



Title	4.3 太陽系科学への貢献
Author(s)	小河, 正基; 石原, 吉明
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 167-170
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83245
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

4.3 太陽系科学への貢献 [小河正基, 石原吉明]

「かぐや」とそれ以降の月探査により、従来とは比べ物にならないほど広範囲にわたり均質で高精度の地形、重力、磁場、表面物質に関するデータが得られ、そこから明らかになった月の歴史は、月科学から生まれたはずの惑星形成・進化のパラダイムの再構築が必要であることを示した。この節では、これらの新しい月内部の科学の持つ意味について論ずる。

4.3.1 月の内部進化と太陽系科学のパラダイム

月の起源に関する巨大衝突仮説以降に描かれた月の形成と進化の大まかな描像をまとめると以下の通りである。

- (1) まず巨大衝突により地球のマントルから放出された物質と巨大衝突天体由来の物質が混合して月が形成された。
- (2) 形成直後の月は高温で深いマグマオーシャンが発達した（以下の 4.3.5 節参照）
- (3) このマグマオーシャンの冷却固化の過程で起こった結晶分化により高地の地殻が形成され、内部（マントル）も分化した。
- (4) この分化した月という天体が冷却することで、はじめは活発だった火山活動も沈静化し、現在の活動していない状態となった。
- (5) 火山活動は Procellarum KREEP Terrane (PKT) と呼ばれる地域に集中して起こった。そのピークは 35 億年前頃だった。

この描像のうち特に(2)から(4)は、月以外の岩石惑星の研究に於いてもその拠り所となるパラダイムとなっていた。

4.3.2 「高温起源」説対「低温起源」説

ところが、4.1.5 節で解説したように、このパラダイムは既に「かぐや」以前に得られていた月の収縮に関する観測データと矛盾するところがあり、本来その正当性をもっと詳しく吟味する必要があった。「かぐや」とそれ以降のより高い精度と信頼度の観測データは、この矛盾は観測の不確定さから来るものではなく本質的なものであることを強く示唆した。

「かぐや」やそれ以降（特にグレイル）の観測により浮かび上がった月の熱史の特徴は以下の（A）から（C）のようにまとめられる。

(A) 4.2.3 節で解説された月の膨張収縮史は、月内部の平均温度は 45 億年の歴史を通してほとんど低下していない、むしろ最初の数億年は上昇したことを示唆している。地殻からマントル浅部にかけては、月形成期のマグマオーシャン状態から現在に至るまで冷却しているので、この平均温度のわずかしかない変化は、マントル深部からコアにかけて温度が上昇したことを意味する。（例えば、Solomon and Toksöz (1973) の fig. 7 参照。）

(B) (A)で示唆された深部での温度上昇の結果、現在のマントル深部には部分溶融層があるらしい。（4.2.1, 4.2.2 節参照）

(C) 40 億年以上前の海の火山活動は皆無ではないが（いわゆるクリプトマリアの活動）活動のピークは 35-40 億年前であったことには変わらない。さらに PKT では 10-20 億年前までは火山活動が継続した。（4.2.4 節参照）

これらの観測結果は、一貫して月深部の温度は時代と共に上昇したことを示唆しており、このことは、形成直後の深部の温度はマントル物質のソリダス温度と比べてこの上昇が可能なくらい低かったことを意味している。この示唆は、形成直後には場合によってはマントル全部が融けるくらい内部の温度は高かったとする巨大衝突仮説の予言とは矛盾する。

観測データが示唆する低温起源と巨大衝突説が示唆する高温起源のいずれが真実に近いかわかる上で最も重要な情報はマグマオーシャンの深さであり、これは斜長岩からなる月の地殻の厚さを直接測ることにより見積もれる。しかし、アポロ計画以降、月の地震探査は行われておらず（4.2.1 節参照）この鍵となるデータは得られていない。さらに、現在の内部の温度分布、膨張収縮の歴史、クリプトマリアの火山活動などの熱史を直接制約する観測データも補強が必要である。

4.3.3 水平不均質構造と月の起源

熱史とならんで、月の起源と関わっている可能性があるもう一つの月の特徴がPKT という放射性元素に富み火山活動が長く続いた地域である（4.2.4 節）このような局在化した火山活動は、マントルに巨大なプルームが一つだけ存在しそれにより引き起こされたという説もあるが（図 4-32a）現実の PKT に見られるように 20 億年以上の長期にわたって、このようなマントル対流のパターンを維持するのは困難である。むしろ図 4-32b のように PKT の地殻内部や直下に放射性元素に富む領域があり、その発熱がこの部分のリソスフェアを薄くし、プルームによる火山活動を助けたという方が、可能性が高い。

この PKT に代表される放射性元素分布、地殻厚、火成活動の水平不均質構造（二分性）の原因を特定することも月の形成過程に重要な制約を与える。というのも、一旦月が出

来上がってしまったからでは、このような二分性を生み出すのは困難だからである。そのためには、二分性がどの深さまで及んでいるかを知ることが必要不可欠であり、地震波や重力によるマントル最上部の構造探査はこの意味でも重要な意義がある。

