

## 特集「ALMAで迫る惑星科学」

# 惑星形成領域からの様々なガス輝線のALMA観測

野村 英子<sup>1</sup>

2019年6月16日受領, 査読を経て2019年7月22日受理.

(要旨) ALMAによる惑星形成領域の高解像度・高感度観測は, ダスト放射のみならず, ガス輝線観測にも劇的な進展をもたらした. 惑星形成領域における分子の空間分布が明らかになり, また, これまで検出が困難であった分子種の発見が相次いでいる. 本稿では, 原始星天体中の円盤の撮像観測や新たな分子種の発見, 原始惑星系円盤における有機分子と同位体分子の新たな検出, また, 円盤中の水とスノーライン, および炭素・酸素元素組成比分布にもとづく系外惑星大気との関連, 残骸円盤におけるガスの検出に関するこれまでの研究成果の一部をレビューし, 今後の原始惑星系円盤から太陽系や系外惑星系への物質進化に対するALMA観測の展望と期待を述べる.

## 1. はじめに

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)による原始惑星系円盤からの分子輝線の高解像度・高感度観測により, 円盤内の分子の分布が明らかになり, また一方で, これまで円盤では検出されていなかった分子や希少同位体分子も続々と発見されている. 原始惑星系円盤からは, ALMA以前の電波望遠鏡や光赤外線望遠鏡などで約15種類の分子が観測されていた. その後, スピッツァー宇宙望遠鏡やハーシェル宇宙天文台による中間・遠赤外線観測により, さらに新たな分子種が5種類ほど発見された. ALMA以降, 現在に至るまでに, 新たな分子種が6種類, 新たな希少同位体分子が4種類ほど発見されている. このような観測をもとに, 原始惑星系円盤から太陽系天体あるいは系外惑星大気にいたる物質進化に関する議論がされ始めている. 特に, 観測より得られる水と有機分子の空間分布およびそのスノーラインの位置に関する情報は, 惑星系における生命起源の研究につながる一方で, ダスト合体成長から岩石惑星・ガス惑星

形成にいたる惑星形成過程を理解する上でも重要である. 本稿では, ALMAにより急速に進展した, 有機分子およびスノーラインの観測に特に重点を置き, 原始星天体から原始惑星系円盤, 残骸円盤にいたる, 諸進化段階における円盤からの様々なガス輝線観測の一部をレビューする.

## 2. 原始星天体からの分子輝線観測

分子雲コアの重力収縮により星が形成される際に星の周囲に円盤が形成されると考えられている. ALMAによる高解像度・高感度観測は, 原始星天体を取りまくガスとダストの塊(エンベロープ)に埋もれた円盤の存在を明らかにした. ガス遷移線の放射波長のドップラーシフトによるずれを測定することで, 天体内の速度構造の情報を得ることができる. ALMAにより原始星天体から放射される様々な分子輝線の速度構造を調べることで, エンベロープから円盤へのガス降着, エンベロープと円盤の境界の温度が $\sim 50$  K以上の暖かな領域, および円盤内の回転運動が明らかになった. それぞれの領域の物理状態に応じて豊富に存在する分子種が異なるので, 様々な分子輝線の速度構造を調べることで, 原始星天体内の構造が明確に示

1. 国立天文台  
hideko.nomura@nao.ac.jp

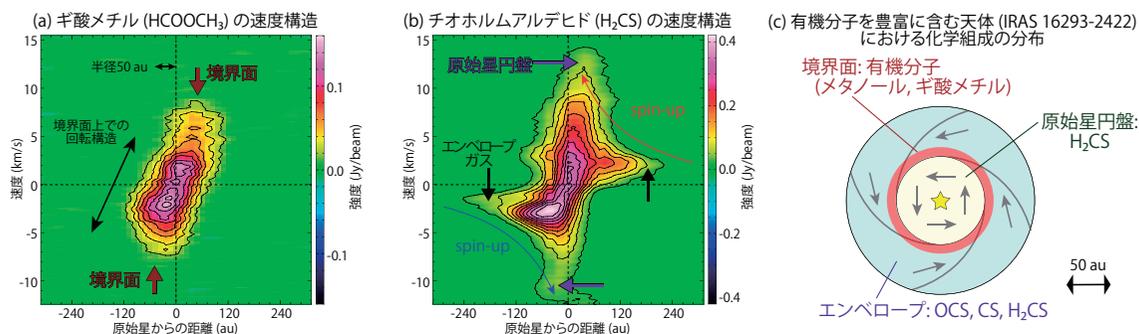


図1：原始星天体中の様々な分子輝線の速度構造のALMA観測。重力収縮するエンベロープと回転円盤，その境界面をトレースしている。[2]

