

地球観測分野の最近の動向

産業技術総合研究所 岩崎晃

1. はじめに

宇宙からのリモートセンシングは人工衛星の位置・広域性を利用して、大気・水域・陸域を観測するものである。人工衛星が生み出される以前から、気球や航空機による観測が行われていたが、宇宙からの観測が可能となることで、より定期的かつ全世界的な運用が可能となった。観測衛星は冷戦下において軍事的な利用のために開発が急ピッチで進められたが、近年は農業監視や資源探査だけでなく地球環境の観測にも大いに力が入れている[1,2]。

1950年代後半から米国において偵察衛星 Corona が打ち上げられたが、当時は写真フィルムを用いた撮像が行われていた[3]。1960年には気象衛星 TIROS が運用を開始され、撮像管がもちいられるようになった。その後 NIMBUS (1964年)、そして現在運用されている NOAA (1978年)としてシリーズ化されている。1972年には、資源探査を目的とした Landsat が打ち上げられ、現在になるまでその後継機が活躍している。NOAA および Landsat は現在に至るまで 20～30年のデータ蓄積があり、過去のデータを大きな資産としている。一方、1986年にはフランスの商業衛星 SPOT-1 が、1991年には欧州の ERS-1 が打ち上げられた。

わが国においては、1987年に海洋観測衛星 MOS-1 (Marine Observation Satellite)、1992年に資源衛星 JERS-1、1996年にはプラットフォーム衛星 ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite)が打ち上げられ、高分解能観測、広域観測、精密大気測定を行っている。また、静止気象衛星ひまわり (GMS) は現在5号機が稼働中であり、もっともなじみの深い観測衛星である。

2002年には、欧州のプラットフォーム衛星 Envisat、米国のプラットフォーム衛星 Aqua、フランスの商業衛星 SPOT-5 が無事に軌道に投入され、運用を開始した。また、日本のプラットフォーム衛星 ADEOS-II も年末に打ち上げが予定されている。これらの衛星は国際共同で進められるものも多く、Aqua には日本やブラジルから、ADEOS-II には米国やフランスから観測センサが搭載され、異なった視点から地球の大気・陸域・水域に関するデータを取得する。本稿では、地球観測分野における最近の動きと筆者がプロジェクトに関わっている ASTER に関する紹介を行う。

2. 地球観測とは

宇宙からのリモートセンシングにおいて利用するのは、主に地球から反射または放射される電磁波であり、光を測定するものと電波を測定するものに分類される。それぞれに受動的なセンサと能動的なセンサがある。光領域では受動的なセンサが主であり、可視域(0.4～1ミクロン)、中間赤外域(1～5ミクロン)および熱赤外域(10ミクロン帯)における

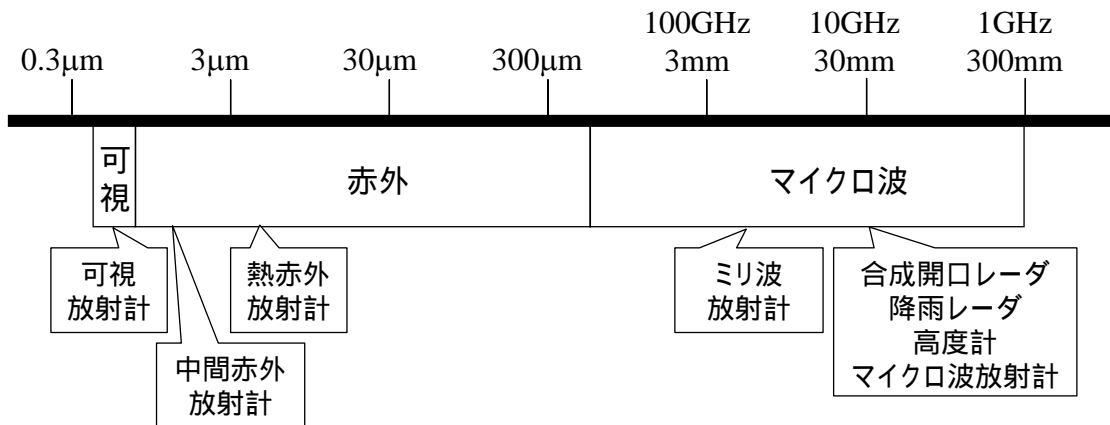


図 1 地球観測に用いられる波長・周波数

光測定を行う。光領域の能動センサとしては、レーザーレーダーが挙げられる。これはレーザー光が大気中のガスやエアロゾルに反射・散乱される成分を測定するものである。図 1 に観測波長帯および用いられる観測装置を示す[1,2,3]。

マルチスペクトラル・スキャナーは画像型センサの代表的なもので、観測対象の二次元情報を得るために地表面を走査する。衛星の飛行方向については、その移動そのものによって走査されるが、飛行方向と直角方向については光学システムによる走査が必要である。その方式として、対物面走査と像面走査に分類される(図 2)。対物面走査(ウィスクブルーム)は、集光部の前に置かれた走査鏡を回転または揺動(振動)することにより、地表面を操作する方式である。地上の対象から走査鏡を経て、入射した光は集光部を通り、像面上の検出素子に入る。一方、像面走査(プッシュブルーム)では地上の対象から入射し

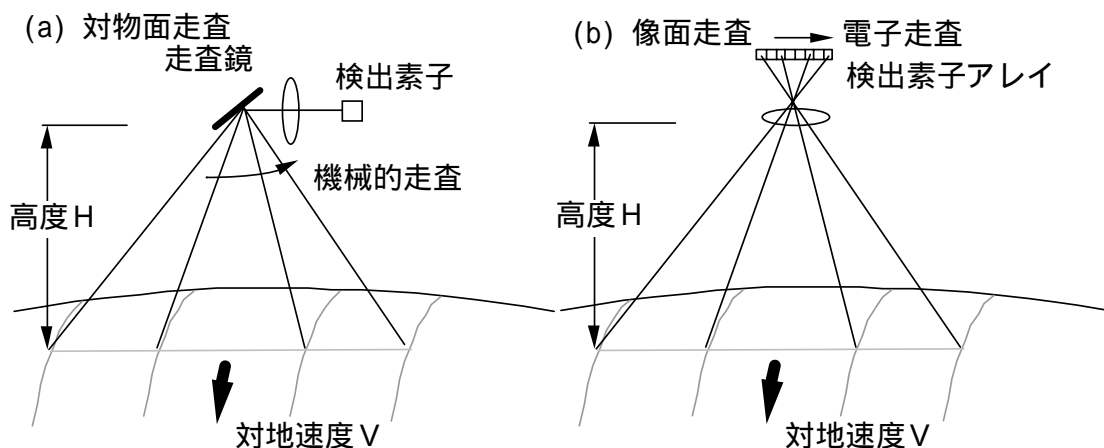


図 2 対物面走査と像面走査[3]

