

Water on Moon: Sciences expected by landing exploration at polar region of Moon

(月の水：理学的立場から見た極域探査・揮発性物質探査)

Ko Hashizume

Faculty of Science, Ibaraki University
1-1 Bunkyo, Mito, Ibaraki, 310-8512 Japan

ABSTRACT

Detection of water on Moon's surface is now considered to be a hot topic, both in scientific and practical aspects. Volatile compounds on present Moon's surface could be supplied from several sources, such as solar wind, micrometeorites, lunar rocks through ion-sputtering and/or comets. Part of the volatile compounds supplied to Moon may be liberated to the open space beyond the surface, migrate, and finally be trapped on/in the cold regolith. At the coldest circumstances, the trapped water could be accumulated for years, forming water-rich resources. We are interested in the behaviors of water on Moon's surface. Knowledge of such behaviors, after comparing with the corresponding results on other planets such as Earth and Mars, may finally provide us a general knowledge on the conditions a planet could be habitable, sustaining water at its surface.

月の水：
理学的立場から見た
極域探査・揮発性物質探査

橋爪 光
茨城大・理

水・有機物（揮発性物質）

This is Life!

- **生命そのもの** (CHONSP)
- **酸化剤・還元剤** ($O_2 + H_2, C_xH_y$) = エネルギー源
- **溶媒** (H_2O, C_2H_5OH, \dots) = 生命発生・反応の場

- 持続可能な有人・無人宇宙活動に不可欠な物質
- 地球からの輸送コスト > 現地での調達コスト

地産地消型 宇宙資源探査

水・有機物（揮発性物質）

◆どこにある？

- 探査を行うべきは天体表面の冷暗な所
光が当たらない場所 = 上空から見え難い場所
- 連中は飛べる！
揮発性物質の埋蔵場所 ≠ 生成場所
全貌把握には全球規模での観測が必要

地産地消型 宇宙資源探査

水・有機物（揮発性物質）

◆どれだけ？

- サンプルングするだけで攪乱される脆弱な埋蔵現場
（= 少ないエネルギーで採取できる有望な資源）

その場観察・その場分析が極めて重要

- 天体固有の水資源学・気候学 **（水惑星学）**

水供給・生成・集積プロセスの理解

月面における揮発性物質供給源・候補

- 太陽風 + 岩石 (金属酸化物)
- 隕石 (微小隕石)
- 彗星

火成活動が活発な時代なら...

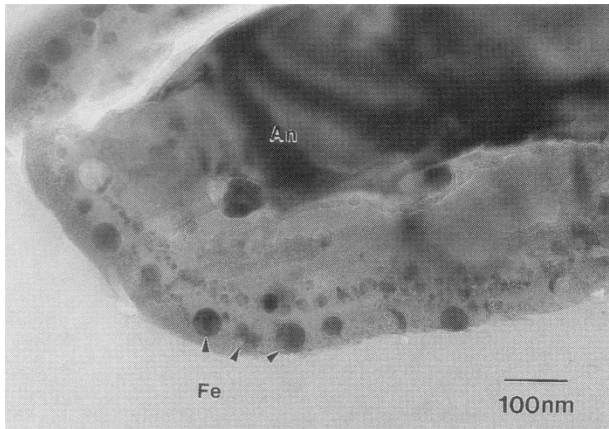
- 月固有の水 (火山ガス)

月マントルは水を含む！地球並み (<数百ppm)?

