

大質量星形成初期段階の統計的研究



森井 嘉穂^{1,2}

〈¹ 東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈² 国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kaho.morii@grad.nao.ac.jp

太陽の8倍以上の質量をもつ大質量星の形成過程の解明には、初期条件の理解が不可欠です。大質量、高密度かつ赤外線点源をもたない赤外線暗黒星雲は、そんな大質量星の誕生現場として期待されています。アルマ望遠鏡による高分解能高感度観測により、小質量星形成領域に比べ約30倍遠方に位置する赤外線暗黒星雲に対しても、高密度分子雲コアの性質が調べられるようになりました。赤外線暗黒星雲39領域のサーベイ観測の結果、839個の分子雲コアを同定し、初期にできるコアは自身で大質量星を形成できるほど重くなく、今後成長する必要があることを明らかにしました。

1. 大質量星形成

太陽の8倍以上の質量をもつ星、大質量星は強力な紫外線放射や星風、巨大な分子流、超新星爆発などによって、周囲の星間空間に膨大なエネルギーを放出する、星・星団形成、銀河進化などにおいて重要な天体です。大質量星が一生涯の最期を迎えると、超新星爆発を起こし、鉄よりも重い重元素を生成し、ブラックホールや中性子星の誕生

につながります。そんな大質量星ですが、小質量星と比べて、寿命が短く存在数が非常に少ないこと、太陽から遠くにしか存在していないこと、また集団で誕生するためにその形成現場は混雑していること、という観測的困難さがあり、大質量星の誕生・形成環境の研究は小質量星形成に比べて遅れをとっています。

そもそも星はどのようにできるのでしょうか。図1は、星の誕生の場である低温高密度な水素分

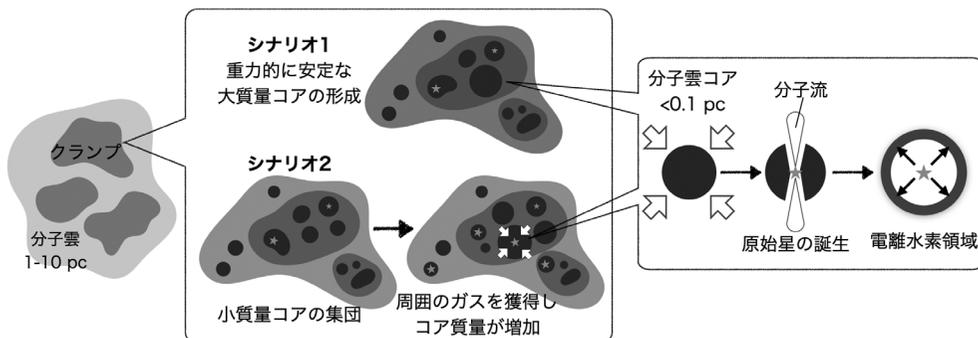


図1 星形成（特に大質量星形成過程）の概念図。分子雲内の高密度領域はクラumpと呼ばれます。本研究では、まだ星形成が始まっていない（赤外線が暗い）赤外線暗黒星雲に埋め込まれた高密度クラumpを観測対象とします。

子を主成分とする雲（分子雲）での、大質量星が形成される様子を表した概念図です。分子雲の中で密度が高い領域（クランプ）の中で形成されたコンパクトな構造（分子雲コア）が自身の重力によってつぶれ、圧力で重力を支えた星の赤ちゃん（原始星）が誕生します。外側に取り残されたガスはその後、原始星に降り積もったり、分子流という質量放出現象で掃き出されたりして、だんだん星質量が増加していくという流れです。分子雲コアのうちすべての物質が原始星に取り込まれるわけではありません。多くは星形成過程で分子流として放出され、原始星になるのは分子雲コア質量の30-50%程度だと言われています。もし大質量星が誕生した場合、強い放射によって周囲のガスは電離され、電離水素領域が形成されます。本稿では、1-10 pcの構造を分子雲、0.1 pc以下のコンパクトな構造を分子雲コア、そして分子雲内の中間的な構造（ ≤ 1 pc）をクランプと定義します。

これまでの天文月報にもまとめられているように [1, 2]、大質量星形成が小質量星形成と異なる点の一つは、星の材料を、効率よく短時間で集める（高い質量降着率を達成する）必要があるという点です。より大質量の星を形成するには、それだけ多くの材料が必要です。また、形成される星の放射圧に打ち勝つためには、小質量星形成の場合より2-3桁ほど高い降着率（ $\sim 10^{-4}-10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ）が必要だと考えられています。しかし、単にガスが集まっているだけでは、大質量な構造は自己重力の作用で分裂してしまいます。分裂によって形成される分子雲コアの典型的な質量（ジーンズ質量）は母体分子雲の密度や温度に依存しますが、例えば、典型的な温度（ ~ 10 K）と密度（ $\sim 10^3 \text{ g cm}^{-3}$ ）の場合、分裂してできる分子雲コアの質量は $\sim 1-10$ 太陽質量程度であり、大質量の星を形成するために必要と考えられる数十太陽質量よりはるかに小さくなってしまいます。

