

星形成領域における 7 mm 帯の星間化学の研究

谷口 琴美

〈学習院大学理学部物理学科 〒171-8588 東京都豊島区目白 1-5-1〉

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

Z45 受信機の観測周波数帯である 42–46 GHz では、CCS や HC_3N , HC_5N などの炭素鎖分子の輝線が観測できます。炭素鎖分子は、炭素原子が直線状に並んだ星間空間特有の分子で、低質量星形成領域では化学的進化の指標として使えることが知られていました。しかし、地球上の室内実験条件下では不安定なためにそれらの実験は難しく、詳細な化学的性質については完全には明らかになっていません。本記事では、Z45 受信機によって行われた、炭素鎖分子の生成経路を観測的に制限する研究と大質量星形成領域の炭素鎖分子に関する研究についてご紹介します。

1. はじめに

現在までに 200 種類以上の分子が星間空間で同定されており、それらの分子は 2 原子分子から 70 個の原子から成る分子まで、そのバラエティは多岐に渡ります [1]。このことから、宇宙空間では化学反応が豊かに起こっていることがわかります。星間空間で見つかった分子の中には、水 (H_2O) やお酢の主成分である酢酸 (CH_3OH) など、私たちの生活に馴染みのある分子も存在していますが、地球上では見かけない分子もあります。

宇宙空間特有の分子の中には、炭素原子が直線状に連なった、“炭素鎖分子”と呼ばれるものがあります。炭素鎖分子は二重結合や三重結合を多く含むために直線状の構造になりますが、この不飽和結合のために地上の室内実験の密度条件では不安定で、すぐに壊されてしまいます。一方で、星間空間のような希薄な環境下では他の分子との衝突頻度が低いため、炭素鎖分子も存在することができます。この炭素鎖分子は、現在までに同定された星間分子のうち 40% 程度を占め、星間空間では決して珍しいものではありません。炭素は分子の骨格となる重要な元素なので、炭素を多く

含む炭素鎖分子の化学を調べることは、宇宙空間における化学反応を理解するためにはとても重要です。

炭素鎖分子は、構造がユニークなだけでなく、星形成領域の進化段階を調べることにも役立ちます。国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて、低質量星形成領域の星なしコアと星形成コアにおける、数種類の炭素鎖分子 (CCS , HC_3N , HC_5N) とアンモニア (NH_3) のサーベイ観測が行われ、コアの進化が進むにつれて NH_3/CCS の柱密度比が増加することが示されました [2]。このことは、炭素鎖分子が化学的進化段階の良い指標となることを証明しています。太陽と同程度くらいの質量を持つ星が生まれる低質量星形成領域では、炭素鎖分子は若い星なし分子雲コアで多く、進化の進んだ星形成コアにかけて減少していくため [2,3]、早期型分子と呼ばれることもあります。以上のことより、炭素鎖分子は化学的な観点だけでなく、星形成領域の研究にとっても重要と言えます。

2. 炭素鎖分子の生成経路の調査

炭素鎖分子は地上では不安定なため、室内実験を行うことが難しいという問題点があります。星

間空間において、炭素鎖分子は主に気相中でイオンと中性原子・分子の反応によって生成することが示唆されていましたが、反応速度や反応性などの詳細な化学的性質については、完全には明らかになっていません。そこで、室内実験で行われる手法を応用し、宇宙空間に存在する炭素鎖分子の観測から生成経路について調べる方法が考案されました [4]。通常の炭素は陽子6個と中性子6個を持つ原子核 (^{12}C) から成ります。炭素の中には、中性子を7個持つ ^{13}C という原子核も存在し、太陽系近傍では $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位体比は 60-70 程度であることが知られています [5]。この ^{13}C をトレーサーとして、化学反応経路を追跡することができます。

