

アルマ望遠鏡で明らかになった ダイナミックな星の誕生

徳田 一起

〈大阪府立大学理学系研究科 〒599-8531 堺市中区学園町1番1号〉
e-mail: s_k.tokuda@p.s.osakafu-u.ac.jp



徳田



大西

大西 利和

〈大阪府立大学理学系研究科 〒599-8531 堺市中区学園町1番1号〉
e-mail: ohnishi@p.s.osakafu-u.ac.jp

星（恒星）は宇宙空間に漂っている水素分子ガスを主成分とする分子雲から誕生します。しかし、その分子雲からどのようにして最終的に星が形成されるかを観測的に明らかにするのはとても困難でした。私たちは、星が誕生する様子を詳しく探るため、星が生まれる母体となる分子雲コア（おうし座方向；MC27/L1521F）を2011年に最初の科学運用を開始したアルマ望遠鏡を使って観測しました。その結果、これまでの観測では検出できなかった面白い構造がたくさん見え始め、同時に星の誕生は私たちの予想よりもはるかに複雑でダイナミックな現象である可能性が高いことがわかってきました。その結果を私たちが感じた驚きとともにご紹介できればと思います。

1. 星の卵の観測で小質量星誕生のメカニズムに迫る

星（恒星）は分子雲コア（大きさが約0.1光年、重さが太陽の数倍から数十倍程度；いわゆる星の卵）と呼ばれるガスと塵の集合体の中で誕生します¹⁾。この分子雲コアの中心部で、ガスや塵がさらに濃く集まり、その中で原始星（星の赤ちゃん）が生まれます。一言に星といっても、宇宙にはさまざまな重さをもった星が存在し、太陽よりも十分の1程度の重さしかもたない星から、太陽の100倍程度もの重さをもった星まであります。さらに、宇宙では太陽のように一つの惑星系の中に一つの恒星が単独で存在しているものよりも、星が生まれたたの段階では二つ以上の星が互いに回り合う連星（多重星）系のほうが一般的かもし

れないという指摘があります^{2),3)}。そのため、星の誕生について研究するうえで、星の重さの決定要因とは何か、多重星系がどのように形成されるかというような問いに答えることが非常に重要と言えるでしょう。

分子雲コアは基本的に自身のもつ重力によって収縮し、その内部に星を形成しますが、その際にガス雲の分裂⁴⁾やガス流による質量の放出現象⁵⁾が起こります。これらの現象は上記に述べた質量決定や多重星形成の問題に深くかかわるため、星の形成されるメカニズムの解明には分子雲コアの観測が重要となります。しかし、星を作る条件を直接反映していると思われる星が誕生する直前、もしくは直後の分子雲コアの観測的研究がこれまで困難であったため、星誕生の初期段階に関する問いに対してあまり理解が進んでいませんでした。

そのような謎を解明するために、観測的に乗り越えなければならない壁が、大きく分けて二つありました。一つ目は、星を作る直前の密度の高い分子雲コアから原始星までの時間が非常に短いため、対応する天体がとても少ないことです。簡単な見積もりでは100個の分子雲コアのうち1個あれば良いところです。そのため、まずできるだけ星の誕生に近い状態にある分子雲コアを探すところからこの分野の研究はスタートしました。そのための格好のターゲットになるのは、私たちの太陽系から最も近い(約450光年)星の誕生現場の一つである、おうし座分子雲です。私たちから近ければ近いほどより鮮明な画像を得ることが可能です。福井康雄氏をはじめとする名古屋大学のグループが開発した名古屋大学4 m電波望遠鏡により、1989年からおうし座領域の全面探査が開始されました。まず、比較的低い密度(1立方センチメートルあたり1万個程度)をもった分子雲コアを広い範囲で観測し、おうし座にある分子雲コアの地図を作り上げました⁶⁾。次にそれを頼りにして、国立天文台野辺山45 m電波望遠鏡等を使って詳しく観測し、MC27/L1521Fという天体がおうし座領域の中で最も密度が高い分子雲コアであり、星が誕生する段階に非常に近い星の卵であることを突き止めたのです^{7), 8)}(図1)。

