

M-V ミッションの紹介（5号機から8号機まで）

川口淳一郎*, 満田和久*, 村上浩*, 清水敏文*

1. はじめに

ここでは、M-V-5号機から8号機までに計画されたミッションおよび衛星の概略を紹介する。紙幅の都合で十分な記述が出来ない事をご了承願いたい。衛星の詳細および観測成果等に関してはそれぞれの成果報告を参照されたい。

2. 工学実験探査機「はやぶさ」(MUSES-C)

MUSES-C探査機は、2003年5月9日13時29分（日本時間）M-V-5号機により惑星間軌道に投入され、「はやぶさ」と命名された。「はやぶさ」は、今後の惑星探査、特に小天体からのサンプルリターンに必要な、1)イオンエンジンによる主たる推進としての惑星間での使用、2)光学情報に基づく自律的な航法と誘導、3)微小重力下での小天体表面の試料採取、4)惑星間軌道からの直接再突入による試料回収の各技術を開発、実証することを目的とした工学実験探査機である。これらの技術を実証するための対象天体は、小惑星1998SF36（イトカワ）であり、これまでに人類が探査した天体の中で最小であるため、工学実験に成功すれば大きな理学的成果が得られることが期待されていた。

最初の1年は、ほぼ地球と併走する太陽周回軌道を取り、この間、イオンエンジンによる加速によって軌道エネルギーを貯めていた。2004年5月19日、再び地球に接近し、地球の重力を使ったスウィングバイによって、イトカワへ向かう所定の軌道へと投入された。この、イオンエンジンによって貯めた軌道エネルギーをスウィングバイによって取り出す手法は世界初の試みであり、また、ほぼイオンエンジンの推力のみによってスウィングバイに必要なkmオーダーの精度で軌道を制御できたことは、大きな工学的成果であると言える。その後、2005年8月28日まで、イオンエンジンは延べ25,800時間の運転を達成した。この間、2005年7月29日にはイトカワからの距離約4万kmの地点にて初めて撮影に成功し、その後も光学情報（イトカワの観測される方向）を用いて、探査機を高精度に制御させることに成功、8月28日の時点では4,800kmの地点まで接近した。

その後は、化学推進装置を用いて軌道の微調整を行いながら接近し、9月12日にはイトカワからの距離約20kmの地点で静止させることに成功した。その後、イトカワの全体像の撮影および科学観測を行い、9月末には高度約7kmの地点（ホームポジション）まで接近して、詳細観測を続けた。10月3日には、7月31日の1台目の故障に続いて2台目のリアクションホイールが故障し、リアクションホイールによる3軸姿勢制御が不能となったが、化学推進系の併用によって、4つの観測機器（可視光多波長カメラ、近赤外分光器、レーザ高度計、X線分光器）によるイトカワの詳細観測は達成することができた。

* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA



図2-2-1 「はやぶさ」の軌道上想像図

イトカワの観測によって、科学的に新たな知見を得ることができた。これまで、低重力下における天体の地形は均質であるとの理論的な予想があったが、イトカワはきわめて多様で、表面状態の二分性や、多数の大型岩塊の広範な分布を示しており、レゴリスに覆われていない天体表面を史上初めて露わにしたと言える。従来はレゴリスに覆われた表面だけしか観測できなかった天体の真の表面を目の当たりにすることになり、この結果は、小天体の地上観測された結果の理解度を将来にわたって大きく前進させるものである。また、試料採取域の詳細観測結果が得られ、試料と相関性が確立できた。サンプルリターンに成功した場合は、分光観測と構成物質の相関を確立することができ、Sタイプ小惑星と普通コンドライトの関係の謎を解決（宇宙風化を理解）できる可能性があり、太陽系創生の理解、当然ながら地球そのものの理解にも通じることになる。取得した画像を、探査機の航法情報と組み合わせることにより、イトカワの形状モデルの構築に成功した。これにより世界的にも未開拓なきわめて小型天体上の低重力環境下での、岩塊の分布やレゴリスの重力に応じた移動に関わるメカニズムの解明が行われている。また、探査機の軌道を解析することにより、イトカワの重力すなわち質量の測定が行われた。これと形状モデル（体積）とを組み合わせることにより、密度推定に成功している。推定された密度は、地球上の岩石やこれまでに観測されたS型小惑星のそれらよりもやや小さく、これは従来考えられてきたよりも大きな空隙の存在を示唆するもので、イトカワほどの大きさの小天体の姿に関する認識を大きく改めさせるものであった。

ホームポジションからの詳細観測により、安全に着陸できる地点が選ばれ、そこへ向けた着陸が計画された。着陸に先立って、11月4日、9日、12日の3回、低高度まで降下する運用を行った。これらの過程で、表面の詳細画像の取得、ターゲットマーカ（着陸時に使用する目印）の投下試験、小型探査ロボットミネルバの分離などを行った。続いて、20日には、第1回の着陸および試料収集が実施された。着陸の最終段階において、センサが障害物を検出したため、探査機は着陸シーケンスを中断したが、安全機能の動作により離脱上昇も行われず、

