

赤外線で宇宙を探る —赤外線天文衛星「あかり」—



村上 浩

〈独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: hmurakam@ir.isas.jaxa.jp

「あかり」は、有効口径 68.5 cm の液体ヘリウム冷却望遠鏡を搭載した、日本初の赤外線観測専用の衛星である。「あかり」は赤外線による全天サーベイを目指したミッションであり、日本時間 2006 年 2 月 22 日早朝に打ち上げられた後、全天の 90%以上を覆うサーベイ観測に成功した。これは世界初の赤外線全天サーベイを行った IRAS 衛星に比べて、格段に高い解像度と広い観測波長域を持つものである。「あかり」は指向観測も数多く行い、2~180 μm の広い波長範囲で太陽系内天体から遠方銀河にいたるさまざまな天体を観測して多くの成果を生み出しつつある。2007 年 8 月 26 日に、冷却用液体ヘリウムを使い切った後も、機械式冷凍機による冷却で近赤外線観測を継続している。

1. はじめに

今月号より、日本初の赤外線天文衛星「あかり」の成果について、特集としてご紹介したい。「あかり」は天体が放射する赤外線を観測する人工衛星で、日本時間で 2006 年 2 月に打ち上げられ、現在も観測を続けている。赤外線は可視光よりも波長の長い電磁波であり、その波長は 0.7 μm から 300 μm 付近までである。このうち 30 μm から 300 μm の波長域は、地球大気が不透明で地上からの観測は難しい。また 3-30 μm の領域も地球大気の放射が強く、地球大気の外に出ることにより観測環境は劇的に改善される。赤外線天文衛星の役割は、このような地上からは見えない、あるいは観測条件の良くない赤外線波長帯で天体を観測することにある。このような長い波長の赤外線による天体観測を最も特徴づけているのは、星間空間の固体微粒子、すなわち宇宙塵からの熱放射である。図 1 は「あかり」による波長 9 μm の全天図で、図の中心が銀河系中心方向であり、横に延びているの

が赤外線で見た天の川である。可視光で見る天の川とは違い、細く銀河面に集中して延びているのがおわかりいただけるであろう。この赤外線画像は宇宙に対して行ったサーモグラフィーと言ってよく、冷たく濃い星間ガス雲の中で星が生まれると、その周囲の塵が暖められて強い赤外線を放射し、それが明るくとらえられる。このような星の形成領域が銀河面に沿って並び、また赤外線が宇宙塵に吸収や散乱されずに遠くまで見通せることも手伝ってこのような天の川が見える。図 1 は全体像であるが、個々の天体の赤外線像もまた可視光で見るのとは全く異なった様相を見せ、驚きを与えてくれる。「あかり」が見た宇宙とはどのようなものか、そこから何がわかるのか、今後の「あかり」特集の記事を楽しんでいただきたい。ここでは最初の特集記事として、「あかり」ミッションの概要を述べておこう。

2. 「あかり」ミッションの目的と背景

赤外線望遠鏡を人工衛星に搭載する計画は、

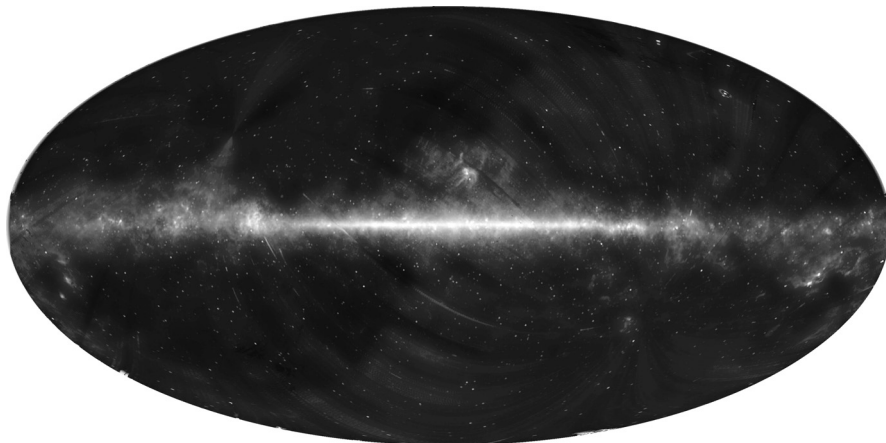


図1 波長 $9\mu\text{m}$ の全天画像.

