

資源探査用衛星搭載センサの開発：ASTER 開発秘話

山口 靖・津 宏治（地質調査所）

要 旨

NASA の地球観測衛星 Terra に搭載されている画像センサ ASTER の構想、開発、運用の歴史を紹介した。ASTER の開発は、日米の ASTER サイエンスチームを中心に進められ、ユーザ側からの声が強く反映された。ASTER と Terra は、設計寿命の 5 年を大きく超えて運用中であり、2019 年 12 月には 20 周年を迎える予定である。

1. はじめに

最近、テレビやパソコン、スマホなどで地球の様々な場所の衛星画像を見る機会が多くなった。朝の天気予報で見ている雲の動きも、静止気象衛星から送られてきた画像である。こうした画像は、リモートセンシング技術によって取得されている。リモートセンシングは、電磁波を用いて非接触でデータを取得する技術と定義されているが、データを取得するセンサが人工衛星や航空機、最近ではドローンなどに搭載されるため、一度に広域を観測することができる、繰り返し観測ができる、現場に行く前にデータを入手できる等の利点があり、様々な分野で利用されている。産総研傘下の地質調査総合センターが守備範囲としている地質マッピングや地下資源探査においても、リモートセンシングは遠隔地の地質情報収集や探査の初期段階などで活用されている。一方、衛星搭載センサの開発は、ハイテク分野であり、取得・蓄積されたビッグデータからの情報抽出は、IT 分野でもある。筆者らがリモートセンシングに係るようになったのは、工業技術院傘下の地質調査所に勤務していた頃、衛星搭載センサの開発にユーザ側から参加する機会を得られたためである。その当時から、衛星搭載センサの開発やデータ利用は、当時の通商産業省（以下、通産省と略）や工業技術院の関心の対象でもあった。

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer（ASTER）は、NASA の地球観測衛星 Terra に搭載された日本製の画像センサである（図 1）。1999 年 12 月に打ち上げられ、当初の設計寿命は 5 年間であったが、現在もデータ取得を続けており、今年の 12 月に打ち上げ 20 周年を迎える。これまでに日本が打ち上げた人工衛星のうち、20 年以上の運用実績を持つのは、1986 年打ち上げのあじさい、1989 年打ち上げのあけぼの、1992 年打ち上げの GEOTAIL しかなく、いずれもスピン安定の科学衛星である。Terra は NASA の衛星ではあるが、3 軸制御の低高度極軌道衛星として、これまで大きなトラブルなしに 20 年近く運用を続けて来られたのは、衛星設計や運用の優秀さの賜物であろう。また Terra に搭載されている 5 つのセンサ（ASTER、MODIS、MISR、MOPITT、CERES）も、一部に不具合は発生したものの、いまだに貴重な観測データを取得し続けていることは、賞賛に値する。本稿は、ASTER 打ち上げ 20 周年という節目を捉え、ASTER の構想

から開発、運用段階に至るまでの様々な逸話をご紹介するものである。

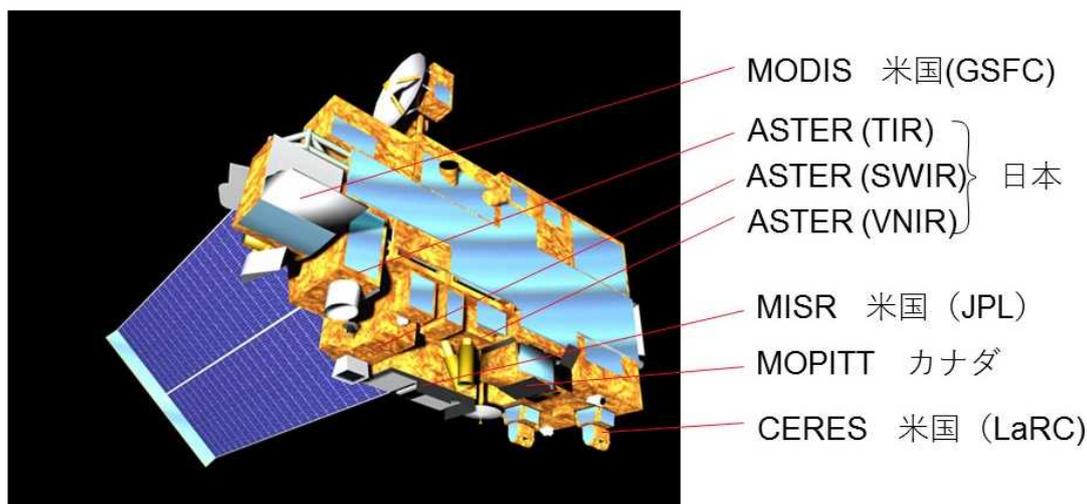


図1 Terra衛星と搭載されている観測センサ

2. OPS から ITIR、そして ASTER へ

通産省が、地球観測センサの開発に本格的に取り組むようになったのは、1992年に打ち上げられた地球資源衛星1号(JERS-1)の時からである。JERS-1の衛星本体は、宇宙開発事業団(当時)が開発を担当したが、光学センサ(OPS)と合成開口レーダ(SAR)という2つの観測センサの開発は、通産省が担当した。これらのセンサの開発段階にあった1986-1987年頃、通産省では既にJERS-1の後継センサの検討が始まっていた。手元にある資料では、その後継センサの候補として Intermediate Thermal Infrared Radiometer (ITIR:日本語名では中間熱赤外放射計)が出てくるのは1987年1月からであるが、その前年から検討は始まっていた。ITIRは、JERS-1搭載センサのEM(Engineering Model)フェーズの開発を担当した資源リモートセンシングシステム技術研究組合(RRSS)から、米国NASAの極軌道プラットフォーム(POP)搭載用センサとして提案されたものである。その後、1987年5月にカナダのオタワで開催された第5回宇宙ステーション極軌道プラットフォームの地球観測利用に関する調整会議(POP調整会議)には、日本側出席者として科学技術庁研究開発局宇宙開発課及び宇宙開発事業団宇宙実験グループからの参加者に加えて、通産省機械情報産業局宇宙産業室長が加わっている。この会議の議事メモを見ると、米国が打ち上げ予定のPOPへ搭載する地球観測センサの候補として、日本側からは AMSR (マイクロ波放射計)とITIRが挙げられている。

