

レーザによる高精度軌道計測：逆反射鏡のしくみと応用

大坪 俊通¹⁾・Graham M Appleby²⁾

¹⁾一橋大学 ²⁾NERC Space Geodesy Facility, UK

Laser ranging technique for precise orbit measurement: retroreflector issues

Toshimichi OTSUBO¹⁾ and Graham M APPLEBY²⁾

¹⁾Hitotsubashi University, ²⁾NERC Space Geodesy Facility, UK

Abstract

Satellite laser ranging has been the most precise technology for measuring satellite orbits, and it achieved sub-centimetre ranging precision in modernised stations. Retroreflectors on board are now to be revisited: (1) the broadening of a reflected pulse is a key error factor for a number of satellites, and (2) the velocity aberration up to several tens of microradians should be compensated by adjusting the dihedral angle. These issues are investigated in view of existing geodetic satellites and also in view of optimal design of the ASTRO-G satellite.

Keywords: Satellite laser ranging, retroreflector.

1. レーザ測距技術とCCR

1960年代に初めて実証されて以来、レーザパルスによる測距は常に軌道計測技術の中で最も高い精度を達成している。最新技術により、多くの測距局においてシングルショット 4-6 mm, ノーマルポイント 1-2 mm 程度の測距精度が得られている。

日本の衛星としては、1986年に打ち上げられた「あじさい(EGS)」を先駆けとし、1996年に「みどり(ADEOS)」, 2001年に「LRE」(図1), 2002年に「みどり2号(ADEOS-II)」, 2006年には「だいち(ALOS)」および「きく8号(ETS-VIII)」に対するレーザ測距が世界の観測局の協力のもと行われてきた。

衛星側に搭載する装置は、コーナーキューブリフレクタ(以降CCRと略す、日本語で逆反射鏡と呼ばれることもある;図2)と呼ばれるプリズムもしくは鏡の組み合わせがあればよい。この種の反射鏡は、物理実験や地上測量などにもよく用いられるものであり、電気を必要としない受動的な装置である。プリズ

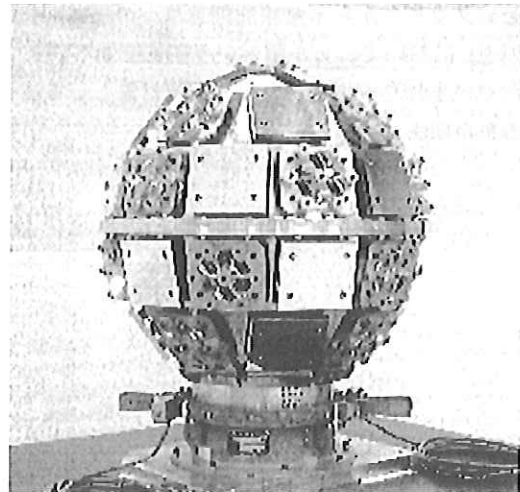


図1: LRE (Laser Ranging Equipment). © JAXA.

ムに入射した光は、直交する3つの裏面で反射されることで向きが反転し、光を来た方向に正確に返すことができる。この性質を利用して、地上から望遠鏡を通してレーザパルスを発射

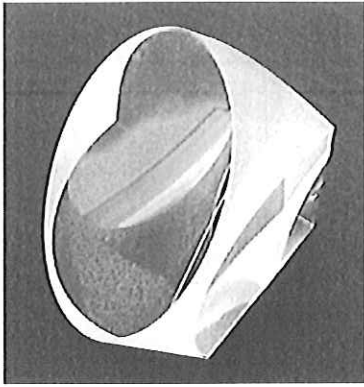


図2: コーナーキューブリフレクタ. 左の円の部分が開口面で, 右に位置する3つの面が反射面.

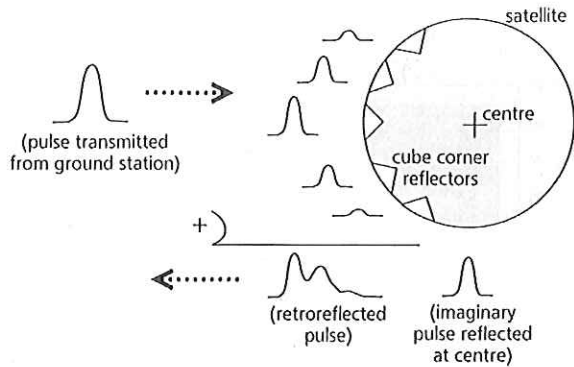


図3: Target signature 効果概念図.

し, その望遠鏡で受信し往復に要した時間間隔を正確に計測することで, 地上局・衛星間の距離がわかる. このような測距観測局が, 世界各地数十カ所に設置され, 連日昼夜を問わず, 様々な人工衛星に対して協調的な測距観測が実施されている.

本稿では, 正確なレーザ測距を安定して行うための, CCR 関係のトピックを2つ取り上げる.

2. CCR アレイの奥行き問題: Target Signature

1990 年代半ばより測距精度向上を背景にして, これまで無視できると考えられていた誤差が顕在化してきた. Target signature 効果¹⁾として知られる反射波形の広がりもその誤差のひとつである.

ほとんどのレーザ測距衛星においては, 受信時にじゅうぶんな信号強度を確保するために, CCR が複数個搭載されている. 図3に示されているように, それらが観測局から見て奥行きを持つことにより, 入射パルスが時間的に鋭いものであっても, 反射パルスの波形は時間的に広がってしまう. 波形が時間的に広がると, その広がり「どこか」で規定される受信時刻はレーザ測距システムに大きく依存するのである.

