



Title	分子雲コアの有機分子 : 星なしコアと 原始星エンベロープ
Author(s)	坂井, 南美
Citation	低温科学, 78, 219-227
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.219
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77786
Type	departmental bulletin paper
File Information	25_p219-227.LT78.pdf



分子雲コアの有機分子：星なしコアと 原始星エンベロープ

坂井 南美^{1)*}

2019 年 11 月 13 日受付, 2019 年 11 月 28 日受理

星間紫外線が遮断されるほど密度が高くなった星間分子雲においては、様々な分子の生成が進む。星間分子雲は星形成の場であるため、そこで形成される分子種やそれらの生成過程の理解は、私たちの住む太陽系の化学的起源を知る上でも極めて重要な問題である。最近の電波望遠鏡受信機の高感度化により、冷たい分子雲コアにおいても複雑な有機分子や様々な分子の同位体種や複雑な有機分子が検出されつつある。物理環境が定義しやすい「星なし分子雲」での観測研究は、分子の生成過程を一部辿ることを可能にするとともに、その理解において最新の分子科学の知見の必要性をあらわにした。本稿では、飽和有機分子と不飽和有機分子に焦点を当て、その詳細を紹介する。

Organic molecules in starless and star-forming cores

Nami Sakai¹

The formation of various interstellar molecules takes place in so-called molecular clouds, where interstellar ultraviolet (UV) radiation is shielded by themselves. Because stars are formed in interstellar clouds, discovering what kind of species are formed and how they are formed is a fundamental and important step in understanding the chemical origin of the Solar System. Owing to sensitivity improvements and new techniques in spectroscopic observations, it is possible to detect COMs as well as various rare isotopic species, even in cold starless clouds. Observational studies of molecules in cold molecular clouds, where environmental conditions are relatively easy to define, have even enabled us to discover how these species are formed. However, these studies have also enabled us to recognize that there is a significant lack of knowledge in molecular science. In this paper, recent observational results of various organic molecules at the molecular cloud scale are summarized along with the current issues we face in understanding their formation mechanisms.

キーワード：星間分子雲, 星間分子, 原始星エンベロープ, 有機分子, 電波観測
molecular cloud, interstellar molecule, protostellar envelope, organic molecule, radio observation

1. はじめに

星は星間空間に漂うガスや塵が自らの重力で集まって生まれる。星間分子雲と呼ばれる巨大な雲の中で、100 万年から 1000 万年をかけて生み出される新しい恒星や惑星系はどのような原始環境（化学組成）にあるのだろうか。星が誕生する前の冷たい分子雲は、それらを考え

る上で極めて重要な情報を与えてくれる。

様々な分子の存在量を探るには、電波による高感度観測が必要であり、特に「複雑な」分子を検出するには時として数 10 から 100 時間もの積分観測を要する。ここで、複雑な分子とは原子 6 個以上から構成される分子を指す。しかし、近年の急速な技術進歩により、一度に観測できる周波数帯域が広がり、また、受信機の感度も格

*連絡先
坂井 南美
理化学研究所 開拓研究本部
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

e-mail : nami.sakai@riken.jp
1) 理化学研究所
RIKEN, Wako, Japan

段に上がったことで、星なし分子雲コアのような比較的
低密度な領域であっても様々な分子のスペクトル線が検
出できるようになった。

本稿では、最近の観測で明らかになってきた、星が誕
生する前の低温・低密度な領域（星なし分子雲コア）、お
よび原始星をとりまく暖かなエンベロープガス中におけ
る有機分子の生成について紹介する。

2. 複雑な有機分子の起源

2.1. 星間空間における分子生成

原始星誕生の場である星間分子雲の主成分は水素分子
である。しかし、微量ながらも様々な分子がその中で生
成されていることが主に電波望遠鏡による分子の回転ス
ペクトル線観測によって明らかとなってきた。星間雲の
密度が低い ($1\text{--}10^2\text{ cm}^{-3}$ 程度以下) 間は、星間紫外線に
よる光解離が勝るため分子生成が阻害され、炭素や酸素
など様々な元素も、イオン・あるいは中性原子として存
在する。密度が上がり、紫外線が雲の外郭で遮断され
ると、ようやく多様な分子が生成され始める。ただし、極
低密度下であるため、生成過程においては、3 体反応や
吸熱反応などはおこらず、イオン分子反応やラジカル・
ラジカル反応などを通してゆっくりと様々な分子が生成
されていく。

例えば、イオン分子反応 (e.g., Herbst, 1981; Herbst
and Leung, 1989) の鍵となるイオン H_3^+ と酸素原子や
炭素原子との反応を通して、OH ラジカルや CH ラジカ
ルが作られる。数 10 万年から 100 万年の時間をかけて
ゆっくりと作られたこれらのラジカルは、さらに他の酸
素原子や炭素原子と反応し、比較的安定な一酸化炭素分
子となっていく (e.g., Suzuki et al., 1979; Suzuki et al.,
1992; Yamamoto, 2017)。低密度環境下であるため、こ
のように化学平衡に達するための時間が非常に長く、分
子雲コアの中で重力収縮により原始星が誕生する時間ス
ケールと同じかあるいはそれよりも長い。このため、分
子雲に含まれるガスは化学的に非平衡状態にあり、時間
によってその組成が変化していく。実際、重力によりガ
スや塵を集め始めたばかりの若い分子雲を観測すると、
中性炭素原子 C と一酸化炭素分子 CO の分布をカバー
するように、OH ラジカルや CH ラジカルが分布してい
る様子が見られる (Maezawa et al., 1999; Sakai et al.,
2012; Ebisawa et al., 2019)。

