The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	2.3.3 月マントルの水量と同位体
Author(s)	鹿山, 雅裕
Citation	月サイエンスブック 第一部. 2021, p. 42-47
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/83232
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

2.3.3 月マントルの水量と同位体 [鹿山雅裕]

月には大気が存在しないことから，有史以来，月面から内部に至るまで水に枯渇した天体であると考えられてきた．アポロ計画で回収された岩石についても，当時の全岩質量分析では水は検出限界以下であり，全岩含水量は全球的に< 1 ppb であると結論付けら

れた (Taylor et al. 2006). このような背景から，これまで報告されている月の形成・進化モデルの多くは, 水を含む揮発性成分に枯渇した ‘ドライ史観’のもと検討が進められてきた.

しかし近年，アポロ試料や月隕石に含まれる副成分鉱物(火山ガラス，アパタイトおよびメルト包有物) (Saal et al. 2008; McCubbin et al. 2010; Hauri et al. 2011) や高地の古い斜長石 (Hui et al. 2013) から，構造水(OH 基)が検出されている．その起源は月のマントルであることが示唆されており, 月の新たな描像としてマントルが揮発性成分に湿潤とする‘ウェット史観’が提唱されている．揮発性成分，特に水の存在は月の変遷史に寄与する重要な要因であることから，ここではマントルの水，特に含水量，同位体および起源に関する研究成果を紹介する．さらに章の末尾では，マントルの水に関する未解決の問題や将来の月探査に向けての重要課題を提起することで, 月科学における将来構想を策定する.

月のマントルに大量の水が存在する根拠は，2008 年にアポロ試料 (15427 と 74220) から初めて見出された (Saal et al. 2008). 火山ガラスの二次イオン質量 (SIMS: secondary ion mass spectrometry) 分析から，多量の H_2O (0.42-46.37 ppm)が検出された．水を含む揮発性成分の含有量はガラスの主成分と相関し, ガラスのコアからリムにかけて減少することから，水は月由来であると示唆している．火山ガラスの大部分は，噴出時の脱ガス作用の影響から母マグマの含水量を正確に決定することは困難としているものの, very-low Ti ガラスについては例外的に冷却速度と水素の拡散率から検討可能としている．脱ガス作用により水(H_2O)が 98 %程度消失したと想定すると，このガラスの母マグマは最大で H_2O = 745 ppm，少なくとも 260 ppm もの含水量に達していたと結論付けられる.

McCubbin et al. (2010)は，アポロ試料である high-Al 玄武岩(14053)，Alkali-Suite (15404) 及びはんれい岩質月隕石 NWA 2977 (NWA 773 clan)から揮発性成分(OH, F, Cl)に豊富なアパタイトを見出し，SIMS 分析により大量の OH (220-7000 ppm)を検出するに至った．ここでは，アパタイトの OH 量から下記の仮定を踏まえて，月のマントルにおける含水量(H_2O)を推定している．アパタイトについて(1) 母マグマからの平衡結晶，(2) 生成時にマグマの 99 %が固化，(3) 水の分配係数は地球内部の玄武岩質マグマを想定，ならびに(4) マントルに対して 3 %のマグマが部分溶融，この四つを仮定から母岩であるマントル物質の含水量を少なくとも 64 ppb から 5 ppm と推定した．しかしここでは，脱ガス作用による影響を一切考慮していないため, 後にこの含水量は過小評価であると指摘されている (e.g., Hauri et al. 2011; Boyce et al. 2010; Anand et al. 2014; Tartése et al. 2014). 最近では SIMS による同位体分析からアパタイトのδ^{37}Cl (Boyce et al. 2010; Anand et al. 2014) やδD (Tartése et al. 2014) を決定し，各種同位体比から(5) 脱ガス時に 85-99 %の水素が消失したと仮定することで，マントルの含水量を検討している (例えば，Boyce et al. (2010)では 6-30 ppm，Tartése et al. (2014)では 6–390 ppm と報告). 一方で，アパタイトを用いたマントルの含水量推定には不確かな点も多く, 仮定の信頼性や妥当性につ

いて更なる検証が必要としている (Tartése et al. 2014). 例えば，ここで紹介したアパタイトによる推定法では，KREEP に富むマントルの含水量が極端に低い結果となり，マグマの分化モデルとの齟齬が生じてしまう (Anand et al. 2014).

