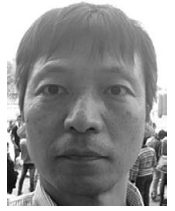


星形成レガシープロジェクトと CARMA-NRO Orion Surveyで探る 星の誕生過程



中 村 文 隆

〈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: fumitaka.nakamura@nao.ac.jp

星形成レガシープロジェクトは、野辺山45 m電波望遠鏡を用いて近傍の星形成領域のオリオンA, Aquila Rift, M17領域を観測し、一酸化炭素とその同位体の分子輝線の広域マップを作成するプロジェクトである。CARMA-NRO Orion Surveyは日本側から見た場合、星形成レガシープロジェクトの一部として推進された国際プロジェクトである。野辺山45 m鏡のデータとアメリカCARMA干渉計データの大規模合成により、今までにない高空間分解能（約3000天文単位）のオリオンA分子雲のマップを作成し、オリオン星形成領域の研究から銀河における星形成過程の包括的理解を目指している。今までにない精細な広域分子ガスマップにより、活発な星形成領域として有名なオリオンA分子雲の詳細構造が明らかになってきた。

1. 星形成レガシープロジェクト

星形成レガシープロジェクトというのが、正確にいつ始まったか定かでない。もう10年ほど前になるだろう。当初は、野辺山45 m電波望遠鏡のメンテナンスや共同利用に提供が難しい所内望遠鏡時間もサイエンスに使えないか、と観測所長から話があり、一酸化炭素に代表される分子輝線で近傍の星形成領域のマッピング観測を進めてはどうかという提案をして始まった。10年の間にメンバーの入れ替わりも激しく、多くの大学院生は卒業し、若手メンバーも新しい職についたりし、年寄メンバーだけが同じ所属のままでここまでたどり着いた。

開始した当時は、野辺山45 m電波望遠鏡にはBEARS (The 25-BEam Array Receiver System) と呼ばれる25ビーム受信機が搭載され、マッピング観測の主力であった。TZ受信機という1ビ-

ームの高感度受信機も導入されている時であったが、より効率的な観測を進めるために高感度マルチビーム受信機 (FOREST) の開発が推進されている時であった。

野辺山45 m電波望遠鏡は世界最大級の口径を持つ日本が誇る単一電波望遠鏡であるが、欠点もいくつかあった。例えば、IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique) 30 m等の世界の他の望遠鏡と比べ、ビーム能率が格段に悪く (観測周波数100 GHzで30-50%くらい)、限られた観測時間で効率よくデータを取得するには、弱い輝線の観測は難しかった。さらに、星形成に直結するような高密度ガスは星形成領域全体に広がって分布しているわけではなく、45 mの角分解能でも十分に分解できないような小さな領域に集中しているので、ビーム希釈の影響を強く受ける。そのため、狭い領域に局在している高密度ガスからの分子輝線を用いた定量的な解析は難しい

という欠点もあった。物理的に意味のある解析を展開するには、やはりALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) のような干渉計を用いた高分解能観測が必須である。

当初は所内観測時間の空き時間に観測割り当てが入るという運用上の問題点もあった。上で述べた低いビーム能率とビーム希釈の影響も鑑み、分子雲中に広がって存在し、輝線強度も比較的強い分子輝線の観測を柱とし、太陽系近傍の星形成領域をターゲットに選ぶことにした。まず分子雲中のガスの基本構造・運動状態を明らかにすることが星形成過程の解明の鍵である。これをプロジェクトの第一目標に掲げ、観測が始まった。

分子雲の力学状態は、ガスの自己重力・超音速乱流・磁場により決められていると期待される[1, 2]。しかし、それらがどの程度重要であるかは十分に理解されていない。特に、超音速乱流は乱流横断時間で減衰するため[3]、何世代にもわたる星形成過程を維持するためには、減衰した乱流を星からのフィードバック等により補ってやる必要がある。理論的にはそのようなメカニズムがよく議論されているが[4, 5]、観測的実証に関しては全く進んでいない。太陽系近傍の分子雲の構造や力学状態を詳細に調べることから、この問題を解明することが大きな科学目標となった[2]。

ターゲットに選んだのは、オリオンA分子雲、カリフォルニア雲、Aquila Rift, M 17の4領域だった。どの領域もHII領域^{*1}を持つ比較的太陽系近傍にある星形成領域である。しかし、その後、観測時間の制限が設けられ、完成した新受信機FORESTの実際の性能なども考慮し、泣く泣くカリフォルニア雲はターゲットから省き、最終的に3領域の観測を進めることになった。

