

令和 3 年 4 月 28 日現在

機関番号：82101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04711

研究課題名（和文）空間シームレスな大気汚染物質輸送モデルによるPM_{2.5}の二次生成成分の精緻化研究課題名（英文）Refinement of secondary components of PM_{2.5} by spatially seamless air pollutant transport model

研究代表者

五藤 大輔 (Goto, Daisuke)

国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境研究センター・主任研究員

研究者番号：80585068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,480,000 円

研究成果の概要（和文）：日本周辺の領域対象実験では、NICAM-Chemモデルが2つの静止衛星や地上観測で検出された越境汚染をうまく再現できた。続いて、全球14km高解像度実験を行い、発生源付近や北極輸送のエアロゾル再現性を検証した。以上を踏まえて、二次生成有機炭素エアロゾル（SOA）を計算する簡易モジュールをNICAM-Chemに導入した。その結果、人間活動由来SOAは放射強制力が -0.08 W m^{-2} となり、最新のIPCCと整合的であった。中国では地表面エアロゾル濃度が増加し、モデルの過小評価が改善した。バイオマス燃焼起源SOAは -0.03 W m^{-2} となり、考慮すべき成分であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PM_{2.5}（微小エアロゾル）は代表的な大気汚染物質であり、人体への健康影響もあることから、大陸からの越境汚染の我が国への流入量を見積もることは、環境だけでなく社会問題であるとともに、温暖化を抑制可能な冷却効果を持つ気候にも影響しうる重要物質である。本研究を通じたモデル検証やモデル高度化によって、予測にまだ改善の余地がある我が国の大気汚染物質予測モデルに、本研究で開発したNICAM-Chemが加わる可能性が高まったとともに、本研究で行った全球規模で高度化されたエアロゾル計算実績によって、今後益々高精度な気候影響評価に繋がる可能性が高まった。

研究成果の概要（英文）：In the regional experiment around Japan, the NICAM-Chem model was able to successfully reproduce the transboundary air pollution detected by two geostationary satellites and ground-based observations. Subsequently, a global 14km high-resolution experiment was conducted to verify the aerosol reproducibility near the source and in the remote area such as Arctic. Based on the above, a simplified module for calculating the secondary organic aerosol (SOA) was introduced into NICAM-Chem. As a result, an anthropogenic SOA has a radiative forcing of -0.08 W m^{-2} , which is consistent with the latest IPCC. In China, the surface aerosol concentrations increased, resulting in improved model underestimation. The SOA generated from biomass burning is -0.03 W m^{-2} , which revealed that it was a component to be considered.

研究分野：大気化学

キーワード：大気汚染物質輸送モデル 全球高分解能計算 モデル開発と観測との検証 二次生成有機炭素エアロゾル エアロゾル放射強制力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

PM_{2.5} (微小エアロゾル) は代表的な大気汚染物質であり、人体への健康影響もあることから、大陸からの越境汚染の我が国への流入量を見積もることは、環境だけでなく社会問題である。環境省大気汚染物質広域監視システムを中心とした観測が広範囲で強化されたが、観測だけでは複合的な発生源をもつ PM_{2.5} の起因を特定することは困難であり、数値シミュレーションによる PM_{2.5} 予測モデルが必要である。我が国の大気汚染物質に関する予測モデルは、国立環境研究所 VENUS や九州大学 SPRINTARS などがあるが、予測精度には改善の余地があり、新しいモデル開発も期待されている。この状況下で、課題提案者は伸縮自在な格子システムをもち、全球型モデルでありながら領域型モデルとしても対応可能な力学コアをもつ、全球-領域ハイブリッド型大気汚染物質輸送モデル (NICAM-Chem) を継続的に開発・改良してきた。そこで、新しい大気汚染物質に関する予測モデルとして、NICAM-Chem を発展させることで、PM_{2.5} 予測精度を上げていきたい。

2. 研究の目的

PM_{2.5} は代表的な大気汚染物質であり、我が国では越境汚染と国内の都市汚染の複合的な発生源をもつ。PM_{2.5} の時空間分布を精度良く知るためには、観測網充実に加えて、数値シミュレーションの高精度化が必須である。このような背景下で、課題提案者は新しい大気汚染物質輸送モデル (NICAM-Chem) を開発してきた。このモデルは領域~全球の空間をシームレスに計算することが可能であり、我が国における PM_{2.5} 予測モデル精度向上に役立てることができる。しかし、PM_{2.5} の二次生成成分に関してはモデル化が未対応であり、本提案課題でこれらの成分の精緻化を行い、我が国周辺の PM_{2.5} 予測精度向上だけでなく、NICAM-Chem による全球高解像度計算やデータ同化などに応用できるモジュール開発を目指す。

