

星の卵から赤ちゃんへの進化を目撃する

香川大学 徳田 一起

1. 星の卵から赤ちゃんが生まれる、進化する

夜空に輝く星にも、誕生の瞬間があります。太陽のような星は、宇宙空間にただよう冷たいガスと小さな塵が、長い時間をかけて集まることで生まれます。星と星の間は何もないように見えますが、実際には主に水素からなるガスが広がっています。その中でも、ガスが比較的濃く集まった場所を「分子雲」と呼びます。分子雲の中には、さらにガスが濃くなった丸い塊があります。大きさはおよそ0.1光年ほどで、太陽の数倍程度の重さの材料が含まれています。これが「分子雲コア」であり、「星の卵」と呼ばれることもあります。ここで「卵」という言葉を使うと、生き物の誕生を思い浮かべるかもしれません。天文学では、分子雲コアが原始星（星の赤ちゃん）になり、やがて太陽のような星へと姿を変えていくような時間を経た変化を「進化」と呼ぶことがあります。ただし、生物の進化のように、何世代もかけて少しずつ性質が変わるという意味ではなく、一つの天体の変化を表します。この進化には、この後紹介するように、非常に長い時間がかかります。

2. 星の卵の進化を観測するには

星の卵は非常に冷たく、温度はおよそ10ケルビン（摂氏ではマイナス263度）ほどしかありません。目で見える光は出さないため、普通の望遠鏡で詳しく調べることは困難です。しかし、冷たいガスや塵は、目には見えない電波を出しています。そこで、南米チリの高地にあるアルマ望遠鏡などの電波望遠鏡が活躍します。

人間の一生を研究するとき、一人の人を生まれてから100年間ずっと観察し続けるのは大変です。しかし、赤ちゃん、子ども、大人、高齢者を一度にたくさん調べれば、人がどのように成長するかを考えることができます。星の卵の研究でも同じ工夫をします。星の卵が成長するには、およそ10万年という長い時間が必要ですが、一人の研究者が、同じ星の卵を10万年間待ち続けることはできません。そこで私たちは、地球から約450光年の距離にある「おうし座分子雲」に注目しました。この領域は私たちからもっとも近くにある星の卵の巣であり、さまざまな成長段階にある分子雲コアが多数存在します。それらを一度に調べれば、星が生まれるまでの道筋を復元できると考えたのです。この観測には、アルマ望遠鏡の中でも、日本が開発に大きく貢献したアタカマ・コンパクト・アレイを使用しました（図1）。アルマ望遠鏡は複数のアンテナで受けた電波を組み合わせ、非常



図1. アルマ望遠鏡の一部であるアタカマ・コンパクト・アレイ。愛称は「モリタアレイ」。口径7メートルのアンテナを近くに並べることで、空に広がった分子雲コアの姿を捉えやすい。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

に細かな特徴を見分けます。ただし、分子雲コアのように、ぼんやりと広がった天体を見るには、アンテナ同士の間隔が近い方が有利です。小回りの利く7メートルアンテナを集めたアタカマ・コンパクト・アレイは、この調査にぴったりだったのです。

3. 星の卵の成長と進化の鍵を握るのは重力

私たちは、おうし座分子雲にある分子雲コアをほぼすべて観測しました。まだ星が生まれていない32個の分子雲コアを対象としています。まだ大人の星のように目に見えるように光ってはいません。周囲からガスを集めながら、少しずつ成長している段階です。観測すると、まだ星が生まれていない32個のコアのうち、12個で中心付近に濃い構造が見つかりました（図2）。

