

## 月の地下に大量の氷が埋蔵されている可能性、月隕石から氷の痕跡であるモガナイトを発見

鹿山 雅裕  
*Kayama Masahiro*

### 1. 月における水・氷の発見と課題

アポロ・ルナ計画以来、月は水に乏しい天体であると考えられてきた。アポロ・ルナ計画で採取された月の岩石や土壌に対して全岩化学分析を行ったところ、揮発性成分量は当時の技術では検出限界以下であり、そのため月は水に枯渇した環境であると結論付けられた<sup>1)</sup>。しかし、2000年以降の月周回衛星（例えば、ディーピンパクトやエルクロス、チャンドラヤーン1号等）により、月の極域（北極と南極付近）表面において最大で5.6~30 wt%にも及ぶ大量の水・氷が観測された<sup>2-4)</sup>。月の極域表面に濃集する水・氷の起源として主に、①水を豊富に含む小惑星や彗星の衝突、②太陽風によるHの打ち込み、③ジャイアントインパクト後も月のマントルに残存したもの（後の火山噴出によりマントルから月面へ水が供給）の3つが想定されている。温度が比較的高い月の低緯度から中緯度領域では、①~③により供給された水が太陽光によりH<sup>+</sup>とOH<sup>-</sup>に分解され、月面の温度勾配に沿って各イオンの一部は極低温の極域に移動し、その表面で水・氷として濃集すると考えられている<sup>2)</sup>。

このように、月の極域において水・氷等の揮発性成分に富む地域の存在が示唆されていることから、水・氷が月の極域のどこに濃集しているのか、更には資源利用（月での有人活動・居住に必要な飲料水や酸素、火星等への惑星間航行に必要な水素燃料等）が可能なのかを明らかにするべく、将来の月のミッションとして2020年代に月極域着陸探査が日本で検討されている<sup>5)</sup>。

一方で、月周回衛星による観測では、月の表面から深さ1 m程度までの情報しか得ることができず、

月の地下1 m以深に水・氷が存在するかどうかについてはほとんど手がかりが得られていなかった。シミュレーションによる知見から<sup>6)</sup>、温度の極めて低い月の地下数mの領域において、水は氷として溜まることが可能であると予想されているが、どれほどの量の氷が、どの地域に埋蔵しているのか、そもそも実在しているのか等、その実像は謎に包まれている。

このような背景から筆者の研究グループは、巨大天体の衝突により月の地下から宇宙空間に放出された後に地球に飛来してきた月の岩石である月隕石に注目し、13種類の月隕石に対する微小部分分析から、月の地下における水・氷の痕跡の探索を試みた。その結果、NWA2727と呼ばれる月隕石（**図1**）から“モガナイト”と呼ばれる水が関与してできる鉱物を発見するに至った<sup>7)</sup>。これは地球外物質では初めての報告例であり、月における水の活動と地下に氷が存在する可能性を示す重要な痕跡である。ここでは、得られた成果と関連する将来の月探査計画について解説する。



2 mm

図1 月隕石 NWA2727 の写真  
 角礫化によるまだら模様が特徴

## 2. モガナイトとは？月隕石 NWA2727 とは？

モガナイトとは、 $\text{SiO}_2$  を主成分とし、単斜晶系（空間群  $I2/a$ ）に属する準安定相の鉱物である（石英と同じ化学組成であるが、結晶構造が異なる多形）<sup>8, 9)</sup>。隕石や宇宙塵等の地球外物質では発見されていなかったものの、地球上には普遍的に産出する。主に蒸発岩やチャート等の水が関与してできた堆積岩に含まれることが知られており、高压の堆積環境でケイ酸 ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) を含むアルカリ流体が蒸発すると、それに伴いモガナイトが沈殿物として生成される。準安定相であることから、常温常圧では短期間で溶解若しくは石英に相転移してしまうため、地球風化作用により生成することは無い。熱水実験による合成も報告されており、100 MPa 以上の高压下においてケイ酸を含むアルカリ流体 (pH=9.5~13) から沈殿する<sup>10, 11)</sup>。

