

# グローバルストックテイクに向けた人為起源 CO<sub>2</sub> 排出量推定に 貢献する衛星観測計画と大気輸送モデル開発の展望

山下陽介\*<sup>1</sup>・谷本浩志\*<sup>2</sup>・小田知宏\*<sup>3</sup>

## 1. はじめに

排出インベントリ (emission inventory) は、人間活動等に由来する温室効果ガス (greenhouse gas : GHG) や大気汚染物質等の排出量を排出係数や活動量データ (統計データ等) を用いて算定したもので、対象となるガス成分の排出管理等の施策並びに関連研究に必要なツールである (環境省 2007)。2015年に国連気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC) 第21回締約国会議において採択されたパリ協定 (Paris Agreement) では、すべての締約国が自国の気候緩和・適応策の目標 (Nationally Determined Contribution : NDC, 国が決定する貢献) を定め、京都議定書 (Kyoto Protocol) 下では一部の国々のみであった GHG (二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>), メタン (CH<sub>4</sub>), 一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O), ハイドロフルオロカーボン (HFCs), パーフフルオロカーボン (PFCs), 六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>), 三フッ化窒素 (NF<sub>3</sub>), 間接 CO<sub>2</sub> など) 排出インベントリの UNFCCC への報告も全ての国に課せられることになった (松永・横田 2019)。

パリ協定下では、定められた目標 (世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに、1.5°C に抑える努力を追求する) の達成に向けて、国際社会全体の NDC 達成度を 5 年ごとに評価するグローバルストックテイク (Global Stocktake : GST, 世界全体としての実施状況の検討) が行われる。GST は 2023 年から実施され、参加各国はその評価結果を踏まえて NDC をより野心的に更新・強化することが求められている。一方で、NDC 作成過程は各国に委ねられ手法が統一されていない課題を含んでいる。GST では、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) 報告書に代表されるような科学的知見に基づく評価も当然含まれており、また近年の UNFCCC によるガイドライン改定 (IPCC 2019) では、正確かつ透明性のあるインベントリによる排出量定量化に向けて科学的アプローチによる支援の必要性が、主に CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O について言及されている。様々な観測プラットフォーム (地上・航空機・衛星など) が、特に、この 10 数年で急速に利用可能となり、インベントリの検証に有用と期待される大気 GHG データが得られるようになってきた。大気 GHG データを用いたインベントリの客観的検証は、インベントリのもととなるデータや計算方法に由来する系統的なバイアスをチェックすることで行い、その精度を独立なデータで評価することができる。特に、もととなる統計データ等の量・質が精度に大きく影響するインベントリ作成においては、一般的に先進国と比較して開発途上国ではインベントリの不確実性が大きいと考えられている (Jonas *et al.* 2010 ; Andres *et al.* 2012)。パリ協定下において初めてインベントリ報告を行う開発途上国等への技術支援が今後も必要であり、こうした国々が NDC の科学的評価を適切に行

\*<sup>1</sup> (連絡責任著者) 国立環境研究所地球システム領域地球大気化学研究室。

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

yamashita.yosuke@nies.go.jp

\*<sup>2</sup> 国立環境研究所地球システム領域地球大気化学研究室。

\*<sup>3</sup> Universities Space Research Association (USRA) / メリランド大学大気海洋科学部 / 大阪大学工学部研究科。

—2020年11月25日受領—

—2021年8月26日受理—

えるよう、排出量の精度を保証する重要性が高まっている。また、我が国は地上や航空機を用いた高精度の長期観測や、衛星による温室効果ガス観測を推進しており、特に世界の大气濃度を一様に把握できる衛星観測を活用した国際社会への貢献が大きく期待されていると考えられる。加えて、世界気象機関の統合全球温室効果ガス情報システムが、都市域等の排出量定量化のために GHG 観測と大気輸送モデルの統合利用を推進するとしており、日本の関係機関の貢献も期待されている。

第2章では、こうした UNFCCC に報告されるインベントリの他に、都市独自の排出インベントリ、大気化学研究で用いられるインベントリやそれらの評価・検証手法についてレビューする。第3章では、近年重要性が高まってきた衛星観測をもとにした排出量推定・検知手法をレビューし、第4章では輸送モデルの利用可能性について検討する。まとめと将来展望について第5章で述べる。排出インベントリ、衛星観測、輸送モデル、それぞれが GST に果たす役割について第1図に示す。

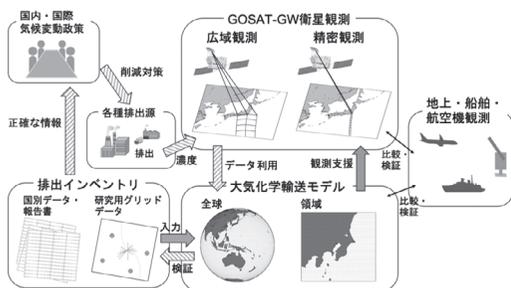
## 2. 排出インベントリ

ここまで述べてきた UNFCCC へ提出されるインベントリは、基本的にその国の排出量の定量化を目的としたものであり、共通のインベントリガイドライン (IPCC 2006) に沿っているものの、他国との系統的な比較を意図したものではない。排出量は、排出セクターごと、または燃料種ごとに計算 (reference

approach) される。大気化学研究で馴染みの深い大気輸送モデルに取り込めるグリッド化されたインベントリではないため、炭素収支の科学的評価を行う際には UNFCCC へ提出されるインベントリとグリッド化されたインベントリ間に存在する利用方法の違いなどを埋める必要がある。

一方、大気化学研究で馴染みの深い Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR, Janssens-Maenhout *et al.* 2012; Crippa *et al.* 2020) は、IPCC ガイドラインで定義される排出部門ごとの吸収排出量を全球で可能な限り一様なアプローチで計算・グリッド化したものであり、UNFCCC のセクターごとに計算されたインベントリとの高い互換性が期待できる。また、炭素循環研究で頻りに利用される Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC, Gilfillan and Marland 2021) は、燃料ベースでの国ごとと排出量を毎年更新・提供しており (reference approach に対応)、そのグリッド化されたデータは Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO<sub>2</sub> (ODIAC) として提供・研究利用されている (Oda *et al.* 2018)。これらグリッド化されたインベントリの多くは、国レベルの排出量を空間的にダウンスケールしており、高解像度になるほど個々の値の誤差が大きくなる (Oda *et al.* 2019)。パリ協定では、国レベルを超えて、地方自治体や都市、産業セクターにおける気候緩和対策が期待されており、ダウンスケールによって得られた吸収排出量マップを用いた評価には注意が必要である。近年では、国レベルのような大きなスケールで算出された排出インベントリをダウンスケールするのではなく、最初から都市内の排出セクターなど細かな空間スケールで排出量推定を行う研究も増えており、大きなスケールのインベントリとの相互比較を通して、気候緩和策に資することが期待される (Oda *et al.* 2019)。なお温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) が報告する日本のインベントリの精度は、CO<sub>2</sub> に対して国レベルで数% ( $2\sigma$ ) (GIO 2020)、全球レベルでは CDIAC で 8% ( $2\sigma$ ) (Andres *et al.* 2014) と報告されている。

世界人口の約60%が居住し、大きな経済活動の場である都市域からの CO<sub>2</sub>排出量は、消費ベースで全球の化石燃料燃焼起源の CO<sub>2</sub>排出量の約4分の3を占めており (Seto *et al.* 2014)、削減ポテンシャルは高い、このポテンシャルを最大限に活用して世界の CO<sub>2</sub>排出量を削減することは、パリ協定の目標達成に向けて大き



第1図 本稿で扱う排出インベントリ、衛星観測、輸送モデルの関係と、それぞれがグローバルストックテイクに果たす役割。衛星からモデル、インベントリを経由しての削減対策を斜線の入った矢印で、インベントリからモデルを経由して衛星観測支援につながるものを塗り潰した矢印で示した。

な鍵となる。そこで2017年、世界の140都市がパリ協定の実施に率先して取り組むことを約束するモントリオール宣言を発表し、低炭素型社会の構築に向けて都市が果たすべき役割が強調された (UNFCCC 2017)。パリ協定では、地域の気候変動対策として国別排出インベントリの他に都市独自の排出インベントリを作成することが推奨されており、気候変動対策に取り組む大都市で構成される C40 (<https://www.c40.org/>, 2021.8.26閲覧) や世界の地方公共団体を結ぶ連盟である世界気候・エネルギー首長誓約 (Global Covenant of Mayors for Climate & Energy, <https://www.globalcovenantofmayors.org/>, 2021.8.26閲覧) では排出インベントリ作成が義務になっている。実際、日本では東京都、横浜市、金沢市が排出インベントリの報告を行っている。

