

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

荻野慎也^{*1}, 宮崎和幸^{*1,2}, 藤原正智^{*3}, 野津雅人^{*4}, 塩谷雅人^{*5}, H. A. Nguyen-Thi^{*8}, 長谷部文雄^{*3}, 松本淳^{*1,4}, J. Witte^{*6}, A. M. Thompson^{*7}, T. V. Nguyen^{*8}, 関谷高志^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構, ^{*2} Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, ^{*3} 北海道大学 大学院環境科学院, ^{*4} 首都東京大学 都市環境学部, ^{*5} 京都大学 生存圏研究所, ^{*6} National Center for Atmospheric Research, Earth Observing Laboratory, ^{*7} NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, ^{*8} Aero Meteorological Observatory, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration, Hanoi, Vietnam

キーワード: オゾン, 大気汚染, データ同化, 化学輸送モデル

1. はじめに

地球規模の環境問題の解決には、その原因となっている物質の挙動を正確に把握し、それを基にした信頼性の高い予測を行う必要がある。そのために、本課題では、地球シミュレータを活用して地球表層を対象とした最先端の物質循環に関わるモデリングの研究・開発を推進している。ここでは、これまで本課題で構築してきたJAMSTEC大気組成再解析データ (TCR,[3][4]) を応用し、対流圏オゾンやエアロゾルの変動要因を解析した研究について以降の節でそれぞれ報告する。

2. ハノイ上空における春季下部対流圏オゾン増大の原因特定

2.1. はじめに

対流圏オゾンは大気酸化能力を制御するOHラジカルを生成することを通じて大気質と密接に関係するとともに、それ自身が大気汚染物質及び強力な温室効果ガスの1つである。大気汚染の起源を特定し、気候変動を理解するためには、オゾンの三次元分布とその時間変動を決定するメカニズムを詳細に理解することが重要である。

本研究では、熱力学的特性に伴うオゾン増加に関する包括的な理解を目指し、化学輸送モデルによる感度実験を実施して詳細な分析を実施した。最初に、3月のオゾン増加の変動を気象状況とともに説明し、高度約1.5kmと約4kmの安定層によって分離されたオゾン変動の観点から3つのレジームを特定した。次に、衛星観測データにより制約されたトップダウン放出量逆推定を用いた化学輸送モデル実験を行うことにより、ハノイ上空のオゾン増加に寄与するオゾン前駆体の発生源領域を調査した。さらに、オゾン増大の三次元空間構造を明らかにし、ハノイ上空約3kmに現れるオゾン増大を制御するメカニズムを調査した。

2.2. データと手法

2004年9月から2018年6月まで、毎月1回または2回、ハノイの航空気象観測所 (21.02°N, 105.80°E) で収集されたオゾンゾンデ データを使用した。データの詳細

はOgino et al (2013) [5]に記載されている。

ハノイ上空でのオゾン増加に対する異なる放出源地域の相対的な重要性を調べるために、全球化学輸送モデルCHASER [1] を用いて感度実験を行った。

一酸化炭素 (CO)、窒素酸化物 (NO_x)、および非メタン炭化水素などの主要なオゾン前駆体の地表排出量は、ボトム排出インベントリ (Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) version 4.2, the monthly Global Fire Emissions Database (GFED) version 3.1, monthly mean Global Emissions Inventory Activity (GEIA)) を利用した。さらに、TCR から得られる、衛星NO₂・CO観測のデータ同化により最適化された日平均NO_x・CO排出量データも利用した。先験情報にはボトムアップ排出インベントリを用いて、データ同化での最適化を実施した [2][3]。人為起源とバイオマス燃焼起源の両方を含むこれらの排出量データは、個々の発生源の排出影響を評価することを可能とした。

2.3. 結果

モデル計算 (図 1a) を用いた結果から、700 hPa で、インド亜大陸の北東部とインドシナ半島の北東部の2つの地域の東部で高いオゾン混合比 (> 62 ppbv) が再現された。インド亜大陸地域でのオゾン前駆物質排出量を完全に削減した感度計算では、インド北東部でのオゾン増加は消失するが、インドシナ半島北東部でのオゾン増加は残った (図 1b)。この結果は、ハノイを含むインドシナ半島の北東部でのオゾンの増加は、インドシナ北部地域での排出に関連していることを示唆している (図 1c)。中国南部の排出量を削減した実験については、インドシナ起源のオゾン増大が残った (図 1d)。図 1e-g に示すように、各領域の排出量のオゾン増大への寄与は、各感度実験の結果を対照実験の結果から差し引くことで、より明確に理解することができる。インドシナからの前駆物質の排出がハノイ上空でオゾン増大を引き起こし、700 hPa 面 (約3 km) におけるその影響が、ハノイ周辺の緯度と経度で約20°の水平範囲に広がることが示された (図 1f)。