1983年の米・蘭・英による世界初の赤外線天文衛星 Infrared Astronomical Satellite (IRAS)¹⁾の打上げ以前から日本でも検討されていた。最初にそれが実現したのは1995年に打ち上げられた多目的衛星 Space Flyer Unit (SFU) に搭載された口径15cmの望遠鏡 Infrared Telescope in Space (IRTS)²⁾であった。この小さな衛星搭載望遠鏡は、近赤外線宇宙背景放射や晩期型星の近・中間赤外線スペクトル、星間炭素イオンの遠赤外線輝線など、ユニークな観測結果を出してくれただけでなく、赤外線天文ミッションに必要な望遠鏡の極低温冷却の技術を確立するのに大きな貢献をしてくれた。同じ1995年には European Space Agency (ESA) による Infrared Space Observatory (ISO)³⁾が打ち上げられた。ISOは高い分光機能を備えた宇宙天文台であった。ここでは日本もデータ受信への協力を行って銀河の Deep Survey をはじめとするさまざまな天文学的成果を得ただけでなく、天文衛星運用について多くのノウハウを学んだ。「あかり」は、これらの積み重ねのうえに実現した待望の赤外線天文衛星である。

「あかり」は全天サーベイミッションである。全天をサーベイして赤外線を放射している天体のカタログを作る仕事は、1983年に観測を行った IRAS が初めて行った。その結果はさまざまな新

しい発見をもたらすとともに、IRASによる天体カタログは天文学で最重要のカタログとして今でも使われ続けている。しかし20年以上が経過した今日では、やはり感度や角分解能の不足は否めない。「あかり」は新たな全天サーベイを行い、第二世代の赤外線天体カタログを作成することを目指して計画された。またそのデータを用いて、銀河や星・惑星系の誕生と進化を追うことがミッションの主目的となっている。

3. 「あかり」とはどのような衛星か

「あかり」⁴⁾は有効径68.5cmの赤外線望遠鏡であり、宇宙に出ることによって地球大気による吸収や放射から逃れて赤外線の観測を行う。ただし理想的な観測条件を実現するためには、宇宙にでるだけではまだ不足である。それは、望遠鏡自身が赤外線を放射することによる。私たちの身の回りにはある普通の温度の物体は、波長 $10\mu\text{m}$ 付近を中心に強い赤外線を出しており、天体望遠鏡も例外ではない。明るく光っている望遠鏡を使って、かすかな天体からの光を観測するのは困難であり、これを防ぐためには望遠鏡を極低温に冷却しなくてはならない。そこで、「あかり」の望遠鏡とその焦点に置かれる観測装置は、内部を真空にした冷却容器に液体ヘリウムタンクとともに納めら



図2 打ち上げ直前の「あかり」衛星.

れ、冷却されている⁶⁾。

図2は、打上げ直前の「あかり」の写真である。上部が冷却容器で、下部が衛星本体である。衛星本体部分には電源や通信機、姿勢制御装置などが搭載されている。周りを取り囲む暗色の板は太陽電池であり、軌道上で展開される。衛星全体の高さは約3.7mで、打上げ時の質量は952kgであった。

図3は冷却容器の断面図である。なかに収められた望遠鏡は有効径68.5cm、合成F比6のRitchey-Chretienタイプの反射望遠鏡で、6 μm 付近よりも長い波長では回折限界の像が得られる性能をもつ。主鏡と副鏡は炭化ケイ素セラミックス製の超軽量鏡で、物理径72cmの主鏡がわずか11kgで作られている。極低温冷却には超流動液体ヘリウムとスターリングサイクル冷凍機が用いられた。冷却温度は、望遠鏡が絶対温度で6度、最も低温の遠赤外線検出器が約2度である。液体ヘリウムは少しずつ蒸発して失われていくが、「あかり」では打上げ時に搭載された約180リットルのヘリウムで550日間の冷却を行うことができた。世界最初の赤外線天文衛星IRASでは600

