地球表層における物質循環モデルの開発研究

課題責任者
関谷　高志　　　海洋研究開発機構 地球環境部門　地球表層システム研究センター

著者
Jagat S. H. Bisht *[1], Prabir K. Patra *[1,2], 滝川　雅之*[3],　金谷　有剛*[1],　山口　将大*[4,1]
*[1] 海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター, *[2] 総合地球環境研究所, *[3] 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター, *[4] 国立環境研究所 地球システム領域

キーワード：WRF-GHG, CO_2, Kanto, high-resolution

1. イントロダクション

CO_2 は長寿命温室効果ガス（Greenhouse gas; GHG）であり、人為起源と自然起源の両方の発生源から放出される。大気中の CO_2 濃度は、おもに人為的活動による排出のため、増加し続けている[1]。地球の大気中 CO_2 濃度は、主にエネルギー源としての化石燃料（石炭、石油、天然ガスなど）燃焼、森林伐採、工業プロセスなど、様々な人間活動によって上昇している。工業、住宅、商業、輸送プロセスなどの様々な排出源からの CO_2 排出量の統計量などに基づき人為起源 CO_2 排出インベントリが整備され、精度向上や期間延長などのために定期的に更新・改善されている[2]。現在の大気中の CO_2 濃度は、人間活動、特に化石燃料の燃焼によるところが大きいことが、いくつかの研究で実証されている[1]。世界の化石燃料による CO_2 排出量の 60%以上が都市域で排出されていることが報告されており[3]、緩和努力における重要な削減対象となっている。

人為的な CO_2 排出に加えて、大気-陸域生物圏の炭素交換は大気中の CO_2 濃度に大きく影響し、大気中の炭素循環を理解する上で同じように重要である。大気-生態系における CO_2 交換量の日変化は、主に日射量、気温、湿度などの気象条件によって変化する、植物生理学的応答によって求められる。我々の研究グループでは生物圏と大気間の二酸化炭素（CO_2）のメソスケール輸送およびフラックス交換推定が可能な領域化学輸送モデル(WRF-GHG)を開発し、つくばでの観測結果との検証等を行っているが、本モデルは 1km 以下の空間スケールにまで適用可能である[4]。WRF-GHG に関して、Ahmadov ら[5]は植生光合成・呼吸モデル（VPRM）[6]モジュールと WRF モデルを結合し、ヨーロッパ上空の CO_2 モデリングを行った。この枠組みは、他の研究 [7, 8]でも利用されており、大気・生物圏結合モデルが、メソスケールの CO_2 輸送の構造を解析する上で有効であることを実証した。また炭素交換量推定の精緻化のためには、VPRM モデルにより推定された CO_2 フラックスは、計算対象地域における CO_2 フラックスの観測値を用いて、代表的な植生タイプごとに各々微調整することが望ましい[9]。

本研究は、日本、特に東京を中心とする関東地方における WRF-GHG の性能を評価することを目的に行った。関東地方は、世界でも有数の経済規模を誇る東京を含む日本最大の経済圏である。関東地方だけで日本の GDP（国内総生産）の約 40%を占め、化学、鉄鋼、機械工業、火力発電所、自動車交通、住宅施設が CO_2 排出量の高い割合を占めている。関東地方のいくつかの地点では、継続的な CO_2 地表面観測および航空機観測が行われており、モデル性能評価のために利用可能である。

2. モデル概要

本研究では、CO_2、メタン(CH_4)、一酸化炭素(CO)の輸送を推定する GHG モジュールを使用する、化学結合 WRF モデル(WRF-Chem バージョン 4.2.1)を使用した。このモジュールには、陸域生態系による炭素交換(光合成による吸収と呼吸)を推定する VPRM サブモデルが含まれている。WRF-GHG モデルの設定に関する詳細は Jagat ら[10]に記載されている。 本研究においても同様の設定を用いた。

3. 地表および航空機観測を用いた CO_2 濃度の検証

気象庁が運営する温室効果ガス世界データセンター（WDCGG)のうち、埼玉県騎西市(北緯36.10度、東経139.57度、標高 34m）における大気中 CO_2 濃度観測データを用いて地表付近での時系列変動に関するモデル検証を行った。本観測では VIA-510R（株式会社堀場製作所製）を使用している。また鉛直構造のモデル検証には、JAL 財団による CONTRAIL プロジェクトによって得られた、羽田（HND）空港発着の日本航空旅客機[11]を用いた連続 CO_2 測定装置