温暖化緩和策として実施される排出削減の実効性を担保するためには、都市やその周辺における排出量の推定が必須となる。特に近年、都市におけるインベントリの多くが共通のガイドライン (GHG Protocol for Cities, <https://ghgprotocol.org/greenhouse-gas-protocol-accounting-reporting-standard-cities>, 2021.8.26閲覧) に基づいて作成されている。しかし、国レベルのような明確な経済活動の境界を定めてデータを集計して計算することは難しく (例えば、エネルギー・交通など)、また対象となる排出部門が全て揃っていない、直接排出ベース (スコープ1: 都市の境界内で発生する排出)・消費ベース (スコープ2: 都市の境界外の発電所などの排出も含む) といった排出量の定義が異なる、CO<sub>2</sub>相当 (CO<sub>2</sub> equivalent) での複数のガスの合算報告が異なる、など課題は多い。さらに、都市域のインベントリは、主にデータ収集のレベルにより都市間で異なる可能性があり (Oda *et al.* 2019)、過去と近年の推定手法の混在も加わり、都市間の比較、及び精度と時間的な連続性の担保が難しい (Ibrahim *et al.* 2012; Ramaswami and Chavez 2013; Lombardi *et al.* 2017)。また、先述の研究系のインベントリ、特にダウンスケールに基づくインベントリとの大きな相違が報告されており、方法論的レビューや比較解析を通じた評価が行われている (Oda *et al.* 2019; Chen *et al.* 2020; Gurney *et al.* 2021)。

近年では都市における排出量を空間的・時間的に詳細に再現し推定する排出モデルが開発されており、より詳細な都市の排出量変化の考慮が可能になってきた (Sovacool and Brown 2010; Hoornweg *et al.* 2011)。

発電所や工場等の点源 (ポイントソース) や交通機関等の線源 (ラインソース) の位置は地図情報等を用いて特定することができ、排出の空間的割付は方法論的には容易に改善できる。排出量算定に関しては、個々の排出源について関連する全ての排出プロセスとその量について詳細な情報が必要であるため、定量化が難しいという新しい課題もある (Turnbull *et al.* 2019)。また作成されたインベントリには、当然の事ながら、未知の排出源やデータベース更新以降に発生した未確認の排出変化を取り入れることはできないため、国別排出インベントリに加え研究系排出インベントリにも評価・検証が必要となる。近年の多くのインベントリの評価は、相互比較をベースにしており、インベントリ間の差を不確実性の代理指標としている。そのような不確実性評価は方法の違いからくる差の理解を助けるが、指標となる独立した値がないことからインベントリのバイアスや精度を客観的に評価することができないという限界がある (Andres *et al.* 2016; Oda *et al.* 2018, 2019)。

他方で、近年、航空機観測・地上観測・タワー観測・衛星観測から得られる大気データからのトップダウン推定を用いて、従来型の積み上げ (ボトムアップ) 式に求めた排出量 (インベントリ) との比較・評価が行われてきた。大気観測から排出量を直接推定するトップダウン法は、炭素循環研究においては主に自然起源の排出吸収量推定を軸に発展してきたが、近年利用可能になってきた都市における観測データを利用し、人為起源の発生源に対しての適用が試みられている (Mays *et al.* 2009; McKain *et al.* 2012; Lauvaux *et al.* 2016; Nathan *et al.* 2018; Gurney *et al.* 2019; Turnbull *et al.* 2019; Lauvaux *et al.* 2020)。トップダウン法では、インベントリベースの手法とは独立に、発生源の風上と風下で観測された大気中濃度差、もしくはバックグラウンド濃度との差から排出量を推定する。例えば、トップダウン法の一つである大気の質量バランス法では、ガス田や都市を1つのソースと考え推定値を算出する。都市スケールの排出量は、サンプリングタワーが整備され周りから比較的独立した場所に位置する米・インディアナポリスにおいては、おおよそ20~30%の精度 ( $1\sigma$ ) と見積もられている (Cambaliza *et al.* 2014; Heimburger *et al.* 2017)。

近年、時空間的に密な排出量データが、特に都市域では得られるようになってきた。都市の人間活動を解像する目安として、高水平解像度 (約1 km)・高時間

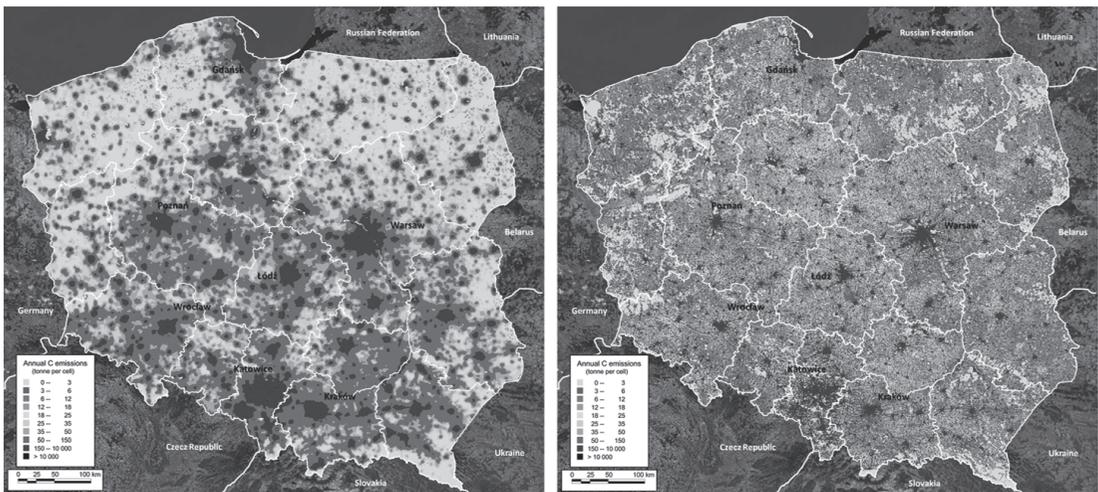
分解能(1時間)が提案されており(Ciais *et al.* 2015), 研究系の排出インベントリプロダクト作成の動きがある(例えばGOSATプロジェクトで開発された全球のODIAC, Oda *et al.* 2018). 輸送モデルによるシミュレーションを高精度化するには, 高分解能で高品質のグリッド化されたインベントリデータが必要である. 高解像度・高時間分解能の研究系排出インベントリの支援により, 領域スケールでは高精度の大気モデルシミュレーションが可能になってきている(McKain *et al.* 2012).

また, ボトムアップ法とトップダウン法を相補的に用いて都市圏の排出総量と排出源の地理分布を求める研究も進められている(Lauvaux *et al.* 2016; Turnbull *et al.* 2019; Lauvaux *et al.* 2020). この手法では, ボトムアップ法を発電所等の点源や道路等の線源の詳細な地理分布の取り込みに用い, トップダウン法ではボトムアップ法で作成された排出インベントリの先見情報を基にするものの, 都市圏の排出総量の推定により排出インベントリを修正している. 例えば, 高水平解像度(約1 km)の研究系排出インベントリ Hestia(Gurney *et al.* 2019) は, このような手法で作成された. Turnbull *et al.*(2019) は, インディアナポリス都市圏の冬季を対象に化石燃料由来の排出量推定の手法間の比較を実施した. 比較対象として, 排出インベントリ Hestia, 排出インベントリ先見情報を用いた2つの異なるトップダウン法(前述の質量バランス法, 及び

排出の空間パターンを導出する逆解析法)で得られた対象領域の合計排出量を用いた. その結果, 独立した手法から得られた化石燃料由来のCO<sub>2</sub>排出量推定結果が約7%の範囲内で一致することが示され, 排出量推定手法の確立が進んできた. また, ポーランドとウクライナ領域の1年間に限れば, 点源や線源の地理分布と都市圏の排出総量の両方を表現できる研究系排出インベントリも実現されている(Bun *et al.*(2019)によるGESAPU 1×1 km 排出量, 第2図).

このように複数の排出量推定手法を相補的に適用することで, 特定の都市域では信頼度の高い排出量推定手法が確立されつつある. しかし, このような研究に資するインベントリ作成には多大なりソース・手間がかかるため, 厳密なインベントリ作成に必要なデータ収集と排出モニタリングが可能な特定の都市域ですら定期的に更新することは挑戦的な課題であり, 途上国等では作成自体が難しいと考えられる.

