

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 月の極の水氷（レビュー）

A Review of Water Ice on the Polar Regions of the Moon

春山 純一, 橋爪 光, 鹿山 雅裕, 長岡 央, 仲内 悠祐

Junichi HARUYAMA, Ko HASHIZUME, Masahiro KAYAMA, Hiroshi NAGAOKA  
and Yusuke NAKAUCHI

2018年6月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 月の極の水氷（レビュー）

春山 純一<sup>\*1</sup>, 橋爪 光<sup>\*2</sup>, 鹿山 雅裕<sup>\*3</sup>, 長岡 央<sup>\*4</sup>, 仲内 悠祐<sup>\*5</sup>

## A Review of Water Ice on the Polar Regions of the Moon

by

Junichi Haruyama<sup>\*1</sup>, Ko Hashizume<sup>\*2</sup>, Masahiro Kayama<sup>\*3</sup>, Hiroshi Nagaoka<sup>\*4</sup>, Yusuke Nakauchi<sup>\*5</sup>

### ABSTRACT

The new era of lunar explorations aiming future settlement of humans in the space have been starting. In this era, one of the most important topics is “water ice” on the lunar polar regions that has been suggested since 1960s. In 1990s, two lunar orbiters, Clementine and Lunar Prospector provided some important results interrelated with the existence of polar water ices on the Moon, particularly in the permanent shadowed area of Shackleton crater. However, the water ice existence in the Shackleton still has not been confirmed by later various observations. On the other hand, the concentration of hydrogen on the lunar polar regions originated from solar wind proton implantation is likely true. LEND neutron spectrometer onboard LRO showed the highest hydrogen concentration at some regions of extremely low temperatures (~40K) should reach 470 ppm, that is corresponding to 0.42wt% of water ice if an appropriate amount of usable oxygen is given. We note that the amount of the highest hydrogen concentration detected at the lunar polar regions is the same order as that have been reported for the element found in minerals of some of lunar samples.

**Keywords:** Moon, Exploration, Water, Ice, Hydrogen, Shackleton crater.

### 概要

将来の有人月面活動を目指した探査の重要課題の一つとして、「月の極の水氷」の存否、その量の調査が挙げられる。月の極に水氷が期待されるのは、月に対して、いくつかの水の供給源が存在する可能性があり、月面に供給された水が、濃集し、かつまたは安定的に存在できる可能性が、極低温域となる永久陰にあるからである。しかし、隕石や彗星の落下衝突した際の衝撃加熱で失われることもあるだろう。更に、現在の永久陰は過去においては永久陰でなかった可能性が指摘されており、地質学的に長期間永久陰となっていて水氷を集積できる場所は無いとも言われる。実際、これまでの探査機による観測では、水氷発見を報告するものがあるが、月の極の水氷の存在について決定的証拠を出したといえるものがない。データや解釈を整理してみると、数%もの「水氷」の存在というデータの解釈には多くの難点があるともいえる。一方で、太陽風起源の水素が月極域に打ち込まれ留まっている可能性もある。最新の中性子分光計による計測結果だと、最も濃集しているところ（40K以下の永久陰など）で470ppm程度と報告されているが、この水素濃集見積もりは（水の形を取るにしても）妥当なところではないかと思われる。月は、人類が宇宙へと活動の場を拓げていくときの橋頭堡であり、その探査は重要不可欠である。だからこそ、今後、有人月面活動を目指した探査について議論、企画していくうえで、最新の科学的知見を十分に加味、考慮した上で進めていくことが必要である。

doi: 10.20637/JAXA-RR-18-001/0001

\* 平成30年4月17日受付 (Received April 17, 2018)

<sup>\*1</sup> 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>\*2</sup> 茨城大学 / 理学部 (Ibaraki University/ College of Science)

<sup>\*3</sup> 東北大学 / 学際科学フロンティア研究所 (Tohoku University/ Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences)

<sup>\*4</sup> 早稲田大学 / 理工学術院総合研究所 (Waseda University/ Waseda Research Institute for Science and Engineering)

<sup>\*5</sup> 会津大学 / 先端情報科学研究センター (University of Aizu/ Research Center for Advanced Information Science and Technology)

## 1. はじめに

1960年代には月に降り立った人類だが、1972年のアポロ17号以後、人は月を訪れず、また1976年、無人のルナ24号による月着陸以後、月探査はしばらく途絶えた。月探査の復活は1990年代まで待たねばならなかった。