私はもともと数値シミュレーションが専門で、星形成領域の観測の経験はほとんどなかったの

で、プロジェクトを推進するにあたって、星形成領域の電波観測の経験が豊富で実際に現地に行き一緒に観測実行できる研究者の助けが必要なことは明らかであった。そこで、世界的には暗黒星雲の全天減光マップ製作者[6]として有名な、東京学芸大学の土橋一仁さんの協力を仰ぐことにした。土橋さんは、学生時代、主に深夜、台湾ラーメンで有名な名古屋市今池の中華料理店に台湾ラーメンと青菜炒めを食べに通った仲であったが、しばらく連絡は取っていなかった。日本天文学会年会でお会いした際にプロジェクトの話をし、快く参加してもらえることとなった。土橋さんは古参メンバーとして観測、データ解析、論文執筆などで活躍していただいた。またプロジェクト開始当初は、島尻芳人さんが野辺山で学位を取得する前後の時、観測に関して大変頼りになる存在であったが、程なくしてポスドクとしてフランスに渡航し、その後、参加した石井峻さんも数年ほどでチリ(ALMA)に異動したりして、観測・解析体制を整えるのが大変であった。さらにサイエンス面での補強のため、近赤外線による星形成領域の磁場観測を進めていた名古屋市立大学の杉谷光司さんにも参加していただいた。

当初は、空き時間で観測していたので、急に空いた時間で観測するため、日帰りで野辺山に行くこともあった。まとまった観測時間がなかったわりには、地道に続けていくことでマップは徐々に完成していった。特に、最後の2年間は、観測割り当ても当初よりは改善し、飛躍的にデータ取得ができるようになった。しかしながら、割り当て時間は、主に週末・休日であったので、別の意味で大変であった。その時期は、東京学芸大学、新潟大学、日本女子大学、茨城大学の大学院生(片倉翔、秦野義子、山日明文、広瀬亜紗、佐々木一成、浦沢優弥子、小山田朱里、田辺義浩さんら)

^{*1} HII領域とは、若い大質量星からの紫外線放射により電離したガスから出る輻射により光っている領域である。大質量星の進化は速いので、分子雲の内部や近傍で観測される天体である。

の活躍があり、なんとか、観測を完了することができた。W40とSerpens Southについては下井倉ともみさん、M17については杉谷光司さんの記事で紹介する予定である。ここでは、オリオンA分子雲の成果について簡単に紹介する。

2. CARMAとのデータ合成

2011年頃、野辺山観測所長であった川邊良平さんと、CARMA (Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy) 観測所長のJohn Carpenterさんから、CARMA干渉計で取得したデータと野辺山45 m望遠鏡のデータを合成して、最も近傍にある大質量星形成領域、オリオンA分子雲(距離約400 pc)の一酸化炭素輝線による高分解能広域マップを作らないかという話が舞い込み、CARMA観測所に大規模プロジェクトの提案をすることになった。CARMA望遠鏡はアメリカ・カリフォルニア州にあった電波干渉計である(図1参照)。2015年4月に全観測を終了し、閉所された。本プロジェクトの観測が最後の観測であった。

2つのデータを合成して約5秒角の分解能を持つマップを作るという話は、野辺山45 m鏡の欠点の1つであるビーム希釈の影響を最小限にできる可能性があり、また今までで最も高分解能の広域オリオンA分子雲マップが残せる可能性があり大

変魅力を感じ、一緒に観測を進めることになった。

合成データを使うと、野辺山45 m鏡で取得された、おうし座やへびつかい座にある分子雲(距離約140 pc) [7]やALMA望遠鏡で取得した太陽から数kpcの距離にある分子雲の内部構造を、同じ空間分解能で直接比較することができる [2]。異なる距離にある分子雲が直接比較できるというのは、サイエンスをする上で非常に魅力的である。

当初は、従来の受信機BEARSを用いた広域マッピング観測を進めていたので、CARMA側にそのデータを提供して、当時東京大学の大学院生であった原千穂美さんがカリフォルニア工科大学に長期滞在し、大規模なデータ合成を推進していたが、様々な壁に当たり、作業は難航した。

干渉計のデータと単一鏡のデータを合成する際、フーリエ空間で重複する空間波長を目印にデータ合成するため、合成するデータの感度をおおよそ合わせておく必要があった。BEARSだけで取得したデータは残念ながら感度が悪く、合成データもあまり良い出来栄ではなかった。それでも、分子雲北側のオリオン大星雲領域のマップはきれいに仕上がった。より広い領域の質の良い合成マップは、FORESTで取得したデータを重ね合わせて感度を大幅に改善する必要があった。図2は試行錯誤の上に出来上がったマップである。一番左は野辺山45 m鏡のみのマップ、中央はCARMA干渉計のみのマップである [8]。野辺山のみでは、分子ガスの広がる様子がよく捉えられているが、ピンぼけ写真のようなイメージであることがわかる。一方、CARMAのみのマップでは、分子ガスの広がりは見えず、小さな領域に局在する分子ガスのみが捉えられていることがわかる。一番右のイメージは両データを合成したデータである。分子ガスの広がりから、微細な構造までよく捉えられている。合成データ作成後、隔週の定期ミーティングや会合などを重ね、サイエンスの議論を重ねている。図3は2017年8月にコロ