1987年9月付の通産省と資源探査用観測システム研究開発機構(JAROS)の共同での提案書によれば、ITIRの構成は近赤外域に1バンド、短波長赤外域に5バンド、熱赤外域に5バンドとなっているが(表1)、熱赤外域の1つのバンドは3.5 μm 帯であり、地表面からの放射を捉えるのに一般的に使われる8~12 μm 帯には4バンドが配置されていた。

表 1 ITIR の諸元。1987 年の通産省と JAROS の提案書の一部を編集・和訳。

| 項目 | | | |
|-------|-----------------------------------|------|-------|
| 観測バンド | 波長域 | バンド数 | 空間分解能 |
| | 近赤外域: 0.85 – 0.92 μm | 1 | 15 m |
| | 短波長赤外域: 1.60 – 2.36 μm | 5 | 15 m |
| | 熱赤外域: 3.53 – 11.7 μm | 5 | 60 m |
| 重量 | 290 kg | | |
| 消費電力 | 650 W | | |

同じ頃、米国側では NASA のジェット推進研究所 (JPL) の Anne Kahle 氏をリーダーとして、Thermal Infrared Ground Emission Radiometer (TIGER) というセンサが、POP への搭載候補として提案されていた。このセンサは、1本の望遠鏡を画像センサとプロファイラ (画像は取得せず、波長方向の詳細なスペクトルデータを取得) が共有し、画像センサは波長 3~5 μm に 4 バンド、8~13 μm に 10 バンドを配置し、空間分解能は 90 m という仕様であった。このように TIGER と ITIR は、どちらも高い空間分解能を持つ熱赤外域の画像センサであり、観測目的や機器仕様に共通性があった。このため NASA 本部は、Kahle 氏に対して日本側と協議し、ITIR と TIGER を統合した提案とするよう働きかけた。

一方、日本側では ITIR の仕様の検討が進み、1989 年 2 月頃には可視・近赤外域に 3 バンド、短波長赤外域に 6 バンド、熱赤外域に 3 バンドという改訂案が示された。可視・近赤外域と短波長赤外域のバンドが増え、熱赤外域のバンドが減っている。特に短波長赤外域のバンドは、鉱物の識別に有効な波長域に設定された。こうした中、Kahle 氏をはじめとする米国側の TIGER チームの 3 名が、1989 年 3 月 8 日につくばの工業技術院を訪問し、TIGER と ITIR の協力について議論を行った。Kahle 氏は熱赤外リモートセンシングの世界的権威であり、TIGER も熱赤外域を売りにしたセンサであった。ところが日本側の仕様検討によれば、上記のように ITIR の熱赤外域のバンド数が減り、それ以外の波長域のバン

表 2 ASTER の観測性能要求 (Yamaguchi et al., 1998)

| 項目 | | | |
|-------|-----------------------------------|------|-------|
| 観測バンド | 波長域 | バンド数 | 空間分解能 |
| | 近赤外域: 0.52 – 0.86 μm | 3 | 15 m |
| | 短波長赤外域: 1.60 – 2.43 μm | 6 | 30 m |
| | 熱赤外域: 8.125 – 11.65 μm | 5 | 90 m |
| 重量 | 406 kg | | |
| 消費電力 | 726 W | | |

ド数が増えていたため、来日した Kahle 氏は不満を隠さず、「あなたたちの検討は、誤った方向に行っている」と主張した。結局、Kahle 氏からの強い要求もあり、ITIR は熱赤外域のバンド数を 5 つに増やし、最終的には表 2 のような観測性能要求となった。その後、ITIR は、ASTER に改称され現在に至っている。

3. ASTER センサの特長

ASTER の最大の特長は、可視・近赤外～短波長赤外～熱赤外域にわたる幅広い波長域を高い空間分解能でカバーしていることであるが、同じ観測センサのカテゴリーに含まれる米国の Landsat 衛星の TM センサとは、大きな違いがある。TM は基本的に一つの観測センサであり、一つの焦点面に検出器が並んでいるのに対して、ASTER は可視・近赤外放射計 (VNIR)、短波長赤外放射計 (SWIR)、熱赤外放射計 (TIR) の 3 つの独立したサブシステムからなり、各サブシステムの焦点面に検出器が並んでいる。このため、広い波長域をカバーするデータセットとして最終的にユーザに提供する際には、各サブシステムの観測バンド間での位置合わせ (レジストレーション) を行わなければならない。これは、データ取得後に地上データ処理で行うことになり、その分だけ ASTER のほうが地上データ処理の負担が大きいことを意味する。しかし、一方でそれぞれの波長域毎にサブシステムを独立させたことによって、各波長域に応じた最適なハードウェア設計とすることが可能となった (表 3 ; Fujisada et al., 1998)。

