

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 A

GOSAT 衛星及び搭載センサ TANSO の概要

温室効果ガス観測技術衛星(Greenhouse gases Observing SATellite) (GOSAT) には温室効果ガス観測センサ(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer) (TANSO-FTS) と雲・エアロソルセンサ(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation - Cloud and Aerosol Imager) (TANSO-CAI) が搭載される。また TANSO-FTS と TANSO-CAI をあわせて TANSO と称する。

## A.1 GOSAT衛星の概要

GOSATは、平成21年1月23日に、H-IIA ロケットにより打ち上げられ、5年間に渡り、全球の二酸化炭素及びメタンの濃度分布（気柱量及び高度分布）を観測する。GOSATは、TANSO-FTSとTANSO-CAIのセンサ部を、衛星地球指向面（+Z面）に搭載し、センサを常に地心方向に向けるよう3軸姿勢制御を行う。また、展開した太陽電池パドルにより、衛星及びセンサの運用に必要な電力を確保するとともに、センサで取得したミッションデータをミッションデータ記録装置（MDP）に記録・再生し、地上局に伝送する。

図 A.1-1 に GOSAT の軌道上外観図、表 A.1-1 に主要諸元、表 A.1-2 に観測軌道パラメータをそれぞれ示す。また、図 A.1-2 に軌道を示す。

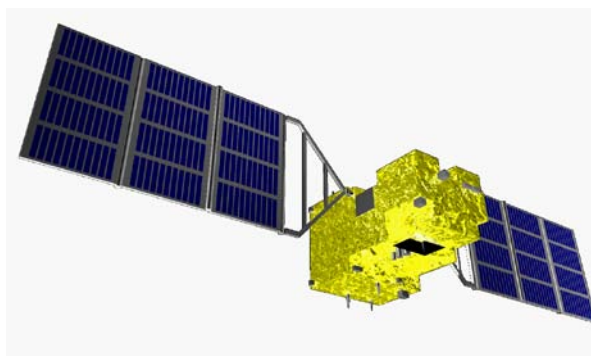


図 A.1-1 GOSAT 軌道上外観

表 A.1-1 GOSAT の主要諸元

項目	諸元
サイズ	本体：高 3.7m(X)×幅 1.8m(Y)×奥行 2.0m(Z) (突起物除く) パドル翼端間：13.7m
質量	1750 kg
発生電力	3.8 kw (EOL)
寿命	5 年
打上げ時期	2009 年 1 月 23 日

表 A.1-2 GOSAT の観測軌道パラメータ

項目	諸元
軌道の種類	太陽同期準回帰軌道
軌道高度	666 km
軌道傾斜角	98.06 deg
1 日の周回数	14 + 2/3 周
回帰までの周回数	44 周
降交点通過地方太陽時	13 時±15 分

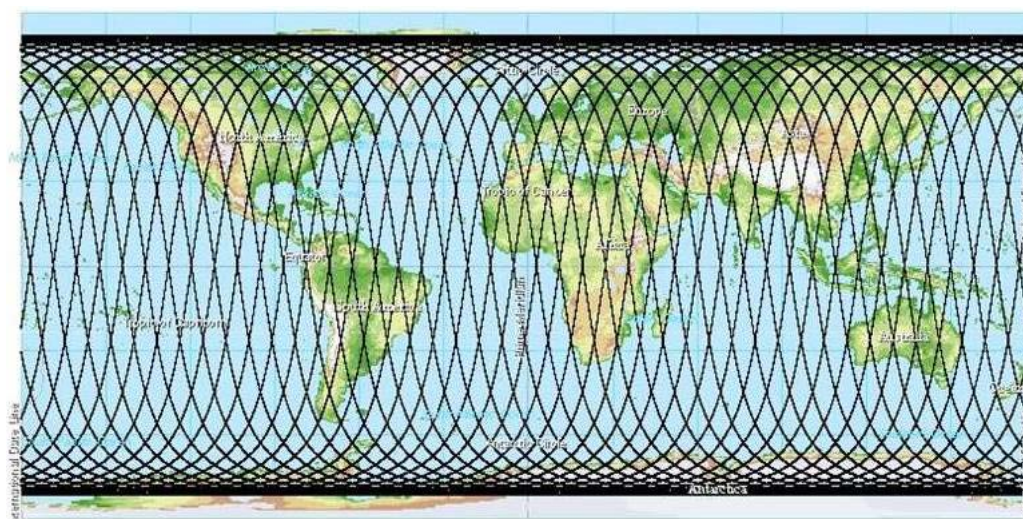


図 A.1-2 GOSAT の軌道

## A.2 GOSAT/TANSO-FTSの概要

### A.2.1 TANSO-FTSの概要

TANSO-FTS の概要を表 A.2-1 に示す。

表 A.2-1 TANSO-FTS の概要

観測方式	直下視観測方式
センサ方式	フーリエ干渉計による大気吸収分光測定
機能	<ul style="list-style-type: none"><li>①可視、短波長赤外、熱赤外で地心方向の大気観測を行う。</li><li>②格子点観測を行う。</li><li>③1 インターフェログラム取得中、同一地点を観測する。</li><li>④SNR 向上の目的で足し合わせ観測を行うため、同一地点を観測する。</li><li>⑤定常観測時にクロストラック方向に指定された固定角度間隔で走査できる。</li><li>⑥3日回帰ごとに、同一地点観測ができる。</li><li>⑦2軸の走査機構を用いてサングリントが予想される地点をポインティングできる。</li><li>⑧定常観測モード、サングリント観測モード、定点観測モードを組み合わせで観測できる。</li><li>⑨以下の軌道上校正を行う。<ul style="list-style-type: none"><li>(1)短波長赤外で太陽照度校正、熱赤外で黒体を用いた校正を行う。</li><li>(2)短波長赤外および熱赤外で深宇宙校正を行う。</li><li>(3)GOSAT およびポインティング機構を月方向に指向することにより、年に1度感度校正を行う。</li></ul></li></ul>

