

若い低質量原始星天体の円盤構造 における有機分子化学の観測研究

大屋 瑠子¹・大小田 結貴²



^{1,2} 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

大屋

大小田

〈¹ 東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: ¹ oya@taurus.phys.s.u-tokyo.ac.jp, ² okoda@taurus.phys.s.u-tokyo.ac.jp

若い低質量原始星天体では、分子雲コアのスケールで化学的な多様性があることが知られ、太陽系の物質的な起源との関連が注目されてきた。近年の高解像度観測によって、この化学的多様性が円盤形成領域まで確かに持ち込まれていること、また、エンベロープガスから円盤構造にかけて化学組成が劇的に変化することが見出された。これら2つの現象は、星間塵上の化学組成と分子の蒸発温度の違いによって、同時に説明することができる。さらに原始星近傍に迫り、回転円盤の内部での分子分布まで解像され始めた。円盤構造の動径方向と厚み方向に沿って、それぞれ化学組成の変化が見出されつつある。ALMAの稼働から10年が経ち、膨大な観測データが提供されている現在、機械学習を適用した無バイアスな解析手法の活用なども、新たな発見につながるものと期待される。円盤形成における化学組成進化の一般性と多様性を支配する要因を探ることは、将来そこで形成される惑星系の化学的な初期条件を規定し、星間物質からの進化を辿るための興味深いトピックである。

1. はじめに

この宇宙はビッグバンから始まり、銀河の大規模構造が作られ、その中で分子雲が形成されてきた。さらに、分子雲の中で星が形成されると、その周りで惑星系が作られ、我々が住む地球のような惑星の誕生へと繋がる。これらは構造形成の歴史であり、また同時に物質進化の歴史でもある。この二つの側面を総合的に理解することが、宇宙の歴史を理解するうえでは不可欠である。中でも、星形成から惑星系形成に至る過程においては、驚くほど多種多様な分子種が作られることが明らかにされてきており、物質進化の理解において重要な段階であるといえる。これらの段階で作られた様々な物質が「どのようにして惑星環境までもたらされるのか」という問題は、太陽系がも

つ豊かな環境を作った物質的起源との関連から、極めて根源的な問いである。

本稿ではとくに、低質量原始星の形成に伴う有機分子の進化について、近年の観測研究成果を報告する。2章では、降着するエンベロープガスから原始星円盤・原始惑星系円盤の形成領域にかけてみられる、個々の天体における空間的変化の様子と、その天体間での多様性について、観測例を挙げて述べる。2.1節の内容は、天文月報第110巻第5号(2017年5月号発行)に寄せた「アルマ望遠鏡特集(3): 化学組成で探る原始星円盤の形成過程」(著: 坂井南美, 大屋瑠子)の一部を約めたものである。2.2節以降に述べる研究の進展に基づいて、2.1節で述べる成果に新たな解釈が与えられたため、本稿でも再度報告する。3章では、観測された有機分子組成の変化と多様性の起

源について述べる。

星形成に伴う物質進化の理解を格段に進めるべく、大型化学サーベイ観測の実施が進められてきたほか、近年、機械学習の活用などにより無バイアスな解析手法の導入も活発になりつつある。そのような観測アプローチの例として、円盤形成領域における解析成果を4章で報告する。5章では、さらに空間解像度を上げて、円盤内部での有機分子組成に迫るパイロット的な研究成果について述べる。

2. 星形成領域の有機分子組成

2.1 有機分子組成の多様性：極端な例

低質量原始星天体においては、分子雲コアのスケール (10^4 au) でガスの化学的特徴に多様性があることが認識されてきた。例えば、大質量原始星の hot core でも見られるような、ギ酸メチル (HCOOCH_3) やジメチルエーテル ($(\text{CH}_3)_2\text{O}$) などといった複雑な飽和有機分子 (Complex Organic Molecules; COMs) に富む hot corino 化学を示す天体が有名である (e.g., [1-5])。一方で、COMs には乏しく、代わりに不飽和な炭素鎖分子 (CCH 分子など) とその関連分子 (c- C_3H_2 分子など) に富む warm carbon-chain chemistry (WCCC) 天体も報告されてきた (e.g., [6-8])。

ALMA (Atacama Large Millimeter/submilli-

meter Array) をはじめとした近年の高解像度観測によって、これらの化学的多様性が原始星円盤形成のスケール (10^2 au) まで持ち込まれていることが確認されている。低質量原始星天体 IRAS 16293-2422 は、Source A と Source B から成る連星系であるが、そのいずれもが代表的な hot corino 天体として有名である。とくに Source B では、波長 0.8 mm, 1.3 mm, 3.0 mm での化学サーベイ観測が ALMA によって実施されている (PILS; The ALMA Protostellar Interferometric Line Survey; e.g., [9, 10])。この天体では、ALMA の初期観測 (Science Verification) の結果でも、グリコールアルデヒド (HCOCH_2OH) 分子の存在が低質量原始星天体で初めて報告されるなど [11], hot corino 化学を特徴付ける COMs 輝線が原始星近傍 (半径 < 30 au) で豊富に検出されている。Source A では、半径 50 au のリング状の位置で、COMs 輝線が局所的に強く検出される様子が報告された ([12]; 図1左)。この位置は、回転・落下するエンベロープガスの近星点 (または「遠心力バリア」とも呼ばれる) にあたり、その内側には回転する円盤構造がすでに形成されている [13]。この位置で、回転円盤の縁や表面に落下ガスが衝突する accretion shock が起きることで、ガスと星間塵の温度が局所的に上昇していることが報告された [12, 14]。この現象にはまだ議論の