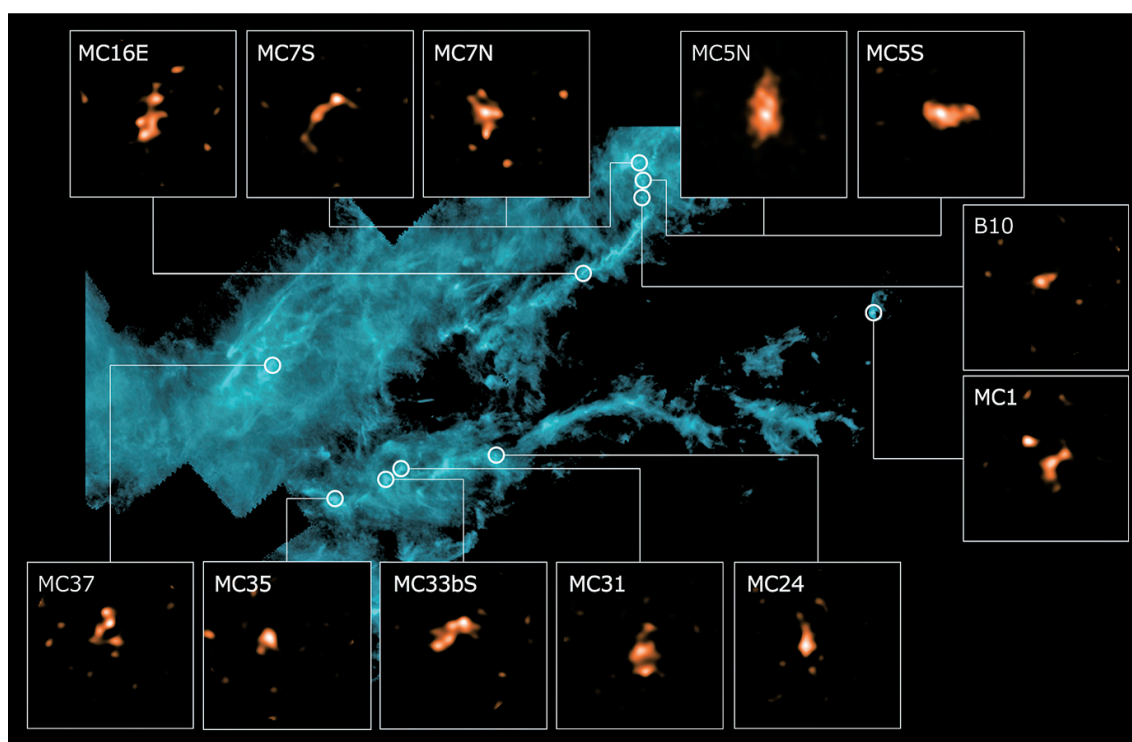


図2. おうし座分子雲にある分子雲コアの観測画像。背景は赤外線で見えた分子雲。小さな枠の中には、アタカマ・コンパクト・アレイで検出された星の卵の中心構造を示す。図3にファーストコア候補天体MC 35と、中心から両側へ向かう小さなガスの流れを示す拡大図を添える。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) , Tokuda et al.; ESA/Herschel

一方で、残りのコアには目立った中心構造が見つかりませんでした。これは、分子雲コアが最初から一気に星になるのではなく、はじめは比較的なめらかな姿をしており、やがて中心部の密度が高くなって、重力による収縮が加速することを示しています。調査から、水素分子の密度が1立方センチメートルあたりおよそ100万個を超えると、分子雲コアは星への進化に向かって急速に進むことが分かりました。星の卵が自分自身の重力に引かれて本格的に縮み始める、重要な境目です。

4. 見つかった「最初の小さな星の芯」赤ちゃんへの進化の瞬間か？

「進化の瞬間」を見ることができるとしたらとってもワクワクしませんか？ 私たちのプロジェクトではそんな瞬間に巡り会うことをもう一つの目標としていました。分子雲コア「MC 35」から、中心の芯の部分から両側へ向かって流れ出すガスが見つかったのです(図3)。流れの広がりには約2,000天文単位でした。1天文単位は地球と太陽の間の距離です。このようなガスの流れは、星の赤ちゃんが誕生したときによく見られます。しかし、MC 35の中心には、赤外線でも明るく光る原始星が見つかりません。そこで、中心には「ファーストコア」と呼ばれる、赤ちゃんへの進化直前の天体が隠れている可能性が出てきました。

ファーストコアとは、「つぶれ続けていた星の卵の中心に、初めてできる小さな芯」です。まだ本当の星ではありませんが、完全につぶれ続ける状態から、いったん立ち止まるような段階です。専門的には「最初の静水圧平衡(せいすいあつへいこう)天体」と呼ばれます。この段階は数千年から長くても1万年ほどしか続かないと考えられています。星の一生が何十億年にも及ぶことを考えると、ほんの一瞬です。MC 35は、星が生まれる直前を調べるための貴重な候補天体と言えます。

