

特集：星間分子の世界④

## 星形成領域の化学を探る

三 上 人 巳

〈名古屋大学理学部 〒464-01 名古屋市千種区不老町〉

星が誕生する場所“分子雲”は、同時に、多種多様な分子が生成し、消滅する物質循環の場でもあります。最近我々は、様々な分子輝線を電波望遠鏡で観測することにより、分子雲がその進化とともに化学組成を大きく変えていること、そして、その変化に原始星の形成活動が深く関与していることを明らかにしてきました。このような星形成領域における分子生成の研究は、分子雲での化学過程の解明だけでなく、その化学過程と密接に関係している原始星の性質やそれを取り巻く物理環境について、新たな情報を与えると考えられます。

## 1. はじめに

我々の銀河系には、一千億個を越える星々とともに、希薄なガスと“星間塵”と呼ばれる固体微粒子から成る巨大な雲が存在しています。その雲の中で比較的密度の高い領域は“分子雲”と呼ばれ、この25年ほどの間、天文学の上で重要な研究対象になってきました。分子雲を構成しているのは主に水素分子ですが、その中にはごく僅かながら（個数密度にして水素分子の一万分の一以下）いろいろな分子が存在しています。1968年にアンモニア（ $\text{NH}_3$ ）が出す23.7 GHzの輝線スペクトルが電波望遠鏡で検出されて以来、現在までに70種類を越える分子のスペクトル線が分子雲で観測されてきました。そして、これらのスペクトル線が、それまでの可視光による観測では調べることができなかった分子雲の広がりや質量、また、密度や温度といったその内部状態について、多くの情報をもたらすようになったのです。さらに最近では、その中で生まれつつある“原始星”の存在が明らかになり、その形成過程や周辺ガスの物理状態を調べるために、分子のスペクトル線を使った観測が盛んに行なわれています。

それでは、分子雲中に存在する種々の分子は、どのように生成しているのでしょうか。それらは、分子雲の一生を通じて変化することなく存在しているのでしょうか。ここでは、このような観点から、分子の生成が星形成とどのように関係しているのかを考えていくことにします。

2. 星形成領域の化学組成  
—オリオンKL

1980年代に入ると、高性能の電波望遠鏡を使って、いくつかの分子雲の化学組成が詳しく調べられるようになりました。その代表的な天体が、オリオンKLとTMC1です。オリオンKLは、有名なオリオン大星雲に隣接する“オリオン座巨大分子雲”中の赤外線星雲です。その中心には太陽の25倍以上の質量を持つ原始星IRc2が存在しており、太陽系に最も近い（約500 pc）大質量星の形成領域として注目されてきました。一方、TMC1は、太陽系から140 pcの距離に位置する“おうし座複合雲”中の高密度領域で、星形成が起きていない分子雲の代表的な存在です。そして、この2つの天体に対する詳しい観測から、両者の化学組成（分子の種類や存在量）が互いに異なっていることが明らかになってきました。例えばオリオンKLにおいては、TMC1で検出されない一

Hitomi Mikami: Chemical Evolution of Star Forming Regions

酸化ケイ素 (SiO) のスペクトル線が非常に強く観測されます。また、メチルアルコール(CH<sub>3</sub>OH)、ギ酸メチル(HCOOCH<sub>3</sub>)、ジメチルエーテル(CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub>)といったメチル基(CH<sub>3</sub>)を含む有機化合物が多量に存在しています。一方、TMC 1では、オリオン KL において存在量の少ない、炭素が長くつながった分子(CCCCH や HCCCCCN など)が多数存在しています。このような2つの分子雲での化学組成の違いは、なぜ生じたのでしょうか。その化学組成は、もともと異なっていたのでしょうか。

オリオン KL の IRc 2 は、太陽の 25 倍以上もある非常に重い星です。したがって、その表面からの放射のエネルギーは、太陽の 10 万倍にも達しています。また、その周辺では秒速 100 キロメートルにも及ぶ超音速のガスの流れ“分子流”が検出されています。このような星形成に伴う放射や分子流は、周囲に衝撃波を形成し、ガスや塵の温度

