

# オリオン座分子雲の広域高密度コアサーベイから見えてきたコアの質量獲得の可能性と新しい星形成シナリオ構築に向けて



竹村 英 晃

〈総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻 〒240-0193 神奈川県三浦郡葉山町（湘南国際村）〉

〈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: hideaki.takemura@grad.nao.ac.jp

私たちは、オリオンA分子雲の中心領域であるオリオン大星雲（Orion Nebula Cluster; ONC）領域について、分子雲コア探査を行い、分子雲コアの質量関数（Core Mass Function; CMF）を求めました。本研究では、これまでになく広域かつ高空間分解能のCARMA+NRO45-m合成C<sup>18</sup>O（J=1-0）データを用いました。求めたCMFを同じ領域にある若い星の初期質量関数（Initial Mass Function, IMF）と直接比較したところ、両者は似た形状を持つものの、分子雲コアの方が星よりも質量が小さい傾向にあることがわかりました。その結果に加え、原始星のアウトフローによって分子雲コアの質量の一部が外部へ放出されることを考慮すると、分子雲コアは星へ進化する過程で外側から質量を獲得する必要があります。星形成の標準モデルでは、星形成の過程でコアの質量は外に放出されると信じられていましたが、本研究の結果、分子雲コアは質量を外部から獲得するという新たな描像が得られました。

## 1. 星形成の現場と標準モデル

銀河の中には分子雲と呼ばれる高密度かつ低温の雲のような天体が多く存在し、分子雲の中には分子雲コアと呼ばれるさらに密度が高い構造が点在しています。分子雲コアは、自己重力で束縛されている分子雲コアと自己重力だけでは束縛されていない分子雲コアに分類されます。そして、自己重力で束縛された分子雲コアが自身の重力によって収縮することで星形成が開始されると考えられています [1] (図1)。分子雲や分子雲コアは温度が低いので、可視光では見ることができず、これまで電波や赤外線を用いた観測的研究が多く行われてきました。

質量は恒星の重要な特性で、恒星の進化の様子

はその質量に強く依存します。私たちがもっともよく知る恒星は太陽ですが、それよりもはるかに質量が大きいベテルギウスのような恒星もあれば、太陽に比べて質量がずっと小さい恒星も存在します。そのような多様性に富んだ星がどのように形成されるかを解明することが、星形成における重要な問題のひとつです。特に、太陽質量の8倍以上の質量を持つ大質量星の形成メカニズムに対する理解は乏しく、大質量星を形成するだけの大量の物質をどのようにして一点に集めるかがわかっていません。それに比べて質量が小さい星については、これまでに観測されたような分子雲コアを“たまご”として、その質量の一部が星に進化すると考えられています。

現在、星形成のシナリオとして主に、乱流コア

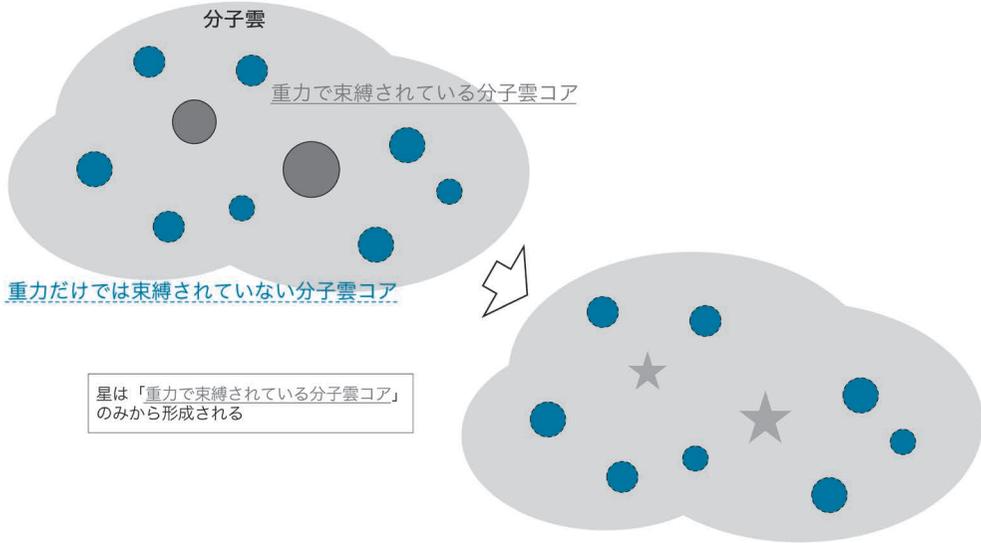


図1 星形成の標準シナリオの模式図。星の“たまご”である、重力で束縛された分子雲コアから星が形成されます。重力で束縛された分子雲コアと重力だけでは束縛されていない分子雲コアを、それぞれ実線と破線で囲んで示しています。

