

# 『あかり』衛星が原始星の年齢を決める

## 佐藤 八重子

〈総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yaeko.sato@nao.ac.jp

## 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

## 田村 元秀

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: motohide.tamura@nao.ac.jp

## 河村 晶子

〈名古屋大学大学院理学研究科天体物理学研究室 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: kawamura@a.phys.nagoya-u.ac.jp

若い星からの放射エネルギーは、進化段階によってその分布や明るい波長帯が異なるため、さまざまな波長域での観測が必要になってきます。若い星は、低温で、塵やガスの濃い星形成領域に存在するため、赤外線での観測が重要になってきます。今回、『あかり』衛星による3-11 $\mu\text{m}$ で星形成領域GGD12-15の観測を行い、IRSF/SIRPOLにて観測された近赤外線偏光観測結果と併せて、1-11 $\mu\text{m}$ のエネルギー分布を描き、それによって、アウトフローの起源と考えられる天体の進化段階をclass I/0であると特定しました。このようにして、広い波長域での観察結果を用いてさまざまな星形成領域において個々の若い星の進化段階を特定することで、集団星形成が行われる環境と原始星の誕生との関連性の統計的な議論が可能になります。

## 1. 星の誕生とその進化

星は、分子雲と呼ばれる密度の高い星間雲から生まれます。星と星の間には、ガスや星間塵からできている星間物質（星間雲）が存在しています。星間ガスの主成分は水素で、低温でかつ周囲より星間ガスや星間塵が濃く集まり、一酸化炭素、アンモニア、水などが分子で存在している領域のことを「分子雲」と呼びます。このような分子雲が収縮することで、星は誕生します。分子雲の中

は、星間ガスや塵の集まりが自身の重力によって収縮し高密度の分子雲コアを生成します。そして分子雲コアがさらに密度を高めると中心部では星が形成されます。この生まれたばかりの星は「原始星」と呼ばれ、原始星が多く形成される領域を「星形成領域」といいます。よく知られる星形成領域の一つに、オリオン大星雲(M42)があります。星形成領域には、濃い星間ガスや星間塵や、そこから誕生する原始星が存在しています。原始星などの若い星から放たれる光は、地球（観測者）に

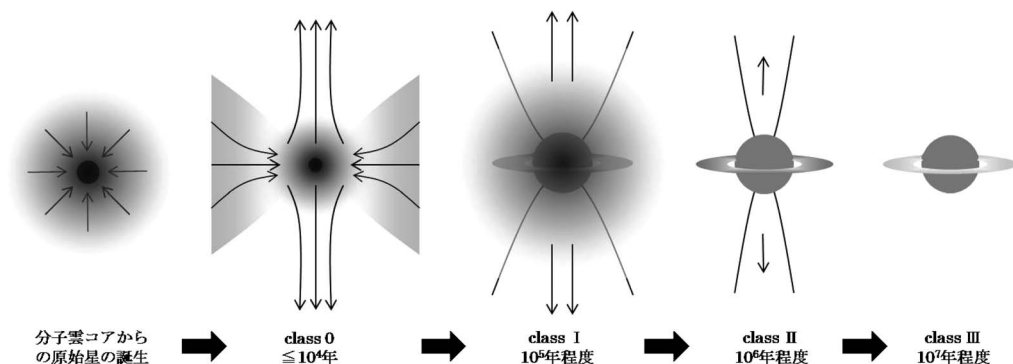


図1 前主系列星の進化.

届くまでに塵によって散乱および吸収されてしまうため、可視光線では観測することが困難です。星間塵による散乱は波長が短いほど効いてくるため、若い星の姿を見るためには、可視光線と比べて波長が長く散乱されにくい赤外線での観測が必要になってきます。星間物質による吸収や散乱により、短い波長域の電磁波成分が弱くなり、長波長側の波長域が相対的に明るくなってしまいう作用を「赤化」といいます。日常でも見られる夕焼けや朝焼けは赤化を受けることで空が赤く見えます。これは、日没や日の出のときには日中よりも太陽からの光がより長く地球大気を通過するため、選択的に青より波長の長い赤の波長帯がより強くなるのが影響しています。このように、特に星間塵が多く分布している星形成領域では、その中に埋もれた若い星から放たれる光は赤化を大きく受けるため、赤外線での観測が重要になってきます。

