

パリ協定における我が国の貢献のための温室効果ガス観測及びデータ利活用の現状と課題

平成 30 年 11 月 22 日

地球観測連携拠点（温暖化分野）

【サマリー】

- パリ協定により、いわゆる 2°C 目標（※ 1）と、今世紀後半に温室効果ガスの人為起源排出量と吸収量を均衡させる（ネットゼロエミッション）という長期目標が設定された。
- パリ協定の目標達成に向けて実施される各種気候変動対策の効果を確認する上で、精度の高い温室効果ガス排出量・吸収量のデータが必要である。特に、途上国等の人為起源排出量の推定精度を上げることが重要である。
- 同時に、地球規模でネットゼロエミッションにどれだけ近づいているか、大気中の温室効果ガスの濃度は予測される安定化経路をたどっているか、もし予測される経路から乖離しているならその原因は何か、という視点でパリ目標の達成度を確認することが必要である。そのためには、各国の温室効果ガスインベントリデータのみならず、地球観測に基づく地球規模での大気・海洋中の温室効果ガスの観測、及びそのデータに基づく人為起源・自然起源の地表・海面における排出量・吸収量の推定精度を総合的に向上する取組が必要である。
- 温室効果ガス分野の地球観測に関わる国内関係府省庁・機関は、協力し、地上・船舶・航空機・人工衛星における観測の充実と国際的な観測データの統合に取り組み、近年、利用可能な観測データが空間的にも時間的にも地球規模でめざましく向上してきた。
- また、その観測データを高度な解析システム（トップダウン的手法（※ 2）、フラックススケールアップ手法（※ 3）等）と組み合わせることにより、全球及び地域別の人為起源・自然起源の排出量・吸収量の推定精度を高めてきた。
- 上記の手法に基づく地表での温室効果ガス排出量・吸収量の推定データを、いわゆるインベントリデータとは独立に算出された情報源として、相互に比較し、相補的に利用することによって、人為起源排出量の推定精度向上に役立てることが可能である。
- 特に、未だ不確実性の高い新興国・途上国からの排出量の確認、従来のインベントリデータからは把握しにくい地球規模での排出量の速報に加え、巨大都市からの排出、農耕地からの間欠的な排出（メタンや一酸化二窒素等）、大規模森林（泥炭）火災による突発的で膨大な排出、人為起源吸収源（大規模植林等）の長期的監視等に対し、温室効

果ガス分野の地球観測に基づく算出結果を活用できる。

- 人為起源・自然起源の地表における排出量・吸収量の高精度での推定は、地球規模での温室効果ガス収支の将来予測の精度を向上させ、国民生活全般に影響を及ぼす気候変動の予測ならびにその影響予測の高度化に活用される。結果として、気候変動影響による国民の生命、財産及び生活、経済、自然環境等への被害を最小化あるいは回避することに貢献する。

※1：世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°Cより十分低く保ち、1.5°Cに抑える努力をすること。

※2：ここでは、大気中温室効果ガス濃度のデータと大気輸送モデルに基づく、地表での温室効果ガス排出量・吸収量（地表フラックス：単位時間・単位面積当たりの移動量）の逆推定をさす（3章参照）。

※3：ここでは、海洋表層や陸域における地球規模の温室効果ガス観測網のデータベースに基づく、温室効果ガス排出量・吸収量（地表フラックス）の広域推定をさす（2.2節参照）。

1. はじめに

2015年12月、気候変動に関する国際連合枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC）の第21回締約国会議において、気候変動に関する新たな国際的枠組としてパリ協定が採択された。その後、2016年11月にパリ協定は発効となり、各国は温室効果ガスの削減を進め、いわゆる2°C目標を達成すること、そのために、今世紀後半には温室効果ガス的人為起源排出量と吸収源による除去量とを均衡させる（ネットゼロエミッション）という長期目標に沿う道筋を示すことが求められることとなった。

今後、パリ協定の目標達成に向けて、各国は、5年ごとに温室効果ガスの削減目標を定めた「自国が決定する貢献（Nationally Determined Contributions; NDC）」を提出することが義務付けられる。また、それに先立って世界全体での実施状況の確認（グローバル・ストックテイク）が行われる。

各国の温室効果ガスインベントリは、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC）のもとで作成された共通のガイドライン（※4）に沿って算出されるが、国や地域によっては、未推計の排出源や、不確実性の高い項目がある。途上国等で温室効果ガスインベントリの精度を向上することは、各国の気候変動対策の効果を確