図1 CARMA干渉計 (Jens Kauffmannさん撮影)。

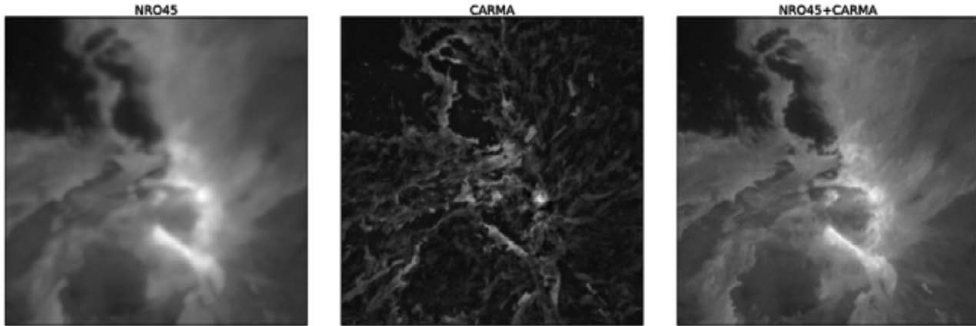


図2 データ合成の様子(カラーの口絵と同じ). 左: 野辺山45 m鏡のみで取得されたオリオン大星雲付近のCOの強度図(実効分解能約21秒角). 図の中央よりやや右下に見える棒構造はオリオン・バーと呼ばれる特徴的な構造. 中央: 同じ領域のCARMA干渉計で取得された図(分解能約5秒角), 右: 野辺山とCARMAのデータを合成して得られた図(実効分解能約8秒角~3000天文単位) [8].



図3 CARMA-NRO チームミーティング. コロラド大学にて.

ラド大学で開催された第一回チームミーティングの際に撮った写真である.

3. サイエンス

本稿では上述の通り, 星形成レガシープロジェクトの3つのターゲットのうち, オリオンA分子雲の観測から明らかになりつつある分子雲の性質について紹介する.

(1) 高分解能のCARMA-NRO マップ

今までにない精細な分子雲の内部構造が明らかになってきた. 最終的なマップの分解能は約8秒角, つまり約3000天文単位で太陽系のサイズ^{*2}の50倍程度の空間分解能が達成できた. 図4は一酸化炭素分子輝線のオリオンA分子雲合成強度マップである. 図の右端の領域には, 大質量星の影響で形成されたバブル構造と分子雲が接する領域の微細構造が見えている. この領域は, 波型構造をした赤外線分布が, Spitzer望遠鏡により発見されているが [9], これと同程度の分解能の分子ガス分布が明らかになった. 図4の右上付近のK-H Rippleと書かれた構造である. この波型構造は, 大質量星による膨張シェルと分子雲の相互作用によって駆動されたケルビン・ヘルムホルツ不安定によりできたと指摘されている構造である [9, 10]. その他, 大質量星からの星風により吹き流されてきたようなノット構造などの高分解能のイメージ(図4中の左の拡大図)が得られた. その他, マップの中には, ロケット効果で加速されているガス塊なども見える. これらの構造は, 以前から発見されていたが, 今回, そのような構造に付随する分子ガスの構造を分解し, 速度構造

*2 ここでは太陽系のサイズは海王星の公転軌道の直径とした.