原始星は、いくつかの進化段階を経て、太陽のような主系列星へと進化していきます。主系列星は星中心部での水素の核融合反応によりエネルギーを生成しますが、主系列へと進化するまでは重力収縮から輝くエネルギーを作り出します。星自身の表面（光球面）から放射されるエネルギー強度（黒体放射）の分布は、星の温度に依存することがわかっています（ウィーンの変位則）。主系列星以前の星（前主系列星）のエネルギー強度分

布は、星からの放射に、星周構造に含まれる塵などの放射が加わるため、それぞれの進化段階で異なってきます。初めの段階（class 0）では、分子雲コアの収縮が進み、中心の原始星に向かって激しく物質が落ち込む一方、アウトフローと呼ばれる物質の放出が行われます。星と比べて低温なガスや塵が多いこの段階では、遠赤外線でも最も明るく輝きます。その後、class I の段階になると、アウトフローは活発になり、中心星の周りに降着円盤やエンベロープと呼ばれる構造を伴うようになります。この段階でも塵は多いため、比較的長い赤外線（中間赤外線～遠赤外線）で最も明るいですが、中心星によるエネルギー放射により近赤外線（2 $\mu\text{m}$  付近）の波長域でも明るくなります。さらに進化が進む（class II）と、弱まったアウトフローとはっきりした（光学的に厚い）降着円盤の星周構造は残りますが、エンベロープはなくなります。塵を多く伴っていたエンベロープがなくなることで、中心星から出された放射が顕著になり近赤外線でも最も明るくなりますが、降着円盤などにより中間赤外線でも強い放射は見られます。最終的（class III）にはアウトフローはなくなり、降着円盤もぼんやりと（光学的に薄く）なってきます。そのため、この段階でのエネルギー放射は、星そのものから出される黒体放射に近づき、その後、これらの星は主系列星へと移行していきます。

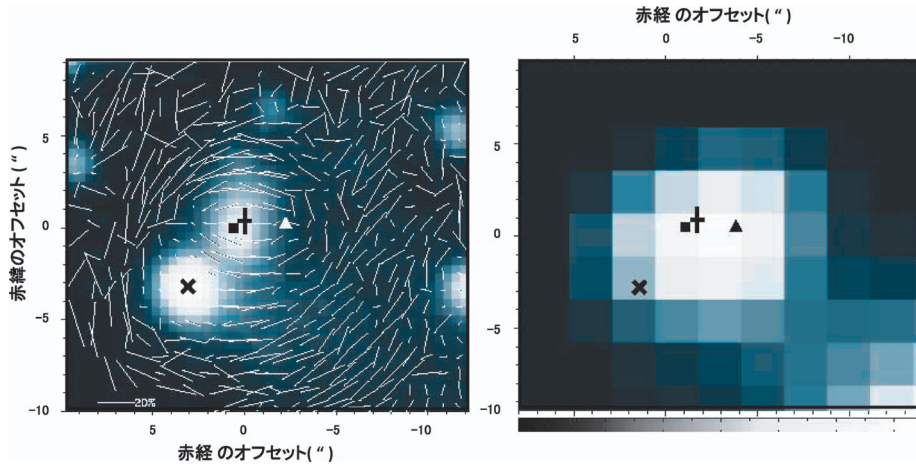


図2 GGD12-15の観測結果。(左) IRSF/SIRPOLによるKsバンド強度図に偏光ベクトル(長さ 偏光度, 向き 偏角)を重ねたもの。(右)『あかり』/赤外線カメラによる7 $\mu\text{m}$ の強度図。+はIRS9Mの中心位置, ×はIRS9Eの中心位置, ■は電波源の位置, ▲は水メーザー源の位置を示している。

