# 特集「ALMAで迫る惑星科学」 ぎょしゃ座SU星に付随する原始惑星系円盤の 活動的相互作用

## 秋山 永治1

2019年10月3日受領, 査読を経て2019年11月5日受理.

(要旨) これまでぎょしゃ座SU星の描像が不明であったが,今回のアルマ望遠鏡による観測で原始惑星系 円盤に長さ1000 au以上の尾構造が付随することが確認された.幾何学的な構造に加え速度構造を調べた結 果,円盤と尾構造は物理的に接続し一つの系を形成していることが判明した.さらに,原始惑星系円盤と尾 構造で構成される系の起源について数値流体シミュレーションで調査したところ,(1)他天体との衝突,(2) 周囲の分子雲によるガス流との相互作用,(3)重力不安定による天体放出,のシナリオで観測結果を再現す ることができ,現段階では褐色矮星程度の質量を持つ天体との衝突または円盤へのガス塊の降着が最も妥当 な説明となっている.今後,広視野観測やSiO輝線をはじめとするショックトレーサーを用いた観測で衝突 に関する観測的証拠を積み上げ,衝突後の原始惑星系円盤の進化と惑星形成が可能な環境が再構築されるの か調査していく予定である.

## 1. はじめに

おうし座とぎょしゃ座に跨る星形成領域には様々な 構造を持つ原始惑星系円盤が存在し、同領域は太陽か ら~140 pcと非常に近い距離に位置している[1]. よ って、詳細な観測が可能であり惑星形成を観測的に理 解する上で重要な研究領域であるため、これまで様々 な波長で観測が行われてきた。2011年にアルマ望遠 鏡による科学観測が開始してからも当該領域における 観測が精力的に行われ、それまで観測が困難であった 天体に対して精緻な画像とともに新たな物理・化学的 情報を与えている. ぎょしゃ座SU星(中心星質量: 1.7 ±0.2太陽質量,スペクトルタイプ:G1,年齢:8.7± 0.7 Mvr [1]) はその一例であり、1990年代には可視光 観測からジェットやアウトフローによって形成された 空洞構造および当該空洞構造の壁面で光が反射する反 射星雲が付随しているとして認識されていた[2-4]. その後2000年代に入り、ハッブル宇宙望遠鏡やすば る望遠鏡の高コントラストカメラHiCIAOと補償光学

AO188を用いた直接観測による戦略的系外惑星・円 盤探査プロジェクト(Stragetic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru, SEEDS)によってぎょ しゃ座SU星に付随する尾構造が発見され[5,6],特に Hバンドの偏光観測では、円盤から南西方向に長さ約 350 au に渡る 0.1~1 µm サイズのダストから成る尾構 造が確認された[6]. そして、本観測のアルマ望遠鏡 による高感度・高解像度観測によって長さ1000 au以 上のガスから成る尾構造が確認され、当該天体の原始 惑星系円盤と尾構造との間には活発な相互作用が働い ていることが明らかになった.近年の観測で尾構造を 伴う原始惑星系円盤が確認されており、中でもぎょし ゃ座RW星Aの原始惑星系円盤において他天体との近 接遭遇によって潮汐アーム構造が誘起されたことが数 値シミュレーションで明らかにされている[7-9]. 理 論研究では以前から尾構造が様々な現象によって誘起 されることが予想されており, 後述するように他天体 との衝突や原始惑星系円盤で生じる重力不安定性から 誘起される天体放出などで形成されることが示されて いる. また, 条件や環境次第では褐色矮星程度の単独 星や連星系が形成されるため、それぞれの誕生や進化

<sup>1.</sup> 北海道大学高等教育推進機構

eakiyama@high.hokudai.ac.jp

を理解する上で観測から得られる貴重な情報となる. 本稿では、原始惑星系円盤との間で顕著な相互作用が 伴う尾構造の起源について、ガス運動に関する観測結 果と数値流体シミュレーションを基に調査したので報 告する.