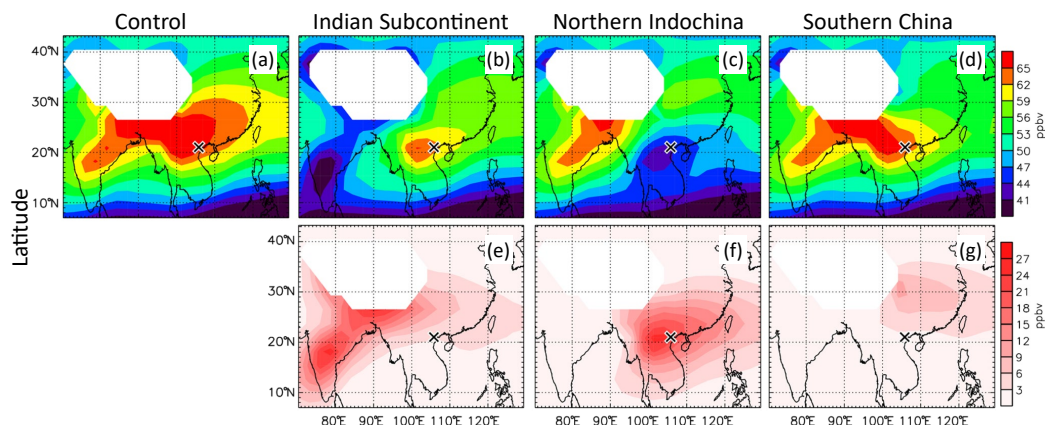


図 1.10 年間の感度モデル実験から得られた、3 月 1 日から 21 日までの期間の 700 hPa での平均オゾン水平分布。(上パネル)(a) コントロール、(b) インド亜大陸、(c) インドシナ北部、(d) 中国南部の実験のオゾン混合比。(下のパネル)(e) インド亜大陸、(f) インドシナ北部、(g) 中国南部地域から放出されるオゾン前駆体によるオゾン生成。各パネルのバツ印はハノイの位置を示している。地表下の領域は白色でマスクされている。

2.4. まとめ

ハノイ上空の約 14 年間の定期的なオゾンゾンデ観測から、3 月に約 3 km でオゾンが増大することが明らかになった。3 月のオゾン濃度は、約 1.5 km と約 5 km の 2 つの安定した層によって分離された 3 つの高さ範囲で大きな時間変動を示した。気象学および後方流跡線解析により、高度約 3 km での典型的なオゾンの増加は、インドシナ半島で汚染された空気由来し、高度 1.5 km 以下の典型的な減少は、寒波イベントに関連する海洋空気の移流によって引き起こされたことが示された。

ハノイ上空でのオゾン濃度は、インドシナ半島北部でのオゾン前駆物質排出を削減した場合、最も効果的に抑制された。これは、おそらくバイオマス燃焼によるタイ北部からの大気汚染が、ハノイでのオゾン増大に最も寄与したことを示唆している。インドシナ半島北部の排出に起因するオゾンの増加が、経度と緯度で約 20°の領域にわたって下部対流圏に拡大したことが、モデル計算から明らかになった。また、モデルは冬季モンスーンの東風に伴う清浄な空気塊の流入による地表付近のオゾン減少を再現した。汚染された空気塊はさらに東に輸送され、太平洋を越えて対流圏中部および上部に移動し、その一部は米国の西海岸に到達した。