上昇を引き起こすと考えられます。この温度上昇は、さらにその中で起きる化学反応の様子をも大きく変えるに違いありません。これは、実験室の化学反応で、温度や濃度などの反応条件を変えることにより、生成物の種類や量が変化することに対応します。TMC 1 には原始星が存在していないことから、オリオン KL と TMC 1 での化学組成の違いは、主にこのような物理状態の違いにより生じたと考えられます。

ブランベックらは、ハット・クリークの干渉計を用い、オリオン KL における分子の分布を高い空間分解能で調べました<sup>1,2)</sup>。その結果、IRc 2 周辺の約 0.1 pc という小さなスケールの中で、HC<sub>3</sub>N や SiO といった分子がそれぞれ異なる分布を示すことが明らかになりました(図1)。これらの分子が異なる種類の反応過程で生成しているとすると、この分布の違いは、この領域でのガスの物理状態が 0.01 pc 程度のスケールで細かく変化して

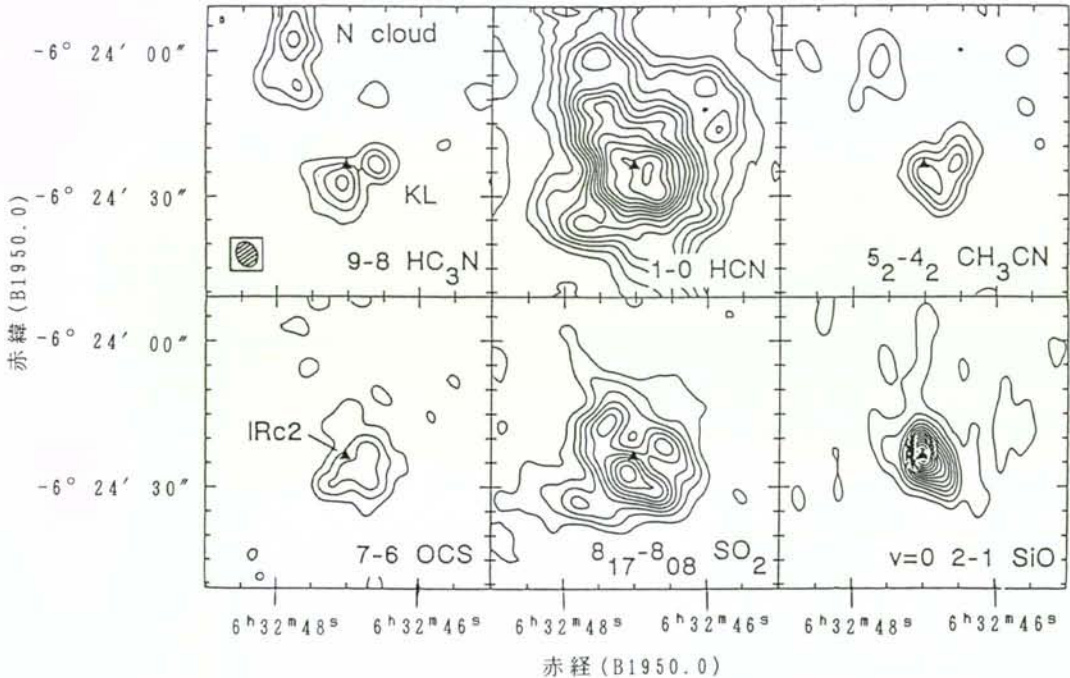


図1 ブランベック (R. L. Plambeck) らがハット・クリークの干渉計を用いて観測した、オリオン KL における 6 つの分子の分布。それぞれのスペクトル線の 9-11 km s<sup>-1</sup> の速度範囲での積分強度を等高線表示してある。各図の表示範囲は、1 分角×1 分角。▲は IRc 2 の位置を示す。

