^{特集「新・惑星形成論」} デブリ円盤に付随するガスの起源 – その解明へ向けて

樋口あや

2021年12月14日受領, 査読を経て2022年1月23日受理

(要旨) 彗星や隕石の起源であるカイパーベルト天体は、太陽系内で惑星が形成された名残であると考え られており、太陽系の成り立ちを調べる上で重要な研究対象である.このため、隕石の分析や彗星のガス 成分の観測,近年では、はやぶさ2によるリュウグウやOSIRIS-RExによるベンヌの調査、ロゼッタによ る67P 彗星の直接調査など様々な研究が行われてきた.この塵・岩石で形成される天体群の起源は「デブ リ(残骸)円盤」として知られている.デブリ円盤は、太陽系外の若い恒星周りで発見された、主に塵(サ イズがマイクロメートルからミリメートル程度の固体微粒子)や岩石(サイズがメートルからキロメートル程 度の大きな固体で、塵が集積し形成されたもの)から構成される円盤である.数10-数100天文単位(au) の半径を持つリング状構造をしたものが多く見つかっており、塵の空間分布や既に円盤内で形成された 惑星の探査などの研究がなされてきた.しかし近年、デブリ円盤にはほとんどないと考えられてきた「ガ ス成分」が多くのデブリ円盤で検出され、その起源が注目されている.2013年からは、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array(ALMA)望遠鏡による観測結果が続々と出版され、ガスの検出 が報告されたデブリ円盤はこれまでに20天体にのぼる.本稿は、近年のデブリ円盤の観測研究の進展に ついて、これまでの研究を振り返り、解説する.

2. 研究の背景

原始惑星系円盤とデブリ円盤を区別する指標として、 典型的に原始惑星系円盤の寿命は数Myr程度 と考えられていることを考慮し、ここでは中心星の年 齢が10Myr以上の天体に対してデブリ円盤と呼ぶ.

2.1 デブリ円盤とは

生まれたばかりの星(原始星)は、周囲のガスを取 り込んで成長し、太陽のような主系列星へと進化す る.それと同時に、原始星の周りでは、惑星系のも ととなるガスと塵からなる円盤(原始惑星系円盤)が 成長する.その円盤内で塵の合体成長や微惑星形

1.東京電機大学 理工学部 理学系 aya.higuchi@mail.dendai.ac.jp 成が起き、円盤のガス成分は、惑星系の形成が完了 すると消失すると考えられてきた(図1参照).形成し たばかりの惑星系では、惑星などの天体ができる際 に残った塵や、微惑星や惑星の衝突によって生じた 岩石や氷からなる破片が円盤状に漂っている.この 塵・岩石群は「デブリ円盤」と呼ばれ、惑星系形成の 最終段階に見られることから、カイパーベルト天体 の起源として注目されている.太陽系の最縁部にあ る「オールトの雲」などもその名残である可能性が示 唆されている [1]. これらからデブリ円盤は、惑星形 成時の太陽系の姿であるとも言えるであろう.デブリ 円盤は、非軸対称な構造が観測されているものも多 く、惑星から重力の影響が要因であると考えられて おり、このことからも、すでに惑星形成が完了した状 態であるという理解がされている.



図1: 星・惑星形成過程の模式図. 分子雲の中で分子雲コアと呼ばれる高密度な領域が形成され, その中で原始星が生まれる. 原始星の周りに はガスと塵からなる原始惑星系円盤が形成され, 円盤内部で塵が衝突合体し惑星が生まれ, その後ガス成分は消失し惑星系が完成する. デブリ円盤はこの最終段階に相当する(イラスト:木下真一郎).

2.2 なぜガスが存在するのか?