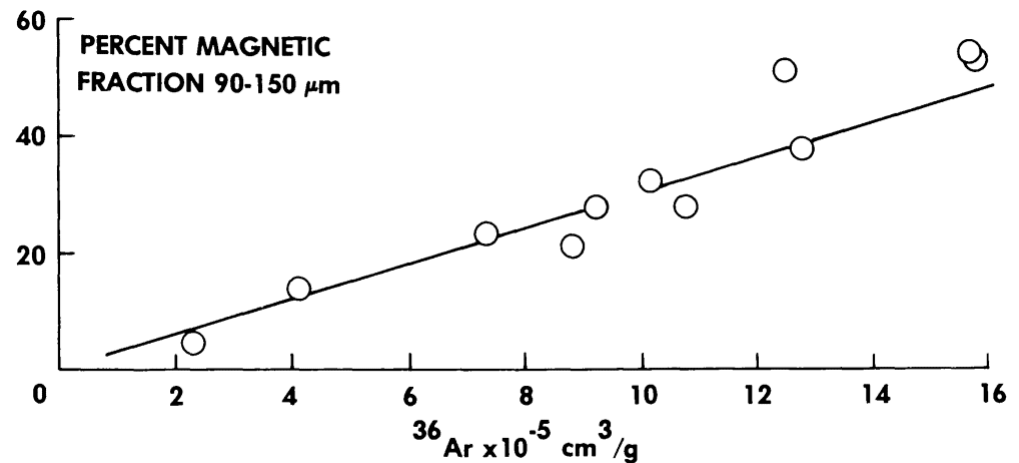
(2008年以降の大発見 – 分析科学 & リモセン)

太陽風と月面岩石から生成される水

● 月面岩石に含まれる酸化鉄の還元



Numerous 100nm-sized **Metallic Iron Particles** on Lunar Grain Surface (Keller & McKay, 1997)



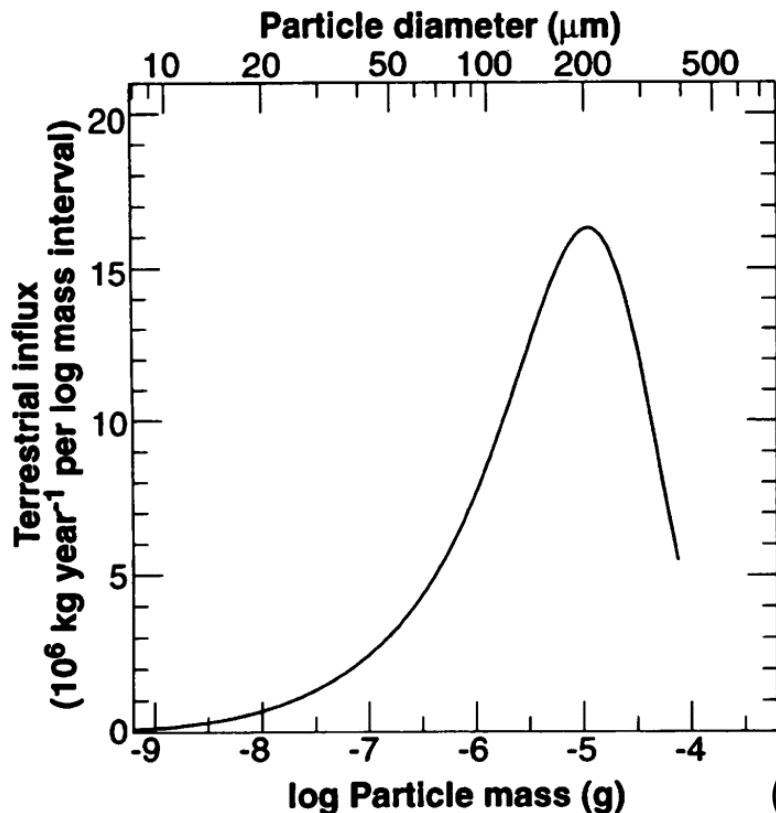
Fraction of metallic iron versus **SW ^{36}Ar** (Bogard, 1976)