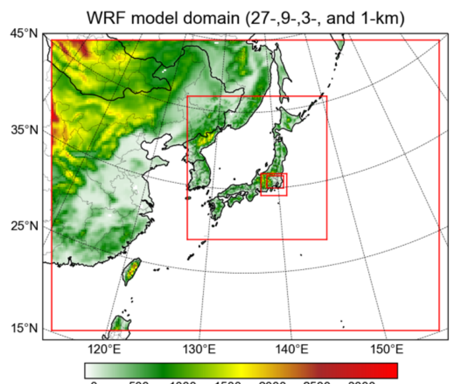

図 1. 本研究における計算領域設定（27、9、3、1km 格子)。色は標高を示す。

(CME) による CO_2 観測濃度データを使用した（[10]）。

4. 結果と考察

WRF-GHG のシミュレーションを、低解像度（27km）と高解像度（1km）の２つの空間解像度行った際の影響について比較・検証を行った。空間解像度の影響を評価するため、本研究においては計算領域間のフィードバックは考慮されていない。高解像度と低解像度の双方のモデル結果が CO_2 濃度を著しく過小評価した例（例えば 2018 年 2 月 2-3 日）が見られるが、同時期には観測の風向の不一致が見られている(図 2 下段)。観測された風向は北西であるのに対し、シミュレーションの風向は北東であるため、当該方向に高排出源域があったものと推定される（図示せず）。また 2018 年 2 月 7-10 日の期間は比較的長期間、高い CO_2 濃度が見られたが、当該時期は風向が概ね 4 m s-1 と弱く、気塊が停滞しやすい状況にあった。このような比較的安定した総観規模の気象条件下においては、高解像度モデルは低解像度モデルと比較して観測された濃度の時間変動をよりよく捉えていることがわかった。

また年々変動についても調査するため、2020 年 2 月の CO_2 濃度と風についても観測結果との比較を行った（図 3）。ここでも 2018 年の事例と同様に、高い CO_2 濃度に伴う停滞的な総観規模気象状態（2020 年 2 月 10-16 日、風速 ＜ 4 m s^{-1}）が、低解像度モデルと比較して高解像度モデルがより良い CO_2 シミュレーションをもたらすことが明らかになった。本シミュレーションの結果、高解像度シミュレーションはポイントソースからの高濃度プリュームの位置が観測と一致しない際には低解像度モデルと比較してモデルと観測の相関を減少させる可能性があると結論づけた。一方で、高解像度モデルを用いることにより、停滞した環境下（風速 ＜ 4 m s^{-1}）における安定的な総観規模条件下での観測された変動をより適切に再現することがわかった。

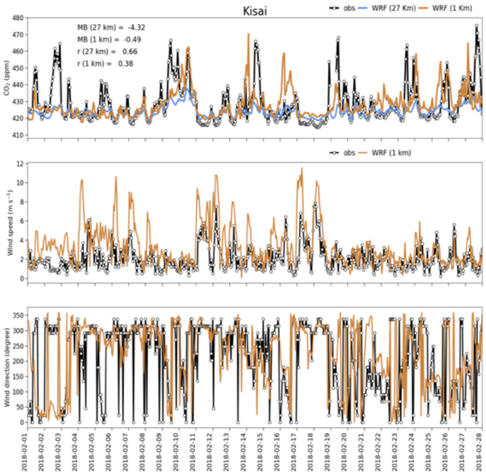

図 2. 2018 年 2 月の騎西観測地点の CO_2 濃度(上段)と風速(中段)および風向(下段)。観測結果(黒)、ドメイン 1(27km 格子;青)およびドメイン 4(1km;橙)における EAGrid 排出量インベントリを用いたモデル計算結果をそれぞれ示す。モデル-観測間の統計的な比較結果についても上部に示す。

