

なんてんの5年間

福井 康雄^{*}、水野 亮^{**}、大西 利和^{***}、水野 範和^{****}

〈名古屋大学大学院理学研究科物理学教室 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: fukui@a.phys.nagoya-u.ac.jp^{*}

mizuno@a.phys.nagoya-u.ac.jp^{**}

ohnishi@a.phys.nagoya-u.ac.jp^{***}

norikazu@a.phys.nagoya-u.ac.jp^{****}

南米チリの電波望遠鏡「なんてん」が観測を開始して5年が経過した。「なんてん」は、分子雲掃天観測史上、最も強力な観測装置としてその高い性能を実証した。南の天の川、マゼラン雲の全面観測をはじめとして多くの成果があがっている。ここでは、最新の研究成果のハイライトとして、1. マゼラン雲、2. 分子雲スーパーシェル、3. 孤立したTタウリ型星、そして、4. 高銀緯雲の探査を中心に、成果を紹介する。なお、天文学会欧文報告 PASJ 53 巻 6 号は「なんてん」特集第2号である。

序文

南米チリに移設したミリ波・サブミリ波望遠鏡「なんてん」が観測をはじめてから、5年が経過した。「なんてん」は星間分子スペクトルの広域観測で群を抜く高性能を発揮し、南天の分子雲の分布を次々と明らかにしている。チリの気象条件が優れていること、そして、自前の超伝導受信機の世界最高の性能が、これをささえている。ここでは、研究成果のハイライトを解説し、「なんてん」の観測計画の一端を紹介しよう。

「なんてん」の特長は、広い天空を十分高い解像力で観測できる点にある。これまでの一酸化炭素スペクトル（波長 2.6 mm）の総観測点数は優に100万点をこえ、質量ともに観測史上最高である。計画のポイントは、世界に先駆けて南天の分子雲の分布を解明することにあった。その目標は十二分に達成されたといつてよく、銀河系とマゼラン雲の分子雲の広域像の詳細がはじめて明らかになった。これらの研究は2巻のPASJ「なんてん」特集号（1999年 Vol.51 No.6と2001年 Vol.53 No.6）に計29編の論文^{1)~29)}として発表された他、国際学会での招待講演など多くの成果報告がなされている。

ここでは、主な成果から4つのテーマにしばって

内容を解説しよう。

成果の第1は、マゼラン雲の全面観測である（第1部）。系外銀河の巨大分子雲の全体像を明らかにしたのはこの観測が史上はじめてである。ミニ球状星団とも言える巨大星団の形成の場を特定するなど、重要な成果があがっている。

第2は、分子雲スーパーシェルの発見である（第2部）。スーパーシェルは、多数の超新星によって形成される星間物質の大きなシェル構造である。新たに発見されたスーパーシェル「カーリーナフレア」は、濃い分子ガス雲と大質量星形成を誘発している。銀河での大質量星と分子雲形成の仕組みの解明に重要な示唆を与えている。

第3は、孤立したTタウリ型星の起源を明らかにしたことである（第3部）。90年代、分子雲から遠く離れた若い星がX線などで多く見つかり、その起源が大きなミステリーだった。「なんてん」の広範な観測で多くの小分子雲が検出され、その中で星形成が起きている可能性が高まっている。

第4は、高銀緯分子雲の探査である（第4部）。太陽系に最も近い分子雲の全容は、「灯台もと暗し」で、よくわかっていない。「なんてん」の観測は、

100 個近い高銀緯分子雲を発見し、太陽系をとりまく星間環境の解明が大きくすすんだ。

「なんてん」設立の経緯は、「なんてんへの道」³⁵⁾に詳しい。1000 人をこえる市民と 100 社をこえる企業の寄付にささえられて、「なんてん」は 5 年間運営されてきた。また、天文学会早川基金による渡航者も 6 人にのぼる。ここで、カーネギー天文台

をはじめ、関係各位の御支援、御協力に深く感謝の気持ちを表したい。本研究の一部は特定領域研究「マゼラン星雲大研究」の援助を得ている。残念ながら、海外での研究を支える公の財政的な仕組みは、なお、できていない。心ならずも、再度市民の方々に御寄付をお願いせざるを得ない現状である（福井康雄）。

第 1 部 マゼラン雲

南天を代表する天体大小マゼラン雲は「なんてん」の最も重要なターゲットであり、精力的な観測が行われてきた。これまでに巨大分子雲の全面観測が完了し、巨大星団の形成の場が特定され、スーパージャイアントシェルが星団形成にも重要な役割を果たしていることが明らかになった。

1. はじめに

大小マゼラン雲は系外天体としては 50–60 キロパーセクという例外的な近距離にあり、これまで様々な波長域で詳しい観測が行われている。セファイド型変光星による距離決定に代表されるように、天文学史の中でも重要な役割を果たしてきた。一方、このように近くにあるのにも関わらず、マゼラン雲の性質は我が銀河系とはいろいろな点で異なっている。まず、星間物質中の酸素、炭素、窒素といった重元素量が銀河系にくらべて 1/3–1/10 と小さく、星の誕生と死にともなう化学進化が、銀河系に比べてまだあまり進んでいないと考えられている。また、毒グモ星雲に代表される超巨大電離水素領域がいくつも存在し、爆発的な星の集団形成も起きている。そして、私たちが特に注目したのが、銀河系にはみられない「ボピュラス星団」という、数万個の星が 30 パーセクあまりの範囲に集中した、年齢が 1 千万年程度の若い巨大高密度星団の存在である。この高密度星団の星数は球状星団の百分の 1 程度だが、その形状は「ミニ」球状星団と呼ぶにふさわしい重力的に束縛された大質量星団である。それに対して、現在、銀河系で

生まれている星団は、星数 100 個程度の散開星団がほとんどで、銀河系ハロー部に存在する球状星団は年齢が 100 億年以上の古いものだけである。したがって、マゼラン雲において高密度星団の形成過程を観測できれば、100 億年以上前の原始銀河系の環境を推測する貴重な手がかりが得られると期待される。

2. 大マゼラン雲の CO サーベイ観測^{1), 18), 19)}

これまでの大マゼラン雲全体を覆う CO 観測は、スミソニアン天文台の 1.2 メートル鏡によるものが唯一であった³⁹⁾。この観測は角分解能が 8.8 分角と粗く、個々の分子雲を分解できていない。そこで、大マゼラン雲全体の分子雲の分布をいち早く明らかにし、そこでの星団形成の様子を知るため、まずは一点あたりの積分時間を短くしたサーベイ観測を開始した。1 年たらずの観測で 2.6 分角という高分解能で大マゼラン雲の主要部全域 36 平方度 (32,800 点) をカバーし、107 個の巨大分子雲を分解してとらえることに成功した。これらの分子雲は、質量が太陽の 10 万倍から数 100 万倍の巨大分子雲

である。この「なんてん」の地図を得て、大マゼラン雲における他の天体との意味のある比較がはじめて可能になった。大マゼラン雲における高密度星団の年齢は適当な恒星進化のモデルと2色図上での比較から求められる⁴⁰⁾。最も若いものは1千万年以下とされており、100万年オーダーの精度はない。特に年齢が1千万年以下の星団は銀河全体で138個が確認されており、これらの星団とみかけ上近い分子雲までの距離をはかると、最も若い星団の3分の1が分子雲から130パーセク以内の近くに集中していることがわかった。一方、それ以外の年齢の古い星団の分布はランダムで、年齢1千万年を超えるとほとんど相関がなくなる。すなわち、これらの星団の形成の場が巨大分子雲であることが明らかになったのである。特に、質量の大きな巨大分子雲に付随している若い星団は数個がコンパクトな群をなしている傾向もみられる。また、超新星残骸と巨大分子雲の相関はほとんどなく、II型超新星の母天体が進化して爆発する以前に、巨大分子雲はあらかじめ散逸していると考えられる。実際に紫外線による観測と分子雲の分布を比較したところ、紫外線放射場の強いところは若い星団の分布との一致はよいが、分子雲は存在しないことがわかった。これは星団が分子雲中で誕生し、その後、母体分子雲を紫外線電離で急速に散逸させている様子と解釈できる。大マゼラン雲では、巨大分子雲が形成されてから数百万年で星団形成が始まり、星団形成後、約600万年という速いタイムスケールで、おそらく星団中のOB型星による星風、紫外線によって分子雲は壊されると考えられる。