太陽系形成論の古典的標準モデル(京都モデル) の枠組みの中では.惑星形成が完了し,残骸のみの デブリ円盤の状態になると、これまで原始惑星系円 盤に付随していたガス成分はすでに散逸することが 一般的な認識であった. つまり, 長らくデブリ円盤 にはガス成分は存在しないと考えられてきた. とこ ろが15年ほど前から、一酸化炭素(CO)、炭素イオ ン(C⁺),酸素原子(O)がガスとして存在しているこ とが明らかになり、このガスの起源が惑星系形成過 程との関連で大きな問題として提起されてきた. な ぜなら、ガスがいつまで残存し、どのように散逸する かで、形成される惑星系の形態が決まるからである. これまでの研究で、その起源について2つの考え方 が提示されてきた. 一つは, 惑星系のもとになったガ ス成分が残存しているという「残存説」であり、もう 一つは、一度原始惑星系円盤のガスが消失した後、 残存した塵や岩石, また彗星からガス成分が新たに 供給されているという「供給説」である、原始惑星系 円盤内のガスの主成分は,中心星の形成時のガスの 主成分である水素分子(H₂)であるのに対し、彗星 などから放出されるガスの主成分は水(H₂O)やCO などの水素分子よりも重い分子である.両者は、塵 とガスの空間分布の比較や、ガスの主成分が水素分

子であるか否かで判別できると考えられている. 塵 とガスの空間分布がよく一致している場合は、供給 説と整合的ではあるが、4章で議論するように、塵か らのガスの供給率については未だに理解されていな い、一方、ガスの主成分を調べようとしても、水素分 子は電波領域には放射を出さず、直接観測ができな い. そのことがガスの起源の理解の障害になってい る. このような理由のため、ガスの起源については、 決着がついていないのが現状である. 我々はこれら の問題を乗り越えるために、塵とガスの空間分布の 比較に加えて、ガスの化学組成を調べることが有効 と考え、特にCOが光解離して生成する中性炭素原 子(C)に着目した. Cがガス中の化学反応でCOに戻 るには、水素分子の介在が必要なので、CとCOの両 方を観測することで、水素分子の量を間接的に見積 もることを提案してきた(図2参照).しかし、炭素原 子の周波数帯は、地球大気の影響で透過率が悪い 帯域であるため、地上からの観測は大変難しく、その 手法がなかなか浸透していないのが現実であった.

3. 観測研究の進展

近年のデブリ円盤の観測事実は、これまでの我々 のデブリ円盤への認識を大きく変えるものである。 現在ガスが検出されているデブリ円盤の割合は、観



図2:星間空間での一酸化炭素分子ガスの化学反応の経路. 一酸化炭素分子(CO)は紫外線によって解離されて,炭素原子(C),炭素原子イオン (C*)になる. 水素分子がたくさんあれば(ピンクの矢印の反応が進めば),炭素原子イオンが一酸化炭素分子に再び戻ることが分かる. Credit:理化学研究所(一部改訂)



ガスの運動速度の視線方向成分 [km/s]

図3:左:49 Ceti における一酸化炭素分子ガス(上)と炭素原子ガス(下)のスペクトル強度.

右:β Pic における一酸化炭素分子ガス(上)と炭素原子ガス(下)のスペクトル強度.

ガスの運動速度(km/s)を横軸としたときの,ガススペクトルの形状(ガスの運動の様子)を比較したもので,ともにASTEによって得られ たもの.上段の一酸化炭素ガスのスペクトルにはALMA望遠鏡による観測データ(赤線)も含む.運動速度の視線方向成分とは,観測す る天体が地球に対してどのように運動しているかを示す.赤の点線は中心速度で,それに対して遠ざかる方向(中心速度より速度が大きい), 近づいてくる方向(中心速度より速度が小さい)に動いていることを示す. Credit:理化学研究所



図4:左:ALMA 望遠鏡が捉えた49 Ceti のデブリ円盤における塵とガスの分布. 塵を赤色, 一酸化炭素分子を緑色, 炭素原子を青色で表示. 右:49 Ceti の想像図. 星を取り巻く塵円盤があり, そのまわりを大量のガスが取り囲んでいる様子を表す. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

