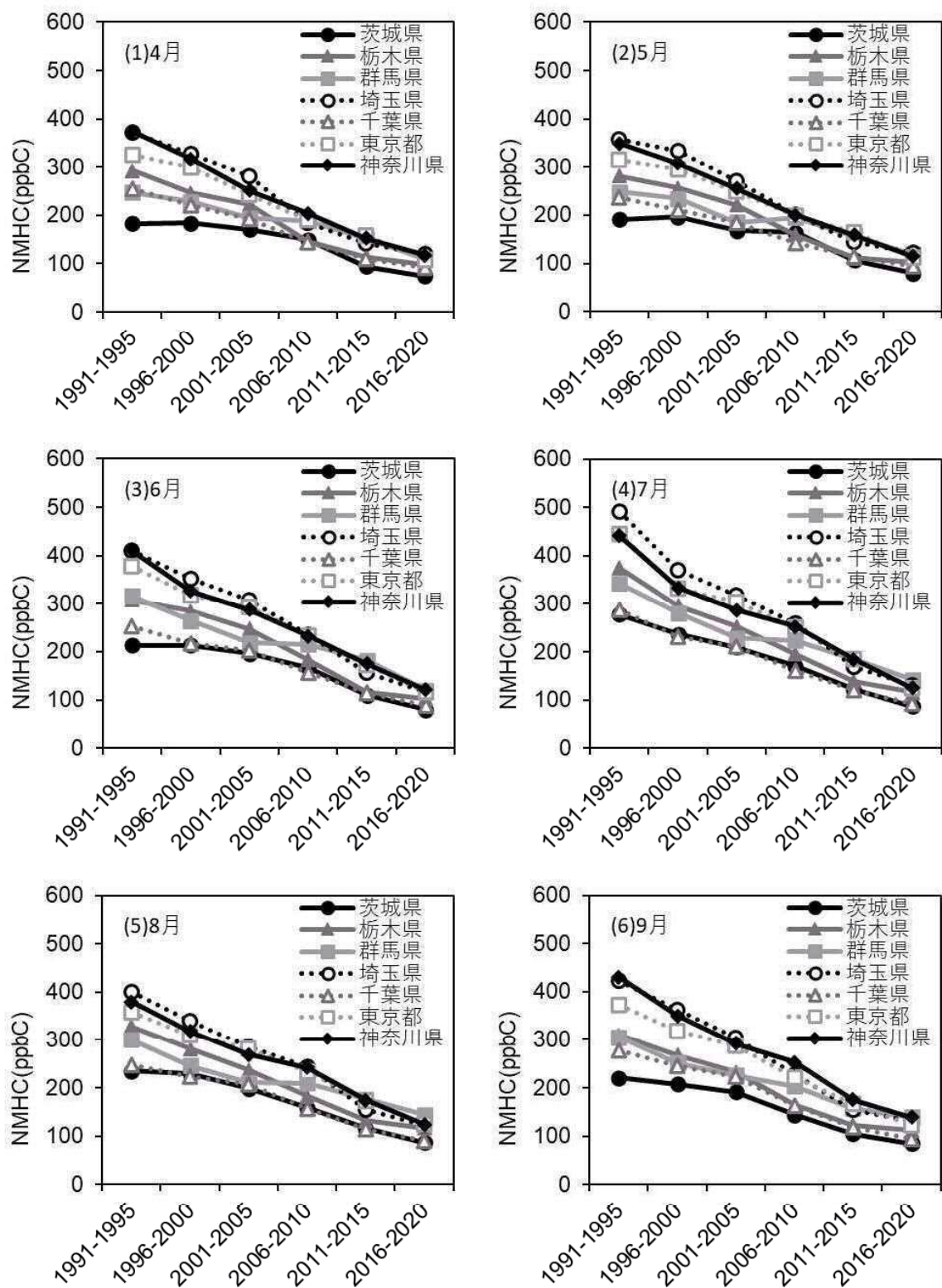


図 4-27 月別の NMHC 月平均値の経年変化 (関東)

