

気象庁における温室効果ガス観測

Observations of greenhouse gases by Japan Meteorological Agency

澤 庸介*
Yousuke SAWA*

気象庁 大気海洋部
Atmosphere and Ocean Department, Japan Meteorological Agency

摘 要

気象庁では世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）/全球大気監視（Global Atmosphere Watch: GAW）計画に基づき、温室効果ガスの変動を把握するため、世界の監視ネットワークの一環として温室効果ガスの観測及びこれに関わる業務を実施している。国内3地点（綾里（岩手県大船渡市）、南鳥島（東京都小笠原村）、与那国島（沖縄県与那国町））において、地上付近の温室効果ガス濃度を観測しており、海洋気象観測船では、日本周辺海域及び北西太平洋における洋上大気及び海中の二酸化炭素等の観測を実施している。さらに、2011年から北西太平洋において航空機による上空の温室効果ガス観測を行っている。気象庁は自ら観測を実施するだけでなく、GAW計画の中で国際的なセンター業務を担当しており、WMO温室効果ガス世界資料センター（World Data Centre for Greenhouse Gases: WDCGG）、全球大気監視校正センター（World Calibration Centre: WCC）、品質保証科学センター（Quality Assurance/Science Activity Centre: QA/SAC）を運営し、観測データの品質を向上させる活動や、世界の温室効果ガス観測データの収集と提供を行っている。

キーワード：温室効果ガス観測，気象庁，世界気象機関，全球大気監視計画

Key words：observation of greenhouse gases, Japan Meteorological Agency, World Meteorological Organization, global atmosphere watch programme

1. はじめに

2021年8月に気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）第6次評価報告書第1作業部会報告書（自然科学的根拠）が公表された。この報告書の政策決定者向け要約（Summary for Policymakers: SPM）冒頭で「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」と、地球温暖化が人間の影響で起きていることを初めて「疑う余地がない」と評価している。太陽の光は、地球の大気を通過し、地表面を暖める。暖まった地表面は、熱を赤外線として宇宙空間へ放射するが、大気はその熱の一部を吸収する。大気中で赤外線を吸収する性質を持つ温室効果ガスが人間活動によって増加し温暖化をもたらしていると考えられている。主な温室効果ガスには二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）、フロンガスがある。温室効果ガスと地球温暖化について専門的に知りたい方は中澤ほか（2015）を、温室効果ガスの種類や特徴の一般的な解説については環境省「温室効果ガスインベントリの

概要」(<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/overview.html>)や気象庁「温室効果ガス Web 科学館」(https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info_tour.html)等を参照していただきたい。

IPCC 第6次評価報告書で報告された2019年の大気中の温室効果ガス濃度は、CO₂で410 ppmに達し1750年を基準とした工業化以前より約47%増加している。CH₄及びN₂Oの濃度もそれぞれ1,877 ppb及び332 ppb（いずれもWMOの解析値）に達し、工業化以前よりも大幅に増加している。

温室効果ガスの地球温暖化への過去・将来にわたる影響が評価されるようになってきたが、気候変動のメカニズムには科学的理解に至っていない部分も残されている。地球温暖化問題に対処するには、変動の兆候を早期に検出するとともに、変化を予測し、将来の影響を想定した対応をとる必要がある。

地球環境の変動理解のためには、地球規模の観測を必要な精度で統一的な基準を用いて長期的に実施し、時期・場所の異なる観測で得られたデータを相互に利用できるようにする必要がある。このための仕組みの1つとして実施されているのが世界気象機

受付：2021年10月1日，受理：2021年12月22日

* 〒105-8431 東京都港区虎ノ門3-6-9, E-mail: yousuke.sawa-a@met.kishou.go.jp

関(WMO)の全球大気監視(GAW)計画である。本稿では GAW 計画の中で実施されている気象庁の温室効果ガス観測と関連業務について紹介する。

2. 気象庁の温室効果ガス観測開始とその背景

2.1 気象庁温室効果ガス観測の開始

気象庁は1987年1月、岩手県気仙郡三陸町綾里(現大船渡市)にある気象ロケット観測所(現大気環境観測所)において、大気中CO₂濃度の連続観測を開始した。同観測所ではWMOの進めていた大気バックグラウンド汚染観測網(Background Air Pollution Monitoring Network: BAPMoN)の地域観測所として、降水・降下じんの化学成分、波長別直達日射計による大気混濁度の観測を実施していたが、これにCO₂観測を加えて拡大地域観測所としてBAPMoNの充実に貢献することになった(伊藤, 1987)。

綾里に続き、気象庁は1993年3月に南鳥島気象観測所(東京都小笠原村)において、BAPMoN基準観測所(現在の全球観測所に相当)を設置し大気中CO₂濃度の観測を開始した。WMOは人為起源排出源からの影響を極めて受けにくい条件でCO₂等の観測を行うBAPMoN基準観測所の設置を加盟国に要請していた。南鳥島は東京の南東約1,860kmに位置する珊瑚礁でできた小さな島で、周囲に存在する人為的な汚染源も極めて少ない。これらのことから北西太平洋域の大気を代表する地点として南鳥島が選定され観測が開始された(城尾, 1993)。

その後、1997年1月に沖縄県与那国島測候所(現与那国島特別地域気象観測所)において大気中温室効果ガス観測を開始したのに加えて、2011年2月には防衛省の協力のもと、航空機による日本の南東上

空の温室効果ガスの観測を開始している。また、測定する温室効果ガスもCO₂だけでなく、CH₄やフロン類に拡大して現在に至っている。観測点の位置と地点ごとの観測項目について表1と図1に示す。

2.2 観測開始の国際的背景

気象庁が温室効果ガス観測を開始した背景には、国際的な要請があった。気象、気候や海洋、地震・津波分野の現象は国境を越えて各国に影響を与える。このため、気象庁は、WMO等の世界各国の関連機関と連携して業務を実施している。

WMOは1947年9月に採択された世界気象機関条約に基づいて1951年に設立された国際連合の専門機関である。4年ごとに条約加盟国の政府首席代表で構成される世界気象会議によって、その運営方