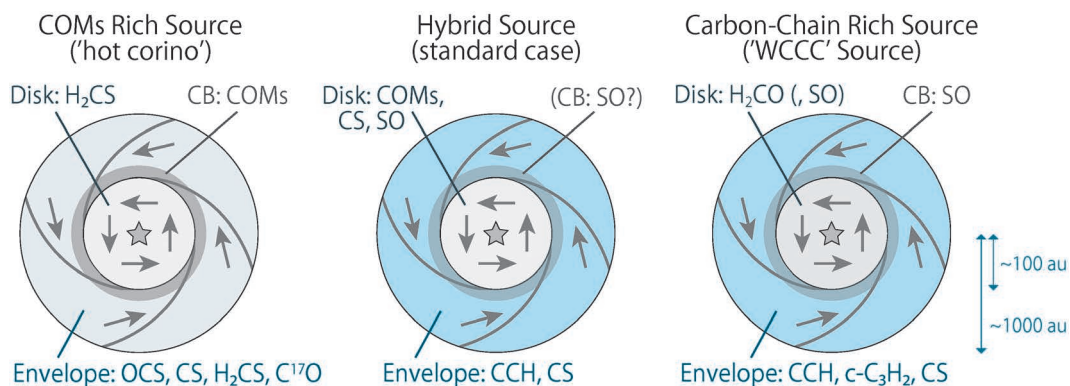


図1 低質量原始星天体の円盤形成領域における化学組成の変化、およびその多様性の模式図。図中のCB (centrifugal barrier; 遠心力バリア) は、回転・落下エンベロープガスの近星点の位置を指す。

余地があるが[15], 局所的な温度上昇によって星間塵からのCOMsの蒸発が促進されることが, IRAS 16293-2422 Source AおよびSource Bでの hot corino 化学の起源であることが指摘されている [12, 14, 16, 17].

IRAS 16293-2422とは大きく異なる化学組成を示すWCCC天体L1527では, この天体を特徴付ける不飽和炭素鎖関連分子が, 円盤形成領域でも検出された ([18-20]; 図1右). CCH分子や $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子の輝線は, 10^3 auスケールに広がる回転・落下エンベロープガスを捉えた. これらの分子輝線は, 原始星から半径100 auの近星点の位置で急激に弱くなり, その内側に形成される円盤構造ではほとんど検出されていない. この近星点の位置ではやはり落下ガスによる accretion shock が起こっており, SO分子輝線が局所的に検出されている [16, 18, 19]. これとよく似た様子が, より進化の進んだClass I天体TMC-1Aでも報告された [21].

ここまで述べたように, 若い低質量原始星天体では, 分子雲コアのスケール (10^4 au) で知られていたガスの化学的多様性が, 円盤形成領域 (10^2 au) まで確かに持ち込まれていることが明らかにされた. さらに, 回転・落下エンベロープガスからその内側の円盤構造にかけて, 物理構造の遷移と関連しながら, ガスの化学組成に急激な変化が起きていることが見出されている.

2.2 有機分子組成の多様性: 典型例

前節で述べた観測成果は, 若い低質量原始星天体で見られる化学的多様性のうち両極端な二例であることが, 近年明らかになった. 低質量原始星天体L483およびB335では, ALMA観測によって, COMsと不飽和炭素鎖関連分子の両方が検出され, かつ, それらの分子種間での分布の違いが報告された ([22-24]; 図1中). すなわち, COMs輝線は原始星近傍の熱い領域に集中して検出され, 不飽和炭素鎖分子の輝線はより外側の温かい領域まで広がって検出されている. たとえ

ばL483では, 10^3 auスケールに広がる不飽和炭素鎖分子の輝線がアウトフロー構造と回転・落下エンベロープガスを捉えることが, 速度構造の解析に基づいて報告された [23]. この天体では原始星を取り巻く回転支持円盤の有無の議論が続いており [25], その形成領域にあたる位置 ($<10^2$ auスケール) でCOMs輝線が検出されたことは [23], 円盤形成のごく初期における化学組成を規定するうえで興味深い結果である.

従来, hot corino 化学とWCCCの特徴は別々の天体で報告されてきており, 互いに排他的なものであるかのように考えられてきた. しかし, L483とB335でみられるように, hot corino 化学とWCCCが単一の天体で共存し, かつ空間的に分離して検出される「hybrid天体」の描像が, 円盤形成領域における有機分子組成の典型例であると考えられる [26]. 実際, 分子雲コアスケールのサーベイ観測では, COMsと不飽和炭素鎖関連分子のいずれもが検出される中間的な化学組成が, 多くの天体で報告されている [27].

