

水素再給合線については H 116 α が中心周波数 4159.171 MHz であり、現在のダウンコンバーターを少し改良する程度で観測可能となるので10チャンネルの受信機で試験観測の予定が鹿島支所のグループで進められている。また同鹿島グループで 30 m ϕ の空き時間を利用して銀河の Anti-Center 方向のマッピングが予定されている。さらに前に述べた銀河面バックグラウンド成分の研究で非熱的成分の存在することが判ったが、今度はその偏波の観測をしてはどうかという話もある。さらにこれは名大空電研よりの提案であるが、4 GHz 帯での、太陽近傍における太陽風によるシンチレーションを準星を使って観測しようという話がある。さらに、もしたとえば十王町にある KDD 22 m ϕ のアンテナなどとの同時観測ができれば、その相関をとって太陽風についてのいろいろな情報が得られる。鹿島と十王町とをびこして鹿島、オーストラリアとの間で日豪 VLB を実行しようという遠大な提案がある。これは日本では主として天文台の森本氏が話を進めているのであるが、その特徴としては南北の基線を持っているということ、したがって一つの電波源

が長時間同時に見えるという利点がある。この VLB 計画は、その 1/1000" の分解能に物を言わせて準星の一層詳しい構造を調べるという外に地球上の位置測定、特に大陸の移動の測定等にも有用であり地球物理学者にも興味ある問題を与えるものである。

今まで述べてきたことによって、鹿島のアンテナと設備が何か電波天文のために建設されたと誤解される人があるかも知れない。鹿島の本来の目的は宇宙通信の研究であって、我々はそのあい間に、電波天文のためにアンテナおよび受信設備を貸していただいているのである。このような困難な状況の中において今日まで、鹿島を、日本の宇宙電波をこれまで育て発達させてこられた先人諸氏の電波天文に関する情熱と努力とに頭を下げると同時に、このように一応の地盤の上になつて余分なことに心をつかうことなく電波天文にいそしめる我々を非常に幸福に思い、かつ先人達の成果を大いに利用しさらに一層よい観測をすることが先人達への感謝のしるしであることを心に念じつつ筆を置くものである。

ミリ波望遠鏡

赤羽 賢 司*

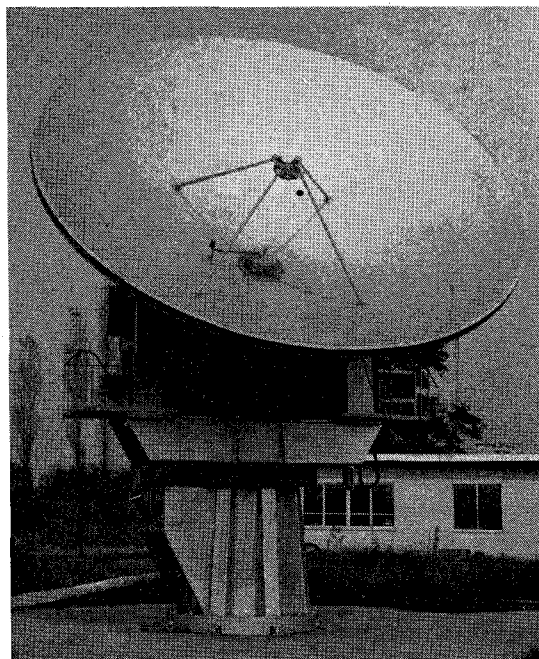
1. はじめに

宇宙電波望遠鏡の将来計画は、われわれが鹿島の30メートル鏡によって H II 領域（銀河系の電離領域）の観測を始めた頃からその切実性を増していた。そして我々が最も身近に感じていたことは、将来本格的な観測を行なうためには、いろいろな意味で、いわゆる精度の高い電波望遠鏡の構造や、操作について多くの経験を持たなければならないということであった。そして口径はたとえ3メートルでもよいから、電波望遠鏡としての多くの基本的な問題に身をもって当らなければならないという気持が、今度東京天文台に完成した6メートル・ミリ波望遠鏡となって現われている。6メートル・ミリ波望遠鏡は完成したばかりで、まだ試験観測の段階であるが、ここではこの望遠鏡の目ざしているミリ波領域での天文学的な事情や、望遠鏡の性能等について簡単に述べてみよう。

