OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	3.3 残された課題
Author(s)	長岡, 央; 川村, 太一; 大竹, 真紀子 他
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 75-82
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83237
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

3.3　残された課題［長岡央，川村太一，大竹真紀子，橋爪光］

地球や火星も月と同様に，マグマオーシャンで覆われた時代を経ていると考えられている．そのため月マグマオーシャンの初期条件(組成や温度)や冷却過程(固化中の結晶粒子とマグマの分離過程，固化タイミングや温度履歴など)を知ることは月の初期進化を知

る上でも，またそこから地球の初期進化を知る上でも重要である．そのような観点で，今後に残された課題を以下に示す．なお，記述の順は優先順位ではない．

(a) マグマオーシャンの組成と固化過程の理解

マグマオーシャンから固化する結晶粒子のサイズや形状や，化学組成とマグマの分別過程を知ることは，マグマの粘性や温度条件や対流の様子を推定することにつながり，これらはマグマオーシャンの環境条件を知る上で重要である．PAN の存在は周回観測と試料分析の両面からその存在が実証され (Ohtake et al. 2009; Nagaoka et al. 2014)，マグマオーシャンを模した数値モデルからもその生成方法が示された (Piskorz and Stevenson 2014)．このような純粋な斜長岩の直接探査や試料回収により，その形成年代や，どのようなメルト組成からどの段階で晶出したのかなどを解明すべきである．実際に PAN が露出しているサイトから試料回収を行い，組織情報，化学組成，結晶化年代，同位体の初生比(εNd 値)，などを取得し，その起源メルトや形成過程の検証を行うことが今後への課題である．これまでの月地殻の着陸探査では，月表層の混合層(天体衝突による溶融・攪拌が何十億年にも渡って続き，もとの地殻から性質が変化した層)の調査・試料採取が行われているが，今後はマグマオーシャンから固化したままの原始地殻がなるべくそのままの形で残されている領域(中央丘や盆地のリングなど)での探査が必要となる．

(b) マグマオーシャンの固化タイミング

マグマオーシャンの固化タイミングや固化順序(従来のような同心円状の固化なのか不均一固化なのか)や温度履歴を知ることは月の初期進化を知る上で重要である．この課題については，マグマオーシャンの固化年代と斜長岩の固化年代の不整合((i)信頼できる最も古い斜長岩の固化年代が月の形成年代に比べて新しすぎる，(ii)斜長岩の固化年代が幅広い年代を示し，この年代幅がマグマオーシャンの固化までの時間を示していると仮定すると，マグマオーシャンの固化に時間が掛かりすぎる)という (Borg et al. 2011)，試料の分析から指摘されている大きな謎が残されている．またマグマオーシャンの組成については現在，地球のコアを除くケイ酸塩部分と月の組成は，例えば鉄や難揮発性元素(Al や Th)については，月と地球の比で 1〜2 倍もの推定値が言われており決まっていない (e.g., Taylor et al. 2006; Sakai et al. 2014)．「かぐや」成果により月裏側で Mg#の高い高地地殻が発見されたことに伴い (Ohtake et al. 2012)，未採取で未分化(先に固化した)な原始地殻の組成や固化年代について知ることにより，これら課題の解決が期待できる．

(c) 月火成岩試料の起源と形成過程の理解

月の表層物質の大部分を占める斜長岩地殻は月形成から 45 億年以上が経過するなかで，地殻内での二次的な火成活動や，表層に飛来する大小様々な天体衝突による混合の影響で形成初期の物質とその後の表層進化によりもたらされた物質が混合された状態となっている．長石質な(斜長岩を多く含む)回収試料の多くや長石質月隕石のすべては角礫岩に分類でき，隕石衝突の影響を受けたが他の岩石との混合を受けなかったモノミクト

角礫岩，もしくは，異なる種類の岩石片が混合されたポリミクト角礫岩に分けられる．また回収試料で斜長岩に分類されている試料も程度の差こそあれ，隕石衝突の影響を受けている．今後，月探査の実施だけてなく，今ある回収試料や月隕石の中から，特に隕石衝突の影響が少なく火成岩的な組織を強く残している岩石片について選択的に詳細を調べ，それらが I)初期マグマオーシャン (LMO)由来の深成岩，II)貫入岩もしくは火山岩，どちらに属するものなのか分類を行い，その起源と形成過程について理解していくことが必要である．

