

人工衛星搭載用可視・近赤外光学センサー

大沢 右二*・平松 優**・赤尾 洋***

人工衛星搭載用光学センサーによる観測は、航空機による観測（多くの場合、写真撮影による）に比べて、空間分解能（解像度）が劣るものの、その高度を利用して、広範囲の観測が可能であるという特徴を有している。また人工衛星は、ある一定の周期（例えば数日から数十日周期）で同一地点の上空に戻ってくるため、繰り返し観測が容易である。この特徴を生かし、地球観測センサーのデータは、広域（例えば都道府県レベル）の土地利用状況の変化を解析したり、地球規模の環境把握などに用いられている。

人工衛星による高解像度の地球観測は、1972年7月23日に打ち上げられた米国のERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite, 1975年1月にLandsat-1に名称変更)により始まった。この衛星は、RBV (return beam vidicon) とMSS (multispectral scanner system) の2つの光学センサーを搭載しており、数十mの解像度（空間分解能）を有していた。特にMSSは、その後のLandsatシリーズにも継続して（一部の仕様は変更されているが）搭載されるなど、衛星リモートセンシングの基礎を築いたセンサーのひとつである。表1にLandsat-1搭載のMSSの諸元を示す。

次にエポックメイキングな地球観測衛星となったのは、フランスのSPOTである。SPOTは1986年に1号機が打ち上げられ、現在は4号機が軌道上で観測を行っており、継続した運用が行われている。表2に示すように、SPOTの分解能は10m（パンクロマチック画像）であり、10万分の1程度の地図に相当する情報をそのデータから得ること

ができるため、衛星リモートセンシングの商業利用が広まった。わが国初の地球観測衛星は、1987年2月に打ち上げられた海洋観測衛星1号(MOS-1)である。この衛星は、2種類の光学センサー(MESSR, VTIR)と1種類のマイクロ波センサー(MSR)を搭載しており、これらの開発とデータ利用を通して、地球観測センサーの基礎技術を身に付けることができた。その後、地球資源衛星1号(JERS-1)、地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)を開発、運用し、現在は環境観測技術衛星(ADEOS-II)と陸域観測技術衛星(ALOS)を開発中である。ALOSは、地図作成、地域観測、災害状況把握、資源探査に貢献することを主ミッションとした衛星で、2種類の光学センサーと1種類の電波センサー(レーダー)を搭載し、2002年度に打上げられる予定である。1章、2章において、ALOS搭載の光学センサーについて概説する。

1. ALOS 搭載用 PRISM

1.1 PRISM の特徴と概要

陸域観測技術衛星(ALOS)パンクロマチック立体視センサー(PRISM: panchromatic remote-sensing instrument for stereo mapping, 以下PRISMと呼ぶ)は、ALOSの主要ミッション機器のひとつで、可視域の1バンドで高分解能の観測画像を得る機器である。

PRISMは地図作成(縮尺1/25,000相当)、地域観測が主目的であり、このため陸域のステレオ画像を取得する機能を有している。地表での分解能(検出器1素子に対応)は2.5m×2.5mとしている。常にステレオ画像を得られるように、この2.5m分解能の放射計(カメラ部分)を、衛星の軌道進行方向に前方、直下、後方と視線を変えて3台配置している。PRISMの外観と配置を図1に示す。

衛星は高度約700kmを周回しているため、地表の2.5

*宇宙開発事業団 ALOS プロジェクトチーム (〒105-8060 東京都港区浜松町 2-4-1)

E-mail: osawa@rd.tksc.nasda.go.jp

**日本電気(株)光応用機器開発部 (〒224-8555 横浜市都筑区池辺町 4035)

***三菱電機(株)宇宙システム部 (〒247-8520 鎌倉市上町屋 325)

表1 Landsat-1 搭載 MSS の主要諸元¹⁾。

項目	諸元
撮像方式	各バンド6素子の検出器と反射鏡の走査による Whisk Broom 方式
観測幅	185 km
f number	3.6
焦点距離	823 mm
観測波長帯	バンド4: 0.5~0.6 μm バンド5: 0.6~0.7 μm バンド6: 0.7~0.8 μm バンド7: 0.8~1.1 μm
解像度 (空間分解能)	約 80 m
露光時間	8, 12, 16 ms から選択

