



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	円盤形成領域の有機分子
Author(s)	大屋, 瑤子
Citation	低温科学, 78, 229-239
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.229
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77787
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p229-239.LT78.pdf



円盤形成領域の有機分子

大屋 瑤子^{1)*}

2019 年 10 月 30 日受付, 2019 年 10 月 31 日受理

近年, 電波望遠鏡の感度と解像度の向上により, 原始星円盤形成領域の化学組成の分布や, 天体間での多様性が明らかにされつつある. 若い低質量原始星天体で知られていた化学的多様性が円盤形成領域まで持ち込まれていることが示され, また単一天体内でも, エンベロープガスから円盤にかけて, ガスの化学組成が急激に変化する様子が見られた. その中で, エンベロープガスでは炭素鎖分子に富む warm carbon-chain chemistry の特徴を示し, 円盤形成スケールでは飽和有機分子に富む hot corino の特徴を示す天体 (hybrid 天体) が, 化学進化の標準的なケースであることがわかってきた. これらの化学的描像は, 星形成に伴う化学進化を理解する端緒になると期待される.

Organic molecules in disk-forming regions

Yoko Oya¹

Thanks to recent improvements in radio telescopes, chemical structures in disk-forming regions have since been revealed. It is known that young low-mass protostellar sources show chemical diversity on the protostellar core scale. The two representative cases are hot corino sources rich in saturated COMs and warm carbon-chain chemistry (WCCC) sources rich in unsaturated carbon-chain molecules. Such chemical diversity on the protostellar core scale has recently been found to be delivered to disk-forming regions. Moreover, the chemical composition of the gas drastically changes from an infalling envelope to a rotating disk in each source. The hot corino sources and the WCCC sources seem to be the distinct cases, and the hybrid case is likely the standard one for chemical evolution in disk-forming regions; the infalling envelope gas is rich in unsaturated carbon-chain molecules (WCCC-like), whereas the rotating disk is rich in saturated COMs (hot corino-like). Both the chemical diversity and the chemical structure are interpreted in terms of the chemical evolution of grain mantle species. Methane formed by the hydrogenation of atomic carbon on dust grain evaporates in warm regions near protostars and effectively forms carbon-chain molecules. On the other hand, COMs formed from CO on dust grains evaporate in hot regions nearer to protostars. Their relative abundance is thus a key factor for chemical diversity, which is suggested to be a result of environmental effects in the prestellar core phase. These new illustrations of chemical structures will be an important clue to understanding chemical evolution during disk formation.

キーワード: 星形成, 原始星円盤, 低質量原始星, 有機分子, 化学進化

Star formation, Disk formation, Low-mass protostars, Organic molecules, Chemical evolution

*連絡先

大屋 瑤子

東京大学大学院理学系研究科物理学教室

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

e-mail: oya@taurus.phys.s.u-tokyo.ac.jp

1) 東京大学大学院理学系研究科物理学教室

Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo,

Japan

1. はじめに

我々の住む太陽系のもつ豊かな物質的環境はどのようにして作られたのだろうか? また, それは宇宙の中でありふれたものののだろうか? これらは, 宇宙における地球と太陽系の存在価値を問う基本的な問題である. これに答えるために, 大きく分けて二つのアプローチが行われてきた. 一つは, 地球を含む太陽系内の惑星や隕

石を調べる考古学的方法である。もう一つは、太陽とよく似た、より若い天体（太陽型／低質量原始星天体）を観測することで、太陽系の過去の姿を類推する方法である。近年、両者の研究が大きく進む中で、その接点が見えつつある。

低質量（太陽型）原始星天体は、星間ガスが自己重力により収縮することで形成される（図1）。まず始めに、分子雲コアが収縮し、核となる原始星を作る。原始星の重力によって落下するガスは、原始星の周りを回転しながら、円盤状の構造を作る（原始星円盤）。その後原始星の進化が進むと、円盤構造の中で惑星系が作られる。しかし、この分子雲コアから惑星系形成に至る過程の中で、いつ・どのようにして原始星円盤が形成されるのかについては、未だ観測的にも理論的にも未開拓の領域として残されている。原始星円盤は、将来の惑星系形成の場である原始惑星系円盤の母体である。そのため、原始星円盤の形成過程とそれに伴う物質進化の理解は、我々の住む太陽系の起源を探る上で不可欠である。それらの研究が立ち遅れてきた要因としては、円盤の形成領域が小さく、また分子雲コアの奥深くに埋もれているため、観測が長らく困難であったことが挙げられる。

近年、ALMA（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array；大型電波干渉計アルマ）の登場により、円盤形成領域の理解が急速に進みつつある。従来の10倍に上る感度と空間解像度を用いた観測研究が可能になったことで、原始星の周りで円盤構造が形成されつつある現場が直接捉えられるようになってきたからである。なかでも、円盤を構成するガスの化学組成の観測研究によって、星間ガスから惑星系への物質進化の理解が進みつつある。とりわけ、有機分子の起源とその進化は、惑星系のもつ物質的環境の理解に繋がる興味深いテーマの

一である。本章では、星形成に伴う物質進化の研究、とくに有機分子の観測研究について述べる。

2. 背景：分子雲コアにおける有機分子の観測研究

低質量原始星天体の形成領域がもつ物質的環境は、単一の大口徑電波望遠鏡を用いた観測研究によって明らかにされてきた。電波を使った観測研究では、天体が持つガスから放出される分子スペクトル線を検出することで、原始星を取り巻くガスの化学組成を調べることができる。電波望遠鏡の性能の向上に伴い、星間空間では、現在までに200種にも上る分子の検出が報告されている（理科年表；2018年7月現在）。低質量原始星天体においても、多くの分子種が検出されており、2000年代からは低質量原始星天体間で化学組成に多様性があることが認識されるようになってきた。

Lefloch et al. (2018) は、IRAM 30 m (Institut de Radioastronomie Millimétrique) 望遠鏡を用いて、9天体（うち、低質量原始星天体は4つ）に対する化学サーベイを実施した（ASAI；Astrochemical Surveys At IRAM）。図2は、そのうち2つの低質量原始星天体（NGC 1333 IRAS 4A および L1527）におけるスペクトル線の観測結果を示す。この結果から、この二つの天体がもつガスの化学組成が大きく異なっていることがわかる。すなわち、NGC 1333 IRAS 4A では CH_3OH などの飽和有機分子の輝線が豊富に見られるのに対し、L1527 で観測されたスペクトル線には $\text{c-C}_3\text{H}_2$ を始めとした不飽和な炭素鎖関連分子の輝線が見られる。この2つの天体は、いずれも形成初期（Class 0-I）の段階にある低質量原始星天体であるが、化学的な観点では大きく異なる性質を持つ

