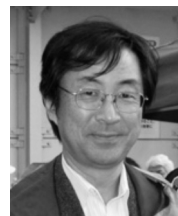


# 銀河系内分子雲の有機分子

大石 雅 寿

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1 国立天文台・天文情報センター

e-mail: masatoshi.ohishi@nao.ac.jp



かつて有機物は生命体のみが作り出せると信じられていたが、現在では無機的に合成することができるため炭素化合物一般を指す。その有機物は星間空間中にすでに100種類以上見出されている。特に最近、受信機性能の格段の向上により有機分子がほとんどないと言われていた暗黒星雲でも多種多様なものが見出された。星間有機分子の中には生命素材になりうるものもある。本稿では、電波天文学の黎明期以来の有機分子発見や探査結果を概観し、宇宙で生成した有機物が惑星形成過程を通じて生命素材となった可能性にも触れる。

## 雪崩を打つ近年の有機分子発見

え？ またTMC-1でこんな大きな有機分子が見つかったの？ 私の素直な感想である。2020年から2021年にかけて、TMC-1（おうし座暗黒星雲-1）で30を超える有機分子が次々に見つかったのである。

TMC-1は、星形成が起きていないと考えられている典型的な（化学的に）若い冷たい暗黒星雲である。この天体は我々から約450光年（140 pc）の距離にあって数分角（約0.1 pc）の長さに及ぶフィラメント状の形状をしており、フィラメントの中でシアノポリインピークと呼ばれるコアでは炭素が鎖状に繋がった星間分子が多く発見されることで有名である。我々は、分子雲中の炭素の振る舞いが重要であるとの認識の下、1990年頃から10年ほどの時間をかけて国立天文台野辺山の45 m大型電波望遠鏡を用いたTMC-1ラインサーベイを実施した [1]。観測の結果得られた分子組成は星形成の影響をほとんど受けていないことから、星間化学において基本的なものと考えられている [2]。TMC-1で観測される星間分子のほとんどは直線分子である。有機分子では、 $\text{H}_2\text{CO}$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}$ といった比較的小さなものに限定されて

いた。その理由として回転遷移の分配関数の大きさの違いであると考えられていた。詳しくは省略するが、直線分子の分配関数は小さく、多くの有機分子が属する非対称コマ分子の分配関数は大きい。スペクトル線強度は分配関数に逆比例するから分配関数の大きい有機分子はほとんど見えない、という解釈である。それ故に、TMC-1に存在する星間分子のほとんどは直線分子と言われてきた。

しかし、近年の有機分子発見ラッシュによりその定説を修正しなければならないこととなった。

## 有機物とは

現代化学では、有機化合物（organic compound）を、歴史的な経緯から一部を除いた炭素化合物の総称と定義している [3]。生命の捉え方の歴史を振り返ると、ギリシャ時代のアリストテレスの考え方から発展した、生命現象には物質には還元できない本質（生氣）が伴っているという生氣論（vitalism）と、生命現象がそれを構成する物質的な諸要素が組み合わされることによって生じ、物理-化学的な諸要素に還元することができるという機械論（mechanism）があった。生命をどう捉えるかという点では哲学的な対立があったものの、生物が作り出す物質が存在する点では考え方に違

いはなかったようだ。生物が作り出す物質は、臓器 (organ←ラテン語のorganum) に関連するためにorganic compoundと呼ばれるようになった。これに対して無生物の代表である鉱物などから得られる物質を無機化合物 (inorganic compound) と呼んでいた。

しかし、1828年にFriedrich Wöhlerが無機化合物であるシアン酸アンモニウムから有機化合物である尿素を合成することに成功したため、古典的な有機/無機の区別は意味を失った。

日本語でorganic/inorganicをなぜ有機/無機と訳したのかについては調べきれなかったが、「機」という文字には「はたらき」「しくみ」という意味があるために採用されたのではないかと推測している。

## 電波天文学黎明期の有機分子発見

電波天文学が本格的に発展し始めたのは第2次世界大戦中に軍の無線通信業務に携わっていた技術者が戦争後にドッと天文業界に流れてきたことが大きな要因である。その技術のおかげで1963年に星間空間での分子としてOHが発見された。その後、1964年のノーベル物理学賞受賞者であるCharles Townesらによってアンモニア、水が見出された後に、1969年に米国電波天文台 (National Radio Astronomy Observatory) の11 m電波望遠鏡を用いて多原子分子としてフォルムアルデヒド (H<sub>2</sub>CO) が発見された [4]。当時の様子をリアルタイムで見ていた森本雅樹さんや海部宣男 (私の元指導教官) さんは、「宇宙空間にこんな“多原子分子”があるのかと当時の天文業界は色めき立ったのだよ」と話していたものである。