炭素鎖分子の中の炭素原子のうち1つだけが ^{13}C に置き換わった ^{13}C 同位体種は、その分子に含まれる炭素原子の数だけ存在します。例えば、 HC_3N という分子には3種類の ^{13}C 同位体種が存在します (H^{13}CCCN , HC^{13}CCN , HCC^{13}CN)。図1に HC_3N の分子構造を示します。ランダムにどの炭素原子が ^{13}C に置き換わるかが決まる場合は、 HC_3N の3種類の ^{13}C 同位体種は同量存在するはずですが、しかし、 HC_3N の生成において、特定の反応が優勢であり、かつ ^{13}C が特定の分子に濃縮するメカニズムが存在する場合には、これら3種類の同位体種の存在量には違いが生じると期待されます。この ^{13}C 同位体種間の存在量の違い、すなわち ^{13}C 同位体分別を観測から導出し、それを基に炭素鎖分子の生成経路について制限を加えることができます。

HC₅Nの分子構造



HC₃Nの分子構造



図1 HC₃NとHC₅Nの分子構造.

2.1 おうし座暗黒星雲におけるHC₅Nの生成経路の調査

おうし座暗黒星雲のうちの1つに Taurus Molecular Cloud-1 (TMC-1) と呼ばれる領域があり、その中でも特に炭素鎖分子の多い所はシアノポリインピークと呼ばれています。シアノポリインとは、 HC_{2n+1}N ($n=1, 2, 3, \dots$) の構造を持つ炭素鎖分子の総称です。このシアノポリインピークにおいては、 HC_3N の主要な生成経路はアセチレン (C_2H_2) と CN ラジカルの反応であることが知られています [4]。 HC_3N の炭素鎖が成長した HC_5N (図1参照) については、 ^{13}C 同位体種は検出されていたものの、同位体分別を調べるだけの良いデータは得られていませんでした [6]。

今までの 40 GHz 帯の受信機より圧倒的にシステム雑音温度の低い Z45 受信機が野辺山 45 m 望遠鏡に搭載されたことで、 HC_5N の ^{13}C 同位体種の輝線の観測が効率的に行える状況になり、 HC_5N の生成経路を調べるために必要なデータが取得できると期待されました。そこで、最も炭素鎖分子が豊富と知られているおうし座暗黒星雲 TMC-1 のシアノポリインピークの HC_5N の 5 種類の ^{13}C 同位体種の観測を行いました。この HC_5N の ^{13}C 同位体分別の観測は、私が修士2年になった時、2014年4月に行いました。当時は受託院生として野辺山宇宙電波観測所に滞在しており、所内時間でしたが、初めて自分が書いた観測提案での観測だったので、緊張しながらも、とてもわくわくしながら観測していました。

図2はZ45受信機で得られたシアノポリインピークにおける5種類の HC_5N の ^{13}C 同位体種のスペクトルを示します。この観測では、亀野誠二さんにご提案いただいた Smoothed Bandpass Calibration [7] という方法を用いて、全体的な観測時間を減らして効率的に観測を行いました。この方法を用いたおかげで、約27時間20分の積算時間のデータでノイズは3 mK程度まで下げることができました。図2に示されているように、輝線の強