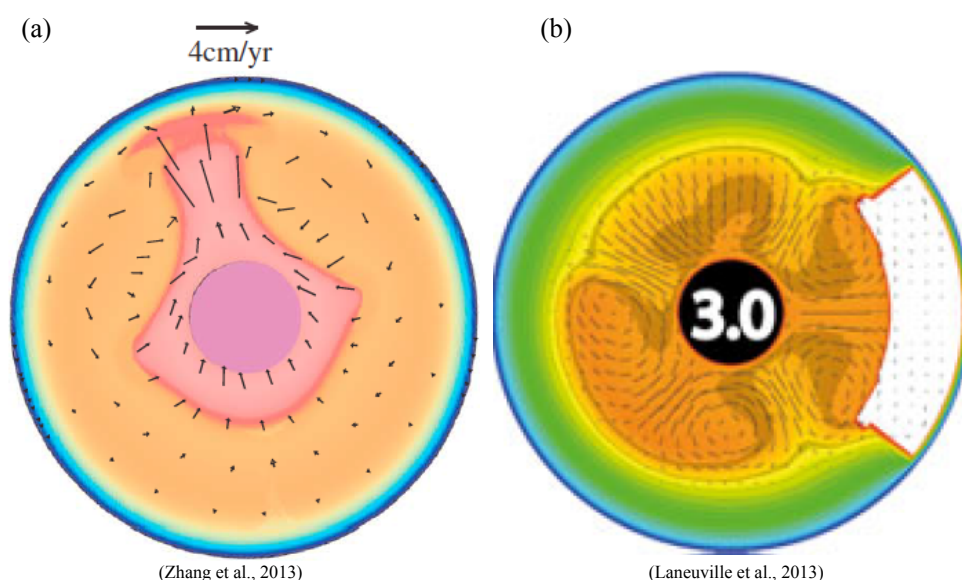


図 4-32 月のマントル対流の数値モデルから期待される温度分布。(a)は巨大なプルームが一つだけ上昇し、PKT の火山活動を引き起こしたというもの。(b)は PKT の地殻直下に放射性元素に富む領域があり、その発熱のため局所的にこの部分だけリソスフェアが薄くなり、プルームが浅いところまで浮上したため白く抜けた領域でマグマが生成され火成活動が局所的に起こったというもの。図中、矢印は対流の流れの方向、月の中心部分にある円はコア、色は温度分布を表す。(b)で「3.0」は月が形成されて 3.0 Gyr (30 億年後) という意味。

4.3.4 惑星固有磁場の起源

4.3.2 節の(A)から(C)で推測された深部の温度上昇にも関わらず、月には 35-40 億年ほど前に、地球の磁場からの外挿では説明できないくらい強いダイナモ起源の磁場があった。(4.2.5 節参照) このことは、月の深部で温度が上昇したという 4.3.2 節の解釈が誤っているか、あるいは、惑星の固有磁場はコアの冷却によって駆動される熱対流および組成対流により生成されるという広く信じられているモデルが現実を単純化しすぎているか、のいずれかを意味する。固有磁場は、コアの冷却だけではなく軌道進化や自転軸の揺らぎなど様々な要因で誘起される可能性があり、しかも、その生成メカニズムは時代と共に変化する可能性もある。地殻に残された残留磁化や現存する惑星内部磁場からその惑星深部の熱史を制約するという研究手法は月のみならず、水星・火星から地球まで広く用いられている。従って、月の深部で温度が上昇していたにもかかわらず固有磁場が存在したこ

とが確定すれば、その惑星の熱史の研究全体に及ぼす影響は大きい。(A)から(C)の観測データの信頼度はその意味でも重要である。

4.3.5 月の起源と太陽系形成過程

標準的な巨大衝突説によると、月是一次の衝突で地球や巨大隕石からたたき出された物質が地球の周りにディスクを形成し、これが一ヶ月から 200 年程度かけて集積し月を形成したとされる(第 2 章参照)巨大衝突によりたたき出されるディスクは高温であるためこのように短期間で月が形成されると、4.3.1 節に述べたようにその内部は高温となる。ところが近年、一回の巨大衝突で月の持つ大きな軌道角運動量や化学組成・同位体組成の全てを統一的に説明することの困難さが認識されるようになり、この問題を解消するモデルとして多重衝突説が提唱された。これは、巨大衝突を何回も繰り返し、その度に形成される地球回りのディスクから段階的に月が成長したというモデルである。この場合は、月形成に百万年単位の時間を要するため、形成過程で原始月は冷却され、形成直後の内部はそれほど高温にはならない可能性がある。月の観測から示唆される低温起源は多重衝突説と整合的であるように見える。このように、月の熱史から形成直後の内部の状態を明らかにすることは、月・地球系の形成過程を制約する。

月の起源を制約することは、太陽系の形成過程を理解する上でも重要な意味を持つ。古典的な太陽系形成論によると、地球は微惑星の集積によって現在の大きさまで成長し、その後たまたま起こった巨大衝突により月が形成されたとされる(第 2 章参照)ところが、2000 年代に入り惑星の寡占成長モデルが提唱されるようになった。このモデルでは、地球は微惑星の集積によって形成された火星サイズの原始惑星(質量にして地球の 1/10 程度)が複数回巨大衝突を繰り返し、合体することで現在の大きさになったとされる。月の多重衝突による形成モデルは、惑星が寡占成長により形成されたとすると受け入れやすい。(ただし、このモデルが本当に天体力学的に尤もらしいか否かについてはさらに議論が必要である。)このように、月内部の熱的状态の研究から太陽系の形成過程を制約することも可能になると期待される。

太陽系形成論の研究は、特に 2000 年代以降コンピューターの発達とともに急速に発展し、我々の太陽系形成過程にも重要な洞察を与えてくれている。しかし他方で、これらの理論はあくまでモデルであることには注意を要する。微惑星や原始惑星の衝突合体による成長は、それらの破壊を含む複雑なプロセスであり、小惑星帯の存在からも明らかのように、この原始惑星の破壊は我々の太陽系の形成において重要な役割を果たした。しかし、微惑星の破壊はモデリングが困難であり、観測データに基づくモデルの検証は太陽系形成過程を理解する上で必要不可欠である。この点で、地球の近傍に位置しアクセスが容易で、しかも 45 億年前の太陽系形成期の記録を残している月はまたとない研究の場を提供してくれている。