

## 東京天文台での月レーザ測距ものがたり (I)

富田 弘 一 郎\*

### ことのはじまり

レーザという活字が天文月報にはじめて現われたのは、1965年10月号で、アテネであった国際会議に出席した東京天文台の古在さんの報告文の中である。

1958年にシャウローとタウンズが理論的に可能性をのべ、1960年にルビーを使って実現した新しい光線は、20世紀における10大発明の1つとして、空想科学小説や少年テレビ冒険ドラマにいち早く登場した。レーザ光線のもつ指向性と大強度という特長を応用した遠距離の測距の可能性は、天文や測地学に利用できる点で注目された。アメリカのアレー、バンダー、プロトキン等が精力的にこの問題に取り組み、早くも1964年には逆反射器をつけた人工衛星エクスプローラ22号が誕生した。

従来、角度情報だけを頼りにケプラーの法則を使って、天体の軌道をきめていたのが、距離を直接測定する新方式が採用できるようになって来たのである。勿論、電波を使って月や金星の距離を測るレーダ方式の実験は行なわれていたが、精度が充分ではなかった。

レーザ光を月へ照射してその反射光を測定する実験は、すでに1962年にアメリカのMITのグループが試み、1966年にはソ連でも2.5m反射望遠鏡を使って同様な実験を行なった。

1967年イタリアで開催された“大陸移動と極運動”のシンポジウムに出席された東京天文台の虎尾さんが、アメリカとフランスが月面に逆反射器を送りこみ、これを使ってレーザ測距をやること、日本でも是非やってほしいこと等を聞いてこられ、天文月報同年10月号にその報告が印刷された。また、月報同年1月号には、東京天文台の広瀬さんが、スミソニアン天文台での人工衛星のレーザ測距の実験報告を紹介して、レーザが我々の身近かにせまって来た感があった。

その少し前、東大宇宙研の齋藤成文先生のおすすめによって、日立製作所がレーザによる人工衛星の追跡方式の研究開発をはじめることになった。幸い、東京天文台の我々がIGYのはじめからベーカー・ナン・カメラで人工衛星の追跡を担当していたいきさつから、このレーザトラッキングに協同研究の形で参加できることになっ

\* K. TOMITA

On the Lunar Ranging Experiments at T.A.O. (I)

た。

この研究は日立製作所戸塚工場の絶大なる努力によって着々と進められ、1968年3月には戸塚工場屋上の仮設小屋に試作機が組立てられ、約50mはなれた黒板にピンクがかかった赤い円い光(ルビーレーザは6943Åで、もっとマッカな光だと思っていたが……)が1秒に1発、景気のよいボンボンという音と共に出て、いよいよレーザが我々のものとなり、早く衛星にあてて見たいものと思った。

一方、アメリカではケネディ大統領のお声がかかりで、アポロ計画が強力に進行中であつた。メリーランド大学のアレーの強い推進力で、アポロ飛行士が携帯する数少ない科学計測器の一つとして逆反射器がとり入れられた。

この実験に先き立ち、月面に軟着陸したサーペーヤ7号に地上からアルゴンレーザを照射する実験が行なわれた。発射基地はキットピークとリック天文台で、サーペーヤのビジコンカメラは拡角10秒、10Wのアルゴンレーザを-1等星と同じ明るさであると記録した。この予備実験の後、NASA(米航空宇宙局)は地上設備として、マクドナルド天文台に107吋の新反射望遠鏡の建設をはじめた。

この望遠鏡は、クーデ式で1968年11月、完工式を行なった。アポロ計画の総額から見れば「雀の涙」ほどの少額であるが、天文学界にとっては大変な財産である。当時、稼動している望遠鏡としては、世界第三の大口徑であったから……。この望遠鏡は、月のない夜は普通の天体物理観測に、残り時間は月レーザに専用される計画であつた。実験開始後まもなく、精神異常オペレータがピストルを主鏡めがけて発射するというハプニングが起つたりした。