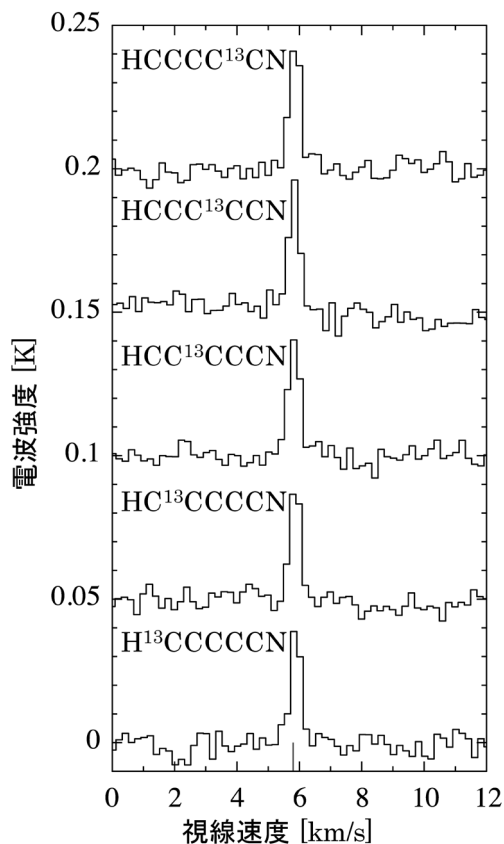


図2 おうし座暗黒星雲シアノポリインピークにおける5種類の HC_5N の ^{13}C 同位体種のスペクトル。

度は30 mK程度であることから、信号対雑音比は約10を達成し、十分な感度で検出されていることがわかります。

この観測ではノーマル種の HC_5N も同時に観測していました。そこで、図3に示すように $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位体比を導出して5種類の ^{13}C 同位体種間で比較しました [8]。この図3からもわかるように、5種類の ^{13}C 同位体種の存在量に明確な違いは見られませんでした。この結果を用いて、おうし座暗黒星雲のシアノポリインピークにおける HC_5N の主要な生成経路について考察を行いました。候補としては大きく3つの経路が考えられていましたが、観測で得られた ^{13}C 同位体分別を説明できる経路は1つでした。 C_5H_m^+ イオンと窒素原子の反

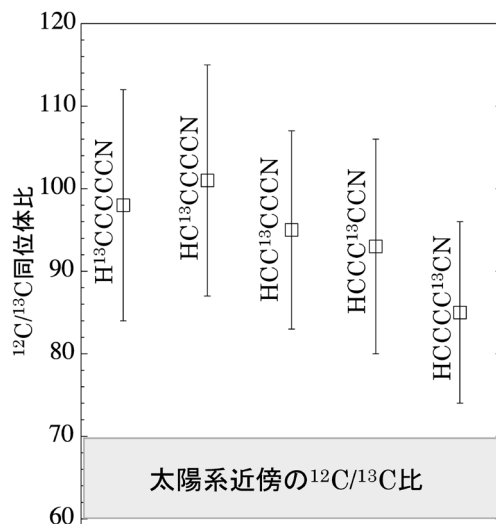


図3 おうし座暗黒星雲シアノポリインピークにおける HC_5N の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位体比。

応によって生成したイオンと電子の再結合反応が、シアノポリインピークにおける HC_5N の主要な生成経路であると示唆されました。 HC_5N の主要な生成経路が C_2H_2 と CN ラジカルの反応であったことから予想された経路とは違い、炭素鎖分子は構造が似ていても、生成経路が必ずしも似ているとは限らないということがわかりました。

この後、アメリカのGreen Bank 100 m望遠鏡を用いて HC_7N の ^{13}C 同位体分別の観測も行われました [9]。この観測からは、 HC_7N の主要な生成経路は HC_5N と類似していることが示唆されました。

さらに、図3からは HC_5N の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は太陽系近傍の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比 (60-70) より高いことがわかります。このような現象は、程度の差はありますが他の炭素鎖分子でも見られ、 ^{13}C 同位体種の希釈と呼ばれています。この ^{13}C 同位体種の希釈の大まかなメカニズムは知られていますが、炭素鎖分子間の違いについてはまだ議論の余地がある段階です。

この HC_5N の ^{13}C 同位体種の観測は、私の修士論文と初めての投稿論文 [8] としてまとめさせて

いただきました。天文学に興味になかった私が大学4年生の時に星間化学に興味を持ったのは、「宇宙空間でどのように分子が生成するのか」と不思議に思ったことがきっかけでした。これに直結する研究を修士論文のテーマにさせてもらえたことに、とても感謝しています。

2.2 星なし分子雲コアの HC_3N の生成経路の比較

炭素鎖分子の ^{13}C 同位体分別の研究はおうし座暗黒星雲のシアノポリインピークで主に行われており、他の天体についてはいくつかの星ありコアで HC_3N の研究があるだけでした [10]。この HC_3N の研究が行われた天体はすでに星が誕生しており、温度も密度もシアノポリインピークとは大きく異なります。そのため、おうし座暗黒星雲で優勢な反応が他の星なし分子雲コアでも適用できるかはわかりません。そこで次に、2つの星なし分子雲コアであるL1521BとL134Nにおける HC_3N の ^{13}C 同位体分別の観測をZ45受信機を用いて行いました [11]。

