

温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT)
搭載
GOSAT センサ (TANSO)

研究公募
(Research Announcement)

添付資料 B

GOSAT/TANSO 校正・検証計画および処理アルゴリズム概要

B-1 GOSAT/TANSO 校正計画

B-1.1 校正計画の概要

校正とは、標準プロダクトであるレベル 1 プロダクトを対象として、センサの特性を明確にするとともに、輝度、幾何、分光特性、画質等が、目標精度内にあることを確認するための評価である。その評価手法は、

- ・ 地上試験による性能評価（打上げ前：地上試験データの利用）
- ・ 軌道上校正（打上げ後：校正モードデータの利用）
- ・ 代替校正（打上げ後：観測データ等の利用）

により実施される。

また、校正精度向上のための校正係数の改定、あるいは、補正用レベル 1 処理アルゴリズムは地上処理システムに反映され、レベル 1 プロダクトはバージョンアップされる。

B-1.2 校正スケジュール

地上試験によるセンサ性能評価は、打上げの約 1 年前までに完了する。打上げ後の初期の校正評価は、試験運用段階（打上げ後 3～6 ヶ月）に実施する。校正済みレベル 1 プロダクトは打上げ後 6 ヶ月を目標に Ver.1 としてリリースされる。初期の校正においてはデータが 1 年分に満たないため、データ収集におけるマッチアップ条件等には工夫を要する。

B-1.3 打上げ前の性能評価

TANSO-FTS、および、TANSO-CAI の主要機能、性能は打ち上げ前に評価を実施する。主に、以下の項目について地上試験による評価を実施する。

(1) 感度および SNR

光電変換性能の指標である FTS-SWIR バンドおよび CAI の感度、SNR については、値付けされた積分球を用いて校正および評価を行う。積分球の値付けは、垂鉛などの定黒体炉より、比較分光計を用いて行う。FTS-TIR バンドの感度校正、SNR の評価については、熱真空試験時に、空洞黒体を用いて実施する。

(2) 偏光感度

FTS-SWIR バンドおよび CAI の偏光感度は、以下の手法により実施する。まず、積分球の出射部に偏光板を設置し、直線偏光光をつくる。その直線偏光光を、後段に設置した 1/2 波長板を回すことにより位相を回転させる。回転する直線偏光光を入射することにより、偏光感度を取得する。FTS では、ポインティング機構部の反射鏡およびフーリエ干渉計機構部のビームスプリッタで主に偏光が生じる。

(3) 装置関数

分光分解能の指標である FTS の装置関数は、バンド毎に拡散された波長可変レーザ光源による光を導入し取得する。また、CAI は単色光を導入して分光特性を取得する。

(4) 視野および MTF

光学性能の指標である、FTS および CAI の視野、および、CAI の MTF は、コリメータに点光源およびスリット光源を設置して評価する。同時に、センサ基準軸に対するアライメント、および、バンド間、ピクセル間のアライメントも評価する。

また、FTS の内部には視野を確認するために高分解能の視野モニタカメラ (CAM) が搭載されている。CAM の視線方向は FTS の視線方向に一致しており、CAM もセンサ基準軸に対してアライメントを評価している。

B-1.4 打上げ後の校正

打上げ後の校正は、軌道上校正と代替校正により実施される。軌道上校正は、校正モードデータを利用することにより実施され、代替校正は主に観測データを利用することにより実施される。

軌道上校正で取得される校正モードデータについての詳細は、添付資料 C 「GOSAT 運用方針及び TANSO 基本観測計画」の「C-2.4.3 校正モードでの運用」に記載されている。本運用方針に従って校正モードデータは取得され、レベル 1 処理、トレンド評価等に使用される。

B-1.4.1 TANSO-FTS (SWIR バンド) の校正

TANSO-FTS の打上げ後の校正は、輝度、幾何、分光特性の 3 つの観点から評価を実施する。SWIR バンド (B1~3) の P/S 偏光バンド毎に、以下の校正項目についての評価を実施する。

(1) 輝度評価

(a) 感度校正

SWIR バンドの軌道上校正は、毎周回の拡散板による太陽照度校正、および、TIR バンドと同時に深宇宙校正を実施する。レベル 1 処理においては、地上試験データから得られた感度校正係数を用いて観測値を輝度値に変換することを予定している。また、太陽照度校正データ、および、後述する月校正データの解析、代替校正結果により感度校正係数は改定される。

(b) 月校正

月面の太陽反射光を校正源として、SWIR バンドの全光学系効率の校正を目的とする。月校正は、校正時に月の面平均輝度が極大となる周回 (月齢 14.8 ± 0.1 の時期) に行う。月校正時は、FTS 視野内に月が完全に入るように衛星を月指向し、FTS のポインティング機構により 2 分以上指向する。

月は輝度変化率で 10^{-7} /年の非常に安定した反射体である。MODIS, ASTER 等の紫外～短波長赤外バンドを観測するセンサの月校正による感度トレンド評価結果では 1%未満の安定度があると報告されている。評価方法を以下に示す。

- ・ 安定した光源を用いた 1 回毎の感度トレンド評価
- ・ ROLO データ (USGS 月校正用反射率 DB) を用いた絶対感度の評価

(c) リニアリティ

FTS 光学系に輝度レベルの異なる一様な光を入射した観測データを用いて、光学系応答のリニアリティを温度依存性も含めて確認する。一様なターゲットの候補を以下に挙げる。

- ・ オフセット：深宇宙校正
- ・ 低輝度：海洋、雪氷 (B2-3)
- ・ 中輝度：森林
- ・ 高輝度：太陽照度校正、雪氷 (B1 のみ) ,乾燥塩湖 (B1 のみ) ,砂漠、プレーヤ

(d) 絶対輝度

代替校正実験、もしくは、良く校正された他衛星センサや航空機センサとの同期観測実験によって得られる、地表面放射輝度と、FTS で観測される放射輝度が等価になるように、センサ輝度モデルの評価を行い、校正係数を算出し、絶対輝度の精度評価を実施する。

評価手法は、

- ・ 現場データを用いた手法
 - ・ 全球データを用いた手法
- に大別される。

① 現場データを用いた手法

代替校正実験により、ある地点の詳細な物理パラメタ (地表面反射率等) を、精度良く同期して取得することにより、計算される大気上端輝度を、GOSAT 観測輝度と比較し、評価する。観測波長帯が、CO₂、CH₄等の吸収バンドのため、検証実験も同期することが望ましい。

② 全球データを用いた手法

良く校正された他衛星センサのデータを利用して、同期したデータを抽出して輝度を比較する。輝度は観測時刻の違いや、観測ジオメトリの違いに影響されるため、直接比較しても合わない場合がある。その場合は、地表面反射率等の物理パラメタを利用して計算される大気上端輝度を、GOSAT 観測輝度と比較し、評価する。

現在、利用する他衛星センサのデータとしては、Aqua/MODIS、および、OCO 等を予定している。

(e) センサ間の相対輝度

1.6 μ m 帯は、FTS バンド 2、および、CAI バンド 4 の双方で観測している。センサ間の相対的な輝度精度を、ゲイン毎に時間変動、温度依存性を評価する。

(2) 幾何評価

(a) 指向精度

FTS 内部には視野を確認するための CAM が搭載されている。FTS と CAM のアライメントは既知であるとする。CAM は VGA モードで約 30km の視野、約 100m の空間分解能を持つ。輝度の明暗境界が明瞭で、その緯経度が既知である場所を地上基準点 (GCP) として、CAM 画像から FTS の幾何精度を評価する。評価に使用するシーンを以下に挙げる。

- ・ 陸海境界線（半島や岬などの突端部を含む海岸線をまたぐシーン）
- ・ 島（FTS10km 視野内に島が収まるシーン）

(b) 指向安定度

インターフェログラム取得中（通常 4sec）における、ポインティングミラーの指向精度について、モニタカメラを動画モードでデータ取得することによって評価する。評価に使用するシーンを以下に挙げる。

- ・ 陸海境界線（半島や岬などの突端部を含む海岸線をまたぐシーン）

(c) センサ間幾何精度

FTS と CAI 間の幾何精度を評価するために、CAM 画像、および、CAI 画像における共通の GCP のずれを評価する。また、センサ間で共通の波長を観測しているため、CAI バンド 4（1.5km 分解能）画像上で、FTS バンド 2（10km 分解能）の位置を輝度マッチングで探索することにより、CAI に対する FTS の幾何精度を評価することを検討している。

(3) 分光特性評価

(a) 装置関数

1.55 μm 半導体レーザー光を拡散板に照射してその拡散光を観測し、バンド 2 の装置関数の評価を行う。

(b) 波長精度

既知の大気吸収線の波長位置を用いて、波長シフト量の評価を行う。

(c) 偏光感度

偏光特性が既知であるターゲットの P/S 偏光バンド間の輝度比について、以下のデータを用いて評価を行う。

- ・ 太陽照度校正（太陽自然光は無偏光）

(d) SNR

一様な高輝度領域をターゲットとして、バンド検出器毎、ゲイン毎における SNR の評価を行う。以下に挙げるデータについて蓄積を行い、評価を行う。

- ・ 太陽照度校正データ
- ・ 砂漠、雪氷（B1 のみ）

B-1.4.2 TANSO-FTS（TIR バンド）の校正

(1) 輝度評価

(a) 感度校正

TIR バンドの軌道上校正は、深宇宙放射（3K 輝度温度相当）および搭載黒体（約 290K 輝度温度相当）を利用することで実施する。レベル 1 校正処理アルゴリズム案について以下に挙げる。

- ・ 搭載黒体を高輝度、深宇宙放射を低輝度の両端とし、高次式でフィッティングする。高次項の係数は地上試験で得られた値を用いる。

- ・ 装置内部の背景放射の影響を受けるので、校正に使用するデータの組合せやセンサ内のモニタ温度等に注意して、位相補正を考慮する。

(b) リニアリティ

FTS 光学系に輝度レベルの異なる一様なターゲットの光を入射した観測データを用いて、光学系応答のオフセット、および、リニアリティを温度依存性も含めて確認する。使用するデータの候補を以下に挙げる。

- ・ オフセット：深宇宙校正
- ・ 低輝度：雪氷
- ・ 中輝度：森林、海洋
- ・ 高輝度：搭載黒体校正、砂漠、プラーヤ

(c) 絶対輝度

SWIR バンドの絶対輝度と同様に、

- ・ 現場データを用いた手法
- ・ 全球データを用いた手法

により、絶対輝度の評価を行う。

① 現場データを用いた手法

気温、水蒸気等の大気プロファイルを取得し、また、海面水温をブイで測定している地点について、高精度での評価を実施する。

② 全球データを用いた手法

良く校正された他衛星センサのデータ（レベル 1 相当）を利用して、同期したデータを抽出して輝度を比較する。また、全球レベルで精度の整った、海面水温データ、気象データ等を用いて海洋上の広範囲において、校正精度の評価を実施する。

現在、利用する他衛星センサのデータとしては、Aura/TES、および、Aqua/AIRS 等を予定している。また、データベースとしては NOAA レイノルズ海面水温等を予定している。

(2) 幾何評価

FTS の SWIR バンドおよび TIR バンドは同光学系により取得されているため、SWIR バンドによる幾何補正後に、TIR バンドの幾何精度の評価を行う。

(3) 分光特性評価

(a) 波長校正

既知の大気吸収線を観測し、波長シフトを評価する。

(b) SNR

一様な高輝度領域をターゲットとして、ゲイン毎における SNR の評価を行う。以下に挙げるデータについて蓄積を行い、評価を行う。

- ・ 搭載黒体
- ・ 砂漠

B-1.4.3 TANSO-CAI の校正

(1) 輝度評価

(a) 感度校正

CAI は軌道上における感度校正について特別な機能を持たないので、地上試験で得られる感度校正式を用いて校正を行うが、オフセット（暗時出力）についてのみ以下のデータ取得を行う。

