

## 東京天文台での月レーザー測距ものがたり (III)

古 在 由 秀\*

標題を「月レーザー測距ものがたり (III)」としたのは、すでに天文月報 66 巻 11 号, 12 号 (1973 年) に、富田弘一郎氏によって同じ標題の (I) と (II) がのせられているからである。(I) では我々が月レーザー測距計画にとりくみだしたいきさつが書かれており、(II) では 1971 年のはじめに我々が岡山の天体物理観測所で行った実験の報告と、当時から進行しつつあった新しい計画について述べられている。今回の報告はその続きである。

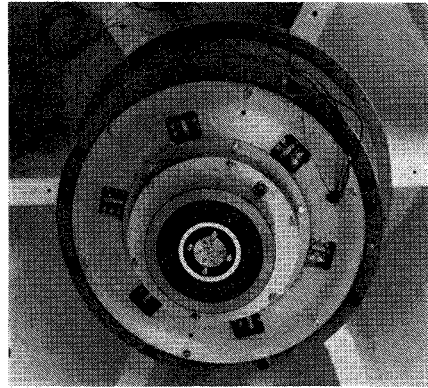
昭和 48 年度からはじめられた新しい計画は、必ずしも順調に進んだとは云えない。48 年の夏から物価の高騰期に入り、当初の計画通りには進行しないのではないかとされた事もしばしばであったが、48 年度中には先ず三鷹光器で送信望遠鏡が完成し、法月鉄工所では受信望遠鏡の形ができた。

### 送信望遠鏡

送信望遠鏡については何回か設計変更があった。予算を出す段階では、レーザー関係者からレーザーのひろがり角については心配ないと云われていたので、40 cm の口径でレーザー・ビームを 3"~5" にしぼれると考えていた。ところが、その後この点が段々に心配になり、口径を 50 cm にすることになった。この 50 cm の反射鏡は人工衛星の測距観測の場合には受信望遠鏡として使われ、横に人工衛星の送信用のコリメーターがとりつけられ、これらが一つのものとして XY 架台にのせてある。XY 架台にしたのは天頂での特異点をなくすため、水平な軸を通して、クーデ焦点から光を送り込むことができる。

こちらは人工衛星にも使われるので、かなり速い速度で動かさなければならないのであるが、X、Y 軸ともトルク・モーターをつけ、ギアの組み合わせではなく、電流の強弱によって回転速度を変える。角度の読み取りはインダクトシンにより、すべての情報はミニコンに入り、またミニコンからの出力によってトルク・モーターの動きも支配される。

ミニコンは、月の位置の予報も行い、予報値とインダクトシンによる角度の読み取り値とを比較し、適当な回転速度を計算し、予報値の方向に望遠鏡を向けることに



架台方位軸に取り付けられたトルクモーター、タコジェネレータ、インダクトシン

なる。なお、インダクトシンの読み取りの精度は 2000 分の 1 度で、2" に相当する。

送信望遠鏡は前にも述べたように人工衛星の測距にも使われる。人工衛星用の発振器も今回改良され、従来使用されていた出力 1 ジュール、パルス幅 25 ns の発振器の前にパルス幅をせまめる装置をつけ、その出力を一段増幅して、出力エネルギー 0.5 ジュール、パルス幅 5 ns のビームが出るようにした。パルスの幅をせまめることによって測距の精度を向上させようとしたのである。

この装置からでてきたレーザー光のひろがり角は 5 m rad ほどであるが、望遠鏡のわきにとりつけられたコリメーターで 1 m rad (3'4) にしぼって人工衛星の方向に発射される。そこで、人工衛星の位置を 1' ほどの精度で知らなければならないのだが、一週間前の観測を使って求めた軌道要素を使えば、特別の衛星をのぞいてこの精度は確保できよう。この精度で人工衛星の位置を軌道要素から計算するのに、我々のミニコンで 0.1 秒かかるが、10 秒に一回の割合で測距を行う計画である我々の場合には、軌道要素だけを入力としてオン・ラインで望遠鏡を制御できる。

今までは人工衛星が見えなければレーザー光をあてることができなかったのであるが、これからは昼でも夜でも人工衛星が地平線上にあれば、測距の観測ができるはずであり、これまでよりも格段に多くのデータが集められるようになる。