2. われわれが求めたミリ波の領域

ミリ波の領域は、今までのいわゆる電波の短波長側への延長領域であるが、地球大気の吸収具合がよくわから

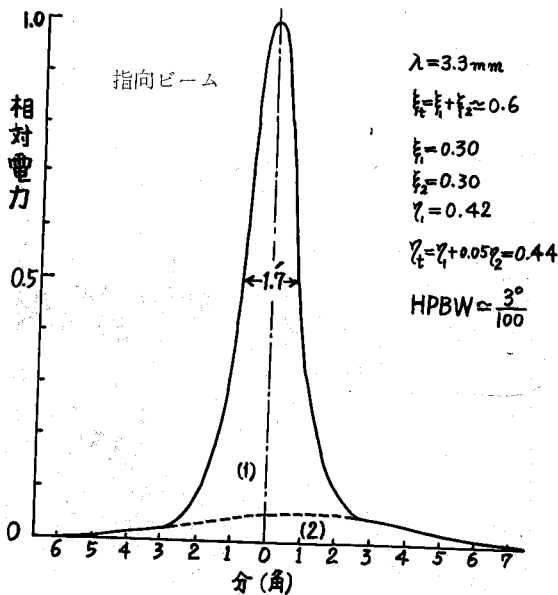
ないこと、受信機を作ることが大変むずかしいこと、またミリ波を精度よく反射する反射鏡が作りにくいこと等



第1図 東京天文台6メートル・ミリ波望遠鏡

* 東京天文台
Kenji Akabane: mm-wave Telescope

のために、数年前まではいわゆる天文学の「眼」としてはほとんどかえりみられなかった。また天文学的な興味も、研究の可能性が未知であるだけに迫力にとほしいものであった。1965年に東京天文台の宇宙電波のグループは波長8ミリメートルで月面電波の観測に手をつけた。これは後に述べるようなミリ波での分子分光といったような大がかりな目的を持つものでなく、当時研究の途上にあつた、電波領域でのカセグレンシステムをよく調べたいというねらいと、未知の領域で天体を見たいというかなり強いあこがれとがあつただけである。当時の（今でも大体そうであるが）宇宙電波研究のグループは、より力強いものがないかわりに、何でもやって見たいものはやろうと努力できる身軽さがあつた。こうしてわれわれは直径30センチメートルのカセグレンアンテナ（電波望遠鏡としておそらく世界で最小）や、1.1メートルパラボラアンテナ等で月や太陽を観測しながら、大した論文にはならなかつたけれども、実に多くのことを学んだ。そして次のステップとして、直径3メートルから5メートル程度のものを作つて見たいという冒険心を押さえることができないまでになつていた。1967年になつて、幸いにもこれが東レ科学技術振興会に認められ、ようやく東京天文台に6メートル・ミリ波望遠鏡ができ上がることになつた。われわれがこの望遠鏡の建設にとりかかる頃は、主として、惑星、H II コンパクト領域、あるいは低温高密度ガス等を観測の目標としていた。線スペクトルについてはむしろ次の段階に考えていた。しかし、その頃有名なタウンズ達のアンモニア線スペクトル（波長13mm）の発見があり、それ以後ミリ波の領域



第2図 波長3.3ミリメートルにおける指向パターン



第3図 望遠鏡トラッキング用計算機

は多くの分子スペクトルの観測で急に賑やかになって来た。そしてわれわれの観測計画も低雑音受信機による連続波観測および分子スペクトル観測という2本立てとなり、しかもこれらを並行して急ピッチで進めなければならぬという状況に追込まれてしまった。

3. 6メートル・ミリ波望遠鏡

ミリ波での観測装置は、原理も外観もほとんど従来の電波望遠鏡と同様である。表紙の写真あるいは第1図でもわかるように、金属のおわんが回転架台の上に乗っている。ただ反射鏡面の精度や、支持回転装置、また検波・増幅装置等に高度の性能が要求される。

