

## 特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」

# 近赤外分光観測から得られた月の水の証拠

仲内 悠祐<sup>1</sup>

2018年12月21日受領，査読を経て2019年1月23日受理。

(要旨) 近年の月探査や Apollo サンプル・月隕石の分析から，月面に水が存在することが強く示唆された。この発見は惑星科学の分野にとどまらず，月での有人活動などを目指す工学の分野からも注目を集めている。中性子分光計の観測では，以前から月における水素原子の濃集が議論されていた。一方，水の存在を議論できる近赤外分光計による観測結果は無く，中性子分光計で観測された水素原子が，水素原子として存在しているのか，水として存在しているのかなどについてわかっていなかった。本項では，近年の月の水の発見について，近赤外分光計観測の原理を説明し，観測結果をレビューする。

## 1. 背景

長年，月には水が存在せずドライな環境であると考えられて来た。しかし，近年の月探査データや過去の探査データの再解析により，月面における水の存在が現実味を帯びて来た。インドの月探査機 Chandrayaan-1 (2008年打ち上げ) に搭載された The Moon Mineralogy Mapper (M<sup>3</sup>) の観測により，月表面反射スペクトルの 3 μm 付近に吸収が観測された [1]。観測データにおける 3 μm 付近の吸収の存在は構造水や分子水の存在を示唆している。この報告を受け，Deep Impact や Cassini の月面観測データの再解析が行われた [2, 3]。これらの再解析においても，月表層において構造水や分子水の存在を示す 3 μm 付近の顕著な吸収が報告されている。また，LCROSS では月南極域の Cabeus クレーターにインパクターを衝突させそのエジェクタの太陽光反射スペクトルを観測した。観測データからは，大量の水氷が月極域の永久影に存在しているとする観測結果が得られた [4]。

発見された構造水や分子水の起源として考えられる要因は大きく 4 つある。①水に富む小惑星や ②彗星

の衝突による分子水や含水鉱物の供給，③太陽風水素イオンと月面主要鉱物の相互作用による構造水や分子水の生成，④火成活動等により噴出した月内因性の構造水や分子水である。本稿では，水の存在やその状態 (鉱物中の構造水，霜，氷塊など) が直接推定可能な赤外反射スペクトルの観測に注目し，赤外反射スペクトルの観測原理を説明した上で，観測結果が支持する水の生成要因について近年の研究成果を紹介する。ただし，上記①と②についてはリモートセンシングデータでは正確に分離できないため，まとめて説明する。

## 2. 赤外反射スペクトルの観測

赤外分光法では，試料を透過または反射した光を分光し各波長における強度を計測することで，測定試料やその構成物質の構造解析や定量を行うことが可能である。分光測定試料中の電子や分子は，それらの状態により固有のエネルギー状態をとる。特に，赤外波長領域の光のエネルギーは分子の振動や回転等の状態を変化させるのに必要なエネルギーと同等であるため，内包する分子種により特定の波長の光を吸収する。反射スペクトルを測定しスペクトルに見られる吸収の中心波長や形状などを調べることで，試料中に含まれる

1. 宇宙航空研究開発機構  
nakauchi@planeta.sci.isas.jaxa.jp

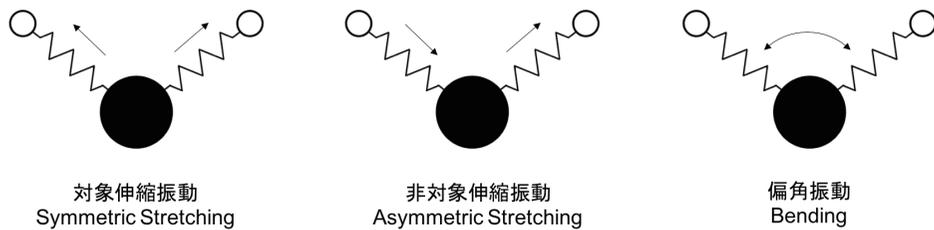


図1：水の振動パターン例。振動パターンに対応したエネルギーが吸収される。水の場合、水素結合の有無によっても吸収するエネルギーは異なる。

表1：赤外線領域における水に関連する主な吸収波長[33].

