

特集「ALMAで迫る惑星科学」

アルマ望遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に見出した惑星形成の種

塚越 崇¹

(要旨) 惑星系の形成過程を知る上では、その母体となる原始惑星系円盤の構造と進化を調べるのが重要である。近年のアルマ望遠鏡を用いた高分解能・高感度観測により、これまでの我々の理解を打ち破る、複雑な円盤の内部構造が明らかにされており、惑星系形成を探る上で革新的な成果を生みつつある。我々の研究グループでも、最も近傍の原始惑星系円盤を保有する若い恒星うみへび座TW星について、アルマ望遠鏡を用いた高分解能観測を推進してきている。本記事では、その最新の研究成果 Tsukagoshi et al. 2019, ApJ, 878, L8 について紹介する。

1. 研究の背景

本記事では、若い恒星を取り巻く原始惑星系円盤と、形成中の惑星を取り巻く周惑星円盤の二種類の円盤について取り上げる。両者の混同を避けるため、周惑星円盤については周惑星円盤と明記することとし、原始惑星系円盤については、原始惑星系円盤、もしくは円盤と省略して記載する。

1.1 惑星系形成と原始惑星系円盤

太陽系のような惑星系は、若い恒星を取り巻く原始惑星系円盤で生まれると考えられている。原始惑星系円盤内で形成中の惑星を観測的に見出すことは、惑星系の形成過程を調べる上で極めて重要である。近年のアルマ望遠鏡(以降アルマ)による高解像度観測では、原始惑星系円盤の穴構造やギャップ構造、スパイラル・アーム構造など、複雑な内部構造が普遍的に存在する様子が明らかにされつつある[例えばアルマ・ラージプロジェクトの一つである DSHARP; 2]。このような内部構造の要因は現在も活発な議論が続いているが、惑星系の形成過程に起因した円盤の構造変化だと考えられている。

理論計算によると、原始惑星系円盤内で形成されつつある惑星は、その周囲に周惑星円盤を形成すると考えられており、その周惑星円盤を通して物質が惑星に取り込まれることで、惑星は成長していく[3]。周惑星円盤は、形成中の惑星の間接的証左として着目されている構造であり、アルマのようなミリ波・サブミリ波長帯の観測においても、検出可能性のある構造であると考えられている[4]。しかしながら、これまでのアルマによるミリ波・サブミリ波観測では、周惑星円盤で期待されるような、小スケールの非軸対称性は見出されていない[5]。いくつかの原始惑星系円盤において、数10から数100 au相当の比較的大きい非軸対称放射は見つかっているものの、このような大きい(サブ)ミリ波放射の偏りは周惑星円盤と考えるには大きすぎる構造であり、円盤内に発生したガス渦により塵が局所的に堆積した結果を見ていると解釈されている[例えば6]。

1.2 うみへび座TW星

原始惑星系円盤の構造を調べるためには、適切な観測天体を選定する必要がある。本研究で観測したうみへび座TW星(TW Hya)は、0.8太陽質量程度の重さをもつ若い恒星で、年齢はおおよそ1000万年程度である。地球からの距離はおおよそ60 pcであり[7]、地球から最

1. 国立天文台科学研究部
takashi.tsukagoshi@nao.ac.jp

も近い位置にある原始惑星系円盤である。円盤の回転軸は視線方向に対しおよそ7度で視線方向とほぼ平行であり、円盤構造を真上から眺めることが可能なため、円盤構造を詳しく調べるのに適した天体である。

惑星系形成過程の観測研究において、TW Hyaの原始惑星系円盤は重要なサンプルと考えられており、これまで多くの観測研究が波長を問わず行われてきている。近年では特に、大型の望遠鏡を用いた高解像度の電波・赤外線観測が多数行われてきており、円盤内における複数のギャップ構造や穴構造といった、複雑な内部構造の解像に大きな貢献をしている[例えば8-10]。

