

# 月着陸船の超低高度周回時の追尾による 高精度重力プロファイルの取得

国立天文台地球回転研究系

日置 幸介、花田 英夫、松本 晃治、荒木 博志、河野 宣之

総合研究大学院大学 天文学専攻課程

菅野 貴之

## 衛星重力計測 — 地球の場合

衛星の軌道要素の進化を利用した重力計測は長年地球において測地学の中心課題であったが、昨今はその精密化、なかでも時間変化の検出が話題を提供しつつある。古くは衛星レーザ測距の結果から得られた  $J_2$  項の永年減少である(Yoder et al., 1983)。地球はその自転の遠心力で赤道部分が張り出しており、その度合いを反映する  $J_2$  項は重力の非球対称成分のなかでとびぬけて大きい。しかし高緯度地方の後氷期地殻隆起(Postglacial Rebound)によってその度合いが小さくなりつつあるのである。最近の研究によると、その減少が 90 年代末に増加に転じたという(Cox and Chao, 2002)。その原因は近年の急速な高緯度地域の氷の融解や海洋の大規模振動現象、あるいは地球深部でのコア-マンテル相互作用等が示唆されている(Dickey et al., 2002)が、いずれも単独では現象との対応が定量的に確立されていない。

$J_2$  以外の項では季節変化が話題となっている。地球では一年周期で北半球と南半球の間を陸水、雪氷、大気等の形での大規模な質量の移動が起こっているが、それに伴う地球の重心移動と次数 1 の荷重変形が近年の GPS 観測で確認されている(Blewitt et al., 2001)。なお類似の変動は火星にも存在することが予測されている(Van Hoolst et al., 2002)。また最近打ち上げられた衛星間トラッキング(SST)による重力精密計測を目的とする CHAMP や GRACE などの衛星は地球重力場のより高次の項の季節変化から、水の動態を中心に環境の変動を監視しようとするものである(Adam, 2002)。これらの成果は今後数年続々と発表され、地球科学界をにぎわせるだろう。

## 衛星重力計測 — 月の場合

月の重力はルナーオービターやアポロ等の月周回衛星の追尾によって 60 年代から計測されてきたが、表側の重力場が均質な精度でマッピングされたのは 90 年代のルナープロスペクター(LP)が初め

てである(Konopliv et al., 2001)。とくに 1999 年前半の半年にわたる延長ミッションでは、平均高度 30km で取得された視線方向の加速度データ(ドップラーデータをスプライン関数近似して時間微分したもの)が公開されているが、クレーター等の地質構造に伴う重力異常の微細構造をとらえており月のリソスフェア厚の見積もり等の研究に有用である。Sugano and Heki (2002)はこういった視線方向加速度データを用いて詳細な月の表側の重力異常マップを求めている。

2005 年に打ち上げが予定されているわが国の SELENE ではリレー衛星による衛星間トラッキング手法を用いた月の裏側の重力場の直接計測、従来の R&RR に加えて相対 VLBI を用いた衛星追尾による月重力場の三次元計測等の新機軸が予定されている。地球の衛星重力計測は外国勢の独壇場であるが、今後の月の重力精密計測はわが国の独壇場とあってよい。

短波長の重力場の計測精度は衛星高度が鍵となるため、高度 100km の SELENE では表裏を通じて百次を超える重力場高次成分の精度はあまり望めない。一方 SELENE に続く月探査計画である SELENE-B や SELENE-2 では月着陸実験が計画されている。軟着陸に先立って衛星が 10 km 程度あるいはそれ以下の低高度で慣性飛行すれば、その時の速度を 2 way ドップラー等の技術で精密計測することによって重力の微細構造情報を持った加速度プロファイルを取得できる可能性がある。SELENE-B 提案書(月惑星表面探査技術 WG,2002)によると、着陸船はまず高度 100 km x 100 km の月周回極軌道に投入され、適当なタイミングで動力降下フェーズに入るとされる。所期のシナリオではそのフェーズ中ほぼ連続的にメインスラスタを噴射し続けるようであるが、オプションのシナリオとして慣性飛行によるコースティングも考えられている。いずれにせよ、これらのシナリオは必ずしも本研究で提案する低高度の慣性飛行と相容れるわけではないが、ここでは低高度慣性飛行が 10 分ないし 15 分程度取られた場合に加速度プロファイルを取得できると仮定し、月科学の観点から

