

45 m 電波望遠鏡でオリオン座を探る

立松 健一*・梅本 智文*・亀谷 収*・平野 尚美*・砂田 和良**

今回で紹介する観測結果は、長谷川¹、林¹、平野²、岩田³、海部³、亀谷³、三上⁴、村田¹、仲野⁵、中野²、大橋^{3,4}、砂田¹、高羽³、立松²、梅本²、山本⁴（¹東大、²国立天文台、³通信総研、⁴名大、⁵大分大）の共同研究にもとづくものです。

1. オリオン座

天文にほとんど興味のない人でも、「オリオン座」は知っています。オリオン座がこのように有名なのは、(1)星座を構成している星が明るく、非常に見つけやすいこと、(2)四角の中に三つ星というように、星座の形が比較的シンプルで覚えやすいこと（図1参照）、(3)オリオン大星雲があること、などの理由によります。2番目の理由は偶然ですが、1番目、3番目の理由は、天文学の研究においてもオリオン座がもっとも有名であることとも密接に関係しています。それは、オリオン座は、

私たちにもっとも近い「OB アソシエーション」、つまり大質量星がさかんに生まれている領域のうちのひとつであるということです。

2. なぜ巨大分子雲を観測しなければならないか

現代の天文学において未解決の重要問題の一つとして、「誕生する星の質量はどのように決まっているのか」という問題があります。実は、こんなに重要なことが本当はよくわかっていないのです。

星の誕生の場所は、分子雲と呼ばれる宇宙空間に漂う雲です。分子雲は、電波望遠鏡で分子からの輝線スペクトルを観測することで存在がわかります。さてこの分子雲には、大きく分けて2種類あります。一つは「巨大分子雲」、そしてもう一つは「暗黒星雲」です。オリオンの大星雲の付近には「オリオン座分子雲」という巨大分子雲が存在することがわかっています。巨大分子雲の質

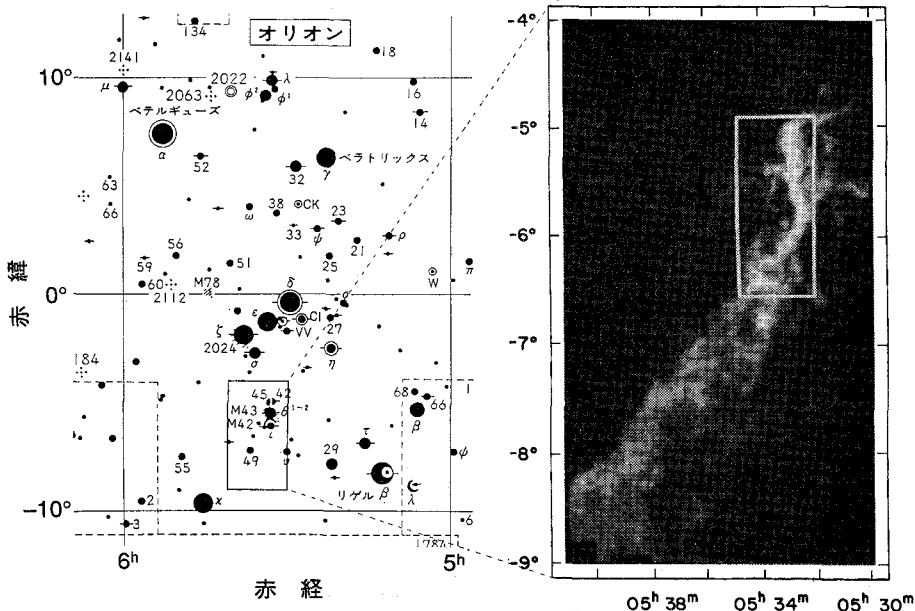


図1 (左) オリオン座。「全体恒星図」(誠堂新光社)より。(右) バリー (J. Bally) らがベル研究所の7 m 電波望遠鏡(分解能1.6分角)を用いて¹³CO (J=1-0) 輝線で観測した「オリオン座分子雲」。積分強度をグレースケールで表示してある。白線の四角は、図2(右)のCS輝線地図の枠に対応する。

* 国立天文台野辺山 Ken'ichi Tatematsu, Tomofumi Umemoto, Osamu Kameya, Naomi Hirano, ** 東大理 Kazuyoshi Sunada: The Orion Survey with the NRO 45 m Radio Telescope

