

「2022年度最優秀研究者賞 受賞記念論文」 原始惑星系円盤の化学進化とスノーライン - 水・有機分子の起源

野津 翔太¹

2023年12月22日受領, 査読を経て2024年1月22日受理

(要旨) 筆者は、原始惑星系円盤内で各分子が気相と固相で存在する領域の境界である"スノーライン"を軸に、原始惑星系円盤(およびより若い段階の原始星天体と、円盤内で形成される太陽系外惑星の大気)の化学構造を理論・観測の両面から探索・比較する研究を行う事で、星・惑星形成段階の化学進化過程の理解の深化を目指してきました。本稿ではこれまで筆者が行ってきた研究の中から、円盤内 H₂Oスノーライン位置の検出可能性に関する理論・観測研究の概要と、H₂Oスノーライン以遠に影構造を持つ円盤の赤道面化学構造研究の概要を紹介しします。

1. はじめに

この度は、日本惑星科学会2022年度最優秀研究者賞の受賞者に選んで頂き、大変光栄に思います。この場をお借りして、指導・受入教員の皆さま、国内外の共同研究者の皆さまをはじめ、お世話になった全ての皆さまに改めて感謝を申し上げます。

筆者は、「太陽系や太陽系外の惑星はどのように作られたのか」「惑星の形成現場において、水や有機分子を含む物質がどのようにして作られ、地球の様な惑星に供給されたのか」などの疑問に迫ることを目指し、惑星形成の現場である原始惑星系円盤(以下、"円盤"と略します)、加えてより若い段階の原始星天体と円盤内で形成される太陽系外惑星の大気の物理・化学構造とその進化を、理論計算(化学反応ネットワーク計算[1]など)と天文観測(アルマ望遠鏡など)の手法を用いて幅広く研究してきました。

筆者がこれまで星・惑星形成、アストロケミストリー分野で行ってきた研究を大別すると、次の3つになります。

(1)円盤内 H₂Oスノーライン位置の検出可能性に関

する理論・観測研究 (論文: [2-6])

- (2)円盤・太陽系外惑星大気・始原天体の化学構造の関係: -元素組成比と惑星形成環境- (論文: [7, 8])
(3)中心原始星と化学的多様性: H₂Oや有機分子組成に対する中心星(X線)放射の影響 (論文: [9])

これらの研究では、円盤内で各分子が気相と固相で存在する領域の境界である"スノーライン"[10, 11]が共通の鍵となっています。スノーラインを軸に円盤内の温度分布・分子組成分布とその時間進化、惑星形成環境との関わりについて議論を進める中で、星・惑星形成段階の化学進化過程の理解の深化を目指してきました。

本稿では筆者がこれまで行ってきた研究のうち、(1) 円盤内 H₂Oスノーライン位置の検出可能性に関する理論・観測研究の概要と、(2)の一部としてH₂Oスノーライン以遠に影構造を持つ円盤の赤道面化学構造研究の概要を、研究背景を交え紹介します。(1)の詳細については、筆者が執筆した過去の日本語解説記事[12,13]も併せてご覧頂ければ幸いです。また本稿で紹介しない研究(3)については、筆者が2022年に執筆した日本語解説記事[14]にて研究の詳細と将来に向けた展望などを紹介しておりますので、併せてご覧頂ければ幸いです。

1. 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 地球惑星システム科学講座

shotanotsu@eps.s.u-tokyo.ac.jp

2. 円盤内 H₂Oスノーライン位置の検出可能性に関する研究

円盤内部において、誕生直後の中心星の近傍は星からの光や降着加熱で高温となり、H₂Oは気体として存在します。一方星から遠い所は光が弱く低温となり、H₂Oはダスト表面に凍結しています。この境界のことを“H₂Oスノーライン(雪線)”と呼び、古典的な標準太陽系形成論(いわゆる“京都モデル”)では円盤半径 $r=2.7$ 天文単位(au)の位置とされます。これは現在の太陽系では火星と木星の間に存在する小惑星帯の位置に相当します[10, 11]。円盤内の数密度にも依存しますが、円盤内のH₂Oスノーラインの典型的な温度は約150 Kです。H₂Oスノーラインの内側では、惑星の材料であるダストが主に岩石(ケイ酸塩)から構成されるため、地球型の岩石惑星が形成すると考えられている一方、外側ではダスト粒子が氷を纏うことで固体物質総量が増加し、さらに岩石ダスト粒子に比べ破壊されにくくなるため、氷惑星やガス惑星の固体コアを形成すると考えられてきました。最近の理論研究ではH₂Oスノーライン付近にダストが濃集することで、局所的に微惑星・惑星が形成されたと考えるモデルなども提案されています[15]。また理論計算に基づくと、中心星や円盤の物理構造の進化と共にスノーラインの位置も時間進化すると考えられています[16]。更にH₂Oスノーライン外側で形成される氷微惑星や彗星は、地球型惑星の水・有機物の起源とも考えられています。よって惑星形成段階でH₂Oスノーラインの位置やその進化を知ることが、微惑星・惑星形成過程や地球上の水の起源を解明する上で不可欠です。

一方でスノーラインの位置を決める円盤の温度モデルについては、依然として不定性が大きい面もあります。古典的な円盤モデルでは、円盤内の乱流が円盤降着を駆動し、降着時に発生したエネルギーが円盤ガスを効率よく加熱するとされる一方、近年の磁気流体数値計算により、乱流源として期待されていた磁気回転不安定は十分に発達せず、円盤は層流であることが示されています。そのような層流円盤では降着加熱が非効率であり、古典的な乱流円盤に比べてH₂Oスノーラインの位置は大きく異なると考えられています[17, 18]。このようにH₂Oスノーライン

