

# 高時空間分解能観測データの同化による 全球大気汚染予測手法の構築

(所内公募型提案研究)

Development of a methodology to forecast global air pollution by assimilating  
high-resolved spatiotemporal measurements

令和2～令和4年度  
FY2020～2022

NIES



国立研究開発法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<https://www.nies.go.jp/>

# 高時空間分解能観測データの同化による 全球大気汚染予測手法の構築

(所内公募型提案研究)

Development of a methodology to forecast global air pollution by assimilating  
high-resolved spatiotemporal measurements

令和2～令和4年度  
FY2020～2022

所内公募型提案研究「高時空間分解能観測データの同化による全球大気汚染予測手法の構築」

(期間：令和2～4年度)

課題代表者：五藤大輔

執筆者：五藤大輔、西澤智明、神慶孝

編者：五藤大輔

## 序

本報告書は、令和2～4年度の3年間にわたって実施した所内公募型提案研究A「高時空間分解能観測データの同化による全球大気汚染予測手法の構築」（研究代表者：五藤大輔）の研究成果をとりまとめたものです。

大気汚染は環境問題として、1970年頃から着目されており、大気汚染物質の代表的なものであるエアロゾルについては2013年のPM<sub>2.5</sub>騒動を機に、日本でも大きな社会問題になりました。PM<sub>2.5</sub>の人体への影響も懸念される中、PM<sub>2.5</sub>自体の時空間分布をより正確に把握することが強く望まれています。国立環境研究所では大気汚染予測システムVENUSを運用しており、継続的な高度化を進めています。しかし、その予測精度は社会のニーズを十分に満たしているとはいえ、個々の数値モデルや予測手法に更なる改善が期待されています。また、ここ10年の間で、大気汚染物質の時空間分布を推定できるセンサーを搭載した人工衛星が次々と打ち上がり、人工衛星から多くのデータを得ることができるようになってきました。このような背景の下で、膨大な衛星観測データを利活用した大気汚染物質予測の高精度化が世界的にも進められています。

本研究では、全球大気汚染物質輸送モデルNICAM-Chemを軸に、データ同化手法を用いた予測手法の構築を実施しました。観測とモデルの誤差を最小にする方程式を基盤として、最も現実場を再現できるような解を導出するデータ同化手法の中で、計算コストの軽い2DVarをNICAM-Chemに新たに導入しました。同化で利用する観測データは、日本の気象静止衛星である「ひまわり」に搭載されたセンサーから得られるエアロゾルの情報を中心に、米国の衛星によるデータや世界中の地上観測データを収集し、本研究チーム独自のデータ選別・統合手法によって高精度の観測データセットを作製しました。その結果、同化することによって、NICAM-Chemによるエアロゾルシミュレーションの再現性が向上し、観測や数値モデルだけでは得られなかった高精度なエアロゾルの時空間分布を得ることができました。本研究を通じて得られた技法・知見を用いて、日々の大気汚染予測の高度化を進めていきます。

本研究開始時には新型コロナウイルスの世界的流行が始まり、本研究実施期間中は我々の行動変容が求められ、これまでとは異なる形態で研究活動を進めました。外部研究者との意見交換や国内外の学会への参加も制限されることとなりました。そのような情勢の中においても、本研究を進めるにあたり、研究所内外の多くの方々にご協力とご支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

令和6年9月

国立研究開発法人 国立環境研究所  
理事長 木本昌秀

# 目 次

1 研究の概要.....	1
1.1 研究全体の目的、目標、構成等.....	1
1.2 研究の概要.....	2
1.2.1 サブテーマ1「NICAM-Chem 同化による予測手法の構築」の概要.....	2
1.2.2 サブテーマ2「同化・検証で用いる高時空間分解能観測データ整備」の概要.....	3
1.2.3 全体.....	3
2 研究の成果.....	5
2.1 サブテーマ1「NICAM-Chem 同化による予測手法の構築」.....	5
2.1.1 NIES スーパーコンピュータを用いた NICAM-Chem の高度化・最適化.....	5
2.1.1.1 目的と経緯.....	5
2.1.1.2 方法.....	5
2.1.1.3 結果と考察.....	6
2.1.1.4 まとめ.....	10
2.1.2 エアロゾルデータ同化手法の開発・改良.....	10
2.1.2.1 目的と経緯.....	10
2.1.2.2 方法.....	10
2.1.2.3 結果と考察.....	12
2.1.2.4 まとめ.....	17
2.1.3 大気汚染予測システムへの発展.....	18
2.1.3.1 NIES 大気汚染予測システム VENUS と NICAM-Chem の結合.....	18
2.1.3.1.1 目的と経緯.....	18
2.1.3.1.2 方法.....	18
2.1.3.1.3 結果と考察.....	19
2.1.3.1.4 まとめ.....	22
2.1.3.2 NICAM-Chem を用いた全球大気汚染物質のリアルタイム予測に向けた課題抽出.....	23
2.1.3.2.1 目的と経緯.....	23
2.1.3.2.2 方法.....	23
2.1.3.2.3 結果と考察.....	23
2.1.3.2.4 まとめ.....	25
2.2 サブテーマ2「同化・検証で用いる高時空間分解能観測データ整備」.....	26
2.2.1 複数の衛星を用いた統合データ（高時空間分解能観測データ）の構築.....	26
2.2.1.1 目的と経緯.....	26
2.2.1.2 方法と結果.....	26
2.2.1.3 考察.....	38
2.2.1.4 まとめ.....	38
2.2.2 対流圏全域および成層圏下部を計測するネットワーク用ライダーの開発.....	39
2.2.2.1 目的と経緯.....	39
2.2.2.2 方法と結果.....	39
2.2.2.3 考察.....	42
2.2.2.4 まとめ.....	42
2.3 全体のまとめと発展性.....	43

[資料]

1 研究の組織と研究課題の構成.....	50
1.1 研究の組織.....	50
1.2 研究課題と担当者.....	50
2 研究成果発表一覧.....	51
2.1 誌上発表.....	51
2.2 口頭発表.....	51

# 1 研究の概要

## 1.1 研究全体の目的、目標、構成等

我が国の大気汚染予測システムには、国立環境研究所（NIES）による日本領域を対象とした WRF（Weather Research and Forecasting）- CMAQ（Community Multiscale Air Quality Modeling System）モデルを利用した大気汚染（エアロゾル及びオキシダント）予測システム VENUS（Visual atmospheric Environment Utility System: ビーナス）、気象庁気象研究所による全球対象の MASINGAR（Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere）モデルを利用した黄砂及びエアロゾル予測システム、九州大学による全球対象の MIROC（Model for Interdisciplinary Research on Climate）- SPRINTARS（Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species）モデルを利用した黄砂及びエアロゾル予測システム、ウェザーニュース等の民間気象会社による領域規模 WRF-CMAQ モデルを利用した大気汚染予測システムなどが存在している。母体となる数値モデルは、どの機関においても継続的に改良されているが、観測結果を十分に再現することができていないのも事実である。このため、観測結果を用いて数値モデルによるシミュレーションを高度化する手法の1つとして、データ同化が用いられる。国内では気象庁気象研究所、国外では米国航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration: NASA）、米国環境保護庁（U.S. Environmental Protection Agency: EPA）、米国海洋大気庁（National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA）、欧州中期予報センター（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF）、中国気象局（China Meteorological Administration: CMA）、韓国国立環境研究院（National Institute of Environmental Research: NIER）などの研究機関でデータ同化手法を用いた大気汚染予測システムが採用されている。

大気汚染予測システムにおいてデータ同化が用いられている大きな理由としては、2000年以降に数多く打ち上げられてきた人工衛星によって、大気汚染物質（特にエアロゾル）を宇宙から観測できるようになったことが挙げられる。2000年代は地球を旋回する極軌道観測衛星によるエアロゾル観測が多かったが、2010年代になると地球と同じ速度で自転する静止衛星によるエアロゾル観測がなされるようになった。例えば、日本の静止気象衛星ひまわり、米国の衛星 GOES（Geostationary Operational Environmental Satellite）、欧州の Meteosat（Meteorological Satellite）、中国の風雲（Fengyun）などが挙げられる。そして2020年代になると、米国では TEMPO（Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution）、欧州では TROPOMI（Tropospheric Monitoring Instrument, Sentinel-5 に搭載されたものは2025年以降）、韓国では GEMS（Geostationary Environment Monitoring Spectrometer）というエアロゾル及び窒素酸化物などの微量気体監視のためのセンサーが搭載された静止衛星が打ち上げられた。この3つの静止化学衛星に加えて、極軌道衛星である TROPOMI/Sentinel-5P も打ち上げられ、全球規模の大気汚染物質観測網が構築されつつある。これは非常に画期的であり、静止衛星によって得られる高時間分解能データを十分に活用することにより、大気汚染予測精度が劇的に向上することが期待されている。

以上の背景から、本研究では来るべき全球静止化学衛星時代のデータ利活用を行い、データ同化手法による大気汚染予測システムのための手法構築を目的とした。この実現のために、全球から領域スケールを空間シームレスに取り扱うことができる国産の数値モデル NICAM（Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model）を母体とした大気汚染物質シミュレーションが可能な NICAM-Chem（NICAM coupled with Chemistry）モデルを用いる。具体的には、NICAM-Chem モデルを予測システムの一部とし、大気汚染物質観測データを用いたデータ同化を行い、得られた高精度シミュレーション結果を予測実験の初期値として用いることで、予測精度向上に繋げたい。このために、まず NICAM-Chem による全球大気汚染物質シミュレーションを確立し（**目標 1**）、予測計算に役立つデータ同化手法の2次元変分法（2-dimensional variation method: 2DVar）を NICAM-Chem に導入する（**目標 2**）。

同化による予測高度化は、同化に用いる観測データの量と質に大きく依存する。そこで本研究では、複数の人工衛星から得られる観測データを独自に統合し、同化に利用する高時空間分解能観測データセットの作成も目標とした（**目標 3**）。これらを実現した上で、大気汚染物質同化を行うことで予測精度を向上させる。このような複数の異なる観測

データセットを同時に利用したデータ同化システムは世界でも稀であり、世界に先駆けた同化システム手法の構築が見込まれる。

また、静止化学衛星による観測データは受動型センサーを使っているために、曇天と夜間においては大気汚染のシグナルを得ることはできない。そこで、曇天と夜間でも観測可能な能動型センサー「ライダー」も利用する。衛星ライダーは、NASA の CALIOP/CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) on the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO)) を用いる。地上ライダーは、NIES が中心となって東アジアに展開している地上ライダー観測網 AD-Net (the Asian dust and aerosol lidar observation network) を用いる。AD-Net のライダー観測において、エアロゾル・雲の相互作用を含めたエアロゾル気候影響の観点からも、低層域だけではなく中・高層域での定量計測も重要となるため、AD-Net ライダーの改良手法を考案・実装し、同化に活用することも目標とした (目標 4)。

さらに、本研究の先に見据える全球大気汚染物質のリアルタイム予測に向けた課題を抽出し、NIES 大気汚染予測システム VENUS との結合を進めることも目標とした (目標 5)。例えば、シミュレーションを実施する上で欠かせないスーパーコンピュータ (スパコン) の性能は年々向上しており、本研究で利用する NIES スパコンも本研究開始時 (2020年3月) に更新された。スパコンの計算機性能の増加によって、シミュレーションの空間解像度を細かく設定することができ、大気汚染物質の時空間分布を決める上で重要な気象場のモデル再現性が向上することも見込まれる。

以上に挙げた 5 つの目標実現のために、本研究ではサブテーマを 2 つ設定した。サブテーマ 1 「NICAM-Chem 同化による予測手法の構築」では、目標 1 と目標 2 の達成を目指した。サブテーマ 2 「同化・検証で用いる高時空間分解能観測データ整備」では、目標 3 と目標 4 の達成を目指した。目標 5 に関しては全体として取り組んだが、本報告書の構成上、サブテーマ 1 の成果部分に記載した。

## 1.2 研究の概要

本研究の全体像を図 1 に示した。サブテーマ 1 では、全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem の最適化を進めた上で、予測に重要な初期値作成のために、高速計算可能なデータ同化手法 (2DVar) を NICAM-Chem に新たに導入した (以後、NICAM-Chem/2DVar と呼ぶ)。サブテーマ 2 では、複数の衛星・地上観測データを融合した高時空間分解能観測データを作成すると共に、シミュレーション結果を検証するための観測データを整備した。また、サブテーマ 2 では、AD-Net ライダーの改良手法の考案・実装を実施した。サブテーマ 2 で得られた高時空間分解能観測データを用いて、NICAM-Chem/2DVar 同化を実施し、衛星・地上観測データを用いてエアロゾルシミュレーション精度を検証した。同化結果は、将来的にはリアルタイム予測の初期値として役立つ。

各サブテーマの具体的な研究成果の概要は次のとおりである。

### 1.2.1 サブテーマ 1 「NICAM-Chem 同化による予測手法の構築」の概要

- 国産モデル NICAM-Chem を用いて反応性のある微量気体シミュレーションを実施した結果、全球 56 km の高解像度設定で 8 年間の長期積分を NIES スパコンにて安定的に実施でき、研究成果目標を達成することができた。シミュレーションされた微量気体であるオゾン・一酸化炭素・窒素酸化物 (NOx) に関して地上観測結果を用いて比較したところ、オゾンは他のモデルと同様に過大評価傾向にあったが良い相関が得られ、一酸化炭素は良い相関で低いバイアスとなったが、NOx の再現性には問題が残ったため、引き続きモデル精緻化が必要である。
- 高速同化手法 2D-Var を NICAM-Chem に新たに導入した結果、エアロゾル同化が問題なく稼働することが確かめられた。同化元データにはサブテーマ 2 で作成した観測データを用いたところ、同化に利用していない独立した観測データによる検証によって、エアロゾルの再現性向上が明らかとなった。さらに、観測データ単体よりも同化した結果の方が高精度であることも明らかとなり、研究成果目標を達成することができた。一方で、世界初の試みとしての地上ライダーも含めた複数観測データを用いた同化までは実現できなかった。

### 1.2.2 サブテーマ2「同化・検証で用いる高時空間分解能観測データ整備」の概要

- 複数の衛星で観測されたエアロゾルデータを収集した上で、品質管理、中央値フィルタの導入、独自開発した空間フィルターを用いた異常値等の除去、MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) を基準とした独自のバイアス補正を施し、同グリッドに対して複数プロダクトのデータが存在する場合はプロダクトに優先順位をつけることでデータ融合を行った。その結果、2018年～2021年の観測データを用いて、2種類の時空間分解能（6時間1度と3時間0.5度）に対する高品質のエアロゾル観測統合データセットを構築することができた。この作成したデータの一部は同化計算で利用でき、研究成果目標は達成できた。一方、衛星・地上ライダーの観測範囲を設定したグリッド空間の整合性に問題が残った。これを解決するために、より高い空間分解能でのグリッドデータ化といった対策が必要と考えられる。
- 既存のAD-Netライダーに対して、新しい高感度検出器を用いて手法を改良した結果、より高高度（～30km：対流圏上部～成層圏中部）での観測が可能になり、エアロゾルの大規模な循環を精度良く捉えることができた。これを踏まえて、今後はAD-Netライダーの高性能化を順次進め、エアロゾル同化に役立てていきたい。

### 1.2.3 全体

- サブテーマ1で開発したモデルシステムと、利用可能な計算機環境を鑑みて、本研究の全球大気汚染予測手法の開発と様々な可能性の検討をしたところ、今後の全球大気汚染予測のリアルタイム化に向けた見込みと問題点が明確化された。具体的には、NIESスパコンを利用することで、全球56kmの高解像度同化シミュレーションを実施できることがわかり、準リアルタイムで本同化システムの実用化に向けての課題を抽出することができた。例えば、同化したシミュレーション結果であっても、社会が求める高精度予測のレベルには達することができなかつたため、継続的なモデル改良が必要である。また、本システムを運用するには、サブテーマ2で開発した衛星データの処理の高速化が必要となることもわかった。
- NIES既存の大気汚染予測システムVENUSの境界データとして、NICAM-Chemの結果を新たに利用した結果、予想よりも劇的な改善は見られなかった。しかし、データの整合性とモデル運用に関わる利便性を鑑み、VENUSとNICAM-Chemの結合システムを今後の基本設計とすることとした。

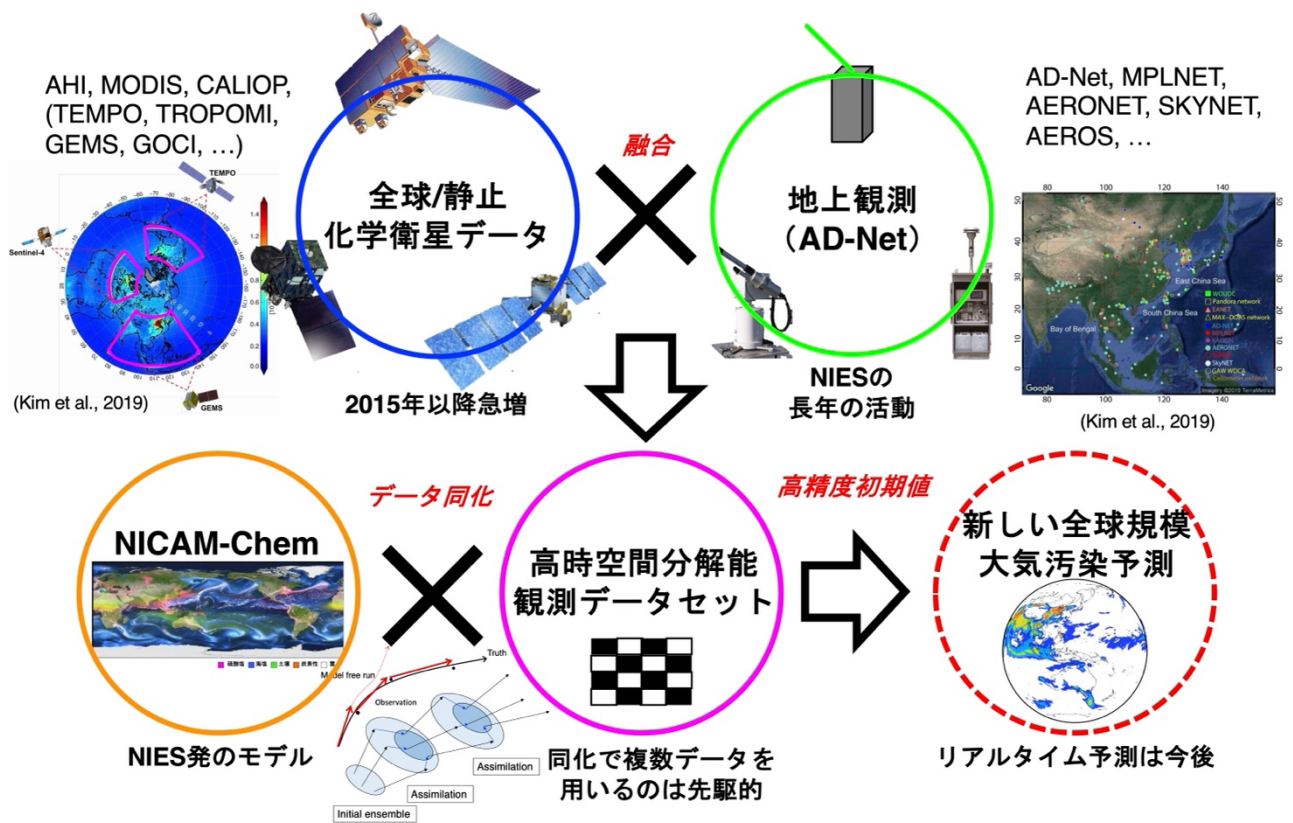


図1 本研究の概要

## 2 研究の成果

### 2.1 サブテーマ1 「NICAM-Chem 同化による予測手法の構築」

#### 2.1.1 NIES スーパーコンピュータを用いた NICAM-Chem の高度化・最適化

##### 2.1.1.1 目的と経緯

本研究で主として用いる全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem<sup>1)</sup>は、全球を数 km 規模の格子で区切った超高解像度シミュレーションから、全球数百 km 規模の格子で区切った低解像度シミュレーションまで、様々な解像度でエアロゾルシミュレーションがされてきた<sup>23,45,6)</sup>。反応性のある微量気体のシミュレーションに関しては、エアロゾルのみのシミュレーションに比べて計算コストが大きいので、領域高解像度シミュレーションが実施されてきた<sup>17)</sup>が、全球計算は数百 km の低解像度で 1 年程度のテストシミュレーションが行われるのみであった。そこで本研究では、データ同化による予測精度高精度化の前に、NICAM-Chem 単独のモデル高精度化を実現するために、NICAM-Chem によるエアロゾル・微量気体シミュレーションを全球高解像度で長期間積分可能とすることを目標とした。また、本研究開始直前の 2020 年 3 月から、本研究で利用する NIES スパコンシステムのベクトル機 (<https://www.cger.nies.go.jp/ja/activities/supporting/supercomputer/>) が旧来 (NEC SX-ACE、総理論演算性能 98.3 TFLOPS) から現行バージョン (NEC SX-Aurora TSUBASA、総理論演算性能 622.8 TFLOPS) に更新され、旧型よりも性能が上がった。そこで、実際に NICAM-Chem によるエアロゾル・微量気体シミュレーションが安定して計算可能か、またどの解像度に設定すればより良い結果が得られるか、等を調べる必要があった。以上の背景から、本研究では NIES スパコンを利用して NICAM-Chem によるエアロゾル・微量気体シミュレーションを全球高解像度で長期間安定的に積分できることを目指した。

##### 2.1.1.2 方法

全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem による微量気体シミュレーションのモデル設定を述べる。NICAM-Chem<sup>1)</sup>は、非静力学正二十面体格子大気モデル NICAM<sup>8,9,10)</sup>に、エアロゾルモジュールである SPRINTARS<sup>11,12,13,14)</sup>と大気化学モジュール CHASER (Chemical AGCM for Study of atmospheric Environment and Radiative forcing)<sup>15,16,17)</sup>が搭載されたモデルである。NICAM のバージョンは 16 (2016 年に公開されたバージョン) を用いた。モデルの物理過程は、輸送<sup>18,19,20)</sup>、放射<sup>21)</sup>、乱流<sup>22,23,24,25)</sup>、層状性の雲に関する大規模凝結過程<sup>26)</sup>、積雲パラメタリゼーション<sup>27)</sup>を用いた。モデル解像度は水平 56 km、鉛直 78 層である。時間ステップは 2 分とした。気象場 (水蒸気・気温・風) は NCEP (National Centers for Environmental Prediction) /FNL (Final) の 6 時間毎の再解析データを用いてナッジングした。全球気候モデル MIROC<sup>28,29)</sup>と結合した大気化学モデル CHASER の気候場を初期値として 2013 年 1 月 1 日からシミュレーションし、2020 年 12 月 31 日までの 8 年間シミュレーションした。

2.1.1 で特に対象とする反応性のある微量気体のシミュレーション方法に関しては詳細を述べる。母体モデルは CHASER であり、全球気候モデル MIROC 上で開発されてきたものであり、本モジュールは NICAM にも導入され、NICAM 上でも改良され続けている<sup>17)</sup>。MIROC に搭載された CHASER は、観測結果やモデル相互比較でもよく検証されている<sup>16, 17, 30, 31, 32)</sup>。CHASER では、約 60 種類の化学種を予報変数として計算しており、O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-HO<sub>x</sub>-CO の対流圏化学を支配する化学反応を中心として 140 本程度の化学反応を計算している<sup>15,17)</sup>。光乖離反応は 37 波長帯で計算され、雲やエアロゾル・気体による散乱・光吸収・射出などが放射コードで計算されている。CHASER で取り扱う化学種 (主に微量気体) が主に対流圏で経験する過程として、移流、鉛直拡散、湿性沈着、乾性沈着、人為起源・バイオマス燃焼起源の放出が考慮されている。エミッションは、NO<sub>x</sub>、一酸化炭素 (CO)、非メタン揮発性有機化合物 (NMVOC: Non-Methane Volatile Organic Compound) の人為起源由来は HTAP v2.2 (Hemisphere Transport of Air Pollution version 2.2)<sup>33)</sup>、バイオマス燃焼起源に関しては GFED v3 (Global Fire Emissions Database version 3)<sup>34)</sup>を用いた。植物由来の自然起源 VOC であるイソプレンやテルペン類は、GEIA (Global Emission Initiative)<sup>35)</sup>のデータを用いた。

モデル結果の検証のために準備した観測データは、対流圏大気化学を支配する主要な物理量である Ox（オゾンあるいはオキシダント）、NOx、CO である。これらの物質は観測サイトが世界中に広がっており、地表面オゾンは、米国 NOAA 管轄で世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）の全球大気監視（Global Atmosphere Watch Programme: GAW）計画に提出されているサイト、アジアを中心に観測されている EANET（Acid Deposition Monitoring Network in East Asia）のサイト、欧州 EMEP（European Monitoring and Evaluation Programme）管轄で GAW に提出されているサイトを用いた。地表面 CO 濃度の観測データは WMO の GAW 計画の下に設立された世界資料センターの一つである温室効果ガス世界資料センター（World Data Centre for Greenhouse Gases: WDCGG）で管轄されているものを利用した。地表面 NOx 濃度は、米国 EPA で管轄しているサイト、EANET のサイト、EMEP のサイトを用いた。モデル検証は、観測データの利便性も鑑み、代表的な年として 2018 年を選定して行った。

モデル結果を評価するにあたり、観測データの多いものは次にあげる統計指標を用いた。モデルの誤差を評価するために式 (1) で表される平均バイアス（Mean Bias: MB）を用いた。

$$MB = \overline{C_{sim}} - \overline{C_{obs}} \quad (1)$$

C は物質濃度を表し、バーは全観測地点平均を表している。MB は 0 に近いほどモデル結果が観測結果に近いことを表す。MB は濃度の絶対値に影響されるため、異なる物質間の比較をする際には規格化するのが適している。規格化された平均バイアス（Normalized MB: NMB）は、

$$NMB = \frac{\sum(C_{sim} - C_{obs})}{\sum(C_{obs})} \times 100[\%] \quad (2)$$

と定義できる。NMB は 0 に近いほど、モデル誤差が小さいことを表す。観測とモデルの相関を示すには、式 (3) で定義されるピアソン相関係数（Pearson correlation coefficient: CORR）を用いた。

$$CORR = \frac{\sum(C_{obs} - \overline{C_{obs}})(C_{sim} - \overline{C_{sim}})}{\sqrt{\sum(C_{obs} - \overline{C_{obs}})^2 \sum(C_{sim} - \overline{C_{sim}})^2}} \quad (3)$$

CORR は 1 に近いほど、モデル結果と観測結果の間の相関が強いことを示す。さらに、モデル結果の不確実性を表す指標として、式 (4) で定義される二乗平均平方根誤差（Root-Mean-Square-Error: RMSE）を用いた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(C_{sim} - C_{obs})^2}{N}} \quad (4)$$

RMSE は正の値であり、値が小さいほど、モデルの不確実性が小さいことを意味する。

地上濃度の観測データに加えて、人工衛星 TROPOMI/Sentinel-5P で得られた NO<sub>2</sub> の鉛直積算量<sup>36</sup>もモデル検証に用いた。TROPOMI/Sentinel-5P は、NO<sub>2</sub> を測定できる衛星の中でも高分解能で高精度なものとしてモデル検証に利用されている<sup>37</sup>。衛星リトリーバルにおいてリトリーバル感度が高度によって異なるため、Averaging Kernel (AK) と呼ばれる鉛直方向の重み係数が必要となるが、モデル検証の際には、TROPOMI で用いた AK を NICAM-Chem の結果に適用し、鉛直積算量を計算した。利用可能な TROPOMI のデータの問題から、対象期間は 2019 年 1 月から 12 月の通年とした。

