

衛星による温室効果ガス観測の現状と今後の展望

Current status and future perspective of satellite observation of greenhouse gases

松永 恒雄*・谷本 浩志・大山 博史

Tsuneo MATSUNAGA*, Hiroshi TANIMOTO and Hirofumi OHYAMA

国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域

Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

摘 要

気候変動の影響を抑えるためには大気中の温室効果ガス濃度を早期に安定化させる必要があるが、そのためにも必要な温室効果ガス濃度の地上観測点の数は十分ではなく、地理的にも偏在している。地球観測衛星による温室効果ガスの全球観測は、このような問題の影響を軽減する上で非常に重要である。我が国は温室効果ガス観測の専用衛星である GOSAT シリーズの運用を 2009 年に開始し、観測と無償データの公開を行ってきたが、それも 2022 年 4 月でまる 13 年となる。また、GOSAT シリーズのデータを使った研究が世界各国で推進されている。さらに、同種の衛星が米国や欧州においても開発・運用されるようになってきている。一方、GOSAT シリーズによる観測を今後も継続するため、3 号機の開発が 2023 年度の打上げを目指して進められている。3 号機では新たに開発する回折格子を利用した分光計により、温室効果ガス濃度の広域面分布の観測に取り組む。また、パリ協定に基づいて各国が国連に提出する温室効果ガス排出インベントリやグローバルストックテイクにおける利活用についても期待されている。さらに、高空間分解能観測が可能な衛星を用いた施設レベルの温室効果ガス排出量の推定についても研究開発が活発に行われている。特に、民間企業を中心に小型温室効果ガス観測衛星コンステレーションを構築する動きが近年加速している。

キーワード：インベントリ，グローバルストックテイク，GOSAT シリーズ，
二酸化炭素，メタン

Key words : inventory, global stocktake, GOSAT series, carbon dioxide, methane

1. はじめに

2021 年 8 月に公開された IPCC(気候変動に関する政府間パネル, Intergovernmental Panel on Climate Change)の AR6(第 6 次報告書)第 1 作業部会報告書(IPCC, 2021)では「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」[「広範囲にわたる急速な変化が、大気、海洋、雪氷圏及び生物圏に起きている。」「自然科学的見地から、人為的な地球温暖化を特定のレベルに制限するには、CO₂(二酸化炭素)の累積排出量を制限し、少なくとも CO₂ 正味ゼロ排出を達成し、他の GHG(温室効果ガス)も大幅に削減する必要がある。』とされており、中でも大気中の GHG 濃度の上昇を抑えることが喫緊の課題となっている。また 2015 年にフランス・パリで開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(UNFCCC COP21)で採択された「パリ協定」では、各国の GHG 排出量削減活動の進捗を確認する「グローバル・ストックテイク」が規定さ

れた。これに関連し、GHG 濃度の実測データから排出量を推定する手法について、現在世界各国で研究が進められている。一方、既存の GHG 濃度の地上観測点の数は不十分で地理的にも偏在しており、GHG の濃度や吸収排出量の分布を十分に把握できない可能性がある。そのため地球観測衛星による GHG の全球観測の重要性が高まっている。

本稿では過去、現在、及び計画中の地球観測衛星による GHG 観測について、今までの経緯や現状、さらには今後の展望について解説する。第 2 章では過去及び現在において主に全球スケールでの GHG 観測(CO₂とメタン(CH₄)のカラム平均濃度(XCO₂とXCH₄))に用いられている地球観測衛星について、特に我が国の GOSAT シリーズを中心に述べる。第 3 章では我が国が開発中の GOSAT シリーズ 3 号機とそのグローバルストックテイクへの貢献などについて説明する。さらに第 4 章では GHG の点排出源観測に特化した高分解能衛星の最新動向について紹介する。なお、関係する衛星やセンサの諸元を表 1、

受付：2021 年 11 月 12 日，受理：2021 年 12 月 27 日

* 〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2, E-mail : matsunag@nies.go.jp

表 1 CO₂ 及び CH₄ のカラム平均濃度の地球観測に利用可能な地球観測衛星 (表 2 に含まれるものを除く).

Satellite/ Platform	Instrument name	Launch	Spectrometer type	Spectral range [nm]	Spectral resolution [nm]	Spatial resolution [km]	Swath width [km]	Comments
ENVISAT	SCIAMACHY	Mar 2002	Grating	604–805, 785–1050, 1000–1750, 1940–2040, 2265–2380	0.48, 0.54, 1.48, 0.22, 0.26	30 x 60	960	Operation ended in Apr 2012
GOSAT	TANSO-FTS	Jan 2009–	FTS	758–775, 1563–1724, 1923–2083	0.021, 0.070, 0.105	10.5 in diameter	Pointing	
OCO-2		Jul 2014	Grating	757.6–772.6, 1590.6–1621.8, 2043.1–2083.4	0.04, 0.08, 0.10	1.25 × 2.25	10	
TanSat		Dec 2016	Grating	758–778, 1594–1624, 2041–2081	0.0425, 0.141, 0.193	2 × 2	20	GHG Observation terminated in Oct 2018.
Sentinel-5P	TROPOMI	Oct 2017–	Grating	710–775, 2305–2385	0.5, 0.25	7 × 7	2600	
GOSAT-2	TANSO-FTS-2	Oct 2018–	FTS	754–772, 1563–1695, 1923–2381	0.022, 0.069, 0.113	9.7 in diameter	Pointing	
ISS	OCO-3	May 2019–	Grating	758–773, 1591–1623, 2042–2083	0.04, 0.08, 0.10	1.6 × 2.2	13	
MicroCarb		Early 2023	Grating	758–768, 1261–1278, 1596–1618, 2024–2051	0.031, 0.051, 0.064, 0.082	4.5 × 9	25	
GOSAT-GW	TANSO-3	FY2023–	Grating	420–490, 747–783, 1590–1654	<0.5, <0.05, <0.2	1-3 / <10	90 / 911	
CO2M		2025–	Prism- Grating- Prism	405–490, 747–773, 1590–1675, 1990–2095	0.6, 0.12, 0.3, 0.35	4 km ²	250	Three satellites with same instruments

表 2 CO₂ 及び CH₄ の点排出源観測に利用可能な高空間分解能衛星.