この「非平衡の化学」のために、雲の進化段階（紫外
線遮断からの時間）によって、その化学組成は、たとえ
温度や密度が似た環境下であっても異なり得る。上記の

観測例、おうし座の星形成領域 HCL 2 においては、南側
領域でまだ化学進化が進んでいないため、中性炭素原子
の微細構造スペクトル線が強く検出される。一方、北側
領域では一酸化炭素分子が強く検出される (Maezawa
et al., 1999)。OH ラジカルや CH ラジカルは、まだ多く
が原子の状態にある希薄な星間雲と分子雲の双方をト
レースできることから、化学組成進化のステップの 1 つ
というのみならず、C と CO の存在量比率と同様、分子
雲コアの形成を探るツールとしても用いることができる
(Ebisawa et al., 2015)。このようにして生成された CO
分子は、水素分子に次ぐ星間分子雲の主要分子として、
その後の有機分子生成の鍵となる。

2.2. 気相反応と表面（固相）反応

星間分子雲では、密度が上がったとはいえ依然として
 $10^4\text{--}10^6\text{ cm}^{-3}$ 程度と低く、CO 分子などが出すスペク
トル線による冷却効果のために温度も $\sim 100\text{ K}$ から $\sim 10\text{ K}$
へ下がっていく (e.g., Ebisawa et al., 2015)。極低温極低
密度環境下におかれた CO 分子は、それ自身が He^+ な
どと反応して再度 C^+ に戻り、 C^+ を起点とした気相反
応の主役になるとともに、CO 分子のまま星間塵に次第
に吸着されていく (Caselli et al., 1999)。星間雲にはシリ
ケートや炭素質の固体微粒子が質量の 1% 程度含まれて
おり、分子がそれにぶつかるとう凍結してしまうからで
ある。その結果、星が誕生する前の冷たい分子雲コアな
どにおいては、気相反応と固相反応が関連しつつも別々に
進んでいくこととなる。

気相反応では、水素分子との反応により順次水素化さ
れた炭素原子が CH_5^+ イオンとなり、電子との再結合・
さらなる C^+ などとの反応などによって、比較的不飽和
な有機分子が生成されていくと考えられている (e.g.,
Sakai and Yamamoto, 2013; Yamamoto, 2017)。星間空
間に特徴的に存在する CCH や C_4H などの炭素鎖分子も
このような気相での反応を経て生成されていく (図 1)。
気相反応では、水素化は水素分子とのイオン分子反応で
起こるが、その過程の中で特に安定なイオンが存在し、
そこからは水素化が進まなくなる。たとえば、 C_2H_3^+ 、
 C_3H_3^+ が安定なイオンの例である。そのため、炭素原子
を起点とする反応系においては、炭素鎖分子のような不
飽和な分子が豊富に生成することになる。実際、炭素鎖
分子は冷たく若い（炭素原子が原子のまま豊富に存在す
る）分子雲コアにおいて非常に豊富に生成されており、
これもまた、他の分子との比から分子雲コアの進化の目
安を知るツールとして用いられている (e.g., Suzuki et al.,
1992; Benson et al., 1998; Hirota et al., 2009; Marka et al.,

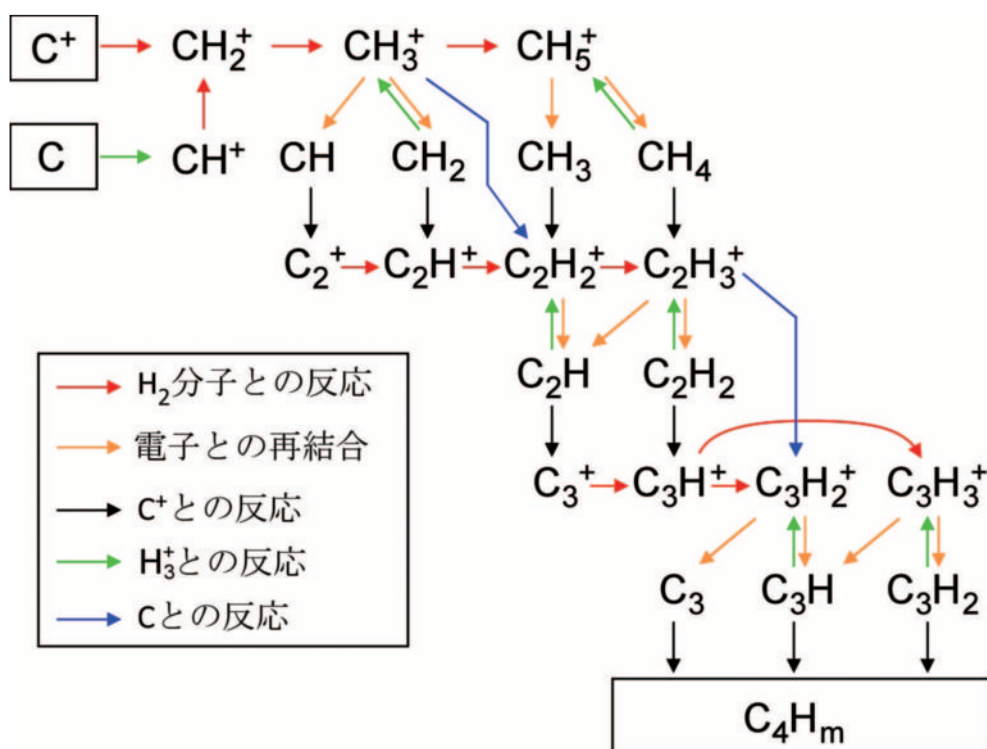


図1：炭素から始まる化学反応経路の模式図 (Sakai and Yamamoto 2013 を改変)
 WCCC (4章参照) では、右上の CH_4 を起点とした反応の効率化が期待される。

2012)。前述のようし座分子雲 HCL 2 領域はその典型例であり、その中でも TMC-1 (CP) と呼ばれる星なし分子雲コアは、星間空間において様々な不飽和有機分子の存在を探る代表天体となっている (e.g., McGuire et al., 2018)。

一方、星間塵へ吸着した原子や分子について、後から降り積もる水素原子による付加反応が順次起こる。たとえば、星間塵表面において、酸素原子 O は水分子 H_2O 、炭素原子はメタン CH_4 、CO 分子はホルムアルデヒド H_2CO を経てメタノール CH_3OH となる。このようにして作られる水や“飽和”有機分子は、原始星が誕生して暖められたり、原始星からの双極分子流 (アウトフロー) による衝撃などにより気相へ出てくるまで、基本的には星間塵に凍りついたまま保存されることとなる。