### 受信望遠鏡

受信望遠鏡については (II) にかかなりくわしい記述が

\* 東京天文台

Y. Kozai: On the Lunar Laser Ranging Experiments at T. A. O. (III).

あり、外見図もでているし、6月号には写真がのっている。これは口径 380 cm の金属製の反射鏡であり、これまたトルク・モータによって軸の回転する経緯儀式の架台にのっている。この反射鏡は F1 で、焦点距離も 380 cm あり、回転放物面の主鏡で、これに口径 40 cm の凸双曲面の金属の副鏡を組み合わせ、合成焦点距離は 30 m となっている。

380 cm の反射鏡は単体ではなく、口径 170 cm の中央鏡と、6 分割される外周鏡に分けられる。このように分けたのは、(II) で述べたカニゼンメッキの槽の大きさにもよるが、中央鏡の大きさは素材によっても決ってしまった。中央鏡の素材は住友軽金属で作った超々ジュラルミンであるが、これから 170 cm の大きさのものをとるのがやっとで、曲率が大きいので、板を二枚重ねて作られた。

先ずこの中心にカセグレンのあなをあけ、きりとられた素材で副鏡が、研磨し、カニゼンメッキをほどこして作られた。これで主鏡製作のテストが行われた。びかびかに光った副鏡を見て、主鏡についての自信もわいたのである。

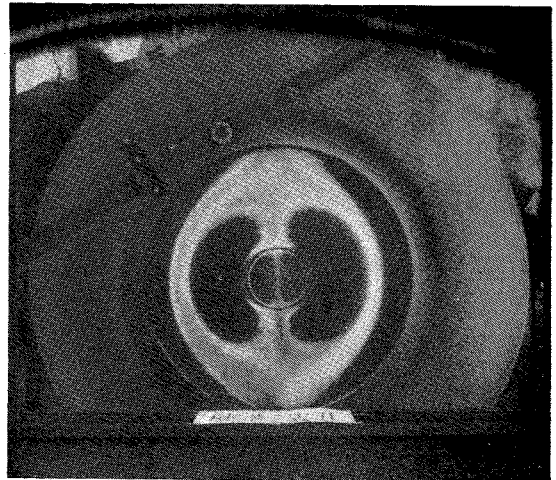
外周鏡の素材はジュラルミンの鑄物で、一つ一つは扇形をしており、これをあわせると中央鏡を支持する枠もでき上り、これに中央部の素材を取り付けて加工がはじまった。先ず、この一体となった素材を大きなターニング・テーブルにとりつけ、ならいゲージにとりつけられたバイトで機械加工を行った。

はじめはあらく鏡面をひき、最後には一回をひくのに一日かかるといった作業日程で3ヶ月かかって10ミクロン程度の精度で放物面を切削した。こうしてでき上がった面にはバイトの目などがのこっていたので、この面に砂ずりで光学研磨をほどこした。

この段階である程度の光学検査をこころみたが、鏡面の反射率の悪さなどもあって不完全なデータしかとれず、400 番までの砂で研磨を続けた。砂ずりには、強化プラスチック (FRP) で研磨盤を2種類作り、曲率の違う中心部と外周部で使い分けた。研磨盤に FRP を使ったのもはじめての試みであろう。

2ヶ月の研磨の後、鏡は6分割して東京に運ばれ、カニゼン・メッキがかけられた。カニゼン・メッキは、90°C の液に鏡を数時間つけてほどこすのだが、厚さを均一にするために、鏡が槽からとりだされた直後に水洗いされたことを後から知ったが、今後カニゼン・メッキをされる方々には、この水洗いを遠慮されるようおすすめしたい。せっかく苦心してみがいた面が、多少なりともゆがむおそれがあるからである。

80 ミクロンほどの厚さにカニゼン・メッキがかけられて、また鏡は焼津にもどり、再び組み立てられた。こ



中心鏡を回転しながらのゾーンテスト

の段階でもまだ鏡は光っていない。これから、砂を細くして、最後の光学研磨が行われた。結局、中央鏡については 8000 番まで、外周鏡については 2000 番までの砂が使われた。

光学研磨を行ってつやがでてきたので、研磨の途中で光学検査も行った。検査の方法については、いろいろ検討を重ねた結果、従来からのフーコー・テストを多少改良した方法が最終的には採用された。

