

特集：星間分子の世界②

暗黒星雲 TMC-1 の化学と物理

平原 靖 大

〈東京大学教養学部 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

星が生まれる前の冷たく静かな暗黒星雲では、様々な分子の回転スペクトル線が観測される。一つの暗黒星雲の中での星間分子の分布は決して一様ではなく、それぞれの分子の生成条件、とくに分子の生成にいたる気相反応の遅速によって系統的に異なることが、おうし座暗黒星雲 TMC-1 の観測の結果明らかになった。このような、暗黒星雲の分子組成についての研究は、暗黒星雲の化学と物理とを結び付ける、新しい視点を与えつつある。

1. はじめに

おうし座領域にある TMC-1 (Taurus Molecular Cloud-1) は、幅 0.2 パーセク、長さ 0.6 パーセクに細長く広がった、現在まだ星形成が起こっていない暗黒星雲です。暗黒星雲は水素分子と細かな塵とを主成分とする物質系で、背景からの星の光を遮るために、黒く見えるのは周知の通りです。1960 年代以降、電波による観測技術が進歩した結果自らは光を出さない暗黒星雲には多種多様な星間分子が存在していることが急速に明らかになってきました。表 1 にこれまでに暗黒星雲から見つかっている星間分子を示します。

星間分子の多くは、ラジカルやイオンなど、通常の実験室の環境では極めて不安定なものです。とくに、これから詳しく述べる TMC-1 は、銀河中心 Sgr-B2 やオリオン分子雲などにくらべ、幾つもの炭素が直線状に連なった、いわゆる直線炭素鎖分子に非常に富んでいることがわかっています。これらの星間分子の生成のメカニズムを解明することは、天文学のみならず化学的にも重要な研究テーマといえます。

暗黒星雲を一つの閉じた物質系と見たとき、

その分子組成は、化学反応を通して、温度、密度、輻射、履歴など多くの物理変数に依存するはずで、特に、温度が 10 K、水素分子密度が 10^{14} 個/cm³ 程度という極端な物理条件の暗黒星雲では、気相における 3 体衝突反応や活性化エネルギーを持つ化学反応は殆ど起こらず、星間紫外線や宇宙線によるイオン化、およびイオン-分子反応が複雑な分子の生成に関与していると考えられます。

表 1 暗黒星雲に見いだされる星間分子

H ₂	OH	H ₂ O	NH ₃	H ₂ S
CO	NO	SiO	SO	SO ₂
OCS	HCO	HNO	NS	PN
CH	C ₂ H	C ₃ H	C ₄ H	C ₅ H
C ₆ H	H ₂ C ₃	H ₂ C ₄	c-C ₃ H	c-C ₃ H ₂
CS	C ₂ S	C ₃ S	C ₂ O	C ₃ O
HCN	HC ₃ N	HC ₅ N	HC ₇ N	HC ₉ N
HC ₁₁ N	CN	C ₃ N	CH ₂ CN	CH ₃ CN
CH ₃ NC	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ CCH	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ CH ₂ CN
CH ₂ CHCN	HNC	HCCNC	HNCCC	HNCO
HNCS	H ₂ CO	H ₂ CS	CH ₃ CHO	NH ₂ CHO
CH ₃ OH	CH ₃ CH ₂ OH	CH ₃ SH	HCOOH	CH ₃ OCHO
CH ₃ OCH ₃	H ₂ CCO	HCCCHO	CH ₂ NH	CH ₃ NH ₂
NH ₂ CN	CH ⁺	HN ₂ ⁺	HCO ⁺	HO ₂ ⁺
HCS ⁺	HCNH ⁺			

Yasuhiro Hirahara: Chemistry and Physics of the Dark Cloud TMC-1

このような環境で、 10^6 年という長いタイムスケールで無数の化学反応が連鎖的に進んだ結果、星間分子が作られていて、実験室でその全てのプロセスを再現することは到底不可能です。

一方で、これまでの観測から得られた暗黒星雲の化学組成の情報は、TMC-1をはじめとしたごく限られた種類の暗黒星雲の、しかも特定の観測点でのものしか得られていません。従って暗黒星雲の化学を更に詳しく理解するためには、より多くの暗黒星雲間あるいは一つの暗黒星雲内部での分子組成を観測によって求め星雲の様々な物理状態との関係を調べる必要があると考えられます。