いかに大量のガスを集め一気に収縮させるのか、分裂がどのように抑制されるのかはいまだわ

かっておらず、原始星誕生前後の星形成初期段階の理解が求められています。理論的な大質量星形成モデルの議論は20年以上前から、大きく二つに分けて行われてきました。一つ目は、単一の大質量コアが暴走的に収縮するというモデルです（図1内シナリオ1） [3]。例えば、分子雲コアが30%の効率で星になると仮定すると、8太陽質量以上の星をつくるためには約30太陽質量以上が必要で、このシナリオでは、このような大質量コアが磁場や超音速乱流によって分裂が抑制される初期状態を予想しています。もう一方は、分子雲内で分裂によってジーンズ質量程度の小質量コアの集団が形成され、それらが競争的にガスを奪い合うことで、効率よくガスを獲得できたものが大質量星となるというモデルです（図1内シナリオ2） [4, 5]。ガスをどのように効率よく獲得するのかについてはいくつかのモデルが考えられており、未だ議論が行われています [5, 6]。このような理論モデルに制限を与え、形成モデルを構築するには、大質量の原始星が形成される前、すなわち初期段階の分子雲コアやその周辺環境を調べるのが重要です。

2. 大質量星の誕生現場

2.1 赤外線暗黒星雲

大質量星が誕生する現場の最有力候補としてとして期待されているのは、赤外線暗黒星雲という領域です。濃く、多くのガスが集まっている分子雲で、その中に含まれる濃い塵が、背景の明るい銀河面放射を吸収することで、赤外線観測でシルエットのように見える天体です（図2）。

単に赤外線暗黒星雲といっても、その進化段階は様々です。すでに若い大質量原始星が誕生しているものもあれば、星形成活動の兆候が全くみつかっていないものもあります。どのような段階にあるかを判断する一つの指標は、中間赤外線点源の有無です。若い大質量原始星が誕生していると、中間赤外線で明るい光源が見られ、中間赤外

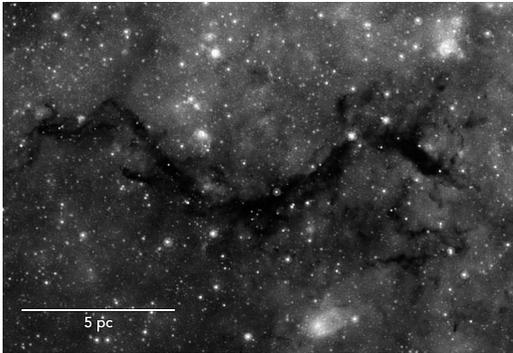


図2 赤外線暗黒星雲G11.11-0.11のスピッツァー宇宙望遠鏡による赤外線3色合成画像 (3.6 μm , 8 μm , 24 μm) [出典NASA/JPL-Caltech S. Carey (SSC/Caltech)]

線や遠赤外線でさえ光源をもたないものはまだ大質量原始星が誕生していない可能性が高いと考えられ、星なしクランプと呼ばれます。具体的には、スピッツァー宇宙望遠鏡やハーシェル宇宙望遠鏡の赤外線観測データ（観測波長24 μm , 70 μm など）を使って進化段階の分類が行われてきました [7, 8].

ただ、これら宇宙望遠鏡の観測では点源がみつからなくても、感度が足りないだけで小質量の原始星はすでに誕生している可能性は否定できません。また、すべての赤外線暗黒星雲が大質量星を形成するというわけではありません。大質量星が存在する領域と、小質量星のみが存在する領域との比較から、経験則的に大質量星を形成するために必要な質量や密度の条件が導かれています*1。大質量星を形成している領域と同程度の質量や密度をもち、かつ中間赤外線や遠赤外線の点源をもたない天体こそが、大質量星誕生現場の最有力候補と考えられるわけです。

2.2 アルマ望遠鏡の必要性

大質量星なしクランプの観測における問題のひ

どつは、それらが豊富に存在するわけではないということです。例えば、ハーシェル宇宙望遠鏡の銀河面サーベイ観測では3500個程度の赤外線暗黒星雲内のクランプが同定されましたが、その中で波長24 μm や70 μm の観測で暗いものは11%程度しかなく、その中でも大質量星の条件を満たすものはより限られます [11]。数が少ないということは、言い換えると遠くまで研究対象範囲を広げないと存在しないということです。このような大質量星なしクランプ候補は、小質量星の形成場所と比べた場合、大体30倍遠くに存在します [12]。遠くにあり、かつ濃いガス塊に埋め込まれた分子雲コアの性質を研究しようと思うと、高い空間分解能、そして高感度な観測が必要です。