## 2. 高解像度観測およびデータ解析

本研究では、アルマ望遠鏡で観測されアーカイブ化 されているぎょしゃ座SU星のデータ(2013, 1.00426, S)を用いている<sup>1</sup>. 本観測は2015年7月19日と8月8  $\exists$  *l*⊂CO(*J*=2-1), <sup>13</sup>CO(*J*=2-1), C<sup>18</sup>O(*J*=2-1)  $\ddagger$ よび波長1.3 mm(Band 6)の連続波で行われ、天体の 積分時間は合計で14分34秒となっている。受信機は CO(*I*=2-1) 放射の静止周波数である 230.538 GHz で チューニングされ、速度分解能は約0.04 km s<sup>-1</sup>(30.518 kHzの周波数分解能に相当)となっている. 観測は15 mから1.57 kmの基線長を含む36から40台で構成さ れたアンテナ群で実施されており、観測視野(FoV)は 約26.7 arcsec. 画像解析後の最終的な合成ビームサイ ズは0.235 asec × 0.356 asec (~ 33 au × 50 au)となっ ている、画像解析にはアルマの標準解析アプリケーシ ョンであるCommon Astronomy Software Applications (CASA) Ver. 4.3.1を用いており、電波干渉計 で得られた観測データから画像を生成する最も一般的 なCLEANアルゴリズムを適用している. また, 信号 雑音比(S/N比)の向上が可能なセルフキャリブレーシ ョン<sup>2</sup>および観測視野内で生じる感度差を補正する主 ビーム補正(Primary Beam Correction)<sup>3</sup>を適用して いる.

## 3. 観測結果: ガス成分からなる尾構造

図1にCO(J=2-1)輝線で得られたぎょしゃ座SU 星に付随する原始惑星系円盤およびその周辺領域の積 分強度図を図1(a),速度分布図を図1(b),速度分散 図を図1(c)に示す. 図では中心星の位置(R.A.: 04<sup>h</sup>55<sup>m</sup>59<sup>n</sup>.387, Dec.: 30°34′01<sup>n</sup>.172)を原点とし、星の 周囲に楕円状に広がった成分がぎょしゃ座SU星の原 始惑星系円盤である.過去のすばる望遠鏡によるHバ ンドの偏光観測では,円盤から南西方向に長さ約350 auに渡る0.1~1 μmサイズのダストの尾構造が確認 されていたが[6], 今回のアルマ望遠鏡によるCOガス 輝線観測では円盤の北側領域から同方向に長さ1000 auを超える顕著な尾構造が新たに検出された. なお, 放射は円形の観測視野の境界に沿って広がる性質があ るため, 尾構造の南西側に見られる扇状の放射は観測 装置由来である可能性がある<sup>4</sup>.

図2に図1(b)の速度分布図を拡大し、すばる望遠鏡 で観測されたHバンドの散乱光(黒コントア)[6]およ び本観測で検出された1.3 mmの連続波放射(白コン トア)の分布を重ねたものを示す.波長1.3 mmの連続 波放射領域とHバンドで得られた散乱光の中心領域 の位置関係はほぼ一致している.また、ミリ波のダス ト放射のピーク強度は850 mJy beam<sup>-1</sup>であり、本体 の中心部に半径約50 auの大きさでコンパクトに集中 していることが判明した.さらに、速度分布図から中 心星から半径1.2 asec(~172 au)の円盤領域における 速度プロファイルを生成し当該領域の運動を調べたと ころ、約5.8 km s<sup>-1</sup>の視線速度を中心に回転運動の特 徴を示す2つのピークを持った速度プロファイルが得 られ、赤方偏移成分が卓越した回転円盤が示された (図3(a)参照).

続いて円盤と尾構造においてガスの運動を調べた結 果,両者のガスの運動は連続的に接続しており,不連 続のない一つのまとまった系として構成されているこ とが判明した.図1(b)の速度分布図に赤線で示した 円盤と尾構造を跨る領域の速度プロファイルを図3 (b)に示す.プロファイルには不連続点がなく,円盤 領域の回転運動(~4-10 asec)から尾構造の運動(~ 10 asec 以遠)に変化し最終的に~6.5 km s<sup>-1</sup>で速度が 一定に維持され,尾構造は系の中心速度に対して全体 的に赤方偏移していることが示された.さらに,尾の

アルマ望遠鏡で得られた観測データは原則データ配布から1 年後にアーカイブデータとして公開される.アーカイブデー タはALMA Science Portalのサイト(https://almascience.nao. ac.jp/aq/)から入手できる.

