

## 天体表層鉱物と太陽風の相互作用

\*仲内 悠祐<sup>1</sup>

### 1. 宇宙航空研究開発機構

近年、月観測データの解析から月表層の非常に広い範囲に OH 基または H<sub>2</sub>O(以下、OH/H<sub>2</sub>O)が存在している可能性が強く示唆された(例えば C.M. Pieters et al., 2009, J.M. Sunshine et al., 2009)。月面における OH/H<sub>2</sub>O の存在は複数の探査機データを用いた解析結果からも存在が示唆されており、その起源の一つとして太陽風と月表層鉱物の相互作用によりもたらされた可能性が指摘されている。この太陽風により生成された水の存在量は 100ppm 程度と推定されている(Milliken & Li, 2017)。成層圏赤外線天文台 SOFIA を利用した観測からは、月面上に H<sub>2</sub>O の存在が報告された(Honniball et al., 2020)。

我々は太陽風プロトンと月や小惑星表層の鉱物の相互作用に着目し、実験的に OH 基や H<sub>2</sub>O の形成過程を調べた。実験では、福井県の若狭湾エネルギー研究センターに設置されたマイクロ波イオン源イオン注入装置を利用した。高真空環境チャンバー内に含水珪酸塩鉱物(Serpentine, Saponite)の粉末サンプルを設置し、太陽風プロトンを模擬した水素イオンビーム(H<sub>2</sub><sup>+</sup>, 10keV)を照射した。照射前後ではフーリエ変換赤外分光計 FTIR を用いて試料表層の近赤外反射スペクトルを取得した。水素イオン照射前後の近赤外反射スペクトル変化から、水素イオンの照射のみで、鉱物中の Si-O 結合の破壊が起こり、新たに Si-OH や H<sub>2</sub>O を生成することがわかった(Nalauchi et al., 2021)。現在、水素イオン照射のみで H<sub>2</sub>O の生成が確認されている鉱物は、Serpentine, Saponite(Nalauchi et al., 2021)に加えて、Plagioclase(H. Tang et al., 2021)のみである。他の珪酸塩鉱物では、OH の生成は確認されているものの、H<sub>2</sub>O の形成は確認されていない(例えば H. Tang et al., 2021)。しかし、いずれの結果からも珪酸塩鉱物中では照射された水素イオンは珪酸塩鉱物中の Si-O 結合を破壊することで、OH 基や H<sub>2</sub>O を形成すると考えられている。

太陽風により形成された OH 基は天体表層の熱環境により移動することが考えられる。Jones et al. (2018)によると、月面において上記 OH 基は極域へ濃集し、緯度 85 度では約 1000 年で飽和することが示されている。BepiColombo が探査する水星の極域における温度は、月極域の温度と同程度まで低い部分が存在する。そのため、水星極域でも OH 基が濃集しれれば、BepiColombo により観測されることが期待される。

