



国環研と地環研等との第II型共同研究

「光化学オキシダント等の変動要因解析を通じた

地域大気汚染対策提言の試み」(2022-2024年度)

Attempt to propose measures for regional air pollution

by analyzing variable factors such as photochemical oxidants

研究概要

目次

S1. 今回の共同研究の成果概要	1
S2. Ox高濃度グループ	2
S2.1 Ox経年変化傾向.....	3
S2.2 Ox高濃度事例解析	3
S2.3 Ox基準超過要因解析	3
S2.4 VOCs及びアルデヒド共同調査.....	4
S2.5 Ox環境基準新指標評価	4
S3. Ox統計グループ	6
S3.1 Ox濃度と気象条件の解析	6
S3.2 モデルの説明変数について.....	8
S4. VOC・SOA高時間分解観測グループ	9
S4.1 VOC及びSOAの高時間分解観測	9
S4.2 Ox生成への寄与に着目したVOC 濃度の地点比較	9
S4.3.1 SOAとVOC,OC等の関係性について	10
S4.3.2 VOC及びSOAの各時間平均値の比較.....	10
S5. PM_{2.5}四季成分データ長期的解析グループ	11
S5.1 自動車排ガスの影響に着目した解析から分かったこと	11
S5.2 越境汚染の影響に着目した解析から分かったこと	12
S5.3 船舶用燃料油の硫黄分規制効果に着目した解析から分かったこと.....	14
S5.4 都市部における硝酸塩の二次生成の影響に着目した解析から分かったこと.....	15

目次

S6. 業績支援検討グループ	16
S6-1. CMAQを用いた大気行政支援の検討	16
S6-1.1 コンセプト	16
S6-1.2 自治体へのCMAQ紹介	16
S6-1.3 CMAQにかかる手引き等の共有	16
S6-1.4 排出量データ作成手順書活用事例と今後の課題	17
S6-2. 空間統計手法を用いた大気行政支援の検討	18
S6-2.1 研究のコンセプト	18
S6-2.2 空間濃度分布予測のためのプログラム等の開発	18
S6-2.3 各自治体における実施・検討状況と今後の課題	19

研究概要

S1. 今回の共同研究の成果概要

今期のⅡ型共同研究では以下の5つの研究グループに分かれて実施した。それぞれについて以下のような成果が得られた。

光化学オキシダント高濃度グループ：解析共通ツール「0xトレンド基礎解析ファイル」の作成やVOC共同調査等を行った上で、様々な解析を実施した。2011～2020年における月別の0x経年変化から、4～8月にかけて全国的に増加傾向が見られる中、関東では7～8月が減少傾向であった。同じ10年間に発生した0x高濃度事例のうち6事例について詳しく解析を行った。0xが環境基準値である60 ppbを超過する時間数の経年変化について解析を実施した。揮発性有機化合物（VOC）成分の測定を2023年春季、2024年春季及び夏季に全国12地点で実施し、様々な0x生成メカニズムの存在が示唆された。0xの新指標値（環境省、平成26年）を用いて全国の測定局における2013～2020年度の8時間平均値の経年変化等について解析し、地域ごとに高濃度域の局数の増減が異なる特徴を示した。

光化学オキシダント統計グループ：統計モデルを扱うプログラム言語としてR言語を選定し、データ取り扱いのプログラムやマニュアル等を作成し共有し、気象データや大気汚染常時監視データの収集、成形、共有化、データの整理、データ相関の可視化が可能となった。2021年度の年間データ（時間値）を用いて、0x濃度と気象条件等の関係を把握した。統計モデルにおいて使用する気象条件の選定手法について、統一的なルールを決めることが重要であるとわかった。

VOC・SOA高時間分解測定グループ：2023年夏季と2024年春季にVOCおよびPM_{2.5}中のSOA（二次生成有機エアロゾル）の共同調査を行った。求めたオゾン生成ポテンシャル（OFP）上位物質のうち、トルエン濃度は0x濃度が上昇する時間帯で減少しており、光化学反応により消費されたことが示唆された。人為起源VOC（トルエン）とSOAトレーサー（DHOPA）の時間帯ごとの挙動を比較し、SOAトレーサーが由来物質ごとに異なる挙動を示すことが確認された。

PM_{2.5}四季成分データ長期解析グループ：2011～2022年度の自排局19地点とそれに比較的近い一般局の元素状炭素（EC）濃度の差は年々減少傾向であり、自動車排ガスの影響は経年的に低下したと考えられた。2011～2022年度で、越境汚染の影響は年々低下してきたことが示唆された。バックグラウンド地点においてNO₃⁻/SO₄²⁻比は増加傾向にあり、大陸での大気中のSO₂の減少によってNH₃が余剰となってNH₄NO₃の生成が促進され越境輸送されている可能性が示唆された。船舶用燃料油に関連し、全国のPM_{2.5}濃度が規制前（2017～2019年度）に比べて規制後（2020～2021年度）は約2割低下し、重油燃焼の主要指標成分であるバナジウム（V）濃度は約8割低下した。都市部における硝酸塩の二次生成の影響に着目した解析では、NO₃⁻濃度の年々変動は、関東においては地域汚染による寄与の大小の影響が大きく、また、湿度が高く風が弱いときに寄与が大きくなる傾向がみられた。

行政支援検討グループ：化学輸送モデルのCMAQ（Community Multi-scale Air Quality）によるシミュレーションを自治体が独自で実行することを目的とし、CMAQを学ぶ勉強会を開催した。CMAQインストールマニュアルと排出量データ作成手順書をグループ共有し、今後のCMAQ活用拡大が望まれる。また、大気汚染常時監視の適切かつ効率的な運用への活用を目標として、大気汚染物質の空間濃度分布を予測するRegression Kriging法（RK法）に着目し、RK法の参加自治体による習得と行政支援への活用を目的として検討を進めた。RK法の実施を容易にするプログラムとツールを国立環境研究所と一部の参加自治体で共同開発した。それらを使用したテスト解析等を参加自治体で進め、各自治体でRK法を実施できる状態になった。各自治体で、それぞれのニーズに即した解析を進め、一部の自治体では、行政部署との協議等を開始しており、今後の活用が期待される。

研究概要

S2. 0x高濃度グループ

得られた主な成果：

光化学オキシダント（0x）対策に資する基礎的知見の取得を目的に、解析共通ツール「0xトレンド基礎解析ファイル」の作成やVOC共同調査等を行い、以下のとおり0x高濃度原因等を解析した。

<0x経年変化傾向>

- 関東では5～8月に120 ppb以上の高濃度となる頻度が多かったが、北海道や東北、九州地方では濃度が高いのは4～5月で、120 ppb以上となる頻度はわずかであった。
- 2011～2020年における0x経年変化は、関東では4～6月は増加、7～8月は減少傾向で特に0x濃度がピークとなる時刻において大きく減少していた。東北や九州地方などでは、4～8月において増加傾向となっている地点が多く、時間帯による変化率の違いは見られなかった。0x汚染レベルが高い地域とそれ以外の地域とでは濃度トレンドが異なっていた。

<0x高濃度事例解析>

- 2011～2020年度に発生した0x高濃度事例のうち6事例について解析した。そのうち2017年5月に発生した事例は関西地方から東北地方にかけて広い範囲で0xが高濃度となった。関西地方及び関東地方では卓越した海風によって湾岸部から空気塊が輸送されながら光化学反応を受け0xが生成したことが考えられた。一方で東北地方では域内生成の影響は少なく、越境汚染による影響と考えられた。

<0x基準超過要因解析>

- 0xが環境基準値である60 ppbを超過する状況について解析を実施した。日本国内ではほぼ全ての地点で3～5月といった春季に0xが60 ppbを超過する時間数が増加する傾向が見られた。また、大規模な大気汚染物質が発生する工業地域近傍では7～8月といった夏季にも0xが60 ppbを超過する時間数が増加する傾向が見られ、関西地方及び関東地方では内陸の地点ほど0xが60 ppbを超過する時間数が増加する傾向が見られた。

<VOC及びアルデヒド共同調査>

- 0x生成に重要な揮発性有機化合物（VOC）成分の測定を2023年春季、2024年春季及び夏季に全国12地点で実施した。特に日中は2時間毎のサンプリングを基本とした。
- 高い時間分解能での観測により、夏季にアルデヒド類の濃度が0xの濃度上昇に伴い上昇する傾向が顕著に現れた。一方、春季には0xとアルデヒド類の相関が低いケースや0xに対するアルデヒド類の割合が低いケースが確認され、域外での生成や季節ごとに異なる0x生成メカニズムの存在が示唆された。

<0x環境基準新指標評価>

- 0xの新指標値（環境省、平成26年）を用いて全国の測定局における2013～2020年度の8時間平均値の経年変化等について解析したところ、90 ppbを超過する高濃度域の局数は減少する傾向を示したと同時に70 ppb以下の低濃度域の局数も減少する傾向を示した。
- 関東、九州、関西地方、瀬戸内地域で高濃度域の局数が減少する傾向を示したのに対し、東北地方や中部地方内陸部では低濃度域の局数が減少するなど地域により異なる特徴を示した。