ミリ波望遠鏡として建設されたNRAO 11 m鏡が期待通りに成果を出すということで、次にどういふ分子を星間空間で探すべきかという検討が天

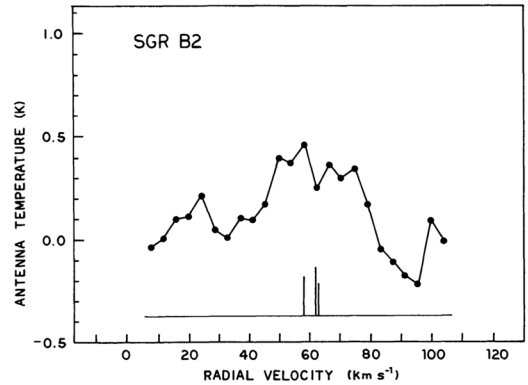


図1 東京天文台6 mミリ波望遠鏡により発見されたCH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> (メチルアミン) の銀河中心でのスペクトル [5]。

文学者と分子分光学者によってなされ、一覧が作成された\*1。その結果、1970年代に、現在でも多くの研究者が研究対象にしている有機分子が次々に発見された。例を挙げると、1970年にCH<sub>3</sub>OH、71年にCH<sub>3</sub>CN、HC<sub>3</sub>N、NH<sub>2</sub>CHO、HCN、1975年にC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH、HCOOCH<sub>3</sub>と1970年代だけで26種もの星間分子が発見され、その多くが有機分子であることに改めて驚く。これだけ11 m鏡が活躍する中、当時の東京天文台が建設した6 mミリ波望遠鏡により1974年に海部さんが日本人として初めてCH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>が発見したこと [5] は自慢\*2しておくべきことだろう (図1)。星間分子、特に有機分子の発見の歴史については私が2016年に執筆したレビュー論文を是非読んでいただきたい [6]。

## これまでの宇宙有機分子の探査

1970年代の有機分子発見ラッシュは、遷移周波数が実験室で測定されたものを狙い撃ちする形で観測されたケースがほとんどであった。当時の受信機感度もそれほど高くなく、また、分光計がカバーできる周波数範囲も広くなかったので、こ

\*1 その一覧を見せてもらったことがあるのだが、コピーを取り損ねた。今から思うと大失敗であった。

\*2 森本さんや海部さんの得意技は自慢であった。

こぞという周波数を長時間にわたって積算し続ける必要があったのである。

その一方、次々に新しい星間分子（有機分子）が見つかるため、広い周波数範囲を無バイアスで観測すればより多くの新発見や星間分子に関する物理情報が得られるだろうと考えたのは実に自然なことであった。そのような先進例をいくつか示そう。まず、スウェーデンの Onsala Space Observatory が 20 m 電波望遠鏡を用いて 72.2–91.1 GHz でオリオン大星雲の中心にあって多くの星が誕生しつつある Orion KL と進化した赤色巨星の星周雲である IRC+10216 に向けて実施したスペクトル線サーベイ [7, 8] が実施され、それと並行する形で NRAO が 70–115 GHz で Orion KL と銀河中心にある巨大分子雲である Sgr B2 に向けてサーベイを行った [9, 10]。Onsala のオリオンサーベイでは 24 種類の星間分子からの 170 本のスペクトル線が報告された。24 種類のうち有機分子はおよそ半分であるが、検出した本数で言うと圧倒的多数を占めている。特に目立つのが  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$  である。IRC+10216 は炭素が多いことが知られているので、炭素鎖直線分子はたくさん見えるもののいわゆる有機分子からのスペクトル線は  $\text{CH}_3\text{CN}$  以外は見えなかった。Sgr B2 は当時分子検出を狙う場合の定番天体ということもあり、Orion KL では見えていなかった多数の有機分子も検出された。

Onsala サーベイが行われていた時期は、野辺山宇宙電波観測所の 45 m 大型電波望遠鏡の建設時期に重なる。建設を主導していたメンバーの 1 人であった海部さんは、早くから広帯域分子線サーベイの有効性に目を付け、当時としては世界最大の帯域幅であった 2 GHz を一気にカバーできる電波分光計の開発を進めていた。アンテナとして使えるようになって始めたのが Orion KL に向けたラインサーベイである。Onsala の 20 m 電