(2) 東海地域

1) 県別の NMHC 月平均値の経年変化

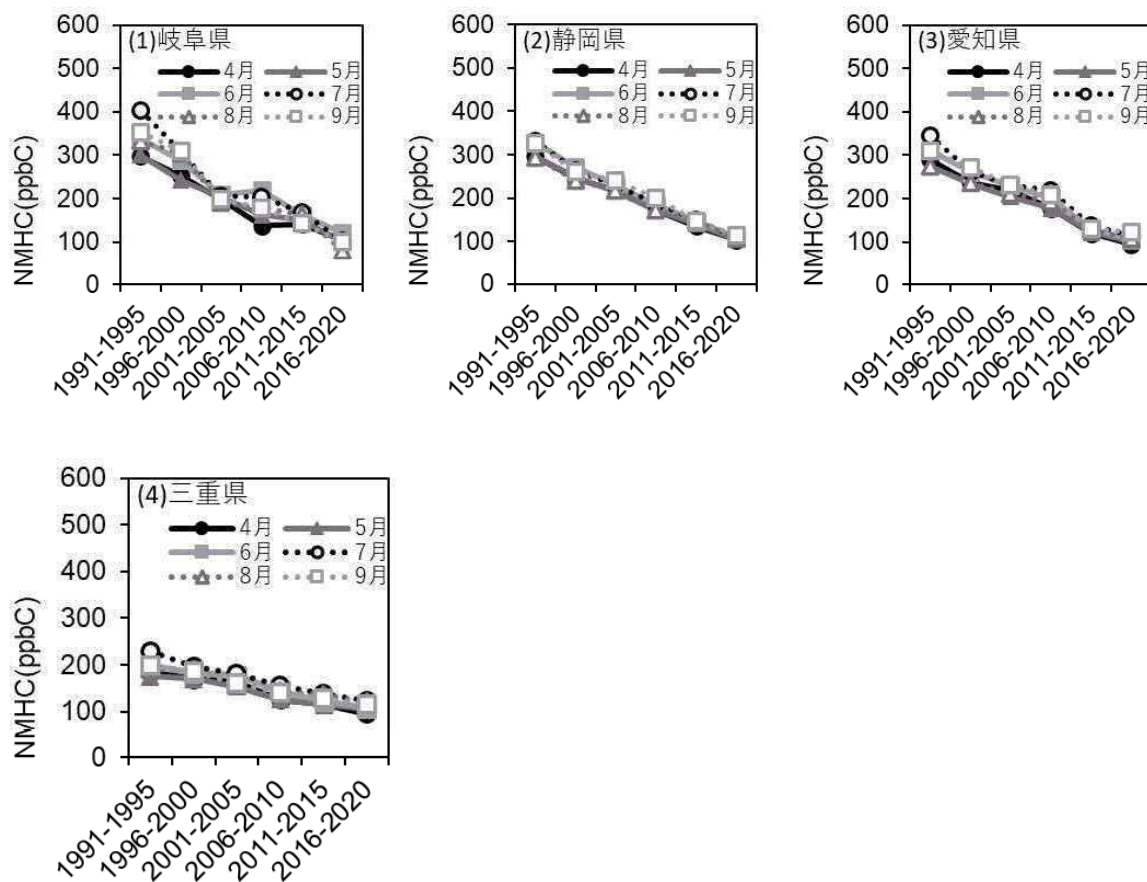


図 4-28 県別の NMHC 月平均値の経年変化（東海）

2) 月別の NMHC 月平均値の経年変化

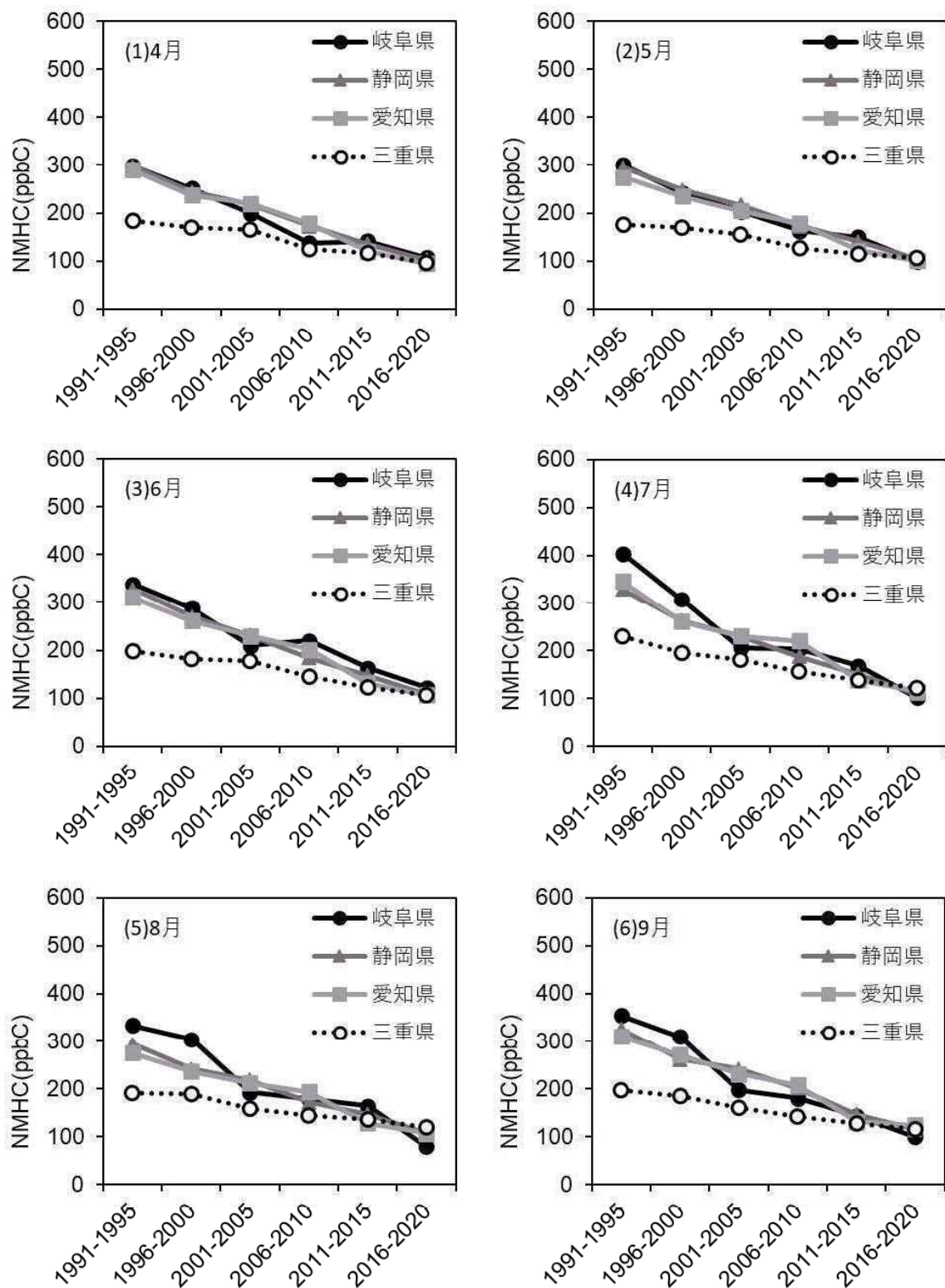


図 4-29 月別の NMHC 月平均値の経年変化（東海）