量が太陽の約 10 万倍もあるのに対して、暗黒星雲の質量は約千倍に過ぎません。暗黒星雲ではもっぱら小質量星が生まれているのに対し、巨大分子雲では大質量星と小質量星の両方が生まれているらしいことがわかっています。大質量星の生成機構として、H II 領域、超新星残骸、恒星風などによるトリガー機構というものが盛んに取り上げられた時期もありましたが、確実な観測例というのが意外と少なく、また第一世代の大質量星をどうやって作るのかという問題はしばしば指摘されてきました。少なくとも上に挙げた観測事実、巨大分子雲と暗黒星雲での誕生している星の質量に違いがみられることは、トリガー機構からだけで説明するのは困難です。私たちは分子雲が本来持っている性質の中に、誕生する星の質量を決めているカギが隠されているのではないかと考えます。

次の章に述べるように、星が「分子雲コア」という分子雲中の特に濃くなっているところで誕生していることがわかってきています。これまでに星生成領域に対して行われた研究の断片の情報から、巨大分子雲には、暗黒星雲には見られないような重たい分子雲コアがあるらしいといわれています。また、分子雲コアの質量が、誕生する星の質量と関係しているのではないかとすることを示唆するデータもあります（例えば、海部氏らが 1988 年秋の学会で発表した、赤外線星の光度とそれをとりまく CS ディスクの質量の間に見られる相関）。これらのことから、巨大分子雲と暗黒星雲で誕生している星の質量が異なっているのは、それぞれの雲に含まれる分子雲コアの質量の違いが反映されているのではないかとこの予想が立てられますが、観測的にはよく確かめられていません。私たちは、小質量星のみならず大質量も誕生している巨大分子雲において、分子雲コアの詳細なデータを取得することが重要ではないかと考えました。具体的には、巨大分子雲中の分子雲コアの質量関数を暗黒星雲におけるそれと比較研究する、あるいは分子雲コアの物理量（質量、温度、乱流運動の大きさ、など）と誕生する星の質量の間の関係を探る、などの研究を行いたいと考えています。

3. フィリップ・マイヤーズ、暗黒星雲、分子雲コア

オリオン座をはじめとする大質量星生成領域も以前から研究されてきたのですが、代表的な暗黒星雲に比べると距離が遠く、星生成の謎に迫るような詳細な観測は、より難しいものとなっています。ここ数年間の星生成に関する重要な知見というのは、どちらかというと小質量星生成領域の研究から得られてきました。そのことを次に説明します。

小質量星生成領域のうちで最も代表的な暗黒星雲「お

うし座分子雲」は距離 150 pc にあり、距離 500 pc の「オリオン座巨大分子雲」に比べても 3 倍近くにあるので、中口径の電波望遠鏡でも比較的良いデータが取得できました。マイヤーズ (Philip C. Myers) たちは、おうし座をはじめとする領域で暗黒星雲のなかの分子雲コア（彼らは dense core と呼んでいます）を観測しました。彼らはまず、パロマーチャートという写真星図からサイズが数分角以下の小さく濃い暗黒雲をリストアップしました。そして、電波望遠鏡を用いて ^{13}CO 、 C^{18}O 、 NH_3 、 HC_3N 、 CS の輝線で観測を行い、基礎的な物理パラメータを導出してきました。 ^{13}CO 輝線を除くとこれらの分子輝線は空間個数密度が 1 万個 cm^{-3} 以上という、星間空間としては非常に密度の高い部分（私たちの感覚から言うとまだ限りなく真空に近いのですが）をトレースします。IRAS 赤外線点源や双極分子流といった星の進化の初期段階を示す天体がこの分子雲コアの中に見られることから、星がまさに分子雲コアから誕生していることが明らかにされてきました。暗黒星雲中の分子雲コアの代表的な物理量としては、 NH_3 の観測データの値をとると、大きさが 0.1 pc (0.3 光年)、質量が太陽の質量の数倍、分子個数密度が数万個 cm^{-3} といったものです。分子雲コアでは太陽程度の小質量星が生成しているらしいので、分子雲コアの質量の数分の 1 が星となる、つまり、まさに星の材料そのものを分子雲コアとしてみているらしいのです。ただし、分子雲コアの質量のうちの星になる割合がどのように決まっているのかは、まだよくわかっていません。

