

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

関谷 高志^{*1}, 須藤 健悟^{*2}

^{*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} 名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

キーワード: 大気化学, 対流圏オゾン, ヨウ素, 化学輸送モデル, 船舶観測 (5 ワード程度)

1. はじめに

対流圏オゾンは、産業革命以前以降、地球温暖化に寄与する第3位の温室効果ガスとして認識されており[1]、メタンの大気寿命に影響を与え、大気化学を中心的に支配するヒドロキシルラジカル(OH)の供給源となっている。対流圏オゾンの主な吸収源は、水蒸気および酸化水素(HOx)ラジカルとの反応による化学的損失、さらにハロゲン種(Cl, Br, I)を含む触媒サイクルである。

Takashima et al. [2]は、西部太平洋暖水域(WPWP)上の海洋境界層(MBL)におけるIOとオゾンレベルの負の相関を見出した。しかし、広く利用されるオゾン依存のヨウ素排出スキームを組み込んだ0次元および粗い分解能(200~300 km)の3次元化学モデルは、これらの観測された特性を捉えることができなかった。そこで、Takashima et al.は、低オゾン条件下でオゾンに依存しないヨウ素放出プロセスの存在を仮説を提唱した。しかしながら、これらのモデルは熱帯の攪乱を十分に表現できていない。最近の気候モデリング研究では、高解像度(25~50km)の気候モデルが大規模な対流システムに関連する熱帯擾乱の性能を部分的に向上させることが示されてきた。このような小規模な気象変動がIO-オゾン関係に与える影響はまだ解明されていない。

本研究[3]は、船舶観測および全球化学輸送モデルを通じて、60kmまでの小規模スケール気象現象がIOおよびオゾン濃度に与える影響を評価した。具体的には、2.8度と0.56度の異なる水平モデル解像度を、研究船(R/V)「みらい」[2]からの観測されたIOおよびオゾンデータを比較した。

2. データと手法

本研究では、CHASER V4.0 化学輸送モデル(CTM) [4]を利用した。水平解像度としてT42(2.8度)とT213(0.56度)の2種類をテストした。T42とT213は鉛直解像度は同一であり、地表から高度40kmまで32層の鉛直層を採用した。気象場は海面水温と海氷濃度を入力として駆動するCTMの力学モジュールと物理モジュールによって計算される。海面水温・海氷濃度はGroup for High Resolution Sea Surface Temperature(GHRSST)のレベル4 multi-scale ultrahigh-resolution(MUR)解析プロダクト[5]を用いた。シミュレートされた気温と水平風は

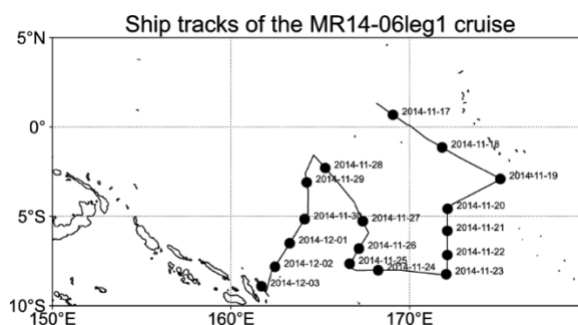


図1. 本研究で使用したMR14-06leg1調査航路。丸で囲まれた点は日平均位置を示す。

ERA-5再解析データ[6]に、気温には5日、水平風には0.7日の緩和時間が適用し、緩和した。大気化学モジュールは、トレーサー輸送、乾性・湿性沈着、オゾン-HOx-NOx-VOCs-CO系およびハロゲン(Cl, Br, I)化学反応メカニズムを含む化学反応(115種・309反応)過程をシミュレートすることで、化学物質の空間的・時間的変動を計算する。海洋上のオゾン乾性沈着速度は、海面ヨウ素との化学反応を考慮した抵抗モデルを用いて計算した[6]。対流圏ハロゲン化学を考慮したCHASERモデルの詳細は、Sekiya et al. [2]で詳述されている。

