

電波望遠鏡「なんてん」 —南天分子雲を開拓する

福井 康雄

〈名古屋大学院理学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: fukui@a.phys.nagoya-u.ac.jp

「なんてん」は、南米チリのラスカンパナス天文台に設けた名古屋大学の電波望遠鏡である。銀河系と大小マゼラン銀河の分子雲と星形成の解明をめざして、96年に日本から移設し、すでに3年間にわたって観測を進めてきた。ここでは、この計画のあらましと、最初の研究成果のハイライトを紹介しよう。

1. 南天観測の構想

星の誕生の仕組みを解明することは、天文学の重要な課題である。星は星間分子雲で形成されるので、分子スペクトルによる観測が不可欠である。名古屋大学での星間分子スペクトルの観測は、1980年代前半に始められた。1985年前後に、名古屋大学構内につくられた1台目の4メートル電波望遠鏡によって多数の原始星＝双極分子流が発見されるなどの成果があがり、口径4メートルという小型装置による分子雲の広域観測が有効であることが実証された^{1), 2), 3), 4)}。次のステップとして1987年に立案されたのが、南天観測計画である。

1980年代、北半球には10台をこえるミリ波望遠鏡があり、星間分子雲の観測もかなり進んでいた。一方、南半球にはこの種の装置は1, 2台しかなく、光や赤外線との比較すると星形成領域の分子雲観測はほとんど手つかずに近い状態であった。南天には、北天には見られないユニークな天体が多い。大小マゼラン銀河はその筆頭である。ほかにも、帆座超新星残骸、ガム星雲、イータカリーニ星周辺、おおかみ座やカメレオン座の暗黒星雲などが、特徴ある星形成領域として知られているが、これらの領域の分子雲の分布はほとんど観測されていなかった。

分子雲の主成分である水素分子は、普通の分子

雲では直接観測できるスペクトルがない。分子雲の観測によく使われるのは、安定に、しかも、多量に存在する一酸化炭素分子COの回転スペクトル(波長2.6ミリメートル等)である。一酸化炭素分子は水素分子について存在量が多い。4メートル望遠鏡の視野は、波長2.6ミリメートルで、約3分角である。星間分子雲の観測装置としてそう高い分解能ではないが、個々の星形成領域は十分とらえることができる。たとえば、500光年の距離にある典型的な暗黒星雲で、1光年以下をらくに分解できる。一方、広い天空を観測するという意味で、15メートル級の装置よりもはるかに強力であり、10倍以上速く掃天できる。

1990年当時、南半球の主なミリ波望遠鏡としては、チリに1.2メートル鏡(スミソニアン天文台)と15メートル鏡(ヨーロッパ南天天文台)の2台があった。前者は、0.5度角前後の低分解能で広く銀河系の分子雲の分布を明らかにした。後者は、個々の分子雲を1分角以下の分解能で詳しく観測していた。しかし、南天の天体の広がりと同様性に対して、南天に向けられた電波の「目」は、いかにも貧弱であった。マゼラン銀河についてみると、15メートル鏡の観測範囲は全体の30分の1にすぎず、分子雲の分布は全くといってよいほど解明されていなかった。私たちは、4メートル鏡の3分角という視野を用いて、両者の間をうめることに



よって、南天の分子雲と星形成の姿を解明することをめざした。また、名古屋大学理学部で開発された超伝導受信機は、世界最高の感度を実現しており、広視野が活かせることも強みであった。未開拓の南天にメスを入れる装置として、4メートル鏡はもっともふさわしいと考えたのである。

2. 海外移設への道

1987年当時、海外に設置された日本の地上望遠鏡はなく、手探りで移設実現の道を探らざるをえなかった。まず、1989年から移設用の2台目の望遠鏡を建設し、観測システムと超伝導受信機を開発をすすめた。このための予算には、科研費の特別推進研究をあてた。ただし、科研費は国内でしか使えないという制約があり、まずは名古屋大学構内に2台目の4メートル鏡を設置して、北天を観測することとした(1991年)。1993年、この研究を終えたあと、本格的に移設の実現を試みた。結果的には、国内でまず装置をならし運転し、いろいろと問題点を解決したことで、その後のチリの運用が見通しよく行なわれた。

