

大型宇宙電波望遠鏡

田 中 春 夫*

1. はじめに

待ちに待った大型宇宙電波望遠鏡の建設が、ようやく開始されようとしている。この計画の骨子ができ上がったのが1969年、その概要が本誌に紹介されてから、すでに9年の歳月が流れている。その間のいきさつを詳しく述べても、おおかたの読者は興味がなからう。ただ、そんなに古い計画が今頃実現して、果して大丈夫なのだろうか、という疑問にだけは答えておかなければならないであろう。

1950年初め、オランダの直径25mパラボラが、波長21cmの水素原子スペクトル線観測から銀河のうず巻き構造を明らかにして以来、宇宙電波観測の重要性が認識され、各国が競って大型パラボラの建設を計画した。そして1960年代に、準星を初めとする輝かしい発見の時代を迎えた。わが国としても、何とかこの戦列に加わりたいたいという希望はあったが、当時の状況としては如何ともなし難く、その時すでに世界のトップに立っていた太陽電波の研究に全力投球せざるを得なかった。

しかし、天文学の飛躍が電波により先導されてゆく情勢をまのあたりにするに及んで、本格的な宇宙電波望遠鏡を持たなければ、世界に大きく立ち遅れるという危機感が、天文学者の間にしだいに成長してきた。そして規模はそれほど大きくなくても世界のレベルを超え、しかも汎用性がある装置ということで、1960年代末にこの計画の骨子ができ上がったのである。すなわち短波長において世界最高の性能を目指そうということである。それは太陽電波の歩んだ道と全く同じであり、土地の広さの制約の多いわが国の宿命でもあろう。

それでは、1970年代における宇宙電波研究の世界の情勢はどうであったろうか。一口で言えば、短波長への拡張と、高分解能化の時代とすることができる。大口径電波望遠鏡については、短波長化を目指して、反射鏡面の張り替えがしきりとなされたが、鏡面の傾きによる重力変形は如何ともなし難く、波長数cmが限度であった。傾いてもいつもパラボラという新しい技術を取り入れ、大口径・短波長を目指した最後の大パラボラともいべきものが西独の100mパラボラである。電波天文に、わが国と同じく立ち遅れた西独として、国威をかけて世界最大の可動パラボラをねらったのであろう。波長も1cmにまで延びた。大きさは別として、短波長の極限を目指し

たのが、NRAOの11m鏡と、東京天文台の6m鏡とである。多くの分子線の発見に次ぐ観測からその重要性が認識され、ミリ波大口径パラボラを指向する傾向がにわかにか高まった。わが45m電波望遠鏡は、まさにその延長線上の最先端をゆく新しい時代の口径電波望遠ということができよう。

大口径電波望遠鏡の致命的弱点は空間分解能にある。面精度を直径の10万分の1(100mで1mm)程度にしか上げることができないので、分解能は20"位が精一ぱい。これでは光学観測との比較もできないため、大口径時代に続く1970年代の主力は干渉計による高分解能観測に注がれた。波長21cmのウェスタボーク(オランダ)に始まり、センチ波のグリーンバンク(米)、ケンブリッジ(英)と続き、いまニューメキシコ(米)のVLAが合成開口42kmという、干渉計巨大化の極限を追求している。これにより空間分解能はセンチ波で1"を割り、干渉計の弱点である長い観測時間も1日に短縮される。これに対しわが干渉計は、短波長化を指向し、高い空間分解能に加えて、高い周波数分解能でスペクトル線観測をねらう近代干渉計の最先端の一翼を担うものといえよう。

要するに、1960年末に立てられたわが大型宇宙電波望遠鏡計画は、1980年代の世界の動向を先取りしたものであり、10年近くを経た現在もなお、全く正しい方向を歩んでいるといえることができる。

ここでは、これ以上意義とか目的とかを述べるよりも、装置の全容を記述することに主眼を置くことにする。

2. 概 要

図1に示すように、直径45mのパラボラアンテナと、東西及び準南北それぞれ約500m余の基線上に、直径10mのパラボラアンテナ5基を移動させる超合成干渉計とからなる。

設置場所は、国鉄最高地点で知られている小海線野辺山駅にほど近い、現在の東京天文台野辺山太陽電波観測所と同じところで、信州大学の農場をお借りしている。用地選定に当っては、水蒸気量の少ない、広い、平坦なところで、雪や台風が少なく、また銀河中心が観測できる場所、という難しい注文があり、野辺山はこれらの条件を満たす数少ない場所の一つである。ただ一つの難点は、標高1,350mの高さの割に冬の寒さが厳しいことである。

大パラボラの直径45mは、マイクロ波帯でも大望遠鏡としてかなりの仕事ができるという汎用性と、世界の群を抜くための短波長化との2つの要求を満たすように

* 東京天文台 H. Tanaka: Large Radio Telescope Project in Japan.

