

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分 : 環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）

研究実施期間 : 2023（令和5）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 5MF-2301

体系的番号 : JPMEERF20235M01

研究課題名 : 2050カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの予測と低オゾン・脱炭素コベネフィット戦略の提示

Project Title : Projection of Ground Level Ozone in Japan in 2050 Carbon-neutral Environment and Proposal of Co-benefit Strategy of Low Ozone and Decarbonization

研究代表者 : 永島 達也

研究代表機関 : 国立環境研究所

研究分担機関 : 埼玉県環境科学国際センター、アジア大気汚染研究センター、九州大学応用力学研究所

キーワード : 地表オゾン、2050カーボンニュートラル、将来排出シナリオ、大気質シミュレーション、気候変動

注: 研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



環境研究総合推進費  
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人  
環境再生保全機構  
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
研究課題情報 .....	3
<基本情報> .....	3
<研究体制> .....	3
<研究経費の実績> .....	4
<研究の全体概要図> .....	4
1. 研究成果 .....	5
1. 1. 研究背景 .....	5
1. 2. 研究目的 .....	5
1. 3. 研究目標 .....	6
1. 4. 研究内容・研究結果.....	7
1. 4. 1. 研究内容 .....	7
1. 4. 2. 研究結果及び考察.....	7
1. 5. 研究成果及び自己評価.....	9
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献.....	9
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価.....	9
1. 6. 研究成果発表状況の概要.....	9
1. 6. 1. 研究成果発表の件数.....	9
1. 6. 2. 主要な研究成果発表.....	10
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動.....	10
1. 7. 國際共同研究等の状況.....	10
1. 8. 研究者略歴 .....	11
2. 研究成果発表の一覧 .....	12
(1) 産業財産権 .....	12
(2) 論文 .....	12
(3) 著書 .....	12
(4) 口頭発表・ポスター発表.....	12
(5) 「國民との科学・技術対話」の実施.....	14
(6) マスメディア等への公表・報道等.....	14
(7) 研究成果による受賞.....	14
(8) その他の成果発表 .....	15
権利表示・義務記載 .....	15

Abstract

## 研究課題情報

## &lt;基本情報&gt;

研究区分 :	環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）
研究実施期間 :	2023（令和5）年度～2024（令和6）年度
研究領域 :	安全確保領域
重点課題 :	【重点課題16】大気・水・土壤等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究 【重点課題9】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価
行政ニーズ :	
課題番号 :	5MF-2301
体系的番号 :	JPMEERF20235M01
研究課題名 :	2050カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの予測と低オゾン・脱炭素コベネフィット戦略の提示
研究代表者 :	永島 達也
研究代表機関 :	国立環境研究所
研究分担機関 :	アジア大気汚染研究センター、九州大学応用力学研究所、埼玉県環境科学国際センター
研究協力機関 :	

注：研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1 「2050カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの予測と低オゾン・脱炭素コベネフィット戦略の提示」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	国立環境研究所	地球システム領域	副領域長	永島達也	
分担者	埼玉県環境科学国際センター	温暖化対策担当	主任	河野なつ美	
分担者	アジア大気汚染研究センター		所長	大原利眞	
分担者	九州大学	応用力学研究所	助教	板橋秀一	
協力者	国立環境研究所	社会システム領域	室長	花岡達也	
協力者	アジア大気汚染研究センター	情報管理部	部長	黒川純一	

注：研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

## &lt;研究経費の実績&gt;

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2023	13,067,693	3,920,307	16,988,000	
2024	13,067,693	3,920,307	16,988,000	
全期間合計	26,135,386	7,840,614	33,976,000	

注：環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

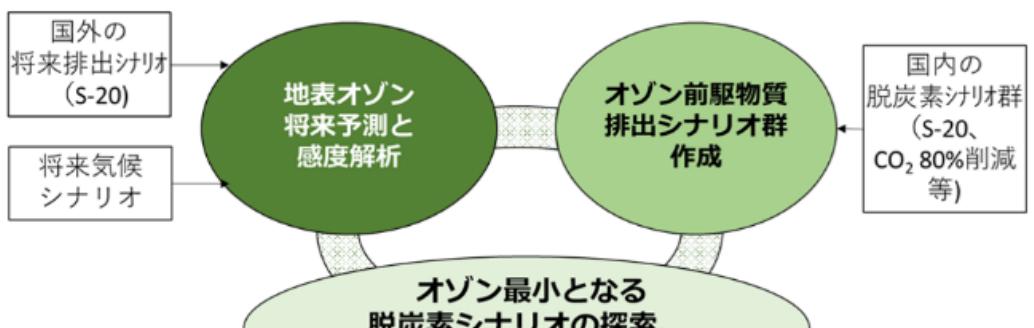
## &lt;研究の全体概要図&gt;

【課題名】2050カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの予測と低オゾン・脱炭素コベネフィット戦略の提示