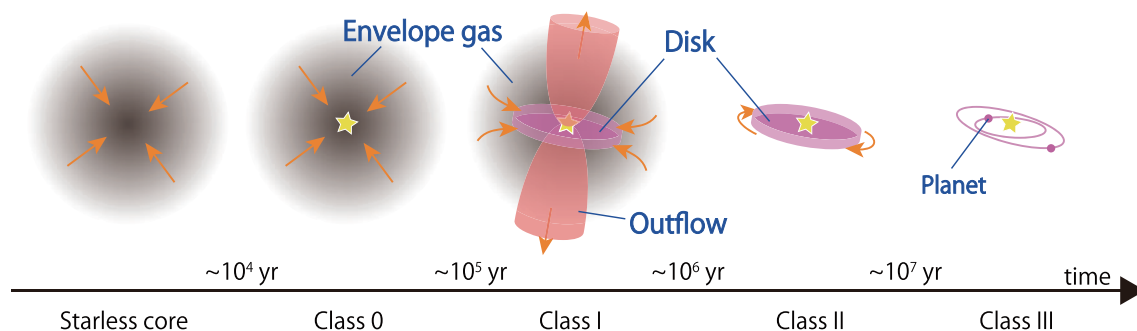


図1：低質量（太陽型）原始星天体の形成過程の概略図。分子雲コア（Starless core）は重力によって収縮し、核となる原始星を作る（Class 0 天体）。原始星の重力によって周囲のガスが落下するにつれ、原始星の周りに円盤状のガスの構造（原始星円盤）が作られる（Class 0-I 天体）。また、円盤とほとんど垂直な方向に、アウトフローが吹き出す。その後、原始星の進化が進むと、ガス円盤（原始惑星系円盤）の中で惑星系が作られると考えられている（Class II-III 天体 / T-タウリ型星）。本章では、原始星円盤の形成初期にあたる Class 0 から Class I の進化段階にある天体の観測研究について述べる。

と言える。これらの化学的特徴はそれぞれ、hot corino chemistry および warm carbon-chain chemistry (WCCC) と呼ばれる (e.g., Ceccarelli, 2004; Bottinelli et al., 2004a; Sakai et al., 2008; Sakai and Yamamoto, 2013)。一方で、これらの化学的特徴は極端な例であることが指摘されており、他の多くの天体はこれら二種類の化学的特徴の中間を示すことが報告されている (Hybrid 天体; Higuchi et al. 2018)。こうした天体では、飽和有機分子と不飽和炭素鎖関連分子の両方の分子輝線が検出されている。

図2に示した分子スペクトル線の様子は、分子雲コアスケール (数1,000 au) における天体の化学組成を捉えたものである。このスケールで見られる化学的多様性が、原始星形成過程に伴ってどのように進化し、また円盤スケール (~ 100 au) の構造にどの程度持ち込まれるのかという問題は、惑星系における物質進化の初期条件を決める重要な因子である。

3. 原始星円盤で観測された有機分子

近年、ALMA を用いた高感度・高空間解像度観測によって、原始星円盤のガスの化学組成が研究され始めている。これにより、前述の分子雲コアスケールでの化学的多様性が、確かに円盤形成領域まで持ち込まれていることがわかってきた。また、この領域でガスの化学組成

に急激な変化が起きていることが明らかになってきた。以下では、若い低質量原始星天体の原始星円盤形成領域における化学組成の多様性を4種に大別し、その化学的描像について述べる。

3.1. Hybrid 天体

2章で述べたように、低質量原始星天体の多くは、hot corino chemistry と warm carbon-chain chemistry (WCCC) の中間の化学的特徴をもつことが報告されている (Higuchi et al., 2018)。そのような化学的特徴をもつ天体の例として、低質量原始星天体 B335 および L483 が挙げられる。

B335 は、太陽系に比較的近い位置 (距離 100 pc; Olofsson and Olofsson, 2009) に存在する孤立した Class 0 低質量原始星形成領域である。近年、原始星近傍の 10 au から 1,000 au スケールにおけるガスの化学組成の観測結果が報告された (Imai et al., 2014, 2016)。図3は、ALMA を用いて観測された B335 におけるスペクトルの様子である。原始星を取り巻くエンベロープガス (~ 500 au スケール) には、不飽和な炭素鎖関連分子 (CCH) の輝線が見られるのに対し、飽和有機分子の輝線 (例えば HCOOCH_3 や $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) はほとんど検出されなかった。一方で、原始星のより近傍 (~ 10 au スケール) のガスでは、不飽和な炭素鎖関連分子の輝線は弱く、複雑な飽和有機分子の輝線が豊富に検出された。すなわ

