

称号及び氏名 博士(理学) 徳田 一起

学位授与の日付 平成 28 年 12 月 31 日

論文名 **Observational Study of High-Density Cores in Early Stages of Star Formation with ALMA**  
(ALMA による星形成初期段階にある高密度分子雲コアの観測的研究)

論文審査委員 主査 大西 利和  
副査 溝口 幸司  
副査 田中 智  
副査 前澤 裕之

2016 年度 博士論文要旨  
Observational Study of High-Density Cores  
in Early Stages of Star Formation with ALMA  
(ALMA による星形成初期段階にある高密度分子雲コアの観測的研究)

大阪府立大学 理学系研究科 物理科学専攻 宇宙物理学研究室  
徳田一起

星(恒星)は最も基本的な宇宙の構成要素の1つであり、その形成過程を明らかにすることは、我々の太陽系の起原や銀河の形成の歴史を辿る上で非常に重要である。しかし、この星形成過程は重力/磁場/乱流などの物理過程が複雑に絡み合ったプロセスであり、空間/密度も数桁に渡って変化する現象であるため、その理解は理論的/観測的に困難を極める。私は、電波干渉計である Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array(ALMA) やその他の単一電波望遠鏡のデータを用いて星の誕生の母体となる分子雲の中でも密度の高い“分子雲コア”に重きを置いて星形成の初期条件を探る為に観測的研究を推進してきた。

<研究の背景, 研究手法>

1970 年代の先駆的理論研究(e.g., Larson 1969; Shu 1977)に始まり、その後発達した電波観測(e.g., Myers et al. 1983)等によって確立されつつある小質量星(1 太陽質量程度)の形成シナリオは、高密度( $>10^4$  個  $\text{cm}^{-3}$ )なガス塊(分子雲コア)が重力収縮し、原始惑星系円盤を伴った原始星を形成し、その後質量降着を経て主系列星になるといったものである。しかし、形成される星質量の決定要因、角運動量輸送機構、連星形成機構など、星形成の初期条件に関する本質的な問題を検証するにはさらなる観測技術の発達が待たれていた。この星形成初期段階では、分子雲コア収縮/分裂、最初の静水圧平衡天体(ファーストコア)の形成、アウトフローによる質量の放出など、上記の課題と深く関わる現象が起こるため、そのような天体を詳細に観測し、理論研究と比較することが星形成の初期条件を探る上で重要となる。

密度  $10^5$  個  $\text{cm}^{-3}$  程度の分子雲コアが星を作るまでの寿命は数十万年程度 (Onishi et al. 2002, Kirk et al. 2005) であり、その密度を持つ分子ガスの自由落下時間の数倍程度長い場合、まだ動的に収縮していない可能性が高い。ただし、それより 1 桁高い密度の分子雲コアはおうし座領域の数十個のサンプルのうち 1 天体(後述の MC27)が確認されている程度で、その寿命は数万年程度と非常に短い。よって、分子雲コアが  $10^6$  個  $\text{cm}^{-3}$  程度の密度になると重力が優勢となり動的に収縮段階状態にあると考えられる。また、分子雲コアの中心部で生じていると思われるガスの収縮/アウトフロー運動、分子雲コアの分裂を分離/検出するには、数秒角未満の非常に高い空間分解能および感度が要求された。従って、星形成初期段階にある極めて希少なサンプルを、現在最も高空間分解能/高感度な望遠鏡である ALMA で観測することが現状最も有効な手段である。本研究の対象である高密度分子雲コア MC27/L1521F は、おうし座領域の数十個の分子雲コアで最も密度が高く、中心に非常に暗く、若い段階にある原始星が赤外線望遠鏡の観測で見つかった(Bourke et al. 2006)ことから、星形成の初期条件を探る上で極めて重要な天体である。ALMA 望遠鏡は Cycle 0 (初期科学運用)の段階で空間分解能 $\sim 1''$ を達成し、原始星周辺のガスの運動/分布を 100 AU スケールで得ることが初めて可能になった。以下の研究結果 1,2 で述べる研究では、ALMA の Cycle 0,1 で、MC27/L1521F の分子輝線および星間微粒子からの熱放射(ダスト連続波)の観測が採択/実行され(観測提案者,大西利和[博士課程指導教員])、私は得られたデータの解析を主導した。

