

謎だらけの大質量星形成に挑む

岡本美子

〈北里大学一般教育部 〒228-8555 神奈川県相模原市北里 1-15-1〉

e-mail: okamtoys@cc.nao.ac.jp

大質量星の生まれる現場は、非常に埋もれて込み合っているため、減光に強い長い波長帯での高空間分解能な観測が必要になります。中間赤外線というすばるで最も長い波長を受け持つ COMICS は、このような埋もれた領域を高解像度で見るのに適しています。このような、すばるをはじめとする高空間分解能観測が、今、大質量星形成の研究を急激に活発にしています。

1. 大質量星形成はわからないことだらけ

星がどのように生まれ、どのように死んでいくのか。これは天文学の大きな興味の一つです。なかでも、O型星と早期B型星に分類されるような、太陽に比べて8倍程度よりも重い星（大質量星）は、紫外線で強く光って電離(HII)領域を形成したり、最期には超新星爆発を起こし、星間物質を重い金属元素で汚染したりと、星の中でも極めて活発な性質を示します。また、遠くの銀河を見たときには、大質量星が最も明るく見えますから、銀河の活動性を調べるのにも大質量星がどのように生まれるのかは興味深い問題です。

ところが大質量星の形成はわからないことだらけです。小質量星の場合には、暗黒星雲の分子雲コアから星に至るまでの大まかなシナリオができており、観測される天体との対応づけもよくなされています。一方の大質量星では、降着円盤から物質が星に降り積もることで直接形成されるのかどうかもまだ議論されています。

大質量星がどう生まれるかを観測から明らかにするには、長い波長域での高空間分解能観測が必要です。これは、大質量星形成は減光が非常に大きいところで起こること、大質量星は必ずほかのもっと軽い星や重い星などとともに関係（クラス

ター）で生まれること、大質量星が生まれている場所が遠いこと（一番近いオリオン領域でも低質量星形成領域として有名なおうし座領域の3倍も遠い!）、によっています。すばるの中間赤外線観測装置 COMICS は、10~20ミクロン帯で、0.3~0.6秒角という高空間分解能の観測が実現できる（5キロパーセクの天体について1,500~3,000天文単位の距離を分解）ことから、大質量星形成領域の観測にはとても適しています。

大質量星形成について具体的に何がわかっていないのでしょうか。おおざっぱに言えば、(1) 観測研究を進める上での仮説となるような大まかな進化シナリオが確立されていない、(2) 観測される各種天体と大質量星形成の各段階との対応づけが進んでいない、(3) 生まれた/生まれつつある大質量星の質量がよくわからない、の3点になるでしょう。

(1) については、大質量星が円盤を通した物質の降着と、一度できた軽い星どうしの合体のいずれで形成されるのかがまだ議論になっています。そもそも合体形成とは、大質量星では中心星からの強い放射が、物質の降着を妨げてしまい重い星は作れないのではないかということで考えられました。これに対し、最近ではB型星の周りに回転分子ガス円盤を発見したと主張する論文もいくつか出てきていますが、まだ確定的なところまで

はきていません。

(2) については、性質が比較的わかっている若い大質量星として超コンパクト HII 領域 (Ultra Compact HII 領域, 以下 UC HII 領域と呼びます) とホットコア (高温分子コア) があります。UC HII 領域は、紫外線で光り始めた大質量星が作った 0.1 パーセク程度の高密度な電離領域で、IRAS 衛星の観測から、銀河系内に 1,600 個ほど存在することが分かっています²⁾。ホットコアは、アンモニアなどの電波分子輝線で観測される 0.1 パーセク程度の温かい (100 K 以上程度) 高密度分子ガスの塊で、UC HII 領域に進化していく前駆体と考えられています。まだ数十個しか見つかりません。このほかにも、大質量アウトフロー、各種メーザ源、サブミリ連続波で光っている低温ダスト塊などさまざまな天体が大質量星形成領域では観測されます。現在は、各天体の性質を詳しく調べ、またより若い天体を探す努力が進められています。

(3) については、生まれた星の質量は星形成の質量依存性などを考える上で極めて基本的なパラメータですが、実際のところ質量を決めることはかなり難しい問題です。周りのガスが晴れてしまえば星自身が見えるようになりますが、生まれつつある星を直接見通すことはなかなかできません。ホットコアやそれ以前になると、ほとんど質量を決められていないのが現状です。