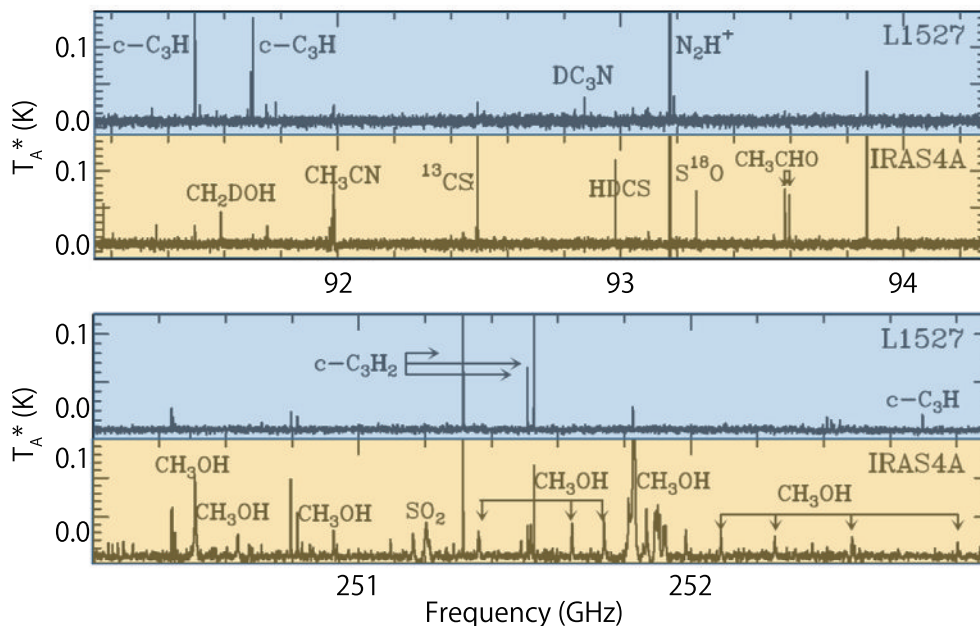


図2: 単一口径電波望遠鏡 (IRAM 30 m 望遠鏡) を用いて観測された、低質量原始星天体のスペクトルの例 (Lefloch et al., 2018)。低質量原始星天体 L1527 は不飽和炭素鎖分子に富む warm carbon-chain chemistry 天体であり、IRAS 4A は複雑な飽和有機分子に富む hot corino 天体であることが知られている。

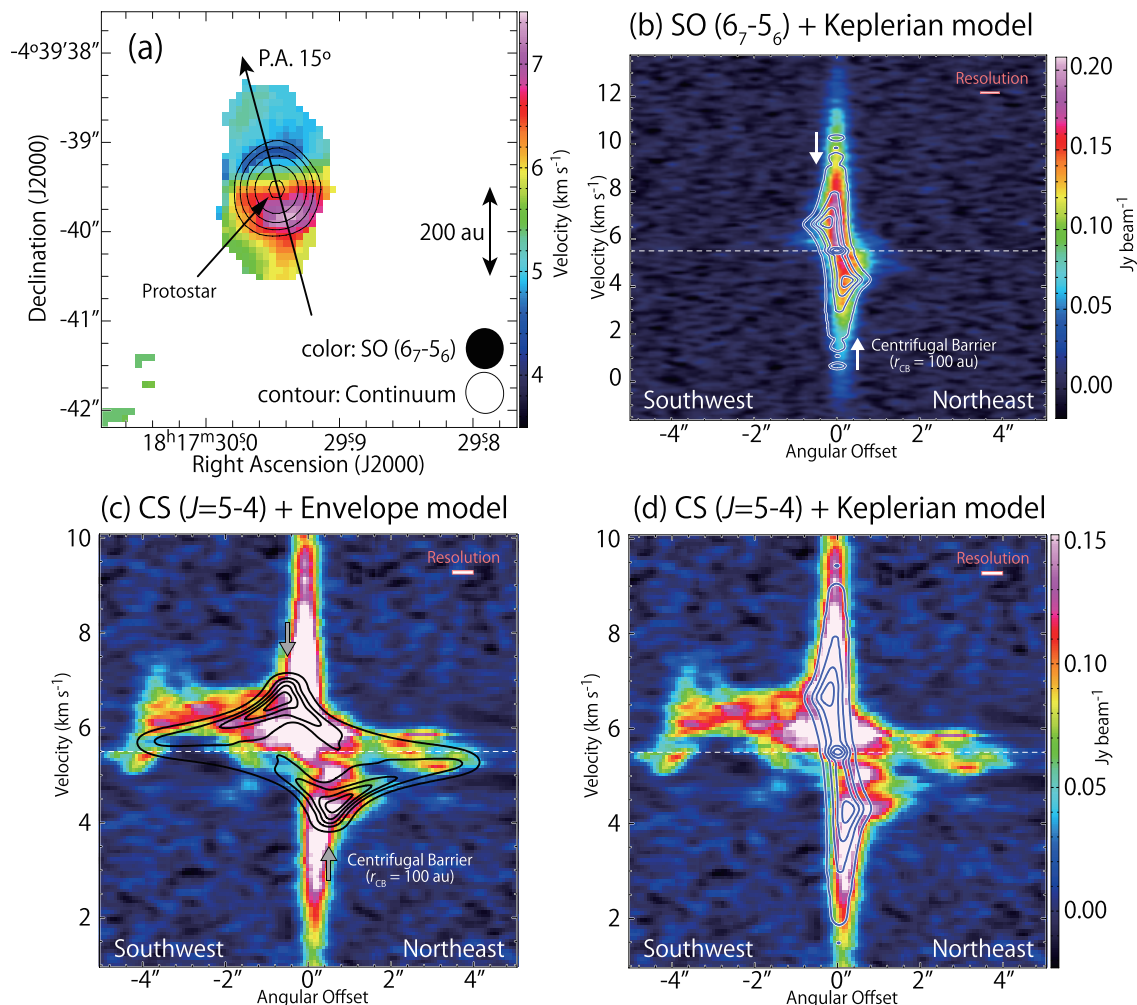


図4：ALMAを用いた、低質量原始星天体 L483 ($d=200$ pc; Rice et al., 2006) における原始星近傍のガス速度構造の観測結果 (Oya et al., 2017)。

(a) SO 分子輝線の速度場 (カラー) と連続波の分布 (等高線; 波長 1.2 mm) の図。原始星の位置に対して、北側のガスは青方偏移、南側のガスは赤方偏移していることがわかる。この速度勾配は、原始星周りのガスの回転構造を表す。

(b) SO 分子輝線の位置-速度図 (カラー)。横軸は図 4 (a) 中の矢印に沿った位置を表す。青等高線は、ケプラー回転するガス円盤のモデルの速度構造を表す。円盤モデルの大きさは半径 100 au に設定した。観測された SO 分子輝線の速度構造の特徴は、モデルによってよく表されている。

(c) (d) CS 分子輝線の位置-速度図 (カラー)。(c) 黒等高線は、回転しながら落下するエンベロープガスのモデルの速度構造を表す。(d) 青等高線は、エンベロープガスの内側でケプラー回転するガス円盤のモデルの速度構造を表す (図 4 (b) に同じ)。

図 4 (b), (c), (d) から、SO 分子輝線は回転するガス円盤を捉えるのに対し、一方 CS 分子輝線は回転円盤とその周りを取り巻くエンベロープガスの両方を捉えていることがわかる。また、hot corino chemistry と関連する HNC 分子輝線は、SO 分子輝線と同様に円盤を捉え、WCCC を特徴づける CCH 分子輝線はエンベロープガスのみを捉えた (図 5 中)。