- ・ 夜間観測
- ・ 暗時素子

(b) 月校正

CAI の月校正は、FTS の月校正と同周回において実施する。CAI の 1 次元アレイ検出器のうち、月光が入射する素子の感度校正を行うことを目的とする。月校正時は、CAI 画像取得のために Y 軸方向に 0.1deg/sec 以下の書く速度で月の全面を含む±2.55deg 以上の回転を 2 往復（4 走査）連続で行う。

(c) リニアリティ

CAI 光学系に輝度レベルの異なる一様な光を入射した観測データを用いて、光学系応答のリニアリティを温度依存性も含めて評価する。一様なターゲットの候補を以下に挙げる。

- ・ オフセット：夜間観測、暗時素子
- ・ 低輝度：海洋、雪氷（B4 のみ）
- ・ 中輝度：森林
- ・ 高輝度：雪氷（B1-3）、乾燥塩湖（B1-3）、砂漠、プレーヤ

(d) 絶対輝度

FTS と同様に、

- ・ 現場データを用いた手法
- ・ 全球データを用いた手法

により、絶対輝度の評価を行う。

① 現場データを用いた手法

全世界に展開されているエアロネット、および、スカイネットのエアロソルデータを利用して、できるだけ多くの地点において最適化することにより校正係数を決定する。

② 全球データを用いた手法

良く校正された他衛星センサのデータ（レベル 1 相当）を利用して、同期したデータを抽出して輝度を比較する。また、全球レベルで精度の整った、他衛星センサのデータから抽出された物理量（レベル 2 相当）や、それに順ずるデータベース、具体的には、地表面反射率、エアロソルパラメタ、気候値等を用いて、校正精度の評価を行う。

現在、利用する他衛星センサのデータとしては、Aqua/MODIS、および、Aura/OMI 等を予定している。または、データベースとしては、GOME、TOMS の地表面反射率等を予定している。

(2) 幾何評価

(a) 指向精度

輝度の明暗境界が明瞭で、その緯経度が既知である場所を地上基準点 (GCP) として、CAI 画像から幾何精度を評価する。評価に使用するシーンを以下に挙げる。GOSAT で使用する GCP データベースは、海岸線データベース GSHHS から予め選定しておく。

- ・ 陸海境界線 (半島や岬などの突端部を含む海岸線をまたぐシーン)

(b) バンド間レジストレーション

前述(a)により指向精度をバンド毎に評価して、そのずれ量を相対的に決定する。

(3) 画質評価

(a) 画素間感度校正

広範囲に一様かつ高輝度なターゲットを用いて、各ピクセル方向にデータを蓄積し、その平均値を算出し、ライン方向に平均値を比較して画素間感度を補正するための係数を算出する。観測刈幅が 750-1000km あるため、一度に校正することは不可能である。数ヶ所のサイトが必要となる。ターゲットの候補を以下に挙げる。

- ・ 雪氷 (B1-B3)、砂漠

(b) MTF

エッジスペクトルや点スペクトルを抽出するために、海岸線等のエッジ、あるいは、島等の点源を観測した幾何補正済み画像を用いて MTF を算出し、光学特性における空間分解能に関して評価する。評価に使用するシーンを以下に挙げる。

- ・ 陸海境界線
- ・ 島

(c) SNR

一様な高輝度領域をターゲットとして、バンド検出器毎、ゲイン毎における SNR の評価を行う。以下に挙げるデータについて蓄積を行い、評価を行う。

- ・ 雪氷 (B1-3)、乾燥塩湖 (B1-3)、砂漠、プラーヤ

B-1.5 校正準備

(1) 現場データを用いた校正手法の検討

TANSO 観測データ、および、地上観測データを用いた代替校正においては、一様性 (FTS の 10km 視野を確保)、時間安定度、晴天率、アクセスの良さを考慮して、実験サイトを選定する必要がある。それらを満たすサイト候補地として、

- ・ 米国ネバダ Railroad Valley プラーヤ
- ・ 豪州南オーストラリア Strzelecki 砂漠 (Tinga Tingana)

について検討を行った。

Railroad Valley は長年 Landsat, MODIS, ASTER 等の代替校正サイトとしてアリゾ

ナ大学が定常的に利用している場所であり、OCO も校正実験サイトとして検討している。Strzelecki 砂漠内の Tinga Tingana は CSIRO がエアロネットを設置している場所であり、サイトの一様性が高い。

図 B-1-1 に、Railroad Valley、および、Tinga Tingana の MODIS 画像を示す。赤丸は校正サイトをポインティングしたときにおける FTS の 10km 視野を表す。画像は約 30km 四方である。Railroad Valley は FTS の 10km 視野に対して一様なエリアがぎりぎりであるのに対し、Tinga Tingana は一様性が高い。図 B-1-2 に、2004 年の晴天率について示す。両サイトとも冬季の晴天率は落ちる。打上げ時期も考慮して、南北両半球にサイトを確保しておくことが望ましい。実施については検討中である。

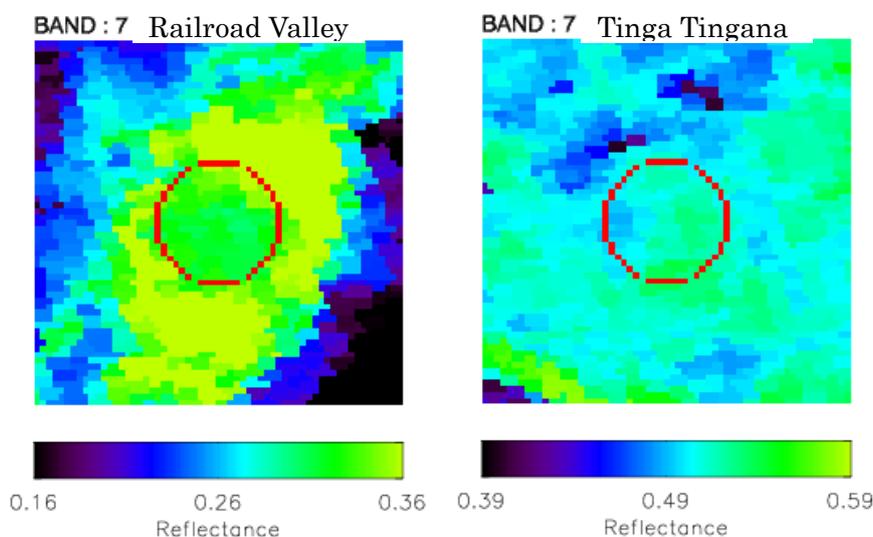


図 B-1-1 校正サイト候補地の MODIS バンド 7 (2.1 μ m) 画像

(2) 全球データを用いた校正手法の検討

他衛星センサのデータを用いた相互校正に適切なサイトを選択するために、既存の全球データを利用してサイトの空間一様性や、時間安定度等の評価を実施している。

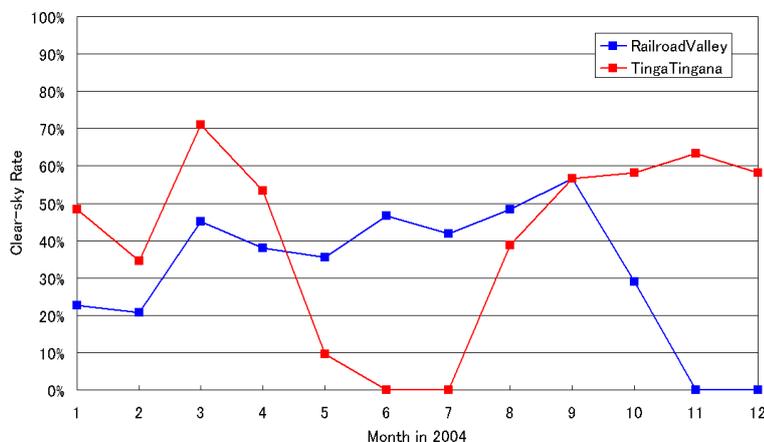


図 B-1-2 校正サイト候補地の晴天率 (2004 年の Aqua/MODIS データ)

図 B-1-3 に、MODIS バンド 7 (2.1 μm) の 5x5 ピクセル (約 25km 四方) 内の平均反射率、および、25 サンプルの標準偏差を示す。使用したデータは、Aqua+Terra の MODIS 全球反射率データ (16 日平均データ) である。サハラ砂漠やルブアルハリ砂漠等に一樣な反射率を有するサイトが存在する。また、この波長帯は土壤水分の影響を多分に受けて反射率が下がるため、高反射率サイトは砂漠や裸地に限られる。

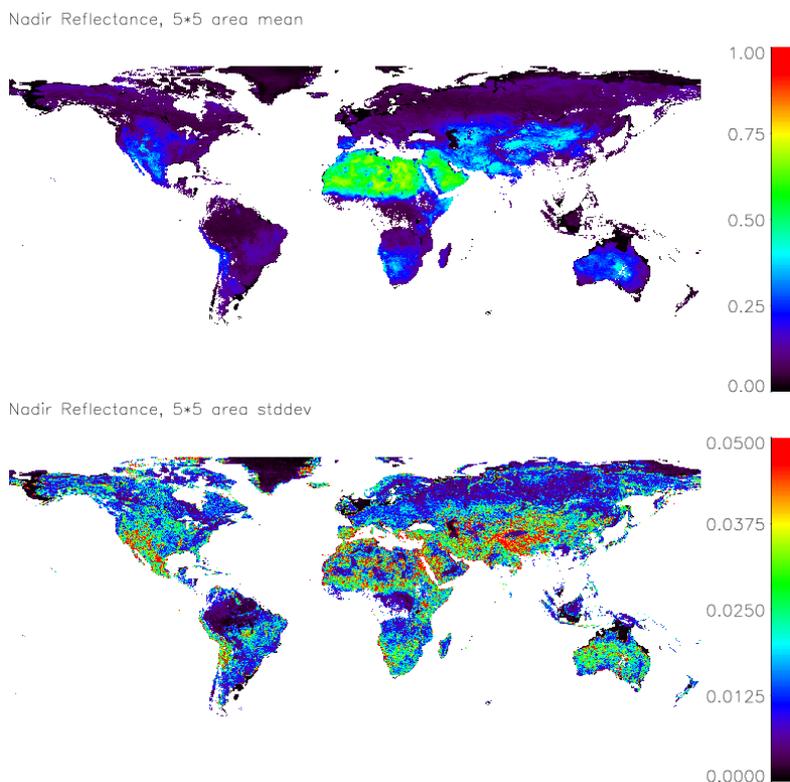


図 B-1-3 MODIS バンド 7 (2.1 μm) 地表面反射率データによる空間一様性調査
 上図：5×5 ピクセル (約 25km) の平均反射率 下図：25 サンプルの標準偏差

図 B-1-4 に、サハラ砂漠の地表面反射率 1 年平均 (約 22 サンプル)、および、1 年間の標準偏差を示す。図中の x 地点、Egypt1(N27.12, E26.10)、および、Algeria3(N30.32, E7.66)は、POLDER の代替校正サイトに利用された地点である。図 B-1-5 に、Egypt1 および Algeria3 の 1 年間の反射率時系列データを示す。POLDER が使用しているサイトは時間安定度が高く、また、図 B-1-3 から空間一様性が高いサイトを選んでいることが解る。

このような既存データの解析を通して、TANSO-FTS、および、CAI の解像度や観測スワッチに合わせた、適切なサイトの選択、および、データ収集を行う計画である。