されたのである(図1) [1, 2]。また，原始星天体の中でも特に明るいFU Ori型バースト天体では，温度が100 K程度の高温になった円盤から複雑な有機分子が多数検出された。原始星天体に円盤が付随することはこれまでの赤外線観測などでも示唆されていたが，エンベロープ中のダストを見通すことができるミリ波の波長帯において高解像度観測を行うことで，円盤の撮像観測が初めて可能となったのである。

また，ALMAによる高感度観測により，原始星天体から様々な複雑な有機分子が新たに検出されている。星間空間において複雑な有機分子は，星が生成される直前の分子雲コアなど，温度が10 K～数10 K程度の低温高密度領域において主にダスト表面反応により生成されると考えられている。分子雲コア中で星が生成されると周囲のダストが暖められ，ダスト表面の分子が気相に蒸発し，ガス輝線として観測できるようになる。これまでは，明るい大質量星形成領域で複雑な有機分子探査が主に行われてきたが，ALMAによる高感度観測は，より暗い，太陽型原始星天体での複雑な有機分子探査を可能にした。すなわち，やがて惑星にもたらされる複雑な有機分子の探査が可能になったのである。例えば，地球上では微生物によっても生成されるクロロメタン(CH<sub>3</sub>Cl)，核酸のアデニンの前駆体でもあるグリコロニトリル(HOCH<sub>2</sub>CN)やZ-シアノメチルアミン(HNCHCN)などが，ALMAにより原始星天体で初検出されている。また，NaClやKClといった塩が星形成領域で初検出された。二炭糖であるグリコールアルデヒド(HOCH<sub>2</sub>CHO)や尿素のもとにもなるシアナミド(NH<sub>2</sub>CN)は，これまで大質量星形

成領域では検出されていたが，太陽型原始星天体ではALMAで初検出された。特に，原始星天体IRAS 16293-2422では分子輝線のサーベイ観測が行われ，分子が続々と新たに検出されている[3]。

### 3. 原始惑星系円盤中の有機分子

原始星天体が進化すると，周囲のエンベロープが散逸してエンベロープからの降着がなくなり，中心星は前主系列星と呼ばれる天体となる。本稿では，この前主系列星周囲の円盤を原始惑星系円盤と呼ぶ。原始星は進化と共に暗くなり，周囲のダストが暖められる領域が小さくなる。これに伴い，ダスト表面から蒸発して，ガス輝線として観測される複雑な有機分子の輝線強度が弱くなる。従って，原始惑星系円盤は惑星系への進化がより進んだ段階である一方で，有機分子輝線の検出は，原始星天体に比べて難しい。しかし原始惑星系円盤からも，地上光赤外線/電波望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡などを用いて有機分子が検出されてきた。ALMA以前の観測では，主に構成原子数が4以下の比較的小さい分子しか検出されていなかったが，ALMAの初期運用開始直後にIRAMミリ波望遠鏡によるHC<sub>3</sub>Nの検出が報告された。その後，ALMAによりc-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>が検出され，さらに構成原子数6のシアニ化メチル(CH<sub>3</sub>CN)やメタノール(CH<sub>3</sub>OH)といった，いわゆる『複雑な有機分子』が円盤から初検出された(図2) [4, 5]。さらに最近では，ギ酸(HCOOH)やチオホルムアルデヒド(H<sub>2</sub>CS)も検出されている。

