

第3回宇宙からの温室効果ガス観測に関する 国際ワークショップ (3rd IWGGMS) 参加報告*

太田 芳文**・江口 菜穂**・吉田 幸生**
塩見 慶***・中塚 由美子**

1. 会議の概要

2006年5月30, 31日に、茨城県つくば市にある研究交流センターにおいて、国立環境研究所 (NIES) の主催で3rd International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS) が開催された。二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) などの温室効果気体を宇宙から観測するためには、多くの課題を検討しなければならないが、IWGGMS はそのための最先端の研究報告と意見交換を目的としたワークショップである。第1回は2004年4月に東京で行われ、2005年3月には米国カリフォルニア州のPasadenaにて第2回目のワークショップが開催された。今回で3回目となる「3rd IWGGMS」には国内外から計68名の研究者が参加した。発表内容は主に2008年の打ち上げを予定している日本のGreenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) と米国のOrbiting Carbon Observatory (OCO) の各プロジェクトの状況、観測機器やデータ処理アルゴリズムの開発状況、校正/検証実験計画、及び衛星観測データを利用した全球炭素収支分布の推定に関するものであった。本稿では3rd IWGGMS で行われた講演の概要について報告する。なお、以下に紹介する講演内容の一部は、近々開設されるNIESのGOSATプロジェクトのホームページ上で公開される予定である。

また3rd IWGGMSの前日の5月29日には、東京・秋葉原コンベンションホールにて宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の主催で文部科学省・環境省・NIESの後援による温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) シンポジウムが開催された。このシンポジウムは、特にGOSATと地球温暖化関連研究について、研究者のみならず広く一般の人にも理解を深めてもらうことを目的として開催されたものである。参加者は民間企業、官公庁、研究機関など多方面から集まり、会場の雰囲気からはこの分野への関心の高さを伺い知ることができた。本稿ではあわせて本シンポジウムの概要についても報告する。 (太田芳文)

2. 3rd IWGGMS

本節では、IWGGMSで行われた講演についてセッション毎に分けて紹介する。

2.1 GOSAT, OCO プロジェクトの概要

この会議の冒頭では、GOSATとOCOの各プロジェクトの概要についての講演が行われた。人間活動によって大気中に放出された二酸化炭素のうち、約40%の二酸化炭素の消失過程 (海洋か陸域生態系が吸収、もしくはそれ以外か?) が明らかにされていない。そのため両プロジェクトでは、この消失過程の解明に貢献することを主たる目的としている。衛星観測のメリットは、同一測器で観測するため、日々均質なデータを全球規模で取得できる点である。そのため、現在世界中に散在している温室効果気体の地上観測網の空白域を埋め、全球規模での二酸化炭素濃度の変動を理解することが可能である。

はじめにGOSATチーフサイエンティストである安岡 (東京大学生産技術研究所) が講演した。環境

* Report on the 3rd International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space.

** Yoshifumi OTA, Nawo EGUCHI, Yukio YOSHIDA, Yumiko NAKATSUKA, 国立環境研究所地球環境研究センター。

*** Kei SHIOMI, 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター。



第1図 3rd IWGGMS 参加者による集合写真 (於：つくば研究交流センター前広場)。

省、NIES、JAXAの三者共同事業であるGOSATは、京都議定書の第一次約束期間開始年(2008年)の8月に打ち上げを予定している。また、全球地球観測システム(GEOSS)の国際的な取り組みの中で、地球温暖化と炭素循環の視点から温室効果ガス観測(特に二酸化炭素)の役割を担っている。

GOSATプロジェクトは、衛星により全球規模でCO₂カラム濃度(3か月平均)を約0.3~1%の精度で測定し、得られたCO₂濃度をCO₂ Source/Sinkインバースモデルへの入力データとして利用して、亜大陸規模での炭素収支の推定を行う計画である。現在はセンサ、解析アルゴリズム、及びインバースモデルの開発が行われており、センサの校正やデータ検証のための地上・航空機観測が計画されている(詳細は後節を参照)。GOSATプロジェクトで得られる成果は、各国のCO₂排出量の推定にも貢献するものと期待される。

次にOCO Principal InvestigatorのCrisp(米・NASA/JPL)が、OCOプロジェクトについて講演した。OCOはGOSAT同様、近赤外波長帯を利用してCO₂カラム濃度を月平均、領域平均で1~2ppmv(0.3~0.5%)の精度で測定することを目標としている。またOCOは、米国のEOS計画で打ち上げられた衛星測器群A-trainの最前方を飛行するため、様々な物理量をA-trainの他の測器から得ることができる。特にCO₂カラム濃度を見積もる際の不確定要因である雲とエアロゾルの情報取得を他の衛星測器に託し、OCO自体はCO₂濃度観測に特化しているところがGOSATとは異なる点の1つと言える。

