

先進光学衛星の目的と技術

阿波祐二*
今城正雄*
安藤聡祐*

Purposes and Technologies of Advanced Optical Satellite

Yuji Awa, Masao Imaki, Akihiro Ando

要 旨

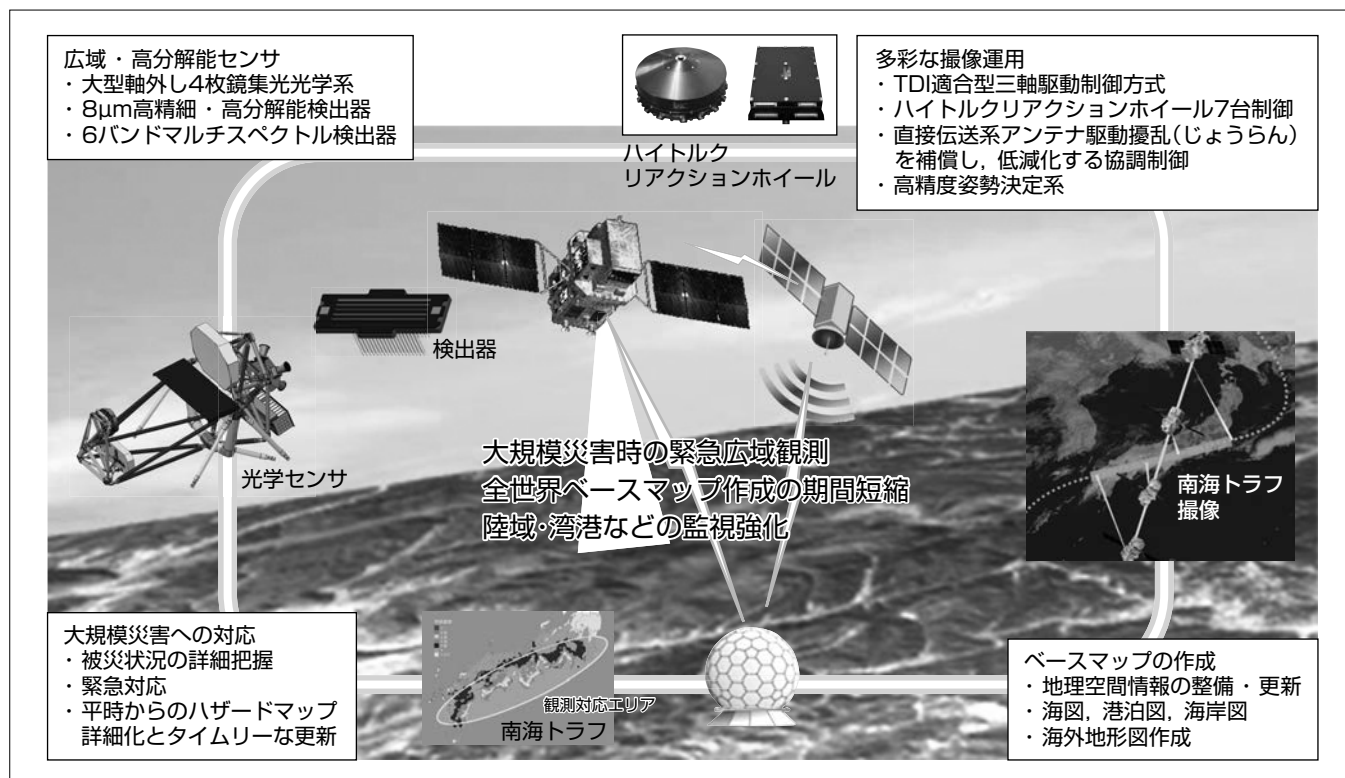
先進光学衛星は、陸域観測技術衛星“だいち”(Advanced Land Observing Satellite: ALOS)で獲得した広域・高分解能観測機能を発展させ、分解能1m以内で日本全域を高頻度に観測し、広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等、様々なニーズに対応することを目的に国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の下、開発を進めている。

これらの目的の実現に向けて、先進光学衛星の光学センサには、広い観測幅と高分解能を両立させるために“大型軸外し4枚鏡集光光学系”を採用した。欧米の高分解能衛星が搭載する“コルシュ光学系”に対し、広域・高分解能性能の両立を実現している。また、衛星バス技術としては、