研究概要

S2.1 O_x経年変化傾向

2011～2020年度を対象に全国各地のO_xトレンド解析を行った。O_xは関東地方の地点は4～8月にかけて60 ppb以上となる頻度が多く、そのうち5～8月で120 ppb以上の高濃度となる頻度が多かったが、北海道や東北、九州地方などの地点では60 ppb以上の頻度が多いのは4～5月で、かつ120 ppb以上となる頻度はほとんどなかった。

O_xの経年変化は、年単位で見ると明瞭な変化傾向がみられない地点が比較的多かったが、昼夜別や月別にみると変化傾向がみられた。月別では、関東地方では4～6月は増加、7、8月は減少傾向で春と夏で増減傾向が異なっているのに対し、東北や九州地方では4～9月のいずれの月も増加している地点や、北海道ではいずれの月も減少している地点があるなど地域、地点によって違いがみられた。さらに時刻別平均濃度の経年変化率を見ると（図S2-1）、関東地方の特に内陸の地点では、7、8月の日中のO_xピーク時間帯において大きく減少していることが分かった。これに対し、四国や九州地方などの地点では、時間帯による変化率の違いはあまりみられなかった。

これらから、O_x汚染レベルが高い関東地方とその他の地方とでは濃度トレンドが異なること、また同じ地域内でもトレンドの増減の程度は異なる場合があることも明らかとなった。

S2.2 O_x高濃度事例解析

本研究では、2010年度から2020年度までに観測されたO_x高濃度事例から6つの事例（事例A～E-2）を解析した。紙面の都合により、ここでは2017年5月19日～2017年5月23日に観測された高濃度事例（事例C）の解析結果のみ記述する。

事例Cの期間中に観測されたO_xの最高濃度を図S2-2に示す。事例Cは、2017年5月19日～23日にかけて関西地方から東北地方にかけて高濃度のO_xが観測された。5月20日、21日に関西地方では10測定局、関東地方では47測定局で120 ppbを超える高濃度が観測された。21日には東北地方の1測定局で120 ppbを超える高濃度が観測された。本期間では日本列島の太平洋側に高気圧が位置し、21日には5月にも関わらず各地で猛暑日となるなど気温が高く、O_xが高濃度になりやすい気象条件であった。

関東地方、東北地方の2地点から後方流跡線を用いた解析を行った結果、両地点の空気塊は中国大陸の東北部、朝鮮半島の北側を經由して到達したことが示され、越境汚染の影響が示唆された。また、関東地方ではO_x濃度上昇前1～2時間前からNMHC濃度の上昇が見られ、気温も高く光化学反応が活発であったことが推察されるため、越境汚染と域内での生成が重なり、卓越した海風により内陸へO_xが輸送されたと考えられる。越境汚染に関連する高濃度事例が度々観測されることから、国外からの影響を監視する観測地点を設ける等、観測の充実を図る必要がある。

S2.3 O_x基準超過要因解析

O_xが環境基準を超過する要因について解析するために、全国の測定局で測定されたO_xが60 ppbを超過する状況に注目した解析を実施した。全国の測定局で、月別にO_xが60 ppbを超過する時間数について経年変化を示した図を図S2-3に示す。日本国内ではほぼ全ての地点で3～5月といった春季にO_xが60 ppbを超過する時間数が増加する傾向が見られた。また、東京湾や大阪湾、瀬戸内海のような大規模な大気汚染物質の排出源となる工業地域近傍では7～8月といった夏季にもO_xが60 ppbを超過する時間数が増加するとともに、内陸の地点ほどO_xが60 ppbを超過する時間数が高くなる傾向が見られた。時間数の経年変化は地点ごとに異なる傾向を示した。

研究概要

S2.4 VOCs及びアルデヒド共同調査

Ox生成の前駆物質として関与するVOCsの全国的な濃度レベル及び組成の経時変化の把握を目的として、2023年夏季、2024年春季及び夏季にVOCs及びアルデヒド類（ALDs）の共同調査を実施した。調査地点数は12地点（図S2-4）、調査対象物質のVOCsは、HAPs: Hazardous Air Pollutants及びPAMS: Photochemical Assessment Monitoring Stationsの成分、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドとした（測定項目は測定機関により若干異なる）。サンプリングは、夜間17時～翌日9時は16時間、日中9時～17時は2時間ごとを基本とした。

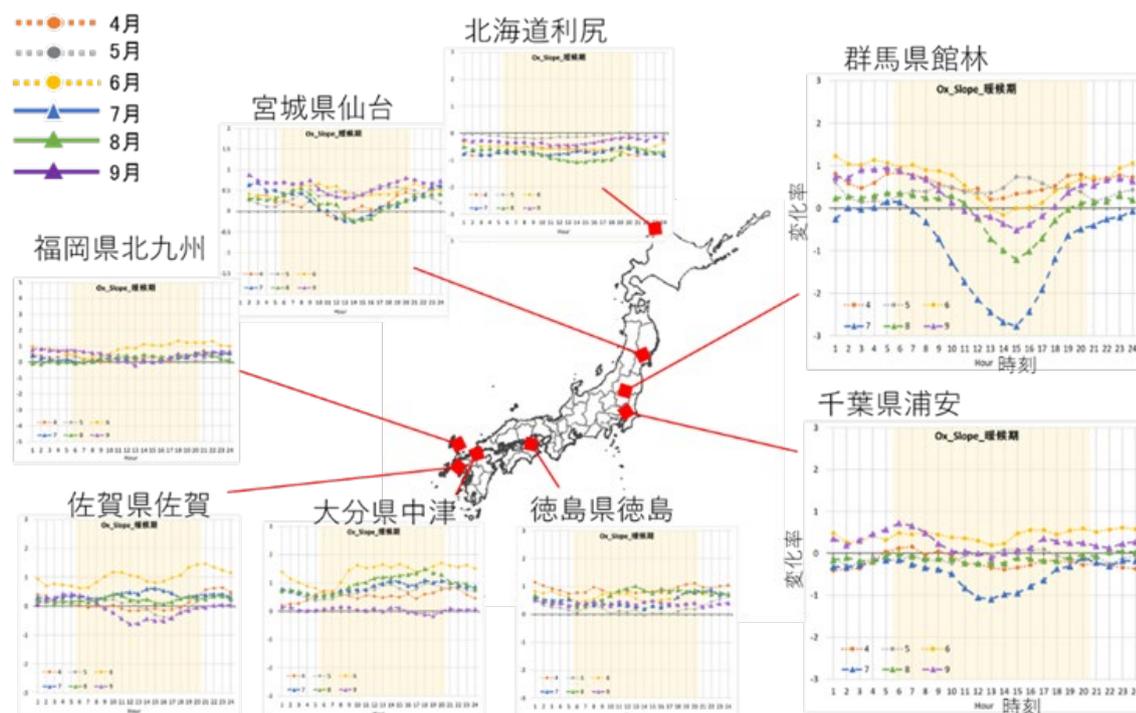
Ⅱ型共同研究7期において光化学二次生成の影響が大きいことが推察されたALDsは、本調査で日中に高時間分解で調査したことにより、夏季調査を中心とした多くの地域で、Ox及びポテンシャルオゾン（PO）の濃度上昇に伴い、ALDs濃度が上昇する傾向が、より顕著に現れた。一方、春季調査において、OxとALDs濃度の相関が低いケースや、夏季調査に比べてOx濃度に対するALDs濃度の割合が低いケースが確認され、春季は夏季よりも域外で生成したOxの影響を受けている可能性や、春季と夏季のOx生成メカニズムに違いがあること等が示唆された（図S2-5）。既往研究において、春季のオゾン濃度は、夏季よりも越境汚染や成層圏オゾンの降下の寄与が高いとの報告があり¹⁾、これらの知見と整合性があると考えられる。

¹⁾ T. Nagashima et al: Atmos. Chem. Phys., 10, 11305-11322 (2010)

S2.5 Ox環境基準新指標評価

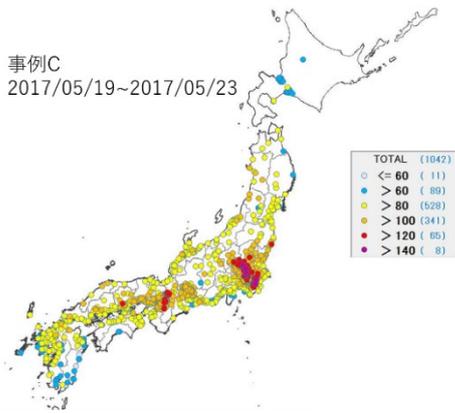
平成26年に環境省からOxの環境改善効果を適切に示すための指標として示された8時間平均値（日最高8時間値の年間99パーセンタイル値の3年平均値）を用いて、2013～2020年度の全国的な状況について解析を行った。

8時間平均値の濃度レベル別測定局数の推移（図S2-6）をみると、90 ppb超過の高濃度測定局は減少した一方、70 ppb以下の測定局数も減少していた。8時間平均値の傾き（図S2-7）は全体の約60%の測定局で増加傾向を示した。