表 3 ASTER のサブシステムの構成 (Fujisada et al., 1998)

| Subsystem | VNIR | SWIR | TIR |
|----------------------|--------------------------------------|--|--|
| Scan | Pushbroom | Pushbroom | Whiskbroom |
| Telescope optics | Reflective | Refractive | Reflective |
| Spectrum separation | Dichroic and band pass filter | Band pass filter | Band pass filter |
| Focal plane | Si-CCD 5000 x 4 | PtSi-CCD 2048 x 6 | HgCdTe (PC) 10 x 5 |
| Cryocooler | not cooled | Stirling cycle, 77 K | Stirling cycle, 80 K |
| Cross-track pointing | Telescope rotation $\pm 24^\circ$ | Pointing mirror rotation $\pm 8.55^\circ$ | Scan mirror rotation $\pm 8.55^\circ$ |

VNIR は、直下視の 3 バンドに加えて後方視の 1 バンドを持っており、地表面の立体視観測 (BH 比 0.6) が可能である。フランスの SPOT 衛星などの複数軌道からの側方視方式ではなく、JERS-1/OPS を継承した同一軌道内立体視であり、直下視と後方視間の撮像時間差は 55 秒しかないため、地表面の時間変化がほとんどなく、雲のない画像ペア取得確率

も高い。立体視データは、肉眼による地形・地質判読に役立つだけでなく、デジタル地形モデル (DEM) の作成に使うことができ、後述する GDEM (全球 DEM) の作成・提供に繋がった。また VNIR は、クロストラック方向に $\pm 24^\circ$ のポインティング機能を有しており、自然災害などに対する緊急観測を行う際に、観測までの時間短縮に貢献している。

図 2 に名古屋周辺の ASTER の画像例を示す。VNIR 画像では植物の分布が良く分かり、TIR 画像では表面温度が分かる。これらの異なる波長域の画像が同時に取得できるのが、ASTER の大きな利点である。二つの画像を比較すると植物の分布域は、葉からの水分の蒸発散により、表面温度が周囲よりも低くなっており、都市のヒートアイランド化をある程度抑制していることが理解できる。

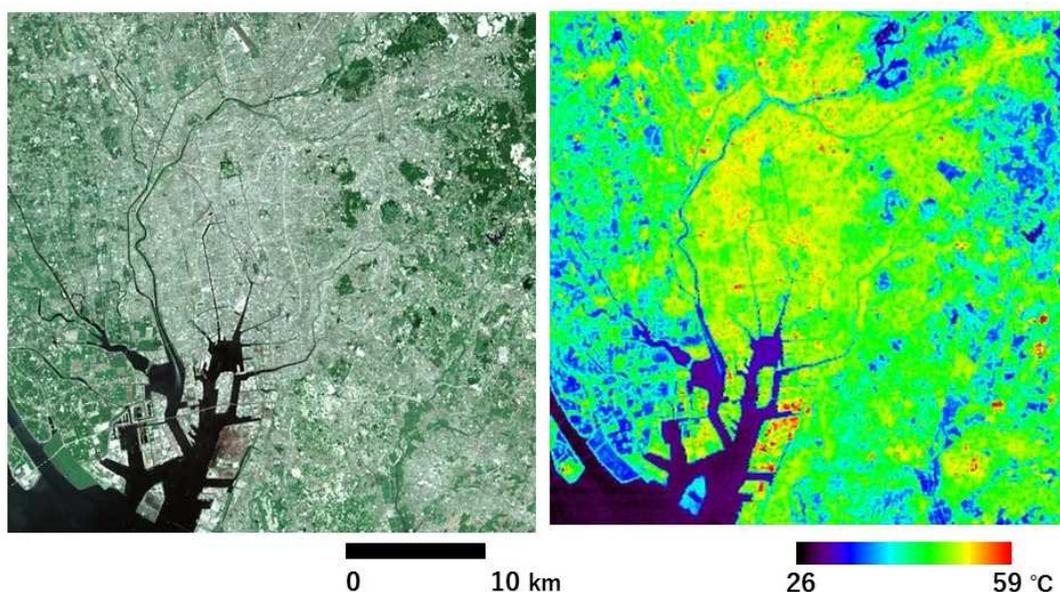


図 2 ASTER の名古屋市周辺の画像例。左：VNIR 画像、右：TIR 画像による表面温度 (imagery courtesy "NASA/METI/AIST/JSS ASTER")。

4. ASTER サイエンスチームの役割

前述のように ASTER センサの仕様は次第に固まっていたが、その過程で重要な役割を果たしたのは、日米の科学者からなる ASTER サイエンスチームである。衛星搭載センサに対応したサイエンスチームを組織するのは、今では日本でも普通になっている。しかし、ASTER の開発が始まった 1990 年頃、少なくとも日本の地球観測分野では、センサに対応したサイエンスチームを明確に決め、ハードウェア製作側と連携して開発を進める体制は、前例が無かった。一方、米国では科学者が中心となったサイエンスチームが衛星搭載センサの開発・搭載を NASA に対して提案し、その提案が認められればサイエンスチームが中心となってハードウェア製作側と連携しながらセンサを作り上げてゆく体制となっている。ASTER の開発においては、センサ製作は日本側で行うものの、センサを搭載するのは