位置は円盤内側領域の降着機構をも反映しており、様々な進化段階の円盤においてH₂Oスノーラインの位置を観測的に制約することで、円盤の加熱機構や円盤進化の駆動機構が明らかになる事も期待されます。

H₂Oスノーライン位置の観測的な同定を目指す際、まずはH₂Oガスや氷の直接空間分解観測が考えられます。しかし円盤において、H₂Oスノーラインの位置は中心星から数~十天文単位[16]であり、これをH₂Oガスや氷の放射で直接空間分解するには高い空間分解能が要求され、簡単ではないのが現状です。

円盤はほぼケプラー回転しているため、円盤から放射される輝線はドップラーシフトを受け広がっています。この輝線の速度プロファイルを高分散分光観測(波長分解能 $R \sim \lambda / \Delta \lambda > 30,000$)により取得し解析することで、輝線放射領域の中心星からの距離の情報を得ることが期待されます。近年、Spitzer(中間赤外線)・Herschel(遠赤外線)宇宙望遠鏡などを用いて、円盤から放射される水輝線が検出されています[19-22]。しかし、これらの輝線は主に円盤表層の高温部やH₂Oスノーライン外側の円盤外縁低温部に存在するH₂Oガスから放射されたものであり、円盤赤道面のH₂Oスノーライン位置を観測から直接同定するには至っていません。

そんな中筆者らは、詳細な円盤物理構造モデルの下で円盤中のH₂O存在量とその分布を化学反応ネットワーク計算で調べた後、その結果を元に多数のH₂O輝線プロファイルを輻射輸送計算し、H₂O分子輝線の高分散分光観測によるH₂Oスノーライン位置同定の可能性を調べました[2-4, 12]。

ここで詳細な円盤物理構造モデルとしては、Nomura & Millar (2005) [23]の定常・軸対称なモデルにX線加熱を加えたモデル[24]を使用しました。中心星は T Tauri星(質量 $0.5M_{\text{sun}}$, $2.0R_{\text{sun}}$, 有効温度4000 K)とHerbig Ae星(質量 $2.5M_{\text{sun}}$, $2.0R_{\text{sun}}$, 有効温度10000 K)を考え、円盤高さ方向のガス密度・温度分布の計算には、静水圧平衡を仮定しています。円盤ガス・ダストはそれぞれ温度分布を計算しており、円盤ガスの温度分布については、加熱源として紫外線光子による光電加熱とX線による水素ガスイオン化、冷却源としてガス・ダスト粒子の

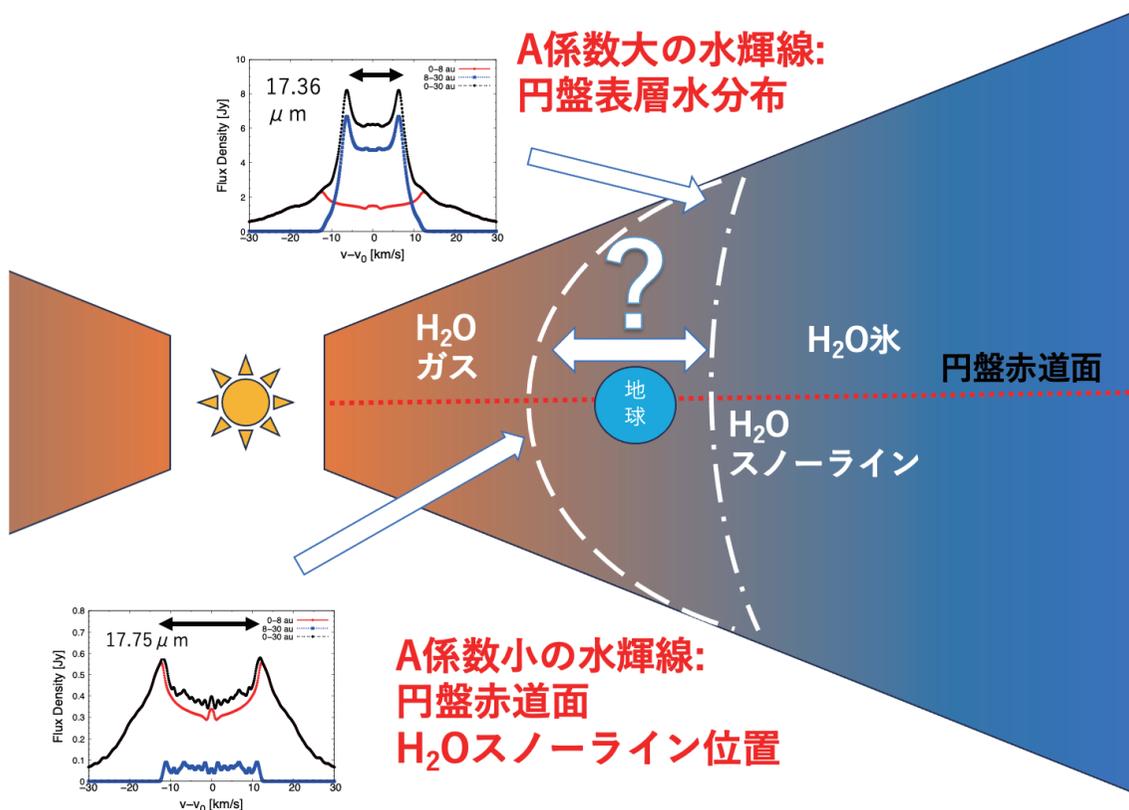


図1: 原始惑星系円盤内のH₂Oガス・氷分布と、高分散分光観測によるH₂Oスノーライン位置同定の概念図。アインシュタインのA係数(放射確率)が小さい ($<10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 輝線は円盤赤道面のH₂Oスノーライン位置の観測に適している一方、A係数が大きい ($>0.1 \text{ s}^{-1}$) 輝線は円盤表層の水分布の観測に適している。詳細は[12, 13]の解説も参照。