測された天体のうち、およそ15%である([2]を参考 に導出)、もちろん中心星の年齢の見積もりの誤差 が大きく、原始惑星系円盤に近い可能性があるこ とも示唆されているが. ガスが検出されたデブリ円 盤のスペクトルエネルギー分布(Spectral Energy Distribution, 以後SED)¹を調べると, 典型的なデ ブリ円盤と同じである². これらから, 多くの研究者 が、なぜガスが存在するのかという疑問に対して答 えを得るため、観測研究を続けている. ここでは. こ れまでのデブリ円盤周りのガス探査の歴史を振り返 り、ALMA望遠鏡の稼働で一気に進展したガスの 研究について概観する. 以下のように、 デブリ円盤か らのガスの検出は、最初は単一鏡による観測によっ て始まり、その後は干渉計を用いて、ガス成分を空間 分解する試みがなされてきた.参考のために、ここで 紹介する典型的な単一鏡の空間分解能は1000au. 干渉計の空間分解能は10au, また円盤のサイズは 100auである.

¹電磁波の強度を波長(周波数)の関数として表したもの. ²原始惑星系円盤のスペクトルエネルギー分布は中心星からの放 射に加え赤外線領域に超過が見られる.一方デブリ円盤では、中 心星からの放射と円盤成分の放射の2 つの成分が分かれて見ら れるようなスペクトルエネルギー分布を示す.

3.1 単一鏡による観測

デブリ円盤に付随するガスの存在が示唆されてき たのは、そもそもは可視光の吸収線(カルシウム・ナ トリウムなど)[3] や遠赤外線領域の酸素原子や炭 素イオンの輝線による観測 [4] からであった. 電波 領域の観測が始まったのは、ZuckermanやDent らによって行われた, IRAM 30m望遠鏡やJames Clerk Maxwell Telescope(JCMT) という 単一鏡の望遠鏡による観測がきっかけであった. Zuckermanらの観測 [5] が報告されたのは1995 年で、まだ原始惑星系円盤やデブリ円盤という区別 なしに、星周円盤のガスをサーベイするという観測 が行われていた時期であった、それにより、 くじら座 49番星(以後, 49 Ceti) でCOのスペクトル線の検 出が報告されたのである。その後DentらがICMT を用いたサーベイ観測を行い [6], 近年では, Moór らがIRAM30m望遠鏡やAtacama Pathfinder Experiment (APEX)を用いて、HD21997 や HD131835 からのCOのスペクトル線を検出した [7].

また日本の望遠鏡では、長らくこのような観 測は行われてこなかったが、我々はAtacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) を用いて、49 Cetiと、がか座 β 星(以後、 β Pic) からのCのスペクトル線の初検出に成功した [8](図 3 参照). 49 Ceti と Pic は, いわゆるデブリ 円盤としては、よく研究されている天体であったが、 これまでにCのスペクトル線の検出は報告されてい なかった. Kral らの論文 [9] でもAPEXを用い てB Pic からのCのスペクトル線を検出しようと数 時間程度の観測は実行されたようであるが、検出 には至らず、輝線強度の上限値を報告するのみで あった. ASTEやAPEXには、ALMA望遠鏡と 同じBand8の受信機(周波数:385 – 500 GHz)が 搭載されており、我々のCのスペクトル線の検出は、 ALMA望遠鏡での観測を行うための準備段階の結 果となったのである. これらの観測を行なった2016 年には、49CetiとB Picの2天体において、ALMA 望遠鏡でCOの空間分布はすでに導出されていた (49 Ceti:図4参照, β Pic:図5参照)ため, たとえ Cのスペクトル線が検出されなかったとしても、どれ くらいの観測時間で、どの程度の上限値が得られる かといった参考資料になるため、あえて挑戦したと いう経緯もある、単一鏡の観測は、大変シンプルで 観測手法としては容易であるが、観測の空間分解能 が悪く、また感度も良くないため、ガス成分を検出す るには、1天体に対してかなりの観測時間を要する. 例えば、我々が行ったCとCOの観測について言え ば、そもそもCに関しては、それが地球の大気の透 過率が良くない周波数帯であることもあって、2天体 で2輝線の総観測時間は100時間以上を要した。ま たCOの観測に関しても注意点がある. 我々が観測 した, 49 Cetiやβ Picのように, 孤立した天体であ ればあまり影響はないが、近くに分子雲などがある 天体に関しては、円盤に付随するガス成分のみを検 出したい場合、近くの分子雲の影響を考慮して観測 をしないと、分子雲からのCOを引っ掛けてしまい. どこからの放射なのかの区別がつかなくなってしま う. 以上の困難を克服するには. 干渉計を用いて. 高 感度・高分解能の観測を行うことが必須であった.