2. COMICS で探る大質量星形成

われわれのグループでは、これらの大質量星形成の問題に COMICS を使った観測で取り組んできました。ここではそれらを簡単に紹介します。

2.1 撮像する：円盤や若い大質量星を探す

最近では円盤の観測例などが出てきたこともあって、大質量星形成についても降着形成がかなり優勢になってきました。このような降着説円盤、アウトフロー、エンベロープなどの構造は、お互いに相互作用しあって決まっているはずで

す。ダストは大質量星形成領域に多く含まれ特に星近傍では加熱されているので、中間赤外線域での高空間分解能撮像で温かいダストの分布を詳しく調べてやれば、生まれつつある大質量星の周りに様子に迫ることができます。これまでの UC HII 領域の撮像観測からは、電離ガスのフローによってダストがはき寄せられてアーク状に分布しているものや、双極型の構造を持つものなど、さまざまな様子が見えてきました (図 1)。

大質量星近傍の構造を見るととき特に興味深いのは、大質量星形成に伴う降着円盤が見えるか、という点です。国立天文台の藤吉拓哉氏を中心とするグループでは、COMICS 撮像による円盤構造の探査を行っており、これまでに大質量原始星 NGC2264 IRS1 で、25 ミクロン放射が点源よりも広がっているのを見いだししました (図 2)。この広がりが降着円盤によるものかどうかについては今後さらに詳しい観測が必要ですが、これは、すばると COMICS の回折限界を実現する高空間分

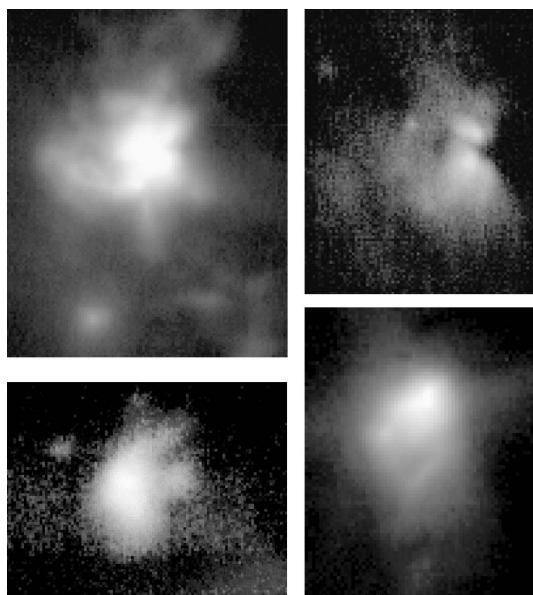


図 1 COMICS によるいろいろな UC HII 領域の 10 ミクロン帯イメージ。
G45.12+0.13 (左上), G35.20-1.70 (左下).
G33.92+0.11 (右上), K3-50A (右下).

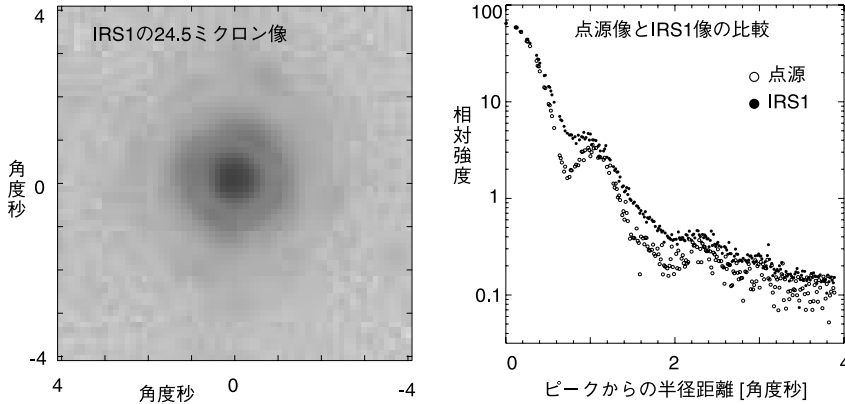


図 2 大質量原始星 NGC2264IRS1 の 24.5 ミクロン像 (左) とその動径方向プロファイルの点源との比較 (右)。IRS1 の動径方向の分布が点源よりも広がっていることがわかる。

解能あってこそ実現した観測といえます。

一方、若い段階を追求していくという面から見ると、特に 20 ミクロン帯での深い撮像は、まだまだ埋もれていて UC HII 領域には至っていないような若い大質量星を探するのに使えます。実際、この方法を使ってホットコア候補の探査を行っているグループもあります³⁾。