OCOは瞬時視野(IFOV)がGOSATよりも小さく、雲の影響を受けていない画素の選別が容易である。一方GOSATはOCOよりも回帰日数が短いため、同一地点の観測頻度が高く、両衛星の観測を組み合わせることで、時空間変動の激しい対流圏下層のCO₂濃度のより詳細な分布を把握することが可能である。(江口菜穂)

2.2 観測測器とその開発状況

JAXA-GOSATプロジェクトマネージャの浜崎(JAXA)と久世(JAXA)からGOSATプロジェクトの進捗状況とセンサ開発に関する講演が、またMiller(米・NASA/JPL)からはOCOプロジェクトの現在までの進行状況について講演があった。

GOSATに搭載される観測センサの総称は、「Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation (TANSO)」である(“炭素”に準えている)。Fourier Transform Spectrometer (FTS)とCloud and Aerosol Imager (CAI)の2つからなり、それぞれ「TANSO-FTS」、「TANSO-CAI」と呼ばれる。温室効果ガス濃度の推定はFTSで取得されるデータから行い、CAIは誤差要因となる雲判別やエアロゾル補正のための情報を取得することを主目的としている。

TANSO-FTSは近赤外の波長帯に3バンド(CO₂ 1.6 μ m帯、2.0 μ m帯、及びO₂ A帯(0.76 μ m))、熱赤外に1バンド(5.6~14.3 μ m)の計4バンドを持つ。近赤外のバンドでは各2方向の偏光観測も行うため、実際には7バンド分の情報が得られる。

TANSO-CAI は近紫外から近赤外まで4つのチャンネル (0.38, 0.68, 0.87, 1.6 μm) を持つ。各測器とも大気を直下に観測する Nadir 型の観測手法を取り、また FTS の水平観測間隔は観測モードにより可変で88~1800 km 間隔での測定が可能である。直下視観測時における TANSO-FTS の IFOV は直径約10 km の円形である。

フーリエ変換型分光器を用いた温室効果気体の観測は、宇宙からのリモートセンシング技術という点では比較的新しい試みであり、現在でも衛星測器として実用化されている例はあまりない。この試みを実現させるため、センサの地上での試作試験用モデル (FTS-BBM) を開発し、JAXA の協力の下に NIES では航空機・飛行船・高所観測実験などを行った。現在では FTS-BBM から得られた知見を活かしながら開発モデル (EM) が作成され、その性能試験が始まっている。

OCO では回折格子型の分光器を用いて CO₂ 1.61 μm 帯, 2.06 μm 帯, 及び O₂ A 帯 (0.76 μm) の近赤外放射を測定する。IFOV は矩形で 3 km² である。GOSAT プロジェクトとは異なりセンサの試験モデルを製作していないが、現在運用されている ENVISAT 衛星搭載の SCIAMACHY センサのデータを参考にしてアルゴリズムの開発を行っている。SCIAMACHY は分光分解能こそ OCO のセンサに劣るものの、同様の回折格子型の分光器であり、そこからの知見は OCO の実際の運用で生じると思われる様々な問題を調査する上で有用である。また OCO の検証実験に最適な地上ステーションの選定や、それらのステーションに配備する地上用観測測器の整備状況等に関しても報告がなされた。

GOSAT, OCO ともに打ち上げまであと2年という段階にきており、「世界初の温室効果ガス観測衛星」の称号を目指した良い競争相手であるとともに、温室効果ガス濃度の推定に必要な分光パラメータなどの情報交換や、観測結果の検証実験などで良い協力関係を今後も持つ事を確認して本セッションは終了した。

(吉田幸生)