(3) 関西地域

1) 県別の NMHC 月平均値の経年変化

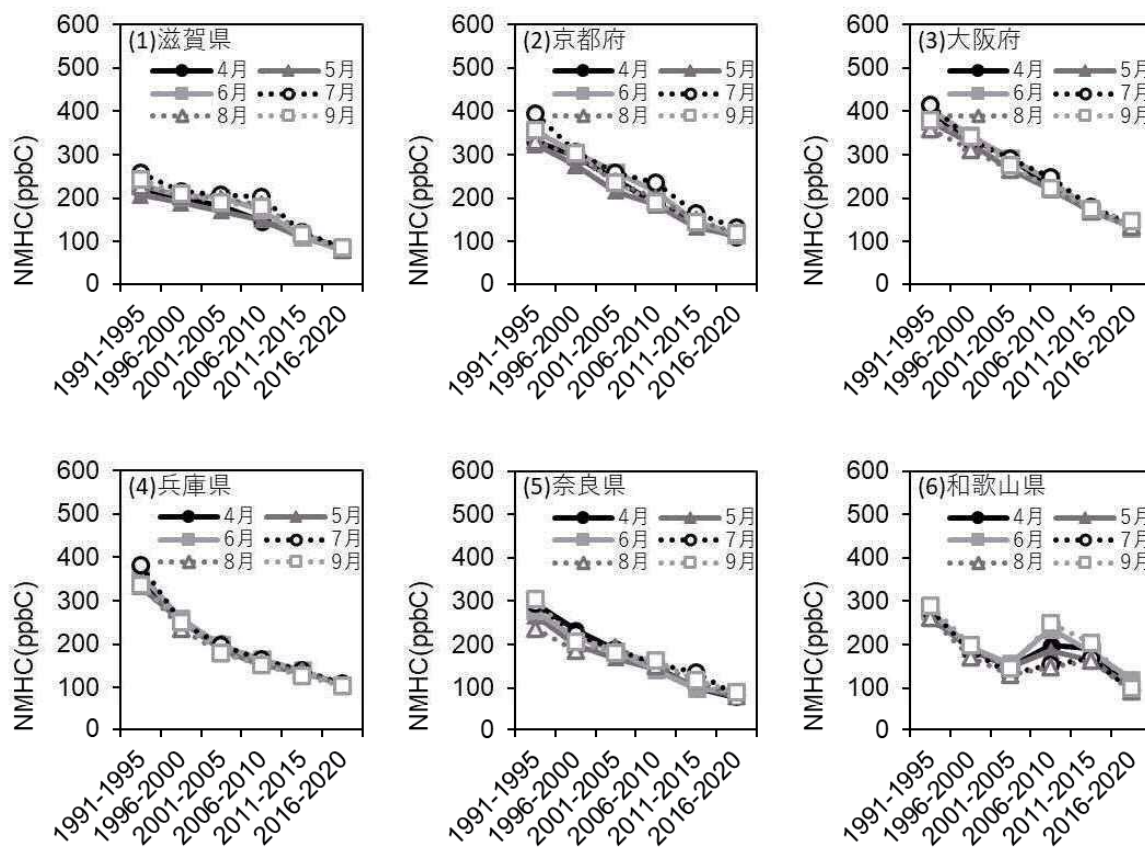


図 4-30 県別の NMHC 月平均値の経年変化（関西）

2) 月別の NMHC 月平均値の経年変化

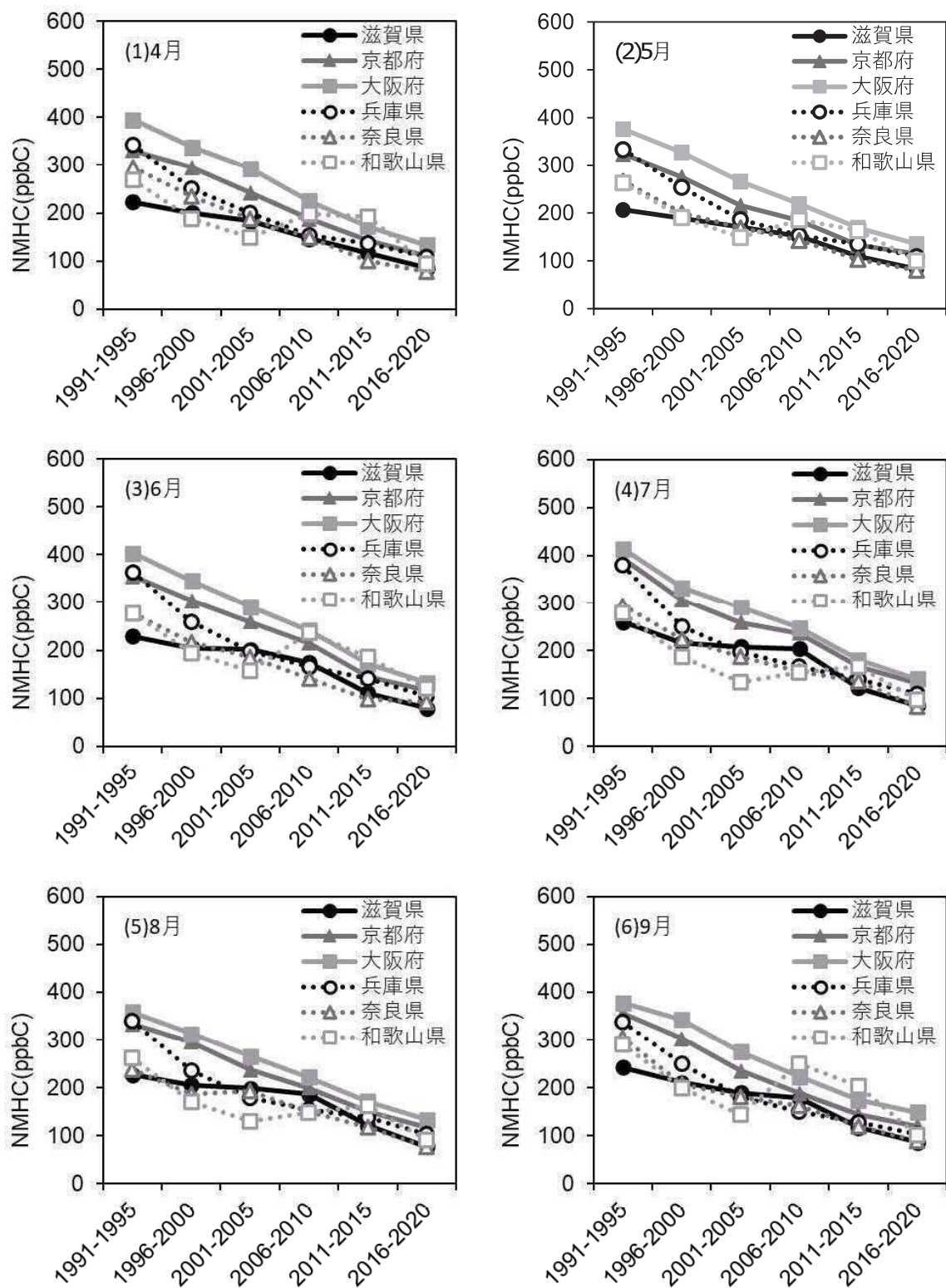


図 4-31 月別の NMHC 月平均値の経年変化 (関西)