NASA の衛星であることから、NASA の開発体制に倣って日米の科学者からなる ASTER サイエンスチームを組織することとなった。

前述した JERS-1 の開発においては、当時の通産省が資源探査という目的のためにセンサ開発を担当したため、ユーザ側からの様々な要求を出すことができた。しかし、資源探査分野のユーザが衛星プロジェクトにまだ不慣れであったこと、既に当時の宇宙開発事業団による開発がある程度進んでいて、ユーザ側が関われる範囲が限られていたことなどの反省点があった。このため、ASTER プロジェクトでは、開発当初の通産省の担当者のご理解もあり、ユーザ側からの声を最大限に生かそうという方針が、当初から徹底されていた。

ASTER サイエンスチームのリーダーは、日本側が地質調査所（当時）の津 宏治、米国側がジェット推進研究所（JPL）の Anne B. Kahle 氏が務めた。現在は、日本側が名古屋大学の山口 靖、米国側が JPL の Michael Abrams 氏に交代している。ASTER サイエンスチーム会議は、原則として年に 2 回、そのうち 1 回は日本、もう 1 回は米国で開催していたが、この数年間は日本側の予算不足のため、年に 1 回だけ日本で開催している。ASTER サイエンスチームの活動は、既に約 30 年の歴史があり、今年 6 月には第 50 回のサイエンスチーム会議を開催する予定である。この ASTER サイエンスチームの活動が、日本側の若手の研究者を育て、その後の様々な衛星プロジェクトを中心となって推進してゆく人材を造ったことは事実であり、人材育成面での貢献も大きい。

サイエンスチームの中には WG がいくつか設けられ、サイエンスチーム会議で活発な議論を行う場となった。WG は、プロジェクトの進行に伴って新設されたり、統合・廃止されたりしてきたが、1995 年頃と 2018 年現在の WG は以下の通りである。

1995 年の第 10 回 ASTER サイエンスチーム会議での WG ; 運用・ミッション計画 WG、レベル 1 処理 WG、放射補正 WG、幾何補正 WG、DEM WG、温度・放射率分離 WG、大気補正 WG、地質 WG、エコシステム・海洋 WG、高次レベルデータプロダクト WG、航空機センサ WG、スペクトルライブラリー委員会、STAR 委員会

2018 年の第 49 回 ASTER サイエンスチーム会議での WG ; 運用・ミッション計画 WG、レベル 1 処理・DEM WG、放射補正 WG、温度・放射率分離 WG、応用（地質、エコシステム、海洋）WG、STAR 委員会

サイエンスチームの最初の仕事は、前述したようにセンサの観測性能要求を決めることで、それに基づいてセンサの開発仕様書が作成された。それまで日本の地球観測ユーザは、大まかな観測性能要求を作ることはあったが、ASTER の開発のように詳細な観測性能要求や校正計画まで立ち入って決める経験は乏しかった。従来は、観測性能要求を聞かれた際に例えば空間分解であれば「高ければ高いほど良い」といった要求を出すことが多く、それによって SN 比や量子化ビット数など他の重要な観測性能が犠牲になり、総合的にみてユーザが満足できるデータとならない場合もある。それに対して ASTER の開発では、ユーザ側も様々な観測性能間のトレードオフを考慮しながら、重量・電力・データ量・予算・開発期間などの制約内で許される最善の観測性能要求として取り纏めた。これが可能であっ

たのは、JERS-1での開発経験がある程度役立ったこともあるが、ハードウェア開発についての知識と経験が豊富な電子技術総合研究所の藤定広幸氏と計量研究所の小野 晃氏のお二人が、サイエンスチームのメンバーとして加わっていたことが大きかった。また、基本的にユーザ要求を重要視するという、プロジェクトとしての姿勢が最大の鍵であった。観測性能要求を議論する会議は、藤定氏と小野氏のリーダーシップのもと、ハードウェア製作側とユーザ側との間で何度も開催され、長時間の議論となることが常であった。また日本側と米国側との間の議論も、サイエンスチーム会議の場などで盛んに行われた。

例えば、観測バンド数と波長位置の決定には、日米 ASTER サイエンスチーム内で長く活発な議論があった。米国側サイエンスチームにはリモートセンシングの世界的な権威が何名も揃っているのに対して、日本側はまだ若いメンバーが多く、最初の頃は全く歯が立たないのではないかと気後れした。しかし、米国側はこれまでの実績や権威を笠に着て頭ごなしに主張することは無く、しっかりしたデータを基にして議論すれば、実績の乏しい日本側の話も真剣に聞いてくれた。前述のように熱赤外域のバンド数については、米国側の強い主張を受け入れた面があったが、可視・近赤外域と短波長赤外域のバンド数と波長位置については、日本側の検討結果と主張を受け入れてくれた。最終的に観測性能要求が日米のサイエンスチーム間で合意できた時のホッとした気持ちは、今でも良く憶えている。

5. 地上データ処理と運用シナリオについて

センサの観測性能要求が固まりセンサの開発が本格的に開始されると、次は地上データ処理システムの検討が始まった。日米間での役割分担としては、まず米国側の受信施設で Terra 衛星からの生（レベル 0）データを受信し、それを日本側に送り、日本側がユーザに提供する最も基本的なレベル 1 データ（センサ入口での放射輝度に対応）に処理する。処理済のレベル 1 データのコピーは、全て米国側にも送り返し、日米双方がさらに進んだレベル 2 以上の高次処理データを作成する。これらのデータプロダクトは、日米のデータセンターから、世界中のユーザに提供される（図 3）。