①災害時の緊急対応の画像取得撮像と②効率的な地図・地

理空間情報(ベースマップ)取得を実現するために、衛星システムの構成を次のとおりとした。

- ①ハイトルクリアクションホイール(RWA)7台の最適配置によって、1,500kmに及ぶ南海トラフ地震発生領域の緊急時の広域撮像を可能にする機動性に優れた姿勢制御システムを採用した。
- ②“だいち2号”(ALOS-2)の観測データ伝送系の2倍の伝送速度要求を実現するために、Ka帯による1.6Gbpsの世界最高速度の伝送系を採用するとともに、取得画像データの蓄積容量制約を排除するために、フラッシュメモリによる950Gバイト以上の大容量データレコーダを採用した。



先進光学衛星の役割と適用技術

先進光学衛星は、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等の様々なニーズに対応することを目的としている。開発に当たって、TDI(Time Delayed Integration)適合型三軸駆動制御方式等の当社独自の多彩な撮像制御技術とミラーや検出器等の当社が持つ光学センサ製造技術を駆使し、世界最先端の性能を実現する。

1. ま え が き

日本での光学センサを搭載した地球観測衛星は年々進歩を遂げ、2006年に打ち上げた陸域観測技術衛星だいち (ALOS)ではパナクロ(Pa): 2.5m, マルチ(Mu): 10mの分解能を達成し、災害監視や地図作成等の分野に広く活用された。先進光学衛星ではこの高性能化トレンドを継続・継承することで国内光学センサ技術の確保に貢献するとともに、更に技術を発展させることによって、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等、様々なニーズに対応することを目的として開発を進めている。

図1に地球観測衛星性能ベンチマークとして、近年開発された海外光学センサに対する先進光学衛星の性能比較を示す。地球観測衛星のミッション性能は、高分解能・狭観測幅(狭域)、低分解能・広観測幅(広域)といった2つのトレンドに大別される。これは搭載する光学系の性質によって方向性が分かれることに起因する。先進光学衛星では両者の特長を兼ねそろえた性能である“広域・高分解能”を実現する。図2に搭載する光学センサの波長域を示す。先進光学衛星では“だいち”と比較してMuバンド数を4から6バンドに増加させ、植生・土壌分析等の定量分析機能を向上させている。

図3にユーザーニーズと、それに対応する先進光学衛星技術を示す。日本の地球観測衛星として“大規模災害への対応”と“ベースマップの作成”に対する要求は高い。大規模災害に対し、被災状況を詳しくかつタイムリーに把握することが重要であり、観測衛星には高分解能・即時性が

求められる。また、平時との比較が必要なことから、被災前のデータ収集を効果的に速やかに実施することが必要で、広域性・高頻度が要求される。これらの要求に対し、先進光学衛星では、広域・高分解能の光学センサを搭載し、緊急撮像にも対応したフレキシブルな撮像運用が可能な機能を具備する。ベースマップの作成に関しては、地形図や海図又は頻繁に変更する都市部の地形を詳細にデータ収集することが重要で、詳細で正確なデータを幅広く・高頻度に収集することが求められる。先進光学衛星では、広い領域を高分解能で画像取得し、大容量の画像データを処理可能な伝送システムを実現する。また、多波長センサを具備し、画像データから植生や土壌の定量的分析が可能である。

本稿では、これまでに開発した地球観測衛星の技術をベースに、先進光学衛星に要求される広域・高分解能の大型光学センサ及びその特長を十分に活用したバス技術について述べる。

2. 先進光学衛星システム

2.1 性能

表1に先進光学衛星システムの諸元を示す。この衛星は当社標準プラットフォームバスであるDS2000をベースとした観測衛星システムである(図4)。広域・高分解能の光学センサを搭載し、大容量の画像データの伝送システムとして光衛星間通信機器を搭載した光データ中継衛星との光衛星間通信リンクによる大容量データ伝送を実現する構成としている。