1.3 先行研究と残されていた課題

我々の研究グループでも、TW Hyaの原始惑星系円盤に対し、アルマを用いた高解像度観測を推進してきた。Tsukagoshi et al. (2016) [11]では、およそ3 auという高い空間分解能で、バンド4(波長2.1 mm)および6(波長1.3 mm)の2波長における連続波放射のデータを取得しており、両データを組み合わせたマップ作成(Multi-frequency synthesis method; MFS)を行うことで、高解像度ミリ波画像だけでなく、スペクトル指数 α の高解像度画像も作成している。観測で得られたミリ波画像では、円盤内の半径25, 41 auの位置に、二つの明瞭なギャップ構造を描き出しており¹、円盤内側では半径5 au程度の穴構造も見出された。これらは同時期に行われたバンド7の高解像度の観測[8]でも、同様に示された構造である。一方、 α の分布を見ると、こちらも軸対称分布をしており、円盤外側から内側にかけて α の値が減少する傾向が見られた。また、ミリ波画像で見られた25 auの位置にあるギャップに対応する形で、局所的に α が増加する様子が見られた。

この α の増加は、ダスト吸収係数 κ_v のスペクトル指数 β において、およそ $\beta \sim 1.5$ に対応している。この値は、星間空間のダストに対して見積もられた値とほぼ同等であり、ギャップ内における、ある程度成長した($\sim$ mm 程度)ダストの欠乏を示唆している。こ

のような特徴的なダストサイズ分布となるには様々な要因が考えられるが、例えば惑星形成起因の理論的解釈と対応が良い[12]。もし惑星によって作られたギャップだとすると、ギャップ形状と理論計算[13, 14]との比較から、およそ数海王星質量の惑星がギャップを作り出していると期待される。

これまで見出されていた構造は、ギャップや穴のような内部構造も含めて、軸対称な円盤構造であった。一方、形成中の惑星が存在していた場合、周惑星円盤のような局所的な構造が付随すると考えられるが、そのような小規模な軸対称構造は見つかっておらず、更なる観測的な検証を必要としていた。

2. アルマによる高解像度・高感度観測

そこで我々の研究グループでは、TW Hyaを取り巻く原始惑星系円盤に対し、更に高感度・高解像度を目指したアルマによる観測を行なった。今回の観測はバンド6(波長1.3 mm)のミリ波で行なっており、ダスト円盤からの熱放射を効率良く捉える事を目的とし、連続波に特化した観測設定を用いている。観測は2017年の5月と11月にそれぞれ異なるアンテナ配列で行われており、最大基線長はおよそ8.6 kmを達成している。特に長基線配列での観測では、約200分という非常に長時間の積分を行っており、高空間分解能に相当するデータで高い感度を実現している。

データ解析にはアルマの解析ソフトウェアパッケージCASAを用いた。CLEANアルゴリズムを用いた画像作成を行っており、得られた観測画像を用いたセルフ・キャリブレーション²も併用することで高い感度を実現している。画像の空間分解能は 46.88×41.56 秒角であり、これはTW Hyaの距離に換算すると 2.79×2.48 auに相当する。最終的な画像のノイズレベルは $9.1 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ を達成しており、先行研究に比べておよそ3倍という非常に高い点源応答感度を達成している。

1. Tsukagoshi et al. [11]内ではそれぞれ22, 37 auとなっている。これは当時見積もられていたTW Hyaの距離54 pcを想定した値となっている。TW Hyaまでの距離は、近年のガイア衛星を用いた観測[7]により更新され59.5 pcとなっており、それに伴いギャップの半径も更新した。

2. 自身の輝度分布を構造モデルとして、そこから予想されるビジビリティ分布と観測ビジビリティを比較することで、位相や振幅の誤差を取り除く手法。誤った放射をモデルとしないよう、反復的に行うことで徐々に誤差を減らしていく。構造モデルとなる放射が単純(例えば点源)かつ十分な信号雑音比がある場合に有効な手法となる。