その当時は、衛星データの地上処理は、メインフレームと呼ばれる大型のコンピュータで行うのが普通であったが、ASTER の地上データ処理は性能向上が著しいワークステーションで行うとの方針になった。今では誰も驚かないが、その当時としては斬新であったと思う。また、米国から日本へのデータ伝送も大きな課題であった。これも今ではネットワーク経由で問題なく送れるが、ASTER プロジェクトの開始当時は、緊急観測データのみが日米間のネットワーク（海底光ケーブル）経由で送られて来て、その他の大部分のデータは、磁気テープに収められ、航空機便で定期的に送られてきていた。

ASTER の運用が順調に進み、データが蓄積されてくると、その蓄積されたデータを活用したデータプロダクトの作成も始まった。代表的なものが、全球 DEM（Global Digital Elevation Model: GDEM）である。ASTER のような光学センサは、雲があるとその下は観測できないが、雲の位置は時間変化する。このため、撮像時期の異なる立体視データか

ら作成した DEM を多数蓄積し、雲のない部分の DEM を重合することにより、雲被覆による抜けの少ない高精度の DEM を作ることができる。このデータプロダクトを GDEM と名付け、2009 年 6 月から無償でユーザに配布している。GDEM の配布前に広く使われていたのは、スペースシャトル搭載の合成開口レーダによる Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) で作成した DEM であった。ASTER GDEM も SRTM DEM も空間分解能は 30 m と同じであるが、SRTM DEM の対象範囲は緯度約 60 度までに限定されるのに対して、GDEM は緯度約 83 度までカバーしている。

ASTER のデータプロダクトのユーザへの配布は、2016 年 3 月までは少額の課金 (Marginal cost) がなされていたが、2016 年 4 月以降は、日米いずれからのデータ配布も無償となり、ユーザ数やダウンロードされたデータ数・量が爆発的に増えた。例えば、2016 年から 2018 年 4 月までの 2 年間で、ASTER のレベル 1~3 データプロダクトは、米国側からだけで 2,400 万ファイル以上がユーザに配布された。また ASTER GDEM は、この約 2 年間に 5,500 万ファイル以上が配布されたとのことである。世界的にも政府が関連した地球観測衛星のデータは、無償でユーザに配布される “Open and free” が主流となっており、ASTER のデータ配布も、その潮流に乗っているとと言える。

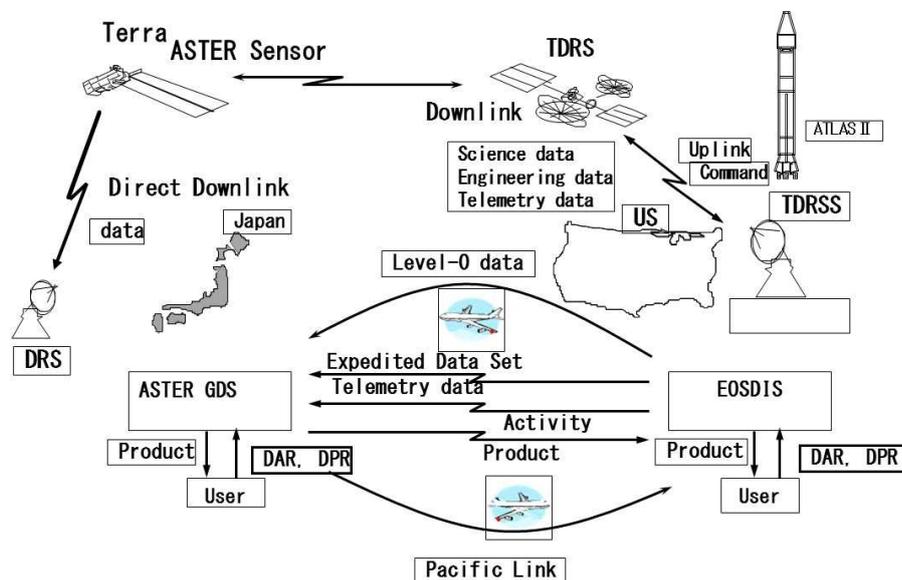


図 3 ASTER データ処理に関する日米間での役割分担。2002 年頃。

ASTER の運用計画の立案も、大きな課題であった。ASTER は、Terra に搭載された 5 つの観測機器の中では画像の空間分解能が最も高く、取得データ量が大きいため、平均して約 8% の運用率に相当するデータ取得のみが許された。このため、運用率 100% の

MODIS などとは異なり、撮影対象域を軌道毎に決め、それに応じて ASTER の各サブシステムの運用を行わなければならない。そのために予めユーザから撮像希望対象の地理的範囲、撮像頻度、撮像モード、ゲイン設定などのデータを集め、データベースに格納した。そのデータベースに基づき、様々な基準によって予め決めておいた撮像優先度の計算を行い、各観測日の観測スケジュールを自動的に計算して作成することにした。さらに自然災害や地上校正などの直前の観測要求や、雲被覆の予報なども取り込むことが出来るよう、観測要求は数日前に作成するバックアップ用のものと、観測直前にアップデートしたものの2種類を作成し、2つのタイミングで NASA に毎日送る仕組みを作った。こうした運用シナリオ造りは、基本的な方針から細かい運用ルールまで、決めるべきことやプロジェクトの進行に応じて見直すべきことが多く、実際の運用の最初の 2、3 年間は試行錯誤の連続であった。その結果、今では安定して ASTER を運用できており、1 日当たり約 600 シーン（1 シーンは 60 km 四方）のデータを取得し続けている。図 4 に示したように、世界の陸地のほとんどは、ASTER によって最低 1 回は撮像済みであり、ほとんどの地域は複数回撮像されている。

