衛星からの地球観測用光学センサー

岩　崎　　晃

Optical Sensors for Earth Observation Satellite

Akira IWASAKI

Earth observation satellites contribute monitoring of natural hazards, such as earthquakes, volcano eruptions and floods caused by typhoon or hurricane. Recent development in software makes it possible to access these data easily. Several new optical sensors in orbit, which adopt new technology and provide data products with higher accuracy, are introduced in this review. Calibration activities and satellite technology that guarantee accuracy of these sensors are also described.

Key words: earth observation, optical sensor, calibration

最初の人工衛星が打ち上げられて数年後には，偵察衛星や気象衛星が打ち上げられた．前者は世界のどの場所でも撮像できること，後者は地球を高所から広域観測できることを生かしたものである．その後，1972年には，地球観測衛星の代名詞ともいわれるLandsat衛星の初号機が打ち上げられた．現在では，100 kg程度の小型衛星や複数の機器を搭載可能な，重量数トンのプラットフォーム型衛星が運用されている．

これらの衛星に搭載されている観測センサーは，光や電波を用いて地球の情報を得る．光学センサーが捉えるのは，可視から短波長赤外の波長域では太陽の反射，熱赤外域では地表面からの熱放射であるが，水蒸気などの吸収があるため，地表面を観測する場合には大気の窓を通して観測することになる．衛星の軌道は，静止軌道や高度1000 km以下の低軌道がおもに用いられるが，光学観測においては，太陽の照射条件をなるべく同じにするために太陽同期準回帰軌道を用いるものがほとんどである．衛星の飛行は一次元方向の走査になるため，画像データにするためには，飛行方向と直交（クロストラック）方向の走査機構が必要になる．

近年，気象衛星と（狭義の意味での）地球観測衛星が融合し，世界各国で意欲的な機器が打ち上げられている．本稿においては，米国のEOS（Earth Observing System）計画（現在はEarth Science Enterprise計画に改名）の観測機器を紹介するとともに，データ品質を維持する活動について概説する．

1.　地球観測センサー

衛星搭載センサーの性能は，空間分解能，観測波長数，ダイナミックレンジおよび観測幅で示されるが，すべてを最大限に満たすことは難しい．S/N比などハードウェアの実現可能性の問題もあるが，観測データを記録し地上に通信伝送するための能力に限界があるからである．空間分解能を高くすれば，観測幅はそれに応じて狭くなり，全球観測の頻度が下がることになる．環境監視や災害把握のように，過去と現在の状況を比較調査する場合には，適度な頻度で全世界のデータを取得している必要がある．農業利用においては，植物の成長速度に応じるため，さらに頻度は高くなる．また，気象利用では時間単位でのデータが必要となる．このように，システムの開発にあたっては，データ利用者からの要求を勘案するための最適システム検討が必要となる．図1に気象衛星ひまわり（GMS）および

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）　E-mail: aiwasaki@al.t.u-tokyo.ac.jp

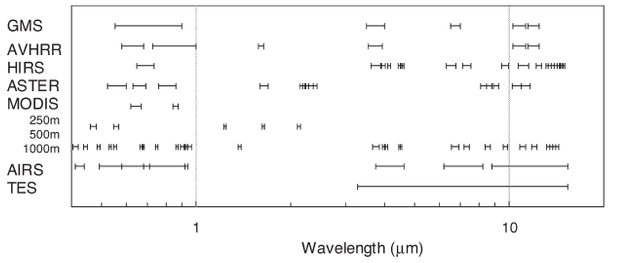

図1　地球観測センサーの観測波長．

本稿で概説するセンサーの観測波長域，表1および図2に代表的な観測機器の仕様および構成を示す．これら各種の機器を組み合わせることで，総合的に地球を理解することになる．