## 2. 原始星における赤外線観測

1章でも述べたとおり、前主系列星は、主系列星と比べて低温で、かつ、さまざまな星周構造を伴っているため、赤外線域で明るくなります。また、その段階によって、エネルギー放射の分布も異なってきます。特に原始星は、周囲に多くの塵やガスを伴っているため、近赤外線だけでは暗く、検出が難しく、中間赤外線より長い波長域での観測が不可欠となってきます。『あかり』衛星は2-180 $\mu\text{m}$ の広い波長帯での観測可能な装置が搭載されていました。観測装置の一つ、赤外線カメラ(IRC)では、近赤外線から中間赤外線の撮像観測と分光観測を行うことができます。特に撮像観測からは、さまざまな波長帯での明るさを測定することができ、どの波長帯で最も明るいのかを知ることができるため、星の進化段階を限定することが可能です。『あかり』衛星・赤外線カメラのように広い波長域での観測を行うことで、前主系列星の進化を知る手がかりを得ることができるのです。

今回は、赤外線カメラの中でも、近赤外線域(3, 4 $\mu\text{m}$ )、中間赤外線域(7, 11 $\mu\text{m}$ )での観測結果を用いて、それぞれの明るさを求めたことから、

ある星団中のメンバーでこれまで着目されていなかった若い星の進化段階を決定づけることができ、その領域の活動性の原因となる重要な役割を果たしていることが判明しました。

## 3. 星形成領域 GGD12-15

オリオン座のすぐそばに、いっかくじゅう座という星座があります。この星座の領域には、さまざまな星形成領域が存在しており、今回はその中でも、よく研究されている星形成領域GGD12-15についての観測の結果を紹介します。GGD12-15とは、ハービッグハロー天体で、それらを含む星形成領域を指します。この領域は、H II領域や水メーザー源、アウトフローなどの星形成が活発である証拠が観測的に見つかっています。H II領域や水メーザー源は、星からの放射が周囲のガスへ影響することで生成される天体で、これらが存在するということは、ガスの中のどこかで生まれたばかりの星があることを示しています。アウトフローも、先述のとおり、若い星(class I, II天体)を伴っているため、その領域で星形成が行われていることを示唆する天体です。さらにこの領域では、電波観測から一酸化炭素ガスが濃く分布して

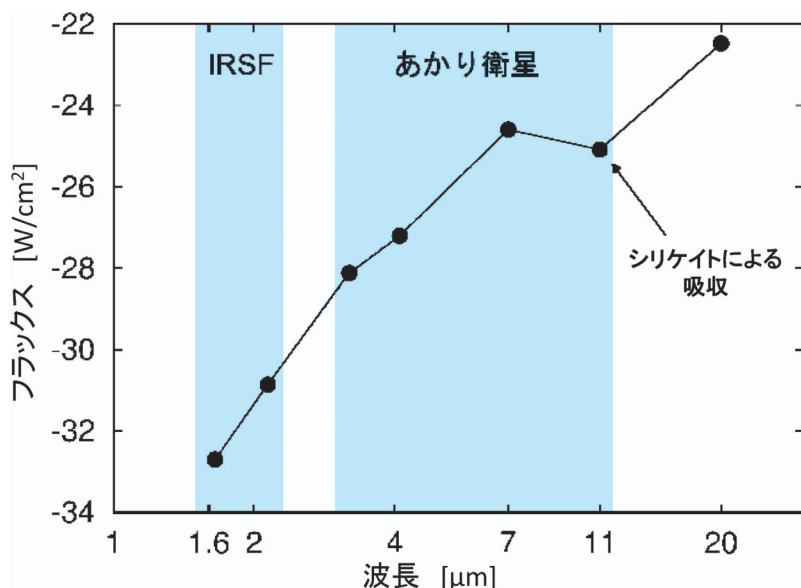


図3 IRS9Mにおけるエネルギー分布図. 11  $\mu\text{m}$ ではシリケートの吸収が見られる. 20  $\mu\text{m}$ のデータは, Harvey et al. (1985)の値を参照.

いることがわかっています. その濃い分子ガス領域に, 赤外線観測から多くの星の集合体も見つかり, 星形成の現場が直接観測されています. ただし, オリオン領域とは異なり, O型星のような星団全体に大きな影響を及ぼす可能性のある重い星は存在していません. このため, 星団の個々の若い星の進化を調べるにも適していると考えられます.