衝突と水素Lyman α 遷移線などによる輻射冷却を考えた上で、局所熱平衡を仮定して算出しています。円盤ダスト温度分布については、加熱源として円盤赤道面での粘性降着加熱 (α 円盤モデル, $\alpha=0.01$, 質量降着率 $10^{-8} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ を仮定)と中心星からの放射加熱を考えた上で、ダスト粒子による放射の吸収・再放出間の放射平衡を仮定して算出しています。密度の高い赤道面では円盤ガス・ダストの温度は均一となっている一方、円盤上層ではガス温度の方がダスト温度に比べ高くなっています。ダストサイズ分布はNomura & Millar (2005) [23]と同じモデルを用いていて、ダストの最大サイズは約 $10 \mu\text{m}$ です。(詳細については、筆者の論文[2-4,12] および、[23-25]を参照)。

なお、粘性加熱の効果は主に円盤赤道面の半径

数au以内で効いており、仮定した円盤モデルにおける円盤赤道面H₂Oスノーライン位置は、T Tauri円盤モデルでは半径約2 au, Herbig Ae円盤モデルでは半径約14 auとなっています。今回仮定したモデルでは古典的な乱流円盤モデル(=降着加熱が効率的なモデル)を仮定していますので、例えば上述の層流円盤の様に赤道面での粘性降着加熱が非効率なモデル[17,18]を仮定した場合は、特にT Tauri円盤モデルにおいて赤道面温度が低下し、円盤赤道面H₂Oスノーライン位置がより円盤内縁に移動すると予想されます。

また化学反応ネットワーク計算とは、ガス中・ダスト表面上での化学素反応を列挙した反応速度式(反応ネットワークモデル)を数値的に解く計算のことで、星・惑星形成領域に存在する各分子ガス・氷の量

とその時間進化過程を予測できます。計算モデル内ではガス中の化学反応やダスト表面反応のほか、ガス・ダスト間の相互作用として、ダスト表面への化学種の凍結や、ダスト表面からの熱的・非熱的脱離の過程を考慮しています¹。

計算の結果、まずH₂Oガスは円盤赤道面のH₂Oスノーライン内側だけでなく、円盤外側の表層部高温領域・光脱離領域にも多く存在する事が確認されました。これらのH₂Oガス分布の傾向は、過去の円盤化学構造研究の結果[26, 27]と一致しています。その結果を元に、H₂¹⁶O, H₂¹⁸O輝線プロファイルを計算し、スノーライン検出に使用可能な輝線の特徴を調べたところ、アインシュタインのA係数(輝線の放射確率の係数)が小さく励起エネルギーが比較的高い(~1000 K)輝線の場合、円盤赤道面のH₂Oスノーライン内側からの放射が光学的に薄い円盤外側や円盤表層からの放射と比べて十分に強くなるため、このような特徴を持つ輝線プロファイルを高分散分光観測で調べる事で、H₂Oスノーラインの位置を同定できることを明らかにしました(図1)。またこのような特徴を持つ水輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短い程大きい事等が分かりました[2-4]。更に円盤からのH₂O輝線検出を目指したアルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)観測も筆頭提案者(PI)として複数回観測時間を取得しており、現在までに一天体のClass II Herbig Ae星HD163296(中心星質量は約2.5太陽質量)の円盤でH₂Oスノーライン位置の上限値を求めています[5]。しかし輝線強度に対する感度の不足から、アルマ望遠鏡では近傍の明るいHerbig Ae星や年齢がより若い(Class I)星の円盤など、あくまで一部の限られた円盤天体での観測が期待されるのみになります。例えば、中心星への高い質量降着バーストを示すClass I原始星(FU Ori型星)V883 Oriの円盤において、アルマ望遠鏡観測により水輝線放射が検

出されており、H₂Oスノーライン位置は80 auと報告されています[28]。

一方で中間赤外線の波長の水輝線については強度が大きいため、将来の赤外線宇宙望遠鏡による高分散分光観測により、T Tauri星など中心星質量が太陽程度以下の天体も含めて、様々な年齢・円盤物理構造の天体に対してH₂Oスノーライン位置のサーベイ観測が可能であると考えられます。現在2030年代中頃打ち上げを目指しJAXA/ISAS戦略的中型計画の一つとして検討が進む次世代赤外線望遠鏡GREX-PLUSの中間赤外線高分散分光観測(10-18 μ m, 波長分解能R~30,000)²においても、様々な大小質量星形成領域の多数の円盤(~100天体)に対して、H₂Oスノーライン位置のサーベイ観測を行い、円盤加熱降着機構や円盤進化・惑星形成過程に重要な制限を与えることが期待されています[29]。

なお、2021年12月に打ち上げられ2022年に科学観測を開始したJWST(ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡, 近・中間赤外線)では、既に観測が実行された初期観測プログラムにおいて主に円盤表層から放射される水輝線が多数検出されています。その中で、コンパクトな円盤(=半径が小さな円盤)ほど水輝線の強度が強いことから、氷ダスト・ペブル(小石)のH₂Oスノーライン内側への降着・昇華による水輝線強度の増加が議論されるなどの成果が報告されています[30]。JWSTは波長分解能がR~3,000程度のため、輝線のケプラー回転プロファイルの分解によるH₂Oスノーライン位置の同定はできないのですが、GREX-PLUSなどの将来観測に向けたモデル計算の較正・高精度化、将来観測候補天体の選定などにも役立つと期待される、極めて重要な観測データとなります。今後本格的にJWSTでの円盤観測が進み更に観測データが揃う中で、これらの詳細研究も更に進めていきたいと考えております。