Satellite/Platform	Sensor name	Launch	Spectrometer type	Spectral range [nm]	Spectral resolution [nm] *Sampling interval	Spatial resolution [m]	Swath width [km] **Domain size
Earth Observing-1	Hyperion	Nov 2000	Grating	450–2400	10	30	7.7
Landsat-8	OLI	Feb 2013	Bandpass filter	1570–1650 (Band 6) 2110–2290 (Band 7)	80 180	30	185
Sentinel-2A	MSI	Jun 2015	Bandpass filter	1560–1660 (Band 11) 2090–2290 (Band 12)	100 200	20	290
GHGSat-D	Claire	Jun 2016	Fabry-Perot	1630–1675	~0.1	50	12 × 12 **
Sentinel-2B	MSI	Mar 2017	Bandpass filter	1560–1660 (Band 11) 2090–2290 (Band 12)	100 200	20	290
GaoFen-5	AHSI	May 2018	Grating	390–2510	10	30	60
PRISMA		Mar 2019	Prism	400–1010 920–2500	9–13 9–14.5	31	31
ZY1-02D	AHSI	Sep 2019	Grating	400–2500	20	30	60
ISS	HISUI	Dec 2019	Grating	400–2500	10–12.5	20(CT) × 30(AT)	20
GHGSat-C1/C2		Sep 2020 / Jan 2021	Fabry-Perot	1630–1675	~0.1	25	15 × 10 **
Landsat-9	OLI-2	Sep 2021	Bandpass filter	1570–1650 (Band 6) 2110–2290 (Band 7)	80 180	30	185
ISS	EMIT	2022	Grating	410–2450	<13	30–80	~100
MethaneSAT		2022	Grating	1249–1305 1605–1683	0.3 0.3	~100(CT) × 400(AT)	~210 x 200 **
Carbon Mapper		2023 2025	Grating	400–2500	5 *	30	18

表2にまとめた。

2. 過去及び現在の主要な GHG 観測衛星

2.1 SCIAMACHY

GOSAT シリーズに先立ち ESA(欧州宇宙機関, European Space Agency)の地球観測衛星 Envisat に搭載された大気組成観測機器である SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY)は短波長赤外域における地心方向の観測を行うことにより, CO_2 と CH_4 のカラム平均濃度の全球観測を世界で初めて行い (Schneising *et al.*, 2011), 様々な成果をあげた。さらに, 欧州では SCIAMACHY と GOSAT のデータを統合したデータセットの作成 (Heymann *et al.*, 2015) や, 2023 年打上げ予定の CO_2 観測衛星 MicroCarb の開発, 2025 年以降の運用開始を想定した GHG 観測衛星群計画 (CO2M) など推進中である。CO2M は欧州の Copernicus 計画の一環として開発が進められているもので, CO_2 , CH_4 , 二酸化窒素 (NO_2) のカラム平均濃度の広刈り幅/高分解能 (刈り幅は 250 km, 瞬時視野は 4 km^2) 観測を行う衛星 3 機から構成される予定である。

2.2 GOSAT シリーズ

GOSAT シリーズは, 気候変動に関する科学の発展と気候変動政策への貢献をミッション目的とした我が国の一連の GHG 観測衛星であり, 2009 年打上げの 1 号機 (温室効果ガス観測技術衛星, Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT) と 2018 年打上げの 2 号機 (GOSAT-2) により 13 年以上にわたり観測/無償データ提供を継続している。また 2023 年度打上げを目指して 3 号機 (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) の開発が進められている (図 1)。なお, GOSAT シリーズは環境省と国立環境研究所 (NIES), 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の共同プロジェクトである。



図 1 軌道上の (左上)GOSAT, (右上)GOSAT-2, (下)GOSAT-GW の想像図 (©JAXA).

GOSAT シリーズの衛星は 2 トン級の中型衛星であり, その軌道は高度 600~700 km, 回帰日数 3 日~6 日の太陽同期軌道である。また設計寿命は 5~7 年である。また GOSAT シリーズには GHG などの大気中濃度を推定するための高波長分解能分光計が搭載されている。GOSAT, GOSAT-2 については広い波長範囲において高い精度, 高い波長分解能のデータを得るためにフーリエ変換分光計 (FTS) を採用したが, その観測は離散的な点観測となった。一方 GOSAT-GW では GHG 濃度の面的な観測を優先し, 回折格子を用いた分光計を採用した。

NIES では XCO_2 や XCH_4 などの GOSAT FTS 短波長赤外域のレベル 2 処理の最初の結果を 2009 年に公表するとともに, アルゴリズム等の改良を継続している (Yoshida *et al.*, 2013)。2021 年 8 月時点の最新バージョンは V02.90/V02.91 であり, その精度 (バイアスとばらつき (1σ)) は地上設置高分解能フーリエ変換分光計データを用いた検証 (Morino *et al.*, 2011) により, XCO_2 : 0.35 ppm と 2.19 ppm, XCH_4 : 2.2 ppb と 13.4 ppb 程度であることが示されている (観測条件: 陸域のハイゲイン設定の場合 (国立環境研究所衛星観測センター-GOSAT プロジェクト, 2020))。また, GOSAT-2 のレベル 2 プロダクト (XCO_2 など) も 2020 年 11 月に一般公開が開始され, 現在もその精度改善に向けた取組が進められている。