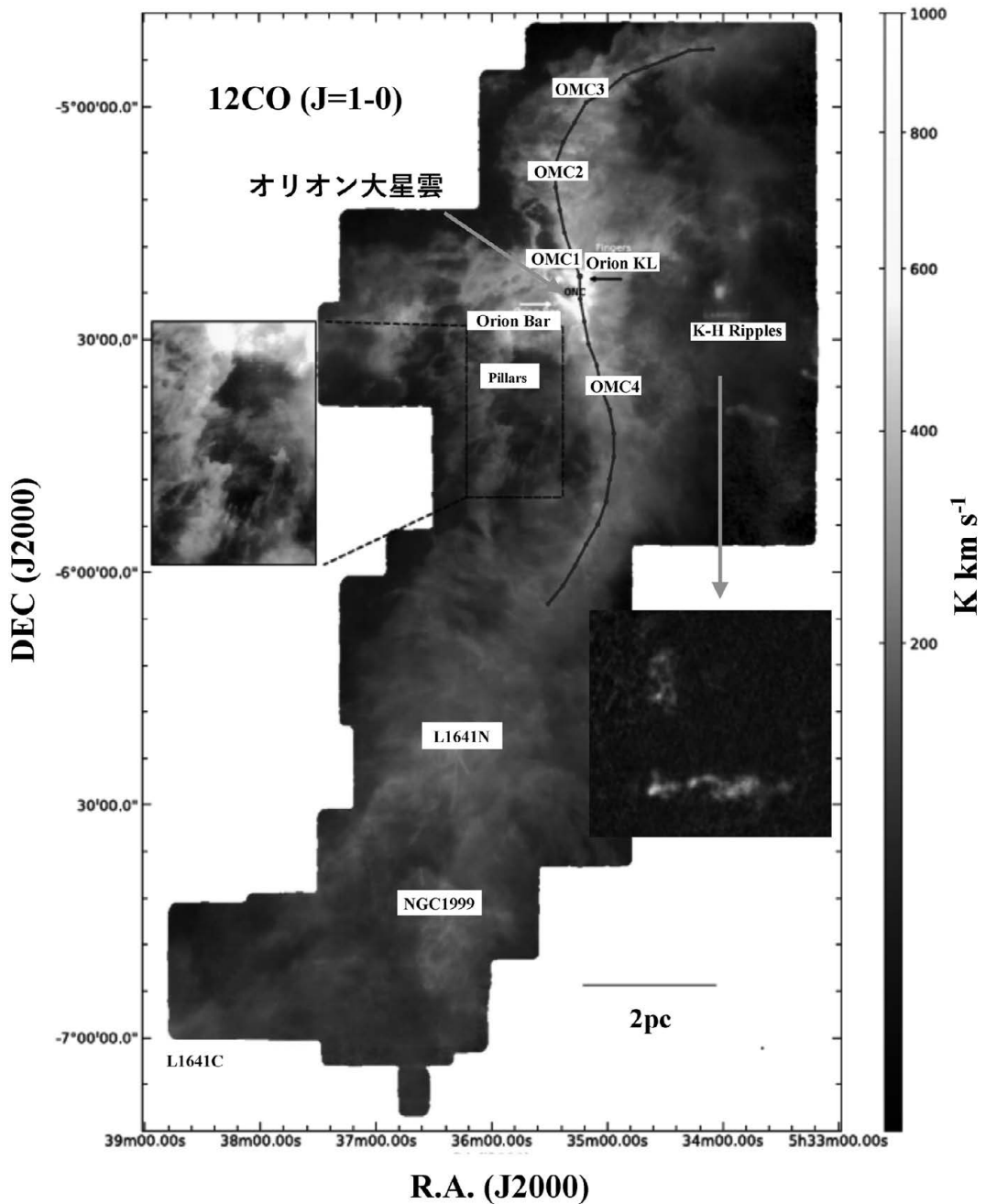


図4 野辺山45 mとCARMA干渉計データの大規模合成により作成されたオリオンA分子雲の一酸化炭素輝線 ^{12}CO の積分強度図 [8]. オリオン大星雲領域にある大質量星の影響で吹き流されたピラー構造の拡大図も示した. 図の右手側には, 分子雲表面付近で起こったケルビン・ヘルムホルツ不安定により形成されたと考えられている波状構造 (K-H Ripples) がある. 右下に波状構造の ^{13}CO による拡大図 (速度6 km/s付近) を示した.