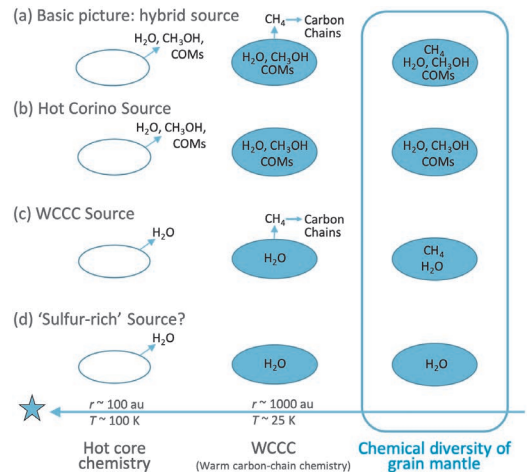


図2 エンベロープガスから円盤形成領域までにおける, 星間塵上とガス中での化学組成の空間的変化の概念図. (a) は hybrid 天体 (2.2 節), (b) と (c) は hot corino 天体と WCCC 天体 (2.1 節), (d) は有機分子に乏しい天体 (3.2 節) での観測結果と対応する.

3. 円盤形成領域における有機分子組成の統一描像

3.1 有機分子組成の空間変化の起源

2章で述べた有機分子組成の空間的な変化は、図2で示す描像で解釈することができる。分子雲コア中の星間塵が、原始星に向かって落下していくことを考える(図2a)。はじめは、星間塵上で様々な分子が作られ吸着している(図2a右)。星間塵が温かい領域($T > 25$ K)まで落下してくると、 CH_4 分子が蒸発し、気相反応によって不飽和炭素鎖関連分子を効率的に生成してWCCCを引き起こす(図2a中)。さらに星間塵が落下し、熱い領域($T > 100$ K)まで来たり accretion shock を起こしたりすることで、水分子とともに CH_3OH 分子やCOMsが蒸発してhot corino化学を示す(図2a左)。これが基本となる描像である。

この化学組成変化の描像は、化学モデルの結果とも矛盾しない。動的に進化する分子雲コアにおける化学進化のモデルでは、原始星から半径 $10^{1.2}$ auの範囲で飽和有機分子(CH_3OH 分子)が気相中にみられ、より外側の半径 $10^{3.4}$ auの範囲では CH_4 分子が気相中にみられる[28]。上でも述べたように、気相中の CH_4 分子によって不飽和炭素鎖関連分子が効率的に生成されることが指摘されている[8]。この分布の違いは、2つの分子種の蒸発温度の違いによるものである。この描像はhybrid天体で観測された様子(2.2節)と整合する。

3.2 天体間での多様性の起源

3.1節で述べた状況は、星間塵がもつ化学組成の初期条件によって変化することが考えられる。たとえば、星間塵上にもともと CH_4 分子が比較的少なかった場合は、熱い領域($T > 100$ K)で蒸発したCOMsが主に検出されることが期待される(図2b)。この様子は、hot corino天体での観測結果と対応する。反対に、星間塵上にもともとCOMsが比較的少なかった場合は、温かい領域($T > 25$ K)で CH_4 分子が蒸発し、不飽和炭素鎖関連分子の生

成が顕著になることが期待される(図2c)。この様子は、WCCC天体での観測結果と対応する。加えて、2章で述べた3種の多様性の他、複雑な有機分子と不飽和炭素鎖分子のいずれにも乏しい天体(Class I天体Elias 29; [29])も見出されており、もともと星間塵上にどちらの分子種も比較的少なかった場合であることが推測される(図2d)。

このことから、原始星天体の間でみられる化学的多様性は、星間塵での化学的多様性によることが考えられる。この化学的多様性の要因としては、星なしコア時代における「ガスの収縮のタイムスケール」と「分子の星間塵への吸着のタイムスケール」のバランスが提案されている[8, 27]。ガスの収縮が進み密度が上がることで、外部から照射する紫外線が遮断されると、気相中のC原子がCO分子に変換される反応が効率的に進み始める。さらにガスの収縮が進んでいく間に、C原子とCO分子は星間塵に吸着されていく。その後、星間塵の表面における反応によって、C原子はWCCCを引き起こす CH_4 分子を、CO分子はhot corino化学を特徴づける複雑な有機分子を、それぞれ生成すると考えられている。このため、紫外線が遮断された後、C原子とCO分子がどのような割合で星間塵に吸着されるのかが、化学的多様性を引き起こしうると推測される。

COMs輝線は、原始星からの放射によってガスと星間塵が温められる効果のほか、2.1節で述べた落下ガスによる accretion shock、またアウトフローに伴う shock によっても増幅され得ることが知られている(e.g., [30–32])。一方で、shockを伴う天体であっても、必ずしもhot corino化学はみられないということも認識されつつある(e.g., L1527, TMC-1A; [19, 21])。また、COMs輝線の検出可能性(hot corino化学の有無)と、円盤構造の有無との関連も着目されている。すなわち、原始星周りにすでに円盤構造が形成されている場合、原始星からの放射が遮蔽されることで、円盤/エンベロープ構造が効率的に温められ