移設そのものは、通常のルートでは望みが極めて薄いことが分かった。「前例がない」というのが大学事務方の対応であり、門戸は閉ざされていた。わずかに、加藤延夫名大総長(当時、現愛知芸術文化センター総長)のもと、西尾理弘名大事務局長(当時、現出雲市長)がいろいろと調査されて、「移設費だけは概算要求できるのではないか、ただし、運営費については民間の寄付金にたよるしかないだろう」とのことであった。

そこで、1994年から、寄付金を募る活動を開始した。移設実現を訴えて、南天観測の意義を知ってもらうために、200回をこえる講演活動を行い、市民、企業の各層に支援を訴えた。中部経済連合の援助も得て、100社以上の企業に寄付の依頼に走り回った。それに応えて、ジャーナリズムも含めて、多くの一般市民の方々が支援の手を差し伸べてくださったことは、大変有難かった。また、有識

者の方々にも寄付金募集の呼びかけ人になっていただいた。飯島宗一、小尾信彌、古在由秀、小平桂一、清水勝、田中精一、豊田章一郎、樋口敬二、星野仙一(50音順)の各氏、各先生方である。

これらの幅広い支援のおかげで、1995年6月に文部省から移設費が認められ、また、寄付金も総額約1億円が集まり、移設が実現した。寄付を寄せて下さった個人は約1000人、企業は約100社である。

3. 移設先をチリに

これと並行して、サイトをチリのラスカンパナス天文台とし、その所有者であるカーネギー研究所天文台との交渉を進めた。ラスカンパナス天文台は、100インチのデュポン望遠鏡などを持つ光学天文台である。カーネギー側は、すでにポーランドやカナダの光学望遠鏡も受け入れており、基本的な姿勢は好意的であった。当時の台長は、L.サール(L. Searl)氏であり、何回かのやり取りの後に覚書を締結して具体的な据え付けの段取りに移った。ラスカンパナスの現地台長はM.ロト(M. Roth)氏であり、名大側は水野亮が現地に滞在して、種々の手配を取り仕切った。

実は、1988年にはサイトとしてオーストラリアのマウントストロム天文台を考えていた。私たちににとっては経験のない海外での運用であるため、観測する大学院生、職員の安全や、ロジステックス(兵たん線)、運営費などへの配慮から、気象条件は劣るものの安心度の高いオーストラリアを、と考えたのである。この選択を変えたのは、1991年、チリ大学のM.ルビオ(M. Rubio)らの強い誘致であった。実際にチリ現地を訪問し、十分に安全な運用ができるという心証を得て、ラスカンパナスを選択した。

研究の面からは、この選択は非常に意味があった。大小マゼラン銀河の分子雲の観測がこの計画の最大の目玉であるが、分子スペクトルの強度が弱いために ^{12}CO スペクトルを使うしかない。とこ

ろが、 ^{12}CO スペクトルの周波数 115 GHz での大気の透明度は、酸素の吸収帯 (118 GHz) が近く、高度と水蒸気量に非常に敏感であり、標高 1000 メートル以下のマウントストロム口では苦しい、というのが実感であった。同位体置換種の ^{13}CO の周波数 110 GHz では、はるかに大気吸収が少なく、マウントストロム口でもある程度の観測はできると思われたが、このスペクトルでは弱すぎて、マゼランは観測できない。これに対して、標高 2400 メートルで空気が乾燥しているチリのラスカンパナスでは、十分に ^{12}CO スペクトルの観測が可能である。オーストラリアでは、マゼラン銀河のよい観測はとも望めなかっただろう。

1996 年 3 月に移設を無事終え、水野亮に 3、4 名の大学院生が加わって、装置全体の立ち上げ作業にはいった。たまたま発生したエルニーニョのために、例外的な積雪などの異常気象に苦しめられたが、一同のがんばりで作業はほぼ予定どおりに進んだ。5 月、名古屋では一般市民に電波望遠鏡の愛称を募集し、「難を転ずる」などの願いをこめた「なんてん」が選ばれた。7 月には、現地で開催式を行なった。この時、名古屋からも支援の市民のかたがた 10 名余が参加され、チリの参加者を含めて 60 名あまりで「なんてん」の門出を祝った。9 月にはファーストウェイヴ、一酸化炭素スペクトルの受信に成功し、十分な指向精度を達成して本観測を開始したのは 10 月のことである (図 1 = 表紙)。

ラスカンパナスは、晴天率が 70 ~ 80 % という優れたサイトである。実際に観測してみると、期待どおり観測条件は大変よく、典型的な大気吸収は 110 GHz で 5 % である。これは、名古屋でのベストの値の 2 分の 1 以下であり、観測効率は飛躍的に向上した。名古屋では考えられない短い観測時間で、どんどん質のよいデータがとれた。