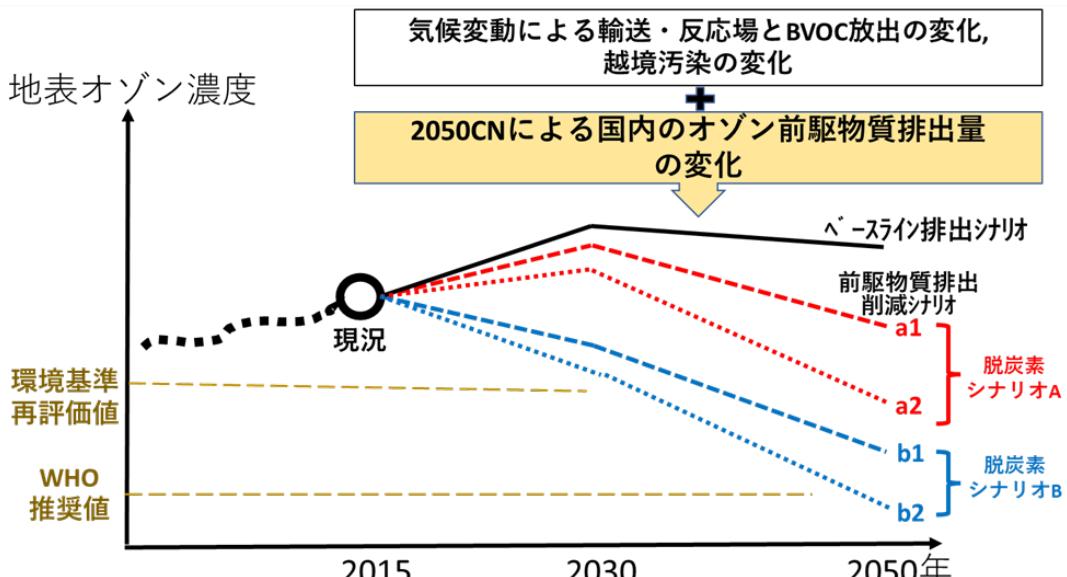
【課題代表機関】国立研究開発法人 国立環境研究所

【課題分担機関】埼玉県環境科学国際センター、アジア大気汚染研究センター、九州大学

研究代表者（永島）、分担者（大原、板橋、河野）、協力者（鵜野、花岡、黒川）



低オゾン・脱炭素のコベネフィット戦略  
(2050CNシナリオ作成に資する情報提供、中環審のOxワーキングプランへの貢献)



異なる脱炭素シナリオと前駆物質排出削減シナリオでの地表オゾン変化、  
並びに、低オゾン・脱炭素シナリオの探索（イメージ）

## 1. 研究成果

### 1. 1. 研究背景

日本における地表オゾン(O3)濃度は、大気汚染防止法などによる対策が講じられているにも関わらず、半世紀以上にわたり環境基準達成率の極めて低い状況が続いている。その濃度の低減はわが国の大気環境行政にとって長年かつ喫緊の課題である。また、地表を含む対流圏中のO3は、その放射特性により気温を温める効果(正の放射強制力)を持ち、その大きさは二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)やメタン(CH<sub>4</sub>)に次いで大きく、近年では、短寿命気候強制物質(Short-Lived Climate Forcers: SLFCs)と呼ばれ、O3濃度の低減は気候変動緩和策としても大きな期待が持たれている。こうした背景から、将来における日本の地表O3濃度の変動には、大気質改善のみならず気候変動緩和の観点からも大きな関心が寄せられており、そのような将来変動を引き起こし得る要因の中でも本課題で特に注目したのが「2050カーボンニュートラル」(2050CN)である。2050CNは2020年10月に日本政府が宣言した、パリ協定の1.5°C目標の達成に整合的な脱炭素目標であり、2050年までに日本における温室効果ガスの排出と吸収をバランスさせ排出を全体としてゼロにすることを目指している。その過程で構築される脱炭素社会では、化石燃料消費が大幅に削減されることが想定され、それに伴ってO3の前駆物質である窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)や揮発性有機化合物(Volatile Organic Compound: VOC)の排出量にも大きな変化が生じ、地表O3濃度への影響も当然ながら予想される。ところが、現在各方面で検討されている2050CN達成に向けたシナリオ研究では、脱炭素以外の環境政策目標との共便益等を志向する視点が薄く、地表O3濃度などの大気質への影響に対する検討は十分とは言えない。また、2050年という将来の日本の地表O3濃度を考える上では、日本国内での2050CNに向けた排出量変化の影響に加えて、中国など日本の周辺国における排出量の将来変化の影響や、気候の将来変化の影響、例えば、気温上昇に伴う植物起源VOC発生量の変化や、東アジア大気循環の変化に伴う越境大気汚染の変化を介した影響についても考慮する必要がある。しかしながら、このような要因を総合的に考慮し、2050CNが目指す脱炭素環境における日本国内の地表O3変化を評価した研究はまだ無い。一方、環境省が策定した「光化学オキシダント対策ワーキングプラン」では、このような現状を踏まえ、光化学オキシダント濃度低減に向けた新たな対策の検討を4年間(2022年度～2025年度)のスケジュールで取り組んでいる。その中でも2050CNを考慮した対策の検討と排出削減シナリオの策定が、取り組みの大きな柱の一つと位置付けられており、2050CNが国内地表O3に及ぼす影響評価を行う緊急性は高い。申請者らは、国立環境研究所の気候変動適応研究プログラム(2018年～2020年実施)において、気候モデルによる将来気候変化予測を空間詳細化する手法(疑似温暖化手法)と大気質モデルを組み合わせて、将来の大気質変化を空間詳細に評価する手法を開発しており、また申請者が研究分担者として参画している推進費S-20では、2050CNが目指すパリ協定の1.5°C目標を考慮した温室効果ガスとSLFCsの削減シナリオ開発が進められており、その情報をいち早く利用することができる。

### 1. 2. 研究目的

本研究課題の目的は、日本における2050CNの達成が国内の地表O3濃度に与える影響を、気候変動の影響や日本国外の排出量変化の影響も取り込んで包括的かつ定量的に示し、低O3濃度と脱炭素が両立する戦略(コベネフィット戦略)の可能性を提示することである。その際、2050CNが達成されない場合も含め、脱炭素対策と大気質汚染対策のレベルが異なる複数の将来シナリオを作成し、国内の地域(都道府県レベル)毎の解析が可能な空間解像度を持った大気質モデルによるシミュレーションを実施する。複数の将来シナリオによる結果の比較から、2050CNの達成を目指すことが、脱炭素社会の構築に加えて、国内の地表O3汚染の改善にもつながり得ることを示す。これにより、2050CNの達成に向けたシナリオ開発に大気質改善の視点を与える契機とし、環境省の「光化学オキシダント対策ワーキングプラン」の推進に貢献する。