また、近年の星生成の理解の進展には、シュー (F. H. Shu) らの理論的研究も忘れることができません。彼らは分子雲コアから原始星が誕生する過程に対してモデルをたてており、議論は大変示唆に富んでいます。原始星への質量降着率が、分子雲コア内の（磁気圧などの効果を入れた）実効的音速の 3 乗に比例するという議論などは、まさに「星の質量は何が決められているのか」という問題に深く関係しており、今後の観測的な検証が待たれます。

4. オリオン座分子雲、45 m 鏡を用いた観測の必要性、CS 輝線を選んだ理由

これまでのオリオン座分子雲における広域観測のうち比較的高い角度分解能で行われたものとしては、バリー (J. Bally) たちがベル研究所の 7 m 電波望遠鏡で行った ^{13}CO 観測 (図 1 参照、オリオン座分子雲のかんりの部分を観測、分解能 1.6 分角) およびバトラ (W. Batrla) たちがマックス・プランク研究所の 100 m 電波望遠鏡を用いて行った NH_3 観測 (オリオン座分子雲のごく一部の 4 分角 \times 20 分角の範囲、分解能 43 秒角) が挙げら

れます。前者の ^{13}CO 輝線は分子雲の密度の低い領域まで見てしまうので、「分子雲コア」の分離という目的のためには不満ですし、また分解能も不足しています。とはいうものの、 ^{13}CO 輝線が受からないようなところでは分子雲コアは存在しないはずですので、今回私たちは彼らの ^{13}CO 地図を観測のガイドとして用いました。バトラたちの観測範囲は余り広くないのですが、分解能はまずまずあり、以下に述べますように私たちの観測結果と比較すると興味深い強度分布の差異を示しています。しかしながら、これまでにオリオン座分子雲全域にわたって密度 1 万個 cm^{-3} 以上の分子雲コアを十分な角度分解能で系統的にサンプルした観測はありません。

暗黒星雲での分子雲コア（マイヤーズのコアの典型的なサイズは 0.1 pc）と比較するという目的から言っても、少なくとも 0.1 pc のコアはもれなくサンプルする必要があります。オリオン座分子雲は、私たちに一番近い巨大分子雲ですが（距離 500 pc）、中小口径の電波望遠鏡でまともに取り組むのは難しい距離にあります。日本には、ミリ波の単一鏡型の電波望遠鏡としては世界で最大の 45 m 電波望遠鏡があります。高い分解能で、しかも広い範囲をサーベイするという目的のためには、大口径の単一望遠鏡が必須であり、この意味で私たちは大変恵まれた立場にいることになります。 45 m 電波望遠鏡で達成可能な分解能 $15\sim 20$ 秒角（周波数 100 GHz 帯において）は、オリオン座分子雲の距離において約 0.05 pc に相当します。本当は、もっと分解能が欲しいところでもあります。贅沢を言っているのはきりがありません。重要なことは、 45 m 電波望遠鏡はこのようなテーマに正面から取り組むことが可能な数少ない（片手で数えられる！）望遠鏡の一つであるということです。

マイヤーズの観測結果から、分子個数密度が 1 万個 cm^{-3} 以上の高密度ガスをトレースする分子が「分子雲コア」の検出・分離に有利であることがわかりました。電波天文で比較的良好に使われる CO 、 ^{13}CO の輝線は分子密度が数百個 cm^{-3} の分子雲の希薄な部分をトレースしており、コアの検出には役不足です。高密度の分子ガスをトレースする分子輝線の中から、CS 輝線を選んだ理由は、まず 1 番目に、CS 分子は星間化学的に割と素直な分子らしいということです。分子雲コアの種々のパラメータに関心があるわけですが、特に第一段階では分子ガスの密度分布をできるだけ素直に反映する分子が好ましいであろうということです。2 番目に、最初のサーベイに用いる CS ($J=1-0$) 輝線は、オリオン座分子雲では 1 点あたり 20 秒の積分で十分な強度で観測できるという点も重要です。