なくなり、COMsの蒸発が抑制されることが予想される。しかし近年、系統的な観測研究によって、COMs輝線の検出と円盤構造の有無の間には、明らかな相関は見られないことが指摘された[33]。これらのことは、円盤形成領域での化学組成分布にみられる天体間での多様性は、物理条件だけで一概に決まるものではなく、星間塵上での化学組成の影響を併せて議論する必要があることを示唆し、前述の描像とも矛盾しない。

4. 円盤形成領域における化学組成分布の無バイアス解析

2.1節で述べたように、各天体の円盤形成領域における化学組成分布は、物理構造の遷移と密接に関連しながら、不連続に大きく変化する。このことから、観測された分子輝線の分布および速度構造の解析と比較は、円盤形成過程に伴う物質進

化と物理進化の両面の探究において重要な手がかりになると期待される。近年のALMAを代表とする電波干渉計観測では、多数の分子輝線の速度構造を同時に捉えることが可能である。たとえば、hot corino 天体 IRAS 16293-2422 Source A (2.1節) では、原始星近傍で多数の有機分子の輝線が検出され、その一つ一つが円盤/エンベロープ構造での回転または回転・落下運動を捉える(図3)。このように膨大な分子輝線データを個別に解析、比較し、その共通点と差異を議論し尽くすことは、困難になりつつある。

この問題に取りかかるアプローチとしては、輝線データ同士の相関を取り出す方法(e.g., 整合フィルター; [35])やデータと物理モデルの相関による解析(e.g., [12, 14])に加えて、機械学習および深層学習を活用したより無バイアスな解析方法の開発が考えられる。4.1節ではこのような取り組み

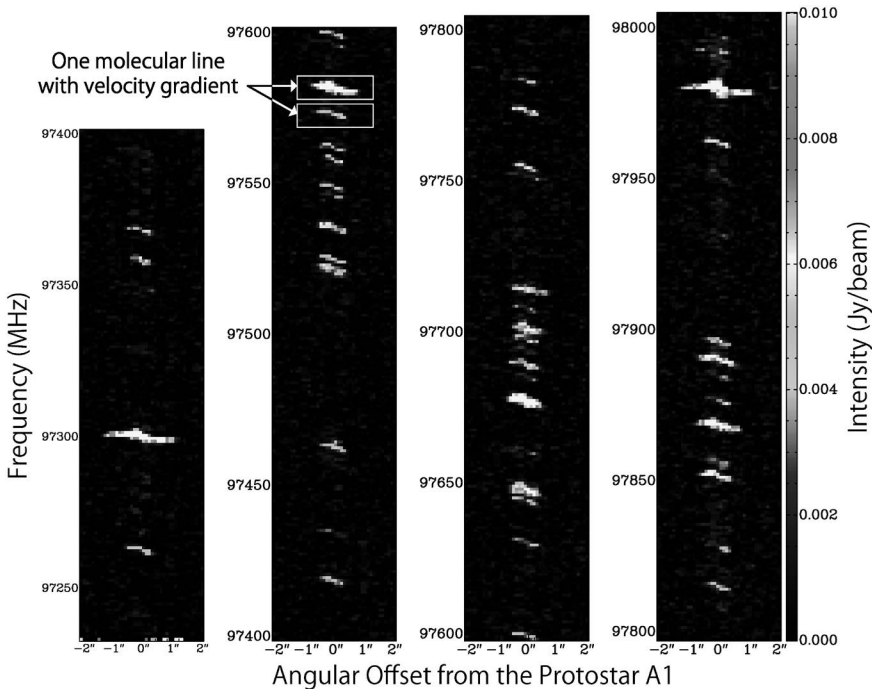


図3 複数の分子輝線に対する位置-速度図の例。IRAS 16293-2422 Source Aに対するALMAによる観測データを用いた[34]。縦軸は観測された周波数を示す。横軸は、原始星A1の位置を中心とし、円盤/エンベロープ構造の伸びる方向に沿う。ガスの回転運動を表す速度勾配が、各分子輝線ごとに捉えられている。