トップダウン法の推定精度はインベントリを評価する上では改善の必要があるものの, 未知の排出源や未確認の排出変化等を把握し, 全球的に均質かつ高精度で準リアルタイムな排出量推定を行うために, 特に全球規模の広範囲をカバーできる衛星観測を利用する動きがある. Pinty *et al.*(2017)は全球的な未知の点源の把握, 新しい石油生産地や成長する都市部等の未確認の排出変化の把握に衛星観測を利活用することを提案した. 第3章では, このような高解像度の衛星観測情



第2図 ODIAC(左)とGESAPU(右)のポーランドにおける排出インベントリの比較(Oda *et al.* 2019のFig. 1, グレースケールに変換). 2010年のCO<sub>2</sub>排出量を1 km×1 kmの解像度で表示(単位はtC/年). 濃い色ほど排出量が多いことを表す.

報も取り入れた排出量推定・検知の動きについて紹介する。

### 3. 衛星観測による濃度推定・排出検知

衛星観測による都市域の人為起源 GHG 濃度の推定や排出検知は、例えば日本の温室効果ガス観測技術衛星 (Greenhouse gases Observing SATellite: GOSAT, Yokota *et al.* 2009) や NASA の Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2, Crisp *et al.* 2017) や OCO-3 (Eldering *et al.* 2019), European Space Agency の Sentinel-5/TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) による CO<sub>2</sub> のカラム平均濃度 ( $X_{CO_2}$ ), CH<sub>4</sub> のカラム平均濃度 ( $X_{CH_4}$ ) データの収集により可能となってきた (Kort *et al.* 2012; Veefkind *et al.* 2012; Janardanan *et al.* 2016; Wu *et al.* 2018; Someya *et al.* 2020; Wu *et al.* 2020; Yang *et al.* 2020; Ye *et al.* 2020). 例えば Kort *et al.* (2012) は、GOSAT から観測された米・ロサンゼルス都市部の  $X_{CO_2}$  とバックグラウンドの参照値となる近隣の砂漠エリアの  $X_{CO_2}$  の差を初めて衛星から検知し、約 22% の CO<sub>2</sub> 排出量変化を検出可能であると評価した。また、近年では OCO-2 から同様にロサンゼルスの都市域における濃度上昇が観測されており、OCO-2 や OCO-3 といったより小さなフットプリントで面的に観測する測器では、1 つのオーバパスの観測から都市起源の CO<sub>2</sub> 検知が可能であることが示されている (Schwandner *et al.* 2017)。ロサンゼルスでは都市域の近隣に人為起源と生物起源の影響が共に小さいバックグラウンドの場所が存在するが、多くのメガシティは他の主要都市と隣接しているか、または都市内部に位置する生物起源の影響を受けており (Miller *et al.* 2020)、メガシティ単独での人為起源 CO<sub>2</sub> 排出量の推定を困難にしている (Kort *et al.* 2012)。

都市圏全体の排出量推定の他に、発電所のような大規模な点源から排出される CO<sub>2</sub> の検出に衛星観測を用いることが議論されている。例えば Bovensmann *et al.* (2010) は、水平 2 km で 0.5% (2 ppm) の観測精度が将来の衛星観測に必要なことを提案した。しかし、点源から排出される強い CO<sub>2</sub> プルームについては位置の検出が可能であるものの、弱いプルームについては生物起源や施設周辺の人為起源の干渉を受け検出が困難である (Kuhlmann *et al.* 2019; Reuter *et al.* 2019)。Nassar *et al.* (2017) は、Bovensmann *et al.* (2010) のアプローチに基づき、OCO-2 データとガウ

スプルームモデルを用いて幾つかの発電所の排出量推定を行い、報告されているインベントリとの比較を行った。

都市圏全体の人為起源 CO<sub>2</sub> 排出量の推定精度や点源から排出されるプルームの検出能力を向上させるために、一酸化炭素 (CO) や二酸化窒素 (NO<sub>2</sub>) のように CO<sub>2</sub> と共放出されながらも生物圏のプロセスの影響をあまり受けない気体を同時計測することで、人為起源と生物起源の影響を分離することが提案されている (Silva *et al.* 2013; Reuter *et al.* 2014; Ciaia *et al.* 2015)。Reuter *et al.* (2019) は、OCO-2 データから得られた CO<sub>2</sub> プルームの起源とその形状を TROPOMI NO<sub>2</sub> を用いて推定し、CO<sub>2</sub> 排出量の推定を行った。その結果、NO<sub>2</sub> は大気寿命が数時間と短寿命であるために、特に高温下で排出されたばかりの CO<sub>2</sub> プルームの検出に適していることが示された。こうした知見をもとに、将来の衛星観測計画においても、軌道上での GHG と大気質 (GHG-Air quality: GHG-AQ) の同時計測の試みが進められている。例えば、化石燃料燃焼起源 CO<sub>2</sub> 排出量の指標として、同じく化石燃料燃焼起源であり窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出量の指標となる NO<sub>2</sub> 測定値の利用が検討されており、特に生物起源の影響を受け検出困難な弱い CO<sub>2</sub> 排出シグナル (約 0.05 ppm 以上) を検出する際に有用となる (Kuhlmann *et al.* 2019)。Kuhlmann *et al.* (2019) は、点源からの排出を検出するのに必要な水平 2 km の空間解像度を持つ Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring (CO2M, Sierk *et al.* 2019) ミッションの観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment: OSSE, 例えば Pinty *et al.* (2017) 参照) を用いてドイツ・イェンシュヴァルデ (Jänschwalde) 石炭火力発電所のプルーム検出能力を調べ、CO<sub>2</sub> プルームの位置検出能力が CO<sub>2</sub> と NO<sub>2</sub> の同時計測で CO<sub>2</sub> 単独よりも大幅に向上することを示した。なお CO<sub>2</sub> 放出量は燃焼量による一方、NO<sub>2</sub> 放出量はガソリンや石炭など燃料の種類により異なるため、NO<sub>x</sub> 放出量を減らす技術が普及している地域では適用に限界がある。また、NO<sub>2</sub> は短寿命で日内変化もあるため、CO<sub>2</sub> と NO<sub>2</sub> の観測に時間差がある場合の適用には注意を要する。他方、大気寿命の長い CO (対流圏中で約 2 ヶ月) では時間的制約は小さいものの、CO<sub>2</sub> 放出量に対する CO 放出量は燃焼効率によるため、総じて効率的な燃焼と公害防止に努めることの多い発電所から放出される CO は非常に少ないという限界がある

(Turnbull *et al.* 2011).

衛星観測を準リアルタイムな排出監視へ利用することも検討の余地がある。2020年の新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 流行に伴う全世界的な経済活動の縮小により、部門別に報告された活動量変化をもとにした CO<sub>2</sub>排出量変化 (Le Quéré *et al.* 2020)、渋滞情報や Google 等の位置情報データによる活動量変化をもとにした CO<sub>2</sub>や NO<sub>x</sub>等の排出量変化の推計 (Forster *et al.* 2020) が行われ、2月から4月にかけて CO<sub>2</sub>や NO<sub>x</sub>排出量が2~3割程度減少したと推定された。しかし、全球規模である程度均質な解析をできるだけデータが入手できていない (Forster *et al.* 2020)。他方、衛星観測を用いて空間的に均質な排出変化の推定が試みられており、CO<sub>2</sub>の大気寿命が長く NO<sub>2</sub>は数時間程度と短いため、NO<sub>2</sub>濃度の推定値が短期的な排出変化の追跡に有用とされる (Duncombe 2020; Miyazaki *et al.* 2020)。このように、衛星観測で得られた NO<sub>2</sub>濃度変化を監視することは、長寿命の CO<sub>2</sub>排出量変化を監視するシステム構築の助けになる可能性がある。

現在、日本で運用中の GOSAT、GOSAT-2の後継ミッションとして温室効果ガス・水循環観測技術衛星 (Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle: GOSAT-GW, [http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gosat\\_gw/](http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gosat_gw/), 2020.9.16閲覧) ミッション計画が進められており、搭載予定の温室効果ガス観測センサ3型 (Total Anthropogenic and Natural emissions mapping Spectrometer-3: TANSO-3) では、GHG-AQ 同時計測として CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>に加え NO<sub>2</sub>の高解像度観測 (精密観測モードで1~3 km) が予定されている。GOSAT-GW は、同様に GHG と NO<sub>2</sub>を計測する CO2M よりも数年早く軌道に投入される予定で、GST への貢献を念頭に地球観測衛星委員会 (Committee on Earth Observation Satellite; CEOS) において大きな役割が期待される。