5. 45 m 電波望遠鏡による観測の実際

私たちは野辺山の 45 m 電波望遠鏡を用いて、オリオン座分子雲で星の材料である「分子雲コア」を片っ端から見つけていくサーベイ観測を開始しました。今回ご紹介する観測は、今年の 5 月に計 6 日間にわたり観測を行ったものです。1 点あたりの実績分時間（ON 点）は 20 秒です。観測した輝線は、周波数 49 GHz の CS ($J=1-0$) 輝線、そして副次的に 110 GHz の ^{13}CO ($J=1-0$) 輝線を同時観測しました。 ^{13}CO 輝線は、感度ぎりぎりのレベルで受かった CS ($J=1-0$) 輝線をチェックする (^{13}CO が受かっていなければノイズである可能性が高い) ために同時に観測しました。より周波数の高い遷移である 98 GHz の CS ($J=2-1$) の観測には 1 分程度の積分が必要であり、最初の短時間積分の広域サーベイでは同時観測は行いません。観測範囲は、バリーらの ^{12}CO 地図上でみえる分子雲リッジ（図 1）の北側 3 分の 1 の部分で、長さ約 1.5 度、幅約 10 分角の範囲を観測しました。観測グリッドは 40 秒角（ほぼ CS ($J=1-0$) の周波数での 45 m 電波望遠鏡の角度分解能に相当）で、約 2000 点においてスペクトルを取得しました。

表紙および図 2 に、今回の観測によって得られたオリオン座分子雲の地図を示します。表紙は、 ^{13}CO ($J=1-0$) 輝線および CS ($J=1-0$) 輝線における電波強度（ピークアンテナ温度）の分布を、疑似カラー表示したものです。電波強度が強くなるにつれて、紺、青、水色、緑、黄、橙、赤、白と変化させて表示してあります。 ^{13}CO では、分子雲がほとんど切れ目なくつながって見えています。実際には、私たちはバリーたちの ^{13}CO 地図をガイドにして観測しているので、観測範囲のかんりの部分で ^{13}CO 輝線が検出されています。ただし、 ^{13}CO については疑似カラー表示の閾値を上げているので、 ^{13}CO の強度の弱い部分は表示していません。CS 輝線では明らかに孤立した雲がみえてきます。 ^{13}CO でみえるように分子雲は全体として S 字型の非常に細長いフィラメントであり、CS 輝線でみるとそのなかに分裂した (fragmented) 分子雲コアが存在していることがわかります。S 字型に細長くのびた形態の形成には、バーナードループとしてみえるオリオンスーパーバブルによる圧縮が効いているのではないかという見方があります（例えば、Bally et al. 1987）。 ^{13}CO ならびに CS においてももっとも強くなっている場所は、オリオン KL の付近の領域です。オリオン KL はオリオン大星雲の真ん中付近に見える赤外線天体で、生まれたばかりの非常に若い星であると考えられています。図 2 には、「オリオン大星雲」とならべた CS の電波強度地図を等高線で示します。一番低い等高線は、電波強度 1.2 度 (3σ レベル) を示し、

有意に輝線が検出された領域を示します。オリオン KL のすぐ南から北東方向にのびている小さな「突起」はオリオン・ブライツバーに付随したもので、「オリオン大星雲」により加速、圧縮された分子ガスの層を表してい

ると考えられます（この領域は以前、面高氏らにより調べられました）。表紙の写真を見ると、 ^{13}CO 輝線においてはこのブライツバーがかなり顕著な構造としてみえることがわかります。

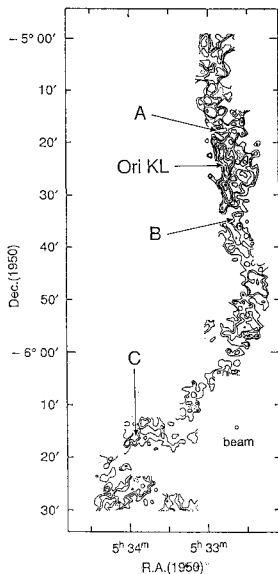
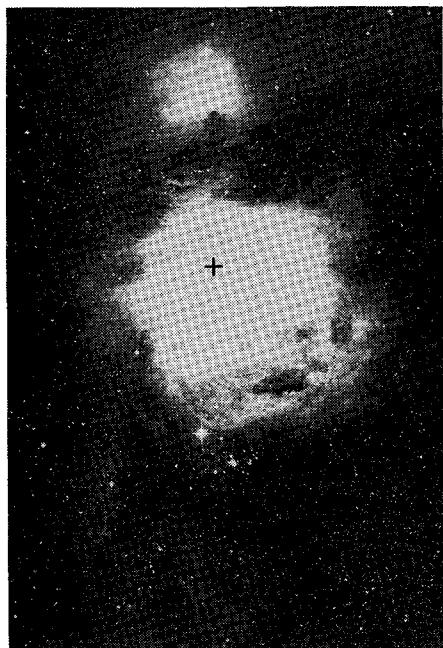