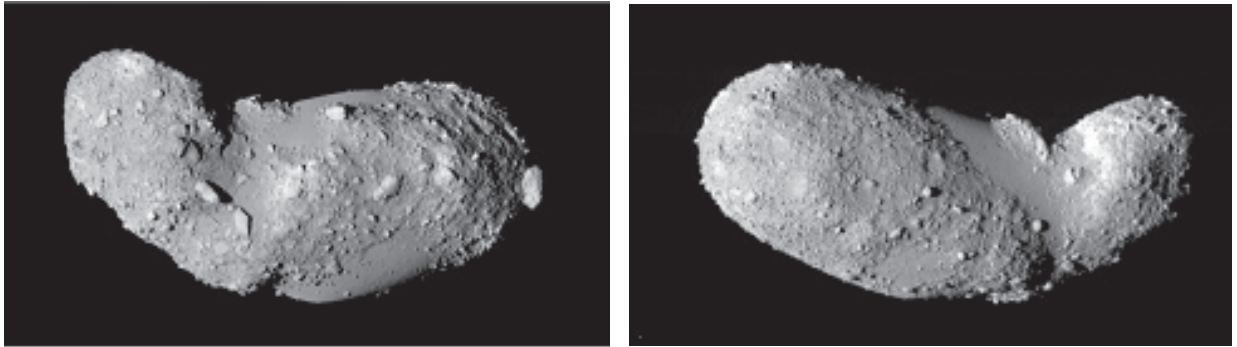


図2-2-2 ホームポジションから撮影したイトカワ

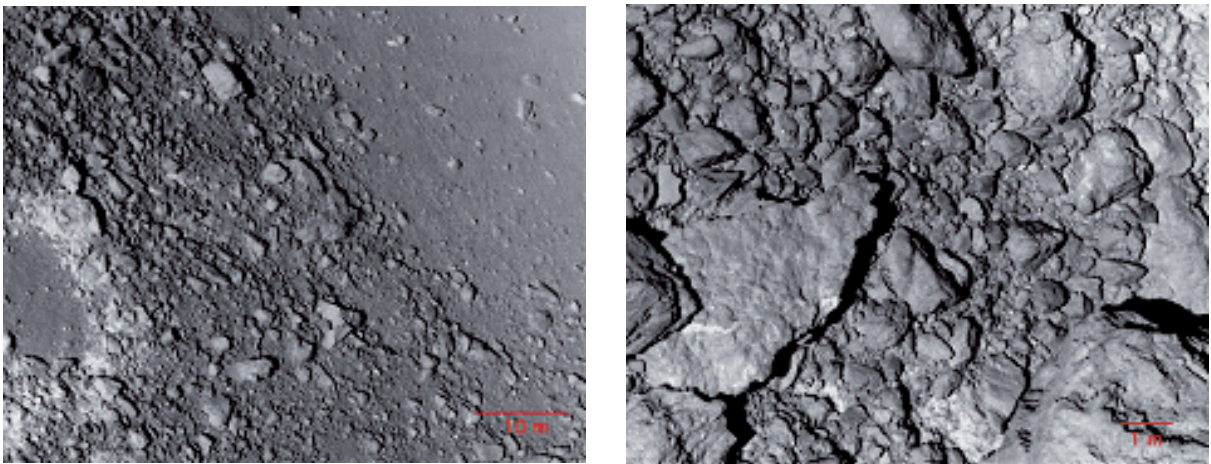


図2-2-3 イトカワ表面の近接画像

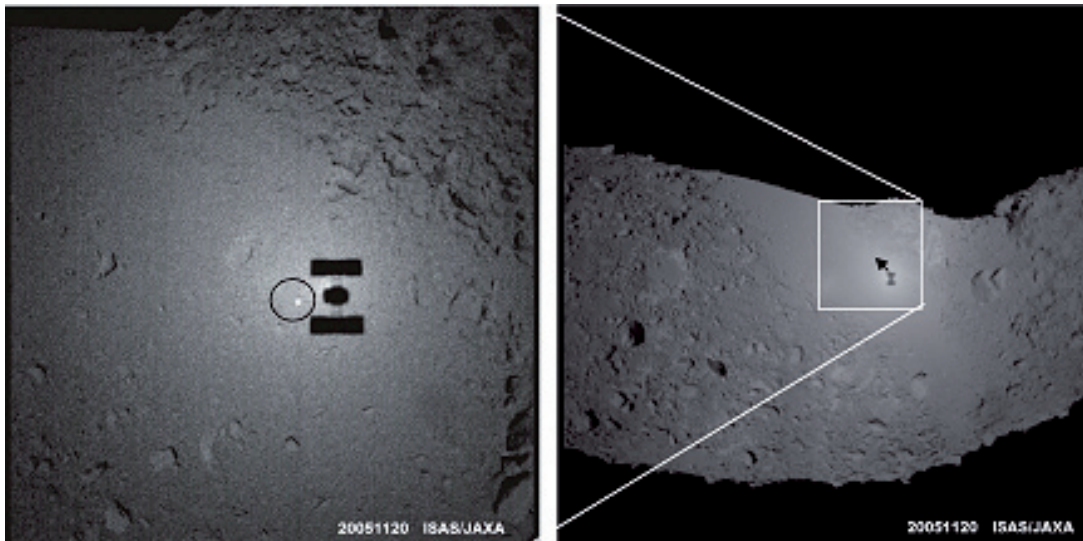


図2-2-4 着陸時に分離されたターゲットマーカと探査機の影

表面に30分程度滞在することとなった。その後、地上からの指令により、探査機はイトカワから離脱した。第2回の着陸および試料採取は26日に実施された。着陸シーケンスは動作し、着陸、離陸、ホームポジションへの帰還まで行われたが、その直後、化学推進燃料の漏洩と思われる姿勢擾乱が発生、探査機はセーフホールド姿勢モードとなった。しかしながら、化学推進系の故障により3軸制御姿勢への回復ができず、さらなる燃料漏洩と思われる外乱により姿勢制御不能状態となり、2005年12月9日から2006年1月23日の間、探査機との通信が途絶えた。探査機との通信が可能となった後は、イオンエンジン中和器からのガス放出による姿勢制御方式を確立し、2007年4月からはイオンエンジンによる軌道と姿勢の同時制御を実現させて、地球への帰還軌道を航行中である。現在の予定では、2010年6月に地球に帰還し、試料の入ったカプセルを分離して、オーストラリアにて回収する。

