

課題名	2A-1102 「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究
課題代表者名	森野 勇（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室）
研究実施期間	平成23～25年度
累計予算額	191,492千円（うち25年度58,169千円） 予算額は、間接経費を含む。
本研究のキーワード	温室効果ガス観測技術衛星、「いぶき」、GOSAT、二酸化炭素、メタン、解析アルゴリズム、検証、エアロゾル、巻雲、ライダー、放射計、高精度温室効果ガス観測

研究体制

- (1) 長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究（（独）国立環境研究所）
- (2) 重点サイトにおける巻雲・エアロゾル光学特性観測に関する研究（国土交通省気象庁気象研究所）
- (3) 重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測に関する研究（（独）宇宙航空研究開発機構）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

地球温暖化は最も重要な環境問題の一つであり、原因となる温室効果ガス濃度の実態把握、地球温暖化による自然生態系・人間社会への影響評価、温暖化対策が必要である。全球の温室効果ガスの時間・空間変動を把握するためには、全球にわたり高頻度の観測が可能な人工衛星を用いた分光観測が最も有効である。このため環境省、国立環境研究所(NIES)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、温室効果ガスの状況を把握する「温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)プロジェクト」を共同で実施することとなった。本プロジェクトは、地球大気中の二酸化炭素やメタンの高精度観測を本格的に目指すもので、この衛星（「いぶき」）に搭載されたフーリエ変換分光計(TANSO-FTS)で観測されたスペクトルの解析によって温室効果ガス濃度を推定するが、地表面反射率、巻雲・エアロゾルの光学的厚さ・分布・種類等から生じる系統的な誤差（バイアス）を補正する必要がある。

「いぶき」は2009年1月23日に、宇宙航空研究開発機構種子島宇宙センターから打ち上げられた。「いぶき」打ち上げ後、衛星及び観測装置の動作確認が行われ、初期校正検証観測期間を経て通常観測モードに移行し、2014年5月現在も順調に全球観測を継続している。「いぶき」の推定結果には最初15 ppm程度の負のバイアスが見られたが、TANSO-FTSの装置関数補正や輝度精度向上、アルゴリズム改良及び初期値改訂と初期検証を繰り返すことにより、明らかに異常値である温室効果ガス濃度データの数は飛躍的に減少した。初期検証結果により、二酸化炭素(CO₂)の場合9 ppm程度の負のバイアスと4 ppm程度のばらつきが存在すること(不確かさで10 ppm程度)が明らかとなり、「いぶき」の温室効果ガス濃度データは一般に公開された。しかしながらこれでは世界研究者の高い評価には至らない精度であり、インバースモデル解析による温室効果ガス収支を含む科学的利用に活用されるためには不十分である。

そこでより高い精度の実現を目指すには、より長期間の検証データを取得しそれらを用いた継続的な検証を行うことで季節変動や経年変動についても評価する必要がある。また地上設置高分解能FTSによる観測と同時に地上の高精度観測装置を用いて巻雲・エアロゾル光学特性を取得し、「いぶき」の温室効果ガス濃度データとの相関解析等を行い、この結果を解析アルゴリズムの改良と初期値の改良などに反映させ、「いぶき」観測データの解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化を行うことが必要である。

2. 研究開発目的

「いぶき」は、対流圏までの温室効果ガスを専用に観測する世界初かつ世界唯一の衛星であり、定常運用が終了後の現在も観測を継続している。その解析結果には従来の大気組成成分観測衛星に求められている精度(数%程度)をはるかに超える1%以下の精度が要求されている。「いぶき」に搭載されたTANSO-FTSの校正、解析処理アルゴリズムの改良と初期値の改訂、検証作業を繰り返すことにより、2010年秋までにCO₂の場合、9 ppm程度の負のバイアスと4 ppm程度のばらつき(不確かさで10 ppm程度)に抑えることに成功している。

一方、観測データのインバースモデル解析による温室効果ガス収支の研究利用については、温室効果ガス濃度の更なる高精度化が要求されている。濃度データ解析における誤差要因は、観測装置(特性)の校正、解析アルゴリズムの不完全性、初期値誤差等であるが、これまで研究的要素が低い業務は既に実施した。

本研究ではより高度な検証と解析アルゴリズムの改良を行って、「いぶき」観測データの解析から得られた温室効果ガス濃度の高精度化を目的とする。目標として、CO₂の場合2 ppm程度のバイアス、ばらつき2 ppm(不確かさで3 ppm)と、現在の不確かさ(推定誤差)の半減を目指す。

3. 研究開発の方法

研究開発方法は図1に示し、サブテーマにそって以下に記載する。

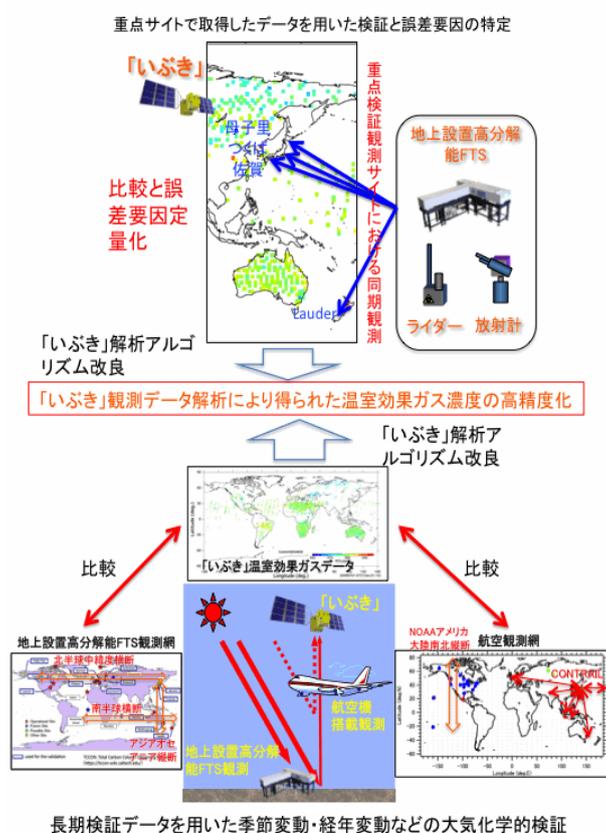


図1 本研究の概念図

(1) 長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究

3年以上の長期間検証データの解析を行い、そのデータ質を評価する。長期間検証データを用いた「いぶき」データの検証、更に、サブテーマ(2)、(3)と協力して重点サイトにおける「いぶき」データの検証を実施する。感度解析結果と検証結果をもとに、解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂を行い、「いぶき」観測データの再解析を実施する。この結果をサブテーマ(2)、(3)と協力して検証し、「いぶき」データの高精度化の確認をする。

(2) 重点サイトにおける巻雲・エアロゾル光学特性観測に関する研究

重点サイトにおいて地上高精度温室効果ガス観測装置に同期してライダー及び放射計による観測体制を構築する。観測を実施し、取得データの解析を行い、それらのデータ質を評価する。この研究によって得られた巻雲・エアロゾル光学特性データはサブテーマ(1)を中心とした検証に活用される。更に、サブテーマ(1)の重点サイトにおける「いぶき」データの検証と高精度化の確認を協力して実施する。

(3) 重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測に関する研究

重点サイトにおいて地上設置高精度温室効果ガス観測装置を用いた観測体制を構築する。観測を実施し、解

析を行い、そのデータ質を評価する。この研究によって得られたデータはサブテーマ(1)を中心とした検証に活用される。更に、サブテーマ(1)の重点サイトにおける「いぶき」データの検証と高精度化の確認を協力して実施する。

4. 結果及び考察

(1) 長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究

「いぶき」観測データの解析より得られた温室効果ガスのデータ質を評価するために、3年以上の長期間検証データを用いて季節変動成分や経年変動成分等の大気化学的視点を考慮した検証、重点サイトにおける検証と誤差要因の特定を実施した(重点サイトにおける検証と誤差要因の特定は(2)に記載)。感度解析結果と上記検証結果をもとに、解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂を行い、「いぶき」観測データの再解析を実施し高精度化を確認した。多くの結果を得たが顕著なものは下記の通りである。

1) 長期間検証データの評価と「いぶき」データ検証

改善された「いぶき」データに対して長期間検証データを用いた季節変動・経年変動などの大気化学的検証を行い、バイアスの特徴を明らかにした。航空機観測データを用いて検証を行い、TCCON(Total Carbon Column Observing Network)データによる検証と同様の結果を得た。殆どバイアスはなくなったが完全にゼロではなかった。このためTCCONデータを用いたバイアスの経験的補正手法を開発し、経験的補正を行い、独立した検証データの航空機観測データを用いて、補正後の「いぶき」データ質の改善を確認した。

補正法は、次の手順で行った。「いぶき」データとTCCONデータの差(二酸化炭素の場合 ΔXCO_2)と、各物理量との相関を調べた。調査した物理量は、地表面気圧の導出値、地表面気圧の先験値と導出値の差(地表面気圧差)、エアマス、 O_2 吸収バンドにおけるアルベド、 CO_2 吸収バンドにおけるアルベド、 O_2 吸収バンドにおける信号雑音比(SNR)、 CO_2 吸収バンドにおけるSNR、エアロゾル光学的厚さ(AOD)などである。これらのうち相関が大きく、二酸化炭素とメタンに共通である4物理量、地表面気圧差、AOD、エアマス、 O_2 吸収バンドにおけるアルベドを採用し補正を行い、補正後は物理量の相関が無くなったことを確認した。なお、メタンの場合も同様の結果を得ることができた。つぎに、補正結果を確認するために、補正前後の「いぶき」データと航空機観測データの比較を行った。図2に散布図を示す。二酸化炭素の場合は、補正後「いぶき」時系列データは航空機観測データに対して一致度が改善されたことが分かった。更に、散布図を比較したところバイアスとばらつきともに改善されたことが確認できた。一方メタンの場合は、陸域でバイアスが小さくなったが、海域は大きな変化はなかった。陸域の相関係数は変化しなかった。

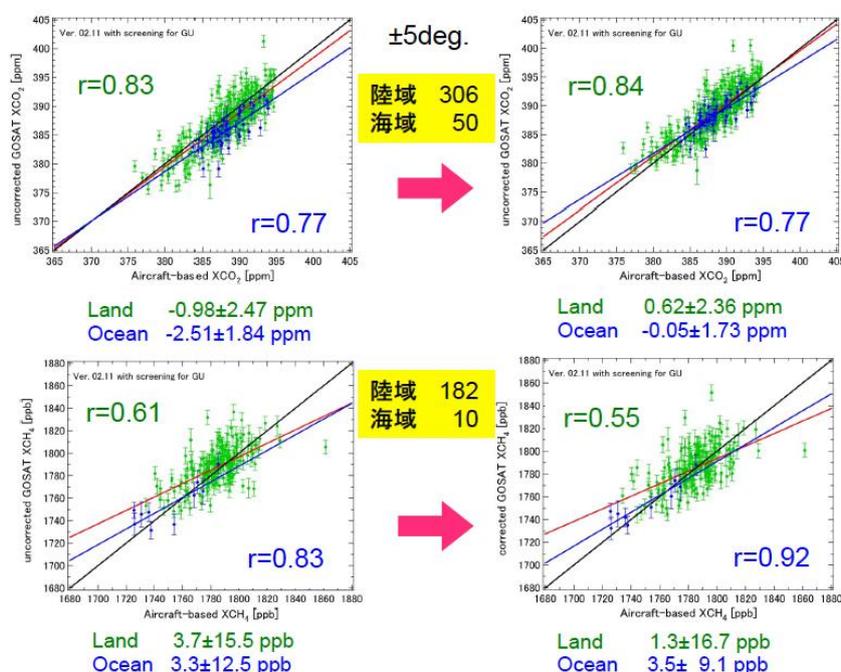


図2 補正前後の「いぶき」データと航空機観測データの散布図
陸域306、海域50等は「いぶき」データの検証に用いたデータセット数である。

2) アルゴリズム改良と初期値改良

本推進費の研究開始時における前バージョンのアルゴリズムを用いた「いぶき」の二酸化炭素カラム平均濃度(XCO₂)のデータ質は、バイアス-9 ppm程度(-2 %程度)、バラツキ4 ppm程度(1 %程度)であったが、下記のつくばにおけるケーススタディと連携しながら解析アルゴリズム改良と参照値の改良を行った結果、バイアス-1.48 ppm(-0.3 %程度)、ばらつき2.1 ppm(0.5 %程度)まで改善し、本推進費の目標を達成した。主な改善項目を表1にまとめた。

表1 主な改訂項目とTCCONデータを用いて評価した「いぶき」データのバイアスの変化

	XCO ₂	XCH ₄
V01.xx	-8.85 ppm	-20.4 ppb
太陽照度データ	(+3 ppm)	(-7 ppb)
エアロゾル光学特性	(+3 ppm)	(+12 ppb)
エアロゾル高度分布	(-1 ppm)	(-4 ppb)
O ₂ 分光パラメータ	(+2 ppm)	(+10 ppb)
V02.00	-1.20 ppm	-7.2 ppb
V02.xx	-1.48 ppm	-6.0 ppb

[注]V01.xx, V02.00: TCCON データ (2009 年公開版) を使用。V02.xx: TCCON データ (2012 年公開版) を使用。V02.00 : 2009/06~2010/07 観測分。V02.xx: 2009/06~2012/11 観測分。

更なる改善を目指して、FTS SWIR L2 (Short Wave InfraRed レベル2) Ver. 02.11プロダクトの実態把握、および、雲の影響が比較的小さい事例に対する検討を実施した。雲の影響が「いぶき」推定結果にどのように影響するかについては、雲の割合が1 %よりも小さい場合は、影響が無視できることを明らかにした。また、巻雲の存在する場合の同時推定を試みた結果、バイアス・ばらつきは改善された「いぶき」データと概ね一致した。

3) 重点サイトTsukubaにおけるケーススタディ

重点サイトの1つであるつくばにおける高精度温室効果ガスと巻雲・エアロゾル光学特性の観測結果を用いたケーススタディを行った。エアロゾルの高度分布としてSPRINTARS(Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species)のシミュレーション値を先験値として、またToonの太陽スペクトルを用いて、バンド1、バンド2に加えてバンド3の観測スペクトルに対してエアロゾルと巻雲も同時推定した結果、図3に示すようにXCO₂のTCCONデータに対するバイアスは、0.17 ppm (0.04 %)と大幅に改善することを確認した。

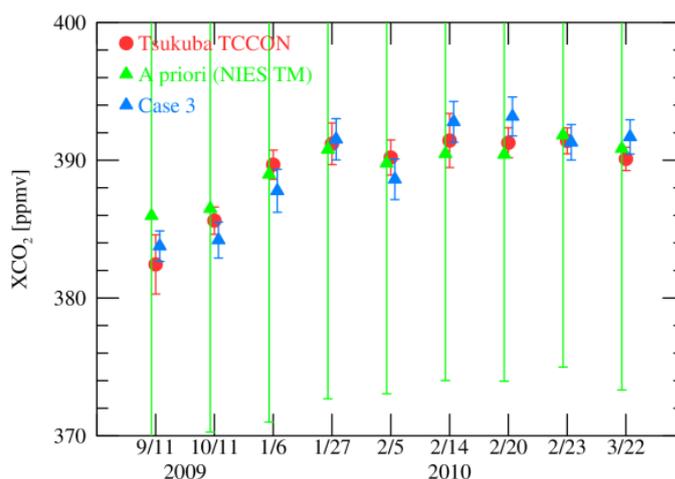


図3 「いぶき」の観測による解析で最も現実的な条件で推定した「いぶき」データ(青▲: Case 3)のTsukuba地上設置高分解能FTSデータ(赤●: Tsukuba TCCON)を用いた評価。緑▲は先験値である。

(2) 重点サイトにおける巻雲・エアロゾル光学特性観測に関する研究

「いぶき」で観測する二酸化炭素とメタンの観測データの高精度化のため、巻雲やエアロゾルの高度分布が測定できるライダーと、精密な光学特性が観測可能な放射計(スカイラジオメーター)を、「いぶき」データの検証のために設定された重点サイト4地点(Moshiri、Tsukuba、Saga、Lauder)に展開し、「いぶき」に同期した検証観測

を行った。表2に4重点サイトにおけるライダーデータ取得状況を示した。

表2 重点4サイトにおけるライダーデータ取得状況(2013年10月17日現在)

観測点	母子里 (44°N)	つくば (36°N)	佐賀 (33°N)	Lauder (45°S)
観測開始日	09/4/14	09/2/2	11/3/23	09/2/18
オーバーパス日数	550	574	312	569
観測日数	109	510	167	272
データ取得率(%)	20	89	54	48

地上FTS、ライダー、スカイラジオメーター、「いぶき」のデータを比較することにより、1) 巻雲のスクリーニング・解析方法を改善することによりデータ数を増加させることが可能なこと、2) 図4に示すように下層エアロゾルの過小評価によりXCO₂データに誤差が生じる可能性があること、3) 成層圏エアロゾルの影響は無視できないことなどを示した。また、放射計観測からは、1) 1年に1回程度は放射計の正確な検定を行う必要があること、2) 可降水量を推定することにより水蒸気の影響を考慮した光学的厚さの推定が可能になったこと、3) 近赤外の波長域でエアロゾル光学特性が分かるようになりエアロゾルの誤差への影響をより正確に評価できるようになったこと、などの成果があった。

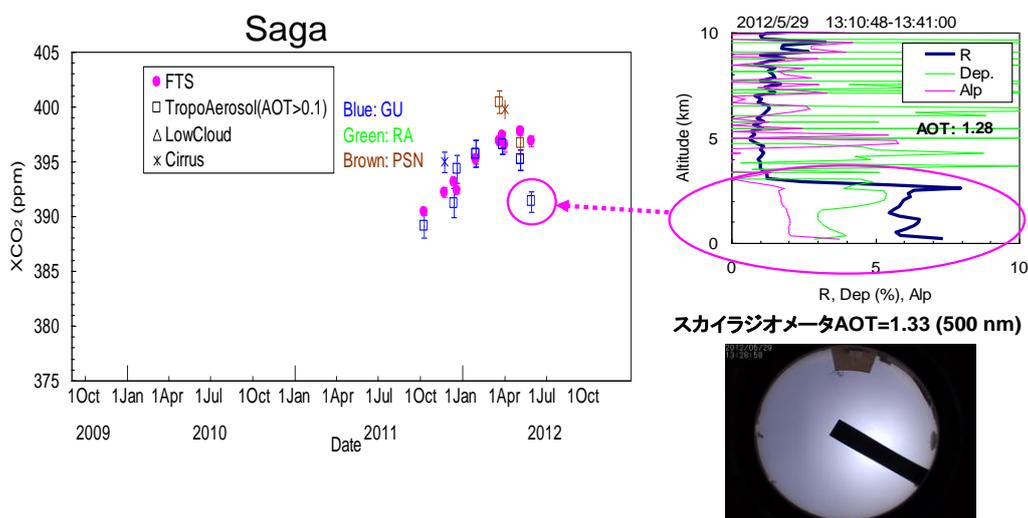


図 4 Sagaで観測された高濃度エアロゾルの事例(2012年5月29日、図左赤丸で囲んだデータ)。図右上:同時刻にライダーで観測した後方散乱比(青線)と偏光解消度(緑線)、後方散乱係数の波長依存性(マゼンタ線)の高度プロファイル。図右下:同時刻におけるスカイビューカメラの画像。

(3) 重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測に関する研究

「いぶき」の観測は、大気中に存在する巻雲やエアロゾルが二酸化炭素とメタンの測定結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。これらの影響を取り除き「いぶき」の観測データの精度を向上させるためには、巻雲やエアロゾルの影響が少ない二酸化炭素のカラム量の地上観測データで検証する必要がある。このため、重点サイトを設け、地上設置高精度温室効果ガス観測装置の整備および観測を実施した。「いぶき」に同期した観測を実施し、スペクトルや解析に必要な気温、湿度、日射データ等の付随データを取得し、データ質の確認と整理を行い、検証に利用可能なデータセットを作成した。このデータとサブテマ(2)のライダーデータ等を用いて、サブテマ(1)に記載された重点サイトTsukubaにおけるケーススタディ(全サブテマ共同で実施)やサブテマ(1)に記載された地上FTS、ライダー、スカイラジオメーター、「いぶき」のデータを比較(全サブテマ共同で実施)に使用した。

表3 重点4サイトにおけるFTSデータの取得状況(2013年12月31日現在)

Sites	観測開始日	オーバーパス日	データ入手状況(観測日)
Tsukuba	2009/01/01	586	230 (2013/11/22まで)
Lauder	2009/01/01	586	188 (2013/12/03まで)
Saga	2011/06/01	314	121
Moshiri	2009/08/21	408	47*
Rikubetsu	2013/11 -	--	--

更に、Saga、Tsukuba、Lauderサイトにおける地上FTSと「いぶき」XCO₂の推定結果、スカイラジオメーターのデータから推定した760 nmのエアロゾルの光学的厚さを比較した。図5にSagaサイトの場合を示す。Tsukuba、Lauderサイトでの地上FTSと「いぶき」FTS SWIRからの推定値を比較した場合、SagaサイトでのGOSATデータのばらつきが地上FTSより大きく見える。Sagaサイトのエアロゾルの光学的厚さは、Tsukuba、Lauderと比較して、高くばらつきも大きい。このことから、サブテーマ「長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究」において、「いぶき」のアルゴリズム改良を実施することにより精度向上しているが、更にエアロゾルの扱いを適切にすることにより精度向上が見込まれることが示唆される。

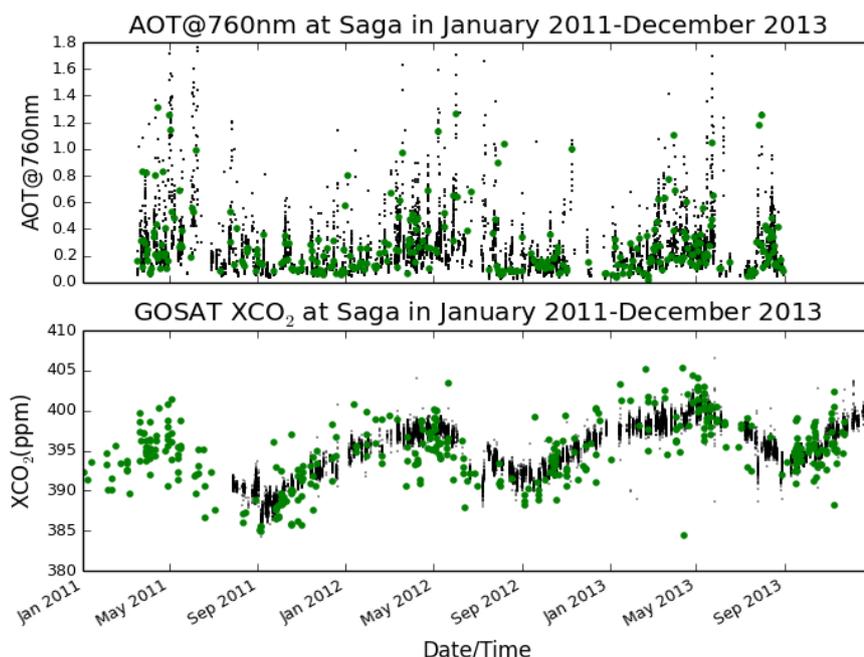


図 5 Sagaサイトにおける地上設置FTS (黒)と「いぶき」(緑)によって観測されたXCO₂の時系列(下図)。スカイラジオメーターから推定した760 nmのエアロゾルの光学的厚さ(黒)と「いぶき」FTS SWIRから推定したエアロゾルの光学的厚さ(緑)(上図)

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) 「いぶき」観測データの解析より得られた温室効果ガスのデータ質を評価するために必要な長期検証データの確保とそのデータ質の確認を行った。長期間検証データを用いた季節変動・経年変動などの大気科学的検証を行い、バイアスの特徴を明らかにすることができた。航空機観測データを用いて改善された「いぶき」データの検証を行い、TCCONデータによる検証と同様の結果、つまり殆どバイアスがないことを確認できたが、バイアスは完全にゼロではなかった。このためTCCONデータを用いたバイアスの経験的補正手法を開発し、経験的補正を行い、独立した検証データである航空機観測データを用いて、補正後の「いぶき」データ質の改善を確認した。

2) 本推進費の研究開始時における前バージョンのアルゴリズムを用いた「いぶき」のXCO₂は、バイアス-9 ppm

程度(-2 %程度)、バラツキ4 ppm程度(1 %程度)であるが、下記のつくばにおけるケーススタディと連携しつつ解析アルゴリズム改良と参照値の改良を行った。この結果、バイアス-1.48 ppm (-0.3 %程度)、ばらつき2.1 ppm(0.5 %程度)まで改善し、目標を達成することが出来た。

更なる改善を目指して、FTS SWIR L2 Ver. 02.11プロダクトの実態把握、および、雲の影響が比較的小さい事例に対する検討を実施した。雲の影響が「いぶき」推定結果にどのように影響するかについては、雲の割合が1 %よりも小さい場合は、影響が無視できることを明らかにした。また、巻雲の存在する場合の同時推定を試みた結果、バイアス・ばらつきは改善された「いぶき」データと概ね一致した。

3) 重点サイトにおける高精度温室効果ガスと巻雲・エアロゾル光学特性の観測の観測を行い、地上FTS、ライダー、スカイラジオメーター、「いぶき」のデータを比較することにより、a) 巻雲スクリーニング・解析方法を改善することによりXCO₂データ数を増加させることが可能であること、b) 下層エアロゾル過小評価によりXCO₂データ誤差が生じる可能性の例示、c) 成層圏エアロゾルの影響は無視できないこと、を明らかにした。

また放射計観測からは、d) スカイラジオメーターの検定定数が経年変化をしており、1年に1回程度は正確な検定を行う必要があること、e) 940 nmチャンネルから可降水量を推定することにより、1627 nmや2200 nmで水蒸気の影響を考慮した光学的厚さの推定が可能になったこと、f) 温室効果ガスの量を推定するために使われる近赤外の波長域でのエアロゾルの特性が直接分かるようになり、より正確にエアロゾルの誤差への影響を評価できるようになったこと、を明らかにした。

4) 重点サイトの1つであるつくばにおける高精度温室効果ガスと巻雲・エアロゾル光学特性の観測結果を用いたケーススタディを行った。エアロゾルの高度分布としてSPRINTARSのシミュレーション値を先験値として、またToonの太陽スペクトルを用いて、バンド1、バンド2に加えてバンド3の観測スペクトルに対してエアロゾルと巻雲も同時推定した結果、二酸化炭素カラム平均濃度はTCCONデータに対してバイアス0.17 ppm (0.04 %)と改善することを確認できた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) GOSAT中間総括会議における本推進費の成果の活用(2012年1月～3月)

GOSAT後継機への反映事項を提言することを目的にGOSAT中間総括会議が3回開催され、本研究の成果である解析アルゴリズム改良と参照値の改良による「いぶき」データ改善の見通しを示し、GOSAT後継機を推進する環境省、JAXA及びNIESに重要な知見を与えることができた。

2) 「いぶき」データ FTS SWIR Ver. 02.xxデータの一般公開(2012年6月)

本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を反映した「いぶき」データの再処理が行われ、そのデータ質の大幅な改善が確認された。この結果を基に新バージョンプロダクトが公開された。

3) 第4回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2012年6月)

GOSATプロジェクトから得られる成果をさらに豊かに有効なものとするため、一般からの研究公募を実施している。米国カリフォルニア工科大学で、環境省、NIES、JAXAの主催で研究公募課題代表者会合が行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データの改善結果を報告した。

4) 第5回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2013年6月)

GOSATプロジェクトから得られる成果をさらに豊かに有効なものとするため、一般からの研究公募を実施している。横浜シンポジウムで、環境省、NIES、JAXAの主催で研究公募課題代表者会合が行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データの改善結果を報告した。

5) GOSATサイエンスチーム会合における研究成果の発表(2013年10月)

環境省、NIES、JAXAによって設置され定期的に開催されているGOSATサイエンスチーム会合で、本推進費の研究成果である航空機観測データを用いた検証解析について、情報を提供し、議論を行った。

6) 温室効果ガス観測技術衛星定常運用終了審査会における本推進費の成果の活用(平成26年2月14日)

温室効果ガス観測技術衛星定常運用終了審査会が行われ、環境省、NIES、JAXAの作成した資料を用いて発表が行われた。本研究の研究成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 第6回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2014年6月)

本会合はつくば市つくば国際会議場で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データの研究成果が活用される予定である。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Y. Yoshida, N. Kikuchi, T. Yokota: Atmospheric Measurement Techniques, 5, 2515–2523 (2012)
“On-orbit radiometric calibration of SWIR bands of TANSO-FTS onboard GOSAT”
- 2) O. Uchino, N. Kikuchi, T. Sakai, I. Morino, Y. Yoshida, T. Nagai, A. Shimizu, T. Shibata, A. Yamazaki, A. Uchiyama, N. Kikuchi, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 3393–3404 (2012)
“Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂: a case study over Tsukuba”
- 3) O. Uchino, T. Sakai, T. Nagai, K. Nakamae, I. Morino, K. Arai, H. Okumura, S. Takubo, T. Kawasaki, Y. Mano, T. Matsunaga, T. Yokota: Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 11975–11984 (2012)
“On recent (2008–2012) stratospheric aerosols observed by lidar over Japan”
- 4) Y. Yoshida, N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Saeki, N. Schutgens, G. C. Toon, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, D. W. T. Griffith, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, J. Robinson, V. Sherlock, B. Connor, M. Rettinger, R. Sussmann, P. Ahonen, P. Heikkinen, E. Kyrö, J. Mendonca, K. Strong, F. Hase, S. Dohe, and T. Yokota: Atmospheric Measurement Techniques, 6, 1533–1547 (2013)
“Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data”
- 5) Y. Miyamoto, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. C. Biraud, P. K. Patra: Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 5265–5275 (2013)
“Atmospheric column-averaged mole fractions of carbon dioxide at 53 aircraft measurement sites”
- 6) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. C. Biraud, T. Tanaka, S. Kawakami, and P. K. Patra: Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 9771–9788 (2013)
“Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”
- 7) 酒井哲、内野修、森野勇、永井智広、赤穂大河、川崎健、奥村浩、新井康平、内山明博、山崎明宏、松永恒雄、横田達也: 日本リモートセンシング学会誌 (2013年3月19日受理)
「佐賀のライダーとスカイラジオメータによって検出された桜島の火山灰の高度分布と光学特性」

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象: 社会・政策研究の分野)

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 内野修、菊地信弘、森野勇、吉田幸生、横田達也、酒井哲、永井智広、真野裕三、清水厚、柴田隆、山崎明宏、内山明博、菊地信行: 第29回レーザーセンシングシンポジウム (2011)
「GOSATプロダクト改良に向けたライダーとスカイラジオメータデータの利用」
- 2) 森野勇、井上誠、宮本祐樹、菊地信弘、吉田幸生、内野修、町田敏暢、横田達也、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, P. K. Patra: 第17回大気化学討論会 (2011)
「GOSAT TANSO-FTS SWIRによる温室効果ガスの観測と検証の進捗状況」
- 3) 内野修、永井智広、酒井哲、真野裕三、Ben Liley、柴田隆、森野勇、横田達也、田久保祥一郎、奥村浩、新井康平: 第17回大気化学討論会 (2011)
「ライダーで観測された成層圏エアロゾルの変動について」
- 4) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, P. K. Patra: 第17回大気化学討論会 (2011)
「航空機観測データを用いたGOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂プロダクトの検証」
- 5) 川上修司、大山博史、塩見慶、田浦朝陽、深町拓也、奥村浩、新井康平、田中智章、森野勇、内野修: 日本気象学会2011年度秋季大会 (2011)
「GOSATデータ検証のための地上高分解能FTSによる二酸化炭素およびメタンの気柱量の長期観測」
- 6) O. Uchino, N. Kikuchi, T. Sakai, I. Morino, Y. Yoshida, T. Nagai, A. Shimizu, T. Shibata, A. Yamazaki, A. Uchiyama, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: AGU Fall Meeting 2011 (2011)
“Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂ and a strategy for retrieval improvement”

- 7) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, P. K. Patra: AGU Fall Meeting 2011, Abstracts of AGU Fall Meeting 2011 (2011)
 “Validation of XCO₂ derived from SWIR of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”
- 8) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota :AGU Fall Meeting 2011 (2011).
 “Study on the retrieval biases appeared in the GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 V01.xx Product”
- 9) O. Uchino, I. Morino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, D. Wunch, P. Wennberg, G. Toon, J. Notholt, V. Sherlock, B. Liley, D. Griffith, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagai, T. Sakai, K. Arai, H. Okumura: EGU General Assembly 2012 (2012)
 “Advanced validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at TCCON and prioritized observation sites”
- 10) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: EGU General Assembly 2012 (2012)
 “Preliminary results of the improved GOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂ and XCH₄ retrievals”
- 11) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, C. Sweeney, P. P. Tans, T. Machida: EGU General Assembly 2012 (2012)
 “Validation of XCH₄ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”
- 12) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也、竹村俊彦: 日本気象学会2012年度春季大会 (2012)
 「SPRINTARSを利用したGOSAT SWIRエアロゾル補正アルゴリズム」
- 13) 吉田幸生、菊地信弘、井上誠、森野勇、内野修、横田達也: 日本気象学会2012年度春季大会 (2012)
 「GOSAT TANSO-FTS SWIR L2カラム量プロダクトの改訂」
- 14) 山崎明宏、内山明博、上沢大作、工藤玲: 日本気象学会2012年度秋季大会(2012)
 「比較検定とImproved Langley法で決められたスカイラジオメーターの検定定数について」
- 15) 内山明博、山崎明宏、工藤玲、上沢大作: 日本気象学会2012年度秋季大会(2012)
 「スカイラジオメーターの940nmチャンネルによる水蒸気量の推定」
- 16) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、佐伯田鶴、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和: 第18回大気化学討論会 (2012)
 「航空機観測データを用いたGOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂とXCH₄の検証」
- 17) 森野勇、井上誠、中前久美、宮本祐樹、菊地信弘、吉田幸生、内野修、町田敏暢、横田達也、澤庸介: 第18回大気化学討論会 (2012)
 「改良した解析アルゴリズムで導出したGOSAT TANSO-FTS SWIRプロダクトとその検証解析」
- 18) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota: AGU Fall Meeting 2012, Abstracts (2012)
 “GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 Version 02 Product and its Validation”
- 19) I. Morino, O. Uchino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, S. Kawakami, T. Nagai, K. Arai: AGU Fall Meeting 2012 (2012)
 “Extended validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at TCCON sites with co-located aerosol profiling”
- 20) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也: 日本気象学会2013年度春季大会 (2013)
 「GOSAT SWIR温室効果ガス濃度導出精度に対するBRDFの影響」
- 21) 中前久美、内野修、森野勇、B. Liley、酒井哲、永井智広、横田達也: 日本気象学会2013年度春季大会、同予稿集、322 (2013)
 「Lauderにおけるプジェウエ火山噴火によるエアロゾル層のライダー観測結果について」
- 22) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也: 日本地球惑星科学連合2013年大会 (2013)
 「温室効果ガス観測技術衛星GOSATによる植生の観測」
- 23) N. Kikuchi, Y. Yoshida, O. Uchino, I. Morino, and T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
 “An Algorithm for Greenhouse Gas Retrievals Using Polarization Information Measured by GOSAT TANSO-FTS”
- 24) T. Sakai, O. Uchino, I. Morino, T. Nagai, S. Kawakami, H. Ohyama, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura, Y. Takubo, K. Kawasaki, T. Akaho, T. Shibata, T. Nagahama, Y. Yoshida, N. Kikuchi, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
 “Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based

lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”

- 25) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota, TCCON partners: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
 “Extension of the targets for the GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ retrievals”
- 26) H. Ohyama, S. Kawakami, T. Fukamachi, K. Arai, H. Okumura: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)
 “Status of Saga site”
- 27) I. Morino, T. Matsuzaki, H. Ikegami, H. Ohyama, N. Yokozeki: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)
 “Status of Tsukuba and Rikubetsu TCCON sites”
- 28) 吉田幸生、菊地信弘、井上誠、森野勇、内野修、横田達也: 日本気象学会2013年度秋季大会 (2013)
 「GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 カラム量プロダクト次期バージョン(V03)へ向けた検討ー」
- 29) S. Kawakami, H. Ohyama, K. Shiomi, F. Fukamachi, C. Taura, K. Arai, H. Okumura: International Symposium on Remote Sensing 2013 (2013)
 “Observations of Carbon dioxide and Methane column amounts measured by high resolution FTIR at Saga in 2011–2012”
- 30) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, T. Saeki, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. Biraud, T. Tanaka, S. Kawakami: 2013 AGU Fall Meeting (2013)
 “Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ using TCCON data and aircraft measurements: Parameter dependency of GOSAT biases and the bias correction”

7. 研究者略歴

課題代表者: 森野 勇

総合研究大学院大学数物科学研究科修了(博士課程)、博士(理学)、

現在、(独)国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員

研究分担者

1) 永井 智広

名古屋大学大学院環境学研究科(博士課程)修了、博士(理学)、

国土交通省気象庁気象研究所気象衛星・観測システム研究部主任研究官、

現在、同室長

2) 川上 修司

名古屋大学大学院理学研究科(博士課程)修了、博士(理学)、

独立行政法人宇宙航空研究開発機構第一衛星利用ミッション本部地球観測研究センター主任開発員

2A-1102 「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究
(1) 長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究

(独) 国立環境研究所 地球環境研究センター 衛星観測研究室

森野 勇、吉田 幸生、横田 達也

平成23～25年度累計予算額：130,169千円

(うち、平成25年度予算額：40,752千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

「いぶき」観測データの解析より得られた温室効果ガスのデータ質を評価するために、3年以上の長期間検証データを用いて季節変動成分や経年変動成分等の大気化学的視点を考慮した検証、重点サイトにおける検証と誤差要因の特定を実施した(重点サイトにおける検証と誤差要因の特定はサブテーマ(2)に記載)。感度解析結果と上記検証結果をもとに、解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂を行い、「いぶき」観測データの再解析を実施し高精度化を確認した。多くの研究成果を得たが顕著なものは下記の通りである。

改善された「いぶき」データに対して長期間検証データを用いた季節変動・経年変動などの大気化学的検証を行い、バイアスの特徴を明らかにした。航空機観測データを用いて検証を行い、TCCONデータによる検証と同様の結果を得た。殆どバイアスはなくなったが完全にゼロではなかった。このためTCCONデータを用いたバイアスの経験的補正手法を開発し、経験的補正を行い、独立した検証データの航空機観測データを用いて、補正後の「いぶき」データ質の改善を確認した。

本推進費の研究開始時における前バージョンのアルゴリズムを用いた「いぶき」の二酸化炭素カラム平均濃度(XCO_2)のデータ質は、バイアス-9 ppm程度(-2 %程度)、バラツキ4 ppm程度(1 %程度)であったが、下記のつくばにおけるケーススタディと連携しながら解析アルゴリズム改良と参照値の改良を行った結果、バイアス-1.48 ppm (-0.3 %程度)、ばらつき2.1 ppm(0.5 %程度)まで改善し、本推進費の目標を達成した。

重点サイトの1つであるつくばにおける高精度温室効果ガスと巻雲・エアロゾル光学特性の観測結果を用いたケーススタディを行った。エアロゾルの高度分布としてSPRINTARSのシミュレーション値を先験値として、またToonの太陽スペクトルを用いて、バンド1、バンド2に加えてバンド3の観測スペクトルに対してエアロゾルと巻雲も同時推定した結果、 XCO_2 のTCCONデータに対するバイアスは、0.17 ppm (0.04 %)と大幅に改善することを確認した。

[キーワード]

温室効果ガス観測技術衛星、二酸化炭素、メタン、解析アルゴリズム、検証

1. はじめに

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」は、2009年1月23日に宇宙航空研究開発機構(JAXA)種子島宇宙センターから打ち上げられ、5年間の定常観測運用が終了し後期利用運用に移行した。現在も順調に全球観測を継続しており、対流圏までの温室効果ガスを観測する世界唯一の衛星である。その解析結果には従来の大気組成成分観測衛星に求められている精度(数%程度)をはるかに超える1%以下の精度が要求されていた。「いぶき」に搭載されたTANSO-FTS(Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer)の校正、解析処理アルゴリズムの改良と初期値の改訂、検証作業を繰り返すことにより明らかに異常値である温室効果ガス濃度データの数は飛躍的に減少し、2010年秋までに二酸化炭素の場合、9 ppm程度の負のバイアスと4 ppm程度のばらつき(不確かさで10 ppm程度)に抑えることに成功した。

しかしながら、衛星観測データのインバースモデル解析による温室効果ガス収支推定等の科学研究のためには、温室効果ガス濃度の更なる高精度化が要求されていた。「いぶき」観測データの解析における誤差要因は、観測装置(特性)の校正、解析アルゴリズムの不完全性(巻雲やエアロゾルなどの影響を完全に記述出来ない)、初期値誤差などであるが、これまで推進費等の研究成果に基づく研究的要素が低い業務は既に行っていたが、これだけでは不十分であった。

2. 研究開発目的

「いぶき」観測データの解析から得られた温室効果ガス濃度の更なる高精度化を目的とした。具体的には、長期間の検証データを取得しそれらを用いた継続的な検証を行って季節変動や経年変動について評価し、また地上設置高分解能FTSによる観測と同時に地上の高精度観測装置を用いて巻雲・エアロゾル光学特性を取得し、「いぶき」の温室効果ガス濃度データとの相関解析等を行う。並行して感度解析により解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂の検討を行う。これらの結果を解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂などに反映させ、「いぶき」観測データの解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化を行う。目標として、二酸化炭素の場合2 ppm程度のバイアス、ばらつき2 ppm(不確かさで3 ppm)と、推進費開始時の不確かさ(推定誤差)の半減を目標とした。

3. 研究開発方法

地上設置高分解能フーリエ変換分光計観測網(Total Carbon Column Observing Network, TCCONデータ)、CONTRAIL(Comprehensive Observation Network for Trace gases by AirLiner)データ、NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)データ等の3年以上の長期間検証データの解析を行いそのデータ質を評価し、これらのデータを用いて季節変動成分や経年変動成分等の大気化学的視点を考慮した「いぶき」観測データの解析より得られた温室効果ガスの検証を実施する。更に、サブテーマ(2)、(3)と協力して重点サイトにおける検証と誤差要因の特定を実施する。

感度解析により解析アルゴリズムの改良や初期値の改訂を実施する。感度解析結果と上記検証結果をもとに、解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂を行い、「いぶき」観測データの再解析を実施する。この結果をサブテーマ(2)、(3)と協力して検証し、「いぶき」データの高精度化の確認を行う。

4. 結果及び考察

(1) 長期間検証データの評価と「いぶき」データ検証

1) 長期間検証データの評価

長期間検証データを用いた検証解析に使用するTCCONデータ、CONTRAILデータ、NOAA等の航空機観測データなどの解析を行いデータ質の評価を行った。

TCCONデータは、「いぶき」の短波長赤外領域(SWIR)データと同じ物理量であるために直接検証が可能で、3年以上のデータを蓄積することが出来た。航空機観測による検定後のXCO₂(二酸化炭素のカラム平均濃度)の不確かさは、概ね1 ppm弱で、環太平洋のTCCON検定論文とほぼ同様の結果となった。更に、TCCONサイト毎の違いを確認した結果、つくばのように都市近郊のサイトは不確かさが1 ppmを越える場合があることが確認できた。検証解析を行う際はこのような特徴を踏まえる必要があることが分かった。

航空機観測データを用いた検証は、「いぶき」データの検証が可能な期間として2年程度のデータを蓄積することが出来た。航空機観測データは高度プロファイルであるため、「いぶき」のSWIRデータつまり、XCO₂を直接検証することが出来ない。そのため乾燥空気数密度プロファイル(CIRA86)を用いてXCO₂の計算を行った。この際、航空機観測データの存在しない低い高度及び高い高度は何らかの仮定が必要となる。航空機観測最低高度より低い高度のデータは、タワー観測が行われている所はタワー観測のデータを用い、存在しない場合は航空機の最低観測高度の値を地表まで一定とする。航空機観測最高高度より高い高度のデータは、圏界面より低い場合は観測最高高度の値を圏界面まで一定とする。成層圏のプロファイルは全球大気輸送モデル(CTM, Patra et al.¹⁾)により計算されたair age(大気の年齢)データを用い、世界気象機関温室効果ガス年報²⁾を参考に、CO₂の混合比を計算した。CH₄については、CO₂の場合とほぼ同様であるが、成層圏・中間圏(~85km)のプロファイルにはHALOE (Grooß and Russell³⁾)またはACE (Jones et al.⁴⁾)の気候値を用いた。

航空機観測データは必ずしも「いぶき」と同期して取得されたものではないため、検証可能な期間が短い間は「いぶき」データとの同期数が少なく統計的に有意な検証解析が出来なかった。このため、航空機観測から計算したXCO₂及びXCH₄に対して経年変動、年変動、半年変動を考慮したカーブフィッティングを行い、この計算値を用いて検証解析を行ってきた。この方法は、統計的に有意なデータセット数を得ることができるが、総観スケールの情報が抜け落ちる欠点がある。このため、見かけより不確かさの小さい検証結果となる可能性がある。本推進費実施期間中に「いぶき」データの検証が可能な期間が2年程度となったため、統計的に航空機観測データと「いぶき」データが直接検証を行える状況になった。一方、直接検証を行うときは、カラムアベレージングカーネル(Column Averaging Kernel, CAK)を考慮することが可能で必須である。CAKとはリモートセンシングデータ解析を行うときに使用する高度に対する感度を示す指標で、一般的にはこれを正しく取り扱わないと高精度な検証解析を行うことが出来ない。しかしながら解析手順が複雑になるため、CAKを考慮するかしないかで検証結果が統計的に有意に変化するか検討した。CAKを適用するかしないかの差はXCO₂の場合+0.022±0.088 ppmとなり、原則CAKを適用しなくても検証解析で評価されるバイアスに大きな差が生じないことが分かった。これにより、カーブフィッティングによる計算値を用いた検証解析には大きな問題がないことが分かった。

