

## 私の星間分子30年

海部 宣 男

〈国立天文台ハワイ観測所 Subaru Telescope, NAOJ, 650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii 96720, USA〉

e-mail: kaifu@subaru.naoj.org

1968年に宇宙空間で初めて多原子分子の電波スペクトルが発見されてから、ちょうど30年である。星間分子の電波分光観測はこの間、「ミリ波」という新しい観測手段とともに、恒星・惑星系形成から宇宙論を含む広範な分野に拡がり、観測天文学の主要な柱の一つに発展を遂げた。日本では早くから赤羽・森本両先生などによりミリ波観測への準備が進められ、また分子分光の先進的な伝統があった。幸い私はそうしたなかでミリ波星間分子分光の創始に立ち合い、その発展とともに歩みながら、なにがしかの寄与もなすことが出来た。今回日本学士院賞の栄に浴したのも、こうした先輩友人の方々の努力と膨大な共同作業のおかげである。改めて深く感謝したい。

今回の受賞に関して天文月報から寄稿を求められたのを機会に、私なりの「星間分子30年」を、星間分子・ミリ波天文学の歴史やわが国での動きを交えつつ振り返ってみたいと考えた。私的で不完全なものになったことを、あらかじめお詫びしておく。本稿を書くにあたっては、1998年2月に鹿児島大学で行われた『森本雅樹教授退官記念・6m望遠鏡シンポジウム』集録に納めた拙稿「6m電波望遠鏡と日本の宇宙電波」からその一部を転用した。この記事には日本の宇宙電波の初期に関する詳しい年代記や論文リストも載せたので、関心がおありの方は、併せてご参照下さればありがたい。

### 1. 宇宙電波分光学事はじめ

東京大学基礎科学科4年に在学中であった私が東京天文台電波天文部の門を叩いたのは、1965年である。基礎科学科の恩師・佐々木泰三先生（現東京大学名誉教授）が、大学院で宇宙電波に進んでみたいという私を、電波の高倉達夫教授に紹介しようとわざわざお連れ下さった。佐々木先生の研究室では、希ガスの紫外分光データを使って遷移グラフ（グロトリアン・チャート）を作る仕事を手伝わせていただいた。そんな経験が、それから3年後に星間分子の電波分光という新しい分野の研究に結びつくステップになるとは、もちろん思いもよらなかった。草深い天文台の構内、バラックのような木造の電波研究室が、印象的だった。

この頃東京天文台では赤羽・森本両先生が、何とか日本でも宇宙電波の観測を始めたいと、奮闘中だった。そんなところへ、私は大学院生として飛び込んだ。正直言ってあまりに何もないのに驚いたのだが、自分の手で新しい宇宙の一端に触れてみたいくて天文学に志した私には、それも新しい分野として魅力に思われた。未開拓の領域であるミリ波への進出を企てた両先生（以降は赤羽さん、森本さんと呼ばせていただく）の努力が実り、東洋レーヨン科学研究助成金800万円で6mミリ波望遠鏡の建設が開始されたのが、2年後の1967年である。

1968年末から翌年にかけて、カリフォルニア大学のタウンズ (Charls H. Townes)、ウェルチ (Jack Welch) のグループにより、アンモニアと水蒸気分

子の電波スペクトル（いずれも波長 1.3 cm 付近）の星間空間での発見が報告された。タウンズは、私が尊敬する天体物理学の巨人だ。レーザーの開発により 1964 年にノーベル物理学賞を受賞した分子分光学の開祖の一人であり、星間分子分光学の生みの親ともなった。その後赤外線干渉計の先駆けをなして今も活躍していることは、良く知られていよう。既に 1957 年、宇宙には様々な分子が存在する可能性があるとして、それらの電波による分光観測の展望をレビューしている。そして口径 6 m の小電波望遠鏡を作り、実際にアンモニア分子のスペクトルを銀河中心で見つけてしまったのである。アンモニア  $\text{NH}_3$  はレーザーでお馴染みの分子で、水素が圧倒的に多い宇宙空間での存在は、或る程度は予期できた。しかしさすがのタウンズも、続く水蒸気分子  $\text{H}_2\text{O}$  の発見は予想外だった。地球大気の弱い水蒸気バンドを通して発見された、強力なレーザー輝線である。すぐ続いてスナイダー (Lewis E. Snyder) とビュール (David Buhl) のペアが、NRAO の電波望遠鏡を用いてホルムアルデヒド  $\text{H}_2\text{CO}$  のスペクトル（波長 6 cm）を発見したことで、星間分子の展望は一気に広がった。重元素が 2 つもついた 4 原子分子、それも有機物である。私はビュールとスナイダーが発見の勢いに乗って書いた一般向けレポートを、大きな興味と共感をもって読んだ。星間分子は、宇宙生命の起源にまでつながるかもしれないという主張に共感した。

これら一連の発見は、ミリ波天文学の入口にいた私にとって、決定的衝撃だった。ミリ波の波長域には、様々な分子の回転スペクトルが無数に存在するはずだ。6 m ミリ波望遠鏡でこうした分子の電波を探索し観測することで、電波天文学に新しい分光観測が開けるのではないかと私は考えて、興奮した。可視光での分光観測の分野は、恒星を中心に天体物理学という広大な世界を開いた。だが当時電波では、中性水素原子の 21 cm 線と波長 18 cm の OH 分子スペクトル、そしていくつかの原子の再結合線が、分光観測のすべてだった。これ