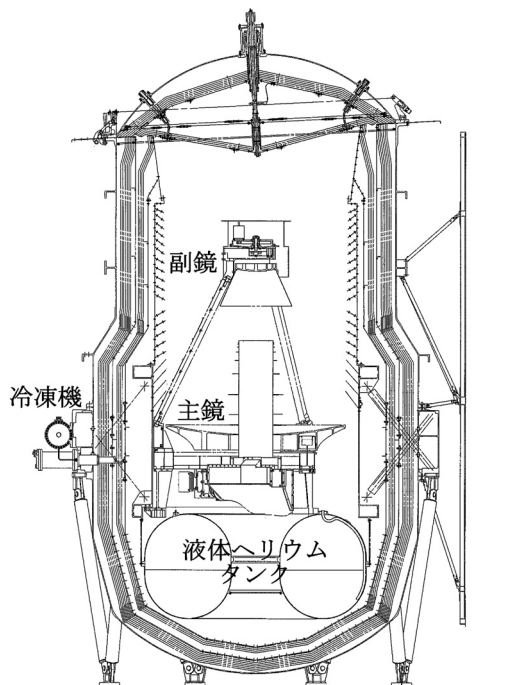


図3 冷却容器の断面図.

リットルの超流動液体ヘリウムで観測期間が11カ月程度であったのに比べると、大幅な効率の向上である。これはさまざまな工夫の結果であるが、特に宇宙用冷凍機は世界に先駆けて日本で開発が進んだものであり、「あかり」においては液体ヘリウムの寿命を2倍程度延ばすという大きな効果があった。図2で最上部のドーム形の部分は望遠鏡開口部のふたになっており、軌道上で解放されて望遠鏡が空を見ることができるようになる。望遠鏡焦点には、近・中間赤外線カメラ(IRC)と遠赤外線サーベイヤー(FIS)の2種類の観測装置が置かれている。IRCは屈折系を用いた3台のカメラで構成され、波長2 μm から27 μm の赤外線を観測する。それぞれのカメラが三つの波長帯を選択できるフィルターをもつだけでなく、プリズムあるいはグリズムによる分光観測も可能である。もう一つの観測装置FISは波長50 μm から180 μm を四つの観測波長帯でカバーしており、また光学系をフーリエ分光モードに切り替えるこ

とにより、遠赤外線での分光観測が可能となる。

4. 軌道上での「あかり」

「あかり」は2006年2月22日午前6時28分(日本時間)に、M-V ロケット8号機により、鹿児島県内之浦町(現肝付町)のJAXA内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられ、高度約700 kmの「太陽同期極軌道」に投入された。北極と南極上空を通り、いつも昼と夜の境界領域を飛ぶ。望遠鏡が太陽や地球を直接見ると極低温冷却が破綻するため、「あかり」は常に太陽を真横に見て、また地球とは反対側を向いて軌道を周回する。この運用で望遠鏡は自動的に空をスキャンして、半年間に1回全天を観測することができる。

「あかり」は打上げ直後に、姿勢センサーの一つである太陽センサーの視野が何かに覆われたように見えるなど、太陽に指向した面にいくつかの問題が発生した。この問題の克服のため搭載ソフトウェアの書き直しなどが必要となり、当初打上げ後2週間後に予定されていた開口部のふた開けは4月13日に延期されて、この日が「あかり」のファーストライトとなった。その後、望遠鏡の焦点合わせ、姿勢制御系や観測装置の各種調整、そして試験観測が実施され、本格的な観測が開始された。「あかり」による観測は以下のような経過をたどって現在に至っている。

1) 液体ヘリウム冷却による赤外線観測

2006年5月8日に「あかり」は本観測を開始し、観測フェーズ1と呼ぶ最初の半年間で、第1回の全天サーベイを達成した。「あかり」は天球を連続的にスキャンするだけでなく、軌道1周回に最大3回、1回当たり10分間、特定の天体に望遠鏡を固定して撮像や分光観測を行うことができる(指向観測)。観測フェーズ1では、この指向観測を用いて、後に述べる北黄極付近の広域サーベイなども、その一部が実施された。