2) 長期検証データを用いた大気化学的検証解析により得ることが期待される知見の検討

長期検証データを用いた大気化学的検証解析を行うことによりどのような情報を得ることができ、「いぶき」の解析アルゴリズムの改良や初期値の改訂に役立てることが出来るか検討を行った。まず、時系列プロットと散布図からは、バイアスの季節変動・経年変動及び緯度依存性を明らかにすることができる。更に、バイアスの成分分析により特定できる誤差要因として以下のように考えることが出来る。全球に一様なバイアス成分は、温室効果ガスの分光パラメータ及び観測装置の感度特性による可能性がある。バイアスの経年変動成分は、装置の感度劣化によると考えられる。季節変動又は太陽天頂角に依存する場合、先験値や観測モードによる影響が考えられる。一方、気圧依存性は、酸素の分光パラメータの誤差による可能性が考えられる。その他エアロゾル光学的厚さ、アルベド、スペクトルオフセット等の依存性についても調査することが有効であると考えられる。

これらの解析をもとに解析アルゴリズムの改良や初期値の改訂を行うことになるが、原因がどうしても分からない場合は、バイアスの成分分析を基にバイアスの経験的補正を行うことが有効である。一例としてNASA/JPLのACOSチームによる方法が報告されている(Wunch et al.⁵⁾)。本研究においても、解析アルゴリズムの改良や初期値の改訂を反映した再解析データ (Ver. 02.xx)を用いて、5)、6)に示すように同様の補正手法を開発し有効性を示した。

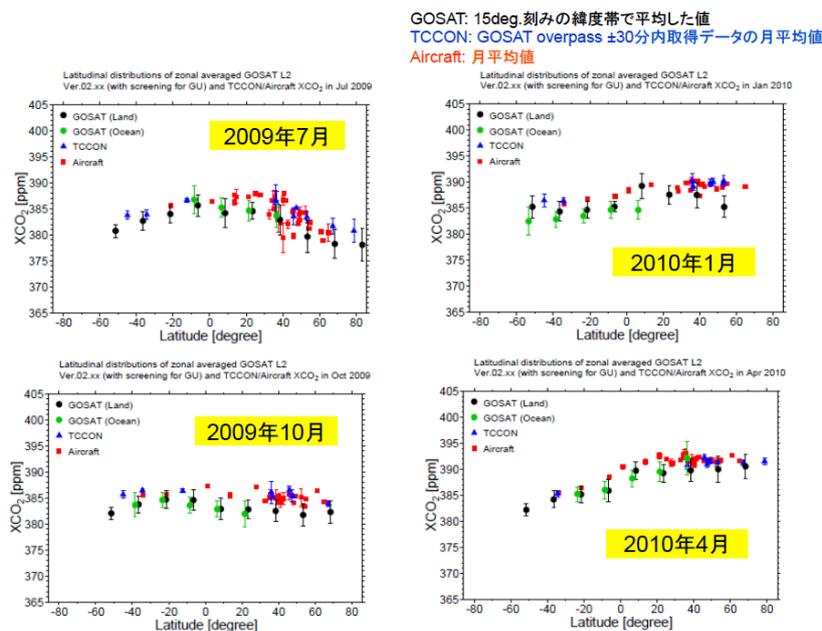
3) TCCONデータを用いた「いぶき」データの検証によるバイアス特徴の解明

本作業では「いぶき」データは現在一般に公開されているFTS SWIR L2 (レベル2) Ver. 02.xxを用いた。TCCONデータは解析手法が更新され再解析された最新データ(GGG 2012解析版)を用いた。解析は、(a)「いぶき」の月別緯度分布のTCCON及び航空機観測データとの比較、(b)「いぶき」の各緯度における帯状月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較、(c) TCCON地点における「いぶき」の月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較を行うことにより、バイアスの特徴を解明することを試みた。

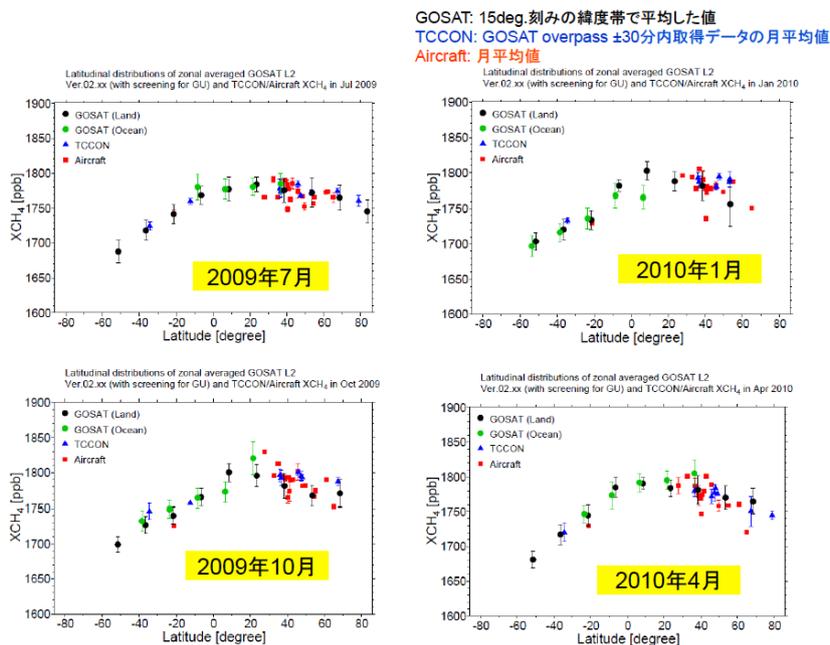
(a)「いぶき」データの月別緯度分布は、全期間で検証データと概ね良い一致を示した。月別緯度分布の例を図(1)-1、図(1)-2に示す。前バージョンVer. 01.xxに対して、特にXCO₂のデータ質が大幅に改善されていることがこの解析でも明らかとなった。

(b)この比較は、(a)における「いぶき」データを、ある緯度幅でまとめて時間軸方向に図示化することにより評価した。図(1)-3と図(1)-4にそれぞれ二酸化炭素、メタンの例を示す。これにより、バイアスの緯度や時間による変化が明らかとなったが、帯状平均であるため解釈が容易でないことが分かった。

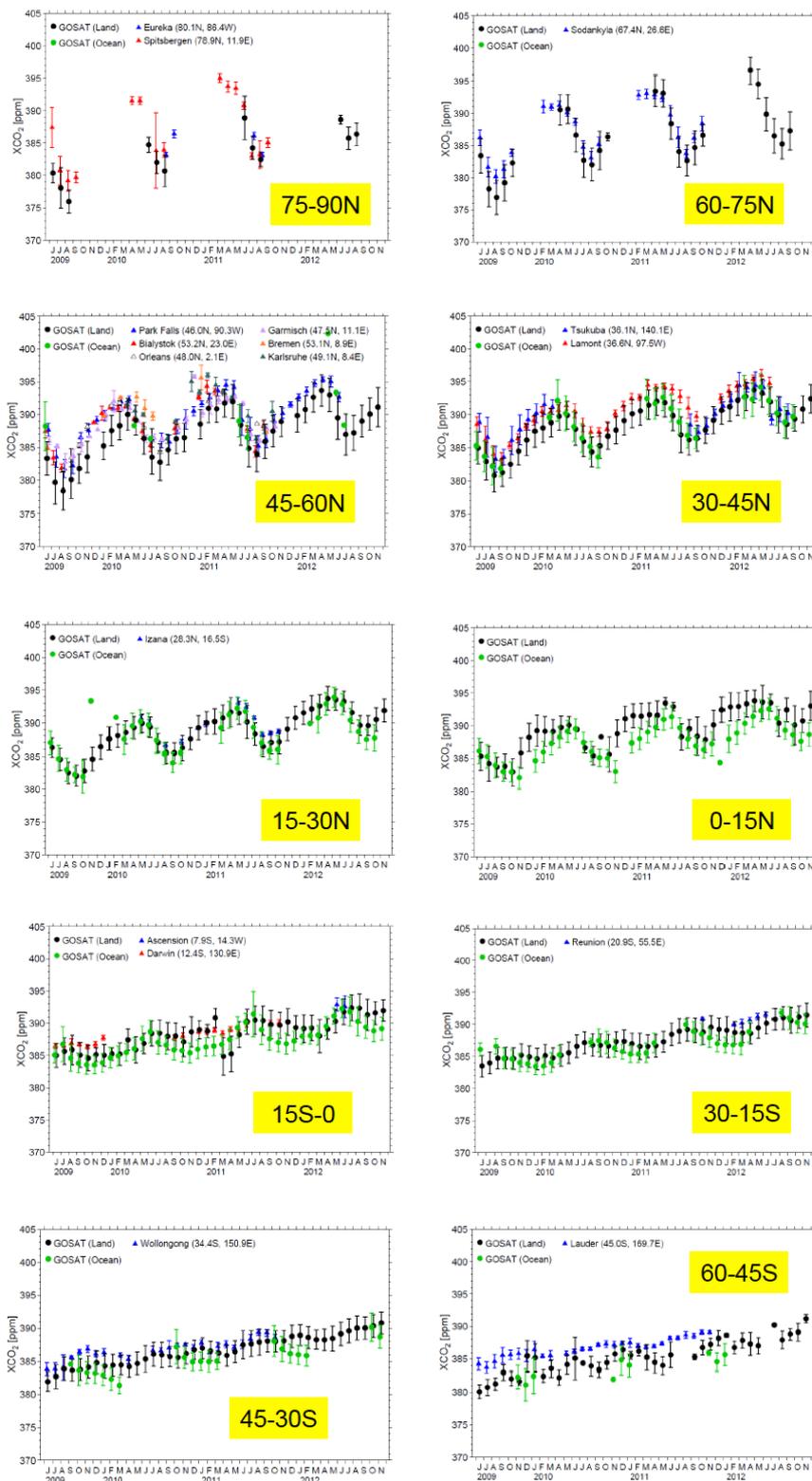
(c)TCCON地点における±5度以内の「いぶき」の月平均値の時間変動をTCCONデータと比較することにより、バイアスの季節変動や経年変化が存在することを明らかにすることができた。その例を図(1)-5 (Park Falls)、図(1)-6 (Tsukuba)、図(1)-7 (Lamont)、図(1)-8 (Wollongong)、図(1)-9 (Lauder)に示す。季節変動成分は、観測方式、太陽天頂角、先験値等の誤差によると考えた。一方、経年変化成分は、「いぶき」センサの劣化係数や先験値等の誤差によると考えた。



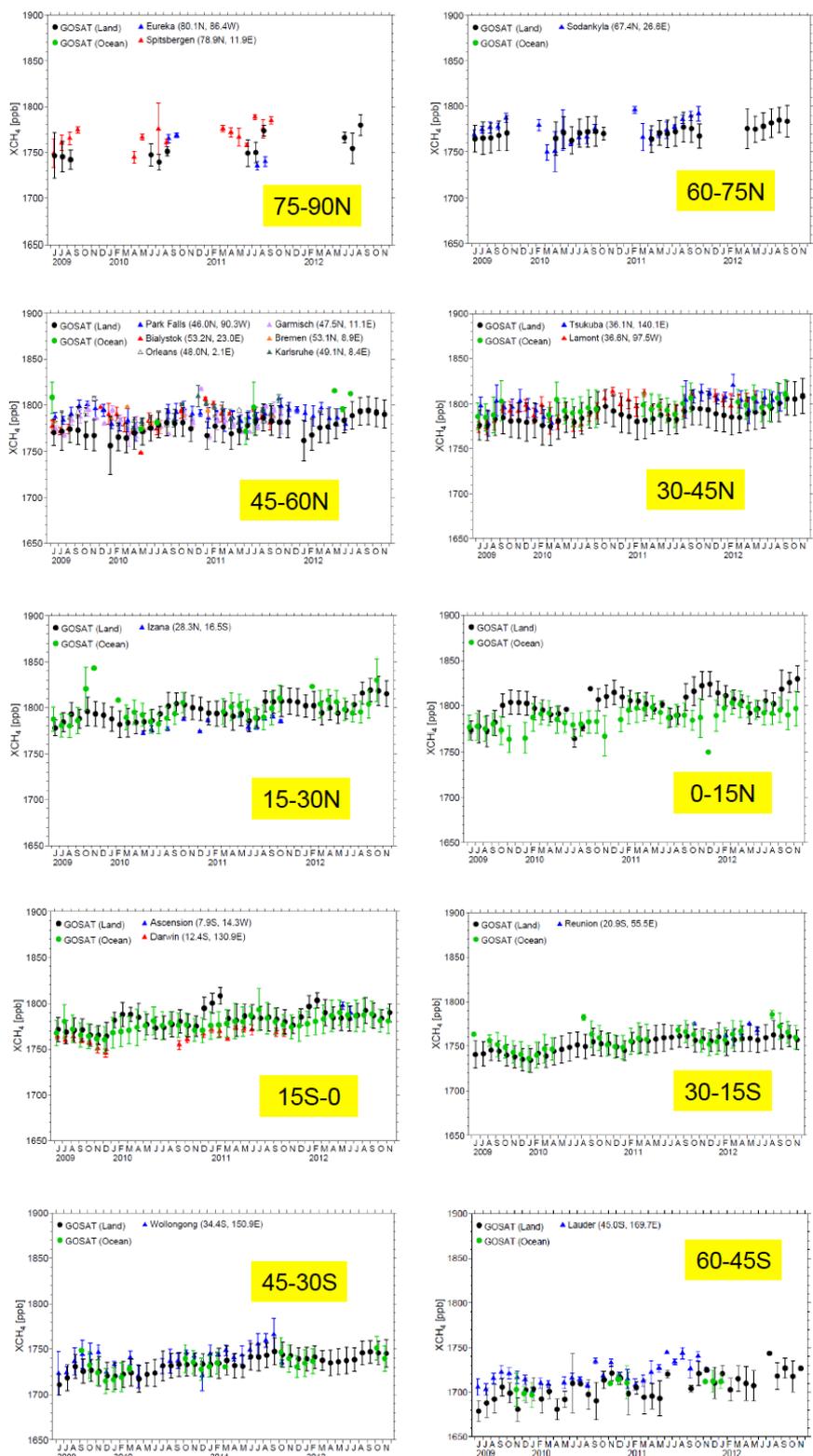
図(1)-1 「いぶき」二酸化炭素データの月別緯度分布とTCCON及び航空機観測データの比較の例
北半球の夏期、秋期、冬期、春期について示した。縦軸はXCO₂、横軸は緯度である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はTCCONデータ、赤四角(■)は航空機データである。エラーバーは平均時の標準偏差である。



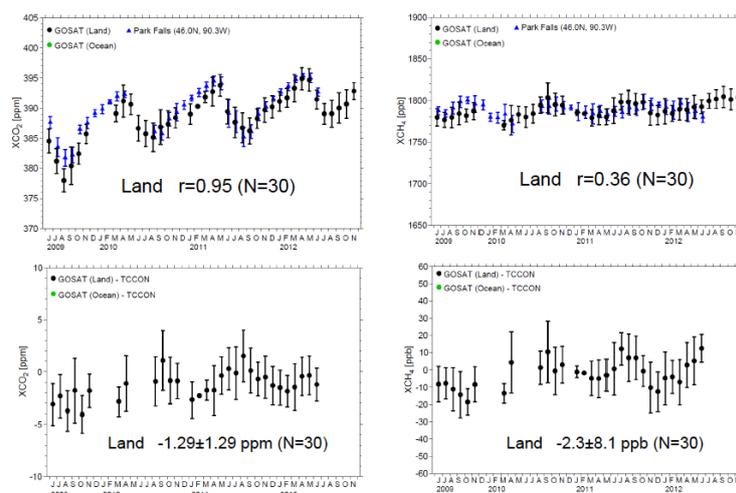
図(1)-2 「いぶき」メタンデータの月別緯度分布とTCCON及び航空機観測データの比較の例
北半球の夏期、秋期、冬期、春期について示した。縦軸はXCH₄、横軸は緯度である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はTCCONデータ、赤四角(■)は航空機データである。エラーバーは平均時の標準偏差である。



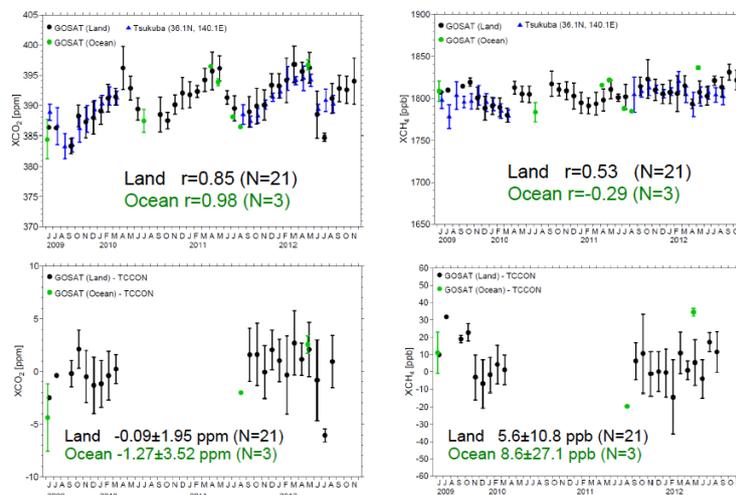
図(1)-3 「いぶき」二酸化炭素データの各緯度における帯状月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。縦軸はXCO₂、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、それぞれの三角はそれぞれのサイトのTCCONデータである。エラーバーは平均時の標準偏差である。



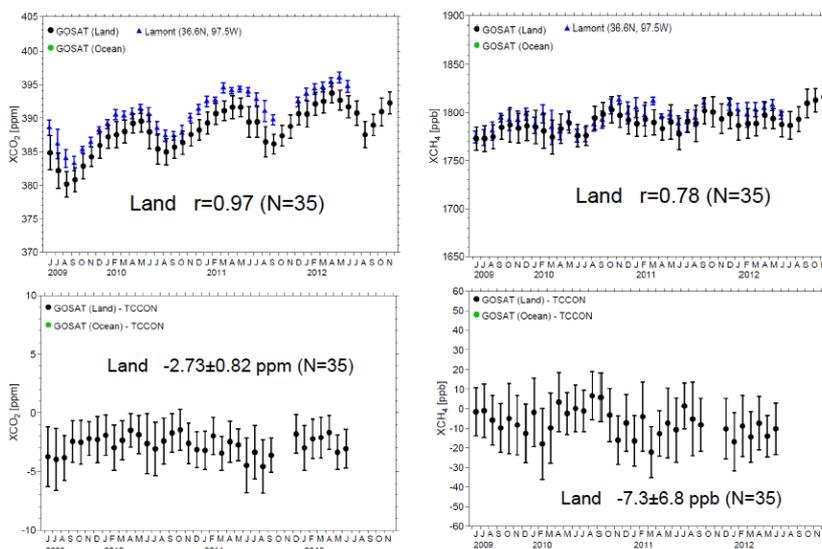
図(1)-4 「いぶき」メタンデータの各緯度における帯状月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。縦軸はXCH₄、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、それぞれの三角はそれぞれのサイトのTCCONデータである。エラーバーは平均時の標準偏差である。



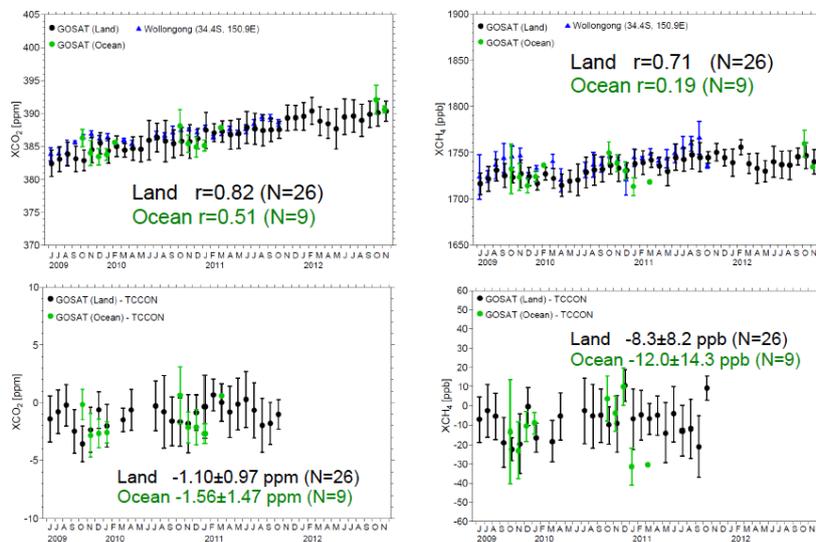
図(1)-5 TCCON地点(Park Falls)における±5度以内の「いぶき」の月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。左は二酸化炭素、右はメタンで、上図の縦軸は XCO_2 及び XCH_4 、下図の縦軸は「いぶき」データとTCCONデータの差、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はPark FallsのTCCONデータである。上図のエラーバーは平均時の標準偏差で、下図のエラーバーは「いぶき」データとTCCONデータの差の平均時の標準偏差である。上図の r は相関係数、 N はデータセット数、下図はバイアスの平均とそのばらつきである。



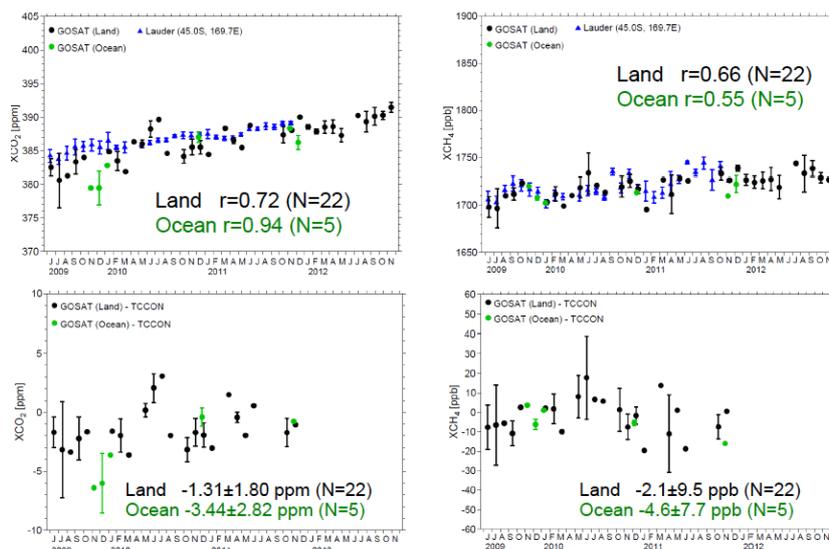
図(1)-6 TCCON地点(Tsukuba)における±5度以内の「いぶき」の月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。左は二酸化炭素、右はメタンで、上図の縦軸は XCO_2 及び XCH_4 、下図の縦軸は「いぶき」データとTCCONデータの差、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はTsukubaのTCCONデータである。上図のエラーバーは平均時の標準偏差で、下図のエラーバーは「いぶき」データとTCCONデータの差の平均時の標準偏差である。上図の r は相関係数、 N はデータセット数、下図はバイアスの平均とそのばらつきである。



図(1)-7 TCCON地点(Lamont)における±5度以内の「いぶき」の月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。左は二酸化炭素、右はメタンで、上図の縦軸は XCO_2 及び XCH_4 、下図の縦軸は「いぶき」データとTCCONデータの差、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はLamontのTCCONデータである。上図のエラーバーは平均時の標準偏差で、下図のエラーバーは「いぶき」データとTCCONデータの差の平均時の標準偏差である。上図のrは相関係数、Nはデータセット数、下図はバイアスの平均とそのばらつきである。



図(1)-8 TCCON地点(Wollongong)における±5度以内の「いぶき」の月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。左は二酸化炭素、右はメタンで、上図の縦軸は XCO_2 及び XCH_4 、下図の縦軸は「いぶき」データとTCCONデータの差、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はWollongongのTCCONデータである。上図のエラーバーは平均時の標準偏差で、下図のエラーバーは「いぶき」データとTCCONデータの差の平均時の標準偏差である。上図のrは相関係数、Nはデータセット数、下図はバイアスの平均とそのばらつきである。



図(1)-9 TCCON地点(Lauder)における±5度以内の「いぶき」の月平均値の時間変動のTCCONデータとの比較。

左は二酸化炭素、右はメタンで、上図の縦軸はXCO₂及びXCH₄、下図の縦軸は「いぶき」データとTCCONデータの差、横軸は時間で年と月(英語の頭文字)である。黒丸(●)と緑丸(●)は、「いぶき」の陸域及び海域データで、青三角(▲)はLauderのTCCONデータである。上図のエラーバーは平均時の標準偏差で、下図のエラーバーは「いぶき」データとTCCONデータの差の平均時の標準偏差である。上図のrは相関係数、Nはデータセット数、下図はバイアスの平均とそのばらつきである。

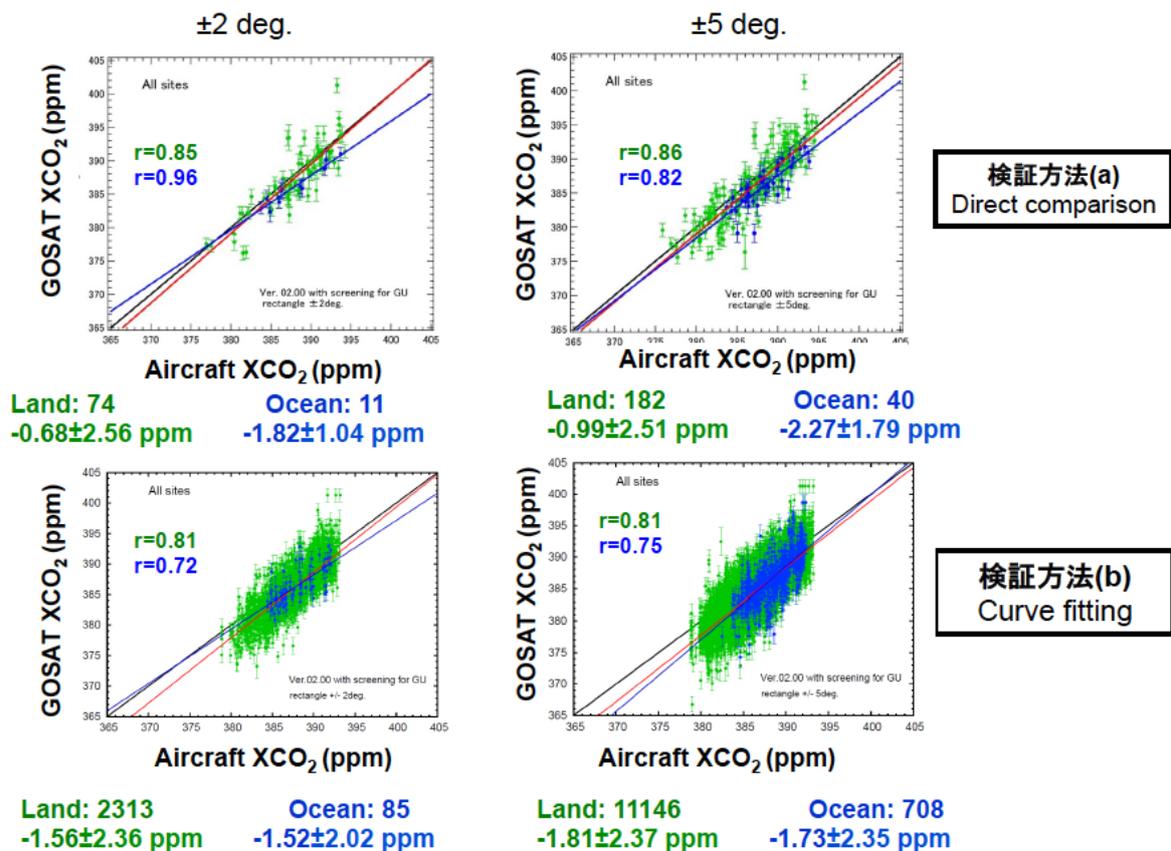
4) 航空機観測データを用いた「いぶき」データの検証

「いぶき」データはFTS SWIR L2 Ver. 02.00を用いた。航空機観測データは、二酸化炭素では47サイト(CONTRAIL、NOAA、DOE(US Department of Energy)、NIES、HIPPO(HIAPER Pole-to-Pole Observations)、NIES(国立環境研究所)-JAXAキャンペーン)、メタンでは、28サイト(NOAA、DOE、NIES、HIPPO、NIES-JAXAキャンペーン)で取得した高度分布データを用いて、高度分布データの存在しないところはモデルデータ、衛星データ、地上データ等を用いてカラム平均濃度を算出した。比較期間は1年2ヶ月である。

検証解析では航空機観測サイトを中心に±2度、±5度以内に存在する「いぶき」データと、(a)同一観測日に得られた航空機観測データからCAKを考慮して算出したカラム平均濃度との比較(direct comparison)、(b)サイト毎の全航空機観測データから算出したカラム平均濃度を用いて季節変動及び経年変動を考慮した曲線にフィットし、決定した係数を用いて計算した「いぶき」観測日の航空機カラム平均濃度データを比較(curve fitting)する二種類の方法で行った。航空機観測データは必ずしも「いぶき」と同期して取得されたものではないため、後者の方法は比較するデータセットを増やすという観点で有用である。

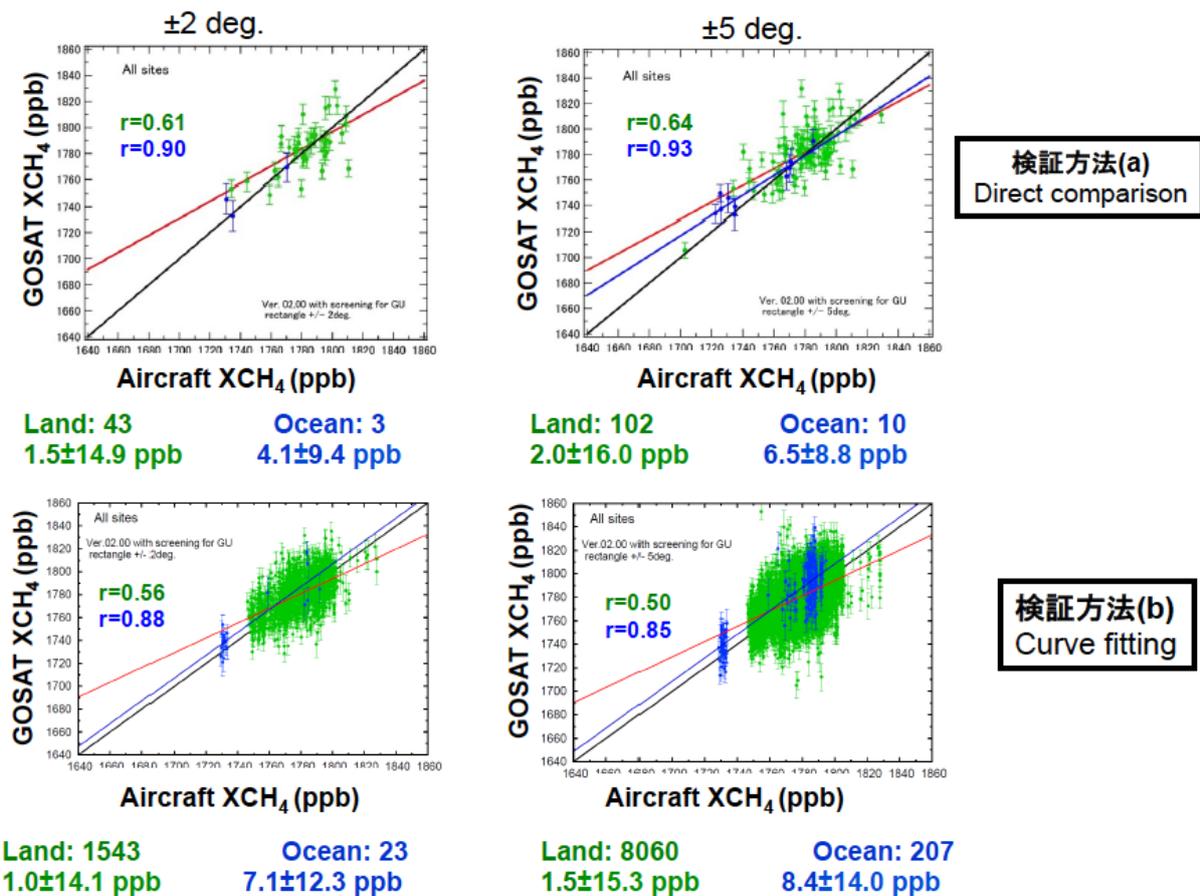
二酸化炭素の結果を図(1)-10に示す。(a)の場合±5度のデータセット数は陸域の「いぶき」データで182、海域の「いぶき」データで40となり、(b)の場合陸域は11146、海域で708となった。バイアス±ばらつきは、(a)の場合、陸域で-0.99 ± 2.51 ppm、海域で-2.27 ± 1.79 ppm、(b)の場合、陸域で-1.81 ± 2.37 ppm、海域で-1.73 ± 2.35 ppmとなった。相関係数は海陸ともにR=0.8程度であ

った。誤差範囲内で両方法は同じ結果を得ることができた。メタンの場合を図(1)-11に示す。(a)の場合±5度のデータセット数は陸域で102、海域で10となり、(b)の場合陸域は8060、海域で207となった。バイアス±ばらつきは、(a)の場合、陸域で 2.0 ± 16.0 ppb、海域で 6.5 ± 8.8 ppb、(b)の場合陸域で 1.5 ± 15.3 ppb、海域で 8.4 ± 14.0 ppbとなった。相関係数は陸域で $R=0.5 \sim 0.6$ 、海域で $R=0.8$ 程度であった。誤差範囲内で両方法は同じ結果を得ることが出来た。「いぶき」データの取得範囲による違いは、二酸化炭素とメタン共にばらつきの範囲内であったため、ないと判断できる。結果はTCCONデータを用いた場合と同じで、上記通り前バージョンVer. 01.xxに対して、特に二酸化炭素が大幅に改善されていることが、本解析でも明らかとなった。



図(1)-10 2010年までのデータセットに対する航空機観測データを用いた「いぶき」二酸化炭素データの散布図

上2枚はdirect comparison、下2枚はcurve fittingによる方法である。左は航空機観測サイトを中心に±2度以内、右は航空機観測サイトを中心に±5度以内に一致した「いぶき」データの比較である。陸域データを緑、海域データを青で示した。縦軸は「いぶき」データ、横軸は航空機観測データである。「Land:」と「Ocean:」の後に記載した数字は、比較したデータセット数を示し、その下の数字はバイアス±ばらつきである。



図(1)-11 2010年までのデータセットに対する航空機観測データを用いた「いぶき」メタンデータの散布図

上2枚はdirect comparison、下2枚はcurve fittingによる方法である。左は航空機観測サイトを中心に±2度以内、右は航空機観測サイトを中心に±5度以内に一致した「いぶき」データの比較である。陸域データを緑、海域データを青で示した。縦軸は「いぶき」データ、横軸は航空機観測データである。「Land:」と「Ocean:」の後に記載した数字は、比較したデータセット数を示し、その下の数字はバイアス±ばらつきである。

5) 「いぶき」データのバイアスの経験的補正法の開発：その1

GOSATプロジェクトは、TCCONデータを用いて評価したバイアス値を定数として明記した検証結果文書を付して「いぶき」データを公開している。大気輸送モデルの逆計算による地域フラックス推定の誤差を一層低減させるためには、「いぶき」データのより詳細なバイアスを明らかにすることとその補正が必要であることが明らかとなってきた。これを実現するためには、「いぶき」データと各物理量の相関解析を基にバイアスの経験的補正を行う方法をあげることができる。先行研究例としてNASA/JPLのACOS (Atmospheric CO₂ Observations from Space) チームによる方法が報告されている (Wunch et al.⁵⁾)。ここでは、TCCONデータを用いたバイアスの経験的補正手法を検討し、経験的補正を行い、補正後の「いぶき」データ質の改善をTCCONデータを用いて確認した。

まず「いぶき」データとTCCONデータの差(二酸化炭素の場合 ΔXCO_2)と、各物理量との相関を調

べた。調査した物理量は、地表面気圧の導出値、地表面気圧の先験値と導出値の差(地表面気圧差)、エアマス、 O_2 吸収バンドにおけるアルベド、 CO_2 吸収バンドにおけるアルベド、 O_2 吸収バンドにおける信号雑音比(SNR)、 CO_2 吸収バンドにおけるSNR、エアロゾル光学的厚さ(AOD)などである。これらのうち相関が大きく、二酸化炭素とメタンに共通である4物理量、地表面気圧差、AOD、エアマス、 O_2 吸収バンドにおけるアルベドを採用し補正を行い、補正後は物理量との相関が無くなったことを確認した。なお、メタンの場合も同様の結果を得ることができた。これらの結果を図(1)-12、図(1)-13に示す。

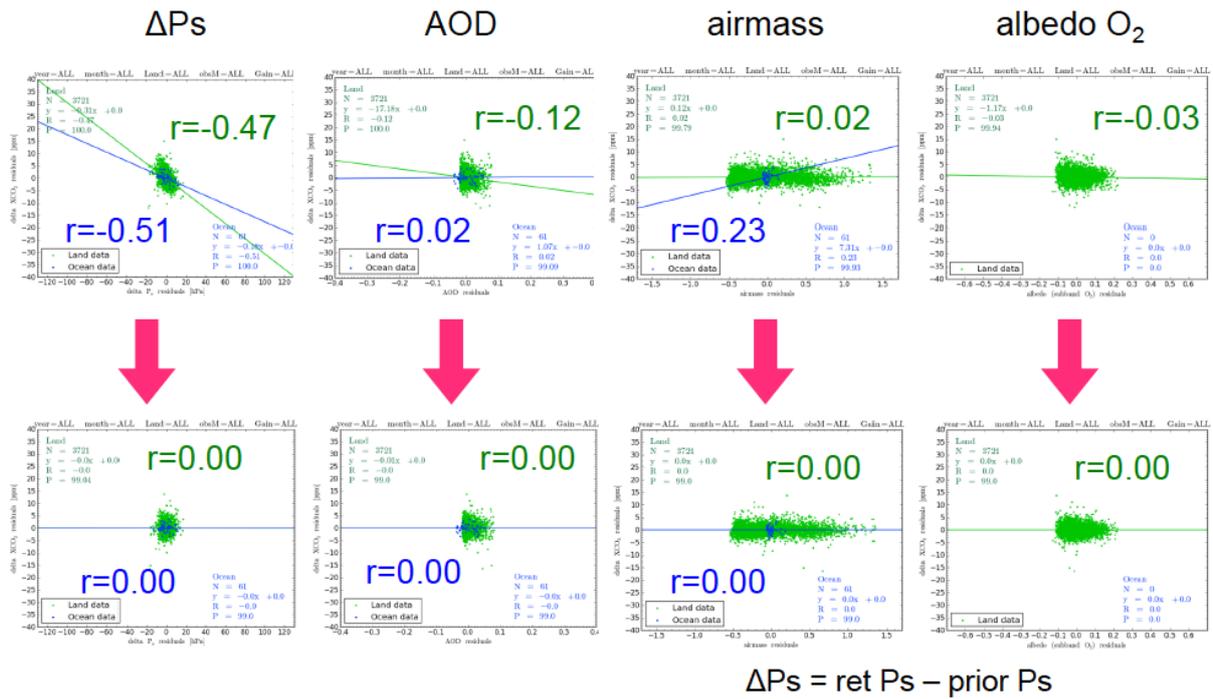
次に補正前後で「いぶき」データのデータ質がどの程度改善されたのか、(a)TCCONサイトであるPark Fallsにおける時系列と散布図、(b)全TCCONサイトにおける散布図、(c)水平分布による確認を行った。

(a)二酸化炭素とメタンともに補正後、「いぶき」時系列データはTCCONデータに対して一致度が改善されたことが分かった。更に、散布図を比較したところバイアスとばらつきともに改善されたことが確認できた。相関係数も補正後大きくなった。

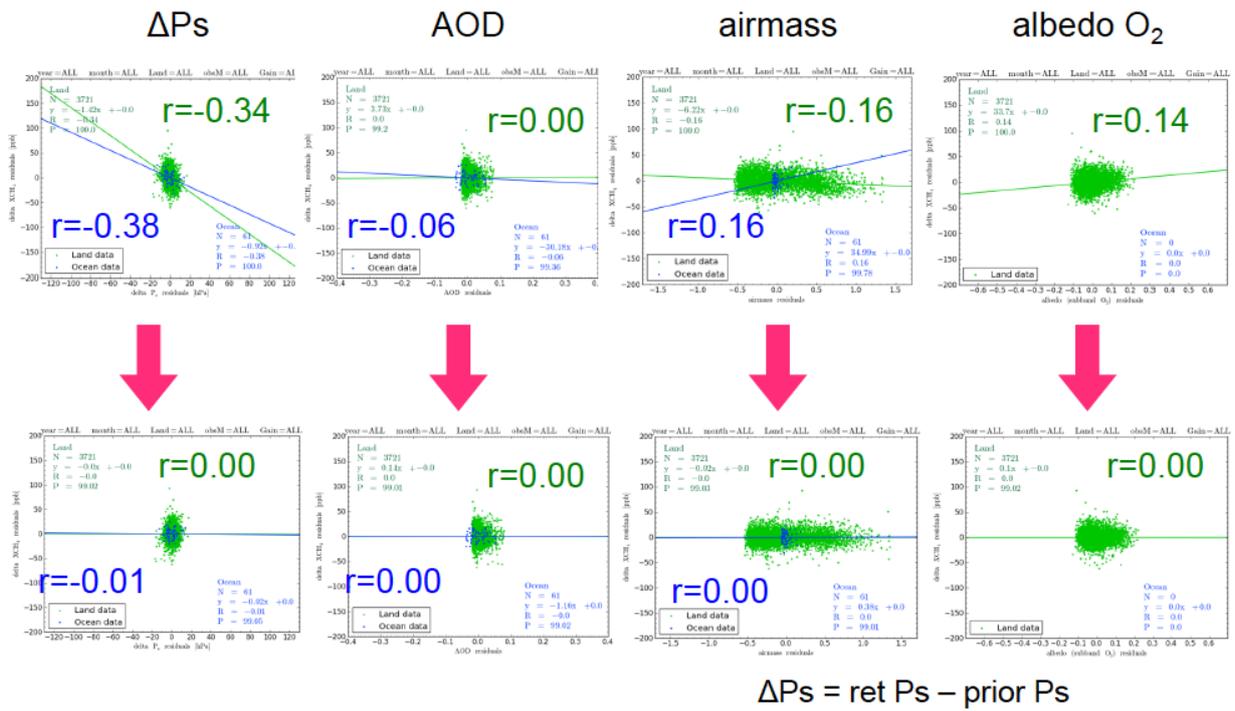
(b)全TCCONサイトにおける散布図を比較したところバイアスとばらつきともに改善されたことが確認できた。相関係数も補正後大きくなった。図(1)-14に二酸化炭素の散布図を示す。ただし、本解析では北大西洋カナリア諸島のIzanaは解析から除外する必要があった。Izana周辺の「いぶき」データは海面反射の観測データである。一方、Izanaサイトは大西洋上の島の海拔2000 m以上の山頂、つまり接地境界層以下の情報が含まれていないことが多いTCCONデータであり、「いぶき」データとそのまま比べることは誤解を招くためである。

(c)水平分布による比較を行ったところ、補正の効果は地域性があることが分かった。図(1)-15～図(1)-22に例を示す。前半は二酸化炭素、後半はメタンで、北半球の夏期、秋期、冬期、春期の結果である。その地域の詳細な要因解析を行うことが必要である。これにより、バイアスの地域性の解明又は何らかの現象の発見につながると考えられる。

本作業では、TCCONデータを基準に補正を行い、補正後の確認をTCCONデータより行った。TCCONデータを基準と評価に重用することは、客観性として不満が残る。本推進費の研究では1)に示したように、長期にわたり取得した航空機観測データを「いぶき」データと比較可能なデータに変換し、そのデータ質を明らかにしている。そこで、このデータを用いて補正後の「いぶき」データをより客観的に評価した結果を次に示す。

