

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 9 日現在

機関番号：82101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26740010

研究課題名(和文) 全球-領域ハイブリッド型物質輸送モデルを用いたPM2.5シミュレーション高精度化

研究課題名(英文) Improvement of PM2.5 simulations using a global-to-regional hybrid material 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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：新しいタイプである全球-領域ハイブリッド型のアerosol輸送モデル(NICAM-Chem)に用いて、アジアのPM2.5予測精度向上を目指した。PM2.5の代表的な成分である黒色炭素(BC)と硫酸塩に注目した結果、月平均濃度分布の再現性は良好であり、高解像度にする事でメソスケールの擾乱に伴う濃度変化を再現できた。NICAMとは別の力学モデルであるMIROCも用いて、雲場の違いによるPM2.5濃度への影響も定量的に評価した。WRF-CMAQモデルも用いて、NICAM-ChemのBCと硫酸塩濃度の検証も行った。モデル間の不確実性を示すことができ、今後のPM2.5予測にも役立つものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：A new-type aerosol transport model (NICAM-Chem) in hybrid scales covering from global to regional areas was developed for properly simulating PM2.5 distribution in Asia. The simulated PM2.5 components of both primary particle of black carbon (BC) and secondary particle of sulfate were generally comparable to the observations in monthly mean values. Especially, the high-resolution simulations give a better performance of simulating diurnal variations in aerosol due to meso-scale phenomena. A model intercomparison using NICAM and different dynamic model, MIROC, quantified the differences in simulating sulfate and PM2.5 caused by the difference in simulating cloud fields. A comparison in BC and sulfate between NICAM-Chem and different transport model, WRF-CMAQ, with the observations were conducted. These results clarify the uncertainties of models, which is an important message to properly simulate PM2.5 distribution.

研究分野：環境学，環境解析学，環境動態解析

キーワード：アerosol輸送モデル PM2.5 大気汚染 東アジア NICAM ストレッチ格子法

## 1. 研究開始当初の背景

大気汚染物質として近年注目される PM<sub>2.5</sub> (微小エアロゾル) は、我が国には大陸からの越境汚染と国内で発生する都市汚染の複合的な発生源があり、それらの健康影響問題も懸念される。PM<sub>2.5</sub> の空間分布を正確に把握するには、継続的且つ広範囲の観測網の整備と共に、エアロゾル輸送モデルによる予測が必要である。しかし、そのような観測網を進展させるには多大な費用が必要であり、観測不可能な場所もあることから、観測網の充実を実現するのはなかなか難しい。そこで、エアロゾル輸送モデルをより高精度化する必要がある。現在の我が国では、米国産の領域型エアロゾル輸送モデル CMAQ を用いたエアロゾルシミュレーションが広く行われている<sup>(1,2)</sup>が、観測結果を利用できない場合においてシミュレーション結果をより良く向上させるには、他のモデルによるシミュレーション結果との比較を行うことが唯一の方法である。しかし、我が国では CMAQ 以外の領域対象型エアロゾル輸送モデルがあまり発達していないため、実質的なモデル間の比較による精度向上を行うのは難しい現状にある。

また、メガシティ（東京などの人口の多い大規模な都市）を中心とした広域大気汚染は全球規模でのエアロゾルの気候影響にも強く影響していることがわかり、より高空間解像度によるシミュレーションの必要性が増してきた<sup>(3)</sup>。そこで、理化学研究所計算科学研究機構・海洋研究開発機構・東京大学大気海洋研究所の日本チームで開発している正 20 面体格子非静力学モデル (NICAM)<sup>(4,5)</sup> と結合したエアロゾル輸送モデル<sup>(6,7)</sup> を用いる必要がある。このモデルは、NICAM に特有のストレッチ格子法（焦点を当てた領域を中心として、モデルのグリッドを集中することにより、中心付近を高解像度にするができる方法<sup>(8)</sup>）を適用することで、領域型モデルとなって計算コストが抑制され、大学レベルで運用されるスーパーコンピュータを用いて日本付近 10km 実験を遂行することができる。これを利用することで超大型スーパーコンピュータを用いた全球高解像度実験への布石となり、ごく近い将来に大気汚染シミュレーションにブレイクスルーを与えることができると期待される。