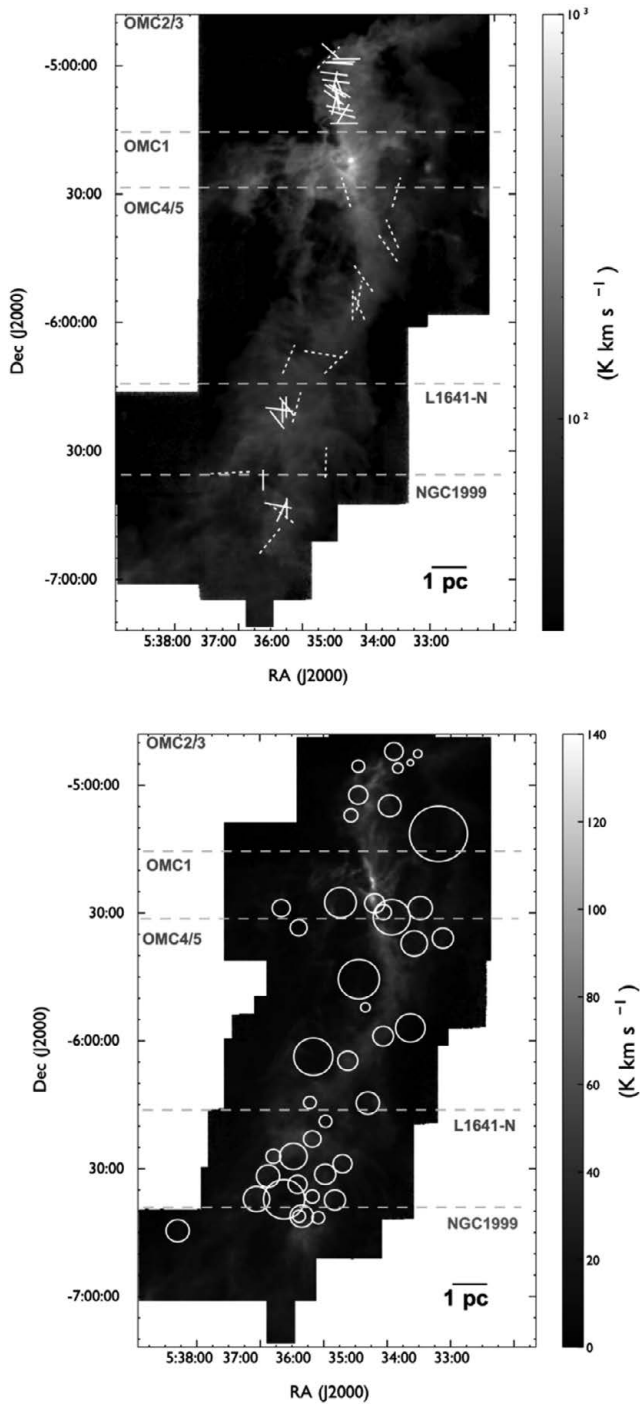


図5 (上) 同定された原始星アウトフロー [12] と (下) 膨張シェル [13] の分布. オリオン大星雲がある OMC-1 領域では、濃い分子ガスの影響で、アウトフローの同定が困難であったため、アウトフロー同定は行っていない。

も明らかにすることができた。

(2) 原始星ジェット・膨張シェルとの同定

星がコアの重力収縮で生まれる際に、原始星ジェット・アウトフローという質量放出現象が起こる。アウトフローは時には秒速100 kmもの速度に加速される[1]。原始星の周りにそのような高速度成分の有無を見ることでアウトフローが検出できる。また、大中質量星からの星風はその周囲に膨張するシェル構造を作る[11]。このような原始星ジェットや膨張シェルは、周りの分子ガスをかき乱し、次世代の星形成に影響を与える。今回、図5に示したように、分子雲内で44個の原始星アウトフローと、42個の膨張シェルとの同定に成功した[12, 13]。うち点線で示した17個の原始星アウトフロー、およびほぼすべての膨張シェルは初検出である。これらの構造が分子雲に及ぼす影響は、従来の予想よりも大きいことが明らかとなった。分子雲乱流の運動量や運動エネルギーは乱流の横断時間程度で減衰することが知られている[3]。減衰した分の運動量や運動エネルギーを継続的に分子雲中に注入できれば、観測されているような超音速の分子雲乱流を長時間維持することが可能となる。我々が同定した原始星アウトフローと膨張シェルの運動量と運動エネルギーが、理論シミュレーションが予想するように数10%の効率で分子雲乱流へ変換されると仮定すると[4]、原始星アウトフローと膨張シェルによる乱流の運動量と運動エネルギーの注入率は、それらの減衰率のそれぞれ40%、200%程度になることがわかった。星のフィードバックが多かれ少なかれ、分子雲乱流の生成に寄与していると結論付けられた。ただし、これらの星のフィードバックだけでは、分子雲全体が壊されることはないこともわかった。Herschel望遠鏡の観測により、分子雲内部にはフィラメント構造が普遍的に存在していることが最近注目されているが[14]、フィラメントと原始星ジェットの放出される向きの間にはあまり相関がないことも明らかとなった(図6

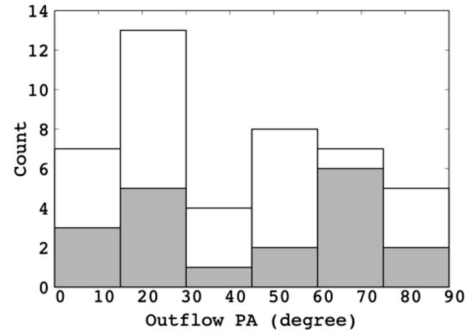


図6 原始星アウトフローの向きとフィラメント構造のなす角度のヒストグラム[12]。白いヒストグラムはオリオンA分子雲全体。灰色のヒストグラムは北側のOMC-2/3領域のみの分布。

参照)。なお、得られた結果は、茨城大学の田辺義浩さんの博士論文としてまとめられた。OMC-2 FIR3と呼ばれるアウトフロー天体が複数含まれる領域については日本女子大の小山田朱理さんが詳細な解析[15]を行い、彼女の修士論文にもまとめられた。

(3) 分子雲の内部階層構造の同定

本プロジェクトでは、Dendrogram[16]とSCIMES[17]と呼ばれる分子雲の内部構造を同定するツールを使って、雲の内部構造や密度の階層構造を定量的に求めた。Dendrogramでは、分子輝線の3次元(位置-位置-視線速度)データ空間内で、輝線強度のピークを探し出し、それらのピークがその近傍にある構造と3次元データ空間内でどのようにつながっているかを解析できる。Dendrogramで同定した階層構造のデータにSCIMESをかけると、それらの構造のうち、位置・速度が関連しているピークを持つ構造を「雲」として同定してくれる。これら2つのツールによって、図7に示すように、分子雲の詳細な階層構造を同定することに成功した。野辺山のみデータからは、78個の構造の同定に成功した[18]。CARMA-NRO合成データを使うと、1500個ほどの構造が同定された。分解能の良いデータを使うと、多数の小さな雲や大きな構造が複数に分かれて同定されたりし