いることを意味しています。そして、このような物理状態の急激な変化は、IRc 2 の激しい活動性により引き起こされたと考えられます。これは、分子生成が星形成と密接に関わっていることを示した点で、また、様々な分子輝線を使って原始星周辺の複雑なガスの構造を明らかにした点で画期的な観測成果です。さらにこの領域での分子の分布については、高い空間分解能と感度を持つ野辺山の 5 素子干渉計により、詳しい観測が現在も進められています。

それでは、分子の分布や存在量は、原始星の形成過程や周囲の物理環境と具体的にどのように結びついているのでしょうか。これは、それぞれの分子の生成機構を明らかにするためにも、また、様々な分子のスペクトル線を使って星形成領域での物理過程を調べていくためにも重要な問題です。しかし、オリオン KL は、太陽系から 500 pc 近くも離れた、しかも、狭い領域で多くの星が活発に生まれている複雑な場所です。このような領域を一つだけ調べていたのでは、星形成と分子生成との関係について十分に明らかにすることはできません。この問題を解決するためには、比較的近距离にある多くの天体を系統的に観測する必要があります。そして、原始星の性質や周辺ガスの物理状態の違いが、分子の存在量や分布にどのように反映されているのかを定量的に調べなければなりません。そこで我々は、太陽系近傍に存在する多くの分子雲において、オリオン KL で特徴的に見られる分子輝線の観測を行なうことにしました。

### 3. 低質量星形成領域の化学 —メチルアルコール輝線の観測

オリオン座分子雲よりも我々に近い場所には、おうし座領域、へびつかい座領域をはじめとする分子雲の複合領域がいくつか存在しています。これらの分子雲は背景の星の光を遮る暗黒の領域として確認されることから、一般に“暗黒星雲”と呼ばれています。暗黒星雲はオリオン座巨大分子

雲とは異なり、太陽質量程度の“低質量星”を生み出す場所です。そして、このような領域を研究対象とすることにより、星の“純粋な”形成過程を統計的に詳しく調べることができるようになってきました。それは、これらの暗黒星雲が太陽系近傍に多く存在していることに加え、星を生み出すまでに長い時間を要することや、外部からの物理的影響（水素電離領域からの衝撃波など）を受けていないといった利点を持つためです。しかし、これまで暗黒星雲中の低質量星形成領域においては、質量や密度などの物理量を求める目的で、一酸化炭素やアンモニアといった分子輝線の観測は行なわれてきましたが、一つ一つの領域の化学組成を細かく調べていく観測は全く行なわれていません。しかも、低質量星の形成活動が周囲の分子雲に与える影響は、大質量星の場合に比べはるかに小さいとみなされ、その化学組成に関しては、ほとんど注目されてきませんでした。そこで我々は、まずはじめに、低質量星の形成活動が暗黒星雲の化学組成を実際に変化させているのかどうかを調べることにしました。ここで着目した分子が、オリオン KL に豊富に存在するメチルアルコール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) です。

我々は野辺山の 45 m 電波望遠鏡を用い、4 つの低質量星形成領域を含む 8 つの暗黒星雲について、メチルアルコール輝線の観測を行ないました。そして、その結果から、星形成領域においてメチルアルコールの存在量が増加している傾向を見い出しました。しかし、その増加は星形成が起きていない領域に比べ 2 倍程度、存在量はオリオン KL の 100 分の 1 程度と僅かなもので、この結果から直接「低質量星の形成に伴い、メチルアルコールの存在量が増加している」とは断言できません。

ここで我々は、それぞれの天体の分子流の年齢に注目しました。メチルアルコール輝線を観測した低質量星形成領域においても、オリオン KL と同様に分子流が検出されています。しかし、オリ