認し、世界全体でパリ協定の目標達成度をはかる上で重要である。

一方、地球規模での自然起源の温室効果ガス吸収量・排出量については、さらに多くの不確実性がある。凍土融解に伴う温室効果ガスの大量排出や、異常高温・干ばつに伴う森林火災の増加、特に多量の炭素を蓄積する泥炭地で発生する火災は、地球規模で大気中二酸化炭素濃度の上昇に影響を与える大規模排出源である。また、地球温暖化の進行により寒冷地域へ森林が拡大する可能性や、いわゆる二酸化炭素施肥（せひ）効果（大気中の二酸化炭素濃度上昇が植物の光合成の効率を上げる効果）によって陸域生態系による二酸化炭素吸収量が増加する可能性もある。こうした自然吸収量・排出量の正確な把握は、気候の将来予測、特に地球規模での温室効果ガス収支の予測精度を向上する上で欠かせず、そのための基盤的な情報が、地球規模で収集・蓄積される温室効果ガス観測データであることは疑う余地がない。

国際的な地球観測の枠組のひとつに、世界気象機関（World Meteorological Organization; WMO）がユネスコ政府間海洋学委員会、国連環境計画、国際学術会議とともに構築・運営する全球気候観測システム（Global Climate Observing System; GCOS）がある。GCOS は UNFCCC が規定する気候変動に関する組織的観測の要請に合致するものとして認定されており、そのため、関係各国・機関が GCOS 下で実施する温室効果ガスの観測は、パリ協定の実施に直接的に貢献するものといえる。また、地球観測に関する政府間会合（Group on Earth Observations; GEO）は、近年、優先連携3分野のひとつとしてパリ協定への貢献を特定し、UNFCCC との連携を深めている。宇宙からの地球観測の国際的な調整機関である地球観測衛星委員会（Committee for the Earth Observation Satellites; CEOS）も、気象衛星調整会議（Coordination Group for Meteorological Satellites; CGMS）と共同で気候作業部会を形成し、温室効果ガスをはじめとする GCOS 必須気候変数（Essential Climate Variable; ECV）の衛星による観測という観点でパリ協定への貢献を推進しているところである。

こうした国際的背景のもと、温室効果ガス分野の地球観測に関わる国内関係府省庁・機関は、協力し、衛星・航空機・船舶・地上観測の充実に取り組み、観測データの空間カバレッジを地球規模でめざましく向上してきた。また、大気中温室効果気体の濃度データと大気輸送モデルを組み合わせた解析手法の研究開発を進め、いわゆるトップダウン的手法の信頼性を向上させてきた。

本報告では、近年の温室効果ガス分野における地球観測の進展と、そのデータを活用した解析手法の向上を概観し、それらの手法に基づく排出量・吸収量データを、いわゆるインベントリデータとは独立に算出された情報源として提供し得ること、そして両者を相互に比較し、相補的に利用することによって、人為起源排出量の不確実性低減に貢献し、パリ協定の目標達成に向けた進捗確認のために有効に活用し得ることについて述べる。また、これを実現する上で解決すべき課題を挙げる。

※4：現在、各国が温室効果ガス排出量算定の根拠としている IPCC の国別温室効果ガスインベントリガイドライン（2006年版）を更新・追加・精緻化するため、「2006年 IPCC 国別温室効果ガスインベントリガイドラインの 2019 年改良」に向けた作業が進められている（2019年に、その方法論を記した報告書が承認される予定）。

2. 温室効果ガス分野における地球観測の進展と課題

2. 1 大気中温室効果ガス濃度の観測

2. 1. 1 地上観測

2. 1. 1. 1 地表における濃度の観測

WMO は、1989 年に全球大気監視（Global Atmosphere Watch; GAW）計画を開始し、温室効果ガス等の地球環境問題に関わる物質の観測実施、品質管理、データ提供を担っている。WMO/GAW 計画のもと、日本では気象庁が岩手県綾里、与那国島、南鳥島で定点観測を実施している。国立環境研究所は、WMO と精度管理等の面で連携し、沖縄県波照間島、北海道落石岬及び富士山頂にて温室効果ガスを含む大気微量成分の観測を継続している。海外では、米国スクリップス海洋研究所が 1957 年より南極点とハワイ・マウナロアにおいて二酸化炭素濃度の観測、国立極地研究所と東北大学が共同で 1983 年より南極昭和基地にて二酸化炭素濃度及び 1991 年より北極圏スバールバル諸島ニーオルスン基地にて温室効果ガスを含む大気微量成分の観測をそれぞれ開始した。また、国立環境研究所は、現在、シベリア 6 地点でのタワー観測ネットワークならびにアジア諸国での空気採取によって温室効果ガスを含む大気微量成分の観測を継続している。

