

# 観測とモデルが解き明かす 地球環境変動のダイナミクス

## Dynamics of Earth Environmental Change Revealed by Observations and Models

当講座では国立環境研究所が実施する観測とシミュレーションモデルの研究に基づき、地球規模の環境変動に関わる大気海洋化学成分の時空間変動と陸域・海洋における炭素収支の観測技術、ならびに気候変動に関連する全球規模の環境変動解析に関する研究と教育を行っている。具体的には、人工衛星、航空機、船舶、地上観測による日本国内、アジア域、太平洋域、北極・南極域の大気中温室効果ガスおよび海洋表層中CO<sub>2</sub>のデータ解析を行い、シミュレーションモデルによる温室効果ガス収支の評価や将来予測を行うことによって地球規模での環境変動の原因究明に向けた研究を実施している。

This division conducts research and education based on observations and simulation models implemented by the National Institute for Environmental Studies. It focuses on spatiotemporal variations in atmospheric and oceanic chemical components related to global environmental change, observation techniques for carbon budgets in terrestrial and marine environments, and analysis of global-scale environmental changes associated with climate change. Specifically, we analyze data on atmospheric greenhouse gases from satellites, aircraft, ships, and ground-based observations across Japan, Asia, the Pacific Ocean, and the Arctic/Antarctic regions and surface ocean CO<sub>2</sub> from ships across the Pacific Ocean. By evaluating greenhouse gas budgets and making future projections using simulation models, we conduct research aimed at identifying the causes of global environmental change.

### 河川水の流入が海洋炭酸系に与える影響評価

河川水は有機物やアルカリ度 (TA) を海へ運び、これらが溶存無機炭素 (DIC) へ分解されることで沿岸域の大気海洋間 CO<sub>2</sub> 交換や海洋酸性化に影響を与える。そのため河川の影響を理解することは炭素循環研究に重要である。しかし日本沿岸域では、黒潮・親潮の流動や降雨・蒸発の影響が大きく、河川水の海洋炭酸系への寄与を定量的に評価することが困難であった。

本研究では、国立環境研究所の協力貨物船観測で得られた数十万点に及ぶ表層炭酸系データを用い、降雨・蒸発の影響を除くために塩分規格化した TA (nTA) の時空間分布を作成した。さらに経験的直交関数解析を適用し、河川水に特有のシグナルを抽出して影響域を特定し、周辺海域との違いを評価した。その結果、本州沿岸に流入する多数の河川がもたらす淡水の影響は平均して沖合約 250 km まで及び (図 1)、その広がりには黒潮流路の変動が関与している可能性が示唆された。また、影響域における河川水の大気-海洋間 CO<sub>2</sub> 交換への正味効果はほぼゼロである (図 2) 一方、海洋酸性化指標であるアラゴナイト飽和度 ( $\Omega_{arg}$ ) は過去 20 年間で平均

### Assessment of the impact of river water inflow on the oceanic carbonate system

River water flowing into the ocean carries organic matter and total alkalinity (TA). This organic matter decomposes to form dissolved inorganic carbon, which influences the exchange of air-sea CO<sub>2</sub> and ocean acidification. Understanding the role of rivers is therefore crucial for the carbon cycle. However, it has been difficult to quantitatively assess the impact of river water on carbonate systems in Japan's coastal areas due to the combined influences of the Kuroshio, the Oyashio, rainfall, and evaporation.