計算された表層付近のオゾン・IO濃度は、船舶観測データを用いて検証した。オゾン濃度は、研究船「みらい」による研究航海[8]で取得された、254nmの紫外線領域で動作する現場型オゾンモニター(Thermo Scientific, 49C)を用いて測定されている。このデータは、「みらい」による研究航海[8]から取得されたもので、2012年から2017年にかけて、南緯67度から北緯75度にわたり、総計11,666時間にわたる観測データである。船舶排気の影響を受けたデータ及び1時間以内に標準偏差の3倍を超えるデータは、時間平均値算出前に除外した。オゾン測定の不確かさは、2013年から2019年にかけて実施した12回の較正に基づき、 $0.9\% + 0.18 \text{ ppbv}$ と推定される。

2014年から2018年にかけて、「みらい」に搭載された多軸差分光吸収分光法(MAX-DOAS)によりIO濃度を測定した[2]。本研究では、温帯域で観測された不確かさが大きいと、熱帯西太平洋域において2014年11月17日~12月3日(MR14-06leg1)に測定されたデータを用いた(図1)。O₄およびIOの差分傾斜気柱密度(DSCD)は、傾斜角

±0.5 度以内のターゲット角 3、5、10、30、90 における分光データから、非線形最小二乗法による分光フィッティングを用いて導出した。IO DSCD の典型的なフィッティング誤差は 1×10^{12} molecules cm⁻² (約 10%) である。

3. 結果

図 2 と表 1 は、観測地点データにおける地表 IO とオゾンの関係を示している。Takashima et al. [2] が報告したように、IO 濃度とオゾン濃度には負の相関が認められた。オゾンモデルバイアスによる無機ヨウ素排出量の過大評価を引き起こす可能性を考慮するため、オゾンモデルバイアスが 50%を超えた期間を除外し、観測された IO-オゾン関係をモデル結果と比較した。

低解像度 (2.8 度) シミュレーションでは弱い正の相関関係が示されたが、高解像度 (0.56 度) シミュレーションでは負の相関が確認された。高解像度シミュレーションの相関係数は観測値より小さかったものの、傾きは観測結果と同程度であった。

図 3 は熱帯太平洋域におけるヨウ素化学に起因するオゾン消失の経度・高度分布を示す。高解像度シミュレーションでは WPWP 域における平均ヨウ素媒介オゾン損失は $0.56 \text{ ppbv day}^{-1}$ であり、低解像度シミュレーション ($0.20 \text{ ppbv day}^{-1}$) の 2 倍以上であった。高解像度モデルにおけるヨウ素に起因するオゾン消失と総オゾン消失の決定係数 ($R^2 = 0.24$) は、低解像度モデル ($R^2 = 0.11$) の 2 倍以上であった。これらの結果は、高解像度モデルにおけるヨウ素起因のオゾン消失が、総オゾン消失の時間的・空間的変動性に大きく影響し、負のヨウ素-オゾン相関関係を生じさせていることを示唆している。

高解像度モデルにおける地表オゾン消失の増加は、高解像度において、WPWP 上空の MBL 外気との混合が減少したことに関因する。人工トレーサー輸送計算結果によれば、WPWP 上空の MBL における 0.56 度解像度での人工トレーサー濃度は、2.8 度解像度よりも 18%高い。この結果は、

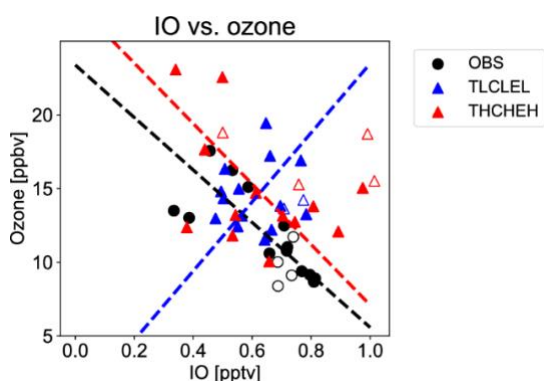


図 2. MR14-06leg1 航海における IO (ppbv) とオゾン (ppbv) の散佈図。黒丸は観測値、赤三角は高解像度シミュレーションの結果、青四角は低解像度シミュレーションの結果を示す。

表 1. MR14-06leg1 航海観測地点で採取したデータから算出した、IO とオゾンの傾き (ppbv/ppbv)、切片 (ppbv)、相関係数。これらの傾きと切片は、縮減主軸 (RMA) 線形回帰法を用いて算出した。

Experiments	Slope	Intercept	Correlation
Observation	-17.57	23.29	-0.70
High-resolution simulation	-20.51	27.61	-0.45
Low-resolution simulation	23.44	0.04	0.08

