

# 大質量星形成領域の炭素鎖分子の化学 —野辺山の歴史の継承と伝承—



谷口 琴美

〈Virginia Initiative on Cosmic Origins Fellow, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, USA〉

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kotomi.taniguchi@nao.ac.jp

現在までに約200種類の星間分子が発見されています。そのうちの40%程度は、炭素原子が複数連なった炭素鎖分子と呼ばれる、星間空間特有の分子です。炭素鎖分子の化学に関する研究は中小質量星形成領域を中心に進められてきましたが、野辺山45 m望遠鏡の研究成果は重要な役割を果たしてきました。その一方で、大質量星（太陽の8倍以上の質量をもつ星）形成領域での炭素鎖分子の化学に関する研究は遅れていました。そこで今回、炭素鎖分子のシリーズの一種であるシアノポリインに着目して大質量星形成領域において研究を進めてきました。大質量原始星周辺の暖かいガスにシアノポリイン分子が存在することや、化学進化の指標として使える可能性を示しました。本記事では、野辺山45 m望遠鏡の観測結果を中心に紹介します。

## 1. はじめに

### 1.1 星間分子と星間化学

現在までに約200種類の星間分子が同定されており、その数は年々増加し、複雑な分子が検出されています<sup>1)</sup>。これらの星間分子に基づいて各天体の化学組成や各分子の空間分布を調べることで、星形成領域の物理環境や進化段階を推定することが可能になります。このような星間化学分野の研究は、観測だけでなく、室内実験や化学反応ネットワークシミュレーションの手法も合わせることで進んできました。

### 1.2 炭素鎖分子の化学の研究

星間分子の中にはユニークなものがあります。炭素原子が複数連なった『炭素鎖分子』と呼ばれるものは、星間分子のうち約40%を占めます。炭素鎖分子は二重結合や三重結合をもち、不安定なラジカル構造をもつものが大多数です。そのため、地球大気のような密度の高い領域では生き残

れず、星間空間特有な分子となります。

1970年代に始まった炭素鎖分子の化学の研究は、中小質量星形成領域を中心に行われてきて、野辺山45 m望遠鏡の研究成果は大きな貢献をしてきました。例として、まず、星なし分子雲コアから星形成コアにかけての炭素鎖分子の化学進化を最初に示した結果が挙げられ、炭素鎖分子は星なし分子雲コアで多く、星形成コアで減少することがわかりました<sup>2)</sup>。炭素鎖分子は若い分子雲で炭素原子イオンや炭素原子から生成するため、分子雲の初期段階から存在しますが、分子雲の進化が進むにつれて、主に酸素原子との反応で減少します。また、分子雲の進化に伴い密度が高くなるにつれて、ダストへの吸着も起こります。したがって、原始星周辺では炭素鎖分子はあまり存在しないと考えられていました。

その後研究が進み、中小質量原始星周辺での炭素鎖分子の生成メカニズムとして『暖かい炭素鎖分子の化学; Warm Carbon Chain Chemistry (以

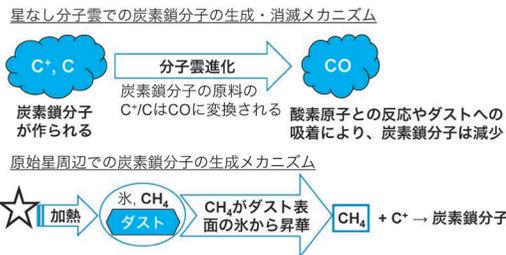


図1 中小質量星形成領域での炭素鎖分子の生成・消滅メカニズム. 上段は星なし分子雲内での炭素鎖分子の生成・消滅メカニズム, 下段はWCCCの炭素鎖分子の生成メカニズム.

下WCCC』というアイデアが提案されました<sup>3)</sup>. WCCCとは、原始星からの加熱によりダストから昇華してくるメタン(CH<sub>4</sub>)を原料にして、炭素鎖分子が生成するメカニズムです. 図1に星なし分子雲とWCCCでの炭素鎖分子の生成メカニズムを模式的に示しました.