検査の原理としては、鏡の各部分での曲率半径を決め、これが当初予定した放物面のものとあっているかどうかを知ることである。我々の反射鏡の曲率半径はほぼ 7.5 m で、平面鏡を使って光をおりまげて、天井につけた装置から光を反射鏡に送る。これで十分に強い反射光が返ってきて、写真にもとることができたので、我々の場合には、まず光源とカメラの位置を決め、鏡のどの部分から光が返って来るかを調べたのである。曲率の中心から出た光は、この中心に返ってくる原理を使うわけである。反射鏡の上にはスケールをおき、フィルム上で光っている部分の半径の値を読みとった。光源とカメラの位置は 5 mm のステップでかえられ、一回の検査は丁度 36 枚どりのフィルム本かけて行った。反射鏡の位置も 60° ずつ動かし、一連のテストは 6 回にわたってくりかえされた。

このテストは、法月鉄工所では光学研磨にあたった池谷憲氏が中心となり、東京天文台側からも冨田弘一郎、佐藤英男氏が協力し、フィルムの測定と、あとの計算は佐藤氏があたった。

こうして求めた曲率半径と鏡の中心までの距離との関係は図に示してあるが、この図で見ても分かる通り、中央鏡については放物線とのずれは  $\pm 0.8$  ミクロン内に入っており、当初の仕様書に書かれた 3 ミクロンよりはるかによくなっている。外周鏡とのつき目では多少悪くなって

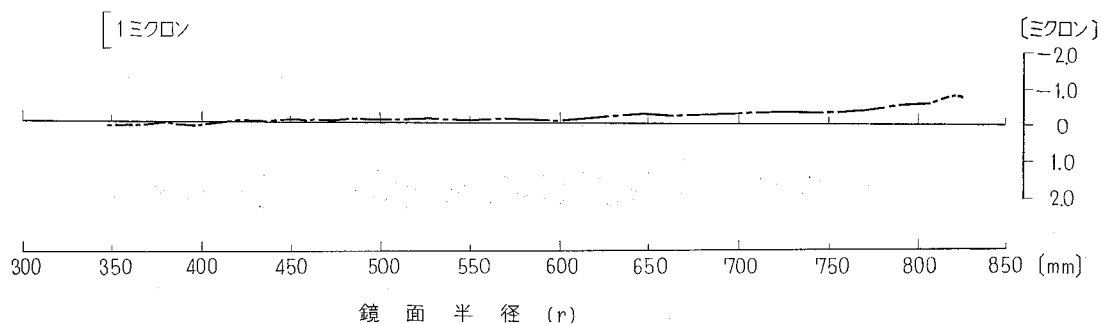


図1 月レーザー受信鏡(中央部)鏡面精度

いるが、ここは副鏡の支柱や枠のかげになっているのでこれは問題にならない。外周鏡でも、放物線とのずれは最大3ミクロンにしかなっておらず、当初の目標であった、40%の光が5"以内に、60%の光が10"以内という制限を大きく上まわっている。なお、5"は焦点での0.75mmのひろがりに対応しており、光電子増倍管による観測では、このひろがりはいずれも問題にはならない。

#### レーザー発振装置とデータ処理系

レーザー発振器については、当初の心づもりと実際の製品との間にかなりのひらきがある。もともとレーザーに関しては我々は全くの素人であったので、電通大宅間宏氏、東京農工大島津備愛氏、東北大稲葉文男氏、東京工大辻内順平氏など、多くの方々の助言をえつつ計画が進められた。我々のレーザー発振器としては、出力のエネルギーは大きく、ひろがり角はなるべく小さく、パルスの幅はなるべくせまくといい三つの条件をみたさなければならない。ところが、これまではこの三つの条件をすべてみたすようなレーザー発振器については、日本のメー

カーは全く経験がなかったといつてよい。教科書などでは、ビームのひろがり角は回折限界によって決まると書いてあるが、この10倍のひろがり角のものを作ることも、実際問題としてはなかなか難しい。