2.3 センサの校正及び検証

本セッションでは、GOSAT 及び OCO の校正検証に関する講演があった。

GOSAT からは、塩見 (JAXA), 町田 (NIES) が校正検証計画について報告を行った。GOSAT の校正

計画は、打ち上げ前の性能評価試験、打ち上げ後のオンボード校正、観測データを用いた代替校正により実施される。現在、JAXA では開発モデル EM の開発及び性能試験に取り組んでいる。また並行して、試作試験用モデル BBM-1 (Tokyo モデル) を用いた観測評価、およびその改良型の航空機搭載型試験用モデル BBM-2 (Tsukuba モデル) の開発にも取り組んでいる。打ち上げ後の代替校正手法の検討も進めており、他センサ間との相互校正や校正検証評価サイトにおける現場観測を検討中である。検証関連では、町田が日本航空 (JAL) 機による CO₂ 現場観測について報告を行った。2003年からの新しい JAL プロジェクトでは従来の自動サンプリング (ASE) に加えて、CO₂ 連続自動測定 (CME) により、航空機の離着陸時における CO₂ 高度分布をリアルタイムに取得することができる。また航路についても、日本-豪州路線に加えて、アジア、欧州、米国路線にも拡大された。昨年11月には初データが取得され、CME データと ASE データは良い一致を示しており結果は良好である。JAL 機による CO₂ 現場観測データは GOSAT 検証計画でも利用される予定である。また、Zhou (中国気象局) から中国における温室効果ガスの地上観測についての紹介があり、中国としての貢献について提案があった。

OCO からは、Bruegge (米・NASA/JPL) が校正計画について報告した。OCO では2007年2月~4月にかけて2週間の性能評価試験を2度 (試験内容は同じ) 実施する予定で、また、2度の性能試験の間には熱真空試験を1か月程度予定している。これは、センサの特性変化を打ち上げ前まで追跡するための工夫である。OCO 用の試験設備は整備されつつあり、評価試験は過去のセンサ評価で使用されていた積分球に OCO 校正用ランプを新たに取付けて実施される。また打ち上げ後の代替校正については、その評価サイトの候補である Railroad Valley (米国ネバダ州) について説明があった。彼女らは代替校正用の測器を搭載した自転車に乗り、評価サイトを走り回って現場データを取得しているとのことであった。本セッションでは、そのようにして実施された Railroad Valley における MISR や MODIS の代替校正結果のトレンド評価についても紹介があった。検証計画については、特別な報告はなかったが、Miller の講演の中で、全炭素カラム量観測ネットワーク (TCCON) における地上 FTS による CO₂ カラム濃度観測網の整備に向

けた取り組みについて報告があった。

GOSAT と OCO は校正検証において協力することを掲げており、議論の中では校正検証に関する共通のデータベースを持つことや、太陽放射モデルの共通化、装置関数の公開や軌道上での評価手法について意見交換がなされた。(塩見 慶)

2.4 CO₂濃度推定手法の開発

このセッションでは分光放射測定から CO₂濃度等の導出までのデータ解析アルゴリズムについて講演と議論が行われた。

GOSAT と OCO では測定方法は異なるが、データ解析アルゴリズムは類似しており、両者とも対流圏下層の CO₂濃度変動に最大の感度をもつ 1.6 μ m 帯の太陽反射光の測定から、CO₂カラム濃度を推定する。

最初に NIES-GOSAT プロジェクトリーダーである横田 (NIES) が、TANSO-FTS の近赤外 3 バンドを利用した CO₂カラム濃度推定手法の開発状況について講演した。巻雲は CO₂濃度推定の重大な誤差要因であるが、2.0 μ m 帯と 0.76 μ m 帯を利用することで巻雲の情報を得ることができる。得られた情報を基に 1.6 μ m 帯を使用して CO₂カラム濃度を推定する手法が開発され、擬似観測スペクトルを使ったシミュレーションではこの巻雲補正手法が概ね有効であることが示された。また、筑波山 (標高 877 m) に BBM-1 を設置し、同期してセスナ搭載の測定器 (in situ 観測) を用いて実施した高所観測実験では貴重な実観測スペクトルが得られ、その解析を通じて解析アルゴリズムの改良を行っていることが報告された。

OCO とは異なり、TANSO-FTS は熱赤外バンドを有し、熱赤外放射からは特に対流圏中層～上層の CO₂濃度の高度分布が得られる。齋藤 (CCSR) は熱赤外データからの CO₂濃度解析手法について講演し、CO₂濃度の推定誤差を評価できるという利点からベイズ統計に基づいた Maximum A Posteriori (MAP) 解析アルゴリズムの検討を進めていることを報告した。さらに、近赤外放射測定で得られる CO₂カラム濃度を拘束条件として使用する解析手法が提案された。これは近赤外放射データだけを利用する OCO アルゴリズムとは異なる新しい試みである。

Boesch (米・NASA/JPL) は現在開発を進めている OCO データ解析アルゴリズムに関する講演を行った。系統的バイアス誤差の低減のためには放射伝達計算モデルの高精度化が必要であり、特に装置関数など

の分光測器特性を正確に知ることの重要性を指摘した。また SCIAMACHY が測定した CO₂ 1.6 μ m 帯、O₂ A 帯のデータに対し、現在の OCO 解析アルゴリズムを適用した結果について報告があった。SCIAMACHY の分光測器特性に不確定要素があるため、地上観測データとの比較では、得られた CO₂カラム濃度には無視できないバイアス誤差が含まれていた。しかし CO₂カラム濃度の季節変動傾向はかろうじて見えているようであった。

