

気候変動政策ブログ

気候変動対策で人工衛星が果たす役割 ～低炭素化社会の実現に向けて～

国際航業株式会社 技術本部 環境保全部 副主任研究員 齊藤 龍



昨年末に採択されたパリ協定は、米・中による早期批准もあり、本年11月4日に発効するにいたった。これより温室効果ガスの削減にすべての国が参加する枠組が構築され、世界は化石燃料依存から脱却し、脱炭素・低炭素化に向けて積極的に取り組むこととなる。

一方、2000年以降、大気中の温室効果ガスを人工衛星で観測する技術が実現し、炭素循環や地球温暖化に関する研究がますます盛んになった。このような人工衛星を使った観測は、現在、日本とアメリカがそれぞれ打ち上げた2機で行われている。今後、中国、ドイツ、フランスなども観測に参加する予定であり、2020年頃は各国の人工衛星が温室効果ガスを観測する見込みとなり、温室効果ガスの衛星観測データはさらに増大することとなる。他方、膨大な衛星観測データを活用し解析するデータ同化などの統計数理モデルや、高度化されたモデルを高速で処理できる次世代スパコン（エクサスケールコンピュータ）は、2020年頃の実現を見据え世界各国で研究開発されている。

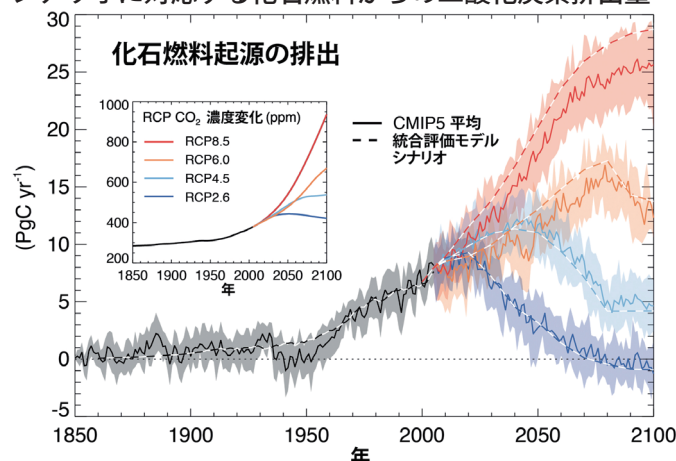
気候変動に関する政策、観測データの量、計算機の性能が2020年頃に大きな転換期を迎えるであろうことを見据え、気候変動対策を進めるにあたり生じる課題点を技術的な面から考察することは大切である。そこで、本稿では人工衛星により主として温室効果ガスを観測することの意義について述べ、各国の動向と今後の展望を探る。

1. 人工衛星を使った温室効果ガスの観測

1.1. 気候変動予測の目的

精度の高い気候予測が可能になれば、気候変動政策を進める上で必要な気温上昇のシナリオを決める際の根拠、そのシナリオに基づく対策事業の費用便益試算や、主要排出国の削減行動の評価など、より具体的で効果的な目標を議論でき、明確で効率の良い施策を検討できる。精度の高い予測を行うためには、地球温暖化の地球気候システムへの影響や炭素循環のメカニズムを正しく理解する必要がある。そのためには、温室効果ガス（主に二酸化炭素）の排出源と量、輸送過程、及び吸収源と量を正確に知ることが重要である。人間活動により排出される二酸化炭素は、大気中では風や気流などによって運ばれ、その一部は陸域生態系や海洋などに吸収される。これらはエネルギー統計、観測、シミュレーションな

図 1.1 RCP シナリオに基づく放射強制力と RCP シナリオに対応する化石燃料からの二酸化炭素排出量



(出所)
文部科学省: RCP(代表的濃度経路)シナリオについて(オンライン,2016年6月閲覧),
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/03/attach/1346369.htm

どで定量的な推定が可能であるが、まだ多くの不確実性を含んでいる。不確実性の要因を明らかにし、それらを取り除くことができれば、将来の気候の予測精度をさらに向上させることができ、精度の高いシナリオに基づいた対策を打ち出せるであろう。ここで、高める精度とは、それぞれのシナリオモデル（図 1.1）で得られる予測結果の精度であり、唯一のシナリオを決定するための確度ではない。最悪のシナリオあるいは最善のシナリオのうちどちらかを除外するべきではなく、それぞれのシナリオに基づいた各予測結果の不確実性を低減することが大切である。

1.2. 温室効果ガスの観測手法

大気中の温室効果ガスの観測手法としては、主に地上観測、航空機観測、衛星観測などがある。地上観測や航空機観測は、観測装置に空気を採取し大気中の温室効果ガスの濃度を直接 (in situ) 計測している。地上観測の地点数は、WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases) のとりまとめによると、二酸化炭素で 190 地点、メタンで 170 地点ほどである。地上観測のための計測器は主に先進国などの都市部に設置されることが多く、砂漠や海洋などの辺鄙な地域では継続的な観測が難しいため観測データが少なく疎な観測網となる。このように全球の地上観測網には偏りがある。地上観測のような定点観測は、連続的に大気中の観測対象を収集し分析し続けることができるため、昼夜間の濃度差などの日変化を調べることができる。このような連続観測は、空気をポンプで直接採取すると同時に、その中に含まれる二酸化炭素濃度を赤外センサ（非分散赤外分光）で計測したり、採取した空気をフラスコなどに一時保管し、分析機関で二酸化炭素濃度を算出したりすることで、高い観測精度 [e.g. Masarie et al., 2001] を持っている。

一方、人工衛星は地球を周回するため、地上観測や航空機観測のような観測網の偏りによる制約が少なく、大気中の温室効果ガスのデータを、全球で網羅的に観測することができる。観測地点の数（フットプリント）は 1 日あたり数万点となり、地上観測の地点数より桁違いに増加し、これまで観測が難しかった砂漠、山岳、熱帯林、海洋などの辺鄙な地域でもデータを取得することが可能となり、全球でほぼ一様な観測データを集めることができるようになった。ただし、観測精度は地上観測より劣り、さまざまな誤差が含まれる。例えば、①大気中に含まれる水蒸気やエアロゾルなどの観測対象外の微量物質から受ける雑音、②人工衛星の製造元によって異なる設計や構造、③測定手法の原理によって生じるバイアス及び季節や緯度帯によって変動するバイアス、④観測データから目的の情報を復元（リトリバー）するためのアルゴ