降着モデル (core accretion model) [2] と競合的コア降着モデル (competitive accretion model) [3] の2つが提唱されています。これらは太陽質量の8倍以上の質量を持つ大質量星を形成するためのシナリオとして挙げられることが多いですが、分子雲内では中小質量星も同時に形成されるため、ここでは質量を限定しない星形成のシナリオとして扱います。両モデルでは期待される初期条件や分子雲コアの進化の様子が大きく異なります。乱流コア降着モデルは、小質量星の形成メカニズムを拡張したものです。大質量星は、内部の強い乱流によって支えられる太陽質量の30倍以上の大質量の分子雲コアである“たまご”の中で形成されます。一方、競合的コア降着モデルでは、分子雲コアが太陽質量程度のほぼ均一な質量を持つことを初期条件とし、大質量分子雲コアは必要ありません。その代わりに、分子雲コアの外側からの質量降着によって分子雲コアが進化します。このとき、“たまごの殻”は存在しません。分子雲の中心にある分子雲コアが最終的に大きな質量を獲得し、大質量星へと進化します。また、

両モデルを合体させた Clump-fed モデル [4] も存在します。このモデルでは、分子雲コアははじめからさまざまな質量を持っており、質量の大きなコアがさらに周囲から質量を獲得して大質量星を形成します。

分子雲コアの進化に着目すると、乱流コア降着モデルでは分子雲コアは星形成の過程で力学平衡状態を保ちながらゆっくりと収縮し、コア質量の一部が中心の星になります。なので、形成される星の質量はコア形成時に決まります。一方、競合的降着モデルでは、コアの進化は短時間にダイナミカルに進みます。形成される星の質量はコア質量よりも大きくなることも可能です。どのモデルが現実の星形成をうまく説明するかについてはまだよくわかっていません。

## 2. 星の初期質量関数 IMF と分子雲コアの質量関数 CMF

前のセクションでも述べた通り、星はさまざまな質量を持ちます。どの程度の質量の星がどのような割合で形成されるかを表す星の初期質量関数

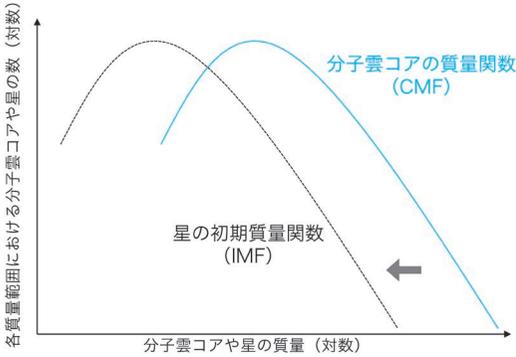


図2 これまでに観測されてきたCMFとIMFの関係。CMFを質量が小さい側に平行移動すると、IMFを再現することができます。

(Initial Mass Function; IMF) が、Salpeter によって初めて導入されました [5]。IMF は、太陽質量の 0.1 倍程度まで増加し、それ以上の質量ではべき乗則に従って減少していくことが知られています。天の川銀河において、この IMF のべきは領域によらない普遍的な性質であると考えられています。

恒星の誕生現場である分子雲コアの質量分布は分子雲コアの質量関数 (Core Mass Function; CMF) と呼ばれています。そしてさまざまな分子雲に対して観測が行われてきた結果、(1) CMF と IMF は形状がよく似ていること、(2) CMF を質量が小さい方向に平行移動すると IMF を再現できるということが、報告されています [6-8]。図2に示すように、分子雲コアの質量と星の質量が一対一対応することから、分子雲コアの質量のうちの一部が星へ進化すると星の IMF が再現されると解釈され、このアイデアは乱流コア降着モデルに合うと言えます。この場合、星の質量とその母体となった分子雲コアの質量の比は、星形成効率 (Star Formation Efficiency; SFE) と呼ばれ、分子雲コアの観測から SFE が 0.3 程度であれば星の IMF を再現できることが知られています。星形成効率が 0.3 というのは、分子雲コアの質量の 30% が星へ進化し、残り 70% の質量

が散逸してしまうということを意味します。実際、初期に力学平衡にある分子雲コアの質量の大部分が原始星のアウトフローによって吹き飛ばされることは、分子雲コアの進化についての数値計算によって確かめられています [9]。

しかし、最近の ALMA による大質量星形成領域の観測から、IMF よりも緩やかなべきを持つ CMF が複数報告されました [10-14]。星形成効率が分子雲コアの質量によって異なる可能性や、CMF が時間進化する可能性などが考えられていますが、この結果の解釈については未だに議論が続いています。

### 3. オリオン A 分子雲の CARMA + NRO45-m 合成データ

分子雲コアを同定して CMF を導出するには、質量 (あるいはサイズ) が小さい分子雲コアを逃さずに観測するために高い空間分解能が必要となります。また、同一の領域において CMF と IMF を比較するためには、分子雲コアの観測をした領域において恒星の質量の推定が精度良く行われていることが求められます。

