

***月極域における揮発性物質探査の意義***  
***Lunar exploration for volatile materials on***  
***the polar region***

**長岡央 (早稲田大学)**

**橋爪光 (茨城大学)**

**鹿山雅裕 (東北大学)**

**大竹真紀子 (JAXA, ISAS)**

**Hiroshi Nagaoka (Waseda Univ.)**

**Ko Hashizume (Ibaraki Univ.)**

**Masahiro Kayama (Tohoku Univ.)**

**Makiko Ohtake (ISAS/JAXA)**

# 月極域における揮発性物質探査の意義

## Lunar exploration for volatile materials on the polar region

著者 長岡央<sup>1</sup>, 橋爪光<sup>2</sup>, 鹿山雅裕<sup>3</sup>, 大竹真紀子<sup>4</sup> 所属 <sup>1</sup>早稲田大学, <sup>2</sup>茨城大学, <sup>3</sup>東北大学, <sup>4</sup>JAXA, ISAS

月極域の太陽光が当たらない永久影には、蒸発温度の低い揮発性物質が捕獲されている可能性が示唆されてきた。しかし従来の周回探査では各手法の違いにより、その化学種や深さ分布、存在量について十分に一致する結果が得られていない。本探査はその場に到着し、極域の揮発性物質を様々な観測手法を組み合わせて分析する。複合的観測から極域の揮発性物質の化学種とその絶対量を定め、その起源を明らかにすることを目的とする。

### イントロダクション

周回探査や試料分析から、月の揮発性物質の重要性が高まっている。以下には各先行研究のサマリーを示す

#### 中性子分光(遠隔探査)

Lunar Prospector NS:

- 両極域に熱外中性子計数率の優位な減衰、**水素**の存在を示唆(Feldman et al. 1998)
- 極域に見られる中性子計数率の減衰量から**水素量**を導く、両極における**平均的水素量は100 - 150 ppm**と見積もる(Lawrence et al. 2006)
- 高地領域における**水素分布**を報告、**高い場所では120 - 150 ppm**程度(Lawrence et al. 2015)

LRO LEND:

- 極域の熱外中性子の減衰を先行研究より優れた空間分解能で観測(Mitrofanov et al. 2012)
- 極域におけるローカル(10km相当)な**水素濃集領域**を報告、**400 - 600 ppm**(Sanin et al. 2017)

#### 反射スペクトル観測(遠隔探査)

- LRO LAMP UV: 南極の永久影に**氷が0.1-2.0 wt.%**? (Hayne+ 2015)
- SELENE TC: LRO LAMP UVは**氷ではなく斜長石**でも説明可(Haruyama+ 2008)
- Arecibo CPR: 南極の**氷はice depositではなくice frost**(Campbell+ 2006)
- LRO LOLA: Shackletonの局地に**22%の氷**? ←間接的手法(Zuber+ 2012)
- LCROSS IR: Cabeusに**2 μmの氷が5.6 wt.%**? **構造水は~1 wt.%**? ←過大評価?(Colaprete+ 2010)
- Deep Impact IR(図2): 北極に**構造水、吸着水、分子水が0.3 wt.%**? ←検量線に難? 含水鉱物?(Sunshine+ 2009)
- Cassini VIMS: 南極と周辺の高地に**構造水と吸着水が10-1000 ppm**? ←推定法は妥当?(Clark 2009)
- Chandrayaan-1 M<sup>3</sup>: PKT外縁の火山ガラスから局地的に**300-400 ppmの構造水**(Milliken and Li 2017)

#### アポロ試料・月隕石

- Apollo glass: 火山性ガラスからマントル起源の**構造水が4-46 ppm**(Saal+ 2008) ← 脱ガス前は**260-745 ppm**?
- Apollo melt inclusion: 火山ガラスのメルト包有物から**構造水が615-1410 ppm**(Hauri+ 2011)
- Apollo rocks: 各岩石主要鉱物(Olv, Pyx, Plg)に**構造水が<10 ppm** ← 脱ガス?(Simont+ 2017)
- Apollo regolith: 水素同位体比の低い太陽風由来の**構造水が~70 ppm**(Zuber+ 2006)
- Lunar meteorites and Apollo samples: **含水鉱物&炭素質コンドライト(CM1)**らしき痕跡が発見? ← 極域に分布? 量が極小(Zolensky+ 1996; Demidova+ 2015)
- Apollo regolith: 月面には太陽風と惑星物質(微小隕石)を起源とする**窒素成分**が混在し、**その量比は拮抗**(Hashizume et al. 2002)
- Apollo samples: **窒素と水素の同位体組成**は、太陽・惑星物質・彗星間で、比較的よい相関を示す。(本当はこの相関は完全ではなく、Bernard Marty流のデータ選別の効果)(Marty B. 2012)
- Apollo regolith: 金属微粒子の表面分析から、**太陽風・惑星物質**どちらも起源としては考えにくい成分を発見。**彗星の寄与**と考えると解釈可能(Ireland et al. 2006; Hashizume & Chaussidon 2009)

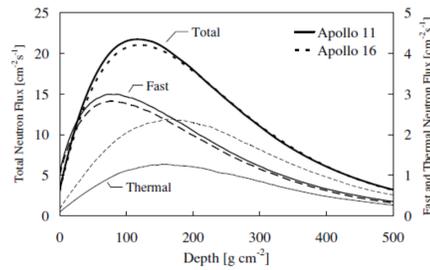


図1. 中性子の発生量の深さ依存性 (Yamashita et al. 2008)