実際のアポロ計画はフォン・ブラウンの執念が実のつて、幾多の難関をのりこえ、1969年7月、アームストロングと同僚飛行士が月面上の静の海の一隅に降り立ったのである。宇宙中継を通じて深夜のテレビの前に釘づけになった人はずい分多勢であつたらう。

100ケの逆反射器の束は地球に向けて無事セットされ、完成したばかりの107吋での実験がすぐはじめられた。また、リック天文台の120吋反射もしばらくの間、月面測距に時間をさくことになり、実際の月面反射器からの最初のリターンは8月1日にリックで捕えられ

た。

この少し前、アレーから東京天文台長宛にアポロ飛行士が月面滞在中だけでよいから、岡山天体物理観測所の74 吋反射を使わせて貰えないだろうか、レーザ装置は1組余分があるので持って行くから、との国際電話がかかって来た。

そのころ日立製作所が試作した人工衛星測距儀は東京天文台堂平観測所に移して実際の追跡実験を行っていた。新しい技術を実用化する前には誰れもが通る予期しないトラブルの続出で、天文のことを知らない日立の技術屋と、エネキに関して弱い我々で、噛み合いが必ずしも滑らかでなかったから大変であった。半年の苦心のすえ、1969年6月の梅雨に入る直前の晴夜、数回の衛星の経過についてリターンが初めて捕えられた。本邦初演の新天体観測技術の出演者の1人になったことは光栄であった。そして、この次はいよいよ月だなど仲間うちで話し合ったものである。人工衛星測距の解説は天文月報1969年2月号に竹内さんが書いておられる。

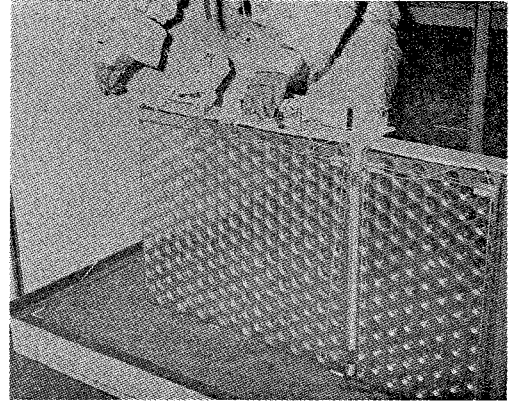
月の測距に関しては、レーザの月報への最初の紹介者である古在さんと広瀬さんが意欲をもやして、基礎的な検討をはじめていた。しかしアレーからの申し出は、岡山の74 吋の年間プログラムも決まっていたので、丁重にお断り申し上げた。しかし、自前で早くやりたいものだという機運は大いに高まって来た。レーザ関係は今までの誼みで日立製作所が大出力のレーザの研究という事で担当してくれることになった。これには広瀬さんと高等学校同窓の日立製作所久保常務(現副社長)のお力添えを特記しておきたい。

東京天文台側は古在さんを主将にしてチーム作りをはじめ、日立の中央研究所や天文台で技術的打合せ会をもつようになったのは1969年7月をはじめであった。

### どの位の信号がもどって来るか

レーザが指向性がよいと云っても、月までの距離が38万kmもあるので、月面ではずい分広がってしまう。また大強度だといっても、やたらに強くするわけにはいかない。あまり強く発振させると、自分自身がこわれてしまう。

レーザレーダ方式で距離を測る時に精度をきめる大きな要素はパルス状にしたレーザ光の幅と立上りの鋭さである。短いパルスを得るためにQスイッチをかける。キセノン・フラッシュ・ランプでルビーロッドを強く照射する。充分強く発光させるために、充電された大容量のコンデンサーをランプを通して放電させる。この放電エネルギーは数千ジュールで、発光時間は1ms以下である。ルビーは直径10mm長さ100mm程の丸棒で、人工結晶である。