### 2.1.1.3 結果と考察

旧来の NIES スパコン（NEC SX-ACE）では、NICAM-Chem によるエアロゾル・微量気体シミュレーションは、全球 110 km から 220 km 解像度に設定して 1 年から数年のシミュレーションが通常であった。しかし、エアロゾル・微量気体は大気寿命が短く、時空間分布が激しく変動するため、モデル再現性を高めるためにはより高解像度が望ましい。また、微量気体の中には大気寿命が比較的長いものもあるため、積分期間は少なくとも 1 年は必要となる。以上の背景から、コンピュータ環境と予測精度とのバランスをよく検討して解像度を定める必要があった。2020 年 3 月から運用されている現行の NIES スパコン（NEC SX-Aurora TSUBASA）で、最適化や試行錯誤を重ねた結果、NICAM-Chem によるエアロゾル・微量気体シミュレーションは、全球 56 km 解像度で少なくとも 8 年間分は安定して実施できることがわかった。次に、全球 56 km 解像度シミュレーションで得られた Ox、NOx、CO に関して、観測との比較を実施した。

図2には、世界中の観測サイトにおけるOx、NOx、COの地表面濃度の年平均値に関して、地上観測結果とNICAM-Chemの結果を散布図で示した。また、表1には図2で比較した統計データをまとめた。その結果、Oxに関しては、式(1)で定義したMBが全体的に過大評価であり、その値が+14.8 ppbvであり、式(2)で定義したNMBでは+50%とやや高めであった。式(4)で定義したRMSEは19.3 ppbvで、MBよりも少し大きかった。しかし、式(3)で定義した相関係数は0.58であったので、モデル結果と観測結果は良い相関といえる。このような結果は、既往研究と整合的であった<sup>38,39,40</sup>。つまり、モデルのOxが過大評価であることはモデル研究ではよく知られており、その原因ははっきりしていない。少なくともNICAM-Chemでも他のモデル同様にOxに正のバイアスがあることが明らかとなった。図3には日本の利尻とハンガリーのKプスタの観測サイトにおける地表面Oxの月平均値の変動を表した。どちらのサイトでもOx過大評価がどの月にも起きていることがわかったが、過大評価傾向は冬から春以外の季節で目立っていた。

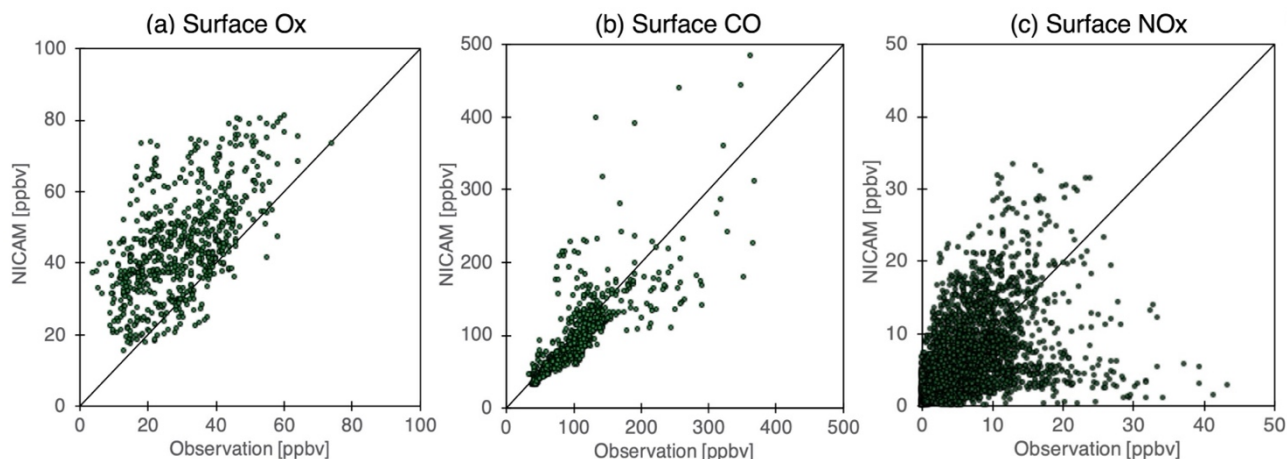


図2 (a)地表面Ox濃度、(b)地表面CO濃度、(c)地表面NOx濃度に関する観測(Observation)とモデル(NICAM)の散布図[ppbv]

表1 地表面Ox濃度、地表面CO濃度、地表面NOx濃度に関する観測とNICAMの統計変数

統計変数	Ox	CO	NOx
MB (平均バイアス)	+14.8 ppbv	-5.9 ppbv	-0.6 ppbv
NMB (規格化バイアス)	+50%	-6%	-69%
CORR (相関係数)	0.58	0.76	0.31
RMSE	19.3 ppbv	40.2 ppbv	20.1 ppbv
N (サンプル数)	672 (56地点)	859 (72地点)	2976 (250地点)

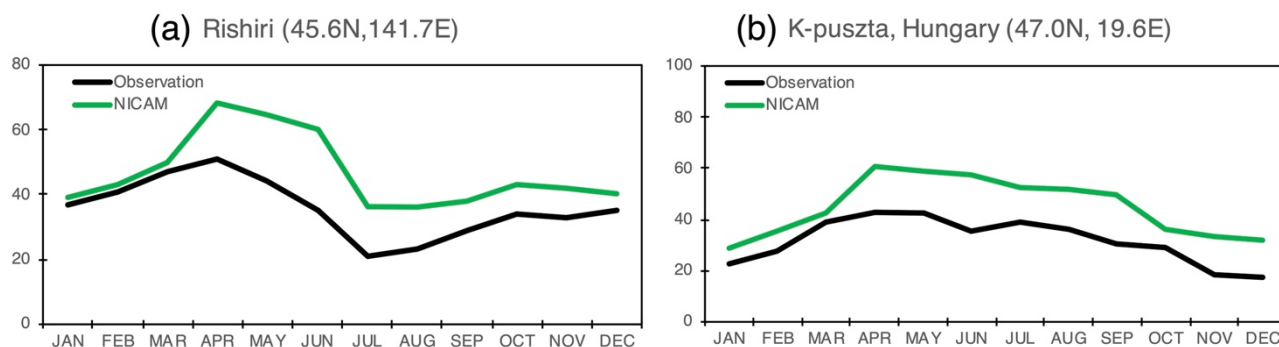


図3 (a)利尻と(b)ハンガリー・Kプスタにおける地表面Ox濃度[ppbv]に関するモデル(NICAM)と観測(Observation)結果の月平均変動

COに関しては、NMBが-6%で、MBも-5.9ppbvであったことから、モデル結果と観測結果の誤差は非常に小さいことがわかった。ただし、RMSEは40.2ppbvであったので、誤差よりも不確実性が大きいことがわかった。相関係数は0.76であったことから、モデル結果と観測結果の間には非常に良い相関が見られた。図2(b)を見ると、高濃度のサイトの結果でモデルの再現性がばらついていることが原因となって、RMSE値が大きくなったと考えられる。これらは、森林火災が活発な時期のインドネシアやベトナムの観測サイトである。そして、COが燃焼起源で大気中に放出されることが多いため、モデルで利用したCOの排出量データに含まれる誤差(排出フラックスや排出場所)がモデル結果に反映されたと推測される。図4には韓国の安眠島とスロベニアのクルヴァベツの観測サイトにおける地表面COの月平均値の変動を表した。安眠島では定常的に高濃度汚染にさらされており、冬季には300ppbv以上の高濃度となっているが、モデルではどの月においてもやや過小評価傾向が見られた。これは、近傍にある済州島のサイトでも過小評価傾向だったため、中国や韓国における排出量データが過小評価している可能性が考えられる。一方、排出量データの不確実性が比較的小さいとされるヨーロッパにあるクルヴァベツでの結果は観測結果を非常に良く表現できていた。

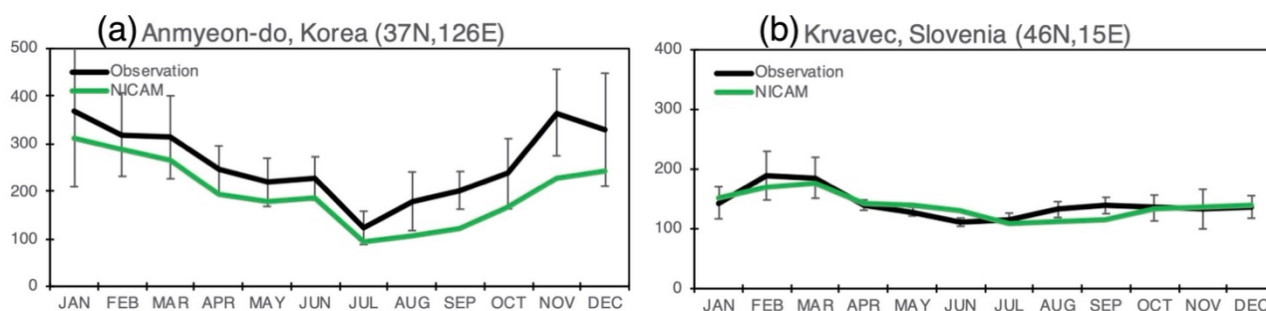


図4 (a) 韓国安眠島と(b)スロベニアクルヴァベツにおける地表面CO濃度[ppbv]に関するモデル(NICAM)と観測(Observation)結果の月平均変動。観測に表示されたバーは観測の不確実性を示す。

NOxに関しては、図2(c)及び表1から、NMBが-69%であり、モデル結果はかなり過小評価していることがわかった。RMSEが20.1ppbvであり、モデルの不確実性が大きいことがわかった。また、相関係数は0.31で、モデル結果と観測結果の間には弱い正の相関が見られたが、OxやCOの結果に比べると相関係数が低かった。図2(c)を見ると、高濃度場所でモデルの再現性がばらついていることが原因で、相関を悪くしていることが示唆される。図5には中国・重慶と日本・利尻の観測サイトにおける地表面NOxの月平均値の変動を表した。重慶はNOxの排出源に近く、観測濃度が比較的高い場所であるが、モデルの再現性が他の場所よりも良好であった。一方、利尻は人間活動の影響を受けにくいバックグラウンドサイトであり、観測濃度が比較的低い濃度であるが、モデルは過小評価であった。観測サイトによってモデルが過大か過小か、かなりばらついているため、より詳細なモデル検証が必要となることがわかった。

そこで図6と7に、TROPOMI/Sentinel-5P衛星から得られたNO<sub>2</sub>鉛直積算量とモデル結果を比較した。図6の水平分布を見ると、NO<sub>2</sub>の発生源である都市部で高濃度であり、海上では低濃度であるような大まかな水平分布再現性はかなり良好であった。これはNO<sub>2</sub>の大気寿命が非常に短いため、シミュレーションで用いたNO<sub>2</sub>のエミッション水平分布がよく現実場を反映しているためと考えられる。図7の散布図を見ると、低濃度で過小評価傾向があり、高濃度で過大評価傾向が見られた。これは、海上でのモデル過小評価と、都市部でモデル結果の過大評価が反映されたと考えられる。モデルと観測の平均値の比は1.16で16%程度の過大評価であったが、相関係数は0.82と非常に高かった。RMSEは平均値の10%程度で、不確実性も小さかった。次に、NOxの時間方向に関する再現性を検証するために、NOxと強い関係のあるOxと共に、日本付近での地表面濃度の日内変動に注目した。

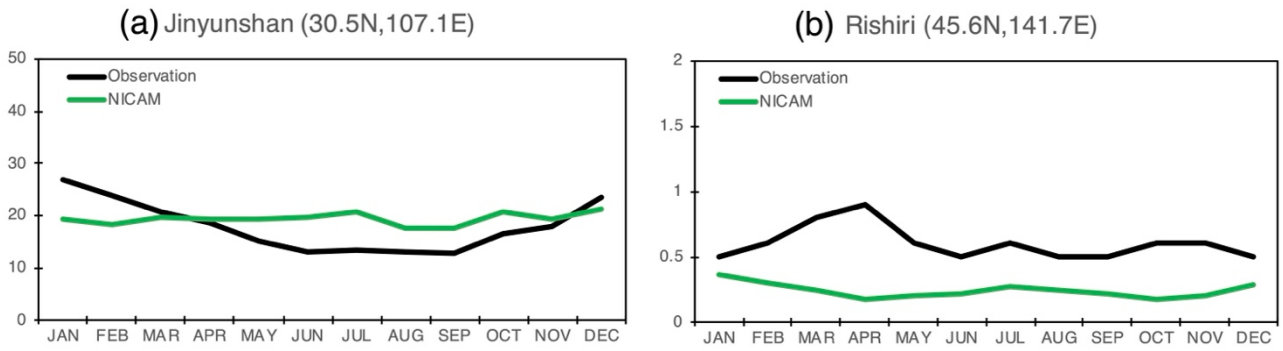


図5 (a) 中国・重慶のJinyunshanと(b)利尻における地表面NO<sub>x</sub>濃度 [ppbv]に関するモデル(NICAM)と観測(Observation)結果の月平均変動

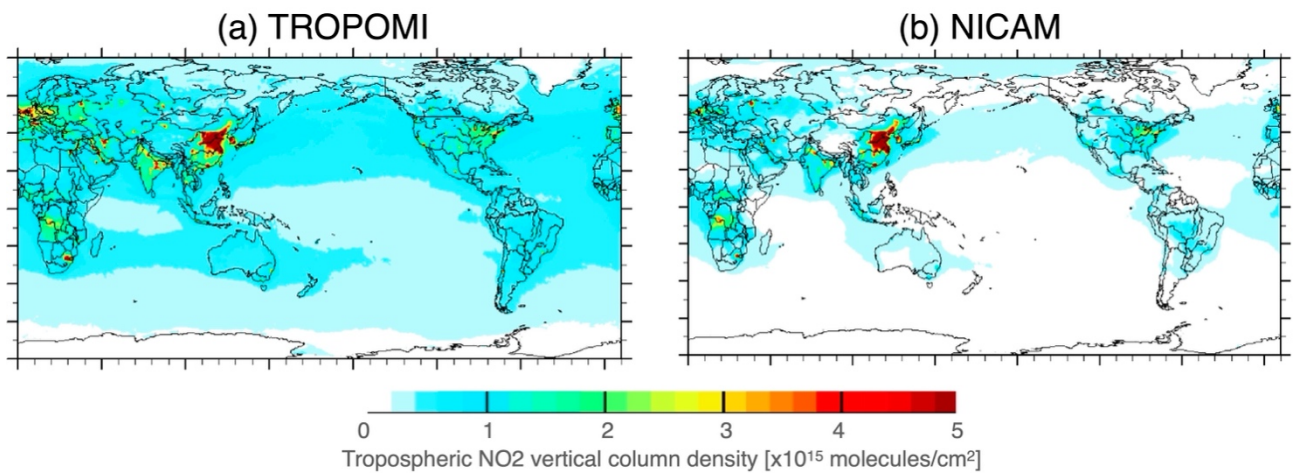


図6 (a) 2019年におけるTROPOMIと(b)NICAMにおけるNO<sub>2</sub>鉛直積算濃度に関する観測 (TROPOMI) とモデル (NICAM) の水平分布

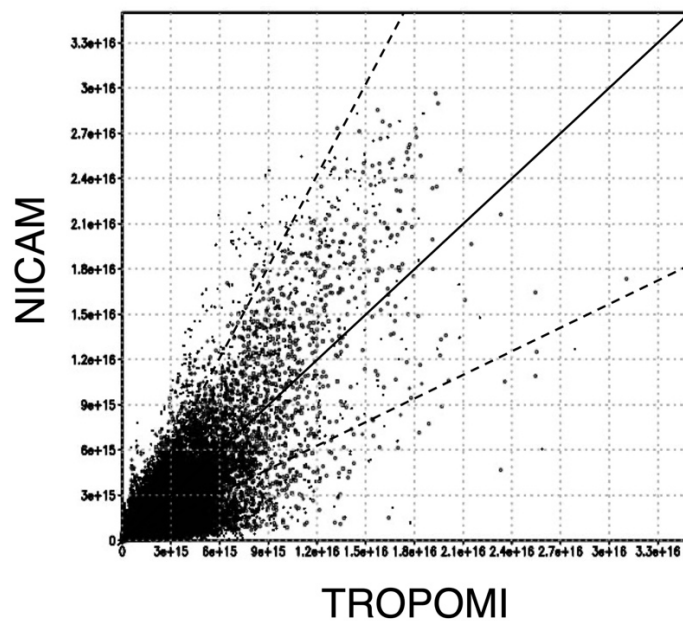


図7 2019年1月から12月におけるNO<sub>2</sub>鉛直積算濃度 [molecules cm<sup>-2</sup>]に関する観測 (TROPOMI) とモデル (NICAM) の散布図。1点1点が衛星とモデルの比較した地点における月平均値を表す。

夏季の関西地方における  $O_x$  と  $NO$  と  $NO_2$  の日内変動も比較を実施した（著作権の問題で図は省略）。参考データとして観測データ（環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめ君）：AEROS）と WRF-CMAQ のモデル結果<sup>41</sup>）を利用した。その結果、NICAM の  $O_x$  再現性は CMAQ と同様に観測で得られた日内変動をよく再現できていたが、どの時間帯においても最大 20 ppbv 程度の過大評価傾向であった。国際モデル相互比較 MICS-Asia<sup>39</sup>）でも最大 20 ppbv 程度であったので、最新のモデル結果とも整合的であり、オゾンモデリング業界の共通の課題となっている。NO および  $NO_2$  に関する日内変動の再現性は、NICAM と CMAQ とで大きく異なっていた。CMAQ では、 $NO_2$  再現性が良かったが、NO の午前中の濃度は観測に比べて過大評価していた。一方、NICAM では、 $NO_2$  の夜中の濃度が観測に比べて過大評価していたが NO は過小評価していたが、 $NO_2$  及び NO の日中の濃度は観測に比べて過小評価であった。以上の結果から、 $NO_x$  のモデル再現が向上しても、 $O_x$  はうまく再現できないことが示唆された。したがって、NICAM でも CMAQ でも  $O_x$  消失過程で未考慮の化学反応（不均一反応等）等に関するモデルの問題点が示唆された。また、NICAM の  $NO_x$  が改善されても  $O_x$  は改善されないことが示唆されたため、 $NO_2$  同化で  $O_x$  再現性が良くなる可能性が低いと考え、課題申請時に提案した  $NO_2$  同化はテスト計算のみに留めた。

#### 2.1.1.4 まとめ

本課題実施前は、NICAM-Chem での微量気体シミュレーションは 220 km 解像度 1 年積分のテスト段階であり、現行の NIES スパコン（2020 年 3 月運用開始）でのパフォーマンスも不明であった。そこで本課題では、NICAM-Chem による微量気体シミュレーションを本格化したところ、現行の NIES スパコンで、56 km 解像度 8 年積分を実施することができた。結果を検証したところ、概ね良好な再現性であったが、 $NO_x$  のみ再現性がやや良くなかった。そこで、オゾンと  $NO_x$  の日内変動に着目した比較を実施したところ、オゾン消失過程で未考慮の化学反応（不均一反応等）等に関するモデルの問題点が示唆された。

### 2.1.2 エアロゾルデータ同化手法の開発・改良

#### 2.1.2.1 目的と経緯

数値モデルのみを用いた大気汚染物質シミュレーションでは、依然として不確実性が大きく、より精度良く大気汚染物質を予測するためには、高精度の初期値場を作成して予測シミュレーションを実施する必要がある。この高精度の初期値場を作成する方法の 1 つとして、数値モデル・観測データ・データ同化手法の組み合わせが挙げられる。この手法は世界中の予測シミュレーションを実施する研究機関でも利用されているが、日本ではあまり利用されておらず、NIES においても利用されていない。したがって、本研究で利用する NICAM-Chem にも導入を進め、将来的な大気汚染物質予測シミュレーションの実施を目的とする。このために、まずは予測システムでも運用可能な計算機負荷が小さい同化手法である 2DVar を NICAM-Chem に導入することを目標とした。そして、観測データが多いエアロゾル光学的厚さ（Aerosol Optical Thickness: AOT）を対象とした同化をするために、エアロゾルに焦点を絞って 2DVar の導入を進めた。

#### 2.1.2.2 方法

NICAM-Chem によるシミュレーションのモデル設定は、2.1.1.2 とほぼ同じであるが、雲物理過程と化学過程と気象場ナッジングのみ異なる。雲物理過程は、雲微物理も考慮して計算可能な水物質（雲水、雨、雲氷、雪、霰）に関する 1 モーメントバルク法である NSW6（NICAM Single-moment Water 6 categories）<sup>42</sup>）を用いており、雲量も診断しておらず、積雲パラメタリゼーションも用いていない。これは将来的に 10 km 規模の高解像度グリッドで 2DVar を計算するためであるが、本研究では解像度 56 km とした。時間ステップは 30 秒とした。これまでの経験から、56 km 解像度で NSW6 を利用してもエアロゾルの再現性に問題はないことはわかっている<sup>9</sup>）。また本研究ではエアロゾル同化に着目し、計算機負荷を軽減するために、大気化学過程を担う CHASER モジュールは用いなかった。気象場は NCEP/FNL の風の再解析データのみを 6 時間毎にナッジングした。対象期間は 2 事例とし、今回注目した領域が日本を中心とした東アジアであ

ることから、冬の代表的な事例としてコロナ禍の影響を受ける前のものとして 2019 年 1 月を選定し、春の代表的な事例として観測データの利用がしやすい事例として 2021 年 3-4 月を選定した。

本研究で対象とするエアロゾルは、SPRINTARS モジュールで計算する。SPRINTARS<sup>11,12,13,14)</sup>は、全球気候モデル MIROC<sup>28,29)</sup> 上で開発されてきたものであり、本モジュールは NICAM にも導入され、NICAM 上でも改良され続けている<sup>2,3,4,5,6)</sup>。SPRINTARS では、対流圏の主要エアロゾル（土壌粒子、海塩粒子、硫酸塩エアロゾル、有機炭素エアロゾル（OC）、黒色炭素エアロゾル（BC））を取り扱っており、これらの物質の質量（混合比）を直接的に計算している。取り扱っている過程は、水蒸気と共に大気中を輸送される過程、鉛直拡散過程、大気中への排出過程（エミッション）、大気中から取り除かれる 2 種類の除去過程（湿性沈着と乾性沈着）、硫酸塩に関しては化学反応が計算されている。エミッションは、土壌粒子と海塩粒子はモデル内で計算されるのに対して、硫酸塩エアロゾルの前駆気体 SO<sub>2</sub> と OC と BC は人為起源由来に関しては HTAP v2.2<sup>33)</sup>、バイオマス燃焼起源に関しては GFED v3<sup>34)</sup> を用いた。エアロゾル種は 1 つの粒子の中に 1 つの化学組成と仮定しているが、OC と BC の一部に関しては 1 つの粒子の中に 2 つの異なる化学種が混在している（内部混合）と仮定している<sup>613)</sup>。エアロゾルの気候影響を考える上で重要な物理量である AOT は、エアロゾル混合比と仮定されたエアロゾル光学特性<sup>36)</sup>によって計算している。

本研究で利用したデータ同化手法 2DVar は、気象庁気象研究所の MASINGAR モデルにも搭載されている<sup>43)</sup>。エアロゾル同化手法のうち、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（Localized Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF）<sup>44)</sup>は NICAM に既に搭載されており、これまでのエアロゾル同化に関する研究を進めてきた<sup>45,46,47)</sup>。同化手法自体は、式（5）で表すことができるコスト関数 J を最小にする  $\tau$  (AOT) を求める理論式を適用し、これは 2DVar でも LETKF でも共通である。

$$J(\tau) = \frac{1}{2}(\tau - \tau^f)^T P^{-1}(\tau - \tau^f) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}\tau - \tau^0)^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}\tau - \tau^0) \quad (5)$$

$$\Delta\tau = \tau^a - \tau^f = \mathbf{P}\mathbf{H}^T(\mathbf{R} - \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T)^{-1}(\tau^0 - \mathbf{H}\tau^f) = \mathbf{K}(\tau^0 - \mathbf{H}\tau^f) \quad (6)$$

$\mathbf{P}$  が背景誤差、 $\mathbf{H}$  が観測オペレータ、 $\mathbf{R}$  が観測誤差、 $\mathbf{K}$  はカルマンゲインを表している。観測に関する情報は、本研究で利用した衛星データに含まれる情報であるが、モデルの誤差である背景誤差  $\mathbf{P}$  は以下の式（7）によって定義される。

$$P_{\tau}^{m,n} = \sigma_{\tau}^m (C^{m,n})^{1/2} \sigma_{\tau}^n \quad (7)$$

$m$  と  $n$  はモデルグリッドを表し、 $C^{m,n}$  はグリッド間 ( $m,n$ ) の距離に反比例した重み付け関数である。 $\sigma$  は AOT に関するモデルの背景誤差標準偏差を表し、本研究では式（8）のように表現される。

$$\sigma_{\tau} = \frac{\hat{\sigma}_{FR}}{\bar{\tau}_{FR}} \tau^f \quad (8)$$

$\bar{\tau}_{FR}$  と  $\hat{\sigma}_{FR}$  は NICAM の全球 14 km グリッドで計算された AOT シミュレーション結果<sup>9)</sup>から計算された月平均値と標準偏差である。本研究では、LETKF で使用される局所化技法を用いている。この技法は、局所領域に含まれる観測値を使用してモデルグリッドごとに AOT の解析増分 ( $\Delta\tau$ ) を独立して計算し、距離に伴う誤った誤差共分散を低減し、並列処理を使用して計算コストを削減することができる。局所的なスケールは 150 km とした。詳細な同化手法に関する概要は参考文献<sup>43,48)</sup>にも記載されている。なお、表 2 には、2DVar と LETKF の特徴の違いをまとめたが、本研究では同化手法の計算機負荷を軽減するために、2DVar を用いた。

本研究で用いた衛星データに関する詳細は、2.2.1 章に記載されているが、ここでも簡単に紹介する。衛星データは、静止衛星ひまわりに搭載された AHI センサーから得られた 500 nm における AOT と、極軌道衛星 Aqua に搭載された MODIS センサーから得られた 550 nm における AOT と、極軌道衛星 CALIPSO に搭載された CALIOP センサーから得られた 532 nm における AOT を用いて、データ融合して作製した新しい衛星データを用いた。データ融合は、検証結果から MODIS の結果が最も正しいものであるとし、データ数が多い AHI のデータを MODIS で補正することで、より確からしい観測データを最大限活用するようにした。

表2 NICAM-Chemに搭載されたエアロゾル同化手法（2DVarとLETKF）の違い

	2DVar <sup>43,48)</sup>	LETKF <sup>45,46,47)</sup>
日本語名	2次元変分法	局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
背景誤差	統計的推定値（擬似アンサンブル利用・局所化技術導入によって従来よりも高度化されている）	アンサンブル実験（20-40個の異なる摂動を与えた実験）によるばらつき結果
計算機負荷	小さい（モデル高解像度化可能）	大きい（アンサンブル実験実施のため）
開発コスト	小さい（同化解析の式を導入するのみ）	比較的大きい（別モジュールの導入が必要）
利点	気象庁気象研究所で運用実績	NICAM-Chemベースで長年開発改良
本研究での位置づけ	準リアルタイム予測で実用化する際に導入	同化手法の継続的な開発を行い、新しい衛星や複数の衛星を適用

シミュレーションの検証方法は、NICAM-Chem/2DVarを用いてデータ融合されたAOTデータを同化した結果（単にNICAM/2DVarと呼ぶ）と、NICAM-Chemを同化なしでシミュレーションした結果（単にNICAMと呼ぶ）と、データ融合した衛星データあるいは同化には用いていないAOTの地上観測データであるAERONET（Aerosol Robotic Network）<sup>49)</sup>との比較を実施した。またAOTは鉛直積算量であることから、同化によって地上付近でのPM<sub>2.5</sub>濃度のモデル再現性を検証するために、PM<sub>2.5</sub>データが入手しやすい日本の環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめ君: AEROS）の結果と比較した。その際に、全国の主要5都市部におけるAEROSのデータに対してデータ品質管理（Quality Control: QC）を実施した後の結果をNICAMのグリッド（56km）に平均したものをを用いた。

また、モデル結果との比較のために、VENUSのシミュレーション結果（利用しているモデルはWRF-CMAQであるため、以後は単にWRF-CMAQと呼ぶ）、米国NASAのエアロゾル再解析結果（MERRA-2）<sup>50)</sup>と欧州ECMWFのエアロゾル再解析結果（CAM5）<sup>51)</sup>の結果を利用した。MERRA-2では母体モデルGEOSに結合されたエアロゾルモジュールGOCART<sup>52)</sup>に対して2DVarによるエアロゾル同化を適用している。同化データは、AquaおよびTerra衛星に搭載されたMODISのAOTと、地上観測AERONETのAOTである。モデル解像度は0.625°×0.5°である。CAM5は4DVarによるエアロゾル同化を適用しており、同化データはAquaとTerraに搭載されたMODISのAOTである。モデル解像度は0.75°×0.75°である。