NWA2727 はハンレイ岩・玄武岩質角礫岩に属する月隕石である（図1）。月の地下深くでゆっくりと固まったハンレイ岩（粗粒のカンラン石と輝石、斜長石で構成）と比較的表面近くで急冷してできた玄武岩（粗粒な班晶の輝石と細粒の輝石、斜長石、石英からなる）が月面での天体衝突により破碎され、破片が固結（角礫化）した岩石である<sup>11, 12)</sup>。ハンレイ岩と玄武岩の特徴を残す数 mm の破片（クラスト）とその隙間を埋めるマイクロメートルオーダーの細かな破片の集合体（角礫部）が存在する（図2）。先行研究<sup>12-15)</sup> から、約 30 億年前にハンレイ岩と玄武岩が結晶化し、約 27 億年前以降に天体が衝突して角礫化、100~3,000 万年前に再度別の天体が衝突して角礫岩の一部が月から放出され、宇宙空間を漂って 1 万 7 千年前に北西アフリカの砂漠に飛来したことが判明している。主要化学組成と微量元素の特徴から NWA2727 はカリウム(K)、希土類元素(REE)、燐(P)（頭文字を取って KREEP）に富んでおり、月周回衛星で得られたデータと比較すると、その類似性から NWA2727 はプロセラルム盆地に由来すると考えられている<sup>12)</sup>。また、ハンレイ岩のみからなる月隕石 NWA2977、3333 及び 6950 は年代測定と化学分析の結果、NWA2727 と共に同時期に天体衝突によりプロセラルム盆地から北西アフリカに飛来したペア隕石であることが知られている<sup>12, 13)</sup>。

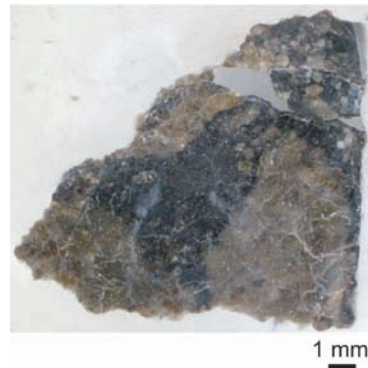


図2 NWA2727 の断面写真

図1の試料の一部を岩石カッターで破断し、その後ダイヤモンド研磨剤で磨いたもの。薄色のクラストと濃い色の部分が角礫部からなる

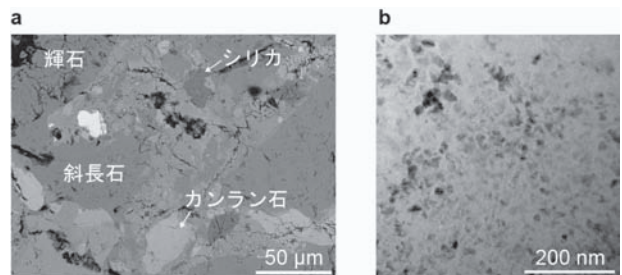


図3 (a) NWA2727 の角礫部における走査型電子顕微鏡写真（後方散乱電子像）、(b) シリカ粒子の透過型電子顕微鏡写真（明視野像）

(a) 粗粒なカンラン石、輝石、斜長石に囲まれたシリカ（色が濃い部分）が粒子として存在。微小部分分析からこのシリカ粒子に大量のモガナイトが検出。(b) 平均半径 4.5 μm の大量のモガナイトの集合体から構成 (modified after Kayama *et al.*, 20187)

## 3. NWA2727 の微小部分分析からモガナイトを発見

岩石のタイプが異なる 13 種類の月隕石に対してラマン分光計、大型放射光施設 SPring-8 (BL10XU) での放射光 X 線回折装置及び電子顕微鏡を用いた微小部分分析を行った。その結果、NWA2727 において唯一、モガナイトが発見された。走査電子顕微鏡観察の結果、NWA2727 の角礫部に細粒（直径数 μm）な  $\text{SiO}_2$  からなる鉱物（シリカ）粒子が複数存在し、粗粒なカンラン石や輝石、斜長石の隙間を埋めるように分布する（図3a）。このシリカ粒子に対して鉱物固有の振動モードを検出できるラマン分光分析を行ったところ、粒子内にモガナイトが大量に存在することが判明した。また、少量ではあるものの、他の  $\text{SiO}_2$  多形として石英と高压条件下で生成するコーサイト及びステイショバイト（それぞれ約 3 GPa 以上と約 8 GPa 以上）も見出された。放射光 X 線回折分析からも、モガナイトの結晶構造に指数付けすることのできる特徴的な回折パターンが得られ、信号は顕著

であることから、やはりこのシリカ粒子には大量のモガナイトが含まれていることが明らかとなった。透過型電子顕微鏡観察の結果、このシリカ粒子の大部分は、平均半径 4.5 nm の極細粒なモガナイトのナノ粒子の集合体から構成されている (図 3b)。このような極微細なモガナイトを含むシリカ粒子は、NWA2727 の角礫部にしか存在せず (図 2)、玄武岩質クラストには石英単結晶のみ、ハンレイ岩にはそもそもシリカが存在しない。また、ペア隕石であり、ハンレイ岩のみで構成される月隕石 NWA2977 や 3333, 6950 にもシリカは無い。即ち、モガナイトは NWA2727 の角礫部に特有の鉱物であると言える。