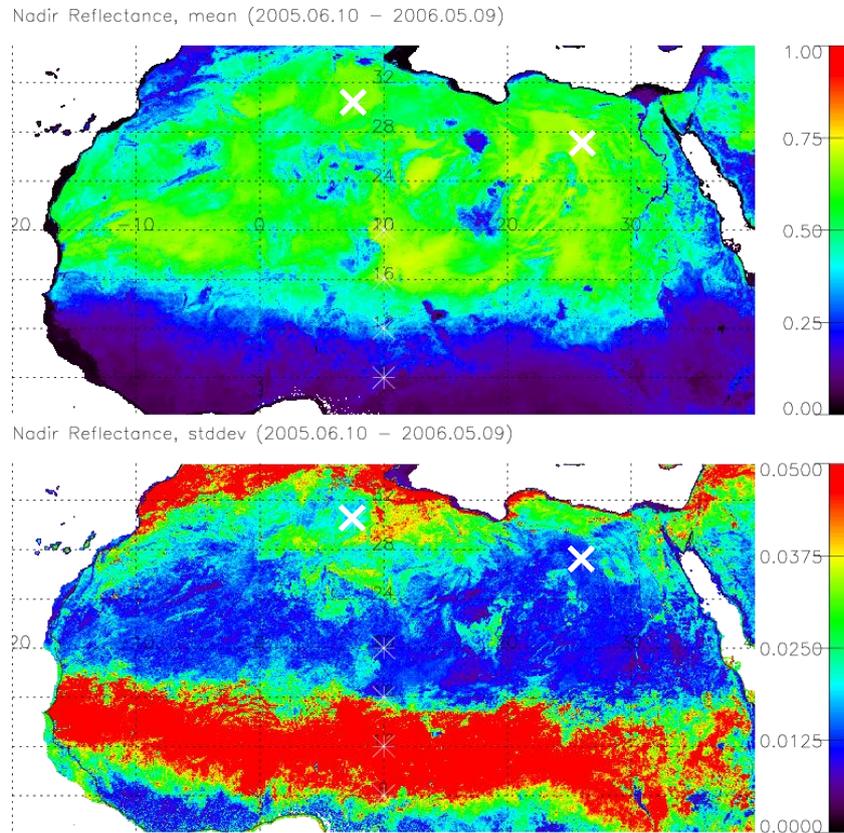


図 B-1-4 MODIS バンド 7 (2.1 μ m) 地表面反射率データによる時間安定度調査
上図：1 年平均値 (約 22 サンプル) 下図：標準偏差

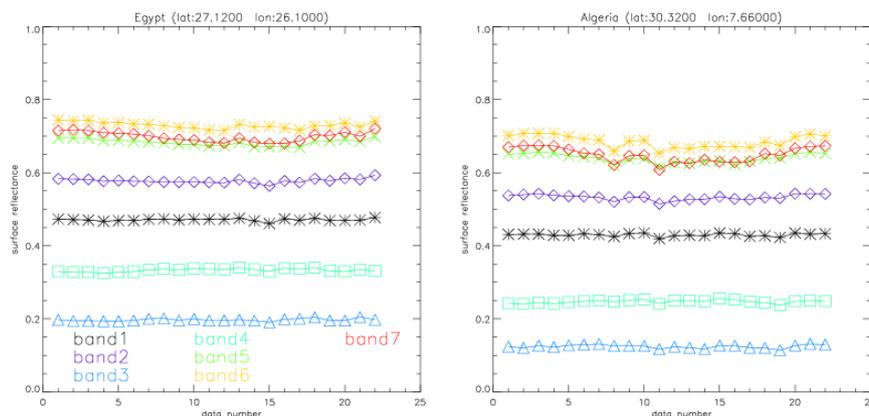


図 B-1-5 特定地点における地表面反射率の 1 年間時系列
左図：Egypt1 サイト 右図：Algeria3 サイト

B-2 GOSAT/TANSO 検証計画

B-2.1 検証の基本的な考え方

GOSAT プロダクトの「検証 (validation)」とは、研究公募本文の表 1 に示す L2、L3、L4 プロダクトの不確かさ* (uncertainty) をこれらとは独立に得られたより不確かさの小さいデータを用いて評価することを言う。これに対し、同等の不確かさの観測データあるいはモデルも用いて推定されたデータによる評価を「比較」と言い、ここでは検証と区別する。いずれも、GOSAT プロダクトのデータ質の評価 (data quality assurance) を目的とするが、同時にデータ処理アルゴリズムの妥当性を評価する意義を有しており、必要に応じてアルゴリズムの改訂に反映される。

なお、L1 プロダクトデータの評価は「校正 (calibration)」と言われ、JAXA が中心になって行う。特に、輝度スペクトルの校正 (絶対輝度、リニアリティ、オフセット、波長校正、装置関数、SNR など) が重要である。

TANSO-FTS の観測から得られた輝度スペクトルから CO₂、CH₄ のカラム量導出に必要な分光パラメータや太陽のフランフォーファー線はアルゴリズム開発の段階において評価し使用されているので、ここでは対象としない。

検証計画の策定にあたっては、検証観測や解析作業に充てられる人員や予算に限りがあるために、検証項目に優先順位を設定する必要がある。

GOSAT の打上げ前は、アルゴリズムの妥当性を評価することが重要である。これを「アルゴリズム検証」と言う。アルゴリズム検証に必要な高所設置および航空機搭載 FTS による観測実験はこれまでに行われている。アルゴリズムの改良のためには今後も観測実験を実施することが必要と考える。

打上げ後についても、プロダクト検証に加えて、誤差要因に関連するパラメータ (エアロソルの光学的特性等) の妥当性を評価することが重要である。これを「パラメータ検証」と言う。

GOSAT の社会的貢献は高次プロダクトの方が大きいと言える。しかしながら、高次プロダクト作成の基礎となる低次プロダクト (L2) の検証が第一義的に重要である。したがって、低次プロダクトの検証の後に高次プロダクトの検証を行うのが望ましい。

検証および比較すべきプロダクトの優先順位を以下のとおりとした。

- (1) L2 SWIR CO₂ カラム量、L2 SWIR CH₄ カラム量
- (2) L2 TIR CO₂ 濃度プロファイル、L2 TIR CH₄ 濃度プロファイル
- (3) L3 SWIR CO₂ カラム量全球分布、L3 SWIR CH₄ カラム量全球分布
- (4) L4A CO₂ フラックス全球分布
- (5) L4B CO₂ 濃度全球分布

* 不確かさ = $\sqrt{(\text{確度})^2 + (\text{精度})^2}$

$$\left(\text{uncertainty} = \sqrt{(\text{accuracy})^2 + (\text{precision})^2} \quad \text{accuracy} = \text{bias} \right)$$

検証データの収集に係る基本方針としては、GOSAT の観測対象領域が全球にわたり、種々の地表面条件、気象条件、大気条件の下での観測を行うことから、すでに世界各地に展開され定常的に取得されている多様な観測データの利用を優先することとする。その際、

複数の特定観測地点のスーパーサイト化（検証に必要な観測機器を設置し重点的・定常的に観測を行うサイト）を図り、プロダクト検証・アルゴリズム検証に必要なデータを収集する。また、種々の気象条件下での航空機観測を含んだキャンペーン観測を実施する。

検証の対象とするデータは、以下に示す地域・気象条件下で取得されたデータとする。

- a. 陸域クリアスカイ
- b. 海域クリアスカイ（サングリント観測）
- c. 陸域で薄い巻雲・エアロゾルがある場合
- d. 海域で薄い巻雲・エアロゾルがある場合（サングリント観測）

※厚い雲に覆われた場所は対象としない。

なお、検証においては時空間的一致基準を考慮して行う必要がある。

実際の検証解析作業のうち、基本的な検証解析とアルゴリズム改訂への反映に関する業務は GOSAT プロジェクトの一環として NIES において実施する。その他、サイエンスチームメンバー、RA による研究者、一般利用者などによる検証解析に係る研究が実施されることを期待する。

B-2.2 アルゴリズム検証のための観測実験

衛星打上げ前に、衛星観測を模擬した実験、すなわち高所設置や航空機搭載 FTS（衛星搭載類似センサ）によって地上からの太陽反射光を観測し、CO₂ カラム量導出のアルゴリズムの検証を行う必要がある。

(1) 高所定点観測

NIES はこれまでに筑波山の山頂付近（800m）に TANSO-FTS に類似の FTS を設置した観測実験を 2005 年と 2006 年の 2 回実施している。これらの観測実験では FTS 観測から算出された CO₂ の濃度を検証するために、麓の農地付近から高度 3,000m まで CO₂ の濃度計を搭載したセスナを飛ばし、FTS の結果と濃度測定結果を比較した。その結果、FTS により高度 3km 以下の気層の CO₂ カラム量が約 1%の精度で観測できることが確認された。したがって、今後もこのような観測実験をいろいろな気象条件で実施し、精度を向上させることが重要である。

(2) 航空機実験

高高度を飛行する航空機に搭載した FTS による観測と航空機による CO₂ 濃度の直接観測を同時に行うことで、アルゴリズムの検証を行う。この手法は、高所定点観測に比べると航空機の振動の問題はあるものの、より高高度から衛星と同じように直接下方視観測できるメリットがある。

B-2.3 SWIR と TIR プロダクト検証

(1) SWIR 観測による CO₂ および CH₄ のカラム量の検証

CO₂ および CH₄ のカラム量の検証に用いる観測装置は、十分に確立された技術に基づいたもので、そのデータ質は保証され、バイアスがなく、1%程度より優れた観測精度を有することが必須である。カラム量の直接的な観測手段としては、太陽直達光を光源とする吸収法がもっとも優れており、現在利用可能な測器の中では地上設置の高分解能 FTS が適している。FTS による観測は 10 分間程度の太陽直達光があれば常時可能である。

TANSO-FTS のフットプリントは 10.5km と広く、観測誤差の観点からはその範囲内で

平坦で地表面被覆状態が一様な場所が検証対象とする観測点として望ましい。FTS 観測地点の中には高山地域の観測点も含まれているので、観測点の周辺環境の情報収集により、できるだけ平坦で誤差要因の少ない観測地点を選定する必要がある。

TANSO-FTS による導出値に顕著なバイアスがある、あるいは測定精度が一定程度を下回るとき、誤差要因を特定しデータ処理アルゴリズムの改良を行う必要がある。カラム量の導出に影響するパラメータとして、巻雲、エアロソル、地表面アルベド、気圧、気温、水蒸気、その他の気体濃度があるが、このうち、巻雲、エアロソルの影響が最も大きい。地表面アルベドは TANSO-FTS 観測データからリトリーバル解析により比較的高精度で得られ、また導出されたカラム量は地表面アルベドにさほど影響されないため、地表面アルベドの検証の優先度は下がる。また、気象要素（気圧、気温、水蒸気）は客観解析データを活用するため検証の優先度は高くない。

巻雲、エアロソルの測定のためには、光学的厚さや鉛直方向に平均化された粒径分布や複素屈折率を推定できるスカイラジオメータと巻雲やエアロソルの高度分布および球形・非球形の区別が可能な偏光ライダーが必要である。これらを FTS 観測地点に設置し同時観測することが検証戦略上重要である。

CO₂ カラム量の算出において、定期旅客航空機の離着陸時における高度分布の直接測定（あるいは試料採取と分析）データが有効である。ただし、地上から高度約 11km 程度までしか CO₂ の濃度プロファイルが観測できない。高度 11km より上空には、およそ 22% の CO₂ が存在するので、カラム量を導出するためには 11km 以上の量を精度よく推定あるいは何らかの方法で測定する必要がある。この高度領域の CO₂ 量の変動が 4% より小さければ、過去の実測値に基づくモデル気候値で代替できる。また、航空機で測定できない地表面から航空機の最低観測高度の濃度を把握するために地表での CO₂ 濃度の測定が必要である。さらに、巻雲、エアロソルの測定のため、検証サイト近傍でのスカイラジオメータとライダーの利用などが望ましい。なお、空港によっては大気汚染が著しい場合があるので検証に用いる際には観測地点と気象条件をよく吟味する必要がある。