さらに研究が進み、<sup>13</sup>C同位体種の存在量の比較、すなわち<sup>13</sup>C同位体分別、から各分子の生成メカニズムに制限を加える手法が確立されてきました<sup>4), 5)</sup>. 炭素鎖分子は複数の炭素原子を含みますが、各炭素原子が<sup>13</sup>Cに置き換わった<sup>13</sup>C同位体種は、その分子が含む炭素原子の数だけ存在します. 電波天文観測では周波数分解能が高いため、その僅かな差を区別することができます. 図2は星間空間で効率的に起こると考えられるシアノアセチレン(HC<sub>3</sub>N)の生成経路の候補と、野辺山45 m望遠鏡を用いたHC<sub>3</sub>Nの<sup>13</sup>C同位体分別の観測結果から推定される三つの星なし分子雲コア(TMC-1, L1521B, L134N)におけるHC<sub>3</sub>Nの主要生成経路を示しています. HC<sub>3</sub>Nには三つの<sup>13</sup>C同位体種(H<sup>13</sup>CCCN, HC<sup>13</sup>CCN, HCC<sup>13</sup>CN)が存在します. TMC-1とL1521Bにおいては、H<sup>13</sup>CCCNとHC<sup>13</sup>CCNの存在量がほぼ同等であり、HCC<sup>13</sup>CNが他の二つより多いことがわかりました. この結果を説明できるHC<sub>3</sub>Nの生成経路は、アセチレン(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)とシアノラジカル(CN)の反応であり、この反応がTMC-1とL1521Bの主要生成経路で

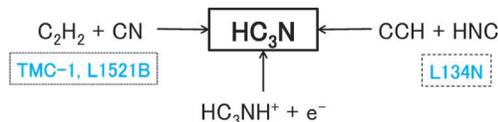


図2 シアノアセチレン(HC<sub>3</sub>N)の主要な生成経路の候補と<sup>13</sup>C同位体分別の観測から推定された三つの星なし分子雲コアにおけるHC<sub>3</sub>Nの主要生成経路<sup>4), 6)</sup>.

あることが示唆されます<sup>4), 6)</sup>. その一方、L134Nでは、三つの<sup>13</sup>C同位体種の存在量がすべて異なりました. この結果をもとに、CCHとHNCの反応がHC<sub>3</sub>Nの主要な生成経路であろうと提案されました<sup>6)</sup>.

これら三つの星なし分子雲コアはいずれも似たような物理環境をもちますが、化学的に見ると違いが見えてきました. この違いは分子雲の化学的進化段階の違いによるものではないかと示唆されました<sup>6)</sup>. 特に、化学反応ネットワークシミュレーションでは、CNの存在量が分子雲の進化が進むにつれて減少することが示されたため、CNを含む反応が効率的に起こりにくくなることが考えられます. L134NはTMC-1やL1521Bに比べて化学的に進化が進んだ天体であることが知られていたため、L134NではCNを含む反応が非効率になり、別の反応(CCH+HNC)が卓越したと考えられます.

以上に示したように、炭素鎖分子は若い星なし分子雲コアからも検出できるため、非常に若い段階の物理環境や進化段階を調べることに使え、重要なツールとなる可能性をもっています. しかし、炭素鎖分子の化学は太陽の8倍以上重い星である大質量星形成領域では明らかになっていませんでした. そこで、大質量星形成領域において、炭素鎖分子のシリーズの一種であるシアノポリイン(HC<sub>2n+1</sub>N; n=1,2,3,...)に着目して、研究を進めてきました.