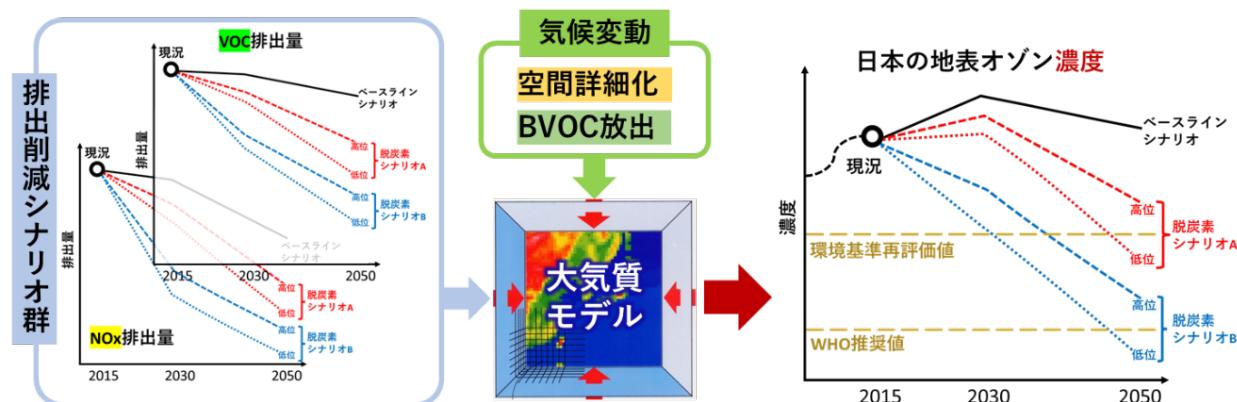


図1-1 本研究の概念図

## 1. 3. 研究目標

&lt;全体の研究目標&gt;

研究課題名	2050カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの予測と低オゾン・脱炭素コベネフィット戦略の提示
全体目標	<p>2030、2050年を対象に、社会経済とエネルギー構成のベースラインシナリオと複数の脱炭素シナリオを基に、大気汚染物質の排出削減シナリオ群を作成するとともに、将来の気候変動や越境汚染の影響を加味して国内の地表O3濃度を予測する。これらをもとに、地表O3を最小化する脱炭素シナリオと大気汚染物質の排出削減シナリオの組合せを探査し、低O3・脱炭素のコベネフィット戦略を提示する。</p> <p>① 2030、2050年を対象に、社会経済とエネルギー構成のベースラインシナリオと複数の脱炭素シナリオを選定し、それらに対して国内におけるO3前駆物質(NOxとVOC)の対策レベルの異なる排出削減シナリオ群(高位と低位など複数の削減シナリオ)を作成する。その際、前駆物質のセクター別排出削減によるO3変化を大気質モデルで評価して、対策レベルの検討に活用する。</p> <p>② ①のO3前駆物質排出削減シナリオに加えて、領域気象モデルWRFでダウンスケールした日本の将来気候変動や国外からの大気汚染物質の越境輸送の将来変化も考慮して、2030、2050年の国内の地表O3濃度を領域化学輸送モデルCMAQにより予測する。</p> <p>③ ①と②をもとに、地表O3濃度を最小化しうる脱炭素シナリオとO3前駆物質の排出削減シナリオの組み合わせを明らかにする。更にO3目標(新基準値やWHO目標値)の達成に必要な脱炭素シナリオとO3前駆物質排出削減シナリオの組み合わせを探査する。最終的に、脱炭素社会における低O3化の達成可能性を定量的に示し、低O3・脱炭素社会に向かう筋道を提示する。</p>

&lt;サブテーマ1の研究目標&gt;

サブテーマ1名	2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの予測と低オゾン・脱炭素コベネフィット戦略の提示
サブテーマ1実施機関	国立環境研究所、埼玉県環境科学国際センター、アジア大気汚染研究センター、九州大学応用力学研究所
サブテーマ1目標	<p>2030、2050年を対象に、社会経済とエネルギー構成のベースラインシナリオと複数の脱炭素シナリオを基に、大気汚染物質の排出削減シナリオ群を作成するとともに、将来の気候変動や越境汚染の影響を加味して国内の地表O3濃度を予測する。これらをもとに、地表O3を最小化する脱炭素シナリオと大気汚染物質の排出削減シナリオの組合せを探査し、低O3・脱炭素のコベネフィット戦略を提示する。</p> <p>① 2030、2050年を対象に、社会経済とエネルギー構成のベースラインシナリオと複数の脱炭素シナリオを選定し、それらに対して国内におけるO3前駆物質(NOxとVOC)の対策レベルの異なる排出削減シナリオ群(高位と低位など複数の削減シナリオ)を作成する。その際、前駆物質のセクター別排出削減によるO3変化を大気質モデルで評価して、対策レベルの検討に活用する。</p> <p>② ①のO3前駆物質排出削減シナリオに加えて、領域気象モデルWRFでダウンスケールした日本の将来気候変動や国外からの大気汚染物質の越境輸送の将来変化も考慮して、2030、2050年の国内の地表O3濃度を領域化学輸送モデルCMAQにより予測する。</p> <p>③ ①と②をもとに、地表O3濃度を最小化しうる脱炭素シナリオとO3前駆物質の排出削減シナリオの組み合わせを明らかにする。更にO3目標(新基準値やWHO目標値)の達成に必要な脱炭素シナリオとO3前駆物質排出削減シナリオの組み合わせを探査する。最終的に、脱炭素社会における低O3化の達成可能性を定量的に示し、低O3・脱炭素社会に向かう筋道を提示する。</p>