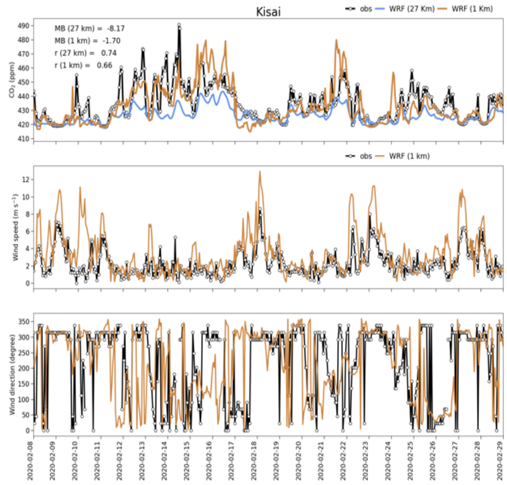

図 3. 図 2 と同じだが、2020 年の場合

次に、高解像度および低解像度の WRF-GHG モデル計算と CONTRAIL 航空機観測による羽田空港周辺の CO_2 濃度の鉛直プロファイルを比較した(図 4a)。低解像度モデルは、高度約 2400m までの観測値を大きく過小評価していることがわかる（図 4a）。それ以上の高度では、1km と 27km のシミュレーションはほぼ同じである。低解像度の WRF-GHG シミュレーションにおける CO_2 濃度の過小評価は細かいスケールの鉛直輸送過程[12]の表現が不十分であることに起因していると考えられる。一方、高解像度モデルは、羽田空港上空で観測された CO_2 濃度の鉛直分布の変動を適切に再現していた。

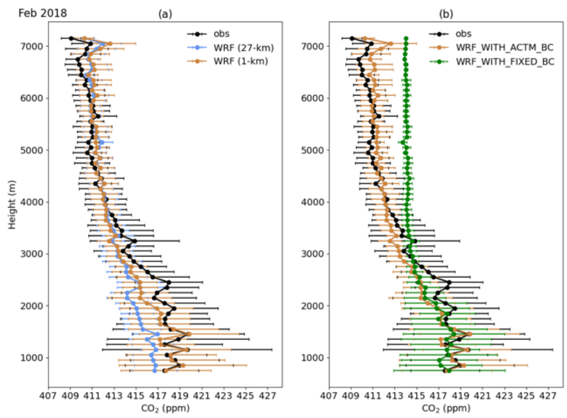

図 4. 2018 年 2 月の CONTRAIL 観測(黒)と WRF-GHG シミュレーションの CO_2 鉛直分布の比較：（a） 空間解像度の影響評価: 低解像度モデル(青)および高解像度モデル(赤)、(b) 初期条件と側面境界条件の影響: 一定値(緑)および MIROC4-ACTM(橙)を用いた場合。エラーバーは標準偏差。

我々の研究では、境界条件の感度解析も行い、MIROC4-ACTM の代わりに固定境界条件を用いて CO_2 濃度シミュレーションを行った（図 4b）。解析の結果、高度 3200m を超えると、MIROC4-ACTM の境界条件を用いた場合と比較して、

CO_2は大気中での寿命が長いため、領域外から流入する気塊の影響も無視できない。このため側面境界について固定値と全球モデルによる推定結果を用いた場合のそれぞれについて比較を行ったところ、固定（一定値）の境界条件を適用した場合、自由対流圏ではCO_2プロファイルに約4ppm の系統的なバイアスが存在することがわかった。さらに、側面境界を固定した場合、7000m付近のCO_2プロファイル（図 4b）で観測されたプルーム状の特徴は再現されなかった。このことから、WRF-GHG の側方境界条件として、より広い領域を持つモデルで計算された濃度場（本研究ではMIROC4-ACTM）を使用することが重要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、これまで 27km 程度で使用されていた領域化学輸送モデル WRF-GHG について、地球シミュレータの計算資源を用いて 1km 程度まで高解像度化し、水平分解能に対するモデルの感度を調べた。その結果、モデルシミュレーションは地表面観測地点の分解能に敏感であることがわかった。高解像度モデルは、とくに安定的な総観規模条件下における停滞的（風速 ＜ 4 m s^{-1}）環境下に観測された高 CO_2 濃度イベントを低解像度モデルよりもより良好に再現することがわかった。

航空機による鉛直プロファイルの比較においても、高解像度モデルは低解像度モデルよりも明らかに再現性が向上していることが確かめられた。鉛直プロファイルの比較においては、地表からある高度（我々の場合は700m）以上では、鉛直輸送プロセス（浅い対流など）が重要であり、雲解像(＜ 10 km; 本研究では1km格子)である高解像度モデルでこれらのプロセスがより適切に表現されることを示唆している。