3. 研究の方法

PM_{2.5} の二次生成成分は直接観測された事例に限りがあるため、それらを含んだ全エアロゾル量等の間接的な量を用いた検証が必要となることから、PM_{2.5} の二次生成成分以外のモデル検証を行った。まず、NICAM-Chem モデルの PM_{2.5} シミュレーションの再現性レベルを把握するために、複数の観測を収集し、観測結果を用いてモデル検証を行った。モデルは水平解像度を最小 10km 程度、日本全体を 25km 程度に設定したストレッチ格子法を用いた。観測は、近年打ち上げられた我が国が運用する静止衛星ひまわりに搭載された AHI のエアロゾル高時間分解能のリトリーバル結果を中心に、韓国で運用している静止衛星 COMS に搭載された GOCI のエアロゾル高時間分解能のリトリーバル結果、国立環境研究所が主に運用するライダーネットワークのエアロゾル鉛直分布、環境省大気汚染物質広域監視システムの PM_{2.5} 地上観測結果も用いた。比較対象は 2016 年 5 月とした。

次に、NICAM-Chem を用いて全球高解像度実験を行い、領域規模の計算で検証を行った日本以外の場所におけるエアロゾル再現性を検証した。これは、領域対象実験だけではモデル自体の物質収支検証ができないためであり、全球規模で比較を行うことで、モデルのより正確な検証が可能となるためである。ここでのモデル解像度は領域対象実験と同程度である全球 14km とした。この解像度は世界最高レベルのものであり、計算機負荷が非常に大きいので、同じ物理スキームを用いて解像度をやや粗くした全球 56km 計算も行なった。56km 解像度は全球規模での大気汚染物質計算では高解像度に属するものである。

全球でのモデル再現性を十分に検証した上で、全球 56km 解像度の雲解像モデルを基本設定とし、二次生成有機炭素 (SOA) を計算することができる 2 生成物モデルを新たに導入し、SOA の地表面濃度、全球における SOA の収量、光学的厚さへの影響、およびその放射強制力を推定した。また一般的な全球モデルでは、SOA の前駆気体としては森林由来のテルペン類のみが考慮されているが、本研究では人間活動由来の芳香族化合物やバイオマス燃焼起源の揮発性有機化合物 (VOC) を新しく考慮した。

4. 研究成果

NICAM-Chem モデルの PM_{2.5} シミュレーションの再現性レベルを把握するために、始めに実施した日本周辺を対象とした領域規模での比較検証の結果から、NICAM-Chem が 2 つの静止衛星 (AHI/HIMAWARI および GOCI/COMS) で検出された越境汚染をうまく再現でき、特にシベリア森林火災の日本への到来 (高濃度エアロゾルの輸送) をうまく再現できていることが確認できた (図 1)。しかし、日本周辺においてエアロゾルの鉛直分布を詳細に分析すると、NICAM-Chem で計算された森林火災由来のエアロゾルは地上観測ライダーで得られたエアロゾル鉛直分布よりも過大評価で、地表面 PM_{2.5} 濃度も地上観測に比べて過大評価していることがわかった。また、中国東岸で NICAM-Chem のエアロゾル量を過小評価していたことから、SOA などの二次生成成分が現状で過小評価していることが示唆された。以上のように、モデルの得意な点と苦手

な点が明らかとなり、モデルの標準実験設定かが概ね整ったので、モデルの苦手な点である二次生成成分のモジュール高精度化に向けて着手した。また、ここで計算された NICAM-Chem の結果は、他モデルでエアロゾルデータ同化した結果よりも観測に近いことがあり、このことはデータ同化手法と共に、高解像度計算がエアロゾル再現性を向上させることを明らかにし、エアロゾル予測において重要な知見が得られた。本成果は Goto et al. (2019)として Atmospheric Research (Impact Factor=4.676) から公表している。