その他、NICAM-Chem/LETKFを用いたエアロゾル同化シミュレーションに関しては、気候変動観測衛星であるGCOM-Cに搭載されたSGLIセンサーから得られたAOT<sup>53)</sup>を利用したシミュレーションを実施した。解像度は全球56kmで、LETKFのような計算コストが大きい同化手法を用いたシミュレーション研究の中では、世界最高レベルの解像度に相当する。実施した数値実験は、エアロゾル同化ありと同化なしの2種類である。アンサンブルメンバーは20とし、摂動は排出量の100%とした。実験対象期間は2018年3月23日から3月31日までの9日間とした。風はNCEP-FNLデータをナッジングした。エアロゾルの排出量インベントリは、人為起源はHTAPv2<sup>33)</sup>、森林火災起源はGFEDv3.1<sup>34)</sup>である。詳細な設定条件に関しては、既に公表されている<sup>47)</sup>。一方、モデルの検証に主に用いたのは、同化には適用していない独立した地上観測であるAERONETやAD-Net<sup>54)</sup>であり、特にAD-Netライダーによって得られたエアロゾル消散係数の高度分布を用いることで、2次元AOT同化によって3次元分布がどの程度影響されるのかにも注目した。

### 2.1.2.3 結果と考察

図8は、データ融合した衛星データのAOTの水平分布、この衛星のAOTデータを使用して2DVar同化を行ったNICAM-Chem（NICAM/2DVar）のAOT、同化していないNICAM-Chem（NICAM）のAOTを示している。衛星AOTは、北緯45度より北の地域では雪と海氷のため欠損が多くとなっている一方で、アジア、アフリカ、アラビアではAOT値が大きく、大気汚染が激しい領域であることを示している。NICAMによって計算されたAOTは、衛星AOTと比較して世界的に約0.04の過小評価が見られた。しかし、衛星データを同化することによって、中国、インド、アフリカ、アラビアの高濃度地域では衛星AOTに近づいた。ただ、衛星AOTのサンプリング数が限られる北太平洋と南太平洋では同化の効果はあまり大きくなかった。ヨーロッパと北米では、元々存在しているエアロゾルが少ない（AOTが低い）ため、NICAMとNICAM/2DVarのAOT差は小さかった。NICAM/2DVarと衛星のAOT差の世界平均は±0.01程度となっ

た。同化を行うと、衛星とシミュレーション結果の差は、同化なしの結果よりも小さくなった。全体として、衛星 AOT を使用した 2DVar 同化は成功したといえる。

図 9 は、世界各地の AERONET サイトで観測された結果に、衛星、NICAM/2DVar および NICAM との間の月平均 AOT の散布図を示している。NICAM の結果は一般に良好で、高い相関係数（式 (3) の CORR は 0.758）、中程度の不確実性（式 (4) の RMSE は 0.135）、および中程度のバイアス（式 (2) の NMB は -29.1%）であった。同化すると、すべての事例で CORR が高く、NMB が低く、RMSE が低くなった。同化によって、同化がない場合のバイアスよりも約 23% 低くなった。衛星結果と比較すると、NICAM/2DVar はより良い統計値を示した。2DVar 同化結果が同化データである衛星の結果よりも結果が良かったのは、2つの可能性が挙げられる。1つは、2DVar 同化が背景誤差と観測誤差に対してうまく機能したためである。もう1つの理由は、衛星データは雲やノイズによってサンプリング数が制限されるため、対象月の平均衛星 AOT が月平均 AOT を表さない可能性もあるからである。

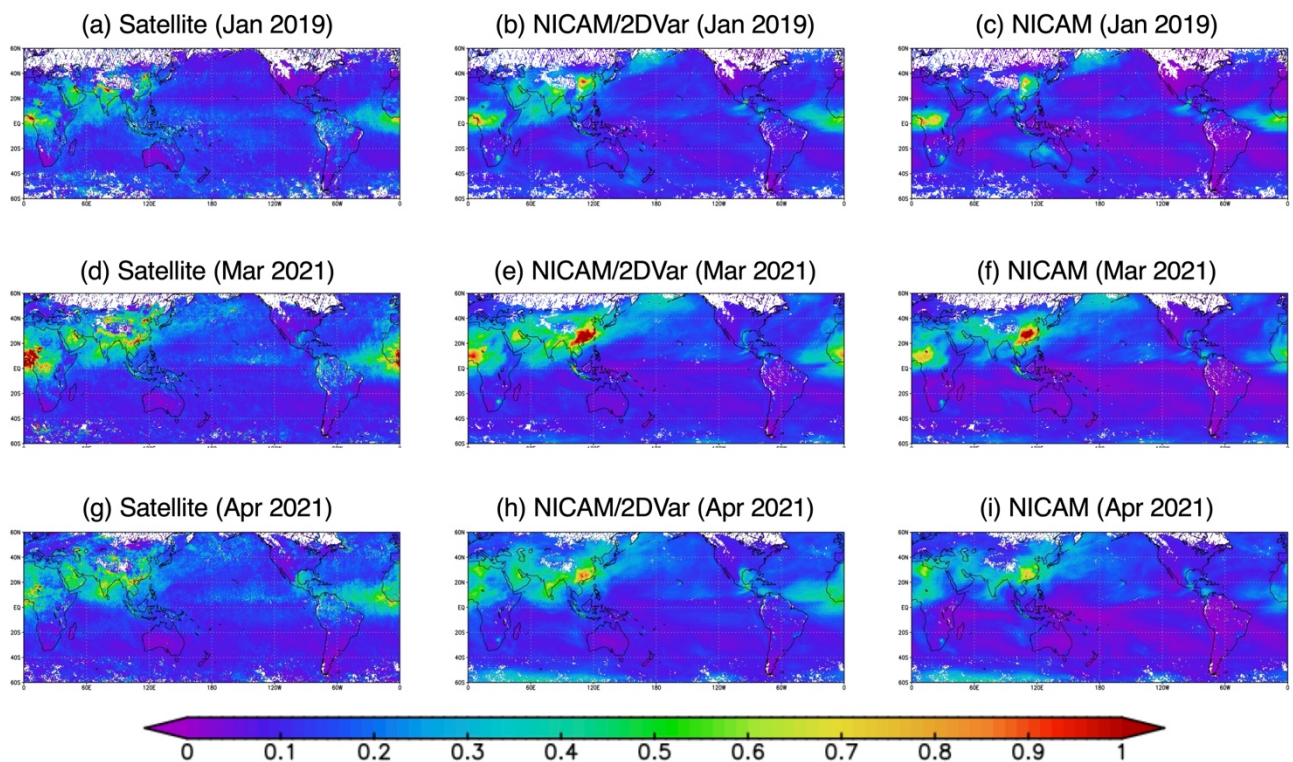


図 8 本課題で作成した衛星融合データ (a, d, g)、NICAM/2DVar (b, e, h)、NICAM-Chem 同化なしの (c, f, i) の全球 AOT 分布図。対象期間は、2019 年 1 月 (a, b, c)、2021 年 3 月 (d, e, f)、および 2021 年 4 月 (g, h, i) である。各パネルの左下にある数字は全球年平均値である。この元データは Goto et al. (2024)<sup>48)</sup>からの引用である。

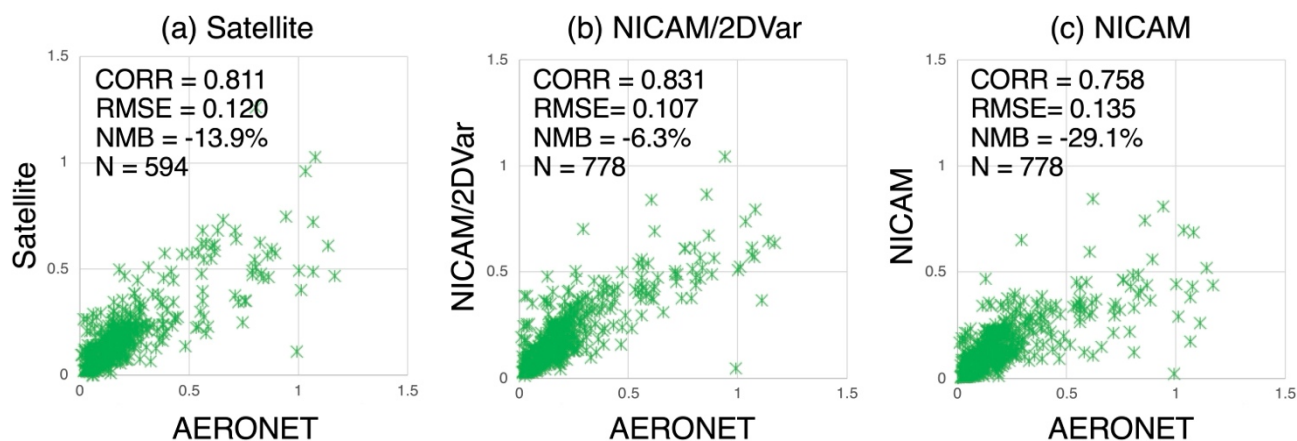


図 9 本課題で作成した衛星融合データ (a)、NICAM/2DVar (b)、NICAM-Chem 同化なし (c) と地上観測データ (AERONET) との比較図。対象期間は、2019 年 1 月、2021 年 3 月、および 2021 年 4 月を合算したものである。各パネルの左上にある数字は統計量 (CORR、RMSE、NMB、サンプル数 N) である。この元データは Goto et al. (2024)<sup>48)</sup>からの引用である。

図 10 は、3 月 30 日から 31 日の強い高濃度ピークを含む、2021 年 3 月 28 日から 4 月 1 日までの期間において、日本の 5 つの選択された地域における地表面  $PM_{2.5}$  濃度の時間的変化を示している。北日本と東日本では、AOT 同化によって地表面  $PM_{2.5}$  濃度の再現性が悪化した、特に福岡付近では AOT 同化後によって地表面  $PM_{2.5}$  濃度の再現性が改善したことがわかった。参考データである MERRA-2、CAMS、WRF-CMAQ の結果は概ね良好な結果を示したが、CAMS は過大評価傾向、WRF-CMAQ は過小評価傾向が見られた。3 月末の過大評価傾向は、モンゴルや中国戈壁砂漠で発生したダストが日本に運ばれたのだが、そのダストが稀に見る大規模なダストであった<sup>55,56)</sup>ため、モデルでそのダストをうまく再現することができなかったからだと考えている。

以上までは衛星 AOT のみを使用した同化であったが、ここからは利用可能な地上観測から推定された AOT である AERONET と SKYNET<sup>57)</sup>も使用した同化を実行した。地上  $PM_{2.5}$  濃度の観測結果とシミュレーション結果を比較検証するために、衛星と地上の両方の観測をデータ同化した NICAM/2DVar の結果 (NICAM/2DVar+Full と記載) および地上観測のみをデータ同化した NICAM/2DVar の結果 (NICAM/2DVar+OnlyG) を図 11 に示している。この結果から、地上観測のみの AOT を同化すると、福岡付近以外では衛星のみの AOT の同化よりも、CORR 値が増加し、RMSE 値が減少し、NMB 値が減少したことがわかった。これは、図 10 で見られるように、衛星で得られた AOT を同化しても地上  $PM_{2.5}$  濃度の再現性が向上しなかったことも一因である。福岡付近は、地上の AOT 観測のみの同化よりも、衛星と地上の両方の AOT 観測を利用した同化の方が、地上  $PM_{2.5}$  濃度再現性は良かった。特に、NICAM/2DVar+Full の結果は、福岡付近では少なくとも相関は非常に良く、他の地域では相関が非常に良く、RMSE も NMB も小さかった。NICAM/2DVar+Full あるいは NICAM/2DVar+OnlyG の相関係数は MERRA-2 および CAMS 値より劣っていたが、NICAM/2DVar+Full 結果の RMSE および NMB 値は MERRA-2 および CAMS よりも優れていた。この理由としては、各モデル間ではエアロゾルを外部混合していると仮定をしているのに対して、NICAM では一部の有機炭素エアロゾルと一部の黒色炭素エアロゾルが内部混合していると仮定しているである。これは、黒色炭素の一部を内部混合であると仮定することによって、粒子の光学特性が大きく変化する、同じ質量の場合に消散係数の値が大きくなることから、AOT が同程度である場合には  $PM_{2.5}$  質量濃度は NICAM の方が小さくなる傾向が出ることになる。差が生じるその他の要因としては、気象場再現性の違い、同化に用いた観測データの違い、エアロゾル鉛直分布再現性の違い、用いたエアロゾル排出インベントリの違いが複雑に関係している。以上のことから、衛星と地上の両方の AOT を使用した 2DVar 法で NICAM によって計算されたエアロゾルシミュレーション結果は観測結果に非常に近い結果が得られ、既存のエアロゾル再解析 (MERRA-2 および CAMS) データセットと同等であることが示唆された。なお、以上の結果は Goto et al. (2024)<sup>48)</sup>にて詳細に議論している。

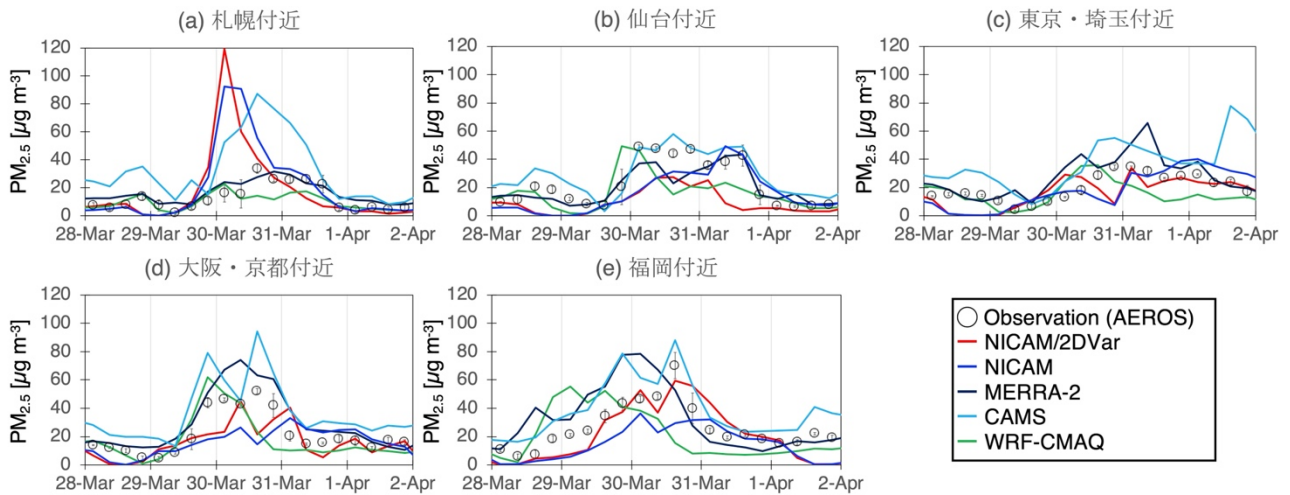


図 10 (a)札幌付近、(b)仙台付近、(c)東京・埼玉付近、(d)大阪・京都付近、(e)福岡付近における各種推定による地表  $PM_{2.5}$  質量濃度  $[\mu g m^{-3}]$  の時間変化。2021年3月28日から4月1日までの期間である。この推定には、地上測定 (AEROS)、NICAM/2DVar、NICAM、および3つのモデル参照結果 (MERRA-2、CAMS、WRF-CMAQ)。この元データは Goto et al. (2024)<sup>48)</sup>からの引用である。

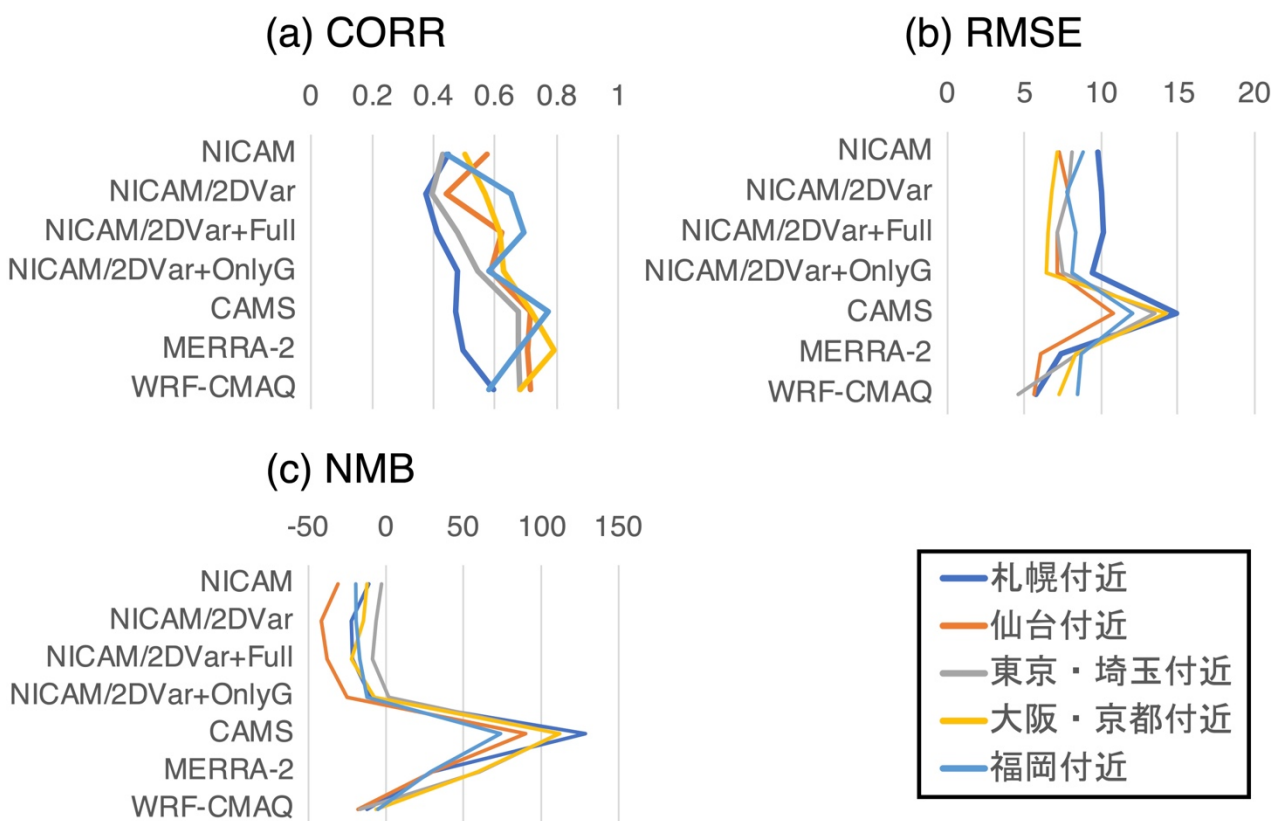


図 11 日本の AEROS サイトを含んだ5つの地域 (約  $1^\circ \times 1^\circ$ ) における各種推定による地表  $PM_{2.5}$  質量濃度  $[\mu g m^{-3}]$  の統計変数 ( (a) CORR、(b) RMSE、(c) NMB) の値。対象期間は2021年3月1日から4月30日までの2ヶ月間。この元データは Goto et al. (2024)<sup>48)</sup>からの引用である。

次に、GCOM-C/SGLI を用いた NICAM-Chem/LETKF によるエアロゾル同化の結果を提示する。図 12 には、NICAM-Chem/LETKF の同化計算によって得られた AOT の 9 日間平均値 (2018 年 3 月 23 日から 3 月 31 日まで期間) などを示した。これまでに NICAM-Chem/LETKF 同化手法自体の検証は十分行った<sup>45,46)</sup> ため、同化システム自体はうまく稼働していることを前提とする。その上で図 12 を解析すると、GCOM-C/SGLI の AOT を同化することによって、モンゴルや中国北東部でダスト成分が増加し、AOT 全体の値も増加したことがわかった。また、中国南部や中央部では同化によって AOT が減少したが、この原因は硫酸塩や炭素性エアロゾルのような人為起源エアロゾルの減少である。図 13 は、得られた NICAM-Chem/LETKF 同化結果をさらに検証するために、同化には適用していない独立した観測データである AD-Net を用いて、3 地点 (ダスト発生源に近いモンゴルのウランバートル、および越境汚染流出地域でもある日本の福江および大阪) におけるエアロゾル消散係数の 3 次元時系列比較を行った。この結果、ダスト発生源付近のウランバートルでは、同化することによって、3 月 29 日から 3 月 30 日にかけての高濃度エアロゾルの過小評価を軽減したことがわかった。そして、ウランバートルで観測された高濃度エアロゾルは、3 月 30 日から 3 月 31 日にかけて福江や大阪にも到来したことが示唆され、同化することによって、観測に近い高濃度エアロゾルを再現することができた。また、3 月 29 日の福江および大阪で、地表面から高度 5 km まで見られる高濃度エアロゾルは、同化の有無に関わらず、観測で見られる複雑な鉛直構造 (福江では、高度 1-2 km では低濃度だが、それ以外の高度では高濃度であった) をうまく再現することはできなかつた。これは、同化している GCOM-C/SGLI の AOT が 2 次元量であり、2 次元量の同化によって複雑な 3 次元の鉛直分布を再現することが難しいためである。これを軽減するためには、NICAM-Chem モデル自身の精緻化も進める必要が示唆される。

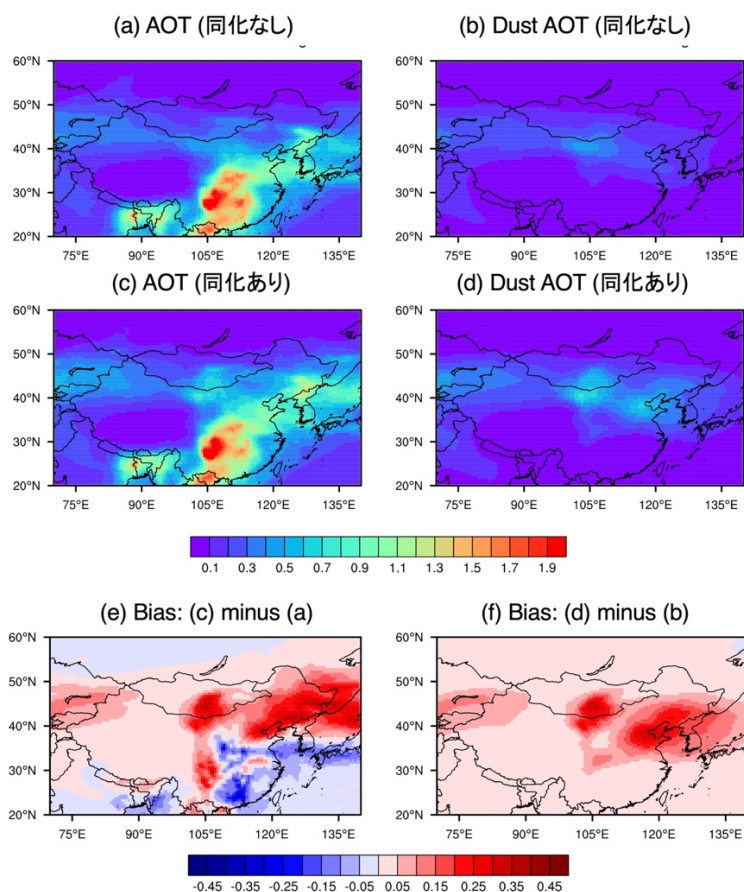


図 12 2018 年 3 月 23 日から 3 月 31 日までの 9 日間で平均した AOT の水平分布。(a) NICAM-Chem の同化なしで計算した AOT と (b) ダストのみの AOT、(c) NICAM-Chem/LETKF を用いて GCOM-C/SGLI の AOT を同化した AOT と (d) ダストのみの AOT、(e) 同化の有無での AOT の差分、(f) 同化の有無でのダスト AOT の差分。Cheng et al. (2021)<sup>47)</sup> の図 2 を日本語にして表示したものである。

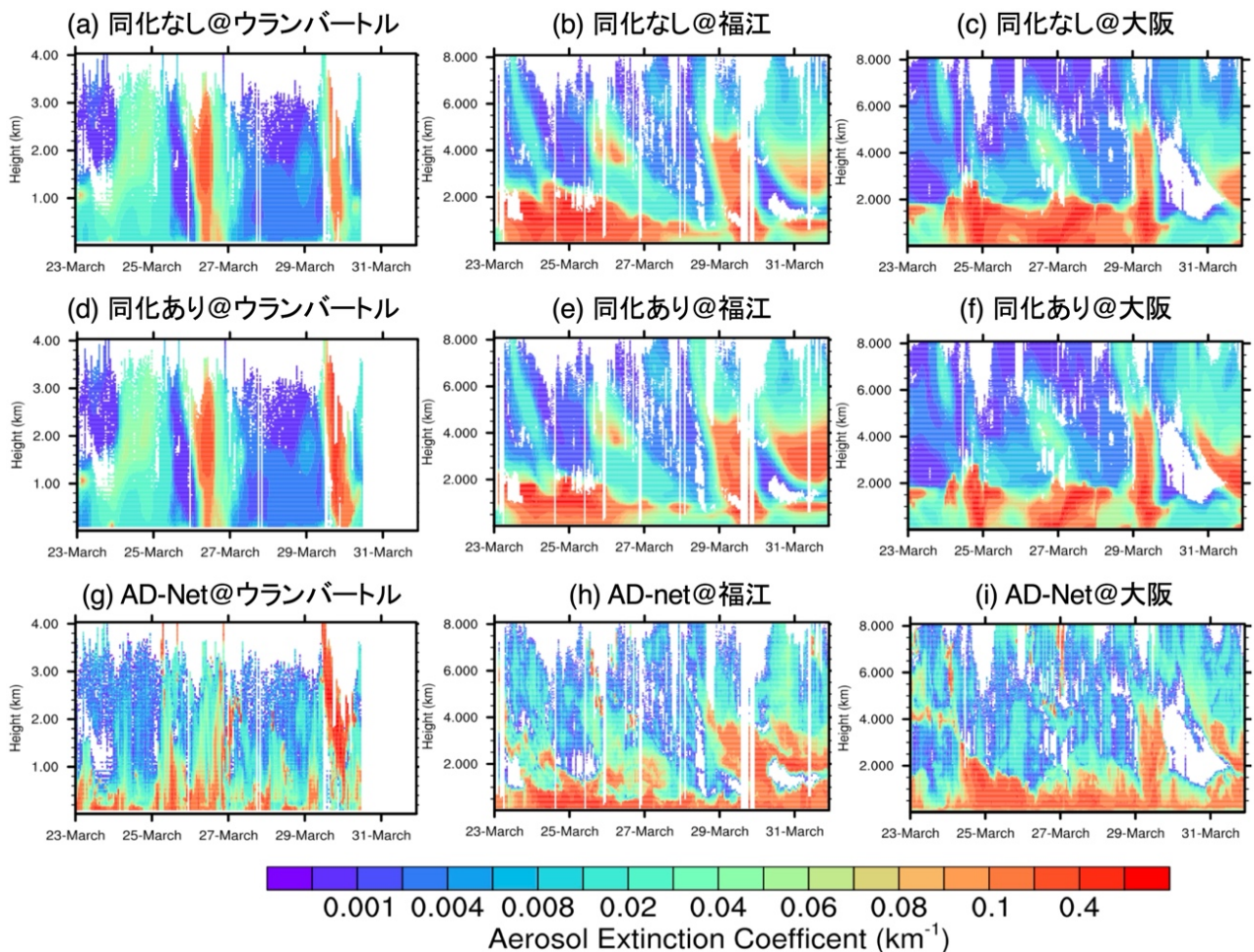


図 13 2018年3月23日から3月31日の期間におけるエアロゾル消散係数 (Aerosol Extinction Coefficient) [ $\text{km}^{-1}$ ]。 (a、d、g) ULT (モンゴル・ウランバートル)、(b、e、h) 福江、(c、f、i) 大阪のサイトでの結果であり、(a、b、c) 同化なしのモデル結果、(d、e、f) 同化ありのモデル結果、および (g、h、i) 観測 (AD-Net) で得られたものである。元データは Cheng et al. (2021)<sup>47</sup> で公表されている出力結果から作図した。