しかし、今世紀に入って月探査は一気に進んできた。この動きは、各国が、ポスト国際宇宙ステーションとして今後の国際的な有人活動、宇宙における居住に向けた取り組みは、月が対象になってくる、と意識していることの現れであろう。今後、月の探査は、詳細な科学観測データの積み重ねを踏まえ、将来の有人月面居住を目指したものになっていくに違いない。

今後の将来の有人月面居住を目指した探査の重要課題の一つとして「月の極の水氷」が、取り沙汰されて久しい。「月の極の水氷」の存在に関する科学的な議論は、古くは、1960年代にまで遡る(Watson et al. 1961a, b)。そして現在、日本を含む多くの国で、月面における水を重要資源とみなし、更には一部「国家権益の保護のため」とも断じて、月面での水の発見調査を最優先課題として月探査を設定する動きがみられる。

確かに、水が、月面で採取され、燃料、飲料水などに用いられれば、人の月面での居住、そして、更にはその先の探査に大変有用であるかもしれない。しかし一方で、水というトピックに飛びつき、注意深い考察も無しに探査を押し進めることは注意しなければならない。水というトピックは、直感的に分かりやすいために、月や水についての知見を具体的に知らずとも、多少は語れる。様々な仮定の上で議論されるべき月の極の水氷の存在を、仮定を無意識に、あるいは意図的に触れずに語り、最後は「あるかどうかかわからないから探査する」と思考を停止し、議論を尽くさない、というのは、少なくとも科学の点では、されるべきではないであろう。

そこで本稿では、月の水(氷)について、最近の科学的知見を概観し、今後の月有人居住を見据えての探査検討へ資するものとした。

## 2. どうして月の極に水氷が期待されるのか

### 2-1 月の極に水氷が期待される理由

月の極に水氷が期待されるのは、大きく分けて、次の二点からであろう：

- ①月に対して、いくつかの水の供給源が存在する可能性があること。
- ②月面に供給された水が、濃集し、かつまたは安定的に存在できる可能性が(極域に)あること。

月面への水の供給過程は様々あると考えられる。たとえば、Arnold(1979)がまとめているように、少なくとも4つはある：

- ①水を含む隕石による持ち込み供給
- ②彗星による持ち込み供給
- ③月の砂(レゴリス)中への打ち込まれた太陽風陽子の酸化鉄の還元による生成供給
- ④内部からの脱ガスによる供給。

また、上記いずれかによって供給された水は、月の極へと移動(migrate)し、濃集するのではないかと古くから言われていた(たとえば Watson et al. (1961a) や Arnold (1975))。というのも、月の極域には、夜側温度120Kを下回る低温となる「永久陰」が存在しているからである。日中最高温度は400Kであるので水分子が得られる熱速度は最高でも0.6km/s程度であり、月面からの脱出速度2.4km/sには至らない。したがって、極域永久陰で無くとも、水分子が、(高温の日中においてさえ)月面に供給、もしくは生成された場合、それら水分子は、月面上を弾道飛行的に移動し、最終的には、超低温の、より水分子が保持されやすい極域永久陰内にて定着する、すなわち、水分子が濃集する。

以下ではまず、月面への水の供給過程について概観する。

### 1) 隕石、彗星による月面への水供給

隕石の月面への落下供給は多い。月全面は、大小様々なクレータで覆われる。特に極のような、後発性の溶岩が埋めていないような古くから残る高地では、数百m程度以下のクレータはほぼ被覆しつくしていることがクレータのサイズ頻度分布を描くと容易に分かる。このことから、隕石や彗星落下量そのものについては、非常に多いものと期待され、彗星はともかく、隕石などに含まれる水の量が仮に1%としても、月面への隕石供給にともなう水の供給総量は、相当な量に上ると考えられる。

### 2) 月面での太陽風水素イオン起源の水生成

太陽風の主成分は、水素イオン(陽子)であり、そのフラックスは、現在、地球近傍で、 $4 \times 10^8$ 個/cm<sup>2</sup>/sである。磁場や大気を持たない月では、その表面の砂(レゴリス)にこの太陽風水素イオンが直接打ち込まれる(implantation)。打ち込まれた太陽風水素イオンの多くは、レゴリスを構成するケイ酸塩内の鉄を還元し、酸素と結びつき水酸基となって捕獲される(「宇宙風化」)。この水酸基が、更にもう一つの別の太陽風水素イオンと結合すると水分子となるのではないかと考えられている。なお、太陽風水素イオンがレゴリス粒子中の利用可能なすべて

