

論文の内容の要旨

論文題目

Dense Gas and Massive Star Formation within Giant Molecular Clouds in the Nearby Spiral Galaxy M 33

(近傍渦巻銀河 M33 の巨大分子雲における
高密度ガスと大質量星形成)

氏名 三浦 理絵

我々は、近傍渦巻銀河 M33 における高密度分子ガスの物理特性やその大質量星形成との関係について研究を行った。本研究はアタカマサブミリ波望遠鏡実験(ASTE)、野辺山 45m 望遠鏡、および野辺山ミリ波干渉計を用いたミリ波サブミリ波観測と、可視光・赤外線のアrchiveデータに基づく。大質量星は巨大分子雲(GMC)内の高密度分子ガスの中で生まれ、その後もまわりのガスと密接に相互作用し合うため、高密度分子ガスについて調査することは大質量星形成を理解する上で重要な鍵となる。本論文の主な最終目標は GMC 内で形成される高密度分子ガスの物理特性とその中で起こる大質量星形成のプロセスを詳細に明らかにすることである。本論文では、星形成の直接の母体である高密度分子ガスについて、下記のように3つの主な研究を行った。その観測対象は、銀河の 1 kpc 以上のスケールから、GMC の 100pc スケール、さらに分子雲の 10pc スケールにまで及ぶ。

第一に、高密度分子ガスの大局的な分布や物理特性、それらと星形成率(SFR)との関連を GMC スケールで調べるために、我々は M33 の分子ガスディスク ($121 \text{ arcmin}^2 \sim 7.29 \text{ kpc}^2$) に対して、ASTE を用いた高感度 (16–32 mK)、且つ、高分解能 ($\sim 100 \text{ pc}$) の CO(J=3-2) マッピング観測を行った(図 1)。これは M33 分子ガスディスク全域における、初めての CO(J=3-2) 大規模サーベイである。CO(J=3-2) 放射はディスク全体に滑らかに広がっており、Tosaki et al. (2011) による CO(J=1-0) 放射分布と類似しているが、多くの場合、2つの CO 放射のピークの間にはオフセット

があることが分かった。CO(J=1-0)に対するCO(J=3-2)の積分強度比($R_{3-2/1-0}$)は0.1から1.4の範囲であり、そのうち、比較的高い値は巨大HII領域(GHR)、銀河中心近傍で見つかった。100pcのスケールでCO(J=3-2)と星形成率(SFR)の空間分布はよい一致を示し、星形成則(CO(J=3-2)放射強度とSFRとの相関)においては良い相関を示した。星形成則における、べき乗の指数は 1.04 ± 0.04 であった。これは、他の銀河で見つかっている値(~ 1)と同じである。我々は、CO(J=1-0)とは異なり、CO(J=3-2)での星形成則が100pcスケールでも強い相関を示すことを追認した(図2)。

さらに我々は、ディスク内での4つの異なる領域(銀河半径1kpc内、北側/南側渦巻腕、GHR)によって、星形成則が違った振る舞いを示すかを調べたところ、他のディスク領域に比べて、GHRでは約1桁高いSFRを示すことが分かった。星形成効率(SFE: SFRを分子ガス質量で規格化したもの)と $R_{3-2/1-0}$ との関係は正の相関を示した(図3)。特筆すべき点はGHRで両数値は他のディスク領域に比べて超過(SFEで4—7倍、 $R_{3-2/1-0}$ で1.5倍の差)が見られた。このようなGHRでの高いSFE($2-3 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$)や $R_{3-2/1-0}$ の値(平均 ~ 0.6)は、遠方のスターバースト銀河のそれに匹敵する程である。これは、GHRが大規模なスターバーストを構成する要素の一つである可能性を示唆する。我々は、3つの指標(1)CO光度質量変換係数、(2)初期質量関数(IMF)や(3) $R_{3-2/1-0}$ でトレースされる高密度分子ガスの割合の違いをGHRと他の領域に対して調べた。結果、CO光度質量変換係数の違いではなく、“top-heavy (優位的に大質量星が生まれる)”なIMF、且つ、高密度分子ガスの割合が高い場合に、GHRでの高いSFEが説明できうることを示した。GMCや星団を分解できるスケールで求められたCO光度質量変換係数、高密度分子ガスの割合やIMFを銀河の各領域に対して比較できるのは近傍銀河だけであり、SFEの違いの原因をこれほど定量的に議論したのは本研究が初めてである。