#### 4. 月でのモガナイトの沈殿と水の活動、地下の水

NWA2727 から発見されたモガナイトは、 $\text{SiO}_2$  の高压相であるコーサイト(まれにスティショバイト)と必ず共存する。これはモガナイトから高压条件下で相転移したこと意味しており、この現象は月から NWA2727 が放出された際に生じた天体衝突に由来する。つまり NWA2727 中のモガナイトは月固有の鉱物と言える。また、モガナイトは常温常圧下では生成しないこと(むしろ溶解若しくは石英に相転移する)、更にモガナイトは NWA2727 の角礫部にしか存在しないこと等も地球風化作用の産物ではないことを意味している(同時期に北西アフリカに飛来したペア隕石の NWA2977, 3333, 6950 に存在しない。NWA2727 の角礫部にしか含まれていない。もし地球風化作用により生成したのであれば、至る所にモガナイトが存在するはず)。月固有のモガナイトが存在することは、月において水の活動が生じていた可能性を示す重要な痕跡である。

NWA2727 に存在するモガナイトは平均半径 4.5 nm のナノ粒子として産するため、シリカの粒成長則<sup>16)</sup>にもとづくと、 $\text{pH}=7.5\sim 10.5$  かつ  $90^\circ\text{C}$  以上の条件で数か月から数年の期間を経てアルカリ流体から沈殿したと考えられる。また、熱水実験で合成したモガナイトの沈殿条件 ( $\text{pH}=9.5\sim 13$ )<sup>10,11)</sup>、更には月面上で太陽光が照射される日照域の最大温度 ( $126^\circ\text{C}$ ) を考慮すると、NWA2727 に産するモガナイトは  $\text{pH} 9.5\sim 10.5$  かつ  $90\sim 126^\circ\text{C}$  のケイ酸水溶液から数か月間から数年間かけて沈殿したと示唆される。また、モガナイトは NWA2727 の角礫部にのみ存在することか

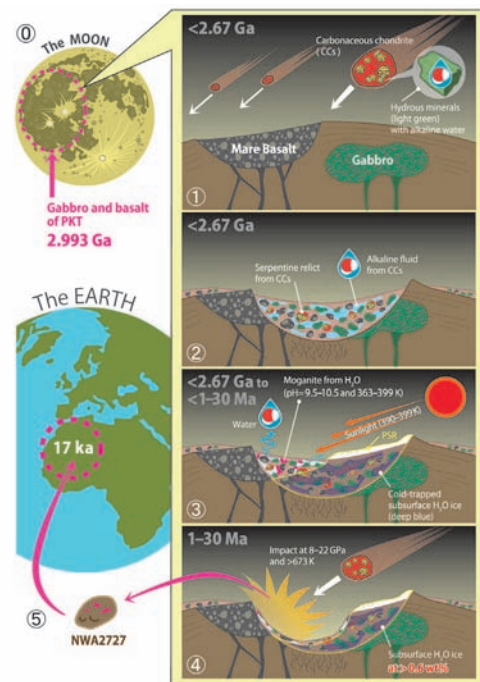


図 4 月におけるモガナイトの沈殿、水の活動及び地下の水の埋積に関するモデルの模式図 (modified after Kayama et al., 20187)  
模式図の①～④が本文の (1) ~ (4) までのモデルの説明に対応

ら、アルカリ性の水に富む天体の衝突とそれに伴う角礫化(圧密作用により押し固められて、割れ目や鉱物同士が密着して隙間が少なくなる)が水の供給と捕縛に密接に関連していることが示唆される。つまり、その沈殿過程には天体衝突により月の外からもたらされたアルカリ性の水が不可欠であり、更にその水が月の比較的温度が高い場所で蒸発することが必要となる。これらの事実をもとに、ここでは月への水の供給プロセスとモガナイトの沈殿に関する次のようなモデルを提案した(図 4)。

- (0) プロセラルム盆地で月隕石の母体となる岩石の大塊(岩体)がマグマから固化(ハンレイ岩と玄武岩の岩体が結晶化したのが約 30 億年前<sup>12,13)</sup>)
- (1) アルカリ性の水に富む天体、おそらく炭素質コンドライト(水や含水鉱物を豊富に含み、その生成に小惑星でのアルカリ流体が関与)の母天体である小惑星がプロセラルム盆地に衝突(天体衝突と角礫化が生じたのが約 27 億年前以降<sup>13)</sup>)
- (2) 衝突で形成したクレーターの内部に月の地殻や炭素質コンドライトの破片が集積、その表面から底部では水が捕縛
- (3) 捕縛されたアルカリ性の水 ( $\text{pH}=9.5\sim 10.5$ ) は月面の太陽光で熱せられた日照域(最大  $117\sim 126^\circ\text{C}$ ) で

