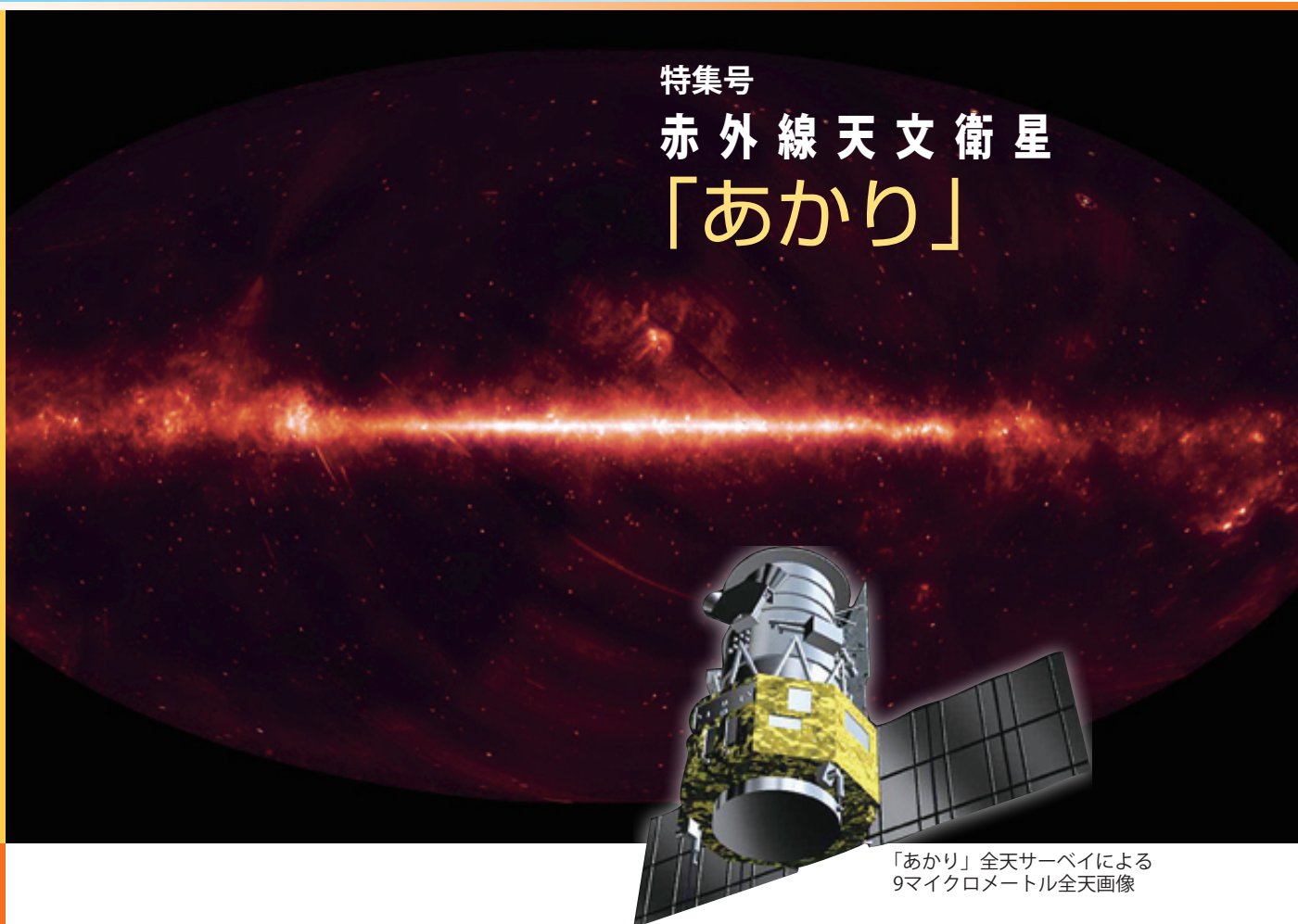


特集号

# 赤外線天文衛星 「あかり」



「あかり」全天サーベイによる  
9マイクロメートル全天画像

## 赤外線で宇宙を探る 赤外線天文衛星「あかり」

村上 浩

JAXA 宇宙科学研究本部  
赤外・サブミリ波天文学研究系

今月号の『ISAS ニュース』は、赤外線天文衛星「あかり」の特集号です。「あかり」は宇宙からやって来る赤外線を観測する人工衛星で、日本時間で2006年2月22日の早朝に打ち上げられ、現在も観測を続けています。赤外線で見ると、宇宙は私たちの目で見るとはまったく違う姿を見せてくれます。赤外線では宇宙の何が見えるのか、そして何が分かるのか、普段見られない宇宙を楽しんでいただきたいと思います。

赤外線は可視光線よりも波長の長い電磁波で、0.7～200マイクロメートル付近の波長を持っています。「あかり」は、このうち2～180マイクロメートルの範囲を観測しています。人工衛星を使うのは、赤外線の広い波長域において地球大気が不透明で、地上からはまったく天体が見えなかったり、大気が出す強い赤外線に邪魔されて観測条件が悪かったりするためです。

「あかり」では、地球大気を抜け出して理想的な観測条件を求めました。

しかし実は、宇宙に行くだけで問題が解決するわけではないのです。私たちの身の回りにある普通の温度の物体は強い赤外線を出しており、天体望遠鏡も例外ではありません。明るく光っている望遠鏡を使って、天体からのかすかな光を観測するのは困難です。望遠鏡自身が赤外線を出さないようにするためには、極低温に冷却しなくてはなりません。「あかり」の望遠鏡は有効口径68.5cmの反射望遠鏡で、鏡は炭化ケイ素セラミックスでつくった超軽量鏡です。この望遠鏡とその焦点に置かれた観測装置全体が、液体ヘリウムと冷凍機を使って冷却されています(望遠鏡と冷却システムについては、尾中・金田(23ページ)、そして中川(24ページ)の記事をご覧ください)。

図1は、打上げ直前に撮影した「あかり」です。高さは約3.7m、重量は約950kgあります。下から1m余りが人工衛星本体で、通信装置や電源、姿勢制御装置や軌道を変更するスラスターなどが搭載されています。まわりを取り囲む黒い板は太陽電池パネルで、軌道に投入された後に展開されます。衛星の上部2m余りが望遠鏡や観測装置を収めた冷却容器です。一番上の丸いドーム状の部分が望遠鏡の蓋で、軌道上で開けられて、望遠鏡が空を見ることができるようになります。望遠鏡が集めた赤外線を観測するのは遠赤外線サーベイヤ(FIS)と近・中間赤外線カメラ(IRC)の2台の装置で、それぞれが波長50～180マイクロメートルと2～27マイクロメートルの赤外線をとらえます。どちらも画像を撮る機能と、スペクトルを得る機能の両方を持っています。

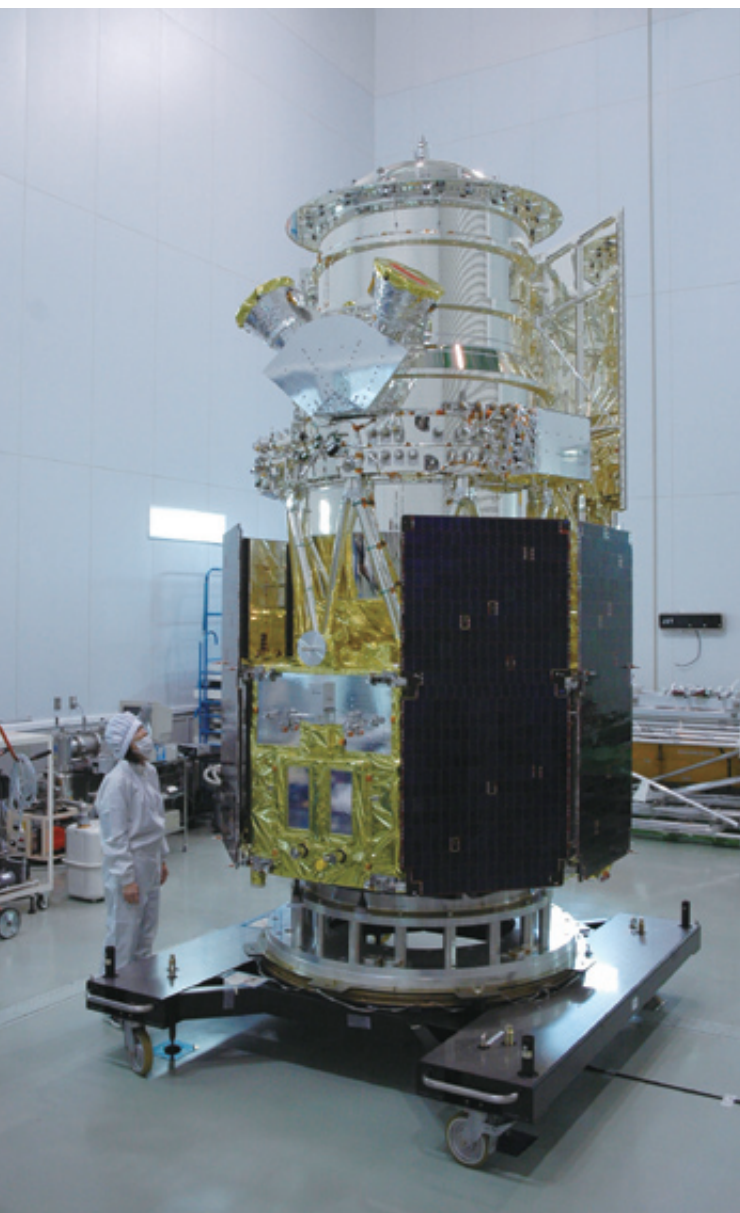


図1 打上げ直前の「あかり」フライトモデル

「あかり」ミッションの主目的は、赤外線で全天を観測(全天サーベイ)して、赤外線を出している天体のデータベース(天文学では「カタログ」と呼びます)をつくり、それをもとに星や惑星系がつくられていく過程や、銀河が星をつくって成長していく様子などを探ることです。赤外線の天体カタログは、1983年に打ち上げられたアメリカ・イギリス・オランダの赤外線天文衛星IRASがつくったものがずっと使われてきました。「あかり」はもっと高い解像度や感度、広い波長域の観測による新しいカタログをつくり、現在の研究上の要求に応えようとしています。この目的のために「あかり」は、高度約700kmで北極と南極の上を通り、昼と夜の境界領域を飛ぶ軌道に投入されました。太陽や地球を直接見ると極低温冷却が破綻するため、望遠鏡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します。この運用では、望遠鏡は自動的に空をスキャンして、半年間に1回全天を観測できるのです。

「あかり」は2007年8月に液体ヘリウムを使い果たすまでに、2回以上の全天サーベイを行って膨大なデータをもたらしました。全天サーベイのほかにも、時々望遠鏡のスキャンを止めて、特定の天体の詳細な観測をする「指向観測」を5000回以上行いました。液体ヘリウムがある間、望遠鏡はマイナス267℃の極低温に冷却されていましたが、ヘリウムがなくなった後も冷凍機だけでマイナス230℃程度まで冷却が可能です。この温度でも波長5マイクロメートルより短い波長の赤外線は観測が可能で、現在はこの波長帯で指向観測を続けています。全天サーベイのデータに基づく天体カタログは、2008年に初版が完成しました。まだ比較的明るい天体だけを集めたカタログですが、プロジェクトチーム内で研究に使われ始めており、2009年の秋には一般に公開される予定です。指向観測のデータは一足先に研究が開始されており、成果がまがりつつあります。今月号で紹介される観測結果は、この指向観測によるものが中心となっています。では、赤外線の宇宙をお楽しみください。

なお、「あかり」は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究本部(ISAS)のプロジェクトとして、東京大学、名古屋大学など、多くの大学の参加により実施されています。検出器の一部は情報通信研究機構の協力を得て開発されました。またデータ受信やデータ解析はヨーロッパ宇宙機構(ESA)とヨーロッパのいくつかの大学、韓国ソウル大学の協力で行われています。

(むらかみ・ひろし)



# 「あかり」が生まれるまで

紀伊恒男

JAXA宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系

2006年2月22日早朝、内之浦からM-Vロケット8号機で打ち上げられて「あかり」は誕生しましたが、少々難産となりました。「あかり」は海外に設置された新GN局（地上ネットワーク局）を運用に用いた初めての科学衛星でした。打上げ直後のオーストラリア・パース局で一瞬受信されたデータは異常を示していました。制御に必要な太陽センサに太陽を検出した兆候が見えないのです。半周後に行う自動軌道制御は、太陽が検出されないことが原因で異常検出機能が働き、短時間の噴射のみになっていました。姿勢維持ができないことで、太陽を太陽電池に十分当てられません。その後は、予定にない機能復帰運用に取り組み、新GN局の手厚い支援に支えられ、その日のうちに取りあえずの平静を取り戻しました。

確実な原因はいまだに分かっていませんが、二つある太陽センサの視野が狭くなる、太陽電池電力の低下、想定外の温度など、衛星の太陽面側に何らかの遮蔽物があるような異常があったようです。太陽センサを失ったことはとても痛く、衛星に異常が生じた際に太陽センサのデータを用いて自律的に待避姿勢に維持する機能が使えなくなりました。これは、衛星の生命にとって懸念される事態です。十分な対策ができないうちは、搭載した液体ヘリウムを守るためにも冷却望遠鏡の蓋を開けられませんか、一方で、蓋を開けないと液体ヘリウムは早く減ってしまい、観測期間を無駄にします。



図2 ようやくクライオスタットの蓋が開き、ファーストライトを迎えて喜ぶ運用チーム（内之浦組）。2006年4月13日。

議論の末、地球センサとジャイロのみを用いた待避姿勢制御をメーカーの協力で急ぎょ開発しました。衛星機上のソフトを書き換え、正常動作を確認して、予定のほぼ1ヶ月遅れで冷却望遠鏡の蓋開けとなりました。こうして、無事に目も明き、本当の「あかり」の誕生を迎えることができました。

「あかり」は液体ヘリウムが550日目でなくなり、打上げ直後の異常の後遺症も抱え、すっかりおばあちゃんになりましたが、今も元気に観測を続けています。（きい・つねお）

## 「あかり」の成果を祝す

松本敏雄

JAXA宇宙科学研究本部 名誉教授  
ソウル大学 物理・天文学科

「あかり」打上げから3年がたち、『ISASニュース』の「あかり」特集号が上梓されることになりました。「あかり」がもたらした素晴らしい科学的成果を、多くの方に楽しんでいただければと思います。私は打上げ前に定年になりましたが、システム設計にかかわった一人として感想を書かせていただくことにします。

我が国初の赤外線天文衛星計画が宇宙理学委員会に正式に提案されたのは、1995年のことです。当時の赤外線グループはSFUに搭載された赤外線望遠鏡IRTSの成功で意気が上がっていたとはいえ、衛星本体の開発はまったくの未経験でした。構造、電源、姿勢制御、推進系、通信系等々について、学びながらシステム設計を進めるという、離れ業のような仕事でした。今にしてみれば、恐ろしいことをよく始めたものだと思います。とはいえ、衛星システムが何とか出来上がったのは、工学の先生方に助けられたおかげです。この場を借りてあらためて感謝したいと思います。

衛星のシステム設計を進めていたころ、宇宙で起きる不具合についてさまざまな想像を巡らしたものです。しかし、打ち上げてみると私が心配したことはほとんど起きず、考えてもいなかった

太陽センサに問題が発生しました。宇宙では予想外のことが起きることを、あらためて認識したものです。とはいえ、「あかり」は大きな不具合を起こすこともなく、順調に観測を続けることができました。開発に携わった一人として「ほっとしている」というのが本音です。

「あかり」の目的は、赤外線宇宙の構造と進化を探ることです。幸い、この特集号を読んでいただければ分かるように、「あかり」はさまざまな分野で大きな成果を挙げました。日本の赤外線グループがアメリカ、ヨーロッパと並ぶもう一つの柱になった、といっているでしょう。「あかり」を契機に、今後は日本が世界の先頭に立って宇宙からの赤外線観測をリードしていくことになればと思います。

最後に一言。私は残念ながら途中で退場しましたが、世界的に見れば極めて少数の人たちによって、衛星の製作・打上げ・運用・データ解析・研究が進められました。困難な仕事をやり遂げた「あかり」関係者に敬意を表したいと思います。