(4) 瀬戸内地域

1) 県別の NMHC 月平均値の経年変化

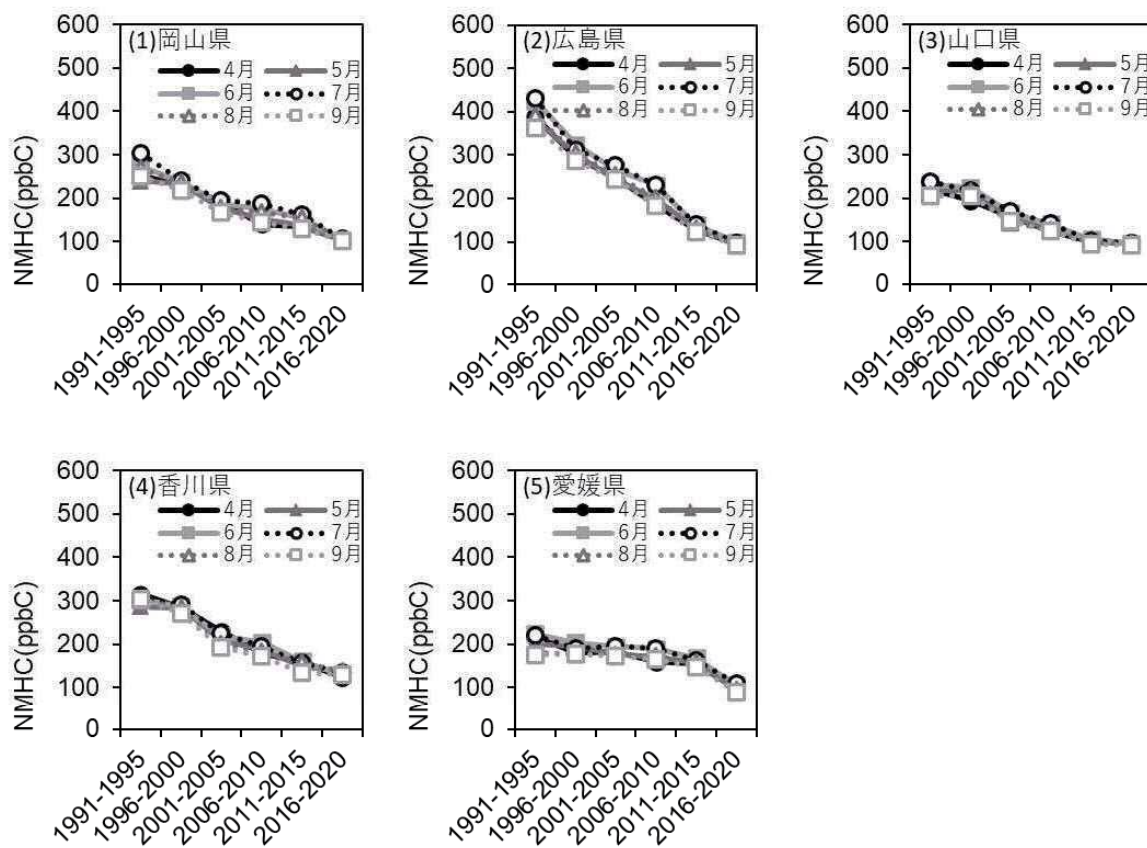


図 4-32 県別の NMHC 月平均値の経年変化 (瀬戸内)