## &lt;引用文献&gt;

[1] Morino et al. (2015), *Aerosol Air Qual. Res.*, 15: 2009-2023. [2] Chitani et al. (2011), *Atmos. Environ.*, 45, 1383-1393. [3] Goto (2014), *Env. Pol.* 195, 330-335 [4] Tomita and Satoh (2004), *Fluid. Dyn. Res.*, 34, 357-400. [5] Satoh et al. (2008), *J. Comput. Phys.* 227, 3486-3514. [6] Takemura et al. (2005), *J. Geophys. Res.*, 110, D02202. [7] Suzuki et al. (2008), *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19817. [8] Tomita (2008), *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 107-119.

## 2. 研究の目的

伸縮自在な格子システムをもち、全球型でありながら領域型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エアロゾル輸送モデル (NICAM-Chem) を用いて、国内外に起源をもつ PM<sub>2.5</sub> のモデル再現性を評価すると共に、アジア全域における PM<sub>2.5</sub> 予測精度向上を目指す。

## 3. 研究の方法

まず、NICAM-Chem のモデル実験を行うためのセットアップ期間として、計算コストを抑制して高解像度実験を行うためのツールであるストレッチ格子法の適用可能性を調べた。モデルの実験条件は、2007 年 8 月の関東地方を対象に、最小解像度約 10km とした。次に、力学ホストモデルのエアロゾル再現性への影響を調べるために、NICAM とは別の力学ホストモデルである MIROC<sup>(6)</sup> を用いて、エアロゾル分布の比較を、東アジア領域を対象として行った。ホストモデルの違いは雲や降水に現れやすいため、特に親水性の高い硫酸塩エアロゾルに着目した。最後に、NICAM のモデル検証をさらに進め、WRF-CMAQ<sup>(12)</sup> および観測結果を用いて、PM<sub>2.5</sub> に含まれる成分である硫酸塩 (sulfate) と黒色炭素 (ブラックカーボン: BC) に関する予測精度を比較検証した。以上のモデルによる比較を通じて、PM<sub>2.5</sub> 予測精度のモデル不確実性を示した。

## 4. 研究成果

(1) NICAM-Chem の基本気象場再現性の検証を中心に行った。対象とした夏季関東地方の中心部では、風や気温などの基本気象場の再現性は良好であったが、関東平野の山間部に近い前橋付近では、主にモデル解像度が不十分であるために、気象場再現性が比較的良くなかった。次に、エアロゾル場の再現性を調べるために、一次生成粒子の代表的な物質として BC、二次生成粒子の代表的な物質として硫酸塩 (Sulfate) に注目した。また、ストレッチ格子法の再現性を評価するために、準一様格子法を用いた NICAM-Chem を用いて、東アジアスケールにおいて両者の比較を行った。但し、計算機資源の制約により、準一様格子法を用いた実験は低解像度実験 (220km 格子) である。その結果、図 1 に示したように、どちらの解像度のモデル結果も東アジアスケールでの月平均値の再現性は良好であった。しかし、高解像度であるストレッチ格子法だけが総観規模の擾乱に伴う濃度変化を再現することも確かめることができた (図 2)。このことから、ストレッチ格子法は高解像度実験に十分適用でき、総観規模の変動を再現するためには高解像度モデルが必要であることが示された。逆に、月平均値の再現性向上を目指す場合には低解像度実験でも問題ないことも同時に示された。以上の結果は、欧州地球物理学連合の会誌の 1 つである *Geophysical Model Development* にて公表した (業績④)。

