

特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」 外来天体の衝突に由来する月の揮発性成分

鹿山 雅裕¹

2018年12月12日受領，査読を経て2019年2月1日受理.

(要旨) 月に存在する揮発性成分の供給源の一つとして，隕石や小惑星，彗星などの外来天体の衝突が挙げられる．外来天体の衝突は，マグマオーシャン初期のレイトベニアから現在に至るまで継続的に月に物質輸送をもたらすことから，月の極付近や地下などの極低温環境に濃集する揮発性成分の主たる原因の一つとされている．外来天体に由来する月の揮発性成分については，主に理論モデルと物質科学の二つのアプローチから研究が進められてきた．従って本書では，各々の研究成果の中でも月における揮発性成分の物質輸送に関して重要なものを紹介すると共に，近年の月周回衛星観測により得られた見解と将来期待される月探査計画についても概説する．

1. 序論

太陽系における天体衝突は，惑星の進化過程やジャイアント・インパクトによる地球－月圏の構築の主たる要因であると共に，物質輸送の観点からは惑星や衛星に揮発性成分を供給するシステムの担い手となり得る．こと月に関しては，太陽系の衝突史を記録する重要な天体に位置付けられており，その理由として，地球や火星などとは異なり月には大規模な大気・水圏が存在しないこと，さらには地質情報を上書きする活発なテクトニクス活動があまり生じていないことなどが挙げられる．従って月の岩石圏には，太陽系45億年にわたって，隕石や小惑星，彗星などの外来天体による衝突の履歴が今もなお残されている．以前より，外来天体の衝突は月への揮発性成分の供給源として重要な役割を果たすことが知られており[1-3]，近年では月極域の表層やプロセルム盆地の地下に埋蔵する水氷の供給源として，外来天体の衝突が注目されている[4, 5]．もちろん水の供給源は外来天体だけに留まらず，太陽風，さらにはジャイアント・インパクト後の初期

物質に由来するマントル及び月のマグマオーシャン中の水が火山噴出によりもたらされた内因性のものも想定されている[3, 6]．月に存在する水氷の特性や起源を理解することは，科学目的として太陽系における揮発性成分の変遷史やその供給・濃集機構を解明するだけに留まらず，月の極付近や地下に眠る水の総量や分布を探る手掛かりとなり得ることから，資源的な側面から，将来の月での有人活動や基地建設，居住に必要な不可欠となる水を確保する意味でも極めて有用な情報となる．

月への水の供給源のうち，外来天体の衝突による揮発性成分の物質輸送，特に水氷に関しては，主に二つのアプローチから研究が進められてきた[7]．その一つは，月の温度環境に基づいた揮発性成分の供給・濃集・散逸に関する理論モデルの構築である．アポロ・ルナ計画以前から月の揮発性成分に関する議論は多数報告されており，そこでは月の永久影(PSR: Permanently Shadowed Region)や夜側，地下などの極低温環境における揮発性成分の挙動と供給・埋蔵量について検討がなされてきた[1-3, 8]．もう一つはアポロ計画以降に行われた物質科学的研究であり，アポロ試料や月隕石を対象とした各種分析が活発に進めら

1. 東北大学学際科学フロンティア研究所新領域創成研究部
masahiro.kayama.a3@tohoku.ac.jp

れてきた[5, 9–11]. 近年ではこの二つのアプローチによる研究成果を基に, 月周回衛星で観測された水氷の供給源の解釈が試みられている[4, 12–14]. さらに, そこで得られた見解は将来の月無人着陸探査やサンプルリターン計画, さらにには有人活動を推進する上で重要な指針となり得る. 従って本書では, 隕石や小惑星, 彗星の衝突により月へ供給された揮発性成分の物質輸送について, 各々のアプローチの観点から, 特に重要な研究成果について紹介する(太陽風や内因性の揮発性成分も月における揮発性成分の主たる起源と考えられており, これについては鹿山&橋爪[6]及び橋爪[15]を参照されたい).

2. 揮発性成分の物質輸送に関する理論モデル

月に揮発性成分が存在する可能性については, アポロ・ルナ計画以前から既に理論モデルに基づいて検討が進められてきた. 当初, 揮発性成分, 特に水は月の環境では不安定であることから, 短期間で散逸すると考えられていた[16, 17]. 一方でWatson et al. [1,2]は, 月の永久影などの極低温環境であれば, 水は氷として長期間留まることができると主張した. その温度条件を120 K以下に設定して水の蒸気圧を考慮すると, 水は SO_2 や希ガスよりも遥かに安定的であり, 速度論による水の散逸率からも, 水は氷として十分に残り得ることを示した. ここでは, 月の永久影に埋蔵する水氷の起源の一つとして, 外来天体の衝突を想定している. Watson et al. [1, 2]は, ここで構築した理論モデルはあくまで示唆的なものであり, 実際に月の永久影に水氷が濃集するのかどうかについては, 来るべき将来, 月の永久影や極付近に装置を設置して観測するほかないと述べている.