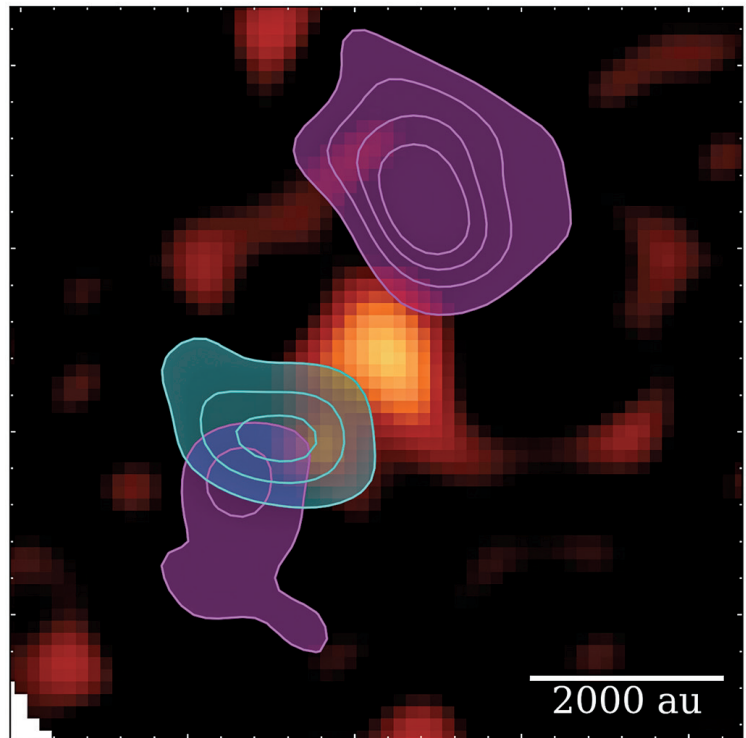


図3. 分子雲コアMC 35の芯（オレンジの部分）の部分とそこからガスの流れをマゼンタとシアンの等高線で表示。

5. 赤ちゃん星に進化した後の方が大忙し

では、星の赤ちゃんが誕生すれば、その周りは静かになるのでしょうか。実際には、その逆です。誕生したばかりの星の周囲では、ガスが中心へ落ち込んだり、反対に外へ押し出されたりと、たいへん激しい運動が起こります。

私たちは、同じおうし座分子雲にある「MC 27」という分子雲コアを、10年以上前からアルマ望遠鏡で繰り返し観測してきました。天文学では、一度観測した天体を、同じ望遠鏡を用いて観測することがよくあります。私たちの研究対象では、天体そのものが大きく変化するには長い時間がかかりますが、観測する電波の種類や、望遠鏡の使い方を変えることで、見えてくる情報が変わります。たとえばテレビ放送では、チャンネルを変えると別の番組を見ることができますよね。同じように、アルマ望遠鏡でも受信する電波の種類を変えると、冷たいガス、温かいガスなど、異なる情報を調べることができます。また、アンテナの並べ方を変えると、広がった構造を見やすくしたり、逆に中心のごく小さな構造を細かく調べたりすることができます。つまり、同じ天体でも「見方」を変えることで、まったく新しい姿が見えてくるのです。

2014年に発表した最初の観測では、MC 27の中心にある原始星のすぐ近くに、非常に濃いガスの塊が見つかりました（図4）。さらに、その周囲には、長く伸びた弓のようなガス雲も広がっていました。このような複雑な構造は、ガスが単純に一か所へ集まって星を作る、というだけでは説明できません。この観測から、星の赤ちゃんが成長する現場は、私たちがそれまで想像していたよりもはるかにダイナミックであることが浮き彫りになりました。