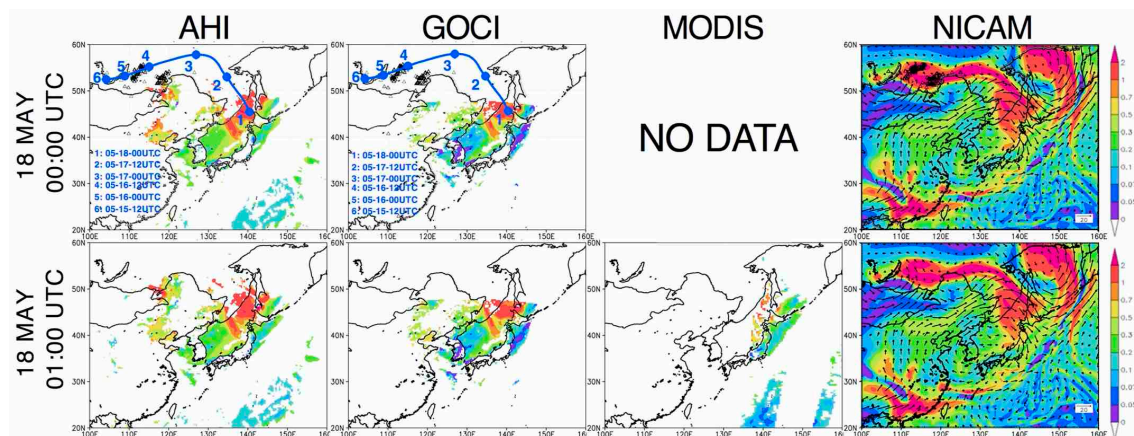


図 1. エアロゾル光学的厚さ

続いて、NICAM-Chem を用いた全球高解像度実験を行ったところ、全球高解像度にすることによって、発生源付近でのエアロゾル再現性も向上し、特に北極へのブラックカーボンや硫酸塩の輸送が非常に良く改善され、従来のモデルでは難しかった極域でのエアロゾル濃度季節変動（特に春季の高濃度）を再現することができた（図 2）。これは高解像度にすることによって、モデル内の雲の表現がより現実的となり、降水のある領域が減少することで、エアロゾルの除去量が減少し、輸送が促進された結果であると考えられる。本計算は気候学的な知見を得るために 3 年間積分したものであり、全球 14km 解像度で大気汚染物質を長期間積分した例は世界でも初めてであり、世の中でも高解像度と分類されている全球 56km 実験結果との定量的な比較を行なった点も大気汚染物質の気候モデリング界において大きなインパクトを与えた。本成果は Goto et al. (2020)として、Geophysical Model Development (Impact Factor=5.240) から公表した。