#### 2.1.2.4 まとめ

計算コストが軽いため、日々の大気汚染予測に利用可能な 2DVar を NICAM-Chem に新たに導入した。本課題で作成した新しい観測データセット (2.2.1章で詳細説明) を用いて、エアロゾル同化を実施したところ、同化なしの結果や同化に利用した衛星データよりも再現性が良かった。例えば、世界各地に設置されている地上観測網である AERONET による AOT の観測結果と比較したところ、同化することによって、相関係数は 0.07 増加、RMSE は 0.03 減少、バイアスは 23% 軽減となった。鉛直積算量である AOT 同化によって地表付近の  $\text{PM}_{2.5}$  濃度の再現性の改善も調べたところ、世界の代表的なモデルである米国 NASA の MERRA2 とヨーロッパ ECMWF の CAMS よりも、NICAM/2DVar は相関係数がやや劣る傾向があるものの、RMSE と NMB は場所や時期によっては再現性が良いことがわかった。さらに、AOT の地上観測データも同化することによって、人工衛星では観測の欠損があるため、同化結果がさらに良くなることが示された。このことは、利用可能な観測データを最大限用いたデータ同化によって、高精度のエアロゾル再解析データが作製できることが示唆された。

一方で、研究計画段階では、世界初の試みとしての地上ライダーも含めた複数観測データを用いた同化を実施する予定であったが、ライダーを用いた同化までは実現できなかった。これは、2.2.1.3 章の考察でも述べているが、ライダー観測が捉えるエアロゾルが空間的に局所的すぎるため、「ひまわり」などの受動型センサーが捉えるエアロゾルとは異なる場合があるため、双方を統合したデータの有効性に関する検討が十分できなかったことが主な要因である。この間

題に関しては今後も検討を重ね、様々な観測データを用いたデータ融合の際に発生する重要な問題として捉え、将来的にはライダー同化も同時に実施していきたい。

また、既に NICAM-Chem に搭載されていた LETKF を用いて、2017 年 12 月に JAXA から打ち上げられた衛星である GCOM-C/SGLI から得られた AOT を同化した結果、モデルのエアロゾル再現性が確かに向上することがわかった。このことは、NICAM-Chem/LETKF が新しい衛星データにも適用可能であることを示し、今後増加する衛星データを利用した同化研究の実現可能性を示している。ただ、2次元量である AOT の同化だけでは、時空間分布の変動が激しいエアロゾルを高精度に捉えることは難しいため、今後は 3次元量であるエアロゾル消散係数（エアロゾルの光学的な 3次元情報）を用いた同化を進めると同時に、同化なしのモデルの改良も継続する予定である。

## 2.1.3 大気汚染予測システムへの発展

### 2.1.3.1 NIES 大気汚染予測システム VENUS と NICAM-Chem の結合

#### 2.1.3.1.1 目的と経緯

NIES で運用している領域規模 WRF-CMAQ モデルを利用した大気汚染予測システム VENUS では、沖縄を除いた日本領域を 5 km の高解像度で大気汚染物質をシミュレーションしている。領域規模モデルを実行するには、モデルが計算しない領域との境界部分において、外部境界から流入してくる大気汚染物質分布（境界データ、あるいは境界条件）を事前に準備しておく必要がある。現状では、気候モデル MIROC<sup>28,29)</sup>に結合した化学輸送モデル CHASER<sup>15)</sup>でシミュレーションされた 2000 年代の平均気候場を、WRF-CMAQ の境界条件（BCON: Boundary CONdition）として利用している。

大気寿命が非常に短い大気汚染物質に関しては BCON の影響が大きくないと考えられるが、大気寿命がそれほど短くない微量気体やその前駆物質は半球規模で輸送拡散されるため、BCON の再現性が重要となってくる。また、現在の BCON も NIES で随時計算できれば、より現実的な計算結果が反映されることになるため、メリットが大きい。そこで、本研究でシミュレーションしている NICAM-Chem の結果を BCON で利用することで、対象領域のエアロゾル及びオゾンの再現性がどの程度影響されるかを調べ、現業の VENUS の改善に向けた方策を得ることを目指した。つまり、NICAM-Chem による全球大気汚染予測を、領域大気汚染予測システム VENUS に反映させることで、VENUS の予測精度向上が期待される。

#### 2.1.3.1.2 方法

現行の VENUS で利用している力学モデル WRF<sup>58)</sup>は version 4.3.3 を用いており、NICAM と同様に大気場を計算できる気象モデルである。NICAM との大きな違いは対象とする領域の範囲であり、WRF は特定領域を切り出して計算する設計がされている。気象場の計算ではナッジング手法を取り入れており、全球 0.25 度格子で計算された NCEP-FNL の気象場（風、温度、湿度）を 6 時間ごとにナッジングしている。本研究の計算は異なる大きさの領域を 3 つ設定して、それぞれを組み合わせた 3 段階ネスティングを採用している。一番大きな領域（Domain 1）は東アジア全体を解像度 45 km で網羅しており（図 14a）、次に小さい領域（Domain 2）は日本全体を解像度 15 km で網羅しており（図 14b）、中心領域（Domain 3）は日本の沖縄を除いた日本領域を解像度 5 km で網羅した（図 14c）。

WRF に結合した化学モデル CMAQ<sup>59)</sup>は version 5.3.2<sup>60)</sup>を用いた。CMAQ は、米国 EPA で開発されたコミュニティモデル（<https://www.epa.gov/cmaq>）であり、世界中に多くのユーザーがいる。CMAQ は、NICAM-Chem に搭載された SPRINTARS と CHASER を合わせたモジュールに対応しており、対流圏エアロゾルや微量気体の対流圏での物質循環を計算することができる。利用するオプションにもよるが、CMAQ で取り扱っている化学種は SPRINTARS や CHASER よりも多く、より複雑である。エアロゾルに関しては、NICAM に搭載された SPRINTARS が質量のみを予測しているのに対して、CMAQ では質量と数濃度を予測し、エアロゾル微物理過程をより詳細に計算している。ただし、このバージョンの CMAQ では砂漠での風の巻き上げによって大気中に放出される土壌粒子が考慮されていないため、黄砂は計算できない。そのため、CMAQ で計算される PM<sub>2.5</sub> 濃度には微小サイズの黄砂が含まれないことにも注意する。以上の違いは、SPRINTARS が全球気候モデルのためのモジュールとして開発されたのに対して、CMAQ は領域規模の大気質モ

デルのモジュールとして開発されたため、設計思想が異なっていることに起因している。微量気体に関しては、NICAMに搭載されたCHASERでは取り扱っていない硝酸塩生成過程や複雑なエアロゾル表面での不均一反応などの化学反応にも違いがある。CHASERも全球気候モデルのためのモジュールとして開発されてきた経緯があり、CMAQとは基本的な設計は同じであるが、細かい部分で異なっている。CMAQで対流圏での物質循環で考慮すべき移流、鉛直拡散、湿性沈着、乾性沈着、人為起源・バイオマス燃焼起源の放出過程は、SPRINTARS及びCHASERとほぼ同じ過程を考慮している。ただし、人為起源・バイオマス燃焼起源の放出過程は、J-STREAM<sup>6)</sup>を利用している。

BCONとしてNICAM-ChemあるいはMIROC-CHASERが必要となるのは図14(a)で示された色付きの領域と白い領域の境界部分である。2.1.1章で述べたように、NICAM-Chemの解像度は56kmである。一方、MIROC-CHASERの解像度は300km程度であり、NICAM-Chemよりもかなり粗い。本研究ではテスト計算を重ねて、NICAM-Chemの対象年のシミュレーション結果ではなくて、2015-2018年の4年間の平均場(月ごとの年平均値)をBCONとして与えることとした。WRF/CMAQの対象年は2018年の1年間とした。モデル検証は地表面PM<sub>2.5</sub>濃度と地表面オゾン濃度とし、検証のためにAEROSによる地上観測データを利用した。

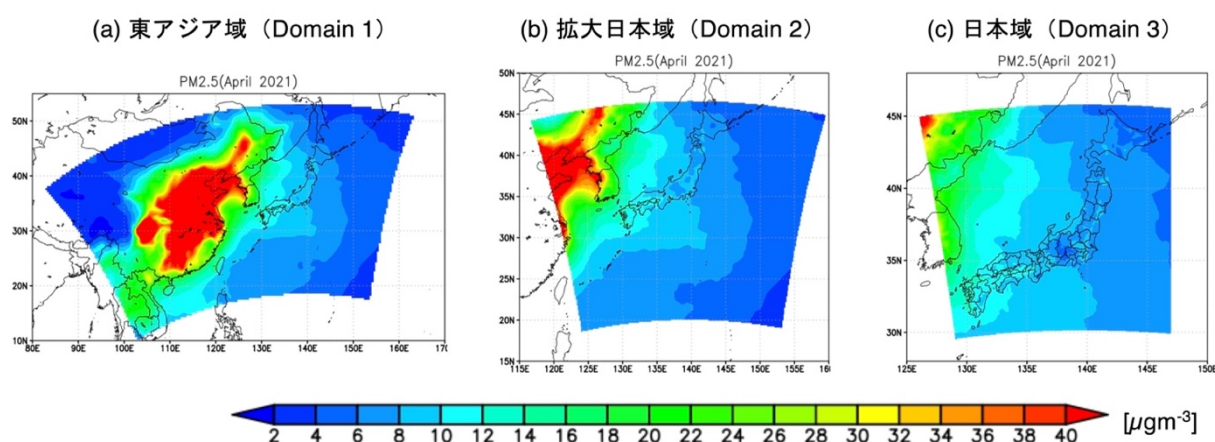


図14 WRF-CMAQの計算領域 (a. 東アジア域、b. 日本域、c. 拡大日本域)。2021年4月におけるPM<sub>2.5</sub>濃度を示す。

### 2.1.3.1.3 結果と考察

日本付近での地表面PM<sub>2.5</sub>濃度の月平均分布図を確認したところ、BCONをMIROC-CHASERとNICAM-Chemに設定してシミュレーションした地表面PM<sub>2.5</sub>濃度の差はあまりなかった。これは、BCONの境界領域が日本から離れているため、地表面PM<sub>2.5</sub>濃度の平均的な場としてはBCONの影響が小さいことを示している。そこで、越境汚染が激しい日時におけるBCONの違いによる地表面PM<sub>2.5</sub>濃度のシミュレーション差を見るために、1例として2018年4月23日の日本付近に注目した(図15)。その結果、高濃度領域のプルームの広がりには大きな差はなかったが、濃度が60µg/m<sup>3</sup>以上の非常に激しい高濃度イベントに対しては、BCONの差で最大10µg/m<sup>3</sup>程度の差が生じることがわかった。地表面PM<sub>2.5</sub>濃度の予測は、高濃度時にどの程度精度良く再現できるかが非常に重要であるため、越境汚染が激しい日時には、BCONの差によって日本付近での濃度差が顕著になることは重要な知見である。

図16には、日本の都市部(東京・大阪・福岡)での地表面PM<sub>2.5</sub>濃度の月平均値を示している。この結果から、大陸に最も近く越境汚染の影響が大きい福岡では、BCONの違いによる影響が強く出ており、BCONにNICAM-Chemを用いた方が地表面PM<sub>2.5</sub>濃度は大きくなる傾向があった。これは主にNICAM-ChemとMIROC-CHASERとで用いた排出イベントの違であると推測される。全体的にはNICAM-ChemをBCONに利用することで全ての事例で結果が改善されることはなかった。また4月におけるWRF-CMAQの過小評価は黄砂が考慮されていないことが一因と考えられる。

次に、日本付近での地表面オゾン濃度を確認したところ、PM<sub>2.5</sub>の結果と同様に月平均分布図では大差がなかったため、越境汚染が激しい日時に着目した。図17には春と秋における大阪と福岡での地表面オゾン濃度の時系列変化を示す。PM<sub>2.5</sub>で見たように、BCONでNICAM-Chemの結果を使うと、MIROC-CHASERの結果を使うよりも高濃度となっ

た。高濃度になることで WRF-CMAQ の過小評価が改善された事例が図 17 (b) の秋の大阪の例であり、改悪されてしまった事例が図 17 (a) の春の大阪の例である。図 17 (c) の秋の福岡の事例を見ると、1日ごとで観測に近い結果が異なった。

図 18 には、日本の都市部（東京・大阪・福岡）での地表面オゾン濃度の月平均値を示している。この結果から、7月以外（1月、4月、10月）の結果は NICAM-Chem を BCON で使うことで、モデル値が大きくなった。特に4月は、NICAM-Chem を BCON として利用することで、観測に比べてかなり過大評価となってしまった。この原因は NICAM-Chem のオゾン再現性が過大評価であったことから、その影響を強く受けてしまった。7月は、NICAM-Chem の結果を BCON で使った方がモデル値は小さく、観測により近かった。

(a) WRF-CMAQ w MIROC (b) WRF-CMAQ w NICAM (c) 差分 (a)-(b)

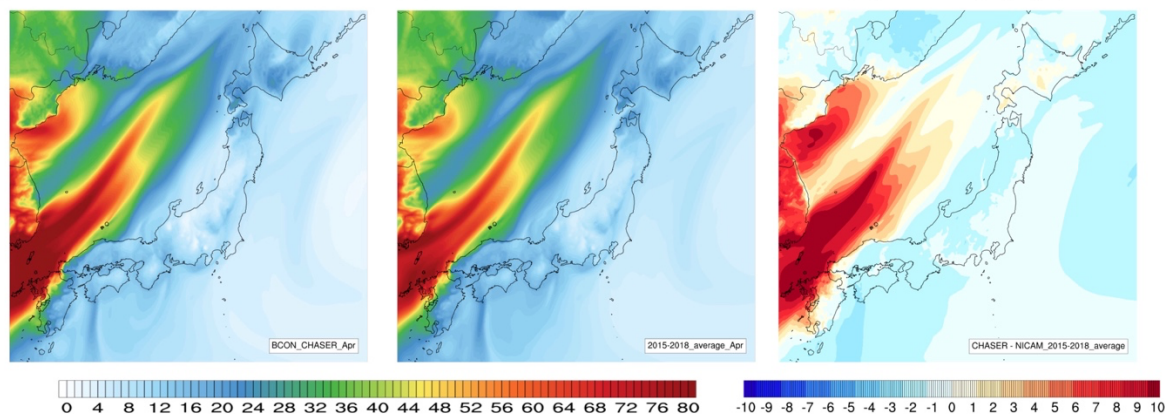


図 15 2018年4月23日におけるWRF-CMAQで計算された地表面PM<sub>2.5</sub>濃度（a. BCONとしてMIROC-CHASERの結果を用いたWRF-CMAQ、b. BCONとしてNICAM-Chemの結果を用いたWRF-CMAQ、c. aとbの差分）。単位は $\mu\text{gm}^{-3}$ 。

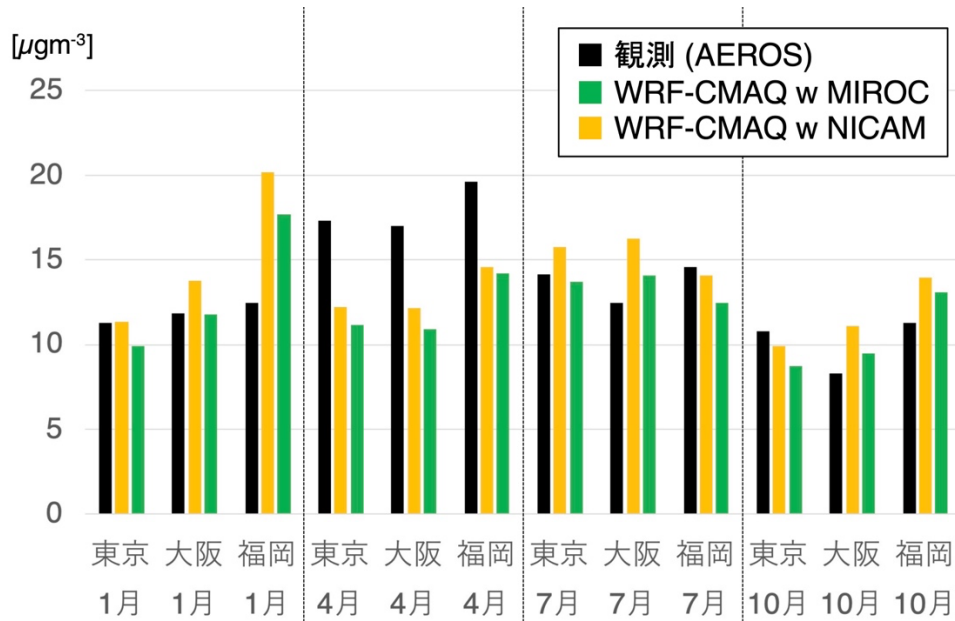


図 16 1、4、7、10 月における東京、大阪、福岡での地表面 PM<sub>2.5</sub> 濃度（黒が AEROS による地上観測結果、緑が BCON として MIROC-CHASER の結果を用いた WRF-CMAQ のシミュレーション結果、黄色が BCON として NICAM-Chem の結果を用いた WRF-CMAQ のシミュレーション結果）。単位は  $\mu\text{gm}^{-3}$ 。

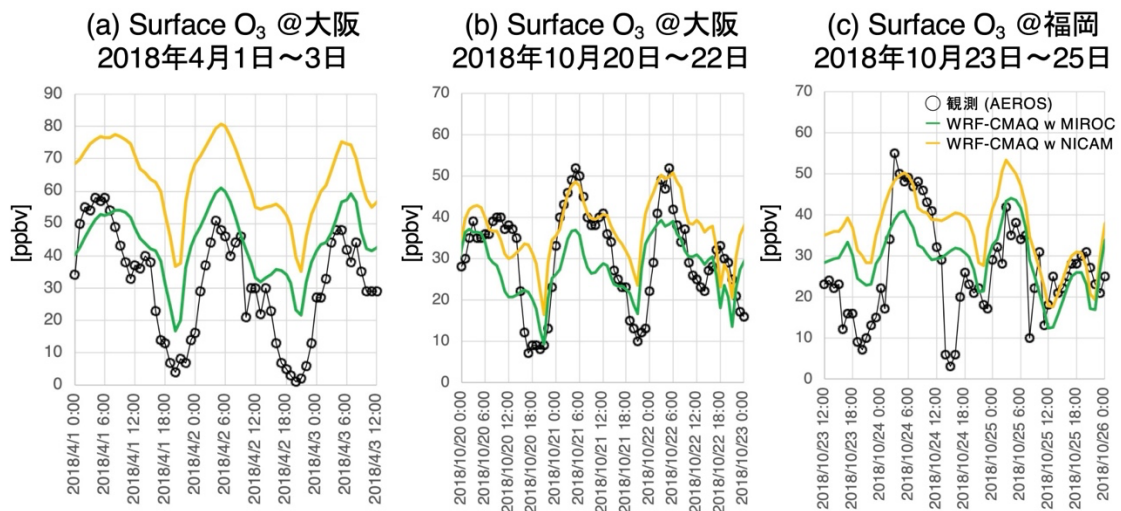


図 17 WRF-CMAQ で計算された地表面オゾン濃度の時系列変化（a. 2018 年 4 月 1 日から 4 月 3 日までの大阪、b. 2018 年 10 月 20 日から 10 月 22 日までの大阪、c. 2018 年 10 月 23 日から 10 月 25 日までの福岡）。黒が AEROS による地上観測結果、緑が BCON として MIROC-CHASER の結果を用いた WRF-CMAQ のシミュレーション結果、黄色が BCON として NICAM-Chem の結果を用いた WRF-CMAQ のシミュレーション結果。単位は ppbv。

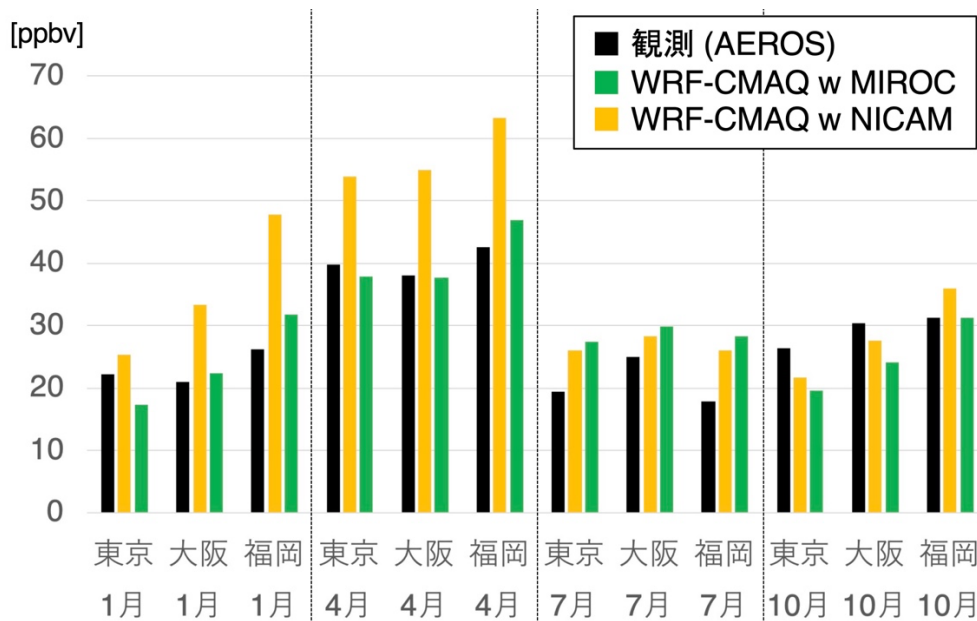


図 18 1、4、7、10 月における東京、大阪、福岡での地表面オゾン濃度（黒が AEROS による地上観測結果、緑が BCON として MIROC-CHASER の結果を用いた WRF-CMAQ のシミュレーション結果、黄色が BCON として NICAM-Chem の結果を用いた WRF-CMAQ のシミュレーション結果。単位は ppbv。

#### 2.1.3.1.4 まとめ

以上の結果から、BCON の違いは、深刻な越境汚染の事例に対しては大きな影響があることがわかった。しかし、BCON の更新だけでは VENUS で使われている WRF-CMAQ による日本付近での PM<sub>2.5</sub> やオゾン濃度シミュレーションが改善しなかった。同時に、NICAM-Chem の結果を用いることで改悪されることもなかった。今後、NICAM-Chem の高解像度化や NICAM-Chem/2DVar の利用によって、BCON が改善されることが確実に見込まれるため、今後の発展性を鑑みて、NICAM-Chem の結果を WRF-CMAQ の BCON として利用していきたい。

## 2.1.3.2 NICAM-Chem を用いた全球大気汚染物質のリアルタイム予測に向けた課題抽出

### 2.1.3.2.1 目的と経緯

NIES で運用している VENUS は、米国で開発された WRF-CMAQ を用いたシミュレーションを実施しており、WRF-CMAQ が継続的に高精度化されているため、WRF-CMAQ を随時最新版に更新することで、日本付近の大気汚染物質予測の改良を実現できる。しかし、更なる発展のために、いくつかの改善すべき課題を認識している。1 つは、衛星等の観測データ情報を予測計算に取り入れていないことである。そこで本研究では、予測計算にも耐えられる、計算コストが軽いデータ同化手法 (2DVar) を用いて、衛星地上観測データを考慮した大気汚染物質予測を進めた。特に衛星事業は発展する見込みが大きく、今後も衛星データの利用は欠かせない。また別の改善すべき課題としては、大気汚染が領域規模だけではなくて、半球から全球規模で輸送されていることから、全球規模の大気汚染物質予測システムが必要となることである。そこで本研究では、全球モデルである NICAM-Chem を用いた大気汚染物質シミュレーションを発展させることを提案した。

以上のような経緯から、本研究ではサブテーマ 1 と 2 で構築された全体のシステムを活用することで、将来的には NICAM-Chem を用いた全球大気汚染物質のリアルタイム予測を実施することを目的とした。このため、リアルタイム予測に向けた課題を抽出することを目標とした。例えば、大気汚染物質に関しては初期値高精度化によって予測精度がどのくらい維持されるか (リードタイム) という問題把握や、NIES で利用可能な計算機システムの中でどのような計算設定が実現可能であるかを把握する必要がある。本章では以上のような検討を進めた。

### 2.1.3.2.2 方法

本研究で新たに発展させた NICAM-Chem/2DVar 同化システムを用いて、大気汚染物質の中でもエアロゾルに関して、リードタイムがどの程度であるかを調べるために、シミュレーション初期値をエアロゾル同化によって計算すると同時に、エアロゾルデータ同化なしの計算も実施し、エアロゾル同化の影響が時空間でどのくらい継続するかを調べた。用いた同化データは、本課題で作成した 6 時間 1 度グリッドデータである。なお、全ての実験で気象場のナッジングを実施したため、エアロゾル同化による気象場への影響は無視する。比較のために示した初期値も同化結果を使っていないエアロゾル同化なしのことを、ここでは「フリーラン」と呼ぶ。

また、同化に必要な衛星データの取得時間、同化システムの計算速度、NIES のネットワーク速度等の実行環境についても調査した。また、NICAM-Chem を NIES スパコンのベクトル機の上で計算するための必要な前処理・後処理の自動化システムの設計も実施した。

### 2.1.3.2.3 結果と考察

エアロゾル予測モデルは、多くの場合、モデルを評価する際には 1 日後の予測計算結果を使用している<sup>62)</sup>。本研究では、シミュレーション結果 (1 日、2 日、3 日予報) と同化結果 (以下「解析値」という) の AOT の差を評価することで、予測精度がどの程度維持されるかを検討した。図 19 は、2019 年 1 月の X 日 (X=1、2、3) 予測と NICAM-Chem/2DVar の AOT の差を示している。その結果、予想通り、予報日数が長いほど AOT 解析値との差が大きくなり、フリーランの結果が最も大きな AOT 差となった。3 日間の予報結果はフリーランとほぼ同じであった。図 20 は、東アジアにおける AOT の時系列変化を見ることで、予測日数の違いが AOT 結果に及ぼす影響に注目した。X-day 予報の結果は、フリーランと解析値の間に存在している。例えば、1 月 25 日から 1 月 30 日にかけて中国で大規模なダストが発生し、1 月 28 日から 1 月 30 日までの 3 日間の予報結果も AOT 同化の影響を大きく受けた。この結果から、対象期間やエアロゾルの種類によって予測精度が異なることを示している。2019 年 1 月では 3 日間の予測結果はフリーランに近いとはいえ、日時によっては差が大きかったため、結果としてエアロゾル同化によって初期値を高精度化した影響は数日間維持されるといえる。