実際、L1157B1 のような、双極分子流と周囲の星なし分子雲が衝突した場所や (e.g., Bachiller et al., 1995; Arce et al., 2008; Sugimura et al., 2011)、高温下にある大質量星形成領域 (e.g., Cummins et al., 1986; Blake et al., 1987)、IRAS16293-2422 や NGC1333 IRAS4A のような低質量原始星まわりの円盤形成領域 (e.g., Cazaux et al., 2003; Bottinelli et al., 2004; Bottinelli et al., 2007; Oya et al., 2016) において、 CH_3OH を始めとした様々な飽和有機分子が星間塵から昇華してきているとみられ、周囲より増量した状態にあることが観測により明らかとなっ

ている。

3. 冷たい分子雲コアの化学

しかし、近年、大きな問題が2つ、顕在化している。一つは、CCH を始めとした不飽和有機分子の生成過程におけるラジカルなど中性分子同士の反応の重要性であり、もう一つは冷たい星なしコアにおける気相中の飽和有機分子の存在である。

3.1. 不飽和有機分子の生成過程

これまで、2.2 節のように主にイオン分子反応による不飽和炭素分子の生成が考えられてきた。一方、近年、観測的視点から、それ以外の生成過程の寄与が議論されつつある。

例えば、 HC_3N 分子の3つの ^{13}C 同位体種 (H^{13}CCCN , HC^{13}CCN , HCC^{13}CN : 特段記載のない限り C は ^{12}C を意味する) の観測から、 HC_3N に対する同位体比を調べ、その比が同位体種によって異なること (たとえば TMC-1 では H^{13}CCCN , HC^{13}CCN , $\text{HCC}^{13}\text{CN} = 1:1:1.4$) から、 HC_3N 分子が C_2H_2 と CN の反応によって主に作られている可能性が指摘されている (Takano et al., 1998; Taniguchi et al., 2016; Araki et al., 2016)。 HC_3N 分子の生成過程としては、 $\text{C}_3\text{H}_3^+ + \text{N}$ や C_3H_2^+ , C_3H_2 を介した

イオン分子反応の重要性が実験室実験 (Knight et al., 1986) や理論計算 (Herbst et al., 1983) などからも議論されていたが、予測に反して中性分子同士の反応が重要である可能性が、様々な領域での同位体種観測から指摘され始めている。 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比率は平均で 77 程度と、星間空間の一般的な値と比べるとやや高い結果であり、特に C_2H_2 分子において ^{13}C 同位体がやや希釈されていることがわかった。

一方、CCS 分子などでも、同様の同位体比率から、 $\text{S}^+ + \text{C}_2\text{H}_2$ のような反応ではなく $\text{CS} + \text{CH}$ というラジカル同士の反応で生成している可能性が指摘されていた (Sakai et al., 2007)。こちらは、 C_2H_2 ではなく CH との反応で炭素鎖が伸びる点が前者と異なる。しかし、やはり、中性分子同士の反応が重要な役割を果たしている可能性が高い。

ただし、CCS 分子のような不対電子対を持つフリーラジカルにおいては、その反応性の高さから、水素原子 H を触媒とした同位体位置の交換反応 ($\text{C}^*\text{CS} + \text{H} \rightarrow \text{C}^*\text{CCS} + \text{H}$) や S 原子との反応による位置交換反応 ($\text{C}^*\text{CS} + \text{S} \rightarrow \text{C}^*\text{CCS} + \text{S}$) など、分子の生成後の影響が否定できないため、反応過程には未だに議論が残っている。

これに対し、吉田らは、最近、 $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 分子についてもその同位体比を詳細に調べた (Yoshida et al., 2015)。その結果、図 2 のように軸上の炭素が ^{13}C 同位体になったものと、その他の位置の炭素が ^{13}C 同位体となったもので、その比率が、有意に異なることが分かった。 $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 分子では CCS 分子などとは違い、生成後から同位体交換反応を起こすのはその安定性からやや難しいと考えられる。このため、やはり、生成過程を反映して同位体比異常がおこっている可能性が高い。この分子でも、 $\text{c-C}_3\text{H}_3^+$ を経た反応経路がその主要生成過程として考えられてきたが、 $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}$ のような中性—中性反応の重要性がクローズアップされている。

同位体比の観測では、もうひとつ重要な点が指摘された。分子に含まれる ^{13}C の割合が原子での割合と比べて

下がる「希釈」の問題である。CCS 分子においては、 $\text{CCS}/^{13}\text{CCS}$ 比が 230 と驚くほど希釈していることが指摘された。 HC_3N でも希釈は部分的に見られており、また、その後の観測で、他の炭素鎖分子でも多くが ^{13}C 同位体の希釈を示していた (Sakai et al., 2013)。

同位体比は様々な分子で求められているが、同位体比率の測定においては、その存在量の少なさから、希少同位体種の検出の難しさがしばしば問題視される。しかし、実際にはむしろ、主要同位体種の存在量を正しく求めることのほうが難しいケースが多々ある。例えば、上述の $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 分子の場合、吉田らは、比較的密度や温度が高く、内部に原始星を含む分子雲コア L1527 に対してラインサーベイ観測を行い、34 本ものスペクトル線から $\text{c-C}_3\text{H}_2$ の存在量を求めている (Yoshida et al., 2015, Yoshida et al., 2019)。存在量が多いため多くのスペクトル線が光学的に厚いので (スペクトル線強度が飽和している状態)、正しい存在量を反映しない。このために、ラインサーベイのような広い帯域をくまなく測定する観測が必要となる。それにより光学的に厚いスペクトル線から比較的低くなる遷移のスペクトル線まで多くのスペクトル線を測定し、その強度を総合的に解析することで正しい存在量を求めることが可能となるからである。その結果、2 種類の同位体種どちらにおいても、 ^{13}C 同位体が大きく希釈していることがわかった。