欧州では、12ヶ国が参加する統合的炭素循環観測システム（Integrated Carbon Observation System; ICOS）が、欧州からの温室効果ガス排出を定量化する目的で約 30 地点で系統的な大気の観測を実施している。

大都市からの温室効果ガス排出を定量化しインベントリデータの改善に貢献するために、近年では積極的に都市域での観測を実施する試みもある。中でも、パリのエッフェル塔や東京のスカイツリーでは定常的な温室効果ガスの観測が実施されている。

2. 1. 1. 2 カラム濃度の観測

全量炭素カラム観測網（Total Carbon Column Observing Network; TCCON）は、太陽の光が大気層を通過する間に温室効果ガスなどによって吸収される原理を利用し、その吸収量

から各種温室効果ガスのカラム濃度を推定している。全量炭素カラム観測網は、2004年に米国で観測が開始され、2018年現在、計25地点が運用中であり（図1）、日本、米国、中国の人工衛星による温室効果ガスカラム濃度の標準的な検証観測としても活用されている。観測地点は、北米、ヨーロッパ、アジア、オセアニア、大西洋及びインド洋島嶼を網羅しているが、南米、アフリカ、シベリアは空白地点になっており、今後の観測点設置が期待されている。



図1. (左) 温室効果ガスのカラム濃度のイメージ、(右) 全量炭素カラム観測網の観測点 (<https://tccodata.org>)。

2. 1. 2 船舶観測

船舶を利用した大気と海洋中二酸化炭素とその他の温室効果ガス等の観測には、主に研究目的で行われるキャンペーン航海による不定期な観測と、季節変化または経年変化を捉えることを目的とする定期観測がある。不定期に行われる観測の回数は多いが、海洋上での温室効果ガスの時間・空間的な変動を捉えその要因を解析するには、定期観測のデータが不可欠である。定期観測には、観測専用船を使った航海観測と、定期貨物船の協力を得て実施する観測とがある。前者としては、気象庁が海洋の二酸化炭素観測を気象研究所の研究観測として1981年に開始し、1989年から凌風丸、2000年から啓風丸により定期的に観測している。2010年からは、両船の観測機能の強化を図り、海水中の二酸化炭素関連要素の高精度な観測として継続しており、気象庁ホームページ「海洋の健康診断表」から、海洋表層～内部の二酸化炭素観測結果、解析データ及び表層二酸化炭素分圧に関連する要素の全球の格子点データ等を定期的に公開している。後者としては、東北大学が1982年より実施している日本～北米大陸間及び日本～豪州間の定期貨物船による観測、国立環境研究所が1995年以降実施している日本～北米大陸間及び日本～豪州東海岸～ニュージーランド間の定期貨物船による観測がある。世界では、米国海洋大気庁が実施している米国～ニュージーランド航路での観測、

英イーストアングリア大学による大西洋航路の観測等がある。

2. 1. 3 航空機観測

現在のところ世界で唯一の民間航空機による定常的な温室効果ガスの観測プロジェクト（Comprehensive Observation Network For TRace gases by AirLiner Project; CONTRAIL）の活動は、日本航空の旅客機を用いた大気採取による観測として 1993 年に始まり、2005 年以降は機上測定による観測が加わり、国立環境研究所、気象研究所、株式会社ジャムコ、日本航空株式会社、JAL 財団による共同プロジェクトとして継続している。世界中を毎日航行する国際定期便の航空機による機上観測を行うことで、広範囲かつ高頻度で大気中の温室効果ガス観測データを収集している（図 2）。東北大学では民間の航空機を用いた日本上空における温室効果ガスの観測を 1970 年代から継続して実施しており、上空の観測値としては世界最長のデータとなっている。国立環境研究所ではデータの空白域であるシベリアの 3 か所においてチャーター機を用いた温室効果ガスの定期的な観測を 1990 年代より実施している。気象庁では、2011 年から独自の航空機を利用した北西太平洋上空の温室効果ガスの観測を行っている。約 1 か月に 1 回、南鳥島へ向かう飛行経路の往路または復路上で大気試料を採取し、気象庁本庁でその大気試料を分析することにより、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、一酸化炭素等の観測を継続している。世界では、米国海洋大気庁（National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA）が航空機をチャーターして米国内十数か所あまりで大気サンプリング観測を実施している。欧州の In-Service Aircraft for the Global Observing System (IAGOS)プロジェクトでも、民間航空機の機上で二酸化炭素等の温室効果ガスを観測する計画がある。