3. X線天文衛星「すざく」(ASTRO-E II)

ASTRO-E II衛星は、2005年7月10日12時30分（日本時間）M-V-6号機により打上げられ、近地点250km・遠地点560kmの予定通りの軌道に投入され、我が国の5番目のX線天文衛星「すざく」となった。衛星は衛星推進系を用いた5回の近地点上昇オペレーションを行い、7月21日に高度約570kmの略円軌道に到達した。梅雨明け直前の不安定な天候下で、不休の努力により完璧な打上げと初期運用を行った実験班各位に敬意を表したい。

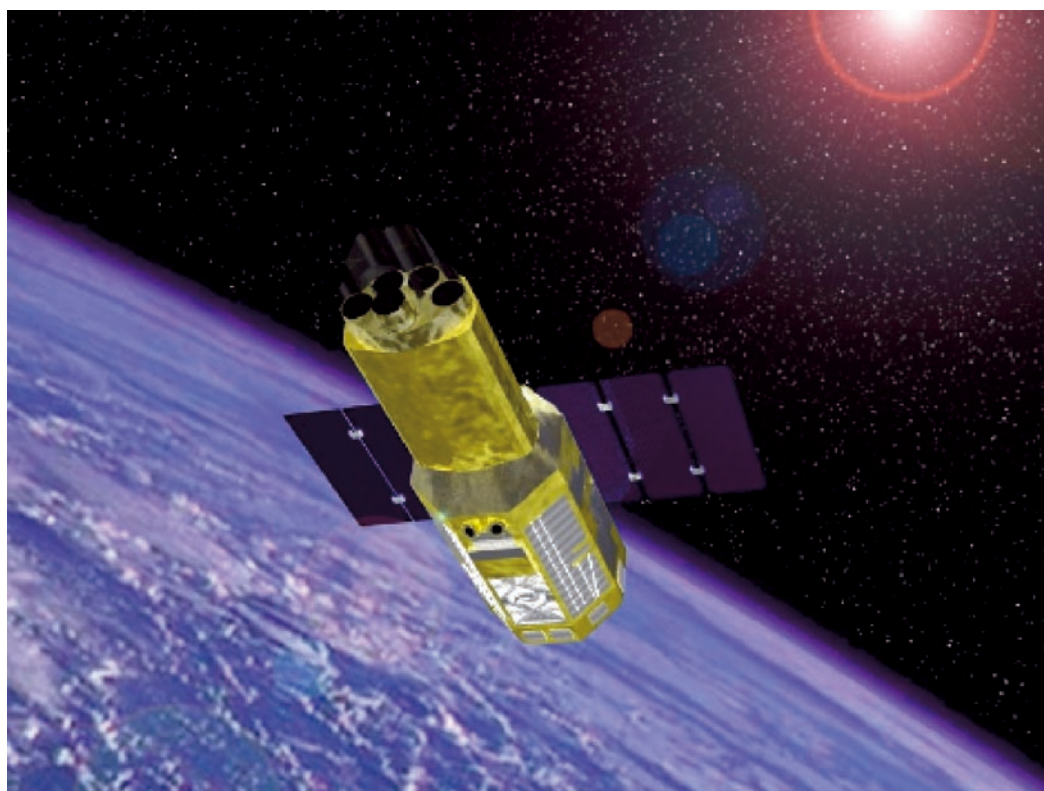


図3-1 「すざく」の軌道上での想像図。軌道上で、伸展式光学ベンチと太陽電池パドルを展開した。

「すざく」は最先端の技術を用いた超高分解能分光観測装置と高感度広帯域分光観測装置を用いて、宇宙の構造進化の解明やブラックホール直近の高エネルギー現象の解明などをめざして、国内外の約40の大学等研究機関の約200人の研究者により、JAXA（宇宙航空研究開発機構）とNASA（米国航空宇宙局）を中心とする広範囲な国際協力により開発された。