^{13}C が希釈されるメカニズムは Langer et al. (1984) によって予測されていたが、これらの観測で観測的にも確立されたと言える。星間分子雲で主要な炭素の担い手である CO 分子については、低温下において $^{13}\text{C}^+ + ^{12}\text{CO} \rightarrow ^{13}\text{CO} + ^{12}\text{C}^+$ ($\Delta E = 35 \text{ K}$) の同位体交換反応が効率よく進行し、 C^+ の ^{13}C 同位体種が極端に少なくなってしまう。その結果、 CO 分子を除き、 C^+ を起点として作られる分子のほとんどにおいて ^{13}C 同位体種が希釈された状態となる。 CO 分子は、星間分子雲において炭素原子の主要な存在形態であるため、 C^+ から ^{13}C 同位体が CO 分子へ取り込まれたとしても $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比率はさほど

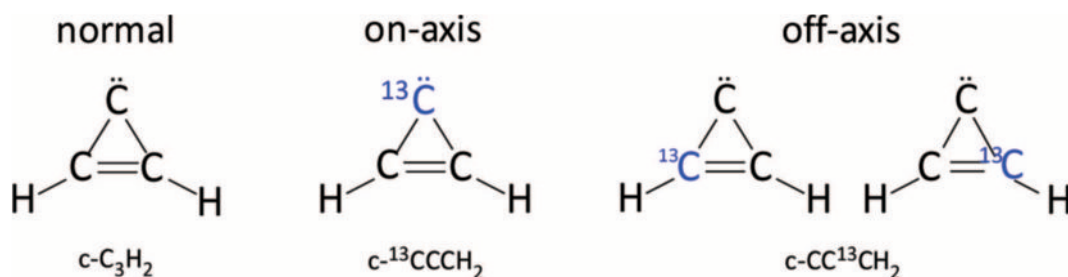


図 2: $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 分子のふたつの同位体

off-axis の ^{13}C 同位体種は、対称性によって通常、on-axis の ^{13}C 同位体種の 2 倍の存在量を示すが、それを考慮しても、on-axis の ^{13}C 同位体種の存在量が有意に少ない (希釈している) ことがわかった。

変わらない。すなわち、この希釈度合を用いることで、 C^+ を起源とする分子とCOを起源とする分子を区別することができる可能性がある。

実際、もっとも単純な飽和有機分子であるメタノール分子 CH_3OH を典型的な星なし分子雲コアTMC-1 (CP)で観測した結果、その比率は 62 ± 10 と希釈は起こっておらず、このことはメタノール分子が $CH_3^+ + H_2O \rightarrow CH_3OH_2^+ + h\nu$ で作られた $CH_3OH_2^+$ の再結合で生成したのではないことを示唆する。むしろ、一酸化炭素分子COを経て星間塵上で CH_3OH が生成された可能性が高いと考えられる (Soma et al., 2015)。今後、炭素鎖分子のような不飽和有機分子だけでなく飽和有機分子でも同位体種を用いた星間空間での実際の生成過程の検証が進むことを期待したい。

3.2. 冷たい星なしコアの飽和有機分子

2.2節に記したように、 CH_3OH などの飽和有機分子は特に星形成領域における特徴的分子として知られてきた。近傍系外銀河などで、星形成活動の有無を判断する材料として使われているケースもある。一方で、 CH_3OH のスペクトル線は、冷たい星なしコアであっても弱いながら検出されてきた。その結果、星なしコアにおける CH_3OH の起源として、3.1節に示したような気相反応の寄与も議論の対象となってきた。しかし、同位体比観測から指摘されたように、冷たい星なし分子雲コアにおいてもCO分子経由の生成過程、すなわち、星間塵へ吸着したCO分子から水素付加反応によりできた可能性が高いことがわかってきた。気相反応では反応分岐比の問題で CH_3OH が生成されないことも実験室実験から別途指摘されており (Geppert et al., 2006)、星間塵表面反応によって作られたものが、冷たい分子雲中にもかかわらず気相にでてきている可能性が高まった。しかし、冷たい分子雲では、原始星のような熱源やアウトフローによる衝撃波などが無いため、氷が暖められて蒸発したり、衝撃波でスパッタされたりして気相へ出てきたとは考えられない。その原因としては、宇宙線を起因とした紫外線 (Cosmic-ray induced UV) によって星間塵表面からでてくる可能性なども議論されているが、星間塵表面反応において生じた反応の余剰エネルギーによって、塵 (氷) 表面から脱離したものである可能性が高いと考えられる (e.g., Garrod et al., 2007)。

いずれにせよ、 CH_3OH が星間塵表面におけるCO分子の水素化によって生成されることはおそらく間違いない。その際、さらに興味を持たれるのが、より複雑な有機分子の生成が起こるかどうかである。最近、相馬らは、

TMC-1 (CP) および、そのすぐ近傍のメタノール分子が多い場所 TMC-1 (MP) において高感度観測を行い、アセトアルデヒド分子 CH_3CHO を検出した (Soma et al. 2018)。TMC-1 (CP) では、 CH_3OH のスペクトル線は、その分布に由来して2つの速度 (周波数) 成分が検出される (図3)。太陽系に対してわずかに異なる速度を持つ雲が望遠鏡のビームの大きさの中にあるためにこのように観測されている。一方で、TMC-1 (CP) において、炭素鎖分子のような明らかに気相反応由来である分子種は、同じくふたつの速度成分を示すが、そのずれは非常に小さく、 CH_3OH 分子のふたつの速度成分の間におさまるほどである。他の気相由来分子からのスペクトル線も同様に細いスペクトル線幅を示すことから、スペクトル線の形を利用することで、純粋に気相で生成されたものであるか、 CH_3OH のように星間塵表面反応に起因するものであるかをある程度判別することが可能である。 CH_3CHO 分子は、明らかに CH_3OH と似たスペクトル線の形状を示しているため、表面反応で生成されたか、あるいは表面反応で生成された CH_3OH などの分子から気相反応で生成されたものである可能性が高い。さらに、TMC-1 (MP) においては、 $HCOOCH_3$ 分子や $(CH_3)_2O$ 分子も検出された。 CH_3CHO と違い、これらの有機分子はホットコアやホットコリノと呼ばれる大質量原始星あるいは小質量原始星まわりの暖かい領域で主に生成されると考えられてきた。しかし、近年、アウトフローと原始星から離れた冷たい場所にある雲がぶつかっている領域 (L1157B1 など) でもこれらの分子が検出されたことから (Arce et al., 2008; Sugimura et al., 2011)、冷たい領域においても星間塵表面で生成されている可能性が指摘されてきた。冷たい分子雲であるTMC-1 (MP) での $HCOOCH_3$ 分子や $(CH_3)_2O$ 分子の検出、そして CH_3OH が強く検出された速度成分のみで検出されたことは、これらの分子が星間塵上で作られたか、あるいは気相に出てきた CH_3OH を親分子として作られたかのどちらかを示唆する。近年、他の冷たい分子雲でも CH_3OH や複雑な有機分子の検出、そして炭素鎖分子やCSなど気相由来分子との分布の違いなどが報告されており (Bacmann et al., 2012; Jimenez-Serra et al., 2016)、その生成過程に注目が集まっている。