た光が集光部を通った後、像面に並べられた検出素子上を走査される。実際には、像面に数千個もの検出素子アレイを並べることで走査が行われ、多素子の CCD アレイの作成によりはじめて可能になった。前者の例として、Landsat, ADEOS/OCTS, Terra/MODIS が挙げられ、走査鏡を用いるために望遠鏡の画角が小さくて済むので、広域観測に向いている。後者はそれぞれの素子が地表面を観測する時間を長く取れるため、S/N が高くなる利点があり、高解像度で観測する場合に適している。SPOT, JERS-1/OPS および ADEOS/AVNIR などに採用されている。

一方、電波センサでは受動的なものとして放射計が、能動的なものとしてレーダが用いられるが、光領域に比べて電波の波長が長いため、空間分解能が低いのが一般的である。しかしながら、雲や雨により電波が散乱されにくいために、全天候的な観測が可能である。放射計は、温度の高い物体から放射される電波を測定するものであり、宇宙からのリモートセンシングでは 1 ~ 300GHz のマイクロ波が利用される。アンテナを機械的に走査する方式と電子回路により多数のアンテナ素子の位相を変えることで走査を行うフェーズドアレイ方式があるが、アンテナの大きさを考慮すると前者がほとんどであり、MOS-1/MSR や ADEOS-II/AMSR などが挙げられる。

能動的なマイクロ波センサとしては、映像レーダ、高度計、散乱計などがある。映像レーダではその代表的なものが合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) である。合成開口レーダは衛星の飛行を利用して衛星の進行方向と直交した方向に電波を発射するサイドルッキングレーダの一種であり、電波の広がりが大きいのにも関わらず、高空間分解能を達成できるという利点を持つ。これは、衛星が飛行している過程で異なる観測位置における同一地上対象物からの反射波を合成し、見かけの上で直径数キロのレーダアンテナを作ったのと同様の解像度を作り出すものである。これが可能なのは、反射波の大きさ (振幅) だけでなく、位相も用いて波の重ねあわせができるからであり、計算機を用いたデータ処理を要する

さらに、同一地上対象物について少し離れた 2 ヶ所から観測された合成開口レーダデータを用いて、それぞれを干渉させることで時間経過にしたがって地表がどのように変化したか調べることができ、インターフェロメトリと呼ばれる。多時期のデータを干渉させることで地震や火山の噴火に伴う地殻変動や地盤沈下などが電波波長の数分の 1 オーダーの精度で測定できるため、近年注目を集めている。

画像センサ以外では、サウンダというセンサ視線方向の化学種や温度プロファイルを測定するセンサが光および電波域で利用される。これは周波数をわずかに変化させることで吸収の度合いが変わる大気分子の吸収線を利用し、吸収係数が温度などの関数であることから、プロファイルを求める。光領域では、オゾン、二酸化炭素、メタンガスなどで赤外域の吸収線を用いた観測が行われており、電波領域では酸素や水蒸気などの計測が行われている。

3. 当分野における動向

(1) 画像センサと商業化

高分解能衛星の分野では、Landsat および SPOT がデータ継続性の観点から利用頻度が高い。Landsat は米国の衛星であり、1970年代からのデータ蓄積を大きな財産としており、ETMは鏡を走査する方式で可視・近赤外、短波長赤外および熱赤外域の観測を行う。現在、1999年に打ち上げられ

た7号機が運用されている[4]。空間分解能は可視カラー画像で、30メートルである。SPOTはフランスの衛星であり、HRV (High Resolution Visible) は一次元検出素子を用いることで空間分解能を高めることに成功した。1998年には4号機が打ち上げられ、合計4機体制で稼働している[5]。SPOT-4にはSPOT-3までのHRVシステムに新たに短波長赤外域の1バンドが加わったHRVIR (High Resolution Visible Infrared) システムが搭載されており、パンクロで地上分解能 10m、マルチスペクトルで 20m 分解能を達成している。これらの衛星を猛追しているのが、1999年に打ち上げられたNASAの衛星 Terra に搭載された ASTER である。ASTERは日本で開発されたセンサであり、短波長赤外および熱赤外に多くの観測波長帯を有すること、同一周回でステレオ視を行うことができるために、データ利用が急速に進みつつある。図3に最近の高分解能衛星の分解能と打ち上げ年次を示す。

これらのセンサはデータ維持とセンサ特性の向上という相反する価値観から、開発が行われている。Landsat/ETMは180kmをいう広域画像を取得する都合上、鏡走査方式を維持しており、空間分解能を犠牲にせざるを得なかった。そのために、SPOT/HRVが入り込む余地ができたといえる。現在、米国地質調査所を中心に進められているLandsat後継ミッション計画 (Landsat Data Continuity Mission) では、一次元検出素子を用いる方向で検討が進められている。EO-1(Earth Observing 1)はNASAのNew Millennium計画で2000年に打ち上げられた実験衛星であり、Landsatの後継を目指すセンサのプロトタイプなどが搭載されている[6]。今後、各国で宇宙産業の低コスト化の流れが強まり、軽量化や民生品利用の観点から技術競争がより激化していくことが予想される。一方、ASTERはJ-ERS1の後継センサではあるが、仕様を完全に受け継ぐものではないために、蓄積データの点からはまだまだであるのが現状である。ただし、同一周回ステレオ視の重要性は強く認識されており、SPOT-5には同様の機能が搭載されている(この点で、SPOT-5は維持と革新をうまく調和させている)。

高分解能衛星の弱点としては、観測幅が狭いため(Landsatで180キロメートル、SPOTやASTERで60キロメートル) 同一地点の観測頻度が低くなることが挙げられる。この