CH₄ については、航空機観測（ボトルサンプリング）が行われており、データが利用できる可能性がある。また、大気球観測は 35km 付近まで最近のデータがあり、検証に有効であると考えられる。

サングリント観測は主として海洋上でなされるが、サングリント観測によるプロダクトの検証には、海岸線近くに設置された高分解能 FTS のデータや、海岸線付近上空を飛行する航空機観測で得られたデータなどで代替できる可能性がある。

地上測定の CO₂ および CH₄ のデータは WDCGG から得られるが、季節変動や空間代表性を考慮すれば、傍証に利用できる可能性がある。特に、南半球では濃度の季節変動が小さいため有効性が高く、場合によっては検証データにもなり得る。

研究的な検証として例えば、航空機で測定した複数の濃度プロファイルと地域大気輸送モデルを用いて観測域周辺の CO₂ 分布を合成（データ同化）し、GOSAT の観測地点に対応する地表面が平坦で一様なアルベドを持つ場所の上空の濃度プロファイルを求め、GOSAT のデータを比較する方法などが考えられる。ただし、この手法そのものの妥当性の検証が必要であるなど、解決すべき課題は多い。

検証データ収集の方針は以下のように考えている。

- ・複数の特定観測地点に必要な観測装置（高分解能 FTS、ライダー、スカイラジオメータ）を整備して重点的に観測を行う「観測地点の重点化」を行う。

- ・「観測地点の重点化」で網羅出来ない気象条件や地表面条件については、「航空機を含むキャンペーン観測」により検証を行うことも有効である。
- ・GOSAT の観測は全球にわたることから、定常的に得られている観測データ（既存地上高分解能 FTS、航空機観測データ、地上観測データ WMO WDCGG 等）を活用する。
- ・海域においてはサングリント観測によりカラム量が導出される。海域では陸域より濃度の変動が小さいため、風向を考慮して海の近くの陸域検証地点のデータが利用できる。また、島嶼や船舶における観測データを間接的な評価に用いることができる。

以上の方針に基づいて典型的な観測地点でのデータ取得を行うが、観測地点の選択の指標としては次のような分類が考えられる。

- ・緯度：低緯度、中緯度、高緯度
- ・水蒸気：多いところ、少ないところ
- ・アルベド：均一なところ、不均一なところ
- ・エアロゾル：変動のあるところ、変動があまりないところ

現在、地上 FTS で 10 ヶ所、航空機観測で 10 ヶ所程度を検証地点として確保できれば最低限の条件は網羅できると考えられる。ただし、検証の必須条件を満たす簡便な検証観測装置が開発されれば、多数展開を行う可能性はある。

各地点のデータについては、時空間変動を考慮した評価を行いプロダクトの不確かさを明らかにする。ただし、バイアスの評価には季節変動のないところで 3 ヶ月程度、一般には半年程度の時間が必要である。これらの評価を基に上記の条件を基準にグルーピングして品質保証を与える。これが難しい場合は、時空間変化を考慮したトラジェクトリ解析や地域 CO₂ 輸送モデルを用いた検証・解析を行うことが有効と考えられる。

次に具体的な観測およびデータ取得計画について述べる。

a) FTS 観測による検証

①地上高分解能 FTS による観測

国内複数地点において、地上設置の高分解能 FTS による定常観測を実施する。

検証においては、地上高分解能 FTS 観測データを TANSO-FTS の解析で用いるのと同じデータ処理アルゴリズム（放射伝達の式）を用いて解析を行い評価することも有効である。

②地上高分解能 FTS ネットワーク等のデータ利用

地上高分解能 FTS の観測ネットワークからデータを取得する。これらのデータについては、データ提供機関との直接交渉や RA に基づく研究協力などにより、データ利用できるよう調整を進める。

検証データを取得する地点の選定においては、TANSO-FTS のフットプリントが 10.5km と広いことから、その範囲内で平坦で地表面被覆状態が様な場所が誤差要因も少なく、初期段階の検証観測点として望ましい。

したがって以下の条件をもとに検証地点を選択していく。

- ・季節変動：小さい（南半球）→ 大きい（北半球）

- ・大気汚染：軽微 → 甚大
- ・地表面：単純 → 複雑

オプションとしては、

- ・サンダリント
- ・雪氷

③小型 FTS による観測

小型 FTS については、測定精度などのデータ質や運用安定性を評価した上で、移動観測が必要な場合には活用する。

b) 航空機観測および大気球観測による検証

①航空機観測データの利用

航空機搭載の CO₂ 濃度連続観測装置は水平飛行時だけでなく、離着陸（上昇・下降）時にも測定できるため、高高度レベルでの CO₂ 濃度の空間（水平）分布データと空港周辺の濃度プロファイルが得られる。

なお、航空機は高度約 10km の定高度飛行までの上昇時に約 100km、定高度飛行からの下降時に約 200～300km 水平移動することから、濃度の空間代表性などを解析時に考慮する必要があるが、これについては輸送モデルを用いた評価が可能である。また、空港周辺の大気下層は都市大気などにより高濃度になっている場合が多いことから、風向を考慮して利用可能なデータであるかどうかを判断する必要がある。さらに、航空機到達高度より上空の CO₂ 濃度の変動を評価する必要がある。大気球による成層圏の観測の知見によれば、荒く見積もっても 0.5% のカラム量変動にとどまることがわかっているが、今後詳細な検討を進めていく。

②大気球観測データの取得

大気球観測データは、航空機観測を行う範囲より上空の CO₂ カラム量の変動特性を把握するために過去のデータも含めて取得することが必要である。

c) その他

①小型気球による観測

現在研究開発中の小型気球用 CO₂ ゾンデについて、測定精度などのデータ質や運用安定性を評価し、費用等も含めて実用レベルに達していると判断出来れば、検証に利用する。

②小型分光測定装置による観測

現在研究開発中のファブリーペローエタロンについて、測定精度などのデータ質や運用安定性を評価し、費用等も含めて実用レベルに達していると判断出来れば、検証に利用する。

(2) TIR 観測による CO₂ および CH₄ プロダクトの検証

L2 TIR CO₂ および L2 TIR CH₄ プロダクトの検証には、SWIR CO₂ および SWIR CH₄ プロダクトの検証用に収集・取得したデータを活用する。さらに、気温、気圧、湿度のプロファイル、地上の射出率データを加えれば有効である。夜間のデータについては取得されたデータを可能な限り活用する。今後、TIR 関係者との調整を行い検証計画の策定を進

める。

なお、O₃濃度プロファイルは JAXA が内部で作成する研究プロダクトであるため、データ質の評価も JAXA により行われる。

(3) SWIR 観測に基づく CO₂および CH₄ カラム量の全球分布の比較

L3 プロダクトは、検証された L2 プロダクトを基に時間・空間平均操作により算出されるものであり、特段の評価を要しない。

(4) CO₂ フラックスの比較

L4A CO₂ フラックス全球分布や L4B CO₂ 濃度全球分布については以下の理由のため比較という位置づけとし、プロジェクトとして実施するのではなく研究として RA で行うことが望ましい。

- ・ L4A、L4B ともモデルによって推定される。
- ・ 輸送モデル自身の信頼性は絶対とは言えず、研究者間で議論されている。いくつかのモデルのアンサンブル平均を取れば比較が可能である。
- ・ フラックス観測は研究ベースであり、データ入手には多大な労力が必要である。
- ・ フラックス観測をモデルと比較するためにはスケールアップが必要であるが、これ自体が研究レベルである。
- ・ 海フラックスは交換係数に依存している。

L4A プロダクトは、全球を 64 の領域に分割し、領域毎の月平均の CO₂ のフラックスを推定したものである。

L4A プロダクトの観測データとの比較は、海域（緯度 5° × 経度 5°）についてはほぼフラックスが一様であると考えられるので、船舶による観測データの利用が有効である。

一方、陸域については、計算過程では、領域内のフラックス分布パターンを仮定して、緯度 1° × 経度 1° のメッシュサイズでフラックスの分布が算出される。これに比べて CO₂ フラックスの地上観測は「点」であり、フラックスの地域差が大きく、かつ観測点が少ない上に分布が空間的に偏っているため、L4A の検証に直接用いることには困難がある。これに対処するには陸域生態系モデルを用いたスケールアップの手法が必要である。これまで、わが国を含め各国でこれについて研究されているが、さらに研究の進展が望まれる。

CO₂ の研究として以下のような比較が考えられる。

a) 大気－海洋間の CO₂ フラックスデータの利用

大気－海洋間の CO₂ のフラックスは、表面海水の CO₂ 分圧および大気中の CO₂ 分圧を測定し、交換係数を用いて求められている。交換係数は、風速と海面水温と塩分に依存する。

b) フラックスサイト観測データの利用

北海道にはフラックスモニタリング地点が数箇所あり、地形と植生の均一性に難があるものの、陸域生態系モデルを利用することによって GOSAT の全球炭素収支推定モデルによるフラックス（L4A）との比較に使える可能性がある。

(5) CO₂ 全球濃度分布の比較

L4B として提供予定のプロダクトは、緯度 1° × 経度 1° のメッシュサイズの 1 ヶ月平

均の 3 次元濃度分布データである。L4B と他の観測データの比較には、その基となる緯度 $1^\circ \times$ 経度 1° のメッシュサイズの 1 時間値または月平均値を用いる。比較用データとしては L2 の検証に用いたデータ（地上設置 FTS などによるカラム量、航空機観測などによる濃度プロファイル）や地上や海上の観測で得られるその他のデータを総合的に活用する。

(6) 他衛星との比較

CO₂や CH₄のカラム量を観測する OCO などの衛星との比較は、GOSAT プロダクトのデータ質を評価するのに有効である。

a) OCO

OCO は NASA/JPL (Jet Propulsion Laboratory) が 2008 年 12 月に打上げ予定の衛星で、GOSAT と同様に短波長赤外波長帯を利用して CO₂ カラム量を観測する。OCO はアメリカの EOS 計画で上げられた観測衛星群 A-train の最前列を飛行し、エアロソル等関連する様々な物理量を他の衛星から得ることができるため、OCO 自体は CO₂ (および O₂) のカラム量の観測に特化している。

分光器は回折格子型で、観測バンドは GOSAT とほぼ同じ $1.61 \mu\text{m}$ 、 $2.06 \mu\text{m}$ および $0.76 \mu\text{m}$ となっている。

GOSAT-OCO 間の協力協定などの枠組みに基づき、データ入手の方法、手続きについて今後、調査検討する。

b) SCIAMACHY

SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) は、ヨーロッパ宇宙機関の ENVISAT 衛星に搭載されているセンサで、主な目的は対流圏と成層圏の化学に重要な大気微量成分を観測することを目的としている。分光器は回折格子型で、紫外、可視、短波長赤外波長領域に感度をもつ 8 つのチャンネルを有する。観測モードは直下視観測、太陽・月掩蔽観測、大気周縁散乱観測があり、O₃、CO、CH₄などの濃度プロファイルとともにカラム量を観測できる。

CO₂の導出も試みられていることから、GOSAT との比較も有効である。

その他、温室効果ガスを測定することを主目的としていない AIRS や IASI などのデータとの比較も考えられる。

B-2.4 SWIR 観測の誤差要因に関連するパラメータの検証

(1) エアロソル・薄い巻雲

TANSO-FTS (SWIR) の L2 アルゴリズムの妥当性を評価するために、プロダクトのデータ質の検証に加えて誤差要因に関連するパラメータであるエアロソルの光学的特性（光学的厚さ、波長指数および一次散乱アルベド）や高度プロファイルを、以下のようなネットワーク等を通じて利用する。ただし、データがサイト上にアップされるまでかなり時間がかかるため、早く入手する必要がある場合は、観測者に対して直接データ取得交渉が必要になる。