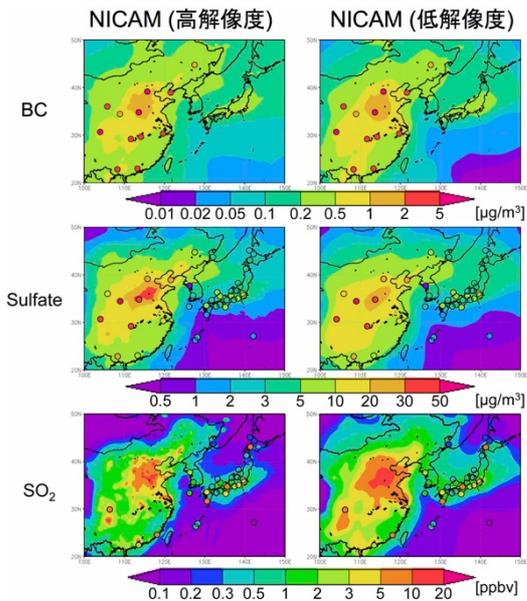


図 1. 2007 年 8 月における BC, Sulfate, 二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) の空間分布図 (Goto et al., 2015a を一部改変)

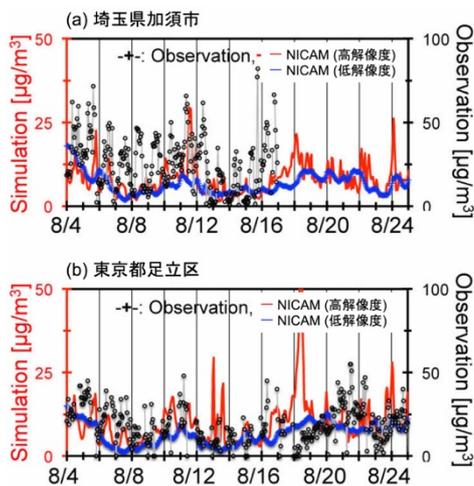


図 2. 2007 年 8 月の関東平野の地点 (埼玉県加須市と東京都足立区) における PM<sub>2.5</sub> 濃度の時系列変化 (Goto et al., 2015a を一部改変)

(2) 力学ホストモデルである NICAM のエアロゾル再現性への影響を調べるために、NICAM とは別の力学ホストモデルである MIROC<sup>(6)</sup> を用いて、エアロゾル分布の比較を、東アジア領域を対象として行った。ホストモデルの違いは雲や降水に現れやすいため、親水性の高い Sulfate に着目した。その結果、図 3 にまとめたように、雲場や輸送場の違いによって、発生源付近での Sulfate およびその前駆気体である二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) の濃度再現性に違いが見られ、その影響が下流域である日本付近やその上空で顕著に出ることが示された。雲場の違いによる硫酸塩濃度の違いを定量的に示したことが非常に重要な点であり、

異なるモデルと PM<sub>2.5</sub> 濃度を比較する際にも、各モデルの雲場再現性も同時に比較する必要があることが示唆される。以上の結果は、米国地球物理学連合の会誌の 1 つである Journal of Geophysical Research Atmosphere にて公表した (業績⑤)。

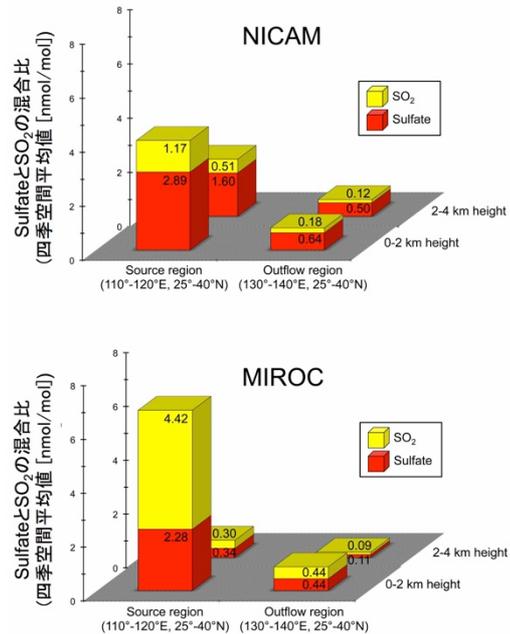


図 3. NICAM と MIROC の 2 モデルで計算された、Sulfate の前駆物質 SO<sub>2</sub> の発生源付近と流出領域、および、高度 2km 以下と以上における年平均濃度