そこで、私たちはオリオン A 分子雲を観測対象としました。この分子雲はもっとも近傍 (~414 pc [15, 16] ~1200 光年) にある巨大分子雲であり、活発な星形成領域として知られ、大質量星形成領域 (OMC-1) を含みます。この分子雲については、米国のカルマ (Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy; CARMA) 干渉計と国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45 メートル電波望遠鏡 (NRO45-m) のデータを合成することにより、これまでになく広域かつ高空間分解能 (8 秒角 ~3300 au @414 pc) の電波画像を作成することに成功しています [17]。電波画像は、OMC-1/2/3/4 から L1641N や V380 Ori までをカバーする広い範囲を、一酸化炭素とその同位体置換体である  $^{12}\text{CO}$  ( $J=1-0$ )、 $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ )、 $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) の 3 つの輝線でカバーして

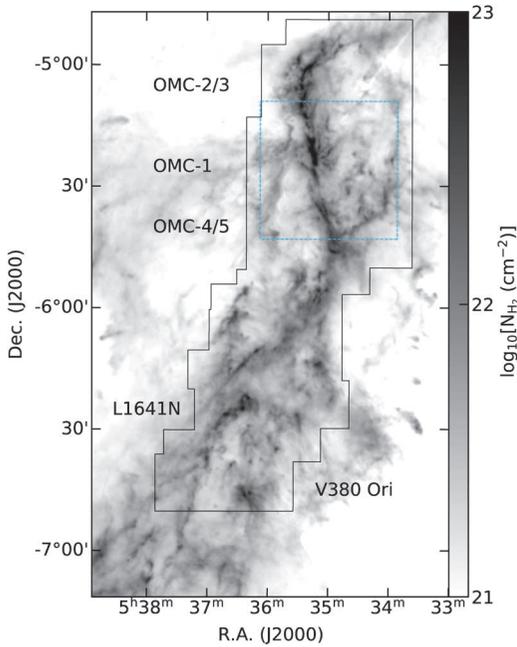


図3 ハーシェル望遠鏡の観測から作成したオリオンA分子雲の水素分子の柱密度のマップ [17]. CARMA+NRO45-m合成C<sup>18</sup>O (J=1-0) 輝線データの観測領域を黒色の線で囲んでいます。また、本研究で注目するONC領域は、青色の点線で囲まれた領域です。

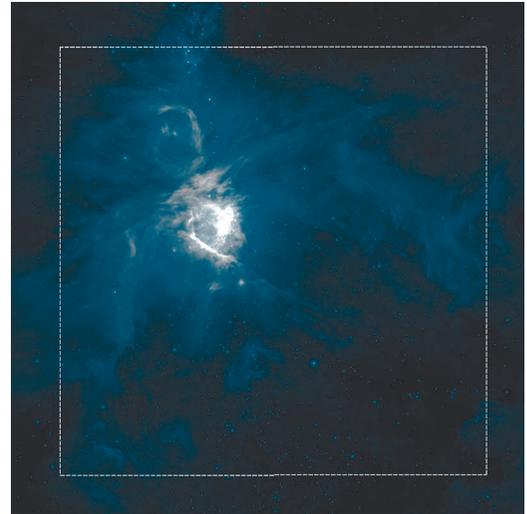


図4 スピッツァー (Spitzer) 宇宙望遠鏡で観測したONC領域の赤外線画像です。図3と同様に、破線で囲まれた領域がONC領域です (NASA/IPAC INFRARED SCIENCE ARCHIVEより)。なおカラー版においては、青色、緑色、赤色がそれぞれ4.5  $\mu\text{m}$ , 5.8  $\mu\text{m}$ , 8.0  $\mu\text{m}$ の観測結果を示しています。

います (図3)。これらの中でもっとも密度が高い領域 ( $n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ) をトレースするC<sup>18</sup>O (J=1-0) のデータを用いることにより、オリオンA分子雲の詳細な分子雲コアのカタログを作成することができます。図3にC<sup>18</sup>O (J=1-0) の観測領域を示します。

また、オリオンA分子雲の中心領域であるOrion Nebula Cluster (ONC) 領域について、詳細な星の観測が行われ、1619個の星について質量が計算されています [18]。この領域はオリオン大星雲を含み、赤外線では図4のように観測されます。ONC領域の明確な境界線はありませんが、本稿では星の観測が行われた領域をONC領域と呼んでいます。