リズムで仮定する条件や近似方法などの論理的な影響による誤差などがある。このような観測誤差は数%程度と見積もられており、それらの誤差は、精度の良い地上での連続観測の観測値との比較によって評価される [e.g. Wunch et al., 2011; Miyamoto et al., 2013]。評価の結果、品質の高いデータのみが解析などで利活用されることが一般的である。

1.3. 衛星観測の意義

衛星観測の利点は、大気中の温室効果ガスを全球規模で俯瞰的に観測でき、まばらに分布している地上の定点観測地点の情報を補完することができる点である。観測地点の空間的な密度の不足を補完し、地上観測や航空機観測などと合わせて利用することで、空間的な不確実性を低減できると期待されている。人工衛星はこの不確実性の低減に資するツールに他ならない。全球を俯瞰的に観測し続けることで、熱帯林の土地利用、氷河や永久凍土の変化、二酸化炭素やメタンの炭素収支の変化のような、炭素循環に大きな影響を与えると考えられている地球環境の変化を監視し、早期に検出することが可能となるであろう。検出された情報は、地域の温室効果ガスの吸収・排出量の推定、国別の削減状況のモニタリング、途上国における森林減少・劣化の定量的かつ客観的な把握などにも貢献する。

体系的な観測体制を確立し気候を監視することで得られる情報を正しく分析し利用することで、気候システムのより正確な理解、全球炭素循環メカニズムの解明などに貢献し、気候変動予測の精緻化や各シナリオに含まれる不確実性の低減にも役立つであろう。そして、このような科学的な分析結果を踏まえることで、気候変動対策において科学的根拠に基づいた数値目標の設定や、優れた制度を導入するための綿密な計画、具体的な政策立案及び検討が可能になるであろう。このように、衛星観測データは、学術研究だけでなく、地球規模で実際に起こっている社会的課題の解決にも大きく貢献するであろう。また、新産業創出や商用利用などに向けた具体的な議論も行われており、今後人工衛星のデータ利用の実利用展開がますます推進されていくと期待されている。

2. 温室効果ガスを観測する人工衛星

2.1. 各国の人工衛星

2000 年以降、大気中の温室効果ガスを宇宙から観測する技術開発が大幅に前進し、人工衛星を使った観測が可能となった。表 2.1 に示すとおり、人工衛星を使った温室効果ガスの観測は、現在 2 機で行われており、さらに各国が今後の計画を発表している。このように、温室効果ガスの観測や監視を目的とした人工衛星が新たに多数加わることで、長期にわたって持続性のある観測ができると期待されている。また、これらの人工衛星のデータを解析する各国の研究チームは、お互いに連携し解析結果やデータの情報共有を行っており、全球観測の国際的な体制強化に貢献している。

2.2. 初めて大気中の二酸化炭素を観測した人工衛星

世界で初めて人工衛星を使って大気中の温室効果ガスを観測し、そのデータをプロダクトとして公に提供した研究機関は、欧州宇宙機関（European Space Agency、ESA）である。ESA は人工衛星 Envisat（Environmental Satellite）を 2002 年から 2011 年までの 9 年間運用した。観測センサは Envisat に搭載された SCIAMACHY（SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography）[Bogumil et al., 2003] で、対流圏および成層圏における微量気体の全球測定を目的に開発された。観測対象の微量気体は主に二酸化炭素やメタン、一酸化二窒素など数十種類のガスと雲やエアロゾルなどである。観測データから得られた二酸

化炭素やメタンの濃度はリトリーバルアルゴリズム（WFM-DOAS）によって復元された値である [Buchwitz et al., 2005]。リトリーバルアルゴリズムはハイデルベルグ大学やオランダ宇宙研究所（Netherlands Institute for Space Research、SRON）などの研究チーム毎で開発されている。

2.3. 現在運用されている人工衛星

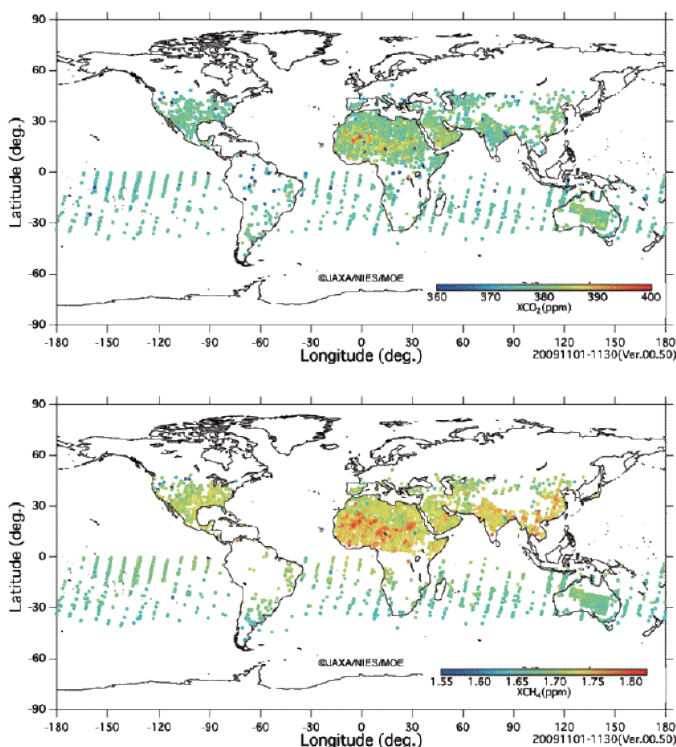
現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、国立環境研究所（NIES）、環境省（MOE）は温室効果ガスの観測を主目的に 2009 年に打ち上げた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（Greenhouse gases observing satellite、GOSAT）[Yokota et al., 2009] を運用している。観測センサは GOSAT に搭載された TANSO-FTS[Kuze et al., 2012] で、大気中の二酸化炭素とメタンの分光データを観測する目的で開発された。太陽光の地表での反射光を光源とする受動センサによる観測であるため、二酸化炭素とメタンの観測データを地球の昼側のみでしか取得できない。雲やエアロゾルを観測することができるセンサ（Cloud and Aerosol Imager、CAI）も搭載されている。NIES が温室効果ガスの濃度データへリトリーバル [Yoshida et al., 2013] したプロダクトを公開し、これらのプロダクトや観測データを海外のサードパーティ（大学や公的機関の研究チームなど）へ提供している。さらに、アメリカ航空宇宙局ジェット推進研究所（NASA Jet Propulsion Laboratory、NASA-JPL）の ACOS（Atmospheric CO₂ Observations from Space）プロジェクトが開発したリトリーバルアルゴリズム [Crisp et al., 2012] や SRON と Karlsruhe Institute of