では密度の低い限られた領域しか観測できない。いろいろな分子の電波が、とりわけ透過度の高いミリ波で観測できれば、観測できる現象は大きく広がる。また、背景強度が低いミリ波での分光観測は、星間物質など低温度の宇宙物質を輝線で観測できることを意味し、星の形成や銀河の構造などで全く新しい世界が開ける可能性がある。

私は、分子分光学の大家である霜田光一先生の研究室（東大理学部一号館にあった）の扉を叩きに行った。当時、D1 から助手になったばかりである。霜田先生も驚かれたであろう。しかし先生は私の話を詳しく聞かれるとすぐ、NBS の膨大な Molecular Spectral Line Table を貸して下さり、分子についていろいろとご教示下さった。私は森本さんの薦めにより東京天文台の談話会で、星間分子の発見とミリ波への展望を話した。これをさらに天文月報に書くように言われてまとめたのが、1969 年 9 月号の「星間分子スペクトルの検出と“宇宙電波分光学”」<sup>1)</sup> である。いま読み直すと、6 m ミリ波望遠鏡で HCN 分子（当時未検出）発見をねらうなどの観測計画とともに、星形成・惑星系形成といったキーワード、分子輝線による銀河構造の描出の可能性、そして 45 m ミリ波電波望遠鏡計画による宇宙電波分光学の飛躍的發展への期待が述べられている。ちょうどこの頃、日本でも大型宇宙電波望遠鏡の建設をということで、議論中だったのである。思い切った高精度による大型ミリ波望遠鏡の構想が、急速に育った。1969 年末に開かれた宇宙電波将来計画シンポジウムで、光栄にも冒頭レビューをやらせていただいたことも、私の大事な記憶だ<sup>2)</sup>。こうした当時の期待のすべてが実現し、それをはるかに越えた現在の発展を思うと、感慨もひとしおのものがある。

さて、ミリ波での観測から、新しい分子の発見や星間物質・星形成など宇宙分子分光の大きな世界が開けると考えた森本さんと私たちは、6 m ミリ波望遠鏡による星間分子の観測計画を練り、マルチチャンネル電波分光計の製作に着手するなど、



図1 三鷹に建設された6mミリ波望遠鏡。30年近く経った今も、鹿見島で健在だ。

未知数であったミリ波での星間分子観測に乗り出した。私も見よう見まねで、電波分光器作りに取り組んだ。11チャンネルの試作品（ひどいものだった）から、ともかくも実用になった30チャンネルのフィルタバンクへと進んだ。貧乏で、何から何まで手作りだった。この時期は、まことに思い出深い。赤羽・森本両リーダーに率いられたこの当時のメンバーには、宇宙電波の技術者の中核となった長根潔、宮澤敬輔両氏がいる。若手研究者では田原博人、海部、大学院生の平林久、近田義広、技術系の宮地竹史など。小さなグループだったが、自分たちの手で新しい世界に挑もうとする意気は、大いなるものがあつた。6mのパラボラ面をほとんど「手で」仕上げた三菱電機の技術者たち。電波分光器作りを機会に、今に至る長い信頼関係を築いた日本通信機。半田ごてを手に夜中まで装置作りに熱

中する作業台に、いつの間にか（もちろん森本さんの手で）配られるウイスキーのグラス。日本の宇宙電波と星間分子研究の土台は、こんな中で形成されていった。

しかしこの頃アメリカでは既に、星間分子観測の立ち上げが急速に進んでいた。アメリカ国立電波天文台（NRAO）は1965年頃から、直径11mという当時最大のミリ波望遠鏡をキット・ピークに建設していた。NRAOは1968年の発見後直ちに、カリフォルニア大学やベル研究所が開発したミリ波受信機をキット・ピークに持ち込み、1970年頃から続々とミリ波での星間分子の発見が報じられるようになる。この状況を私は、「アリゾナのゴールドラッシュ」と題してレビューしている（『天文月報』1971年10月号<sup>3)</sup>。とりわけ、COとHCNの発見は大きな出来事だった。どちらも強いスペクトル線で、暗黒星雲をトレースできることがわかったことから、初めて星間分子とダストとが明確に結びついたのである。

独立にHCN、CO分子の検出も視野に置いていた私達は悔しい思いをしたが、受信機等の技術的立ち後は如何ともし難かった。アイデアや努力だけではダメである。科学も、「やって見せて、ナンボ」の世界なのだ。技術、金、人員すべてで米国に大きく劣っていた三鷹の6mミリ波望遠鏡が本格的な星間分子スペクトル観測に入ったのは、1972年。パラH<sub>2</sub>CO分子およびOCS分子の新しい遷移を72GHzで検出したことで、ようやく「ミタカの6mミリ波望遠鏡」は、その存在を世界に示す事ができた。米国に次ぐ、ミリ波星間分子観測の2番乗りではあつた。とは言っても、天体追尾は半分人力で行い（これを私は「奴隷船」と名付けた）、30チャンネル電波分光計の16進出力を卓上計算機で10進数に直して方眼紙にプロットし、どうにか初めての「発見」に漕ぎつけるといった状況だった。しかし最初の成果が出たときには