下するエンベロープガス (>100 au) からその内側の円盤形成領域 (~ 50 au) にかけて、ガスの化学組成が大きく変化することが示された。すなわち、エンベロープガスでは H_2CS 分子と OCS 分子の輝線が検出されたのに対し、原始星円盤では H_2CS 分子輝線は見られたが OCS 分子輝線は検出されなかった (図 5)。また、この天体の hot corino chemistry を特徴付ける COMs の輝線は、エンベロープと円盤の境界 (半径 ~ 50 au) に集中して見られることがわかった。このことは、COMs が物理構造の

遷移領域で星間塵から蒸発してきている可能性を示す。なお、同様の現象は Source B でも確認されている (Oya et al., 2018)。

3.3. Warm Carbon-Chain Chemistry 天体

低質量原始星コア L1527 は、原始星を取り巻く 10,000 au スケールのガスが不飽和な炭素鎖関連分子 (C_4H , $\text{c-C}_3\text{H}_2$ など) に富む warm carbon-chain chemistry (WCCC) の化学的特徴を示す (Sakai et al., 2008)。

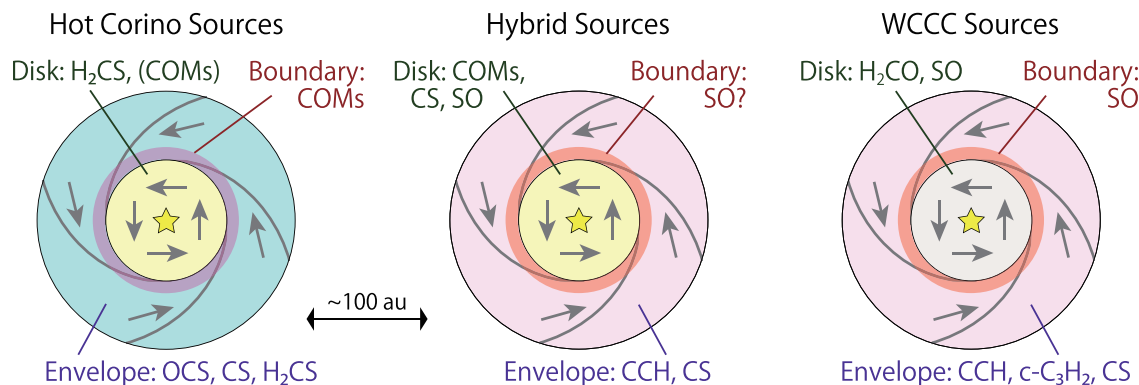


図5：低質量原始星天体の円盤形成領域におけるガスの化学組成の概念図。天体間で化学的多様性が見られる。また、同一天体内でも、回転・落下するエンベロープガス (Envelope) とその内側の原始星円盤 (Disk)、およびそれらの境界領域 (Boundary) でガスの化学組成が劇的に変化することが報告されている (Oya, 2017)。(COMs: complex organic molecules, 複雑な有機分子)

この天体は、Class 0-I 原始星 IRAS 04368 + 2557 の周囲で Kepler 回転する原始星円盤を既に形成していることが報告されている (Ohashi et al., 2014; Aso et al., 2017)。

Sakai et al. (2014a, 2014b) は、原始星を取り巻くガスの物理構造と化学組成を、ALMA を用いた観測研究によって明らかにした。L1527 の落下・回転するエンベロープガスでは、不飽和な炭素鎖関連分子 (CCH, $c\text{-C}_3\text{H}_2$) や CS 分子 (Oya et al., 2015) が検出された (図5)。その内側の原始星円盤成分では、一酸化炭素 (C^{18}O) 分子 (Ohashi et al., 2014) とホルムアルデヒド (H_2CO) 分子 (Sakai et al., 2014a) の輝線が報告されている。一方で、3.1-3.2 節で述べた天体とは異なり、hot corino chemistry に特徴的な飽和有機分子 (CH_3OH) は、原始星近傍の暖かい ($>100\text{ K}$) 領域でも微弱にしか検出されなかった。このことは、この天体のもつ星間塵の化学組成がこれらの分子種に乏しいことを示唆する。

また、WCCC 天体である IRAS 15398-3359 でも、やはりエンベロープガスから円盤形成領域にかけての化学組成の急激な変化が見られた (Oya et al., 2014; Okoda et al., 2018)。すなわち、落下・回転するエンベロープガスは CCH, $c\text{-C}_3\text{H}_2$, H_2CO などの分子輝線によって捉えられ、一方その内側の円盤形成領域 (半径 $\sim 40\text{ au}$) は H_2CO と SO の分子輝線によって捉えられた。この天体は最近、原始星質量が極端に小さい (~ 0.007 太陽質量) ことから、Class 0 天体の中でも極めて若い原始星天体の観測例としても注目を集めつつある。

3.4. その他の天体

3.1-3.3 節で挙げた天体では、飽和有機分子と不飽和な炭素鎖関連分子のいずれか或いはその両方の輝線が検出された。一方で、いずれの有機分子にも乏しい天体も、

最近報告されている。

Elias29 は、上記の天体 (Class 0, 0-I) より進化の進んだ Class I 低質量原始星天体である (Miotello et al., 2014 など)。この天体は近傍の恒星からの輻射によって温められており、原始星から半径 $10,000\text{ au}$ の範囲のほとんどの場所で、星間塵の温度が 20 K 以上であると考えられている (Rocha and Pilling, 2018)。Oya et al. (2019) は、原始星の周りで回転する円盤状のガスが、SO と SO_2 の分子輝線によって捉えられることを報告した。しかし、複雑な飽和有機分子 (HCOOCH_3 , CH_3OCH_3) および不飽和な炭素鎖関連分子 (CCH, $c\text{-C}_3\text{H}_2$) は、エンベロープガスと円盤の別を問わず検出されなかった。原始星近傍の星間塵の温度がこれらの分子の蒸発温度 ($\sim 100\text{ K}$ またはそれ以下) よりも高いことから、有機分子は気相だけでなく星間塵上でも存在量が少ないと考えられる。この天体は、3.1-3.3 節で述べた天体に比べて進化段階が進んでいる (Class I) ため、化学反応によって有機分子がすでに壊されてしまっている可能性がある。あるいは、4 章で述べるように、星間塵の温度が高いという環境的效果も、この天体の化学的特徴の要因になりうると考えられる (Oya et al., 2019)。