衛星には5台のX線反望遠鏡と5台の焦点面X線検出器、さらに1台の硬X線検出器が搭載されている。焦点面検出器の1台はX線マイクロカロリメータと呼ばれ、絶対温度60ミリKの超低温で動作し、鉄のK輝線（約7キロ電子ボルト）において、これまでの観測装置に比べて一桁以上優れたエネルギー分解能を持つことを特徴とする。しかし、打上げ約一ヶ月後に、検出器を冷却するための液体ヘリウムが失われて観測が不可能になる大変残念な事態となった。JAXAとNASAそれぞれに原因調査委員会が設置され、直接原因だけでなく、問題を防げなかった根本原因に至り原因究明が行われ、今後のプロジェクトへの提言がまとめられた。天文学の観測は行うことはできなかったが、マイクロカロリメータは2週間にわたって衛星軌道上で正常に動作し、所定の超高エネルギー分解能を達成したことが確認されている。X線マイクロカロリメータという非常に難しい技術を軌道上で利用する基本的な技術は獲得できた。今後は、問題点を反省し、提言を生かし、一日も早く超高分解能X線分光観測による宇宙物理学の研究を実現させたい。

「すざく」のもう一つの特徴である高感度広帯域分光能力は、残りの4台のX線望遠鏡とその焦点面検出器であるX線 CCDカメラ、硬X線検出器の組み合わせにより、目標通り、あるいはそれ以上の優れた観測能力を持つことが確認された。すなわち、0.3keVから500keVの広いエネルギー範囲にわたり、ごく一部のエネルギー帯を除いて、これまでで最も低いバックグラウンドを達成し、これまでにない高感度の広帯域X線分光観測を、一台の衛星で実現したことを確認した。さらに、0.3～1keVの超軟X線においては、これまでの観測装置に比べて検出効率とエネルギー分解能を大幅に改良したことも確認した。これらの特徴を生かした初期観測から、すでに重要な科学的な成果が得られ始めている。また、その観測対象も、地球磁気圏や彗星などの太陽系内から、10億光年以上の距離にある活動銀河核や銀河団まで多種多様な天体に広がっている。「すざく」衛星の先輩である1994年に打上げられた「あすか」衛星の観測からは、2005年までに1500編を超える論文が査読つき学術誌に掲載され、その数は今でも増え続けている。「すざく」衛星からは、これをを超えるような、高エネルギー宇宙物理学・天文学の発展にインパクトを与えるような観測成果が大いに期待される。

観測装置の性能実証と軌道上校正を目的とする初期観測（打上げ後約8ヶ月間）終了後は、軌道上の天文台として、「すざく」衛星は国際公募により観測を行っている。一定のルールの基に、世界各国の研究者からの観測提案を受け付けており、これまでの公募は、競争率は約4倍、日本・欧米以外に、インド、韓国、中国等のアジア諸国からも提案が来ている。初期観測、国際公募による観測ともに、観測後一定のデータ処理を終了してから1年後には、データは公開され、世界の全研究者が利用できるようになる。一方、衛星の運用は、ISAS/JAXAおよびメーカー派遣の技術者の支援のもとに、スタッフ、ポスドク、大学院生を含む研究者が行っている。「あすか」時代よりも計算機やネットワーク能力が向上している一方で衛星も複雑になっている。国際公募により観測が行われている状況化で、自分たちの衛星として運用を支えている研究者、特に大学院生を中心とする若手研究者には感謝の意を表したい。

4. 赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)

「あかり」(ASTRO-F)は、我が国で初めての本格的な赤外線天文衛星であり、全天を観測して赤外線天体のデータベース（天文学ではカタログと呼ぶ）を作成する全天サーベイミッションとして計画された。このような赤外線領域での全天サーベイは、1983年に米・蘭・英により打上げられた世界初の赤外線天文衛星であるIRAS (Infrared Astronomical Satellite) によって初めて行なわれ、様々な新発見を含む大きな成果を上げ、その天体カタログは現在でも天文学分野で非常に重要な地位を占めている。しかしその後、電波からX線に至る各波長域での観測手段の急速な発展により、IRASによるデータベースは、その感度、解像度共に現在では不十分なものとなっている。「あかり」は、IRASよりも高い感度、解像度により第2世代の赤外線天体カタログを作成し、銀河、星、惑星系の誕生と進化という現代天文学の中心的な課題に迫ろうとするミッションである。