原始惑星系円盤で検出された複雑な有機分子は，

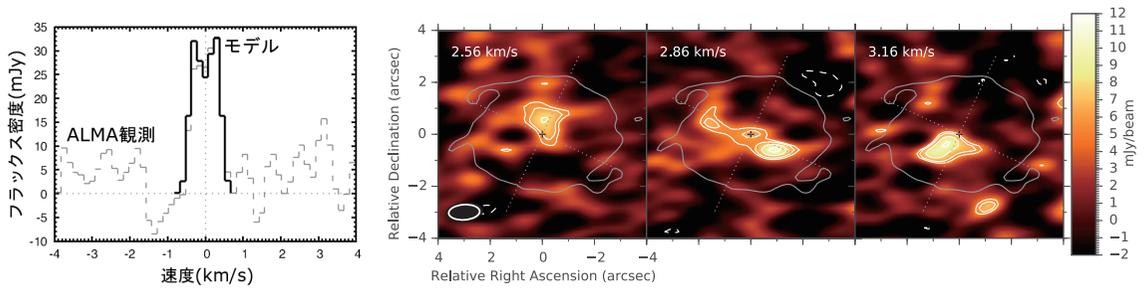


図2：原始惑星系円盤中のメタノールのALMA観測。円盤半径30-60 auの領域から輝線が放射されている。[5]

$\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  ともに円盤外縁部(半径30-100 au, au:天文単位)に存在していた。 $\text{HC}_3\text{N}$ や $\text{CH}_3\text{CN}$ は、その後、複数の天体から検出されている。また、太陽型前主系列星であるTW Hya円盤からは $\text{CH}_3\text{CN}$ の輝線が7本検出されており、温度や分子柱密度に強い制限を与えている。これらの輝線は励起エネルギーが高く、円盤中の30-50 K以上の比較的暖かな領域をトレースしていると考えられている。

$\text{CH}_3\text{OH}$ に関しては低励起エネルギーの輝線が検出されており、20 K程度の低温領域をトレースしていると考えられる。前述のように、星間空間において複雑な有機分子は、ダスト表面反応により生成されると考えられているが、円盤外縁の低温領域では、ダスト表面の分子は熱的には気相に脱離しないため、非熱的過程により脱離したと考えられる。実際、原始惑星系円盤中の有機分子生成のモデル計算では、ダスト表面で複雑な有機分子が生成された後、中心星からの紫外線や星間空間からの宇宙線起源、反応熱などで分子が非熱的に気相に脱離することが示されている[6]。

$\text{CH}_3\text{OH}$ が検出されたTW Hya円盤では、ハーシェル宇宙天文台により最も低励起の水分子輝線が検出されており、こちらもダスト表面から水分子が非熱的に気相に脱離したものと解釈されている。観測された $\text{CH}_3\text{OH}$ と水分子の存在量比は0.7-5%程度であり、太陽系内の彗星中の分子の存在量比とよい一致を示した。これは、原始太陽系円盤において、今回観測された水分子や $\text{CH}_3\text{OH}$ を脱離したダスト表面の氷と同様のものが、彗星に取り込まれた可能性を示唆する。ただし、ダスト表面から非熱的に脱離した分子の組成比は、必ずしも元の氷の組成比を反映しているとは限らないので、注意が必要である。

最近のロゼッタ彗星探査機による67P/チュリコフ・ゲラシメンコ彗星の観測は、ALMA観測と相補的に原始惑星系円盤内の有機分子生成過程を検証した。ロゼッタ探査機搭載の質量分析計を用いたその場観測により、多数の複雑な有機分子が彗星から検出された。これまでにALMAで観測された複雑な有機分子は、10-20 K程度の低温環境下においてダスト表面で水素付加反応により生成されたと推察される。一方で、ロゼッタ探査機で検出された分子とモデル計算を比較すると、一部の分子は存在量比がよく一致しており、これらはより暖かな30-50 K程度の環境下のダスト表面でラジカル同士の反応により生成された分子と考えられる。今後もALMA等による原始惑星系円盤の分子輝線観測と円盤モデル計算、太陽系内天体の観測を比