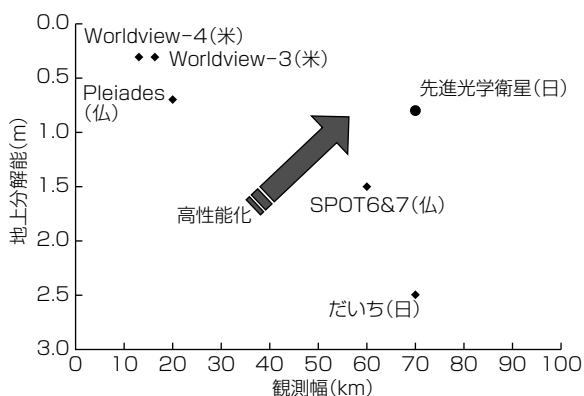


図1. 衛星搭載光学センサベンチマーク

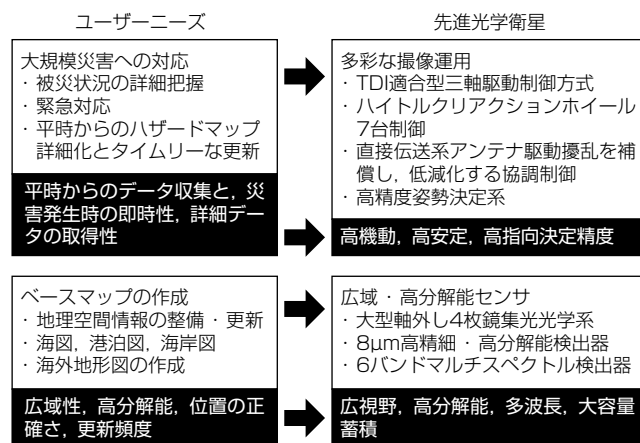


図3. ユーザーニーズと先進光学衛星技術

衛星	波長	400nm									500nm									600nm									700nm									800nm											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7
先進光学衛星	Pa	Pan																																															
	Muバンド1	Coastal																																															
	Muバンド2										Blue																																						
	Muバンド3										Green																																						
	Muバンド4																			Red																													
	Muバンド5																												RedEdge																				
Muバンド6																																					Near-IR												
だいち	Pa	Pan																																															
	Muバンド1	Blue																																															
	Muバンド2										Green																																						
	Muバンド3																			Red																													
Muバンド4																												Near-IR																					

図2. センサバンド

表1. 先進光学衛星システムの諸元

軌道高度	670km(赤道上)
軌道種別	太陽同期準回帰軌道
降交点通過地方太陽時	10:30
回帰日数	35日
ミッション	広域・高分解能の光学観測
データ伝送系	直接伝送(Ka帯: 1.6Gbps以上, X帯: 0.8Gbps以上, 光データ中継)
質量	2,700kg以下(打上時)
寸法	5×14×3.5(m)(太陽電池パドル展開時)
設計寿命	打ち上げ後7年

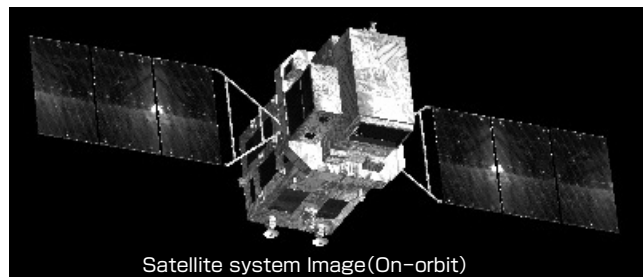


図4. 先進光学衛星システムのイメージ

表2. 広域・高分解能センサの諸元

センサバンド	Pa/Mu 6バンド
地上分解能(GSD)	Pa: 0.8m/Mu: 3.2m
観測幅	70km
波長域(Pa)	520~760nm
波長域(Mu)	バンド1: 400~450nm
	バンド2: 450~500nm
	バンド3: 520~600nm
	バンド4: 610~690nm
	バンド5: 690~740nm
	バンド6: 760~890nm
量子化ビット数	11ビット

2.2 観測ミッションの性能

表2に広域・高分解能センサの諸元を示す。焦点面分光方式を採用しPa・Muセンサを同一鏡筒で集光する。特にMuセンサは6バンドを持ち、植生や土壌分析等に効果的な波長帯を設定している。光学系は軸外し4枚鏡を採用して広域と長焦点を両立させ、検出器に宇宙用TDI-CCD(Charge Coupled Device)としては最高性能である画素ピッチ8μmを採用することで“広域・高分解能”の光学センサを実現している。