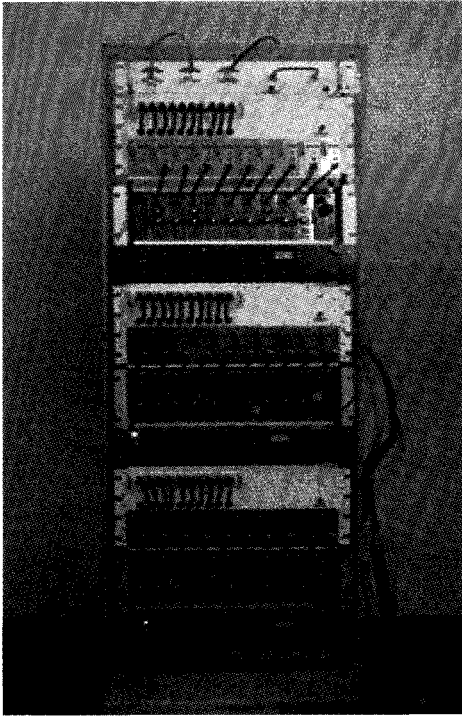


図2 オール手作り分光計，30チャンネルフィルタバンク，パラホルムアルデヒド，メチルアミンなどの発見に活躍した。

実に嬉しかったし，45 m ミリ波望遠鏡計画にも，大きな弾みがついた。

## 2. 星間分子観測の発展と

### 45 m ミリ波望遠鏡計画

1972年から74年にかけて，私は星間分子観測の中心となった NRAO の客員として，ヴァージニアのシャーロットツヴィルに滞在することになった。当時三菱電機の技術者と共同で進めていた45 m ミリ波望遠鏡の基本設計が一段落し<sup>4)</sup> (後述)，東京天文台から調査費の概算要求をする段階になったことも，背景にある。

NRAO には，あらかじめ特定の共同研究者がいたわけではなかった。気持ちとしては真剣勝負のつもりだった。当時星間分子観測をリードしていた

ビュール，スナイダー，ターナー (Barry Turner) らと議論したり一緒に観測したり，キットピークの活況と受信機技術をつぶさに見，また多くの友人を得た。実際6m望遠鏡で鍛えられたおかげで彼らと互角に観測ができ，「6 m 望遠鏡」での日々に，改めて感謝の念を抱いたものである。

NRAO ではいろいろな観測をしたが，何といても赤色巨星での SiO メーザーの発見が，心に残る仕事である。これはビュールとスナイダーが Ori-A で発見した未同定の強い二重輝線のスペクトルを見せられて，OH メーザーと似たプロファイルを持つことに気付いたことに始まる。二重線は未知の分子の微細構造線によるものだと言いつけるスナイダーを説得し，一緒に晩期型変光星を観測した結果，ほとんどすべての対象星で強いメーザー輝線を発見した<sup>5)</sup>。別グループの実験室での測定から，この線が SiO 分子の振動励起スペクトルであることも分かった。OH，H<sub>2</sub>O に次ぐ，3つめの星間分子メーザーである。この発見は帰国してから，SiO メーザー観測の必要に迫られて音響光学型電波分光計を開発するという大きなおまけまで，生み出してくれた。

私の NRAO 滞在中，日本では45 m ミリ波望遠鏡の設置場所の調査や10 m 5 素子干渉計の設計が進み，いよいよ1974年初めに，「調査費がついた！」との国際電話が入った。そこで2年目に入っていた NRAO 滞在を途中で打ち切り，古巣に戻ることにしたのである。ただし私の所属は1969年以來ずっと理学部天文教室で，私はその後も1978年まで教室の助手ポストをお借りしながら，三鷹の天文台宇宙電波部に入り浸っていた。ポストのない宇宙電波を何とかしてやろうという，当時の教室の先生方の暖かい計らいによるものだった。

この間三鷹の「6 m」では，富山大学の高木光司郎さん達が実験室で測ったメチルアミン分子を発見するなどさらなる観測の成功に力を得て，追尾や出力も自動化されていった。科研費で波長3ミリの受信機を搭載し，256チャンネルのフィルタバ

ンク分光器も整備して、「6 m」はようやく、電波望遠鏡らしくなった。

後述するように1970年代前半、星間分子の観測は急速に発展を遂げた。1976年に『科学』に書いたレビュー「宇宙電波分光学」<sup>6)</sup>を見直すと、発見されている星間分子は約20、HI雲から暗黒星雲、星形成領域、赤色巨星などの基本的な観測が勢ぞろいし、「宇宙探求のプロープとしての星間分子」の役割の大きさは、誰の目にも明かになっている。また星間化学においても、ハーブスト (E. Herbst) やワトソン (W. D. Watson) によるイオン分子反応の理論が提唱され、井口哲夫君がダスト上での分子生成を唱えるなど、その後の方向性が出そろった。