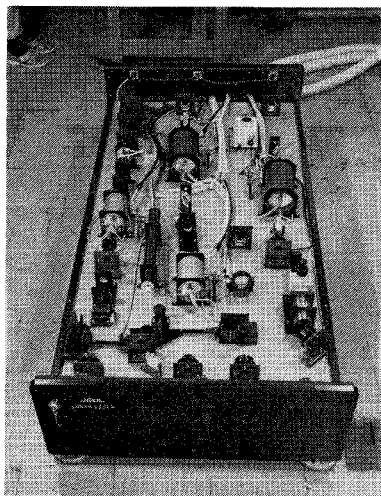
結局、予算の制約もあり、日本電子に発注する時の仕様としては、出力1.5ジュール以上、ひろがり角1.5 mrad以下、パルス幅20 ns以下としておいた。日本電子では、基礎実験からはじめ、もともになる人工ルビーとしては世界最高級の、ユニオン・カーバイド社のセレクトタイプ級のを輸入し、発振器の他に3段の増幅をすることになった。(II)には増幅は一段と書いてある。ひろがり角をせばめるために、発振器から発生するレーザー光のうち、一つのモードだけをとり出し、このためのエネルギーの損失を補償するために、増幅をも二段にわたって行わなければならないことが分ったからである。

発振器も増幅器も10 mm×100 mm、あるいは15 mm×150 mmのルビーのまわりに、らせん状のキセノンランプをとりつけ、一列にではなく、おりかえて二列にならべ、全体をアルミ製の光学定盤にとりつけ、300 kgの重さのものになった。

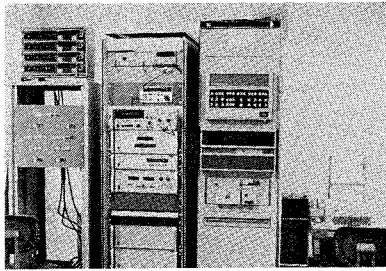
出来上ってみると、出力は5ジュール以上もできるし、ひろがり角は0.7 mradで、TEM00のモードのレーザーで中心集中度は非常によく、パルス幅は20 nsである。パルス幅をのぞいては、月レーザー測距用としては世界一流のものである。経済的効率を考え、我々はこれを10秒一回のくり返して使うつもりである。

あとに残るのはデータ処理系である。はじめの計画では、これはレーザー発振器と一体に、どこかのメーカーに発注する予定であったが、その後土屋淳氏が我々のグループに加わり、人工衛星レーザー測距儀製作の経験をいかし、神田泰氏などが協力してかなりの部分を自作することが可能という見通しが立ったので、物価の上昇をおぎなう意味でも、ここに我々の労力をつぎ込んだ。

といっても、各部分には既製品を購入したものが多く、ミニコンをはじめ時間間隔測定装置などでは、ヒューレット・パッカド社のものを多く入れている。時間



レーザー発振装置



データ処理・制御部

間隔測定装置（カウンター）は二台あり、一台は  $0.1 \mu\text{s}$  の分解能で使用し、秒信号がでてからレーザー光発射までの時刻差を測定する。もう一つはコンピューティング・カウンターで、レーザー光の往復時間を  $0.1 \text{ ns}$  の精度で測定する。コンピューティング・カウンターでは、 $10 \text{ MHz}$  の時計信号を使用し、これだけでは  $0.1 \mu\text{s}$  の分解能しか出ないが、レーザーの発射光の一部をうけてカウンターがスタートする時と、反射光によってこれがとまる時には、時計信号の間を内挿して  $0.1 \text{ ns}$  の精度が保てるようにしてある。

反射光を受ける光電子増倍管は、往復の予定時間の前後  $1 \sim 5 \mu\text{s}$  ほどしか働かせないのだが、このためのレンジ・ゲイトの部分は自作し、このゲイト中には反射パルスの時間分布を測定する装置も自作した。これによっても、往復時間を  $25 \text{ ns}$  の分解能で測れる。カウンターは、レンジ・ゲイト内に光電管から出てくる最初の信号でとまってしまうので、これがノイズであるかどうか、後者の装置で見分けようというのである。カウンターがノイズでとまっても、これで往復時間は精度は悪いが測れることになる。

その他、時計、望遠鏡や全体のシステムの制御部も自作され、明星電気で作ったトルク・モータの電源部とのつながりはじめ、ミニコンのソフトウェアにいたるまで、多くの人々の協力をえて我々で行った。