本研究では、3 月にハノイ上空の高度約 3 km でオゾンが増加した原因は、(1) インドシナ半島において汚染された高濃度オゾン空気塊が高度約 5 km の安定層まで十分に混合され、その空気塊がハノイ西部まで東向きに移流されたこと、(2) 高度約 1.5 km 以下の安定層における寒波イベントに伴い、汚染されていない低濃度オゾンの空気塊が海洋域からハノイ東部まで西向きに移流されたことによるものと新たに提案した。このようなメカニズムは、活発な浅い対流が発達した後、夏季モンスーンの降水が始まる前の 3 月から 4 月の間のみ発生する。東南アジアでのオゾンの増加は、バイオマス燃焼の増加だけでなく、モンスーン前の季節に形成された大気循環システムによっても引き起こされると結論付けた。この大気循環システ

ムは、オゾン分布の詳細な三次元空間構造を決定するために役立つもので、モデル計算を駆使した本研究から、新たなメカニズムを理解することができた[6]。

3. COVID-19 感染拡大に伴う社会経済活動の変化がエアロゾルの二次的生成に与えた影響

新型コロナウイルス (COVID-19) の感染拡散を防ぐための世界的なロックダウンにより、人為的な大気汚染物質の排出が大幅に削減された。前例のない世界的な排出量削減は、人間活動の減少に大気組成がどのように応答するかを調査を可能とした。微小エアロゾル粒子 (PM_{2.5}) に対する COVID-19 の全球的なロックダウンの影響は評価されている[7]。しかしながら、領域から全球規模での二次的に化学生成されるエアロゾル成分の変化については未だ評価されていない。そこで、エアロゾル前駆体 (NO₂, SO₂) の観測情報をデータ同化により統合することで、人為起源排出の減少に二次生成エアロゾルが全球規模がどのように応答するかを調査した。具体的には、TROPOMI による対流圏 NO₂ カラム量と総 SO₂ カラム量、MLS によるオゾンと HNO₃ 高度プロファイルの多成分化学データ同化を用いて、COVID-19 ロックダウンに関連する排出量削減に対する二次生成無機エアロゾルの応答を定量的に評価した。

ベースラインである "business-as-usual" 排出量と比較して、2020 年 4 月の人為起源 NO_x と SO₂ 排出量は、主要汚染地域においてそれぞれ 19-25% と 14-20% 減少した (図 2)。これらの排出削減により、2020 年 4 月の硫酸塩と硝酸塩エアロゾルのカラム量は、米国東部でそれぞれ 11% と 21%、ヨーロッパで 8% と 11%、中国東部で 12% と 14% 減少したが、これは排出削減と気象の季節サイクルに対する化学とエアロゾル熱力学システムの複雑で非線形な反応によるものであることがモデル計算結果から示唆さ

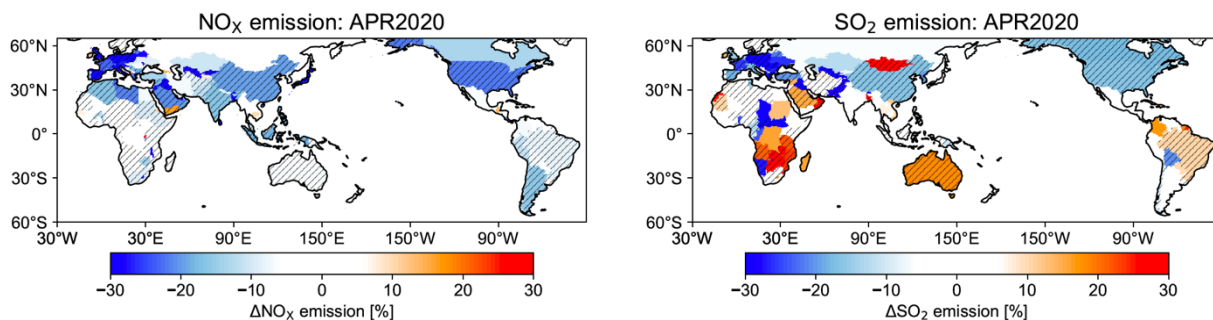


図 2. COVID-19 ロックダウンによる国別の NO_x および SO₂ 排出量削減の空間分布。2020 年 4 月の NO_x (左) と SO₂ (右) の COVID-19 アノマリーは、各国における 2020 年と BAU の排出量の平均差から推定される。アノマリーは相対変化量 (%) で示されている。排出量アノマリーが不確実性よりも大きく、かつ、人為的排出量の全排出量に対する割合が 70%以上の国をハッチングで示している。