TANSO-FTS は以下の3ユニットから構成される。

- ① TANSO-FTS・光学系ユニット
- ② TANSO-FTS・制御系ユニット
- ③ TANSO-FTS・電気回路ユニット

ブロック図を図 A.2-1 に示す。TANSO-FTS は実利用実証ミッションであることを考慮し、極力、冗長構成を採用している。また、外観図および光学系ユニットの内部構造を図 A.2-2 示す。

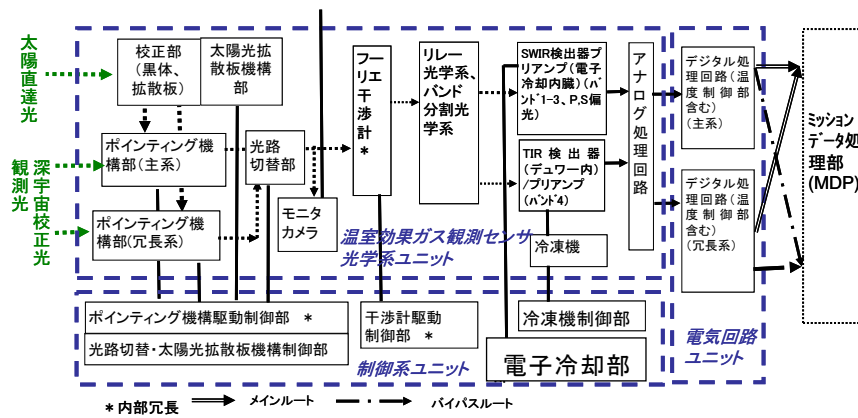


図 A.2-1 TANSO-FTS のブロック図

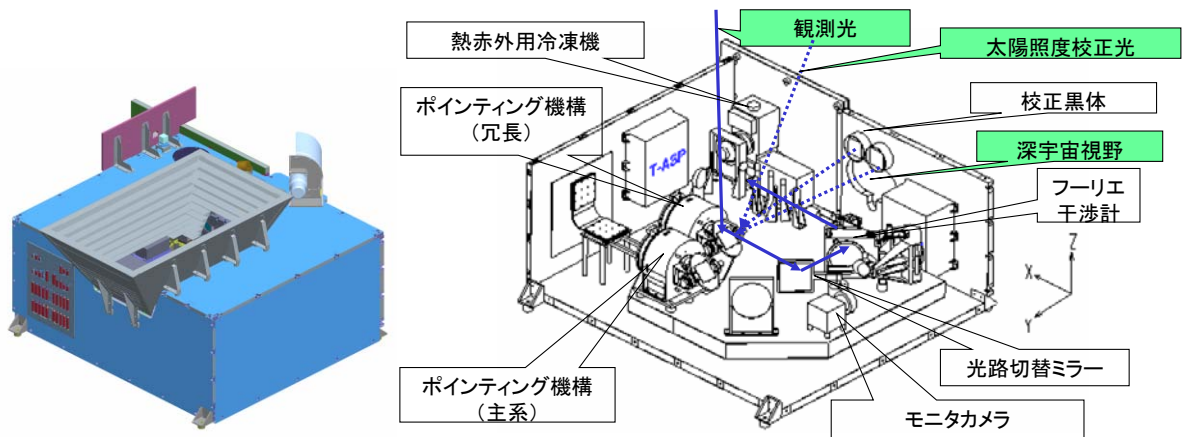


図 A.2-2 外観図および光学系配置図

## A.2.2 TANSO-FTSの仕様

### (1) フーリエ干渉計機構部

フーリエ干渉計機構部の仕様および走査の概要を表 A.2-2 に示す。

表 A.2-2 フーリエ干渉計機構部の仕様および走査の概要

分光方式	フーリエ干渉計
ポート数	2ポート方式（シングルパス）
走査	V字型のスイングアームの先端に2つのコーナーキューブが取り付けられ、支持されたフレキシブルブレードを中心に左右に走査する（図 A.2-4 参照）。
データ取得方式	両側走査片道データ取得
ビームスプリッタ	ZnSe（コーティングなし）
サンプリング	半導体レーザによるサンプリング
信号処理	インターフェログラムデータを地上へ伝送