の遊離酸素と結合すると、水酸基または水分子の形成は停止する(「飽和状態」)。

ところで、月の極の永久陰、すなわち太陽直達光が届かない場所でも、太陽水素イオンの打ち込みは生じる。というのも、太陽からの光子とは異なり、太陽風水素イオンは、宇宙空間磁場の磁力線に即し旋回運動をおこなっているからである。もちろん、平均的には、極域に近づけば、太陽風フラックスは、低中緯度に比べ減少する。しかし、その減少率を考慮しても、極表面には、太陽風水素イオンの飽和が生じるといわれる(Starukhina and Shkuratov 2009; Starukhina 2006, 2012)。レゴリスが太陽風水素イオンの打ち込みに関して飽和状態に達する時、捕獲される水素の量は1000ppm程度、1wt%の水相当の量である。しかし、水素イオンの打ち込みが飽和に達するかどうかは多分に議論の余地を残している。

### 3) 内部起源の水

月の内部起源の水については、いまだ議論があるが、Saal et al. (2008) は、745ppmの水相当のOH含有を、アポロ試料の中に発見している。

以上のように、水分子を月にもたらす過程は様々ある。また、冒頭述べたように、月面の至るところで供給された水(分子)は、極へ移動し、極の永久陰に直接、間接に集積し得るということから、多少の散逸があっても、極域の永久陰域には水分子が、場合によっては数10wt%残存しているかもしれないとする主張(たとえば、Eke et al. 2009)が受け入れられてきているようにみえる。

しかし、極への水濃集については、次に述べるように多くの問題がある。

#### 2-2 月での水形成、極への水濃集の問題

前項では水が供給・或いは形成される過程を概観したが、これらが残存し、また、月の極に濃集したと考えるには、次のような多くの疑問(たとえば、Watson et al. 1961 a, b, Arnold 1979, Starukhina 2012)があり、それらに答えなければならない:

①隕石や彗星の落下衝突した際の衝撃加熱で、衝突天体の水分子は、電離・分解してしまい、水としては殆ど月面には残存できないのではないかと? 例えば、より始源性が高く水含有割合も多い長周期彗星の場合、衝突速度は、平均で約50km/s、速いもので70km/sにも及ぶ。衝撃実験による高圧・高温条件でも構造水は一部残る可能性が先行研究により示唆されているが(例えば、Lange and Ahrens 1982)、実際の衝突現象では圧力の不均一性や上記の様々な要因による温度の増加が見込まれ、圧力・温度の保持時間も長いことから構造水が完全に消失してしまう可

能性もある。

②隕石や彗星の落下衝突した際の衝撃加熱は、衝突天体だけでなく、月面に衝突以前に堆積していた水成分をも、電離・分解し、水損失に寄与してしまうほうが多いのではないかと?

③太陽風水素イオンが月面に打ち込まれたとしても、捕獲は水酸基形成するものであり、その後に水素イオンが更に打ち込まれてきた時に、水酸基に結合して水分子となるのは多くはないのではないかと?

④Butler (1997)が理論的考察に取り入れたように、月面で得る熱速度は、水分子の量が多いため統計的に扱わなければならない、脱出速度を持つ水分子も、多かれ少なかれ生じ、極域へと到達する水分子の総量は減少する。

⑤仮に極域永久陰に水氷が集積し得たとしても、過去においては地球との距離の近さから自転軸が安定せず、現在の永久陰は過去においては永久陰ではなかった可能性も指摘されている(Arnold 1975)。そもそも地質学的に長期間永久陰となっていて水氷を集積できる場所は殆ど無いのではないかと?

