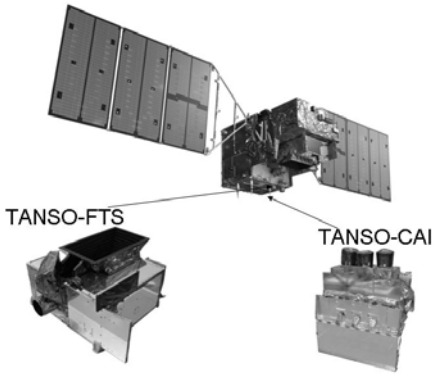
# いぶき搭載温室効果ガス観測センサの設計と軌道上性能

久世暁彦　Akihiko KUZE (JAXA)

## 1. は じ め に

温室効果ガス観測技術衛星(Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT)) には二酸化炭素($CO_2$)やメタン($CH_4$)などを観測する温室効果ガス観測センサ Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation (TANSO)が搭載されている [1]. TANSO は，太陽光の地表面反射光（0.76, 1.6, 2.0 μm）および大気と地表面の熱放射光（5.5-14.3 μm）を分光観測するフーリエ干渉計(TANSO-Fourier Transform Spectrometer）と観測精度低下の要因となる大気中の雲・エアロソルを検出し補正を行うための紫外から短波長赤外までの画像取得を行う雲エアロソルセンサ(TANSO-Cloud and Aerosol Imager))で構成する(第１図).



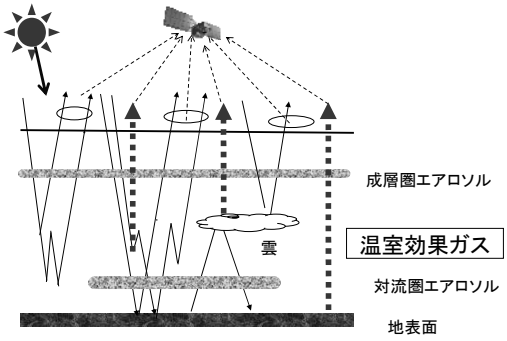

第１図 TANSO-FTS および CAI の搭載位置と外観

## 2. TANSO の観測方式

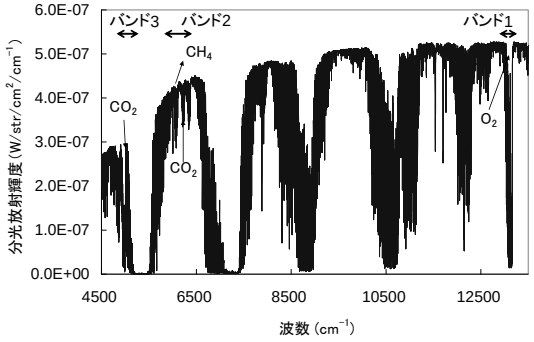
**2.1 TANSO-FTS**　$CO_2$ の 1.66 μm の波長帯は吸収強度を表す吸収断面積の温度依存性が小さく，かつ他の大気成分との干渉がなく，光学的厚さも適度であり，$CO_2$ の高精度観測に適する．1.6 μm には $CH_4$ の吸収線もあり，$CO_2$, $CH_4$ の吸収線をカバーする波長帯を TANSO-FTS の観測波長帯とした．2 μm は 1.6 μm より強い吸収帯を含む多数の吸収線を有し，あわせて観測をおこなう．$CO_2$ および $CH_4$ は差分吸光で測定するため，絶対観測誤差の影響を受けにくいが，観測光の大気中の実効光路長を正確に評価する必要がある．$CO_2$ よりも大気中の濃度が高く，かつ均一に分布する酸素($O_2$)の吸収から散乱の影響も含めた実効光路長を 0.76 μm の $O_2$-*A* 帯の測定から導出する．

GOSAT のミッションは変動の大きい下部対流圏 $CO_2$ 観測であるため，太陽光が地表面で反射した光を観測する方法が適する．第２図に示すように，短波長赤外波長は地表面からの反射とともに，大気分子によるレーリー散乱光，雲や大気中の微小粒子であるエアロソルによるミー散乱光を観測するため，観測光の光路は複雑である．ミー散乱量は雲やエアロソルの高度，厚さ，タイプに依存するため，TANSO-CAI により必要な情報を得，放射伝達モデルで多重散乱も含め大気圏外の分光放射輝度を計算し，衛星の観測値と比較する．短波長赤外域では太陽光の大半が地表面に到達し，大気の散乱の波長依存性も小さいため，複数の波長帯で観測を行っても高度分布の情報を得るのは難しい．気柱量に加えて高度分布の情報を得るには，熱赤外の吸収断面積が異なる複数の波長帯を用いる．