## 1. 4. 研究内容・研究結果

### 1. 4. 1. 研究内容

本研究課題では、1) 日本がカーボンニュートラルの達成を目指す2050年に向けた03前駆物質の排出量について、脱炭素対策と大気質汚染対策のレベルが異なる複数の将来シナリオを推計し、2) それらの将来排出シナリオと、2050年までの日本およびアジア域における気候変化のシナリオを合わせて領域大気質モデルによるシミュレーションを行い、日本における2050CNの達成による国内地表03濃度への影響を定量的に評価するとともに、幾つかの感度実験を行って日本国内における排出削減対策の効果と可能性を検討した。

1)においては、排出シナリオ推計の基準年を2015年に設定した上で、2050CNの達成による日本の地表03への影響を評価する際に比較対象となる、脱炭素と大気質汚染に対する対策技術を保守的に設定したベースラインシナリオを2つ(FIXシナリオ、BAUシナリオ)と、両方の対策を積極的に考慮した脱炭素シナリオと同じく2つ(20Dシナリオ、15Dシナリオ)設定し、東アジアにおける2030年及び2050年のオゾン前駆物質の人為起源排出量データを推計した。また、脱炭素技術として将来的に導入が見込まれ大気質への影響が大きいと想定される新燃料(水素燃料、合成燃料、アンモニア混焼、およびバイオマス燃料)を対象に、これらによる大気汚染物質排出情報に関する文献調査を行った。

2)においては、アジア全域を含みつつ各都道府県のレベルでの地表03濃度の将来変化を解析するため、数値シミュレーションで使用する数値モデルの計算領域などを設定した上で、領域気象モデルによる基準年の再現実験を行い、同モデルを使った擬似温暖化手法によって、全球気候モデルによる気候の将来予測結果を空間的にダウンスケールして将来の気候シナリオを作成した。これらと、1)にて作成された、基準年および4つの将来シナリオによる排出量データを領域大気質モデルに入力して、地表03濃度の現状再現実験と将来シナリオ実験を行った。現状再現実験は気象および03の観測データにより再現性が評価された。将来シナリオ実験の結果は、地表03の日平均03濃度に加えて、環境基準の超過率や日最高8時間濃度などの濃度指標の変化の観点からも解析を行った。また、日本における2050CNの条件に相当する15Dシナリオを基準とした感度実験を実施し、同シナリオにおける国内削減対策の寄与や、更なる排出削減を行った場合の効果を見積もった。

### 1. 4. 2. 研究結果及び考察

#### 1) 将来排出シナリオ群の推計と脱炭素対策技術情報の収集・整理

計算対象期間である2013年～2017年をカバーし、日本の排出実態が良く反映されているHTAP\_v3インベントリを用いて、現況再現実験用の03前駆物質の領域大気質モデル入力用のグリッド排出量データを作成した(成果1)。このデータに、研究協力者の花岡氏から提供を受けた、ベースラインシナリオ(FIXシナリオ、BAUシナリオ)と脱炭素シナリオ(20Dシナリオ、15Dシナリオ)毎の国/排出セクター/物質別に集計された排出量変化率を掛け合わせて、2030年および2050年のシナリオ毎のグリッド排出量を算出した。算出されたNOxとNMVOCの年間排出量の地域分布からは、ベースラインシナリオでは日本・韓国・台湾を除く全域で排出量が顕著に増加する一方、脱炭素シナリオでは中国とインドを含むアジア全域で排出量が減少しており、脱炭素に伴う化石燃料消費の減少によって、大気汚染物質も大きく減少する「脱炭素と大気汚染緩和のシナジー効果」が明らかにみられた(成果18)。

各シナリオにおける日本、中国、韓国の排出量の経年変化は、国毎にNOxとVOCで同様の傾向を示す。特徴をまとめると、中国ではベースラインシナリオで排出量が増加する一方で脱炭素シナリオでは排出量は減少し、日本では全てのシナリオで排出量が減少し、韓国ではベースラインシナリオのFIXシナリオでは増加するがその他のシナリオでは減少しており、国ごとに特徴が異なっている。インドとベトナムでは、NOxとVOC排出の経年変化傾向は異なり、NOxは脱炭素シナリオでも減少が十分には期待できない一方、VOCは中国と同様に脱炭素シナリオでは減少傾向を示した。こうした国ごと・成分ごとに経年変化の傾向が異なる背景には、排出量に占める発生源種別の割合と各発生源に対する対策強度の違いがある。こうして確認された各シナリオの特徴から、特に脱炭素シナリオがアジアのNOxとVOCの排出量に与える影響と課題をまとめると、以下のようになる。

- NOxについては、主要発生源である産業起源と自動車起源の排出量が、脱炭素化により着実に減少することが予測される。一方、主要な脱炭素対策である電化は、電力生産量の増大等を伴うため、特に発展途上国においては、エネルギー起源のNOx排出量の減少は限定的となり、火力発電所に対する後処理技術の導入・強化等による排出削減対策が必要である。
- NMVOCは、主要発生源である自動車起源と発展途上国における家庭起源の排出量が、脱炭素化により顕著に減少することが予測される。一方、溶剤等の固定蒸発起源排出量は脱炭素対策では削減できず、将来的の脱炭素社会において主要な発生源になることが予想される。したがって、脱炭素化を進めた場合においても、固定蒸発発生源に対する排出削減対策は別途強化する必要がある。

本研究で作成された各シナリオにおける日本の2050年の排出量の2015年比を、既往研究の結果と比較すると、最も脱炭素化が進む15Dシナリオでは、NOxとVOCともに既往研究に比べて排出量が大きく低減しており、