3. スーパージャイアントシェルと星団形成^{17), 30)}

それでは、星や星団の形成母体である巨大分子雲は、どのようにして形成され、そこで巨大星団はどのように誕生するのだろうか。銀河系のような渦巻き銀河における分子雲・星形成のプロセス

には、渦状腕に伴う密度波が重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、マゼラン雲のような不規則銀河では、密度波は存在しない。そこで、注目されるのがスーパージャイアントシェルと呼ばれる巨大なシェル構造である。マゼラン雲では、原子水素ガス(HI)や電離水素ガス(H α)の観測から多くの巨大なシェル構造が同定されている。このようなシェル構造は複数回の超新星爆発や星団からの星風などによって形成されたと考えられており、シェルによる圧縮が進むと周りのガスがかき集められ、さらに分子雲形成、星形成を起こす可能性が理論的にも示唆されてきた⁴¹⁾。「なんてん」による観測結果と、これら巨大シェルの分布を比較したところ、いくつかの巨大分子雲がシェルの縁に分布している傾向がみられる。そこで、我々はさらにS/N比を2倍以上あげた高感度の観測により、スーパージャイアントシェルの周りの分子ガスの分布を丹念に調べた(カラーページ図4参照)。その結果、全体の約30%程度の分子雲が、スーパージャイアントシェルの縁を取り囲むように分布していることがわかった。さらに、これらの分子雲では若い星団が形成されており、それらの星団は分子雲の中でシェルの内側に多く分布することが統計的に明らかになった。これは、シェルの膨張により分子雲が圧縮され、星団の形成が促進されていることを示すものと考えられる。

現在、大マゼラン雲のさらに広い範囲に対して、高感度の観測を拡大している(カラーページ図3)¹⁵⁾。これまでに約20平方度をカバーし、300個近い分子雲を検出している。その結果、銀河の南東部の境界にそってCOアークと呼ばれる若い巨大分子雲が長さ2キロパーセク程度にわたって円弧状に並んだ構造が明確になり、光のバーの部分にも多数の巨大分子雲が集中して分布している様子が明らかになった。これらは、星がつくる重力ポテンシャルもまた、巨大分子雲の形成において重要な役割を果たしていることを示唆していると考えられる。これらの大構造の起源の解明が今後の課題である。

4. 小マゼラン雲の観測¹⁶⁾

小マゼラン雲は大マゼラン雲に比べ、さらに重元素量が小さいことで知られる。より小さな銀河であるため、過去の大マゼラン雲との衝突などで強い潮汐力を受け、その形状も大きく歪んでいる。中性水素原子ガスによる観測結果をみると、小マゼラン雲から引きずり出されたガスが、大マゼラン雲との間にブリッジとなって繋がっている様子を鮮明にみることができる。このような銀河同士のガスの衝突は、例えばアンテナ銀河などにみられるように、ガスの効率良い圧縮をうながし、活発な大質量星の集団形成を誘発することが、これまでも観測的、理論的に示唆されてきた。「なんてん」による小マゼラン雲の観測は98年より始められたが、その輝線強度は大マゼラン雲に比べさらに5倍近く弱い。これは重元素量が銀河系や大マゼラン雲より、さらに小さいことを反映したものと考えられる。その

ため「なんてん」の高感度の受信器をもってしても1点あたり1時間近い積分を要し、これまでにようやくバーの主要部と大マゼラン雲へのブリッジにつながるウイング領域の観測が終了した段階である（カラーページ図5参照）。バーの部分では粒状の分子雲が多数検出されたが、今回特に注目されたのは、これまであまり観測が行われていなかったウイング領域において最も巨大な分子雲を発見したことである。この分子雲は質量が太陽の百万倍もあり、複数のコンパクトな大質量星形成領域が付随している。したがって、大マゼラン雲との相互作用によって巨大分子雲が形成され、現在そこで巨大星団が形成されつつある領域を捉えた可能性もあり、大変興味深い。

今後、なんてんの主鏡面の精度向上に伴って、200–500 GHz 帯での観測を本格化して、より高分解能の分子雲の探索を行う計画である（水野範和）。

第2部 スーパーシェル

スーパーシェルは、質量の大きな星が数10個爆発することによってつくられる、巨大な泡状の構造である。1970年代に中性水素原子の21cm線スペクトルによって発見された⁴²⁾。理論的にも1980年代、池内了らによる先駆的な研究⁴³⁾があり、チムニー（煙突）構造とよばれ、銀河円盤とハローをつなぐ重要な役割をはたすと考えられてきた。「なんてん」はカリナフレアを代表とする分子スーパーシェルを10個以上発見し、星形成とスーパーシェルの密接な関係を明らかにした。

1. カリーナフレアの発見²⁾

1999年、「なんてん」はスーパーシェル「カリナフレア」を発見した。場所は、竜骨座（カリナ）のイータ星のすぐ北である。図1に分子雲の分布を示した（カラーページ図2cも参照）。視線速度から推定される距離は約2～3キロパーセク、カリナ領域とほぼ同じ、カリナ腕のすぐ上にこれは位置する。星間塵からの赤外線も同様のシェル状の分布を示し、しかも中には軟エックス線源

が広がっており、超新星残骸の存在を示す。私達は、この分子雲群をカリナフレアと名付けた。この観測の動機は、銀河系円盤からの距離 z の大きな部分に分子雲がどのくらいあるかを確かめよう、という点であった。太陽系の周囲には、高銀緯分子雲とよばれる小分子雲が多数みついているが、他のアームに同様の分子雲があるかどうか、全く研究がなかった。高銀緯分子雲が普遍的なものであれば、他の円盤部にも多くの小分子雲があ

ってよいはずである。それを確かめようとしたのである。

カーリーナフレアの分子雲は、全部で120個あまりが $z = 500$ パーセクまで分布している。個々の分子雲の質量は100–1万太陽質量程度である。速度は毎秒20キロメートルの範囲に分布し、全体が約毎秒10キロメートルの速度で膨張していると考えられる。中性水素原子ガスはよりなめらかなシェル状の分布を示し、やはり膨張している。これがスーパーシェルと認識されなかったのは、中性水素の観測の分解能が粗すぎるためであった。シェルの総質量は約 10^5 太陽質量であり、運動エネルギーは 10^{51} エルグに相当する。スーパーシェルの理論的なモデル⁴⁴⁾と比べると、約2千万年の間20～30個の超新星が生じ、その爆発によってスーパーシェルが形成されたと解釈できる。