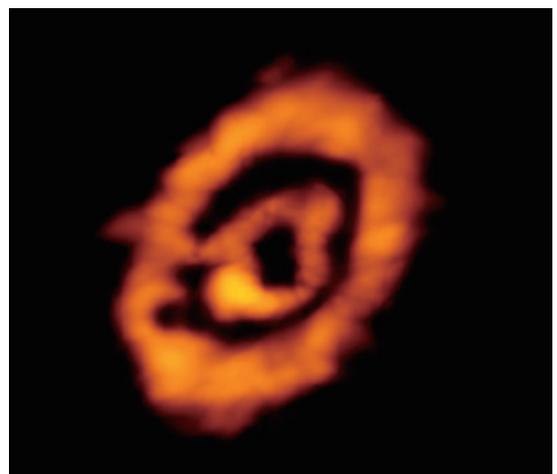


図3：原始惑星系円盤からの $\text{DCO}^+$ 輝線のALMAによる撮像観測 [7]

Credit : K. Oberg, CfA; ALMA (NRAO/ESO/NAOJ); B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

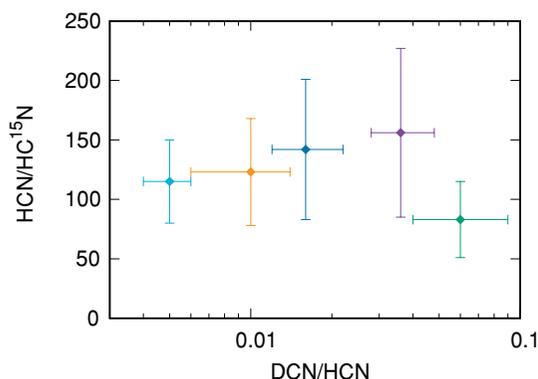


図4：原始惑星系円盤5天体におけるHCN/HC<sup>15</sup>N vs. DCN/HCNのALMA観測[9]

較することで、太陽系内物質起源の研究が進展すると期待される。

#### 4. 原始惑星系円盤中の同位体分子

ALMAによる高解像度・高感度観測により、円盤中の希少同位体分子が新たに検出されている。ALMA以前にも<sup>13</sup>C, <sup>18</sup>O, <sup>17</sup>O, 重水素(D)などを含む希少同位体分子は検出されてきたが、ALMAはこれらの希少同位体分子の撮像観測を可能にした(図3) [7]。ALMA以前もDCN, DCO<sup>+</sup>の重水素分子は観測されていたが、その解像度は悪く、主に円盤外縁の10–20K程度の低温領域をトレースしていた。一方ALMAによる高解像度観測は、低温領域のみならず、円盤内縁の30 Kを超えるような比較的暖かな領域においても重水素分子が豊富に存在することを明らかにした。これまでの重水素分子の生成過程としては、低温環境下においてH<sub>2</sub>D<sup>+</sup>を介して進む反応が主に考えられてきたが、このALMA観測により、暖かな領域においてもCH<sub>4</sub>D<sup>+</sup>など別の分子を介した反応により、重水素分子が豊富になりうるということが明らかになった[8]。

またALMAにより、新たに<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O, HC<sup>15</sup>N, C<sup>15</sup>N, N<sub>2</sub>D<sup>+</sup>などの希少同位体分子が円盤から検出された。

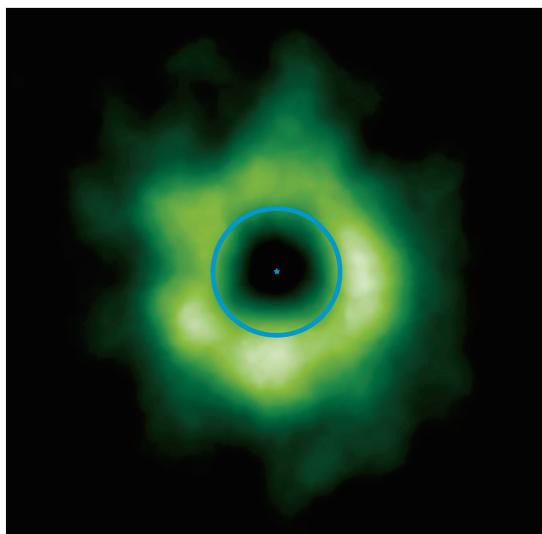


図5：N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>輝線によるCOスノーラインのALMA観測。青丸がスノーラインの位置を表す。[12]  
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