ミリ波では焦点の付近の“できるだけ小さな”部分に反射エネルギーが集まってくれないと困る。この要求が、光路位相差の立場からいえば、光学望遠鏡より一層きびしいことは、焦点に集まった全エネルギーを電気振動の形で導かねばならないからである。この要求は、許される反射面の誤差が波長のおよそ20分の1以下であれば満たされる。つまり反射面はその精度の20倍程度の波長まで使用できる。それ以上短かい波長になると、電波のエネルギーが焦点の付近で大きくちらばってしまうのである。たとえば波長2ミリメートルまで使いたいときには、鏡面にゆるさされる誤差は0.1ミリメートルとなり、この精度を保ちながら、どの位大きな反射鏡を作れるかということが、ミリ波望遠鏡としての一つの限界である。また望遠鏡の回転機構の精度が、鏡面の精度に比例

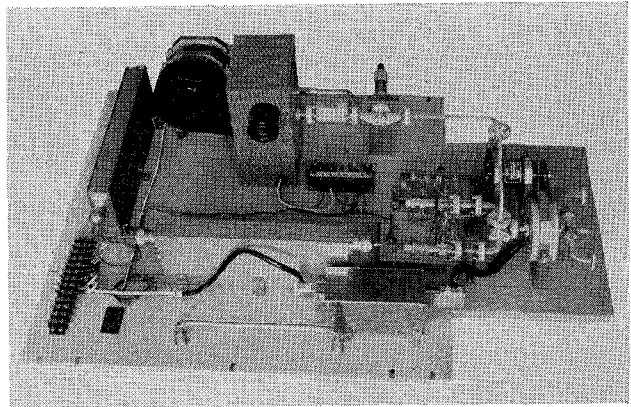
して要求されてくるので、支え方とか、回転の精度とかからもやはり一つの限界があらわれる。現在のところ、ミリ波で使えるものは大体口径12~13メートルが限界とされている。

受信機も、焦点の付近に置く特殊な半導体検波器を除いては、従来の電波天文用受信機とまったく同様である。最近宇宙通信技術の進歩や、ミリ波での通信技術の進歩によって高性能の半導体検波器や、増幅器が開発されるようになった。これらの技術の進歩は、ミリ波天文での観測的可能性の基礎となっているし、ミリ波天文での高度の要求は、これらの技術の進歩をいちじるしく刺激している。

6メートル・ミリ波望遠鏡は、このような条件のもとで、できるだけ注意深く、設計、工作、組立て、調整が行なわれた。設計の初めより月による試験観測まで、ほぼ3ケ年かかっている。

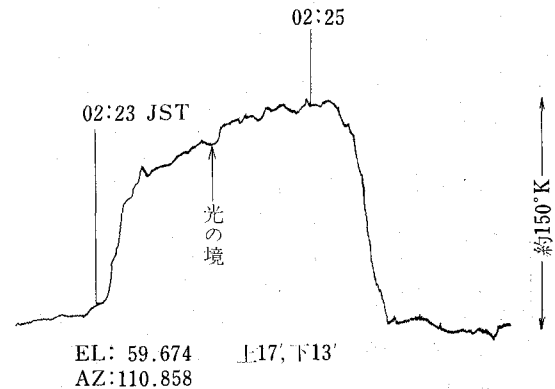
鏡面は、厚さ10ミリメートルの純アルミニウム板を溶接して大体の形を作り、これを大きな旋盤で加工し、さらに現地で最終的な組立て後に鏡面をダイヤルゲージで測りながら手仕上げをする、という手のこんだ方法となった。反射面は、鏡面全体の反射能率の向上をはかって修正パラボロイド面を採用したが、この理想面からの最終的な鏡面誤差は、rmsで0.1ミリメートルにおさまった。もちろんこれは気温や日照の影響を強く受けるが、夜間 $-10^{\circ}\text{C}\sim+15^{\circ}\text{C}$ では大体上記の精度に入っているようである。鏡面は大地からの輻射のもれこみ電波を極端におさえるために、焦点面切断という電波でも最も深い($f/D=0.25$)ものを設計した。これは収差の問題を併わせ考えて、今後の検討が必要であろう。副反射鏡は直径36センチメートルであるが、この大きさや、主反射鏡の深さ等が、周囲の温度変化に対して、望遠鏡全体が強いか弱いか大きな要因となっていることが、試験観測の結果から次第にわかって来た。第2図は波長3.3ミリメートルにおける6メートル鏡の指向ボタンである。これは夏季の夜間($\sim 25^{\circ}\text{C}$)に月の周縁を利用して(第5図参照)測定されたものであり、裾のかなりの部分がべったりと広がっている第2図は光学望遠鏡でいう星像の形に相当するものであるが、その鋭さを悪くしている多くの原因のうち第2図の場合は、(2)とかいてある底部のひろがり最も重大である。これは鏡面のゆるやかな変形によっておこるものと思われ、単なる副反射鏡のピント合せぐらいでは除去できそうもない。(2)の部分については、夜間の周囲温度との関係を測定中である。第1図は6メートル・ミリ波望遠鏡の全景を示す。

