

東京天文台での月レーザー測距ものがたり (II)

富田 弘 一 郎*

岡山での実験

先月号に記した様な予備的な計算やシステムの検討が正しいかどうか、また、大出力レーザーの遠距離測距の可能性などを調らべるために東京天文台と日立製作所の共同研究の形で1971年1月から4月まで、毎月数夜づつ岡山の188 cm 反射が使えることになった。

日立製作所では中央研究所の島津備愛氏が中心になって大出力のルビーレーザーを新しく設計製作し、同戸塚工場の橋篤志氏のグループがデータ処理系の設計製作と実際のおペレートを担当した。東京天文台側は、望遠鏡と装置の配置、ガイド、レンジゲートの計算、タイムキーピング、等に責任をもち、現地の岡山の諸氏をはじめ天文台各部からの援助を受けた。

188 cm 望遠鏡は送信と受信に交互に使用する。焦点位置はクーデにし極軸の南端クーデ分光器室の直前に直角プリズムを置いて光軸を東に水平に向ける。焦点位置には視野用ファインダ、視野角を変える絞、干渉フィルター、PMT をセットした。この直前にフリップミラーを置く。このミラーが光軸に挿入されると、クーデ室の屋上に配置されたレーザー発振器からのレーザー光線が望遠鏡の中を通過して行く。フリップミラーの所につけた凹レンズで望遠鏡は200倍の角倍率とし、ルビーの拡がり角を絞り上げた。主鏡を出たレーザー光線が月に向かって飛んでゆく。約2.5秒たつと逆反射器からもどった光が188 cm の主鏡の焦点に集められる。フリップミラーはその時まで光軸からどいているので、リターン信号は視野絞り、干渉フィルターを通過して PMT に到達する。PMT の光電面上には半球形プリズムを接着して量子効率を少しでも増強する工夫をした。RCA 31000 F という PMT を電子冷凍で -20°C に冷却して用い、干渉フィルターは取扱上の便利さから 10 \AA のものを使った。

PMT の出力は3種類の処理をした。第1はレーザー発射の瞬間にスタートさせた時間々隔測定用の高速電子カウンタを PMT 出力でストップさせる。このカウンタの時間分解能は 10 ns で片道距離に換算すると 1.5 m である。

第2は MPHC (波高分析式多重チャンネルパルスカ

ウンタ) である。これはレンジゲートが開いている時間々隔を10個のチャンネルに分割し、各チャンネルに入ってくる光電子パルスの数をその高さ別に記録する。第3は出力波形をオシロスコープに入れてカメラで撮影する。1と2はプリンタに発射時刻の値と共にプリントされる。1の時間分解能が最もよいが、本物の信号でストップするとは限らない。雑音でもなんでも、レンジゲートが開いてから一番早く来たパルスで止まってしまう。MPHC はレンジゲートの幅を狭くできないので(月の距離がまだよく判っていないのだから当然)時間分解能は悪く $1 \mu\text{s}$ ばかりである。勿論チャンネル数を増やせばよいが、この時は製作時間と経費の点で10チャンネルでガマンした。第3の方法はオシロの横軸走引を早くすればよいが、後でフィルムを測定する。

岡山での実験はあくまで距離測定は二次で、リターンが確実にとらえられるかどうか目的であったから、第2の方法が主力武器であった。また、この実験を通して大出力レーザーの経験と月測距のシステムを決める上で、机上では気付かないなにかが得られるかも知れないという点を期待した。

レーザーはQスイッチにポッケルセルを使い1段増幅で所要の出力が得られた。くりかえしは最高6秒間に1発で、拡り角 3 mrd 、大きなレーザー電源、コンデンサ箱、冷却水用タンク等を188 cm ドーム内に配置するにはかなり苦労した。

データ処理はノイズを極力避けるため188 cm のノースピアーの横に組立式シールドルームを置いてその中にセットした。

基準時刻は三鷹から携帯用水晶時計をはこび、ロランCを受信して保持し、時計はクーデ室内に設置した。

望遠鏡を正しく月面上の逆反射器に向けるには一工夫が必要である。188 cm のクーデ焦点では勿論、反射器は直接見えない。そこで月面上の形のはっきりした小火口でオフセットガイドをする事にした。