Estimated Production Rate: $[\text{O, atoms}] \approx [\text{H, atoms}] / 300$

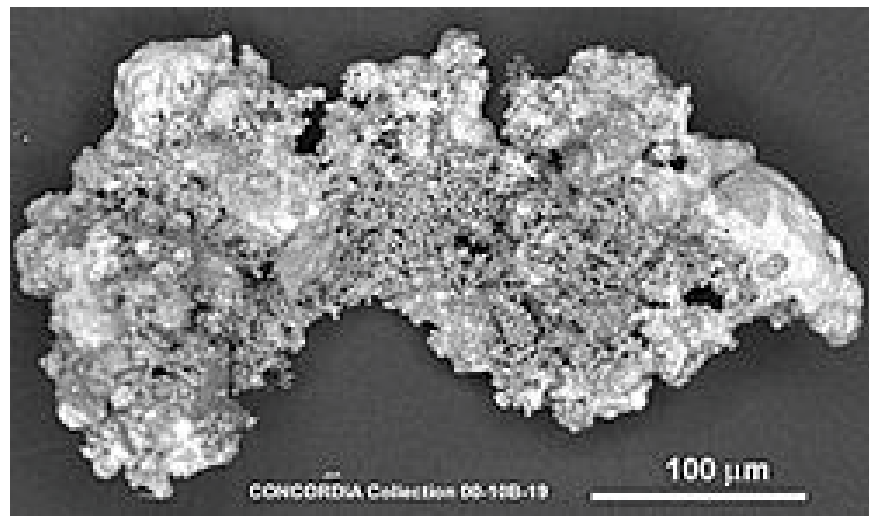
● FeTiO_3 (イルメナイト) + $\text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ (3-5 wt%, Gibson+, 1994)

Micro-Meteorites (MM)

- 地球に降着する地球外物質の圧倒的な質量割合
(Love & Brownlee, 1997)
- 炭素質コンドライト同様、**揮発性物質に富む**
(e.g., Messenger et al., 2003)



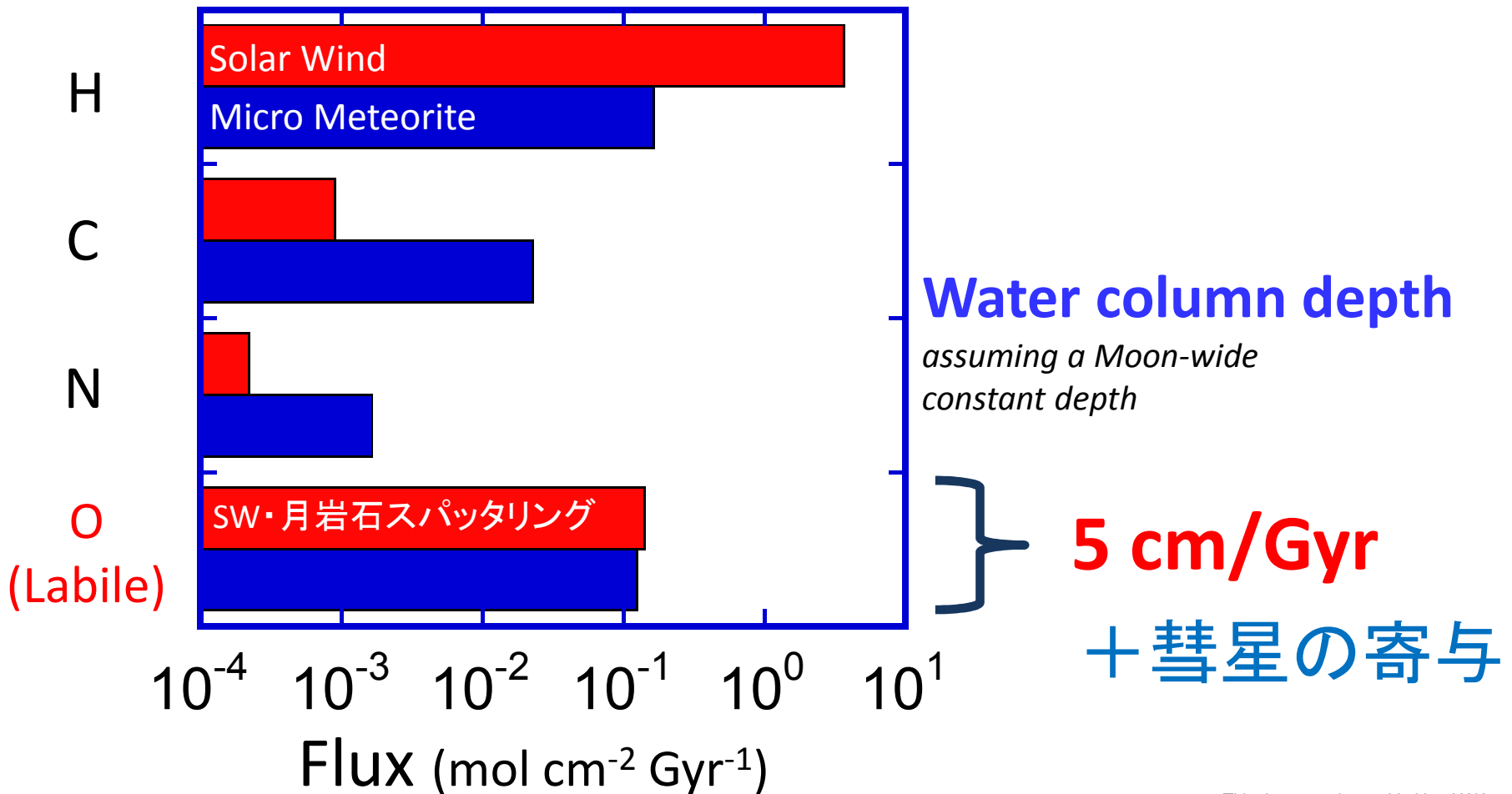
(Love & Brownlee, 1997)