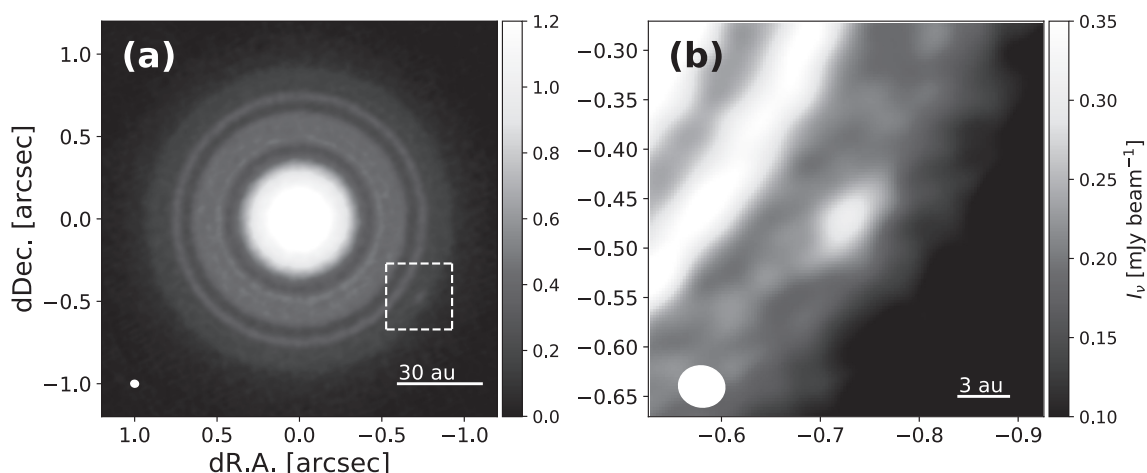


図1: 取得されたTW Hyaの原始惑星系円盤のバンド6(波長1.3 mm)連続波画像。図中左下の白い楕円は観測分解能を示す。(a)円盤の全景。(b)超過放射近傍、a内の点線で示した $0''.4 \times 0''.4$ 範囲内の拡大図。超過放射を見やすくするためカラースケールを変更している。(図はTsukagoshi et al. (2019)[1]より改変して引用)

3. 観測結果：円盤内に局所的なミリ波放射の超過を検出

図1(a)に示した観測結果の通り、先行研究で見出されていた、ギャップ構造や穴構造をより鮮明に捉えることに成功した。円盤全体の積分強度は 560.9 ± 0.4 mJyであり、過去の観測と同程度である。非常に高感度となる画像の作成に成功したが、25 auのギャップ位置において、Tsukagoshi et al. (2016) [11]で予想されていた惑星の存在を示唆するような特徴的な構造は、残念ながら見られなかった。

しかしながら、図1(a)を見ると、中心星から南西側の半径およそ52 auのあたり、円盤の端に近い箇所でも局所的なミリ波放射の超過を見出すことができる。図1(b)は超過放射の周囲を拡大したものであり、この成分が数au程度の広がりしか持たないことが見て取れるこの超過放射は信号雑音比で32ほどあり、背景となっている円盤成分の強度に比べても1.5倍ほど明るい。背景となっている原始惑星系円盤の放射に比べての有意性は、図2で示した動径・方位角輝度プロファイルも参照されたい。超過放射の強度は原始惑星系円盤に比べ、信号雑音比でおよそ11-12程度であり、本観測より3倍程度感度の悪い過去の観測では検出の難しい構造である。原始惑星系円盤のミリ波放射分布において、このような極めて小さい内部構造を見出し