すなわち、水分子の極域への十分な量の移動と堆積を期待するには、例えば、水成分を含む隕石、彗星が高速衝突後の大きな水分子残存率、水分子の低い光乖離率、水分子のレゴリス上での長い吸着滞在時間、といった、少々直感とは反するような状況を、根拠ある実験データでもって主張しなければならない。加えて、移動の際に異端的に脱出速度を超えた熱速度を持つことになる水分子の存在、永久陰としての存続時間、なども十分な考慮しなければならない。こうした水氷の移動・極への堆積にとってネガティブな要素を「データがないから」といった理由で議論から落とし、極への水氷の堆積の期待のみを述べるような主張には十分注意しなければならない。

### 3. 月南極シャックルトンクレータの水氷

1960年代、70年代の月探査、特にアポロ計画では、月の極の水氷に対する知見は、得られていない。なぜならば、アポロ計画では、赤道軌道が周回船においても採用され、極域データは収集されなかったからである。

アポロ計画から20年以上の時を経て、1994年、米国の打ち上げたクレメンタインと、1998年、やはり米国の打ち上げたルナー・プロスペクタは、いずれも月極軌道周回衛星であった。この二機の探査から得られた様々な知見のうち、月の極の水氷の存在に関わるものとして、次の三つが特筆される:

- ①クレメンタイン衛星による、月南極域が夏の時の二ヶ月の連続観測により、画像情報の重ね合わせにより、月南極の永久陰部分が同定された(Shoemaker et al. 1994)
- ②クレメンタイン衛星による、月南極点近傍に位置し永久陰を有するシャクルトンクレータ(直径約20km)へのレーダ照射実験で、反射波の地球での受信データに水氷の存在を示唆する結果を得た(Nozette et al. 1996)
- ③ルナー・プロスペクタ衛星搭載中性子分光計(NS)の観測により、月の両極域に水素濃集がみられることが確認された(Feldman et al. 1998)。

クレメンタイン衛星による月極の永久陰同定は、1)南極域だけだったこと、2)画像情報によるもので高度情報からレイ・トレーシングを行ってより確実に得るものとは違う、といったことはあるものの、月極に永久陰の存在を確認したことは意義が大きい。

一方、Nozette et al. (1996)の、クレメンタインの電波照射実験によるシャクルトンクレータ内の水氷同定については、その後、否定的な報告が相次いでいる。Nozette et al. (1996)の報告直後、Simpson and Tyler (1999)は、クレメンタイン衛星実験データの再解析では確認されなかったことを報告している。更にStacy et al. (1996)や、Campbell et al. (2006)によるアレシボ地上アンテナを使った同種の実験でも、クレメンタイン実験によって、水氷の存在が示唆されたシャクルトンクレータ内の永久陰部分(の中の地球からは可視部分)には、水氷の堆積があるとは言えないとの結論が出された。クレメンタイン実験で水氷の存在によるとされた類似の反射は、ケイ酸塩鉱物が極度に冷却している場合や、電波波長程度の表面のラフネス(凸凹具合)によっても生じる(例えば、Campbell et al. 2006, Starukhina 2012, Fa and Cai, 2013)。また、Campbell et al. (2006)の実験では、地球から見えるシャクルトンクレータの一部の永久陰にさえ、クレメンタイン実験で水氷の存在によるとされた類似の反射を観測しており、シャクルトンクレータの永久陰に水氷があるとする結論に対する重要な否定的根拠となる結果を提示している。

2007年に打ち上げられたSELENE(かぐや)に搭載された「地形カメラ」によるデータで、Haruyama et al. (2008)は、シャクルトンクレータの(太陽一次光については)永久陰となっている底が、クレータ上部からの二次反射光で照らされているのを観測するのに成功し、

- ①同クレータの底は100K程度と、 $10^9$ 年オーダで水氷を保持するのに可能なほど低温である

しかし、一方で、

- ②同クレータの底には、スケートリンクを張ったような平ら状な地形はみられない
- ③同クレータの底の反射率は、クレータ縁周りの地質のそれと同程度である
- といった結果を得、永久陰となっているクレータ内では宇宙風化の影響がより少ないことを鑑みると、周りの反射率と同程度の反射率、ということは、水氷の露出はあっても数%か、多分にほぼ無いとの結論を下した(Haruyama et al. 2008)。