2) 月別の NMHC 月平均値の経年変化

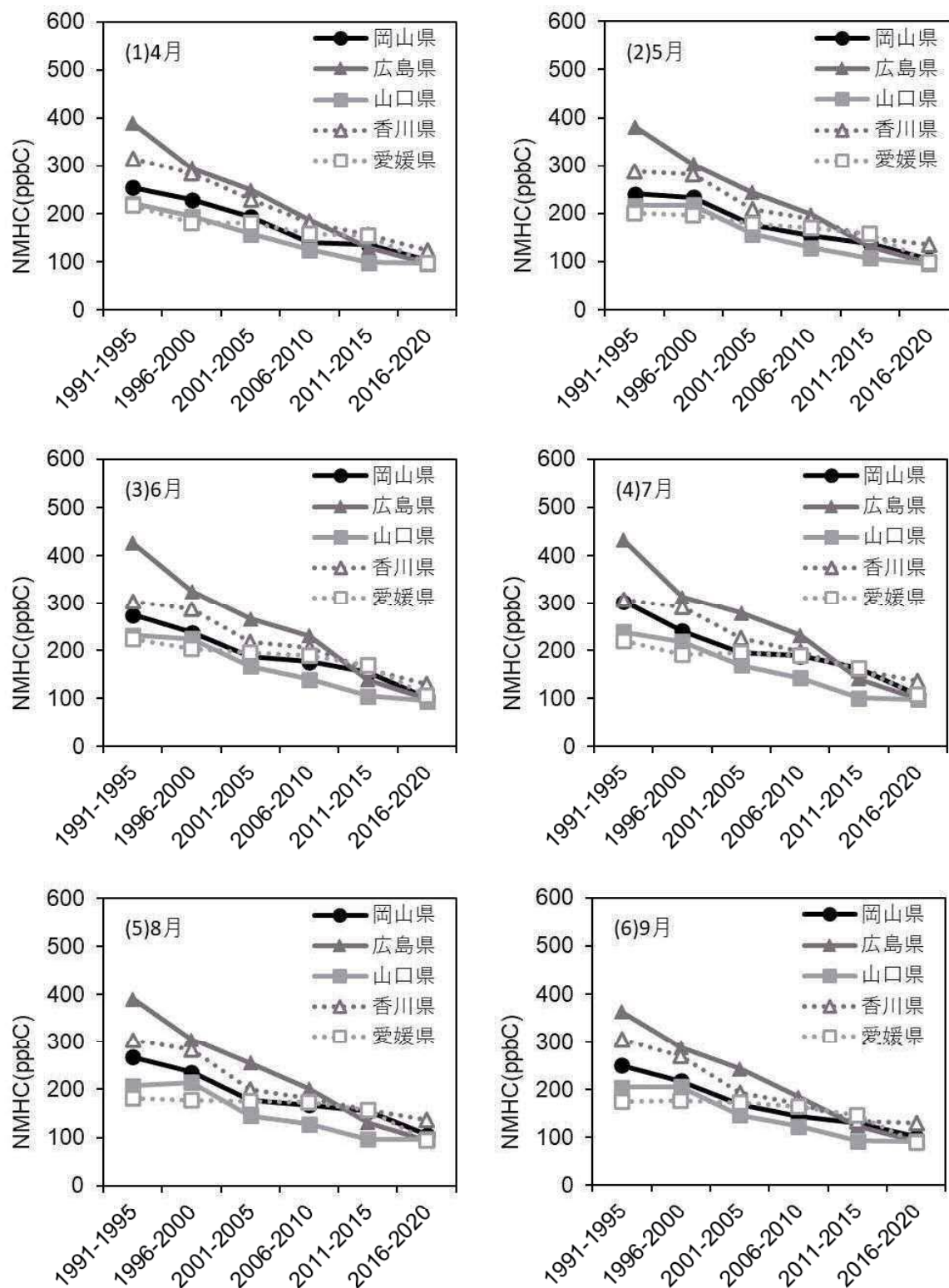


図 4-33 月別の NMHC 月平均値の経年変化 (瀬戸内)