本研究では、以上2つの観測からそれぞれCMFとIMFを導出して比較することで、星の形

成シナリオの検証を行いました。

#### 4. 分子雲コアの同定と質量の計算

本研究では、オリオンA分子雲の3次元のC<sup>18</sup>O (J=1-0) 輝線強度データに階層構造解析アルゴリズム (図5) であるDendrogram [19] を適用し、ONC領域において692個の分子雲コアを同定しました。ここで、Dendrogramの出力結果には、観測ノイズに由来する偽構造が含まれています。そこで、電波の強度が小さい構造や空間あるいは速度方向において十分な広がりを持たない構造を同定したサンプルから除いています。また、観測領域の端に位置する構造も、正確に質量を計算できないため、サンプルから除いています。今回の分子雲コアの同定数は、ほぼ同じ領域における先行観測 [20] で同定された分子雲コアの数である65個の10倍以上になります。

これまでの分子雲コア同定やCMFの研究では、

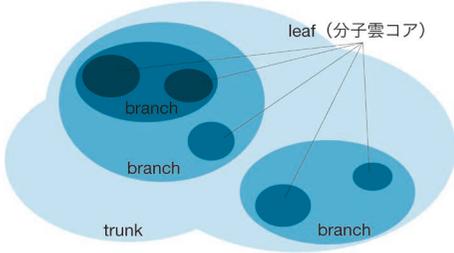


図5 Dendrogramアルゴリズムによって検出した分子雲の階層構造の模式図。もっとも下の階層を“trunk”（幹）、ピークを“leaf”（葉）、その間の階層を“branch”（枝）と呼びます。本研究では、“leaf”を分子雲コアとして扱っています。

2次元の天球面上の柱密度マップを使って分子雲コアの同定が行われてきました。しかし現実のコアはxyz 3次元の構造なので、このような同定法では、コアの真の質量を見積もることはできません。視線方向のガスは、コア内部のガス成分と外部の成分からなるので、従来の方法ではコアの質量を過大評価することになります。私たちは以前の研究 [21] で、視線方向の構造の切り分けを行わない場合、分子雲コアの質量を3倍程度過大評価してしまうことを明らかにしています。この弱点を克服するため、本研究 [22] では、分子雲と分子雲コアの position-position-velocity空間での広がり、水素分子の柱密度マップ [17] から分子雲コアの質量を計算しています。ここで、水素分子の柱密度の導出には、ハーシェル（Herschel）宇宙望遠鏡の3波長（250  $\mu\text{m}$ , 350  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ ）の観測結果 [23] を用いています。具体的にはまず、星間ダストからの放射は黒体放射に似ていることが知られているので、3波長のフィッティングから温度を求めます。その温度と250  $\mu\text{m}$ の観測データから星間ダストの質量を求め、星間ダストと星間ガスの質量の比を1対100として水素分子の質量に変換します。そして、その質量から水素分子の個数を計算することで、水素分子の柱密度を作成することができます。分子雲の構造は、3次元のC<sup>18</sup>O (J=1-0) 輝線強度

データにDendrogramアルゴリズムを適用して求めました。図6にさまざまな柱密度における、分子雲コアの質量 $M_{\text{core}}$ と、その位置の柱密度をすべて足し合わせて求めた質量 $M_{\text{projection}}$ の比を示します。その比の平均値は0.29で、私たちの以前の研究結果 [21] と整合的です。この手法でも、視線方向に分子のアバンダンスや励起温度が一樣であるなどの仮定をすることになりますが、コア3次元空間構造であることを考慮したことになるので、天球面に射影された2次元データを用いた場合よりも質量の見積もりはより真の値に近くなるはずで

次に、Herschel Orion Protostar Survey (HOPS) [24] の結果を用いて、若い星状天体（young stellar object; YSO）が付随する星ありコアと付随しない星なしコアの分類を行いました。その結果、12個の分子雲コアを星ありコアに、680個を星なしコアにそれぞれ分類しました。さらに、ピリアル解析を行い、星なしコアの中で151個を重力で束縛されたコアに分類しました。これは、分子雲コアの重力収縮によって星形成が開始するので、星を形成しうる分子雲コアは重力的に束縛されていることが期待されるためです。以上より、同定した分子雲コアの分布を図7に示します。これまでの観測によって示されている通り、分子雲コアの大部分が細長いフィラメント状の構造にそって分布していることがわかります。

### 5. ONC領域のCMFとIMF

図8に同定したONC領域のIMFと重力的に束縛された星なし分子雲コアについてのCMFを示します。まず、この領域においてもIMFとCMFはいずれも普遍的なSalpeterのIMFと似たべきを持ちます。CMFとIMFの最大値をとる質量を比較すると、CMFはIMFと同程度あるいはIMFよりも小さい質量で最大値をとることがわかります。