（まつもと・としお）

# 太陽系のあかり

上野宗孝

JAXA 宇宙科学研究本部 宇宙科学技術センター

石黒正晃

国立天文台 天文情報センター

大坪貴文

JAXA 宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系

臼井文彦

JAXA 宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系

惑星から固体微粒子まで、太陽系にはさまざまな物質が存在します。それらの多くは表面温度が絶対温度300K（27℃）以下であり、放射の中心波長も10マイクロメートルよりも長い赤外線、すなわち「あかり」の得意な守備範囲に入ります。木星など惑星本体は「あかり」で観測するには明る過ぎますが、小惑星や彗星、太陽系外縁部天体などに加えて惑星間塵は格好の観測対象となります。

我々の太陽系において、惑星間塵の総量は小さな小惑星を粉砕した程度にすぎないので、太陽系全体の質量に対しては微量な存在です。しかしその表面積の大きさから惑星間塵の赤外線放射強度は極めて大きく、例えば9マイクロメートルの波長で宇宙を観測すると、大部分の光は惑星間塵からの放射によるものとなります（図3）。そのため、ビッグバンの名残とされる宇宙背景放射の観測など、宇宙の最も遠方の情報を引き出すときにも、最も近い惑星間塵の寄与の精度よい差し引きが必要となります。太陽系外の惑星を観測する際も同じことで、先方の惑星間塵の放射強度は惑星のそれを大きく

上回る可能性があり、惑星間塵の存在を理解することは今後ますます重要になります。

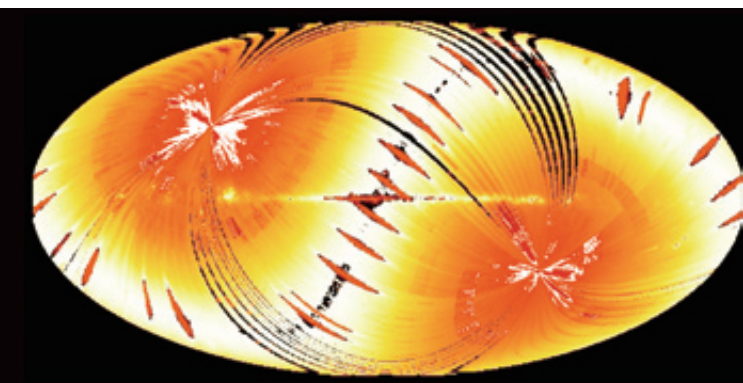
惑星間塵に関する理解は、「あかり」の先輩に当たる赤外線天文衛星IRASにより、新たな地平線が拓かれました。それまで黄道光（惑星間固体微粒子による太陽散乱光）としてぼんやりとした構造が知られていた惑星間塵に多様な空間的微細構造が発見され、それらが、彗星や小惑星から放出された固体微粒子の太陽系内での軌道運動に対応した情報を保持していることが明らかになりました。惑星間空間に存在する固体微粒子は、太陽からの放射を受けて角運動量を失い続けます。例えば、地球近傍に存在する1マイクロメートル程度の大きさの固体微粒子は、1万年程度の時間で太陽に落ちて込んでしまいます。1万年は太陽系の歴史においては一瞬の出来事ですから、今見えている惑星間塵にはその供給源が存在することになります。しかし、惑星間塵の起源についての定量的な理解は十分とはいえません。

IRASで発見された惑星間塵の空間的な微細構造は、その後の地上観測により、IRASの分解能よりもはるかに小さな空間スケールを持つことが明らかになってきました。「あかり」の持つ優れた空間分解能はIRASを1桁以上凌駕するので、これまでの観測で埋もれてしまっていた多くの未踏峰の微細構造を探し出すことができるのです。「あかり」で行った波長18マイクロメートルでの全天サーベイ観測データから惑星間塵放射の空間構造を調べたところ、多数の新しい微細構造が発見されつつあります。これらの空間的な構造の情報と惑星間塵の軌道進化のシミュレーションを合わせることで、惑星間塵の起源を定量的に明らかにすることができそうです。さらに「あかり」では惑星間塵の分光観測も行っています。太陽系天体は、その形成場所の違いにより、進化してきた温度環境が異なります。この温度環境の違いにより固体微粒子中に存在するケイ酸塩の結晶構造に差異が生じ、分光観測することによって、それを見分けることができます。結晶構造に太陽系内の場所に対する依存性が見られることが期待され、惑星間塵の起源を知る上で非常に重要な手掛かりになります。

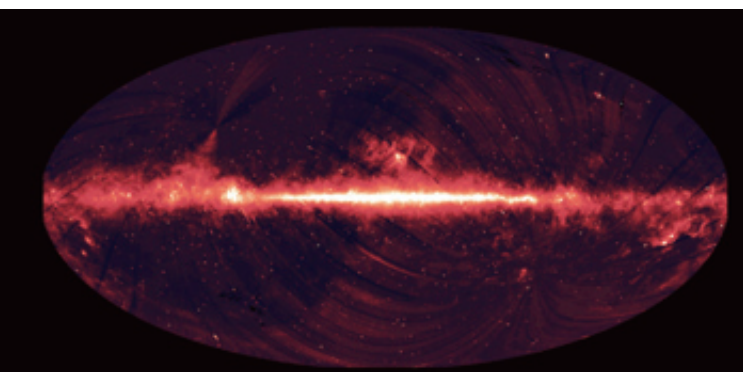
このように「あかり」は、我々の太陽系における惑星間塵の観測において総合的なデータを取得することができ、現在データ解析を進めつつあります。

（うえの・むねたか、いしぐろ・まさてる、  
おおつぼ・たかふみ、うすい・ふみひこ）

図3 波長9マイクロメートルでの全天サーベイ画像  
（天の川が中央水平に位置する座標系）



黄道光差し引き前



黄道光差し引き後



# 「はやぶさ2」の目的地を調べる

## 162173 1999JU3の観測

長谷川 直

JAXA月・惑星探査プログラムグループ  
研究開発室

JAXA 宇宙科学研究本部 宇宙科学技術センター

現在、JAXAでは、「はやぶさ」に続く小惑星探査計画「はやぶさ2」の検討を進めています。「はやぶさ」は、地球に最も頻繁に落ちてくる「普通コンドライト」と呼ばれる隕石と同じ鉱物組成であると考えられている小惑星「25143 イトカワ」を探査しました。「はやぶさ2」では、普通コンドライトより低温領域で形成され、多くの有機物を含んでいる「炭素質コンドライト」隕石と同じ鉱物組成を持つと考えられている、「C型小惑星」の探査を考えています。現在「はやぶさ2」の目的地の第1候補として考えられているのは、「162173 1999JU3」という小惑星です。

小惑星の大きさは探査機がその天体とランデブーする上で非常に重要な情報であり、表面の反射率も探査機の熱設計やカメラの感度を定める上で重要な情報です。また表面の状態は、表層の物質を採取するときや小型着陸ロボット探査には必須な情報です。それ故、大きさ、絶対反射率、表層状態の情報は、1999JU3を探査する上で事前に知っておくべき必要不可欠なものです。1999JU3については、これまで色の観測からC型小惑星であることが分かっていますが、大きさや絶対反射率、表層状態の情報は得られていませんでした。

1999JU3のような小さな小惑星についてこれらの情報を得ることは、地上観測が可能な可視光のみでは困難です。木星や土星のような大きな天体は望遠鏡によって形が分かるので、それから大きさを求めることができます。しかし、1999JU3のような小さな小惑星は、たとえ「すばる」望遠鏡をもってしても、点としか見えません。そこで、天体の明るさから大きさを計算するのですが、惑星や小惑星を可視光で観測する場合、それは太陽光の反射光を見えています。すなわち、絶対反射率と大きさの2つのパラメーターが明るさに関係するので、一方が分からないともう一方も分からないことになります。

「あかり」では、中間赤外線と呼ばれる波長域で観測が可能です。この波長域では、可視光領域で反射せずに吸収した太陽光が熱に変換され、その熱が放射として出てきます。その熱放射の強度は、主に絶対反射率と大きさで決まります。つまり、可視光領域と中間赤外線領域で観測される光は異なる

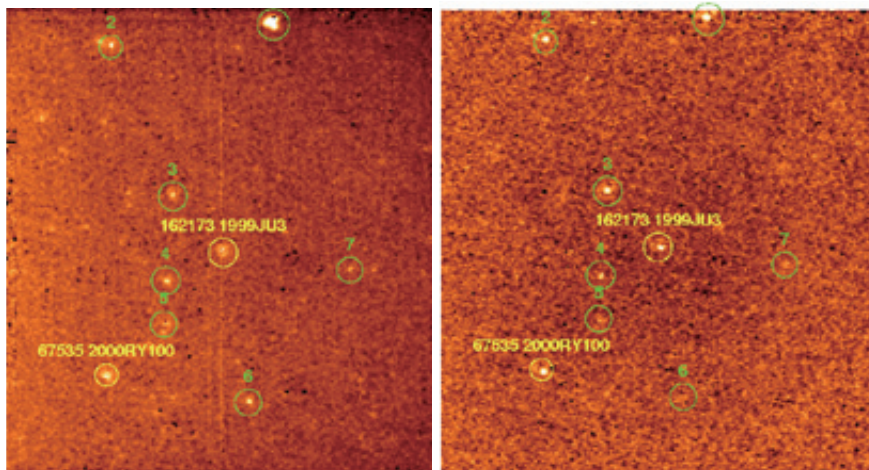


図4 「あかり」近・中間赤外線カメラがとらえた小惑星1999JU3（視野中心の黄丸）左は15マイクロメートル、右は24マイクロメートルでの観測。複数の波長での観測から表面の温度などの重要な情報が得られる。この画像には別の小惑星（左下の黄色丸）も写っていた。緑丸は背景の恒星。

る物理プロセスによるものですが、それを決めているパラメーターは同じです。したがって、可視光領域と中間赤外線領域の観測があれば、連立方程式を解くがごとく、未知数である絶対反射率と大きさを同時に求めることができます。

我々のチームでは、「あかり」搭載の近・中間赤外線カメラ（IRC）と「すばる」望遠鏡の冷却中間赤外線分光撮像装置（COMICS）を用いて1999JU3を観測し、中間赤外線のデータを得ることに成功しました（図4）。そして、すでに得られている可視光線の観測値と今回の中間赤外線データを組み合わせることによって、1999JU3の大きさと絶対反射率の情報を得ることができました。1999JU3の大きさは、直径が約900mであり、イトカワより一回り大きいことが分かりました。また、絶対反射率は0.06前後であり、これはC型小惑星の典型的な絶対反射率に近い値になりました。

そして、もう一つの重要な情報である表層状態についても、「あかり」と「すばる」望遠鏡のコラボレーションによって、初めて得られました。詳細はここでは書きませんが、1999JU3の表層は、月のように砂で覆われているのではなく、イトカワのように岩石で覆われているであろうことが分かりました。

以上のように「あかり」を用いた観測によって、1999JU3の大きさ、絶対反射率、表層状態の情報を得ることができ、探査計画に対して非常に有益な情報をもたらしたのみならず、直径1km以下のC型小惑星の様相もうかがい知ることができました。

（はせがわ・すなお）

# 「あかり」の赤外線撮像観測が 赤ちゃん星の年齢を決める

佐藤八重子

国立天文台 光赤外研究部  
総合研究大学院大学 天文科学専攻

星は、分子雲と呼ばれる密度の高い星間雲が収縮して誕生します。生まれたての星が多く存在する領域を、星形成領域と呼びます。星形成領域には若い星や星間ガス、星間塵などが存在しており、若い星から放たれる光は、地球（観測者）に届くまでにガスや塵に吸収・散乱されてしまい、直接見ることは困難です。若い星の姿を観測するためには、吸収・散乱されにくい赤外線観測する必要があります。

生まれたての星（原始星）は、大きく4つの進化段階に分けられます。太陽のような一人前の星（主系列星）は自ら核融合反応を行うことでエネルギーを生み出しますが、原始星では重力収縮によりエネルギーをつくり出しています。初め（Class 0）は、分子雲の収縮に伴い星に向かって物質が激しく落ち込み、一方でアウトフローと呼ばれる原始星から物質が吹き出す現象も起きます。周囲にガスや塵が多いため、遠赤外線でも明るく輝きます。次（Class I）に、活発なアウトフローに加え、星を取り巻く降着円盤やエンベロープと呼ばれる構造が整ってきます。その後、アウトフローが弱まり降着円盤のみを伴うようになると、Tタウリ型星と呼ばれます。その中でも、比較的長い波長でも明るい古典的Tタウリ型星（Class II）と、近赤外線でも最も明るい弱輝線Tタウリ型星（Class III）に分類されます。

「あかり」の、2～180マイクロメートルという広い波長域での観測が可能であるという特徴は、これら原始星を含むような星形成領域の観測に大きな威力を発揮します。

冬の代表的な星座、オリオン座のすぐそばに、いくつかじゅう座があります。この領域には、さまざまな星形成領域が存在しています。我々はその中の一つ、GGD12-15と呼ばれる領域から、アウトフローを持つ原始星を直接観測することに成功しました。星形成領域GGD12-15には、多くの若い星や星間ガス・塵などが存在しており、星形成が活発であることが知られています。今回、この領域に対して、「あかり」の近・

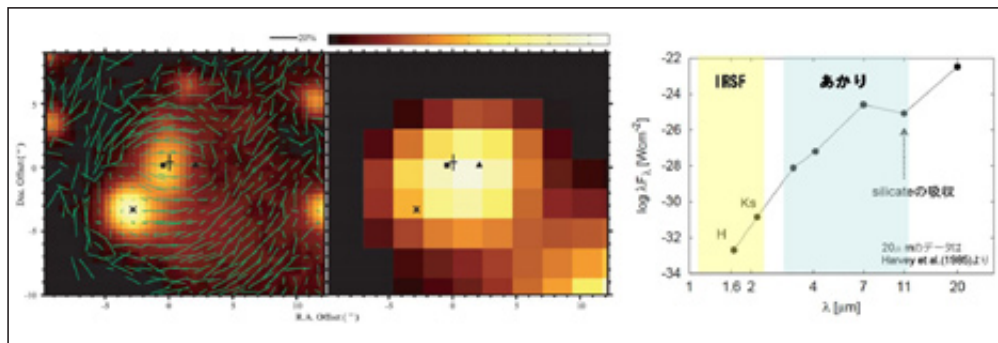


図5 星形成領域GGD12-15

左：IRSF/SIRPOLによる1.65マイクロメートルの画像に偏光ベクトルマップを重ねたもの。個々の線の向きが偏光の向き、長さが偏光度を示している。

中：「あかり」/IRCによる7.0マイクロメートルの画像

+ アウトフローを伴う原始星の中心位置、× 左下の星の中心位置、■ 電波源、▲ 水メーザー源（×，■，▲は位置合わせのために使用）

右：アウトフローを伴う原始星の波長ごとの明るさ（1.6～20マイクロメートル、20マイクロメートルの値は参考文献より）。中間赤外線でも最も明るくなっているのが分かる。色別に各装置の観測可能波長域を示している。

中間赤外線カメラ（IRC）と、南アフリカにあるIRSF 1.4m望遠鏡の近赤外線偏光装置SIRPOL（名古屋大学・国立天文台）を用いての観測を行いました。「あかり」/IRCでは、近・中間赤外線（3，4，7，11マイクロメートル）による撮像観測を、IRSF/SIRPOLでは、近赤外線（1.25，1.65，2.14マイクロメートル）による偏光観測を行いました。偏光観測とは、星から出される無偏光な光が、星周辺の環境（塵の存在、磁場の方向）によってどのように偏光するかをとらえるものです。つまり、偏光観測を行うことで、その星に伴う塵の存在や、星から放出された光が通過する領域に卓越する磁場の方向を知ることができます。IRSFによる偏光観測から、原始星に伴うアウトフローの形状に塵が分布していることが分かりました。一方、「あかり」では、塵の奥深く埋もれた原始星そのものを検出し、この天体が中間赤外線でも最も明るく輝いていることを見いだしました。両者の結果から、この星はとても若いClass 0/I天体であることが初めて明らかになりました。

このようにして、広い波長域での観測の解析結果から、どの波長で明るく光っているのかが分かり、それぞれの星の進化段階を知ることができます。ある星形成領域にどのような星が存在しているのかを知ることで、星が生まれた環境・星形成領域の環境を知る手掛かりになっていきます。こうした「あかり」ならではの特性を生かした研究から、今後も新たな興味深い結果が出てくることが大いに期待されます。