アルマ望遠鏡以前もいくつかの大質量星なしクランプ候補における分子雲コアの探査は行われていましたが、アルマ望遠鏡の高性能な観測により、0.1 pcを十分に分解して、1太陽質量以下のコアをも同定できるような、赤外線暗黒星雲、特に大質量星なしクランプ候補の内部構造の研究がよいよ可能になってきたのです。

3. ASHESサーベイ

これまでの大質量星なしクランプのアルマ望遠鏡を用いた観測は、有名領域に限定したケーススタディが主流でした。1, 2領域の観測を行い、大質量星なしコアの有無や、分裂やガスの運動を詳細に調べることで大質量星形成の初期段階を解明しようというものです。ただ、クランプの環境に依らない典型的な分子雲コアの性質を調べたり、数が少ないと考えられる大質量コアの議論をする場合には、数多くの領域を観測し、大量のサンプルを扱う必要があります。そこで我々は、ASHESサーベイ (ALMA Survey of 70 μm Dark High-

*1 大質量星を形成する分子雲が満たす条件には、以下の2つがよく使われます。1つは $M > 870 M_{\odot} (R/\text{pc})^{1.33}$ という条件です [9]。ここで M は分子雲質量を、 R は分子雲半径を表しています。もう1つは、柱密度（視線方向に沿って密度を積分した値）が0.05 g cm^{-2} よりも高い必要があるという条件です [10]。

mass Clumps in Early Stages) を行いました。

ASHESサーベイの対象天体は、ハーシェル宇宙望遠鏡による赤外線観測（波長 $24\ \mu\text{m}$, $70\ \mu\text{m}$ ）で明るい点源をもたない星なしクラump候補であり、質量が500太陽質量かつ柱密度が $0.1\ \text{g cm}^{-2}$ 以上であり、大質量星形成に必要と考えられている条件を満たすクラump 39領域です。小質量分子雲コアのサイズを分解できるように、距離が6 kpcよりも近いものに限定しました。選ばれた39領域の平均温度は15 K程度という低温環境であり、大質量星形成初期段階にある分子雲クラumpの最有力候補といえます。本サーベイの特徴は、中間赤外線点源をもたない赤外線暗黒星雲の電波干渉計を用いた観測としては過去最大の39領域を対象天体としていること、そして各領域の広域マッピングをおこない、クラump全体を捉えたことです。

本サーベイでは、分子雲コアを定義するのに最適な低温ダスト（塵）からの熱放射（波長1.3 mm）に加え、高密度ガスのトレーサーである重水素分子輝線（ N_2D^+ , DCO^+ , DCN ）、分子流のトレーサー（ CO , SiO ）、あたたかいガス（50–100 K）のトレーサー（ H_2CO , CH_3OH ）などのデータを

取得しました。本研究では、分子流や H_2CO , CH_3OH が検出されたコアを星ありコア、いずれも未検出だったコアを星なしコアと定義しました。図3は観測結果の一例です。左の赤外線画像が示すように、赤外線で暗く電波で明るい $\sim 1\ \text{pc}$ のクラumpを観測し、中央のような高解像度ダスト連続波放射強度マップを得ました。これまでに、12領域のデータを解析したパイロットサーベイや特定の領域に対してケーススタディを行い、以下のようにコアスケールの大質量星形成初期段階の特徴を明らかにしてきました。クラumpスケールでは星形成活動の兆候はみられていなかった対象天体ですが、アルマ望遠鏡を用いた観測では、ほとんどの領域で原始星の存在を示唆する分子流やあたたかいガスからの輝線を検出しました [13–15] (図3右)。また、重水素（D）を含む分子輝線は、高密度分子雲コア付近で検出され、それらの存在量比（ $\text{DCO}^+/\text{N}_2\text{D}^+$ ）をみると、小質量星形成領域のコア付近でみられるものよりも1桁ほど小さいことが明らかになりました [16]。化学反応ネットワークモデルによると、観測された低い $\text{DCO}^+/\text{N}_2\text{D}^+$ 比を説明するには20–25 Kの温度環境が必要だということがわか