1.1　ASTER（advanced spaceborne thermal emission and reflectrion radiometer）[1)]

ASTERによって得られるような，空間分解能が数mから30m程度の画像データは，資源探査，農業利用や災害監視などに供されている．米国のLandsat衛星は，180kmの観測幅をもつthematic mapper（TM）を搭載している．thematicというのは，さまざまな観測波長による主題図の作成を意味し，可視から熱赤外の7波長域で画像を取得する．大きな観測幅と広範な観測波長を両立するために，振動鏡でクロストラック方向の走査を行う．一方，フランスのSPOTや日本のJ-ERS1には，一次元検出器を用いた電子走査型センサーが搭載され，Landsatよりも高空間分解能の画像を取得している．さらに，高空間分解能の領域では，米国政府の規制緩和により偵察衛星技術を民生用に転用したIKONOS（空間分解能0.8m）やQuickbird（空間分解能0.6m）の画像が商業化されている．検出器の光量不足を補うため，time delay integration（TDI）という電荷積分技術が必要となる．

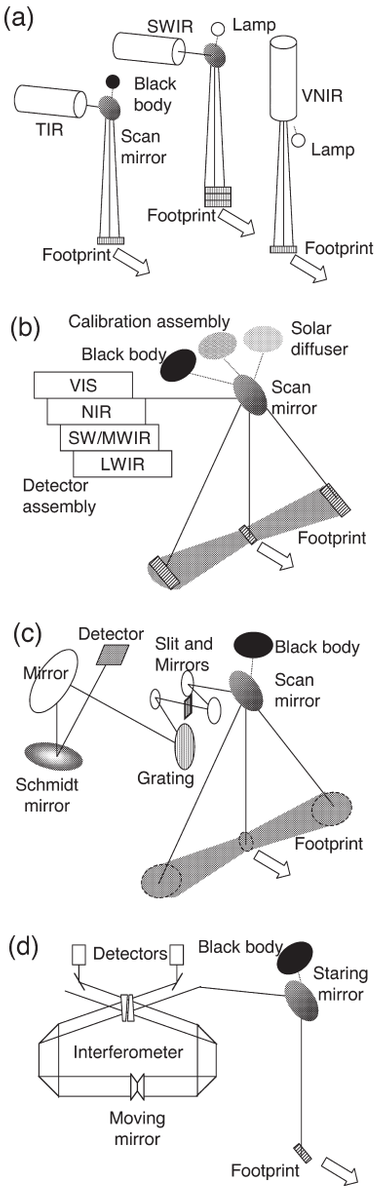

図2　観測センサーの構成．(a) ASTER，(b) MODIS，(c) AIRS，(d) TES．VNIR，SWIR，TIR，VIS，NIR，MWIR，LWIR：本文参照．

表1　地球観測センサーの仕様．

センサー	ASTER	MODIS	AIRS	TES
搭載衛星 （打ち上げ年）	Terra（1999）	Terra（1999） Aqua（2002）	Aqua（2002）	Aura（2004）
分光システム	フィルター	フィルター	回折格子	フーリエ変換
走査方式	電子式	回転鏡	回転鏡	—
観測バンド数	14	36	2378	約20000*
波長域	0.52〜11.65 μm	0.405〜14.385 μm	3.74〜15.4 μm	3.2〜15.4 μm
空間分解能	15，30，90 m	250，500，1000 m	13.5 km	0.5×5 km
観測幅	60 km	2330 km	1650 km	—
量子化	8，12 bit	12 bit	12〜14 bit	16 bit
データレート	89.2 Mbps	10.6 Mbps	1.27 Mbps	4.5 Mbps
電力・重量	406 kg，726 W	229 kg，163 W	177 kg，220 W	385 kg，361 W

*インターフェログラムとしてのサンプル数．

ASTERは日本で開発されたセンサーで，短波長赤外および熱赤外域に多数の観測波長帯を設けることで鉱物の詳細な分類を可能とし，資源探査での用途が期待されている．広範な波長域を観測するためには，いくつかの種類の検出素子が必要であり，検出器面が大きくなる．また，狭帯域の赤外観測には，高感度の検出素子が必要となる．このため，電子走査型の可視近赤外（VNIR），短波長赤外(SWIR)，および振動鏡走査型の熱赤外（TIR）の3つの観測システムから構成され，別々の望遠鏡で撮像する．赤外検出器は，波長範囲によりPtSiとHgCdTeが用いられ，スターリング冷凍機で冷却される．