また、Barkley (英・Leicester 大学) は、独自の FSI WFM-DOAS アルゴリズムの紹介と、SCIAMACHY データから得られた北米大陸の CO₂カラム濃度分布や季節変動の様子について講演した。SCIAMACHY データを用いた CO₂濃度解析については未だ多くの検討事項が残されているが、衛星からの CO₂濃度観測の可能性が示され、GOSAT や OCO は大いに期待されているようであった。

CO₂濃度を精度良く求めるためには雲・エアロゾルといった推定誤差要因の影響を取り除く必要がある。この点に関して GOSAT の TANSO-CAI を担当している中島 (CCSR) が講演した。TANSO-FTS の IFOV 内における雲・エアロゾルの分布を把握する為には TANSO-CAI のような高空間分解能センサが必要であることを述べ、さらに陸上のエアロゾルを観測するには近紫外チャンネル (0.38 μ m) が有用であることを示した。しかし、GOSAT の目標である CO₂カラム濃度推定誤差 1% に相当するエアロゾルの光学的厚さは 1.6 μ m 帯で約 0.03 であり、それを識別することは非常に困難な問題である。これに対して、AERONET、SKYNET といった地上エアロゾル観測網や SPRINTARS などのエアロゾル輸送モデルを併用した雲・エアロゾル解析アルゴリズムが提案された。

セッションの最後には、GOSAT と OCO の放射伝達モデルの相互比較や雲・エアロゾルの取り扱いについて活発な議論が行われ、IWGGMS の中でも一際熱いセッションであった。(太田芳文, 吉田幸生)

2.5 炭素収支推定のためのモデル開発

温室効果気体の発生・吸収源 (Source/Sink, S/S) を亜大陸規模で精度良く推定するためには、気体濃度を精度良く測定するだけでなく、観測濃度データから S/S を推定するインバースモデルの開発が重要な位置付けとなる。本セッションでは大気輸送モデル

相互比較 (TransCom) グループの中心的なメンバーを交えて特に衛星観測データを利用した S/S 推定について講演が行われた。

はじめに Maksyutov (NIES) から、CO₂地上観測データのみを利用して亜大陸規模の S/S 推定を行った場合には、特に地上観測の空白域であるアフリカ大陸や南アメリカ大陸での CO₂フラックスの不確実性が大きく、これ以上の精度での推定は困難な状況にあるという講演があった。一般的に衛星観測は地上観測と比べて CO₂濃度の測定精度は劣るものの、全球を均一に観測することができ、観測地点数は圧倒的に多いため、測定精度の多少の劣化は許容できるとの指摘があった。GOSAT や OCO で得られる CO₂濃度データにより、現在の S/S 推定の状況を打開できることが期待される。また NIES GOSAT プロジェクトで現在開発が進められているインバースモデルについて紹介があり、様々な大気輸送モデルの中から最適なものを検討していることや、インベントリデータ (化石燃料消費量、バイオマス燃焼地域データ等) の整備を行っていることが報告された。

Ciais (仏・LSCE) は、CO₂フラックス推定手法として広く使われているベイズ推定法の概要について講演した。さらに衛星観測を想定した擬似的な CO₂濃度観測データを作成し、そこから CO₂フラックスを推定するシミュレーションの紹介を行った。CO₂濃度の観測頻度は OCO を想定しているようであったが、1 か月程度の CO₂濃度データで特に陸域の CO₂フラックス推定誤差が大幅に減少することが示された。しかし CO₂観測データに 0.3ppmv ほどのバイアス誤差が含まれている場合、その影響はそのまま CO₂フラックス推定結果にも無視できないバイアス誤差となって現れることが指摘された。GOSAT、OCO とも CO₂カラム濃度測定におけるバイアス誤差の低減が重要な課題であると言える。

このほか、Carouge (NIES) が大気輸送モデル LMDZ を利用し、ヨーロッパに着目した地域規模の CO₂フラックス分布推定について講演を行った。地域規模の領域に限った推定を行う場合も、観測サイトの空間的な配置や輸送モデルの品質に起因する影響が顕著に現れてくることが指摘された。また Petron (米・NCAR) は、Terra 衛星搭載の MOPITT と化学輸送モデル MOZART を利用した CO の放出源推定、及び大気中 CO 濃度分布とその季節変動について講演した。データ同化技術を介して観測と化学輸送モ