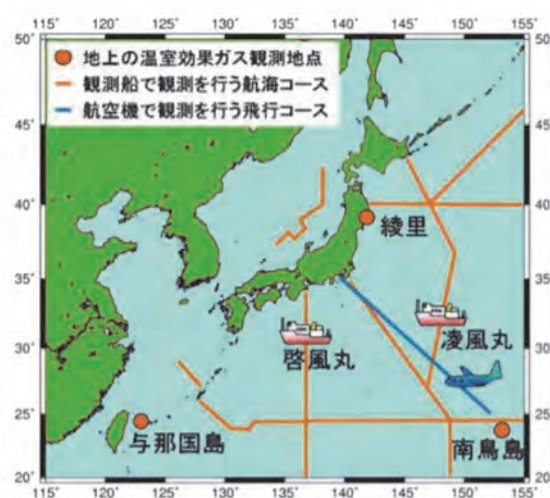


図1 気象庁における温室効果ガスの観測網。
気象庁では、綾里、南鳥島及び与那国島の3地点で連続観測を実施しているほか、2隻の海洋気象観測船(凌風丸、啓風丸)により洋上大気及び海水中の、航空機により上空の温室効果ガス観測を定期的実施している。

表1 気象庁における温室効果ガス等の観測項目。

観測所	綾里 (大気環境 観測所)	南鳥島 (南鳥島気象 観測所)	与那国島 (与那国島特別 地域気象観測所)	航空機観測 (厚木航空基地 -南鳥島間)	海洋気象観測船 (凌風丸、啓風丸)	
緯度	39° 02'N	24° 17'N	24° 28'N	約 25° -34° N	主な観測線	
経度	141° 49'E	153° 59'E	123° 01'E		東経 137 度線 3° N-34° N	
標高	260 m	7 m	30 m	航路上約 6 km 及び 南鳥島上空	東経 165 度線 5° S-35° N	
観測要 素/観 測開始 年月	二酸化炭素 1987.1 メタン 1991.1 一酸化二窒素 1990.1 一酸化炭素 1991.1 地上オゾン 1990.1 クロロフルオロカー ボン類(特定フロン類) 1992.1 1,1,1-トリクロロエタン 1993.1 四塩化炭素 1993.1 ハイドロフルオロカー ボン類(代替フロン類) 2020.3	1993.3 1994.1 1994.1 1994.1 1994.1 2020.3	1997.1 1998.1 1998.1 1997.1	2011.2 2011.2 2011.2 2011.2	大気中 CO ₂ 濃度 表面海水中 CO ₂ 濃度 全炭酸濃度 pH 全アルカリ度	研究観測 1981- 凌風丸 1989- 啓風丸 2000-

針が決定(決議)され、毎年の執行理事会においてWMOの事業計画、予算案などを決定する。世界気象会議の出席者は通常は各国気象機関の長が政府代表として参加する。このため、決議事項には国家的な対応が求められる。

世界的に環境問題に対する関心が高まったことを受けて、WMOは1970年第22回執行委員会(現執行理事会)で国際的な環境に関する観測網であるBAPMoN設立を加盟国に要請した。気象庁はこの要請に基づき1975年に綾里に地域観測所を設立し運用を開始した。

大気中のCO₂濃度の精密観測は米国スクリプス海洋研究所(Scipps Institution of Oceanography: SIO)のKeeling博士らによって1957年に開始されていたが、その後観測データの蓄積と研究の進展により、大気中のCO₂濃度が全球的な規模で増加していること、今後もCO₂濃度が増加すると気温の上昇を招き、気候や生態系などの地球環境に悪影響を及ぼしかねないことが指摘されるようになった。これらを受けて、1977年WMO第29回執行委員会において、WMO事務局長は「WMO大気中CO₂の研究とモニタリング計画」を提案し、決議15として承認された。同決議は、人間活動による大気中CO₂の増加が全球的な気候に及ぼす影響が十分考慮されるが、現状の知識は今後を予測するには不十分であるとし、そのため事務局長に対してCO₂問題についての詳細な計画の策定を求めた。また加盟国に対しては、CO₂観測所の設置や関連研究の推進を要望した。

1979年2月にスイス・ジュネーブで開催された第1回世界気候会議では、CO₂を始めとする人間活動による温室効果ガス排出の増加の気候に及ぼす影響を憂慮する宣言がなされた(片山, 1979)。

1979年4月に開催されたWMO第8回総会では国連環境計画(United Nations Environment Programme: UNEP)代表が、WMO及び国際学術連合会議(International Council of Scientific Unions: ICSU)と協力した大気CO₂に関連した研究を提案した。これを受けて総会は、UNEPとの協力事業を決議15に基づき実施するよう決定した。さらに、1980年のWMO第32回執行委員会では、第1回世界気候会議で採択された世界気候計画(World Climate Program: WCP)についての討議において、CO₂に関する科学的観点からの評価の必要性が改めて指摘された。そして、WMO加盟国が国ごとの基本計画を作り、積極的にWCPを推進することが要請された。特に、CO₂の移流拡散と長距離輸送の機構解明のために海洋及び陸上の代表点でCO₂観測を至急実施することが求められた。

1985年10月にオーストリアのフィルラッハにおいてUNEP, WMO, ICSUにより共催された「大気微量成分の気候変動における役割の評価に関する国際会議」では、大気の放射収支に関与するガスや

エアロゾル等の大気微量成分の研究は重要かつ緊急の課題であることが認識され、各国政府に対して、それらの観測及び研究を強力に助成することが勧告されている(伊藤, 1987)。

このように1970年代から1980年代にかけて、国際的に温室効果ガス観測の拡充が求められるようになった。

2.3 温室効果ガス観測をめぐる日本国内・気象庁内の動き

世界的な流れを受けて、気象庁においても環境観測が必要であるとの認識が高まっていた。気象庁ではWMOの要請に応じ、1973年から1975年に3つのBAPMoN地域観測所、1976年以降に1つの基準観測所を設立することを計画し検討を始めた。1973年度からは気象研究所が4か年計画で「気候に影響する大気汚染物質の測定法及びその監視のシステム化に関する研究」を実施し、基準観測所建設候補地として1975年度に南鳥島、1976年度に父島で予備観測を実施している(気象研究所地球規模大気汚染特別研究班, 1978)。

1977年の気象審議会答申第11号では、「気象災害にかかわる気候調査・研究体制整備の方針について」の中で、CO₂の調査研究を、また、「海洋観測システム整備とその成果利用促進の方針について」の中で、大気・海洋間のCO₂交換の解明等の推進が要請された。