2.2 分光する：質量を決める

大質量星形成において、星の質量を決めるのはとても重要で難しい問題です。われわれは UC HII 領域の段階で大質量星の質量を推定する観測的研究を COMICS を用いて行ってきました。詳しくは天文月報 2002 年 3 月号に紹介したので省きますが⁴⁾簡単にいうと以下ようになります。

UC HII 領域の段階でも、まだ直接光球放射を見通すことはできませんから電離領域からの放射を調べることで、もとの星からの紫外線放射場の様子を探ります。一つにはどのくらい電離放射が強いかわかる電波連続波強度から測って、対応する星の質量を求められますが、これでは領域にある星の一つではないときには星の質量を過大評価してしまいます。そこでわれわれは、電離エネルギーが違ういくつかのイオン輝線から領域の紫外線放射の「硬さ」を求めることで質量の推定をしました。おあつらえむきにこのようなイオン輝線というの

は中間赤外線域に多く存在し、特に [NeII] (12.8 ミクロン)、[ArIII] (8.99 ミクロン)、[SIV] (10.51 ミクロン) 輝線が強く観測されます。それぞれの輝線は Ne^+ , Ar^{2+} , S^{3+} イオンから放射されますが、各イオンはそれぞれ、22, 28, 35 eV の電離エネルギーで形成されます。われわれは、COMICS の低分散分光機能を用いた UC HII 領域のこれらの輝線マッピングなどから、これらの輝線強度比がモデル予想とかなりずれていることを見だし、電離フラックス予想に用いられている大質量星大気モデルが実際とずれているか、UC HII 領域は単一ではなく複数の星に電離されている可能性があることを示しました^{5), 6)}。さらに、COMICS の 0.4 秒角程度の空間分解能を活用して、実際に K3-50A という UC HII 領域で電離星が複数存在していることを空間分解輝線マッピングによって示しました⁶⁾。その後、ISO 衛星による UC HII 領域のアーチャー分光のデータ解析が進み、輝線の観測データも増えてきています。観測を行った Peeters らのグループでは、電離領域の輝線放射が領域の局所的な金属量にかなり依存することを示しました。また、最近では UC HII 領域の電離星と思われるソースの近赤外線分光によってスペクトル分類を行う研究を進めているグループもあります。今後、これらの多波長の観測

を統合することで、より正確に大質量星の質量を決定できるようになれば、大質量星形成過程の質量依存性についての研究が一步進むでしょう。

2.3 高分散分光する：星の周りのガス運動を調べる

COMICS は、撮像と低/中分散分光機能（波長分散 250~2,000）のほかに、波長分散 10,000（速度分解能にして 30 km/s 相当）の高分散分光機能を備えています。COMICS の場合にはエッセル型ではなく、輝線フィルターで次数分離することで、波長域は制限されるもののロングスリットでの高分散分光を行うように作られています。これによって、輝線の運動速度などの空間分布を、高い空間分解能 (0.4 秒角) で調べることができます。現在、先に述べた 3 輝線 ([NeII], [ArIII], [SIV]) のフィルターでの高分散分光が可能です。

速度分解能 30 km/s とは、波長方向のナイキストサンプリングから述べた値ですが、実際にはロングスリット分光によって輝線プロファイルの空間方向変化がとれますから、電離輝線の中心速度や速度幅の空間変化はもっと細かく調べることができます。また、例えば UC HII 領域の水素電波再結合線などは 20 km/s から 60 km/s ほどの速度幅を持つことが観測されており⁷⁾、電離領域ではかなりの威力を発揮します。電波域の再結合線に比べて COMICS 観測が持つメリットとしては、0.4 角度秒という極めて高い分解能がたやすく実現できることと、水素電離ガスでは電離領域全体を見てしまうのに対し、水素よりも高い電離エネルギーで形成されたイオンの輝線を使えばより大質量星近傍の電離状態の高い部分をトレースできることが挙げられます。これまでにわれわれは、試験観測を含めて 4 個の UC HII 領域の [NeII] 輝線の高分散分光観測を行い、すべての天体で、中心速度や速度幅の空間変化があることを見いだしました (図 3)。観測天体の中心速度の変化は 10~30 km/s にわたります。