(d) 高地地殻の絶対厚の把握

マグマオーシャンの固化過程や組成，温度履歴を理解するには，高地地殻の理解が必須である．これまでには重力場観測データから高地地殻の相対的な厚さについて推定されてはいるものの (e.g., Ishihara et al. 2009)，高地地殻の絶対的な厚さは未だに得られていない．これを知ることでマグマオーシャンの初期組成，中でも地殻中に多くが含まれるアルミニウムや熱源元素である天然放射性元素(トリウム，カリウムなど)の総量に制約を与えることができる．一方で，マグマオーシャンの温度履歴を知る上で放射性元素は重要である．その濃集度や濃集領域，濃集層の厚さの把握が必要である．一方で，低濃度領域での絶対量もマグマオーシャン固化過程における端成分の化学的特徴を把握する上で非常に重要である．「かぐや」等成果により KREEP 濃集領域，KREEP 低濃度領域が知られており (Kobayashi et al. 2010, 2012; Yamashita et al. 2010)，これらの探査により課題解決が期待される．

(e) マグマオーシャンの初期バルク組成

マグマオーシャンの初期バルク組成を知ることは，その後の進化過程(固化過程や月の内部構造など)を知る上で重要である．マグマオーシャンの初期バルク組成を知るために，現在のマントルの構造(層分布，組成＝カンラン石マントルか輝石マントルか，その上下，水平均一性など)を知ることが重要である．マントル起源と考えられるカンラン石や輝石の分布領域や組成など特徴が「かぐや」等近年の月探査機による成果から知られており (Yamamoto et al. 2010)，これからの探査により課題解決が可能と期待される．一方で，Mg に富んだカンラン石を多く含む岩石試料としてトロクトライトがアポロ計画で回収されている．トロクトライトはカンラン石と斜長石から主に構成されている．トロクトライトの結晶化年代は 44 億年以降と地殻形成と比較して新しく，希土類元素の存在度パターンは KREEP の特徴をもっているものあり，マグマオーシャン後の火成活動による貫入岩由来である推測される． 月周回衛星「かぐや」が発見した多数のカンラン石岩体 (Yamamoto et al. 2010) はマントルと地殻への貫入岩どちらに起源をもつものなのか，直接探査による判別が今後必要である．

(f) マントルオーバーターンの理解

マグマオーシャンの固化に伴い，固化した結晶にはマグネシウムが鉄に比べて選択的に取り込まれ，逆にマグマは徐々に鉄に富んで行く．そのため，先に固化・沈降したマントル物質に比べて後に固化するマントル物質は鉄に富み密度が高く，結果としてマントルのより浅い部分にはより密度の高い物質が堆積することになる．そのため，ある程度進んだ時点でそれまでに固化したマントル中では密度の逆転が生じており，さらに固化の終盤でチタンに富む最も密度の高い層が形成することがトリガーとなりマントルオーバーターンが生じたという説がある．「かぐや」成果から見つかったコア・マントル境界の部分溶融領域の成因 (Harada et al. 2014) もこのオーバーターンによる放射性元素の深部への取り込みとする説もある．ただし，マントルオーバーターンの直接的な証拠はほとんど無く，これの有無や，起こった時期，オーバーターンの水平・垂直サイズはその後の月の進化に大きく影響することから，これらを知ることが重要である．「かぐや」成果からマントル起源と考えられるカンラン石や輝石の分布領域が知られている．これらの場所に着陸してマントル組成を把握することにより，マントルの層構造を理解することでマントルオーバーターンを理解することができる．また，直接のマントル物質ではないが SPA 中央部のマントル溶融・固化物質やマントル深部(500 km 程度)が溶融，噴出した破砕性堆積物を調査することによっても，重要な情報を得ることができる．また月表側北半球の大部分を占めるのが海と呼ばれる領域で，マントルの一部が溶融し，噴出した玄武岩が表層を埋めたものである．玄武岩に含まれるチタン量はその不混和性(液体マグマに残りやすい性質)からマントルの後期結晶分化を追跡する情報源となり得る．表層に吹き出した玄武岩の元素組成の多様性はマントル組成の不均質を示唆している可能性が高く，これがマントルオーバーターンによりもたらされたものなのかどうかを，これまでに得られていない領域を含めての玄武岩組成を調べることで，マントル組成の把握を試みる．