だがこの時点で、星間分子の観測にとって基本的なミリ波望遠鏡は、まだNRAOの11 mが最大だった。口径分解と感度不足で、まだ系外銀河の分子は観測できていなかった。45 mという大型ミリ波望遠鏡を世界に先駆けて建設できれば、日本は天文学において大きな寄与を成し得るであろう。この頃NRAOは口径65 mの大型ミリ波望遠鏡の設計を進めていたし、スウェーデンはオンサラ宇宙観測所に20 mのミリ波望遠鏡を作っていた。ドイツも、30 mミリ波望遠鏡計画を模索していた。帰国した私は森本さん達との「三菱通い」に再び加わり、45 m望遠鏡の更なる高精度化を追求した。既にホモロガス変形法のめどはついてはいたが、ミリ波でも波長の短い2~3 mm帯の観測にはまだ精度的に不足であった。そこで、レーザーを用いた45 m望遠鏡の鏡面測定法と鏡面自動調整システムの開発、鏡面支持構造の温度コントロール設計等を、私が中心になって進めた。一方では名古屋大学空電研究所(当時)田中グループの鰻目信三・石黒正人さんらが、それまでは波長1 cmまでと考えていた五素子干渉計を、ミリ波観測に使える高精度干渉計とするべく、設計や実験を進めた。しかし調査費は通常1年のところが2年目も調査費、3年目にはそれさえ危うい情勢となり、

森本さんや私は百方駆けずり回った。多くの方々の支持と協力のおかげで1978年からの建設が決まった時には、もちろん何とも言い様のない嬉しさだったけれども、ミリ波の人たちとそれをどう祝ったのかは、どういうわけか思い出せないのである。

### 3. 音響光学型電波分光計 (AOS) の開発

大型電波望遠鏡計画推進の一方、NRAO滞在中に赤色巨星で発見したSiOメーザの観測のためにどうしても高分散の分光計が欲しかった私は、1974年から「音響光学型電波分光計 (Acousto-Optical Radio Spectrometer = AOS)」の開発を始めた。きっかけは、太陽電波の甲斐啓造さんとの会話だった。結晶を伝わる超音波によるレーザー光の回折効果を応用したAOSのアイデアは、オーストラリアのランバート (L. E. Lambert) が1962年に発表し、コール (T. W. Cole) が試作した。コールと同じCSIROに客員として滞在していた甲斐さんが、それを太陽電波スペクトルの時間変化を測るダイナミック・スペクトルに応用した。私はその原理を星間分子のミリ波スペクトル観測に使い、当時始まった光ダイオードアレイで回折光を検出すれば、手っ取り早くて安いマルチチャンネル電波分光計が出来るのではと考えたのである。要するに動機は、金がなかったのだ。甲斐さんはリーダー不在となった野辺山太陽電波観測所を立て直すためオーストラリアから急遽帰国し、実に困難な時期を背負われた。悲願だった野辺山電波ヘリオグラフの建設を目前にした1991年、難病を得て亡くなられたのは、返すがえす残念でならない。

私達のAOS開発は、急作りの暗室(ベニア板で私が造った)でスタートした。古物の光学部品の錆を落とし、電電公社武蔵野通信研究所の内田直哉さんからお借りした二酸化テルル結晶と、256素子の光ダイオードリニアアレイ(これとレーザだけは買った)を使って作り上げた星間分子用音響

光学型電波分光器第一号は、256チャンネル・周波数分解能37KHzだった。この高い周波数分解能は、二酸化テルル結晶の特定方向に伝わる極めて遅い音波を応用したもので、波長4 mmで視線速度0.15 km/sに相当する。これはSiOメーザや暗黒星雲の鋭い分子スペクトル線を分解するのにぴったりだった。しかも、同期回路で1チャンネルずつ組み上げるフィルタバンク方式では大金かけてやっと手が届く（しかも調整が大変！）256チャンネルが、いともやすやすと組み上がったの

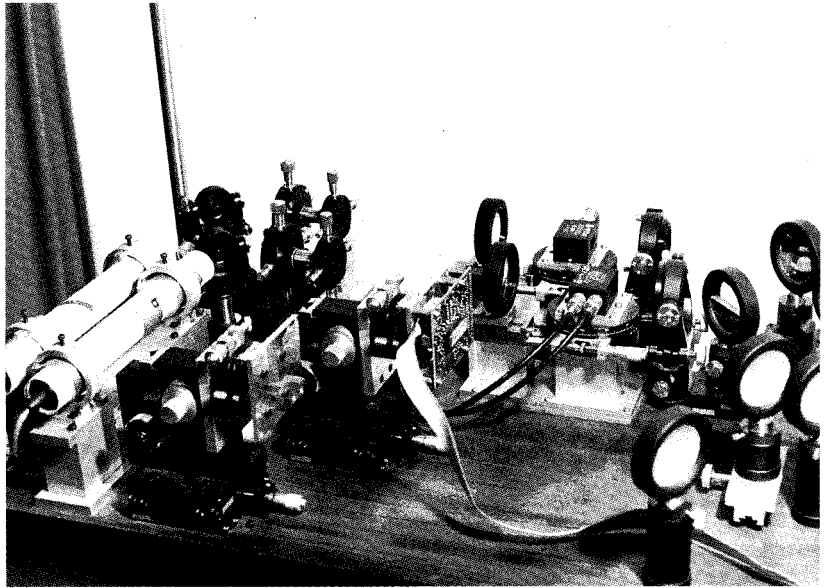


図3 野辺山のAOSのプロトタイプとして製作した、3,500チャンネルのコンパクトAOS。6 mミリ波望遠鏡による観測に用いられた。

である。総経費は数十万円だったと思う。これを光学定盤に置いたまま6 mミリ波望遠鏡に繋いで、充分実用に耐え、かつ極めて安定に大きなチャンネル数の実現が可能なることを確かめた。これが、星間分子分光観測に実用化された世界初のAOSである<sup>7)</sup>。最後のテスト段階では浮田信治君が大いに頑張り、彼の博士論文になったOriKLのSiOメーザ時間変動観測などで、AOSは抜群の性能を発揮した。