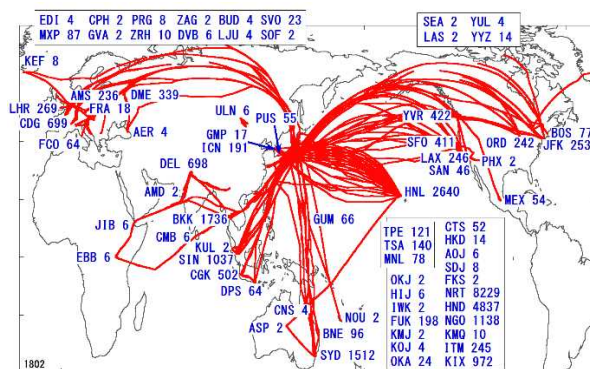


図 2. CONTRAIL プロジェクトによる大気中温室効果ガスの観測経路と鉛直分布の観測回数 (<http://www.cger.nies.go.jp/contrail/>)。

2. 1. 4 衛星観測

温室効果ガス観測技術衛星（Greenhouse gases Observing SATellite; GOSAT）は、主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの濃度を観測することを主目的とした世界初の衛星であり、2009年1月の打ち上げ以来、現在も観測を継続している。環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構が共同で推進する GOSAT プロジェクトは、観測データを提供するウェブサイト（※5）を通して、地上から大気上端までの空気の柱（カラム）に含まれる二酸化炭素やメタンの平均濃度（カラム濃度）、及びそれらの観測データに基づいて推定された地球全大気中の温室効果ガス濃度の時間変化や空間分布のデータを提供している。後継となる温室効果ガス観測技術衛星2号（GOSAT-2）については、2018年10月に打ち上げられた。世界では、2014年7月に米国がOCO-2、2016年12月に中国がTanSatの打ち上げに成功し、それぞれ二酸化炭素のカラム濃度の測定を継続している。また2017年10月に打ち上げられた欧州の Sentinel-5p がメタンのカラム濃度の広域観測を行っている。

衛星観測の利点は、その他の手法に比べて観測可能域が広大であり、観測データの空白域を低減する役割を果たすことができることである。一方、欠点は、濃度データに対して時間的にも空間的にも変動するバイアスが存在することであり、その適切な修正法を確立することが課題となっている。

※5：GOSAT 観測データ・プロダクトの提供サイト（GOSAT Data Archive Service (GDAS) https://data2.gosat.nies.go.jp/index_ja.html）。

2. 1. 5 温室効果ガス濃度のデータの普及と利用促進

WMO/GAW 計画の下に設立された世界資料センターの一つである温室効果ガス世界資料センター（World Data Centre for Greenhouse Gases; WDCGG）は、1990年の設立以来継続して気象庁が運営を行っている。WDCGG では地上観測点や船舶観測・航空機観測等により大気や海洋において観測された温室効果ガス及び一酸化炭素をはじめとする関連ガスの濃度データを収集・保管・配布している。また、これらの大気中濃度の長期傾向や季節変動を解析し、刊行物としてとりまとめている。WDCGG が収集したデータは、図3のように地上観測点の多くが北半球の先進国周辺に位置しており、アフリカ、南米、シベリア、インド等の強い放出源または吸収源が存在する地域で観測点の数が不足している。海上では、ペルー沖等の重要な海洋湧昇域で観測が実施されていないといった課題がある。WDCGG では地上・船舶・航空機観測に加え、衛星観測データも活用することが一層重要となると位置づけており、GOSAT や OCO-2 等の衛星観測データをその品質管理情報とともに WDCGG ウェブサ

イトから提供を開始することを計画している。

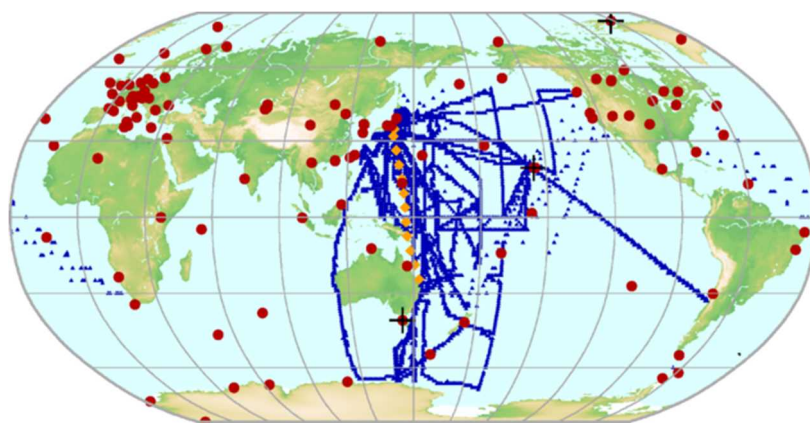


図3. 温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) (<https://gaw.kishou.go.jp/jp/>) が収集した温室効果ガス濃度の観測点。