<sup>2.</sup> 大気の状態は観測中に変化しているため、宇宙からやってくる天体からの電波信号には位相揺らぎが生じる. セルフキャリブレーションはこの位相ゆらぎを取り除く最も広く用いられている方法であり、正しく機能すればS/N比を大幅に向上させる効果がある.

干渉計では主ビームは視野に相当する.視野内の感度は一様 ではなく,視野の中心では感度が高く境界領域では低くなる. この感度の違いを補正し均一にすることを主ビーム補正という.

アルマ望遠鏡のアンテナパワーパターンについて ALMA Cycle 6 Technical Handbook の3章に詳説されている.



図1: CO (J=2-1) 輝線観測で得られた積分強度図(a),速度分布図(b),速度分散図(c)を示し,星の座標(R.A. 04<sup>n</sup>55<sup>m</sup>59".387, Dec. 30° 34'01".172)を原点としている. 積分強度図のコントアは3σ(1σ = 23 mJy beam<sup>-1</sup>)以上の放射が検出された領域を表す.図中の赤線は図3に示す速度プロファイル,速度分布プロファイル,速度分散プロファイルの原点(R.A. 04<sup>n</sup>55<sup>m</sup>59".73, Dec. 30° 34'03".32)を表す.速度分布図と速度分散図は1.87から10.87 km s<sup>-1</sup>間の速度チャンネルを積分して生成している.解析後の最終的な合成ビームを各パネルの左下に示す.Akiyama et al. 2019[10]の図を改編.



図2: 図1(b)で示したCO(J=2-1)輝線の速度分布図に、Hバン ドの散乱光放射(黒コントア)[6], 1.3 mmの連続波放射(白 コントア)を重ね合わせた図である.カラースケールは図 1(b)のものと同じである.散乱光放射の最外のコントア は2のの領域を表し2のステップで表示している.白で示し たコントアは5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 σ (1σ = 0.135 mJy beam<sup>-1</sup>)の領域を表す. Akiyama et al. 2019 [10]から 引用.

南西方向では遠方にいくにつれ赤方偏移量が小さくな り、当該方向では減速していると考えられる.また, 同領域の速度分散プロファイル(図3(c))では,円盤 領域で~2 km s<sup>-1</sup>,尾構造領域で~0.7 km s<sup>-1</sup>のばら つきとなっている.もう一つの特徴的な結果として, 円盤領域ではガス速度が弓状に分散し円盤から尾構造 の方向に沿って分散領域が繋がっている様子が示され ている(図1(c)).フレアアップ構造などのないフラ ットな円盤が純粋にケプラー回転している場合,赤方 成分と青方成分が観測ビーム内に等しく検出され,速 度分散は回転軸を境に線対称になる.しかし,当該円 盤では非対称な速度分散が見られることから,円盤領 域には回転以外の運動が伴っていることが示唆される.

## 4. 議論

#### 4.1 ぎょしゃ座SU星系の運動構造

ぎょしゃ座SU星は観測結果から幾何学的な構造に 加え、COのデータから得られる速度構造から大きく 分けて円盤と尾構造の2成分で構成されることが明ら かになった(図1参照). さらに、当該天体の速度分布



図3: 円盤領域と尾構造の速度構造を示す. パネル (a) は中心星 (R.A. 04<sup>555<sup>m</sup>59<sup>n</sup>.387, Dec. 30° 34'01".172) から半径1.2 asec (~ 172 au) の領域内における速度プロファイルを表し, パネル (b) と (c) はそれぞれ図1 (b) と (c) で示される赤線に沿った円盤 領域から尾構造に渡る速度分布プロファイルと速度分散プロファイルを表す. また, パネル (a) と (b) の破線はぎょしゃ座 SU星の視線速度 (5.8 km s<sup>-1</sup>) を表す. Akiyama et al. 2019[10]の図を改編.</sup>



図4: ぎょしゃ座SU星に付随する原始惑星系円盤および尾構造の速度成分を図に示す.パネル(a)は観測で得られた速度分布図(図 1(b)と同じ)であり,パネル(b)は後述するパネル(c)のケプラー円盤の回転成分との差分を表す.パネル(c)は本観測結果 とハッブル宇宙望遠鏡で得られた円盤の幾何学的配置[12]を基に,典型的なケプラー回転円盤モデル[11]を用いて算出され た速度分布を表す.円盤以外の領域には天体の視線速度である 5.8 km s<sup>-1</sup>が与えられている. Akiyama et al. 2019[10]から 引用.