この間、星間分子のホープだった井口哲夫君が脊椎ガンのため30才の若さで亡くなるという、本当につらいことがあったのだけれども、6 m望遠鏡AOSは、45 m用の大型AOSへと発展する重要な基礎となった。従来のフィルタバンク型分光計では不可能な飛躍的多チャンネル化が可能との確信を持った私は、まずコンパクト化を追求した3,500チャンネルのAOSを作り、小さな6 m望遠鏡ながら世界一贅沢な分光観測を楽しんだ（図3）。45 m電波望遠鏡には、思い切って8,000チャンネルの高分散型と、8,000チャンネルの広帯域型のAOSの二

つを製作することにした。この仕事は主に宮地、近田両君と組んで進めた。野辺山の45 m望遠鏡観測棟に今度は本格的にしつらえた暗室の中で、大型定盤の上を這い回って組み立てたこと、いま韓国で活躍中の趙(Cho Se Hyon)さんや故鈴木博子さんと徹夜で調整したことなども、懐かしい思い出だ。私が素人細工で折ったタップの端は、今も野辺山AOSの光学定盤の中に何本か埋まっているはずだ。ともあれ野辺山のAOSは、着想の新しいさだけではなく、それまでの電波分光計のサイズを一桁以上超えたものであり、大きな反響を呼んだ。ある意味でその後の大量データ取得観測の先鞭をつけたと思っている<sup>8)</sup>。

野辺山の大型AOSの特徴を最大限活かすプロジェクトの一つとして始めた暗黒星雲の分子スペクトル探査は、全く新しい有機分子（特に直線炭素鎖分子）多数の発見につながり、暗黒星雲の化学進化の理解に新局面をもたらした。この実りあるプロジェクトはまた、予想以上の長期にわたる大仕事にもなった。そして、この観測が大きな発

展を遂げつつあったその時、野辺山の星間化学の中心として大活躍をしていた鈴木博子さんを、自動車事故で失った。これは、言葉であらわすことのできない打撃だった。だが川口建太郎さんが中心になって IRC + 10267 の分子探査を完成させたほか、最も困難だった暗黒星雲 TMC1 の探査観測も私がひきつぎ、最終段階での大石雅寿君たちの頑張りでようやく完結し、論文に仕上げつつある<sup>9), 10)</sup>。

野辺山の AOS は、星形成領域の 2 周波・多分子線同時マッピング観測などにも大いに活躍

し、効率的に使われた。また中井尚正君らがその性能をフルに活用して、活動銀河核に存在するブラックホールの初めての観測的確証という大きな発見をしたことも、嬉しいことだった。そうこうするうちに AOS は世界中のミリ波望遠鏡で使われるようになったが、野辺山の AOS はいまだチャンネル数で最大の電波分光計である。最近のデジタル技術の発達でコンパクト化した相関型分光計が、そろそろ AOS にとって替わってゆくだろう。

1970 年代のこの時期はまた、星間分子という新しい分野を開くために、非常に多くの協力関係を築いた時期でもある。霜田、森野、広田各先生をはじめ、高柳和夫、高木光司郎、斎藤修二、岡武、中川直哉、等々数多くの傑出した分子科学者の方々から支援と協力をいただいたことは、日本の星間分子研究のその後の発展にとって決定的であった。この緊密な協力は総合的で有機的な日本独自の星間分子研究のスタイルを生み出し、アメリカなどの研究者からも、よくうらやましがられた。その成果はさらに、理論量子化学や物性実験、隕石の研究者等との共同へと広がり、継続的な「星間分子ワークショップ」や重点領域研究などの展開を経て、今に続いている。

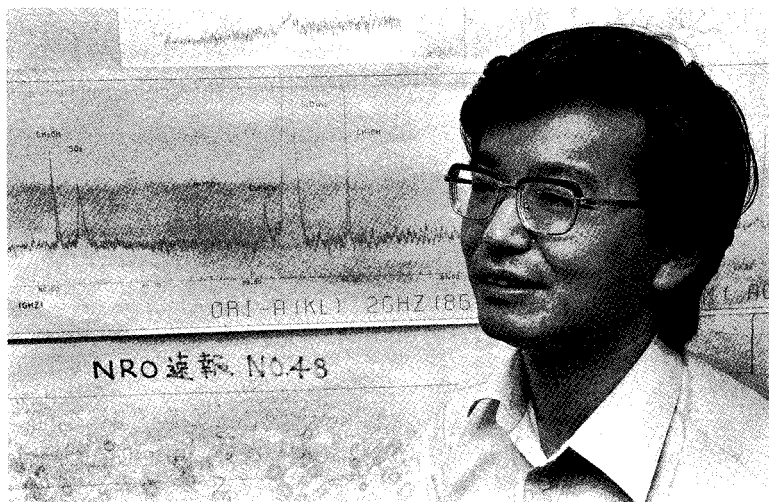


図4 45 m望遠鏡と大型 AOS による初期のスペクトル観測データの前に立つ著者。

#### 4. 野辺山宇宙電波観測所の実現と技術開発

1982 年に一応の完成を見た野辺山宇宙電波観測所は、現在もミリ波において世界をリードする観測成果を送り出している。「日本の実験科学の分野が初めてなした世界的貢献」と当時『NATURE』誌が書き、また古在由秀前会長がご自身の退官記念出版で思い出として語っておられるように、野辺山は日本の天文学がはじめて、先進的な観測装置を開発し第一線の観測データを生み出すことが出来ることを、実際をもって示した。現在進行形である野辺山についての解説に字数を費やす必要はないだろう。しかしその創設時の考え方など、私なりに重要と思われるいくつかの点について、まとめを述べておきたい。