ガイド用の火口と反射器の月面上の座標差に、視差、秤動、大気差等考えられる補正全部を入れて、岡山での値を10分毎に計算した。

一方、188 cm の鏡筒の横にガイドイグテレスコープを臨時に取りつけた。日食観測用に以前作った口径10 cm、焦点距離8 m の対物レンズが役に立った。これの焦点面には X, Y に移動できる接眼鏡をつけて、移動量は

* 東京天文台

K. Tomita: On the Lunar Ranging Experiments at T.A.O. (II)

ダイヤルゲージで測る。二つの望遠鏡の姿勢による平行性の狂いを10分毎にチェックする様にした。

レンジゲートを開く時刻は米暦からと、アメリカのJPLでマルホランドが改良した月の運動から求めたものを計算したが実際には後者を使った。この値は秒以下7桁まで設定できる。経費節約のためこの設定はマニュアルであった。1人が計算値をよみ上げて、他の人がスイッチを操作し、設定値をよみ上げてチェックした。

各装置の配置、つなぎこみ、調整などの作業は1970年12月からはじめ、実際の実験観測は翌年1, 2, 4月に実施した。特に2月15日と18日には晴天に恵まれて予定の観測ができた。この時の装置の概要は1971年3月号の天文月報のアルバム欄に出ている。

観測の手順は次の通りである。望遠鏡は前半夜は他のプログラムの観測に使っている。過密ダイヤは日本に唯一つしかない大望遠鏡だから仕方がない。

昼間は光軸や電気系の調整をやる。レーザと望遠鏡の軸を一致させる作業が一番難物だった。尚、強いレーザが鏡面を破壊する心配があったので、第2クーデ鏡は別に作ったものと交換した。第1クーデ鏡ではレーザビームが凹レンズで充分拡げられるので、まず安心であった。今回の実験の後では第2クーデ鏡にも異状は認められなかった。昼間の作業は16時30分でやめて前半夜の観測者に望遠鏡を引きつぎ、夜半までお休みである。日立のグループは遙照山のみどり荘に泊まった。夜半に出かけて朝帰りの長期滞在客はさぞ迷惑なことであつたらう。24時に全員が188cmドームの待機室に集合する、24時30分からテレスコープタイムがレーザグループのものになる。グループは4つの持場に分離される。第1は望遠鏡係で188cmのクーデ焦点、ガイディングテレスコープの接眼部、コントロールデスクと3名である。

第2グループはレーザ発射担当で、発射電源、水冷装置等の監視とPMTの操作をする。

第3はシールドルームの中でレンジゲート設定、オンシロ用モータドライブカメラ操作、プリンタ等の操作をするエレキ係である。

第4はタイム係でクーデ室内で水晶時計のお守り役である。その他、全部を総括する号令係がいる。

観測は次のシーケンスをくりかえした。

1) オフセットガイドのチェック、クーデ焦点とオフセットガイドの接眼で同時に適当な小火口を見て軸合せとX, Yの原点をきめ、計算しておいたオフセット量だけX, Yを動かす。その接眼十字線にガイド用の小火口を入れる。(望遠鏡を動かして)クーデ焦点には逆反射器が入っている筈。