（さとう・やえこ）



# 「あかり」がとらえた 謎の中間赤外線天体

瀧田 怜

JAXA宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系  
総合研究大学院大学 宇宙科学専攻

「あかり」は、宇宙の地図をつくるために赤外線で全天の観測を行いました。このうち波長9マイクロメートルと18マイクロメートルで行った観測は、従来の赤外線天文衛星IRASより10倍以上細かい構造を見ることができます。そうすると、これまでは一つの点にしか見えなかった天体が、実はとても面白い構造をしていることが分かります。今回は、そういう天体のお話です。

図6は、はくちょう座Xと呼ばれる領域の「あかり」全天サーベイデータから作成した赤外線画像です。この領域は地球から約3000光年先にあり、現在も非常に活発に星が誕生しています。今回私たちが着目したのは、白枠で囲った天体(TYC 3159-6-1)で、これを拡大したものが図7左です。この画像では青い点は星を表し、赤で示されるのは絶対温度で約100K(マイナス173℃)に暖められた塵が放つ赤外線です。この画像をよく見ると、真ん中にある星を中心にして赤い放射が広がっていることが分かります。この天体、IRASでは図7右のようにしか見えていませんでした。これも「あかり」の性能があつてこそのものでした。

星が中心にあり、18マイクロメートルのみで広がった放射をまとうこの天体、いったいその正体は？ まずは、どういう天体なら説明できるのかを考えました。一つは、「生まれたばかりの星とそのまわりにある塵」というものです。星は塵とガスの塊の中で誕生することが分かっているので、こういう形に見えてもおかしくはないだろう、ということです。もう

一つは、「年老いた星とその星がまき散らした塵」です。年老いた星が塵をまき散らすことも分かっているので、この星が自分の放出した塵のほぼ中心に位置していることも納得がいきます。

そこで、これらの可能性について調べるために、私たちは地上の望遠鏡を使って追観測を行いました。まず中心の星を、ぐんま天文台の口径150cm望遠鏡を使って可視光での分光観測を行いました。星の分光で得られるスペクトルは、表面の化学組成によって異なるので、そこからどういう星かを調べることができます。ところが、予想に反して特徴のあるスペクトルが見られず、若い星か年老いた星かの区別は付きませんでした。次に国立天文台ハワイの「すばる」望遠鏡で波長約10マイクロメートルの分光観測と、国立天文台野辺山の「ミリ波干渉計」による電波の撮像観測を行いました。これは、若い星のまわりに存在するはずの、惑星系のもととなる円盤中の塵からの放射を見ようとしたのですが、残念ながら観測できませんでした。この結果は、星のすぐ近くには塵が少ないことを示すので、年老いた星の可能性の方が大きくなります。しかし最大の問題は、どうやって塵を100Kにまで暖めるか、ということです。というのも、この塵、星から20万天文単位の距離まで広がっているのです。これを説明するには中心の星だけでなく何か別のエネルギー源が必要なのですが、まだその正体はつかめておらず、悩みのタネです。

「あかり」が投げ掛けてきた宇宙の謎、あなたも一緒に考えてみませんか？  
(たきた・さとし)

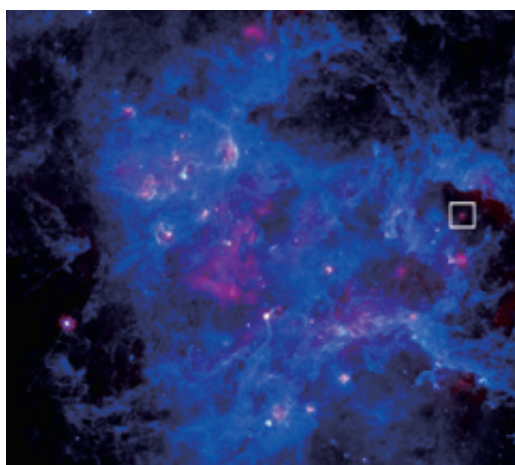


図6 はくちょう座X領域(約6度×6度)の「あかり」による中間赤外線画像  
9マイクロメートル(青)と18マイクロメートル(赤)の全天サーベイデータから作成。青く見えるのは、星と、星間空間中に存在する有機物からの放射。赤は、絶対温度約100Kの塵からの放射を主に見ている。画像の左上から右下にかけて天の川が横切っている。

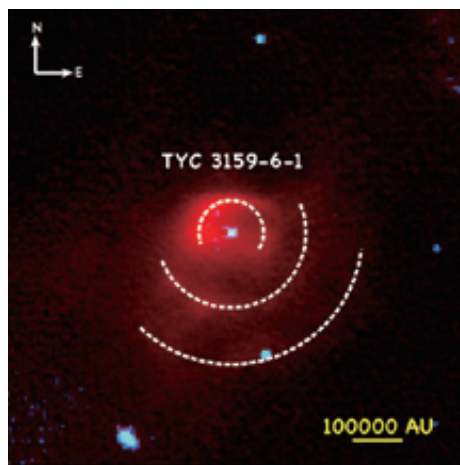


図7 TYC 3159-6-1の拡大図

左:「あかり」の9マイクロメートル(青)と18マイクロメートル(赤)での画像。白破線に沿って円弧状に18マイクロメートルの強い放射が見られる。

右: IRAS衛星の12マイクロメートル(青)と25マイクロメートル(赤)での画像。「あかり」と違い、細かい構造は分らない。また中心の星も見えていない。

# 「あかり」が見た 3世代にわたる星形成の連鎖

石原大助

東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻

星は、密度の高い分子雲中でさまざまなきっかけにより生まれると考えられています。超新星爆発や質量の大きな星からの星風の影響によって、ガスや塵からなる星間物質が掃き集められて密度が高くなり、星形成が誘発される現象は、これまでも知られていました。「あかり」による赤外線での観測により、1光年から100光年の空間スケールで、3世代にわたって連鎖的に星形成が起きたことを示唆する証拠がとられました。生まれたばかりの星からの光は、星を取り囲む大量の塵に吸収され赤外線で再放射されるので、赤外線による観測が有効です。

こぎつね座IC4954/4955は、我々から約6500光年の距離にある反射星雲です。これを「あかり」に搭載された近・中間赤外線カメラ（IRC）および遠赤外線サーベイヤー（FIS）で観測しました。図8左は、中間赤外線の9、11、18マイクロメートルのデータから合成した疑似カラー画像です。赤い部分は若い大質量星の近くで塵が高温に暖められている様子を、青い部分はそれより少し星から離れたやや穏やかな環境にある有機物巨大分子の存在を示しています。図で白いところは、そのような有機物の密度が高くなっていると考えられます。画面下側と右上に見える2つの円弧状の構造は、中心にある質量の大きな若い星（白の+）がまわりの星間物質を浸食し、また押しのけて外側に掃き集めていく様子を表しています。遠赤外線の65、90、140マイクロメートルから合成した疑似カラー画像（図8右）では、若い星のまわりで暖められた塵が、青白く見えるところに分布しています。2つの青い領域の間の

赤く見える部分は、比較的溫度が低く塵を暖めるエネルギー源はないものの、星をつくる材料となるガスや塵が大量に存在することを示しています。

図8左の赤い点は、地上から行われた2マイクロメートル帯の観測から抽出した、生まれたばかりの星の分布を示します。生まれたばかりの星は、主に白い領域のまわりと、遠赤外線でも赤く光っている2つの星雲の間の領域に集中しており、IC4954/4955の領域で若い星（お父さん・お母さん星）が星間物質を掃き集めて次の世代の星（子ども星）をつくっている様子が分かります。

さらに「あかり」の全天サーベイの中間赤外線データから、この周囲の約1度四方を切り出してきて見たのが、図9です。この図で一番明るく見えているのが上で説明したIC4954/4955領域ですが、中央部に空洞が見られます。空洞の大きさは50光年程度です。空洞のまわりの星の年齢層から、数百万年から1000万年前に空洞の中央部分で第1世代の星（おじいさん・おばあさん星）が生まれ、その影響で現在のIC4954/4955の第2世代の星ができていると推定できます。

我々の銀河系には、この領域と似たような構造がたくさん見られます。これらを拡大していくと、一つの構造がさらに細かい構造から成り立っていることも分かります。今後さまざまなケースを解析していくことにより、星から星間物質への、また星間現象から星形成への相互作用について、銀河スケールでの包括的な研究が進むでしょう。

（いしはら・だいすけ）

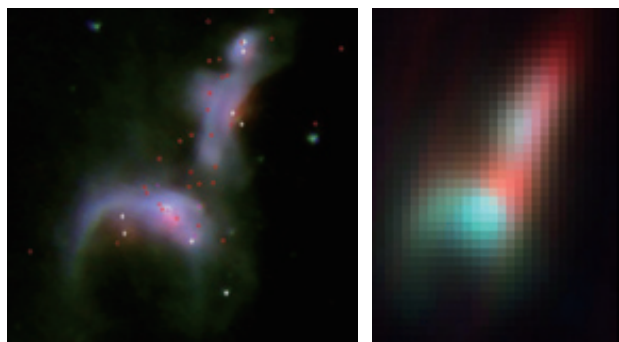


図8 IC4954/4955領域

左：「あかり」近・中間赤外線カメラによるIC4954/4955領域の9、11、18マイクロメートルのデータから合成した疑似カラー画像。赤の丸印は若い星の位置を、白の+は星間物質を暖める大質量星の位置を表している。  
右：赤外線サーベイヤーによる遠赤外線65、90、140マイクロメートルのデータから合成した疑似カラー画像。

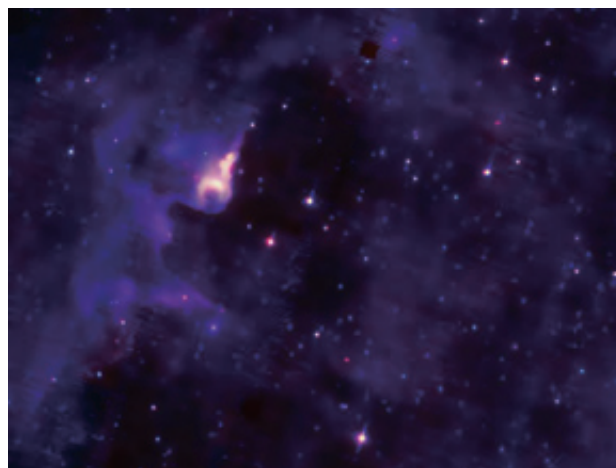


図9 「あかり」搭載近・中間赤外線カメラによるIC4954/4955周辺の疑似カラー画像

差し渡し110光年の領域の9、18マイクロメートルのデータから合成。中央部に直径50光年程度の暗い領域があることが分かる。中心左上で明るく光っているのがIC4954/4955。



# 「あかり」全天サーベイによる デブリ円盤の研究

藤原英明

東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻

近年、太陽系外に多くの惑星が見つかってきています。惑星の生い立ちを探ることは、現代天文学の中でも最もホットな分野の一つだといえるでしょう。現在考えられている惑星系形成の標準的なシナリオでは、生まれたての星の周囲にできる原始惑星系円盤の中で、もともと星間空間に存在していた小さな塵が集まることで微惑星に成長し、さらにその微惑星同士が衝突・合体することで地球のような岩石質の惑星がつくられると考えられています。また、より進化が進んだ星の周囲では、微惑星同士が衝突・合体する際に生成された大量の破片によって、塵の円盤が二次的につくられるとも考えられています。この円盤は、惑星の材料のデブリ（残骸）でできているため、「デブリ円盤」と呼ばれています。デブリ円盤は、まさに惑星形成の現場であると考えられるため、非常に興味深い研究対象です。

デブリ円盤中の塵は、中心の星からの光を吸収し暖められることで赤外線を放射します。1980年代にIRAS衛星で初めてこの種の天体が発見されて以来、精力的に研究が進められてきました。これまでに、遠赤外線で光る低温の塵が存在するデブリ円盤がたくさん見つかってきました。一方で、中間赤外線で光るより暖かい塵は、どういうわけかあまり見つかっていません。暖かい塵は中心星により近い場所、惑星形成が進む領域に存在し、惑星形成過程とより密接な関係があると期待されるため、その素性を調べることは大変重要です。そこで私たちは、IRAS衛星よりも暗い天体まで見ることができる「あかり」の中間赤外線全天サーベイデータの中から、中間赤外線で見える暖かい塵が存在するデブリ円盤を探す試みを進めています。

HD106797は、「あかり」で新たに見つかったデブリ円盤の一つです。18マイクロメートルで中心星自身の明るさよりはるかに明るく光っていることが、「あかり」の全天サーベイによって明らかになりました(図10)。さらに、「あかり」での発見を受けて、私たちは南米チリにあるジェミニ南天文台を使い、より詳細な追観測も行いました(HD106797は南天にあるため、日本からもハワイにある「すばる」望遠鏡からも見る事ができないのです！)。その結果、「あかり」で明らかになった18マイクロメートルに加えて、10～13マイクロメートル付近でも、デブリ円盤に起因する赤外線放射があることが判明しました。10マイクロメートル帯と18マ

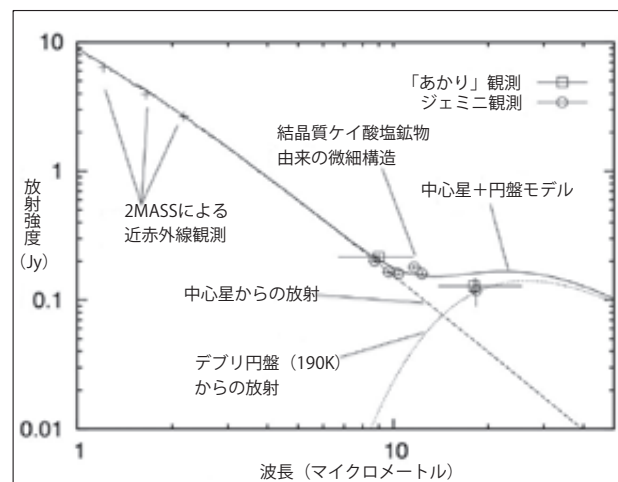


図10 HD106797の近赤外線から中間赤外線にかけてのスペクトル分布

中心星より明るく光っている中間赤外線の放射成分は、絶対温度約190Kの塵を考えればよく説明できる。また、12マイクロメートル付近をピークとする微細構造が見られ、これは結晶質のケイ酸塩鉱物に起因すると考えられる。

マイクロメートル帯の放射強度比から塵の温度を見積もってみると、絶対温度で190K(マイナス83℃)程度。HD106797は、暖かい塵を持つ興味深い天体であることが分かりました。さらに、10マイクロメートル帯のスペクトルに注目してみると、12マイクロメートル付近をピークとする細かい凹凸(微細構造)があることが分かりました。この微細構造は、大きさが1マイクロメートル程度以下の結晶質のケイ酸塩鉱物が豊富に存在していることの証しであると、私たちは考えています。過去に見つかった数例の暖かいデブリ円盤でも結晶質のケイ酸塩鉱物が存在する形跡が見られるという報告があることから、微惑星同士の衝突・合体による暖かいデブリ円盤の形成過程と結晶質のケイ酸塩鉱物の存在には、何か密接な関係があるのかもしれませんが。

「あかり」の中間赤外線全天サーベイからは、暖かい塵が存在するデブリ円盤の候補がHD106797のほかにも複数見つかってきています。「あかり」での発見を軸に、デブリ円盤の素性とその背景にある惑星系形成過程の研究が、今後も大きく進むことでしょう。(ふじわら・ひであき)

# 大マゼラン雲中の年寄り星

板 由房

国立天文台 国際連携室

大マゼラン雲（以下LMC）は、我々が住んでいる天の川銀河のお隣にある別の銀河で、南半球に行くと肉眼でもぼんやりと雲のように見えます。地球から約16万光年程度のところに位置しており、宇宙規模の距離でいえば、とてもご近所にある銀河です。そのために、わりと小口径（1m弱程度）の望遠鏡でも、LMCに存在する星を一つ一つ分離して調べることが可能です。そこで、私たちは「あかり」を用いて、LMCに存在する年寄り星たちを一つ一つ調べました（図11）。

まず、なぜ天の川銀河にも存在する年寄り星を調べずLMCの年寄り星を調べるのか？という疑問が生まれると思います。それは、例えて言うならば、日本とアメリカではお年寄りを取り巻く環境が大きく異なることを利用して、日本のお年寄りとアメリカのお年寄りの「違い」の理由を調べるようなものです。天の川銀河に存在する年寄り星の性質はこれまでの研究でだいぶ調べられていますから、今回新しくLMCの年寄り星を調べて、両者の「違い」を知ることが目的です。次に、なぜ年寄り星を調べるのか？という疑問も生まれたと思います。それは、人間とは違い（最近はそうでもない？）、年寄り星は太陽のような壮年期にある星に比べて非常に「活動的」であるからです。どのように活動的かというと、周期的に星の明るさが変化したり（中には1年程度の間に1000倍以上も変化する星があります）、ガスや塵などの物質を宇宙空間に吐き出したりしているのです。