アポロ・ルナ計画以降になると, 月の揮発性成分に関しては物質科学的研究が主流となり, 様々な月試料に対して各種分析が行われた. しかし, アポロ・ルナ試料から月固有の揮発性成分は検出されず[18], アポロ16及び17号が着陸地点した近傍の永久影周辺の月試料ですら揮発性成分の存在は認められなかった[19, 20]. そのため, Watson et al. [1, 2]により提唱された理論モデルに関して懐疑的な見解にならざるを得なかった. そんな中, Arnold [3]は, アポロサイト近傍の永久影は比較的高い温度環境(>200 Kと推定)にある

ことから, Watson et al. [1, 2]による理論モデルを即座に否定するものではないと考え, この理論モデルを極低温環境にある月極域の永久影に当てはめて再検証を行った. そこでは, 月の自転軸が軌道平面や黄道に対してほぼ垂直であることを理由に, 極付近に位置するクレーターの内部に数億年以上, 場合によっては月形成以降一度も太陽光に曝されていない永久影が存在することを見出した. ここでは, 月極域における永久影の表面温度について, Watson et al. [1, 2]の理論モデルにより予想されている120 K以下が合理的な値であると判断している. さらに, 月全体に対して極付近の永久影が占める割合をLunar Orbiterで撮影された写真から算出し, Watson et al. [1, 2]で報告されている占有率5%は妥当であると指摘している[3]. 揮発性成分の起源として, 主に外来天体の衝突を想定しており, 衛星観測により取得されたデータや天体衝突に関するモデルを考慮して, いずれの外来天体も主たる供給源となり得ることを示唆した. また, 巨大天体よりもむしろスケールの小さい微小隕石や星間塵などによる物質輸送の方が, 供給量への貢献度は高いと推察している. さらにここでは, 月極域の永久影に存在すると目される水氷の供給源について以下の四つを提唱している. ①揮発性成分に富む隕石や小惑星と②彗星の衝突による物質輸送, ③太陽風, そして④月内部からの火山噴出に伴う脱ガス作用である. Arnold [3]は, これらの要因により月極域の永久影にもたらされた水氷の総埋蔵量は 10^{16} から 10^{17} gにも達すると推定した. 後に, 月面における水の輸送モデルに関する数値計算から, ①から④により供給された水の一部は月の温度勾配に沿って極付近に移動し, そこで氷として捕縛されることが示唆されている[21–23].

1990年代後半以降, 月周回衛星探査が盛んになると, 月極域における水氷の存在を支持する数多くの観測データが明示され, それに伴いWatson et al. [1, 2]やArnold [3]による理論モデルの重要性が再認識されるようになった. 月周回衛星Clementineに搭載されたバイスタティック・レーダー観測やLunar Prospectorによる中性子分光観測から, 月極域に水氷が存在する可能性が見出された[24–26]. Lunar Prospectorによる観測データ(詳細については長岡[27]を参照されたい)から, 月極域に眠る水氷の総埋蔵量(水素が全て H_2O と仮定)は 10^{13} から 10^{15} gにも達することが予想さ

れたものの、その起源を特定するには至っていなかった。そこでBerezhnoi and Klumov [28]は、理論モデルの観点から、月極域の永久影に存在する氷は、主に彗星の衝突により生じた揮発性成分の蒸気層とその凝縮の産物であると解釈した。ここでは、月へ飛来する彗星の典型的な衝突条件(月の重力や彗星の直径、密度、衝突速度など)を設定している。衝突直後、彗星の大部分は完全に蒸発し、次いで衝撃波によるレゴリスの蒸発、溶融及び破砕が生じる。その後、彗星と月の土壌の混合物が放出され、最終的にクレーターが形成される。この過程において、彗星の衝突により生成された混合物の一部は蒸発層として月に留まり、後に月極域の永久影において氷として捕縛される。また、揮発性成分の凝縮モデルからこの蒸発層や永久影に捕縛された氷の化学組成は、彗星と大差はないと予想された。従って、月極域の永久影に分布する彗星由来の氷は、その供給・濃集過程において化学組成の変化を伴わないことが示唆され、すなわち、水以外の揮発性成分(炭素や窒素、硫黄の化学種など)も多分に含まれることが示唆される。ここで得られた数値計算の結果から、月極域の永久影に埋蔵する彗星の衝突由来の揮発性成分量は H_2O が $\sim 10^{14}$ g、Sが $\sim 5 \times 10^{13}$ g、 CO_2 が $\sim 5 \times 10^{13}$ g 及び SO_2 が $\leq 5 \times 10^{12}$ gと推定された。一方で、①に由来する揮発性成分、特に微小隕石や星間塵の衝突によるものについては、理論モデルからの検討は困難としているものの、その貢献度に応じて彗星により供給された氷の割合は減少すると解釈している。仮に微小隕石や星間塵の衝突が主たる原因となれば、当然、理論モデルにより予想される氷の化学組成は大きく変わる。しかし、実際に①と②のどちらが主たる原因となり得るかを理論モデルのみで明らかにすることは難しい。Berezhnoi and Klumov [28]は、揮発性成分に富む隕石・小惑星と彗星との間には、揮発性成分の種類や化学組成、水の同位体組成(D値)の特徴に大きな差があることから、将来の探査計画によりその詳細を明らかにすることが重要であると述べている。

ここまでで紹介した論文の他にも、彗星の衝突による揮発性成分の物質輸送と月極域の永久影への濃集に関する様々な理論モデルが報告されている。Ong et al. [29]は、流体シミュレーションから飛来した彗星の総量の約6.5%が衝突を経てもなお月に残ると推定し、その後の極付近への水の輸送と濃集を考慮すると、月

極域には総量として 1.3×10^8 から 4.3×10^9 トンもの莫大な量の氷が10億年間にわたって安定的に存在すると解釈している。Stewart et al. [30]は、彗星の衝突により生じた揮発性成分の蒸気層が月面にどの程度滞在可能か、さらには水の蒸発層が月極域で氷として捕縛される埋蔵量はどの程度かを理論モデルの観点から検討している。衝突後に発生した水の蒸発物は、大部分はわずか数秒で月の重力圏から離脱するものの、一部については重力に捕縛されたまま蒸気層として数カ月間残る。直径2 kmの彗星を仮定した場合、衝突から6か月後には $\sim 1.3 \times 10^{11}$ kgほどの水の蒸発層は消失してしまうものの、月の南極に $\sim 4.6 \times 10^9$ kg、さらに北極に $\sim 1.8 \times 10^9$ kgの水が輸送過程を経て氷として埋積すると推察している。

