

レーザーによる人工衛星測距

竹 内 端 夫*

レーザー光を地上から発射し、これが人工衛星に反射されて再び帰って来るに要する時間の測定から、人工衛星までの距離を測定する方法はアメリカの航空宇宙局、スミソニアン天文台、フランスの国立宇宙研究所などで実験研究されている。またわが国でも日立製作所が開発した測距儀を東京天文台の堂平観測所に据付け、昨年の12月から協同で試験観測を開始している。ここではスミソニアン天文台が行なっている実験装置の説明を中心に、併せて国産機の概要を紹介したいと思う。

人工衛星の軌道を1メートルとか、あるいは数十センチといった正確さで求めることができるようになると、地震予知のための地殻変動の研究や、アインシュタインの相対性原理の検証に人工衛星が利用できるようになる。しかしこのように高い精度はペーカークンカメラのような写真観測からは期待することができない。その理由は写真測定の場合の1"とか2"といったどうしても避けられない誤差が、1000軒も遠くにいる衛星の位置に

少なくとも10メートルという程度の不確かさを導き入れてしまうからである。

ところがレーザーを使うことにすると事情は変わってくる。レーダーと同じようにレーザーは衛星までの距離を測るもので、空間における衛星の見える方向を知るものではない。しかしその測距の精度は現在でも数メートル、近い将来には数十センチにまで高められる可能性がある。

レーザー測距儀が人工衛星の観測に応用できるようになったのは、まだここ数年来のことである。レーザー光を用いて測距を行なうためには、地上から発射されたレーザーの細い光束を人工衛星によって反射させて、再び地上の受光器に送り届けてやらなければならないが、そのためには人工衛星の表面に光が到達したのと全く同じ方向に、光を反射させる特殊なプリズム—逆反射器—を張りつめておく必要がある。この逆反射器を積んだ人工衛星というのは、1964年にアメリカが打ち上げたエク



第1図 アメリカのアリゾナ州マウント・ホプキンスにあるスミソニアン天文台のレーザー測距儀（左側）とペーカークン・シュミットカメラ（右側）。

* 東京天文台

第1表 レーザー実験用人工衛星

衛星名(国)	遠地点 (km)	近地点 (km)	軌道傾斜	周期 (分)	逆反射器 の数	有効面積 (cm ²)	姿勢安定法
Expl. 22 (米)	1090	890	80°	105	360	80	磁気
Expl. 27 (米)	1320	940	41	108	360	80	磁気
Geos 1 (米)	2270	1120	59	120	334	940	重力
D 1-C (フ)	1350	530	40	104	144	100	磁気
D 1-D (フ)	1850	580	39	110	144	100	磁気
Geos 2 (米)	1610	1080	74	112	400	1100	重力

スプローラー22号をはじめとして現在6個を数える。その中の2個がフランスの打上げたディアデム衛星であることは注目に値する。これらの衛星が出現してはじめてレーザー測距のシステムが可能となったのである。

個々の逆反射器は一辺の長さが数センチの、立方体の一つの頂角のような形であるが、アメリカの場合これを人工衛星の一つの面に300から400個ぎっしりと並べて反射面をつくっている。地上からの光を反射するためには、この反射面が地球の方を向いている必要があるが、ジオス1号とジオス2号の場合には人工衛星の姿勢を重力で制御して、常にこの条件が満たされるようにしてある。しかし他の四つは地球の磁場を利用しての姿勢制御で、南半球では反射面が空を向いてしまうので、レーザー実験は北半球でしかできない。

レーザー光というのは可視光のスペクトルの中の一つの波長(ルビーレーザーの場合6943Å)をもっているもので、ペーカナンカメラなどの場合と同様、空が晴れていなければ観測はできない。したがって望遠鏡と同じように観測条件のよい土地に据付けなければならない。しかしペーカナンカメラのときは、衛星に太陽の光が当たっていて、しかも観測地は地球の影の中にいなければな

