

特集「ALMAで迫る惑星科学」 ALMA望遠鏡でスノーラインを観る

奥住 聡¹

2019年10月2日受領，査読を経て2019年10月27日受理。

(要旨) 惑星形成の現場である原始惑星系円盤において、氷が昇華する場所のことをスノーラインと呼ぶ。スノーラインは惑星の素であるダストの進化や微惑星の形成にさまざまな影響を与えうるが、その正確な位置は実は謎に包まれている。原始惑星系円盤の高解像度観測を可能にした ALMA は、我々のスノーラインに関する理解を大きく前進させる可能性を秘める。本稿では、スノーラインとダストの進化に関する最新の理論的理解を整理したうえで、ALMAを用いた水スノーラインの撮像観測の試みと、ALMA によって発見された原始惑星系円盤のダストリングのスノーライン起源説を紹介する。さらに、将来のスノーライン探査の課題と展望についても議論する。

1. はじめに

惑星形成の舞台は、若い星の周囲を取り巻くガスとダストの円盤(原始惑星系円盤)である。この円盤に含まれるダスト微粒子が衝突合体などを通じて成長することで、キロメートルサイズの固体小天体である微惑星が形成されると考えられている。円盤の温度は一般に中心星からの距離とともに低下するので、離れた領域にあるダストほどより揮発性の高い物質を含む。このような温度・組成勾配によって、軌道ごとに異なる組成を持った惑星・小天体が生まれる。

原始惑星系円盤の物質の組成分布を考える上で最も重要となるのは、スノーラインの位置である。スノーラインとは、水をはじめとする揮発性物質の昇華が起こる場所として定義される。水を例にとると、円盤内での水氷の昇華温度はおおむね160 K前後であり、円盤の温度がこの昇華温度に一致する場所が水のスノーラインということになる。惑星形成を考える上で特に興味があるのは、固体物質の集中する円盤赤道面におけるスノーラインの位置であり、これは赤道面上の曲線として表現される¹。

最も豊富な揮発性物質である水のスノーラインは、惑星系の形成において特に重要や役割を果たす。水スノーラインの外側では、岩石に加えて、岩石に匹敵する量の水氷が固体として加わる。このため、木星などの巨大ガス惑星のもととなる固体核は、スノーラインの外側でより容易に形成されると考えられてきた[1]。視線速度法によって発見された太陽系外の巨大ガス惑星の軌道分布を見ると、中心星から数天文単位(au)の軌道付近に分布のピークが見られ、これと原始惑星系円盤の水スノーラインの関係に興味を持たれている[2]。最近の惑星形成論では、スノーラインが微惑星の形成を促進する可能性にも大きな注目が集まっている(2節参照)。

このような惑星形成における重要性にも関わらず、スノーラインが具体的に円盤のどの位置にあるのかは、実は理論的に定かでない。太陽系をつくった円盤(原始太陽系星雲)の水スノーラインは、太陽から3 auの軌道に存在したと仮定されることがしばしばある。しかし実際には、円盤の温度分布は円盤進化のモデルに

1. 東京工業大学 地球惑星科学系
okuzumi@eps.sci.titech.ac.jp

*1. 惑星形成の研究者が断りなくスノーラインに言及するとき、それは赤道面上のスノーラインを指すことが多い。実際には、円盤の温度は赤道面からの距離にも依存するので、スノーラインは円盤の内部で曲面の形をとる(例えば図1, 2)。

依存し、しかも円盤進化に応じて移動することがわかっている。原始太陽系星雲の水スノーラインは、太陽系の微惑星が形成された時期に、現在の木星軌道付近に存在していた可能性もあれば、現在の地球軌道より内側に存在していた可能性もあるのである[3]。もし後者の可能性があるとするなら、「なぜ我々の地球はこれほどまでに水に欠乏しているのだろうか?」という根本的な疑問が浮上してくる²。筆者らの理論計算によると、水スノーラインが地球軌道よりも内側へ移動した時期が遅いと、地球軌道付近の原始惑星は多量の氷ダストを捕獲し、「水浸し」の惑星となってしまっていた可能性がある[4]。このような可能性が本当にあったのなら、木星が早期に形成されて氷ダストが地球軌道付近へ移動したのを防いだ[5]などといった複雑な地球型惑星形成シナリオを検討しなければならなくなる。

スノーラインの進化とその周りでのダスト進化をより確実に理解するためには、現実の原始惑星系円盤のスノーラインを観測できるようになることが必要不可欠である。実は近年、原始惑星系円盤の高解像度観測を実現した電波望遠鏡ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)を用いて、スノーラインを撮像しようとする試みがなされ始めている。また、ALMAによって多数の原始惑星系円盤上にリング状のダスト構造が発見されているが(武藤の特集記事[6]を参照)、これらのリング構造がスノーラインと関連しているのではないかという説も提唱されている。今後、スノーラインにまつわる理論の観測的検証は大きく進展する可能性を秘めている。

本稿では、原始惑星系円盤のスノーラインとダスト進化に関わる理論研究とALMA観測の現状を、筆者自身の研究も交えながら紹介する。まず2, 3節ではスノーラインに関する理論的な理解を整理し、続く4, 5節で関連するALMA観測を紹介する。将来のスノーライン観測の展望についても最後の6節で議論する。本稿では特にダストの熱放射の観測に焦点を当て、ガスの輝線観測によるスノーラインの検出の試みには立ち入らない。後者については野村の特集記事[7]をご覧いただきたい。

2. スノーライン付近でのダスト進化と微惑星形成

スノーラインはさまざまな過程を介してダストの進化に影響を与える。この節では、近年のダスト進化・微惑星形成に関する理論研究で特に注目されている4つの過程を紹介する(図1)。これら4つの過程は排他的ではなく、1つのスノーラインの前後で同時に起こりうる。