(g) 月の難揮発性元素絶対量の把握

月全体に取り込まれた難揮発性元素である Th 全量を制約するためには，地殻や KREEP 層の厚さを正確に決めることが今後の重要課題であることを先に述べた．特に Th が存在する岩相として，全量推定に最も大きな影響を与えるのは，マグマオーシャンの最終残液である urKREEP 層であると考えられる．この層が月全体にどれだけの量存在し，またどの程度の Th 量を保持しているのかを明らかにしない限り，月全体にとりこまれた全 Th 量を見積もることは難しい．月の表側 PKT 領域には，特に Th 量が周辺より濃集している領域(アリスタルコス，アリスティルス等)が複数箇所報告されている (e.g., Lawrence et al. 2003; Hagerty et al. 2006)．その中のいくつか(アリスタルコス，アリスティルス)は衝突クレータと対応している．これらの起源として，I) 地下の KREEP 層が天体衝突により掘削され表面に露出した，II) クレータ形成時のインパクトメルト起源，III) 天体衝突後に途中で KREEP に富んだ物質と混ざった玄武岩が噴出した，など複数の要因が考えられる．Th の濃集域から試料回収を行い，その起源を明らかにすることで，表層に広がる高 Th 領域の起源と成因を明らかにする．

(h) 月岩石圏における揮発性成分量把握

2008 年以来，月火成岩に水が捕獲されているとの報告が続々と成されている．また，月高地試料に含まれる水素の同位体組成は地球マントル水の組成と区別がつかないことも明らかになった．2008 年以前，月火成岩に固有に含まれる水の存在は確認されていなかった．この旧来の観測事実は，月の巨大衝突形成仮説に従うと，地球から放出された高温の月形成物質からは水を含む揮発性物質が完全に失われたと解釈できる，とされた．

2008 年以降，この解釈の枠組みが大きく変わった．月固有の水素の存在を最初に証明したのは Saal et al. (2008)である．月表土試料の中に含まれるガラス玉の一部は，月面においてマグマが噴火し飛び散ったものが急冷し作られたと考えられている．このガラス玉中に含まれる揮発性成分(H, C, F, S, Cl)を分析したところ，ガラス玉の表面から中心部に向かって高くなる H, F, S, Cl 濃度が観測された．これは，前述の揮発性元素が外からガラス玉に浸入したのではなく，月面にマグマが噴出し急冷した際に，ガラス玉から揮発性元素が拡散して散逸した痕跡だと説明される．噴出前のマグマ中の推定水濃度は，少なくとも 260 ppm，最確値は 745 ppm と結論された．

これ以外にも複数の報告から，月岩石圏は全くの無水ではないことが明瞭に示された．ただし，岩石圏全体においてどれだけの濃度の水が存在するのかは未だもって明らかではない．研究者らが月試料中のガラス玉，メルト・インクルージョンやアパタイトなどの水濃度観測値を元に，各担体の形成過程を考慮した上で母岩の水分量の推定を試みたところ，60 ppb から 800 ppm まで実に 4 桁も違う値が計算された．地球・上部マントル(MORB 根源岩石圏)の水濃度推定値が約 260 ppm なので，それと同等の値から遙かに少ない値まで分布し，初期月－地球系の水分布の把握という大目標に向かってはなはだ不十分な現状である[1]．

今後，月岩石圏に含まれる揮発性元素研究の究極の大目標は，月岩石圏における揮発性元素初期組成，岩石圏全体における濃度と同位体組成を求め，地球岩石圏と比較することにより，水惑星・地球形成に関する理解に寄与することだろう．しかし，月岩石中にこれまで観測された水は，月の火成史において何回も部分溶融や分別結晶を繰り返した

[1] 注意すべきは，SIMS 分析でわかるのはあくまで水素の存在であり，分子形態は原理的にわからない．しかし，Saal et al. (2008)を始めとする近年の論文の多くでは，水素の検出を持って水分子あるいは水酸基イオンの発見と報告している．濃度も水素原子の重量割合ではなく，水あるいは水酸基の形を仮定し水素原子の重量を 9 ないし 17 倍した値が記載されていることが多い．この仮定は，地球岩石圏のように酸素活量が高い場合は特に疑う必要は無い($H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$ という反応式において反応は右方向に進む)．しかし，酸素活量が地球より少なくとも 5-6 桁は低いと考えられる月岩石圏では，考察する状況によっては入念な検証が必要な仮定である．

後に岩石中に捕獲されたものを見ている．岩石圏全体の初期濃度推定に向かい，正確な火成史の理解に加え，月の内部環境を正しく模擬した条件における水の固液分配係数などを実験的に求めなければならないが，その道程は遠い．今後，より直接的な推定が行える，月面に露出したマントルかんらん岩を新たにサンプリングするなどの取り組みが必要だろう．