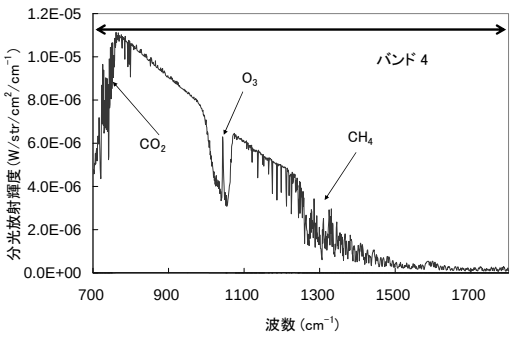
分光計として，単素子で広い波長範囲の観測が可能で，かつ光学的スループットが大きく高い信号対ノイズ比(SNR)観測が可能なフーリエ干渉計を採用した．第３図に，横軸を波数，縦軸を観測輝度例として TANSO-FTS が観測する 4 バンドの波長範囲および大気成分を示す．




第２図　TANSO-FTS で観測する大気散乱・地表面反射光（実線）および大気と地表面の熱放射光（太点線）




(a)




(b)

第３図 TANSO-FTS の観測波長範囲と大気成分
(a)バンド 1, 2, 3 (b)バンド 4

**2.2 TANSO-CAI** TANSO-FTS で温室効果ガスを導出する際に誤差要因となる雲・エアロソルの検出・補正のためのデータを取得する TANSO-CAI を搭載する．GOSAT のミッションは陸域の温室効果ガスの観測であり，陸域の反射率が低くエアロソルの観測に適する紫外波長域の 380nm を選択する．またエアロソルによる太陽散乱光はエアロソルの種類により波長依存性が異なるため，複数の波長帯でエアロソルの波長特性を取得し，種類を推定し，1.6μm および 2.0μm の観測の補正に使用する．植生の分光反射率に変化があるレッドエッジと呼ばれる波長帯を境とし，かつ $O_2$ の吸収体を避け，680nm と 870nm を観測する．さらに，TANSO-FTS の主波長である 1.6μm の計 4 波長帯で観測し，エアロソルの情報を得る．

## 3. TANSO の概要

**3.1 TANSO-FTS** TANSO-FTS の概要を第 1 表に，また光学系を第 4 図に示す．ポインティング機構は，衛星進行方向と直角(CT)方向に±35deg の視野を走査する機構上に，物理的に±10deg 回転し衛星進行(AT)方向に±20deg の視野範囲を有する機構が搭載されており，格子点観測を実現する．この 2 軸のポインティング機構は CT 方向にさらに回転することで，内部に搭載されたバンド 4 用の校正黒体，ゼロ点校正用の深宇宙，太陽照度校正・装置関数校正用の拡散板を指向し，校正光を導入する．また，FTS のデータを取得に要する 4 秒間衛星の動きによらず同一地点を観測するため，主に AT 方向を衛星の動きにあわせ低速で走査する．機構系には冗長系があり，光路切替え鏡により冗長系からの観測光を導入することができる．

モニタカメラは，ポインティング鏡で導入された観測光束の周辺光の一部を折り曲げ鏡で切出し，1280×1024 素子の CMOS 検出器により，FTS の観測範囲を中心とする約 30km 四方を 100m の空間分解能で観測する．コマンドにより撮像周期・蓄積時間・画像の切出し範囲を選択できる．

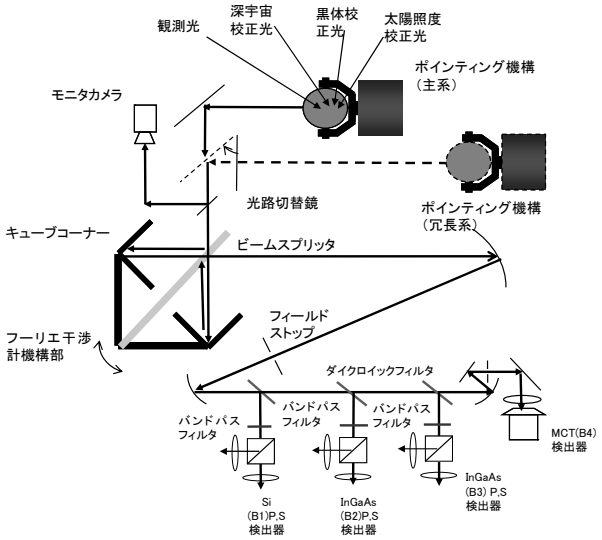
フーリエ干渉計機構部はフレキシブルブレードを回転中心として，ロータリーモータでアームの両端に取り付けられたキューブコーナーを駆動する．分光分解能はビームスプリッタで分けられた 2 つの光の最大光路差に比例し，機構部を振り子状に走査して±2.5cm の光路差を生成する．光路差の測定および機構部の制御にはレーザ干渉光を用いる．寿命および搭載性を考慮し，1.31μm の通信用の半導体レーザを採用した．発振波長は温度の関数であるが，軌道上で 0.001K の精度で温度制御することで，地上のフーリエ干渉計で用いる波長安定度に優れるヘリウムネオン(HeNe)レーザと同等の安定度を実現する．レーザおよびレーザ検出器は冗長系を有する．