表 2.1 各国の温室効果ガス観測衛星計画（2016 年 6 月時点）

国名	ミッション名	センサ名	空間分解能	機関名	運用期間
ドイツ、フランスなど	Envisat	SCIAMACHY	1 ピクセルあたり南北 30km、東西 60km から 120km	ESA	2002-2011（運用終了）
日本	GOSAT	TANSO-FTS	瞬時視野角 15.8mrad（地表面への投影直径は約 10.5km）	JAXA、NIES、MOE	2009-（運用中）
アメリカ	OCO-2	3 NIR/SWIR grating spectrometer	1.29km × 2.25km	NASA-JPL	2014-（運用中）
中国	TanSat	ACGS	—	MOST、CMA、CAS	2016-2018（計画）
アメリカ	ISS OCO-3	—	—	NASA-JPL	2017-2022（計画）
日本	GOSAT-2	—	—	JAXA、NIES、MOE	2018-2023（計画）
フランス	MicroCarb	回折格子分光計	1 ピクセルあたり 5km × 6km	CNES	2020（計画）
ドイツ	Merlin	—	—	CNES、DLR	2020（計画）
ドイツ、フランスなど	CarbonSat	—	2km × 2km	ESA	2023（計画）

Mission	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Envisat																								
GOSAT																								
OCO-2																								
TanSat																								
ISS OCO-3																								
GOSAT-2																								
MicroCarb																								
Merlin																								
CarbonSat																								

図 2.1 GOSAT の観測データを基に作成された
二酸化炭素とメタンの気柱平均濃度分布



(出所)

国立環境研究所: 温室効果ガス・地球観測衛星 GOSAT「いぶき」(オンライン, 2016 年 6 月閲覧), <http://www.gosat.nies.go.jp/index.html>

Technology (KIT) が開発したリトリーバルアルゴリズム (RemoTeC) [Basu et al., 2013] など、他の研究チームらの独自のアルゴリズムによって復元された気柱平均濃度 (気柱に含まれる積算濃度の平均値) も公開されている (図 2.1)。GOSAT は 2014 年に設計寿命を迎えたが、現在 (2016 年 6 月) も運用され、温室効果ガスを観測している。

一方、アメリカでは 2014 年に、NASA-JPL が二酸化炭素の発生源と吸収源をマッピングすることを主目的に軌道上炭素観測衛星 (Orbiting Carbon Observatory-2、OCO-2) [Crisp et al., 2004; Thompson et al., 2012] の打ち上げに成功し運用している。OCO-2 は、NASA が主導する地球観測のための衛星群 (A-Train) の一部である。この A-Train は、高度約 700km の同一衛星軌道上に各国の衛星を多数配置することで、同地点の様々な地球環境をほぼ同時に観測することができる。A-Train には OCO-2 の他に、Aqua (NASA)、CloudSat (NASA)、CALIPSO (NASA/CNES)、Aura (NASA)、GCOM-W1 (JAXA) が同一軌道上で隊列を構成している。大気中の温室効果ガスの解析にはその他の気象データも重要であるため、OCO-2 の観測データと同時刻同地点の地球環境を A-Train によって観測することはデータ解析を行う上で有益である。OCO-2 に搭載されている観測センサは 3 台の高解像度の回折格子分光器 (3 co-boresighted, high

resolution, imaging grating spectrometers) で一式となっている [Frankenberg et al., 2015]。また、OCO-2 には世界初の太陽光誘起蛍光センサ (Solar-Induced Fluorescence、SIF) が搭載されており、このセンサによって植物の光合成で放出されるクロロフィル蛍光を利用した大気中の二酸化炭素の量を高精度で計測することができる [Schimel et al., 2015]。OCO-2 の空間分解能は GOSAT より 10 倍ほど高いため、全球をより精緻にマッピングする。そのため、収集するデータ量も膨大になる。これらの観測データや解析結果は NASA-JPL で公開されている。

2.4. 現在計画されている人工衛星

日本やアメリカ以外でも、温室効果ガスを全球で観測するための人工衛星の開発・運用が計画されている。例えば、フランス国立宇宙開発センター (Centre National d'Études Spatiales、CNES) は二酸化炭素の発生源と吸収源の地球規模の地図を作成することを主目的に、超小型人工衛星 MicroCarb[Buil et al., 2011] を 2020 年に打ち上げる計画を発表した。これにより、都市、植物、海洋から排出される二酸化炭素の量を測定できるようになる。センサはフランスの気候環境科学研究所 (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement、LSCE) と同国のラプラス研究所 (Institut Pierre Simon Laplace、IPSL) との共同研究で開発され、1ppm の精度を見込んでいる。この測器は、CNES によって開発された小型人工衛星に用いられる共通プラットフォーム (衛星バス) である MYRIADE に搭載される。文字通りこの人工衛星は小型で軽量化されており、OCO-2 に搭載された測器に比べ 3 分の 1 の重さである。