アポロ15号が月面に残した逆反射器

両端面を平行平面に研磨し、多層蒸着膜をつけて光共振器を構成するようにすると、レーザ光が発振する。ルビー端面をメッキしないで、両側に外部鏡を置いて光共振器を作ってもよい。この中の1つの鏡を例えば毎秒400回転させると2.5ms毎にごく1瞬間だけ光共振器が構成されて、短いジャイアントパルスが発射する。これがQスイッチ方式で、パルスの幅は10ns(ナノ秒 $=10^{-9}$ 秒)位まで短くすることができる。回転鏡の代わりに電気光学効果に応用したポッケルセル等も使用される。ピーク出力は10GW(ギガワット $=10^{12}$ )にも達するものが最近の技術でできるようになった。

レーザ光の拡がりには、発振器の出口の口径によるディフラクションリミットまで狭くすることは不可能である。人工結晶の均質性などに大きく影響されるらしい。普通のルビーでは2~3mrad(ミリラジアン、 $1\text{mrad} \approx 200''$ )にもなってしまう。

この拡がりを絞りあげるには望遠鏡を逆に使う。普通の天体望遠鏡で、対物鏡口径を $D$ 、倍率を $M$ とすると、射出瞳径(ラムズデンの円) $d$ は $d = \frac{D}{M}$ である。光軸に対して $t_g \omega$ の傾で対物鏡に入った光線は、射出瞳を $t_g \omega'$ で通過する、 $\frac{t_g \omega'}{t_g \omega} = M$ であって、 $t_g \omega'$ の拡がりをもったレーザ光線を逆向きに通すと、対物鏡から $t_g \omega$ にせばめられた光が外に出てゆくことになる。 $d$ はレーザビームの直径より小さいとケラレが生じる。

実際に使う望遠鏡は、ケプラー式では焦点位置で光線が1点に集中するので、強力なレーザ光で空気分子が破壊し放電が起ったりして危険であるから、ガリレオ式として使う。

ルビーレーザをそのまま月を照射すると月面上で1000kmも拡がるから、100倍の望遠鏡を通すとこれを10kmまで縮めることができ、6秒角に相当する。シンチレーションやガイディングエラー(月面上の反射器

は見えないからガイドに工夫が必要) を考えるとこれ以上絞りあげるのは不得策である。

月面上で直径 10 km に拡がったレーザー光で逆反射器のおいてある場所を照射する。反射器に当たった光だけが地球に向かってもどって来る。月面で反射した光は拡散してしまっていて弱くなり、反射器からの光が圧倒的に強い。

逆反射器は頂角が  $90^\circ$  の正三角錐の一種のプリズムで、四角い箱の隅を  $45^\circ$  にななめに切り落した形をしている。その底面に光を入ると正しく元の方向に光が戻る性質がある。手に持って見ると中央に自分の目玉が写っていて、プリズムを傾けてもいつでも目玉が見えている。月面上に置いて来た逆反射器は直径 38 mm の熔融石英で、頂点の直角度は 0.3 秒以下、90% 以上がディフラクションリミット内にもどるといふ良質のものである。38 mm では  $4''$  になる。 $(\lambda=6943 \text{ \AA})$ 。これより小さくすると都合が悪い。月と地球が動いているから、速度光行差によって反射光が発射地点に戻って来なくなる。アポロ 11, 14 号では、この反射器を 10 列 10 行にならべ 100 個を 1 組としたものを持って行った。これを  $\pm 1$  度の精度で地球に向けてセットしたという。アポロ 15 号では 300 個を増やしたものを置いて来た。フランス製の反射器はソ連の月ロケットルナ 17 号と 21 号で月面にはこぼれ、有名な無人月面車ルノホートに乗せられ、地球からの指令で実験の時だけカバーがはずされるという。ムキ出しのままだと放射線で反射率が劣化するといわれ、アポロのものはその点が心配であるが 10 年は変化しないという予定である。

直径 10 km に拡がった光のうち  $11 \text{ cm}^2 \times 100$  または  $\times 300$  の面積に当たった光だけが地球に戻って来る。今度は反射器の回折による拡がりでも地上を照射する。この直径は地上で約 8.5 km である。速度光行差はこの値以下である。

