

最近の技術から

レーザーによる人工衛星の測距

土 屋 淳

東京大学東京天文台 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

1. ま え が き

人工衛星の追跡には電波技術が広く使われている。初期には、望遠鏡と写真による天文観測が活躍したが、最近では特殊な場合のみである。レーザーによる人工衛星の測距は、その精度が前二者にくらべて2桁近くも高く1~2 cm に達し、人工衛星の運動理論の研究、地球回転・極運動の監視、地殻変動測定、測地学的な利用、人工衛星のミッション援助などに利用されている。

1960年の最初のレーザー発振成功から4年後、逆反射器を搭載した衛星「ビーコンB」(米)が打ち上げられ、人工衛星のレーザー測距 (satellite laser ranging 以下 SLR と略記する) が始まった。この技術の現状を紹介し、将来の展望についても述べたい。

2. 人工衛星の軌道に影響を与えるもの

人工衛星の運動は太陽系の惑星などにくらべて複雑である。その原因には、

- a) 地球の重力ポテンシャルが球対称でないこと
- b) 地球大気による空気抵抗
- c) 太陽光の輻射圧の影響
- d) 月・太陽・惑星などによる重力

などがある。これらのうち、d) は、通常、影響は小さく、また、正確に計算できる。影響が大きいのは初めの三つで、しかも、b), c) は、理論計算がむずかしい。したがって、科学的な観測を始め、定常的な衛星の運用にも軌道追跡を常時行なう必要がある。一般の人工衛星の軌道情報に対する要求精度はそれほど厳格ではなく、軌道上の位置にして数十 m から時には100 m 以上の誤差が許される。電波追跡はこれに十分な能力を持つ。一方、力学に関係するものと測地用の衛星追跡には、1 cm の桁の精度が必要であって、SLR の本領はここにある。

3. SLR 用の人工衛星

SLR 用の人工衛星は、レーザー光を送信点に反射するため、多数のコーナキューブからなる逆反射器を搭載

している。このような人工衛星は現在、十数個が飛行中である。「ラジオス」(米)、「スターレット」(仏)、そして「あじさい」(日)などは大気抵抗や太陽輻射圧の影響が最小になるよう、電波送信機とアンテナや太陽電池板などをいっさい持っていない(図1)。一方、「シーサット」(米)(現在、機能を停止)の例では、海面測定用レーダー高度計のミッション援助を目的としてSLR用逆反射器を積んだ。逆反射器の有効面積は0.01~0.1 m²程度であって、1個のコーナキューブは数 cm の大きさである。その結果、回折効果によって逆反射光は数秒角の広がりとなり、光行差の影響を逃げることができる。

4. SLR の原理と実際

SLR の原理は簡単であって、レーザーのパルスが地上と人工衛星とを往復する時間から距離を求める。測量用の光波測距儀のような高周波で変調したCWレーザーは、SNRが不足するので利用されていない。

受信パルスのエネルギーは近似的に次の式で示される。

$$P_r = P_0 (16 \sigma S T^2) / (\pi^2 \rho^4 \theta^2 \Theta^2)$$

ただし、 P_r は受信信号エネルギー(J)、 P_0 は有効送信エネルギー(J)、 ρ は人工衛星までの距離(m)、 θ は送信ビーム幅(rad)、 Θ は逆反射器の散乱角(rad)、 σ は逆反射器の有効面積(m²)、 S は受信望遠鏡の有効面積(m²)、そして、 T は大気の透過率である(図2)。ふつう0.1~1 Jのレーザーを0.1~1分角のビーム幅で送り出し、口径50~80 cmの望遠鏡で受信すると、遠距離衛星の場合、受信光子数は10個程度となる。天空の自然および人工の雑音光は、干渉フィルタとレンジゲートで除去する。これによって、昼間の観測も可能である。ただし、いうまでもなく、晴天でなければならない。