第2図での指向ボタンの鋭さはおよそ2'の程度であるが、一般に電波望遠鏡では像というか、フィールドと



第4図 波長3.3ミリメートル受信機

いうものが簡単には作れないので、その分解能を生かすためには、分解能(指向ボタン)の10分の1程度以下の精度でお皿を回転させなければならない。そのために、(i) いろいろに傾くお皿にむりがかからないように支えること、(ii) 回転架台がたわまないこと、(iii) 回転が滑かでギヤ系にあそびがないこと、(iv) 回転角度の読み出しが充分信頼できること、(v) 非常にゆっくり、またかなり速く駆動できること等が設計の要点となった。そのために経緯儀式架台とし、その角度的な精度の規準を一応 $3''\sim 4''(1''/1000)$ に定めた。このために、ベアリングの選定や、ギヤの測定等に長い時間を必要とした。経緯儀式にしたのは将来日本にできる大型電波望遠鏡が当然経緯儀式であることを想定して、そのプログラムトラッキングの技術を実地に習得するいみをもっている。第1図を見よう。一見してわかるように水平軸を支える腕(フォーク)を思いきって丈夫にしてある。水平軸の終段ギヤの径をできるだけ大きくして、しかも長い軸がねじれないために2メートル立方の丈夫な箱全体を水平軸とした。そしてギヤをその箱の側面にはりつけるようにした。垂直軸については、重みも横ずれも同時に支えるシ

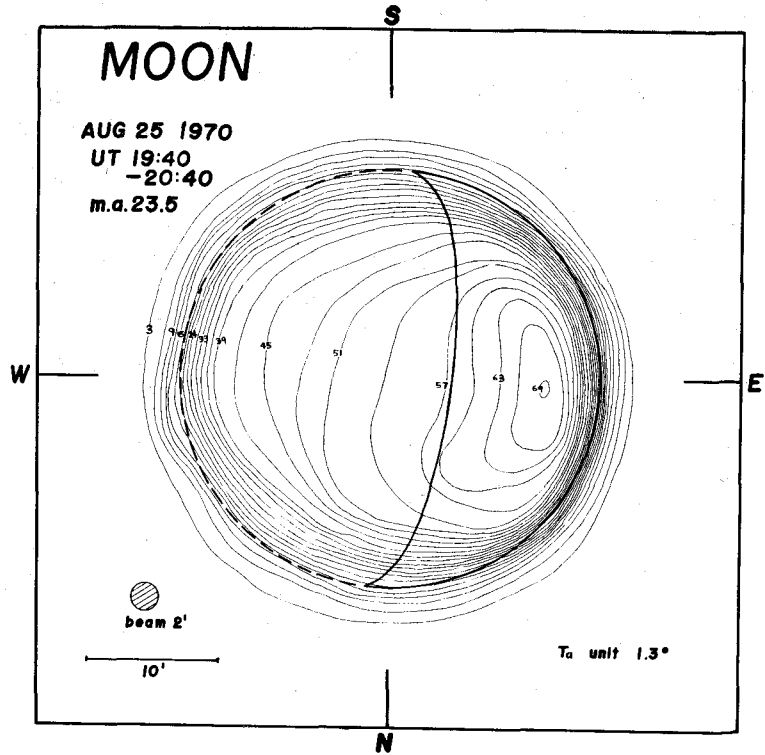


第5図 月のスキャン曲線(波長3.3ミリメートル)