また、FTS 観測あるいは航空機観測を行っている地点には、スカイラジオメータやライダーを設置する必要がある。ライダーはエアロソルや薄い巻雲の高度分布を 15m 程度の精度で測定でき、また偏光解消度から球形／非球形が区別できるため、これにより雨雲か巻雲か、砂塵かを区別できる。スカイラジオメータは、太陽直達光および天空の前方散乱を測定するが、これらから光学的厚さ、粒径分布、複素屈折率が導出でき、さらに一次散乱アルベド、位相関数を求めることができる。これらは TANSO-CAI の検証に役立つ。

(2) 地表面反射率

SWIR のリトリバルの結果としての地表面反射率の精度確認のために下記のデータを取得する。その際、対象地域は地表面が均質な場所を選ぶ。

a) MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) は、NASA の地球観測衛星 Terra/Aqua に搭載されている光学センサである。0.4~14 μm の波長域を 36 バンドで観測し、観測幅は約 2,330km、空間分解能は 250~1,000m である。NASA のサイエンスチームがアルゴリズムを開発し、各データセンターが地表面反射率を含めた種々のプロダクトを作成している。

b) ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) は、NASA の地球観測衛星 Terra に搭載されている光学センサであり、可視近赤外放射計、短波長赤外放射計および熱赤外放射計で構成されている。0.52~11.65 μm の波長域を 14 バンドで観測し、観測幅は 60km、空間分解能は 15~90m である。日本側で作成される標準プロダクトは、地表面反射率、地表面温度、地表面放射率および DEM などである。

(3) 酸素カラム量

バンド 1 (O₂ A バンド) から得られる酸素カラム量を検証する。

a) 地上気圧およびレーウィンゾンデデータ

定常的に観測を行っている高層気象観測地点のデータを利用し、必要に応じて観測を実施する。レーウィンゾンデデータは、他の検証にも利用される。

b) 客観解析値

高層気象観測地点の分布は海洋や発展途上国、極地でまばらであり均一ではないことから、客観解析値も検証に利用する。

B-2.5 CAI プロダクトの検証

TANSO-CAI は TANSO-FTS の補助センサである。このため、TANSO-FTS の L2 のプロダクト (誤差要因に関連するパラメータ) の導出に必要な CAI プロダクトをまず検証すべきであり、それ以外の CAI プロダクトの検証は優先順位が下がる。なお、雲マスクプロダクトの検証は重要である。CAI L1B は NIES が作成するプロダクトであるため、位置、バンド間レジストレーションおよびラジアンズなどについて評価を行うことは重要である。

CAI プロダクトと SWIR の誤差要因に関連するパラメータの検証データは共通するものがあることから、今後、CAI 関係者との調整を行い検証計画の策定を進める。

B-2.6 キャンペーン観測

リモートセンシング機器 (FTS、ライダー等) と同時に航空機搭載の直接観測機器による観測を実施し、TANSO-FTS の測定精度を確認することは重要である。

衛星同期時に高高度まで上昇する航空機により高精度の CO₂ 濃度プロファイルを取得し

てカラム量を求め、それぞれの機器の精度の時間的変化がないか評価を行う。航空機が到達できる高度より上空の CO_2 の濃度は圏界面高度によって変化するので、圏界面高度を正しく求める必要がある。これにはレーウィンゾンデによる同時観測データや客観解析データの内挿を用いる。航空機が測定できない地表面から航空機の最低観測高度の濃度を把握するために、地表での CO_2 濃度の測定が必要である。

また、誤差要因となるエアロソルの直接観測を航空機で同時に実施することも有効であると考えている。

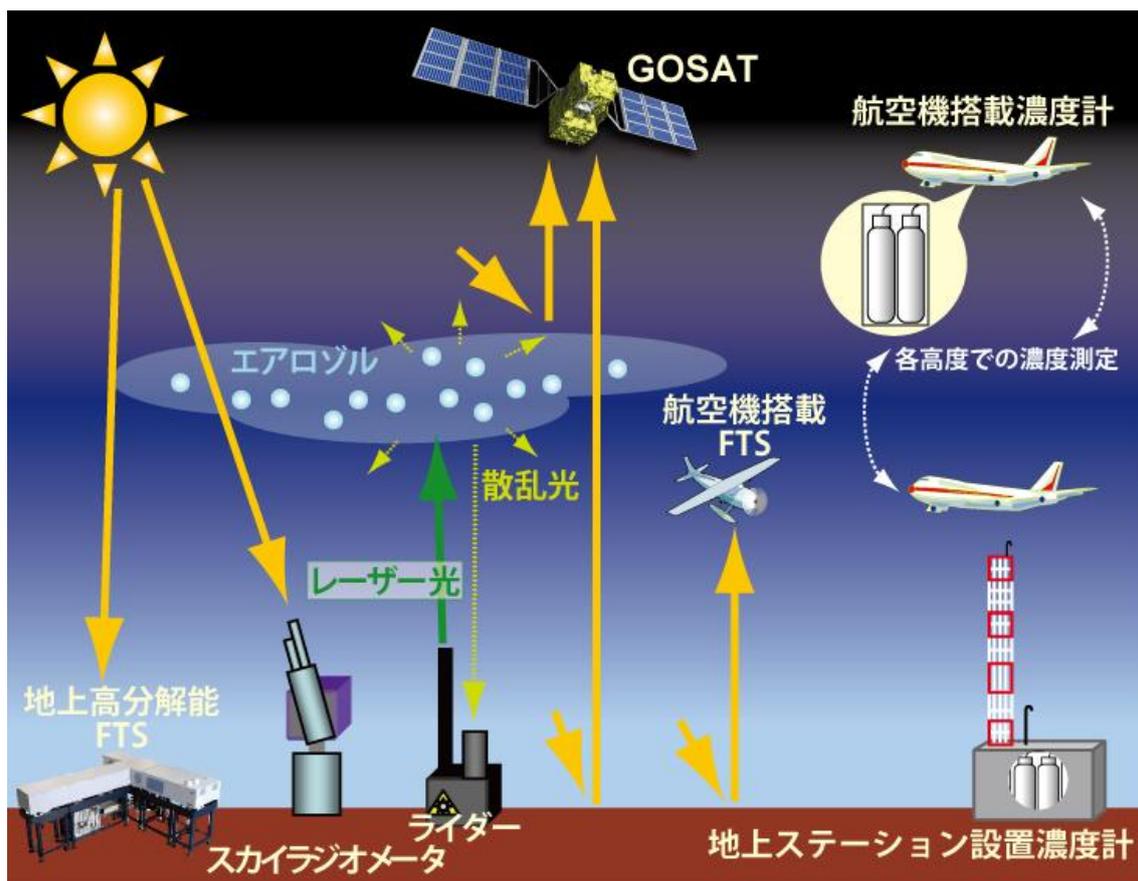


図 B-2-1 CO_2 カラム量、 CH_4 カラム量に対する検証観測の模式図

B-2.7 検証スケジュール

衛星打上げ日を 2009 年 1 月としたときの、検証スケジュールを表 B-2-1B-2-1 に示す。

これは、本計画案に記載した現時点での検証準備／データ確保のスケジュールを列記したものである。

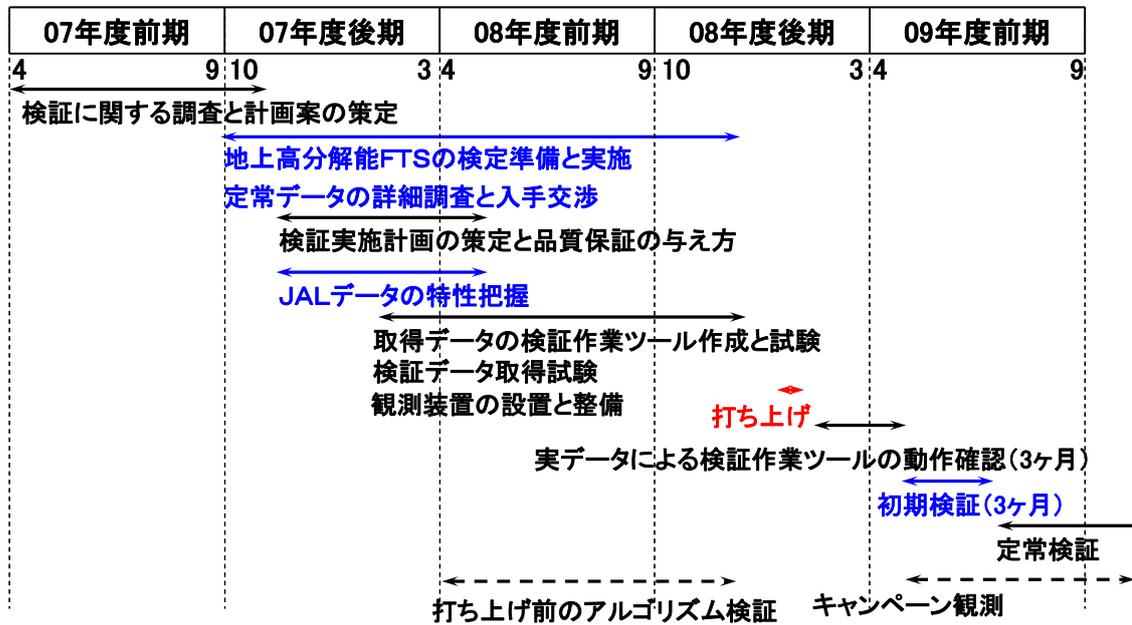


表 B-2-1 検証スケジュール

B-3 GOSAT/TANSO 処理アルゴリズム概要

B-3.1 全体データ処理の概要

全体データ処理の概要と、各処理によって得られるデータレベルの概要を図 B-3-1 に示す。データプロダクトの処理レベル (L1, L1A~L4B) については、RA 本文の表 1 を参照のこと。