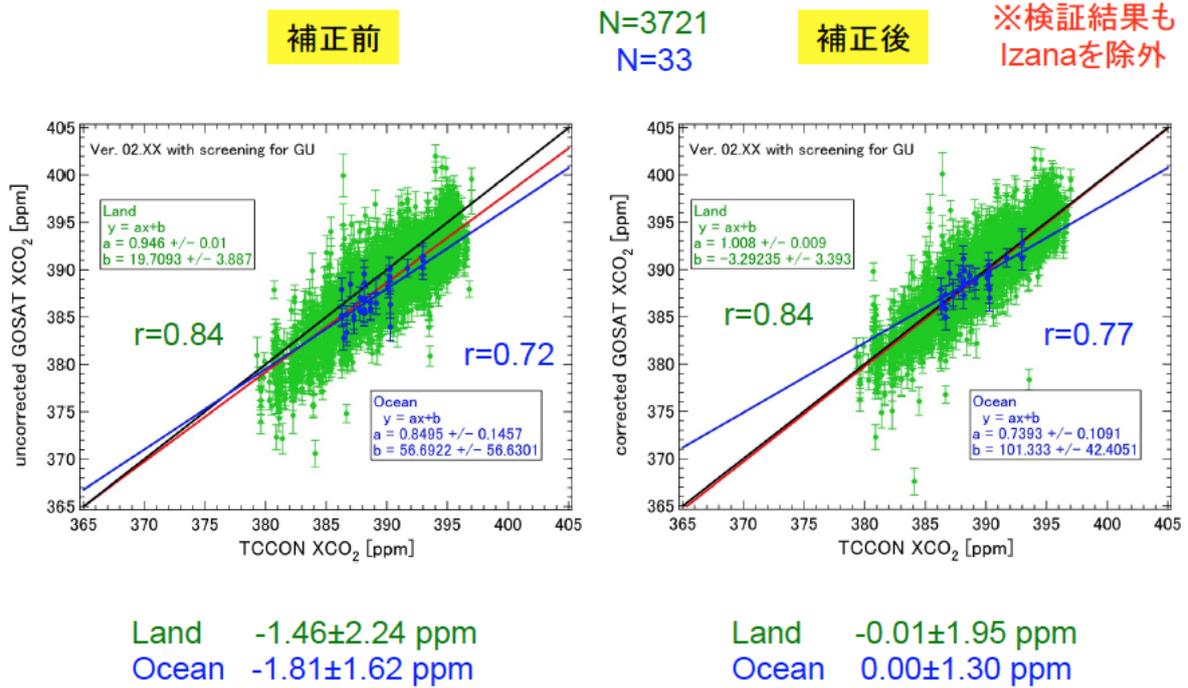


図(1)-12 補正前後の $\Delta XC0_2$ と各物理量の相関図。2009～2012年の3年間の「いぶき」データに対して補正を行った。データセット数は陸域3721、海域33である。上図は補正前、下図は補正後の相関図である。縦軸は「いぶき」とTCCONデータの差、横軸は左から「いぶき」で導出した地表面気圧と先験値地表面気圧の差、同時推定されたエアロゾルの光学的厚さ、エアマス、同時推定されたband 1の地表面アルベドである。緑は陸域の「いぶき」データ、青は海域の「いぶき」データである。rは相関係数である。補正後相関係数がゼロになっていることが分かる。

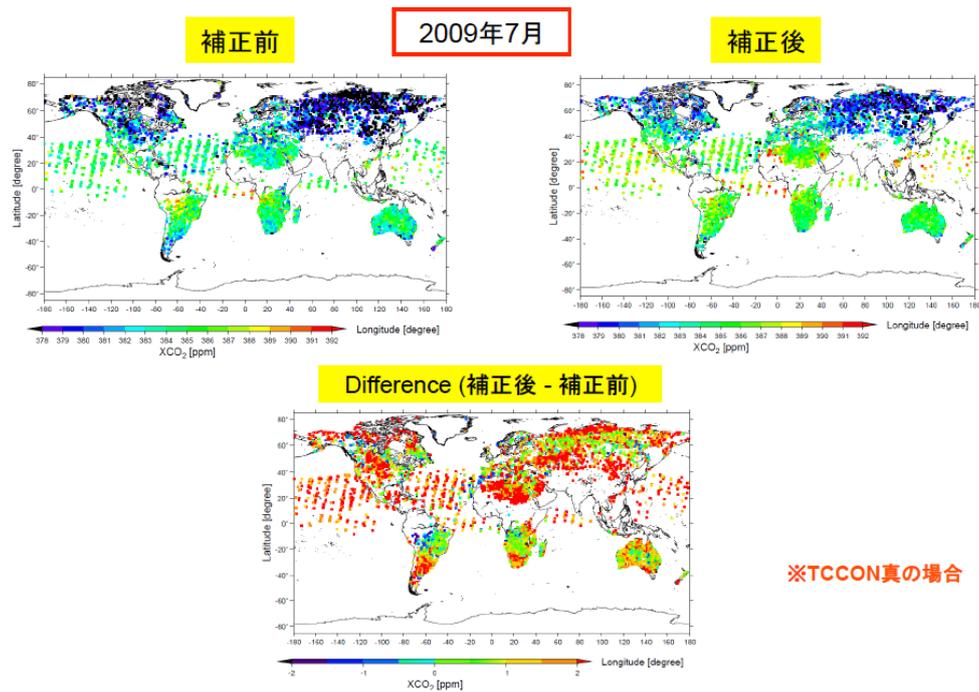


図(1)-13 補正前後の ΔXCH_4 と各物理量の相関図

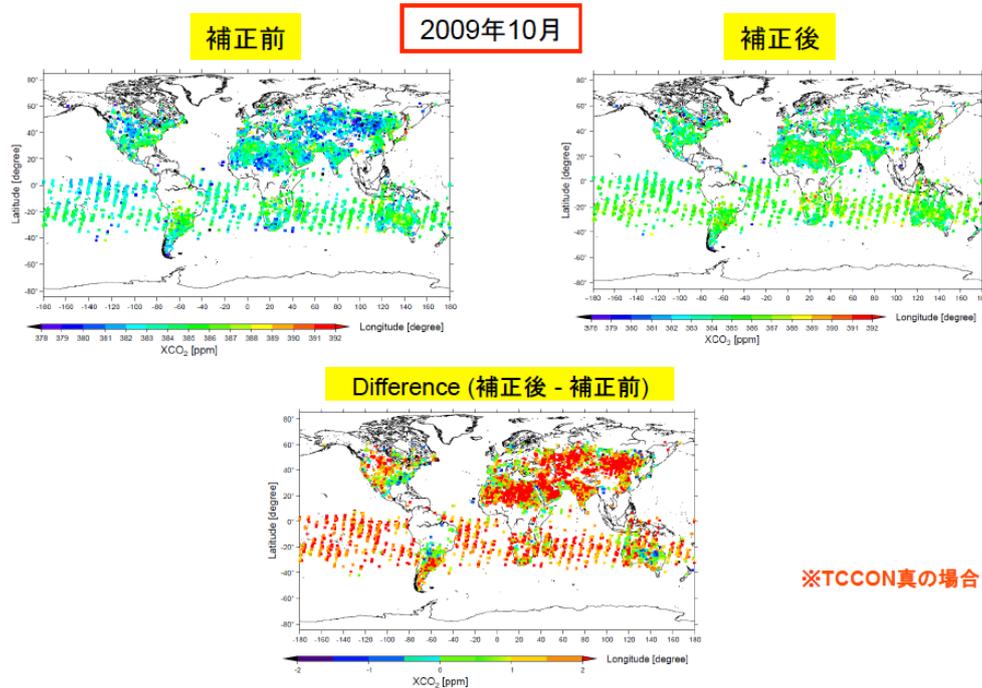
2009～2012年の3年間の「いぶき」データに対して補正を行った。データセット数は陸域3721、海域33である。上図は補正前、下図は補正後の相関図である。縦軸は「いぶき」とTCCONデータの差、横軸は左から「いぶき」で導出した地表面気圧と先験値地表面気圧の差、同時推定されたエアロゾルの光学的厚さ、エアマス、同時推定されたband 1の地表面アルベドである。緑は陸域の「いぶき」データ、青は海域の「いぶき」データである。rは相関係数である。補正後相関係数がゼロになっていることが分かる。



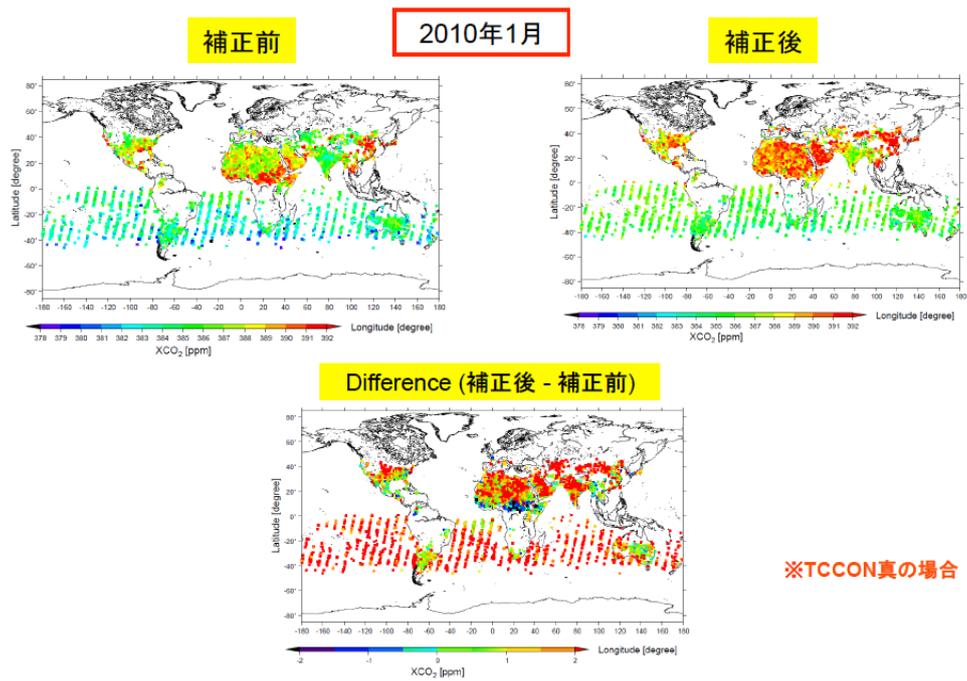
図(1)-14 補正前後の「いぶき」データとTCCONデータの散布図。2009～2012年の3年間の「いぶき」データに対して補正を行った。データセット数(N)は陸域3721、海域33である。補正と散布図作成ではIzanaのTCCONデータを除外した。それぞれの散布図の縦軸は「いぶき」データ、横軸はTCCON データである。図中の緑色は陸域の「いぶき」データ、青色は海域の「いぶき」データで、図の下の数字は航空機観測データを用いて検証した「いぶき」データのバイアス±ばらつきである。rは相関係数である。左は補正前、右は補正後の散布図である。



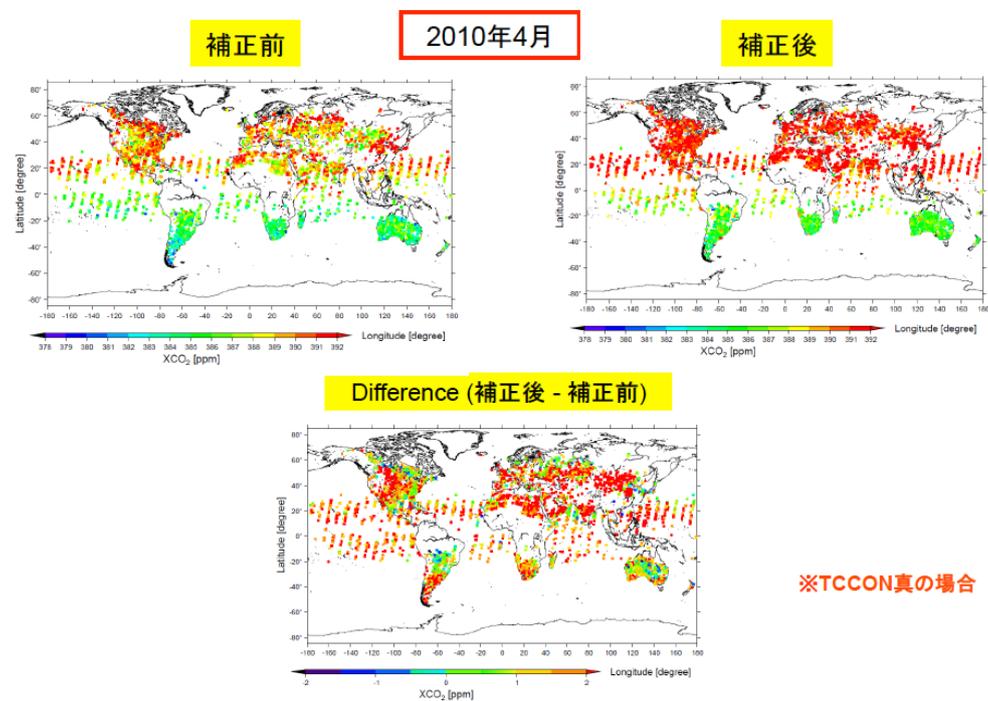
図(1)-15 2009年7月における二酸化炭素の補正前後の水平分布比較
上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



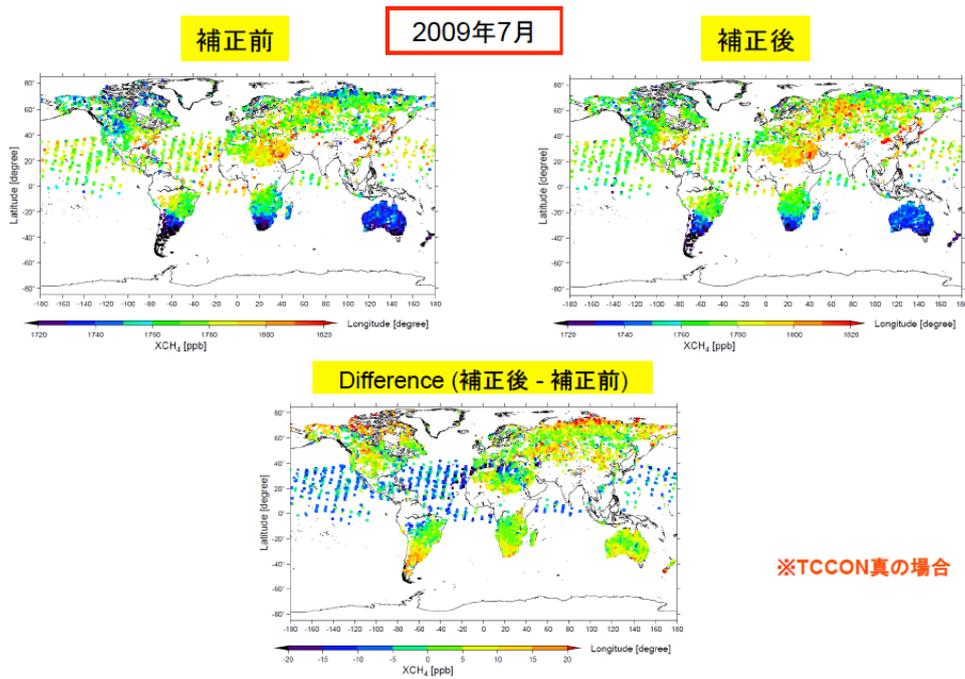
図(1)-16 2009年10月における二酸化炭素の補正前後の水平分布比較
上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



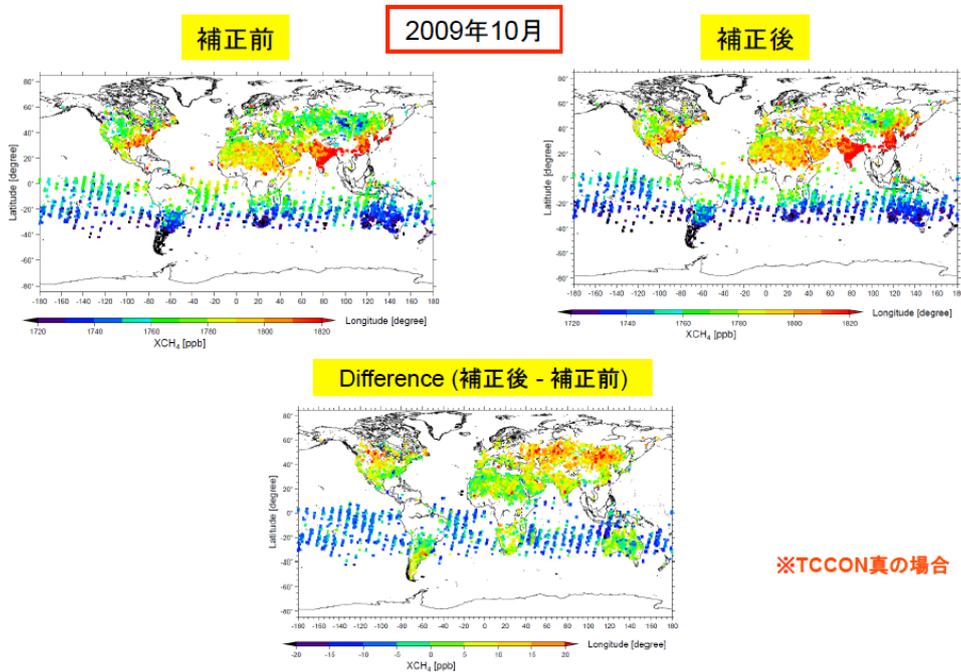
図(1)-17 2010年1月における二酸化炭素の補正前後の水平分布比較
上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



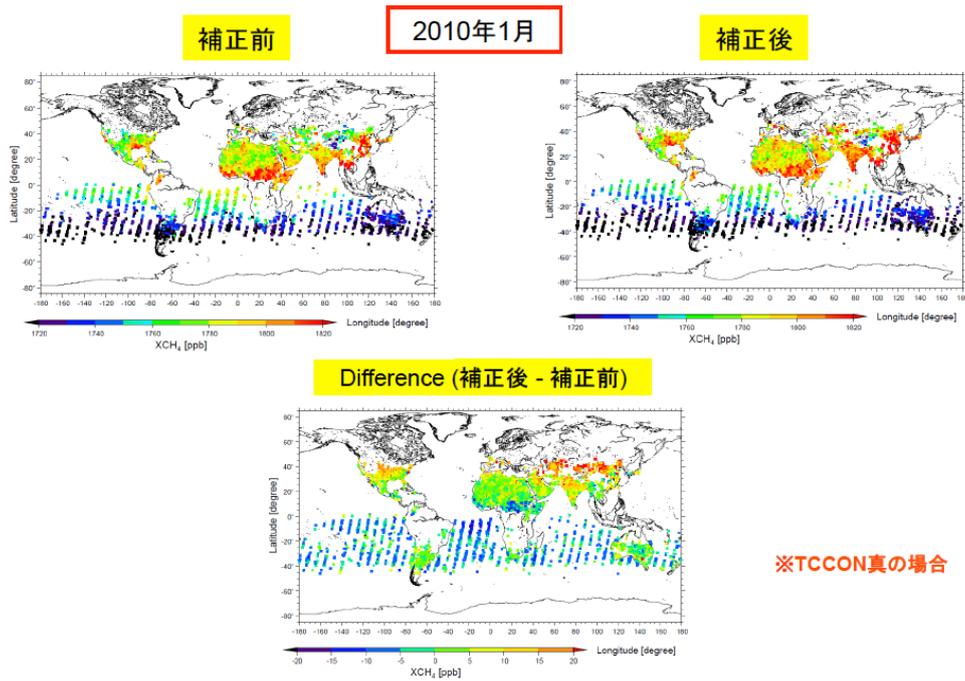
図(1)-18 2010年4月における二酸化炭素の補正前後の水平分布比較
上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



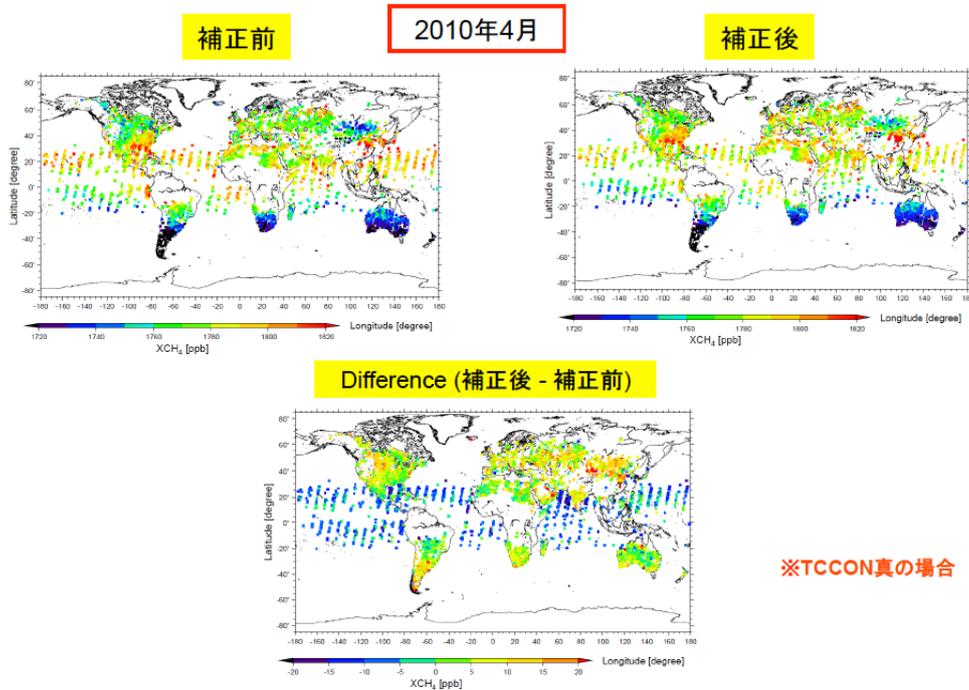
図(1)-19 2009年7月におけるメタンの補正前後の水平分布比較
 上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



図(1)-20 2009年10月におけるメタンの補正前後の水平分布比較。上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



図(1)-21 2010年1月におけるメタンの補正前後の水平分布比較
 上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。



図(1)-22 2010年4月におけるメタンの補正前後の水平分布比較
 上図の左が補正前、右が補正後、下図がその差(補正前-補正後)である。

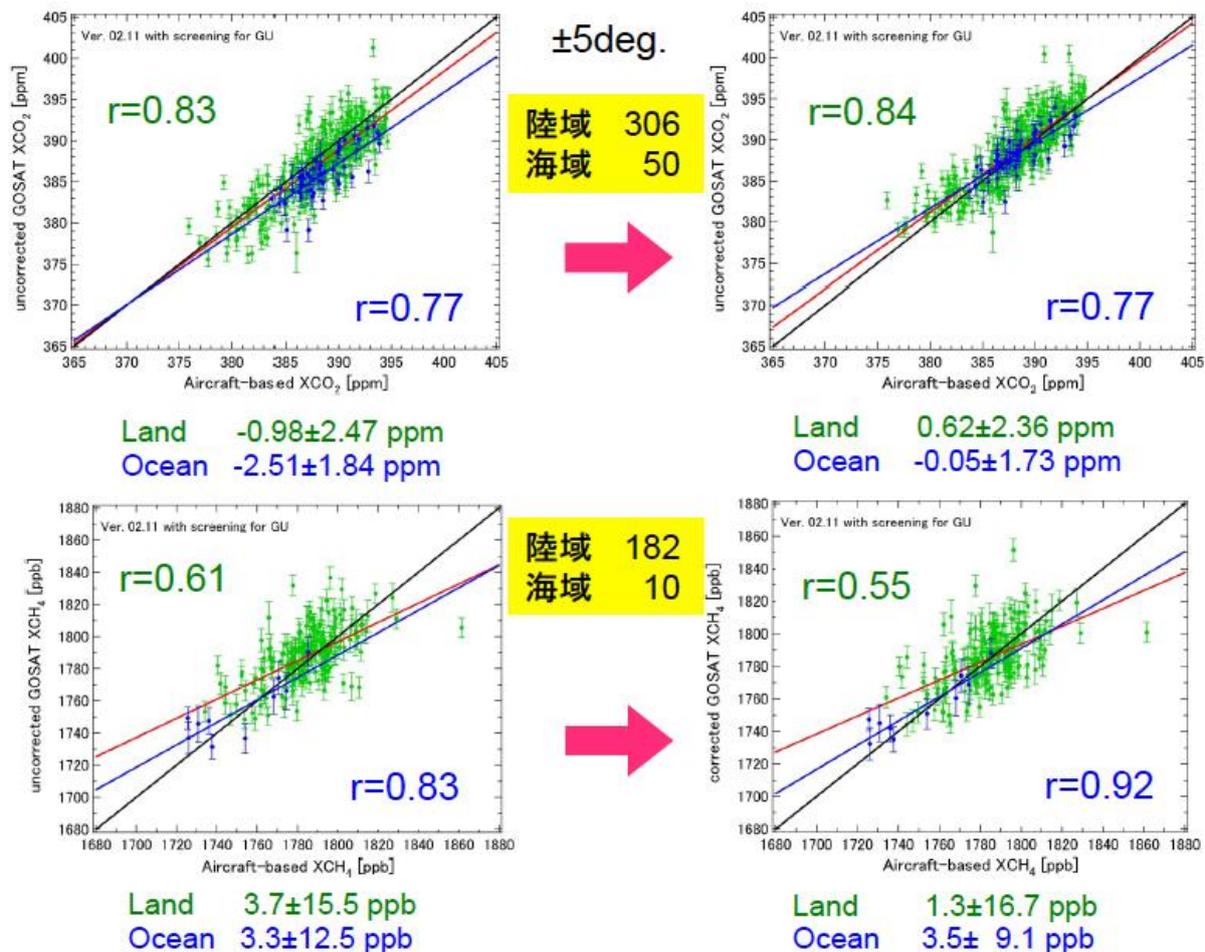
6) 「いぶき」データのバイアスの経験的補正法の開発：その2

ここでは、2014年4月25日現在最も解析期間の長いバージョンVer. 02.11を用いて、TCCONデータを真値とした場合のバイアスの経験的補正を行い、補正後の「いぶき」データ質の改善を確認した。前に示したような補正前後の評価の客観性の問題を解決するために、航空機観測データを用いてデータ質の改善の確認を行った。

補正前後で「いぶき」データのデータ質がどの程度改善されたのか、航空機観測データを用いて確認を行った。なお、5) 「いぶき」データのバイアスの経験的補正法の開発：その1では、Ver. 02.1xに対して行ったので、その違いを確認するためにTCCONデータによる結果も再確認した。経験的補正前後の相関係数が、Ver. 02.1xよりもVer. 02.11が僅かながら大きい値となっていることから、Ver.02.11のデータ質が、Ver. 02.1xよりも改善されていることが分かった。

図(1)-23 に補正前後の「いぶき」データと航空機観測データの散布図を示す。二酸化炭素の場合は、補正後「いぶき」時系列データは航空機データに対して一致度が改善されたことが分かった。更に、散布図を比較したところバイアスとばらつきともに改善されたことが確認できた。相関係数も補正後大きくなった。

一方、メタンの場合は、陸域でバイアスが小さくなったが、海域は大きな変化はなかった。相関係数は、陸域は改善されなかった。ただし、ばらつき内の変化であることと、海域のデータセットが10と多くないことに注意しなければならない。メタンの改善があまり良くなかった原因として、TCCONデータと航空機観測データの一貫性、 「いぶき」データの先験値の不確かさ、重回帰を行う物理量の選択が適切であるか等を挙げる事が出来る。これらの要因を検討した結果、現在のところ重回帰を行う物理量の数が多すぎる事が一つの要因であることが明らかになった。つまり、均一バイアスの項とAODのみを用いて重回帰を行った場合、相関係数は殆ど変化しないが、バイアスとばらつきが改善することを確認することが出来た。今後詳細な検討を行いこの研究結果を論文にまとめる予定である。



図(1)-23 補正前後の「いぶき」データと航空機観測データの散布図

それぞれの散布図の縦軸は「いぶき」データ、横軸は航空機観測データである。図中の緑色は陸域の「いぶき」データ、青色は海域の「いぶき」データで、図の下の数字は航空機観測データを用いて検証した「いぶき」データのバイアス±ばらつきである。rは相関係数である。上の2枚は二酸化炭素(単位: ppm)、下の2枚はメタン(単位: ppb)の散布図である。左の2枚は補正前、右の2枚は補正後の散布図である。

(2) アルゴリズム改良と初期値改良

1) はじめに

2010年8月に一般に公開された「いぶき」データ FTS SWIR L2 Ver. 01.xx の二酸化炭素ラム平均濃度 (XCO_2) には 9 ppm 程度の負のバイアスと 4 ppm 程度のバラツキがあり、これらの半減が本研究の目標である。「いぶき」データの高精度化のために解析アルゴリズムの改良や初期値の改訂によりバイアス・バラツキ低減が期待される項目の検討を実施した。本研究と「(3) 重点サイト Tsukuba におけるケーススタディ」を並行して、途中で得られた知見を互いにフィードバックさせながら研究を進めた。

FTS SWIR L2 Ver. 01.xx からのアルゴリズム改良項目として、エアロゾル高度分布の扱いの変更、TANSO-FTS バンド 1 輝度オフセット項の導入を行った。初期値 (= 参照値) 改良項目として、太陽照度データベース、エアロゾル光学特性、分光パラメータ、TANSO-FTS 感度劣化特性の改訂

を行った。以下にこれらの検討結果について記載する。

2) 太陽照度データベース（参照値）の改訂

太陽照度データベースは Ver. 01.xx まで Kurucz が作成したもの⁶⁾を使用していた。本データベースは Kitt Peak 国立天文台に設置された高分解能 FTS で観測された太陽光観測スペクトルをベースとして、地球大気による吸収構造を理論計算と手作業によって除去することで作成されたものである。しかしながら、地球大気による吸収構造の除去が不十分であったためか、作成された太陽照度データベースには二酸化炭素やメタン等の吸収線位置に極僅かな凹凸が残っており、これが XCO_2 , XCH_4 にエアマス依存のバイアスを生じる要因の一つとなっていたことが判明した。これを解決するため、TCCON や ACOS で用いられている Toon の太陽照度データベース⁷⁾に差し替えた。Toon は太陽光の吸収構造（Fraunhofer 線）を経験的な関数形で表現し、Kitt Peak 国立天文台で観測されたスペクトルに加え、気球搭載 FTS で高度 30 km 以上で観測されたスペクトル等も併用し、太陽光の吸収構造と地球大気による吸収構造を同時にスペクトルフィッティングで解析した後に、太陽光の吸収構造に対応する部分のみを用いて太陽照度データベースを再構成しているため、地球大気による影響がない。図(1)-24 に Kurucz と Toon の太陽照度データベースの比較を、図(1)-25 に太陽照度データベースの改訂による XCO_2 , XCH_4 の変化をエアマスの関数として示す。太陽照度データベース（参照値）の改訂による XCO_2 , XCH_4 の変化はそれぞれ +3 ppm、-7 ppb 程度である。

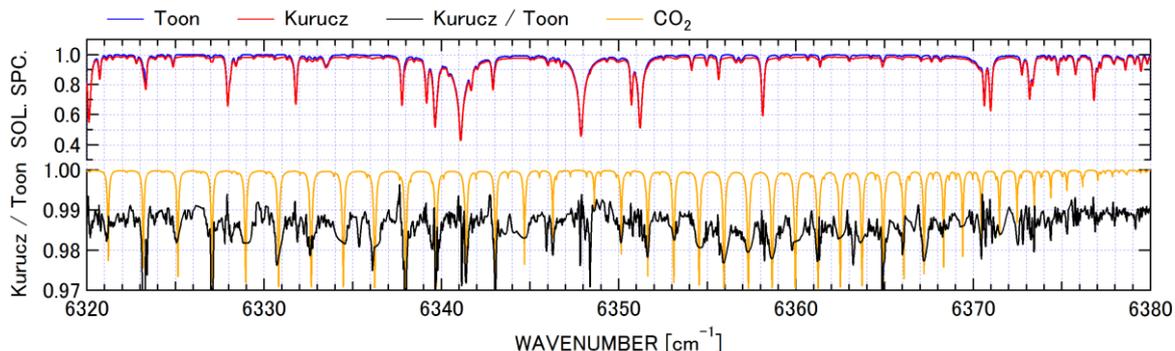


図 (1)-24 (上段) Kurucz (赤) と Toon (青) の太陽照度データベース、および (下段) 両者の比 (黒) と二酸化炭素の吸収線位置 (橙)。比に見られる構造は Kurucz の太陽照度データベースに起因しており、二酸化炭素の吸収線位置に対応して比が小さくなっている (二酸化炭素の吸収構造を除外しきれていない) ことがわかる。

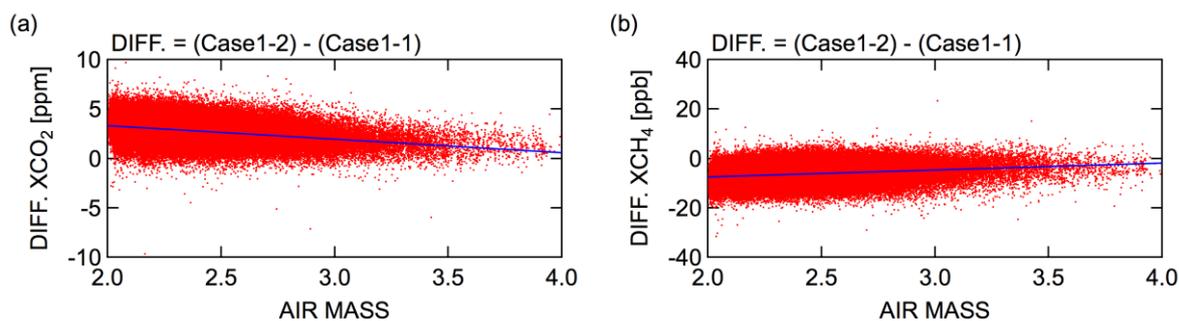


図 (1)-25 太陽照度データベースの改訂に伴う (左) XCO_2 、(右) XCH_4 の変化。Case1-1 では Kurucz の太陽照度データベースを、Case1-2 では Toon の太陽照度データベースを使用した。Kurucz の太陽照度データベースに残っている吸収構造に相当する光路長の影響はエアマスが大きいほど (光路長が長いほど) 相対的に小さくなる。

3) エアロゾルの光学特性 (参照値)、高度分布の扱い (アルゴリズム) の改訂

XCO_2 、 XCH_4 導出における最大の誤差要因は雲・エアロゾルの散乱による光路長の変化である。光路長変動は雲・エアロゾルの量や種類だけでなく地表面の明るさにも依存し、一般に地表面が暗い場合には光路長が短く、明るい場合には長くなる傾向にある。また、「いぶき」では地球-大気系からの反射光を観測するため、雲・エアロゾルの量や種類、地表面の明るさに違いが無くても雲・エアロゾルの存在高度が高くなるほど光路長変動の影響は大きくなる。加えて、雲・エアロゾルの散乱特性や地表面反射率は波長依存性を示すため、光路長変動の影響も波長依存性を示す。「いぶき」データの解析において、雲・エアロゾルの散乱による光路長変動の影響は適切に除去・補正されなければならない。GOSAT プロジェクトによる FTS SWIR L2 処理の方針は、TANSO-FTS の視野内に雲が存在しない事例に対して、エアロゾルの補正を行いカラム平均濃度を導出するというものであり、エアロゾルの地域性・季節性をエアロゾル輸送モデル SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) の計算結果を利用することで考慮する点に特徴がある。なお、エアロゾルに対する多くの仮定と現実とのズレが解析結果に誤差として表れるため、解析結果の品質評価過程において、エアロゾル光学的厚さがある閾値よりも大きい場合には解析結果が低品質であるとして除外することとなる。

FTS SWIR L2 Ver. 01. xx 処理では、光路長変動の補正を目的として、カラム平均濃度と同時にエアロゾル光学的厚さ (AOD) と地表面気圧を推定した。この際、エアロゾルは地表から高度 2 km の範囲に一様に存在すると仮定した。しかしながら、エアロゾル光学的厚さと地表面気圧の双方を同時に過大評価し、かつ、カラム平均濃度を大幅に過小評価する事例が多発した (図 (1)-26)。品質評価過程で用いるエアロゾル光学的厚さに対する閾値はこの結果を踏まえて 0.5 (波長 1.6 μm における値) としたが、この値は非現実的といえるほど大きな値であるにも関わらず、多くの事例が低品質として除外されることとなった。Ver. 01. xx 処理に使用された初期値等の調査や感度解析を通して、このエアロゾル光学的厚さと地表面気圧の同時過大評価傾向には複数の要因が関係していることが判明した。まず、Ver. 01. xx まで使用していた SPRINTARS のバージョン (V3.54) では大粒子の寄与が大きすぎたため、適切なエアロゾル光学特性やその波数依存性が再現できていないという問題が見つかった。最新バージョンである SPRINTARS (V3.84) ではより確

からしいエアロゾル光学特性やその波数依存性が得られることが判明したため、SPRINTARS のバージョンアップを実施した (図 (1)-27)。また、エアロゾルの高度分布の違いが理論スペクトルに与える影響は地球大気による吸収の強さに依存するため、層厚 2 km の単一エアロゾル層の仮定が誤差をもたらすことが判明した。これを解決するために、SPRINTARS で計算されたエアロゾル高度分布を先験値としてエアロゾル高度分布を同時推定することにした。これらの改訂により、特に同時推定されたエアロゾル光学的厚さの過大評価傾向が大幅に緩和され、解析結果の品質判定で除外される事例数が減少した (有効解析データ数が増加した)。また、同時推定された地表面気圧に見られた大きな外れ値が減少し、これに伴い XCO_2 、 XCH_4 の外れ値も減少した。エアロゾルの扱いの違いによるエアロゾル光学的厚さ、地表面気圧、 XCO_2 の変化を図 (1)-28 に示す。エアロゾル光学特性 (参照値) の改訂による XCO_2 、 XCH_4 の変化はそれぞれ +3 ppm、+12 ppb 程度、エアロゾル高度分布の扱い (アルゴリズム) の改訂による変化はそれぞれ -1 ppm、-4 ppb 程度である。

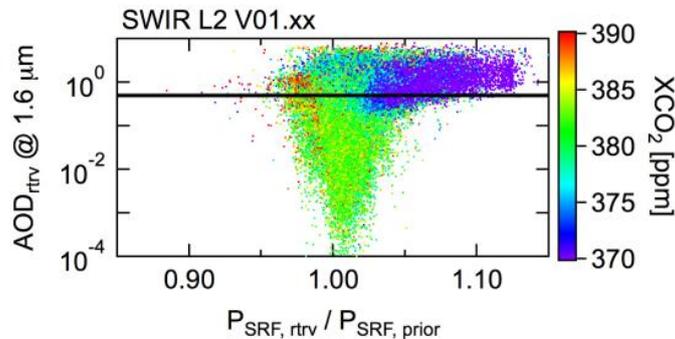


図 (1)-26 FTS SWIR L2 Ver. 01.xx において、カラム平均濃度と同時推定されたエアロゾル光学的厚さと地表面気圧の関係。地表面気圧は先験値で規格化している。また、色は XCO_2 の濃度を表す。エアロゾル光学的厚さと地表面気圧が同時に大きくなっている事例 (図中右上) では、 XCO_2 が極端な低濃度を示すことが確認できる。黒線はエアロゾル光学的厚さが 0.5 の線で、これよりもエアロゾル光学的厚さが大きな事例は低品質であると判断し、品質評価過程で除外した。

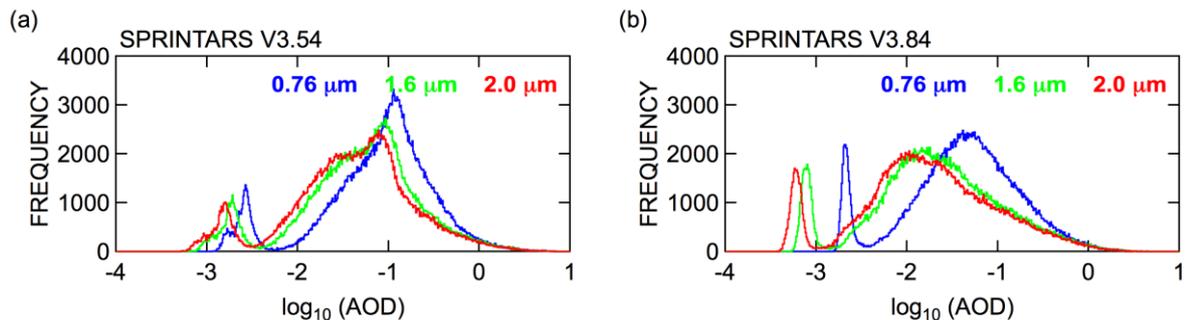


図 (1)-27 SPRINTARS のエアロゾル分布を基に計算したエアロゾル光学的厚さの頻度分布。(左) V3.54、(右) V3.84。色の違いは波長の違い (TANSO-FTS のバンドに対応) を表す。一般に粒子の大きさが小さいほど波長が長くなるにつれ光学的厚さが小さくなることから、V3.54 では大粒子の寄与が大きいと考えられる。

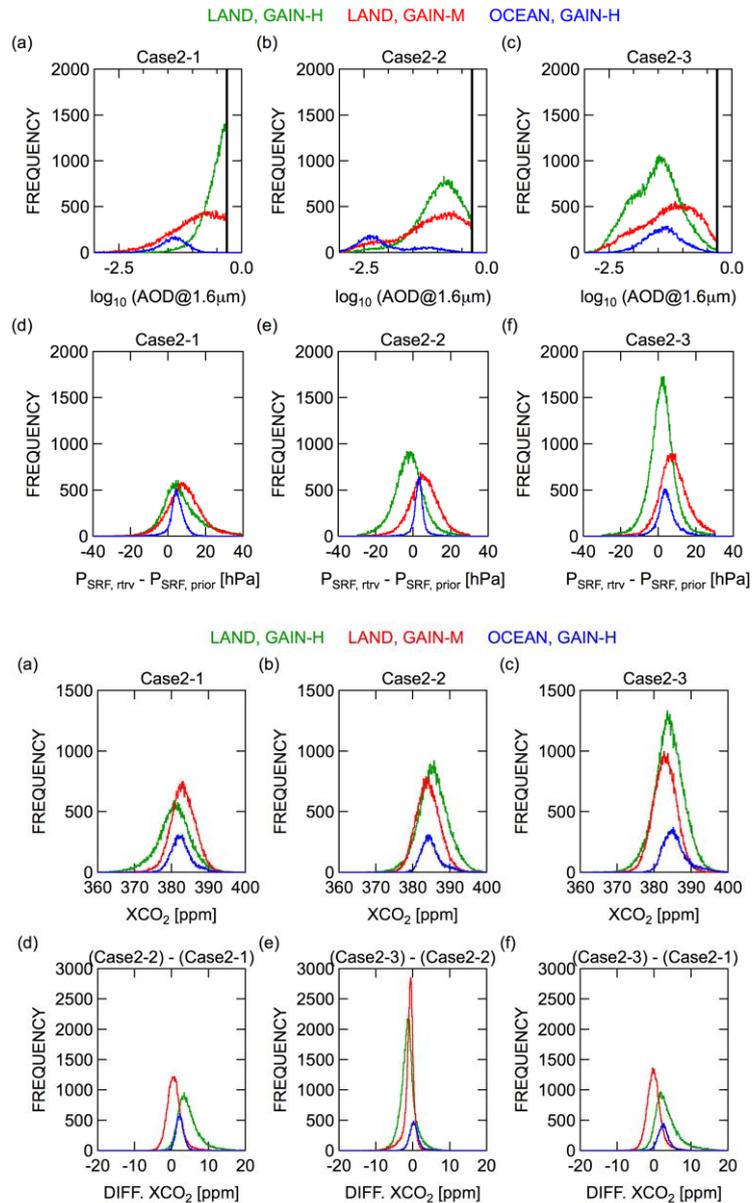


図 (1)-28 エアロゾルの扱いを変えた事例解析における (上段: a-c) エアロゾル光学的厚さ、(上段: d-f) 地表面気圧、(下段: a-c) XCO_2 の頻度分布と (下段: d-f) 事例解析間の XCO_2 の差の頻度分布。地表面気圧は先験値からの差で表した。色の違いは海陸・ゲインの違いを、黒線はエアロゾル光学的厚さ 0.5 (Ver. 01.xx における品質判定条件) を表す。層厚 2 km の単一のエアロゾル層に対し、Case2-1 では SPRINTARS V3.54 のエアロゾル光学特性を、Case2-2 では SPRINTARS V3.84 のエアロゾル光学特性を使用してエアロゾル光学的厚さを推定した。Case2-3 は SPRINTARS V3.84 のエアロゾル光学特性を使用し、エアロゾル高度分布を推定した。エアロゾルの扱いの改訂に伴い、エアロゾル光学的厚さの過大評価傾向が大幅に緩和され、品質評価過程で低品質と判定される事例が減少したことがわかる。また、地表面気圧の外れ値とそれに伴う XCO_2 の外れ値も少なくなり、全体的にバラツキが小さくなっている。

4) TANSO-FTS バンド 1 輝度オフセット項の組込 (アルゴリズム)

JAXA における TANSO-FTS データの解析により、TANSO-FTS バンド 1 には検出器以後のアナログ回路に非線形性が存在することが判明し、これにより観測スペクトルには入力輝度の強さに依存する誤信号が混在していることが明らかとなった。非線形性をもたらすアナログ回路はローパスフィルタとプリアンプの二か所であり、その影響度はゲインによっても異なる。観測スペクトルに対する非線形性の補正手法の開発・改良は JAXA において現在も検討が続けられている。

この TANSO-FTS バンド 1 の非線形性が解析に及ぼす影響を調べるため、海洋上で取得された観測スペクトルに対して、雲・エアロゾルが存在しないと仮定して地表面気圧を推定した結果を図 (1)-29 に示す。海面の反射率は鏡面反射方向周辺を除いて十分に小さいため、雲・エアロゾルの散乱によって光路長が短くなる効果が卓越していると考えられる。したがって、雲・エアロゾルが存在しないと仮定して地表面気圧を推定した場合、得られる地表面気圧には雲・エアロゾルの量に応じた過小評価が生じると考えてよい。すなわち、得られた地表面気圧の上端包絡線は雲・エアロゾルの影響をほとんど受けていない事例とみなすことができる。上端包絡線のみに着目した場合、観測スペクトルの信号対雑音比 (SNR) が大きくなるにつれ (入力輝度が強くなるにつれ)、地表面気圧が過小評価されており、おそらくは非線形の影響であると思われる。JAXA の検討によると、ローパスフィルタの非線形性は緩やかな波数構造を持つものの、観測スペクトルに対してオフセット的な誤信号をもたらすとのことである。そこで、TANSO-FTS バンド 1 の観測スペクトルに波数依存性の無い輝度オフセットがあると仮定して、輝度オフセット項を同時推定することとした (アルゴリズム改訂)。輝度オフセット項を同時推定することで地表面気圧の SNR 依存性が低減された (図 (1)-30)。なお、輝度オフセット項の同時推定は SNR 依存性を低減させただけであり、非線形性そのものが適切に補正されているわけではない点に注意すべきである。