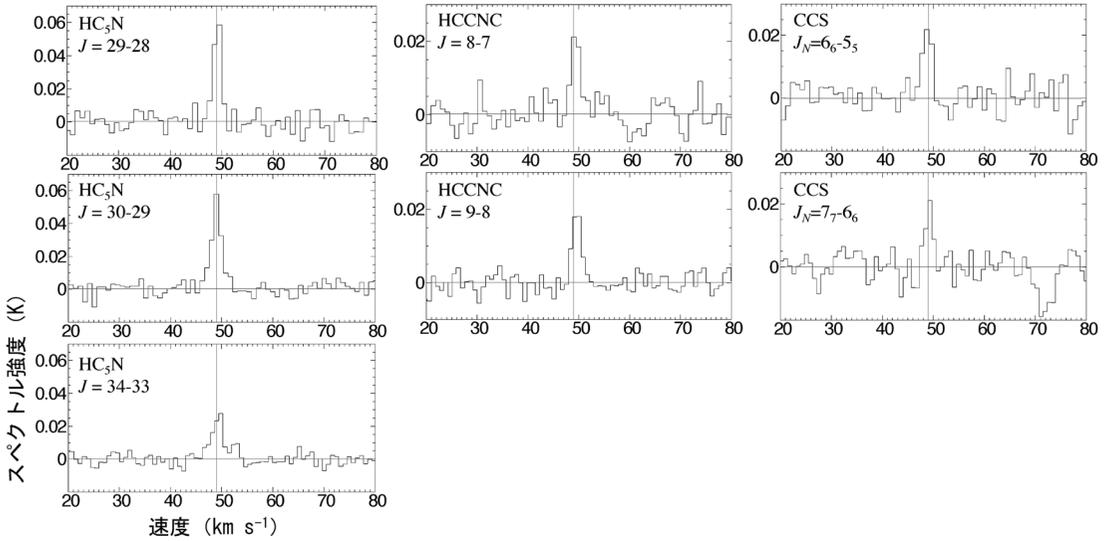


図3 野辺山45 m望遠鏡で得られたG28.28-0.36における炭素鎖分子のスペクトル。縦軸はスペクトル強度、横軸は速度成分。49 km s<sup>-1</sup>の縦線はG28.28-0.36の速度成分を表しており、G28.28-0.36からの放射であることを示す。

## 2. 大質量原始星周辺のシアノポリインの化学

### 2.1 暖かいガスにシアノポリインは存在するか？

前述のとおり、一般的に炭素鎖分子は原始星周辺では少ないと思われてきました。それに対し、化学反応ネットワークシミュレーションからは、ダストから昇華してくるアセチレン (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) によるシアノポリインの効率的な生成メカニズムが提案されました<sup>7)</sup>。図1の下段のCH<sub>4</sub>をC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>に置き換えて考えたものになります。このシミュレーション結果を受けて、HC<sub>5</sub>Nのホットコア（大質量原始星周辺の高温・高密度の分子が豊富な領域）のサーベイ観測が行われました<sup>8)</sup>。その観測からは、79天体中35天体からHC<sub>5</sub>Nを検出したと筆者らは述べていましたが、1本の回転遷移のラインの検出では検証が不十分でした。私が修士課程を修了する半年ほど前、博士課程の研究テーマで悩んでいた最中にこれらの論文を読み、「大質量星形成領域の炭素鎖分子の化学」をテーマにしようと直感で決めてしまいました。

研究テーマを固めた時期は野辺山45 m望遠鏡の共同利用観測の観測提案の受付時期でした。そこで観測提案書を提出したところ、部分採択され、1天体分の観測を実施しました。観測する天体の候補は複数ありましたが、偶然に観測したG28.28-0.36という大質量星形成領域から、複数の炭素鎖分子のラインを検出しました。図3はこの観測で検出された炭素鎖分子 (HC<sub>5</sub>N, HCCNC, CCS) のスペクトルを示します。特に、HC<sub>5</sub>Nの輝線はエネルギーが高いもので、HC<sub>5</sub>Nが暖かいガスに存在することがわかってきました。

この結果をもとにして、野辺山45 m望遠鏡だけでなく、アメリカのGreen Bank 100 m望遠鏡やVery Large Array干渉計にも観測提案を通し、追加観測を行いました。

### 2.2 大質量原始星周辺に化学的多様性はあるか？

化学組成は物理環境や化学進化の良い指標となることは前述しましたが、化学組成を調べる利点として、観測した時点だけでなく、星形成領域の過去の状態も推測するツールになりうるということです。中小質量星形成領域ではWCCCが提案

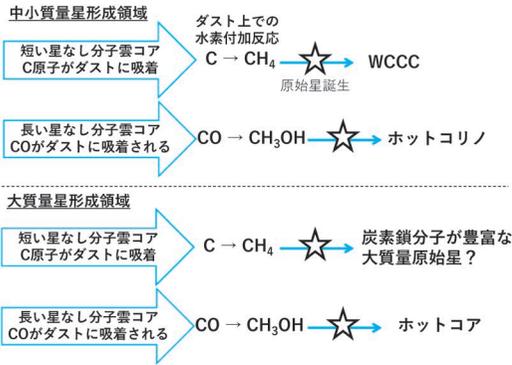


図4 原始星周辺の化学的多様性と考えられる起源.

されました。通常、原始星周辺ではメタノール (CH<sub>3</sub>OH) などの水素原子が多く付加した複雑有機分子が豊富に検出されることが多く、中小質量星形成領域ではホットコリノと呼ばれ、大質量星形成領域ではホットコアと名づけられています。ホットコリノとWCCCの違いが生じた要因として、星なし分子雲コアの時代の長さが関係しているのではないかと提唱されています<sup>3)</sup>。図4は原始星周辺の化学的多様性と中小質量星形成領域で提案された化学的多様性の要因をまとめたものです。星なし分子雲コアの時代が短いと、炭素原子がCOに変換される時間が十分取れず(図1参照)、炭素原子のままコアの中心でダストに吸着されます。ダスト上では水素原子の付加反応が効率的に起こるため、炭素原子はCH<sub>4</sub>になります。原始星が誕生すると、気相にCH<sub>4</sub>が昇華して炭素鎖分子の原料となり、WCCCメカニズムで炭素鎖分子が効率的に生成します。