(i) マグマオーションの冷却・分化過程と月の内部構造

アポロ以後，月が地殻，マントルといった層構造を持った分化天体であることは広く受け入れられており，マグマオーシャンを始めとする月の起源や進化における重要な事象を制約する境界条件の一つとなっている．月の内部構造は 4 章で議論されているような地球物理学的な手法から本章でも触れられている地球化学的な手法まで，幅広い方法で推定が試みられてきた．ただ地殻，マントル，核という基本的な構造は共有しているもののモデル間で差があるなど詳細にいたるまでの統一的なモデルの構築には至っていない．ここではマグマオーシャンの初期組成，温度，深さ，などに関連がある項目について取り上げ今後の探査に向けた課題を抽出する．詳細な議論は 4 章で行っているため，ここでは主にマグマオーシャン説に関連が深い課題として，1. マグマオーシャンの深さ，2. マグマオーシャンの初期温度，3. 地殻の晶出過程について議論する．

現在ではマグマオーシャンは深さ数 100 km 以上まで達していたと考えられている．その根拠としては地殻の厚さを用い，現在の斜長岩地殻を晶出するために必要なマグマの量や，地震波探査で得られた月内部構造の不連続面などがあげられる．しかしこれらの元となった内部構造モデルは先述の通り，不定性が大きく，残された課題は多い．まず地殻厚モデルについては不定性の大きさがあげられる．地殻の厚さの根拠の一つに地震探査の結果がある．地殻の厚さは主にアポロ 12，14 号の着陸地点で行われたアクティブ地震探査や，ロケットの一部を落下させた地動を観測した人工地震探査などの結果をもとに約 60 km と推定された (e.g., Goins et al. 1981; Nakamura 1983)．その後，2000 年代のアポロデータの再解析により，より薄い地殻(30-40 km)が提唱され，複数の手法でアポロ時代より薄い地殻が支持されたこともあり，現在，地殻の厚さは約 30-40 km と考えられている (e.g., Lognonné et al. 2003)．ただし，アポロ時代の解析と近年の解析では異なる値に収束するものの，その結果は誤差の範囲では一致しているとみなせ，確定的な結果が得られたわけではなく，依然 30-60 km と大きな不定性があると考えられる．この結果は地殻の総体積にも直接影響し，その母マグマの総量の見積もりへの影響も大きい．

また地殻厚モデルの推定においては水平方向の不均質も問題としてあげられる．地震学的に得られた地殻厚はあくまで着陸地点の値を反映していると考えられ，水平不均質は主に重力探査の結果，および地形情報をもとに議論されている (Ishihara et al. 2009; Wieczorek et al. 2013)．これらの測地学的観測の結果から月の表側と裏側で地殻厚が有意

に異なり，裏側の地殻が厚いことが知られている．アポロの観測点は全て月の表側にあり, そのほとんどが海にある. そのため裏側の地殻を地震学的に直接探査した例はなく，重力観測の結果に対する境界条件を与え, 全球の地殻厚モデルの精度を向上させるためにも裏側の観測点で地殻厚を測定することが重要である.

マグマオーシャンの深さに関する議論でよく参照されるのが月内部構造モデルにおける不連続境界面，特にマントル内の不連続面の存在である．例えば Nakamura (1983) では深さ 270 km 以深に低速度層があり，深さ 500 km 付近で再度，地震波速度が上がるモデルを提唱し，しばしばこの 500 km という値がマグマオーシャンの深さに対応している可能性が議論されてきた. このような不連続面の深さはモデルに応じてばらつきが多く，コンセンサスを得ていない(詳細は 4 章で議論する)．また近年，月の内部に地殻—マントル，マントルー核，以外の境界面が存在しないモデルも提唱された (Garcia et al. 2011)．この結果により不連続面の存在が観測データを説明する上で必須ではないことが示され, 現在のアポロデータではマントル内の構造を明確に分離することができないことが示唆された. マグマオーシャンの深さに応じてそれに対応した不連続面を持つ内部構造を現在の月が持っている可能性があることは十分に考えられるが現在それを明確に示す地震学的な観測結果はほとんどない．一方，測地学的な観測により月の核周辺に部分溶融層の存在が示唆されている．例えば (Harada et al. 2014) は地震学的なモデル (Weber et al. 2011) と測地観測の結果を統合し，Q 値の周波数依存性が低粘性の部分溶融層で説明できることを主張した．対して，Nimmo et al. (2012) は同様に地震学と測地学のデータから部分溶融層が存在しない月モデルでも観測されている Q 値を説明できると結論づけている．このように現状の観測データでは Q 値等の観測を説明するために部分溶融層の存在を必要とするか否かについては見解が分かれる. 内部構造とマグマオーシャンの深さの関連を議論するには現在のデータは不十分であり, 地震学や測地学を含めた地球物理学的観測データを新たに取得することは必須といえる. 同様に核の構造についてもさらに観測が必要である．現在，核の半径は 300-400 km と言われているが (Williams et al. 2001; Garcia et al. 2011; Weber et al. 2011)，その組成については諸説ある．液体外核・固体内核の有無や(あるとすれば)それらの密度は，核内に存在する軽元素の量などの組成と密接に関係している. 核の組成は全溶融状態からの晶出過程を理解する上で欠かすことのできない情報であり，今後の探査により明らかにされる必要がある.