4. 原始星円盤形成領域における化学組成の起源

3 章で述べたように、若い低質量原始星天体の円盤形成領域には、ガスの化学組成に天体間で多様性があることが観測的に示されてきた。加えて、個々の天体内でも、回転・落下するエンベロープガスからその内側の円盤への構造進化に伴って、ガス・星間塵の化学組成が著しく変化することも明らかになった (図5)。これらの二つの観測的事実は、次のように理解される。

4.1. 星なしコア時代から Class 0/I にかけての有機分子の進化

図6は、収縮する分子雲コアにおける、化学進化の概念図を表す。原始星近傍のガスの化学組成は、気相での化学進化だけでなく、星間塵でどのような分子が作られ、どのような分子が蒸発してくるのかにも依存する。原始星の誕生時、星形成の母体である分子雲コアに含まれる星間塵に着目すると、その表面には様々な分子（水分子や有機分子など）が吸着している（図6(2)）。原始星の重力によって星間塵が落下していくと、原始星に近づくにつれて星間塵の温度が上昇していく。星間塵の温度がメタン分子（CH₄）の蒸発温度（～25 K；原始星からの距離～10³⁻⁴ au）を上回ると、塵表面からメタン分子が蒸発する。蒸発したメタン分子は、気相反応によって種々の不飽和な炭素鎖関連分子（C₄H や c-C₃H₂ など）を効率的に生成すると考えられる（warm carbon-chain chemistry）。星間塵がさらに落下していくと、その温度は水分

子の蒸発温度（～100 K；原始星からの距離～10¹⁻² au）に達し、星間塵から水分子や飽和有機分子（CH₃OH や HCOOCH₃ など）が蒸発する（hot corino chemistry）。この描像は定性的なものであるが、実際、収縮する分子雲コア中での化学進化モデルでも、星間塵からの蒸発によって気相での有機分子の組成が変化する様子が確認されている（図7；Aikawa et al., 2008）。これが、若い原始星近傍における有機分子進化の基本描像と考えられる。

上記の過程の中で、水分子・飽和有機分子とメタン分子は蒸発温度が異なるため、蒸発する位置が異なる。すなわち、hot corino chemistry は比較的温度の高い原始星近傍で見られるのに対し、warm carbon-chain chemistry はより原始星から離れた位置で見られることが期待される。実際の天体では、原始星周りのガスの温度は、原始星による熱輻射以外にも、ガスの落下による衝撃やガスの物理的構造、また外的要因（近傍天体からの輻射など）にも依存する。また、上記のような星間塵上での

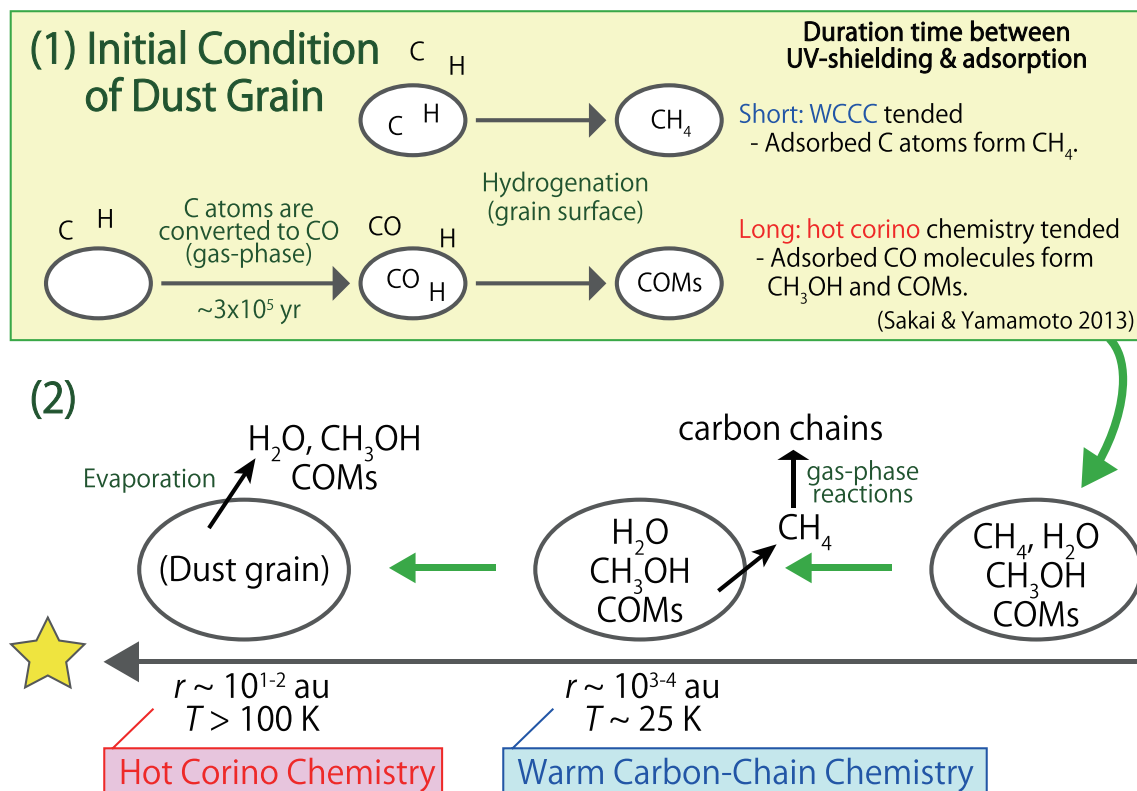


図6：収縮する分子雲コア中での化学進化の概念図。

(1) 分子雲コア中の星間塵表面における化学組成の多様性。分子雲の収縮に伴ってガスの密度が高くなると、外からの紫外線が遮断され、炭素原子（C）から一酸化炭素分子（CO）を生成する気相反応が効率的に進む。その後一酸化炭素分子が星間塵表面に吸着すると、表面反応により複雑な飽和有機分子（COMs）を生成する。一方、炭素原子が一酸化炭素分子に変換される前に星間塵に吸着された場合、表面反応によってメタン分子（CH₄）を生成する（Sakai and Yamamoto, 2013）。