から円盤の回転成分以外に~6.5 km s<sup>-1</sup>の視線速度で ~0.7 km s<sup>-1</sup>の速度分散を持つ運動が付随することが 明らかになっている. さらに回転以外の速度成分を詳 しく調べるため, 観測で得られた速度分布と典型的な ケプラー回転円盤モデル[11]から算出される速度分布 との差分を抽出した. 図4に結果を示す. 図4(a)と(c) はそれぞれ観測で得られた速度分布とケプラー回転円 盤モデルで算出された円盤の速度分布を表し, 図4 (b)に両者の差(図4(a)-図4(c))を示す. なお, 観測 で得られた尾構造の速度成分に対しては図3(a)の速 度プロファイルで得られた5.8 km s<sup>-1</sup>の視線速度を差 し引いている. 差分を算出した結果, 回転運動を表す 円盤の東西方向の赤方偏移と青方偏移成分は十分に差 し引かれているが, 円盤の北側では約4 km s<sup>-1</sup>の速 度成分が尾構造につながる形で残留することが判明し

た.特に図1(c)で示された速度分散が円盤内で弓状 に分布する領域において,尾に繋がる領域で顕著な残 差が見られ円盤の回転運動だけでは差し引くことので きない速度成分が尾構造の方向に向かって存在するこ とが明らかになった.

よって、当該残留成分はケプラー回転以外の運動を 示しており、弓状の速度分散から予想される位置関係 とも整合的である.また、円盤の北側領域から尾構造 に渡ってスムーズに繋がった状態で運動していること から円盤の北側領域と尾構造は相互作用しながら一体 となって運動しているものと推察される.

#### 4.2 尾構造の起源

ぎょしゃ座SU星で見られるような原始惑星系円盤 と尾構造で構成される系については、以前から理論研



図5:尾構造の形成シナリオを基に数値流体シミュレーションで円盤と尾構造を再現した結果を示す[15, 17, 24]. パネル(a), (b), (c)はそれぞれ他天体との衝突,重力井戸に向かって生じる分子雲内のガス流との相互作用,重力不安定下で円盤内に形成 された複数の天体との相互作用から発生する天体放出におけるシミュレーション結果を示す.グレースケールはガスの面密 度を表しガスの速度を矢印で表している.スケールバーの値は対数で与えられており,単位はg cm<sup>-2</sup>となっている.カラー 図は電子版を参照のこと.

究がされており様々な形成メカニズムが提唱されてい る.考えられるシナリオとして,(1)他天体との衝突, (2)周囲の分子雲から生じるガス流との相互作用,(3) 重力不安定による褐色矮星や惑星規模の天体放出,が ある.本研究では観測結果を数値シミュレーションで 再現させ幾何学的および運動力学的構造の整合化を図 ることを試みた.ここでは,観測と数値シミュレーシ ョンの結果を基に各メカニズムの可能性について議論 していく.

第一の可能性として、恒星もしくは褐色矮星程度の 質量を持つ天体がぎょしゃ座SU星の原始惑星系円盤 の外側領域と近接遭遇あるいは衝突する現象が考えら れる. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)シミ ュレーションを用いた理論研究では、<br />
点源と円盤の衝 突によって点源天体が部分的に円盤物質を剥ぎ取り. 進行方向に沿って物質を引きずる形で最終的に尾構造 が形成される結果が示されている[13, 14]. また. Vorobyov氏の研究では、円盤から3000 au離れた位 置から仮想天体を衝突させるモデル計算を行っている. そして、円盤の回転方向に対して順行および逆行衝突 のいずれの場合においても長い尾構造が形成されるこ とを明らかにしている[15]、今回、観測したぎょしゃ 座SU星を想定し、原始惑星系円盤に点源天体を衝突 させる数値流体シミュレーションを行った(シミュレ ーションの詳細はVorobyov 2016[24] およびVorobyov et al. 2017[15]を参照). 過去のすばる望遠鏡の観測か ら衝突であれば点源天体の質量は褐色矮星以下である