このような複雑なデータを統合するために，画像相関で望遠鏡間の位置あわせをする処理が地上で行われる．さらに，衛星飛行方向にステレオ視の機能をもち，標高モデルを構築し，地形の面からも資源探査に貢献する．2006年に打ち上げられたALOS（advanced land observing satellite）には，2.5 mの空間分解能でステレオ画像を取得するPRISMが搭載されており，さらに高精度の標高モデルの作成が期待される．

1.2 MODIS（moderate resolution imaging spectroradiometer）[2)]

気象衛星NOAAに搭載されているAVHRR（advanced very high resolution radiometer）は，6つの波長帯で1.1 kmの空間分解能，2800 km幅の観測を行い，2機体制で20年以上にわたり高頻度観測を実現している．一方，1978年にNimbus-7に搭載されたCZCS（coastal zone color scanner）は，輝度の低い海域を対象に低ノイズ特性ならびに高ダイナミックレンジをもって，クロロフィルなどの高精度観測を可能とした．日本のADEOS-IIに搭載されたGLI（global imager）では，34の観測波長での画像データを取得した．

MODISはNASAによって開発された広域観測センサーであり，上記機器や後述するサウンダーの観測波長帯を引き継いでおり，観測対象は陸域―海域―大気と全般にわたる．36の波長で狭帯域に絞って観測しているため，スペクトル情報を詳細に取得する．観測幅が大きいうえに，2つの衛星に搭載されているため，観測頻度が高い．

広範な波長域を多くの波長で観測するために，焦点面は可視（VIS），近赤外（NIR），中間赤外（SW/MWIR）および長波長赤外（LWIR）の4つに分かれており，中間赤外および長波長赤外のHgCdTe検出器は放射冷却により85 Kで運用される．また，感度要求を満たすために望遠鏡の直径は18 cmとなり，クロストラック方向の観測幅が大きいことから，長径57.8 cmの鏡が毎分20.3回転で走査する．地球周縁に対しては，距離の増大とともに瞬時視野は大きくなり，各走査間で重なりあうbowtie効果が発生し，画像化するうえで注意が必要である．走査鏡が地球を指向していないときは，構体内に設置された太陽光拡散板，校正ランプや黒体を用いて各検出器を校正する．

MODISによって取得されたデータはそのまま提供されるほか，さまざまな高次データプロダクツに加工される．陸域では植生指標，葉面積指数，地表面温度，土地被覆や炭素収支など，大気ではエアロゾル，雲や可降水量，海域では海面温度，クロロフィル濃度，海洋生産性や海色など，30を超える種類のデータが提供される．これらのいくつかのデータは，物理量の推定値から一歩進んで，モデルに基づいて算出されたものである．その妥当性の検証は同時に進められている段階であるが，加工された情報のみを必要とするデータ利用者にはきわめて有効である．

MODISは，プロトタイプ機であり，初号機のTerra搭載機器に発生していた問題のいくつかはAquaで解決された．これを実用機器として発展させたVIIRS（Visible-infrared Imager Radiometer Suite）が，NOAAを引き継ぐ次世代の気象観測システムNPOESS（National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System）に搭載予定である．

1.3 AIRS（atmospheric infrared sounder）[3)]

気象衛星NOAAにはHIRS（high resolution infrared sounder）というフィルター分光器（サウンダー）が搭載されており，鉛直方向に関して高い分解能で観測を行う．20の波長帯で大気観測を行い，大気の各層において温度や圧力が変化することで吸収線形が変化することを利用して，温度や水蒸気量の鉛直分布を推定する．マイクロ波による測定に比べて，光学的手法の精度が高く装置が簡便であるが，雲の影響を強く受けるため，一緒に搭載されているマイクロ波データと組み合わせる必要がある．

