

富士山頂サブミリ波望遠鏡とその初期成果

関本裕太郎^{*、**}，山本智^{*}，岡朋治^{*}，立松健一^{**}

* 〈東京大学理学部物理学教室・初期宇宙研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

** (国立天文台電波天文学研究系 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山)

富士山頂サブミリ波望遠鏡は中性炭素原子線 CI: 492 GHz による銀河面広域観測を目的として開発され、1998年11月より富士山頂 西安河原 (標高 3725 m) にてサブミリ波観測をおこなっている。口径 1.2 m の主鏡に、800/500/350 GHz を同時に観測できる超伝導受信機、そして 900 MHz のバンド幅を持つ音響光学型分光計 (AOS) を装備している。また、電波望遠鏡として世界で初めて衛星通信をつかった遠隔制御で東京大学理学部物理学教室/野辺山宇宙電波観測所から望遠鏡を遠隔運用している。富士山頂の冬季の大気透過度は 220 GHz の調査から予想されたとおりすばらしく、1998 年度冬季だけで過去に中性炭素原子線で観測された領域の 10 倍以上に相当する 20 平方度にわたりマッピングした。中性炭素原子線の広域観測をもとに、星間分子雲の物理的・化学的進化を解明していく。

1. はじめに

富士山頂サブミリ波望遠鏡は中性炭素原子線の広域観測と日本におけるサブミリ波天文学のスタートという2つの目的で、東京大学理学部初期宇宙センターが中心になって国立天文台野辺山宇宙電波観測所・分子科学研究所と協力して開発・製作した。日本は野辺山 45 m 鏡や 10 m・6 素子干渉計といったミリ波の天文学において世界の最先端を進んでいる。しかし、サブミリ波の本格的な観測装置はまったくなかった。サブミリ波には、ミリ波で観測される分子 (CO, CS, etc) の高回転線だけでなく、炭素原子の微細構造線 (CI) や星間塵の熱放射等の多様な観測対象が存在している。サブミリ波は大気中の水蒸気の吸収を強く受けるので、標高 3000 m より低い場所ではほとんど観測できない。富士山頂は、標高 3776 m と日本で最も高く、冬季の平均気温が -20 度と低く、晴天が続く、サブミリ波に適した環境であることを、山本智 (東京大学理学部)、斉藤修二 (当時分子科学研究所・現福井大学) は 1993 年頃に見いだして計画を

スタートした。

1980 年代から始まった一酸化炭素原子線の広域観測は、分子雲の濃い所つまり分子雲コアから星は生まれることを明らかにしてきた。しかし分子雲コアや分子雲がどのようにして形成されるのかは、まだわかっていない。化学進化モデルによると拡散した原子ガス (diffuse cloud) から分子雲を形成する過程で、炭素原子は一酸化炭素分子へと存在形態がかわる。この様子を Suzuki et al. 1992 では、炭素鎖分子とアンモニア分子の存在比をもとに分子雲の進化を論じて、中性炭素原子観測の重要性を指摘している¹⁾。我々は中性炭素原子の分布を探り、分子雲の形成や進化を明らかにすることを目標とした。

これまでに中性炭素原子の広域観測はほとんどおこなわれていなかった。サブミリ波望遠鏡はハワイ島マウナケア山に JCMT 15 m 鏡と CSO 10 m 鏡が 1990 年代初めから中性炭素原子線の観測をおこなっていたが、10 秒程度のビームで狭い範囲 (10 分角程度) の観測をおこなってきた。一方、1980 年代より中小口径望遠鏡によって