表2 SPOT-1 搭載の HRV の主要諸元。

項目	諸元
撮像方式	CCD による Push Broom 方式
観測幅	60 km (1 式の光学系観測幅)
f number	3.3
焦点距離	1,082 mm
観測波長帯	XS1: 0.50~0.59 μm XS2: 0.61~0.68 μm XS3: 0.79~0.89 μm パンクロバンド: 0.51~0.73 μm
解像度 (空間分解能)	XS1~XS3: 20 m パンクロバンド: 10 m

m は角度に直すと 0.74 秒角 (3.61 μrad) の微小角である。撮像時のぶれとアライメントずれを防ぐため、光学系と検出器を保持する構造体には、高度な安定性と超低歪みが要求される。

1.1.1 検出器

PRISM の撮像方式は、衛星の移動を利用し、移動方向に直角に設置した多素子の 1 次元検出器で地表を走査する方式で、プッシュブルーム走査方式と呼ばれている。PRISM は広い撮像幅と高い分解能を有するため、検出器には多素子が要求される。直下視は 70 km の幅を撮像するため、1 次元で 28,000 素子以上が必要とされ、実際には 30,000 素子の検出器を使用する。また前方視および後方視の放射計では、地球自転により生じる撮像地点のずれをカバーするため 40,000 素子の検出器が使用される。

1.1.2 光学系

PRISM は名前にパンクロマチックがあるように、広波長域の 1 バンドのみを使用して撮像を行い、その波長域は 0.52~0.77 μm である。この波長範囲で 0.74 秒の角度を解像する必要があるため、色収差のない反射光学系を採用することとした。

また広い撮像幅を有しており、光学系の視野角は 7.6° と広いことが要求される。そのため非点収差の補正を行うよう軸はずしの 3 枚鏡の構成とした。1 次反射鏡および 3 次

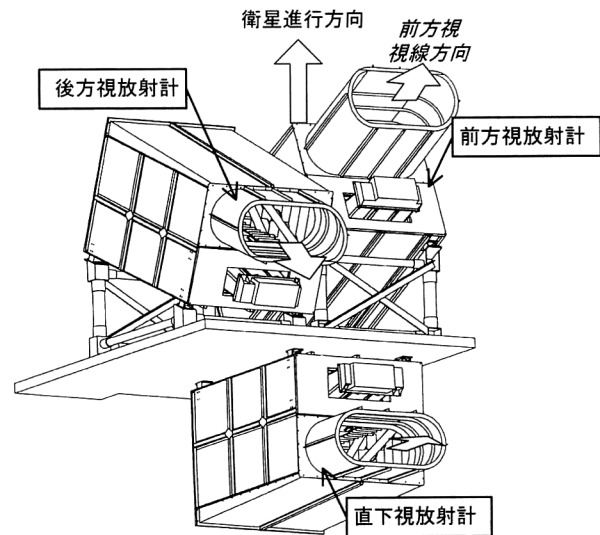


図1 ALOS 搭載 PRISM の外観。

反射鏡は凹面、2 次反射鏡が凸面ですべて非球面である。光学系の光路図を図 2 に示す。

1.1.3 構造体

3 枚の反射鏡および検出器をつなぐ構造には、宇宙空間で遭遇する環境に耐え、かつ高度なアライメントを維持する必要がある。そのため高度な温度制御を行うとともに、構造体に熱膨張率の非常に小さい炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を採用し、高剛性、軽量で非常に安定な構造を実現した。