NO<sub>x</sub>については産業と船舶の排出削減が進むと想定されているためであり、NMVOCについては全てのシナリオにおいて固定蒸発発生源の排出量を過去のトレンドを外挿して設定しているためと考えられる（成果18）。

脱炭素社会に向けて将来的に導入が見込まれる新燃料（水素燃料、合成燃料、アンモニア混焼、バイオマス燃料）を対象として、これらの燃料を使用する際の大気汚染物質排出情報に関する調査研究資料を収集・整理した。新燃料のうち、アンモニア混焼やバイオマス燃料、水素燃料では、従来燃料に比べてNO<sub>x</sub>排出が多くなる調査研究結果が多いが、燃焼条件等を制御することにより排出を抑制することが可能であり、さらに後処理によって排出量を低減しうると考えられた。一方、新燃料の燃焼に伴う大気汚染物質の排出は燃焼・燃料条件等によって大きく変化し、さらには後処理技術にも依存するため、脱炭素社会推進における新燃料の使用拡大が引き起こす大気環境影響を定量的に評価する際の不確実性はまだ大きく、本研究課題において大気質モデルに入力するための将来排出シナリオに導入するには情報が不足していると判断するに至った。新燃料使用時の大気汚染物質排出量については、今後も科学的知見の蓄積が引き続き必要な状況と言える（成果18）。

## 2) 領域規模大気質モデルによる数値シミュレーション

領域大気質モデルCMAQで使用する気象データを作成するため、領域気象モデルWRFを用いて現況再現実験と、擬似温暖化手法による将来気候シナリオの作成実験を行った。WRFによる計算では、領域大気質の数値シミュレーションの際に広く用いられている、モデル計算ドメイン内の気象再解析データへのナッジングを行わない事としたが、現況再現実験で計算された気象データは観測値を比較的良好再現しており、このデータと現況の排出量を用いCMAQでO<sub>3</sub>濃度の現況再現実験を行った。計算された日平均O<sub>3</sub>濃度は、観測値を10ppb程度過大評価する傾向にあったが、地表O<sub>3</sub>濃度の評価指標として広く用いられている日最高8時間平均濃度の年間99%タイル値（以下、新指標相当量）については観測値を良く再現していることが確認できた（成果17）。

WRFでは、ベースラインシナリオ（FIX、BAU）と脱炭素シナリオ（20D、15D）用に、それぞれ別の将来気候シナリオ（SSP2-4.5およびSSP1-1.9）を利用した擬似温暖化手法による計算を行って、アジア域と日本域それぞれの将来気象データを作成した。日本付近での昇温は0.5°C～1.5°C程度と見積もられた。このデータと、1)で作成した4つの将来排出シナリオをCMAQに与えて、2030年代および2050年代における地表O<sub>3</sub>濃度の変化を計算した。アジア域全体における現況計算からの変化は、日平均O<sub>3</sub>濃度と新指標相当量とともに、ベースラインシナリオの場合は、南アジア、東南アジア、東アジアの多くの地域で増加し、脱炭素シナリオではアジア全域で著しい減少をもたらすことが分かった。日本域にフォーカスすると、ベースラインシナリオでは、日平均O<sub>3</sub>濃度全国的に微増があるいはあまり大きな変化は見られないものの、高濃度イベントの指標である新指標相当量は全国的に明瞭に増加する傾向を示した。一方、脱炭素シナリオでは、日平均O<sub>3</sub>濃度と新指標相当量がともに全国的に大きく減少した（成果17）。

BAUシナリオと15Dシナリオの2050年代実験の結果を都道府県別に評価すると、BAUシナリオ実験では現況再現実験からの変化の傾向が、計算を行った年の状況によって大きくばらつくため、統計的に有意な変化が生じる地域は限定的であることが分かった。一方15Dシナリオ実験では、現況からの変化が年々のばらつきを超えて大きく、全都道府県で統計的に有意なO<sub>3</sub>濃度の減少が生じることが確認された（成果17）。

次に、それぞれの将来シナリオによって日本国内における新指標相当量がどのように変化するかを比較したところ、ベースラインシナリオでは新指標相当量は徐々に増加し、日本国内における地表O<sub>3</sub>汚染の状況は悪化し続け、例えば米国の環境基準値である70ppbと指標とした場合、全国平均としてこれを下回ることは非常に難しいことが分かった。一方、脱炭素シナリオでは2050年代にこの指標を有意に下回る可能性のあることが示された。15Dシナリオ実験と計算設定を同一にして、排出量だけは現況想定のデータを用いる感度実験を行い、これをを利用して15Dシナリオにおける国内排出削減の寄与分を評価すると、全国平均として約37%であった（成果17、成果19）。この国内削減の寄与は地域によって大きく異なり、太平洋側の都市圏では国内対策の寄与が50%を超える一方で、関東や埼玉では70%を超えており、寄与率が最大となった埼玉では約80%に達している。こうした地域では、国内の地表O<sub>3</sub>濃度の低減に対しては、国内排出への対策が依然として重要であることが強く示唆される。一方、同じ都市圏でも日本海側で大陸に近い北九州や、元々の国内排出量が少ない北海道と東北では国内の排出対策による寄与が20%を切っていた。更に、15Dシナリオ実験と同一の計算設定で、国内の人為起源排出量を全廃させた感度実験を行って、国内対策による地表O<sub>3</sub>濃度の減少の上限を探索したところ、全都道府県平均で最大約5ppbの追加的な新指標相当量の削減が見込まれた。15Dシナリオによる国内地表O<sub>3</sub>濃度の改善効果は、現行の環境基準値（1時間値60ppb）を超過する日数の比率（環境基準超過率）の変化としても確認された。15Dシナリオ実験ではこの超過率が現況再現実験に比べて劇的に減少し、感度実験では更に減少することが示された。15Dシナリオ実験と感度実験における国内の新指標相当量の変化を、米国の現行の環境基準値である70ppbとWHOのAQGレベルである50ppbを超過する日数の割合（超過率）の変化として評価すると、70ppbについては15Dシナリオ実験で超過率が著しく減少し、感度実験では国内全域でほぼ達成される見込みあることが示された。一方、50ppbについては感度実験の結果でも超過率は高く、このレベルを達成することは容易ではなく、このような高水準の環境目標値を日本国内において達成するためには、国内における排出対策だけでは全く不十分であり、国際的な取り組みが必須となることが強く示唆さ