ここで、分子雲コアの検出確率についても議論

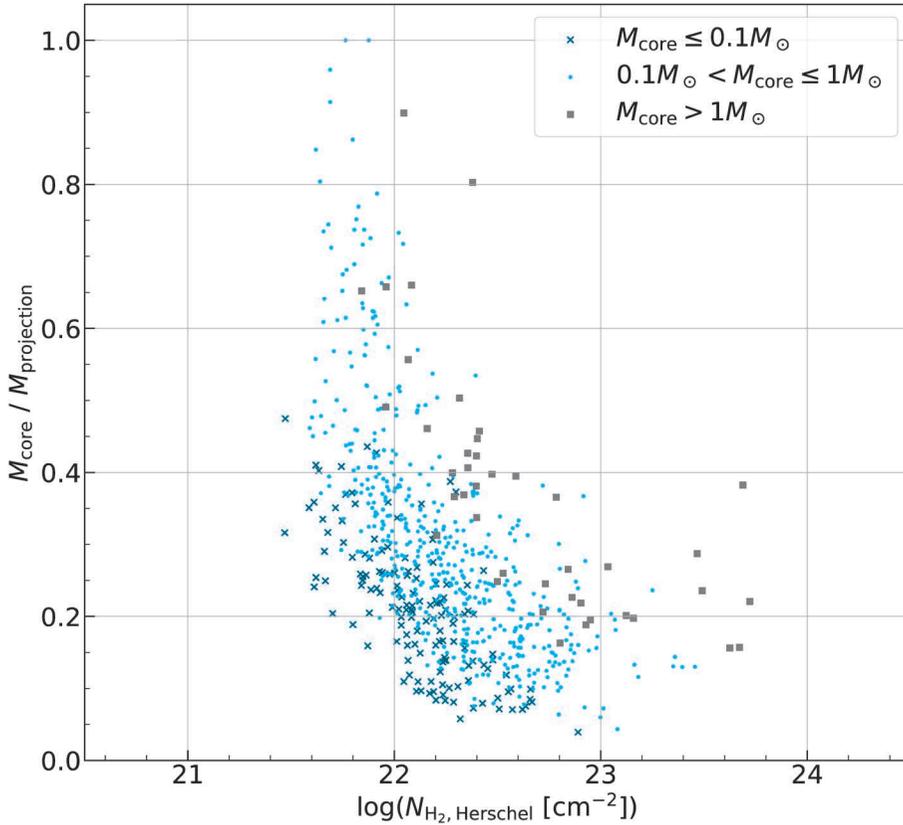


図6 分子雲コアの質量 $M_{\text{core}}$ とその位置の柱密度をすべて足し合わせて求めた質量 $M_{\text{projection}}$ の比と、柱密度の関係 [22]. 質量の比が小さいことは、分子雲コアの周囲にガスが多く存在していることを意味します.

をします. 観測の分解能や感度が十分ではない場合、質量やサイズが小さい分子雲コアを見逃し、観測のバイアスによって人工的にCMFの最大値を作ってしまう可能性があります. すなわち、CMFがより小さい質量で最大値を取り得ます. そこで私たちは、さまざまな質量の分子雲コアの検出確率を人工的なコアを用いて調べました. 検出確率が90%となる質量を検出限界 (detection limit) として図8に示しています. そして、CMFの最大値をとる質量が検出限界の質量よりも大きいので、分子雲コアの同定を正しく行えたと結論づけています.

よって、重力的に束縛された分子雲コアについてのCMFとIMFは同程度の質量で最大値をとり、似たべきを持つことがわかりました.

## 6. 星形成シナリオへの示唆

本研究で得られたCMFとIMFの関係は、これまでの研究によって報告されてきた「CMFを星形成成功率の分だけ質量が小さい方向に平行移動するとIMFが再現できる」という結果と大きく異なります. この領域の将来のIMFと現在観測されているIMFが同じと仮定すると、CMFとIMFが同程度の質量で最大値をとるということは、星形成の母体である分子雲コアの質量とそこで形成される星の質量が同程度であることを意味します. 原始星からのアウトフローによって分子雲コアの質量の大部分が吹き飛ばされてしまうことを考慮すると、分子雲コアはこれから質量を外部から獲得する必要があります (図9).