たのは初めてのことである。超過放射のある半径にはその他の同様の放射は見られず、またギャップのような構造も存在していないことを注記しておく。

超過放射の検証のため、バンド7(波長0.8 mm)のアーカイブデータを用いてイメージを作成したところ、ノイズが大きいもののほぼ同じ位置に超過放射が見られた。このアーカイブデータにおける高解像度データは、2015年に取得されたものであり、本研究で行われた観測のおよそ二年前に相当する[8]。TW Hyaで見積もられている固有運動は大きく、二年間でおよそ 136 mas yr^{-1} が期待されるが、両データにおいて超過放射の位置にそこまでの差異は見られなかった。つまり、アーカイブデータと本研究の両方で超過成分が見出されたことは、この超過放射が背景天体ではなく、TW Hyaの円盤内に存在する放射であることを示している。

超過放射をより浮かび上がらせるため、円盤放射の軸対称成分を差し引いたものを図3に示す。着目していた超過放射は明らかな非軸対称成分であり、背景に対して 12σ で検出されていることがわかる。抽出された超過放射に対して、二次元ガウシアンを用いたビジュリティフィッティングを行ったところ、超過放射の大きさは $(4.4 \pm 0.2) \times (1.0 \pm 0.2)$ auほどであることがわかった。これは、超過放射のある半径でのダスト円盤のスケールハイトと同程度か、やや小さい構造と

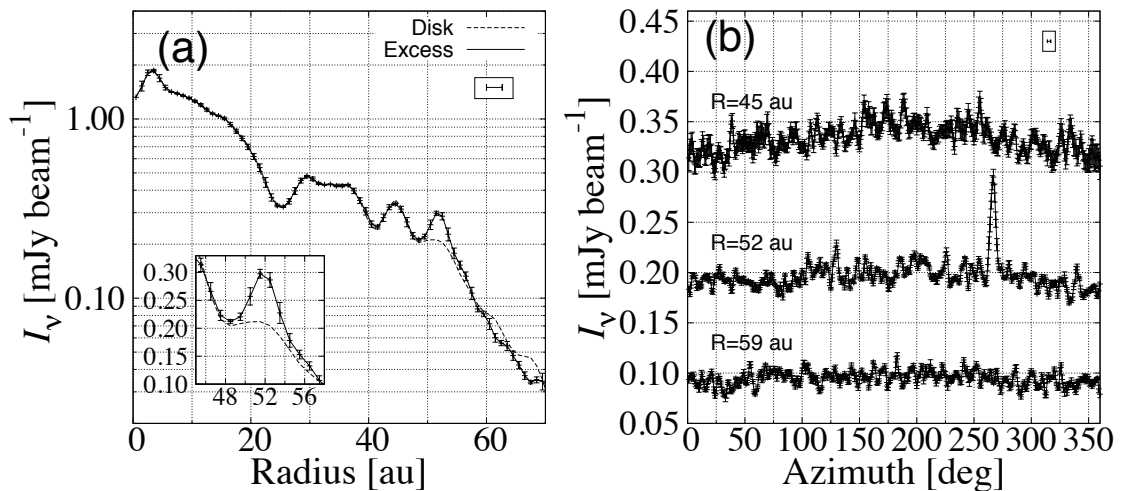


図2: 円盤の傾き角を補正した後の動径・方位角方向の輝度プロファイル。各図右上の囲い内にある線は観測分解能を示す。(a) 超過放射を通る動径方向輝度プロファイル(実線; 方位角 236° – 238°)と、超過放射近傍の平均プロファイル(点線; 方位角 222° – 236° および 238° – 252° を平均)。左下のパネルは、超過放射のある52 au付近を拡大し、縦軸を線形スケールにしたもの。(b) 半径45, 52, 59 auにおける方位角方向輝度プロファイル。(図はTsukagoshi et al. (2019) [1]より改変して引用)