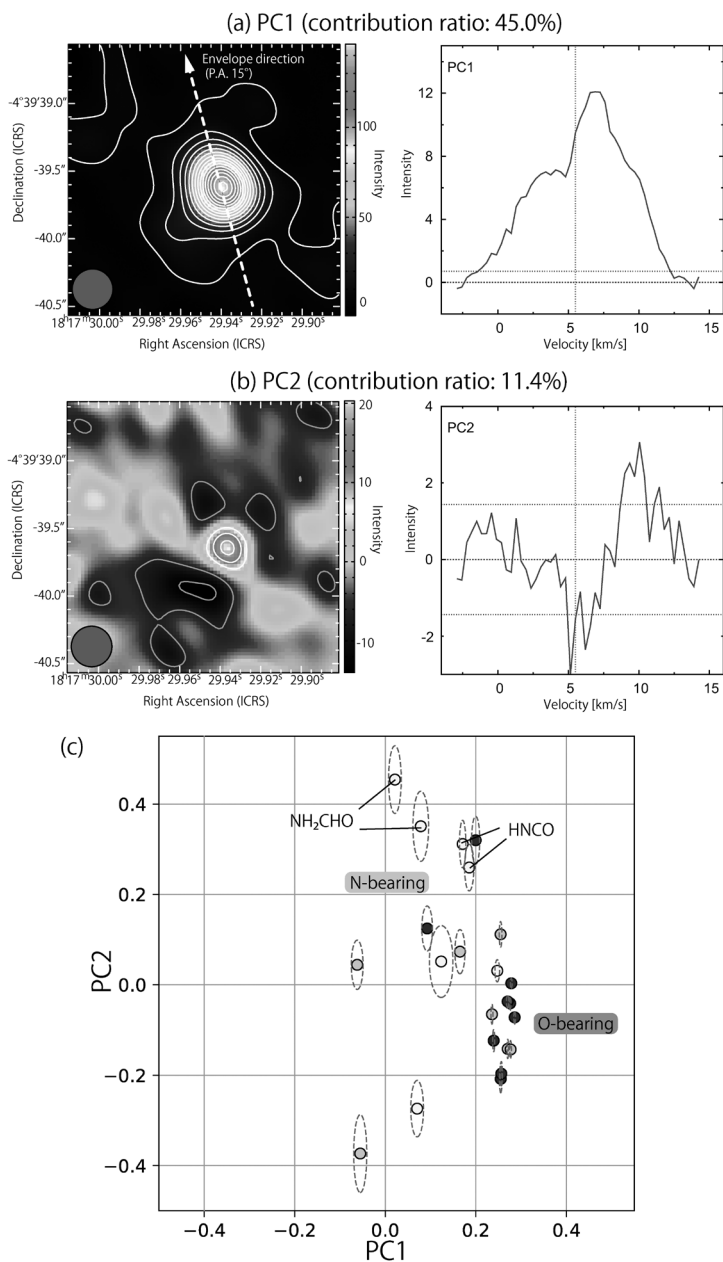


図4 Hybrid天体L483での、PCAを適用した解析結果[40]。ALMAで観測された23本の分子輝線の三次元データを用いた。(a, b) 第一主成分 (PC1; Principal Component 1) と第二主成分 (PC2) の、積分強度図と原始星位置でのスペクトル。(c) 各分子輝線データへの、PC1とPC2の寄与を示すプロット。PC1は原始星を取り巻く円盤/エンベロープの全体構造を捉えるのに対し、PC2は原始星近傍に集中した高速度シフト成分を持つ。窒素原子を含む分子 (HNCO, NH₂CHO など) に対してはPC2が正の寄与を持ち、原始星位置に集中して高速で回転するコンパクトな成分を捉える傾向がみられる (© AAS. Reproduced with permission)。

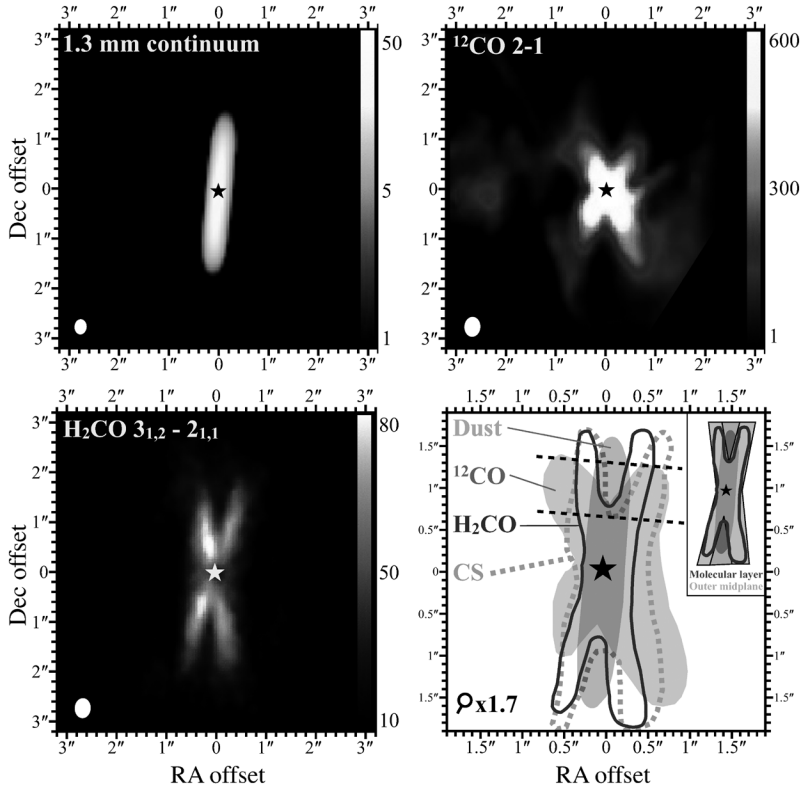


図5 Class I天体IRAS 04302+2247でのALMAによる観測結果 ([45]より抜粋)。ほとんどedge-onの円盤構造における分子輝線分布を示す。(左上)円盤の赤道面を捉える波長1.3 mmの連続波マップ。(右上, 左下) ^{12}CO 分子と H_2CO 分子の積分強度図。(右下)連続波および分子輝線分布の模式図。分子輝線は赤道面を挟み込むように分布していることがわかる (Credit: Podio, L., et al., A&A, 642, L7, 2020, reproduced with permission © ESO).