本稿では、後者の塵を吐き出すことについての研究成果をご紹介します。これまでの研究で、年寄り星が吐き出す塵には、大きく分けて、酸素が含まれるものと炭素が

含まれるものの2種類があることが分かっていました。酸素が含まれる塵の代表例はケイ酸塩（道ばたの石ころや砂の主成分）やアルミニウムの酸化物（ちなみにアルミニウム酸化物にクロム、チタン、鉄などが微量混じったものはルビーやサファイアと呼ばれ、女性に人気があるようです）で、炭素が含まれる塵にはすすのようなものや炭化ケイ素などがあります。

「あかり」の近・中間赤外線カメラ（IRC）による観測データを詳しく解析すると、年寄り星が吐き出すガスや塵の種類や量を知ることができます。私たちは、これまで感度の問題で観測できなかったLMC中の年寄り星を、「あかり」で多数観測しました。年寄り星が吐き出した塵が出す光の強さなどを詳しく調べた結果、年寄りとしては比較的若い星と本当に年寄りの星では、吐き出している塵の主成分が異なることが分かってきました。前者は主に酸化アルミニウムからなる塵を、後者は主にケイ酸塩からなる塵を、それぞれ吐き出していたのです。年寄り星から吐き出される塵が時間とともに変化していくことを示唆するデータが得られたのは、「あかり」によるLMCの観測ならではのことです。

私たちの身の回りにある物質はどこから来たのか？と疑問に思ったことはないでしょうか。天地開闢のときにできたのは、ほとんどすべて水素とヘリウムです。そのほかの元素は星の内部で合成されて、上記のようにして年寄り星が宇宙空間に吐き出したり、超新星爆発のときに合成されて宇宙空間にばらまかれたり、ということを経験して、現在まで蓄えられてきたものです。道ばたの石ころや、あなたの

体をつくる炭素や窒素の何割かは、  
源をたどると年寄り星が吐き出した塵とガスに行き着きます。年寄り星が宇宙の物質進化と循環に一役も二役も買っていると知ると、現在の日本と照らし合わせて面白いとは思いませんか。  
(いた・よしふさ)

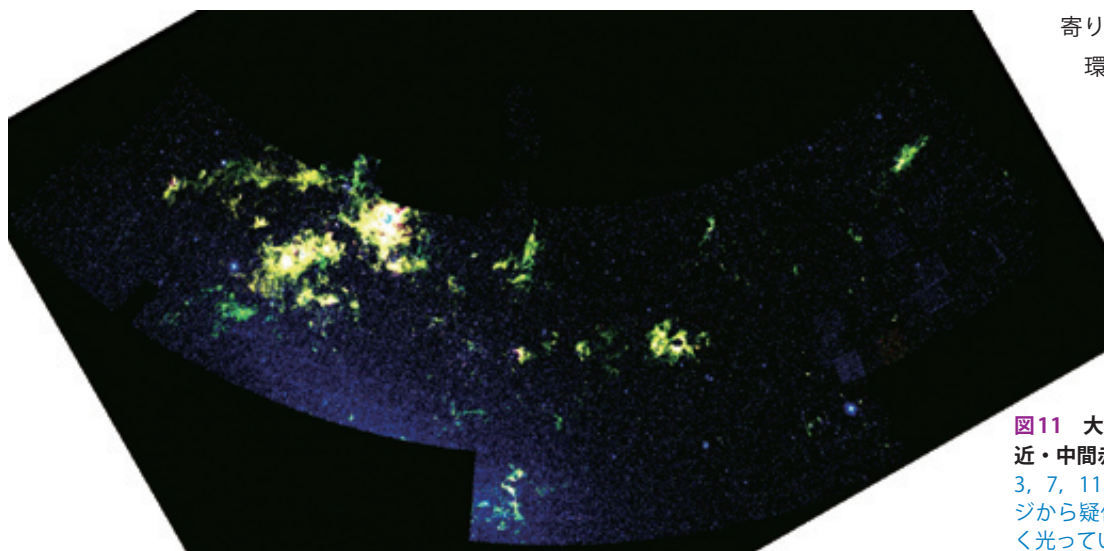


図11 大マゼラン雲の「あかり」近・中間赤外線カメラによる画像  
3, 7, 11マイクロメートルのイメージから疑似カラー合成を行った。青く光っているのが主に年寄りの星。



# 星と星間物質が出会う場所

## 遠赤外線でたどる塵の冒険

泉浦秀行

国立天文台 岡山天体物理観測所

植田稔也

デンバー大学 物理・天文学科

「あかり」のこれまでにない高い空間解像度を駆使し、オリオン座の1等星ベテルギウスが解き放ったガスがその周囲で流れる星間ガスと激しく衝突し、混じり合う様子をとらえることができました。

どんな星も年老いると、さまざまな方法でまわりの星間空間に自分の身を吹き出していきます。そして、星間空間に吹き出された物質の一部は、冷えて固体微粒子（塵）になります。こうして星々が長い時間をかけて大量のガスや塵をじわじわと星間空間にまき散らしていく過程は「質量放出」と呼ばれ、宇宙の物質循環において大きな役割を担っていると考えられていますが、その仕組みはいまだに完全には解明されていません。これまでのところ、質量放出では、星のガスが冷えて一部が塵になり、ガスと塵が混ざり合ったほこりっぽい風（星風）となって星周空間へ流れ出していくと考えられています。放出された後の塵はどんどん冷えて暗くなっていますが、何かの原因で再び暖められると、そこで再び遠赤外線を出して光ってくれるので、塵の居場所を知ることができます。

遠赤外線で光る塵の居場所を探ることができれば、星からの質量放出がどのように起こるのか、星風はどこまで広がっているのか、星間物質とはどういう出会い方をして、どのように混ざり合っていくのか、そういった問いに対する答えを見つけることができます。そこで「あかり」の出番となるわけです。「あかり」の遠赤外線サーベイヤ（FIS）は、波長65, 90, 140, 160マイクロメートルの4波長で、塵の放つ遠赤外線をとらえることのできる観測装置です。この波長域は絶対温度30K（マイナス243℃）程度のものをとらえるのに適していて、星のまわりに広がっている冷たい塵が少しでも暖められている場所を探すのにうってつけです。そして、多くの星が実際にFISで探査されました。

その結果の一つとして「あかり」が詳しく描き出したのは、活発な質量放出星ベテルギウスのまわりの塵が放つ弧状の輝きです（図12）。ベテルギウスは、オリオン座の左上部に赤く輝く、地球から約640光年の距離にある年老いた重たい星です。中心の青白く描かれたベテルギウスを取り囲むように弧状に光っている構造は、その独特の形状からパウ・ショック（弧状衝撃波）によるものと考えられます。星風が星間物質にぶつかり、物質の密度や圧力が急激に変化する「衝撃波」と呼ばれる現象が発生します。ベテルギウスが星間空間を動いているため（図12では右下手前から左上奥に向かって）、進行方向の前面に当たる左上側で弧状の衝撃波が発生したと考えられます。そして塵は衝撃波で暖められ、遠赤外線姿を現すことになったというわけです。観測されたバ

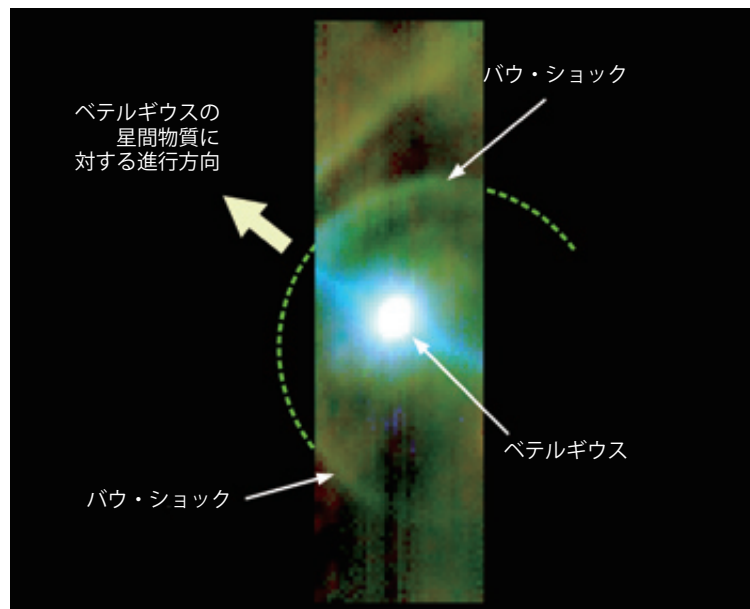


図12 「あかり」遠赤外線サーベイヤによるベテルギウス周辺の3色合成擬似カラー画像

波長65, 90, 140マイクロメートルにおける画像を、それぞれ青・緑・赤の3色に割り当てて作成した。ベテルギウスが星間物質に対して進む方向に、星から吹き出た物質と、星間物質が衝突してできたパウ・ショック（弧状衝撃波）が見える。パウ・ショックの差し渡しは約3光年に及ぶ。ベテルギウス本体を貫き、左上から右下に伸びる白い光は、観測装置の特性による人工的な偽信号。ベテルギウスは、画面右下手前から左上奥に向かって進んでいる。

ウ・ショックの形状を理論と比較することで、ベテルギウス周辺に星間物質の大河が流れ、ベテルギウスはその大河を横切って動いていることが分かりました。この大河はベテルギウスの付近では時速4万kmで流れ、ベテルギウスはこの流れを横切りながら時速11万kmで進んでいます。ベテルギウスから吹き出す時速6万kmの風が船の舳先のように星間物質の川をかき分けているところが、パウ・ショックとして見えているのです。この星間物質の大河は、オリオン座の大星雲やその周辺で次々に生まれている、若くて大きい星の集団が源流であると考えられます。「あかり」による観測で、星風と星間物質がぶつかり、パウ・ショックを形成する例が次々と見つかっています。今後の解析の進展にご期待ください。（いずみうら・ひでゆき、うえた・としや）

（注）ベテルギウスの星風とそのまわりの星間物質の間で衝撃波が発生していることは、25年前にIRAS衛星による観測からも示唆されていました。しかし、IRASの観測では解像度が不足していたため、詳しい状況は分かっていませんでした。今回の「あかり」の画像は、これまでよりも数倍解像度が高く、初めて衝撃波の細かい構造まで詳しく調べることを可能にしました。



# 赤外線天文衛星「あかり」



## 赤外線天文衛星「あかり」

赤外線で見ると宇宙とは？「あかり」はどのような衛星で、その使命は何なのか？「あかり」ミッションの紹介です。

p.1 赤外線で見ると宇宙とは？赤外線天文衛星「あかり」

p.3 「あかり」が生まれるまで

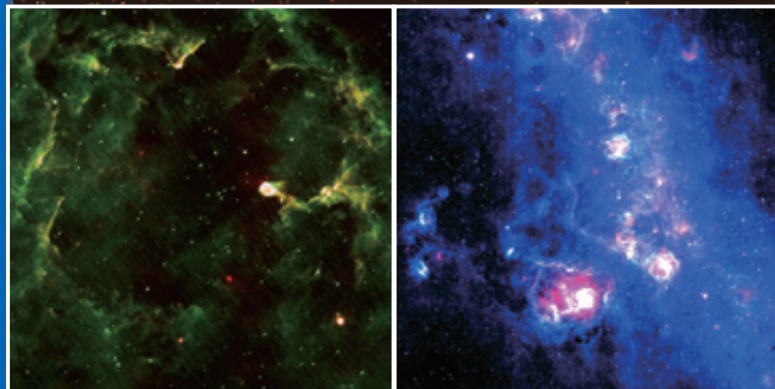
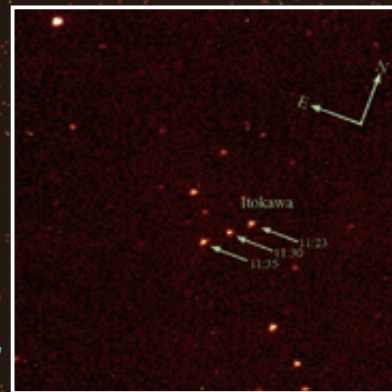
## 太陽系からのあかり

我々の太陽系を知ることは、我々の生い立ちを知ることであります。「あかり」は太陽系の謎にどう迫ったのでしょうか。

p.4 太陽系からのあかり

p.5 「はやぶさ2」の目的地を調べる ～162173 1999JU3の観測

小惑星イトカワ  
の IRC 画像



ケフェウス座の散光星雲  
IC1396 の中間赤外線画像

M8 付近の天の川の中間赤外線画像

## 星の誕生を照らすあかり

星の誕生の場面を調べることは、赤外線天文学が得意とするところです。続々と成果が生まれています。

p.6 「あかり」の赤外線撮像観測が赤ちゃん星の年齢を決める

p.7 「あかり」がとらえた謎の中間赤外線天体

p.8 「あかり」が見た、3世代にわたる星形成の連鎖

## 未知の太陽系からのあかり

宇宙のどこかに、我々の太陽系のような惑星系があるに違いない。「あかり」が第二の太陽系を探します。

p.9 「あかり」全天サーベイによるデブリ円盤の研究

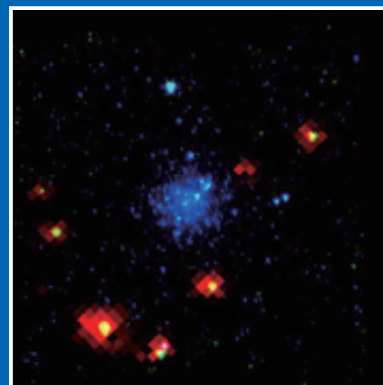
## 宇宙のリサイクルを見るあかり

星の死は、同時に次の世代の星をつくる材料を宇宙に返すことでもあります。壮大な宇宙の輪廻転生を「あかり」が追います。

p.10 大マゼラン雲中の年寄り星

p.11 星と星間物質が出会う場所～遠赤外線で見ると塵の冒険

p.14 「あかり」によって見えてきた大マゼラン雲中の超新星残骸の素顔

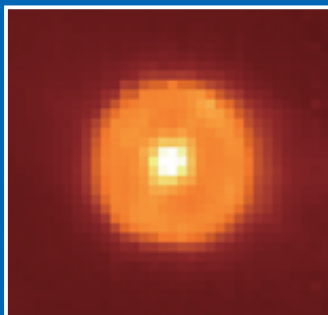


球状星団 NGC1853 と  
その周辺の遠方の銀河

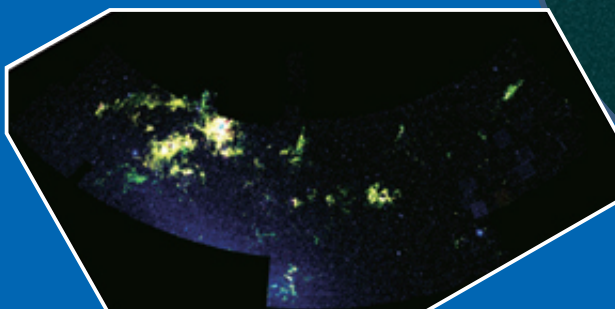
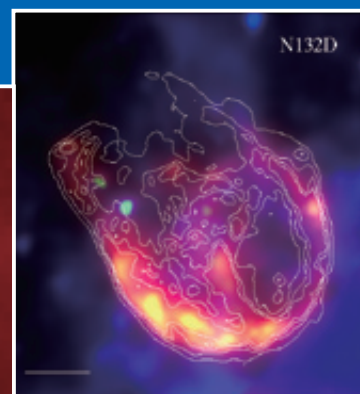