2006年11月8日より、液体ヘリウムを使い果たした2007年8月26日までを観測フェーズ2と

呼んでいる。フェーズ1の全天サーベイでは、月に邪魔されたり、南大西洋の地磁気異常帯で多くの宇宙線にさらされて検出器雑音が増えたりすることにより、観測できなかった天域が存在する。フェーズ2では、これらの天域の補足サーベイを行うとともに、指向観測が数多く行われた。フェーズ2の終了時点で、全天サーベイは2回以上観測した天域の割合で94%に達した。また実施した指向観測の回数は、フェーズ1,2を合わせて5,000回を超えた。

2) 液体ヘリウム消費後の観測

「あかり」はスターリングサイクル冷凍機を搭載しているおかげで、液体ヘリウムを使い果たした後も、望遠鏡と検出器を絶対温度40度程度に保つことが可能である。これにより、波長2-5 μm の近赤外線では観測を続けることができる(観測フェーズ3)。2007年8月に液体ヘリウムを使い果たした後、「あかり」は温度がしだいに上がって安定するのを待つとともに、少しずつ来ていた軌道を本来の「太陽同期」に修正した。また冷却温度が変わったことに対応して、望遠鏡焦点や近赤外線カメラの再調整、および試験観測を行った。また新しい観測計画を作成し、2008年6月1日より、近赤外線の指向観測によるフェーズ3を開始した。この観測フェーズが現在も継続している。

5. 「あかり」はどのような観測を行ったのか

「あかり」は、一般の天文研究者からのさまざまな観測提案を募集・選考して順次実行する「天文台型」のミッションではない。基本的にはミッション前にすべて計画された、全天サーベイを中心とする系統的な観測を実行し、そのデータを用いて研究を行うとともに、天体カタログなどのデータアーカイブを世界に公開する。「あかり」の観測内容について以下に述べる。

5.1 「あかり」によるサーベイ観測

「あかり」が行ったサーベイ観測の中心は、もち

「あかり」特集

ろん全天サーベイである。全天サーベイは中間赤外域の 9, および 18 μm , 遠赤外域の 65, 90, 140, 160 μm の計 6 波長帯で行われた。IRAS によるサーベイは 100 μm までの 4 波長帯であったので、「あかり」は、より長い 2 波長帯を追加したことになる。また「あかり」全天サーベイは IRAS と重なる波長帯で数倍の角分解能をもつ。例えば図 4 は反射星雲 IC4954/4955 の「あかり」90 μm と IRAS 100 μm の画像を比較したものである

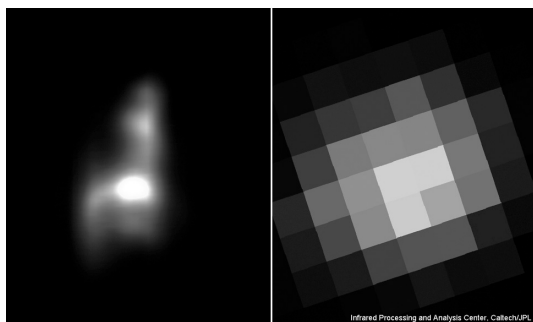


図 4 「あかり」と IRAS による反射星雲 IC4954/4955 領域の遠赤外線画像の比較。

(画角は約 10 分)。IRAS では分解できていなかった星形成領域の構造が「あかり」では見えてきているのがよくわかる。

全天サーベイに基づく天体カタログの制作は、1 回のスキャンで検出可能な比較的明るい天体の情報を集めた最初のカatalog (Bright Source Catalogue) が 2008 年に完成し、チーム内での試用、および改訂作業が行われている。このカタログに含まれる天体数は中間赤外線検出されたものが約 70 万個、遠赤外線検出されたものが約 7 万個であり、遠赤外線での天体数は現在の改訂作業で大幅に増えることが期待されている。図 5 はそれぞれのカatalogに含まれる天体の位置を全天図にプロットしたものである。波長 90 μm で検出された天体は、銀河面に沿って並ぶ星形成領域に集中しているため、細長い帯状に並ぶ。波長 9 μm で見える天体は、晩期型の星も多く検出されるため、もう少し幅の広い帯状に見える。どちらも銀河面から離れたところでは、星形成の活発な系外銀河などが検出