図2 (左) 東京大学理学部木曾観測所の 105 cm シュミットカメラで撮影されたオリオン大星雲。+印はオリオン KL の位置を示す。(右) 今回の観測によって得られた CS ($J=1-0$) 輝線でみたオリオン座分子雲の地図。電波強度(ビークアンテナ温度)の分布を、等高線表示してある。各等高線は、1.2, 1.6, 2, 2.8, 4, 5.6, 7.6, 10 度の電波強度を示す。最低等高線は 3σ レベルに対応する。beam と書いてある小さな丸が、観測の角度分解能を示す。A, B, C は図3, 4の表示範囲を示すために記入してある。

図3 図2のCで示した点を中心とする4分角×4分角の領域に対応する CS ($J=1-0$) 輝線のプロフィール地図。7×7個の点で得られたスペクトルを天球上での位置に対応して2次元に並べた。

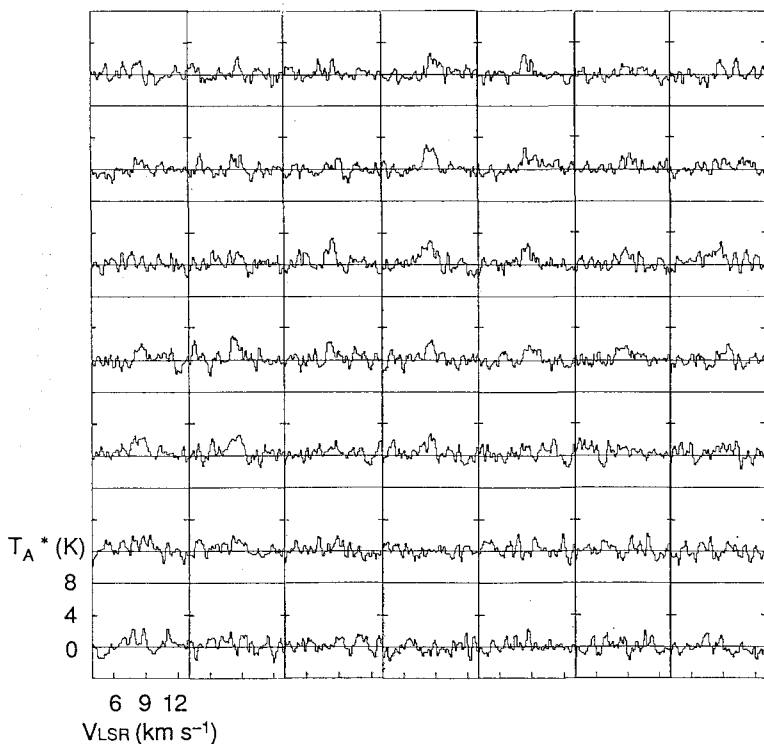


図 3 は、図 2 の C で示した点を中心とする 4 分角 × 4 分角の領域に対応した CS 輝線のプロファイル地図です。プロファイル地図というのは、得られたスペクトルを天球上での位置に対応して 2 次元に並べたもので、図 3 中の 7 × 7 個の正方形の中がプロファイルとなっています。ここでは、実際にたった 20 秒の積分時間で CS 輝線がどの程度の S/N で受かっているかを示すために、それほど強度が強くない領域での例を示しました。

私たちはこの観測データをもとにオリオン座における「分子雲コア」のカタログ作りをはじめました。

6. 分子雲コアのカタログ作り

表紙や図 2 に示しました電波強度地図においてもある程度クラumpingの様子がありますが、これだけから分子雲コアを分離するのは大変困難です。というのは、分子雲コアがそれぞれ完全に孤立していればカタログ作りも簡単でしょうが、実際には重なり合っているものも少なくないからです。分子雲コアは数 km s^{-1} の相対速度を持っていることがしばしばありますが、このような相対速度の存在は分離を行うときには非常に役に立ちます。しかし、やっかいなのは、速度が違う近接する 2 つの分子雲のコアなのか、それとも速度勾配 (回転など) をもった 1 つの分子雲コアなのか、という判断です。