吸収を示す波長	対応する構造
2.2 $\mu\text{m}$	OHの伸縮振動, Si-OHの偏角振動
2.3 $\mu\text{m}$	metal-OHやOHの伸縮振動
2.5 $\mu\text{m}$	H <sub>2</sub> Oの対象伸縮振動および偏角振動
2.72 $\mu\text{m}$	OHの伸縮振動
2.77 $\mu\text{m}$	H <sub>2</sub> OとOH基が水素結合を持った場合(-OH... <sup>H</sup> OH)の伸縮振動
2.85 $\mu\text{m}$	SiOHとOH基が水素結合を持った場合(-OH... <sup>H</sup> OSi)の伸縮振動
2.91 $\mu\text{m}$ ~ 2.95 $\mu\text{m}$	H <sub>2</sub> Oの対象・非対称伸縮振動
~ 3.1 $\mu\text{m}$	H <sub>2</sub> Oの偏角振動

物質を特定することが可能である。

本稿のメインピックとなる水には、構造水や層間水、霜などといった様々な状態が存在する。反射スペクトルでは、このような状態に対応した吸収が見られる。例えば霜の反射スペクトルは、近赤外領域(例えば、 $\sim 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ ,  $\sim 2 \mu\text{m}$ )に特徴的な吸収形状を示し、鉱物などに含まれる構造水や層間水であれば、少し異なった位置(例えば、 $\sim 1.4 \mu\text{m}$ ,  $\sim 1.9 \mu\text{m}$ ,  $\sim 2.3 \mu\text{m}$ )に吸収が現れる[5, 6]。これらの反射スペクトルに現れる吸収は、構造水や分子水の伸縮振動や変角振動などに起因し(図1)、それぞれの吸収の中心波長により状態の推定が可能である(表1)。

惑星探査において、赤外分光法は鉱物や物質の同定・定量に有用な手段の一つである。例えば探査機による月の赤外反射光観測の場合、月表層のレゴリス層で拡散反射された太陽光反射光を観測できる。この反射光を分光することで赤外スペクトルが得られる。この時、観測対象の空隙率などにも依存するが、本手法による観測深さは概ね数ミリメートルの深さである[7]。惑星表面は様々な鉱物・物質が含まれており、反射スペクトルデータの形状から構成物質を一意に決定するの

は困難である。そこで惑星探査データの解釈では、実験室で取得した隕石や地球鉱物の反射スペクトルデータと比較することで構成鉱物の推定が可能となる。

近年、月の赤外反射スペクトルに基づき推定された月の水の存在量が報告されている[e.g. 1]。しかし上記でも説明したように、赤外反射スペクトルが有する深さ情報は高々表層から数ミリメートルである。そのため、赤外反射スペクトルを用いた深さ方向の水分布の様相に関しては議論の余地があることを念頭に置きたい。

### 3. 月外来物質由来の水

彗星等の外来物質により、月面へ水や含水鉱物が供給された場合は、反射スペクトルの3  $\mu\text{m}$  付近に供給物質に由来する吸収が現れると考えられる。その場合に観測される吸収の形状は、衝突天体に含まれる含水鉱物の反射スペクトルの形状に類似したシャープな形となるはずである。しかし、M<sup>3</sup>などの月面観測データでは外来物質と考えられるシャープな形状を持つ吸収は見つかっていない。月における流星体の衝突速度

は約11～70 km/sであり、月面への衝突により小さな粒子は完全に蒸発し、層状珪酸塩などに含まれる構造水や分子水は結合を保持できないと考えられている[8].