TANSO-FTS の特徴である可視から熱赤外までの広波長範囲の観測実現ため，ビームスプリッタにはコーティングをしていないセレン化亜鉛(ZnSe)を採用した．高い表面精度を有し，フーリエ干渉計で通常用いる熱赤外波長域よりも 1 桁短い波長(バンド 1)でも高い干渉効率が得られる．

フーリエ干渉計機構部で干渉した観測光は，フィールドストップに集光し，全バンド共通の視野が決定される．分光分解能を実現し，最大限の光量を確保するために空間分解能は 10.5km と大きく，視野内に雲やエアロソルが干渉する可能性があるが，TANSO-CAI により検出できる．またフィールドストップを中心とする画像は，モニタカメラにより得られる．

フィールドストップを通過した観測光は再び平行光となり，ダイクロイックフィルタで短波長より順番に分離する．分離後，狭帯域バンドパスフィルタで不要な帯域外の光をカットし，さらにバンド 1, 2, 3 では，偏光ビームスプリッタで 2 つの直線偏光に分離し，検出器に集光する．バンド 1, 2, 3 で観測する観測光は，エアロソル・雲により散乱する場合および海面で反射する場合強く偏光する．一方，TANSO-FTS の光学系自身も，ポインティング鏡，ビームスプリッタ，ダイクロイックフィルタに偏光がある．偏光特性の評価および冗長の目的から FTS のバンド 1, 2, 3 では 2 方向の直線偏光の同時測定を行う．

検出器にはバンド 1 はシリコン(Si)，バンド 2, 3 はインジウムガリウムヒ素(InGaAs)，バンド 4 は光導電型水銀カドミウムテルライド(PC-MCT)検出器を用いる．バンド 2, 3 の検出器は TANSO-FTS 用に新たに開発した 2.08μm まで感度を有する検出器で，暗電流を極力おさえるため 3 段のペルチェ素子で-40℃まで冷却する．バンド 4 の検出器は 70K まで冷却するが，後述するように FTS は振動擾乱に敏感であるため，衛星搭載用として通常使用されるスターリング冷凍機ではなく，より振動の少ないパルスチューブ冷凍機を用いている．インターフェログラムと呼ばれる干渉光は 16 ビットの AD 変換器で量子化し，衛星時刻，姿勢データ，観測モード，ポインティング機構の 2 軸の角度，検出器温度，黒体温度などとともに軌道上で編集され，衛星のデータ処理系へ送られる．




第 4 図 TANSO-FTS の光学系

構体側面には深宇宙の視野を確保する校正窓，バンド 4 用の校正黒体が設置されている．構体上面には，反射率が高く，拡散性に優れるテフロン製のスペクトラロン拡散板および装置関数校正用レーザを設置する．この拡散板は太陽直達光および装置関数校正用レーザを拡散させ，校正光を FTS 光学系に導入する．

第 1 表　TANSO-FTS の概要

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 前置光学系 | ポインティング機構<br>視野角：CT: ±35deg, AT: ±20deg<br>モニタカメラ | | | |
| 分光計 | フーリエ干渉計<br>最大光路差: ±2.5cm (両側走査)<br>口径: 68mm<br>走査速度(片側): 1.1, 2, 4 秒<br>データ取得: 往復 | | | |
| 後置光学系 | 瞬時視野角 15.8mrad (直下 10.5km) | | | |
| バンド | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 波長範囲 ($cm^{-1}$) | 12900-13200 | 5800-6400 | 4800-5200 | 700-1800 |
| 直線偏光測定 | 2 | 2 | 2 | N/A |
| 検出器 | Si | InGaAs | InGaAs | PC-MCT |
| SNR (実測値) | > 300 | > 300 | > 300 | > 280 |