2) レーザを発射する、3秒前にブザーが警報を鳴らし注意を喚起する。レーザは10秒毎に発射した。その間

にエレキ係は次のレンジゲートを設定する。

3) レーザの発射をやめて、月面バックグラウンドのノイズをカウントする。

4) 望遠鏡を僅かずらして、逆反射器からはずし、レーザを発射してみる。

以上をほぼ15分毎にくりかえした。

観測の前後に1等星を入れてホトンカウンティングし、大気の透過率の程度を測った。

2月の下弦の月は高度が低く観測条件としては中以下であったが2月15日と18日の観測結果を第2図に示そう。

横軸はMPHCの各チャンネル、縦軸は信号の総数である。15日は反射器が月の明暗境界線に近かったので、レーザ発射回数の割りにカウント数が多くなっている。18日は全く暗部に入っている状態であった。15日は第7、18日は第9チャンネルに有意な信号が存在するのがわかる。この時のレンジゲートは $20\mu\text{s}$ で、1チャンネルが $2\mu\text{s}$ である。JPLでの計算に岡山の測地座極に少しミスがあって、月の距離の予報値が正しければ、リターンは第7チャンネルに入る筈であった。15日はO-C=0、18日は $+4\mu\text{s}$ で、これは距離に直すと600mになる。この原因はまだよく判らないし、これが本当のリターンかどうかあやぶむ人もいるが、我々はこれが本物だと信じている。

今回の実験では余り条件がよくない状況でリターンが得られたこと、計算値にほぼ近い強さであること、エレキ系の信頼性にもっと力を入れる必要があること等々、我々の考えている将来計画にいろいろ役に立つ結果が得られた。この実験観測には岡山の現地の諸氏をはじめ天文台事務部等の数えあげればきりのない程の人々の協力によって初期の目的が達成されることを特筆しておきたい。

大きい受信鏡の可能性

雑音にまけない強い信号をつかまえるには何度も書いたように受信用の望遠鏡を大きくすればよい。しかもレーザ測距の場合には光を集めるだけでよいから鏡面精度はあまり上等である必要がない、月面背景光を抑えるために必要な視野角以内にリターンの光が集まればよいのだから光学望遠鏡とはかなり違う。

有名なハンブリ・ブラウンの干渉計は直径38cmの正六角形の球面鏡252枚を蜂の巣状に集めたモザイク集光鏡である。フランスが計画中の月レーザ受信鏡は直径25cmの凸レンズ210個をたばねて有効面積 10m^2 とするという。

東京天文台の大沢さんの見学談によればニース天文台でも球面によるモザイク集光系が赤外観測に使用されているそうである。

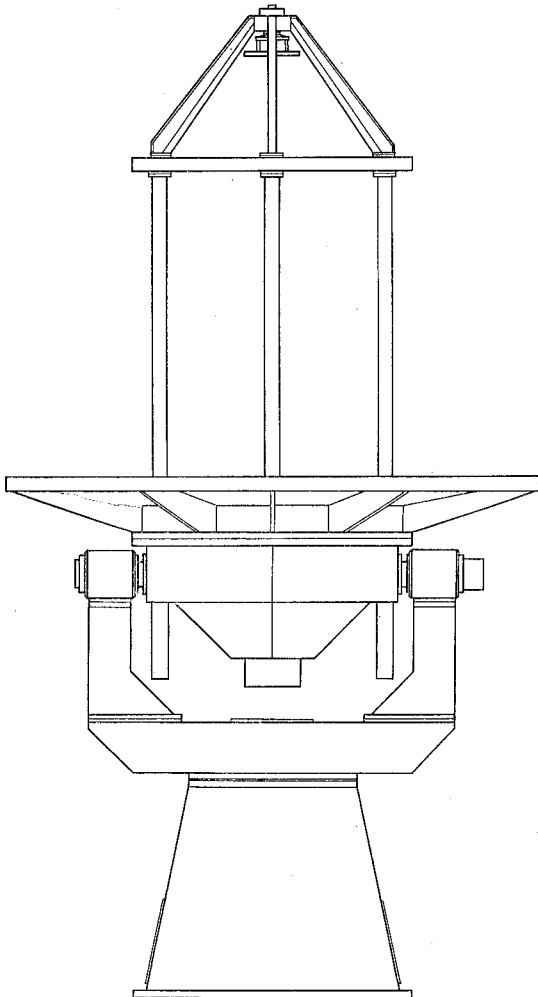
最近になってスミソニアン天文台とアリゾナ大学の共同プロジェクトとしてMMT (Multiple-Mirror-Telescope) の計画がすすめられている。直径 183 cm の反射鏡 6 個を一つの架台に取りつけて焦点を 1 ケ所に結ばせる構造のものである。また、多数の独立した架台をもった望遠鏡を同時制御して同一天体に向ける構想がカナダで行なわれている。