そこで私達は、とくに星形成以前の冷たく静かな暗黒星雲の化学を理解するため、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡を用いて、TMC-1のマッピング観測を多数の星間分子のスペクトル線によって行ってきました。ここでは、この観測の結果得られたTMC-1の物理的な構造、および分子の空間分布について紹介し、双方の関係から示唆されるTMC-1での化学進化のシナリオについて述べたいと思います。

2. TMC-1の物理的構造

図1に、炭素鎖分子 CCS $J_N=4_3-3_2$ (45 GHz) と、アンモニア NH_3 (J, K)=(1, 1) (23 GHz)のスペクトル線強度のTMC-1での空間分布を示します。全体的な傾向として、 CCS のスペクトル線はTMC-1の南東で強いのにに対し、 NH_3 のスペク

トル線はむしろ北西で強いことが分かります。TMC-1において、分子によってその分布の傾向が異なることは、実は1979年に行われた比較的低い空間分解能(約 $2.2''$)の観測によって、炭素鎖分子 HC_5N と NH_3 の“反相関”関係として既に知られていました¹⁾。我々の観測の空間分解能 $40\sim 80''$ でTMC-1を観測すると、この星雲内のより細かな構造が、分子種ごとの分布の違いとともに浮かび上がってきます。すなわち、TMC-1の細長く伸びた構造の中には、図1にA-EおよびXで示す合計6つのスペクトル線強度の極大点がとびとびに並んで存在しています。そして、これらの極大点は、 CCS と NH_3 とでXを除いてよく一致しているのも、もう一つの特徴です。

次に、 CCS のスペクトル線によるTMC-1の長軸方向の位置速度図を図2に示します。TMC-1の長軸方向にそった視線速度の様な勾配は殆ど存在せず、極大点A~EおよびXで視線速度が互いに有意に異なっていることがわかります。このことから、TMC-1全体の構造は円盤状ではなくむしろ細長いフィラメント状であり、更にその中にいくつかの暗黒星雲コアが形成されていると考えることができます。個々のコアは、半径 $0.02\sim 0.06$ パーセク、質量が太陽程度と見積られます。

このような暗黒星雲内の微細な構造は、これまでのCSやCOを用いた観測ではその光学的厚みのために明らかにされていませんでした^{2),3)}。従って、炭素鎖分子をはじめとする、存在量の比較的

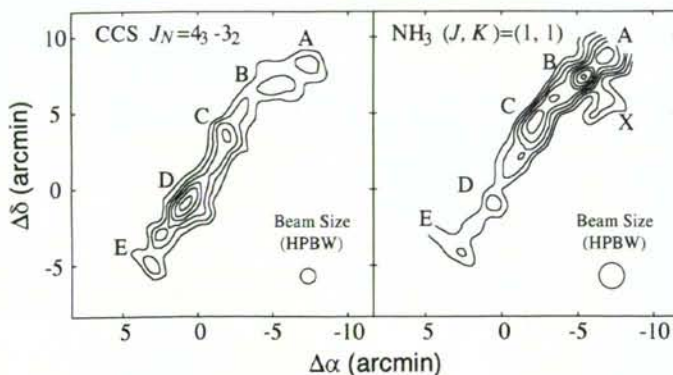


図1 TMC-1におけるスペクトル線の積分強度の分布。

左： CCS $J_N=4_3-3_2$ 、右： NH_3 (J, K)=(1, 1)。図の原点はTMC-1のシアノポリインピーク、(R. A. (1950), DEC. (1950))=($4^h38^m38^s.5$, $25^{\circ}35'45''$)にとった。等高線は $0.4K\cdot km/s$ を最小値として $0.2K\cdot km/s$ おきにひいた。

