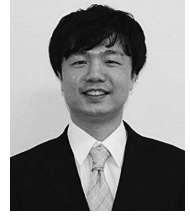


低金属量銀河大小マゼラン雲の観測で探る 星形成過程の普遍性：銀河系外で星の産 声を捉える挑戦の道のり



徳田 一起^{1,2}

〈¹九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744〉

〈²国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: tokuda.kazuki.369@m.kyushu-u.ac.jp

星は誕生した瞬間から双極分子流（アウトフロー）を放出する。アウトフローはほぼ例外なく“現在”の星形成領域、すなわち銀河系の原始星において普遍的に存在することから星の産声として広く知られている。しかし、星形成過程に重大な影響を与える重元素量（金属量）は宇宙年齢が若いほど少ないため、このアウトフローを普遍的なサインとした星形成過程が宇宙の歴史においてどれほど一般的なものであるかについては観測的検証が待たれていた。我々はALMA望遠鏡の初期科学運用の頃より低金属量銀河であるマゼラン雲等の局所銀河群の巨大分子雲、及びそれに付随する原始星の観測を精力的に行ってきた。2015年に大マゼラン雲で原始星アウトフローを発見し、ついに今年（2022年）、これまでのアウトフロー観測史においては最も金属量の低い銀河である小マゼラン雲での初検出を達成した。この結果は、アウトフローを伴った星形成過程が太陽金属量の0.2-1倍の環境で普遍であることを意味する。本記事では大小マゼラン雲で発見された星の産声を軸にしつつ筆者らが進めてきた星形成及び星間物質の研究の履歴についても概観する。

1. 序論：これまでの原始星アウトフローの研究

恒星（星）は宇宙の基本的な構成要素である。そのため、我々の身近な太陽系をはじめとしてその形成過程を知ることは我々自身の起源を知ることにも繋がる。また星間ガスから生まれた星がそのフィードバックによりヘリウムよりも重い元素を放出し、周囲の環境をどのように変化させるかという問いに関しては、銀河形成／進化とも密接に関連する。このように、星形成の研究は宇宙の小さいスケールと大きなスケールの現象を統一して理解するための要とも言える。

星間分子雲の特にガス密度が濃い場所であり、

重力的に束縛されている分子雲コア（星の卵）からの原始星形成過程は近年の理論／観測的研究により大きく理解が進んだ。磁場に貫かれた分子雲コアはわずかながら回転しているが、誕生する原始星よりも5桁大きい角運動量を持っていることから、星が形成されるためにはその余剰分を外部に捨て去る必要がある（この星形成過程における“角運動量問題”に関しての詳しい解説は富阪幸治氏[1]、町田正博氏[2]の過去の天文月報記事も参照されたい）。余剰な角運動量を捨てる機構として双極分子流（以下、アウトフロー）が主要な役割を果たすため、星形成の理論研究を検証するうえでアウトフロー観測が重要な役割を果たしてきた。このアウトフロー生成機構に関しては、古

典型的には高速度ジェットに巻き込まれて間接的に放出されるモデル [3] なども提案されてきたが、ALMA等の高解像度観測により [4]，原始星円盤から磁気遠心力風により直接駆動される機構 [5] が有力視されるようになった。

観測研究の歴史において、このアウトフロー現象は完全に予想されていたわけではなかった。当初星の誕生はもっぱら収縮運動のみが考えられてきたため、Snellらが1980年におうし座分子雲の原始星L1551 IRS 5からの質量放出現象を捉えた際 [6] は驚きを持って迎え入れられた。しかしながら天文学においては1例の発見のみではなかなか確立された描像として浸透しない。福井康雄氏は名古屋大学4 m望遠鏡をはじめとする日本国内の電波望遠鏡を使った一酸化炭素 (CO) 輝線による太陽系近傍星形成領域の分子ガス無バイアス探査で、質量降着期にある太陽質量程度の原始星には普遍的にアウトフローが付随していることを示した [7, 8]。その後海外のチームなども大型電波望遠鏡を用いて銀河面上にあるより遠方領域の探査を精力的に行い、大質量星が誕生する際においてもアウトフローが普遍的に存在することが示された [9, 10]。松下祐子氏は観測的に示されていた原始星の光度 (質量) とアウトフローの運動量などの物理量に正の相関関係があることに着眼し、この傾向を磁気遠心力風による円盤駆動のアウトフローによって説明可能であることを理論計算によって示した [11]。これにより、大小様々な質量レンジの原始星においてアウトフローの駆動のメカニズムが普遍的であるという理論的な裏づけがより強固になったのである。

上記に述べた研究は主に太陽金属量環境下での星形成現象、すなわち“現在”の星形成を記述したものである。星の形成と死の循環サイクルは、星間空間の金属量を増加させ銀河の物質進化を担う。この金属量は星間ガスの加熱/冷却及び電離度に影響を与えるため、分子雲コアや原始星円盤が重力的に不安定になる条件や、磁場の散逸率を

変化させる。理論計算によると、低金属量環境下では磁気制動がより効率的に働き、アウトフローを駆動する円盤そのものの形成が阻害されること [12]，円盤が形成された場合においても、その分裂が現在の星形成に比べて促進されること [13, 14] などが示されている。ただし、これらの研究では主に金属量が0の初代星形成から現在の星形成までを大雑把にパラメータサーベイすることが主流であり、それぞれの金属量レンジで詳細に調べられたものはほとんど存在しないことに注意したい。つまりこれまでの理論研究で観測的に検証可能な太陽金属量程度からその1/10程度までの範囲で、星形成をどのように変化させるか (させないか) については、強い制限が必ずしもあるわけではなく、そのような金属量で分子雲コアから原始星が形成されるプロセスを追求するためにも観測的な知見の蓄積が望まれていた。

本記事では、筆者らが進めてきた大小マゼラン雲のALMA観測で検出したアウトフローについて紹介し、その意義について考察する。なお、星形成の研究は分子雲コアやアウトフローが観測される0.1 pcスケールよりも大きいスケールの構造/現象と不可分であることや、ALMAの観測視野とマゼラン雲の相性がよく数pc以上の視野が常に担保されていたことから、アウトフロー自体の検出は同時に進めてきた研究の“副産物”として得られた側面が強い。銀河系の外で原始星アウトフローをどのように見つけてきたかを関連研究の背景や発見時のエピソードを交えて紹介する。

2. 大マゼラン雲でのアウトフロー探査

2.1 銀河系外での初検出: N159領域

大マゼラン雲は金属量が太陽系の0.5倍程度、距離も50 kpcと星形成銀河の中では最も近いことから、様々な望遠鏡で精力的に観測されてきた銀河である。銀河系外での初めての原始星アウトフローの発見は大マゼラン雲N159領域のALMA

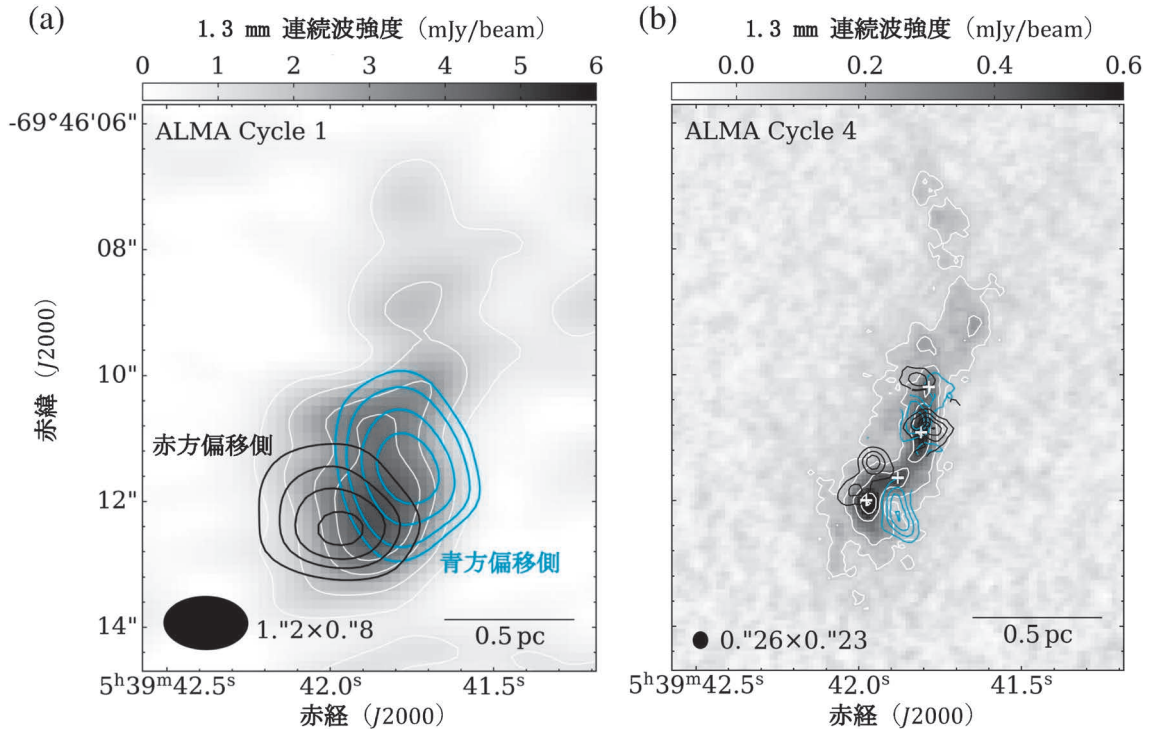


図1 大マゼラン雲で初めて検出された原始星分子アウトフロー。(a) ALMA Cycle 1で取得されたN159W-South領域の原始星アウトフロー。黒と青の等高線はそれぞれ赤方偏移側、青方偏移側のCO (2-1) 高速度成分を表す。グレースケールと白色の等高線は1.3 mm連続波(濃いガスに含まれる星間微粒子からの熱放射)を表す。左下に示した楕円は観測のビームサイズ(空間分解能)である。文献[16]より改変して記載。(b) ALMA Cycle 4で取得したデータを用いてより高解像度に(a)を描画したもの。白のクロスはアウトフローの駆動源である赤外線源及び連続波ピークの位置を示す。文献[25]より改変して記載。なお、高分解能観測で検出されたアウトフローをより最適に描画するためCOの速度範囲をパネル(a)のものより再調整している(詳しくは文献を参照)。

Cycle 1の観測によりもたらされた。Remy Indebetouw氏らによる大マゼラン雲30 Dor領域のALMA Cycle 0の研究[15]に続いて行った2例目の分子雲観測である。N159領域は既に分子ガスの電離が進んでいる30 Dorとは異なり、大マゼラン雲において最も質量の大きい巨大分子雲が存在するため、大質量星/星団形成の初期段階を調べるうえで重要領域と位置づけられる。福井康雄氏が主導するN159領域プロジェクトの解析を、当時大阪府立大学の大学院生であった筆者と原田遼平氏らが担当し、COの高速度成分の注意深いサーチを行った。その結果、N159W領域で $\sim 10^5 L_{\odot}$ を持つ2つの大質量原始星が付随する高

密度ガスから相対速度約 20 km s^{-1} のアウトフローの発見に至った[16]。そのうちの一つを図1(a)に示す。最も濃いガスが存在している1.3 mm連続波ピークを中心にCO高速度成分が対称的に分布していることがわかる。

紙面では割愛するが、この原始星方向で交差したV字型の分子雲も見出され、2つの紐状分子雲(以下、フィラメント状分子雲)の衝突により大質量原始星の形成が誘発された可能性を提案するなど[16]、銀河系外の星形成領域を個別原始星の単位で研究できることを示し、マゼラン雲におけるその後の分子雲相互作用による誘発的星形成や原始星アウトフローの観測[17-19]の先鞭をつけ

た観測となった。

2.2 0.1 pc を切った解像度でのフィラメント状分子雲とアウトフローの詳細観測

最初の N159 領域の ALMA 観測は 1" (大マゼラン雲の距離では 0.24 pc 相当する) 程度の解像度であったため、さらなる高解像度観測を行う気運が高まっていた。論文発表を行った 2015 年頃、Philippe André 氏らのレビュー論文 [20] に代表されるように Herschel 衛星による太陽系近傍のフィラメント状分子雲の網羅的観測が注目を集めていた。分子雲がおおむねフィラメント状の形態をとっていること自体は、アウトフロー掃天観測においても活躍した名古屋大学 4 m 望遠鏡などを用いた様々な電波観測 (例えば, [21, 22]) により、1990 年代から周知の事実ではあったものの、Doris Arzoumanian 氏が初めて示したフィラメント状分子雲の半値幅はおおむね 0.1 pc で揃っているという結果 [23] は業界にインパクトを与え、大きな論争を巻き起こしていた。

ALMA 望遠鏡の観測提案競争においてもこの 0.1 pc 幅が一つのキーワードになりつつあったことから、筆者らも N159 領域をターゲットとして銀河系外では初めてフィラメント状分子雲を 0.1 pc 以下の解像度で観測した [24, 25]。その結果、一酸化炭素同位体 ^{13}CO 輝線及び、図 1 (b) に記載した 1.3 mm 連続波でトレースするフィラメント状分子雲の幅がおおむね ~ 0.1 pc であることを示すことができた。

本研究のさらなる特筆すべき点は、同時観測を行った N159E-Papillon 領域のフィラメント状分子雲の複合体も 50 pc 離れているにもかかわらず N159W-South 領域と驚くべき類似性を示したことである。南北方向に伸びた 0.1 pc 幅のフィラメントの指向性や星形成の活発度合いなど多くの共通点を有しており、この 2 つの領域は双子と呼ぶにふさわしい。当該研究では、2.1 節で述べた個別のフィラメント状分子雲の衝突を改定する形で、ALMA が観測している分子雲スケールを超

えたより大きなガス衝突流が起源となって同時多発的に大質量星形成を誘発した可能性を提唱した [24, 25]。

0.1 pc 以下の解像度の観測はフィラメント状分子雲の詳細を解き明かすだけでなく、原始星アウトフローの同定にも大きく貢献した。Cycle 1 の観測で 1 つと思われていたアウトフローの成分は実はそれぞれの連続波ピーク (分子雲コア) から放出される 4 つの成分であることを確認した (図 1 (b))。アウトフローの典型的なサイズは 0.1 pc 程度であるため、個別の成分を分解し、フィラメント状分子雲に沿った星形成活動を明らかにするためにも高解像度観測が重要であったことが伺える。

3. なかなか見つからない小マゼラン雲の原始星アウトフロー

アウトフローの観測においても ~ 0.1 pc の解像度が有効であることがわかったとはいえ、2.1 節で示した通りに、1" 程度 (0.24 pc) の解像度の観測でも検出は十分に可能である。それゆえ、金属量は太陽系の 0.2 倍程度と、大マゼラン雲よりもさらに低いものの距離が大きくは変わらない (~ 62 kpc) 小マゼラン雲においても、アウトフローはすぐに見つかるだろうと楽観視していた。しかし、大マゼラン雲で原始星アウトフローを発見した際に使用した CO (2-1) 輝線のデータに基づいて、小マゼラン雲にある原始星方向を中心にアウトフローに起因する高速度成分があるかどうかを確認したが [26-28]、一向に見つからなかったのだ。

この間、小マゼラン雲のある星形成領域において大質量原始星からのアウトフローによる衝撃波起因と思われる水素分子輝線が近赤外線の観測で見つかったため [29]、おそらく分子のアウトフローがあることは確からしいことが判明しつつあった。しかしながら、上記のアウトフローの質量のごくわずかしちトレースしないため、依然と

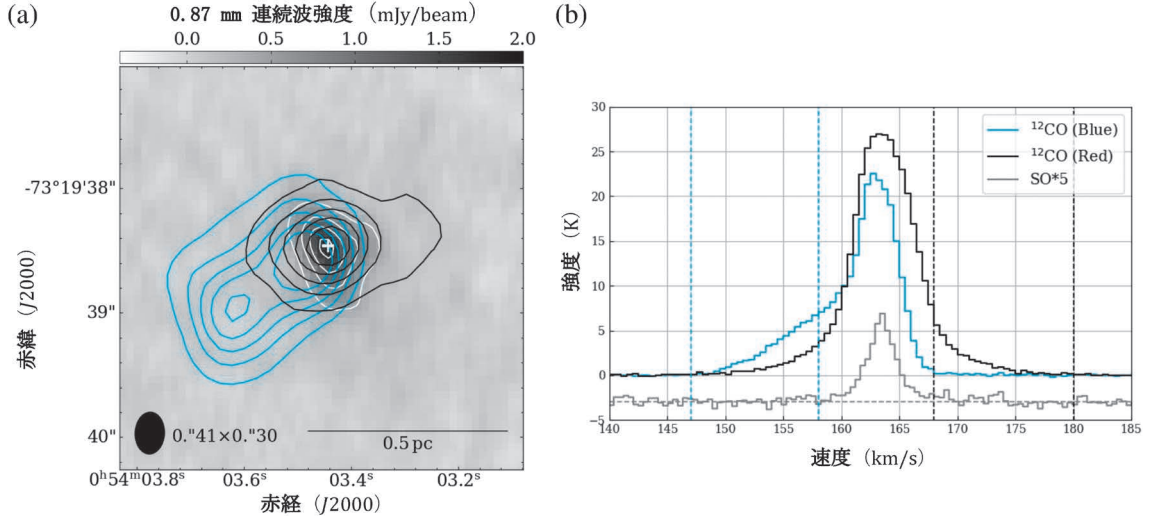


図2 小マゼラン雲で初めて検出された原始星分子アウトフロー (文献 [31] より改変して記載). (a) 黒と青の等高線はそれぞれ赤方偏移, 青方偏移したCO (3-2) の高速度成分を表す. グレースケールと白等高線は0.87 mm連続波の分布を示す. 白クロスは連続波のピーク座標を示す. 左下の楕円は観測のビームサイズ (空間分解能) である. (b) 黒と青のプロファイルはそれぞれ赤方偏移と青方偏移したCO (3-2) の高速度成分を示すスペクトルである. グレーのプロファイルは濃いガスをトレースするSO輝線のスペクトルであり (描画目的のため, ゼロレベルをマイナス側にずらしている), 2つのCOの高速度成分の相対速度を測定するため, 系の中心速度を導出するために用いた.

して電波の観測による同定とそれによる力学的性質の解明は駆動メカニズムを制限するうえで切望されていた. 筆者らのチームも, 小マゼラン雲でのアウトフローの有無を調べるために特化したALMAの観測提案を何度か提出したが, 残念ながら採択には至らなかった.

小マゼラン雲のアウトフローの検出をさらに諦めさせる要素は, 筆者らが独立に進めていた全く別の研究によりもたらされた. 村岡和幸氏らとともにさんかく座銀河M33 (距離 ~840 kpc) における3つの巨大分子雲を~1 pcの解像度で観測し, そのうちの1つで原始星アウトフローのよい候補を見つけた [28]. M33の金属量は小マゼラン雲のそれに近いとは言え, さらに10倍以上遠い銀河においても首尾よく検出できたのだ. このことから, 小マゼラン雲で検出できなかったのはアウトフローを介した星形成の描像が太陽金属量0.2倍の環境下では大きく変化するのではと考えるよ

うにもなった.

4. 小マゼラン雲の原始星アウトフロー初検出

時は2022年, 大マゼラン雲でのアウトフロー初検出から既に7年が経過していた. 同年6月頃に, 今後の大小マゼラン雲の分子雲の性質及び星形成をより包括的に研究することを見据えて, アーカイブデータを可能な限り見直す計画を進めていた. その中にはかつて筆者の同僚である Sarolta Zahorecz氏 (大阪府立大学在籍時) が観測提案を行った小マゼラン雲の原始星周辺の化学組成を調べるプロジェクトも含まれていた. この観測では, 小マゼラン雲において分光観測により既に確認されていた大質量原始星カタログ [30] から比較的若い段階にあると思われる天体を6つを選び出しており, アウトフローを探索するうえで有用なCO (3-2) 輝線も含まれていた.

このうち3天体からアウトフローと思わしきCO (3-2) の高速度成分を検出することに成功し、空間分布の対称性が最もよく、まさに“双極”分子流と呼ぶに相応しいY 246の結果について優先的に報告した[31]. その結果を図2に示す. 密度の高い分子ガスに含まれる星間微粒子からの0.87 mm連続波源の中心に光度 $\sim 3 \times 10^4 L_{\odot}$ の原始星が存在する. そこから、北西-南東方向に、相対速度 20 km s^{-1} の高速度成分が確認できた. 図2 (b) に示すように、スペクトルの強度はやや青方偏移成分が強いものの形の対称性もよい. アウトフローの力学的時間は 10^4 年程度と原始星が若い段階にあることとも矛盾がない. 分子ガスの総量は $30\text{--}70 M_{\odot}$ 程度であり、これらから見積もられる運動量、運動量フラックスはそれぞれ $\sim 10^3 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ と $\sim 10^3 M_{\odot} \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となった. これらは、この原始星と同程度の光度で確認されている銀河系の天体[9]や理論予想[11]とも整合的である. したがって、小マゼラン雲においてもアウトフローの駆動メカニズムは銀河系天体と共通している強い証拠が得られたと言える.

これまで発見されてきた各銀河の原始星アウトフローのうち、小マゼラン雲での検出が最も困難であり、発見が遅れることになった. この困難はどこから生じたものであろうか? 現在考えられる最も確からしい要因は、小マゼラン雲でのCO輝線のトレーサーとしての振る舞いの特異性である. 通常、水素分子の存在量はCO輝線観測により間接的に測定されるが、銀河系においては分子雲の非常に低密度領域(個数密度 $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$)までを満遍なく捉えることができる. しかし、小マゼラン雲ではCOで見えない水素分子の割合は劇的に増加するようである. 例えば筆者らが別途進めていた超広域CO観測によると、星間微粒子によって見積もられた水素分子の総量の10%ほどしか捉えることができないことがわかった[32]. この場合、CO輝線はすでに $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 程度の高密度ガストレーサーになっており[26]、薄いガス

成分がトレースされていないことがアウトフローの検出率を下げていた可能性がある. また、このように高密度でかつ、アウトフローの衝撃波や原始星自体に加熱されて高温と考えられる環境はCOのより高い準位の輝線強度を強めるためにも有利に働くため、CO (3-2) 輝線の選択が成功要因になった可能性もある. 銀河系外縁部においても太陽系の0.25倍程度と小マゼラン雲と大きくは変わらない金属量の場所も存在することが示唆されているが[33]、COでトレースされる分子雲やアウトフローの空間的な広がり[34]は銀河系の内側領域と大きい差は確認されていない. したがって、強力な星間輻射場など小マゼラン雲特有の環境がCO分子輝線の振る舞いの特異性を生み出している可能性がある. しかしながら、環境ごとのトレーサーの振る舞いに関しては観測的に完全に理解されているわけではなく、さらなる研究が必要である.