0.56 度解像度では 2.8 度解像度よりも MBL 内の気塊がより停滞していたことを示しており、これは MBL 内の気塊が自由対流圏へ上昇する対流輸送が弱かったことに起因すると考えられる。別のあり得る理由としては、高解像度におけるトレーサー移流計算での数値拡散の抑制が関係している可能性がある。さらに、ヨウ素化学のみを考慮した感度シミュレーションにより、ヨウ素に起因するオゾン損失は、ハロゲン間化学反応 (すなわちヨウ素と塩素・臭素化合物の反応) ではなく、ヨウ素化学に起因することが確認された。

4. 議論と結論

本研究では、2014 年 11 月から 12 月にかけて実施された R/V 「みらい」 MR14-06leg 航海の WPWP 域における小規模スケール (60km まで) の気象プロセスが地表のヨウ素濃度とオゾン変動に及ぼす影響を調査した。高解像度のシミュレーションは、低解像度シミュレーションとは異なり、船上観測データで確認されたヨウ素濃度とオゾンの負の相関関係を概ね捉えていた。観測されたヨウ素とオゾンの関係は、小規模スケールの大気輸送過程や海洋ヨウ素放出過程のみに起因するのではなく、小規模スケールの大気輸送過程と化学過程の相互作用に起因すると考えられる。高解像度シミュレーションでは、WPWP 上空における MBL 外の空気との混合が減少した結果、WPWP 上空におけるヨウ素起因のオゾン化学消失 ($0.56 \text{ ppbv day}^{-1}$) が低解像度シミュレーション ($0.20 \text{ ppbv day}^{-1}$) を上回った。

海洋上のヨウ素とオゾンの変動を支配するプロセスを包括的に理解するには、海洋ヨウ素放出に関する既存パラメタリゼーションは、WPWP 上空の大気中 IO 濃度を観測値より過大評価する傾向がある。海洋マイクロレイヤー (SML) は有機物の存在による溶解度増加により、ヨウ素放出を抑制する可能性がある。これらの要因を考慮した新たなパラメタ化手法の開発は、大気中のヨウ素とオゾン化学に対する生物地球化学的制御を理解する上で不可欠である。

さらに、本研究で用いたモデルの解像度は熱帯大気循環を完全に捉えるには不十分である。熱帯域における大

規模対流系を効果的に表現するには10km解像度が必要である。

本研究は、WPWP域で観測されたI₀とオゾンの共変動において、小規模スケールの大気輸送・化学過程が決定的な役割を果たすことを明らかにした。これらのプロセスは、人為的オゾン変化と自然ハロゲンプロセスの相互作用を検証する上で不可欠である。ヨウ素化合物を含む短寿命ハロゲン種は、気候モデルで考慮されていない自然気候システムの重要要素であり、人間活動によって増幅される[8]。他の季節や海洋域におけるオゾンとI₀の変動をモデル評価することは、将来の対流圏オゾンの気候影響に関する潜在的なバイアスと不確実性の低減に寄与するだろう。