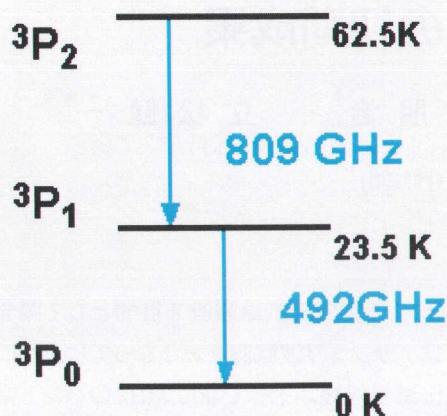


図1 中性炭素原子の遷移

COの観測がおこなわれ、分子雲の広域サーベイが精力的におこなわれてきた。コロンビア大学1.2 m鏡・東大天文センター60 cm望遠鏡・名古屋大学4 m鏡・FCRAO14 m鏡など大変により成果をあげた。しかしサブミリ波広域観測をおこなう望遠鏡はほとんどなかった。近年、COBE衛星のFIRASが7度のビームで銀河面をサーベイして、中性炭素原子線が分子雲の冷却に重要な寄与をしていることを明らかにして以来^{2), 3)}、中性炭素原子線の広域観測をはじめようとするグループがでてきた。D. Jaffe率いるCSOのフォーカルリデューサーは、CSOの主鏡面のたった直径1 mをもちいて観測を効率的におこなうものである。また、A. A. Starkらは南極に1.7 mのASTROという望遠鏡を製作した⁴⁾。また、60 cm鏡を積んだ衛星SWASも中性炭素原子線の広域観測をはじめている。

中性炭素原子線は磁気双極子モーメントによって809 GHz、492 GHzの2つの遷移をもつ(図1)。これらのラインを放射するのに必要な密度(critical density)はおおよそ 1000 cm^{-3} である。天体からの中性炭素原子の492 GHzのラインはカイパー飛行機天文台をつかってT.G. Phillipsによって初めて検出された⁵⁾。一方809 GHzのラインはハワイ大学2.2 m望遠鏡でD. Jaffeによって初めて検出されている⁶⁾。



図2 富士山頂に設置したラジオメータ (1995-1996)

2. サイト

富士山は休火山で、他の主要山脈から切り離された孤立峰である。冬季は平均で15 m/sの強風が常時吹いている。望遠鏡は、直径600 mの火口の西側に位置する西安河原(標高3725 m)に建設した。富士山頂の最高地点、剣ヶ峰(標高3776 m)から北に200 m下ったところで、そばに環境庁の避難小屋がある。6-10月の間は、ブルドーザで重量1トンまでの荷物を運び上げることができる。

我々は富士山山頂で小型レドーム付220 GHzラジオメータを2年間おいて、富士山頂での大気透過度やレドームへの着氷・着雪について検討をおこなった⁷⁾(図2)。220 GHzでの大気透過度のデータから富士山頂では冬季5ヶ月のうち約30%の時間で492 GHzの観測可能であると予想していた。着氷・着雪対策に関しても、放熱と表面を平坦にすることにより、富士山頂の乾いた雪はレドームには付着しないことを実証できた。

3. 装置

3-1 アンテナ

主鏡はアルミニウムの削り出しで、直径1.2 m焦点距離0.48 mである(表紙図、図3、図4)。サイズはコロンビア大学1.2 m鏡と同じである。主鏡の大きさは製作した法月精機の旋盤の大きさと

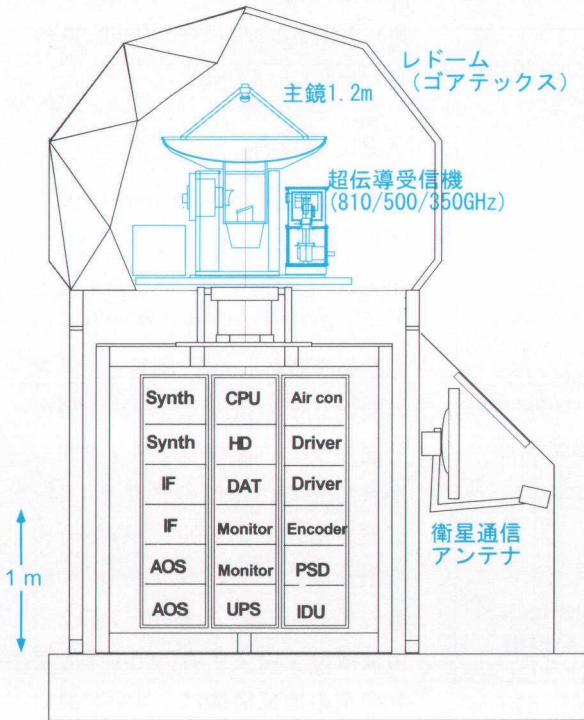


図3 富士山頂サブミリ波望遠鏡の概略図

同じである。1.2 m 鏡でのビームサイズは 2.2 @492GHz, 3.1@345GHz である。アンテナを含めた望遠鏡の大部分は雄島試作研究所の富樫・野田らが製作した。

