

特集「かぐや」が見た新“月世界” 「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)による 月全球高度観測 – 初期成果より –

荒木 博志¹, 田澤 誠一¹, 野田 寛大¹, 石原 吉明¹, Sander Goossens¹,
佐々木 晶¹, 河野 宣之¹, 神谷 泉², 大嶽 久志³, Jürgen Oberst⁴, and C.K. Shum⁵

(要旨) 2007(平成19)年9月14日打上の月周回探査衛星「かぐや」に搭載されたレーザ高度計(LALT)の初期運用結果と初期成果から得られた月地形図を紹介する。周回衛星に搭載されたレーザ高度計による天体の地形探査は非常に有効であるが、月についてはこれまで全球探査が実現しておらずLALTが初めての試みとなる。2007年12月30日以来観測運用を開始し、傾斜の大きいクレータ中央丘を含め月面地形を問題なく測距できる性能を有することが確認された。さらに4月9日に公開された2週間分のデータを使った月地形図では、従来の月全球地形図(ULCN2005)に対して分解能が大きく向上していることも確認できた。

1. はじめに

太陽系固体天体の形状や地形の知識は、地形図作成はもちろんのこと、内部構造や起源・進化を考えるためにも重要な情報である。月惑星探査による地形の計測はカメラの画像をもとにした写真測量と高度計データによるものに分けられる。画像の写真測量データは面的で分解能も高く局所的な地形分布の把握が容易であるが、全球にわたる高度データ(Digital Elevation Map: DEM)作製に計算機資源や時間がかかり、楕円率など全球的な形状の情報も必要になってくる。一方高度計データの空間分解能はカメラに及ばないが単純な距離の時系列であり、地上での比較的簡単な処理で全球地形情報が(経度、緯度、高度)の形で得られる点で優れている。

高度計による探査は、カメラによる地形探査に比べると事例は少ないが、火星ではMars Global Surveyor(MGS)のレーザ高度計MOLA(米国)で、小惑星ErosではNEAR-Shoemakerのレーザ高度計NLR(米国)で、それぞれ全球地形探査が実施された[1,2]。金星ではPioneer-VenusやMagellan探査機からのレーダ観測(米国)により全球地形探査が実施されている[3]。日

本の「はやぶさ」探査機に搭載されたレーザ高度計LIDARは我が国初の惑星探査用レーザ高度計であり、小惑星Itokawaの地形だけでなくドップラートラッキングによる重力場データと合わせて平均密度を求め、推定された内部構造(ラブルパイル構造)の根拠の一つとなるなど大きな成果を上げた[4]。また1974年のマリナー10号以来の探査となる水星についてもMessenger搭載のレーザ高度計(MLA)の初観測が1月14日に実施され[5]、2013年打上予定の日欧共同水星探査Bepi-Colomboにもレーザ高度計BELAの搭載が予定されている。

月のレーザ高度計探査は1994年のClementineレーザ高度計(LIDAR)以来なかったが、月周回探査衛星「かぐや」搭載のレーザ高度計(LALT)により再開された。本稿ではLALTの初期運用及び初期観測結果を用いた月地形図について簡単に紹介する。

2. 従来の月レーザ測距および 月全球地形図

レーザ高度計を月惑星探査に使用した最初の例は、アポロ15, 16, 17号に搭載された高度計で、周回母船に搭載されたメトリックカメラ用の測地基準点データ取得を目的にしたものであった[6]。その後1994年にClementine月探査衛星搭載のレーザ高度計(LIDAR)による探査が行われて緯度80度までの高度データの取得に成功し、南極-エイトケン盆地の大半の地形デー

1. 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト
2. 国土地理院 地理地殻活動研究センター
3. 宇宙航空研究開発機構
4. ドイツ航空宇宙センター
5. オハイオ州立大学



図1: LALT-E外観(左)と放熱板側から見たLALT-TR(右)

表1: LALT仕様及び性能表

諸元	数値
質量 (総計)	19.09 kg
(LALT-TR)	15.34 kg
(LALT-E)	3.75 kg
サイズ (LALT-TR)	360mm*450mm*408mm
々 (LALT-E)	241mm*301mm* 88mm
消費電力	44.2 W
レーザタイプ	Diode pumped, Q-switched, Cr doped Nd:YAG laser
波長	1064+/-1 nm
パルスエネルギー	100+/-5 mJ
レーザパルス頻度	1Hz or 0.5Hz
軌道沿い分解能	1.54 km or 3.08 km
時間パルス幅	17+/-3 nsec. (FWHM)
レーザコリメータ	ガリレオ式屈折 口径: 73mm
ビーム拡がり角	0.4+/-0.1 mrad
受信用望遠鏡	カセグレン式反射, 口径: 100mm
望遠鏡視野	1mrad
測距値分解能	1m
測距距離	50~150 km or 0~150km
測距精度(*)	5m

* 時間パルス幅17 nsec.に相当.