#### 4. GGD12-15 領域における観測

『あかり』衛星では, GGD12-15 領域における赤外線カメラでの 3.2, 4.1, 7.0, 11.0  $\mu\text{m}$  の撮像観測を行いました. 赤外線カメラの視野は, 約 10 分角  $\times$  10 分角の大きさで, 星形成領域によっては全体を一度に撮像することが可能です. 2006 年の打ち上げからすでに 3 年が経った後でも, 近赤外線での観測が続けられており (2009 年 5 月現在), 星形成領域における観測も数多く行われてきました.

また, GGD12-15 領域に対して地上での近赤外線観測も行ってきました. 『あかり』衛星・赤外線カメラによる 3-11  $\mu\text{m}$  の波長域の観測と 1-2  $\mu\text{m}$

の近赤外線域の観測を合わせることで, 多くの波長帯における若い星の明るさを知ることができます.

南アフリカ共和国・北ケープ州にある, 南アフリカ天文台サザーランド観測所には, 日本の近赤外線望遠鏡があります. 名古屋大学/国立天文台が所有する IRSF1.4 m 望遠鏡には, 近赤外線の観測装置 SIRIUS が備え付けられています. SIRIUS は, J (1.25  $\mu\text{m}$ ), H (1.63  $\mu\text{m}$ ), Ks (2.14  $\mu\text{m}$ ) の三つの波長帯を同時に撮像できる装置であり, 約 8 分角  $\times$  8 分角の広い視野をもつのが特徴です. また, SIRIUS に偏光装置を合わせた SIRPOL という装置を用いての近赤外線偏光観測も行うことが可能です. GGD12-15 領域でも観測が行われてきました. 偏光とは, 特定の方向に振動する光のことを言います. 星から放出された光は, 偏光はしておらず (無偏光), 周囲の塵による散乱や, 星間空間にある塵に吸収されることで, 特定の方向に偏光をもちます. 中心星から出された光は, 星の周囲の塵によって散乱され, 光の進行方向に垂直な偏光を示します. こうしてできる偏光のパターンか

ら、星の周囲に存在する塵の分布がわかり、塵に埋もれた星の位置を特定することができます。また、星間空間に存在する磁場によって、非球形の星間塵は磁場に垂直に整列し、そこを通過する無偏光な光は星間塵の長軸方向に選択的に吸収されるため、星間塵に垂直な、つまり、磁場に平行な偏光をもって光は透過します。そのため、その領域の磁場の方向を知ることが可能です。このように、偏光観測からは、多くの天体の情報を知ることができ、とても重要な観測の一つと言えます。

## 5. アウトフローの励起源

GGD12-15 領域には、一酸化炭素輝線の電波観測から大局的なアウトフローが存在することが知られていました。アウトフローの中心部には、水メーザー源や H II 領域など、特徴ある天体が存在していることから、アウトフローの起源になっている天体についての多くの研究がなされてきました。アウトフローの詳細な構造から、H II 領域より水メーザー源付近にその起源が存在すると考えられてきましたが、その正体について決着はついていませんでした。電波観測から水メーザー源のごく近傍に電波源の存在が確認されていましたが、IRSF・SIRPOL による観測でも水メーザー源付近に二つの近赤外線源 IRS9E/IRSM が検出されました。過去の赤外線観測でも IRS9E/IRS9M は観測されてきましたが、精度が不十分だったために、水メーザー源や電波源が二つの赤外線源の中心に位置しているかのように観測されており、これらの天体は正確な位置関係を築けていませんでした。今回、IRSF・SIRPOL による偏光観測から、IRS9E は点源天体で、IRS9M は双極状の構造を伴う塵に埋もれた天体であることがわかりました。前章にありますように、偏光観測からは、星の周囲の塵の分布や塵に埋もれた星の位置を精度良く知ることができます。IRS9M は、J バンドでは検出できず、Ks バンドで明るいため、若い天体であることは予測できました。IRS9M 周囲の双