鏡面精度 10 μm r.m.s. を目指すために、自重変形と温度変形を抑える工夫をした。熱膨張係数が同じ材質をもちいることによって、温度が変化し

表1 富士山頂サブミリ波望遠鏡の諸元

主鏡 直径	1.2 m
主鏡 焦点距離	0.48 m
主鏡 重量	81 kg
主鏡 鏡面精度	10 μm r.m.s.
アンテナ 材質	Al 5052
副鏡 直径	72 mm
レドーム 直径	2.92 m
ビーム幅	2.2 分角 at 500 GHz
ポインティング精度	20 秒角
IF 周波数	1.8 - 2.5 GHz
分光計 (AOS)	1.7 - 2.6 GHz
月に対する効率	72 % at 500 GHz
受信機	810/500/350 GHz

ても相似変形し、鏡面精度は保たれる。アジマス台より上は、大部分アルミニウムの 5052 という素材をつかった。Al 5052 は加工性がよいのが特徴である。しかし、モータやベアリングは SUS や鉄を素材に含んでいる。そこで、モータやベアリングの支えには、オフセット構造をもちいて、熱変形してもその変形が主鏡や軸に伝わらないように工夫している。自重変形を抑えるために、簡単な有限要素法の計算をおこない、高さ 150 mm 厚み 15 mm の井桁状の格子をアンテナの裏側に取り付けている。主鏡の重量は 81 kg である (表 1)。

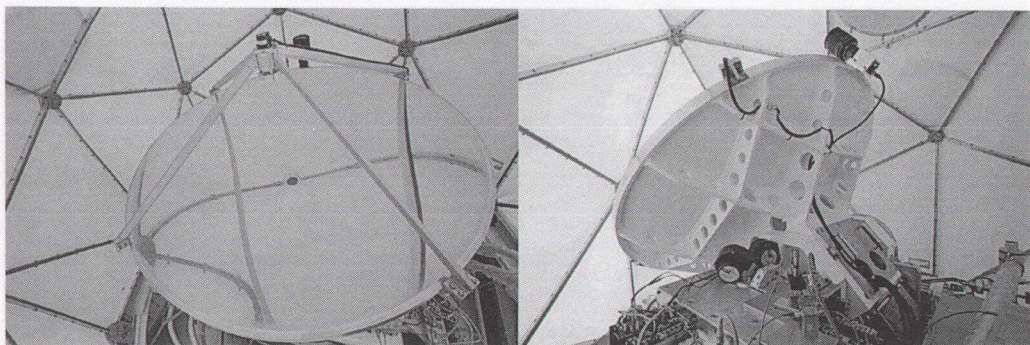


図4 富士山頂サブミリ波望遠鏡の主鏡

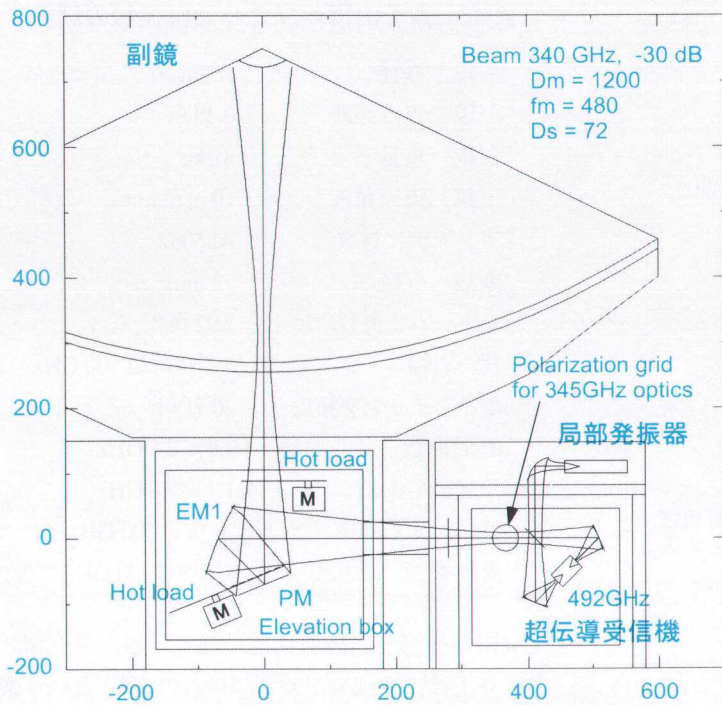


図5 富士山頂サブミリ波望遠鏡の光学系

置には、光エンコーダ（精度 2 秒角）と磁気レゾルバー（精度 30 秒角）をもちいている。

3-2 光学系

受信機はナスミス焦点に置く（図 5，図 6）。天体からの 300–800GHz を受信するために、主鏡とホーンの間には周波数に依存しない光学系を設計した。副鏡とホーンの間には 2 個の楕円ミラー，1 個の平面ミラー，3 個のグリッドがおかれている。2 個のグリッドは、偏波分離と準光学的な LO 結合の役割を果たしている。ホーンの直前のグリッドは、角錐ホーンの交差偏波成分を除去する。光学系とアンテナの機械構造は、互いに設計変更を繰り返して最適な解を探した。