(5) 九州地域

1) 県別の NMHC 月平均値の経年変化

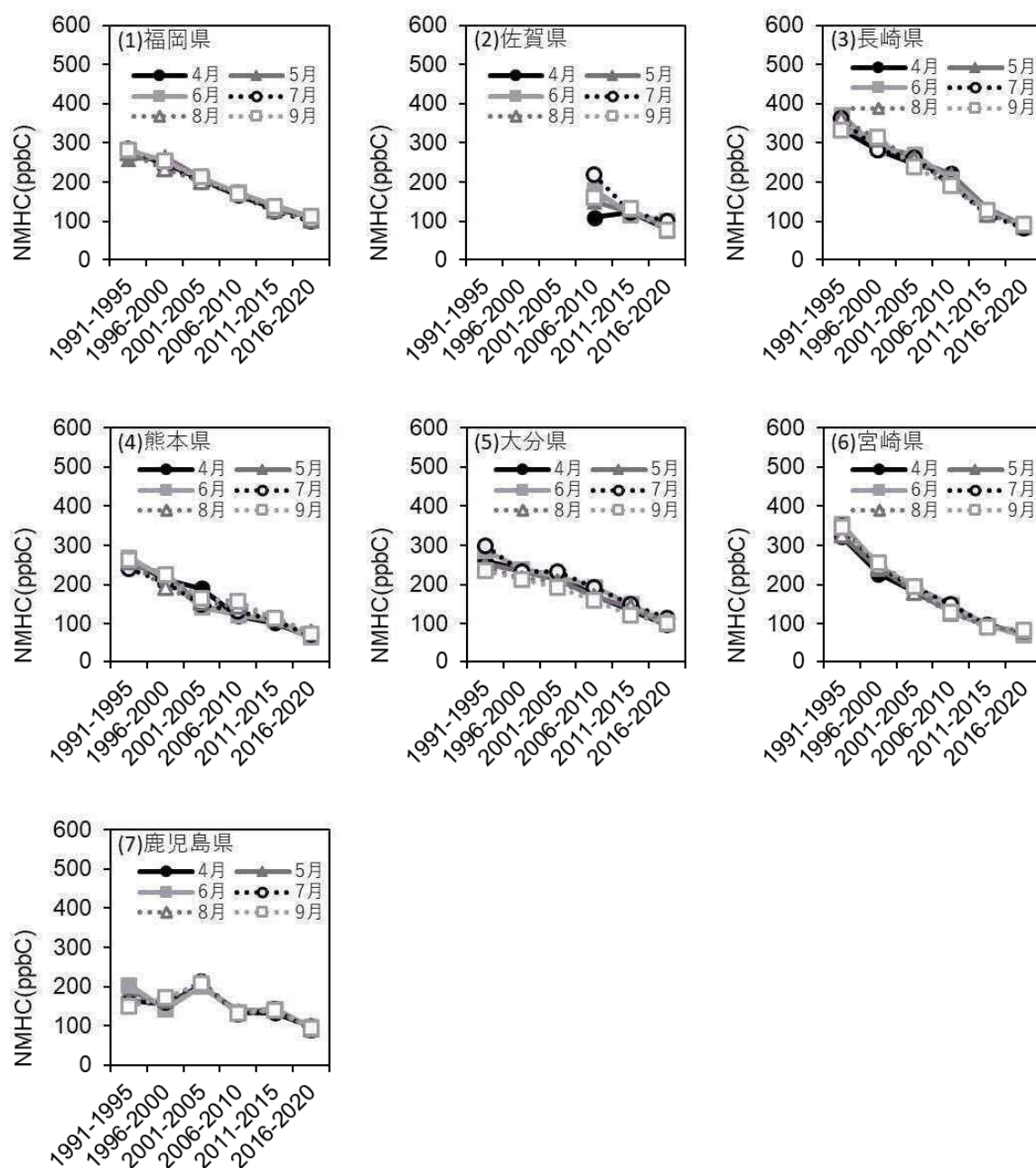


図 4-34 県別の NMHC 月平均値の経年変化（九州）

2) 月別の NMHC 月平均値の経年変化

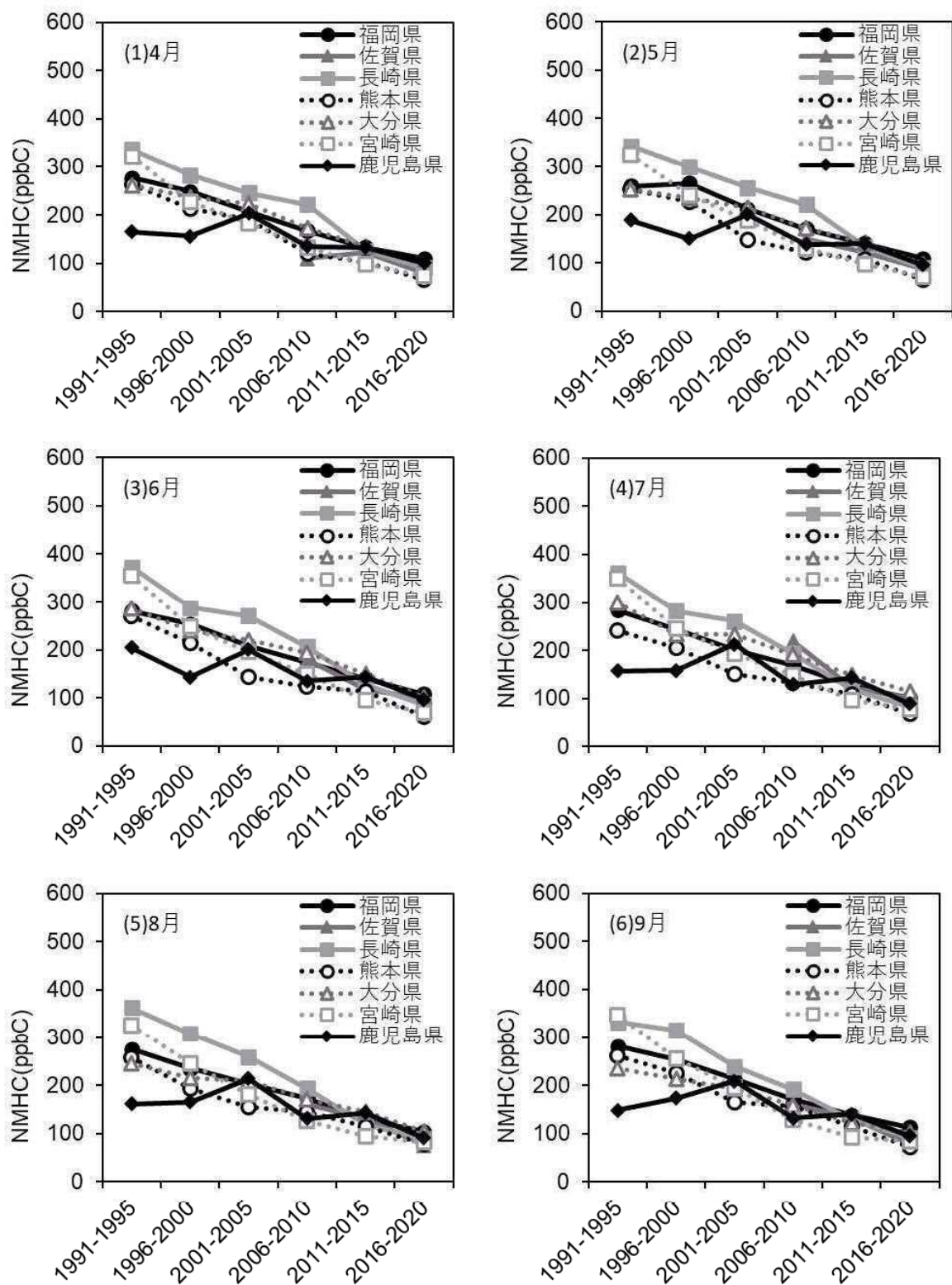


図 4-35 月別の NMHC 月平均値の経年変化 (九州)

5. 検討会の開催概要及び検討委員の指摘事項

検討会委員（敬称略、五十音順）

氏名	所属	専門分野
浅川 大地	大阪市立環境科学研究センター	大気観測・解析
早崎 将光	一般財団法人 日本自動車研究所	気象要因の影響解析
福崎 有希子	横浜市環境科学研究所	大気観測(VOC)・解析
山地 一代	神戸大学大学院	大気環境モデリング
山村 由貴	福岡県保健環境研究所	大気観測・モデリング

5.1. 第1回検討会

5.1.1. 開催内容

- 【開催日時】 2022年10月3日（月） 10:00～11:35
- 【参加者】 検討委員：浅川委員、早崎委員、福崎委員、山地委員、山村委員
環境再生保全機構：金本様
日本環境衛生センター：高橋、吉村、遠藤、塩手

5.1.2. 議事次第

- (1) 本調査について
- (2) 調査研究の作業状況について
 - ・文献調査
 - ・大気汚染対策の情報収集
- (3) 今後の作業について
- (4) その他

5.1.3. 配布資料

- 資料1 調査研究の概要
- 資料2-1 文献調査～オキシダント高濃度要因に関する研究～
- 資料2-2 地方公共団体における大気汚染対策等の情報収集
- 資料3 地方公共団体へのヒアリング計画

5.1.4. 指摘事項と対応

■ 議事(2) 文献紹介について

No.	指摘事項	対応方針
1	測定した年代が異なる文献同士の結果を比較して良いのか。	常時監視データ等を用いて年代を揃えたうえで比較する。
2	常時監視データのOxデータを用いる際は測定法の入替え時期と校正法の統一時期に留意した方が良い。	今後の常時監視データの解析は2つの時期に留意したうえで行う。
3	削減対策を検討するためには、BOXモデルやチャンバーなど室内実験を扱った文献も対象とした方が良い。	これまでの文献調査では室内実験の優先順位は下げていたが、今後は参考にしていく。
4	WRFで滞留等の影響を評価した結果は設定	気象関係の文献を調査し、今後WRFを解析で