れた。これらの領域における二次エアロゾルの減少は、Suomi NPP/VIIRS と Terra, Aqua/MODIS から得られた 2020 年 4 月とそれ以前の年のエアロゾル光学深度の変化 (全成分のエアロゾル量変化に対応) の 43%以上に相当した。これらの結果は、大気汚染・気候変動対策としての NO_x、SO₂ 排出規制効果の評価に対して有用な情報を提供するものである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15204043, JP18204041, JP21244072, JP26220101, JP16K00535 の助成を受けた。ハノイにおける SHADOZ ゾンデ観測は NASA の Upper Atmosphere Research Program through funding to Goddard Space Flight Center (Maryland USA) および the Ozone group at NOAA's Global Monitoring Lab (Colorado USA) の支援を受けた。本研究には、ESA が処理した Copernicus Sentinel TROPOMI データ (2018 年) を修正したものが含まれている。また、データ同化及びモデル計算には、JAMTEC の支援により地球シミュレータを使用した。

文献

- [1] Sudo, K., Takahashi, M., Kurokawa, J., & Akimoto, H. (2002). Chaser: A global chemical model of the troposphere 1. Model description. *Journal of Geophysical Research*, 107(D17), 4339. <https://doi.org/10.1029/2001JD001113>
- [2] Miyazaki, K., Eskes, H., Sudo, K., Folkert Boersma, K., Bowman, K., & Kanaya, Y. (2017). Decadal changes in global surface NO_x emissions from multi-constituent satellite data assimilation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 807–837. <https://doi.org/10.5194/acp-17-807-2017>
- [3] Miyazaki, K., Eskes, H. J., & Sudo, K. (2015). A tropospheric chemistry reanalysis for the years 2005–2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8315–8348, <https://doi.org/10.5194/acp-15-8315-2015>.
- [4] Miyazaki, K., Bowman, W. K., Yumimoto, K., Walker, T., & Sudo, K. (2020). Evaluation of a multi-model, multi-constituent assimilation framework for tropospheric chemical

reanalysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(2), 931–967. <https://doi.org/10.5194/acp-20-931-2020>

- [5] Ogino, S.-Y., Fujiwara, M., Shiotani, M., Hasebe, F., Matsumoto, J., Hoang, T., et al. (2013). Ozone variations over the northern subtropical region revealed by ozonesonde observations in Hanoi. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(8), 3245–3257. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50348>
- [6] Ogino, S.-Y., Miyazaki, K., Fujiwara, M., Nodzu, M. I., Shiotani, M., Hasebe, F., et al. (2022). Cause of a lower-tropospheric high-ozone layer in spring over Hanoi. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035727. <https://doi.org/10.1029/2021JD035727>
- [7] Hammer, M.S., van Donkelaar, A., Martin, R.V., McDuffie, E.E., Lyapustin, A., Sayer, A.M., Hsu, N.C., Levy, R.C., Garay, M.J., Kalashnikova, O.V., et al. (2021). Effects of COVID-19 lockdowns on fine particulate matter concentrations. *Sci. Adv.*, 7, eabg7670.

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

Shin-Ya Ogino^{*1}, Kazuyuki Miyazaki^{*1,*2}, Masatomo Fujiwara^{*3}, Masato I. Nodzu^{*4}, Masato Shiotani^{*5}, H.A. Nguyen-Thi^{*8}, Fumio Hasebe^{*3}, Jun Matsumoto^{*1,*4}, J. Witte^{*6}, A.M. Thompson^{*7}, T.V. Nguyen^{*8}, and Takashi Sekiya^{*1}

*1 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *2 Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, *3 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, *4 Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, *5 Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, *6 National Center for Atmospheric Research, Earth Observing Laboratory, *7 NASA Goddard Space Flight Center, *8 Aero Meteorological Observatory, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration

Keywords : ozone, air pollution, data assimilation, chemical transport model

1. Introduction

To solve global-scale environmental problems including global warming, it is necessary to accurately understand the geochemical cycles that cause such problems and to make reliable predictions. To this end, this project is carrying out research and development of state-of-the-art modeling related to geochemical cycles at the Earth's surface using the Earth Simulator. Here we report in the following sections on studies that have applied the JAMSTEC tropospheric chemistry reanalysis data (TCR, [3][4]), which have been constructed under this project, to analyze the controlling factors for spatial and temporal variations in tropospheric ozone and aerosols, respectively.