# 天体表層鉱物と太陽風の相互作用

仲内 悠祐

JAXA SLIMプロジェクト

第22回惑星圏研究会 2021.02.19

1

## 宇宙風化作用

宇宙風化作用：天体表層の光学特性が変化する現象

要因：太陽風イオン、銀河宇宙線、電子線、紫外線、微小隕石衝突など

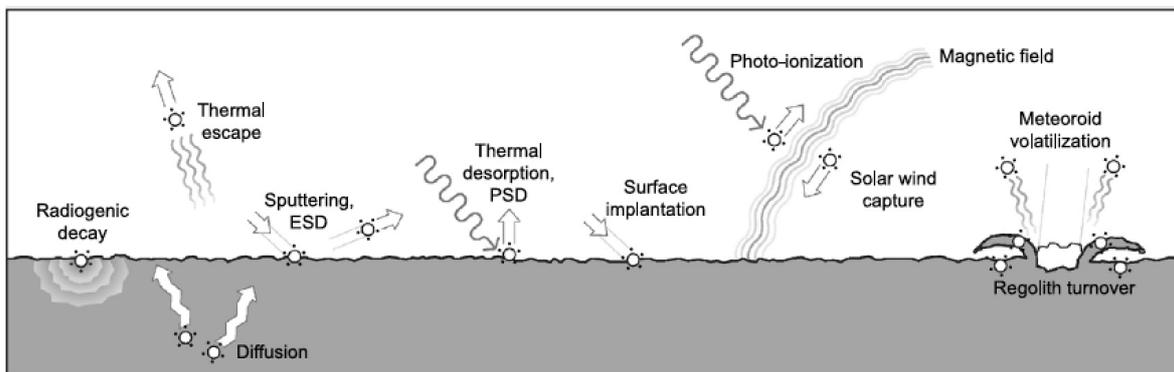
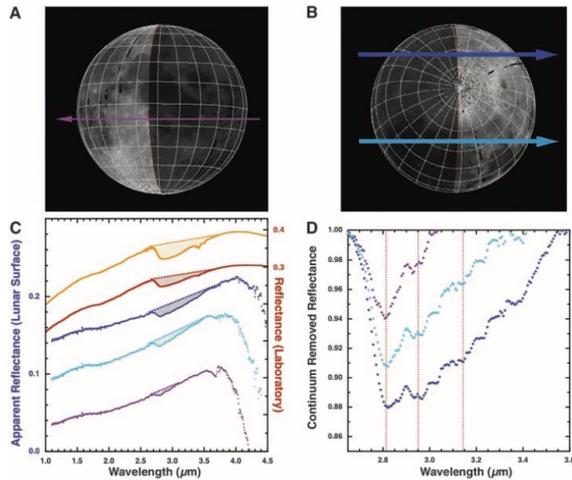


Image of Space Weathering process [Domingue et al., 2007]

太陽風プロトンと鉱物の相互作用に伴う、OH/H<sub>2</sub>Oの生成に注目

2

## 太陽風によるOH/H<sub>2</sub>O



[Sunshine et al. (2009)]

### The Important studies

- Pieters et al., (2009) & Sunshine et al., (2009)  
複数の探査機データ(M<sup>3</sup>, Cassini, Epoxi) から、月面の近赤外反射スペクトルに 3μm帯の吸収を発見。太陽風照射起源である可能性を示唆。
- Milliken & Li, (2017)  
M<sup>3</sup>データから、OH and/or H<sub>2</sub>O が月面に100ppm程度存在していると報告。低緯度~中緯度のため、太陽風照射が要因であると考えている。
- Honniball et al., (2020)  
SOFIA(航空機)を利用して、月面を観測し日照域で H<sub>2</sub>O を発見。おおよそ 500ppm(max 700ppm)と推定。

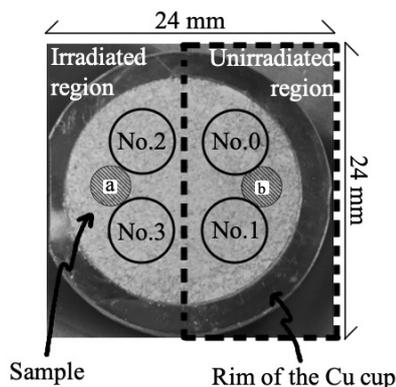
太陽風プロトンと鉱物の相互作用に注目が集まっている

3

## イオン照射実験 [Nakauchi et al. 2021]

### サンプル

1. Serpentine (Sangencyaya, Kyoto)  
composition : (Mg, Fe<sup>2+</sup>)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>
2. Saponite (synthetic : Kunimine Industry Co., Ltd.)  
composition : (Ca/2, Na)<sub>0.3</sub>(Mg, Fe<sup>2+</sup>)<sub>3</sub>(Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2-4</sub>(H<sub>2</sub>O)



