

『あかり』による太陽系天体の観測

上野 宗孝

〈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: ueno@stp.isas.jaxa.jp



上野



石黒

石黒 正晃

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: masateru.ishiguro@nao.ac.jp



長谷川



大坪



臼井

長谷川 直・大坪 貴文・臼井 文彦

〈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: hasehase@isas.jaxa.jp, ootsubo@ir.isas.jaxa.jp, usui@ir.isas.jaxa.jp

『あかり』は天文観測で対象となりうるほとんどすべての種類の天体の観測を行いました。太陽系天体についても多様なサンプルデータを得ることができています。本稿では太陽系小天体についての観測と惑星間塵の観測についての観測結果を紹介します。

1. 『あかり』による太陽系天体の観測

太陽系には惑星から固体微粒子そして惑星プラズマ領域までさまざまな物質や現象が存在します。これらの中でも固体成分の大部分は 300 K 以下の温度をもち、この結果その物体から放射される電磁波の中心波長も 10 μm よりも長い赤外線領域、すなわち『あかり』の格好な観測対象となります。火星や木星などの惑星そのものは『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については多様な観測結果を得ることができました。

2. 太陽系小天体 1999 JU3 の観測

2003 年 5 月に打ち上げられた工学試験ミッション「はやぶさ」は、2005 年 9 月に、地球に最も頻繁に落ちてくる「普通コンドライト」隕石と

同じ鉱物組成をもつと考えられている「S 型小惑星」の一つ近地球型小惑星「25143 イトカワ」を探索しました¹⁾。2009 年 6 月現在、宇宙航空研究開発機構では「はやぶさ」に続く小惑星探索計画「はやぶさ 2」の検討を進めています。「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もつと考えられている「C 型小惑星」の探索を目指しています。ただし「C 型小惑星」は「S 型小惑星」と比較して、地球から近傍の小惑星領域にはあまり存在しておらず、さらに探査機が往復しやすい軌道をもつ近地球型小惑星は非常に少数派です²⁾。現在「C 型小惑星」と判明している中で、探査機が一番往復しやすい軌道をもっている天体は「162173 1999JU3」です³⁾。このことから、現在「はやぶさ 2」の第一候補の天体として小惑星「1999JU3」が検討さ

れています。

惑星探査を行うにあたって探査の対象となる天体の情報は不可欠な情報で、特に小惑星の大きさ（密度を仮定すれば質量になります）は探査機が探査天体にランデブーして探査するうえで必須情報です。「はやぶさ」が「イトカワ」を探査したときは「イトカワ」の直径がおおよそ 300 m 前後という小天体でしたので⁴⁾、「イトカワ」でのランデブー探査は併走するスタイルで行われました。小惑星の表面の反射率は探査機の熱設計やカメラの感度を決めるうえでも重要な情報です。表面の状態（レゴリスに覆われているか、それとも、一枚岩なのか）は表層の物質を採取するときや小型着陸ロボット探査（はやぶさミッションにおけるミネルバ）には必要な情報となります。「はやぶさ」の探査機設計時は「イトカワ」表層の様相がわからなかったために、表層の試料を採取するサンプルは、レゴリスでも岩盤でも採取できるようなデザインに設計されました。以上のことから惑星探査機で天体を探査するうえにその天体の大きさ、絶対反射率、表層状態は事前に知っておく必要がある情報です。しかしながら、「1999JU3」はこれまでのスペクトル観測から、「C型小惑星」と判明していましたが、それ以外の物理パラメーターである大きさ、絶対反射率、表層状態、自転周期、形状等は判明していませんでした。

「1999JU3」のような小さな小惑星について大きさ・絶対反射率の情報を得ることは、地上から観測が可能な可視光の観測のみでは困難です。ハッブル宇宙望遠鏡や補償光学系を搭載した地上望遠鏡等の高空間分解能望遠鏡によっても、「1999JU3」のサイズを特定することが難しく、さらにレーザーによる探査も対象となる天体が地球に接近してこない限り実施は困難です。また掩蔽観測（小惑星による恒星食）による導出も天体自体の明るさが暗いうえに、適当な掩蔽の機会に恵まれませんでした。