図 4 にオリオン大星雲の中心部分での CS 輝線の速度変化の様子を示します。この「位置-速度図」は、縦軸が図 2 の A, Ori KL, B を結ぶ線分における位置を表し、横軸は視線速度を表します。0 点はオリオン KL (Ori KL) にとってあります。そのすぐ南の -80 秒角の位置、 $V_{\text{LSR}} = 6 \text{ km s}^{-1}$ の速度に見られる分子雲コアでは、最近 IRAM の 30 m 電波望遠鏡で SiO の輝線にて双極分子流「オリオン S」(Ziurys et al. 1990) が検

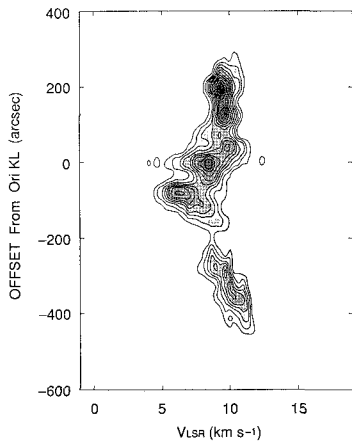


図 4 オリオン大星雲の中心部分での CS (J=1-0) 輝線の「位置-速度図」。縦軸の 400, 0, -600 が、図 2 の A, Ori KL, B に対応する。横軸は視線速度を表す。

出され、生まれたばかりの星が存在していることがわかっています。分子雲コアが、このような位置-速度図をもとにすることによってはっきり分離できることがわかります。

得られた観測データから「分子雲コア」を分離しカタログ番号を付け、観測から導かれた物理パラメータを入力していきます。現在までのデータでカタログ作りをしたところ、全部で約 100 個のコアを同定しました。このうちのほとんどは今まで全く知られていなかったものです。観測された典型的な分子雲コアは、サイズが 0.2 pc、質量が 30 太陽質量程度でした。

7. 分子雲内の階層構造、クラumpと分子雲コア

私たちは CS 輝線で分離できる「分子雲コア」に注目していたのですが、どうやらその上の (大きな) 階層もみえているようです。表紙の写真の CS 輝線地図で、赤や白で表示されているオリオン KL 付近の一番強い部分の少し下のあたりに、分子雲コアの集合体である水色の 3 つの塊が見えます。ここでは仮にクラumpと呼びます。その南側では、CS 輝線ではかろうじて見えるという感じですが、対応する場所を ^{13}CO でたどるとかなりはっきりと、同じような間隔でクラumpが並んでいることがわかります。両輝線のデータを併せて見ると、今回観測した分子雲は 11 個程度のクラumpが南北に連なって、S 字型の分子雲リッジを形作っているように見えます。 ^{13}CO 輝線でもトレースできるということは、分子雲コアよりも密度が低い上の階層であると考えられます。ただし、1 つコメントしておかなければならないのは、私たちはバリーらの ^{13}CO 地図をもとにして分子雲リッジの部分のみを観測しました。観測範囲は正方形、長方形の組み合わせで広げましたので、境界は直線です。表紙の ^{13}CO 輝線地図で直線状境界がみえていますように、観測範囲が限られていることによって多少分子雲の見え方が左右されていることは事実です。しかしその点を加味しても、クラumpは確かに存在していると思われれます。クラumpの大きさは 5 分角 (0.7 pc) 程度、間隔は 8 分角 (1.2 pc) 程度です。

さて、これらのクラumpは何を表しているのでしょうか。フィラメント状の分子雲では、直径の 2 倍程度の間隔で、長さ方向にぶつぶつに切れるという重力不安定性がよく知られています。分子雲リッジの幅は 5 分角 (0.7 pc) 程度であるのに対し、クラumpがその 2 倍程度の間隔で並んでいます。私たちは、クラumpがこのような重力不安定性を表しているのではないかと考えています。