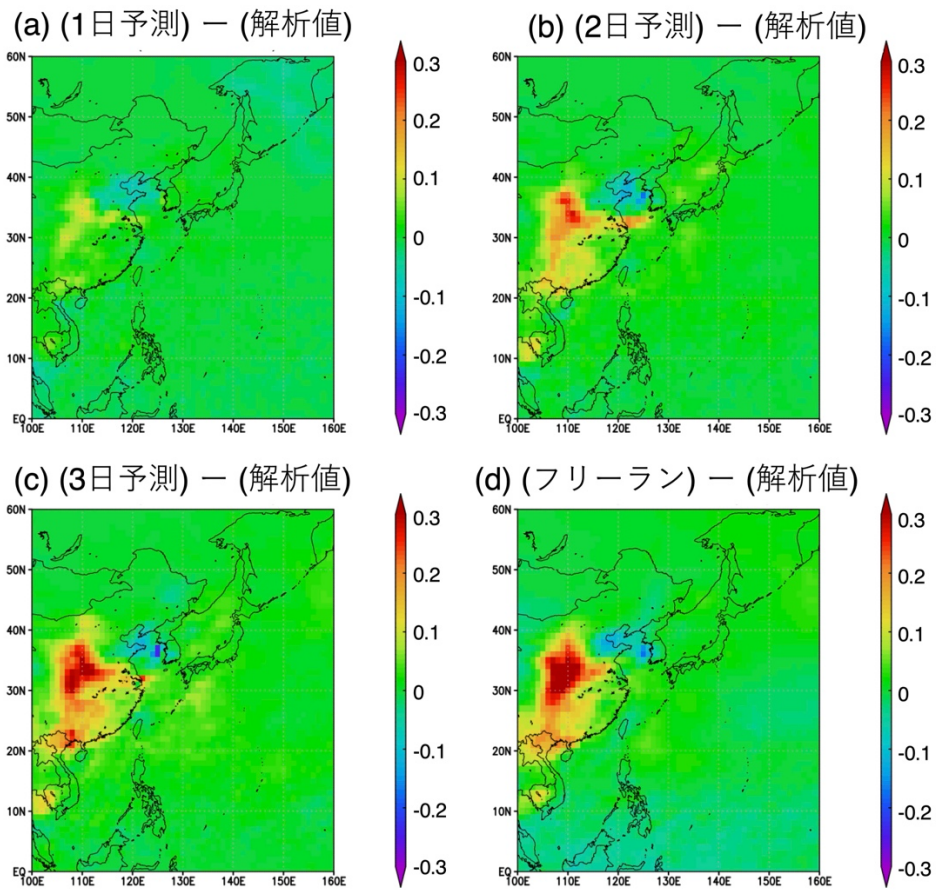


図 19 (a, b, c) X日(X=1, 2, 3)の予測と分析、(d) 2019年1月のフリーランと解析値の月平均AOTの差。この元データは Goto et al. (2024)<sup>48</sup>からの引用である。

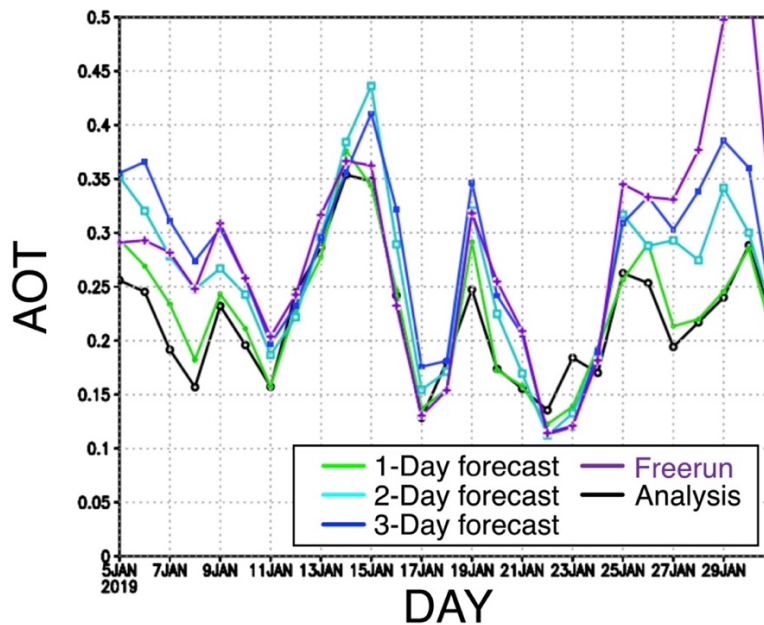


図 20 2019年1月の東アジア(東経100度~130度、北緯25度~45度)のNICAMによるAOT領域平均の時間変化。この元データは Goto et al. (2024)<sup>48</sup>からの引用である。

次に、衛星データの取得タイミングに関して考察する。本研究で利用したエアロゾルに関する衛星データは3種類あり、2つ (MODIS 及び CALIOP) は米国 NASA から配信されているものであり、残り1つ (ひまわり AHI) は JAXA から配信されている。MODIS もひまわりも他の研究機関でエアロゾル予測計算に利用されているものでもあり、準リアルタイムでデータを取得することが可能である。NIES のネットワーク速度もここ数年で劇的に改善され、データ転送速度は最大 100 MB/s 程度出ることから、1時間で 360 GB 程度のデータをダウンロードすることが理論上可能である。従って、大量の衛星データを取得するには問題がないことがわかった。しかし、このデータに対してサブテーマ2で開発された QC を適用し、NICAM 入力値へ自動変換させる過程にやや時間がかかることがわかり、リアルタイム予測への課題として残された。また、本研究で利用した NASA の MODIS 及び CALIOP は、運用年数が 10 年以上となり、退役することが予定されていることから、NASA の VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) や ESA/JAXA の EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) 等の新しい衛星データを取り入れることが次の課題となる。

計算速度に関しては、NIES スパコンで NICAM-Chem/2DVar を全球 56 km 解像度に設定して 160 並列を用いたシミュレーションを行うと、1日積分が 12 分程度で実施可能である。2DVar を稼働させることによって全体の速度は 3% 以下の増加となる。一方、LETKF によるエアロゾル同化で 20 アンサンブルを実施すると、同解像度・同並列化では約 8 倍の時間が必要となる。つまり、2DVar は LETKF よりもかなり高速で、2DVar の計算コストが非常に軽いことがわかる。NIES スパコンの利用以外の選択肢としては、外部機関のスパコンを利用する手段もある。例えば、東京大学情報基盤センターの Wisteria/BDEC-01 (<https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/wisteria/service/>) は、NIES スパコンよりも多くの並列化計算することが可能である。しかし、多くのユーザーが利用しているため、計算のためのスクリプト開始から、実際に計算されるまでの待ち時間が最大 1 日以上かかることが多く、繁忙期には 3 日以上待つ場合がある。このように、外部機関のスパコンは待ち時間が長いことが最大の難点であり、さらにメイン運用サーバーである NIES スパコンに計算結果を転送させる必要がある。以上のことから、並列化数をあまり大きくすることはできないが、NIES スパコンを利用した予測システムを構築するのが最善と判断できる。

#### 2.1.3.2.4 まとめ

以上の考察から、NIES スパコンでの準リアルタイム予測は可能であるが、現在利用可能な最大並列化を実施しても、全球 56 km 解像度でしか実現できないことがわかった。ただ、仮に 2560 並列計算が可能となった場合には、さらに解像度を上げることができ、気象場の再現性が向上し、大気汚染物質のシミュレーション精度も向上する見込みが高い。また、2.1.2 章で取り上げた NICAM-Chem/2DVar のシミュレーション精度から考えると、本研究で予測精度は向上したが、それでも社会的ニーズを十分に満たすレベルの精度とはいえないと考えている。さらに、同化の予測への影響は数日であることがわかり、同化なしのモデル自体を継続的に精緻化すべきであることも明らかとなった。したがって、引き続きモデル精緻化を進めると共に、観測データを収集し、観測情報を最大限利用することで、近い将来の目的である準リアルタイム予測を実現したい。

## 2.2 サブテーマ2「同化・検証で用いる高時空間分解能観測データ整備」

### 2.2.1 複数の衛星を用いた統合データ（高時空間分解能観測データ）の構築

#### 2.2.1.1 目的と経緯

本研究で推進する同化手法を用いた大気汚染予測の高精度化を実現するために、サブテーマ2では複数の人工衛星と地上観測から得られるデータを統合した観測データセットを構築する。特に本研究では、太陽光等を光源とした受動型センサーによる観測データだけではなく、レーザーを光源とした能動型センサー「ライダー」による観測データも上記の統合観測データセットに取り込む点が新機軸となる。受動型センサーの観測データを用いた大気汚染物質の推定では、その高度分布の抽出と共に曇天や夜間のデータを用いた推定は難しい。ライダーは、高度分布を高い分解能（数十 m 程度）で、曇天（ただし、ライダーから雲層まで）や夜間においても計測（推定）できるため、受動型センサーによる観測データとの複合利用によって、多くの観測情報が得られる見込みがある。本研究では、運用中の衛星ライダー CALIOP の観測データと共に、地上でのライダー観測データも統合観測データセットへ取り込む。ここでは、NIES が中心となって東アジアに展開している地上観測ネットワーク AD-Net<sup>54)</sup>を用いる。また、同様に受動型センサーを用いた地上ネットワーク観測 AERONET<sup>49)</sup>と SKYNET<sup>57)</sup>の観測データも取り込む。

#### 2.2.1.2 方法と結果

##### (1) 観測データ（元データ）

表3に収集した観測データの概要を示す。運用中かつ2018年以降の観測データを対象とした。Himawari衛星には可視赤外放射計 AHI (Advanced Himawari Imager)、Aqua衛星（米国）には中分解能スペクトル放射計 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) が搭載されている。その観測データから、エアロゾル光学的厚さ (AOT) やオングストローム指数といったエアロゾル気柱積算量が推定され、その全球データが公開されている。公開データの時空間分解能やデータの品質を吟味し、本研究では AHI の Level-3 データと MODIS の Level-2 データを利用した。また、微量気体成分として、Sentinel-5 Precursor衛星（欧州）に搭載された広帯域イメージングスペクトル放射計 TROPOMI の Level-2 データである NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> の気柱積算量の全球データを用いた。

CALIPSO衛星搭載ライダーCALIOPからは校正された信号値（減衰付き後方散乱係数）である Level-1 データと雲・エアロゾル・大気分子の識別フラグ VFM (Vertical Feature Mask) を内包した Level-2 データを用いた。これらの観測データに NIES・気象研・九州大学の共同研究で開発されたエアロゾル推定アルゴリズム<sup>63,64)</sup>を適用して、エアロゾル消散係数の高度分布を推定し (CALIOP 単体プロダクト)、これを統合観測データセットに導入した。また、CALIOP と MODIS の放射輝度データ (Level 1 データ) を複合利用するアルゴリズムも開発しており<sup>65)</sup>、ここから推定されたエアロゾル消散係数の高度分布データ (CALIOP 複合プロダクト) も統合観測データセットに導入した。単体プロダクトでは、夜間や曇天に対する推定データが存在する。一方、複合プロダクトでは MODIS データも用いることから、夜間・曇天における推定データは無いが、その推定精度（特に AOT）は単体プロダクトに比べ高い。

地上観測データでは、標準プロダクトとして公開されている AD-Net のエアロゾル消散係数データ、AERONET および SKYNET の AOT およびオングストローム指数データを本研究では用いた。

表3 本研究で用いた観測データ

センサー (衛星 or network)	データ範囲	本研究で利用する主なパラメタ	データ
AHI (HIMAWARI)	60°S - 60°N; 80°E - 160°W 静止衛星	AOT, オングストローム指数 品質フラグ, 推定誤差	Aerosol L3 Version031
MODIS (Aqua)	全球 極軌道衛星	AOT 品質フラグ, 推定誤差	Aerosol Level2 Collection6.1
CALIOP (CALIPSO)	全球 極軌道衛星	減衰付き後方散乱係数 Vertical Feature Mask (VFM)	Level 1B version4 Level 2 version 4
TROPOMI (Sentinel-5 Precursor)	全球 極軌道衛星	NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> の気柱積算量 品質フラグ, 推定誤差	Level 2 Version 01.02.00- 01.04.00 (OFFL)
Sun-photometer (AERONET)	全球 地上ネットワーク	AOT, オングストローム指数 推定誤差	V3 Data Product Level 2.0 ( <a href="https://aeronet.gsfc.nasa.gov/">https://aeronet.gsfc.nasa.gov/</a> )
Skyradiometer (SKYNET)	主にアジア、欧州 地上ネットワーク	AOT, オングストローム指数 推定誤差	Level 2 ( <a href="https://www.skynet-isdsc.org/">https://www.skynet-isdsc.org/</a> )
Lidar (AD-Net)	東アジア域 地上ネットワーク	エアロゾル消散係数 (球形,ダスト) 推定誤差	- ( <a href="https://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net/">https://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net/</a> )

(2) 衛星データを用いた統合観測データセットの構築の流れ

図21に解析の流れを示す。(2)に示した観測データを元データ(L0)として、時空間に対してグリッド化したデータセット(グリッドデータ、L1)を作成した。その後に、L1データを統合することでL2データを作成した。同化を含むモデル研究への利用を見据え、本研究では、6時間1度毎と3時間0.5度毎の2つの時空間分解能での統合データを作成した。

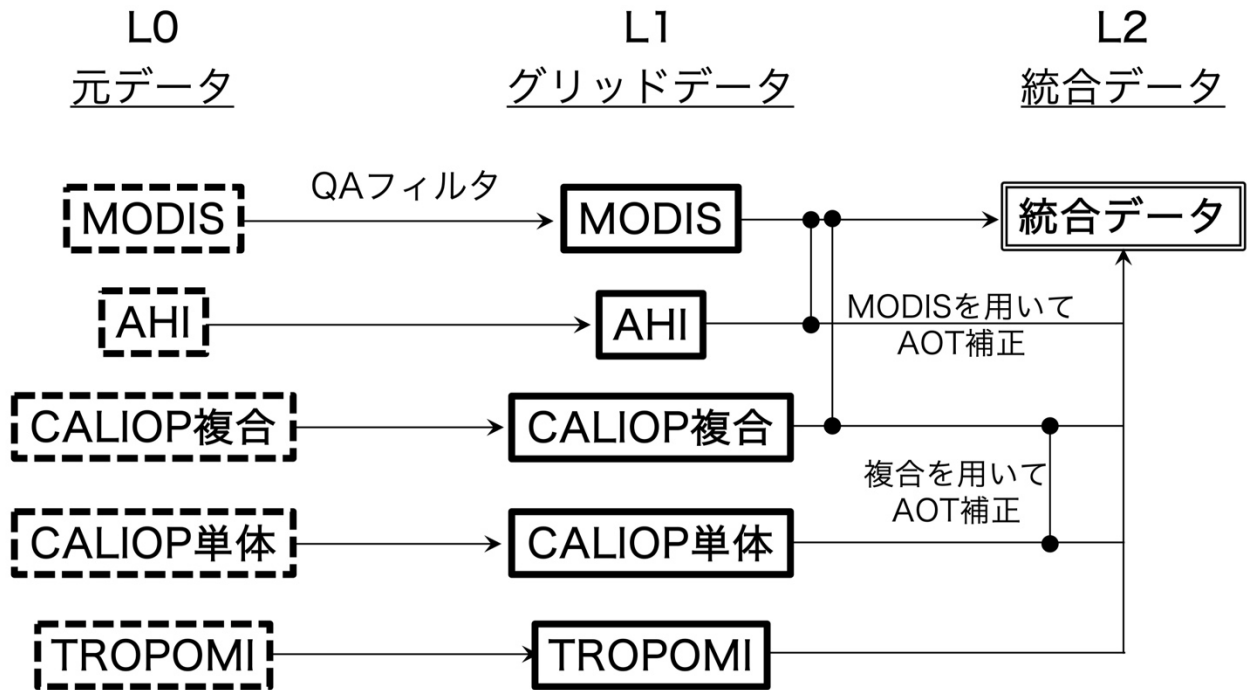


図21 衛星データを用いた統合データ作成の流れ

### (3) 衛星データを用いた L1 データの作成

まず、観測データに内包されているデータ品質フラグを用いて異常値や低品質データをふるい落とし (QA フィルタ)。例えば、AHI データでは、データ利用可能性、雲フラグ、各パラメタの推定精度など 10 数項目にわたるフラグが用意されている。データの吟味、文献調査、該当データを利用している研究者やアルゴリズム開発者からの聞き取り調査も行い、データ品質を高く保ちつつ、データを棄却しすぎないように、QA フィルタの設定を行った。図 22 に QA フィルタの実行結果の例を示したが、フィルタにより推定精度の低いデータや雲の影響を受けたデータが除去されていることがわかる。一方で、AOT が比較的高く (AOT が 0.4 以上)、かつ、周囲のグリッドから孤立したデータ点が今なお残っている。これは雲の影響 (雲の縁辺域など) を受けたデータが除去しきれない可能性がある。同化研究へのこれらのデータの悪影響を考慮し、これらの除去を目的として更にフィルターを適用した (後述)。

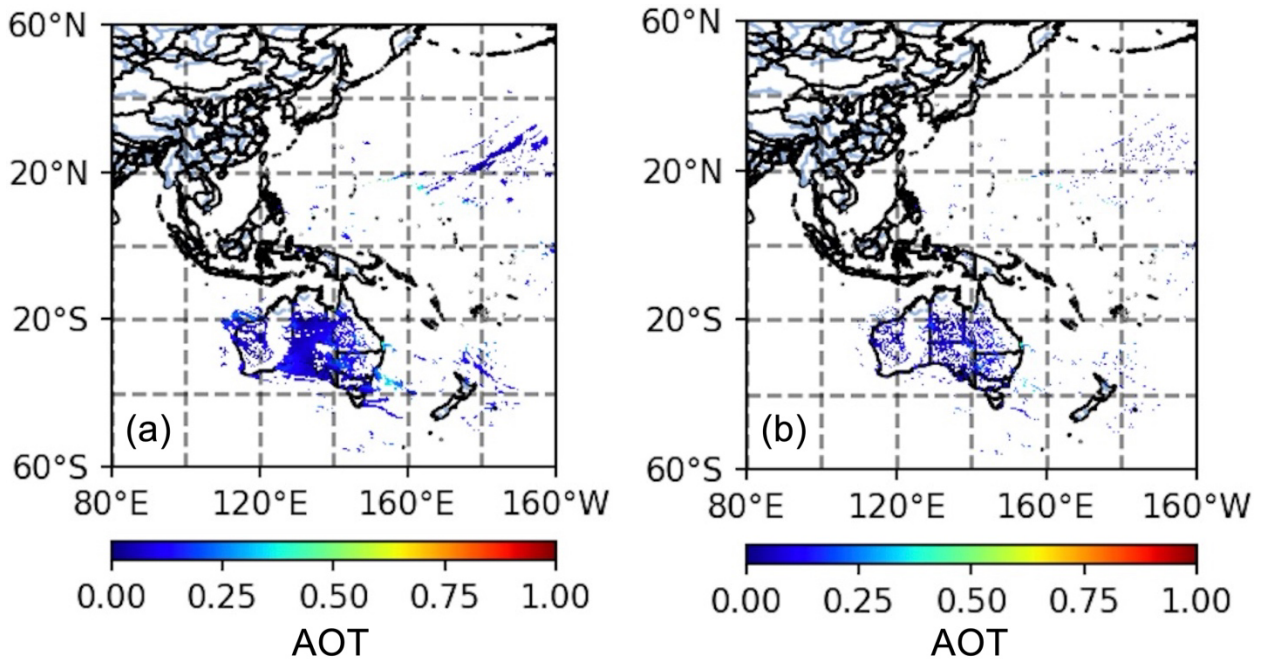


図 22 データ品質フラグを用いた (a) フィルタリング前 (元データ) と (b) フィルター後の AHI/Himawari の AOT データ。ここでは対象が 2019 年 1 月 1 日 0000-0010UTC。

L1 データの作成の前に、QA フィルタを掛けた MODIS データの検証として、AERONET 地上観測データと比較した (図 23)。ここでは、MODIS データの 1 ピクセル (水平 10 km×10 km 格子) に入った観測サイトの同時刻データを用いた。双方はよく整合し (相関係数~0.9)、直線回帰では、2018 年は  $\text{MODIS} = 0.005 + 0.93 \times \text{AERONET}$ 、2019 年は  $\text{MODIS} = 0.008 + 0.91 \times \text{AERONET}$  となった。MODIS は AERONET に比べ過小となるが、これは AOT の波長が異なるため (MODIS は 550 nm、AERONET は 500 nm)、波長補正を行うと双方の整合は更に良くなる。MODIS と AERONET の整合の良さは先行研究でも報告されており<sup>6)</sup>、本研究においても再確認された。複数の衛星データを利用する際に、プロダクト間でバイアスが生じると問題となる。そこで、上記の結果を踏まえ、本研究では MODIS データに他の衛星観測データを合わせることで、プロダクト間バイアスを低減することにした (本節 (5) 衛星間のバイアス補正を参照)。

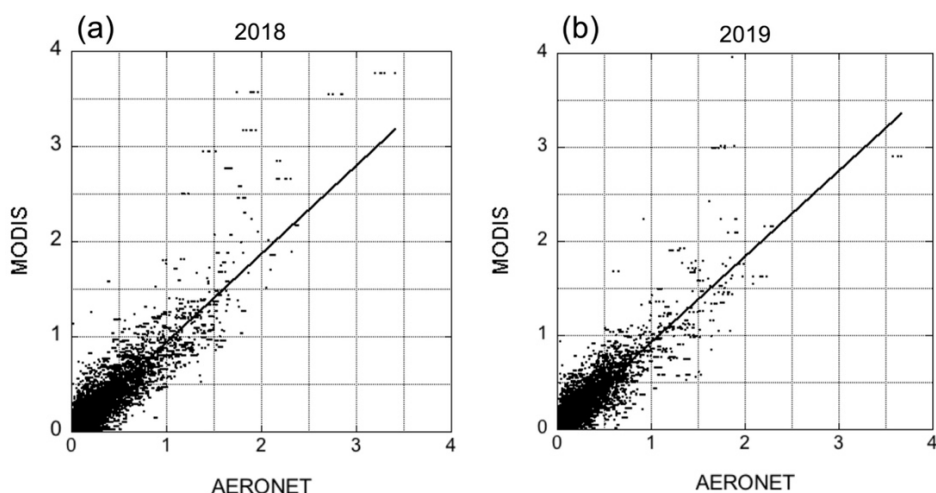
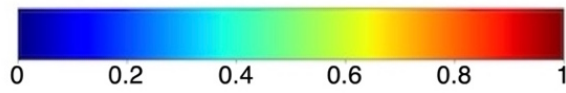
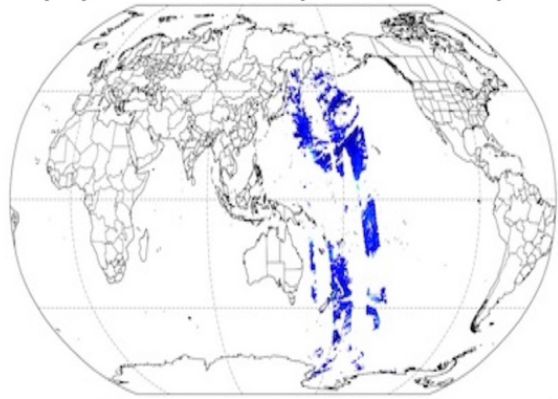


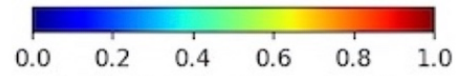
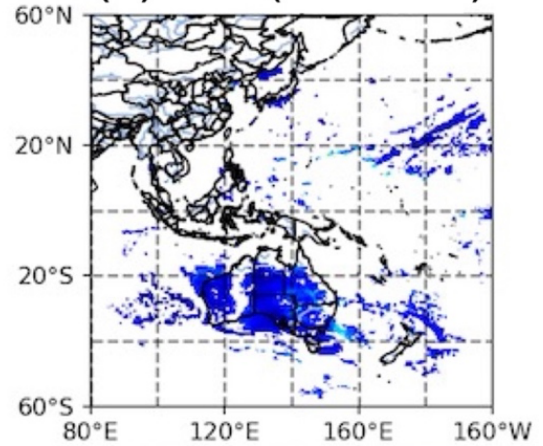
図 23 品質データフラグによりフィルターされた MODIS の AOT（波長 550 nm）と AERONET の AOT（波長 500 nm）の比較。(a) 2018 年の全データを使用、(b) 2019 年の全データを使用。

作成した L1 データの例を図 24 (AHI と MODIS)、図 25 (TROPOMI) そして図 26 (CALIOP) に示す。QA フィルタをかけた L0 データを用いて、規定の時間・空間分解能に対して（平均値ではなく）中央値を算出し、これを各グリッドの推定値として採用した（中央値フィルタ）。これにより、グリッド内での異常値（他ピクセルでの値に比べ異常に大きい、ないし、小さい）の影響を抑制することができる。一方で、図 24 の AHI データに見られるように、AOT が 0.4 以上と比較的高く、かつ、周囲のグリッドから孤立して残っているデータ点が見られる。これは MODIS データにも幾分見られた。そこで AHI および MODIS に対して、別途開発したフィルタを適用することにした（本節 (4) 空間フィルタの適用を参照）。TROPOMI からは微量気体成分の気柱積算量のグリッドデータを作成したが、AHI に見られるような比較的値が高く、周囲のグリッドから孤立したデータ点は、顕著には見られなかった（図 25）。また、CALIOP 単体（および複合）プロダクトの推定では、AOT が高く孤立したデータ点は、顕著には見られなかった（図 26）。これは、AHI 等の受動型センサーに比べてライダーは雲検出の精度が高いといった測器の特性、そして、水平・高度方向のスミージングによってノイズの影響が低減されている解析の特徴が、効果を発揮したと考えられる。また、AOT の全球分布図（図 26 (a) および (d)）に CALIOP データの特性が表れている。例えば、MODIS（や AHI、TROPOMI）では、スキャニングおよびイメージング測定によって、水平方向（特に経度方向）に対して数 1000 km におよぶ広範な範囲を計測できるため、計測した AOT 分布は衛星軌道に沿って帯状になる（図 24）。一方、CALIOP にはスキャニングおよびイメージング測定機能が備わっていないため、測定の水平幅は極めて狭くなる（～70 m 程度）。その結果、衛星軌道に沿った「線」状の AOT 分布になる。このことは、MODIS や AHI に比べると、CALIOP データの空間代表性が乏しいことを示している。この点に関しては、2.2.1.3 章にて考察する。

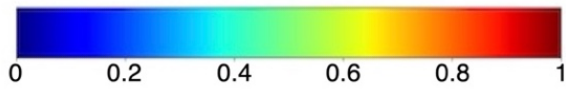
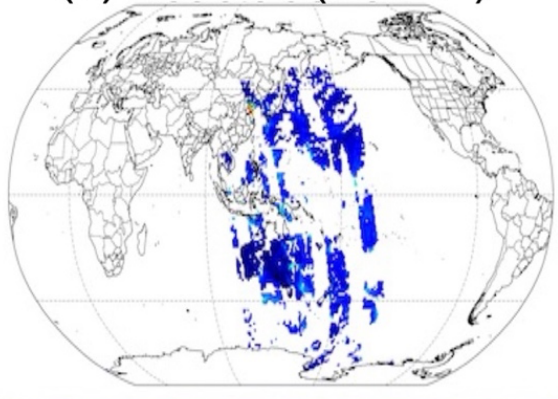
(a) MODIS (3h / 0.5°)



(b) AHI (3h / 0.5°)



(c) MODIS (6h / 1°)



(d) AHI (6h / 1°)

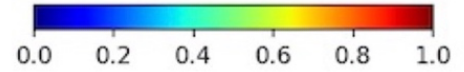
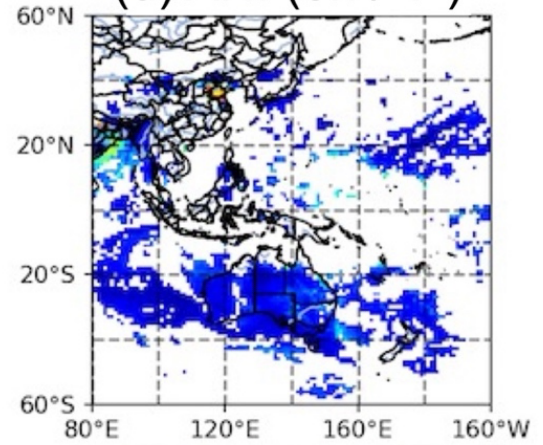


図 24 グリッドデータ化した(a、c)MODISのAOT(550nm)と(b,d)AHIのAOT(500nm)。(a、b)3時間0.5度(c、d)6時間1度グリッド。各々2019年1月1日00-03UTCと00-06UTCのデータを使用した。