以下で紹介するダスト進化過程のいくつかは、ダストの「落下」と呼ばれる現象も関与する。個々の過程の説明の前に、ダスト落下についてあらかじめ説明しておこう。原始惑星系円盤の固体は、ガスから受ける抵抗により、公転しながら中心星に向かって軌道移動すると考えられている(より詳細については解説[8]を参照)。この現象をダストの落下と呼ぶ。落下の速度は固体のサイズに依存し、サイズが1メートルよりも十分に小さい限りは、小さい固体のほうがより遅く落下する。このため、固体の破壊が起こりやすい場所では、中心星方向への固体の流れが渋滞を起こし、固体の密度の増加が起こる。固体密度の増加は、ダストの重力不安定や流体不安定を経由した微惑星形成が起こるための必要条件である[9, 10]。

(a) 氷昇華によるダスト塊の解体

氷ダストの落下と昇華の両方を考えると、スノーライン上では岩石ダストの堆積が起こりうるということがわかる。氷に覆われたダスト粒子の合体成長物(塊)が水スノーラインより外側にあるとし、これらがスノーラインの内側へと落下してくる状況を考えよう(図1(a))。このような塊がスノーラインを通過すると、氷の昇華とともに塊が解体する可能性がある。もしこのような解体が起こると、塊の破片であるシリケート粒子は上述の理由により、スノーラインのすぐ内側で渋滞を起こすことになる。これによってスノーライン付近のシリケート密度が大きく上昇すれば、岩石微惑星の形成が局所的に起こるかもしれない[11-13]。

(b) 氷昇華によるダスト付着力の変化

氷ダスト塊から放出される微小なシリケート粒子も、再び付着合体して塊を形成し、より速く落下するようになる。したがって、スノーラインよりも十分内側におけるシリケートの密度は、シリケート粒子の塊がどれだけ大きく付着合体できるかで決まるはずである。

²海が地球の全質量に占める割合は、わずか0.02%しかない。

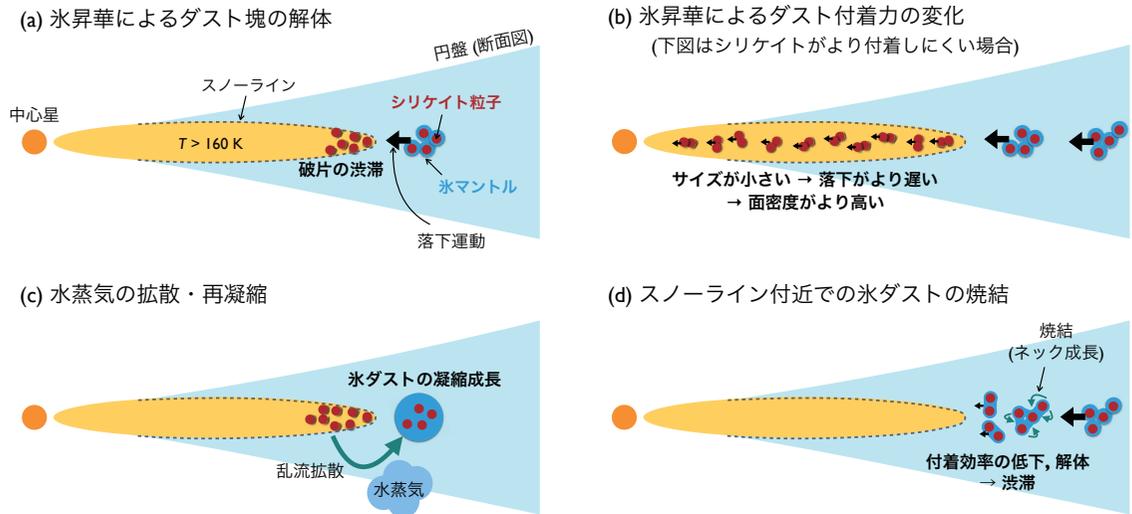


図1：スノーライン前後で起こりうるダストの進化過程。それぞれの説明については2節を参照。これらは排他的ではなく、同時に起こりうる。

もし、シリケイトの付着力が水氷のそれよりも低ければ、シリケイト塊はもとの水ダスト塊よりも大きくはならないので、スノーラインより内側の領域で渋滞を起こす(図1(b)) [14]。これによって、スノーラインより内側での岩石微惑星形成が引き起こされる可能性がある [15]。

実際のところシリケイトと水氷のどちらがより高い付着力を持つのかという、まだ確定的な答えが得られていない。従来、水氷のほうがより付着しやすいという理論予想 [16, 17] が広く受け入れられており、これを支持する室内実験の結果も存在する [18]。ところが最近、これまでの通説を覆すような理論計算や実験の結果 [19-21] がいくつか報告されてきている。ダストの付着力に応じて、想定すべきダスト進化・微惑星形成のシナリオは大きく変わってくるので、この問題の解決は惑星形成論における急務と言ってよい。4節で紹介するスノーラインの撮像観測は、この問題の将来的な解決に大きく貢献するかもしれない。

なお、極性を持たないCO₂の氷は、吸着力が弱いと考えられ、実際にそれを支持するような実験結果もある [22, 23]。もしCO₂氷が水氷よりも付着しづらいのであれば、水スノーラインよりも遠方にあるCO₂スノーラインでは、外から内に向けてダストの面密度が減少することが予想される [24, 25]。

(c) 水蒸気の拡散・再凝縮

円盤の中に乱流が存在すると、スノーライン上での氷の昇華で生じた水蒸気は、乱流によってスノーラインの外側へ輸送される(図1(c))。この水蒸気がスノーライン外側のダスト上で再凝縮すれば、後方のダストは成長することになる [26]。これによって、スノーライン外側の固体面密度は上昇する [15, 27]。面密度上昇が十分に起これば、そこで氷微惑星が形成されるかもしれない [26, 28]。