中でも目立ったのは、1997 年に始めた大マゼラン銀河の全面観測である。6 度平方を 2 分角のグリッドで埋め尽くしたのだが、1 点あたりの観測

時間は約 30 秒、33000 点の観測がわずか 6 ヶ月で完了した。銀河面の分子雲の観測はさらに迅速で、1 点あたり 3、4 秒というのがふつうである。これは、名古屋で、冬季最良の条件下の 5、6 分の 1 以下である。しかも、1 年をとおして観測が可能であり、南天の掃天は驚くほどのペースで進んでいる。

4. 成果 1 :

大マゼラン銀河の巨大分子雲

マゼラン銀河は、「なんてん」のもっとも重要なターゲットである。系外天体としては 16 万光年から 20 万光年という例外的な近距離にあり、古くから天文学上のさまざまな標準を与えてきた。アンドロメダ銀河は 230 万光年の距離であるから、それよりも 10 倍以上詳しく観測できる。その天文学上の意義は、実に大きい。よく知られた例は、セファイド型変光星の周期光度関係が、小マゼラン銀河で発見されたことだろう。銀河の形成進化を考える上でも、一つの銀河の全体を各波長で均一に観測できることの意義は大きい。この意味では、マゼラン銀河が唯一の、宇宙的な「至近距離」にあり、全貌をとらえることのできる銀河である。マゼラン銀河中の天体は、どれも私たちから距離がほぼ一定であることも、大きな利点である。

このマゼラン銀河で、色の青い高密度星団 populous cluster が発見されたのは 1960 年代である。高密度星団の星数は約 1 万、球状星団の百分の 1 であるが、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星団である。このような星団は、銀河系には皆無である。今、銀河系で生まれている星団はすべて、星数 100 個程度の散開星団である。ご存知のように、銀河系ハローに存在する球状星団は、100 億年以上の年齢の古いものだけである。高密度星団の形成過程を観測できれば、100 億年以上前の、球状星団を形成していた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。

大マゼラン銀河全体をおおう分子雲の観測は、

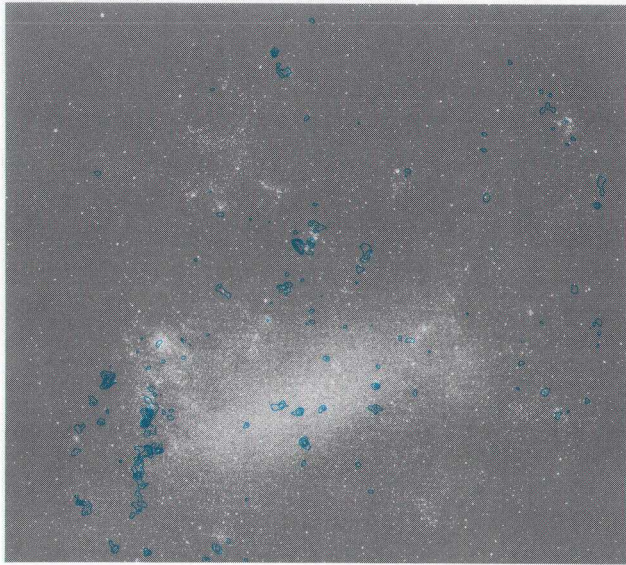


図2 大マゼラン銀河。青い等高線が巨大分子雲の分布を示している。

スミソニアン天文台が、チリのセロトロロにおいた1.2メートル鏡によるものが唯一であった。この観測は角分解能が約10分角で、個々の分子雲は分解できていない。これに対して、「なんてん」の観測では100個あまりの巨大分子雲が分解してとらえられた(図2)。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。「なんてん」の地図を得て、他の天体との意味のある比較が可能になった。特に注目されるのが、高密度星団との比較である。

星団の年齢は、適当な恒星進化のモデルと2色図上で比較して求められる。最も若いものは1千万年以下とされており、1千万年以下の若い星団は銀河全体で300個が確認されている。若い星団と分子雲の様子を詳しく見るために、巨大なHII領域かじき座30周辺の拡大図を図3に示した。若い星団は数個が群をなし、分子雲と位置的によく一致する。特に、図中の中央に二つの星団群があることに注目したい。下の星団群は分子雲のピークに一致する。この分子雲が星団形成の場であることは、明らかである。もうひとつの上の星団群は