2. Cause of a Lower-Tropospheric High-Ozone Layer in Spring Over Hanoi

2.1. Introduction

Tropospheric ozone is closely related with air quality by producing hydroxyl radicals, which control the oxidizing capacity of the atmosphere and is itself an air pollutant and one of the strong greenhouse gases. It is important to describe and understand the mechanism determining the three-dimensional (3D) distribution of ozone and its temporal variation in order to trace the origin of air pollution and to understand climate variability and change.

In this study, we conducted a comprehensive study on the ozone enhancement with thermodynamic properties and the detailed analysis of chemical model sensitivity experiments. We first describe the variabilities of the ozone enhancement in March together with background meteorological properties, in which we identify three regimes in terms of ozone variability separated by the stable layers at about 1.5 km and about 4 km. We then investigated the source region of ozone precursors that contributes the ozone enhancement above Hanoi by conducting

sensitivity experiments using a chemical transport model with the observationally constrained top-down emissions. We further reveal the 3D structure of the ozone enhancement and investigate the mechanisms controlling the ozone enhancement that appears at about 3 km above Hanoi.

2.2. Data and methods

We used ozonesonde data collected at the Aero-Meteorological Observatory (21.02°N, 105.80°E), Hanoi, once or twice in each month from September 2004 to June 2018. The observations are described in detail in Ogino et al. (2013) [5]. To examine the relative importance of different emission source regions on the ozone enhancement above Hanoi, we performed sensitivity experiments using the global chemical-transport model, CHASER [1].

The surface emission of major ozone precursors, such as carbon monoxide (CO), nitrogen oxide (NOx), and nonmethane hydrocarbons, were included in the model based on the published emission inventories [the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v4.2, the monthly Global Fire Emissions Database (GFED) v3.1, and monthly mean Global Emissions Inventory Activity (GEIA)]. We employed daily NOx and CO emissions that were optimized using the assimilation of satellite NO₂ and CO measurements, where the a priori emissions were constructed based upon bottom-up emission inventories [2][3]. These emissions, including both anthropogenic and biomass burning components, were obtained from the Tropospheric Chemistry Reanalysis (TCR, [3][4]) and enabled us to evaluate the emission impacts for individual sources.

2.3. Results

At 700 hPa, the control experiment (Fig. 1a) reveals high ozone mixing ratio (>62 ppbv) over each of the eastern parts of the two regions: the northeastern part of Indian subcontinent and

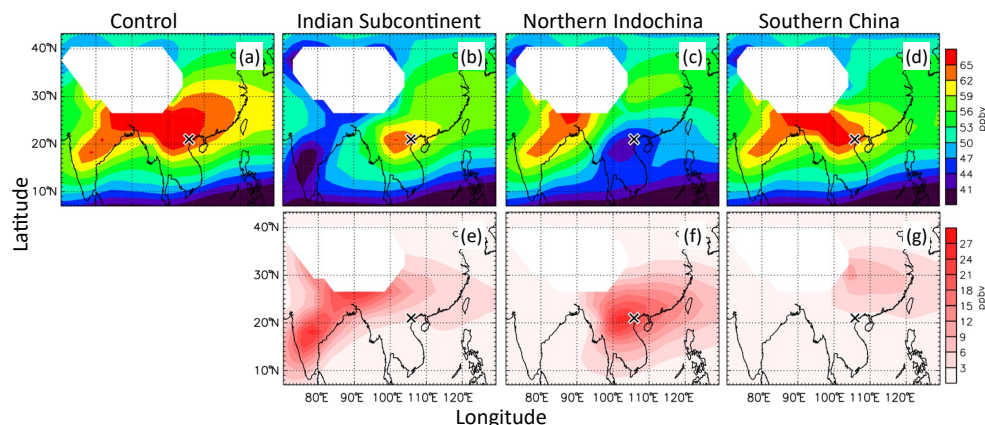


Fig. 1. The mean horizontal ozone distributions at 700 hPa for the period from March 1st to 21st obtained from the 10-year sensitivity model experiments. (Upper panels) Ozone mixing ratio for (a) the control, (b) the Indian subcontinent, (c) the northern Indochina, and (d) the southern China experiments. (Lower panels) The ozone production due to the ozone precursors emitted from (e) the Indian subcontinent, (f) the northern Indochina, and (g) the southern China regions. A cross mark in each panel shows the location of Hanoi.