3. H₂Oスノーライン以遠に影構造を持つ円盤の赤道面化学構造研究

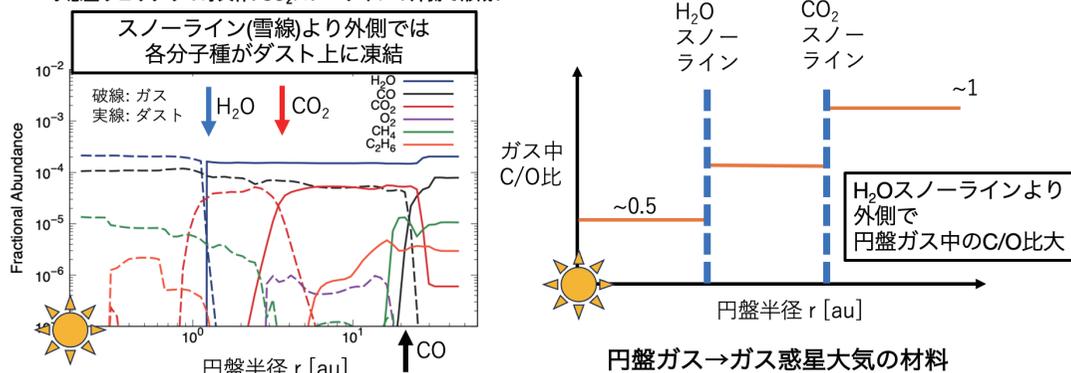
木星サイズの巨大ガス惑星大気元素組成は、大

¹化学反応ネットワーク計算については、古家健次氏の解説記事[1]もぜひご覧ください。また古家氏の解説記事でも言及されている通り、正確な化学素過程をモデルへ組み込むうえでも、天文学の枠を超えて室内実験や理論化学分野の研究者との協力も重要になりつつあります。最近では、“学術変革領域研究 次世代アストロケミストリー”(https://www.next-astrochem.com)という枠組みでの議論も進んでいます。

²GREX-PLUS中間赤外線高分散分光観測のサイエンス計画立案には、2021年に計画が中止された赤外線天文衛星SPICAのサイエンス検討活動の成果が生かされています[6, 13]。

原始惑星系円盤のスノーラインと元素組成比

小惑星リュウグウの母天体: CO₂スノーラインの外側で形成?



原始惑星系円盤ガスとガス惑星大気元素組成比(C/O比, N/O比など)の比較
→惑星形成領域・移動過程を知る手がかりとなる

図2: 原始惑星系円盤赤道面の分子組成分布(左図)と、原始惑星系円盤内のスノーラインと元素組成比(C/O比)分布の概念図(右図)。左図において、破線はガス、実線はダストの分布。左図中の分子組成分布は影構造がないT Tauri円盤の組成分布であり、Notsu et al. (2022) [8]の計算結果をもとに新たに作成。

気形成時の円盤ガス元素組成を反映すると考えられます。水は酸素を含む主要な分子なので、ガス中の炭素-酸素元素組成比(C/O比)はH₂Oスノーライン前後で値が大きく変化します[31]。そこで円盤内と惑星大気のC/O比の比較を通じ、惑星大気獲得・移動の過程に制限を与える研究がなされてきました[7, 32, 33] (図2)。なお、実際には円盤ガスに加えて微惑星・ペブルなどの固体成分も降着・蒸発を介して大気組成に影響を与えるので、両成分の効果を考慮する必要があります[34-36]。

近年では大気中のC/O比以外の元素組成比に着目した研究も注目され始めており、例えばN₂, NH₃スノーライン前後でガス・ダスト中の窒素量が変化する事を踏まえ、大気中のN/O比, N/C比が形成場所を探る上で有用である可能性が議論されています[37, 38]。また、Sや難揮発性元素といった円盤内で主に固体として存在する元素[39]に着目し、(ガス降着後に)惑星大気に取り込まれた固体成分量の制約の可能性も議論されています。

ここで太陽系の木星大気に着目すると、揮発性の高いNおよび希ガスも含め均質に重元素に富んだ大気組成(太陽組成の約3倍)である事が知られていま

す。この均質な揮発性元素超過[40, 41]は従来の円盤温度構造モデルの元でのその場形成では説明できない謎とされ、これまでは木星コアが遠方(30 au以遠)の低温環境(<30 K)で形成された可能性などが提案されてきました[42, 43]。しかしこの木星コア遠方形成説は、近年のペブル集積によるガス惑星のコア形成及び軌道移動の理論研究により30 au以遠から5 auへのコアの移動が困難であること、更には近年太陽系の隕石同位体二分性を説明する上で提案された木星が1Myr以内に内側・外側円盤を空間的に分断したという説[44]と矛盾することなどもあり、木星大気元素組成の謎は解明には至っていない状況です。なお木星大気元素組成問題の詳細については、大野和正氏の遊星人論文[35]もぜひご覧ください。

一方近年の円盤輻射輸送計算[45, 46]によると、ダストが動径方向に濃集する領域が存在する場合、中心星からの放射が遮られる事で影構造が形成され、円盤内側領域においても低温な領域が形成されうる可能性が示唆されています。最近 Ohno & Ueda (2021) [47]は、T Tauri 円盤 (原始太陽系円盤) においてH₂Oスノーライン (= 1.3 au) 前後で