決められたものであり、波長 3mm まで使用できるよう設計されている。

干渉計は、45m パラボラの得意とするミリ波帯で、光学観測に匹敵する分解能の画像を得ることを目標としている。波長 3mm まで使え、しかも移動できるということで直径 10m が決められた。アンテナの数は多いほど観測日数が短縮されるが、一ラウンドの観測を 2~3 か月以下で済ませるために必要な最小の数が 5 基ということである。比較的波長の長い、1.35 cm の H₂O スペクトル線で出発するのは、その強度が強く、ミリ波スペクトル干渉計の基礎を確立するためである。

5 素子干渉計は、必要に応じ 45m パラボラと組合せて 6 素子干渉計としても使用することができ、また 45m パラボラを VLBI (超長基線干渉計) の一素子として使う場合のように、10m パラボラの一部をこれの補助として使うこともできる。

3. 45 m 電波望遠鏡

(1) 機械構造 (表紙写真参照)

鏡面は、平均 1.3m×2.5m 位の大きさのアルミ製パネル 648 枚を骨組構造に取りつける。骨組構造は、アンテナが傾いても鏡面がいつもある理想的なパラボラ面を作る (ホモロジー構造) ように設計されている。焦点は傾きに従って動くので、副反射鏡をプログラム制御により動かすようになっている。パネル単体の鏡面誤差、ホモロジー構造の誤差何れも 0.1mm 以下としてあり、パネルの取付誤差、測定誤差を含めて、総合で 0.3mm (rms) 以下の誤差を達成しようとしている。なお中心部直径 20m は 0.2mm 以下とし、波長 3mm を割る観測

にも期待を寄せている。

電波の光学系は図 2 のようにクーデ方式を採用し、多周波同時観測や周波数切換えを便利にし、また開発途中の受信機も実験室的に使用できるようにした。このため電波通路が水平軸を貫通するのでその太さに制限があり、波長 6cm 以上は 1 次焦点を使わざるを得ない。このためカセグレン型は使えず、グレゴリアン型とした。長い波長では、直径 4m の副鏡の中心部を外して給電ホーンを出す。前置増幅器は、副鏡の上にある上部機器室に置く。架台は、直径 22m の円形レール上を、下部機器室ごと回転する。

アンテナの駆動は次のようにする。図 3 に示すように、まず経緯軸の交点に小形で精密な経緯儀の主視準儀をおく。これは、回転架台と機械的に絶縁するため、円形レールの中心に独立した基礎をおき、架台の中心部にあるラジアルベアリングの内輪の中を素通りした塔を建て、その上に取り付ける。この主視準儀を精密に計算機制御で駆動し、これに反射鏡を追従させる。すなわち、主視準儀から出た光を、45m 反射鏡の中心構造に取りつけられた鏡で反射させ、戻った光がいつも所定の位置に来るように制御する「コリメータ」方式をとる。これにより、架台は変形しても、反射鏡は正確に希望する「方向」に向けることができる。

