

Title	2.3.2 地球マントル起源VS衝突天体起源 : バルク組成, 同位体組成
Author(s)	長岡, 央
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 40-42
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83231
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

2.3.2 地球マントル起源 VS 衝突天体起源：バルク組成，同位体組成 [長岡央]
月誕生の起源としては，今までに 1) 地球が太陽系星雲内で集積した後の残りの物質が地球近傍で凝縮し，ほぼ同時期に，別々の天体として成長したとするモデル(兄弟説)：2) 原始地球集積後，回転不安定性のために地殻の一部が剥ぎ取られ，それが月に集積したとするモデル(親子説)：3) まったく違う場所で形成された天体が地球重力に捕獲されたとする説(捕獲説)，等が議論されてきたが，現在最も有力視されているのが，前節にて解説されたジャイアント・インパクト説(巨大衝突説)である。

ジャイアント・インパクトの結果，月の元となった始原物質がどのようなものであったか，この謎は依然として未解決である．特に月の始原物質として，1) ジャイアント・インパクトで地球に衝突した天体構成物質，2) 地球マントル物質，以上二つの候補が考えられており，どちらがどの程度支配的であったのかについては現在も議論が続いている．ここでは月の始原物質に関して，化学組成の観点から重要なテーマについて抽出し，簡潔にまとめる．

化学組成の観点からは，バルクの元素組成と同位体組成の二つのテーマについて紹介する．月の始原物質が地球マントル起源である場合，月の化学組成(バルク組成，同位体組成)は地球のものと酷似するはずである．一方で，衝突天体起源であれば，月の化学組成は衝突天体側の寄与により，地球のものとの差が生じ得る．

地球と月を構成する岩石・鉱物は，共通点を持ちつつも，月と地球の間には複数の違いが指摘されてきた．ここでは特にバルク組成という観点から，月の始原物質を議論する上で重要となる以下の課題について触れる：1) 月の難揮発性元素量は，地球の原始マントルよりも豊富に存在する；2) 月は地球と比較して揮発性元素が大幅に欠如している；3) 月のバルク Mg#は，地球のものと比較して低い値をもつ．

まず 1)の月と地球の間での難揮発性元素含有量の違いについて議論する．難揮発性元素(Al, Ca, Th など)はその蒸発温度の高さから，月形成時の熱による散逸が最もしづらい元素群であり，始原物質の元素情報を最もよく保存している．したがって，月や地球におけるこれらの元素含有量を比較することで，月の始原物質を制約することができる．実際に月の全岩組成を測定することは不可能なため，今までに試料データや探査データ，数値計算を基に間接的に月の難揮発性元素含有量の見積りがなされてきた．その中でも，周回探査による全球観測が成功した Th について，月面での全球濃度分布を使って，月の全 Th 量が見積られた (Jolliff et al. 2000; Warren 2005)．しかし，それぞれで見積もられた全量は，地球の等倍 (Warren 2005) から二倍 (Jolliff et al. 2000) と大きな幅がある．月の全 Th 量が地球の全量と異なる場合，その違いを説明するためには衝突物質側の組成差の寄与や，熱による元素の散逸や濃縮などが関連していることになる．両者は月を地殻・マントル(上部，下部)・核に分け，各層での Th 全量を探査データや試料データから見積もったが，この両者の不一致に関しては用いた Th 分布の解釈の違い(Th の深さ方向の減衰を Warren 2005 は仮定)や，そもそもの地殻構造の層モデルの違い，用いた

データの信頼性 (特に裏側高地の極低 Th 濃度地域の精度) の問題, 等が起因している。層モデルの違いとは、レゴリス層, その下にある斜長岩層, Th-rich (KREEP)層, 下部地殻, それぞれの厚さや組成の違いを指す。地殻層構造モデルの違いによる地殻の全 Th 量に与える影響については, Taylor et al. (2006)が用いる地殻モデルの違いにより, 地球の等倍から二倍程度に大きく変動することを指摘し, 彼らは現状のデータから地球の 1.5 倍程度が妥当であると結論づけた。しかし, これはあくまでも 2006 年までの元素分布データや地殻厚データ, 層構造のモデルによるものである。「かぐや」の Th 分布 (Kobayashi et al. 2010; Yamashita et al. 2010) や月隕石のデータを駆使すると, Jolliff et al. (2000)の斜長岩地殻(FHT)の全 Th 量の見積りは, 過剰評価である可能性が指摘されている(長岡央 2014)。

2)の揮発性元素の欠如に関しては, 回収試料中の斜長石の An 値(molar $100 \times \text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$)が地球のものと比較して高いこと(Na, K が枯渇)や, その他の揮発性元素(例えば, H, Bi, Tl など) が非常に少ないことが指摘されている (Taylor et al. 2006)。揮発性元素の含有量の違いについては, 衝突時の熱による散逸はマントル起源または衝突体起源に関わらず, ジャイアント・インパクトでは起こりうるため, その残量の比較から起源を議論することは難しい。したがって, 揮発性元素の比較では, その同位体組成に基づいて起源を議論するほうがより効果的であろう。

