

Title	2.3.1 地球マントル起源VS衝突天体起源 : コア, 角運動量
Author(s)	松本, 晃治
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 38-39
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/83230">https://doi.org/10.18910/83230</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 2.3 未解決の重要課題

### 2.3.1 地球マントル起源 VS 衝突天体起源：コア，角運動量 [松本晃治]

月の核の大きさ・密度・状態 (固体 or 流体)・構造 (内核の有無) は，巨大衝突により形成したとされる月の初期温度や組成などのパラメーターやその後の熱進化を考える上で重要であるが，それらはまだ観測から十分な精度で推定されているとは言えない．内部が一様な球状天体の慣性モーメント  $I$  を  $MR^2$  ( $M$ :質量， $R$ :半径) で規格化した値は  $I/MR^2=0.4$  となる．天体が分化し，密度の高い物質が中心付近に沈めばその値は小さくなる．比較的大きな金属核を持つ地球の場合， $I/MR^2\sim 0.331$  である．一方，月の慣性モーメントは  $I/MR^2\sim 0.393$  であり 0.4 に近いため，少なくとも大きな核は存在しないと考えられる．実際，SELENE の電磁気学探査によって核半径の上限値として 400 km が報告されている (Shimizu et al. 2013)．地震学的には，2011 年に核・マントル境界からの反射波(コアフェーズ)を検出したとする二つの論文が発表され，核半径の推定値は  $330 \pm 20$  km (Weber et al. 2011) および  $380 \pm 40$  km (Garcia et al. 2011) と報告された．ただし，Weber らがマントル最下部の低速度層と固体内核にも言及しているのに対し，Garcia らのモデルはこれらを含まないという違いがある．このようなモデルの差は内部構造の不確定性の現れと考えられる．また，核半径の推定結果はマントル部分の速度構造モデルに依存すること，コアフェーズの検出はまだ明確ではないことから，報告されているコアサイズの不確定性も小さくない(4.2.1 (d)節参照)ことにも注意が必要である．

ラブ数は流体核の大きさに感度を持つ(流体核半径が大きい方がラブ数も大きくなる)．前述の Weber, Garcia モデルを用いて 2 次のポテンシャルラブ数  $k_2$  を計算すると，より小さい流体核を持つ Weber モデルの方が Garcia モデルより大きい  $k_2$  を与える．これは一見矛盾するように見えるが，ラブ数は流体核半径のみならずマントルの粘弾性にも依存するため，Weber モデルに含まれる(弾性定数が小さい)低速度層が  $k_2$  の理論値を押し上げていると理解できる．4.2.2 節に見るように，GRAIL によってラブ数  $k_2$  の精度は約 1 %まで向上したが，上記二つのモデルは GRAIL の結果が出る前に構築されたものであり，GRAIL の観測値と比較すると，それらに基づく  $k_2$  の理論値は有意に小さい．そ

ここで、最新の観測に調和的なモデルの構築が必要となり、Matsumoto et al. (2015) は GRAIL で観測された  $k_2$  を含む最新の測地パラメーターと Apollo 走時データとを組み合わせて内部構造推定を試みた。しかし、表側のみで観測された走時データで拘束できるのは深発月震が起こる深さ (およそ 1000~1200 km) までであり、それより深い部分は測地パラメーターで拘束されることになる。その結果、流体核半径とマントル最下部の低速度層の厚さの間にトレードオフが残り、両者の分離は困難であった。また、固体内核の密度を  $8000 \text{ kg m}^{-3}$  と仮定した上でその半径も推定したが、260 km という上限値を与えるに留まった。

核の密度は、Fe 核にどの程度軽元素が含まれ、どの程度融点が下がるかを議論する上で重要である。質量と慣性モーメントは核密度に対する拘束条件となり得るが、核密度を決めるためには、地殻・マントル部分の構造 (密度・厚さ) に加えて核半径を知ることが必要となる (たとえ地殻・マントルの構造が完璧に決まったとしても、核の半径と密度の間にトレードオフが残る)。このように、質量・慣性モーメント・ラプ数・ $Q$  値等の測地パラメーターの精度は向上したが、これらは月全体を特徴付ける積分量であり、層境界の位置 (深さ) の情報を持たない。逆に、層境界の位置が精度よく決定されれば、核を含む月深部構造の理解を次の段階に進めることができる。しかし、現状の月震データはメガレゴリスのような短波長不均質構造の散乱の影響を強く受けており、そのデータから層境界からの反射波を検出することは容易ではない。この問題を解決するためには、散乱の影響を受けにくい低周波地震波を観測できる広帯域地震計を月面上に広範囲に展開し、データを解析することが極めて有効となるであろう。

従来の巨大衝突説においては、月を形作る材料は主にインパクトの物質であり、月と地球の同位体組成がお互いに計測精度内で一致することを説明しにくいことが難点であった。Ćuk and Stewart (2012) は、高速回転する原始地球に対して衝突が起きた結果、地球のマントル・大気と周惑星円盤がお互いに力学的に分離することなく十分なミキシングが実現するという高角運動量巨大衝突モデルを提案し、この問題の解決を試みた。ただし、この高角運動量モデルでは、現在の月・地球系が持つ値と比較すると衝突後の角運動量が超過しており、角運動量を抜く現実的なメカニズムが必要となる。Ćuk and Stewart (2012) は、地球の公転周期と月の近地点歳差との間の出差共鳴を通した潮汐進化の過程で角運動量が失われるメカニズムを提唱したが、Wisdom and Tian (2015) はこのような角運動量の喪失は限られた範囲の潮汐パラメーターでしか起こらないことを示した。これを受けて Ćuk et al. (2016) は、よりロバストなメカニズムとして obliquity tide (月に対する見かけの地球の位置が南北に動くことによる潮汐) による潮汐進化を提案している。今後も、例えば難揮発性元素インベントリの月・地球比から月形成円盤の到達温度を推定するなど、理論研究の進展と観測による実証の可能性の検討が望まれる。