	によって大きく変わる。温暖化や気候変動でその設定がどうなるかは気象関係の文献にあるはず。	用いる場合に設定の参考とする。
--	--	-----------------

■ 議事(2) 大気汚染対策の情報収集について

No.	指摘事項	対応方針
5	最近気候変動適応センター等でも SLCF 排出削減について各県独自のプランが検討されているかもしれない。	各県の SLCF 削減プランについて調査、独自性のあるものはまとめる。
6	大阪府の VOC 規制撤廃及びガイドラインへの緩和について、答申や環境審議会の資料等も参考になると思う。	大阪府の VOC 規制撤廃等に関して、大阪府の HP から答申や環境審議会の資料を調査する。

■ 議事(3) 今後の作業について

No.	指摘事項	対応方針
7	ヒアリングの対象には、関東の発生源地域に東京以外にも Ox 対策にかなり力を入れている川崎を入れると良い。	ヒアリングの対象に川崎市の行政担当者を追加する。
8	大阪から滋賀や兵庫への移流を調査するために大阪府の環境農林水産総合研究所にも話を聞いてほしい。	大阪府の環境農林水産総合研究所の大気環境の担当者をヒアリング対象に加える。

■ 検討会で紹介いただいた文献情報

No.	文献情報	要因	概要(備考)
1	Sadanaga et al.: Analyses of the Ozone Weekend Effect in Tokyo, Japan: Regime of Oxidant ($O_3 + NO_2$) Production, Aerosol and Air Quality Research, 12, 161~168 (2012)	オゾン生成 レジーム	関東地方では週末と平日でレジームが違う
2	Sakamoto et al.: Relative and Absolute Sensitivity Analysis on Ozone Production in Tsukuba, a City in Japan, Environmental Science & Technology 53, 13629~13636(2019)	オゾン生成 レジーム	つくばは、午前と夕方は VOC 律速、午後は NOx 律速で全体として VOC 律速である
3	山村ら：福岡県における地域汚染由来の高濃度オゾンに対する NOx 、 VOC 排出量削減の効果、全国環境研会誌,45,202-212(2020)	オゾン生成 レジーム	福岡県内のレジームを調査、海風による輸送についても言及
4	国立環境研究所 II型共同研究報告書 (※公開は要確認)	オゾン生成 レジーム	神奈川県削減効果をシミュレーションを用いて評価 (小松先生)
5	Itahashi et al.: Fifteen-Year Trends (2005–2019) in the Satellite-Derived Ozone-Sensitive Regime in East Asia: A Gradual Shift from VOC-Sensitive to NOx -Sensitive, Remote Sensing, 14(18), 4512(2022)	オゾン生成 レジーム	論文で示した衛星データによる HCHO と NO₂ のカラム濃度比から律速状態を判断する手法は、長期間、広域的に同質な評価を行う上では有効と考えられる
6	Akimoto et al.: Rethinking of the adverse effects of NOx -control on the reduction of methane and	オゾン生成 レジーム	過去 30 年間の対流圏 CH₄ の増加速度の時間変化、

	tropospheric ozone – Challenges toward a denitrified society, Atmospheric Environment, 277, 119033 (2022)		および律速状態に関連する都市／農村の O ₃ 問題等がレビューされており、参考になる文献をフォローする。
7	Fukunaga et al.: Relationship between Changes over Time in Factors, Including the Impact of Meteorology on Photochemical Oxidant Concentration and Causative Atmospheric Pollutants in Kawasaki, Atmosphere, 12, 446 (2021)	排出量削減効果	DPOx(日中のオゾン生成量)という新指標で過去 30 年間の川崎の排出量削減効果进行评估
8	関東地方大気環境対策推進連絡会微小粒子状物質・光化学オキシダント調査会議における VOC 調査 (とりまとめ中 ; 3 月中旬頃公開)	VOC 組成とオキシダント生成の関係	関東甲信静で連携した光化学オキシダントに関する広域調査
9	※VOC 多成分測定を紹介。 発生源の特定が目的であるが、2019 年の集中観測は論文として公開されている。 Fukusaki et al.: Source region identification and source apportionment of volatile organic compounds in the Tokyo Bay coastal area, Japan, Atmospheric Environment X, 9, 100103(2021)	VOC 組成とオキシダント生成の関係	東京湾岸地域 7 地点での高時間分解能測定、川崎市での集中観測
10	坂本陽介 : HOx 反応性測定法を活用したエアロゾルによる過酸化ラジカル取り込み係数の決定, エアロゾル研究, 37, 5-11(2022)	VOC 組成とオキシダント生成の関係	-
11	櫻井ら : オゾンゾンデ観測に基づく首都圏光化学オキシダント高濃度事象の解析, 大気環境学会誌, 55, 230-237(2020)	循環・滞留など	相模湾での夜間の海風陸風についてゾンデとモデルの組み合わせで検証
12	NO ₃ と同じ	循環・滞留など	福岡県都市部で発生した O _x が上空で高濃度になり、小郡に運ばれ地表面で高濃度になる現象を報告
13	Itano et al.: Local and regional contributions to springtime ozone in the Osaka metropolitan area, estimated from aircraft observations, Atmospheric Environment, 40, 2117-2127(2006)	循環・滞留など	大阪府内で飛行機を用いて高度別に O _x を観測
14	Akimoto et al.: Analysis of monitoring data of ground-level ozone in Japan for long-term trend during 1990–2010: Causes of temporal and spatial variation, Atmospheric Environment, 102, 302-310(2015)	長距離越境輸送	1990～2010 年の O _x データを越境汚染の視点でまとめている