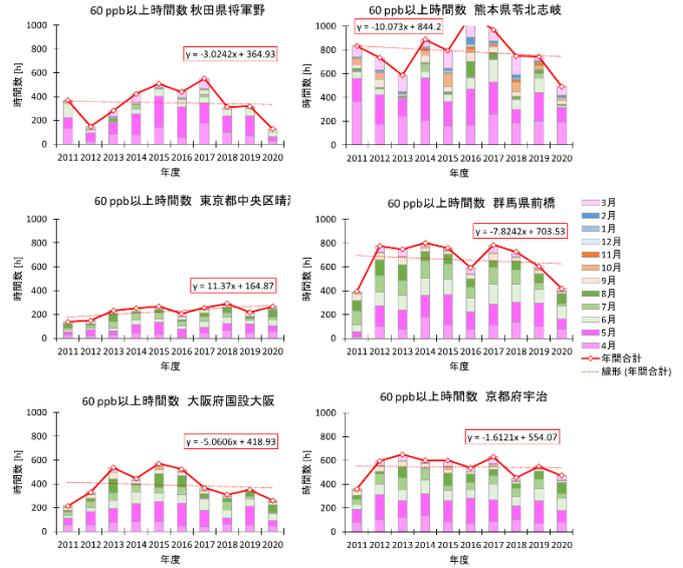


図S2-1 主な地点の2011～2020年における4～9月の時刻別Ox濃度の経年変化率

研究概要



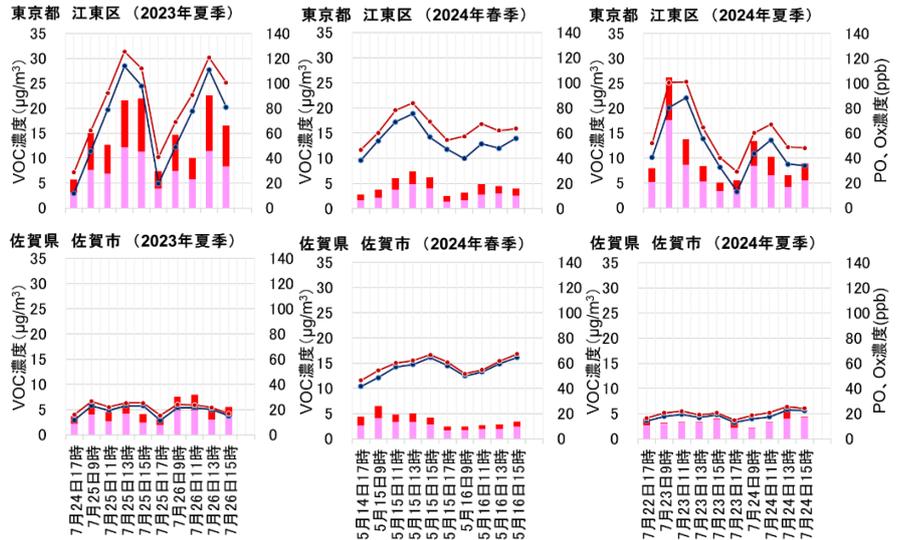
図S2-2 Ox高濃度事例C中に観測されたOx最高濃度



図S2-3 全国の月別Ox60 ppb超過時間数の経年変化

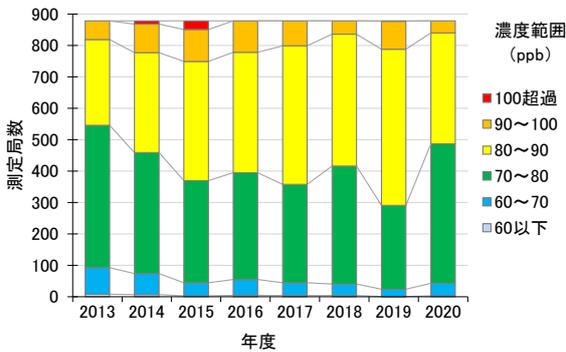


図S2-4 VOC共同調査地点

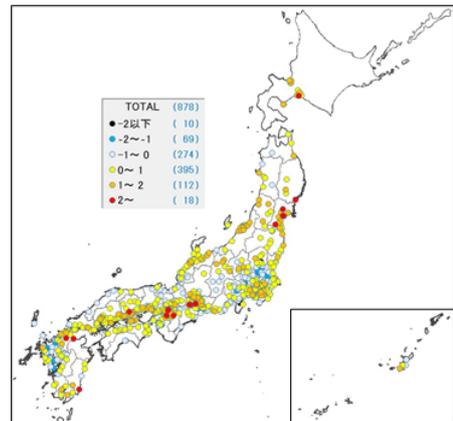


【凡例】 Formaldehyde Acetaldehyde Ox PO

図S2-5 ALDs、Ox及びPOの経時変化（東京都及び佐賀県の例）



図S2-6 8時間平均値の濃度レベル別測定局数の推移



図S2-7 Ox 8時間平均値の濃度変化(傾き)分布

研究概要

S3. Ox統計グループ

得られた主な成果：

<データ解析手法の共有>

- 統計モデルの扱えるプログラム言語としてR言語を選定し、その使い方等について複数回の勉強会を実施。大まかな作業の流れやデータの取り扱い方法について、マニュアル等を作成し共有した。
- R言語を用いて、気象データや大気汚染常時監視データの収集、成形を行えるプログラムを共有化。R言語に不慣れであっても、データの整理が行えるようになり、データの相関を図で確認することが可能となった。

<各地点におけるOxと気象条件等の関係の整理>

- 2021年度の年間データ（時間値）を用いて、Ox濃度と気象条件等の関係を把握した。
- 気象条件は、各地の気象台で測定されている気温、降水量、湿度、全天日射量や、風向・風速などを対象とした。その他には年、月、曜日といった時間スケールに関する項目もOx濃度にどのように影響するかを調べた。
- 気温や風速といった影響は、おおむね多くの地点で共通する関係性が見られた一方、風向については地点ごとの特色が顕著に表れた。また、気象条件の与える影響については、月ごとの階層化が必要である可能性が示唆された。
- 月ごとや日内でのOx濃度の変動は多くの地点で共通したが、曜日の影響については地点ごとに影響が異なっていた。

<統計モデルについて>

- Ox濃度と気象条件等の関係については、地点ごとに異なる可能性が高い。また、その関係性は時間経過とともに変動している可能性が示唆され、統計モデルの設計においてはそれらの点を踏まえる必要がある。そのため、使用する気象条件の選定手法について、統一的なルールを決めることが重要である。

S3.1 Ox濃度と気象条件の解析

Ox濃度に対して、気象条件が一定の影響を持っていると考えられる。そこで、統計的な手法を用いてOx濃度に対する気象条件の相関を調べることで、直接または間接的な影響の最終的な関係性を把握することを目的とした。

今回は、その準備段階として2021年度のOx濃度と気象条件の関連を多地点で把握すべく、データの解析を行った。数値による相関の把握では情報を見落とす可能性があるため、図示して定性的な評価を行った。Ox濃度は環境展望台の大気汚染常時監視データ¹⁾のうち、時間値データを用いた。気象データについては、気象庁のホームページ²⁾からダウンロードした。それぞれのデー

研究概要

タを加工し、最終的には統計ソフトR³⁾のパッケージopenair⁴⁾を用いて図にした。以下に、作成したプロット等の例を示す(図S3-1)。

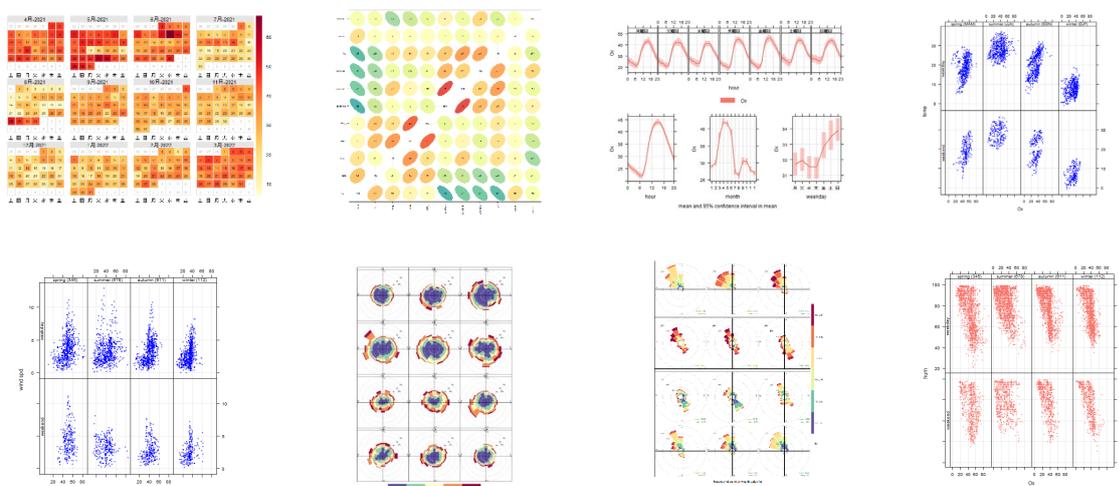


図 S3-1 2021年度の0x濃度と気象条件の関連

2021年度の年間のデータを用いて、0x濃度と気象条件の関係を把握した。春ごろに高濃度となる傾向は調査地点で共通する傾向であった。5月に数日間、濃度が低下する傾向が全国的にみられたが、これは長期的な天候不順が全国的に起こり、その影響であると考えられる。また、6月上旬には共通した時期に高濃度となる日が出現した。これも、全国的な晴天が続き、気温が上がったことによる影響だと考えられる。

○ 0x濃度と気温については、弱い正の相関があると示唆された。しかし、両者をプロットしたところ月ごとで群を作るケースが見られ、その関係性は月ごとに階層化した解析が必要である可能性が示された。