走査の概要を図 A.2-3 に示す。走査速度安定化要求は1%以下である。光路差ゼロ（ZPD）の位置を中心とする両側のインターフェログラムを取得する。

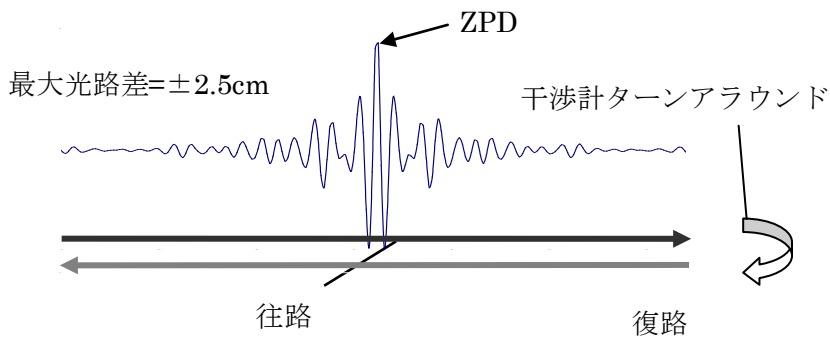


図 A.2-3 フーリエ干渉計走査概要

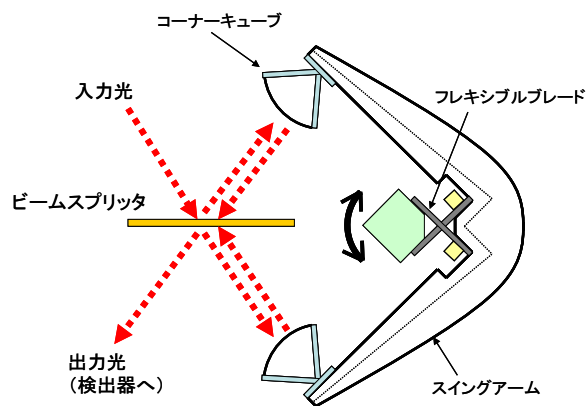


図 A.2-4 ダブルコーナーキューブ／スイングアーム／フレキシブルブレードの概要

(2)バンド構成

TANSO-FTSは4バンドの検出器を有しており、各バンドは同一視野をもつ。  
表 A.2-3 に4バンドの波長範囲、分光分解能などを示す。

表 A.2-3 各バンドの波長範囲と分光分解能

バンド	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 4
波長帯	可視	短波長赤外	短波長赤外	熱赤外
偏光観測	有	有	有	無
波長範囲 (注1)	12900- 13200 cm <sup>-1</sup>	5800- 6400 cm <sup>-1</sup> (注5)	4800- 5200cm <sup>-1</sup>	700- 1800 cm <sup>-1</sup>
帯域外特性 (注2)	<12700cm <sup>-1</sup> . >13400cm <sup>-1</sup> において、透過 率 0.1%以下。	<5000cm <sup>-1</sup> >6800cm <sup>-1</sup> において、透過 率 0.1%以下。	<4500cm <sup>-1</sup> >5500cm <sup>-1</sup> において、透過 率 0.1%以下。	<600cm <sup>-1</sup> >3800cm <sup>-1</sup> において、透過 率 0.1%以下。
分光分解能 (注3)	0.2 cm <sup>-1</sup>	0.2 cm <sup>-1</sup>	0.2 cm <sup>-1</sup>	0.2 cm <sup>-1</sup>
装置関数の半値 全幅 (注4)	0.6 cm <sup>-1</sup> 以下	0.27 cm <sup>-1</sup> 以下	0.27 cm <sup>-1</sup> 以下	0.27cm <sup>-1</sup> 以下
測定パラメータ	(O <sub>2</sub> ) →気圧、 巻雲情報	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, 巻雲情 報	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, ほか

注1：バンド1, 2, 3の波長範囲においては最大効率値の80%以上の効率を有する。

バンド4は波長範囲においては検出器感度を量子効率に換算し、最大効率値の60%以上の効率を有する。ここで規定する効率は光学系効率、検出器の量子効率、アンプの応答をかけたものとする。

注2：フーリエ変換に伴う信号の折り返し波長域では0.01%以下とする。

注3：分光分解能は(1/(2\*最大光路差))で規定する。

注4：装置関数の半値全幅は単色光源を全画角の範囲に照射し、アポダイゼーションを行わずに逆フーリエ変換を行った場合の半値全幅で規定する。

注5：バンド2においては、軌道上装置関数測定用 1.55 μm (6460 cm<sup>-1</sup>) レーザ波長で0.1以上の透過率を有すること。

(3) 光学系・バンド分割・偏光観測方式

表 A.2-4 に TANSO-FTS の光学系・分光・偏光に関する仕様の概要を示す。  
また、図 A.2-5 に TANSO-FTS 光学系の概要を示す。

表 A.2-4 光学系・バンド分割・偏光に関する仕様の概要

光学系	有効口径	φ 68 mm (バンド 1~3)、φ 60 mm (バンド 4)
	F 値	F=2 (FTS と検出器間に設置する検出器光学系の F 値)
	光学系	反射光学系、ただし、バンド 1-3 の検出器への集光は屈折光学系を用いる。
	口径絞り	バンド 1-3 は、コーナーキューブが口径絞りとなる。 FTS 走査に伴う光束の移動は、口径 68mm に対して、光路垂直方向に 1mm 以内である。 バンド 4 は、背景光をおさえるために、口径絞りを検出器光学系の中に設置する。
	視野絞り	フーリエ干渉計による変調後、集光し、全バンド共通のスリットで視野を決定する。(15.8mrad : 地表面換算 10.5km)
バンド分割	バンド分割	スリットで視野を絞った後コリメートし、バンド 1 より、順番にダイクロイックフィルタで各波長帯の観測光を分割する。
	帯域外光除去	検出器光学系部にバンド 1-3 それぞれに狭帯域バンドパスフィルタを設置する。
偏光	偏光分割	バンド 1-3 に関しては、検出器光学系部に偏光ビームスプリッタを設置し、2 偏光を同時観測する。



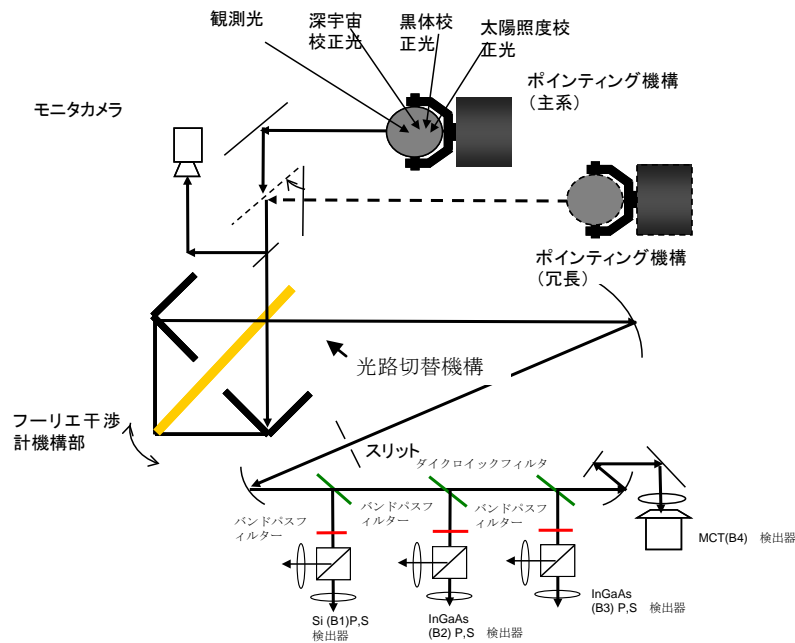


図 A.2-5 TANSO-FTS の光学系概要

(4) バンド間・センサ間レジストレーション

バンド間・センサ間のレジストレーションは、以下の通りである。

- ① FTS 内のバンド間レジストレーション：0.05 画素以下
- ② TANSO-FTS と TANSO-CAI のレジストレーション：TANSO-CAI の 0.5 画素以下
- ③ FTS 入射部にモニタカメラ（視野確認カメラ）を設置し、TANSO-CAI とのレジストレーションをとれるようにする。