もう一つの重要な発見は、水平方向の境界条件に対するモデルの感度である。航空機観測と比較したところ、固定境界条件を適用した場合、高度 3200 m（2018 年２月）を超えても系統的なバイアス（～4 ppm）が持続することが明らかになった。我々の水平方向の境界感度の結果は、3200 m よりも上層の、自由対流圏における CO_2 の輸送構造はユーラシア大陸からの長距離輸送の影響を受けていることを示唆している。

謝辞

騎西市の CO_2 濃度データを提供してくださった埼玉県と WDCGG に感謝する。CONTRAIL プロジェクトにご協力いただいた日本航空、JAL 財団、JAMCO 東京の技術者、スタッフに感謝する。WRF-GHG シミュレーションには、JAMSTEC の支援により地球シミュレータを使用した。本研究は GOSAT-GW プロジェクトの支援を受けている。

文献

[1] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metzl, N., Monacci, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrot, D., Pocock, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., et al.: Global Carbon Budget 2022, Earth Syst. Sci. Data, 14, 4811–4900, https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022, 2022.

[2] Gurney, K. R., Liang, J., Patarasuk, R., Song, Y., Huang, J., and Roest, G.: The Vulcan Version 3.0 High‐Resolution Fossil Fuel CO2 Emissions for the United States, J. Geophys. Res. Atmos., 125, https://doi.org/10.1029/2020JD032974, 2020.

[3] Huo, D., Huang, X., Dou, X., Ciais, P., Li, Y., Deng, Z., Wang, Y., Cui, D., Benkhelifa, F., Sun, T., Zhu, B., Roest, G., Gurney, K. R., Ke, P., Guo, R., Lu, C., Lin, X., Lovell, A., Appleby, K., DeCola, P. L., Davis, S. J., and Liu, Z.: Carbon Monitor Cities near-real-time daily estimates of CO2 emissions from 1500 cities worldwide, Sci. Data, 9, 533, https://doi.org/10.1038/s41597-022-01657-z, 2022.

[4] Ballav, S., Patra, P. K., Sawa, Y., Matsueda, H., Adachi, A., Onogi, S., Takigawa, M., and De, U. K.: Simulation of CO2 concentrations at Tsukuba tall tower using WRF-CO2 tracer transport model, J. Earth Syst. Sci., 125, 47–64, https://doi.org/10.1007/s12040-015-0653-y, 2016.

[5] Ahmadov, R., Gerbig, C., Kretschmer, R., Körner, S., Rödenbeck, C., Bousquet, P., and Ramonet, M.: Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO2 transport models with coastal tower measurements of CO2, Biogeosciences, 6, 807–817, https://doi.org/10.5194/bg-6-807-2009, 2009.

[6] Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., and Gottlieb, E. W.: A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO2 exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), Global Biogeochem. Cycles, 22, https://doi.org/10.1029/2006GB002735, 2008.

[7] Park, C., Gerbig, C., Newman, S., Ahmadov, R., Feng, S., Gurney, K. R., Carmichael, G. R., Park, S.-Y., Lee, H.-W., Goulden, M., Stutz, J., Peischl, J., and Ryerson, T.: CO2

Transport, Variability, and Budget over the Southern California Air Basin Using the High-Resolution WRF-VPRM Model during the CalNex 2010 Campaign, J. Appl. Meteorol. Climatol., 57, 1337–1352, https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0358.1, 2018.
[8] Pillai, D., Buchwitz, M., Gerbig, C., Koch, T., Reuter, M., Bovensmann, H., Marshall, J., and Burrows, J. P.: Tracking city CO2 emissions from space using a high-resolution inverse modelling approach: a case study for Berlin, Germany, Atmos. Chem. Phys., 16, 9591–9610, https://doi.org/10.5194/acp-16-9591-2016, 2016.
[9] Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., and Gottlieb, E. W.: A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO2 exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), Global Biogeochem. Cycles, 22, https://doi.org/10.1029/2006GB002735, 2008.
[10] Jagat S. H. Bisht, Prabir K. Patra, Masayuki Takigawa, Yugo Kanaya, Masahiro Yamaguchi, Toshinobu Machida, and Hiroshi Tanimoto, 2023, CO2 high-resolution simulation using WRF-GHG over the Kanto region in Japan, ESS Open Archive. June 08, 2023, https://doi.org/10.22541/essoar.168626399.94131688/v1
[11] Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirotani, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., and Ogawa, T.: Worldwide measurements of atmospheric CO 2 and other trace gas species using commercial airlines, J. Atmos. Ocean. Technol., 25, 1744–1754, https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1, 2008.
[12] Yamashita, Y., Takigawa, M., Goto, D., Yashiro, H., Satoh, M., Kanaya, Y., Taketani, F., and Miyakawa, T.: Effect of Model Resolution on Black Carbon Transport from Siberia to the Arctic Associated with the Well-Developed Low-Pressure Systems in September, J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II, 99, 2021–014, https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-014, 2021.