また、CNES はドイツ航空宇宙センター (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt、DLR) と共同でメタンの全球観測を主目的に開発する人工衛星メタン・リモート・センシング・ライダー・ミッション (MEthane Remote sensing Lidar mission、MERLIN) [Kiemle et al., 2011] を 2020 年に立ち上げる計画である。MERLIN に搭載されるセンサは統合経路差分吸収ライダー (Integrated Path Differential Absorption LiDAR) である。メタン濃度は、センサから地表に向けて発射したレーザー光の経路にある大気中のメタンガスの量に応じて減衰する反射信号を解析し、算出される。

さらに、中国科学技術部 (Ministry Of Science and Technology、MOST) が 2016 年に TanSat (Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite Mission)、NASA-JPL が 2017 年に OCO-2 の後継機 OCO-3、JAXA が 2018 年に GOSAT の後継機である GOSAT-2、ESA が 2020 年に CarbonSat をそれぞれ打ち上げる計画を予定している。

3. 温暖化対策に資する衛星観測データの解析例

3.1. 温室効果ガス濃度の時系列変化の解析例

衛星観測データを解析することによって、大気中の二酸化炭素濃度やメタン濃度の季節変動や経年変化、増加率などの時系列情報を全球規模で確認できるようになった。また、これらの温室効果ガス濃度の北半球と南半球の南北差も、地上観測のみを使った解析より詳しく表現できるようになった。図 3.1 は二酸化炭素濃度とメタン濃度の経度平均された時系列変化であり、これらの濃度が季節変動や南北差を伴いながら年々上昇していることを示している。

図 3.1 に示した二酸化炭素濃度とメタン濃度の時系列変化は、2003 年から 2010 年までを SCIAMACHY の観測データ、2010 以降を GOSAT の観測データを用いることで連続的にプロットしたものである。この図から、二酸化炭素濃度とメタン濃度の北半球と南半球の南北差の季節変化や経年変化を視覚的にとらえることができる。SCIAMACHY と GOSAT のセンサの性能は異なるため、同質のデータに基づいて作図されているわけではない。しかし、SCIAMACHY と GOSAT は両衛星とも 2009 年と 2010 年の同時期に観測していたため、観測期間が重なった時期の観測データを地上観測と比較し校正することで、データ間の差や偏りを補正している。このように両衛星の性能差を埋めるための補正をすることで、ほぼ同質と見なせる濃度値を得ることができる。このようなほぼ同質で長期間の時系列を得るためには、重なった観測期間が少なくとも季節変化をとらえることのできる 1 年以上は必要である。

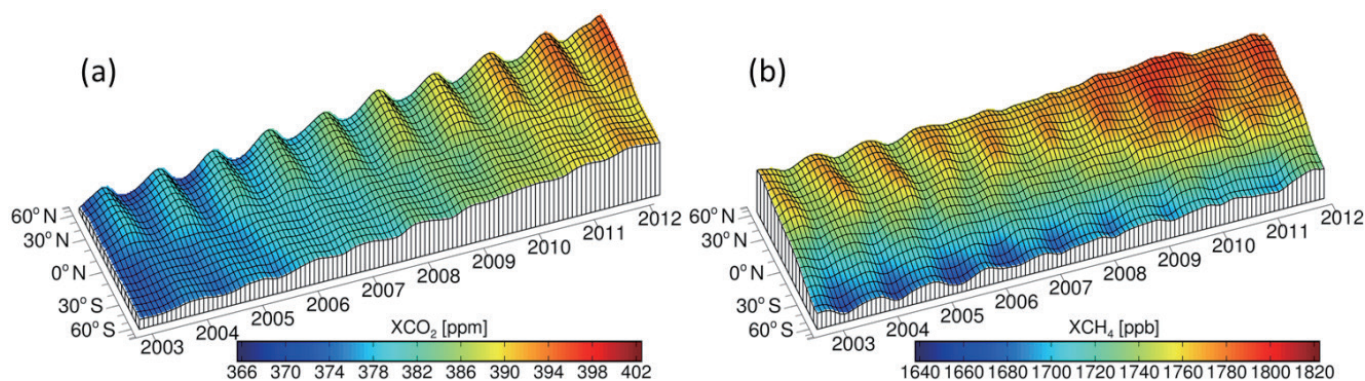
3.2. GOSAT データを使った

温室効果ガスの吸収・排出源の解析例

全球規模の時系列解析（図 3.1）だけでなく、亜大陸あるいは都市スケールを対象とした分析も行われている。例えば、GOSAT が 2009 年 6 月から 2012 年 12 月までに取得したメタンの衛星観測データを使った解析結果から、人口密集地域、大規模な農業地域、天然ガス・石油の生産・精製地域などの人為起源によるメタン排出地域では、その周辺地域よりもメタン濃度が高いことがわかった。さらに、GOSAT で観測された人為起源メタン濃度と排出量データから推計された人為起源メタン濃度との間に強い正の相関関係があることもわかった [JAXA, 2015]。このように、衛星観測データを解析することで、人為起源によるメタン排出に伴う濃度上昇を検出できる可能性があると期待されている。一方で、アジアや南アメリカでは GOSAT で観測された人為起源メタン濃度が排出インベントリなどによる人為起源メタン濃度より大きい値となった。これは、排出インベントリデータが過小、あるいはモデルや解析方法に含まれる誤差による可能性を示している。ここで、モデルとは、主に温室効果ガスなどの大気中微量成分の濃度変動を再現計算するための数値モデル（大気輸送モデル）のことである。大気輸送モデルは多くの研究機関で開発されているが、それらのモデルから得られる結果には差異がある。モデル間誤差は、さまざまな大気輸送モデルの結果を比較することで評価できる [Saito et al., 2013]。