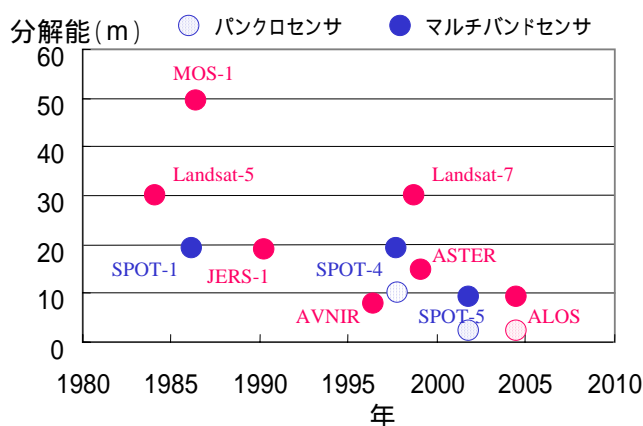


図3 高分解能衛星の空間分解能

ため、災害時の観測や農業関連など変化の激しい分野では、観測頻度の増大を求める要求が高まりつつある。これは打ち上げる衛星の数を増やすことで達成されるが、コストの観点から厳しいのが現状である。

中分解能衛星の分野では、NOAA/AVHRR とともに Terra に搭載された MODIS の利用が進んでいる。MODIS は空間分解能が 250 メートル程度であるが、30 以上の観測波長を持つとともに、観測幅が 2200 キロメートルと広いために、ほぼ毎日の観測が可能となる。これらの特徴とともに、作製される高次データが極めて種類に富んでいるために、京都議定書がらみで森林吸収源などの観測の点では最も使い勝手の良いセンサである。現在、同じセンサが Aqua で打ち上げられ、2 台体制での運用がなされている。また、日本で作られたセンサ GLI も同様に 2000km の観測幅を持ち、2002 年に ADEOS-2 で打ち上げられる予定である。一方、フランスで作られたセンサ POLDER は偏光観測など特異な機能を持つために黄砂などのエアロゾル観測で注目されており、ADEOS に搭載された。

一方、超高解像度センサについては安全保障や危機管理の観点から、米国において 1950 年代から偵察衛星技術の開発に着手しており、赤外観測も取り入れられている。現在、運用されている KH-12 衛星では望遠鏡の直径が 4.5m、長さが 15m、重さが 18ton にもおよぶ。このような超高分解能衛星の分野では偵察衛星の民生利用が認可されたことにより、IKONOS や QuickBird など空間分解能 1 m 程度 (QuickBird では 61 センチメートル) の商業リモートセンシング衛星が打ち上げられ、データも販売されている。欧州においては、SPOT の流れをくむ偵察衛星 Helios が運用されている。わが国においても、情報収集衛星の開発が進められており、2003 年には 1 号機が打ち上げられる予定である。

電波領域の画像センサでは合成開口レーダが商業化されている。宇宙からの合成開口レーダによる観測は、1978 年米国の海洋観測衛星 SEASAT がさきがけであり、3 ヶ月の運用にも関わらず期待を抱かせるものであった。1980 年代からスペースシャトルに搭載され、さまざまな改良を経て、2000 年の SRTM に至っている。また、1990 年代に入り、日本の地球資源衛星 1 号 (JERS-1) や、欧州宇宙機関の ERS-1、ERS-2、カナダの RADARSAT 衛星等 [7] が打ち上げられ、身近なものになってきた。このうち、JERS-1 には L バンド (1.3GHz) ERS-1 や RADARSAT には C バンド (5.3GHz) シャトルには C および X バンド (9.7GHz) のマイクロ波周波数帯が使われている。一般に、波長が長いほど電波が物質内部に入り込みやすく、C バンドでは葉や枝で電波が反射されるのに対して、L バンドでは幹や地表の反射となるため、さまざまな波長を組み合わせることで植生の分類が可能となる。

干渉 SAR に関しては、さまざまな衛星を用いて試みられてきたが、兵庫県南部地震などでは地震前後のデータを比較することで地殻変動の様子を広域的に観測できており、今後の災害対策などへの貢献が期待されるところである。

(2) 地球観測衛星の相次ぐ打ち上げ

欧州においては、2002年5月に Envisat が打ち上げられた[8]。ERS-1,ERS-2 に続くプラットフォーム衛星であり、9個の観測センサが搭載されている。5.3GHz帯(Cバンド)の合成開口レーダAMI、レーダ高度計RA(13.7GHz)、マイクロ波放射計や2方向を観測する光学計ATSRは3世代に渡り、改良を重ねながら搭載されている。ESAでは将来計画として、SPECTRA、EarthCARE、WALESなどの計画が検討されている。データ利用に関しては、ESAの持続的成長のために環境に関する政策決定が必要となっており、観測データを環境モニタリングツールとして、モデリングの入力パラメータとするプロジェクトが進められている。地球観測を環境管理や安全保障のツールとして、ヨーロッパが主導的な立場をとることを主眼にしている。

2002年5月にはSPOT-5が打ち上げられたが、HRG(High Resolution Geographic)では衛星飛行方向のステレオ視が可能となり、高精度な地球立体モデルおよび2.5mという高い空間分解能をいかして利用を広げようとしている[5]。

米国においては、Mission To Planet Earth(MTPE)プロジェクトがEarth Science Enterprise(ESE)と改称され、2000年以降に衛星プラットフォームが運用に入った[9]。1999年12月に打ち上げられたTerra(EOS-AM1)はMODIS、MISR、ASTERなどを搭載し順調なデータ取得を続けている[10]。さらに、2002年5月にAqua(EOS-PM1)が軌道に投入された。MODISはTerraに搭載されたものとあわせて2台体制となり、より頻繁に画像を取得できるようになった[11]。Aqua/AIRSは、温室ガスを測定するために赤外域で2380チャンネルの波長測定を行い、一緒に搭載されたAMSU-AやHSBといったセンサのデータと組み合わせることで、複合データに加工することになっている。引き続きEOS計画ではAura(EOS-CHEM)が打ち上げられる予定である。Aura/TESはマイケルソン干渉計であり光学的に大気成分の高度分布を測定するものであり、オゾン、水やフロンの大気中濃度を高精度に測定するサウンダーHIRDLSなどと一緒に運用される。その後についてはNPOESS(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System)が運用されることになっており、すでに搭載装置の仕様が決まりつつある。MODISを引き継ぐべくNPOESS/VIIRSセンサが検討されており、バンド数とコストの兼ね合いにより、22バンドに落ち着いた模様である。ATMSはマイクロ波のサウンダーであり、大気温度、ガス種、および湿度を測定する。