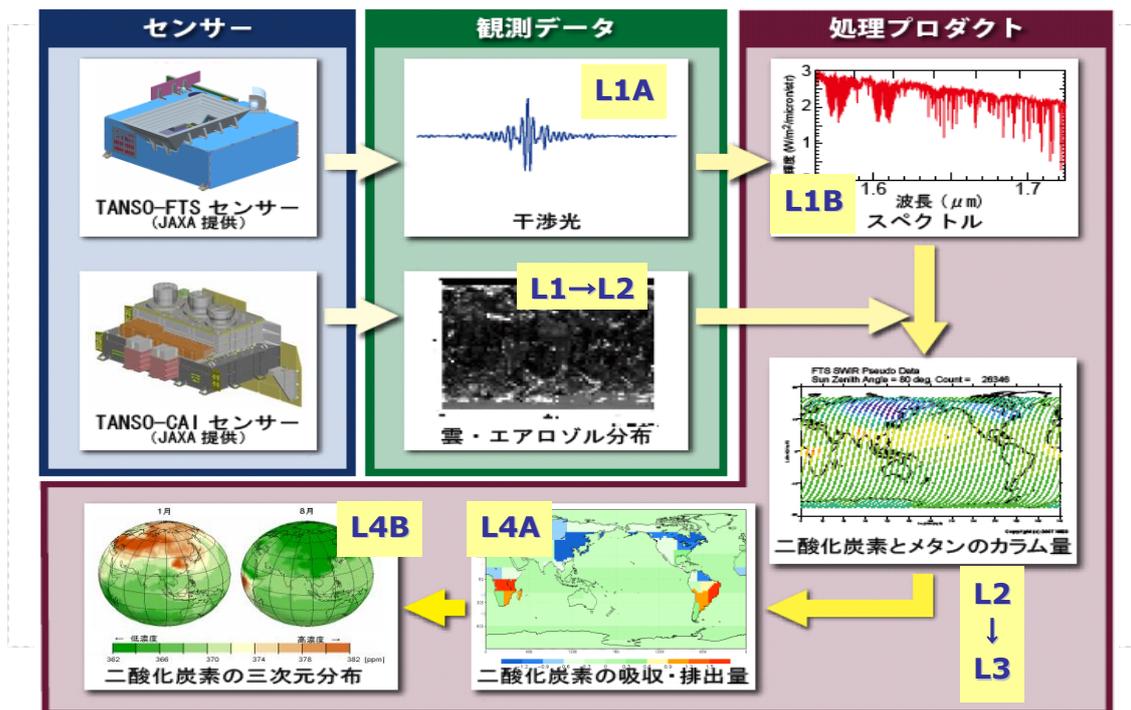


図 B-3-1 データ処理の流れとデータプロダクトのレベル

TANSO-FTS と TANSO-CAI を用いて測定されたデータは、図 B-3-1 に示す流れでデータ処理がなされプロダクトが作成される。FTS による観測値のインターフェログラム (L1A) からスペクトル (L1B) が得られ、CAI (L1) からは雲やエアロソルに関するデータ (L2) が作成される。これらのデータを統合し、雲やエアロソルの少ない観測点において、二酸化炭素とメタンのカラム量 (L2) を算出し、全球でのそれらの濃度マップ (L3) の作成と、大気輸送モデルを利用した解析により、全球における二酸化炭素の吸収・排出量の分布 (L4A) と二酸化炭素の三次元分布 (L4B) を推定する。

本添付資料では、TANSO-FTS 及び TANSO-CAI の L1 処理及び L2 処理を中心に、処理概要とそれらのアルゴリズムの概要を示す。

B-3.2 TANSO-FTS レベル 1 処理

(1) L1A データ (インターフェログラム)

L1A データには、観測データのインターフェログラム、校正データ (TANSO の標準散乱板による大気圏外太陽照度データ) のインターフェログラム、時刻データ、ミッションテレメトリデータ (装置内温度、追尾機構のポインティング角度)、工学値変換デー

タなどが記録されている。なお、L1A データは内部プロダクトに位置づけられており、一般ユーザには公開されないが、校正・検証・アルゴリズム開発を課題とする RA 研究者には一部提供する予定である。

(2) L1B データ (スペクトラム)

L1B データには、基礎データ (データ数、ゲイン値、走査方向等)、観測データのスペクトル (SWIR は波数あたりの電圧値 $[V/cm\cdot l]$ 、TIR は分光放射輝度 $[W/cm^2/cm\cdot l/str]$)、校正データ、装置関数、時刻データ、ミッションテレメトリデータ、工学値変換係数、品質データ、幾何情報データ (観測点の中心位置を示す緯度・経度) などが記録されている。また、SWIR の感度校正データが提供される。

(3) L1A データから L1B データへの処理概要

SWIR バンド (バンド 1, 2, 3) については、以下の順に処理が施される。

- ・工学値変換 (離散値 Digital Number \rightarrow 電圧値への変換)。
- ・スパイクノイズ検出・補正を施す。SWIR バンドについては、機能としては有するが、原則非線形補正は施さない。
- ・上記インターフェログラムの zero path difference (ZPD)位置検出。
- ・フーリエ変換を行う。
- ・低周波成分を確認して、フラグ生成 (低周波成分が大きいときはフラグを立て、走査中に視野が揺らいだこと及び微小振動を受けたことを示す)。
- ・フラグが立った場合は、低周波成分補正を施したインターフェログラムを作成。
- ・窓関数を与え、分解能を落として複素フーリエ変換(FFT)を行う。変換後の実数部と虚数部との関係から位相角を求め、変換された値から位相情報を読み取る。
- ・位相補正をせずに zero-filling を行って 76,545 点とした (低周波成分補正済みの) インターフェログラムを複素フーリエ変換し、上記で求めた位相角分を回転して位相補正済みのスペクトル (実数部のスペクトル) を求める。なお、L1B データとしては、実数部と虚数部の両方のデータが提供される。

TIR バンド (バンド 4) については、以下の順に処理が施される。ただし、下記の方法は一つの処理手法であり、今後変更される可能性がある。

- ・工学値変換 (離散値 Digital Number \rightarrow 電圧値への変換)。
- ・スパイクノイズ検出・補正、直流(DC)分を差し引き、非線形補正を行う。
- ・上記インターフェログラムの zero path difference (ZPD)位置検出、FFT シフト
- ・位相補正をせずに SWIR と同様に低周波成分から視野の揺らぎ補正の有無を判断して必要なら補正を実施。
- ・位相補正後に zero-filling を行ってインターフェログラムのデータポイント数を 38,400 ($=2^9 \times 3 \times 5^2$) 点に揃えた上でフーリエ変換を行い、更に TIR の深宇宙観測データと黒体観測データとを用いて、観測スペクトルデータ (フーリエ変換後の実数部データ) を分光放射輝度($W/cm^2/cm\cdot l/str$)に換算する。

なお、バンド 1, 2, 3 に関しては ZPD でのインターフェログラムの値がデジタル数値で 65,400 以上の場合は飽和とみなし、品質フラグを立てる。バンド 4 に関しては、ZPD でのインターフェログラムの値がデジタル数値で 65,400 以上の場合、または 136 以下の場合は飽和とみなし、品質フラグを立てる。

また、TANSO-FTS では、①発振波長 (1310 nm (ノミナル)) が温度により変化する半導体レーザを用いていること、②軌道上の温度変動でアライメントが変動する可能性があることから、波長校正を行う。

B-3.3 TANSO-CAI レベル 1 処理

TANSO-CAI には 4 つのバンドがあり、バンド 1～3 は波長幅 20 nm、空間分解能 0.5 km、素子数 2000 で、バンド 4 (中心波長が 1.60 μ m) は波長幅 90 nm、空間分解能 1.5 km、素子数 500 である。

L1A データには放射補正及び幾何補正を行うための情報が付与される。

なお、L1A データは内部プロダクトに位置づけられており、一般ユーザには公開されないが、校正・検証・アルゴリズム開発を課題とする RA 研究者には一部提供する予定である。

(1) 放射補正

L1A のデジタルデータは、工学値変換係数を用いて輝度 ($W/m^2/\mu m/str$) に変換される。検出器はダイオード型検出器であるため、出力値の非線形補正は原則として行う必要はない。なお、TANSO-CAI の各バンドのゲインは、月単位でゲイン切り換えテーブルが用意され、出力信号が飽和しないように調整しながら運用される予定である。

(2) 幾何補正

バンド間データ相互の拡大・縮小及び回転情報から、バンド間レジストレーションが可能となる。バンド 3 を基準とし、その他のバンドはそこからのずれ量の相対値として提示される。中心画素は、バンド 1～3 は 1024 画素、バンド 4 は 256 画素である。なお、補正後のバンド間レジストレーション誤差は 0.2 画素以下を目標としている。また、L1 データには代表素子の緯度・経度情報が付与される。

(3) L1B データ

TANSO-CAI の L1 データは上記の補正のための情報が付与されて提供されるが、それに基づいて工学値変換を行い、バンド間レジストレーションを実施し、更に画素毎に標高情報 (Digital Elevation Model ; DEM) を利用してオルソ変換を施して観測位置を補正したデータを L1B データ (標準プロダクト) として提供される。

(4) L1B+ データ

TANSO-CAI の L1B データを更に適度なシーン単位に地図投影し、各バンドの画素毎の輝度データを保管してリサンプリングした画像を L1B+ データ (標準プロダクト) として提供する。

B-3.4 TANSO-CAI レベル 2 処理

TANSO-CAI からは、雲フラグ情報が標準プロダクトとして算出され、雲特性パラメータ、エアロソル特性パラメータが研究プロダクトとして算出される。

まず、TANSO-CAI の可視 2 つのチャンネルを用いて、海面上と比較的暗い陸面上における光学的に厚い雲の判別を行う。次に、雲と判別され、それが水雲である場合は雲特性解析を行う。推定される雲特性は雲の光学的厚さ τ_c (光の波長 0.5 μ m における) と雲粒有効半径 r_c である。 τ_c は光に対する雲の厚さを示す無次元量である。CAI から算出する予定の雲プ

ロダクトを表 B-3.4-1 に示す。

表 B-3.4-1 TANSO-CAI から導出される雲プロダクト

推定パラメータ	単位	バンド番号	備考
雲フラグ	-	2,3,4 [※]	海面上と比較的暗い陸面上の光学的に厚い雲
雲光学的厚さ(@0.5 μm)	-	2,4	水雲及び氷雲
雲粒子有効半径	μm	2,4	水雲及び氷雲
鉛直積算雲水量	g/m^2	2,4	

※バンド4は研究として用いる。

次に、TANSO-CAI の全バンドデータと、気象データ等の補助データと合わせ、エアロソル特性の解析を行う。地球上には多種多様なエアロソルが混在しているが、主要なエアロソルとして、硫酸塩・黒色炭素・有機炭素などの人為起源エアロソル、砂塵性エアロソル、海塩エアロソルが挙げられる。推定の際には、人為起源エアロソルを硫酸塩と黒色炭素の内部混合によるものとし、人為起源・砂塵性・海塩の3種が外部混合する粒子系を仮定し、それぞれの光学的厚さ(波長 550nm における) τ_a および人為起源エアロソルにおける黒色炭素の含有率(体積比) γ_{soot} を推定する予定である。これらを表 B-3.4-2 に示す。

表 B-3.4-2 TANSO-CAI から推定されるエアロソルパラメータ

推定パラメータ		
エアロソル光学的厚さ (波長 550nm)	人為起源エアロソルモード	τ_{acm}
	砂塵性エアロソルモード	τ_{dst}
	海塩エアロソルモード(*海上のみ)	τ_{slt}
人為起源エアロソルモードにおける黒色炭素体積比率		γ_{soot}

*サンプリング外

以下、それぞれのアルゴリズムの概要について述べる。

(1) 雲フラグアルゴリズム

MODIS や GLI のような多波長イメージャは、多くの可視バンドに加えて、高層雲や絹雲の判別を行う水蒸気バンドや赤外スプリットウィンドウを有するため、単独センサのみで高精度な雲判別を行うことができる。一方、TANSO-CAI は近紫外から短波長赤外に4バンドのみを有するため MODIS や GLI より判別精度が劣る可能性がある。従って、雲フラグのユーザは、CAI から提供される数種類の雲判別テストの結果と、別途 FTS 観測等から提供される雲フラグを適宜選択して利用することが推奨される。CAI において雲判別に利用できる主なバンドは、可視光のバンド2 (0.670 μm) とバンド3 (0.865 μm) である。光学的に厚い雲の場合に、短波長赤外のバンド4 (1.6 μm) が氷雲と水雲の区別に用いられる可能性があるが、現在は研究段階である。雲フラグアルゴリズムでは、バンド2 とバンド3 における反射率の閾値テストと、可視における2つのバンドの反射率の比の閾値テスト(カラーテスト)を行う予定である。前者は雲の反射率が海面や比較的暗い陸面よりも高いことを、後者は雲におけるチャンネル2 と3 の反

射率が同程度であることを利用した判別方法である。

CAI の雲フラグアルゴリズムは表 B-3.4-3 に示す 4 つの個別テストを行い、その結果を格納する予定である。

表 B-3.4-3 CAI 雲フラグテスト (予定)

テスト番号	実施内容
Test1	$R[B2] > (R2+A[B2])$
Test2	$R[B3] > (R3+A[B3])$
Test3	$0.9 < (R[B2]/R[B3]) < 1.1$
Test4	if “true” on test1 and Test3, then examine $R[B4]/R[B2]$.