Environmental Geochemical Cycle Modelling Research

Project Representative
Takashi Sekiya Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors
Jagat S. H. Bisht *[1], Prabir K. Patra *[1,2], Masayuki Takigawa *[3], Yugo Kanaya *[1], Masahiro Yamaguchi *[4,1]
*[1]Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *[2]Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, *[4]Institute of Arctic Climate and Environment Research, *[4]Earth System Division, National Institute for Environmental Studies Tsukuba

Keywords：WRF-GHG, CO_2, Kanto, high-resolution

1. Introduction

CO_2 is a well-mixed and long-lived greenhouse gas (GHG) in the atmosphere which has both anthropogenic and natural sources. CO_2 concentration is increasing steadily in the atmosphere because emissions by anthropogenic activity [1]. The concentration of CO_2 in the Earth's atmosphere has been steadily rising due to various human activities, primarily the burning of fossil fuels (such as coal, oil, and natural gas) for energy, deforestation, and industrial processes.

To estimate gridded CO_2 emissions from various sources, such as industrial, residential, commercial, and transportation processes, anthropogenic CO_2 emission inventories have been developed and are regularly updated and improved for better accuracy [2]. Several studies have demonstrated that the current concentration of CO_2 in the atmosphere is largely due to human activities, particularly the burning of fossil fuels [1]. It has been reported that more than 60% of global fossil-fuel CO_2 emissions are produced in cities [3], making them important targets for mitigation efforts.

In addition to anthropogenic CO_2 emissions, atmosphere-biosphere carbon exchange significantly affects the atmospheric CO_2 concentration and is equally important to understand the atmospheric carbon cycle. At sub-daily scale, atmosphere-ecosystem CO_2 exchange is mainly determined by physiological and phenological responses driven by meteorological conditions such as solar radiation, temperature, and humidity. A regional model fully coupled with meteorology that can run in a kilometer scale or below could be used here to address the mesoscale transport of carbon dioxide (CO_2) and its flux exchange between the biosphere and the atmosphere [4]. Ahmadov et al. [5] coupled Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) [6] module with the WRF model, and conducted CO_2 modeling over Europe. This framework has also been utilized in other studies [7, 8], which have demonstrated the effectiveness of the atmosphere-biosphere coupled model in capturing mesoscale CO_2 transport at regional and local scales with significant improvements. VPRM CO_2 fluxes are required to be fine-tuned using observed vegetation fluxes for the land use types in the region [9].

This study is performed to evaluate the performance of WRF-GHG over Japan, specifically the Kanto region, centered around Tokyo. The Kanto region is the largest economic area in Japan, that includes Tokyo, which boasts one of the largest economies of any city in the world. The Kanto region alone accounts for about 40% of Japan's GDP (gross domestic product), where the chemical, steel, machine industries, thermal power plants, automobile traffic, residential facilities account for a high proportion of CO_2 emissions. Several sites over Kanto region have continuous CO_2 surface data and aircraft observations that can be used to better evaluate the model performance.

2. Materials and Methods

We use WRF with coupled chemistry (WRF-Chem version 4.2.1) model, which uses the GHG module to simulate the transport of CO_2, methane (CH_4), and carbon monoxide (CO) (hereafter referred as WRF-GHG). The module includes VPRM to simulate the CO_2 biogenic emissions. The WRF-GHG set-up details are given in Jagat et al. [10]. We used the similar setup here.