### A.2.3 TANSO-FTSの観測方式

(1) 観測の原理

太陽は絶対温度 6000 度弱の黒体光源とみなすことができ紫外から近・短波長赤外までの光を主に放射する。太陽から放射された短波長赤外光は雲・エアロソールなどにより吸収、散乱される以外は大半が地表面に到達し、地表面で散乱された光が再び大気圏外に戻るのので、これを衛星から観測することができる。短波長赤外光領域には二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>)、水蒸気 (H<sub>2</sub>O) の吸収線が存在するので、この測定から濃度を算出することができる。

地表面や雲などからは、それ自身のもつ温度と波長特性に応じた強度の熱赤外放射があり、その波長帯には主要大気成分及び微量大気成分の吸収線が多数存在する。大気成分を構成する各気体分子は、短波長赤外や熱赤外の波長範囲に固有の吸収線をもつ。吸収の強さはスペクトルにより異なるが、これらの吸収波長、吸収強度と濃度の関係については、実験室などで求められたデータベースを用いることができる。観測対象である大気分子の吸収スペクトルを検知し、光を電気信号に変換（光電変換）し、スペクトルごとの強度を求め、そのレベルから大気分子の量を導出するのが、分光観測の原理である。

衛星に搭載されたセンサでは、観測対象の方向に走査鏡を向けて、観測光を導入し、回折格子や干渉計などの分光計により、波長帯ごとに分かれた検知器で観測光を光電変換し、電気信号として地上にデータを送信する。地上で受信されたデータから、情報を抽出し、スペクトルデータに変換する。こうして得られたスペクトルデータから、地球大気に存在する各大気成分の量を計算する。

## (2) フーリエ干渉計の原理

フーリエ干渉計は光をビームスプリッタ(BS)で分割した後、光路差の異なる二つの光を干渉させる装置であり、光路差を順に変えて得られるインターフェログラムを、逆フーリエ変換することにより、光源のスペクトルを得る。この方式には以下の特徴がある。

- ① 光量利得に優れている。
- ② 広波長範囲のスペクトルを高分光分解能で取得出来る。

フーリエ干渉計は、コンピュータの発達により高速の逆フーリエ変換が可能となったこと、また、レーザ測距により高精度の機械走査が可能となったことにより実用化された。図 A.2-6 にマイケルソン型干渉計の原理図を示す。通常 M1 は固定鏡で M2 は可動鏡であるが、TANSO-FTS では M1, M2 ミラーを一つのスイングアームに搭載することにより M1, M2 を逆位相で同一距離動かすことができることから光路差は 2 倍となり、高速走査も可能で、高分光分解能と高空間分解能の両者が実現できるという特徴がある。