星間物質の流れを  
横切るオリオン座の  
ベテルギウス

うみへび座U星のまわりに  
広がる塵の遠赤外線画像



大マゼラン雲中の  
超新星残骸 N132D



大マゼラン雲の近・中間赤外線画像



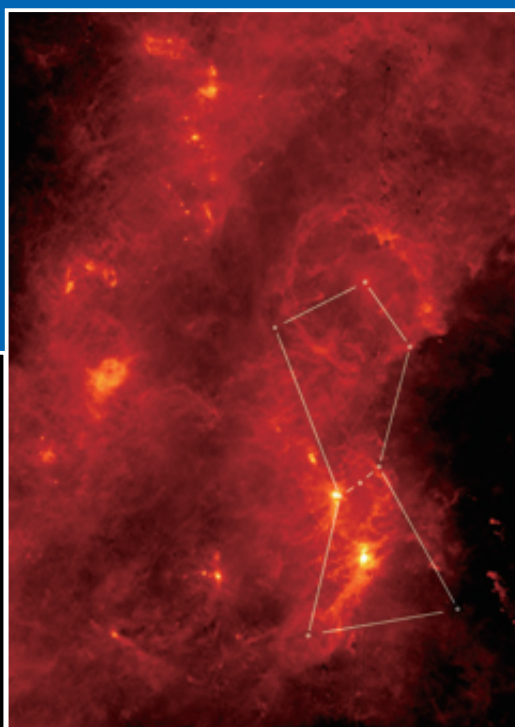
## 銀河のなりわいに射し込むあかり

銀河の中ではどのように星が生まれているのだろう。どのような活動が起きているのだろうか。「あかり」の見た銀河の活動のひとつです。

p.15 遠赤外線分光画像が解き明かす我々の銀河系中心部

p.16 星間塵がつくり出す近傍銀河の多様な姿

渦巻き銀河 M101 の FIS 観測結果を、可視光 (DSS) と紫外線 (GALEX) に重ね合わせたもの。



オリオン座と天の川の FIS 140 マイクロメートル画像

## 巨大ブラックホールからのあかり

銀河の中心に鎮座する巨大ブラックホールの正体に「あかり」が迫ります。

p.17 クェーサーの若き日を暴く

p.18 塵に埋もれた活動的な超巨大ブラックホール



北黄極の「あかり」  
近・中間赤外線深探査領域

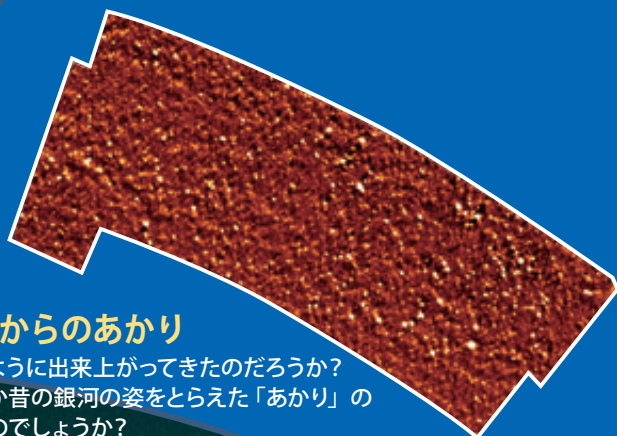
## はるかな銀河からのあかり

我々の宇宙はどのように出来上がってきたのだろうか？  
はるか彼方、はるか昔の銀河の姿をとらえた「あかり」のデータは何を語るのでしょうか？

p.20 「あかり」北黄極遠方銀河サーベイプロジェクト

p.21 「あかり」大規模サーベイが若き日の銀河を探る

p.22 「あかり」で切り開く、遠方銀河団フロンティア



南黄極付近の  
遠赤外線観測画像

## 「あかり」を支える技術

赤外線で宇宙を観測する「あかり」には、ほかの衛星にはない特殊な技術開発が必要でした。

p.23 あかりをとらえる「あかり」の望遠鏡システムの開発

p.24 クールな衛星「あかり」

## コラム

p.3 「あかり」の成果を祝す

p.17 「あかり」へのESAの参加

p.19 すべては私の手の中に……！ 「あかり」観測スケジューリング

### 出典

- p.1 Murakami, H., et al., 2007, PASJ 59, S369
- p.4 Ishiguro, M., Ueno, M., 2008, Lecture Notes in Physics 758, 231
- p.5 Hasegawa, S., et al., 2008, PASJ 60, S399
- p.6 Sato, Y., et al., 2008, PASJ 60, S429
- p.7 Takita, S., et al., 2009, PASJ 61, in press
- p.8 Ishihara, D., et al., 2007, PASJ 59, S443
- p.9 Fujiwara, H., et al., 2009, ApJ 695, L88
- p.10 Ita, Y., et al., 2008, PASJ 60, S435
- p.11 Ueta, T., et al., 2008, PASJ 60, S407
- p.14 Seok, J. Y., et al., 2008, PASJ 60, S453
- p.15 Yasuda, A., et al., 2009, PASJ 61, in press
- p.16 Suzuki, T., et al., 2007, PASJ 59, S473
- p.17 Oyabu, S., et al., 2009, ApJ, in press (arXiv: 0903.2149)
- p.18 Imanishi, M., et al., 2008, PASJ 60, S489
- p.20 Wada, T., et al., 2008, PASJ 60, S517
- p.20 Lee, H. M., et al., 2009, PASJ 61, in press (arXiv: 0901.3256)
- p.21 Takagi, T., et al., 2007, PASJ 59, S557
- p.22 Koyama, Y., et al., 2008, MNRAS 391, 1758
- p.22 Goto, T., et al., 2008, PASJ 60, S531
- p.23 Kaneda, H., et al., 2007, PASJ 59, S423
- p.24 Nakagawa, T., et al., 2007, PASJ 59, S377



# 「あかり」によって見えてきた 大マゼラン雲中の超新星残骸の素顔

具 本 哲

ソウル大学 物理・天文学科

太陽よりもずっと重たい星は、その生涯を劇的な大爆発で閉じます。大爆発を起こした星は、夜空に突然現れたかのように明るく輝くので、「超新星」と呼ばれてきました。超新星爆発は、宇宙の中で起きる現象の中でも最も激しいものの一つであり、大量のエネルギーと星の内部の核融合反応でできた新しい元素を宇宙空間に放ちます。爆風の衝撃波は星からはるか離れたところまで伝わっていき、星間空間をかき乱します。爆発の後に残る「超新星残骸」は、我々に超新星爆発そのもの、あるいは星間空間に漂うガスや塵（星間物質）の進化に対する役割について教えてください。

「あかり」は、大マゼラン雲にある超新星残骸の、これまでにない情報を含む画像を取得しました。大マゼラン雲は、我々の天の川銀河のお供の銀河で、我々からは約16万光年の距離にあります。宇宙の中では比較的近い距離にあること、また我々から銀河の中の活動を一望できることから、星間物質の観測的な研究にはうってつけの天体です。我々は「あかり」で、大マゼラン雲の広い範囲を計画的に観測しました。これまでに40個以上の超新星残骸が大マゼラン雲の中に見つかっていますが、その約半数が「あかり」で観測した領域に入っています。「あかり」の近・中間赤外線カメラ（IRC）による観測で、我々はそのうち8天体から赤外線の放射を検出することができました。超新星残骸の、中間赤外線での詳細な画像が得られたのは、今回が初めてのことです。

観測された超新星残骸の画像を図13に示します。

図13は7, 11, 15マイクロメートルのデータを、それぞれ青、緑、赤に割り当てて合成した疑似カラー画像です。さまざまな超新星残骸の形が見えています。多くは、きれいな球殻状の構造を見せていますが、これは主に超新星爆発の衝撃波によって掃き寄せられた星間物質であると考えられます。「あかり」の観測した、これらの超新星残骸からの赤外線放射は、X線の放射（等高線で示してある）とよく一致しています。これは、X線によって加熱されたガスがその中の塵を暖め、それが赤外線で光って見えているのだと解釈することができます。「あかり」のデータは、超新星残骸や星間塵の生成と消滅の過程に光を当てています。

星間塵は1マイクロメートルよりもずっと小さな固体微粒子で、その多くはケイ酸塩や炭素のすすなどからできているとされます。星間塵は、赤色巨星の周辺のある程度温度が低くかつガスの密度が高いところや、あるいは超新星爆発で吹き飛ばされたガス中でつくられると考えられています。一方、超新星爆発の衝撃波は、星間塵を破壊してガスに戻してしまうと考えられます。未来の星や、もしかすると地球のような惑星の種となり得るこれらの塵の生成と破壊の過程を、きちんと理解するのは大事なことです。中間赤外線の観測、とりわけ11, 15マイクロメートルの観測は、「あかり」でしか得られないデータを生み出します。これらの情報から、我々は

大マゼラン雲中の超新星残骸に「暖かい塵」からの放射成分を見つけました。それが意味するところは、超新星爆発の衝撃波で破壊される星間塵の量は、これまで考えられてきたものよりは少ないのではないかと、ということです。今後さらに解析が進めば、我々の超新星残骸、そしてその星間塵への影響に対する理解がさらに進んでいくことでしょう。

(Koo Bon-Chul)

(日本語訳：山村一誠)

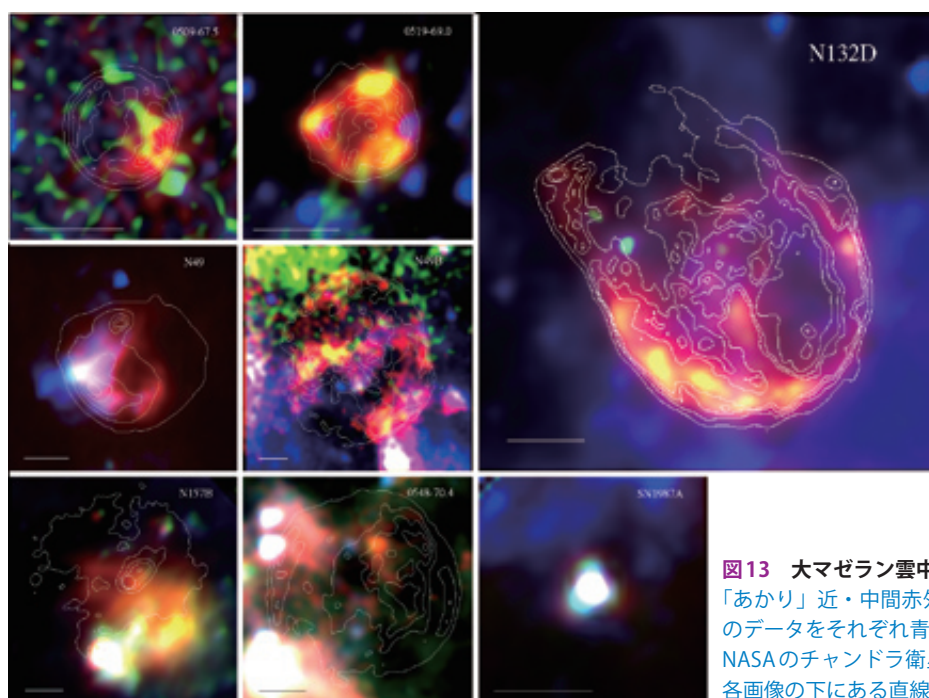


図13 大マゼラン雲中の超新星残骸の疑似カラー画像

「あかり」近・中間赤外線カメラの7, 11, 15マイクロメートルのデータをそれぞれ青、緑、赤に割り当てて合成した。等高線は、NASAのチャンドラ衛星によって観測されたX線の強度である。各画像の下にある直線は、それぞれ20光年の長さを示している。



# 遠赤外線分光画像が解き明かす 我々の銀河系中心部

安田晃子

名古屋大学大学院 理学研究科

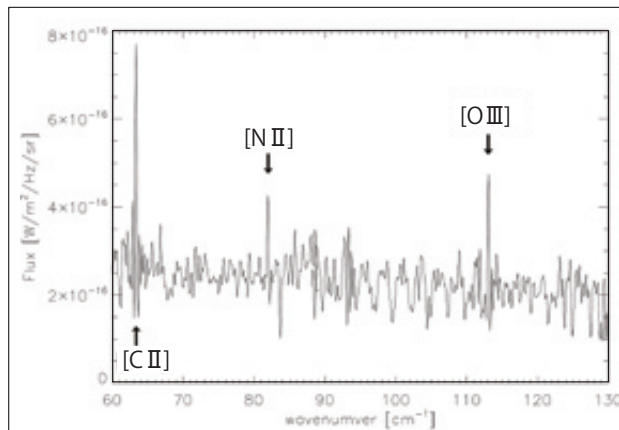


図14 「あかり」遠赤外線分光器で得られたスペクトルの一例  
連続波のほかに、波長158マイクロメートルの[C II]線、  
122マイクロメートルの[N II]線、88マイクロメートルの  
[O III]線（図ではそれぞれ63cm<sup>-1</sup>、82cm<sup>-1</sup>、113cm<sup>-1</sup>に位置する）が観測された。

天の川銀河（銀河系）は、我々にとって最も身近な銀河です。銀河系のほかにもさまざまな銀河が存在していますが、我々が属するこの銀河ほど詳細に観測できるものはほかにありません。特に銀河系の中心は、ブラックホールの存在が知られていたり、ガスの状態が複雑であったりと、非常に面白い観測対象になっています。それ故、さまざまな波長でいろいろな観測が行われています。

我々は「あかり」に搭載された遠赤外線サーベイヤー（FIS）の分光観測機能を用いて、銀河系中心付近に存在する若い星の高密度の集団（クラスター）の観測を行いました。

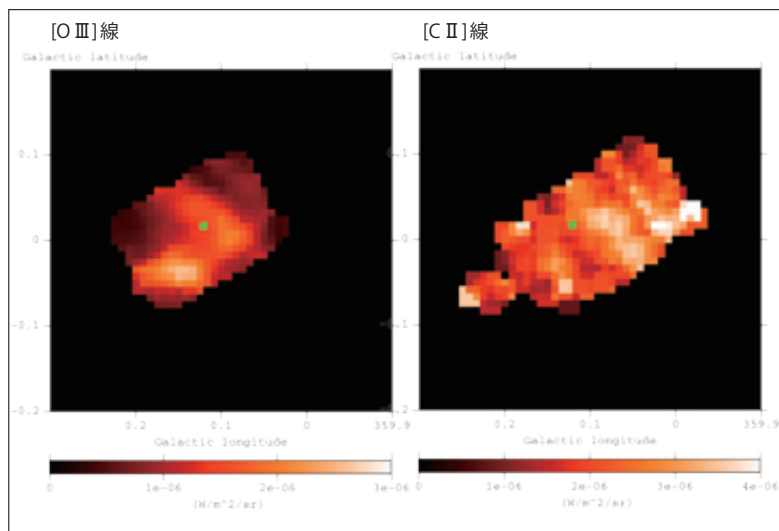
分光観測で得られるスペクトルは、撮像観測で得られるきれいな画像に比べると地味な印象を受けますが、そこにはより豊富な情報が入っています。遠赤外線領域では、星間塵からの放射を示す連続した波長範囲で放射する成分（連続波）のほかに、ガスの情報を有した特定の波長で放射する輝線がいくつも存在します。「あかり」では連続波と3本の輝線を観測することができました（図14）。二階電離した酸素の放射する[O III]線、一階電離した窒素の放射する[N II]線に加え、一階電離した炭素の放射する[C II]

線です。これらの輝線はそれぞれ異なった状態のガスから放射されます。得られた輝線情報から、観測領域における輝線強度の分布図を作成したのが図15です。電離エネルギーが高く、主にガスが電離された領域から放射される[O III]の輝線は、クラスターの周辺で非常にも明るくなっていることが分かります。これはクラスター周辺のガス雲がクラスターからの強い放射によって電離されていることを非常によく示しています。一方、電離エネルギーの低い[C II]線の分布図を見てみると、[O III]線の分布とまったく違う様子を示していることが分かります。これは[O III]線と[C II]線の電離エネルギーの違いによると考えられます。どちらもクラスターが電離/励起源であり、クラスターからの放射光は周囲のガス雲を表面から電離していきます。しかし、エネルギーの高い光子は表面で消費されてしまうのに対し、エネルギーの低い光子はガス雲の内部まで届いているということが、[O III]線と[C II]線の分布図から分かります。

銀河系中心付近のクラスター領域を遠赤外線分光観測し強度分布図を作成したのは、「あかり」が初めてです。この結果は、「あかり」の2次元検出器を持つという特徴を十分に生かした観測によるもので、クラスター周辺のガスの状態の変化をよくとらえています。紹介し切れませんが、このほかに[N II]線や連続波の情報が得られており、それらを総合的に解析することで、このクラスター周辺の複雑なガスの状態を明らかにすることができます。（やすだ・あきこ）

図15 得られた輝線情報から作成した輝線強度分布図

クラスターの位置は緑点で示した。このクラスターに対し、銀河中心側の輝線分布が[O III]と[C II]で異なった様子を示しており、[C II]の方がクラスターからより遠いところでも明るくなっている。観測範囲の違いは長波長側と短波長側の2種類の検出器の位置の違いによるものである。