3. 先進光学衛星適用技術

3.1 多彩な撮像運用を可能にする衛星システム

先進光学衛星では光学センサにTDI-CCDを適用する。この検出器は光電変換された信号成分を電荷レベルで転送する構造を持っており、転送方向と転送タイミングに対し衛星進行方向と視点移動速度を合わせることによってアナログ信号加算を可能にする。S/N比(Signal to Noise ratio)を実効的に向上させる非常に有効な手段である。ただし、この検出器は信号加算期間にわたって指向軸を安定して制御する必要があり、一般的なプッシュブルーム撮像制御だけでは効果的な信号積算や様々な地上対象に対す

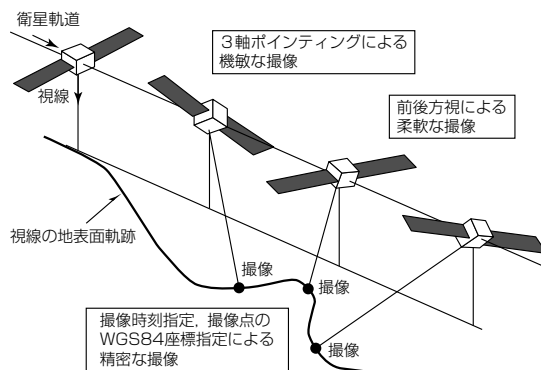


図5. TDI適合型三軸駆動制御



図6. ハイトルクリアクションホイール

る柔軟な撮像に対応できない場合がある。特に先進光学衛星では南海トラフ等の大規模な地形画像を一度に取得するといった要求がある。1回の撮像が長時間に及ぶため、長時間の高精度な指向制御が必要になる。この要求に対し先進光学衛星では当社が培ってきた姿勢制御技術を活用し、TDI適合型三軸駆動制御方式(TDI Pointing Control: TPC)を適用する(図5)。

TPCは、視点運動見積りを厳密に求める(数値解析)ことによって制御誤差を抑制するとともに、ロール方向だけではなくピッチ・ヨー方向も含めたフレキシブルな3軸のポインティング制御で様々なターゲットに対応可能な方式である。

また、先進光学衛星は高いアジリティ性能を確保するためにハイトルクリアクションホイール(HTRW)(図6)を7台搭載する。ロール軸だけではなく、南海トラフ撮像や立体観測時に求められるピッチ・ヨー軸の動力性能を高めるため、7台の配置形状を最適化することで、直下方向に対して60°ポインティング時にも迅速に撮像可能な構成としている。

3.2 広域・高分解能光学センサ

3.2.1 広角集光光学系

衛星搭載用光学センサはフェアリング寸法制限等の打上げ環境に対応するため、コンパクトな光学系が要求される。一方、広域・高分解能化への要求はともに光学系を大きくする設計(長焦点距離・広視野化)となり、コンパクト化と相反する。先進光学衛星では6°の広い視野を確保するために軸外し光学系タイプを選択し、4枚のミラーの全てに曲率を持たせることによって従来の3枚方式に比べて全長を30%短くした光学系を設計した。これによって“広角・高分解能”なコンパクトな集光光学系を実現する(図7)。

構造設計としては、4枚全てのミラー支持にバイポッド方式を採用することによって光学系を低歪(ひず)みで保持し、各ミラーの面変形を抑制している。鏡筒は熱変形ノミ

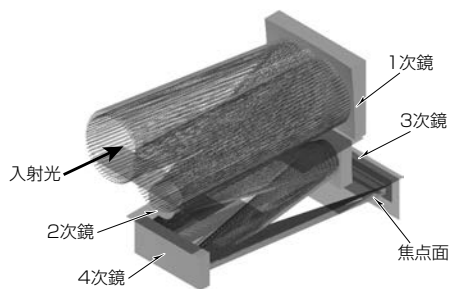


図7. 広角集光光学系

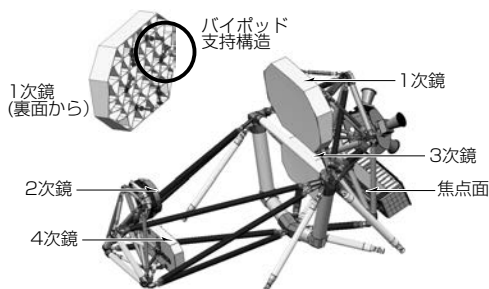


図8. 高安定鏡筒とミラー支持構造



図9. ミラーの製造フロー

ナルゼロ・膨潤変形ゼロのCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)ロッドを採用することで光学系を高安定に保持し、各ミラー間のアライメントずれを抑制している(図8)。