のうち、教師なし機械学習の手法の一つである主成分分析を導入したALMA観測データの解析例を取り上げる。このほか我々は、物理モデル [13] を教師データとした教師あり学習 (Support Vector Machine, 3-Dimensional Convolutional Neural Network) を導入した手法を開発しつつある。

4.1 主成分分析を用いた化学組成分布および速度構造の解析

機械学習の手法の一つである主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA) は、多次元データの相違性を抜き出すのに有効な手法である [36]。この手法を複数の分子輝線データに適用することで、それらの特徴を捉える解析アプローチが、これまで銀河や星なしコアの観測研究で適用されてきた (e.g., [37, 38])。低質量原始星天体の

円盤形成領域においても、この手法が有効であることを報告した [39, 40]。

4.1.1 二種類の解析エリアにおける分子分布の解析

低質量原始星天体IRAS 15398-3359は、北東-南西方向に2000 auスケールで伸びるアウトフロー構造をもつ。また、原始星の近傍200 auスケールのコンパクトな領域には、北西-南東方向に伸びる円盤/エンベロープ構造がある [13, 41]。これら2つの構造において、分子輝線の積分強度図にPCAを適用した解析を行った [39]。

H_2CO 輝線の観測から、このアウトフロー構造は衝撃波領域を伴うことが報告されていたが [13]、2000 auスケールでのPCAによる分子輝線解析の結果、アウトフローの全体的な構造に加え

て衝撃波領域が確かに見出された [39].

一方、200 au スケールでの分子分布に対して PCA による解析を適用すると、分布の広がりによって、分子輝線が2つのグループに大別された。たとえば、SO 分子や CH₃OH 分子は半径 50 au スケールのコンパクトな分布を示し、原始星に付随する円盤構造を捉えていることが考えられる。これに対し、CCH 分子や c-C₃H₂ 分子はより広がった分布を示し、半径 100 au スケールにわたってエンベロープ構造を捉えていると解釈できる。また、H₂CO 分子の複数の輝線に PCA による解析を適用した結果、励起温度による分布の違いが見出された。すなわち、励起温度の低い輝線は広がった分布を示す分子輝線のグループに分類でき、励起温度の高い輝線はコンパクトな分布を示すグループに分類できる。このことは、原始星に近づくにつれてガスの温度が上昇している様子が、PCA による解析で抽出されたものと解釈できる。

4.1.2 Hybrid 天体における速度構造の解析

ALMA などの電波干渉計による分子輝線データは、分布に加えて速度方向の情報をもつ三次元の観測データである。三次元キューブデータに対して PCA による解析を適用することで、ガスの速度構造と化学組成の関連を調べることができる。Hybrid 化学を示す低質量原始星天体 L483 (2.2 節) で、速度方向の情報も含めた PCA による解析を実施した。また我々は、hybrid 化学を示す低質量原始星天体 B335 についても、同様の手法による解析を進めつつある。

L483 で観測された分子輝線の三次元データに PCA を適用した結果、円盤/エンベロープ構造の回転・落下運動の全体像を捉える PC1 (Principal Component 1) の成分と、より原始星近傍で高速の回転を示す PC2 の成分が分離された。PC2 は、原始星に近づくほどガスがスピニングアップする様子を捉えているものと解釈できる。この解析により、酸素を含む有機分子と、窒素を含む有機分子が異なる特徴をもつことが見出された (図 4;

[40])。窒素を含む有機分子は、原始星近傍に集中したよりコンパクトな分布をもち、より高速の成分を捉える傾向が示された。たとえば、HNCO 分子と NH₂CHO 分子はいずれも窒素を含む分子であり、太陽系内の彗星でも検出されていることから (67P/Churyumov-Gerasimenko; [42])、惑星系化学の視点からも注目される。L483 での PCA による解析の結果、これらの分子種の輝線はよく似た速度構造を捉えていることがわかった。酸素を含み窒素を含まない有機分子のうち、例外的に、t-HCOOH 分子は窒素を含む有機分子とよく似た特徴を示した。このことは、この分子の生成過程を探る緒としても興味深い。

酸素を含む有機分子と窒素を含む有機分子の間での分布の違いは、より進化の進んだ大質量星天体での観測研究でも報告されており (e.g., [43, 44])、物理条件や化学過程との関連を含めて、その起源の解明が待たれる。速度分解能と感度の高い観測研究においては、速度構造の情報も含めた分子間の比較が、円盤形成領域における物質進化を探究する強力なアプローチになることが期待される。

5. 惑星系形成スケールに踏み込む観測的アプローチ

近年、高い感度と空間解像度での観測によって、円盤内構造における化学組成分布の観測研究が可能になりつつある。たとえば、4.1.2 節で述べた窒素を含む有機分子が示すようなコンパクトな分布は、将来の惑星系形成と関連することも考えられる。このような動径方向での分布に加えて、円盤の厚み方向に沿った層構造も見出されつつある [45].