星間塵表面において、どのような形でどのくらいのエネルギーを得たどのような分子が壊れずにそのまま脱離するのか、そのような確率がどれほど高いのかなど、分子レベルでの脱離過程の理解が今後必須である。

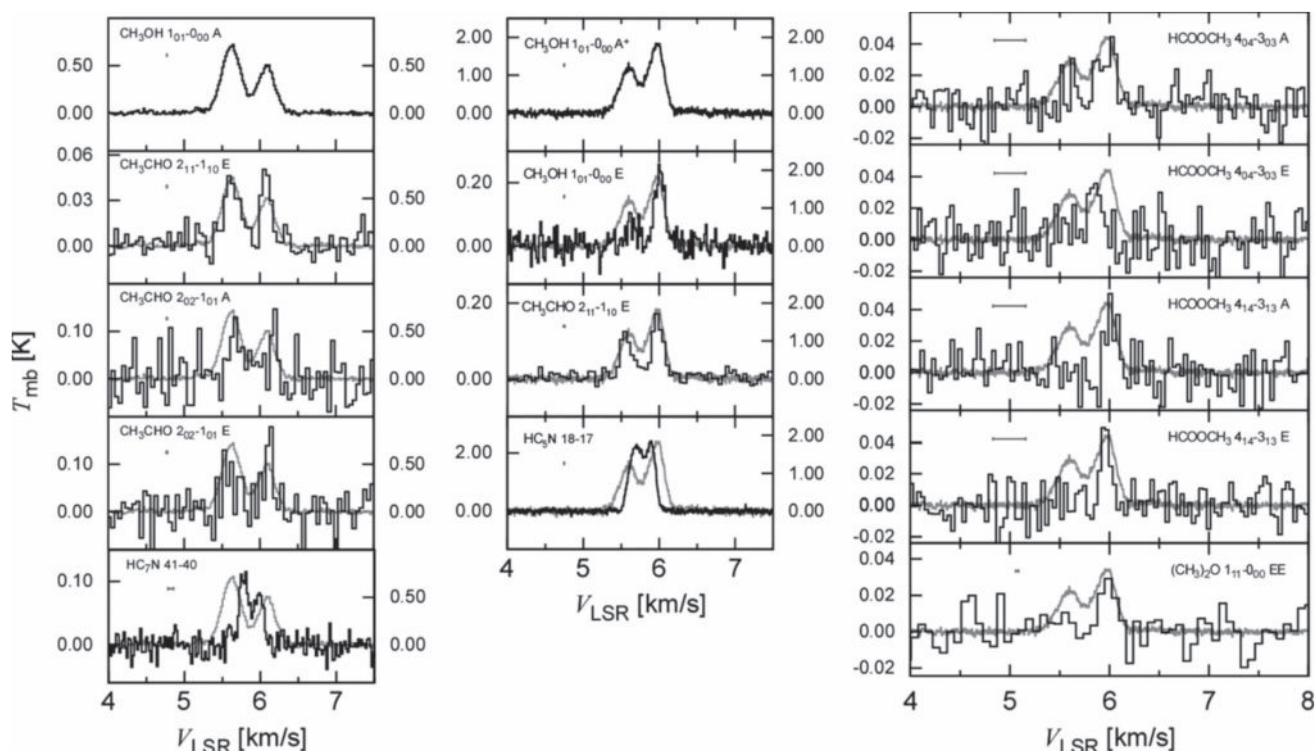


図3：星なし分子雲における有機分子のスペクトル線 (Soma et al. 2018 を改変)
 (左) TMC-1 (CP) における CH_3OH 分子と CH_3CHO 分子のスペクトル線の比較。
 (中) TMC-1 (MP) における CH_3OH 分子と CH_3CHO 分子のスペクトル線の比較。
 (右) TMC-1 (MP) における HCOOCH_3 分子, $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ 分子のスペクトル線
 灰色線で比較のための CH_3OH 分子のスペクトル線を示す。 CH_3OH 分子や CH_3CHO 分子のスペクトル線は、気相反応由来分子である HC_7N と明らかに異なる速度の成分を示す。

4. 原始星エンベロープの化学

最後に、星なし分子雲で見られた化学進化がその後どのように星・惑星形成領域へと伝播していくのかについて議論したい。

3章で述べたように、冷たい星なし分子雲においては、 C^+ を起点とする気相反応が効率よく進み、炭素鎖分子のような不飽和有機分子が豊富になると考えられる。飽和有機分子は、TMC-1 (MP) のように、生成されはするもののその存在量比はホットコアやホットコリノなど星形成領域のものと比べると2桁程度以上少ない。星形成領域では、ほとんどの炭素が CO の形で固定され、また、密度上昇とともにイオン化率も下がっていくことから、 CO 分子の存在量が圧倒的に高くなる。温度が 20 K よりも低いうちは、星間塵に CO 分子は吸着されて出てこない。一方、温度上昇とともに水素原子の吸着が少なくなると、星間塵表面上に豊富になった CH_3O など水素化されたラジカルからの飽和有機分子生成も効率よく起こるようになると期待される。実際、2003年にへびつかい座の IRAS16293-2422 で HCOOCH_3 分子や $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ 分子などが検出されて以降 (Cazaux et al., 2003),