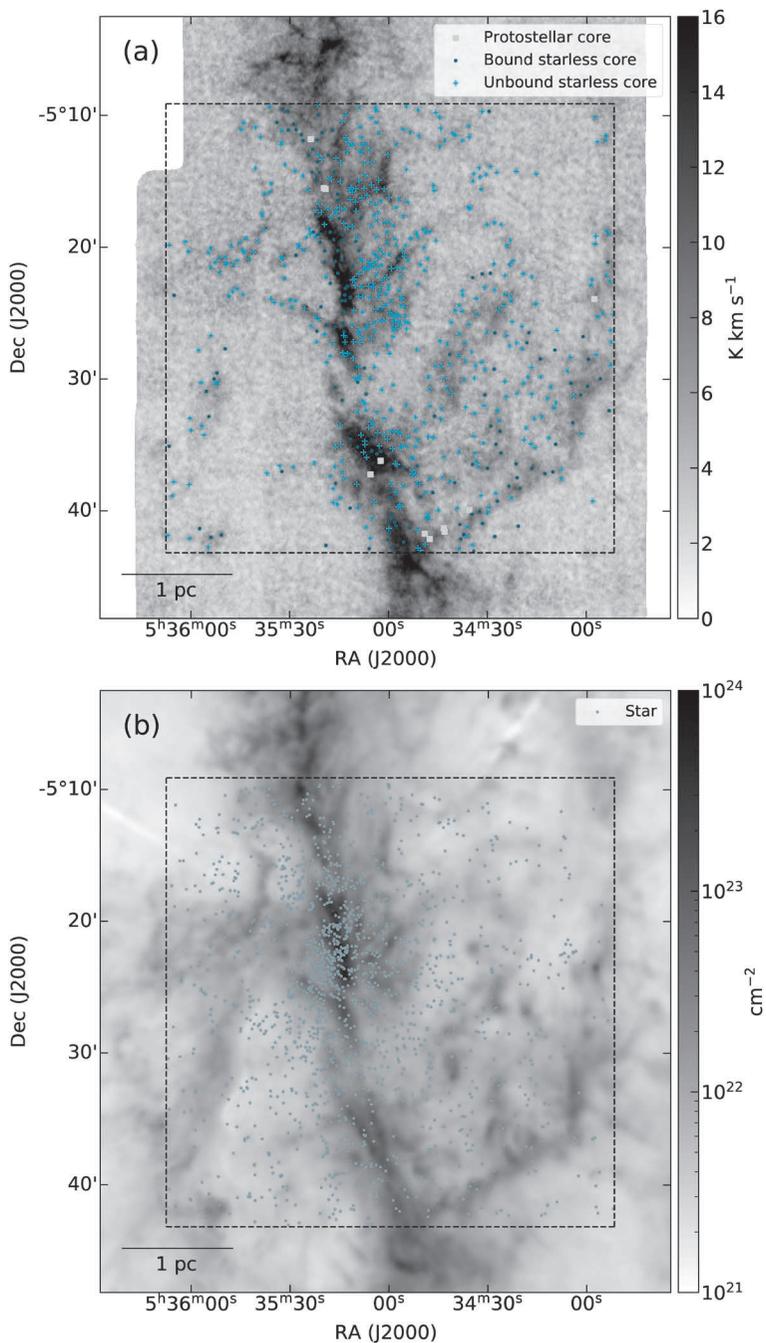


図7 (a) ONC領域において同定した分子雲コアの分布. 星あり分子雲コア (■), 重力的に束縛された星なし分子雲コア (●) と重力だけでは束縛されていない星なし分子雲コア (+) を分けてプロットしています. 背景は, CARMA+NRO45-m 合成 C<sup>18</sup>O ( $J=1-0$ ) 輝線データの積分強度図です. (b) ONC領域の星の分布. 先行観測によって検出された星のうち, 質量が計算されているもののみ示しています. 背景は水素分子の柱密度のマップです. ([22] の Figure 1.).

現在の星形成の標準モデルでは、星形成の現場となる分子雲コアは自己重力で束縛されている必要があります。そこで、本研究で同定した重力的

に束縛された星なしコアから星形成率（star formation rate; SFR）を計算し、星のカタログ [18] から計算した 2 Myr 以内の平均の星形成率と比較しました。図 10 に星の年齢のヒストグラムを示します。まず、すべての重力的に束縛された星なし分子雲コアが、自由落下時間の 3 倍の時間で星形成効率を 100% として星を形成すると仮定します。ここで、自由落下時間の計算には、重力的に束縛された分子雲コアの密度の平均値である  $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  を使用しました。この結果、星形成率はおよそ  $1 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  となりました。一方、星のカタログから求めた ONC 領域の過去 2 Myr 以内の平均の星形成率は  $1.5 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  です。両者の値がほぼ一致していることから、重力的に束縛された星なし分子雲コアから星が形成されれば、ONC 領域の星形成率を再現できると考えられます。しかし、星のカタログにおいて検出されているものの、質量の計算ができていない星があることを考えると、この値は下限値となります。よって、重力だけでは束縛されていない星なしコアから星が形成される可能性を排除することはできません。

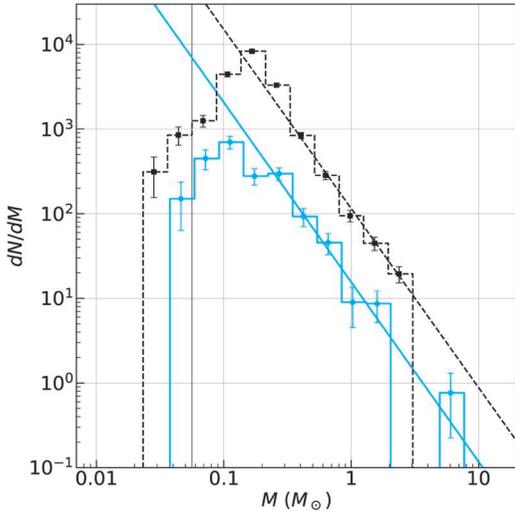


図8 ONC 領域における重力で束縛された星なしコアの CMF (実線のヒストグラム) と IMF (破線のヒストグラム) の図。また、それぞれの質量関数の大質量側を最小二乗法で直線近似した結果を実線と破線で示しています。質量の軸に垂直な実線は検出率が 90% となる質量を示しています。