2. 星形成を誘発

私たちが注目したのは、大質量星

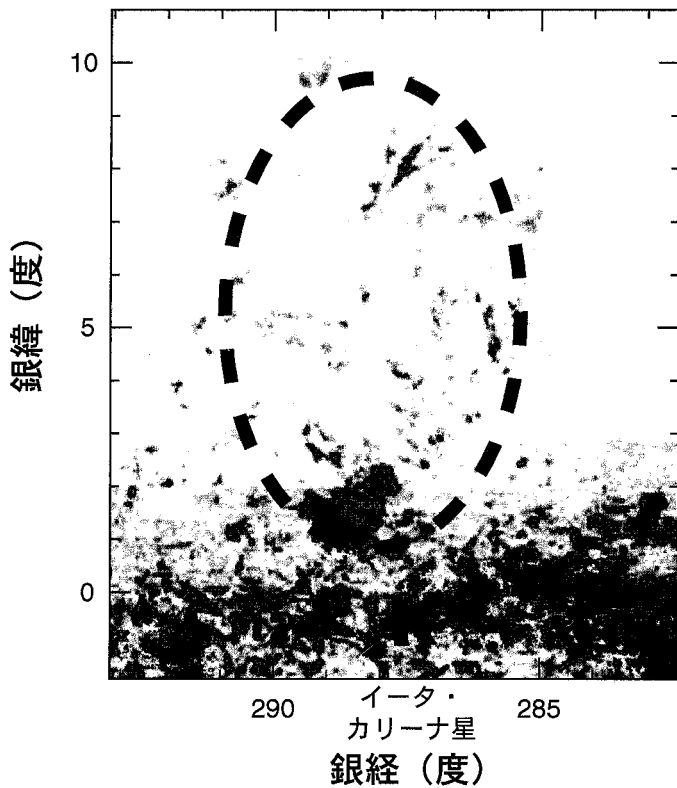


図1 カーリーナフレア²⁾。グレースケールはCOスペクトルの積分強度を示す。十字は、イータ・カーリーナ星の位置を示している。

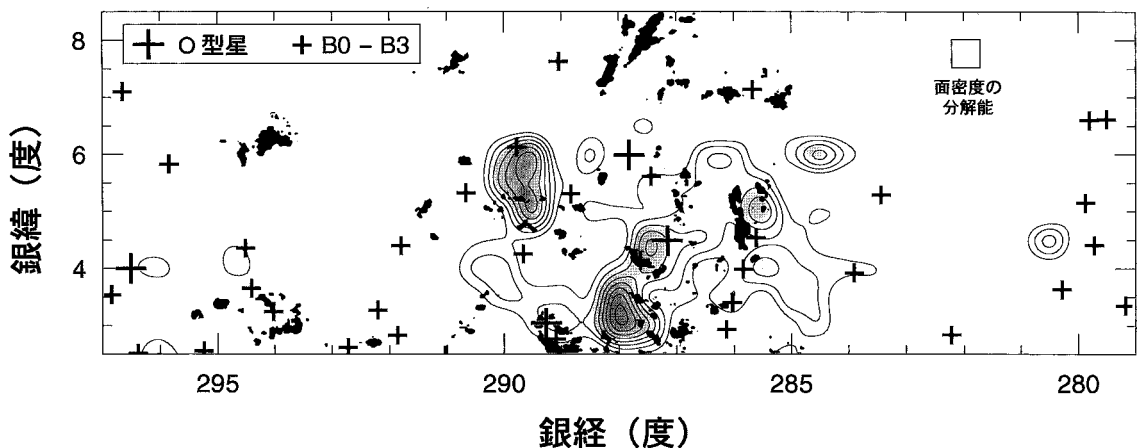


図2 カーリーナフレア方向のOB型星の分布²⁾。黒の十字がO型星、青の十字がB0からB3型星の位置を示している。等高線とグレースケールがB4からB9型星の面密度を、黒く塗りつぶされた等高線は分子雲の分布を示している。

とスーパーシェルとの関係である。図2に示したように、多くのOB型星がこのシェルの中にある。総数約350個が $z = 100$ パーセクから500パーセクに分布する。その左右の領域と比較すると、このような高さにOB型星はほとんどないのがふつうである。カリナフレアの特異性がよくわかる。分子雲には原始星である遠赤外線源も10個あまり附随しており、いま星形成が起きていることも間違いない。

このスーパーシェルの最大の特長は、分子雲と大質量星の形成を、スーパーシェルがトリガーしたと見られる点である。母星団はOB型星約70個からなるもので、周囲の星数は約300個にのぼる。このように明瞭に星形成を示す分子雲スーパーシェルは、これまでに例がない。

発見にいたった理由は明らかである。「十分高い角度分解能で、広い空間を観測する」ことが、これまで分子スペクトルではなされていなかったのである。カリナフレアの例では観測点数は2, 3万点、従来掃天観測のなかった銀緯2, 3度以上の領域が詳しく観測されている。これが、分子雲スーパーシェルの発見の必要条件であった。分子輝線と比べると水素原子の観測は分解能が粗く、すこし距離が遠くなるとシェルを区別できない。

スーパーシェルの頻度は極めて高いはずである。銀河系全体で30～40年に1回程度の超新星が生じている。1個の超新星残骸の大きさは30パーセク程度である。これをもとにして概算すると、銀河系円盤は1千万年以内に超新星残骸で埋め尽くされる勘定になる。超新星になる大質量星は、散開星団として誕生する。典型的なOB型星を含む星団には20～30個の超新星予備軍がふくまれる。典型的な場合、最も質量の大きい星が超新星になったあと、ほぼ100万年に1個の割合で次々に超新星が生じることになる。周囲に十分な星間ガスが存在すれば、爆風と高温ガスの圧力で圧縮され、スーパーシェルが形成される。カリナフレアはたまたま、銀河面から大きく離れているために、円盤内天体の混入の影響を受けることなく、スーパーシ

ェルの影響が明瞭にとらえられた。

3. さらに続々とスーパーシェルを発見

それでは、このような分子雲スーパーシェルはどの程度銀河系内にあるのか。「なんてん」を用いて探査を行ってみると、10個あまりが見つかった²⁰⁾。カラーページ図2dには、ケンタウルス座に発見されたスーパーシェル2個を示した。これらは、ほぼ銀河面の真ん中近くに膨張の中心がある。カリナフレアは銀河面から100パーセク程度はなれていたが、むしろ銀河面内にあるのが多数であろう。これらのスーパーシェルは、年齢が1000万年程度で、銀河面に空洞をつくり、同時に銀河面外に分子ガスをまきあげている。たしかに、分子雲スーパーシェルは多数存在し、これまでの探査、分子雲の掃天は不十分であったために見つかりなかったのである。従来の分子雲掃天は、観測範囲は広いが低角度分解能のものと、分解能は高いが観測範囲が狭いものにかぎられていた。「なんてん」のもたらしした強力な掃天力によって、分子雲スーパーシェルの発見が可能となった。

4. イータカリニ星の形成の原因は？

スーパーシェルの役割で注目されるのは、トリガーによる星形成の重要性である。特に大質量星の形成には、スーパーシェルのはたす役割が大きいことが予測される。2つの例をあげよう。1つは、カリナフレアとイータカリニ星との関係である。図1を見ると、イータカリニ星はちょうどカリナフレアと同じ銀経にある。カリナフレアは周囲に大きな圧力をおよぼしている。例えば、左下銀経289度、銀緯1～2度にある巨大分子雲は、シェルに沿うアーク状をしめしており、明らかに強く加速されている。また、赤外線分布には、やや外側にもアーク状分布が認められ、ここまで影響がおよんでいると考えられる(カラーページ図2c)。イータカリニ星は、銀河系最大の質量を持つと見られる特異星であり、その周辺は際立って活発な大質量星形