**3.2　TANSO-CAI**　TANSO-CAI の概要を第 2 表に示す．小型の放射計で 3 本の屈折系の望遠鏡で構成する．比較的波長の近いバンド 2, 3 は 1 つの望遠鏡を共有する．バンド 1, 2, 3 では，2000 素子の 1 次元 Si アレイ CCD を用いる．バンド 4 で使用する 1.6 $\mu$ m 帯の 1 次元 InGaAs アレイ CMOS は，最大素子数が 512 素子に限定され，空間分解能 1.5km で走査幅は±30deg である．ペルチェ素子により 0℃まで冷却する．

第 2 表　TANSO-CAI の概要

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 光学系 | 3 望遠鏡　屈折系 | | | |
| バンド | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 中心波長 (μm) | 0.380 | 0.674 | 0.870 | 1.600 |
| 波長幅 (μm) | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.090 |
| 空間分解能 (km) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 |
| 走査幅 (deg) | ±36.1 | ±36.1 | ±36.1 | ±30.0 |
| 検出器 | Si | Si | Si | InGaAs |
| ピクセル数 | 2000 | 2000 | 2000 | 500 |
| 積分時間 | 32 段階 | 32 段階 | 32 段階 | 32 段階 |
| SNR (実測値) | > 200 | > 200 | > 200 | > 200 |

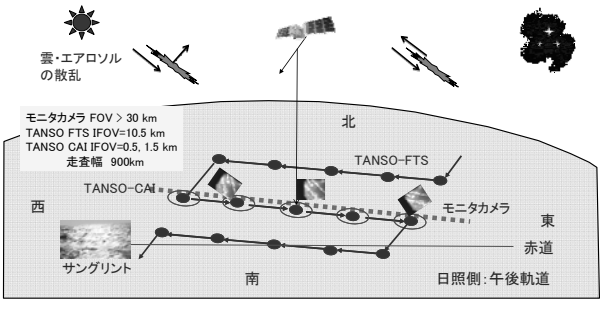
地表面反射率が低い場合，観測光に占めるエアロソルの散乱成分が相対的に高くなり，エアロソルの観測精度が向上する．他方，雲は反射率が高いため，雲とエアロソルを同時に観測するためには，観測可能な輝度範囲（ダイナミックレンジ）を広くとる必要がある．一方，SNR を確保するためには，検出器での光の蓄積時間をできるだけ長く確保する必要がある．この相反する要求を実現するため，太陽天頂角が大きく輝度が低い高緯度では積分時間を長くする運用が可能なように，積分時間は 19%毎に 32 段階切替えることができる．

## 4.　TANSO の軌道上運用とデータ処理

**4.1　軌道上観測運用**　第 5 図に TANSO の地上データ取得の概念図を示す．TANSO-FTS は 3 日間で，地表面データをできるだけ密に取得するため，2 軸のポインティング機構を用いて格子状に観測する．FTS は，1 インターフェログラム取得時間として 1.1, 2, 4 秒の 3 種の走査速度を有するが，SNR を確保するには 4 秒走査が最適で，進行方向に直角に 5 点，約 180km の格子状の点を 4 秒ごとに取得する運用を標準とする．TANSO-CAI は約 1000km の走査幅をもち，空間分解能に相当する衛星進行時間毎に 1 次元アレイ素子の 1 ライン分のデータを取得し，3 日で全球をぬけなく観測する．FTS 内部に搭載されたモニタカメラは，4 秒に 1 度データを取得することで FTS の各データに対応する画像を取得することができる．

日照域では FTS の全バンドおよび CAI のデータ取得を行い，日陰域では FTS のバンド 4 のみ観測を行う．TANSO-FTS では，反射率が高い厚い雲の観測では飽和することを許容し，増幅率を高くし(Gain H)，SNR を優先させた観測をおこなう．ただし，反射率が高く，十分な光量を確保できることが予め予測可能な太陽照度校正およびサハラなどの砂漠上空では，増幅率をさげて(Gain M)観測を行う．

海面は反射率が低く十分な観測輝度が得られないが，太陽光の鏡面反射点であるサングリント点は輝度が高いため，大洋上では TANSO-FTS は 2 軸のポインティング機構を用いてサングリント点を指向した観測を行う．あわせて，地上で観測を行っている格子点以外の検証点などのために，特定点観測として，地上からポインティング角と時刻を指定し観測を行う．



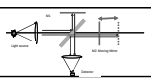
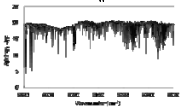
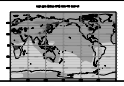
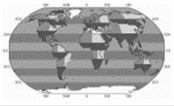