その後、Zuber et al. (2012)は、LRO搭載のLOLAが、能動的に1000nm付近のレーザを発射する高度計であることを利用し、シャクルトンクレータ内の反射率は高いと報告した。そして、その高い反射率をもたらすものは、水氷の露出によるものかもしれないと述べた。しかし、その高い反射率は、SELENE搭載地形カメラの可視域で得た反射率の傾向、すなわち可視域の反射率の約2割ほど高くなること(Ohtake et al. 2010)と調和的であり、特段に高い反射率がみつかったという主張には、注意を要する。実際、Yamamoto et al. (2012)や、Haruyama et al. (2013)は、シャクルトンクレータの壁上部、日照域となったところについて、高い反射率を持つpurest anorthosite (PAN)を同定している。これらの結果は、Haruyama et al. (2008)のシャクルトン内部が周りと同程度の反射率であるということ、あらためて支持するものといえる。従って、LOLAによる測定結果は、水氷の存在に一意的に結びつくものではない。

北極点近傍に存在する、底が永久陰となっている二つのクレータの地形カメラデータ解析からも、底の温度や反射率が推定される。結果は、シャクルトンクレータと同じく、あるいはむしろ、反射率は低く、やはり水氷の露出を積極的に主張するものではないことが初期的な解析で分かっている(Haruyama et al. 2009)。

永久陰内の水氷の調査は、LRO搭載の超極端紫外線観測機器(LAMP)の反射率観測によっても行われ、シャクルトンクレータ内では2%の水氷の存在可能性が報告されている(Gladstone et al. 2012)。ただし、この報告では、誤差評価が明確でないように見える。精度についての検討を更に進めなければ、その妥当性については、すぐには受け入れるべきものではないであろう。

そして、シャクルトンクレータ内に水氷が数%も露出していない、というのは、ルナー・プロスペクタ搭載中性子分光計(NS)の後継となったLRO搭載中性子分光計(LEND)の観測から、確定的になったといえる。Mitrofanov et al. (2010, 2012)によって、シャクルトンクレータ内の水の存在を示唆

するような中性子観測量の減衰は無かったと報告されたのである。

以上のように、月南極点に位置し、最も水氷の露出が期待されていたシャックルトンクレータの永久陰となっている底には、数%以上にも及ぶ水氷の存在は確かめられてはいないといえる。むしろ、否定的な結果が多い、というのが現状である。

#### 4. シャックルトンクレータ以外の月極水氷の観測

シャックルトンクレータ以外において、月の極域での水の存在を示唆する観測は、これまでどうであっただろうか？以下に、Mini-SAR による観測結果、LCROSS による衝突実験結果、中性子分光計による観測結果を概観する。

##### 4-1 Mini-SAR による観測結果

今世紀になって行われた探査によって取得したデータの解釈により、月の極域での水氷の存在についての報告主張が、いくつかなされてきている。その代表が、チャンドラヤーンと LRO に搭載された Mini-SAR と呼ばれる電波放射計による観測結果に基づくものである(たとえば、Spudis et al. 2010)。

この Mini-SAR データに基づく報告主張の内容は、すでに述べたレーダデータの解釈としての曖昧性を多分に含んだものであり、水氷の存在を必ずしも支持しないものである(Fa and Cai 2013)。Spudis et al. (2010)は、極域クレータには、高いレーダ反射率を示すものが有り、それらクレータ群は、周りにも高い反射率を示すものと、周りには高い反射率を示さないものがあるとした。前者は、形成年代が比較的若くクレータ内は凹凸があり、レーダの高反射につながっているが、後者のクレータは古く(したがって、凹凸による高いレーダ反射の可能性が低く)、水氷の存在による高い反射率に他ならないとの主張である。しかし、同様の様相をみせるクレータが、(水氷など期待すべくもない)月赤道にも見られることが学会(2011年のLPSC)で指摘されるなど、Mini-SAR データからの水氷存在の主張には疑問を抱く専門家も多いようである。

##### 4-2 LCROSS による衝突実験結果

もう一つの水氷の存在の主張を強く裏付けるとされるのが、LCROSS による南緯 81.5 度に存在するカベウスクレータへの衝突の際、水が観測されたという報告である。Colaprete et al. (2010)は、LCROSS 衝突の際に生じた Plume (噴出雲)について、シェパード(追尾)機により波長域 1.3~2.3  $\mu\text{m}$  の分光観測することに成功したと報告した。そして彼ら

は、観測データから、衝突の際に飛散した中に水の舞い上がりが生じ、更にその後、衝突点地面が暖められたことによって、再び水氷が生じたということを示し、 $5.6 \pm 2.9\%$  の水の存在を主張した。しかし、この主張を受け入れるには以下の難点がある：①まずは、論文掲載図からではあるが、生データに非常にノイズが載っているようにみえることである。このデータをもって、果たして有意義な観測スペクトルのデコンボリューション結果を得たといえるのであろうか？