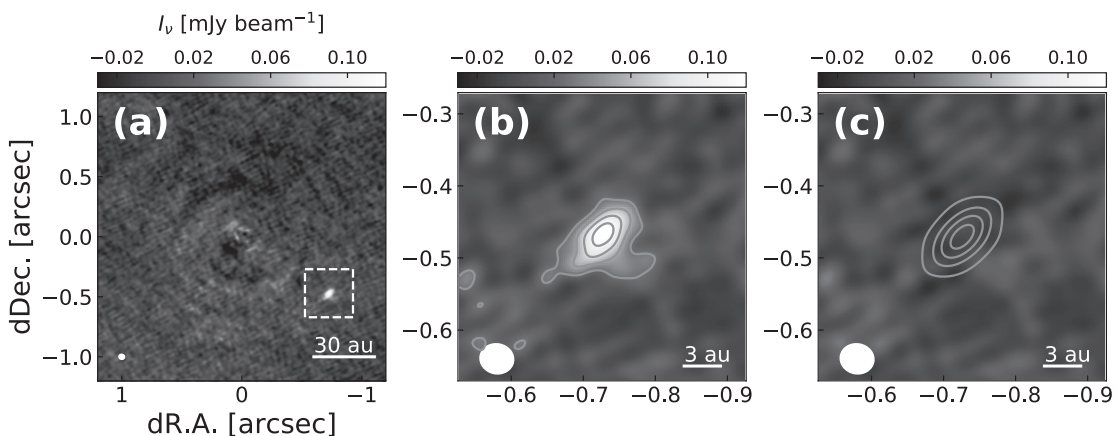


図3: 軸対称成分を差し引いた後のバンド6(波長1.3 mm)連続波放射の残差放射画像。軸対称成分はビジビリティで差し引いた後、図1と同様のパラメータで作図している。図中左下の白い楕円は観測分解能を示す。(a) 残差画像の全景。(b) 超過放射近傍の拡大図。等高線は 3σ レベル毎に引いてある。(c) 抽出した超過放射成分に対するガウシアンフィットの結果。等高線は最適解のガウシアン関数を示し、bと同じレベルで引いてある。カラーは抽出した超過放射成分から最適解のガウシアン関数を差し引いた残差を示す。(図はTsukagoshi et al. (2019) [1]より改変して引用)

なる[15]。積分強度は $250 \pm 5 \mu\text{Jy}$ であり、放射が光学的に薄いとし、ダスト温度 $T_{\text{dust}} = 18 \text{ K}$ [10]、ダストオパシティ $\kappa_\nu = 2.3 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ [15]を仮定すると、超過放射のダスト質量はおよそ $(2.83 \pm 0.06) \times 10^{-2}$ 地球質量と見積もることができる。

最後に、上述の超過放射以外のミリ波放射の非軸対称性についても言及しておきたい。TW Hyaのミリ波放射は全体的に軸対称分布であるが、円盤の内側に近づくにつれ、方位角方向 2π で一周期となる強度変動を示す傾向を見ることができる(図2b)。変動強度は

半径 45 au でおおよそ 1 % 程度と微弱であり、過去の観測の感度では検出の難しい変動成分である。TW Hya の円盤では過去の可視光観測において、円盤表面輝度の方位角方向の変化が報告されており、それは円盤内側の構造変化が引き起こす円盤表面に生じる影によるものと考えられている [16]。今回の観測で見つかったミリ波放射の方位角方向の揺らぎは、可視光で見られた揺らぎと同様の変動周期を示しており、このような円盤表面の影の構造と関連しているかもしれない。本研究では超スケールの超過放射に焦点を当てており、この方位角方向の揺らぎに関してはここではこれ以上議論しない。

4. 超過放射の起源は何か？

超過放射の起源については、現在のデータではまだ切り分けが難しい。大きく分けて以下の二つの可能性が挙げられるが、どちらも惑星系形成に繋がる重要な構造であると考えられる。

一つの可能性として挙げられるのは、原始惑星系円盤に生じた小規模なガス渦に、ダスト粒子が補足されている、という解釈である。このような解釈は、比較的大きいスケールの円盤非軸対称性の説明としてしばしば参照されている [17]。ガス渦ができると圧力勾配力が働くため、ある程度の大きさに成長したダスト(～mm)には流体抗力が働き、ガス渦の中心にダストが集積していく。理論計算によると、安定したガス渦の形状は、アスペクト比一桁程度の楕円状になることが予想されている [18]。ダストはガス渦の中心に集積する傾向を持つが、集積するダスト分布のアスペクト比は、ガス渦の形状と似た分布になると期待される [19]。今回見出された超過放射の形状は、アスペクト比でおおよそ 4 程度であり、上述の様な理論予想とは整合的である。