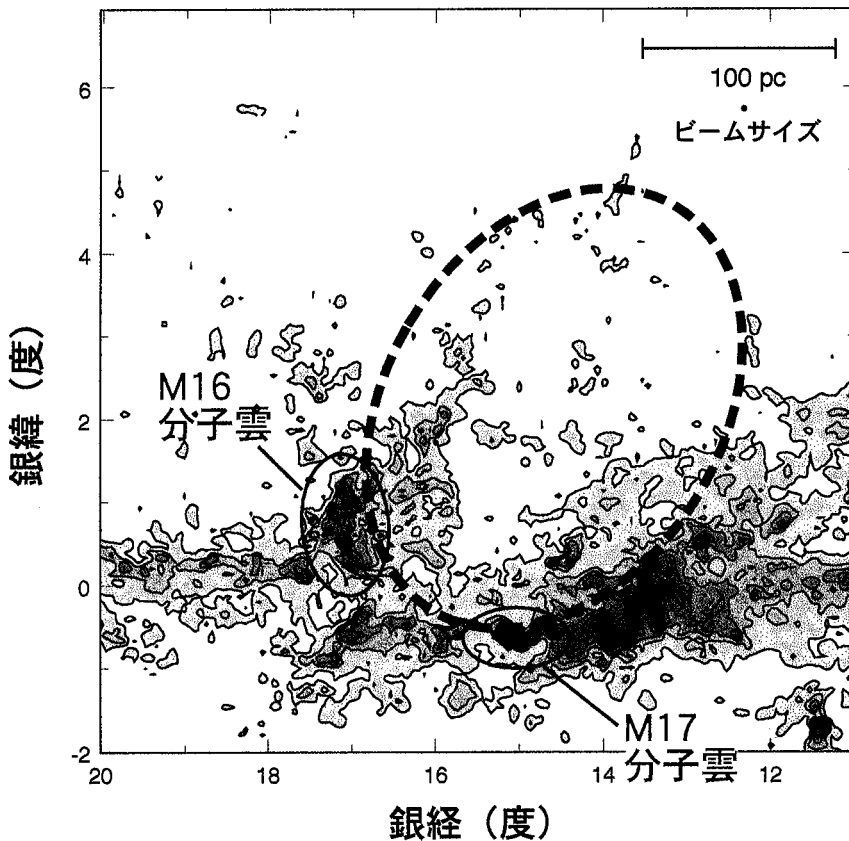


図3 M16, M17 の上方に位置するスーパーシェル⁴⁵⁾。グレースケールと等高線はCO スペクトルの積分強度を示している。

成領域である。多くのOB型星が集中し、銀河系最大である。なぜ、このような星形成が可能になったのか、大きな問題である。スーパーシェルの存在が、大規模なガスの圧縮を引き起こし、それによって初めて大質量星形成が可能になったという解釈が可能である。

もう一つのスーパーシェルは、いて座のM17, M16方向に発見された⁴⁵⁾。図3は、このシェルを示す。M16巨大分子雲は、ほぼ銀河面に垂直に分布し、その中に注目されているわし星雲もある。M17もまた、代表的な輝線星雲としてよく知られる。これらの巨大分子雲は、このスーパーシェルを取り巻いて分布していることがわかる。ここでもまた、巨大分子雲の形成がスーパーシェルによっ

て引き起こされた可能性がある。実際、スーパーシェルの内部には大質量星が数多く存在し、カリナフレアとよく似た状況がある。

なんてんの観測によって、分子雲スーパーシェルの存在が初めて明らかになり、特に大質量星形成のトリガー効果が注目されることがわかった。巨大分子雲の形成、そして、大質量星形成にスーパーシェルは本質的な役割をはたしている公算がでてきた。今後、系外銀河でのスーパーシェルの観測がすすめば、より普遍的にその効果を検証できるだろう。実際、大マゼラン雲の超巨大シェルは、星団形成をトリガーしていることが指摘されている。これがスターバースト銀河の素過程を説明できるかもしれない(福井康雄)。

第3部 孤立Tタウリ型星の起源を追って

南の空には、へびつかい座、カメレオン座、おおかみ座などの太陽系近傍の小質量星の形成領域がある。これらの領域では分子雲から遠く離れた若い星Tタウリ型星が発見され、その起源が謎にまつまれている。「なんてん」は新たに多くの小質量分子雲を発見し、孤立Tタウリ型星の起源を解明した。

1. 孤立したTタウリ型星

太陽程度の重さの星が形成される過程で、主系列星になる前にTタウリ型星と呼ばれる特有のスペクトルを持つ段階を必ず経過する。Tタウリ型星の中でもより進化が進み主系列星に近くなると、水素等の輝線がだんだん弱くなる。そこで、水素の輝線幅が細いものや、輝線がほとんど見えないものはさらに「弱輝線Tタウリ型星」に分類される。1980年代のEINSTEIN衛星のX線観測から、弱輝線Tタウリ型星はX線を出していることがわかってきた⁴⁶⁾。そして1990年代中ごろより、ROSAT衛星等のX線データをもとにした弱輝線Tタウリ型星探査が盛んに行われるようになった。その結果、カメレオン座、おおかみ座をはじめ、オリオン座、おうし座等の多くの星形成領域で新しい弱輝線Tタウリ型星が見つかった。新たに見つかったTタウリ型星の中には母体と考えられる分子雲から10パーセク以上遠く離れたところに存在するものが少なくなかった。秒速1～2キロメートル⁴⁷⁾程度の通常の星の運動では、Tタウリ型星の年齢の間（カメレオン座で検出されたものでは百万年程度）にはせいぜい1～2パーセク動くのがやっとである。そこで10パーセク以上も離れたTタウリ型星がどこで生まれたのか、あるいはどうやって遠くまで動いたのかが大きな問題となった。これらは母体の分子雲から遠くはなれたTタウリ型星という意味で「孤立したTタウリ型星」と呼ばれる。

孤立したTタウリ型星の起源としては、二つの大きな説が提案されていた。一つは、3つ以上の星の重力相互作用により一つの星に運動エネルギー

が与えられ、それが高速度星として飛び出し遠くまで達していると考ええるもの（高速度星起源説）⁴⁸⁾、もう一つは、まだ知られていない小さな分子雲が広い範囲にわたって存在し、その小分子雲で孤立したTタウリ型星が形成されたと考ええるもの（既存分子雲起源説）⁴⁹⁾などであった。

私達は「なんてん」望遠鏡を用いて、孤立したTタウリ型星の起源と考えられるような未知の分子雲がないか、カメレオン座とおおかみ座で探査することにした。

2. なんてんの観測結果

2.1. カメレオン座の ^{13}CO 、 ^{12}CO 観測

カメレオン座では、ROSAT衛星のデータをもとに40個弱の孤立したTタウリ型星が同定された^{50), 51), 52)}。これらの孤立したTタウリ型星はさしわたし30パーセク×15パーセクほどの広範囲にわたって分布している。

「なんてん」による観測は、星を形成しうる高密度分子雲が孤立したTタウリ型星が分布する範囲にどの程度存在するかを調べるため、密度が1000個/cm³以上の比較的高密度の分子ガスを調べるのに適した ^{13}CO ($J=1-0$) スペクトルを用いて始められた。180平方度にわたる観測の結果、25個の小分子雲が既知の分子雲の周りに検出され、そのうち10個程度が孤立したTタウリ型星の近傍にあることがわかった（図4）。これらの分子雲は平均的な質量が20太陽質量程度と小さいが、それまでの名古屋大学の広域観測で、数十太陽質量の分子雲でも星形成の兆候を示す例が何例も検出され