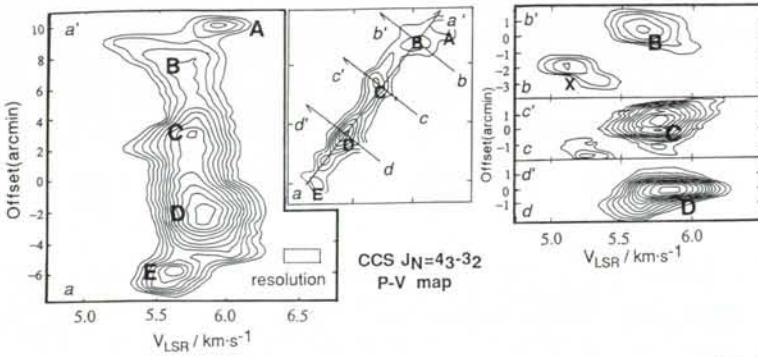


図2 CCS $J_N=4_3-3_2$ による位置速度図. 切断線は真ん中の図のa-a'からd-d'に示す. コアXはCCSのスペクトル線の積分強度図(図1)では見えないが, この図ではTMC-1の中心とはずれた視線速度(~ 5.1 km/s)でb-b'上に存在することがわかる.

少ない分子をもちいた観測を行うことは, 暗黒星雲の特に濃い部分の構造を調べる上でも有力であるといえます. 一方で, 物理条件においてはそれほど違って見えない, TMC-1内の暗黒星雲コアの間で, CCSとNH₃の存在量比が違っているという事実は, 暗黒星雲の星間化学を理解するうえで重要な鍵を握っているように思われます. そこで次に, その他の分子がTMC-1においてどのように分布しているかについて述べます.

3. TMC-1の化学的構造

図3に, 我々の観測の結果から得られたCCS, C₃S, C₄H, SO, およびHN₂⁺の柱密度の, TMC-1の長軸方向に沿った分布を示します. この図から分かるように, 炭素鎖分子C₃S, C₄Hの分布は, CCSと非常によく似た分布傾向を示し, TMC-1の南方で存在量が多いことがわかります. また,

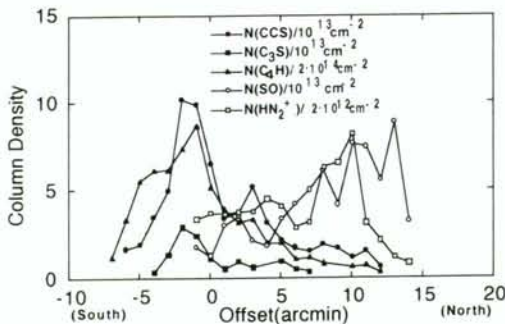


図3 TMC-1の長軸にそって切ったときの各分子の柱密度(存在量に相当する)の分布. 図の横軸は左がTMC-1の南東方向, 右が北西方向で, 原点はシアノポリリンピークをさす.

窒素を含む炭素鎖分子系列であるシアノポリリン(HC_{2n+1}N)の分布も炭素数7のものまで観測された結果, 同様に南方に片寄った分布傾向を持つことが分かっています^{1),4),5)}. このように, 不飽和の炭素鎖分子, C_nH, C_nS, HC_{2n+1}Nは, 炭素数の違いや分子の種類の違い(水素, 硫黄, 窒素を含むか否か)によらず, 共通してTMC-1の南方領域に多く存在します.

一方で, 炭素鎖構造をもたない分子であるSOやHN₂⁺の分布の傾向はこれとは大きく異なっています. この2つの分子の存在量はTMC-1の南方領域では比較的少なく, むしろ北方領域で多くなっています. NH₃と比較的よく似た分布の傾向を示すことがわかります. 従来の観測では, HCO⁺が北方領域に片寄った分布を示すことが報告されており⁶⁾, これを含めると, 合計4つの分子が北方領域で存在量が増大するパターンを示すことが分かりました.

このように, TMC-1で検出される分子は, その分布のタイプによって, 炭素鎖分子型と, アンモニア型との, 大きく2つのグループに分類する事が可能であることがわかってきました. 言い換えると, TMC-1の分子組成は, 北方から南方にかけて系統的に変化しているといえます. このことを最も顕著に示す例として, SOおよびCCSの柱密度の空間分布を図4に示します.