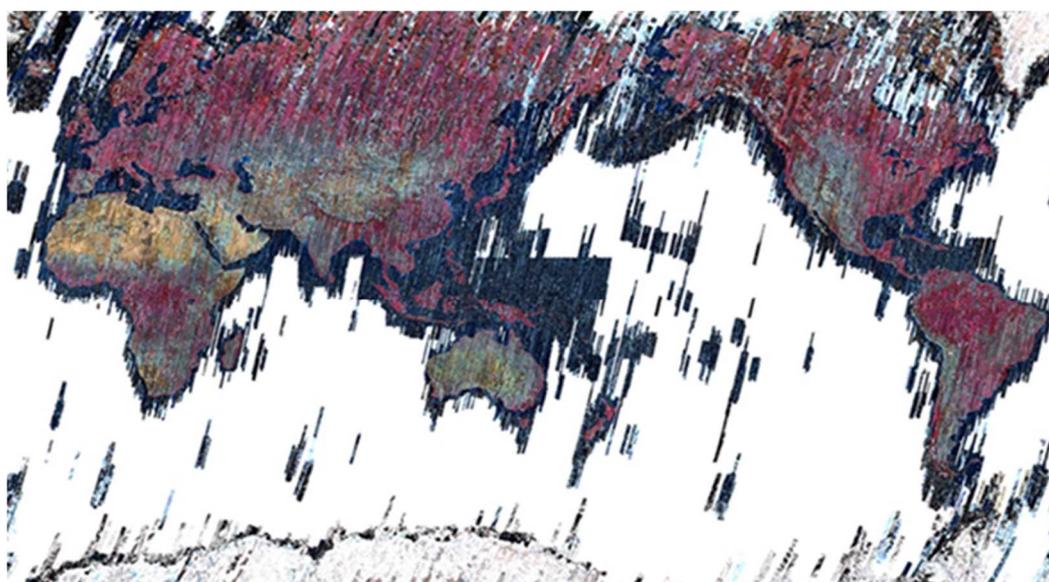


図 4 ASTER のレベル 1 データのブラウザ画像のモザイク。陸域はほぼ網羅した。

6. ASTER 後継機について

ユーザにとっての大きな関心事は、データの継続性である。NASA の EOS 計画が最初に立案された頃、大型の地球観測衛星を合計 6 機打ち上げる計画であった。いずれも太陽同期の低高度極軌道衛星で、そのうち 3 機は赤道上空通過地方時が午前の衛星、3 機は午後の衛星で、それぞれ EOS-AM1, 2, 3, EOS-PM-1, 2, 3 と呼ばれていた。各衛星の寿命は 5 年間で、合計して 15 年間の観測を継続する計画であった。EOS 計画の主要な目的は地球環境

変動の衛星による観測・監視であるが、環境変化の多くは僅かであり、短い観測期間では捉えるのが難しいため、出来るだけ観測期間を延ばすことにより、変化や変動を捉えようという目論見である。結果的に EOS 計画で打ち上げられた大型の地球観測衛星は、午前軌道の Terra (EOS-AM1 に相当) と午後軌道の Aqua (EOS-PM1 に相当) の 2 機になってしまったが、この 2 機が当初の設計寿命を大幅に超えて今でも観測を継続しているのは、予想外の喜ばしい状況である。そして観測期間が延びたことにより、地球環境の変化や変動が捉えられた事例が増えてきている。

しかし、TerraもASTERも永久に動き続けることはあり得ず、いずれかのタイミングで運用停止になることは必然である。従ってユーザとしては、観測の継続性を担保するため、後継となる観測センサの開発を望むことになる。ASTERの後継センサについても、当初の設計寿命が終わる前の2004年頃には関係者の間で議論が始まった。ちょうど同じ頃、米国の陸域リモートセンシングの代表であるLandsatシリーズの後継についても、米国内で議論が行われていたが、その時点では後継がどうなるのか、米国政府の方針は固まっていないように思われた。このため、日米のASTERサイエンスチームのメンバーを中心として、様々な国々のリモートセンシングデータのユーザや研究者を巻き込み、ASTERとLandsatを統合した後継ミッションの提案を短時間で取り纏めた。そして「Landsat/ASTER後継ミッションの日米共同開発／打ち上げ／運用に関する提案書」として100名以上の賛同者の署名を付け、2004年4月16日付でNASA本部地球科学担当副長官、経済産業省宇宙産業室長、米国地質調査所所長、資源・環境観測解析センター専務理事宛に提出した。後日、NASA副長官と米国地質調査所所長からは、提案内容は興味深いが、残念ながら採択することは難しい旨の回答が届き、Landsat/ASTERの共同開発は実現しなかった。その後、Landsat計画は、米国が独自に後継機の開発を進め、現在もLandsat Data Continuity Mission (LDCM) として継続していることは、周知のとおりである。

ASTER と類似した観測バンドを持つ地球観測衛星として、民間企業の Digital Globe 社が 2014 年 8 月に打ち上げた World View-3 がある (<http://worldview3.digitalglobe.com/>)。この衛星は、可視・近赤外域に 8 バンド、短波長赤外域に 8 バンドを持つが、特に波長 2.1 ~ 2.4 μm に配置された 4 つのバンドは、ASTER の SWIR のバンド 5~8 に対応し、粘土鉱物や炭酸塩鉱物の識別・マッピングを目的としている。実は、WorldView-3 の設計段階において、筆者の一人 (YY) は、地質リモートセンシングの専門家として観測バンドの波長位置についてのコメントを求められたことがある。その際には「ASTER の観測バンドの波長域は、かなり詳しい検討をして決めたので、ASTER の仕様が最適である」と返答した記憶がある。結果的に WorldView-3 の観測バンドは、ASTER のバンド 9 相当のバンドが無い点を除いて、他のバンドの波長位置はほとんど同じである。ただ ASTER の SWIR の空間分解能が 30 m であるのに対して、WorldView-3 は 3.7 m であり、その高い空間分解能の故に WorldView-3 のほうが鉱物の識別能力は高いという研究結果が、いくつか報告されている。ASTER は 1990 年代に製作されたセンサであるのに対して、WorldView-3 は 2010