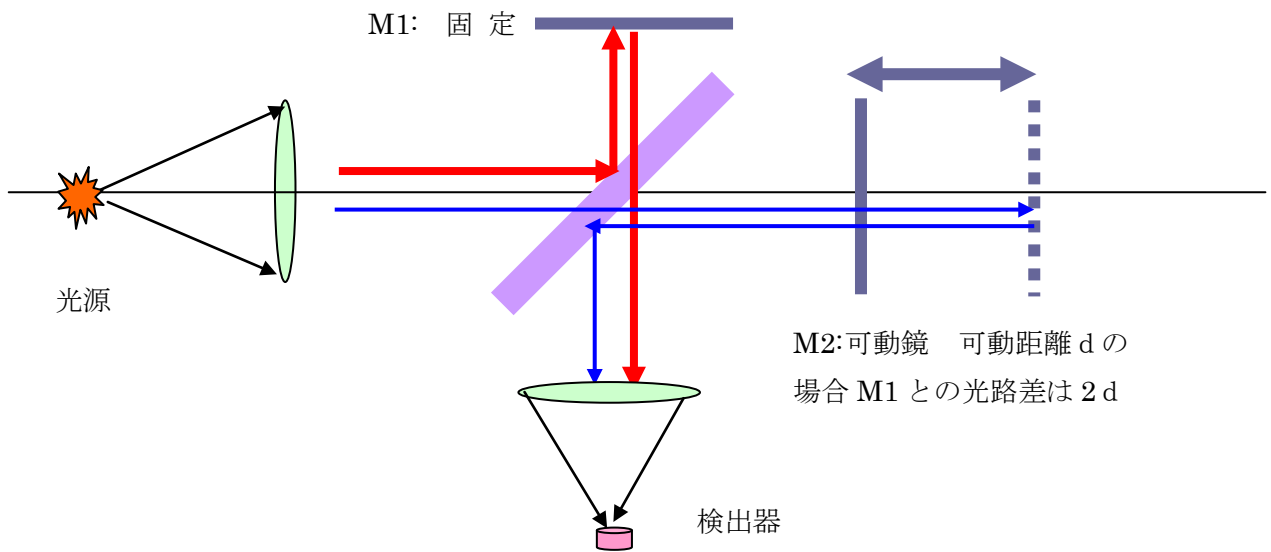


図 A.2-6 マイケルソン型干渉計の原理図

なお、衛星搭載用としては、ロケット打上げ時の振動環境や宇宙空間での熱環境も考慮した設計が行われる。

フーリエ干渉計では図 A.2-7 に示すようなインターフェログラムと呼ばれる信号が得られる。

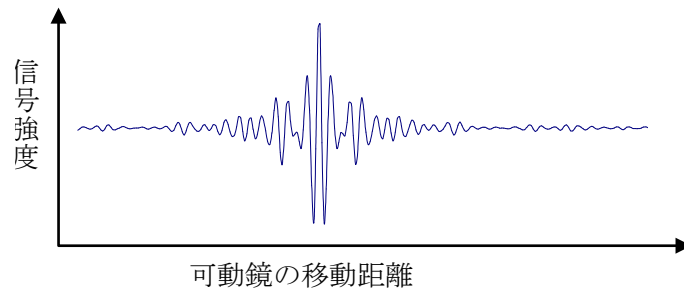


図 A.2-7 インターフェログラムデータ

このインターフェログラムを逆フーリエ変換すると図 A.2-8 に示すような大気による吸収スペクトルが得られる。ここに示したスペクトルは、地球大気中の水蒸気、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ により吸収された太陽光を GOSAT 地上試験モデルにより平成 17 年 11 月に観測したものである。

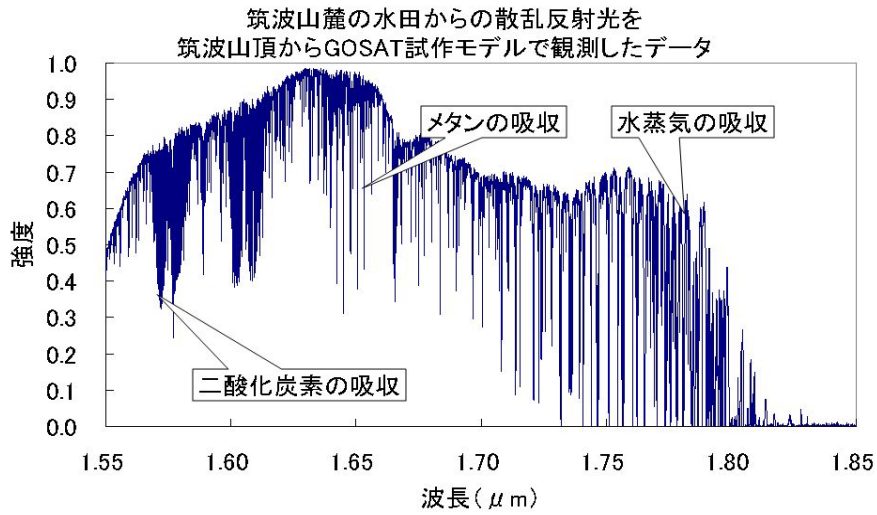


図 A.2-8 H17年11月GOSAT地上試験モデルにより筑波山頂で  
取得した大気散乱光スペクトル(1.6 μm帯のみ)