#### 4. 大気輸送モデルの展望

こうした将来の GHG-AQ 同時計測を行う衛星観測ミッションを支援するため、空間高解像度化学輸送モデルの開発が急務であると言える。当該輸送モデルに必要な要件として、筆者らは (1) Ciais *et al.* (2015) で提案された最先端の研究系排出インベントリに求められる高水平解像度 (約1 km)・高時間分解能 (1時間)、(2) GHG-AQ 同時計測を支援できる CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>

の同時モデルシミュレーション、を挙げる。(1)の水平解像度は TANSO-3の精密観測モードに相当し、(1)の実現には高解像度実験を行うための技術的課題の克服に加え高い計算機性能を要する。(2)の実現には CO<sub>2</sub>の輸送に加え NO<sub>2</sub>濃度を再現するための大気化学モデルとの結合、及び研究・政策の両面から支援できるインベントリ、都市圏において排出削減策の評価に必要な排出量変化を検知できるだけの精度が必要となる。

空間高解像度計算には、領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) がしばしば用いられる。McKain *et al.* (2012) は、高水平解像度 (約1.3 km) に設定した WRF と高解像度 (約10 km)・高時間分解能 (1時間) の排出インベントリ (Vulcan v.2.0, Gurney *et al.* 2009) を組み合わせたシミュレーションを行った。WRF はオイラー型のモデルであるが、排出量変化の推定には、ラグランジュ型輸送モデル STILT (Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport) が用いられた。STILT では、ソース・レセプター関係を考慮することで、排出量と濃度変化を直接的に結びつけられる。得られた結果を米・ソルトレークシティの地上観測と比較すると、都市圏全体で約15%の人為起源 CO<sub>2</sub>排出量変化を検出できることが示された。この結果は、特定の都市圏における (1) の実現可能性を示しているが、NO<sub>2</sub>などの化学種へも適用するための将来的な開発が必要である。

NO<sub>2</sub>の化学反応を扱うことができるオイラー型の領域モデルとして、WRF に U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Community Multiscale Air Quality (CMAQ, Byun and Schere 2006) を組み込んだ WRF-CMAQ、及び WRF-Chem (WRF-Chemistry, Grell *et al.* 2005) が広く利用されている。これらのモデルでは、CO<sub>2</sub>輸送を併せて扱った例がまだ少ない。将来的に GHG-AQ 同時計測の支援ツールとするには、GHG と AQ の壁を取りはらう努力が必要である。NO<sub>2</sub>の化学反応を扱うモデルにパッシブな CO<sub>2</sub>を導入することにより、短期間のブルーム検出や排出量解析・推定に利用できる。さらに、植生モデルなども取り入れた CO<sub>2</sub>吸収排出モデルへと進化させる努力により、長期的な排出量解析・推定にも大きく寄与できる可能性がある。

領域モデルでは計算領域の側面境界の与え方に難しさはあるものの、対象とする地域に計算領域を限定することで、計算コストの削減や局所的な高解像度化の

メリットを得やすい。領域モデルで局所高解像度化する際には、対象領域の中心ほど格子間隔を細かく取るネスティングと呼ばれる手法が用いられることが多い。対象領域の中心に点源を置くなどネスティングの特性を生かせば、点源から放出されるブルームを検出できる衛星観測をリトリバル初期値や解析における参照データ提供の面などから支援できる可能性がある。

領域モデルの他に、国別や都市圏全体といった広範囲の排出量推定には全球モデルも利用されてきた。全球モデルでも、オイラー型の濃度シミュレーションを行い、その計算結果を用いてラグランジュ型輸送モデルで排出量推定を行った例がある。Ganshin *et al.* (2012) や Maksyutov *et al.* (2021) は、全球低解像度 (2.5°×2.5°) の大気輸送モデルを用いたオイラー型のシミュレーションを行った。排出量推定には、ラグランジュ型輸送モデル FLEXPART (FLEXible PARTICle dispersion model) を用いて、1×1 km の CO<sub>2</sub> 排出量を算出することができた。この結果は、複数の手法の併用による全球での高解像度排出量推定の実現可能性を示している。

高解像度の推定手法の一方で、オイラー型の濃度シミュレーションを利用した全球での低解像度の濃度推定、排出量推定の取組みがある。濃度推定の代表的なものとして、データ同化手法が用いられてきた。データ同化は、観測データと数値モデルに基づいて気象場等を推定する手法で、数値予報モデルの初期値作成や長期再解析データ作成に広く用いられてきた (露木 2008)。近年では、気象データに加えてエアロゾル・GHG や他の化学種などの大気化学データにも適用されている (Yumimoto *et al.* 2018 ; Miyazaki *et al.* 2019)。また、全球モデルと観測情報を組み合わせた準リアルタイムな濃度モニタリングの試みがある (Agustí-Panareda *et al.* 2014 ; Massart *et al.* 2014 ; Flemming *et al.* 2015 ; 2017 ; Keller *et al.* 2021 ; Weir *et al.* 2021)。Keller *et al.* (2021) は水平約25km, Weir *et al.* (2021) は水平約50km のモデルを用いており、衛星のフットプリントレベルの高解像度での解析はできないものの、都市圏全体の濃度モニタリングには適用可能である。また、ECMWF の Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) 全球オペレーショナルデータでは、GHG や他の化学種濃度を中心に運用が行われている。なお、アンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化では、アンサンブル数分だけ計算コストが増加するため、解像度はなかなか上げら

れないという課題がある。

他方、排出量推定の代表的なものとして逆解析法がある。逆解析法は大気輸送モデルと排出量の最適化手法を組み合わせて、排出量マップを作成する手法であり、全球での CO<sub>2</sub> 排出量推定値が求められている (Takagi *et al.* 2011 ; Maksyutov *et al.* 2013 ; Niwa *et al.* 2017)。逆解析法による排出量推定では、点源等の位置までは推定できないため、国別や地域別といった広域の排出量の把握に向いており、そうした目的には低解像度でも十分対応できる。高解像度で点源等を推定できる他の手法とは異なり、逆解析法は広域向けの排出量推定ツールである。

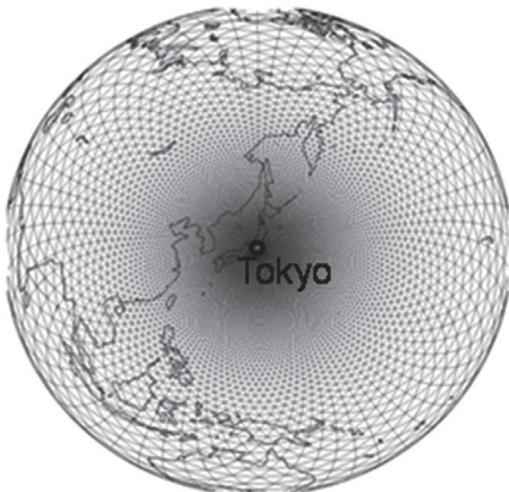
このように、領域モデルを用いたオイラー型の高解像度濃度シミュレーションや、ラグランジュ型輸送モデルを用いた高解像度の排出量推定、及び、全球モデルを用いた低解像度の濃度シミュレーション、データ同化を用いた国別や地域別といった広範囲での濃度推定、逆解析を用いた排出量推定が行われてきた。

領域モデルでは可能となってきた高解像度計算を全球モデルでも行うことができるようになれば、C40 都市等の点源を同時にシミュレーションし、高解像度の衛星観測を全球で準リアルタイムに支援できる可能性が出てくる。実現には高解像度・高時間分解能のイベントリや高い計算機性能を必要とするという課題もあるが、全球高解像度モデルの利用可能性についても検討の余地がある。例えば、日本の全球雲解像モデルとして、非静力学正20面体大気モデル (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model : NICAM, Tomita and Satoh 2004 ; Satoh *et al.* 2008, 2014) があり、エアロゾル・大気化学へも拡張されてきた (NICAM-Chem, Suzuki *et al.* 2008 ; Goto *et al.* 2015 ; Trieu *et al.* 2017 ; Goto *et al.* 2018)。また、CO<sub>2</sub> 輸送を扱う NICAM 炭素循環モデルも構築されているが (Niwa *et al.* 2011)、NICAM においても CO<sub>2</sub> 輸送を扱うモデルと NO<sub>2</sub> の化学反応を扱うモデルの統合が課題である。なお、高解像度で衛星サウンディングをデータ同化する場合、衛星のフットプリントよりもモデル格子間隔が小さくなる場合がある。このため、高解像度のモデル格子ヘデータを取り込む手法の開発など、今後の技術開発が必要となる。

全球高解像度計算は最先端のスーパーコンピュータを用いても挑戦的な課題であり、エアロゾル輸送に拡張された NICAM による全球一様3.5km 実験は、2週間程度のシミュレーション期間が限界で (Sato *et al.*

2016). 最近の計算機性能向上を加味しても、全球一様 14km グリッドでの数年積分が実現可能な段階にきたばかりである (Goto *et al.* 2020). その一方で、NICAM でダイヤモンドグリッド (Uchida *et al.* 2017) と呼ばれる、領域がダイヤモンドの形状をした完全領域モデルも開発されており、福島原発事故由来の放射性物質輸送に関するシミュレーションにおいて、水平解像度 1 km の計算実績がある (Nakajima *et al.* 2017; Sato *et al.* 2018, 2020).

