

Title	3.2.3 「かぐや」等探査機観測の成果と試料分析の対比
Author(s)	長岡, 央; 鹿山, 雅裕
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 67-75
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83236
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

3.2.3 「かぐや」等探査機観測の成果と試料分析の対比 [長岡央, 鹿山雅裕]

アポロ計画で回収された斜長岩の化学組成を基に、マグマオーシャンにおける斜長岩地殻の形成モデルが提唱された (Warren 1985). 一方で、近年の探査機によるガンマ線を用いた全球探査により、アポロが着陸した表側の領域は液相濃集元素が非常に濃集した PKT (Procellarum KREEP Terrane) と呼ばれる特殊な地質領域周辺であることが明らかになった (Jolliff et al. 2000; Haskin et al. 2000). 代表的な液相濃集元素であるカリウム (K), 希土類元素 (REE; セリウム(Ce)やユウロピウム(Eu)などの Rare Earth Element), リン(P)の頭文字をとって KREEP と呼ぶ. 月隕石は、月面への隕石衝突により、無作為に月面から脱出してきたものであり、月裏側を含む月全球の地質や地史を知る重要な情報源となる. 特に斜長石に富む月隕石は、Th のような液相濃集元素の含有量が大幅に低いものもあり、その多くは PKT による影響の少ない裏側高地に由来する可能性が高い (e.g., Korotev et al. 2003; Takeda et al. 2006). 起源地域の厳密な特定(起源クレータなど)には至っていない月隕石がその多くを占めるが、高精度な元素情報、鉱物情報、同位体情報を取得できる月隕石は、月全球の地質情報を得る有力な手段である. 全球的な地質情報を取得可能な月隕石と遠隔探査データを組み合わせた議論により、アポロ試料に基づく月の形成・進化モデルは修正されつつある. また昨今の分析技術の大幅な進歩により、多くの元素の検出限界が飛躍的に向上した. その結果、今まで月試料では検出できなかった軽元素、特に水の定量分析に関する成果が報告されており (e.g., Saal et al. 2008), 揮発性元素に非常に枯渇した天体であるという月のイメージが近年塗り替えられつつある. ここでは、探査により得られた新しい知見と最新の月試料(アポロ試料, 月隕石)の研究による知見の整合性, 矛盾について、地殻組成, マントル組成の観点からまとめ、今後解決すべき課題とその解決に向けた将来のサンプルリターン探査への指針を導く.

(a) 斜長岩地殻組成

月面の8割を覆う物質はAlやCaに富む斜長岩質地殻であり、それらは月の高地と呼ばれる。アポロ計画では16号が唯一月表側高地から試料回収を行った。しかし、回収されたソイルやレゴリスはPKT領域の近傍であるため、希土類元素の存在度パターンはKREEP物質の影響を強く受けていた(e.g., Korotev, 1997)。月表層は常に大小様々な外来隕石による衝突にさらされているため、高地表層の物質は度重なる隕石衝突による圧砕作用で粉碎され、衝撃による溶融でガラス化、再結晶化した状態(角礫岩)となっている。月表層では隕石衝突によるガーデンング作用で周囲に分布する多様な岩相が広い範囲で混合されるため、ソイルやレゴリスのバルク組成はその起源地域の平均組成とみなすことができる(e.g., Gillis et al. 2004)。一方で、アポロ計画で回収された月のグラニュライトは、隕石衝突による変成のため、外来隕石からの親鉄元素のコンタミネーションを受けているが、KREEP物質の影響は受けておらず、PKT形成前の地殻組成を代表している可能性が示唆されてきた(Lindstrom and Lindstrom 1986)。