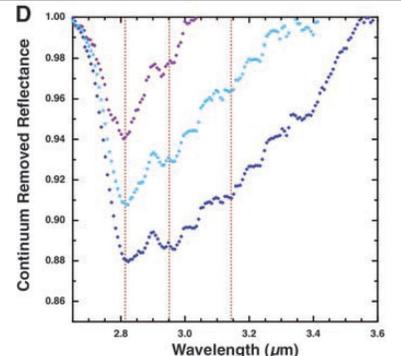


図2. Sunshine+ (2009)では1.05-4.5 μmを700点:5 nm分解能 ⇒ OHとH<sub>2</sub>Oの分解可能、H<sub>2</sub>Oの化学種は難しい(分子水(層間水・流体包有物か? 吸着水か?)はわからない)

#### 現状の問題点, 課題点

月極域に見られる揮発性物質の知見は各手法の違いにより非常に大きな誤差をばらむ。

- 化学種: 水素?, 構造水?, 層間水?, 流体包有物?, 吸着水?, 水氷?
- 含有量: 水 0.1 wt% (水素100 ppm相当) ~22wt% (?)
- 分布: 永久影?, 極低温領域?, 深さ分布?
- 同位体: 水の起源?, 複数起源の混合比率?

#### 課題の解決

- 月極域の水素濃集地域における直接探査の提案
- 探査項目: 揮発性物質の種類, 形態, 絶対量, 分布, 起源
- 化学種: 分光観測, 質量分析, など
  - 含有量: 中性子観測, など
  - 分布: 中性子観測, レーダー観測, など
  - 同位体: 起源, 複数の起源の混合比

### 探査提案

目的: “どこに” “なにが” “どれだけ” あるのかを調べ, その濃集原理を理解する

#### 1) “どこに” = 揮発性物質の水平方向, 垂直方向の分布

##### 水平方向

- ⇒ 先行研究(図3)で示唆された水素濃集領域付近に着陸
- ⇒ 中性子分光計, レーダー等による水平方向の分布推定

##### 垂直方向

- ⇒ レーダー観測, 分光画像観測による地下構造探査
- ⇒ 深さ方向にサンプルを採取

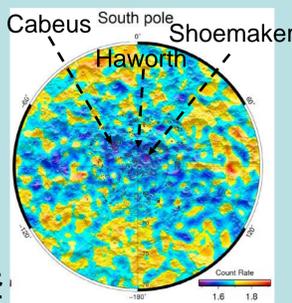


図3. 南極の熱外中性子計数率分布 (Mitrofanov et al. 2012)

#### 2) “なにが” = 探査項目: 揮発性物質の状態, 形態と周辺地質化学種の同定

⇒ 近赤外イメージング分光計

- ① 1nm以下の波長分解能(図4)
  - ② 1wt%以下の水: 2.8-3.0μmの波長範囲
  - ③ 1wt%以上の水: 1.5-2.1μmの波長範囲
- 極域環境(温度・真空度)に対応した地上データ取得も非常に重要(検出限界や波長範囲が要検討)

化学種の同定 ⇒ 採取試料を質量分析計によるその場分析

周辺地質 ⇒ 分光画像観測による地質環境

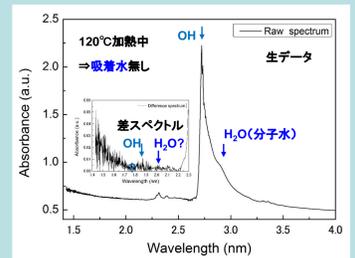


図4. 透過赤外吸収: 地球上の輝石単結晶 (Kayama in submitted) 含水量が1 wt%程度

#### 3) “どれだけ” = 揮発性物質の存在量

その場観測による水素量の定量

- ⇒ 熱重量分析計により試料加熱時の温度と質量変化から水素量を推定
- ⇒ 中性子分光計(図5)により一定時間観測し、水素量を定量: ①100 ppm程度の水素量を定量下限値とする

水の定量, DH比の測定

- ⇒ 微量水分計によるその場観測(図6)

- ① D/H比を10% 精度で決定
- ② 酸素同位体決定(挑戦的目標)

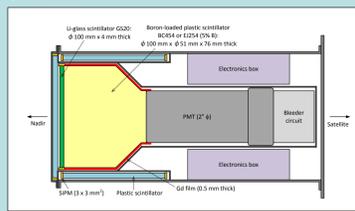


図5. 中性子分光計の概要図例

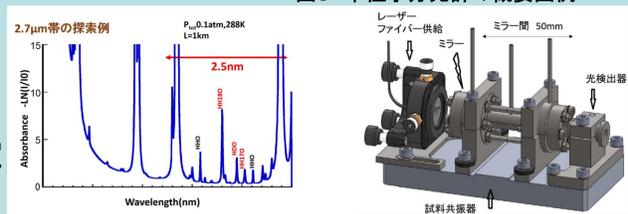


図6. 左図: 微量水分計から得られる水スペクトル 右図: 微量水分計の概要図

#### 存在量と環境条件の関係からその濃集原理の解明

想定される観測と運用コンセプトの一例

1. 周回探査データを基に着陸地点を選定
  - 中性子分光による水素濃集点近傍かつ日照地形通信等が好条件
2. 目標地点に着陸し, ローバを展開
3. 走行しながら, 中性子分光とレーダーによる観測
4. 特長的地点に止まり, 試料を採掘
5. 分光カメラや質量分析計で化学種を同定し, 水の有無を判定. 熱重量分析計により試料を加熱し水素量を推定.
6. 中性子分光や微量水分計の定量に必要な観測時間程度とどまり, 定量分析
7. 同地点を異なる日照期間に観測