ここで、 $R[B2]$, $R[B3]$, $R[B4]$ は CAI のバンド 2, 3, 4 の反射率^{注 1)}、 $A[B2]$, $A[B3]$ は CAI バンド 2, 3 での地表面アルベド、 $R2$, $R3$ は地表面アルベドのマージン値である。Test1 から Test3 は、対象ピクセルが雲である可能性について診断する。Test4 の結果は、氷雲と水雲を判別する判断材料を試験的に提供する。なお、TANSO-CAI 単独による雲フラグの精度には次のような限界が予想される。まず、光学的に薄い雲、特に巻雲は上記の手法では捉えきれない。また、雪氷面や砂漠等の明るい地表面や、地表面状態の時間変化が激しい領域では CAI 単独での雲判別には限界がある。

注 1) ここで定義する反射率は $\pi L / (F_0 \cos \theta_0)$ を示す。 L は観測放射輝度、 F_0 は装置関数を考慮した太陽照度、 θ_0 は太陽天頂角である。

(2) 雲特性アルゴリズム

雲の光学的厚さと雲粒有効半径が求められる原理は次の通りである。まず、CAI のバンド 2 ($0.67\mu\text{m}$) における水滴の複素屈折率の虚数部が $\sim 10^{-8}$ 程度と非常に小さいため、雲粒による多重散乱が起こっても吸収をほとんど受けない。従って、雲層内に入射した光は雲粒による散乱を繰り返し、最終的に雲頂から衛星方向に散乱された光が観測されることになる。雲の光学的な厚さが増大すると、雲頂から上向きに散乱される光が増加するため、CAI のバンド 2 はより多くの光を観測することになる。光学的厚さが 70 程度まで増大すると、多重散乱の結果上向きに散乱される確率は上限に達し、観測輝度はそれ以上変化しなくなる。一方の雲粒有効半径の推定には CAI のバンド 4 ($1.6\mu\text{m}$) が用いられる。この短波長赤外波長における水滴の複素屈折率の虚数部は $\sim 10^{-5}$ と可視光より 3 桁大きい。従って、雲層に入り込んだ短波長赤外光は雲粒による散乱を繰り返すうちに吸収されてしまうことになる。雲粒のサイズが大きいほど吸収が強いため、衛星搭載センサが観測する光が弱くなる。粒径が大きくなると雲層における吸収は徐々に飽和するため、雲粒有効半径 $30\mu\text{m}$ 程度が上限である。

雲特性リモートセンシングでは、可視光、短波長赤外光の観測輝度から、光学的厚さ、雲粒有効半径 が求められる。実際の観測輝度には、地表面反射成分や雲層からの熱放射成分のように、雲特性推定には本来不要な放射成分が含まれている。大気層や雲層の透過率、衛星天頂角、太陽天頂角、相対方位角などからこれら不要な放射成分を計算し、除去する。衛星観測を用いた物理量の推定は、放射伝達コード (Nakajima and Tanaka,

1986, 1988)を用いたシミュレーションによる観測放射輝度と TANSO-CAI が観測した放射輝度との比較によって行われる。このような推定方法ではニュートン法等による反復計算が必要になるが、ここで利用するアルゴリズムでは、前もって雲の光学的厚さと雲粒有効半径を変化させながら、角度に依存した輝度値や大気層や雲層の透過率、球面アルベドを計算しておいたデータベース(Look Up Table, LUT)を用意する。

(3) エアロソルパラメータ推定アルゴリズム

TANSO-CAI は、エアロソル散乱に感度があり、エアロソルリモートセンシングに一般によく利用される 670nm と 870nm の他、地表面反射の影響が少なく、また吸収性のエアロソルに感度のある 380nm と大粒子エアロソルに感度のある 1.6 μ m に観測バンドを有する。これら 4 バンドの衛星シグナルを理論計算し、MAP(Maximum a Posteriori)法を用いてエアロソル特性パラメータの導出を行う。

なお、TANSO-CAI からエアロソルパラメータを推定できる条件に限られるため、推定できない場所のエアロソルについては GOSAT プロジェクトで開発しているエアロソル輸送モデルを用いた推定結果を利用する。このエアロソル輸送モデルは、Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS) を核として GOSAT プロジェクト用に開発されたエアロソルの三次元動態シミュレーションモデルである。

B-3.5 TANSO-FTS (SWIR バンド) のレベル 2 処理

TANSO-FTS の短波長赤外の 3 バンド (以下、TANSO-FTS-SWIR と記す) では、バンド 1 ~3 のそれぞれについて、入射光の直交する 2 つの偏光面の信号を測定するため計 6 バンド分のデータ (インターフェログラム) が得られる。この TANSO-FTS-SWIR データに加え、種々の補助情報を利用して、二酸化炭素とメタンのカラム量を、目標とする精度 (二酸化炭素については相対誤差 1%, メタンについては相対誤差 2%) で計測する。求めたカラム量[molecules/cm²]は、水蒸気を除いた湿度 0%の大気 (乾燥気体) に含まれる二酸化炭素の割合を示す量 XCO₂ [v/v] (体積混合比) に換算して利用されることが多い。この換算のためには、バンド 1 から求めた酸素のカラム量 (または地表面気圧) や観測時・観測地点の客観解析データに基づく地表面気圧を利用する。

TANSO-FTS-SWIR の L1B (スペクトル) から L2 のカラム量算出までのデータ処理の流れを図 B-3-2 に示す。

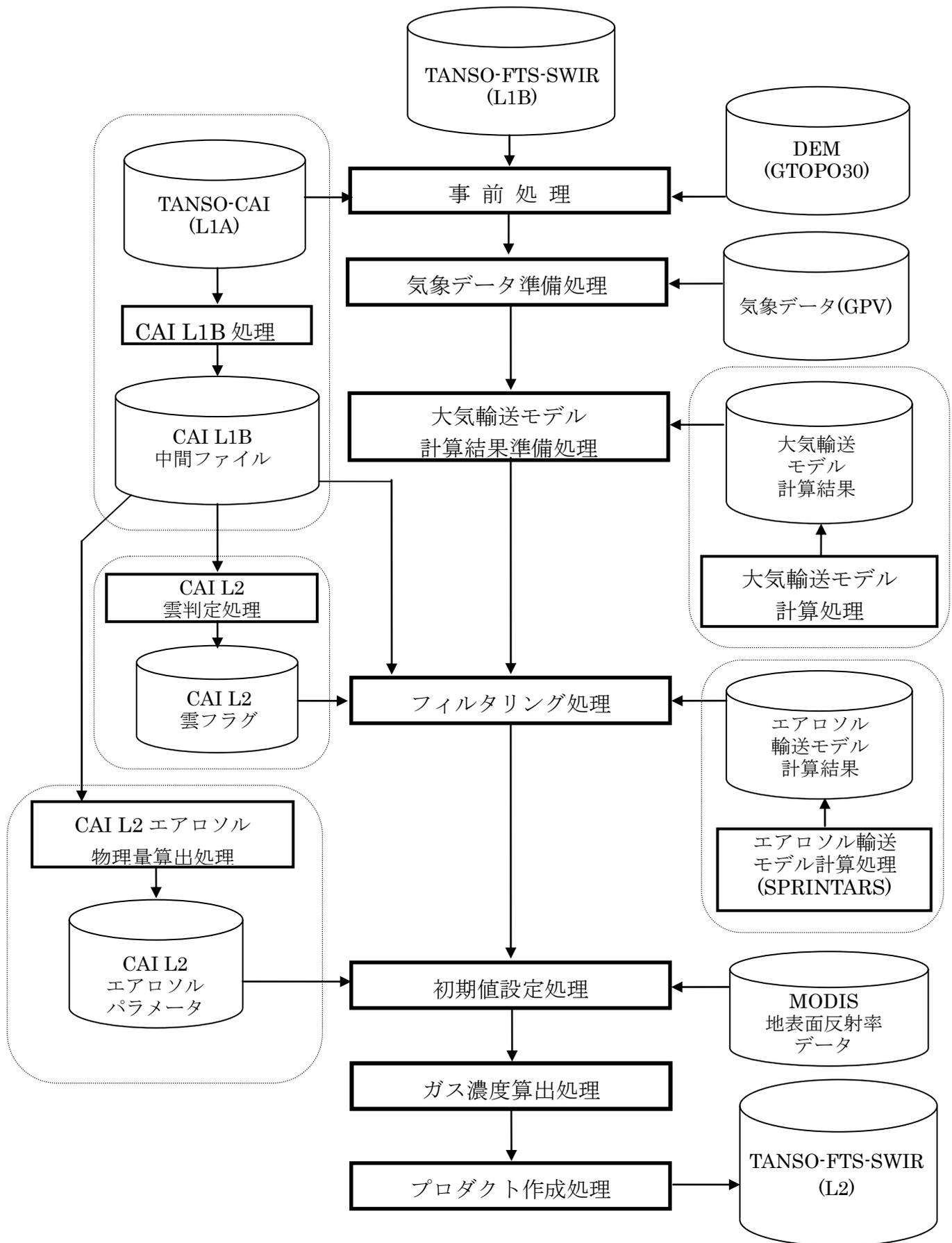


図 B-3-2 TANSO-FTS-SWIR 信号の L2 データ処理フロー

(1) 偏光情報の利用

TANSO-FTS-SWIR では、直交する 2 軸での偏光信号が求められる。これらを **parallel** (平行)軸と **senkrecht** (ドイツ語で垂直を意味する)軸という意味で、**P** と **S** と表記する。**P** と **S** の観測データの扱いは、処理方式の中で次の 3 つの方式による利用を考えている。処理の初期バージョンでは「方式 1」を利用する予定である。地表面の散乱光観測の場合には偏光度は小さいが、海面のサンダリント観測では偏光度が大きくなるのがシミュレーションで確認されている。

【方式 1】: 観測の偏光二成分を合成し、全強度の輝度スペクトルとして利用する。この場合、放射伝達の理論計算には偏光状態を記述しない従来からの放射伝達モデルを用いる。

【方式 2】: 観測の偏光二成分の輝度スペクトルをそのまま独立情報として利用する。即ち、放射伝達には GOSAT プロジェクトで開発した偏光状態を記述する放射伝達計算モデル (Pstar2b コード) を使用する。Pstar2b コードは高速化の工夫により、従来の偏光を考慮しない放射伝達計算コードの数倍程度の処理時間で計算が可能である。

【方式 3】: 観測の偏光二成分の輝度スペクトルをそれぞれ全強度の輝度スペクトルで近似して使用する。ここでは、偏光に関連するパラメータ (地表面アルベド・散乱位相行列など) は偏光成分毎に異なる値、それ以外のパラメータ (光学的厚さ・気体濃度など) は同一の値であると仮定して、偏光軸別に偏光状態を記述しない放射伝達モデルを用いて近似的に計算する。

(2) 推定アルゴリズム

L1B から L2 のカラム量推定のアルゴリズムとしては、その最終的な推定対象である二酸化炭素及びメタンのカラム量を求めるために、中間パラメータとして気体の体積混合比の高度分布を求める。推定に必要な気温・気圧等の鉛直分布データは、観測地点の日時における気象パラメータの客観解析データを用いる予定である。なお、TANSO-FTS-SWIR で利用する短波長赤外波長帯の複数の吸収線は、輝度スペクトル信号に高度分布を求められるような高度方向に鋭な加重関数構造を持たない。したがって、中間的に求める体積混合比の高度分布は非常に不安定な構造を持つ場合がある。しかし、多重散乱やパスラディアンスの影響を無視した厳密性に欠ける説明ではあるが、観測輝度スペクトル中の吸収帯構造の吸収の深さを積分した面積の大小が、カラム量の大小に関係が深いので、カラム量は安定的に求められる。