第 5 図 TANSO-FTS, CAI, モニタカメラのフットプリント

**4.2　軌道上校正運用**　軌道上では TANSO-FTS の感度および装置関数校正を行う．GOSAT の周回中北極域で，衛星が日照，地表面は日陰時に，拡散板に太陽直達光を照射し，太陽照度校正(感度校正)を行う．TANSO-FTS は大気による吸収線毎に分離できる分解能を有しており，データ処理で

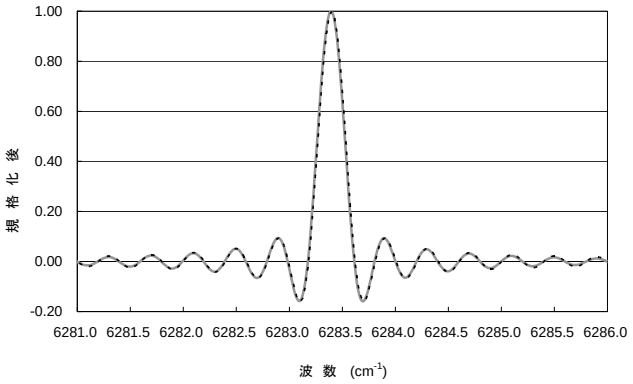
既知の波数を同定できるので，軌道上での波数校正は不要である．一方，後述する装置関数はデータ解析に不可欠でるため，太陽照度拡散板に 1.55 $\mu$ m の半導体レーザ光を単色光源として照射し，バンド 2 の校正を行う．軌道上で拡散板は，短波長域において表面に付着した汚染成分が紫外光により劣化し，褐色化する可能性があるため，表裏両面を使用し，表面は常時校正に使用し FTS 光学系の感度校正を行うとともに，裏面は 1 カ月に 1 回使用して表面の拡散反射率の劣化をモニタする．さらに，年に 1 回程度衛星を月に指向し，月校正を行う．TANSO-CAI は搭載校正光源を持たないが，TANSO-FTS 月校正時に衛星の回転を利用して月面を走査し，感度校正を行う．

**4.3　データ処理**　第 3 表に TANSO-FTS のデータ処理フローを示す. 軌道上で取得されたインターフェログラムは，テレメトリデータとともに地上に送られる(レベル 0)．地上では，衛星軌道情報，時刻，ポインティング機構の角度情報から地上での観測位置，太陽位置などを計算し，観測した生インターフェログラムとともにレベル 1A データを作成する．次に，波長毎に位相補正をおこない，スペクトルを導出する. バンド 1, 2, 3 のスペクトルの単位は(V/cm$^{-1}$)でレベル 1B として保存する．このスペクトルに，レベル 1B とともに提供する輝度換算値を掛け合わせると分光放射輝度が得られる．この輝度換算値は，運用当初は打上げ前に産業技術総合研究所(AIST)の基準より値付けされた積分球により評価した値を使用するが，打上げ後，拡散板・光学系の効率の低下などが発生する可能性があるため，太陽照度校正・月校正・後述する代替校正の結果などから総合的に判断し，換算値を見直す．バンド 4 は，搭載黒体の劣化は想定しにくいことから軌道上校正自身で高い校正精度を確保できること，および周回あたり 4 回程度高頻度で校正を行えることにより，直近に実施した黒体・深宇宙校正データからを用いて分光放射輝度を計算し，レベル 1B として提供する．

第 3 表 TANSO-FTS のデータ処理フロー

| | |
|---|---|
| **軌道上** |  |
| **レベル1A: インターフェログラム**<br>**HDF5 フォーマット** | |
| **レベル1B: スペクトル**<br>**HDF5 フォーマット** |  |
| **レベル2: 気柱量**<br>**HDF5 フォーマット** | $XCO_2$＝8×10$^{21}$/cm$^2$（例）<br>$XCH_4$＝4×10$^{19}$/cm$^2$（例） |
| **レベル3: 全球分布**<br>**HDF5 フォーマット** |  |
| **レベル4: 吸収排出量**<br>**NetCDF フォーマット** |  |

国立環境研究所（NIES）はレベル 1B データより，$CO_2$ および $CH_4$ の気柱量を導出し，レベル 2 とする．波長幅を持たない単色光が入射し±2.5cm の光路差でデータを取得した場合, 第 6 図に示すような波長幅を有する出力となる．これを装置関数と呼ぶ．放射伝達モデルにより温室効果ガスの吸収線の形状を再現するだけのステップで計算した値に，装置関数を畳み込む計算を行い，0.2cm$^{-1}$ の間隔でサンプリングを行っている TANSO-FTS の結果と比較し，温室効果ガスの気柱量を計算する. 装置関数は, 波長, 視野角, 光軸からのずれの関数であり，第 6 図に示すように，モデル計算値は，TANSO-FTS に単色レーザ光をいれて測定した結果とよく一致する. NIES は 1 回帰分のデータより $CO_2$ や $CH_4$ の気柱量などの全球分布を作成し(レベル 3)，さらに化学輸送モデルを用いて, 全球 64 地域の吸収排出量を導出する(レベル 4).