高地に由来する月隕石は全球に広がる高地からの無作為なサンプリングである。高地の月隕石のすべては隕石衝突による影響を受けた角礫岩である。その中で特にレゴリス角礫岩に分類される高地隕石は、表層での混合を広い範囲で経験したと考えられるが、それら多くの全岩組成はアポロ16号の回収レゴリスと比べて、希土類元素やThに非常に枯渇している(Korotev et al. 2003, 2006; Warren et al. 2005; Nagaoka et al. 2013)。その他にも、高地月隕石はその組織や含有物の違いにより、フラグメンタル角礫岩、インパクトメルト角礫岩、グラニュリティック角礫岩に分類される(e.g., Korotev 2005)。これらの月隕石も希土類元素やThに非常に枯渇しているものがある(Warren et al. 2005; Takeda et al. 2006; Korotev et al. 2006)。ガンマ線分光による全球観測では特に裏側高地でThが枯渇している(Prettyman et al. 2006; Yamashita et al. 2010; Kobayashi et al. 2012)。斜長岩質高地の大部分は裏側に広がっていることから、斜長岩質の月隕石の多くは裏側起源であると考えられる。また、Th量だけでなく高地の月隕石は表側で回収されたFANや斜長岩質角礫岩と比較して、Mg#(= $\text{molar } 100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$)の組成幅がより高い値(Mg#~80)まで広がっている。このことから、月裏側高地には表側よりもよりMg#の高い高地が広がっていることが推定されてきた(Korotev et al. 2003; Takeda et al. 2006; Arai et al. 2008; 荒井朋子 2011; Gross et al. 2014)。実際に「かぐや」で得られた高地の全球Mg#分布(Ohtake et al. 2012)によると、裏側高地の赤道付近にもっともMg#の高い地殻が存在し、表側から裏側赤道付近に向うにつれてMg#が高くなることが示された。この結果は月隕石研究から示唆されていた月高地のMg#の表裏の地殻組成の二分性を、空間的広がりのもと初めて実証した結果となった。また、月裏側で最もMg#の高い領域は、「かぐや」搭載GRSにより示された最もThの少ない領域(Kobayashi et al. 2012)とも一致する。月高地隕石の全岩組成を調べたところ、最もMg#が高く、最もTh量の少ない試料が報告された(Takeda et al. 2006)、これがDhofar 489グループと呼ばれる隕石群である。これらの隕石に含まれる斜長岩質クラスト中の苦鉄質鉱物の中には、Mg#が80を超えるものも多く見つかっており、表側から回収されたFANのものと比較して明

らかに高く、「かぐや」で得られた Mg# 分布の結果とその上限値もよい一致を示す。これらの結果はアポロ試料分析により提唱されたマグマオーシャンによる一様な FAN 地殻形成の問題点を指摘しており、より Mg# の高いマグマから斜長岩地殻が形成しつつ、裏側から表側へ地殻が成長していくにつれ、そのマグマ組成は鉄に富むものへと変化していったことを示唆している。このことは、従来のマグマオーシャンモデルについて、単純な密度差のみの斜長岩浮上だけでは説明できず、より複雑な固化過程モデルへの修正を促した。

「かぐや」観測が従来の地殻組成に大きな変革をもたらした成果の一つが、純粋斜長岩 (Purest ANorthosite; PAN) の 全球的な検出である (Ohtake et al. 2009; Yamamoto et al. 2012)。この地殻物質はアポロで持ち帰られた FAN 試料より、斜長石に富んだ組成(98% 以上を斜長石が占める)をしており、従来のマグマオーシャンモデルでは主要成分として考慮されていなかった。マグマからダイレクトに固化した斜長岩の情報を得るためには、角礫化を受けていない試料、言い換えると隕石衝突による影響の少ない試料(例えば親鉄元素量が非常に低いもの)の分析が必要である。Nagaoka et al. (2014) では、Takeda et al. (2006) の全岩組成分析により外来隕石からの親鉄元素の汚染が非常に少ないかつ FeO の全岩含有量が非常に低いことが分かった斜長岩クラストと同じ岩石片から薄片試料を作成し、薄片観察ならびに鉱物分析を詳細に行い、岩石片中の鉱物量比と鉱物中の主要元素濃度を決定した。その結果、このクラストは 98% 以上の斜長石で構成される PAN であり、含まれる自形斜長石の中には粒径が 1 mm 以上にもなる粗粒な組織をもつことがわかった。これらの組織は、自形として成長した斜長石が集積する過程で、その粒間に捕まったメルトから苦鉄質鉱物が結晶化したものと解釈でき、このクラストはマグマからの集積岩の一部として分類できる。Dhofar 489 と Dhofar 911 (Dhofar 489 と同じグループの隕石)の他の薄片からも、同様に PAN を複数片発見した (Nagaoka et al. 2014)。