すでに地球を周回している LAGEOS, AJISAI, ETALON のような球形の衛星について考える. これらの衛星の大きさや搭載されている CCR の材質・形状は全く異なる. まず, われわれは, 個々の反射鏡の材質・形状に関するデータから, 立体的な入射角に対する応答を計算した. さらに, 今度は衛星全体を考え, その光学的な応答を詳細に計算した.

このような球形の測地衛星の重心補正值は, 測距システムや測距方法に強く依存することがわかっている. 全体的に見

て, 衛星サイズの小さい LAGEOS はシステム依存性が 1 cm 程度と小さいが, サイズの大きな ETALON や AJISAI は 4 cm 以上に及ぶ²⁾.

この誤差要因により, 地球重力定数 GM, 測距局の位置と速度の鉛直成分, 地球基準座標系のスケールなど, 測地学上重要なパラメータの精密決定が妨げられている.

レーザ測距の技術・運用を統括する国際組織 International Laser Ranging Service (ILRS) においても, この問題は盛んに議論されており, 筆者2名を含む Signal Processing Working Group が結成され, 世界の数多くの研究者が取り組んでいる.

3. 光行差補償のための CCR 直交度調整

地上の測距局と人工衛星は, 3 ~ 8 km/s の相対速度をもって互いに運動している. 測距観測を成立させるためには光行差を考慮する必要がある. もし, CCR が光を「精度よく」入射方向に戻してしまうと, 測距局で反射光を受信できないおそれがある.

これを解決するため, CCR の頂角をあえて 90° からわずかにずらし, 反射光に空間的広がりをを持たせる工夫が広く行われている. このときのずらす角度を dihedral angle と呼ぶ. われわれは, CCR の仕様をもとに, 遠方界回折パターンを計算するソフトウェアを開発した. 試験的に, LAGEOS 衛星に搭載された CCR の寸法で, dihedral angle が 1 秒角・2 秒角・3 秒角と設定したときの遠方界回折パターンを図4に示す. Dihedral angle を大きく設定するほど, 空間的なビーム広がりが大きくなり, エネルギーが拡散することがわかる. なお, 実際に LAGEOS に搭載された CCR の dihedral angle は 1.25 秒角

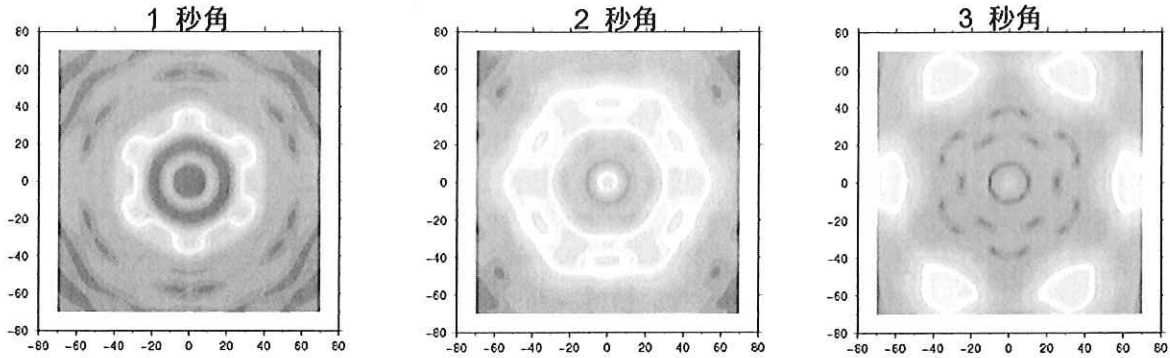


図4: Dihedral angle による回折パターンの変化. 38mm 径の CCR を仮定. グラフの単位は microrad.

であり, 高度 6000 km の円軌道衛星に対して発生する 35~40 μ ラジアン³⁾の光行差が考慮されている.

前述の target signature 効果を見積もる際, 従来はこの回折パターンを考慮せずに単純化して計算を行っていたが, 今後はモデルに含めることで, より正確な反射波形のシミュレーションが期待できる.

あらゆる入射角に対して, このような回折パターンを計算することは, 従来はスーパーコンピュータレベルのリソースを必要としたが, 現在の高性能パソコンで数日ないし数週間で処理可能である.

4. さいごに: ASTRO-G CCR アレイへ向けて

レーザ測距技術および CCR は, 極めて単純な原理を実現しているが, 測距精度の向上・計算機性能の向上に伴って, 新たな研究テーマも残っている.

この研究は, ASTRO-G 衛星(2012 年ころ打ち上げ予定)に搭載する CCR アレイの設計にも応用されることになっている³⁾. 本衛星は, 長楕円軌道を採用することになっており, レーザ測距観測を成立させるためには従来にはない光学設計が必要なる. 現在, これに適した CCR の組み合わせを検討中である.

参考文献

- 1) Appleby, G. M., Satellite signatures in SLR observations, in Proc. 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2.1-2.14, 1992.
- 2) Otsubo, T., G. M. Appleby, System-dependent centre-of-mass correction for spherical geodetic satellites,

Journal of Geophysical Research, 109, B4, 9-1—9-10, 2003.

- 3) 大坪 俊通, 國森 裕生, 中村 信一, ASTRO-G 精密軌道決定用レーザリフレクタの設計 [2] 配列と光学応答, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 2007.

(2008 年 3 月 23 日受付, 2008 年 6 月 15 日受理)