第 6 図　TANSO-FTS の装置関数
（実線；打上げ前実測値，太点線：モデル計算値）

## 5.　TANSO の軌道上性能

**5.1　軌道上性能**　いぶきは，2009 年 2 月 7 日に初画像を取得し，機能・性能の確認を行ってきた．TANSO-FTS により取得されたスペクトル例を図 7 に，TANSO-CAI で取得された画像例を図 8 に示す．得られたスペクトルの実部および虚部の比から基本性能である SNR が得られていることを確認した．また搭載単色レーザによる装置関数校正により，図 9 に示すように，軌道上で分光分解能が実現されていることを評価した．搭載した拡散板による太陽直達光の観測により，TANSO-FTS の顕著な感度劣化，波長シフトがないことを確認した．さらに，3 月 11 日には衛星を月に指向することにより，月面を光源とする TANSO-FTS および CAI の感度校正実施し，FTS および CAI ともに感度・SNR の劣化がないことを確認している．

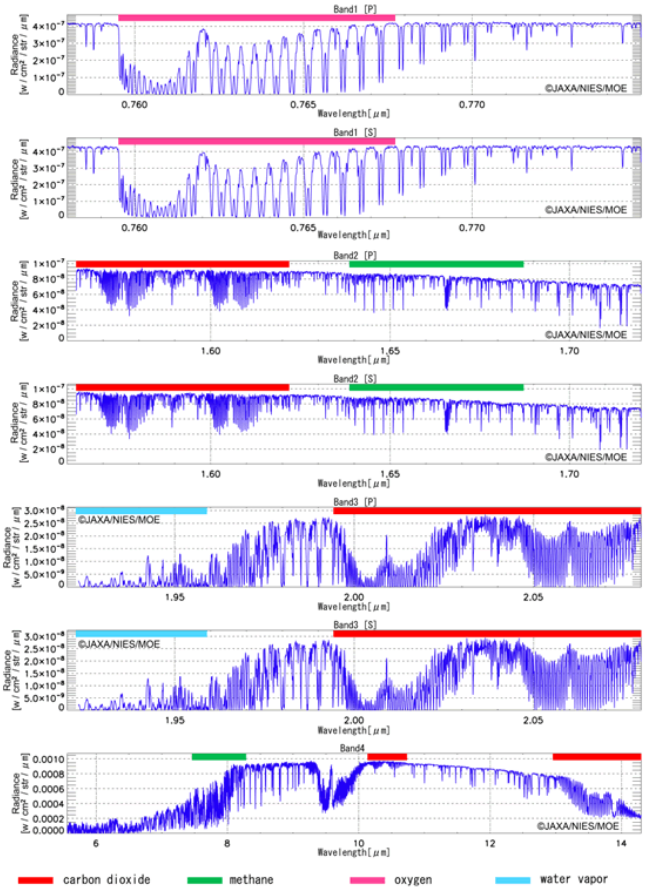
微小振動に関しては，搭載単色レーザによる装置関数評価のサイドローブデータ位置から衛星姿勢制御に用いている地球センサ起因とみられる影響が検出されているが，地球観測時のノイズレベルより十分小さく観測には影響がない．

**5.2　軌道上運用**　4 月 10 日より初期校正運用を行い，地上基準点を用いて幾何校正評価をおこなった．

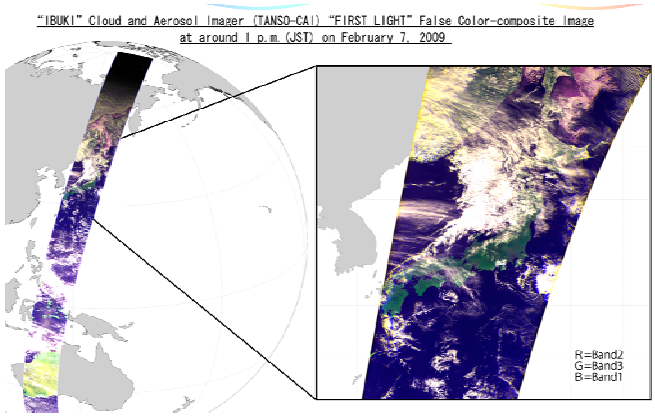
6 月には, 米国ジェット推進研究所(JPL)とともに米国ネバ

ダ州レールロードバレー（RRV）において代替校正実験を行い，TANSO-FTS で観測された２直線偏光の分光放射輝度と，地上観測値をもとに偏光を含む放射伝達モデルによる計算した大気上端の輝度値が 10%の精度で一致することを確認した．さらに同年 10 月には，RRV 上空において Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS)との同時飛行実験をおこなっている [2)]．