と推測されたため、シミュレーションでは円盤と0.05 太陽質量を持つ褐色矮星との衝突を想定している、図 5(a)に衝突シミュレーションの結果を示す. シミュレ ーションによると円盤質量にはほとんど依存せず,点 源天体が中心星から80 au以上離れた円盤の外側領域 を近接遭遇する状況であれば1000 auを超える尾構造 が形成されることが示された。さらに、 点源天体が円 盤回転に対して順行衝突と逆行衝突が考えられるので 両者の状況について調査したところ、順行衝突の方が 再現性が良く尾の幅や円盤と尾の接続領域の形状にお いて観測結果に近い尾構造が形成されることが確認さ れた.しかし、衝突させる両天体の相対位置によって は逆行衝突でも尾構造が再現されることを確認してい る. また速度構造においても図3(b)で示される観測 で導出された速度分布プロファイルと整合的であった. もし尾構造が衝突によるものであるならば、点源天体 は円盤の東から西に向かって一部の円盤物質を持ち去 りながら観測視野外へと移動したと推測される。加え て、尾構造全体が赤方偏移していることから点源天体 は観測者に対して円盤の手前側から反対方向に向かっ て衝突したと解釈できる.

一方で, 星形成領域であっても星同士の近接遭遇や 衝突は非常に稀な現象である.しかし衝突天体が点源 と数100 auサイズの円盤の場合, 衝突領域が増える ためその頻度は2桁以上増加し,数100万年に1回の 程度になることが報告されている[16].おうし座-ぎ ょしゃ座星形成領域に存在するぎょしゃ座RW星Aに おいて、同星の原始惑星系円盤から伸びる長さ600 au の潮汐アームが発見された[7]. その後, SPHシミュ レーションによって衝突計算が行われ、 当該潮汐アー ムが高い精度で再現されることが報告されている[8]. これまで2MASS. Spitzer. WISEによるサーベイ観 測によって、おうし座-ぎょしゃ座星形成領域では非 常に多くの天体が密に存在することが明らかになって おり5. 天体間での近接遭遇はどの方向においても起 こる可能性があると推測される。もしぎょしゃ座SU 星に付随する尾構造が他天体との衝突によるものであ れば、ぎょしゃ座RW星Aの原始惑星系円盤に次ぐ2 例目となり、これまで観測されている原始惑星系円盤 には外的あるいは後述する円盤の重力不安定のような 内的要因によって進化の途中で大量の質量を失ったり. 円盤構造が破壊されたものも含まれていると考えられ る. このような原始惑星系円盤の状況下で惑星が形成 されるかは定かではないが、ぎょしゃ座SU星の原始 惑星系円盤にはコンパクトなダスト円盤が観測で確認 されている(図2). 故に、仮に円盤が破壊されても比 較的短時間で円盤が復元し惑星形成を開始する可能性 が考えられる.

また,当該天体の周囲には分子雲の残骸など多くの 物質が存在し円盤への降着も考えられる.もし尾構造 が降着の結果である場合は降着天体は円盤に近づくに つれ加速すると考えられるため,図3(b)から示され る中心星からの距離と赤方偏移の変化との対応から西 側から東側に向かって尾を伴いながら衝突していると 考えられる.しかしながら,降着物質が固体天体であ ると衝突前に潮汐力によって破壊され長く伸びた尾構 造は形成されないので,尾構造を形成するにはガス塊 のような流動性を持った天体である必要がある.

第二の可能性として、ぎょしゃ座SU星の周囲に存 在する分子雲が生じさせるガス流との相互作用が考え られる.おうし座-ぎょしゃ座星形成領域には広範囲 に渡って分子雲が存在する.分子雲の分布に偏りがあ ると最も質量が集中している箇所が重力井戸として働 き、当該箇所に向かって流れが生じてフィラメント状 に物質が移動することが報告されている[17].そこで、 重力井戸がぎょしゃ座SU星の南西方向に5 arcmin (~0.2 pc)離れた場所にあると仮定してシミュレーシ ョンしたところ、重力井戸に向かって物質の流入が発 生し当該天体の円盤物質も流れに引きずられる形で 徐々に尾構造が形成していく様子が確認された(図5 (b)).よって、もしぎょしゃ座SU星が当該領域の重 力井戸の近傍に位置している場合、顕著な尾構造が形 成される可能性が考えられる.また、ぎょしゃ座SU 星の尾構造の方向で僅か3 arcmin(~26,000 au)離れ た場所にぎょしゃ座SU星より質量の大きい中質量星 のぎょしゃ座AB星(2.4±0.2太陽質量[18])が存在す る.当該天体はごく近傍に位置しているため、ぎょし ゃ座SU星に対して重力井戸に似た相互作用を及ぼす ことが考えられる<sup>6</sup>.