(2) 星間塵が原始星に向けて落下するにつれて、星間塵の温度が上昇し、表面に吸着していた分子は気相に蒸発する。星間塵の温度が25 K程度に達すると、メタン分子（CH₄）が蒸発し、気相反応によって不飽和な炭素鎖関連分子を効率的に生成する（warm carbon-chain chemistry；WCCC）。星間塵の温度が100 K程度に達すると、水分子、メタノール分子（CH₃OH）、COMsが蒸発し、hot corino chemistryを示す（Aikawa et al., 2008; Oya, 2017）。

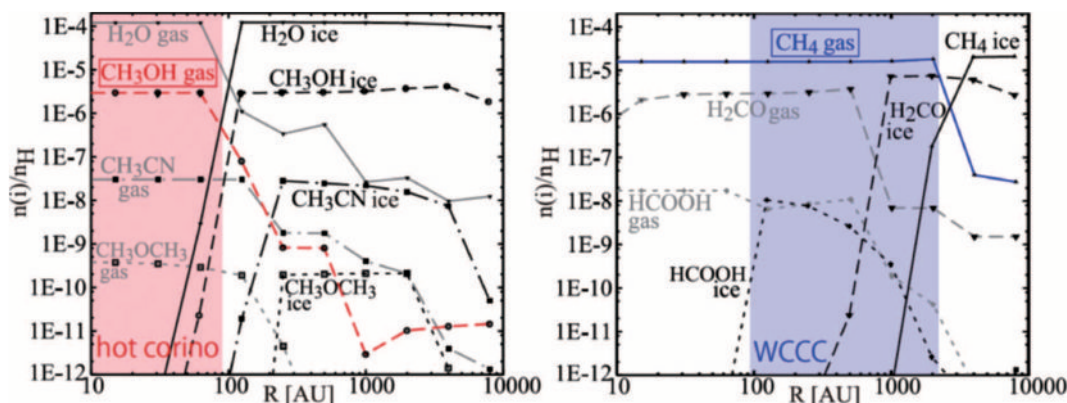


図7：収縮する分子雲コアにおける気相および固相での化学進化のモデル（Aikawa et al., 2008）. 原始星からの距離 R が 100 au 以下の範囲で、hot corino chemistry を特徴付ける飽和有機分子（ CH_3OH , CH_3OCH_3 など）が星間塵から蒸発していることがわかる. 一方、原始星からの距離が 1,000 au 程度の位置ではメタン分子（ CH_4 ）が蒸発する. 蒸発したメタン分子は気相反応によって、warm carbon-chain chemistry (WCCC) を特徴付ける不飽和な炭素鎖関連分子（ C_4H , $\text{c-C}_3\text{H}_2$ など）を豊富に生成すると考えられている（Sakai and Yamamoto, 2013）.

化学反応だけでなく、冷たく高密度なガス中でも複雑な有機分子は生成されうる（Ruaud et al., 2015; Balcani et al., 2015）. それでも、3.1 節で述べた観測結果にあるように、単一天体内で飽和有機分子と不飽和炭素鎖関連分子の検出される位置が異なる（図5）という大枠の傾向は、上記の描像とよく一致するといえる.

4.2. 天体間でのガスの化学組成の多様性

前節で述べた過程では、星間塵からの飽和有機分子やメタン分子の蒸発によって、ガスの主な化学組成が決まると考えられている. では、これらの有機分子はどこから来るのだろうか？ その起源は、星なしコア時代にまで遡ることが提案されている（Sakai and Yamamoto, 2013）. 希薄な分子雲中では、炭素原子（C）は紫外線の照射によって主にイオン（ C^+ ）の状態で見られる. 分子雲が収縮してガスの密度が上昇し、外部からの紫外線の照射が遮断されると、気相中の炭素原子は主に中性（C）の状態をとる. 中性炭素原子は気相中で酸素を含む分子（OH など）と反応し、一酸化炭素分子（CO）を生成する. 分子雲コアの収縮に従ってガスの密度がさらに上昇すると、気相中の一酸化炭素分子は星間塵の表面に吸着される. その後、表面反応により飽和有機分子の生成が進むと考えられる. 一方で、炭素原子が一酸化炭素分子に変換される前に星間塵へ吸着した場合、表面反応によってメタン分子を生成する.

一般的には、星形成の母体となる分子雲コアにおいて、炭素原子の気相中での一酸化炭素分子への変換と、星間塵への吸着のタイムスケールは同程度（ $\sim 10^5$ yr）である. このため、天体のもつ環境によって、気相中の炭素

表1：分子雲コア時代の星間塵表面の化学組成と、円盤形成領域で期待される化学的特徴

	一酸化炭素分子が吸着した	一酸化炭素分子が吸着しなかった
炭素原子が吸着した	Hybrid 天体 (3.1 節)	WCCC 天体 (3.3 節)
炭素原子が吸着しなかった	Hot corino 天体 (3.2 節)	その他の天体 (3.4 節)

原子の多くがそのまま星間塵に吸着するか、一酸化炭素分子への変換が十分に進んでから吸着するか、その割合が天体ごとに異なることが予想される. 例えば、外部からの紫外線照射が強い環境にある天体の場合、紫外線が完全に遮断されるのは分子雲コアのガスの密度が比較的高くなってからであるため、その後炭素原子の一酸化炭素分子への変換が十分進む前に星間塵への吸着が進むと考えられる. また、乱流等で支えられた分子雲コアでは、収縮のタイムスケールが長くなるため、星間塵への吸着が進む前に炭素原子の多くが一酸化炭素分子に変換されることが期待される.