GOSAT による CO_2 と CH_4 の月ごとの全球分布図の例を図 2 に示す。それぞれ季節変動を示す南北分布や局所的な排出源などの特徴が表れている。

GOSAT による毎月の観測データから地球の全大気の平均的な濃度も算出されており, CO_2 , CH_4 と

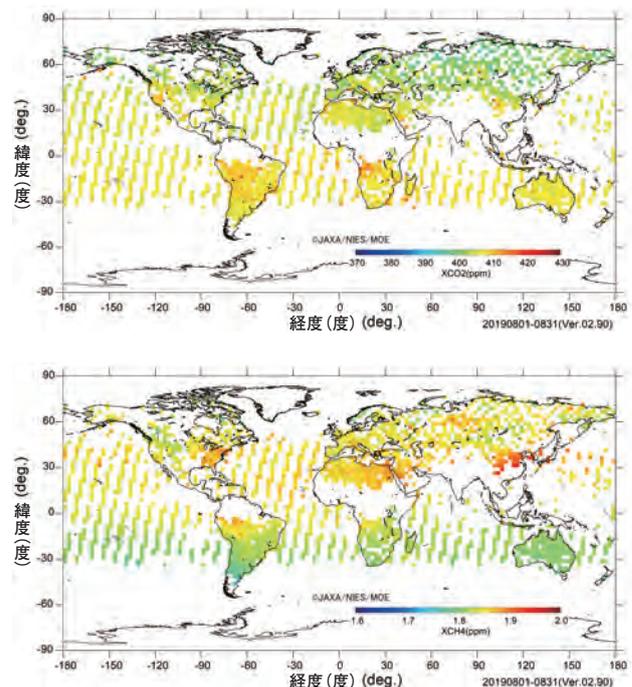


図 2 GOSAT による (上) XCO_2 と (下) XCH_4 の全球分布図 (2019 年 8 月)。

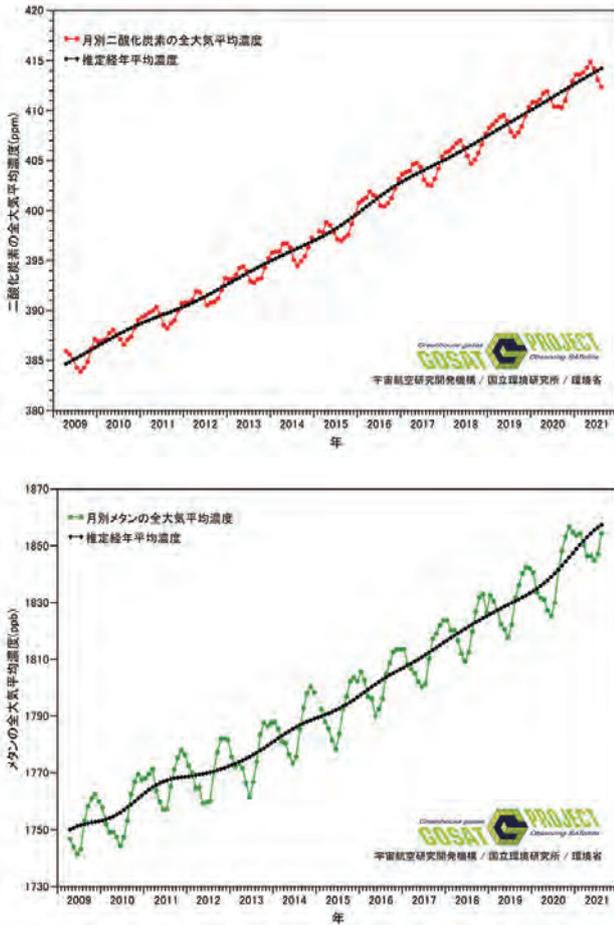


図3 GOSATによる(上)CO₂と(下)CH₄の全大気平均濃度(2009年4月～2021年8月)。

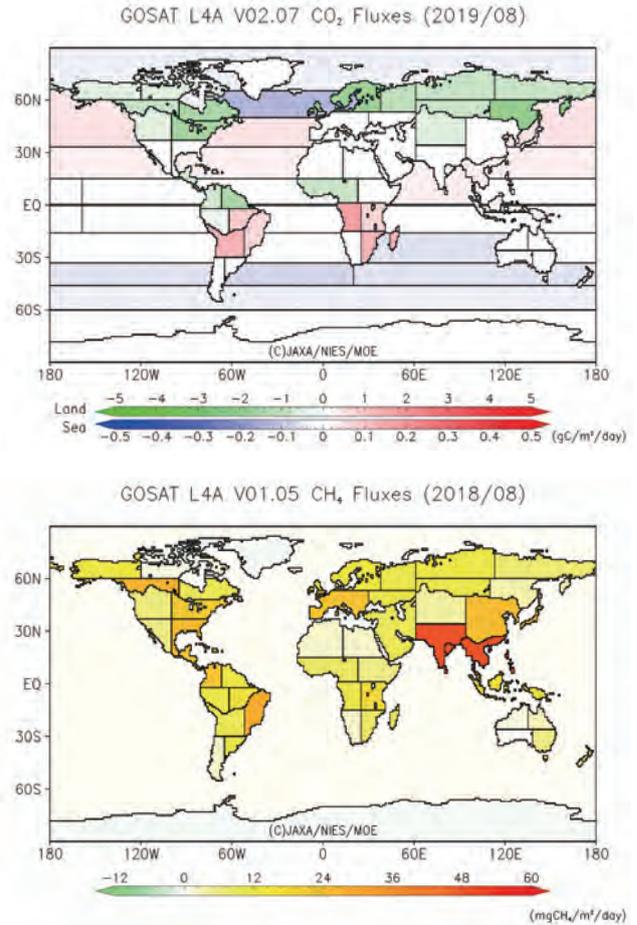


図4 GOSATによる(上)CO₂(2019年8月)と(下)CH₄(2019年8月)の領域ごと正味吸収排出量。

過去12年間にわたる濃度の上昇傾向が確認された(図3)。また、これらのデータはIPCC AR6においてもGHG濃度の長期トレンドを示すために使われている(IPCC, 2021)。

また、レベル2プロダクトに対しインバージョン処理を適用して作成されたレベル4Aプロダクト(領域ごとの正味吸収排出量)も公開されている(図4)(Maksyutov *et al.*, 2013)。8月は北半球高緯度の森林によるCO₂吸収が顕著であること、インドと東南アジアのCH₄排出量が多いことなどがわかる。

さらに、人為起源排出量の多い地域やその風下地域の上空でCO₂濃度が周囲に比べて高くなることを利用して、インベントリの精度を評価する研究も行われている(Janardanan *et al.*, 2016; Janardanan *et al.*, 2017)。

また、GOSAT, GOSAT-2の観測センサやデータ処理システム、アルゴリズム等については日本リモートセンシング学会(2008, 2019)も参照されたい。

2.3 OCO-2とOCO-3など

OCO(Orbiting Carbon Observatory)は米国航空宇宙局(NASA)のCO₂観測衛星プロジェクトで、2009年にその1号機の打上げに失敗した後、2014年に2号機(OCO-2)を打ち上げ、現在もその運用を続けて