3.2 ALMA 望遠鏡の稼働により

2011年からALMA望遠鏡が初期運用に入り,デ ブリ円盤のガス成分を高感度・高分解能で観測で

きる時代に突入した.もちろんこれまでに、既存の 干渉計, 例えばSubmillimeter Array(SMA)や Combined Array for Research in Millimeterwave Astronomy(CARMA)でも観測は行われ てきた [10]. しかし、デブリ円盤のガス成分は原始 惑星系円盤のものと比べて希薄であるため、そもそ もの放射自体が微弱であり、高品質な画像を得るこ とが困難であった. そのため、デブリ円盤の研究を 行ってきた人々にとって、ALMA望遠鏡は頼みの綱 だったのである、実際、2013年からKóspálやMoór らによってHD21997 からの塵やCO. そしてCOの 希少同位体である¹³CO・C¹⁸Oといった分子輝線の 検出・空間分解された画像が報告され [11, 12], そ の後もB Pic や49 Ceti, HD 32297 などからCO の空間分布の報告がなされてきた[13-15]. その結 果.現在ではガスが付随するデブリ円盤は20天体 にまで増えてきた [2]. これらは、ALMA望遠鏡の 性能を最大限に活かすことができたおかげで、デブ リ円盤の観測研究が進んだ大きな成果と言えよう. また、これまではCOの観測が主に行われてきたが、 我々はCのスペクトル線観測も行い. 初めて49 Ceti に付随するCの空間分布を得ることに成功し([16], 図4参照). さらに炭素原子の希少同位体(¹³C)のス ペクトル線の初検出にも成功した [17]. さらに, β PicやHD131835といった天体でも、Cの空間分布が 得られるようになってきた [18-20].

また付随するガスの性質についても、これまでの 常識を覆す結果が出始めている. 電波観測から導出 されるデブリ円盤に付随するガスの温度は10K程度 [11, 21] であり、円盤に付随するガスの温度としては かなり低温であるという結果が明らかになってきた のである. 星が生まれる現場である分子雲は、10K という低温な環境であることは知られているが、原 始惑星系円盤など、すでに星が生まれている環境で あれば、中心星の影響で、ガスの温度は20-50K程 度になっていることが考えられている . 実際デブリ 円盤のSEDから導出される塵の温度は、60-100K 程度である [4]. この結果は、ガスと塵の温度が一 致せず,両者が局所熱平衡状態にはないことを示唆 している. 塵が成長していることによって光電効果 による加熱の効率が下がり、周囲のガスが温まりに くくなっているのであろうという解釈もされてはいる



図5:上:βPicを取り巻く円盤の一酸化炭素の強度分布.

下:速度構造を手掛かりに構築した円盤内の一酸化炭素の分布の鳥瞰図. 一酸化炭素分子の大きなかたまりが2時方向に見える. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) and NASA's Goddard Space Flight Center/F. Reddy

が [21]³, これはまだ議論の段階である.以上から, 原始惑星系円盤で行われているような議論と同様の 解釈ができないところも難しいところではある.我々 の結果でも,デブリ円盤のガスの温度が低すぎる件 について議論しており,COが放射を出す機構につい て再検討しなければいけないのではとの提案をして いる [21]. 分子の回転スペクトルの放射が起こるの は,分子がその周辺に存在する分子と衝突し回転励 起され,励起状態から基底状態へ戻るためである. 一般に原始惑星系円盤などでは,COはガスの主成 分であるH₂との衝突によって,回転励起される.し かし,デブリ円盤では水素分子が少ない可能性が あるため,同様なメカニズムをもとにした解析はでき ない.つまりCOやC,そして電子など,一般的には H₂よりも十分少ないと考えられている相手との衝突 を考えて,スペクトル線強度を解析しなければなら

³円盤内に小さい塵が多く存在すると、中心星や星間紫外線によ る光電効果でガスの加熱効率が良く、温まりやすい. デブリ円盤 では小さい塵の量が原始惑星系円盤よりも少なく、光電効果によ るガスの加熱が効きにくいという解釈.