一方で、彗星などの外来物質により揮発性物質が供給された可能性がLunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS)の実験により示された。LCROSSは月南極の永久影(Cabeusクレーター)にインパクトを打ち込み、その噴出物の太陽光散乱スペクトルを測定した[4]。近赤外分光計の視野内で捉えたとされる水と水氷の最大総量は $155 \pm 12$  kgであり、掘削量などから推定すると $5.6 \pm 2.9$  wt%の水氷が存在したことが示唆された。この近赤外波長領域での観測では、水以外の揮発性物質( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ など)も検出された。彼らは水やその他の揮発性成分の反射スペクトルを線形混合モデルで合成し、観測されたエジェクタの反射スペクトルを再現することで、成分の混合比を求め、さらにエジェクタ放出量の推定値を用いることで存在量を推定している。これらの物質は月外来物質による供給が考えられるが、推定された水以外の揮発性物質の存在量は彗星などの衝突によりもたらされるとされる量よりも大きく、起源を特定できるだけの情報は揃っていない。近年、月全球で水の存在が確認され、それらは月面の低緯度から高緯度にかけて存在量が増える傾向にあることが示されている(詳細についてはsection 4や[1]などを参照されたい)。この分布を生む要因として、太陽風により月全球で形成された水が低温領域へ移動する可能性などが議論されている(詳細については[9]などを参照されたい)。このような状況において、リモートセンシングデータが示す水が月外来物質により供給されたことを一意に示すことは非常に難しいのが現状である。一方、月試料の分析からは、外因性の水が月に存在したことを示す結果が得られている[11]。物質分析から得られる知見については[12]を参考にされたい。

## 4. 太陽風由来の水

### 4.1 探査機による観測

Pieters氏らは $\text{M}^3$ で得られた月面反射スペクトルに見られた $3 \mu\text{m}$ 付近の吸収に注目した。 $\text{M}^3$ の空間解像

度は高度100 kmにおいて140 m/pixelであり、観測波長は $0.406 \mu\text{m} \sim 2.991 \mu\text{m}$ である。報告された月全球に見られる構造水や分子水の主な生成要因は、太陽風水素イオンと月主要鉱物の相互作用による構造水や分子水の生成であると考えられている[e.g. 1]。月表面における $3 \mu\text{m}$ 付近の吸収の分布は、月極域付近の低温領域だけでなく、比較的高温になる中低緯度領域でも観測され、月面全体に分布している。一方、Lunar Prospector搭載中性子分光計(LPNS)で観測からは、水素は月極域に濃集していることが示唆されており[10]、近赤外分光計で観測された構造水や分子水の分布と一致しない。とりわけ、 $\text{M}^3$ による観測では、 $3 \mu\text{m}$ 付近の吸収強度が強かったGoldschmidtクレーター( $73.0^\circ\text{N}$ ,  $3.8^\circ\text{W}$ )は、LPNSの観測結果では水素濃度が低いことが示されている[1]。この差異は、観測手法による観測深度の違いにより説明される。可視・近赤外分光法による観測深度はレゴリス表層の数mm程度である。一方、中性子分光法による観測では深さ1 m程度の情報を収集している(詳細は[13]を参照されたい)。この違いから、 $\text{M}^3$ などにより月全球で観測された構造水や分子水はレゴリスの極表層のみに存在していることが示唆される。

月面における $3 \mu\text{m}$ 付近の吸収はSunshine氏らによっても示された。彼女らはEPOXI (Deep Impactの延長ミッション)に搭載されたHigh-Resolution Instrument-infrared spectrometer (HRI-IR)の2007-2009年の観測データを解析した。HRI-IRの空間解像度は約80-90 km/pixelであり、観測波長は $1.05 \mu\text{m} \sim 4.5 \mu\text{m}$ である。観測結果では月面低緯度帯における $3 \mu\text{m}$ 付近の吸収は、朝から昼にかけて吸収強度が減少し、昼から夕方にかけて吸収強度が増加する傾向が報告されている[2]。吸収強度の増減量は、最も吸収の強い時に対して40%程度である。この結果は、月面における構造水や分子水の損失および供給が月の半日という短いサイクルで起こっていることを意味し、太陽風水素イオンと月面鉱物の相互作用による構造水や分子水の供給を支持している。生成された構造水や分子水の結合は弱いことが予想され、日中の月面温度上昇に伴い遊離した後に月面を移動し最終的には永久陰などの低温領域に捕獲されると考えられている[14, 15]。