図 3-7 は月隕石 Dhofar 489 と Dhofar 911 中の PAN とアポロ試料 60015 の鉱物組成を、従来の FAN 組成と比較したものである。アポロ試料 60015 はアポロ計画で回収された FAN 試料の約半分近くの質量を占める PAN に相当する斜長岩である。アポロ試料 60015 は非常に高い斜長石含有量(> 97% 以上)をもち、含まれる苦鉄質鉱物の組成は均質であり、岩体自体がほぼ同時期のメルトから結晶化した PAN であると考えられる。「かぐや」以前の斜長岩地殻は FAN を主体とする鉄に富む斜長岩が高地地殻を占めていたと考えられており、地殻中での大幅な化学組成の変化は鉄に富む領域で限定的であった (Mg# 40-70)。月隕石から発見された PAN はより Mg# の高いものも存在し、幅広い範囲で組成変化を起こしている(図 3-7)。この組成幅を説明可能なモデルが、各 PAN クラストの固化したタイミングの違いである。「かぐや」の可視・近赤外分光観測データにより、観測された表側と裏側の表層 Mg# の違いを説明可能な全球的なダイナミクス (Ohtake et al. 2012)により、大規模な純粋斜長岩層が全球的に生成したモデルを考える。そのモデルでは裏側の比較的浅いところにできた斜長岩は初期に形成したものであり

高い Mg# をもち、その後水平方向と深さ方向に斜長岩地殻が成長するにつれ、Mg# は減少していく。月隕石中の PAN の Mg# の違いは水平方向だけでなく、垂直方向も含めた結晶化時期の違いによる PAN 層の Mg# の不均質性として解釈できる (Nagaoka et al. 2014)。

月試料中から見つかる斜長岩クラストの多くは、表層での隕石衝突による破碎や熱変成を明らかに経験している二次的な変成岩(インパクトメルト角礫岩、グラニュリティック角礫岩)である。これらの岩石クラストは、同名の隕石試料内で比較しても、含まれる苦鉄質鉱物量とその Mg# は非常に変化に富んでいる (Lindstrom and Lindstrom 1986; Cahill et al. 2004; Cohen et al. 2005; Korotev 2005; Warren et al. 2005; Joy et al. 2010; Yamaguchi et al. 2010; Nagaoka et al. 2013; Gross et al. 2014)。これは、表層物質が多種多様な組成をもった(分化度の異なる)岩石種により、広く水平方向・深さ方向に混合を受けた可能性が考えられる。「かぐや」(Yamamoto et al. 2012) やクレメンタイン (Hawke et al. 2003) の観測において、高地地殻の上部(表層から 10 km 程度まで)は、その下部よりも苦鉄質鉱物に富んだ組成で、隕石衝突によるミキシングの影響を強く受けた混合層 (Mixing layer) であることが指摘されており、月隕石に含まれる大部分の変成を受けた斜長岩クラストはこの混合層に由来すると考えられる。