# 星間塵がつくり出す 近傍銀河の多様な姿

金田英宏

名古屋大学大学院 理学研究科

鈴木仁研

国立天文台 先端技術センター

我々は「あかり」によって、近傍のさまざまな形態を持つ銀河を観測してきました。図16は、距離2000万光年にある渦巻銀河NGC1313を観測した結果です。同じ赤外線でも、観測する波長によって銀河の見え方が異なることが分かります。近赤外線（波長3、4マイクロメートル）では銀河中心の棒状構造が明るく見えますが、これは年老いた星からの光を見えています。一方、遠赤外線（波長65、90、140、160マイクロメートル）では星の光で暖められた星間塵が出す光を見ており、銀河全体、特に銀河腕に塵が多く存在することが分かります。中間赤外線では銀河腕に沿って局所的に明るく

なっており、波長7、11マイクロメートルでは有機物の巨大分子（芳香族炭化水素）が出す光を、波長15、24マイクロメートルでは若い星が放つ紫外線によって高温に熱せられた小さな星間塵が出す光を、主に見えています。図中の近・中間赤外線スペクトルは、銀河腕の領域で分光観測を行った結果で、芳香族炭化水素が示す特徴的なパターン（矢印）を検出したものです。このように波長によって見えている対象が違いますが、それらの空間分布が異なるということは、銀河内のそれぞれの領域で環境が異なることを意味します。

図17は、上記のような多波長画像データから、暖かい（絶対温度20～30K=マイナス253～243℃）塵と冷たい（絶対温度約15K=マイナス258℃）塵の2成分を分離して、それぞれが空間的にどう分布するかを、距離2400万光年にある立派な渦巻銀河M101に対して調べた結果です。暖かい塵の放射強度は、塵による減光を受けやすいH $\alpha$ 輝線や紫外線に比べて、星形成率を見積もるよい指標となります。一方、冷たい塵の放射強度は、ガス量と塵量がよく比例することが知られているので、ガス量を見積もるよい指標となります。銀河内の領域ごとに暖かい塵の放射強度（ $\equiv$ 星形成率）と冷たい塵の放射強度（ $\equiv$ ガス量）の関係を調べた結果、銀河中心部と外縁部、銀河腕領域で、この関係が系統的に変化することが分かりました。このことは、星形成を引き起こす物理メカニズムが、銀河内の領域によって異なることを意味します。

銀河の中の場所による星間環境の違いが赤外線ですこまで詳細に示され、議論できるようになったのは、「あかり」による観測の成果で、世界的に見てもほぼ初めてのことです。私

たちが所属する天の川銀河もこれらと同じような多数の星からなる渦巻銀河ですが、私たちは銀河の中にいるので、近傍銀河と同じように銀河全体をとらえることは困難です。「あかり」で近傍銀河を観測することによって、銀河の中でどの種の星間塵がどのように分布しているか、場所ごとに星形成がどのように進んできたかをクリアにとらえることができ、銀河が今後どう進化するのかを予知できます。

（かねだ・ひでひろ、すずき・とよあき）

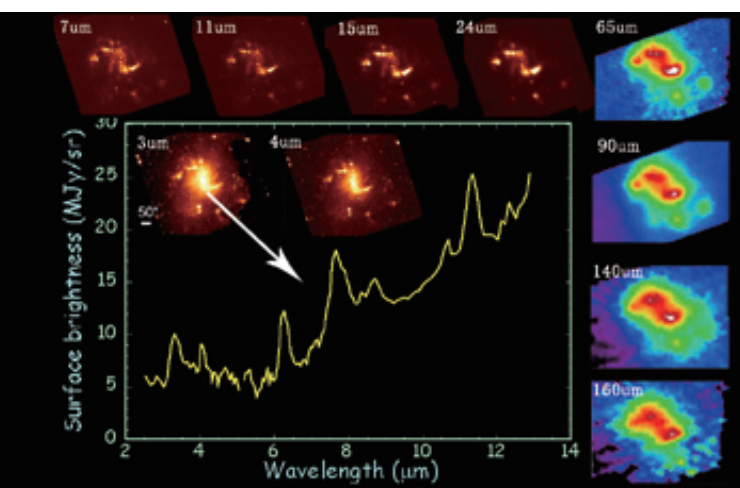


図16 渦巻銀河NGC1313を「あかり」で観測した例  
波長が異なる10種類の赤外線（3～160マイクロメートル）  
で見た銀河の画像と、銀河腕に存在する有機分子が出す  
赤外線スペクトル（2～14マイクロメートル）。

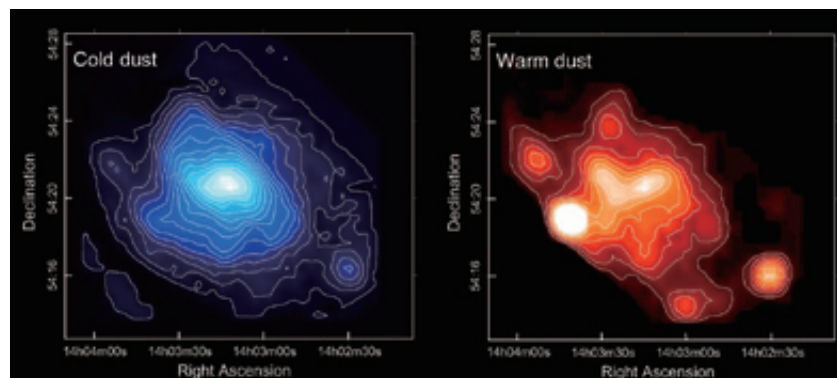


図17 遠赤外線画像データから得られた渦巻銀河M101の冷たい塵（左）と暖かい  
塵（右）の空間分布

冷たい塵の放射強度（ $\equiv$ ガス量）は銀河中心をピークに外縁部に向かって減衰する滑らかな分布を示しているのに対し、暖かい塵の放射強度（ $\equiv$ 星形成率）は斑点状に分布している。両分布から、M101は銀河中心付近よりも外縁部で活発な星形成を起こしている風変わりな銀河である様子が分かった。



# クェーサーの若き日を暴く

大藪進喜

JAXA宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系

太陽の質量の1億倍にもなるという超巨大ブラックホールを中心に据えたクェーサーという天体が、宇宙には存在します。そのブラックホールに物質が落ち込むことで、重力エネルギーを解放し、明るく光り輝いています。このようなクェーサーは、宇宙に数多くある銀河と密接な関係を持つことが知られており、宇宙全体の進化にも重要な役割を果たしていると考えられています。しかしながら、クェーサー、そしてその中心にある超巨大ブラックホールがどのようにでき、どのように成長してきたかは、よく分かっていません。

そのようなクェーサーですが、もう少し詳細に見ていくと、超巨大ブラックホールをご本尊に据え、そこに落ち込む物質が円盤状に取り巻き、光り輝いています。そのまわりに高速（秒速数千km）で運動しているたくさんのガスの雲があり、その外側には塵（固体微粒子）がドーナツ状に存在しており、これらは光り輝く円盤に激しく照らされていると考えられています。そのため高速で運動しているガス雲中の原子は電離し、それが電子と再び結合するときに数多くの輝線（それぞれの原子に特有の、特定の波長のみで起きる放射）を出します。また、塵が直接照らされているドーナツの一番内側では、まさに微粒子が融けている現場を見ることができると考えられています。クェーサーは、ドーナツの穴を上から見ているので、中のものをすべてまともに見ることができると考えられている天体です。

さて、このような天体がどうしてできたかを知るために一番手っ取り早いのが、その形成途中を見ることです。そこで、遠くの宇宙を見る、すなわち宇宙の若き日のクェーサーを見てやろうと考えたわけです。しかし宇宙は膨張しているために、遠くを見るとその光は、より赤い光へシフトしてしまいます。そこで、赤い光を見るのに長けた「あかり」が必要となりました。

我々は、「あかり」の近・中間赤外線カメラ（IRC）の分光機能を使い、120億年前、すなわち宇宙ができてからまだ17億年しかたっていない時代のクェーサー APM08279+5255を見

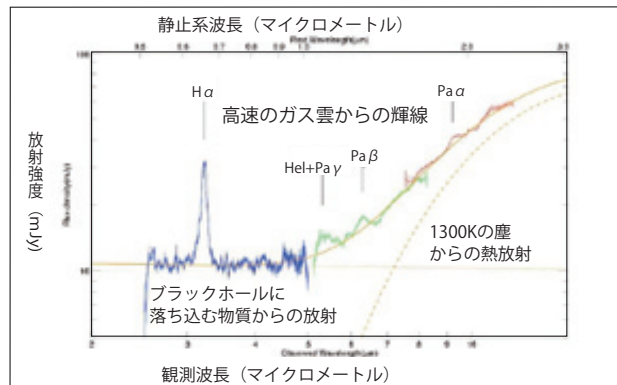


図18 120億年前のクェーサー APM08279+5255 の「あかり」による近・中間赤外線スペクトル

下の横軸は観測での波長、上は波長のシフトを補正した値。縦軸は放射強度。

てみました（図18）。5～12マイクロメートルという波長を観測したわけですが、実は、もしこのクェーサーが我々の近くであれば、可視光から近赤外線という地上からも観測できる波長帯を見たことになります。このクェーサーの観測から、超巨大ブラックホールに落ち込む物質の放射、高速で運動しているガス雲の水素・ヘリウムからの輝線、そして塵のドーナツの内壁から来ている、まさに塵が融ける絶対温度1300Kの熱放射の検出に成功しました。120億年前のクェーサーにもかわらず、その様子は今、我々が知っている近傍のクェーサーとまったく同じ姿のように見えることが分かりました。

宇宙がわずか17億歳であってもクェーサーの姿が変わらないとすると、クェーサーという天体は、考えられているよりもっと短時間で形成していなければなりません。クェーサーがどうやってできたのかという問題は、今後も大事な研究課題として残っています。はてさて。（おおやぶ・しんき）

## 「あかり」へのESAの参加

Alberto Salama

ヨーロッパスペース天文学センター（ESAC）/ESA

ヨーロッパ宇宙機構（ESA）は、ISAS/JAXAのパートナーとして「あかり」プロジェクトに参加しています。「あかり」からさかのぼること10年以上前、ESAの赤外線宇宙天文台（ISO：1995～98）ミッションへ当時の宇宙科学研究所が参加して築いた大変良い関係を受け継いでのことでした。ESAの「あかり」での役割は、ミッションをうまくサポートするように設定されました。ドイツのダルムシュタットにあるESOCは、スウェーデンのキルナ局でのデータ受信を担当しました。これによって、「あかり」は

観測データの転送量を気にすることが少なくなりました。また、スペインのマドリッドにあるESACは、全天サーベイの観測方向の決定と、これらの協力の見返りとしてESAが得た指向観測機会の10%についてヨーロッパの天文学者からの観測提案を受け付け、そのサポートを行っています。

1回目の観測公募は、液体ヘリウムで冷却が行われていた時期のもので、28件のヨーロッパプロポーザルが採択され、400回以上の指向観測が行われました。2回目は、現在も続く、液体ヘリウムがなくなってからの

観測期間向けで、11のプロポーザルが、全部で700観測を行っています。ESACには、ISOにも携わったベテランのスタッフがいて、日本のチームと共同でユーザーサポートを行っています。この作業によってつくられたマニュアルなどの書類は、将来の「あかり」データユーザーにも使われていくものと期待しています。ISO、「あかり」と成功裏に続けられてきたヨーロッパと日本の宇宙機関の協力は、日本の次期赤外線天文ミッションSPICAへと受け継がれていきます。

（あるべると・さらま）（日本語訳：山村一誠）

# 塵に埋もれた 活動的な超巨大ブラックホール

今西昌俊

国立天文台 光赤外研究部

宇宙には数多くの銀河が存在します。これらの銀河が輝いているのは、銀河に分布する星々の内部の核融合反応によってエネルギーが作り出され、それが放射に変換されているからです。宇宙には星と並んで重要なエネルギー生成活動が存在します。それは、太陽の100万倍以上の質量を持つ超巨大ブラックホールに物質が落ち込む際の重力（位置）エネルギーを解放して、明るい放射が作り出される活動です（図19）。超巨大ブラックホールは、銀河の中心部に一般に存在します。我々の天の川銀河のように、中心に超巨大ブラック

ホールを持ち、かつ広がった銀河全体にガス（気体）や塵（固体）を持つような銀河同士の衝突/合体は、宇宙では頻繁に生じています。その際、ガス同士が衝突することによって新たに大量の星が100万年程度の短期間で生成されると同時に、ガスや塵が銀河の中心部に輸送されることによって存在していた超巨大ブラックホールにさらに大量の物質が落ち込んで活動的になり、強い放射を出すと考えられます。しかし、その強い放射の大部分は周囲の塵に吸収され、我々のところに直接届きません。代わりに、暖められた塵が強い放射を行い、赤外線で明るく輝く赤外線銀河として観測されるようになります。つまり、合体赤外線銀河は、塵の向こう側で超巨大ブラックホールが物質を激しくのみ込んで明るく輝いていると同時に、質量を増加させ、成長している現場である可能

図19 超巨大ブラックホール

右下:超巨大ブラックホールに物質が落ち込み、エネルギー放射される概念図。ブラックホール（中心の黒い丸）は、光さえも放出しない暗黒の天体なので、直接見ることはできない。物質が超巨大ブラックホールの重力によって引き寄せられ、渦を巻いて円盤状（降着円盤と呼ばれる）に高速に落ち込んでいくとき、ガス同士の激しい衝突/摩擦によってガスは非常に高温になり、紫外線から可視光線にかけて極めて強い放射が放たれる。物質を飲み込むことによって、超巨大ブラックホールは質量をさらに増加させて成長し、より重力が強くなる。その結果、より多くの物質を引き付け、より明るく輝くことができるようになる。

© NASA/CXC/SAO

左上:塵に埋もれた活動的な超巨大ブラックホールは赤外線で明るく輝く。

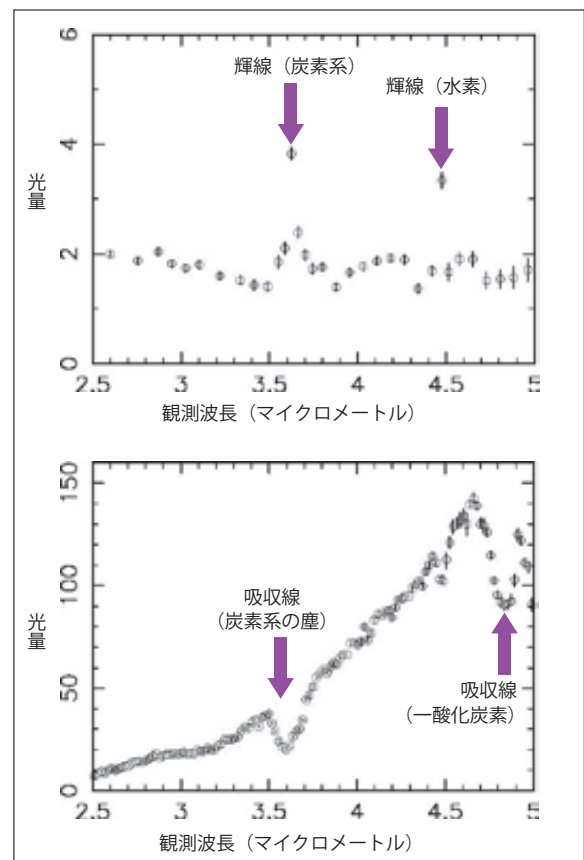
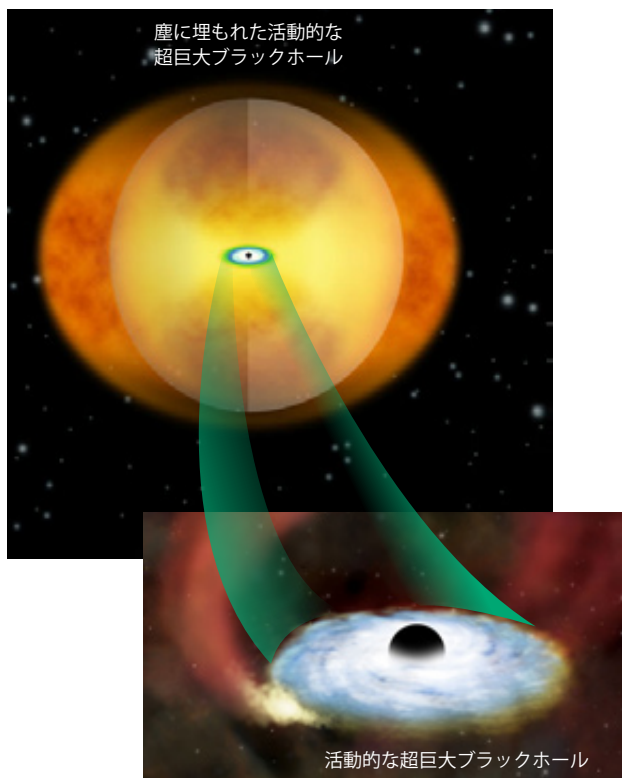