円盤中に<sup>15</sup>Nを含む分子を検出したのは、ALMAが初めてである。ALMAによるHCNの同位体の観測結果は、重水素と<sup>15</sup>Nの濃集を示した(図4) [9]。太陽系内の彗星でも重水素や<sup>15</sup>Nが濃集しており、隕石や惑星間塵中の有機化合物では特に、重水素、<sup>13</sup>C, <sup>15</sup>Nの同位体比が非常に高い値を示すことが知られている。今後、様々な円盤、様々な分子に対して<sup>13</sup>Cも含めた同位体比を測定することで、円盤内のどのような分子がどのような過程を経て太陽系内天体中の有機分子の起源となったのかを探る研究が進展すると期待される。

#### 5. 原始惑星系円盤中の水とスノーライン

原始惑星系円盤からの水分子輝線の観測は、地上望遠鏡の近中間赤外線観測や赤外線宇宙望遠鏡を用いて行われてきた。特に、スピッツァー宇宙望遠鏡やハーシェル宇宙天文台では、中間・遠赤外線にて水分子輝線が多数の原始惑星系円盤から検出された。また、赤外線天文衛星あかりやすばる望遠鏡により、近赤外線にて氷の吸収線も検出されている。ミリ波・サブミリ波においてもこれまで重水素を含む水分子の観測が試みられてきたが、検出には至らなかった。ALMAでは、円盤からの高励起の水分子線の仮検出や輝線強度の上

限値の報告がされている[10, 11]. ALMAのような地上観測では、天体からの水の遷移線は地球大気中の水に吸収されるため、 $\text{H}_2\text{O}$ の低励起線の観測は不可能であるが、 $\text{H}_2\text{O}$ の高励起線や $\text{HDO}$ 、 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ といった希少同位体分子は観測可能である.

ALMAの初期成果の1つに、原始惑星系円盤中の一酸化炭素(CO)のスノーラインの観測がある. 極性の低いCOは、極性の高い水分子に比べて昇華温度が低い. すなわち、COの昇華領域(スノーライン)の位置は、水分子に比べて円盤外側に現れる. 太陽型前主系列星であるTW Hya周囲の円盤で、 $\text{N}_2\text{H}^+$ 分子を用いて半径約30 auの位置にCOスノーラインの存在が報告された. COは $\text{N}_2$ に比べプロトン親和力が高いため、COが気相に存在すると $\text{N}_2\text{H}^+$ と反応して $\text{HCO}^+$ を生成する. よって、COがダストに凍結する領域で、 $\text{N}_2\text{H}^+$ の存在量が高くなるのが分子雲コアの観測などにより知られている. 本観測ではこの性質を原始惑星系円盤に応用し、高感度・高解像度のALMAにより、COスノーラインの撮像観測に成功したのである(図5)[12]. その後に観測された光学的に薄い $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ 輝線もまた、同様の位置にスノーラインを検出している. また $\text{DCO}^+$ 輝線の観測により、COスノーラインの検出を試みた例もある.  $\text{DCO}^+$ はCOを材料として生成され、かつ低温領域でより豊富に存在することから、COスノーライン付近で存在量が多くなると考えられる. 実際、高解像度のALMAにより、 $\text{DCO}^+$ がリング状に分布する様子が撮像観測されている.

水分子のスノーラインに関しても、中心星の光度が高く、スノーラインの位置がより大きな半径に現れる原始星天体では、 $\text{HCO}^+$ や $\text{CH}_3\text{OH}$ を用いた間接的な水分子のスノーラインの撮像観測がALMAで試みられた. COに比べて水分子はプロトン親和力が高いため、水分子が気相に蒸発すると、 $\text{HCO}^+$ が反応して $\text{H}_3\text{O}^+$ を生成する. 従って水分子のスノーラインの内側で $\text{HCO}^+$ の存在量が減少するのである. また、 $\text{CH}_3\text{OH}$ の昇華温度は水分子の昇華温度に近いので、 $\text{CH}_3\text{OH}$ の空間分布の観測より、水分子の分布が予想される.

