

温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2) のミッション機器

上野信一*
中野貴敬*

Mission Instruments for Greenhouse Gases Observation Satellite-2(GOSAT-2)

Shinichi Ueno, Takayuki Nakano

要 旨

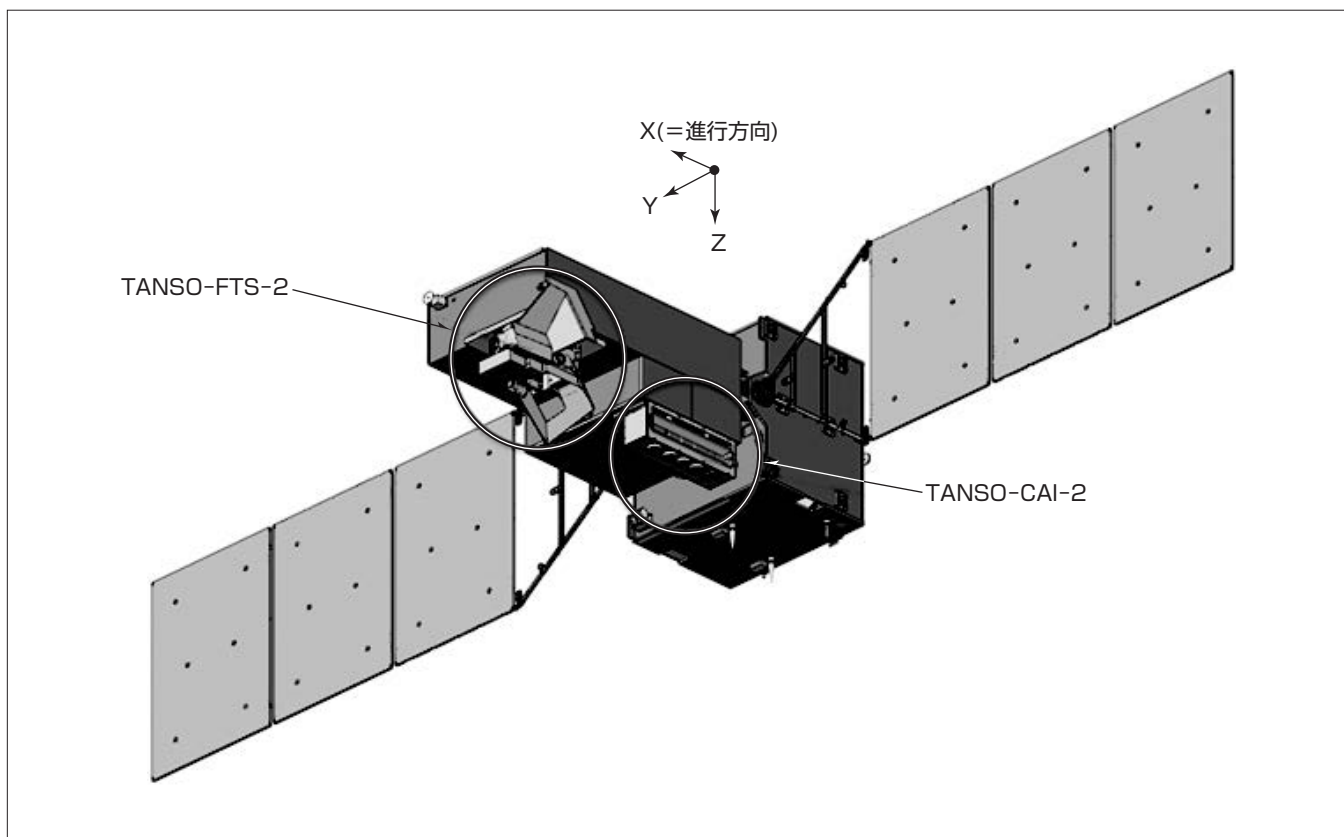
温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (Greenhouse gases Observing SATellite-2: GOSAT-2) は、日本が欧米に先駆けて 2009 年 1 月に打ち上げた世界初の温室効果ガス観測専用衛星“いぶき (GOSAT) ⁽¹⁾⁽²⁾ の後継衛星として開発が進められている。