一方、水循環を解析するために熱帯降雨観測衛星TRMMの後継として、GPM(Global Precision Measurement)が計画されており、これには世界各国から子衛星が参加するとともに母衛星にはTRMM/PR(降雨レーダ)の後継センサが搭載される。

2000年のSTS-99ミッションのスペースシャトルに搭載されたSRTMミッションでは、送信アンテナを貨物室に、受信アンテナを貨物室と長さ60mのマスト先端に搭載し、干渉型合成開口レーダとして運用された。2つの受信アンテナを用いることで、わずか11日間の観測ながら地球の広範囲にわたって、立体地形図を作成することに成功している[12]。

日本においては観測プラットフォームADEOS-IIが2002年12月に打ち上げ予定であり、

GLI のほかマイクロ波放射計 AMSR や改良型大気周縁分光計 ILAS-2、海上風観測装置 SeaWinds、POLDER が搭載される[13]。AMSR は Aqua でも運用されているため、2機体制となる。

高分解能観測に関しては、ALOS (Advanced Land Observing Satellite) が打ち上げ予定である。可視センサは 2.5m の地上分解能でステレオ視により詳細な高度地図を作り上げるものであり、各望遠鏡がかなり大きなものである。AVNIR-2 は空間分解能 10m の可視近赤外画像を取得する。また、同時に搭載される合成開口レーダー PALSAR は偏波観測が可能であり、さまざまな利用が期待されている[14]。

温室効果ガスの排出および除去に関して、気候変動に関する国際連合枠組条約(1992)や京都議定書(1997)において、国内の制度を整備することが求められている。この中で、排出削減対策、吸収源対策とともに、これら対策の基礎となる監視・観測の強化が盛り込まれている。21 世紀においては二酸化炭素の排出に伴う気候変動が最大の課題とされており、長期にわたるデータ取得が国際的に求められるところである[15]。これを受けて、総合科学技術会議宇宙開発利用専門調査会においては、地球温暖化ガスの観測を継続的に実施するとともに、水循環の継続的観測の実施、および世界最高水準にあるわが国のセンサ技術の高度化と観測データの系統的な集積、解析技術の向上、が重点分野として謳われている。ADEOS-II の後継機として、GCOM (Global Change Observation Mission) が計画されており、上記の問題に対処すべく GCOM-A1 と GCOM-B1 の装置構成が決まりつつある。

(3) 小型・中型衛星

今までに述べた衛星は例えば、ランドサットは 2ton、SPOT は 3ton、Envisat に至っては 8.2ton という大型の衛星であり、小回りにかけるという問題がある。また、地球観測には直下での観測以外に斜めから観測や、さまざまな波長での測定など、研究サイドからさまざまな要望がなされているのが現状である。さらに、災害や農業などへの利用のために自らで衛星を所有したい国が増えつつある。このような中、欧州を中心に小型衛星への取り組みが強化されている。

英国の Surrey Satellite Technology 社 (SSTL) は、50kg ~ 150kg 級の衛星を使って地球観測に取り組んでおり、UoSat-12 (1999 年) では分解能 10m (パナクロ)、32m (カラー) をすでに達成している。2001 年に打ち上げられた Proba 衛星にも参加しており、衛星の姿勢を連続的に変えることで、同一の地域をさまざまな角度から観測するミッションに成功している。ドイツの RapidEye 社の農業観測衛星 RapidEye も手がけており、4 機体制のコンステレーションで 6.5m という高解像度画像を取得することになっている[16]。

フランス宇宙機関 CNES ではいくつかの小型衛星ミッションを検討しており、Cartwheel は合成開口レーダを搭載する衛星の近傍を飛行し、その反射波を用いて干渉 SAR を作成しようとする意欲的な計画である。500kg 級の中型衛星においては海面高度を測定する JASON (従来の POSEIDON 衛星を 4 分の 1 に減量) が打ち上げられるとともに、Y 型の

アンテナを用いて土壌水分を測定する SMOS などのミッションが計画されている。PLEIADES は小型の望遠鏡の開発により、500kg 程度の衛星 2 機を用いて、20km 幅の観測を SPOT と同様の精度で行うものである。このように、センサはこれまでのデータの継承と新しい衛星観測システムの導入の 2 本柱で行われている。前述の POLDER は、単独で 100 キログラム級衛星 PARASOL としても打ち上げられる予定である。PARASOL は Aqua や CloudSat と編隊飛行をすることで、同じ場所を違った観点から観測し、地球表面や大気の現象を総合的に解析することができる。

一方、NASA においても小型・中型衛星のミッション検討がなされている。Landsat のデータを継続するために、Pushbroom 型のセンサの検討を開始し、その前段階として EO-1 を 2000 年に打ち上げた。この衛星は、マルチバンドセンサを受け継ぐ ALI(Advanced Land Imager)と将来のハイパースペクトルを目指した Hyperion などを搭載しており、全重量は 500kg である。ハイパースペクトラムセンサは、スペクトルをより連続的に取得する装置であり、近年開発が進められているセンサである。Hyperion は可視近赤外から短波長赤外域に 220 バンドという非常に多くの分光画像を取得する実験センサである。このようなセンサは 680-750nm の波長域(レッドエッジ)で植物の活性度を詳細に調べることを可能とするために、植生の視点から大いに注目される。その他に、太陽、月、内部光源および地上の画像を用い、空間特性、輝度特性とも Landsat を上回る性能を有する。ただし、Landsat に比べ、画像の走査方式が異なるため(像面走査)、空間周波数特性は Landsat より優れているが、180km という広大な領域を観測するためにはセンサのクラスタ化などが必要とされる。

科学衛星を短期に提供するしくみとして、Small Explorer (SMEX)プログラムが創設され、180~250kg の衛星ミッションが進められている[17]。この中で、Triana は L1 から地球観測を行うという野心的な計画である。このほか、587kg の MTI (Multi-spectral Thermal Imager)など、単機能かつ高性能なセンサが次々と軌道運用されている。

以上のように、安価で使い勝手の良い小型衛星バスがあれば、新しいセンサを開発した研究者が他の衛星と連携する形で自らの装置を打ち上げることが可能となるために、今後のトレンドとして注目される。とりわけ、250 から 1000 メートル程度の空間分解能では望遠鏡などが小さくて済むために、小型衛星が主流となると考えられている。ドイツ宇宙機関 DLR では森林火災などの監視を目指して BIRD を 2001 年に、アルゼンチンでは SAC-C を 2000 年に打ち上げている。