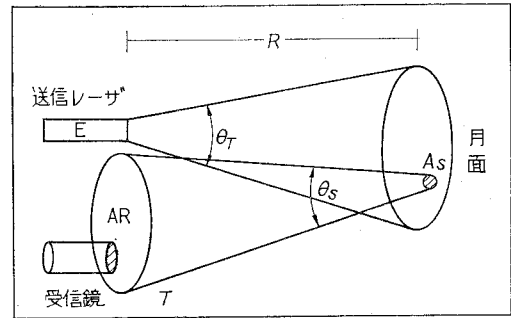
この様に拡がった光をかき集めるためには成る可く大きな受信用の望遠鏡を使えばよいのはいうまでもない。

その他、光を弱める要素は地球大気による吸収、送受信鏡の反射効率、月の秤動による反射器の効率等である。

受信エネルギーを計算するレーザー・レーダ方程式は次式が知られている。(ルビー 6943  $\text{\AA}$ )

$$\frac{S}{E} = \frac{1}{R^4} \cdot \frac{A_S \cdot A_R}{\theta_T \cdot \theta_S} \cdot T^2 \cdot \frac{10^{19}}{2.86} \cdot \frac{\text{Photon}}{J}$$

S: 受信光子数, E: 送信エネルギー (ジュール), R: 距離 (m),  $A_S$ : 逆反射器有効面積 ( $\text{m}^2$ ),  $A_R$ : 受信鏡有効面積 ( $\text{m}^2$ ),  $\theta_T$ : 送出ビーム拡がり (ステラジアン),  $\theta_S$ : 逆反射器ビーム拡がり (ステラジアン), T: 大気透過率, 第 1 図参照。



第 1 図

これを使って、出力 5J の時に、我国最大の 188 cm 反射でどの位の光子がもどるかを計算してみた。T を 0.7, 受信、反射器の効率を共に 0.5 とすると、受信光子数は 10 ケとなる。

これを光電子増倍管 (PMT) で受けるわけであるが、ルビーの赤い光は PMT の感度が悪くなっているところである。S-20 光電面をもった PMT の量子効率は何%といわれ 1 回のレーザー発射で 1 光子が得られないことになる。

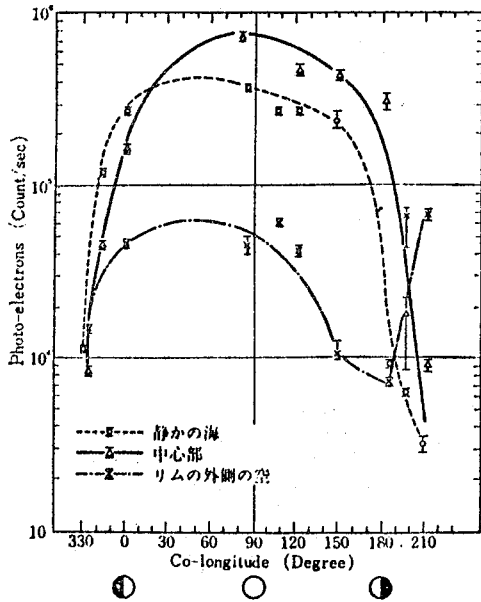
だから、レーザー出力を増強するか、受信鏡の直径を大きくするかしないと確実なリターンが得られない。勿論、上の計算には不確定要素がいくつも入っているので、実験でこの数値をたしかめてみたいものだと考えた。

人工衛星の場合は、追尾の困難さからレーザーの拡がり角を 2 m rad にしている。2000 km の距離の衛星のところでは 4 km に拡がっている。月の場合に比べて 1/2.5 である。一方、人工衛星に搭載している反射器の有効面積は、月面上のものに比べて 1/2.5 位であって、丁度逆反射器の所では月と人工衛星とで条件が同じわけである。

反射器の性能が同じものだとすると、地上を照射する反射ビームの拡がり角は、日と人工衛星の距離の比の自乗になって  $4 \times 10^4$  だけ月の方が損になる。この不足分を補うためにレーザー出力を増強し、大口径の受信鏡を使い、受信エレキ系に工夫が必要になってくる。