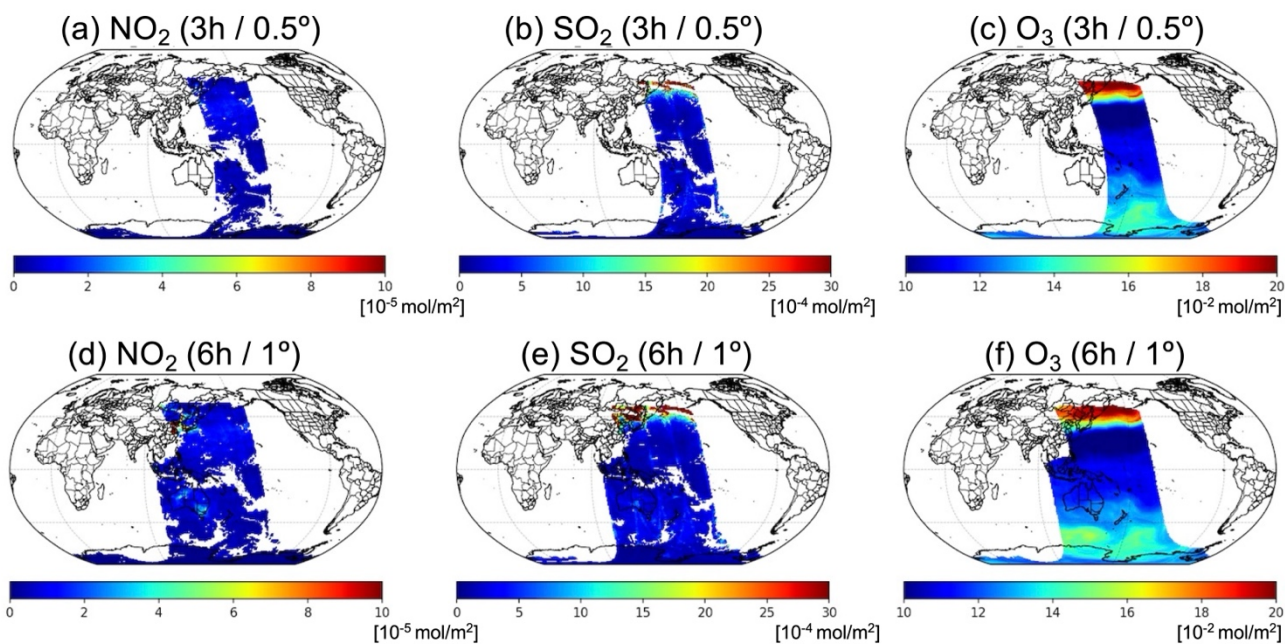


図 25 グリッドデータ化した TROPOMI の(a, d) NO<sub>2</sub>、(b, e) SO<sub>2</sub>、(c, f) O<sub>3</sub>の気柱積算量。(a, b, c) 3 時間 0.5 度 (d, e, f) 6 時間 1 度グリッド。各々2019年 1 月 1 日 00-03UTC と 00-06UTC のデータを使用した。

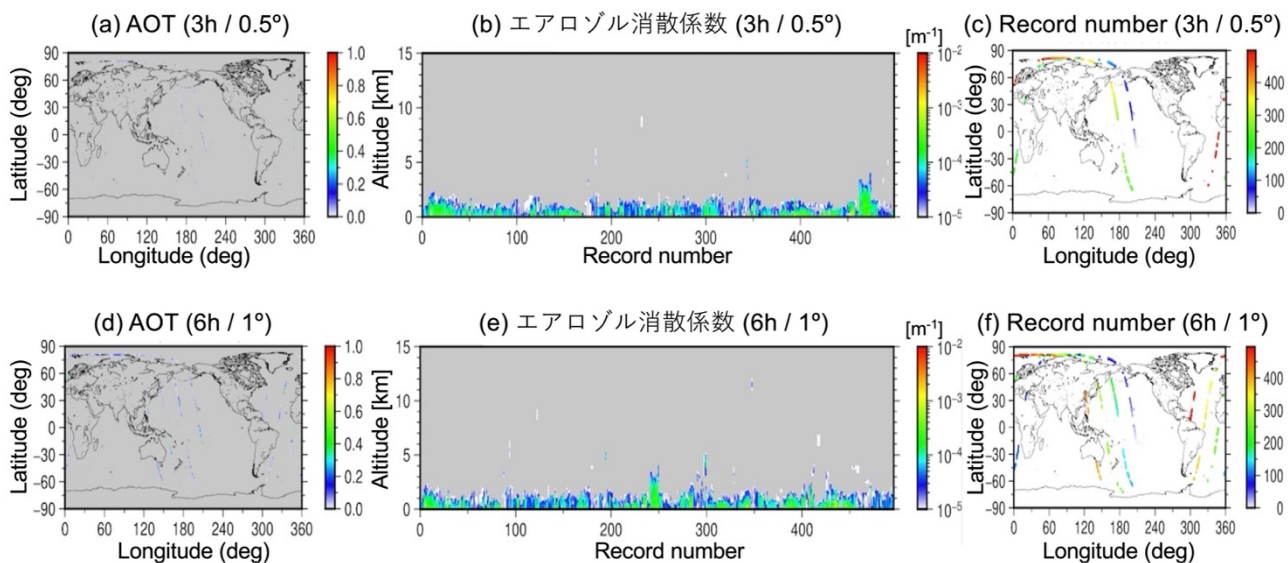


図 26 グリッドデータ化した CALIOP 単体プロダクトの (a, d) AOT と (b, e) エアロゾル消散係数 (波長 532 nm) と (c, f) Record number と位置の関係。(a, b, c) 3 時間 0.5 度と (d, e, f) 6 時間 1 度のグリッドデータ。各々2019年 1 月 1 日 00-03UTC と 00-06UTC のデータを使用した。

#### (4) 空間フィルタの適用

AHI と MODIS の L1 データに適用する数値フィルタを開発した。このフィルタは CALIOP を用いた雲マスク解析用に開発されたフィルタ<sup>6)</sup>をベースに設計した。基本概念は「水平空間で連続していないデータを除去する」ことであり、具体的な設定は以下とした。

- A. 診断対象となるグリッドを中心とした、正方形の診断対象領域 ( $N \times N$  グリッド) を設定する。
- B. AOT が 0 以上となるグリッド数 ( $N_{\alpha}$ ) をカウントする。
- C.  $N_{\alpha}$  が閾値 ( $N_{\alpha, th1}$ ) より小さい場合は、診断対象グリッドのデータは除去する。
- D. ただし、診断対象グリッドの AOT が AOT 閾値 ( $AOT_{th}$ ) より小さく、かつ、 $N_{\alpha}$  が  $N_{\alpha}$  閾値 ( $N_{\alpha, th2}$ ) より大きい場合はその診断対象グリッドを残す。
- E. A から D を全グリッドに対して行う。
- F. E の出力に対して、診断対象グリッドに対して AOT が 0 以上のグリッドが隣接しない場合は、診断対象グリッドを除去する。

D はプルーム等のエアロゾル層の縁辺域を除去しないための条件となる。F は孤立したグリッドデータを除去するための条件となる。用いた閾値等はプロダクトの空間分解能や推定精度等を考慮し、経験的に次のように設定した。

$N=7, N_{\alpha, th1}=35, N_{\alpha, th2}=16, AOT_{th}=0.15$  (AHI)

$N=5, N_{\alpha, th1}=13, N_{\alpha, th2}=9, AOT_{th}=0.15$  (MODIS)

図 27 に上記フィルタの適用例を示す。時空間分解能に関わらず、比較的 AOT の高い孤立したデータ点 (異常値) がフィルタによって適切に除去されている。エアロゾルが存在し ( $AOT > 0$ ) 空間的に連続した領域は (プルーム等)、フィルタによって幾分縮小されてはしまうが、概ね適切に残されている。

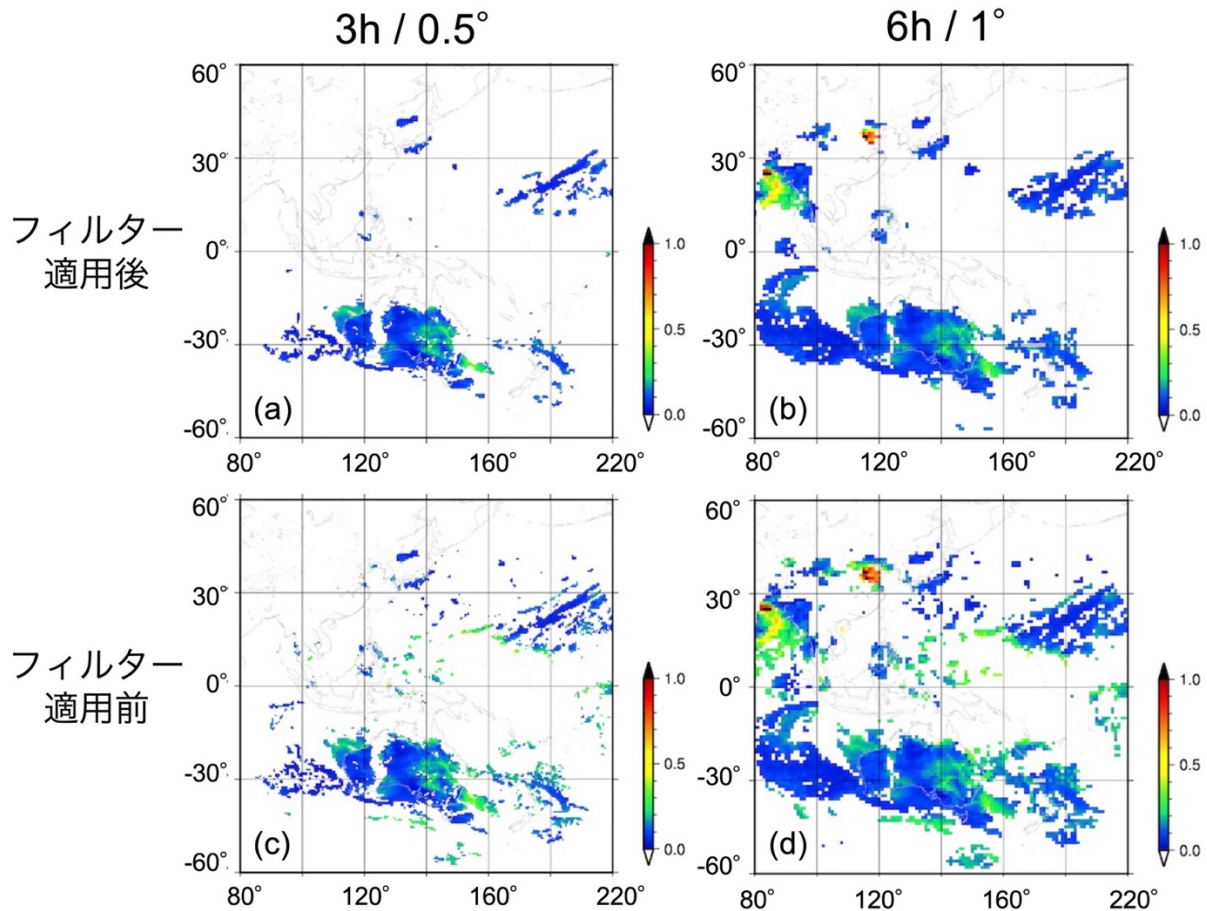


図 27 AHI の L1 データに空間フィルタを適用した AOT の結果。(a、b) 適用後と (c、d) 適用前を示し、(a、c) 3 時間 0.5 度グリッドと (b、d) 6 時間 1 度グリッドの結果である。2019 年 1 月 1 日 00-03UTC と 00-06UTC のデータを使用した。

#### (5) 衛星間のバイアス補正

基準とした MODIS の AOT に対して他の衛星の AOT を整合させるため、回帰直線を 1 ヶ月毎に求め、それを用いてバイアス補正を行なった。以降の解析では、空間フィルタを適用した L1 データを用いた。また、AHI で推定されているオングストローム指数を用いて、AHI の AOT の波長補正を行なったデータを用いた。

MODIS-AHI 間の回帰直線の算出例として 2019 年 1 月の 6 時間 1 度グリッドデータの結果を示す (図 28)。使用した全データ数は約 18,000 点となった (図 28 (a))。ここから頻度分布を求め (図 28 (b))、推定精度の低いデータ (AOT < 0.06) や頻度の低いデータを除去した後に、線形回帰を行なった。線形回帰では、 $y=ax+b$  と  $y=cx$  の 2 パターンを実施した。図 29 に、得られた回帰直線パラメタの 2019 年 1 月から 2021 年 12 月までの時系列を示す。切片 (b) は概ね  $\pm 0.03$  程度の範囲にあり、MODIS-AHI 間のオフセットは比較的小さいと考えられる。傾きについては、 $c$  は 3 年間を通して比較的安定しているが ( $c=0.83\pm 0.03 (1\sigma)$ )、 $a$  は  $b$  に応じて大きく変動する ( $a=0.67\pm 0.19 (1\sigma)$ )。装置間バイアスが月単位で大きく変動することは想定しにくいことから、 $y=cx$  の結果を本研究では採用し、AHI-MODIS 間のバイアスを補正することにした。

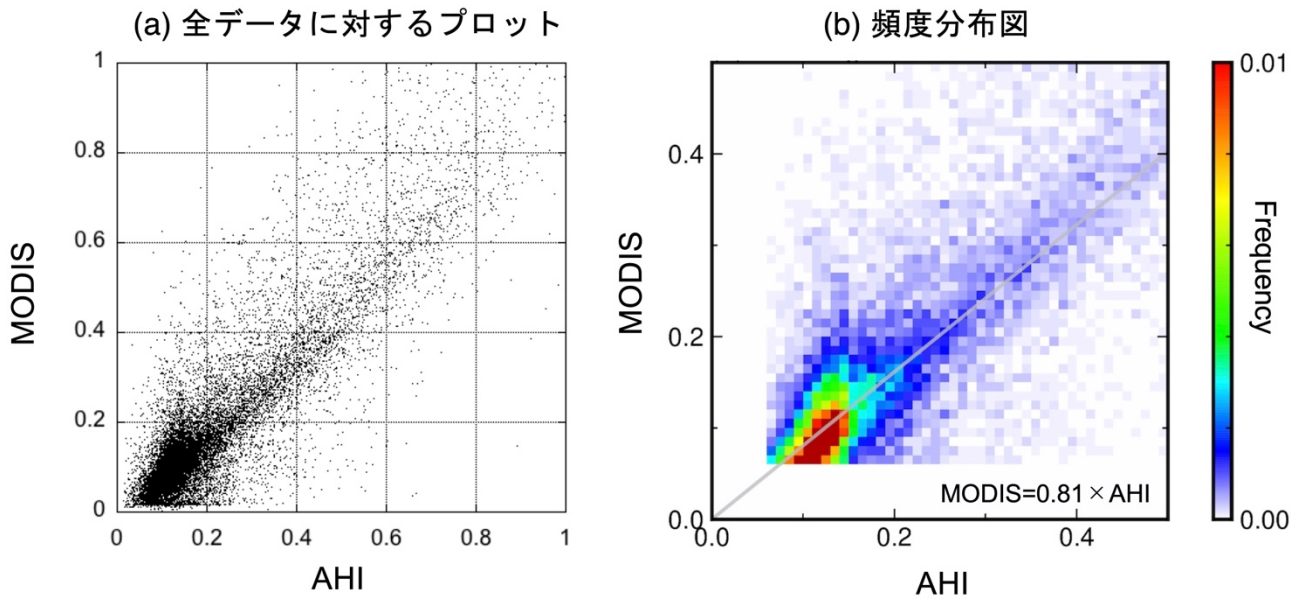


図 28 2019 年 1 月に対して、6 時間 1 度グリッドデータを用いた MODIS と AHI の比較で、(a) 全データに対するプロットと (b) 頻度分布図（但し、AOT < 0.06 のデータが除去されている）。図は Goto et al. (2024)<sup>48</sup>からの引用である。

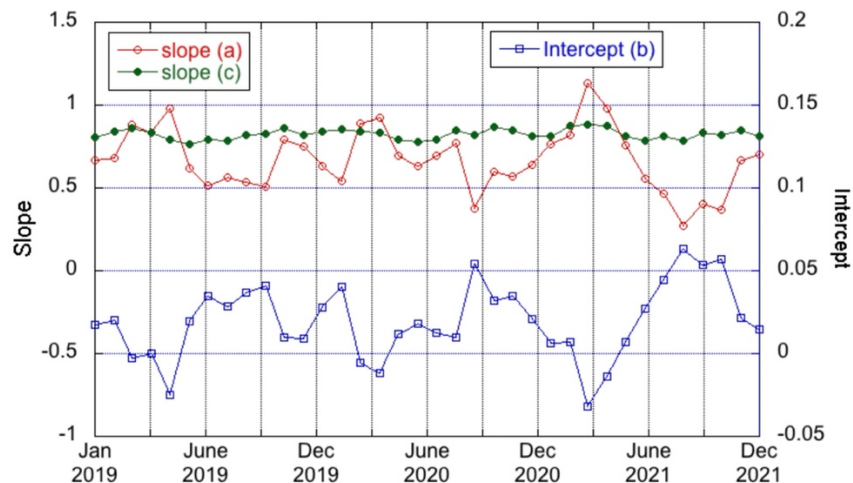


図 29 MODIS-AHI 間の AOT バイアス補正のための回帰直線パラメタの時系列（2019 年～2021 年）。回帰式は  $\text{MODIS} = a \times \text{AHI} + b$  ないし  $\text{MODIS} = c \times \text{AHI}$

CALIOP 複合プロダクトと MODIS に対しても同様の解析を実施した。こちらでは  $y = ax + b$  がより現実に即した結果となり（3 年間の平均： $\text{MODIS} = 0.84 \pm 0.12$  ( $1\sigma$ )  $\times$  CALIOP +  $0.05 \pm 0.00$  ( $1\sigma$ )）、これを採用することにした。データ統合（L2 データの作成）では、日中データに対してはプロダクト精度の高い CALIOP 複合を採用し、夜間データに対しては CALIOP 単体データを採用した。そこで、昼夜のデータを不整合なく繋げるために、CALIOP 複合に対して CALIOP 単体を線形回帰することで、CALIOP 単体データのバイアス補正を行なった。2019 年の年間平均では、CALIOP 複合 =  $1.11 \pm 0.03$  ( $1\sigma$ )  $\times$  CALIOP 単体 +  $0.00 \pm 0.00$  ( $1\sigma$ ) となり、安定的でオフセットもほぼ無いという結果となった。

上記のバイアス補正解析では 6 時間 1 度グリッドデータに対してだけでなく、3 時間 0.5 度グリッドデータに対しても実施し、双方の結果に大きな差異が無いことを確認した。この結果を受けて、6 時間 1 度グリッドデータから算出された回帰直線を全データに適用することにした。

## (6) L2データの構築

バイアス補正を行った L1 データを統合して L2 データを作成した (図 30、31)。同グリッドに対して複数プロダクトが存在する場合があります、データの融合が必要となる。そこで本研究では、該当のグリッドに対して AHI データがある場合は AHI データを、AHI データがない場合は MODIS データを、MODIS データがない場合は CALIOP データを採用するとした、優先度 (AHI > MODIS > CALIOP) による方法でデータを融合した。AHI は静止衛星による観測のため、アジア域を常時観測している (ただし、AOT データが得られるのは光源のある日中のみ)。一方、MODIS は極軌道衛星によるため、周期的にアジア域の一部を観測する。よって、アジア域においては AHI と MODIS データが同時に存在する時空間エリアが周期的に存在する。AHI と MODIS 間のバイアス補正 (本節 (5) 衛星間のバイアス補正を参照) はなされているが、観測データが常在する AHI を優先することでデータ統合による時空間ギャップは、より抑制されることになる。エアロゾルの高度分布データについては、日中グリッドは CALIOP 複合プロダクトが優先され、夜間グリッドは CALIOP 単体プロダクトが格納された。微量気体成分 (NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> の気柱積算量) についても L2 データを構築した。ただし、本研究では TROPOMI データのみを使用し、他の衛星による微量気体成分は収集していないため、データ融合の必要はない。

研究計画に沿って、2018 年から 2021 年までの L2 データを構築した。データはユーザーの利便性を考慮し、日毎の netcdf 形式ファイルとし、AOT、エアロゾル消散係数 (高度分布)、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> の気柱積算量、各パラメタの推定精度、そしてデータフラグを格納した。L1 データについても、日毎の netcdf 形式ファイルとして作成した。ここでは衛星プロダクト毎にデータをまとめ、エアロゾルの詳細な光学・微物理パラメタ (オンゲストローム指数、一次散乱アルベド等) を格納した。よって、L2 データへの拡張は容易に実施することができる状況となっている。本研究では時空間分解能として、6 時間 1 度および 3 時間 0.5 度を採用したが、より高分解能な統合データの作成も可能である。例えば、より高解像度シミュレーション計算に必要な 1 時間 0.25 度データの作成を現在進めている。また、2018 年以前および 2021 年以降のデータの作成も継続的に進めている。

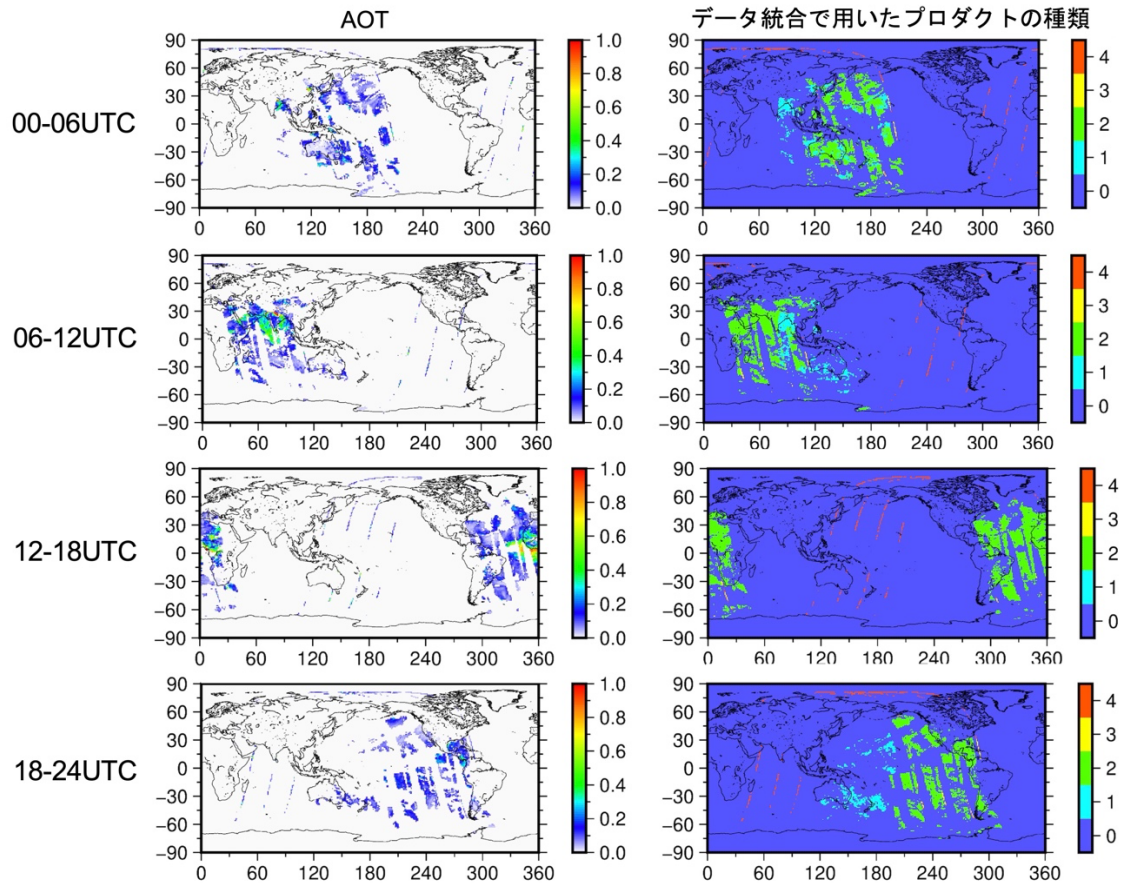


図 30 2019 年 1 月 1 日に対する 6 時間 1 度グリッドでの L2 データ。データ統合で用いたプロダクトの種類 (0:データ無し、1: AHI, 2: MODIS, 3: CALIOP 複合、4: CALIOP 単体)

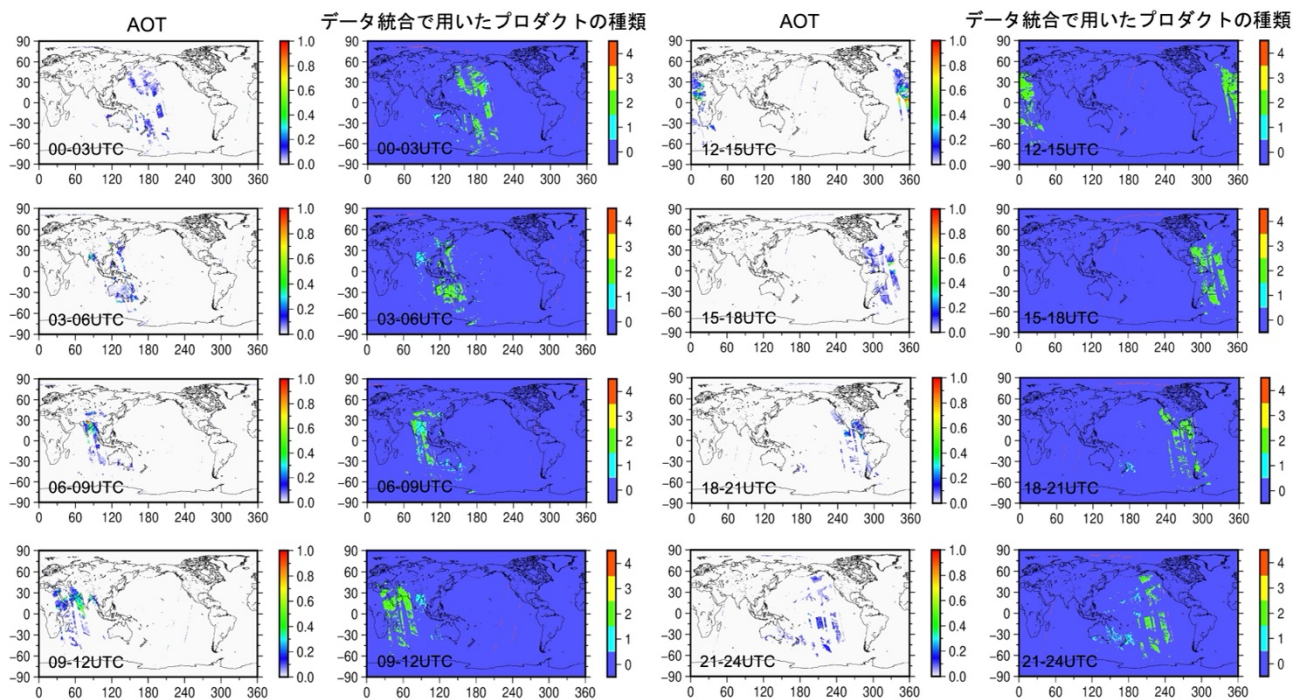


図 31 図 30 と同様。但し、2019 年 1 月 1 日に対する 3 時間 0.5 度グリッドでの L2 データ

(7) 地上観測データの統合

地上観測データについても同様にグリッドデータ化した。具体的には、地上観測地点を内包する時空間グリッドに対して、データの中央値を算出し (L1 データ)、統合観測データセットに組み込んだ (L2 データ) (図 32、33)。同グリッドに対する衛星データと地上データの融合は、空間代表性の観点から本研究では実施しなかった (2.2.1.3 章参照)。

衛星と地上の双方を内包したこの統合観測データセットは、利便性を高めた衛星・地上観測データのマッチアップデータでもある。よって、同化研究への活用と共に、気候モデルの検証や衛星観測の検証への活用も期待できる。