2. 2 温室効果ガスフラックスとスケールアップ

2. 2. 1 海洋における温室効果ガスフラックスとスケールアップ

国際統合海洋表層二酸化炭素観測データベース(Surface Ocean CO₂ Atlas; SOCAT)プロジェクトは、世界の観測機関から海洋表層二酸化炭素分圧のデータを収集し、統一基準に基づく品質管理とデータベース化を推進している(図4)。また、全球海洋の内部の炭酸系と栄養塩等のデータを収集整備するプロジェクトである Global Ocean Data Analysis Project (GLODAP) (<https://www.nodc.noaa.gov/ocads/oceans/GLODAPv2/>) については、2004年にデータ公開を開始し、その後もデータ収録と品質管理の取組を進めている。

海洋上の二酸化炭素フラックスをスケールアップする取組としては、世界の海洋表層における各種観測データ(二酸化炭素分圧、水温、塩分、植物プランクトン等)に基づき、機械学習法をはじめとする統計的手法、及び海洋の循環を考慮に入れたプロセスモデル等によって、海洋における表層二酸化炭素分圧の広域評価や、全球海洋における二酸化炭素フラックスを推定する手法が開発改良されている。また、観測データの統合的解析や、各機関のプロダクトの国際比較・評価等の活動が行われている。このような手法を今後も高度化していくためには、研究観測船や定期貨物船による観測の長期継続、観測データの普及と利用促進、観測空白域における観測網・観測頻度・観測項目の拡充に加え、SOCATプロジェクトのような観測データの統一的な品質保証・管理を維持継続する取組が必要とされている。

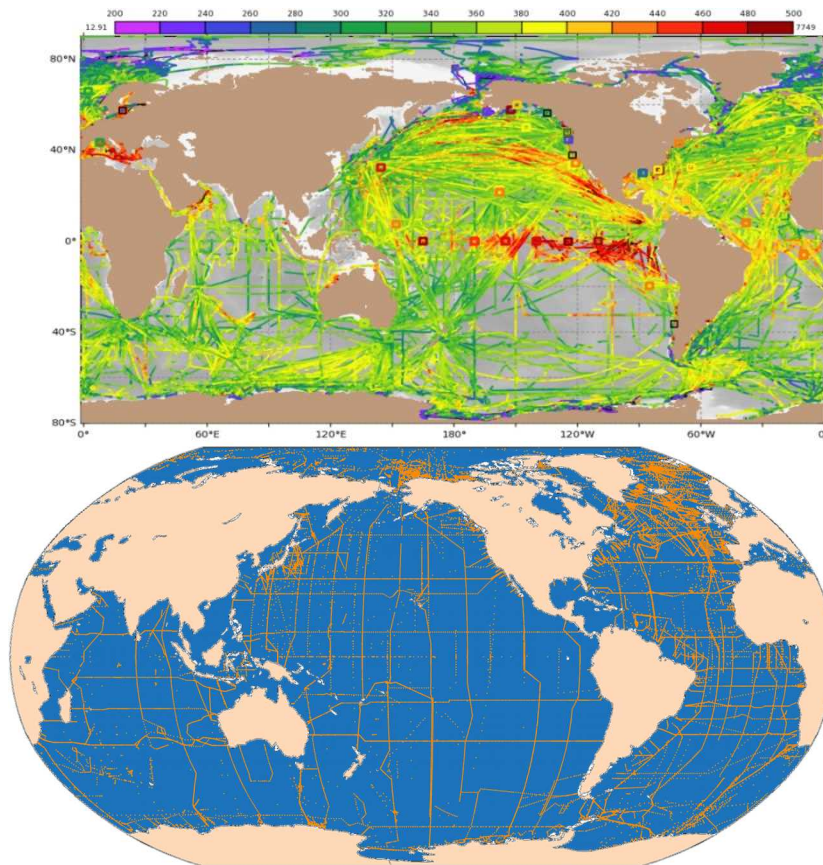


図4. 国際統合海洋表層二酸化炭素観測データベース (<https://www.socat.info/>) に基づく全球海洋表層二酸化炭素分圧の観測航路 (上図、カラスケールは観測された分圧を表す) と Global Ocean Data Analysis Project (GLODAP) (<https://www.nodc.noaa.gov/ocads/oceans/GLODAPv2/>) に基づく全球海洋内部の炭酸系と栄養塩等のデータ分布 (下図)。

