

<特集>大気シミュレーション～国環研の取組と地方環境研究所での活用事例～

福岡県での大気シミュレーション活用事例と今後の展望

山村 由貴\*・廣瀬 智陽子\*

(\*福岡県保健環境研究所)

1. はじめに

福岡県は、越境汚染の影響を受けやすい北部九州に位置するため、PM2.5は西風の卓越する春季と冬季に高濃度が観測される傾向がある(例えば、鶴野ら2017<sup>1)</sup>)。一方、県内には工業地帯や交通量の多い商業都市もあることから、光化学オキシダントは越境汚染影響の強い春季に加え、地域汚染の影響が強い夏季にも高濃度が観測されることがある<sup>2)</sup>。

越境汚染の影響については従来、

- ・HYSPLITによる後方流跡線の方位が中国大陸か
  - ・五島、対馬、壱岐等、人為発生源の少ない離島の測定局で高濃度になっているか
  - ・深夜、早朝に県内測定局で高濃度になっているか
- 等から判断していた。これらも重要な情報であるが、後方流跡線や測定局の測定値はある地点(点)のデータであることから、汚染の動きを面的に捉えることは難しい。また、越境汚染の影響の有無を判断することはできるが、その影響を定量的に評価することができない、さらに、測定値は現在までのデータしかないため、今後の濃度変化や越境汚染の影響を予測することが難しいといった問題もあった。

これらの問題を解決する手段の一つが、大気シミュレーションである。大気シミュレーションでは、任意エリアの汚染の動きを面的に示すことができ、さらに、任意発生源からの排出量を削減して計算を行うことで、その発生源の影響を評価することも可能である。光化学オキシダント数ppbレベルの定量評価を議論することは難しいと考えられるが、越境の影響が大きい・小さいというレベルの定量評価は可能と考えられる。さらに、計算に用いる気象データを未来の予測値にすることで、汚染の予測も可能となる。

大気シミュレーションによるPM2.5や光化学オキシダントの濃度予測は、SPRINTARS<sup>3)</sup>やVENUS<sup>4)</sup>が存在する。しかし、いずれも予測結果の最小表示単位は県である。

福岡県は玄界灘、瀬戸内海、有明海に面しているため海風の動きが複雑であることや、光化学オキシダントの原因物質であるNOxやVOCの排出量が多い都市部や工業地帯を有することから、海風や地域汚染の影響が強くなる

夏季は特に、県内であっても高濃度になるエリアや時間の地域性が強い<sup>2)</sup>。そのため、県内地域ごとの濃度レベルを予測して欲しいとのニーズがあった。

そこで、福岡県保健環境研究所では、2018年からシミュレーションモデルの導入に着手し、2022年2月から、福岡県独自の濃度予測を開始した。本稿では、福岡県で行っている予測の概要と事例について紹介する。

2. 計算条件

シミュレーションモデルには、世界的にユーザー数の多い、気象モデルWRF<sup>5)</sup>と化学輸送モデルCMAQ<sup>6)</sup>を使用した。WRFは米国大気研究センターと米国国立環境予測センターによって開発されたモデルであり、移流・拡散・雲微物理・積雲・大気境界層高さ・地表面・放射過程等を計算することが可能である。CMAQは米国環境保護庁によって開発されたモデルであり、気象と排出量情報をもとに、様々な大気汚染物質について移流、拡散、沈着、気相・液相化学反応等を考慮した濃度を計算・出力することが可能である。

計算領域は図1に示す東アジア域(D01, 解像度45km×45km)、西日本域(D02, 解像度15km×15km)、北部九州域(D03, 解像度5km×5km)でネスティングを行っている。