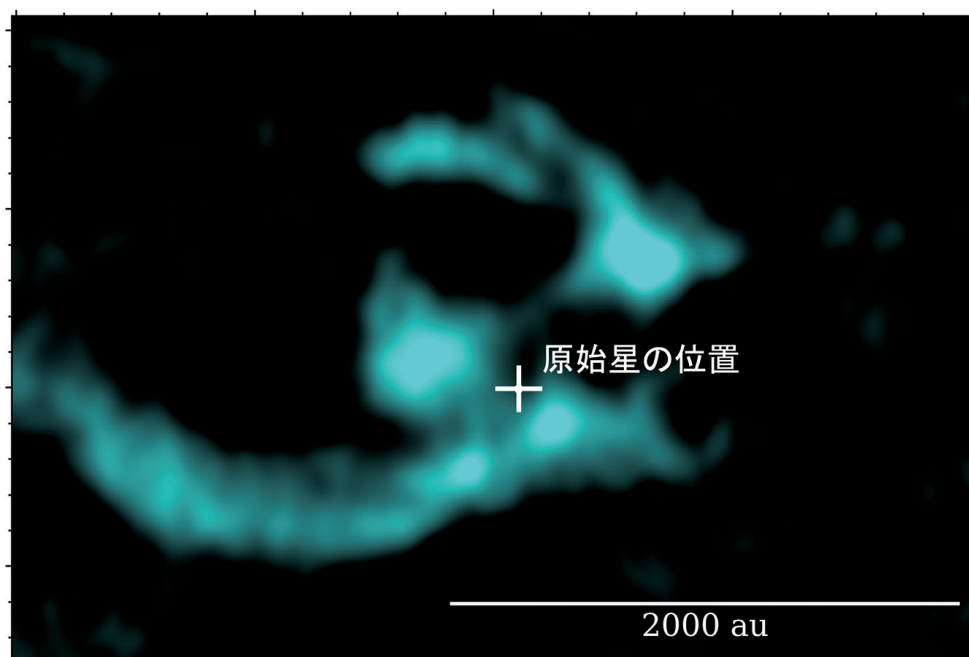


図4. アルマ望遠鏡で観測した分子雲コアMC 27の中心部の様子。十字で示した場所に原始星が存在する。その周囲の弓状の構造が特徴的である。

6. 「くしゃみ」の跡に残った温かいリング

その後、私たちはアルマ望遠鏡を使って、MC 27の中心にある原始星のすぐ近くを、さらに細かく観測しました。すると、原始星を取り巻く小さな円盤の端に、数天文単位ほどの長さを持つ「トゲ」のような構造が見つかりました（図5左）。さらに、波長約0.4ミリメートルの電波を使ってMC 27を観測しました。これは、一酸化炭素分子が少し高いエネルギーを持っているときに発する電波です。この電波を使うと、冷たいガスの中に隠れた「少し温かいガス」を探することができます。その結果、原始星の近くに、直径約1,000天文単位のリング状のガス雲が見つかりました（図5中央）。このリングは、周りの冷たいガスよりも少なくとも10ケルビン以上温かいことも分かりました。この温度差は重要な手がかりになります。

