

# 大質量星形成領域における化学組成

池田 美穂

〈国立天文台天文学データ解析計算センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: miho.ikeda@nao.ac.jp

大質量星形成領域に特徴的な大型有機分子の生成機構を探るため、銀河中心方向の Sgr B2 分子雲でいくつかの大型有機分子の分布を調べました。分子によって分布が異なり、それが生成機構の違いによる可能性が示唆されました。またいくつかの大型有機分子を様々な星形成領域で探査し、その存在量と各領域の物理量の比較を行うことで、大型有機分子が分子雲のどんな物理量を反映しているのか明らかにすることが出来ました。本稿ではこの2種類の観測について紹介します。

## 1. はじめに

### 1.1 星間分子

80年代に建設された、野辺山の45m鏡やIRAMの30m鏡などの高感度な大型ミリ波電波望遠鏡の活躍、また多くの電波望遠鏡による分子雲のスペクトル線サーベイなどにより、星間空間では今までに100種以上もの分子種が様々な領域で発見されています。暗黒星雲であるTMC-1では、地球上には存在しない炭素鎖分子が多数検出されています。一方大質量星形成領域であるOMC-1やSgr B2では飽和した(単結合を多く含む)分子が見られるようになります。このように領域によって化学組成は大きく異なり、分子雲の進化に伴って刻々と変化しています。

また星間分子は分子雲の様々な物理状況を反映しているため、物理量を求める際のプローブとして使われることもあります。例えば電波領域では水素分子ガスを観測できないため、CO分子が使われます。分子雲の中でもさらに密度が高い部分のレーザーとしては、分子が励起される臨界密度の高いHCNが使われます。また分子雲の重要な物理量である温度は、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CH}_3\text{CCH}$ 、 $\text{CH}_3\text{CN}$ などの対称コマ分子の観測から求められます。

### 1.2 星間分子の生成機構

ではこれらの星間分子はどのように生成されるのでしょうか？地球上では2つの粒子が結合する際、余計なエネルギーを受け取ってくれる第3者がいる可能性があります。星間空間は地球上に比べて極端に密度が低いからです。そのような3体衝突で分子を生成するのは困難です。そのため2体反応であるイオン・分子反応が考え出されました。この反応はエネルギー障壁を持たないか、持っても非常に小さいため星間空間のような低温・低密度でも十分起こり得ます。星間分子が次々と発見されていた当時は、このイオン・分子反応ではほとんどの分子の生成が説明できると考えられていました。実際暗黒星雲ではこの反応の中間体である分子イオンも検出されています。ところが電波望遠鏡の発展と共に、さらに大きく、複雑な形をした分子が次々と発見されるようになってくると、前述のイオン・分子反応だけでは説明しきれない観測結果が出てきました。“さらに大きな複雑な分子”というのは、1.1でも述べたように大質量星形成領域で多く見られる飽和した有機分子のことです。ここでは単結合を多く含むこれらの分子のことを“大型有機分子”と呼ぶことにします。分子雲の化学組成は、発見されている分子に関する

る反応を取り入れたモデル計算を、時間に沿って追ってやるとその変化が予想できます。前述のイオン・分子反応をこのモデル計算に取り入れて、大質量星形成領域で検出されている分子の存在量を見積もってやると、観測から得られる存在量の方が数桁高いのです。そこでイオン・分子反応のような気相中の反応ではなく、固体であるダスト表面上での反応が考え出されました。この反応はダストが分子が生成される際の余計なエネルギーを吸収して、ダスト内部の振動や熱に換えるという触媒的役割を果たし、気相中の反応より速く進みます。ダスト表面上反応はこのとき初めて考えられたものではなく、分子ガスを構成する最も存在量の多い水素分子も、ダスト表面上で生成されると考えられています。水素分子は生成された後すぐにダストから蒸発して気相中に出てきますが、大型有機分子も同様に簡単にダスト表面から蒸発できるのでしょうか？

### 1.3 大質量星形成領域の化学

大型有機分子は昇華温度が高いため、水素分子のように簡単にダストから蒸発できるわけではありません。ダストが何らかの熱源で暖められないと、その表面上で分子が生成されていても、凍りついたままで気相中に出てこれないのです。ただし大質量星形成領域にはたいがい若い星が埋もれた電離水素領域が存在します。現在ではこの若い星からの放射がもっとも有効な熱源だろうと考えられています。分子雲の化学組成の進化のモデル計算はイオン・分子反応を中心に発展してきましたが、最近はこのダスト表面上反応も取り入れたモデル計算が行われるようになってきました。このようなモデル計算ですと、特に大型有機分子を大量に生成することが可能になります。しかし観測されている全ての分子の存在量を同時に説明できないなどまだまだ問題点はあります。