凝縮成長によって氷ダストの落下速度は上がるので、それによってスノーライン外側の固体面密度が減少する効果も実はある。だが、理論計算 [15, 27] の結果を見てみると、凝縮が直接的に固体面密度を上げる効果のほうが大きいようである^{*3}。

(d) スノーライン付近での氷ダストの焼結

固体粒子の塊を融点・昇華点よりも少し低い温度の環境に置くと、粒子の接触面積が増加し、粒子どうしが接合する。これを焼結という。焼結した粒子の塊は、衝突のエネルギーを内部で吸収しにくいいため、衝突しても合体せずに跳ね返ったり割れるようになる [29, 30]。焼結自体も粒子塊の分裂を引き起こしうる [31]。

原始惑星系円盤の中で温度が氷の昇華点より少し低い場所は、スノーラインの少し外側である [32]。そこ

*3. これは、落下速度がダストの質量の1/3乗(半径の1乗)でしか増えないためと思われる。

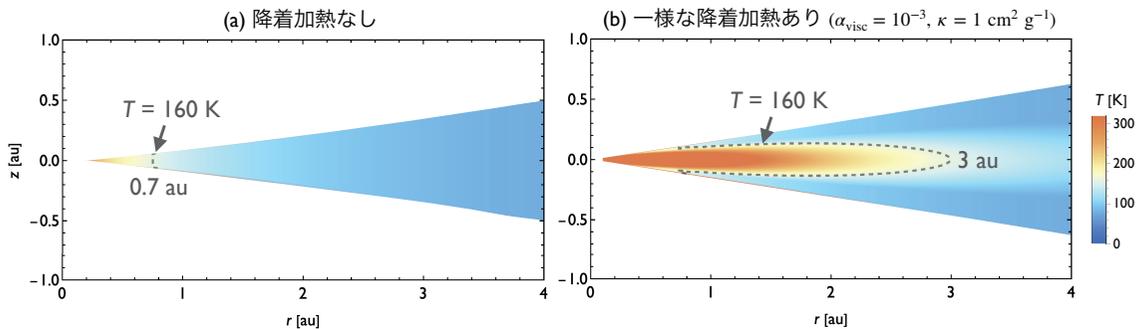


図2：光学的に厚い原始惑星系円盤の温度分布の例。zは円盤赤道面からの距離、rは円盤中心軸からの距離である。図(a)は、中心星の光が円盤の上層を照らすことのみを考慮して温度分布を計算したものである。図(b)では、中心星からの照射に加えて、円盤内部での一様なガス降着による加熱を考慮している(無次元粘性係数 α_{visc} 、円盤オパシティ κ の値は図を参照)。ガス降着が円盤上層でのみ起こる場合は、温度分布は(a)のものに近くなる[38]。中心星の光度は太陽光度に等しく、円盤の質量降着率は 2×10^{-8} 太陽質量/年としている。点線は水スノーラインの位置を示す。ここでは表示していないが、円盤のごく上層の光学的に薄い領域では、温度は再び上昇する[36]。

では焼結によって氷ダストの塊の破壊が起こり、氷ダストの渋滞が起こるだろう[31, 33](図1(d))。この過程も過程(c)と同様に、氷微惑星の形成につながるかもしれない[31]。

過程(c)と異なり、ダストの焼結はさまざまな揮発性物質のスノーラインの背後で起こる可能性がある[32, 33]。なぜなら、ダスト粒子の構成物質が粒子の接点に少量移動するだけでも、接触面積は大きく増加しうるからである。城野らの理論計算[30]によると、焼結に関与する物質が粒子体積の1%程度を占めるだけでも、焼結による塊の付着力低下が顕著に起こる。

3. スノーラインはどこにあるのか？

もし本当にスノーラインの前後で微惑星形成が促進されるのであれば、「微惑星の工場」たるスノーラインが現実の原始惑星系円盤の中のどこに位置するのかを確実に理解したい。ところが、以下で詳しく紹介するように、現在の円盤進化モデルから導かれるスノーラインの位置は、極めて不定である。

「原始太陽系星雲の水スノーラインは約3 auの軌道に存在した」というよく引き合いに出される推定は、若い太陽の光度が現在の太陽光度に等しく、かつ周囲の円盤が光学的に薄かった(円盤内部に中心星の光が直接届いた)という仮定のもとでの推定である[34]。約3 auといえば、ちょうど太陽系の小惑星帯(メインベルト)のあたりであるが、小惑星帯には水に富む小

惑星とそうでない小惑星のゾーニングが確かに見られる。このことから、水スノーラインの位置が約3 auという推定は、一見もつともらしく思える。

しかし、現実の原始惑星系円盤は、少なくともダストが微惑星を形成している段階では、中心星の光に対して非常に光学的に厚いと考えられる⁴。光学的に厚い円盤は、表面でしか中心星の光を受け取ることができない。このため、円盤内部に熱源がない限り、円盤内部の温度は光学的に薄い円盤に比べて約50%程度も低くなる[35, 36]。原始太陽系星雲がこのような低温環境だったとすると、水スノーラインの位置は太陽からおよそ0.7 auのところ、つまり現在の金星の軌道付近であったことになる(図2(a))。

ただし、円盤の熱には、中心星の光に加えて、円盤ガスが中心星に向かって降着するときに発生する熱(降着熱)も寄与する。特に、降着熱が円盤の赤道面付近で効率良く発生する場合は、熱が外部へ逃げにくいために円盤内部はよく温まる。このような状況では、赤道面におけるスノーラインは、中心星から3 au程度のところに到達しうる(図2(b))。

だが、降着熱が赤道面で効率良く発生するかどうかは、ガス降着を駆動する現実的なメカニズムが不明であるため明らかでない。降着の駆動メカニズムの有力

⁴4. 例えば、原始太陽系星雲のモデルとしてよく用いられる最小質量円盤[34]では、中心星の光が1 auの軌道の赤道面に直接届くようになるのは、微小なダストの量が初期の1-10万分の1にまで減少してからである。

