

## 特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

## 月重力観測と二分性の起源

阿部 豊<sup>1</sup>, 戸田康史<sup>1</sup>, 小島勝行<sup>1</sup>

月は質量中心が形状中心に対して約2km地球側にずれていることは良く知られている[1]。このずれはマントル内部の密度不均質や、コアの偏芯などによって生じている可能性もある。しかし、月の表と裏の二分性 (dichotomy) との対応も考えれば、質量中心と形状中心のずれは平均的な地殻の厚さが表側と裏側で異なる (裏で厚く、表で薄い) ことによる、と考えるのは一つの自然な発想である。この場合、地殻の厚さの表と裏での違いが二分性の本質であるということになる。

さて、そのような地殻の厚さの不均質をもたらした原因として、月形成時のマグマオーシャン内の対流などの月内部での現象に原因を求める内因説と、衝突などに原因を求める外因説が考えられる。観測によってどちらかが支持されれば、月の地殻発達史についての重要な情報が得られる。ここでは、そのような立場から重力場・地形の観測によって、二分性を含めた月の地殻発達史についての情報を得る可能性を考えたい。

アドミッタンス (= ジオイド高 / 地形の高さ) は重力場・地形データの解析でしばしば用いられる量である。アドミッタンスの性質を理解するため、地殻とマントルからなる2層構造を考える。A. 地殻上面に凹凸が与えられたとき、B. 地殻下面に凹凸が与えられたとき、C. 地殻内部にマントルよりも重い物質が置かれたとき、の三つの場合を考えよう。はじめは凹凸または荷重は弾性によって支えられるが、やがて粘性緩和してアイソスタシ

ーによって支えられるようになる。A. の場合、地形が弾性によって支えられているときも、アイソスタシーが成り立っているときも、地形が高まった部分で重力も大きく、アドミッタンスは正である。ただし、弾性的に支えられているときの方がアドミッタンスは大きい。B. の場合、弾性的に支えられているときは負だが、アイソスタシーが成り立てばAと全く同じになるので正である。C. の場合、荷重のために地形が低まったところで重力は大きくなり、弾性的に支えられていてもアイソスタシーが成り立ってもアドミッタンスは負の値をとる。

さて、月のアドミッタンスはかなり変わった波長依存性を示す (図1) [2]。波長が長いところでは正だが、波長が短くなるにつれて小さくなり、波長1000km程度では負、それより小さいところでは

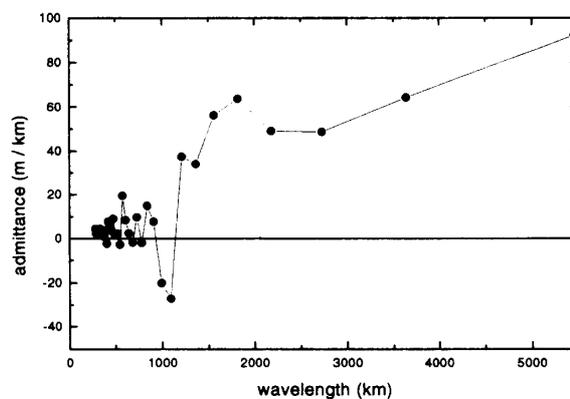


図1 月の地形と重力のアドミッタンスの波長依存性。GLGM2地形[5]・重力[6]モデルに基づいて Neumann and Zuber [2] が求めたものを波長の関数に変換して示している。

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

殆ど0になる。このような観測事実は、地形がアイソスタシーで支えられているとしても、弾性的に支えられているとしても単純には説明できない。

このような特徴は、もしかすると月の裏側のデータの不確定性に伴う見かけ上のものであるかもしれないから、より正確な観測で確認することはぜひとも必要である。

現在までに得られているアドミッタンスが現実の月を正しく反映しているとした場合、上で述べたようなアドミッタンスの特徴を使って考えると、最も単純な説明は次のようなものであろう。

1. 1000kmより波長が長い地形は、短波長の地形よりはアイソスタシーに近いものの、かなりの程度弾性的に支えられている。
2. 1000kmより波長が短い地形は、弾性的にサポートされているが、地形と全く無関連な地殻内の密度異常または地殻下面の凹凸が作る重力乱れが、地形が作る重力乱れの効果をうち消している。