○ 0x濃度と風速の関係については、単純な関係性は見られなかった。多くの地点において、風速が遅い場合には0x濃度は幅広い値をとるが、風速が早くなるにつれて約40ppm付近に収束するような傾向が見られた(夏季を除く)。風速との関係性については、非線形な関係性に加えて、他の気象条件との交互作用についても十分に検証する必要があると考えられた。

○ 0x濃度と風向との関係については、各地点の特徴が表れており、生成メカニズムとの関連が大きいと考えられる。また地点ごとに月別の影響を見ると、風向の影響は月毎で異なっており、気温の場合と同様にその関係性が経時的に変化していることが示された。解析的にどのように扱うのが、今後の課題になると考えられる。

○ 日内変動の傾向については、地点や季節に依らず、一定の変動をすることが示された。月ごとの平均値についても、春季に高く夏季に低い傾向が示された。曜日による影響は地点により異なる傾向を示した。

研究概要

S3.2 モデルの説明変数について

これまで見てきたように、 O_x 濃度にはいくつかの気象条件や季節（月）および曜日などが影響していると考えられる。また、長期的な変動を解析するうえでは、年ごとの影響もあると考えられる。暫定的に書き下した関係式は、以下のものになると考えられる。

$$Ox_t \sim Z \left(\sum_{m=1}^{12} \sum_{\alpha=0}^p \sum_{i=1}^q \sum_{n=1}^3 h(m)g(t-\alpha)f(t,i,n) + year + month + weekday \right)$$

・・・ eq. 1

ここで Ox_t は時刻 t における O_x 濃度を意味する。 $h(m)$ は月に依存するパラメータで、月ごとの影響の強さを示す。 $g(t-\alpha)$ は時刻 t から、 α 時間だけさかのぼった影響を示すパラメータで、 p はさかのぼる最大時間を示している。 $f(t, i, n)$ は時刻 t における気象条件 i のデータを意味し、 q は気象条件の数を示す。 n は説明変数の次数を示し、3次までを仮定している。 $year$ 、 $month$ および $weekday$ はそれぞれ、データの属する年、月および曜日に対応するパラメータとなる。 $Z()$ は、これらの変数に適用する統計モデルを示す。気象条件等のデータと Ox_t との関係性については、線形性を仮定せずより柔軟な解析が可能ないように非線形性を仮定するため、一般化線形モデルや加法モデル等がより好ましいと考えられる。ただし、eq. 1は交互作用を表現していないが、今後の解析においては交互作用についても考慮する必要があると考えられる。

また、今回は時間値を用いてその関係性を解析した。しかし、 O_x 濃度の日最高8時間平均値や日内変動の値を用いたり、気象条件を一定期間の平均値とすることで、より適切に気象条件の影響を評価できる可能性もあり、それらの点についても検討を進める。

参照

- 1) <https://tenbou.nies.go.jp/download/>
- 2) <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 3) R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing*_ R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- 4) Carslaw, D. C. and K. Ropkins, (2012) *openair --- an R package for air quality data analysis*. *Environmental Modelling & Software*. Volume 27-28, 52-61.

研究概要

S4 VOC・SOA高時間分解観測グループ

得られた主な成果：

- VOC共同調査の結果から求めたOFP上位物質のうち、5 地点で共通していたのは、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド及びトルエンであった。トルエンは排出量の多い物質であるが、桜井及び前橋では昼間に濃度が減少する傾向にあった。大阪、羽曳野及び名古屋でも、Ox濃度が上昇する時間帯でトルエン濃度が減少しており、光化学反応により消費されたことが示唆された。
- 人為起源VOC（トルエン）とSOAトレーサー（DHOPA）の間では、大阪および名古屋の都市部において正の相関関係が確認された一方で、その他のVOCとSOAトレーサーとの間に相関関係は確認されなかった。
- 各時間平均値を比較し、イソプレン由来SOAトレーサーがD3～D4、モノテルペン由来SOAトレーサーがD1～D2に、それぞれ濃度が上昇した。一方、トルエン由来SOAトレーサーについては、すべての観測地点でD3に濃度が高くなる傾向が確認された。

S4.1 VOC及びSOAの高時間分解観測

Ox濃度の高くなる春季（2024 年5 月13-17 日）及び夏季（2023 年7 月24-28 日）において、Ox生成の前駆物質であるVOC及びVOCから光化学反応を経て生成するPM_{2.5}中SOA（Secondary Organic Aerosol, 二次生成有機エアロゾル）の共同調査を7 機関で行った。採取時間は、夜間は1 ターム（N：17-9時）、昼間において、2 時間毎の4 ターム（D1：9-11時、D2：11-13時、D3：13-15時、D4：15-17時）とし、日内の変動、特に光化学反応が活発な日中の挙動を把握した。

S4.2 Ox生成への寄与に着目したVOC 濃度の地点比較

5 地点（大阪、羽曳野、桜井、名古屋、前橋）における85 物質のVOC合計濃度を比較した。名古屋では濃度が他地点に比べて2 倍程度高く、前橋では低かった。Ox濃度が100 ppb付近まで上昇した2023 年夏季調査期間の時間帯別平均値では、大阪ではD2、羽曳野及び名古屋ではD3、桜井ではD4 の時間帯に最大となった。前橋では他地点と異なりD1 からD3 にかけて濃度が減少し、D4 に上昇しており、昼間の濃度変動は地点により異なることが分かった。

オゾン生成ポテンシャル（OFP）の上位物質をOx生成への寄与が大きい可能性がある物質として推定したところ、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド及びトルエンは全地点で共通していた。羽曳野、桜井及び前橋では植物起源のVOC（イソプレンあるいは α -ピネン）、名古屋では1-ブテンのOFPも高かった。トルエンは排出量の多い物質であるが、桜井及び前橋では日中に濃度が減少する傾向にあった。その他の地点においても、Ox濃度の高かった日に着目すると、Ox濃度が上昇する時間帯でトルエン濃度が減少しており、光化学反応により消失していたことが示唆された。（図S4-1）

研究概要

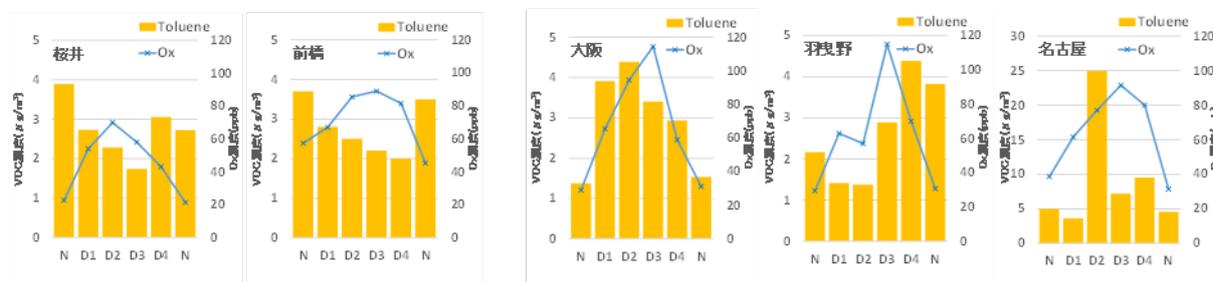
S4.3.1 SOAとVOC,OC等の関係性について

前駆体VOCと各SOAトレーサーとの相関関係について、イソプレンおよびSOAトレーサー成分である2-Methyltetrols (2MTs; 2-Methylthreitolと2-Methylerythritolの合計)と α -ピネン及びSOAトレーサー成分である3-Methylbutane-1,2,3-tricarboxylic acid (MBTCA)との間には、一部の例外を除き、ほとんど相関関係は認められなかった。一方で、トルエンおよびSOAトレーサー成分である2,3-Dihydroxy-4-oxopen-tanoic acid (DHOPA)の間では、大阪および名古屋の都市部において正の相関関係が確認された(大阪: $r = 0.79$ 、名古屋: $r = 0.57$)。また、OCと各SOAトレーサー成分との相関関係を確認したところ、2MTsとの間には相関関係が認められなかったが、MBTCAとは全観測地点において正の相関関係が確認された($r = 0.60 \sim 0.87$)。さらに、DHOPAについては福井を除く5地点で正の相関関係が認められた($r = 0.54 \sim 0.96$)。これらの結果から、OCは主に人為起源および α -ピネン由来のSOA成分の影響を受けやすい可能性が示唆された。