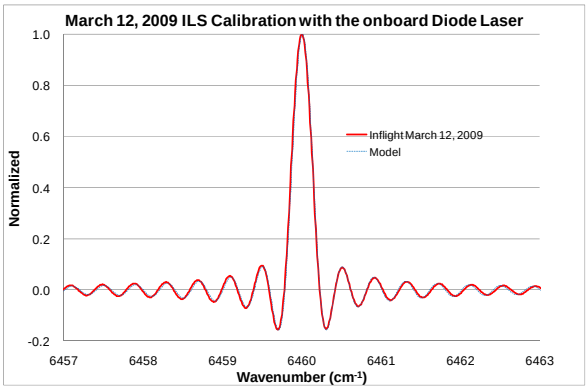
また毎週回実施している拡散板表面による太陽照度校正に加えて，毎月１回，拡散板裏面を用いた評価を実施している．




第７図　TANSO-FTS で取得されたスペクトル（2009 年 4 月 23 日つくば上空）



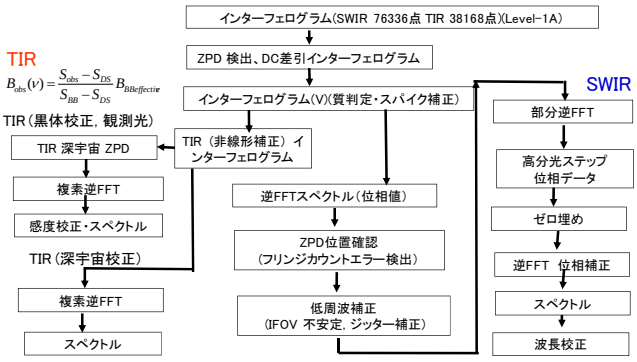

第８図　2009 年 2 月 7 日 TANSO-CAI で取得された画像




第９図　搭載単色レーザの出力（モデル計算値との比較）

### 5.3　レベル１処理

TANSO-FTS に関しては，第１０図に示すフローでスペクトルを導出する．打ち上げ後，位相補正の改良，データの質のフラグの追加，ポインティング機構の振動やフーリエ干渉計機構部動作にともなう口径触の補正，偏光を考慮した赤外感度校正の追加などのバージョンアップをおこなってきた．




第10図　TANSO-FTS レベル1処理フロー

### 5.4　特記事項

TANSO-FTS・CAI とも打ち上げ後１年を経て，概ね良好な運用を続けているが，特記事項として軌道上運用で発生した現象を述べる．

TANSO-FTS のポインティング機構は，２軸それぞれに搭載されたレゾルバを用いて制御し，その出力値をもとに地上観測点の導出を行うが，カメラデータとの比較により，レゾルバに最大数 km のオフセットがあることが確認されている．

また，ポインティング機構の静定不良データが一部みられるため，格子点観測のパターンの一部改訂や，不定期に格子点数をかえた運用を行っている．

FTS の光路長の基準であるサンプリングレーザ光路パスの光学アライメントが打ち上げ後徐々に変化し，サンプリング間隔がシフトしている．本変動にともないレーザの受信レベルも低下している．パス打ち上げ後１年現在，本シフト・受信レベル低下は収束にむかっている．

またレーザ受信レベルの低下にともない，インターフェログラムの光路差ゼロ（Zero Path Difference (ZPD)）位置が徐々にシフトし，所望の光路差が得られなくなるため，約３日毎に ZPD 位置のリセットを行っている．

また，拡散板表裏両面による太陽照度データ，RRV に代替校正，他の衛星データの比較から，TANSO-FTS・CAI と

も短波長において感度低下の可能性が示唆されている．また拡散板は常時露出している表面のバンド１波長での反射率の低下がみられている．感度低下に関しては，2010 年 2 月 28 日に実施予定の約１年ぶりに実施する月校正により確度の高い評価が可能である．

**5.5 校正データ** レベル１データとともに表４表に示すモデルをユーザに提供する．モデルは放射感度・スペクトル・幾何・偏光に大別される．使用方法については，アルゴリズム基準書（英文名 Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)）に記載している．