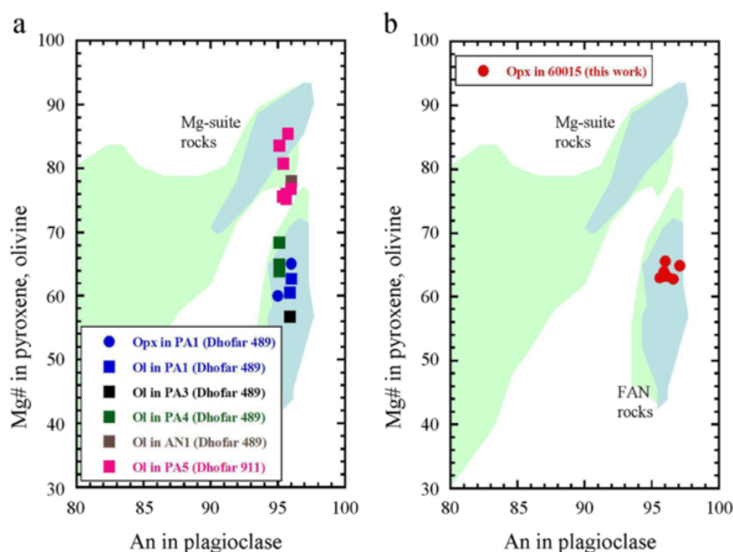


図 3-7 PAN 中の鉱物組成比較 (Nagaoka et al. 2014)。横軸は斜長石中の An (= molar $100 \times \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$) 値，縦軸は斜長石に隣接する輝石カンラン石の Mg# を示す。淡い青が示す組成範囲は隕石衝突による影響の少ない FAN，Mg-suites (アポロ計画で回収されたトロクトライトやノーライトの内、苦鉄質鉱物が Mg に富むものを指す)，淡い緑が示す組成範囲は上記以外のものを示す (Warren 1993; Yamaguchi et al. 2010)：左図は Dhofar 489 と Dhofar 911 中から発見された PAN 中の鉱物組成をプロット。右図はアポロ回収 60015 の鉱物組成(赤)をプロット。

低い親鉄元素含有量から隕石衝突の影響は少ないと分類されてきた FAN の中には、60025 のようにマグマオーシャンからの地殻形成を考えた場合、結晶化年代が非常に若いものが存在する。FAN の結晶化年代が月形成時から幅をもつことはマグマオーシャンによる地殻形成モデルと矛盾する。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(シリアルマグマティズム)で形成された可能性が示唆された (Borg et al. 2011)。Gross et al. (2014)は、月隕石で見られる Mg#の幅広い組成変化は、地殻が単純なマグマオーシャンにより形成されたものではなく、より複雑な地殻の形成過程によると解釈している。この Mg#の幅広い変化はシリアルマグマティズムによる結果と考えると FAN の幅広い年代幅とも整合的であると Gross らは指摘している。

今後の試料分析研究では、我々が観測している地殻物質の内、初期マグマオーシャンの産物、その後の連続的な火成活動によるもの、について十分な切り分けを行い、それぞれの起源を議論していく必要があるだろう。この切り分けには試料の鉱物組織(含有量、粒径、形状)、鉱物組成、微量元素を含めた元素組成の詳細分析、晶出マグマ組成の制約のために結晶化年代と同位体の初生値といった情報を高精度で取得していかななくてはならない。「かぐや」による観測で PAN と混合層の起源深度の違いが指摘された。起源深度の違いは、鉱物の成長度に影響を与えるため、隕石衝突による破碎を受けていないもともとの斜長石の粒径は今後の重要な観測対象となる。

(b) マントル組成

マグマオーシャンの組成を追う上で、もう一つ重要なのがマントルの組成である。海の玄武岩は、月マントルの部分溶融の結果、マグマが表層に吹き出してできた火山岩である。玄武岩試料の全岩組成や鉱物組み合わせは、マントル組成の手がかりに、同位体年代は月のマグマ活動時期への重要な制約となる (Neal and Taylor 1992; Nyquist and Shih 1992; 荒井 2011)。アポロ計画により回収された月の玄武岩は、地球のものと比較して、鉄とチタンに富んでいる。特にチタン含有量はサンプル毎に、大きな組成幅が存在する(最も低いものは $< 1 \text{ wt\% TiO}_2$, 高いものは $> 10 \text{ wt\% TiO}_2$)。海玄武岩の結晶化年代は約 38 億年前から 32 億年前に分布し、結晶化年代の古い玄武岩ほどチタンに富む傾向がある (e.g., Nyquist and Shih 1992)。アポロの回収地点では、玄武岩と共に火山性ガラスも回収された。火山性ガラスも玄武岩試料同様、チタン含有量に組成幅があり、高いチタン量のブラックガラスやオレンジガラス、チタン量の低いグリーンガラスやイエローガラスなどが回収された。

月隕石由来の玄武岩の発見により、アポロ計画が回収した玄武岩から理解されていた月のマグマ組成やマグマ活動時期の従来理解に新たな知見を加えた (e.g., 荒井朋子 2011)。南極由来の結晶質月隕石玄武岩 (Asuka881757, Yamato793169 など) は、チタン量が 1 wt\% 程度と非常に低く、結晶化年代は約 38 億年前より古く、 μ 値(= $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)が極めて低い (Yanai and Kojima 1991; Takeda et al. 1993; Torigoye et al. 1993; Misawa et al.