2. 2. 2 陸域における温室効果ガスフラックスとスケールアップ

1990年代以降、世界各地の陸域生態系の上で微気象学的方法により熱・水・二酸化炭素フラックス (単位時間・単位土地面積当たりの大気・陸面間の交換量) の長期観測を行うことができるようになり、近年ではメタンフラックスの長期連続観測を行う観測点も急速に増えている。現在では世界規模の観測網 (FLUXNET) が観測点情報の収集、観測法の標準化、データ品質管理法の開発、データベース化等を推進している。世界に観測点が500地点以上あるとされるが、依然として中央アジア・アフリカ・オーストラリア等の半乾燥域、南・東南アジア等の熱帯・亜熱帯、シベリア等に深刻な観測空白域が残されている (図5)。



図5. 陸域生態系における熱・水・二酸化炭素フラックスの観測点. 図中の色は2015年時点での観測継続年を表す。濃赤 20年以上、赤 16~20年、橙 11~15年、黄 6~10年、薄緑 1~5年 (<http://fluxnet.fluxdata.org>)。

陸域の熱・水・二酸化炭素フラックス観測網のデータベース、衛星観測データから得られる植生指標、森林等のバイオマスデータ、土地利用及び土地利用変化のデータ等を多地点で収集し、機械学習法をはじめとする統計的手法や陸域生態系プロセスモデルにより温室効果ガスの吸収・排出量のスケールアップを行う取組が進められている。また、気候変化に伴う植生分布の変化も考慮に入れた動的全球植生モデル (Dynamic Global Vegetation Model; DGVM) の開発改良も進められている。近年では、GOSAT 等の衛星によって観測される太陽光励起クロロフィル蛍光 (Solar-induced chlorophyll fluorescence; SIF) (※6) のデータから植物の光合成量を推定することによって陸域生態系モデルに制約を与え、生態系の二酸化炭素吸収量・排出量の推定精度を上げようとする手法も開発されつつある。

※6：植物が光合成を行う際に放出する特定の波長をもつ光。

2. 2. 3 酸素濃度や安定同位体比の観測に基づく温室効果ガスフラックス推定

海洋や陸域での温室効果ガスの排出量・吸収量を推定する上で、地上・船舶・航空機の大気観測において各種温室効果ガスの濃度を測定することに加えて、酸素濃度や炭素の安定同位体比の観測を行うことでこれらを有力な制約条件として利用できる。酸素濃度測定を行うと、陸域生態系が二酸化炭素を交換する際には一定の比で酸素を交換するが海洋との二酸化炭素交換では酸素が関わらないという原理を応用して、海洋と陸域の炭素フラックスを区別することが可能になる。炭素の安定同位体比 (^{12}C と ^{13}C の比) も陸域生態系と海洋との炭素交換量を区別できる指標として広く観測されている。また炭素の放射性同位体 (^{14}C) は化石燃料起源の二酸化炭素を定量するための強力な情報源として利用されている。これらの観測

は日本では国立環境研究所、東北大学、産業技術総合研究所、国立極地研究所などにより実施されている。

3. トップダウン的手法の高度化と課題

2章で述べた温室効果ガス分野の観測の充実により、近年、地球規模で観測可能域が拡大し、その観測データを高度な解析システム（トップダウン的手法）と組み合わせることにより、全球及び地域別の人為起源・自然起源の排出量・吸収量の推定精度を高める取り組みが急速に進展している。トップダウン的手法による地表での温室効果ガス排出量・吸収量の精度向上には、大気中温室効果ガスの高精度観測点を高密度化すること、及び大気輸送モデルや先験値（安定した推定結果を得るために計算にあらかじめ与える条件）の改良が必要不可欠であるとされる。

世界の複数の機関が大気輸送モデルを含む解析システムの開発改良に取り組んでおり、数年に一度程度の頻度で様々な相互比較プロジェクト（代表的なものとして大気輸送モデル相互比較プロジェクト The Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project; TransCom がある）が行われ、大気輸送モデルの特性が結果に及ぼす影響や、複数の解析結果に基づく温室効果ガス収支の地域別評価が進められている。従来、このようなプロジェクトでは二酸化炭素に主眼が置かれていたが、現在ではメタンや一酸化二窒素の比較実験も行われている。解析システムのベースとなる大気輸送モデルは、従来使われてきた全球モデルの他に、領域モデル、また、空気塊を粒子に見立てた移流拡散モデルが用いられるなど多様化が進んでいる。いずれのモデルでも、時間・空間分解能を上げて人為及び自然起源の大規模排出源を詳細に把握しようとするのが最近の傾向であり、特に、米国や欧州、豪州では、トップダウン的手法による解析（逆推法）を、地域を絞って高解像度化し、従来のインベントリ算出手法では正確にとらえにくい人為起源排出量を推定する方法も開発されている。例えば、人為的施業の影響により大規模農耕地から間欠的に発生するメタンや一酸化二窒素の排出量が、自然起源の吸収・排出量の変動に比べて十分に大きく、かつ観測データが十分に密である条件下では、逆推法による排出量推定が、インベントリデータを補完する情報源として利用可能であると認識されるようになってきた。