鏡面精度の測定のために、まずならいゲージを製作し、3次元測定器で測定した。次にならいゲージを鏡面に当てて、10 μm 厚の隙間ゲージが入らないことを確認した。

駆動には、バックラッシュのない NSK 社のダイレクトドライブモータをもちいている。角度検出装

3-3 フロントエンド

810/500/350GHz が同時受信可能な超伝導受信機を製作した。超伝導ミキサーは野辺山の野口・史によって開発された Parallel connected twin junction (PCTJ) や Distributed Junctions (DJ) を使っている⁷⁾。500 GHz は NASDA の稲谷によって新たに考案され

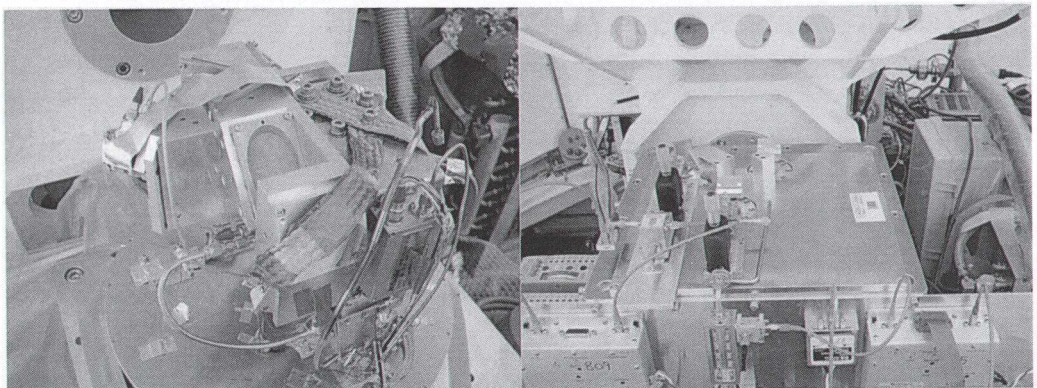


図6 富士山頂サブミリ波望遠鏡の超伝導受信機（810/500/340 GHz）

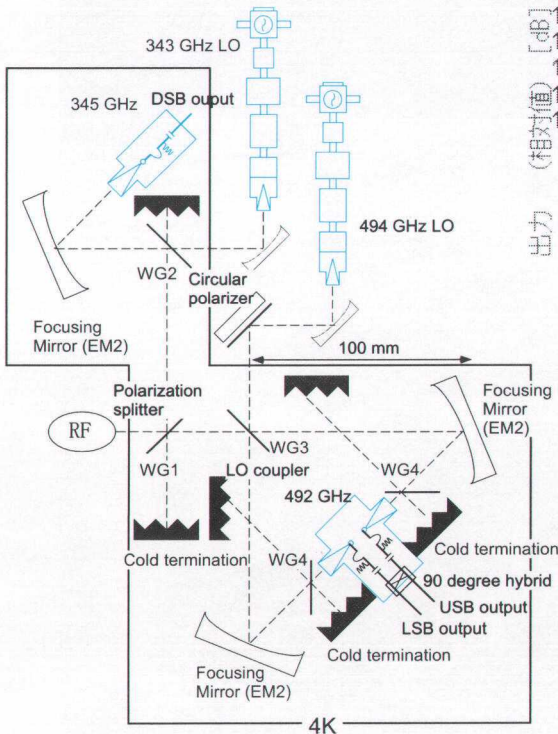


図7 超伝導受信機内4K光学系の概略図

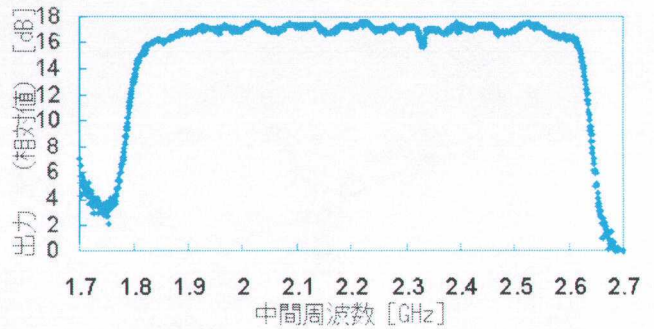


図8 音響光学型分光計 (AOS) のバンド特性

たサブミリ波準光学的 Single sideband (SSB) 方式⁸⁾がもちいられている (図7)。810, 350 GHzは、double sideband (DSB) で受信する。局部発振器 (LO) は冷却グリッドで準光学的に結合されて、角錐ホーンに入る。ミキサマウントは角錐ホーンとともに電鍍法で一体成型した。ミキサチップ手前の導波管は通常の半分の高さで、492 GHzでは $508 \mu\text{m} \times 127 \mu\text{m}$ である。IF 周波数は野辺山 45 m 鏡の 25 マルチビーム受信機とおなじ 1.8–2.5 GHz である。

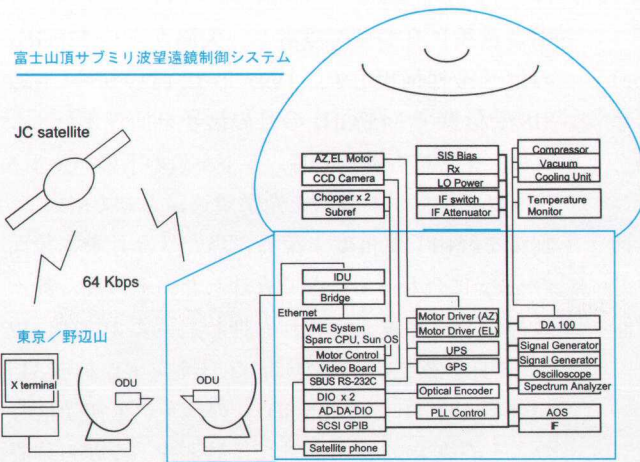


図9 制御システムの概念図

3-4 バックエンド

バックエンドとして音響光学型分光計 (AOS) を、尾関・藤原・斉藤らの分子研のグループが製作した¹⁰⁾。ケルン大学の AOS¹¹⁾を参考にして、帯域 900 MHz で特性の良いものが製作された (図8)。1ch の分解能は 1.6 MHz で、1024 channel を持つ。