「あかり」は有効径68.5cm φの反射望遠鏡を搭載している。反射鏡は天文衛星では世界初の炭化ケイ素製であり、その高い剛性を利用して軽量化が図られている。物理径71cm φの主鏡の重量はわずか11kgに抑えられている。「あかり」の望遠鏡が通常の天体望遠鏡と最も異なるのは、その動作温度が絶対温度6度以下という極低温であることである。これにより望遠鏡自身からの赤外線放射を抑え、理想的な観測条件（低背景光）を達成する。望遠鏡の焦点には、遠赤外線サーベイヤー（Far-Infrared Surveyor ; FIS）と近・中間赤外線カメラ（Infrared Camera ; IRC）という2つの観測装置が搭載されている。この2つの観測装置により、波長2～180 μmという広い波長域に渡る観測が可能で、連続的な天球のスキャンによる全天サーベイだけでなく、望遠鏡を特定の天体に固定する指向観測により、撮像や分光観測も可能である。望遠鏡と赤外線観測装置は、液体ヘリウムタンクと共に真空断熱された冷却容器（クライオスタット）に収められ、冷却される。極低温冷却系は、寒剤としての超流動液体ヘリウムと20Kまでの冷凍能力を持つスターリングサイクル冷凍機を併用したシステムである。液体ヘリウムは少しずつ蒸発して行き、これが観測期間を決める。「あかり」では、冷凍機によるヘリウムタンクへの入熱低減その他の工夫により非常に高効率の冷却システムが実現されており、わずか170ℓの液体ヘリウムにより、1.5年程度の冷却が可能である。

表4-1 「あかり」の主な仕様、及び機能

衛星	サイズ 重量 電源 通信 データレコーダ 姿勢制御 推進系	2.0 m×1.9 m×高さ 3.7m, 太陽電池パドル展開時の全幅 5.5 m 打上げ時 952 kg Ni 水素電池 22Ah, 1 系統 太陽電池パドル 2 翼 発生電力 1060 W(BOL) 960 W(EOL) S バンド コマンドアップリンク, 及び, 低速テレメトリ X バンド 科学データ用高速テレメトリ 4Mbps, CCSDS 勧告準拠 容量 2GBytes RW による 3 軸制御(定常観測時) IRU, 精太陽センサ, スタートラッカによる機上精姿勢決定 (ただし精太陽センサは現在使用不可. 本文参照) 1 液(3N×4)・2 液(20N)デュアルモード 調圧式	
ミッション 機器	極低温冷却系	液体ヘリウム 170 ℓ + 20K 級スターリングサイクル冷凍機 2 台 液体ヘリウム保持期間(主要観測期間) 1 年半(要求 1 年以上) 冷却温度 望遠鏡 5.8 K, 遠赤外線検出器 2 K	
	望遠鏡	有効径 68.5 cm φ, Ritchey-Chretien タイプの光学系, 合成焦点距離 4.2m 炭化ケイ素を鏡材に用いた軽量望遠鏡 結像性能 波長 6.2 μm 以上の波長で回折限界(軌道上での実績値)	
	焦点面 観測装 置	遠赤外線サー ベイヤー(FIS)	波長 50～180 μm を覆う 4 波長帯で全天をサーベイ. 指向観測では, 撮像, 及びフーリエ分光器による分光観測. Ge:Ga 半導体を用いた光伝導型検出器の 5×12 素子, 及び 5×20 のアレイ を使用.
		近・中間赤外線 カメラ(IRC)	波長 2～27 μm を覆う 9 波長帯で試行観測による撮像/分光. 9 μm と 24 μm の 2 波長帯では全天サーベイも行なう. 検出器は, 波長 2～5 μm では InSb フォトダイオードの 400×512 素子 アレイ, 5～27 μm では Si:As 光伝導型検出器の 256×256 素子アレイ. 液体ヘリウム消失後は, 波長 5 μm 以下の観測のみ継続可能.

「あかり」は日本時間2006年2月22日午前6時28分に、M-Vロケット8号機により、遠地点約720km、近地点約300kmの軌道に打上げられた。その後、衛星の2次推進系による6回の軌道変更により、観測軌道である高度約700kmの太陽同期極軌道（円軌道）に投入された。

「あかり」は、打上げ直後に、2種類の2次元太陽センサが太陽を捉えられない、あるいは、太陽電池パドルの出力が設計値よりも低い、等の問題が発見された。衛星太陽指向面の一部が何ものかによって遮蔽されていると推測されているが、詳細は不明である。幸い観測に支障はなく、機上の精姿勢決定はスタートラッカによって行ない、また姿勢制御系異常時の退避姿勢は太陽センサなしで制御されるよう、搭載ソフトウェアの改修を行なった。4月13日には冷却容器の蓋を開放し、「あかり」は試験観測を開始した。約1ヶ月にわたり、望遠鏡の焦点調整、赤外線観測装置の調整、感度較正等を実施し、観測装置が予想通りの性能を持つことが確認された。5月8日からは、本観測を開始している。

極低温冷却系の動作は非常に順調であり、軌道上での液体ヘリウム残量測定に基づく予想では、冷却は少なくとも2007年9月9日までは継続できる見込みであり、計画された観測はすべて実施可能である。液体ヘリウム消失後は、冷凍機のみにより近・中間赤外線カメラによる波長 $5\mu\text{m}$ 以下の観測を継続する予定である。