1.2 PRISM の性能

PRISM の主要性能を表 3 に示す。PRISM は地表分解能が 2.5 m であり、ほぼすべての家屋、道路等が識別可能なため、PRISM の画像および同時に搭載される AVNIR-2 (2 章参照) のデータ等を用いることにより、縮尺 1/25,000 相当の地図に必要な精度で地形情報等の取得が可能である。3 方向の画像を同時に撮像可能なことから、異なる方向からの画像の組が 3 組でき、高頻度で標高データを取得可能である。このため、未だ地図が整備されていない地域で利用されるとともに、すでに地図が作成されている地域の地図を更新する業務の効率化も期待されている。

1.3 PRISM 試作モデル (BBM)

PRISM の開発は、今までにない高性能で大型の機器であるため、いくつかの困難が予測される。難しい部分として光学系、検出器 (部分製作)、構造体を含む放射計 1 台分を平成 9 年から 10 年にかけて試作した。このモデルはブレッドボードモデル (BBM) と呼ばれ、BBM を利用し製造および評価のめどをつけている。図 3 に PRISM の BBM の外観写真を示す。

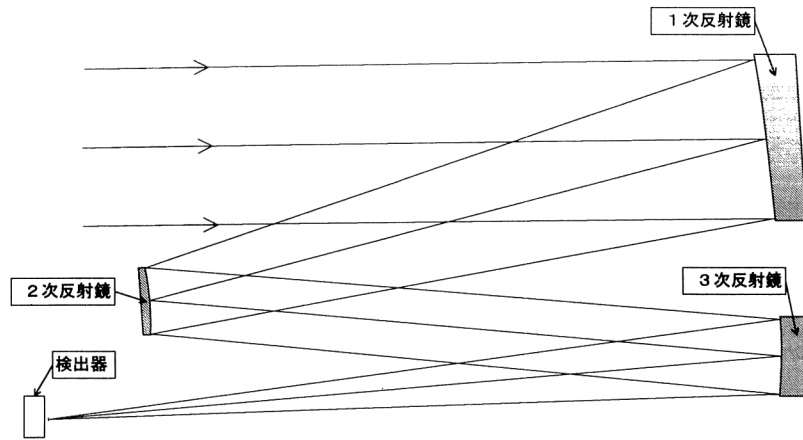


図2 PRISM 光路図.

表3 ALOS 搭載 PRISM の主要諸元.

項目	諸元
撮像方式	1次元 CCD 検出器による Push Broom 方式
光学系の数	3 (直下視, 前方視, 後方視独立)
観測波長域	0.52~0.77 μm
瞬時視野角 (地上分解能)	3.61 μrad (2.5 m)
視野角(観測幅)	7.6°以上 (70 km 以上)
S/N	70 以上
空間周波数伝達 特性 (MTF)	0.20 以上
立体視基線・高度 比 (B/H 比)	前方視/後方視間: 1.0

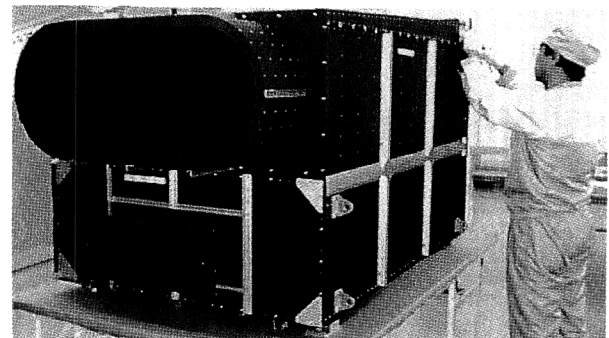


図3 PRISM 試作モデル (BBM) の外観.