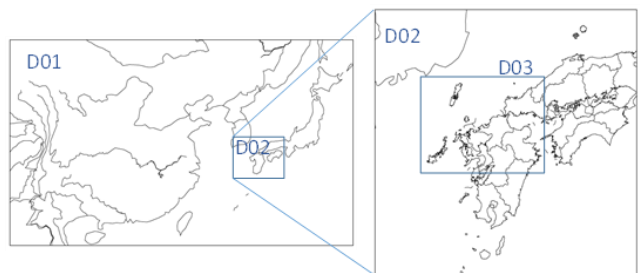


図1 計算領域

気象データには、米国国立環境予測センターの気象予報値GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive (ds084.1)<sup>7)</sup>を使用している。排出量には、表1に示すデータを使用している。REASv2.1については、対象年が2008年であるため、文献値<sup>14)</sup>や衛星

データ<sup>15)</sup>をもとにSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排出量を補正して用いているが、現在発表されているREASv3（2015年までを対象）への更新も検討している。火山からのSO<sub>2</sub>については、福岡県の大気に影響を与える可能性が高く、かつ気象庁によるSO<sub>2</sub>排出量観測データの存在する桜島、阿蘇山、諏訪之瀬島を考慮した。予報対象期間は、当日～3日先までとした。

表1 排出量データ

東アジア人為起源 (日本を除く)	Regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2.1 <sup>8)</sup>
国内人為起源 (自動車・船舶を除く)	EAGrid2010-Japan <sup>9)</sup>
国内船舶	OPRF's Ship Emission inventory <sup>10)</sup>
国内自動車	JATOP Emission Inventory-Data Base 2011 Automobile Source (JEI-DB2011-AS) <sup>11)</sup>
植物起源VOC	Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN) version2.04 <sup>12)</sup>
火山	気象庁火山活動報告資料 <sup>13)</sup>

### 3. 福岡県内の大気汚染予報

#### 3.1 予報システム概要

福岡県の予報システム（以下、本システム）の具体的な計算の流れを図2に示す。各作業はワークステーションのシェルスクリプトに記載し、Linuxのオペレーションシステムのジョブ管理ツールcronによって、毎日定時に自動で実行される。

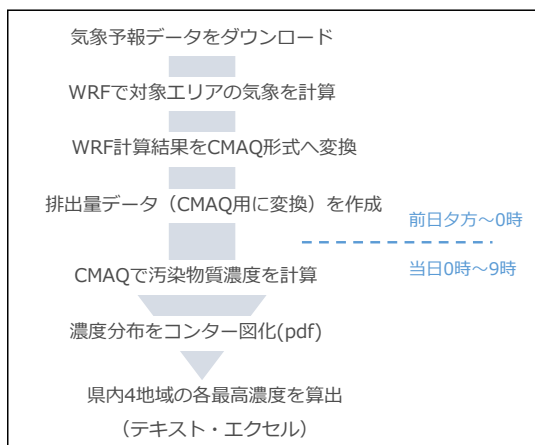


図2 予報システム概要

計算中に0時を超えると日付が変わり、不具合が生じるため、排出量データの作成までが0時前に終わるよう逆算し、予報対象日の前日夕方から気象データのダウンロードを実行する。

表1の排出量データは、物質名称や解像度がデータごとに異なるため、CMAQでの計算に適した形式に変換する

必要がある。このCMAQ用の排出量データ作成の際、以下の3パターンを作成することとした。これにより、通常の濃度分布に加え、越境汚染の寄与濃度、県内のVOC、NO<sub>x</sub>排出量削減要請の光化学オキシダント濃度低減に対する効果も同時に予測することが可能となる。

- 全ての排出量を含むもの（濃度予測用。以下、この排出量での計算を通常計算とする）
- 国外の人為起源排出量をゼロとしたもの（越境汚染寄与評価用。以下、この排出量での計算を国外ゼロ計算とする）
- 県内VOC、NO<sub>x</sub>排出量を2割削減したもの（県内のVOC、NO<sub>x</sub>排出量削減要請の効果試算用）

0時を超えると、作成した3パターンの排出量で、CMAQによる計算が行われる。それぞれの計算結果から、PM2.5、光化学オキシダント濃度を取り出してコンターマップにし（図3）、pdf形式で保存される。なお、図3(b)の越境汚染の寄与濃度は、通常計算と国外ゼロ計算の差分である。