②そして、そもそもデコンボリューションは、どのようなエンドメンバーを仮定するかによって、容易に結果が変わりうる。そうした試行の過程が論文からは見て取れない。特に、今回の測定波長域では、水の他にも多くの分子種による吸収も期待される場所であり、エンドメンバーの過程などには、注意を特にしなければならない。

③加えて、LCROSS 衝突に際して、地上からの観測のいずれからでも、水の飛散どころかレゴリス成分の plume さえ報告されていない(Heldman et al. 2010, Hong et al. 2011)。唯一、Stricker et al. (2013)は、Apache Point Observatory での可視(Vバンド)での LCROSS 衝突時観測データに、レゴリス成分の Plume が見いだされたとの報告を行っている。彼らは、観測データを詳細に解析し、LCROSS 衝突で舞い上がったレゴリス量は、Colaprete et al. (2010)が見積もった量より少ないと結論づけた。結果、Colaprete et al. (2010)での水飛散量を  $6.5 \pm 1.6\%$  と報告した。しかし、これは、そもそも、Colaprete et al. (2010)がシェパード衛星による 1.3~2.3  $\mu\text{m}$  分光観測データのデコンボリューション解析から見積もったものをそのまま使っていることに注意しなければならない。

カベウスクレータ内の水氷存在については、LCROSS 実験の分光データの更なる検証が必要であろう。

##### 4-3 中性子分光計による観測結果

ルナー・プロスペクタは、中性子分光計による観測で、月の極に水素の濃集を確認した(Feldman et al. 1998, Lawrence et al. 2006 など)。それらは、クレメンタインによる永久陰確認と、レーダでのシャックルトンクレータ内の水氷存在示唆と相まって、水が存在している証拠に他ならないとする主張する向きが少なくない。しかし、これまで述べたように、シャックルトンクレータ内の水氷の存在は、極めて根拠が薄弱である。水素濃集を水氷の存在と短絡的に結びつけることは、十分に気をつけなければならない。

ルナー・プロスペクタの中性子分光計の後継機と

なった LRO 搭載 LEND データは、解像度を格段に上げ、月極域の水素濃集に関わるデータを提供してきている。そのデータの解析結果によれば、月極の水素濃集度は、最も高いところでは、470ppm (0.047 質量%) に及ぶ、としている (Mitrofanov et al. 2010, 2012)。これらの量は、月のレゴリス粒子殻への太陽風プロトンの衝突打ち込み (implantation) によって、レゴリス内酸化鉄の還元を起こしつつ、水素が捕獲されるということに調和的な量である (Starukhina 2012)。一方で、中性子分光計の観測による水素イオンの濃集分布は、必ずしも、極の永久陰の分布とは相関がない (Feldman et al. 1998, Lawrence et al. 2006, Mitrofanov et al. 2012)。これらのことから、LEND によって月極域に観測された水素濃集は、多分に (水では無く) 太陽風起源の月面に打ち込まれた「水素」そのものであり、しかも、その濃集量は「最大でも」470ppm、仮に水換算できるとしても 0.42% 程度というのが実際のところではないかと思われる。(ある深さに、極度に濃集すると仮定すれば、異なる値は出るが、それは、将来の利用という点からの濃集量推定では、本質的なことではないであろう。)

## 5. 最後に

現在、月探査が有人探査をみすえ、世界的に活発化しており、月の水への期待は、再度高まっている。しかし、これまで見てきたように、月の極の水氷の存在・濃集は、確証的なものは無く、しかも「いろいろな解釈、考えがある」と言うどころではなく、むしろ、殆どが数%もの水の存在にさえ懐疑的にならざるを得ないものである。一方で、打ち込まれた太陽風起源の水素の存在は可能性が高いと思われる。しかし、その水素の濃集量は、前節の最後に述べたように、LEND データの解析結果を信じるならば、最も濃集しているところで、470ppm、仮に、酸化を行えるような遊離酸素が存在、あるいは持ち込めたとして、水換算では 0.42% にも満たないというところである。