NGC1333IRAS4A/4B など他の原始星まわりからも同様に検出され (Bottinelli et al., 2007; Sakai et al., 2006), どの原始星まわりでも同様にこれらの分子が豊富であると思われた。

しかし、おうし座の L1527 分子雲コアにある原始星 IRAS04368+2557 においては、高感度観測にもかかわらずそれらの分子は検出されなかった。その後の観測により、L1527 では星形成領域であるにもかかわらず飽和有機分子は非常に少ない一方で、炭素鎖分子や $\text{c-C}_3\text{H}_2$ などの不飽和有機分子、なかでも比較的短い炭素鎖をもつものが豊富であることがわかった。L1527 においては、原始星まわりの半径 500–1,000 au 程度の比較的暖かい領域 (温度 25 K 程度) で星間塵から CH_4 が蒸発し、 CH_4 を起点とした不飽和有機分子の気相中での再生成 (Warm Carbon-Chain Chemistry: WCCC) が起こっている可能性が高いことが、炭素鎖分子の組成や分布、温度などからわかった (Sakai et al., 2010; Sakai and Yamamoto, 2013)。

ここで問題となるのは、なぜ、この天体では、 CH_4 を起点とした炭素鎖分子の再生成が起こり得るのか、また、なぜ L1527 では CH_3OH や HCOOCH_3 などの有機分子

が少ないのかということである。前述の IRAS16293-2422 や NGC1333IRAS4A においては、CCH や $c\text{-C}_3\text{H}_2$ などは非常に少なく、再生成はそれほど効果的ではないように見える。この違いの原因として最も有力なのが、星間塵の組成の違いである。

2.2 節で述べたように、星間塵への分子の吸着（凍結）は、分子雲の温度が低い星なしコア時代から始まる。希薄な星間雲から密度が上がると共に、分子のスペクトル線により雲の温度は 10 K 程度まで下がっていく。その過程を起点として、分子の星間塵への吸着も始まる。しかしながら、星間紫外線によって分子の破壊が起こる希薄な星間雲から、比較的密度の高い分子雲が形成され、そこでさらに重力収縮が始まり、原始星が形成されるまでの時間は、その環境によって異なり得る。分子雲形成からすぐに重力収縮により原始星が誕生する場合もあれば、周囲の星の影響などにより乱流が卓越し、重力収縮が始まるのが遅い場合もあるだろう。炭素原子 C から CO が生成されるのにかかる時間は 100 万年程度であるが、重力収縮が始まったコアから原始星が誕生する時間は数 10 万年程度と短い。従って、重力収縮が始まる時点で、気相中の炭素原子と CO 分子の存在量比率は、天体によってやや違ってよい。それらの原子・分子が星間塵に吸着後、星間塵上では水素化反応が進み、それぞれ CH_4 と CH_3OH が生成される。前者の場合 WCCC を引き起こし、後者の場合飽和有機分子が豊富となる。たとえば、外圧の効果などにより母体となる分子雲形成からすぐに重力収縮を起こして原始星が誕生すれば、WCCC が起こりやすいだろう。逆に、分子雲形成から時間が経ってから、あるいは他の原始星が先に誕生するなど数世代後に雲の中で重力収縮が始まって原始星が誕生した場合、飽和有機分子に富んだ天体となる可能性が高い。

このように飽和有機分子に恵まれる原始星をホットコア天体、あるいは、ホットコリノ天体と呼ぶ。

最近、ペルセウス座分子雲において、一定量のガス質量と明るさを持つ原始星天体すべてに対する化学サーベイを行った (Higuchi et al., 2018)。同じ分子雲の中で誕生した原始星であるにもかかわらず、そのエンベロープの化学組成を調べると、WCCC 天体に近いものからホットコリノ天体に近いものまで、大きな多様性があることが明らかになった (図 4)。ここでは、CCH や $c\text{-C}_3\text{H}_2$ を WCCC 天体の指標、 CH_3OH をホットコリノ天体の指標として、その比を取っている。この比は天体ごとで大きくばらつくこと、さらに、飽和有機分子に富んだ天体は主に母体となる分子雲の中心付近で誕生しやすいことなどから、上記の仮説が少なくとも原因の一つである可能性が高まった。

上記の一連の結果は、原始星誕生の際の化学組成に多様性がありえることを明瞭に示した点で意義が大きい。ここでは不飽和有機分子と飽和有機分子という軸での多様性について議論したが、原始星の誕生過程においては、他にも多様性を生む原因があって不思議ではなく、どのような化学組成の天体がどのような環境や物理進化過程において誕生するのか、その全貌の解明が、私達の太陽系の物質的起源を知る上でも極めて重要である。

5. 今後の展望

近年、観測感度の向上により、複雑な有機分子やそれらの同位体すらも検出可能となっている。また、星なし分子雲 TMC-1 (MP) での HCOOCH_3 の検出のように、例え少量の存在であっても、複雑な分子が検出できるようになった。スペクトル線の形状や同位体比率、分子分