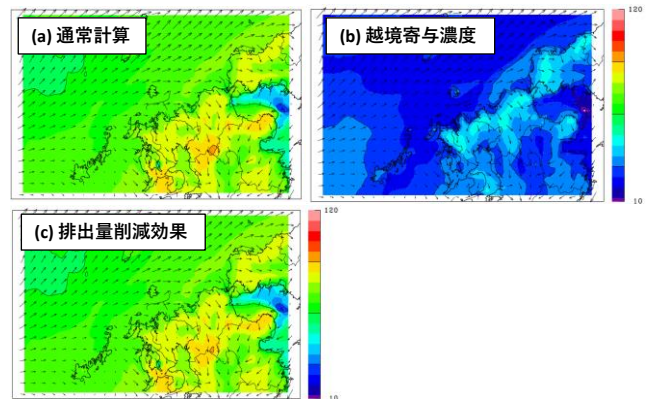


図3 計算結果のコンターマップ出力例  
(光化学オキシダント)

(a) 通常計算, (b)越境寄与濃度, (c) 排出量削減効果

さらに、県内を図4に示す4つの地域、1日を0～6、6～12、12～18、18～24時の4つの時間区分に分け、3日先までの各地域の最高濃度（光化学オキシダントは1時間値、PM2.5は6時間平均値）を算出する（図5(a)）。この結果はエクセルファイルとして出力すると共に、大気関係の業務に従事する県職員の登録メールアドレスへ自動で送信される。これにより、休日の高濃度対応が必要な場合も、予測結果を確認することが可能となる。光化学オキシダントが120ppb、PM2.5が70 μg/m<sup>3</sup>を超えると予測された場合には、図5(b)に示すように、該当地域の県民に対して、福岡県LINEで高濃度予測情報を配信することとしている<sup>16)</sup>。なお、日中の活動に活用できるよう、全ての計算工程は、遅くとも朝9時頃には完了するよう設計している。

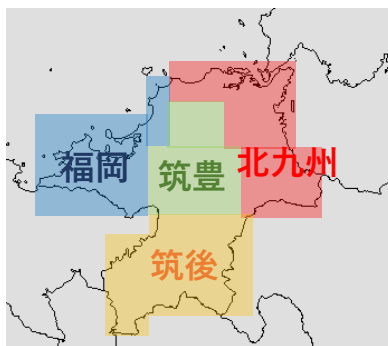


図4 地域区分

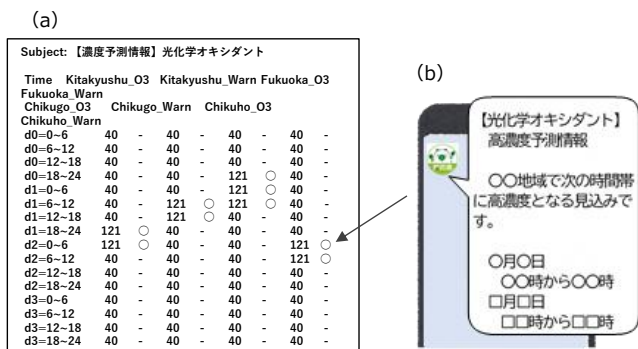


図5 濃度出力とLINE配信例

### 3.2 予測精度

予報を開始した2022年2月15日から2023年8月31日までの予測値について、観測値と比較したものを図6 (a)光化学オキシダント、(b)PM2.5) に示す。図6は、3.1で

述べた4つの時間区分、各地域内の最高値（オキシダントは1時間値、PM2.5は6時間平均値）で比較しており、観測値には大気常時監視局の測定値、計算値には各地域に該当する計算格子のうち、高度200m以下の平地の当日予測値を用いている。

光化学オキシダントは決定係数が0.43～0.51、RMSEが14.5～15.4ppbであった。観測値が80ppbを超えたデータのうち、計算値の誤差が±20ppb以内であった割合は、北九州75%、福岡79%、筑後88%、筑豊82%であり、高濃度対応に資する精度を得られていると考えられる。