GOSAT-2 は、ミッション機器として温室効果ガス観測センサ 2 型 (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Fourier Transform Spectrometer 2: TANSO-FTS-2) と雲・エアロゾルセンサ 2 型 (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Cloud and Aerosol Imager 2: TANSO-CAI-2) の 2 種類のセンサが搭載される。

TANSO-FTS-2 センサは、二酸化炭素やメタンなどの

温室効果ガスをフーリエ分光法で観測する。TANSO-FTS-2 では、前号機に対して①センサ開口の拡大による観測データの品質向上、②観測波長領域の拡張による一酸化炭素の観測データ追加、③雲領域の回避観測による有効観測データ数の増加の性能向上を行う。

TANSO-CAI-2 は、TANSO-FTS-2 で二酸化炭素を測定する際に誤差要因となる雲の有無の判定やエアロゾル (大気粒子状物質) の測定に用いる画像センサである。TANSO-CAI-2 は、前号機に対して①直下視観測から前方/後方視観測への観測方向の変更及び増加、②観測波長領域追加によるブラックカーボンや PM2.5 等の微小粒子状物質の観測、③短波長赤外領域バンドの観測幅の拡大の性能向上を行う。



温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2) の形状とミッション機器搭載状況

X 方向が衛星の進行方向である。-Y 方向が太陽光が当たらない面となるため、2 つのミッション機器 (TANSO-FTS-2 及び TANSO-CAI-2) の放熱面は -Y 方向に設置されている。+Z 方向が地球面方向であり、センサは +Z 方向を観測方向としている。

1. ま え が き

本稿では、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の指導の下、当社が開発を進めている温室効果ガス観測技術衛星 2号 (GOSAT-2) に搭載されるミッション機器 TANSO-FTS-2 センサ (以下“FTS-2”という。) と TANSO-CAI-2 (以下“CAI-2”という。) について述べる。

2. FTS-2 センサ

2.1 FTS-2 センサの構成

FTS-2 センサの主な仕様を表 1 に、観測対象を表 2 に、構成を図 1 に示す。FTS-2 は、大きくセンサユニットと電気回路ユニットの 2 つに分けられる。

センサユニットは、製造性を高くするためにモジュール化された構造である。そのモジュール構成を図 2 に示す。センサユニットは大きくスキャナアセンブリ構造 (SSA) と光学結合アセンブリ構造 (IOA) の 2 つに分かれる。SSA は、観測地点を決定するスキャナと光源、観測時に雲領域を回避するための視野画像を撮影するモニタカメラと迷光を抑

表 1. FTS-2 の主な仕様

	バンド1	バンド2	バンド3	バンド4	バンド5
分光方式	フーリエ分光方式				
波数範囲 (cm ⁻¹)	12,950~13,250	5,900~6,400	4,200~5,200	1,188~1,800	700~1,188
帯域外波数範囲 (cm ⁻¹)	<12,750 >13,450	<5,100 >6,800	<4,100 >5,500	<1,000 >3,800	<600 >1,300
サンプリング間隔 (cm ⁻¹)	0.2				
有効サンプリング点数	153,090	76,545	38,400		
偏光観測	あり			なし	
S/N比	ケース 1	>400	>300	>300	
	ケース 2	>650	>500	>NA	
	ケース 3	>200	>150	>NA	
ILS半値全幅 (cm ⁻¹)	≤0.4	≤0.27			
消費電力 (平均/最大)	≤200W / ≤350W				
質量	≤225kg				
残存確率 (5 年後)	≥0.85				

NA: Not Applicable

表 2. FTS-2 の観測対象

バンド	波数	主な観測対象
1	12,950~13,250	O ₂
2	5,900~6,400	CO ₂ , CH ₄
3	4,200~5,200	CO, CO ₂ , H ₂ O
4	1,183~1,800	CH ₄ , H ₂ O
5	700~1,183	CO ₂ , 温度