ウェット史観を支持する成果の一つとして，FAN に属する高地の古い斜長岩 (15415, 60015) とトロクトライト(76535)から例外的に含水量の高い斜長石も報告されている. Hui et al. (2013)は，赤外透過分光法による加熱脱水実験から各岩石の斜長石に 0.5-6.4 ppm 以上の構造水が内在することを見出し，一方でカンラン石の水は検出限界以下であった. LMO の分化モデルと水の分配係数から FANs およびトロクトライトと同時に晶出したマントル物質 (輝石と仮定) の含水量(H_2O)を約 2 ppm (76535)から約 6 ppm (60015) と予想している. 斜長石ではマグマ初期に平衡状態で晶出かつ脱ガス作用による影響はほとんど無いことから，(3) 水の分配係数および(4) 部分溶融の量(3-20 %)の 2 つの仮定のみでマントルの含水量を推定することが可能となる. 斜長石により推定された含水量は，アパタイトのものよりもかなり古い年代のマントルの値であり，このことから月の初期マントルひいては LMO (詳しくは 3 章を参照)において大量の水が存在した可能性を示唆している. しかし，ここで得られた含水量は赤外分光法の検出限界に非常に近い値であることから，信頼性や再現性に関して疑問視する声もある (Mosenfelder and Hirschmann 2016). 水を主要構成元素としない鉱物 (NAMs: Nominally Anhydrous Minerals, 例えばカンラン石，輝石，斜長石など)は結晶構造に比較的水が入りにくいことから，必然的に検出される水の量は極わずかとなり，現状では高い精度での水の定量分析は非常に難しい.

マントルの含水量に関する検証のうち最も確実性の高いものとして，Hauri et al. (2011) が試みたメルト包有物の SIMS 分析が挙げられる. 同論文では，high-Ti に属するアポロ試料の火山ガラス(74220)に注目し，脱ガス作用の影響が極めて少ないカンラン石中のメルト包有物を対象とした SIMS による揮発性成分の定量分析を試みている. メルト包有物は噴出前にマグマにおいて成長したカンラン石に捕縛されたことから，脱ガス作用による揮発性成分の消失はほとんど無いと結論付けている. SIMS 分析の結果，メルト包有物の含水量(H_2O)は 615 から 1410 ppm となり，これは同アポロ試料に含まれるマトリックスガラスや火山ガラスの 2 から 100 倍にも達する. このことは，脱ガス作用により火山ガラスやアパタイトから 95-98 %にも及ぶ水が消失したことを意味している. また，数～数百 ppm にも及ぶフッ素や硫黄，塩素も検出されており，水と合わせて揮発性成分量は地球の中央海嶺玄武岩(MORB)に含まれるメルト包有物のものと同程度となる. メルト包有物を用いると，(3)水の分配係数 (ただし地球の玄武岩質ガラスを想定)および(4)部分溶融の量 (5-30 %)の仮定のみでマントルの含水量を推定することができる. 従って，月のマントルにおける水の特徴は地球の上部マントルに類似すると示唆している. ここで得られたマントルの含水量はアパタイトや斜長石を用いた推定値よりも高く，年代についてはアパタイトと同程度のマントルを想定している.