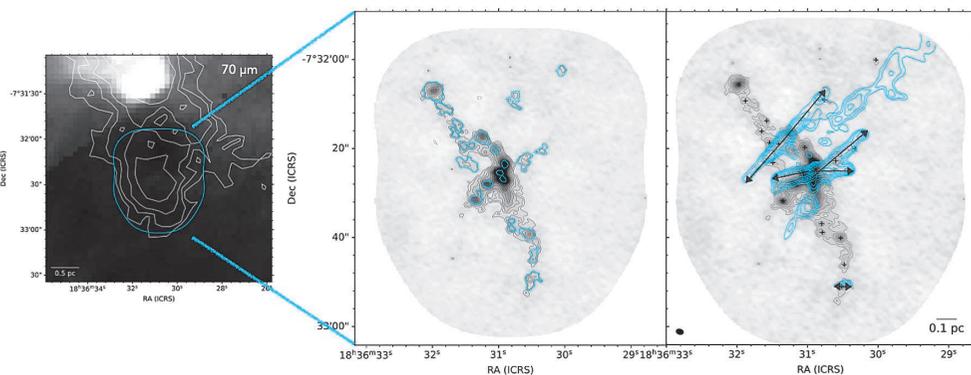


図3 ASHESサーベイの観測結果例。(左) 赤外線 $70\ \mu\text{m}$ の観測結果に単一鏡で観測したダスト連続波放射（波長 $870\ \mu\text{m}$ ）を等値線で重ねたもの。水色線で囲った領域をアルマ望遠鏡で観測しました。(中央) アルマ望遠鏡による観測で得られたダスト連続波強度分布を色マップと灰色の等値線で表しています。コアとして同定した構造は、水色線で囲まれた領域です。(右) 分子流の検出例。矢印は分子流の噴出方向を示しており、矢印の根元に原始星がいると考えられます。水色線は CO ($J=2-1$)の積分強度を表しています。

り、小質量星形成領域にある星なしコア周囲の環境（ ~ 10 K）よりもあたたかい環境にあることが示唆されました。いくつかのコアはすでに原始星を形成しており（星ありコア）、それらの星形成活動によってあたたかい環境が誕生しているということです。

一方で、分子流の質量放出率やエネルギーは、大質量原始星からのものに比べて1-2桁ほど小さく [14, 17]、星ありコアと星なしコアの非熱的な速度分散の差があまりない [15] ということも明らかになりました。これらの結果は、ASHESの対象天体が、赤外線で見え、より進化が進んだ大質量星形成領域と異なり、まだクランプ全体に影響を及ぼすほどに活発な星形成活動は起きていない段階にあるということを示唆しています。

本稿では、全39領域で同定された800個以上の分子雲コアの統計調査に基づいて大質量星形成シナリオに迫った研究について紹介させていただきます。この研究は、私が中心となっておこない、2023年6月にASHESサーベイ9本目の査読付き論文として出版されました。

図4は本観測で得られた全39領域のダスト連続波放射強度マップです。空間分解能約0.02 pc (5000 au) のアルマ望遠鏡を用いた観測によって、 ~ 1 pc の高密度クランプ内の内部構造が明らか

かになりました。細長く伸びた構造をもつものもあれば、観測視野全体に放射が広がっているものなど様々です。

4. 分子雲コアの統計調査

4.1 サンプル構築

星の材料となるガス塊、分子雲コアを観測データから一意に定義するのは容易ではありません。分子雲コアは孤立して存在するわけではなく、特に大質量星形成領域のように星の集団を形成するような領域では、周囲のガスに埋もれており境界がはっきりしているわけではないからです。観測屋は、周囲よりも高密度でコンパクトな中心集した構造を分子雲コアと定義し、他にも重力的に束縛されている、すなわちガスが収縮して星を形成しそうだという条件を課すこともあります。しかし、依然として分子雲コアの境界を決めるのは難しく、これまでにいくつかの同定手法が構築されてきました。

本サーベイでは、デンドログラム（樹形図）という手法 [18] を用いて、ダスト熱放射マップから、階層的構造を同定し、その中でも最も小さい構造を分子雲コアとして定義することにしました。この手法で同定された分子雲コアは、ある程度以上の放射強度をもち、かつ周囲よりも有意に