また、月面に存在する磁気異常領域(Swarl)の観測でも、太陽風水素イオンと月面鉱物の相互作用によ

る構造水の生成を支持している[16]. Swarlの内側では、自身の磁場により太陽風水素イオンが入り込みにくいと考えられており、太陽風水素イオンにより構造水や分子水が形成される場合、Swarl内部では生成量は少ないことが予想される。Kramer氏らは、M<sup>3</sup>の観測データを用いてSwarl内外の2.82 μmの吸収強度を比較し、Swarl内外で吸収強度が異なることを示した。さらに2.82 μmの吸収強度の大小はSwarlの形状とよく一致することがわかり、本結果も太陽風水素イオンによる構造水の生成を支持した結果となった。ただし、Kramer氏らの結果では、反射スペクトルの3 μm付近の吸収は2.82 μmを中心としたシャープな形状を示すことから、分子水は観測されていないと考えられている。

## 4.2 太陽風模擬イオン照射実験

1 AUにおける太陽風水素イオンは約1.1 keVのエネルギーを持つものが支配的である。この程度のエネルギーを持つ太陽風水素イオンが月面に照射されると、鉱物中の5-10 nm程度の深さに貫入し停止する。打ち込まれた水素イオンが月面鉱物に含まれる酸素(約45 wt%)と結合することで、構造水や分子水を形成すると考えられている[8, 17]。このコンセプトは太陽風が直接計測された頃、Zeller氏らによって提案されたものである[18]。

Pieters氏らの報告を受け、太陽風水素イオンと鉱物の相互作用による構造水や分子水生成の再現実験が行われた。Ichimura氏らは、太陽風水素イオンのエネルギーを模擬した水素・重水素イオンビームをApolloサンプル(A16: 62241, A17: 70051)に照射し、その反射スペクトルの変化を観察した[19]。水素・重水素イオンを照射前後のApolloサンプルの反射スペクトルを比較すると、水素イオン照射後には3 μm付近(重水素イオン照射後には4 μm付近)の吸収強度が増加していることが確認された。この実験で重要な点は、照射実験に重水素イオン(D<sup>+</sup>)を用いたことである。重水素は大気にはほとんど存在しないため、重水素の照射により形成された吸収(4 μm付近)は吸着水(H<sub>2</sub>O)由来の吸収(3 μm付近)と切り分けることが可能である。重水素イオンの照射による4 μm付近の吸収強度の増加は大気中の吸着水の影響ではないことが明らかであり、照射によりOD基やD<sub>2</sub>O(H<sup>+</sup>照射の場合)

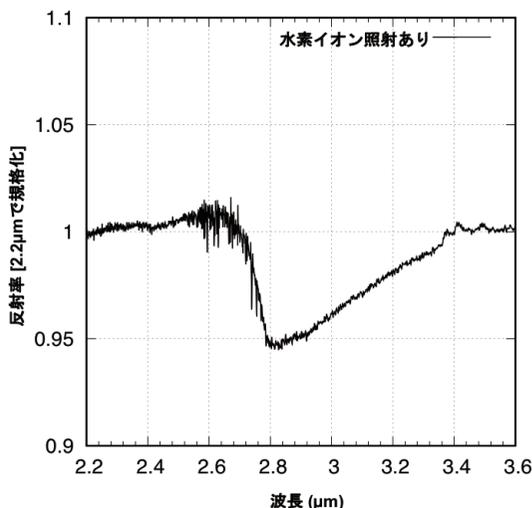


図2: Olivineに対する水素イオン照射実験前後の反射スペクトルの比較[21]。ペレット状にしたOlivine粉末試料について、水素イオン未照射の反射スペクトル vs 水素イオン照射後の反射スペクトルを示している。照射後の反射スペクトルでは、2.8 μmを吸収中心とした3 μm付近の吸収の増加が観察されている。