前節までに解説した理論モデルの多くは、月極域の永久影や夜側の表面に露出した氷を想定しており、同じく極低温環境にある月の地下についてはほとんど検討されていなかった。一部の先行研究では、表面に氷が露出する永久影では、その地下にも氷が埋蔵する可能性を指摘していたものの、その詳細な輸送・濃集モデルについては報告されていなかった。さらに日照域については、月の重力・真空条件を考慮すると表面では氷が容易に散逸してしまうため、地下も同様に氷は存在しないと考えられていた。そこでSchorghofer and Taylor [8]は、月の地下における水の安定性と供給・散逸・濃集のそれぞれのプロセスを数値計算により検証し、永久影や夜側の地下はもちろんのこと、氷が露出していない日照域でも地下は極低温環境であることから、氷はそこに残存し得ることを明らかにした。ここでは数値計算の前提条件として、揮発性成分の供給源は①から③を想定している。また、昇華や輸送時の光分解により散逸する氷の量は表面と地下ともに温度条件に依存するものの、太陽風や微小隕石・星間塵の衝突による影響は寧ろ地下の方が少ないと解釈している。予想される地下の温度は、表面に氷が露出する永久影では、深さ 10^{-4} から 10^2 mの範囲で80から140 Kとなる。このような極低温環境では、表面から散逸した水分子の一部は地下に流入するため、時間と共に地下に存在する氷の埋蔵量は定常的に増加する。水分子は次第に地下深くへ移動し、この際、土壌当たりの水の密度は変化しない。また、表面が氷で覆われている地域では、地下の水分子は非常に散逸しにくく、

太陽光や太陽風、微小隕石・星間塵の衝突により表面に氷の消失した結果、土壌のみが露出してもなお地下の水は長期間にわたり残存し得ると推察している。さらに、このような極低温環境において氷はアモルファス相として存在する可能性も示唆している。この理論モデルにより予想される地下の水の埋蔵量は数百 ppm であり、これは過去の理論モデル [3, 30] や月周回衛星 LCROSS により得られた観測データ [4] より得られた値よりも明らかに低い。その原因として、Schorghofer and Taylor [8] で示された理論モデルでは、化学形態についてレゴリス粒子を覆うように吸着した単一相を想定しており、多層構造やレゴリス粒子の隙間に捕縛された氷を想定していないことが考えられる。これについては次章で詳しく紹介するが、月の地下に間隙水が大量に埋蔵する可能性を裏付ける証拠が最近の物質科学研究により得られている [5]。

本章で紹介した理論モデルは、主に彗星に由来する月極域の水の埋蔵量について検討を行っている。彗星の衝突に関するシミュレーションは非常に複雑であり、そこで予想された水の総埋蔵量には大きな幅があるものの、その多くは、月周回衛星 Lunar Prospector や Chandrayaan-1, LCROSS により得られた観測データの見解と調和的である。一方で、Watson et al. [1, 2] や Arnold [3] で言及されているように、月における揮発性成分の輸送・濃集過程を理論モデルから紐解く上で、実際にはいくつかの不確かな仮定に基づいて検証を行っている。さらに、理論モデルによるアプローチの多くは、②の供給源のみを対象としており、①についてはモデルの複雑性から現状では報告例が少ない。さらに外来天体の物質輸送モデルは、アポロ計画の知見から得られたクレーター年代学に基づいて構築されている。今後の月のサンプルリターン計画などでこれが再検証された場合、当然、外来天体の衝突による水の供給・濃集モデルを見直す必要がある。従って、月極域での揮発性成分の輸送・濃集機構や予想される総埋蔵量については、まだまだ改善の余地がある。より高い精度で信頼性の高い検証を進めるためには、理論モデルによるアプローチだけに留まらず、次章で紹介する月試料を対象とした物質科学研究や月周回衛星観測、さらには将来の月極域着陸探査やサンプルリターン計画が必要不可欠である。

3. アポロ試料及び月隕石に残る外来天体由来の水の痕跡

外来天体の衝突により引き起こされる月への物質輸送は、月のマグマオーシャン (LMO : Lunar Magma Ocean) 形成直後から現在に至るまで生じる普遍な現象である。その輸送量を決定する要素、例えば、外来天体の種類や衝突頻度は時代の変遷と共に移り変わることから、月試料を対象に様々な時代で発生した衝突の痕跡を探ることはアポロ計画以降の解決すべき重要課題の一つに位置付けられている。前章で述べたように、理論モデルだけでは外来天体による揮発性成分の物質輸送の全容を把握することは難しく、従って、それを補完するもう一つの手段として月試料を対象とした物質科学研究によるアプローチが盛んに行われてきた。アポロ試料や月隕石を対象とした各種分析の結果、外来天体、特に隕石や小惑星による物質輸送が月の化学組成、特に揮発性成分の種類や量、同位体比を決定付ける重要な役割を果たすことが明らかとなっている。一方で、物質科学研究の多くは、隕石や小惑星の衝突を対象としたものであり、彗星によりもたらされた揮発性成分の痕跡を直接的な証拠として見出した研究成果は少ない。このような背景から本章では、隕石や小惑星により月へ供給された揮発性成分に関する物質科学研究の中でも、特に将来の月探査計画に密接に関係する研究成果の一部について、月の進化史と共に概説する。