3-5 レドーム

アンテナを風雪から守るレドームは米国の ESSCO 社で製作された。雨具で有名なゴアテックスのメンブレン (0.3 mm 厚) を、3 角形のアルミニウムフレームに張り、それを 40 個組み合わせる。着氷・着雪しないように、レドームの外側はねじなどの突起物がないように工夫している。



図10 ヘリコプターによる富士山頂への設置<1998年7月29日>

3-6 制御システム

制御システムは、VME (Versa Module Europe) をバスとし、Force社のSparc CPUを使ったシステムで、Sun OS 4.1を使っている。ソフトはC言語をベースとしている。

グラフィックには、PGPLOTをもちいている。通信は、JCサテライト社の衛星通信を使用し、64kbpsの専用回線である。また、バックアップ回線として、NTT社のN-starを使用している。

4. 望遠鏡設置

富士山頂1.2 m望遠鏡は、1995年9月から設計を開始し、1996年に製作し、1997年6月に野辺山の6 mミリ波望遠鏡(現鹿見島)の跡地に設置された。1997年7月は、220 GHzショットキーバリアダイオードでできたハーモニックミキサーを富士

山望遠鏡に合わせて設計し、太陽からの220GHzの信号を初検出した。1997年12月の初めには、SIS受信機で345 GHzの月の信号を捕らえた。これは、幸いにも満月の時、レドームの上のパネル5枚をはずして、主鏡面を光学望遠鏡として用いて、副鏡を経由して再度主鏡面に当たった月を主鏡面のapexに合わせることで成功した。その後、数々の苦難を乗り越え、暮れも押し迫った1997年12月25日の夜23:50分頃に、オリオンKLから345 GHzのCO(J=3-2:345GHz)のラインを初受信した。その後1998年3月まで、観測をしながら装置をくみ上げていった。4月・5月は遠隔制御の開発をおこない、6月の第一週に望遠鏡を解体し、富士山への設置を準備した。梅雨が明けて1週間ほどした7月26日から富士山へのヘリコプター設置のために山頂及び御殿場の駐車場を借りたヘリ