<http://leonid.arc.nasa.gov/leonidnews40.html>

水起源候補の月面総供給・生成量比較

- 現・太陽風フラックス: 2.8×10^8 protons $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
- 太陽風による月岩石スパッタリング(還元)レート: 1 atom O / 300 protons
- 地球軌道への微小隕石降着率: $(4 \pm 2) \times 10^{10}$ grams/yr (Love & Brownlee, 1997)



(Simulation) 月極域・表土中の水

月面への水の供給率: **5 cm/Gyr**

- 月面全域に**供給**された水 (1億年分)

0.5 cm water column Moon-wide

- 極域 (表面積5% = 緯度72°) に水が**移動**

10 cm water column@Lunar-Poles

- 冷たい表土中 (1m厚) に水を**捕獲**

3 wt% of water in the regolith

月極域・表土中の水推定例: **5.6 ± 2.9** wt% (Colaprete et al., *Science*, 2010)

リモートセンシングによる月極域水

- 局所的濃度推定編 -

● 最大22wt%

シャクルトンクレータ底面・壁面、高度計、反射率 (Zuber+, 2012)

● 無い? (最大限 7.5wt%)

シャクルトンクレータ底面・壁面、地形カメラ、反射率 (Haruyama+, 2008)

● 5 – 10 wt%

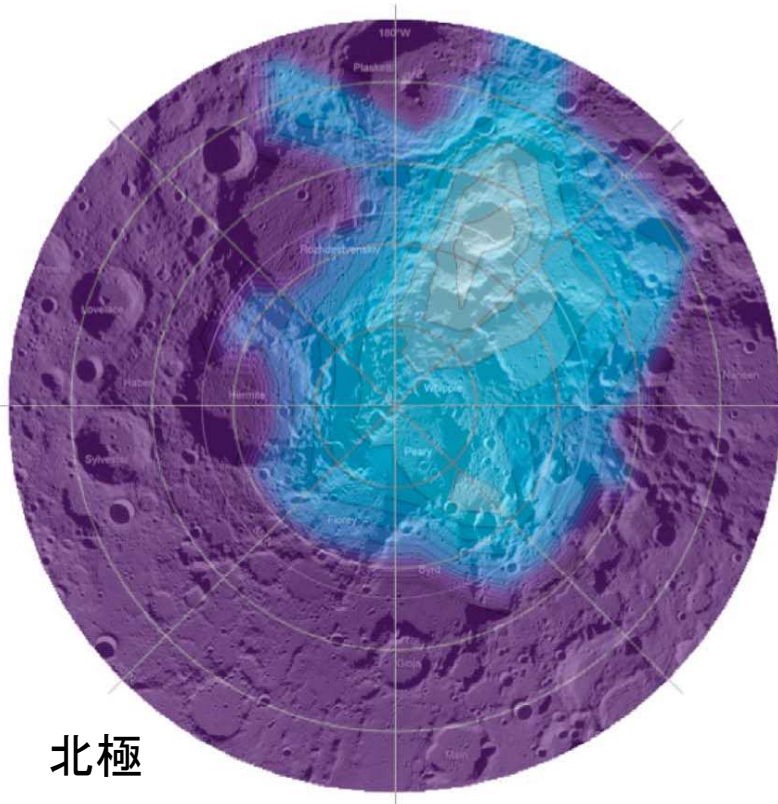
クレータ内表土層1m中、合成開口レーダ、円偏向比率 (Thomson+, 2012)

● 5.6 ± 2.9 wt% (update: 6.3 ± 1.3 wt%; Stryker +, 2013)

クレータ表土中、ペネトレータ、近赤外(<2.4 μ m)吸収 (Colaportate+, 2010)

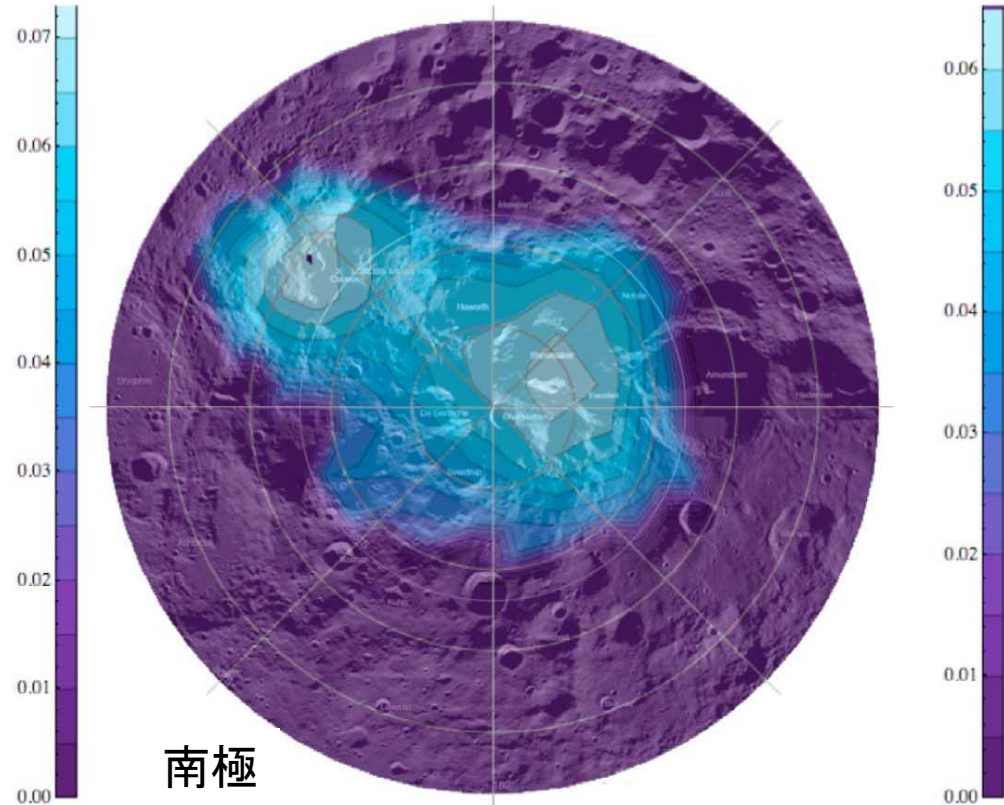
中性子分光法で見られた月極域の水素濃集

- 広域濃度推定編 -



北極

(緯度80° 以上)