デルが融合するという非常に印象的な内容であり、物質循環研究における新たな糸口を垣間見る講演であった。(太田芳文)

3. 第3回温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) シンポジウム

本節では、個人的な感想を交えてシンポジウムの概要を紹介する。GOSAT に関連した講演では安岡、浜崎、Maksyutov が、米国の OCO プロジェクトからは Crisp が講演した。また、住 (CCSR) が「気候研究の最前線」と題して地球温暖化による気候変動研究について講演し、さらに清水 (慶応大学) により「地球温暖化解決のための電気自動車」という講演が行われた。Crisp は英語での講演であり逐次通訳が行われていたが、講演内容は明瞭であり通訳なしでも非常に分かり易いものであった。

GOSAT、OCO とも大気中 CO₂濃度を人工衛星から測定することを目的としているが、両プロジェクトの講演を続けて聴講できたため、2つのプロジェクトの共通点、相違点が明確に理解できたところが良かった。特に Crisp が講演の中で OCO と GOSAT の「Friendly Competition (友好的な競争)」を強調していたところが印象的であった。つまり、GOSAT、OCO 両プロジェクトの成功の為にはその結果が Scientific Community に受け入れられることが重要であり、その為にもお互いの観測データを比較・検証し合い、その確実性を認めた上で各プロジェクトの成果に結び付けることが重要との認識が示されていた。

Maksyutov の講演は、衛星観測により得られた CO₂濃度からその発生・吸収源を亜大陸規模で推定するというものであった。GOSAT や OCO のような CO₂濃度の衛星観測が実現すれば、亜大陸規模での CO₂の排出・吸収量の推定が可能であり、国土面積の大きな国であれば国別の排出量推定ができる可能性があるということであった。また住の講演では、地球温暖化に伴う気候変動の将来予測について、最新の予測結果が紹介された。気候の将来予測のためには CO₂排出シナリオをどの様に設定するかが重要であるが、より現実的なシナリオを設定するためには新たな観測が必要であり、GOSAT、OCO の両プロジェクトの意義は非常に重要なものであるということであった。

最後に、清水の電気自動車開発に関する研究の紹介があった。市販されている車の中では最も加速性が良いとされているボルシェと、最新の電気自動車との加

速性能試験の映像が紹介され、電気自動車の方が短時間で時速300 kmの走行速度までスピードを上げる事が出来る様子は印象深かった。

なお、本シンポジウムの講演資料は、<http://www.prime-intl.co.jp/gosat2006/program.html>より取得することが可能である。(中塚由美子)

略語一覧

AERONET : Aerosol Robotic Network
 ASE : Improved Automatic Air Sampling Equipment
 自動大気採取装置
 ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer 資源探査用将来型センサ
 BBM : Bread Board Model
 CAI : Cloud and Aerosol Imager
 CCSR : Center for Climate System Research 気候システム研究センター (東京大学)
 CME : Continuous CO₂ Measurement Equipment
 EM : Engineering Model
 ENVISAT : Environment Satellite
 EOS : Earth Observing System 地球観測システム
 FSI : Full Spectral Initiation
 FTS : Fourier Transform Spectrometer フーリエ変換型分光器
 GEOSS : Global Earth Observation System of Systems 全球地球観測システム
 GOSAT : Greenhouse Gases Observing Satellite 温室効果ガス観測技術衛星
 IFOV : Instantaneous Field of View 瞬時視野
 IWGGMS : International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space 宇宙からの温室効果ガス観測に関する国際ワークショップ
 JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構
 JPL : Jet Propulsion Laboratory 米国ジェット推進研

究所

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique フランス気象力学研究所
 LMDZ : (フランス LMD で開発された気候モデル)
 LSCE : Le Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement フランス気候環境科学研究所
 MISR : Multi-angle Imaging Spectroradiometer
 MOE : Ministry of the Environment 環境省
 MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer 分解能撮像分光放射計
 MOPITT : Measurements of Pollution in the Troposphere 対流圏汚染観測計
 MOZART : Model for Ozone and Related Chemical Tracers オゾン及び関連微量成分用化学輸送モデル
 NASA : National Aeronautical and Space Administration 米国航空宇宙局
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター
 NIES : National Institute for Environmental Studies 国立環境研究所
 OCO : Orbiting Carbon Observatory
 SCIAMACHY : Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography
 SKYNET : Sky Radiometer Network
 SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species
 TANSO : Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation
 TCCON : Total Carbon Column Observing Network 全炭素カラム量観測ネットワーク
 TransCom : The Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project 大気トレーサー輸送モデル相互比較計画
 WFM-DOAS : Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy