

アルマ望遠鏡イメージングツール PRIISMが拓くサイエンス： 原始惑星系円盤の微細構造



山口

所司

山口 正行^{1,2}・所司 歩夢³

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

〈²国立天文台アルマプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈³九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 〒819-0395 福岡市西区元岡 744〉

e-mail: ¹ masayuki.yamaguchi.astro@gmail.com, ³ shoshi.ayumu.660@s.kyushu-u.ac.jp

原始惑星系円盤には、中心星を取り囲む明るい環状構造であるリング、その間に見られる暗い溝状のギャップ、さらに円盤内を渦巻腕状に伸びるスパイラルなど、多様な微細構造が存在しており、惑星形成の進行を映し出す物理的痕跡として注目されている。これらを統計的に論じるためには高解像度観測が不可欠であるが、観測時間の制約から均一な高解像度サンプルの構築は困難であった。本研究では、本特集の概要記事で紹介したPRIISMをALMA連続波観測データに適用し、観測時間の制約を計算処理によって克服する戦略を採用した。これにより、同一データから従来法（CLEAN）を上回る実効解像度が得られ、多数の天体を目標解像度に揃えて解析する枠組みを整えた。太陽系近傍の低質量星形成領域に対して、原始惑星系円盤のサーベイを実施した結果、おうし座・ぎょしゃ座分子雲の43天体ではギャップの幅と深さの間に冪則が成立することを見出し、惑星-円盤相互作用モデルとの整合性を示した。へびつかい座分子雲の78天体に対する進化段階横断サーベイでは、微細構造が星形成後の20-40万年程度の早期からすでに形成されることを統計的に示した。さらに個別天体への詳細解析もあわせて、本稿ではPRIISMが拓いた円盤研究の知見を概説する。

1. 原始惑星系円盤の微細構造と ALMA 高解像度観測の現状

現在までに6,000個を超える系外惑星が発見されており、その形成過程の解明は太陽系の起源や地球外生命の探究につながる重要な学術的課題である。これらの惑星は若い恒星を取り巻く「原始惑星系円盤」（以下、円盤）の中で誕生する [1]。そのため、円盤構造の理解が惑星形成理論の核心をなしている。2011年以降、電波干渉計ALMAの登場により、惑星形成現場である円盤赤道面の

ダスト空間分布を直接解像できるようになった。これまでの観測により、円環状のリング・ギャップ構造、局所偏在構造、スパイラル構造など、理論予測と整合しつつも、予想以上に多様な微細構造が次々と発見されている。これらの微細構造を統計的に調べることで、円盤に共通しうる形成機構を探り、惑星形成過程に観測的な制約を与えることができる。

しかしながら、微細構造を統計的に解明するうえで最大の障壁となるのが、要求される空間分解能の高さである。微細構造の代表的なスケールは

円盤の厚みに対応すると考えられ、中心からの円盤半径のおよそ10% (5–10 au) に相当する。近傍の星形成領域 (距離は約150 pc) でこのスケールを解像するためには、0.05秒角の高い空間分解能が必要となる。0.10秒角から0.05秒角への解像度倍増は、ビーム面積が1/4に縮まり、輝度の低い円盤外縁部の構造ほど雑音に埋もれるため、同じ感度で捉えるには観測時間を一桁以上増加させる必要がある。このため、大規模母集団を同一解像度で網羅的に観測することは困難であった。その結果、ALMA運用開始から十数年を経た現在においても、微細構造を統計的に論じうる「均一な高解像度サンプル」は一部の明るい円盤に限定されてきた。この観測時間の制約を克服することが、本研究の出発点である。

2. PRIISMによるALMA観測データの解析

新規観測のみで観測時間の制約を打破することが現実的でない以上、既存データを再解析する道を探る必要があった。ALMAは運用開始から十数年を経て、0.10–0.30秒角級の中分解能データが近傍領域に対して大量に蓄積され、アーカイブとして公開されていることに注目したい。これらをより高い実効解像度で再解析することができれば、観測時間に律速されてきた円盤微細構造の統計研究を進展させられる。その手段として注目したのが、事前学習データを必要とせず観測との整合性を担保できるスパースモデリングである。これは、画像の全フラックスを制約するL1正則化と、隣接画素の輝度勾配を制御して実効解像を最適化する全変動 (TSV) を組み合わせた罰則付き最小二乗法である。これは高空間周波数成分を2つの罰則項の制約のもとで活用できる点に特徴がある。もともとは、超長基線電波干渉計 (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) で先行的に発展してきた手法であるが、結合素子型干渉計であるALMAという異なる uv カバレッジ・感度環

境でも実用的に機能するかは当時自明ではなかった。そこでまず我々は、ALMAの実観測データへの適用試験を行った。その結果、スパースモデリングを応用したイメージングは、従来法のCLEANと比較して2–3倍の実効解像度向上が達成され、かつ再構成画像の輝度分布が異なる高解像度観測から作成された画像と比較して $\pm 10\%$ 程度の誤差に収まることを確認した [2]。これにより、スパースモデリングが原理検証段階を終えて、ALMA実観測データに対しても運用可能なイメージング手法となりうることが示された。

この実証を契機として、国立天文台の中里剛氏・統計数理研究所の池田思朗氏を中心とする共同開発チームにより、アルゴリズムの本格的な実装と最適化が進められ、ALMA向けのイメージングツールPRIISM (プリズム: Python module for Radio Interferometry Imaging with Sparse Modeling) が公開された [3, 4]。数学的背景や実装の詳細については、本特集の「アルマ望遠鏡イメージングツールPRIISMの概要」を参照されたい。

PRIISMの実装により、ALMAの円盤データの系統的な再解析が可能となった。我々はピーク強度対雑音比 (S/N比) と達成解像度の関係を定量化し、S/N比 ≥ 100 の円盤については従来法を上回る2–3倍の実効解像度を安定して実現できることを示した [5]。この要求感度を満たす円盤は近傍星形成領域に対してすでにALMAのアーカイブに多数蓄積されている。すなわち、これらをPRIISMで再解析することにより、数十～数百天体規模の均一な微細構造カタログを構築できる見通しが得られた。観測時間の制約により停滞していた統計的検証を、計算処理による解像度の底上げで進展させる段階に到達したと言える。

3. 原始惑星系円盤のPRIISMイメージング・サーベイの開拓

本研究では、PRIISMを用いた円盤サーベイを、太陽系から最も近い2つの低質量星形成領域であ

る、おうし座・ぎょしゃ座分子雲と、へびつかい座分子雲に対して実施した。これら2領域は相補的な時系列断面を切り取るため、両者に対し異なる戦略のサーベイを設計した。

その前提として、若い恒星天体（YSO）の進化段階分類を簡単に整理しておく。YSOはスペクトルエネルギー分布（SED）の形状によってClass 0, I, FS (flat spectrum), IIと段階分類される。Class 0/Iは、中心星と円盤がエンベロープに包まれ、活発な降着が続いている段階であり、典型的な年齢は数万～数十万年である。Class FSはその移行期に位置し、その後、年齢が約100万年以上のClass II段階になると、エンベロープはほぼ消失して円盤が独立する。この進化系列のどの段階から微細構造が現れ始めるのかを明らかにすることは、「いつ惑星形成が始まるのか」という問いに直接つながる。

おうし座・ぎょしゃ座分子雲では、年齢がおおよそ100万–300万年のClass II段階の円盤が多数を占めるため、比較的進化の揃った母集団となっている。ここでは「Class II円盤の微細構造を多数の天体について同一条件で並べる」サーベイを実施し、母集団としての幾何学的特徴、とりわけ惑星–円盤相互作用が残す痕跡の抽出を狙った。一方、へびつかい座分子雲は平均年齢が約100万年とより若く、Class I, FS, Class IIの各進化段階の天体を同一領域内で比較できる稀有な領域である。ここでは「いつから微細構造が現れるのか」という時間軸に沿った問いに統計的に挑むことが可能となる。以下、2領域の結果を順に紹介する。

4. おうし座・ぎょしゃ座分子雲の原始惑星系円盤

本章では、[5]で報告したサーベイの主要結果を紹介する。目的は、比較的進化が進んだClass II円盤の母集団に対し、微細構造の出現頻度と幾何学パラメータを高解像度かつ均一な手法で評価することにある。

星形成領域としては、太陽系近傍（距離約140 pc）であるこの領域に対し、ALMA Band 6（1.3 mm帯）のアーカイブデータが利用可能な43天体のClass II円盤を選定した。元のCLEANビームサイズは0.05–0.30秒角と幅広く分布するが、PRIISMを用いたイメージング適用後の実効解像度は0.02–0.10秒角となり、中央値で従来法（CLEAN）と比較して約2倍、最高で3倍程度の高解像度化が達成された。すなわち中心星から数au相当のスケールである。

図1にPRIISMで得られた連続波画像を示す。43天体すべてのダスト円盤が空間的に分解され、外縁半径は8–238 auに分布する（中央値45 au）。検出された24個のリング・ギャップ構造のうち12個はCLEAN画像には現れず、PRIISMで初めて姿を現したものである。次節以降では個々の構造を定量化し、その起源に迫る。

4.1 ギャップ幅–深さのべき乗則の発見

本サーベイの最大の科学的成果は、個々のギャップから抽出した「幅」と「深さ」のあいだに、統計的に明瞭なべき乗関係が成り立つことを示した点にある。各ギャップに対し、リング側ピーク強度を基準とした深さ δ_l （リング強度／ギャップ底強度の比）と半値全幅相当の幅 Δ_l を均一な方法で測定し（図2中央）、 $\Delta_l \propto (\delta_l - 1)^{0.32 \pm 0.07}$ という関係が得られた（図2右）。一方、数値シミュレーションに基づく惑星起源のギャップ構造の経験則は、円盤厚み比 $h_{\text{gap}}/r_{\text{gap}}$ （ギャップ位置 r_{gap} における円盤の厚み h_{gap} ）は0.05–0.1の範囲で指数 ~ 0.25 を预言する [6]。観測値 0.32 ± 0.07 はこの预言と統計誤差の範囲で整合しており、観測された幅–深さ関係は「惑星–円盤相互作用」を主要なギャップ形成機構とみる描像と矛盾しない統計的証拠を与えた。

4.2 推定された惑星質量分布：太陽系との相似性

前節において [6] が予想する惑星起源のギャップモデルと整合的な天体に対して、ギャップ幅–惑星質量関係式を適用して内在する惑星の質量を

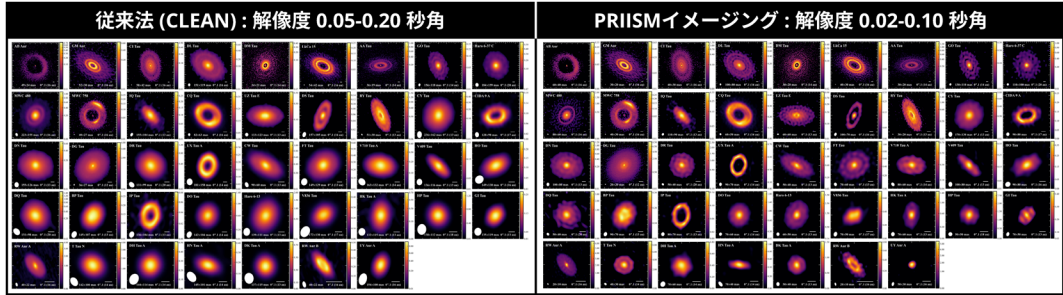


図1 おうし座・ぎょしゃ座分子雲のClass II円盤43天体のダスト連続波（1.3 mm帯）画像。左半分は従来法のCLEANによる画像（解像度0.05-0.20秒角）、右半分は同一データをPRIISMで再構成した画像（解像度0.02-0.10秒角）。同一サンプルの並列表示により、解像度向上が個々の円盤に与える効果を直接比較できる。CLEAN画像で平坦に見えていたコンパクト円盤の中にも、PRIISM画像でリング・ギャップ構造が新たに浮かび上がる天体が含まれることを視覚的に確認することができる。Yamaguchi et al. (2024) [5] より引用。

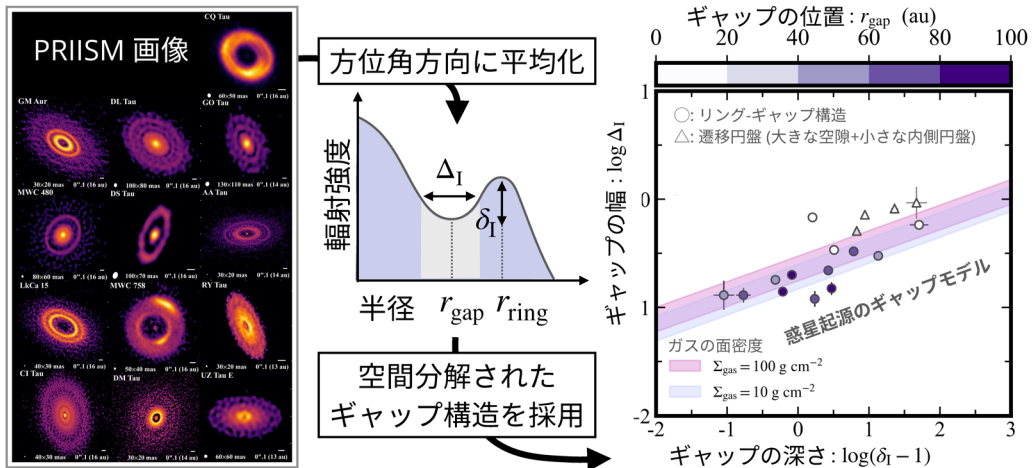


図2 ギャップ幅-深さ関係の解析プロセス。左: PRIISM画像から空間的に分解されたリング・ギャップ構造を持つ天体群。中央: 方位角方向に平均化した放射強度プロファイルから、リング側ピークを基準とした深さ δ_I とギャップ幅 Δ_I を定義。右: 各ギャップを $(\delta_I - 1, \Delta_I)$ 平面にプロットした結果。観測点はべき乗関係 $\Delta_I \propto (\delta_I - 1)^{0.32 \pm 0.07}$ に従う。青色帯はガス面密度 $\Sigma_{\text{gas}} = 10, 100 \text{ g cm}^{-2}$ における惑星起源ギャップモデル [6] の予言で、観測の指数はこの予言と統計誤差の範囲で整合する。円記号はリング・ギャップ構造、三角記号は遷移円盤を表す。Yamaguchi et al. (2024) [5] の図をもとに一部改変。

見積もった（図3）。得られた質量-軌道半径分布では、内側領域（ $r \sim 10 \text{ au}$ ）には土星-木星質量、外側領域（ $r \sim 40\text{--}100 \text{ au}$ ）には海王星質量程度の惑星が位置している。「内側に木星質量級の惑星、外側に海王星質量級の惑星」という質量分布は太陽系の惑星配置と共通しており、このような特徴が一般的なClass II円盤に普遍的に内在する可能性を示唆する。

ただし太陽系との明らかな相違点もある。本研究の天体における外側領域に位置する惑星の軌道半径（ $40\text{--}100 \text{ au}$ ）は、太陽系の天王星・海王星（ $20\text{--}30 \text{ au}$ ）よりも2-3倍大きい。この相違は惑星形成理論にとって挑戦的な問題を提起する。標準シナリオであるコア降着説（km級の微惑星の衝突合体によるコア形成）やペブル降着説（ガス抵抗の影響でドリフトする小石（ペブル）の降

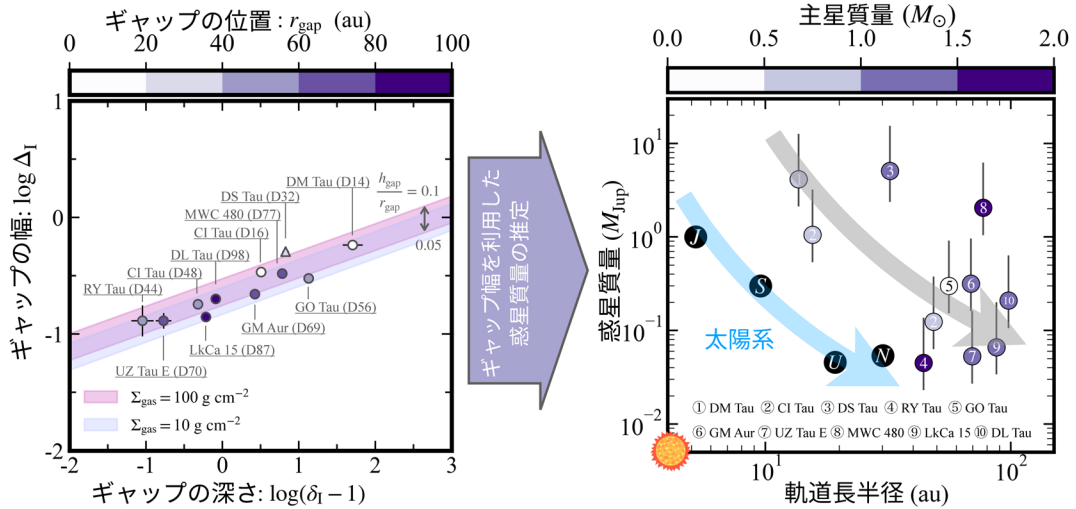


図3 左: 惑星起源整合領域 ($h_{\text{gap}}/r_{\text{gap}}=0.05\text{--}0.1$) に乗る 11 個のギャップ。各点には天体名とギャップ名称を併記した。ギャップ名称は暗い環状領域 (dark) の頭文字「D」に中心星からの距離 (au 単位) を添えたもので、例えば D14 は半径 14 au に位置するギャップを表す。右: ギャップ幅-惑星質量関係式から見積もった惑星の質量-軌道半径分布。番号は、各天体に対応する。内側に木星質量級の惑星、外側に海王星質量級の惑星という内外で異なる質量が分布する傾向は太陽系のアーキテクチャ (J: 木星, S: 土星, U: 天王星, N: 海王星) と相似的である一方、外側惑星の軌道半径は太陽系より 2-3 倍大きいという相違が見られる。Yamaguchi et al. (2024) [5] の図をもとに一部改変。

着) では、軌道半径 30 au 以遠で海王星質量級以上の惑星を円盤寿命 (数百万年) 内に形成することは容易ではない [7, 8]。一方、重力不安定説で期待される顕著な非軸対称構造は本サンプルにはほとんど見られない [9]。近年、この困難を打開する手掛かりとして、ガスとダストの協調的相互作用によるダスト集積機構が議論されている。その代表例である永年重力不安定 [10] は、ガス乱流が弱い若い円盤で発達しやすく、低温な円盤外縁部に高密度ダストリングを形成し、微惑星形成の基礎を整える。ただし、この経路から海王星質量級以上の惑星に至る全過程を統一的に説明する理論モデルは依然として確立に至っておらず、遠方での大質量惑星形成経路の解明は観測・理論の両面で今後の重要課題である。

さらに、本研究で十分に解像されなかった「ギャップ候補」が約 20 個存在する点にも注意を要する。これらは本研究の代表的な解像度 (~ 0.05 秒角) では幅・深さの定量計測に至らな

かった微細構造であるが、検出済みのギャップに対して用いた幅-惑星質量関係式を外挿すれば、海王星質量以下の惑星群が軌道半径 5-40 au の広範囲に分布している可能性を示唆する。重要なのは、このような低質量惑星の形成は、コア降着やペブル降着が円盤寿命内で機能する範疇にあり、形成時間の問題を抱えずに説明できる点である。すなわち、木星質量以下の惑星が円盤に普遍的に分布しているとすれば、コア降着・ペブル降着が惑星形成の主要機構として働いていることを示唆する。翻って先ほど論じた 40-100 au の海王星質量級以上の惑星については、例外的に質量の大きい円盤での形成、あるいは大質量惑星形成を加速しうる副次的要因が関与した可能性がある。この下限側の集団を実証するには、海王星質量惑星が形成しうるギャップ構造を分解できる 0.05 秒角を下回る「超高解像度観測」が今後不可欠である。

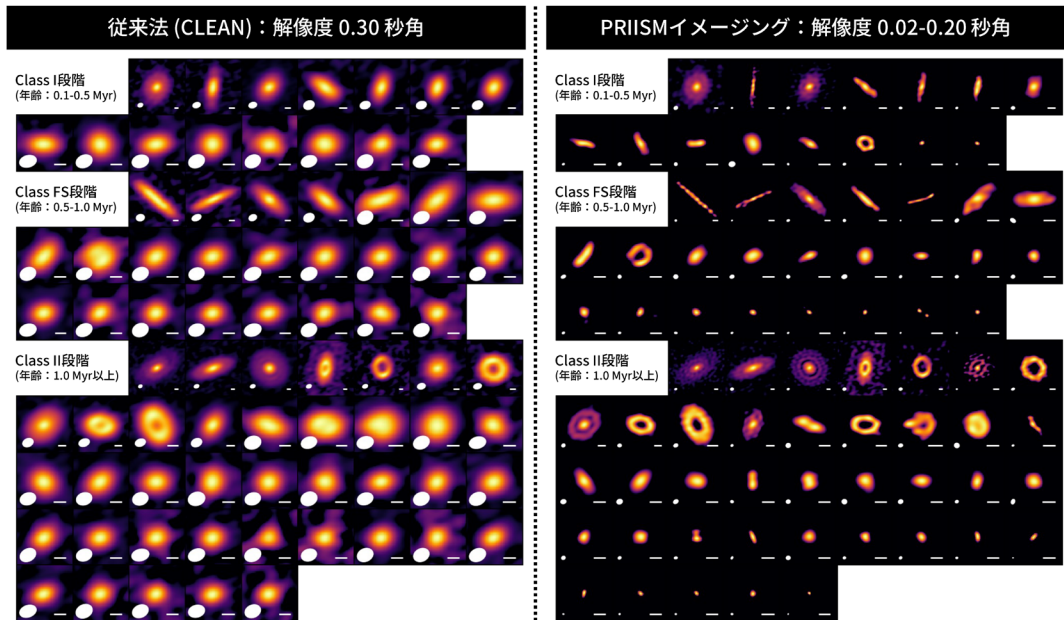


図4 従来法CLEAN (左)とPRIISMを用いた新たな画像解析手法(右)によって得られた、へびつかい座分子雲に位置する78個の原始惑星系円盤の1.3 mmダスト連続波画像ギャラリー。各進化段階ごとに、ダスト円盤半径が大きい天体から順に左上から右下へと並べている。各パネルの左下はビームサイズまたは実効的な解像度、右下には30 auのスケールが示されている。Shoshi et al. (2025) [11] の図をもとに一部改変。

5. へびつかい座分子雲の原始惑星系円盤

本章では、[11]で報告した、へびつかい座分子雲における原始惑星系円盤のPRIISMサーベイの主要結果を紹介する。本研究の目的は、Class IからClass IIにかけての円盤を対象に、微細構造の検出頻度と円盤構造の統計的性質を調べることで、未解明だった微細構造の形成時期に観測的な制約を与えることにある。

へびつかい座分子雲は、おうし座・ぎょしゃ座分子雲と同様、太陽系から最も近い低質量星形成領域の1つであり、その距離は約140 pcである。一方、両者に比べて、誕生からおおよそ100万年と若いことに加えて、幅広い進化段階の天体が存在しており、微細構造の形成時期を統計的に迫るうえで理想的な対象領域である。本研究では、大規模円盤サーベイODISEA [12]で取得された

ALMA Band 6 (1.3 mm帯)のアーカイブデータにPRIISMを用いた画像解析を適用し、合計78天体(Class I: 15天体, Class FS: 24天体, Class II: 39天体)の画像を得た。

元のCLEAN画像の解像度はおおよそ0.30秒角 $\times$ 0.22秒角(42 au $\times$ 31 au)であり、多くの円盤では半径や微細構造を十分に制約することが難しかった(図4左)。一方、PRIISM画像では0.02–0.20秒角の実効的な解像度が得られ、CLEAN画像に対して中央値で約3.8倍の解像度向上を達成した(図4右)。これにより、CLEAN画像では不明瞭だった円盤の大きさや形状をより明確に捉えることができた。得られた画像から測定したダスト円盤半径は5–179 auに分布し、中央値は27 auであり、へびつかい座分子雲の円盤が、おうし座・ぎょしゃ座分子雲の円盤に比べて比較的にコンパクトであることを示している。さらに本研究では、円盤構造を分類し、微細構造の有無と星・円

盤の物理量との関係を議論した。

5.1 各進化段階における微細構造の検出率

従来法に比べ高い解像度を達成したPRIISM画像を用いて、方位角方向に平均した放射強度プロファイルと円盤の長軸方向に沿ったプロファイルを併用し、円盤構造の分類を行った。その結果、全78天体のうち、リング構造が26天体、スパイラル構造が1天体、ギャップ構造候補が5天体に見られた。さらに、リング構造を持つほぼedge-on円盤（観測の視線方向に対する傾斜角が大きく90度付近になっている円盤）、または連星周囲の円盤の候補が3天体確認され、残りの43天体は特徴的な構造を持たない円盤に分類された。微細構造を持つ円盤に分類されたものの中で、既存の高解像度観測によって構造が確認済みの天体を除くと、15天体が本研究によって新たに微細構造を持つ円盤候補として同定された。各進化段階におけるリング構造およびその候補の検出率は、Class I, Class FS, Class IIでそれぞれ40%, 33%, 38%であった。少なくとも一部のClass I円盤では、リング構造がすでに形成されていることが観測的に確かめられる。ただし、各進化段階のサンプル数（15, 24, 39天体）は限られており、進化段階間の検出率の差異が有意かどうかは本サンプルでは判定できない。また未分解の微細構造を含むコンパクト円盤の存在によって検出率が変わらう点にも注意が必要である。

5.2 微細構造の形成時期の解明

本サーベイの最大の科学的成果は、微細構造を持つ円盤が観測される最若期を統計的に初めて制約した点にある。本研究サンプルに加え、ALMA大規模国際観測計画eDisk^{*1}における19個のClass 0/Iサンプル [13] をダスト円盤半径および中心星の進化段階の指標となるボロメトリック温度を用いて比較を行った（図5）。その結果、多くの微細構造を持つ円盤は、ダスト円盤半径が

30 au以上かつボロメトリック温度が200–300 K以上の領域に分布していた。本研究では、PRIISMを用いた解析によってeDiskと同程度の解像度を多数天体へ一様に適用できたため、このような傾向を統計的に示せた点が重要である。ただし、半径が15–20 auを下回るコンパクト円盤では微細構造の検出が難しく、またボロメトリック温度が100–200 K付近のサンプル数も十分ではない点に注意が必要であり、今後の研究によって両者の閾値は低い値へ更新される可能性がある。さらに、ボロメトリック温度の閾値である200–300 Kは、中心星誕生後およそ20–40万年経過した段階に相当すると考えられており [14]、観測的にはこの時期までに円盤内に顕著な微細構造がすでに形成されている例が確認されたことを意味する。これらの構造が惑星に起因するのであれば、惑星形成が従来の想定よりもはるかに若い段階から開始している可能性を示す手掛かりとなる。

6. 個別天体のPRIISM詳細解析

これまで述べた統計サーベイは「微細構造の母集団としての性質」に観測的制約を与えるものであるが、個々のギャップやリングがどのような物理機構によって形成されたかを問うためには、個別天体に対する詳細解析が不可欠である。我々はサーベイ研究と並行して、とくに既存の枠組みでは説明が難しい特異な円盤や、進化段階・降着現象の理解に直結する天体に対しても、PRIISMによる画像解析を進めてきた。

T Tauri型星の原型として知られるT Tau Nの半径~24 auのコンパクト円盤に対しては、半径12 auのギャップを初検出し、土星質量程度の惑星の存在を示唆した [15]。ギャップ位置・惑星質量ともに太陽系の土星と類似しており、低質量星形成領域で多数を占めるコンパクト円盤においても、太陽系に類似した巨大惑星形成の痕跡が存