図20 「あかり」によって得られた、合体赤外線銀河の赤外線分光スペクトルの例

上の天体は、連続線に対して正の超過を示す輝線が強く、星生成活動が支配的と判断される。下の天体は、輝線は弱く、連続線に対してへこんだ吸収線が支配的で、塵に埋もれた活動的な超巨大ブラックホールが放射エネルギーの大部分を担っている場合に観測される特徴を示す。



性が高い天体です。

このような塵に埋もれて存在する活動的な超巨大ブラックホールの存在を確認し、その性質を明らかにする目的には、塵による吸収の影響を受けにくい赤外線で、光を波長ごとに分ける分光観測を行うことが非常に有効です。「あかり」は、赤外線の波長2.5～5マイクロメートルを一度に分光観測できる機能を有しており、分光スペクトルの形から、合体赤外線銀河において活動的な超巨大ブラックホールと星生成活動が、それぞれどのような割合でエネルギーをつくり出しているかを区別することができます(図20)。地上の「すばる」望遠鏡などを用いた観測では、特定の赤外線の波長しか地球大気を十分透過できないため、限られた天体しか観測できませんでした。我々は、地球大気に邪魔されることのない宇宙にある「あかり」を用いて、地球から約30億光年までの距

離にある合体赤外線銀河を系統的に観測することにより、以下のことを明らかにしました。

(1) 合体赤外線銀河では、塵に埋もれた活動的な超巨大ブラックホールは期待通り数多く存在し、超巨大ブラックホールの質量成長において重要な役割を担っている。

(2) 現在赤外線により明るく、より多くの星をつくりつつあり、したがって将来より星質量の大きな銀河に進化するであろう天体ほど、銀河のエネルギー発生に対して活動的な超巨大ブラックホールが果たす役割が大きくなっている。この結果は逆にいえば、現在星質量の大きな銀河ほど、かつて活動的な超巨大ブラックホールの影響を強く受け、より昔に星生成が終了した(銀河のダウンサイジング現象)という、従来からいわれていた理論仮説を観測的に支持するものである。

(いまいし・まさとし)

## すべては私の手の中に……!

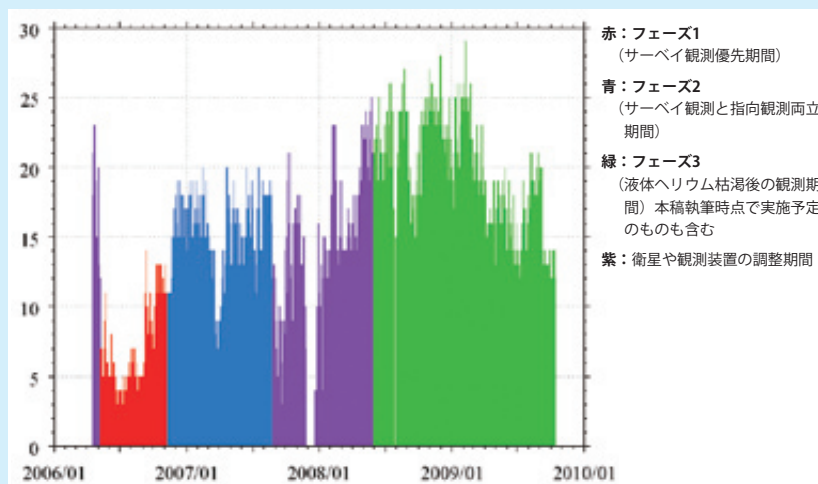
### 「あかり」観測スケジュールリング

臼井文彦

JAXA宇宙科学研究本部  
赤外・サブミリ波天文学研究系

「あかり」は「赤外線で見えた宇宙の地図」をつくるために、全天に対する「サーベイ観測」を実施してきました。これは、風景などの写真を何枚も合成してパノラマ写真にするように、半年間かけて検出器で空を少しずつ観測していき、そのデータを後からつなぎ合わせることで広大な全天の地図をつくり上げるものです(この結果については『ISAS ニュース』2009年1月号「『あかり』全天サーベイ赤外線天体カタログ初版の完成」を参照)。一方で、衛星や検出器の特性を生かして、衛星を一定時間同じ方向に向けて特定の天体をじっくり観測する「指向観測(ポインティング観測)」も行っています。一つの指向観測は姿勢制御を含めて約30分間が単位になり、その間はサーベイ観測を中断しています。サーベイ観測で得られる地図の完成度は高めたい、けれども指向観測で詳細に調べたい対象はたくさんある、という相反する要求を、それぞれに折り合いをつけて共存させる(なんと日本人的な発想でしょう!)のが、スケジュールリングにおいて非常に大変な作業になりました。

「あかり」はサーベイ観測を目的として設計された衛星なので、指向観測を行う自由度は非常に低く(1日に観測可能な天域は全天の3%もありません)、衛星のさまざまな運用制約条件のもとで多くの観測計画を組み立てるというのにも骨が折れました。この作業では、コンピュータの中で衛星の動きをシミュレーションし、ベストなタイミングでの観測を行えるように観測計画を立案していきます。衛星の軌道は安定しているとはいえ、わずかなずれ(軌道高度が1日に数



#### 1日あたりに実施した指向観測の数

観測はいつでも一定の割合で行われているのではなく、時期によって増減している。これは、「あかり」にとって“旬”なもの(その時期にしか見られないもの)に重点的な観測が行われていることによる。2007年12月、「あかり」の軌道制御運用が行われていたので観測がない。注意深く見ると2008年7月にも観測が行われていない期間があるが、これは衛星が緊急回避行動(セーフホールド)に入って全観測が停止されたためである。

十cmから大きいときには数十m以上も)変化しているので、その変化に合わせて観測時刻を最適化するという調整も日々行っています。

苦労のかいもあって、打上げ後から冷媒の液体ヘリウムがなくなる2007年8月までの550日間の間に、全天の94%以上のサーベイ観測と5000回以上の指向観測を行うことができました。冷媒がなくなった後も、機械式冷凍機を用いて近赤外線の波長域での観測を続行しています(本稿執筆時の2009年3月現在も継続中で、すでに指向観測は1万5000回以上)。

「あかり」の観測提案は、衛星開発・運

用の関係者だけでなく、日本、韓国、そしてヨーロッパ各国の天文学者からも集められました。皆さん優秀な研究者ばかりですが、要求もとてもシビアです(無理難題も多かったのです……。観測対象は太陽系内の天体から遠方銀河まで、まさに全宇宙にわたっていますが、スケジュールリングを担当した者としては、その一つ一つに思い入れがあります。こんなにも幅広い分野にかかわることができたというのは、この仕事ならではのやりがいだと感じています。

(うすい・ふみこ)

# 「あかり」北黄極遠方銀河 サーベイプロジェクト

松原英雄

JAXA宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系

「あかり」の主目的は、全天の大部分を赤外線でサーベイし、天体の住所録や赤外線の地図を作成することです。しかし全天サーベイの場合、観測装置の見ている方向がかなり高速（1秒間に4分角）で移動するため、露光時間が短くなり、検出できるのは比較的近くて明るい天体に限られます。今から70億～100億年昔の宇宙に存在した銀河からの微弱な赤

外線を検出するには、数十～数百秒の露光時間がどうしても必要です。そのため、「あかり」には全天サーベイモードとは別に、空の1点を約500秒間見続ける指向観測モードが用意されています。

「あかり」は観測開始から液体ヘリウム消失までの約1年半に、約5000回の指向観測を行いました。そのうちの約14%に相当する700回の指向観測を北黄極領域（黄道座標での北極で、りゅう座の方向）に投入し、遠方銀河サーベイを大々的に行いました。北黄極で行った理由は、南北黄極方向が「あかり」からの可視性が最も良いからです（南黄極付近は大マゼラン雲の大規模サーベイを実施）。図21は、「あかり」がどのように北黄極サーベイを行ったかを示したものです。北黄極サーベイは、0.38平方度の「ディープ（深探査）」領域、5.8平方度の「ワイド（広域探査）」領域の2つからなっており、ほぼ毎日行った指向観測の方向を少しずつずらして、最終的に図のような円形の領域を観測しました。それぞれの領域で、「あかり」の近・中間赤外線カメラ（IRC）の全観測波長（2.5～24マイクロメートルの9波長帯）の画像を作成しました。図22は、そのうち2.5～4マイクロメートルの「ディープ」領域の疑似カラー合成画像で、約2万個の赤外線天体が見えています。また、中間赤外線（波長15～18マイクロメートル）においても4000個以上の赤外線天体を検出することができました。驚いたことに、この赤外線天体の30～40%が可視光では非常に暗く、その観測には8～10mクラスの大望遠鏡が必要となります。一方「ワイド」領域では、検出限界は「ディープ」には及ばないのですがサーベイ領域の広さから、近赤外線で約10万個、中間赤外線でも約1万個の赤外線天体を検出できました。プロジェクトチームには、国立天文台、岩手大学、ソウル大学（韓国）、オープン大学（英国）、UCLA（米国）などから多くの研究者が参加しています。みんなで分担して「すばる」望遠鏡、電波干渉計、紫外線天文衛星 GALEX などによる観測を進め、多波長のデータを用いて「あかり」赤外線天体の正体を研究しているところです。

「あかり」が打ち上がる前に、米国はSpitzer宇宙望遠鏡を2003年に打ち上げ、遠方銀河サーベイをいろいろな領域で大々的に行いましたが、「あかり」北黄極領域サーベイは2.5～24マイクロメートルをすき間なくカバーする撮像フィルターを備えているなどのユニークな特長があります。近いうちに、この北黄極サーベイで検出された赤外線天体のカタログや処理済みの画像を全世界に公開しますので、ぜひいろいろな分野の方々に利用していただければと思います。

（まつはら・ひでお）

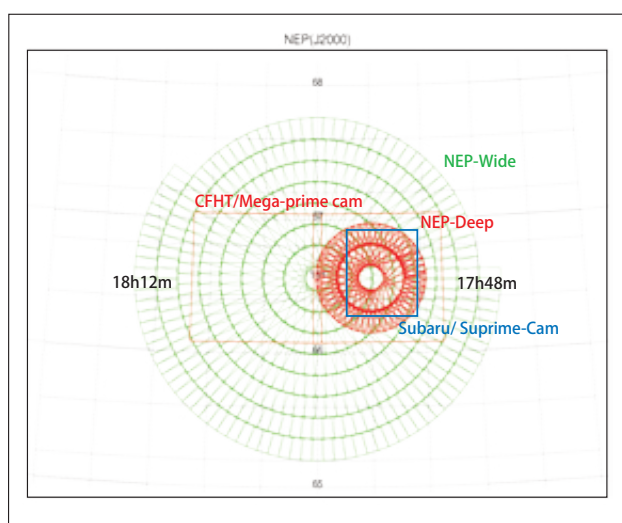


図21 「あかり」北黄極サーベイ  
（緑：ワイド領域、赤：ディープ領域）  
「すばる」望遠鏡およびCFHT望遠鏡による可視光撮像の行われた領域を、それぞれ青・オレンジの四角で示している。



図22 ディープ領域の「あかり」2.5～4マイクロメートルデータから作成した疑似カラー画像



# 「あかり」大規模サーベイが 若き日の銀河を探る

高木俊暢

JAXA宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系  
日本学術振興会 特別研究員

現在の宇宙は、どちらかというと斜陽の季節に差し掛かっています。例えば1年間で新しく生まれる星の数（星生成率）は、宇宙全体で見ると減少の一途をたどっていて、70億年前に比べると10分の1にまで落ち込んでいます。逆にいうと、それだけ昔の宇宙は活発で、激しい星生成が起きている銀河が数多く存在していました。私たちの銀河系では、1年に太陽1個分くらいの質量のガスが星になっていますが、70億年以上前の宇宙では、その100から1000倍の勢いで新しい星が生まれている銀河があります。そのような激しい銀河には、ガスや塵が大量にあって、新しい星の光（紫外線）のほとんどは塵に吸収されます。その結果、銀河は塵が放射する赤外線以最も明るくなります。つまり、そのような激しい星生成を行っている銀河を観測するには、「あかり」のような赤外線天文衛星が最も適しています。

私たちは、「あかり」の近・中間赤外線カメラ（IRC）を使って大規模なサーベイ観測を行い、0.38平方度（満月2個分ほど）の空を2～24マイクロメートルの赤外線ですく観測しました。特に、9つの異なった波長帯で撮像観測をしたことが特徴です。中間赤外線域では、塵の中でも大きさが0.01マイクロメートル以下の非常に小さい、大きな分子といった方がよいような物質（多環芳香族炭化水素：PAH）が強く光っています。図23を見ると、観測波長で10マイクロメートル（赤方変移を受ける前の波長で6マイクロメートル）付近から長い波長に向けて、天体からの放射が急激に大きくなっていきますが、これはPAHによる放射特性によるものです。この

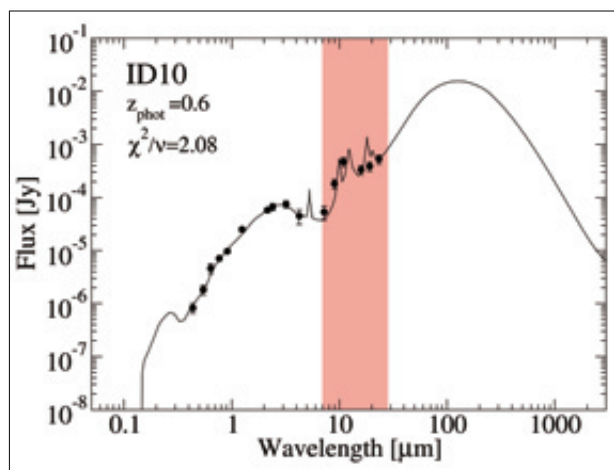


図23 約60億光年先にある銀河のスペクトル・エネルギー分布  
赤く示した波長帯では、多環芳香族炭化水素（PAH）放射が卓越している。

ため、「あかり」による7, 9, 11マイクロメートルの3種類のデータからカラー画像をつくると、非常に赤い天体となります（図24）。

「あかり」の観測は、このようにPAH放射が非常に強い銀河を見つけるのに適しています。爆発的な星生成を起している銀河は近傍にもまれにありますが、「あかり」で見つかった遠方赤外線銀河は、もっと規模が大きく、銀河形成の観点でも重要な役割を演じていると思われます。このように活動的な銀河の中には、星生成以外に、銀河中心の大質量ブラックホール周辺（活動銀河核：AGN）からの赤外線放射が卓越している場合があります。私たちは特に、可視光（Rバンド＝波長0.7マイクロメートル）と中間赤外線（15マイクロメートル）での明るさの比（色）が極端に赤い天体（Extremely Red Mid-infrared Objects：ERMOS）に注目し、塵に隠されたAGNの解析をしています。

このように、「あかり」による大規模サーベイでは、銀河系近傍には見られない激しい活動性を見せる銀河が数多く見つかりました。今後、これらの特殊な銀河が、銀河の形成過程で果たした役割を明らかにしていく予定です。