S4.3.2 VOC及びSOAの各時間平均値の比較

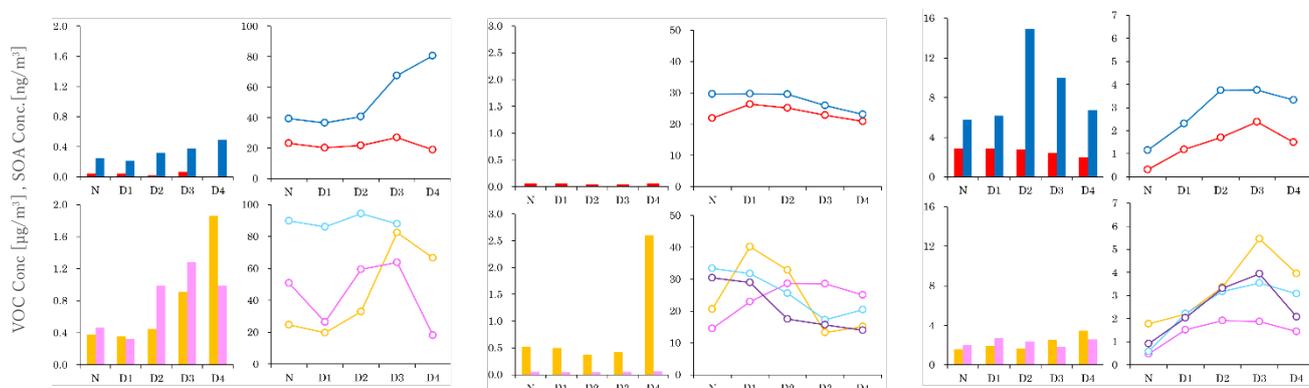
各時間分解における平均値を都市部と郊外部に分けて比較した(図S4-2)。VOCの濃度変動を確認したところ、人為起源VOCは都市部で高濃度を示し、植物起源VOCは郊外部で高濃度を示す傾向が見られ、都市構成の違いによる地域差が確認された。

また、SOAトレーサーの濃度変動に関しては、2MTsがD3~D4にかけて濃度が上昇する一方、MBTCAはD1~D2にかけて濃度が上昇し、植物由来SOA成分間で異なる挙動が観察された。一方、トルエン由来のSOAトレーサーについては、すべての観測地点でD3に濃度が高くなる傾向が確認された。



図S4-1 トルエン及びOxの濃度変動(2023年夏季)

(都市部) ○: 大阪 ○: 名古屋 (郊外部) ○: 羽曳野 ○: 桜井 ○: 各務原 ○: 福井
 イソプレン及び2ME+2MT α ピネン及びMBTCA トルエン及びDHOPA



図S4-2 各時間分解平均における前駆体VOC(棒グラフ)及びSOAトレーサー成分(折れ線)の経時変化(上段:都市部、下段:郊外部)

研究概要

S5 PM_{2.5}四季成分データ長期的解析グループ

得られた主な成果：

- 自動車排ガスの影響に着目した解析では、2011～2022年度の自排局19地点とそれに比較的近い一般局の元素状炭素（EC）濃度の差について考察したところ、一部を除き年々減少傾向であり、特に濃度差が大きかった地点では、約8割減少した。自排局でのECの年平均値はNO_xの年平均値と強い正の相関がみられた。こうしたことから、自動車排ガスに由来するPM_{2.5}の影響は、地域や場所によって程度に差はあるが経年的に低下したと考えられた。
- 越境汚染の影響に着目した解析では、2011～2022年度の新潟県以西の日本海側及び九州・沖縄の東シナ海側27地点における春季と冬季のPM_{2.5}及び硫酸イオン（SO₄²⁻）濃度を解析したところ、概ね減少傾向がみられており、PM_{2.5}では山陰や九州・沖縄、SO₄²⁻では九州・沖縄の春季において減少傾向が顕著に現れた。その他のいくつかの成分の減少傾向も踏まえて、越境汚染の影響は年々低下してきたことが示唆された。
- バックグラウンド地点においてSO₄²⁻は減少傾向、硝酸イオン（NO₃⁻）は増加傾向（したがってNO₃⁻/SO₄²⁻比は増加傾向）にあり、特に対馬や五島で顕著な変化がみられた。これは、大陸での大気中のSO₂の減少によって（NH₄）₂SO₄の生成に使われていたNH₃が余剰となってNH₄NO₃の生成が促進され、越境輸送されている可能性が示唆される。
- 船舶用燃料油の硫黄分規制効果に着目した解析では、全国のPM_{2.5}濃度が、規制前（2017～2019年度）に比べて規制後（2020～2021年度）は約20%低下した。船舶燃料である重油燃焼の主要指標成分であるバナジウム（V）濃度は、バックグラウンドを含む全ての地域で79%低下した。
- 近畿以西を対象にPMFによる発生源寄与解析を行った結果、規制前に比べて規制後のPM_{2.5}濃度は、瀬戸内地域では21%低下しており、ほかの地域でも18～24%の低下が見られた。これは重油燃焼因子の寄与が激減したためであり、特に瀬戸内地域で顕著であった。
- 都市部における硝酸塩の二次生成の影響に着目した解析では、2011～2022年度の関東、東海、近畿、九州（福岡県）の29地点の冬季のNO₃⁻濃度について考察したところ、年々変動しているが経年的に低下傾向であるとは言えなかった。地域ごとでは関東が高かったが、九州（福岡県）でも関東や近畿より高い年度もあった。
- NO₃⁻濃度の年々変動は、関東においては地域汚染による寄与の大小の影響が大きく、また、湿度が高く風が弱いときに寄与が大きくなる傾向がみられた。

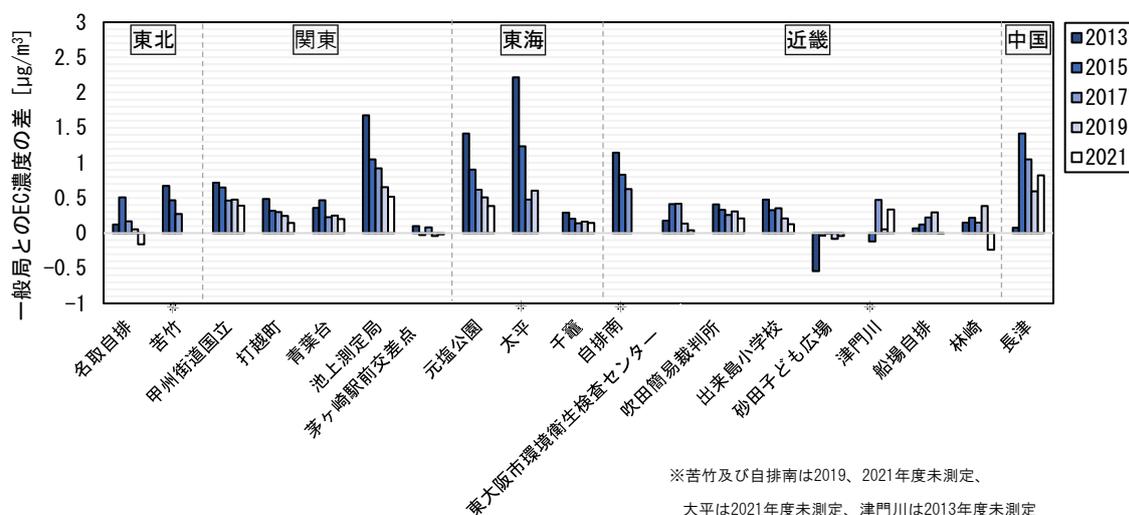
S5.1 自動車排ガスの影響に着目した解析から分かったこと

全国の自排局19地点のデータを抽出し、季節別に各年度における大気中のPM_{2.5}質量濃度及びEC濃度を解析した。また、PM_{2.5}に含まれる自動車由来のEC濃度の変化を見るため、解析対象の自排局から比較的近い一般局16地点のデータを抽出し、自排局と一般局の年平均EC濃度の差を算出した（図S5-1）。自排局19地点における季節別のPM_{2.5}質量濃度とEC濃度を比較すると、質量濃度は西高東低の傾向である一方、EC濃度はこうした傾向は見られなかった。EC濃度は特定の測定局において高い傾向にあったことから、越境汚染よりも地域汚染の影響を強く受けていたことが示唆された。

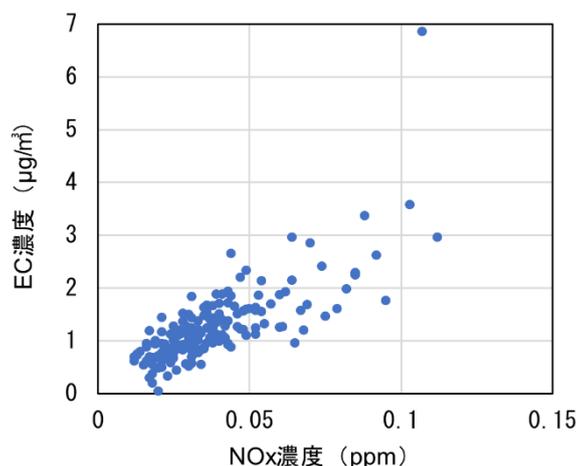
研究概要

自排局と一般局におけるEC濃度の差は、近畿の一部（兵庫県）の測定局を除き年々減少傾向であり、自動車由来のECが年々減少してきていることが示唆された。特に自排局と一般局とのEC濃度の差が大きい地点（池上測定局、元塩公園、大平）では測定開始時から2022年度（大平は2020年度）までにEC濃度の差が約8割減少していた。一方、兵庫県内の測定局は測定開始時から自排局と一般局の差が小さい傾向であったが、これは瀬戸内海側に交通量の多い幹線道路や工場が立地しており、海岸から山までの距離が比較的近いという地理的特徴があることから、自排局と一般局のEC濃度にあまり差がみられなかったのではないかと考えられた。

自排局19地点における2011～2022年度のNO_x及びECの大気濃度の年平均値を解析したところ、いずれの測定局においても年々減少傾向であり、NO_xとECの大気濃度の間には正の相関がみられた（図S5-2）。こうしたことから、地域や場所によって程度に差はあるが、自動車排ガスに由来するPM_{2.5}の影響は経年的に低下したことが明らかになった。