は蒸発してモガナイトを沈殿、地下数 m 以深では低温環境であるため氷として残存

(4) 再度別の天体の衝突でクレーターを構成する角礫岩の一部が宇宙へ放出 (100~3,000 万年前<sup>15)</sup>)

(5) 宇宙を漂った後に地球の北西アフリカにある砂漠に月隕石として落下 (NWA2727 と一緒に NWA2977, 3333 及び 6950 等の月隕石が飛来したのが 1 万 7000 年前<sup>15)</sup>)

ケイ酸水溶液からモガナイトを沈殿させるためには水が不可欠であり、その量を化学平衡計算により算出することができる。今回のケースのような、ケイ酸水溶液が pH 9.5~10.5 かつ 90~126℃ の条件では、モガナイトの沈殿に必要な水の量は少なくとも 0.6 wt% にも達し、岩石 1 m<sup>3</sup> 当たり換算すると 18.8 L 以上と推定される。月の表面では太陽光の熱で水が蒸発することによりモガナイトが作られ、温度が非常に低い地下では氷として埋蔵すると考えられる。先行研究で報告されたシミュレーションの結果によると<sup>6)</sup>、月の氷は太陽光が当たらない地下では数十億年以上も残り続けることが予想されているため、月でモガナイトが沈殿した当時だけでなく、今もなおプロセラルム盆地の地下に大量の水が存在している可能性が示唆される。これほど大量の水・氷が月で報告された例は、月の極域以外では初であり、月の地下には将来の月探査計画・有人活動において活用できる貴重な水資源が今も眠っている可能性が今回の成果で明らかとなった。

## 5. 将来の月探査計画に向けて

このように、月の水・氷は科学目的 (月への水の供給・濃集機構や月の形成・進化史との関係等) だけに留まらず、人類が月面で活動するために欠かせない貴重な水資源としても活用が期待されている。宇宙における水資源は、月の探査だけに留まらず、火星等の別の天体に関するミッションにおいても重要なテーマの 1 つである。そのため、水資源の獲得と現地での資源利用を目的とした月の無人・有人探査が各国で計画されており、その機運が近年急速に高まっている。日本も無人ローバーによる月極域着陸探査<sup>5)</sup> や新たなサンプルリターン計画 (HERACLES) 等、月における水の探索を 1 つの重要課題として将来的にミッションに参画することが現在検討されている。

本著で紹介した研究成果により、水資源として十分に活用できるほど大量の水がプロセラルム盆地のどこかのクレーターに眠っている可能性が明らかとなった。しかし、具体的にプロセラルム盆地内のどのクレーターなのか? つまり NWA2727 の起源地については現状のデータだけでは場所を明示することはできない。しかし重要なことは、これまでの月周回衛星で得られたデータは月の表面に関する情報であり、今回の研究成果から月の地下にも大量の水が埋蔵する可能性が示されたことである。これはなんにもプロセラルム盆地に限ったことではない。即ち、シミュレーションで予想されているように<sup>6)</sup>、プロセラルム盆地の地下で生じた現象が、水・氷が表面に大量に存在すると目される極域の地下においても十分に起こり得ることである。このような背景から、月周回衛星により多くのデータが得られている月極域及びその地下の無人・有人探査が今後の宇宙探査における最重要課題と言える。

## 参考文献

- 1) Taylor, *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **70**, 5904-5918 (2006)
- 2) Sunshine, *et al.*, *Science*, **326**, 565-568 (2009)
- 3) Colaprete, *et al.*, *Science*, **330**, 463-468 (2010)
- 4) Li, *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115** (36), 8907-8912 (2018)
- 5) 長岡央, 他, 遊星人, 第 27 卷 (第 1 号), 103-106 (2018)
- 6) Schorghofer, *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, **112**, E02010 (2007)
- 7) Kayama, *et al.*, *Science Advances*, **4**, eaar4378 (2018)
- 8) Heaney, *et al.*, *Science*, **255**, 441-443 (1992)
- 9) Götze, *et al.*, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **133**, 96-105 (1998)
- 10) Schäfer, *et al.*, *Solid State Sciences*, **8**, 625-633 (2006)
- 11) Kyono, *et al.*, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **112**, 324-335 (2017)
- 12) Jolliff, *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 4857-4879 (2003)
- 13) Borg, *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 3963-3980 (2009)
- 14) Fernandes, *et al.*, *Meteoritics & Planetary Science*, **38**, 555-564 (2003)
- 15) Nishiizumi, *et al.*, *Proceedings of the 35th Lunar and Planetary Science Conference*, The Woodlands, TX, 15 to 19 March (2004)
- 16) Hsu, *et al.*, *Nature*, **519**, 207-210 (2015)

(東北大学学際科学フロンティア研究所)