ここでは G45.12+0.13 の例を紹介します。こ

の領域は、センチ波で UC HII 領域が 5 秒角サイズに広がっており、その北東と南西に、2 角度分スケール (UC HII 領域の 10 倍以上の広がり) の CO 分子アウトフローが観測されています。COMICS で [NeII] 高分散分光を行った結果、UC HII 領域中でアウトフローと同じ方向に、Ne⁺ ガスの速度幅が大きくなっていることを見いだしました (図 3f)。これは、過去のアウトフロー活動に伴ってガス密度が低くなった双極の中抜け構造が大質量星の近くにできており、Ne⁺ ガスの膨張流出がその方向により激しくなっているためではないかと考えています。実際、このような中抜け構造の壁部分に物質がはき寄せられたような跡が、中間赤外線のダスト放射イメージ上のアーク構造として見えています (図 1 参照)。つまり、この領域では、大質量星の周りに小質量星に似た、双極方向の低密度領域と、それに垂直な方向に分布したエンベロープのようなやや高密度な領域が存在していると推測されます⁸⁾。これらの結果は、大質量星が形成する際に、小質量星と同じように極に垂直な方向に高密度な物質分布を持つ構造の段階を経ることを示唆しており、大質量星形成過程を考える上で、興味深い結果です。

3. 系外銀河への応用

大質量星形成と銀河の活動性とは密接に関係していますから、ここまで述べてきたような中間赤外線観測は、可視光では見えない、系外銀河での埋もれた星形成活動の観測にも応用できます。

なかでも大質量星形成の観点から最も興味深いのは、埋もれた超星団の観測でしょう。超星団とは、可視光で見えるコンパクトで非常に明るい、大質量星を多数含む若い大規模星団です。最近、NGC5253 や Henize 2-10 などの系外銀河において超星団の前駆体と考えられる非常にコンパクトな中間赤外線源やセンチ波源が高空間分解能撮像によって見つかってきました^{9), 10)}。これらの放射源ではセンチ波と 10 ミクロン放射がかなりよく

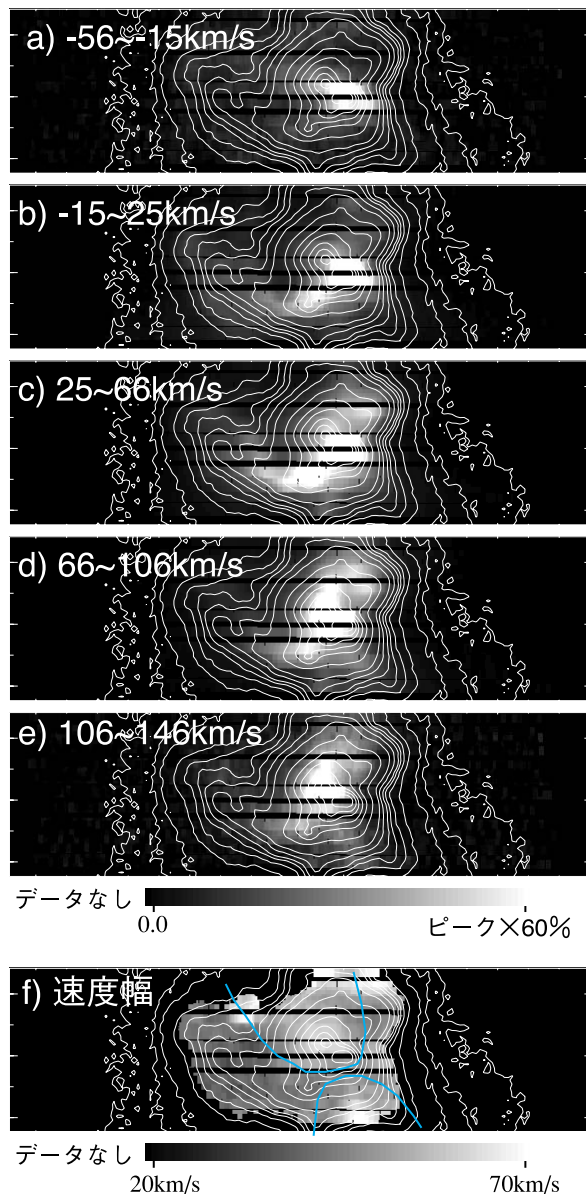


図 3 G45.1+0.13 の [NeII] 高分散分光によるマップ (いずれの絵でも白の等高線は 11.7 ミクロンでの撮像マップ). 約 5 秒角×19 秒角. 1 秒角は実距離で 9,500 天文単位に対応. (a)~(e) 各 LSR 速度での輝線の強度分布 (チャンネルマップ, グレースケール). 速度によってかなり分布が異なるのが見えてきたのがわかる. (f) [NeII] 輝線の速度幅の分布 (グレースケール). UC HII 領域の中心部から北東と南西の方向 (図で青い線で示した楕型に囲んだ内側の領域) に速度幅が大きくなっている. これは CO アウトフローが出ている方向に一致している.