これらの物質科学的研究と合わせて，最近では月マントルの水に関する計算モデルや再現実験もいくつか報告されている．Karato (2013)では，水素に鋭敏な鉱物の電気伝導と Tidal Q に注目し，深さ 400 から 1200 km の範囲の月のマントルの平均的な含水量を評価している．マントル物質を想定したカンラン石と斜方輝石に水が完全に存在しないと仮定すると，電気伝導度と Tidal Q を用いて予想される温度は想定よりも遥かに高い値となり，約 1000 km より深いマントルに大規模な溶融領域が存在する結果となる．これは地震波トモグラフィーや熱力学的計算で示唆されているマントルの部分溶融では説明できないことから，無水のマントルモデルは棄却される．含水量を 0.01 から 0.01 wt%の範囲とすると大規模な溶融は生じず，月内部の温度分布とも調和的であることから，月のマントルは水に湿潤な環境と結論付けている．Evans et al. (2014)は熱力学的計算を用いて，月のコア-マントル境界における熱進化モデルから，マントルに含まれる水との関係性を推察した．月のコアのサイズ(最大半径で 200 km の固体内核と 380 km の外核) (Williams et al. 2013) とダイナモにより駆動する磁場が少なくとも 4.2 から 3.56 Ga まで生じていた事実 (Garrick-Bethell et al. 2009; Cournède et al. 2012; Shea et al. 2012; Suavet et al. 2013) を説明するためには，コアの上部 100-500 km に 40 ± 20 ppm ほどの水に豊富なマントル層の存在を想定する必要があると言及している．また，深発月震の原因についても，マントルに含有する水が寄与する可能性も指摘されている (東と and 片山 2015). ここで紹介した研究はすべて最近の月衛星探査や地震計により得られた観測データにもとづいていることから，推定されるマントルの含水量は現在の値を想定している．このように，物質科学ならびに理論計算・再現実験の両面から，月のマントルには不均質ながらも数から数百 ppm もの水が存在する可能性が指摘されている．マントルに含まれる水の起源については二つの可能性が示唆されており，(1)ジャイアント・インパクト後も月の初期物質 (初期地球とテイア天体の破片・溶融物) に残存した (Karato et al. 2013; Hauri et al. 2015) および (2)レイトベニアにおける隕石・彗星衝突により供給された (Saal et al. 2013; Barnes et al. 2016) 揮発性成分とされている． (1)については，LMO と密接に関係することから 3 章で触れ，ここでは(2)のレイトベニアによる供給について紹介する．

LMO における揮発性成分の起源の一つとして，レイトベニアで月面に衝突した隕石・彗星が考えられている．Greenwood et al. (2011) は，岩相を異にするアポロ試料のアパタイトを対象に SIMS による質量・同位体分析を行い，δD から彗星の衝突による寄与が多大であることを示唆した．アパタイトの含水量は，海の玄武岩で高い傾向となり(最大で 6050 ppm)，高地の角礫岩やアルカリ斜長岩において比較的低い値を示す．一部の玄武岩では，アパタイトのδD は+391～+1010 ‰と地球物質よりも明らかに高く，これは水が月由来であることを裏付ける証拠となり得る．また，玄武岩のアパタイトは火成活動に起因することから，その水の起源は月のマントルであることが指摘されている．さらに，δD が彗星 (Hale-Bopp, Hyakutake, P/Halley) の値と類似することから，LMO に彗星が衝突することで揮発性成分が供給されたと結論付けている．角礫岩(14503)は

低いδD を示すが，これについては高地の試料であることから，太陽風に由来する水素の付加が寄与したと推察している．

一方で Barnes et al. (2016) は，月試料の含水量と揮発性成分の同位体比，さらには月の進化モデルを考慮すると，レイトベニアにおける水の供給に炭素質コンドライトの衝突が高く貢献すると結論付けている．ここでは先行研究をもとに BSM の含水量を 10, 100 もしくは 300 ppm と仮定し，隕石と彗星の種類に応じて衝突を経て LMO に供給し得る含水量とδD を精査している．その結果，主な供給源を炭素質コンドライトとし，彗星の寄与は相対的に低いとすると，BSM の含水量と水素同位体のいずれも説明することが可能となる．さらにここでは，ジャイアント・インパクト後も初期物質の揮発性成分が残存した可能性についても考慮しており，その寄与は 25 %程度と少なく (Barnes et al. 2016)，LMO ひいては月全体の水の供給源は主に隕石・彗星の衝突に由来すると主張している．しかし，3 章で述べているようにレイトベニアによらず初期物質に残存する揮発性成分のみでマントルの含水量を解釈することも十分に可能であり (Karato 2013; Hauri et al. 2015)，いずれの説が正しいのかについては未だに議論が続いている．