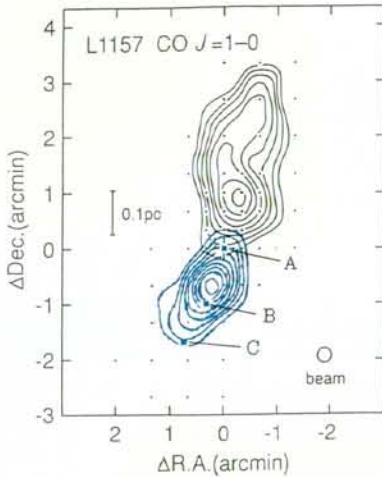


図2 梅本らが野辺山の45m電波望遠鏡を用いて観測した、L1157暗黒星雲における一酸化炭素輝線 ( $J=1-0$ ) の高速成分の分布。青線は我々に近づいて来る成分 ( $-9.0-1.0\text{km s}^{-1}$ )、黒線は遠ざかる成分 ( $4.5-14.5\text{km s}^{-1}$ ) の積分強度を等高線で表示している。+は赤外線源の位置を示す。A, B, Cは、図4での観測点を示す。

オン KL の IRc 2 から生じた分子流の年齢が2千年程度と非常に若いのに対し、我々が観測した天体の分子流は5万年から10万年と、IRc 2 に比べずっと年をとったものです。したがって、IRc 2 の分子流が、分子雲を破壊している段階にあるのに対し、我々が観測した低質量星形成領域の分子流は、周辺ガスを既に吹き飛ばしてしまった可能性があります。このような分子流の発達段階の違いが、観測されるメチルアルコールの存在量の違いとして表れているのかも知れません。そこで我々は、これまでに観測されている低質量星形成領域の中から、最も若い分子流が検出されている天体を探し出しました。それらは、年齢が数千年から1万年の分子流を持つ  $\rho\text{Oph-E}$ , B 1, L 1157 の3つの領域です。我々は、これらの低質量星形成領域を含む21天体について、前回よりもさらに詳しいメチルアルコールの観測を行ないました。その結果、我々が予想した通り、その3つの星形成領域において非常に強いメチルアルコールのスペク

トル線を検出することができました。その存在量は、他の暗黒星雲に比べると10倍から100倍も増加しています。特にL 1157 (図2)<sup>3)</sup>においては、オリオン KL での存在量とほぼ同じ値になりました。これは、低質量星の形成に伴って暗黒星雲の化学組成が急激に変化していることをはっきりと示す結果です。さらにこの結果は、分子流の年齢が若い段階において、メチルアルコールの生成過程が特に強い影響を受けている可能性も示唆しています。

#### 4. 分子流との相互作用 一星間塵からの分子の蒸発

続いて我々は、メチルアルコールがどのような原因で増加しているのかを調べるために、野辺山の5素子干渉計を使って、L 1157 でのメチルアルコールの分布を高分解能で調べました。その結果、図3に示したように、メチルアルコールが数個の小さな塊 (クランプ) として存在していることがわかりました。しかも、それらのクランプは分子流に沿った幅約0.08 pc の細い領域に集まっています。また、クランプの平均的サイズは約0.03 pc、質量は0.3太陽質量程度と見積ることができました。このような構造や分子流に沿った分布は、星形成領域で度々観測されるハービック・ハロー天体によく似ています。もし、この構造がハービック・ハロー天体と同じように、分子流と周辺ガスとの激しい衝突により形成されたのだとすると、この結果は、強いショックを受けた領域でメチルアルコールの存在量が急速に増加していることを示唆しています。

メチルアルコールは、いくつかの星形成領域に対して行なわれた赤外吸収スペクトルの観測から、星間塵表面を覆う“氷”に含まれる分子の一つではないかと言われてきています。このことと考え合わせると、我々の観測結果は、分子流と強く相互作用した領域で塵が加熱され、暖まった塵の表面からメチルアルコールが蒸発していること