ポートで待機した。最初の2日は霧雨であった。1998年7月29日に3分割した望遠鏡のヘリコプター設置に成功した(図10)。富士山は6月から10月までのみブルドーザによる輸送が可能であるため、大急ぎで受信機や分光計・制御システムを設置した。大きな台風も2度ばかりきた。1回目の台風の後に、CIの492 GHzラインを初受信したが、その次の台風で外側の扉が風でとばされてしまった。その後、望遠鏡の立ち上げが遅れたが、11月からは、遠隔制御による観測をはじめることができた。

5. 観測・性能

ポインティングは、初めに光学望遠鏡で望遠鏡の器差をとり、次に太陽や月の345 GHzをもちいて、電波軸と光学軸を合わせた。ポインティング性能は20"角 r.m.s 程度で合っていることを、毎月確認している。天体から受信した信号強度は、チョップアホイル法によって、レーリージーンズ近似によるアンテナ温度に変換される。このアンテナ温度を主ビーム温度に変換する。

満月の時に望遠鏡の月に対する効率を求めた。レドームによる損失を含めた月に対する効率は72%@492 GHz, 75%@345 GHzと高い値がえられている。さらに、ドーム内温度と大気温度の違いによる補正によって主ビーム温度を求める。上記の方法によって得られた天体の温度を、標準天体(Orion KL, M17SW)の温度と比較し、正しいことを確かめた。月や太陽の端の観測から、ビーム幅も求めている。設計どおり492 GHzで2.2', 345 GHzで3.1'であった。

望遠鏡は1998年度の11月~3月と1999年10月~3月に順調に観測している。これまでに観測した天体は、TMC1, Orion A, Orion B, M17, NGC2264, W3, DR21, L134N, W44, W51, W28, Ophi-

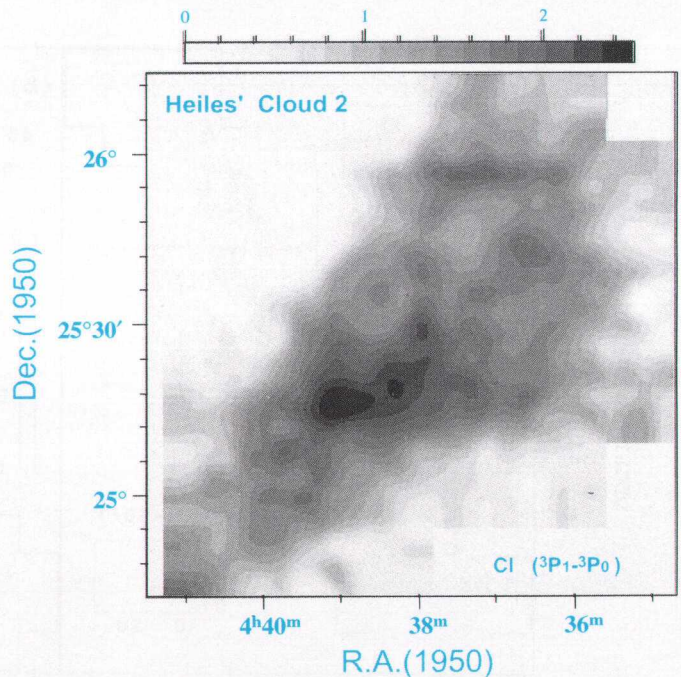


図11 おうし座分子雲のCIマップ (Maezawa et al., 1999)²²⁾

uchuis, NGC1333, MBM12 他である。

1998年度の成果としては、おうし座暗黒星雲HCL2ではC¹⁸Oで濃いところ(Sunada & Kitamura)より南側にCIが強い領域を発見した(図11)¹²⁾。この結果は、おうし座分子雲では南側が北側に比べて若いという炭素鎖分子の分布の傾向と一致する¹⁾。CIからCOへの分子雲の進化が見えているかもしれない。他の領域でもこのように中性炭素原子がCOに比べて相対的に高いところが見つかりつつある。一方、巨大分子雲Orion Aでは分子雲全体でCI/¹³COの分布が非常に似ていることを見出している(図12)¹³⁾。

超新星残骸と分子雲の相互作用という観点からW28, W44, W51の広域CI観測を行った¹⁴⁾。IC443では、相互作用によるショックによってCOが解離されるかまたは宇宙線による電離度の上昇からCIが相対的に増加すると報告されている。富士山頂サブミリ波望遠鏡でも同様の結果を得ている。