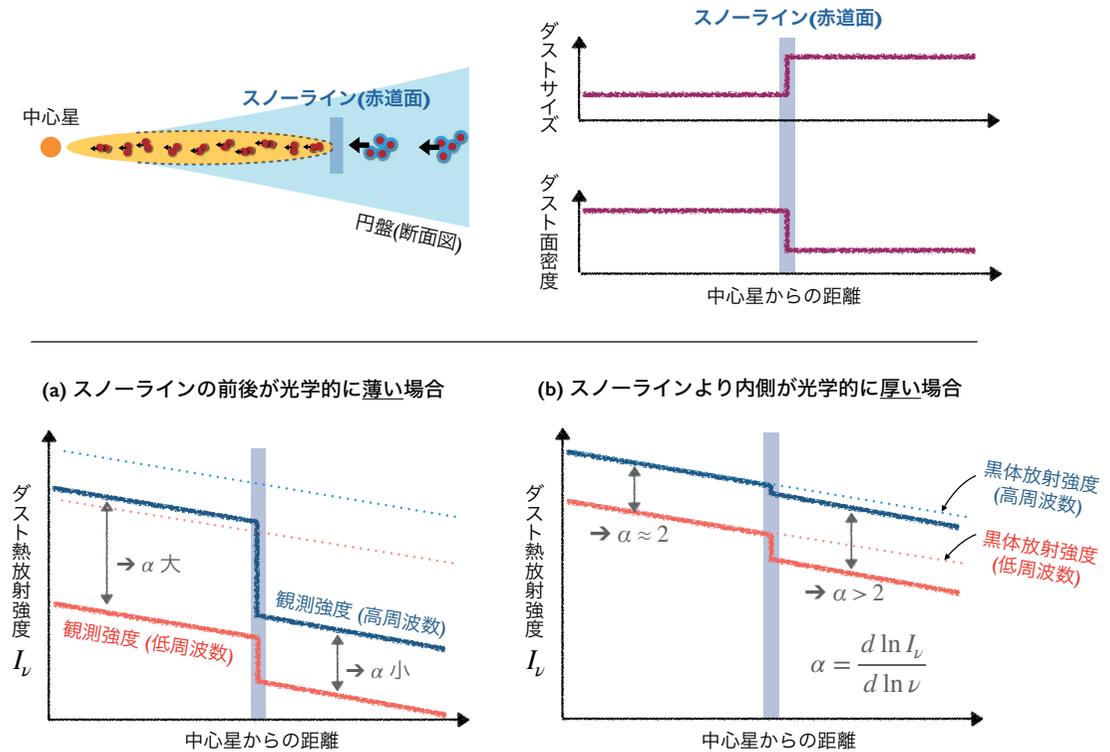


図3：図1(b)の場合のダストサイズおよび面密度の分布の例(上图)と、この場合に観測されると予想されるダスト熱放射強度分布(下图)の模式図。下图において、 α はダスト熱放射の強度 I_ν の周波数 ν 依存性($I_\nu \propto \nu^\alpha$)を表す指数である。光学的に薄い領域では、 α はダストの大きさに依存する(下图(a))。光学的に厚い極限では、電波帯での α はレイリー・ジーンズ則の値 $\alpha=2$ に等しくなる(下图(b))。

候補の1つは、円盤ガスと磁場との相互作用である。しかし、磁場駆動のガス降着は、円盤内部の加熱にほとんど寄与しないことが複数の磁気流体力学シミュレーションから明らかとなっている[37, 38]。磁場と相互作用しながら運動するガスの中では、磁場をつくる電流がジュール熱を発生させ、これがガスの加熱を引き起こす。ところが、原始惑星系円盤の赤道面は、一般に電離度が低いために電流が流れにくく、ジュール加熱も発生しづらいのである。森と筆者らによる最新の磁気流体計算[38]によると、磁場が降着を駆動する円盤の温度分布は、降着熱を無視した場合の温度分布(図2(a))にかなり近くなる。また、仮に赤道面における降着熱の発生が効率良く起こるとしても、降着率やダストの量が減少するにつれて⁵円盤内部の温度上昇は起こりにくくなり、温度分布は降着熱を無視した

⁵ダストが減ると、円盤内で発生した熱が円盤外部により逃げやすくなるのである。

場合のものに近づいていく[3]。

このように、原始惑星系円盤のスノーラインの理論的な不定性は、円盤の降着メカニズムの起源やダストの進化といった惑星形成論の主要な不定性と密接に関わっており、簡単に解消できるものではない。しかし、この問題を放置する限り、「地球をはじめとする岩石惑星は、原始太陽系星雲のどこで形成されたのか?」という惑星科学の大きな問いに対して、我々は確定的な答えを与えることはできないだろう。

4. ダスト撮像観測による水スノーライン検出の試み

スノーラインの場所を観測的に同定し、その付近でのダスト進化を調べられるようになれば、微惑星形成の理解は大きく進展し、円盤降着のメカニズムの解明も前進するはずである。この節では、ALMAを用いたスノーライン観測の試みについて紹介する。

ALMAを用いた水スノーライン検出には2つのアプローチがあり、1つは水分子輝線の分光観測[39-41]、もう1つはダスト熱放射の撮像観測である。前者のアプローチについては、提案者である野津と野村による記事[7, 42]で詳しく解説がなされているので、本稿では後者のアプローチに焦点を当てることにする。なお本節では、水スノーラインのことを単にスノーラインと呼ぶ。

4.1 原理

ダスト撮像観測からスノーラインの位置を探るというアイデアは、「スノーライン前後ではダストのサイズ・量が急激に変化するはずである」という2節で紹介した理論予想に基づいている。円盤の各場所からのダスト熱放射の強度、そしてその周波数依存性（いわば「色」）は、一般にその場所のダストのサイズと量（面密度）に応じて変化する。したがって、円盤のダスト熱放射の空間分布を多波長で撮像し、それらをダスト進化の理論予想から導かれる放射分布と比較すれば、原理的にはスノーラインの場所を特定することができるはずである。もちろん、この検出の仕方は、不定性の大きいスノーライン前後でのダスト進化モデルに依存することに注意が必要である。現時点では、これはスノーラインの検出法と呼ぶよりも、ダスト進化モデルの検証法と呼ぶべきなのかもしれない。