さらに、2006年、海外のグループがNASAのスピッツァー赤外線宇宙望遠鏡により同天体を観測した結果、分子雲コアに深く埋もれた生まれたての若い原始星が確認されました⁹⁾。これらの研究により、星を作った直後の分子雲コアがようやく見つかったのです。しかし、二つめの壁が存在することを忘れてはいけません。それは星を作る瞬間のガスの分布や運動は1,000–10 AU以下(視直径に直すと、100–0.1秒角)の空間的にとても小さい現象であるということです。分子雲コアそれ自体は既存の電波望遠鏡で見つけることができますが、その中で作られている星やその周辺のガスの様子を詳しく調べるには、桁外れの視力と感

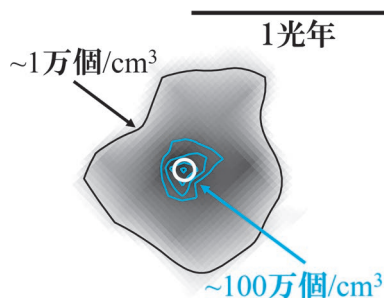


図1 分子雲コア, MC27/L1521Fの全体像。グレースケールおよび青等高線がそれぞれ、名古屋大学4 m電波望遠鏡によって得られた $C^{18}O$ ($J=1-0$), および野辺山45 m電波望遠鏡によって得られた $H^{13}CO^+$ ($J=1-0$)の電波強度を表す。白丸はアルマ望遠鏡で観測した範囲。

度をもった高性能な電波望遠鏡が必要だったので。

2. アルマ望遠鏡による観測

2011年に部分的に完成し、初期科学運用(サイクル0)を開始したアルマ望遠鏡(ALMA; Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)は、建設途中ながらも既存の電波望遠鏡の性能をはるかに凌駕し、星の誕生現場を非常に高感度かつ細かく観測できるまさに夢のような望遠鏡でした。私(徳田)の指導教員である大西利和教授が2011年6月、アルマのサイクル0の観測提案募集に、この天体の中心を詳しく調べるための提案をした結果、最も優先度の高い観測の一つとして採択されました。その頃私は大学の学部4年生だったのですが、大西先生から『観測データが届いたら是非解析をしてみないか』と話があったときから、観測されるのを非常に楽しみにしていました。観測天体の先行研究のデータ収集や、その他の研究活動を行いながらデータがやってくるのを今か今かと胸を高鳴らせながら過ごしていたことを記憶しています。そして、待つこと約1年半、私が修士課程1年の終盤にあたる2013年3月ようやくデータが私たちの元に届きました。その後、注意深く解析を進めていくと、私たちの予想

を超えるような現象や天体の存在がたくさん明らかになってきたのです。

3. 原始星の傍に潜んでいた きょうだい星誕生の兆候

私たちをまず驚かせたのが、スピッツァー望遠鏡で発見されていた原始星とは異なる位置に濃いガス塊が潜んでいたことです。図2に示すのが、MC27/L1521Fの中心部の密度の高いガスおよびそれに含まれる塵の分布です。まず、塵の分布を見ると、三つのおも立ったピークがあることがわかります。私たちはこのピークをそれぞれ、MMS-1、MMS-2、MMS-3と名づけました。このうちMMS-1はスピッツァー宇宙望遠鏡等による先行研究で見つかった若い原始星に対応します。当初私たちは、この原始星の周辺を取り巻くように、星の材料となる濃いガスの塊が存在していると予想していましたが、驚くべきことにその原始星とは離れた位置に濃いガスの塊MMS-2、MMS-3が存在していたのです。また、この濃い

ガスの塊たちは海外のほかの望遠鏡（プラトー・デ・ビュール干渉計、SMA干渉計）の観測では見逃されていたものであり、この結果はアルマ望遠鏡が高い視力と感度をもった非常に高性能な望遠鏡であることを裏づけるものでもありました。

この二つのガスの塊のうち、MMS-2と名づけたものは、これまで小質量星が誕生する領域で発見された星なしの分子雲コアとしては最も密度が高く（ $\sim 10^7$ 個 m^{-3} 、1立方センチメートルあたりの分子の数が数千万個）、星が誕生する直前の段階であると考えられます。今後MC27/L1521Fは、既に誕生している原始星（MMS-1）のきょうだい星がMMS-2の内部で形成され、連星（多重星）系を形成する可能性があることがわかったのです。