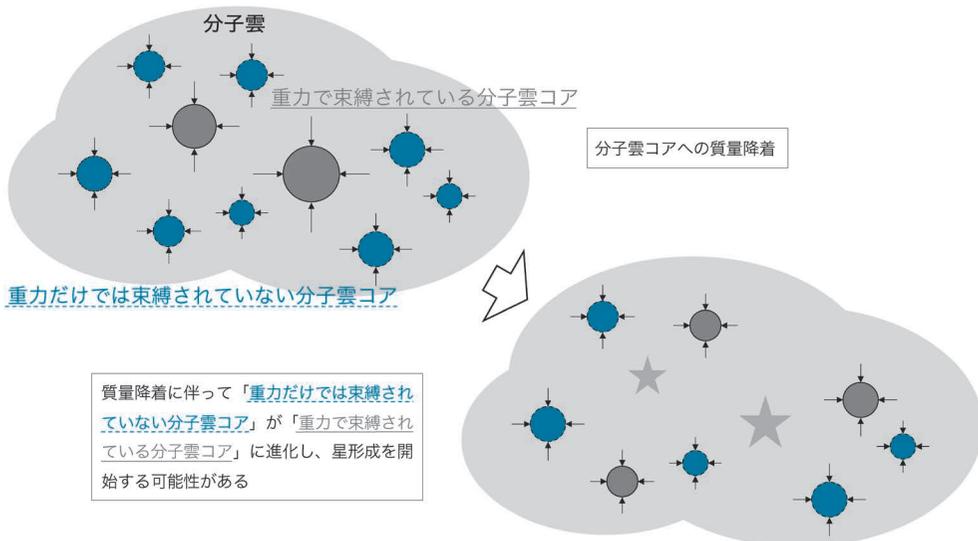


図9 分子雲コアへの質量降着を考慮した星形成シナリオの模式図。

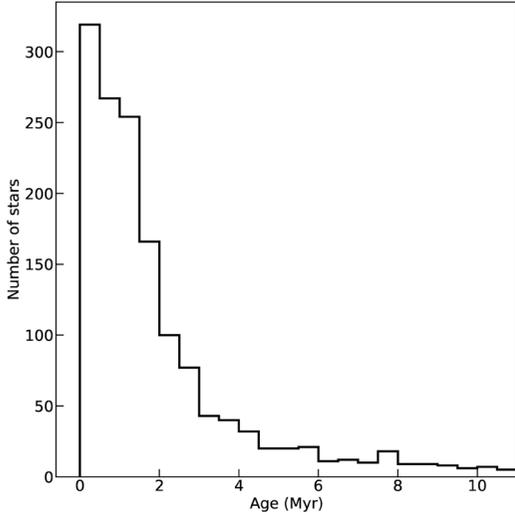


図10 星のカタログから [18] 求めた星の年齢のヒストグラム。( [22] の Figure 2.).

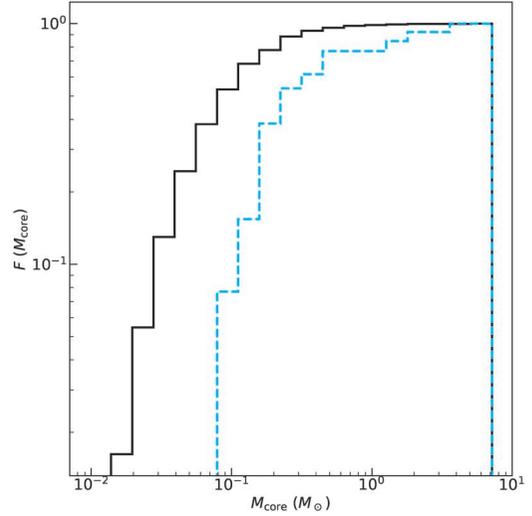


図11 星なし分子雲コア（実線）と星あり分子雲コア（破線）の質量についての累積分布関数。星あり分子雲コアが星なし分子雲コアよりも質量が大きい傾向にあることがわかります。