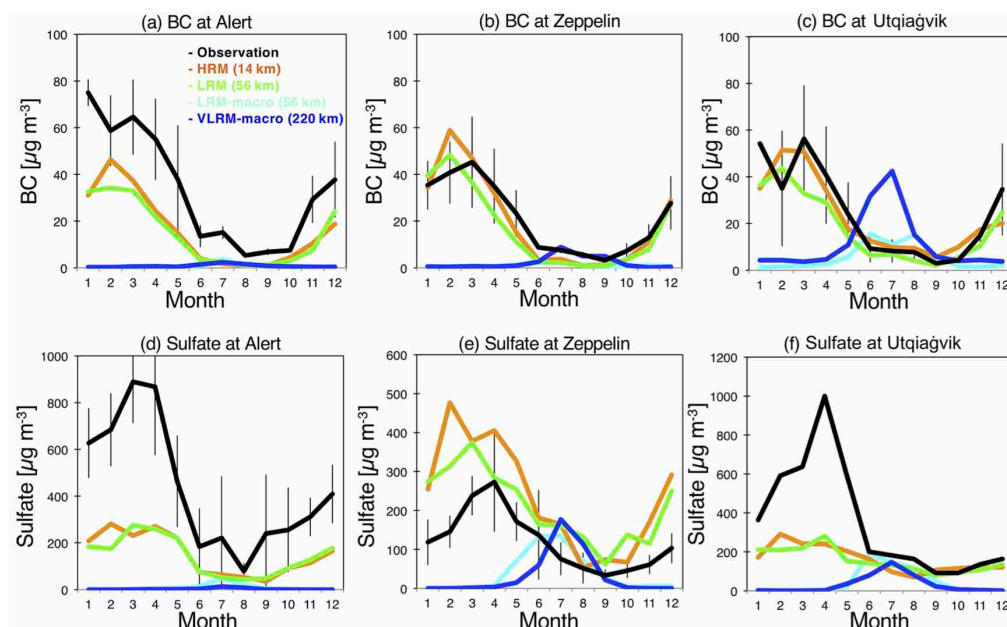


図 2. 北極でのエアロゾル地表面濃度

図 2 の結果から高解像度計算の方がエアロゾル再現性は良いことが明らかとなった。しかし、全球 14km と 56km 解像度の計算結果を比較したところ、両者の差が平均場としては 10%程度の差しか生じないことがわかったため、全球 56km 解像度を基本設定とすることにした。この新しい基準モデルに対して、SOA 計算モジュールを導入したところ、森林由来のテルペン類由来の SOA (BSOA) 全球生成量は $22.1 [\text{Tg yr}^{-1}]$ 、人間活動由来の芳香族化合物 (VOC) 由来の SOA (ASOA)