northeastern part of the Indochina Peninsula. By eliminating the ozone precursor emission over the Indian subcontinent region, the ozone enhancement over northeast India disappears, whereas the one over the northeast Indochina Peninsula remains (Fig. 1b). The ozone enhancement over the northeastern part of the Indochina Peninsula, including the Hanoi location, was associated with emissions over the northern Indochina region (Fig. 1c). In the case of the southern China experiment, the Indochina signal remains (Fig. 1d). The contribution from emissions over each region can be more clearly seen by subtracting the result of each sensitivity experiment from that of the control experiment, as seen in Figures 1e–1g. We find that the Indochina emission produces the ozone enhancement above Hanoi and its impact at 700 hPa (about 3 km) spreads around Hanoi with horizontal extent of about 20° in latitude and longitude (Fig. 1f).

2.4. Conclusions

Regular ozonesonde observations for about 14 years above Hanoi revealed an ozone increase at ~3 km in March. The ozone densities in March showed large temporal variability at three height ranges that are separated by two stable layers at ~1.5 and ~5 km. Meteorological and backward trajectory analyses showed that a typical ozone enhancement at ~3 km originated from air polluted over the Indochina Peninsula and a typical decrease below 1.5 km was caused by the advection of the clean oceanic air associated with a cold surge event.

The ozone concentration above Hanoi was most effectively suppressed when emissions of ozone precursors over northern Indochina Peninsula are eliminated. This suggests that air pollution from northern Thailand (probably due to biomass burning) contributed most to the ozone increase in Hanoi. The model showed that the ozone increase originated from the northern Indochina Peninsula emission expanded in the lower

troposphere over an area of about 20° in longitude and latitude. The model also reproduced the ozone decrease near the surface due to the clean air intrusion associated with the winter monsoon easterly wind. The polluted air was further transported eastward into the middle and upper troposphere across the Pacific Ocean, and some of it reached the west coast of the USA.

We propose that the ozone increase at 3 km over Hanoi in March is caused by the eastward advection of polluted, high-ozone air that was well mixed up to the stable layer at ~5 km over the land mass of the Indochina Peninsula to the west of Hanoi, and by the westward advection of less-polluted, low-ozone air from the oceanic area to the east of Hanoi associated with a cold surge event below the stable layer at ~1.5 km. Such a mechanism occurs only between March and April, after the development of active shallow convection and before the start of summer monsoon rainfall. We conclude that the ozone enhancement over Southeast Asia is caused not only by the biomass burning enhancement, but also by atmospheric circulation system formed in pre-monsoon season. The circulation system determines the detailed 3D structure of ozone distribution [6].

3. The global COVID-19 lockdown impacts on secondary aerosol formation

The world-wide lockdown measures to prevent spreading the 2019 Novel Coronavirus (COVID-19) led to substantial reductions in anthropogenic air pollutants' emissions. The unprecedented global emission reductions enable us to investigate how atmospheric composition respond to reduced human activity. Global COVID-19 lockdown impacts on fine particulate matters ($PM_{2.5}$) have been evaluated [7]. However, changes in secondary

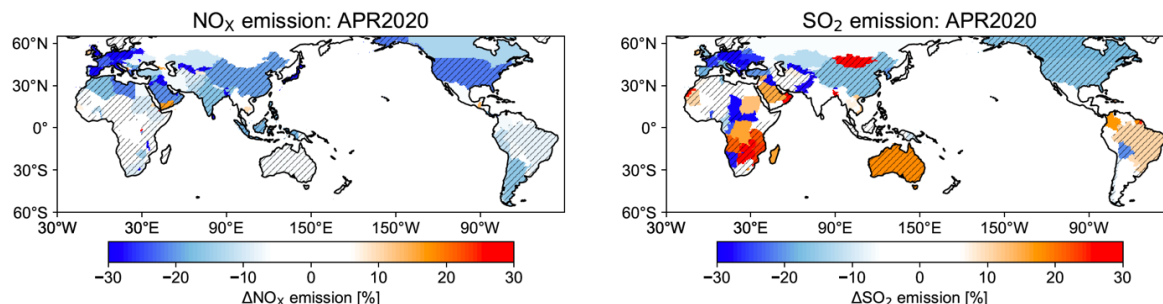


Fig. 2. Spatial distributions of the NO_x and SO₂ emission reductions at a country scale due to the COVID-19 lockdown. The COVID-19 anomalies of NO_x (left) and SO₂ emissions (right) in April 2020 are estimated from mean differences between the 2020 and BAU emissions over individual countries. The anomalies are shown in relative changes (in percentage). Countries with emission anomalies larger than their uncertainties and with the anthropogenic emission contributions to total emissions larger than 70% are shown in hatched lines.