いる。また2019年にはOCO-2の予備部品などを活用した3号機(OCO-3)を打上げ、国際宇宙ステーションに取り付けた。

OCOシリーズはCO₂観測に特化した回折格子を用いた分光計を搭載している。0.76, 1.6, 2.0 μm帯の3観測波長帯において、GOSATと同様の太陽光のスペクトルを下方視モード、サングリントモード、ターゲットモード(陸上の特定の領域を一定時間継続して指向するモード)の3種類の方式で測定している。またその約10 kmの観測幅の中に8つのフットプリント(それぞれ1.25 km×2.25 km)をもつ。GOSATより空間分解能が高く、その観測幅は狭いものの面的な観測が可能なおともあり、雲の影響を受けていない高品質のデータ数はGOSATより大幅に増加している(O'Dell *et al.*, 2018)。さらに、OCO-2では火力発電所(Nassar *et al.*, 2017)などの大規模点排出源の観測にも成功している。

また、高機能のポインティングシステムを有するOCO-3では80 km四方を2分間で観測するSnapshot Area Mapsを活用し、排出源周辺の詳細な濃度分布観測を進めている(Kiel *et al.*, 2021)。

なおNASAでは静止衛星による南北アメリカ大陸のGHG観測(GeoCarb)も計画している。本計画は

空間分解能数 km, 刈り幅数千 km の分光計により CO₂, CH₄, 一酸化炭素(CO)のカラム平均濃度の高頻度観測を目指すものである。

2.4 TROPOMI

TROPOMI(TROPOspheric Monitoring Instrument)は、2017年10月に打上げられたESAの衛星Sentinel-5 Precursorに搭載されている回折格子分光計であり(表1)、約2,600 kmの広い観測幅により1日で全球を面的に観測することができる。短波長赤外バンド(2.3 μm帯)のスペクトルを用いて、特徴の異なる2つのリトリーバルアルゴリズム(センサが観測する分光データから大気中の気体濃度を推定するアルゴリズム)によりそれぞれCH₄プロダクトが算出されている(Schneising *et al.*, 2019)。SRON(オランダ宇宙研究所)のアルゴリズムでは、近赤外バンド(0.76 μm帯)のO₂スペクトルを同時に使用することで、雲やエアロゾルに関する情報と鉛直12層のCH₄カラム量を算出する。L2プロダクトver.2の時点では、陸上のみをスペクトルに対してリトリーバルが行われている。Bremen大学のWFM-DOAS(Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy)アルゴリズムでは、エアロゾルや地表面による散乱のスペクトルへの影響を多項式で近似し、仮定したCH₄プロファイルスケーリングすることで陸上及び海上のカラム量を算出する。これらのプロダクトを用いて、2018年米国オハイオ州での天然ガス井戸噴出事故のような、大規模排出源からのCH₄排出量の推定が行われるようになってきた(Pandey *et al.*, 2019)。また、米国の天然ガスや石油採掘場がある5つの盆地内全体の排出量推定(Schneising *et al.*, 2020)に使用されたほか、その中の1つのPermian盆地に対しては、インバージョン解析により空間的に分解された(0.25°×0.3125°ごとの)排出量の推定が行われた(Zhang *et al.*, 2020)。

2.5 IPCC インベントリガイドラインと2019年改良

IPCCは各国が国連に提出するGHG排出インベントリを作成するためのガイドラインなどを公開している(<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html>)。最新のガイドラインは2006年に発行されたものであるが、それに対し最新の科学的知見などを反映させるために「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」が制定された(IPCC, 2019)。本文書の第1巻第6章「品質保証/品質管理および検証」では大気観測結果とインベントリの比較検証が取り上げられており、インバースモデルに入力する濃度データが不足している時に衛星データを利用することが推奨されている。また、現在利用可能な衛星データとしてGOSATについても言及されている。

また、本文書の制定に先駆け、インドは2018年12月に国連に提出した隔年更新報告書(MoEFCC, 2018)において、GOSATや航空機、地上観測点で測

定されたCH₄の濃度データから大気輸送モデルを使ってインドからのCH₄の月毎排出量を算出し、それがインベントリと誤差の範囲で一致することや、2010~2014年にかけてインドのCH₄の年間排出量がほぼ変化していないこと、また、これらは広く使われている全球インベントリであるEDGAR(Emissions Database for Global Atmospheric Research)と比べて30%程度少ないことを報告している。

3. GOSAT-GW とグローバルストックテイク

先述のように、2009年に打ち上げられたGOSAT以降、米国、中国、欧州においてCO₂やCH₄を観測する衛星が運用されている。我が国ではGOSATシリーズの3号機となるGOSAT-GW計画が進められており、温室効果ガス観測センサ3型(Total Anthropogenic and Natural emissions mapping Spectrometer-3: TANSO-3)が搭載され、CO₂, CH₄に加えNO₂が観測される予定である。GOSAT-GW衛星の軌道は、昇交点通過地方太陽時を13時30分とする昇交軌道(地球の昼間側で赤道を南から北に横切る軌道)で、その軌道高度は約666 kmである。打ち上げは2023年度が予定されており、設計寿命は7年以上となっている。なお、GOSAT-GW衛星には、TANSO-3センサに加えて、水循環変動の把握と予測研究のために用いられる高性能マイクロ波放射計3(Advanced Microwave Scanning Radiometer 3: AMSR3)センサも併せて搭載される予定であるが、ここではTANSO-3センサを用いたGHG観測ミッションの概要について述べる。

TANSO-3センサには、GOSAT及びGOSAT-2で採用されているフーリエ変換分光器とは異なり、回折格子型の分光器が採用されている。これは、GOSAT及びGOSAT-2で行ってきた、全大気GHGの月別平均濃度の監視やグローバルスケールでのGHGの吸収・排出解析の継続に加え、より詳細に、国や都市の規模における排出量の解析を行うべく、空間的により詳細化した観測データを取得するためである。GOSAT及びGOSAT-2では直径10 kmの点観測であったが、GOSAT-GWでは面的な観測になり、その面に含まれる点の数も細かく、かつ多くなる予定である。そのため、TANSO-3センサは、「広域モード」と「精密モード」の2つを有し、広域観測モードでは911 kmの観測幅を10 km分解能で面的に観測し、精密観測モードでは90 kmの観測幅を3 kmより高い分解能で詳細に観測する(図5)。

