

月潮汐応答の内部構造依存性：月マントル最下部の部分溶融層への測地学的示唆 Dependence of the tidal response on the internal structure of the Moon: Geodetic implication to the partial melt layer

原田 雄司^{1*}, ホーセンス サンダー², 松本 晃治³, エン 建国⁴, 平 勁松⁵, 野田 寛大³

HARADA, Yuji^{1*}, Sander Goossens², Koji Matsumoto³, Jianguo Yan⁴, Jinsong Ping⁵, Hiroto Noda³

¹ 中国科学院上海天文台, ² 米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター, ³ 自然科学研究機構国立天文台, ⁴ 武漢大学測絵遙感信息工程国家重点実験室, ⁵ 中国科学院国家天文台

¹SHAO, CAS, ²GSFC, NASA, ³NAOJ, NINS, ⁴LIESMARS, Wuhan Univ., ⁵NAOC, CAS

一般に、天体の潮汐変形や物理秤動に伴う内部のエネルギー散逸は、内部構造、取り分け粘性構造に依存する。天体内部の粘性分布は内部の物理的状态、特に熱的状态を強く反映するから、潮汐エネルギー散逸は熱史の観点において重要な現象の一つである。中でも月やガリレオ衛星のような、熱進化と軌道進化が相互作用する天体においては尚更である。ここで潮汐散逸の大きさは、主にクオリティファクタ (Q) 及びラブ数 (k_2) によって表現される。これらの値も必然的に粘性構造に依存し、従って熱的状态やその歴史を知る手掛かりを与える。

月の潮汐散逸の粘性依存性は或る先行研究によって既に調べられているが、そのパラメスタディには残念ながら幾つかの問題点が含まれている。一点目は、月内部を均質球と仮定している事である。しかし現実の月内部は分化している事が月震の観測から明らかとなっている。よって均質球ではなく地震学的に得られた速度構造を前提とするべきである。二点目は、 Q だけしか計算されていない事である。しかし実際に測地観測から得られるのは Q と k_2 の両方である。よって両方の値が計算されるべきである。三点目は、そもそも計算結果と対応する観測量が当時は存在しなかった事である。しかし現在では、月レーザ測距による回転計測から Q が求まっており、周回機の精密軌道決定による重力場計測から k_2 も求まっている。よってパラメスタディの結果と、現時点での Q や k_2 の計測結果が照合されるべきである。

これらの問題を解決すれば、月の内部構造に対して新たな制約を課す事が出来るであろう。即ち、 Q と k_2 の双方を矛盾無く説明し得るのはどのような粘性構造であるのか、という考察が可能となる。更に、そのような考察を踏まえて、次世代の月探査計画において調査すべき事は何か、という布石を打つ事も可能となる。

そこで本研究では、現実的な内部構造に基づいて粘弾性潮汐変形のパラメスタディを行ない、その計算結果を既存の測月学的な観測結果と比較した。具体的には月震の逆解析に基づく密度構造と弾性構造を踏まえ、かつアセノスフェアの粘性をパラメタとして与えて、 Q 及び k_2 を算出した。同じく月震に基づく知見によれば、月のマントルの最下部には減衰の大きな領域が存在すると考えられている。この領域の粘性は上部の粘性よりも相対的に低い可能性がある。よって本研究では、単純化の為に二つの極端な粘性構造を想定した。一つ目は、アセノスフェア全体の粘性を均一と見做し、その値を桁の範囲で変化させた場合である。二つ目は、高減衰領域の粘性の値のみ同じ範囲で変化させた場合である。そして各々のモデル計算に関して、かぐや、嫦娥1号、LROによって得られている観測値と比べる事によって、 Q と k_2 を同時に満たす粘性の解が許容されるかどうか検討した。

その結果、内部構造が特定の低粘性領域を含み、かつかぐや又は嫦娥1号に基づく値を参照した場合のみ、回転と重力の両方の測地観測を満足する粘性の解が存在する、という事が分かった。この場合、観測された Q に対応する粘性の範囲は一つしか存在しない。そしてこの範囲に対応する k_2 の理論値は、観測値と概ね調和的であった。尚、LROの観測値と一致しなかった理由は、LROの観測値が他の二つの観測値よりもやや大きな値を示すからである。一方、低粘性領域を含まない場合、観測された Q に対応する粘性の範囲は大きく二つ存在する。しかしながら、どちらの範囲に対応する k_2 の値も、何れの周回機の観測値とも調和しなかった。

結論として、月内部の地震波の減衰領域は恐らく低粘性領域に相当すると考えられる。そして従来から指摘されていたように、この高減衰領域では部分溶融が起きているであろう。何故なら測地観測の結果から推定される粘性の値は非常に低いからである。特筆すべき点は、少なくとも固体の橄欖岩の粘性としては低過ぎるが、完全な液体としては高過ぎる事である。従ってこの領域は、レオロジー的に臨界状態となる量の液相を含んでいると期待される。この部分溶融層はマントルの熱対流の様式、ひいては熱の輸送効率に大きな影響を与えるであろう。その一方で、この部分溶融層の存在によって潮汐散逸による内部発熱量にも影響するであろう。従って、もし部分溶融層が月の歴史の長期に及んで持続していたならば、月の熱進化や軌道進化を復元する上で考慮されるべき要素の一つである。

又、LROから得られた k_2 の値は、かぐやや嫦娥1号の値と比べて過大評価されていると考えられる。ただこの予想は勿論、将来の探査を踏まえて再検証されるべきである。例えば現在進行中のGRAILにおいて、より精密な重力場観測が行なわれた暁には、今回の結論の妥当性に関して更に確実な議論が可能となるかもしれない。

キーワード: 月, 潮汐応答, 内部構造, 部分溶融, クオリティファクタ, ラブ数

Keywords: the Moon, tidal response, internal structure, partial melt, quality factor, Love number