4 . ASTER センサ

(1) ASTER センサの構成

リモートセンシングにおいて、可視・近赤外から短波長赤外域は地表からの太陽光の反射を、熱赤外域は地表の熱輻射を測定するものであり、最もよく使われる領域である。ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer)は JERS-1 の観測バンドを

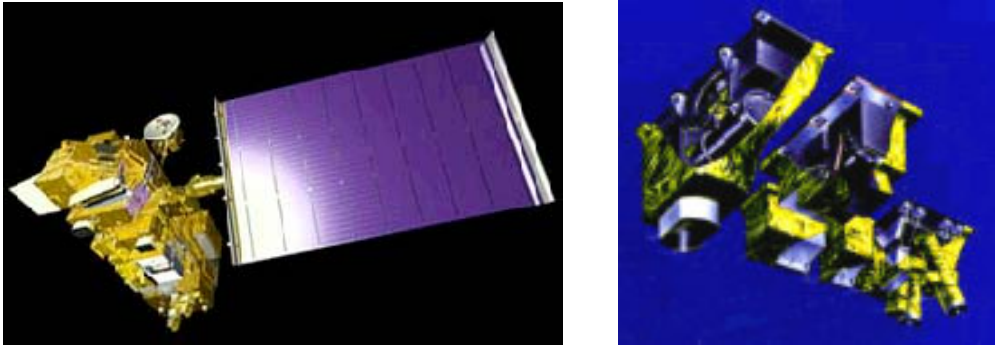


図 4 Terra 衛星と ASTER センサシステム。

改良しつつ、熱赤外バンドを加えたものである[18]。地球資源の探査を目的としてプロジェクトが開始された多バンドセンサであり、上述の Terra 衛星に搭載されている（図 4）。

表 1 に Terra 衛星の緒元および ASTER の観測バンドを示す。可視近赤外（VNIR）、短波長赤外（SWIR）、熱赤外（TIR）に 14 の観測バンドを持ち、それぞれの空間分解能は 15、30、90m である。3 つのサブシステム、およびステレオ視（後方を見ることで、高さ情報を得る）の望遠鏡を有するため、それぞれの画像の位置合わせが必要である。また、Landsat と同様の軌道（観測幅 172km）を取るが、観測幅が 60km であるために、機器を傾けて 172km をカバーする機構が採用されている。

光学センサは、光を導入する光学システム、必要な波長域を分別する分光システムおよび光を信号に変換する検出器（光電変換器）から構成される。図 5 に示すように、各波長によって、検出器の種類が異なり、それぞれの配置も異なっている。可視光のセンサは、シリコンの 4100 素子リニアアレイに入射する光をプリズムで分光している。短波長赤外のセンサは、白金シリコンショットキーバリア型の 2048 素子リニアアレイを並列に配置して、

表 1 Terra 衛星および ASTER センサの諸元

軌道	太陽同期軌道	Subsystem	Band No.	Spectrum Range (μm)	Spatial Resolution
赤道地方時間	午前10時30分	VNIR	1	0.52 - 0.60	15 m
地球楕円率	0.0012		2	0.63 - 0.69	
飛行高度	700-737km (赤道で705km)		3N	0.78 - 0.86	
傾斜角	98.2度		3B	0.78 - 0.86	
回帰周期	16日	SWIR	4	1.600 - 1.700	30 m
隣接軌道間距離	172km		5	2.145 - 2.185	
軌道周期	98.88分		6	2.185 - 2.225	
ミッション期間	6年		7	2.235 - 2.285	
			8	2.295 - 2.365	
		TIR	9	2.360 - 2.430	90 m
			10	8.125 - 8.475	
			11	8.475 - 8.825	
			12	8.925 - 9.275	
			13	10.25 - 10.95	
			14	10.95 - 11.65	

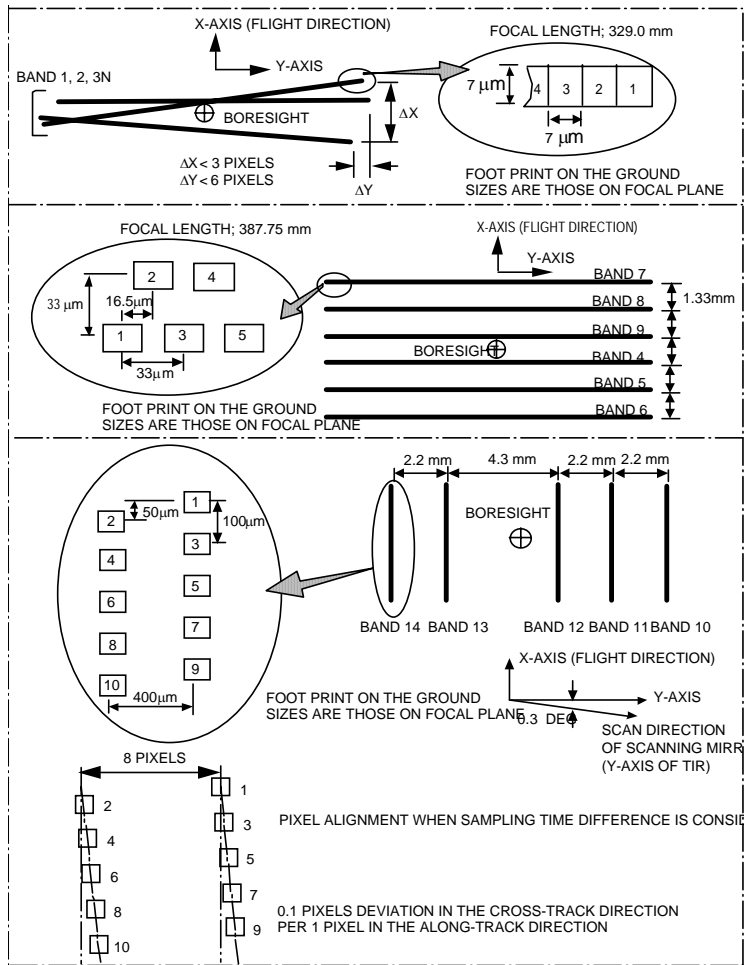


Figure 2-1 Sensor Geometric Model

図 5 ASTER センサの構成

フィルター分光している。並列配置は、センサを液体窒素温度まで冷却するためであるが、地上を観測した場合には視差が発生し、後処理が必要となる。熱赤外センサは、水銀カドミウムテルルの 10 素子アレイ上に、ミラーを走査して得た像を投影している。