^{*1} 近傍のClass 0/I原始星周囲の円盤を~7 auの高解像度で系統的に観測し、円盤形成の初期過程や惑星形成の兆候を明らかにすることを目的としたALMA大規模国際プロジェクト。

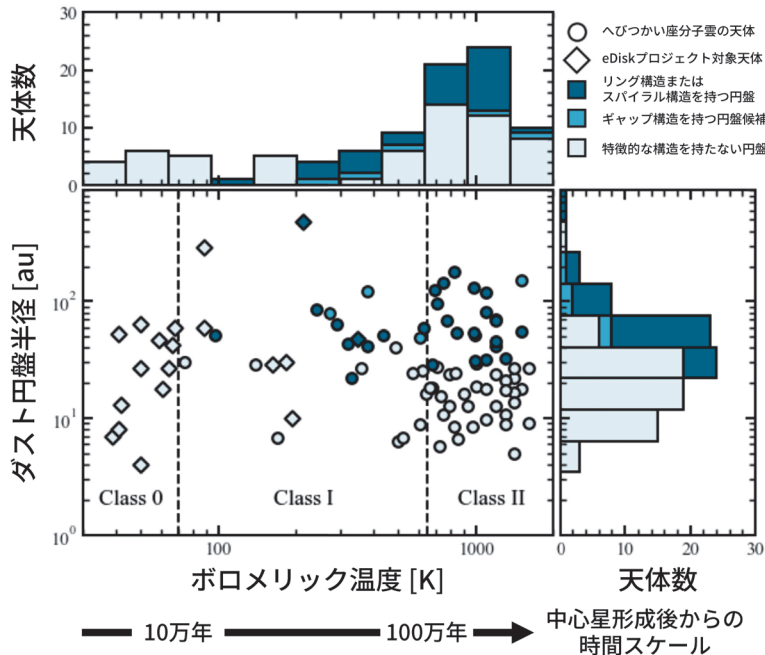


図5 ヘビつかい座分子雲の76天体^{*2} (円)とeDiskサンプル19天体(ひし形)のボロメトリック温度^{*3}とダスト円盤半径の関係。マーカーの色の濃淡は3種類の円盤構造を表しており、濃い色がリング構造またはスパイラル構造を持つ円盤、中間の濃さはギャップ構造を持つ円盤候補、薄い色は特徴的な構造を持たない円盤に該当している。上部および右側のパネルは、ボロメトリック温度とダスト円盤半径のヒストグラムを示している。[\[11\]](#)の図をもとに一部改変。

在しうることを示す先駆的な例となった。

次に、最も若い(年齢~300万年)系外惑星をホストすることで知られるClass II円盤IRAS 04125+2902では、円盤内に多重不整列構造を発見した[\[16\]](#)。これは系外惑星と円盤構造を直接結ぶ希少な観測例として、惑星形成期における円盤の動的攪乱の存在を観測的に示している。さらに、Class I段階の原始星CrA IRS 2周囲の円盤からは二重リング構造を発見した[\[17\]](#)。ギャップから推定される惑星質量は土星質量級であり、Class II円盤サンプルで得られた質量-軌道半径の傾向(図3)と整合的であることから、5.2節で議

論した「Class I段階で既に微細構造形成が始まりうる」シナリオを個別天体レベルで裏付ける。

最後に、若い爆発型変光星(EXor型)として知られるEX Lupiでは、内側円弧と外側リングという非軸対称な微細構造を発見した[\[18\]](#)。EX Lupiは数年単位の爆発的質量降着を起こす特異な進化段階の天体であり、本研究は降着現象と微細構造形成の關係に観測の手掛かりを与える。

これら一連の研究は、「サーベイで分布を捉え、個別解析で物理機構に迫る」という相補的な研究戦略の好例であり、統計サーベイと個別解析を両輪として進めることで、円盤微細構造の理解を多

^{*2} ヘビつかい座分子雲の天体のボロメトリック温度には[\[14\]](#)の値を採用した。ただし、2天体については同文献でボロメトリック温度が算出されていないため、本解析からは除外している。

^{*3} Class FSはSEDの近赤外から中間赤外にかけてのスペクトル傾きに基づく分類であり、ボロメトリック温度による分類ではClass IまたはClass IIに含まれる[\[14\]](#)。一方、Class 0はボロメトリック温度によってのみ定義されるため、eDiskサンプルとの比較ではボロメトリック温度に基づく分類を用いた。

面的に深めることができる。

7. まとめと今後の展望

本稿では、スパースモデリングに基づくイメージングツールPRIISMを近傍星形成領域の100天体以上のALMAアーカイブデータに適用し、原始惑星系円盤を高解像度で系統的に解析した結果、および特徴的な個別天体の詳細な解析結果を概説した。