その一方で、炭素原子がCOに変換されるのに十分な長い星なし分子雲コアの時間があれば、ダスト上には主にCOが吸着され、水素付加反応によりCH<sub>3</sub>OHが生成します。ダスト上での反応や原始星からの加熱により昇華した後さまざまな反応を経て、より複雑な有機分子が生成します(ホットコリノ)。大質量星形成領域のホットコアもホットコリノと同様です。

しかし、大質量星形成領域において、WCCC天体に対応するものがあるかというのは明らかになっていません。大質量星形成領域においてもWCCCのような天体の存在の有無を調べることは、大質量星の形成過程の解明につながる可能性があります。そこで、Green Bank 100 m望遠鏡、野辺山45 m望遠鏡、ASTE望遠鏡を用いて観測を行い、化学組成に違いがあるかを調べました<sup>9), 10)</sup>。Green Bank 100 m望遠鏡では4個の大質量原始星(G10.30-0.15, G12.89+0.49, G16.86-2.16, G28.28-0.36)の観測を行いました<sup>9)</sup>。これらの天体はすでにHC<sub>5</sub>Nの輝線の検出報告<sup>8)</sup>がある35天体のうち、前述の三つすべての望遠鏡から観測できる天体です。野辺山45 m望遠鏡とASTE望遠鏡では、G10.30-0.15を除く3天体の観測を行いました<sup>9), 10)</sup>。

検出報告にあるとおり、観測した全天体からHC<sub>5</sub>Nの輝線が検出されましたが、Green Bank 100 m望遠鏡の観測では、G10.30-0.15を除く3天体から、さらに長いHC<sub>7</sub>Nも検出されました<sup>9)</sup>。HC<sub>7</sub>Nの明確な検出報告は大質量原始星周辺ではなかったため、今回観測した天体は長い炭素鎖分子を多く含むガスが周辺に存在することを示しています。

野辺山45 m望遠鏡では観測した全3天体から100 GHz帯にある高エネルギーのHC<sub>5</sub>Nの輝線を検出しました<sup>9)</sup>。前述のとおり、これらの高エネルギーの輝線は、HC<sub>5</sub>Nが星なし分子雲コアのような温度の低い領域にある場合は検出できないものであるため、HC<sub>5</sub>Nは少なくとも暖かいガスに存在すると言えます。図5にHC<sub>5</sub>N, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>CCHの3種類の分子の水素分子(H<sub>2</sub>)に対する存在量比を3天体間で比較したものを示します<sup>10)</sup>。分子の励起状態を調べるrotational diagramという手法を用いた解析より、この図は暖かいガスの化学組成を反映していると考えられます。G12.89+0.49ではHC<sub>5</sub>Nの存在量が最も低く、CH<sub>3</sub>OHの存在量が最も高い傾向があります。そ

の一方、G28.28-0.36ではHC<sub>5</sub>Nの存在量が最も高く、CH<sub>3</sub>OHの存在量が低いことがわかります。G16.86-2.16はこれら2天体の中間の特徴です。このことから、HC<sub>5</sub>NとCH<sub>3</sub>OHに負の相関がある可能性が考えられます。CH<sub>3</sub>CCHの存在量は3天体間で大きな違いが見られません。また、このほかにも複雑有機分子の回転遷移の輝線が複数検出されました<sup>10)</sup>。G12.89+0.49から最も多くの種類の輝線が検出され、逆にG28.28-0.36ではCH<sub>3</sub>OH以外の有機分子ではCH<sub>3</sub>CHOのみが検出されました。

ASTE望遠鏡の観測では、G12.89+0.49からCH<sub>3</sub>OHの高エネルギーの輝線が検出されましたが、G28.28-0.36からは検出されませんでした。

大質量星形成領域にもWCCCのような天体が存在する場合、図4より炭素鎖分子とCH<sub>3</sub>OHは反相関になると予想されます。図5はそのことを反映している可能性もあります。しかし、今回の観測は単一鏡で1点のみの観測であるため、空間分布がわかりません。大質量原始星周辺の化学的多様性を確立するためには、干渉計を用いた高空間分解の観測により、各分子の空間分布とそれらの関係性を調べるのが重要になってきます。