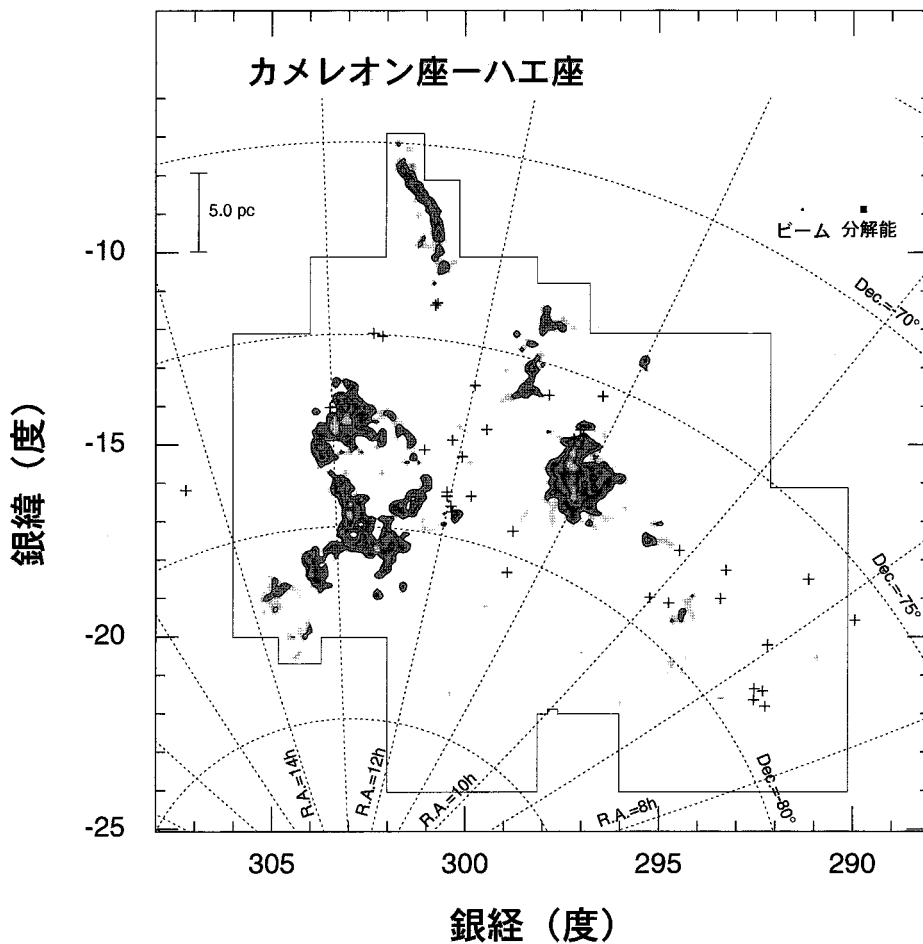


図4 カメレオン座・ハエ座方向の ^{13}CO スペクトルの積分強度図の上に、Tタウリ型星の位置を青の十字で示したもの³³⁾.

ており、このような小分子雲で星が形成される可能性は十分高いと考えられる。孤立したTタウリ型星の起源が近傍の分子雲であった可能性を初めて観測的に示唆した。しかし、まだ分子ガスから遠く離れたTタウリ型星も多く存在していた。我々は小分子雲は、大分子雲に比べ、星が形成される時の分子流や星風などにより母体の分子雲が散逸しやすいだろうと推測した。そこで ^{13}CO スペクトルで検出されたのは、大きめの分子雲で一部が散逸せずに取り残された分子雲か、これから星を形成しようとしている分子雲だと考え³³⁾、観測

を次の段階に進めることにした。

第2段階は密度が小さい分子ガスの分布を調べるため ^{12}CO ($J=1-0$) スペクトルを用いた。図5にその結果を示す。 ^{13}CO で見つけた分子雲の周りに数 $100\text{個}/\text{cm}^3$ の比較的低密度の分子ガスが大きく広がっていることがこの観測から明らかになった。これら比較的低密度の分子ガスと孤立したTタウリ型星の位置的な相関は非常によい。孤立したTタウリ型星全体の65%程度のTタウリ星が分子雲から1パーセク以内に位置している。この観測で検出された分子ガスは、孤立したTタウリ型星が

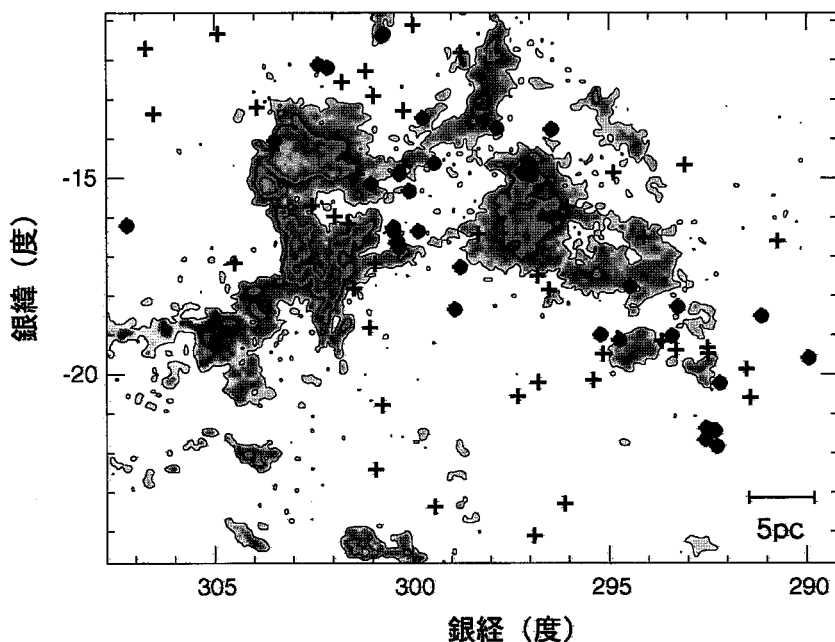


図5 カメレオン座方向のCOスペクトルの積分強度図²⁶⁾。青丸、十字はX線源で青丸はTタウリ型星

形成された高密度の小分子雲の母体の分子ガスであると考えられ、既存の分子雲起源説をさらに強く支持するものであった²⁶⁾。

2.2. おおかみ座の¹²CO観測

我々は同様の¹²CO観測を、南天のもうひとつの代表的な小質量星形成領域であるおおかみ座についても行った(表紙参照)。おおかみ座でもROSAT衛星のX線データをもとに大規模なTタウリ型星探査が行われている^{53), 54)}。表紙の図は、おおかみ座の分子ガスの分布とTタウリ型星の分布を示す。孤立したTタウリ型星と分子ガスの相関を見ると、確かに分子雲の近くにTタウリ型星の集中が見られるが、その一方、分子ガスが検出されていない領域にもまだ多くのTタウリ型星が分布している点がカメレオン座と大きく異なる。おおかみ座の暗黒星雲の特徴は、2つのOB型星の集団(アソシエーション)に挟まれている点である。OB

型星は紫外線を放出し、まわりの分子ガスを電離する。暗黒星雲右側の部分では、孤立したTタウリ型星とOB型星の集団の分布が重なっている。Tタウリ型星の母体となった分子ガスはOB型星からの紫外線でより早く散逸してしまった可能性が考えられる。また、孤立したTタウリ型星の年齢と分子ガスからの距離を調べると、暗黒星雲右側の分子ガスから遠くに位置するもの、すなわちOB型星と分布が重なっているものは、暗黒星雲近傍のものより年齢が古いものであることがわかった。年齢の古いTタウリ型星は、OB型星の母体となった分子雲で形成された可能性が高い。実際、おおかみ座暗黒星雲の右側で年齢が500万年以上の古いTタウリ型星といくつかのOB型星がより密度が低い中性水素ガスのひも状分布に沿って並んでいる部分があり、この中性水素ガス雲として見えている雲が共通の起源であった可能性が考えられる²⁷⁾。

3. ヒッパルコス衛星による固有運動の観測

これまで述べたように、カメレオン座では、孤立したTタウリ型星と分子ガスの分布によい相関があった。おおかみ座では、年齢の若いTタウリ型星は現在検出されるガス雲と比較的よい相関を示すが、年齢の古いTタウリ型星は母体となった分子雲が完全に散逸してしまったと解釈される。これらの観測結果は、孤立したTタウリ型星の起源が近傍に存在した分子雲から形成されたとする説を支持する。