1. は二分性の生成時期に関して重要な制約を与えるだろう。最も長波長の地形は、詰まるところ、形状中心と質量中心のずれであるが、これがアイソスタシーからはずれていることは、二分性が生成された時期には既に地殻やマントルは地形加重を十分に弾性的に支えられる程度に堅かったことを意味する。Ojima and Abe [3]は表面から冷却されつつある半無限粘弾性体の粘性緩和を計算し、得られるアドミッタンスを観測値と比較した。その結果、二分性に関係するような波長の長い地形は、冷却が始まってから200My以上たってから形成されたことが示唆された。このことは二分性が月マグマオーシャン内の対流によって生じたのではないことを示唆する。つまり、マグマオーシャン内の対流などの流動効果で生じたならば、弾性的に支えられることは考えにくいからである。

短い波長では地殻の下面に凹凸があるか、ある

いは地形とは全く無関連な地殻内部の密度異常があることが期待されるが、その正体の解明は地殻発達史を考える上で重要な情報になろう。地殻内部の密度異常があるとすれば、それは化学組成の不均質であろう。その場合、地表面の組成と重力場から地形の効果を除いたもの間に何らかの関係があるかもしれない。また、地殻下面の凹凸であるならば、その実体解明は重要課題である。先ほど述べたと同じ理由で、対流などの内因的原因で弾性的に支えられた地殻下面の凹凸を作るとは容易ではないからである。

また、波長1000km程度ではアドミッタンスは顕著な負の値を示す。これはマスコンベーズンに関係しているとも考えられている。だが、アドミッタンスが負になるのは、表面に密度の大きな溶岩が載っていることだけでは説明できない。マントルよりも密度が小さい物質が表面に載ったとしてもアドミッタンスが負になることはないからである。したがって、この負の値はマントル物質が異常に浅い部分に持ち上がっているというような状況を考える必要がある。そのような状況を作っている構造の実体の解明も地殻発展史を考える上で必要であらう。とりわけ、特定の波長の地形（あるいは特定の大きさの衝突盆地）で顕著にこのような現象が見られることは説明を要するであらう。

一方、二分性の起源に関して、Toda and Abe [4]は天体がランダムに月表面に衝突することによって、形状中心と質量中心がずれることを示唆した。初期の地殻の厚さが一定であったとしても、天体の衝突でクレーターが掘削され、エジェクタがまき散らされることによって地殻の厚さは変化する。このために天体が衝突する度に形状中心は質量中心に対して動く。この動きはランダムウォークのようなもので、多数回衝突が起こった後の形状中心と質量中心の距離の期待値はある有限値になる。Toda and Abeはクレーター形成による掘削を簡単な

モデルによってシミュレーションし、多数回の衝突が起こった後で落ち着くずれの大きさが、ほぼ観測されているずれの大きさと一致することを示した。

形状中心と質量中心のずれが地殻の厚さの不均一による場合、ずれの大きさは地殻の厚さを球関数展開したときの1次の項に対応する。まだ試していないが、ランダムな衝突で生じる地殻の厚さの不均一についてはより高次の項まで推定ができるはずである。これと観測値の比較から仮説がチェックできるだろう。また、同様の現象は他の天体でも起こるので、原始地殻が残っている天体：火星、水星でも同様のずれが期待される。実際、火星では南北方向の形状中心と質量中心のずれが知られている。水星についてはまだ観測がない。<sup>注</sup>

Geophysical Research 102, 16339-16359.

## 参考文献

- [1] Bills, B. G., and Ferrari, A. J., 1977: A harmonic analysis of lunar topography, *Icarus*, 31, 244-259.
- [2] Neumann, G. A., and Zuber, M. T., 1996: Coherence analysis of Lunar mare basins, *Lunar Planetary Science*, XXVII, 953-954, Lunar Planetary Institute, Houston.
- [3] Ojima, K., and Abe, Y., 1998: to be submitted to Proc. 30th Lunar Planetary Symposium, Institute of Space and Aeronautical Science, Sagamihara.
- [4] Toda, Y., and Abe, Y., in preparation.
- [5] Smith, D.E., et al., 1997: Topography of the Moon from Clementine lidar. *Journal of Geophysical Research* 102, 1591-1611.
- [6] Lemoine, F.G.R., et al., 1997: A 70th degree lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data. *Journal of*

---

(注) 最近になって、地上観測によって水星の形状中心と質量中心にずれがあることが示されていることがわかった。  
[Anderson, J.D. et al., 1996: Shape and orientation of Mercurg from rader rauging date. *Icarus*, 124, 690-697.]