In this study, we created spatiotemporal distributions of salinity-normalized TA (nTA), which removes the effects of rainfall and evaporation, using surface carbonate ecosystem data obtained mainly from hundreds of thousands of observed data mainly by cargo ships by the National Institute for Environmental Studies. Applying empirical orthogonal function analysis to the distributions enabled us to extract river-specific signals and identify the riverine water-affected area. This also enabled us to make quantitative comparisons with the unaffected surrounding area. Our analysis revealed that, on average, river-water signals along the Honshu coast extend approximately 250 km offshore,

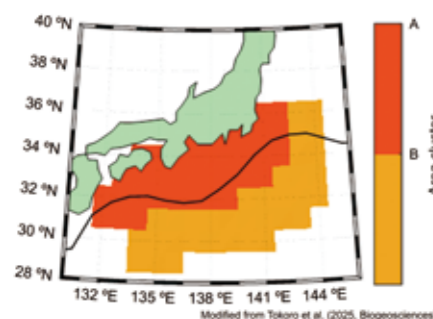


Fig. 1 The riverine water-affected area and surrounding unaffected area revealed by Empirical Orthogonal Function analysis of nTA distributions. The black line represents the mean Kuroshio Current path.

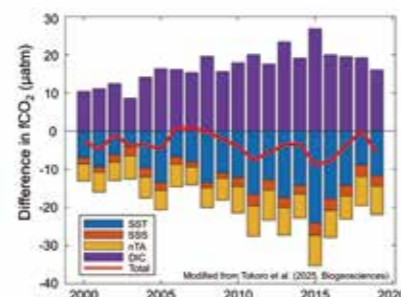


Fig. 2 Annual variation in the difference of ocean surface partial pressure of CO<sub>2</sub> (fCO<sub>2</sub>) between the riverine water-affected area and the surrounding area. The colors in the bar chart represent the contribution of each element, and the red line indicates their total.

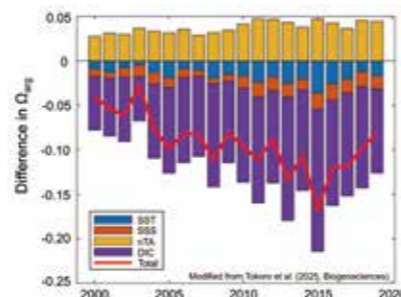


Fig. 3 Annual variation in the difference of aragonite saturation ( $\Omega_{arg}$ ) between the riverine water-affected area and the surrounding area. The colors in the bar chart represent the contribution of each element, and the red line indicates their total.



客員教授 中岡 慎一郎  
Professor  
Shin-ichiro Nakaoka



客員教授 八代 尚  
Professor  
Hisashi Yashiro

0.09 低下していた (図 3)。これは、CO<sub>2</sub> 交換に関しては河川水流入が CO<sub>2</sub> 吸収を促す効果と有機物分解が放出を促す効果が相殺されるのに対し、 $\Omega_{arg}$  では低水温や有機物分解がその低下を上回り、長期的な酸性化として現れるためである。

### 全球化学モデルを用いたオゾン前駆体削減の国内および越境汚染への影響評価

オゾンは深刻な健康被害 (年間 100 万人以上の過剰死亡の推計) や生態系への悪影響を及ぼすほか、温室効果ガスとしての性質も有している。本研究では、高解像度全球化学モデル NICAM-Chem (水平解像度 56km) を用い、人為起源の窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出削減が各地のオゾン濃度に与える影響を評価するため、世界を 12 地域に分類し、特定の地域の排出量をゼロにする「ゼロアウト法」により分析を行った。その結果、国内のオゾン削減効果はインド (年平均 14 ppbv 減, 図 4) と中国 (同 11 ppbv 減, 図 5) で最大であることが示された。中国の削減は越境汚染にも顕著な影響を及ぼし、日本で 7 ppbv、北米や西欧でも 1 ppbv のオゾン低下をもたらすと予測された。また、北米の削減も遠方の欧州やアジアに波及しており、中国と北米は相互に越境汚染の影響を及ぼし合う関係にあった。一方で、インド等の低緯度地域では活発な対流活動により NO<sub>x</sub> が自由大気へ運ばれるため、地上での水平拡散は中緯度地域より限定的だった。