一方の高速度星起源説の方はどうだろうか？ 1998年ごろよりヒッパルコス衛星による星の固有運動（天球上の星の運動）の測定データが発表され、高速度星説の直接的な検証が可能になった^{例55)}。高速度星説が正しい場合は星の固有運動ベクトルは、すべて飛び出した母体の分子雲から放射状に外を向いているはずである。しかし観測された速度

ベクトルはそれとはまったく異なるパターンを示していた。ここで、高速度星起源説はほぼ完全に否定され、近傍分子雲起源という考えが支持される結果となった。

4. これからの観測

どのくらい小分子雲が存在し、星を形成するかは、高銀緯分子雲の探査とも関連する重要な課題である。孤立Tタウリ型星の分布と分子ガスおよび水素原子ガスの分布を比較することにより、過去の（現在は散逸してしまった）星形成領域の分布を探る手掛かりが得られることが、この研究で見えてきた。今後我々は、おおかみ座からへびつかい座まで観測範囲を延ばし、従来研究されてきたものよりひとまわり大きな分子雲の複合体として、OBアソシエーションや孤立したTタウリ型星と分子雲の関係を調べようとしている（水野 亮）。

第4部 「なんてん」による高銀緯分子雲の探査

高銀緯分子雲とは、その名の通り、太陽系から見て銀河面から離れた高銀緯、およそ銀緯 20° 以上に存在する分子雲のことである。「なんてん」はその高い掃天性能を活かして、徹底的な高銀緯の分子雲の探査をすすめてきた。

1. 高銀緯分子雲とは

銀河系は薄い円盤状をしているので、我々から距離が離れるほど銀河円盤の厚みは見かけ上薄くなっていく。そのため、高銀緯にある銀河系内の天体は、太陽系に極めて近い可能性が高い。実際、星間減光などから求められた高銀緯分子雲の距離は、100パーセク程度である。つまり、高銀緯分子雲の探査は、太陽系の近傍の分子ガスの分布を明らかにすることにつながる。距離が近いことは、最も詳しく観測できることも意味するので、星形成

をはじめ、ユニークな研究成果も期待されるひとつの実験室でもある。高銀緯分子雲は密度が低く、水素分子 $100 \text{ 個}/\text{cm}^3$ 程度であり、そのほとんどは星を形成していないが、星形成の起きている場合もある。また、銀緯が高いために、視線方向で他の分子雲が偶然重なる可能性も低いので、他の波長域の観測結果と比較しやすい。分子雲として柱密度が小さいために星間空間の紫外線が入り込み、紫外線に影響をうけた場合のガスやダストの性質の研究にも適している。

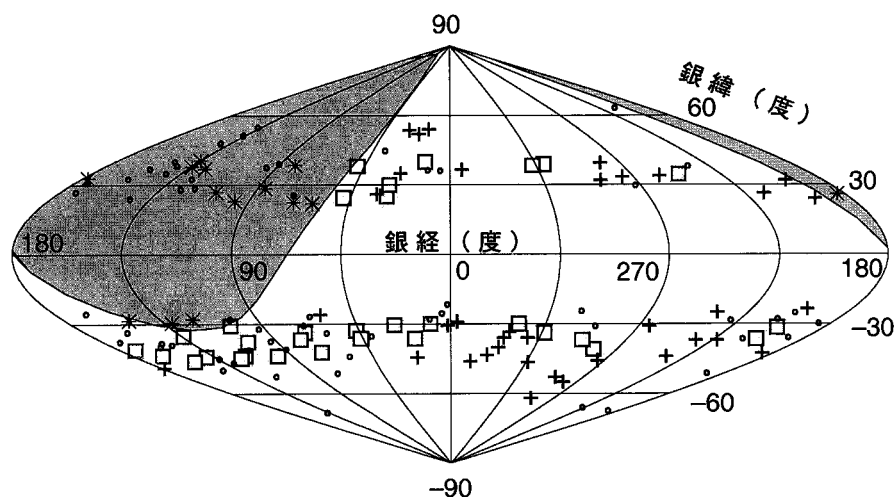


図6 Reach⁶¹⁾らによる、高銀緯領域の水素分子雲候補天体。青色の四角は、COが検出されたもの、十字はCOが検出されなかったもの、星印は「なんてん」からは観測できないもの、小さい黒丸は既に知られている高銀緯分子雲と一致しているものを示している²¹⁾。グレーの部分は、「なんてん」からは観測できない場所。

2. 高銀緯分子雲の探査

高銀緯分子雲の探査手段としては、光の減光、分子スペクトル、ダストの赤外線、背景の星からの光の吸収線、と様々である。最も直接的な方法は、分子の放射を観測すること、具体的には一酸化炭素分子スペクトルの観測である。しかし、密度が低いために分子スペクトルの強度が弱く、さらに、見かけの面積が非常に大きいために、分子スペクトルのみで探査するのは事実上不可能である。そこで、他の波長帯の観測データも参考にして観測する手法が、これまで主にとられてきた。

全天にわたる参考データとしては、赤外線と光の減光がある。赤外線天文衛星アイラスによる赤外線の全天サーベイは、至る所に薄くてフィラメント形状をした赤外線雲を見出した⁵⁶⁾。その後の観測で、これらの赤外線雲の中心部には、分子雲が存在することがわかってきた⁵⁷⁾。また、光の減光の方向を一酸化炭素スペクトルで観測して高銀緯分子雲がとらえられ、100個を超える分子雲がカタログされた⁵⁸⁾。これらの研究は、高銀緯分子雲の

性質を初めて明らかにしたという意味で重要である。しかし、問題点としては、減光を起こす背景の星数が、高銀緯では減少するために、漏れなく分子ガスが存在する領域を特定することは困難である。一方、MagnaniやHartmannらは^{59), 60)}、一酸化炭素分子スペクトルを用いて、8.4分角のビームに対して1度角のグリッドサイズで北半球から見える高銀緯領域をすべて観測し、高銀緯分子雲がどの程度存在しているかを確率的に検討した。しかし、高銀緯分子雲の典型的なサイズは数十分角以下であり、必ずしも天球に一樣に存在していないことを考えると、なお、多くの分子雲を見落としている可能性がある。そこで我々は、「なんてん」望遠鏡を用いて、もう一度、高銀緯領域を徹底して調べてみることにした。その結果、今までに検出されていなかった多くの分子雲を新たに検出することができた。以下では、その結果を紹介しよう。

3. 「なんてん」による高銀緯分子雲の探査

我々は、いくつかの方法を用いて高銀緯分子雲

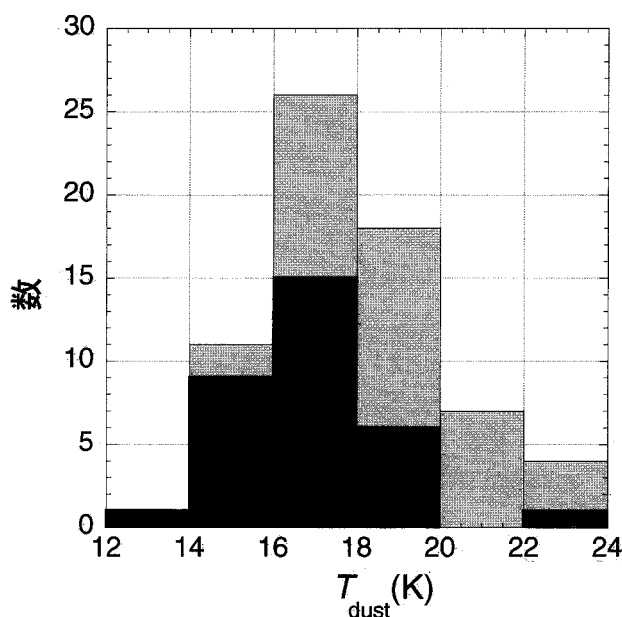


図7 「なんてん」で観測した水素分子雲候補天体のダストから求めた温度²¹⁾。青の領域はCOが検出されたものを示す。

の探査を行ってきた。探査能力の高い「なんてん」望遠鏡をもってしても、全天の探査は非常に時間がかかるので、まずは他の観測データを参考にして観測を行った。我々のとった方法は、1) 一酸化炭素分子スペクトルによる全面マッピング、2) 遠赤外線と中性水素原子から求めた水素分子雲候補天体の観測、3) 遠赤外線 (IRAS の 60, 100 ミクロン放射) のデータから推測した冷たいダスト雲の観測、4) 高銀緯分子雲複合体の全面観測、などである。以下では、1, 2, 4 について解説しよう。