れた（成果17）。

### 1. 5. 研究成果及び自己評価

#### 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

＜得られた研究成果の学術的意義＞

- 本研究課題で用いた擬似温暖化手法は、全球気候モデルによる将来気候予測データを、領域気象モデルを使って空間的に詳細化する手法として広く活用されているものであるが、その手法を領域大気質モデルに応用して、将来の国内大気質の予測解析に応用した事例はこれまでない。また、日本全域を15kmという格子サイズで表現することにより、将来の国内大気質の変化を都道府県レベルで評価・解析することが可能となり、大気汚染対策の立案に対して学術的に詳細な貢献が可能となった。更に、同手法を応用する過程において、既存研究ではその取り扱いが十分に検討されてこなかった再解析データを計算ドメイン内でナッジングすることの影響を大気質の観点から詳細に調べ、ナッジングの採用が必ずしも大気質の計算結果に良い影響を及ぼすとは言えないことを始めて明瞭に示すことができた。
- 本研究課題で実施した、2050年CN（あるいはネットゼロ）環境での日本ならびに東アジアの将来シナリオ計算では、排出量の変化だけではなく、擬似温暖化手法による空間詳細な気象場の変化やそれによるBVOCの排出変化も加え、考えうる将来変化要因を網羅して大気質の予測を行った、このような、将来条件を網羅的・総合的に考慮した数値シミュレーションはこれまでに例が無い。
- 感度実験によって、2050CNに伴う国内排出削減対策の効果を定量的に見積もり、環境基準超過率や日最高8時間濃度の年間99%タイル値（新指標相当量）の変化といった行政担当者に理解しやすい形で可視化したことは、科学的な情報を政策に生かすという意味で学術的な意義が大きい。
- 2050CNという脱炭素社会を構築するための対策を進めた場合の大気汚染（O<sub>3</sub>汚染）低減への効果（シナジー効果）を、日本ならびに東アジアにおいて定量的に示したことは、脱炭素化への流れを力強く後押しする学術的な貢献といえる。

＜環境政策等へ既に貢献した研究成果＞

特に記載する事項はない。

＜環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果＞

- 本研究課題では、2050CN条件に相当する15Dシナリオにより、2050年の国内地表O<sub>3</sub>汚染が大幅に改善されることを示し、その内の国内排出削減の寄与を感度実験の結果と合わせて定量的に示した。加えて、国内での排出削減の上限（人為起源NO<sub>x</sub>とVOC排出の全廃）による効果も定量化したことは、2050CNに向かう日本の国内O<sub>3</sub>汚染改善に向けた国内対策の強度を検討する上で基礎的な知見を提供したことになると考える。こうした知見は、令和6年度に終了した「光化学オキシダント対策ワーキングプラン」の後を受けた、光化学オキシダント濃度等の低減に向けた新たな対策の検討（「微小粒子状物質・光化学オキシダント対策ワーキングプラン（仮）」）での活用が十分に見込まれる。
- 15Dシナリオによる地表O<sub>3</sub>汚染の改善に対する国内排出削減の寄与が地域ごとに大きく異なることを示した結果からは、国内対策が有効で重要な地域と、国内対策以外の検討が必要な地域が明瞭に可視化された。前者の地域としては関東～中部～近畿の都市圏、とりわけ北関東や埼玉を筆頭とする関東域で国内対策の重要性が指摘されたが、これは、現在関東広域の光化学オキシダント対策に取り組んでいる九都県市連携の動きを学術の面から後押しする結果といえ、今後の地域における大気環境行政に向けた削減策の提案に繋げることが可能と考える。
- 15Dシナリオ実験の解析から、地域のO<sub>3</sub>汚染の改善に向けて国内排出対策以外の検討が必須とされた地域（北日本、九州、日本海側の地域）の対策には、周辺国を交えた国際的な取り組みが重要と考えられる。また、WHOの大気質ガイドラインのような、より厳しい環境目標に対応しようとすれば、そうした地域だけではなく、全国的に国内対策だけでは対応できないことも示された。このことは、日本全体の大気環境改善における国際的な取り組みの重要性を明瞭に示しており、今後の環境政策の方向性の検討に貢献することが見込まれる。

#### 1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

＜全体達成状況の自己評価＞ · · · · ·

3. 目標どおりの成果をあげた

＜サブテーマ1 達成状況の自己評価＞ · · · · · 3. 目標どおりの成果をあげた

## 1. 6. 研究成果発表状況の概要

## 1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	1
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	4
口頭発表・ポスター発表	21
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	0
その他の成果発表	0

## 1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」から10件まで抜粋)
1	Itahashi, S. (2023) Severe level of photochemical oxidants (O <sub>x</sub> ) over the western coast of Japan during autumn after typhoon passing. <i>Scientific Reports</i> , 13, 16369. <a href="https://doi.org/10.1038/s41598-023-43485-0">https://doi.org/10.1038/s41598-023-43485-0</a>
17	永島達也、河野なつ美、板橋秀一、大原利眞、花岡達也、黒川純一、鵜野伊津志. (2025) 2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの将来見通し (1) 大気質モデルによる将来シナリオ実験. 第66回大気環境学会・大気環境モデリング分科会
18	大原利眞、板橋秀一、永島達也、河野なつ美、花岡達也、黒川純一、鵜野伊津志. (2025) 2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの将来見通し (2) 将来排出シナリオ. 第66回大気環境学会・大気環境モデリング分科会
19	河野なつ美、永島達也、板橋秀一、大原利眞、花岡達也、黒川純一、鵜野伊津志. (2025) 2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの将来見通し (3) 低オゾン達成のための感度実験. 第66回大気環境学会・大気環境モデリング分科会