1993; Torigoye-Kita et al. 1995). さらに約 43 億年前と極めて結晶化年代の古いチタンに乏しい月隕石玄武岩も発見された (Terada et al. 2007). 月隕石研究からは、年代とチタン含有量には相関がみられず、アポロ玄武岩から示唆されていた、古い玄武岩ほどチタン量が多いという経験則は見直しを迫られた. 最も結晶化年代の若い月隕石玄武岩は 29 億年前であり (Borg et al. 2009), 海の火成活動は従来よりも長く続いていたことがわかった(43 億年前から 29 億年前). しかし、クレーター年代学から指摘される 25 億年よりも若い玄武岩については、現在報告されている月隕石の中からは見つかっておらず、高チタン玄武岩の報告例もない. このような月隕石研究と遠隔探査の結果とのギャップを今後埋めるためには、「かぐや」により示唆された非常に若い結晶化年代をもつ高チタン玄武岩ユニット (Kato et al. 2017a) からの試料回収が望ましい. 一方で、今ある月隕石がどこからきたのか、その起源クレータを明らかにすることも今後の試みとして非常に重要である. 月隕石の起源地域を特定することは、その場からの試料回収を意味する. 今までに、南極産月隕石の玄武岩グループ (Yamato793169, Asuka881757, MIL05035, MET01210: YAMM 隕石)の物質科学データセットと月探査データとの照合による起源クレータの特定試み (Arai et al. 2010) が行われている.

「かぐや」観測により、大規模な衝突クレーター周辺に非常に純度の高いカンラン石岩体の露出が初めて報告された (Yamamoto et al. 2010). その反射スペクトルの形状はアポロで回収されたダナイトのものに近いことから、クレーター形成の際に掘り返されたマントル物質の可能性を示唆している. 我々がもつサンプルコレクションの中で直接的にマントル物質と断定されたものはないが、ダナイトはカンラン石が 90 %以上を占める深成岩であり、マグマオーシャンの結晶化モデルから推測されるマントル組成にもっとも近い岩石試料である. しかし、もっとも回収量の多い 72415 (55 g)と呼ばれるアポロ試料は、過去研究から比較的浅い所に貫入し、固化したこと(半深成岩的)が示唆されており (Ryder 1992), ダイレクトなマントル物質とは言えない. ダナイトほどではないが、粗粒なカンラン石に富んだ斑レイ岩が、NWA 773 グループと呼ばれる月隕石群からのみ多く発見されている (e.g., Fagan et al. 2003, 2014; Jolliff et al. 2003). しかし、これらの斑レイ岩は、マントルが部分溶融して出来たマグマが、1)表層に噴出して厚い溶岩層を形成し、その底に沈積して形成したか、2)表層近く(深さ数キロ程度)に貫入して、そこでマグマ溜を形成し、沈積したものであること、が指摘されており (Jolliff et al. 2003; Nagaoka et al. 2015), 72415 の起源に近い. これら岩体の母マグマの主要元素組成は、アポロ 14 号で回収されたグリーンガラスに近いことが指摘されており、グリーンガラスのメルト組成が深さ約 400 km の温度圧力のマントル組成に相当するため、それ相当の起源深度ではないかと推測されている (Jolliff et al. 2003). しかし、これら深成岩の組成は母マグマの組成から変化しており、その岩体の中でも分化傾向がみられる (Nagaoka et al. 2015).

我々は直接的な月マントル物質といえる試料は未だ持ち得ていないのが現状である. 火山性ガラスはマントルに起源をもち、その後噴出時に急冷されたため、玄武岩や斑レイ

岩のように結晶分化の度合いが少なく、マントル化学組成を知る上で重要である。一方で、次の3)で紹介するマントル中の揮発性元素をターゲットとした場合、噴出時の脱ガスの影響を仮定・考慮しなくてはならないという課題がある。したがって、「かぐや」で発見されたカンラン石岩体を目指し、その岩石体がマントル起源かどうかを検証する直接探査が求められている。その探査でマントル起源であることをはっきりさせることで得られるマントル試料の情報は、未だ推測に過ぎなかった我々のマントル組成への知識理解を飛躍的に向上させるものとなるだろう。マントルのダイレクトな組成を得ることは、月バルク組成の90%近くの組成を制約したことになり、月バルク組成を導く上で非常に強い制約を与える。