まず、わずか数人のスタッフで建設をスタートした野辺山の大型電波望遠鏡計画が、苦闘の末にはあるがそれなりの成功を見た主な要因を、三つあげる。

その第一は、「ミリ波大口径の実現」を目指した積極性である。1970 年当時、ミリ波という短波

長観測に必要な高精度を大口径電波望遠鏡で実現する技術的見通しは、まだどこにもなかった。だが6 m ミリ波望遠鏡の建設を進める中で、大口径のミリ波望遠鏡も可能ではないかとの自信が、三鷹のミリ波グループの中で育った。ここで特筆すべきはやはり、森本さんが持ち込んだ「ホモログス変形法」である<sup>4)</sup>。理論的には NRAO のフォン・ヘルナー、実践的にはパークスの64 m 電波望遠鏡などで知られ、当時建設が始まっていたドイツ・MPIの100 m 電波望遠鏡（ボン近郊）にもその思想が採り入れられていた。しかしそれを徹底的に応用してミリ波用の高精度大型パラボラ鏡面を実現したのは、野辺山の45 m 望遠鏡が最初である。検討は塚田憲三さんを先頭とする三菱電機の技術陣との徹底した議論から始まり、プラスチック模型を用いての変形実験、当時まだ新しかったFEM（有限要素法）の計算などで、高精度大型鏡面の見通しが得られた。そのほかマスターコリメータと光ビーム結合による高い指向精度の確保、レーザーによる鏡面自動測定装置と鏡面遠隔調整システムの開発、ビーム伝送系による多数波同時・受信機遠隔切り替えなど、45 m 望遠鏡には高精度達成のために世界初の試みがさまざまに盛り込まれ、工夫と開発努力が注入された。主鏡面の温度制御、自動鏡面測定調整システムやマスターコリメータなど高精度の実現は、先に述べたAOSの開発と共に、私が主に受け持ったテーマである<sup>12)</sup>。三菱電機・測機舎の工場や筑波での測定（国土地理院のレーザー測長システムをお借りした）に何百回もあるいは何か月も通ったこと、また野辺山での建設の最終期、寝食を忘れての立ち上げは、忘れられない貴重な思い出だ。45 m 望遠鏡で達成した精度は、三菱電機のエンジニア達と一緒に「がんばり抜いてしぼり出した」精度だと、私は思っている。その後も引き続いて野辺山の若い人たちが改良の努力を重ねた45 m は、今も世界最大集光力のミリ波望遠鏡である。

空電研グループの粘り強い努力で干渉計計画を

ミリ波用の高精度設計とし、石黒さんがリーダーとして頑張って実現した野辺山五素子干渉計も、そうした積極的精神の結果である。オーエンスバレーやIRAMと競いつつ、星間分子スペクトルの高分解能観測を実現した。これがなかったら、1990年代のミリ波干渉計の時代に、日本は互して行くことが出来なかったのである。そして五素子干渉計（今は六素子、次いで45 mと結んだRAINBOWへと飛躍しようとしているが）はさらに、LMSAという大きな将来展望につながった。

二つめの要因はもちろん、これまで述べてきたように「星間分子」を目指した科学的見通しである。星間分子分光観測は、1970年代前半には既に、星間化学、星間物質、星形成、惑星系形成などミリ波天文学の大きな未来を約束していた。そうした新しい分野にまっすぐ切り込もうと言う45 m ミリ波望遠鏡計画の野心と魅力は、特に物理学分野をはじめ広い研究者の支持を得て、宇宙電波計画実現の大きな力となった。野辺山が苦闘しつつもそれを実現し期待にこたえてきたことは、既に見てきたとおりである。

最後に第三の要因は、技術開発の重視である。これについて、少し詳しく述べたい。

物理学や工学から興った電波天文学は、もともと実験物理の色彩を濃く持っていた。日本でも光学天文分野（当時の）とは異なり、電波天文分野は初めから手作り路線だった。私自身も物理分野から大学院に入って、これに全く違和感はない。電波の大学院生はみな、当然のように開発を受け持った。それが野辺山の建設において大いに発揮されたわけだが、野辺山宇宙電波観測所の開設後も、この路線は頑なに守られた。

しかし人員も経験も少ない我が国の状況では、研究と開発の両輪を進めることは実に難しかったと言わねばならない。論文が少ない、観測研究に専念すべしとの（もちろん好意も含めた）批判は、当時も今も多い。それも尤もではあるが、小人数で苦しくはあっても野辺山が技術開発や新しい芽



を育てる努力を何とか貫き通してきたことは、やはり日本の状況において正解だったと、私は思っている。技術もまた積み上げと継続であり、力を蓄えて初めて新たな発展が展望できるからだ。今の若い人には、何故そんな当然のことを言うのかと思われる向きも多いかもしれないが、かつてはそれが常識ではなかった（そして今も若干残っている）のも、事実である。45 m ミリ波望遠鏡自体、「できっこない」などの内外の批判にさらされながら、多くの新しい技術開発を盛り込んで生まれたものだった。ミリ波干渉計もこれがなかったら、LMSA・世界アレイという大きな展望を今日本の天文学は持ち得ていなかった。「VSOP= はるか」につながった森本、平林、井上ら VLBI グループのねばりも、然りである。稲谷が創設したミリ波受信機の開発、近田らの FX 相関器、など多くの技術が野辺山で育ち、未来の観測に展望を開いてきた。日本の天文学はこれらの上に、新たなステップを進めて行くことができる。