より多くの光を集めたい貪欲な天文学者の知恵なのだ。

日本では天文用ではないが、東北大学の科学計測研究所に太陽炉として使う直径 10 m のモザイク放物面鏡がある。これは平面モザイクのヘリオスタットと正対して、太陽光を集めるようになっている。

また、10年ほど前にアメリカでは軽合金鏡がはやりだした。そのころカニゼンメッキという特殊な無電解の化学メッキが発明された。

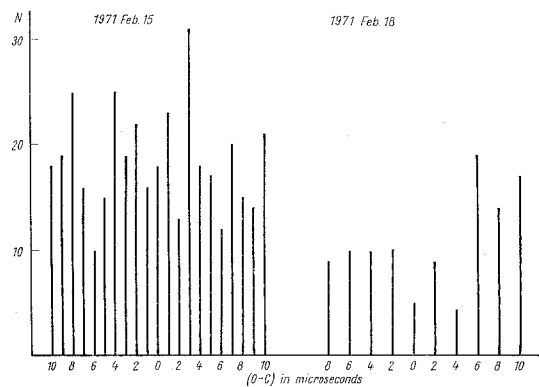
ニッケル 90%、燐 10% の合金でアルミ等の表面にコ



第 1 図

ートし、耐蝕性にすぐれ非常に硬い。非結晶質であることも大きな特長で、この表面を光学研磨する。ハーシェル時代の金属鏡とは違って軽量であり研磨面にアルミ蒸着もできる。素材にジュラルミンを使えば熱の伝導率がよいから鏡面の変型が少ない。支持法が簡単で（ボルトで直接取り付けられる）ある等かなり優れた特長もっている。アリゾナ大学の月惑星研究所では 150 cm の反対望遠鏡に組み立ててよい成績を續めた。また、キットピークの国立天文台の有名なマクマス太陽望遠鏡の集光鏡もこの形式の金属を最初は使っていた。筆者が機会があって訪れたツーソンのキットピーク天文台の光学工場の大型研磨機の 1 台にも、オチョコ型のこの金属鏡がのっていた。軽合金はテンザロイという超々ジュラルミンである事も聞いた。この型式の鏡は赤外観測用として各地で盛んに用いられるようになった。

我々の月レーザ受光鏡として採用してよい方法である。丁度この時期に京都大学物理第二教室では本格的な赤外望遠鏡の計画がはじまっていた。ここの奥田さんのグループは名大の早川先生の指導で赤外による天体観測について、日本でのパイオニヤ的存在であった。岡山の 91 cm や 188 cm を使って広範囲の赤外観測にはげんでおられ、専用の望遠鏡を夢みて金属反射鏡の調査を早くからやっておられた。奥田グループは予算が我々より早くついて口径 1 m の金属反射鏡をいよいよ作りはじめた。製作を引き受けたのは静岡県焼津の法月さんである。法月さんのことは天文月報 1971 年 10 月号に田中先生が紹介している。金属鏡という日本でははじめての仕事を少ない経費で完成した法月さんの腕には感心してしまう。田中先生の紹介文の中に「お世話になる天文屋も一緒にタタケ」という項がある。タタキあげた腕を使えという意味なのだが、値段の方をタイで法月さんを困らせてばかりいるみたいで申し訳ないと思う。赤外金属鏡の製作の途中を見せてもらって、次はもっと大きい奴をたのみますよ……、考えてみましょう、という話がすすん



第 2 図

でいた。

架台の方は三鷹に完成した 6m ミリ波電波望遠鏡が見事な性能を發揮しているので安心である。大きい鏡をどの様に作るかが我々の計画の成否をきめるのである。

われわれの計画のあらまし

月測距計画はいよいよ1973年4月からスタートした。この機会に計画のあらましをお話しておこう。

レーザの送信と受信を別の望遠鏡にした。送信系は角倍率をかせいで、レーザの拡がりや絞りを絞るのだから光学的に第1級のものが欲しい。口径はあまり大きい必要はない。質のよいレーザなら4~50cm級でよいがレーザ部分を固定したいので、グーゼ式の架台にしたい。受信鏡は鏡面精度は犠牲にしても大口径がほしい。送受信を共通にするには余りにも違いすぎる要求性能である。むしろ分離して特長を發揮する方がよいと判断した。