衛星では高頻度で観測ができるため、上記で取得したスペクトルから大気成分量をもとめ、全球分布図が求まり、図 A.2-9 の全球の分布図を得ることができる。

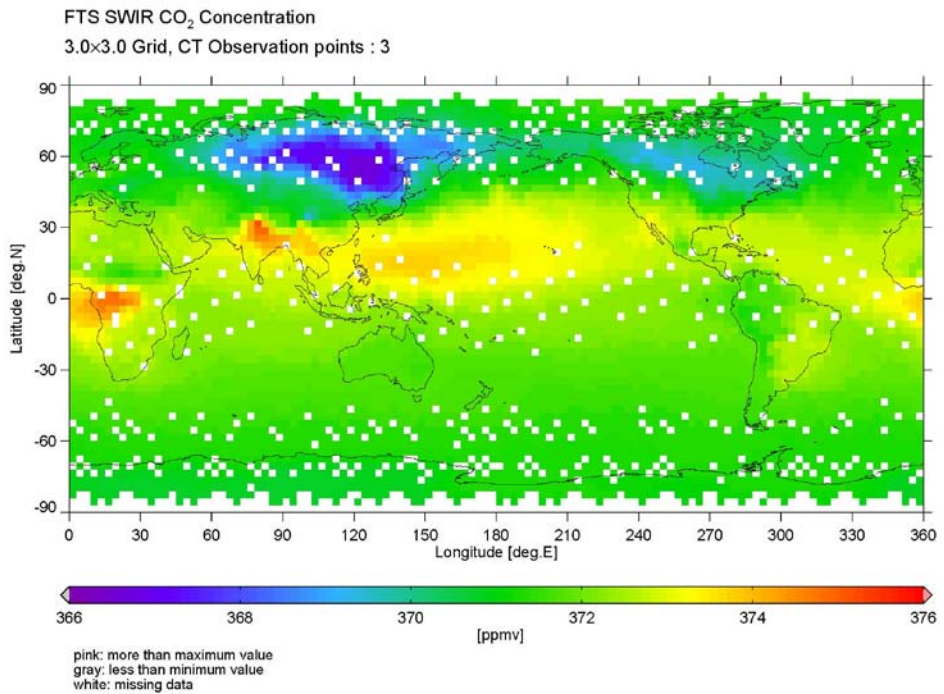


図 A.2-9 CO<sub>2</sub> 全球分布図

上記に示した衛星観測データと大気輸送モデルを用いて、図 A.2-10 に示すような二酸化炭素のネット吸収排出量全球分布図が得られる。

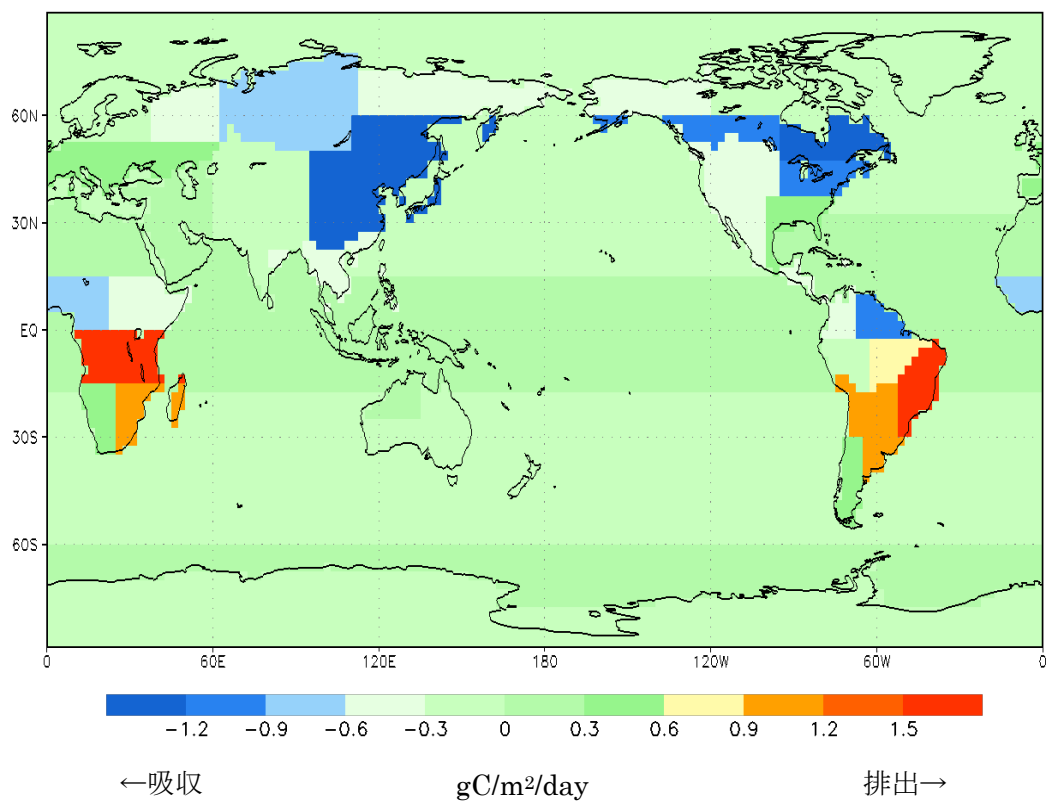


図 A.2-10 二酸化炭素のネット吸収排出量全球分布

更に、得られた二酸化炭素のネット吸収排出量と大気輸送モデルを用いて、図 A.2-11 に示すような二酸化炭素の3次元全球分布が得られる。

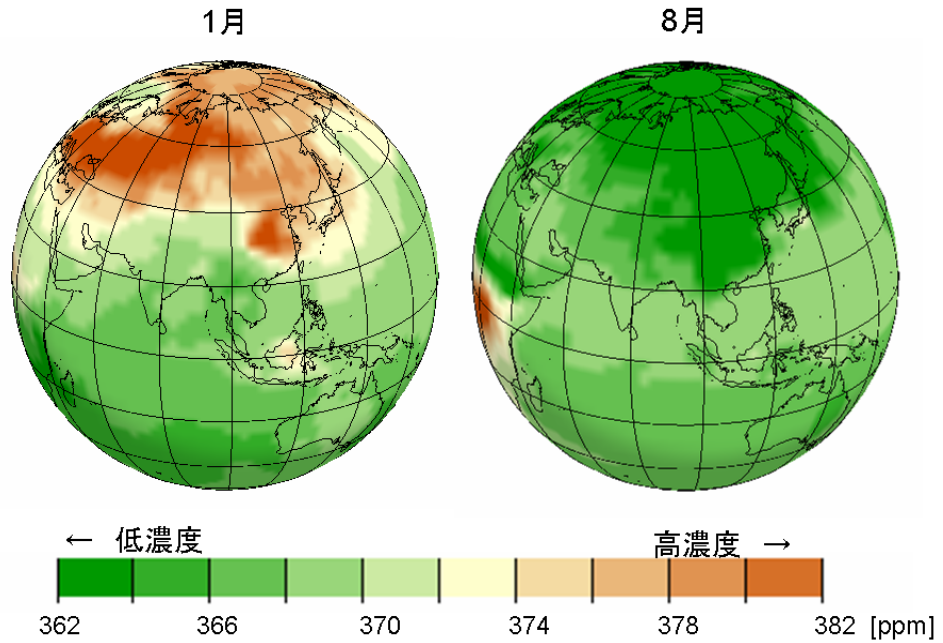


図 A.2-11 ネット吸収排出量と大気輸送モデルより得られる二酸化炭素の3次元全球分布

(3) GOSATでの観測

図 A.2-12 に示すように太陽からの可視・短波長赤外放射光の地球大気及び地表面からの反射光および熱赤外波長域での地表面および地球大気からの熱放射光を観測する。

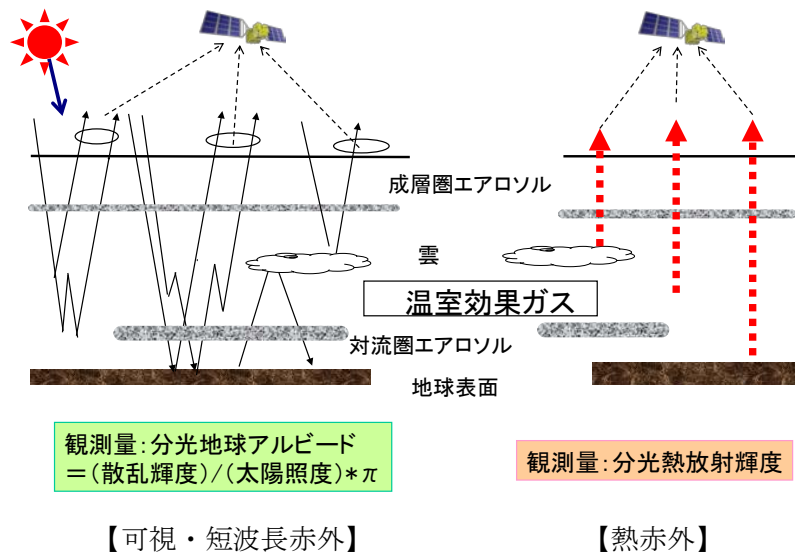


図 A.2-12 GOSAT での観測

TANSO-FTS は可視波長域の  $0.76 \mu\text{m}$  から熱赤外  $14.3 \mu\text{m}$  までの広波長範囲にわたって地球から放射される光を観測する (図 A.2-13 参照)。気温の鉛直分布は熱赤外で測定する。気圧は酸素分子 ( $\text{O}_2$ ) の吸収から求めることができる。気柱量は  $\text{CO}_2$  炭素よりも濃度が高くかつ一定な  $\text{O}_2$  の吸収をリファレンスとして導出する。