合はOH基やH<sub>2</sub>O)が生成されることが裏付けられた。Olivineに対する水素イオン照射実験はいくつか実施されており、概ね同等の反射スペクトルの変化が得られている(図2)。

Schaible氏らは、Olivine薄片試料に対する水素イオン(5 keV)を照射し、FTIRを用いて透過スペクトルを測定した[20]。この実験では、イオン照射から透過スペクトルの測定まで一貫して大気に晒されることなく実験が行われ、吸着水の影響を排除したデータが得られた。照射による透過スペクトルの吸収形状の変化から、構造水の生成が確認されたが分子水生成の直接的証拠は得られなかった。彼らは水素イオン照射量を変化させ、各照射量に応じた3 μmの吸収の強度変化を定量化し、各照射量に対する構造水の生成量を算出した。水素イオンの照射により生成された構造水は最大で $4.0 \times 10^{16}$  OH/cm<sup>2</sup>であり、太陽風照射年代換算で約10<sup>2</sup>年で飽和すると見積もられた。照射された水素イオンのトラップ効率は照射初期では約90%であるが、その効率は照射量増加とともに指数関数的に減少している。この結果は、太陽風照射により非常に短い期間で構造水が生成されることを意味する。太陽風を模擬したイオン照射実験は、概ねM<sup>3</sup>などの観測結

果を支持している。

## 5. 月内因性由来の水

月における水の存在は、Apolloサンプルなどの分析からも報告されている[22]。サンプル中の水のD/H比の分析から、それらはGiant Impact後に時間をあまり置かずに取り込まれたものであると考えられている[23]。このように取り込まれた水は、マグマオーシャンにおけるマグマ残留部分(KREEP)に含水鉱物を保持しなければならない。しかし月面表層におけるKREEPの分布領域は少なく、水に関する吸収が月全球で観測された事実を説明できないため、[1]や[2]などで報告された構造水や分子水は内因性由来とは考え難く、太陽風水素イオンと鉱物の相互作用で生成されたものであると考えられている[8]。

一方で高解像度のM<sup>3</sup>データを利用し、局所的領域で内因性の水の存在を示唆する観測結果が得られている。月赤道域のBullialdusクレーターの中央丘のピークとリムにおいて、水を発見したとする報告がなされた[24]。Klima氏らは、観測された2.8 μmを中心とする吸収は月内部で形成された構造水などを持つ火山性鉱物に由来すると主張している。月低緯度の比較的高温となる領域において構造水や分子水が太陽風起源で形成された場合、温度変化とともに吸収強度が減少することが示唆されている[2]。また、月が地球磁気圏に入っている時期には太陽風フラックスは減少するため構造水や分子水の生成量が減少すると考えられる。彼らの観測結果では温度変化と吸収強度の相関がなく、さらに地球磁気圏に入った際に水素イオンのフラックスに依存した吸収強度の減少が見られていないとし、観測された水の起源は月内因性由来であると結論づけている。しかし、彼らの示す中央丘の反射スペクトルは[2]で示されているような吸収強度の変化が見受けられ、吸収強度の温度変化や太陽風フラックスによる変化がないとは言い切ることはできないと考える。

Milliken氏らは、緯度±35°以内の火砕流堆積物の領域では他の領域に比べ水が濃集していることを示した[25]。彼らはM<sup>3</sup>で取得した月面反射スペクトルから2.85 μmでのeffective single particle absorption thick-ness(ESPAT)を算出した。ESPATは光路中で光が吸収される割合を意味し、水の存在量の指標とな