5. まとめ: 大小マゼラン雲での原始星アウトフロー発見の意義

大小マゼラン雲で原始星アウトフローが検出されたことは、これまで銀河系の観測や理論で蓄積されてきた知見に基づく、分子ガストレーサーの挙動が特に小マゼラン雲においてはこれまで知られていた振る舞いと大きく異なる点を除けば自然な結果と言えるかもしれない. この発見の意義については真摯に考察する必要があるだろう.

マゼラン雲の金属量は宇宙の歴史において最も星が活発に作られていた時期である赤方偏移2程度(約100億年前)の銀河において主に見られる. このような銀河においても、現在の星形成領域で問題となった角運動量輸送の機構が普遍的に存在していることが明らかになったと言えるだろう. 分子雲コアから原始星が形成されるメカニズム(マイクロプロセス)が共通しているのであれば、過去の宇宙で見られた爆発的な星形成の要因を、銀河衝突などのより大きいスケールのガスのダイ

ナミクスに求めることは自然な帰結となる（さまざまなスケールでのガス衝突流の研究に関しては筆者らの最近の天文月報記事も参照されたい[35]）。筆者らが見出したフィラメント状分子雲（2.2節）の形成も大小マゼラン雲の相互作用に起源があると考えており、これを口火に今後銀河スケールの現象と分子雲コア／フィラメントスケールの観測を結びつける研究を幅広く行い、銀河の進化を駆動するような星形成現象の理解を進める必要がある。

筆者らの研究で見出したアウトフローは大質量原始星からのものであるが、銀河系で見られている光度とアウトフロー物理量の関係に基づくと、おそらくさまざまな質量の星々でアウトフロー駆動のメカニズムが大小マゼラン雲でも共通していると考えてよい。その場合、降着円盤は必ず存在しており、小質量星周りの円盤からは惑星が形成されるであろう。低金属量環境下における惑星の形成に関しては観測的に知見が少ないため、大小マゼラン雲でアウトフローの存在を直接的に、また降着円盤の存在を間接的に示したことは重要である。特に小マゼラン雲の金属量は固体惑星がギリギリ形成されると言われている臨界値にも近く（文献[36]によると太陽金属量の0.1倍程度以上）、宇宙で最も早期に形成された地球型惑星の起源に迫る研究の動機づけともなるであろう。

謝 辞

この記事で紹介した一連の研究成果に関しては、国立天文台アルマ共同科学研究事業（2016-03Bおよび2022-22B）等の支援を受けて行われた。町田正博氏、大西利和氏、福井康雄氏らをはじめとする共同研究者の方には本原稿の執筆も含めて多大なアドバイスを頂いた。また、4章で述べた研究[31]の共同研究者である田中圭氏、下西隆氏にはマゼラン雲アウトフロー探査において競争しつつも大変有益なアドバイスを頂いた。Sarolta Zahorecz氏が観測提案を行ったデータが

なければ、小マゼラン雲でのCOアウトローの発見はより遅れていたであろう。上記のプロジェクトのALMAデータの解析には大阪公立大学の学生である國年悠里氏らの迅速な貢献があったことも強調しておきたい。様々な金属量環境下で分子雲コアから原始星までの星形成過程が普遍的であるという一つの到達点に辿り着けたのは、筆者の周囲及び研究コミュニティに、海外グループにはないアウトフローを探索するための観測的／理論的知見や信念／哲学が強く根付いていたためであると感している。最後に、この原稿を作成するにあたってお世話になった、2022年度の天文月報編集委員の岩崎一成氏にお礼を申し上げる。