月のマントルについて，上記のように近年ではウェット史観が提唱されているものの，実際には検証すべき問題や解決すべき課題も多い．例えば，月のマグマ過程，特にマントルの部分溶融については不明瞭な点が多く，母マグマを形成した部分溶融のマントルに対する割合は鉱物ごとに異なり，非常に幅広い値をもつ (Anand et al. 2014; Tartése et al. 2014)．特にアパタイトについては，マグマ過程末期の産物であることから仮定の制約が難しく，果たして本当に平衡結晶なのかについても十分に検証する必要がある．また，水の分配係数は地球や火星内部を想定した値を参照しており，月固有のマントル組成には対応していない (Hui et al. 2013; Tartése et al. 2014)．さらに，マントルの含水量は鉱物が結晶化した時点での推定値であり，年代との関係性についてはほとんど示されていない．火山ガラスやアパタイト，メルト包有物の SIMS 分析からは (Sharp et al. 2010; Boyce et al. 2010; Hauri et al. 2011)，塩素やフッ素，硫黄，炭素などの揮発性成分も検出されている．しかし，マグマにおける各揮発性成分の消失もしくは濃集過程についてはほとんど議論されておらず，年代ごとにマントルにどれほど存在していたのかは定かではない．加えて，揮発性成分に関する計算モデルや再現実験などの理論的なアプローチ (e.g., Evans et al. 2014; Karato et al. 2013) はまだまだ少なく，現状では水を含む揮発性成分とマントルにおける熱進化史との関係性について十分に理解されているとは言い難い．物質科学的研究についても，マントルの含水量の推定には多くの仮定が必要となり，NAMs に関しては分析精度の面からも信頼性や妥当性について問題点が指摘されている．月隕石については，落下後に地球上で汚染された影響を検証することが難しいなど，まだまだ課題が多い．

一方で，ドライ史観を支持する根拠も依然として報告されている．Sharp et al. (2010)は SIMS を用いた玄武岩，火山ガラスおよびアパタイトの塩素同位体分析と水素と塩素の

間の同位体分別モデルから月のマントルの含水量を推定している．δ^{37}Cl は各種月試料において-0.7 から+24 ‰の範囲となり，マグマ過程の違いから地球物質 (0-1.6 ‰) よりも比較的高くなる傾向となる．ここで得られた月試料の塩素濃度(最大で 117 ppm)と上記のδ^{37}Cl をもとに月のマントルの塩素濃度を推定したところ全体として 40 ppb 程度であり，地球の同位体分別モデルを用いて換算すると水素濃度は 10 ppb 程度となる．また, 先行研究で報告されている揮発性成分に豊富な月試料はマグマ過程により濃集した稀有な凡例であり, 推定された含水量はマントル全体を代表する値ではないと主張している．また，Albarède et al. (2015) は比較的揮発性の高い亜鉛に注目し，月試料(火成岩のカンラン石や輝石，火山ガラス)の質量分析により得られた鉛濃度と地球の同位体分別モデルによる換算から，マントルの含水量を 1 ppm 以下と報告している．月の進化に関する計算モデルからは (Elkins-Tanton and Grove 2011)，月マントルの含水量は地球と比べて< 10 ppm とやや低い値になることが予想されている．ドライ史観を支持する研究はいまもなお活発に報告されており, 最近の研究からもこれを裏付けるいくつかの根拠が示されている．しかし，ドライ史観を支持する物質科学的データの多くは間接的なものであり, 現状では地球の同位体分別モデルを用いて水素濃度を他の揮発性成分濃度から換算しているに過ぎない．またドライ史観でも，マントルの含水量を推定するために月の複雑なマグマ分化や脱ガス作用の影響についていくつかの仮定を設けている．

月のマントルにおける水の量については, 上で紹介したように物質科学あるいは理論計算・再現実験の観点からも議論の余地がある．どちらの史観がより適切であるかを明らかにするためには，マントル物質のサンプルリターンと水の質量・同位体分析が重要となる．さらに最近では，月のマントルは水に不均質である可能性も示唆されていることから (e.g., Sharp et al. 2010; Elkins-Tanton and Grove 2011; Evans et al. 2014)，産状を異にする岩石に対して多角的かつ体系的に水の評価を行うことが重要な鍵となる．アポロ計画により回収された試料の多くはレゴリスや玄武岩，高地の斜長岩などでることから，主要構成鉱物に含まれる含水量は極めて少ない．そのため現状では，どうしても揮発性成分を濃集しやすい副成分鉱物を用いざるを得ない．その結果，マントルの含水量の推定のために複雑なマグマ過程に対していくつかの仮定を設けることとなり, 妥当性や信頼性の面で問題が生じる．従って，近い将来実現が期待される月のサンプルリターン計画において，マントルを起源とする low-Ca 輝石やカンラン石に富む露出岩体 (Yamamoto et al. 2010; Ohtake et al. 2014) から試料を回収し，その主要構成鉱物に対する水分析を行うことで，長きにわたり繰り広げられてきたドライ vs ウェット論争に決着をつけることが期待される．