南極

(緯度80° 以上)

WEH (Water Equiv. H) enhancement

$$= ([H] - [H]_0) \times 9$$

$[H]_0$: average non-polar level (50ppm H; 0.045% WEH)

Epithermal neutron

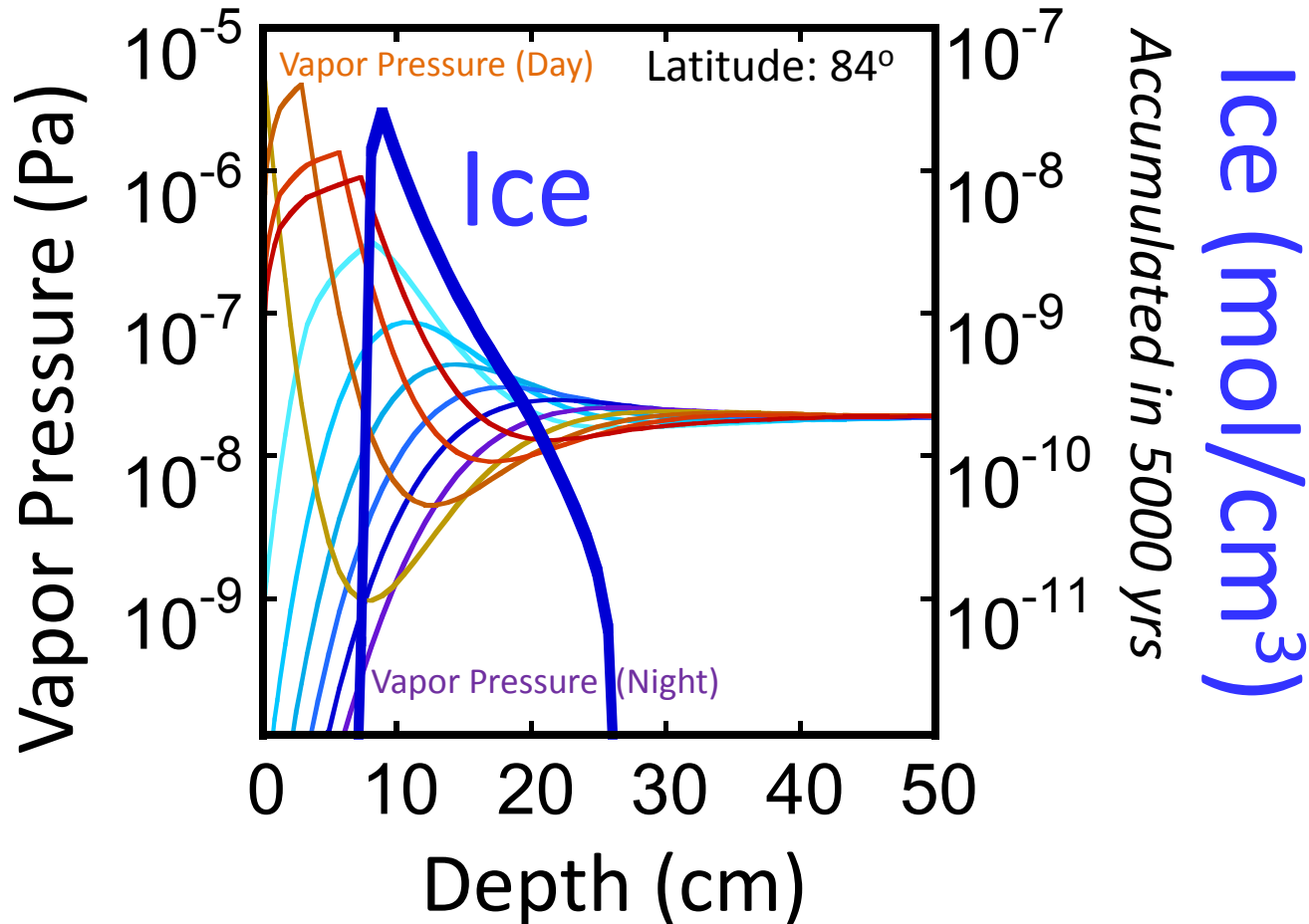
Resol: 400 m/pixel



私たちの予想:

月極域表土中深度10cmに存在する含水層

(Pumping Effect: Schorghofer & Taylor, JGR, 2007)