探査の対象候補をいくつか紹介する。

## クレーターの重力異常

SELENE-B では、着陸船に搭載される月面ローバーの探査対象が比較的若いクレーターの中央丘とされているので、まずクレーターが重力異常でどのように見えるかを概観する。ローバーの探査対象としても挙げられているコペルニクスについて、図1にLPの延長低高度ミッション時のその上空を

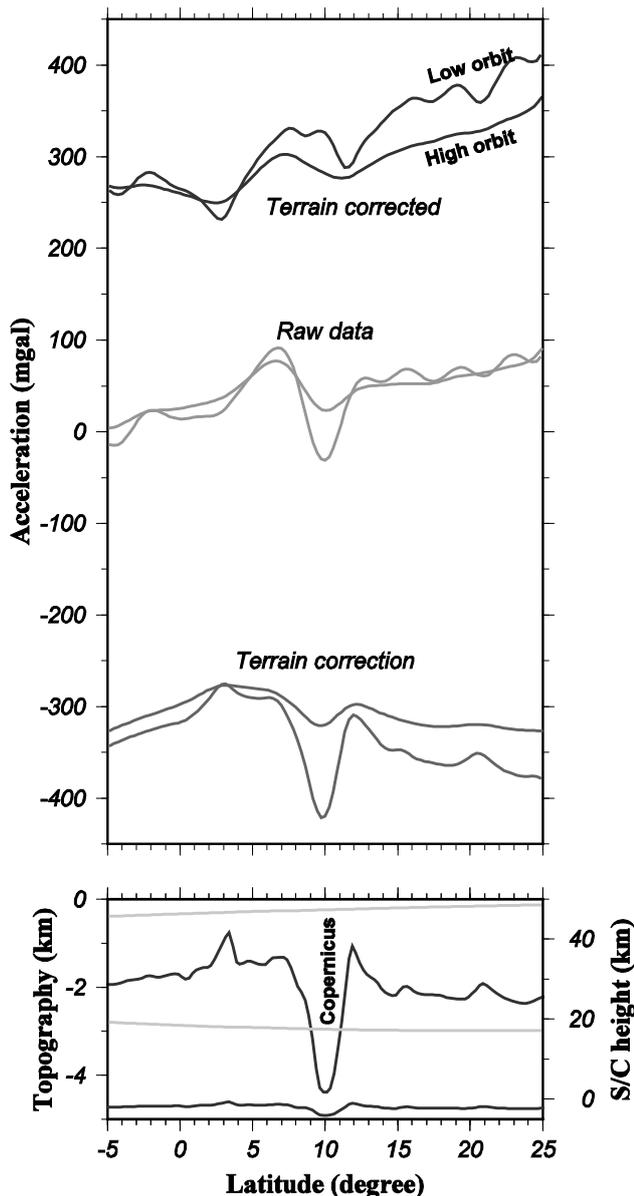


図1 LP でみたコペルニクスクレーター上空の視線方向加速度プロファイル。下の図は地形と衛星軌道（二本）の高度を示す。起伏の大きいプロファイルは上下を強調した地形。上の図は加速度プロファイルの生データ、地形による補正量、地形の分を取り除いた加速度プロファイルそれぞれの軌道について示したものの。

高度約 20 km および約 50 km で通過した際の視線方向加速度のプロファイルを示す。地形の凹に対応する負の重力異常が生データには顕著だが、それらはほとんど地形の影響であり（地形による加速度プロファイルと生データの曲線が類似）、クレーター深部に起因する重力異常（モホ面の起伏等）は見えていない。