受信鏡は金属モザイク主鏡で経緯儀架台とする。赤道儀より追尾は面倒だが、そもそも月の運動は赤道儀では正確には追えないから、経緯儀にして2軸共、数値制御する。軸にかかる荷重が単純だから機構上有利であるが天頂に死点がある。月の赤緯は+30度が北限で、堂平に設置すれば天頂距離6度までとれて死点は大丈夫であるし月レーザは写真撮影をしないので視野の回転は差支えない。ちなみにソ連で建設中の6m反射も経緯儀である。

口径は3.8mとした。但し、中央鏡部と外周鏡部に分け、しかも外周部は6個に分割可能である。

中央鏡部は口径1.7m、焦点距離3.8mの放物面鏡である。1.7mの口径はなにも岡山の188cmに敬意を表して決めたわけではない。住友軽金属で作る素材(超々ジュラルミン)の大きさ、カニゼンメッキ槽、アルミ蒸着タンクの制限などから決定した。この部分はできるだけ良い面に光学研磨する。目標は面精度で1ミクロン以下まで努力したい。

外周鏡部は集光力を少しでも多くしたいために加えたもので、ジュラルミン鋳物である。6個の扇形をまとめてドーナツ状になる。加工は中央部と外周部を一体に支持する中央棒部をまず組み上げて、その上に素材を取りつけて1体にし、機械加工で放物面に仕上げる。このため大型のターニングを用意している。ならいゲージで10ミクロン程度に切削したい。これをつや出し研磨する。外周部6個と中央部にバラしてカニゼンをかける。厚み50~80ミクロンの予定だ。

もう一度組み立てて光学検査をしながら少しずつ修正研磨する。外周部まで組み上げると口径比F1という明るいもので、球面と放物面の差が大きく測定がむづかしいと覚悟している。

副鏡は凸双曲面で合成焦点距離30mとなる。副鏡もジュラルミンである。全体の40%の光が5秒角以内に、60%が10秒角以内に集まって欲しい。

主鏡を球面にすることも考えたが、我々の加工法では放物面でもむづかしさは大差ないし、要は上手に検査し、修正すべき場所と量を適切に早く知ることだと思っている。Fが明るいので、普通のフーコーテストは感度が悪い。ハルトマン法に似たゾーンテストをくりかえすのがよいだろう。

鏡面は裏側からボルトで枠構造の支持部に取りつける。枠構造から副鏡支持部の支柱もたち上がり、PMTもこの部分につく。高度軸もこの部分から左右に出ていて、方位回転軸上のフォークに取りつく。方位軸の旋回範囲は真南を中心として±120度、高度角は20度から天頂まで変えられる。各軸にはインダクトシンをつけて、約1秒までの角度がデジタルで読み出せる。旋回はトルクモータを使用し微速から高速まで1台のモータで回転する。ギヤ系が全くないのが大きな特長である。望遠鏡の制御は勿論数値制御で、ミニコンが予報値と現在値の差から所要速度を計算する。この値をD-A変換し乍らトルクモータが回転する。

送信望遠鏡は当初は赤道儀の上に第3軸として追尾軸をつける方法を考えていたが、ミニコンの導入がきまったので2軸に変更した。軸は経緯儀式とXY式の利害得失を検討中である。経緯儀式は受信鏡と同時に制御でき軸の荷重変化もなく簡単であるが、クレーンにするためには垂直方向にレーザビームが入ることになり、ミラーの数が増える。しかも2軸共に光を通さねばならない。XY式だと死点が地平線に来て、軸の回転変化範囲も比較的少ない点でよい。最もよい点は1軸は光を通さないで、クレーンになることでしかも水平にレーザを導き入れればよい。

鏡は50cmの球面鏡でオフアキシスで使う。カセグレンやニュートン式のように中央部に副鏡があると、ルビーの中央部の大切な部分がかくされてしまう。ルビーロッドの中央に穴をくり抜いて冷却効果をあげているレーザがアメリカにはあるが、日本の技術では無理のようだ。軸外れで使ってコマ収差が出てほしい問題にならない。