GOSAT及びGOSAT-2の離散的な観測方式は、全球で空間的・時間的にある程度平均された濃度を正確に観測する点では良いが、観測点の間に930 kmの間隔が空くので排出源を直接観測できない場合があること、観測点が約10 km径の大きさであるため、その観測点内に複数の排出源が存在する場合は多

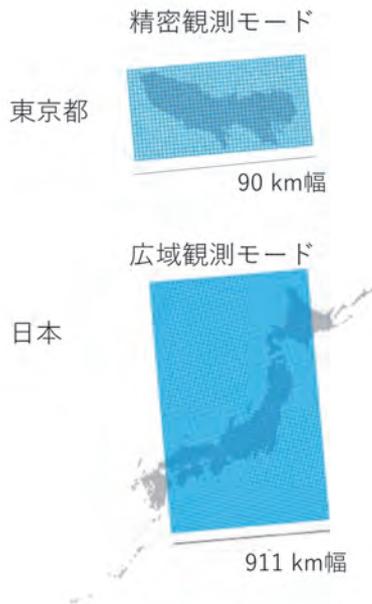


図5 GOSAT-GWによる観測のイメージ。

上：精密モードで東京都を観測する場合、下：広域モードで日本を観測する場合の観測幅とデータの空間分解能。

く、排出源別に排出量を解析することが難しい。排出源単位で排出量を特定するためには、観測データの空間的な詳細化が必要で、観測点の間隔を縮小する面的な観測に加えて、空間分解能を高めることが有効である。また、雲が観測視野のある割合以上を占めてしまうと、CO₂やCH₄のデータが得られなかったり、データの質が下がったりするため、空間分解能を高めた面的観測を行うことで、排出量推計の精度を高めるために有効観測データ数を増やすことができる。

こうした新しい目的と技術開発を踏まえ、GOSAT-GWのGHGミッションには、(1)全大気GHGの月別平均濃度の監視、(2)国別人為起源GHG排出量の検証、(3)大規模排出源等の検知、の3つが求められており、GOSAT及びGOSAT-2に引き続いてCO₂の全大気平均濃度を監視していくこと、パリ協定に基づいて世界各国が作成・公表するCO₂及びCH₄排出量の検証において正確性、透明性及び信頼性を向上させること、NO₂観測の援用により大都市や大規模固定排出源からの排出について未知の排出源の検知や推計の高精度化を行うこと、が科学的な目標となっている。以下に詳細を述べる。

(1)全大気GHGの月別平均濃度の監視：衛星の運用は通常、数年から10年程度であり、長期間にわたってCO₂やCH₄の全大気濃度を高い精度で把握するには、複数の衛星から得られるデータを組み合わせることが必要になってくる。GOSATでは2009年から、GOSAT-2では2018年から今日までCO₂とCH₄の全球大気平均濃度を監視し続けており、GOSAT-GWでもこれらに続いて安定的かつ恒常的なGHGの全球大気濃度監視を

行う。

(2)国別人為起源GHG排出量の検証：2015年に採択されたパリ協定では、GHGの削減目標の達成度について、2023年から5年ごとに評価する「グローバルストックテイク」と呼ばれる仕組みが導入された(津久井・梅宮, 2021)。世界的な脱炭素化に向けて、各国が作成・公表するGHG排出量の正確性、透明性及び信頼性を向上させるためにも、GOSAT-GWによる検証を実現することが期待されている。衛星観測データ数の増加は排出量の推計精度の向上に寄与するが、GOSAT-GWでは911 km幅の広域観測と90 km幅の精密観測モードの最適な運用により、月間で得られるデータ点数がGOSAT及びGOSAT-2の100~1,000倍程度になると試算されている。これにより、国別人為起源GHG排出量の推計精度を向上させること、中でも各大気観測からの検証の正確性を向上させることで、国の排出インベントリの透明性を向上させることが期待されている。

(3)大規模排出源等のモニタリング：GHGの排出量のうち、エネルギー起源のCO₂排出が占める割合は非常に大きく、例えば日本の場合、2019年の総排出量約12億トンのうち85%を占める。そのエネルギー起源のうち発電による排出は約40%を占める。また、世界中にも、年に6.5 Mt CO₂以上の排出量をもつ中規模~大規模の発電所は世界の発電による総排出量の約半分を占めている、と言われている。そこで、国別排出量を構成する要素である火力発電所等について、一つ一つの排出源からのCO₂排出量を検証する重要性が高まっている。しかしながら、大気中のCO₂全体量と比較して人為排出による変化量は小さく、日中は植生による吸収の変動が大きいため、人為排出された増加分を正確に捉えることは、測定精度と空間分解能が高くない人工衛星の観測では極めて難しいことが課題であった。そこで、GOSAT-GWでは、大気中寿命が数時間程度と短いNO₂の観測を援用したCO₂排出源の解析に関する研究開発を行っている(Fujinawa *et al.*, 2021)。NO₂は、CO₂と同じ化石燃料燃焼から大気中に放出されるものの、寿命が短いため、バックグラウンド濃度が低く、排出後の濃度増加分のシグナルが見えやすいという特徴がある。こうした特徴により、NO₂の観測データを用いることで、個別発生源から出る排煙の形状(ブルーム)の把握が容易になり、排出量の推計精度の向上に寄与できる。また、小規模排出源の同定も可能になる可能性があり、例えば、排出インベントリに排出源が把握されていない場合であっても、衛星からその場所を同定し、排出量を推計することができる可能性