図S5-1 自排局(19地点)と一般局のEC濃度の差の経年変化



図S5-2 自排局(19地点)における年平均EC濃度及びNO_x濃度の関係(2011～2022年度)

S5.2 越境汚染の影響に着目した解析から分かったこと

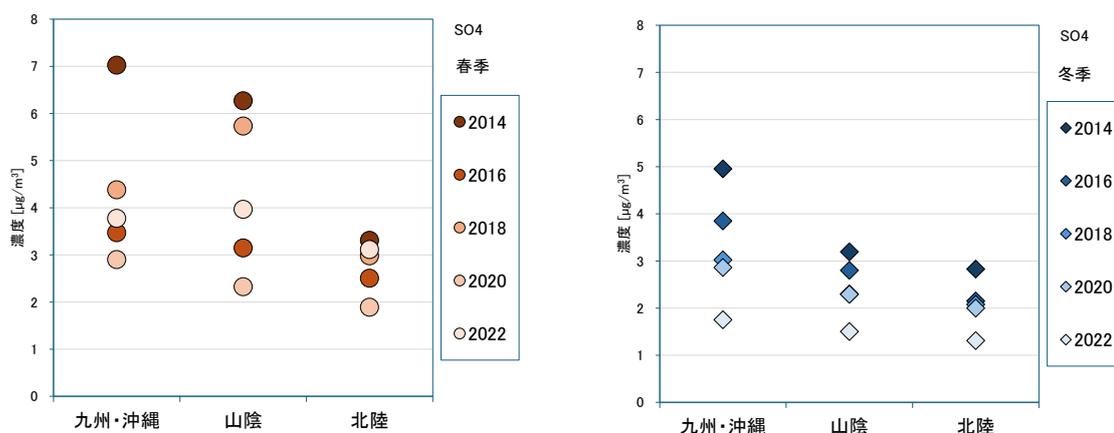
2011年度から2022年度までのPM_{2.5}及びPM_{2.5}成分データについて、新潟県から島根県にかけての日本海側及び九州・沖縄の東シナ海側27地点（バックグラウンド及び一般環境）の測定結果を解析した（図S5-3）。解析は、偏西風や季節風による越境輸送の影響が大きいと考えられる春季及び冬季の調査期間の平均値を対象とした。

研究概要

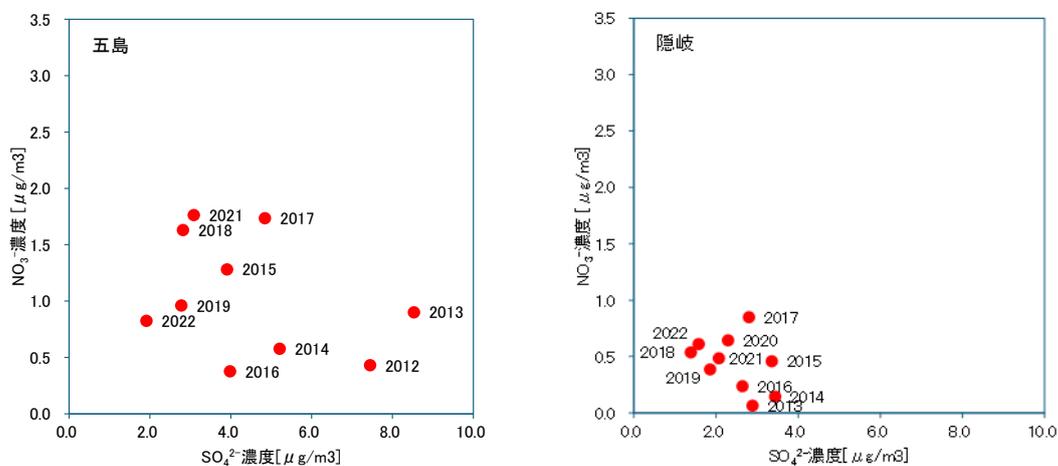
春季及び冬季の質量濃度は、どの地点も2011年度から2022年度にかけておおむね減少傾向がみられた。地域別でみると山陰や九州・沖縄は減少傾向が大きく現れた。SO₄²⁻濃度は質量濃度と同じく、春季及び冬季において2011年度から2022年度にかけておおむね減少傾向が見られた。特に九州・沖縄の春季において減少傾向が顕著に現れた。質量濃度とSO₄²⁻濃度は年々減少傾向にあり、西高東低（大陸から離れるにつれて濃度が低くなる）の傾向にあった。従ってPM_{2.5}及びSO₄²⁻は主な発生源である大陸の影響を強く受けており、中国におけるSO₂等の排出量減少の影響によりPM_{2.5}及びSO₄²⁻が経年的に減少したと推察される。

春季及び冬季のアンモニウムイオン（NH₄⁺）は、SO₄²⁻がほぼ硫酸アンモニウムとして存在していると考えられるため、SO₄²⁻及びPM_{2.5}と同様に経年的に濃度が減少していた。有機炭素（OC）については経年的な濃度変化がほとんどなく、バックグラウンド地点の濃度が低い傾向にあることから、OCは越境汚染に加えて地域内生成によっても多く発生している可能性が示唆される。また、E C、ヒ素（As）、鉛（Pb）においては全体的に減少傾向にあったが、地点によっては濃度が著しく高くなるなど地点間で差が確認された。そのような地点においては越境汚染の影響に加え地域内発生の影響を受けている可能性が考えられる。Vについて春季は2020年度、冬季は2019年度以降に濃度が大きく減少した。これは2020年1月以降の船舶燃料油規制による燃料転換が進んだ効果であると考えられる。また、この減少傾向は一般環境だけでなくバックグラウンド地点でも確認されたため、広域的に規制の効果が現れていることが推察される（図S5-4）。

バックグラウンド地点全てにおいてSO₄²⁻は減少傾向、NO₃⁻は増加傾向、NO₃⁻/SO₄²⁻比は増加傾向にあり、特に対馬や五島で顕著な変化がみられた。対馬や五島は中国等の大陸に近い位置にあり、越境汚染の影響を受けやすいため変化が大きく表れたと推察される。冬季においてNO₃⁻/SO₄²⁻比が年々増加していることから、大気中のSO₂の減少によって従来硫酸アンモニウム形成に使われたアンモニアが過剰となり、硝酸アンモニウムが生成され、越境輸送している可能性が示唆される。



図S5-3 地域ごとに平均したSO₄²⁻濃度の経年変化(左:春季, 右:冬季)



図S5-4 バックグラウンド地点におけるNO₃⁻/SO₄²⁻比の経年変化(左:五島, 右:隠岐)

研究概要

S5.3 船舶用燃料油の硫黄分規制効果に着目した解析から分かったこと

2012年度から2022年度のPM_{2.5}成分分析結果から、東北・北海道、関東、中部、近畿、中国・四国、九州・沖縄、バックグランドの7地域に分けて、地域毎に四季の平均値を算出した。また、2017年度から2021年度のPM_{2.5}成分分析結果から、近畿地方以西において瀬戸内（大阪湾岸含む）、日本海・太平洋、近畿、九州、バックグランド（潮岬、隠岐、五島）の5地域に区分し、データの選別等を行いPMF 5.0（US. EPA）で発生源寄与解析を試みた（表S5-1）。

全国のPM_{2.5}濃度は、規制前（2017～2019年度）に比べて規制後（2020～2021年度）は約20%低下した。また、バックグランド地域で特に顕著であったが、規制前は春～秋季にPM_{2.5}濃度が高くなる季節変動が見られていたが、規制後は季節変動がほぼ見られなくなった。SO₄²⁻濃度は30%低下、NH₄⁺濃度は30%低下した。SO₄²⁻やNH₄⁺濃度はPM_{2.5}濃度と同様に規制前には季節変動が見られたが、規制後には季節間の濃度差が小さくなった。沿岸部のみでなく全国の測定局でこれら成分濃度の低下傾向がみられており、船舶燃料油規制以外の要因も影響している可能性がある。船舶燃料である重油燃焼の主要指標成分であるVとニッケル（Ni）濃度について見ると、Vはバックグランドを含む全ての地域で規制後に79%低下し、NiはVほど顕著ではないが、34%低下した。Vは春季から夏季に高濃度になる顕著な季節変動が規制前には見られていたが、規制後には季節変動はほぼ見られなくなった。

PMFによる発生源寄与解析の結果、得られた7つの因子の組成プロファイルと寄与濃度の季節変化などを考慮して発生源を割り当て、そのうち重油燃焼と硫黄系二次生成因子を船舶排出ガスに由来する因子とした。瀬戸内地域では、PM_{2.5}濃度は21%低下しており、その他地域区分でも18～24%の低下が見られ、この低下には重油燃焼因子や硫黄系二次生成因子の影響が大きかった。いずれの地域区分でも規制後は重油燃焼因子の寄与濃度が激減し、それは特に瀬戸内地域で顕著であった。硫黄系二次生成因子も各地域区分で19～33%の低下が見られた。ただ、重油燃焼因子とは異なり、瀬戸内地域よりも日本海・太平洋や近畿、九州地域の方が寄与濃度の低下幅は大きく、これらの地域では越境輸送や地域内発生源由来の硫黄系二次生成粒子濃度も低下した可能性がある。