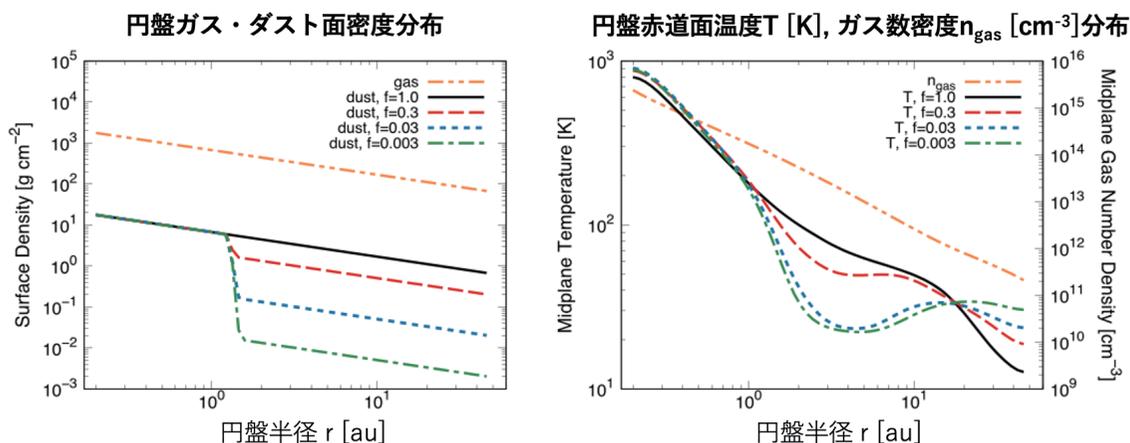


図3: 影構造を持つT Tauri円盤物理構造モデル(Ohno & Ueda 2021に基づく。H₂Oスノーライン位置は $r=1.3$ au)における、ガス・ダスト面密度分布(左図)・赤道面温度 T [K]、赤道面ガス数密度 n_{gas} [cm⁻³]分布(右図)。面密度・温度分布において、黒線はスノーライン前後でのダスト面密度差がない(=影構造がない)円盤の場合の分布。赤破線・青点線・緑破点線はそれぞれ面密度差が3, 30, 300倍の場合の分布であり、徐々に深い影構造を持つ場合の分布に対応。これらの分布図はNotsu et al. (2022)[8]の図を一部加工して作成。

30倍程度以上のダスト面密度差があれば³、その外側(現在の木星軌道付近)では影になる事で温度が30Kを下回り(図3)、N₂や希ガスなどがダスト上に凍結可能である事を示しました。また影領域での重元素に富む固体成分を惑星大気形成時に取り込む事で、均質に重元素に富んだ木星大気(太陽組成の3倍の組成)をその場形成(~5 au)でも説明可能であると議論しています。一方でOhno & Ueda (2021)[47]では、主要分子のみ議論し個々の分子の組成を固定していること(例: N₂ガス+N₂水=一定)、さらにそれぞれの分子の凍結・昇華のみを考慮した単純な化学モデルを仮定しており、影構造を持つ円盤の化学構造の理解は不十分な面が残されていました。

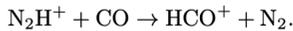
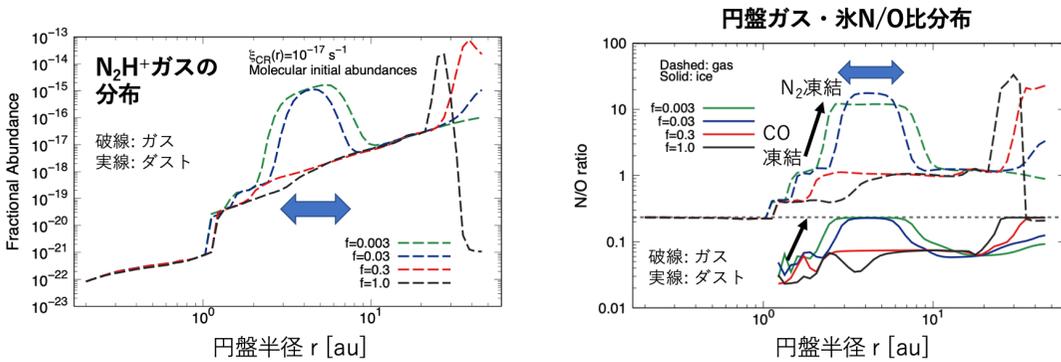
これらの先行研究を踏まえ、筆者らは同じ影円盤物理構造モデル(図3)の下で詳細なガス・ダスト化学反応ネットワーク計算を実施し、主要分子の組成や元素組成比の分布を調べました[8]。その結果、影構造を持つ円盤ではHCN, CH₄, H₂COなど先行研究

[47]では考慮されていない分子も豊富に存在すること、2 au以遠でCO₂やCH₄, C₂H₆などがダスト上に凍結する事(図5)、円盤ガスC/O比が広範囲で均質(概ね1)になる一方N/O比が影領域で著しく増加する事(図4)などが分かりました。この事から、N/O比が円盤影構造の指標となりうる可能性が示されました。また、N₂を材料に形成されCO凍結領域でガス中に豊富に存在するN₂H⁺⁴の組成が影領域で増加する事も示されました。図4に示したN₂H⁺組成分布は円盤赤道面の化学構造計算の結果のため、存在量は~10⁻¹⁵と少ないですが、密度の薄い円盤上層ほど電離率が高くイオン分子量が~10⁻⁹程度まで増加することが期待されます[50, 51]。今後、影構造を持つ円盤の2次元化学構造計算を進める中で、N₂H⁺輝線放射が円盤観測における影構造のトレーサーとして使用できる可能性を議論することも重要です(図4)。