シングルコンバインド・ベアリング（直径1.4メートル）を使用した。これは重みをなるべく広い部分で分散して支える方が、駆動摩擦は大きいですが、精度とか、ねじれ、たわみにむりが無いという結論から出発した。またこのような支え方は垂直軸の回転の中心に場所的な余裕ができて、太い電線コードを通したり、角度を読む高精度のサークルを取付けたりすることができる。大体において回転架台としては、重量約15トンの“数秒よみ”経緯儀が目標であり、現在までの測定では、大体目標値に到達している。

このようにして経緯儀式を選んだのは、当然望遠鏡のプログラムトラッキングを予定しているわけであり、お皿や架台の設計と同時にその計画を立てたが、実際には大分おくれて、現在望遠鏡の駆動部分にトラッキング装置を取付け中である。第3図はそのトラッキング装置の計算機の部分である。オキタック4300というミニコンピュータをオンラインに使用して、望遠鏡の追尾トラッキング、天球の走査トラッキング等の複雑なソフトウェアの準備が現在進行中である。またこのトラッキング装置は時分割に使用されて、観測のデータ処理にもかなり使用できる予定である。

受信機に関しては全面的に電気通信研究所の御指導によった。同所で開発されたGaAsショットキーバリア検波器は特にミリ波のために設計され、雑音特性からいって、現在われわれが使用できる世界最高のものである。われわれは6メートル計画の当初から、同所の好意的な協力を頂いてきている。そして、地球大気吸収バンドや、星間の分子スペクトル線の見通し等を考えて、波長3ミリ、4ミリ、12ミリの3波長帯の受信機を常備するように計画を進めた。試験観測の段階では、まず鏡面のテスト、また天体との接触等の意味で波長3ミリの連続波受信機をマウントしてある。第4図は3ミリ帯受信機変調、検波、増幅の各部分である。これがお皿の背面の受信機室に取付けられている。変調機（ディック式）には、われわれ独特の低損失スイッチ等かなり意欲的なものが試みられているが、望遠鏡全体としての低雑音化には、われわれの予想の甘かった多くの問題が、試験観



第6図 波長3.3ミリメートルでの月のマップ

測の段階でかなりうきぼりにされてきている。

一方89 GHz (1ギガヘルツ=10⁹ Hz)(HCN), 73 GHz (H₂CO), 22 GHz(H₂O)等の分子スペクトル受信機の準備も精力的に進められている。これらについては、システムの低雑音化の他に、受信機の周波数分解能向上のために、高精度の比較発振器が必要であり、これも電気通信研究所の御協力のもとに何とか見通しがついて来ている。

第5図は波長3.3ミリメートルにおける月の観測例である。月の赤道の近くを赤経方向にスキャンしたものである。月の三日月でない部分からも強い電波放射があることがわかる。このようにしてスキャンを何回も行なって、月面の電波強度をマップにしたものが第6図である。図中の三日月状の実線は、観測時における月の位相を示す。

4. ミリ波での観測的興味

第7図をみよう。横軸は電波の周波数、縦軸は電波星の電波の強さである。従来の電波の領域では、電波星の強さは大体 $\nu^{-0.7}$ (ν : 周波数)のように ν と共に弱くなっていった。このまま ν と共にいつまでも弱くなっていけばたいした問題もおきなかったのであるが、最近になって、さらに高い周波数では第7図のように電波の強さが増加しているものがあり、しかもミリ波の領域では強さが数ヶ月の程度でかなり変わっているものがみつかって、大

問題になったのである。

ミリ波の領域で電波が強いということは、電波星の中に特別に高エネルギーの電子が存在することであり、したがって、電波星の活動度とか、あるいは“若さ”とかいったものをあらわしていることになる。これは電波星の一生を調べるのにきわめて重要な手がかりとなる。現在のところ第7図のような傾向がはっきりわかる電波星の数は、それほど多くはない(強い準星など)が、なんとかしてこのような種類の電波星を数多く探し、電波星の実態を少しでもよくみきわめようとする努力がミリ波天文の大きな部分である。