タを取得するなどの成果を上げたが、有効な測距数は約72548点にとどまった[7]. 2005年には地上観測時代からの測地基準点網やClementine月探査で取得された画像の写真測量結果などを統合し、米国地質調査所でULCN2005がまとめられた。極域を含む27万点余りの地形データセットで、写真測量によるネットワークとしては太陽系最大のものとなっている[8].

3. LALTの測距観測

LALTは「かぐや」主衛星から月面までの距離を計測するレーザ測距儀であり、CrドープNd:YAGレーザパルスを1秒間隔で月面に向けて放射し、月面上軌道沿いに約1.54km間隔で測距データを取得する。パルスビームの広がり角は0.4ミリラジアンで、高度100kmからでは月面上のビーム径(フットプリント)は40mに

なる[9]. LALTは、高圧電源部やレーザ光送受信部などを含み主衛星構体外部に取付けられるLALT-TRと、低圧電源部やデータ処理・制御系を含みLALT-TRとのインターフェース制御をするためのLALT-E(衛星内部に搭載)から構成される(図1)。LALTの仕様及び観測性能を表1に示す。LALTの主要科学目標は、1)月の形状の高精度決定、2)極域を含む月面全領域での地形高度図の作成、3)子衛星を使った月重力場探査(RSAT/VRAD)から得られる重力場データと高度計データを併用して行う月重力場異常や月内部構造の探査である。

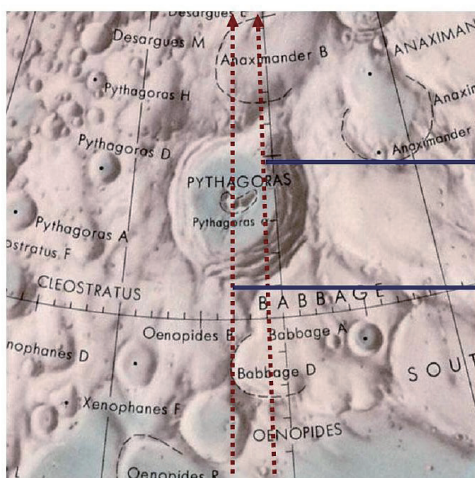
LALTの運用履歴、観測状況を簡単に紹介する。平成19年(2007年)9月14日の打ち上げ後、「かぐや」がまだ月遷移軌道上にある9月23日にLALTは機上単体機能試験で初めて電源を投入された。同様の試験を月周回軌道投入後の11月1日にも実施し、低圧電源および温度制御機能が正常であることを確認した。さらに11月25日に単体の高圧機能確認としてレーザ発振用の高圧電源、レーザ発射機能、および測距機能が正常であることを確認し(初観測に成功)、12月30日(UT)から観測運用を開始した。3月末で677万点以上の高度データを取得し、測距成功率すなわちレーザを発射した回数に対する測距データ取得率は97%以上である。

「かぐや」は高度約100 kmの極軌道を約2時間で周回しているため、軌道は1周回ごとに経度方向に約1度ずつずれてゆき、おおよそ半月(半恒星月: 約13.7日)で月面をほぼ1周する。周回数が増えるにつれて軌道間の隙間が埋まってゆき月面上の経度方向の分解能は向上していく。しかし実際には軌道間隔は地域ごとにばらつきがあり、これがその場所の実質的な分解能を決めている。

4. LALT初期観測結果の概要

LALTデータは測距値の時系列データであるから、地形データを得るにはこれらを月重心原点の3次元座標に変換しなければならない。そのためにNASA/JPLの下に作られたNAIF (Navigation and Ancillary Information Facility)のSPICEツールキットを使っている[10]. 主衛星軌道データ(SPKカーネル)は、JAXAから提供される2-wayドップラーデータを用い、国立天文台(RISE月探査プロジェクト)で軌道

Pythagoras(N63.5, W63.0);
Nov. 25, 2007



Lunar and Planetary Institute
<http://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/>