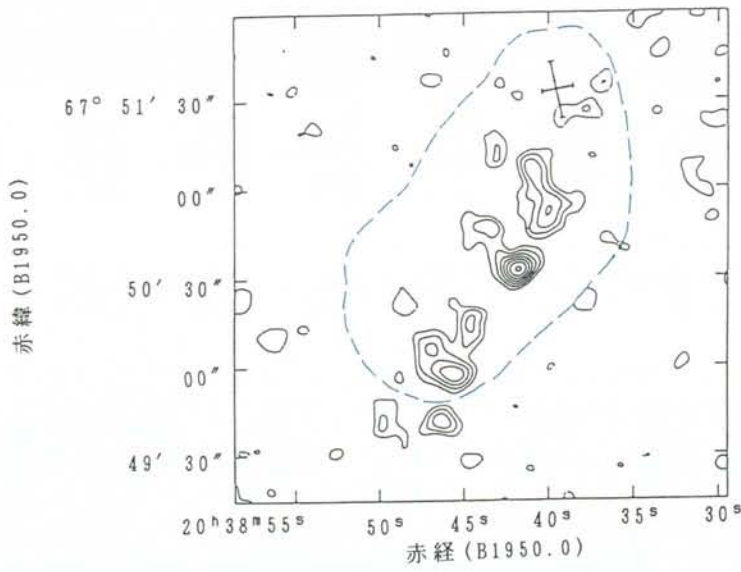


図3 野辺山の5素子干渉計で観測されたL1157におけるメチルアルコール輝線 ( $J_k=1_0-0_0 A^+$ ) の積分強度分布. 速度範囲は,  $-1.0-6.8 \text{ km s}^{-1}$ . 青破線は, 図2に示した分子流の近づいて来る成分の分布を示す. ビームサイズは9秒角 $\times$ 9秒角. +はエラーを含めた赤外線源の位置を示す. 最低等高線と等高線間隔は, それぞれ  $2\sigma$  レベルと  $1\sigma$  レベルに対応する.

を意味しているかも知れません。

それでは、塵を構成している他の分子も、分子流に伴うショックにより気相中に飛び出してくるのでしょうか。我々は、星間塵の主要な成分であると考えられる SiO (一酸化ケイ素) のスペクトル線の検出を、L 1157 において試みました。これまで SiO 輝線は、オリオン KL をはじめとする大質量星形成領域においてのみ観測されています。そして、塵からの蒸発温度が SiO の場合 1500 K 以上と非常に高いことから、そのような高温領域をつくり出すには、大質量星の激しい形成活動が必要であると考えられてきました。しかし、L 1157 での観測の結果、予想をはるかに上回る強いスペクトル線が分子流方向で検出されました (図 4)<sup>4)</sup>。しかも、その線幅は最大 20 km/s にも達しており、分子流により激しく押し流されたガスの中に SiO が存在していることを示しています。

野辺山の 45 m 鏡と JCMT の 15 m 鏡による観測からは、SiO が分子流の双極成分の片方 (手前に近づいてくる成分) にだけ存在していることがわかりました。その分布は、原始星と考えられる赤外線源から 30 秒角ほど離れた、分子流の中央から

先端までのとても狭い領域に集中しています (図 5)。この分布は、干渉計で観測されたメチルアルコールの分布とよく対応しています。また、十分に分解されていませんが、その中にスペクトル強度のピークがいくつか見られ、メチルアルコールと同じようにクランプ状の構造を持っていることを示唆しています。

さらに、L 1157 での SiO 輝線の検出と前後して、他の低質量星形成領域においても SiO の存在が確認されました。それらの天体は、我々がメチルアルコールの強いスペクトル線を観測した  $\rho$ Oph-E と B1, そして、非常に若い分子流 (約 3500 年) が検出されている L 1448 です。これらの天体に対する最近の観測から、SiO のスペクトル線が、1) 赤外線源から離れた分子流の先端方向で強くなっていること、2) メチルアルコールの分布とよい相関を示すこと、そして、3) その線幅が数 km/s から十数 km/s にも及んでいることなど、L 1157 と似た振舞いを示すことが明らかになりました。