これら要請と庁内の検討結果も踏まえ、気象庁は1977年に、BAPMoN基準観測所を1979年までに父島に設置する計画とWMOに対し意思表示した。しかしながらこの計画の実施に当たっては予算上、運営上の困難があり、1983年になっても観測開始に至らなかった。

国際的にCO₂観測への要請が高まる中で、1983年3月の気象審議会第15号答申「気象変化に関する長期的な対応について」では、気候に影響する大気中の微量成分の定常観測を強化すべきであることが指摘された。また、1983年10月の衆議院行政改革に関する特別委員会では、気象庁のCO₂観測体制について質問がなされ、定常的な観測と研究の推進についても言及された。前年1982年のWMO第34回執行委員会において、WMO加盟国に対してBAPMoNや他のCO₂観測所の整備等が勧告されたこともあり、気象庁として速やかに観測を始める必要性が高まっていたが、父島における観測開始の目途は立たないままであった。

このような情勢に対応するため、気象庁では庁内にCO₂観測に関する検討会を設け1983年9月から12月にかけて計4回の会合を開催し、CO₂観測の具体案の検討を行った。検討会のまとめは、1984年1月に開催された大気バックグラウンド汚染観測検討会で報告され承認されるとともに、3月の庁議において以下のような基本方針が決定された。

- 1) 観測部(当時)では、大気バックグラウンド汚染の地域観測所として業務を実施している綾里において、大気中のCO₂濃度の測定を行う。
- 2) 海洋気象部(当時)では、主として東経137度線に沿う(気象庁が運用する)観測船凌風丸による定期的海洋観測時に、洋上大気中及び海洋表層のCO₂濃度の測定、並びに海洋の各層における海水中のCO₂濃度の測定を行う。

なお、海洋におけるCO₂測定については、気象研究所地球化学研究部(当時)が所内一般研究「溶存ガスの大気・海洋交換の研究」で1981年から1983年の凌風丸冬季航海に乗船してCO₂測定を行っており測定方法は確立されていた。

一方、大気CO₂観測については、観測部測候課等における検討に加えて当時から世界的にも先進的な研究を実施していた東北大学理学部田中正之教授、中澤高清博士(当時助手)の助言をいただいた。中澤先生からは1983年6月に「気象庁BAPMoN stationにおいて実施すべき二酸化炭素濃度の測定について」という詳細な10ページ以上に及ぶ手書きの解説資料をいただいている。また、田中先生には同年11月に気象庁に来庁いただきCO₂観測に関するご助言と当時最終観測地点の候補となっていた綾里に対する評価をいただいた。

気象庁の検討会では綾里以外に、相川(新潟県)、江刺(北海道)、八丈島(東京都)、富士山、与那国島、南鳥島など多くの地点が候補に挙がっていたが、田中先生の助言も踏まえ、長期的資料を取得するのに適した地点を気象、地勢、運用から検討した結果、綾里での観測を開始することに決定された。

なお、1983年12月には環境庁(大気保全局企画課、大気規制課)と気象庁(企画課長ほか)とのCO₂観測に関する話し合いがもたれ、気象庁が気候変動に関する監視として大気バックグラウンドのCO₂観測を行う計画であることを説明している。

2.4 現在の枠組み：GAW

現在の気象庁のCO₂観測を含む大気環境観測は主にGAW計画の枠組みで実施されている。GAW計画は1970年代以前の2つの長期監視計画である「全球オゾン観測システム(Global Ozone Observing System: GO₃OS)」とBAPMoNを統合し、大気組成変化を取り扱う観測・監視、研究活動を広く包含した計画で1989年のWMO第41回執行理事会において制定された。

GAWの目的は次のようになっている(堤, 2017)。

- ・ 大気中の化学成分及び特定の物理的特性について、地球規模の長期的な監視を継続的に実施する。
- ・ 品質保証及び品質管理に重点を置く。
- ・ 利用者に対し、関連する総合的な成果やサービスを提供する。

GAWの対象分野は、温室効果ガス、オゾン、紫外

線、エーロゾル、反応性ガス、大気降水物(降水化学)の6つで、対象分野ごとに科学諮問部会(Scientific Advisory Group: SAG)が組織されGAWの観測・解析に関する計画、技術的事項が検討されている(オゾンと紫外線のSAGは2019年に統合)。GAWの仕組みや現在の実施計画についての詳細は、堤(2017)を参考にしたい。

GAWの目的は大気組成の変化の地球規模の長期的な観測と監視であるが、温室効果ガス分野では一般の気象と比較して困難な点はいくつかある。

1つ目は観測網が地域的に偏在していることである。大気組成の観測は先進国を中心に実施され、発展途上国では観測が少ない。

2つ目の特徴として、観測基準が必ずしも統一されていないことが挙げられる。温室効果ガスの測定では、標準ガスと呼ばれる濃度既知のガスとの比較による相対測定により濃度を求めている。この標準ガスは米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)やSIO、日本では東北大学、国立環境研究所などが独自に開発し維持してきた歴史があり、研究機関によってはWMOとは異なる基準を維持・運用している。

3つ目の特徴は、観測データの品質差が大きいことである。温室効果ガスの測定には高い技術力を要し、装置の振る舞いや測定データの評価にも機器や現象に対する深い理解が必要である。観測場所によって、得られる観測データの変動特性も大きく異なり、目的によって適切なデータ選択・品質管理が必要となる。

4つ目はデータの流通が限定的であることである。温室効果ガスの観測は研究観測として実施されることが多く、データの取得に多くの労力がかかっていること、微小な変化を検出するために標準ガス濃度のドリフト等を評価しデータを確定するまでに多くの検討が必要なこと、観測データの取得が研究成果と密接に関わること等から、データがなかなか公開されないことも多い。著者は気象庁入庁時WDCGGを運営する部署に配属されたが、当時WDCGGへ提出されるデータは現在よりもかなり少なかった。このため、発足間もないWDCGGへのデータ提出を求めるため、当時のセンター長が温室効果ガス観測を実施している国内の研究機関にデータ提出を依頼して回る訪問に同行した経験があるが、自らが苦労して取得したデータをWDCGGで一般に公開することに対して難色を示す研究者も一定数いたことを記憶している。現在はデータ公開に対する理解も進んでいるが、温室効果ガスデータの流通は毎日専用回線で配信される気象データと比較するとかなり限定的である。