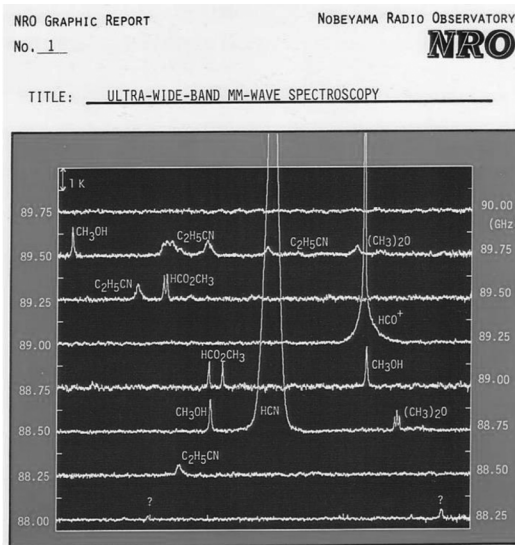


図2 野辺山宇宙電波観測所の 45 m 大型電波望遠鏡と 2 GHz 幅電波分光計によって取得された Orion KL における 88–90 GHz での初スペクトル。同観測所が制作した NRO Graphic Report の第 1 号である。全部で 2 GHz (=2000 MHz) 幅のスペクトルを 250 MHz ごとに区切って 8 つ縦並べしてある。縦軸は温度で表現した電波強度を表している。非常に弱い信号まで見えていた。“?” は正体がわからなかった未同定線である。

波望遠鏡に比べて 2 倍の空間分解能と 4 倍の集光力を持った 45 m 鏡により、それまではなかなか見えなかった数多くのスペクトル線を一気に検出することができるようになった。図 2 は、Orion KL で得たサーベイデータの一部である。得られたスペクトル線は、非常に強い  $\text{HCO}^+$  や  $\text{HCN}$  以外はほとんどが有機分子からのものである<sup>\*3</sup>。

これだけ様々な分子種（特に有機分子）の存在がわかり、また、数が少ないとは言え観測天体間で組成の違いがあることがわかってくると、物理条件が異なる天体を数多く観測することによって組成の違いの理由を明らかにしたいと考えるのが自然である。

\*3 この試験観測データを解析し私の博士論文にした。

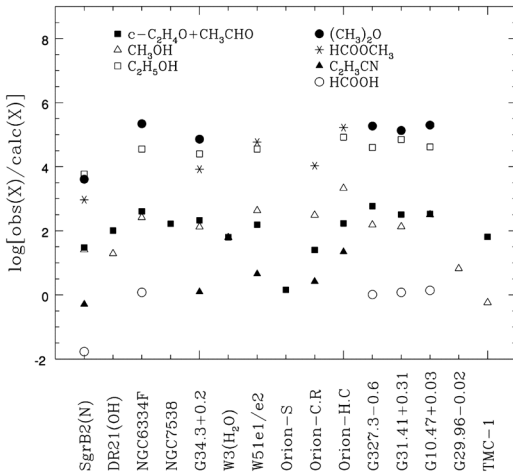


図3 有機分子サーベイを行った天体毎の、観測で得られた分子組成と気相反応を仮定して行った化学反応シミュレーションによる分子組成の比。値が大きいほど気相反応では観測量が説明できないことを意味する [11]。

そこで我々は、1997年から1998年にかけて、北天と南天の大質量星形成領域と暗黒星雲を対象としたサーベイを実施した。この研究は、大学院生であった池田美穂さんが中心になって行われた [11]。サーベイを行う天体としては、レーザーとして様々な天体で観測されていたCH<sub>3</sub>OHの存在量が多いものを中心に選択した。有機分子は星間塵表面における反応で生成されると考えられていたため、同様に星間塵表面反応で生成されるCH<sub>3</sub>OHと有機分子の間に正の相関があると期待されたためである。図3にサーベイの結果検出した各有機分子の存在量を“気相反応”を仮定して化学反応シミュレーションを行って得た存在量との比較を示す。気相反応モデルとの乖離が大きい有機分子の生成は、星間塵表面反応が主体となっていることが考えられる。実際これらの分子が豊富に存在する天体では赤外の光度が大きい傾向が見られた。赤外線源がないと考えられる暗黒星雲TMC-1ではCH<sub>3</sub>OHとCH<sub>3</sub>CHO以外は検出されず、その存在量はほぼ気相反応で説明できた。