また、炭素収支の見積もり手法については、異なる推定手法（トップダウンとボトムアップ）で得られる解析結果を比較することで、見積もり手法の評価・検証が行われている。トップダウンによる推定手法は、衛星観測データから得られた大気中の二酸化炭素濃度と大気輸送モデルを使い逆推定することで、地表面での吸収・排出量を算出する手法である。二酸化炭素の濃度は、人為起源や海洋や植生などの自然起源による吸収・排出によって変動する。これらの吸収・排

図 3.1 人工衛星 Envisat と GOSAT の観測データをもとに作成された二酸化炭素 (a) とメタン (b) の気柱平均濃度の時系列変化と南北差



(出所) ESA GHG CCI website (オンライン, 2016 年 6 月閲覧), <http://www.esa-ghg-cci.org>

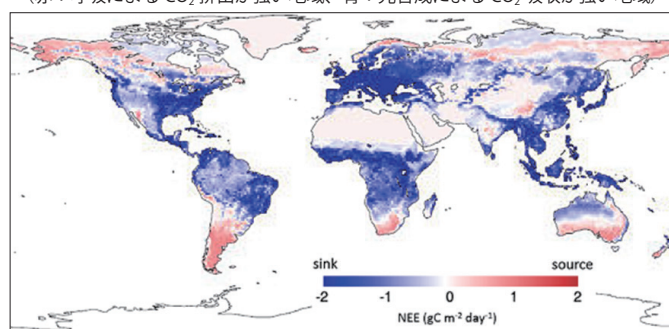
出は、時間あたりに地表面を出入りする量（フラックス）で定量的に表すことができる。このように、大気中の二酸化炭素濃度の分布と地表面でのフラックスの相互関係をモデルで表現し、そしてこのモデルを観測値と融合するデータ同化手法（4D-Var や LETKF など）に取り込むことで、妥当な吸収・排出量を逆推定する [e.g. Chevallier et al., 2009; Nakatsuka et al., 2009; Miyazaki et al., 2011]。他方、ボトムアップによる推定手法は、地表の植生分布や植物の生産活動をモデル化した陸域生態系モデルを使い、植物から大気中へ放出される二酸化炭素の量を算出する方法である。植物の光合成、呼吸、土壌有機物の分解などの過程を取り入れたモデルを使い、全球の吸収・排出量を推定する（図 3.2）。推定値は、渦相関法で二酸化炭素吸収・排出量を測定している地上観測ネットワーク間の空白域を、機械学習で知られるサポートベクトル帰帰（Support vector regression、SVR）法で最適化される [e.g. Yang et al., 2007; Ueyama et al., 2013]。これらのトップダウンとボトムアップの異なるアプローチで得られる推定結果を比較する研究結果 [Kondo, et. al., 2015] から、フラックスの推定値は北半球に分布する北米やシベリアの森林域では良く一致し、熱帯から南半球に分布するアマゾンや東南アジア、アフリカなどの森林域ではあまり一致しないことがわかった。この差異の要因としては、熱帯域で生じやすい雲により人工衛星の観測が妨げられることによる衛星観測データの不足や、地表観測地点の少なさから生じる代表性の不確実性などが考えられている。このように、フラックスの推定結果には地域によってまだ大きな不確実性が含まれている。

3.3. 森林炭素貯蔵量の解析例

大気中の二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスを観測することを主目的とはしない衛星観測データを利用し、炭素循環に関する研究に役立てる試みがある。

例えば、NIES は、NASA の人工衛星アイスサット (Ice,

図 3.2 サポートベクトル帰帰で推定された純生態系 CO₂ 交換（Net Ecosystem CO₂ Exchange、NEE）の分布図
（赤：呼吸による CO₂ 排出が強い地域、青：光合成による CO₂ 吸収が強い地域）

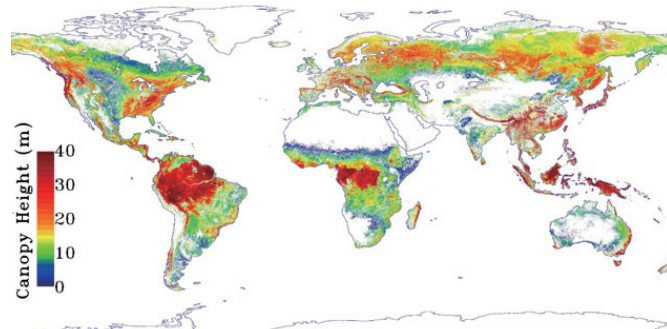


（出所）Kondo, et. al., 2015

Cloud, and land Elevation Satellite、ICESat）で得られたデータを利用することで、世界各地の森林の炭素貯留量を高精度に計測できる技術を開発した [Hayashi et al., 2015]。アイスサットは本来、北極圏や南極の氷床や海氷の厚さや面積の経年変化を計測することを主目的にし、2003 年から 2009 年までの 7 年間運用された。アイスサットには、地面からの反射光で地表の高低差を計測する測器が搭載されている。NASA は、この測器で地面からの反射光と樹冠からの反射光の時間差を測定し、樹高の計測に応用した [Schutz et al., 2005]。この技術により、森林の鉛直構造を短時間で詳細に把握することを可能にした。このように作成された全球の森林の樹高分布から、樹高が最も高い森林は北米の太平洋岸北西部や東南アジアに分布していることがわかった（図 3.3）。このデータを利用することで、全球規模での森林の炭素貯留量推定に応用することが可能となり、インベントリ作成における不確実性の低減に貢献できると期待されている。

また、JAXA の人工衛星 だいち 2 号（Advanced Land Observing Satellite、ALOS-2）やカナダ宇宙局の人工衛星レーダサット（RADARSAT-2）などに搭載されている SAR センサ（レーダ）や、NASA の人工衛星ランドサット（Landsat-8）や ESA の人工衛星センチネル（Sentinel-2）などに搭載されている光学センサは、土地被覆や地盤変化などの地表面情報を高分解能で観測することができる。精緻な地表面情報の時系列データを解析することで森林減少・劣化をモニタリングすることができ、森林保全の取り組みに貢献できる。例えば、途上国の森林減少・劣化による温室効果ガスの排出の抑制を図る REDD+（Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation in developing countries）の活動においては、人工衛星による土地利用変化の観測が全球の森林の状態を把握することに役立てられており、森林保全の定量的かつ客観的な評価に応用されている。