それでも、水素は、燃料や、水を生成するのに役立つということで、その調査を主張するのはあるかもしれない。しかし、その主張をするには、同時に、水素が最高値に濃集していると考えられる場所 (最も低温に近いところであろうから、およそ 20K 領域) に、アプローチし、大量の地面を掘り返し、そこから、(どのように供給するかは別として) 持ち込んだ遊離酸素と効率よく反応させる手段も並行して検討していくことが必要となろう。

また、水素濃集場所を調べるには、着陸探査が最適かどうかにも注意深い検討が必要となる。仮に、着陸探査によって水素濃集を見いだしたとしても、そ

の集積がどのように広がっているかは、まったく推測が困難だろうと思われる。というのも、水素の濃集は、過去の隕石衝突、その飛散物の拡がり、更にはこれまでの自転軸の動きに伴う永久陰の分布などに大きく依存しているはずで、現時点において、それらを追うのは、殆ど不可能に思えるからである。むしろ、極域を遠隔探査で、これまで以上に精度良く水素濃集を観測出来るような探査機のほうが、水素濃集調査においては、実効的であるかもしれない。

ところで、近年分析技術が向上したこともあり、アポロサンプルにも水に由来する水素が同定され始めた。最初の発見は Saal et al. (2008) によるもので、アポロ試料の火山ガラスから 4-46 ppm の OH 含有量を見出し、脱ガスの影響が無ければ 745 ppm 程度存在したのではないかと結論付けている。その後も、水素は試料中に見つかりはじめ、Boyce et al. (2010) では、2400ppm 水相当の水酸基、Greenwood et al. (2011) では、6000ppm 水相当にも達する水素が見いだされている。これらは、アパタイトなどの特有の鉱物岩片に含まれているものであり、また重水素を含むことから、太陽風起源ではない。すなわち、月のマグマオーシャン時代に取り込まれた可能性が高く、月の進化を解明するのに重要なものである。アパタイトそのものが全岩に占める割合は非常に小さいので、資源という意味では論外かもしれないが、アパタイトなどに見られる水 (正確には水素) は、月の起源と進化の解明の観点からは、月の極のそれとは全く異なる科学的に重要な意味を持つものである。そこを混同して、極の水の科学的重要性を論じてはならない。

戻って、月の極にあるのは、水ではなく、水素と考えることもできる。ただし、水素が濃集しているとしても、40K 或いは更に低く 20K などという超低温のところである。それを資源として利用するとき、果たしてどれだけのコストパフォーマンスがあるのかは、濃集量の過度の「期待値」ではなく、科学的に妥当と思われる形態や存在量で議論されるべきであり、そうした値を出すことに科学の重要性、科学者の存在意義がある。月は、人類が宇宙へと活動の場を拡げていくときの橋頭堡であり、その探査が重要不可欠であることは言を俟たない。だからこそ、月での居住を見据えての月探査ではどこをどう目指すべきかは、最新の科学的知見を正しく取り入れつつ、今後、客観的に専門的にトレードオフを行っていくことが望まれよう。