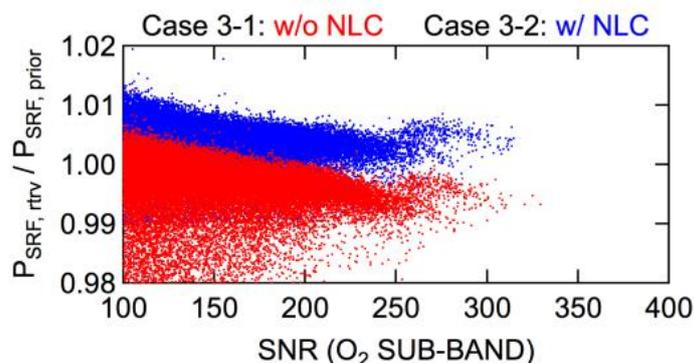


図 (1)-29 海洋上で観測されたスペクトルに対して、雲・エアロゾルが無いと仮定して推定した地表面気圧。地表面気圧は先験値で規格化している。推定された地表面気圧の上端包絡線は雲・エアロゾルの影響をほとんど受けていない事例とみなすことができる。Case3-1 では非線形性未補正のスペクトルを、Case3-2 ではローパスフィルタの非線形性を補正したスペクトルを用いた。いずれの場合も地表面気圧は SNR 依存性を示す。

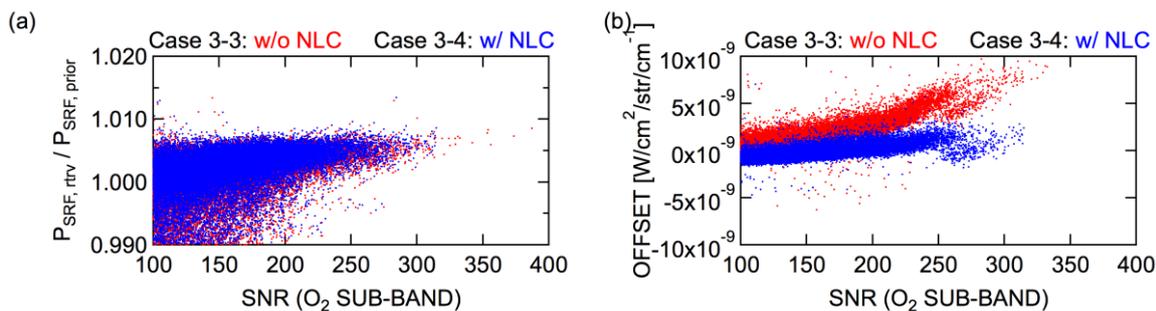


図 (1)-30 海洋上で観測されたスペクトルに対して、雲・エアロゾルが無いと仮定して推定した（左）地表面気圧と（右）同時推定された輝度オフセット項。地表面気圧は先験値で規格化している。Case3-3 では非線形性未補正のスペクトルを、Case3-4 ではローパスフィルタの非線形性を補正したスペクトルを用いた。輝度オフセット項を同時推定することで地表面気圧の SNR 依存性が低減した。また、同時推定された輝度オフセット項は Case3-4（ローパスフィルタの非線形性を補正したスペクトルを用いた）の方がゼロに近付いており、少なくとも非線形補正の方向性が間違っていないことが確認された。

5) 酸素の分光パラメータ（参照値）の改訂

さて、図 (1)-30 において、先験値で規格化した地表面気圧の上端包絡線は 1 より大きな値となっている。地表面気圧に誤差をもたらす要因としては、雲・エアロゾルの散乱による光路長変動、酸素の分光パラメータの系統誤差、TANSO-FTS バンド 1 の非線形性等が考えられるが、上端包絡線は雲・エアロゾルの影響をほとんど受けていない事例とみなせるため、地表面気圧の系統的な先験値からのズレは、酸素の分光パラメータか TANSO-FTS バンド 1 の非線形性によると考えられる。今回は便宜上このズレが全て酸素の分光パラメータの系統誤差であるとみなし、分光パラメータを調整することで地表面気圧の系統誤差の低減を狙う。分光パラメータは気圧依存性を示すため、地表面気圧のズレ量をそのまま分光パラメータのズレ量とみなすことはできない。そこで、地表面気圧は先験値のまま固定し、酸素濃度の高度分布を一律に調整するスケール係数を推定し、それを分光パラメータのズレ量とみなした（図 (1)-31）。酸素の分光パラメータ（参照値）の改訂に伴う XCO_2 、 XCH_4 の変化は +2 ppm、+10 ppb 程度である。

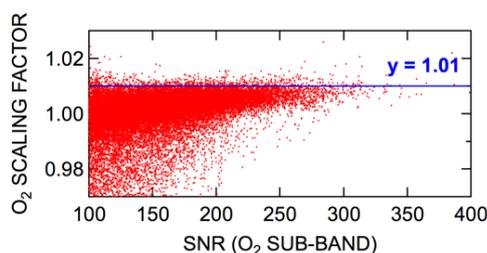


図 (1)-31 海洋上で観測されたスペクトルに対して、雲・エアロゾルが無いと仮定して推定した酸素濃度の高度分布を一律に調整するスケール係数。地表面気圧は先験値のまま固定している。スケール係数の上端包絡線 1.01 が酸素の分光パラメータの系統的なズレであるとみなし、分光パラメータの改訂を行った。

6) TANSO-FTS 感度劣化モデル（参照値）の改訂

一般に衛星センサの感度は経年変化（劣化）を示すことが知られており、FTS SWIR L2 Ver. 01. xx では 2010 年 8 月に JAXA より提供された感度劣化モデルを用いて感度の経年変化を補正してきた（図 (1)-32）。しかしながら、提供時点以後の感度劣化は予測値であり、実際の感度劣化からずれていることが年 1 回の頻度で実施されている代替校正実験の解析によって判明している。Ver. 01. xx の解析結果からは、本来時間変化しないことが期待される残差スペクトルの形状やバンド間感度調整係数の値が時間と共に徐々に変化している様子が確認されており（図 (1)-33）、感度劣化モデルのズレの影響と推測された。TANSO-FTS は軌道上太陽照度校正のための拡散板を有しており、拡散板表面による太陽照度校正を毎週回、拡散板裏面による太陽照度校正を月 1 回の頻度で実施している。拡散板そのものも経年変化をするため、より変化が小さいと考えられる拡散板裏面による太陽照度校正データを用いて TANSO-FTS の感度変化を調べ、新たな感度劣化モデルを作成した（図 (1)-34）。新しい感度劣化モデルを用いることで、解析結果に生じていた望ましくない時間変化は解消された（図 (1)-35）。感度劣化モデル（参照値）の改訂により、解析結果の精度が時間変化する危険を回避することができている。

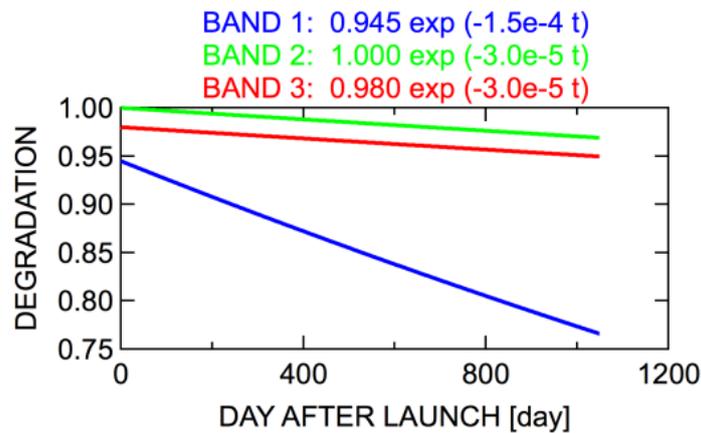


図 (1)-32 2010 年 8 月に JAXA より提供された感度劣化モデル。色の違いは TANSO-FTS のバンドの違いを表す。感度劣化は $a * \exp[-b * t]$ (t は打上からの経過日数 (day after launch)) としてバンド毎にモデル化され、偏光成分間の違いやバンド内の波数依存性は考慮されていない。時定数が大きいため、感度劣化が長期間継続するようなモデルとなっている。

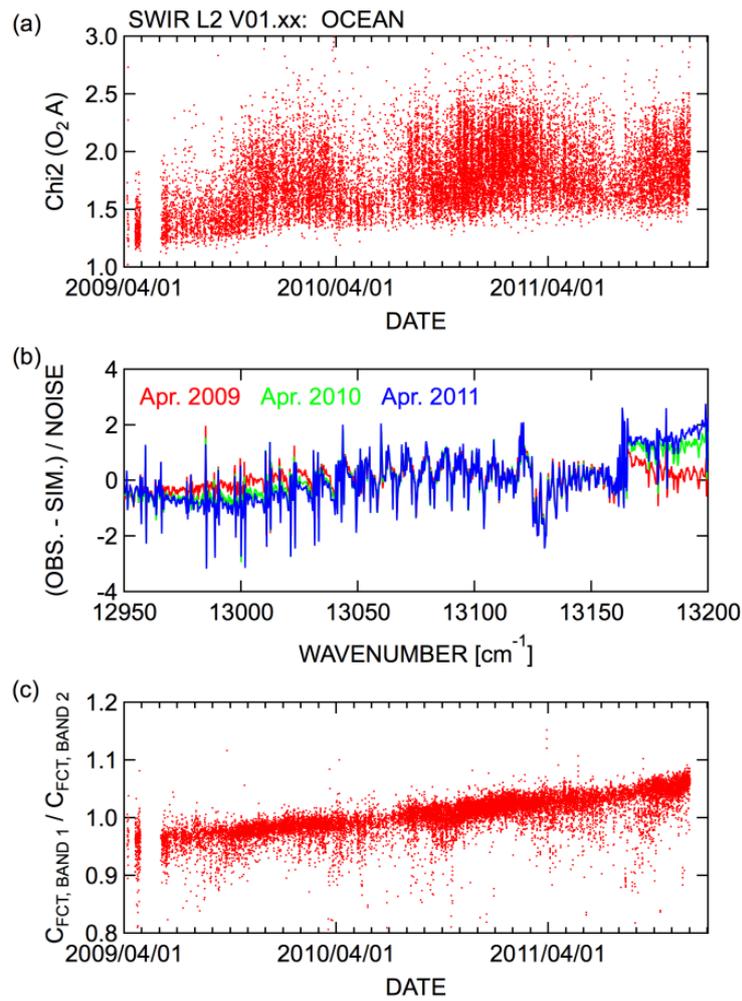


図 (1)-33 海洋上で取得された観測データに対する FTS SWIR L2 Ver. 01.xx の (上段) バンド 1 のスペクトル残差二乗和、(中段) バンド 1 の平均的なスペクトル残差構造、(下段) バンド間感度調整係数の時間変化。スペクトル残差構造の変化に伴いスペクトル残差二乗和の最小値が時間とともに大きくなっていることがわかる。バンド間感度調整係数は、感度補正が不十分であった場合に海上風速のみで全波数域の海面反射率を計算した際に生じる系統的なスペクトル誤差を低減するために導入した係数であり、バンド間の輝度補正に生じている不整合が時間と共に変化していることを表している。

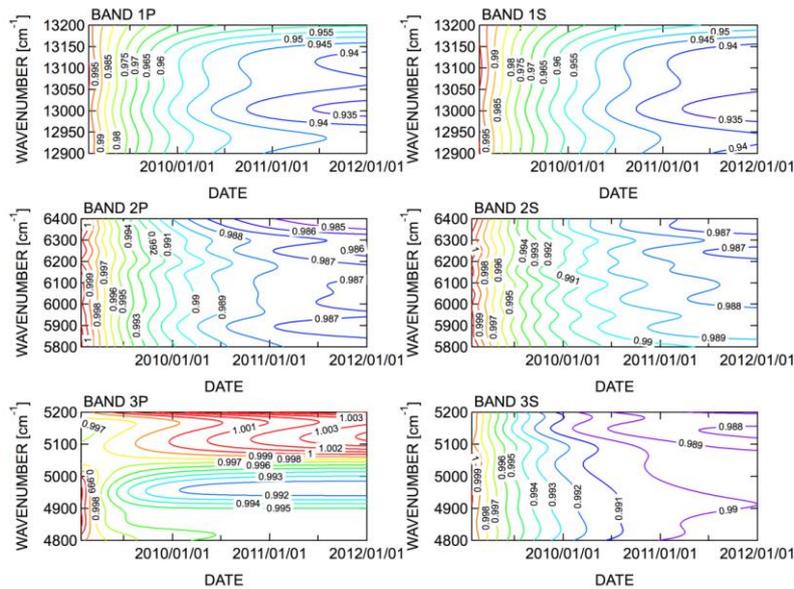


図 (1)-34 太陽照度校正データより評価した新しい感度劣化モデル。感度劣化は $a + b * \exp[-c * t]$ (t は打上からの経過日数) としてバンド・偏光成分毎に複数の波数点に対して評価した。図中の等高線は2009年3月時点を1とした劣化率である。感度変化が時間と共に緩やかになる傾向は代替校正実験の傾向と一致している。

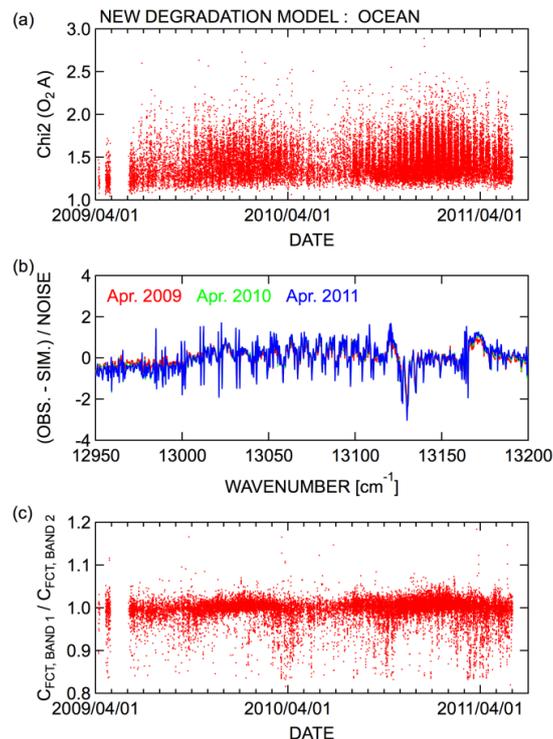


図 (1)-35 海洋上で取得された観測データに対して、新しい感度劣化モデルを使用して解析した (上段) バンド 1 のスペクトル残差二乗和、(中段) バンド 1 の平均的なスペクトル残差構造、(下段) バンド間感度調整係数の時間変化。図 (1)-33 で見られた望ましくない時間変化が解消されていることがわかる。

7) アルゴリズム、初期値改良の結果：FTS SWIR L2 Ver. 02.xx プロダクト

これらの改良点を反映した解析アルゴリズムは GOSAT プロジェクトへフィードバックされ、その解析結果が検証解析によりデータ質が評価された後 FTS SWIR L2 Ver. 02.xx として 2012 年 6 月に公開された。図 (1)-36 に 2009 年 7 月の XCO_2 について Ver. 01.xx と Ver. 02.xx を比較した結果を、図 (1)-37 に Ver. 02.xx と TCCON データとの比較を示す。また、サイト別の詳細については図 (1)-38、39、および、表 (1)-1、2 に示す。 XCO_2 のバイアス \pm ばらつきは -1.48 ± 2.09 ppm となり、バイアスとばらつき共に半減以下、 XCH_4 は -5.9 ± 12.6 ppb と、バイアスは半減以下、ばらつきも半分近くになり、本研究の目標が達成されたことがわかる。

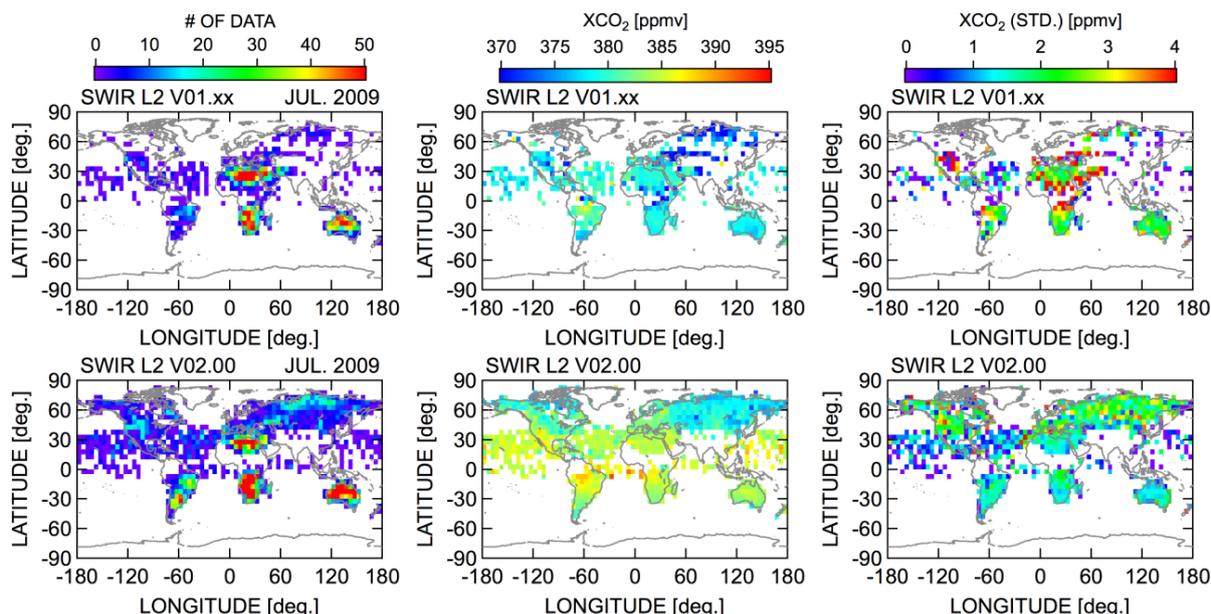


図 (1)-36 FTS SWIR L2 (上段) Ver. 01.xx と (下段) Ver. 02.xx の比較。2009 年 7 月の XCO_2 の例。5 度グリッド内の (左) 有効解析データ数、(中) 平均値、(右) 標準偏差。Ver. 02.xx では Ver. 01.xx と比べ、有効データ数の増加・データ存在領域の拡大・バイアスの低減・バラツキの低減が確認できる。

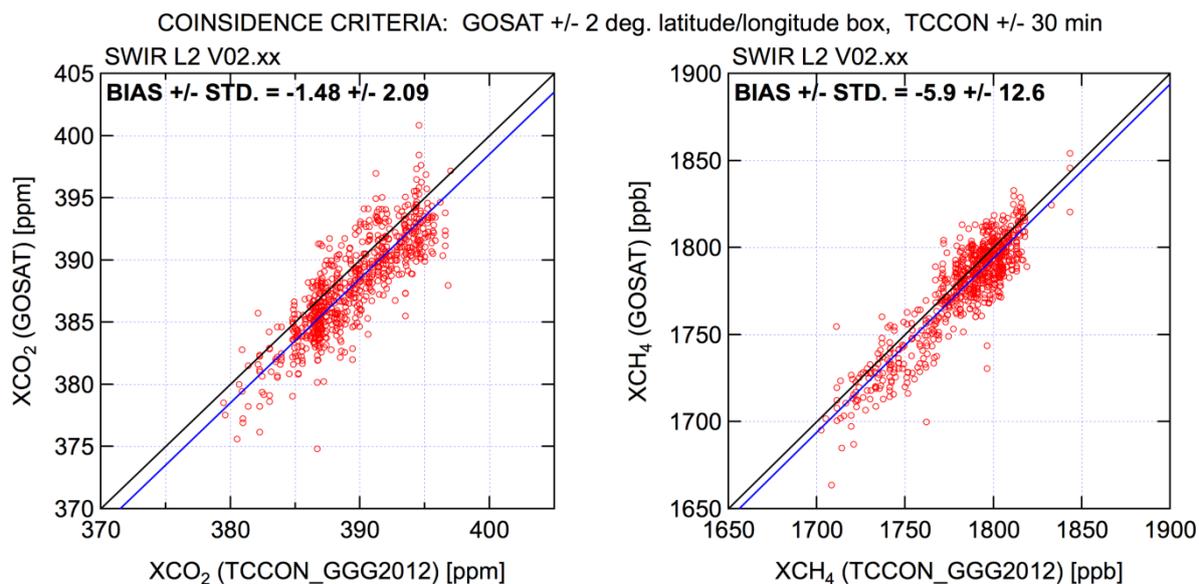


図 (1)-37 TCCON サイト周辺の「いぶき」による観測データの解析結果 (FTS SWIR L2 Ver. 02. xx) と TCCON データの比較。TCCON データは「いぶき」のオーバーパス ± 0.5 時間の平均値、「いぶき」データは TCCON サイトを中心に緯度・経度 ± 2 度の枠内に含まれるデータを用いた。黒線は 1 対 1 の直線で、青線は $y = x + a$ としてフィッティングした直線。

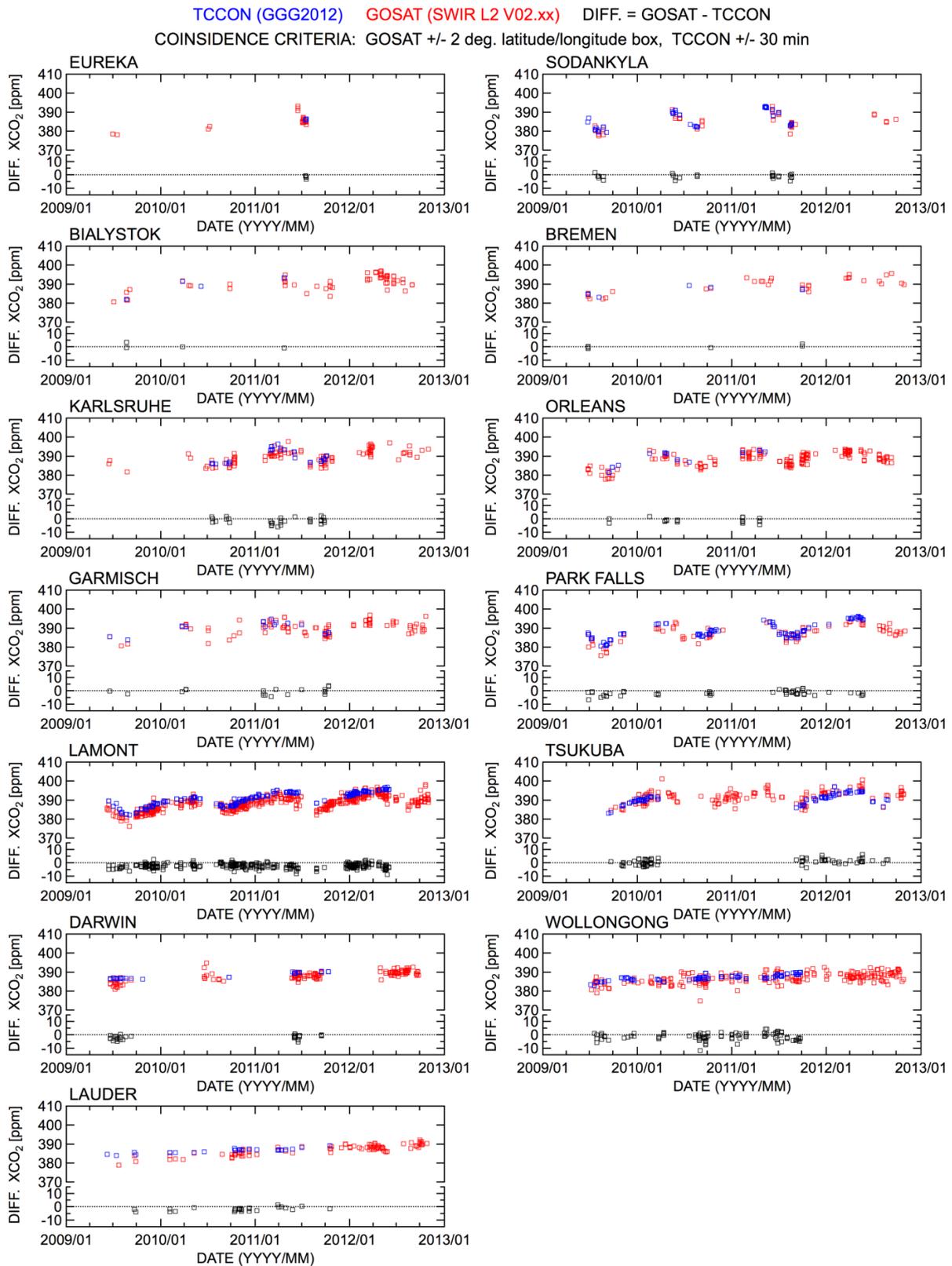


図 (1)-38 TCCON サイト別の「いぶき」による観測データの解析結果 (FTS SWIR L2 Ver. 02. xx) と TCCON データとの比較結果。XCO₂ の場合。青色はTCCON、赤色は「いぶき」データで、黒色は「いぶき」データとTCCONデータの差である。

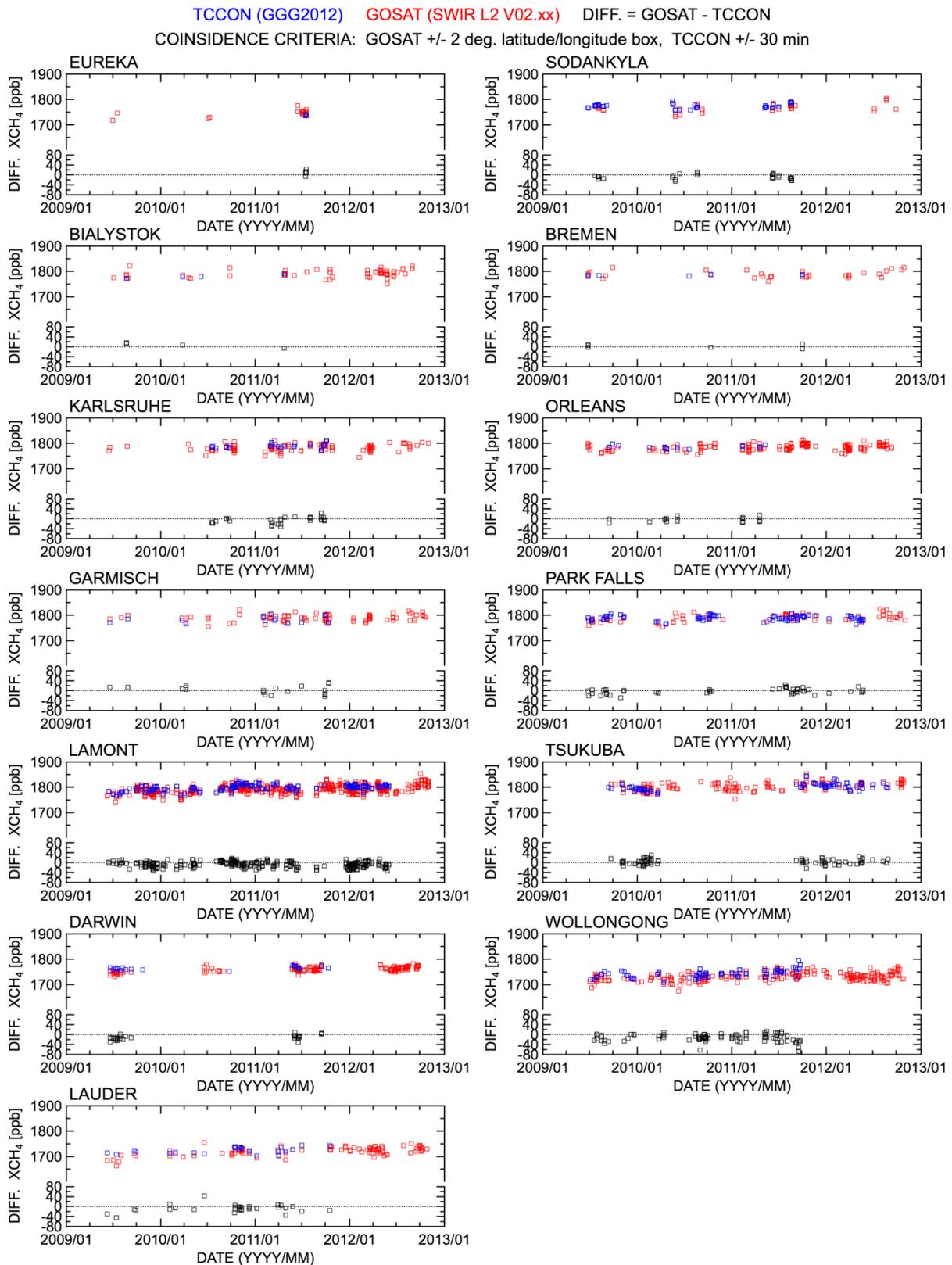


図 (1)-39 TCCON サイト別の「いぶき」による観測データの解析結果 (FTS SWIR L2 Ver. 02. xx) と TCCON データとの比較結果。XCH₄ の場合。青色はTCCON、赤色は「いぶき」データで、黒色は「いぶき」データとTCCONデータの差である。

表 (1)-1 TCCON サイト別の「いぶき」による観測データの解析結果 (FTS SWIR L2 Ver. 02.xx) と TCCON データとの比較結果。XCO₂ の場合。

サイト	緯度 [deg.]	経度 [deg.]	GOSAT - TCCON (GGG2012)		
			<i>N</i>	<i>A</i> [ppm]	σ [ppm]
Eureka	80.05	-86.42	5	-1.49	0.98
Sodankyla	67.37	26.63	28	-0.97	1.57
Bialystok	53.23	23.03	4	0.61	2.04
Bremen	53.10	8.85	6	0.25	1.25
Karlsruhe	49.10	8.44	32	-1.48	2.12
Orleans	47.97	2.11	20	-1.14	1.55
Garmisch	47.48	11.06	20	-0.35	2.20
Park Falls	45.95	-90.27	49	-1.56	1.70
Lamont	36.60	-97.49	326	-2.23	1.62
Tsukuba	36.05	140.12	77	0.90	2.04
Darwin	-12.42	130.89	32	-1.82	1.63
Wollongong	-34.41	150.88	92	-1.25	2.66
Lauder	-45.04	169.68	28	-1.67	1.30
Total (single scan)			719	-1.48	2.09
Total (station bias <i>A</i>)			13	-0.94	0.98

[注]N: 「いぶき」とTCCONのデータセット数、A: バイアス、 σ : ばらつき

表 (1)-2 TCCON サイト別の「いぶき」による観測データの解析結果 (FTS SWIR L2 Ver. 02.xx) と TCCON データとの比較結果。XCH₄ の場合。

サイト	緯度 [deg.]	経度 [deg.]	GOSAT - TCCON (GGG2012)		
			<i>N</i>	<i>A</i> [ppb]	σ [ppb]
Eureka	80.05	-86.42	5	10.3	10.2
Sodankyla	67.37	26.63	28	-7.8	9.6
Bialystok	53.23	23.03	4	7.8	9.7
Bremen	53.10	8.85	6	2.6	7.8
Karlsruhe	49.10	8.44	32	-6.2	12.3
Orleans	47.97	2.11	20	-4.5	8.8
Garmisch	47.48	11.06	20	3.9	16.1
Park Falls	45.95	-90.27	49	-1.1	11.0
Lamont	36.60	-97.49	326	-7.5	10.7
Tsukuba	36.05	140.12	77	4.0	10.6
Darwin	-12.42	130.89	32	-10.3	9.6
Wollongong	-34.41	150.88	92	-12.3	14.8
Lauder	-45.04	169.68	32	-7.9	15.1
Total (single scan)			719	-5.9	12.6
Total (station bias <i>A</i>)			13	-2.2	7.3

[注]N: 「いぶき」とTCCONのデータセット数、A: バイアス、 σ : ばらつき

8) FTS SWIR L2 Ver. 02.xx に見られる問題点

FTS SWIR L2 Ver. 02.xx データは Ver. 01.xx データと比べ大幅に精度が改善してはいるものの、表 (1)-1、2 からサイトによってバイアスの大きさが異なることがわかる。こういった地域的なバイアスの違いはカラム平均濃度データをフラックス解析等に用いた場合の誤差要因となるため望ましくない。FTS SWIR L2 Ver. 02.xx データの誤差の傾向を把握することは、さらなる「いぶき」データの高精度化に必要不可欠である。そこで、TCCON データを真値とみなし、Ver. 02.xx データとの差を同時推定パラメータ等に対してプロットし、傾向を調べた (図 (1)-40)。Ver. 02.xx 導出値と TCCON データとの差は、同時推定された地表面気圧の先験値からのズレと明瞭な相関があることが見て取れる。これは同時推定された地表面気圧・水蒸気量から計算される乾燥大気のカラム量を用いてカラム平均濃度を計算しているためである。地表面アルベドとの関係を見てみると、アルベドが高い領域でカラム平均濃度を過小評価していることがわかる。アルベドが高い、すなわち地表面が明るい場合には、エアロゾルは光路長を長くする効果が卓越することをふまえると、解析時に見積もられた有効光路長が実際の光路長よりも長かった、つまり同時推定されたエアロゾル量を過大評価している可能性があることを示唆している。また、導出値と TCCON データの差の時系列からは、最初の半年程度は過小評価傾向が若干大きいものの、それ以降は時間変動があまり大きくない様子が見て取れる。観測開始直後は TANSO-FTS の感度変化が急激に起きた時期でもあり (図 (1)-34)、新しい感度劣化モデルでもこの時期の感度劣化を十分に再現できていない可能性がある。

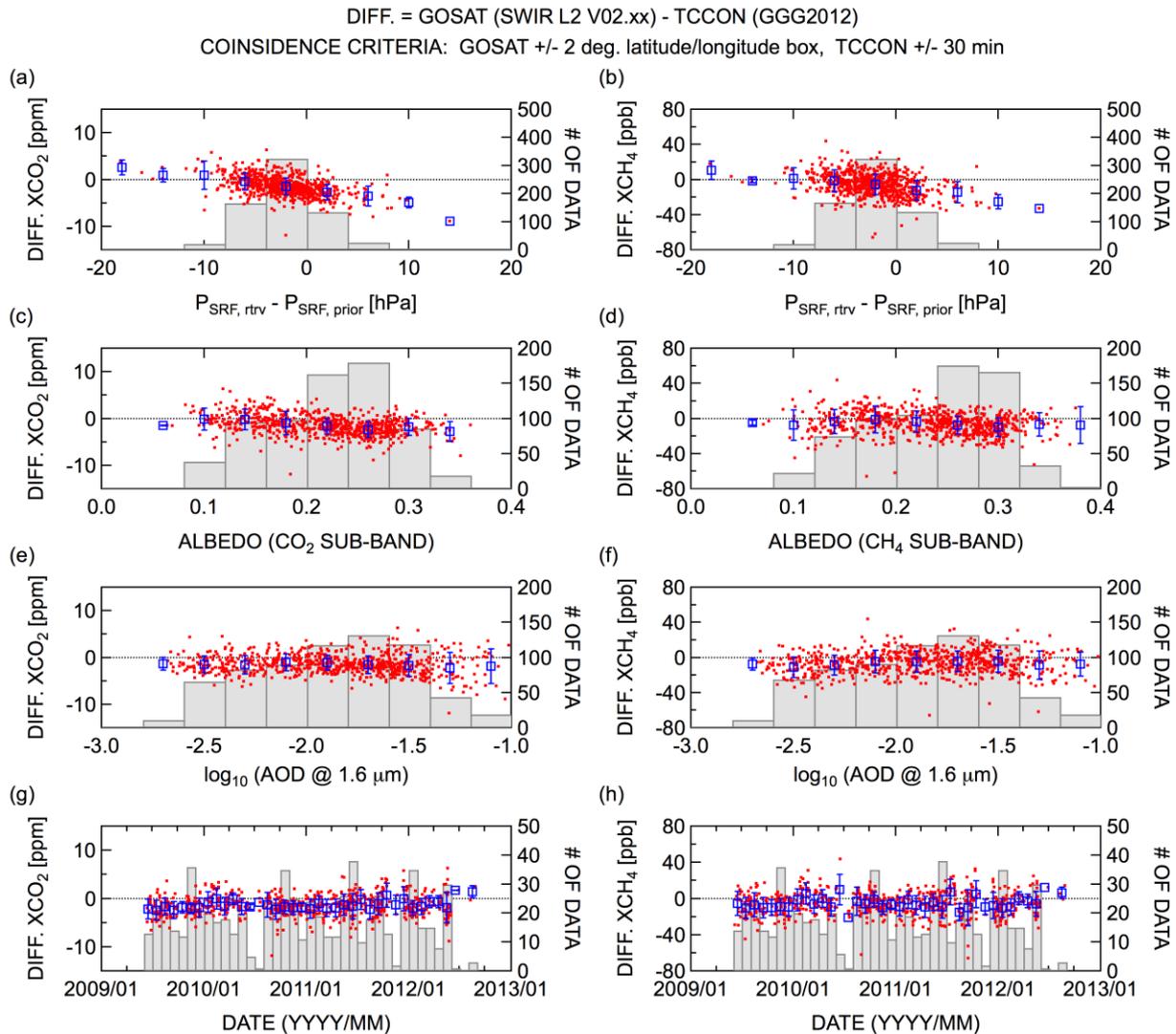
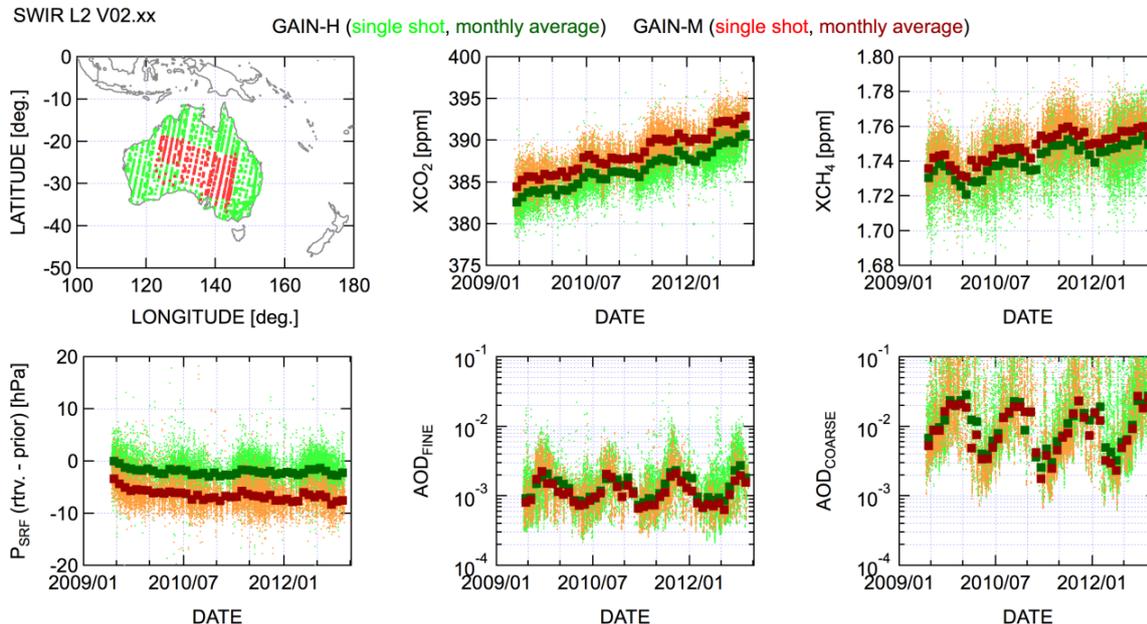


図 (1)-40 FTS SWIR L2 Ver. 02.xx 導出値と TCCON データとの差と同時推定パラメータ等との関係。(左) XCO₂、(右) XCH₄ で、上から地表面気圧の導出値と先験値の差、地表面アルbedo、エアロゾル光学的厚さ、時系列。赤点は個々の結果を、青四角とエラーバーは横軸を適当に分割した時の各区間内の平均と標準偏差を、灰色棒は区間内のデータ数(右軸)を表す。

ところで、TANSO-FTS は地表面反射率が高いサハラ砂漠上空やオーストラリア中央部において、観測信号が飽和しないようプリアンプのゲインを通常の Gain-H (high) から Gain-M (medium) へ切り替える運用が実施されている。また、FTS SWIR L2 処理では陸上と海上とで地表面反射率の扱いが異なる。こういった装置や処理の特性の違いは解析結果の精度とも関連すると考えられるが、Gain-M で運用されている領域の周辺には TCCON サイトがない、海上のデータを検証できる TCCON サイトは数が限られており、また、比較的最近になって運用が開始されたために十分な期間の検証ができない、など、TCCON データによる検証は陸域の Gain-H データのみに限られるという問題がある。Gain-M データや海上のデータは別途評価方法を考える必要がある。

オーストラリアは濃度変化が比較的小さいため、Gain-H データと Gain-M データの比較に適していると考えられる。オーストラリア上で取得されたデータをゲイン別に比較した結果を図(1)-41 に示す。XCO₂, XCH₄ 共に Gain-M データの方が大きな値を示す（系統的な差が生じている）ことが確認された。同時推定された地表面気圧とエアロゾル光学的厚さを調べたところ、エアロゾルには明瞭な違いが無いものの、地表面気圧には系統的な差が生じており、これがカラム平均濃度の系統的な差の直接的な原因であることがわかった。また、図(1)-42 に海上のデータの時系列を示す。あくまでも参考でしかないが、先験値として用いているモデル計算値と導出値の差を確認したところ、毎年 4 ~ 7 月にかけて両者の差が他の時期よりも大きくなる傾向が見られた。先ほどと同様に同時推定された地表面気圧とエアロゾル光学的厚さとの関連を調べた結果、大気上層のエアロゾル大粒子の光学的厚さの変動の様子と良い対応を示すことがわかった。一般に、海上では大気下層に海塩エアロゾルが卓越することが多いため、この大気上層で見られたエアロゾル大粒子の変動は実際の変動を表しているわけではなく、スペクトル残差を最小とする過程で生じた誤差である可能性も否定できない。地表面気圧・エアロゾルは共に TANSO-FTS バンド 1 に多くの情報をもつ一方で、このバンドには非線形性という大きな問題が残っている。アナログ回路の設計から、非線形性の影響度がゲインで異なることが判っているため、オーストラリアで見られたゲイン間の差は、非線形性と何らかの関係があることはほぼ間違いのないと思われる。JAXA GOSAT プロジェクトにおいて続けられている非線形性の補正手法の検討と連携して問題解決にあたる必要がある。



図(1)-41 オーストラリアにおける TANSO-FTS のゲイン運用状況（左上）と FTS SWIR L2 Ver. 02.xx 導出値の時系列プロット（左上以外）。緑は Gain-H、赤・橙は Gain-M を表す。時系列プロットの点は個々の結果、四角はそれぞれの月平均値を表す。

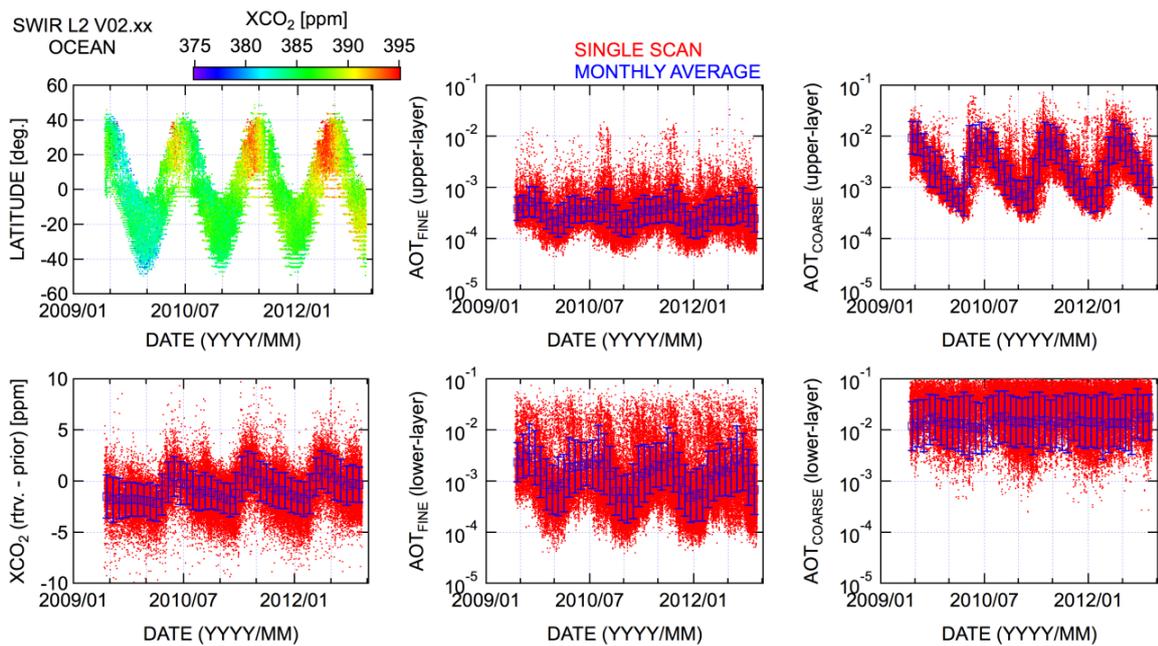


図 (1)-42 海上における FTS SWIR L2 Ver. 02.xx 導出値の時系列プロット。(左上) 観測点の緯度、色は XCO_2 の値、(左下) XCO_2 導出値と先験値の差、(中上) 大気上層のエアロゾル小粒子、(中下) 大気下層のエアロゾル小粒子、(右上) 大気上層のエアロゾル大粒子、(右下) 大気下層のエアロゾル大粒子。赤点は個々の結果を、青四角とエラーバーはそれぞれの月平均値と標準偏差を表す。