### イオン照射

場所: 若狭湾エネルギー研究センター

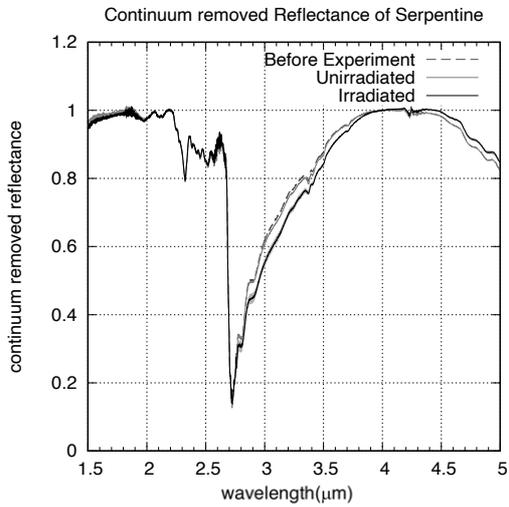
Irradiated Atom	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	
Energy (keV)	10	
Flux (μA/cm <sup>2</sup> /sec)	2.3 ~ 2.5	
Sample	Serpentine Saponite	Serpentine
Accumulated Dose (ions/cm <sup>2</sup> )		1.5×10 <sup>16</sup>
		6.1×10 <sup>16</sup>
		1.5×10 <sup>17</sup>
	1.3×10 <sup>18</sup>	3.4×10 <sup>17</sup>
		5.7×10 <sup>17</sup>
		1.1×10 <sup>18</sup>
		1.7×10 <sup>18</sup>

### 反射スペクトル測定

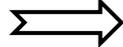
Instrument : FTIR  
Spectral range : 2.0 – 5.0 μm  
Foot print : φ 5 mm

4

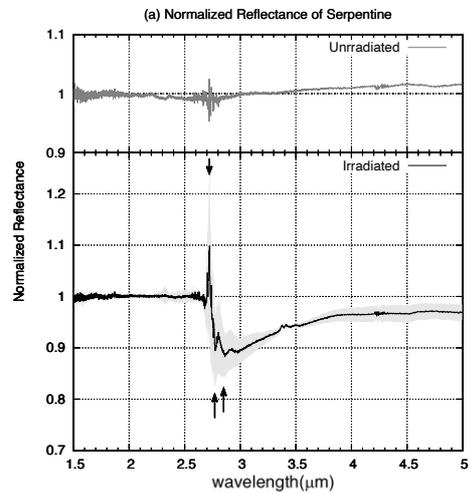
## Serpentineのスペクトル変化 [Nakauchi et al. 2021]



スペクトル変化を強調



$$\frac{R_{H\_Irrad}(\lambda)}{R_{H\_Unirrad}(\lambda)}$$

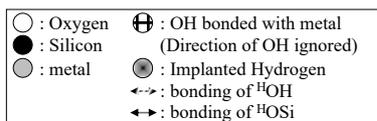
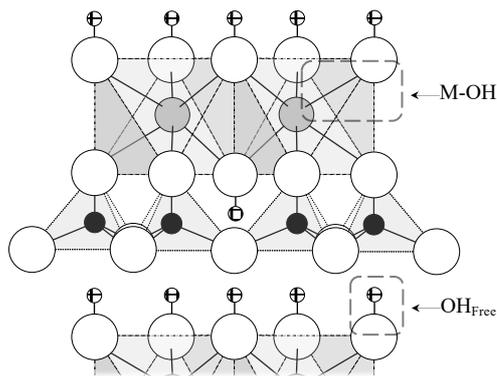


at 2.72 μm : stretching of OH (水素結合なし)  
 at 2.77 μm : Si-O-H...<sup>H</sup>OH (水素結合あり)  
 at 2.85 μm : Si-O-H...<sup>H</sup>OSi (水素結合あり)

5

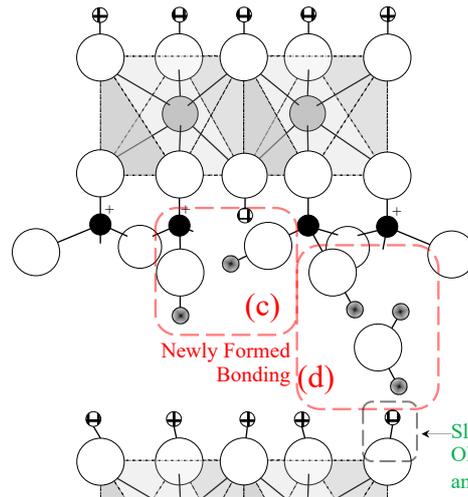
## 水素イオンとSerpentineの反応 [Nakauchi et al. 2021]

(a) Serpentineの結晶構造 (H照射前)



This figure is NOT in scale.