図4はZ45受信機で得られた2つの星なし分子雲コアにおける HC_3N の3種類の ^{13}C 同位体種のスペクトルです。L1521BとL134Nの積算時間はそれぞれ約6時間と38時間20分で、ノイズレベルはそれぞれ6-7 mKと2-3 mKとなりました。信号対雑音比はL1521Bで8.1-12.0, L134Nで4.0-9.1です。この結果を用いて、 HC_3N の ^{13}C 同位体種間の存在量の比較をすると、L1521Bでは $\text{H}^{13}\text{CCCN}:\text{HC}^{13}\text{CCN}:\text{HCC}^{13}\text{CN}=0.98:1.00:1.52$, L134Nでは $\text{H}^{13}\text{CCCN}:\text{HC}^{13}\text{CCN}:\text{HCC}^{13}\text{CN}=1.5:1.0:2.1$ となりました。すなわち、L1521Bでは H^{13}CCCN と HC^{13}CCN がほぼ同量であり、 HCC^{13}CN が他よりも多いことがわかります。一方で、L134Nでは3つの ^{13}C 同位体種の存在量が異なります。

この結果を基に、各天体における HC_3N の主要な生成経路を調べました。L1521Bの ^{13}C 同位体分別のパターン ($\text{H}^{13}\text{CCCN}=\text{HC}^{13}\text{CCN}<\text{HCC}^{13}\text{CN}$)

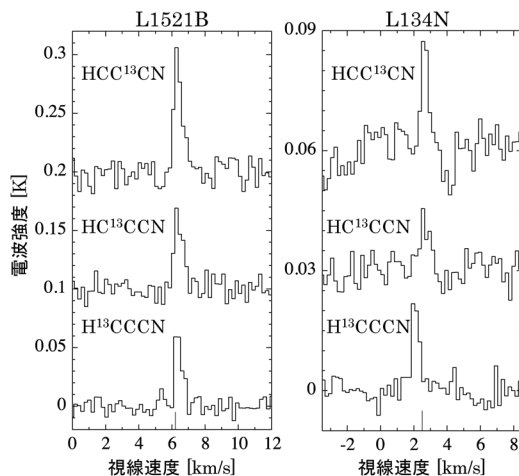


図4 星なし分子雲コアL1521BとL134Nにおける HC_3N の3種類の ^{13}C 同位体種のスペクトル。

はおうし座暗黒星雲のシアノポリインピークの結果 [6] と同じです。詳細は割愛しますが、L1521Bにおける HC_3N の主要な生成経路はアセチレン (C_2H_2) とCNラジカルの反応であることがわかりました。

L134Nの3つの ^{13}C 同位体種の存在量が異なるパターンは、この天体で初めて見つかりました。 HC_3N の主要な生成経路の候補は3つ考えられていましたが、このパターンを作り出す可能性のあるものは1つであり、CCHとHNCの反応がL134Nにおける HC_3N の主要な生成経路であることが示されました。

3つの星なし分子雲コアの HC_3N の主要な生成経路を比較すると、L134Nだけ他の天体と異なることがわかりました。これらの3天体はいずれも温度や密度の条件が似ているにも関わらず、なぜこのような違いが生じたのでしょうか。この問いについて考察するため、化学反応ネットワークシミュレーションを用いて調べました [11]。L134NはシアノポリインピークやL1521Bに比べて、化学的に進化の進んだコアと言われています [12]。そこで、 HC_3N の生成に関わると示唆された分子やラジカルであるCCH, C_2H_2 , CN, HNCの存在