図6:ALMA望遠鏡により得られたHD 21997のデブリ円盤の画像("左:塵の分布,中央:一酸化炭素の積分強度図,右:一酸化炭素の平均速 度図,"). 左の画像は,星の周りに分布する塵の円盤,真ん中の画像は一酸化炭素からの放出を示しており,ガスは塵よりも星の近くにあ ることを示す.右の画像はガスの速度を示す.赤色は遠ざかる成分,青色は近づいてくる成分を表し,これはガスが中心星の周りを回転し ていることを示す.

Credit: Á. Kóspál (ESA) and A. Moór (Konkoly Observatory)

ないのである. このことが, 電波領域の分子観測に よるデブリ円盤研究の難しさの一つとして浮かび上 がってきた [21]. このようにALMA望遠鏡による 観測の進展で, デブリ円盤のガスの研究は大きく発 展し, これまでの固定観念や先入観を大きく覆すこ とになった. なぜデブリ円盤にガス成分が存在する のか, そしてそのガスの性質の特殊性に対する議論 は, さらに白熱することになるのである.

4. ガスの起源は何か

ここで問題になるのは、このガス成分はどうして 存在するのか、そしてガスの成分がどのようなもので あるかということである。これまでの惑星形成モデ ルであれば、すでに散逸してしまっているはずのガ スがなぜ検出できるのか、しかも、¹³CO, C¹⁸O, ¹³Cな どの希少同位体のスペクトル線まで検出されている ということは、主同位体のスペクトル線は光学的に 厚いこと(つまり飽和していること)を意味する。もし 主同位体のスペクトル線が光学的に薄いと仮定して ガスの量を求めていた場合、それよりもずっと多いガ ス成分が存在していることになる。β Picなどの非 軸対称な構造をしている天体と,HD21997などの空 間的に対称な構造をしている天体では,対称な天体 の方がガス質量は大きい傾向があるが,その要因は 明らかではない.ここ数年の観測の進展にもかかわ らず,このガスの起源についての議論は,いまだに解 決されておらず,さらに混沌としてきている状態であ る.これを明らかにするとともに,ガスや塵の存在量 比を調べることは,デブリ円盤の起源のみならず,惑 星大気の起源の理解において極めて重要である.ま た,ガスの起源はガスの組成とも関連していることも 重要である.もし塵からの昇華ガスが起源だとする と,ガスの組成は系外彗星の組成を反映しているこ とになるからである.

4.1 原始惑星系円盤からの残存ガス(残存説)

まず,ガスが検出される原因として大変シンプル な考え方であるが,原始惑星系円盤からの生き残り であることが考えられる.これまでの理論研究では, 惑星系が形成されるとすぐにガス成分が散逸してし まうという考え方が一般的で,長い間ガス成分を保 持することは難しいと言われてきた.近年では,仲 谷らの計算 [22] により,長期間ガス成分を保持す るメカニズムも提案されているが、まだ一般的では ない. ALMA望遠鏡によって得られたCOの観測 結果を見ると、例えば49 CetiやHD21997、そして HD32297では、そのガスの空間分布や円盤の広が り、運動の様子は原始惑星系円盤のそれとよく似て いる(HD21997:図6参照).もちろん、ガスや塵 の質量は原始惑星系円盤より1桁は少ないため、時 間進化によって減少していったという解釈は自然で ある. 一方、β Picのガスは、比較的非軸対称に分 布しているため(図5参照)、これと比較すると、49 Cetiなどのガスの分布は、これまでのデブリ円盤と はまったく違う描像である.