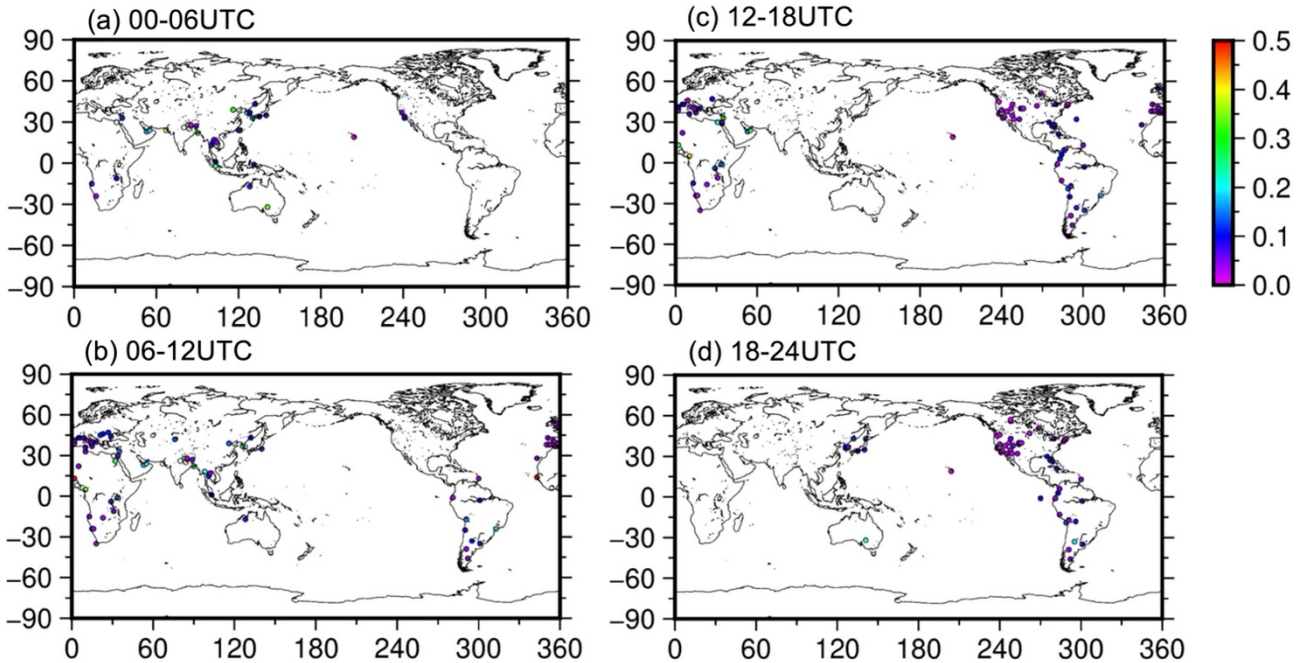


図 32 AERONET と SKYNET データを用いた AOT の L2 データ (2019 年 1 月 1 日)(a)00-06UTC (b)06-12UTC (c)12-18UTC (d) 18-24UTC

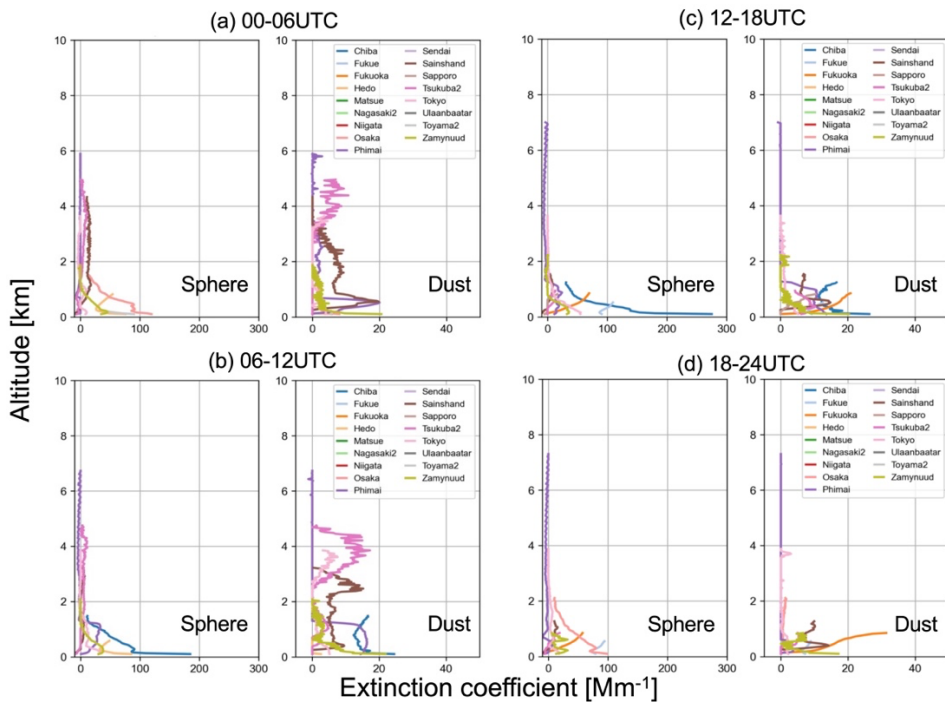


図 33 AD-Net データを用いた球形エアロゾル (Sphere) と鉱物ダスト(Dust)の消散係数の L1 データ (2019 年 1 月 1 日)。(a)00-06UTC (b)06-12UTC (c)12-18UTC (d) 18-24UTC。観測地点毎 (緯度・経度毎) に色分けしている。

### 2.2.1.3 考察

2.2.1.2 (3) 節で述べたように、CALIOP による計測では水平観測幅が狭いため (70 m 程度)、MODIS や AHI に比べて水平空間に対する空間代表性が乏しい。本研究では、グリッド分解能として 1 度 (約 100 km) ないし 0.5 度 (約 50 km) でのデータセットを構築した。用いた MODIS の AOT データの水平分解能は約 10 km で、AHI に対しては約 5 km であり、これらの観測ではグリッド内の水平分布 (水平不均質性) を捉えることができている。一方、CALIOP では、衛星の進行方向 (～緯度方向) に対してはデータが存在するが (1 km 毎)、進行方向に直行する方向 (～経度方向) にはデータがほぼ無いため、グリッド内の一部を「線」で捉えることしかできていない。

MODIS を用いたプロダクト間バイアス補正において、回帰直線を算出した (2.2.1.2 (5) 節参照)。プロダクトによってグリッド内の網羅度が異なる場合、プロダクトの空間代表性の相違がこの補正式に影響する (よって、補正式の誤差となる)。空間代表性の差異による影響は、回帰直線パラメタ (傾きと切片) の値自体と共にその変動 (標準偏差) にも現れると考えられる。CALIOP 複合プロダクトに対して算出された回帰直線 ( $\text{MODIS} = 0.84 \pm 0.12 (1\sigma) \times \text{CALIOP} + 0.05 \pm 0.00 (1\sigma)$ ) では、その傾き (a) の変動は約 14% (～0.12/0.84) となり、AHI のそれ (3% = 0.03/0.83) に比べて大きく、切片 (b = 0.05) も顕著に存在することから、プロダクト間の空間代表性の相違が懸念される。一方で、グリッド分解能 0.5 度のデータセットにおける回帰直線パラメタに対しても、上記と概ね同様な値や変動となった。このことは、空間代表性の相違の影響は大きくないことを示唆している。

本研究では、CALIOP プロダクトに関する空間代表性の取り扱いが課題として残された。その具体的な課題として、

- (1) (本節で議論した) CALIOP データに対するバイアス補正をどうすべきか (必要なら、改良法は) ?
- (2) CALIOP データに対するグリッド分解能の最大値はいくつか? (最も粗い分解能はいくつか?)
- (3) CALIOP データを用いたグリッド化において、望ましいグリッド形状は何か?

が挙げられる。課題 (1) および (2) に対しては、より高い空間分解能のデータを作成してその統計解析を進め、結論を得たいと考えている。課題 (3) については、本研究では一般的な正方形グリッドを用いたが、CALIOP 測定の特性と空間代表性の担保を考慮すると、長方形グリッド (緯度方向に広く、経度方向に狭い) が適したことになる。課題 (2) と関連して、その分解能の大きさも検討する予定である。また、空間代表性の問題は、地上観測データも同様であり、CALIOP 以上に重要な課題となってくる。上記課題は地上観測データに対しても同義であり、併せて検討していく。

### 2.2.1.4 まとめ

同化手法を用いた大気汚染予測の高精度化を実現するために、衛星および地上観測から得られる複数観測データを統合した全球観測データセット (統合観測データセット) を構築した。統合観測データセットの品質の確保のために、観測データの品質フラグ等を用いたデータの取捨選択、中央値フィルタや独自開発した空間フィルタを用いた異常値等の除去を行なった。また、センサー特性の相違等に起因するプロダクト間バイアスの除去のために、MODIS を基準としたデータ補正を実施した。同グリッドに対して複数プロダクトのデータが存在する場合は、プロダクトに優先順位をつけることでデータを融合した。最終的には 2018 年～2021 年の観測データを用いて、2 種類の時空間分解能 (6 時間 1 度と 3 時間 0.5 度) に対する統合観測データセットを完成させた。一方、観測幅の狭い CALIOP データや観測点のみとなる地上観測データに対してはグリッド空間に対する代表性に懸念が残った。より高い空間分解能でのグリッドデータ化といった対策が今後必要と考えられる。

## 2.2.2 対流圏全域および成層圏下部を計測するネットワーク用ライダーの開発

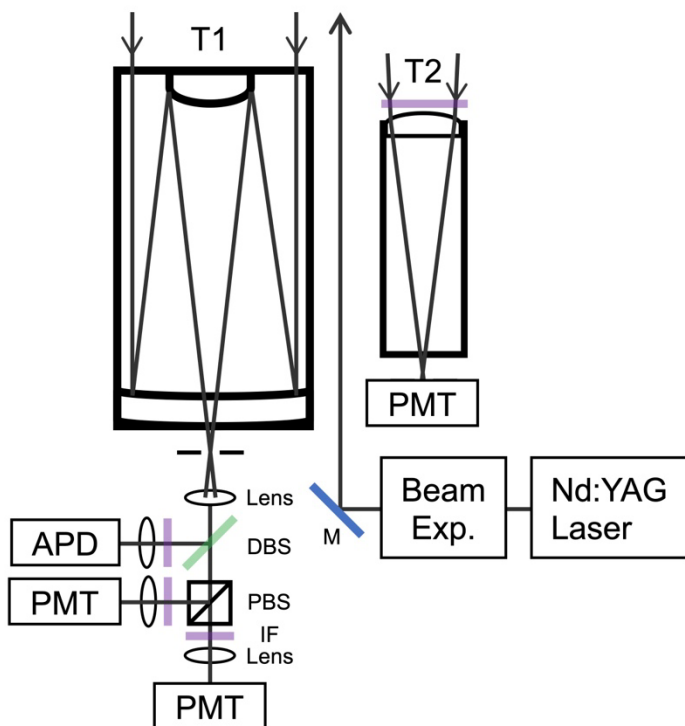
### 2.2.2.1 目的と経緯

AD-Net は、黄砂や大気汚染粒子を主なターゲットとしたエアロゾル（および雲）の観測ネットワークであり、対流圏中層域までを主な計測範囲としている。一方、火山噴火や森林火災に伴い発生するエアロゾルは、対流圏中層から成層圏下部に流入することがしばしば報告されている。よって、雲との相互作用を含めたエアロゾル気候影響の観点から、対流圏全域および成層圏下部までの定量計測は重要となる。そこで、本研究で推進する同化を含めた観測データの利用研究の将来展開を見据え、より高い高度での計測も可能な AD-Net ライダーの改良手法の考案と実装を本研究の目的とした。

### 2.2.2.2 方法と結果

現状の AD-Net ライダーシステムでは、高度 9 km までのエアロゾル消散係数の定常測定に成功しており、それを標準プロダクトとして公開している。図 34 に使用されているライダーシステムを示す。市販の Nd:YAG レーザー（波長 1064 nm と 532 nm で同時発振）を用いて、ビームエキスパンダーによりビームを拡大して大気へ送信する。望遠鏡（T1）で大気からの散乱光を集光し、それを 1064 nm と 532 nm で波長分岐し、それらの信号強度を計測する（検出器は 1064 nm に対しては APD（Avalanche PhotoDiode）を、532 nm に対しては PMT を使用）。また、532 nm では偏光子（PBS）を用いて、偏光測定も行なっている。ライダー固有の問題である「送信レーザーと受信視野の不一致による近距離信号取得の困難さ」を克服するために、口径の大きい望遠鏡（T1：D~20 cm）だけではなく、口径の小さい望遠鏡（T2：D~5 cm）も併用することで、近距離からの信号取得も可能にしている。ただし、口径の小さい望遠鏡では偏光解消度の測定は実施しておらず 532 nm での全強度測定のみとなる。これら 2 つの望遠鏡によって測定された信号を結合することで、地表近傍から高度 9 km までのエアロゾル消散係数の測定を実現している。

(a)



(b)



図 34 AD-Net ライダーシステム。(a) 構成、(b) 外観 (NIES 敷地内に設置)

そこで本研究では、地表近傍～成層圏下部までの測定を実現するために、従来のシステムをベースに改良を行なった(図35)。高高度域までの優位な信号を測定するために、より高感度な検出器(MPPC: Multi-Pixel Photon Counter(浜松ホトニクス))を、遠距離測定用の口径の大きな望遠鏡(T1)による信号測定に導入した。ライダーの製作に先んじて、本システムを使用した場合の信号シミュレーション解析を行い、従来のシステムで測定される高度9 kmでの信号の品質(信号雑音比)と、同等なレベルとなる改良システムの高度は20 km程度という結果となった(図36)。これにより、本改良システムによる成層圏下部までの測定が可能であることが、理論的に実証された。

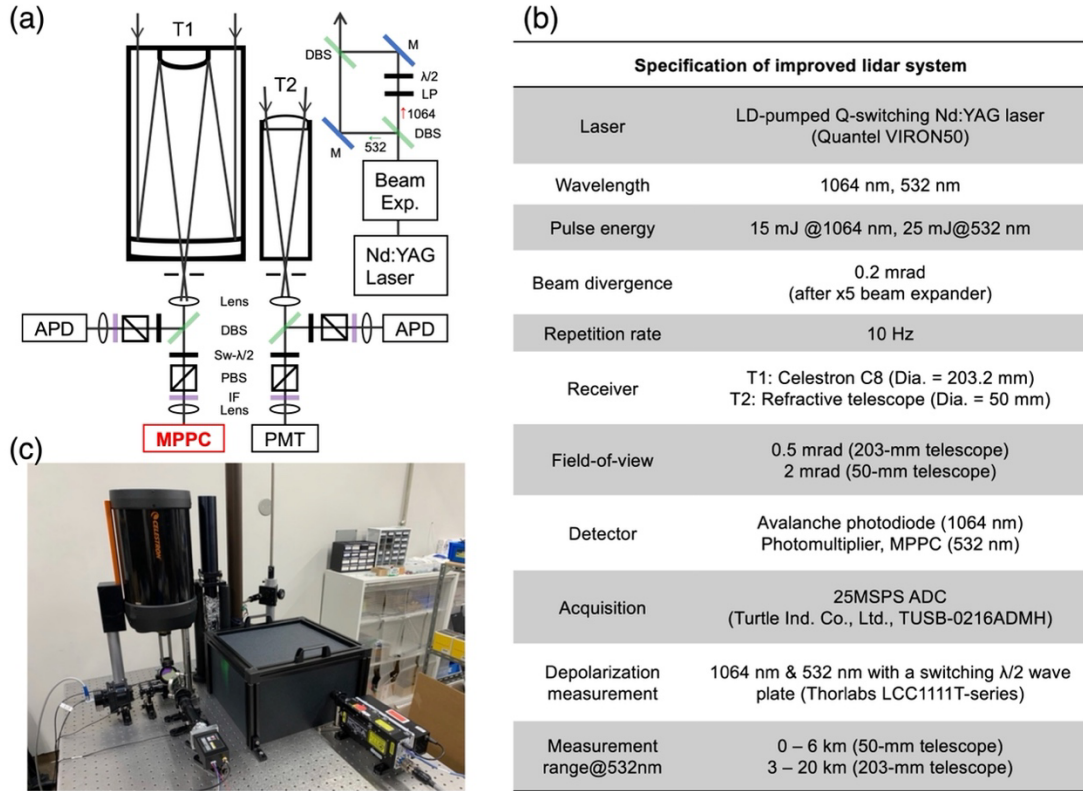


図 35 改良したライダーシステムの (a)構成、(b)諸元、(c)製作したライダーシステム (NIES 大気共同実験棟内に設置)

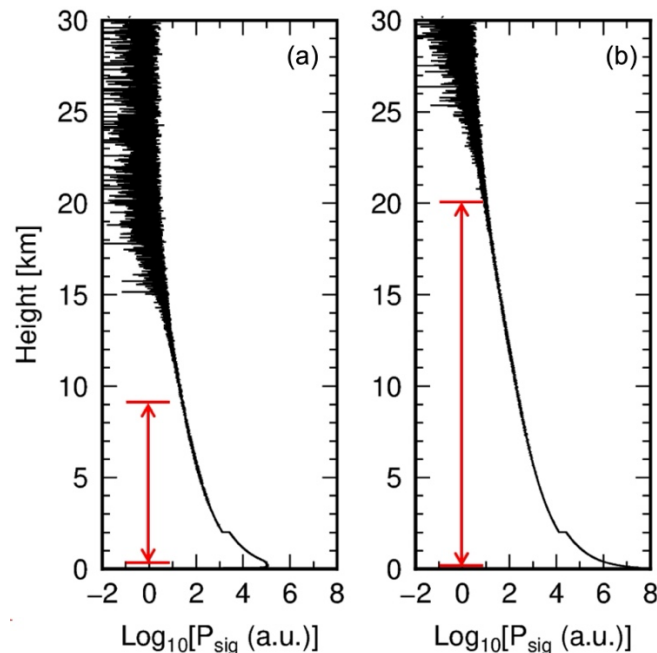


図 36 (a)従来のシステムと(b)改良版システムに対する波長 532 nm での測定信号強度のシミュレーション

加えて本研究では、黄砂（や氷晶雲）などの非球形粒子の検出や推定において重要な測定パラメタとなる偏光解消度も、地表近傍から成層圏下部まで測定可能にすることを企図した。ここでは、偏光方向を高速で切り替えられる電気式の1/2波長板（switching 1/2 wave plate）を、新たに検出器の前に導入する方式として考案した。この方式の付加的な利点として、偏光解消度を算出するための信号校正が不要になること（測定精度の向上）、そして、偏光測定に必要な（高価な）検出器の数を半減できること（コストダウン）が挙げられる。また、波長 1064 nm での偏光測定機能も付加した。

上記方策を導入したライダー（以降、改良ライダー）を試作し、NIES 敷地内に設置された AD-Net ライダーと同時測定を行なった（図 37）。改良ライダーによる計測は、より鮮明に高高度での大気を捉えることができています。特に偏光解消度では、高度 5 km 以上の信号を鮮明に捉えると共に、高度 6 km 付近のエアロゾル層を完全に捉えることに成功している。一方、昼間は背景光（太陽光）の影響により信号品質が低下していることも見てとれ、今後の課題となる。また、図 38 に実測値の信号雑音比の高度分布の例を示す。下部成層圏（高度 22 km 付近）における信号雑音比は 10 以上であり、シミュレーション解析の結果と概ね整合する。これらの結果から、改良システムによる計測では、成層圏下部において 10% 程度の信号誤差での測定が可能であることが実証された。

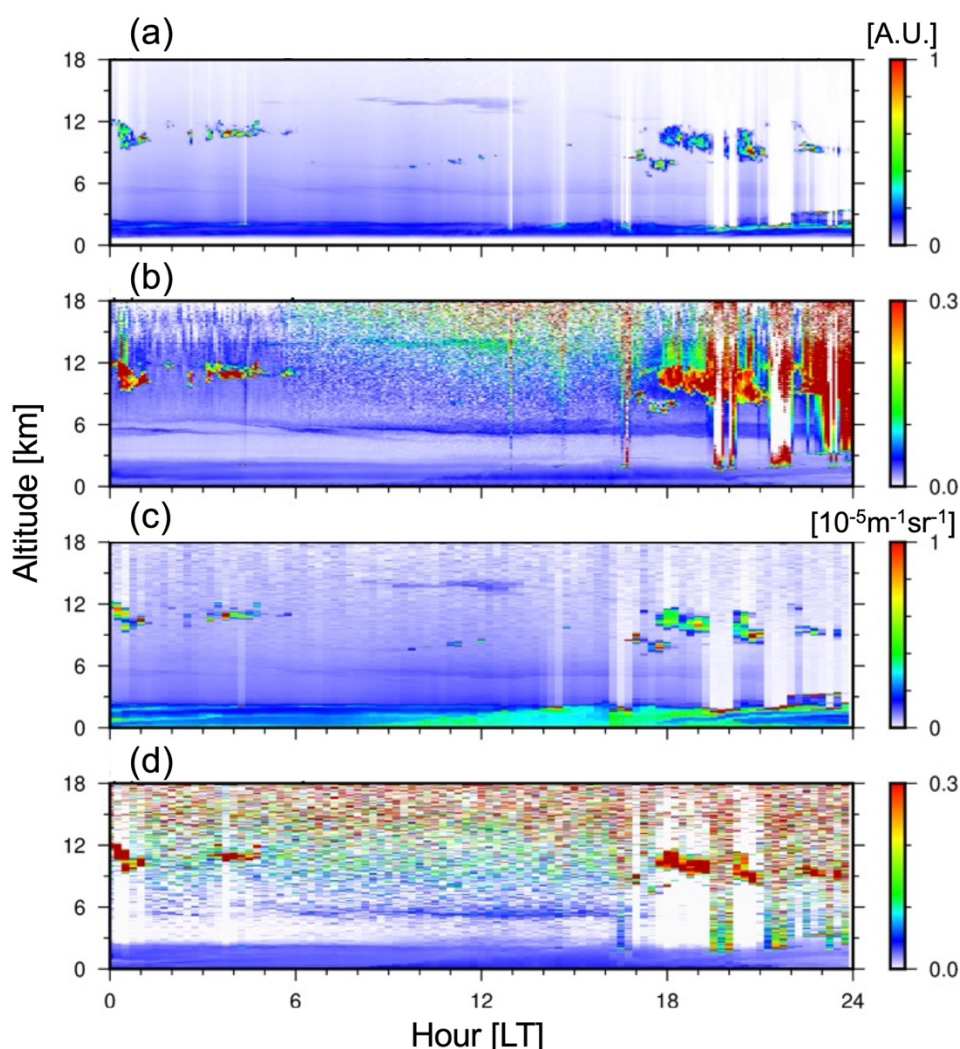


図 37 改良版システムと従来システムによる同時測定（2021 年 9 月 24 日）。改良システムにより測定された波長 532 nm での(a)信号強度と (b) 偏光解消度。従来システムにより測定された波長 532 nm での (c) 減衰付き後方散乱係数（校正された信号強度）と (d) 偏光解消度。

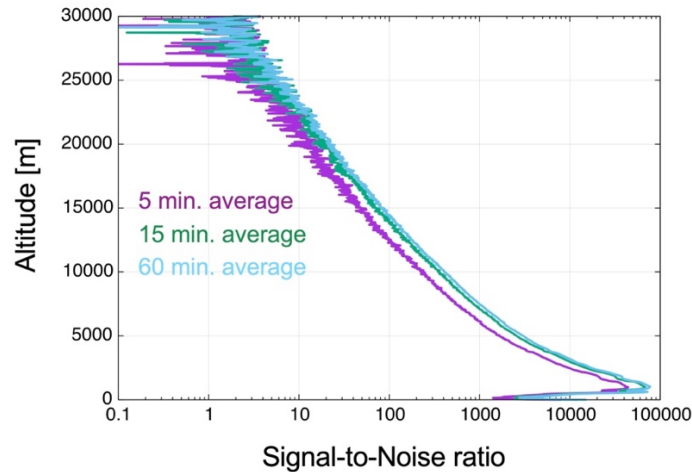


図 38 改良版システムにより実測された波長 532 nm での受信信号の信号雑音比。2022 年 11 月 12 日 22 時に測定されたデータを使用した。信号積算時間を 5 分、15 分、60 分とした場合の信号雑音比の高度分布が示されている。

### 2.2.2.3 考察

従来型の AD-Net ライダーでは対流圏の観測に限定されていたが、超高感度検出器 (MPPC) を使うことによって成層圏までの大気エアロゾルの高度分布を観測することに成功した。本研究では、成層圏観測の実現にあたって、検出器だけではなく装置構成も工夫した。一般的に、ライダー信号は測定距離の二乗に反比例して弱くなることから、近距離側 (低高度側) の信号が強くなる。高感度検出器を使うことによって、微弱な遠距離側 (高高度側) の信号を検出できるようにはなったが、低高度側は観測可能な範囲を超える (飽和する) 強い信号を受信することになる。検出器の特性から、飽和後の応答信号として予測不能なノイズが付加されるため、低高度信号のすぐ後に受信する高高度信号の品質が悪くなる。この問題を克服するため、本研究では受信望遠鏡を送信光源と離して (ここでは約 8 m) 設置することで、低高度側の後方散乱光が受信望遠鏡の視野に入らないように工夫した。

本研究の改良を AD-Net の他の観測地点に展開する場合は、改良が必要となる。AD-Net の他の地点では装置の設置場所が限られることから、受信望遠鏡と送信光源の距離を近くする構成が必要となる。そこで、解決策として高速シャッターの導入が考えられる。これは、高速シャッターにより低高度側の受信光を遮断し (もしくは弱めて)、高高度側の受信光を通過させる (透過させる) 方法になる。高速シャッターの候補として、マイクロ秒オーダーで光路の切り替えが可能となる光スイッチや、高速で偏光の向きを変えられる液晶偏光フィルタが挙げられる。いずれも電気的な制御が可能で、機械的な動きが無いためロバスト性が高い。本研究で導入した偏光フィルタ (switching 1/2 wave plate) は液晶偏光フィルタである。本研究では、大気エアロゾルの偏光解消度を測定するため、レーザーショット毎に受信光の偏光の向きを変えて、レーザーの直線偏光の向きに対して平行・垂直な成分を交互に測定した。一般的に垂直成分の後方散乱光は平行成分のそれと比べて 2 桁以上弱いことから、低高度側を垂直成分、高高度側を平行成分に切り替えることで高速シャッターとしての役割を果たすことができる。現在、高速シャッターに必要なタイミングや切り替えの安定性について調査を進めている。

### 2.2.2.4 まとめ

同化を含めたライダー観測データの利用研究の将来展開を見据え、高高度での計測も可能な地上ネットワーク用ライダーの開発を行なった。AD-Net ライダーの高性能化をターゲットとして、高感度検出器の導入、偏光測定機能の刷新、そして、それに伴うシステムの全体構成を考案し、試作機を制作した。結果として、対流圏中層までの計測を実現していた AD-Net に対し、本システムでは成層圏下部まで計測が可能であることを、シミュレーション解析そして実測により実証することに成功した。近距離からの強い信号に対する対策が必要といった課題は残ったが、本システムを用いたネットワーク観測の実現に向けて課題を解決していく予定である。

### 2.3 全体のまとめと発展性

我が国の大気汚染予測システムにはデータ同化を利用した高精度予測が望まれる一方で、大気化学物質監視の衛星網や地上観測の拡充が進んでいる。そこで本研究では、より多くの観測データを活かした同化手法による大気汚染予測システムのための手法構築を目的とした。このために、全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem の最適化を進めた上で、予測に重要な初期値作成のために、高速計算可能なデータ同化手法 (2D-Var) を NICAM-Chem に新たに導入した。複数の観測データを融合した高時空間分解能観測データを作成し、同化を実施し、地上観測データを用いてエアロゾル予測精度を検証した。研究成果の概要は 1.2 章でもまとめて述べたので、ここでは本研究の発展性に関して記述したい。本研究成果の学術面では、主に以下の 3 点の発展性があると考えている。

- 大気汚染予測システムの基本設計を構築できたため、別課題で進めていた全球 10 km 規模シミュレーションと組み合わせることで、超高解像度全球大気汚染予測が実現に近づき、当該分野で世界トップレベルに飛躍することも期待できる。
- 現在実施中の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) /地球観測研究センター (EORC) との共同研究に、本課題で開発した NICAM-Chem/2DVar と NICAM-Chem/LETKF の 2 つの同化手法を用いて、新しい衛星データによるエアロゾル同化研究成果を還元させることにより、開発した全球大気汚染予測システムが発展する。
- 現在実施中の NIES 戦略的研究プログラム「気候変動大気質プログラム」PJ2 に、得られた統合 AOT データおよび NICAM-Chem/2DVar モデリングの成果を還元することで、SLCF 排出量推定の手助けとなることが期待できる。また気候変動大気質プログラム PJ3 に、再解析としての検証データの成果を還元することで、シナリオシミュレーションを支えるモデルの信頼性を確かめることが期待できる。