これらの重油燃焼因子と硫黄系二次生成因子の寄与濃度低下がPM_{2.5}濃度低下に大きく貢献しており、日本海・太平洋と近畿、九州地域ではPM_{2.5}濃度低下の64～81%が両因子寄与濃度の低下に起因していた。瀬戸内地域とバックグランド地域ではその傾向はより顕著であり、PM_{2.5}濃度低下へのこれら2因子の寄与は瀬戸内地域では87%、バックグランド地域では97%であったと推定された。従って、瀬戸内地域やバックグランド地域では他地域よりも船舶燃料油規制による大気質改善効果がより大きかったと考えられる。

表S5-1 近畿以西の各地域の規制前後のPM_{2.5}濃度

地域区分	PM _{2.5}				重油燃焼因子				
	規制前	規制後	濃度差	低下率	規制前	規制後	濃度差	低下率	PM _{2.5} 低下への寄与*
	(μg/m ³)			(%)	(μg/m ³)			(%)	(%)
瀬戸内	13.3	10.5	2.8	-21	1.6	0.3	1.3	-82	47
日本海・太平洋	12.3	9.5	2.8	-22	0.8	0.1	0.7	-84	25
近畿	12.2	9.3	2.9	-23	0.9	0.1	0.7	-86	26
九州	14.9	11.4	3.5	-24	0.9	0.1	0.8	-84	22
バックグランド	11.1	9.1	2.0	-18	1.0	0.2	0.8	-81	42

*PM_{2.5}濃度低下に占める重油燃焼因子の寄与率

研究概要

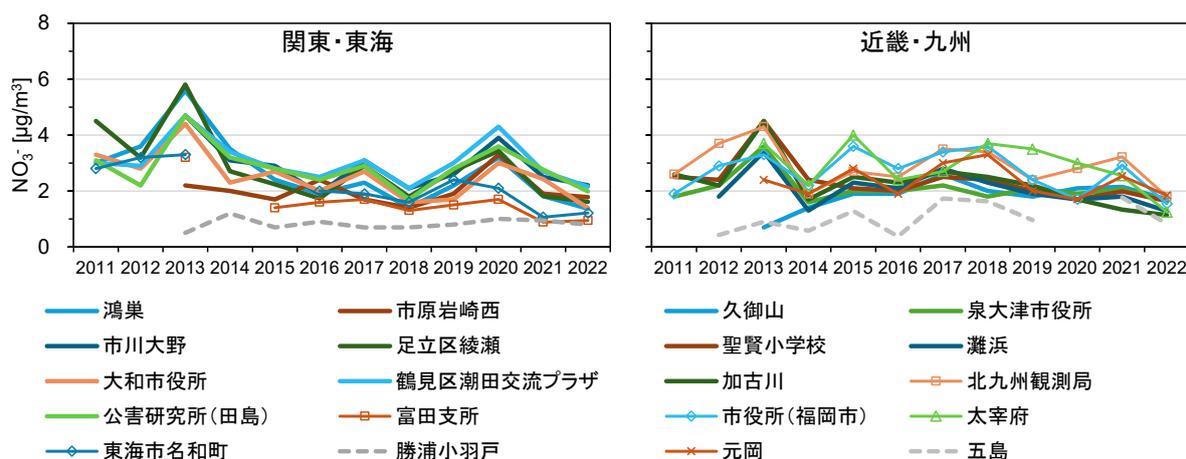
S5.4 都市部における硝酸塩の二次生成の影響に着目した解析から分かったこと

解析は2011～2022年度の大部分を継続して測定している関東（埼玉・千葉・東京・神奈川）13地点、東海（愛知）2地点、近畿（京都・大阪・兵庫）9地点、九州（福岡）4地点を対象とした。これらの地点の NO_3^- 濃度について冬季の平均濃度を求めて考察した（図S5-5）。

年度・地点ごとの NO_3^- 濃度の冬季平均は2～4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であることが多く、2013年度は全体的に高濃度であったが、経年的に低下傾向とまでは言えず年々変動しており、またそれは地域間で同じ傾向であったり異なっていたりしてまちまちであった。地域ごとに濃度レベルをみると関東が高めであったが、九州でも関東や近畿より高い年度もあった。 $\text{PM}_{2.5}$ に占める NO_3^- の割合（ $\text{NO}_3^-/\text{PM}_{2.5}$ 比）は、濃度と同様に年々変動があるものの関東では0.2～0.3程度が多く、それ以外の地域では概ね0.1～0.2であった。濃度では関東や近畿より高い年度がみられた九州の $\text{NO}_3^-/\text{PM}_{2.5}$ 比は近畿と同程度であった。 $\text{NO}_3^-/\text{PM}_{2.5}$ 比も経年的な傾向があるとまでは言えないが、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が低下傾向である分、若干であるが上昇気味に見える部分もあった。全体的に高濃度であった2013年度は、 $\text{NO}_3^-/\text{PM}_{2.5}$ 比では他の年度と大きく違っていなかったため、硝酸塩のみが特異的に高くなったわけではないと考えられた。

地域汚染による硝酸塩生成の寄与を考察するため、関東では各地点と勝浦の濃度差を取ることでそれを見積もった。その結果、濃度の年々変動は地域汚染による寄与の大小の影響が大きく、関東の中では埼玉・東京・神奈川が千葉に比べて影響が大きい傾向であった。一方、九州について、五島では越境汚染の寄与のみであるとして、各地点と五島との濃度差を取ることで越境汚染と地域汚染の寄与の様子をみたところ、福岡の都市部における地域汚染がある程度存在するところに、年によっては越境汚染が濃度を押し上げることがあると考えられた。

関東における地域汚染の寄与の年々変動の要因として気象との関係性をみたところ、湿度が高く風が弱いときに寄与濃度が高くなる傾向がみられた。気温については同じ冬季での変動幅の中では関係なさそうであった。また、顕著に高かった2013年度と他年度との間に明確な違いはみられなかった。



図S5-5 NO_3^- 濃度の冬季平均の経年変化

研究概要

S6 行政支援検討グループ

S6-1 CMAQを用いた大気行政支援の検討

得られた主な成果：

- 大気汚染にかかる行政課題解決には多面的な検討が必要であるが、自治体ではリソースの問題などから検討に必要な情報を得ることが困難である。これらの情報を得る手段の一つである化学輸送モデルのCMAQ (Community Multi-scale Air Quality) によるシミュレーションを自治体が独自で実行することを目的とした活動を行った。
- 自治体でのCMAQの導入を促すために、CMAQを学ぶ勉強会を開催した。
- 自治体でCMAQを実施する際に大きな問題となるCMAQ環境の構築と排出量データの作成について情報を集め、CMAQインストールマニュアルと排出量データ作成手順書をグループ共有した。
- 自治体において、これらの手引き等を活用している事例が上がっており、今後のCMAQ活用拡大が望まれる。

S6-1.1 コンセプト

大気汚染にかかる行政課題解決には、対象となる汚染物質の発生、固相・液相・気相への遷移、化学変化などを通してどのように大気中を運ばれ、人の健康にどのように影響を与えるかを検証しなければならない。一般的にこれらの検証は、対象となる汚染物質をサンプリングし、分析することによって汚染状況の確認を行い、その分析結果からクラスター解析やレセプターモデルとして知られるPMF法やCMB法による発生源の解析をすることによって行われるが、これらの分析、解析を、数多くの物質で、広範な空間に、適切な時間分解能により行うことは自治体単位では難しく、大気汚染における行政課題において十分に対応できているとは言い難い。

この問題に対応する一つとして、大気汚染物質のシミュレーションがあり、大気環境行政の分野では大気常時監視測定局の適正配置などで用いられているが、シミュレーションにはハード、ソフトで膨大なリソースが必要で専門的な知識も必要であるため、一部を除いた自治体では専門機関への委託によっており、大気汚染に関する多様な行政課題への対応が難しい状況にある。

そこで、化学輸送モデルシミュレーションであるCMAQ (Community Multi-scale Air Quality) を自治体が独自で使用することを目的とした活動を行った。

S6-1.2 自治体へのCMAQ紹介

CMAQを自治体で使用するにはあたっては、CMAQについて自治体担当者が興味を持ち、仕組みなどを理解する必要があることから全国環境研究所協議会と合同でCMAQにかかる勉強会を開催し、CMAQの概要、使用するPCの構成、使用事例、ツールなどを全国の自治体に紹介した。

S6-1.3 CMAQにかかる手引き等の共有

自治体へのCMAQ導入では、自治体が所有するPCへのCMAQインストールが障害となっている。これまで導入マニュアルはⅡ型共同研究において作成されてきたが、OSの違いやCMAQなどのバージョンアップ等によりマニュアルどおりにはいかない場面が見られた。

研究概要

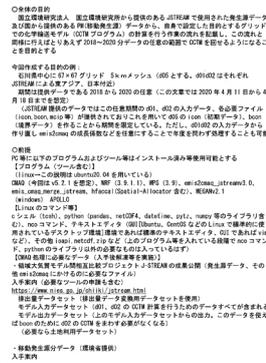
また、CMAQに必要な排出量データの作成においては、国立環境研究所の領域大気質モデル間相互比較プロジェクトJ-STREAMの成果として、排出量データやCMAQ入力用排出量データへの変換ツール等が公開されているが、添付されているマニュアルのみで使用するのは難しい。

そこで、これらに関する情報を集め、自治体で使用している最新のCMAQインストールマニュアルと排出量データ作成手順書をグループ内で公開した（図S6-1、図S6-2）。