さてもし若い星からの放射によって、ダスト表面上で生成された分子が気相中に出てきているとい

う仮説が正しければ、これらの分子の分布は若い星が埋もれている場所に集中することが予想されます。大型有機分子は存在量そのものが低いため、また大型であるが故に分配関数が大きくなり、1つのエネルギー準位当たりの存在量が低いため観測が困難です。そのため今までは大型有機分子の観測例は少なく、特に分布はほとんど知られていませんでした。そこで最も多くの大型有機分子が観測されている、我々の銀河中心方向にある Sgr B2 (射手座) 分子雲で様々な大型有機分子のマッピング観測を行い、その分布と電離水素領域との空間的關係を調べました。

また 1.1 でも述べたように星間分子は様々な物理量を反映することがわかっていますが、大型有機分子に関しては、大質量星形成領域に局在するという以外のことはあまり知られていません。つまりどんな物理量を反映しているのかよくわかっていないということです。そこで大型有機分子を様々な大質量星形成領域で探査する観測を行い、その存在量と分子雲の物理量との関係を調べました。

## 2. 銀河中心領域における大型有機分子の分布

Sgr B2 分子雲は我々の銀河中心方向に存在する巨大分子雲であり、太陽から約 8.5 kpc の距離にあります。50 あまりのコンパクトな電離水素領域が連続波や再結合線の観測から同定されており<sup>1)</sup>、これらの領域は若い星からの UV 放射によって電離しています。つまりたくさんの若い星がこの電離領域に埋もれており、今まさに星形成が起こっている領域です。この分子雲は非常に密度の高い 2 つのコアが存在します。これらのコアは Sgr B2(M), (N) と呼ばれ、約 2 pc 離れています<sup>2), 3)</sup>。それぞれ電離水素領域が付随しているソースです。この 2 つのコアのうち特に Sgr B2(N) は Sgr B2(M) より若く、最も多くの大型有機分子が検出されて

いる場所でもあります。我々はこの2つのコアを含む約3分×5分の範囲で、酸素を含む分子( $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ )とアミノ基( $\text{NH}_2$ ) / イミノ基( $\text{NH}$ )を含む分子( $\text{CH}_2\text{NH}$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}_2\text{CHO}$ ,  $\text{NH}_2\text{CN}$ )合わせて8種の分子の分布を調べました。観測に用いたのは野辺山45m望遠鏡で、 $\text{CH}_2\text{NH}$ の輝線を除いた他の分子は70–100 GHzの輝線を用いたため、15–20秒(距離にして約0.6–0.8 pc)という高い分解能のマップが得られました。

当初の予想では酸素を含む分子も、アミノ基 / イミノ基を含む分子も単結合の数が多い飽和分子であることから、Sgr B2(N)の周りに集中した分布が得られると考えられました。しかし両者の間にははっきりとした違いが見られました。酸素を含む分子は予想通りSgr B2(N)の近傍に集中しているか、ピークを持っていることがわかりました

(図1)。それぞれピークがSgr B2(N)から少し北東にずれていますが、この位置に若い星が多く埋もれていることがセンチ波の連続波の観測からわかっています<sup>4)</sup>。またこのピークでの水素分子に対する分子の相対的な存在量を求めてみると、 $10^{-8}$ – $10^{-9}$ という値になりました。この存在量を気相中のイオン・分子反応のみを取り入れたモデル計算で説明しようとする<sup>5)</sup>、どうしても観測値より2–4桁低い値になってしまいます。ところがダスト表面上反応も取り入れたモデル計算と比較すると<sup>6), 7)</sup>、より観測値に近い計算結果となっています。つまり酸素を含む分子はダスト表面上反応が重要な役割を果たしていると考えられます。Sgr B2(N)近傍の電離水素領域に埋もれた若い星からの放射が、ダストを暖める熱源になっているのでしょう。一方アミノ基 / イミノ基を含む分子は積分強度のピークが