一方で、太陽型前主系列星周りの原始惑星系円盤内の水分子のスノーラインは、半径約数au付近の位置に現れると考えられ、ALMAでも撮像観測は難しい. そこで、高励起の水分子輝線を用い、ケプラー回転に

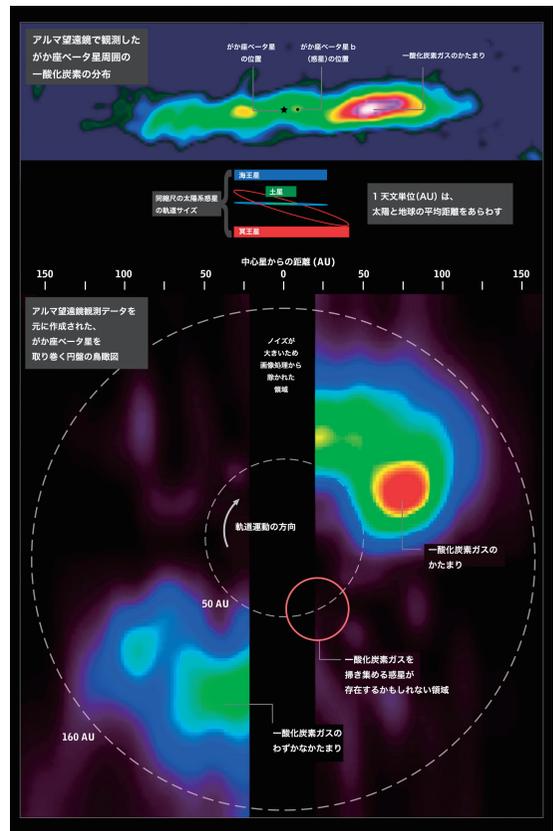


図6:  $\beta$  PicからのCOガスの観測 [16]

Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) and NASA's Goddard Space Flight Center/F. Reddy

よるドップラーシフトを利用したスペクトロ・アストロメトリーの手法により、撮像観測ではなく、分光的に水分子のスノーラインの位置を検出する観測が試みられている[10,11,13]. これまでスピッツァー宇宙望遠鏡やハーシェル宇宙天文台で観測されてきた水輝線は、円盤の外縁の表層部をトレースするものであった. 高感度のALMAにより初めて、円盤赤道面付近のスノーラインをトレースする水輝線の検出に迫ろうとしている.

## 6. 原始惑星系円盤中のC/O組成比分布

スピッツァー宇宙望遠鏡により円盤から $\text{H}_2\text{O}$ 、OH、HCN、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$ といった分子が検出された一方で、系外惑星大気中にも同様の分子種が検出されるようになった. これらの観測より、円盤と系外惑星大気の間

素組成の関連について、特にC/O比の観点から議論が行われるようになった。

惑星形成論によると、巨大ガス惑星は水分子のスノーラインの外側で形成される。系外惑星系で発見された短周期巨大ガス惑星は、惑星形成後、軌道進化した結果、恒星近くを公転するようになったと考えられている。このシナリオの観測的検証法の1つとして、円盤ガスと系外惑星大気のC/O比を比較する方法が提案されている。円盤内のダスト表面の水の主成分は水分子(H<sub>2</sub>O)であり、円盤内ガスのC/O比は、水のスノーラインの内外で変化すると考えられる。スノーラインの内側では水が蒸発してガス中の酸素量が増加し、逆に外側ではガス中の酸素量が減少するのである。このような変化は、水だけではなく、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)など他の分子のスノーラインの内外でも起こる。すなわち、様々なスノーラインの内外でC/O比が変化していくと考えられる。よって、ガス惑星大気の元素組成が形成時の円盤ガスの元素組成を反映すると考えると、惑星大気中のC/O比を指標として、惑星が円盤内のどの場所で形成されたかに関する情報が得られる[14, 15]。

現在、ALMAによる様々な分子輝線の高感度・高解像度観測を用いて、円盤内のC/O比分布を調べるプログラムが実施されている。将来、次世代光赤外線望遠鏡により系外惑星大気のC/O比の観測が進めば、ALMA観測で得られた円盤内のC/O比分布と比較することにより、惑星形成とその後の軌道進化のシナリオ、特に短周期ガス惑星形成過程を検証することができると期待される。