可視近赤外および短波長赤外はリニアアレイを用いた画像取得であるプッシュブルーム型であり、熱赤外はミラーで走査するウィスクブルーム型である。ASTER は、この両者の組み合わせにより、広い波長範囲の画像を取得しているが、3つのサブシステム、4つの望遠鏡から構成される

ため極めて複雑である。そのために、それらを統合するソフトウェアの役割も重要である。

(2) ASTER を支える技術

近年の地球観測衛星においては、画像の高品質化が進み、画像上での位置精度およびさまざまな波長の光で捕らえた画像間の位置合わせ精度が向上している。これは、位置推定と姿勢制御技術の発達により、衛星が地上の観測目標を捕らえる能力が向上したためである。衛星の位置および姿勢が正しく把握できれば、画像の位置合わせを視線ベクトル（光検出器が向いている方向）を修正することで行うことができる。このようにして得られた衛星画像では、波長バンド間で画像位置合わせ精度が十分に取れていることで、植生分布や土地被覆分布などを調べる際の誤差が少なくなることが期待される。

Landsat や ASTER は地上高度 705km を飛行するため（表 1）、衛星の姿勢の誤差は観測位

置に大きな影響を与える。この高度から地球を見た場合、1秒（3600分の1度）という微小角度のずれが、地上での位置ずれ3mに相当するので、衛星の姿勢測定精度はきわめて重要である。このような、精度の高い姿勢決定のためには、恒星を観測して星図と照会し、衛星の向きを検出するスターセンサが必要であるが、近年、恒星のデータの充実とともにより精密化されている。

次に、衛星画像は膨大なデータ量であるために、地上への伝送にも設備が必要である。TDRS（Tracking and Data Relay Satellite）衛星は、アメリカのTRW社が開発した重さ約2トンのデータ中継衛星であり、NASA/ゴダード宇宙飛行センターが運用している。NASA関連の人工衛星（例えば、ハッブル宇宙望遠鏡、赤外天文衛星）や軍事衛星、スペースシャトル、日本の技術試験衛星、国際宇宙ステーションなどのデータ通信の中継に利用される。平均高度36000kmの静止軌道に4基のTDRS衛星があり、極軌道を飛ぶ地球観測衛星とは赤道通過時に通信可能となる。TDRS衛星から地上局であるホワイトサンズ空軍基地（ニューメキシコ）にデータがおろされる。

Terra衛星では、TDRS衛星へのデータ送信の際の電波を利用して、衛星の位置と速度を求める。太陽に同期した極軌道をとる衛星は1周回に2度赤道を通過するが、その際の位置・速度情報から、運動方程式を用いて衛星の軌道を決定している。その際、空気抵抗、月による摂動、重力分布などのパラメータはカルマンフィルターで推定する。現段階で、100m以下の精度を達成しており、今後ソフトウェアの改良により、更に高精度化される予定である。ただし、現在の衛星における位置測定の主流はGPS（Global Positioning Satellite）に移りつつある。GPSはカーナビゲーションなどで用いられているが、基地局でGPSによって測定された緯度経度を正確な緯度経度と比較し、その差分を補正情報として発信することで精度を向上させるDGPS（Differential GPS）により、誤差を数m以下にまで向上させることが可能となる。Landsat-7以降の衛星では、GPSの情報が位置情報として用いられている。

時間に関しては、衛星の飛行速度が約7km/sであること、地球の自転速度が赤道上で約460m/sであることから、高精度な管理が必要である。上述のGPSなどを用いることで、時間の精度も極めて高くなっているが、地球の自転運動の観測から計算される時刻であるUT1（Universal Time 1、世界時）を用いる必要がある。というのも、世界中の原始時計から構成される時刻であるTAI（International Atomic Time）とUT1とTAIから決められるUTC（Coordinated Universal Time、協定世界時）を見ると、TAIとUTCはパリの国際度量衡局において管理されているが、地球の自転は必ずしも一定ではないため、UT1が地球を見る上では一番則した時間系である。

以上のように、衛星の位置・姿勢情報が正確に測定され、画像データとともに地上に伝送されるため、画像処理に反映されるようになってきた。

（3）衛星データの処理

衛星で取得されたデータは衛星打ち上げ後に、さまざまな処理パラメータを調整することで、その品質が改善される。データ処理は複雑なシステムから出てくるデータに対して、放射量補正と幾何補正をかけて画像データが出力することにある。

放射量補正は、センサへの入射輝度と出力電圧の関係を校正するものであり、暗時出力やランプ出力などでセンサ特性を求め、机上校正以外に、地上の砂漠や湖を観測した輝度に対して大気補正結果を用いて補正をかける代替校正も行われ、あわせてセンサの特性が決定される。入射輝度と出力電圧が比例する場合は比較的簡単であるが、非線型の関係を持つ場合は、かなりの試行錯誤を要する。

幾何補正とは観測データを地球表面の画像として再構築しなおす過程であり、センサが観測するベクトルを追跡して、地球回転楕円体との交点を求め、それを緯度経度という形で表現するまでの処理である。このため、図6に示すように、センサ 機体 軌道 地球固定 地球回転 地球楕円体、という多段階の座標変換を経る。その際に、上述の時間や衛星位置・姿勢が問題となるわけである。一般的には、衛星位置・姿勢も誤差を含むために、推定すべきさまざまなパラメータを勘案して、補正がなされる。しかしながら、衛星に関するパラメータがある程度信用できるものであれば、センサのパラメータのみを決定することで済む。

出力された画像データに対して、各バンドが位置あわせされていることが、その後のデータ利用にとって重要である。ASTER センサにおいては、図7に示すように、可視バンドを基準として、他の望遠鏡との位置合わせを行い、それを望遠鏡内の各検出器に反映させることにより、バンド間の位置合わせパラメータを決定している。絶対位置校正、望遠鏡間校正、望遠鏡内校正の3段階で評価が必要である。