一方、地球規模での二酸化炭素循環に関しては、人為起源排出量の寄与に比べ、海や陸における自然起源の吸収量・排出量の時間空間変動の寄与が世界規模で顕著であることから、トップダウン的手法をもって二酸化炭素のインベントリを補完する情報源として直接利用するにはまだ課題が多いのが現状である。具体的には、二酸化炭素の吸収量・排出量の起源別

分離に有用な情報を持つ他の気体（例えば、メタン、一酸化炭素、酸素など）や同位体などの観測データを複合的に解析する手法の開発、また、これら観測データの充実と適正な品質管理、大気輸送モデルの不確実性低減が必須と考えられている。

4. トップダウン的手法とフラックススケールアップ手法の相互比較と課題

これまで、二酸化炭素に関するトップダウン的手法とフラックススケールアップ手法それぞれの改良は進められてきたものの、対象領域や空間分解能が大きく異なる等の理由により、両者を直接比較し精度検証する試みには困難が伴うとされてきた。例えば、2013年から2014年に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書においても、南米や東南アジアではトップダウン的手法とフラックススケールアップ手法による方法の間で、二酸化炭素の吸収量・排出量の推定結果に符号が逆転するほどの（一方の推定方法では吸収源、他方の推定方法では排出源とされるほどの）不一致があると報告された。

しかし、その後の大気輸送モデルの開発改良、活用し得る観測データの増加、土地利用変化をはじめとする不確実性の高かったデータの改善等に伴い、トップダウン的手法とフラックススケールアップの比較検証が過去数年で急速に進展し、それによって見いだされる問題点の改善により、様々な空間スケールにおいてフラックス推定の改善が進められた。あわせて、これまでほとんど考慮されていなかった水域（河川・湖沼・地下水等）を通じた炭素循環等の未考慮の項目についても推定精度向上が進められた。その結果、これまで困難とされた途上国においても森林の二酸化炭素吸収量・排出量の年々の変動がより現実的に捉えられるようになり、地球温暖化対策としての森林減少・劣化防止の効果が大気中温室効果ガス濃度の抑制にどれだけ効果を及ぼしているか等を確認できる可能性が向上したとすることができる。

5. 人為起源排出量推定精度向上に向けた、温室効果ガス分野の地球観測データの利活用 の道筋

人為起源排出量の評価には、インベントリガイドラインに基づく各国からの報告値に加え、地球規模の化石燃料起源人為排出量マップ（Carbon Dioxide Information Analysis Center; CDIAC や Open source Data Inventory of Anthropogenic CO₂ emission; ODIAC）のように、国別排出量の統計値を人口分布や夜間光、経済指標、月別燃料消費データ等を用いて空間的・

時間的に展開したものが発表されている。一方、地球規模大気研究のための排出量データベース（Emission Database for Global Atmospheric Research; EDGAR）のように、地域ごとの燃料の消費量、二酸化炭素排出係数、空間情報等を組み合わせてボトムアップ的に積み上げた手法もある。いずれの方法も、今後は高解像度化・高時間分解能化が求められる。また、特に後者ではデータの更新にかかる時間を短縮することが課題である。

これまで、人為起源排出量推定の確からしさを確認するには、異なる排出量データ、ならびにその源泉となる排出係数・活動データ・入力情報等を集めて比較し、標準誤差等を用いて相対的に評価するという方法がとられてきた。しかし、近年では大気中温室効果ガスの濃度の観測が全球規模で継続的に行われるようになったことから、人為起源二酸化炭素排出による大気カラムの二酸化炭素濃度上昇が衛星観測により検出できるようになった。また、観測データの充実と大気輸送モデルの改良によりトップダウン的手法の高分解能化が進んだことから、いわゆるインベントリデータとは独立性の高い人為起源排出量の推定結果を地域別に提供できる可能性が広がっている。国際的な取組としては、WMOの統合全球温室効果ガス情報システム（Integrated Global Greenhouse Gas Information; IG³IS）が、国別インベントリ報告の不確実性低減や、大都市等からの排出量の時間変化の定量化をはじめとする科学的な支援をめざして温室効果ガス観測とモデルの統合利用（トップダウン的手法）を推進するとしており、日本の関係機関も連携してこれに貢献することが期待されている。