このアイデアを初めに提案したのはBanzattiら[14]である。彼らは、2節(b)のようなスノーライン内側におけるダストの破壊・渋滞を想定し、ミリ波帯におけるダスト熱放射の空間分布がスノーライン前後でどのようにふるまうかをダスト進化シミュレーションに基づいて系統的に予言した。観測される熱放射の強度分布は、各軌道における円盤の光学的厚みにも依存するので、予想される熱放射分布は多様である。例えば、スノーライン内側のダスト渋滞領域が光学的に薄ければ(図3(a))、スノーライン前後でのダストのサイズ・密度の変化を多波長での電波強度マップから直接見取することができる。一方、スノーライン内側が光学的に厚い場合は(図3(b))、そこからの熱放射の強度は黒体放射の値に等しくなり、ダストの性質を直接は反映しない⁶。この場合は、放射強度の周波数依存性(色)が急激に黒体放射のそれに近づくような軌道を探せば、スノーラインが存在しそうな位置を特定することがで

きる。さらに、その軌道の温度は、原理的にはその場の黒体放射強度から見積もることができる。もしその温度が水氷の昇華温度と一致すれば、そこにスノーラインが存在することのより強い証拠となるだろう。

ダスト撮像観測による水スノーラインの検出は、スノーラインの軌道半径が電波望遠鏡の空間分解能よりも大きな天体にのみ有効である。ALMAの最高分解能はおよそ10ミリ秒角だから、地球から100パーセク⁷前後にある比較的近傍の原始惑星系円盤では、1 auよりも十分に大きい半径を持つスノーラインのみがALMAで撮像可能である。3節で述べたように、太陽と同程度の光度をもつ星の周囲の円盤では、スノーラインの半径は1-3 au前後であると理論的に予想され、スノーラインの撮像は難しいかもしれない。しかし、例えば光度が太陽の30倍にも及ぶHerbig型星の周囲の円盤であれば、スノーラインの半径は8 au程度と予想されるので、ALMAを用いたスノーライン撮像はより容易であるはずである[14]。

4.2 例：V883 Oriの周囲の円盤

ダスト撮像観測によるスノーラインの検出は、すでに実際のALMA観測で試みられている。Ciezaら[43]は、V883 Oriという若い星の周囲の円盤をALMAを用いて撮像し、図3に示すようなスノーライン内側でのダスト渋滞の徴候を初めてとらえたと報告した。この天体は、円盤から星への質量降着が一時的に激増する「FU Ori型アウトバースト」と呼ばれる状態にある天体であり、その光度は太陽光度の約400倍にも及ぶ。スノーラインの半径は40 au程度と見積もられ、スノーライン付近をALMAを用いて撮像することが可能である。Ciezaらは、約1.3-1.4 mmの波長帯でこの円盤のダスト熱放射分布を撮像し(図4;解像度はおよそ10 au)、ちょうど中心星から約40 auの軌道より内側においてダスト熱放射の波長依存性が黒体放射のそれに近づいていることを示した(詳細は原論文[43]の図2を参照)。彼らはこれを、「スノーラインより内側の光学的厚みはダストの渋滞により大きくなる」という理

⁶ただし、ダストのアルベドがゼロでない場合は、光学的に厚い放射の強度はダストのアルベドに依存する。ここでは簡単のためダストの電波散乱を無視している。

⁷1パーセク $\approx 2 \times 10^5$ au。地球から100パーセク離れた天体について、天球面上での1秒角は100 auの距離に相当する。後述のおうし座HL星が属するおうし座分子雲までの距離は、およそ140パーセクである。

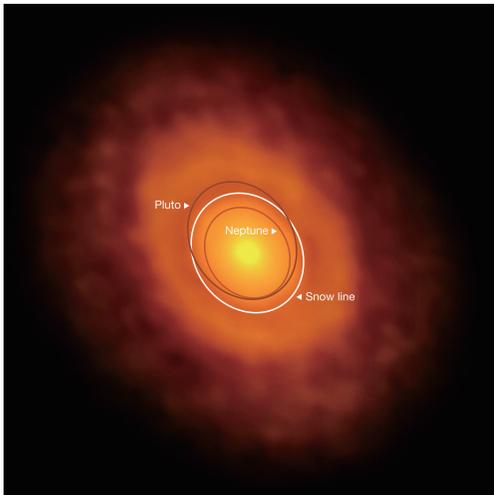


図4：ALMAによって観測された、若い星V883 Oriの原始惑星系円盤のダスト熱放射分布。中心から約40 auの軌道(白線)において、スノーラインの存在を示唆する。ダスト放射の波長依存性の変化が見られた(詳細は原論文[43]を参照)。比較のため、太陽系の海王星、冥王星の軌道が2本の黒線で示されている。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/L. Cieza.