## 7. 残骸(デブリ)円盤中のガス

残骸円盤は主系列星に付随する円盤であり、前主系列星に付随する原始惑星系円盤内のガスとダストが散逸した後、小天体の衝突などにより2次的に生成されたダストで主に構成されていると考えられている。ALMA以前には、残骸円盤からのガスの観測はごく限られた天体のみであった。しかし、ALMAによる高感度観測により、残骸円盤中にわずかに存在するガスの検出が可能となった。 $\beta$  Pic周囲の残骸円盤中に検出されたCOは非軸対称な分布をしており、円盤内の彗星や氷小惑星同士の衝突により生じた可能性が示

唆されている(図6) [16]。一方で49 Ceti周囲の残骸円盤のように、ガスが軸対称に存在している円盤もあり、原始惑星系円盤内の原始的ガスがまだ散逸しきれずに残っている可能性も、特に若い天体では示唆されている[17]。

また、いくつかの天体では、COに比べて中性炭素の量が多いことがALMAやASTE観測で明らかになった。これは、原始惑星系円盤とは異なり、ダストが光学的に薄い残骸円盤中では、中心星からの紫外線が円盤内に浸透し、COが光解離するためである。また、このような残骸円盤中のCOと中性炭素の存在量比には、水素分子がどのくらい存在しているかが影響すると考えられている[18]。

残骸円盤中のガスは、円盤中の天体の進化を考える上でも重要である。今後様々な残骸円盤に対してガス観測が統計的に行われることにより、原始惑星系円盤ガス散逸や残骸円盤中の天体衝突などに関する理解が進展すると期待される。

## 8. おわりに

ALMAによる惑星形成領域の高解像度・高感度観測は、ダスト放射のみならず、ガス輝線観測にも劇的な進展をもたらした。本稿で紹介した研究は、ALMAのこれまでの成果のごく一部にすぎない。今後も新たな発想にもとづく研究が続々と現れるであろう。最近のダスト連続波の超高解像度ALMA観測により、円盤内にリング・ギャップ構造が普遍的に存在することが明らかになってきている。一方で、これまで分子輝線で観測されたリングやギャップ構造は、比較的解像度の低いものであった。今後、分子輝線の超高解像度観測により、ダスト連続波のリング・ギャップ構造に対応する化学的効果で現れる分子輝線の空間構造が見えてくるだろう。また一方で、これまでは個々の天体の観測が多かったが、今後は統計的観測の重要性も大きくなると思われる。円盤からの分子輝線の超高解像度観測や統計的観測に基づき、原始惑星系円盤から太陽系、系外惑星系内への物質進化に関する我々の理解が大きく進展すると期待される。

## 謝 辞

本稿を丁寧に査読していただいた古家健次氏に心より感謝します。また、本稿のために図を作成していただいた大屋瑤子氏と Catherine Walsh 氏に深く感謝します。筆者は、JSPS 科学研究費 新学術領域研究 (18H05441)、基盤研究(C) (19K03910) および ALMA 共同科学研究事業 2018-10B からの補助を受けています。

## 参考文献

- [1] Sakai, N. et al., 2014, *Nature* 507, 78.
- [2] Oya, Y. et al., 2016, *ApJ* 824, 88.
- [3] Jørgensen, J. K. et al., 2016, *A&A* 595, A117.
- [4] Oberg, K. I. et al., 2015, *Nature* 520, 198.
- [5] Walsh, C. et al., 2016, *ApJL* 823, L10.
- [6] Walsh, C. et al., 2014, *A&A* 563, A33.
- [7] Oberg, K. I. et al., 2015, *ApJ* 810, 112.
- [8] Aikawa, Y. et al., 2018, *ApJ* 855, 119.
- [9] Guzman, V. V. et al., 2017, *ApJ* 836, 30.
- [10] Carr, J. S. et al., 2018, *RNAAS* 2, 169.
- [11] Notsu, S. et al., 2019, *ApJ* 875, 96.
- [12] Qi, C. et al., 2013, *Science* 341, 630.
- [13] 野津翔太, 2018, *遊星人* 27, 120.
- [14] Oberg, K. I. et al., 2011, *ApJL* 743, 16.
- [15] Mordasini, C. et al., 2016, *ApJ* 832, 41.
- [16] Dent, W. R. F. et al., 2014, *Science* 343, 1490.
- [17] Hughes, A. M. et al., 2017, *ApJ* 839, 86.
- [18] Higuchi, A. E. et al., 2017, *ApJL* 839, L14.