これらは大質量星形成領域の中心（ホット・コア）での有機分子であるが、IRAS 16293-2422を代表とする太陽系に類似した中心星周囲（ホット・コリノ）でも多くの有機分子が検出されるようになった。IRAS 16293-2422からは後に、ALMAの試験観測によって糖の仲間であるグリコールアルデヒド（HCOCH<sub>2</sub>OH）が検出された [12]。

### 生命素材分子の探査

池田さんの仕事は酸素を含んだ有機分子を主として対象としていた。では、窒素を含んだ有機分子の分布や存在量は天体毎にどう違うのであろうか？ アミノ酸にはアミノ基（-NH<sub>2</sub>）が含まれるため、含窒素有機分子の研究は宇宙に生命素材が存在するか否かを調べるうえでも重要なステップとなる。アミノ酸のうち最も簡単なものはグリシン（NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH）である。グリシンは上述した70年代のNRAOリストに含まれているのだが、当時は遷移周波数が知られていなかった。実験室で遷移周波数の測定に成功し、初の星間での検出が試みられたのが1979年である [13]。それ以降数々の試みが行われたが現時点で未検出のみである。

窒素原子核（<sup>14</sup>N）には四重極モーメントがあり、分子内の電場勾配との相互作用によって超微細構造線を生じる。このため、含窒素有機分子のスペクトル線の強度は弱くなりがちである。したがって、簡単な含窒素有機分子が多い天体を見出すことが鍵となる。そこで我々は、HCNに水素原子が2個ついたCH<sub>2</sub>NH（メチレンイミンあるいはメタンイミン）の探査を2013年に行った。探査は、まず、米国マサチューセッツ大学との共同研究として行い [14]、その後しばらくしてからさらに発展させる形で大学院生の鈴木大輝君が中心になって行った [15]。その結果、我々が探査を始める前には2天体（Orion KLとSgr B2）しかなかったCH<sub>2</sub>NH天体が9天体へ増えた。また予



想外なことに、わし座にある大質量星形成領域で分子線が非常にたくさん見つかる G10.47+0.03 における CH<sub>2</sub>NH の組成比が Orion KL とほぼ同じで 9 天体のうちで最も多いことが明らかになった。我々は CH<sub>2</sub>NH は星間塵上で HCN に水素が付加することにより生成されると当初は考えていたのだが、鈴木君が化学反応シミュレーションを実施した結果、観測される CH<sub>2</sub>NH はむしろ気相反応によって生成されたものが主であることがわかった。一方、星間塵上で HCN に水素が付加した場合はただちにさらに水素が付加し、メチルアミン (CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>) となることもわかった。

実験室で模擬星間塵を用いて生成反応を調べてみると、星間塵上に豊富に存在することが知られている二酸化炭素とメチルアミンが混じった状態に紫外線を照射するとグリシンが生成される [16]。つまり、若い星からの紫外線が入り込む星間分子雲中ではメチルアミンはグリシンの前駆体

と考えられる物質の一つと言えるのであるから、グリシンの探査を行うためにはメチルアミンが豊富な天体を見出せばよいことになる。

そこで我々は、2014年3月に野辺山宇宙電波観測所の 45 m 電波望遠鏡を用いて CH<sub>2</sub>NH が豊富な天体において CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> のサーベイを実施した。その結果、新しい CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> 天体として G10.47+0.03 を見出し (図4)、また、さそり座の“出目金星雲”のすぐそばにある大質量形成領域 NGC 6334F にも CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> が存在する可能性を示した [17]。G10.47+0.03 における CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> の水素分子に対する組成比は  $1.5 \times 10^{-8}$  にも及び、将来のグリシン探査候補天体として有力であると示すことができた。野辺山からは NGC 6334F の最高仰角が低いために明確な結論を言えなかったが、その後 ALMA を用いた観測により NGC 6334F における CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> の存在が明確に示された [18]。これらの結果により、CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> が見出された天体は