測距精度はレーザーのパルス幅で決まる。現在は、YAGレーザーにより0.1 nsの桁のパルス幅が実現していて、冒頭に述べたcmの桁の測距精度が得られる。

SLR用には可視光レーザーが用いられ、第2高調波YAGレーザーとルビーレーザーの2種が使われている。これ以外のレーザーがSLRに利用された例はほと

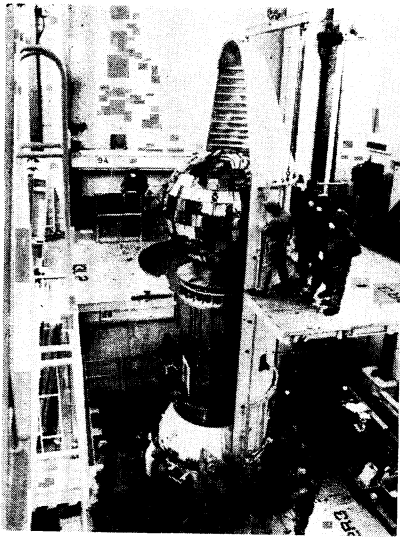


図 1 1986年8月わが国が打ち上げた測地用人工衛星「あじさい」が H-1 ロケットに組み付けられた状況
先端の球体のみが衛星で、それ以外は取付金具や同時に打ち上げられた別の衛星等である。太陽光反射用の曲面鏡 318 枚とレーザー用逆反射器 120 組 (コーナキューブ 1,436 個) を表面に張ってある。球体の直径は 2.15m, 重量 685 kg. (宇宙開発事業団提供)

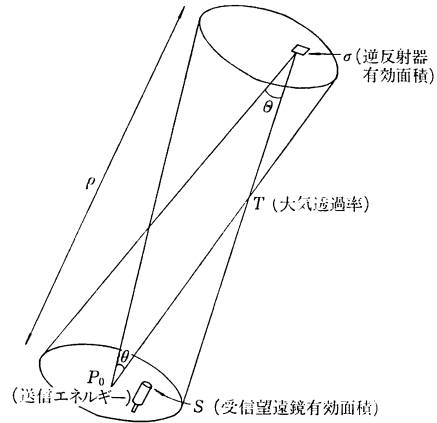


図 2 レーザー測距の受信エネルギー

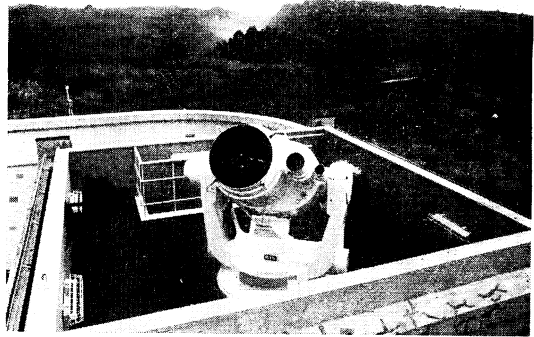


図 3 レーザー測距装置の例 (海上保安庁水路部下里水路観測所)
望遠鏡の運転は電算機によりプログラム追尾される。(海上保安庁水路部提供)

んどない。

地球大気による光路の伸びは気象データにより 1 cm の精度での補正計算が可能である。逆に言えば、これが現在の SLR の精度の限界を与えていることになる。

5. SLR の今後の課題^{1,2)}

SLR の測距精度が 1 cm の桁に達したのは 1980 年以降である。現在の大きな課題は、1 cm の精度のデータを解析して、地球力学の物理像を明らかにすることである。

測距精度を mm の桁に向上するため、2 色 SLR が検討されているが、超えなければならない技術的課題は多い。

地球回転観測や測地には VLBI (超長基線電波干渉計) との競合がある。VLBI も測地的には 1 cm の精度をもつが地球重力場についての情報は与えない。そのかわり、宇宙という慣性系における地球や太陽系の振舞いを知ることができる。SLR と VLBI は、相補的な関係を保って共存するであろう。VLBI は全天候運用が可能であるが、装置の価格は SLR のほうが若干低い。SLR が mm の測距精度を実現したとき、VLBI に対して優位に立つであろう。

もう一つ VLBI と競合する応用として、遠距離区間での時刻比較がある。ヨーロッパで計画されている LASSO 計画では、特別な静止衛星の打上げが予定されている。2 局からほぼ同時に SLR 観測を行ない、衛星上で両局のレーザーパルスの到達時刻差を測って、2 局の時計の差を 1 ns 以下の精度で求めるものである。

人工衛星に SLR 装置を搭載し、地上に多数の逆反射器を置く逆レーザー方式の提案がある。これは、地殻変動観測などに有力であるが、GPS (global positioning system) の衛星を利用した GPS 測位干渉計と競合する。

文 献

- 1) 友田好文, 鈴木弘道, 土屋 淳 (編): 地球観測ハンドブック (東大出版会, 東京, 1985).
- 2) 日本測地学会 (編): GPS—人工衛星による精密測位システム (日本測量協会, 東京, 1986).

(1987年2月24日受理)