### 堂平観測所への設置

一方、堂平観測所では、昨年 10 月になって観測室の建設がはじまった。観測室は  $91 \text{ cm}$  反射望遠鏡のドームの東側の低地で、人工衛星追跡カメラのペーカー・ナン室の西北に建てられた。この建物も三つの部分から成り、一番西側が送信望遠鏡室で、その北側にレーザー発振器をおく部屋がとられている。東側には受信望遠鏡がおかれ、いずれにもスライディング・ルーフがとりつけられている。受信望遠鏡室用の屋根は  $5.5 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$  に高さ  $4.5 \text{ m}$  というとても大きいものになってしまった。中央部は二つの部屋に仕切られ、北側にデータ処理・制御部がおかれ、南側が仕事部屋になっている。

この建物の完成を待って、3月下旬送信望遠鏡・受信望遠鏡をはじめ、三鷹で調整中であった諸器械が次々に運び込まれた。

据え付け作業のハイライトは、何といたっても口径  $3.8 \text{ m}$  の受信望遠鏡の搬入で、望遠鏡は大型トラック二台にのせられて夜の 10 時に焼津を出発した。その頃から堂平では雪が降りはじめ、どうなることかと心配していた。朝には雪はやんでいた。8時に到着予定ということであったが、一台のトラックは6時には堂平に到着してしまった。もう一台のトラックには反射鏡をばらさずに高度軸にとりつけたままのせ、先導車をつけ、小川町から定峯峠をへて、ほぼ定刻の8時少し前、観測所の入口の白石峠に向うのが、 $91 \text{ cm}$  のドームのあたりからはっきり見えるようになった。後には、搬入の仕事をするので頼んだ  $15 \text{ トン}$  のクレーン車も丁度ついてきたし、我々の方からの先導車もついていた。

ところが、白石峠の直前で、雪で車がスリップして止ってしまい、そこであわてて車輪にチェーンをまきつける作業がはじまったりして、観測所に着いたのは9時半頃であった。

据え付けはスムーズに行われた。架台がクレーンでつり上げられて建物に入り、その上に高度軸ごと反射鏡が運び込まれた。そこで反射鏡は水平にされ、副鏡の6本の支柱が立てられ、その上に副鏡の枠がのる。それを、カセグレンのあなの中からでている筒の上ののって、法月の工場長が背のびしてボルトでしめる。といった具合で、3時頃には搬入の仕事は終わってしまった。

続いて三鷹光器の送信望遠鏡が、そして日本電子のレーザー発振器が運びこまれた。いずれも大仕事であったが、事故一つ起らず、また作業中はなんとかお天気ももって、皆で無事を喜びあった。

今まで書いてきたことでお分りのように、我々の月レーザー測距装置は各部分を異ったメーカーに作ってもらい、これを一つのシステムとして完成させるのは我々の仕事となっている。したがって、装置一式が運び込まれたといっても、これでこれらがスムーズに動き出すわけではない。勿論、装置一つ一つの据付調整は各メーカーが担当したのであるが、これらを結びつける仕事は我々でしなければならない。

4月になって早速この仕事ははじまった。堂平観測所の基準時計はペーカー・ナン室の EECO の水晶時計（三鷹のセシウム時計やローラン C の信号とは毎日比較はしている）であるが、これからの信号をケーブルをひっぱる。各望遠鏡の各軸のトルクモータをそれぞれの電源につなぎ、電源とミニコン、制御部とをむすびつける。トルク・モータを制御するミニコンのプログラムも完成させなければならない。

こんなことで多忙な日を送っていたある日、我々は東京天文台と二、三のメーカーにまつわる悲しいニュースをきいた。我々としては、事件がどうして、どんなに起ったのか、正確なことは何一つ分っていないが、物価の高騰期にもかかわらず、我々の無理な注文をいずれも入れてくれ、仕様書よりもより高い性能のものを非常な努力で作ってくれた法月鉄工所と三鷹光器に対する感謝の気持は今も変わらない。