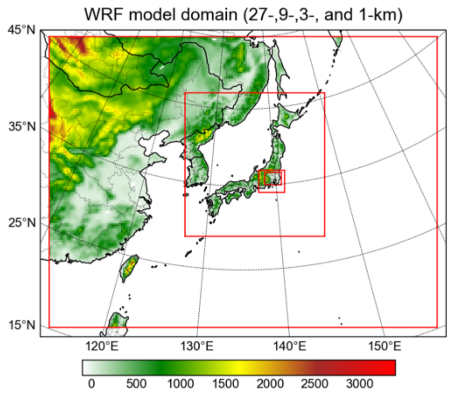

Figure 1. The diagram illustrates the domain configurations for the model simulations (four domains: 27, 9, 3, and 1 km) and displays the terrain height for each domain.

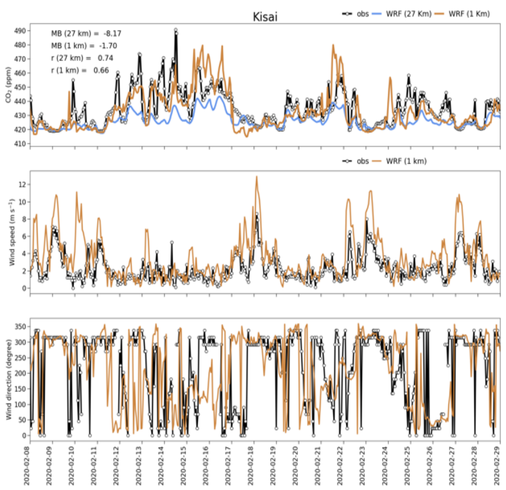

Figure 2. CO_2 concentrations and winds at Kisai observation site during February 2018. The observations (black) shown along with model simulation with EAGrid for domain 01 (27 km) and domain 04 (1 km). Statistics of model observation comparison is given in the top-panel.

3. CO_2 concentration observations

Atmospheric CO_2 hourly concentration in-situ data is analyzed at Kisai (36.10ºN, 139.57ºE, altitude; 34 m). The in-situ CO_2 concentration data recorded with VIA-510R (HORIBA Ltd.) with measurement uncertainty of ~0.3 ppm at Kisai observations sites is obtained from the World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) operated by the Japan Meteorological Agency (JMA). We also use CONTRAIL Continuous CO2 Measuring Equipment (CME) CO_2 concentration data aboard Japan Airlines' commercial airliner flights [11] for flights arriving and departing from Haneda (HND) airport in Japan ([10]; Figure 1).

4. Results and Discussion

We compared the WRF-GHG simulation for two spatial resolutions; coarser resolution (27 km) and finer resolution (1 km). In the case of coarser resolution, the model simulations are performed for the outermost domain independently (Fig. 1; 27 km) during February 2018 without taking other domains into account. We may notice instances (for e.g., 02-03 February 2018) where both 27 km and 1 km resolution model simulations significantly underestimated the CO_2 concentration. We have also shown the wind plots in Figure 2 for Kisai which display wind direction mismatches between the model simulations and observations during 02-03 February 2018. The observed wind direction is from the North-West, while the simulated wind direction is from North-East. We have noticed a hotspot over the North-West direction in the emission map (Figure not shown). Similarly, a wind direction mismatch could be noticed during 16-17 January 2018 between the model simulations and observations. In the wind plots (Fig. 2), we may notice dominants model winds are from South-West (greater Tokyo region), whereas the dominant observed winds are from North-East direction in 1 km simulations. Additionally, we noticed that, when the prolonged synoptic condition associated with high CO_2 concentrations (Fig.2; 07-10 February 2018; wind speed < 4 m s^{-1}), the model simulations with 1 km resolution better capture the observed variability compared to 27 km model simulations.

We have also demonstrated the model-observation comparison for CO_2 concentration and winds during February 2020 (Fig. 3). Here we also noticed that, the prolonged synoptic condition (10-16 February 2020; wind speed < 4 m s^{-1}) associated with high CO_2 concentrations leads to better CO_2 simulations with a 1 km model horizontal resolution compared to 27 km. We concluded that, the high-resolution simulation amplifies the model bias which is introducing more transport error, and reduces the model-observation correlation. Additionally, the high-resolution modeling found to better reproduce the observed variability for prolonged synoptic conditions that involves stagnant wind (wind speed < 4 m s^{-1}).