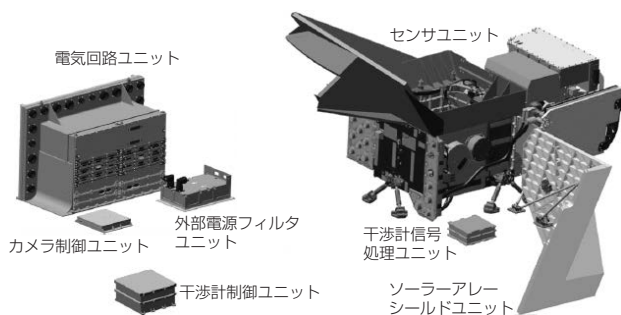


図 1. FTS-2 センサの構成

制するためのシールド構造でできている。IOA は、干渉計、光学系、検出器などの光学素子と検出器を冷却するパッシブクーラ、アナログ信号処理回路部などで構成されている。

FTS-2 全体はアメリカ海洋大気庁の気象衛星 Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership) に搭載された CrIS (Cross-track Infrared Sounder) をベースに設計を行っている。干渉計は、いぶきの設計をベースにしているが、特に次の 3 つの点で向上を図っている。

- (1) 干渉計の開口径: $\phi 68\text{mm} \rightarrow \phi 77\text{mm}$ 拡大による S/N 比 (Signal-to-Noise ratio) の向上
- (2) レーザアライメント: ピックアップミラーのモノリシック化や集光レンズ追加によるロバスト性向上
- (3) フリンジカウント: ハーフフリンジカウントによる精度向上

オンボードでの信号処理フローを図 3 に示す。時間に同期した、等時間サンプリングによってインターフェログラムへ変換する。また、等時間サンプリングのインターフェログラムの取得は、出力データ周波数に対して 5~12 倍のオーバーサンプリングを行う。サンプリングは 14bit の ADC (Analog-to-Digital Converter) で行い、データビット数をバンド 1~3 は 16bit, バンド 4, 5 は 18bit に向上させて出力する。これは、エイリアシングの抑制や量子化誤差の低減に非常に有効である。

2.2 FTS-2 センサの性能見積り

TANSO-FTS-2 の S/N 比の見積り結果を図 4 に示す。性能評価での入射輝度は 3 ケース設定 (表 3) されており (ただし、バンド 4, 5 はケース 1 だけ), それぞれの条件で S/N 比を算出しているが、ここではケース 1 の算出結果を示す。実線が要求仕様値である。バンド 1~3 は S/P (Senkrecht/Parallel) 波のいずれかの観測光に対して S/N 比要求を満足していれば良く、S/N 比が高い S 波観測の見積り結果を示している。バンド 1~5 の全ての条件で S/N 比が要求仕様を満足している。