その L1B から L2 への推定処理アルゴリズムは、観測輝度スペクトルへの非線形最小二乗法を用いた制約付きガウスニュートン法による手法を標準とする。すなわち、観測情報と先験情報とを用いて、解を安定に求める手法を用いる。逐次的に求められる解は、B-3-(1)式で示される。 i 回目の推定対象パラメータベクトルを x_i とし、その先験情報 (a priori 値、推定開始時点の初期値としても利用) を x_a とし、観測スペクトルの分散共分散行列 (波数点数×波数点数) を S_ε 、先験情報の分散共分散行列 (推定対象パラメータ数×推定対象パラメータ数) を S_a 、観測スペクトルベクトル (波数点数) を y 、 x_i を条件として放射伝達計算により理論的に計算される観測スペクトルを $F(x_i)$ 、推定対象パラメータの単位量変化に対するスペクトルの変化量を表すヤコビアン (Jacobian) 行列 (波数点数×推定対象パラメータ数) を K_i とすると、

$$x_{i+1} = x_i + (K_i^T S_\varepsilon^{-1} K_i + S_a^{-1})^{-1} [K_i^T S_\varepsilon^{-1} (y - F(x_i)) - S_a^{-1} (x_i - x_a)] \quad \text{B-3-(1)}$$

で表される。なお、 $K = \partial y / \partial x$ である。

また B-3-(1)式は、B-3-(2)式のような評価関数 $J(x)$ を最小とする解を選択することに相当し、Maximum A Posteriori (MAP) 推定法 (または最大事後確率推定法) と呼ばれる。

$$J(x) = [y - F(x)]^T S_e^{-1} [y - F(x)] + (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) \rightarrow \min. \quad \text{B-3-(2)}$$

S_e の要素の値は、波数別の観測装置の特性 (SNR) などの情報に基づいて決める。 S_a の対角要素は、高度ごとに推定対象パラメータがどの程度自由に変化し得るかの先験情報に基づいて与え、非対角要素は推定対象パラメータ間の変動の縛り (例えば、気体種ごとの高度分布の相関など) の情報から要素の値を与える。

B-3-(2)の理論スペクトルの計算には、HITRAN 2004 データベースの分子分光パラメータを利用する。ただし、バンド 2, 3 の二酸化炭素は、2008 年の改訂版のラインパラメータを利用し、1.67 μm 帯のメタンのラインパラメータの一部は、GOSAT プロジェクトで独自に作成したデータを用いる予定である。また、B-3-(2)のスペクトルフィッティングを行う際には、太陽大気 **Fraunhofer** 線と地球大気の水蒸気の影響を除去するため、波数選択を行う予定である。1.6 μm 帯及び 2.0 μm 帯における太陽 **Fraunhofer** 線の情報は、GOSAT プロジェクトが米国 Harvard-Smithsonian Observatory の Dr. R. L. Kurucz に依頼して作成されたデータを使用する。

なお、太陽光が地表面 (または海表面) で散乱されて衛星センサに到達するまでの放射伝達の過程は、光路途中の大気分子やエアロゾル粒子、雲粒子による (多重) 散乱と減衰の効果を計算できる HSTAR コード (東京大学気候システム研究センターの中島映至教授のグループによって開発された RSTAR コードを拡張したコード) を核にして、それを改良したコードを使用して研究開発を進めている。これにより、光学的に薄い巻雲やエアロゾルの存在下でもカラム量を目標精度で推定できることが、数値シミュレーションにより確認されている。したがって、図 B-3-2 処理フローにおける「フィルタリング処理」によって、観測データのシーンがクリアスカイ、もしくは光学的に薄い巻雲またはエアロゾルが存在する状態であるかを判別して、これらのデータに対して L2 データ処理を実行する予定である。

また、実際の推定には、B-3-(1)式を基本として、更に地表面アルベドも推定対象に加えて同時推定を行う。これにより、観測地表面のいかなるスペクトル構造に対しても柔軟に二酸化炭素とメタンのカラム量を推定することが可能である。

(3) 高速化推定アルゴリズム

上記の推定アルゴリズムを実現するために、現在は、離散座標軸 (Discrete ordinate) 計算法と呼ばれる放射伝達計算法と、MAP 法と呼ばれる推定手法を組み合わせたデータ処理システムが開発されつつある。また、これ以外にもモンテカルロ法と等価理論 (Equivalence theorem) を組み合わせて簡易放射モデルをつくり、そのパラメータと二酸化炭素など他の未知量を同時に観測スペクトルから高速かつ高精度に導き出す手法 (Photon Path-length Probability Density Function; PPDF 法) を GOSAT 定常処理アルゴリズムの将来バージョンとして研究開発を進めている。

B-3.6 TANSO-FTS (TIR バンド) のレベル2 処理

これまでの衛星観測による CO₂ 濃度解析には、主に熱赤外センサのデータが用いられてきた。しかし、この手法では対流圏中層から上層にかけての濃度変化は精度良く解析できるものの、境界層内で起きる植生への取り込みによる CO₂ 濃度の大幅な低下や、人為発生源近くにおける地表付近での濃度増大などの検出は難しい。これは、濃度変化の起きる高度の気温と背景放射の等価輝度温度との差が下層大気ほど小さく、検出が難しくなるからである。

TANSO-FTS の熱赤外バンド (以下、TANSO-FTS-TIR と記す) の場合、気温の鉛直分布にも依存するものの、晴天下では上空から 700~750hPa くらいの高度までの CO₂ 濃度の鉛直分布が得られるものと期待されている。図 B-3-3 には中緯度における典型的な鉛直分解能関数 (Averaging Kernel) を示す。

(1) CO₂ 鉛直濃度分布の推定処理アルゴリズム

熱赤外センサデータから CO₂ 濃度を導出するためには、独立した気温情報が必要となる。TANSO-FTS-TIR の場合、同時運用されるマイクロ波センサ等がないため、客観解析データを用いる。

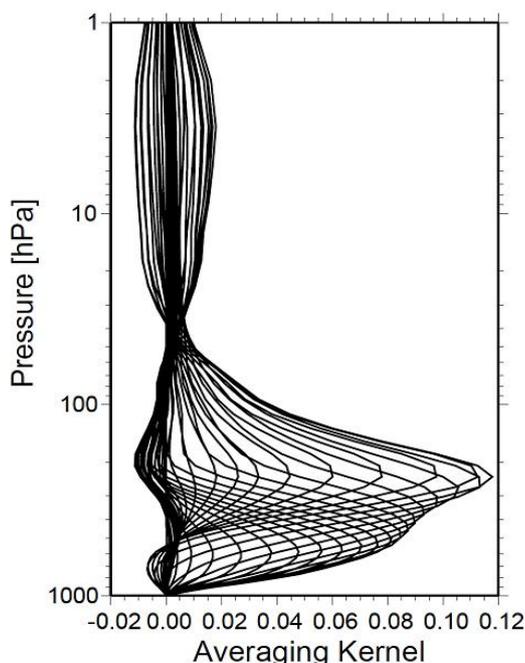


図 B-3-3 TANSO-FTS-TIR データによる CO₂ 解析の鉛直分解能関数 (Averaging Kernel)。中緯度における典型的な例。(作図：齋藤尚子)

CO₂ 濃度の推定には物理解析手法を適用し、TANSO-FTS-SWIR と同様に最大事後確率推定法 (MAP : Maximum A Posteriori) を B-3-(2)式を用いる。

CO₂ 濃度の初期推定値と共分散値は、CO₂ 輸送モデルの出力結果を統計的に処理して得られた結果を用いる。ヤコビアン行列は気温と CO₂ 濃度の鉛直分布の関数であるため、客観解析データから気温分布を、また、CO₂ 濃度については上記初期推定値を用いて、地域、季節、時刻を考慮した最適値を各観測データについて個別に計算する。

(2) CO₂カラム濃度分布の推定処理アルゴリズム

この解析には10 μm付近にあるCO₂のホットバンドの放射輝度スペクトルを利用するもので、暖かい地面や海面を背景にした場合、放射の減少量が掩蔽法のようにCO₂濃度に依存することを利用している。

まず、客観解析データを初期推定値として解析された各FTS視野内の気温と水蒸気量の鉛直濃度分布を元に、CO₂濃度の単位変化に対するCO₂の10 μm帯における放射輝度スペクトルの変化量（ヤコビアン行列）を計算する。一方、水蒸気量推定誤差の低減のため、理論計算スペクトルと観測スペクトルとの間の系統的なズレを、気体による吸収の少ない波長域を用いて補正するというベースライン補正を行う。このベースライン補正を行った後の理論計算スペクトルと観測スペクトルの差の値にヤコビアンをかけることにより、CO₂カラム量を導出する。放射輝度スペクトルの理論計算を行うためには、地表面射出率の波長依存性のデータが必要となるが、これには地表面射出率データベースと観測時前後の気象データを用いて推定された結果を用いる。また、この波長帯に影響を及ぼすオゾン濃度については、OMI 等の衛星搭載センサからのデータを利用する。

(3) 雲判別

FTS 視野内雲量の推定は、昼間は TANSO-CAI の解析結果を元に行う。ただし熱赤外放射スペクトルは巻雲などの薄い氷雲の検出に優れているため、TANSO-FTS-TIR による解析結果も併用する。一方、夜間においては TANSO-CAI は運用されないため、TANSO-FTS-TIR 単独での雲判別を行う。

TANSO-FTS-TIR データを用いた雲解析には次の3つの方法がある。

1. スライシング法
2. 閾値法
3. スプリットウィンドウ法

1. については、CO₂の15 μm帯を用いた Menzel et al. (1983)の方法を適用し、積雲の雲頂高度の推定を行う。2. は、気象衛星 NOAA 搭載の AVHRR や MODIS センサデータの解析結果として保存されている海面水温データベースの値と、雲無しと仮定して TANSO-FTS-TIR データから解析された海面水温との差の値から判別する方法である。この方法は海上では優れているものの、陸域における客観解析データの地表面温度の推定誤差が大きいため、陸域では参考データとして利用する。3. は、8~10 μm と 11~13 μm の2つの波長帯のデータを組み合わせて解析する方法で、主に雲域と判別された場合の雲高度、雲粒の氷/水の判定を行う。

B-3.7 レベル3以降の処理

全球を一定区画（2.5° メッシュなど(TBD)）に区切り、一定期間において観測された TANSO-FTS-SWIR の二酸化炭素とメタンのカラム量データ（L2）を用いて、時間空間補間や適切な統計処理を施し、区画ごとの濃度の代表値を求める。それらを全球マップとして表し、L3 データを作成する。TANSO-FTS-TIR についても全球マップの L3 を作成する予定であるが、その詳細については今後決定する。

TANSO-CAI の L3 処理については、標準プロダクト：[ある期間単位での、全球輝度マップ（雲有り）、全球輝度マップ（雲なし）、植生指数マップ]、研究プロダクト：[ある期間単位での、エアロゾル特性マップ、雲特性マップ] の作成処理を想定しているが、その詳細については今後決定する。

その他、GOSAT の L2 または L3 データと地上測定局の二酸化炭素及びメタンの濃度デ

ータから大気輸送モデルの逆推定によって求められる全球 64 分割のフラックスマップ (L4A) と、それに基づいて大気輸送モデルにより計算された二酸化炭素及びメタンの三次元濃度分布マップ (L4B) については、それらのデータプロダクトの提供が衛星打ち上げから 1 年以上後になるため、現在その処理の詳細を固めているところであり、本添付資料での説明は省略する。

以 上