NICAM では、全球一様の格子間隔の他に、ストレッチグリッド (Tomita 2008) が利用可能である。ストレッチグリッドでは、球面上の格子間隔が対象領域の中心に近づくにつれて細くなり局所高解像度化される。その際に、領域モデルで必要なネスティングを必要とせず、複数の解像度間で滑らかに遷移させることができる (Uchida *et al.* 2017). 関東地方を対象領域の中心としたストレッチグリッド (第 3 図) を用いて、Trieu *et al.* (2017) は関東地方で約 11km、日本領域で約 25km の大気化学シミュレーションを実現しているが、プルーム検出や都市の排出量推定に必要とされる水平 1 km の達成には、前述の衛星サウンディング同化時の問題や、高解像度計算時に数値不安定を起こさない計算手法の確立など、さらなる技術革新を必要とする。



第 3 図 関東地方を対象領域の中心とした全球モデル NICAM-Chem のストレッチグリッド (Trieu *et al.* 2017 の Fig. 1 a).

## 5. まとめと将来展望

これまでの排出インベントリで課題となっていた未知の排出源、未確認の排出変化を把握するとともに、統計データ等の量・質がインベントリの精度に影響しうる地域での精度向上のため、衛星観測を利活用する動きと今後の衛星観測計画をサポートするための大気輸送モデルについてレビューした。

GST に科学コミュニティが果たせる役割は大きく、衛星観測と輸送モデルを組み合わせた排出インベントリの改良はその一つである。現在の CO<sub>2</sub>衛星観測データを用いた都市圏や点源から排出される人為起源 CO<sub>2</sub>排出量の推定・検知においては、CO<sub>2</sub>が生態系による吸収の影響を受け推定・検知が困難になることがある。そこで、CO<sub>2</sub>と同じく化石燃料燃焼に起源を有す一方、生物圏の影響を受けない NO<sub>2</sub>等を同時計測することで CO<sub>2</sub>排出量の推定精度を向上させる GHG-AQ 同時計測の試みが進められている。2023年度打ち上げ予定の GOSAT-GW では、GHG に加え NO<sub>2</sub>の高解像度観測が予定されており、得られたデータの利活用に用いる大気化学輸送モデルの開発を進める必要がある。

国別や都市圏全体といった広範囲の排出量推定を行うために、オイラー型の全球モデルによる濃度シミュレーションが行われてきた。全球モデルは、低解像度計算にデータ同化や逆解析法を組み合わせることで、全球規模での排出量推定や準リアルタイムな濃度モニタリングに力を発揮できる。一方、領域規模ではオイラー型の領域モデル WRF がしばしば使われ、高水平解像度での CO<sub>2</sub>輸送のシミュレーション例がある。領域モデルは、計算領域を限定しネスティングの特性を生かすことで、計算コストの削減と局所的な高解像度化のメリットを得やすい。このように、GST に向け全球・領域モデルや複数の推定手法の特性を相補的に用いて、衛星観測ミッションの支援に効果的に貢献することが望ましい。

全球モデルによる高解像度計算は、最先端のスーパーコンピュータを用いても挑戦的な課題であるものの、C40都市にある点源の同時シミュレーション等の実現につながり、高解像度の衛星観測を全球で準リアルタイムにサポートできる可能性がある。日本の全球雲解像モデル NICAM は、近年、エアロゾル・炭素循環・大気化学へも拡張されており、高解像度の計算実績を上げつつあることから、将来における活用が期待できる。ただし新たな課題として、CO<sub>2</sub>輸送を扱う炭素循環モデルと NO<sub>2</sub>等の化学反応を扱うモデルの統

合、生態系による CO<sub>2</sub> 吸収を扱う植生モデルの取り込み、衛星サウンディングのフットプリントより小さいモデル格子へデータ同化する際の手法開発、高解像度計算時に数値不安定を起こさない計算手法の確立、高解像度・高時間分解能のインベントリの必要性などが浮かび上がる。これら全ての課題の克服には時間を要するかもしれないが、GST への貢献に向けて技術開発を鋭意続けていく必要がある。

## 謝 辞

本稿を執筆するに当たり、国立環境研究所の地球システム領域三枝信子領域長、地域環境保全領域五藤大輔主任研究員には多くの有益なコメントを頂いた。本研究の一部は、環境研究総合推進費「ブラックカーボンおよびメタンの人為起源排出量推計の精緻化と削減感度に関する研究」(2-1803, JPMEERF20182003) として行われた。

## 参 考 文 献

- Agustí-Panareda, A., S. Massart, F. Chevallier, S. Boussetta, G. Balsamo, A. Beljaars, P. Ciais, N. M. Deutscher, R. Engelen, L. Jones, R. Kivi, J.-D. Paris, V.-H. Peuch, V. Sherlock, A. T. Vermeulen, P. O. Wennberg and D. Wunch, 2014: Forecasting global atmospheric CO<sub>2</sub>. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 11959-11983, doi:10.5194/acp-14-11959-2014.
- Andres, R. J., T. A. Boden, F.-M. Bréon, P. Ciais, S. Davis, D. Erickson, J. S. Gregg, A. Jacobson, G. Marland, J. Miller, T. Oda, J. G. J. Olivier, M. R. Raupach, P. Rayner and K. Treanton, 2012: A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion. *Biogeosciences*, **9**, 1845-1871, doi:10.5194/bg-9-1845-2012.
- Andres, R. J., T. A. Boden and D. Higdon, 2014: A new evaluation of the uncertainty associated with CDIAC estimates of fossil fuel carbon dioxide emission. *Tellus B*, **66**, 23616, doi:10.3402/tellusb.v66.23616.
- Andres, R. J., T. A. Boden and D. M. Higdon, 2016: Gridded uncertainty in fossil fuel carbon dioxide emission maps, a CDIAC example. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 14979-14995, doi:10.5194/acp-16-14979-2016.
- Bovensmann, H., M. Buchwitz, J. P. Burrows, M. Reuter, T. Krings, K. Gerilowski, O. Schneising, J. Heymann, A. Tretner and J. Erzinger, 2010: A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO<sub>2</sub> emissions from space and related applications. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 781-811, doi:10.5194/amt-3-781-2010.
- Bun, R., Z. Nahorski, J. Horabik-Pyzel, O. Danylo, L. See, N. Charkovska, P. Topylko, M. Halushchak, M. Lesiv, M. Valakh and V. Kinakh, 2019: Development of a high-resolution spatial inventory of greenhouse gas emissions for Poland from stationary and mobile sources. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, **24**, 853-880, doi:10.1007/s11027-018-9791-2.
- Byun, D. and K. L. Schere, 2006: Review of governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Appl. Mech. Rev.*, **59**, 51-77, doi:10.1115/1.2128636.
- Cambaliza, M. O. L., P. B. Shepson, D. R. Caulton, B. Stirr, D. Samarov, K. R. Gurney, J. Turnbull, K. J. Davis, A. Possolo, A. Karion, C. Sweeney, B. Moser, A. Hendricks, T. Lauvaux, K. Mays, J. Whetstone, J. Huang, I. Razlivanov, N. L. Miles and S. J. Richardson, 2014: Assessment of uncertainties of an aircraft-based mass balance approach for quantifying urban greenhouse gas emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 9029-9050, doi:10.5194/acp-14-9029-2014.
- Chen, J., F. Zhao, N. Zeng and T. Oda, 2020: Comparing a global high-resolution downscaled fossil fuel CO<sub>2</sub> emission dataset to local inventory-based estimates over 14 global cities. *Carbon Balance Manag.*, **15**, 9, doi:10.1186/s13021-020-00146-3.
- Ciais, P., D. Crisp, H. D. van der Gon, R. Engelen, G. Janssens-Maenhout, M. Heimann, P. Rayner and M. Scholze, 2015: Towards a European Operational Observing System to Monitor Fossil CO<sub>2</sub> Emissions-Final Report from the Expert Group. European Commission, doi:10.2788/52148.
- Crippa, M., E. Solazzo, G. Huang, D. Guizzardi, E. Koffi, M. Muntean, C. Schieberle, R. Friedrich and G. Janssens-Maenhout, 2020: High resolution temporal profiles in the emissions database for global atmospheric research. *Scient. Data*, **7**, 121, doi:10.1038/s41597-020-0462-2.
- Crisp, D., H. R. Pollock, R. Rosenberg, L. Chapsky, R. A. M. Lee, F. A. Oyafuso, C. Frankenberg, C. W. O'Dell, C. J. Bruegge, G. B. Doran, A. Eldering, B. M. Fisher, D. Fu, M. R. Gunson, L. Mandrake, G. B. Osterman, F. M. Schwandner, K. Sun, T. E. Taylor, P. O. Wennberg and D. Wunch, 2017: The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 59-81, doi:10.5194/amt-10-59-2017.
- Duncombe, J., 2020: Six ways satellites tracked COVID-19. *Eos*, **101**, doi:10.1029/2020EO146340.
- Eldering, A., T. E. Taylor, C. W. O'Dell and R. Pavlick, 2019: The OCO-3 mission: measurement objectives and

- expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 2341-2370, doi:10.5194/amt-12-2341-2019.
- Flemming, J., V. Huijnen, J. Arteta, P. Bechtold, A. Beljaars, A.-M. Blechschmidt, M. Diamantakis, R. J. Engelen, A. Gaudel, A. Inness, L. Jones, B. Josse, E. Katragkou, V. Marecal, V.-H. Peuch, A. Richter, M. G. Schultz, O. Stein and A. Tsikerdekis, 2015: Tropospheric chemistry in the Integrated Forecasting System of ECMWF. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 975-1003, doi:10.5194/gmd-8-975-2015.
- Flemming, J., A. Benedetti, A. Inness, R. J., Engelen, L. Jones, V., Huijnen, S. Remy, M. Parrington, M. Suttie, A. Bozzo, V.-H. Peuch, D. Akritidis and E. Katragkou, 2017: The CAMS interim Reanalysis of Carbon Monoxide, Ozone and Aerosol for 2003-2015. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 1945-1983, doi:10.5194/acp-17-1945-2017.
- Forster, P. M., H. I. Forster, M. J. Evans, M. J. Gidden, C. D. Jones, C. A. Keller, R. D. Lamboll, C. Le Quéré, J. Rogelj, D. Rosen, C.-F. Schleussner, T. B. Richardson, C. J. Smith and S. T. Turnock, 2020: Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nat. Clim. Change*, **10**, 913-919, doi:10.1038/s41558-020-0883-0.
- Ganshin, A., T. Oda, M. Saito, S. Maksyutov, V. Valsala, R. J. Andres, R. E. Fisher, D. Lowry, A. Lukyanov, H. Matsueda, E. G. Nisbet, M. Rigby, Y. Sawa, R. Toumi, K. Tsuboi, A. Varlagin and R. Zhuravlev, 2012: A global coupled Eulerian-Lagrangian model and 1×1km CO<sub>2</sub> surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO<sub>2</sub> transport simulations. *Geosci. Model Dev.*, **5**, 231-243, doi:10.5194/gmd-5-231-2012.
- Gilfillan, D. and G. Marland, 2021: CDIAC-FF: Global and national CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel combustion and cement manufacture: 1751-2017. *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 1667-1680, doi:10.5194/essd-13-1667-2021.
- GIO, 2020: National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN 2020 (Greenhouse Gas Inventory Office of Japan and Ministry of the Environment, Japan, ed.), CGER/NIES, 788pp.
- Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C. F. S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara and T. Nakajima, 2015: Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 235-259, doi: 10.5194/gmd-8-235-2015.
- Goto D., T. Nakajima, T. Dai, H. Yashiro, Y. Sato, K. Suzuki, J. Uchida, S. Misawa, R. Yonemoto, T. T. N. Trieu, H. Tomita and M. Satoh, 2018: Multi-scale simulations of atmospheric pollutants using a Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia* (K. Vadrevu, T. Ohara and C. Justice, eds.). Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, doi:10.1007/978-3-319-67474-2\_14.
- Goto, D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, E. Oikawa, R. Kudo, T. M. Nagao and T. Nakajima, 2020: Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14-km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3731-3768, doi:10.5194/gmd-13-3731-2020.
- Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock and B. Eder, 2005: Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmos. Environ.*, **39**, 6957-6975.
- Gurney, K. R., D. Mendoza, Y. Zhou, M. Fischer, S. de la Rue du Can, S. Geethakumar and C. Miller, 2009: The Vulcan Project: High resolution fossil fuel combustion CO<sub>2</sub> emissions fluxes for the United States. *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 5535-5541, doi:10.1021/es900806c.
- Gurney, K. R., R. Patarasuk, J. Liang, Y. Song, D. O'Keeffe, P. Rao, J. R. Whetstone, R. M. Duren, A. Eldering and C. Miller, 2019: The Hestia fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions data product for the Los Angeles megacity (Hestia-LA). *Earth Syst. Sci. Data*, **11**, 1309-1335, doi:10.5194/essd-11-1309-2019.
- Gurney, K. R., J. Liang, G. Roest, Y. Song, K. Mueller and T. Lauvaux, 2021: Under-reporting of greenhouse gas emissions in U. S. cities. *Nature Commun.*, **12**, 553, doi:10.1038/s41467-020-20871-0.
- Heimbürger, A. M., R. M. Harvey, P. B. Shepson, B. H. Stirm, C. Gore, J. C. Turnbull, M. O. L. Cambaliza, O. E. Salmon, A.-E. Kerlo, T. N. Lavoie, K. J. Davis, T. Lauvaux, A. Karion, C. Sweeney, W. A. Brewer, R. M. Hardy and K. R. Gurney, 2017: Assessing the optimized precision of the aircraft mass balance method for measurement of urban greenhouse gas emission rates through averaging. *Elem. Sci. Anth.*, **5**, 26, doi:10.1525/elementa.134.
- Hoornweg, D., L. Sugar and C. L. T. Gómez, 2011: Cities and greenhouse gas emissions: moving forward. *Environ. Urban.*, **23**, 207-227.
- Ibrahim, N., L. Sugar, D. Hoornweg and C. Kennedy, 2012: Greenhouse gas emissions from cities: comparison of international inventory frameworks. *Local Environ.*, **17**, 223-241, doi:10.1080/13549839.2012.660909.
- IPCC, 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Green-