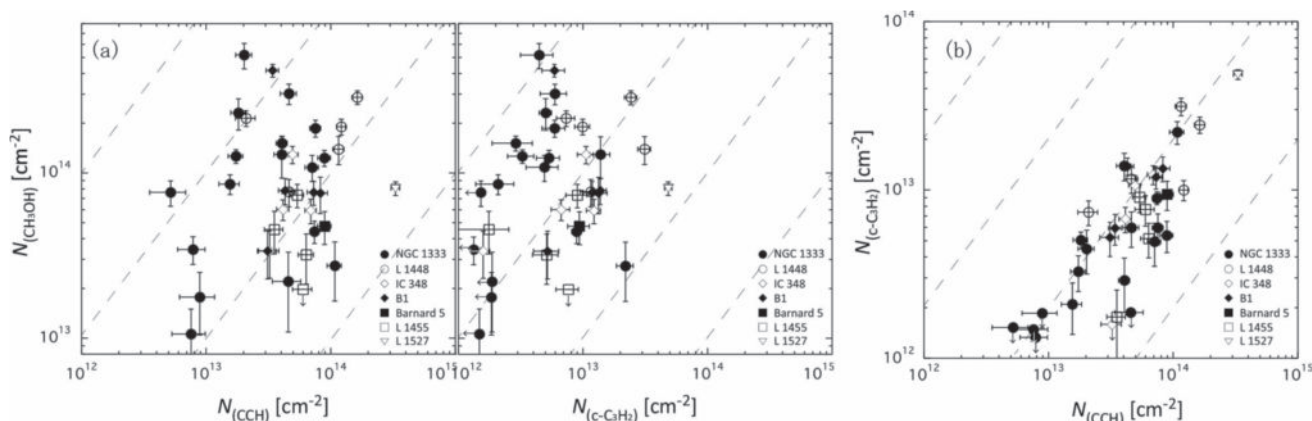


図 4: ペルセウス座分子雲における化学的多様性

34 個の若い原始星のエンベロープ (5,000 au 程度) において、CCH 分子と $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子の存在量はいよ相関 (相関係数 0.88) を示すが、それらと CH_3OH の比では 2 桁ものばらつき (それぞれ相関係数 0.01, および 0.1) を示す。 (Higuchi et al., 2018 を改変)

布をつぶさに調べ上げることで、検出された分子の生成過程にまで踏み込んだ議論ができるようになった。その一方で、様々な反応における反応効率や分岐比、反応バリア、表面反応、表面からの脱離メカニズムなど、多岐にわたる分子科学の詳細な情報が欠けていることも明らかになりつつある。それらの情報なくして、星間空間で起こっている化学反応の実態を理解することは難しい。今後、宇宙における化学進化を追うためには、分子科学分野と協力して研究をすすめていくことが必要だろう。

観測的にも、原始星エンベロープで発見された化学的多様性が、惑星系形成領域にどのようにもたらされているのか、高分解能での観測的研究も待たれる。惑星系形成領域での多様性の理解は、惑星の化学的多様性の理解、すなわち原始地球環境の化学的起源とも直結する重要な課題である。今後、さらなる高感度観測や大規模サーベイなどでこれらが明らかになっていくと期待される。

謝辞

本稿執筆にあたって、特に、おうし座分子雲 TMC-1 における有機分子観測に尽力した相馬達也氏、L1527 における同位体比観測およびラインサーベイ観測に尽力した吉田健人氏、冷たい分子雲での分子進化プロセス解明において、観測・議論など様々な面で多大なご協力をいただいた渡邊祥正氏、酒井剛氏、そして山本智先生に感謝したい。

なお、筆者は、文部科学省 科学研究費 新学術領域研究 (25108005)、JSPS 科学研究費 基盤研究 (C) (25400223)、基盤研究 (B) (16H03964)、基盤研究 (S) (18H05441)、および JSPS 二国間交流事業フランスとの共同研究からの支援を受けている。

参考文献

- Araki, M., S. Takano, N. Sakai et al. (2016) Precise Observations of the $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ Ratios of HC_3N in the Low-Mass Star-Forming Region L1527. *Astrophys. J.*, **833**, 291.
- Arce, H. G., J. Santiago-Garcia, J. K. Jørgensen, M. Tafalla, and R. Bachiller (2008) Complex Molecular Molecules in the L1157 Molecular Outflow. *Astrophys. J.*, **681**, L21-L24.
- Bachiller, R., S. Liechti, C. M. Walmsley, and F. Colomer (1995) Methanol Enhancement in Young Bipolar Outflows. *Astron. Astrophys.*, **295**, L51-L54.
- Bacmann, A., V. Taquet, A. Faure, C. Kahane, and C. Ceccarelli (2012) Detection of Complex Organic Molecules in a Prestellar Core: A New Challenge for Astrochemical Models. *Astron. Astrophys.*, 541, L12.
- Benson, P. J., P. Caselli, and P. C. Myers (1998) Dense Cores in Dark Clouds. XI. A Survey for N_2H^+ , C_3H_2 , and CCS . *Astrophys. J.*, **506**, 743-757.
- Blake, G. A., E. C. Sutton, C. R. Masson, and T. G. Phillips (1987) Molecular Abundances in OMC-1: The Chemical Composition of Interstellar Molecular Clouds and the Influence of Massive Star Formation. *Astrophys. J.*, **315**, 621-645.
- Bottinelli, S., C. Ceccarelli, R. Neri, et al. (2004) Near-Arcsecond Resolution Observations of the Hot Corino of the Solar-Type Protostar IRAS 16293-2422. *Astrophys. J. Lett.*, **617**, L69-L72.
- Bottinelli, S., C. Ceccarelli, J. P. Williams, and R. Lefloch, (2007) Hot corinos in NGC 1333-IRAS4B and IRAS2A. *Astron. Astrophys.*, **463**, 601-610.
- Caselli, P., C. M. Walmsley, M. Tafalla, L. Dore, and P. C. Myers (1999) CO Depletion in the Starless Cloud Core L1544. *Astrophys. J.*, **523**, L165-L169.
- Cazaux, S., A. G. G. M. Tielens, C. Ceccarelli et al. (2003) The Hot Core around the Low-Mass Protostar IRAS 16293-2422: Scoundrels Rule! *Astrophys. J. Lett.*, **593**, L51-L55.
- Cummins, S. E., R. A. Linke, and P. Thaddeus (1986) A Survey of the Millimeter-Wave Spectrum of Sagittarius B2. *Astrophys. J. Suppl.*, **60**, 819-878.
- Ebisawa, Y., H. Inokuma, N. Sakai, K. M. Menten, H. Maezawa, and S. Yamamoto (2015) OH 18 cm Transition as a Thermometer for Molecular Clouds. *Astrophys. J.*, **815**, 13.
- Garrod, R. T., V. Wakelam, and E. Herbst (2007) Non-thermal desorption from interstellar dust grains via exothermic surface reactions. *Astron. Astrophys.*, **467**, 1103-1115.
- Geppert, W. D., M. Hamberg, R. D. Thomas et al. (2006) Dissociative recombination of protonated methanol. *Faraday Discuss.*, **133**, 177-190.
- Herbst, E. (1981) Can negative molecular ions be detected in dense interstellar clouds? *Nature*, **289**, 656-657.
- Herbst, E. (1983) Ion-molecule synthesis of interstellar molecular hydrocarbons through C_4H : toward molecular complexity. *Astrophys. J. Suppl.*, **53**, 41-53.
- Herbst, E. and C. M. Leung (1989) Gas Phase Production of Complex Hydrocarbons, Cyanopolynes, and Related Compounds in Dense Interstellar Clouds. *Astrophys. J. Suppl.*, **69**, 271-300.
- Higuchi, A. E., N. Sakai, Y. Watanabe et al. (2018) Chemical Survey toward Young Stellar Objects in the Perseus Molecular Cloud Complex. *Astrophys. J. Suppl.*, **236**, 52.
- Hirota, T., M. Ohishi, and S. Yamamoto (2009) A Search for Carbon-Chain-Rich Cores in Dark Cloud. *Astrophys. J.*, **699**, 585-602.
- Jimenez-Serra, I., A. I. Vasyunin, P. Caselli et al. (2016) The Spatial Distribution of Complex Organic Molecules in the L1544 Pre-stellar Core. *Astrophys. J. Lett.*, **830**, L6.
- Knight, J. S., C. G. Freeman, M. J. McEwan et al. (1986)