また有機分子に着目すると、影領域ではH₂COやCH₃OH, NH₂CHOなどの飽和有機分子の存在量が増加する一方、不飽和有機分子(C₂H₂, C₃H₂, HCOOCH₃など)の存在量が減少する事などが分

³H₂Oスノーライン前後でのダスト面密度差とそれに伴う影構造は、水氷ダストに比べ壊れやすくサイズが小さいケイ酸塩ダストが、中心星落下速度の低下に伴いH₂Oスノーライン付近に濃集することで形成されると考えられています。その為実際の円盤でどの程度の影構造が発達するか詳細予測をする為には、ケイ酸塩・水氷ダストの物性(限界付着速度など)・サイズ分布の理解も重要です。

⁴CO凍結領域のみでガス中に豊富に存在する事から、N₂H⁺放射分布は円盤COスノーライン位置のトレーサーとして用いられています[48, 49]。



N₂H⁺: 円盤内のCOスノーライントレーサー

**円盤ガス・氷 N/O 比: 影領域で著しく増加 (CO, N₂の昇華温度の僅かな差が寄与)
→影領域の存在 & ガス惑星形成領域の指標となりうる
N₂H⁺ガス分布: 円盤影領域で著しく増加**

図4: 影円盤の化学構造計算で得られたN₂H⁺ガスの組成分布(左図)と、円盤ガス・氷N/O比分布(右図)。両方の図において、黒線はスノーライン前後でのダスト面密度差がない(=影構造がない)円盤の場合の分布。赤線・青線・緑線はそれぞれ面密度差が3, 30, 300倍の場合の分布であり、徐々に深い影構造を持つ場合の分布に対応。破線はガス、実線はダストの分布。これらの分布図はNotsu et al. (2022) [8]の図を一部加工して作成。

かりました。これは前者の生成には冷たいダスト上の水素付加反応が重要である一方[52]、後者の生成にはCH₄を起点とするガス中での反応や、暖かいダスト上でのラジカル同士の衝突による生成反応が重要である点に関わっていると考えられます。なお有機分子の総量としてはCH₃OHなどが豊富に生成されるために、影領域において影領域がない場合の総量に比べ5-10倍程度増加することが示されており、従来の円盤モデル(~30 au)よりもはるかに内側(~5 auの木星軌道領域)に有機物に富む領域が形成される事を明らかにしました(図5)。なお、影領域で成長した氷ダスト・ペブルが影領域を脱し内側領域(H₂Oスノーライン前後の領域)へと落下する中で、加熱に伴う不飽和な複雑有機分子(COMs)の生成が進む事も期待されます。

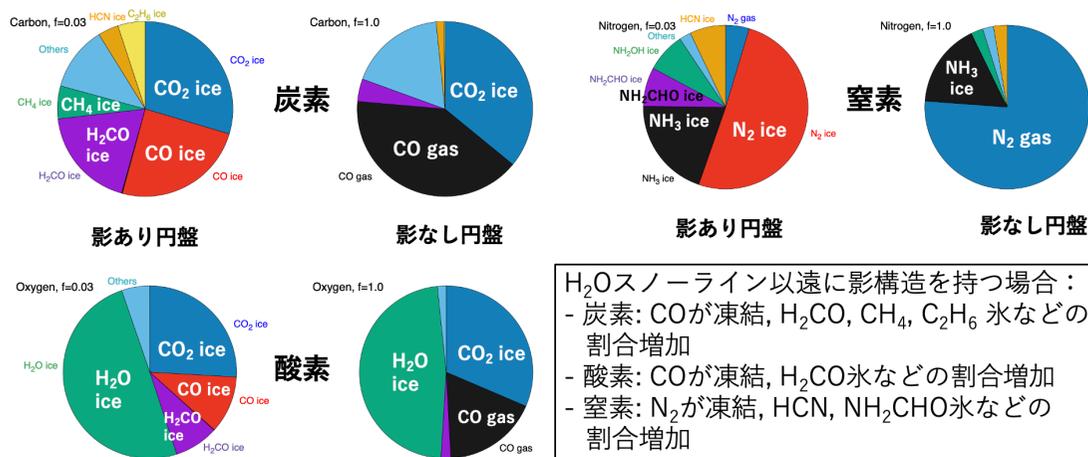
その他、影領域の存在が太陽系の始原的な彗星や小惑星などの小天体の化学組成に影響を与えるかどうか重要な観点です。そこで67P/Churyumov-Gerasimenko彗星における様々な揮発性物質や有機分子の存在量[53]と、筆者らのモデル計算結果の比較を行なったところ、いくつかの分子の組成(CO,

CO₂, C₂H₆, N₂の存在量など)は、彗星粒子が影領域に相当するT ~25 Kの低温領域で形成されたことを示唆するものでした。

計算結果に基づくと、影構造を持つ円盤では、様々な複雑な有機分子について分子雲からその組成が完全に継承されるのではなく、半径5 au程度(木星軌道付近)の円盤内縁部においても形成が進む可能性が示唆されました。今後、2次元円盤物理モデルを用いた化学構造計算や、アルマ望遠鏡やngVLA(次世代大型電波干渉計)⁵を用いたより解像度の高い円盤分子輝線・ダスト放射観測がさらに進む事で、円盤内の影構造が化学進化に与える影響についても、より詳細な解明が可能になると期待されます。

⁵ngVLAではアルマ望遠鏡より空間分解能が向上することに加え、ダストの光学的厚み(不透明度)が小さい数ミリからセンチメートルにかけての波長帯をカバーする事で[54]、H₂Oスノーライン内側の岩石惑星形成領域(高温領域)を含む円盤物理・化学構造の詳細理解が進むと期待されています。