### <研究結果 1: ALMA Cycle 0 による MC27/L1521F の観測>

まずは ALMA Cycle 0 の結果で特筆すべきことを以下に述べる。本観測は HCO<sup>+</sup>や H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>等の分子輝線観測および 1.1 mm 帯ダスト連続波の観測で、空間分解能は ~1" (~140 AU) である。解析の結果、天体の中心に存在する原始星とは異なる位置にこれまでの干渉計等では検出されなかった、極めて密度の高い (~10<sup>7</sup> cm<sup>-3</sup>) 分子雲コア、MMS-2 が存在することを見いだした。これは小質量星形成領域において最も密度の高い星なし分子雲コアであり、中心部でファーストコアのような星形成初期段階にある天体が形成されている可能性がある。また、原始星からのコンパクトアウトフロー(年齢~200年)やそれらと相互作用するガス、2,000 AU スケールのアーク構造の存在等を明らかにした。また共同研究により行った数値シミュレーション(Matsumoto et al. 2015)により、このアーク構造は分子雲コアの収縮途中で分裂した高密度分子雲コアと原始星同士の重力相互作用が波紋のように広がって形成されている可能性が明らかになった。これら一連の研究により、(1)単独星と思われていた系が、実は連星系となる可能性が高いこと、(2)本観測で明らかになった構造は近年までの観測/理論的研究により予想されていたよりも遥かに複雑であり、星形成の初期条件はより動的なものである可能性を初めて示すことができた。

### <研究結果 2: ALMA Cycle 1 による MC27/L1521F の観測>

次に ALMA Cycle 1 の結果を示す。分子雲コア MC27 それ自体は数 1,000 AU 以上に広がった構造を持っており、そのような大きなスケールの情報を取得するのは、電波干渉計の苦手とするところであり ALMA Cycle 0 においても十分ではなかった。この弱点を補うことが出来るのが、Cycle 1 より利用可能となった Atacama Compact Array, Morita Array (ACA) である。このアレイを含めたダスト連続波の観測により、天体の広がった空間構造を取得し、さらには単一電波望遠鏡 (IRAM 30m 鏡, JCMT 15 m 望遠鏡) により得られていたデータをフーリエ空間上で合成し、数 10,000 AU から数 10 AU スケールという 3 桁にも渡る非常に高いダイナミックレンジの密度構造を 1 つの分子雲コアで初めて観測的に明らかにすることに成功した。注目すべき知見は、分子雲コアの密度のベキ指数分布が中心から ~3,000 AU を境に変化していることである(内側:  $\rho \propto r^{-1.4}$ , 外側:  $\rho \propto r^{-2}$ )。このような構造は古くから理論的に予想されていた (inside-out collapse model, e.g., Shu 1977) が、そのモデルで説明するには中心の原始星が若すぎるなど、いくつか矛盾が生じる。ベキ指数分布が変化している内側は、Cycle 0 の観測により示された非常に複雑な構造たちを内包している領域であることから、これら内部の複雑な構造体同士の相互作用により、中心部の密度構造が形成されたものであると解釈している。また、短い波長 (0.87 mm) での高い空間分解能 (~0."5) の観測により、高密度分子雲コア MMS-2 が 2 つのピークを持っていることが明らかとなった。これは高密度天体の分裂の可能性を示唆するものであり、星形成初期段階の分裂現象の初期条件等を探る上で重要な天体であることをさらに明瞭化することに成功した。

### <研究結果 3: ALMA による分子雲コア進化段階の評価手法の確立>

本研究において MC27 という原始星形成極初期段階の分子雲コアではその内部構造は極めて複雑でよりダイナミカルな星形成の描像を示唆するものであった。その次の研究ステップとして重要視したいのが、MC27 に進化段階の近い同種の天体を ALMA で数多く観測し、統計的に進化段階を探り、星形成初期段階に生じる構造、現象の多様性/普遍性を明らかにすることである。この種の研究において、小質量星形成領域の分子雲コアは基本的に分子輝線/ダストともに非常に強度が弱い、および、数百 AU 規模の非常に高

い分解能が必要であることから、感度および空間分解能が最も高くできる最近傍(<200 pc)の小質量星形成領域にターゲットを絞ることが重要となる。そこで、私は今後のALMA観測に向けて、現在得られているMC27のデータとALMAアーカイブデータを元に適切な観測手法および観測ターゲットの選択基準を考案した。MC27との比較対象とした天体はL183とL1544であり、両者ともその他の近傍小質量星形成領域にある分子雲コアと比べて比較的進化した星形成直前の天体に分類される。これら分子雲コアの単一鏡でみた構造は良く似ているが、ACA (7m array)を用いた観測では、MC27の中心集中度の高さが他の天体に比べて際立つことが分かった。それに対して、コンパクトな構造のみに感度がある12 m arrayの観測では、MC27は分裂構造が卓越しているが、L1544,L183ではMC27で見られたほどの分裂構造(高密度分子雲コアや原始星)が見られない、もしくはエミッション自体が未検出という結果であった。このことから、(1)単一鏡の観測でMC27に近い強度(中心集中度)を持つ分子雲コアを観測天体として選ぶ必要があること、及び(2)コンパクトな構造が発達していない可能性のある星なし分子雲コアでは12 m arrayの観測はリスクが高いが、数1,000 AU以上の構造を漏れなく捉えるACAを用いることによりその進化段階を推定可能であることが分かった。