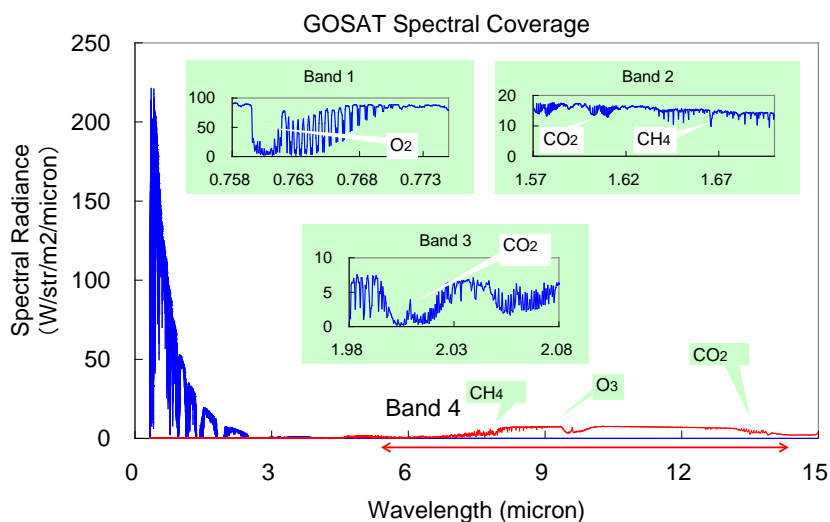


図 A.2-13 TANSO-FTS の観測波長帯と大気の吸収線

## A.3 GOSAT/TANSO-CAIの概要

### A.3.1 TANSO-CAIの概要

表 A.3-1 に TANSO-CAI の目的を示す。

表 A.3-1 TANSO-CAI の目的

目的 1	FTS データの有効性の判定	厚い雲がある場合はデータを棄却するかの判定をする。被雲率だけでなく雲の厚さを判定できることが望ましい。
目的 2	雲、エアロソルの検出・FTS データの補正	FTS データの雲、エアロソルによる誤差を補正するための情報を提供する。雲特性、エアロソルの特性(光学的厚さ、エアロソルタイプ)を評価する。そのためエアロソルの分光特性を導出できることが望ましい。

TANSO-CAI では、エアロソルのタイプ、光学的厚さを導出する必要がある。そのために、大気分子による吸収がなく、最大の SNR が確保でき、かつエアロソルの光学的厚さの分光特性が観測可能な波長帯を選定する必要がある。一般にエアロソルによる散乱は大きく偏光するため、偏光観測が望ましい。しかしながら、直下視に近い固定角度で観測を行なう TANSO-CAI では、偏光量が小さくなり、エアロソル推定が著しく困難となるため、偏光観測よりもバンド数の確保を優先させた。このような理由から TANSO-CAI では、表 A.3-2 に示すような 4 バンドを選定した。

表 A.3-2 TANSO-CAI の観測波長帯と選定根拠

	選定根拠
バンド 1 (0.380 $\mu$ m)	地表面反射率が低い紫外で O <sub>3</sub> の吸収がないこと。
バンド 2 (0.674 $\mu$ m)	植生の反射率の立上りと O <sub>2</sub> Bバンド及び H <sub>2</sub> O の吸収に干渉しない。
バンド 3 (0.870 $\mu$ m)	H <sub>2</sub> O の吸収に干渉しない。
バンド 4 (1.60 $\mu$ m)	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> の吸収は補正できるものとし、H <sub>2</sub> O の吸収をさげ、最大の波長幅を確保する。かつ検出器のカットオフの温度変動の影響をうけない。

TANSO-CAI は以下の 2 ユニットから構成される。



- ① TANSO-CAI 光学系ユニット
- ② TANSO-CAI 電気回路ユニット

ブロック図を図 A.3-1 に示す。

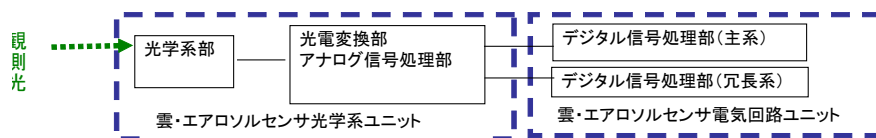


図 A.3-1 TANSO-CAI のブロック図

また、TANSO-CAI の外観図を図 A.3-2 に示す。

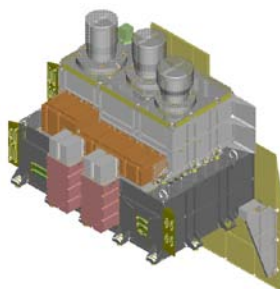


図 A.3-2 TANSO-CAI の外観図

### A.3.2 TANSO-CAIの仕様

#### (1) 波長帯と性能

TANSO-CAI の仕様を表 A.1-1 に示す。

表 A.3-3 TANSO-CAI の仕様

	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4
中心波長 ( $\mu\text{m}$ ) (注1)	0.380±0.005	0.674±0.005	0.870±0.005	1.60±0.01
波長幅 ( $\mu\text{m}$ ) (注1)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.10
帯域外特性① ( $\mu\text{m}$ ) (注2)	<0.36 及び >0.4 で1%以下	<0.658 及び >0.692 で1%以下	N.A.	<1.0 及び >1.69 で1%以下
帯域外特性② ( $\mu\text{m}$ ) (注2)	N/A	>0.696 で0.1%以下	<0.840 及び >0.890 で0.1%以下	N/A
帯域外特性③ ( $\mu\text{m}$ ) (注3)	>0.45 で0.15%以下	N/A	N/A	N/A
帯域外特性④ ( $\mu\text{m}$ ) (注3)	>0.7 で0.03%以下	N/A	N/A	N/A
偏光観測	無			