論予言(図3(b))を裏付けるものであると解釈した。

ただし、この観測が本当にダストの渋滞をとらえたものであるかどうかについては、議論の余地がある。というのも、FU Ori型アウトバーストの持続時間は典型的には100年のオーダーであるが、ダストの渋滞が発達するのに要する時間はこれよりも長いと見積もられるのである。Schoonenbergと筆者らは、V883 Oriの円盤の観測で見られた構造はダストの渋滞によるものではなく、スノーライン前後でのダストサイズの変化によるものであるという解釈を提案している[44]。

このように細かい解釈は分かれるところだが、このALMA観測が水スノーライン起源の何らかの構造をとらえた可能性は大きいと言えるだろう。今後、スノーライン前後でのダストの成長度合いの違いを示す決定的証拠が得られれば、2節(b)で述べたシリケートと水氷の付着力に関する論争の解決につながるかもしれない。今後のより広い波長帯(そして欲を言えば、より高い解像度)での追観測が望まれる。

5. 多様な物質のスノーラインと円盤リング構造

前節では主に水のスノーラインに注目したが、原始

惑星系円盤に含まれる固体物質はシリケートと水氷だけではない。例えば太陽系の彗星の核は、水氷に対して10%前後の量のCO、CO₂を含んでいる。水氷に対する存在度が1%に届きうる彗星物質であれば、NH₃、CH₄、C₂H₆などさらに多くのものがある[45]。これらの物質のスノーラインを原始惑星系円盤上で検出することができれば、その円盤の固体の組成分布を推定できるようになるし、温度分布も知ることができる(つまりスノーラインを円盤の「温度目盛」として使える)ようになるだろう。COのスノーラインについては、ALMAを用いた円盤の分子輝線観測によって検出に成功したとする報告がある(野村の記事[7]の5節および図5をご覧ください)。

もし、さまざまなスノーラインの前後において2節で挙げたようなダスト進化が起こるのなら、原始惑星系円盤のダスト分布には多重の同心円状の構造が現れるはずである。興味深いことに、本特集の武藤の記事[6]で詳しく解説されているように、近年のALMA観測によってリング状のダスト分布を示す円盤が多数発見されている。ダストリングの起源としては、惑星や円盤不安定性など数多くのが指摘されているが(前号の武藤[6]と富永[46]の記事を参照)、スノーライン起源説もこれらの説に並んで注目を集めてきた。本節では、多重ダストリングが初めて発見された天体である、おうし座HL星(HL Tau)周囲の円盤[47](以下、HL Tau円盤と呼ぶ)に焦点を当て、この天体のリング構造をスノーライン起源ととらえる見方について、筆者自身の研究[25, 33]を交えながら紹介したい。

5.1 多重ダストリングの凝縮起源説

初めに多重リングのスノーライン起源説を唱えたのはZhangら[48]である。彼女らは、過去のHL Tau円盤の温度分布モデルを用いて、この円盤の3つの主要なギャップ(明るいリングの間の暗い領域)の温度を推定した。この温度モデルによると、3つのギャップの温度は、水、NH₃などの凝縮温度や、CO、N₂などの包接水和物の形成温度に近い。このことから彼女らは、これらの軌道では氷の再凝縮や包接水和物の形成によってダストが素早く成長し(2節(c))、急速に中心星方向に落下することで円環状のダスト欠損(ギャップ)を形成したとする仮説を提案した。

この説は、多重リング形成が円盤の力学進化ではな

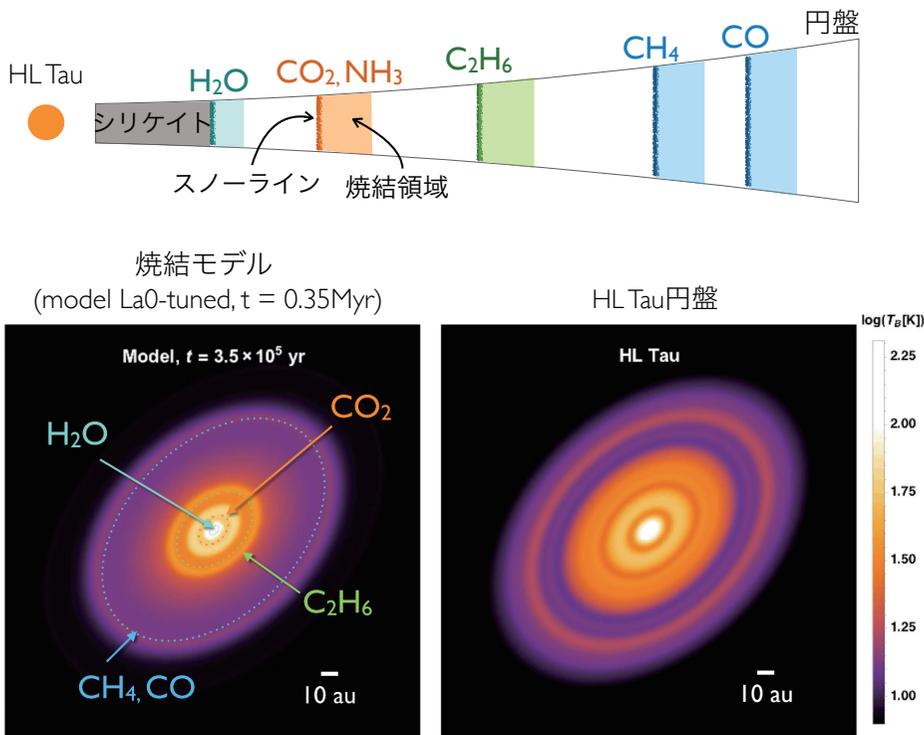


図5： 上図： HL Tau円盤の多重ダストリングの焼結起源説[33]を表す概念図。 縦線はさまざまな揮発性物質のスノーラインを表し、その外側の色付き領域はダスト塊の焼結が起こる領域[32, 33]を表す(図1(d)も参照)。 左下図： 焼結を考慮したダスト進化シミュレーションから導かれる、HL Tau円盤の波長1.3 mmにおけるダスト熱放射強度(輝度温度)分布のスナップショット。 点線はいくつかの分子種のスノーラインを表す。 焼結領域に滞留したダストが、熱放射マップ上で明るいリングとして見えることを示している。 右下図： ALMA 観測 [47] によって得られた HL Tau円盤の1.3 mm熱放射マップから、円盤上の軸対称な成分だけを抽出して表示したもの(詳細は[33]の 2.1 節を参照)。 冊子『ALMA2 Project -アルマ望遠鏡が切り開く2020年代の科学のフロンティア』(国立天文台発行, <https://alma-telescope.jp/publish>)の図3.9を改変。