ミラー素材にはゼロ膨張ガラスであるクリアセラムZ^(注1)を採用し、衛星搭載向けに強度を確保しつつ軽量化を実施している。先進光学衛星では硝材からミラー面研磨、光学系組立て調整と、全製造・試験工程を国産メーカーで実施する。特に軽量化加工は自社工程であり、これまで5組の光学系を製造、軌道上実績を上げている(図9)。

(注1) クリアセラムは、(株)オハラの登録商標である。

3.2.2 高精細TDI-CCD検出器

集光光学系と並んで光学センサのキーパーツである検出器は、当社開発品であるTDI-CCDを採用する。当社熊本製作所のSi(シリコン)プロセスを用いてウェーハ製造し、当社鎌倉製作所でアセンブリ化している。素子の基本構造は当社独自の表面入射構造をベースとしており、高感度ながら高いMTF(Modulation Transfer Function)性能を両立した構造である。衛星搭載用として国内で先駆けて画素ピッチの高精細化に取り組み、先進光学衛星で採用する画素ピッチ8 μm は国内唯一の軌道上実績を持つ。Mu検出器は32 μm ピッチの画素構造で6バンドの波長帯で個別に画像取得が可能である。ステップマルチ転写を駆使し、6バンドの検出器素子を1つのパッケージに実装可能とした(図10)。

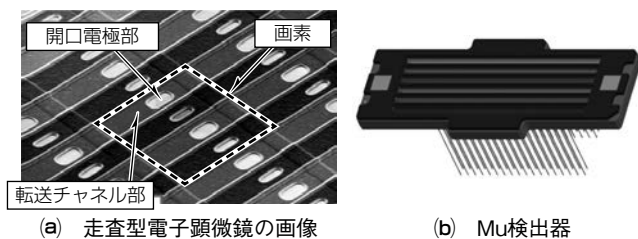


図10. TDI-CCD構造

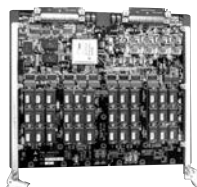


図11. MDPのメモリボード試作品

表3. メモリボードの主要諸元

レコーダ方式	半導体メモリレコーダ (NANDフラッシュメモリ)
記憶容量	950Gバイト(EOL)以上
入力インタフェース	チャンネルリンク
出力インタフェース	ウィザードリンク

EOL: End Of Life



図12. パンシャープン画像

3.2.3 国産データレコーダ

先進光学衛星に搭載するミッションデータ処理装置(MDP)は、大容量の画像データを扱うため、2007年からJAXAと開発を進めてきた国産NVDR(Non-Volatile Data Recorder)の開発技術を活用する。国産NVDRで用いたフラッシュメモリは、従来のデータレコーダに用いられてきたSDRAMに比べて圧倒的にデバ

イスの記録容量密度が向上するメリットがある。一方で、アクセス速度の観点及び不良ブロックの発生などの宇宙用途に対して克服すべき課題があるが、インタリーブアクセス方式の採用や誤り訂正技術の適用によって宇宙用としての性能・信頼性を確保している(図11及び表3)。

4. む す び

先進光学衛星は、日本の観測衛星技術を発展させるとともに、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等のニーズに貢献することを目的として開発を進めている。当社独自の多彩な撮像制御技術と光学センサ製造技術を駆使し、世界最先端の性能の実現に向け開発を実施中である。図12は先進光学衛星で得られる1m級分解能の光学画像シミュレーションによって得られたパンシャープン画像である。全地球規模での画像データ取得によって日本だけではなく世界中の様々なニーズに対応する。

参考文献

- (1) 匂坂雅一：先進光学衛星について、第2回先進光学衛星利用ワークショップ(2016)
- (2) 度會英教：衛星システムの概要と観測性能、第2回先進光学衛星利用ワークショップ(2016)