このような弱い信号を取扱う時に雑音が問題になる。今までも天体観測技術は暗い微弱な光の検出に努力して来た。しかし強い雑音の中に埋もれた信号を選び出すのはかなりむずかしく、特殊な技術が必要である。天文の方で有名なのは日食外の太陽コロナの観測で、リヨの天才的なコロナグラフの発明で実現されている。最近の情報処理の技術でも雑音の中から有意な信号を取り出す方法がいろいろと考えられ、火星の写真を写したマリナーの情報伝達法は有名である。

月レーザー測距ではどんな雑音が入って来るであろう



第2図 月光の背景光雑音

か。

PMT は暗電流雑音がある。最近では優れた管ができて、特に冷却すると毎秒 100 カウント位まで減らすことができる。

エレキ系の増幅器などの雑音もごく僅少である。

背景光は強い雑音である。光害といって問題にしている人工灯火によるもの、夜天光によるもの、黄道光によるもの等々があるが月面測距ではやはり月光が一番強敵である。

月の明るさはよく知られている様に満月で -12.5 等で各月令による変化は理科年表にでている。堂平観測所の 91 cm 反射で、1970 年 1 月から 3 月に月面の明るさを光子カウンティング法で測ってみた。使った PMT は RCA 7265、中心波長 6943 Å 透過幅 100 Å の干渉フィルターを併用した。視野角は 6 秒角として、月面の中心部、静の海、リムを測定した。図がその結果で、次の式で理論的に計算したものとよく一致した。

$$n = \frac{\pi}{4} I \cdot D_R^2 \cdot \alpha^2 \cdot \Delta\lambda \cdot T \cdot \frac{10^{19}}{2.86}$$

$n$ : 受光光子数,  $I$ : 背景輝度,  $D_R$ : 受光鏡直径 (m),  $\alpha$ : 視野角直径 (ラジアン),  $\Delta\lambda$ : 干渉フィルター透過幅 (Å),  $T$  は受信鏡の透過率である。

$\alpha$  はシンチレーションやガイディングエラーを考えると 6 秒角どまりである。  $\Delta\lambda$  はレーザー光が単色性がよいので、原理的にはすごく狭くすることができるが、技術的には狭い透過幅の干渉フィルターは使用上不便であって、2~3 Å どまりである。

これから 188 cm を受信用として使った時の月面背景光を計算すると、満月で 3 Å のフィルター、6 秒角の視野で 1 秒間に  $1 \times 10^5$  ホトン位になってしまう。

前の期待されるレーザーリターンより格段に大きいのでビックリするがレーザーの幅が小さいことを利用して、背景雑音をへらすことができる。

そもそもレーザーを空に向けて発射すると、望遠鏡のすぐ近くの厚い空気層で散乱したレーザー光が受かってしまう。PMT がその散乱光に感じて、測距用カウンタを止めてしまつては月の距離が測れない。これは人工衛星の時も同じである。そこで、レーザーを発射して、しばらくの間は PMT が働かない様にしておく。我々はこれをレンジゲートと名づけリターンが戻ってくると予想される直前まで、ゲートを閉じておく、月までの距離は大体わかっているので、レーザー光が往復してくるのに約 2.5 秒かかるが、詳しく計算すればレンジゲートの開いている時間を  $10 \mu s$  ( $10^{-5}$  秒) とすることができる。そうすれば、月面からの雑音は 1 ホトンになるから、前述のリターン信号と区別ができるであろう。

序でに白昼の空ではどうであろうか、半月は昼間でも肉眼で見ることができるから、太陽から 90 度もはなれると月面の方が青空より明るいことになる。上の条件では昼間でもリターンが検出できることになる。(勿論、ポインティングやガイド等に問題がかなりあるが……)。レーザーが単色性で、狭い干渉フィルターを使える強味なのである。 (次号につづく)