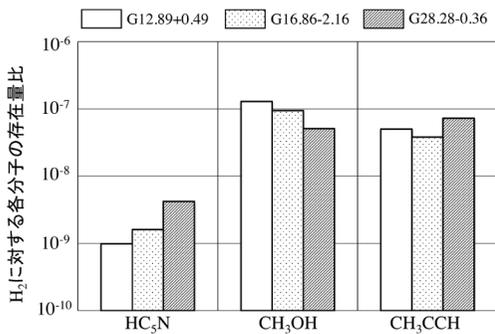


図5 三つの大質量原始星周辺の化学組成の比較<sup>10)</sup>。縦軸は水素分子に対する各分子(HC<sub>5</sub>N, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>CCH)の存在量比を示す。

### 3. 大質量星形成領域の炭素鎖分子の化学進化

#### 3.1 大質量星の進化

大質量星の形成過程については完全には明らかになっていませんが、図6のような過程を経ていると考えられています。大質量の星なし分子雲コアから大質量原始星が誕生しますが、原始星の周辺には密度の高いガスやダストがあるため、誕生直後の大質量原始星を赤外線や可視光で見つけるのは難しくなります。原始星の進化が進むにつれて、アウトフローが見られ、可視光や赤外線でもコアの中心で誕生していた原始星が観測できるようになってきます。また、原始星周辺の高温(>100 K)で高密度(>10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup>)環境では、複雑な有機分子が多く見られ、ホットコアが存在します。さらに進化が進むと、中心星から水素原子を電離するのに十分なエネルギーをもつ紫外線が放出され、電離水素領域(H II領域)が形成されます。このような大きな流れは提唱されていますが、どのようにして大量の物質を集めるかといったメカニズムについては、今日でも議論が続いています。大質量星形成過程の解明も重要ですが、物理的・化学的な初期状態も十分に解明されていないという点も重大な問題点です。

#### 3.2 大質量星形成領域の化学進化の指標

大質量形成領域の化学組成の大規模なサーベイ観測として、オーストラリアにあるMopra 22 m望遠鏡を用いた『The Millimeter Astronomy Legacy Team 90 GHz (MALT90)』<sup>11), 12)</sup>があります。MALT90サーベイは、周波数が86.7から93.2 GHzの観測で、比較的小さい分子(N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HCN, HNC,

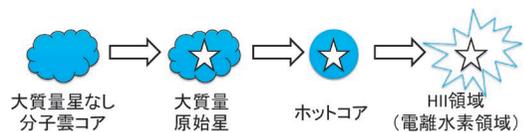


図6 大質量星の形成過程の描像。

HCO<sup>+</sup>, など) に焦点を当て、図6に示した星なしコアから電離水素領域までの天体をターゲットにしています。このMALT90のデータを使って、大質量星形成領域の化学進化の指標を確立しようとした研究がありました。これらの研究によると、例えば、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>とHCO<sup>+</sup>の存在量は進化が進むにつれて増加する傾向があり、HCN/HNCの積分強度比も進化が進むにつれて増加する傾向が示唆されました<sup>13)</sup>。また、大質量星形成領域の温度、密度、紫外線強度などの物理環境は中小質量星形成領域とは異なるために、化学プロセスも中小質量星形成領域のものとは異なることが指摘されました<sup>13)</sup>。さらに、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>やCCH/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>の存在量比は、大質量原始星から電離水素領域に進化が進むにつれて減少傾向を示すことがわかり、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>やCCHがH<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>との比を取ることで化学進化の良い指標となることが示唆されました<sup>14)</sup>。しかし、これらはあくまで化学進化の指標として使える可能性が示されただけであり、はっきりとした化学進化の指標は、大質量星形成領域では確立されていない状況です。

そこで、中小質量星形成領域と同様に、炭素鎖分子を使って大質量星形成領域の化学進化を調べることができるのではないかと考えました。中小質量星形成領域での炭素鎖分子の特徴は、非常に若い星なし分子雲コアでも検出できることでし

た。もし、大質量星形成領域でも中小質量星形成領域と同様であるなら、炭素鎖分子を観測することは、大質量星形成領域の初期の化学組成を調べることにつながる可能性が考えられました。また、誕生直後の大質量星原始星は濃いガスやダストに埋もれているので、可視光や赤外線では見つけにくいという問題があります。そこで、星なし分子雲コアから大質量原始星の部分で鋭敏な化学進化の指標を見つけることで、大質量形成領域の進化段階をより詳しく調べることができるのではないかと考えられます。