**表4表 ユーザへ提供するモデル**

| | |
|---|---|
| 放射感度 | FTS SWIR 感度校正係数 |
| | FTS TIR 感度（偏光感度モデル） |
| | CAI 感度校正係数 |
| | FTS-SWIR, CAI 感度補正係数 |
| スペクトル | FTS ILSF （装置関数） |
| | FTS 波数補正係数 |
| | CAI 分光感度 |
| 幾何 | FTS 視線ベクトル |
| | CAI 視線ベクトル |
| 偏光 | FTS Mueller 行列 |

TANSO-FTS-SWIR，TANSO-CAI の放射感度は，打上前に積分球により値付けした感度校正したデータを提供しているが，前述したように，特にバンド１で経年変化がある可能性があるため，別途，打上後からの日数の関数として感度補正係数を提供する．ユーザはレベル１B データに，感度校正係数と感度補正係数を掛け合わせることにより分光放射輝度をもとめることができる. TANSO-FTS-TIR に関しては，TIR 波長域において，ポインティングミラーの反射率が偏光別に異なることおよびフーリエ干渉計機構部のビームスプリッタの偏光別透過率が異なることから，ポインティング機構の２軸の角度別に偏光別の感度を考慮して感度校正を行う必要がある．偏光感度モデルは ATBD に記載するが，TIR のレベル１B データは，偏光を考慮した校正後の分光放射輝度を提供する．

スペクトルモデルに関しては，TANSO-FTS の装置関数（Instrument Line Shape Function (ILSF)）を代表波数に関して提供する. 装置関数は, 波長, フーリエ干渉計の光路差, 画角，収差，光軸からのずれ，変調効率の光路依存性の関数であり，打上前に単色レーザにより得られた装置関数データをもとにモデルを構築し，波長別のデータを作成している．また前述のように，サンプリングレーザの光路パスのアライメント変動により，レベル１B データの波数間隔が変化するため，波数補正係数を打上後からの日数の関数として提供する．TANSO-CAI に関しては，光学系の分光透過率，バンドパスフィルタ，検出器の分光感度特性を考慮した打上前に作成した分光感度モデルを提供する．

FTS の視線ベクトルは，ポインティング機構の２軸の角度情報であるレゾルバテレメトリ出力，ポインティング機構の衛星基準座標に対する取り付け誤差情報を含んだモデルを提供する．前述のレゾルバのオフセットの補正情報を追加してユーザに提供することを現在検討している．CAI に関しては，各バンド各素子の視線ベクトルを，打上前にコリメータを用いて評価し，中心素子からの素子数の関数として，進行方向・クロストラック方向ともそれぞれ３次式で表現している．ユーザには，打上後地上基準点 (Ground Control Point (GCP)) を用いて３次式の係数を見直した値を提供している．

TANSO-FTS の偏光モデルとして，Mueller 行列（4×4）の形でユーザに提供する．Mueller 行列は，ポインティング機構の２軸の角度，ポインティングミラーのコーティングの位相, ポインティング機構の偏光別反射率の関数である．ユーザは，偏光を考慮した放射伝達モデルより導出したストークスパラメータの I,Q,U,V 成分を入力として，本 Mueller 行列をかけわせ，TANSO-FTS のバンド 1, 2, 3 の各 P ,S 成分をそれぞれ導出し，実際に観測された P, S の分光放射輝度と比較することができる．

## 6. まとめ

2009 年 2 月 7 日に初画像を取得以来, TANSO はほぼ 100% の運用を行っている．同年，7 月 30 日より定常観測に移行し，TANSO-FTS は約 180km の格子点観測・サングリント観測・ユーザ要求による検証点などの特定点観測を，CAI は日照側での観測を行い，データ提供を継続している．温室効果ガスの吸収排出量の導出には継続的な高精度な観測が必要であり，今後データ解析における更なるアルゴリズムの改良，校正・検証が必要となる．最後に，TANSO の開発にあたり，環境省，NIES，GOSAT サイエンスチーム，NEC 東芝スペースシステム㈱，ABB-BOMEM Inc.，AIST 計量標準総合センタ，米国ジェット推進研究所，コロラド州立大学，JAXA 技術研究本部の担当の方々に感謝する．

## 参 考 文 献

1) A. Kuze, H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamazaki, " Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring," *Appl. Opt*., vol. 48, pp. 6716-6733, Dec. 2009.
2) G. Vane, R. O. Green, T. G. Chrien, H. T. Denmark, E. G Hansen, W. M. Porter, “The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS),” Remote Sens. Environ., vol. 44, no. 2-3, pp 127-143, May-Jun., 1993.)