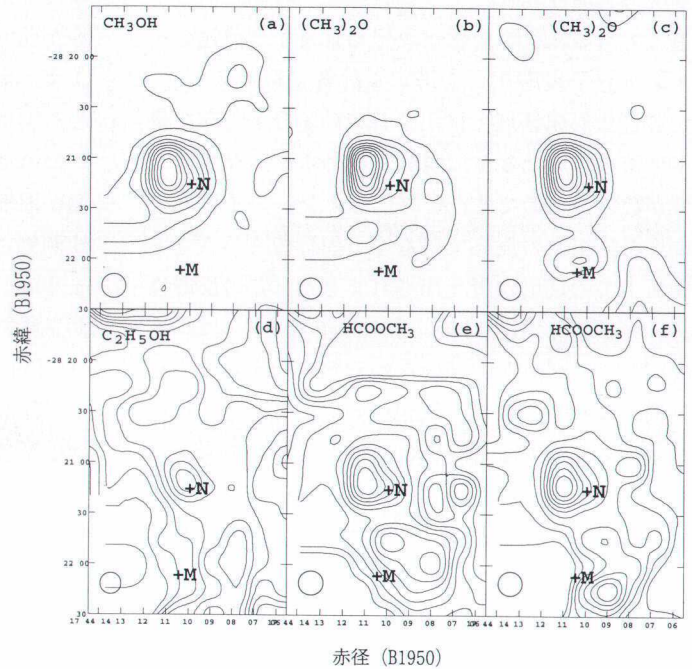


図1：酸素を含む大型有機分子 (a) $\text{CH}_3\text{OH}$   $15_{3,13}$ – $14_{4,10}$  A+, (b) $(\text{CH}_3)_2\text{O}$   $7_{2,6}$ – $7_{1,7}$ , (c) $(\text{CH}_3)_2\text{O}$   $15_{2,13}$ – $15_{1,14}$ , (d) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$   $5_{1,5}$ – $4_{0,4}$  (e) $\text{HCOOCH}_3$   $7_{1,6}$ – $6_{1,5}$  A, (f)  $\text{HCOOCH}_3$   $7_{1,6}$ – $6_{1,5}$  E の積分強度図。2つの十字はSgrB2(N),(M)の位置を示している。等高線はピークの値の10%から90%まで10%刻み。各パネルの左下の円はビームサイズを示す。

Sgr B2(N), (M)の西側にあり、さらに南北に長く広がっていることがわかります(図2)。Sgr B2(N), (M)の西側には特に熱源となるようなソースは検出されていません。この南北に広がった構造は、高密度ガスをトレースすると考えられる $\text{HC}_3\text{N}$ の分布と非常によく似ていることがわかりました<sup>8)</sup>。つまり酸素を含む分子のように電離水素領域近傍に集中しているのではなく、高密度ガス全体に存在していると言えます。また酸素を含む分子と同様積分強度ピークでの水素分子に対する存在量を求めてみると、 $10^{-9}$ – $10^{-11}$ と酸素を含む分子より少し低い値になっています。これらのアミノ基 / イミノ基の存在量を気相中のイオン・分子反応のみを取り入れたモデル計算で予想すると、どの程度になるのでしょうか。Lee<sup>9)</sup>らによれば観測から得られた値とほぼ同じ $10^{-10}$ 程度になります。従ってアミノ基 / イミノ基を含む