第二に、我々は、GMC進化の観点から、高密度分子ガスと星形成領域の空間的な相関を調べることを目的に、初めてCO(J=3-2)データから71個のGMCを同定した。また、可視光のアーカイブデータを用いて、星の数密度分布の超過(これまでの視覚的な方法より客観的な手法である; 図4参照)から75個の星団を同定した。さらに、星の進化モデルを用いて、これら星団の年齢を見積もった。我々は、GMCと若い星団、HII領域との空間的な重なりによって(図5上参照)、GMCを5つのタイプに分類した: タイプAは大質量星形成の兆候がない、タイプBは比較的小さなHII領域のみ付随する、タイプCはHII領域と若い($< 10 \text{ Myr}$)星団の両方が付随する、タイプDはHII領域と比較的若い($10-20 \text{ Myr}$)星団が付随する、タイプEはHII領域と比較的古い($> 20 \text{ Myr}$)星団が付随するGMCである。観測領域の端に位置するGMCを除く64個のGMCのうち、5つのタイプに分類されたGMCの数はそれぞれ1(2%)、12(19%)、29(45%)、18(28%)、4(6%)個であった。一つの渦巻銀河内で星団の年齢を使って定量的にGMCの分類を行った例は初めてである。我々はこれらタイプ分けがGMCの進化系列に相当すると解釈する。個数比から各進化段階のタイムスケールを見積もると、それぞれ1Myr、5—7Myr、9—11Myr、10—13Myr、5—6Myrであり、質量 10^5 Mo 以上のGMCの寿命は30—40Myrと推定された。これは、これまでにLMCで報告された寿命よりやや長い、その違いは対象とする分子雲の大きさや分子雲のトレーサーの違いで説

明できうる。年齢が10—30Myrの星団と寿命が<10MyrとされるHII領域の両方がGMCに付随しているということは、GMC内ではこのタイムスケールで継続的に大質量星が形成されていることを示唆する。また、 R_{3-21-0} でトレースされる高密度分子ガスの割合が大質量星形成領域の周りで高くなっていることが分かった(図5下)。これらの結果から、前の世代の星団の周りで高密度分子ガスが形成され、そこで次の世代の星が生まれるように、GMC内部で星形成の伝搬が起こっていると考えられる。

第三に、我々はGMC内部の詳細構造と星形成の関係から星形成の伝搬をより詳細に明らかにするために、M33で最も明るいGHRであるNGC604に対して、NMAを用いた高分解能(~ 10 pc)のCO(J=1-0)、HCN(J=1-0)、89 GHz連続波観測を行った。COデータから10個の分子雲(質量 $(0.8-7.4) \times 10^5$ Mo、サイズ5-29 pc)を同定した。これらは典型的な銀河内のGMCのサイズと同程度である。さらに、最も大きな分子雲2箇所ではHCN放射を、また“H α シェル”の淵で89 GHz連続波を初めて検出した(図6)。HCNと89 GHz連続波のピークはCOのそれとはオフセットがあり、中心の星団の方向に分布する(図6)。10個のうち3つの分子雲は、空間的にも速度的にもH α シェルと良く相関しており、分子ガスが膨張するHII領域と相互作用していることが示唆される。さらに、89 GHz連続波、H α とSpitzer 24 μ mデータから求めた星形成効率が、中心の星団からの距離に対して、減少傾向にあることが分かった(図7)。これは、星団からの距離に従って分子雲の進化段階が変化していることを示唆する。高空間分解能のデータによって我々はこれまでにTosaki et al.(2007)により提案されていた、等方的に膨張するHII領域がまわりのガスを外側へ押し出し、そこで高密度分子ガスが形成され星形成が促されるというシナリオをさらに支持する結果を得た。