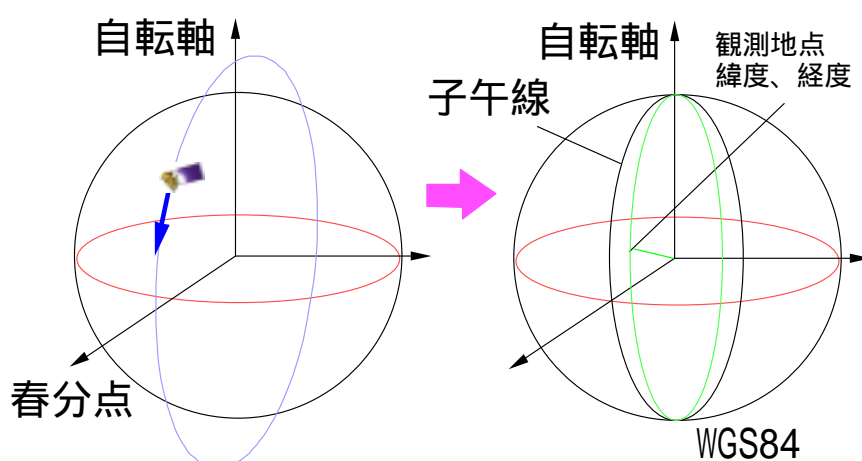


図 6 地球観測画像処理に伴う座標変換

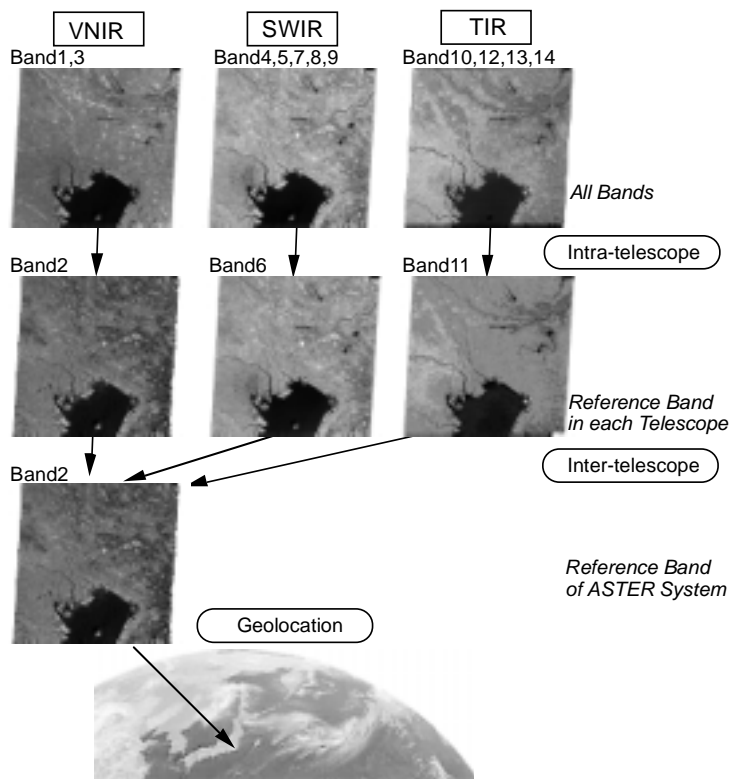


図 7 バンド間位置あわせの過程

画像はプッシュブрум型センサで得られたものであり、スペクトルに似通った部分もあるため、お互いのマッチングがかなり良い。また、可視画像との整合性もとれている。ただし、軌道直交方向の視差が発生するシステムになっており、ソフトウェアによって修正がなされている。熱赤外画像はウィスクブрум型センサで得られたものであり、熱赤外バンド間のマッチングがとれている。一方、可視画像とは、走査方法が異なるために、走査鏡の軸パラメータなどに関して、調整が必要である。

このようにして得られた視線ベクトルを用いて、再び画像を処理し、ずれ量を減少させ

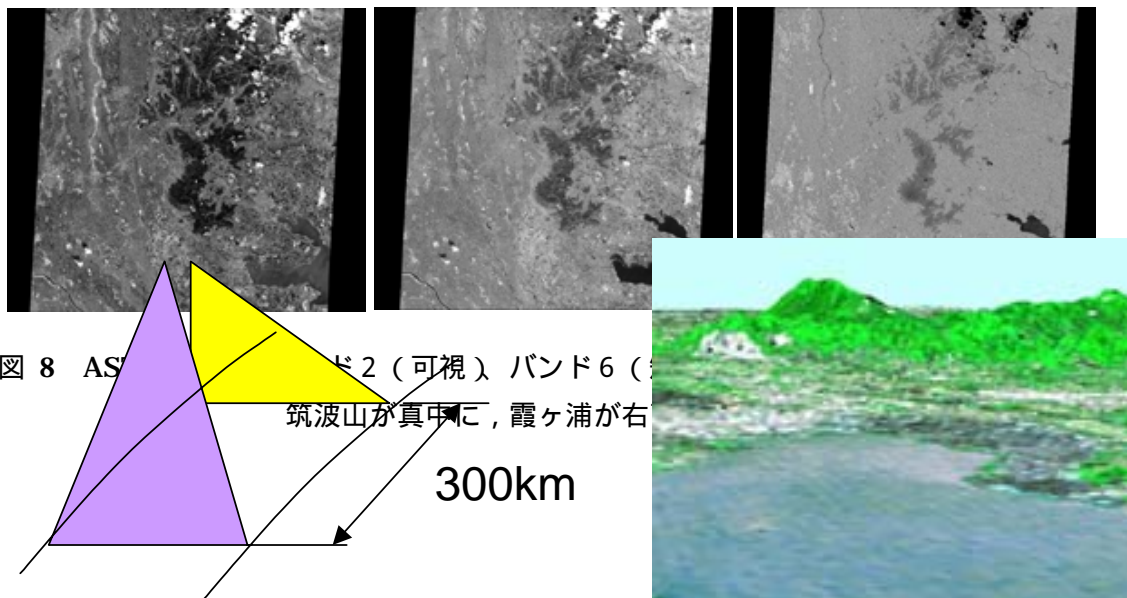


図 8 AS 帯 2 (可視)、バンド 6 (短波長赤外)、バンド 11 (熱赤外) のバンド間で、筑波山が真中に、霞ヶ浦が右

図 9 ステレオ視の原理と霞ヶ浦から望む筑波山

図 8 に画像の例を示す。それぞれ、可視、短波長赤外および熱赤外の画像であるが、分解能の違いだけでなく、特徴的な部分がかなり異なることがわかる。たとえば、雲は可視・短波長赤外光を強く反射するが、熱赤外輻射は低い（温度が低い）のに対し、水域は可視・短波長赤外・熱赤外とも暗く撮像される。