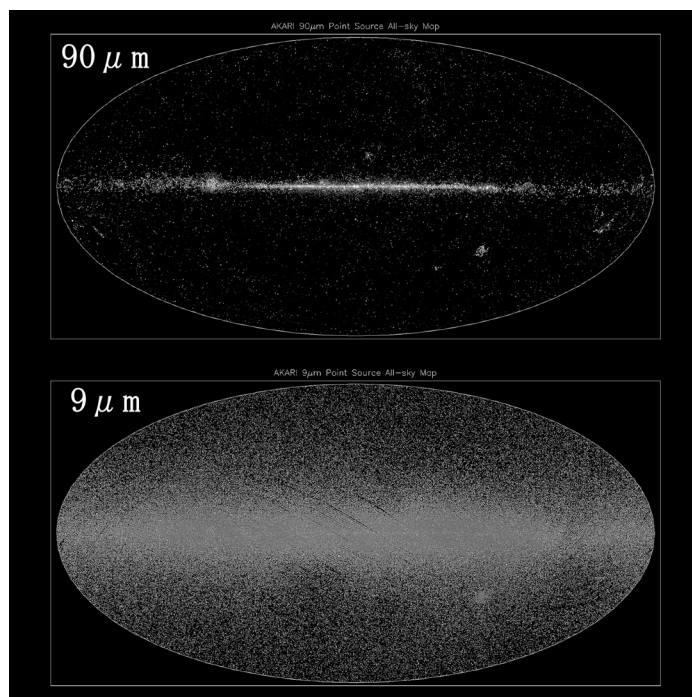


図 5 「あかり」Catalog初版に含まれる天体の位置の全天プロット。

されている。この **Bright Source Catalogue** は今年度中に一般に公開される予定である。その後は、より暗い天体までを含む **Faint Source Catalogue** の制作と公開に進む予定である。

「あかり」は全天サーベイのほかに、特定の領域に対して指向観測を用いた高感度の広域サーベイを行っている。一つは銀河進化を調べるのを主目的に、**IRC** を用いて北黄極付近で行われた広域サーベイであり、比較的広くて浅い **Wide** 領域 (5.8 平方度) と、その一部をより深くサーベイした **Deep** 領域 (0.38 平方度) の二つの観測が実施された⁷⁾。近赤外線では **Wide** と **Deep** それぞれの領域で 10 万個と 2 万個以上、中間赤外線ではそれぞれ 1 万個と 5,000–8,000 個の銀河が検出されている。この観測に対応した **FIS** を用いた遠赤外線での銀河サーベイも、以下に述べる **Mission Program** の一つとして南黄極に近い領域で行われ、約 10 平方度の観測から、波長 $90\ \mu\text{m}$ で 2,000 個以上の銀河が検出された。これらのデータを用いて、宇宙の星形成の歴史を探る研究や、赤外線宇宙背景放射の研究が進行中である。

もう一つの指向観測による広域サーベイは、やはり **IRC** を用いた大マゼラン銀河サーベイである⁸⁾。ここでは約 10 平方度の領域がサーベイされ、60 万個以上の星を中心とした天体が検出されている。現在、中小質量星がその生涯の末期に大量のガスを宇宙空間に還す質量放出過程の研究を手始めに、このデータを用いた研究が進み始めており、ここで検出された天体のカタログも公開される予定である。

5.2 「あかり」Mission Program

指向観測を用いた観測計画は上記の広域サーベイだけでなく、**Mission Program** と呼ばれる 15 項目の系統的な観測計画を含んでいる。観測対象は、惑星間塵や小惑星などの太陽系天体、近傍分子雲の原始星や原始惑星系円盤、主系列星周りの塵円盤、褐色矮星の大気、晩期型星からの質量放出、銀河系や近傍銀河の星間物質 (塵とガス) と