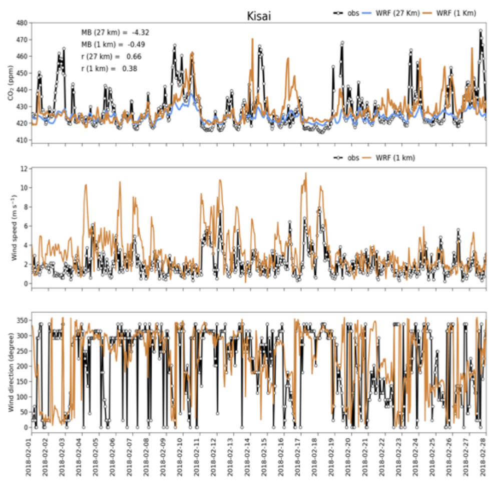

Figure 3. Same as Figure 2 but for the year 2020.

We compared the WRF-GHG simulations with CONTRAIL aircraft observations for two spatial resolutions; coarser resolution (27 km) and finer resolution (1 km) (Fig. 4a). It may be noted that coarser resolution simulations largely underestimated the observed CO_2 concentration up to an altitude range of approximately 2400 m (Fig. 9a). Above that, the 1 km and 27 km model simulations are similar. The under-estimation of CO_2 concentration in coarser resolution WRF-GHG simulations could be attributed to the under-representation of fine scale vertical transport processes [12] such as: vertical diffusion and convection. On the other hand, 1 km simulations reasonably reproduced the observed variability in the vertical distribution of CO_2 concentration.

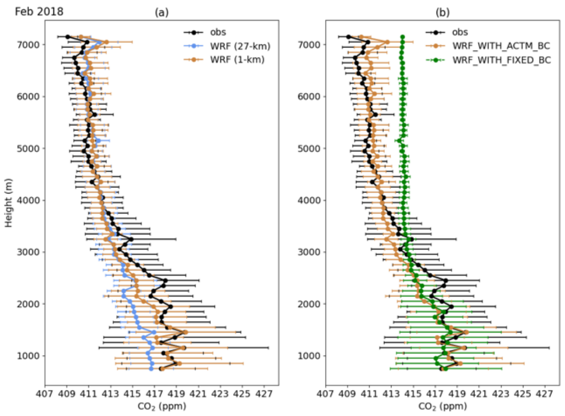

Figure 4. Comparison of CO_2 vertical distribution between CONTRAIL and WRF-GHG simulations during February 2018 for: (a) finer (1 km) and coarser (27 km) model domains, (b) fixed (a constant value) initial and lateral boundary conditions and with MIROC4-ACTM initial and lateral boundary conditions to WRF-GHG. The error bar represents the standard deviation.

Our study also included a sensitivity analysis of boundary conditions, where we conducted CO_2 concentration simulations using fixed boundaries instead of MIROC4-ACTM (Fig. 4b). The analysis showed that, beyond an altitude of 3200 m, a systematic bias of approximately 4 ppm exists in the CO_2 profile when fixed (a constant value) boundary conditions are applied, as compared to the results obtained when using boundary conditions from MIROC4-ACTM. Furthermore, when using fixed lateral boundary conditions, plume-like signatures as observed in the CO_2 profile around 7000 m (Fig. 4b) are not reproduced. We conclude that the selection of a model field with a wider domain (MIROC4-ACTM for this study) for lateral boundary conditions to WRF-GHG is critically important.

5. Summary

The model sensitivity to horizontal resolution was examined. We noticed that, model simulations are sensitive to model resolution at surface observation site. High-resolution modeling reproduced the observed variability during prolonged synoptic conditions (wind speed < 4 m s^{-1}) associated with high CO_2 concentration.

The advantage of high-resolution modeling was evident in aircraft profile comparisons, indicating a clear superiority over coarser resolution model simulations. The vertical profile comparison shows that above certain altitude from surface (700m in our case) the vertical transport processes (such as convection and vertical diffusion) are more dominant which are better represented in high resolution modeling.

Another significant finding is the model's sensitivity to lateral boundary conditions. By comparing with aircraft observations, we can pinpoint the altitude from where boundary condition effects become paramount. The study reveals a persistence systematic bias (~ 4 ppm) beyond an altitude of 3200 m (February 2018) when fixed boundary conditions are applied. Our lateral boundary sensitivity results suggest that CO2 simulations beyond 3200 m are influenced by long-range transport from Eurasia.

