The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	1.5 月科学の新展開(惑星科学的スコープへ)
Author(s)	山下, 直之; 長岡, 央
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 13-15
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83226
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

1.5　月科学の新展開（惑星科学的スコープへ）[山下直之，長岡央]

地球型惑星の形成初期の化学組成や地球物理学的パラメーターは，その後の固体惑星の多様性を説明する上で重要だが，未だ十分な理解には至っていない．これは，地球のような大型の惑星では，内部の熱的活動による火成活動やプレートテクトニクスのため，始原的な情報が失われてしまったためである．一方で，プレートテクトニクスが見られない月では，形成初期から約 30 億年間の物質進化の歴史が刻まれている．月面には地球ではすでに消失してしまった冥王代(45～40 億年前)の岩石試料が，月隕石やアポロ試料の中に豊富に残されている一方で，「かぐや」の観測により約 15 億年前までは玄武岩質な火成活動が継続していたこともわかった．さらに「かぐや」以後の探査結果から，よりシリカに富む火山活動に由来する地形などが点在していると報告されている．このような火山性地形の存在は，地球や火星で見られる火山活動との対比，惑星火山学という視点からも非常に興味深い．月は形成初期から数十億年に渡る火成活動の変遷を検証できる場である．ここでは「かぐや」の成果を受け，今後の月科学が向かう新たな方向性について簡単に紹介する．

(a) 月の起源とマグマオーシャン

月の最有力な起源説であるジャイアント・インパクトと，その後の地殻とマントルの形成を促したマグマオーシャンは，月の形成史を語る上で最も重要なイベントである．しかし近年の研究により，マグマオーシャンから固化した初期地殻と長年考えられてきた FAN の固化年代にばらつきがある事が報告されており，数値計算から予想される地殻形成にかかる時間との矛盾が指摘されている．マグマオーシャン仮説の検証のためには，月形成初期に結晶化したであろう最も古い斜長岩を持ち帰り，結晶化最初期の化学組成や同位体組成を調べることが必要である．特に，同位体の初生値は母マグマの組成を反映しており，そこから導かれるマグマオーシャンの初期組成は，月バルク組成ひいてはジャイアント・インパクト仮説の検証にも繋がる．

また最近の月試料分析の結果から，月のマントルは従来よりも揮発性物質(水を含む)に富んでいた可能性が示唆されている．マグマオーシャン時の高熱状態を生き残り，マントルに一部の揮発性物質が取り込まれた可能性が無視できなくなってきた．したがって，月の起源物質が元々揮発性成分に富んでいたのか，その後のマグマオーシャン時に隕石落下によって揮発性物質が供給されたものなのか，決着はついていない．しかしどちらの場合にしろ，これらの新たな情報がマグマオーシャン仮説に与える影響について今後検証していく必要がある．これからの月科学では，形成時に取り込まれた揮発性物質を含めた様々な元素が，どのようなプロセスを辿り，どこに取り込まれ，後の火成活動にどのような影響を与えたかについての議論が必要不可欠である．さらに月マントル組成への正しい理解は，その後の火成活動を知る鍵となり，さらにはより大型で複雑な系をもつ天体のマントルの形成初期の姿を理解する手がかりとなるはずである (Saal et al. 2008; Borg et al. 2011).

(b) 月の年代史

月には風化作用を起こすほどの大気や水循環が存在しないため，非常に古い地形が豊富に残されており，クレーター年代学を適用するのに最適の環境といえる．月面で回収された試料の結晶化年代(同位体年代学を用いる)によると，25 億年よりも若い年代のものは現存する試料中には存在しない．一方で，クレーター年代学を用いて表層年代を推定した結果，月表側 PKT に噴出している玄武岩の中には，25 億年よりも若いものが複数の領域で報告された．これはアポロが回収した試料に偏りがあるとも解釈できるが，一方でランダムサンプリングである月隕石(玄武岩質)の中にも，そのような若い年代を示すサンプルはまだ報告されていない．クレーター年代学において，特に若い年代の決定精度を向上させるためにも，PKT 内に分布する噴出年代が 25 億年前よりも若い玄武岩ユニットから試料を回収し，これらの絶対年代を得ることが必要である．月の年代は太陽系惑星の年代を決定する上で軸となるものであり，月における年代学の高精度化は太陽系惑星の変遷に絶対年代における時間軸を設ける上で重要である．

(c) 月内部の構造と元素組成

月の内部構造の理解は表層組成の理解と比較して，まだ十分に把握できているとはいえない．現在の内部構造を知る手段として地球物理学的探査が必要である．「かぐや」でも行われた全球的な重力場観測は非常に有用であるが，一方でアポロ計画以降行われていない着陸探査による地震計や熱流量計を用いたその場観測もまた非常に有効な手段である．例えば，地震計のデータから推測される月における中心核の有無とそのサイズといった情報は月の起源を議論する上で非常に強い制約を与える．また，熱流量計から推測される月内部の温度構造は，月内部進化の状態を強く制約する．日本の今後の探査においても，このような物理探査の重要性は強く掲げられている．

一方で月の内部進化に関わる物質科学も今後探査で調査すべき課題である．月は，地球や火星と比較して小さいため，内部は比較的早い段階で冷え固まったとされてきた．しかし，月表層での火成活動が回収試料の最も若い結晶化年代から，さらに 20 億年近く継続していたことがわかり，特に若い玄武岩が吹き出している PKT には，地球や火星で見られるような粘性が高いマグマによる火山性地形が複数報告されている．また月試料分析により，月マントルは従来考えられていたよりも多くの揮発性元素を含んでいた可能性が指摘され始めた．これら最近の研究成果から，従来の揮発性元素に非常に枯渇したマントルを基とする単純な火成活動しか起こりえなかった月のイメージは塗り替えられつつある．特に揮発性物質が月の内部進化に与えた影響と，マントル進化が後の火成活動もたらした影響は，月の進化を語る上で必須の情報であり，かつ火星や地球との比較という面で今後の発展性が期待できる (Saal et al. 2008).

(d) 極域探査

月面上の資源探査場所として極域が注目を集めている．特に中性子分光観測により，極域の永久陰地点(一年中日が当たらない場所)に非常に強い水素の濃集が確認されている．しかし，現状の情報のみではこの水素の化学種までは特定しきれていない．水素の存在量や分布だけでなく，単体の元素(H_2)としてトラップされているのか，水素が表層の酸素と結合し水酸基(OH)として存在しているのか，もしくは水(H_2O)の状態であるのか，これらの情報を得ることが水素を資源として活用する上で非常に重要となる．また，極域探査は資源探査という観点からだけでなく，科学探査としても貴重な観測データを提供することが期待される．水素もしくは水がどこから来て,どのようにして月の極域に濃集したのか，表層に分布するその他の揮発性物質はどのように月面を移動しているのか．これらの謎を解明するためには，その移動プロセスを支配するパラメーターを明らかにすることが重要である．月極域での濃集プロセスの解明は，天体表層における揮発性物質移動の体系的な理解に繋がる．また，揮発性物質の供給起源として太陽風由来，メインベルト由来などいくつか議論されている最中であり，極域の水の同位体情報などの取得はその供給起源を明らかにする鍵となるだろう (Watson et al. 1961; Sanin et al. 2017; Kayama et al. 2018).