GAWではこれらの問題を解決し、高品質で相互に比較可能な観測データを地球規模で取得しデータ流通を促進することを目指している。この目的のた

め、温室効果ガス分野では、WMO から日本国政府への要請により 1990 年 10 月に WDCGG が気象庁に設置され、世界の温室効果ガスデータを収集・公開することとなった(須田ほか, 2010)。また、GAW では中央較正施設(Central Calibration Laboratory: CCL)に指名された機関が WMO の基準となる標準ガスを維持・管理している。大気中 CO₂ と CH₄ 濃度については NOAA/地球システム調査研究所(Earth System Research Laboratories: ESRL)がこの役割を担っている。CCLに加えて、地域的な較正センターとして全球大気較正センター(WCC)が業務を分担している。気象庁は 2002 年 3 月からアジア及び南西太平洋(WMO の第 II 地区及び第 V 地区)での CH₄ の較正センター業務を担当し、地区内での標準ガスの巡回比較実験等を実施している。また、GAW 計画では観測ネットワークのデータの品質を維持することを目的とした品質保証科学センター(QA/SAC)が設置されている。気象庁は温室効果ガスの分野において 1995 年 10 月から、アジア及び南西太平洋域の CO₂, CH₄ に関して、観測に対する助言や支援を実施している。これらの活動を通じて、各観測所で得られるデータのばらつきを抑え、世界的に高精度で比較可能な観測を維持するための活動を行っている。

GAW の観測所は観測環境に応じたカテゴリー化がなされている。全球観測所(Global Station)は局所的な汚染源からの有意な影響が永続的にないと評価された地点で、2021 年 3 月、現在世界で 30 地点あり、南鳥島はその 1 つである。地域観測所(Regional Station)は、測定項目について、地域を代表し、重大な局所的な汚染源の影響を受けないか、少なくとも汚染源の影響のない気塊を頻繁に観測する地点で、綾里と与那国島は地域観測所となっている。全球観測所と地域観測所として認定されるためには、立地以外に観測項目数、適切な品質管理の実施と監査の受け入れ、内部トレーサビリティ及び WMO 基準へのトレーサビリティの確保、WMO のデータセンターへの速やかなデータ提出、気象要素(気温、気圧、風向風速等)の観測等の要件がある。清浄大気の観測を目的とした全球観測所と地域観測所に加えて、最近になって局地観測所(Local Station)というカテゴリーが追加された(WMO, 2017)。これは、都市環境や都市近隣の排出源の影響を評価する研究やサービスへの関心の高まりを反映している。また、地上観測所以外の航空機や船舶による観測は移動体観測所(Mobile Station)として位置付けられており、気象庁が実施する船舶観測、航空機観測も登録されている。

GAW には各国の気象機関以外が運営する観測も多く登録されている。国内では、国立環境研究所等の研究機関、東北大学等の大学、埼玉県等の地方自治体のデータが WDCGG に提出され公開されてい

る。また、GAW では GAW を支援する協賛観測所とそれらからなる協賛ネットワーク(Contributing Network)も定義され協力を求めている。協賛観測所の条件は基本的には GAW 観測所と同様であるが一部条件が緩和されており、WMO 基準との関係が明らかになっていれば良いこと、GAW のデータセンターではなく独自のデータセンターからの公開で良いなど、観測機関の独自性が一定程度尊重されている。

2.5 国際的枠組みの中での GAW の位置づけ

これまで記載したように GAW は WMO の中で気候変動に関わる重要な観測ネットワークとして位置付けられている。しかしながら、現在の地球観測は地球温暖化などの地球環境問題に対する国際的な取組の広がりの中で、従来の気象分野を中心とした WMO の守備範囲にとどまるものではなくなってきた。

1992 年に全球気候監視システム(Global Climate Observing System: GCOS)が設立された。これは 1990 年の第 2 回世界気候会議における世界気候計画 WCP の強化策の提言を受けて設立されたもので、WMO と政府間海洋学委員会(Intergovernmental Oceanographic Commission: IOC)、UNEP、ICSU が支援機関となっている。その目的は地球規模の気候観測の状況を定期的に評価し、様々な観測システムやネットワークを国際的に調整することである。これにより GCOS は気候システムの観測に関する包括的情報を提供することを目指している。GCOS は大気、海洋、陸面の 3 つのパネル(分野)から構成され、大気パネルは地表(GCOS Surface Network: GSN)、上層(GCOS Upper-Air Network: GUAN)、放射(Baseline Surface Radiation Network: BSRN)、大気化学成分から構成されており、GAW は大気化学成分の基準ネットワークとして位置付けられている。GCOS は気候変動に関する国際連合枠組条約(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)の 2005 年第 11 回締約国会議(the 11th Conference of the Parties: COP11)で UNFCCC の組織的観測を推進するものとされた(気候変動枠組条約第 5 条 研究及び組織的観測)。これを受けて翌 2006 年に結ばれた GCOS-GAW Agreement によって GAW は GCOS 実施計画の大気化学成分を担当することとなった。したがって、GAW は、気候変動に関する国際的な取組の中で大気化学成分の組織的観測を担っていることになる。

3. 観測結果

ここでは、気象庁の温室効果ガス観測の主な結果を紹介する。気象庁の観測データは気象庁 HP(大気・海洋環境観測年報(気象庁, 2021a)等)で公開されており、より詳しい観測成果は気象庁等の刊行物

(気候変動監視レポート(気象庁, 2021b), 気象業務はいま(気象庁, 2021c), 日本の気候変動2020(文部科学省・気象庁(2020)))等にも掲載されているので, これらも参照いただきたい。

