

月面における水の起源と水源地：物質科学的見地からの検討

Origin of water and water reservoirs on the Moon as considered from the perspective of material sciences

*鹿山 雅裕¹、富岡 尚敬²、大谷 栄治³、中嶋 悟⁴、瀬戸 雄介¹、長岡 央⁵、Fagan Timothy⁶、Götze Jens⁷、三宅 亮⁸、小澤 信³、関根 利守⁹、宮原 正明⁹、松本 恵¹、庄田 直起¹、留岡 和重¹

*Masahiro KAYAMA¹, Naotaka Tomioka², Eiji Ohtani³, Satoru Nakashima⁴, Yusuke Seto¹, Hiroshi Nagaoka⁵, Timothy Fagan⁶, Jens Götze⁷, Akira Miyake⁸, Shin Ozawa³, Toshimori Sekine⁹, Masaaki Miyahara⁹, Megumi Matsumoto¹, Naoki Shoda¹, Kazushige Tomeoka¹

1.神戸大学大学院理学研究惑星学専攻、2.海洋研究開発機構高知コア研究所、3.東北大学大学院理学研究科地球学専攻、4.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻、5.早稲田大学先進理工学部、6.早稲田大学教育学部地球科学専修、7.TU Bergakademie Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy、8.京都大学大学院理学研究科地球惑星学専攻地質学鉱物学教室、9.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2.Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 4.Department of Earth and Space Science, Osaka University, 5.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 6.Department of Earth Sciences, Waseda University, 7.TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mineralogy, 8.Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, 9.Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

月探査機によるスペクトル観測から、月面において様々な水の化学種（水酸基、鉱物に結合する分子水、氷）が大量に検出されている。各種水の供給源として太陽風と彗星・小惑星の衝突が提案されているものの、これらの現象では大量に存在する水酸基や鉱物に結合する分子水の由来、月面における水の不均一性を十分に説明できない。近年、月隕石の微小部分分析から深部岩体やマントルにおいて大量の水の存在が示唆されており、月探査機から南極エイトケン盆地やプロセルム盆地においてカンラン石に富むマントル起源の露出岩体や深部岩体由来の中央丘が発見された。これらの事実から、マントル起源の水が大量に月面に供給され得る可能性が示唆される。本研究では、岩相を異にする月隕石の微小部分分析から水の化学種を同定し、月面に分布する水の起源解明を試みた。さらに、月の土壌（主にレゴリス）や露出岩体（斜長岩地殻、海の玄武岩、カンラン石に富む中央丘、角礫岩層およびマントル岩体）の全岩含水量を物質科学的側面から定量的に推定することで、月面における水源地の検討を行った。

はんれい岩質月隕石は主要構成鉱物としてカンラン石、単斜輝石および斜長石を含有し、玄武岩質月隕石は単斜輝石斑晶と輝石および斜長石の基質から成る。角礫岩質月隕石は玄武岩・はんれい岩質クラストとそれらの礫質部から構成されている。各種岩相の主要構成鉱物を対象とした水の定量分析として、高温透過赤外吸収その場加熱実験を行った。鉱物相同定には透過電子顕微鏡、放射光X線回折ならびにラマン分光装置を供し、化学組成ならびにモード解析には走査型電子顕微鏡を用いた。

赤外吸収分光その場加熱実験の結果、はんれい岩質月隕石の主要構成鉱物に共通して顕著な水の吸収帯が確認された。同様の吸収帯は玄武岩質月隕石の単斜輝石斑晶においても検出されるものの、その吸光度は極めて低い。同様の傾向は角礫岩質月隕石においても認められる。段階過熱実験から、これら吸収帯は鉱物に結合する水酸基と分子水に帰属される。Beer-Lambert法から、はんれい岩質月隕石におけるカンラン石、輝石および斜長石の含水量はそれぞれ633、627および674 ppm（水酸基は373、468および517 ppm）と推定され、玄武岩質月隕石の単斜輝石斑晶は169 ppm（水酸基は106 ppm）となる。走査型電子線顕微鏡観察から礫質部においてのみ扁桃体状シリカ粒子の存在が見出された。透過型電子顕微鏡観察からこのシリカ粒子は平均粒径9 nmを有する微晶質ナノシリカの集合体として存在し、各種微小分析による相同定から月の流体に由来するモガナイトと判明した。モガナイトは非角礫質月隕石に産出しないことから、天体衝突に伴う水酸基および分子水の脱水と角礫化による流体の捕縛を経て沈殿したと推察される。

月土壌ならびに露出岩体における全岩含水量は、天体衝撃による水の損失率と太陽風による水の付加率を補正した上で、本研究で得られた各種鉱物の含水量と岩相のモード組成から推定できる。はんれい岩質および玄武岩質月隕石の全岩含水量はカンラン石に富む中央丘と海の玄武岩に対応し、それぞれ757および25 ppmとなる。海の玄武岩の場合、単斜輝石斑晶（11 vol.%）にのみ水が検出されることから全岩含水量は低く、その主な原因としてマグマ噴出時の脱ガス作用が考えられる。角礫岩層の全岩含水量は668 ppmとなり、盆地の永久影に限り流体はモガナイトを生成せずにコールドトラップされることから、モガナイトの体積を流体のそれと判断することができ、その結果として780 ppmにも達する。全岩含水量はマントル岩体で808 ppmと最大となり、斜長石近くで23 ppmと最少となる。一方で、月土壌に関しては70 ppmと推定される。マントル岩体ならびに中央丘と周囲の角礫岩層は最も湿潤と予想されていた月土壌の10倍以上の全岩含水量を保持し、これらの露出岩体は、極表層（<100 nm）にしか存在しないレゴリスと比べて広範囲（数kmの露出領域）に分布することから、月面で最も水に富み、また巨大な水源地といえる。

月土壌に含まれる水は太陽風の水素に由来する水酸基であることから、月面に存在する水酸基の大部分はマントルから供給された水であり、一部が太陽風に由来する。鉱物に結合する分子水はマントル起源の水にのみ起因し、氷についてはマントル起源（衝突角礫化により捕縛）と彗星・小惑星由来の両方が考えられる。彗星・小惑星から供給された氷は月土壌や各露出岩体に共通して存在し、月面の不均一な熱分布に従って存在する。従って、温度の低い高緯度の地域ほど全岩含水量は高いと予想される。つまり、月探査の将来構想として、南極エイトケン盆地、次いでプロセラルム盆地のマントル岩体や中央丘が最も重要な探査地域の候補となり得る。

キーワード：月、水の起源、水源、月隕石、マントル岩体、カンラン石に富む中央丘

Keywords: Moon, Origin of water, Water reservoir, Lunar meteorite, Olivine-bearing site, Olivine Hill