Acknowledgement

We thank to Saitama Prefecture and WDCGG for providing the CO_2 concentration data for Kisai. We are thankful to engineers and staffs of the Japan Airlines, JAL Foundation, and JAMCO Tokyo for supporting the CONTRAIL project. Earth Simulator was used for WRF-GHG simulations with the support of JAMSTEC. This research has been supported by GOSAT-GW project.

References

[1] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metzl, N., Monacci, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrot, D., Pocock, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., et al.: Global Carbon Budget 2022, Earth Syst. Sci. Data, 14, 4811–4900, https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022, 2022.

[2] Gurney, K. R., Liang, J., Patarasuk, R., Song, Y., Huang, J., and Roest, G.: The Vulcan Version 3.0 High - Resolution Fossil Fuel CO2 Emissions for the United States, J. Geophys. Res. Atmos., 125, https://doi.org/10.1029/2020JD032974, 2020.

[3] Huo, D., Huang, X., Dou, X., Ciais, P., Li, Y., Deng, Z., Wang, Y., Cui, D., Benkhelifa, F., Sun, T., Zhu, B., Roest, G., Gurney, K. R., Ke, P., Guo, R., Lu, C., Lin, X., Lovell, A., Appleby, K., DeCola, P. L., Davis, S. J., and Liu, Z.: Carbon Monitor Cities near-real-time daily estimates of CO2 emissions from 1500 cities worldwide, Sci. Data, 9, 533, https://doi.org/10.1038/s41597-022-01657-z, 2022.

[4] Ballav, S., Patra, P. K., Sawa, Y., Matsueda, H., Adachi, A., Onogi, S., Takigawa, M., and De, U. K.: Simulation of CO2 concentrations at Tsukuba tall tower using WRF-CO2 tracer transport model, J. Earth Syst. Sci., 125, 47–64, https://doi.org/10.1007/s12040-015-0653-y, 2016.

[5] Ahmadov, R., Gerbig, C., Kretschmer, R., Körner, S., Rödenbeck, C., Bousquet, P., and Ramonet, M.: Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO2 transport models with coastal tower measurements of CO2, Biogeosciences, 6, 807–817, https://doi.org/10.5194/bg-6-807-2009, 2009.

[6] Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., and Gottlieb, E. W.: A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO2 exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), Global Biogeochem. Cycles, 22, https://doi.org/10.1029/2006GB002735, 2008.

[7] Park, C., Gerbig, C., Newman, S., Ahmadov, R., Feng, S., Gurney, K. R., Carmichael, G. R., Park, S.-Y., Lee, H.-W., Goulden, M., Stutz, J., Peischl, J., and Ryerson, T.: CO2 Transport, Variability, and Budget over the Southern California Air Basin Using the High-Resolution WRF-VPRM Model during the CalNex 2010 Campaign, J. Appl. Meteorol. Climatol., 57, 1337–1352, https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0358.1, 2018.

[8] Pillai, D., Buchwitz, M., Gerbig, C., Koch, T., Reuter, M., Bovensmann, H., Marshall, J., and Burrows, J. P.: Tracking city CO2 emissions from space using a high-resolution inverse modelling approach: a case study for Berlin, Germany, Atmos. Chem. Phys., 16, 9591–9610, https://doi.org/10.5194/acp-16-9591-2016, 2016.

[9] Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., and Gottlieb, E. W.: A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO2 exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), Global Biogeochem. Cycles, 22, https://doi.org/10.1029/2006GB002735, 2008.

[10] Jagat S. H. Bisht, Prabir K. Patra, Masayuki Takigawa, Yugo Kanaya, Masahiro Yamaguchi, Toshinobu Machida, and Hiroshi Tanimoto, 2023, CO2 high-resolution simulation using WRF-GHG over the Kanto region in Japan, ESS Open Archive. June 08, 2023, https://doi.org/10.22541/essoar.168626399.94131688/v1

[11] Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirotani, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., and Ogawa, T.: Worldwide measurements of atmospheric CO 2 and other trace gas species using commercial airlines, J. Atmos. Ocean. Technol., 25, 1744–1754, https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1, 2008.

[12] Yamashita, Y., Takigawa, M., Goto, D., Yashiro, H., Satoh, M., Kanaya, Y., Taketani, F., and Miyakawa, T.: Effect of Model Resolution on Black Carbon Transport from Siberia to the Arctic Associated with the Well-Developed Low-Pressure Systems in September, J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II, 99, 2021–014, https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-014, 2021.