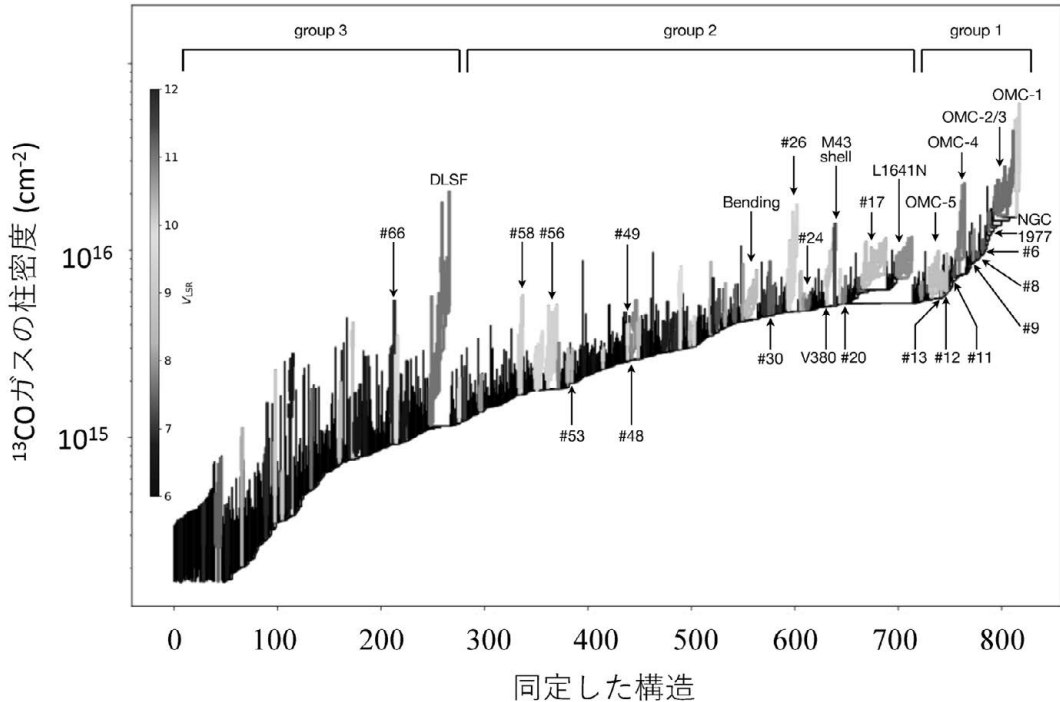


図7 Dendrogramにより同定された分子雲の階層構造. 1本1本の線は、一酸化炭素輝線強度から同定された内部構造（クランプと呼ぶ）を示す [18]. 横軸は同定された内部構造の番号で主にピーク強度と階層構造の情報を使って便宜的に割り振られた番号である. 主な構造の名前を矢印で示した. 縦軸はピークの位置での ^{13}CO ガスの柱密度. クランプのピーク強度や速度情報を使って仲間の構造ごとに分類した, 分子雲の内部構造の家系図のようなもの. 各構造の階層的なつながりがわかる. グレースケールでSCIMESで仲間と認定された構造を示した.

だが、大きな雲はマップの分解能にさほどよらず同定できた。また、分子雲構造がオリオン大星雲からのUV放射の影響を受けてCO分子の存在量が分子雲全体で変化している様子も明らかになった。同位体を含む分子である ^{13}CO 、 C^{18}O などの存在量は分子雲全体で5.7-17.4と1桁程度の変化がある。さらに、図8に示したように、紫外線の強度と $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$ 存在量比の間には正の相関が見られた。これは、大質量星が形成されているオリオン大星雲付近では、 ^{13}CO に比べて存在量が相対的に少ない C^{18}O が選択的に壊され、 $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$ の比が大きくなるという解釈で説明可能である。