中間赤外線の波長では、太陽系内小天体が可視

光領域で吸収した太陽光が熱となり、その結果熱放射光として天体から出てきます。その熱放射の強度は主に絶対反射率と大きさに決まります。可視光領域と中間赤外線領域で観測される光の強度を決めているパラメーターは、大きさ・絶対反射率の二つであるため、可視光領域と中間赤外線領域の観測の両方のデータがあれば、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るようになります。

われわれのチームでは『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ができました。これにより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合せ、Thermophysical Model (TPM) という小惑星熱モデル⁵⁾⁷⁾を用いることで、「1999JU3」の大きさと絶対反射率の精度の良い情報を得ることができました。この小惑星の熱モデルは天体形状が分かっているならば非常に正確に小惑星の大きさを予測できるモデルであり、「イトカワ」の場合、われわれのチームの観測が「はやぶさ」による「イトカワ」探査以前に求めた天体サイズとしては一番近い値を示しました⁸⁾。

「1999JU3」の大きさについては、解析の結果直径が約 900 m であり、「イトカワ」より一回り大きいことがわかりました。また絶対反射率は 0.06 前後であり、この値は「C型小惑星」の定型的な絶対反射率に近い値になったこともわかりました。それに加えてこれらの観測により、もう一つ重要な情報である表層状態についても、TPM を用いた解析により熱慣性情報が得られました。熱慣性は密度と比熱、熱伝導度の平方根であり、「1999JU3」の表層は「炭素質コンドライト」隕石であると仮定すると密度と比熱を決めることができるため、小惑星の表層の熱慣性は主に熱伝導度で決まります。熱伝導度は表層の構成物質にも依存しますが、表層の粒径にも依存します。具体的

には、粒径が細かい場合は熱伝導度が低く、粒径が大きいケースでは熱伝導度が高くなります。われわれのチームが行った「イトカワ」の観測では、「イトカワ」は月と比較して熱慣性が高く、レゴリスで覆われてはいないと予測していましたが、実際の探査でもそのことが証明されました⁸⁾。今回の「1999JU3」の解析では「イトカワ」と同程度の熱慣性をもっていることがわかり、このことから「1999JU3」の表層は月のように砂で覆われているだけでなく、「イトカワ」のように岩石で覆われていることが推測されます。このように、『あかり』の観測によって「はやぶさ2」の探査候補天体である「1999JU3」の物理情報であるサイズ・絶対反射率・表層状態を求めることができ、今後の探査機設計や探査計画に重要な情報を得ることができました⁹⁾。

3. 惑星間塵の観測

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観測衛星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite; 1983 年英米蘭) により、大きく前進しました。IRAS の観測により、それまで黄

道光（惑星間空間に存在する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の世界に多様な空間的微小構造が発見され¹⁰⁾、さらにそれらの細かな濃淡の構造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¹¹⁾ (図1)。惑星間空間に存在する固体微粒子は、相互衝突や、太陽放射圧、惑星による摂動などさまざまな力を受けます。さらに太陽からの放射によるポインティングロバートソン効果は固体微粒子のもつ角運動量を減少させる効果があり、例えば地球近傍に存在する $1\mu\text{m}$ の大きさをもつ固体微粒子の場合、おおよ

