The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	2.1.1 月の起源説，地球-月系の材料物質
Author(s)	玄田，英典
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 19-21
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83227
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

2.1 「かぐや」以前の理解

2.1.1 月の起源説，地球-月系の材料物質 [玄田英典]

この節では，まず，月の起源を考える上で重要となってくる観測的にわかっている制約条件についてまとめる．そして，現時点では，完全とは言えないが，他の仮説(捕獲説，分裂説，共成長説)と比べれば相対的に，非常に多くの観測的制約条件を満たす説である巨大衝突説 (ジャイアント・インパクト説) について解説する．

(a) 観測的制約条件

月の質量は，地球の約 1/80 であり，他の惑星―衛星系と比較すると突出してその比が大きい．月が大きいということは，地球―月系の角運動量も当然大きくなる．したがって，月の起源を考える場合，衛星の大きな質量だけでなく，大きな角運動量も説明しなければならいことを意味する．

アポロ計画により地球に持ち帰られた月試料の分析から，月の高地の組成が斜長石を多く含む斜長岩でできていることがわかった．またそのような試料の年代測定により，月の高地の年代が極めて古いことがわかっている．斜長石を主要構成鉱物とする厚さ数十 km の月の高地地殻を作るためには，月が過去に深さ数百 km という大規模な溶融状態，つまりマグマオーシャン状態であった必要がある．このマグマオーシャンが冷却していく過程で，かんらん石や輝石が析出・沈降し，分化の進んだマグマオーシャンから析出した大量の斜長石が浮上することによって月の高地地殻が作られる必要がある (e.g., Wood et al. 1970)．また，月の高地地殻の正の Eu 異常と月の玄武岩の負の Eu 異常は，月がかつてマグマオーシャン状態であったことを支持する (Warren 1985)．マグマオーシャンが実際にどれくらいの深さであったのかについては，まだ議論はわかれている (倉本圭 et al. 2007)が，大規模溶融は，月の形成メカニズムに強い制約を与える．

月の平均密度 (3340 kg m^{-3}) は，地球の非圧縮時の平均密度 (4450 kg m^{-3}) よりも小さい．このことは，月は地球よりも軽い物質でできていることを意味し，月に金属鉄が少ないと考えるのが最も簡単である．月震および月重力の解析でも，月には金属鉄のコアがないか，もしくはあったとしても月質量のわずか 3 %程度と非常に小さいことが示唆されている (Hood and Zuber 2000).

月のバルク組成に関しては，揮発性元素(蒸発温度が 1300 K 以下)が強く枯渇している点を除けば，地球マントルの化学組成と基本的には類似していると通常は考えられている (例えば Jones and Palme 2000)．しかし，実際のところは，我々は月に関しては表面組成しか分かっておらず，また，地球マントルに関しても，下部マントルの組成は厳密

にはわかっていない．したがって，バルク組成が類似しているかどうかを月の形成メカニズムの制約にどれくらい用いてよいのかはよくわからない．

一方，同位体に関しては，組成よりも確かなことが言える．地球と月の酸素同位体組成は，分析の誤差範囲で区別できないほど同じ分別線にのることがわかっている (Wiechert et al. 2001; Young et al. 2016)．一方，火星やほとんどの隕石の酸素同位体組成は，地球と月のそれとは異なる (Clayton 1993)．このことは，地球と月が酸素同位体的に同じ材料でつくられた(Dauphas 2017)，もしくは，月形成過程で酸素同位体がよく混ざり同位体平衡に達した (Pahlevan and Stevenson 2007)，もしくは，月の大部分は地球マントル物質由来であることを意味するのかもしれない．さらに，最近では，酸素同位体以外に，クロム (Cr) 同位体組成 (Lugmair and Shukolyukov 1998; Qin et al. 2010) やチタン (Ti) 同位体比 (Zhang et al. 2012) についても，地球と月で分析の測定誤差の範囲内で区別できないことがわかっている．

(b) 巨大衝突説(ジャイアント・インパクト説)