4. 原始星から吹き出した生まれたてのガス流

原始星自体からも面白い現象が見えてきました。原始星から吹き出すアウトフロー（ガス流）の存在です。図3を見てみると赤外線の大極星雲の向きに対応するようにガスが分布していることがわかります。これらの速度はおおよそ 10 km s^{-1} で、原始星に対して紙面右側に分布しているのが私たちの太陽系に向かって近づいてくる（青方偏移）成分、左側のものが遠ざかる（赤方偏移）成分となっていました。原始星からのアウトフロー自体はほかの天体においてもよく見られる現象です。しかし、ほかの天体で見られるそれと比べて非常にコンパクト（数百AU程度）でした。そして、その大きさと速度から年齢を見積もってみると、わずか数十年から200年前に原始星から吹き出したものであるとわかったのです。このような生まれたてのガス流を調べることにより、星の重さの決まり方を探るうえで重要なヒントになると考えています。

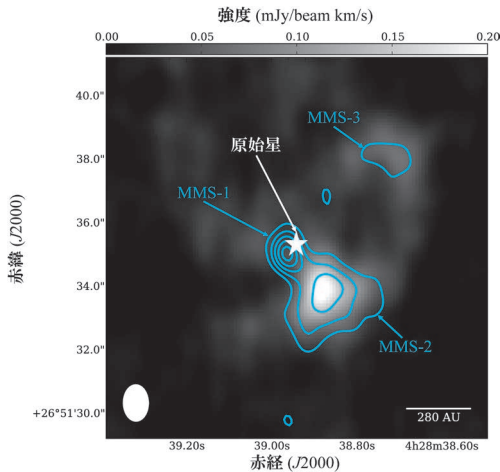


図2 アルマ望遠鏡によって観測されたMC27/L1521の中心部におけるガスおよび塵の分布。グレースケールが $H^{13}CO^+$ ($J=3-2$) 輝線（濃いガスからの電波）、青等高線が1.1 mm電波連続波（塵からの電波）の強度分布を示している。左下の楕円はアルマ望遠鏡の視力を表す。

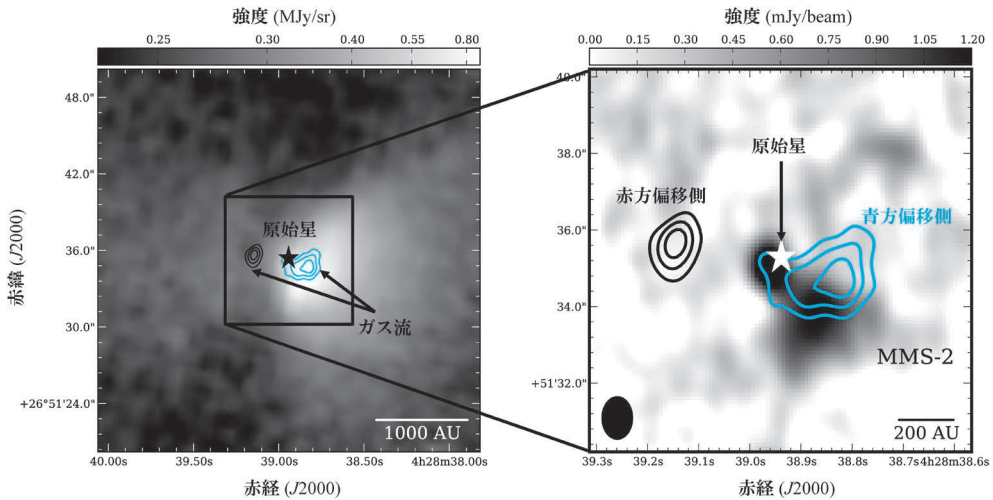


図3 左: MC27/L1521Fのスピッター宇宙望遠鏡による赤外線画像*1 (グレースケール) とアルマ望遠鏡によって得られたアウトフローガスの分布. 東西 (紙面に対して左右の方向) に明るく輝いているのが赤外線で見える双極星雲である. 右: 左図の中心部を拡大したもので, 塵およびHCO⁺ (J=3-2) 輝線の強度分布を表す. グレースケールは1.1 mm電波連続波 (濃いガスに含まれる塵からの電波), 黒と青の等高線はそれぞれ, 太陽系から遠ざかる成分, 太陽系に近づいてくる速度をもったガスの成分を表す. 左下の楕円はアルマ望遠鏡の視力を表す.

*1 画像はNASA/JPL-Caltech提供.