(3) NICAM-Chem モデルの検証をさらに進め、他のモデルである WRF-CMAQ<sup>(12)</sup> および観測結果を用いて、PM<sub>2.5</sub> に含まれる成分である BC と Sulfate に関する予測精度を比較検証した。その結果、図 4 に示すように、一次生成粒子である BC の比較から、川崎・福岡では NICAM-Chem の方が再現性は良いが、大阪・名古屋では WRF-CMAQ の方が再現性は良かった。また、二次生成粒子である硫酸塩の比較から、国内汚染寄与が大きいと考えられる川崎では両モデルの再現性は概ね良好であったが、越境汚染寄与が大きくなる場所ではモデル再現性が異なっていた。例えば隠岐では WRF-CMAQ の方が観測結果に近く、越境汚染をよく再現できていることが示唆された。しかし大阪では NICAM-Chem の方が越境汚染寄与は小さいために、観測結果をよく再現できた。エアロゾル成分のモデル相互比較が我が国を対象として行われるのは珍しく、両モデルの長所短所、つまりモデル不確実性を示すことができたことは重要である。しかし、異なるモデルの共通の問題点を見つけるには、比較期間を増やし、統計的なデータ処理等を行う必要があると考えている。

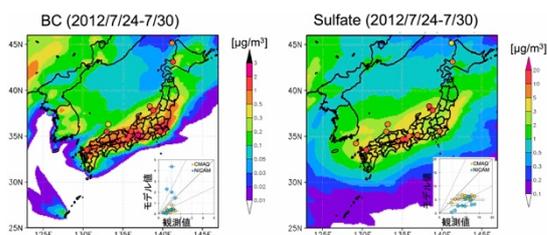


図 4. NICAM を用いて計算した BC と Sulfate の 2012 年 7 月の地表面付近濃度分布図。図中の相関図には NICAM と観測の比較、および、WRF-CMAQ と観測の比較結果を含んでいる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Goto D., Sato Y., Yashiro H., Suzuki K., Nakajima T. (2017) Validation of high-resolution aerosol optical thickness simulated by a global non-hydrostatic model against remote sensing measurements. AIP Conference Proceedings, 1810, 100002, doi:10.1063/1.4975557 (査読有) .
- ② 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, doi:10.1016/j.atmosenv.2017.03.030 (査読有) .
- ③ Goto D., Ueda K., Ng C.F.S., Takami A., Ariga T., Matsuhashi K., Nakajima T. (2016) Estimation of excess mortality due to long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> in Japan using a high-resolution model for present and future scenarios. Atmospheric Environment, 140, 320-332, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.06.015 (査読有) .
- ④ Schutgens N.A.J., Gryspeerdt E., Weigum N., Tsyro S., Goto D., Schulz M., Stier P. (2016) Will a perfect model agree with perfect observations? The impact of spatial sampling. Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 6335-6353, doi:10.5194/acp-16-6335-2016 (査読有) .
- ⑤ Goto D., Nakajima T., Dai T., Takemura T., Kajino M., Matsui H., Takami A., Hatakeyama S., Sugimoto N., Shimizu A., Ohara T. (2015) An evaluation of simulated sulfate over East Asia through global model inter-comparison, Journal of Geophysical Research Atmosphere, 120 (12), 6247-6270, doi:10.1002/2014JD021693 (査読有) .
- ⑥ 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, 235-259, doi:10.5194/gmd-8-235-2015 (査読有) .