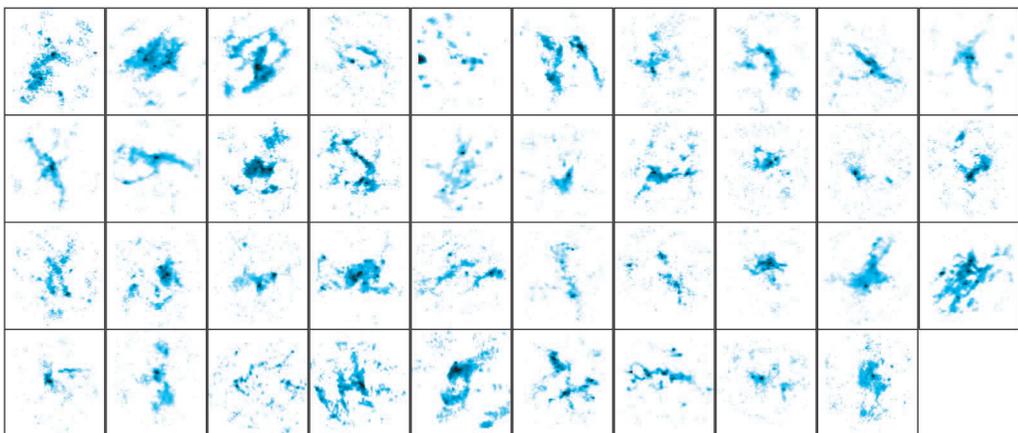


図4 ASHESサーベイで得られた39領域のダスト連続波マップ。各パネルの縦幅がおおよそ1.45 pcに対応します。

高い放射強度をもつ構造です。全39領域に対してこの手法を適用した結果、計839個の分子雲コアを同定することができました（図3中央の水色線で囲われた構造）。これは、赤外線暗黒星雲における分子雲コアのサンプルとして過去最大のものです。広視野で高感度高空間分解能観測が可能なアルマ望遠鏡で、多くのクランプを観測したからこそ得られた成果です。もちろん、これら全てが星をつくるかどうかは现阶段ではわかりませんが、パイロットサーベイの結果、高密度ガスのトレーサが検出された分子雲コアのうち、80%は重力的に束縛されていると見積もられおり、ほとんどは重力によって収縮すると期待されます [15].

4.2 分子雲コアの質量

まず初めに、839個のコアの質量を見積もりました。シナリオ1が予想するような大質量星なしコアは存在するのでしょうか。分子雲コアの質量は、ダストの性質と温度、およびガスダスト質量比を仮定することで、ダスト熱放射の放射強度から見積ることができます。その結果、839個の分子雲コアの質量は、0.05太陽質量から81太陽質量と見積もられました。

図5は、全839個のコアから作成した分子雲コアの質量関数（対数-対数軸）です。どの質量のコアがどのくらい存在しているかを表しています。~1太陽質量以上では、質量が大きくなるほど指数関数的に数が減っています。おおむね、近

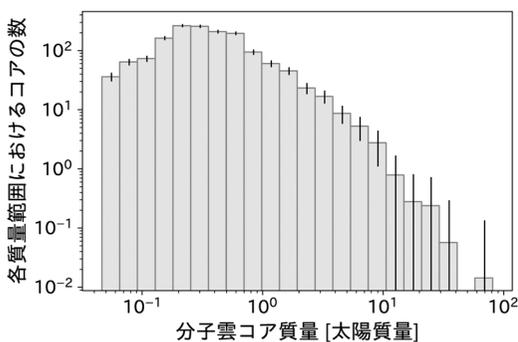


図5 分子雲コアの質量関数

傍の小質量星形成領域や大質量星形成領域で見られているものと同様の分布をしています。30太陽質量以上をもつコアは1%以下（7/839）であり、平均的な分子雲コア質量は、クランプの密度、温度から予想される分裂片の質量（ジーンズ質量；大体1-3太陽質量）程度だということが明らかになりました。

対象としたクランプはいずれも大質量星を形成しうるほどの質量をもっていますが、各クランプで最も重い分子雲コアが仮に30%の効率で星になったとしたとき、その星質量は、クランプ質量から期待される最大星質量に対してどの程度大きいのでしょうか。図6には、領域ごとに最も重い分子雲コアの質量を0.3倍したものを丸印で示しています。観測された分子雲コア質量から期待される星質量です。星印は、星団質量と星団内最大星質量の経験則 [13, 19] から導かれた、クランプ質量から予想される最大の星質量です。このとき、クランプ質量の30%が星団になると仮定しています。いずれの領域も、クランプの質量としては大質量星を形成しうる一方で、4領域以外は点線（大質量星の定義である8太陽質量）よりも下側に丸印が分布している、すなわち、ほとんどの領域で観測された分子雲コアは、自身だけで大質量星を形成できるほどには大質量ではないことがわかります。また、4領域いずれの大質量コアも、本観測によって、分子流やあたたかいガスの存在を示唆する分子輝線が検出されており、本観測からは図1内シナリオ1で仮定されているような大質量星なしコアは検出されませんでした。

4.3 重い分子雲コアができる環境

先ほど、星団質量と最大星質量の経験則について触れましたが、大質量星が存在するような星団では、星団の質量と最大の星質量との間に相関があるとされています。もしシナリオ1が期待するように、分子雲コア質量で星質量が決まり、さらに星団の質量もクランプ質量と相関をもつとすると、大質量なクランプの方が、より重い分子雲

コアを形成すると予想されます。そこで、各クラumpの質量と、そこで観測された最大コア質量に相関があるのかを調べました（図7左）。図からはあまり強い相関は見られません。スピアマンの順位相関係数でどれほど相関しているかを測ってみても、あまり相関はなさそうです。これは、最終的な星質量が、現在観測されたような初期の分子雲コア質量で決まらないことを示唆している可能性があります。

一方で、他のクラumpの物理量とも相関の有無を探っていると、最大コア質量とクラumpの密度

との間に穏やかな相関があることがわかりました（図7右）。初期段階では、より高密度なクラumpの方がより重い分子雲コアを形成しているようです。

4.4 分子雲コアの空間分布における偏り

では、クラump内に注目してみると、コアはどのように分布しているのでしょうか。星団内では大質量な星同士が集中して、小質量な星と分離するように存在する傾向がみられています（mass segregation；質量分離）。星団の進化の過程で、互いの重力によって星同士が引き寄せ合い、この