月形成直後の LMO では、レイトベニアによりその表面から内部に至るまで物質輸送が繰り返し引き起こされていた。特に揮発性成分に関しては、外来天体の衝突による物質輸送が LMO やマントル全体のバジェットの一端を担うと解釈されている [10, 11]。月に内在する揮発性成分、こと水の起源に関しては、月試料に含まれるアパタイトを対象とした質量・同位体分析により議論が進められてきた。その一方で、どのような種類の外来天体が主要な要因として LMO やマントルに揮発性成分を供給したのかについては様々な解釈がある。Greenwood et al. [10] は、アポロ試料である玄武岩 (10044, 12039, 12040, 14053 及び 75055)、角礫岩 (12013, 14305, 94) 及びアルカリ斜長岩 (14305, 303) に産するアパタイトに注目し、二次イオン質量分析から母マグマに含まれる水の量と同位体組成の決定

を試みた(図1). その結果, 大部分のアパタイトから大量の構造水(物質の結晶構造をなすOH基)が検出され, その含水量は最大で6500 ppm(アポロ試料10044)にも達する. そのうち, 玄武岩10044, 12039

及び75055に含まれるアパタイトの水素同位体比(δD)は+391から+1010 ‰の範囲となった(図1b)(後にSinger et al. [31]及びGreenwood et al. [32]によりカンラン石玄武岩12018から最大で1500 ‰程度のアパタイトが見つかった). これは地球の水が示す水素同位体比よりも明らかに高く, よってアパタイトから検出された構造水は月固有のものであると言える. また, 分析に供したアポロ試料に認められるアパタイトの構造水は, その δD に基づいて大きく二つの起源に分類される. 一つは δD が比較的低い値を示すアパタイトであり, 月の初期物質が保有していた内因性の水と考えられている. もう一つは δD が高いものであり, この値の起源をシリケイトメルトからの蒸発に伴うレイリー分別で説明することが実験的には難しいことから, 外来天体による水の供給を可能性の一つに想定している. ここで, 月の高地に由来するアパタイトについては, 汚染成分や太陽風起源の値を示すものをいくつか報告している. 一方で玄武岩に関しては, 高い δD を示す. その中でも特に12309に産するアパタイトは非常に高い δD を有し, 彗星Hale-BoppやHyakutake, P/Halleyの値と類似することから, 月全体への水の供給源として彗星が主たる原因となり得ると主張している. また, 重水素に乏しい特徴を有する炭素質コンドライトと同様の δD を示すアパタイトは, 月の海の玄武岩からは確認されていない. Barnes et al. [11]では, 過去に報告された揮発性成分に関する物質科学的研究や理論モデルを再検証し, LMO初期に水をもたらした外来天体は主に炭素質コンドライトとその母天体が支配的である可能性を示唆している. ここでは, 先行研究により得られたデータを基に, 月におけるケイ酸塩領域の平均組成(BSM: Bulk Silicate Moon)を算出している. BSMとして水は10から300 ppm程度存在し, このうちの25 %が外来天体の衝突に由来, さらに外来天体により水が供給される範囲は深さ400と1000 kmと仮定している. ここでは, 仮定した条件と先行研究で報告されている月試料のアパタイトの δD の両方を満たすかをポイントにLMOに水を供給した主要な外来天体を解釈している. 彗星の多くは高い δD を有することから, 彗星が主たる供給源とすると, 月試料のアパタイトが示す δD とは調和しないケースもあり, そのため供給量に対する貢献度は低いと推察している(図1b). 一方で, 炭素質コンド

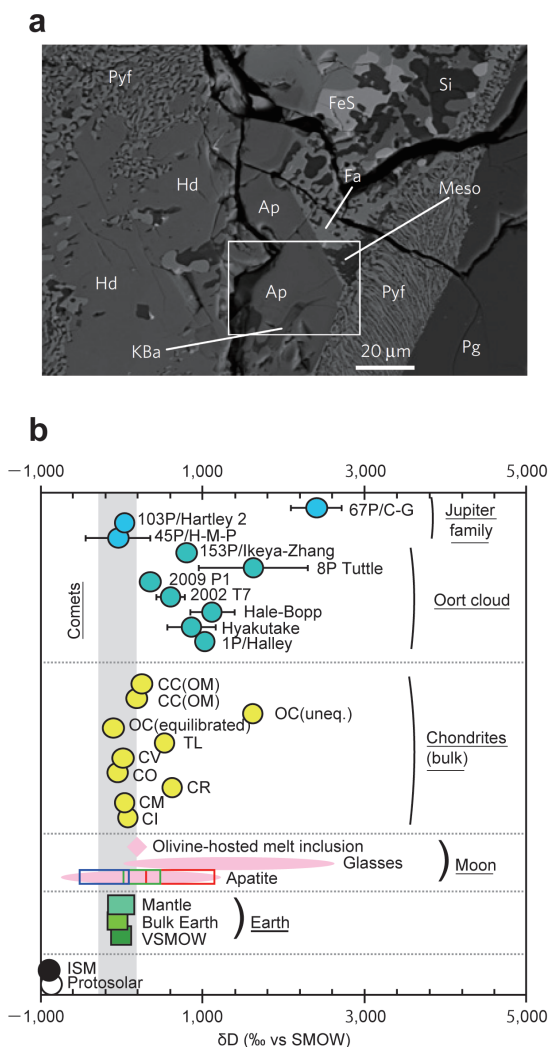


図1: (a) アポロ試料である玄武岩10044に分布するアパタイト(Ap)の後方散乱電子像. カンラン石や輝石の粒間を埋めるように産出する(Greenwood et al. [10]を改変). (b) 月, 地球, 各種コンドライト及び彗星の水素同位体組成(δD). 月試料に含まれるアパタイトやガラス, メルト包有物の δD は淡桃色で示され, 地球とは明らかに値が異なる. 月内部のBSMにおける δD は灰色で示され, コンドライト, 特に炭素質コンドライトの値と類似する. 一方で, 月試料のアパタイト(薄桃色)において記される赤, 緑, 青色の四角は, それぞれ月の玄武岩, 高地岩石, アポロ14053試料のアパタイトが示す δD に相当する. このうち, 月内部からの火山活動に起源を有する玄武岩中のアパタイトの δD は彗星の値と類似する(Greenwood et al. [10]及びBarnes et al. [11]を改変).