らないという、いわゆる薄明条件を満たしている必要があるが、レーザー観測の場合は発射したレーザー光が衛星に当たるだけ衛星の予報位置が正しければ、衛星が光っていない真夜中でも、または空が明るい真昼でもかまわないという長所がある。

さらにレーザー測距は技術的にはレーザー光を発射してから、帰ってくるまでの時間を測るだけの問題であるので、ペーカナンカメラのときのように撮影、現象、フィルム測定、位置整約といった多くの時間を要するような操作が全くない。極端に言えば受光器が反射光を受取った瞬間に、記録器には衛星までの距離が数字で表示されている、といってもいいくらい迅速に結果を見ることが出来る。

またいわゆる電波レーダーと比較すれば、レーザー光による測定は次の三点ですぐれている。まず発射するパルスの継続時間を極めて短かくすることができるので測定の精度が高い。レーザー光は極めて細い平行した光束として遠くまで送ることが可能であるので効率が高い。そして最後に波長が短いので大気によって受ける影響を補正することが簡単である、という三点である。

第1表および第2表に今までに発射された逆反射器を載せた6個の人工衛星の特性と、代表的なレーザー観測所の性能を掲げておく。

スミソニアン天文台が現在運営している、12カ所のペーカナン・ステーションに備えつける予定のレーザー測距儀の原型として、現在アメリカのアリゾナ州マウント・ホプキンスで実験を進めているシステムは次のようなものである。

まずレーザー光はクセノン・フラッシュランプによって励起されたルビーロッドから発し、Qスイッチによって毎分1発という比較的ゆっくりとした割合であるが、500 MW という高出力となってコリメーターを通して送光される。直径9ミリ長さ16センチのルビーロッドはクセノンランプと共に、楕円形の切口をした銀メッキの筒の中の楕円の焦点の位置に並べられ、循環水によって冷

レーザーとは

1960年アメリカのヒューズ社のメイマンによってはじめて実現された、周波数が一定で、位相もそろった光。装置は原理的にはメーザーと全く同じで、クロムイオンを少量含んだルビー棒と、これにエネルギーを与えるクセノン放電管とからなり、放電管からの光で刺戟されるとルビー棒から波長6943Åの強い赤色光が出る。レーザー光はすぐれた単色性とその平行性のために超遠距離にまで到達させることができるのが特徴である。

第2表 レーザー衛星追跡所

所在地	アメリカ 航空宇宙局	フランス 国立宇宙 研究所	アメリカ ケンブリッジ 空軍研究所	アメリカ スミソニアン天文台		
	アメリカ メリーランド	フランス, スペイン	アメリカ マサチューセツ	アメリカ ハワイ	ギリシャ	アメリカ アリゾナ
パルス継続時間 (ns)	12—18	25—30	30	40—60	10	15
パルスエネルギー (J)	1	1	1.8	0.5	1	7.5
レーザー出力 (MW)	70	30	60	8	100	500
パルス発射頻度 (min ⁻¹)	60	15	20	2	2	1
測時分解能 (ns)	1	10	1	10	10	1
レーザー光束拡がり (mrad)	1	0.5—2	3	1	1	0.6—6
受光望遠鏡口径 (cm)	40	35	13	40	40	50
受光バンド幅 (nm)	1	1.8	1	2	2	0.6
受光光束幅 (mrad)	1.5—5	0.5—2	1—5	2	2	0.6—6
追尾装置	プログラム	手動	プログラム	手動	手動	手動

却されている。燐酸カリウムを含んだポッケルセルがスイッチとして用いられており、適当な時刻に達するまで高いポテンシャルを保っていて、レーザー光を発射しないように防いでいる。それから 30 ns (ns, ナノセカンドは 10⁻⁹ 秒) の間にポテンシャルは 0V に落ち、それから 200 ns 後に 15 ns だけ継続するジャイアント・パルスが出て行くのである。コリメーターとしては口径 15 cm のものを用い、出ていくレーザー光束の拡がり角度の 2' から 20' の間で調節できるようになっている。レンズ類はすべて 6943 Å のレーザー光が最もよく透過するようにコーティングされている。