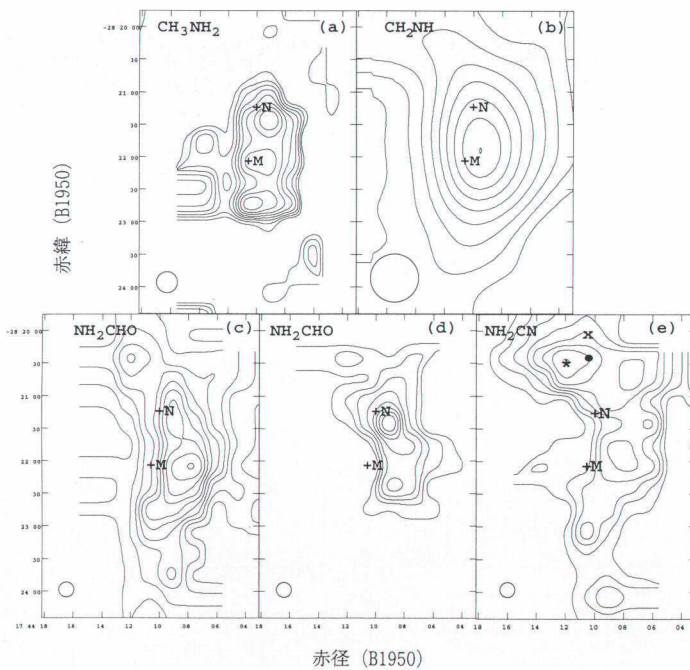


図2：アミノ基・イミノ基を含む大型有機分子 (a)  $\text{CH}_3\text{NH}_2$   $4_{1,4}-4_{0,4}$  (b)  $\text{CH}_2\text{NH}$   $3_{0,3}-2_{1,2}$ , (c)  $\text{NH}_2\text{CHO}$   $5_{1,5}-4_{1,4}$ , (d)  $\text{NH}_2\text{CHO}$   $5_{2,4}-4_{2,3}$  (e)  $\text{NH}_2\text{CN}$   $5_{1,4}-4_{1,3}$  の積分強度図。2つの十字は SgrB2(N),(M)の位置を示している。(e)の黒丸(●)は  $\text{HNC O } 1_{0,1}-0_{0,0}$  の積分強度ピーク、バツ印(x)は  $\text{HNC O } 4_{0,4}-3_{0,3}$  と  $\text{HCO}_2^+ 5_{0,5}-4_{0,4}$  の積分強度ピーク、アスタリスク(\*)は 36GHz のメタノールの  $4_{1-3_0}$  の積分強度ピークを示している。等高線はピークの値の 20% から 90% まで 10% 刻み。各パネルの左下の円はビームサイズを示す。

分子の存在量は気相中の反応のみで説明できることとなります。つまり酸素を含む分子、アミノ基/イミノ基を含む分子の分布の違いは、それぞれの分子の生成機構の違いを反映していると考えられます。最近ではイオン・分子反応、ダスト表面上反応に加えて中性・中性反応が考えられるようになってきました。この反応はその名のとおり中性の分子同士あるいはラジカル同士の反応で、昔はエネルギー障壁が高いため、星間空間の生成反応としては起こり得ないだろうと考えられていました。しかしエネルギー障壁がほとんどない中性・中性反応が次々と発見されるようになってきたため、星間空間での生成反応として注目を浴びるようになってきました。アミノ基を含む分子  $\text{NH}_2\text{CHO}$ ,  $\text{NH}_2\text{CN}$  は

$\text{NH}_3$  を前駆体とする中性・中性反応で生成されているのではと指摘されています。 $\text{CH}_2\text{NH}$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  の気相中の反応としては、それぞれ  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}_3$  を前駆体とするイオン・分子反応が挙げられます。 $\text{NH}_2$  は  $\text{NH}_3$  から生成されると考えられています。ではこの前駆体である  $\text{NH}_3$  の分布は Sgr B2 分子雲でどうなっているのでしょうか?  $\text{NH}_3$  は 20 GHz 帯という低い周波数に遷移を持つため、野辺山 45m 望遠鏡のような大口径の望遠鏡でも、そのビームサイズは Sgr B2 (N), (M) が分解できないほどの大きさになってしまいます。また Sgr B2 (N) 方向では吸収で観測されているため、正確な物理量を見積もれないという欠点もあります。干渉計による高空間分解能の観測もあるのですが、今度は逆に広がった構造には感度を持たなくなってしまい、アミノ基/イミノ基を含む分子が示した広がった構造と比べることが出来なくなります。アンモニアがアミノ基/イミノ基を含む分子の生成に関連しているかどうか

を確かめるためには、アンモニアの高空間分解能の分布が必要です。そのためには 1mm 帯に遷移を持つ  $\text{NH}_2\text{D}$  などの同位体分子を用いた、単一鏡でのマッピング観測が必要だと思われます。

### 3. 大型有機分子の存在量と分子雲の物理状況との関係

このように大質量星形成領域での大型有機分子の分布を調べる事が出来ましたが、ではこれらの分子の存在量はいったいどんな物理量を反映しているのでしょうか? 物理量が異なる領域で存在量を比べたとき、化学組成はどのような違いを見せるのでしょうか? こういったことを調べるた

めに、大型有機分子を複数の星形成領域で探査する観測を行いました。この観測はもともと新しい環状の星間分子 cyclic-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O (エチレンオキシド、この後 c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) を Sgr B2 で検出したことをきっかけとして始まった観測です。c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O は CH<sub>3</sub>CHO (アセトアルデヒド) の構造異性体の1つであり、CH<sub>3</sub>CHOの方は様々な領域で検出されています。しかしその生成機構がよくわかっていないため、構造異性体であり、同様な機構で生成されると考えられる c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O と同時に様々