年代のセンサであり、20年間の技術進歩を考えれば致し方ないが、もしASTER後継センサがもう少し早く実現していれば、WorldView-3と勝負できたかもしれないと思うと残念でならない。なお経済産業省は、ASTERよりも観測バンド数が圧倒的に多いHyperspectral Imager Suite (HISUI; Iwasaki et al., 2011)の国際宇宙ステーションへの取り付けを2019年度後半に計画しており、これがASTER後継センサとなる。

7. ASTERに対するユーザからの高い評価

ASTERデータは、多くのユーザに配布され、世界中で活用されている。利用分野としては、地下資源探査、地質マッピング、火山噴火・洪水・大規模地滑りなどの自然災害の被害把握、森林・氷河・サンゴ礁などの環境変化の解析、都市・農地などの土地被覆変化の監視など多岐に亘る。前述のようにASTERの観測バンドのいくつかは、岩石・鉱物の識別やマッピングを念頭に設定されている。図5に筆者らが提案したASTERデータの表現法の例を示すが、地下資源探査に役立つ様々な岩石・鉱物の情報が、ASTERデータから得られることが分かる。

筆者が2016年にイギリスのロンドンで開催された地質リモートセンシングの学会に参加した際には、ある民間の資源探査会社の方々から「ASTERの出現はこの分野では画期的で、

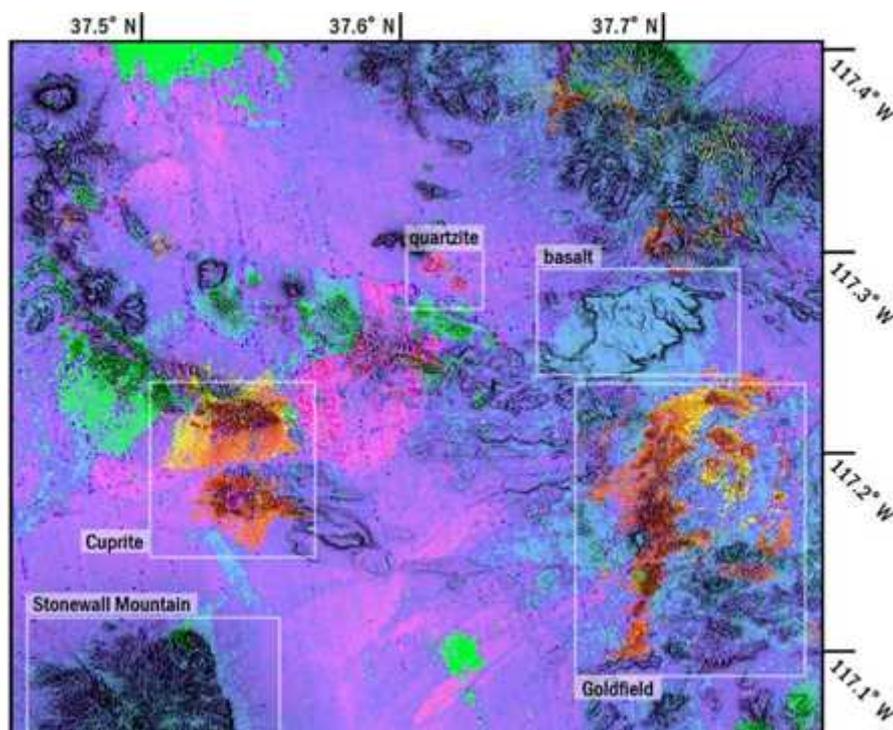


図5 ASTER画像により岩石・鉱物分布を見易く表示した例(右が北方向)。米国ネバダ州Cuprite地域。赤～黄色は熱水変質帯、緑色は石灰岩、水色は玄武岩、赤紫色は珪化帯または珪岩。画像の明るさが地形を表現している(Kurata and Yamaguchi, 2019)。

まさに”Game Changer”だった」との言葉を掛けていただいた。米国、イギリス、カナダ、南アフリカ等の参加者からも、ASTER データに対する謝意を表していただき、ASTER の当初の目的が達成されたことを実感した。また 2019 年 2 月にサウジアラビアで開催された国際学会で ASTER についての基調講演を行った際には、地元の国営石油会社であるサウジアラムコの方々から、ASTER データは探査に役立っていると伺った。オーストラリアでは、全国土を対象として様々な鉱物の分布を示す「ASTER Geoscience Map」を出版している (Cudahy, 2012)。このデータプロダクトは地下資源探査に活用されており、2013 年の Orion Gold 社によるクイーンズランド州での新たな金鉱床探査ターゲットの発見 (<https://hotcopper.com.au/threads/ann-aster-interpretation-identifies-new-target-a.2066859/>) や、2014 年の Kentor Gold 社による金鉱床の発見などに結びついたとされている (WASTAC, 2014)。民間会社による資源探査は、社外に情報が公表されないことが多く、ASTER が実際の探査にどこまで役立ったのか表になかなか出て来ないが、時々こうした現場の声を聴けると、ASTER の開発に係わった者としては嬉しい限りである。