Class I 天体 IRAS 04302+2247 では、ほとんど edge-on の円盤構造での分子輝線分布が、ALMA による観測で捉えられた (図 5)。円盤の厚み方向での分布が 50 au を切るビームサイズで解像された。波長 1.3 mm の連続波は、直線上に伸びる円盤の赤道面を捉える。これに対し、CO 分子、CS 分子、H₂CO 分子の輝線は、連続波分布を挟んで

X字状に伸びる分布を示し、赤道面よりもむしろ円盤表面を捉えていることが報告された。この分布の層構造の起源としては、円盤表面と赤道面での物理条件の違いが挙げられる。円盤表面は原始星からの輻射を受けやすいため、ガスと星間塵の温度が上昇して分子の蒸発が促される。加えて、光解離による化学反応が進むことで、一部の分子種は効率的に生成または破壊される可能性も指摘されている。一方、円盤の赤道面は、ガスと星間塵の密度が高く、また温度も比較的低下するため、気相中の分子が星間塵に吸着されやすくなる。このような円盤内部での化学組成分布は、そこで起こる物質進化の過程に影響することが考えられ、活発な議論が行われている (e.g., [46–48])。

このように惑星系形成のスケールに迫る研究では、近年、電波領域での観測では光学的厚みの問題が認識されつつある。たとえば、低質量原始星連星 NGC 1333 IRAS 4A は、複雑な有機分子に富む hot corino 天体である。天球面上で 400 au ほど離れた 2 つの原始星 IRAS 4A1 と IRAS 4A2 が、ALMA 観測によって十分解像され、その化学組成が報告された [49]。波長 1.2 mm での分子輝線観測の結果、hot corino 化学を特徴づける複雑な有機分子 (e.g., CH_3CHO , HCOOCH_3) が、原始星 IRAS 4A2 の位置では強く検出されるのに対し、原始星 IRAS 4A1 では非常に弱いことがわかった。この違いは、当初、2 つの原始星の間での化学組成の違いとして解釈された。しかしその後、VLA (Very Large Array) による波長 1.3 cm (K-band) での分子輝線の観測で、原始星 IRAS 4A1 にも複雑な有機分子が確かに付随していることが確認された [50]。このことから、ミリ波での観測では、光学的に厚い星間塵によって、分子輝線が遮蔽されていると解釈できる。

6. さいごに

ALMA の初期科学運用が始まった 2011 年から 10 年が経った。単一天体、単一分子輝線でのパイロット的な観測研究だけでなく、大型プロジェ

クトによる膨大なデータに基づいた成果が報告され始めている。飛躍的に向上した感度と解像度での電波干渉計観測を通して、我々は、星形成に伴う物質組成と物理構造の進化についての理解を格段に進めてきた。3 章で述べたように、若い低質量原始星天体の円盤形成における有機分子組成には、一定の理解が得られたといえる。エンベロープガスから円盤への不連続な遷移に加えて、4 章と 5 章で述べたような従来想像されていた以上に複雑な円盤内構造まで、直接的に捉えられ始めている。そこでの物質進化の一般性と多様性を明らかにするには、物理構造進化との関連を解きほぐし、これらの理解を両輪で進めていくことが重要になると考える。また、近年の高い解像度をもつ干渉計観測において、より原始星近傍の惑星系形成スケールに踏み込むには、原始星近傍での光学的厚みの効果の考慮が不可欠になりつつあり (5 章)、より光学的に薄いセンチ波領域での観測の重要性も益々増していこう。2030 年代には ngVLA (next generation Very Large Array) の稼働も計画されており、現在までの理解を大きく変えるような新たな発見に期待したい。今、はやぶさ 2 をはじめとしたサンプルリターンミッションなどにより、太陽系内の物質探査における格段の進展が見込まれている。このような時代において、円盤形成での化学組成の理解は、星間物質から惑星系形成までの物質進化をつなぐ要の一つとして、今後の展開が益々楽しみな分野である。

謝辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文および筆者の博士論文に基づいています。共著者および共同研究者の皆様へ深く感謝いたします。本研究は、ALMA による観測データに基づいています。ALMA は ESO, NSF (USA), NINS (Japan) による協同プロジェクトであり、NRC (Canada), NSC, ASIAA (Taiwan) ならびにチリ共和国の協力によるものです。Joint ALMA Observatory は ESO, AUI/