な星形成領域で探査を行いました。野辺山 45m 鏡、キットピークにある NRAO の 12m 鏡を用いて北天のソースを、チリにある SEST 15m 望遠鏡を用いて南天のソースを合わせて<sup>9)</sup> 22 のソースで探査を行いました。そのうち両分子を 11 のソースで、CH<sub>3</sub>CHO に関してはさらに 5 つのソースで検出することに成功しました。図 3 にこれら 2 つの分子のプロファイルを示します。さらに両分子が検出できたソースでは他の大型有機分子 (CH<sub>3</sub>OH, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O, HCOOCH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>CN, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CN, HCOOH) も検出することができました。このサーベイ観測は分子雲の中心 1 点のみの観測のため分布を調べることは出来ませんでした。様々な大

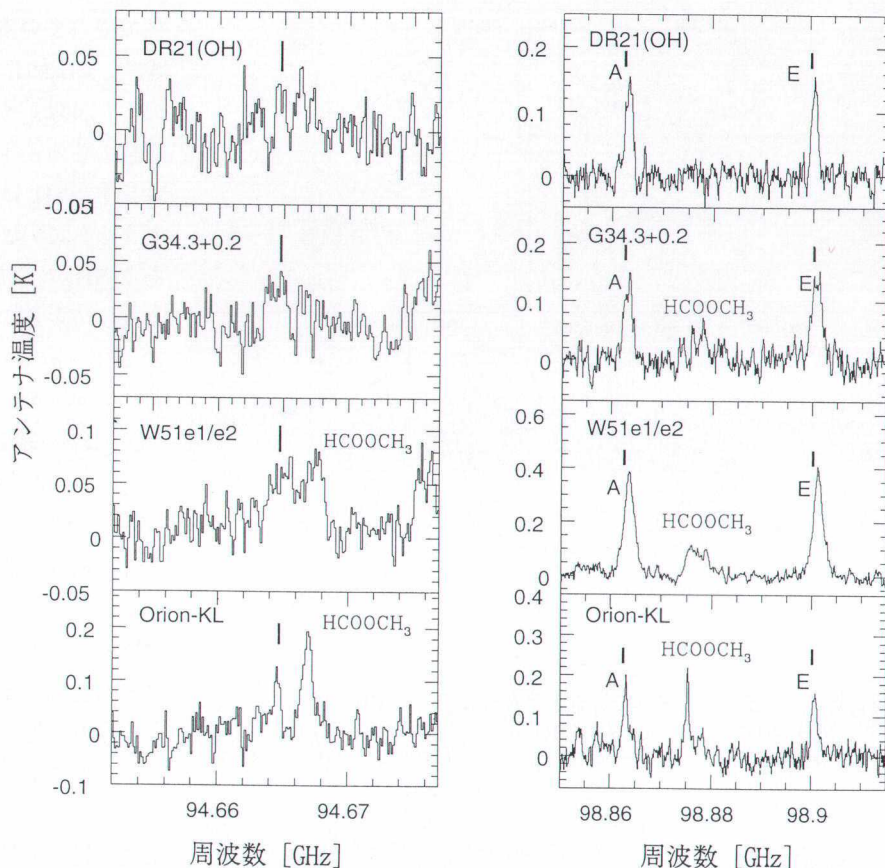


図 3：左の 4 つのパネルが c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O 3<sub>1,3</sub>-2<sub>0,2</sub> 94664.6MHz の輝線、右側が CH<sub>3</sub>CHO 5<sub>1,4</sub>-4<sub>1,3</sub> A 98863, 3MHz, E 98900.9MHz の輝線のプロファイル。

型有機分子の存在量を、様々な領域の物理量と比較することが可能になったのです。まず検出できた大型有機分子の存在量を求めてみると、領域によってかなりばらつきがあることがわかりました。これはそれぞれの領域の何を反映しているのでしょうか？ そこでこの存在量を各領域のガスの温度と比較しました。図 4 a は各領域のガスの温度に対する検出された分子の存在量を、ログスケールでプロットしたものです。この図を見ますと、Sgr B2 分子雲を除いて、ガスの温度が高い領域では分子の存在量も高くなっていることがわかります。ガスの温度の上昇とともに、これらの分子の生成反応が活発になっていると考えられます。大