方法論的特徴として特筆すべきは、観測時間に縛られない研究スタイルが確立された点である。標準的な計算機環境のみを用い、既存のALMA観測データにPRIISMを適用することで、未報告の天体構造を抽出し、さらに物理モデルとの比較を通じて形成機構を議論する。このプロセス全体を、新規観測提案に依存することなく実行できる枠組みを整えてきた。本アプローチは新たな観測時間の獲得を必須としないため、学生・研究者にとっても着手しやすく、一方で既存データから未報告の構造を引き出した際の科学的意義は大きい。

今後の展望として、第一に、PRIISMによる円盤サーベイを、おおかみ座、カメレオン座、さそり座といった他の星形成領域へ、さらにClass 0/I段階の若い天体へと拡張することが挙げられる。これにより、微細構造形成の出発点を、進化段階および環境依存性の両面から観測的に特定することが可能となる。第二に、ALMA輝線データへの円盤イメージングの適用である。円盤ガスの空間分布は、輝線観測に固有の帯域幅の制約から、ダスト連続波で達成されてきた数十ミリ秒角スケールの分解能には到達しておらず、同一円盤内のガスとダストを同等の分解能で直接比較することは現状原理的に困難な状況にある。輝線イメージングへのPRIISMの導入はこの問題を解消し、例えば円盤中に埋もれた惑星の質量に対して観測的制約を新たに与える。さらに、同手法をClass 0/I段階の若い天体に適用すれば、高密度な分子ガスの塊であるエンベロープに埋もれた円盤

ガスの微細構造を初めて空間分解する道が拓かれ、微細構造の発生時期そのものに観測的制約を与えうる。この技術的課題については、本特集の「アルマ望遠鏡イメージングツールPRIISMの今後の展望」を参照されたい。

謝 辞

本稿を作成するにあたって、天文月報編集委員の小山翔子氏には大変お世話になりました。ここで深くお礼を申し上げます。本稿はJSPS科研費：JP26K00741 (MY), JP26K17220 (MY), JP-25KJ1947 (AS) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Hayashi, C., et al., 1985, in *Protostars and planets II*, eds. M. S. Matthews, (Univ of Arizona Pr, Tucson, AZ), 1100
- [2] Yamaguchi, M., et al., 2020, *ApJ*, 895, 84
- [3] Nakazato, T., & Ikeda, S., 2020, PRIISM: Python module for Radio Interferometry Imaging with Sparse Modeling, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:2006.002
- [4] Nakazato, T., et al., 2020, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 11453, 114532V
- [5] Yamaguchi, M., et al., 2024, *PASJ*, 76, 437
- [6] Zhang, S., et al., 2018, *ApJ*, 869, L47
- [7] Levison, H. F., et al., 2010, *AJ*, 139, 1297
- [8] Bitsch, B., et al., 2015, *A&A*, 582, A112
- [9] Vorobyov, E. I., 2013, *A&A*, 552, A129
- [10] Tominaga, R. T., et al., 2023, *ApJ*, 953, 60
- [11] Shoshi, A., et al., 2025a, *PASJ*, 77, 572
- [12] Cieza, L. A., et al., 2019, *MNRAS*, 482, 698
- [13] Ohashi, N., et al., 2023, *ApJ*, 951, 8
- [14] Evans, N. J., II, et al., 2009, *ApJS*, 181, 321
- [15] Yamaguchi, M., et al., 2021, *ApJ*, 923, 121
- [16] Shoshi, A., et al., 2025b, *ApJ*, 993, 90
- [17] Shoshi, A., et al., 2026, *ApJ*, 998, 214
- [18] Yamaguchi, M., et al., 2025, *ApJ*, 993, 85

PRIISM Science: Probing Substructures in Protoplanetary Disks

Masayuki YAMAGUCHI^{1,2} and Ayumu SHOSHI³

¹*Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan*

²*NAOJ ALMA Project, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

³*Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan*

Abstract: Protoplanetary disks exhibit diverse fine substructures—bright concentric rings, dark gaps, and spiral arms—regarded as physical fingerprints of ongoing planet formation. Statistical studies of these features require high-resolution observations, but observing-time costs have hindered the construction of uniform high-resolution samples. We applied PRIISM, the imaging tool introduced in the technical article of this special issue, to ALMA continuum data, achieving effective resolution beyond conventional method CLEAN on the same data and enabling uniform analysis of many disks. Surveys of the two nearest low-mass star-forming regions revealed a power-law relation between gap width and depth in 43 Taurus-Auriga disks, consistent with planet-disk interaction, and statistically demonstrated that substructures already form as early as 0.2–0.4 Myr after stellar birth in 78 Ophiuchus disks spanning multiple evolutionary stages.