木星軌道付近(5.3au)における、炭素・酸素・窒素の担い手分子



影あり円盤：中心星により近い領域(3-8 au)に、化学的多様性に富む氷を保持する領域が形成される

図5: 木星軌道付近(5.3 au)における、影あり円盤(面密度差30倍のモデル)・影なし円盤それぞれの炭素・酸素・窒素の担い手分子を示した円グラフ図。これらの分布図はNotsu et al. (2022)[8]の図を一部加工して作成。

4. まとめと今後

本稿では筆者がこれまで行ってきた星・惑星形成段階の化学進化過程に関する研究のうち、円盤内H₂Oスノーライン位置の検出可能性に関する理論・観測研究の概要と、H₂Oスノーライン以遠に影構造を持つ円盤の赤道面化学構造研究の概要を、研究背景を交え紹介しました。網羅的な総説記事ではなく限られた視点・切り口の研究紹介記事ではありませんが、星・惑星形成過程におけるアストロケミストリー研究の重要性が少しでも伝わる内容となっていれば幸いです。

なお本稿では十分に紹介することができませんでしたが、アルマ望遠鏡の高感度・高空間分解能を生かした分子輝線観測により、原始惑星系円盤内の化学構造の理解が大きく進みつつあり[55, 56]、最近では多数の天体に対して分子輝線・ダスト放射の高解像度サーベイ観測を実行したMAPS [57, 58]などの大規模観測プロジェクトの成果なども報告されています。筆者らのグループも国内外の共同研究者の協力の上、化学モデル計算研究の結果を生か

した円盤水・有機分子輝線観測の研究にも取り組んでいます。最近では中心星への高い質量降着バーストを示し、水輝線放射の検出も報告[28]された原始星(FU Ori型星) V883 Oriの円盤に対して、アルマ望遠鏡で分子輝線観測を実施し、原始星から円盤へと進化する間に複雑有機分子(CH₃OCH₃, CH₃OCHOなど)の組成が著しく増加する事を確認しました。併せて原始惑星系円盤において複雑有機分子の炭素同位体比(¹²C/¹³C比)を初めて検出し、その値(¹²C/¹³C~20-30)が星間空間の値(~69)に比べ有意に低い事を明らかにしました。これらの研究成果は、筆者が2023年4月から11月まで所属していた東京大学大学院理学系研究科天文学専攻相川研究室の博士課程院生の大和義英氏がデータ解析を主導、筆頭著者として論文をまとめております[59]⁶。

今後もアルマ望遠鏡や将来の電波・赤外線望遠鏡(ngVLA, GREX-PLUSなど)を用いての観測研究

⁶こちらのV883 Oriの円盤に対するアルマ望遠鏡観測研究については、天文月報2024年4月号に掲載予定の記事でも詳細を解説しております。

と理論計算(化学反応ネットワーク計算など)研究を共に進める中で、スノーラインを軸に円盤内の温度分布・分子組成分布とその時間進化、惑星形成環境の議論を深め、星・惑星形成過程の全体像の理解に貢献していきたいと考えております。また本稿を執筆中の2023年12月から東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 地球惑星システム科学講座に所属させて頂くことになり、今後は円盤化学構造と太陽系始原天体の化学組成の比較など、天文学・惑星科学を繋ぐ観点の議論・研究もさらに深めていく事ができればと考えております。

5. 謝辞

本稿は、日本惑星科学会2022年度最優秀研究者賞 受賞記念論文として執筆しました。推薦して頂いた野村英子氏および選考委員の皆さまに感謝申し上げます。

筆者は学部4年生の頃から、野村英子氏(当時京都大学助教、東京工業大学准教授を経て、現 国立天文台教授)や佐々木貴教氏、嶺重慎氏らの御指導のもと、主に Class II 天体の原始惑星系円盤の化学進化とH₂Oスノーラインに関する研究を専門として進め、博士学位論文をまとめました[60]。その後博士号取得後に、日本学術振興会海外特別研究員としてオランダ・ライデン大学に赴任する機会を得て(オランダ赴任の経緯や現地での研究生活の様子については、筆者が以前執筆した記事[61]もご覧頂ければ幸いです)、そこで受入研究者のEwine F. van Dishoeck氏のご指導のもと、若い原始星天体の化学進化へと自分自身の研究対象の幅を広げることとなりました。また、その後基礎科学特別研究員として所属した理化学研究所の坂井南美氏および日本学術振興会特別研究員PDとして所属した東京大学の相川祐理氏のご指導の下研究を進める中で、アルマ望遠鏡での原始星天体・円盤観測研究や将来望遠鏡のサイエンス検討などにも深く関わる様になりました。本稿で紹介した研究を含むこれまでの筆者の研究は、上記の指導・受入教員の皆さまおよび所属した研究室のメンバー(大和義英氏、大小田結貴氏ら)のほか、Catherine Walsh氏、Tom J. Millar氏、Alice S. Booth氏、Christian Eistrup