極状の偏光のパターンからは、埋もれた IRS9M の位置を測定することができ、その位置は、アウトフローの起源となる電波源とほぼ一致し水メーザー源からも 2 秒ほどのとても近傍にあることがわかりました。つまり、この IRS9M も大局的なアウトフローの起源の有力候補であることがわかったのです。

さらに、『あかり』衛星・赤外線カメラによる 3-11  $\mu\text{m}$  の観測から、この興味深い天体における重要な性質を示す結果を得られました。1 章や 2 章でもありますように、アウトフローを伴うような若い星がどの進化段階であるか示すためには、多くの波長帯での明るさを測定し、どの波長で明るくなるのかを知る必要があります。IRSF による H バンドと Ks バンドの測光の結果と、『あかり』衛星による 11  $\mu\text{m}$  までの測光結果を合わせて、IRS9M の放射強度の分布図を作成したところ、その傾きから、class 0/I 天体であることがわかりました。今回は、過去の観測結果 (20  $\mu\text{m}$ ) も加えて、1.6-20  $\mu\text{m}$  までのエネルギー分布を作成しましたが、これからは、どの波長で最大のエネルギーをもつのかを知ることはできません。しかしながら、class II 天体は、近赤外線 (数  $\mu\text{m}$ ) でエネルギー分布のピークをもつため、長い波長ほど大きなエネルギーを放出しているこの IRS9M は、class II 天体であるはずがありません。一酸化炭素の観測で求められたアウトフローの年齢は、class I 天体程度 ( $\sim 10^5$  年) であるという結果が求められており、今回の IRS9M が class I/0 天体であることは、この天体こそがアウトフローの起源の天体であるということを示す重要な結果になりました。

今回のように近赤外線～中間赤外線の観測からだけでも、エネルギー分布の傾きを計算することで、その天体の進化段階を特定することができます。IRSF・SIRPOL による近赤外線偏光観測からはアウトフローを伴う天体の検出とその位置決定ができ、『あかり』衛星・赤外線カメラによる中間

赤外線までの観測からは天体の明るさ（エネルギー）の測定と天体の進化段階の特定ができました。

GGD12-15 領域には、ほかにも特徴ある天体が多く存在しています。それらの天体に対しても、あかり衛星の中間赤外線観測の結果を用い、進化段階を特定することで、この集団的星形成領域の環境下でいかに原始星が形成してきたかを知る一つの重要なバロメーターになると考えています。この領域に限らず、他の星形成領域でも原始星の生まれる環境の違いなどに着目し、星がどのように生まれてくるのかの研究を統計的にも進めることができると期待しています。

## 6. 最後 に

『あかり』衛星・IRC 関係の皆様、『あかり』星形成グループの皆様、IRSF/SIRPOL 開発グループの皆様、その他数多くの皆様に、多岐にわたってご支援・ご協力いただき、またこのようなすばらしい観測をさせていただいたことをたいへん感謝します。今後も、興味深い成果を報告できるように努めてまいります。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- 1) Lada C. J., 1987, IAU Symp. 115, 1
- 2) Onaka T., Matsuhara H., Wada T., et al., 2007, PASJ 59, S401
- 3) Nagayama T., et al., 2003, Proc. SPIE 4841, 459
- 4) Kandori R., et al., 2006, Proc. SPIE 6269, 159
- 5) Sato Y., Tamura M., et al., 2008, PASJ 60, S429
- 6) Gomez Y., Rodriguez L. F., Garay G., 2000, ApJ 531, 861
- 7) Harvey P. M., et al., 1985, ApJ 288, 725

### The Evolution of a Protostar decided with the AKARI

Yaeko SATO

*The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Munetaka UENO

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

Motohide TAMURA

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

Akiko KAWAMURA

*Department of Astrophysics, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan*

Abstract: We present results of mid-infrared imaging of the GGD12-15 region with the AKARI and the infrared camera. The region is a star formation region with a CO outflow. We can decide the exciting source of the outflow is a class I/0 source by a spectral energy distribution using photometric data from 3 to 11 micron with the AKARI and H-band (1.6 micron) and Ks-band (2.2 micron) with IRSF/SIRPOL in South Africa. Thus, the classification of young stellar objects is very important to discuss statistically about clusters of stars and environments of star forming regions.