

SELENE-2での月レーザー測距

野田寛大¹⁾・國森裕生²⁾・月光検討会

¹⁾ 国立天文台 ²⁾ NICT

SELENE-2 Lunar Laser Ranging experiment

Hiroto NODA¹⁾, Hiroo KUNIMORI²⁾, The Moonlight Project

Abstract

The Lunar Laser Ranging (LLR) has a long history of more than 40 years since the Apollo and the Luna mission put laser reflectors on the Moon since 1960's. We propose to put a new-type laser reflector on the lunar surface for Japanese no-human lunar landing mission SELENE-2. Due to the fact that currently-available reflectors are localized in the lunar northern hemisphere, the new reflector should be put on the southern hemisphere of the Moon so that baselines between currently-available reflectors can be long enough to achieve more accurate observation for the study of the dynamics of the lunar rotation. Currently Japan does not have any ground laser stations for the LLR, while the budget for the new telescope is limited. We summarize the specification of the telescope and the laser system for the LLR and discuss the possibility of sharing a telescope for other astronomical or planetary science purposes.

Key Words: SELENE-2, Lunar Laser Ranging

1 はじめに

月の内部構造を推定する方法は、地震学の手法を月に応用した月震計データの解析と、月面上に設置された複数のレーザー反射板までの地球からの距離を正確に測定して月の回転変動を測定する方法 (Dickey et al., 1994) がある。月の回転変動 (物理秤動) を詳しく測ると、慣性能率比、月の核の有無や大きさ、熔融状態、核-マントル境界の偏平率、摩擦などが得られ、月の起源と進化を制約する鍵となる。後者は月レーザー測距 (Lunar Laser Ranging: LLR) と呼ばれる。1969年にアポロ月着陸船の宇宙飛行士が反射板を設置してから約40年間の測定成果があり、受光したレーザーのタイミング検出精度が向上したことなどにより、統計処理を施した後の精度で測って cm のレベルで月-地球距離を測定することが可能となりつつある。2005年には米国の Apache Point 観測所が観測を開始し、これまでの観測所での戻り光子数を大幅に上回り、測距精度も cm を切る精度に迫ろうとしている (Murphy et al., 2008)。「かぐや (SELENE)」に続く日本の次期月探査計画 SELENE-2 でもロボット技術で反射板を設置することを計画している。SELENE-2 では、月の見掛け上の回転運動 (幾何秤動) により発生する誤差を小さくするための工夫をした反射板を、現在の反射板の月面上の配置から離して設置することによって月

の回転変動を1ミリ秒角以下の高精度で推定することにより、月の核 (存在すれば) とマントルの間で生じる差動回転による摩擦によって起こる回転の消散の割合を正確に決めることを目指す。同時に LLR データは月の暦の作成のために用いられており、月面上での無人および有人探査が活発になるであろう今後は、精密な月座標系の確立とより精密な暦が必要となる。

現在 LLR を行っている地上レーザー局は米国の McDonald 観測所、Apache Point 観測所、フランスの Cote d'Azur 観測所 (OCA) の3か所であるが、予算の関係で米国は2010年度からは McDonald 観測所での観測を停止し、Apache Point 観測所一局のみになる予定である (Williams, 私信)。フランス局は改修が行われ、2009年11月に新しい装置でのファーストライトを迎えた。地球上での観測局を増やすことにより観測の冗長性を持たせ、かつ異なる地球回転の位相で観測することにより、これまで見えていなかった月の回転変動を詳細にモデル化できると期待される。また、厳しい予算状況等により、今後も安定したデータを取得できるかどうかは不明である。そこで日本が自前でデータを取得することが必要となるが、昨今の厳しい予算状況で、LLR専用の観測所を立ち上げることは困難と予想される。現在国内には1-2m弱級の光学望遠鏡が稼働または建設されており、LLR観測と共用できる

可能性があると考えていた。本研究会では現在のSELENE-2 反射板および地上局の検討状況を紹介し、今後の計画に生かしたいと考えている。

2 反射板の検討状況

反射板は月面着陸機の一か所に取り付けられて打ち上げられ、着陸機が月面に着陸したのちにロボットアーム（マニピレータ）で展開される。アポロミッションで展開された反射板は直径3.8cmの小型コーナークューブリフレクター（CCR）がCCR保持部分の間隔を空けて100個敷き詰められた格好をしている。小型のCCRは必ずしも光学的に有利な構造ではないが（Otsubo et al, 2009）、昼夜の温度変化に対して光学的な性能が発揮されるように作成されたものと考えられる。他方、地球から見る月は月の歳差・章動運動である物理秤動に加えて、月軌道が楕円であることに起因して見かけ上も首振り運動を行う（幾何秤動または光学秤動と呼ばれる）。幾何秤動の大きさは片側10度程度になるので、反射板も同様に月-地球方向に対して最大10度程度の傾きが発生し、測距誤差の主要因となっている。30cm四方の反射板が10度傾くので最大で10cm程度の測距誤差となるが、光子が統計的には反射板の中心付近で反射すると仮定して、光子数を稼いで統計誤差を減らすことにより現在の測距精度が約1cm程度という値を出している。SELENE-2では3つの面をそれぞれ垂直に貼り合わせた格好をした単一の大型反射板を設置することにより、幾何秤動による誤差を少なくすることを検討中である。昼夜の温度変化による反射板の貼り合わせ角度変化や面そのものの歪が発生するので、求める精度のものを製造できるかを検討することが課題となっている。