少し空間的に広がり、その方向では分子ガスは少なくなっている。私たちは図3を、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した。さらに、大マゼラン銀河全体について、高密度星団とみかけ上最も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300光年以内に集中していることがわかった。一方、それ以外の高密度星団の分布は全くランダムで、年齢が1千万年を超えるとほとんど分子雲との相関がなく、急速な分子雲の散逸という上の考え方を支持する。また、超新星残骸と分子雲の相関

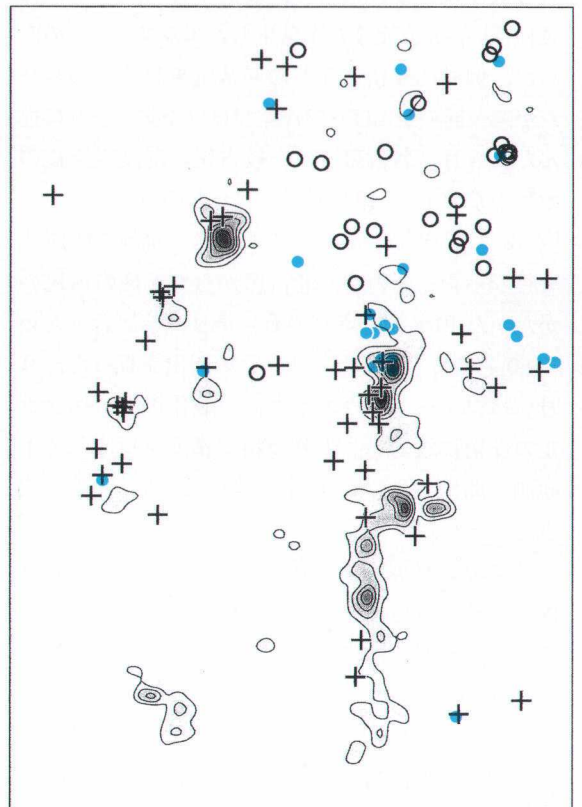


図3 かじき座30(30 Dor)付近の巨大分子雲の拡大図。十字はHII領域、青丸と白丸はそれぞれ年齢が1千万年以下および1千万年から3千万年以下の若い星団の分布を示している。図中の1cmが約1200光年に対応する。

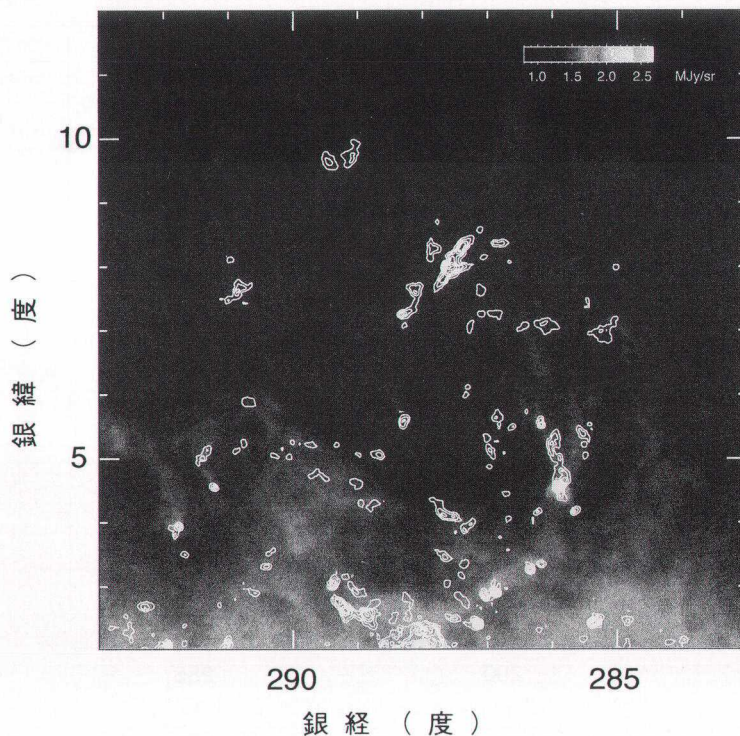


図4 カリーナフレア。等高線がCOスペクトルの積分強度，グレースケールが遠赤外線（アイラス衛星の100マイクロン帯）の強度分布を表す。

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、母体の分子雲はほとんど散逸していることを示すものと考えられる。このように、高密度星団の形成の場が初めてとらえられ、母体の分子雲の進化と物理的性質が研究できるようになったわけで、今後の高密度星団形成の追究における重要な前進がもたらされた。この結果は、国際天文連合190などで発表され、マゼラン銀河の研究における近年のもっとも重要な貢献として評価されている⁵⁾。現在、さらに感度を高めた観測が進められており、さらに多くの分子雲が見つかっている。それらについては、また機会をあらためて報告したい。