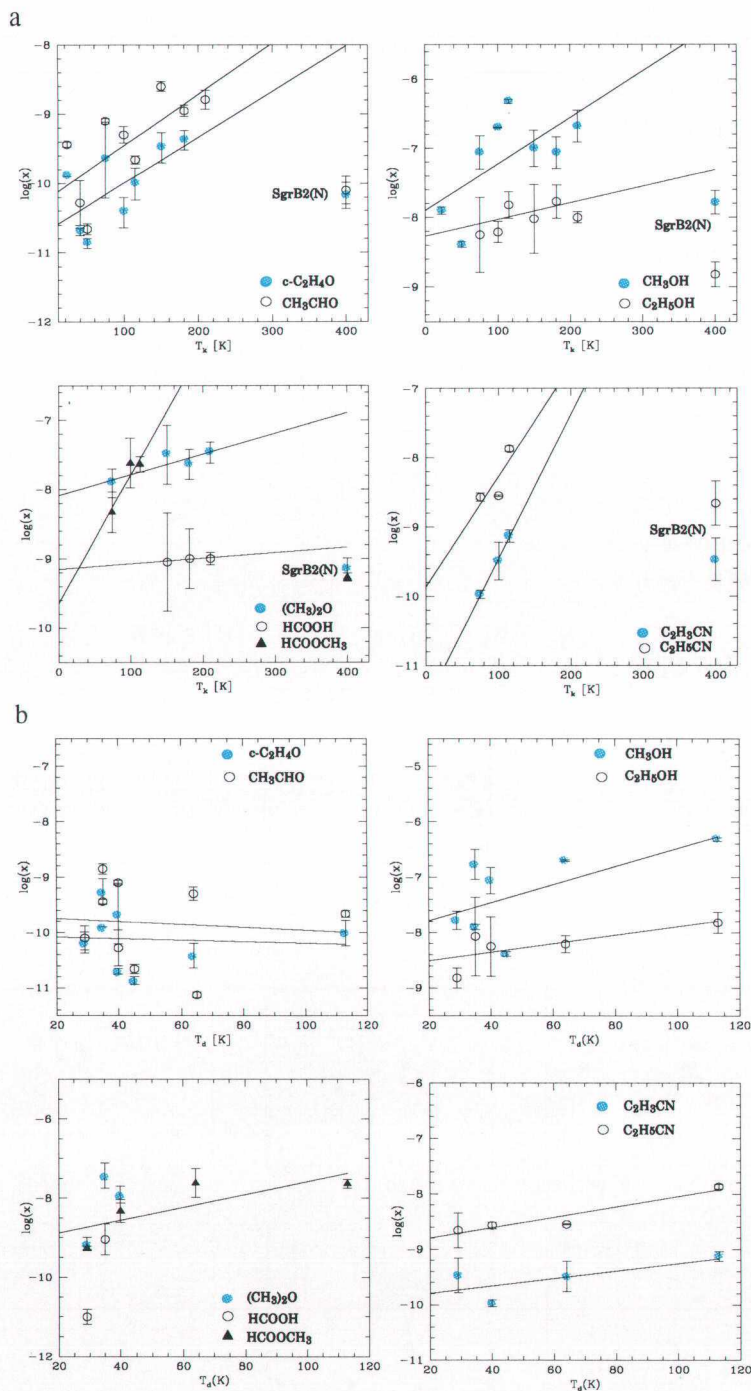


図4 a.: (上の4つのパネル) 各領域のガスの温度に対する分子の存在量をプロットしたもの。ガスの温度は $\text{CH}_3\text{CN}$ の観測から求められた値。  
 b.: (下の4つのパネル) 各領域のダストの温度に対する分子の存在量をプロットしたもの。ダストの温度はサブミリ波から赤外領域の連続波の観測から求められた値。

型有機分子の生成には、ダスト表面上反応が重要な役割を果たしているようだ。前節で述べましたが、ではこれらの存在量とダストの温度との関係はどうなっているのでしょうか？ 図4 bはダストの温度に対する分子の存在量をプロットしたものです。 $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ 以外の分子の存在量はガスの温度と比較したときと同様、ダストの温度が高い領域では存在量が増えていることがわかります。ところが $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ に関しては、存在量とダストの温度との間に全く相関が見られません。これはどういうことを示しているのでしょうか？  $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ 以外の分子はダスト表面上で生成され、分子雲の進化と共にダストの温度が上昇し、ダストから蒸発してくる量が増えたため気相中での存在量も増えていると考えることが出来ます。一方 $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ はダスト表面上の反応よりも気相中での反応が重要であるため、ダストの温度とは何の関係もないように見えるのではと我々は考えました。 $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ 以外の分子の中には前節のSgr B2分子雲でのマッピング観測によって、ダスト表面上反応が重要であると示唆された分子も含まれていることから、ダストの温度に対する存在量の