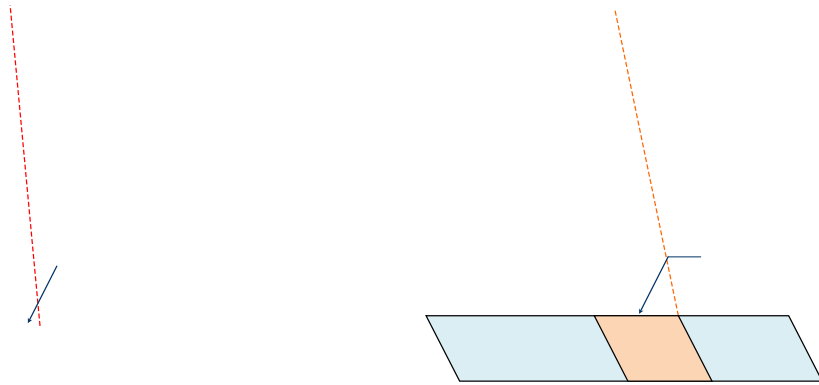
注1：中心波長、波長幅は1および2次のモーメント量で規定する。光学系効率の分光特性、フィルタの分光特性、検出器の分光特性などを考慮する。

注2：右記の波長で水蒸気の吸収帯を避けるため、帯域外①での感度は中心波長の感度の1%以下であること、帯域外②での感度は中心波長での感度の0.1%以下であること。

注3：右記の波長で帯域外③での効率は中心波長の効率の0.15%以下、帯域外④での効率は中心波長の効率の0.03%以下であること。

#### (2) 瞬時視野およびクロストラック方向の視野角

直下点において500 m(バンド1, 2, 3)、1.5 km(バンド4)とする。クロストラック方向の視野角は±35 degとする。(日照時の観測で3日間で全球をカバーする)。図 A.3-3 に、瞬時視野及び視野の概念図を示す。



【バンド 1,2,3】

【バンド 4】

図 A.3-3 TANSO-CAI の瞬時視野と視野

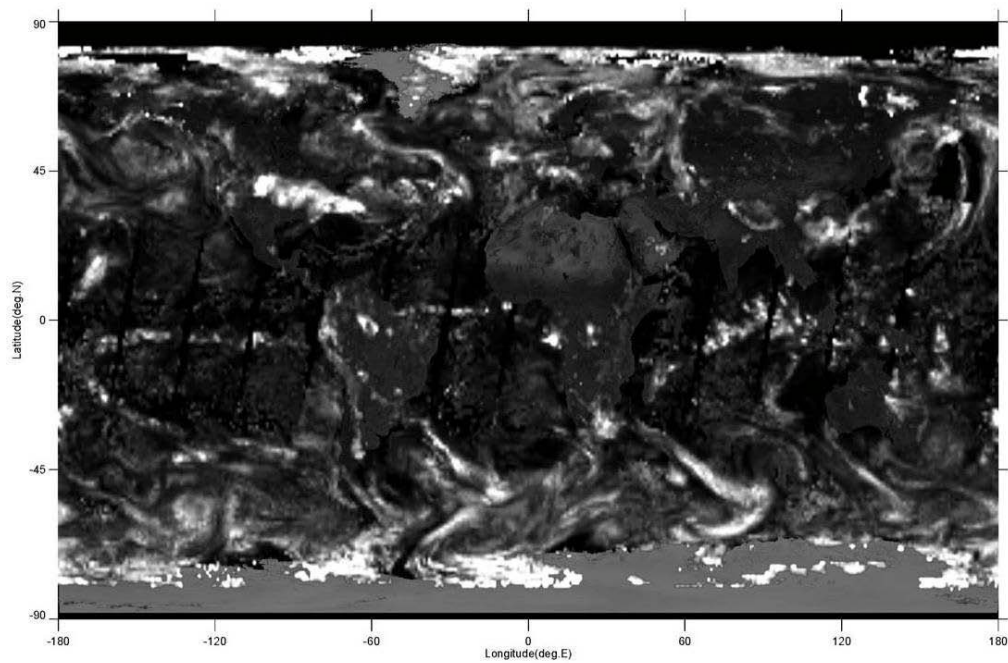
### A.3.3 TANSO-CAIの観測方式

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>の気柱量は、太陽光、地表面、衛星間の光路上の吸収量から導出される。光路長は、濃度既知である酸素 (O<sub>2</sub>) の TANSO-FTS の 0.76 μm 帯の吸収量を用いて導出する。光路中に、雲・エアロソルが存在する場合は、実効光路長が変わるため、補正が必要となる。

雲とエアロソルの影響の補正精度を向上させるため、紫外、可視、短波長赤外の波長帯からなる多バンドの電子走査イメージャを搭載し、雲被覆と陸域及び海上のエアロソルの観測を行う。エアロソルの空間分布を把握するため広範囲 (1000km) のクロストラックの視野を有する。

TANSO-FTS と TANSO-CAI のレジストレーションは、打上げ後、TANSO-FTS 内に取り付けられた視野確認カメラを用いて行う。

図 A.3-4 に CAI の観測例を示す。



Copyright (c) 2007 NIES

図 A.3-4 MODIS データより作成した CAI (バンド 2 に相当) による観測例