5. 成果2：カリーナフレアの発見

「なんてん」の ^{12}CO の周波数での感度は非常に高い。マゼラン銀河の観測はそれを実証している。

銀河系内の分子雲についても、広範な分子雲の掃天観測が急ピッチで進んでおり、銀河系の分子雲の掃天観測として、角分解能と観測範囲でこれまでの観測を大きく凌駕する成果があがっている。ここでは、その中からりゅうこつ座領域に焦点をあてたい。りゅうこつ座は南天を代表する星座のひとつであり、その方向にはカリーナアームがある。私たちはりゅうこつ座方向の観測を銀緯プラスマイナス10度の範囲で行った。その結果発見されたのが、初めての「分子雲の」スーパーシェル、カリーナフレアである。

図4には、100個あまりの分子雲がやや縦長に分布している。これらの雲は、太陽から1万光年の距離にある。したがって、銀河面から1300光年以上にまでひろがった分子雲複合体であることがわかる。銀河面内分子雲の典型的な厚みは300光年そこそこであるから、これは異常な高さに分子雲が分

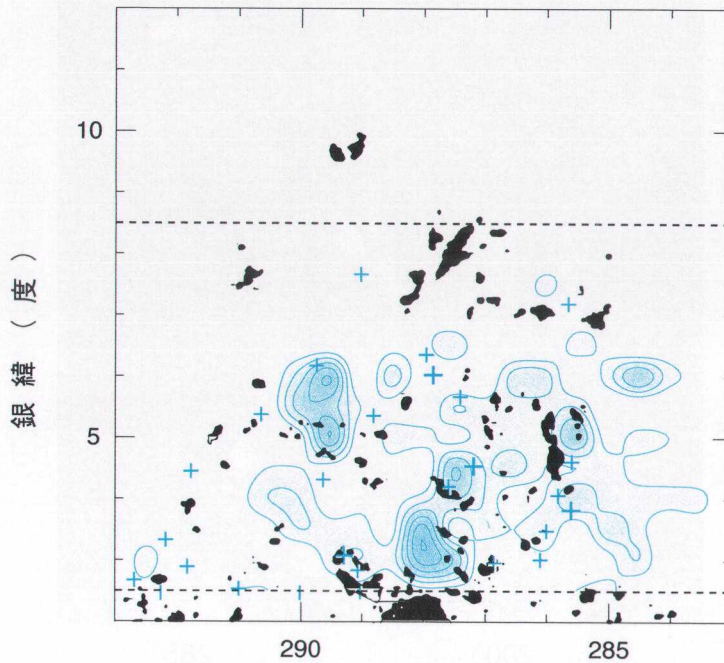


図5 カリーナフレア方向のOB型星の分布. 青の十字がO型星, 黒の十字がB0からB3型星の位置を, 等高線とグレースケールがB0からB3型星の面密度を表している. 黒く塗りつぶされた等高線は分子雲の分布を表す.

布していることを意味する. しかも, 遠赤外線も同様のシェル状の分布を示す. 速度分布も考慮して, 私たちはこれが巨大な, さしわたし1200光年のスーパーシェルであると結論した.

スーパーシェルは従来, 中性水素ガスの21 cm スペクトルで観測され, 多くの銀河面にきりたったフィラメント状の分布が, スーパーシェル候補としてカタログされている⁶⁾. これらはすべて, 星形成を伴わない, 密度の低いガスである. 分子ガスがシェル状に分布している例は皆無であった. スーパーシェルが星の形成にどのように寄与するかも不明であった. スーパーシェルの成因は, 大質量星による超新星爆発や, 星風による周囲の星間ガスの圧縮である⁷⁾. 1個の超新星爆発でつくられるシェルの大きさはせいぜい数百光年程度だが, スーパーシェルは数10個の爆発によってつくられる千光年を超

えるサイズを持つ.