る。ESPATと分子水量(wt%)の線形関係[26]から観測領域の含水量を推定した。結果から、比較的広範囲に100 ppm未満の水が存在し、一部周囲よりも300-400 ppm程度高い水の濃集領域が存在することがわかった。広範囲に広がる水は、その領域の広さ、緯度依存性、試料分析の結果[27]から太陽風起源と推定された水の量(70 ppm程度)などの整合性に基づき、太陽風起源であると考えられている。濃集領域のパターンは、クレーターやその噴出物などの地形とは相関が見られないが、火山ガラスのような反射率が特に低い物質(Dark Mantle Deposit : DMD)などを含む火砕流堆積物の領域であるため、月内部から噴出したものであると主張している。全ての火砕流堆積物の領域で水の濃集が見られているわけではないが、観測された範囲ではLow-Ti領域とHigh-Ti領域の含水量を比較すると後者が高い含水量を示す。この結果は、High-Tiの月火山性ガラスのcooling rateが早い(脱ガスが少ない)という研究結果とも一致する[28, 29]。Milliken氏らの観測結果とモデルの計算と組み合わせると噴出前のマグマは260-795 ppmの水を含むことになり、月火山性ガラスの分析で得られた値(485-1,114 ppm)と近い値を示す。ただし本議論において(a)ESPATと分子水量(wt%)の線形関係は粒径に依存する、(b)観測期間により月面輝度が異なりESPATの絶対値が一致しない、この2点に注意すべきである。(a)について、ESPATから求められる含水量は、同じESPATの値に対して粒径が小さくなるにつれ高めに出ることがわかっている。彼らは、月面のレゴリスの粒径を60-80 μmで均一であると仮定しているが、DMDなどの火山性噴出物の平均粒径はApolloサンプルから40 μm程度と考えられ、観測結果に見られている含水量の程度の差異は粒径の違いが反映されている可能性がある。彼らは粒径の違いを考慮しても火山性噴出物に見られる水の濃集は存在するとしている。ただし、上記のような粒径の差異が存在する場合、ESPATから求められる含水量には2-3倍程度の差が出てくるため、粒径の差によっては、彼らの言う観測領域の違いによる水の濃集度に大きな差が出ない可能性があることは留意されたい。(b)について、彼らの結果からは全ての期間において、同一領域の火山性噴出物には水の濃集が見られているが、観測期間の違いにより同一領域でもESPATの値が変動している。異なる観測期間での

ESPATの絶対値(分子水量含有量の絶対値)の差異は、期間により輝度値が異なるためであるとしているが、分子水含有量が低い領域からの相対値として含水量を見たときに、その値が同じであるのか期間により相対値すら異なるのかの説明がなされておらず、含水量の推定値には疑問が残る。

これまで、多数のサンプル分析や理論モデルからは月内因性の水の存在が示唆されてきた(詳しくは[12]を参照されたい)。Milliken氏らの結果は、リモートセンシングデータから初めて月内因性と考えられる水を同定したとして非常に重要である。しかし、リモートセンシングデータのみから水の起源を詳細に区別することは難しく、先に挙げた(a),(b)の精査によっては、彼らの観測結果の再検討が必要となる可能性があり得ることは留意されたい。

## 6. 月極域の水の証拠

月や水星は自転軸の傾きが小さいため、極域にできたクレーターなどの地形は永久影を持ち、月の場合は水の昇華温度110 K以下の極低温となる。このような領域は水など揮発性化合物を固体のまま保持できると考えられている。これまでも永久陰に水氷の存在が示唆されてきた。LPNSの観測では、月極域に水素原子が濃集している領域が存在することがわかってきた[10]。しかし、比較的高エネルギーの中性子である熱外中性子の観測では、レゴリス層の深さ1 m程度の領域に存在する水素原子を見ているため、分子水や構造水、水素原子などの区別ができていない。また、Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO)搭載Lyman Alpha Mapping Project(LAMP)によるLyman Alpha輝線(UV領域)の観測でも、分子水の存在が示唆されてきた[30]。UV領域の観測では、水素原子と水の区別は可能なものの、構造水と分子水の区別できないため、永久陰の領域に水氷が存在すると断定できなかった。LRO搭載レーザー高度計(LOLA)の観測でも、1,064 nmの反射率のパターンが水氷のそれと似ている領域を極域に発見した[e.g. 31]。しかし、粒径が細かい場合や宇宙風化の程度が低いレゴリスでも高反射率を示すことがあり、LOLAのデータから水氷であることを断定するのは難しい。これらの理由から、永久陰での水氷の存在を直接観測した例はなかった。