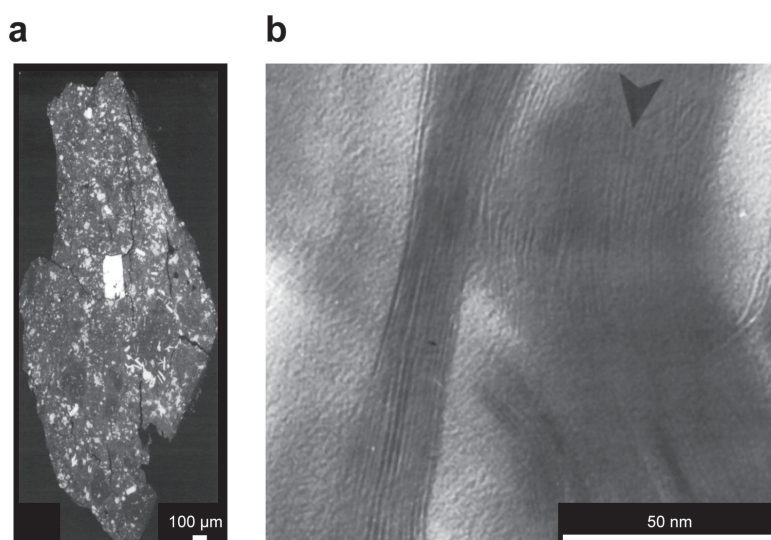


図2：(a) Bench crater meteoriteの後方散乱電子像及び(b) 苦鉄質ケイ酸塩を対象とした透過型電子顕微鏡像。苦鉄質ケイ酸塩には矢印で示すような格子縞が認められ、その間隔からサボナイトに同定される(Zolensky et al. [9]を改変)。

ライト、特にCO、CI、CM及びCVに属するものがそれぞれ同程度の量で供給されたとすると、BSMにおける水の量とアパタイトの δD の両方を十分に説明することが可能である。この際、彗星(Oort cloudもしくはKuiper belt由来を想定)の寄与はどれだけ多く見積もっても約20 %程度と考えている。両者の解釈について、Barnes et al. [11]は、BSMに基づく解釈であることから揮発性成分の起源は月全球に相当する。一方でGreenwood et al. [10]は、アポロ試料ごとの議論であるため(図1b)、より局地的な領域における起源に対応すると考えることもできる。そのため、両者は必ずしも見解が相違するものではない。また、鹿山&橋爪2019にて概説したように、月における水の起源に関するモデルはいくつかの仮定に依存してしまうことから、Barnes et al. [11]の見解については、再現実験やシミュレーション、将来のサンプルリターンによる新たな試料を用いてさらに検証する必要がある。最近ではアパタイトにおける水素の挙動をより詳細に理解するための研究(例えば、Higashi et al. [33]によるアパタイトの水素同位体組成の分布と水素自己拡散係数を指標とする成果など)も活発に行われており、月における水の描像をより明らかにするための試みもなされている。いずれにせよ、それぞれの研究成果からは、外来天体の衝突が月の揮発性成分の変遷、さら

には月の進化史に多大な影響を及ぼしたことが示唆される。

隕石や小惑星による揮発性成分の物質輸送を検討する上で、極めて重要な物的証拠としてアポロ計画で発見された“Bench crater meteorite”が挙げられる。多くの場合、アポロ試料や月隕石に認められる外来天体の衝突の痕跡は、金属微粒子や検出限界の高いバルク組成分析等でしか検出できないような極微小な物質に限られていた。その原因として、月には大規模な大気が存在しないことから地球のように外来天体は飛来する際に減速せず、その結果、より高速で月面に衝突することが考えられていた。そんな中、Wood et al. [34]はアポロ12号によりプロセラルム盆地から回収された土壌(アポロ試料12037)の観察を行い、月の物質とは明らかに特徴が異なる岩片を見つけた(図2a)。プロセラルム盆地との関係性は不明としながらも、月の玄武岩、玄武岩質角礫岩、ガラス、ノーライト及び斜長岩が細粒化した土壌の中に、 3.0×1.5 mm角の大きさの炭素質コンドライトに由来する岩片が含まれており、発見場所にちなんで“Bench crater meteorite”と名付けられた。肉眼観察において、この岩片は黒色細粒状を示し、大部分が不透明であるものの、一部に黄橙色を呈する透明な輝石で構成されるコンドリュールが認められる。偏光顕微鏡下において、この輝石は特