3.1 地上におけるCO₂濃度観測

気象庁地上観測点におけるCO₂濃度は, 植物や土壌微生物の活動の影響による季節変動を繰り返しながら増加し続けている(図2)。観測点の中で最も高緯度に位置する綾里では, 季節変動が最も大きくなっている。これは, 北半球では, 中高緯度の陸上生物圏の活動の季節変動が大きいことを反映している。また, 与那国島と南鳥島はほぼ同じ緯度帯にあるものの与那国島の濃度が高く, 季節変動の振幅も大きい。これは, 与那国島がアジア大陸に近く, 秋から春にかけて人間活動や植物及び土壌微生物の活動によりCO₂濃度が高くなった大陸の大気の影響を強く受けるためである。2020年の年平均濃度は, 綾里で416.3 ppm, 南鳥島で414.5 ppm, 与那国島では417.2 ppmとなった(いずれも暫定値)。各地点における2019年からの増加量は2.3~2.4 ppm/年であり, これは最近10年間の平均年増加量と同程度である。新型コロナウイルス感染拡大に伴う移動制限措置等により, 2020年の人為起源のCO₂排出量は, 2019年と比較し7%程度減少したことが報告されているが, 大気中のCO₂濃度は増加が続いており, 短期的に年々の自然変動と区別することは困難である(WMO, 2020)。

CO₂濃度の年増加量は一定ではなく年々変動がみられる(図2b)。年増加量が大きくなる時期はエルニーニョ現象の発生時期に対応しており, このような対応は日本に限らず多くの観測地点で認められる。これは, エルニーニョ現象がもたらす熱帯域を中心とした高温と少雨により植物の呼吸や土壌有機物分解作用の強化及び光合成活動の抑制が生じ, 陸上生物圏からの大気へのCO₂放出が強まるためであ

る(Keeling *et al.*, 1995; Dettinger and Ghil, 1998)。特に1997から1998年に発生した大規模なエルニーニョ現象に対応してCO₂濃度は3地点とも大きく増加している。最近では2014年夏~2016年春にかけて発生したエルニーニョ現象に続いて, CO₂濃度が大きく増加した。興味深いのは, 3地点のCO₂の濃度絶対値や季節変化の振幅には違いがあるにも関わらず, 増加速度は3地点ともよく似た年々変動を示していることである。このことは, CO₂濃度の年々変動が大きな時空間スケールを持っており, かつ3地点における観測データの空間代表性が高いことを示している。一方で, 2009年から2010年にかけてのCO₂増加速度は綾里で4 ppm/年を超えているが, 与那国島ではそれよりも増加速度が小さく, 南鳥島では更に小さく最大3 ppm/年となっている。これらの増加速度の違いは, アジア大陸等のやや小さなスケールでのCO₂吸収・排出量の変化を反映していると考えられる。

なお, 数年スケールの年々変動に隠れているが, 3地点におけるCO₂濃度の増加速度は長期的に増加傾向にある。これは, 過去数十年にわたって化石燃料消費が加速度的に増大していることを反映しており, 同様の結果はNOAA/ESRL等の全球的な解析結果でも得られている。

3.2 地上におけるCH₄濃度観測

図3に気象庁3地点におけるCH₄濃度時系列を示す。CH₄濃度は冬季に濃度が高く夏季に低い季節変化を示す。これは, 夏季には水蒸気濃度が高く紫外線が強くなることによりOHラジカルが増加し, これと反応することでCH₄が消滅するためである。3地点の濃度は, 綾里が最も高濃度で季節振幅が大きく, ほぼ同じ緯度帯にある南鳥島, 与那国島では, 夏季は同程度の濃度だが, 冬季是与那国島の方が高濃度である。これは, 放出源が多く存在するアジア大陸からの影響が緯度や大陸からの距離によって異

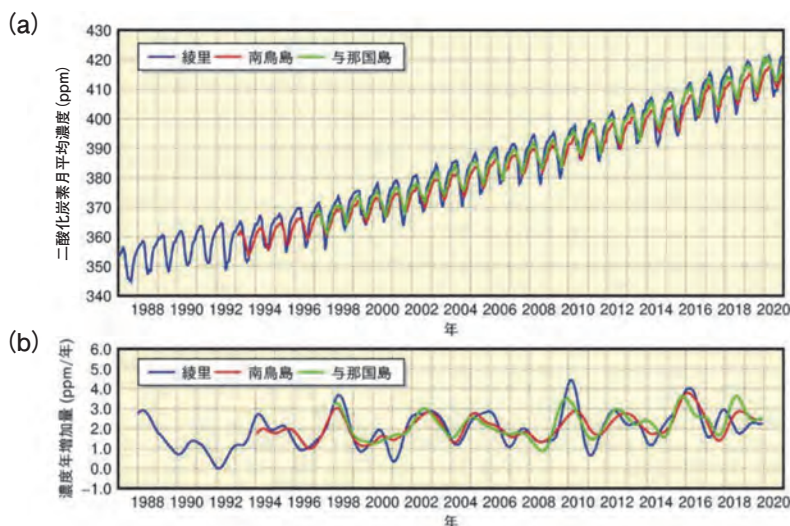


図2 綾里, 南鳥島及び与那国島における大気中CO₂の(a)月平均濃度と(b)濃度年増加量の経年変化。濃度年増加量は, 季節変動成分を除いた月別値から, 各月の増加量を1年あたりに換算して求めている。算出方法はWMO(2009)による。

なること、OH ラジカルが豊富な低緯度の海洋性気団の影響が観測点や季節によって異なるためと考えられる。3地点のCH₄濃度は、2000年代前半には濃度増加がほとんど見られないが、2007年頃から再び増加している。WDCGGが収集している世界のCH₄濃度の解析結果でも同様の傾向が認められている。2007年以降の増加については、熱帯の湿地及び北半球中緯度での人為起源による排出が寄与していると考えられている(WMO, 2020)。

3地点のCH₄の増加速度は、CO₂の増加速度に比べて地点間のばらつきが大きい。CH₄は、化石燃料燃焼・採掘、畜産、稲作、埋め立て、湿地、シロアリなど多様な排出源の影響を受けるため、これらの地域的な影響を反映して濃度の違いが生じていると考えられる。CH₄は分子あたりの放射強制力が大きく、大気中寿命がCO₂よりも短いことから、排出を削減すればCO₂よりも早くその効果が表れると期待されている。しかしながら、多様な排出源の個々の排出量見積もりには大きな不確かさがあり、CH₄濃度の変化を監視するために観測を継続することが必要である。