5月31日には、日本天文学会の年會に出席された方々や、近在の方々など多くの人達にも、装置一式を見て頂いた。

### 今後の計画

御多分にもれず、我々の方も人手不足で、正直に云って仕事は余り進んでいない。第一の目標を、人工衛星の測距の部分の完成におき、これから手をつけている。長いこと使いなれた人工衛星測距儀は解体され、必要な部分は新しい建物に運び込まれ、望遠鏡のミニコンなどへのつなぎこみも終っている。梅雨が終れば、昼でも夜でも、人工衛星の測距のデータはバリバリととれるようになるう。

人工衛星の方は、角度の読みとりも1'ほどの精度でよいのであるが、月の方になると二つの望遠鏡を2"の精度でコントロールしなければならない。このためには、インダクトシンをふくめた架台の特性、大気差の様子を、恒星の追跡によってはっきり知らなければならないのである。このような仕事は、雲の合い間を見て行うというわけにはいかないので、秋まで持ちこさなければならぬ。

月の、とくにレーザー逆反射器の方向の精密予報値の計算、レンジ・ゲートの設定などは、ミニコンではとてもできないので、冬に東京天文台に導入される高速の電子計算機で行い、内挿だけをミニコンで行うという方法をとることになるう。このような仕事も終って、月レーザー測距の本格的な仕事ははじまるのは、今年の冬になる予定である。このような目標で、我々は今仕事をしている。

現在、世界中で月レーザー測距の定常的な観測をしているのは、1969年以後のアメリカ・マクドナルド天文台だけで、月の上におかれた4つの逆反射器を交互に観測し、測距の精度は内部誤差から2~3nsになっていると推定されている。現在月面にある逆反射器は1969年7月、アポロ11号が静かの海に運んだもの、1970年10月、ソ連のルナ17号がルノホート1号にのせて雨の海に運んだもの、1971年2月のアポロ1号によるフラマウロにあるもの、72年7月のアポロ1号によるハドリーの谷のもの、72年1月のルナ21号によるルノホート2号

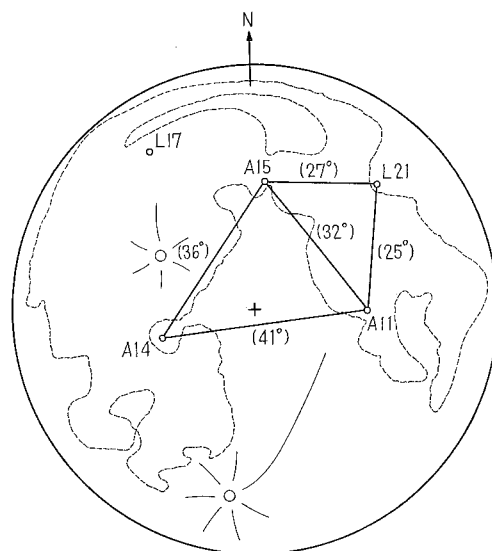


図2 月面上の逆反射器の配列、Aはアポロ、Lはルナを表わす

によって雨の海に運ばれたもののもつであるが、このうちルノホート1号のものは、ほこりでもかぶってしまったらしく、その性能を發揮していない。

しかし、あとの4つは月面上でうまく配列にあるので、これらの観測の比較から、月の自転運動の理論の再検討がすでにはじまっており、過去4年半のデータで、これらの観測が70cmの誤差で表わせる、月の自転と公転の理論ができ上がっている。これらのデータを使わない理論だと、レーザーによる測距のデータを50m以下の誤差では表わせない。

我々とほぼ時期を同じくして、アメリカではハワイにもう一つの観測所を完成させ、またアメリカで作られた金属鏡がオーストラリアに移され、レーザー測距計画がはじまろうとしている。フランスでもニースの近くに新しく設立された測地天文学研究所(CERGA)で装置を完成させようとしている。ハワイとフランスの受信装置については(II)にのっている。

これに我々や、ソ連のクリミア天文台も加わって、1976年からの月レーザー測距の国際協力計画が実行されようとしている。このような国際協力計画がないと、この観測から、地球の極運動をふくめた自転運動の観測、観測地の相対運動の検出が行えないからである。

ともかく、この計画に間に合うよう、我々の装置も完全なものにしたいし、その時期に(IV)をまた天文月報にのせたいと思っている。

このレーザー測距装置の製作にあたっては、この論文にお名前を出した人以外にも、多くの方々の世話になっていることをとくに記したい。