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

## 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題で得られた研究成果の普及活動は合計で4件行った。研究分担者の河野による市民団体等への講演3件では、「気候変動によって変化する地域環境を予測するには？（気候変動適応について）」と題し、埼玉県が実施する「県政出前講座」のうちの一テーマとして研究実施期間中に行った。この講演では、本研究課題で得られた成果を含めて、埼玉県などの地域環境に対する気候変動の影響やその将来の予測について、使われる手法の概説も含めて分かりやすく説明した。また、研究分担者の大原による講演では、本研究課題で得られた成果を用いつつ、光化学オキシダント問題に関する最新の動向や知見を分かりやすく解説した。

## 1. 7. 国際共同研究等の状況

&lt;国際共同研究の概要&gt;

国際共同研究を実施していない。

## 1. 8. 研究者略歴

&lt;研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴&gt;

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
永島達也	<p>研究代表者及びサブテーマ1リーダー      東京大学大学院理学系研究科博士課程（地球惑星物理学専攻）修了      博士（理学）      国立環境研究所NIESポスドクフェロー、同研究所研究員、主任研究員、主席研究員を      経て、現在、国立環境研究所 地球システム領域 副領域長 及び      筑波大学大学院 理工情報生命学術院 生命地球科学研究群 連携准教授を併任      環境省・光化学オキシダント等総合対策推進検討会委員      専門は大気化学気候モデリング、研究テーマは気候変動と大気質変化</p>

## 2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

### (1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない。				

### (2) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2023	Itahashi, S. (2023) Severe level of photochemical oxidants (O <sub>x</sub> ) over the western coast of Japan during autumn after typhoon passing. <i>Scientific Reports</i> , 13, 16369. <a href="https://doi.org/10.1038/s41598-023-43485-0">https://doi.org/10.1038/s41598-023-43485-0</a>	1	有

### (3) 著書

<著書>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

### (4) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
2	2023	河野なつ美、永島達也、板橋秀一、大原利眞. (2023) 脱炭素と低オゾンを両立するシナリオ提案のための地表オゾン将来予測実験. 第64回大気環境学会年会	1	無
3	2023	河野なつ美、永島達也、板橋秀一、大原利眞. (2023) カーボンニュートラル下の地表オゾン予測に向けた数値解析. 第28回大気化学検討会	1	無
4	2023	板橋秀一. (2023) 長崎県で秋季に初めて発令された光化学オキシダント注意報の概況. 第64回大気環境学会年会	1	無
5	2023	Ohara, T. (2023) Long-term trends of anthropogenic emissions in Asia and their validation in Japan. International Meeting on Land Cover/Land Use Change (LCLUC) in South/Southeast Asia and Synthesis	1	無
6	2023	Ohara, T. (2023) Roles of emission inventory in atmospheric environmental management. The EANET Emission Inventory Webinar Workshop on Combustion Sources	1	無
7	2023	Ohara, T. (2023) VOCs and secondary air pollution in East Asia, Workshop on Knowledge Sharing for VOCs Related Activities in EANET. Pre-event of BAQ2023	1	無
8	2023	Ohara, T. (2023) Long-term trends in anthropogenic emissions of air pollutants in Asia and Japan. International Conference on	1	無

		CMAS/Asia-Pacific		
9	2024	永島達也、河野なつ美、板橋秀一、大原利眞、鵜野伊津志、黒川純一、花岡達也. (2024) 2050カーボンニュートラル環境の国内地表オゾンへの影響. 第65回大気環境学会・大気環境モデリング分科会	1	無
10	2024	永島達也、河野なつ美、板橋秀一、大原利眞、鵜野伊津志、黒川純一、花岡達也. (2024) 2050カーボンニュートラル環境の国内地表オゾンへの影響評価. 第25回環境と衛生のオンラインセミナー「カーボンニュートラル時代の大気環境：PM2.5とオゾンの未来予測」	1	無
11	2024	永島達也、河野なつ美、板橋秀一、大原利眞、鵜野伊津志、黒川純一、花岡達也. (2024) 2050カーボンニュートラル環境の国内地表オゾン濃度への影響. 第8回アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会	1	無
12	2024	Ohara, T., Nakamura, K., Kurokawa, J., Nagashima, T., Hanaoka, T., Itahashi, S., Kawano, N., Uno, I. (2024) Current status of surface ozone and its projection under the 2050 scenarios in Est Asia. International Meeting on Land Cover/Land Use Change (LCLUC) in South/Southeast Asia and Synthesis	1	無
13	2024	Ohara, T. (2024) Long-term trends of surface ozone and anthropogenic emissions of its precursors in Japan. The 7th International Workshop on Regional Air Quality Management in Rapidly Developing Economic Regions and The First GBA Climate Forum (7RAQM)	1	無
14	2024	Kawano, N., Nagashima, T., Itahashi, S., Ohara, T. (2024) An estimation of impact of grid-nudging on the ozone simulation in Asia. The 16th International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution (iCACGP) Symposium and 18th International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference	1	無
15	2024	Kawano, N., Nagashima, T., Itahashi, S., Ohara, T., Chatani, S. (2024) A future projection of the impact of emissions from nature on the summertime surface ozone concentration in Asian metropolitan areas with WRF-CMAQ model. International Symposium on plant phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs (PCF2024)	1	無
16	2025	Kawano, N., Nagashima, T., Itahashi, S., Ohara, T., Kurokawa, J., Hanaoka, T., Uno, I. (2025) Co-benefits of low-carbon strategy in Japan on surface ozone concentration in cities. 12th International Conference on Urban Climate	1	無
17	2025	永島達也、河野なつ美、板橋秀一、大原利眞、花岡達也、黒川純一、鵜野伊津志. (2025) 2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの将来見通し(1) 大気質モデルによる将来シナリオ実験. 第66回大気環境学会・大気環境モデリング分科会	1	無