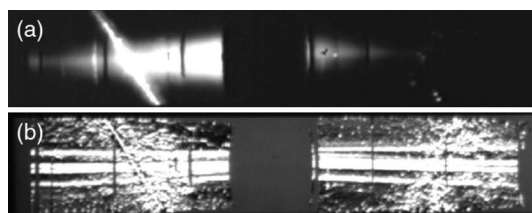


図1 IRAS で検出された検出された黄道光中の微小構造（黄道座標系で中心の抜けている部分が太陽方向）。下図は滑らかな成分を差し引き、細かな構造を協調したもの。

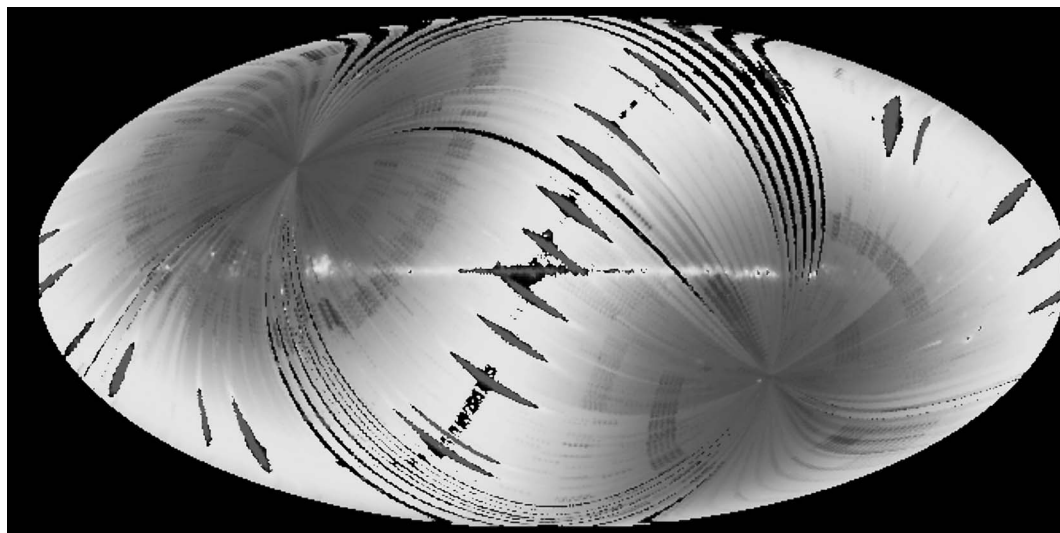


図2 『あかり』IRC サーベイの全天放射マップ（銀河座標系）。水平に広がる天の川銀河の輝度よりも黄道面（この座標系では湾曲している）を中心に帯状の分布をもつ黄道光（惑星間塵からの熱放射）が卓越している。

そ1万年で太陽に落ち込んでしまいます。このことから原始惑星系円盤の固体微粒子が惑星間空間にそのままどまっていなかったことは明らかです。さらに惑星間塵は毎秒約10tもの量が太陽に落ち込んでいることが知られており¹²⁾、惑星間塵にはそれを補う供給源が存在することになります。しかしながら惑星間塵の供給源についての定量的な理解は十分とは言えません。われわれ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過ぎませんので、太陽系全体の質量に対しては極めて微量な存在です。しかしその表面積の大きさから惑星間塵の赤外線輝度は極めて大きく、例えば9 μm の波長で宇宙の観測を行うと、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2:表紙図)。このため宇宙背景放射の観測においても、惑星間塵起源の光を精度良く取り除くことが重要となり、宇宙の遠方の情報を引き出すときにも、最も近い惑星間塵による明るさの精度良い差し引きが必要となります。系外の惑星を観測した際も同じことで、惑星間塵の輝度は惑星のそれを大きく上回る可能性があり(例えば画架座ベータ星)、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。

われわれの太陽系に話を戻すと、IRASで発見された惑星間塵の空間的な微細構造は、その後の可視光による彗星ダストトレイルの発見¹³⁾などの地上観測によりIRASの分解能よりもはるかに小さな空間スケールをもつことが明らかになってきました。つまりIRASでは際立った構造のみを拾い出していたということです。『あかり』のもつ優れた空間分解能はIRASの観測を1桁以上凌駕しますので、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。実際『あかり』で行った、波長18 μm 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いました。『あかり』に搭載された赤外線カメラ・分光器IRCがカバーする近中間赤外線波長帯には、さまざまな鉱物の特徴的な放射・吸収バンドが存在します。特に太陽系だけでなく広く宇宙に存在するシリケート(鉄・マグネシウムなどの金属を含むケイ酸塩鉱物)ダストは顕著なバンド・フィーチャー(分光学的構造)をもち、そのフィーチャーのピークとなる波長・強度・形状は鉱物の組成や結晶構造、サイズ・形状に応じて変化することが知られています。これらの微粒子が太陽系の中でどのようなプロセスを経て進化してきたのかを調べるためには、惑星間塵のこうしたフィーチャーを候補鉱物の赤外線スペクトルと比較してみることも有効な手段の一つとなります。例えば、地球外起源の鉱物として隕石や成層圏での採集惑星間塵(IDPs)などが地上には存在せずし、惑星間塵候補鉱物の模擬物質を実験室で赤外分光測定することも可能な時代となりました。