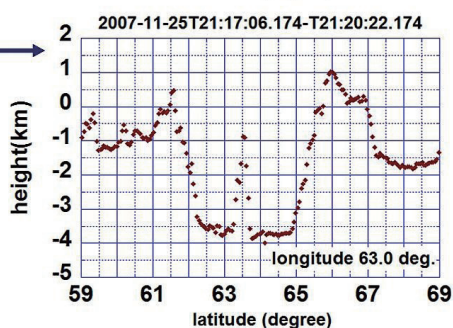
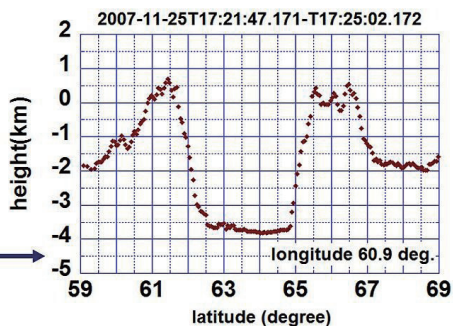
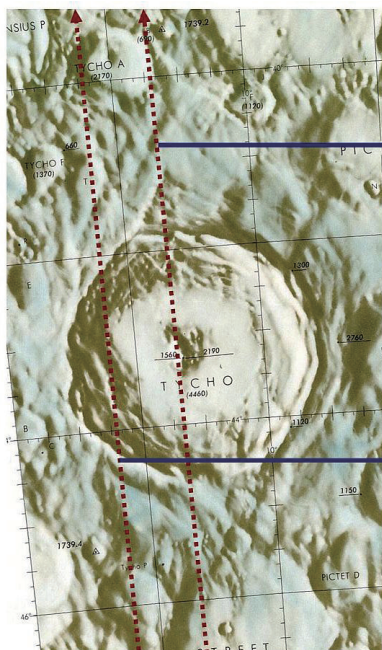


図2: LALT初観測時のピタゴラスクレータ高度プロファイル. 測線が中央丘を横切る場合とそうでない場合の違いが捉えられている。



Lunar and Planetary Institute
<http://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/>

Tycho (S43.4,W11.1); Jan. 1, 2008

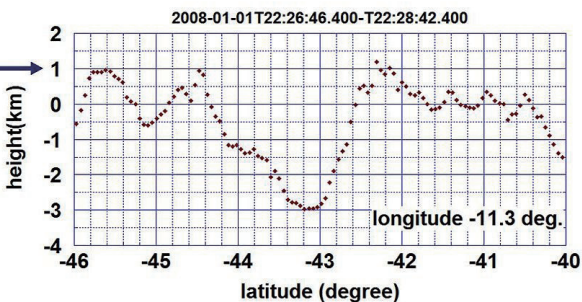
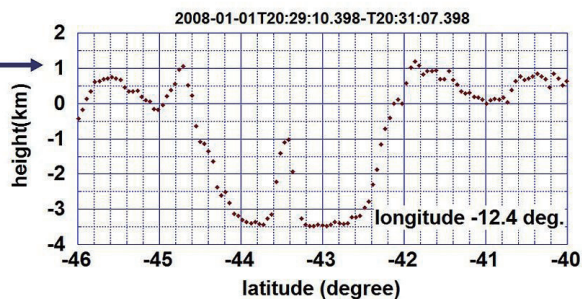


図3: ティコクレータの高度プロファイル. 図2と同様に中央丘が捉えられている。

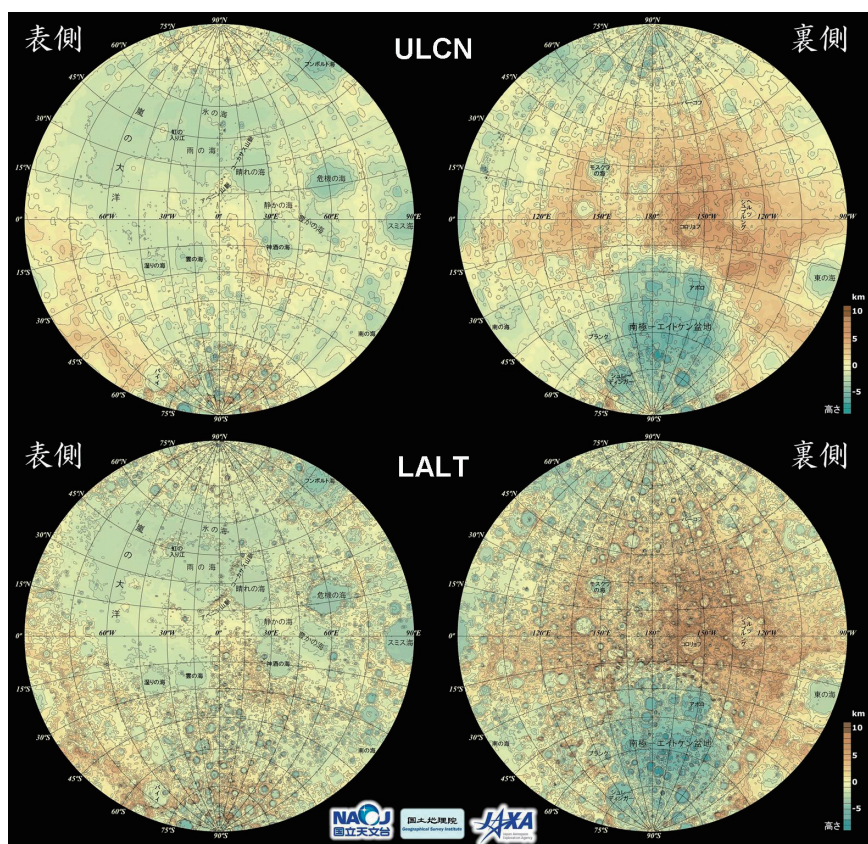


図4: 上の2枚がULCN2005, 下の2枚がLALT地形図。いずれも平射図法による。LALT地形図はULCN2005に比べ高度分解能と水平方向分解能のいずれも大きく向上していることがわかる。国土地理院作製の地形図を改変[11][12]。