「あかり」による赤外線データは、濃い星間ガスから恒星が生まれる様子、恒星がその生涯の終末期にガスを星間空間に吹き出す様子などを鮮明に描き出す。さらに、恒星の生死を繰り返して進化して行く銀河の姿をも見せてくれる。図4-1は、「あかり」が取得した赤外線画像の例である。「あかり」のデータ処理はまだ緒に就いたばかりであり、今後このような画像を含む膨大なデータが解析され、恒星の誕生と死、惑星系の形成、銀河進化について多くのことが明らかになると期待される。

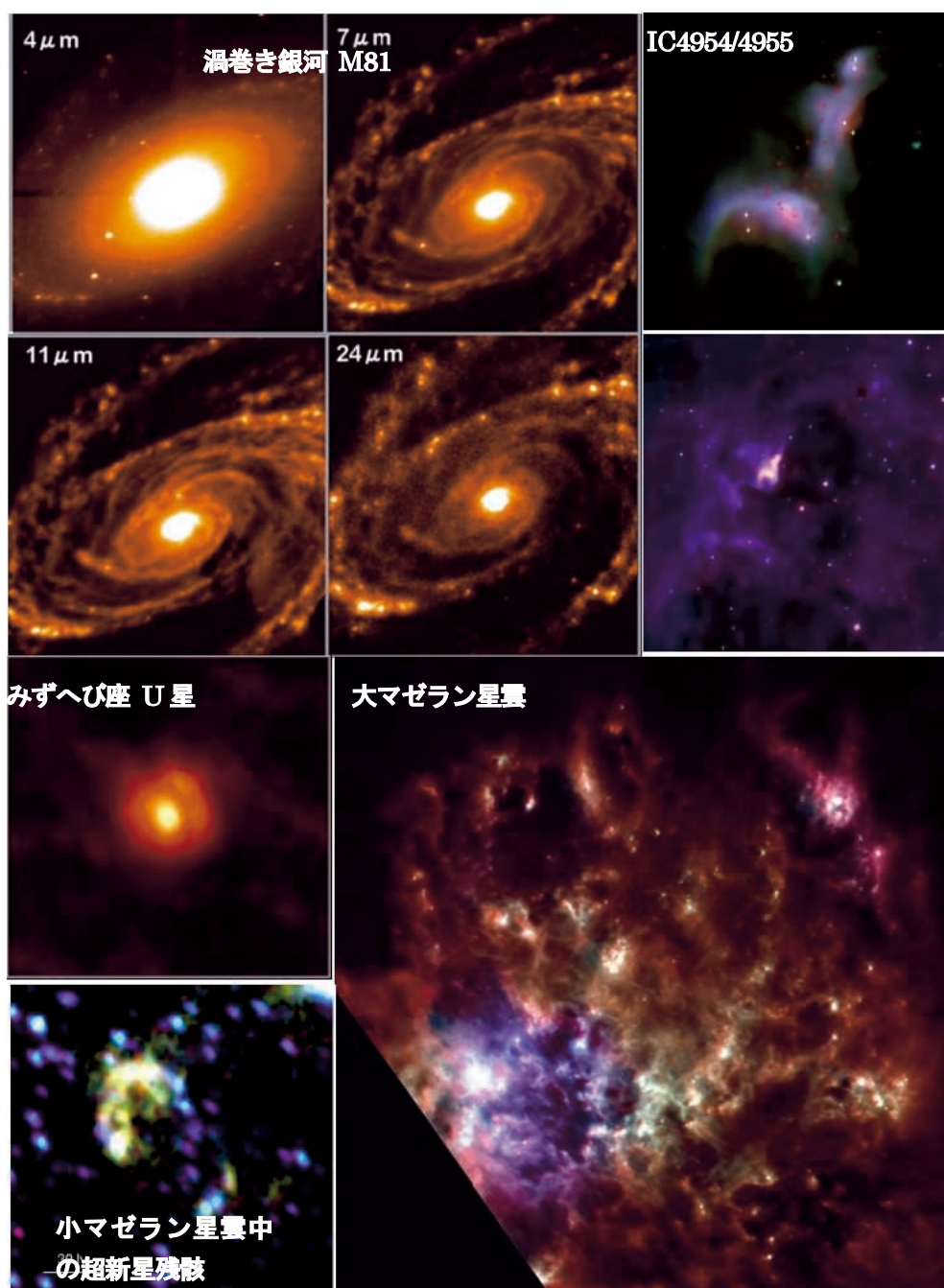


図4-1 「あかり」による赤外線画像の例

左上の4枚の画像は渦巻き銀河M81。観測波長が違えば、昔に作られた星の分布、新たに恒星が生まれている領域等、異なった情報を得ることができる。右上は星が誕生している反射星雲IC4954/4955のクローズアップ画像、その下は星雲を含む広域の赤外線画像で、3世代にわたる恒星誕生の様子を知ることが出来る。左下の2枚は、太陽程度の質量の星がその生涯の最後にガスを噴き出している様子、及び大質量星の最後である超新星爆発が周囲のガスを加熱している様子である。右下は、我々の銀河系のそばにある大マゼラン星雲(銀河)の赤外線画像で、この銀河全体で非常に活発に恒星形成活動が起きていることが分かる。