上で述べたとおり、黄道光を担っているような地球近傍の惑星間塵は、主に彗星・小惑星から供給されたと考えられていますが、こうした太陽系天体は、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ると推測されます。この温度環境の違いによりシリケートの組成や結晶構造、あるいは無水鉱物/含水鉱物に差異が生じ、分光観測することによってそれらを見分けることができます。例えばこれまでに、彗星(特にオールト雲起源と考えられる長周期彗星)のスペクトルでは高温生成物の結晶質オリビンのフィーチャーがいくつも見つかっています¹⁴⁾。彗星の結晶質オリビンは鉄よりもマグネシウムに富み、ピーク波長は11.25–11.3 μm 付近に来るものが多いことがわかっています。一方、小惑星は小さいダストを多量には放出していないため、中間赤外線で見られる顕著なフィーチャーは見られませんが、近赤外線の吸収

フィーチャーなどから、表層を覆っている小さなダストには含水鉱物が存在するものがあることが示唆されています¹⁵⁾。しかしこれらの小惑星や隕石では見つかっている含水鉱物成分は、これまでのところ彗星のスペクトルでは明確には確認されていません。含水鉱物の存在は、「液体」の水とシリケートが比較的長い期間一緒に存在したという環境を示唆しています。また、例えばダストのサイズに制限を加えることができれば、さらにその供給源に迫る一つの手がかりを得られます。例えば彗星核が何度も太陽にあぶられている短周期彗星では凝集が起こり、長周期彗星よりも大きなダストに成長していると考えられます。一方、小惑星の衝突が供給源であれば、そのサイズは彗星とは違ったものになると予想されます。このように、組成・サイズ・結晶構造などから多面的に惑星間塵の供給源に迫ろうというのが、黄道光の中間赤外線分光観測の目的です。

さて、『あかり』以前にこうした黄道光の赤外線分光観測を行った衛星が全くないかという点、実はそうではありません。ヨーロッパが中心となった ISO (Infrared Space Observatory, 1995 年欧州宇宙機構)、また『あかり』の前身である日本の宇宙赤外線望遠鏡 IRTS (Infrared Telescope in Space, 1995 年) でも、限られた領域ではあるものの黄道光の分光観測を行っています。ISO では搭載装置のうち異なる二つの装置で中間赤外線の分光観測を行っており、一方の ISOCAM 装置による観測では 9–11 μm に 5–10% 程度のシリケートの超過フィーチャーを検出したのに対し¹⁶⁾、ISOPHOT による観測では 20% というデータの精度の範囲内ではフィーチャーは検出できないと結論づけています¹⁷⁾。日本の IRTS の観測結果は、やはり 15% 程度の超過フィーチャーが存在することを示しました¹⁸⁾。しかし、ISOCAM だけは 5–16 μm という比較的広い波長範囲をカバーしていましたが、ISOPHOT も IRTS も 12 μm より長波長側がカバーできなかったため、10 μm 帯に本当に超過

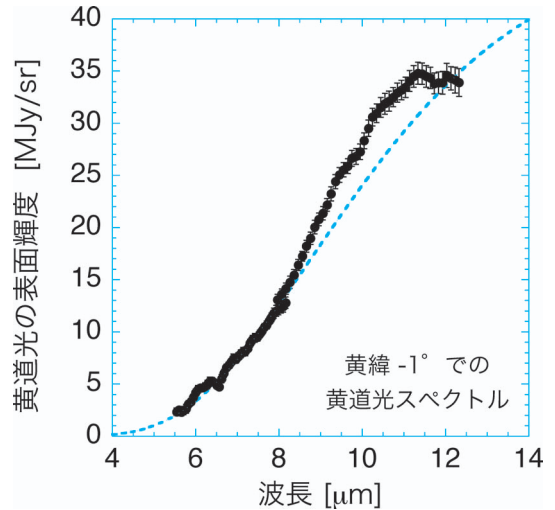


図3 『あかり』IRCの分光観測により得られた、黄緯-1度領域における黄道光のスペクトル。

があるのかどうかは十分に吟味できなかったのが実情です。『あかり』の IRC は 12 μm より長波長側もカバーできるため、そういう点でも黄道光の観測に適しています。われわれは太陽系内の場所、つまり『あかり』観測の場合には観測視線方向の黄緯によって、こうしたスペクトル・フィーチャーに依存性が存在すると期待して、『あかり』でさまざまな黄緯の黄道光を分光観測しました。図3には例として黄道面付近での中間赤外線スペクトルをプロットしていますが、9–11 μm 付近にシリケートの超過成分が確かに検出されています(青の点線は黒体輻射成分)。