天文学は本来優れて実験科学であるというのが、私にとって若い頃から変わらない信念である。現在私は、日本の天文学が技術開発の体制において確実に大きく一步を進め得たと感じている。若い人たちが装置作りに取り組むのは、今やどの分野でも当たり前になった。大学には、観測装置開発を進めるグループがいくつもでき、三鷹の開発実験センターは、大きな装置の開発や技術開発の共同利用の拠点となっている。1988年の国立天文台発足後、初期の研究交流委員会で私が果たした主な仕事は（発足時の各種共同利用の立上げは別として）、「共同開発研究」の提案・実施だった。これは大学での実験開発の推進に、国立天文台が多少なりともお役にたてる基盤になったと思う。ついで野辺山からすばるプロジェクトに移った1990年に最初にしたことの一つは、小林行泰君と一緒に世界の主な光学天文台の工場や技術開発体制を見て歩くことだった。すばるプロジェクトをスタートさせた小平桂一さんたちの先見の明で、すばる

の概算要求には「開発センター」の構想が盛り込まれていた。これを共同利用が可能な天文技術開発の拠点にしようというのが、私のねらいだった。天文開発実験センター長になった小林君や多くの若手のめざましい活躍で、すばるに関してはそれがほぼ達成された。1996年の国立天文台第三者評価において、UKIRTなどエジンバラ王立天文台の黄金期を築いたマルコム・ロンゲア (M. Longair) 教授ら評価委員が開発実験センターを絶賛されたのは、かつてエジンバラの開発体制を見て大きな刺激を受けた私にとっても、まことに嬉しい限りだった。いま開発実験センターでは、スペースや LMSA など新しい技術への発展も展望されている。

## 5. 星間分子観測のこれまで・これから

星間分子のミリ波分光の発展は、1960年代には思いもよらなかった新しい宇宙の観測手段が登場し、20年余で宇宙観測の主要な手段の一つにまで成長するという、天文学において歴史的な出来事の一つだった。電波、ミリ波、赤外線、X線と並べて見ると、ミリ波は「星間分子」という宇宙の新しい物質階層に結びついたところが特徴だ。そういう意味では、ダストと結びついた赤外線とやや似ている。だが、何と言っても情報量の豊富な線スペクトル（分光学！）であること、しかも技術的に波として取り扱えることから極めて高分散の分光が出来たことが、星間分子観測の大きな特徴だった。大学院生時代からこれにつぶさに立ち会ってこられた私は、まことに幸せ者だと思う。

野辺山宇宙電波観測所が活動を始めた1982年以来十数年のうちにも、星間分子の観測は目を見張るような拡がりを見た。星間分子自体、その数は100種類を超えた。低温・希薄な条件でのイオン分子反応を主体とするという宇宙分子生成の理解の進展と共に、赤外線によるダストの観測ともつながりが生まれた。スネル (R. Snell) らが発見

した双極分子流や、私たちが L1551 の原始星ガス円盤からはじまっていくつかの寄与をした原始星・原始惑星系円盤等新しい現象が、次々と姿を現した。それらを組み込んだ星生成プロセスを核として、銀河系内の物質進化の大きな流れが、見え始めてきた。感度の向上に伴い、星間物質や晩期型星のみならず、T-タウリ型星、銀河全域やさらに遠方の活動銀河核、クエーサーまで、広く詳しく観測されるようになった。それは全体として、宇宙の進化史において星形成がいかに重要な役割をも果たしてきたかを、はっきりと認識させるものでもある。

この発展の過程では、ミリ波と並行して発展した赤外線天文学との密な関係も、大きく作用している。この二つの分野は互いに互いを必要としながら星形成という現象をアタックしてきた。野辺山の完成間もない頃から私と佐藤修二さんが中心になって始めたミリ波・赤外線の日英共同研究長期プロジェクトは、そうした面からも大変時宜を得たものだったと思う。野辺山の研究はこれによって大きく拡がりを増し、赤外線の若手も多く育った。この共同はイギリスでも高い評価を受けたが、私自身にとっても、すばるプロジェクトに移るといふ意外な展開の基盤となったのである。日英共同研究を通じての UKIRT などマウナケアでの観測や赤外線との交流がなかったら、このジャンプは私にとっても難しかったに違いない。

そうしたなかで私が自分自身のテーマとして意識してきたのは、星間物質・恒星・惑星系をつなぎ、やがては生命に至る、「宇宙物質の進化」である。前述したように、惑星系の形成から生命の発生までを追うことは、私にとって当初からの大きな夢だった。一方、惑星系の材料としての星間物質そのものの理解を、もっと深く進めていくべきであろう。おうし座暗黒星雲の分子スペクトル探査や原始星ガス円盤、関連する様々な観測研究を通じて、「暗黒星雲の化学進化と物理進化を結びつけて理解すること」は常に、私や共同研究者