[学会発表] (計 14 件)

- ① Goto D., Ueda K., Ng C.F.S., Takami A., Ariga T., Matsuhashi K., Nakajima T. (2016) Influence of model grid size on the simulation of PM<sub>2.5</sub> and the related excess mortality in Japan. 2016 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, 14 December, 2016.
- ② 五藤大輔, 中島映至 (2016) モデル水平分解能のエアロゾル濃度への影響. 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 名古屋大学豊田講堂シンポジオン会議室 (愛知県名古屋市), 2016 年 10 月 28 日.
- ③ 五藤大輔, 中島映至 (2016) 全球から領域規模に対応した大気汚染物質輸送モデルとその応用. 第 22 回大気化学討論会, 北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟 2F (北海道札幌市), 2016 年 10 月 14 日.
- ④ Goto D., Nakajima T. (2016) High resolved aerosol simulations using a non-hydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM). 15<sup>th</sup> AeroCom workshop, Beijing, China, 19 September, 2016.
- ⑤ Goto D. (2016) Seamless global-to-regional simulation of aerosols with O(10km) grid spacing, 2nd International Workshop on SLCPs in Asia: Chemistry-climate modeling and its applications, Incheon, South Korea, 18 February, 2016 (invited).
- ⑥ Goto D. (2015) Regional simulation of aerosols using NICAM-Chem with a stretched-grid system. The 13<sup>th</sup> International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ13), Kobe International Conference Center (Kobe, Japan), 11 November, 2015.
- ⑦ Goto D., Nakajima T., Dai T., Takemura T., Kajino M., Matsui H., Takami A., Hatakeyama S., Sugimoto N., Shimizu A., Ohara T. (2015) Uncertainty of sulfate aerosols against differences between host climate models. 26th IUGG 2015, Prague, Czech Republic, 27 June, 2015.
- ⑧ Goto D. (2015) Assessment of sulfate aerosols and its uncertainty due to clouds using global models. International Workshop on Land Use/Cover Changes and Air Pollution in Asia, Bogor, Indonesia, 6 August, 2015.
- ⑨ Goto D., Nakajima T., Satoh M., MEXT/RECCA/SALSA Project Team (2015) Development of an atmospheric aerosol-

chemistry model (NICAM-Chem) and its application to regional simulations over East Asia. The 6<sup>th</sup> MICS-Asia workshop, Zhuhai, China, 6 Feb, 2015.

- ⑩ Goto D., Nakajima T., Satoh M., MEXT/RECCA/SALSA Project Team (2014) Development of aerosol-chemistry transport model coupled to non-hydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) through applying a stretched grid system to regional simulations around Japan. 2014 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting San Francisco, USA, 15 December, 2014.
- ⑪ 五藤大輔, 中島映至, Dai T., 竹村俊彦, 梶野瑞王, 松井仁志, 原由香里, 高見昭憲, 島山史郎, 杉本伸夫, 清水厚, 大原利真 (2014) アジア域における硫酸塩エアロゾル分布に対するホストモデルの不確実性評価. 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市), 2014 年 10 月 22 日.
- ⑫ Goto D., Nakajima T., Murata R., Yashiro H., Sudo K., Dai T., Misawa S., Uchida J., Ohara T., MEXT/RECCA/SALSA Project Team (2014) Development of simulating aerosols and tropospheric ozone in megacities using a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system. 2014 International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference, Natal, Brazil, 25 September, 2014.
- ⑬ Goto D., Nakajima T., Dai T., Yashiro H., Sudo K., Murata R., Misawa S., Uchida J., Inoue T., Tsuruta H., Satoh M., Tomita H., Ohara T., MEXT/RECCA/SALSA Project Team (2014) Simulation of atmospheric aerosols and ozone around Tokyo using a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting 2014, Royton Sapporo Hotel (Sapporo, Japan), 1 August, 2014.
- ⑭ Goto D., Nakajima T., Dai T., Yashiro H., Murata R., Sudo K., Misawa S., Uchida J., MEXT/RECCA/SALSA Project Team (2014) Simulation of SLCP in Japan using a new atmospheric aerosol-chemistry model (NICAM-Chem) with a stretched-grid system. 2<sup>nd</sup> ABC-SLCP Symposium, Fukutake Hall, Hongo Campus, University of the Tokyo (Tokyo, Japan), 22 July, 2014.

## 6. 研究組織

### (1)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