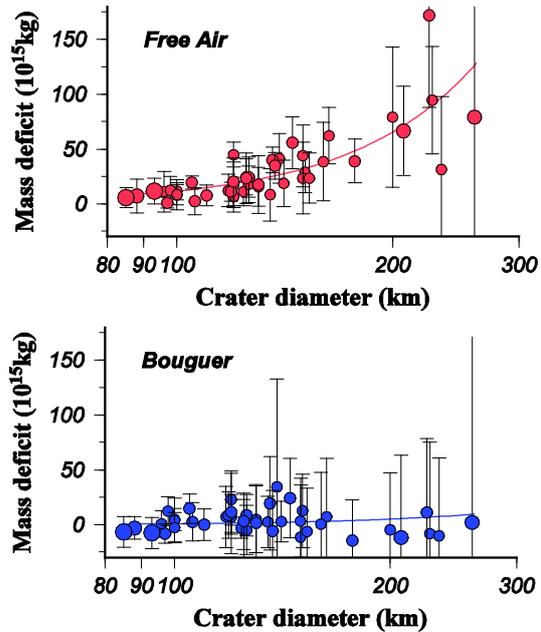


図2 LPの視線加速度データから Sugano & Heki (2002)の方法で質量分布異常を求め、そこから中規模クレーターに付随する質量欠損を計算し、クレーターの直径との関係を示したもの。上は生データに、下は地形補正を行った加速度データに基づく質量欠損で、それぞれフリーエア重力異常とブーゲー重力異常でみた質量欠損に相当するものである。前者は地表の起伏とモホの起伏の両方の和を、後者はモホの起伏を反映する。質量欠損を求める際は、バックグラウンドの値をクレーター周縁の値から定義し、それを基準にクレーター内部の質量欠損を積分した。図に示された誤差はバックグラウンド値を定義する際の不均一を反映したものの。

図1のような視線方向加速度を用いて Sugano & Heki (2002)の手法によって月表面の質量異常分布を推定することができる。地形補正前と地形補正後の加速度データから求めた二種類の質量異常分布図から、直径 80 km から 300 km 程度までのクレーターに付随する質量欠損を計算したものを図2に示す。地形補正前の加速度データから求めた質量欠損（フリーエア重力異常に相当するもの）はきれいな直径の関数として表される一方、地形補正後の加速度から得られた質量欠損（ブーゲー重力異常に相当）はほぼゼロである。これはクレーターの凹地形に伴う月表面の質量欠損がモホの起伏でアイソスタシー補償されていないことを示す。

補償が起こっていないクレーターの最大直径はクレーター生成時のリソスフェア厚の下限に関する情報を与える。

図2から、SELENE-Bの探査対象となっているクレーターはいずれもリソスフェアの弾性でささえられる規模のものであり、アイソスタシー補償の観点からは興味深いとはいえない。しかし図1より低い高度で(10 km程度)見れば、クレーターの中央丘に付随する重力異常が見える可能性があり、中央丘を形成する岩石が周囲と密度コントラストを持てばその地下構造の議論もできるかもしれない。

### 火山性の重力異常

クレーターに付随するもの以外の重力異常としては雨の海や晴れの海、危難の海等の「マスコン」がよく知られている。マスコンは図2に示した中規模のクレーターより大きな衝突盆地がアイソス

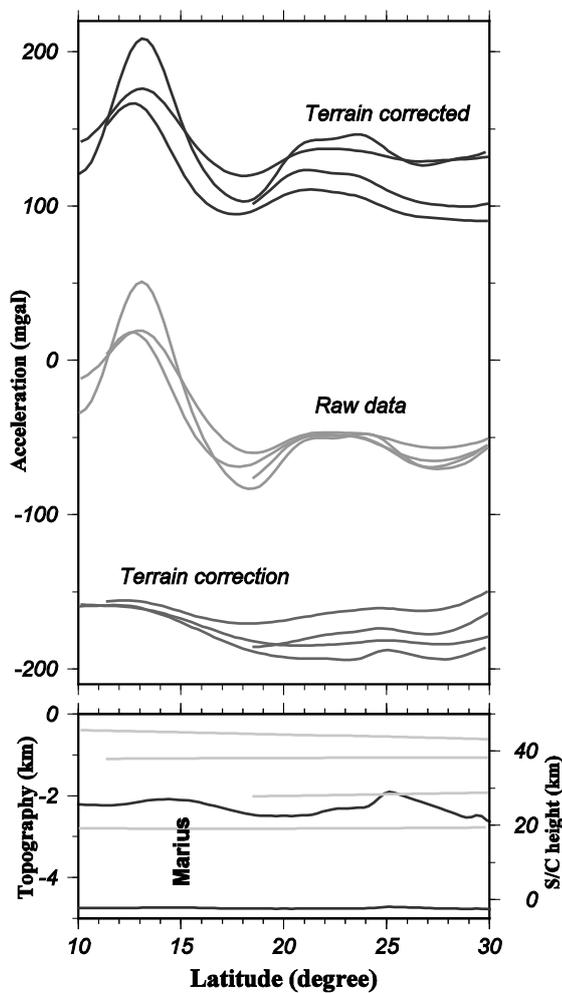


図3 LPでみたマリウス地域上空の重力プロファイル。図の内容は図1とほぼ同様。この地域は地形的にはなだらかな丘でしかないが、強力な正の重力異常をしめし、地下に高密度の物質の存在を示唆する。