コリメーターの 15 cm レンズの背面からの反射光を受けける位置に ITT の二層光電ダイオードが置かれて、レーザー光が発射された瞬間からの時間を測定する時計がスタートして、距離の測定が開始されるのである。

衛星に反射されて帰ってきたレーザー光は、光電管をその焦点においた口径 50 cm の反射望遠鏡によって受止められる。またこの望遠鏡が、正しく衛星の方に向いているかどうかを確かめるために、眼視ファインダーも必要である。送光器であるコリメーターを含めて、都合 3 本の望遠鏡が一つの架台に載せられて、レーザー測距儀を形造ることになる。架台としては経緯台式に動くものが用いられ、角度の設定精度は ±1' 程度であるという。ただし角度を変える操作は手動で行なうので、早い速度で空を横切っていく人工衛星を次から次へと追いかけるのは甚だ難しい。そのためにレーザー光の発射も 1 分に 1 回という間隔の広いものとし、手動で次の予報位

置まで動かすための時間をかせいでいるのである。

受光反射望遠鏡の中に入ってきたレーザー光は、主鏡

一般課程 地学 [I]

天文・気象

A 5 判 180 頁
¥550

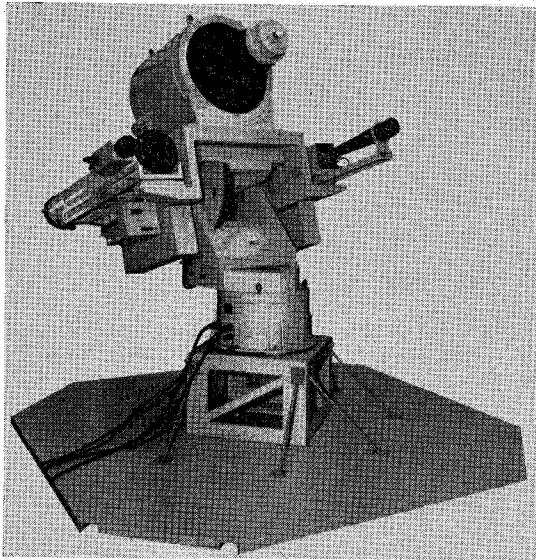
東京天文台 大沢清輝
東京学芸大(前)富永政英

内容:

1. 天体の観測
2. 太陽系
3. 恒星の世界
4. 星雲と宇宙
5. 天文学の応用
6. 大気中に起る現象
7. 天気の現象
8. 物理的に見た海洋

今回の改訂増補によって最新の結果をとり入れ、
高校、アマチュア天文家の参考書にも好適。
近日発売

東京都千代田区三崎町 2-10-5 株式会社
電話 (263) 0671 (代表) 東京教学社
振替口座 東京 66168 番



第2図 国産のレーザー測距儀

副鏡によって反射した後、メニスカスのフィールドレンズを通して像を結ぶ。これがコリメーターレンズによって平行光線となり、6Aの透過幅をもつ干渉フィルターを通してから集像レンズにより光電増幅管 RCA.7265 の陰極面上に投ずるのである。これら全受光光学系の有効率は約 43% であるという。

観測を行なった時刻と、レーザー光が往復するに要した時間とは VLF 報時で運転する水晶時計 EECO ZA 34685 型を用いて導かれる。この時計を用いての絶対時刻の誤差は UTC 系で $\pm 100 \mu\text{s}$ (μs , マイクロセカンドは 10^{-6} 秒) 以内に保たれ、短い時間内における周波数安定度は 2×10^{-10} 以内という高いものである。この安定した周波数を用いて、もし往復時刻を 1 ns まで測ることができたとすれば、これを光速と組合せて、人工衛星までの距離を 15 cm という驚異的な精度で求めることができるわけなのである。