5. 太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)

「ひので」(SOLAR-B)衛星(図5-1)は、太陽表面やコロナで起こる様々な爆発現象や加熱現象を観測し、磁場と天体プラズマの素過程や太陽地球間宇宙環境に影響を与える根源を調べることを目的とし、M-Vロケット7号機によって2006年9月23日6時36分(日本時間)に内之浦宇宙空間観測所から無事に打上げられた。衛星搭載推進系による数回の軌道制御の後、10月初めには高度約680kmの太陽同期極軌道に最終的に投入された。太陽同期極軌道は、1年のうち約8ヶ月は24時間連続的に太陽を見続けることが可能で、また高解像度の望遠鏡によって安定した熱環境のおかげで高解像度性能の保持にも大きな利点がある。

「ひので」には、可視光、極端紫外線、軟X線で太陽を観測する3つの最新鋭かつ大型の望遠鏡が搭載されている。X線望遠鏡(XRT)は、コロナ構造とそのダイナミックな変動、コロナ加熱のなぞに挑む斜入射型望遠鏡で、解像度約1秒角(最大)の軟X線画像を撮像している(図5-2)。1990年代に大活躍した「ようこう」衛星搭載の軟X線望遠鏡に比べ、解像度が3倍以上向上したほか、200万度以下の低温側プラズマにも感度を持っていて、コロナプラズマ全体の微細構造、爆発や加熱の微細な構造を鮮明に捉えることができる。極端紫外線撮像分光装置(EIS)は、極端紫外域に多数存在するコロナ・遷移層起源の輝線スペクトルを取得する分光装置で、スリットのマッピング観測やスロット観測により、10万度から200万度のコロナ・遷移層大気の撮像の他、運動、温度、密度などプラズマ状態の空間情報を得ることができる。類似のSOHO衛星搭載機器に比べ空間分解能が3倍以上あり、ドップラー効果を用いて高温プラズマの運動状態を10倍以上の検出感度で求めることができる。可視光磁場望遠鏡(SOT)は、宇宙空間から太陽を観測する世界最大口径の高性能望遠鏡で、太陽表面(光球、彩層)の磁場ベクトルや運動を高精度で計測できる能力を持つ。これまでにない0.2-0.3秒角の鮮明な画像を地球大気ゆらぎのない安定した条件下で取得でき、人類が目にしたことのない質的に新しいデータを取得している(図5-3)。高解像度の画像のみでなく、分光学的データも取得され、太陽表面の磁場や速度の定量解析によって新しい現象や知見が得られつつある。以上述べたように、3つの望遠鏡は所期の性能を持つことが確認され、今後の観測やそれから得られる科学的成果に大きな期待が持たれる。

最後に「ひので」の打上げオペレーションにおいて、これまでのISAS衛星にはない徹底したクリーン対策が実施されたことを特筆しておきたい。太陽からの光を観測する「ひので」搭載望遠鏡は、鏡の反射率や透過フィルタなどの光学性能の劣化が望遠鏡としての寿命を大きく左右するため、製作段階から衛星レベルの試験まで徹底したクリーン対策を実施した。特に強力な太陽紫外線の照射は、鏡など光学素子に付着したダスト(粒子コンタミ)や分子コンタミ粒子の黒化を起し、反射率の低下や望遠鏡熱バランスを狂わすなど影響が甚大である。クリーンルームでの試験では、衛星や望遠鏡をルマロイシートと呼ばれる汚染防止シートで厳重にバグgingし、また近傍での作業者は完全防備して作業を実施するなど対策を講じた。射場におけるロケットへの衛星搭載の作業および衛星がおかれるクリーン環境も可能な限り管理する必要があった。そのため、フェアリング収納作業直前までの衛星のバグging実施、近傍で作業を行う作業員に対して衛星側指定のクリーン着着用、無防備な衛星が対向することになるロケットフェアリングの徹底した事前清掃など、ロケット作業に影響を及ぼさない範囲で、また射場で出来る限りのクリーン対策をロケット関係者との調整の上で実施した。また、整備塔移動後において頭胴部・衛星が置かれる環境のクリーン度が想定以上に悪く、ダスト数を可能な限り低減させるために長時間連続したフェアリング空調の実施を急遽実施いただいた。これらのクリーン対策が功を奏し、軌道上の「ひので」搭載の望遠鏡は、執筆の段階までにはコンタミによる透過率劣化などの性能変化は全く見られていない。



図5-1 ひので (SOLAR-B)