NRAO, NAOJにより運営されています。本研究を進めるにあたり、ご尽力いただいたALMAの関係者の方々に感謝の意を表します。本研究は科学研究費基金(21224002, 25400223, 25108005, 18H05222, 19H05069, 19K14753, 21K13954)および日仏交流促進事業(SAKURAプログラム)より支援を受けています。また、筆者らはフロンサイエンス・リーディング大学院(Advanced Leading Graduate Course for Photon Science; ALPS)および日本学術振興会特別研究員制度(15J01610, 20J13783)の支援を受けています。さいごに、本稿執筆の機会を与えてくださった天文月報編集委員の福井暁彦氏にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] van Dishoeck, E. F., et al., 1995, *ApJ*, 447, 760
- [2] Schöier, F. L., et al., 2002, *A&A*, 390, 1001
- [3] Cazaux, S., et al., 2003, *ApJ*, 593, L51
- [4] Ceccarelli, C., 2004, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 323, 195
- [5] Maury, A. J., et al., 2014, *A&A*, 563, L2
- [6] Sakai, N., et al., 2008, *ApJ*, 672, 371
- [7] Hirota, T., et al., 2009, *ApJ*, 699, 585
- [8] Sakai, N., & Yamamoto, S., 2013, *Chem. Rev.*, 113, 8981
- [9] Jørgensen, J. K., et al., 2016, *A&A*, 595, A117
- [10] Coutens, A., et al., 2016, *A&A*, 590, L6
- [11] Jørgensen, J. K., et al., 2012, *ApJ*, 757, L4
- [12] Oya, Y., et al., 2016, *ApJ*, 824, 88
- [13] Oya, Y., et al., 2014, *ApJ*, 795, 152
- [14] Oya, Y., & Yamamoto, S., 2020, *ApJ*, 904, 185
- [15] van't Hoff, M. L. R., et al., 2020, *ApJ*, 901, 166
- [16] Miura, H., et al., 2017, *ApJ*, 839, 47
- [17] Oya, Y., et al., 2018, *ApJ*, 854, 96
- [18] Sakai, N., et al., 2014a, *Nature*, 507, 78
- [19] Sakai, N., et al., 2014b, *ApJ*, 791, L38
- [20] Oya, Y., et al., 2015, *ApJ*, 812, 59
- [21] Sakai, N., et al., 2016, *ApJ*, 820, L34
- [22] Imai, M., et al., 2016, *ApJ*, 830, L37
- [23] Oya, Y., et al., 2017, *ApJ*, 837, 174
- [24] Jaber, A. A., et al., 2014, *ApJ*, 791, 29
- [25] Jacobsen, S. K., et al., 2019, *A&A*, 629, A29
- [26] Oya, Y., 2020, *Origins: From the Protosun to the First Steps of Life*, 345, 111
- [27] Higuchi, A. E., et al., 2018, *ApJS*, 236, 52
- [28] Aikawa, Y., et al., 2008, *ApJ*, 674, 984
- [29] Oya, Y., et al., 2019, *ApJ*, 881, 112
- [30] Arce, H. G., et al., 2008, *ApJ*, 681, L21
- [31] Codella, C., et al., 2015, *MNRAS*, 449, L11
- [32] Okoda, Y., et al., 2021a, *ApJ*, 910, 11
- [33] Belloche, A., et al., 2020, *A&A*, 635, A198
- [34] Oya, Y., et al., 2021, *ApJ*, 921, 12
- [35] Loomis, R. A., et al., 2018, *AJ*, 155, 182
- [36] Jolliffe, I. T., 1986, *Principal component analysis*, Springer Series in Statistics, Berlin: Springer.
- [37] Ting, Y.-S., et al., 2012, *MNRAS*, 421, 1231
- [38] Gratier, P., et al., 2017, *A&A*, 599, A100
- [39] Okoda, Y., et al., 2020, *ApJ*, 900, 40
- [40] Okoda, Y., et al., 2021b, *ApJ*, 923, 168
- [41] Okoda, Y., et al., 2018, *ApJ*, 864, L25
- [42] Goesmann, F., et al., 2015, *Science*, 349, 2.689
- [43] Crockett, N. R., et al., 2015, *ApJ*, 806, 239
- [44] Csengeri, T., et al., 2019, *A&A*, 632, A57
- [45] Podio, L., et al., 2020, *A&A*, 642, L7
- [46] Aikawa, Y., et al., 2002, *A&A*, 386, 622
- [47] Dullemond, C. P., et al., 2007, 555
- [48] Dutrey, A., et al., 2014, 317
- [49] López-Sepulcre, A., et al., 2017, *A&A*, 606, A121
- [50] De Simone, M., et al., 2020, *ApJ*, 896, L3

Diversity of Organic Chemistry and Its Unified Picture in Disks of Young Low-Mass Protostellar Sources Studied with ALMA

Yoko OYA and Yuki OKODA

The University of Tokyo, Division of Physics, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: A chemical diversity in young low-mass protostellar cores have extensively been studied. Recent high angular-resolution observations have revealed that the chemical diversity in protostellar cores are indeed delivered into disk-forming regions and that the chemical composition of the gas drastically changes from envelopes to disks. It is suggested that the chemical differentiation and its diversity can be explained simultaneously by differences in the chemical composition of grain mantles and the desorption temperatures of molecules. Moreover, we are now stepping into the 10-au scale view of disk structures. Molecular distributions are spatially resolved along the radial and vertical directions in disks, and are discussed in relation to the chemical evolution to planets. To further their understandings and make even new findings, one powerful approach would be an unbiased analysis of plenty of observational data with machine/deep learnings. Exploring the factors for the generality and diversity of material evolution during the disk formation process is essential to defining the initial condition for the chemical evolution during the planet formation, and furthermore, bridging from the interstellar medium to the material origin of planetary systems.