さらに、オゾン生成における化学反応の強い非線形性も確認された。例えば日本で NO<sub>x</sub> を 20% 削減した設定にすると国内削減の方が中国の削減より効果的だったが、100% 削減の設定では結果が逆転しており、削減率の仮定が評価に影響を及ぼすことが示唆された。本研究は、各国の排出削減が地球規模に波及することを定量化しており、健康維持と気候変動対策に向けた国際協力の重要性を示した。

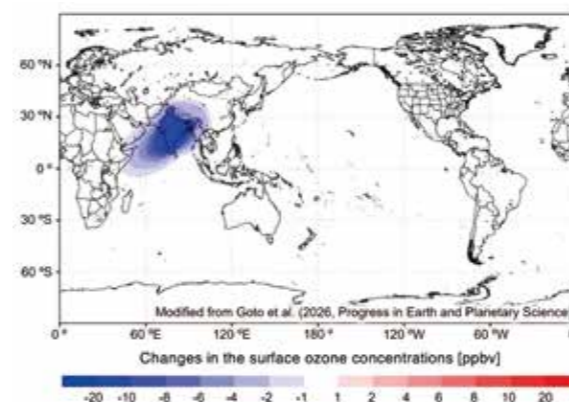


Fig. 4 Horizontal distribution of the absolute difference in the annual average surface ozone concentrations between the standard experiment and the sensitivity experiment, where anthropogenic NO<sub>x</sub> emissions in China are set to zero.

suggesting that variations in the path of the Kuroshio Current contributed to the identification of this affected area (see Fig. 1). Furthermore, we found that the net effect of river water on the CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and the ocean was negligible (Fig. 2). Meanwhile, aragonite saturation, an indicator of ocean acidification, has decreased by 0.09 over the past 20 years due to the combined effects of water temperature, alkalinity, and the decomposition of organic matter (Fig. 3).

### Global Impacts of Anthropogenic NO<sub>x</sub> on Transboundary Ozone Concentrations

This study utilizes the high-resolution global chemistry model NICAM-Chem (56 km resolution) to quantify how reducing anthropogenic nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) impacts domestic and transboundary ozone concentrations. By applying a zero-out method across 12 world regions, the study includes evaluation of regional mitigation strategies, addressing ozone's significant health risks, which include over one million estimated excess deaths annually.

Key findings show that domestic ozone reductions are largest in India (14 ppbv, Fig. 4) and China (11 ppbv, Fig. 5). Furthermore, Chinese NO<sub>x</sub> reductions significantly decrease ozone in Japan (by 7 ppbv) and North America and Western Europe (by 1 ppbv). Reductions in North America similarly affect distant regions across the Atlantic and Pacific. In tropical areas, such as India, active convection transports precursors to the free troposphere, making surface-level horizontal propagation more limited mid-latitude regions.

The study also highlights the strong nonlinearity of ozone chemistry. In Japan, a 20% domestic NO<sub>x</sub> reduction is more effective than a 20% Chinese reduction, but this relationship reverses in a 100% reduction scenario. These results emphasize that countries are interconnected as both sources and receptors, underscoring the vital importance of international collaboration for global human health and climate goals.

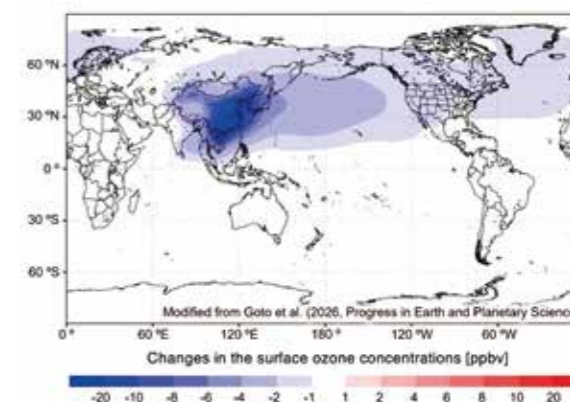


Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the sensitivity experiment, where anthropogenic NO<sub>x</sub> emissions in India are set to zero.