・雑誌

1) ALMA Observations of a High Density core in Taurus: Dynamical Gas Interaction at the Possible Site of a Multiple Star Formation, K. Tokuda, T. Onishi, K. Saigo, A. Kawamura, Y. Fukui, T. Matsumoto, S. Inutsuka, M. N. Machida, K. Tomida, and K. Tachihara, *Astrophysical Journal Letters*, **789**, L44 (6pp) (2014)

2) Revealing a Detailed Mass Distribution of a High-density Core MC27/L1521F in Taurus with ALMA, K. Tokuda, T. Onishi, K. Saigo, A. Kawamura, Y. Fukui, T. Matsumoto, S. Inutsuka, M. N. Machida, K. Tomida, K. Tachihara, and Ph. André, *Astrophysical Journal*, **826**, 26 (10pp) (2016)

3) An origin of arc structures deeply embedded in dense molecular cloud cores, T. Matsumoto, T. Onishi, K. Tokuda, and S. Inutsuka, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, **449**, p123-127 (2015)

・会議録

1) ALMA Observations of a High-density Core in Taurus: Dynamical Gas Interaction at the Possible Site of a Multiple Star Formation, T. Onishi, K. Tokuda, K. Saigo, A. Kawamura, Y. Fukui, S. Inutsuka, K. Tachihara, T. Matsumoto, M. N. Machida, and K. Tomida, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year. Proceedings of a Conference held at the Tokyo International Forum, ASP Conference Series*, **499**, p211, (Tokyo, Japan, 2014)

2) ALMA Observations of a High-density Core in Taurus: Dynamical Gas Interaction at the Possible Site of a Multiple Star Formation, K. Tokuda, T. Onishi, K. Saigo, A. Kawamura, Y. Fukui, T. Matsumoto, S. Inutsuka, M. N. Machida, K. Tomida, and K. Tachihara, *IAU General Assembly, Meeting #29, id.2251451*, (Honolulu, USA, 2015)

# 学位論文審査結果の要旨

学位論文題目

Observational Study of High-Density Cores in Early Stages of Star Formation with ALMA  
(ALMA による星形成初期段階にある高密度分子雲コアの観測的研究)

提出者氏名 徳田 一起

恒星は宇宙における最も基本的かつ重要な構成要素である。恒星は様々な天体現象を通してエネルギーを供給し重元素を生成する事で、銀河進化に影響を与える。恒星の特徴（明るさ、大きさ、進化、寿命など）は初期質量によって決まる。すなわち、星の進化はその誕生時に決まり、ひいては銀河の進化過程は星の形成機構によって規定されていると言える。しかし、この星形成過程は重力/磁場/乱流などの物理過程が複雑に絡み合ったプロセスであり、空間/密度も数桁に渡って変化する現象であるため、その理解は理論的/観測的に困難を極めている。

本研究は、原始星形成直前直後の段階にある分子雲コアの ALMA 望遠鏡による高分解能観測を通して、太陽と同程度の質量を持つ小質量星の形成初期条件に迫ったものである。研究の対象である高密度分子雲コア MC27/L1521F は、おうし座領域の数十個の分子雲コアで最も密度が高く、中心に非常に暗く、若い段階にある原始星が赤外線望遠鏡の観測で見つかったことから、星形成の初期条件を探る上で極めて重要な天体である。ALMA の観測により、極めて密度の高い( $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ )分子雲コア、及びその分裂の様子や、原始星からのコンパクトアウトフロー(年齢 $\sim 200$  年)、それらと相互作用するガス、2,000 AU スケールのアーク構造の存在等を明らかにした。これら一連の研究により、(1)単独星と思われていた系が、実は連星系となる可能性が高いこと、(2)本観測で明らかになった構造は近年までの観測/理論的研究により予想されていたよりも遥かに複雑であり、星形成の描像はより動的なものである可能性が浮かび上がった。さらに、ALMA の観測サイクル : **Cycle 1** から利用可能となった **Atacama Compact Array(Morita Array)**、及び大型単一鏡により得られた観測データをフーリエ空間上で合成し、数 **10,000 AU** から数 **10 AU** スケールという **3** 桁にも渡る非常に高いダイナミックレンジの密度構造を **1** つの分子雲コアで初めて観測的に明らかにすることに成功した。分子雲コアの密度のベキ指数分布が中心から $\sim 3,000$  AU を境に変化しており、内部の複雑な構造体同士の相互作用により、中心部の密度構造が形成されたものであると示唆した。

以上のように本研究では、小質量星原始星の複雑な形成初期の環境を ALMA による観測を通して、はじめて明らかにしたものである。また、同種の天体の統計的観測による、星形成初期段階に生じる構造、現象の多様性/普遍性を明らかにすることを検討しており、将来の小質量星形成の理解に大きな影響を与えるものと考えられる。

以上により、本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものとして判断した。

委員長 大西 利和  
溝口 幸司  
田中 智  
前澤 裕之