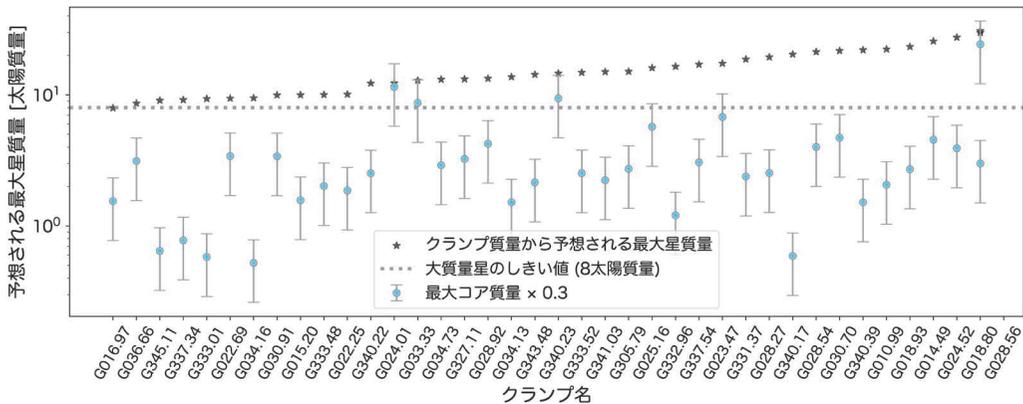


図6 クラump質量から予想される最大星質量と、観測された最大コア質量から予想される最大星質量の比較。丸印は、各領域で最も大質量なコアが30%の星形成効率で星を形成した場合に期待される星質量を、星印は、クラump質量の30%が星団になると仮定し、星団質量と最大星質量の経験則から見積もった最大星質量を表しています。点線は大質量星の定義である8太陽質量に対応します。

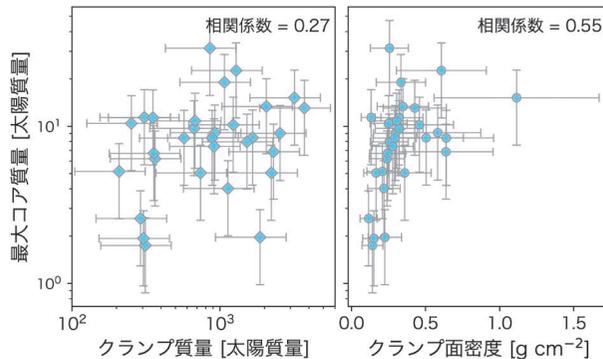


図7 各クラumpで観測された最大コア質量と、クラumpの質量（左）、面密度（右）の散布図。各パネルの右上に、スピアマンの順位相関係数の値を示しています。相関係数が0.4以上だと穏やかな相関、0.7以上だと強い相関があるといわれています。

ような現象が起きることは予想されるのですが、その効果が効くほどに十分な時間が経っていない若い星団でも、同様の傾向が近年観測されており、原始的な質量分離と呼ばれています [20]. コア成長モデル (シナリオ2) は、クランプの重力ポテンシャルの底にあるコアの方が効率よくガスを獲得できると予想しており、その場合原始的な質量分離や分子雲コア質量による空間分布の違いが期待されます [5].

本サーベイの対象領域は、大質量星形成初期段階にあると期待されるため、コアの段階で質量分離の兆候がみられるかを調べるのに適しています。私たちは連続波放射マップから同定したコアの位置 (2次元) と質量の情報をを用いて、質量分離の度合いを Λ パラメータを用いて測りました。 Λ は、ある個数のコアをランダムに選んだ場合のコア間距離の合計と、質量が大きいものから順にある個数分選んだ場合のコア間距離の合計の比をとったものです [21]. 図8が示すように、大質量なコアがより集中して分布している (質量分離が起きている) と、比は1より大きくなり、小質量のコアと同様に分布しているとき、比は1程度になります。

図9上には、39領域のうち、質量分離度の最大が2よりも大きくなった領域だけを表示しました。

質量による偏りが無い場合 重いものが集中している場合

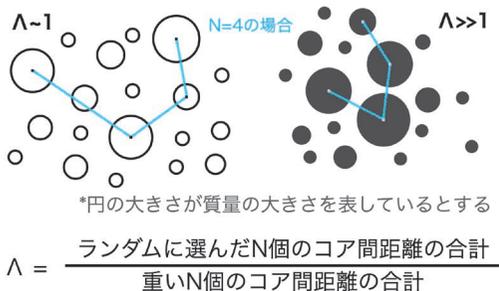


図8 質量分離度 (Λ) が1程度の場合 (左) と、1より十分大きい場合 (右) の、分子雲コア分布の違いを表した模式図。模式図には、コア数 $N=4$ の場合に、質量分離度の定義式の分母の評価で用いるコア間距離を水色線で表しています。