HIRSのスペクトル分解能（$\lambda/\Delta\lambda$）は75であり，気象予測精度の向上に伴い，さらに高精度データが必要となった．鉛直方向1 kmの分解能で1 K以下の温度精度ならびに鉛直方向2 kmの層で湿度2%以下の観測精度のために，AIRSは2300以上の波長帯で観測し，スペクトル分解能（$\lambda/\Delta\lambda$）1200を満たす．大気温度鉛直分布，水蒸気量鉛直分布，地表面温度，海面温度，オゾン量などのデータプロダクツが出力される．

スペクトル分解能を高くするため回折格子が用いられ，焦点面には観測波長に応じた回折次数の位置に17個の一次元HgCdTe検出器が配置されている．検出器の素子数は最大192個で，素子の集積度が焦点面を大きくしている

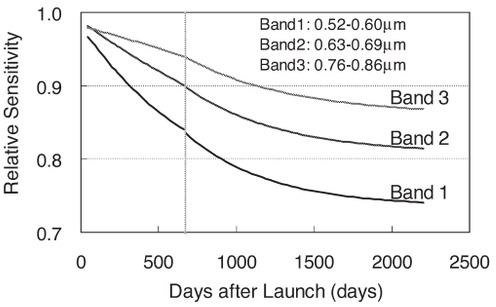

図3　打ち上げ後の感度変化（文献6に基づく）．

最大要因である．HgCdTe検出器のうち，13.4 μmより短波長ではPV（光起電力）型，長波長ではPC（光導電）型が用いられる．迷光を減らすために，入射スリットおよび検出器面の上にバンドパスフィルターが装着されている．検出器がパルスチューブ冷凍機で60 Kに冷却されるほか，分光器も放射冷却により155 Kまで冷やされる．クロストラック方向の走査は回転鏡によって行われ，MODISと同様に，走査ごとに黒体校正が行われる．AIRSを発展させたCrIS（crosstrack infrared sounder）は，NPOESSに搭載予定である．

1.4　TES（tropospheric emission spectrometer）[4,5]

対流圏でのオゾンや温暖化ガスの挙動を探るためには，より詳細なスペクトル分解能ならびに高いS/N比が求められ，宇宙用フーリエ変換型分光計が開発されている．日本のADEOSに搭載されたIMG（interferometric monitor for greenhouse gases）がメタンガスなどの観測に威力を発揮したが，その運用は短期間のものであった．Envisat衛星には，MIPAS（Michelson interferometer for passive atmospheric sounding）というマイケルソン干渉計が搭載されている．

NASAによって開発されたTESは，直下および大気周縁を観測する．通常のマイケルソン干渉計よりも鏡の移動距離を大きくする目的で，コーナーキューブを張りあわせた移動鏡を用いており，直下モードでは4秒間に$\pm$8.45 cmの走査を行い，0.06 cm^{-1}のスペクトル分解能を得る．移動鏡の速度は，半導体励起Nd:YAGレーザーで測定する．16素子HgCdTe検出器がパルスチューブ冷凍機で65 Kまで冷却され，光学系は放射冷却により180 Kで運用される．インターフェログラムの取得中に背景の特性が変化すると誤差になるため，光源である地表面を追跡するための走査鏡が設けられている．大気周縁を観測する際にも，この鏡を用いる．

本装置で出力されるデータはオゾン，メタン，窒素酸化物，一酸化炭素などであるが，地球温暖化で一番問題となっている炭酸ガスの分布を測定するには，感度の点で十分とはいえない．さらに高感度のセンサーを搭載するGOSAT（greenhouse gases observing satellite）の開発が，JAXAおよび国立環境研究所で進められている．

2.　センサーの校正

地球観測センサーは，軌道上で長期にわたって，輝度および位置の点からきわめて高精度の測定性能が求められる．宇宙では，放射線や熱真空環境の影響を受けるため，装置の経年変化をきちんと追跡し，補正値を推定する必要がある．データの時系列利用のために，EOS計画では，長期データ品質保証の観点から校正を重視している．ここでは，運用開始から6年を経過したASTERの校正活動について述べる．

2.1　ラジオメトリック性能[6]