アポロ計画以前は，分裂説，捕獲説，共成長説が考えられていた．しかし，アポロ計画後，月が大規模に溶融を経験したこと，揮発性元素が枯渇ていしていること，金属鉄コアに欠乏しているという制約条件が加わったことにより，これらの説の可能性が極めて低くなり，新たな説を考えざるをえなくなった (例えば，玄田英典 2010)．アポロ計画で持ち帰られた月試料の詳細な分析が行われた直後，Hartmann and Davis (1975)，および Cameron and Ward (1976)によって独立的に，現在の巨大衝突説の原型が提案された．巨大衝突説では，原始地球に，巨大な天体が斜め衝突することによって，大量の物質が地球周回上にばらまかれ，それらの物質から月が作られる．この斜め衝突によって現在の地球–月系の大きな角運動量が与えられる．この説が提案された当時は，巨大衝突のような激しいイベントが本当にあったのかどうか疑わしいと考える研究者が多く，あまり真剣に受け止められていなかった (Stevenson 1987)．そのおよそ 10 年後の 1984 年に，ハワイ・コナにおいて「月の起源に関する会議」が行われ，1986 年に「Origin of the Moon」というタイトルの本が出版され (Hartmann and Phillips 1986)，巨大衝突説でなければ，観測事実をうまく説明できないという統一的な見解に収束し，それ以来，巨大衝突説が，月の起源としてもっとも有力視されるようになった．

また，1990 年代になると，地球型惑星形成の詳細な数値計算が行われるようになり，地球型惑星形成の後期には火星サイズの原始惑星同士の衝突が複数回起きることがわかってきた (Chambers and Wetherill 1998; Kokubo and Ida 1998)．つまり，巨大衝突説が提案された時は，恣意的であると考えられていた巨大衝突が，実は，惑星形成時に必然的に，しかも複数回起こるイベントであることがわかってきたことによって，さらに巨大衝突説を支持する展開となった．

同様に，1990 年代になると，3 次元の巨大天体衝突の高解像度シミュレーションが行われるようになり，月の観測的制約条件を満たす衝突条件が詳しく調べられるようになった．その結果，ほぼ現在の大きさにまで成長した地球に，火星サイズ (地球質量の 10 %) の天体が斜め衝突することで月質量の 2〜3 倍の物質が地球の周りに留まることがわかった (Canup 2004)．この円盤から月が作られることから，原始月円盤と呼ばれている．この原始月円盤から月サイズの衛星が作られる過程についても詳細なシミュレーションが行われており，1 カ月〜1 年という非常に短い時間で月が形成される (Ida et al. 1997).

巨大天体衝突のシミュレーションからは，原始月円盤の物質は，主に衝突天体のマントル物質であることがわかっている (Canup 2004)．このことは，現在の月に大きな金属鉄コアがないこととは矛盾しない．また，衝突によって解放されるエネルギーは非常に大きく，円盤物質は全溶融し，一部蒸発するほど高温になる (Genda and Abe 2003)．また，円盤から月が集積する際に解放される重力エネルギーよって，月が全球的に溶融するのは疑いない．このことは，月が大規模溶融を経験したことと調和的である．円盤形成および短時間の月集積から，形成された月に揮発性元素が枯渇する．この過程を追った計算 (Abe et al. 1998) によると確かに揮発性元素 (Na，K など) は強く枯渇し，難揮発性元素(Ca，Al など)は濃集する結果が得られている．

以上の様に，巨大衝突説は，月の観測事実の多くを自然に説明する．しかし，同位体組成に関しては，巨大衝突説で自然に説明できていない．前述した様に，月と地球の同位体組成は区別ができない．もし，衝突天体が原始地球と異なる同位体組成を持っていたとしたら，月の大部分は衝突天体物質由来であることを考えると，地球とは異なった同位体組成を持ってしまう．衝突時に地球が高速回転していれば，大量の地球マントルが放出され，上記の同位体組成問題を解決できるかもしれない (Ćuk and Stewart 2012)．ただし，高速回転する地球から角運動量を抜く必要があり，まだ完全には解決されていないようである (Wisdom and Tian 2015)．詳細は 2.3.1 節において詳しく議論するが，巨大衝突説は，まだ完全解決には至っていない状態であることを付け加えておく．