微的なモザイク組織を示し、これはBench crater meteoriteが月へ飛来した際に生じた衝撃変成作用の痕跡であると解釈された。地球で発見された炭素質コンドライトよりも衝撃変成作用の影響は色濃く、その原因としてやはり月には大気が存在し無いためほとんど減速せずに衝突したことが挙げられる。反射及び電子顕微鏡観察から、岩片に小球状のマグネタイトと硫化物の存在が見出され、その化学組成は炭素質コンドライトのものと調和的である。これらの事実を総合的に判断して、Bench crater meteoriteはType II(水質作用の影響を受け、含水鉱物などを多く含み、水などの揮発性成分に富む岩石学的タイプ)に属する炭素質コンドライトに分類された。より詳細な岩石・鉱物学的記載に関しては、McSween [35]により報告されている。黒色細粒状で産出するマトリックスの組織はC2コンドライトに類似するとしながらも、ここではフランボイダル・マグネタイト(小球状の集合体)の存在からCIコンドライトに分類している。化学組成は、他のコンドライトと比べてPやSに富み、Mg/Siが高く、Fe/Siが低い特徴を有する。Bench crater meteoriteの分類については、後にZolensky et al. [36]により更なる検討が試みられており、マトリックスの構成鉱物である硫化物、酸化物、炭酸塩鉱物及び苦鉄質ケイ酸塩鉱物の組織、形態及び化学組成がCM1コンドライトに属するKaidun chondriteと非常に類似することが明らかとなった。さらにZolensky [9]は、微小部分分析を用いてBench crater meteoriteから月試料において初めて含水鉱物を発見した(図2b)。電子顕微鏡観察の結果、苦鉄質ケイ酸塩は100 %の化学量論組成を示さず、さらに構造水を主成分とする層状ケイ酸塩の特徴である格子縞が認められた。さらに化学組成分析からも、苦鉄質ケイ酸塩には含水鉱物であるサポナイトが含まれていることが判明した(図2b)。ここでは、外来天体が月に飛来した際の大規模な衝突現象を経験してもなお、含水鉱物に内在する構造水は十分に生き残ることができると結論付けている。また、ここで得られた知見は、層状ケイ酸塩を対象に一段式火薬銃により衝撃変成作用を模擬した衝突実験の結果とも整合する[37]。従って、隕石や小惑星の衝突も層状ケイ酸塩を構成する構造水の一部は月の表層に残存し得ることが示唆される。他方で、月面衝突により外来天体から脱水した構造水や層間水や流体包有

物などのH₂O分子水、吸着水、さらに水氷は、前章の理論モデルに従うと、一部が蒸気層として長期間留まり、最終的には極付近や地下へ輸送された後に水氷としてそこに捕縛されると推察される。さらに重要なことは、月周回衛星LCROSSやDeep Impactによる赤外分光観測から、含水鉱物由来と目される構造水が大量に発見されており、さらに高頻度で氷や吸着水、分子水を伴って検出されている[4, 13]。この事実を考慮すると、含水鉱物を構成する構造水は他の水の化学種を繋ぎとめるリザーバーとしての役割を果たしている可能性が考えられる。

月の火山活動中期から末期にかけて結晶化した月隕石にも、外来天体の衝突による痕跡は色濃く残されている。特に最近では、角礫岩(角状の岩片が圧密により固まった岩石、月の場合、天体衝突により破碎した岩石のエジェクタがクレーター内部に降り積もり、後に固結したものが多い)に属する月隕石から隕石や小惑星の衝突により月に供給された水の痕跡がいくつか報告されている[5, 38]。Demidova et al. [38]では、月隕石Dhofar 032及び961の電子顕微鏡観察から脱水したサーペンティン((Mg, Fe)₃Si₂O₅(OH)₄)の残留物を発見している。Dhofar 032は斜長岩質の天体衝突により一部溶融(インパクト・メルト)した角礫岩に分類され、1.5 mm程度の粗粒な鉱物粒子からなるクラスト(主に斜長岩、トロクトライト、ノーライト及びガブロンノーライト)と細粒な鉱物の集合であるマトリックスから構成されている。Dhofar 961も同様にマトリックスを有するインパクト・メルト角礫岩に属するものの、その大部分は最大で1 cmにも及ぶ比較的大きなクラスト(粗粒の鉱物からなるハンレイ岩、ガブロンノーライト、ノーライト、ガブロンノーソサイト及び斜長岩)から構成されている。Dhofar 032には鉄・ニッケル粒子が存在することから、地球に落下した後に受けた風化作用の影響は少ない(風化すると酸化物になるため)と結論付けている。一方で、Dhofar 961については、カルサイト(CaCO₃)、石膏(CaSO₄)、セレストタイト(SrSO₄)、バライト(BaSO₄)、スメクタイト及び鉄の水酸化物が割目に存在することから、地球風化作用の影響は中程度と考えられている。Dhofar 032には特徴的な組織を有する球状物質が認められ、これはカンラン石と輝石の連晶から構成される共融組織を示す。Dhofar 961には、燐に富み、ゾーニングを有す

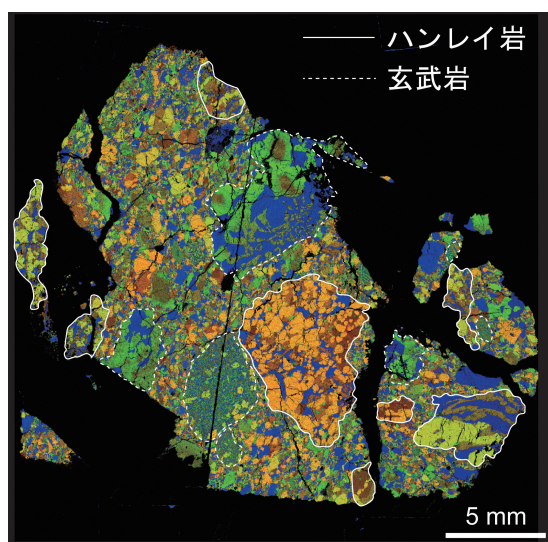


図3：走査型電子顕微鏡による波長分散型蛍光X線分析で得られたNWA 2727の元素マップ像。Mg, Fe及びAlそれぞれの蛍光X線強度を赤、緑及び青色としてRGB合成により撮影された。白の実線で囲まれた領域はハンレイ岩質、点線は玄武岩質クラストであり、それ以外の領域は角礫岩質マトリックスとなる(Kayama et al. [5]を改変)。

るカンラン石巨晶($370 \times 370 \mu\text{m}$)輝石の離溶ラメラ(固溶体の鉱物が冷却過程において二相以上に分離してできた組織)が多数存在する。これらの観察事実は、サーペンティンが脱水作用を受けた後に生じる残留物の特徴と類似していると述べている。ここでは、サーペンティンの残留物を月固有の存在と捉え、超苦鉄岩から産したサーペンティンが天体衝突による脱水作用