4.2 塵からの昇華ガス(供給説)

一方,惑星形成に使われなかった塵の残骸や破 片から,COが昇華してくるという説が,デブリ円盤 では長年提唱されてきた.2次ガス・脱ガスと言われ ているメカニズムである。例えば,Dentらによって 報告されたALMA望遠鏡によるβ Picの観測結果 (図5参照)では,COと塵の分布の比較から供給説 を提唱している。β Pic周りのガスの非軸対称性が 高いことは,円盤内での特定の領域で,微惑星の衝 突が起こった結果か,または連続的に衝突が起きて いる状況のいずれかを示唆しているとの解釈である [13].このような微惑星同士の衝突による脱ガスは, デブリ円盤ガスの起源の一つとして考えられている が [23,24],現場を捉えた観測はなく,デブリ円盤 のモニター観測を行うなどの継続的な観測が必要だ と思われる.

彗星からのガスの放出も一つのメカニズムとして 考えられている [25, 26]. 基本的には, ヘールボップ 彗星からガスが放出される様子をモニター観測した 研究 [27] がベースとしてなっており, これらの現象 がデブリ円盤でも起きているという考え方, つまり2 次ガスを支持する研究者の方が世界的に見て多いよ うに見受けられる.実際に観測されるガス総量を説 明するには, ヘールボップ彗星が1年間に800個到来 すれば説明可能との見積もりを行っている([13]の結 果から見積もられた値).このような環境が常にデブ リ円盤内で再現可能なのか, その辺りの疑問はまだ 未解決である.一方, HD 21997などのガス, 1桁以上質 量が違うため、ヘールボップ彗星が年に6000個以上 到来する必要がある([11]の結果から見積もられた 値).そうすると、他のデブリ円盤のガスの質量を全 て説明するのは難しいと思われる.実際にデブリ円 盤のモニター観測により、ガスの放出が観測された というような事実はまだ報告されていない、ガス中に 放出された分子の寿命は、紫外線に暴露された場合 は1000年未満と短いため [2]、検出が難しいことも 追い討ちをかけていると言えよう.

近年では、MoórやKóspálらが「ハイブリッド円 盤」という概念を導入し[11],原始惑星系円盤から の残存ガスと、塵からの供給ガスの両方の影響で、 ガスが検出されているのではと解釈している。いず れにしろ、ガス成分が検出されているのは事実であ り、残存説・供給説ともに、タイムスケールやそのメ カニズムの現実性など、理論的な観点からの検証が 益々求められる。

5. 今後の展開

ALMA望遠鏡の観測が進んだ結果, デブリ円 盤のガスの組成の調査が可能になりつつある. 実 際にKlusmeverらの観測では、49 Cetiにおいて、 CO以外の分子の観測(CN, HCN, HCO⁺, SiO, CH₃OH)を実行している[28].残念ながら彼らの 観測では、確実な検出は報告されていないが、今後 空間分解能を高くし、積分時間を長くするなどの観 測条件を向上させることで、このような分子輝線の 検出は可能になるかもしれない.一方、4章で述べ たように、デブリ円盤では光解離のタイムスケール が短いことが、分子輝線の検出を難しくしている一 つの要因である.よってこれらの影響を受けない. 酸素原子や炭素イオンの高感度観測も検討しなけ ればいけない、これまでに酸素原子や炭素イオンは 検出されている天体もあるが、成層圏赤外線天文台 (The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA) やJames Webb Space Telescope(JWST)による観測により、その検出確 率の向上も期待される.

炭素原子の同位体種(¹³C)のスペクトル線までが 検出されるような環境は、これまでに分子雲など、光 学的に厚い領域では議論されてきたが、デブリ円盤 のような環境では検討されてこなかった. ここ10年 余りで,観測は一気に進展しており,さらなる研究の 発展には先入観を捨てた様々なアプローチで向き合 うことがますます重要であろう.