$M^3$ などの近赤外分光計による観測では、太陽光を光源としその反射光を観測している。そのため、永久影内部のように光源のない領域の観測はできなかった。だが、Li氏らは、 $M^3$ の観測データの中でも南緯・北緯ともに $75^\circ$ – $90^\circ$ の領域で、太陽入射角が $90^\circ$ 以上の影領域に注目して解析を行った[32]。彼らが注目した領域では、月極域では太陽入射角が浅いために永久影が生じるが、周囲の地形で太陽光が反射し永久影を照らす二次光が光源となり得る。彼らは、水氷が霜の状態で存在する場合に反射スペクトルに吸収がみられる波長(1.3  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$ , 2.0  $\mu\text{m}$ )に注目し解析を行った。解析では、南緯・北緯共に $80^\circ$ 以上の領域でのみ、上記水氷の霜の特徴を持つスペクトルが見つかった。さらに反射スペクトル形状から、北極側に比べ南極側の霜の粒径が大きいことが示唆された(霜の粒径による反射スペクトル形状の違いは[5]などを参照されたい)。発見された反射スペクトルの形状を、反射スペクトルのmixing modelを用いてレゴリスと水氷の霜の反射スペクトルにより再現すると、30 wt%(または20 vol%)の水氷の霜が存在していると考えられる。ただし赤外反射スペクトルで観測される深さは、数mm程度であることには留意されたい。一方で彼らの解析結果を見ると、上記の観測結果を単純に鵜呑みにはできない。彼らの注目した二次光領域は、光量が非常に少なくデータの質(signal to noise ratio: SN比)は悪い。彼らはこの問題の解決策として、連続する波長での移動平均をとることでデータの質を補い議論を行っている。一般的に近赤外分光計による観測ではこのような手法は用いないが、SNが悪い場合にはやむなく取りうる手段の一つである。SNが悪い場合に彼らが行ったような解析手法を用いると、平均を出す際に用いる波長の数が少ないため、一つの波長で大きなノイズを持っている場合にその影響が顕著に出てしまう懸念がある。彼らのデータにおいても、上記の懸念が吸収形状に影響を与えているように見受けられる。一方で、南極・北極の各領域において反射スペクトルに水氷の霜の吸収があると判断されたデータ(スムージング無し)を用いてそれぞれの平均をとると、平均された反射スペクトルに確かに上記波長に吸収が見られ、これは水氷の霜の存在を示唆する。このような結果から、月極域に水氷が霜の状態として存在する可能性が徐々に明らかとなってきたが、それらがどこに存在するのかといっ

た場所の特定には未だ議論の余地がある。

## 7. 今後の課題と将来の月探査への期待

月探査機のリモートセンシングデータやApolloサンプルをはじめとする試料分析の結果から、月に水のような揮発性成分が存在する可能性が益々高まってきた。発見されつつある揮発性成分の状態(例えば分子水なのか構造水なのか)、存在量、分布については様々な議論があり具体的な数値も提案されている。しかし、リモートセンシングデータや試料分析のみでは、それぞれの装置・手法の特性から、揮発性成分の状態、存在量、深さ方向への分布などの議論をすることが難しいのが現状である。

また、近年具体的計画が次々と発表されている月探査には、資源探査の側面も大きい。人間が月に赴いた際に利用可能な資源をいかに定量的に確度高く見積もるかが課題となっている。特に、月に水が多量に存在すれば宇宙飛行士の生活や燃料などへ利用でき、宇宙での活動のハードルが大きく下がることが予想される。このような利用を考えた場合、水の「状態と分布」は極めて重要である。例えば、月で手に入る水が水氷のように少ないエネルギーで人が利用できる状態へ変化させられるものであれば有益であるが、鉱物中の構造水のように大きなエネルギーを要さねば分離できない場合は利用価値が格段に下がる。また、深さ方向への分子水の分布については、未だ誰も保証できていない。