送信光学系は1枚小プリズムを追加して人工衛星レーザの受信用としても転用できるようにも考えている。

レーザはルビーを使って1段増幅、出力は最低5J、繰り返えしは少なくとも30秒1回を予定している。拡がり角は送信系で5秒角にする。クレーン式だからレーザ部分は固定されているので安定で大型となっても大丈夫である。

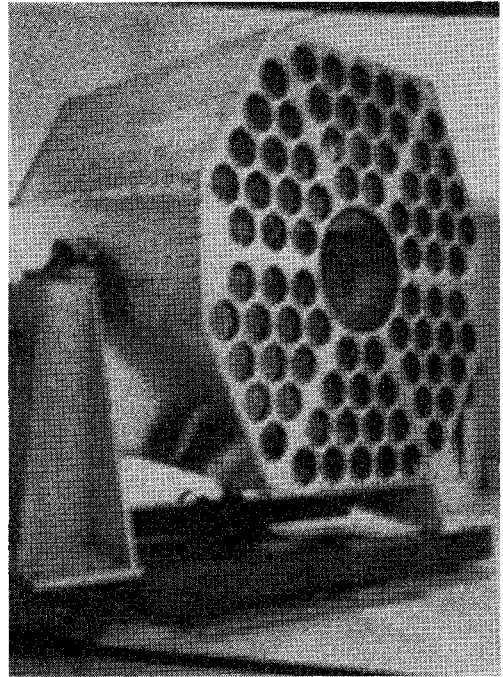
データ処理系は1nsの高速カウンタと波高分析計を

併用したい。後者は岡山の実験のときの MPHIC と似たものだが今回のものは2000チャンネルもあり、しかも時間分解能は 10ns である。各チャンネルに入ったパルスの高さが8ビットで記録できるので、ノイズと信号を見分けるのに偉力を発揮しよう。

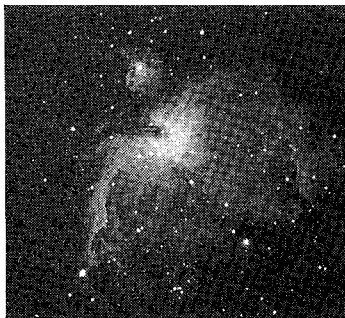
レンジゲートはミニコンで制御する。上記の観測データの記録もミニコンで制御して磁気テープに入る。

これらの装置は東京天文台堂平観測所に設置する。ペーカー・ナンカメラ、レーザトラッカー等と同じ場所で観測できることは、マクドナルド天文台より数年遅れてスタートする我々の強味である。

この計画で一番の問題点はやはり大口径の集光金属鏡の製作であろう。研磨や検査の段階で大いに努力せねばならないと思っている。今までの経過をかなり長々と報告した。月レーザで何にがわかるかという様なテーマは別の機会に本誌に紹介したい。“新装置でのリターンがとれました”という報告も早く書きたいものである。



第3図 ハワイにおける月レーザー用集光レンズ。マウイ島に建設中の月レーザー受光用光学系で、約80個のレンズを使用している。架台は高度方位角方式。



カラーアルバム

星空の四季

藤井旭著

■B5変型判／148ページ／定価二、〇〇〇円（千一四〇）

好評発売中！

日本の都市の夜空から星が消えつある今、紙上に美しい星空をカラー印刷で再現。春夏秋冬の星座と、よく知られている星雲星団を、順に追って紹介。

〈主な内容〉

冬の星座——こぐま座・北斗七星・おおぐま座・M82・りょうけん座M3・M51・しし座のさがま／他
 秋の星座——さそり座・M6M7・いて座・南斗六星・三裂星雲・M8とオメガ星雲・夏の銀河／他
 夏の星座——カシオペア座・カシオペア座と北極星・ケフェウス座の銀河・NGC6946・M31／他
 春の星座——オリオン座・オリオン星雲・プレアデス星座／他