膨張するシェルの質量は 10^5 太陽質量で運動エネルギーは 10^{51} エルグである. スーパーシェルの理論と比べると, これを説明するには20個から30個の超新星爆発が必要である. 運動エネルギーのごく一部しか膨張シェルにはつたわらないためである. 最初の超新星爆発以来, 約2千万年を経たスーパーシェルと見られる. 爆発の中心は銀河面から300光年ばかり上にずれたあたりで, このずれのために, 上方に非対称に膨張したと考えられる. 典型的なOB型星団の質量分布を仮定すると, ほぼ100万年に一度の割合で超新星爆発が起これり, どんどんシェルが膨張したと見られる. 実際, カリーナフレアの内部には広がった軟エックス線も検出されており, 最近の爆発のあとと考えられる.

カリーナフレアの大きな特徴は, スーパーシェル

によって星形成がトリガーされたと見られる点である。図5に示したのは、この方向の若いOB型星の分布である。カーナフレアの方向にのみ銀緯3度以上に広がった星の分布が見られる。星の総数は300個にのぼる。爆発後2千万年とすると、B3型よりも重い星はすべて爆発したはずである。その結果、最初のOB星団はB4型より軽い星だけである。このような星の集団が図中カーナフレアの「底」の部分にみられる。この70個の星を含む星団が300個以上の大質量星の形成をトリガーしたことになり、「正のフィードバック」がおきていることになる。スターバースト現象のミニチュアとも解釈できる。りゅうこつ座の場合には、ガスは銀河面に多いから、原料となるガスは高さとともに減少する。もし、星間物質がもっと高くまで分布していれば、より高い星形成率のトリガー効果が期待できそうである。

引き続き進められている銀河面サーベイによって、さらに多くのスーパーシェル候補が発見されている(例 図6=表紙)。2, 3年後には、分解能2分角の分子地図が南の天の川全体について完成するはずである。これは、スミソニアン天文台グループの30分角の地図を大きく塗りかえるものであり、スーパーシェルのみならず、種々の相互比較に使える貴重なデータベースになると期待される。

6. まとめに替えて

ここに紹介したのは、「なんてん」の成果のごく一部である。その他の「なんてん」の初期の観測成果のほとんどは、PASJの51巻6号に14篇の論文として発表されている。また、10をこえる国際学会で50篇以上の論文が発表されている(2000年4月時点)。今後も、南天の観測を広範に進めて南天分子雲の開拓を進めていきたい。その成果は、近い将来LMSA計画に継承されることにもなる。

南天観測計画を進めるに当たって、名古屋大学星の会をはじめとして、多くの方々になみなみならぬご支援、ご協力をいただきました。この限られた

紙面ではみなさんのお名前をあげることはとてもできませんが、「なんてん」観測チームを代表して、厚く感謝の念を表したいと思います。なんてんチームのメンバーは、筆者を含めて、以下の27名です。小川英夫、水野 亮、大西利和、米倉覚則、長濱智生、肖 可成、河村晶子、立原研悟、尾林彩乃、山口伸行、加藤滋郎、早川貴敬、原 淳、水野範和、阿部理平、齋籐弘雄、山口玲子、松永健一、森口義明、真野 悟、峯 義浩、青山紘子、浅山信一郎、吉川奈緒、小出直久、豊田秋一郎、山本宏昭。

参考文献

- 1) Fukui Y., et al., 1993, in *Protostars and Planets III*, ed. E. H. Levy, J. I. Lunine, (Tuscon: Arizona University), 603
- 2) Fukui Y., 1989, in *Low Mass Star Formation and Pre-Main Sequence Objects*, ed. B. Reipurth (Garching bei Munchen: ESO), 95
- 3) Fukui Y., et al., 1986, *ApJ*, L85, 311
- 4) 福井康雄, 1998, 大宇宙の誕生, (光文社)
- 5) van den Bergh S., 1998, *PASP*, 110, 1377
- 6) Heiles C., 1984, *ApJS*, 55, 585
- 7) 例えば, Tomisaka K., Ikeuchi S., 1986, *PASJ*, 38, 697

NANTEN Radio Telescope: Pioneering the Southern Molecular Clouds

Yasuo FUKUI

Department of Astrophysics, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8602, Japan

Abstract: NANTEN is the radio telescope of Nagoya University installed at the Las Campanas Observatory in Chile. The telescope is aimed at revealing the molecular clouds and star formation in the southern Milky Way and the Magellanic Clouds with its high capability in surveying molecular emission. I present a brief history of NANTEN and the highlight of the first results including the identification of the formation sites of populous clusters in the Large Magellanic Cloud and the discovery of the first molecular supershell, the Carina Flare.