表 4 に、装置関数の見積り結果を示す。要求仕様を満足していることが確認できる。

2.3 雲検出の例

FTS-2 では、雲を回避して観測を行うことで有効観測

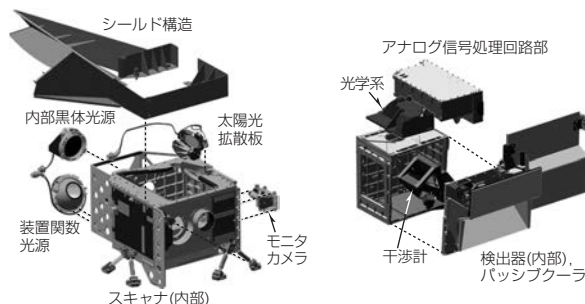


図 2. FTS-2 センサユニットのモジュール構成

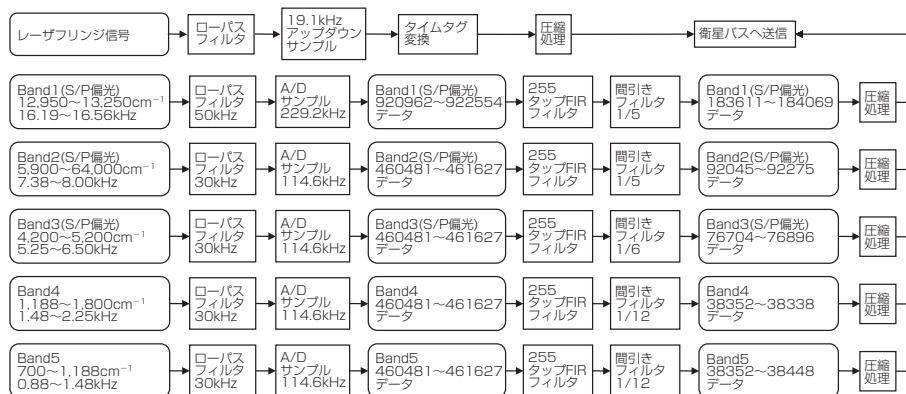


図 3. FTS-2のオンボード信号処理フロー

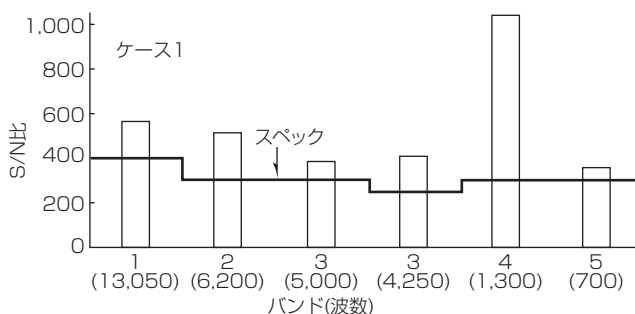


図 4. S/N比の見積り(ケース1)

データの増加を図っている(この機能をインテリジェントポイントングと呼ぶ)。視野確認カメラで得られた画像から雲のない領域を検出するアルゴリズムの検討を行った。

表 4. 装置関数の半値全幅

バンド	要求仕様	設計結果
1	0.40cm ⁻¹	0.365cm ⁻¹
2	0.27cm ⁻¹	0.265cm ⁻¹
3		0.257cm ⁻¹
4		0.244cm ⁻¹
5		0.243cm ⁻¹

図 5 に、雲がある視野画像サンプルに対して雲検出アルゴリズムを適用した例を示す。図 5(a)は雲検出の信号処理アルゴリズムを示す。このアルゴリズムでは、視野画像のカラーの輝度値に対してフィルタしきい値処理を行い、雲の有無に応じた雲マスク画像を作成する。そして、雲マスク画像に対してセンサ視野を重畳して最も雲がない領域を観測点として抽出する。

図 5(b)に、衛星画像に対してこれらのアルゴリズムを適用した例を示す。四角枠内が視野確認モニタカメラの撮影領域を示し、濃淡 3 段階で雲の有無を示している。①中間色四角が視野中心で雲のない領域、②一番濃い四角が視野中心以外に雲がない領域、③一番色の薄い四角は視野全体が雲に覆われている領域を示し、図中に各色の代表例を示す。①の領域は従来の観測データであり、②の領域がインテリジェントポイントングで観測データが増加する領域となる。この例では、①の領域は20%、②の領域は26%、③の領域は54%であり、したがって、インテリジェントポイントングで観測データは20%から46%へ2.3倍向上するという結果が得られた。

表 3. 入射分光輝度の規定値

バンド	波数 (cm ⁻¹)	入射分光輝度(W/cm ² /cm ⁻¹ /str)		
		ケース 1	ケース 2	ケース 3
1	13,050	5.5 × 10 ⁻⁷	1.8 × 10 ⁻⁶	1.8 × 10 ⁻⁷
	6,200	5.2 × 10 ⁻⁷	1.7 × 10 ⁻⁶	1.7 × 10 ⁻⁷
3	5,000	3.8 × 10 ⁻⁷	1.3 × 10 ⁻⁶	1.3 × 10 ⁻⁷
	4,250	3.0 × 10 ⁻⁷	1.0 × 10 ⁻⁶	1.0 × 10 ⁻⁷
4	1,300	3.29 × 10 ⁻⁶ (280K)	—	—
5	700	1.15 × 10 ⁻⁵ (280K)	—	—