ソフトGEODYN-IIを使って計算している。考慮する月重力場モデルは6月現在、RISE内部の「かぐや」重力場グループ作製によるSGM90eである。衛星時刻データ(longSCLKカーネル)と衛星姿勢データ(CK)は、「かぐや」プロジェクトから提供されるものを使用し、LALTの主衛星に対する視野角データ(IKカーネル)はLALTグループで準備した。高度は月重心原点の半径1737.4kmの球面を基準としている。

図2はLALT初観測時(2007/11/25(UT))に取得された測距データを地形データに変換し、ピタゴラスクレータ(63.5°N, 63.0°W)の地形プロファイルを抽出した結果である。経度60.9°Wの測距では、フットプリントはクレータ内部の平坦な部分を通っているが、約4時間後の経度63.0°Wの測距では中央丘の高度プロファイルを取得し、クレータの概形だけでなく中央丘、クレータ内部平原の高度プロファイルの特徴を明確に

捉えることができた。中央丘は内部平原から約3000mの高さでそびえており、斜面の傾斜角は平均約25°で内部平原の平坦さと対照的である。図3では同様に2008年1月1日(UT)に取得されたティコクレータ(43.4°S, 11.1°W)の高度プロファイルを示した。ここでも外輪山内壁のテラス構造と中央丘が明確に捉えられており、中央丘の傾斜角は概ね25～30°であることがわかる。傾斜角30°ではレーザーパルスのピーク強度がほぼ一桁下がるが、この条件でもほぼ問題なくデータ取得ができることがわかった。図2, 3のいずれも比較的新しいクレータで侵食が進んでいないため、内部平原から外輪山のピークに至る高度差が4000～5000mに達している。

2008年1月7日から20日までに取得された地形データを使って作製し、4月9日に一般公開された全球月面地形図を図4に示す。地形図作製は国土地理院が担

当し、比較のためULCN2005データを同一手法で処理した地形図も示した。表側を中心とした海、裏側を中心とした高地、南極-エイトケン盆地の高度差をはじめ、直径数十kmのクレータまでよく再現されている。ULCN2005は直径約100km以下のクレータの再現性が悪く、より大きなスケールでも虹の入江など一部で不完全な部分が見られるのに対し、LALTの地形図はこれらの点で大きく改善されている。図4では平射図法 of 地形図を紹介したが、国土地理院のホームページで様々な図法、サイズで地形図が公開されている[11]。また、JAXAの「かぐや」画像ギャラリーでも地形図が紹介されているので参照されたい[12]。この地形図作製の時点では経度方向の分解能は1°程度だが(赤道域で約30km)その後の観測の進展により大幅に改善されている。

5. おわりに

「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)の初期運用及び初期観測結果を用いた月地形図について簡単に紹介した。LALTの地形図は、従来のものより高度分解能と水平方向分解能いずれについても大きく改善された。LALTグループでは極域で測線のクロスオーバー残差の解析からフットプリント位置精度のさらなる改良を検討中である。同時に、極域の日照日陰、重力場データを併用した内部構造、見過ごされていた衝突盆地の探索などの課題についても検討を進めている。

謝 辞

LALTの開発・運用に当たり、JAXAの「かぐや」プロジェクトチームの皆者、及びNECのLALT担当者の皆様には一方ならぬお世話になっております。また匿名査読者の方には貴重なコメントをいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Smith, D. E. et al., 2001, J. Geophys. Res. 106, 23689.
- [2] Zuber, M. T. et al., 2000, Science 288, 2097.
- [3] Rappaport, N. J. et al., 1999, Icarus 139, 19.
- [4] Abe, S. et al., 2006, Science 312, 1344.
- [5] Zuber, M. T. et al., 2008, Science 321, 77.
- [6] Neumann, G. A. et al., 2001, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIV-3/W4, 73.
- [7] Smith, D. E. et al., 1997, J. Geophys. Res. 102, 1591.
- [8] Archinal, B. A. et al., 2006, Open-File Report 2006-1367, U. S. Geological Survey.
- [9] Araki, H. et al., 2008, Adv. Space Res. 42, 317.
- [10] <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>
- [11] <http://gisstar.gsi.go.jp/selene/>
- [12] <http://wms.kaguya.jaxa.jp/>