ASTER/VNIRは可視近赤外域に3つの観測波長をもつが，観測輝度の要求値は絶対精度4%である．このため，センサーの絶対輝度を保証するために，ランプとフォトダイオードからなる機上校正系が放射計の望遠鏡入口に取り付けられた．放射計だけでなく，機上校正系自身も劣化・故障する可能性があるため，2系統の機上校正系を設けて冗長系とした．劣化の要因としては，放射線によるガラス材料のブラウニングや，半導体の劣化，ならびに衛星からのアウトガスの吸着による透過特性の低下が考えられている．

放射計の特性は，打ち上げ前（1996年）に銅点黒体(1084.62℃)を基準として校正された積分球を使って値付けがなされ，同時に機上校正系の値付けは放射計を用いて行った．打ち上げ後（2000年）に機上校正を実施したところ，ランプ光量は安定であるにもかかわらず，放射計入口のフォトダイオードの出力が放射計の出力と同様に減少した．このことから，校正光学系と放射計入口の劣化が疑われたが，最終的には代替校正の結果から，放射計入口の劣化と判断された．代替校正では，比較的均一な地面を用いて，地表面反射率と太陽照度および大気減衰量から，放射計での観測輝度を推定する．

図3は，軌道上での機上校正結果から算出された感度変化を示す．短波長側のバンド1の劣化が，長波長側のバンドに比べて激しいことがわかる．放射計の劣化原因については明らかになっておらず，軌道調整の際のヒドラジン噴射と劣化時期の関係も明瞭ではない．別の衛星センサーでは校正系が劣化していた例もあるため，高精度化の観点からは，総合的な原因調査が望まれる．

一方，画像品質はMTF（modulation transfer function）

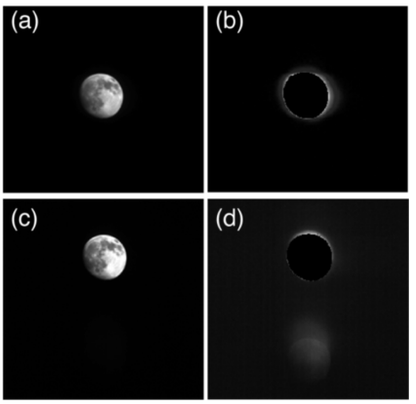

図4　月観測画像．(a) 短波長赤外画像，(b) (a) の強調画像（月部分マスク），(c) 近赤外画像，(d) (c) の強調画像（月部分マスク）．

図5　パキスタン地滑りの三次元画像（産業技術総合研究所提供画像を加工）．

を用いて評価される．MTF は，被写体のもつコントラストをどの程度忠実に再現できるかを空間周波数特性として表現するものであるが，地球観測センサーの場合には点光源や線光源に近い地上対象物を用いており，必然的に大気の影響を受けることになる．このため，軌道上で月を用いた観測を実施し，深宇宙を背景とした画像取得を行った．図 4 に示すように，月周囲に広がる迷光成分が明らかであり，画像品質を劣化させていることがわかる．得られた結果に基づいて画像補正をかけると，コントラストの大きい対象物の輝度精度が向上することが確認された．しかしながら，4 トン級の衛星が満月を観測するために宙返りするのは，熱設計などの観点から容易なものではない．

2.2　幾 何 性 能

衛星の位置および姿勢推定技術の発達により，地上観測点の位置精度が大幅に向上している．高度 705 km を飛行する ASTER では，姿勢角 1 秒が約 3 m に相当する．高精度姿勢決定のためには，恒星を星図と照合するスターセンサーおよび角速度を測定する光ジャイロが利用される．また，Terra 衛星は，TDRS（Tracking and Data Relay Satellite）衛星へのデータ送信時の電波のドップラー測定に基づき軌道を決定しており，その精度は水平方向に 50 m 以下となっている．GPS（global positioning system）利用により，今後の衛星ではさらに高精度の位置情報が利用可能である．