このように、初期条件としての星間塵表面の化学組成に多様性があると、原始星近傍でのガスの化学組成に多様性を生むことが期待される（表1）. 星間塵表面に吸着する炭素原子と一酸化炭素分子の割合が同程度の場合、原始星近傍のガスには不飽和な炭素鎖関連分子と飽和有機分子の両方がもたらされる. これは3.1 節で述べた天体の観測例（hybrid 天体）と一致する. 一方で、多くの炭素原子が一酸化炭素分子に変換されて星間塵に吸着した場合、星間塵表面の化学組成はCOMs に富み、メタン分子に乏しくなる. この状況は、3.2 節で述べた hot

corino 天体の化学的特徴にあたる。それとは反対に、多くの炭素原子が一酸化炭素分子に変換される前に星間塵に吸着した場合、星間塵表面はメタン分子に富み、COMs に乏しくなる。これは 3.3 節で述べた warm carbon-chain chemistry 天体にあたる。一方、炭素原子と一酸化炭素分子のどちらも星間塵に吸着しなかった場合、不飽和・飽和によらず有機分子に乏しい天体になることが予想される (3.4 節)。これは例えば、外部からの強い紫外線や X 線の照射などによって、分子雲コア時代から星間塵の温度が炭素原子・一酸化炭素分子の吸着温度 (~ 20 K) より高く保たれていた場合に起こりうるであろう。

これまで、化学的に特異な hot corino 天体 (3.2 節) や WCCC 天体 (3.3 節) が注目を集め、その化学組成がよく調べられてきた。しかし、これらの天体は化学的多様性の両極端なケースであり、むしろ hybrid 天体 (3.1 節) がより標準的なケースであると考えられる。分子雲コアスケールの観測では多くの天体が hot corino chemistry と WCCC の中間の性質を示す (Higuchi et al., 2018) ことから、hybrid 天体における円盤スケールでの化学過程を探ることが、円盤形成に伴う化学進化を理解する上で不可欠と考えられる。

5. まとめ

電波天文の領域では、近年の観測機器の性能向上によって、天体の物理的・化学的構造の理解が急速に進みつつある。低質量原始星天体の観測研究では、若い天体の円盤形成に伴う化学進化の研究が可能になった。これにより、分子雲コアスケールで知られていた化学的多様性が確かに円盤形成領域まで持ち込まれること、および、エンベロープガスから原始星円盤への進化に伴って化学組成が激変することが明らかにされた (3 章)。有機分子に関するこの 2 つの新しい観測事実は、星間塵表面での反応を含めた化学進化として理解できる (4 章)。これらは、原始星円盤での化学進化の初期条件を規定する重要な現象であり、その後の原始惑星系円盤、ひいては惑星系形成に至るまで、天体の物質的環境に影響すると考えられ、非常に興味深い現象である。

一方で、硫黄関連分子でも化学組成の特徴的な変化が見られており (図 5)、たとえば、hot corino 天体 (IRAS 16293-2422) では、OCS 分子はエンベロープガスのみで検出されるのに対し、 H_2CS 分子はエンベロープガスとその内側の円盤成分の両方で検出される。この化学組成の変化の要因は未だ明らかでないが、これらの分子種は

太陽系内の彗星のコマ (67P/Churyumov-Gerasimenko) でも検出されており (Calmonte et al., 2016)、これらの化学組成がどのように関連しているのかも興味深い。Hybrid 天体である L483 (3.1 節) では近年、HCS や HSC などの分子輝線も新たに検出されており (Agúndez et al., 2018)、その分布や生成過程を探ることは一つの糸口になるだろう。また、有機分子や硫黄関連分子に限らず、若い原始星天体の化学組成の分布については、依然として観測例が限られており、どのような分子種が原始星円盤にもたらされるのかは、未だ全体像が把握されていない。加えて、星形成に伴う物質進化は、構造形成の過程と密接に絡んでおり、これらを包括的に理解することが肝要である。すなわち、ガスの化学組成の急激な変化は、エンベロープガスから円盤への遷移領域に集中して報告されているが、そこでどのような化学過程が起こっているのか、物理構造の変化とどのように関係しているのかといった、観測事実の背景にあるプロセスの解明が今後の課題である。

低質量星形成過程における星間化学の理解は、電波観測等による分子雲コアスケールの研究と、赤外線観測等による惑星系形成スケールの研究とに、長らく分かれて進められてきた。2010 年代になり、ALMA の登場によって、これらの研究分野の間をつなぐ原始星円盤形成領域の化学組成の理解が急速に進んだ。これらの成果は、次の 10 年に向けて、分子雲コアから惑星系形成、ひいては太陽系内での探査の結果まで、星形成に伴う化学進化を包括的に理解する足がかりになると期待したい。

参考文献

- Acharyya, K., and Herbst, E. (2017) Protostellar and cometary detections of organohalogens. *Nature Astronomy*, **1**, 703–708.
- Agúndez, M., Marcelino, N., Cenicharo, J., et al. (2018) Detection of interstellar HCS and its metastable isomer HSC: new pieces in the puzzle of sulfur chemistry. *Astronomy and Astrophysics*, **511**, L1–L4.
- Aikawa, Y., Wakelam, V., Garrod, R. T., et al. (2008) MOLECULAR EVOLUTION AND STAR FORMATION: FROM PRESTELLAR CORES TO PROTOSTELLAR CORES. *The Astrophysical Journal*, **674**, 993–1005.
- Aso, Y., Ohashi, N., Aikawa, Y., et al. (2017) ALMA Observations of the Protostar L1527 IRS: Probing Details of the Disk and the Envelope Structures. *The Astrophysical Journal*, **849**, 56–70.
- Bottinelli, S., Ceccarelli, C., Lefloch, B., et al. (2004a) COMPLEX MOLECULES IN THE HOT CORE OF THE