9) さらなる改善検討：雲の影響が小さいと思われる事例

個々の事例に対するバイアス・バラツキの低減による高精度化のみならず、観測全体に対する有効解析データ数の増加、も「いぶき」データのさらなる利用拡大にとって重要な課題である。FTS SWIR L2 処理は、解析に適するデータの選択 (pre-screening)・カラム平均濃度推定・推定結果の品質評価 (post-screening)、という三段階の処理からなっている。図 (1)-43 に Ver. 02.11 全期間 (2009/06 ~ 2013/04) に対する pre-/post-screening 通過率を示す。Ver. 02.xx 処理ではこれまで同様、FTS 視野内に雲が存在せず、観測スペクトルの SNR が比較的大きな事例を解析対象としているため、pre-screening を通過したデータの分布は晴天率の高い亜熱帯域で多く、晴天率の低い熱帯域や中高緯度で少ないといった雲の分布を反映した結果となっている。海上は雲に加えてサングリント域周辺以外では十分な SNR が確保できないことによる制約が加わる。なお、TANSO-FTS の迷光防止のフードによる視野制限により、「いぶき」が観測できるサングリント域は太陽天頂角が 30 度よりも小さい領域に限定される。post-screening では、サハラ砂漠周辺など、エアロゾルの影響が大きいと考えられる地域の周辺で低品質の結果が多くなっているものの、それ以外の地域では pre-screening 通過数の 9 割程度が post-screening を通過していることが確認された。

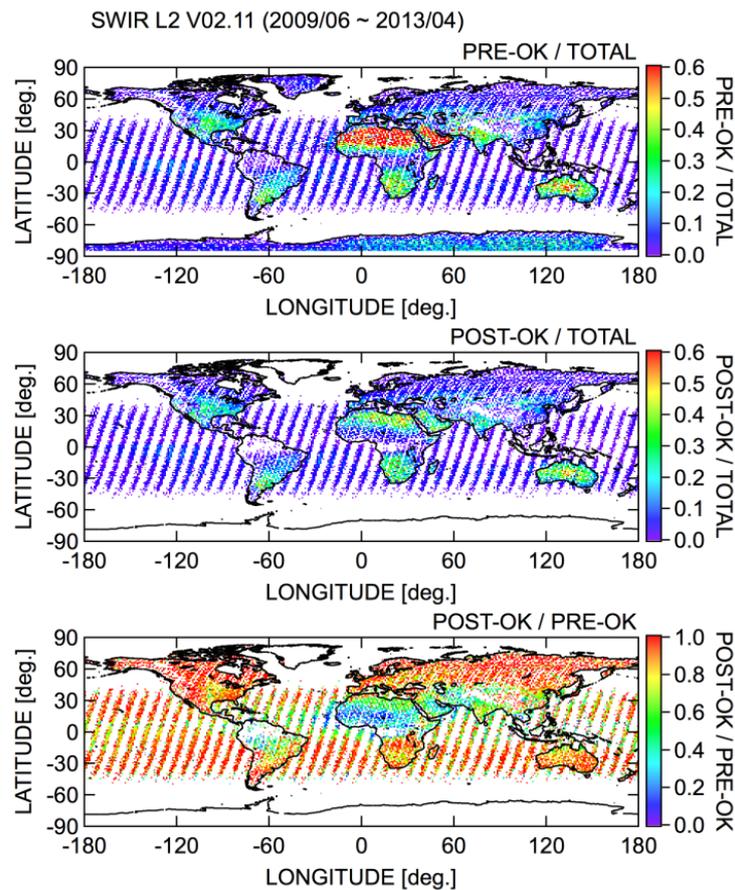


図 (1)-43 FTS SWIR L2 Ver. 02.11 処理における pre-/post-screening 状況。(上段) 全日照観測に対する pre-screening 通過率、(中段) 全日照観測に対する post-screening 通過率、(下段) pre-screening 通過数に対する post-screening 通過率。通過率がゼロの場合は白抜きとなっている。

図 (1)-43から、有効解析データ数の増加には post-screening 通過率を上げるよりも pre-screening 通過率を上げる方が効果的であると考えられる。主要な pre-screening 項目のうち SNR に対する条件緩和は、低 SNR データには十分な情報が含まれないことを考えると有効ではない。FTS 視野内に雲が含まれる事例への拡張が有効と考えられるが、全カラム平均濃度の導出が目的であることを考えると、光学的に薄い巻雲のような事例や、低層の積雲など、視野内の極一部のみを雲が覆っているような事例のみが対象となり得るだろう。

視野内の一部のみが雲に覆われているような事例は厳密には三次元放射伝達問題として扱う必要があるが、計算コストが膨大になるうえ観測量には三次元構造に関する十分な情報が含まれないため現実的ではない。視野内の雲量が少ない場合などはむしろ雲が存在しないとして扱っても大きな誤差を生じない可能性がある。そこで、pre-screening で判断される視野内の雲の有無に関わらず、雲を考慮せずにカラム平均濃度推定処理を行い、推定結果を雲が存在しない事例の結果と比較することで、雲の影響が無視できる限界を調査した。図 (1)-44 に結果を示す。視野内の雲量が多くなるにつれ、解が求まらない・スペクトル残差が大きい等 post-screening で除外される割合が増加するものの、視野全てが雲に覆われているような事例であっても

post-screening を通過することがあった。地表面気圧と XCO_2 のそれぞれについて導出値と先験値の差の頻度分布を視野内雲量の範囲を変えて調べた。視野内に雲が含まれる場合、雲より下層の大気による吸収を受けないため、地表面気圧・カラム平均濃度ともに過小評価する傾向にある。影響の度合いは雲量だけでなく雲の高度や波長の違いにも依存するため単純ではなく、雲が存在しない事例と大差ない結果を示すこともあるが、視野内雲量が増えるにつれ、明らかな外れ値の頻度が増えることがわかる。 XCO_2 に対しては、視野内雲量 0.01 以下であれば外れ値をほとんど増やすことなく約 10% の有効解析数の増大が期待できる。ところで、視野内に雲が存在するにもかかわらず、post-screening を通過した事例について、発生時期等を調べた結果を図 (1)-45 に示す。視野内雲量が 1 (視野全面を雲が覆っている) である事例が北半球中高緯度の冬から春に集中していることがわかる。なお、視野内雲量の評価には「いぶき」搭載の TANSO-CAI から求めた雲フラグデータを利用しているが、雪氷域と雲域の判別が困難であることが判っている。今回の調査において、視野内雲量が 1 で post-screening を通過した事例の中には雪氷域を雲域と誤判定したことで混入した事例も含まれていると考えられる。雲フラグデータの精度改善も有効解析データ数増加には重要であろう。

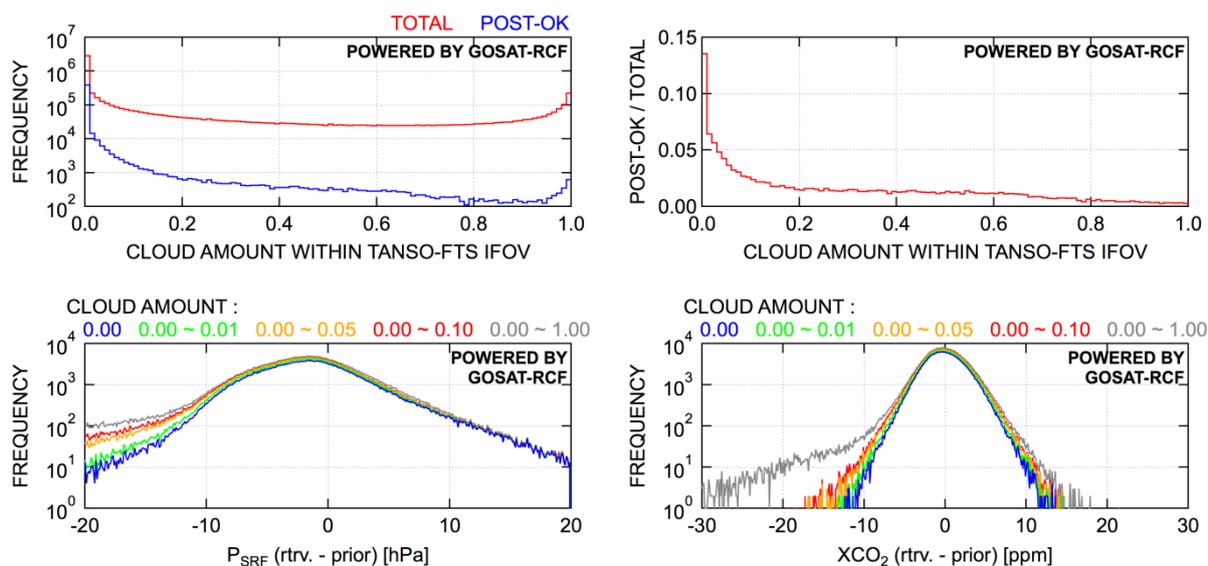


図 (1)-44 (左上) FTS 視野内雲量の頻度分布。赤は全日照データ、青はカラム平均濃度推定処理で post-screening を通過したデータ。(右上) FTS 視野内雲量別の全日照データに対する post-screening 通過率。(左下) 地表面気圧の導出値と先験値の差の頻度分布。色は視野内雲量の範囲を表す。(右下) XCO_2 の導出値と先験値の差の頻度分布。色は視野内雲量の範囲を表す。

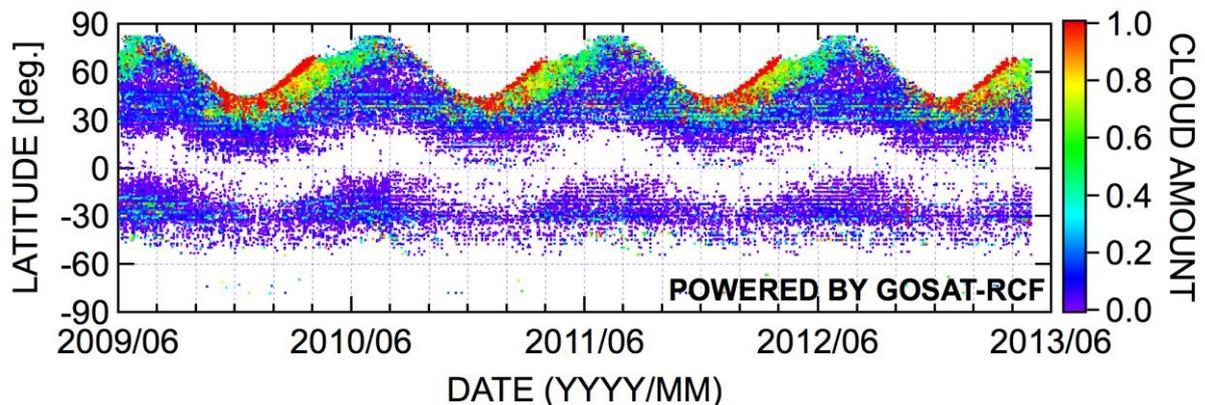


図 (1)-45 FTS 視野内に雲が存在するものの post-screening を通過する事例の観測点の緯度の時系列プロット（視野内に雲が存在しない事例はプロットしていない）。色は視野内雲量を表す。

1 0) さらなる改善検討：巻雲が存在する事例

FTS 視野内を巻雲が覆っているような事例の場合、たとえ巻雲の光学的厚さが小さくても、その存在高度の高さから光路長変動に与える影響は大きいことを考慮する必要がある。つまり、巻雲が存在する事例に対しては、巻雲物理量をカラム平均濃度と同時推定すべきである。考慮すべき巻雲物理量は、光路長変動を表すための巻雲の光学的厚さ・存在高度と光学特性の波長依存性を表すための巻雲粒子の代表的な大きさが考えられる。今回は均質な単層の巻雲を考え、光学的厚さ・雲頂気圧・有効粒径を同時推定パラメータとした。この際、巻雲の雲頂気圧と雲底気圧の差は 30 hPa であるとした。また、巻雲の光学特性を扱う場合は、巻雲を構成する粒子の形状が六角柱型を基本とする非球形粒子である点に注意しなければならない。今回は Ice Cloud Bulk Scattering Model Ver. 3⁸⁾ を巻雲の光学特性として用いた。加えて、従来巻雲検知に使用していた TANSO-FTS バンド 3 の水蒸気吸収帯の観測スペクトルを観測信号として解析に使用した。図 (1)-46 に巻雲を考慮した場合の有効解析データの分布と FTS SWIR L2 Ver. 02.11 に対する増加率を示す。有効解析データ数の増加率は地域・季節で変わるものの、全球平均で約 10% の増加、熱帯域に限定すると約 2 倍となる領域もある。月有効解析データ取得率（一か月間に 1 個以上の有効解析データが得られる頻度）としては全球平均で約 5% の増加であった。導出されたカラム平均濃度を TCCON データと比較したところ（図 (1)-47）、バイアス \pm ばらつきは XCO_2 に対して -1.38 ± 1.96 ppm、 XCH_4 に対し -4.0 ± 12.5 ppb と FTS SWIR L2 Ver. 02.xx の結果と概ね一致しており、巻雲が含まれる事例に対象を拡張したとしても大幅な精度劣化が起こらないことが確認できた。また、導出された巻雲の光学的厚さと雲頂気圧を CALIPSO 衛星による結果と比較した。CALIPSO 衛星にはライダーが搭載されており、雲の存在高度や光学的厚さがプロダクトとして提供されている。ここでは、CAL_LID_L2_05kmCLay-Prov-V03 を使用し、マッチアップ条件は観測点間距離が 100 km 以内で観測時刻差が 30 分以内とした。雲頂気圧は同時推定された巻雲の光学的厚さが比較的大きい場合には CALIPSO 衛星から得られた雲頂気圧と良い一致を示した。巻雲が光学的に薄い場合には、観測スペクトルが持つ巻雲の情報が少ないため、一致度が悪くな

ると考えられる。また、光学的厚さの一致度はそれほど高くなかった。これは、雲頂気圧が水蒸気や気温、風の場合といった比較的大きな空間スケールで変動する物理量と関連が大きいのに対し、光学的厚さはより小さな空間スケールでの雲粒の発達・成長過程を反映していることや、マッチアップ条件の緩さ、「いぶき」と CALIPSO 衛星の視野サイズの違いなども影響していると考えられる。

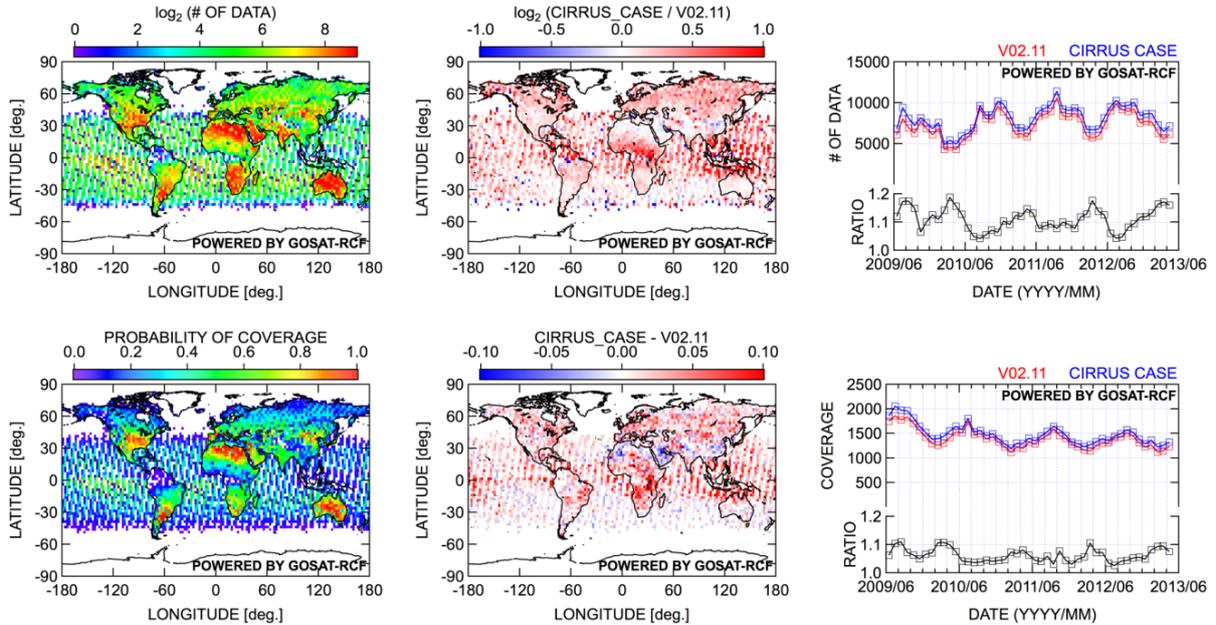


図 (1)-46 (左) 巻雲を考慮してカラム平均濃度推定を行った場合の 5 度グリッド内の (上段) 有効解析データ数と (下段) 月有効解析データ取得率 (グリッド内に月 1 個以上の有効解析データが得られる頻度)、および (中) それらの FTS SWIR L2 Ver. 02. 11 に対する比率、(右) 月別値の時系列。

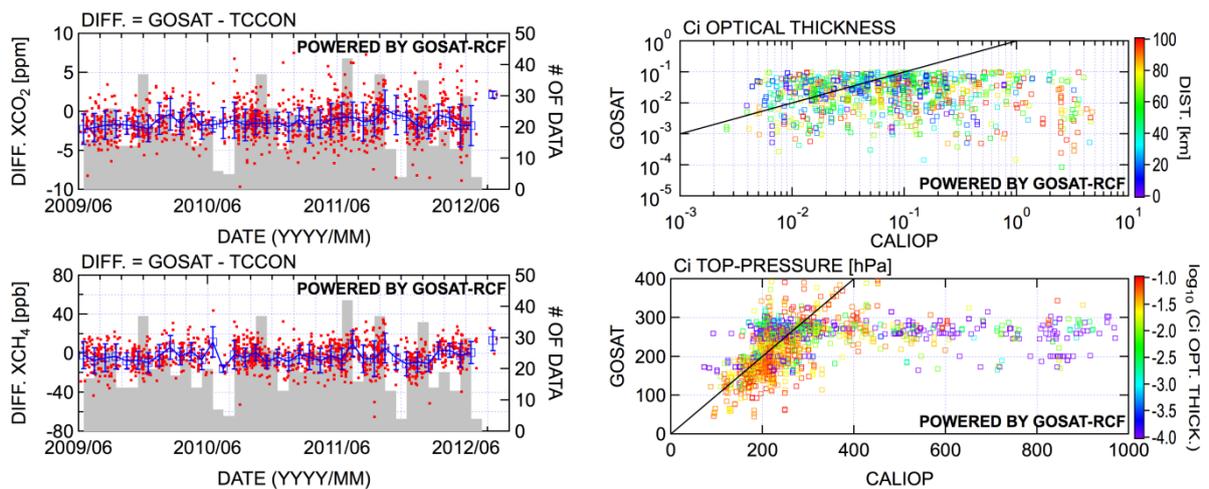


図 (1)-47 巻雲を考慮してカラム平均濃度推定を行った場合の (左) TCCON データとのカラム平均濃度の比較、および、CALIPSO 衛星データとの (右上) 巻雲光学的厚さ、(右下) 雲頂気圧の比較。

1 1) その他の課題

最後に上記以外のカラム平均濃度の精度や有効解析データ数に影響する可能性のある項目について触れておく。以下の項目については現時点で十分な調査・検討が実施されていない点に注意が必要である。

TANSO-FTS バンド 1 の波数域には、植生蛍光やラマン散乱があることがわかっているが、これらは FTS SWIR L2 Ver. 02.xx 処理では考慮されていない。いずれも吸収線の深さを浅くする効果を持っているため、エアロゾル量の過大評価を介してカラム平均濃度の誤差となりうる。ただし、影響の一部は非線形対策で導入した輝度オフセット項で緩和されている可能性もある。

近年、成層圏エアロゾルが増加しているという報告がある。先にも触れたが、高高度に存在する散乱物質は大きな光路長変動をもたらすことから、解析において成層圏エアロゾルを適切に表現する必要がある。FTS SWIR L2 Ver. 02.xx 処理では大気を気圧で等分されるように 15 層に分割しているため、このままでは成層圏の鉛直構造が適切に表現できない。何らかの工夫が必要である。

FTS SWIR L2 Ver. 02.xx 処理では、雪氷域において系統的な低濃度バイアスを示すことがわかっている。おそらくは地表面反射率に角度依存性があるためと考えられる。Ver. 02.xx 処理では陸面は Lambert 面(完全拡散面)として等方的に反射が起きるとしているが、BRDF(双方向反射率分布関数)を扱うように改訂すべきであろう。

「いぶき」データの処理の多くは平行平板大気の仮定をおいている。このため、太陽天頂角が 70 度よりも大きなデータは FTS SWIR L2 処理や CAI 雲フラグ処理の対象外となっている。球面大気を扱えるような改訂を行うことで、現在よりもより高緯度側で有効解析データ数が増えることが期待される。

(3) 重点サイト Tsukuba におけるケーススタディ

本研究はサブテーマを横断して実施したものである。つまり、Tsukuba におけるライダー及びブスカイラジオメーターを用いた巻雲・エアロゾル光学特性観測はサブテーマ(2)が担当、Tsukuba における高精度温室効果ガス観測はサブテーマ(3)が担当、検証解析はサブテーマ(1)が主導し、アルゴリズム改良と再解析はサブテーマ(1)が担当した。なお、本研究と「(2)アルゴリズム改良と初期値改良」を並行して、途中で得られた知見を互いにフィードバックさせながら研究を進めた。

今回、Tsukuba の 2009 年 9 月 11 日～2010 年 3 月 22 日における「いぶき」による温室効果ガスデータが推定され、地上設置高分解能 FTS データ、ライダー及びブスカイラジオメーターデータが完全にそろっている 9 日を対象とした。推進費開始時に一般公開されていた前バージョン(Ver. 01.xx)による解析アルゴリズムを用いて推定した「いぶき」データは、図(1)-48 に示すように地上設置高分解能 FTS データに対して -10.99 ± 3.83 ppm と地上設置高分解能 FTS を用いた検証(Morino et al.⁹⁾, -7.70 ± 2.75 ppm より大きな負のバイアス(表記はバイアス±ばらつき)を示した。Ver. 01.xx では、層厚 2 km のエアロゾル層を仮定し、エアロゾル光学特性は SPRINTARS から計算した結果を使用し、エアロゾル光学的厚さのみを同時推定し、巻雲を同時推定せず、Kurucz の太陽照度データベースを用いて推定していた。「いぶき」データと地上設置高分解能 FTS データのバイアスとライダー及びブスカイラジオメーターデータとの関係を確認した結果、有意な相関があることが分かった。つ

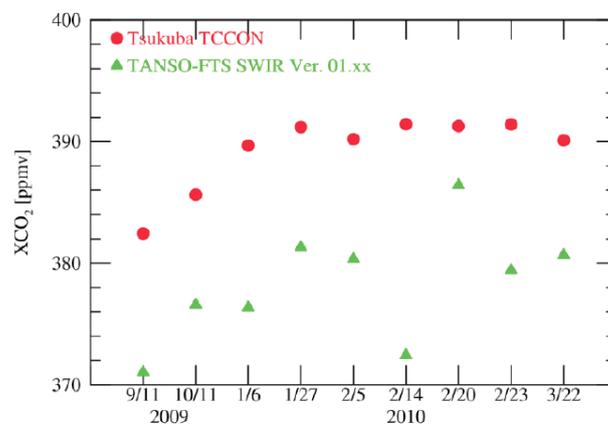
まりライダーによる巻雲やエアロゾルの高度分布やスカイラジオメーターによる観測結果を用いれば、バイアスが改善する可能性が示唆された。このため、次の3ケースについて推定を行いバイアスがどのように変化するか調査を行った。

Case(1)：ライダー観測に基づくエアロゾル・巻雲高度分布を仮定し、エアロゾル光学特性はライダー及びスカイラジオメーターの観測結果を使用し、エアロゾル・巻雲の光学的厚さを同時推定、Kuruczの太陽照度データベースを用いた場合。これは巻雲やエアロゾルの高度分布・光学特性に関する情報として高精度な観測データを用いた場合である。

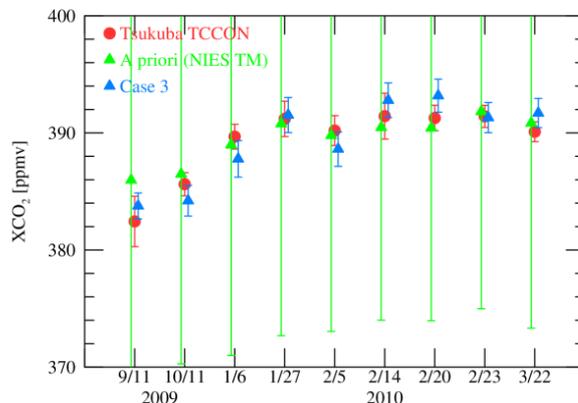
Case(2)：ライダー観測に基づくエアロゾル・巻雲高度分布を仮定し、エアロゾル光学特性はライダー及びスカイラジオメーターの観測結果を使用し、エアロゾル・巻雲の光学的厚さを同時推定、Toonの太陽照度データベースを用いた場合。これはアルゴリズム改良と初期値改良で指摘があった太陽照度データベースを改善した場合である。

Case(3)：SPRINTARSによるエアロゾル高度分布・光学特性を先験値として使用し、エアロゾル高度分布を同時推定し、巻雲を均質単層であるとして雲頂気圧と光学的厚さを同時推定、Toonの太陽照度データベースを用い、更に観測スペクトルとしてバンド3を追加し3バンドを用いて同時推定した場合。ライダー及びスカイラジオメーター観測データは「いぶき」の全ての観測地点で取得することは不可能であり、Case(3)は、「いぶき」観測データの解析で最も現実的な推定条件である。

それぞれ結果は、Case(1)の場合 -7.40 ± 2.39 ppm、Case(2)の場合 -2.43 ± 2.45 ppm、Case(3)の場合 $+0.17 \pm 1.49$ ppmとなった。Case(3)の場合の結果を図(1)-49に示す。このことよりエアロゾルの高度分布・光学特性の先験値にSPRINTARSを用い、エアロゾル高度分布を同時推定した場合2 ppm程度のバイアスが改善できたことが分かる。また、Toonの太陽照度データベースに変更することにより5 ppm程度バイアスが改善されたことが分かる。しかしながら、これは非常にうまく行った場合であると考えられる。更にデータセット数は9日と少ないこと、気象を含む観測条件によってどうなるかハッキリしない部分がある。このため上述の重点サイト4カ所において取得された多くのデータセットを用いて、同様の研究を行う必要がある。各サイトの巻雲・エアロゾルの分布と XCO_2 の比較についてはサブテーマ(2)に記載されている。



図(1)-48 前バージョン(Ver01.xx)の解析アルゴリズムを用いて推定した「いぶき」データ(緑▲)のTsukuba地上設置高分解能FTSデータ(赤●)を用いた評価



図(1)-49 つくばにおけるケーススタディの結果。「いぶき」の観測による解析で最も現実的な条件、つまりCase (3)で推定した「いぶき」データ(青▲: Case 3)のTsukuba地上設置高分解能FTSデータ(赤●: Tsukuba TCCON)を用いた評価。緑▲(A priori (NIES TM))は先験値である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

「いぶき」観測データの解析より得られた温室効果ガスのデータ質を評価するために必要な長期検証データの確保とそのデータ質の確認を行った。長期間検証データを用いた季節変動・経年変動などの大気科学的検証を行い、バイアスの特徴を明らかにすることができた。

航空機観測データを用いて改善された「いぶき」データの検証を行い、TCCONデータによる検証と同様の結果、つまり殆どバイアスがないことを確認できたが、バイアスは完全にゼロではなかった。

このためTCCONデータを用いたバイアスの経験的補正手法を開発し、経験的補正を行い、独立した検証データである航空機観測データを用いて、補正後の「いぶき」データ質の改善を確認した。

本推進費の研究開始時における前バージョンのアルゴリズムを用いた「いぶき」のXCO₂は、バイアス-9 ppm程度(-2 %程度)、バラツキ4 ppm程度(1 %程度)であったが、下記のつくばにおけるケーススタディと連携しつつ解析アルゴリズム改良と参照値の改良を行った。この結果、バイアス-1.48 ppm(-0.3 %程度)、ばらつき2.1 ppm(0.5 %程度)まで改善し、目標を達成することが出来た。

更なる改善を目指して、FTS SWIR L2 Ver. 02.11プロダクトの実態把握、および、雲の影響が比較的小さい事例に対する検討を実施した。雲の影響が「いぶき」推定結果にどのように影響するかについては、雲の割合が1 %よりも小さい場合は、影響が無視できることを明らかにした。また、巻雲の存在する場合の同時推定を試みた結果、バイアス・ばらつきは改善された「いぶき」データと概ね一致した。

重点サイトの1つであるつくばにおける高精度温室効果ガスと巻雲・エアロゾル光学特性の観測結果を用いたケーススタディを行った。エアロゾルの高度分布としてSPRINTARSのシミュレーション値を先験値として、またToonの太陽スペクトルを用いて、バンド1、バンド2に加えてバンド3の観測スペクトルに対してエアロゾルと巻雲も同時推定した結果、二酸化炭素カラム平均濃度はTCCONデータに対してバイアス0.17 ppm(0.04%)と改善することを確認できた。

更に、Tsukubaを含む重点サイト4地点における検証と誤差要因の特定では、ライダーによるエアロゾル・雲データで分類した「いぶき」 XCO_2 (Ver. 02.11)を地上FTS XCO_2 (GGG 2012解析アルゴリズム)で評価し、エアロゾルや雲の関係を明らかにした(サブテーマ(2)に記載)。これらの知見は、更なる解析アルゴリズム改良と参照値の改良に継続して活用する予定である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) GOSAT中間総括会議における本推進費の成果の活用(2012年1月～3月)

GOSAT後継機への反映事項を提言することを目的にGOSAT中間総括会議が3回開催された。本会議では、本研究の成果である解析アルゴリズム改良と参照値の改良による「いぶき」データ改善の見通しを示し、GOSAT後継機を推進する環境省、宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び国立環境研究所(NIES)に重要な知見を与えることができた。

2) 「いぶき」データ Ver. 02.xxデータの一般公開(2012年6月)

本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を反映した「いぶき」データの再処理が行われ、そのデータ質の大幅な改善が確認された。この結果を基に新バージョンプロダクトが公開された。

3) 第4回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2012年6月)

GOSATプロジェクトから得られる成果をさらに豊かに有効なものとするため、一般からの研究公募を実施している。本会合は米国カリフォルニア工科大学で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データの改善結果を報告した。

4) 第5回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2013年6月)

本会合は横浜シンポジウムで、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

5) GOSATサイエンスチーム会合における研究成果の発表(2013年10月)

環境省、NIES、JAXAによって設置され定期的に開催されているGOSATサイエンスチーム会合で、本推進費の研究成果である航空機観測データを用いた検証解析について、情報を提供し、議論を行った。

6) 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)定常運用終了審査会における本推進費の成果の活用(平成26年2月14日)

温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)定常運用終了審査会が行われ、環境省、NIES、JAXAの作成した資料を用いて発表が行われた。本研究の研究成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 第6回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2014年6月)

本会合はつくば市つくば国際会議場で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われる予定で、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告される予定である。

今後、GOSATプロジェクトの研究活動及び関連業務を通じ、更に一層成果の広報・普及に努める予定である。

6. 国際共同研究等の状況

平成23年度、本推進費の研究経費でニュージーランド国立大気水文研究所ローダー大気観測所のVanessa Sherlock氏とBen Liley氏を招聘し、検証解析及び検証データ取得に関する打合せを行った。

「いぶき」観測データの解析アルゴリズムの手法開発・改良検討において、国立環境研究所と米国コロラド州立大学Christopher O'Dell氏、英国レスター大学Hartmut Boesch氏、オランダ宇宙研究所/ドイツカールスルーエ大学Andre Butz氏などの研究者がそれぞれ開発している解析アルゴリズム、解析結果の相互比較を行っている。

「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の検証には、地上設置フーリエ変換分光計による温室効果ガス濃度観測網ネットワーク(Total Carbon Column Observing Network、Chair Paul Wennbergカリフォルニア工科大学教授)のデータ(TCCONデータ)を使用しており、毎年開催のTCCON会議に参加し、研究成果の発表、議論、技術情報交換等を行っている。更に、国立環境研究所はつくば及び陸別に地上設置フーリエ変換分光計を設置運用し、TCCONデータを作成しTCCONに提出している。

ニュージーランド国立大気水文研究所ローダー大気観測所(NIWA Lauder)にスカイラジオメーターを設置し共同で観測を行っている。NIWA Lauderと気象研究所と協力してライダー観測を行っている。

「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の検証に用いるTCCONデータの早期取得のために、米国カリフォルニア工科大学Paul Wennberg教授、ニュージーランド国立大気水文研究所Hisako Shiona氏、オーストラリアウーロンゴン大学David Griffith教授、ドイツブレーメン大学Justus Notholt教授と共同研究などを行っている。ドイツブレーメン大学Justus Notholt教授と協力してフランスオルレアonzにスカイラジオメーターを設置し観測を行っている。

GOSAT プロジェクトは研究公募により50件以上の国際共同研究を実施している。本研究で得た成果も発表し、情報交換を実施している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Y. Yoshida, N. Kikuchi, T. Yokota: Atmospheric Measurement Techniques, 5, 2515–2523 (2012)
“On-orbit radiometric calibration of SWIR bands of TANSO-FTS onboard GOSAT”

- 2) O. Uchino, N. Kikuchi, T. Sakai, I. Morino, Y. Yoshida, T. Nagai, A. Shimizu, T. Shibata, A. Yamazaki, A. Uchiyama, N. Kikuchi, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 3393-3404 (2012)
 “Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂: a case study over Tsukuba”
- 3) Y. Yoshida, N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Saeki, N. Schutgens, G. C. Toon, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, D. W. T. Griffith, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, J. Robinson, V. Sherlock, B. Connor, M. Rettinger, R. Sussmann, P. Ahonen, P. Heikkinen, E. Kyrö, J. Mendonca, K. Strong, F. Hase, S. Dohe, and T. Yokota: Atmospheric Measurement Techniques, 6, 1533-1547 (2013)
 “Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data”
- 4) Y. Miyamoto, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. C. Biraud, P. K. Patra: Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 5265-5275 (2013)
 “Atmospheric column-averaged mole fractions of carbon dioxide at 53 aircraft measurement sites”
- 5) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. C. Biraud, T. Tanaka, S. Kawakami, and P. K. Patra: Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 9771-9788 (2013)
 “Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象：社会・政策研究の分野)

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 森野勇、吉田幸生：地球環境研究センターニュース、Vol.23、No.6、10-13 (2012)
 「環境研究総合推進費の研究紹介 12 衛星観測による温室効果ガス濃度データの高精度化を目指して-環境研究総合推進費A-1102「『いぶき』観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究」」
- 2) 井上誠、森野勇、内野修、吉田幸生、横田達也、町田敏暢：地球環境研究センターニュース、Vol. 24, 22-23 (2013)
 「衛星「いぶき」(GOSAT) から得られた二酸化炭素濃度の検証—世界47か所の航空機観測データを用いて—」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) I. Morino, M. Inoue, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, O. Uchino: The 22nd Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy (2011)
 “Observations of greenhouse gases with a Fourier transform spectrometer onboard GOSAT and progress on validation of GOSAT data”

- 2) I. Morino, M. Inoue, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, O. Uchino: Symposium on 'A Revolution in Spectroscopy by the Optical Frequency Comb' (2011)
 “Observations of Greenhouse Gases with a Fourier Transform spectrometer onboard GOSAT and Progress on Validation of GOSAT Data”
- 3) 内野修、菊地信弘、森野勇、吉田幸生、横田達也、酒井哲、永井智広、真野裕三、清水厚、柴田隆、山崎明宏、内山明博、菊地信行: 第29回レーザセンシングシンポジウム (2011)
 「GOSATプロダクト改良に向けたライダーとスカイラジオメータデータの利用」
- 4) 東野美和、那須侑子、林田佐智子、齋藤尚子、横田達也、吉田幸生、町田敏暢、松枝秀和、今須良一、塩見慶: 第17回大気化学討論会 (2011).
 「CONTRAIL データを用いたTANSO-FTSから導出されたメタン気柱平均濃度およびメタン鉛直分布の検証解析」
- 5) 弓野未来、森野勇、吉田幸生、内野修、横田達也、北和之: 第17回大気化学討論会 (2011)
 「GOSAT TANSO-FTS SWIRから導出したH₂Oカラム平均濃度の地上設置高分解能FTS観測データを用いた検証」
- 6) 森野勇、井上誠、宮本祐樹、菊地信弘、吉田幸生、内野修、町田敏暢、横田達也、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、P. K. Patra: 第17回大気化学討論会 (2011)
 「GOSAT TANSO-FTS SWIRによる温室効果ガスの観測と検証の進捗状況」
- 7) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、P. K. Patra: 第17回大気化学討論会 (2011)
 「航空機観測データを用いたGOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂プロダクトの検証」
- 8) 江口菜穂、吉田幸生、森野勇、佐伯田鶴、横田達也、S. Maksyutov、渡辺宏: 第17回大気化学討論会 (2011)
 「カラム平均濃度XCO₂、XCH₄の季節・経年変化」
- 9) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、P. K. Patra: 日本気象学会2011年度秋季大会 (2011)
 「航空機観測データを用いたGOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂プロダクトの検証」
- 10) 川上修司、大山博史、塩見慶、田浦朝陽、深町拓也、奥村浩、新井康平、田中智章、森野勇、内野修: 日本気象学会2011年度秋季大会 (2011)
 「GOSATデータ検証のための地上高分解能FTSによる二酸化炭素およびメタンの気柱量の長期観測」
- 11) 吉田幸生、菊地信弘、井上誠、菊地信行、森野勇、内野修、横田達也: 日本気象学会2011年度秋季大会 (2011)
 「GOSAT TANSO-FTS SWIRによる二酸化炭素カラム平均濃度の観測」
- 12) Y. Yoshida, J. Joiner, A. Vassilkov, Y. Yoshida, A. Kuze, L. Corp, E. Middleton: AGU Fall Meeting 2011, Abstracts of AGU Fall Meeting 2011 (2011)
 “Improvements in space-based terrestrial chlorophyll fluorescence retrievals”
- 13) O. Uchino, N. Kikuchi, T. Sakai, I. Morino, Y. Yoshida, T. Nagai, A. Shimizu, T. Shibata, A. Yamazaki, A. Uchiyama, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: AGU Fall Meeting 2011 (2011)
 “Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂ and a strategy

- for retrieval improvement”
- 14) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, P. K. Patra: AGU Fall Meeting 2011, Abstracts of AGU Fall Meeting 2011 (2011)
- “Validation of XCO₂ derived from SWIR of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”
- 4) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota : AGU Fall Meeting 2011 (2011).
- “Study on the retrieval biases appeared in the GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 V01.xx Product”
- 15) T. Yokota, N. Kikuchi, Y. Yoshida, A. Bril, S. Oshchepkov, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, N. Kikuchi, T. Saeki, H. Takagi, S. Maksyutov, K. Hiraki, Y. Yokota, T. Matsunaga, F. Kawazoe, H. Watanabe: AGU Fall Meeting 2011, Abstracts of AGU Fall Meeting 2011 (2011)
- “On the progress of NIES GOSAT project and data product distribution.”
- 16) O. Uchino, I. Morino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, D. Wunch, P. Wennberg, G. Toon, J. Notholt, V. Sherlock, B. Liley, D. Griffith, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagai, T. Sakai, K. Arai, H. Okumura: EGU General Assembly 2012 (2012)
- “Advanced validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at TCCON and prioritized observation sites”
- 17) T. Yokota, N. Kikuchi, Y. Yoshida, A. Bril, S. Oshchepkov, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, D. Belikov, T. Saeki, H. Takagi, S. Maksyutov, K. Hiraki, Y. Yokota, T. Matsunaga, F. Kawazoe, H. Watanabe: EGU General Assembly 2012 (2012)
- “Status of the GOSAT XCO₂, XCH₄, and other data products”
- 18) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: EGU General Assembly 2012 (2012)
- “Preliminary results of the improved GOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂ and XCH₄ retrievals”
- 18) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, C. Sweeney, P. P. Tans, T. Machida: EGU General Assembly 2012 (2012)
- “Validation of XCH₄ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”
- 19) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、吉田幸生、横田達、C. Sweeney、P. P. Tans、町田敏暢: 日本気象学会2012年度春季大会 (2012)
- 「航空機観測データを用いたGOSAT TANSO-FTS SWIR XCH₄プロダクトの検証」
- 20) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也、竹村俊彦: 日本気象学会2012年度春季大会 (2012)
- 「SPRINTARSを利用したGOSAT SWIRエアロゾル補正アルゴリズム」
- 21) 吉田幸生、菊地信弘、井上誠、森野勇、内野修、横田達也: 日本気象学会2012年度春季大会 (2012)
- 「GOSAT TANSO-FTS SWIR L2カラム量プロダクトの改訂」
- 22) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、佐伯田鶴、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和: 第18回大気化学討論会 (2012)
- 「航空機観測データを用いたGOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂とXCH₄の検証」

- 23) 森野勇、井上誠、中前久美、宮本祐樹、菊地信弘、吉田幸生、内野修、町田敏暢、横田達也、澤庸介: 第18回大気化学討論会 (2012)
「改良した解析アルゴリズムで導出したGOSAT TANSO-FTS SWIRプロダクトとその検証解析」
- 24) I. Morino, O. Uchino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, V. Sherlock, B. Liley, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagai, T. Sakai, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura: 8th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS8) (2012)
“Advanced validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at prioritized observation sites”
- 25) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: 8th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS8) (2012)
“GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 Version 02 Products”
- 26) I. Morino, M. Inoue, Y. Miyamoto, O. Uchino, N. Kikuchi, Y. Yoshida, T. Yokota, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, G. C. Toon, J. Messerschmidt, T. Warneke, J. Notholt, N. M. Deutscher, D. W. T. Griffith, V. Sherlock, B. Connor, J. Robinson, R. Sussman, M. Rettinger, P. Ahonen, P. Heikkinen, E. Kryo, T. Nagahama, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. Tans: NDACC IRWG/TCCON 2012 meeting (2012)
“Status of GOSAT L2 data”
- 27) I. Morino, M. Inoue, K. Nakamae, Y. Miyamoto, N. Kikuchi, Y. Yoshida, T. Yokota, O. Uchino: The 22nd International Conference on High Resolution, Molecular Spectroscopy (2012)
“Atmospheric Greenhouse Gases Observed With a Fourier Transform Spectrometer onboard GOSAT and Validation of GOSAT Data”
- 28) T. Yokota, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, H. Takagi, S. Maksyutov, H. Watanabe, GOSAT members: SPIE Asia-Pacific Remote Sensing (2012)
“Column-averaged concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT TANSO-FTS SWIR spectra and their use in estimating regional surface fluxes”
- 29) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota: AGU Fall Meeting 2012, Abstracts (2012)
“GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 Version 02 Product and its Validation”
- 30) I. Morino, O. Uchino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, S. Kawakami, T. Nagai, K. Arai: AGU Fall Meeting 2012 (2012)
“Extended validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at TCCON sites with co-located aerosol profiling”
- 31) T. Yokota, N. Kikuchi, Y. Yoshida, A. Bril, S. Oshchepkov, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, D. Belikov, T. Saeki, H. Takagi, S. Maksyutov, A. Yuki, S. Kanekon, F. Kawazoe, M. Ajiro, H. Watanabe: EGU General Assembly 2013 (2013)
“Characteristics of GOSAT Level 2 column concentrations (XCO₂ and XCH₄) and other data products”
- 32) 井上誠、森野勇、内野修、佐伯田鶴、吉田幸生、横田達也: 日本気象学会2013年度春季大会 (2013)
「TCCONデータを用いたGOSATプロダクトの検証-バイアスのパラメータ依存性とその補正手法の検討-」

- 33) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也: 日本気象学会2013年度春季大会 (2013)
「GOSAT SWIR温室効果ガス濃度導出精度に対するBRDFの影響」
- 34) 森野勇、井上誠、中前久美、菊地信弘、吉田幸生、内野修、横田達也: 分子分光研究会第13回 (2013)
「GOSAT搭載フーリエ変換分光計による大気中温室効果ガスの観測」
- 35) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也: 日本地球惑星科学連合2013年大会 (2013)
「温室効果ガス観測技術衛星GOSATによる植生の観測」
- 36) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Saeki, Y. Yoshida, T. Yokota, the TCCON partners: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
“Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ using TCCON data: Parameter dependency of GOSAT biases and the bias correction”
- 37) N. Kikuchi, Y. Yoshida, O. Uchino, I. Morino, and T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
“An Algorithm for Greenhouse Gas Retrievals Using Polarization Information Measured by GOSAT TANSO-FTS”
- 38) T. Sakai, O. Uchino, I. Morino, T. Nagai, S. Kawakami, H. Ohyama, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura, Y. Takubo, K. Kawasaki, T. Akaho, T. Shibata, T. Nagahama, Y. Yoshida, N. Kikuchi, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
“Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”
- 39) T. Yokota, I. Morino, Y. Yoshida, S. Maksyutov, NIES GOSAT Project members: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
“Progress of GOSAT Project in 2012 and 2013”
- 40) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota, TCCON partners: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
“Extension of the targets for the GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ retrievals”
- 41) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota: 9th International Carbon Dioxide Conference (2013)
“Progress status of the GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄”
- 42) I. Morino, T. Matsuzaki, H. Ikegami, H. Ohyama, N. Yokozeki: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)
“Status of Tsukuba and Rikubetsu TCCON sites”
- 43) O. Uchino, I. Morino, M. Inoue, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, N. Kikuchi, K. Nakamae, T. Yokota, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, G. C. Toon, J. Messerschmidt, T. Warneke, J. Notholt, N. M. Deutscher, D. W. T. Griffith, V. Sherlock, B. Connor, J. Robinson, R. Sussmann, M. Rettinger, P. Ahonen, P. Heikkinen, E. Kyro, J. Mendonka, K. Strong, F. Hase, S. Dohe, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagahama, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. Tans, T. Sakai, T. Nagai, H. Okumura, K. Arai, B. Liley, T. Shibata: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)

- “Status of GOSAT SWIR Level 2 XCO₂ and XCH₄ data”
- 44) O. Uchino, I. Morino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, T. Yokota: The 3rd International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing (2013)
“Column Amounts of CO₂ and CH₄ Observed by GOSAT”
- 45) I. Morino, M. Inoue, K. Nakamae, N. Kikuchi, Y. Yoshida, O. Uchino, T. Yokota: The Twenty-third Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy (2013)
“Observations of atmospheric greenhouse gases with a Fourier transform spectrometer onboard GOSAT (Greenhouse Gases Observing SATellite)”
- 46) 森野勇、井上誠、中前久美、菊地信弘、吉田幸生、内野修、横田達也: 第7回分子科学討論会 (2013)
「GOSAT搭載フーリエ変換分光計による地球大気中温室効果ガスの観測」
- 47) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、佐伯田鶴、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、S. C. Biraud、田中智章、川上修司、TCCON partners: 第19回大気化学討論会 (2013)
「TCCONデータと航空機観測データを用いたGOSATプロダクトの検証ーバイアスのパラメータ依存性とその補正手法の検討ー」
- 48) 森野勇、井上誠、内野修、中前久美、菊地信弘、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、S. C. Biraud、田中智章、川上修司、酒井哲、永井智広、内山明博、山崎明宏、大山博史、新井康平、奥村浩、柴田隆、長濱智生、B. Liley、V. Sherlock、J. Robinson、TCCON partners: 第19回大気化学討論会 (2013)
「GOSAT TANSO-FTS SWIRによる温室効果ガスの観測」
- 49) 菊地信弘、吉田幸生、内野修、森野勇、横田達也: 日本気象学会2013年度秋季大会 (2013)
「GOSAT SWIR偏光情報の利用による温室効果ガス濃度導出精度の改善検討」
- 50) 吉田幸生、菊地信弘、井上誠、森野勇、内野修、横田達也: 日本気象学会2013年度秋季大会 (2013)
「GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 カラム量プロダクトー次期バージョン (V03) へ向けた検討ー」
- 51) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, T. Saeki, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. Biraud, T. Tanaka, S. Kawakami: 2013 AGU Fall Meeting (2013)
“Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ using TCCON data and aircraft measurements: Parameter dependency of GOSAT biases and the bias correction”
- 52) I. Morino, T. Sakai, T. Nagai, A. Uchiyama, A. Yamazaki, S. Kawakami, H. Ohyama, K. Arai, H. Okumura, T. Shibata, T. Nagahama, N. Kikuchi, Y. Yoshida, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, O. Uchino, T. Yokota: 2013 AGU Fall Meeting (2013)
“Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”
- 53) Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, T. Yokota: 2013 AGU Fall Meeting (2013)
“Algorithm improvement and expansion of GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 retrievals”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による温室効果ガスの全球観測から分かったこと（平成25年8月6日、佐賀大学本庄キャンパス、観客 25名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKニュース（佐賀放送局）（平成25年8月6日、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による温室効果ガスの全球観測からわかったことについて 1分30秒ほど紹介）
- 2) 佐賀新聞（平成25年8月7日、朝刊、「予測精度の成果報告、衛星いぶき参画の佐大」）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) P. K. Patra, M. Takigawa, G. S. Dutton, K. Uhse, K. Ishijima, B. R. Lintner, K. Miyazaki, J. W. Elkins: Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 1209–1225 (2009)
“Transport mechanisms for synoptic, seasonal and interannual SF₆ variations and “age” of air in troposphere”
- 2) WMO: WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 3, World Meteorological Organization, <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/GHGbulletin.html>, 2006.
- 3) J.-U. Grooß, J. M. Russell: Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 2797-2807 (2005)
“Technical note: A stratospheric climatology for O₃, H₂O, CH₄, NO_x, HCl and HF derived from HALOE measurements”
- 4) A. Jones, K. A. Walker, J. J. Jin, J. R. Taylor, C. D. Boone, P. F. Bernath, S. Brohede, G. L. Manney, S. McLeod, R. Hughes, W. H. Daffer: Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 5207-5220 (2012)
“Technical Note: A trace gas climatology derived from the Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS) data set”
- 5) D. Wunch, P. O. Wennberg, G. C. Toon, B. J. Connor, B. Fisher, G. B. Osterman, C. Frankenberg, L. Mandrake, C. O’Dell, P. Ahonen, S. C. Biraud, R. Castano, N. Cressie, D. Crisp, N. M. Deutscher, A. Eldering, M. L. Fischer, D. W. T. Griffith, M. Gunson, P. Heikkinen, G. Keppel-Aleks, E. Kyrö, R. Lindenmaier, R. Macatangay, J. Mendonca, J. Messerschmidt, C. E. Miller, I. Morino, J. Notholt, F. A. Oyafuso, M. Rettinger, J. Robinson, C. M. Roehl, R. J. Salawitch, V. Sherlock, K. Strong, R. Sussmann, T. Tanaka, D. R. Thompson, O. Uchino, T. Warneke, S. C. Wofsy: Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 12317–12337 (2011)
“A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space”
- 6) R. L. Kurucz: <http://kurucz.harvard.edu/sun/irradiance2008/>
- 7) Toon: private comm. (2010)
- 8) Ice Cloud Bulk Scattering Model Ver. 3: http://www.ssec.wisc.edu/ice_models/
- 9) I. Morino, O. Uchino, M. Inoue, Y. Yoshida, T. Yokota, P. O. Wennberg, G. C. Toon, D. Wunch, C. M.