図 3.3 人工衛星のセンサ (ICESat/GLAS、MODIS、TRMM) で観測されたデータをもとに作成された樹高分布図



（出所）NASA Map Sees Earth's Trees in a New Light (オンライン, 2016 年 6 月閲覧), <http://www.nasa.gov/centers/jpl/news/earth20120217.html>

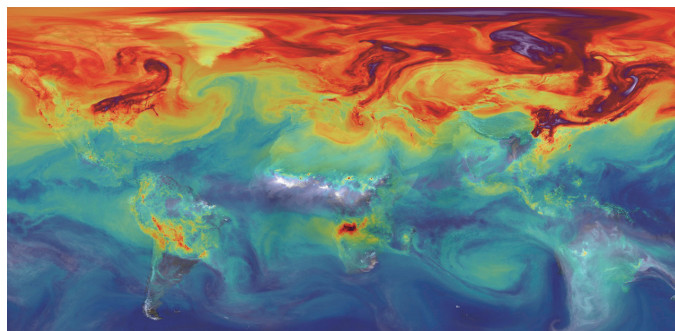
4. 技術的な課題と展望

4.1. 人工衛星の観測原理や周回軌道による制約

人工衛星には、観測センサの原理や周回軌道により、観測できる範囲や密度に偏りが生じるなどの制約がある。例えば、地表面で反射した太陽光を光源とする受動センサで大気を観測している人工衛星の場合、地球の夜側または極域では観測データを得ることができない。また、厚い雲（水蒸気）で覆われた地域では衛星観測データの解析が難しい場合があるなど、大気の状態による制約がある。温室効果ガスを観測する人工衛星の場合、衛星直下の大気を観測し温室効果ガスの気柱平均濃度を算出するため、温室効果ガス濃度の正確な高度分布を得ることが難しい。人工衛星は全球を高速で移動しながら衛星直下をモニタリングするため、特定地点の常時観測や全球の同時観測ができない。周回軌道は、多くの地球観測衛星で太陽同期軌道（Sun-synchronous orbit）が採用されている。また、同一地点の上空を通過する周期は周回軌道の高度によって決まる。その周期（回帰日数）はGOSATの場合およそ3日間隔でOCO-2の場合およそ16日である。そのため、数週間程度継続するような現象、例えば、森林火災の影響や気圧配置の変化による影響などの総観規模の現象や、季節変動や年々変動などの長い期間の現象は観測できるが、日変動の現象は捉えることができない。

温室効果ガスを観測する人工衛星においては、特定の工場や発電所などからの温室効果ガスの排出量を常時観測することが主目的ではないため、都市スケールより狭い範囲での精緻な大気観測は難しい。温室効果ガス濃度の空間分布や時系列変化を大きく俯瞰してモニタリングできることが利点である。

図 4.1 大気輸送モデル GEOS-5 で計算された二酸化炭素の濃度分布



(出所)
NASA Goddard's Global Modeling and Assimilation Office (オンライン, 2016年6月閲覧), <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-holds-media-briefing-on-carbon-s-role-in-earth-s-future-climate>

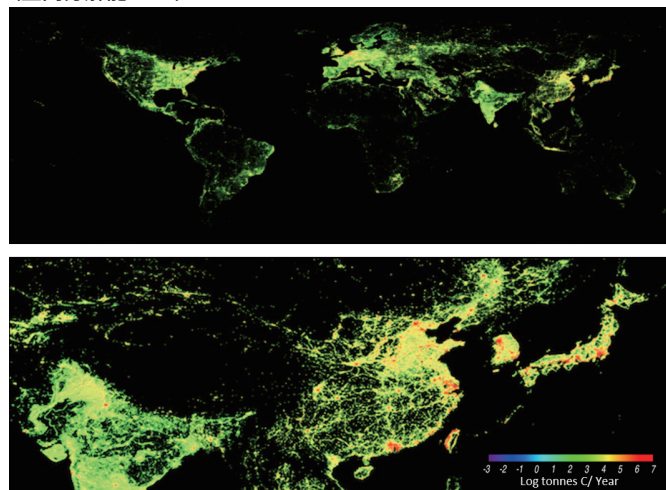
4.2. 将来への技術的展望

衛星観測データは、温室効果ガス排出量の監視・検証ツールとして有効利用できると期待されている。例えば、人工衛星を使ったメタン観測の場合、パイプラインから漏洩する天然ガスを検知するための調査実験や、家畜などの反芻動物、稲作に必要な水田、ごみの埋め立処分などの排出量を観測することが可能であるか研究されている。メタンの排出起源は、人間活動による人為起源のものが約6割、湿地などの自然起源のものが約4割である。そのため、人為起源と自然起源のメタンの起源を区別し、高い精度で評価することができれば、人為起源メタン濃度の全球分布と排出インベントリとの関係を知ることができる。

将来の気候変動予測の難しさの要因として、気候システムに内在する自然変動による不確実性や、経済発展にともない大きく変化する技術進歩や土地利用、エネルギー消費などの社会環境の変化による不確実性などが挙げられる。しかし、過去から現在における、気候変動と社会環境の関係を調べることで、将来の気候予測に資する情報、特に人為起源による温室効果ガスの排出インベントリと気候変動との関連性や影響について新たな知見を得る試みは可能である。

排出インベントリと大気中の温室効果ガスの関係については、工場、オフィス、家庭、交通などによるエネルギー消費量の統計データをもれなく精査し、このような人為起源から排出される温室効果ガスの量と排出源、そして輸送過程をより正確に推定できることが必要である。仮に、エネルギー消費量を人工衛星でモニタリングできるようになれば、各国のインベントリを共通のものさしで公正に検証でき、既存の統計データと合わせることでより信頼できるインベントリを

図 4.2 人工衛星で観測した夜間の可視画像を基に作成された化石燃料起源の二酸化炭素排出量分布図 (空間分解能 1km)



(出所) Oda et al., 2011

作成できるであろう。しかし、現状の技術では、経済活動を人工衛星でモニタリングし定量化することはできない。また、人工衛星で観測が可能となった大気中の温室効果ガス濃度は、地上で生じている経済活動を直接反映しているわけではないため、大気中の濃度分布から地上のエネルギー消費量分布を見積もるためのモデルが必要になる。そこで、炭素収支をより正しく推定するため、大気輸送モデルの精緻化や膨大な衛星観測データの解析手法の高度化だけでなく、データ同化に必要な逆推定や最適化などの統計数理モデルの高度化[e.g. Babenhauserheide et al., 2014; Miyoshi et al., 2015] も進められている。

このように今後、人工衛星や地上観測のデータ数の増加やモデルの高度化により、吸収・排出源の全球濃度分布推定（図 4.1）の精度が向上すると期待されている。また大気輸送モデルに陸域生態系モデルや海洋モデルを組み合わせたモデルを使いデータ同化することができれば、炭素循環だけでなく水、生態、海洋など気候系に関わる循環のメカニズムの包括的な解明に貢献できると期待される。人為起源により変わりゆく気候や生態系の動態を長期的に研究し、炭素循環の地球システムへの役割を明らかにすることが重要であり、得られる新たな知見を気候予測へ反映させることで、予測結果の不確実性を低減できるであろう。

一方、温室効果ガスなどの大気微量成分以外を対象とした衛星観測データを用いることで、人間活動の分布を推定する研究事例がある。人工衛星ランドサットや人工衛星 Terra/Aqua（MODIS センサ）で観測した夜間の可視画像を解析することで、夜間の人間活動がインベントリ（図 4.2）として作成されている。このように、衛星観測データを使いインベントリを改良することで、気候変動政策を進める上での数値設定の根拠、その設定値に基づく対策費や、排出国の削減行動の評価など、より具体的な目標を定め効率の良い施策を検討できると期待されている。

5. 衛星観測の気候変動対策へのさらなる活用に向けた提言

内閣府がとりまとめている宇宙基本計画（平成 28 年 4 月閣議決定）[平成 27 年度改訂、宇宙開発戦略本部決定]においては 2020 年以降、気候変動のメカニズム解明に関わる科学データの収集や気候変動政策に資する地球観測衛星の検討計画のロードマップは必ずしも十分とは言えない面もある（2016 年 6 月時点）。気象衛星ひまわりと GOSAT の後継機については検討されているが、水循環変動観測衛星（GCOM-W1、しずく）、気候変動観測衛星（GCOM-C）、全球降水観測計画（GPM）、雲エアロゾル放射ミッション（Earth

Care）など、地球の環境変化の観測に貢献している地球観測衛星の後継機計画がまだ明確になっていない。

気候変動の解明には、長期間にわたる地球観測が重要である。観測が数年以上も途絶え継続的なデータが不足すると、データの連続性が失われる。もし、観測の途切れた期間に地球環境が急激に変化する臨界点や傾向の変曲点が現れていた場合、我々はその重要な気候イベントの兆候を見逃すことになるであろう。これは、気候変動に係る地球システムのメカニズムを解明する上で大きな損失になりかねず、気候変動対策への遅れにもつながりかねない。そのため、持続可能で継続的かつ体系的な観測システムが必要である。耐久性を向上させるための技術革新を促進させたり、後継機計画を推進したりすることで、地球観測を途絶えさせない体制を整え冗長化を図ることが求められる。

一方、人間社会や生態系への気候変動の影響を評価し地球規模の社会課題を解決していく上で、地球環境の実態を把握することは非常に重要であり、そのためには地球観測データの様々な分野への利活用が必要不可欠である。特に衛星観測データは、各種環境要因の空間分布や時系列変化を全球規模で俯瞰して分析することが可能であるため、地球規模の急激な環境変化や地域による環境変化の違いを見極めるために有効である。また、膨大な衛星観測データを他の観測データ（地上観測、航空機観測、船舶観測など）と合わせて利用することで観測密度や観測精度などの情報を補うことができる。このような膨大で様々な観測データの長所を活かすことで、気候変動に係る現象解明に貢献するデータ解析（ビッグデータやデータマイニングなど）や現象の推定精度をより向上させる統計数理モデル（データ同化やパターン認識など）などの基礎研究が進められている。さらに、基礎研究への貢献だけでなく、衛星観測データは、防災活動や災害対応、新エネルギー開発、資源探査などにも活用されている。

このように気候変動対策の適応や緩和に関する分野への衛星観測データの応用と関連技術の開発は今後ますます加速するであろう。気候変動対策を進める上で、産官学の関係者は市民の便益にかなうよう、衛星観測データの多様な分野への利用促進を図ることを目指し連携をより拡大・強化すべきであり、そして、地球規模の社会課題の解決に資する新技術や産業を創出していくべきである。