今回の『あかり』IRCの観測で、黄道光の中間赤外線スペクトルの 10 μm 帯にはシリケートによる超過成分があることが確認されました。超過成分には鋭いピークを示すようなフィーチャーは見られませんが、超過フィーチャーの両肩部分である 9.3 μm と 11.35 μm 付近に弱いピークがあることが見て取れます。彗星は惑星間塵の大きな供給源の一つと予想されますが、長周期彗星のマグネシウムに富んだ結晶質オリビンのピーク波長は 11.25–11.3 μm と、黄道光スペクトルよりもやや短波長側にピークをもつため、こうした彗星の小

さな塵（サイズ $<1\mu\text{m}$ ）が特に卓越して寄与している可能性は低そうです。一方、こうしたフィーチャーは先に述べたような成層圏で採集した惑星間塵でも見つかっています。彗星起源だと考えられている惑星間塵のうち、特にパイロキシンを多く含むものは、黄道光に近いフィーチャー形状で $9.3\mu\text{m}$ と $11.35\text{--}11.4\mu\text{m}$ 付近に弱いピークを示すものがあります¹⁹⁾。こうしたIDPsはサイズでいうと $10\mu\text{m}$ 程度かそれ以上の大きさをもつものが多いのですが、黄道光の中間赤外線放射を担っているような惑星間塵には、こうしたダストが大きな割合を占めていると推測できそうです。

黄道光のような拡散光の場合は慎重なデータの吟味が必要であることと、その解析や校正には時間がかかるため、他の観測のように即座には結果へと結びつきませんが、現在までの作業でおおまかな傾向はつかめてきました。こうした惑星間塵がどういう彗星から供給されているのか、また小惑星の寄与はどの程度なのかなど、まだまだ明らかにすべき謎はたくさん残っていますが、それを解明するヒントになりうるような『あかり』の観測データも蓄積されてきましたので、今後の解析によってこうした点を明らかにしていけると期待しています。

参考文献

- 1) Fujiwara A., et al., 2006, *Science* 312, 1330
- 2) Binzel R. P., et al., 2004, *Icarus* 170, 259
- 3) Binzel R. P., et al., 2001, *Meteoritics & Planetary Science* 36, 1167
- 4) Mueller T. G., et al., 2005, *A&A* 443, 347
- 5) Lagerros J. S. V., 1996, *A&A* 310, 1011
- 6) Lagerros J. S. V., 1997, *A&A* 325, 1226
- 7) Lagerros J. S. V., 1998, *A&A* 332, 1123

- 8) Mueller T. G., 2006, *IAU Symp.* 236, 261
- 9) Hasegawa S., et al., 2008, *PASJ* 60, SP2, S399
- 10) Low F. J., et al., 1984, *ApJ* 278, L19
- 11) Sykes M. V., 1988, *ApJ* 334, L55
- 12) Gruen E., Zook H. A., Fechtig H., Giese R. H., 1985, *Icarus* 62, 244
- 13) Ishiguro M., et al. 2002, *ApJ* 572, L117
- 14) Ootsubo T., et al., 2007, *Planetary and Space Science* 55, 1044
- 15) Hasegawa S., et al., 2003, *Geophysical Research Letters* 30, 2123
- 16) Reach W. T., Morris P., Boulanger F., Okumura K., 2003, *Icarus* 164, 384
- 17) Leinert Ch., et al., 2002, *A&A* 393, 1073
- 18) Ootsubo T., et al. 2000, *Advances in Space Research* 25, 2163
- 19) Sandford S. A., Walker, R. M. 1985, *ApJ* 291, 838

AKARI Observations of Solar System Objects

Munetaka UENO

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

Masateru ISHIGURO

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Sunao HASEGAWA, Takafumi OOTSUBO, and Fumihiko USUI

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

Abstract: We present a brief summary of AKARI observations of the solar system objects. Asteroid 1999JU3; a candidate of HAYABUSA-2 target, is remotely explored at infrared wavelengths, while excellent spatial resolution and spectroscopic capabilities of AKARI give us a unique opportunity to study the interplanetary dust.