があると目されている(Reuter *et al.*, 2019)。

世界的な脱炭素社会の実現に向けて、パリ協定に基づき、GHGを早期に削減してゆくことは世界的な約束事となり、様々な排出源から大気中に放出されるGHGの排出量を正確に把握する重要性はますます増している。2021年4月、我が国も2050年のカーボンニュートラル、2030年のGHG排出量46%削減(2013年比)の目標を掲げた。こうした状況で、宇宙からの衛星観測データを用いた導出には世界的に大きな期待が寄せられている。特に、各国が自ら設定する排出削減目標(Nationally Determined Contributions, NDC)を適切かつ野心的に目標設定する上で必要となる「現状の排出量の正確な把握」に重要な貢献となる。

現在でも、気候変動に関する国際連合枠組条約並びに関連する締約国会議の決定に基づき、いわゆる先進国は、GHGの排出・吸収量を算定し公表している。こうした算定値を「ボトムアップ」推計というが、このボトムアップ推計の排出インベントリの課題は2つある。1つは「値の正確さ」で、GHGの種類による不確実性や、それぞれの国のインベントリ技術による不確実性がある。もう1つは「タイムラグ」で、「ボトムアップ」推計インベントリの作成には公式統計値が使われるため年単位の時間がかかる。例えば、我が国では2021年4月に2019年度版の算定値が公表されている(環境省・国立環境研究所, 2021)。こうしたボトムアップ推計と相補的な役割を果たしうるのが、衛星データに代表される大気観測データを使った「トップダウン推計」であり、近年では大気観測データが準リアルタイムの速度で配信されるようになったこともあり、その迅速性に大きな期待が寄せられている。直近の排出インベントリを迅速に構築することは、将来シナリオの「基準年」としてのみならず、過去に作成したシナリオの妥当性「検証」にも重要であり、グローバルストックテイクでは削減対策効果を迅速に検証して次の対策に活かす上で非常に重要である(Janssens-Maenhout *et al.*, 2020)。

4. 高分解能 GHG 衛星

2章及び3章で述べた衛星は、全球のGHGカラム平均濃度をシングルショットで1%よりも良い精度で算出できるようにセンサの波長分解能や信号雑音比(SNR)が決められている。高い波長分解能で高いSNRを得るためには、フットプリント(空間分解能)を大きくする必要があるため、フットプリントは数キロから10 km程度のもが多く、GOSAT-GWの精密観測モードで選択できる最小のフットプリントでも1 km×1 kmである。衛星から点排出源を観測する場合、フットプリントが大きくなると観測される(バックグラウンドに対する)増大量は小さ

くなる。前述のように、大型の火力発電所や天然ガス井戸噴出事故のような大規模点排出源については、それぞれOCO-2やTROPOMIのデータを用いて排出量の推定が行われているが、規模の小さい発電所や炭鉱におけるベントのような点排出源については、排出量推定は難しい。そこで、フットプリントを1 km以下にする代わりに、衛星の姿勢を制御して特定の範囲を最大数分間連続して観測する方式(ターゲットモード)により点排出源を観測する衛星が開発されている(表2のGHGSat, MethaneSAT)。ファブリペロー干渉計を搭載したカナダのGHGSatは商業利用を目的とした民間の衛星であり、12 km×12 kmの範囲を50 mのフットプリントで観測している。これまでに、トルクメニスタンの油ガス田(圧縮ステーションやパイプライン)から排出されるCH₄の観測や、炭鉱でのベントに伴うCH₄の観測が行われている(Varon *et al.*, 2020)。ただし、前者のような極めて規模の大きな排出源の場合は1回の観測で排出量の推定が行えるが、後者も含めた通常の場合は、風向を考慮して複数回のイメージを平均する必要がある。2020年と2021年にそれぞれ打ち上げられたGHGSat-C1とC2では、迷光やゴーストを改善した干渉計が搭載されており、軌道上での校正機能も追加されていることから、観測精度の向上が見込まれている。さらに、2023年までに追加で8つの衛星が打ち上げられ、本格的な運用が開始される予定である。一方、米国の非営利環境保護団体(Environmental Defense Fund)が中心となって開発しているMethaneSATは、210 km×200 kmの範囲を100 m×400 mのフットプリントで1日に30ヶ所から40ヶ所程度観測する。MethaneSATでは、エアロゾルや雲による光路長変動の情報を得るために、これまでの下方視のGHG観測衛星で使用されてきた0.76 μm帯(A-band)の酸素(O₂)スペクトルの代わりに、1.27 μm帯のO₂スペクトルを測定する。1.27 μm帯はCO₂やCH₄の吸収バンドに近い(散乱特性に近い)という利点がある一方で、airglow(大気光)による影響が不確かであったが、SCIAMACHYのlimb-viewingスペクトルを用いた評価によりairglowの影響を補正できることが明らかとなり(Bertaux *et al.*, 2020)、MethaneSATや2023年打ち上げ予定のフランスのMicrocarbでは1.27 μm帯のO₂スペクトルが使用される。なお、MethaneSATにより算出された排出量データを含む全てのプロダクトは、サイエンスコミュニティーに無料で公開される予定である。

上述の衛星及びその搭載センサは、GHG等の大気微量成分を専門に観測することを目的としているが、ハイパースペクトルセンサと呼ばれる可視域から短波長赤外域(400~2,500 nm)の地表面散乱光を波長分解能10 nm程度、フットプリント30 m程度で測定するセンサもGHG点排出源の観測に利用