反射鏡の指向精度は、再現性で 1000 分の 1 度ということになっている。

(2) 受信装置

受信周波数は 1000MHz 以上、といっても実質的には、1420MHz の中性水素線スペクトル以上の周波数を対象

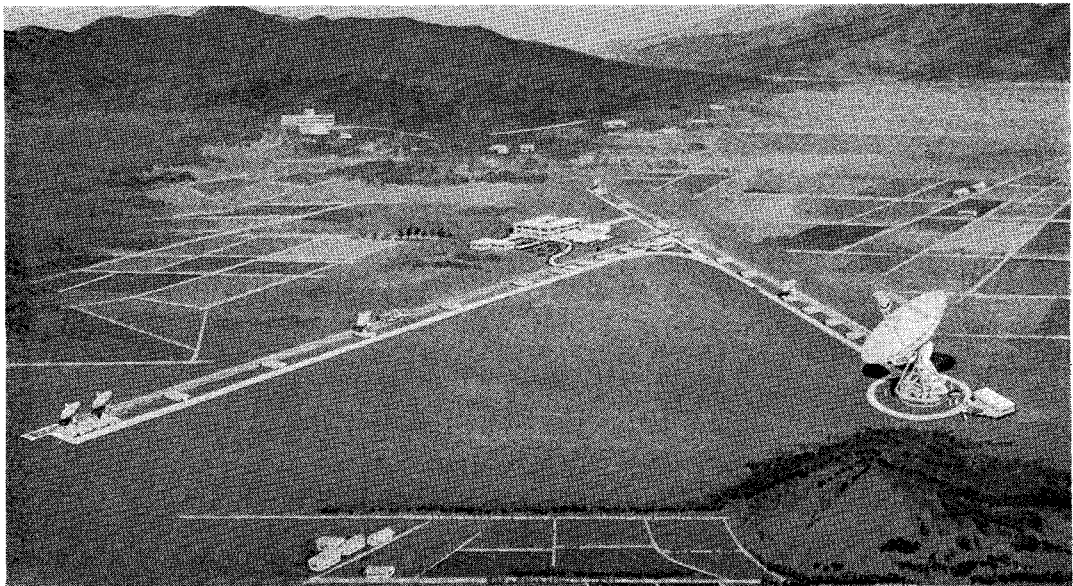


図 1 完成予想図

としている。電波は、どんな周波数を受信してもよいわけであるが、実際にはほとんどの周波数が人工的な通信電波に利用されていて、数桁以上も微弱な宇宙電波受信は極めて困難である。このため限られた周波数だけが、電波天文用に使えることになっていて、国際的な保護を受けられる。45m電波望遠鏡では、これらの周波数帯域をほとんど網羅するように周波数帯域を決めている。すなわち、1.4, 1.6, 2.7, 5, 10, 15, 22, 30, 40, 80 GHz 帯で、帯域幅を広めにしてある。

5GHz 以下の4つの周波数帯域の前増幅器は上部機器室に入れ、下部機器室の10~30GHzの4つの周波数帯の前増幅器と共に、何れも冷却パラメトリック増幅器を用いる。冷却はHeガス循環式とし、雑音温度は、1.4GHzで20K以下、30GHzで100K以下を予定している。下部機器室の40~80GHz帯には、いまのところ冷却ミキサを使うほかなく、雑音温度200K以下を見込んでいる。

バックエンドとしては、次のものを用意することとし目的に応じて選択できるようになっている。

- (i) 連続波用 帯域幅 5, 50, 100, 500 MHz 可変
- (ii) デジタル自己相関型分光計 $\Delta f = 0.25 \sim 10$ KHz, 1,024 チャンネル
- (iii) 高分解音響光学型分光計 $\Delta f = 43$ KHz, 13,824 チャンネル
- (iv) 広帯域音響光学型分光計 $\Delta f = 370$ KHz, 8,192 チャンネル
- (v) VLBI 観測装置

4. 超合成干渉計

超合成干渉計の原理については、本誌昭和50年3月号に述べられているので詳細は省略するが、概要は次の通りである。

或る空の領域の輝度分布を測る、つまり電波写真を撮るのに、最も直接的な方法は、アンテナビームで空を走査することである。これに対し、発想を変え、輝度分布を調和解析したときの周波数成分、すなわちフーリエ成分を一つづつとって合成すれば像が得られるという基本原理を使う。一つのフーリエ成分は、2つのアンテナの間隔と方向に対応する。従って、アンテナ対を、あらゆる方向と間隔に配置すれば、像を作るのに必要なすべてのフーリエ成分が観測できる。その像の分解能は、最大間隔を直径とする大アンテナと等しく、その大アンテナの開口を合成するという意味で開口合成干渉計と呼ばれている。そして更に、地球の自転による方向の変化を利用するのが超合成干渉計である。アンテナが全開口面をカバーしなくても、フーリエ成分が全領域をカバーすればよい。そして時間さえかければ、2つのアンテナでこれを実現することができる。アンテナの数を5つにすれば