もしガス渦に捉えられたダスト粒子だった場合、円盤ダストの柱密度が局所的に 2 倍程度となっていることを示唆している。円盤全体のガスダスト比 100 を仮定すると、この超過放射の領域では、ガスダスト比 50 程度となっていることを示唆している。このような比較的弱いダスト集積は、比較的弱いガス渦でも達成可能だろう。

ガス渦説に対する問題は、今回の観測で超過放射が

ただ一つしか見つかっていないことである。円盤が乱流状態であれば、上述のような弱いガス渦が多数存在すると期待される。同じ軌道長半径に存在するガス渦は、いずれ大きな一つの渦となると期待されるが [18, 20]、異なる軌道の上に複数の渦が存在しうるだろう。小さいガス渦が観測可能な水準で長時間存在しうるかどうかはよく分かっていない。観測的には、今回見出された超過放射が、複数の小さいガス渦におけるダスト集積の「氷山の一角」を見ている可能性もある。本当に複数の小さいダスト集積が存在しているかどうか、より感度の良い観測を行い調査する必要がある。

超過放射が一つしか見つかっていないことを説明するもう一つの解釈としては、形成中の惑星を取り巻く周惑星円盤である。形成中の惑星が存在すると、母体の原始惑星系円盤からガスとダストを降着し、局所的に密度と温度が上昇するとともに、惑星の周囲に周惑星円盤を形成する [3]。検出された超過放射は、このような周惑星円盤が残存エンベロープのような構造を捉えているのかもしれない。

超過放射が周惑星円盤起源だとした場合、そのサイズから惑星質量を推測することができる。超過放射に対して見積もった短軸サイズの半値(～0.5 au)を周惑星円盤の半径だと仮定し、周惑星円盤の半径として典型的にヒル半径の 1/3 程度とする [21]。ヒル半径は、

$$r_H = r_p \left(\frac{M_{pl}}{3M_*} \right)^{1/3} \quad (1)$$

で記述され、 r_H はヒル半径、 r_p は惑星の軌道長半径、 M_* は中心星質量、 M_{pl} が推測したい惑星質量である。適切に値を代入すると、見積もられる惑星質量は海王星質量程度となる。

海王星質量という比較的軽い惑星質量は、いくつかの観測結果と整合的である。TW Hya の円盤では、38 μm (L' バンド) の観測で惑星質量の上限値が得られており、52 au の半径において、少なくとも 1～2 木星質量の惑星は存在しないことが示唆されている。逆に言えば、海王星質量程度の惑星はまだ棄却されていない、ということになる。また、我々の観測結果では 52 au の半径においてギャップ構造が見られておらず、これも軽い惑星の存在を示唆している。海王星質量であれば中心星質量との比はおおよそ 10^{-5} ほどとなり、理論計算に従うと [22]、ガス分布にもダスト分布にも大

きなギャップを作ることが難しいことが予想される。粘性の小さい円盤 ($\alpha \leq 10^{-4}$) であれば海王星質量程度の惑星でもギャップを開けうるが[23], TW Hyaの円盤の粘性に対しては, 十分な観測的上限値は得られていない [$\alpha \leq 7 \times 10^{-3}$; 24].

しかしながら, 周惑星円盤とするシナリオでは, 観測で得られたミリ波のフラックス密度を全て説明することが難しい, という問題がある. シンプルな周惑星円盤の粘性円盤モデルに従うと[4], 海王星質量の惑星を取り巻く周惑星円盤で期待されるフラックス密度は, 最大でもおよそ $100 \mu\text{Jy}$ 程度である. 観測で得られたフラックス密度は倍以上の差異があるため, 例えば, 惑星と周惑星円盤を取りまくエンベロープのような構造も考える必要があるのかもしれない.