た。5つの領域のみ、 N が3-4程度で2よりも大きくなっています。横軸 N は、選ぶコアの数です。 N が大きくなるほど、比較に用いるコアの数が、各領域の全コア数に近づくので、比はだんだん1に近づいていきます。表示されていない領域では、質量分離度が常に1程度であり、ほとんどの領域で質量分離が見られませんでした。すなわち、現段階では、比較的大質量なコアも小質量なコアと同様に分布していると考えられます。質量分離に関する先行研究と比べて、本研究の観測視野は小さいため、より広い範囲で、より多くのコアを含めて考えると質量分離が見える可能性は否定できませんが、現在のところシナリオ2が予想するようなコアの原始的質量分離の兆候はみられませんでした。

コアの空間分布と質量の相関ではなく、密度と

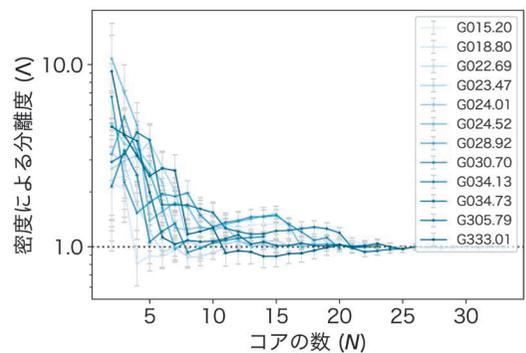
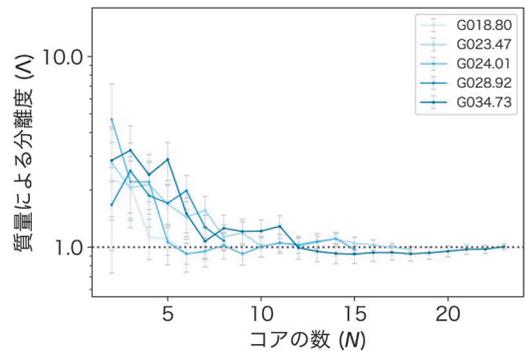


図9 上) 質量分離度と (下) 密度による分離度のコアの数 (N) 依存性。各パネルでは、 N が3以上で分離度 (Λ) が2以上になった領域のみを表示しています。

の相関を調べてみると、異なる結果が得られました。図9下には、密度による分離度（図8に示した質量による分離度と同様に、ランダムに選択したコアN個の間の距離の合計と、密度の降順に選んだコアN個の間の距離の合計の比（ Λ ）を使って導出）を図示しています。先ほどと同様、39領域のうち、分離度の最大が2よりも大きくなった領域だけを表示していますが、図9上と比べてより多くの16領域が2よりも高い分離度をもつことがわかりました。つまり、約半数の領域では、比較的高密度なコアが、分離して存在することを意味しています。このようなコアはクラump内でもよりガスが集まっている領域に存在しているために、コアの密度による空間分布の偏りが生じていると考えられます。クラump内でもガス密度が高い領域は、より効率よくガスを獲得できると期待されるため、その内部にあるコアはより太りやすい環境にあると期待されます。もし、これら高密度コアが大質量なコアに成長すると仮定すると、現在みられている密度による分離は、原始的な質量分離の兆候と考えられるかもしれません。

5. 大質量星形成モデルの確立に向けて

ASHESサーベイをはじめ、アルマ望遠鏡によって大質量クラump内の内部構造が明らかになり、大質量星形成の初期段階にある分子雲コアの性質が調べられるようになりました。本稿ではダスト連続波放射強度マップから同定された839個のコアの質量や空間分布の統計調査についての結果を紹介しました。最後に、ASHESサーベイで得られた結果からどのような大質量星形成シナリオが考えられるかを議論します。

図1内のシナリオ1では、重力的に安定な大質量星なしコアが存在し、分子雲コア質量と形成される星質量に相関があると予想しています。一方で、本サーベイにより、800個以上の大量のサンプルを構築したとしても、大質量の星なしコアはなく、そもそも大質量コアをもたない領域がほ

とんど（90%）ということが明らかになりました（図6）。今後大質量星なしコアが誕生する可能性や、大質量星なしコアの寿命が非常に短い可能性は否定できませんが、大質量星なしコアは少なくとも初期段階には存在していないことが示唆されました。また、クラump質量と分子雲コア質量との相関もみられませんでした（図7左）。