振る舞いの違いは生成機構の違いによると考えています。また  $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$  以外の分子は、分子雲の進化と共に存在量が増えているのではないかと述べましたが、では他の分子雲の進化をトレースするような物理量との関係はどうなっているでしょう？ そこで我々は星生成率をトレースする、赤外の光度と質量の比  $L(\text{IR})/M$  と、ダストに関係すると思われる分子の存在量との関係を調べてみました (図5)。 $L(\text{IR})/M$  は Gordon らによって測定されている値を採用しました<sup>10</sup>。ソースは3箇所だけと比較できるデータが少ないのですが、明らかに  $L(\text{IR})/M$  の高い領域で、ダストに関係すると思われる分子の存在量が増えています。つまり分子雲の進化と共に存在量が増えているという仮説をサポートする結果となりました。

またこれらの分子の存在量を見積もる際に、それぞれの領域で分

子の励起状態を表す励起温度も同時に求めることが出来、この値が分子ごとにある傾向を示すことがわかりました。各分子ごとに励起温度に対して存在量をプロットしたものが図6です。プロットした点1つが1つの領域のデータを表していることになります。 $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ,  $\text{HCOOH}$  はどの領域でも低い励起温度を示しているのに対して、 $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{CN}$ ,

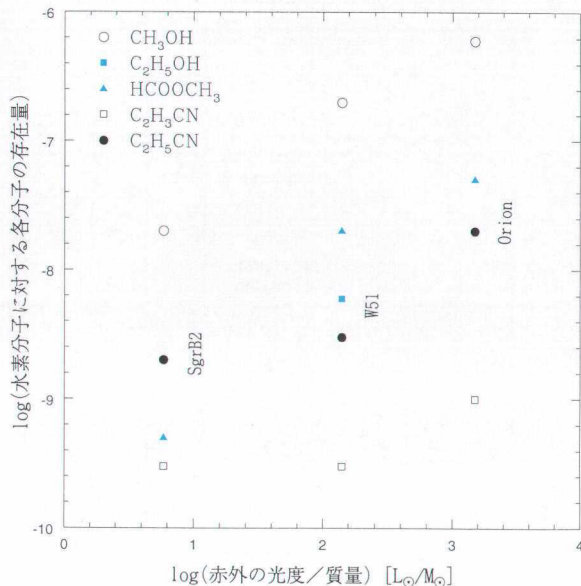


図5: W51, Orion, SgrB2 における赤外の光度/質量 ( $L(\text{IR})/M$ ) に対する、ダストに関連すると思われる分子の存在量のプロット。

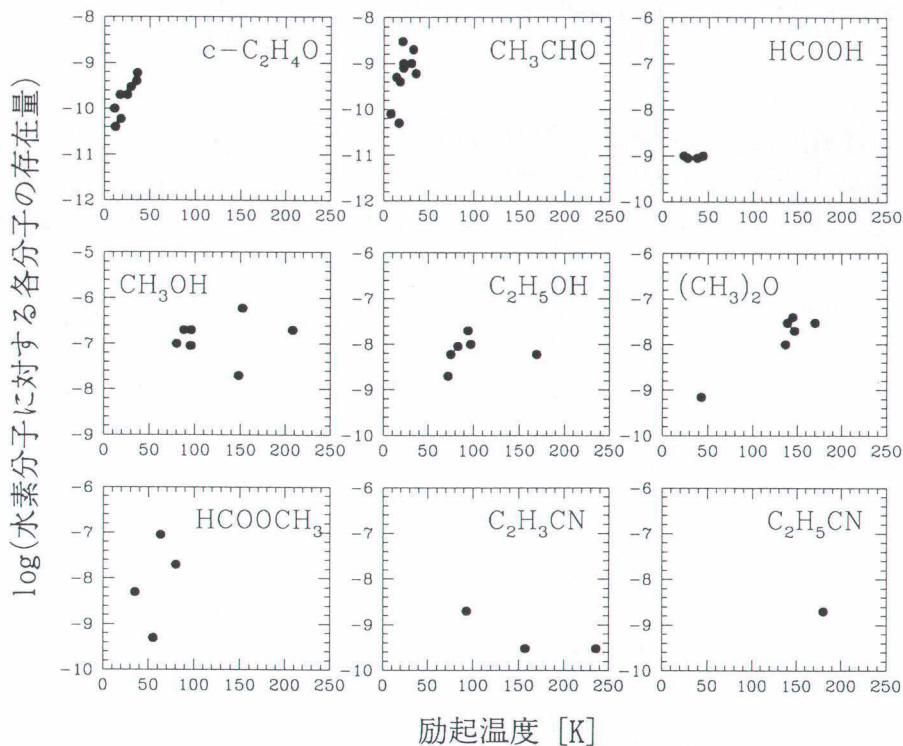


図6: 各分子の励起温度 ( $T_{\text{rot}}$ ) に対して存在量を分子ごとにプロットしたもの。

$C_2H_5CN$  はかなり高い励起温度を,  $HCOOCH_3$ ,  $C_2H_5OH$  はその中間程度の励起温度を示しています。こういった大型有機分子は  $CO$  のような軽い分子と違って励起される臨界密度が高くなるため、励起温度が分子雲のガスの温度と平衡にはならず低くなります。これは大型有機分子の電気双極子モーメントが大きいからです。しかしこれらの分子の間ではこの電気双極子モーメントに大きな違いはありません。にも関わらず励起温度の間にはっきりとした違いが見られるのです。そこで我々はこの励起温度がガスの温度をそのまま反映しているのではないにしても、それぞれの分子が存在する場所の物理状況の違いを示しているのではと考えています。そのため生成に主に効いている反応も違うのかもしれません。

#### 4. まとめ

今までは、このような大型有機分子の観測が困難であったため観測数が少なかったわけですが、今回の我々の観測によって数多くの大型有機分子の分布と、様々な領域における存在量を得ることができました。そして大型有機分子の中でも、ダスト表面上ではなく不飽和分子と同様に気相中で生成されている分子が存在する可能性が示唆されました。また生成機構の違う分子が物理状況の違う場所に存在している可能性も示唆されました。今まではこのような形が複雑であり存在量が少ない大型有機分子は、星形成が活発で高温・高密度の領域に存在するという程度のことしかわかっていなかったのですが、それらを生成機構でも空間分布でも分類が出来るようになってきたと言えるでしょう。

本稿は筆者の博士学位論文<sup>11)</sup>の内容に基づくものです。本研究を進めるにあたり、指導教官の大石雅寿助教授をはじめ、共同研究者である A. Nummelin 氏, J. E. Dickens 氏, P. Bergman 氏, Å. Hjalmarson 氏および W. M. Irvine 氏からご指導、ご協力を頂きました。深く感謝いたします。

また各観測所で観測を手伝ってくださったスタッフの方々にも御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Gaume R.A., Claussen M.J., De Pree C.G., Goss W.M., Mehringer D.M., 1995, ApJ 449, 663
- 2) Benson L.M., Johnston K.J., 1984, ApJ 277, 181
- 3) Vogel S.N., Genzel R., Palmer P., 1987, ApJ 316, 243
- 4) Martín-Pintado J., de Vicente P., Wilson T.L., Johnston K.J., 1990, A&A 236, 193
- 5) Lee H.-H., Bettens R.P.A., Herbst E., 1996, A&A 119, 111
- 6) Caselli P., Hasegawa T.I., Herbst E., 1993, ApJ 408, 548
- 7) Charnley S.B., Tielens A.G.G.M., Millar T.J., 1992, ApJ 399, L71
- 8) de Vicente P., Martín-Pintado J., Willson T.M., 1997, A&A 320, 957
- 9) Nummelin A., Dickens J.E., Bergman P., Hjalmarson Å., Irvine W.M., Ikeda M., Ohishi M., 1998, A&A 337, 275
- 10) Gordon M.A., 1988, ApJ 331, 509
- 11) 池田美穂 1999, 博士学位論文 (総研大)

#### Chemical Composition of Massive Star-Forming Regions

Miho IKEDA

National Astronomical Observatory, Tokyo 181-8588

Abstract: In order to clarify formation mechanisms of large organic molecules which are abundant in massive star-forming regions, we investigated distributions of several large organic molecules toward the Sgr B2 molecular cloud. The distributions were different from molecule to molecule, probably indicating the difference of formation mechanism. Then we carried out survey observations of large organic molecules toward several star-forming regions and compared the abundances of these molecules with physical conditions of molecular clouds. We saw which physical condition related to the abundances. These two observational results are introduced in this article.