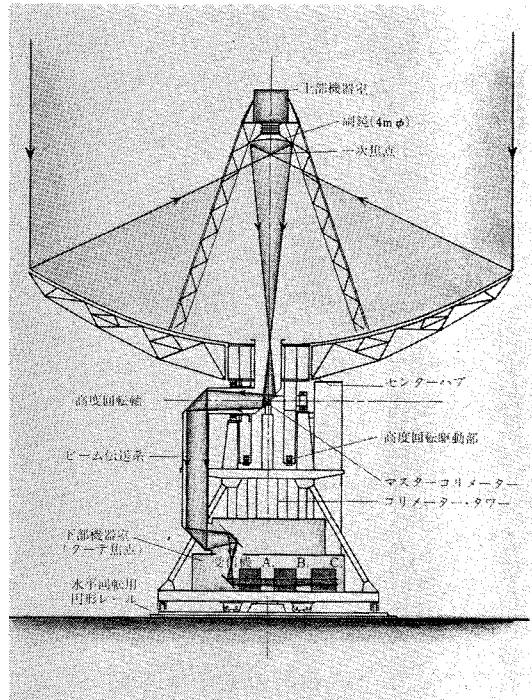


図2 クーデ光学系概念図

主鏡で集められた電波は十分なスペースを持つ下部機械室へ直接導かれ、ここで多数の受信機に分配される。

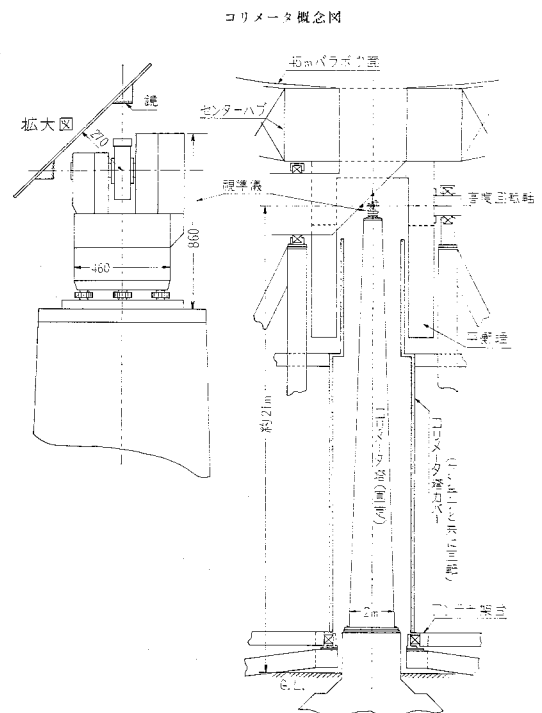


図3 コリメータ概念図

ば、アンテナ対の組み合わせは10になるので、観測時間をほぼ一桁短縮することができる。時は金なりで、時と金のかね合いでアンテナの数が決まる。われわれの計画は、直径10mのアンテナ5基で、直径約600mの開口を数十日かけて合成しようとするものである。

(1) ステーション配列 (図4)

東西560m、南北520m、傾き57°の基線上に図5に示すような30個のステーション、すなわちアンテナを乗せる基礎を置く。この上に全部アンテナがあった時、像のフーリエ成分、すなわちアンテナ対の間隔と方向が、できるだけ抜けがなく、重複が少ないように設計(MRA設計)されている。実際には、観測対象の θ 角によって条件が変わるので、東西、南北それぞれをMRA配列とし、その多くの可能性の中から、交点付近が密になるものを選んだ、南北にとって交点の一つはMRAからの追加となっている。

図6の左側は、この配列により取りうるフーリエ成分の例を示し、これにより合成されたビームを図6の中央に示す。図6の右側は、画像処理をすることにより、等価的にこの程度のビームによる観測ができることを示す。

(2) 機械構造 (表紙写真参照)

10mパラボラの鏡面は、平均1m×2.5m位の大きさのアルミ製パネル60枚を骨組構造にとりつけたもので、

鏡面精度は0.2mm(rms)以下を目指している。電波の光学系として、カセグレン型クーデ方式を採用することにより、冷却パラメトリック増幅器の使用を楽にし、またアンテナの回転に伴うケーブルの位相誤差の問題を取り除くことができる。干渉計のアンテナでは、経軸、緯軸が正確に一点に交わること、その交点の各アンテナ間の相対位置が極めて安定であることが肝要である。このため、架台および基礎、並びにその取り付け方には細心の注意を払わなければならない。

アンテナは数日に一度移動させることになる。これは、レール上を移動できる親子台車により行う(表紙写真参照)。まず引込線上的子台車にアンテナを乗せ、そのまま本線上の親台車に乗せて移動する。動力は発動発電機を使用し、移動中にも必要な受信機関係の電源はこれにより賄う。東西線と南西線の間の乗り入れは、ターンテーブルによる。