銀河スケールからGMC内部の分子雲のスケールにまで及ぶ、これら3つの研究を組み合わせることによって、(1)星形成則とGMCの進化の関係、(2)GHRで高いSFEをもたらす星形成プロセスの原因を調査した。同定されたGMCで星形成則をプロットするとType C、DやEは、これまでに求められた相関の傾き(~ 1)の周りに分布しているのに対し、Type AやBはそれらよりオフセットがあることが分かった。すなわち、これまで経験則として多く使われてきた星形成則における分散がGMCの進化にともなう密度変化の違いに起因する可能性を示す。これは、これまでの遠方銀河における研究では、分解能の不足や観測対象が明るい天体に偏っているために、明らかにできなかったことである。また、GHRと、それと同程度の年齢で同程度のガス量を含む“普通”のHII領域での星形成のプロセスの違いを調べた。両者について、中心の星団から放射される光子数を比較したところ、GHRでは後者より10—30倍大きいこと、さらに、電離されたHII領域の膨張によって掃き集められるガスの量は、約10—30倍大きいことが見積もられた。すなわち、より大きな星形成領域ほど、先にできた星団の周りに、より効率的にガスが集められ、そこで次の世代の星が形成される。したがって、GHRでは星形成の材料である分子ガスがより短いタイムスケールでより多量に集められた結果、GHRのSFEが高くなると考えられる。

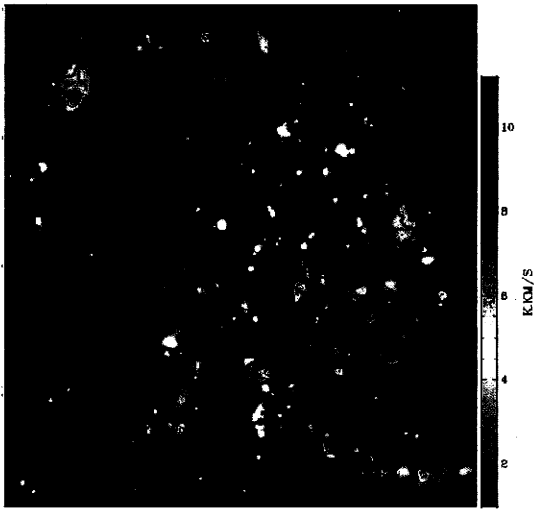


図 1. M33 の CO(J=3-2)積分強度図. 背景は H α 放射. 実線で囲われた領域は CO(J=3-2)で観測された領域.

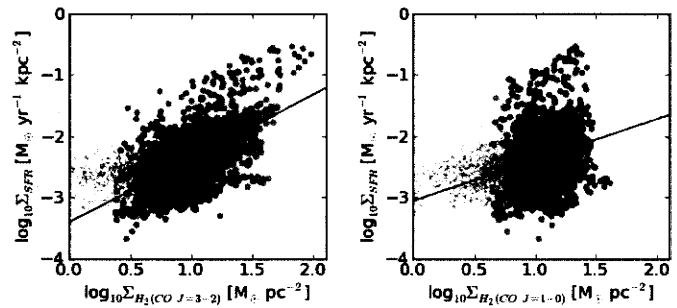


図 2. CO(J=3-2)(左)と CO(J=1-0)(右)それぞれに対する星形成則. 縦軸星形成率, 横軸分子ガス質量. 実線は近似直線で, 傾きはそれぞれ 1.04 と 0.67.

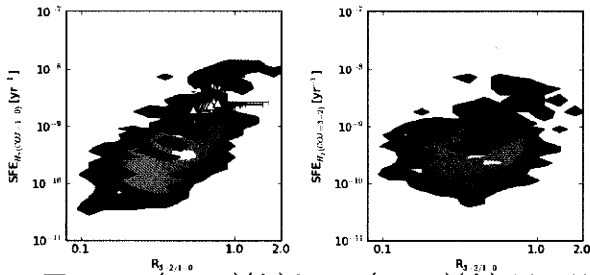


図 3. CO(J=1-0)(左)と CO(J=3-2)(右)それぞれから求めた SFE と $R_{3-2/1-0}$ の相関関係. 赤い等高線は GHR, 青はそれ以外.