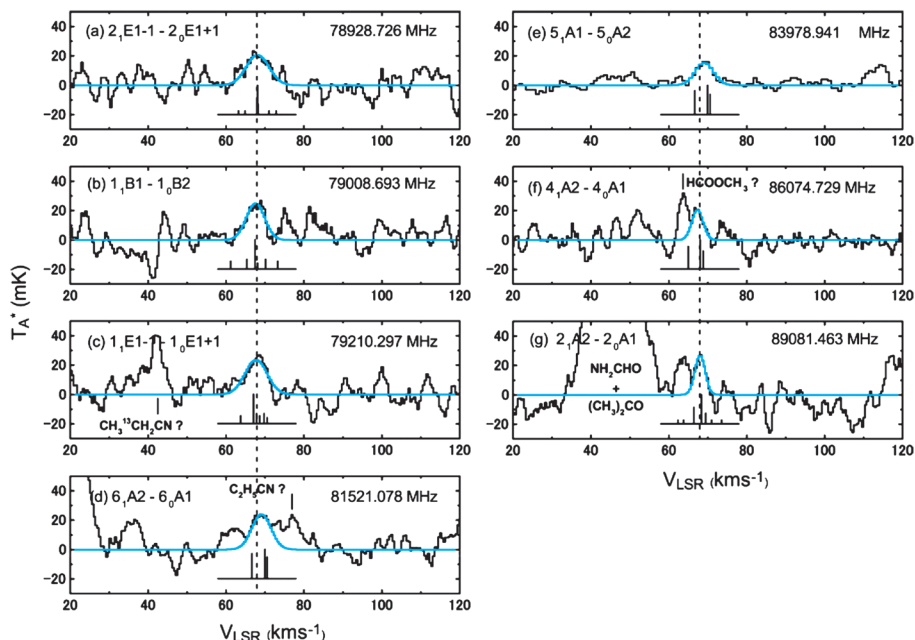


図4 G10.47+0.03で得られたメチルアミンのスペクトル。検出できた7本の遷移周波数を右上に、また、遷移量子数を左上に示す。横軸は視線速度である。黒実線が観測データ、青い線はフィットした曲線、垂直の破線は天体の視線速度に対応する [17]。

Orion KL, Sgr B2, G10.47+0.03, NGC 6334Fの4天体となった。他のホット・コアやホット・コリノにも $\text{CH}_3\text{NH}_2$ が（そして望むらくはグリシンも）存在すると期待される結果となった。

我々は野辺山での研究結果を発展させてALMAによるグリシン探査に挑んだ。できるだけ他の分子線が存在しない周波数帯を選んで観測したつもりであったが、ALMAの非常に高い感度のために予想外に多くのスペクトルピークが見えてしまい、グリシンのヒントはあるものの明確な結論はまだ得られていない。

## 近年の有機分子発見ラッシュ

2018年に非常に興味深い論文がScience誌に掲載された。TMC-1でベンゾニトリル( $\text{C}_6\text{N}_5\text{CN}$ :ベンゼン $\text{C}_6\text{H}_6$ の一つの水素をシアン基(-CN)で置き換えた分子)を発見したというのだ[19]。大きな環状分子は、星間雲内に存在すると誰もが考えている多環芳香族炭化水素(PAH=Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)に類似した物質であり、進化した赤色巨星IRC+10216の周囲などでベンゼン( $\text{C}_6\text{H}_6$ )やサッカーボールに似た構造を持つフラーレン( $\text{C}_{60}$ や $\text{C}_{70}$ など)が見つかった。環状分子は分配関数が大きいために個々のスペクトル線強度が小さくなるので、ガス温度が10 Kと極低温環境であるTMC-1でこのような環状分子が見つかるとは誰も予想していなかった。彼らは、我々が実施した野辺山TMC-1サーベイのデータ\*4をスタッキングする(重ね合わせる)ことによりベンゾニトリルが存在する可能性を見出し、そして米国西バージニア州にある直径100 mのGreen Bank Telescopeを用いてベンゾニトリルを確認したのであった。Brett McGuire達はこの成功に引き続き、芳香族系分子を探索する

プロジェクトであるGOTHAM (GBT Observations of TMC-1: Hunting Aromatic Molecules)を立ち上げ、六員環と五員環が連結した形態を持つインデン( $c\text{-C}_9\text{H}_8$ )などを見出した。核酸塩基も環状構造を含むため、環状分子が宇宙で生成できることは生命の起源との関連を考える上で非常に意味深い。

欧州にいる分子ハンター達がこの状況を指をくわえて見ているはずはない。スペインのJosé Cernicharoをリーダーとする研究グループは、IRAMの30 m電波望遠鏡やスペインのYebes 40 m鏡に超高感度受信機を搭載し、TMC-1での分子線サーベイを実施した。Yebes 40 m鏡では31-50 GHzをカバーするQUIJOTE (Q-band Ultrasensitive Inspection Journey in the obscure TMC-1 Environment) プロジェクトを推進し、ノイズレベルが0.2-0.3 mKと極めて高感度の観測を実現した。その結果、McGuire達がスタッキングによって発見したインデンの個別スペクトルを明瞭に検出したことをはじめ、数多くの環状炭化水素分子を発見した[20]\*5。