3)に関しては, 地球に持ち帰られた月斜長岩中苦鉄質鋳物の Mg#が, 地球のものと比較して, 鉄に富むもの(Mg#50-70; ferroan anorthosite, FAN)であったことから, 月のマグマオーシャンは地球のものより, 鉄に富んでいた可能性が考えられてきた(Warren 1985)。マグマオーシャンを模したモデル計算のもと, アポロ試料中の斜長石浮上の条件から導いたマグマ組成は, 地球のもの(Bulk Silicate Earth: BSE)と比較して, 鉄に富んでいる可能性(1.3-1.8 倍)が指摘されている (Sakai et al. 2014)。一方で, 月隕石の研究から, アポロ回収点とは異なる領域に, FAN より Mg#の高い斜長岩が分布していることが分かった (Arai et al. 2008; Korotev et al. 2003, 2006; Takeda et al. 2006)。さらに最近の月隕石研究では, 角礫化の影響が非常に小さい斜長岩の中には, FAN と比較してより Mg#の高い苦鉄質鋳物(~Mg#85)を含む純粹斜長岩(PAN)が見つかっており (Nagaoka et al. 2014), 従来よりも高い Mg#のマグマ (地球と同程度) が必要であることがわかってきた。

次に同位体組成の観点から, 月の起源物質について触れる: 1)酸素同位体が地球のものと同じ; 2) ϵ Nd 値からみる地球マントル起源 or コンドライト起源。

まず 1)に関して, 地球と月の酸素同位体比が非常に近い値を示すこと (Clayton and Mayeda 1975) は非常に有名な話であり, これは両者(もしくはその始原天体)がソーラーネビュラの中で, ほぼ同じような場所で作られたことを意味している。この特徴はむしろ月の形成モデルとして, 兄弟説や親子説を支持するものである。衝突起源の場合は, 地球と同じ酸素同位体比をもつ衝突体であるか, 衝突体の月質量への寄与が非常に小さかった (Wiechert et al. 2001) という制約を与える。最近の酸素同位体分析の結果では,

月回収試料の酸素同位体比と地球のものとの間にずれが見られるという結果 (Herwartz et al. 2014) と、一方で差は非常に小さいという結果 (Young et al. 2016) が報告されている。前者は月の大部分は衝突体に由来しているという見方や捕獲説を説明でき、後者は月がジャイアント・インパクト由来であるなら、非常に高いエネルギーと角運動量による衝突の結果、地球と衝突体のそれぞれの物質はよく混合され、似た組成になったと考えられている。

月の希土類元素 (Rare Earth Element, REE) 組成に着目した場合、月の起源物質が地球マントル起源であるか、衝突体起源であるかにより、それが溶けたマグマから生成される斜長岩の同位体は異なる組成を示す。その指標となるのが ϵ Nd 値 (Nd の質量数は 143 or 142) である。これは ^{147}Sm (半減期 1.03×10^8 年) (or ^{146}Sm (半減期 1.06×10^{11} 年)) が崩壊してできる ^{143}Nd (or ^{142}Nd) に着目したものである。 ϵ Nd 値は、以下のような式で示され、始原物質 (chondritic uniform reservoir, CHUR) との比として表される。

$$\epsilon^{143}\text{Nd} = \left[\frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{CHUR}}} - 1 \right] \times 10^4 \quad (2-1)$$

始原物質からの分化度が低いほど、値は 0 に近づく。正の値はコンドライト的マグマと比較して、軽希土類元素が枯渇した起源物質(地球マントル的)に由来し、負の場合はその逆の組成 (軽希土類元素が豊富) をもった起源物質に由来する。Borg et al. (2011) はアポロ回収試料の FAN を用いた Sm-Nd の同位体分析を行い、FAN がマグマオーシャンの結果、コンドライト的なマグマから出来た産物ではなく、地球マントル的組成(軽希土類元素が枯渇)のマグマから晶出したと報告した。これと合わせて、FAN の結晶化年代が月形成時からかなりの幅をもつことも問題視しており、月の地殻は従来のようにマグマオーシャンに由来するのではなく、その後の連続的な火成活動で形成されたと彼らはその論文で述べている。月の初期地殻(最古)がどのような組成をもつマグマから形成されたかは、月の始原物質(初期マグマ組成)を知る上で非常に重要な情報である。FAN 結晶化年代の多くは、月形成の年代から 1 億年以上経過しており、かつその年代の幅はマグマオーシャンの数値計算モデルと比較して長過ぎることが指摘されている (Elkins-Tanton et al. 2011)。このことからすでに表側から回収された斜長岩の多くは、一番始めに結晶化した時の情報がその後火成活動によりかき消されている可能性も考えられる。この問題の解決には、月で最古の斜長岩を持ち帰り、その ϵ Nd 値を高精度に決定することが必要である。