第三の可能性として、星/惑星形成時に重力不安定 によって褐色矮星程度の質量を持つ天体や惑星が円盤 から放出される現象が考えられる. 当該放出現象は大 小複数の天体が円盤内で形成される中で、互いに重力 相互作用を及ぼし合いランダム運動が誘発されること で発生する[19.20] 重力不安定による天体放出が発 生するには円盤質量が十分に大きい必要がある。ぎょ しゃ座SU星の円盤質量はビュール高原電波干渉計 (Plateau de Bure Interferometry, PdBI) によるミリ 波観測によって9.0×10<sup>-2</sup>太陽質量と見積もられてい る[21]. しかし、当該結果は円盤の不透明度や温度な どの不定性によって過小評価されている可能性があり. 当該円盤質量の結果は下限値として考えた方が良く数 倍大きい可能性がある[22]. 天体放出のシミュレーシ ョンの結果(図5(c), シミュレーションの詳細は Vorobyov 2013 [23] を参照),重力不安定が起こる円 盤の最小質量は0.1太陽質量でありPdBIで得られた円 盤質量と整合的であった、また、12木星質量を持つ 天体が放出され、当該放出天体の進行方向の後方に弧 状衝撃波が発生して尾構造が形成されることが示され た.

尾構造は上述のメカニズムで再現することが確認さ れた.中でも第一の可能性である近接遭遇を含めた衝 突やガス塊の降着については,現在のところ幾何学的 構造の観点から一定の合理性が認められる.また,速 度分布図や速度プロファイルから円盤と尾構造は共に 規則性のある運動を持っていることから,運動力学的 な構造においても観測結果を理論的に矛盾なく説明す ることが可能である.しかしながら,すばる望遠鏡に

各種サーベイデータがAladin Sky Atlasのサイト(https:// aladin.u-strasbg.fr)で公開されている.

本研究の協力者である Eduard Vorobyov 氏との個人的な議 論から引用.

よるHバンド偏光観測の結果から衝突天体は2×10<sup>-3</sup> 太陽質量以下と見積もられているが、アルマの観測で は検出されていない. 当該天体がアルマの観測視野外 にある可能性は否定できないが、現在のところガス塊 の降着による説明が最も有力だと考えられる.

一方で, 第二, 第三の可能性においては幾つかの不 確定要素や観測結果と不整合な点が見られる. まず重 力井戸に向かったガス流との相互作用において、分子 雲内で一方向に向かう均一なガス流は観測では確認さ れておらず、依然として仮定上の議論となっている。 さらに、重力井戸の正確な位置を知るには広範囲に渡 る分子雲全体を観測して詳細な物質分布を把握する必 要がある. そのため特定することが容易ではなくメカ ニズム自体の確認が非常に困難である。また当該メカ ニズムでは、ほぼ円盤の中心領域から尾構造が形成さ れるが、観測では円盤外縁部と繋がった尾構造が確認 されているため不整合の点が見られる。 続いて、 重力 不安定による天体放出において、尾構造の形成は可能 であるが中心部ではもはや円盤構造が維持されず, 天 体放出時では不規則な形状となる. 観測では回転する 円盤成分が検出されているので、この点において観測 結果との矛盾が認められる。

これまでの調査の結果、小天体との衝突もしくはガ ス塊の円盤への降着が最も有力な説明となっている. 今後, アルマ望遠鏡のAtacama Compact Array (ACA)を含めた広視野観測で尾構造全体の描像を捉 え,衝突天体の調査をしていく予定である.さらに, もし衝突が起きたとすれば衝撃波が発生するので,衝 撃波を探査するのに有効なSiO輝線で衝突に関する観 測的な裏付けを積み重ねていく予定である.