を受けて作られたと解釈している。一方でKayama et al. [5]は、これらの月隕石には程度の高い天体衝突の痕跡が認められることから、月固有の生成物というよりはむしろ外来天体による供給物である可能性が高いと示唆している。最近では、月表面での揮発性成分の物質輸送だけに留まらず、月の地下における水の供給と濃集に関する物質科学的見解が得られている。Kayama et al. [5]は、月隕石NWA 2727の各種微小部分分析により、月の表層における流体活動と地下に埋蔵する水の痕跡としてモガナイト(化学組成が SiO_2 であり、石英とは結晶構造の異なるシリカ多形)を発見している。NWA 2727は相対的にKREEPに富むハンレイ岩・玄武岩質角礫岩に分類され、さらに非常に若い結晶化年代を示す。これらの事実から、NWA 2727の起源地はプロセラルム盆地内に位置するクレーターにあると解釈している。また、この月隕石はNWA 773や2977, 3333, さらには6950などとは岩相の組み合わせが異なるものの、年代や鉱物・岩石学的記載から同じ起源地から産出したペア隕石(NWA 773 clanと称される)と考えられている。NWA 2727は、主にハンレイ岩と玄武岩のクラスト(数mm)からなり、その隙間を埋めるように各クラストが角礫化したマトリックス($<50 \mu\text{m}$)が分布する(図3)。ラマン分光、放射光X線回折及び透過型電子顕微鏡を用いた微小部分分析から、NWA 2727を構成する角礫岩質マトリックスにおいてのみ、2から $13 \mu\text{m}$ ほどのモガナイトを内包するシリカ鉱物が発見された(図4a)。一方で、モガ

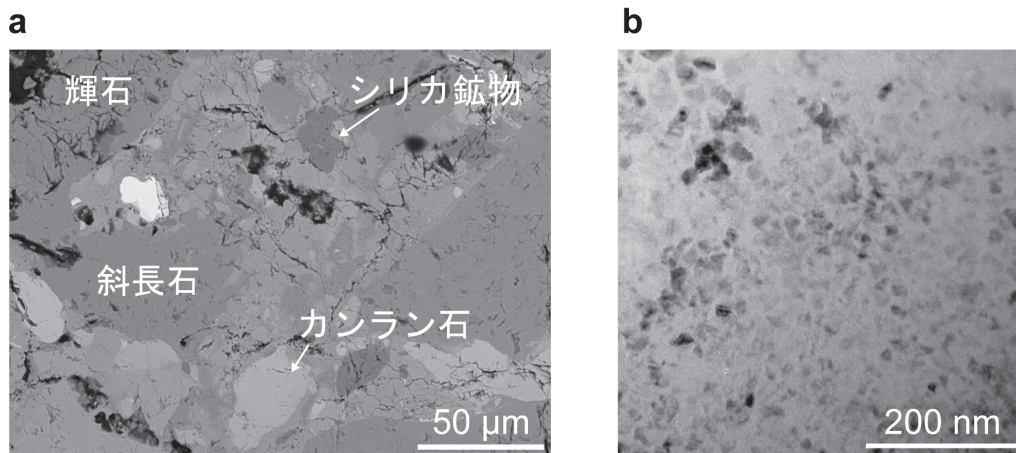


図4：(a) NWA 2727に含まれるシリカ鉱物の後方散乱電子像。シリカ鉱物はカンラン石や輝石、斜長石粒子の隙間を埋めるように分布。(b) シリカ鉱物の透過型電子顕微鏡。シリカ鉱物はモガナイトのナノ粒子の微晶質集合体として構成されていることが分かる(Kayama et al. [5]を改変)。

ナイトはハンレイ岩・玄武岩質クラストや他のペア隕石には認められなかった。このシリカ鉱物を対象とした透過型電子顕微鏡観察の結果、モガナイトは平均粒径が4.5 nm程度の微晶質なナノ粒子の集合体をなし、その一部は天体衝突によりシリカ高圧相(高圧条件下で安定なSiO₂)であるコーサイト及びスティショバイトに相転移していた(図4b)。さらにモガナイトは、100 MPa以上の高圧条件下においてアルカリ性の水が蒸発して生じる沈殿物である。これらの事実を基に、NWA 2727から発見されたモガナイトは月で生じた水の流体活動に由来することが判明した。ここでは、モガナイトの沈殿条件を満たす水の供給源として炭素質コンドライトが考えられており、シリカの粒成長則から沈殿には数か月から数年程度の時間が必要であることから、NWA2727の母岩である角礫岩に一時的に水が捕縛されたことが示唆される。月の表層では太陽光による熱で数か月から数年にわたるタイムスケールで水が蒸発し、それに伴いモガナイトが沈殿した。一方で地下では、極低温環境であるため捕縛された水は氷として捕縛される。さらにここでは、モガナイトの沈殿反応に必要な水の量を溶解モデルから数値計算し、それを基に地下に存在する水氷の埋積量を0.6 wt%以上と見積もっている。前章で紹介したSchorghofer and Taylor [8]による理論モデルを考慮すると、月の地下の極低温環境では、水氷は数十億年以上、昇華せずに残存し得ることが予想されている。これらの研究成果から、プロセラルム盆地内のいずれかのクレーターの地下には、炭素質コンドライトの衝突により供給された水が氷として今もなお大量に眠っていることが推察される。

4. 今後の課題と問題解決に向けて将来期待される探査計画

本書で概説した理論モデルや物質科学的研究と合わせて、様々な研究成果に基づき、最近では月周回衛星による観測データから月における揮発性成分の起源について検討が進められている。その中でも、外来天体による物質輸送は、月の極付近や地下に存在する揮発性成分のパジェットや性質を決定する主たる原因の一つと考えられている。Deep ImpactやChandrayaan-1に搭載された赤外分光装置から、水氷や分子水と合わせて含水相(水を主成分とする物質)由来の構造水が検