5. 星の赤ちゃんや卵がダイナミックな運動で作ったアーク構造

そして, さらに私たちを驚かせたのが, 原始星や分子雲コアがダイナミックに運動した兆候を表す, 非常に長く (2,000 AU程度) 伸びた尾のような (アーク構造) ガス雲の存在です. 私たちはまず, 赤外線観測で見えていた双極星雲 (図3, 左図) に対応するようなガスの分布があると予想していました. しかし, これに対応する成分はほとんど4章で述べたガス流のみであり, 代わりに見えてきたのが, 図4に示すようなアーク構造だったのです. このような構造は一つの分子雲コアが等方的に収縮を行ったと考えると, 説明が難しいのです. また, このアーク構造は原始星やそのきょうだい星となりうる分子雲コア (MMS-2) につながるように分布しているため, これらは何らかの関係を示している可能性が高いことが想像できるかと思います. これらを結びつけている要

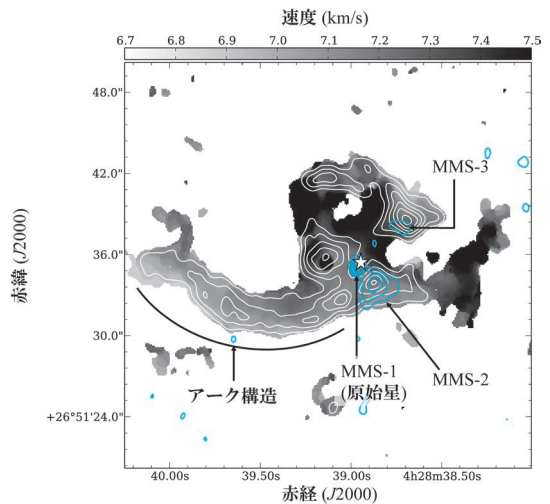


図4 グレースケールと白等高線はそれぞれ, HCO⁺ (J=3-2) 輝線の速度分布と空間分布を表す. 青等高線で示すのが, 1.1 mm電波連続波の強度分布.

因とはいったい何なのでしょう. 私たちは原始星やMMS-2を生んだ母体となる分子雲コアの進化において『乱流 (ガスが無秩序に動き回ってい

る状態』という現象が重要な役割を果たしているのではないかと考えました。そこで、この天体がどのように時間進化してきたかを調べるために、共同研究者である松本倫明氏（法政大学）に乱流状態にある分子雲コアの進化をコンピュータでシミュレーションして頂きました。その結果、一つの母体分子雲コアが複数に分裂してより小さいガス塊や原始星を形成し、それらがお互いに回り合う様子が見えてきました。その小さいガス塊や原始星がそれぞれ及ぼし合っている重力の影響が波紋のように広がって、アーク構造を作っていることがわかりました¹⁰。今回の研究で、乱流状態にあるガス雲の中で星の赤ちゃんや星の卵がダイナミックに運動しながら多重星系を作る可能性があるということが初めて明らかになったのです。

6. 星の誕生メカニズムの解明を目指して

アルマ望遠鏡の観測を通してMC27/L1521F中心部の非常に鮮明な空間/速度構造を描き出すこ

とに成功しました。図5にアルマ望遠鏡で明らかになった特徴的な構造をまとめます。星の誕生直前の分子雲コアMMS-2や生まれたてのガス流（アウトフロー）、長く伸びた尾のようなガス雲（そのほか、複数の分子雲コアやアウトフローに衝突しているガスなど）は、今回のアルマの観測で初めて見えてきたものです。また、この天体はこれまでの観測から一つの星が作られる現場（単星系）だと考えられてきましたが、アルマの観測により多重星になる可能性が高いことがわかりました。これらは非常に興味深いことであり、今後アルマ望遠鏡による観測が進めば、これまで単星系と考えられてきたほかの天体も多重星系と判明するなど、これまでの望遠鏡では取得できなかった構造が見いだされるかもしれません。

ここで、今後の私たちの研究についても少し触れておきたいと思います。私たちは、モリタレイ（Atacama Compact Array）と呼ばれる日本が中心となって開発したアンテナ群を含めたアルマ望遠鏡でもう1度この天体を観測しました。この観測により、最初の観測（サイクル0）では取得