氏、Arthur D. Bosman氏、Inga Kamp氏、本田充彦氏、廣田朋也氏、秋山永治氏、塚越崇氏、石本大貴氏、植田高啓氏、大野和正氏、井上昭雄氏、中川貴雄氏をはじめとした国内外の多数の皆さまとの共同研究です。この場を借りて、お世話になった全ての皆さまに深く感謝致します。筆者らの化学反応ネットワーク計算研究については、国立天文台CfCAの計算サーバを使用しました。筆者の研究活動はJSPS 科研費(16J06887, 20K22376, 23KJ0329, 23K13155)より支援を受けています。また、本稿を丁寧に査読いただいた匿名の査読者の方に感謝致します。最後に、本稿執筆をサポートくださった遊星人編集長の三浦均氏に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] 古家健次, 2021, 遊星人 30, 4.
- [2] Notsu, S. et al., 2016, ApJ 827, 113.
- [3] Notsu, S. et al., 2017, ApJ 836, 118.
- [4] Notsu, S. et al., 2018, ApJ 855, 62.
- [5] Notsu, S. et al., 2019, ApJ 875, 96.
- [6] Kamp, I. et al., 2021, PASA 38, e055.
- [7] Notsu, S. et al., 2020, MNRAS 499, 2229.
- [8] Notsu, S. et al., 2022, ApJ 936, 188.
- [9] Notsu, S. et al., 2021, A&A 650, A180.
- [10] Hayashi, C., 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement 70, 35.
- [11] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II (Tucson: University of Arizona Press), 1100.
- [12] 野津翔太, 2018, 遊星人 27, 120.
- [13] 本田充彦ほか, 2020, 天文月報 113, 774.
- [14] 野津翔太, 2022, 天文月報 115, 252.
- [15] Hyodo, R. et al., 2021, A&A 646, A14.
- [16] Oka, A. et al., 2011, ApJ 738, 141.
- [17] Mori, S. et al., 2019, ApJ 872, 98.
- [18] 森昇志, 2021, 遊星人 30, 148.
- [19] Carr, J. S. and Najita, J. R., 2008, Science 319, 1504.
- [20] Hogerheijde, M. R. et al., 2011, Science 334, 338.
- [21] Blevins, S. M. et al., 2016, ApJ 834, 152.

- [22] van Dishoeck, E. F. et al., 2014, *Protostars and Planets VI* (The University of Arizona Press, Chicago), 835.
- [23] Nomura, H. and Millar, T. J., 2005, *A&A* 438, 923.
- [24] Nomura, H. et al., 2007, *ApJ* 661, 334.
- [25] 野村英子ほか, 2007, *遊星人* 16, 208.
- [26] Woitke, P. et al., 2009, *A&A* 501, L5.
- [27] Walsh, C. et al., 2015, *A&A* 582, A88.
- [28] Tobin, J. et al., 2023, *Nature* 615, 227.
- [29] Inoue, A. et al., 2023, *GREX-PLUS Science Book* (arXiv: 2304.08104).
- [30] Banzatti, A. et al., 2023, *ApJL* 957, L22.
- [31] Öberg, K. I. et al., 2011, *ApJL* 743, L16.
- [32] Madhusudhan, N., 2012, *ApJ* 758, 36.
- [33] Moses, J. et al., 2013, *ApJ* 763, 25.
- [34] Hori, Y. and Ikoma, M., 2011, *MNRAS* 416, 1419.
- [35] 大野和正, 2022, *遊星人* 31, 131.
- [36] Shibata, S. and Helled, R., 2022, *ApJL* 926, L37.
- [37] Cridland, A. et al., 2020, *A&A* 642, 229.
- [38] Turrini, D. et al., 2021, *ApJ* 909, 40.
- [39] Kama, M. et al., 2019, *ApJ* 885, 114.
- [40] Atreya, K. et al., 2020, *Space Science Review* 216, 17.
- [41] 堀安範, 2022, *遊星人* 31, 42.
- [42] Öberg, K. I. and Wordsworth, R., 2019, *AJ* 158, 194.
- [43] Bosman, A. D. et al., 2019, *A&A* 632, L11.
- [44] 荒川創太ほか, 2022, *遊星人* 31, 50.
- [45] Ueda, T. et al., 2019, *ApJ* 871, 10.
- [46] Okuzumi, S. et al., 2022, *PASJ* 74, 828.
- [47] Ohno, K. and Ueda, T., 2021, *A&A* 651, L2.
- [48] Qi, C. et al., 2013, *ApJL* 765, L14.
- [49] Aikawa, Y. et al., 2015, *ApJ* 807, 120.
- [50] Walsh, C. et al., 2012, *ApJ* 747, 114.
- [51] Cleeves, I. L., 2014, *ApJ* 794, 123.
- [52] Watanabe, N. and Kouchi, A., 2002, *ApJL* 571, L173.
- [53] Rubin, M. et al., 2020, *Space Science Review* 216, 102.
- [54] 植田高啓, 2022, *遊星人* 31, 68.
- [55] Öberg, K. I. et al., 2023, *ARA&A* 61, 287.
- [56] Aikawa, Y. et al., 2024, *COMET III* in press (arXiv: 2212.14529).
- [57] Öberg, K. I. et al., 2021, *ApJS* 257, 1.
- [58] 古家健次ほか, 2022, *天文月報* 115, 305.
- [59] Yamato, Y. et al., 2024, *AJ* 167, 66.
- [60] Notsu, S., 2021, *Springer Theses* (DOI: s10.1007/978-981-15-7439-9).
- [61] 野津翔太, 2021, *遊星人* 30, 25.

著者紹介

野津 翔太



東京大学 大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻 地球惑星シ
ステム科学講座 助教. 京都大学
大学院理学研究科 物理学・宇宙
物理学専攻 宇宙物理学・天文学
分野 博士後期課程修了. 博士(理
学). オランダ・ライデン大学 日本学術振興会海外特
別研究員, 理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑

星形成研究室 基礎科学特別研究員, 東京大学 大
大学院理学系研究科 天文学専攻 日本学術振興会特
別研究員PDなどを経て, 2023年12月より現職. 専
門は星・惑星形成, アストロケミストリーなど. 理論
計算(化学反応ネットワーク計算など)と天文観測(ア
ルマ望遠鏡など)の手法を用いた研究を進めている.
日本惑星科学会, 日本天文学会, 日本地球惑星科学
連合に所属. 日本惑星科学会 編集専門委員会 委員
を務める.