このような, TMC-1の分子組成の非一様性の原因としては, これまでは分子の分布についての情報が少ないこともあり, 気相における元素存在

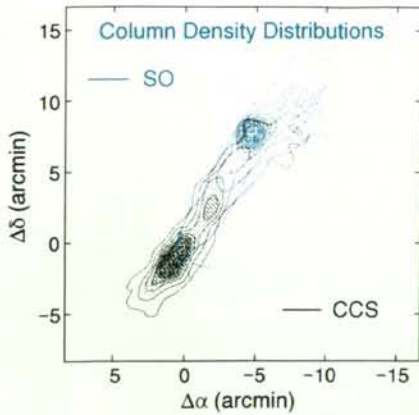
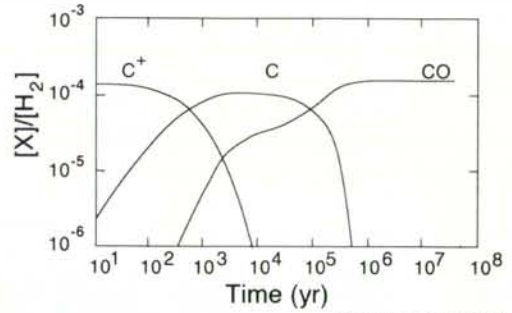


図4 TMC-1における CCS と SO のカラム密度の空間分布. 原点は図1と同じ. 等高線は $10^{13}/\text{cm}^2$ を最小値として $10^{13}/\text{cm}^2$ おきにひいた.

度比の違い (C/O 比) に押しつける考え方が一般的でした. しかし, 北方領域で存在量が多くなる分子が様々な元素から構成されていて共通点に乏しいことからすると, 単純な元素存在度比の違いで分布の違いを合理的に説明することは困難と考えられます. また, 星雲内での温度や密度も化学反応の道筋を大きく左右するほどの顕著な違いはなく, これらの物理的な環境の違いが TMC-1 内の分子組成の非一様性の直接の原因とは考えられません. 従って, これらの観測結果は分子の化学的な生成メカニズム上の何らかの違いを反映している可能性が高いと考えられます.

4. TMC-1 での分子の生成メカニズム

そこで次に, TMC-1 における分子の生成反応について検討します. 各種の炭素鎖分子の生成機構としては, C, C⁺, C₂H₂, C₂H₂⁺等が関与する, 反応速度のはやいイオン-分子反応によるモデルが提示されてきました. そして近年, これらの反応モデルを考慮した大規模な化学反応ネットワークを構築し, 分子組成の時間発展を考慮したシミュレーション計算が相次いで行われています^{7),8),9)}. これらの結果によると, 炭素鎖分子の存在量は, 反応開始後 3×10^5 年という化学進化初期に極大になり, その後の反応の進行につれて減少し

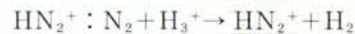
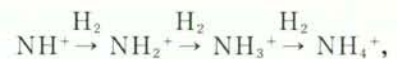
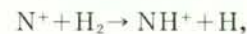
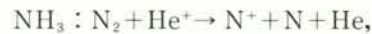
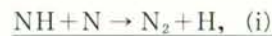


(Suzuki *et al.* 1992)

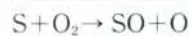
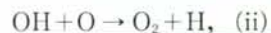
図5 シミュレーション計算の結果求められた暗黒星雲での C⁺, C および CO の存在量の時間変化 (Suzuki *et al.* (1992) より一部を引用). 星雲の物理条件は水素分子密度 10^4 個/cm³, 温度 10K に固定している. 暗黒星雲の化学進化に伴って, 主要な炭素の形態が CO へと順に移り変わってゆくが, 炭素鎖分子は C や C⁺ が多い段階で速やかに生成し, その後減少する.

ます. これは, 主要な炭素の形態が, 図5に示すように星雲の化学進化にともなって C⁺ から C へ, そして最後に安定な CO へと移り変わることを反映しています.

一方, SO, HN₂⁺, NH₃ は, イオン分子反応ではうまく作ることができない点で共通しています. N を含む分子である HN₂⁺, NH₃ は, 以下の反応式に示すとおり, 安定な N₂ を経由して生成すると考えられます.



また SO は, やはり一旦安定な O₂ を経由して, 以下の反応により生成します.