一方、PM2.5は決定係数0.21～0.32であり、オキシダントに比べて精度は低かった。本システムでは、微小粒子状SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>3</sub><sup>+</sup>、OC（有機炭素）、EC（元素状炭素）の和をPM2.5と仮定しているが、実際には水分等の本システムでは考慮できていない成分が含まれていること、各成分の主要発生源や生成過程が異なるため、成分ごとに精度が異なる可能性があることや、黄砂や野焼きや火事等、排出量データに含まれない突発的な事象の反映は困難であることなどが原因と考えられる。

図6(b)のうち、PM2.5の観測値が70μg/m<sup>3</sup>を超える高濃度となったのは、北九州で2件（図中赤丸A、B）と筑後で1件（図中赤丸C）の計3件である。このうち、高濃度Aは、福岡に黄砂が飛来した2023年4月13日であった。前述のとおり、本システムでは、黄砂を考慮することができないため、この高濃度Aを捉えることができなかったと考えられた。なお、福岡県では黄砂は本システムとは別に予測を委託している。

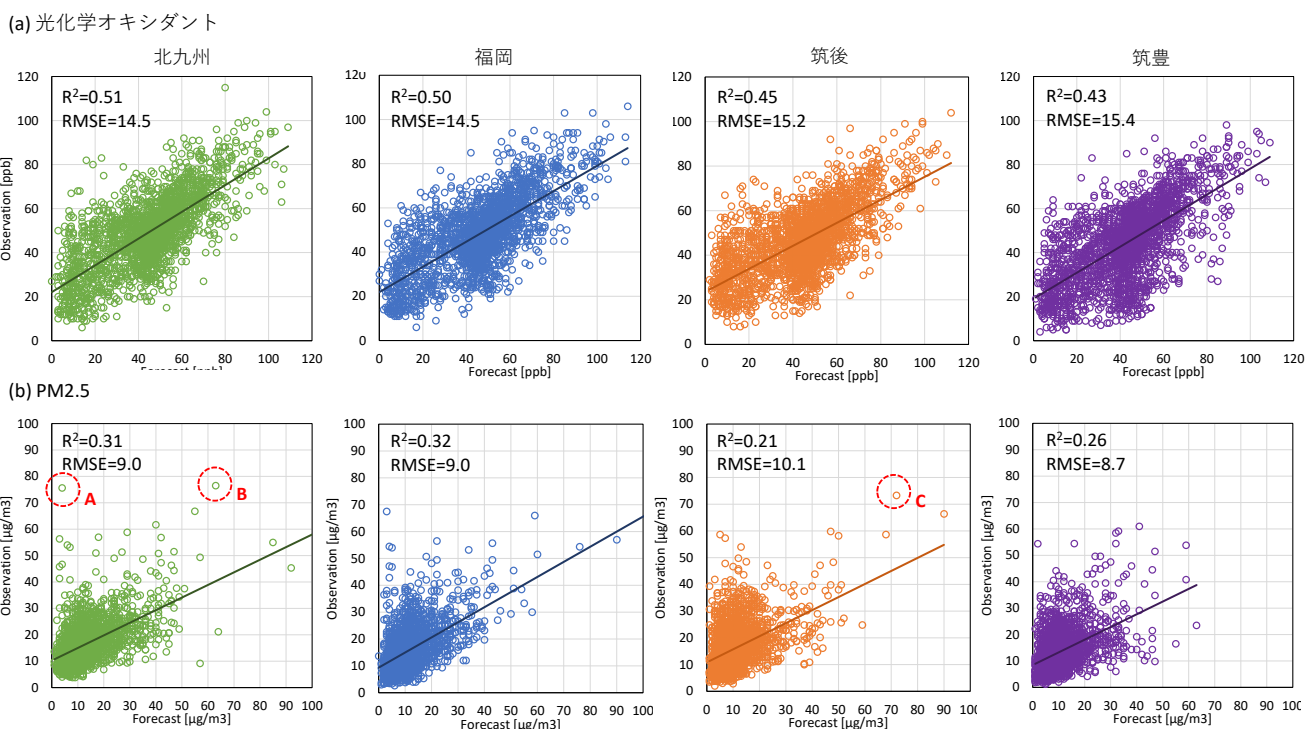


図6 観測値と予測値の比較 (a) 光化学オキシダント、(b) PM2.5

一方、高濃度B, Cは共に、越境汚染によって煙霧が発生した2023年1月6日であった（詳細は3.3に記載）。北九州（高濃度B）がやや過小ではあるが、1月6日は高濃度を予測することができていた。このことから、越境汚染に伴う高濃度事例に対しては、ある程度精度良く捉えることが可能と考えられる。