これらの結果は、分子流と周辺ガスとの激しい相互作用により生じた衝撃波が、星間塵を加熱し、

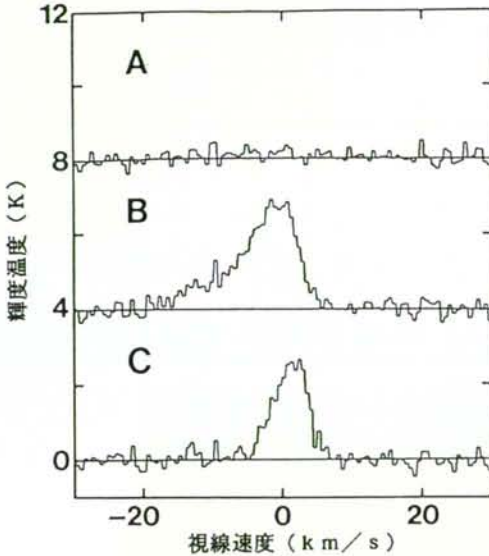


図4 野辺山の45m鏡で観測されたL1157における一酸化ケイ素輝線(J=2-1)のプロファイル。観測点A, B, Cは、図2に示した点と同じ。

その表面、及び、内部から、メチルアルコールとSiOを気相中へ放出させていることを強く支持しています。しかも、年齢が1万年以下の若い分子流を持つ天体において、これらの分子の存在量が著しく増加していることから、分子流が分子雲を破壊し始めた段階において、特に急激な温度上昇が引き起こされている可能性を示唆しています。これは、低質量星の形成に伴い、分子雲がどのような物理的影響を受けているのかを考える上でも重要な結果です。

## 5. おわりに

以上のように、太陽系近傍の低質量星形成領域においていくつかの分子輝線を系統的に観測することにより、星形成領域での物理過程と分子生成との関連について総合的に捉えることができるようになってきました。しかし、このような星形成領域における化学過程の研究は、最近ようやく始まった段階です。これからさらに、分子の分布や存在量について、また、個々の分子が存在するガスの物理状態について、いくつかの天体で詳しく

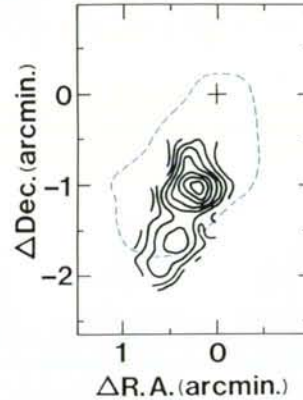


図5 JCMT 15m電波望遠鏡で観測されたL1157における一酸化ケイ素輝線(J=5-4)の積分強度分布。ビームサイズ、グリッド間隔は、それぞれ25秒角と10秒角。速度範囲は-15.0-5.0 km s<sup>-1</sup>。+は赤外線源の位置を、破線は図3と同じ分子流の分布を示す。

調べていく必要があります。そして、分子流のエネルギーや周辺ガスの密度、原始星の性質などに着目し、それらの違いが、生成している分子の種類や量にどのように反映されているのかを、天体毎の比較から明らかにすることが次の重要な課題です。このように、各天体で得られた物理量と、分子の存在量やその変化のスケールといった化学的諸量とを定量的に結びつけることにより、星形成領域の物理化学過程の規則性を明らかにできれば、様々な分子の化学的性質を使って、分子雲の進化段階や原始星の形成過程について、これまでとは別の角度から新しい情報が得られるのではないかと考えています。

## 参考文献

- 1) Plambeck, R. L., Wright, M. C. H. 1988, *Astrophys. J. Letters.*, **330**, L61.
- 2) Wright, M. C. H., et al. 1983, *Astrophys. J. Letters.*, **267**, L41.
- 3) Umemoto, T., et al. 1992, *Astrophys. J. Letters.*, in press.
- 4) Mikami, H., et al. 1992, *Astrophys. J. Letters.*, in press.