Roehl, J. Notholt, T. Warneke, J. Messerschmidt, D. W. T. Griffith, N. M. Deutscher, V. Sherlock, B. Connor, J. Robinson, R. Sussmann, M. Rettinger: *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1061-076 (2011).

“Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra”

(2) 重点サイトにおける巻雲・エアロゾル光学特性観測に関する研究

国土交通省 気象庁 気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 第3研究室

永井 智広、酒井 哲

気候研究部

内山 明博、山崎 明宏

平成23～25年度累計予算額：31,749千円（うち、平成25年度予算額：9,368千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

「いぶき」で観測する二酸化炭素とメタンの観測データの高精度化のため、巻雲やエアロゾルの高度分布が測定できるライダーと、精密な光学特性が観測可能な放射計（スカイラジオメーター）を、「いぶき」データの検証のために設定された重点サイト4地点（Moshiri、Tsukuba、Saga、Lauder）に展開し、「いぶき」に同期した検証観測を行った。ライダー観測からは、1) 巻雲のスクリーニング・解析方法を改善することによりデータ数を増加させることが可能なこと、2) 下層エアロゾルの過小評価によりXCO₂データに誤差が生じる可能性があること、3) 成層圏エアロゾルの影響は無視できないことなどを示した。また、放射計観測からは、1) 1年に1回程度は放射計の正確な検定を行う必要があること、2) 可降水量を推定することにより水蒸気の影響を考慮した光学的厚さの推定が可能になったこと、3) 近赤外の波長域でエアロゾル光学特性が分かるようになりエアロゾルの誤差への影響をより正確に評価できるようになったこと、などの成果があった。

[キーワード]

エアロゾル、巻雲、光学特性、ライダー、放射計

1. はじめに

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）は、二酸化炭素とメタンの測定を主目的とする地球観測衛星として、2009年1月23日、宇宙航空研究開発機構種子島宇宙センターから打ち上げられた。衛星打ち上げ後、観測装置の校正、データ解析アルゴリズムの改良及び温室効果ガスの初期検証が行われ、温室効果ガス濃度データは一般に公開されているが、科学的利用のため、温室効果ガス濃度データの更なる高精度化が必要とされている。

「いぶき」の観測では、大気中に存在する巻雲やエアロゾルが二酸化炭素とメタンの測定結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。これらの影響を取り除き「いぶき」の観測データの精度を向上させるため、巻雲やエアロゾルの高度分布や光学特性を詳細に調べることが重要である。

2. 研究開発目的

「いぶき」の観測データを高精度化するためには、観測データの検証を行って誤差要因を特定し、これを基に解析アルゴリズム改良を行う必要がある。検証の際には、多種の観測装置を用いて3年以上の長期にわたって継続的に取得したデータが必要である。そこで本課題では、巻雲やエアロゾルの高度分布や光学特性を精密に測定することができる地上観測装置を用い、GOSAT観測データの解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化を行うために必要となる巻雲やエアロゾルの長期観測を行い、巻雲やエアロゾルが「いぶき」の観測データに与える影響を評価するとともに、このデータを高精度化することを目的とする。

3. 研究開発方法

全課題を通じて設定された4箇所の重点サイト、Moshiri（北海道）、Tsukuba、Saga、Lauder（ニュージーランド）に、巻雲やエアロゾルの高度分布を測定するライダーと、精密な光学特性を測定する放射計（スカイラジオメーター）を設置し、観測体制を構築する。サブテーマ（3）で行う地上高精度温室効果ガス観測装置とともに、「いぶき」のオーバースパスに同期した、あるいは連続した観測を行ってGOSATの検証データを取得するとともに、サブテーマ（1）と協力して「いぶき」の観測データの評価を行って巻雲やエアロゾルが「いぶき」の観測に与える影響の評価を行う。

（1）ライダー観測

巻雲やエアロゾルがGOSATデータに及ぼす影響を評価するために、Moshiri、Tsukuba、Saga、及びLauderの4重点サイトにエアロゾルライダーを設置し、「いぶき」オーバースパス時における巻雲とエアロゾルの高度分布を観測した。各サイトに設置したライダーの諸元を表（2）-1に示す。また、Sagaに設置したライダーのブロックダイアグラム及び写真を図（2）-1に示す。ライダーの送信レーザー波長は532 nmと1064 nmの2波長で、大気から後方散乱された光を532 nmについては光電子増倍管、1064 nmについてはアバランシェフォトダイオードで検出する。また532 nmについては偏光成分を観測する。検出した光信号はトランジェントレコーダを用いてアナログ、フォトンカウントで計測し、PCにデータを保存する。これら受信信号から、粒子の光学的濃度に対応する後方散乱係数と非球形性の指標である偏光解消度、サイズ分布に関する波長依存性が観測パラメータとして得られる。観測データの時間分解能は1分、高度分解能は最大7.5 mである。測定高度範囲は昼間で約0.2 km～15 km、夜間で約0.2 km～35 kmである。

表 (2)-1 4重点サイトに設置したライダー装置の諸元

Station	Moshiri		Tsukuba		Saga		Lauder	
Transmitter								
Laser	Nd:YAG		Nd:YAG		Nd:YAG		Nd:YAG	
Wavelength	532 nm	1,064 nm	532 nm	1,064 nm	532 nm	1,064 nm	532 nm	1,064 nm
Pulse Energy	50 mJ	50 mJ	140 mJ	230 mJ	130 mJ	130 mJ	180 mJ	100 mJ
Pulse Repetition	10 Hz		20 Hz		10 Hz		10 Hz	
Beam Divergence	< 0.1mrad	<0.1mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad	0.2mrad
Receiver								
Telescope Type	Schmidt Cassegrain		Schmidt Cassegrain		Schmidt Cassegrain		Schmidt Cassegrain	
Telescope Diameter	20 cm		35.5 cm (Far) 20.0 cm (Near)		30.5 cm		30.5 cm	
Field of View	0.2 mrad		1.0 mrad		1.0 mrad		1.0 mrad	
Polarization	P and S	None	P and S	None	P and S	None	P and S	None
Number of Channels	3 (P×2, S×1)	1	5 (P _{Far} ×2, S _{Far} ×1, P _{Near} ×1, S _{Near} ×1)	2 (Far×1, Near×1)	3 (P×2, S×1)	1	3 (P×2, S×1)	1
Gate Width	7.5m (min)		7.5m (min)		7.5m (min)		7.5m (min)	
Detectors	PMT (H957-19)	APD	PMT (R3234-01)	APD	PMT (R3234-01)	APD	PMT (R3234-01)	APD
Signal Processing	12 bit A/D and Photon Counting		12 bit A/D and Photon Counting		12 bit A/D and Photon Counting		12 bit A/D and Photon Counting	

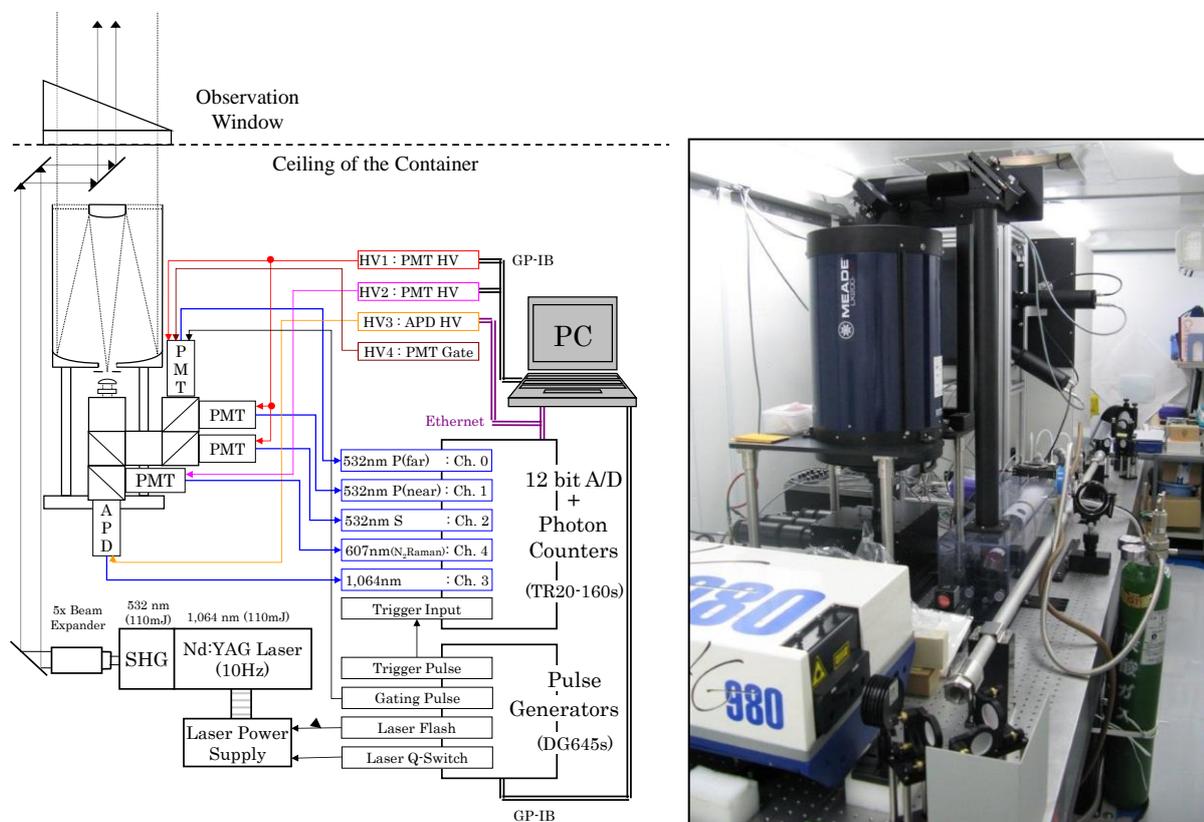


図 (2)-1 Sagaライダーのブロックダイアグラム (左) 及び写真 (右)

(2) 放射計観測

重点サイトにおいて放射計（スカイラジオメーター）による観測体制を構築する。スカイラジオメーターの諸元を表 (2)-2に示す。観測を実施し、取得データの解析を行い、それらのデータの精度を評価する。この研究によって得られた巻雲・エアロゾル光学特性データはサブテーマ(1)を中心とした検証に活用される。本研究では、上記重点サイトの連続観測による巻雲・エアロゾル光学特性のデータを取得、解析を行いデータ質の評価を行った。また、(独)国立環境研究所のグループに観測データを提供し、国立環境研究所と共同で、重点サイトにおける検証データを用いた検証を実施した。

表 (2)-2 スカイラジオメーターの諸元

波長 (nm)	340	380	400	500	675	870	940	1020	1225	1627	2200
半値全幅 (nm)	3	3	10	10	10	10	10	10	10	20	20
ディテクタ	Si フォトダイオード								InGaAs フォトダイオード		
測定レンジ	2.5mA , 250uA , 25uA , 2.5uA , 250nA , 25nA , 2.5nA										
温度制御	20℃										
太陽位置センサー	4 素子Si センサー										
太陽追尾可動範囲	方位角 $\pm 300^\circ$ (真南 0°)、高度角 $-60 \sim 170^\circ$ (水平 0°)										
通信方法	RS422										
消費電力	200W (100V/2A)										
電源	AC100~AC240/2A										

4. 結果及び考察

(1) ライダー観測

1) 観測状況

表 (2)-3に4 重点サイトにおける観測開始日から2013年10月17日までのデータ取得状況を示す。「いぶき」オーバースパスに同期した観測を開始した時期は、MoshiriとTsukuba、Lauderは2009年、Sagaは2011年である。オーバースパス全日数は300~600日で、そのうち観測を行ったのは計100~510回である。データ取得率は連続観測を行っているTsukubaが89%と最も高い。Moshiriが20%と低い理由は、冬季は積雪により観測現場に行くことができないためである。

表 (2)-3 4重点サイトにおけるライダーデータ取得状況 (2013年10月17日現在)

観測点	母子里 (44°N)	つくば (36°N)	佐賀 (33°N)	Lauder (45°S)
観測開始日	09/4/14	09/2/2	11/3/23	09/2/18
オーバー パス日数	550	574	312	569
観測日数	109	510	167	272
データ取得 率(%)	20	89	54	48

図 (2)-2に4重点サイトにおけるオーバーパス時の巻雲やエアロゾルの分布状況を示す。ここでは主にライダーの後方散乱強度と偏光解消度から、曇り (Cloudy) とまばらな雲 (Scattered cloud)、巻雲 (Cirrus)、エアロゾルもしくはダストが多い (Hazy or Dust)、晴れ (Fine) の5つに分類した。晴天率はLauderが40%と最も高く、次いでMoshiri (26%)、Saga (19%)、Tsukuba (17%) の順である。エアロゾルもしくはダストが最も頻繁に分布するのはSagaで14%、次いでTsukuba、Moshiri、Lauderの順である。またエアロゾル濃度が高い順もこれと同じであった。巻雲は全地点で20~30%の出現頻度であった。

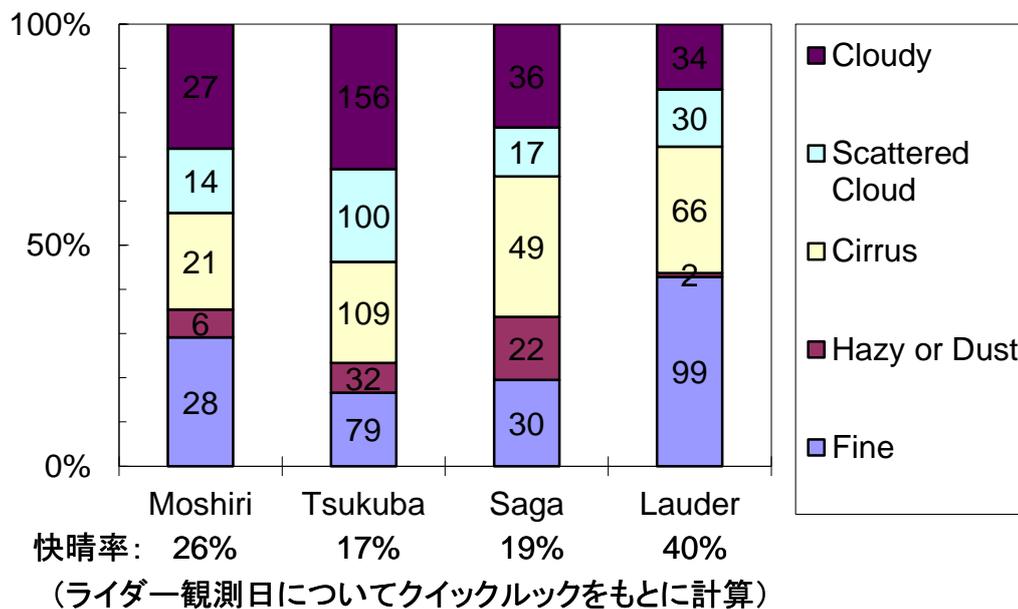


図 (2)-2 4重点サイトにおけるオーバーパス時のエアロゾル・巻雲の分布状況

2) ライダー観測結果と考察

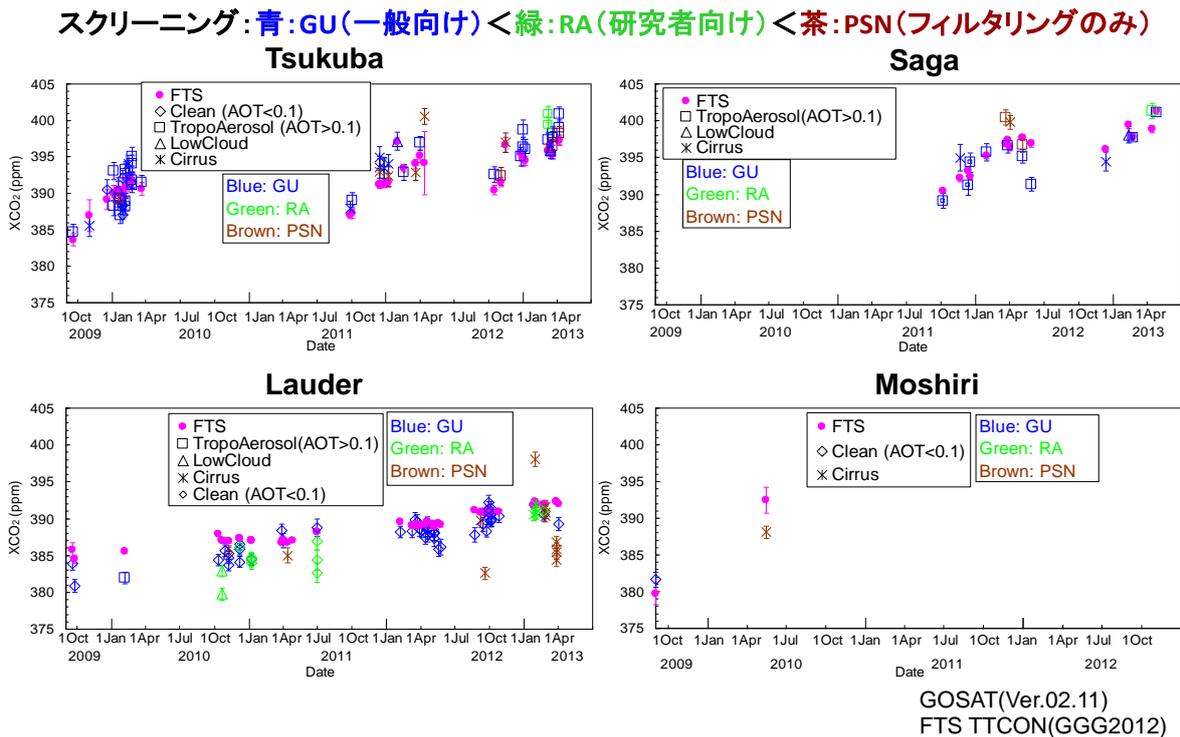
a) 巻雲・エアロゾルの分布とXCO₂の対応

巻雲やエアロゾルの分布状況と、「いぶき」・地上設置フーリエ変換分光計 (Fourier Transform Spectrometer: FTS) から求めたXCO₂の対応を明らかにするために、図 (2)-3にライダーで観測した巻雲やエアロゾルの分布とXCO₂の対応の時系列を示す。この図ではライダーデータに基づいて、

巻雲やエアロゾルの分布状況を清浄（ライダーデータから推定した光学的厚さが0.1以下）、エアロゾル（光学的厚さが0.1より大きい）、下層雲（雲頂高度が約5km以下）、巻雲（雲底高度5km以上）の4つに分類した。また、「いぶき」データのスクリーングレベルにより、データを一般向け（GU）、研究者向け（RA）、非公開（フィルタリングのみ：PSN）別に示した。

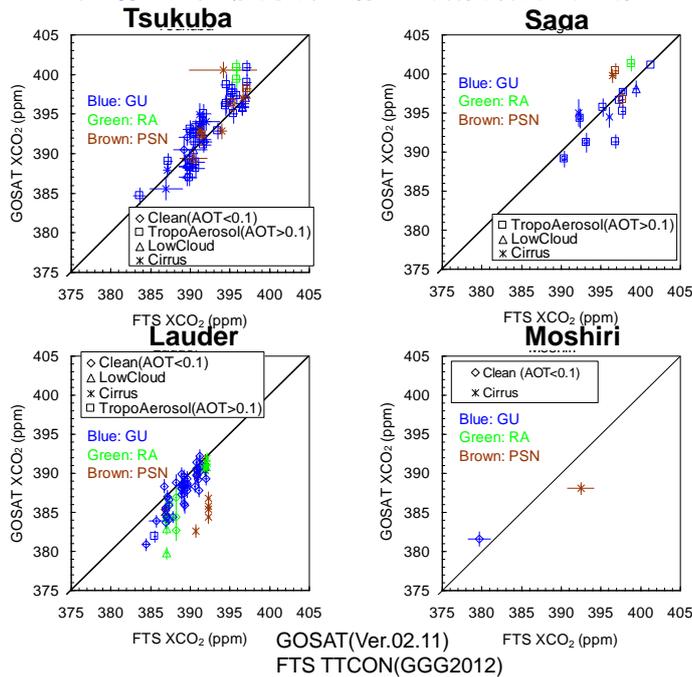
図(2)-4に横軸に地上FTSで観測したXCO₂、縦軸に「いぶき」で観測したXCO₂を取った散布図を示す。巻雲やエアロゾルの分布による分類とスクリーングレベルは図(2)-3と同じである。各地域の特徴を見ると、一般向けデータでは、Tsukubaについては全体に良く一致しておりばらつきも少ない、Sagaは一部を除いて良く一致しているがばらつきが大きい、Lauderは「いぶき」データがFTSデータに比べて全体に過小評価、Moshiriはデータ数が少なくはっきりした事は言えない。このようにサイトごとに「いぶき」データとFTSデータの間の相関が異なることが分かる。

これらの図から分かることは、ごく一部を除きスクリーングは概ね有効に効いていることである。すなわち、ライダーで巻雲が観測された場合は非公開データとなっている。ただし光学的厚さの小さい巻雲が出現していて非公開とされたデータのなかには、「いぶき」とFTSデータが良く一致しているデータがあった。また、大気下層に非常に濃いエアロゾルが分布している場合に「いぶき」とFTSデータが大きく異なる場合があった。これら点について調べた結果を以下で述べる。



図(2)-3 巻雲やエアロゾルの分布で分類したXCO₂の対応の時系列(左上：Tsukuba、右上：Saga、左下：Lauder、右下：Moshiri) 「いぶき」観測点がFTSの緯度経度±0.5度以内のみプロットした。マゼンダ色の●がTTCONデータ、白抜き記号で青色が一般に公開されている「いぶき」データ、青色が研究公募で採択された研究者に公開されている「いぶき」データ、茶色が非公開の「いぶき」データである。白抜き記号は、大気中浮遊物質の状況を示す。

スクリーニング:青:GU(一般向け)<緑:RA(研究者向け)<茶:PSN(フィルタリングのみ)



(GOSAT観測点がFTSの緯度経度±0.5度以内のみプロット)

図 (2)-4 巻雲やエアロゾルの分布で分類した XCO_2 の散布図(横軸-FTS、縦軸-「いぶき」)(左上: Tsukuba、右上: Saga、左下: Lauder、右下: Moshiri) 「いぶき」観測点がFTSの緯度経度±0.5度以内のみプロットした。マゼンダ色の●が TCCON データ、白抜きの記事で青色が一般に公開されている「いぶき」データ、青色が研究公募で採択された研究者に公開されている「いぶき」データ、茶色が非公開の「いぶき」データである。白抜きの形は、大気中浮遊物質の状況を示す。

b) 大気下層の高濃度エアロゾル

Sagaのデータのうち、スクリーニングにおいて一般向けに分類されているが、「いぶき」データがFTSに比べて XCO_2 を大きく過小評価しているケースがあった(図(2)-5)。具体的には2012年5月29日のデータで、「いぶき」データがFTSデータに比べて5.5 ppm小さかった。このケースにおける光学的厚さはライダー推定値が1.29、スカイラジオメーター観測値が1.33で、高濃度のエアロゾルが分布していた。これに比べて「いぶき」データから求めた光学的厚さは0.30と低い値を示した。ライダーデータからそのエアロゾルは高度3km以下に分布しており、球形の微小(サブミクロン)粒子が卓越している事が分かった(図(2)-5右上)。NOAA HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) による後方流跡線解析からは、エアロゾルは主に中国大陸から輸送されてきている事が分かった。したがって、この粒子は中国大陸から輸送された汚染物質であったと推測される。このように下層に高濃度のエアロゾルが分布している場合、「いぶき」データが XCO_2 を過小評価する可能性があることが示された。

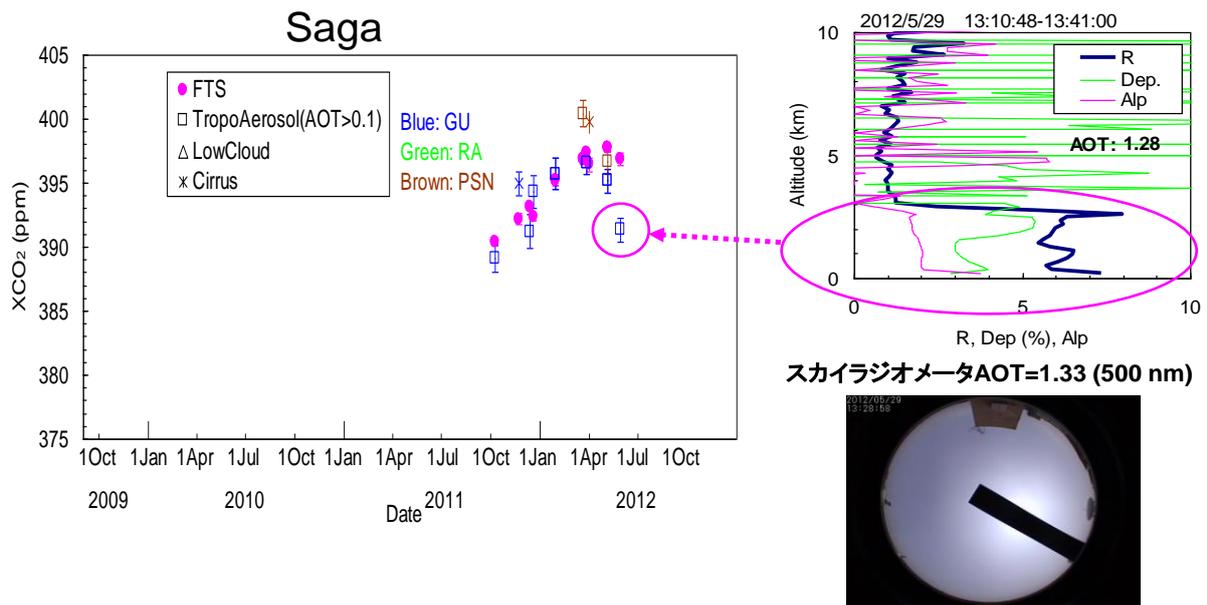


図 (2)-5 Sagaで観測された高濃度エアロゾルの事例(2012年5月29日、図左赤丸で囲んだデータ)。図右上：同時刻にライダーで観測した後方散乱比(青線)と偏光解消度(緑線)、後方散乱係数の波長依存性(マゼンダ線)の高度プロファイル。図右下：同時刻におけるスカイビューカメラの画像。マゼンダ色の●がTCCONデータ、白抜きの記号で青色が一般に公開されている「いぶき」データ、青色が研究公募で採択された研究者に公開されている「いぶき」データ、茶色が非公開の「いぶき」データである。白抜きの形は、大気中浮遊物質の状況を示す。

c) 巻雲の影響(スクリーニング)

巻雲スクリーニングの効果を確かめるために、ライダーで観測した巻雲の光学的厚さに対する「いぶき」と地上FTSで観測したXCO₂の差の分布を図(2)-6に示す。この図から、スクリーニングにより非公開とされているが、巻雲の光学的厚さが小さく(0.2以下)、GOSATと地上FTSがよく一致している場合があった。このデータが巻雲(2 μm帯)でスクリーニングされたかどうかは不明だが、解析方法を改善してデータ数を増やせる可能性が示された。アルゴリズムチームではこの結果を参考にして、新しい解析アルゴリズムでは巻雲も考慮したリトリバルを行うことになった。

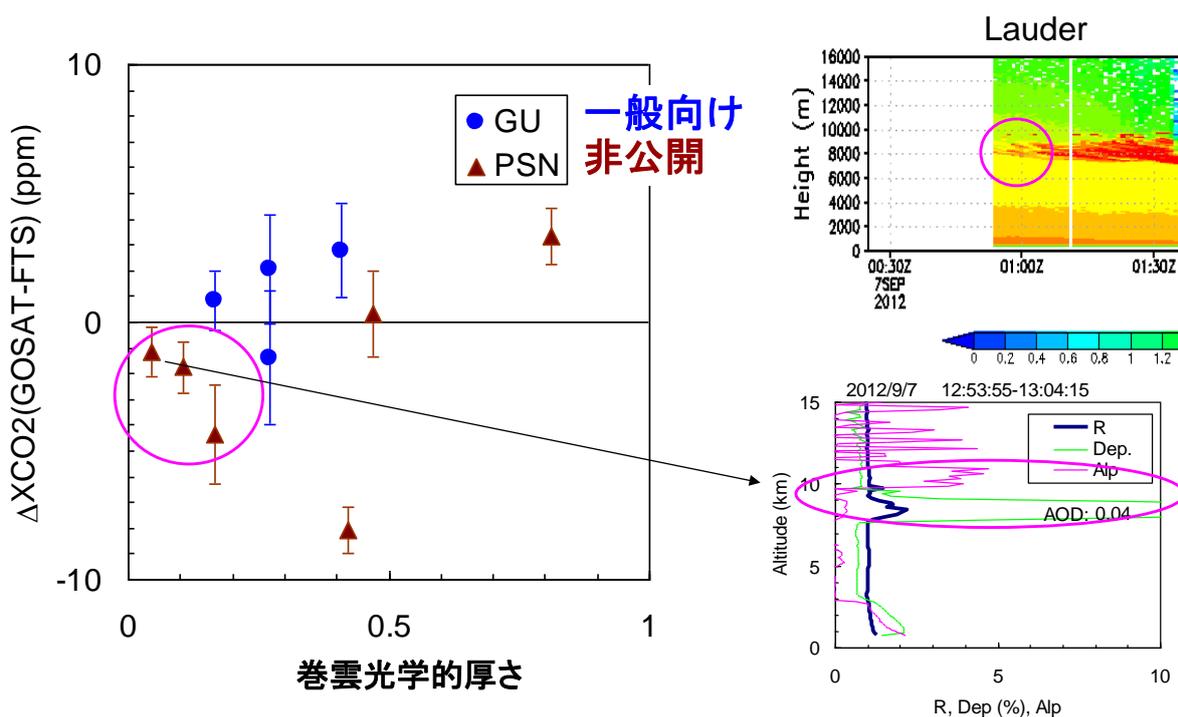


図 (2)-6 ライダーで観測した巻雲の光学的厚さに対するGOSATと地上FTSで観測したXCO₂の差の分布 (左)。青色が研究公募で採択された研究者に公開されている「いぶき」データ、茶色が非公開の「いぶき」データである。2012年9月7日にLauderで観測された巻雲の高度-時間断面図 (右上) と光学パラメータの高度分布 (右下)。

d) 成層圏エアロゾルのXCO₂導出への影響

対流圏の巻雲やエアロゾルの観測に加えて、ライダーでは成層圏エアロゾルの観測も行うことができる。成層圏エアロゾルの観測結果をアルゴリズムチームに提供してその影響を評価したところ、大規模な火山噴火の影響を受けていないバックグラウンドの成層圏エアロゾル (光学的厚さ0.01程度) であっても、これを無視すると「いぶき」から求めたXCO₂が約0.5 ppmの負バイアスを持つことがわかった。従って、「いぶき」解析アルゴリズムを改良するために、成層圏エアロゾル光学的厚さの先験値はOSIRIS (Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System)データ、高度分布はライダーデータを反映させること、SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species)から計算した先験値は対流圏に限定することをサブテーマ (1) に提案した。

e) ライダーによる巻雲・エアロゾル観測のまとめ

ここまで示してきたライダーによる巻雲やエアロゾルの観測データとXCO₂の観測結果から得られたアルゴリズムチームへの貢献をまとめると以下の3点になる。

- 1) 巻雲スクリーニング・解析方法を改善することによりXCO₂データ数を増加させることが可能。
- 2) 下層エアロゾル過小評価によりXCO₂データ誤差が生じる可能性を示した。
- 3) 成層圏エアロゾルの影響は無視できない。

さらに「いぶき」によるXCO₂導出におけるエアロゾルの影響を具体的に評価するために、各重点サイトのタイプ別エアロゾル鉛直分布データセットを作成し、サブテーマ（1）へデータ提供した。

f) 桜島噴煙（2013年8月18日噴火）をSagaで観測した事例

2013年8月18日に発生した桜島の火山噴火に伴う火山灰粒子を、Sagaのライダーおよびスカイラジオメーターで観測した。大規模噴火の約3日後から高度2 km付近に光学的に薄い粗大非球形粒子を含むエアロゾル層を観測した(図 (2)-7)。すなわち、ライダーデータは高い偏光解消度(10-15%)と低い後方散乱係数波長指数 (0.6-0.7) を示したことから、直径1 μm以上の非球形粒子が分布していたと考えられる。一方、スカイラジオメーターデータによる、波長500 nmにおける、光学的厚さ、オングストローム係数、単散乱アルベドはそれぞれ、0.12~0.40、0.16~0.49、0.73~0.91を示したことから、吸収性の粒子を含んでいたと考えられる。このことはHYSPLIT を用いて8月21日14時 (LT) ライダーサイトの上空2 kmに粒子を置いて3次元の後方流跡線解析を行った結果、桜島付近を起源とする粒子がSaga上空に到達していることから確かめられた(図 (2)-8)。このライダーとスカイラジオメーターの観測結果はGOSATの検証などに使用する予定である。

なお、ライダーを用いた火山灰監視技術の開発は、近年のアイスランド噴火を契機にヨーロッパでは積極的に行われているが、日本国内のライダーで火山灰を観測した報告例は非常に少ない。今後は気象衛星を利用した火山灰の広域監視技術の開発に加えて、ライダーの特徴を最も生かした高い距離分解能による火山灰の高度分布監視技術の開発やネットワークの展開も重要な研究テーマになると考えられる。

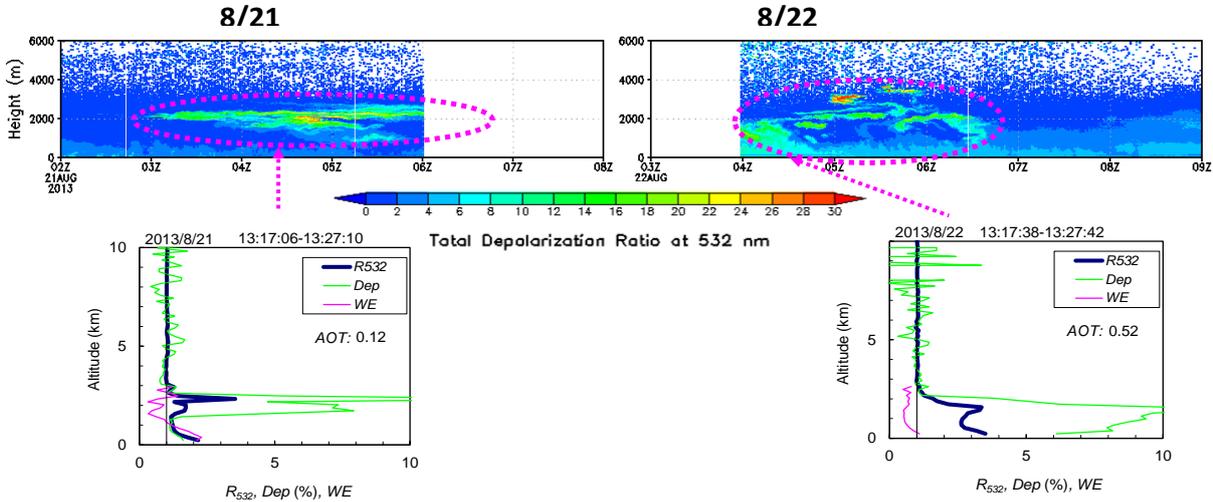


図 (2)-7 2013年8月21日、22日にライダーで観測した全偏光解消度の時間-高度断面図（上）と 13:17-13:27 JSTにおけるエアロゾルパラメータの鉛直分布（下）。R532は波長532 nmにおける後方散乱係数、Dep(%)は波長532 nmにおける偏光解消度、WEは後方散乱係数波長指数である。

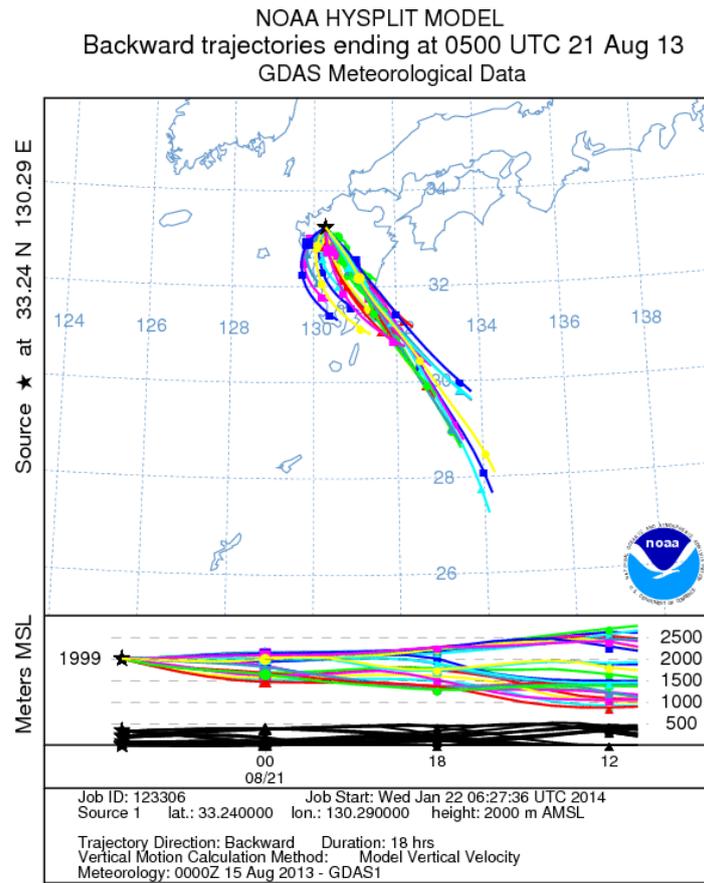


図 (2)-8 NOAA HYSPLIT Modelによる後方流跡線解析の結果。計算の初期地点は8月21日14時 (JST) でSagaライダーサイトの上空2km。

(2) 放射計観測

1) スカイラジオメーターの検定

スカイラジオメーターの観測は、エアロゾルの光学特性を高精度に推定できることがその特徴である。エアロゾルの高精度推定を可能にするためには精密検定が不可欠である。検定のためのデータ取得の観測は、大気が清澄で混濁状態が変化せず水蒸気による影響が少ない条件下で行わなければならない。NOAA Mauna Loa観測所 (ML0) は、太平洋のほぼ中央にあるハワイ島の標高3400 mに位置するため、極めて大気が清澄で安定であり、この種の精密検定観測に最適の場所である。本研究では、スカイラジオメーター準器の精密検定を毎年ML0で実施した。ML0にて行った検定観測の様子を図 (2)-9(a)に、2010年から2014年にかけて実施した精密検定観測の結果を図 (2)-10(a)に示す。スカイラジオメーター準器は、2012年11月の検定の結果、紫外から近赤外域の波長を測定しているレンズに劣化を確認したため、新しいレンズに交換した上で、2013年11月の精密検定観測を実施した。波長340~1020 nmについての2013年の検定定数は前年と異なり値が大きくなっており、レンズ交換により透過率に改善があったことを確認できた。また、新しいレンズによる検定定数は波長340~1020 nmにおいて0.8%以内の誤差で決定されており、過去4年間の結果と同程度の精度を維持していることが分かった。波長1225、1627、2200 nmの検定定数は0.5%以内の誤差で決定されており、過去5年間の検定定数に大きな変化が無く経年劣化が小さいことが明

らかとなった。ML0でのスカイラジオメーター準器の検定観測終了後、12月中旬から12月末にかけて気象研究所放射観測棟において準器とTsukubaのスカイラジオメーターとの比較を行い（図(2)-9(b)）、検定定数をTsukubaのスカイラジオメーターに転写した。Tsukubaのスカイラジオメーターは1%の誤差で転写を行うことができた（図(2)-10(b)）。Tsukubaスカイラジオメーターの検定定数の経年変化は5年間で2～11%の差を確認した。波長340～400 nmでは8～11%の大きな経年変化があり、これは準器と同様にレンズの劣化が原因であることが分かった。