5. 研究の発展

本研究では, 原始惑星系円盤のミリ波放射の中に, 数auスケール程度の小さな構造を見出すことに成功している. 一方でこの超過放射の要因, とりわけ中心に形成中の惑星が存在するかどうかについては, ミリ波観測だけでは判断が難しい. そのため, 異なる方法で予想される惑星の存在を検証する必要がある.

形成中の惑星が存在する場合, 最も顕著な特徴としては, 惑星近傍において物質が高温 ($> 1000 \text{ K}$) となることである. 本研究での分解能では, 超過放射自体を空間分解しきれておらず, 冷たいダスト放射を全体的に捉えるのみとなっている. アルマでより高い分解能での観測を行うことができれば, 中心部に高温となったダストが存在するかどうか検証が可能となるだろう. もしくは, 高解像度の赤外線観測により直接高温のダストを捉えることでも, 同様の検証が可能となる.

惑星の兆候を捉えるもう一つの方法は, 惑星への質量降着に起因した電離水素ガスの放射を見つけることである. よく用いられるのは, バルマー系列の $n = 3 \rightarrow 2$ となる輝線 ($\text{H}\alpha$ 輝線) で, 高感度の可視光観測を行うことで, 海王星質量の惑星の検証が可能となるだろう.

けて実行されました(課題番号: 17K14244, 17H01103, 18H05441, 19K03932). この研究では, アルマ観測データ ADS/JAO.ALMA#2017.1.00520.S, 2016.1.00842.S, 2015.1.00308.S, 2015.1.00686.S, 2016.1.00229.S, 2016.1.00311.S, 2016.1.00440.S, 2016.1.00464.S, 2016.1.00629.S, 2016.1.01495.S を使用しています. データ解析の一部には, 国立天文台天文データセンターの共同利用データ解析システムを使用しています.

参考文献

- [1] Tsukagoshi, T. et al., 2019, ApJ 878, L8.
- [2] Andrews, S. M. et al., 2018, ApJ 869, L41.
- [3] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, AJ 124, 3404.
- [4] Zhu, Z. et al., 2016, ApJ 832, 193.
- [5] Isella, A. et al., 2014, ApJ 788, 129.
- [6] van der Marel, N. et al., 2013, Science 340, 1199.
- [7] Gaia Collaboration et al., 2016, A&A 595, A2.
- [8] Andrews, S. M. et al., 2016, ApJ 820, L40.
- [9] van Boekel, R. et al., 2017, ApJ 837, 132.
- [10] Huang, J. et al., 2018, ApJ 852, 122.
- [11] Tsukagoshi, T. et al., 2016, ApJ 829, L35.
- [12] Zhu, Z. et al., 2012, ApJ 755, 6.
- [13] Kanagawa, K. D. et al., 2015, ApJ 806, L15.
- [14] Kanagawa, K. D. et al., 2016, PAS 68, 43.
- [15] Andrews, S. M. et al., 2012, ApJ 744, 162.
- [16] Debes, J. H. et al., 2017, ApJ 835, 205.
- [17] Raettig, N. et al., 2015, ApJ 804, 35.
- [18] Richard, S. et al., 2013, A&A 559, A30.
- [19] Lyra, W. and Lin, M.-K., 2013, ApJ 775, 17.
- [20] Ono, T. et al., 2018, ApJ 864, 70.
- [21] Quillen, A. C. and Trilling, D. E., 1998, ApJ 508, 707.
- [22] Dipierro, G. and Laibe, G., 2017, MNRAS 469, 1932.
- [23] Dong, R. et al., 2017, ApJ 843, 127.
- [24] Flaherty, K. M. et al., 2018, ApJ 856, 117.

謝 辞

本稿で紹介した研究は科学研究費補助金の補助を受