く物質進化の結果である点と考えるのがユニークであり、大きな注目を集めた。しかし、この説が想定するシナリオは、必ずしも現在のダスト進化理論から支持されているわけでないことに注意が必要である。まず、2節(c)で述べたように、凝縮成長が起こる領域では、ダストの面密度は減少せずに増加する(つまりダストのギャップではなくリングができる)ことが理論計算[27]から示されている。加えて、アンモニアやCOのように水に比べて存在度の低い物質の再凝縮は、ダスト成長にほとんど寄与しないと考えられる(例えば[49])。

5.2 多重ダストリングの焼結起源説

筆者ら[33]らがスノーライン上でのダストリング形成メカニズムとして注目したのは、水ダストの凝縮ではなく焼結である。2節(d)で述べたように、ダスト

の焼結は水氷よりも存在度の小さな揮発性物質によっても起こりうる。もし円盤の水ダストが彗星核のようにさまざまな揮発性物質を含んでいるのなら、それぞれの揮発性物質のスノーラインの背後でダストの焼結と滞留、つまりリング形成が起こる可能性がある(図5上)。著者らは、HL Tau円盤のダストがこのような多成分水から成ると仮定し、HL Tau円盤の中のダストの成長・焼結・中心星方向への落下をシミュレートすることで、円盤からのダスト熱放射が時間とともにどのように進化するかを調べた。スノーラインの位置を決めるHL Tau円盤の温度分布については、単純に中心星からの距離の冪乗に比例すると仮定し、ALMAによって観測されたHL Tau円盤のダスト熱放射分布に基づいて冪および比例係数を決定した。

シミュレーションの結果、10-100万年の時間スケールで、複数のスノーラインの背後に確かにダストのり

ングが形成されることがわかった。図5の下図は、シミュレーション結果からダスト熱放射の空間分布を予想したもの(左)と、HL Tau円盤の実際の熱放射分布(右)を並べたものである。両者を比較すると、20, 40, 80 auの軌道にあるの3つの主要なリングが、いくつかの揮発性物質(内から順にCO₂, C₂H₆, CH₄もしくはCO)の焼結領域のリングに対応しているように見える。我々のモデルはフォワードモデルであり、かつ単純な温度分布を仮定しているので、観測された放射強度分布を完璧に再現できるわけでない。それでも、我々のモデルは放射強度分布のいくつかの重要な特徴を再現することに成功している。さらに、CO₂の低い付着力(2節(b))まで考慮に入れた筆者と田崎の新しい計算によって、HL Tau円盤のサブミリ波の偏光パターンまでよく再現できることも明らかになった[25]。

スノーライン説は、円盤ガスの密度分布に対してはどのような予言を与えるだろうか。凝縮説と焼結説のいずれにおいても、円盤ガスがリング状の濃淡をもつことは要求されない。筆者らのダスト進化モデルでは、ガス円盤の面密度は中心星からの距離に対して単調減少すると仮定されている。しかし、焼結とは別の何らかの物理現象を介して、ダストのリングがガスのリングを生み出すことはありうる。例えば、Huと著者らが最近取り組んだ磁気流体計算[50]は、HL Tau円盤のダストリングが円盤ガスの電離度の分布にリング状の構造をつくり、さらにそれが磁気流体力学を介してガスのリングを作り出す可能性を示している。実は、HL Tau円盤のALMA観測ではHCO⁺イオンの輝線放射分布も観測されており、その軸対称成分を解析するとリング状の濃淡が見られるとする報告がある[51]。

HL Tau円盤のリング構造の説明に関しては一定の成功を収めた焼結起源説であるが、さまざまな原始惑星系円盤に見られるダストリングの全てがスノーライン起源というわけではなさそうである。スノーラインの位置は基本的には円盤の温度分布で決まるので、スノーライン起源のダストリングの位置は中心星の光度と相関を持つはずである。しかし、そのような相関は、ダストリングを持つ既知の円盤の統計に明確には現れていない(例えば[52])。したがって、原始惑星系円盤のリング構造には、スノーラインとは別の成因も関与していると考えるのが自然であろう。さまざまな円盤に見られる多重リング構造の中から、スノーライン起

源の可能性の高いリングだけを抽出する方法論はまだ確立しておらず、今後の理論整備が必要である。

6. スノーライン観測の将来

ALMAによるスノーラインの観測例はこれまでにまだ数えるほどしか存在しないが、いずれ系統的なスノーラインの探査が試みられるようになるだろう。しかし、今後のALMAによるスノーライン観測が順調に進むとは限らない。大きな問題となる可能性があるのは、サブミリ波帯における円盤の光学的な厚みである。つまり、円盤上層のダストによって、円盤赤道面のダストのサブミリ波放射が吸収されてしまう可能性がある。現状のALMAを用いて約100 pcの距離にある円盤の数auスケールの構造を撮像しようとする、波長が1 mm以下のサブミリ波帯で観測しなければ十分な空間解像度を得ることができない。ところが、原始惑星系円盤の中心から10 au以内の領域はサブミリ波に対して光学的に厚い可能性があり、惑星形成の場である赤道面付近のスノーラインの構造をサブミリ波で観測できない恐れがある。

上記の問題を観測の段階で回避するためには、できるだけ高温と思われる円盤を観測ターゲットとして選ぶことが重要である。すでに述べたとおり、光度の大きいHerbig型星の周囲では、スノーラインの半径は10 auに近くなる。中心星から10 au前後の円盤領域を空間的に解像し、かつ赤道面まで見通すことは、1–3 mm程度の波長帯であればALMAでも可能かもしれない。さらに光度の大きいFU Ori型星の周りでは、スノーラインの半径はさらに大きくなる。しかし、これもすでに述べたとおり、FU Ori型アウトバーストは一時的な現象のため、観測結果の解釈には注意を要する。より低温の円盤のスノーライン観測を実現するためには、円盤の光学的厚みが相対的に小さくなる波長1 mm以上のミリ波帯において、現状のALMAより高い空間解像度を有するような電波望遠鏡の登場を待つ必要がある。例えば、ALMAの機能拡張計画「ALMA2」では、ALMAの空間解像度を数倍向上させることが議論されている[53]。さらに、米国国立電波天文台などが2028年の運用開始を目指して計画中の次世代超大型干渉電波望遠鏡群(the next-generation Very Large Array, ngVLA)が実現すると、