これらの反応 (i), (ii) は共に, 活性化エネルギーを持たないものの, 中性-中性反応であるために温度依存性を持ちます. このため, 低温の TMC-

1では、イオン-分子反応に比べその反応速度が1/100程度に遅くなることが分かっています¹⁰⁾。この結果、シミュレーション計算では、SO、HN₂⁺、NH₃は共通して進化初期にはその存在量は比較的少なく、化学進化の後期である反応開始後10⁷年で初めて存在量が增大します。

このように、分子の生成メカニズムを考慮すると、それぞれの分子の生成の“速さ”と、TMC-1における分布の傾向とは非常によい対応関係にあることが分かります。従って、TMC-1における分子組成の非一様性は、領域間の化学的な進化段階の相違によって、統一的な解釈が可能であると考えられます。

5. TMC-1の化学進化と物理進化

一般に、暗黒星雲が化学的な定常状態に達するまでのタイムスケールは、10⁷年以上と見積られています。この時間は、星雲の物理的な寿命である10⁶年に比べて長いので、現在観測される暗黒星雲はすべて化学的な平衡状態になく、いわば化学進化の途中にあることとなります。TMC-1にこのことを当てはめると、北方から南方にとびとびに並んでいる暗黒星雲コア間で、化学進化の段階が違っている可能性があります。北方に行くに従って生成の遅いSO、HN₂⁺、NH₃などが増加し、南方に行くに従って生成の速い炭素鎖分子が増加することからすると、現在のTMC-1の分子組成は、北方領域のコアほど進化が進んでおり、南方領域のコアはまだ進化の初期段階にあると考えることで、説明できます。

この考え方が正しいとすれば、さらに踏み込んで、暗黒星雲の分子組成を星雲の物理進化についての一つの“時計”として用いることが可能かも知れません。仮にTMC-1が、北方領域から重力収縮を開始し、フィラメント状の構造から暗黒星雲コアの連なった構造に物理的に進化してきたとすると、北方領域のほうが星雲の形成後より長い時間を経過しているために、化学的な進化も進ん

だということは十分有り得ると考えます。実際、光学的に薄いC³⁴SのJ=1-0および2-1のスペクトル線の観測から、TMC-1内の水素分子の数密度分布を見積ると南方領域(～10⁴個/cm³)に比べて北方領域でわずかに上昇する傾向(～10⁵個/cm³)があり¹¹⁾、北方領域が重力収縮の進んだ段階にあるとする仮説とも矛盾しないように思われます。またTMC-1以外の暗黒星雲コアのサーベイ観測の結果、星生成を伴った暗黒星雲コアでは統計的に炭素鎖分子CCSが少なくNH₃が多くなる傾向にあること⁹⁾も暗黒星雲での化学進化と物理進化がよく対応していることを示唆します。

今後、他の暗黒星雲についても、分子組成やその分布を観測によって詳しく調べることが、星雲の化学進化と物理進化の関係を解きあかす上で重要であると考えます。

6. おわりに

星間化学の研究は、新しい星間分子を発見することを一つの大きな目標としてこれまで進められ、大きな成功をおさめました。今後、さらに個々の星間分子の持つ様々な意味を考えることによって、化学の諸分野のみならず、天文学に対しても新しい視点を提供することができると考えます。その意味で、星間化学は未知の問題をまだまだ数多く含んだ広大な学問領域であり、今後の発展が期待されます。

参考文献

- 1) Little *et al.* 1979, MNRAS, **189**, 539.
- 2) Snell *et al.* 1982, ApJ, **255**, 149.
- 3) Schloerb *et al.* 1983, ApJ, **267**, 163.
- 4) Töle *et al.* 1981, A & A, **95**, 143.
- 5) Olano *et al.* 1988, A & A, **196**, 194.
- 6) Guélin *et al.* 1982, A & A, **107**, 107.
- 7) Herbst and Leung 1989, ApJS, **69**, 271.
- 8) Millar and Herbst 1990, A & A, **231**, 466.
- 9) Suzuki *et al.* 1992, ApJ, in press.
- 10) Prasad and Huntress, 1980, ApJS, **244**, 1087.
- 11) Hirahara *et al.* 1992, ApJ, in press.