可視のセンサは、入射光がビームスプリッタで分けられた後、検出器に届くために、画像間のレジストレーションは、軌道直交、平行方向に 0.2 ピクセル以下になっている。短波長赤外

た。得られた画像をその結果、ASTER の目標値である望遠鏡内の画像合わせが 0.2 画素、望遠鏡間の画像合わせが 0.3 画素、地上位置決定能力 100m を満足することが判明した[19]。

(4) ステレオ視による立体モデル

ASTER のもう一つの特徴としてステレオ視による地球立体モデルの作製が挙げられる。直下点から 300km 後方を観測するセンサと直下観測の画像を比較することで、標高（正確には地球楕円体からの高さ）25mにつき 1 画素のずれ量を発生する（図9）。サブピクセル以下の画像相関を用いることで、高精度な立体モデルが得られる。これまでの検証では、10m程度の精度が得られている[20]。得られた標高の結果から、衛星画像の地形補正を行い、地図と重ね合わせることが可能となる。図9に地図と重ね合わせた画像と立体モデルをあわせて作成した鳥瞰図を示す。

(5) ASTER データ利用

ASTER センサの 14 バンドを用いることで、さまざまな波長を統合したデータ解析が可能となる。例えば、浦井は ASTER の熱赤外 5 バンドのうち、二酸化硫黄の吸収が大きいバンドおよびステレオ視による高度測定を利用することで、三宅島における二酸化硫黄の放出量を推定している[21]。また、さまざまなバンドを用いることで、サンゴ礁や森林の監視が行われている。さらに、熱赤外のバンド演算により、地表面の温度と輻射率を分離するなど[22]、ASTER ならではのデータが供給できるために、今後の利用が期待される。

5. おわりに

地球観測分野における最近の宇宙利用の現状と将来動向を紹介した。地球温暖化がクローズアップされる中で、より多くのデータを用いて地球のデータを取得し、そのモデリングにより将来を予測しようとする試みが多数なされている。しかしながら、地球観測セン

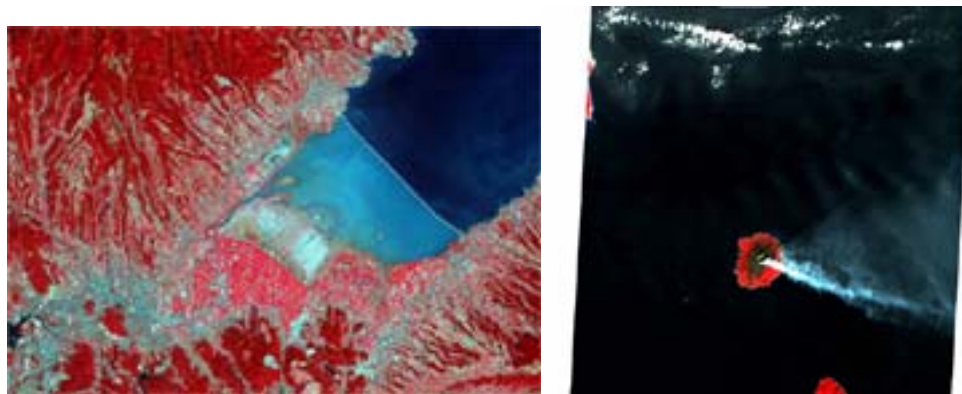


図 10 ASTER 観測画像の例：有明海および三宅島

データは資源・環境観測解析センターより

サが必要なデータをすべて取得するわけにいかず、観測頻度、空間分解能、測定波長、測定角度など、求められるパラメータは非常に多い。モデリングをさらに精密にするための要求が厳しくなり、より高精度のセンサが開発されていくことになる。

一方、商業的にはさらなるデータ利用産業の育成が求められるところである。これには、地理情報システム (GIS) に基づく利用者の増大が今後の鍵であると考えられる。最近の地球観測衛星画像は幾何学精度および S/N 比などのデータ品質が向上したため、データ利用者にとっても作業の大きな軽減になる。たとえば、これまで地上対応点との照合や地形補正は大きな作業となっていたが、もはや不要となりつつあり、利用者は岩石分類や植生判断など高次の処理をするだけで良くなっている。また、かつては大型計算機が必要であった画像解析も、パソコンレベルで処理が可能となっている。低解像度の観測データに関しては、無料で入手できるものも増えつつある。地球観測データ利用は「どう使うか」の時代に突入したといえよう。

参考文献

1. 土屋 清編著、リモートセンシング概論、朝倉書店、1990 年
2. 岡本謙一編著、地球環境計測、ウェブサミット講座、オーム社、1999 年
3. ERSDAC 編、宇宙からの地球観測、資源・環境リモートセンシング実用シリーズ、2001 年
4. Landsat ホームページ、<http://Landsat7.usgs.gov/index.php>
5. SPOT 社ホームページ、<http://www.spotimage.com/home/>
6. EO-1 ホームページ、<http://eo1.gsfc.nasa.gov/>
7. RADARSAT ホームページ、
http://www.space.gc.ca/csa_sectors/earth_environment/radarsat/default.asp
8. Envisat ホームページ、<http://envisat.estec.esa.nl/>
9. NASA ESE ホームページ、<http://www.earth.nasa.gov/>
10. NASA Terra ホームページ、<http://terra.nasa.gov/>
11. NASA Aqua ホームページ、<http://aqua.gsfc.nasa.gov/>
12. SRTM ホームページ、<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>
13. ADEOS-II ホームページ、http://sharaku.eorc.nasda.go.jp/ADEOS2/index_j.html
14. ALOS ホームページ、<http://alos.nasda.go.jp/>
15. 総合科学技術会議宇宙開発利用専門調査会報告書、平成 14 年 5 月
16. SSTL 社ホームページ、<http://www.sstl.co.uk>
17. SMEX ホームページ、<http://sunland.gsfc.nasa.gov/smex/smexlite/index.html>
18. ASTER ホームページ、<http://www.ersdac.or.jp>
19. A.Iwasaki, H. Fujisada, S. Tsujimoto, Proceedings of SPIE Vol. 4540 (2002) 27-38
20. H. Fujisada, A. Iwasaki, S. Hara, SPIE Vol. 4540 (2002) 39-49

21. M. Urai, **Proceedings of SPIE Vol. 4486 (2002) 14-20**
22. T. Matsunaga, Y. Sawabe, S. Rokugawa, H. Tonooka, M. Moriyama, **Proceedings of SPIE Vol. 4486 (2002) 20-30**