(4) 星のたまご、高密度コアの同定

8秒角分解能の C^{18}O マップから、Dendrogramを用いて、約2000個の高密度コアの同定に成功し

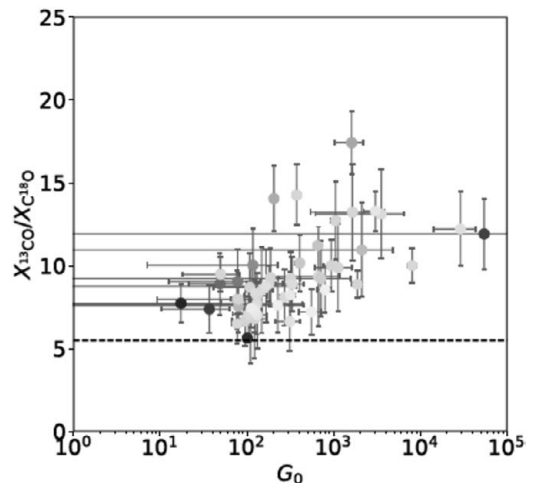


図8 $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$ の存在量の比と紫外線強度 G_0 の関係 [18]. 紫外線強度が強くなると、相対的に C^{18}O の存在量が小さくなる。

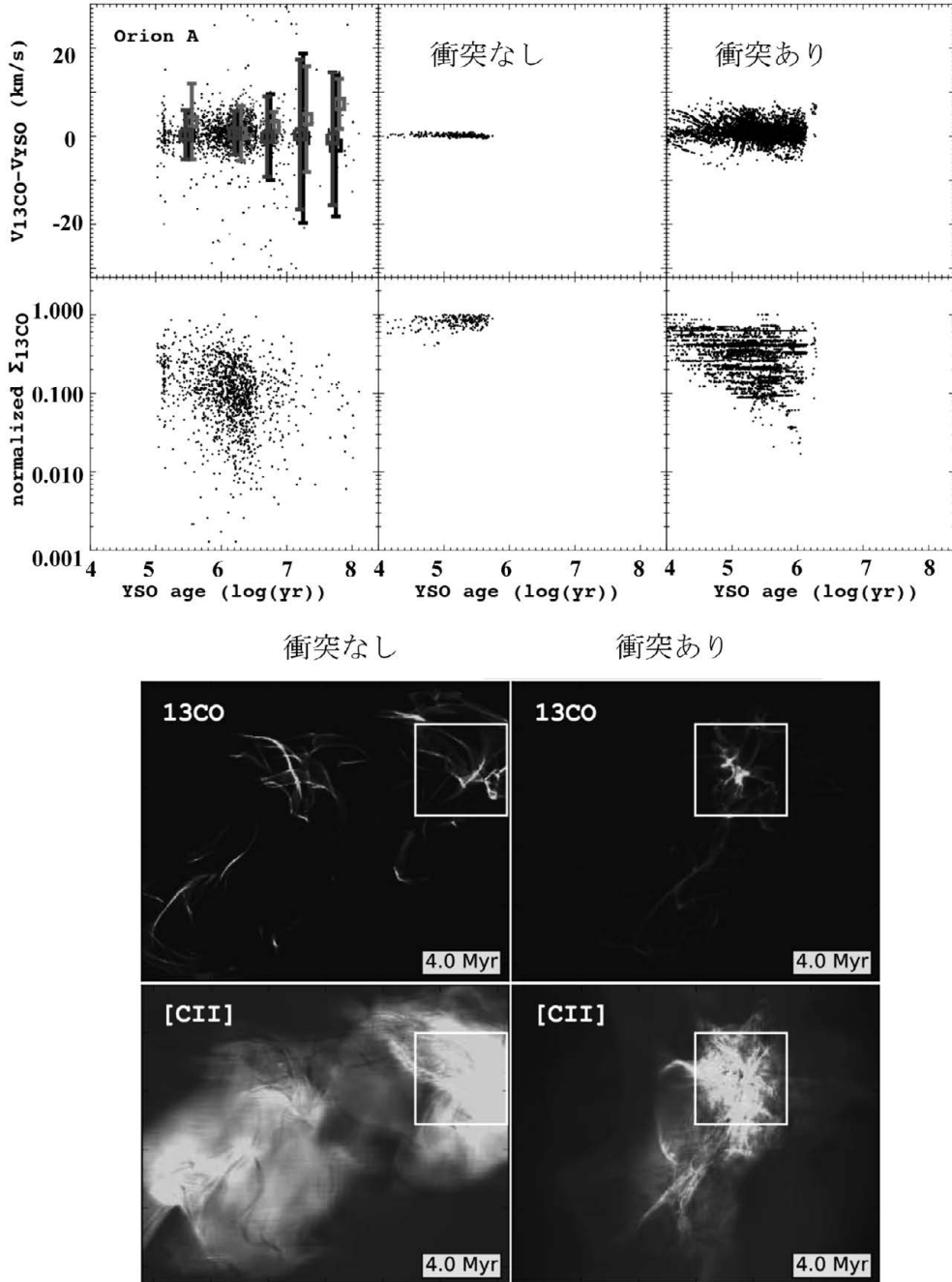


図9 上段上：原始星と ^{13}CO の速度差と原始星の年齢の関係、上段下：原始星の位置でのCO柱密度と原始星の年齢の関係 [24]。下段のイメージは、分子雲衝突のシミュレーション結果 [23]。2つの分子雲のoff-center衝突により、オリオンA分子雲と似た形状の分子雲（北側で密度の高いフィラメント状分子雲）が形成される様子がわかる。原始星の年齢が大きくなるに従い、分子ガスと原始星の速度差の分布が分子雲衝突の場合と矛盾しないこと、ガスが減少することがわかった。