### 3.3 炭素鎖分子を使った大質量形成領域の化学進化の指標の確立を目指して

野辺山45 m望遠鏡を用いて、HC<sub>3</sub>N, HC<sub>5</sub>NといったシアノポリインとN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>の検出を目指して、17個の大質量星なし分子雲コアと35個の大質量原始星のサーベイ観測を行いました。観測天体は大質量星なし分子雲コアと大質量原始星の天体リスト<sup>15), 16)</sup>から、野辺山45 m望遠鏡で効率的に観測できる位置にあるものを選びました。

HC<sub>3</sub>Nは観測した天体のほぼすべてから検出されましたが、HC<sub>5</sub>Nはその半分程度の検出率でした<sup>17)</sup>。そこで、化学進化の指標としてHC<sub>3</sub>Nを使うことにしました。

後期型の分子として考えられているN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>を用いて、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>とHC<sub>3</sub>Nの柱密度比、N(N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>)/N(HC<sub>3</sub>N)、を化学進化の指標として使えるか調べることにしました。N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>やNH<sub>3</sub>が後期型分子と言われる理由は、これらの分子は気相で生成する場合、N<sub>2</sub>からの生成経路が提案されていますが、N<sub>2</sub>の生成に時間がかかるためです。そのため、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>やNH<sub>3</sub>は炭素鎖分子に比べ、コアの進化段階の後半でピークを迎えると考えられます。図7に横軸にN(N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>)/N(HC<sub>3</sub>N)柱密度比、縦軸にHC<sub>3</sub>Nの柱密度を取って、大質量星形成領域の星なしコアと星形成コア(大質量原始星)の結果を示しています。大質量星なし分子雲コアから大質量原始星にかけて進化が進むにつれて、

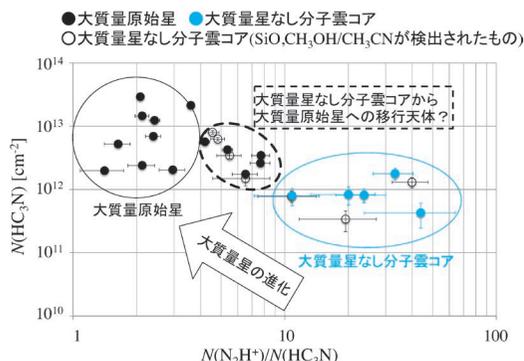


図7 大質量星なし分子雲コアから大質量原始星にかけての化学進化。

$N(N_2H^+)/N(HC_3N)$  柱密度比は減少する傾向を示しました。また、大質量星なし分子雲コアの定義は赤外線放射の検出がない天体<sup>15)</sup>ですが、分子輝線の観測から、SiO, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>CNなど星形成の兆候を示すものが検出されているものもあります。これらの天体は、図7では星なし分子雲コアから大質量原始星の間に位置する部分にプロットされました。この部分の天体は星なし分子雲コアから大質量原始星への過渡期の天体である可能性が考えられます。赤外線の観測では、原始星が高密度のガスやダストに深く埋もれているため星が生まれていないように見えていますが、化学進化の指標を使うと誕生直後の原始星が付随するかどうかを区別できる可能性が窺えます。 $N(N_2H^+)/N(HC_3N)$  柱密度比は大質量星なし分子雲コアと大質量原始星の段階で鋭敏な化学進化の指標の良い候補として考えられます。

また、今回の $N(N_2H^+)/N(HC_3N)$  柱密度比の減少傾向という結果は予想と反したものでした。中小質量星形成領域では、図8に示したように、 $N(NH_3)/N(CCS)$  柱密度比は増加傾向を示していたからです。図7と8は使っている分子種は違いますが、どちらも縦軸に炭素鎖分子(HC<sub>3</sub>NとCCS)の柱密度、横軸には後期型分子(N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>とNH<sub>3</sub>)と炭素鎖分子の柱密度比を取ったものです。それぞれの図中に示した、進化の矢印の向きは逆向きとなっているのがわかります。なぜこのような違いが見られたかというのが次の疑問になります。

今回は、図7からも読み取れるように、HC<sub>3</sub>Nの増加が顕著に見えました。これはHC<sub>3</sub>Nが大質量原始星周辺のガスで生成していることを示唆しています。前章で書いたとおり、シアノポリインは大質量原始星周辺でダストから昇華してきたCH<sub>4</sub>やC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>を基に生成していると考えられました<sup>17)</sup>。最も短いHC<sub>3</sub>NはHC<sub>5</sub>Nなどの長いものより比較的簡単に生成します。そのため、HC<sub>3</sub>Nが比較的多くの原始星周辺で生成していることが考えられ