(c) 最新の揮発性元素分析

各国の月探査から、月面に様々な種類の水が分布していることが明らかとなった。例えば、ディープ・インパクト (Sunshine et al. 2009) やエルクロス (Colaprete et al. 2010) では、赤外反射分光観測により鉱物と結合する構造水や分子水、含水相に起因する信号を報告している。また、チャンドラヤーン1号の Moon Mineralogy Mapper (M³)からは、ノーライトに分類されるであろう貫入岩体 (Klima et al. 2013) とカンラン石中央丘 (Bhattacharya et al. 2015) の両方から水に起因する信号が検出された。その化学種については化学組成として水を含まない鉱物 (NAMs: Nominally Anhydrous Minerals) に内在する微量の構造水に帰属されている。

月探査機により観測された水の化学種のうち、氷については主に形成時から今日に至るまでに月に落下した隕石・彗星により供給されたと考えられており、月面の温度勾配に応じて永久影や極、地下へ移動した後に低温のためトラップされることが知られている (e.g., Schorghofer and Taylor 2007; Sunshine et al. 2009; Kayama et al. 2018)。構造水は、太陽風由来の水素がアグルチネートに取り込まれたもの (Liu et al. 2012) とマントル起源の深成岩体に保持されたもの (Klima et al. 2013; Bhattacharya et al. 2015)、さらには微小隕石や小惑星の衝突に由来するもの (Arnold 1979; Zolensky 1997) に分類される。

月のマントルに水素や他の揮発性成分が大量に存在するのであれば、その起源として(1)巨大衝突後も残存した初期物質 (Karato 2013; Hauri et al. 2015) と(2)レイトベニアにおいて月面に衝突した隕石、小惑星及び彗星 (Saal et al. 2013; Barnes et al. 2016) が考えられ、いずれにせよ初期の LMO (Lunar Magma Ocean) は揮発性成分に豊富であったと示唆される。しかし(1)については、巨大衝突による初期物質の全溶融に伴い揮発性成分は完全に消失したとする仮説も昔から根強く支持されている (Ringwood 1979; Canup 2004; Wiczorek et al. 2006)。そのため、(2)の供給モデルが最近注目されており、初期物質の揮発性成分量によらずウェット史観を支持し、月試料の同位体モデルとも調和的であることから、LMO に揮発性成分が存在したとする重要な仮説の一つとなっている。ここでは、LMO の揮発性成分に関する様々な研究を月の変遷史に沿って紹介する。

LMO の揮発性成分に関する最大の焦点は、巨大衝突後も月の初期物質に揮発性成分が残存したかどうかである。従来の仮説では、衝突による熱で初期物質は全溶融したと捉え、それに伴い揮発性成分は完全に消失したとしている (e.g., Ringwood 1979; Canup 2004; Wiczorek et al. 2006)。しかし近年、月のマントルに大量の水が存在する可能性が指摘されており(詳しくは 2 章を参照)、その起源の一つとして衝突後も月の初期物質に残存した揮発性成分を想定している。

Karato (2013)は、鉱物の電気伝導度と Tidal Q(地震波が伝搬する物質の特性により生じる減衰のファクター)から月マントルの平均含水量(H₂O)が 0.01 から 0.001 wt%にも及ぶと推定した。その成因について、巨大衝突により生じた溶融物は従来の考えでは固化するまでに大量の揮発性成分を失うことから、新たな説として、初期物質の大部分が液相として集積すると仮定し、溶融物の集積のタイムスケールが冷却速度よりも速いもしくは同程度であれば、大量の水を保持したまま LMO から現在の月に成長可能と言及している。

Hauri et al. (2015)は、火山ガラスの質量分析から月全体のケイ酸塩鉱物における全岩化学組成 (BSM; Bulk Silicate Moon)を明らかにし、BSM の揮発性成分量を考慮した新たな巨大衝突モデルを提唱している。ここでは、母マグマがマントルに由来する火山ガラスを質量分析に供している。Saal et al. (2008)のデータを参照すると、含水量(H₂O)は very-low-Ti ガラス(15427)において最も高い 4-46 ppm となり、脱ガス率を 98 %と仮定すると、初期マグマにおける含水量(H₂O)を 265-745 ppm と制約することができる。これをもとに BSM の含水量を見積もると 133-292 ppm となり、アパタイトの同位体分析から予想される炭素質コンドライトの衝突による供給量を考慮すると、月に保持されている水は全量として $0.95\text{--}2.8 \times 10^{20}$ kg にも及ぶ。これほど大量の水の存在は、月の初期物質における全溶融モデルとは調和的ではない。一方で大部分が固相で集積したとすると、大量の水の存在を説明できるものの、従来の大規模な巨大衝突モデル (Canup 2004; Wang and Jacobsen 2016)とは整合しない。ここでは中間的なモデルとして、初期物質が揮発性成分を保持した 25 %の固相と残りの溶融した液相との混合物からなると想定することで、BSM の含水量を説明することが可能としている。このモデルではレイトベニアによる供給も検討しており、その影響を微々たるものとして、初期の LMO における揮発性成分の多くは月の初期物質に由来すると結論付けている。