全球生成量は 43.9 [Tg yr⁻¹] (過去の文献では 24.6-70.0 [Tg yr⁻¹])、バイオマス燃焼起源の VOC 由来の SOA (BBSOA) 全球生成量は 12.7 [Tg yr⁻¹] (過去の文献では 9.5-15.5 [Tg yr⁻¹]) と計算された。この結果、ASOA 導入によって、AOT は 0.0014 増加し、エアロゾル放射強制力は大気上端で -0.08 [W m⁻²] の変化が見られた。IPCC-AR5 (2013) では人為起源有機炭素エアロゾルに対する放射強制力は -0.03 [W m⁻²] (-0.27 [W m⁻²] から +0.20 [W m⁻²]) と見積もられていたことと整合した。さらに領域規模に注目すると、例えば、ASOA が多い中国では地表面平均濃度が 3.96 [μg m⁻³] から 8.25 [μg m⁻³] 増加した。これによって、過小評価していたモデルの有機炭素エアロゾル濃度は改善に向かった。一方で、BBSOA 導入によって、AOT は 0.0005 増加し、エアロゾル放射強制力は大気上端で -0.03 [W m⁻²] の変化が見られた。IPCC-AR5 (2013) では BBSOA 放射強制力は推定されていなかったので参照すべき値はないが、他の気候モデルでは未考慮である物質の放射強制力が定量化されたことは価値がある。さらに領域規模に注目すると、例えば、BBSOA が多いアマゾンでは地表面平均濃度が 4.18 [μg m⁻³] から 4.74 [μg m⁻³] 増加し、AOT も 0.043 から 0.044 と微増した。ASOA とは異なり、前駆物質の発生源が赤道に近い地域であることが多いため、対流活動によって、BBSOA が 2-6km 上空でも生成されることがわかった。しかし、モデルで計算された AOT の過小評価は十分に改善されなかった。これはバイオマス燃焼によって発生する一次生成有機炭素エアロゾルが全体に及ぼす影響が非常に大きいため、BBSOA の寄与が相対的に小さく見えたためである。それでも、地球温暖化によって増大すると予想される BBSOA の考慮は、大気汚染の気候影響評価をする際には重要である。以上の成果は論文としてまとめている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 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.	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-scale Simulations of Atmospheric Pollutants Using a Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Vadrevu K., Ohara T., Justice C. (eds) Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham	6. 最初と最後の頁 277 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-67474-2_14	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Dai T., Cheng Y., Zhang P., Shi G., Sekiguchi M., Suzuki K., Goto D., Nakajima T.	4. 巻 190
2. 論文標題 Impacts of meteorological nudging on the global dust cycle simulated by NICAM coupled with an aerosol model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 99-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosenv.2018.07.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T.M., Choi M., Kim J., Sugimoto N., Shimizu A., Oikawa E., Nakajima T.	4. 巻 217
2. 論文標題 Aerosol model evaluation using two geostationary satellites over East Asia in May 2016	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Research	6. 最初と最後の頁 93-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosres.2018.10.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Dai T., Cheng Y., Suzuki K., Goto D., Kikuchi M., Schutgens N.A.J., Yoshida M., Zhang P., Husi L., Shi G., Nakajima T.	4. 巻 11(3)
2. 論文標題 Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advances in Modeling Earth Systems	6. 最初と最後の頁 680-711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018MS001475	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Yousuke, Goto Daisuke, Michibata Takuro, Suzuki Kentaroh, Takemura Toshihiko, Tomita Hirofumi, Nakajima Teruyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 985
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-03379-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jing Xianwen, Suzuki Kentaroh, Guo Huan, Goto Daisuke, Ogura Tomoo, Koshiro Tsuyoshi, Mulmenstadt Johannes	4. 巻 122
2. 論文標題 A Multimodel Study on Warm Precipitation Biases in Global Models Compared to Satellite Observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 11,806 ~ 11,824
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JD027310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Schutgens Nick, Tsyro Svetlana, Gryspeerdt Edward, Goto Daisuke, Weigum Natalie, Schulz Michael, Stier Philip	4. 巻 17
2. 論文標題 On the spatio-temporal representativeness of observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 9761 ~ 9780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/acp-17-9761-2017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Goto Daisuke, Sato Yousuke, Yashiro Hisashi, Suzuki Kentaroh, Oikawa Eiji, Kudo Rei, Nagao Takashi M., Nakajima Teruyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 3731 ~ 3768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-13-3731-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Goto Daisuke, Morino Yu, Ohara Toshimasa, Sekiyama Tsuyoshi Thomas, Uchida Junya, Nakajima Teruyuki	4. 巻 20
2. 論文標題 Application of linear minimum variance estimation to the multi-model ensemble of atmospheric radioactive Cs-137 with observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 3589 ~ 3607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/acp-20-3589-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cheng Yueming, Dai Tie, Goto Daisuke, Schutgens Nick A. J., Shi Guangyu, Nakajima Teruyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Investigating the assimilation of CALIPSO global aerosol vertical observations using a four-dimensional ensemble Kalman filter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 13445 ~ 13467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/acp-19-13445-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Dai, Cheng, Goto, Schutgens, Kikuchi, Yoshida, Shi, Nakajima	4. 巻 10
2. 論文標題 Inverting the East Asian Dust Emission Fluxes Using the Ensemble Kalman Smoother and Himawari-8 AODs: A Case Study with WRF-Chem v3.5.1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 543 ~ 543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos10090543	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T., Sugimoto N., Shimizu A., Nakajima T.
2. 発表標題 Understanding of Atmospheric Aerosol Behavior Using a Semi-Regional Model, a Geostationary Satellite and in Situ Measurements over Japan in May 2016
3. 学会等名 15th Annual Meeting: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goto D.
2. 発表標題 Analysis of aerosol transport to Japan by combining seamless regional model and multiple observations including geostationary satellite: A case study of May 2016
3. 学会等名 Land Cover/Land Use Changes (LC/LUC) and Impacts on Environment in South/Southeast Asia -International Regional Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goto D., Sato Y., Yashiro H., Suzuki K., Nakajima T.
2. 発表標題 Global aerosol climatology with 14 km grid spacing using a non-hydrostatic atmospheric transport model
3. 学会等名 2018 International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goto D.
2. 発表標題 Global aerosol budget and its radiative forcing using a non-hydrostatic global atmospheric transport model with 14 km grid spacing
3. 学会等名 2018 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goto D.
2. 発表標題 Global aerosol simulation with 14 km grid spacing
3. 学会等名 5th International SKYNET workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五藤大輔
2. 発表標題 全球高解像度シミュレーションによるエアロゾル物質収支と放射強制力
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T., Sugimoto N., Shimizu A., Nakajima T.
2. 発表標題 Model evaluation using a geo-stationary satellite and in-situ measurements around Japan in May 2016
3. 学会等名 2017 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Goto D., Sato Y., Yashiro H., Suzuki K., Nakajima T.
2. 発表標題 Aerosol climatology with 14 km grid spacing using a non-hydrostatic global atmospheric transport model
3. 学会等名 16th AeroCom workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 五藤大輔, 菊池麻紀, 鈴木健太郎, 早崎将光, 吉田真由美, 永尾隆, 杉本伸夫, 清水厚, 中島映至
2. 発表標題 2016年5月における静止衛星ひまわりを用いたNICAMのエアロゾル再現性の検証
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 五藤大輔
2. 発表標題 エアロゾル全球高解像度気候実験
3. 学会等名 超高解像度大気モデル開発ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 五藤大輔, 佐藤陽祐, 八代尚, 鈴木健太郎, 中島映至
2. 発表標題 地球に存在する大気汚染物質を高解像度で計算可能なシミュレーションモデルの開発
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Goto Daisuke
2. 発表標題 Global aerosol simulations with a cloud-system resolving model
3. 学会等名 8th International EarthCARE science workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五藤大輔
2. 発表標題 全球高解像度エアロゾルシミュレーションを対象としたモデル解像度の影響評価
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	IAP/CAS			