出されている[12, 13]。これについてPieters et al. [12]は、月固有あるいは外来天体によりもたらされた物質であると述べている。LCROSSによる赤外分光観測の結果からは、月極域に位置するカベウス・クレーターにおいて大量のH₂OやOHなどの水とそれに伴うCH₄やNH₃などの彗星の主成分となる各種揮発性成分が認められている[4]。Lunar Prospectorでは、中性子分光観測により水と目される水素が局地的に濃集していることが判明し、その原因として地形や温度による影響の他に、彗星が月に不均一に水を供給した可能性も示唆している[14, 39]。しかし、月周回衛星により得られた観測データは波長分解能や信号の検出限界、さらには信号の検出領域(フットプリントや深度プロフィール)などの問題(詳しくは仲内[40]を参照されたし)から、揮発性成分の量や種類(元素や化学種、化学形態など)、分布を高い精度かつ信頼性で解析することは難しく、さらに同位体比の決定や地下での埋蔵に関する詳細を得ることは不可能に近い。従って、月周回衛星観測による知見だけでは、月極域や地下に存在すると目される水氷の詳細、特に起源を解明することはできない。また、本書で述べたように現状の理論モデルや物質科学的研究に関しても解決すべき課題は多く、検討を更に進めるためには、やはり未だ到達していない月極域に降り立つことが最優先事項である。月に存在する揮発性成分は、科学目的として月の進化史の謎を紐解く重要な鍵であることはもちろんのこと、資源的な側面からも揮発性成分、特に水は有人探査や月面での基地建設、居住に必須なリソースとなる。従って、月の極付近に存在する水氷のパジェットとその供給・濃集機構の全容を把握するためには、将来の月極域着陸探査やサンプルリターン計画が必要不可欠である。

謝 辞

ゲストエディターであるJAXA/ISASの大竹真紀子氏と長岡央氏には本書の編集作業、執筆依頼並びに原稿への助言をいただきましたことを深く感謝申し上げます。また、査読者の伊藤正一氏にも、厚く御礼申し上げます。本研究はJSPS科研費JP18H01298の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Watson, K. et al., 1961a, *J. Geophys. Res.* 66, 1598.
- [2] Watson, K. et al., 1961b, *J. Geophys. Res.* 66, 3033.
- [3] Arnold, J. R., 1979, *J. Geophys. Res.* 84, 5659.
- [4] Colaprete, A. et al., 2010, *Science* 330, 463.
- [5] Kayama, M. et al., 2018, *Sci. Adv.* 4, eaar4378.
- [6] 鹿山と橋爪, 2019, *遊星人* 28, 24.
- [7] Joy, K. H. et al., 2016, *Earth Moon Planets* 118, 133.
- [8] Schorghofer, N. and Taylor, G. J., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, E02010.
- [9] Zolensky, M. E., 1997, *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 15.
- [10] Greenwood, J. P. et al., 2011, *Nat. Geosci.* 4, 79.
- [11] Barnes, J. J. et al., 2016, *Nat. Commun.* 7, 11684.
- [12] Pieters, C. M. et al., 2009, *Science* 326, 568.
- [13] Sunshine, J. M. et al., 2009, *Science* 326, 565.
- [14] Miller, R. S. et al., 2014, *Icarus* 255, 229.
- [15] 橋爪, 2019, *遊星人* 28, 6.
- [16] Spitzer, L. Jr., 1952, *The Atmosphere of the Earth and Planets* (Univ. Chicago Pres.), 239.
- [17] Kuiper, G. P., 1952, *The Atmosphere of the Earth and Planets* (Univ. Chicago Pres.), 367.
- [18] Taylor, S. R., 1975, *Lunar Science: A Post-Apollo view* (New York: Pergamon Pres.).
- [19] Eberhardt, P. O. et al., 1976, in *Lunar Sci. Conf.* 7th, 563.
- [20] Durrani, S. A. et al., 1976, in *Lunar Sci. Conf.* 7th, 1157.
- [21] Butler, B. J., 1997, *J. Geophys. Res.* 102, 19283.
- [22] Crider, D. H. and Vondrak, R. R., 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 26773.
- [23] Crider, D. H. and Vondrak, R. R., 2002, *Adv. Space Res.* 30, 1869.
- [24] Nozette, S. et al., 1996, *Science* 274, 1495.
- [25] Feldman, W. C. et al., 1998, *Science* 281, 1496.
- [26] Lawrence, D. J. et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, E08001.
- [27] 長岡央, 2019, *遊星人* 28, 37.
- [28] Berezhnoi, A. A. and Klumov, B. A., 1998, *JETP LETTERS* 68, 163.
- [29] Ong, L. et al., 2010, *Icarus* 207, 578.
- [30] Stewart, B. D. et al., 2011, *Icarus* 215, 1.
- [31] Singer, J. A. et al., 2017, *Geochem. J.* 51, 95.
- [32] Greenwood, J. P. et al., 2018, *Space. Sci. Rev.* 214, 92.
- [33] Higashi, Y. et al., 2017, *Geochem. J.* 51, 115.
- [34] Wood, J. A. et al., 1971, *Smithsonian Astrophys. Obs. Spec. Rep.* 333, 177.
- [35] McSween, H. Y., 1976, *Earth Planet. Sci. Lett.* 31, 193.
- [36] Zolensky, M. E. et al., 1996, *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 518.
- [37] Boslough, M. B. et al., 1980, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 11th.
- [38] Demidova, S. I. et al., 2015, *Petrology* 23, 116.
- [39] Prem, P. et al., 2014, *Icarus* 255, 148.
- [40] 仲内, 2019, *遊星人* 28, 45.