（たかぎ・としのぶ）

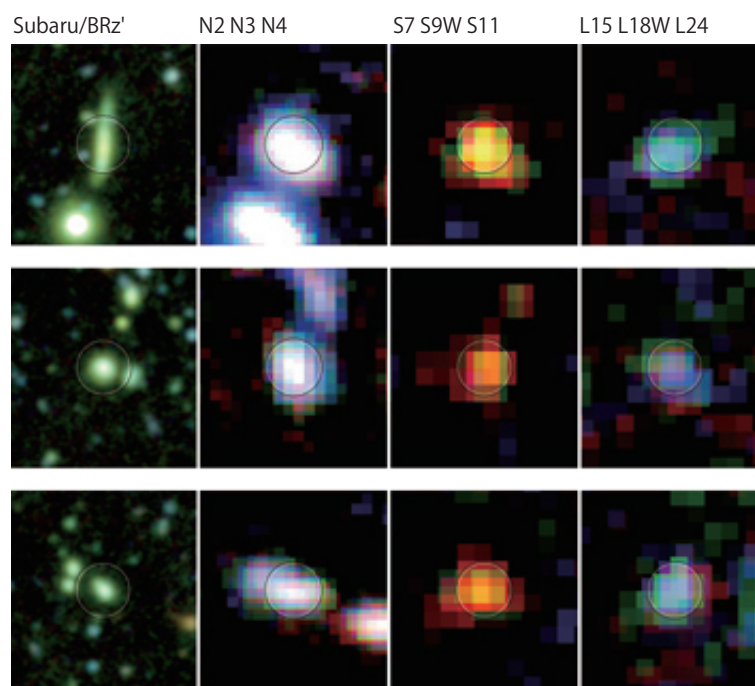


図24 PAH放射の強い銀河のカラー画像

左から、「すばる」望遠鏡による可視光、「あかり」による近赤外線（2, 3, 4マイクロメートル画像の合成）、中間赤外線（7, 9, 11および15, 18, 24マイクロメートル画像の合成）の観測。

# 「あかり」で切り開く 遠方銀河団フロンティア

小山佑世

東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻

後藤友嗣

ハワイ大学

日本学術振興会特別研究員

「あかり」は、遠方宇宙の「銀河団」の観測に威力を発揮しています。銀河団はその名の通り銀河の集団ですが、実はその周辺にも、銀河団の重力に引かれて銀河団へ集まろうとしている銀河がたくさん存在します。最近のさまざまな研究から、このような銀河団の周辺の環境は、銀河の進化に大きな影響を与える重要な場所ではないかと考えられています。銀河団の進化を解き明かすには、遠方つまり過去の銀河団へとさかのぼり、さらに銀河団領域だけでなく、その周辺領域までを広く見渡すことが必要とされています。

そこで小山らのグループは、「あかり」の広い視野を生かし、北黄極近くに位置する70億光年彼方の銀河団RXJ1716.4+6708を中間赤外線（15マイクロメートル）で重点的に観測しました。中間赤外線の観測では、大量の暖かい塵を伴って激しく星形成活動を行っている銀河をとらえることができます。解析の結果、このような赤外線で見える銀河は、銀河が最も集中している銀河団の中心領域には見つからず、その外側を取り囲むように存在していることが分かりました（図25）。さらに今回、広い視野の観測によって初めて、このような赤外

線で明るい銀河が、銀河団周囲のフィラメント構造に沿って、銀河団からかなり離れた場所にまで存在していることも分かりました。「あかり」による広い視野の赤外線観測は、銀河団の周辺環境で銀河はその性質を確かに変えられつつあること、そして今回見つかった銀河団周囲の赤外線で輝く銀河たちが銀河団の進化を解き明かすための重要な鍵を握っている可能性を、示したのです。

以上のように、遠方の銀河団は、環境が銀河に及ぼす作用を調査するための重要な研究対象なのです。しかしながら、80億光年より遠くの銀河団は、発見することがこれまで非常に困難でした。宇宙膨張によって可視光が赤外線領域にシフトしてしまうため、可視光線望遠鏡の探査では見つからないからです。「あかり」は、ここでも力を発揮することができます。「あかり」による近赤外線での観測によって、これまで可視光線では困難だった、80億光年より遠くの銀河団を見つけることができるからです。後藤らのグループは、赤外線のこの特徴を生かして、「あかり」北黄極領域のデータから70億～100億光年先の銀河団の探査を行いました。銀河団の検出には、銀河団に所属する銀河に特徴的な色に着目することで、たまたま同じ方向に見える無関係な銀河の混入を取り除き、検出効率を上げる工夫がなされています。結果、16個の新しい銀河団を発見することに成功しました。図26に90億光年の距離にある銀河団の画像を例示します。左が「すばる」望遠鏡による可視光線のイメージ、右が「あかり」による赤外線（4マイクロメートル）のイメージです。○を付けてある銀河が銀河団に属する銀河です。これらの銀河団はどれもあまりに遠方のため、赤外線でなければ発見は困難でした。「あかり」は銀河団研究のフロンティアを、より遠方に向かって切り開き始めたといえるでしょう。（こやま・ゆうせい、ごとう・ともつぐ）

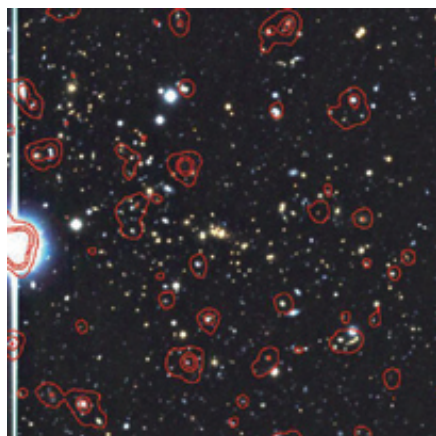


図 25 70 億光年彼方の  
RXJ1716 銀河団領域

「すばる」望遠鏡による可視光カラー写真（一辺は3.5分角）の上に、「あかり」による中間赤外線（15マイクロメートル）の明るさを等高線で重ね書きしている。中間赤外線で見える銀河が銀河団周辺にたくさん見えている。

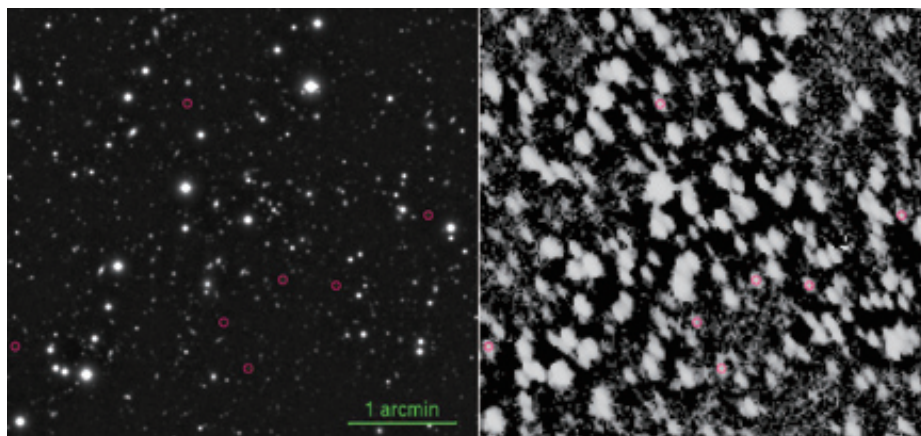


図 26 「あかり」による銀河団  
探査によって 90 億光年先に新  
しく発見された銀河団の一例

左は「すばる」望遠鏡による可視光線の画像。右は「あかり」による赤外線（4マイクロメートル）の画像。○を付けてある銀河が銀河団に属する銀河。



# あかりをとらえる「あかり」の望遠鏡システムの開発

尾中 敬

東京大学大学院 理学系研究科

金田英宏

名古屋大学大学院 理学研究科

「あかり」は、赤外線という目に見えない光で暗い天体までとらえることを目的とする衛星です。そのため、普通の可視光用の望遠鏡にはない性能が要求されます。可視光用の望遠鏡では、望遠鏡自身が光ってしまうと困るので、普通、望遠鏡の筒などは黒く塗装されています。赤外線の望遠鏡でも同じことがいえます。望遠鏡が暖かいと赤外線で光ってしまうため、望遠鏡を冷やす必要があるのです。冷やすといっても、とても暗い天体の観測の邪魔にならない

ようにするためには、マイナス267℃という非常に冷たい温度、極低温にする必要があります。一般にものを冷やすと縮みますが、縮む程度は材料により異なり、また材料がきちんとしていないとゆがんでしまう場合があります。鏡がゆがむときれいな像がとれませんから、極低温まで冷やしてもゆがまない鏡・望遠鏡システムをつくり上げることが「あかり」では要求されました。

衛星に載せるための特別な制限もあります。衛星が持っている重量は非常に厳密に制限されます。望遠鏡は「あかり」の中でも主要部分を占めるため、できるだけ軽くつくる必要があります。また、ロケットで打ち上げるときには大きな加速度がかかるため、それに耐える十分に頑丈な望遠鏡をつくる必要があります。

このように軽く、強く、かつ冷やしてもゆがまない望遠鏡が要求されたわけですが、これらの要求は、どちらかというくと相反するものです。強い望遠鏡にするには重くした方が有利ですし、冷やししやすい金属の鏡はゆがみやすいという問題を抱えています。従来鏡に使われているガラスでは、これらの「あかり」望遠鏡の条件を満たすことはとても難しかったため、我々は炭化ケイ素（SiC）と呼ばれる新しい素材による鏡の開発を行うことにしました。炭化ケイ素はいわゆるセラミックで、比較的軽く、しかも強度が強いことが分かっていたのですが、冷やしてどうなるかは未知の世界でした。我々は特殊な炭化ケイ素の小型鏡を試作し、冷却試験を何回も行

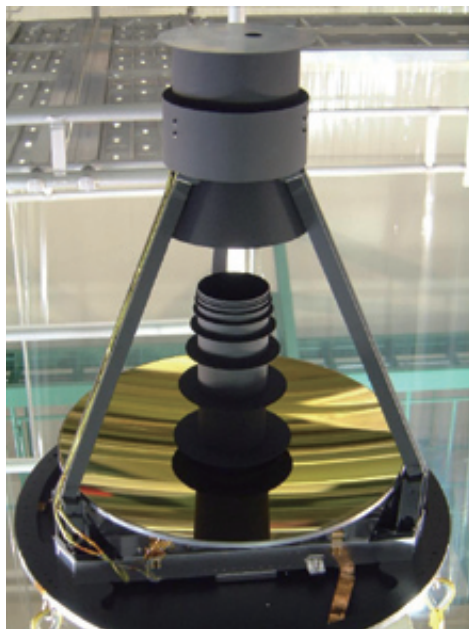


図 27 「あかり」望遠鏡



図 28 「あかり」望遠鏡の冷却試験装置での測定風景

い、極低温まで冷やしてもゆがみが非常に少ないことを確認しました。ここで特殊といったのは、芯には穴ぼこの多い材料を使い、表面にはやや重い、密度の高い炭化ケイ素の膜を付けた材料のことです。このようなサンドイッチ構造の材料を使うことにより、軽く、強く、精度の良い鏡をつくることができました。この鏡を使って、図27に見られるような「あかり」の望遠鏡ができました。主鏡の大きさは直径71cm（有効口径は68.5cm）で、重量は11kgです。

「あかり」の望遠鏡はさらに、図28に見られるように、大型の冷却装置に入れて極低温での性能評価を何回も行いました。低温実験は1回が数週間かかるという手強いもので、初めころは徹夜で測定を行いました。実はこの低温試験を行っているうちに、鏡を支えている部分の接着がはがれるという事故が起こり、打上げが延期になってしまい、多くの方に迷惑を掛けることになりました。その後宇宙科学研究本部の工学の方々の協力により、大幅な設計の見直しが行われました。このように、多くの人の努力に支えられて現在の「あかり」望遠鏡が出来上がったのです。打ち上げられてからの「あかり」望遠鏡は、何のトラブルもなく予想通りの高い性能を発揮し、これまで観測を続けています。

（おなか・たかし、かねだ・ひでひろ）

## クールな衛星「あかり」

中川貴雄

JAXA宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系

宇宙からの赤外線観測を高感度で行おうとするときに、大切なことがあります。それは、望遠鏡を含む観測機器を冷却する必要があるということです。どのような望遠鏡といえども温度を持っている限りは、その温度に応じた赤外線を放射します。20℃の望遠鏡の発する赤外線放射（熱放射）は、天体からの赤外線放射よりも、典型的には100万倍以上も強くなります。このような強大な望遠鏡からの赤外線放射のもとでは、暗い天体など見ることはできません。高感度達成のためには、望遠鏡からの熱放射を下げる必要があります。そのための最も効果的な方法は、望遠鏡を冷却することです。「あかり」の場合では、望遠鏡をマイナス265℃以下（絶対温度で数K以下）という極低温にまで冷却する必要がありました。

このような極低温を実現するため、「あかり」では、人類が手にできる最も冷たい液体である液体ヘリウム（1気圧での沸点がマイナス269℃）を用いました。ただし、液体ヘリウムには大きな欠点があります。それは、非常に蒸発しやすい液体

であるということです。例えば、1gの液体ヘリウムが蒸発するときに奪う熱は、1gの水が沸騰して蒸発するときのそれに比べて1/100しかありません。したがって、「あかり」冷却系にとっての最重要課題は、液体ヘリウムをいかに節約するかということになります。

図29に「あかり」冷却系の断面図を示します。下の方に、液体ヘリウムを収めるタンクが見えます。このタンクを液

体ヘリウムで満杯にして、衛星を打ち上げます。地上において外からの熱を遮断して液体ヘリウムの余計な蒸発を防ぐため、魔法瓶のような大きな真空容器に収められています。望遠鏡の開口部にも蓋（開口蓋）がかぶせてあります。衛星が宇宙に行って衛星外部が真空になった後に、この蓋を開けて観測を始めます。

さらに「あかり」では、赤外線天文衛星としては世界で初めて、機械式冷凍機（2段式スターリング冷凍機）で真空容器の内部を冷却しました。その結果、観測中の液体ヘリウムへ伝わる熱を大幅に低減することができました。1995年にESAが打ち上げた赤外線宇宙天文台ISOと比べると、10分の1以下と極めて小さな値です。日本製品は、車だけでなく宇宙望遠鏡でも、「燃費が非常に良い！」ことが証明されました。

「あかり」冷却系により、観測機器は軌道上で所定通りの温度に冷却されました。それでも、二つの予想外の事態が起きました。

一つは、姿勢センサのトラブルにより、打上げから望遠鏡の開口蓋を開けるまでの期間が予定の3倍にも延びたことです。蓋が付いた状態では、液体ヘリウムの蒸発量は4倍にも増加します。日々どんどん減少していくヘリウムのことを思うと、気が気ではありませんでした。

もう一つは、蒸発したヘリウムガスが衛星の外に排出されたのですが、それが効率の良い推進系として働いてしまったことです。排出されたガスの圧力が、衛星を加速したのです。そのために、通常は下降していくべき軌道が、「あかり」の場合は毎日、数十m上昇していきました。

このように予想外の事態も起きましたが、冷却系全体としては設計通りの性能を発揮しました。そして、ミッションから要請されていた最低1年の観測期間を超え、約1.5年にわたり液体ヘリウムは保持されていました。設計上、液体ヘリウムの軌道上保持期間は、打上げ後550日と予想されていました。液体ヘリウムが蒸発し切ったのは、打上げ後550.5日でした。予測との差は、わずか半日。軌道上でいろいろと予想外のことは発生しましたが、設計予想値と実績が0.1%（!）という高精度で一致したことになります。

（なかがわ・たかお）

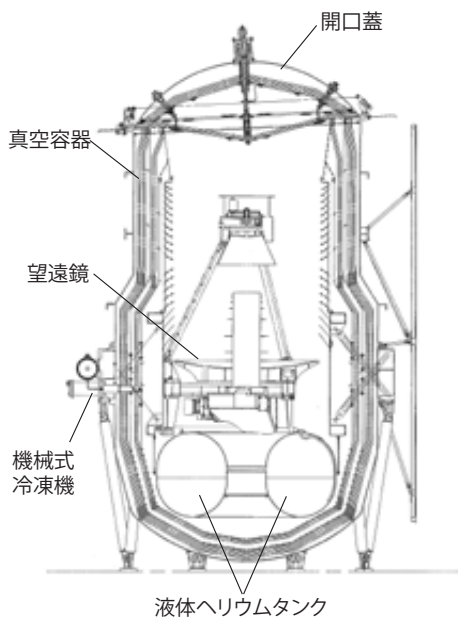


図29 「あかり」冷却系の断面図  
液体ヘリウムと機械式冷凍機を併用したシステムである。

ISAS ニュース No.337 2009.4 ISSN 0285-2861

発行／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 TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット (<http://www.isas.jaxa.jp/>) でもご覧になれます。

デザイン／株式会社デザインコンビニア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

#### 編集後記

ようやく発行にこぎ着けた「あかり」特集号、お楽しみいただけたでしょうか？ お気付きの通り、今回は指向観測の成果が中心です。全天サーベイデータの本格的な解析は始まったばかり。特集号第二弾が出せるよう、頑張ります。（山村一誠）

\* 本誌は再生紙（古紙100%）、大豆インキを使用しています。

R100

古紙配合率100%再生紙を使用しています