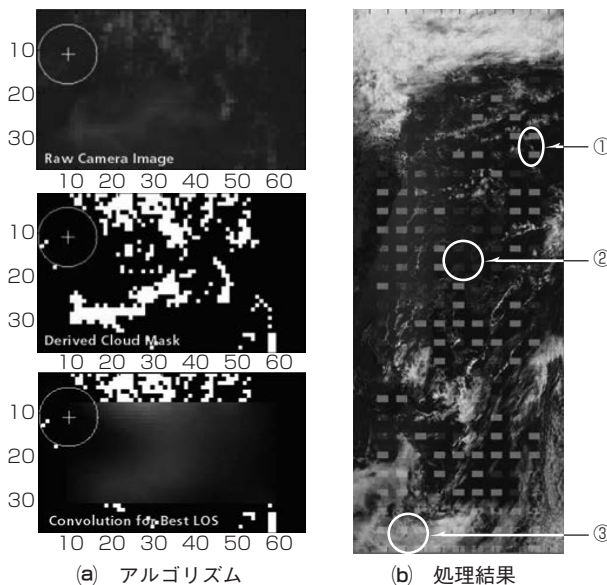


図 5. 雲検出処理の例

3. CAI-2センサ

3.1 CAI-2センサの主要諸元

CAI-2センサの主要諸元を表 5 に示す。GOSAT/CAIでは直下視だけであったが、GOSAT-2ではサンダリントの影響を避けるために前方視/後方視としている。さらに、観測方向の増加と合わせて観測バンド数を増加させている。このタイプの観測センサとしては世界初^(注1)の340nmUV帯観測バンドを持っている。

(注 1) 2015年10月30日現在、当社調べ

3.2 CAI-2センサの構成

CAI-2は、光学系ユニット(OPT)と電気回路ユニット(ELU)の2つのユニットから構成される。ブロック図を図 6 に示す。

CAI-2は、前方視 5 バンド/後方視 5 バンドの合計10バンドから構成される。光学系構成として、1本のレンズ系(鏡筒)に観測波長帯が同じ又は近い前方視/後方視バンドを各1バンドずつ配置した。この合計5本の鏡筒構成によって、鏡筒の本数を最小化して光学系ユニットの小型化を図りつつ、要求の観測バンドと観測方向を満足させている。各鏡筒と各バンドの観測方向を図 7 に示す。

表 5. CAI-2の主要諸元

		光学系部 1	光学系部 2	光学系部 3	光学系部 4	光学系部 5	
共通	分光方式	分光フィルタ方式					
	I FOV(チルト角±20°において)	700±15μ rad(0.46±0.01kmに相当)			1400±30μ rad(0.92±0.02kmに相当)		
	観測幅	日照時観測期間 6日間で全球/同一地点を2方向から観測					
	データ取得周期(撮像周期)	73.2ms以下			146.5ms以下		
	S/N比	規定分光放射輝度にて200以上					
	ダイナミックレンジ	最大輝度レベルで飽和しない					
	MTF(矩形波応答)	0.2以上					
	量子化ビット数	12ビット					
	ゲイン(積分時間)切り替え段数	32					
	バンド間レジストレーション	0.5画素以内(ナレッジ)					
取得校正データ	ダミー(暗時)画素出力, 検出器温度, 電気校正						
前方視	バンド	1	2	3	4	5	
	バンド視線方向(チルト角)(°)	20					
	中心波長(μm)	0.343±0.005	0.443±0.005	0.674±0.005	0.869±0.005	1.63±0.0075	
	波長幅(μm)	<0.02				<0.09	
	帯域外特性	<0.323 >0.363	<0.423 >0.463	<0.654 >0.694	<0.849 >0.889	<1.540 >1.720	
	規定分光放射輝度(W/m ² /sr/μm)	45	79	46	30	7	
	最大分光放射輝度(W/m ² /sr/μm)	209	530	400	250	58	
	後方視	バンド	6	7	8	9	10
		バンド視線方向(チルト角)(°)	-20				
		中心波長(μm)	0.380±0.005	0.550±0.005	0.674±0.005	0.869±0.005	1.63±0.0075
波長幅(μm)		<0.02				<0.09	
帯域外特性		<0.360 >0.400	<0.530 >0.570	<0.654 >0.694	<0.849 >0.889	<1.540 >1.720	
規定分光放射輝度(W/m ² /sr/μm)		48	65	46	30	7	
最大分光放射輝度(W/m ² /sr/μm)	300	500	400	250	58		