次にミリ波で大切なものは天体の分子スペクトルである。いままでの電波の領域で知られた有名なスペクトル線は、中性水素(1420 MHz)と OH 分子スペクトル線(1667 MHz)とであった。中性水素線はわれわれの銀河系の全ぼうを見せてくれたし、OH 分子スペクトルは若い星のまわりにおこる、特殊なメーザー機構のようなものをわれわれ人類に知らせてきた。

一般に電波の領域では線スペクトルが発生しにくい。それは多くの原子の持ち得るエネルギーレベルの差が大きくて、光の振動数のものは出しやすいが、電波のような低い振動数のものは出しにくい。ただ水素原子だけが電波の領域に線スペクトルを出している。ところが、一方分子になると、その低いエネルギー状態では、それぞれのエネルギーレベル差によっては、ちょうどミリ波のあたりに多くの線スペクトル放射を行なうようになってくる。これは、理論的にも、また実験的にもすでに確かめられていることである。

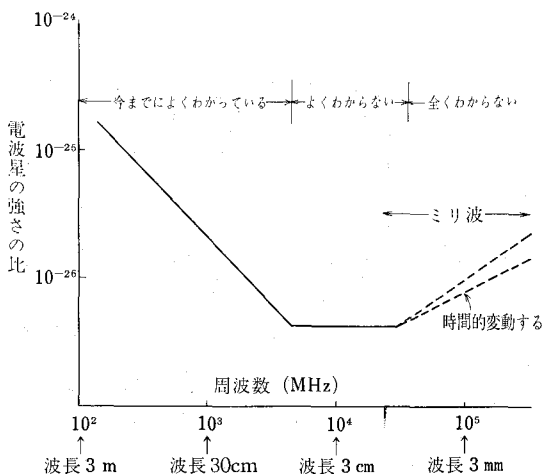
宇宙では水素原子が物質の大部分を占め、その他の元素はごくわずかである。しかし、これらのわずかな元素

のどれが水素と結びついて、また、どのような状態で存在しているかということ、宇宙の進化というような大きな話ではなくても、星と星との間の空間がどのようになっているかということ調べるだけでも、きわめて大きな課題となってくる。つまり、もし実際の観測が可能ならば、どうしても調べてみたくなるものなのである。また無理をしてでも観測を可能にしたいのが天文学者の自然の姿であろう。

この他にも、ミリ波の領域では、たとえば星間にあるかも知れない高密度ガスのように、いままでに人間が捕えたことがない天体を、少なくとも探索し得るというような大きな楽しみを持たせてくれる。要するに、光や、波長の長い電波では、見えるものは大体見つかった(特別に大がかりな装置を使わない限り)感じの宇宙の姿に対して、ミリ波の領域での観測は、いままでに全く知らなかったような新しい事実を見出して行く可能性が高く、すでにそれはアメリカなどで出はじめてるのである。第1表にミリ波領域での主な分子スペクトルを示す。

第1表 代表的な分子スペクトル (1 GHz=10⁹Hz)

分子	周波数 (GHz)	分子	周波数 (GHz)
H ₂ O	22.2352	CO	115.2706
NH ₃	23.6945	H ₂ CO	140.8393
	23.7226	NO	150.1763
	23.8701	H ₂ CO	150.4982
	24.1394	H ₂ S	167.9106
H ₂ CO	72.8381		168.3226
HCN	88.6301		168.7625
	88.6315		
	88.6336		



第7図 電波星の周波数と強さの関係 (連続スペクトル)

5. む す び

以上に6メートル望遠鏡の解説や、最近のミリ波での観測的興味等を述べてきたが、われわれに6メートル・ミリ波望遠鏡の建設を踏み切らせて下さった東レ科学技術振興会ははじめ、多くの方々に厚く感謝申し上げなければならない。われわれが鹿島で電波研究所の御好意によってH II領域の観測を始めてからすでに5年を経過している。鹿島での観測は益々発展の途上であり、最近仲間が多くなってきたことが、何にもまして心強い。今回は東京天文台に6メートルが完成し、われわれがこの6メートルから果して何を学びとるかは、まだ多くの未知数を含んでいるが、われわれのこうしたたゆまない努力が、独創性豊かな45メートル宇宙電波望遠鏡建設に向って一つに結集されて行くことがわれわれの念願である。