実際、星なし分子雲コアの大部分が重力だけでは束縛されておらず、外圧によってコアが支えられていると指摘した研究もあり [25]、本研究においても星なしコアのうち、重力だけでは束縛されない分子雲コアの割合の方が高くなっています。重力だけでは束縛されていない星なしコアが、外圧の効果と分子雲コアの外部からの質量の流入によって、重力で束縛された星なしコアを経由するなどして星へ進化する可能性も考えられます。実際、星なし分子雲コアと星あり分子雲コアの質量を比較すると、星あり分子雲コアの方が質量が大きい傾向にあることがわかりました（図11）。さらに、最近の観測によって、原始星からのアウトフローが検出されている星あり分子雲コアと、アウトフローが検出されていない星なし分子雲コアの質量を比較したところ、星ありコアの方が質量が大きい傾向にあることが報告されています [26]。このことは、分子雲コアが進化をする過程で、質量を外から獲得することを示唆しており、本研究の結果と整合的です。

## 7. ま と め

本研究では、これまでになく広域かつ高空間分解能のオリオンA分子雲のCARMA+NRO45-m合成C<sup>18</sup>O ( $J=1-0$ )輝線データを用いて、ONC領域の分子雲コア探査とCMFの導出を行いました。さらに、同じ領域のIMFと直接比較をした結果、CMFとIMFは同程度の質量で最大値をとり、いずれも普遍的なIMFと似たべきを持つことがわかりました。このCMFとIMFの関係は、星形成の標準シナリオから示唆されるものとは大きく異なり、分子雲コアの外部からの質量の流入を示唆するものです。また、分子雲コア外部からの質量の流入によって、重力的に束縛されていない星なしコアから星が形成される可能性が出てきました。現時点では、重力的に束縛されていない星なしコアが星を形成するのか、散逸していくのかはわかっておらず、私たちはこの問題に取り組んでいく予定です。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご協力いただいた共同研究者のみなさまに感謝いたします。総合研究大学院大学や国立天文台科学研究部（理論研究部）からは多くのご支援をいただきました。本研究でのデータ解析は、国立天文台の天文データセンター（ADC）の多波長データ解析システムにて行いました。その他、これまでの大学院生活において関わったすべての方に感謝いたします。

参考文献

[1] McKee, C. F., & Ostriker, E. C., 2007, *ARA&A*, 45, 565  
 [2] McKee, C. F., & Tan, J. C., 2003, *ApJ*, 585, 850  
 [3] Bonnell, I. A., & Bate, M. R., 2006, *MNRAS*, 370, 488  
 [4] Wang, P., et al., 2010, *ApJ*, 709, 27  
 [5] Salpeter, E. E., 1955, *ApJ*, 121, 161  
 [6] Motte, F., et al., 1998, *A&A*, 336, 150  
 [7] Alves, J., et al., 2007, *A&A*, 462, L17  
 [8] André, P., et al., 2014, *Protostars and Planets VI*, (University of Arizona Press), 27  
 [9] Machida, M. N., & Matsumoto, T., 2012, *MNRAS*, 421, 588  
 [10] Motte, F., et al., 2018, *Nature Astron.*, 2, 478  
 [11] Liu, M., et al., 2018, *ApJ*, 862, 105  
 [12] Cheng, Y., et al., 2018, *ApJ*, 853, 160  
 [13] Sanhueza, P., et al., 2019, *ApJ*, 886, 102  
 [14] Kong, S., 2019, *ApJ*, 873, 31  
 [15] Menten, K. M., et al., 2007, *A&A*, 474, 515  
 [16] Kim, M. K., et al., 2008, *PASJ*, 60, 991  
 [17] Kong, S., 2018, *ApJS*, 236, 25  
 [18] Da Rio, N., et al., 2012, *ApJ*, 748, 14  
 [19] Rosolowsky, E. W., et al., 2008, *ApJ*, 679, 1338  
 [20] Ikeda, N., & Kitamura, Y., 2009, *ApJ*, 705, L95  
 [21] Takemura, H., et al., 2021a, *PASJ*, 73, 487

[22] Takemura, H., et al., 2021b, *ApJ*, 910, L6  
 [23] André, Ph., et al., 2010, *A&A*, 518, L102  
 [24] Furlan, E., et al., 2016, *ApJS*, 224, 5  
 [25] Kirk, H., et al., 2017, *ApJ*, 846, 144  
 [26] Kong, S., et al., 2021, *ApJ*, 912, 156

**Comparison of CMF and IMF in the ONC Region with CARMA+NRO45-m Combined Data**

**Hideaki TAKEMURA**

*Department of Astronomical Science, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Shonan Village, Hayama, Kanagawa 240-0193, Japan  
 Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: We have conducted dense core survey toward the Orion Nebula Cluster (ONC) region with CARMA+NRO45-m combined data of C<sup>18</sup>O (*J*=1-0) line. Then, we derived a core mass function (CMF) with our core samples and a stellar initial mass function (IMF) from previous observation. Both two functions have similar shapes and dense cores tend to have smaller masses compared to the stars. Besides, several numerical simulations suggested that a large fraction of the core mass is blown off by the feedback of its central protostar. These results imply that dense cores need to accumulate masses from surrounding clouds.