1.4 今後の予定

ALOS の 2002 年度の打ち上げに向け、PRISM は実際に衛星に搭載するプロトフライトモデル (PFM) の製作を始める前に、いくつかのモデルを製作し評価を行うよう計画している。前記の BBM もそのひとつであり、現在設計を進めているエンジニアリングモデル (EM) では、地上での数々の試験に供することにより、設計の妥当性の検証および打ち上げ環境、宇宙環境に耐えることを確認する。また PFM も平成 11 年度半ばから開始し、平成 12 年度中に完成の予定である。

2. ALOS 搭載用 AVNIR-2

ALOS に搭載する高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2) は、地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) に搭載された高性能可視近赤外放射計 (AVNIR) の分解能をさらに向上させたもので、可視から近赤外域の観測波長を用いて、主に陸域、沿岸域を観測することにより、地域環境の把握に必要な土地被覆分類図、土地利用分類図などの作成に利用されるものである。

AVNIR-2 はまた、災害状況の把握のために、衛星進行方

向と直交する方向 (クロストラック方向) に観測領域を変更するポインティング機能をもっている。表 4 に AVNIR-2 と AVNIR の主要諸元を対比して示す。同表からわかるように、地上分解能は 16 m から 10 m に向上され、また地表の観測頻度を高めるために、ポインティング角は $\pm 40^\circ$ から $\pm 44^\circ$ に拡大されている。

AVNIR-2 の開発は、AVNIR の開発実績とハードウェアの成果を最大限に活用することにより、上記の仕様向上に対して開発課題を最小にすることを目指している。この観点から、地上分解能の向上を検出器のチップサイズ変更と後段の信号処理回路の変更により達成することとしている。これにより、ポインティング機構部、集光分光部および構体等は AVNIR の設計を踏襲し、極力同一形状、同一仕様としている。

また、信号処理部等の電気回路部においても、AVNIR での設計実績を生かして類似構造とすることで、EM (エンジニアリングモデル) を部分的要素試作にとどめている。AVNIR-2 の構成目目は表 5 に示すように、光学系を主体とする走査放射計ユニットと信号処理系を主体とする電気回路ユニット、およびそれらを結合するユニット間インテグレーション部品から構成されている。

表4 AVNIR と AVNIR-2 の主要諸元.

項目	AVNIR	AVNIR-2
撮像方式	1次元 CCD 検出器による Push Broom 方式	同左
観測波長域	バンド 1: 0.42~0.50 μm バンド 2: 0.52~0.60 μm バンド 3: 0.61~0.69 μm バンド 4: 0.76~0.89 μm (この他にパンクロバンドをもつ)	バンド 1: 0.42~0.50 μm バンド 2: 0.52~0.60 μm バンド 3: 0.61~0.69 μm バンド 4: 0.76~0.89 μm
瞬時視野角 (地上分解能)	バンド 1~4: 20.08 μrad (16 m) パンクロバンド: 10.04 μrad (8 m)	バンド 1~4: 14.28 μrad (10 m)
視野角(観測幅)	5.7°(80 km)	5.8°(70 km)
S/N	200 以上	200 以上
空間周波数伝達特性 (MTF)	バンド 1~4: 0.25 以上	バンド 1~3: 0.25 以上 バンド 4: 0.20 以上
ポインティング角	$\pm 40^\circ$	$\pm 44^\circ$

表5 AVNIR-2 の構成品目.

ユニット	コンポーネント
走査放射計ユニット	ポインティング機構部 集光・分光部 検出部 検出器駆動部 アナログ信号処理部 光学的校正部 構体 ユニット内インテグレーション部品
電気回路ユニット	駆動制御部 デジタル信号処理部 テレメトリー・コマンド処理部 電源部 構体 ユニット内インテグレーション部品
ユニット間インテグレーション部品	

2.1 ポインティング機構

ポインティング機構部は、地上の追跡管制センターからの指令(コマンド)によって、視野中心方向を衛星直下点に対して $\pm 44^\circ$ まで変更することが可能であり、約700 kmの高度から見える大部分の地域を観測できるようにしている。ポインティングミラーは、超低熱歪みの光学材料である ULE (ultra low expansion) を用い、軽量化加工を施すことにより、外形約 250 mm \times 718 mm \times 85 mm、重量 9.2 kg である。ポインティングミラーは、AVNIR の設計と全く同一の設計となっている。機構部は、モーター調達先(米国)の吸収合併の影響により、AVNIR 開発時と同一のメーカーからの調達が困難な状況となったため、一部の設計変更を行っているが、これも最小限の検証計画に基づき開発を進めている。