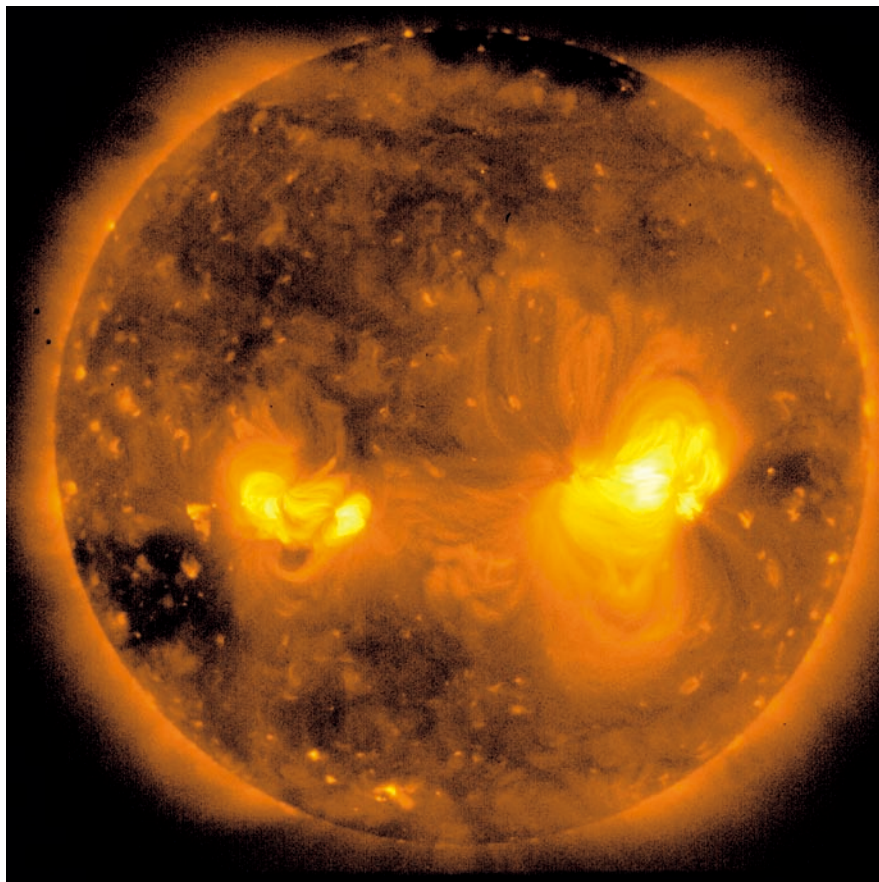


図5-2 「ひので」搭載X線望遠鏡が撮影した太陽コロナ

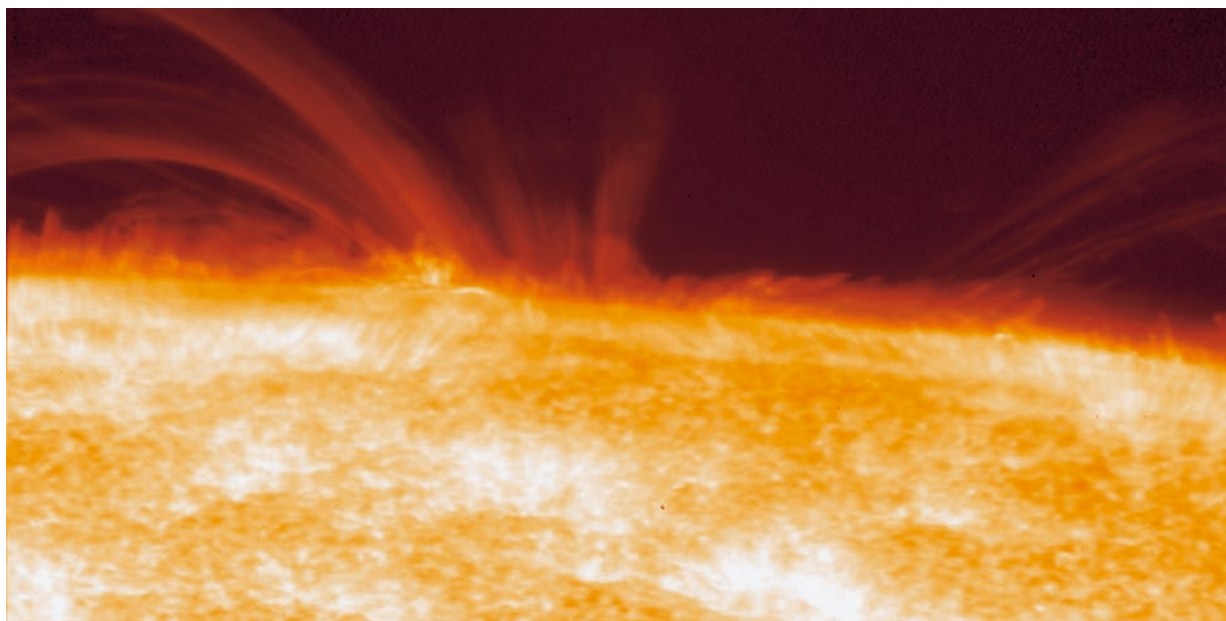


図5-3 「ひので」搭載可視光磁場望遠鏡が取得した太陽縁の高解像度画像

6. おわりに

M-V型ロケットは7号機の打上げ成功をもって運用終了となった。このうち本稿では5号機から8号機までの4機（7号機と8号機の打上げ順序が逆転）で打上げたミッションおよび衛星について紹介した。