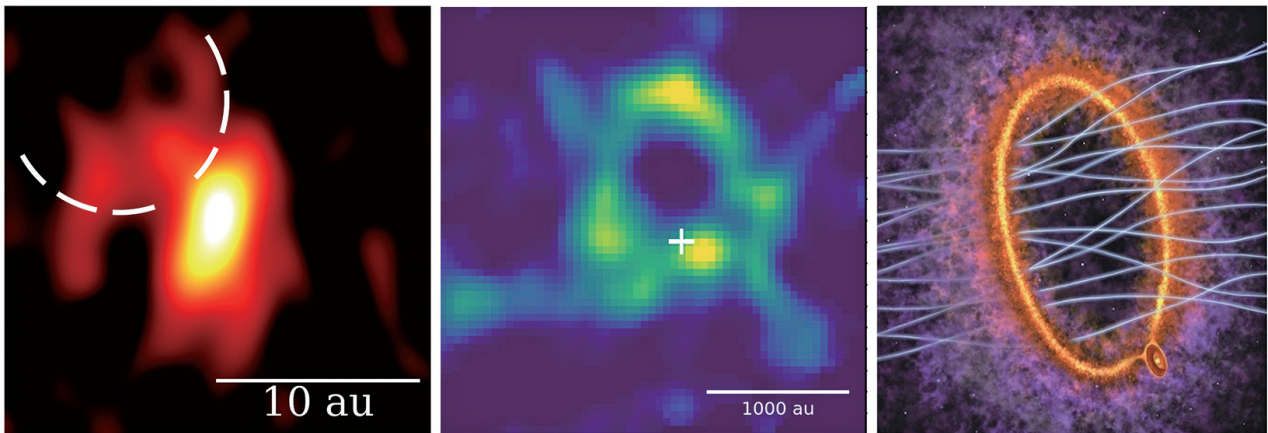


図5. (左) アルマ望遠鏡で細かく観測したMC 27の原始星。中央の円盤から伸びる「トゲ」構造を点線で強調している。
(中央) アルマ望遠鏡で発見したMC 27の温かいリング状ガス雲。十字印の位置に原始星がある。
(右) MC 27内部の想像図。右下に原始星とその周りを取り巻く円盤が描かれ、そこからリング状に暖かいガスが広がっている。リングの内部は磁力線が貫いている。
Credit: 徳田一起 (香川大学) / ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) / Y. Nakamura, K. Tokuda et al.

では、このトゲや温かいリングは、何によって作られたのでしょうか。ここで重要になるのが「磁場」です。磁石の周りに目に見えない力が働いているように、星が生まれる分子雲コアの中にも磁場があります。ガスが重力に引かれて原始星へ落ち込むとき、磁力線の束である「磁束（じそく）」も一緒に中心へ運ばれます。しかし、磁束が中心に集まり過ぎると、磁場が強くなりすぎた星へと進化してしまいます。そのため、星が成長する過程では、どこかで余分な磁束を外へ逃がす必要があります。

私たちは、円盤の端にたまった磁束が、あるとき急に外側へ押し出されたのではないかと考えています（図5右）。関係しているのは、「磁気浮力」や「交換型不安定性」と呼ばれるしくみです。これは、磁場の力が強い場所と、ガスがたくさん降り積もる場所の圧力のバランスが、原始星の方向に沿って急に変わると起こりやすくなります。少し難しい言葉ですが、水の中の空気の泡を思い浮かべると分かり

やすいかもしれません。空気の泡は、周りの水より軽いために上へ浮かんでいきます。同じように、磁場が強く集まった場所では、磁場の圧力がガスを押しのけるため、周りよりガスが少ない泡のような部分ができます。そのような部分が周囲のガスと入れ替わるように動くことで、たまった磁束が外側へ運ばれると考えられています。

これは、人間がくしゃみをして、余分なほこりを勢いよく外へ出す様子と少し似ています。そこで、この現象を「赤ちゃん星のくしゃみ」と表現しました。もし赤ちゃん星がくしゃみのように磁束を外へ吐き出したなら、そのとき周りのガスも一緒に押されます。押し出されたガスが周囲のガスにぶつкаると、その衝撃でガスが温められます。私たちが見つけた温かいリングは、その「くしゃみ」の跡かもしれません。また、円盤の端に見つかったトゲのような構造も、磁束が外へ運ばれる途中で作られた可能性があります。小さなトゲ、大きな温かいリング、さらには最初に観測した弓のようなガスは、一見すると別々の構造に見えます。しかし、どれも赤ちゃん星が余分な磁束を外へ逃がした結果として、同じしくみで説明できるかもしれないのです。

7. 星の誕生を一枚の成長記録に

星の誕生は、人間の時間感覚から見ると、非常にゆっくりと進みます。しかし、星が生まれる直前と直後には、短い期間に大きな変化が起こります。

アタカマ・コンパクト・アレイを使ったおうし座領域の調査からは、星の卵が重力による本格的な収縮を始める条件が見えてきました。さらにその中で、卵が星へ進化する瞬間を表しているかもしれないMC 35の「芯」の姿を捉えました。MC 27に潜む原始星の周囲では、ガスの形や磁場を大きく変化させる様子が見えてきました。私たちは、こうした異なる段階の天体をつなぎ合わせ、星の誕生を一枚の「成長記録」として描きたいと考えています。星は、静かに生まれるのではありません。冷たい星の卵の中で、重力、ガスの運動、磁場が複雑に関わり合いながら、ダイナミックにその姿を進化させていくのです。

著者紹介 徳田 一起（とくだ かずき）



香川大学教育学部講師。電波望遠鏡を用いて、星が生まれる直前と直後の分子雲を研究している。アルマ望遠鏡をはじめとする電波望遠鏡を活用し、星の卵から赤ちゃん星へ至る進化を調べている。