2.2 集光・分光部

集光・分光部は、瞬時視野角、視野角の要求条件のもとに、必要な輝度分解能を実現する口径を定め、収差の低減

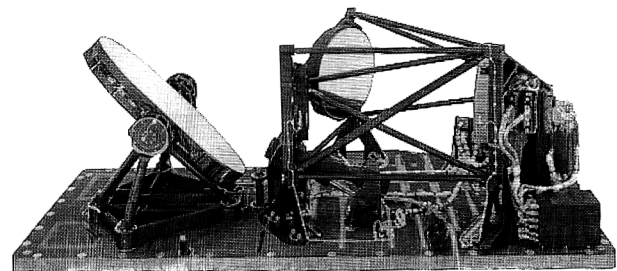


図4 ADEOS 搭載 AVNIR の内部構造 (ALOS 搭載 AVNIR-2 と同形状).

化、軽量化、宇宙空間における耐放射線等の総合性能にすぐれた光学系を定めている。集光部は、有効開口径 240 mm のシュミット補正板、平面反射鏡、主鏡、補正レンズからなるシュミット屈折方式を採用している。この方式は焦点距離が長くなる傾向があるが、補正用の光学系をうまく組み合わせて軸長を約 30%短縮している。分光系は、ダイクロイックプリズムとトリミングフィルターを組み合わせたプリズム分光方式としている。また、地上での試験検証を確実なものとするために、大気中と真空中でのデフォーカスを補正する焦点調整モジュールを設けている。光学系を支持する鏡筒には炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を使用し、炭素繊維の配向、継手部材の組み合わせに工夫を施し、線膨張係数をゼロに近づけ、熱歪みの低減を図っている。図4に AVNIR の集光・分光部を含む走査放射計ユニット内部を示す。AVNIR-2 においても同様の構成としている。

2.3 検出器および検出器駆動部

検出器は AVNIR と同様に白金シリサイド (PtSi) ショットキー・バリアのリニアアレイ CCD を用いている。画素サイズは分解能の向上に対応して 16 μm (AVNIR) から 11.5 μm (AVNIR-2) に小型化する一方、画素数は 5,000