(3) 受信装置

受信周波数は22.5GHzのH₂O線とすることは既に述べた。東西と南北のステーションでアンテナの向きが変わるので、受信機の前に回転偏波旋回器をおき、偏波方向を変えられるように、回転角を計算機制御することになっている。

干渉計の受信機で最も問題となるのは、局部発振器の

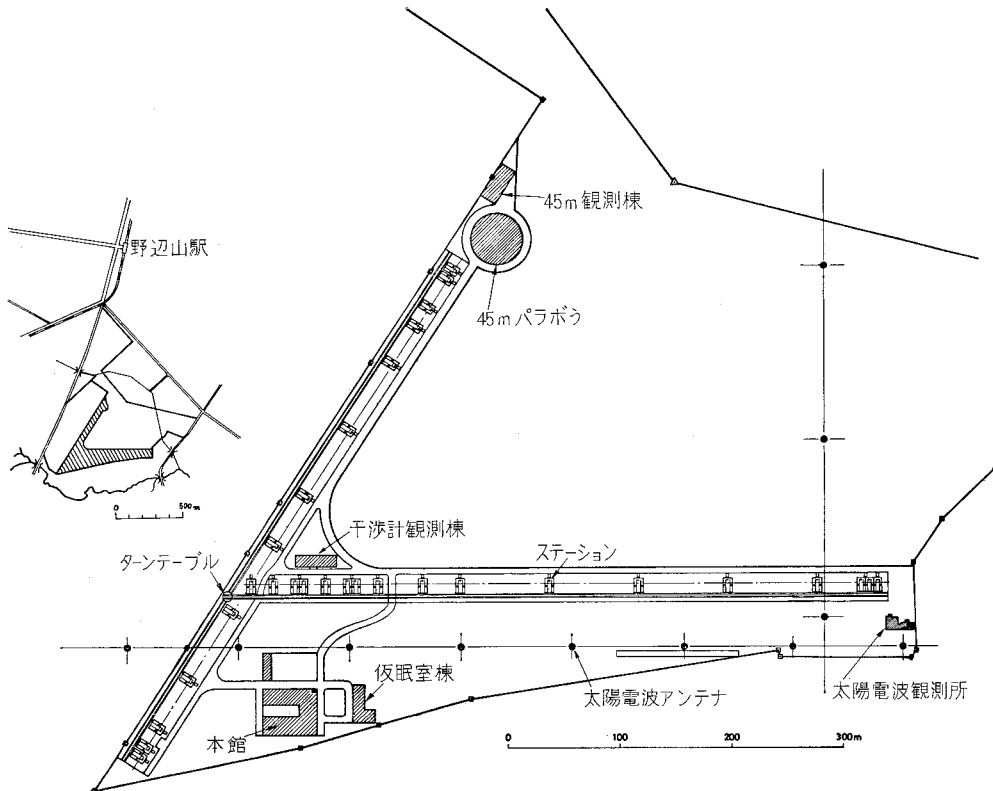


図4 施設全体配置図

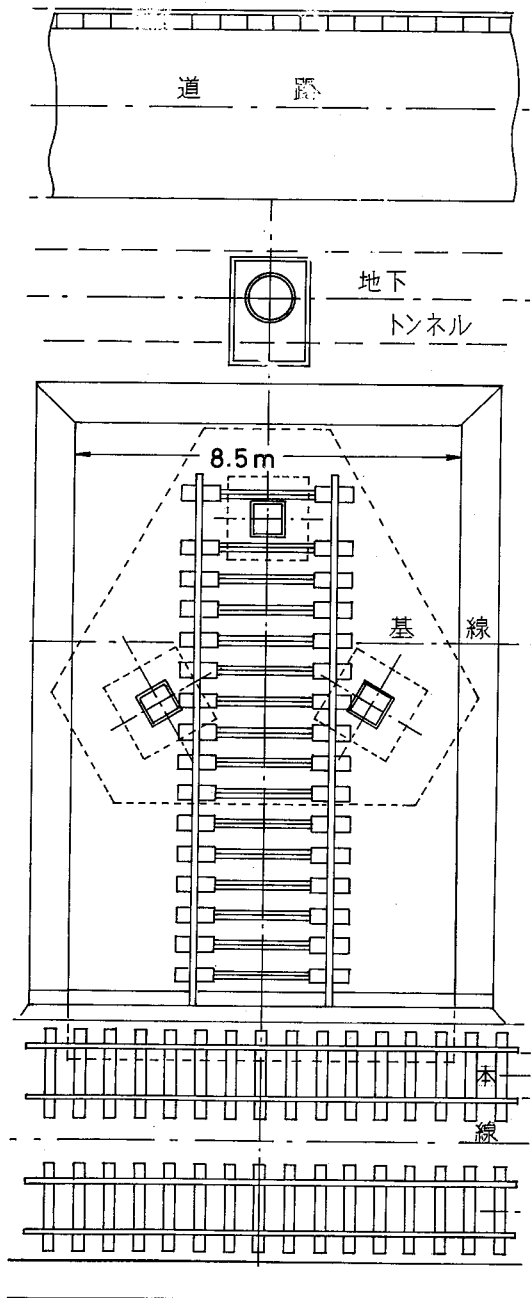


図5 ステーション概略図

周波数および位相をすべて等しくするため、位相ロックしなければならないことである。しかも、周波数の変更ができるようにしておく必要がある。このため、まずUHFで精密に位相の合った信号を作り、これを位相ロック通信する方式をとることになっている。

各ステーションからの信号を観測室に導く中間周波数の同軸ケーブル、および局部発振器用の同軸ケーブルは、できるだけ均一な温度を保つ必要があるため、地下トン

ネル内に敷設する。このトンネルは基線全長に亘り、地下1.5m以下に埋設され、内部を人が通って点検できるようにする。

観測室内では、各アンテナに到達する電波の時間差を補正するための遅延線路、位相差を読み易くするためのプリングローター等を置き、バックエンドに接続する。

バックエンドの主要部分は、5個のアンテナの組み合わせ10対について、次の2種類からなっている。

- (i) 連続波用広帯域相関計 帯域幅 100 MHz
- (ii) 音響光学型分光相関計 $\Delta f = 43$ KHz, 488 チャンネル/対

後者は図7の構成で、周波数スペクトルと10組のプリングの合成が2次元像として得られ、フォトダイオードアレーで電気信号に変換する。トランスデューサの配列をMRA、すなわち例えば100110000101とすれば、任意のアンテナの組み合わせのプリングは、合成されたプリングの一つの周波数成分として取り出すことができる。