2) スカイラジオメーターの解析結果

TsukubaとSagaについて行った解析結果を図(2)-11に示す。図(2)-11では500 nmのエアロゾルの光学的厚さ（AOT@500 nm）、500 nmの一次散乱アルベド（SSA@500 nm）及びオングストローム指数（ALPHA）の日平均値を示している。また、解析を行った結果を表(2)-4に示す。Tsukubaは季節変化がはっきりとしており、光学的厚さが冬に薄く、夏に厚い、また、一次散乱アルベドが冬に小さくなる傾向がある。Sagaでは光学的厚さが冬季に薄く、春季に厚くなっている。また、一次散乱アルベドの値は夏季に値が小さくなる傾向がある。TsukubaとSagaのオングストローム指数は春季に小さくなることもあり大粒子の寄与が大きいことを示している。これは黄砂が飛来していたことに対応していると推定できる。Sagaの光学的厚さはTsukubaに比べ相対的に厚いことから、エアロゾルが多いことが考えられる。

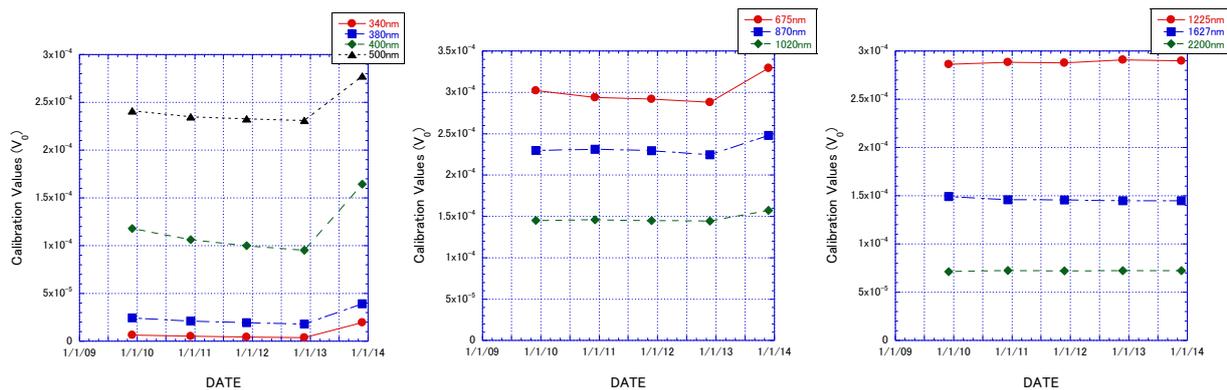


(a)

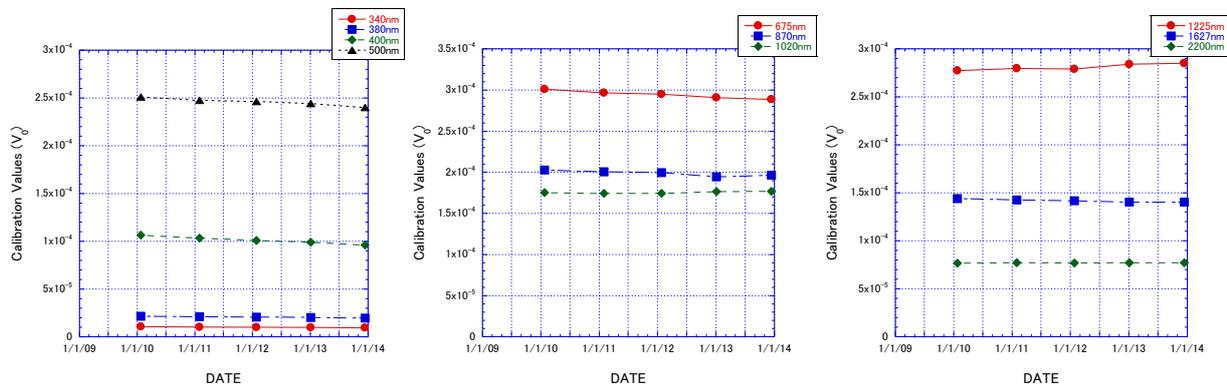


(b)

図(2)-9(a) Mauna Loa観測所で検定観測を行っているスカイラジオメーター、(b) 気象研究内でスカイラジオメーターの比較観測を行っている様子。



(a)



(b)

図 (2)-10 スカイラジオメーターの検定定数の経年変化。(a) 準器のスカイラジオメーター、(b) Tsukubaのスカイラジオメーター。左図の波長は、赤色が340 nm、青色が380 nm、緑色が400 nm、黒色が500 nmである。真ん中の図の波長は、赤色が675 nm、青色が870 nm、緑色が1020 nmを示し、左図の波長は、赤色が1225 nm、青色が1627 nm、緑色が2200 nmを示す。

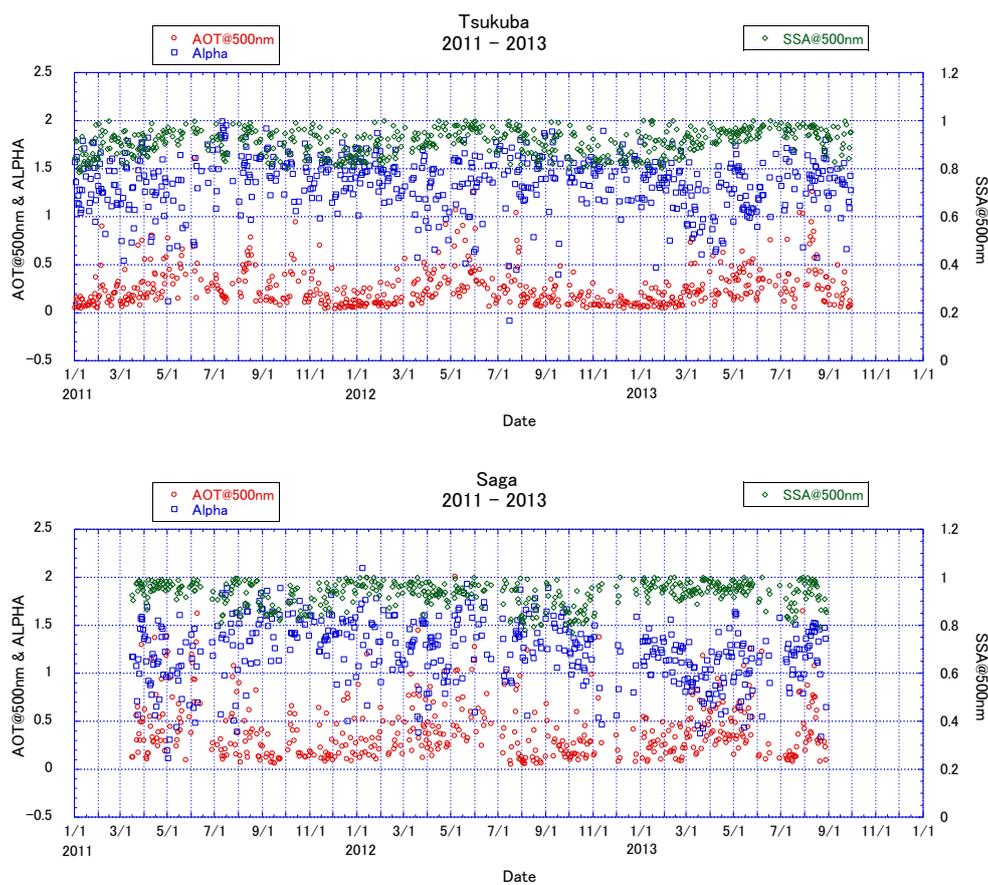


図 (2)-11 Tsukuba及びSagaにおけるスカイラジオメーター観測データの解析例。赤色が500 nmのエアロゾルの光学的厚さ (AOT@500 nm)、青色がオングストローム指数 (ALPHA)、緑色が500 nmの一次散乱アルベド (SSA@500 nm) の日平均値を示す。

表 (2)-4 Tsukuba及びSagaにおけるエアロゾル光学特性の傾向

	光学的厚さ	オングストローム 指数	一次散乱アルベド
Tsukuba	冬季に薄く、 夏季に厚い	春季に小さく、 夏季に大きい	冬季に小さく、 夏季に大きい
Saga	冬季に薄く、 春季に厚い	春季に小さい	夏季に小さい

スカイラジオメーターのエアロゾル特性を推定する通常のデータ処理では、340～1020 nmのデータしか利用されない。すなわち、この波長域の特性しか分からない。スカイラジオメーターには、雲特性の推定を目的として1627 nm、2200 nmでも測定を行っており、これらのチャンネルの太陽直達光の減衰の測定からこれらの波長で光学的厚さの推定をすることができる。二酸化炭素やメタン量の推定には、これらの波長域にある吸収帯が使われており、二酸化炭素やメタン量の推定や誤差の解析には、これらの波長域のエアロゾルの特性データの情報が役に立つものと思われる。この課題では、1627 nm、2200 nmのチャンネルの光学的厚さの推定法を新たに開発し、その特性について調べた。

1627 nmや2200 nmでは、弱いながらも水蒸気、二酸化炭素、メタンの吸収帯があり、太陽光の減衰を利用する場合、これらのガス吸収による減衰を補正する必要がある。水蒸気の補正をするために、スカイラジオメーターの940 nmチャンネルの太陽直達光の減衰から可降水量（コラム水蒸気量）を推定する方法を開発した。940 nmチャンネルの検定は、MLOで取得したデータと同時に測定されている可降水量のデータや他の吸収ガスの量を与えて透過率を評価し、Langley法により決定した。1627 nm、2200 nmチャンネルについても同様に検定定数を決定できる（水蒸気吸収の影響は小さい）。可降水量と透過率の関係はモデル大気を与え理論計算値を元に経験式を作った。太陽直達光の測定値から940nmの透過率を求め、可降水量と透過率の経験式から可降水量を推定する。推定した可降水量とGPS 可降水量の比較では、バイアスが0.09 g/cm²、2乗平均平方根誤差が0.179g/cm²、相関係数は、0.996であった。

3) 近赤外域 (1627, 2299 nm) のエアロゾル光学特性

1627 nmや2200 nmチャンネルについても940nmチャンネルと同様に可降水量と透過率の経験式を作ることによって、940 nmチャンネルから可降水量が推定できれば、水蒸気による減衰の補正ができ、エアロゾルの光学的厚さを推定できる。図 (2)-12に太陽光の減衰から推定した光学的厚さの時間変化の1例を示した。

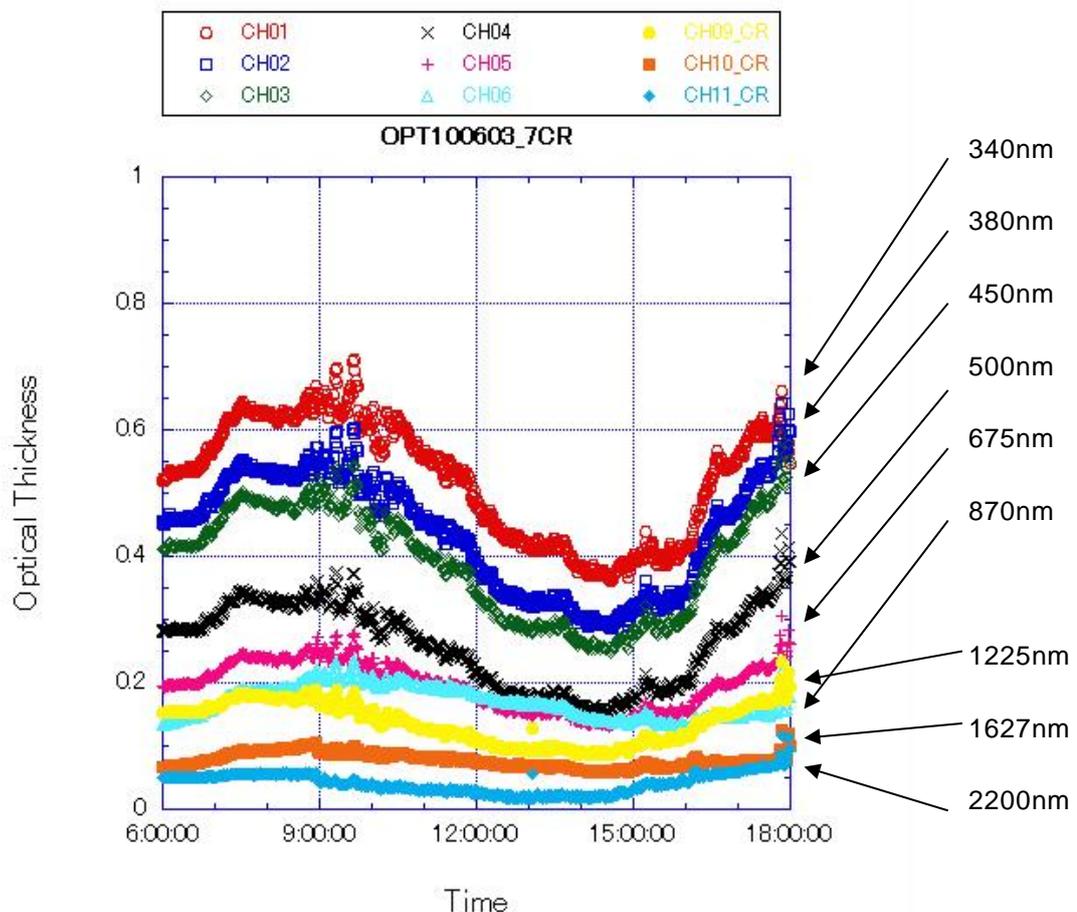


図 (2)-12 エアロゾルの光学的厚さの時系列の測定例

2011年にTsukubaで観測した500 nmと1627 nmそれぞれの波長帯での光学的厚さの散布図を図(2)-13に示す。データは、両者がほぼ同じ値である領域から、1627 nmの光学的厚さが500 nmの光学的厚さの約6分の1の範囲にある。両者がほぼ同じ値にあるデータは、大きな粒子に対応し、ここでは雲データの厳しい除去を行っていないので薄い雲のデータも含まれているものと思われる。1627 nmの光学的厚さが500 nmの光学的厚さの約6分の1付近程度となる領域にデータが多く存在する傾向があるように見える。この原因としては、ある種の特徴のエアロゾルに対応している可能性がある。

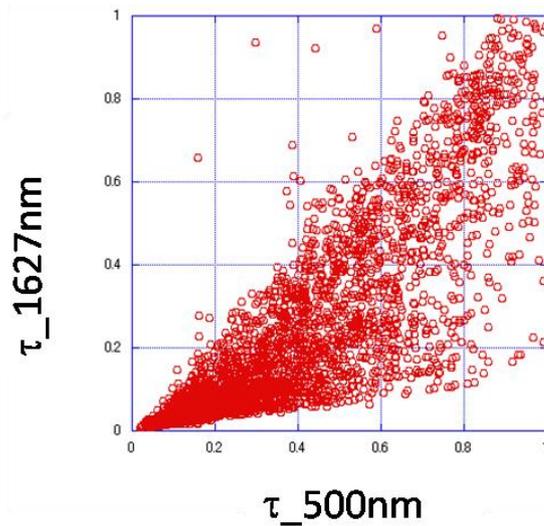


図 (2)-13 可視域の光学的厚さ (τ_{500nm}) と1627 nmでの光学的厚さの散布図
データは、2011年Tsukubaの観測値である。

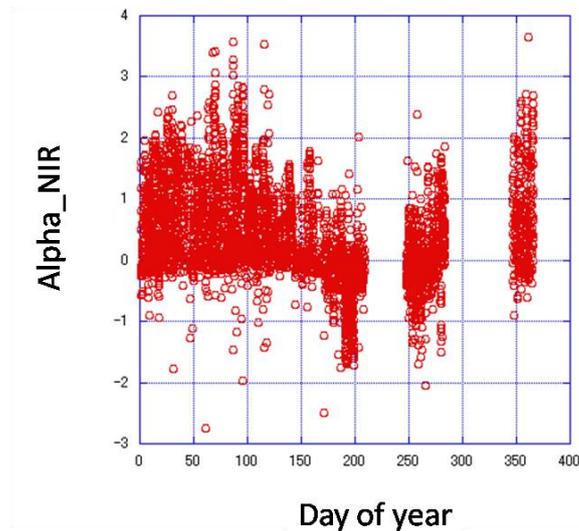


図 (2)-14 1627 nmと2200 nmの光学的厚さから算出したオングストローム指数 (Alpha_NIR)
データは、2011年Tsukubaの観測値である。

2011年Tsukubaでの1627 nmと2200 nmの光学的厚さから決定したオングストローム指数 (Alpha_NIR) のを図 (2)-14に示す。オングストローム指数は、光学的厚さを波長の冪乗で近似した時の係数であり、粒子サイズの小さいものが相対的に多いか、大きいものが相対的に多いかを示す指標として使われる。一方、その波長依存性はエアロゾルの性質によっても異なる。この図において特徴的なことは、夏季の値が負になること、すなわち、2200 nmの光学的厚さが1627 nmよりも大きくなることである。

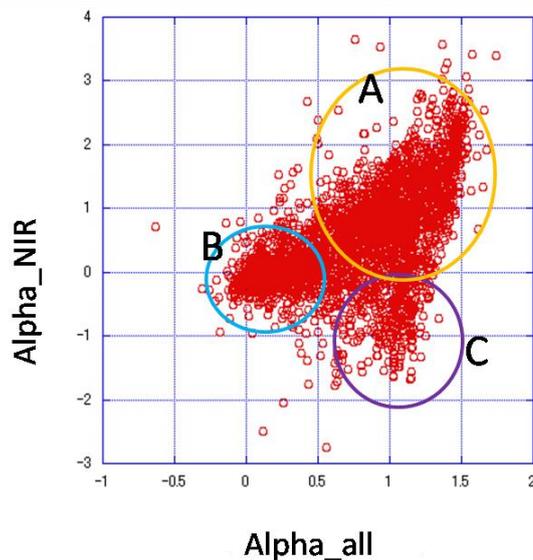


図 (2)-15 すべての波長から算出したオングストローム指数 (Alpha_all) と近赤外の波長から算出したオングストローム指数 (Alpha_NIR) の散布図。データは、2011年 Tsukuba の観測値である。

観測されたエアロゾルをオングストローム指数で分類するため、図 (2)-15は、すべての波長から算出したオングストローム指数 (Alpha_all) を横軸に、近赤外の波長から算出したオングストローム指数 (Alpha_NIR) を縦軸にとった散布図である。この図上で両方とも値が小さい (概ね0.5以下) の領域Bは、大きな粒子 (雲も含んでいる可能性有り) に対応し、Alpha_NIRが負でAlpha_allが1付近の領域Cは、夏季に特徴的なエアロゾルに対応し、Alpha_NIRもAlpha_allもともに値が0.5以上の領域Aは、通常観測されるエアロゾルに対応する。

ここで示したように全波長のオングストローム指数と近赤外域のオングストローム指数は、一意に対応しておらず、可視域のエアロゾル特性から近赤外域のエアロゾル特性を推定する時には注意が必要である。今回示したのは光学的厚さのデータだけであるが、近赤外域のエアロゾル特性の違いは、今後データ検証やアルゴリズム改良に利用できる可能性がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

ライダー観測からは、

- 1) 巻雲スクリーニング・解析方法を改善することによりXCO₂データ数を増加させることが可能。

- 2) 下層エアロゾル過小評価によりXCO₂データに誤差が生じる可能性を示した。
- 3) 成層圏エアロゾルの影響は無視できない。

ことが、また放射計観測からは、

- 1) スカイラジオメーターの検定定数が経年変化をしており、1年に1回程度は正確な検定を行う必要がある。
- 2) 940 nmチャンネルから可降水量を推定することにより、1627 nmや2200 nmで水蒸気の影響を考慮したエアロゾル光学的厚さの推定が可能になった。
- 3) 温室効果ガスの量を推定するために使われる近赤外の波長域でのエアロゾルの特性が直接分かるようになり、より正確にエアロゾルの誤差への影響を評価できるようになった。

ことが明らかとなった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) GOSAT中間総括会議における本推進費の成果の活用(2012年1月～3月)

GOSAT後継機への反映事項を提言することを目的にGOSAT中間総括会議が3回開催された。本会議では、本研究の成果である解析アルゴリズム改良と参照値の改良による「いぶき」データ改善の見通しを示し、GOSAT後継機を推進する環境省、宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び国立環境研究所(NIES)に重要な知見を与えることができた。

2) 「いぶき」データ Ver. 02. xxデータの一般公開(2012年6月)

本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を反映した「いぶき」データの再処理が行われ、そのデータ質の大幅な改善が確認された。この結果を基に新バージョンプロダクトが公開された。

3) 第4回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2012年6月)

GOSATプロジェクトから得られる成果をさらに豊かに有効なものとするため、一般からの研究公募を実施している。本会合は米国カリフォルニア工科大学で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データの改善結果を報告した。

4) 第5回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2013年6月)

本会合は横浜シンポジウムで、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

5) GOSATサイエンスチーム会合における研究成果の発表(2013年10月)

環境省、NIES、JAXAによって設置され定期的に開催されているGOSATサイエンスチーム会合で、本推進費の研究成果である航空機観測データを用いた検証解析について、情報を提供し、議論を行った。

6) 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)定常運用終了審査会における本推進費の成果の活用(平成26年2月14日)

温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)定常運用終了審査会が行われ、環境省、NIES、JAXAの作成

した資料を用いて発表が行われた。本研究の研究成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 第6回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2014年6月)

本会合はつくば市つくば国際会議場で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われる予定で、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた研究成果が報告される予定である。

6. 国際共同研究等の状況

ニュージーランド国立大気水文研究所ローダー大気観測所において、ライダーを用いたエアロゾルの鉛直分布観測を行っている。

中国科学院大気物理研究所と共同で、本課題で検定したスカイラジオメーターの検定定数を転写したもので北京、青島で共同観測を行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上发表

<論文(査読あり)>

- 1) O. Uchino, T. Sakai, T. Nagai, K. Nakamae, I. Morino, K. Arai, H. Okumura, S. Takubo, T. Kawasaki, Y. Mano, T. Matsunaga, T. Yokota: Atmos. Chem. Phys., 12, 11975–11984 (2012)
“On recent (2008–2012) stratospheric aerosols observed by lidar over Japan”
- 2) O. Uchino, N. Kikuchi, T. Sakai, I. Morino, Y. Yoshida, T. Nagai, A. Shimizu, T. Shibata, A. Yamazaki, A. Uchiyama, N. Kikuchi, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: Atmos. Chem. Phys., 12 (1), 3393-3404 (2012)
“Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂: a case study over Tsukuba”
- 3) 酒井哲、内野修、森野勇、永井智広、赤穂大河、川崎健、奥村浩、新井康平、内山明博、山崎明宏、松永恒雄、横田達也: 日本リモートセンシング学会誌 (2013年3月19日受理)
「佐賀のライダーとスカイラジオメータによって検出された桜島の火山灰の高度分布と光学特性」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上发表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) O. Uchino, N. Kikuchi, T. Sakai, I. Morino, Y. Yoshida, T. Nagai, A. Shimizu, T. Shibata, A.

- Yamazaki, A. Uchiyama, N. Kikuchi, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Yokota: AGU Fall Meeting 2011 (2011)
- “Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT TANSO-FTS SWIR XCO₂ and a strategy for retrieval improvement”
- 2) 内野修、永井智広、酒井哲、真野裕三、B. Liley、柴田隆、森野勇、横田達也、田久保祥一郎、奥村浩、新井康平：第17回大気化学討論会 (2011)
- 「ライダーで観測された成層圏エアロゾルの変動について」
- 3) 内野修、菊地信弘、森野勇、吉田幸生、横田達也、酒井哲、永井智広、真野裕三、清水厚、柴田隆、山崎明宏、内山明博：第29回レーザセンシングシンポジウム (2011)
- 「GOSATプロダクト改良に向けたライダーとスカイラジオメータデータの利用」
- 4) I. Morino, O. Uchino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, V. Sherlock, B. Liley, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagai, T. Sakai, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura: AGU Fall Meeting 2012 (2012)
- “Extended validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at TCCON sites with co-located aerosol profiling”
- 5) T. Yokota, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, H. Takagi, S. Maksyutov, H. Watanabe, GOSAT members: SPIE Asia-Pacific Remote Sensing (2012)
- “Column-averaged concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT TANSO-FTS SWIR spectra and their use in estimating regional surface fluxes”
- 6) I. Morino, O. Uchino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, V. Sherlock, B. Liley, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagai, T. Sakai, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura: 8th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS8) (2012)
- “Advanced validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at prioritized observation sites”
- 7) 中前久美、内野修、森野勇、B. Liley、酒井哲、永井智広、横田達也：第18回大気化学討論会 (2012)
- 「ライダーを用いたLauder上空のチリ・Puyehue火山噴火による大気中火山性エアロゾルの観測」
- 8) 山崎明宏、内山明博、上沢大作、工藤玲：日本気象学会2012年度秋季大会 (2012)
- 「比較検定とImproved Langley法で決められたスカイラジオメータの検定定数について」
- 9) 内山明博、山崎明宏、工藤玲、上沢大作：日本気象学会2012年度秋季大会(2012)
- 「スカイラジオメータの940nmチャンネルによる水蒸気量の推定」
- 10) 内野修、酒井哲、永井智広、中前久美、森野勇、新井康平、奥村浩、田久保祥一郎、川崎健、B. Liley、真野裕三、松永恒雄、横田達也：日本気象学会2012年度秋季大会 (2012)
- 「ライダーで観測された近年の成層圏エアロゾル増加と気候等への影響」
- 11) 内野修、酒井哲、永井智広、中前久美、森野勇、田久保祥一郎、奥村浩、新井康平、松永恒雄、横田達也：第30回レーザセンシングシンポジウム (2012)
- 「GOSATプロダクト検証用可搬型ライダーによる観測」
- 12) 中前久美、内野修、森野勇、B. Liley、酒井哲、永井智広、横田達也：第17回大気ライダー研究会、同予稿集、11-11 (2013)
- 「チリ・プジェウエ火山噴火による火山性エアロゾルの地上ライダー観測 (Lauder) について」

- 13) T. Sakai, O. Uchino, I. Morino, T. Nagai, S. Kawakami, H. Ohyama, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura, Y. Takubo, K. Kawasaki, T. Akaho, T. Shibata, T. Nagahama, Y. Yoshida, N. Kikuchi, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Abstract Collection, 54 (2013)
 “Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”
- 14) K. Nakamae, O. Uchino, I. Morino, B. Liley, T. Sakai, T. Nagai, T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS9), Abstract Collection, 56 (2013)
 “Lidar observation of the 2011 Puyehue volcanic aerosols at Lauder, New Zealand”
- 15) 中前久美、内野修、森野勇、B. Liley、酒井哲、永井智広、横田達也：日本気象学会2013年度春季大会、同予稿集、322 (2013)
 「Lauderにおけるプジェウエ火山噴火によるエアロゾル層のライダー観測結果について」
- 16) I. Morino, T. Sakai, T. Nagai, A. Uchiyama, A. Yamazaki, S. Kawakami, H. Ohyama, K. Arai, H. Okumura, T. Shibata, T. Nagahama, N. Kikuchi, Y. Yoshida, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, O. Uchino, T. Yokota: AGU Fall Meeting 2013, Abstracts (2013)
 “Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による温室効果ガスの全球観測から分かったこと（平成25年8月6日、佐賀大学本庄キャンパス、観客 25名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKニュース（佐賀放送局）（平成25年8月6日、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による温室効果ガスの全球観測からわかったことについて 1分30秒ほど紹介）
 2) 佐賀新聞（平成25年8月7日、朝刊、「予測精度の成果報告、衛星いぶき参画の佐大」）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(3) 重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測に関する研究

(独) 宇宙航空研究開発機構

川上修司

<研究協力者>

名古屋大学

大山博史

平成23(開始年度)～25年度累計予算額：29,844千円

(うち、平成25年度予算額：8,049千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

「いぶき」の観測は、大気中に存在する巻雲やエアロゾルが二酸化炭素とメタンの測定結果に大きな影響を及ぼすことが知られ、これらの影響を取り除き「いぶき」の観測データの精度を向上させるためには、巻雲やエアロゾルの影響が少ない二酸化炭素のカラム量の地上観測データで検証する必要がある。このため、重点サイトを設け、地上設置高精度温室効果ガス観測装置の整備および観測を実施した。「いぶき」に同期した観測を実施し、スペクトルや解析に必要な気温、湿度、日射データ等の付随データを取得し、データ質の確認と整理を行い、検証に利用可能なデータセットを作成した。スカイラジオメーターから導出されたエアロゾルの光学的厚さとの対応から、SagaサイトはTsukubaサイトなど他の重点サイトと比較してエアロゾル量が高いサイトであることを見出した。

[キーワード]

温室効果ガス観測技術衛星、高精度温室効果ガス観測、二酸化炭素、メタン、エアロゾル

1. はじめに

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)は、二酸化炭素とメタンの大気中のカラム量の測定を主目的とする地球観測衛星である。2009年1月23日、宇宙航空研究開発機構種子島宇宙センターから打ち上げられ、衛星打ち上げ後、搭載センサの校正、データ解析アルゴリズムの改良及び温室効果ガスの初期検証が行われ、温室効果ガス濃度データは一般に公開されている。しかし、科学的利用のためには、この温室効果ガス濃度データの更なる高精度化が必要とされている。

「いぶき」の観測では、大気中に存在する巻雲やエアロゾルが二酸化炭素とメタンの測定結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。これらの影響を取り除き「いぶき」の観測データの精度を向上させるためには、巻雲やエアロゾルの影響が少ない二酸化炭素のカラム量の地上観測データで検証する必要がある。また、長期間の検証データを取得しそれらを用いた継続的な検証を行って季節変動や経年変動についても評価する必要がある。

2. 研究開発目的

「いぶき」衛星搭載観測装置の校正、データ解析アルゴリズム改良、温室効果ガスの初期検証が行われ、温室効果ガス濃度データは一般に公開されたが、科学的利用のために更なる高精度化が必要である。

そのため、継続的に取得した検証データ、重点サイトで取得した多種多様な検証データによる検証と誤差要因の特定を行う。これを基に解析アルゴリズム改良を行い、「いぶき」観測データの解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化を行う。

そこで本業務は、重点サイトにおける高精度温室効果ガスを継続的に観測できる体制を構築し、データを取得し、解析を行いデータ質の評価を行うことを目的とする。

3. 研究開発方法

研究開発方法は図 (3)-1に示し以下に記載する。本研究「重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測に関する研究」で取得されたデータは、サブテーマである「長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究」を中心とした検証に活用する。このため、重点サイトにおいて地上設置高精度温室効果ガス観測装置を用いた観測体制を構築する。

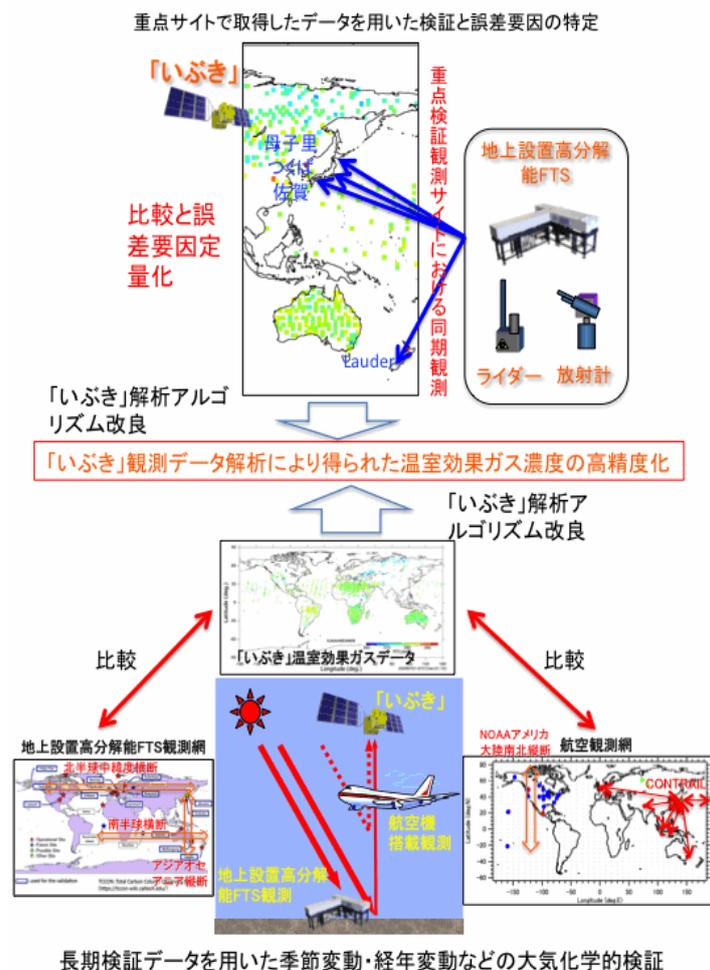


図 (3)-1 本研究の概念図

重点サイトにおける地上温室効果ガス高精度観測と同期して巻雲・エアロゾル光学特性の観測体制の構築、データ取得、解析を行う。このようにして得られた地上温室効果ガスデータ、「いぶき」温室効果ガスデータ、巻雲・エアロゾル光学特性との相関解析を行い、不確かさを明らかにすると同時にその原因を特定する。この検証結果を解析アルゴリズムの改良と初期値の改訂を反映させ「いぶき」観測データの再解析を実施する。この解析による温室効果ガス濃度を検証して高精度化の確認を行う。重点サイトにおける観測項目を表(3)-1に示す。重点サイトには、地上温室効果ガス高精度観測のための地上設置高分解能フーリエ変換分光計(FTS)、巻雲・エアロゾルの高度分布を測定するライダー(lidar)と巻雲・エアロゾル光学特性を測定する放射計(sky radiometer又はsun photometer)を設置している。赤で囲んだサイト、Tsukuba、Moshiri、Saga、Lauderが本研究で観測を行う重点サイトであり、これ以外のサイトは観測項目が不十分であることが分かる。また、Rikubetsuも重点サイトとして活用が期待されているため表(3)-1に記載した。本研究は上記の研究のうち高精度温室効果ガスに関する部分を担当する。

表(3)-1 重点サイトにおける検証観測所の状況

Instrum. Site	FTS	Lidar	Sky Radiometer	Sun Photometer
Tsukuba	Bruker 125 HR (NIES)	Observed by MRI	Observed by MRI	None
Moshiri	Bruker 120 HR (Nagoya Univ.)	Observed by Nagoya U. (supported by NIES)	Observed by NIES (not in winter)	None
Rikubetsu	<i>Bruker Upgraded 120 HR (NIES) will be installed on Mar 2012</i>	<i>From Moshiri?</i>	<i>From Moshiri?</i>	
Lauder	Bruker 125 HR (NIWA,120 HR: backup)	Observed by NIWA (Upgraded MRI & NIES)	Observed by NIES & NIWA	CSD Middleton SP02 (ABM)
Saga	Bruker 125 HR (JAXA & Saga Univ.)	Observed by NIES & Saga Univ.	Observed by NIES & Saga Univ.	
Orleans	Bruker 125 HR (U. Bremen)	None	Observed by U. Bremen &NIES	None
Bialystok	Bruker 125 HR (U. Bremen)	None	<i>To be installed at Bialystok and Bremen</i>	None
Darwin	Bruker 125 HR (U. Wollongong)	Small power lidar (ARM site)	None	Cimel (ARM site)
Park Falls	Bruker 125 HR (Caltech)	None	None	None
Lamont	Bruker 125 HR (Caltech)	Small power lidar (ARM site)	None	Cimel (ARM site)

[注]NIES: 国立環境研究所、MRI: 気象研究所、NIWA: ニュージーランド国立大気水文研究所、ARM: 米国エネルギー省の大気放射測定

4. 結果及び考察

(1) 重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測装置の整備

Sagaサイトにおける地上設置高精度温室効果ガス観測装置調整作業について主に述べる。Sagaサイトには、2011年5月末に、地上設置高精度温室効果ガス観測装置を設置した。設置状況を、図(3)-2に示す。Sagaサイトにて高精度温室効果ガス観測装置による観測を始める前に装置の調整作業を実施した。精度を保つためには、入念な光学調整を実施する必要があるためメーカーである(株) Bruker社の技術者と共に実施した。



図 (3)-2 佐賀大学構内装置コンテナ全景

Sagaサイトに設置したFTSは、船舶での観測のために何度も輸送されたため光学系のアライメントのズレが少しずつ起きており、取得した温室効果ガスのリトリバルの精度劣化が起きつつあった。また、Sagaサイトへの輸送の際に、大きく光学系のアライメントがずれたため、温室効果ガスの精度がまったく不十分になってしまった。このため同年7月に光学調整を実施し、これ以降は正常なデータを取得することが可能となった。下記に、調整項目毎に詳細を記述する。2011年5月末にSagaに高精度温室効果ガス観測装置が移設され7月に調整を実施した後、観測が開始された。これにより重点サイト4カ所における高精度温室効果ガスの観測体制が完成した。

1) 干渉計レーザーアライメント調整

つくばから佐賀への装置移設の際に、振動による光学系に微小なズレが発生し、光学的にアライメントが必要な状態となった。このため、振動等で変化した基準ヘリウムネオンレーザーの光軸をスキャナ全領域において安定し受光出来るよう再調整した後、レーザー本体位置を再固定した。スキャナが水平移動を維持できるようにスキャナーレール下のテンショナーによりレール自重によるたわみ量をオシロスコープを用いて光学調整しながらスキャナ可動位置全域における水平調整を行った。干渉計部レーザーディテクターX/Yの位置の調整を実施した(図 (3)-3)。また、全域スキャンにて一定以上のレーザー強度があることを確かめた。

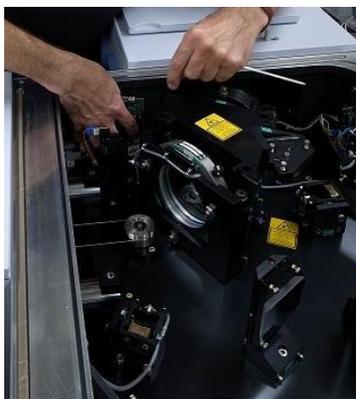


図 (3)-3 干渉計部光学調整

2) レーザーボードノイズ対策

レーザーボードノイズ対策が必要な部品 (ECL-03) であることを確認し、ECL-04に交換することにした。交換する前のゴースト信号の大きさを7.5kHzから40kHzまでのスキャナ速度で見積もるためのスペクトルデータを取得した (図 (3)-4)。

サンプリングレーザーの波数を ν_L 、光源の波数を ν としたときに出現する、 $\nu_L - \nu$ の領域 (13000-14000 cm^{-1}) にゴースト信号が出ることを防ぐ対策部品の取り付けを実施 (ECL-03から04へ交換)。レーザーボードのポテンショメータを調整してスキャナ速度7.5 kHzでゴースト信号が最少になるようにして、交換後のゴースト信号の大きさを見積もる (または、ゴースト信号が消えていることを確認する) ためのスペクトルデータを取得した (図 (3)-4)。

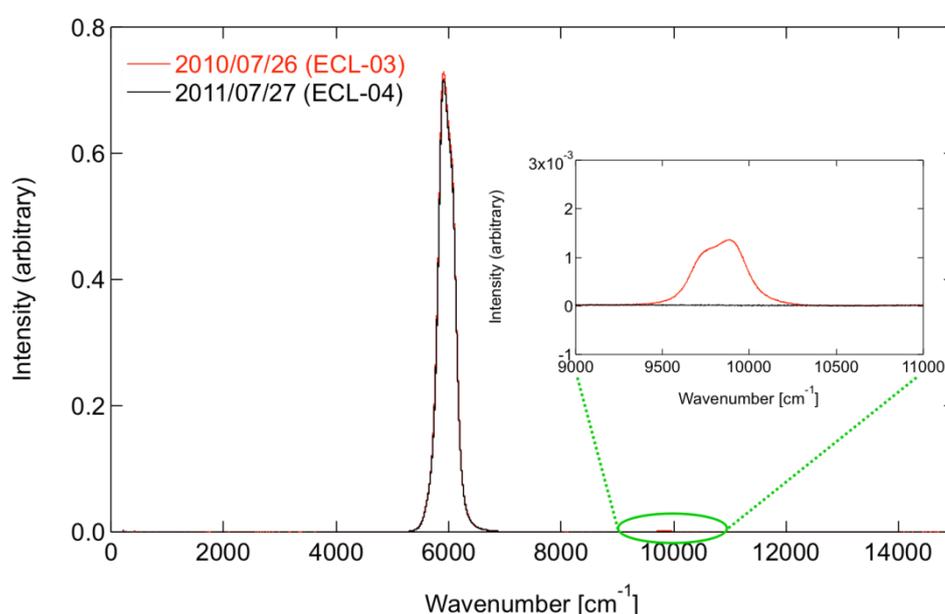


図 (3)-4 レーザーボード交換前 (赤) および交換後 (黒) のゴースト信号 (9500-10200 cm^{-1}) の比較

3) ガスセルを用いた装置関数の最適化

酸化二窒素 (N_2O) 標準ガスセル測定によって吸収線の形状を確認したところ装置の移動による光学ずれがあり、干渉計測定器の最適化が必要なレベルであることがわかった。このため、内部赤外光源により干渉系を最適化し、性能を確認した後、 N_2O 標準ガスセル測定による吸収線の形状が理想的となるよう微調整と測定を繰り返し実施し、2010年3月時の形状に戻っていることを確認した (図 (3)-5)。同様に臭化水素 (HBr) セルでも確認した (図 (3)-6)。その後定期的に (年1回程度)、 HBr セルを使用し、吸収線の形状を確認し、非対称性が生じてないか等を確認している。2011年と2014年の測定は、セル内の圧力が違う異なる HBr セルを使っているが、特に非対称性を生じてないことを確認できている (図 (3)-7)。3年経過後も、光学的なアライメントの微妙なずれがおこってないことが確かめられた。

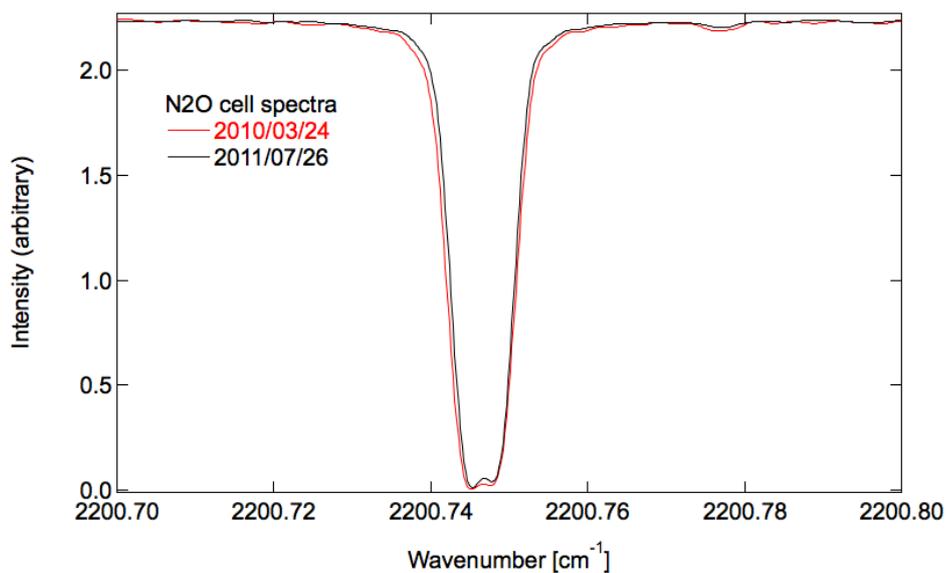


図 (3)-5 2010年3月(赤) および2011年7月(黒) の N_2O セルスペクトルの比較

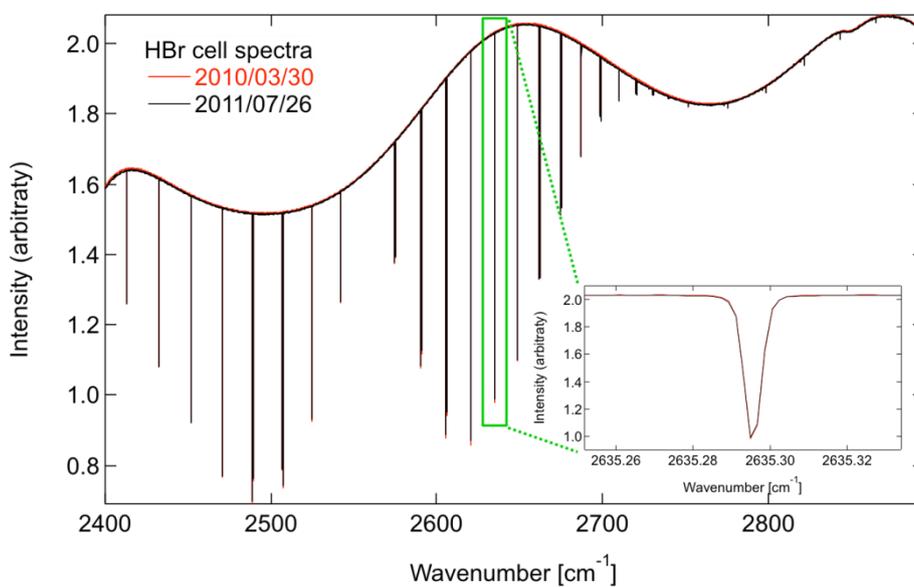


図 (3)-6 2010年3月(赤) および2011年7月(黒) のHBrセルスペクトルの比較

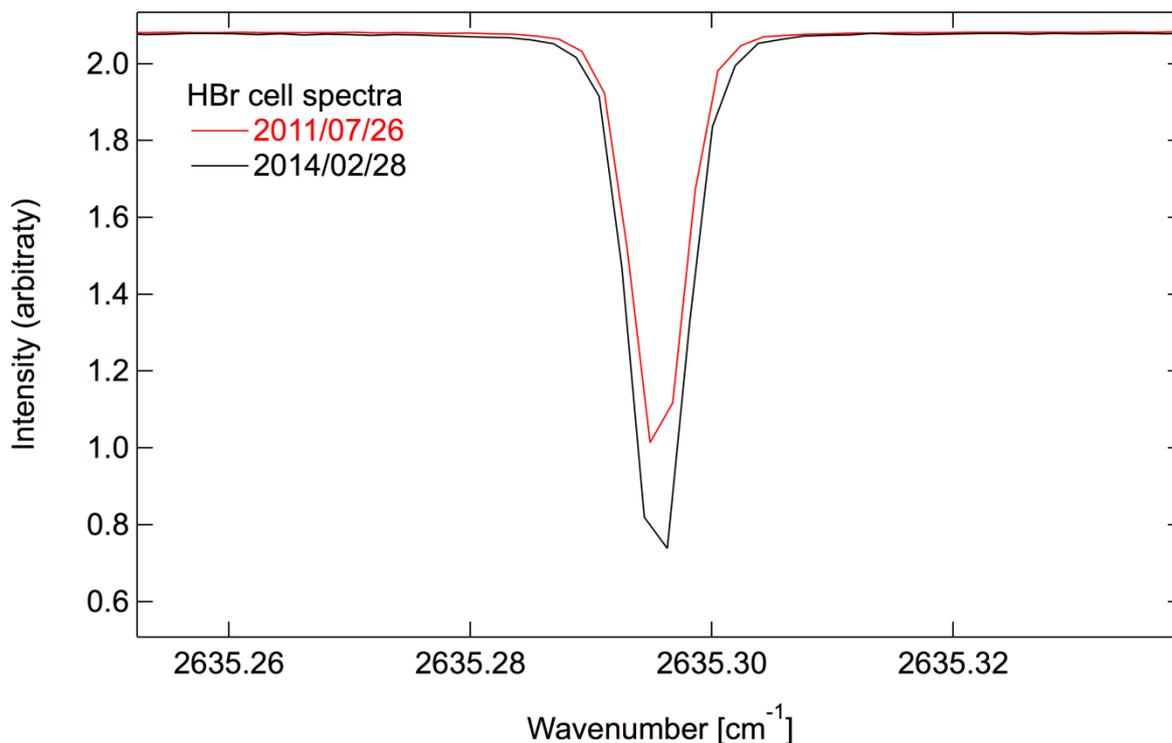


図 (3)-7 2011年7月26日(赤) および2014年2月28日(黒) のHBrセルスペクトルの比較

4) 太陽追尾装置調整及びミラー交換作業

約1年程度の使用でホコリなどの付着により金ミラーが曇り、反射率が落ちて測定器に入射する光量はかなり減っていることを確認した(図(3)-8)。コンテナ上の太陽追尾装置のミラーをバックアップミラーと交換、追尾装置本体のアラインメント調整を実施して、正常に太陽を追尾できることを確認した(図(3)-9)。また、追尾装置が水平になっていなかったため、水準器で確認しながら調整ネジによって水平になるように調整した。