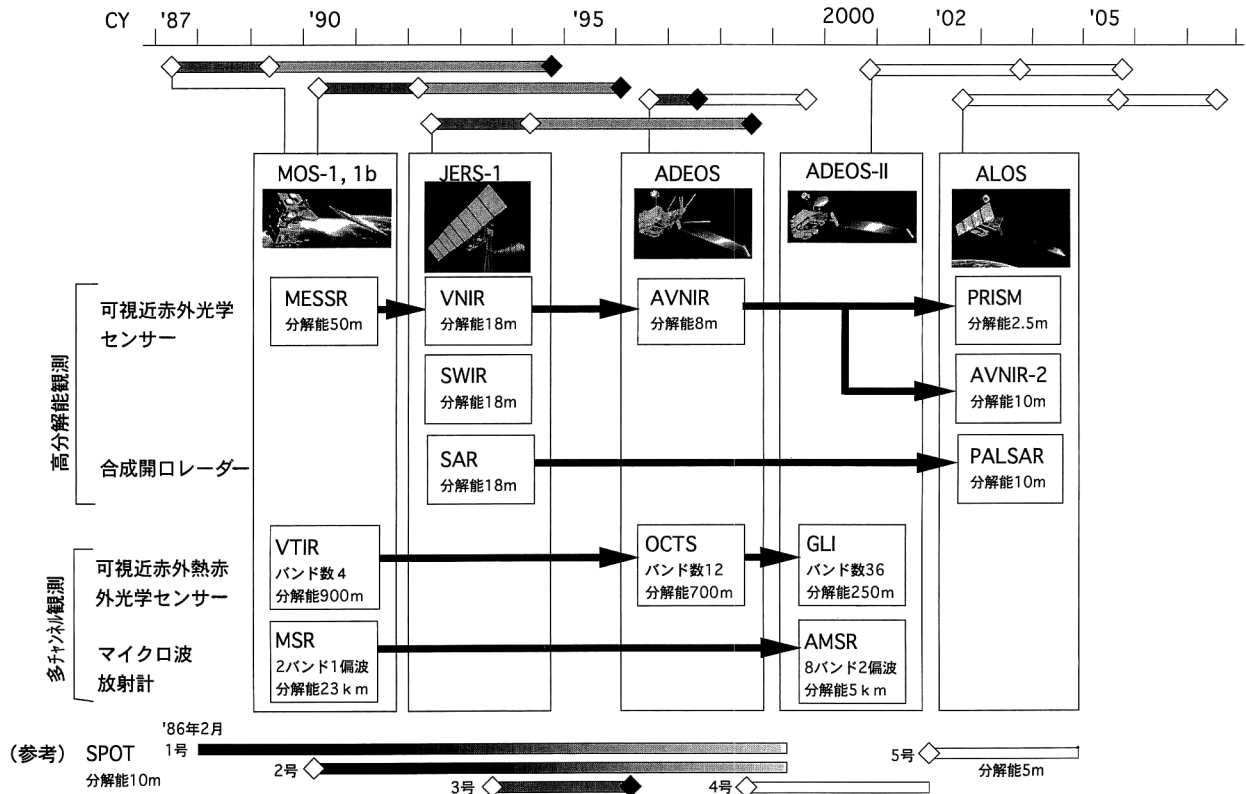


図5 日本の地球観測衛星の流れ。

画素から7,100画素に増やしている。なお、画素配列はAVNIRと同様に各画素を千鳥格子状に並べたスタガ配列とすることで、高い輝度分解能、空間分解能を達成している。また、緯度や季節により変化する地表の反射率を考慮し、広範囲の放射輝度に対応するために、CCDには露光量が調整できる電子シャッター機能を付加している。一方、チップ長は85mm (AVNIR) から82mm (AVNIR-2) と小型化されるものの、封止パッケージはAVNIRと同様の形状とすることにより、構造系の見直しを不要としている。

2.4 校正系

校正は、センサーの出力を放射輝度に関係づけるもので、打ち上げ前の地上校正と打ち上げ後の軌道上校正がある。AVNIR-2では、積分球を用いた地上校正を行うとともに、軌道上では、内部光源であるハロゲンランプによる光学系を含む全システムの光学的校正および検出器への電荷注入による電氣的校正の2方式の搭載校正系により校正を行う。

2.5 構体系

走査放射計ユニットの構体は、CFRP表皮/アルミコア複合材を基材とした構造で、軽量、高剛性を確保している。一方、電気回路ユニットの構体は、高い熱伝導性と排熱効果を得るために、アルミ表皮/アルミコア複合材を基

材とした構造としており、AVNIRと同様の設計を踏襲している。

3. 技術動向

日本の地球観測衛星の流れを図5に示す。同図からわかるように、地球観測センサーは2つのタイプに大別することができる。1つは、高分解能を特徴とするセンサーで、PRISMとAVNIR-2はこのタイプである。もう1つは、多チャネルを特徴とするもので、ADEOS-IIに搭載するグローバルイメジャー (GLI) がその代表である。今後の光学センサーとしては、地表の情報を精度よく取得できるように、高分解能を保持しつつ、より多チャネルで観測することが可能なセンサーが求められている。また、高分解能の中間赤外、熱赤外のセンサーは、夜間観測や都市部のヒートアイランド現象などを観測するためなど重要なセンサーであるが、高感度かつ多素子の検出器が存在せず、この分野の技術開発が望まれている。

文献

- 1) P. N. Slater: *Remote Sensing Optics and Optical Systems* (Addison-Wesley Publishing, Massachusetts, 1980) pp. 465-497.

(1999年3月17日受理)