8. おわりに

ASTER サイエンスチーム会議は、この 6 月に東京で開催される会合が、ちょうど 50 回の節目となる。この間にメンバーの入れ替わりもあり、第 1 回から欠かさず参加している人は、居なくなってしまったが (筆者の YY は 1 回だけ都合で欠席)、これだけ長い間一緒に活動しているとお互いに気心も知れ、運命共同体のような感じになっている。打ち上げ前に運用シナリオを策定していた頃には、日米間の利害が対立し、机を叩いて激しい議論をしたことも何度かあった。しかし、米国側メンバーはディベート慣れしていて、議論は議論と割切っており、激しいやり取りが感情的に後まで尾を引くことはなく、会議後には仲良く食事をしに行ったりした。また、何かを決めなければならない場面では、米国側は割とすんなり決めるのに対して、日本側は日本に戻ってから検討して返事するという回答が多かったように思う。こうした様々な場面で日米間の文化の違いを感じることも多かった。Plafcan (2011) は、日米間の科学技術協力プロジェクトの好例として ASTER プロジェクトを取り上げ、その経緯や成功の原因などを米国コーネル大学の博士論文のテーマとして研究対象とした。ASTER データを使った研究や実利用の成果が世に出ることも嬉しいが、ASTER プロジェクト自体が研究対象となったことに対しては、関係者の一人として誇らしい思いである。

ASTER も、それを搭載した Terra も、今年の 12 月に打ち上げ 20 周年を迎える。NASA としては、Terra の軌道制御用の燃料が確保できる間は運用を継続する方針とのことであり、ASTER チームとしてもこの方針に従って出来るだけ長くデータ取得を継続したいと心から願っている。最後に、経済産業省、産業技術総合研究所、宇宙システム開発利用推進機構、NASA の担当者、ASTER センサや地上処理システムの開発に携わって来られた民間企業の方々、日米の ASTER サイエンスチームのメンバー、会議での通訳など、ASTER プロ

プロジェクトに係わって来られた全ての皆様方にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

9. 参考文献

- Cudahy, T. (2012): Satellite ASTER Geoscience Product Notes for Australia. *Australian ASTER Geoscience Product Notes, Version 1*. CSIRO ePublish, EP-30-07-12-44.
- Fujisada, H., Sakuma, F., Ono, A., and Kudoh, M. (1998): Design and preflight performance of ASTER instrument protoflight model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (4), 1152-1160.
- Iwasaki, A., Ohgi, N., Tanii, J., Kawashima, T., and Inada, H. (2011): Hyperspectral Imager Suite (HISUI) -Japanese hyper-multi spectral radiometer, *Proc. IGARSS 2011*, 1025-1028.
- Kurata, K. and Yamaguchi, Y. (2019): Integration and visualization of mineralogical and topographical information derived from ASTER and DEM data. *Remote Sensing*, 11, 162.
- Plafcan, D. (2011): Technoscientific Diplomacy: the practice of international policies in the ASTER collaboration. In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, Chapter 4, R. Ramachandran, Justice, C., Abrams, M., eds., Springer: New York, 2011, pp. 483-508.
- Western Australia Satellite Technology and Applications Consortium (WASTAC) (2014): Annual Report, 56pp, www.wastac.wa.gov.au.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Tsu, H., Kawakami, T., and Pniel, M. (1998): Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (4), 1062-1071.

【著者略歴】

山口 靖 (YAMAGUCHI, Yasushi)

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| 1980年 (昭和 55年) | 東北大学大学院理学研究科地学専攻修士課程修了 |
| 1980年 (昭和 55年) | 通商産業省工業技術院地質調査所地殻熱部地殻熱探査課 |
| 1980-82年 (昭和 55-57年) | 新エネルギー総合開発機構地熱調査部地熱調査第二課出向 |
| 1984-86年 (昭和 59-61年) | 米国スタンフォード大学応用地球科学部客員研究員 |
| 1987年 (昭和 62年) | 地質調査所地殻熱部地殻熱探査課主任研究官 |
| 1989年 (平成元年) | 理学博士 (東北大学) |
| 1992年 (平成 2年) | 地質調査所国際協力室国際地質課 |
| 1996年 (平成 8年) | 名古屋大学大学院理学研究科助教授 |
| 2001年 (平成 13年) | 名古屋大学大学院環境学研究科教授 |

2009-2011 (平成 21-23 年) 名古屋大学大学院環境学研究科長

津 宏治 (TSU, Hiroji)

1970 年 (昭和 45 年) 東京大学大学院理学系研究科地球物理学修士課程修了

1970 年 (昭和 45 年) 工業技術院地質調査所物理探査部技術開発課

1992 年 (平成 2 年) 地質調査所企画室長

1993 年 (平成 3 年) 地質調査所地殻物理部長

1994 年 (平成 4 年) 工学博士 (東京大学)

1995-1997 年 (平成 5-9 年) 財団法人資源・環境観測解析センター (出向)

1997 年 (平成 9 年) 地質調査所地殻物理部長

1997 年 (平成 9 年) 地質調査所次長

1999 年 (平成 11 年) 四国工業技術研究所長

2001 年 (平成 13 年) 財団法人資源・環境観測解析センター理事

2012-2013 年 (平成 24-25 年) 財団法人宇宙システム開発利用推進機構理事

2013-2015 年 (平成 25-27 年) 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構利用技術本部長

受理日 : 2019年3月26日