LMO の揮発性成分に関する議論の多くは水に焦点が当てられ、分析精度やモデルの不足、地球風化作用の影響などから炭素や窒素、フッ素、塩素、硫黄などに関する報告例は少ない。従って現状では、LMO における各種揮発性成分の有無や量(特にモデル依存性の高い初期 LMO)については、議論すべき課題はまだ多い。さらに BSM の揮発性成分により提案されるモデルと月試料の同位体分析により得られた結果が一部整合せず (Hauri et al. 2015)、これについてはレイトベニアにおける水の供給が主な原因であることを支持する根拠となっている。

2章にて説明したように、月は従来考えられていたよりは揮発性成分に富むとする見方からは、LMOには恒久的に大量の揮発性成分が存在したことになる。つまり揮発性成分、特に水がLMOの密度や結晶分化過程を規定する重要な役割を果たすこととなる。そうであれば、初期のLMOにおける月地殻の形成モデルを再検証する必要がある。Hui et al. (2013)は、高地の斜長岩を対象に赤外透過分光法から斜長石に内在する構造水を検出した。4,360±3 Myrの結晶化年代を示すFAN (60025)は斜長石において最大で6.4 ppmの構造水を保持し、水の分配係数から母マグマの含水量を約1600 ppmと推定している。このFANが結晶化した時点でLMOの80%が固化したと仮定すると、初期のLMOにおける含水量は約320 ppmとなり、LMOの末期のurKREEPに約1.4 wt%の水が濃集していたことになる。しかし多くの場合、NAMsの含水量は極めて低いことから質量・同位体分析自体が困難であり、また最近では同論文に反証するデータ (Mosenfelder and Hirschmann 2016) が提示されている。加えて、FANの年代は幅広い範囲を持つことからLMOと直接的に関係する試料は限られ、推定された含水量はモデル依存であること、さらには、用いた試料の結晶化年代に対する信頼性(試料量が少量かつ衝撃変成作用の影響を受けやすいAr-Ar年代の値であること)などの観点からも、LMOの揮発性成分については更なる検証が必要である。

LMOの揮発性成分量を明らかにする一つの指標として、BSMやマントル全体の含水量の活用が期待される。しかし、マグマの結晶分化作用の複雑性や年代の若い火山ガラスのデータの不確定性など検証すべき事項も多い。さらドライ史観を支持するデータもこれまでに数多く報告されている面からも、LMOの揮発性成分に関する真偽を十分に検証することは難しい。従ってこの重要課題の解決に向けて、2章で論じたような月のマントルの水の有無に関する更なる検証や将来の月探査計画による新たなアプローチが重要な鍵となる。

副成分鉱物であるアパタイトの質量・同位体分析からもLMOの揮発性成分に関する検討がされており、その供給源としてレイトベニアにおける小惑星・彗星衝突が提唱されている (Greenwood et al. 2011; Barnes et al. 2016)。しかし、巨大衝突モデルの条件いかなんでは、月の初期物質に残存する揮発性成分の観点でも十分に説明することが可能である (Karato 2013; Hauri et al. 2015)。また、アパタイトはマグマ過程末期の生成物であることから、これを用いてLMOやマントルの揮発性成分量を定量的に議論することは難しいとの指摘もあり (Tartèse et al. 2014)、さらに一つの試料内でも塩素の含有量と同位体比に大きなばらつきがみられることから、あくまで局地的な現象に過ぎず、月全体を代表するものではないとの見方も強い (Sharp et al. 2010)。