3 地上局の検討状況

地上局に求められる機能・性能は1) レーザを射出し、2) 反射した光子を受光し、3) 光子の飛行時間を計測し、4) 距離を1cm以下で測定することである。また、5) 航空機などにレーザを当てないように安全対策も必要である。これらを実現するための第一歩として、望遠鏡やレーザ、補償光学系の専門家に聞き取り調査を実施し、また、2009年度の国立天文台の開発経費を用いて地上レーザ局の概念検討をNEC社に依頼した。その結果、以下に述べるような望遠鏡、レーザ、観測シーケンス等が明らかになってきたので紹介する

（望遠鏡のスペック）以下に望遠鏡およびレーザのシステムベースラインを述べる。改修前のフランス局の値を参考にすると、望遠鏡口径が1.5m、Nd:YAGレーザ1064 μ mの2次高調波である532nmのパルスレーザ光を用い、レーザ出力エネルギー200mJ、パルス幅

300psを想定する。パルス幅が短くなればなるほど時間分解能が良くなるので1ショットごとの測距精度が高くなる。そのため、繰返し周期1kHz程度の高繰返しレーザも想定する。検出器はAPDまたはMCPを用いる。望遠鏡にはナスミス焦点またはクーデ焦点を持ち、レーザ室で発生させた高出力レーザを焦点に導く必要がある。ターゲットが小さいので、追尾精度は1秒角程度が必要と予測される。また、星によるガイド追尾ができない場合もあるので、ガイドの方法も検討が必要である。月面が光っていれば特徴的な地形を利用するという手があるが、月の夜では工夫が必要である。

（観測シーケンス）月面上の反射板は現在4か所が利用可能であり、今後5個以上になるとして、5か所の反射板を一晩のうち（2時間程度を想定）に順に2回程度観測する。例えばApache Point観測所では月に10晩程度が割り当てられており、天候条件で観測できない日を除いて数晩の観測が実施されている。なお、新月付近や満月でも背景光を除去できない場合（望遠鏡の性能による）は観測ができない。最適な観測頻度・条件を決めるには観測およびデータ解析のシミュレーションを行うことにより今後明らかになるとと思われる。

（補償光学）レーザを地上から打つので、大気の大擾乱によりレーザ光がシーイングサイズに広がり、効率的に反射板に当たらない。本来であればハワイなどのシーイングが良い場所を選択すべきであるが、シーイングがそれほど良くない日本で実施する場合を考え、補償光学（adaptive optics, AO）をオプション課題として検討している。補償光学が常時利用できることと、レーザ出力を抑えることができるため、光学部品の破損の危険性が少ない、レーザ繰返し周期を上げることができる、などの点で大変有利である。大口径の望遠鏡では、高度90km付近にあるナトリウム層にレーザを当てて光らせて、人工星として利用する「レーザガイド星AO」が利用できるが、中口径の場合はかすかな光のレーザガイド星を検出して波面補正をすることは困難とされている。太陽観測用に飛騨天文台で行われているような取得画像を高頻度サンプリングすることによって波面を補正する方法（Miura et al., 2006）や、打ち上げたレーザが地上10km付近まででレイリー散乱される光を別に検知して波面を補正する方法（Wilson et al., 1997）を検討している。後者については米国JPLで過去に試験観測が行われたことがあり、また将来大容量データを転送するための宇宙機との光通信を行う場合にも有用と考えられる（なお、軍事利用では検討されているはずだが資料がない）。

（安全対策）レーザが航空機に照射されるのを防ぐため、通常の衛星レーザ測距で実施されているようなレーダー監視システムを導入することにより安全性を

確保する。レーダーが視野内に航空機を発見するとレーザー送出を即時にシャットダウンする。

(試験観測) システムを作る前のどこかのタイミングで既存の望遠鏡を用いた測距試験を実施することを検討している。ただし、反射された光子が検出できることを目標とし、タイミング検出系に高精度は求めないこととする。目的は望遠鏡のポインティング、回線設計の確認などである。過去に東京天文台で行われた月レーザー測距実験が失敗に終わっていることから、現在手にすることのできる技術で測距が行えることを立証することは、プロジェクトを進める上で重要と考えている。SELENE-2の打ち上げが2016年頃とされているので、試験観測は2012年くらいまでに実施し、その後の地上局開発につなげたいと考えている

4 おわりに

2016年頃に打ち上げる月探査着陸機 SELENE-2 に月レーザー測距に使う反射板を搭載することを提案している。データを取得するには地上レーザー局が必要であるが、現状で国内には存在しないので新規に開発する必要がある。本講演ではそのために必要な地上局の要素を整理した。LLRで行うサイエンスには年単位の観測が必要であるので、惑星観測や天文観測と共用して望遠鏡当たりの費用対効果を上げる必要があると考えている。例えば米国の Apache Point 観測所の 3.5m 望遠鏡の開発経費は NASA が提供し、完成後は大学コンソーシアムが運営に当たっている。カリフォルニア大 San Diego 校の Tom Murphy 氏が LLR 観測の PI を務めており、同望遠鏡で行う複数の観測のうちの一つである。望遠鏡や協働について情報をお持ちの方は野田またはチームメンバーまで連絡をいただければ幸甚である。

参考文献

- 1) Dickey, J. O. et al., *Science*, **265**, pp 482-490, 1994.
- 2) Murphy T. et al., *Pub. Astronom. Soc. Pacific*, **120**, 20-37, 2008.
- 3) Otsubo, T., et al., *Adv. Space Res.*, in press.
- 4) Miura, N. et al., *Optical Review*, **13**, pp 338-345, 2006.
- 5) Wilson, K. et al., TDA progress report 42-131, 1997.

(2009年12月22日受付, 2010年1月15日受理)