月における水の存在量を決定することは、理学・工学にとって共に重要な課題である。しかし、日照領域において観測されている水は構造水が主であると考えられており[e.g. 1]、利用しやすい形の分子水が存在したとしても熱的には不安定なため[14]、永久陰のような低温領域へ移動し濃集することが考えられる[e.g. 10]。このため、水の存在可能性・利用可能性が共に高いと考えられる月極域への探査が重要である。

## 謝辞

本稿を執筆する機会をいただいた大竹真紀子博士、ならびに長岡央博士に厚く御礼を申し上げます。また、査読者である松岡萌博士には有意義なご指摘をいただきました。深く感謝いたします。

## 引用文献

- [1] Pieters, C. M., 2009, *Science* 326, 568.
- [2] Sunshine, J. M. et al., 2009, *Science* 326, 565.
- [3] Clark, R. N., 2009, *Science* 326, 562.
- [4] Colaprete, A. et al., 2010, *Science* 330, 463.
- [5] Clark, R. N., 1999, in *Remote Sensing for the Earth Sciences* 3, 3.
- [6] Clark, R. N. et al., 2011, *Icarus* 212, 180.
- [7] Hapke, B., 2012, *Theory of reflectance and emittance spectroscopy* 2<sup>nd</sup> edition., Cambridge Univ. Press.
- [8] McCord, T. B. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116.
- [9] 橋爪光, 2019, *遊星人* 28, 6.
- [10] Lawrence, D. J. et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, E08001.
- [11] Kayama, M. et al., 2018, *Science Advances* 4, eaar4378.
- [12] 鹿山雅裕, 2019, *遊星人* 28, 14.
- [13] 長岡央, 2019, *遊星人* 28, 37.
- [14] Hibbitts, C. C. et al., 2011, *Icarus* 213, 64.
- [15] Crider, D. H. and Vondrak, R. R., 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 26773.
- [16] Kramer, G. Y. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116, E00G18.
- [17] Starukhina, L. V. and Shkuratov, Y. G., 2000, *Icarus* 147, 585.
- [18] Zeller, E. J. et al., 1966, *J. Geophys. Res.* 71, 4855.
- [19] Ichimura, A. S. et al., 2012, *Earth and Planetary Science Letters* 345, 90.
- [20] Schaible, M. J. and Baragiola, R. A., 2014, *J. Geophys. Res.* 119, 2017.
- [21] Nakauchi, Y. et al., 2014, 45th LPSC, Abstract 2004.
- [22] Saal, A. E. et al., 2008, *Nature* 454, 192.
- [23] Greenwood, J. P. et al., 2011, *Nature Geosci.* 4, 79.
- [24] Klima, R. et al., 2013, *Nature Geosci.* 6, 737.
- [25] Milliken, R. E. and Li, S., 2017, *Sci Adv* 3, e1701471.
- [26] Milliken, R. E. and Mustard, J., 2007, *Icarus* 189, 550.
- [27] Liu, Y. et al., 2012, *Nature Geosci.* 5, 779.
- [28] Arndt, J. and Engelhardt, W. V., 1984, *J. Geophys. Res.* 89, C225.
- [29] Arndt, J. and Engelhardt, W. V., 1987, *J. Geophys. Res.*

92, E372.

[30] Hayne, P.O. et al., 2015, *Icarus* 255, 58.

[31] Fisher, E. A. et al., 2017, *Icarus* 292, 74.

[32] Li, S. et al., 2018, *PNAS* 115, 8907.

[33] Davis, K. M. and Tomozawa, M., 1996, *J. Non-Crystalline Solids* 201, 177.