## 参考文献

- Anorold, J. R., "Ice in the Lunar Polar Regions", *J. Geophys. Res.* 84 (B10), 5659- 5668 (1979).
- Butler, B. J., "The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon", *J. Geophys. Res.* 102, 19283- 19291 (1997).
- Boyce J. W. et al. "Lunar apatite with terrestrial volatile abundances", *Nature* 466, 466- 469, (2010).
- Campbell, D.B. et al., "No Evidence for Thick Deposits of Ice at the Lunar South Pole", *Nature* 443, 835-837, (2006).
- Colaprete, A. et al., "Detection of water in the LCROSS ejecta plume", *Science* 330, 463- 468 (2010).
- Eke, V.R. et al. "The spatial distribution of polar hydrogen deposits on the Moon", *Icarus* 200, 12- 18, (2009).
- Fa, W. and Cai, Y., "Circular polarization ratio characteristics of impact craters from Mini-RF observations and implications for ice detection at the polar regions of the Moon", *J. Geophys. Res.* 118, 1582- 1608, doi:10.1002/jgre.20110, (2013).
- Feldman, W.C. et al.. "Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles", *Science* 281, 1496- 1500, (1998).
- Gladstone, G.R. et al., "Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions", *J. Geophys. Res.* 111, E00H04, doi: 10.1029/2011JE003913, (2012).
- Haruyama, J. et al., "Lack of Exposed Ice Inside Lunar South Pole Shackleton Crater", *Science* 322, 938-939, (2008).
- Haruyama, J. et al., "SELENE (Kaguya) Terrain Camera Observation Results of Nominal Mission Period", *40<sup>th</sup> LPSC*, abst#1553, (2009).
- Haruyama, J. et al., "An Explanation of Bright Areas inside Shackleton Crater at Lunar South Pole other than Water-Ice Deposits", *Geophys. Res. Lett.* 40, 1- 5, doi:10.1002/grl.50753, (2013).
- Heldman, J.L., et al., "LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) Observation Campaign: Strategies, Implementation, and Lessons Learned", *Space Sci Rev.*, DOI 10.1007/s11214-011 -9759-y, (2010).
- Hong, P.K. et al., "A ground-based observation of the LCROSS impact events using the Subaru Telescope", *Icarus* 214 (1), 21-29, (2011).
- Lange M. A. and Ahrens T. J., "The Evolution of an Impact-Generated Atmosphere", *Icarus* 51, 96-120, (1982).
- Lawrence, D.J. et al. "Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles", *J. Geophys. Res.* 111, E08001, (2006).
- Mitrofanov I. et al., "Neutron mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND", *Science* 330, 483- 486 (2010).
- Mitrofanov I. et al., "Testing Polar Spots of Water-rich Permafrost on the Moon: LEND Observations Onboard LRO", *J. Geophys. Res.* 117, E00H27, doi:10.1029/2011JE003956, (2012).
- Nozette, S. et al. "The Clementine bistatic radar experiment", *Science* 274, 1495- 1498 (1996).
- Ohtake, M. et al., "Deriving the Absolute Reflectance of Lunar Surface Using SELENE (Kaguya) Multiband Imager Data", *Space Sci Rev.* 154, Issue 1-4, 57-77, (2010).
- Saal, A.E. et al., "Volatile Content of Lunar Volcanic Glasses and the Presence of Water in the Moon's Interior", *Nature* 454, 192-195, (2008).
- Shoemaker, E.M. et al. "The South Pole Region of the Moon as Seen by Clementine", *Science* 266, 1851-1854, (1994).
- Simpson, R.A. and Tyler, G.L.. "Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole", *J. Geophys. Res.* 104, 3845- 3862, (1999).
- Spudis, P. D. et al., "Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission, *Geophys. Res. Lett.* 37, L06204, doi:10.1029/2009 GL042259, (2010).
- Stacy, N. J. S. et al., "Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits", *Science* 276, 1527- 1530, (1997).
- Starukhina, L.V. and Y.G. Shkuratov, "The Lunar Poles: Water Ice or Chemically Trapped Hydrogen?", *Icarus* 147, 585-587, (2000).
- Starukhina, L.V., "Polar Regions of the Moon as a Potential Repository of Solar-wind-implanted Gases", *Advances in Space Research* 37, 50-58, (2006).
- Starukhina, L., "Water on the Moon: What Is Derived from the Observation?", in: Badescu, V. (Eds.), *Moon - Prospective Energy and Material Resources*, Springer, pp. 57-85,



(2012).

Strycker, P. D. et al. “Characterization of the LCROSS impact plume from a ground-based imaging detection”, *Nat. Commun* 4, 2620, doi:10.1038/ncomms3620, (2013).

Watson, K. et al., “On the Possible Presence of Ice on the Moon”, *J. Geophys. Res.* 66 (5), 1598-1600 (1961a).

Watson, K. et al., “The Behavior of Volatiles on the Lunar Surface”, *J. Geophys. Res.* 66 (9), 3033-3045 (1961b).

Yamamoto, S. et al., “Massive Layer of Pure anorthosites on the Moon”, *Geophys. Res. Lett.* 39, L13201, doi:10.1029/2012GL052098, (2012).

#### 謝辞：

長谷部信行博士，三宅洋平博士には，本論文をレビューいただき，多数の建設的，有用なコメントをいただきました。感謝いたします。

なお，本論文は，2017年宇宙環境利用シンポジウムにおける発表（「月の居住に向けて」：春山純一著・発表）について，本論文著者らとともに加筆・修正を行い，更に論文レビューを受けたものである。

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-18-001  
JAXA Research and Development Report

月の極の水氷(レビュー)  
A Review of Water Ice on the Polar Regions of the Moon

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>  
発行日 平成30年6月20日  
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