参考文献

- [1] 富阪幸治, 2000, 天文月報, 93, 604
- [2] 町田正博, 2012, 天文月報, 105, 262
- [3] Arce, H. G., et al., 2007, *Protostars and Planets V* (Tucson, AZ: University Arizona Press), 245
- [4] Hirota, T., et al., 2017, *Nat. Astron.*, 1, 0146
- [5] Machida, M. N., & Hosokawa, T., 2013, *MNRAS*, 431, 1719
- [6] Snell, R. L., et al., 1980, *ApJ*, 239, L17
- [7] Fukui, Y., et al., 1989, *Nature*, 342, 161
- [8] Fukui, Y., et al., 1993, *Protostars and Planets III* (Tucson, AZ: University of Arizona Press), 603
- [9] Beuther, H., et al., 2002, *A&A*, 383, 892
- [10] Zinnecker, H., & Yorke, H. W., 2007, *ARA & A*, 45, 481
- [11] Matsushita, Y., et al., 2018, *MNRAS*, 475, 391
- [12] Higuchi, K., et al., 2018, *MNRAS*, 475, 3331
- [13] Tanaka, K. E. I., & Omukai, K., 2014, *MNRAS*, 439, 1884
- [14] Matsukoba, R., et al., 2022, *MNRAS*, 515, 5506
- [15] Indebetouw, R., et al., 2013, *ApJ*, 774, 73
- [16] Fukui, Y., et al., 2015, *ApJ*, 807, L4
- [17] Shimonishi, T., et al., 2016, *ApJ*, 827, 72
- [18] Saigo, K., et al., 2017, *ApJ*, 835, 108
- [19] Harada, R., et al., 2019, *PASJ*, 71, 44
- [20] André, P., et al., 2014, *Protostars and Planets VI* (Tucson, AZ: University of Arizona Press), 27
- [21] Mizuno, A., et al., 1995, *ApJ*, 445, L161
- [22] Onishi, T., et al., 1996, *ApJ*, 465, 815
- [23] Arzoumanian, D., et al., 2011, *A&A*, 529, L6
- [24] Fukui, Y., et al., 2019, *ApJ*, 886, 14
- [25] Tokuda, K., et al., 2019, *ApJ*, 886, 15
- [26] Muraoka, K., et al., 2017, *ApJ*, 844, 98
- [27] Neelamkodan, N., et al., 2021, *ApJ*, 908, L43

- [28] Tokuda, K., et al., 2020, ApJ, 896, 36
- [29] Ward, J. L., et al., 2017, MNRAS, 464, 1512
- [30] Oliveira, J. M., et al., 2013, MNRAS, 428, 3001
- [31] Tokuda, K., et al., 2022, ApJ, 936, L6
- [32] Tokuda, K., et al., 2021, ApJ, 922, 171
- [33] Fernández-Martín, A., et al., 2017, A & A, 597, A84
- [34] Brand, J., & Wouterloot, J. G. A., 2007, A&A, 464, 909
- [35] 徳田一起ほか, 2022, 天文月報, 115, 713
- [36] Johnson, J. L., & Li, H., 2012, ApJ, 751, 81

Investigating the Universality of Star Formation Based on the Low-Metallicity Magellanic Clouds observations: A Detection Report of the First Cry of Newborn Stars Outside the Milky Way

Kazuki TOKUDA^{1,2}

¹*Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan*

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

Abstract: Newborn stars launch bipolar outflows as their first cry, universally observed in the present star-forming regions. Previous outflow studies have mainly focused on the solar-neighborhood condition, and it is poorly understood whether such outflow-driving is expected in the low-metallicity environment, representing the earlier phase of the universe. Since the early ALMA's scientific operations, we have been actively observing molecular clouds and the associated protostellar objects in the low-metallicity Magellanic Clouds, whose metallicity is 0.2-0.5 times the solar value. In this article, we report the first molecular outflow detection in both Magellanic Clouds, suggesting that the star formation mechanism from molecular cloud cores to protostars is common through the metallicity range.