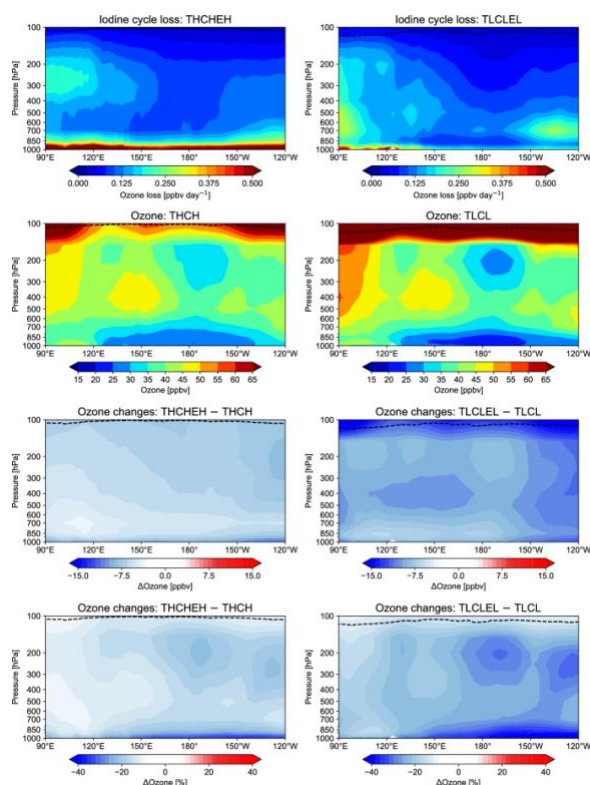


図3. 2014年11月17日から12月3日にかけての熱帯太平洋（南緯15度～北緯15度）における、化学的オゾン損失の経度-気圧断面（1行目）、ヨウ素化学を考慮しないシミュレーションのオゾン濃度（2行目）、およびヨウ素関連プロセスによるオゾン濃度の絶対的・相対的变化（それぞれ3行目と4行目）。化学消失とオゾン変化は、それぞれ0.56解像度（左）と2.8解像度（右）のシミュレーションから推定された。単位は化学消失がppbv day⁻¹（1行目）、オゾン濃度とその変化がppbv（2・3行目）および%（4行目）である。破線は対流圏界面の気圧を示す。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（研究助成番号 21H04933）の支援を受けた。欧州中期予報センター

（ECMWF）の気象再解析データの使用に感謝する。モデル計算には、海洋研究開発機構の支援により、地球シミュレータを使用した。

文献

- [1] IPCC, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, 2391 pp (2021)
- [2] Takashima et al., “Full latitudinal marine atmospheric measurements of iodine monoxide”, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4005-4018 (2022)
- [3] Sekiya et al., “Evaluation of processes driving iodine monoxide and ozone variability over the Western Pacific warm pool”, *Prog Earth Planet Sci* 12, 44 (2025)
- [4] Sekiya et al., “Global Bromine- and Iodine-Mediated Tropospheric Ozone Loss Estimated Using the CHASER Chemical Transport Model”, *SOLA*, 16, 220-227 (2020)
- [5] Chin et al., “A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature”, *Remote Sens. Environ.*, 200, 154-169 (2017)
- [6] Hersbach et al., “The ERA5 global reanalysis”, *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999-2049 (2020)
- [7] Chang et al., “Ozone deposition to the sea surface: chemical enhancement and wind speed dependence”, *Atmos. Environ.*, 38(7), 1053-1059 (2004)
- [8] Kanaya et al., “Ozone and carbon monoxide observations over open oceans on R/V Mirai from 67° S to 75° N during 2012 to 2017: testing global chemical reanalysis in terms of Arctic processes, low ozone levels at low latitudes, and pollution transport”, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 7233-7254 (2019)
- [9] Saiz-Lopez et al., “Natural short-lived halogens exert an indirect cooling effect on climate”, *Nature* 618, 967-973 (2023)

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

Takashi Sekiya*¹, Kengo Sudo*²

*¹Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*²Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Keywords : Atmospheric chemistry, Tropospheric ozone, Iodine, Chemical transport model, ship-borne observations

1. Introduction

Tropospheric ozone is recognized as the third most important greenhouse gas contributing to global warming since the pre-industrial era [1] and serves as a source of the hydroxyl radical (OH), which influences the atmospheric lifetime of methane and centrally governs atmospheric chemistry. The primary sinks of tropospheric ozone are chemical loss through reactions with water vapor and hydrogen oxide (HOx) radicals, along with catalytic cycles involving halogen species (Cl, Br, and I).

Takashima et al. [2] identified a negative correlation between IO and ozone levels in the marine boundary layer (MBL) over the Western Pacific Warm Pool (WPWP). However, the zero-dimensional and coarse-resolution (200–300 km) three-dimensional chemical models, which incorporate commonly used ozone-dependent iodine emissions, failed to capture these observed characteristics. They hypothesized the existence of ozone-independent iodine emission processes under low-ozone conditions. Nonetheless, these models do not adequately represent tropical disturbances. Recent climate modeling studies indicated that high-resolution (i.e., 25–50 km) climate models partially improved the performance of tropical disturbances associated with large-scale convective systems. The influence of fine-scale meteorological variability on IO-ozone relationships remains unexplored.

This investigation [3] assesses the influence of fine-scale (down to 60 km) meteorological processes on IO and ozone concentrations through ship-borne observations and a global chemical transport model. Specifically, it compares two distinct horizontal model resolutions (2.8 degree and 0.56 degree) with observed IO and ozone data from the research vessel (R/V) Mirai [2].