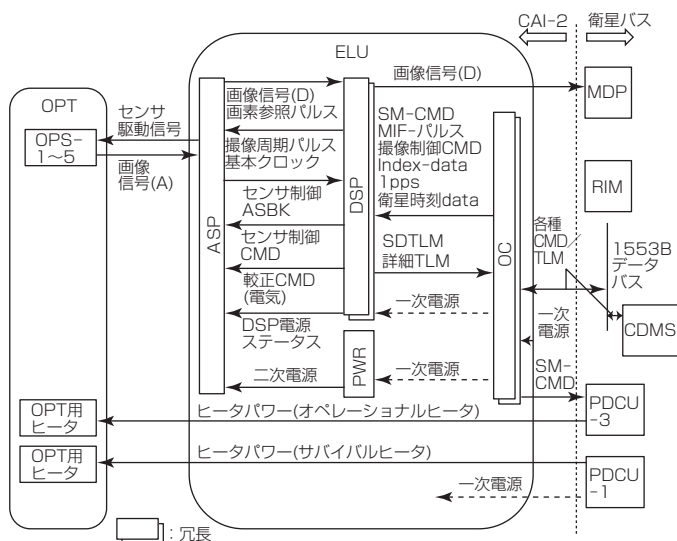


図 6. CAI-2ブロック図

3.3 CAI-2センサの性能見積り

CAI-2の主要性能である, S/N比の見積り結果を表6に示す。仕様値はS/N比が200以上であり, 要求仕様を満足している。

4. むすび

TANSO-FTS-2とTANSO-CAI-2の詳細設計が完了しており, PFM(ProtoFlight Model)製造フェーズに移行している。前号機(いぶき)及びCrIs開発で培われたヘリテージ技術を活用して, 確実な性能達成と短期間での開発を実現する。

表 6. CAI-2性能(S/N比)見積り

バンド	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/N比	272	303	383	260	347	260	329	383	260	347

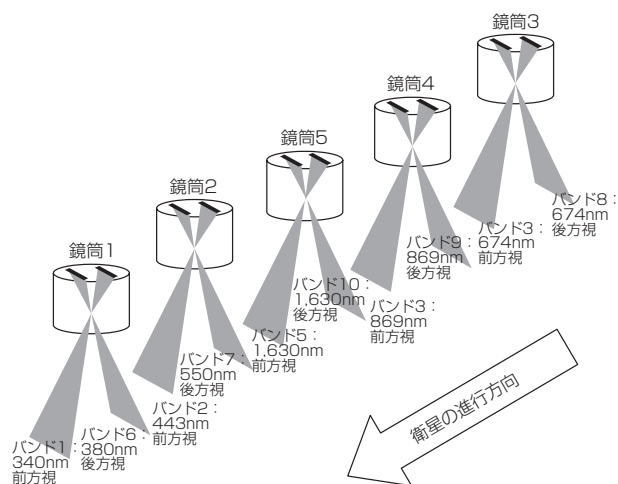


図 7. 観測バンド/観測方向と鏡筒構成

参考文献

- (1) Hamazaki, T., et al.: Sensor system for Greenhouse Gas Observing Satellite(GOSAT), Proc. Of SPIE, **5543**, 275~282 (2004)
- (2) 中島正勝, ほか: いぶきの運用と搭載センサの軌道上性能, 電子情報通信学会技術研究報告, **110**, No.92, 121~122 (2010)