初期に形成されているコアがジーンズ質量程度の小中質量であることや、ほとんどが重力的に不安定だという結果 [15] はシナリオ2を支持します。コアの分布が質量に依っている様子はほとんどの領域でみられませんでした（図9上）、より密度の高い領域では大質量コアが形成されている様子や（図7右）、密度が高いコア同士は近接して存在している兆候がみられ（図9下）、効率よくコアガスを獲得することで、成長できるのではと期待されます。

実際に、コアの質量成長を示唆する観測結果も報告されています。例えばパイロットサーベイでは、分子雲コアの進化段階を分類することにより、原始星をすでに形成していると期待される星ありコアが星なしコアに比べて、大質量かつ高密度だという傾向が見つかり [15]、また分子流の大きさと速度から見積もったおおまかな分子流の駆動時間が分子雲コア質量と正の相関をもつことも明らかになりました [14]。これは、進化に伴い質量を増すことを示唆しています。

また、本サーベイの対象領域の含まれる一つの領域にある中質量コア周囲では、コアの重力収縮を示唆するガスの運動が検出されており、輝線の形状から $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と高い質量降着率が見積もられました [22]。他の領域でも、ガスの運動の解析から、コア周りで、フィラメント状の細長い高密度構造に沿ってガスがコアに流入している様子が見られ、 $5 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ の質量流入率が見積もられています [23]。この高い降着率が自由落下時間程度継続すれば、10太陽質量程度増量することができ、シナリオ2のように大質量原始星を形成しうると期待されます。

おおむね、シナリオ2をサポートする結果が得られたのですが、実際にどれほど普遍的に、またどのように、非常に効率的な質量獲得が起きているのかは観測的に検証されておらず、さらなる研究が必要だと考えられます。今後、コア周囲の環境やガスの運動などの解析を行いコアが質量成長している様子が普遍的にみられるのか、そのガス流入率は大質量星を形成するのに十分高いのかを調べたり、より進化の進んだ段階にあるコアの質量や分布と比較をしたりすることで、大質量星形成シナリオへさらなる制限を与えたいと考えています。

謝 辞

本稿の科学的な内容は主に2023年に筆者らが発表した査読論文 [17] に基づいています。指導教員である中村文隆氏、Patricio Sanhueza氏をはじめとする共同研究者の皆様、また本稿の執筆機会をくださった甘日出文洋氏にこの場をお借りして深く感謝いたします。本研究は日本学術振興会の科学研究費 (JSPS KAKENHI Grant Number JP22J21529, JP22H01271)、若手研究者海外挑戦プログラム、およびFoPM、東京大学WINGSプログラムの支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] 細川隆史, 2009, 天文月報, 102, 595
- [2] 元木業人, 2014, 天文月報, 107, 375
- [3] McKee, C. F., & Tan, J. C., 2003, ApJ, 585, 850
- [4] Bonnell, I. A., et al., 2001, MNRAS, 323, 785
- [5] Vázquez-Semadeni, E., et al., 2019, MNRAS, 490, 3061
- [6] Padoan, P., et al., 2020, ApJ, 900, 82
- [7] Contreras, Y., et al., 2017, MNRAS, 466, 340
- [8] Urquhart, J. S., et al., 2022, MNRAS, 510, 3389
- [9] Kauffmann, J., & Pillai, T., 2010, ApJ, 723, L7

- [10] He, Y.-X., et al., 2015, MNRAS, 450, 1926
- [11] Traficante, A., et al., 2015, MNRAS, 451, 3089
- [12] Whitaker, J. S., et al., 2017, AJ, 154, 140
- [13] Sanhueza, P., et al., 2019, ApJ, 886, 102
- [14] Li, S., et al., 2020, ApJ, 903, 119
- [15] Li, S., et al., 2023, ApJ, 949, 109
- [16] Sakai, T., et al., 2022, ApJ, 925, 144
- [17] Morii, K., et al., 2021, ApJ, 923, 147
- [18] Rosolowsky, E. W., et al., 2008, ApJ, 679, 1338
- [19] Larson, R. B., 2003, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser., 287, 65
- [20] Alfaro, E. J., & Román-Zúñiga, C. G., 2018, MNRAS, 478, L110
- [21] Allison, R. J., et al., 2009, MNRAS, 395, 1449
- [22] Contreras, Y., et al., 2013, A&A, 549, A45
- [23] Redaelli, E., et al., 2022, ApJ, 936, 169

High-mass Star Formation Hidden in Dark Clouds

Kaho MORII^{1,2}

¹*Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

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

Abstract: To understand the formation process of high-mass stars, it is essential to constrain the initial conditions. Infrared Dark Clouds (IRDCs) are thought to be the birthplaces of such high-mass stars. High spatial resolution and high sensitivity observations with ALMA have enabled us to study the properties of the dense molecular cloud cores embedded in IRDCs. We performed the ASHES survey on 39 massive clumps, dense parts of IRDCs, and identified 839 cores, showing that the initially formed cores are not massive enough to form high-mass stars on their own and need further growth to do so.