3.3 上空の温室効果ガス観測

気象庁は防衛省の協力の下、2011年から厚木航空

機(神奈川県綾瀬市)–南鳥島間の輸送機において、北緯約34度–25度の航路上で水平飛行中の上空約6km及び南鳥島降下中の異なる高度で温室効果ガス濃度の観測を月に1回行っている(Tsuboi *et al.*, 2013)。図4に水平飛行中に採取した大気中のCO₂濃度を示す。また、南鳥島の地上で観測した濃度の月平均値を赤点で示す。上空のCO₂濃度は、地上における観測値と同様に年々増加している。ただし、南鳥島の地上及び航路上で観測された上空約6kmでの観測値から季節変動を取り除いて比較すると、平均的には上空の濃度が地上の濃度よりも低い。南鳥島上空の鉛直分布を解析すると、冬から春にかけては上空に向かうほど濃度が低くなる傾向があるが、夏季には鉛直的な差は小さくなる。これらの結果は、大陸域において陸上生物圏の影響を受けた地上付近の大気が南鳥島の地上や上空まで輸送されていること、また、その輸送の様相が季節や高度によって異なることを示している。冬から春にかけて上空ほど濃度が低くなり、夏に鉛直方向の濃度勾配が緩やかになる傾向は、東北大学の航空機観測の結果(Tanaka *et al.*, 1987)やチャーター機や民間航空機を利用した鉛直分布の観測でも同様に得られている(Machida *et al.*, 2008; Sasakawa *et al.*, 2013; Sweeney

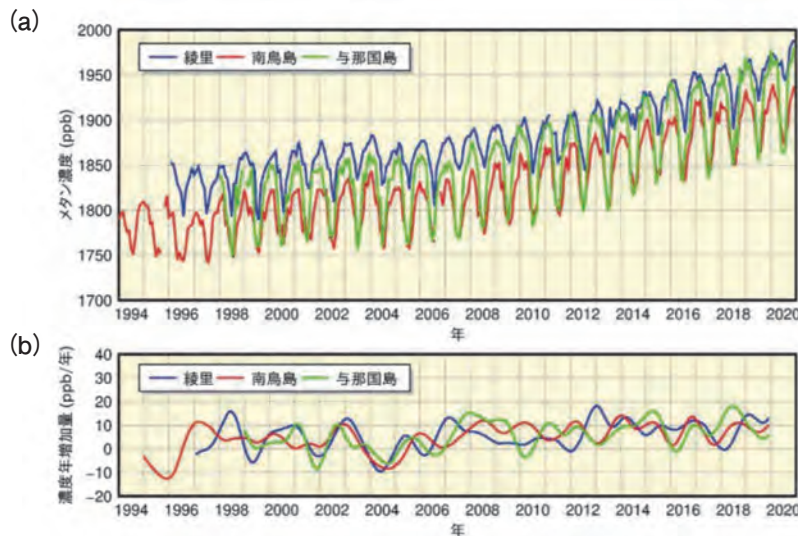


図3 綾里、南鳥島及び与那国島における大気中のCH₄の(a)月平均濃度と(b)濃度年増加量の経年変化。

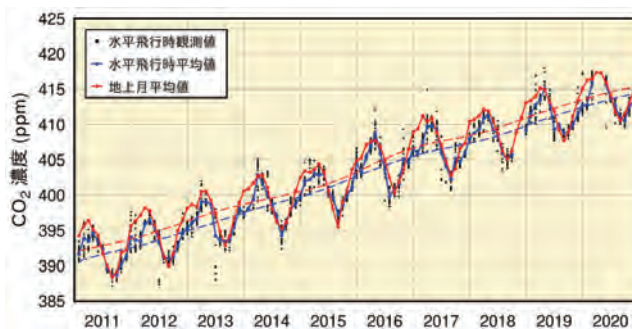


図4 厚木航空基地–南鳥島間の航空機観測による水平飛行時(高度約6km)に採取した大気中のCO₂濃度(黒点)とその平均値(青点)及び南鳥島の地上における月平均CO₂濃度(赤点)。青破線及び赤破線は、上空及び地上の各平均値からそれぞれの季節変動を取り除いた成分を示す。

et al., 2015)が、対流圏中層における温室効果ガスの定期的な観測は少なく、上空の観測データは、アジア大陸における吸収・排出量の季節的な変化や輸送を評価する上で極めて貴重である(Niwa et al., 2014)。

3.4 海洋の観測

気象庁における海洋のCO₂観測は、1981年に気象研究所の研究観測として始まり、1989年から凌風丸で、2000年から啓風丸(両船とも気象庁が保有する観測船)で定期的な観測が開始された。2010年には、当時神戸海洋気象台に所属していた啓風丸を本庁に移管するとともに、両船の化学物質の分析装置や海水を採取する採水装置を更新して、北西太平洋域で海水中のCO₂関連要素の高精度・高密度の観測を開始した。

現在気象庁では、表面海水中及び大気中のCO₂濃度と海水中のCO₂に関連する3つの要素(全炭酸濃度、pH、全アルカリ度)を観測している。これらのうち、表面海水中及び大気中のCO₂濃度の観測は、観測船の航行中に連続して、そのほかの3つの要素については、観測船を留めて多筒採水器を用いて決められた深度の海水を採取し、船内の実験室で分析している。

図5に、東経137度線における表面海水中と大気中CO₂分圧の長期変化を示す。気象庁が観測した北西太平洋(東経137度線上の北緯3-34度)の表面海水中及び大気中CO₂分圧は、全ての緯度帯において増加し続けている。東経137度線における1985年から2020年までの36年間で表面海水中のCO₂分圧は平均1.8 μatm/年(1.5-2.1 μatm/年)の割合で、また、大気中のCO₂分圧は平均1.8 μatm/年(1.8-2.0 μatm/年)の割合で増加している。東経165度線でもほぼ同様の増加傾向が認められている。亜熱帯

域においては、表面海水中のCO₂分圧は、夏季に高く、冬季に低いという季節変動をしており、その変動幅は東経137度線、東経165度線ともに緯度が高いほど大きくなるという特徴がある。それに対して大気中のCO₂分圧の季節変動は小さく、夏季以外には表面海水中のCO₂分圧が大気中のCO₂分圧を下回るため、一年を通じて平均すると海洋が大気中のCO₂を吸収している。一方、熱帯域においては、ほぼ一年を通じて表面海水中のCO₂分圧が大気中のCO₂分圧を上回るため、海洋が大気にCO₂を放出している(Ishii et al., 2009)。