### 3.3 高濃度予報事例

予報開始以降に観測されたPM<sub>2.5</sub>高濃度事例を紹介する。2023年1月5日～7日にかけて、九州・山口各県でPM<sub>2.5</sub>の1時間値が50 μg/m<sup>3</sup>を超える高濃度が観測され、福岡県内では霧のように霞んだ状態となっていた（図7）。



図7 福岡県太宰府市の様子  
(1月6日10:00 福岡県保健環境研究所屋上から撮影)

この時のPM<sub>2.5</sub>濃度予測結果を図8(a), そのうち越境汚染による濃度を図8(b)に示す。図8(a)(b)から、高濃度の主な要因は越境汚染であったことが示唆された。

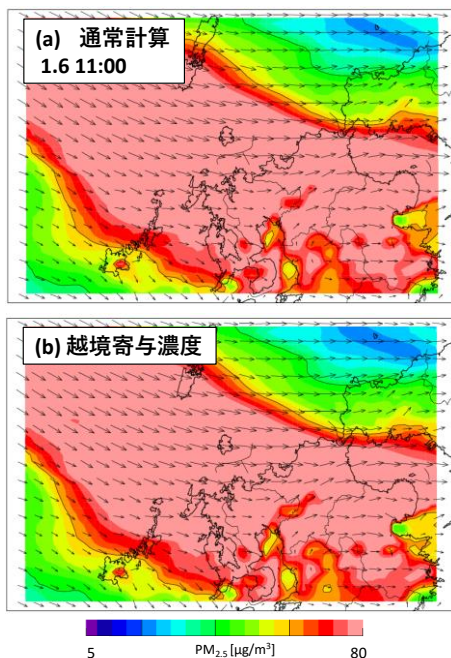


図8 PM<sub>2.5</sub>濃度予測結果（1月6日11時）  
(a)通常計算 (b)越境寄与濃度

### 3.4 異臭事例への応用

CMAQでは、前述したオキシダントやSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等のみでなく、SO<sub>2</sub>やHNO<sub>3</sub>等、数百種類の化学物質の濃度が同時に計算・出力される。ここでは、同時に出力されたSO<sub>2</sub>の予測結果を、異臭事例に活用した例を紹介する。

2022年12月21日午前8時頃、福岡市内で「硫黄のような臭いがする」との通報が相次いだ。福岡市内にある測定局のSO<sub>2</sub>時間値濃度は、最大で0.023ppm（午前9時、春吉局）まで上昇していた。SO<sub>2</sub>濃度が上昇する要因として、もっとも典型的な例として火山が考えられる。ただし、SO<sub>2</sub>の刺激臭が感知されるのは0.3-1 ppm<sup>17)</sup>であることから、臭いの原因はSO<sub>2</sub>と同じ火山ガスであるH<sub>2</sub>S等であった可能性が高いと考えられた。CMAQにはH<sub>2</sub>Sが含まれていないため、H<sub>2</sub>SがSO<sub>2</sub>と類似する挙動をしたと仮定して、SO<sub>2</sub>の解析を行った。

SO<sub>2</sub>計算結果の水平分布図を、図9(a1)(a2)(a3)、桜島付近と福岡市付近を含む同一経度（図9(a1)の赤線）に沿った断面図を図9(b1)(b2)(b3)に示す。図9(b1)(b2)(b3)から、桜島から噴出したSO<sub>2</sub>は高度を下げながら北上し、21日午前、福岡市付近で地上に到達していたことがわかる。地上への到達時間と、福岡市内で異臭通報が多く寄せられた時間帯が一致していることから、H<sub>2</sub>S等の臭いの原因物質も、本計算のSO<sub>2</sub>と同じ動きをしていた可能性が高いと考えられた。