2. Data and Methods

The CHASER V4.0 chemical transport model (CTM) [4] was utilized. We tested two different horizontal resolutions, T42 (2.8 degree) and T213 (0.56 degree). T42 and T213 share the same vertical grid resolution: 32 vertical layers extending from the

surface to an altitude of 40 km. The meteorological fields were computed in the dynamics and physics modules of the CTM which needs the sea surface temperatures and sea ice concentrations as input. These were taken from the Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) Level 4 multi-scale ultrahigh-resolution (MUR) analysis product [5]. The simulated air temperature and horizontal winds were nudged to the ERA-5 reanalysis data [6], with a relaxation time of 5 days for temperature and 0.7 days for horizontal wind. The chemical module computes spatial and temporal variations in chemical species, by simulating tracer transport, dry and wet deposition, and chemical processes (115 species and 309 reactions), including the ozone-HOx-NOx-VOCs-CO system and halogen (Cl, Br, and I) chemistry. The ozone dry deposition velocity over the ocean was calculated using the resistance-based scheme that accounts for the chemical reaction with sea surface iodine [6]. Further details of the CHASER model with tropospheric halogen chemistry are elaborated in Sekiya et al. [2].

The simulated near-surface ozone and IO concentrations were validated using ship-based observations. The ozone concentrations were recorded using an in-situ Ozone Monitor (Thermo Scientific, 49C) operating in the UV at 254 nm, which were acquired from the research cruises on R/V Mirai of the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology [8], spanning from 67S to 75N for a total of 11,666 h from 2012 to 2017. The data affected by ship exhaust and those exceeding 3 of the standard deviation within one hour were excluded before generating the hourly mean. We estimate ozone measurement uncertainty to be 0.9% (1-sigma variability of sensitivity) + 0.18 ppbv (1-sigma variability of intercept), based on 12 calibrations over the period during 2013–2019.

The IO concentrations were measured by the multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) aboard the R/V Mirai for 2014–2018 [2]. For this evaluation, the data collected over the tropical Western Pacific in November 17–December 3, 2014 (during the MR14-06leg1 cruise) were used (Fig. 1), given the large uncertainties observed in the extratropical

regions. The differential slant column densities (DSCDs) of O_4 and IO were derived from the spectral data at the elevation angles within ± 0.5 of target angles at 3, 5, 10, 30, and 90 using a nonlinear least-squares spectral fit. Typical fitting error of IO DSCDs was 1×10^{12} molecules cm^{-2} (approximately 10%).

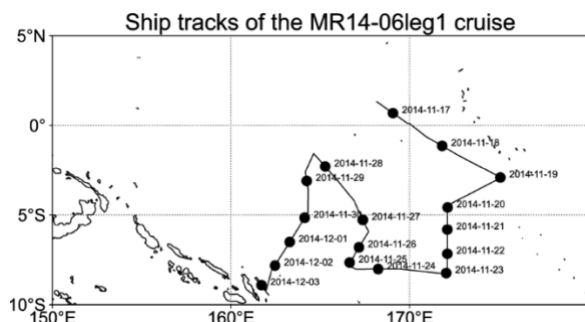


Figure 1. The MR14-06leg1 cruise tracks of the data used in this study. The closed circles represent daily mean locations

3. Results

Figure 2 and Table 1 illustrate the relationships between surface IO and ozone in the observation location data (i.e., observation and model data sampled at the observation locations). As documented in Takashima et al. [2], a negative correlation was observed between IO concentrations and ozone levels. To account for potential degradation due to ozone model biases, which could lead to excessive inorganic iodine emissions, the observed IO-ozone relationships were compared with the model results, excluding the periods when ozone model biases exceeded 50%.

The low-resolution (2.8-degree) simulation exhibited weak positive correlation relationships in the observation location data, whereas the high-resolution (0.56-degree) simulation demonstrated a negative correlation. Although the correlation coefficient in the high-resolution simulation was smaller than observed, the slope was comparable to that seen in the observations.