量の時間変化を調べました。その結果、L134NでHNCを含んだ反応が優位になった理由として、「CN/HNCの存在量比が分子雲の進化が進むにつれて減少するから」という可能性が示唆されました。すなわち、分子雲の化学的進化段階が早いシアノポリンピークやL1521Bでは、CNがまだ豊富に存在するため C_2H_2 とCNの反応が優位に起こり、進化が進むにつれてCNが減少してHNCが相対的に増加することで、HNCを含んだ反応が優位になったということです。

HC_3N という分子は原始惑星系円盤でも惑星大気でも検出される分子です。そのため、 HC_3N をプローブとして様々な領域で優位な化学反応を追跡することが可能になると考えられます。

3. 大質量星形成領域における炭素鎖分子の観測

大質量星形成領域における炭素鎖分子の研究は、低質量星形成領域に比べてかなり遅れています。Z45受信機を使用して大質量星形成領域における炭素鎖分子の観測が行われているので、この章では2つの研究成果についてご紹介します。

17個の大質量星なし分子雲コアと35個の大質量原始星における HC_3N と HC_5N のサーベイ観測が行われました [13]。この HC_5N のサーベイ観測の結果は、大質量星形成領域においては、最も感度が高く、均一なデータセットになっています。大質量原始星周辺では HC_5N は少ないと考えられていましたが、観測した大質量原始星のうち50%から HC_5N が検出されました。オーストラリアのNASA Deep Space Station 34 (DSS-34) 望遠鏡で行われたホットコアにおける HC_5N のサーベイ観測では、 HC_5N の検出率は約44%と報告されていました [14]。2つの独立なサーベイ観測の結果が一致していることから、大質量原始星周辺には HC_5N は比較的多く存在していることがわかります。

さらに、星が集団的に誕生している領域であるクラスター領域における HC_3N とCCSの大局的

な空間分布も得られています [15]。若い星や双極分子流が検出された天体があるクラスターでも HC_3N やCCSが検出されており、それらはクラスター領域においても化学進化の指標になり得ることがわかってきました。

上記のZ45受信機での観測結果は、新しい炭素鎖分子の化学を調べる入り口となる結果です。低質量星形成領域の炭素鎖分子の化学においても、野辺山45 m望遠鏡を使った観測が重要な成果を出していました [2,16]。現段階では、大質量星形成領域における炭素鎖分子の研究は始まったばかりで、研究課題は多く残っています。特に、大質量星形成領域において重要な高空間分解能のデータが不足しています。今後は、ALMAのBand1受信機を使うことでより進展すると期待されます。

4. 7 mm帯の星間化学に関する研究の展望

上記のように、Z45受信機は未開拓だった大質量星形成領域における炭素鎖分子の化学に関する研究を進展させています。これが本特集の中村文隆先生が記事に書かれていた期待に沿っているかは自信がありませんが、Z45受信機の結果を進展させ、7 mm帯の星間化学の研究を今後より進展させていきたいと思えます。次に、新しい受信機を用いた、30-50 GHzにおける星形成領域の星間化学に関する研究の展望について、簡単にまとめたいと思えます。一般的に低周波数領域では、複雑な有機分子の輝線の間隔が広がるため、輝線の同定がより容易になると言われています。

この複雑有機分子の観測におけるメリットの他に、30-50 GHz帯で観測が有利になるものとして炭素鎖分子が挙げられます。前述の通り、炭素鎖分子は早期型の分子であり、それらの多くは温度が高い領域では壊されてしまいます [17]。そのため、低励起エネルギーのラインの観測が必要になります。炭素鎖分子の多く、特に長い分子は、7 mm帯に低励起エネルギーの輝線が存在し

ているため、新しい7 mm帯の受信機を用いることで、星なし分子雲コアや星周辺のエンベロープと呼ばれる部分に存在する炭素鎖分子の観測がより効率的に行えるようになると期待されます。星形成が起こっているコアでも炭素鎖分子の一種であるシアノポリインと呼ばれるシリーズが多いことが知られており [18–20]、化学的多様性も示唆されています。この化学的多様性は星形成過程や環境の多様性を反映している可能性があるため重要な指標になり得ますが、現段階では星形成コアでの炭素鎖分子の観測が少ないために、検証が進んでおらず、今後の観測に期待されます。