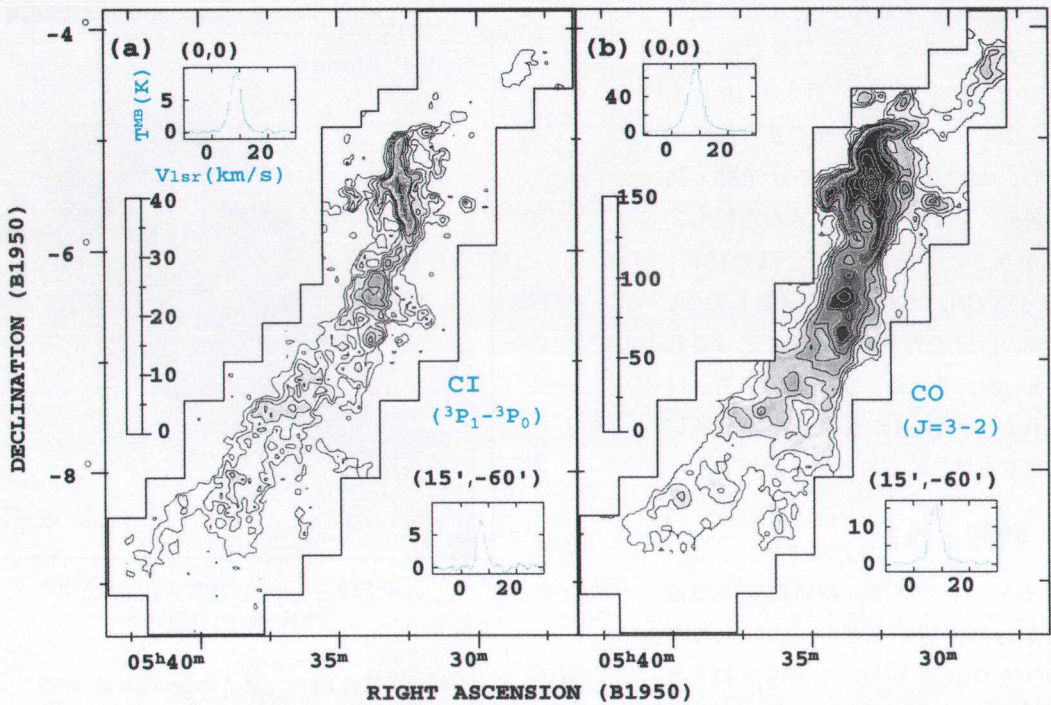


図12 オリオン座分子雲のCI・COマップ (Ikeda et al., 1999)¹³⁾

6. 今後

1999年度の観測からは新たに800 GHz帯の観測も始まっている(図13)。800 GHz帯には809 GHz CIや807 GHzのCO (J=7-6)など興味深い輝線が存在するが、全くの未知の領域である。世界的にも800 GHz帯で定常観測している望遠鏡はない。

CIの2本の輝線により励起状態を解くとともに、High-JのCOがどのように分布しているのかが興味がもたれる。今後は492 GHz, 345GHz帯での観測感度をさらに向上させて、近傍銀河の観測を計画している。

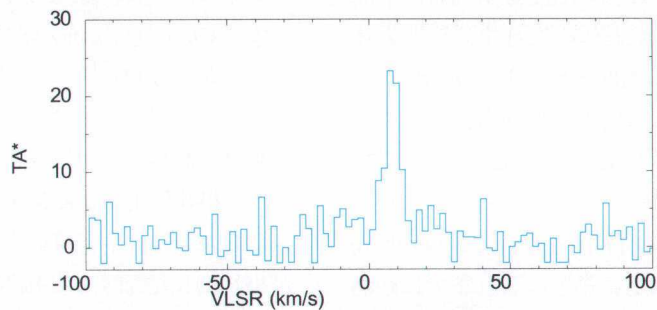


図13 CO J=7-6: 807 GHz Orion A のスペクトル

謝 辞

富士山頂サブミリ波望遠鏡は多くの方々の協力なくしては開発・製作できなかつた。気象庁、特に富士山頂測候所のスタッフの方には様々な援助をいただいた。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は、東京大学 池田正文・前澤裕之・伊藤哲也・斎藤岳・岩田充弘・亀谷和久・酒井剛・藤原英夫、国立天文台大石雅寿・野口卓・有川裕司・麻生善之・宮澤敬輔・史生才、宇宙開発事業団 稲谷順司・尾関裕之、福井大学 斎藤修二と共同で開発をおこなった。