### 4. 今後の展望

現在は高濃度が予測された時のみLINEで情報配信を行っているが、今後は濃度分布や高濃度有無等の情報を、福岡県ホームページ上にも掲載することを検討している。さらに、過去の計算結果と観測結果を用いて機械学習を行い、この学習済モデルを使って、未来の濃度予測結果に対して補正を行うという試みも行っている。この補正機構によって精度向上が見込まれた場合、本システムへの組み込みを検討する。

本稿では大気シミュレーションの活用例を紹介したが、大気以外にも海洋や河川等、様々なシミュレーションモデルが存在する。また、技術の発展に伴い、近年はAIによる予測を活用した事例も増加している。

現象を予測し、それに対する対策を事前にコンピュータ上で試算できることが、シミュレーションモデルやAIの大きな強みであり、地方自治体にとっても必要不可欠な技術である。今後、大気分野に限らず、地方環境研究所がシミュレーションモデルやAIといった情報技術を活用して事象の予測や施策の効果を試算し、その結果に基づいて、行政が最適な施策を実行するという仕組みが根付いていくことを期待して、本稿を締めたいと思う。

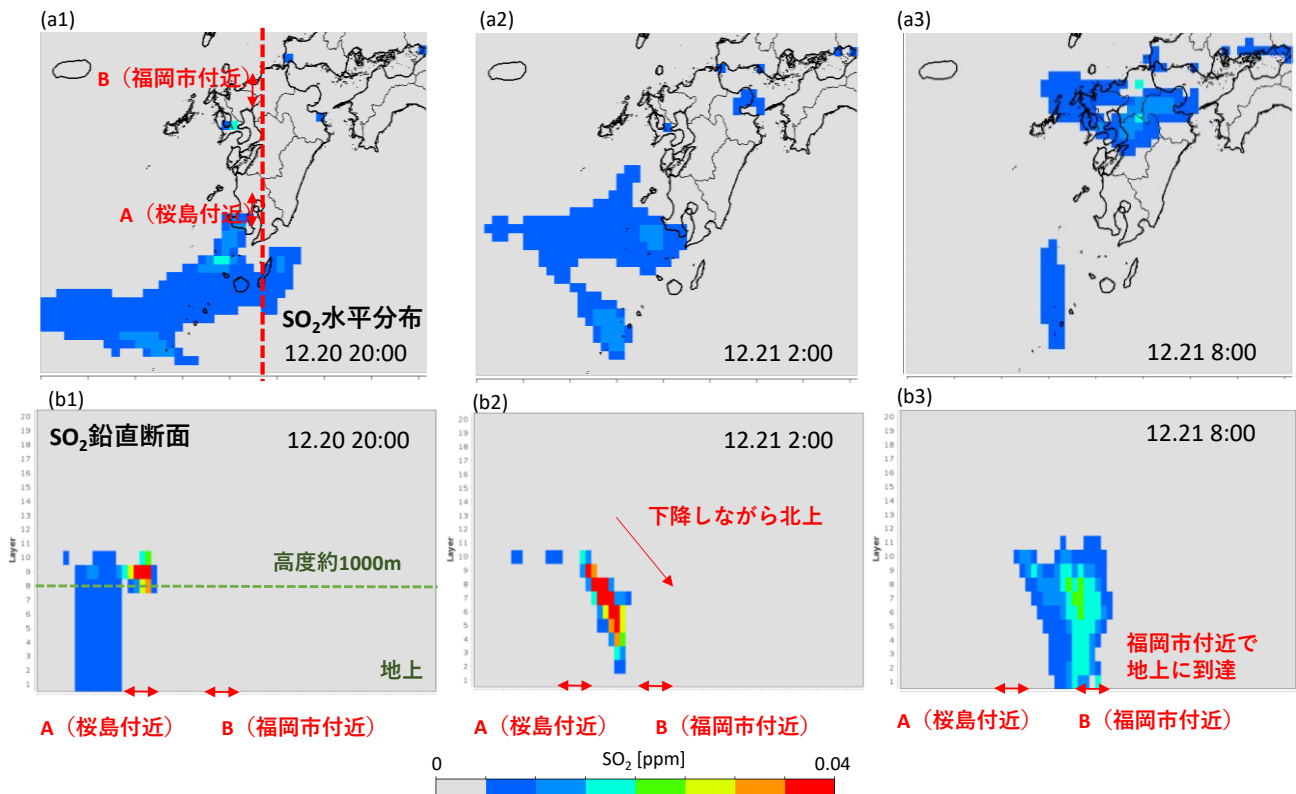


図9 SO<sub>2</sub>濃度分布 (D02(15km×15km))  
(a1) (a2) (a3) 水平分布 (b1) (b2) (b3) 鉛直断面

## 5. 謝辞

本システムの構築および機械学習による誤差補正は、(独) 環境再生保全機構 大気環境の改善分野に関する調査研究「地方公共団体におけるシミュレーションモデルを活用した光化学オキシダント対策の検討に関する調査研究」として実施しました。また、排出量データの作成は、大阪大学大学院工学研究科嶋寺光准教授からプログラムをご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 6. 引用文献

- 1) 鵜野伊津志, 桑原 昇平, 王 哲, 板橋 秀一, 弓本 桂也, 長田 和雄, 山本 重一: ソース・レセプター手法を用いた西日本・日本海沿岸への PM2.5 越境輸送の解析. 大気環境学会誌, **32**, (3), 188-198, 2017
- 2) 山村由貴, 力寿雄, 中川修平, 山本重一: 福岡県内における地域汚染由来の高濃度オゾンに対する NO<sub>x</sub>, VOC排出量削減の効果. 全国環境研会誌, **45**, (4), 51-61, 2020
- 3) 九州大学: SPRINTARS, <https://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/> (2023.9.10アクセス)
- 4) 国立環境研究所: VENUS, <https://venus.nies.go.jp/> (2023.9.10アクセス)
- 5) Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. D., Barker D. M., Duda M. G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J. G.: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Notes*, NCAR/TN-475+STR, 1-113, 2008
- 6) Byun D., Schere K. L.: Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Applied Mechanics Reviews*, **59**, 51-76, 2006