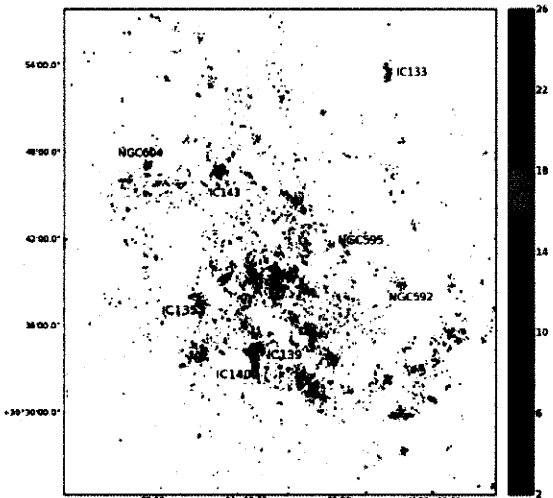


図 4. 100Myr より若い星の数密度分布. ラベルされているのは比較的明るい星団.

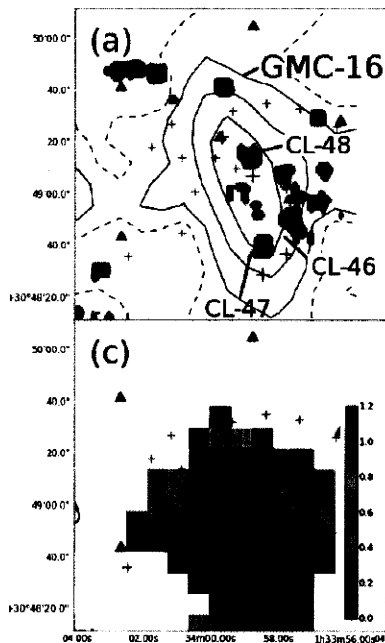


図 5. TypeD に分類された GMC-16 の CO(J=3-2)(上)と $R_{3-2/1-0}$ (下)の分布. 青い等高線は比較的若い星の数密度分布(図 4 と同じ). CL-XX は同定された星団. 赤と橙の+は HII 領域, 緑の▲は $24\mu\text{m}$ のソース. $R_{3-2/1-0}$ は星団の側で高くなる.

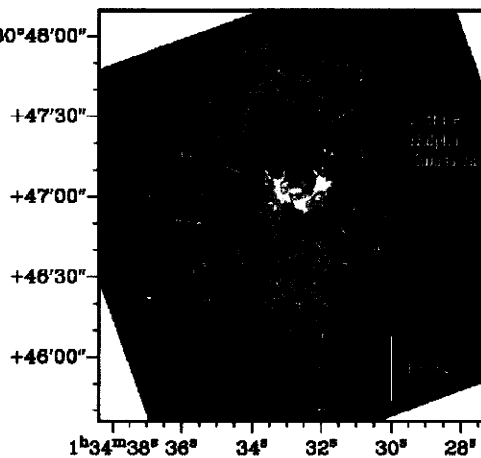


図 6. NGC604 における CO(J=1-0)(シアン), HCN(赤), 89GHz 連続波(黄)の高分解能マップ. 背景は H α 画像で灰色の等高線は HII 領域の広がりを示す. ○は干渉計の視野で HCN, 連続波を観測した領域を示す. ガスは HII 領域の中心から南東方向に多く存在する.

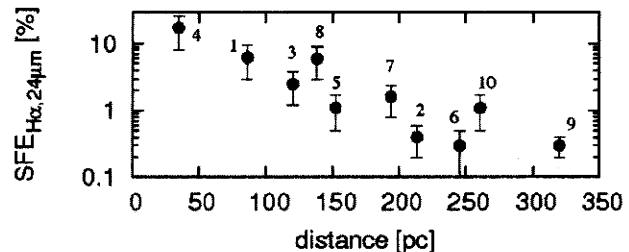


図 7. NGC604 の中心(図 6 中ピンクの点)からの距離に対する, 一つの銀河から GMC 内部の分子雲のスケールにまで及ぶ各分子雲における SFE の変化. SFE は中心から減少傾向にある.