4. 解析成果、観測データの利用

気象庁は1980年代から温室効果ガス観測を実施し、データを積み重ねてきた。観測データは気象庁HPやWDCGGを通じて公開され、WDCGGでの全球解析値に利用されている。IPCCの第6次報告書では、SIO、NOAAの解析値に加えてWDCGGの解析値がWMOの値として掲載されている。気象庁の観測結果は気象庁刊行物等で公表されるとともに、毎年春に前年の濃度変化傾向について報道発表を行い、温室効果ガスに関する情報提供を行ってきた。また、気象庁は国内外の観測データと合わせて大気輸送モデルを用いた解析を行い、CO₂濃度の全球三次元分布「二酸化炭素分布情報」を2009年から公表している(池上ほか, 2009)。また、観測データは気象庁内の利用だけでなく、温室効果ガス観測技術衛星GOSAT等の人工衛星データの検証や地域規模の温室効果ガスの循環研究の基礎データとして広く利用されている(Shim et al., 2013; Patra et al., 2016; Ciais et al., 2019)。観測地点が東アジア域の下流に位置することから、気象庁の観測データは大陸起源の温室効果ガスの収支を評価する上で有効であることが示されている(Suntharalingam et al., 2003; Niwa et al., 2014)。

海洋観測についても、これまでに蓄積された国内外の海洋観測データから、表面海水中のCO₂濃度と水温・塩分・クロロフィル濃度との間には、海域や季節によってそれぞれ特徴の異なる相関関係があることがわかってきた。気象庁では、この相関関係を利用して、全海洋の表面海水中のCO₂濃度を推定し、CO₂の吸収・放出を解析して公表している(Iida et al., 2020)。海洋には大気からCO₂を吸収する海域と、大気にCO₂を放出する海域が存在するが、海洋全体で平均すると海洋は大気からCO₂を吸収している。しかし、将来地球温暖化が進行すると、海洋のCO₂吸収能力が低下することが予測されている。このため、気候変動の将来予測にも海洋CO₂吸収の変動を捉えることが重要になっている。

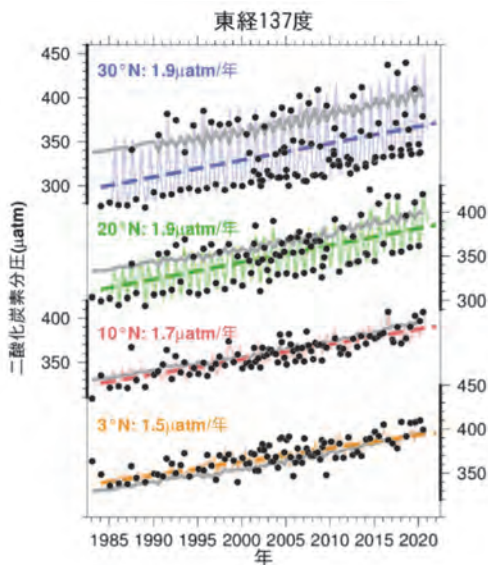


図5 東経137度線における表面海水中と大気中CO₂分圧の長期変化。
表面海水中のCO₂分圧の観測値(●)及び解析によって得られた推定値(細線)と長期変化傾向(破線)並びに大気中CO₂分圧(灰色の実線)を示す。

5. 今後の課題

2018年に制定された「地球温暖化対策の推進に関する法律」第三条では、「国は、大気中における温室効果ガスの濃度変化の状況並びにこれに関連する気候の変動及び生態系の状況を把握するための観測及び監視を行うとともに、総合的かつ計画的な地球温暖化対策を策定し、及び実施するものとする」とされている。2015年のUNFCCC第21回締約国会議(COP21)で採択されたパリ協定の成立を受けて、2018年11月の科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会地球観測推進部会の「パリ協定を踏まえた気候変動対策に貢献する温室効果ガス観測及びデータ利活用」では、温室効果ガスの排出量・吸収量を推定し気候変動対策に貢献するために数年から数十年にわたる観測が不可欠とされ、国内外の様々な枠組下で長期継続的に実施されている観測の維持が求められている。また、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略(2019年6月閣議決定)」では、「温室効果ガス、気候変動及びその影響等を把握するための総合的な観測・監視を引き続き進めていく」とされている。

気象庁の温室効果ガス観測開始から30年以上が経過した。この間、気象庁は北西太平洋域において貴重な長期観測データを提供してきた。一方で、温室効果ガス観測は気象庁だけが実施しているものではなく、国立環境研究所や産業技術総合研究所、東北大学なども国内に限らず長期系統的な観測を実施している。2015年の第6期地球観測推進部会「今後10年の我が国の地球観測の実施方針」では、「地球環境の現状を正確に記録することで、過去から現在に至る変化過程の把握、将来予測のための初期値の設定など、多様な課題解決に至る基礎的な情報が得られることから、そのための観測を強化する必要がある」とされている一方、「予算及び人的資源等に限りがある中、必要な観測体制を維持し、継続的に観測データを取得していくためには、地球観測を実施する機関が中心となってそれぞれの観測の目的を明らかにしつつ、既存の観測項目の必要性や課題解決への貢献度の評価と新たな観測項目の洗い出し等を実施し、今後、我が国が長期継続すべき観測項目を特定することを検討すべきである」との課題も指摘されている。さらに、「重要度の高い定常的観測項目は、関係府省・機関の業務観測の1つとして実施する等の長期継続性を確保する方策を検討すべきである」とされている。温室効果ガスの観測は、現在でも高い技術力を必要とし、研究観測が大きな割合を占めているが、気象庁が業務観測の1つとして長期継続性を確保することは引き続き重要である。