されるようになってきた(表1の Hyperiaon/Earth Observing-1, AHSI(Advanced HyperSpectral Imager)/GaoFen-5, PRISMA(PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa), AHSI/ZY1-02D, HISUI(Hyperspectral Imager SUIte)/ISS, EMIT(Earth Surface Mineral Dust Source Investigation)/ISS, Carbon Mapper)。これらのデータは、地表面での鉱物や植生(クロロフィル等の光合成色素)等による波長に依存した反射/吸収特性を利用して、鉱物調査や資源探査、バイオマス量推定等に利用することを目的としているが、CO₂とCH₄の吸収バンドがある短波長赤外域のスペクトルからそれらのカラム量を算出することも可能である。その方法は、GOSATシリーズのL2リトリバルアルゴリズムと同様に、観測スペクトルと放射伝達モデルで計算したスペクトルを比較して逆問題を解く方法と、既知のカラム量に対して計算された複数のスペクトルから観測スペクトルと最もよく一致するスペクトルを探す方法がある。衛星搭載ハイパースペクトルセンサによるGHG点排出源の最初の観測としては、カリフォルニア州 Aliso Canyon における天然ガス井戸のCH₄噴出事故を Earth Observing-1 搭載 Hyperion によって観測した例がある(Thompson *et al.*, 2016)。1990年代に開発された Hyperion では、上述のような極めて大規模な点排出源しか観測できなかったが、近年、より高感度なセンサが各国で開発されるようになってきた。Cusworth *et al.* (2019)のシミュレーション解析によると、そのようなハイパースペクトルセンサのデータは比較的規模の小さな点排出源の観測にも有効であることが示されている。実際の観測スペクトルを使った解析としては、イタリアの PRISMA のデータを用いた火力発電所からのCO₂排出量の推定(Cusworth *et al.*, 2021)や、PRISMAと中国の GaoFen-5及び ZY1-02Dに搭載された AHSIによる米国 Permian 盆地のCH₄ホットスポットにおける排出量推定(Irakulis-Loitxate *et al.*, 2021)が行われるようになってきた。また、米国の非営利団体 Carbon Mapper Inc. が JPL 等と協力して開発している Carbon Mapper は、ハイパースペクトルセンサの中でも、特にCO₂とCH₄の大規模排出源の観測を目的とした衛星である。通常の push-broom 方式に加えて、衛星の姿勢を変えることで along-track 方向に沿った特定の範囲(70 km 程度)を高い SNR で観測する strip 方式、海岸線付近の排出源を観測するための glint 方式の3つの観測モードを有する。2023年に最初の2つの衛星が打上げられ、2025年には複数機の衛星が追加される計画となっている。これにより、優先度の高い特定の領域であれば、日毎から週毎の頻度で観測できるようになる。MethaneSATと同様に、算出されたCO₂とCH₄の排出量データは無料で一般に公開される予定である。

一方、表2の Sentinel-2 や Landsat シリーズのよ

うに、バンドパスフィルタを用いることで各バンドに対して単一のシグナル(可視域から短波長赤外域で10程度)を得るマルチスペクトルセンサもCH₄点排出源の観測に使用されるようになってきた(Varon *et al.*, 2021)。CH₄の増大量は、(1)CH₄の吸収バンドを含むバンドのみを使用し、同一地点でCH₄のブルームがあるパスとないパスの反射率の変化を用いる方法、(2)同一のパスにおいて、CH₄の吸収バンドを含むバンドと含まないバンドの反射率の変化を用いる方法、(3)それらを組み合わせた方法により算出される。ハイパースペクトルセンサに比べて波長分解能が低いため、排出量に対する感度が低くなり検出限界は低下するが、観測幅が広いことで高い頻度で同一地点を観測できるという利点がある。また、表2に示した Landsat-8 や Landsat-9 の他にも、短波長赤外域にバンドをもつ Landsat シリーズのデータにも上記の方法を適用できることから、過去に遡って長期間の評価が可能である。

引用文献

- Bertaux, J.-L., Hauchecorne, A., Lefèvre, F., Bréon, F.-M., Blanot, L., Jouget, D., Lafrique, P. and Akaev, P. (2020) The use of the 1.27 μm O₂ absorption band for greenhouse gas monitoring from space and application to MicroCarb. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 3329–3374. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3329-2020>
- Cusworth, D. H., Jacob, D. J., Varon, D. J., Chan Miller, C., Liu, X., Chance, K., Thorpe, A. K., et al. (2019) Potential of next-generation imaging spectrometers to detect and quantify methane point sources from space. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 5655–5668. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5655-2019>
- Cusworth, D. H., Duren, R. M., Thorpe, A. K., Eastwood, M. L., Green, R. O., Dennison, P. E., Frankenberg, C., et al. (2021) Quantifying global power plant carbon dioxide emissions with imaging spectroscopy. *AGU Advances*, 2, e2020AV000350. <https://doi.org/10.1029/2020AV000350>
- Fujinawa, T., Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Kanaya, Y., Kawashima, T., Kataoka, F., Mori, S., Eskes, H. and Tanimoto, H. (2021) First concurrent observations of NO₂ and CO₂ from power plant plumes by airborne remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092685. <https://doi.org/10.1029/2021GL092685>
- Heymann, J., Reuter, M., Hilker, M., Buchwitz, M., Schneising, O., et al. (2015) Consistent satellite XCO₂ retrievals from SCIAMACHY and GOSAT using the BESD algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 2961–2980. <https://doi.org/10.5194/>