このような方法による測距がどのくらい遠くにいる人工衛星にまで有効かは、必要とする精度にもよるが、1) 夜間の観測、2) 光の帰って来る確率を 70% と考え、3) ジオス 1 に搭載されている程度の逆反射器を積んでいるとし、4) 光束のひろがりや角度の $2''$ 程度におさえることができると仮定すると、約 1 万 km と推定されている。もしレーザー光の送信に口径 1.2 m 級の反射鏡が利用できれば、この距離は 3 万 6000 km、すなわち静止衛星の軌道の位置までのばすことができるであろう。さらに反射光を受ける光学系として口径 10 m の反射鏡を用いることができれば、月面に置いた逆反射器からのレーザー光も感知できるはずである。

一方わが国における人工衛星用レーザー測距儀は、昭

和 42 年度の通産省の鉱工業技術研究補助金を受けて東大生産研の齋藤成文教授の指導の下に、日立製作所戸塚工場のレーザーグループが開発を行ない、このほど人工衛星に向けて試験観測を行なう段階にまで達した。その特性を、特にスミソニアン天文台の開発したものと異なる点に重点をおいて説明すれば次の通りである。

レーザー光の出力はピーク値で 5 MW ~ 20 MW で、スミソニアンのものに比べてやや小さいが、毎秒 1 回の頻度で 15 分間は連続発射が可能である。このように早い繰返しの観測を可能にしたのは、人工衛星の追跡を紙テープを用いて自動制御する方式を採用したため、これがこの測距儀の最大の特徴である。すなわち電子計算機で計算した毎秒の人工衛星の予想位置(高度および方位角)を紙テープにパンチして、これをプログラム追尾装置の光電リーダーに読み込ませると、レーザー発光装置および受光望遠鏡を載せた架台は、自動的に人工衛星を追いかける。観測者はファインダーを通して人工衛星が視野の中の十字線に乗っているかどうかをチェックし、もしプログラム追尾が完全でないときには、手もとの微動調整スイッチを用いて架台のスピードを変えることができる。

このように原則的には望遠鏡が常に人工衛星の方に向いているので、レーザー発射の頻度は発光装置にだけ依存することとなる。もし発射する度に必ず衛星からの反射光が捕えられ、観測が成功するものならば、軌道の研究の上からは 1 分に 1 回の頻度でも十分なのであるが、追跡の精度や、大気中の雑音による妨害など、種々の理由によって成功率が下ることも予想されるので、5 MW という強力なジャイアントパルス・レーザーが発射される頻度としては甚だ高い、毎秒 1 発の発光装置を開発することにしたのである。

昨年 9 月から東京天文台の堂平観測所のペーカーン・シュミットカメラ観測室に並んで、レーザー測距儀観測室の工事が始まり、12 月の 15 日には戸塚工場に完成していた第 1 号機が運びこまれた。早速 16 日から光学部分の据付調整が開始され、続いてレーザー発光部、プログラム追尾部をテストして、年末までに漸く 1 km 先の剣ヶ峰の頂上に建てた標的に向けて測距実験を行なうまでにこぎつけた。

現在、戸塚工場の HITAC 5020 および天文台の OKI-TAC 5090 を用いて追尾用のテープを作るプログラムを開発中で、この 2 月ころからは実際に逆反射器を載せた人工衛星を目標としてレーザー光を発射できる予定である。もし計画通り人工衛星までの距離を数メートルの精度で測定することに成功すれば、すぐ傍のペーカーン・シュミットカメラで得られた写真観測の結果と組合せて、衛星の空間における位置は堂平での観測だけで決められるようになる。近く実現することになるであろう国産の人工衛星の軌道追跡に威力を発揮することが期待される。