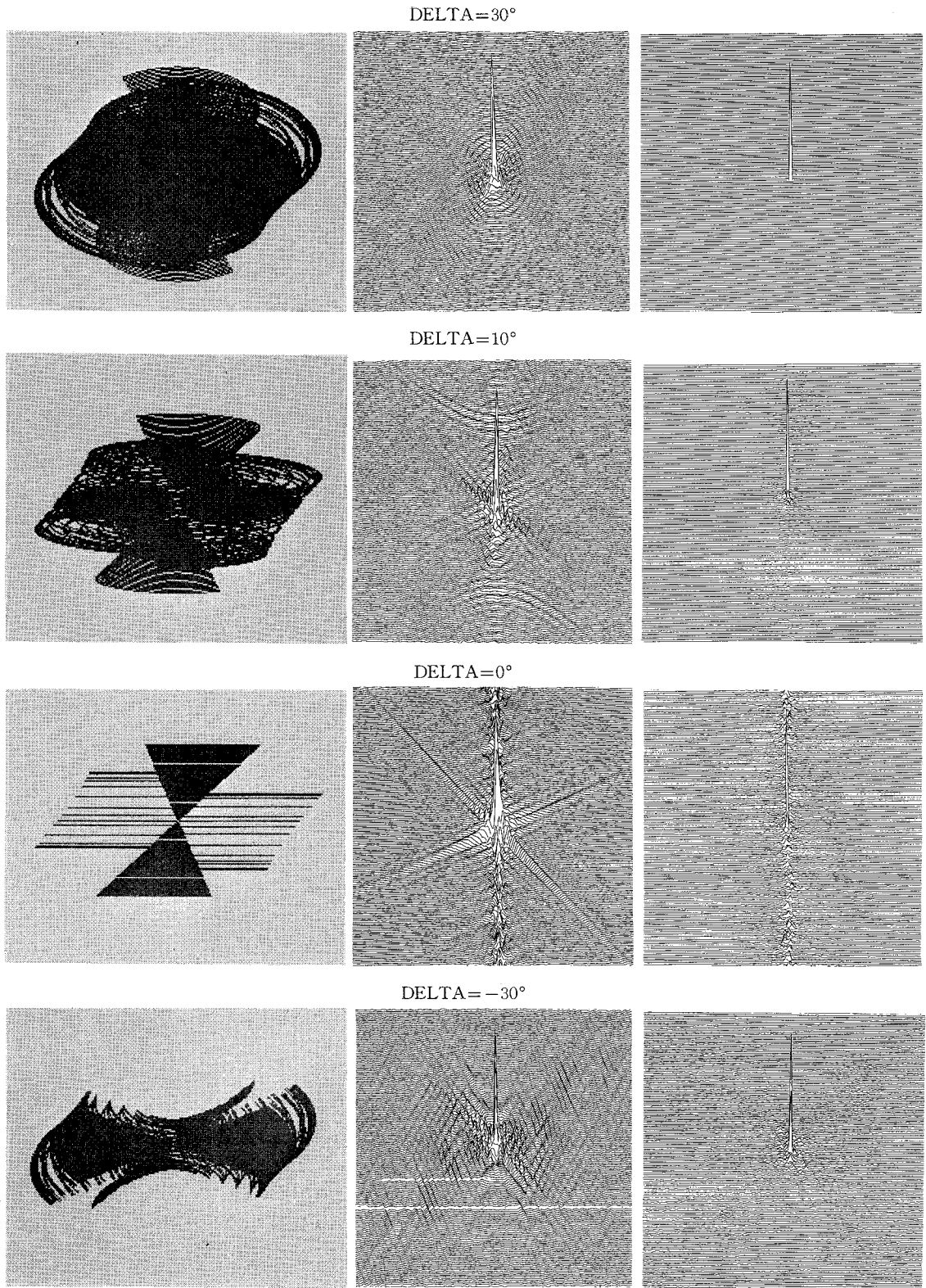
5. データ処理・制御装置

電波望遠鏡は、アンテナを空に向ければ像が写るというものではない。それは像を作るのに必要な素材としてのデータが得られるに過ぎない。これを計算機のメモリーに集積するのが「撮影」で、これに複雑な処理を加えて初めて現像される。すなわち、アンテナは計算機と組み合わされなければ望遠鏡と呼ぶことができない。

一方アンテナの駆動制御も、座標変換や個有誤差の補正等、計算機なしでは全く実行不可である。

このため、45m観測室および干渉計観測室に、それぞれ駆動制御用小型計算機とデータ集録中型計算機を置き、本館の中央処理制御大型計算機に接続する。「現像」から「撮影」へのフィードバックが極めて重要であるので、すべて現地のオンラインシステムで処理制御を行うことになっている。

大型計算機に頼らなければならない最も大きな仕事は、干渉計観測の画像処理であろう。観測によって得られる情報は不十分なものである。例えば図6の左側に見られるように必要なフーリエ成分が抜けていたり、伝播による位相のゆらぎ誤差があったり、もっと極端な場合として、多くのVLBI観測では位相の情報が欠けたりしている。このように不十分な情報から、最適な像を再生するのが画像処理であり、いくつかの手法が既に実行され、また新しい提案もなされている。図6の右側も、その1つによって処理を加えた例である。ここでは、「像は負の値を取らない」という予めわかっている条件だけを使って、「観測していないフーリエ成分は0である」という全く不条理な仮定を排除したものである。いずれの方法を使うにしても計算量は膨大なものになる。しかし



フーリエ成分 直接のビーム 画像処理後
図6 5素子干渉計により得られるフーリエ成分と等価ビーム (空電研・石黒正人氏による)