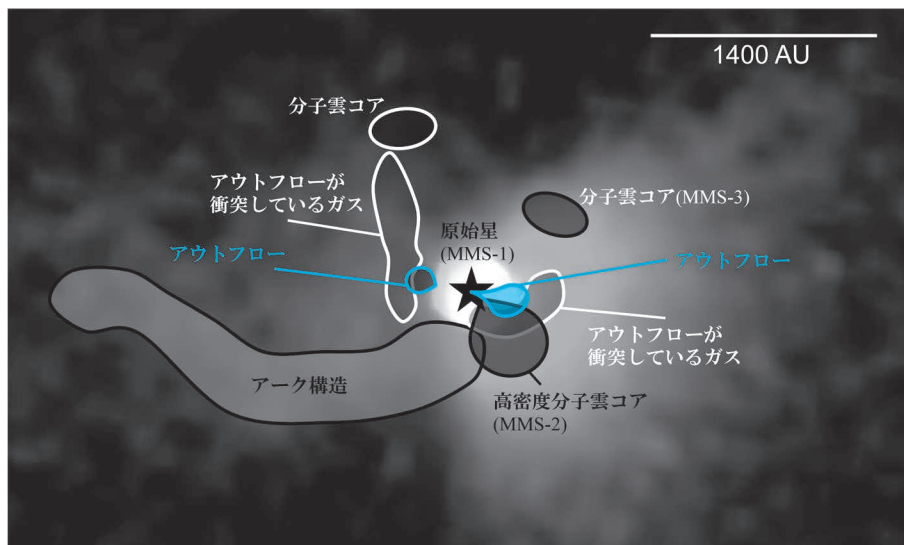


図5 スピッツァー望遠鏡により得られた赤外線画像^{*1}にアルマの観測により明らかになった特徴的な構造を重ねて表示したもの。

*1 NASA/JPL-Caltech提供。

できなかった広がった天体構造を捉えることに成功し、現在（2015年7月現在）結果の解析および論文化を進めています。これらMC27/L1521Fで得られた結果を元に、今後さらに性能が上がったアルマ望遠鏡を用いて、同天体のより詳しい観測やそのほかの分子雲コアに対しても続々と観測を行い、星の誕生メカニズムの理解を急速に進めていきたいと思っています。

謝 辞

本研究において、この原稿の元となった論文¹¹⁾の共著者の皆様にはたいへんお世話になりました。西合一矢氏、河村晶子氏にはアルマ望遠鏡によるデータの取り扱いについて、詳しく教えていただきました。松本倫明氏には数値シミュレーションを行っていただき、福井康雄氏、犬塚修一郎氏、町田正博氏、富田賢吾氏、立原研悟氏には多数の理論的な観点からのアドバイスやコメントをいただきました。この場をお借りして感謝いたします。また、アルマ望遠鏡の開発・運用チームの皆様、大阪府立大学宇宙物理学研究室の皆様にも厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Myers P. C., Linke R. A., Benson P. J., 1983, ApJ 264, 517
- 2) Maury A. J., Andr e P., Hennebelle P., et al., 2010, A&A 512, A40
- 3) Chen X., Arce H. G., Zhang Q., et al., 2013, ApJ 768, 110
- 4) Matsumoto T., Hanawa T., 2003, ApJ 595, 913
- 5) Machida M. N., Inutsuka S., Matsumoto T., 2008, ApJ 676, 1088
- 6) Onishi T., Mizuno A., Kawamura A., Ogawa H., Fukui Y., 1996, ApJ 465, 815
- 7) Mizuno A., Onishi T., Hayashi M., et al., 1994, Nature 368, 719
- 8) Onishi T., Mizuno A., Fukui Y., 1999, PASJ 51, 257
- 9) Bourke T. L., Myers P. C., Evans N. J. II, et al., 2006, ApJL 649, L37
- 10) Matsumoto T., Onishi T., Tokuda K., Inutsuka S., 2015, MNRAS 449, L123
- 11) Tokuda K., Onishi T., Saigo K., et al., 2014, ApJL 789, L4

ALMA Observations of a High-Density Core in Taurus: Dynamical Gas Interaction at the Possible Site of a Multiple Star Formation

Kazuki TOKUDA and Toshikazu ONISHI

Department of Physical Science, Graduate School of Science, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai 599-8531, Japan

Abstract: Molecular cloud cores eventually collapse dynamically, forming protostars inside them, and the physical properties of the cores determine the nature of the forming protostars. We report ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) observations toward MC27/L1521F, which is considered to be very close to the very early stage of star formation. We revealed that the spatial and velocity distributions, which are not detected with previous observations, are very complex and suggest that the initial condition of star formation is highly dynamical in nature.