月面水探査：水の定量に向けて

● 一点の観測では済まない

複雑な地形(e.g., クレータ周辺)のローカルな濃集
極域表土全域、表土内部に隠れた水

● 月面上・水分子挙動の総合理解

水の生成・移動・埋蔵・散逸などの素過程

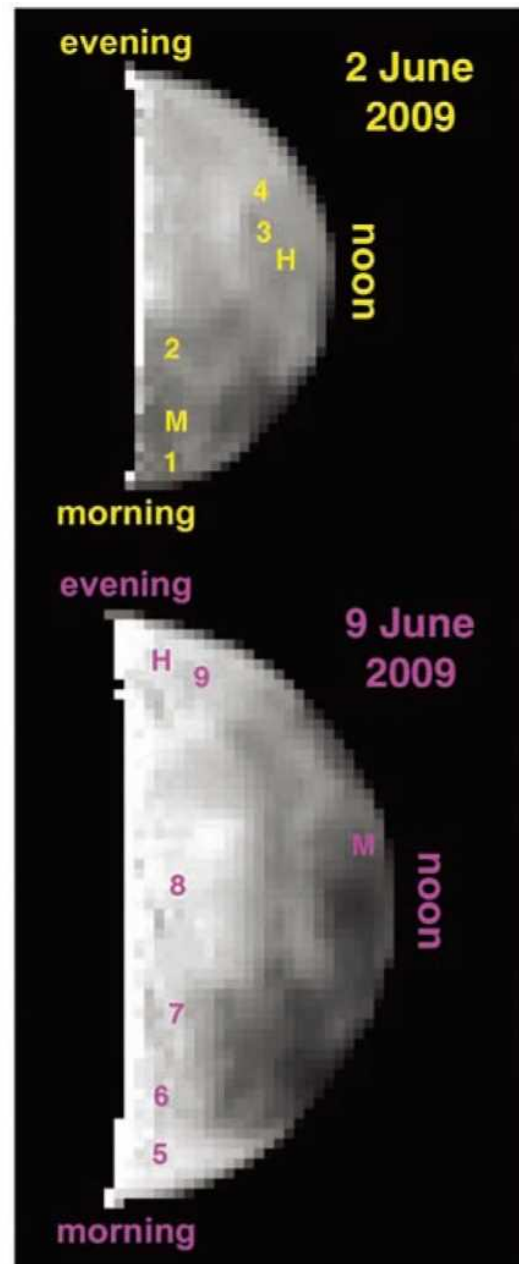
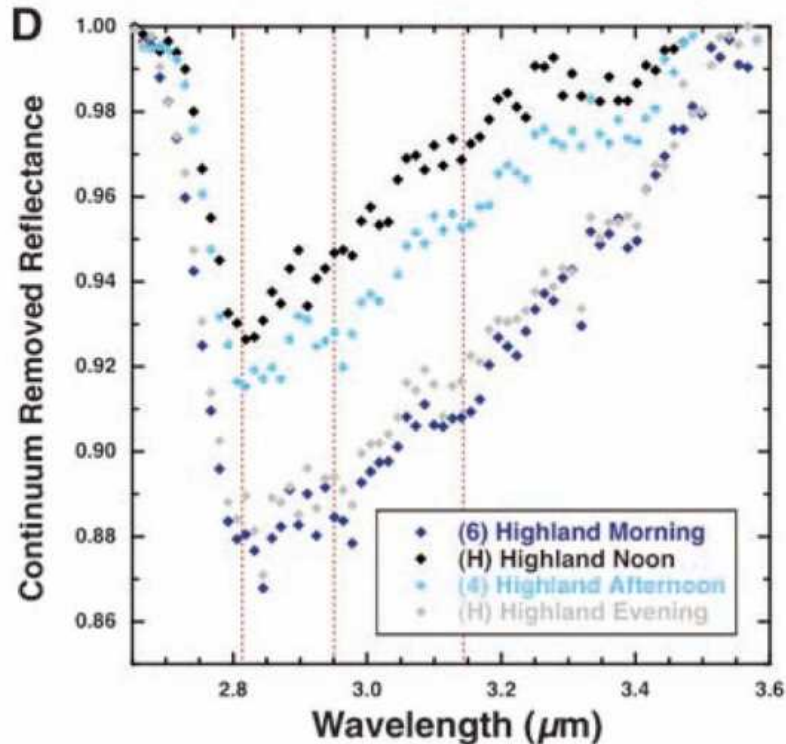
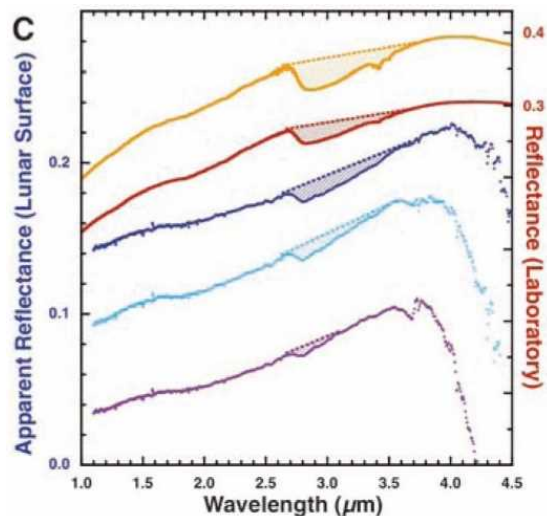
熱い月面から冷たい月面に向かう水フラックスの
連続観測(e.g., 人工コールドトラップ)

● 越夜の観測は欲しい

揮発性分子は本質的に冷たい場所に向けて動く

月面の冷たい場所めがけて 移動する水？

EPOXI, Deep Impact
Fly-by to Moon



一点詳細か、多点観測か？

- 典型的捕獲サイト(境界条件)が未確定な現状

ある程度の多点観測は必要

✓ (若い・古い)クレータ中の局所地形での観測

✓ (緯度毎の)表土中水濃度深さ分布測定

- 一点での詳細な取り組みは？

温度が変動する月面での連続観測など

- 有人か、無人か？

無人観測技術次第 (ロボット, ローバ, AI, センサ, サンプラ等)

複雑地形を認識し、アクセスし、複数試料採取技術

まとめ

- 月面に着陸してその場・水探査を行う必要
行って、近づいて、その場で見なければわからない。
水捕獲の現場は、ローカルで、暗く、かつ、脆弱。
- どんな探査が必要？
極域における水捕獲現場の探査
(クレータ、および、緯度毎の表土内部)
測候所
(全球的理解に向け水分子挙動の連続観測・実験)
- 有人で行った方がよい・行える探査
柔軟な多点サンプリング(無人技術次第)
マイルドな環境における持続的活動(連続・精密観測)