タシー補償をうけ、その後盆地内部に玄武岩溶岩(Mare basalt)が噴出したもので、モホの起伏(マントルプラグ)と玄武岩の両者によってフリーエア、ブーゲー双方で強い正の重力異常を示す。

このような典型的なマスコン以外に正の強い重力異常を示す地域が嵐の大洋やその周辺にいくつか存在する。たとえば図4では雨の海や湿りの海などのマスコンのほかに、熱の入江やMarius Hills/Aristarchus PlateauなどのVolcanic Complexに伴う強い正の重力異常が見られる。

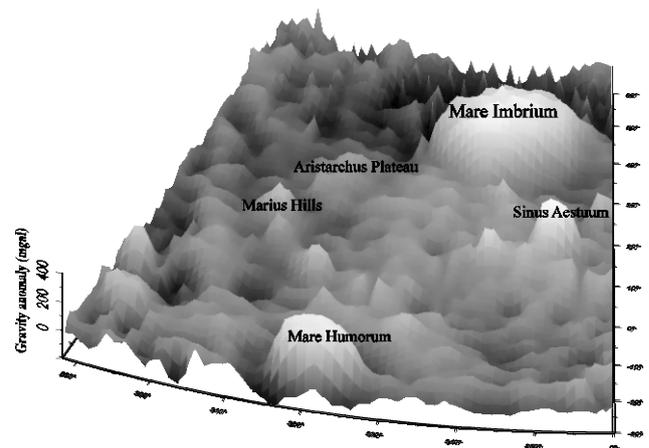


図4 嵐の大洋とその周辺のフリーエア重力異常。雨の海(Mare Imbrium)や湿りの海(Mare Humorum)等の衝突盆地に伴うマスコン以外に熱の入江(Sinus Aestuum)、Marius Hills、Aristarchus Plateau などにも正の強い重力異常が見られる。

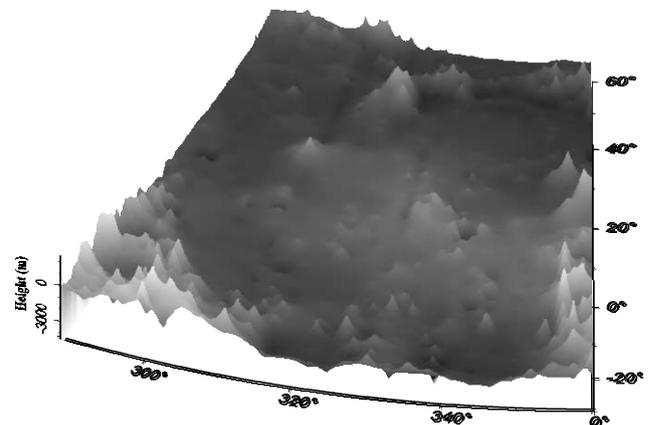


図5 Clementine レーザ高度計による嵐の大洋とその周辺の地形(図4と同じ範囲)。

これらの正の重力異常に対応する明瞭な地形は見られず、一見平坦なその地域の地下に密度の高い物質が存在していることを示す。月の地殻を形成する斜長岩の密度が $2.8\sim 2.9\text{ g/cm}^3$ 、海の玄武岩の密度は $3.4\text{ g/cm}^3$ と両者の間には明瞭な密度コントラストがあり、地下構造が重力の信号として見えや

すい。正の重力異常の起源として自然なのは嵐の大洋の玄武岩を供給した火道がこれら正の重力異常の下に存在するという考え方であろう。これは Marius Hills や Aristarchus Plateau などに見られる火山性の地形の存在とも調和的である。典型的なマスコンと異なり、こういった衝突盆地に伴わない地域からマグマが噴出する原因は何だろうか。月マントル対流の数値実験(e.g. Spohn et al., 2001)によると、地球にみられるようなマントルプルームが月の初期史に存在したことが伺える。プルームの先端部がたまたまこれらの地域にあったということかもしれない。このような地域の精密重力プロファイルが得られれば火道の形状等についての手がかり(例えば岩脈状ならその走向等)から初期の月テクトニクスに関する情報が得られるだろう。