5.2. 第 2 回検討会

5.2.1. 開催内容

【開催日時】 2023年1月19日（木）10:00～11:35

【参加者】 検討委員：浅川委員、早崎委員、福崎委員、山地委員、山村委員

環境再生保全機構：金本様

日本環境衛生センター：高橋、吉村、遠藤、塩手

5.2.2. 議事次第

- (1) 調査研究の作業状況について
 - ・文献調査
- (2) 次年度の作業について
- (3) 地方公共団体へのヒアリングについて
- (4) 成果発表会について
- (5) その他

5.2.3. 配布資料

資料1 調査研究の概要（第1回検討会資料の再掲）

資料2 文献調査～オキシダント高濃度要因に関する研究～

資料3 地方公共団体へのヒアリング結果

資料4 成果発表会スライド案

5.2.4. 指摘事項と対応

■ 議事(1) 調査研究の作業状況について

No.	指摘事項	対応方針
1	オゾン生成レジームやNOタイトレーション効果について、海外の事例があれば情報として補強するとよい。	必要に応じて次年度の文献調査で補強する。

■ 議事(2) 次年度の作業について（次年度実施予定の解析案について）

No.	指摘事項	対応方針
2	（オゾン生成レジームに関して）NMHCは自排局のみ、Oxは一般局のみで測定されていることが多い。また発生源と別の場所でOx濃度が上がることもある。解析対象は同一の局だけでなく、ある程度の範囲内に含まれる複数の局も解析した方がよい。	解析に使用可能な測定局が多い地域は同一の局でも十分かもしれないが、少ない地域では、ご意見いただいた考え方もデータの選定において検討したい。同一でない局のデータを使う場合に、局同士が代表できる地理的な範囲を検討しつつ解析を行う。
3	（NOタイトレーションに関して）解析期間の2010～2020年は国外の変化の方が大きく、5年ごとにまとめるのでは期間が長い。	文献を参考にはじめは5年単位の解析を実施し、その結果を見て、解析期間を短くする等再度設定するような形で進め、最適な結果を得たい。
4	NOタイトレーション効果の $\Delta\text{Titr}(\text{O}_3)$ の算出におけるNOx中のNO ₂ の排出比率の係数が最近変わってきているという推計があるため、係数変化の影響があるのかどうか留意する。	解析結果で得られた長期的な変化が、NOタイトレーション効果であるのか、排出比率が変わったことによるものであるか、留意して取りまとめる。
5	（前駆物質の排出量の削減効果について）過去30年の常時監視データで ΔOx （日中の	校正方法の変更が長期のトレンドに影響しているように見えるデータもあるので、解析結果を

	平均値から夜間の平均値を差し引いた値)を解析するときには、測定法の変更や校正法の変更による Ox 濃度への影響に注意が必要である。	評価する際に注意する。
6	対策は都道府県単位で実施するので、5地域の解析を行う際に、地域を都道府県に細分化した方が、自治体は結果を判断しやすい。	留意しながら次年度の解析を進める。細分化した場合、その地域の解析に使用できるデータ数が十分であるか等にも注意したい。
7	3つの解析は発生源周辺や都市部の対策立案には寄与すると思うが、都市部から影響を受ける地域が対策を立てるには循環・滞留の観点での評価も必要である。移流について押さえた上で、都市部や発生源地域ではこのような対策がとれるという流れにするとうい。	次年度の最終報告では、移流を受ける側の自治体への影響についても注意してとりまとめる。(今年度の報告でも、次年度の方針として記載する。)

■ 議事(3) 地方公共団体へのヒアリングについて

No.	指摘事項	対応方針
8	「とりまとめに期待する事項」で気象関連の情報がほしいとあるので、とりまとめに含めた方がよい。	解析に入れることは難しいと考えているが、次年度のとりまとめでは考慮する。
9	気象条件の変化、あるいは気象条件で補正する手法について情報提供してもよいと思った。東京都の星氏の文献や、国外の事例も参考にする。	対策の効果を考える場合には、統一された気象条件下の経年変化等が参考になるので、次年度は文献情報を参考にしつつ、とりまとめる。
10	まとめの記載でオキシダント濃度が上昇する気象条件について、地域の担当者が把握できているような書き方はしない方がよい。	気象条件の整理が望まれるとの前後の記載との整合性もとって、書き方を検討し修正する。
11	ヒアリングの結果から移流や輸送が重要と考えられる。来年度の解析内容と温度差があり気になる。	気象条件や移流・輸送について解析は実施しないが、ヒアリング内容を踏まえたとりまとめを行う。
12	行政担当者は短期間で交代するので、資料は分かり易い表現をする必要がある。	次年度の最終報告において、留意してとりまとめたい。

■ 議事(4) 審査発表会について

No.	指摘事項	対応方針
13	「地域の行政担当者が活用できるように」という目的から「地域の研究者及び行政担当者にもヒアリングを実施した」とアピールした方がよい。	本年度報告書に追記する。
14	「地域単位で対策を講じることが可能な」という表現は、「地域単位で対策立案に有用な～」等の表現にしたほうがよい。	本年度報告書を修正する
15	「近年のオキシダント濃度に寄与していると考えられる要因」の3番目と、「地域内で高濃度になりやすい地域、前駆物質の排出量が多い地域」の2番目に「移流」が使われている。この2つはスケール規模が異なるので、例えば、前者を越境輸送や長距離	本年度報告書で区別できるように記載する。

	輸送に変更して、区別されてはいかがか。	
16	目的に対して今年度このような調査を行って、次年度に進めるに当たってこれをターゲットにするので3つの解析に絞ったという流れを記載した方がよい。	本年度報告書の調査概要やまとめにおいて調査の流れがわかるように追記等を行う。
17	文献調査の結果として、地域ごとに効果的な対策や気象的な特徴のまとめがあると各地域の行政担当者や研究者にとってありがたい。	具体的な対策を示すことは難しいかもしれないが、対策立案の参考とできるような地域の特徴を次年度の取りまとめで整理したい。
18	この取りまとめが自治体向けに発信する情報であるという点を説明した方がよい。	自治体向けに発信する情報であるとわかるように説明する。