- LOW-MASS PROTOSTAR NGC 1333 IRAS 4A. *The Astrophysical Journal*, **615**, 354–358.
- Bottinelli, S., Ceccarelli, C., Neri, R., et al. (2004b) NEAR-ARCSECOND RESOLUTION OBSERVATIONS OF THE HOT CORINO OF THE SOLAR-TYPE PROTOSTAR IRAS 16293–2422. *The Astrophysical Journal Letters*, **617**, L69–L72.
- Calmonte, U., Altwegg, K., Balsiger, H., et al. (2016) Sulphur-bearing species in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Monthly Notices of the R Royal Astronomical Society*, **462**, S253–S273.
- Caux, E., Kahane, C., Castets, A., et al. (2011), TIMASS: the IRAS 16293–2422 millimeter and submillimeter spectral survey, I. Observations, calibration, and analysis of the line kinematics. *Astronomy and Astrophysics*, **532**, A23–A63.
- Cazaux, S., Tielens, A. G. G. M., Ceccarelli, C., et al. (2003) THE HOT CORE AROUND THE LOW-MASS PROTOSTAR IRAS 16293–2422: SCOUNDRELS RUIE! *The Astrophysical Journal Letters*, **593**, L51–L55.
- Ceccarelli, C. (2004) The Hot Corinos of Solar Type Protostars, In: Hollenbach, D., McKee, C., and Shu, F. (eds) *Star Formation in the Interstellar Medium*, **323**, 195–203.
- Coutens, A., Ligterink, N. F. W., Loison, J.-C., et al. (2019) The ALMA-PILS survey: First detection of nitrous acid (HONO) in the interstellar medium. *Astronomy and Astrophysics*, **623**, L13–L21.
- Higuchi, A. E., Sakai, N., Watanabe, Y., et al. (2018) Chemical Survey toward young Stellar Objects in the Perseus Molecular Cloud Complex. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **236**, 52–76.
- Hirota, T., Ohishi, M., and Yamamoto, S. (2009) A SEARCH FOR CARBON-CHAIN-RICH CORES IN DARK CLOUDS. *The Astrophysical Journal*, **699**, 585–602.
- Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., et al. (2016) DISCOVERY OF A HOT CORINO IN THE BOK GLOBULE B335. *The Astrophysical Journal Letters*, **830**, L37–L43.
- Imai, M., et al. (2019) Unveiling a Few Astronomical Unit Scale Rotation Structure around the Protostar in B335. *The Astrophysical Journal Letters*, **873**, L21.
- Jacobsen, S. K., Jørgensen, J. K., Francesco, J. D., et al. (2019) Organic chemistry in the innermost, infalling envelope of the Class 0 protostar L483. *Astronomy and Astrophysics*, **629**, A29–A45.
- 国立天文台編 (2018), 理科年表, 丸善.
- Kuan, Y.-J., Huang, H.-C., Charnley, S. B., et al. (2004) ORGANIC MOLECULES IN LOW-MASS PROTOSTELLAR HOT CORES: SUBMILLIMETER IMAGING OF IRAS 16293–2422. *The Astrophysical Journal Letters*, **616**, L27–L30.
- Lefloch, B., Bachiller, R., Ceccarelli, C., et al. (2018) Astrochemical evolution along star formation: overview of the IRAM Large Program ASAI. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **477**, 4792–4809.
- Ohashi, N., Saigo, K., Aso, Y., et al. (2014) FORMATION OF A KEPLERIAN DISK IN THE INFALLING ENVELOPE AROUND L1527 IRS: TRANSFORMATION FROM INFALLING MOTIONS TO KEPLER MOTIONS. *The Astrophysical Journal*, **796**, 131–141.
- Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., et al. (2018) The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398–3359. *The Astrophysical Journal Letters*, **864**, L25–L31.
- Olofsson, S., and Olofsson, G. (2009) A new method of determining distances to dark globules. The distance to B 335. *Astronomy and Astrophysics*, **498**, 455–461.
- Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., et al. (2014) A SUBSTELLAR-MASS PROTOSTAR AND ITS OUTFLOW OF IRAS 15398–3359 REVEALED BY SUBARCSECOND-RESOLUTION OBSERVATIONS OF H₂CO AND CCH. *The Astrophysical Journal*, **795**, 152–160.
- Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., et al. (2015) GEOMETRIC AND KINEMATIC STRUCTURE OF THE OUTFLOW/ENVELOPE SYSTEM OF L1527 REVEALED BY SUBARCSECOND-RESOLUTION OBSERVATION OF CS. *The Astrophysical Journal*, **812**, 59–70.
- Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., et al. (2016) INFALLING-ROTATING MOTION AND ASSOCIATED CHEMICAL CHANGE IN THE ENVELOPE OF IRAS 16293–2422 SOURCE A STUDIED WITH ALMA. *The Astrophysical Journal*, **824**, 88–106.
- Oya, Y. (2017) A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures around Young Low-Mass Protostars. *The University of Tokyo*, Japan.
- Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., et al. (2017), L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity. *The Astrophysical Journal*, **837**, 174–188.
- Oya, Y., Moriawaki, K., Onishi, S., et al. (2018) Chemical and Physical Picture of IRAS 16293–2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studies with ALMA. *The Astrophysical Journal*, **854**, 96–114.
- Oya, Y., López-Sepulcre, A., Sakai, N., et al. (2019) Sulfur-bearing Species Tracing the Disk/Envelope System in the Class I Protostellar Source Elias 29. *The Astrophysical Journal*, **881**, 112–127.
- Pineda, J. E., Maury, A. J., Fuller, G. A., et al. (2012) The first ALMA view of IRAS 16293–2422. *Astronomy and Astrophysics*, **544**, L7–L12.
- Rice, E. L., Prato, L., and McLean, I. S. (2006) AN ASSOCIATION IN THE AQUILA STAR-FORMING REGION: HIGH-RESOLUTION INFRARED SPECTROSCOPY OF T TAURI STARS. *The Astrophysical Journal*, **647**, 432–443.
- Rocha, W. R. M., and Pilling, S. (2018) The role of external far-ultraviolet irradiation in the survival of astrophysical ices in Elias 29. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **478**, 5190–5198.

- Ruaud, M., Loison, J. C., Hickson, K. M., et al. (2015) Modelling complex organic molecules in dense regions: Eley-Rideal and complex induced reaction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **447**, 4004–4017.
- Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., et al. (2008) ABUNDANT CARBON-CHAIN MOLECULES TOWARD THE LOW-MASS PROTOSTAR IRAS 04368+2557 IN L1527. *The Astrophysical Journal*, **672**, 371–381.
- Sakai, N., and Yamamoto, S. (2013) Warm Carbon-Chain Chemistry. *Chemical Reviews*, **113**, 8981–9015.
- Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., et al. (2014a) Change in the chemical composition of infalling gas forming a disk around a protostar, *Nature*, **507**, 78–91.
- Sakai, N., Oya, Y., Sakai, T., et al. (2014b) A CHEMICAL VIEW OF PROTOSTELLAR-DISK FORMATION IN L1527, *Astrophysical Journal Letters*, **791**, L38–L42.
- Schöier, F. L., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E. F., et al. (2002) Does IRAS 16293–2422 have a hot core? Chemical inventory and abundance changes in its protostellar environment. *Astronomy and Astrophysics*, **390**, 1001–1021.
- van Dishoeck, E. F., Blake, G. A., Jansen, D. J., et al. (1995) MOLECULAR ABUNDANCES AND LOW-MASS STAR FORMATION. II. ORGANIC AND DEUTERATED SPECIES TOWARD IRAS 16293–2422. *The Astrophysical Journal*, **447**, 760–782.