星生成活動、爆発的な星形成途上の銀河、あるいは巨大ブラックホール周りの活動が活発な銀河、さらには赤外線宇宙背景放射の観測まで、非常に多岐にわたる。これらの指向観測のデータからは、全天サーベイに先駆けて、多くの天文学的な成果が生まれ始めている。今回の「あかり」特集に登場する多くの話題は、これらの指向観測の結果によるものが主となっている。

指向観測では、その 30% は公募観測に当てられており、日本の研究者はもちろん、「あかり」ミッションに協力している韓国と欧州各国の研究者からの観測提案に基づいた観測が行われた。

5.3 液体ヘリウム消費後の近赤外線観測

2008 年 6 月から本観測が開始された液体ヘリウム消費後の観測は、波長 $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ の近赤外線での指向観測に限られている。近赤外線領域はすばる望遠鏡をはじめとする地上大型望遠鏡と競合する波長帯ではあるが、「あかり」は依然として高い感度を保っているだけでなく、波長 $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ で地球大気に邪魔されず連続したスペクトルが取得できるという点で、「あかり」は依然として非常にユニークな観測装置である。米国の **Spitzer Space Telescope** にも近赤外線領域の分光器は搭載されていないため、その意味は大きい。現在、やはり太陽系天体から遠方銀河、近赤外線宇宙背景放射まで、16 項目に及ぶ **Mission Program** が進行中である。また公募観測も継続されている。

6. おわりに

今年 2 月に東京大学と宇宙航空研究開発機構の共催で、「あかり」初の国際会議が開催された。出席者は 150 名でほぼ半数が海外からの参加者であった。会議では指向観測結果を中心に、太陽系から遠方銀河や宇宙背景放射に至る観測結果が議論され、今後発表される多くの成果に対する期待は非常に高まっている。また「あかり」の成功で、日本のスペース赤外線天文学は世界の第一線に立った。現在日本では、次期赤外線天文ミッショ

ンとして、口径3 m級の極低温冷却望遠鏡 SPICA の概念設計が始まっている。この計画にはすでに欧州が参加しており、韓国と米国との国際協力の議論も始まっている。今後は「あかり」で第一線に立った日本のスペース赤外線天文学が、世界と協力して、あるいは世界をリードして、さらに発展してくれることを期待したい。

なお「あかり」は、JAXA 宇宙科学研究本部のプロジェクトとして、東京大学、名古屋大学など、多くの大学、研究機関の参加により実施されており、検出器の一部は情報通信研究機構により開発された。またデータ受信やデータ解析は欧州宇宙機構 (ESA) と欧州のいくつかの大学、韓国ソウル大学の協力で行われている。

参考文献

- 1) Neugebauer G., et al., 1984, ApJ 278, L1
- 2) Murakami H., et al., 1996, PASJ 48, L41
- 3) Kessler M. F., et al., 1996, A&A 315, L27
- 4) Murakami H., et al., 2007, PASJ 59, S369
- 5) Kaneda H., Onaka T., Kawada M., Murakami H., 2003, Appl. Opt. 42, 708
- 6) Nakagawa T., et al., 2007, PASJ 59, S377
- 7) Wada T., et al., 2008, PASJ 60, S517
- 8) Ita Y., et al., 2008, PASJ 60, S435

Infrared All-Sky Survey Mission AKARI

Hiroshi MURAKAMI

*Institute of Space and Astronautical Science, Japan
Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai,
Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan*

Abstract: AKARI, the first Japanese satellite dedicated to infrared astronomy, is an infrared all-sky survey mission with a 68.5 cm liquid-helium cooled telescope. It was launched on 2006 February 21 UT, and surveyed more than 90% of the entire sky with a higher spatial resolution and a wider wavelength coverage than that of the previous IRAS all-sky survey. Pointed observations were used for systematic observations of important astronomical targets in 2–180 micron. These will become an additional heritage of this mission. After the exhaustion of liquid-helium on 2007 August 26, AKARI is continuing pointed observations in near-infrared with mechanical coolers.