18	2025	大原利眞、板橋秀一、永島達也、河野なつ美、花岡達也、黒川純一、鵜野伊津志. (2025) 2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの将来見通し (2) 将来排出シナリオ. 第66回大気環境学会・大気環境モデリング分科会	1	無
19	2025	河野なつ美、永島達也、板橋秀一、大原利眞、花岡達也、黒川純一、鵜野伊津志. (2025) 2050 カーボンニュートラル環境での国内地表オゾンの将来見通し (3) 低オゾン達成のための感度実験. 第66回大気環境学会・大気環境モデリング分科会	1	無
20	2025	Ohara, T. (2025) Trends and Future Projections of Anthropogenic VOCs Emissions in East Asia and Japan - Perspective on ozone reduction in East Asia -. 2025 Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE) Plenary session	1	無
21	2025	Nagashima, T., Kawano, N., Itahashi, S., Ohara, T., Hanaoka, T., Kurokawa, J., Uno, I. (2025) Future projections of surface ozone in Japan in 2050 Carbon-Neutral environment. JSPS-CAS Joint Seminar 'Symposium on high-resolution numerical simulation of atmospheric environment in Japan and China'	1	無
22	2025	【発表予定】 Nagashima, T., Kawano, N., Itahashi, S., Ohara, T., Hanaoka, T., Kurokawa, J., Uno, I. (2025) Future projection of surface ozone in Japan under a carbon-neutral environment in 2050. International Conference on Atmospheric Environment, Extreme Weather, and Health	1	無

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
23	2024	河野なつ美. 2024.10.22. 気候変動によって変化する地域環境を予測するには? (気候変動適応について). 川越環境保全連絡協議会県内視察研修会小江戸塾.	1
24	2024	河野なつ美. 2024.11.16. 気候変動によって変化する地域環境を予測するには? (気候変動適応について). 環境科学修了生の会2024度定例会	1
25	2024	河野なつ美. 2025.2.13. 気候変動によって変化する地域環境を予測するには? (気候変動適応について). 越生新こうねん大学愛好会研修講座	1
26	2025	大原利眞. 2025.10.2. 光化学オキシダント問題, 再び!. 2025年度酸性雨シンポジウム	1

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ

		特に記載する事項はない。	
--	--	--------------	--

## (8) その他の成果発表

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

## 権利表示・義務記載

本研究課題における数値シミュレーションは、国立環境研究所が保有するスーパーコンピュータ(HPE Apollo 2000)を用いて行われた。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に代表者又は分担者として参画した研究者にあります。  
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及び独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）のロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。  
ERCAは、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

**Abstract****[Project Information]**

Project Title :	Projection of Ground Level Ozone in Japan in 2050 Carbon-neutral Environment and Proposal of Co-benefit Strategy of Low Ozone and Decarbonization
Project Number :	JPMEERF20235M01
Project Period (FY) :	2023-2024
Principal Investigator :	Nagashima Tatsuya
(PI ORCID) :	
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies 16-2 Onogawa, Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN Tel: +81-29-850-2898 E-mail: nagashima.tatsuya@nies.go.jp
Cooperated by :	Center for Environmental Science in Saitama; Asia Center for Air Pollution Research; Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Keywords :	Surface Ozone, 2050 Carbon Neutral, Future Emission Scenarios, Air Quality Simulation, Climate Change

**[Abstract]**

In this study, we created a baseline emission scenario and a decarbonization emission scenario for the 2030s and 2050s, which have different approaches to decarbonization and air pollution measures, and two scenarios with different levels of measures within each scenario (four future emission scenarios in total: FIX, BAU, 20D, and 15D). We set a model domain that allows for the analysis of transboundary pollution, including both the whole of Asia and the detailed Japanese region, and then used a pseudo-global warming method to create spatially detailed future climate scenarios for Asia and Japan. We input these future scenarios and future climate scenarios into a regional air quality model to conduct experiments to predict changes in domestic surface ozone ( $O_3$ ) concentrations in the 2030s and 2050s. In the baseline emission scenario, surface  $O_3$  pollution in Japan continues to worsen toward the 2050s, but in the 15D scenario, which is the future scenario that corresponds to the conditions for achieving carbon neutrality in 2050 in Japan, we quantitatively showed at the prefectural level that domestic  $O_3$  pollution will improve significantly at the same time as decarbonization is achieved, and that it is possible that  $O_3$  pollution will fall below the US National Air Quality Standards of 70 ppb nationwide in Japan in the 2050s. A sensitivity experiment was conducted based on the 15D scenario to estimate the contribution of domestic emission reductions to the improvement of  $O_3$  pollution under the scenario. The national average was about 37%, but the contribution exceeded 50% in urban areas on the Pacific coast side of Japan and exceeded 70% in northern Kanto area. The exceedance rate of the current environmental quality standard, the US environmental quality standard value, and the WHO AQG level were selected as the domestic  $O_3$

concentration achievement targets, and the achievement status of each target in 2050 under the 15D scenario was confirmed. Furthermore, the effect of additional reductions in domestic emissions was also explored. It was quantitatively shown that domestic measures remain important for improving domestic O<sub>3</sub> pollution in a decarbonized society, and that international efforts are also essential.

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund of the ERCA (JPMEERF20235M01) funded by the Ministry of the Environment.