### 着陸船の軌道追跡

着陸船を低軌道で慣性飛行させて視線加速度プロファイルを取得する際に必要な軌道追跡手法について最後に述べる。通常は地球からの 2way Range and Range Rate (R&RR)観測で得られた視線方向の速度と距離データをもとに、衛星軌道を決めつつ重力場に関する情報を得る。その際数分間の時間かけて軌道追跡データを蓄積してまず軌道パラメータを収束させる。重力場を求める際はさらに長期間軌道追跡を行って軌道要素の進化から重力場を求めていた。こういった従来の手法ではここで提案しているような短い慣性飛行では精密重力プロファイルを取得できない。

この困難を克服するためには従来の地球ベースの R&RR 観測に加えて、相対 VLBI 観測が欠かせない。衛星に搭載した適当な電波源と背景にある準星等の間の相対 VLBI で得られる遅延と遅延率から視線と直交する面内での衛星の位置と速度が得られる。それらを R&RR 観測と組み合わせることによって原理的には位置三成分  $X, Y, Z$  および速度三成分  $dX/dt, dY/dt, dZ/dt$  の軌道決定に必要な 6 パラメータを一瞬にして決めることができる(Heki et al., 1999)。短時間の慣性飛行で重力プロファイルを取得するためにはこのような三次元追尾技術が必須となるであろう。

追跡に関するもうひとつの課題はサンプリング間隔である。一般に重力場では衛星高度と同程度の空間スケールの構造が見えるとされる。衛星高度が 10 km でも 100 km でも月表面に対する衛星速度はそれほど変わらないが、10 km の場合重力でみえる構造が一桁細くなるため、加速度も一桁上の空間分解能で見えるように R&RR や相対 VLBI のサンプリング間隔を短くする必要がある。LP の

低高度ミッションではサンプリング間隔は 10 秒であり、20 km 弱の最低高度に見合う値になっている。高度 10 km ならその倍、5 km ならさらにその倍と短いサンプリング間隔が要求される。R&RR にせよ相対 VLBI にせよ信号強度が十分であれば積分時間は短縮できるが、衛星の姿勢変化の分がこれらの信号に混じってくるためそれらを分離するための特別な注意が必要となる。

### 参考文献

- Adam, D., Amazing GRACE, *Nature* **416**, 10-11, 2002.
- Blewitt, G., D. Lavallee, P. Clarke and K. Nurutdinov, A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected, *Science* **294**, 2342-2345, 2001.
- Cox, C.M. and B.F. Chao, Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998, *Science* **297**, 831-833, 2002.
- Dickey, J.O., S.L. Marcus, O. de Viron and I. Fukumori, *Science*, **298**, 1975-1977, 2002.
- Heki, K., K. Matsumoto and R. Floberghagen, Three-dimensional tracking of a lunar satellite with differential very-long-baseline-interferometry, *Adv. Space Res.* **23**, 1821-1824, 1999.
- Konopliv, A.S., S.W. Asmar, E. Carranza, W.L. Sjogren and D.N. Yuan, *Icarus* **150**, 1-18, 2001.
- Spohn, T., W. Konrad, D. Breuer and R. Ziethe, *Icarus* **149**, 54-65, 2001.
- Sugano, T. and K. Heki, High resolution lunar gravity anomaly map from the Lunar Prospector line-of-sight acceleration data, *Proc. 35<sup>th</sup> ISAS Lunar Planet. Symp.* 223-226, 2002.
- 月惑星表面探査技術 WG、SELENE-B 提案書、2002.
- Van Hoolst, T., V. Dehant, O. de Viron, P. Defraigne and J.-P. Barriot, Degree-one displacements on Mars, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 6-1 – 6-4, 2002.
- Yoder, C.F., J.G. Williams, J.O. Dickey, B.E. Schutz, R.J. Eanes and B.D. Tapley, Secular variation of earth's gravitational harmonic  $J_2$  coefficient from LAGEOS and nontidal acceleration of earth rotation, *Nature* **307**, 757-762, 1983.