であった鈴木博子さん、斎藤修二さんの念頭にあった。その先に、ダスト、彗星、隕石、惑星がある。星間分子や星形成と、ダスト、太陽系形成、隕石、等を結んで総合的な研究領域の発展を目指した科研費重点領域研究「星間物質とその進化」(平成3～6年度)は、その延長上にあった。もちろん「すばる」は、こうした面でもすばらしい力を発揮する装置であると期待している。

一方この間、星間分子観測の技術面の発展で特筆すべきは、干渉計の高度化と、短波長化とりわけサブミリ波への進出である。野辺山、オーエンスバレー、IRAM などのミリ波干渉計は、野辺山 45 m や IRAM30 m 等の大型単一開口ミリ波望遠鏡よりも一桁高い、1 秒角の高分解能を実現しつつある。一方 CSO10 m, JCMT15 m など乾燥高地に建設されたサブミリ波望遠鏡は、高励起分子線やダストの観測により、星形成領域の理解を進めた。そしてこれらの発展は、ミリ波検出器、相関器など受信機技術の進歩と制御計算能力の拡大に支えられてきた。そうした世界的な発展の中にあつて、野辺山宇宙電波観測所が常に最先端に互して優れた成果を挙げてきたことを、率直に喜びたい。数々の観測的成果もさることながら、先に述べたように常に装置面での開発を進めてきたことも、欠かせない側面だ。不十分な面はもちろん多くあつたと思う。だが完成から 10 年経ってもわずか 30 数人(事務官も入れてである!)というわずかな人員と研究者層の全体的薄さという困難ななかで、日本の天文学のレベルアップと将来展望に大きな貢献をしてきた。このことを野辺山は、誇りとして良いだろう。私自身も、誇りに思っている。

日本はサブミリ波では、気象条件もあつて立ち後れていた。山本 智さんの「富士山望遠鏡」という卓抜なアイデアと努力によって日本でのサブミリ波観測が実現したことも、すばらしい。稲谷順司さんは宇宙開発事業団に飛び込み、スペースからのサブミリ波に手を届かせようとしている。すばるの次期プロジェクトとしての LMSA は、そうし

た多くの技術的・研究的な到達の上に、いよいよ実現に向けて動き始めた。アメリカ・ヨーロッパとがっぷり組んだ三極対等の「ワールド・アレイ」構想は、「すばる」のレベルをもう一つ超えたハイレベルの国際共同に、日本の天文学が進もうとするものである。星間分子スペクトルやダストを、100分の1秒角の分解能（すばるの10倍高い！）と、1万平方メートル相当の高感度で観測する。観測波長でも、地上で可能なサブミリの極限まで手を伸ばす。地上では究極の星間分子観測装置とも言える。赤羽さんなら、「いやえらいことになってきたもんだ」と言われるだろう。森本さんなら、「おれの出番はもっとデッカイ話だよ」だろうなあ。

星間分子の「発見ラッシュ」から、30年。次の30年を、見通してゆきたいものである。

### おわりに。

日本の星間分子研究の発展は、めざましかった。しかし、不運でもあった。本文で述べた井口哲夫君、鈴木博子さんの若い死は、惜しんでも悼んでもあまりあるものである。この二人があったら、日本の星間分子研究は...というのは、もちろん繰り言だ。繰り言だが、私はここでそれを書かずに筆を置くことは出来ない。最近では、独自の実験的ダスト研究で着々と実績を上げていた坂田 朗さんの死がある。これも無念というほかはない。

このとりとめない文を閉じるにあたり、これまでお世話になった多くの方々への感謝とともに、星間分子研究でいただいた学士院受賞のお礼を、井口哲夫君と鈴木博子さんとに心から捧げたい。

### 参考文献

- 1) 海部宣男, 1969, 星間分子スペクトル線の検出と“宇宙電波分光学”, 『天文月報』62巻第9号
- 2) 海部宣男, 1969, 宇宙電波研究の現状と方向, 『宇宙電波将来計画総合シンポジウム集録』, p.1
- 3) 海部宣男, 1971, 宇宙電波分光学の発展, 『天文月報』64巻第10号
- 4) 赤羽賢司, 森本雅樹, 海部宣男, 1970, 45m大型宇宙電波望遠鏡計画, 『科学』Vol.40, No.12
- 5) Kaifu N., Buhl D., Snyder L.E., 1975, A New Type of Maser Source in the Millimeter Wavelength Region, *ApJ* 195, 359
- 6) 海部宣男, 1976, 宇宙電波分光学, 『科学』Vol.46, No. 11
- 7) Kaifu N., Ukita N., Chikada Y., Miyaji T., 1977, *PASJ* 29, 429
- 8) Kaifu N., Chikada Y., 1984, Radiospectrometers for MM- and Submm - Wave Astronomy, *URUSI Symposium "MM- and Submm- Astronomy"* p.167
- 9) Kawaguchi K., et al., 1995, A Spectral-Line Survey Observation of IRC+10216 between 28 and 50 GHz, *PASJ* 47, 853
- 10) Kaifu N., et al., A 8.8-50 GHz Complete Spectral Line Survey toward Dark Cloud TMC-1, in preparation
- 11) 1995, 重点領域研究報告書「星間物質とその進化」(研究代表者: 海部宣男)
- 12) Kaifu N., 1984, Nobeyama 45-m Telescope, *URSI Symposium "MM- and Submm- Astronomy"*, p. 5