- house Gas Inventories (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe, eds.). IGES.
- IPCC, 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (D. Gómez and W. Irving, eds.). IGES.
- Janardanan, R., S. Maksyutov, T. Oda, M. Saito, J. W. Kaiser, A. Ganshin, A. Stohl, T. Matsunaga, Y. Yoshida and T. Yokota, 2016: Comparing GOSAT observations of localized CO<sub>2</sub> enhancements by large emitters with inventory-based estimates. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 3486–3493, doi:10.1002/2016GL067843.
- Janssens-Maenhout, G., F. Dentener, J. Van Aardenne, S. Monni, V. Pagliari, L. Orlandini, Z. Klimont, J. Kurokawa, H. Akimoto, T. Ohara, R. Wankmueller, B. Battye, D. Grano, A. Zuber and T. Keating, 2012: EDGAR-HTAP: a Harmonized Gridded Air Pollution Emission Dataset Based on National Inventories. European Commission Publications Office, doi:10.2788/14069.
- Jonas M, G. Marland, W. Winiwarter, T. White, Z. Nahorski, R. Bun and S. Nilsson, 2010: Benefits of dealing with uncertainty in greenhouse gas inventories: introduction. *Clim. Change*, **103**, 3–18, doi:10.1007/s10584-010-9922-6.
- 環境省, 2007: 排出インベントリとは何か?  
<https://www.acap.asia/wp-content/uploads/emissionjp.pdf> (2021.8.26閲覧)
- Keller, C., M. J. Evans, K. E. Knowland, C. A. Hasenkopf, S. Modekurty, R. A. Lucchesi, T. Oda, B. B. Franca, F. C. Mandarino, M. V. D. Suárez, R. G. Ryan, L. H. Fakes and S. Pawson, 2021: Global impact of COVID-19 restrictions on the surface concentrations of nitrogen dioxide and ozone. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 3555–3592, doi:10.5194/acp-21-3555-2021.
- Kort, E. A., C. Frankenberg, C. E. Miller and T. Oda, 2012: Space-based observations of megacity carbon dioxide. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L17806, doi:10.1029/2012GL052738.
- Kuhlmann, G., G. Broquet, J. Marshall, V. Clément, A. Löscher, Y. Meijer and D. Brunner, 2019: Detectability of CO<sub>2</sub> emission plumes of cities and power plants with the Copernicus Anthropogenic CO<sub>2</sub> Monitoring (CO2M) mission. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 6695–6719, doi:10.5194/amt-12-6695-2019.
- Lauvaux, T., N. L. Miles, A. Deng, S. J. Richardson, M. O. Cambaliza, K. J. Davis, B. Gaudet, K. R. Gurney, J. Huang, D. O’Keefe, Y. Song, A. Karion, T. Oda, R. Patarasuk, I. Razlivanov, D. Sarmiento, P. Shepson, C. Sweeney, J. Turnbull and K. Wu, 2016: High-resolution atmospheric inversion of urban CO<sub>2</sub> emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX). *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 5213–5236, doi:10.1002/2015JD024473.
- Lauvaux, T., K. R. Gurney, N. L. Miles, K. J. Davis, S. J. Richardson, A. Deng, B. J. Nathan, T. Oda, J. A. Wang, L. Hutrya and J. Turnbull, 2020: Policy-relevant assessment of urban CO<sub>2</sub> Emissions. *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 10237–10245, doi:10.1021/acs.est.0c00343.
- Le Quéré, C., R. B. Jackson, M. W. Jones, A. J. P. Smith, S. Abernethy, R. M. Andrew, A. J. De-Goll, D. R. Willis, Y. Shan, J. G. Canadell, P. Friedlingstein, F. Creutzig and G. P. Peters, 2020: Temporary reduction in daily global CO<sub>2</sub> emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Change*, **10**, 647–653.
- Lombardi, M., E. Laiola, C. Tricase and R. Rana, 2017: Assessing the urban carbon footprint: An overview. *Environ. Impact Assess. Rev.*, **66**, 43–52, doi:10.1016/j.eiar.2017.06.005.
- Maksyutov, S., H. Takagi, V. K. Valsala, M. Saito, T. Oda, T. Saeki, D. A. Belikov, R. Saito, A. Ito, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, R. J. Andres and T. Yokota, 2013: Regional CO<sub>2</sub> flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO<sub>2</sub> observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9351–9373, doi:10.5194/acp-13-9351-2013.
- Maksyutov, S., T. Oda, M. Saito, R. Janardanan, D. Belikov, J. W. Kaiser, R. Zhuravlev, A. Ganshin, V. K. Valsala, A. Andrews, L. Chmura, E. Dlugokencky, L. Haszpra, R. L. Langenfelds, T. Machida, T. Nakazawa, M. Ramonet, C. Sweeney and D. Worthy, 2021: Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes based on the NIES-TM-FLEXPART coupled transport model and its adjoint. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 1245–1266, doi:10.5194/acp-21-1245-2021.
- Massart, S., A. Agustí-Panareda, I. Aben, A. Butz, F. Chevallier, C. Crevoisier, R. Engelen, C. Frankenberg and O. Hasekamp, 2014: Assimilation of atmospheric methane products into the MACC-II system: from SCIAMACHY to TANSO and IASI. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 6139–6158, doi:10.5194/acp-14-6139-2014.
- 松永恒雄, 横田達也, 2019: 温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) の科学的成果等について. *日本リモートセンシング学会誌*, **39**, 2–8.
- Mays, K. L., P. B. Shepson, B. H. Stirn, A. Karion, C. Sweeney and K. R. Gurney, 2009: Aircraft-based measurements of the carbon footprint of Indianapolis. *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 7816–7823.
- McKain, K., S. C. Wofsy, T. Nehrkorn, J. Eluszkiewicz, J.

- R. Ehleringer and B. B. Stephens, 2012: Assessment of ground-based atmospheric observations for verification of greenhouse gas emissions from an urban region. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **109**, 8423–8428, doi:10.1073/pnas.1116645109.
- Miller, J. B., S. J. Lehman, K. R. Verhulst, C. E. Miller, R. M. Duren, V. Yadav, S. Newmand and C. D. Sloop, 2020: Large and seasonally varying biospheric CO<sub>2</sub> fluxes in the Los Angeles megacity revealed by atmospheric radiocarbon. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **117**, 26681–26687, doi:10.1073/pnas.2005253117.
- Miyazaki, K., T. Sekiya, D. Fu, K. W. Bowman, S. S. Kulawik, K. Sudo, T. Walker, Y. Kanaya, M. Takigawa, K. Ogochi, H. Eskes, K. F. Boersma, A. M. Thompson, B. Gaubert, J. Barre and L. K. Emmons, 2019: Balance of emission and dynamical controls on ozone during the Korea–United States Air Quality campaign from multi-constituent satellite data assimilation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 387–413, doi:10.1029/2018JD028912.
- Miyazaki, K., Bowman, K., Sekiya, T., Jiang, Z., Chen, X., Eskes, H., M. Ru, Y. Zhang and D. Shindell, 2020: Air quality response in China linked to the 2019 novel coronavirus (COVID-19) lockdown. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089252, doi:10.1029/2020GL089252.
- Nakajima, T., S. Misawa, Y. Morino, H. Tsuruta, D. Goto, J. Uchida, T. Takemura, T. Ohara, Y. Oura, M. Ebihara and M. Satoh, 2017: Model depiction of the atmospheric flows of radioactive cesium emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **4**, 2, doi:10.1186/s40645-017-0117-x.
- Nassar, R., T. G. Hill, C. A. McLinden, D. Wunch, D. B. A. Jones and D. Crisp, 2017: Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from individual power plants from space. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 10045–10053, doi:10.1002/2017GL074702.
- Nathan, B. J., T. Lauvaux, J. C. Turnbull, S. J. Richardson, N. L. Miles and K. R. Gurney, 2018: Source sector attribution of CO<sub>2</sub> emissions using an urban CO/CO<sub>2</sub> Bayesian inversion system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 13611–13621, doi:10.1029/2018JD029231.
- Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh and R. Imasu, 2011: A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport. *J. Meteor. Soc. Japan*, **89**, 255–268, doi:10.2151/jmsj.2011-306.
- Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan and N. Saigusa, 2017: A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0)–Part I: Offline forward and adjoint transport models. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 1157–1174, doi:10.5194/gmd-10-1157-2017.
- Oda, T., S. Maksyutov and R. J. Andres, 2018: The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO<sub>2</sub>, version 2016 (ODIAC2016): a global monthly fossil fuel CO<sub>2</sub> gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. *Earth Syst. Sci. Data*, **10**, 87–107, doi:10.5194/essd-10-87-2018.
- Oda, T., R. Bun, V. Kinakh, P. Topylko, M. Halushchak, G. Marland, T. Lauvaux, M. Jonas, S. Maksyutov, Z. Nahorski, M. Lesiv, O. Danylo and J. Horabik-Pyzel, 2019: Errors and uncertainties in a gridded carbon dioxide emissions inventory. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, **24**, 1007–1050, doi:10.1007/s11027-019-09877-2.
- Pinty, B., G. Janssens-Maenhout, M. Dowell, H. Zunker, T. Brunhes, P. Ciaia, D. Dee, H. Denier van der Gon, H. Dolman, M. Drinkwater, R. Engelen, M. Heimann, K. Holmlund, R. Husband, A. Kentarchos, Y. Meijer, P. Palmer and M. Scholze, 2017: An Operational Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions Monitoring & Verification System – Baseline Requirements, Model Components and Functional Architecture. European Commission Joint Research Centre, doi:10.2760/08644.
- Ramaswami, A. and A. Chavez, 2013: What metrics best reflect the energy and carbon intensity of cities? Insights from theory and modeling of 20 US cities. *Environ. Res. Lett.*, **8**, 035011, doi:10.1088/1748-9326/8/3/035011.
- Reuter, M., M. Buchwitz, A. Hilboll, A. Richter, O. Schneising, M. Hilker, J. Heymann, H. Bovensmann and J. P. Burrows, 2014: Decreasing emissions of NO<sub>x</sub> relative to CO<sub>2</sub> in East Asia inferred from satellite observations. *Nat. Geosci.*, **7**, 792–795, doi:10.1038/ngeo2257.
- Reuter, M., M. Buchwitz, O. Schneising, S. Krautwurst, C. W. O’Dell, A. Richter, H. Bovensmann and J. P. Burrows, 2019: Towards monitoring localized CO<sub>2</sub> emissions from space: colocated regional CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 9371–9383, doi:10.5194/acp-19-9371-2019.
- Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita and T. Nakajima, 2016: Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Sci. Rep.*, **6**, 26561, doi:10.1038/srep26561.
- Sato, Y., M. Takigawa, T. T. Sekiyama, M. Kajino, H. Terada, H. Nagai, H. Kondo, J. Uchida, D. Goto, D. Quélo, A. Mathieu, A. Quérel, S. Fang, Y. Morino, P. von