マグマオーシャンの初期温度を制約する上で, 現在の月内部の熱構造を知ることは必要不可欠である. 月の温度構造はアポロの熱流量観測や磁場観測によって推定されているが, そ のいずれも月内部の温度を制約するのには十分とは言えない. 熱流量観測はアポロ 15, 17 号で行われたが現在ではその両方が PKT の影響を受けており月の代表的な熱流量を表すものではないと考えられている．近年，月の熱的環境については数値シミュレーションをもとに研究が進められてきた (e.g., Laneuville et al. 2013)．ただしその結果を検証するために必要な観測データが十分ではなく, 新たな観測結果が求められている. アポロ時代と現在で大きく変化したのは月全球の地質学的な観測である. 現在では熱源

元素も含めた月表層の組成分布が多くの元素，鉱物で知られており，地質学的な情報量は格段に向上した．将来の観測ではこれらの情報をもとに適切な着陸地点での熱流量観測を実施することが重要となる．熱流量観測は観測点直下の総発熱量を観測するため，月内部の温度プロファイルを推定するには別の方法で月内部の絶対温度を制約する必要がある．このために一般的に用いられるのが地震波速度や誘電率の温度依存性である．アポロ時代には地表と周回軌道上で同時に磁場観測をおこなうことで月内部の温度の推定を行った (e.g., Hood and Zuber 2000)．地震波でも同様の試みが行われたが (Gagnepain-Beyneix et al. 2006) いずれの場合も仮定するマントル等の組成に対する依存性が大きい．それぞれの観測量の精度，観測量を増やすことはもちろんマントルの組成の理解を深めることも重要な課題となる．このように現在得られている月温度構造は用いるモデルや観測データ，仮定する前提条件に大きく依存しており，ばらつきが大きく，十分な精度を達成しているとは言えない．現在の温度構造は初期温度のみでなく，熱源元素の全球分布や仮定する内部進化(内部構造)によっても大きく異なるため課題は多いが現在の月の熱的環境を知ることが重要な鍵となることは間違いない．そのためにも月表面での発熱量を地質構造と対応付けた形で理解すること，マントルの組成の理解を向上させ，地震波や誘電率を用いた温度推定の精度を向上させることがもとめられる．

最後に地殻の晶出過程を理解する上で重要な地殻内の層序について議論する．地殻内に組成的な不均質構造が存在するかは以前から議論がなされている．月の内部構造モデルでも地殻内に複数の層を設けているモデルは多いが現状，明確な境界面を観測した例はない (e.g., Nakamura 1983; Lognonné et al. 2003)．アポロのアクティブ探査の結果では深さ 1 km 程度までの構造が詳細に探査されているがここで観測されている不連続面は組成の違いを反映したものではなく，レゴリス層の掘削度の違いを反映したものだと考えられている (Cooper et al. 1974)．近年の PAN の発見などに伴い，地殻内に組成的な不均質性があるかが注目されている．このような層序は地殻の晶出過程の時間変化を反映したものであり，マグマオーシャンの分化過程の指標となる．地殻内の層序を探査するためには着陸点での詳細な地質調査が求められ，小型の地震計アレーを用いたアクティブ探査などが必要となる．同様のアレー観測は過去にも行われたが先述の通り，探査深度は 1 km 程度に止まっており，地殻内の層序を明らかにするにためには地震計の高感度化，人工震源の拡張などが課題となる．既知の人工震源を用いて月表層の地震波速度モデルを速度誤差数%で決めることができればその他の地質学的な観測などと統合することで地殻内の鉛直方向の組成変化に対する示唆が得られ，地殻の形成過程を理解する鍵となる観測となる．