Figure 3 displays the longitudinal and vertical distributions of ozone losses attributed to iodine chemistry over the tropical Pacific. In the high-resolution simulation, the average iodine-mediated surface ozone loss over the WPWP was 0.56 ppbv day^{-1} , more than double that in the low-resolution simulation (by 0.20 ppbv day^{-1}). The coefficient of determination between the iodine-mediated and total ozone losses at high resolution ($R^2 = 0.24$) was more than twice as large as that at low resolution ($R^2 = 0.11$). These results suggest that the iodine-mediated ozone loss at high resolution significantly influences the spatial and temporal variability of total ozone loss, producing negative IO-ozone correlation relationship.

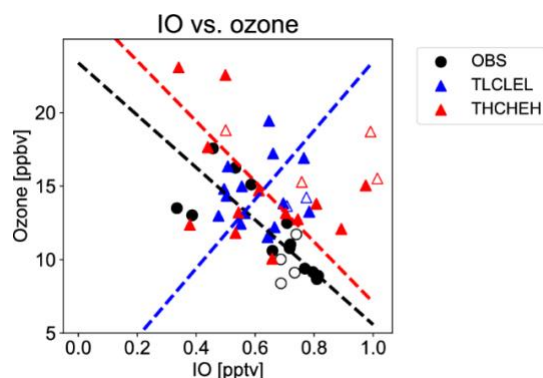


Figure 2. Scatter plot of IO (pptv) versus ozone (ppbv) during the MR14-06leg1 cruise. Black circle represents the observations, the red triangle denotes the results of high-resolution simulation, the blue square represents the low-resolution simulation.

Table 1. Slope (ppbv/pptv), intercept (ppbv), and correlation coefficient of IO vs. ozone calculated from the data sampled at the MR14-06leg1 cruise observation locations. These slopes and intercepts are calculated using the reduced major axis (RMA) linear regression method.

Experiments	Slope	Intercept	Correlation
Observation	-17.57	23.29	-0.70
High-resolution simulation	-20.51	27.61	-0.45
Low-resolution simulation	23.44	0.04	0.08

The greater surface ozone loss in high-resolution model resulted from the reduced mixing with air outside the MBL over the WPWP at the finer resolution of 0.56 degree, which was confirmed by the synthetic tracer transport calculations. The calculations suggested that synthetic tracer concentrations at 0.56 resolution in the MBL over the WPWP are 18% higher than those at 2.8 resolution. This result indicates that the air mass in the MBL was more stagnated at 0.56 resolution than at 2.8 resolution, which can be attributed to weaker convective upward transport of air mass in the MBL to the free troposphere (not shown). Another reason could be related to suppressed numerical diffusion in the tracer advection calculation at higher resolution. Additionally, sensitivity simulation considering only iodine chemistry confirmed that iodine-driven ozone loss was attributed to iodine chemistry, rather than cross halogen chemical reactions (i.e., reactions of iodine with chlorine and bromine compounds)

4. Discussion and conclusion

In this study, the influence of fine-scale (down to 60 km) meteorological processes on surface IO and ozone variability over the WPWP was investigated during the R/V Mirai MR14-06leg1 cruise in November–December 2014. The 0.56-resolution simulation generally captured the negative correlation relationships between IO and ozone observed in ship-borne data, unlike the low-resolution simulation. The observed IO-ozone relationship can be attributed to the interplay of fine-scale atmospheric transport and chemical processes, rather than solely to fine-scale atmospheric transport process or oceanic iodine emission processes. The iodine-mediated ozone chemical loss in the high-resolution simulation (by $0.56 \text{ ppbv day}^{-1}$) exceeded that in the low-resolution simulation (by $0.20 \text{ ppbv day}^{-1}$) over the WPWP, resulting from reduced mixing with air outside the MBL over the WPWP at the finer resolution of 0.56 degree.