6. 終わりに

ALMA望遠鏡が稼働してはや10年. デブリ円盤 に対するガスの観測研究は大きく進展した. もはや ガスの存在を疑う人はおらず、多くのデブリ円盤でガ スが付随しているという描像は当たり前になってき た、そのうちのいくつかの天体では、希少同位体種 のスペクトル線が検出されたこともあり、従来の認識 のような希薄なガス成分ではないと、認識を改める 必要が出てきた. これまでは原始惑星系円盤とデブ リ円盤は、全く別物だという認識があったが、今後 はさらに原始惑星系円盤の延長線上であると考慮 した議論と、かつ、まったく別物という観点の2方向 から考えなければいけない. なぜなら. 2次的なガス 供給の現場を観測で捉えることは大変難しく、その 存在を証明することは困難ではあるが、これらの存 在を否定することも難しいからである. 微惑星同士 の衝突脱ガスや塵からの昇華の影響がどれくらい効 くのか、またその効率はどれくらいなのか、今後は太 陽系内の小惑星, 隕石, 彗星の研究を行なっている 研究者を交えて、統計的な議論を進めていかなけれ ばならない. これらの問題は、我々が行っている観 測天文学のみでは解決できず,太陽系内の探査との 連携が必須であり、観測天文学と物質科学の融合 が大変重要な観点になるだろう.特に、はやぶさ2に よるリュウグウやOSIRIS-RExによるベンヌの成分 分析から何かヒントが得られるのか、彗星からのガ スの放出機構がデブリ円盤で見つかっているガスを 再現できるほどの効果があるのか.もし、リュウグウ やベンヌから有機分子を含めた様々な分子が見つか れば、デブリ円盤と太陽系小天体とを繋ぐ大きなヒ ントになるのであろう.このように、デブリ円盤の観 測結果を考慮した惑星系形成シナリオを構築するに は、多様な観点からこれらの事実を見つめ直すこと が必要である. そういった意味では、今後の天文学 と惑星科学の橋渡しとしても、 デブリ円盤は重要な 役割を担っていると言えるだろう.

7. 謝辞

本稿は筆者が行ってきたデブリ円盤の観測研究 も含めて,近年のデブリ円盤観測を振り返り,執筆し たものである.紹介した筆者の研究は,科学研究費 (18K03713/19H05090)の助成を受けており,紹介 した筆者の研究結果は以下のALMA望遠鏡データ (ADS/JAO. ALMA#2011. 0. 00780. S, 2012. 1. 00195. S, 2016. 2. 00200. S, 2017. 0. 00467. S)を用いたものである.

参考文献

- [1] Portegies Zwart, S., 2021, A&A 647, 136.
- [2] Hughes, A. M., Duchêne, G. and Matthews, B. C., 2018, ARAA 56, 541.
- [3] Slettebak, A., 1975, ApJ 197, 137.
- [4] Roberge, A. et al., 2006, Nature 441, 724.
- [5] Zuckerman, B. et al., 1995, Nature 373, 494.
- [6] Dent, W. R. F. et al., 2005, MNRAS 359, 663.
- [7] Moór, A. et al., 2015, ApJ 814, 42.
- [8] Higuchi, A. E. et al., 2017, ApJL 839, 14.
- [9] Kral, Q. et al., 2016, MNRAS 461, 845.
- [10] Hughes, A. M. et al., 2008, ApJ 681, 626.
- [11] Kóspál, Á. et al., 2013, ApJ 776, 77.
- [12] Moór, A. et al., 2013, ApJ 777, L25.
- [13] Dent, W.R. F. et al., 2014, Science 343, 1490.
- [14] Hughes, A. M. et al., 2017, ApJ 839, 86.
- [15] Moór, A. et al., 2019, ApJ 884, 108.
- [16] Higuchi, A. E. et al., 2019, ApJ 883, 180.
- [17] Higuchi, A. E. et al., 2019, ApJL 885, 39.
- [18] Cataldi, G. et al., 2018, ApJ 861, 72.
- [19] Kral, Q. et al., 2019, MNRAS 489, 3670.
- [20] Cataldi, G. et al., 2020, ApJ 892, 99.
- [21] Higuchi, A. E. et al., 2020, ApJ 905, 122.
- [22] Nakatani, R. et al., 2021, ApJ 915, 90.
- [23] Czechowski, A. and Mann, I., 2007, ApJ 660, 1541.
- [24] Jackson, A. P. et al., 2014, MNRAS 440, 3757.
- [25] Beust, H. et al., 1990, A&A 236, 202.
- [26] Zuckerman, B. and Song, I., 2012, ApJ 758, 77.

- [27] Biver, N. et al., 1997, Earth Moon and Planets 78, 5.
- [28] Klusmeyer, J. et al., 2021, ApJ 921, 56.