- Schoenberg, H. Grahn, N. Brännström, S. Hirao, H. Tsuruta, H. Yamazawa and T. Nakajima, 2018: Model intercomparison of <sup>137</sup>Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: Simulations based on identical input data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 11748–11765, doi:10.1029/2018JD029144.
- Sato Y., T. T. Sekiyama, S. Fang, M. Kajino, A. Quérel, D. Quélo, H. Kondo, H. Terada, M. Kadowaki, M. Takigawa, Y. Morino, J. Uchida, D. Goto and H. Yamazawa, 2020: A model intercomparison of atmospheric <sup>137</sup>Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1-km resolution. *Atmos. Environ.*, **X7**, 100086, doi:10.1016/j.aeoa.2020.100086.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comp. Phys.*, **227**, 3486–3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, Y. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Schwandner, F. M., M. R. Gunson, C. E. Miller, S. A. Carn, A. Eldering, T. Krings, K. R. Verhulst, D. S. Schimel, H. M. Nguyen, D. Crisp, C. W. O'Dell, G. B. Osterman, L. T. Iraci and J. R. Podolske, 2017: Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, **358**, eaam5782, doi:10.1126/science.aam5782.
- Seto, K. C., S. Dhakal, A. Bigio, H. Blanco, G. D'elgado, D. Dewar, L. Huang, A. Inaba, A. Kansal, S. Lwasa, J. McMahon, D. Müller, J. Murakami, H. Nagendra and A. Ramaswami, 2014: Human settlements, infrastructure, and spatial planning. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J. C. Minx, eds.), Cambridge University Press, Cambridge/New York.
- Sierk, B., J.-L. Bézy, A. Löscher and Y. Meijer, 2019: The European CO<sub>2</sub> Monitoring Mission: observing anthropogenic greenhouse gas emissions from space. *Proc. Int. Conf. Space Opt.*, doi:10.1117/12.2535941.
- Silva, S. J., A. F. Arellano and H. Worden, 2013: Toward anthropogenic combustion emission constraints from space-based analysis of urban CO<sub>2</sub>/CO sensitivity. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4971–4976, doi:10.1002/grl.50954.
- Someya, Y., Y. Yoshida and S. Maksyutov, 2020: Large increase in atmospheric methane over west Siberian wetlands during summer detected from space. *SOLA*, **16**, 157–161, doi:10.2151/sola.2020-027.
- Sovacool, B. K. and M. A. Brown, 2010: Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, **38**, 4856–4869.
- Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima and G. L. Stephens, 2008: Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- Takagi, H., T. Saeki, T. Oda, M. Saito, V. Valsala, D. Belikov, R. Saito, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, R. J. Andres, T. Yokota and S. Maksyutov, 2011: On the benefit of GOSAT observations to the estimation of regional CO<sub>2</sub> fluxes. *SOLA*, **7**, 161–164, doi:10.2151/sola.2011-041.
- Tomita, H., 2008: A stretched grid on a sphere by new grid transformation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86A**, 107–119.
- Tomita, H. and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, **34**, 357–400.
- Trieu, T. T. N., D. Goto, H. Yashiro, R. Murata, K. Sudo, H. Tomita, M. Satoh and T. Nakajima, 2017: Evaluation of summertime surface ozone in Kanto area of Japan using a semi-regional model and observation. *Atmos. Environ.*, **153**, 163–181, doi:10.1016/j.atmosenv.2017.03.030.
- 露木 義, 2008: データ同化入門. 気象研究ノート, (217), 1–32.
- Turnbull, J. C., P. P. Tans, S. J. Lehman, D. Baker, T. J. Conway, Y. S. Chung, J. Gregg, J. B. Miller, J. R. Southon and L.-X. Zhou, 2011: Atmospheric observations of carbon monoxide and fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions from East Asia. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**, D24306, doi:10.1029/2011JD016691.
- Turnbull, J. C., A. Karion, K. J. Davis, T. Lauvaux, N. L. Miles, S. J. Richardson, C. Sweeney, K. McKain, S. J. Lehman, K. R. Gurney, R. Patarasuk, J. Liang, P. B. Shepson, A. Heimbürger, R. Harvey and J. Whetstone, 2019: Synthesis of urban CO<sub>2</sub> emission estimates from multiple methods from the Indianapolis Flux Project

- (INFLUX). *Environ. Sci. Technol.*, **53**, 287-295, doi:10.1021/acs.est.8b05552.
- Uchida, J., M. Mori, M. Hara, M. Satoh, D. Goto, T. Kataoka, K. Suzuki and T. Nakajima, 2017: Impact of lateral boundary errors on the simulation of clouds with a nonhydrostatic regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 5059-5082.
- UNFCCC, 2017: The cities of the world proclaim the Montréal Declaration.  
<https://newsroom.unfccc.int/news/the-cities-of-the-world-proclaim-the-montreal-declaration> (2021.8.26 閲覧)
- Veefkind, J. P., I. Aben, K. McMullan, H. Förster, J. De Vries, G. Otter, J. Claas, H. J. Eskes, J. F. De Haan, Q. Kleipool, M. Van Weele, O. Hasekamp, R. Hoogeveen, J. Landgraf, R. Snel, P. Tol, P. Ingmann, R. Voors, B. Kruizinga, R. Vink, H. Visser and P. F. Levelt, 2012: TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens. Environ.*, **120**, 70-83.
- Weir, B., L. E. Ott, G. J. Collatz, S. R. Kawa, B. Poulter, A. Chatterjee, T. Oda and S. Pawson, 2021: Calibrating satellite-derived carbon fluxes for retrospective and near real-time assimilation systems. *Atmos. Chem. Phys.*, doi:10.5194/acp-21-9609-2021.
- Wu, D., J. C. Lin, B. Fasoli, T. Oda, X. Ye, T. Lauvaux, E. G. Yang and E. A. Kort, 2018: A Lagrangian approach towards extracting signals of urban CO<sub>2</sub> emissions from satellite observations of atmospheric column CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>): X-Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport model ("X-STILT v1"). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 4843-4871, doi:10.5194/gmd-11-4843-2018.
- Wu, D., J. C. Lin, T. Oda and E. A. Kort, 2020: Space-based quantification of per capita CO<sub>2</sub> emissions from cities. *Environ. Res. Lett.*, **15**, 035004, doi:10.1088/1748-9326/ab68eb.
- Yang, E. G., E. A. Kort, D. Wu, J. C. Lin, T. Oda, X. Ye and T. Lauvaux, 2020: Using space-based observations and Lagrangian modeling to evaluate urban carbon dioxide emissions in the Middle East. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031922, doi:10.1029/2019JD031922.
- Ye, X., T. Lauvaux, E. A. Kort, T. Oda, S. Feng, J. C. Lin, E. G. Yang and D. Wu, 2020: Constraining fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions from urban area using OCO-2 observations of total column CO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD030528, doi:10.1029/2019JD030528.
- Yokota, T., Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe and D. Maksyutov, 2009: Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: first preliminary results. *SOLA*, **5**, 160-163, doi:10.2151/sola.2009-041.
- Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami and T. Maki, 2018: Assimilation and forecasting experiment for heavy Siberian wildfire smoke in May 2016 with Himawari-8 aerosol optical thickness. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 133-149, doi:10.2151/jmsj.2018-035.

---

## Prospects for satellite observation design and the development of atmospheric transport model to contribute to the estimation of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions for the Global Stocktake

Yousuke YAMASHITA<sup>\*1</sup>, Hiroshi TANIMOTO<sup>\*2</sup> and Tomohiro ODA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> (Corresponding author) *Global Atmospheric Chemistry Section, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan*

<sup>\*2</sup> *Global Atmospheric Chemistry Section, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies*

<sup>\*3</sup> *Universities Space Research Association (USRA); Department of Atmospheric and Oceanic science, University of Maryland; Graduate School of Engineering, Osaka University*

(Received 25 November 2020; Accepted 26 August 2021)

---