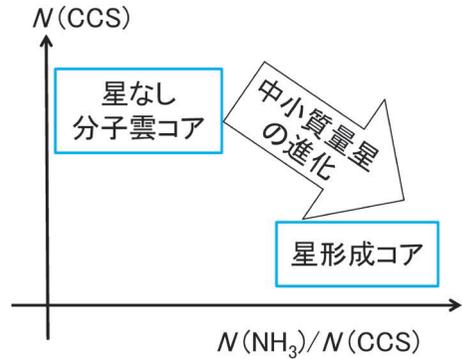


図8 中小質量星形成領域の星なし分子雲コアから星形成コアにかけての化学進化<sup>2)</sup>。

ます。また、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>の減少も僅かに見られました。これはCOとの反応(N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>+CO→N<sub>2</sub>+HCO<sup>+</sup>)によるN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>の破壊メカニズムによるものと考えられます。星なし分子雲コアの時代にダストに吸着していたCOは、大質量原始星からの加熱で昇華し、大質量原始星周辺の気相中には多くのCOが存在する環境があるため、そのような領域でN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>が効率的に壊されているのではないかと考えられます。このことから、HC<sub>3</sub>Nの生成およびN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>の破壊には、ダストから昇華してくる分子が大きくかかわっていると言えます。これが中小質量星形成領域の化学進化の指標と逆向きの傾向を示した要因と考えられます。大質量星形成領域の場合、中小質量星形成領域に比べて温度が高くなるため、大質量星形成領域ではダストから分子が多く昇華してきて、気相の化学反応に大きな影響を与えていると考えられます。

大質量星形成領域の初期段階の化学組成を知ること、また化学進化を調べることは、大質量星の形成過程の研究と深い関わりがあります。今回の結果から、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>が星なしコアですでに豊富に存在することから、中小質量星の星なしコアと比較して化学進化が進んだコアであることが考えられます。このことから、中小質量星と同じ化学進化のシナリオを当てはめることが正しいとは限りません。さらに、密度、温度、紫外線強度といった

物理環境は、大質量星形成領域と中小質量星形成領域では大きく異なります。これらの物理条件は化学反応の速度に大きな影響を与えます。したがって、大質量星形成領域の化学は中小質量星形成領域の拡大という単純な描像ではありません。複数の物理環境による影響と化学進化の関係を明らかにするためには、観測だけでなく、化学反応ネットワークシミュレーションで物理条件を変えながら、どのような因子がどの分子の存在量に影響を与えるのかといった影響も調べる必要があります。さらに、各分子の空間分布の情報を観測により得る必要があります。

#### 4. 最後 に

野辺山45 m望遠鏡の観測から、大質量星形成領域の炭素鎖分子の化学について、最初のステップとなる結果が得られてきました。中小質量星形成領域での炭素鎖分子の化学に関して野辺山45 m望遠鏡が率先して成果を出してきた、という歴史を少しでも受け継いだものになればと願っています。

野辺山45 m望遠鏡で得られた成果から提案された考えは、ほかの望遠鏡で得られた結果の解釈にも使われています。例えば、 $^{13}\text{C}$ 同位体分別の観測から生成経路を調べるという手法です。HC<sub>7</sub>Nの $^{13}\text{C}$ 同位体種の検出および同位体分別の導出は、現在の45 m望遠鏡では現実的な観測時間内では不可能と言えますが、Green Bank 100 m望遠鏡でTMC-1において達成されました。この結果に基づいてHC<sub>7</sub>Nの生成経路が議論され、野辺山45 m望遠鏡で得られた結果や考察が多数引用されました<sup>18)</sup>。HC<sub>7</sub>Nの $^{13}\text{C}$ 同位体分別を導出したGreen Bank 100 m望遠鏡の感度の良さに、私は感銘を受けました。TMC-1においては、HC<sub>3</sub>NとHC<sub>5</sub>Nの生成経路は議論されていましたが<sup>4), 5), 19)</sup>、次に長いHC<sub>7</sub>Nがどのようになっているかという疑問は残っていました。Green Bank 100 m望遠鏡の結果はこの疑問に答えるのに十分なものでした。