センサーの視線ベクトルは打ち上げ前にコリメーターを使って精密に決定されるが，打ち上げ時の振動によってずれる可能性がある．ASTER においては望遠鏡が 4 本あり，それぞれがクロストラック方向に指向することができるため，打ち上げ後に取得したデータに対して画像相関により視線ベクトルと回転軸の調整が行われた．その後の運用において，視線ベクトルはきわめて安定であることが確認できている．

ASTER のステレオ視機能では，直下視と後方視の 2 本の望遠鏡は 27.6 度の角度をなしており，1 画素の視差が 25 m の標高差に相当する．視差は画像相関によって算出され，起伏の変化が大きな場所を除くと，標準偏差 10 m 以下の精度である．従来の衛星作成標高モデルにおいては，地上の既知点を用いて値を決定するものが主であったが，衛星技術の進歩により，画像および衛星航法データのみからデータ処理をすることで十分な精度を示すようになりつつある．図 5 に，パキスタン地震の地滑りを観測した例を示す．長さ 2 km にわたり最大 100 m もの崩落が発生しており，現地調査の結果と一致している．

地球観測衛星のセンサーは，過去のデータの蓄積や継続性を考慮したうえで，新たな進化を遂げており，赤外検出器（冷凍機を含む）やレーザーの技術革新により進化した最近の機器を紹介した．Aura（観測機器 4 種）は，Aqua（観測機器 6 種）の後方約 8 分（距離にして 3000 km）を飛行しており，100 kg 程度の小型衛星がその間を飛行する（通称 A-Train）．小型衛星は，リスク分散，短期開発およびインターフェースの軽減といったメリットがある．このため，プラットフォーム衛星に種々の機器を搭載して観測するだけでなく，衛星群での地球観測が今後注目されるところである．機器ごとに作成されるデータだけでなく，いくつかのセンサーを用いた複合的なデータの供給も計画されている．2006 年 4 月には，新たに 2 つの衛星が A-Train に加わった．このうちのひとつが，レーザー光を照射しエアロゾルなどの挙動を能動観測するライダー CALIPSO（cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder

satellite observations)[7] である．

一方，空間分解能とスペクトル分解能を両立させるハイパースペクトル（HS）センサーが，次世代センサーとして注目されている．2000年に打ち上げられたEO-1にはHyperionというHSセンサーが搭載され，30 m空間分解能で，0.4〜2.4 μmの波長範囲を220の波長でスペクトル画像を取得した．通信速度の制限により，観測幅は7.7 kmと少ない．したがって，現段階ではあくまで実験機の位置づけであり，Landsat-7の後方約3分を飛行することでデータを相互利用する．適切な観測波長の選択もしくは高速通信の利用により，有効に利用されることになろう．

文　献

1) Y. Yamaguchi, A. B. Kahle, H. Tsu, T. Kawakami and M. Pniel: "Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectrion Radiometer (ASTER)," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **36** (1998) 1062–1071 (Terra搭載機器特集号).
2) W. L. Barnes, T. S. Pagano and V. V. Salomonson: "Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **36** (1998) 1088–1100.
3) H. H. Aumann, M. T. Chahine, C. Gautier, M. D. Goldberg, E. Kalnay, L. M. McMillin, H. Revercomb, P. W. Rosenkranz, W. L. Smith, D. H. Staelin, L. L. Strow and J. Susskind: "AIRS/SMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **41** (2003) 253–264.
4) R. Beer, T. A. Glavich and D. M. Rider: "Tropospheric emission spectrometer for the Earth Observing System's Aura satellite," Appl. Opt., **40** (2001) 2356–2367.
5) R. Beer: "TES on the aura mission: Scientific objectives, measurements, and analysis overview," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **44** (2006) 1102–1105.
6) F. Sakuma, A. Ono, S. Tsuchida, N. Ohgi, H. Inada, S. Akagi and H. Ono: "Onboard calibration of the ASTER instrument," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **43** (2005) 2715–2724 (ASTER機器特集号).
7) D. M. Winker, W. H. Hunt and C. A. Hostetler: "Status and performance of the CALIPSO Lidar," Proc. SPIE, **5575** (2004) 8–15.

(2006年4月19日受理)