これらの結果を踏まえると、有機分子の生成機構をさらに精細化する必要があると言える。また、星間塵表面から気相に蒸発するために必要なエネルギーとして星からの紫外線以外にも反応の際に出たエネルギーも考慮(いわゆる非熱的蒸発 non-thermal desorption)した化学反応モデルやその基礎となる反応定数などを決めることが必須となる。

## 今後への期待

本稿では、星間空間にある有機分子に関する歴史やエポックメイキングな研究結果を概観した。銀河系内の主として大質量星形成領域を対象とし

\*4 著者の1人で長年の知り合いであるTony Remijanが10年以上前に我々のサーベイデータをテキストデータで欲しいと言ってきたので提供したものを活用した成果である。

\*5 José (愛称はPepe) 達の論文では常に我々のTMC-1サーベイとの比較がなされ、野辺山サーベイよりも感度が10~20倍高いと書かれる。この20~30年の技術向上の結果起きた科学の進歩の結果である。

たものになってしまったが、有機分子は惑星形成領域（ディスク）、系外銀河や銀河間物質にも見出されている。かつて生命が作り出すと信じられた有機分子は宇宙の様々な場所に存在するのだ。

これらの有機分子は、惑星形成過程の中で一部は惑星表面に到達し生命の発生に繋がった可能性がある。彗星や隕石は惑星形成過程と共に形成されると考えられており、星間分子雲中で形成された有機分子が彗星や隕石に保存されているとも言われている。実際、欧州宇宙機関が打ち上げたROSETTA探査機が2014年から2015年にかけてチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の核に接近した際、彗星から吹き出る物質を質量分析機によるその場測定をしたところ、グリシン（そして $\text{CH}_3\text{NH}_2$ も）が見つかった[21]。惑星形成の初期に多くの彗星や隕石が惑星表面に降り注いだことを考えると、星間分子雲で作られた有機分子が彗星や隕石を通じて生命発生の種になったとも考えられる。このような仮説を検証することで宇宙と我々生命体との関連や他の惑星における生命存在性の議論がより深まると思われる。その大きな方向での学際研究のさらなる進展を期待する。

### 参考文献

- [1] Kaifu, N., et al., 2004, PASJ, 56, 69
- [2] Gratier, P., et al., 2016, ApJS, 225, id.25
- [3] 長倉三郎ほか編, 1998, 理化学辞典 (岩波書店)
- [4] Snyder, L. E., et al., 1969, Phys. Rev. Lett., 22, 679

- [5] Kaifu, N., et al., 1974, ApJ, 191, L135
- [6] Ohishi, M., 2016, J. Phys. Conf. Ser., 728, Issue 5, article id. 052002
- [7] Johansson, L. E. B., et al., 1984, A&A, 130, 227
- [8] Johansson, L. E. B., et al., 1985, A&A Suppl. Ser., 60, 135
- [9] Turner, B. E., 1989, ApJ. Suppl., 70, 539
- [10] Turner, B. E., 1991, ApJ. Suppl., 76, 617
- [11] Ikeda, M., et al., 2001, ApJ, 560, 792
- [12] Jørgensen, J. K., et al., 2012, ApJL, 757, id. L4
- [13] Brown, R. D., et al., 1979, MNRAS, 186, 5
- [14] Dickens, J. E., et al., 1997, ApJ, 479, 307
- [15] Suzuki, T., et al., 2016, ApJ, 825, id. 79
- [16] Kim, Y. S. & Kaiser, R. I., 2011, ApJ, 729, id. 68
- [17] Ohishi, M., et al., 2019, PASJ, 71, id. 86
- [18] Bøgelund, E. G., et al., 2019, A&A, 624, id. A82
- [19] McGuire, B. A., et al., 2018, Science, 359, 202
- [20] Cernicharo, J., et al., 2021, A&A, 649, id. L15
- [21] Altwegg, K., et al., 2016, Sci. Adv., 2, e1600285

## Organic Molecules in the Milkyway Galaxy

Masatoshi OHISHI

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

Abstract: More than 100 organic molecules have been detected in the interstellar space. Some of these species have a possibility to be related with origin of life. In this article, radio astronomical studies on organic molecules in the Milkyway Galaxy are overviewed including the dawn of radio astronomy in the 1970s and recent discovery rush in a dark cloud, TMC-1.