光学的に薄いミリ波およびセンチ波帯において、現在のALMAのサブミリ波観測に匹敵する解像度で円盤のガス放射を撮像することを可能になる(例えば[54])。これらの次世代電波望遠鏡が実現するのはまだ何年も先のことであるが、来るべき将来の観測に備えて比較可能な理論を整備していくことは、今からでも早すぎることはないだろう。

謝辞

本稿で紹介した研究のうち、筆者の関わったものは、百瀬宗武氏、城野信一氏、田中秀和氏、小林浩氏、田崎亮氏、森昇志氏、Djoeke Schoonenberg氏、Xiao Hu氏らと共同して行いました。共同研究者の各氏にこの場を借りて感謝します。また、遊星人のALMA特集を企画してくださった秋山永治ゲストエディター、図5の転載を相談させていただいた片岡章雅氏、査読を引き受けてくださった武藤恭之氏にもお礼申し上げます。筆者の研究はJSPS科研費JP16K17661, JP18H05438, JP19K03926の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kokubo, E. and Ida, S., 2002, *ApJ* 581, 666.
- [2] Fernandes, R. B. et al., 2019, *ApJ* 874, 81.
- [3] Oka, A. et al., 2011, *ApJ* 738, 141.
- [4] Sato, T. et al., 2016, *A&A* 589, A15.
- [5] Morbidelli, A. et al., 2016, *Icarus* 267, 368.
- [6] 武藤恭之, 2019, *遊星人* 28, 190.
- [7] 野村英子, 2019, *遊星人* 28, 200.
- [8] 奥住聡, 2014, *遊星人* 23, 371.
- [9] Sekiya, M., 1998, *Icarus* 133, 298.
- [10] Johansen, A. et al., 2009, *ApJL* 704, L75.
- [11] Saito, E. and Sirono, S., 2011, *ApJ* 728, 20.
- [12] Ida, S. and Guillot, T. 2016, *A&A* 596, L3.
- [13] Hyodo, R. et al., 2019, *A&A* 629, A90.
- [14] Banzatti, A. et al., 2015, *ApJL* 815, L15.
- [15] Drązkowska, J. and Alibert, Y. 2017, *A&A* 608, A92.
- [16] Chokshi, A. et al., 1993, *ApJ* 407, 806.
- [17] 和田浩二, 2009, *遊星人* 18, 216.
- [18] Gundlach, B. and Blum, J. 2015, *ApJ* 798, 34.
- [19] Kimura, H. et al., 2015, *ApJ* 812, 67.
- [20] Steinpilz, T., et al. 2019, *ApJ* 874, 60.
- [21] Musiolik, G. and Wurm, G., 2019, *ApJ* 873, 58.
- [22] Musiolik, G. et al., 2016a, *ApJ* 818, 16.
- [23] Musiolik, G. et al., 2016b, *ApJ* 827, 63.
- [24] Pinilla, P. et al., 2017, *ApJ* 845, 68.
- [25] Okuzumi, S. and Tazaki, R., 2019, *ApJ* 878, 132.
- [26] Ros, K. and Johansen, A., 2013, *A&A* 552, A137.
- [27] Schoonenberg, D. and Ormel, C., 2017, *A&A* 602, A21.
- [28] Drązkowska, J. and Dullemond, C. P., 2018, *A&A* 614, A62.
- [29] Sirono, S., 1999, *A&A* 347, 720.
- [30] Sirono, S. and Ueno, H., 2017, *ApJ* 841, 36.
- [31] Sirono, S., 2011a, *ApJL* 733, L41.
- [32] Sirono, S., 2011b, *ApJ* 735, 131.
- [33] Okuzumi, S. et al., 2016, *ApJ* 821, 82.
- [34] Hayashi, C., 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 70, 35.
- [35] Kusaka, T. et al., 1970, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 44, 1580.
- [36] Chiang, E. I. and Goldreich, P., 1997, *ApJ* 490, 368.
- [37] Hirose, S. and Turner, N. J., 2011, *ApJL* 732, L30.
- [38] Mori, S. et al., 2019, *ApJ* 872, 98.
- [39] Notsu, S. et al., 2016, *ApJ* 827, 113.
- [40] Notsu, S. et al., 2017, *ApJ* 836, 118.
- [41] Notsu, S. et al., 2018, *ApJ* 855, 62.
- [42] 野津翔太, 2018, *遊星人* 27, 120.
- [43] Cieza, L. A. et al., 2016, *Nature* 535, 258.
- [44] Schoonenberg, D. et al., 2017, *A&A* 605, L2.
- [45] Mumma, M. J. and Charnley S. B., 2011, *ARAA* 49, 471.
- [46] 富永遼佑ほか, 2019, *遊星人* 28, 172.
- [47] ALMA Partnership et al., 2015, *ApJL* 808, L3.
- [48] Zhang, K. et al., 2015, *ApJL* 806, L7.
- [49] Stammer, S. M. et al., 2017, *A&A* 600, A140.
- [50] Hu, X. et al., 2019, *ApJ* 885, 36.
- [51] Yen, H. W. et al., 2016, *ApJL* 820, L25.
- [52] Andrews, S. M. et al., 2018, *ApJ* 869, L41.
- [53] アルバロ・ゴンサレスほか, 2019, *遊星人* 28, 184.
- [54] Ricci, L. et al., 2018, *ApJ* 853, 110.