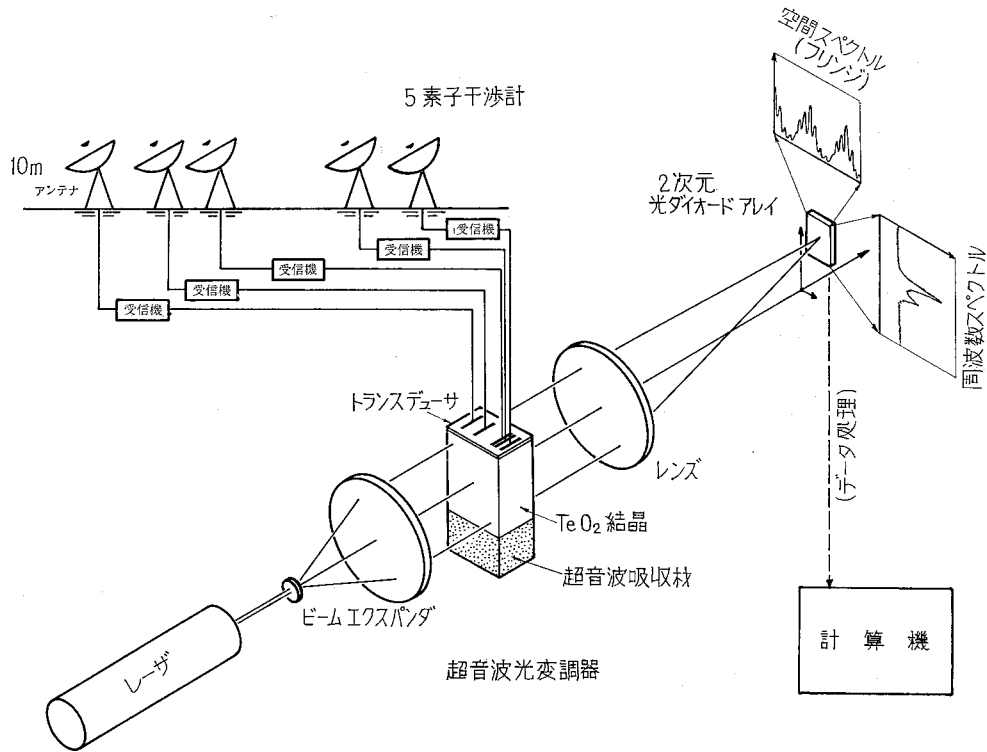


図 7 干渉計用音響光学型分光計説明図

これにより、次にとるべきアンテナの配置を決めたり、もう観測は打ち切ってもよいといった、極めて効果的なフィードバックを行うことができる。

6. むすび

以上、極めて簡単に計画全般にわたって紹介したが、とにかくこれが絵に画いたモチでなく、今から4年後には現実に姿を現わすものであることが、これまでと全く

異なる。土木工事は昭和 53~54 年度で完了し、昭和 55 年度には現地組立てにかかることになっている。同時に建物は完成し、昭和 56 年度は調整の年ということになっている。まさに、わが国天文学にとっての大事業である。もとよりこの装置は、全国共同利用であり、建設の段階から大いに注文をつけ、また御協力いただきたい。

雑報 [I]

1978 年へび座新星

倉敷天文台の本田 実氏は、2月28日20時03分~20時07分(世界時)に撮影したフィルム上でへび座に9等級の新星らしい星像を発見し、東京天文台へ通報された。東京天文台木曾観測所で3月4.82日(世界時)に行った確認観測で次の位置に写真等級で8.3等の星を確認した。

$$\alpha = 17^{\text{h}}48^{\text{m}}59^{\text{s}}.74 \quad \delta = -14^{\circ}43'8''.2 \quad (1950.0)$$

続いて3月7.83日(世界時)に得た2度プリズムによるスペクトルには、 $H\alpha$ の輝線など新星の特徴が見られたので、新星であることが確認された。なおこの新星は、本田氏にとっては4個目の発見である。

(香西洋樹)

低速度移動天体 Chiron

ヘール天文台のコワルは122cmシュミット望遠鏡で写した乾板上に低速で移動する18等級の天体を発見した。発見日時と位置は次の通りである。

$$1977\text{年}10\text{月}18.38090\text{日} \quad \alpha = 2^{\text{h}}05^{\text{m}}34^{\text{s}}.09$$

$$\delta = +12^{\circ}09'12''.5 \quad (1950.0)$$

東京天文台木曾観測所の試験観測期間中に写された写真にもこの天体が写っていることが判明するなど、各地で古い乾板の調査や、観測が行われた結果、次の軌道要素がマースデンによって得られた。

$$T = 1996 \text{ Feb. } 19.5345 \text{ E.T.} \quad \text{Epoch} = 1977 \text{ Sept. } 14.0 \text{ E.T.}$$

$$\left. \begin{array}{l} \omega = 339^{\circ}.1051 \\ \Omega = 208.7141 \\ i = 6.9229 \\ q = 8.509883 \text{ AU} \end{array} \right\} 1950.0 \quad \left. \begin{array}{l} e = 0.378623 \\ a = 13.695195 \text{ AU} \\ n^{\circ} = 0.01944702 \\ P = 50.68 \text{ 年} \end{array} \right\}$$

(香西洋樹)