参 考 文 献

- 1) H Suzuki., S Yamamoto., M Ohishi., N Kaifu., S Ishikawa., Y Hirahara., S Takano., 1992, ApJ 392, 551
- 2) E L. Write et al., 1991 ApJ 381, 200
- 3) C L. Bennet et al., 1994, ApJ 434, 587
- 4) A A. Stark., R A. Chamberlin., J G. Ingalls, J Cheng, G Write., 1997 Review of Sci. Instrum. 68, 2200
- 5) T. G Phillips., P. J Huggins., T. B Kuiper., R. E Miller., 1980, ApJ 238, L103
- 6) D. T Jaffe., A. I Harris., M Silber., R Genzel., A. L Betz., 1985, ApJ 290, L593.
- 7) Y Sekimoto., H Yoshida., T Hirota., Y Takano., E Furuyama., S Yamamoto., S Saito., H Ozeki., J Inatani., M Ohishi., A. G Cariasmenos., S. L Hensel., 1996, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 17, No.7, 1263
- 8) S. C Shi., T Noguchi., J Inatani., 1997 IEEE Trans Applied Superconductivity, 7, 2587
- 9) J Inatani., S. C Shi., Y Sekimoto., H Mashiko., S Ochiai., 1998, Ninth international symposium on space terahertz technology, 337
- 10) H Ozeki., H Fujiwara., H Yoshida., T Horigome., S Saito., 1995 Ann. Rev. of Inst. Mol. Sci. II-B-2
- 11) R Schieder., V Tolls., G Winnewisser., 1989 Exp. Astronomy 1, 101.
- 12) H Maezawa., M Ikeda., T Ito., G Saito., Y Sekimoto., S Yamamoto., K Tatematsu., Y Arikawa., Y Aso., T Noguchi., S. C Shi., K Miyazawa., S Saito., H Ozeki., H Fujiwara., M Ohishi., J Inatani "Large-scale mapping observations of the CI 3P1-3P0 line toward heiles cloud2 in the Taurus Dark Cloud" 1999, ApJ 524, L129
- 13) M Ikeda., H Maezawa., T Ito., G Saito., Y Sekimoto., S Yamamoto., K Tatematsu., Y Arikawa., Y Aso., T Noguchi., S. C Shi., K Miyazawa., S Saito., H Ozeki., H Fujiwara., M Ohishi., J Inatani., "Large-scale mapping observations of the CI 3P1-3P0 line toward the Orion A molecular Cloud" 1999, ApJ 527, L59
- 14) Y Arikawa., 2000 PhD thesis The Graduate University for Advanced Studies

The Mt. Fuji submillimeter-wave telescope and its initial results

Yutaro SEKIMOTO

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo and Nobeyama Radio Observatory

Satoshi YAMAMOTO

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo

Tomoharu OKA

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo

Ken'ichi TATEMATSU

Nobeyama Radio Observatory

Abstract: The Mt. Fuji submillimeter-wave telescope has been operated since November 1998 to survey neutral atomic carbon (CI) toward the Milky Way. It has a 1.2 m main reflector with a surface accuracy of 10 μ m in rms. A superconductor-insulator-superconductor (SIS) mixer receiver mounted on the Nasmyth focus receives 810/492/345 GHz bands in DSB simultaneously. An acousto-optical spectrometer (AOS) has 1024 channels for 0.8 GHz bandwidth. The telescope was installed with a helicopter and bulldozers at the summit of Mt. Fuji (alt. 3725 m) in July 1998 after a test operation at Nobeyama for a year. It has been remotely operated via a satellite communication from Tokyo or Nobeyama. Atmospheric opacity at Mt. Fuji was 0.4 - 1.0 at 492 GHz in 30 % of time and 0.07 - 0.5 at 345 GHz in 60 % of time during winter five months. The system noise temperature was typically 1200 K (SSB) at 492 GHz and 500 K (DSB) at 345 GHz. The beam size was measured to be 2.2 and 3.1 at 492 and 345 GHz, respectively. We have conducted a large-scale survey of the CI (492 GHz) and CO (3-2: 345 GHz) emission from nearby molecular clouds with a total area of 10 square degrees.