図S6-1 CMAQインストールマニュアル



図S6-2 排出量データ作成手順書



S6-1.4 排出量データ作成手順書活用事例と今後の課題

公開した排出量データ作成手順書は、福岡県はPM_{2.5}や光化学スモッグなど3日先までの大気汚染予測を行う「福岡県大気汚染予測システム（愛称：Fcast（エフキャスト）」）のシミュレーション用データ作成の参考とされている（図S6-3）。

また、CMAQを用いた自治体の調査研究にも使用されている。

CMAQに関して、開催した勉強会への参加者は60名を超えており、自治体の関心が高いことがうかがえるが、実際に使用している自治体は、研究報告などを見ても一部に限られている。

今後、CMAQの普及を図るためには一段の導入障壁の低下と排出量データ取り扱いの簡易化が求められる



図S6-3 福岡県大気汚染予測システム

研究概要

S6-2. 空間統計手法を用いた大気行政支援の検討

得られた主な成果：

- 自治体の重要な政策課題である大気汚染常時監視の適切かつ効率的な運用への活用を目標として、大気汚染物質の空間濃度分布を予測するRegression Kriging法（RK法）に着目し、RK法の参加自治体による習得と行政支援への活用を目的として検討を進めた。
- RK法の実施を容易にする統計解析環境Rのプログラム（RKscripts）とGUIツール（RKsupport）を国立環境研究所と一部の参加自治体で共同開発した。
- RKscripts及びRKsupportを使用したテスト解析等を参加自治体で進め、各自治体でRK法を実施できる状態になったことを確認した。
- 各自治体でRKscripts及びRKsupportを用いて、それぞれのニーズに即した解析を進めた。一部の自治体では、行政部署との協議等を開始しており、今後の活用が期待される。

S6-2.1 研究のコンセプト

大気汚染常時監視の適切かつ効率的な体制構築と運用は、それを担う都道府県及び政令市（以下「自治体」）にとって重要な政策課題である。その具体例としては、大気汚染常時監視測定局（以下「測定局」）の配置や光化学オキシダント注意報の発令地域区分の設定が挙げられる。配置等の検討を科学的に行うためには、大気汚染物質の空間濃度分布の把握が重要となる。そこで、本研究では、実測値に基づき空間濃度分布を得る空間統計手法の一つであるRegression Kriging法（以下「RK法」）に着目し、これを自治体の政策に活用することを目指した取り組みを進めてきた。具体的には、「①RK法を参加自治体で実施できる状態にすること」と「②RK法を参加自治体における行政支援に活用すること」を目的として検討を重ねた。

S6-2.2 空間濃度分布予測のためのプログラム等の開発

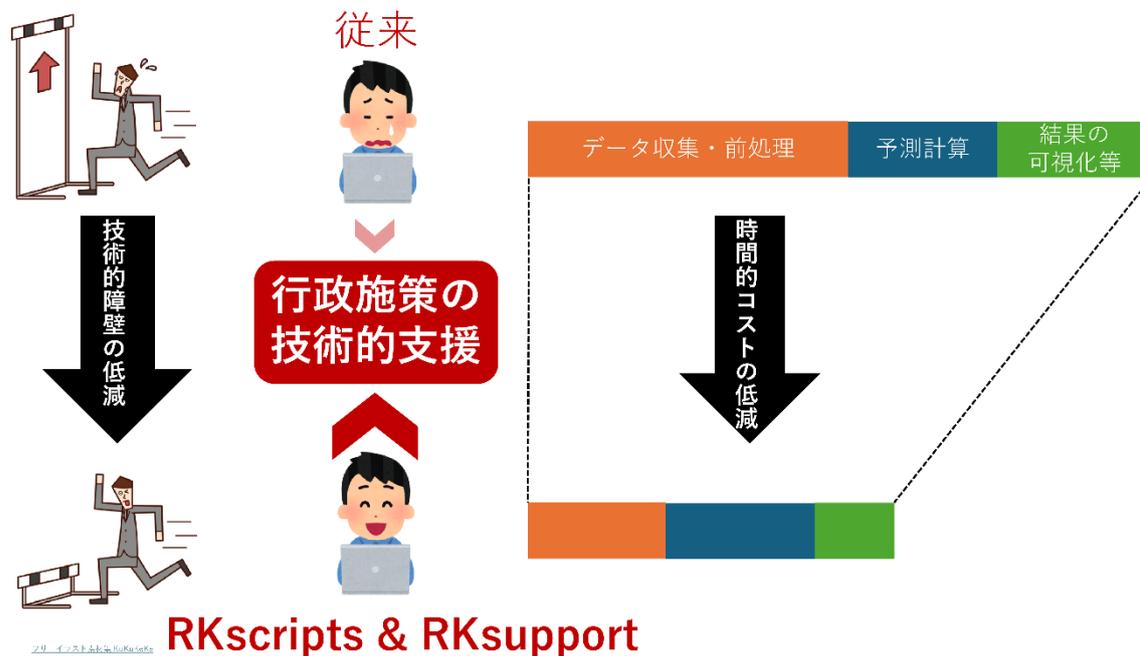
RK法は実測値をベースに高い空間分解能で空間濃度分布を予測できることから、測定局配置の検討や疫学調査等の様々な目的で活用されている。一方で、土地利用や気象観測等の様々なデータを説明変数として使用するため、データの前処理に多くの時間を要するといった時間的コストや高度なプログラミング技術が求められるといった技術的障壁が課題となり、特に自治体における使用例は限られていた。そこで、RK法を測定局配置の検討に活用した事例を有する熊本県と国立環境研究所で協力して、RK法の実施を容易にするためのプログラム等の開発を試みた。

開発したプログラム等は、統計解析環境Rのプログラム（RKscripts）とGUIツール（RKsupport）で構成される。RKscriptsは、説明変数の準備等の前処理から予測結果の可視化までをまとめて実行可能なプログラムである。RKsupportは、RKscriptsの予測条件設定等をマウス操作で容易にできるGUIツールであり、これによってプログラミング初心者でも直感的に扱うことが可能となる。

プログラム等は2023年11月～2024年2月にかけて参加自治体向けに配布し、テスト解析を実施しながらバグ等の把握と改良を実施した。2月末時点で、プログラミング初心者を含めた全参加自治体（参加者）が一定の解析結果を得ることができており、時間的コスト及び技術的障壁の低

研究概要

減にこれらのプログラム等が大きな効果を発揮したと考えられた（図S6-4）。なお、RKscripts及びRKsupportは、参加自治体等のフィードバックを受けながら、継続的に改良を続けている。

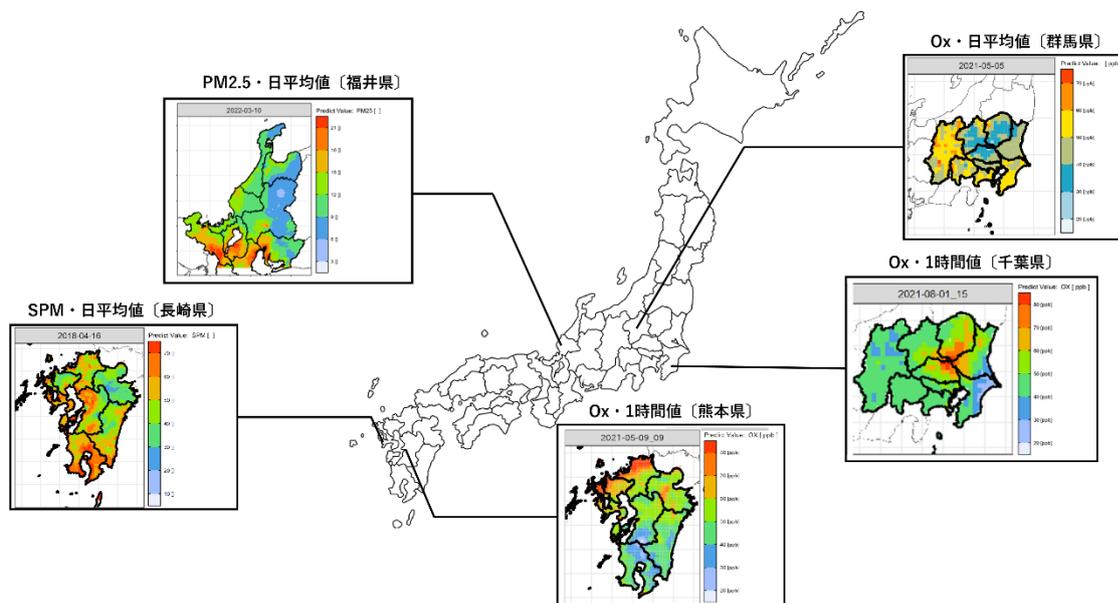


図S6-4 開発したプログラム等による効果

S6-2.3 各自治体における実施・検討状況と今後の課題

各自治体では、それぞれの行政的なニーズ等に応じた検討が進められ、各自が求める空間濃度分布が成果として得られている（図S6-5）。各詳細については、報告書を参照いただきたい。

目的①については、開発したプログラム等による後押しと各自治体の努力により概ね達成できたが、目的②については、各自治体の体制やニーズ等に左右されるため、進捗は様々である。今後、今期の成果をさらに発展させ、自治体の政策への活用を広げていくことが重要である。



図S6-5 各自治体による解析結果の例