- 7) NCAR: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive, <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (2023.9.10アクセス)
- 8) Kurokawa J., Ohara T., Morikawa T., Hanayama S., Janssens-Meanhout G., Fukui T., Kawashima K., Akimoto H.: Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 11019-11058, 2013
- 9) 福井 哲央, 國領 和夫, 馬場 剛, 神成 陽容: 大気汚染物質排出インベントリ EAGrid2000-Japanの年次

- 更新. 大気環境学会誌, **49**, 117-125, 2014
- 10) 海洋政策研究財団: 平成22年度 排出規制海域設定による大気環境改善効果の算定事業報告書, ISBN978-4-88404-265-3, 2010
- 11) (一財) 石油エネルギー技術センター: JATOP技術報告書「自動車排出量推計」, JPEC-2011AQ-02-06, 2012
- 12) Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P. I., Geron C.: Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**, 3181-3210, 2006
- 13) 気象庁: 各火山の活動状況, [https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/open-data/data\\_index.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/open-data/data_index.html) (2023.9.10アクセス)
- 14) Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., Zhang, Q.: Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 14095-14111, 2018
- 15) NASA: OMI/Aura Nitrogen Dioxide (NO2) Total and Tropospheric Column 1-orbit L2 Swath 13x24 km V003, [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMNO2\\_V003/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMNO2_V003/summary) (2023.9.10アクセス).
- 16) 福岡県: 光化学オキシダント・PM2.5・黄砂の予測について, <https://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/oxpm25kosa.html> (2023.9.29アクセス)
- 17) 日本火山学会: 第9回公開講座 火山ガスと防災, <http://www.kazan-g.sakura.ne.jp/J/koukai/02/hirabayashi.html> (2023.9.10アクセス)