一致し、埋もれた電離領域の存在を示唆します. 各放射源の大きさは数パーセク、電子密度は 10^5 cm^{-3} で、センチ波領域で銀河系内の UC HII 領

域によく似た形の SED を持ち、センチ波よりも長い波長で光学的に厚い制動放射であることがわかります. センチ波フラックスは銀河系内の大質

量星クラスター W49A の 10 分の 1 から 10 倍以上まで分布しており、これは大質量星形成の規模は連続的であることを示しています。また、UC HII 領域で見られた [NeII] などの O 型星が作る高電離輝線も観測されます。電離光度は明るいもので $10^{52\sim 53}$ 個毎秒程度にもなり、例えば O7 型星 1 個が放射する電離光度は毎秒 10^{49} 個ですから、これらの天体は非常に小さいサイズの中に数千個もの O 型星を含んでいると考えられます。

これらの中間赤外線源は、種々の性質の類似性から、数十から数千個の大質量星クラスターに対応した、銀河系内 UC HII (ultracompact HII) 領域の大規模版と考えられるため、超高密度 (ultradense) HII 領域と呼ばれることがあります。また超星団は、年齢が数百万年以上ですすでに母体分子雲が晴れて可視光で見えるようになったものですが、超高密度 HII 領域は、年齢数十万年程度のまだ埋もれた生まれつつある超星団だとの考えから埋もれた超星団とも呼ばれます。NGC5253 の場合、超高密度 HII 領域からの 10 ミクロン放射は、銀河全体のその 90% にも上り、今後、中間赤外線域の高空間分解能撮像を行うことで、超高密度 HII 領域を探せる可能性があります。また、UC HII 領域に適用したのと同様の分光観測によって、それらの若い領域の電離ガスやダストの性質を詳しく調べられます。われわれのグループでは、東京大学の尾中 敬氏を中心に、すばる共同利用を使って、このような超高密度 HII 領域を含む天体の観測をこの冬から開始しています。

4. おわりに

現在、大質量星形成の研究は系内天体・系外銀河の両方について急激な発展途上にあります。ここでは、中間赤外線・サブミリ波・電波連続波・分子線など長波長域での高感度・高空間分解能観測が大きな役割を果たしており、COMICS は中間赤外線域で現在世界最高の装置として、この分野でのさらなる活躍が望まれています。

謝 辞

本研究は、COMICS グループとの共同研究により行われたものです。グループの皆様、すばるスタッフの皆様、その他お世話になった皆様に謝意を述べたいと思います。

参考文献

- 1) Zhang Q., Hunter T. R., Sridharan T. K., 1998, ApJ 505, L151 など
- 2) Wood D. O. S., Churchwell E., 1989, ApJ 340, 265
- 3) de Buizer, et al., 2002, ApJ 564 L101
- 4) 岡本 美子, 2002, 天文月報 95, 134
- 5) Okamoto Y. K., et al., 2001, ApJ 553, 254
- 6) Okamoto Y. K., et al., 2003, ApJ 584, 368
- 7) Garay G., Lizano S., 1999, PASP 111, 1049
- 8) Okamoto Y. K., et al., 2003, IAU Symposium 221, Star Formation at High Angular Resolution, ed. by M. Burton, et al., electronically published at www.phys.unsw.edu.au/iau221
- 9) Kobulnicky H. A., Johnson K. E., 1999, ApJ 527, 154
- 10) Vacca W. D., Johnson K. E., Conti P. S., 2002, AJ 123, 772

Search of Massive Star Formation with COMICS

Yoshiko K. OKAMOTO

Institute of Physics, Center for Natural Science, Kitasato University 1-15-1 Kitasato, Sagamihara, Kanagawa 228-8555

Abstract: Mid-infrared observations is useful for studies of massive star formation. Especially COMICS offers powerful tools: imaging survey of the circumstellar structures of forming massive stars such as massive disks and cavity structures, mass estimate from spectroscopy of fine structure lines, and high dispersion spectroscopy to census gas motion around formed stars. COMICS will open the next generation infrared studies of massive star formation.