8. バトラたちの NH₃ 輝線分布との比較

図 5 は、私たちの観測した CS 輝線のデータを、バト

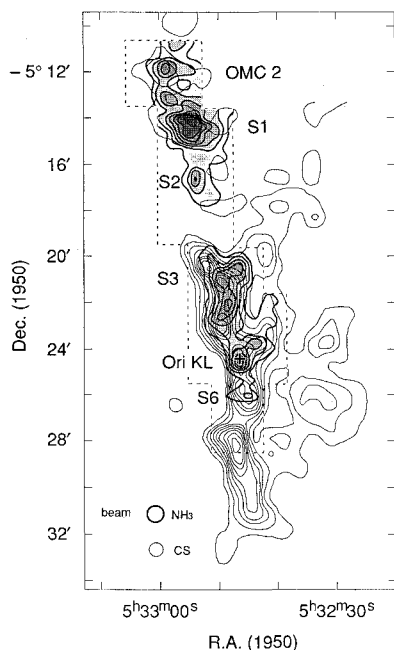


図5 今回得られたCS (J=1-0) 輝線地図を細い等高線で、バトラたちのNH₃ 輝線地図を太い等高線ならびにグレースケールで表示した。ともに電波強度(ピークアンテナ温度)を示し、最低レベルが2度で、そこから1度おき。CS観測の分解能は36秒角、NH₃観測の分解能は43秒角。点線でバトラたちの観測範囲を表示した。S1, S2, …… はバトラたちが命名したコアの名前。

ラたちのNH₃観測の結果と比較したものです。私たちのCS観測の分解能は36秒角、彼らのNH₃観測の分解能は43秒角、つまりほぼ同じですが、強度分布には顕著な違いが見られます。オリオンKL付近は両輝線でともに一番強くなっています。しかし、北側でみられるNH₃の顕著な分子雲コアは、CSではさほど強くありません。特に、S2と彼らが命名したNH₃ピークに対応する場所ではCS輝線がほとんど受かっていないことに注目してください。逆に南側では、CS輝線で強度がかなり強いコアが、NH₃では全く受かっていない、もしくはかなり強度が弱いことがわかります。S6は、先に述べました双極分子流「オリオンS」が発見された分子雲コアですが、NH₃輝線はあまり強くありません。その南のCSでみえる分子雲コアはNH₃の観測範囲に入っているにもかかわらず、図5では全く見えません。S3の北端では、CSでは北東にのびる成分が強いのに対し、NH₃では北西にのびる成分が強くなっています。観測する分子によって見え方が違うというのは、オリオンに限らずしばしば観測されるところで、特にNH₃は多くの領域で他の分子の分布とは非常に異なる見え方をします。

このような分子による見え方の違いがどうしておこっているのかは重要な研究対象ですが、星間化学方面からの山本氏、三上氏らのグループの最近の研究は大変興味深いものです。暗黒星雲に対する彼らの最近の研究結果は、分子雲の年齢によって種々の分子の存在量に変化していることを示しています。また、NH₃分子の特異な分布には、星生成活動により宇宙塵から蒸発して出てくる分がきいているらしいということです。

9. 今後の観測計画について

45 m 電波望遠鏡を用いたオリオン座分子雲での分子雲コアの大規模サーベイは、まだ始まったばかりです。

今回の観測範囲はオリオン座分子雲の北側の部分だけですが、実はオリオン座分子雲は南北で性質が異なっているらしいということが示唆されています。つまり、北半分ではバリーの¹³CO地図にも示されているように、非常に細くそして濃いリッジとしてみえます。オリオンスーパーバブルによる圧縮あるいはオリオン大星雲の力学的、熱的影響が、北半分の分子雲の性質を変化させてきたと考えられます。南半分は、巨大分子雲の本来の性質を探るにはより好ましい領域です。また、北半分でそれぞれに属する分子雲コアを比較研究することは大変興味深い研究です。もしトリガー機構と星生成が関係しているとすれば、はっきりとした分子雲コアの性質の違いとして現われてくるはずで

また、今回の観測はまだ40秒角グリッドと、45 m 電波望遠鏡の性能(100 GHz帯では、分解能約20秒角で観測できる)をまだ生かしきっていません。私たちは45 m 鏡で輝線観測の行えるもっとも高い周波数100 GHz帯で最終的なデータを取得したいと考えています。しかし、いきなり100 GHz帯で20秒角分解能でフルサンプリング観測を行うと、観測時間が大変かかってしまいます。私たちはCS分子の2つの輝線を用い、まず49 GHzのCS (J=1-0) 輝線を約40秒角のビーム幅で巨大分子雲をフルサンプリングし分子雲コアを検出した後、それぞれのコアについては98 GHzのCS (J=2-1) 輝線を約20秒角のビーム幅で観測することにより分子雲コアの詳細なデータを取得するという、2段階の観測で効率を上げる計画を立てました。他の追従を許さない「オリオン座分子雲における分子雲コアのデータベース」を構築し、そして「星の質量は何が決めているのか」という大問題への解答を見つけるべく、私たちは全力を上げて取り組んでいくつもりです。