気象庁の温室効果ガス観測業務がこれまで継続してこられたのは、庁内関係者はもとより、庁外の専門の先生方のご支援があってこそのものである。今

後も国内・国際的枠組の中で必要な責務を果たせるよう変わらぬ支援をお願いしたい。

引用文献

- Ciais, P., Tan, J., Wang, X., Roedenbeck, C., Chevallier, F., Piao, S.-L., Moriar, R., Broquet, G., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Peng, S., Poulter, B., Liu, Z. and Tans, P. (2019) Five decades of northern land carbon uptake revealed by the interhemispheric CO₂ gradient. *Nature*, 568, 221–225. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1078-6>
- Dettinger, M. D. and Ghil, M. (1998) Seasonal and interannual variations of atmospheric CO₂ and climate. *Tellus*, 50B, 1–4. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v50i1.16018>
- Iida, Y., Takatani, Y., Kojima, A. and Ishii, M. (2020) Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *Journal of Oceanography*, 77, 323–358. <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00571-5>
- 池上雅明・藤田 建・平原隆寿・竹内綾子・須田一人・眞木貴史・森 一正(2009)二酸化炭素分布情報について. 測候時報. 76, 4–6. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.01.002>
- Ishii, M., Inoue, H. Y., Midorikawa, T., Saito, S., Tokieda, T., Sasano, D., Nakadate, A., Nemoto, K., Metzl, N., Wong, C. S. and Feely, R. A. (2009) Spatial variability and decadal trend of the oceanic CO₂ in the western equatorial Pacific warm/fresh water. *Deep Sea Research Part II*, 56, 591–606.
- 伊藤朋之(1987)気象庁大気二酸化炭素の観測を開始. 天気, 34(5), 336.
- 城尾泰彦(1993)南鳥島気象観測所における二酸化炭素の観測開始：世界気象機関(WMO)大気バックグラウンド汚染観測網(BAPMoN)基準観測所として. 天気, 40(4), 290.
- 片山 昭(1979)世界気候会議と世界気候計画. 天気, 26(12), 733–743.
- Keeling, C. D., Whorf, T. P., Wahlen, M., van der Plichtt, J. (1995) Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666–670. <https://doi.org/10.1038/375666a0>
- 気象研究所地球規模大気汚染特別研究班(1978)バックグラウンド大気汚染の測定法の開発. 気象研究所技術報告, 1, 177pp. <https://doi.org/10.11483/mritechrepo.01>
- 気象庁(2021a)大気・海洋観測年報. [https://www.data.jma.go.jp/env/data/report/data/\(2021年9月27日確認\)](https://www.data.jma.go.jp/env/data/report/data/(2021年9月27日確認))

- 気象庁(2021b)気候変動監視レポート2020. [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/\(2021年9月27日確認\)](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/(2021年9月27日確認))
- 気象庁(2021c)気象業務はいま2021, 191pp.
- Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirokuni, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, N., Ishikawa, K. and Ogawa, T.(2008) Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(10), 1744–1754. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1>
- 文部科学省・気象庁(2020)日本の気候変動2020：大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書. <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html> (2021年9月27日確認)
- 中澤高次・青木修二・森本真司(2015)地球環境システム：温室効果ガスと地球温暖化, 共立出版, 日本.
- Niwa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Sawa, Y., Machida, T., Nakamura, M., Kawasato, T., Saito, K., Takatsuji, S., Tsuji, K., Nishi, H., Dehara, K., Baba, Y., Kuboike, D., Iwatsubo, S., Ohmori, H. and Hanamiya, Y. (2014) Seasonal variations of CO₂, CH₄, N₂O and CO in the mid-troposphere over the western North Pacific observed using a C-130H cargo aircraft. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 92(1), 50–70. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2014-104>
- Patra, P. K., Saeiki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Kumar, K. R. and Nakazawa, T. (2016) Regional methane emission based on observed Atmospheric Concentrations (2002–2012). *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94, 91–113. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-006>
- Sasakawa, M., Machida, T., Tsuda, N., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A. and Krasnov, O. (2013) Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011. *The Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 118, 9489–9498. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50755>
- Shim, C., Lee, J. and Wang, Y. (2013) Effect of continental sources and sinks on the seasonal and latitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide over East Asia. *Atmospheric Environment*, 78, 853–860. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.055>
- 須田一人・木下篤哉・松本隆則・栗原幸雄・濱田啓次・田中秀和・坂井めぐみ(2010)温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)設立20周年. 測候時報, 77, 4–6.
- Suntharalingam, P., Spivakovsky, C. M., Logan, J. A. and M. B. McElroy (2003) Estimating the distribution of terrestrial CO₂ sources and sinks from atmospheric measurements: Sensitivity to configuration of the observation network. *The Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 108, 4452. <https://doi.org/10.1029/2002JD002207>
- Sweeney, C., Karion, A., Wolter, S., Newberger, T., Guenther, D., Higgs, J. A., Andrews, A. E., Lang, P. M., Neff, D., Dlugokencky, E., Miller, J. B., Montzka, S. A., Miller, B. R., Masiarie, K. Al., Biraud, S. C., Novelli, P. C., Crotwell, M., Crotwell, A. M., Thoning, K. and Tans, P. P. (2015) Seasonal climatology of CO₂ across North America from aircraft measurements in the NOAA/ESRL Global Greenhouse Gas Reference Network. *The Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 120, 5155–5190. <https://doi.org/10.1002/2014JD022591>
- Tanaka, M., Nakazawa, T. and Aoki, S. (1987) Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, 39B, 3–12. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v39i1-2.15318>
- Tsuboi, K., Matsueda, H., Sawa, Y., Niwa, Y., Nakamura, M., Kuboike, D., Saito, K., Ohmori, H., Iwatsubo, S., Nishi, H., Hanamiya, Y., Tsuji, K. and Baba, Y. (2013) Evaluation of a new JMA aircraft flask sampling system and laboratory trace gas analysis system. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 1257–1270. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1257-2013>
- 堤之智(2017)新たなWMO/GAW実施計画：2016–2023について. 天気, 64(8), 607–614.
- WMO (2009) Technical report of global analysis method for major greenhouse gases by the World Data Center for Greenhouse Gases. *GAW Report*, 184, WMO/TD, 1473.
- WMO (2017) WMO Global Atmosphere Watch (GAW) implementation plan: 2016–2023. *GAW Report*, 228, 75pp.
- WMO (2020) WMO Greenhouse Gas Bulletin, 16, 9pp.



澤 庸介 / Yousuke SAWA

気象庁大気海洋部環境・海洋気象課全球大気監視調整官。東北大学理学部卒業。東北大学大学院理学研究科博士課程前期2年の課程修了。1994年気象庁入庁。WDCGGにおけるデータ処理業務に従事。1997年気象研究所に異動。航空機、富士山測候所や地上観測所における温室効果ガスと関連物質の観測研究に参加。2019年に気象庁本庁に異動となり全球大気監視調整官を拝命。博士(理学)、気象予報士。