た。その成果は総研大生の竹村英晃さんの2019年度の修士論文としてまとめられた。オリオン大星雲領域の高密度コアと星の分布の比較から、星が形成される際に、コア外の周囲の分子ガスが高密度コアに降着する過程が重要かもしれないという、従来の星形成シナリオでは説明が難しい事柄がわかってきた。さらなる解析により、高密度コアから原始星、主系列星への進化における質量獲得プロセスが明らかになると期待される。

(5) オリオンA領域での分子雲衝突の可能性

最近、分子雲衝突によって誘発される星形成過程が盛んに研究されている [19–21]。オリオンA領域の原始星の視線速度を測定したAPOGEE IN-SYNCプロジェクト^{*3}のデータ [22]とCARMA-NROの¹³COマップを直接比較し、原始星とガス間に大きな速度差があり、その速度差の様子が分子雲衝突のシミュレーションから予想される分布 [23] に似ていることがわかった (図9参照)。オリオンA分子雲の星形成も分子雲衝突により誘発された可能性がわかってきた [24]。

4. 最後 に

CARMA-NROサーベイによる¹²CO/¹³CO/C¹⁸Oのマップは将来一般公開されることになっている。多くの人にデータを使ってもらい、新しいサイエンスの成果が出ることを祈っている。

これまで星形成レガシープロジェクトに参加していただいた方々、野辺山観測所の職員の皆様に感謝する。また、単一鏡データリリースを長期間待っていただいたCARMAグループの皆さんにも深く感謝する。

参考文献

- [1] Shu, F. H., et al. 1987, ARAA, 25, 23
 [2] Nakamura, F., et al., 2019, PASJ, 71, S3

- [3] Stone, J., et al., 1998, ApJ, 508, L99
 [4] Nakamura, F., & Li, Z.-Y., 2007, ApJ, 662, 395
 [5] Vázquez-Semadeni, E., et al., 2019, MNRAS, 490, 3061
 [6] Dobashi, K., et al., 2005, PASJ, 57, S1
 [7] Yoshida, A., et al., 2010, ApJ, 718, 1019
 [8] Kong, S., et al., 2018, ApJS, 236, 25
 [9] Berné, O., et al., 2010, Nature, 466, 947
 [10] Berné, O., & Matsumoto, Y., 2012, ApJ, 761, L4
 [11] Arce, H., et al., 2011, ApJ, 742, 105
 [12] Tanabe, Y., et al., 2019, PASJ, 71, S8
 [13] Feddersen, J. R., et al., 2019, ApJ, 862, 121
 [14] André, P., et al., 2019, A&A, 629, L4
 [15] Nakamura, F., et al., 2019, PASJ, 71, S10
 [16] Rosolowsky, E. W., et al., 2008, ApJ, 679, 1338
 [17] Colombo, D., et al., 2015, MNRAS, 454, 2067
 [18] Ishii, S., et al., 2019, PASJ, 71, S9
 [19] Tasker, E., & Tan, J. C., 2009, ApJ, 700, 358
 [20] Furukawa, N., et al., 2009, ApJ, 696, L115
 [21] Nakamura, F., et al., 2012, ApJ, 746, 25
 [22] Da Rio, N., et al. 2017, ApJ, 845, 105
 [23] Wu, B., et al., 2017, ApJ, 835, 137
 [24] Lim, W., et al., 2020, PASJ, submitted

The CARMA-NRO Orion Survey and NRO Star Formation Legacy Project

Fumitaka NAKAMURA

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

Abstract: NRO Star Formation Legacy Project is a project to make wide-field ¹²CO/¹³CO/C¹⁸O maps of nearby star-forming regions, Orion A, Aquila Rift, and M17, using the Nobeyama 45-m telescope. The CARMA-NRO Orion Project is a part of the NRO star formation Legacy Project from the Japanese perspective. In this CARMA-NRO Orion Project, we combined two datasets taken with the CARMA interferometer and the 45-m single dish telescope, and made ¹²CO/¹³CO/C¹⁸O maps with a fine angular resolution of about 3000 au. Using these maps, we attempt to understand how stars like our sun are formed from molecular clouds in our Galaxy. We have revealed interesting cloud structures and dynamics using the combined images.

^{*3} Infrared Spectra of Young Nebulous Clusters (IN-SYNC). スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) III の Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) プロジェクトの中の観測プログラム。星形成領域に付随する星や原始星の近赤外線スペクトルを用いて星の視線速度を測り、星の集団の力学状態を調べる観測計画。