星形成領域においては重水素濃縮度が星形成段階の重要な指標になることが知られています。今までは、 N_2D^+/N_2H^+ やDNC/HNCなどの70 GHz付近の分子輝線の観測が盛んに行われてきました。これらの分子は比較的密度の高い領域を調べるのに適しています。一方で、様々な周波数帯で観測できる HC_3N の重水素濃縮度を調べることで、星なしコアと星形成コアの時代の環境を調べることができるかもしれません。新しい7 mm帯の受信機を用いて、炭素鎖分子と有機分子の多天体サーベイ観測やラインサーベイ観測を行うことで、星形成領域の化学に関する新たな知見が得られることが期待されます。

謝 辞

本稿の観測成果は筆者が大学院生の時に行った観測によるものです。修士論文の指導をくださった尾関博之教授（東邦大学）、学位論文の研究指導をくださった齋藤正雄教授（国立天文台／総合研究大学院大学）をはじめ、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の方々に心より感謝申し上げます。特に、齋藤教授には、ご自身の専門ではない星間化学を志望していた私の指導教官を引き受けていただき、また常に励まし続けていただいていることに感謝の気持ちでいっぱいです。また、電波天文学について一から勉強中であった修士1

年の時に、Z45受信機の立ち上げ作業への参加という貴重な機会を与えてくださった中村文隆准教授（国立天文台／総合研究大学院大学）とZ45受信機グループの皆さんに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] McGuire, B. A., 2018, ApJS, 239, 17
- [2] Suzuki, H., et al., 1992, ApJ, 392, 551
- [3] Benson, P. J., et al., 1998, ApJ, 506, 743
- [4] Takano, S., et al., 1998, A&A, 329, 1156
- [5] Milam, S. N., et al., 2005, ApJ, 634, 1126
- [6] Takano, S., et al., 1990, ApJ, 361, L15
- [7] Yamaki, H., et al., 2012, PASJ, 64, 118
- [8] Taniguchi, K., et al., 2016, ApJ, 817, 147
- [9] Burkhardt, A. M., et al., 2018, MNRAS, 474, 5068
- [10] Taniguchi, K., et al., 2016, ApJ, 880, 106
- [11] Taniguchi, K., et al., 2017, ApJ, 846, 46
- [12] Dickens, J. E., et al., 2000, ApJ, 542, 870
- [13] Taniguchi, K., et al., 2018, ApJ, 854, 133
- [14] Green, C.-E., et al., 2014, MNRAS, 443, 2252
- [15] Shimoikura, T., et al., 2018, ApJ, 855, 45
- [16] Sakai, N., et al., 2008, ApJ, 672, 371
- [17] Taniguchi, K., et al., 2019, ApJ, 881, 57
- [18] Taniguchi, K., et al., 2017, ApJ, 844, 68
- [19] Taniguchi, K., et al., 2018, ApJ, 866, 32
- [20] Taniguchi, K., et al., 2018, ApJ, 866, 150

Astrochemical Studies in Star-Forming Regions in the 7 mm Band

Kotomi TANIGUCHI

Department of Physics, Faculty of Science, Gakushuin University, Mejiro, Toshima, Tokyo 171-8588, Japan

Abstract: We can observe several lines of carbon-chain molecules, such as CCS, HC_3N , and HC_5N , in the 42–46 GHz band, which is covered by the Z45 receiver installed on the Nobeyama 45-m radio telescope. Carbon-chain molecules are unique species in the interstellar medium and circumstellar shells and they have been known as a useful chemical evolutionary indicator in low-mass star-forming regions. Despite their importance in astrochemistry, our knowledge about their chemical properties is poor because of deficiencies of laboratory experiments. In this article, I summarize studies about constraining main formation mechanisms of cyanopolynes ($HC_{2n+1}N$) in starless cores and observations of carbon-chain species in high-mass star-forming regions, which were conducted by the Z45 receiver.