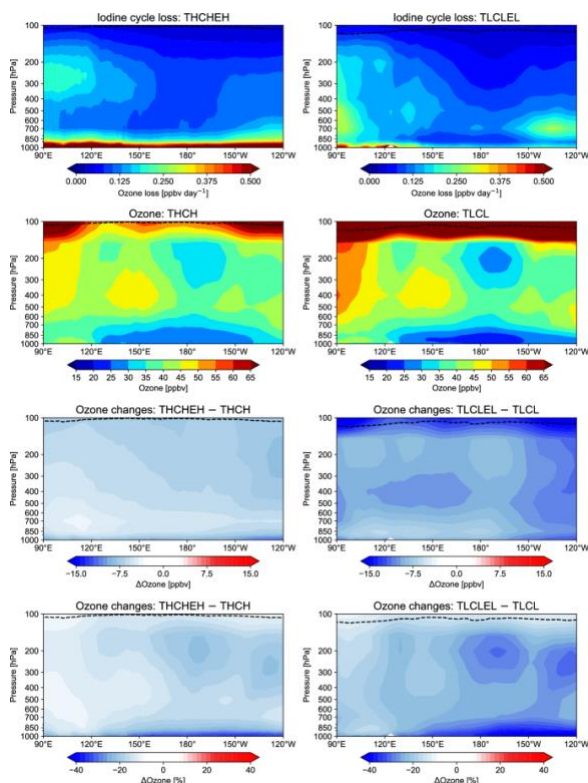


Figure 3. Longitude-pressure cross section of chemical ozone loss (first row), ozone concentrations in the simulation without iodine chemistry (second row), and absolute and relative changes in ozone concentrations due to iodine-related processes (third and fourth rows, respectively) during November 17–December 3, 2014 over the tropical Pacific (15S–15N). Chemical loss and ozone changes are estimated from simulations with 0.56 resolution (left) and 2.8 resolution (right), respectively. Units are ppbv day^{-1} for chemical loss, ppbv (second and third rows), and percentage (fourth row) for ozone concentration and its change. Dashed line denotes the tropopause pressure.

Additional challenges persist in comprehensive understanding the processes that govern iodine and ozone variability over the ocean. Specifically, current parameterizations for iodine release from the ocean tend to overestimate the observed atmospheric IO concentrations over WPWP. The sea surface microlayer (SML) could inhibit the iodine release due to increased solubility from the presence of organic matter. Developing a novel parameterization that include these factors is essential for understanding the biogeochemical controls on atmospheric iodine and ozone chemistry.

Moreover, the current model resolution is inadequate to fully capture the tropical atmospheric circulation. A resolution of 10 km is required to effectively represent large-scale convective systems in the tropics.

This study highlights the crucial role of the interplay between fine-scale atmospheric transport and chemistry processes and the ozone-independent iodine emission process in the co-variability of IO and ozone observed over the WPWP, with an implication that these processes are essential for verifying an interaction between anthropogenic changes in ozone and natural halogen processes. Short-lived halogen species, including iodine compounds, are regarded a key component of the natural climate system not accounted for in climate models and amplified by anthropogenic activities [8]. Model evaluation of the co-variability of ozone and IO in other seasons and over other ocean regions would contribute to reduce potential bias and uncertainties in climate impacts of tropospheric ozone in the future.

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 21H04933. We are grateful for the use of meteorological reanalysis data from European Centre for Medium-range Weather Forecasts. Earth Simulator was used for model simulations via the support of Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.

References

- [1] IPCC, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, 2391 pp (2021)
- [2] Takashima et al., “Full latitudinal marine atmospheric measurements of iodine monoxide”, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4005–4018 (2022)
- [3] Sekiya et al., “Evaluation of processes driving iodine monoxide and ozone variability over the Western Pacific warm pool”, *Prog Earth Planet Sci* 12, 44 (2025)
- [4] Sekiya et al., “Global Bromine- and Iodine-

- Mediated Tropospheric Ozone Loss Estimated Using the CHASER Chemical Transport Model”, SOLA, 16, 220-227 (2020)
- [5] Chin et al., “A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature”, Remote Sens. Environ., 200, 154-169 (2017)
- [6] Hersbach et al., “The ERA5 global reanalysis”, Q J R Meteorol Soc. 2020; 146: 1999-2049 (2020)
- [7] Chang et al., “Ozone deposition to the sea surface: chemical enhancement and wind speed dependence”, Atmos. Environ., 38(7), 1053-1059 (2004)
- [8] Kanaya et al., “Ozone and carbon monoxide observations over open oceans on R/V Mirai from 67° S to 75° N during 2012 to 2017: testing global chemical reanalysis in terms of Arctic processes, low ozone levels at low latitudes, and pollution transport”, Atmos. Chem. Phys., 19, 7233-7254 (2019)
- [9] Saiz-Lopez et al., “Natural short-lived halogens exert an indirect cooling effect on climate”, Nature 618, 967-973 (2023)