aerosols on regional to global scales remain unclear. Integration of observational information on aerosol precursor gases from space provide insight on responses of secondary aerosols to reduced anthropogenic emissions on the global scale. We quantify the response of secondary inorganic aerosols to COVID-19-related emission reductions using a multi-constituent chemical data assimilation of the TROPOMI for tropospheric NO₂ column and total SO₂ column, the MLS for ozone and HNO₃ vertical profiles.

Compared to the baseline “business-as-usual” emissions, anthropogenic NO_x and SO₂ emissions in April 2020 were reduced by 19–25% and 14–20%, respectively, over major polluted regions (Fig. 2). These regional emission reductions led to decreases in sulfate and nitrate aerosol column amounts by 11% and 21%, respectively, over the eastern United States, by 8% and 11% over Europe, and by 12% and 14% over eastern China in April 2020. The model results suggested that these changes resulted from complex and non-linear responses of chemistry and aerosol thermodynamic system to the emission reductions and seasonal cycles in meteorology. The decreases in secondary aerosols over these three regions corresponded to more than 43% of the aerosol optical depth changes between April 2020 and previous years derived from Suomi NPP/VIIRS and Terra and Aqua/MODIS. These results provide an implication for impacts of anthropogenic NO_x and SO₂ emission controls for air pollution and climate change.

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Nos. JP15204043, JP18204041, JP21244072, JP26220101, and JP16K00535. The SHADOZ sondes at Hanoi are supported by NASA's Upper Atmosphere Research Program through funding to Goddard Space Flight Center (Maryland USA) and the Ozone group at NOAA's Global Monitoring Lab (Colorado USA). This work contains the modified Copernicus Sentinel data (2018), processed by ESA, for TROPOMI. Earth Simulator was used for simulation and data assimilation calculations with the support of JAMSTEC.

References

- [1] Sudo, K., Takahashi, M., Kurokawa, J., & Akimoto, H. (2002). Chaser: A global chemical model of the troposphere 1. Model description. *Journal of Geophysical Research*, 107(D17), 4339. <https://doi.org/10.1029/2001JD001113>
- [2] Miyazaki, K., Eskes, H., Sudo, K., Folkert Boersma, K., Bowman, K., & Kanaya, Y. (2017). Decadal changes in global surface NO_x emissions from multi-constituent satellite data assimilation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 807–837. <https://doi.org/10.5194/acp-17-807-2017>
- [3] Miyazaki, K., Eskes, H. J., & Sudo, K. (2015). A tropospheric chemistry reanalysis for the years 2005–2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8315–8348, <https://doi.org/10.5194/acp-15-8315-2015>.
- [4] Miyazaki, K., Bowman, W. K., Yumimoto, K., Walker, T., & Sudo, K. (2020). Evaluation of a multi-model, multi-constituent assimilation framework for tropospheric chemical reanalysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(2), 931–967. <https://doi.org/10.5194/acp-20-931-2020>
- [5] Ogino, S.-Y., Fujiwara, M., Shiotani, M., Hasebe, F., Matsumoto, J., Hoang, T., et al. (2013). Ozone variations over the northern subtropical region revealed by ozonesonde observations in Hanoi. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(8), 3245–3257. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50348>
- [6] Ogino, S.-Y., Miyazaki, K., Fujiwara, M., Nodzu, M. I., Shiotani, M., Hasebe, F., et al. (2022). Cause of a lower-tropospheric high-ozone layer in spring over Hanoi. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035727. <https://doi.org/10.1029/2021JD035727>
- [7] Hammer, M.S., van Donkelaar, A., Martin, R.V., McDuffie, E.E., Lyapustin, A., Sayer, A.M., Hsu, N.C., Levy, R.C., Garay, M.J., Kalashnikova, O.V., et al. (2021). Effects of COVID-19 lockdowns on fine particulate matter concentrations. *Sci. Adv.*, 7, eabg7670.