本研究成果の環境問題の解決に向けた発展性としては、主に以下の 3 点が挙げられる。

- 開発した複数の衛星 AOT データを統合する方法は、別の衛星 AOT に対しても応用利用が可能であり、今後衛星 AOT データ量がますます増加することから、同化研究に役立つ AOT データの継続的な提供が可能であり、大気汚染物質予測システムの継続的な高精度化が期待できる。
- 全球大気汚染予測システムの基本設計を構築できたので、今後のリアルタイム予測および既存大気汚染物質予測システム VENUS との統合が進展することが期待できる。
- 現在実施中の環境研究総合推進費戦略的研究開発 (I) S-20「短寿命気候強制因子による気候変動・環境変動に対応する緩和策推進のための研究」の大気汚染物質排出量削減シナリオに対する気候環境応答を計算する研究に、再解析としての検証データの成果を還元することで、シナリオ作成を支えるモデルの信頼性を確かめることができ、シナリオ策定の高精度化の手助けとなることが期待できる。

本研究成果の社会・行政・国際貢献への発展性としては、主に以下の 3 点が挙げられる。

- 開発したエアロゾルの 3 次元情報を取り込んだ CALIOP と MODIS の統合データは、世界的にも先駆的な取り組みであり、2024 年度に打ち上がった EarthCARE/ATLID の公式リトリバーバル手法でも利用されることから、国際的な貢献が期待できる。
- 得られた統合 AOT データからデータ欠損地域を明確化できたため、国内外の地上観測サイトの設置地域を最適化できることが期待できる。
- 現在実施中の日韓 PM<sub>2.5</sub> 会合や日韓中 3 カ国環境研究機関長会合 (TPM) 等の東アジアの大気汚染に関する会合で、NIES として新しい同化モデル及びその結果を提供でき、国際貢献が期待できる。

本課題全体としては当初の目標を達成することができたが、研究期間中には解決できなかった問題もいくつかあった。特に、ライダーデータを利用したエアロゾル同化システムの構築、ライダーデータを含めた様々な観測データを融合した観測データセットの高解像度化と長期間化、NICAM-Chem 自身のモデル高度化、などは重要な問題として引き続き取り組んでいきたい。これらの活動を通じて、大気汚染予測システムが更に発展することを期待している。

## 引用文献

- 1) Goto D., Nakajima T., Dai T., Yashiro H., Sato Y., Suzuki K., Uchida J., Misawa S., Yonemoto R., Trieu T.T.N., Tomita H., Satoh M. (2018) Multi-scale Simulations of Atmospheric Pollutants Using a Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. In: Vadrevu K., Ohara T., Justice C. (eds) Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham
- 2) Suzuki K., Nakajima T., Satoh M., Tomita H., Takemura T., Nakajima T. Y., Stephens G. L. (2008) Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophysical Research Letters*, 35(19), L19817. <https://doi.org/10.1029/2008GL035449>
- 3) Dai T., Goto D., Schutgens N. A. J., Dong X., Shi G., Nakajima T. (2014) Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core. *Atmospheric Environment*, 82, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.018>
- 4) Goto D., Dai T., Satoh M., Tomita H., Uchida J., Misawa S., Inoue T., Tsuruta H., Ueda K., Ng C. F. S., Takami A., Sugimoto N., Shimizu A., Ohara T., Nakajima T. (2015) Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan. *Geoscientific Model Development*, 8(2), 235–259. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-235-2015>
- 5) Sato Y., Miura H., Yashiro H., Goto D., Takemura T., Tomita H., Nakajima T. (2016) Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Scientific Reports*, 6, 26561. <https://doi.org/10.1038/srep26561>
- 6) Goto D., Sato Y., Yashiro H., Suzuki K., Oikawa E., Kudo R., Nagao T. M., Nakajima T. (2020) Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14 km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3731–3768. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3731-2020>
- 7) Trieu T. T. N., Goto D., Yashiro H., Murata R., Sudo K., Tomita H., Satoh M., Nakajima T. (2017) Evaluation of summertime surface ozone in Kanto area of Japan using a semi-regional model and observation. *Atmospheric Environment*, 153, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.030>
- 8) Tomita H., Satoh M. (2004) A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid, *Fluid Dynamics Research*, 34, 357-400
- 9) Satoh M., Matsuno T., Tomita H., Miura H., Nasuno T., Iga S. (2008) Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, 227, 3486-3514. doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006
- 10) Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Miura H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., Yamada Y., Goto D., Sawada M., Miyoshi T., Niwa Y., Hara M., Ohno T., Iga S., Arakawa T., Inoue T., Kubokawa H. (2014) The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1), 18–49. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
- 11) Takemura T., Okamoto H., Maruyama Y., Numaguti A., Higurashi A., Nakajima T. (2000) Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D14), 17853–17873. <https://doi.org/10.1029/2000JD900265>
- 12) Takemura T., Nakajima T., Dubovik O., Holben B. N., Kinne S. (2002) Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *Journal of Climate*, 15(4), 333–352. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2)
- 13) Takemura T., Nozawa T., Emori S., Nakajima T. Y., Nakajima T. (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *Journal of Geophysical Research*, 110(D2), D02202. <https://doi.org/10.1029/2004JD005029>

- 14) Takemura T., Egashira M., Matsuzawa K., Ichijo H., O'ishi R., Abe-Ouchi A. (2009) A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(9), 3061–3073. <https://doi.org/10.5194/acp-9-3061-2009>
- 15) Sudo K., Takahashi M., Kurokawa J., Akimoto H. (2002a) CHASER: A global chemical model of the troposphere: 1. Model description. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D17), 4339, <https://doi.org/10.1029/2001JD001113>
- 16) Sudo K., Takahashi M., Akimoto H. (2002b) CHASER: A global chemical model of the troposphere 2. Model results and evaluation, *Journal of Geophysical Research*, 107, D21, 4586, <https://doi.org/10.1029/2001JD001114>
- 17) Sudo K., Akimoto H. (2007) Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *Journal of Geophysical Research*, 112, D12302, <https://doi.org/10.1029/2006JD007992>
- 18) van Leer B. (1977) Toward the ultimate conservative difference scheme, Part IV, A new approach to numerical convection. *Journal of Computational Physics*, 23(3), 276–299. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(77\)90095-X](https://doi.org/10.1016/0021-9991(77)90095-X)
- 19) Miura H. (2007) An upwind-biases conservative advection scheme for spherical hexagonal-pentagonal grids. *Monthly Weather Review*, 135(12), 4038–4044. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2101.1>
- 20) Niwa Y., Tomita H., Satoh M., Imasu R. (2011) A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 89(3), 255–268. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2011-306>
- 21) Sekiguchi M., Nakajima T. (2008) A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109(17–18), 2779–2793. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.07.013>
- 22) Mellor G. L., Yamada T. (1974) A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(7), 1791–1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)
- 23) Mellor G. L., Yamada T. (1982) Development of a turbulence closure model for geostrophic fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
- 24) Nakanishi M., Niino H. (2004) An improved Mellor–Yamada level 3 model with condensation physics: its design and verification. *Boundary-Layer Meteorology*, 112(1), 1–31. <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000020164.04146.98>
- 25) Nakanishi M., Niino H. (2009) Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 87(5), 895–912. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895>
- 26) Le Treut H., Li Z.-X. (1991) Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: Feedback effects associated with the simulation of cloud optical properties, *Climate Dynamics*, 5, 175–187
- 27) Chikira M., Sugiyama M. (2010) A Cumulus Parameterization with State-Dependent Entrainment Rate. Part I: Description and Sensitivity to Temperature and Humidity Profiles, *Journal of the Atmospheric Science*, 67, 2171–2193, <https://doi.org/10.1175/2010JAS3316.1>
- 28) Watanabe M., Suzuki T., O'ishi R., Komuro Y., Watanabe S., Emori S., Takemura T., Chikira, Ogura T., Sekiguchi M., Takata K., Yamazaki D., Yokohata T., Nozawa T., Hasumi H., Tatebe H., Kimoto M. (2010) Improved climate simulation by MIROC 5: mean states, variability, and climate sensitivity, *Journal of Climate*, 23, 6312–6335, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>
- 29) Tatebe H., Ogura T., Nitta T., Komuro Y., Oguchi K., Takemura T., Sudo K., Sekiguchi M., Abe M., Saito F., Chikira M., Watanabe S., Mori M., Hirota N., Kawatani Y., Mochizuki T., Yoshimura K., Takata K., O'ishi R., Yamazaki D., Suzuki T., Kurogi M., Kataoka T., Watanabe M., Kimoto M. (2019) Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12, 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
- 30) van Noije T. P. C., Eskes H. J., Dentener F. J., Stevenson D. S., Ellingsen K., Schultz M. G., Wild O., Amann M., Atherton C. S., Bergmann D. J., Bey I., Boersma K. F., Butler T., Cofala J., Drevet J., Fiore A. M., Gauss M., Hauglustaine D. A., Horowitz

- L. W., Isaksen I. S. A., Krol M. C., Lamarque J. -F., Lawrence M. G., Martin R. V., Montanaro V., Müller J. -F., Pitari G., Prather M. J., Pyle J. A., Richter A., Rodriguez J. M., Savage N. H., Strahan S. E., Sudo K., Szopa S., van Roozendael M. (2006) Multi-model ensemble simulations of tropospheric NO<sub>2</sub> compared with GOME retrievals for the year 2000, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 2943-2979
- 31) Stevenson, D. S., Young, P. J., Naik, V., Lamarque J. -F., Shindell D. T., Voulgarakis A., Skeie R. B., Dalsoren S. B., Myhre G., Bernsten T. K., Folberth G. A., Rumbold S. T., Collins W. J., MacKenzie I. A., Doherty R. M., Doherty R. M., Zeng G., van Noije T. P. C., Strunk A., Bergmann D., Cameron-Smith P., Plummer D. A., Strode S. A., Horowitz L., Lee Y. H., Szopa S., Sudo K., Nagashima T., Josse B., Cionni I., Righi M., Eyring V., Conley A., Bowman K. W., Wild O., Archibald A. (2013) Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 3063-3085, <https://doi.org/10.5194/acp-13-3063-2013>
  - 32) Nagashima T., Ohara T., Sudo K., Akimoto H. (2010) The relative importance of various source regions on East Asian surface ozone, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11305-11322, <https://doi.org/10.5194/acp-10-11305-2010>
  - 33) Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Dentener F., Muntean M., Pouliot G., Keating T., Zahng Q., Kurokawa J., Wankmüller R., van der Gon H. D., Kuenen J. J. P., Klimont Z., Frost G., Darras S., Koffi B., Li M. (2015) HTAP\_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(19), 11411–11432. <https://doi.org/10.5194/acp-15-11411-2015>
  - 34) van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Kasibhatla P. S., Arellano Jr. A. F. (2006) Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3423-3441
  - 35) Guenther A., Hewitt C. N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., McKay W. A., Pierce T., Scholes B., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J., Zimmerman P. (1995) A global-model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research*, 100(D5), 8873–8892. <https://doi.org/10.1029/94JD02950>
  - 36) Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H. J., de Haan J. F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P. F. (2012) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sensing of Environment*, 120, 70-83
  - 37) Sekiya T., Miyazaki K., Ogochi K., Sudo K., Takigawa M. (2018) Global high-resolution simulations of tropospheric nitrogen dioxide using CHASER V4.0, *Geoscientific Model Development*, 11, 959-988, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-959-2018>
  - 38) Stevenson D. S., Dentener F. J., Schulz M. G., Ellingsen K., van Noije T. P. C., Wild O., Zeng G., Amann M., Atherton C. S., Bell N., Bergmann D. J., Bey I., Bulter T., Cofala J., Collins W. J., Derwent R. G., Doherty R. M., Drevet J., Eskes H. J., Fiore A. M., Gauss M., Hauglustaine D. A., Horowitz L. W., Isaksen I. S. A., Krol M. C., Lamarque J. -F., Lawrence M. G., Montanaro V., Müller J. -F., Pitari G., Prather M. J., Pyle J. A., Rast S., Rodriguez J. M., Sanderson M. G., Savage N. H., Shindell D. T., Strahan S. E., Sudo K., Szopa S. (2006) Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone, *Journal of Geophysical Research*, 111, D08301, <https://doi.org/10.1029/2005JD006338>
  - 39) Li J., Nagashima T., Kong L., Ge B., Yamaji K., Fu J. S., Wang X., Fan Q., Itahashi S., Lee H. -J., Kim C. -H., Lin C. -Y., Zhang M., Tao Z., Kajino M., Kiao H., Li M., Woo J. -H., Kurokawa J., Wang Z., Wu Q., Akimoto H., Carmichael G. R., Wang Z. (2019) Model evaluation and intercomparison of surface-level ozone and relevant species in East Asia in the context of MICS-Asia Phase III - Part 1: Overview, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 12993-13015, <https://doi.org/10.5194/acp-19-12993-2019>
  - 40) Griffiths P. T., Murray L. T., Zeng G., Shin Y. M., Abraham N. L., Archibald A. T., Deushi M., Emmons L. K., Galbally I. E., Hassler B., Horowitz L. W., Keeble J., Liu J., Moeini O., Naik V., O'Connor F. M., Oshima N., Tarasick D., Tilmes S., Turnock

- S. T., Wild O., Young P. J., Zanis P. (2021) Tropospheric ozone in CMIP6 simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 4187–4218, <https://doi.org/10.5194/acp-21-4187-2021>
- 41) Chatani S., Yamaji K., Itahashi S., Saito M., Takigawa M., Morikawa T., Kanda I., Miya Y., Komatsu H., Sakurai T., Morino Y., Nagashima T., Kitayama K., Shimadera H., Uranishi K., Fujiwara Y., Shintani S., Hayami H. (2020) Identifying key factors influencing model performance on ground-level ozone over urban areas in Japan through model inter-comparisons, *Atmos. Environ.*, 223, 117255, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117255>
  - 42) Tomita H. (2008) New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86a, 121–142
  - 43) Yumimoto K., Tanaka T. Y., Oshima N., Maki T. (2017) JRAero: the Japanese reanalysis for aerosol v1.0. *Geoscientific Model Development*, 10, 3225–3253. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3225-2017>
  - 44) Hunt B., Kostelich E., Szunyogh I. (2007) Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter, *Physica D*, 230, 112–126
  - 45) Dai T., Schutgens N. A. J., Goto D., Shi G., Nakajima T. (2014) Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model. *Environmental Pollution*, 195, 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.021>
  - 46) Dai T., Cheng Y., Suzuki K., Goto D., Kikuchi M., Schutgens N. A. J., Yoshida M., Zhang P., Husi L., Shi G. Nakajima T. (2019) Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(3), 680–711. <https://doi.org/10.1029/2018MS001475>
  - 47) Cheng Y., Dai T., Goto D., Murakami H., Yoshida M., Shi G., Nakajima T. (2021) Enhanced simulation of an Asian dust storm by assimilating GCOM-C observations, *Remote Sensing*, 13, 3020, <https://doi.org/10.3390/rs13153020>
  - 48) Goto D., Nishizawa T., Uchida J., Yumimoto K., Jin Y., Higurashi A., Shimizu A., Sugata S., Yashiro H., Hayasaki M., Dai T., Cheng Y., Tanimoto H. (2024) Development of aerosol assimilation system using global non-hydrostatic model, 2-dimensional variation method, and multiple satellite-based aerosol products, *Journal of Advances in Modeling Earth System*, 16(9), e2023MS004046. <https://doi.org/10.1029/2023MS004046>
  - 49) Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanré D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smimov A. (1998) AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
  - 50) Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle P., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., de Silva A. M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B. (2017) The modern-era retrospective analysis for research and applications version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30, 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
  - 51) Courtier P., Thépaut J.-N., Hollingsworth A. (1994) A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120(519), 1367–1387. <https://doi.org/10.1002/qj.49712051912>
  - 52) Chin M., Ginoux P., Kinne S., Torres O., Holben B. N., Duncan B. N., Martin R. V., Logan J. A., Higurashi A., Nakajima T. (2002) Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements, *Journal of the Atmospheric Science*, 59, 461–483
  - 53) Yoshida M., Yumimoto K., Nagao T. M., Tanaka T. Y., Kikuchi M., Murakami H. (2021) Satellite retrieval of aerosol combined with assimilated forecast. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 1797–1813. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1797-2021>
  - 54) Shimizu A., Nishizawa T., Jin Y., Kim S. -W., Wang Z., Batdorj D., Sugimoto N. (2018) Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia, *Optical Engineering*, 56(3), 031219

- 55) Jin, J., Pang, M., Segers, A., Han, W., Fang, L., Li, B. et al. (2022). Inverse modeling of the 2021 spring super dust storms in East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10), 6393–6410. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6393-2022>
- 56) Yu, T., Xiaole, P., Yujie, J., Yuting, Z., Weijue, Y., Hang, L., Shandong, L., and Wang, Z. (2023). East Asia dust storms in spring 2021: Transport mechanisms and impacts on China, *Atmospheric Research*, 290, 106773, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106773>
- 57) Nakajima T., Campanelli M., Che H., Estellés V., Irie H., Kim S. -W., Kim J., Liu D., Nishizawa T., Pandithurai G., Soni V. K., Thana B., Tugjurn N. -U., Aoki K., Go S., Hashimoto M., Higurashi A., Kazadzis S., Khatri P., Kouremeti N., Kudo R., Marengo F., Momoi M., Ningombam S. S., Ryder C. L., Uchiyama A., Yamazaki A. (2020) An overview of and issues with sky radiometer technology and Skynet. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(8), 4195–4218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020>
- 58) Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., Huang X. -Y. (2021) A description of the advanced research WRF version 4. Tech Note, NCAR/TN. 556+STR, 165 pp. <http://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- 59) Byun D., Schere K. L. (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51–77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- 60) Appel K. W., Bash J. O., Fahey K. M., Foley K. M., Gilliam R. C., Hogrefe C., Hutzell W. T., Kang D., Mathur R., Murphy B. N., Napelenok S. L., Nolte C. G., Pleim J. E., Pouliot G. A., Pye H. O. T., Ran L., Roselle S. J., Sarwar G., Schwede D. B., Sidi F. I., Spero T. L., Wong D. C. (2021) The Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model versions 5.3 and 5.3.1: system updates and evaluation, *Geoscientific Model Development*, 14, 2867-2897, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2867-2021>
- 61) Chatani S., Yamaji K., Sakurai T., Itahashi S., Shimadera H., Kitayama K., Hayami H. (2018) Overview of model inter-comparison in Japan's study for reference air quality modeling (J-STREAM), *Atmosphere*, 9, 19, <https://doi.org/10.3390/atmos9010019>
- 62) Campbell P. C., Tang Y., Lee P., Barker B., Tong D., Saylor R., Stein A., Huang J., Huang H. -C., Strobach E., McQueen J., Pan L., Stajner I., Sims J., Tirado-Delgado J., Jung Y., Yang F., Spero T. L., Gilliam R. C. (2022) Development and evaluation of an advanced National Air Quality Forecasting Capability using the NOAA Global Forecast System version 16, *Geoscientific Model Development*, 15, 3281-3313, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-3281-2022>
- 63) Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Okamoto H. (2011) Algorithm to retrieve aerosol optical properties from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar considering nonsphericity of dust, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112, 254-267
- 64) 西澤智明、工藤玲、日暮明子、及川栄治、岡本創 (2019) EarthCARE 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲推定アルゴリズム、*日本リモートセンシング学会誌*, 39, 215-224
- 65) Kudo R., Higurashi A., Oikawa E., Fujikawa M., Ishimoto H., Nishizawa T. (2023) Global 3-D distribution of aerosol composition by synergistic use of CALIOP and MODIS observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 3835–3863 <https://doi.org/10.5194/amt-16-3835-2023>
- 66) Sayer A. M., Munchak L. A., Hsu N. C., Levy R. C., Bettenhausen C., Jeong M.-J. (2014) MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and “merged” data sets, and usage recommendations, *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 119, 13965–13989, <https://doi.org/10.1002/2014JD022453>
- 67) Hagihara Y., Okamoto H., Yoshida R. (2010) Development of a combined CloudSat/CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, *Journal of Geophysical Research*, 115 (D4), <https://doi.org/10.1029/2009JD012344>

[資料]

# 1 研究の組織と研究課題の構成

## 1.1 研究の組織

### [A 研究担当者]

地域環境保全領域	五藤 大輔 清水 厚 菅田 誠治 打田 純也
地球システム領域	西澤 智明 八代 尚 日暮 明子 神 慶孝 谷本 浩志

(注) 所属・役職は年度終了時点のもの。

### [B 客員研究員]

弓本 桂也	(九州大学応用力学研究所)	(令和2～4年度)
Dai Tie	(中国科学院大气物理研究所)	(令和2～4年度)

### [C 協力研究者]

山下 陽介	(国立環境研究所)	(令和2～4年度)
中島 映至	(国立環境研究所・東京大学)	(令和2～4年度)
Kim Jhoon	(韓国 Yonsei 大学)	(令和2～4年度)
Cheng Yueming	(中国科学院大气物理研究所)	(令和2～4年度)
早崎 将光	(自動車研究所)	(令和4～4年度)
兼松 透江	(国立環境研究所)	(令和2～4年度)

## 1.2 研究課題と担当者

### サブテーマ1 NICAM-Chem 同化による予測手法の構築

五藤 大輔、菅田 誠治、打田 純也、八代 尚、弓本 桂也\*、Dai Tie\*、山下 陽介\*\*、Cheng Yueming \*\*、兼松 透江\*\*

### サブテーマ2 同化・検証で用いる高時空間分解能観測データ整備

西澤 智明、清水 厚、日暮 明子、神 慶孝、谷本 浩志、中島 映至\*\*、Kim Jhoon \*\*、早崎 将光\*\*

(注) \*客員研究員、\*\*協力研究者

## 2 研究成果発表一覧

### 2.1 誌上発表

<雑誌>

---

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

---

Cheng Y., Dai T., Goto D., Murakami H., Yoshida M., Shi G.Y., Nakajima T. (2021) Enhanced simulation of an Asian dust storm by assimilating GCOM-C observations. Remote Sensing, 13 (15), 3020, <https://doi.org/10.3390/rs13153020>

Cheng Y., Dai T., Cao J., Chen L., Goto D., Yoshida M., Nakajima T., Shi G. (2022) Improvement of the Aerosol Forecast and Analysis Over East Asia With Joint Assimilation of Two Geostationary Satellite Observations. Geophysical Research Letter, 49 (21), <https://doi.org/10.1029/2022GL099908>

Cheng Y., Dai T., Goto D., Chen L., Si Y., Murakami H., Yoshida M., Zhang P., Cao J., Nakajima T., Shi G. (2024) Improved hourly estimate of aerosol optical thickness over Asian land by fusing geostationary satellites Fengyun-4B and Himawari-9, Science of the Total Environment, 923, 171541, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171541>

Dai T., Cheng Y., Goto D., Li Y., Tang X., Shi G.Y., Nakajima T. (2021) Revealing the sulfur dioxide emission reductions in China by assimilating surface observations in WRF-Chem. Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 4357-4379, <https://doi.org/10.5194/acp-21-4357-2021>

Goto D., Nishizawa T., Uchida J., Yumimoto K., Jin Y., Higurashi A., Shimizu A., Sugata S., Yashiro H., Hayasaki M., Dai T., Cheng Y., Tanimoto H. (2024) Development of an aerosol assimilation system using a global non-hydrostatic model, a 2-dimensional variational method, and multiple satellite-based aerosol products, Journal of Advances in Modeling Earth System, 16(9), e2023MS004046. <https://doi.org/10.1029/2023MS004046>

Kudo R., Higurashi A., Oikawa E., Fujikawa M., Ishimoto H., Nishizawa T. (2023) Global 3-D distribution of aerosol composition by synergistic use of CALIOP and MODIS observations, Atmospheric Measurement Techniques, 16, 3835-3863, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3835-2023>

Nishizawa T., Kudo R., Oikawa E., Higurashi A., Jin Y., Sugimoto N., Sato K., Okamoto H. (2024) Algorithm to retrieve aerosol optical properties using lidar measurements on board the EarthCARE satellite, Atmospheric Measurement Techniques, <https://doi.org/10.5194/amt-2024-100>

清水厚 (2022) ミー散乱ライダーネットワークによる東アジア域対流圏エアロゾルのモニタリング. レーザセンシング学会誌, 3 (1), 1-10

西澤智明, 工藤玲, 及川栄治, 日暮明子 (2022) 衛星搭載ライダーによる全球エアロゾル観測. 計測と制御, 61 (5), 350-354

### 2.2 口頭発表

---

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

---

Goto D. (2022) Research on air pollution prediction by assimilating aerosol products retrieved from satellites, The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2021

Nishizawa T., Higurashi A. (2021) Current status and progress on International SKYNET Data Center (ISDC). 6th International SKYNET workshop, abstracts

Nishizawa T., Kudo R., Higurashi A., Takakura S., Oikawa E., Okamoto H. (2022) An Algorithm to Retrieve Aerosol Optical Properties from ATLID and MSI Measurements. ILRC 30, Abstracts

Nishizawa T., Kudo R., Takakura S., Higurashi A., Jin Y., Oikawa E., Okamoto H. (2022) Developments of aerosol and cloud retrieval algorithms using ATLID and MSI data of EarthCARE. The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2021

Nishizawa T., Kudo R., Higurashi A., Jin Y., Oikawa E., Okamoto H. (2023) Development of an aerosol retrieval algorithm using the EarthCARE satellite onboard lidar and imager, 28<sup>th</sup> IUGG, Abstracts.

工藤玲,日暮明子,及川栄治,西澤智明,藤川雅大 (2023)CALIOP-MODIS 複合解析によるエアロゾル組成の長期変動, 第41回レーザセンシングシンポジウム、同予稿集, 1, 21-24

五藤大輔 (2022) 大気環境に関わるエアロゾル全球シミュレーション. 2022 年度シンポジウム富岳で見える気象の未来予想図, なし

五藤大輔 (2023) 全球・領域規模でのエアロゾルシミュレーションについて. 令和4年度化学物質環境実態調査 環境科学セミナー, 同予稿集, 11-12

西澤智明, 工藤玲, 日暮明子, 高倉理, 及川栄治, 岡本創 (2021) EarthCARE 衛星搭載ライダー・イメージャーを用いたエアロゾル・雲導出アルゴリズムの開発. 第39回レーザセンシングシンポジウム, 同予稿集, 1, 144-146

西澤智明, 神慶孝, 日暮明子, 清水厚, 谷本浩志, 五藤大輔 (2022) エアロゾルデータ同化に向けた衛星観測データセットの構築. 第40回レーザセンシングシンポジウム, 同予稿集, 16-18

西澤智明, 神慶孝, 日暮明子, 清水厚, 谷本浩志, 五藤大輔 (2022) データ同化に向けたエアロゾル等衛星観測データセットの構築. 2022 年度秋季大会講演予稿集, 122

西澤智明, 工藤玲, 及川栄治, 日暮明子, 神慶孝, 岡本創 (2023) EarthCARE 衛星搭載ライダー・イメージャーを用いたエアロゾル・雲導出アルゴリズムの開発 (2), 第41回レーザセンシングシンポジウム, 同予稿集, 1, 69-70

日暮明子, 西澤智明, 工藤玲, 及川栄治, 岡本創 (2021) 衛星搭載ライダー・イメージャー複合解析手法による全球エアロゾル特性の長期解析. 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 2021 年度秋季大会講演予稿集, 158

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 147 号  
NIES Research Project Report, No.147

(SR-147-2024)

高時空間分解能観測データの同化による全球大気汚染予測手法の構築  
(所内公募型提案研究)  
令和 2～令和 4 年度

Development of a methodology to forecast global air pollution by assimilating  
high-resolved spatiotemporal measurements  
FY2020～2022

---

令和 6 年 9 月発行

編 集 国立環境研究所 編集分科会  
発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所  
〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2  
E-mail : pub@nies.go.jp

Published by the National Institute for Environmental Studies  
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan  
September 2024

---

無断転載を禁じます

国立環境研究所の刊行物は以下の URL からご覧いただけます。

<https://www.nies.go.jp/kanko/index.html>