加えて、フラックススケールアップによる自然起源の海洋・陸域における温室効果ガス吸収量・排出量の信頼性が向上しつつあることから、トップダウン的手法（人為起源と自然起源の排出量・吸収量の合計）、フラックススケールアップ（自然起源の吸収量・排出量）、従来のインベントリデータ（人為起源の排出量・吸収量）の三者の結果を相互に比較し、不整合があればその原因を解明し、それぞれの手法を高度化していくことが可能である。

上記の手法に基づき、未だ不確実性の高い新興国・途上国からの排出量の確認、従来のインベントリデータからは把握しにくい地球規模での排出量の速報に加え、巨大都市からの排出、農耕地からの間欠的な排出、大規模森林（泥炭）火災による突発的で膨大な排出、人為起源吸収源の長期的監視等に対し、温室効果ガス分野の地球観測に基づく算出結果を活用できる。人為起源・自然起源の地表における排出量・吸収量の高精度での推定を実現することにより、各種気候変動対策の効果を地球規模で確認することが可能になり、産業・運輸・民生をはじめとする各部門で排出削減行動の動機づけを高めることができる。また、温室効果ガスの循環を含む地球システムモデルの開発改良等に活用されることにより、国民生活全般に影響を及ぼす気候変動の予測ならびにその影響予測の高度化が加速し、気候変動影響による国民の生命、財産及び生活、経済、自然環境等への被害を最小化あるいは回避することに貢献する。

6. まとめと課題

近年急速に発達している複数の観測手法に基づく温室効果ガス観測と、そのデータを統合的に用いる解析手法の進展について概観した。今後は、これらを用いて、パリ協定の目標達成に向けた進捗を評価するグローバル・ストックテイクのタイミングにあわせて、いわゆるインベントリデータとは独立した情報として、地球規模の温室効果ガス排出量・吸収量データを作成し公開するために、温室効果ガス分野の地球観測データを活用すべきである。

これを実現するための第一の課題は、未だ世界に広がる観測空白域を低減することである。その際に、地球規模の温室効果ガス排出量・吸収量の推定精度を向上する上で、新たな観測点を追加することにより優先的に解消すべき空白域を探るため、現状の観測データに基づく排出量・吸収量評価の精度限界、観測空白域の解消がもたらす精度向上の定量評価、さらに最適かつ現実的な観測体制の提案を行うための「観測システムシミュレーション実験」を実施して検討することが有効である。温室効果ガス分野の地球観測に関わる国内関係府省庁・機関は、協力し、既存の長期観測に加えて、大学を含む研究機関が研究の一環として実施中もしくは新規に開始する観測とも協力して情報を収集し、効果的な観測の拡充とその維持をはかるべきである。

第二の課題は、トップダウン的手法に関し、インベントリデータとの相互比較や緩和策の効果の評価を行う上で十分な推定精度と時間空間分解能を実現するための技術開発である。加えて、人為起源と自然起源の排出量・吸収量を高い信頼度で分離する手法の開発改良も急務である。それらの実現により、未だ不確実性の高い新興国・途上国からの排出量、大都市や大規模発生源からの人為起源排出量とその時間変化を短い時間遅れで確認できるようになる。トップダウン的手法の開発に取り組む国内研究機関は、連携し、必要な技術開発を行うことが必要である。

また、従来のインベントリ算出手法からは正確に推定しにくい排出源として、大規模農耕地からの間欠的な排出（農耕地からのメタンや一酸化二窒素の排出）、森林減少・劣化に伴う排出、大規模森林（泥炭）火災による突発的な排出などがある。これらについても、トップダウン的手法による推定精度を高め、インベントリデータを補完する情報源として活用することが期待できる。これにより、大規模な農耕地や森林を有する国や地域で、排出削減を国別排出削減目標に積極的に取り入れ、その削減効果を確認することができる。さらに、気候変動対策として大規模植林やバイオ燃料作物などによる人為的な吸収源を拡大した場合、それらが期待通りに二酸化炭素を吸収しているかどうかを長期的に確認する手段としても活用すべきである。

最後に、グローバル・ストックテイクのタイミングにあわせ、トップダウン的手法とフラ

ックススケールアップ手法により、地球規模での人為起源・自然起源の排出量・吸収量の推定精度を上げつつ、5年ごとに公表するためのしくみを国内に構築することが重要な課題である。そのために、関係府省庁は協力し、初回の2023年までに、衛星・航空機・船舶・地上観測などのデータを短い時間遅れで収集整備し、適正な品質管理を行い、国内複数の機関が開発するモデルで同時に解析し、複数のモデルの結果に基づいて最適な評価を行う手法を開発すること、及びそれに要する作業を長期的に支援する体制を整備する必要がある。