- Production and loss of HC₃N in interstellar clouds - Some relevant laboratory measurements. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **219**, 89–94.
- Langer, W. D., T. E. Graedel, M. A. Frerking, and P. B. Armentrout (1984) Carbon and oxygen isotope fractionation in dense interstellar clouds. *Astrophys. J.*, **277**, 581–604.
- Maezawa, H., M. Ikeda, T. Ito et al. (1999) Large-Scale Mapping Observations of the C I ³P₁-³P₀ Line toward Heiles Cloud 2 in the Taurus Dark Cloud. *Astrophys. J.*, **524**, L129–L132.
- McGuire, B. A., A. M. Burkhardt, S. Kalkenstien et al. (2018) Detection of the aromatic molecule benzonitrile (c-C₆H₅CN) in the interstellar medium. *Science*, **359**, 202–205.
- Marca, C., K. Schreyer, R. Launhardt, D. A. Semenov, and Th. Henning (2012) Tracing the evolutionary stage of Bok globules: CCS and NH₃. *Astron. Astrophys.*, **537**, A4.
- Oya, Y., N. Sakai, A. Lopez-Sepulcre et al. (2016) Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS16293-2422 Source A Studied with ALMA. *Astrophys. J.*, **824**, 88.
- Sakai, N., T. Sakai, and S. Yamamoto (2006) Detection of HCOOCH₃ toward a Low-Mass Protostar, NGC1333 IRAS 4B. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **58**, L15–L18.
- Sakai, N., M. Ikeda, M. Morita et al. (2007) Production Pathways of CCS and CCCS inferred from their ¹³C Isotopic Species. *Astrophys. J.*, **663**, 1174–1179.
- Sakai, N., T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto (2010) Distribution of Carbon—Chain Molecules in L1527. *Astrophys. J.*, **722**, 1633–1643.
- Sakai, N., H. Maezawa, T. Sakai, K. M. Menten and S. Yamamoto (2012) CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 as a Tracer of Molecular Cloud Evolution. *Astron. Astrophys.*, **546**, A103.
- Sakai, N. and S. Yamamoto (2013) Warm Carbon-Chain Chemistry. *Chem. Rev.*, **113**, 8981–9015.
- Sakai, N., T. Sakai, T. Hirota et al. (2014) Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar. *Nature*, **507**, 78–80.
- Soma, T., N. Sakai, Y. Watanabe, and S. Yamamoto (2015) Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1. *Astrophys. J.*, **802**, 74.
- Soma, T., N. Sakai, Y. Watanabe, and S. Yamamoto (2018) Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1. *Astrophys. J.*, **854**, 116.
- Sugimura, M., T. Yamaguchi, T. Sakai et al. (2011) Early Results of the 3mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **63**, 459–472.
- Suzuki, H. (1979) Molecular Evolution in Interstellar Clouds. I: Ion Chemistry in Dense Clouds. *Prog. Theor. Phys.*, **62**, 936–956.
- Suzuki, H., S. Yamamoto, M. Ohishi et al. (1992) A Survey of CCS, HC₃N, HC₅N, and NH₃ toward Dark Cloud Cores and their Production Chemistry. *Astrophys. J.*, **392**, 551.
- Takano, S., A. Masuda, Y. Hirahara, et al. (1998) Observations of ¹³C Isotopomers of HC₃N and HC₅N in TMC-1: Evidence for Isotopic Fractionation. *Astron. Astrophys.*, **329**, 1156–1169.
- Taniguchi, K., M. Saito, and H. Ozeki (2016) ¹³C Isotopic Fractionation of HC₃N in Star-Forming Regions: Low-Mass Star-Forming Region L1527 and High-Mass Star-Forming Region G28.28–0.36. *Astrophys. J.*, **830**, 106.
- Yamamoto, S. (2017) *Introduction to Astrochemistry: Chemical Evolution from Interstellar Clouds to Star and Planet Formation*. Springer Japan, Tokyo.
- Yoshida, K., N. Sakai, T. Tokudome et al. (2015) Abundance Anomaly of the ¹³C Isotopic Species of c-C₃H₂ in the Low-Mass Star Formation Region L1527. *Astrophys. J.*, **807**, 66.
- Yoshida, K., N. Sakai, Y. Nishimura et al. (2019) An Unbiased Spectral Line Survey Observation toward the Low-Mass Star-Forming Region L1527. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **71**, S18.