・わし座 (Aquila) 領域の分子雲探査⁸⁾

わし座領域には、中性水素スペクトルで見ると、いわゆるアキーラリフト (Aquila Rift) から銀河面に向かって分布するフィラメント状構造が見られる。そこで、 $26^\circ < \text{銀経} < 42^\circ$ 、 $-25^\circ < \text{銀緯} < -2^\circ$ の領域全域を3分角のビームに対し、8分角グリッドで観測した。コロンビア大学の1.2 m 鏡による観測では、この領域では非常に弱い一酸化炭素分子スペクトルしか検出されていなかったが、我々の観

測では、64 個もの独立した分子雲が検出された。この観測から、広がり10-20分角程度の分子雲が広い領域にわたって存在しており、十分に細かい空間分解能で広範囲を観測する重要性があることがはっきりした。

・遠赤外線とHIから求めた水素分子雲候補天体の観測²¹⁾

星間物質は、ガスとダストからできている。ガスの大部分は水素原子、または水素分子であり、紫外線量、粒子密度に応じて両者がある割合で混ざり合っている。ここで、ガスの総量、つまり水素の総量とダストの割合が一定で、かつ、温度が一樣であると仮定すると、ダストから出る熱的な連続波の放射量と水素の総量は比例関係にあることが期待される。つまり、水素原子の量を示す中性水素のスペクトル強度と遠赤外線強度を比較して、「遠赤外線の強度の割合が周りよりも大きいところ」=「遠赤外線超過雲」は、「水素分子を

含んでいる領域」=「水素分子雲」である可能性が高いと予想される。このような考えで、空間分解能は約1度角と粗いが、中性水素と遠赤外線のデータから、遠赤外線超過雲のカタログが作成された⁶¹⁾。我々は、このカタログのうち、チリから観測可能な68個について、一酸化炭素分子スペクトルで観測を行った。その結果、47%にあたる32個で一酸化炭素分子スペクトルを検出した(図6)。これは、遠赤外線超過雲が確かに水素分子を含んでいる場合が高いことを示す。これらの分子雲は、今までの減光などをもとにした観測では検出できなかったものである。また、100 ミクロンと240 ミクロンの赤外線強度から求めたダストの温度が低いほど、一酸化炭素分子スペクトルの検出率が急激に高くなっていることがわかった(図7)。これは、紫外線がよく遮へいされている領域で、CO分子が紫外線によって壊されずに残っていることを示している。さらに、一酸化炭素分子スペクトルが検出されなかった遠赤外線超過雲は、ダスト温度

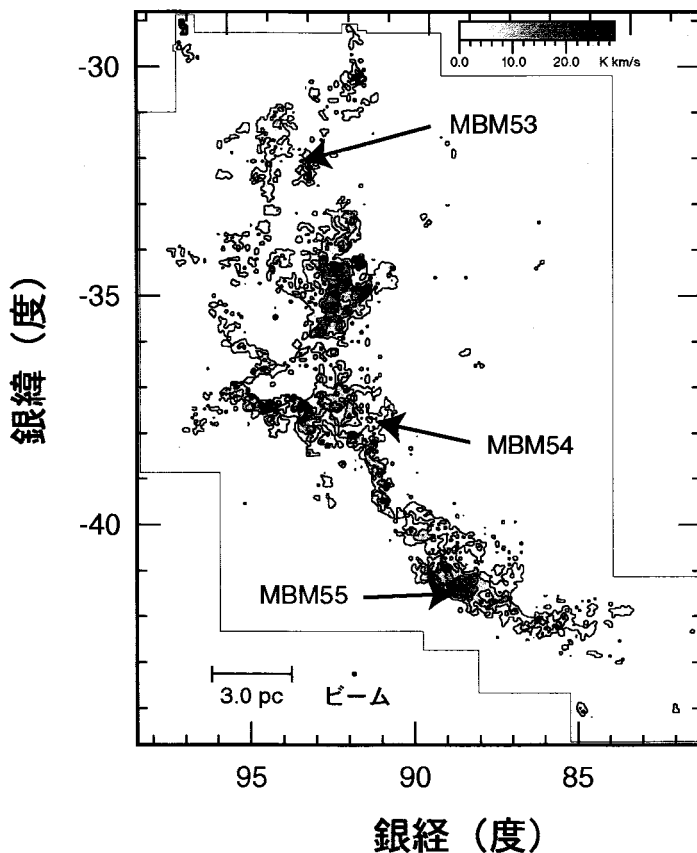


図8 MBM 53, 54, 55 方向の $\text{CO}(J=1-0)$ スペクトルの積分強度図。黒線の枠は観測領域を示している。この領域を8分角グリッドで観測し、 CO スペクトルの検出されたところを4分角グリッドで観測している。等高線は、 1.5 K km s^{-1} から 4.5 K km s^{-1} 毎。

が周りと同じか、低いことがわかった。これらの雲も、やはり水素分子を含んでいる可能性が高く、一酸化炭素分子の存在量の少ない水素分子雲であると考えられる。これらの雲は、分子雲形成の初期段階にある可能性も高く、注目される。

・高銀緯分子雲複合体の全面観測

現在までに多くの高銀緯分子雲が同定されているが、それらのほとんどは数点のみ、もしくは数十分角の粗い空間分解能の観測である。全面を詳しく観測

するのは時間がかかり、極めて困難なのである。我々は「なんてん」を用いて、これらの分子雲の高分解能観測を計画した。

まず手始めに、MBM 53, 54, 55 を含む高銀緯分子雲複合体の4分角グリッド観測を行った(図8)。以前の観測では見えていなかった、非常に粒状の構造がよく分解できている。また、MBM 53, 54 の間に減光の観測では見つかることのできなかった分子雲が新たに検出された。この分子雲は、今回の観測領域の中で一酸化炭素分子スペクトルの強度が最も強く、質量も大きい。減光方向のみの観測では、このような分子雲も見逃す可能性があることを示しており、注目される。

4. これから

高銀緯分子雲の研究の最終的な目標としては、分子雲の形成機構の解明、様々な分子の化学的な生成破壊の循環と、ダスト成長の仕組みの解明、太陽系近傍における星形成の詳細観測、等がある。ここで示した「なんてん」による探査で明らかにな

ったように、まだまだ高銀緯領域の分子ガスの分布は完全には明らかになっていない。これからは、OTF (On the Fly) 法を用いた高銀緯領域の完全な広域サーベイが必要である。さらに、 $\text{CO}(J=1-0)$ の観測データをもとにした高励起遷移 $\text{CO}(J=2-1, 3-2)$ の観測を行って分子雲の物理量を導出し、高銀緯領域での星形成の可能性の探査(C^{18}O などによる観測)等を行って、上記の問題に答えていきたいと考えている(大西利和)。

参考文献

PASJ「なんてん」特集号1 (1999年51巻6号)