- amt-8-2961-2015
- IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., et al. (eds.), Cambridge University Press (in press)
- IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., et al. (eds), IPCC, Switzerland.
- Irakulis-Loitxate, I., Guanter, L., Liu, Y. N., Varon, D. J., Maasakkers, J. D., et al. (2021) Satellite-based survey of extreme methane emissions in the Permian basin. *Science Advances*, 7, eabf4507. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4507>
- Janardanan, R., Maksyutov, S., Ito, A., Yukio, Y. and Matsunaga, T. (2017) Assessment of anthropogenic methane emissions over large regions based on GOSAT observations and high resolution transport modeling. *Remote Sensing*, 9, 941. <https://doi.org/10.3390/rs9090941>
- Janardanan, R., Maksyutov, S., Oda, T., Saito, M., Kaiser, J. W., Ganshin, A., Stohl, A., Matsunaga, T., Yoshida, Y. and Yokota, T. (2016) Comparing GOSAT observations of localized CO₂ enhancements by large emitters with inventory-based estimates. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3486–3493. <https://doi.org/10.1002/2016GL067843>
- Janssens-Maenhout, G., Pinty, B., Dowell, M., Zunker, H., Andersson, E., et al. (2020) Toward an operational anthropogenic CO₂ emissions monitoring and verification support capacity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), E1439–E1451. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0017.1>
- 環境省・国立環境研究所(2021) 2019年度(令和元年度)の温室効果ガス排出量(確報値). <http://www.nies.go.jp/whatsnew/20210413/20210413.html> (2021年9月1日確認)
- Kiel, M., Eldering, A., Roten, D. D., Lin, J. C., Feng, S., Lei, R., Lauvaux, T., Oda, T., Roehl, C. M., Blavier, J.-F. and Iraci, L. T. (2021) Urban-focused satellite CO₂ observations from the Orbiting Carbon Observatory-3: A first look at the Los Angeles megacity, *Remote Sensing of Environment*, 258, 112314. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112314>. https://data2.gosat.nies.go.jp/doc/documents/ValidationResult_FTSSWIRL2_V02.90_GU_ja.pdf
- 国立環境研究所 衛星観測センター GOSAT プロジェクト(2020) [留意事項] GOSAT レベル 2 標準プロジェクト検証結果. https://data2.gosat.nies.go.jp/doc/documents/ValidationResult_FTSSWIRL2_V02.90_GU_ja.pdf(2021年9月1日確認)
- Maksyutov, S., Takagi, H., Valsala, V. K., Saito, M., Oda, T., Saeki, T., Belikov, D. A., Saito, R., Ito, A., Yoshida, Y., Morino, I., Uchino, O., Andres, R. J., and Yokota, T. (2013) Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 9351–9373. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9351-2013>
- MoEFCC (2018) India: Second Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Government of India. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/INDIA%20SECOND%20BUR%20High%20Res.pdf> (2021年9月1日確認)
- Morino, I., Uchino, O., Inoue, M., Yoshida, Y., Yokota, T., et al. (2011) Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1061–1076. <https://doi.org/10.5194/amt-4-1061-2011>
- Nassar, R., Hill, T. G., McLinden, C. A., Wunch, D., Jones, D. B. A. and Crisp, D. (2017) Quantifying CO₂ emissions from individual power plants from space. *Geophysical Research Letters*, 44, 10,045–10,053. <https://doi.org/10.1002/2017GL074702>
- 日本リモートセンシング学会(2008) GOSAT 小特集. 日本リモートセンシング学会誌, 28, 2. https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rssj/28/2/_contents/-char/ja(2021年9月1日確認)
- 日本リモートセンシング学会(2019) GOSAT-2 特集号, 日本リモートセンシング学会誌, 39, 1. https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rssj/39/1/_contents/-char/ja(2021年9月1日確認)
- O'Dell, C. W., Eldering, A., Wennberg, P. O., Crisp, D., Gunson, M. R., et al. (2018) Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 6539–6576. <https://doi.org/10.5194/amt-11-6539-2018>, 2018.
- Pandey, S., Gautam, R., Houweling, S., van der Gon, H. D., Sadavarte, P., et al. (2019) Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116, 26376–26381. <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>
- Reuter, M., Buchwitz, M., Schneising, O., Krautwurst,

- S., O'Dell, C. W., et al. (2019) Towards monitoring localized CO₂ emissions from space: co-located regional CO₂ and NO₂ enhancements observed by the OCO-2 and S5P satellites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(14), 9371–9383. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9371-2019>.
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Bovensmann, H., Burrows, J. P., et al. (2019) A scientific algorithm to simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 6771–6802. <https://doi.org/10.5194/amt-12-6771-2019>
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Heymann, J., Bovensmann, H. and Burrows, J. P. (2011) Long-term analysis of carbon dioxide and methane column-averaged mole fractions retrieved from SCIAMACHY. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 2863–2880. <https://doi.org/10.5194/acp-11-2863-2011>
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Vanselow, S., Bovensmann, H. and Burrows, J. P. (2020) Remote sensing of methane leakage from natural gas and petroleum systems revisited. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 9169–9182. <https://doi.org/10.5194/acp-20-9169-2020>
- Thompson, D. R., Thorpe, A. K., Frankenberg, C., Green, R. O., Duren, R., et al. (2016) Space-based remote imaging spectroscopy of the Aliso Canyon CH₄ superemitter. *Geophysical Research Letters*, 43, 6571–6578. <https://doi.org/10.1002/2016GL069079>
- 津久井あきび・梅宮知佐(2021)解説：パリ協定・第1回グローバル・ストックテイク(GST), IGES Briefing Note. <https://www.iges.or.jp/jp/pub/first-global-stocktake/ja>(2021年9月1日確認)
- Varon, D. J., Jacob, D. J., Jervis, D. and McKeever, J. (2020) Quantifying time-averaged methane emissions from individual coal mine vents with GHGSat-D satellite observations. *Environmental Science & Technology*, 54, 10246–10253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01213>
- Varon, D. J., Jervis, D., McKeever, J., Spence, I., Gains, D. and Jacob, D. J. (2021) High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 2771–2785. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021>
- Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., et al. (2013) Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 1533–1547. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1533-2013>.
- Zhang, Y., Gautam, R., Pandey, S., Omara, M., Maasackers, J. D., et al. (2020) Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space. *Science Advances*, 6, eaz5120. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5120>



松永 恒雄 / Tsuneo MATSUNAGA

1990年東京大学工学部卒業。1992年同大学院工学系研究科修士課程修了。1997年同研究科より博士(工学)号授与。通商産業省工業技術院地質調査所研究員、東京工業大学大学院専任講師を経て、2001年より国立環境研究所勤務。2016年より地球環境研究センター(2021年より地球システム領域)衛星観測センター長(衛星観測研究室長兼務)を務める。地質・環境分野におけるリモートセンシングの研究を行うとともに、ASTER, SELENE, HISUI, GOSAT シリーズなどの衛星プロジェクトに従事している。



谷本 浩志 / Hiroshi TANIMOTO

1996年東京大学理学部卒業。2001年同大学院理学系研究科博士課程修了。2001年同研究科より博士(理学)号授与。2001年国立環境研究所研究員、その後主任研究員を経て、2010年より室長、2021年より気候変動・大気質研究プログラムの総括を務める。専門は大気化学で、地球規模の大気質について地上観測・モデル・衛星観測を統合的に利用した研究を行うとともに、IGACやCEOS等の国際プロジェクトの共同代表を務め、国際連携を推進している。



大山 博史 / Hirofumi OHYAMA

2009年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了、博士(理学)。宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター宇宙航空プロジェクト研究員、名古屋大学宇宙地球環境研究所研究員を経て、現在、国立環境研究所地球システム領域主任研究員(衛星観測センター兼務)。地上設置及び衛星搭載分光装置によって測定されたスペクトルデータの解析等に従事している。