## 5. まとめ

これまでぎょしゃ座SU星の描像が不明であったが, 今回アルマ望遠鏡による観測で原始惑星系円盤に長さ 1000 au以上の尾構造が付随することが確認された. 幾何学的な構造に加え速度構造を調べた結果,当該天 体の円盤と尾構造は物理的に接続しており一つの系を 形成していることが判明した.さらに,原始惑星系円 盤と尾構造で構成される系の起源について,数値流体 シミュレーションを基に調査したところ,(1)他天体 との衝突,(2)周囲の分子雲によるガス流との相互作用, (3)重力不安定による天体放出,のシナリオで観測結 果を再現することができたが,現段階では褐色矮星程 度の質量を持つ天体がぎょしゃ座SU星に付随する原 始惑星系円盤の外側領域を通過する衝突または円盤へ のガス塊の降着が最も妥当な説明となっている.今後, 広視野観測やSiO輝線をはじめとするショックトレー サーを用いた観測で衝突に関する観測的証拠を積み上 げ,衝突後の原始惑星系円盤の進化と惑星形成が可能 な環境が再構築されるのか調査していく予定である.

## 謝 辞

執筆者は、日本学術振興会学術研究助成基金助成金 基盤研究C(17K05399)の補助を受けています.アル マ望遠鏡は自然科学機構,欧州南天天文台,米国国立 財団などによる国際共同計画として多くのプロジェク ト関係者で運用されており、本研究で使用したデータ はアルマ望遠鏡で取得されました.また、本論文の執 筆にあたってはEduard Vorobyov氏から多くのサポ ートをいただきました.研究に関わられた皆様にこの 場をかりて深く感謝申し上げます.さらに、遊星人の ALMA特集を企画してくださった和田浩二氏と関口 朋彦氏、および本稿の改善にご尽力いただいた査読者 に心よりお礼申し上げます.

### 参考文献

- [1] Calvet, N. et al., 2004, Astron. J. 128, 1294.
- [2] Tamura, M. et al., 1991, Astrophys. J. 378, 611.
- [3] Nakajima, T. and Golimowski, D. A., 1995, Astron. J. 109, 1181.
- [4] Padgett, D. L. et al., 1999, Astron. J. 117, 1490.
- [5] Grady, C. A. et al., 2001, Bulletin of the American Astronomical Society, 33, 77.16.
- [6] de Leon, J. et al., 2015, Astrophys. J. Lett. 806, L10.
- [7] Cabrit, S. et al, 2006, Astron. Astrophys. 452, 897.
- [8] Dai, F. et al., 2015, Mon. Not. R. Astron. Soc. 449, 1996.
- [9] Rodriguez, J. E. et al., 2018, Astrophys. J. 859, 150.
- [10] Akiyama, E. et al., 2019, Astron. J. 157, 165.
- [11] Isella, A. et al., 2015, Astron. Astrophys. 469, 213.
- [12] Chakraborty, A. and Ge, J. 2004, Astron. J. 127, 2898.

- [13] Forgan, D. and Rice, K. 2009, Mon. Not. R. Astron. Soc. 400, 2022.
- [14] Thies, I. et al., 2011, Mon. Not. R. Astron. Soc. 417, 1817.
- [15] Vorobyov, E. I. et al., 2017, Astron. Astrophys. 608, A107.
- [16] Scally, A. & Clarke, C. 2001, Mon. Not. R. Astron. Soc. 325, 449.
- [17] Regály, Z. and Vorobyov, E. I. 2017, Mon. Not. R. Astron. Soc. 601, 24.
- [18] DeWarf, L. E. et al., 2003, Astrophys. J. 590, 357.
- [19] Vorobyov, E. I. and Basu, S., 2010, Astrophys. J. 719, 1896.
- [20] Basu, S. and Vorobyov, E. I., 2015, Astrophys. J. 805, 115.
- [21] Ricci, L. et al., 2010, Astron. Astrophys. 512, A15.
- [22] Dunham, M. M. et al., 2014, Mon. Not. R. Astron. Soc. 473, 4459.
- [23] Vorobyov, E. I. 2013, Astron. Astrophys. 552, 129.
- [24] Vorobyov, E. I. 2016, Astron. Astrophys. 590, A115.