それと同時に、野辺山の観測結果やその解釈が受け継がれていくように感じました。

今回ご紹介した研究は、単一鏡を用いた観測が中心で、各分子の空間分布や天体ごとの特徴までは捉えきれいていません。大質量星形成領域は中小質量星形成領域に比べて距離が遠いため、干渉計を用いた高空間分解能の観測が必要になってきます。ALMA, Submillimeter Array (SMA), Very Large Array (VLA) などの干渉計を使った追加観測を行うことで、大質量原始星周辺の化学的多様性についてより明らかにできると考えられます。また、大質量星は集団的に星が生まれている領域に存在することが多く、共通の母体となる分子雲から誕生しています。そこで、同じ集団に属するほかの進化段階の天体との比較により、化学進化や周囲の物理環境による化学組成への影響の検証も可能になると考えられます。炭素鎖分子の観測には、低い周波数での観測も必要になってきます。そのため、ALMAのBand 1や2, Square Kilometer Array (SKA), next generation VLA (ngVLA) など、新たな観測装置でのサイエンスの展開も考えられます。野辺山45 m望遠鏡の結果を元に、研究を発展させていきたいと考えています。

今回は観測例の紹介でしたが、化学的多様性や大質量星形成過程と化学進化の関連について解決するためには、化学反応ネットワークシミュレーションや大質量星形成のモデルも不可欠です。観測とシミュレーションを組み合わせることで、大質量星形成過程の解明につながる研究に取り組んでいきたいと考えています。

#### 謝 辞

本稿の内容は筆者の博士論文<sup>20)</sup> および筆者らが発表した投稿論文に基づいています。博士課程の研究を進めるにあたり、丁寧かつ熱心なご指導をいただいた国立天文台／総合研究大学院大学の齋藤正雄教授には心から感謝いたします。これら

の成果は、齋藤教授、東邦大学の尾関博之教授をはじめ、多くの共同研究者の方々からの助言やご協力の賜物であり、厚く御礼申し上げます。東邦大修士課程および総研大博士後期課程に在学中、いつも温かい目で見守っていただいた、立松健一所長、南谷哲宏助教授はじめ国立天文台野辺山宇宙電波観測所の職員の方々に、深く感謝申し上げます。また、本稿執筆の機会を与えてくださった編集委員長の小宮山裕氏に感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞に代えさせていただきます。

### 参考文献

- 1) <https://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules> (2018.5.5)
- 2) Suzuki, H., et al., 1992, ApJ, 392, 551
- 3) Sakai, N., & Yamamoto, S., 2013, Chemical Reviews, 113, 8981
- 4) Takano, S., et al., 1998, A&A, 329, 1156
- 5) Taniguchi, K., et al., 2016, ApJ, 817, 147
- 6) Taniguchi, K., et al., 2017, ApJ, 846, 46
- 7) Chapman, J. F., et al., 2009, MNRAS, 394, 221
- 8) Green, C.-E., et al., 2014, MNRAS, 443, 2252
- 9) Taniguchi, K., et al., 2017, ApJ, 844, 68
- 10) Taniguchi, K., et al., 2018, ApJ, Submitted (arXiv:1804.05205)
- 11) Foster, J. B., et al., 2011, ApJS, 197, 25
- 12) Jackson, J. M., et al., 2013, PASA, 30, e057
- 13) Hoq, S., et al., 2013, ApJ, 777, 157
- 14) Yu, N., & Wang, J.-J., 2015, MNRAS, 451, 2507
- 15) Sridharan, T. K., et al., 2005, ApJL, 634, L57
- 16) Sridharan, T. K., et al., 2002, ApJ, 566, 931
- 17) Taniguchi, K., et al., 2018, ApJ, 854, 133
- 18) Burkhardt, A. M., et al., 2018, MNRAS, 474, 5068
- 19) Taniguchi, K., & Saito, M., 2017, PASJ, 69, L7
- 20) 谷口琴美, 2018, 博士論文 (総合研究大学院大学)

## Carbon-Chain Chemistry in High-Mass Star-Forming Regions—From Nobeyama to Next Generation—

Kotomi TANIGUCHI

*Virginia Initiative on Cosmic Origins Fellow,  
University of Virginia, Charlottesville, Virginia,  
USA*

*National Astronomical Observatory of Japan,  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Approximately 200 molecules have been detected in the interstellar medium and circumstellar shells so far. About 40% of them are classified as carbon-chain species, which are unique molecules in the space. Chemistry of carbon-chain molecules has been studied mainly in low-mass star-forming regions and observations with the Nobeyama 45-m radio telescope have achieved great results. On the other hand, studies about carbon-chain chemistry in high-mass star-forming regions have been behind. We progress studies focusing on cyanopolyne series. We found that long cyanopolyynes exist in the warm gas around massive young stellar objects. Moreover, we have shown the possibility that cyanopolyynes can be used as chemical evolutionary indicator in high-mass star-forming regions. In this article, I introduce studies about chemistry of carbon-chain molecules in high-mass star-forming regions mainly with the Nobeyama 45-m radio telescope.