図(3)-8 使用により曇ったミラー



図(3)-9 交換作業風景

(2) 重点サイトにおける地上設置高精度温室効果ガス観測装置の運用

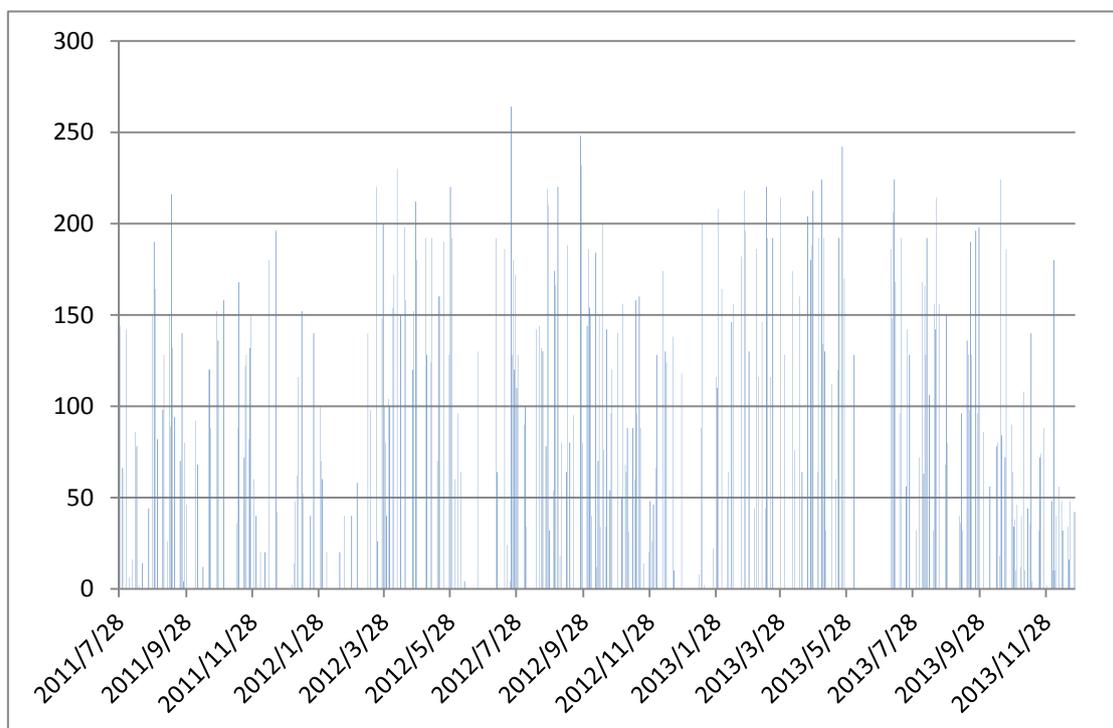
国内外の重点サイトの地上設置高精度温室効果ガス観測装置の運用を行い、高精度温室効果ガスの観測体制を維持した。この結果、表(3)-2に示す通り、2013年を含め2009年以降重点サイト

におけるFTSデータが取得できた。ただし、Moshiriサイトは、太陽追尾装置故障のため2012-2013年の測定結果はない。Tsukuba、Lauder、Saga、Moshiri、Rikubetsuサイトでのデータ取得状況を表(3)-2に示す。Sagaサイトにおける2011年からの日別スペクトル数を図示化し、例として、Sagaサイトにおける日別のスペクトル取得数を図(3)-10に示す。「いぶき」オーバースペース日の観測データは、2011年6月～2013年12月の間に314日あったが、その39%にあたる121日分のデータ取得ができた。Sagaサイトでの2011-2014年のデータ取得状況として、各月の月平均値を表(3)-3に示す。

表(3)-2 重点サイトにおけるFTSデータの取得状況(2013年12月31日現在)

Sites	観測開始日	オーバースペース日	データ入手状況(観測日)
Tsukuba	2009/01/01	586	230 (2013/11/22まで)
Lauder	2009/01/01	586	188 (2013/12/03まで)
Saga	2011/06/01	314	121
Moshiri	2009/08/21	408	47*
Rikubetsu	2013/11 -	--	--

*太陽追尾装置故障のため2012年の測定なし



図(3)-10 Saga地上設置FTSによって取得された日別スペクトル数(2011年7月～2013年12月)

表 (3)-3 Sagaサイトにおける2011-2014年のデータ取得状況(月平均値を示す)

month/year		scan_all		XCO ₂ (ppm)		XCH ₄ (ppm)	
		all	flag0	mean	std.	mean	std.
Jul	2011	260	228	390.85	0.44	1.8020	0.0135
Aug	2011	892	794	390.45	0.76	1.8014	0.0118
Sep	2011	1496	1284	388.16	1.09	1.8215	0.0138
Oct	2011	788	727	390.76	0.53	1.8231	0.0074
Nov	2011	1196	1036	392.27	0.70	1.8229	0.0085
Dec	2011	498	373	393.06	0.85	1.8158	0.0053
Jan	2012	856	622	395.11	0.82	1.8220	0.0065
Feb	2012	120	84	395.77	0.83	1.8189	0.0090
Mar	2012	1110	935	397.04	0.64	1.8253	0.0066
Apr	2012	1930	1597	397.27	0.68	1.8160	0.0098
May	2012	1756	1499	397.23	0.75	1.8250	0.0069
Jun	2012	354	111	393.75	1.97	1.8256	0.0061
Jul	2012	1572	1236	393.38	1.27	1.8327	0.0206
Aug	2012	1366	911	392.13	0.83	1.8096	0.0124
Sep	2012	1646	1184	391.71	0.58	1.8283	0.0142
Oct	2012	1986	1384	393.04	0.74	1.8351	0.0080
Nov	2012	1216	664	394.88	0.75	1.8279	0.0046
Dec	2012	934	571	396.72	0.71	1.8350	0.0051
Jan	2013	754	385	397.75	0.92	1.8279	0.0090
Feb	2013	1306	1071	398.16	0.68	1.8253	0.0070
Mar	2013	1470	1308	398.68	0.80	1.8266	0.0079
Apr	2013	1392	973	400.18	1.02	1.8222	0.0098
May	2013	1864	1237	399.98	0.98	1.8272	0.0090
Jun	2013	128	120	398.83	0.54	1.8217	0.0049
Jul	2013	1578	1208	397.03	1.43	1.8114	0.0130
Aug	2013	1894	1641	394.86	1.13	1.8364	0.0153
Sep	2013	1374	1116	393.86	0.73	1.8568	0.0089
Oct	2013	1120	676	395.15	1.00	1.8410	0.0097
Nov	2013	708	464	397.83	0.70	1.8401	0.0048
Dec	2013	572	385	399.14	0.90	1.8344	0.0048
Jan	2014	950	616	399.91	0.60	1.8331	0.0059
Feb	2014	554	403	400.44	0.71	1.8257	0.0042

[注] flag0とは、解析を行って、解析結果に問題がないことを意味する。

Sagaサイトで2011年6月から観測を継続しているが、この間、FTSのアラインメントをモニタするために、FTSの内部光源（ハロゲンランプ）を用いて定期的に塩化水素(HCl)ガスセルの吸収スペクトルを測定し、そのデータ解析により装置関数を評価した。図(3)-11にSaga地上設置FTSにおける装置関数の線幅と対称性に関する情報をそれぞれ表す変調効率と位相誤差を示す。2011年7月にFTSのアラインメントを調整して以降、定期的に(計15回)測定しているが、変調効率は光路

差によらず1に近い値（理想的な値）を示している。また位相誤差は0に近い値を示しており、これらのことはFTSのアライメントが安定していることを表している。

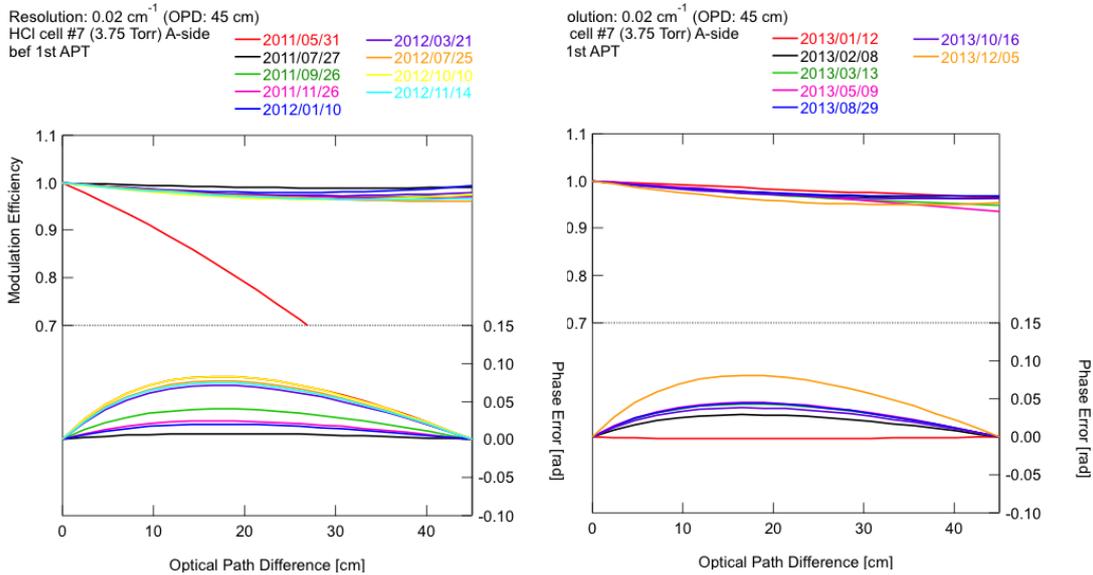


図 (3)-11 Saga地上設置FTSにおけるHClガスセルスペクトルから推定した装置関数に関する情報(左:2011/2012年、右:2013年、上: 変調効率、下: 位相誤差)

Sagaサイトで、ゴーストスペクトル(サンプリングレーザーの波数を ν_L 、光源の波数を ν としたときに、 $\nu_L - \nu$ の領域に現れる誤信号)を、バンドパス光学フィルターを使って確認した。このゴーストスペクトルが親スペクトルに重なってリトリvableされるカラム平均濃度にバイアスを発生させることが報告されている。InGaAs検出器で測定した太陽光スペクトルのうち、大気中の水蒸気によって太陽光が完全に吸収されている波数領域 (7160~7170 cm⁻¹) に現れるゴースト信号とその親信号の波数領域 (8628~8638 cm⁻¹) からGhost Parent Ratio (GPR) を算出した。図 (3)-12 に佐賀大学に移設後の2011年6月から2013年12月までのGPRとその日平均値を示す。太陽光スペクトルからも、レーザーボードを交換した2011年7月27日を境にGPRが減少していることが確認できた。また、レーザーボード交換後のGPRの日平均値の時間変動が小さいことも確認できた。

2011年7月からスペクトルデータや解析に必要な気温、湿度、日射データ等の付随データを取得した(図 (3)-13)。

図 (3)-14及び図 (3)-15に、O₂ 1.27- μ m吸収帯から導出した地表面気圧と気圧の比較を示す。およそ、O₂ 1.27- μ m吸収帯から導出した地表面気圧は、17 hPa (~1.7%) の正のバイアスがあり、精度 (precision) は0.2%であることがわかる。ラインパラメータに不確実性があることからこのようなバイアスが生じることはわかっているが、このような特性が時系列的に変化していないかとモニタすることにより測定器の安定性を知ることができる。

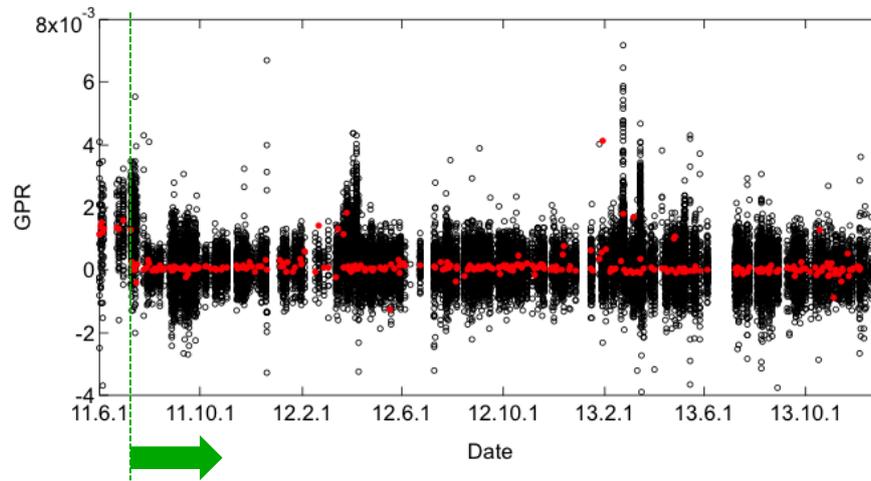


図 (3)-12 Saga地上設置FTSにおける太陽光スペクトルから算出したGhost Parent Ratio (GPR) の時系列(各スペクトルから得られた値は黒、日平均値は赤)

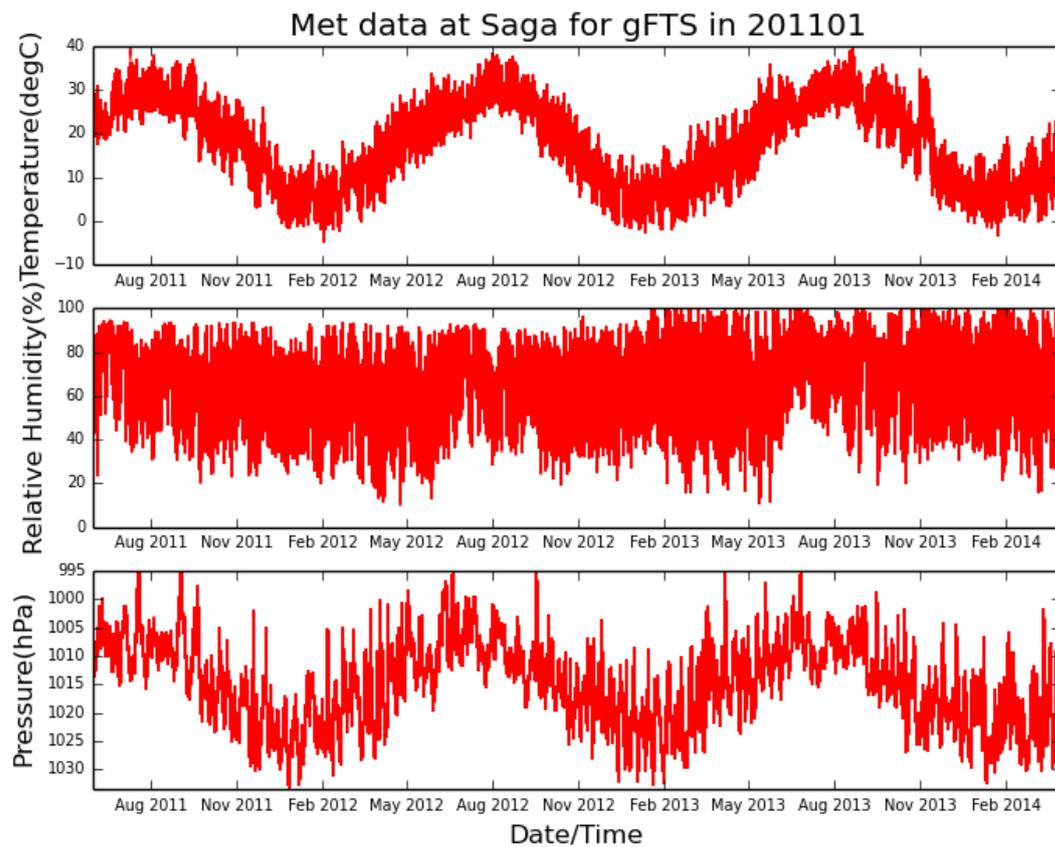


図 (3)-13 Sagaサイトにおける気温、相対湿度、気圧 (2011年7月～2014年3月)

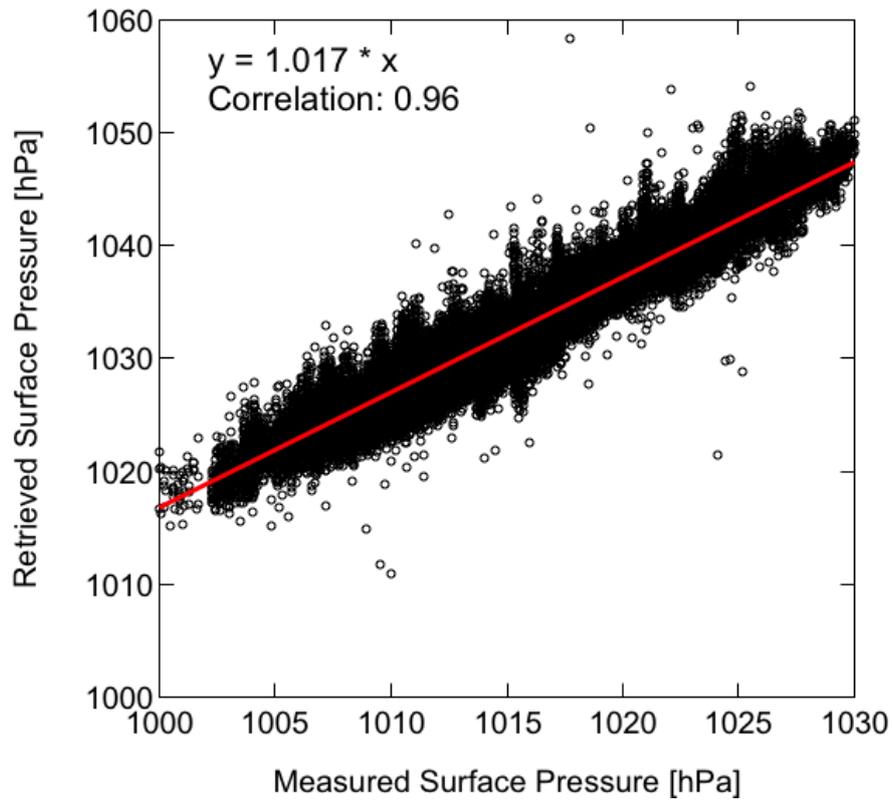


図 (3)-14 O_2 1.27- μm 帯から導出した気圧との比較

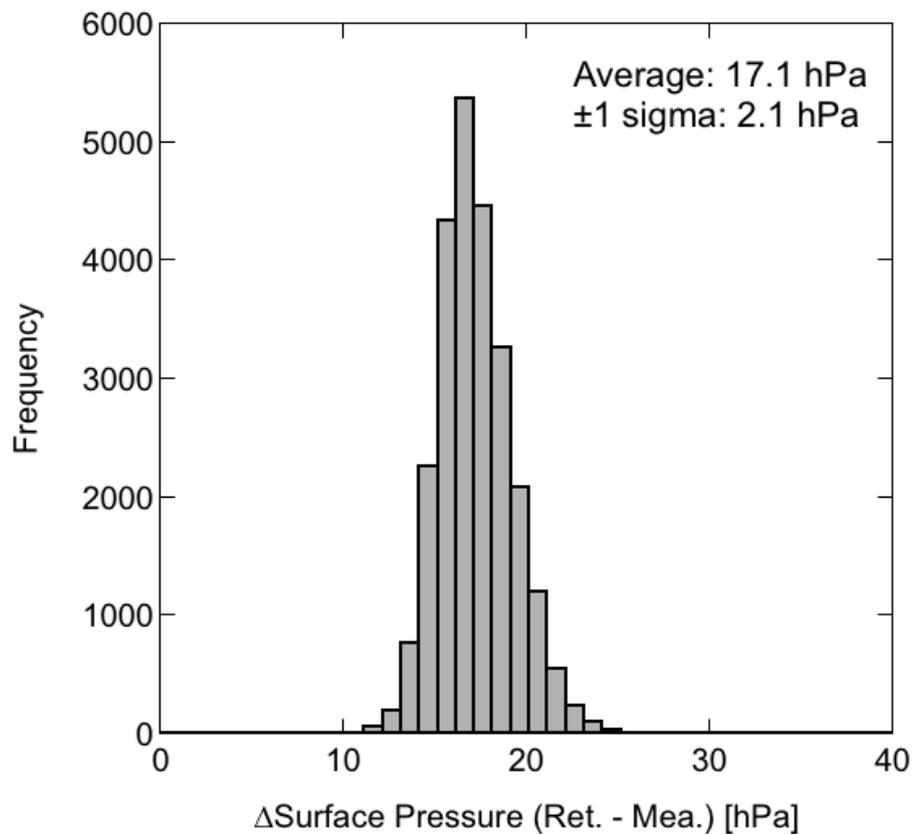
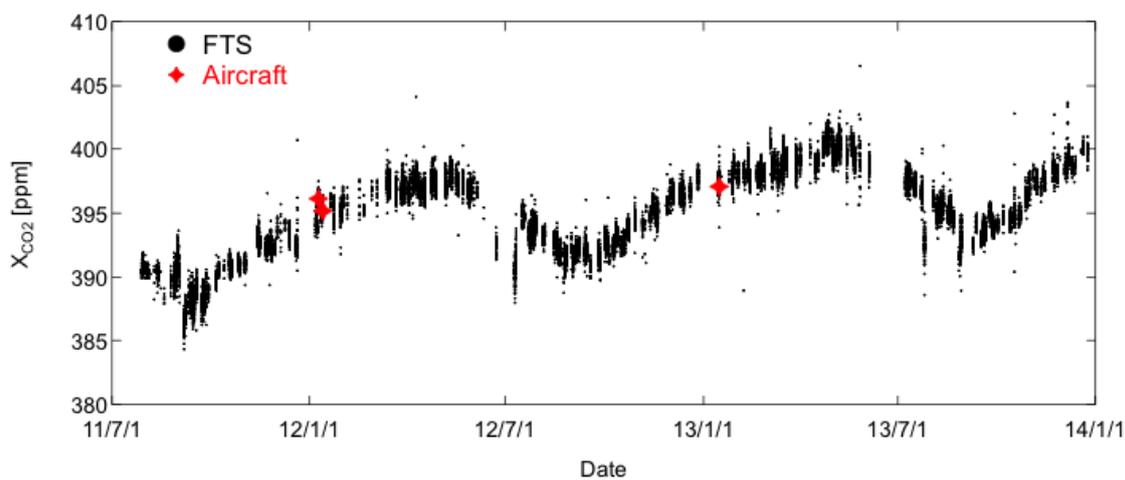


図 (3)-15 (O_2 - 気圧計) のヒストグラム

取得したデータに対してデータ解析プログラムを用いてデータ解析を行った。TCCON (Total Carbon Column Observing Network) において標準の解析アルゴリズムとして採用されているGFIT (version 4.8.6) を用いて大気微量成分 (CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , H_2O , HDO , HF) のカラム平均濃度を推定した。Sagaサイトにおける推定結果を2011年7月からの XCO_2 および XCH_4 の時系列図として図(3)-16及び図(3)-17に示す。 XCO_2 については光合成の活発な夏期に極小値をとり、それ以降濃度が増加している様子が観測された。一方 XCH_4 については、佐賀においてこれまで測定された濃度より高い極大値が2013年9月に観測された。Saga、Tsukuba、Lauderサイトにおける地上FTSと「いぶき」 XCO_2 の推定結果を2011年7月からの時系列図として図(3)-18、図(3)-19、図(3)-20に示す。「いぶき」データ(NIES Ver. 02.xx)は、各サイトを中心として緯度経度 ± 5 度の矩形内のデータを抽出した。同時に、図(3)-18、図(3)-19、図(3)-20(上図)に、各サイトでスカイラジオメーターのデータから推定した760 nmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT@760nm)を示す。760 nmのエアロゾルの光学的厚さは、スカイラジオメーターの測定データである870 nmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数から計算した。Tsukuba、Lauderサイトでの地上FTSと「いぶき」FTS SWIRからの推定値を比較した場合(図(3)-19、図(3)-20)、Sagaサイト(図(3)-18)でのGOSATデータのばらつきが地上FTSより大きく見える。Sagaサイトのエアロゾルの光学的厚さは、Tsukubaサイト、Lauderサイトと比較して、高くばらつきも大きい。このことから、サブテーマ「長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究」において、「いぶき」のアルゴリズム改良を実施することにより精度向上しているが、さらにエアロゾルの扱いを適切にすることにより精度向上が見込まれることが示唆される。



図(3)-16 地上設置FTSによって観測されたSagaサイトの XCO_2 の時系列

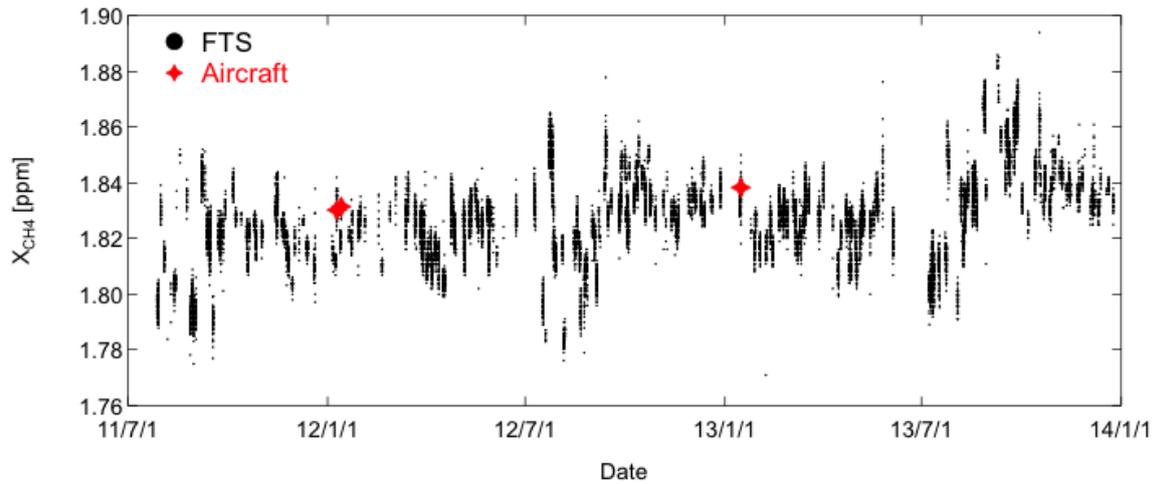


図 (3)-17 地上設置FTSによって観測されたSagaサイトのXCH₄の時系列

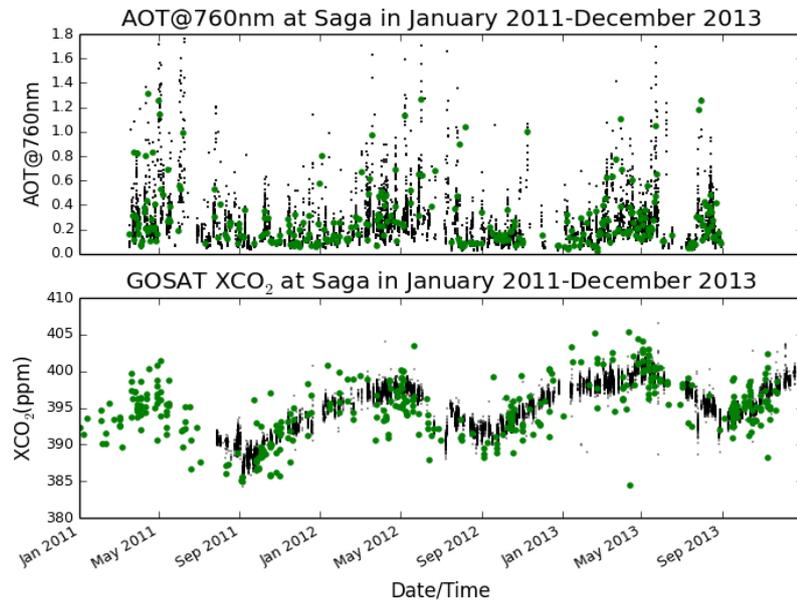


図 (3)-18 Saga : 地上設置FTSによって観測されたXCO₂(黒)の時系列と各サイトの「いぶき」XCO₂(緑) (下図)。スカイラジオメーターから推測された各サイトの760 nmのエアロゾルの光学的厚さ(黒)と「いぶき」 FTS SWIRから推定したエアロゾルの光学的厚さ(緑) (上図)

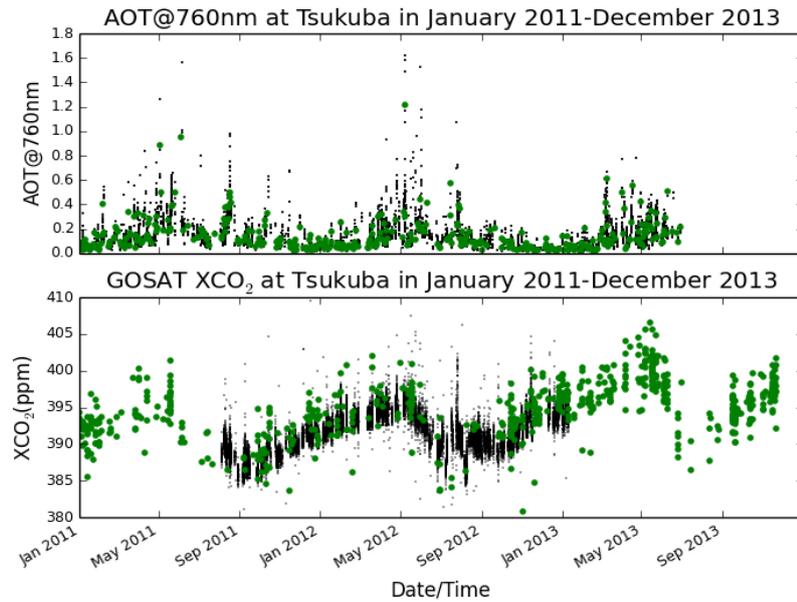


図 (3)-19 Tsukuba: 地上設置FTSによって観測された XCO_2 (黒)の時系列と各サイトの「いぶき」 XCO_2 (緑) (下図)。スカイラジオメーターから推測された各サイトの760 nmのエアロゾルの光学的厚さ(黒)と「いぶき」 FTS SWIRから推定したエアロゾルの光学的厚さ(緑) (上図)

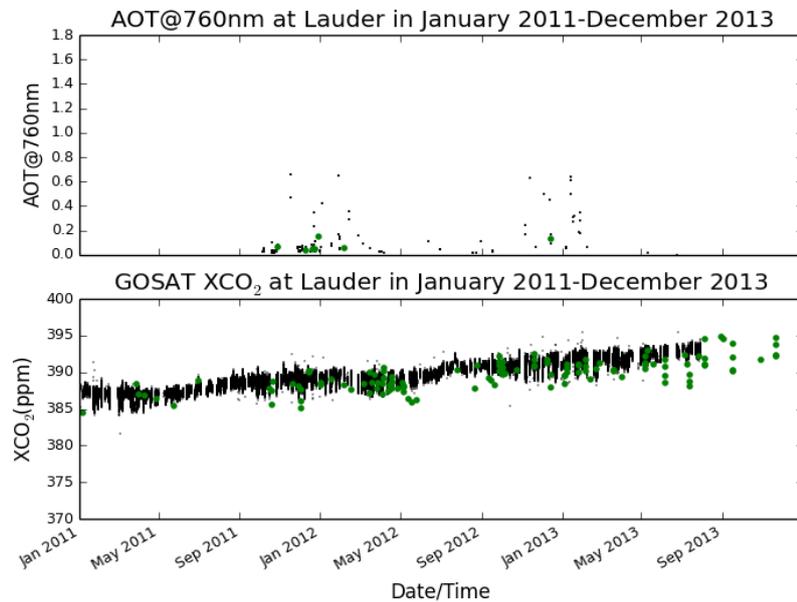


図 (3)-20 Lauder: 地上設置FTSによって観測された XCO_2 (黒)の時系列と各サイトの「いぶき」 XCO_2 (緑) (下図)。スカイラジオメーターから推測された各サイトの760nmのエアロゾルの光学的厚さ(黒)と「いぶき」 FTS SWIRから推定したエアロゾルの光学的厚さ(緑) (上図)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

重点サイトにおける高精度温室効果ガスと巻雲・エアロゾル光学特性の観測を行い、データの取得とデータ質の評価を継続的に実施した。

更に、Tsukubaを含む重点サイト4地点における検証と誤差要因の特定では、ライダーによるエアロゾル・雲データで分類した「いぶき」XCO₂ (Ver. 02.11)を地上FTS XCO₂ (GGG 2012解析アルゴリズム)で評価し、エアロゾルや雲の関係を明らかにした。これらの知見は、更なる解析アルゴリズム改良と参照値の改良に継続して活用する予定である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1) GOSAT中間総括会議における本推進費の成果の活用(2012年1月～3月)

GOSAT後継機への反映事項を提言することを目的にGOSAT中間総括会議が3回開催された。本会議では、本研究の成果である解析アルゴリズム改良と参照値の改良による「いぶき」データ改善の見通しを示し、GOSAT後継機を推進する環境省、宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び国立環境研究所(NIES)に重要な知見を与えることができた。

2) 「いぶき」データ Ver. 02.xxデータの一般公開(2012年6月)

本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を反映した「いぶき」データの再処理が行われ、そのデータ質の大幅な改善が確認された。この結果を基に新バージョンプロダクトが公開された。

3) 第4回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2012年6月)

GOSATプロジェクトから得られる成果をさらに豊かに有効なものとするため、一般からの研究公募を実施している。本会合は米国カリフォルニア工科大学で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データの改善結果を報告した。

4) 第5回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2013年6月)

本会合は横浜シンポジウムで、環境省、NIES、JAXAの主催で行われ、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

5) GOSATサイエンスチーム会合における研究成果の発表(2013年10月)

環境省、NIES、JAXAによって設置され定期的に開催されているGOSATサイエンスチーム会合で、本推進費の研究成果である航空機観測データを用いた検証解析について、情報を提供し、議論を行った。

6) 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)定常運用終了審査会における本推進費の成果の活用(平成26年2月14日)

温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)定常運用終了審査会が行われ、環境省、NIES、JAXAの作成した資料を用いて発表が行われた。本研究の研究成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた成果が報告された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 第6回研究公募課題代表者会合での国際アピール(2014年6月)

本会合はつくば市つくば国際会議場で、環境省、NIES、JAXAの主催で行われる予定で、本研究の成果である解析アルゴリズムと参照値の改良結果を用いて再処理された「いぶき」データを用いた研究成果が報告される予定である。

今後、GOSATプロジェクトの研究活動及び関連業務を通じ、更に一層成果の広報・普及に努める予定である。

6. 国際共同研究等の状況

平成23年度、本推進費の研究経費でニュージーランド国立大気水文研究所ローダー大気観測所を訪問し、Vanessa Sherlock氏とBen Liley氏と、地上設置フーリエ変換分光計のデータ解析、スカイラジオメーターのデータ取得に関する打合せを行った。

地上設置フーリエ変換分光計による温室効果ガス濃度観測網ネットワーク (Total Carbon Column Observing Network)に参加し、Sagaサイトとして佐賀に地上設置フーリエ変換分光計を設置運用し、TCCONデータを作成しTCCONに提出している。また、TCCON会議に参加し、Sagaサイトの近況報告、及び技術情報交換等を行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. Inoue, I. Morino, O. Uchino, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, T. Yokota, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. P. Tans, A. E. Andrews, S. C. Biraud, T. Tanaka, S. Kawakami, and P. K. Patra: Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 9771-9788 (2013)
 “Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data”

<査読付論文に準ずる成果発表> (対象：社会・政策研究の分野)

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 川上修司、大山博史、塩見慶、田浦朝陽、深町拓也、奥村浩、新井康平、田中智章、森野勇、内野修: 日本気象学会2011年度秋季大会(2011)
 「GOSATデータ検証のための地上高分解能FTSによる二酸化炭素およびメタンの気柱量の長期観測」
- 2) O. Uchino, I. Morino, Y. Yoshida, N. Kikuchi, M. Inoue, K. Nakamae, T. Yokota, D. Wunch, P. Wennberg, G. Toon, J. Notholt, V. Sherlock, B. Liley, D. Griffith, S. Kawakami, H. Ohyama, T.

- Nagai, T. Sakai, K. Arai, H. Okumura: EGU General Assembly 2012 (2012)
 “Advanced validation of the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ at TCCON and prioritized observation sites”
- 3) H. Ohyama, S. Kawakami, T. Fukamachi, K. Arai, C. Taura, H. Okumura: TCCON meetings (2012)
 “Status of Saga site”
- 4) S. Kawakami, H. Ohyama, K. Shiomi, F. Fukamachi, C. Taura, K. Arai, H. Okumura: International Symposium on Remote Sensing 2013 (2013)
 “Observations of Carbon dioxide and Methane column amounts measured by high resolution FTIR at Saga in 2011-2012”
- 5) T. Sakai, O. Uchino, I. Morino, T. Nagai, S. Kawakami, H. Ohyama, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Arai, H. Okumura, Y. Takubo, K. Kawasaki, T. Akaho, T. Shibata, T. Nagahama, Y. Yoshida, N. Kikuchi, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, T. Yokota: The 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (2013)
 “Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”
- 6) I. Morino, T. Matsuzaki, H. Ikegami, H. Ohyama, N. Yokozeki: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)
 “Status of Tsukuba and Rikubetsu TCCON sites”
- 7) O. Uchino, I. Morino, M. Inoue, Y. Miyamoto, Y. Yoshida, N. Kikuchi, K. Nakamae, T. Yokota, D. Wunch, C. M. Roehl, P. O. Wennberg, G. C. Toon, J. Messerschmidt, T. Warneke, J. Notholt, N. M. Deutscher, D. W. T. Griffith, V. Sherlock, B. Connor, J. Robinson, R. Sussmann, M. Rettinger, P. Ahonen, P. Heikkinen, E. Kyro, J. Mendonka, K. Strong, F. Hase, S. Dohe, S. Kawakami, H. Ohyama, T. Nagahama, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, C. Sweeney, P. Tans, T. Sakai, T. Nagai, H. Okumura, K. Arai, B. Liley, T. Shibata: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)
 “Status of GOSAT SWIR Level 2 XCO₂ and XCH₄ data”
- 8) H. Ohyama, S. Kawakami, T. Fukamachi, K. Arai, H. Okumura: NDACC IRWG/TCCON Meeting 2013 (2013)
 “Status of Saga site”
- 9) 井上誠、森野勇、内野修、宮本祐樹、佐伯田鶴、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、S. C. Biraud、田中智章、川上修司、TCCON partners: 第19回大気化学討論会 (2013)
 「TCCONデータと航空機観測データを用いたGOSATプロダクトの検証ーバイアスのパラメータ依存性とその補正手法の検討ー」
- 10) 森野勇、井上誠、内野修、中前久美、菊地信弘、吉田幸生、横田達也、町田敏暢、澤庸介、松枝秀和、C. Sweeney、P. P. Tans、A. E. Andrews、S. C. Biraud、田中智章、川上修司、酒井哲、永井智広、内山明博、山崎明宏、大山博史、新井康平、奥村浩、柴田隆、長濱智生、B. Liley、V. Sherlock、J. Robinson、TCCON partners: 第19回大気化学討論会 (2013)
 「GOSAT TANSO-FTS SWIRによる温室効果ガスの観測」
- 11) I. Morino, T. Sakai, T. Nagai, A. Uchiyama, A. Yamazaki, S. Kawakami, H. Ohyama, K. Arai, H.

Okumura, T. Shibata, T. Nagahama, N. Kikuchi, Y. Yoshida, B. Liley, V. Sherlock, J. Robinson, O. Uchino, T. Yokota: 2013 AGU Fall Meeting (2013)

“Impact of aerosols and cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂ and CH₄ inferred from ground-based lidar, skyradiometer and FTS data at prioritized observation sites”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による温室効果ガスの全球観測から分かったこと（平成25年8月6日、佐賀大学本庄キャンパス、観客 25名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKニュース（佐賀放送局）（平成25年8月6日、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」による温室効果ガスの全球観測からわかったことについて、1分30秒ほど紹介）
- 2) 佐賀新聞（平成25年8月7日、朝刊、「予測精度の成果報告、衛星いぶき参画の佐大」）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Study on Precision Improvement of Greenhouse Gas Concentrations Obtained by Analysis of the "IBUKI" Observational Data

Principal Investigator: Isamu MORINO

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506,
JAPAN
Tel: +81-29-850-2515 / Fax: +81-29-850-2219
E-mail: morino@nies.go.jp

Cooperated by: Meteorological Research Institute (MRI); Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

[Abstract]

Key Words: Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT, Carbon dioxide, Methane, Retrieval analysis algorithm, Validation, Aerosol, Cirrus, Lidar, Radiometer, High-precision measurement of greenhouse gases

Column-averaged dry air mole fractions of carbon dioxide and methane (X_{CO_2} and X_{CH_4}) have been retrieved globally from the SWIR spectra observed with GOSAT TANSO-FTS. The GOSAT X_{CO_2} and X_{CH_4} data (GOSAT data) in the previous version (Ver. 01.xx.) had biases of -8.85 ppm (-2.3%) for X_{CO_2} and -20.4 ppb (-1.2%) for X_{CH_4} , evaluated by comparing with those obtained by ground-based high-resolution FTS at the Total Carbon Column Observing Network (TCCON) sites.

Some factors for these error characteristics (e.g., solar irradiance database, handling of aerosol scattering) were identified by sensitivity analysis and evaluation of a prior dataset based on the Tsukuba case study and corrected in a revised version of the retrieval algorithm (Ver. 02.xx). The improved GOSAT data showed smaller biases (-1.48 ppm for X_{CO_2} and -5.9 ppb for X_{CH_4} , respectively) than those of the Ver. 01.xx in comparison with the TCCON data.

Although GOSAT Ver. 02.xx data shows much smaller biases than Ver. 01.xx, time series of the differences between GOSAT data and TCCON/aircraft data exhibit seasonal variations and annual trends. Therefore, we attempted to conduct correlation analysis between the GOSAT biases and the simultaneously retrieved auxiliary parameters, and corrected the GOSAT data by a multiple linear regression for four parameters, which are correlated with the GOSAT biases, to cancel out their correlations. The TCCON data were used as the reference values in this analysis. We compared the corrected GOSAT data with the aircraft data. The results showed smaller differences between the corrected GOSAT data and aircraft data.

To improve further the SWIR retrieval algorithm, we studied the impact of aerosols and cirrus on the GOSAT Ver. 02.11 data, using lidar, skyradiometer and FTS data at four prioritized observation sites of Tsukuba, Moshiri, Saga and Lauder.

The main findings are as follows:

1) The screening of GOSAT data by scattering in the 2 μm band eliminated some data showing good agreement with the FTS data when thin cirrus clouds were present, suggesting that the amount of GOSAT data could be increased by a retrieval algorithm taking into account thin cirrus clouds.

2) A large difference was found between GOAST and FTS data when a dense aerosol layer was present in the atmospheric boundary layer over Saga on May 29, 2012.

3) The stratospheric aerosol, increasing after 2008 due to large volcanic eruptions, has non-negligible impact on the GOSAT data.