- 1) Fukui Y., et al., p745, "First Results of a CO Survey of the Large Magellanic Cloud with NANTEN; Giant Molecular Clouds as Formation Sites of Populous Clusters"
- 2) Fukui Y., et al., p751, "Discovery of the Carina Flare with NANTEN; Evidence for a Supershell That Triggered the Formation of Stars and Massive Molecular Clouds"
- 3) Yamaguchi N., et al., p765, "Distribution and Kinematics of the Molecular Clouds in the Gum Nebula"
- 4) Yamaguchi N., et al., p775, "A Study of Dense Molecular Gas and Star Formation toward the Vela Molecular Ridge with NANTEN"
- 5) Yamaguchi R., et al., p791, "Molecular Clouds and Star Formation in the Southern H II Regions"
- 6) Saito H., et al., p819, "A Study of the Molecular Cloud toward the H II Regions S 35 and S 37 with NANTEN"
- 7) Yonekura Y., et al., p837, "Search for Molecular Clouds toward Intermediate-to-High Latitude IRAS Sources in the Southern Sky"
- 8) Kawamura A., et al., p851, "A Dark-Cloud Complex in Aquila: Small Molecular Clouds Possibly Associated with the Aquila Rift"
- 9) Mizuno A., et al., p859, "Dense Cores and Star-Formation Activities in the Chamaeleon Dark-Cloud Complex"
- 10) Onishi T., et al., p871, "NANTEN Observations of the Pipe Nebula; A Filamentary Massive Dark Cloud with Very Low Star-Formation Activity"
- 11) Kato S., et al., p883, "NANTEN Observations of the Southern Coalsack in ^{13}CO and $\text{C}^{18}\text{O } J=1-0$ Emission"
- 12) Hara A., et al., p895, "A Study of Dense Cloud Cores and Star Formation in Lupus: $\text{C}^{18}\text{O } J=1-0$ Observations with NANTEN"
- 13) Yonekura Y., et al., p911, "NANTEN Observations of Dense Cores in the Corona Australis Molecular Cloud"
- 14) Hayakawa T., et al., p919, "A New Derivation of the Extinction-to-CO Column Density Ratio in the Chamaeleon I Dark Cloud"

PASJ「なんてん」特集号2 (2001年53巻6号)

- 15) Fukui Y., et al., L41, "On the Mass Spectrum of Giant Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud"
- 16) Mizuno N., et al., L45, "First Results of a CO Survey of the Small Magellanic Cloud with NANTEN"
- 17) Yamaguchi R., et al., p959, "Sensitive CO Observations of the LMC Supergiant Shells with NANTEN: Their Effects on the Formation of Molecular Clouds and Stellar Clusters"
- 18) Mizuno N., et al., p971, "A CO Survey of the LMC with NANTEN: II. Catalog of Molecular Clouds"
- 19) Yamaguchi R., et al., p985, "A CO Survey of the LMC with NANTEN: III. Formation of Stellar Clusters and Evolution of Molecular Clouds"
- 20) Matsunaga K., et al., p1003, "Detection of Eight Molecular Supershells in the Southern Milky Way with NANTEN"
- 21) Onishi T., et al., p1017, "A Survey for High-Latitude Molecular Clouds toward Infrared-Excess Clouds with NANTEN"
- 22) Moriguchi Y., et al., p1025, "A $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ Survey of Molecular Clouds toward the Vela Supernova Remnant with NANTEN"
- 23) Saito H., et al., p1037, "The Most Massive C^{18}O Molecular Complex in Centaurus and Star Formation Therein"
- 24) Aoyama H., et al., p1053, "A Large-Scale Study of H^{13}CO^+ and $\text{C}^{18}\text{O } (J=1-0)$ in Orion B"
- 25) Kun M., et al., p1063, "Study of Molecular Clouds and Star Formation in the Region of IC 2118"
- 26) Mizuno A., et al., p1071, "A Large Scale $^{12}\text{CO } (J=1-0)$ Survey toward the Chamaeleon Region with NANTEN"
- 27) Tachihara K., et al., p1081, " ^{12}CO Molecular Cloud Survey and Global Star Formation in Lupus"
- 28) Kawamura A., et al., p1097, "Study of L 688/L 694/L 700: a Complex of Dark Clouds in Aquila"
- 29) Hayakawa T., et al., p1109, "CO Column Density and Extinction in the Chamaeleon II-III Dark-Cloud Complex"

「なんてん」関連その他の主要文献

- 30) Yamaguchi R., et al., 2001, ApJ 553, L185, "Molecular Clouds in the Supergiant Shell LMC 4: Evidence for Triggered Cluster Formation"
- 31) Tachihara K., et al., 2001, PASJ 52, 1147, "Molecular Clouds around a Runaway O Star, zeta Ophiuchi"
- 32) Dubner G., et al., 1999, AJ 118, 930, "Interaction of the Supernova Remnant G18.8+0.3 with the Surrounding Medium"
- 33) Mizuno A., et al., 1998, ApJ 507, L83, "A ^{13}CO ($J = 1-0$) Search for Small Molecular Clouds toward the Chamaeleon-Musca Dark Cloud Complex"
- 34) Dobashi K., et al., 1998, PASJ 50, L15, "Nest of Molecular Outflows in the Circinus Cloud"
- 35) 「なんてんへの道」名古屋大学大学院天体物理学研究室編（新聞報道等のまとめ：ご希望の方は郵送料等実費1000円にて送付いたします。）
- 36) 福井康雄, 1998, 「大宇宙の誕生」(光文社)
- 37) 福井康雄, 2001, 「大宇宙の素顔」(光文社)
- 38) 福井康雄, 2000, 天文月報, 93, 8, 413 "電波望遠鏡「なんてん」—南天分子雲を開拓する"
- 39) Cohen R. S., et al., 1988, ApJ 331, L95
- 40) Bica E., et al., 1996, ApJS 102, 57
- 41) Ehlerová S., et al., 1997, A&A 328, 121
- 42) Heiles C., 1979, ApJ 229, 533
- 43) Ikeuchi S., 1998, Lecture Notes in Physics, 506, 399
- 44) McCray R., 1988, in Supernova Remnants and the Interstellar Medium, (Cambridge Univ. Press) p447
- 45) Moriguchi Y., et al., 2001 in preparation
- 46) Montmerle T., et al., 1983, ApJ 269, 182
- 47) Jones B. F., Herbig G. H., 1979, AJ 84, 1872
- 48) Sterzik M. F., Durisen R. H., 1995, A&A 304, L9
- 49) Feigelson E. D., 1996, ApJ 468, 306
- 50) Alcalá J. M., et al., 1995, A&AS 114, 109
- 51) Alcalá J. M., et al., 1997, A&A 319, 184
- 52) Covino E., et al., 1997, A&A 328, 187
- 53) Krautter J., et al., 1997, A&AS, 123, 329
- 54) Wichmann R. et al., 1997, A&A 320, 185
- 55) Frink S. et al., 1998, A&A 338, 442
- 56) Low F. J. et al., 1984, ApJ 278, L19
- 57) Weiland J. L., et al., 1986, ApJ 306, L101
- 58) Magnani L., Hartman, D., Speck, B. G., 1996, ApJS 106, 447
- 59) Magnani L., et al., 2000, ApJ 535, 167
- 60) Hartmann D., et al., 1998, ApJ 492, 205
- 61) Reach W. T., William F. W., Nils O., 1998, ApJ 507, 507

The first five years of NANTEN

Yasuo FUKUI, Akira MIZUNO, Toshikazu ONISHI, and Norikazu MIZUNO

Department of Astrophysics, Nagoya University

Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: NANTEN, a 4m mm and sub-mm telescope in Chile, has been operating for 5 years since 1996. NANTEN has demonstrated its high performance as the most powerful instrument to survey the molecular clouds in the sky. We present here the highlight of the scientific outcome including topics on 1: Magellanic Clouds, 2: molecular supershells, 3: the origin of the isolated T Tauri stars, and 4: high latitude clouds. The last issue of PASJapan (Vol. 53, No. 6) is the second special issue of NANTEN, which features the most recent results on the southern molecular clouds and star formation.