参考文献

- Babenhauserheide, A., S. Basu, S. Houweling, W. Peters, and A. Butz (2015), Comparing the CarbonTracker and TM5-4DVar data assimilation systems for CO₂ surface flux inversions, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9747-9763, doi:10.5194/acp-15-9747-2015.
- Basu, S., S. Guerlet, A. Butz, S. Houweling, O. Hasekamp, I. Aben, P. Krummel, P. Steele, R. Langenfelds, M. Torn, S. Biraud, B. Stephens, A. Andrews, and D. Worthy (2013), Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8695-8717, doi:10.5194/acp-13-8695-2013.
- Bogumil, K., J. Orphal, T. Homann, S. Voigt, P. Spietz, O.C. Fleischmann, A. Vogel, M. Hartmann, H. Kromminga, H. Bovensmann, J. Frerick, and J.P. Burrows (2003), Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY pre-flight model: instrument characterization and reference data for atmospheric remote-sensing, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 157 (2), 167-184.
- Buchwitz, M., R. de Beek, S. Noël, J. P. Burrows, H. Bovensmann, H. Bremer, P. Bergamaschi, S. Körner, and M. Heimann (2005), Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: year 2003 initial data set, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 3313-3329, doi:10.5194/acp-5-3313-2005.
- Buil, C., V. Pascal, J. Loesel, C. Pierangelo, L. Roucayrol, and L. Tauziède (2011), A new space instrument concept for the measurement of CO₂ concentration in the atmosphere, *SPIE 8176-12 Remote Sensing Europe*, Prague.
- Chevallier, F., S. Maksyutov, P. Bousquet, F. M. Bréon, R. Saito, Y. Yoshida, and T. Yokota (2009), On the accuracy of the CO₂ surface fluxes to be estimated from the GOSAT observations, *Geophysical Research Letters*, 36(19).
- Crisp, D., R. M. Atlas, F.-M. Breon, et al. (2004), The orbiting carbon observatory (OCO) mission, *Adv. Space Res.*, 34, 700-709.
- Crisp, D., B. M. Fisher, C. O'Dell, et al. (2012), The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part II: Global XCO₂ data characterization, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 687-707, doi:10.5194/amt-5-687-2012.
- Frankenberg, C., R. Pollock, R. A. M. Lee, R. Rosenberg, J.-F. Blavier, D. Crisp, C. W. O'Dell, G. B. Osterman, C. Roehl, P. O. Wennberg, and D. Wunch (2015), The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 301-313, doi:10.5194/amt-8-301-2015.
- Hayashi M., N. Saigusa, Y. Yamagata, and T. Hirano (2015), Regional forest biomass estimation using ICESat/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo, *Carbon Management*, 6(1-2), 19-33, doi:10.1080/17583004.2015.1066638.
- JAXA (2105), プレスリリース「温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)によるメタン観測データと人為起源排出量との関係について」2015年11月27日(オンライン, 2016年6月閲覧), http://www.jaxa.jp/press/2015/11/20151127_ibuki_j.html
- Kiemle, C., M. Quatrevalet, G. Ehret, A. Amediek, A. Fix, and M. Wirth (2011), Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 2195-2211, doi:10.5194/amt-4-2195-2011.
- Kondo, M., K. Ichii, H. Takagi, and M. Sasakawa (2015), Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(7), 1226-1245.
- Kuze, A., H. Suto, K. Shiomi, T. Urabe, M. Nakajima, J. Yoshida, T. Kawashima, Y. Yamamoto, F. Kataoka, and H. Buijs (2012), Level 1 algorithms for TANSO on GOSAT: processing and on-orbit calibrations, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2447-2467, doi:10.5194/amt-5-2447-2012.
- Masarie, K. A., R. L. Langenfelds, C. E. Allison, T. J. Conway, E. J. Dlugokencky, R. J. Francey, P. C. Novelli, L. P. Steele, P. P. Tans, B. Vaughn, and J. W. C. White (2001), NOAA/CSIRO flask air intercomparison experiment: A strategy for directly assessing consistency among atmospheric measurements made by independent laboratories, *J. Geophys. Res.*, 106, 20,445-20,464.
- Miyamoto, Y., M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, and P. K. Patra (2013), Atmospheric column-averaged mole fractions of carbon dioxide at 53 aircraft measurement sites, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5265-5275, doi:10.5194/acp-13-5265-2013.
- Miyazaki, K., T. Maki, P. K. Patra, and T. Nakazawa (2011), Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO₂ flux estimation using an ensemble-based 4-D data assimilation system, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D16).
- Miyoshi, T., K. Kondo, and K. Terasaki (2015), Big Ensemble Data Assimilation in Numerical Weather Prediction, *Computer*, 48(11), 15-21.
- Nakatsuka, Y., and S. Maksyutov (2009), Optimization of the seasonal cycles of simulated CO₂ flux by fitting simulated atmospheric CO₂ to observed vertical profiles, *Biogeosciences*, 6, 2733-2741, doi:10.5194/bg-6-2733-2009.
- Oda, T., and S. Maksyutov (2011), A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 543-556, doi:10.5194/acp-11-543-2011.
- Saito, R., P. K. Patra, C. Sweeney, et al. (2013), TransCom model simulations of methane: comparison of vertical profiles with in situ aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, 118, 3891-3904, doi:10.1002/jgrd.50380.
- Schimel, D., R. Pavlick, J. B. Fisher, G. P. Asner, S. Saatchi, P. Townsend, and P. Cox (2015), Observing terrestrial ecosystems and the carbon cycle from space, *Global change biology*, 21(5), 1762-1776.
- Schutz, B. E., H. J. Zwally, C. A. Shuman, D. Hancock, and J. P. DiMarzio (2005), Overview of the ICESat mission, *Geophysical Research Letters*, 32(21).
- Thompson, D. R., D. C. Benner, L. R. Brown, D. Crisp, V. M. Devi, Y. Jiang, and R. Castaño (2012), Atmospheric validation of high accuracy CO₂ absorption coefficients for the OCO-2 mission, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(17), 2265-2276.
- Ueyama, M., K. Ichii, H. Iwata, E. S. Euskirchen, D. Zona, A. V. Rocha, Y. Harazono, C. Iwama, T. Nakai, and W. C. Oechel (2013), Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 118, 1266-1281, doi:10.1002/jgrg.20095.
- Wunch, D., P. O. Wennberg, G. C. Toon, et al. (2011), A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12317-12337, doi:10.5194/acp-11-12317-2011.
- Yang, F., K. Ichii, M. A. White, H. Hashimoto, A. R. Michaelis, P. Votava, A. X. Zhu, A. Huete, S. W. Running, and R. R. Nemani (2007), Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through support vector machine approach, *Remote Sens. Environ.*, 110, 109-122.
- Yokota, T., Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe, and S. Maksyutov (2009), Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results, *Sola*, 5, 160-163.
- Yoshida, Y., N. Kikuchi, I. Morino, et al. (2013), Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1533-1547, doi:10.5194/amt-6-1533-2013.