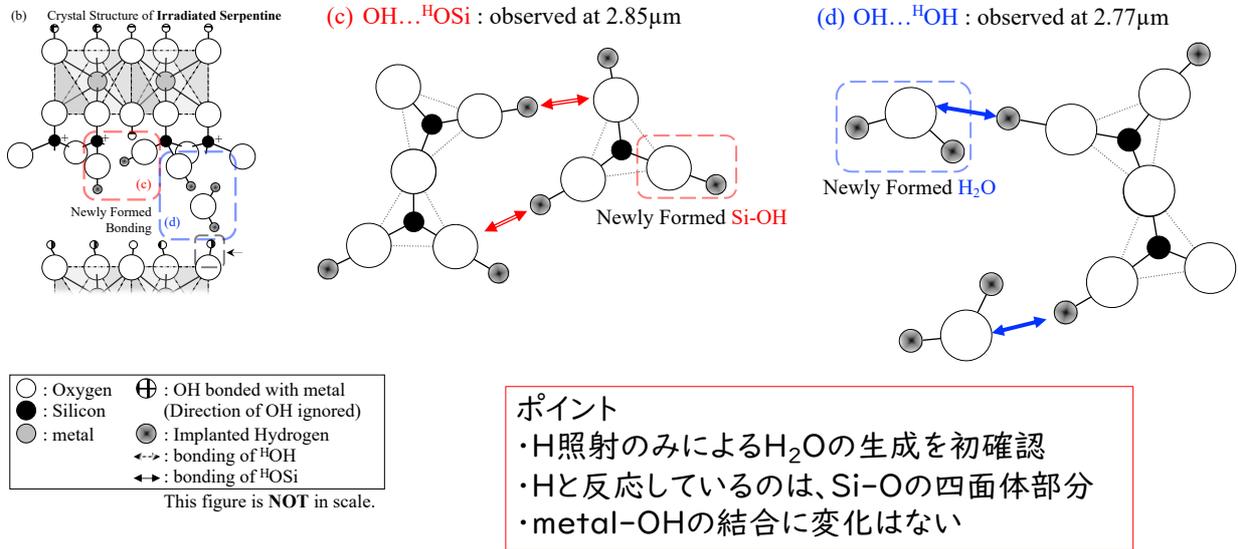
(b) Serpentineの結晶構造 (H照射後)



Slightly modified OH<sub>Free</sub> due to amorphization

6

## 水素イオンとSerpentineの反応 [Nakauchi et al. 2021]



7

## 水素イオン照射での生成物(実験)

	鉱物	照射量	反応箇所	reference
OH/H <sub>2</sub> Oの生成を確認できず	Anorthite (CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )	H <sup>+</sup> , 1 keV, ~10 <sup>18</sup> ions/cm <sup>2</sup>	Oの優先的なスパッタが発生? Anorthiteは反射スペクトルにノイズが多い	D.J. Burke et al., 2011
	Ilmenite (FeTiO <sub>3</sub> )			
H照射でOHのみ生成確認	SiO <sub>2</sub> glass	H <sup>+</sup> , 2-10 keV, ~10 <sup>17</sup> ions/cm <sup>2</sup>	Si-O四面体	M.J. Schaible et al., 2014 H. Tang et al., 2021
	Olivine	H <sup>+</sup> , 5 keV, ~10 <sup>17</sup> ions/cm <sup>2</sup>		
	Olivine	H <sup>+</sup> , 7 keV, ~10 <sup>17</sup> ions/cm <sup>2</sup>		
	Clinopyroxene			
	Orthopyroxene			
Volcanic Glass				
H照射のみでH <sub>2</sub> O生成確認	Serpentine	H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , 10 keV, ~10 <sup>18</sup> ions/cm <sup>2</sup>		Y. Nakauchi et al., 2021
	Saponite			
	Plagioclase	H <sup>+</sup> , 7 keV, ~10 <sup>17</sup> ions/cm <sup>2</sup>		H. Tang et al., 2021

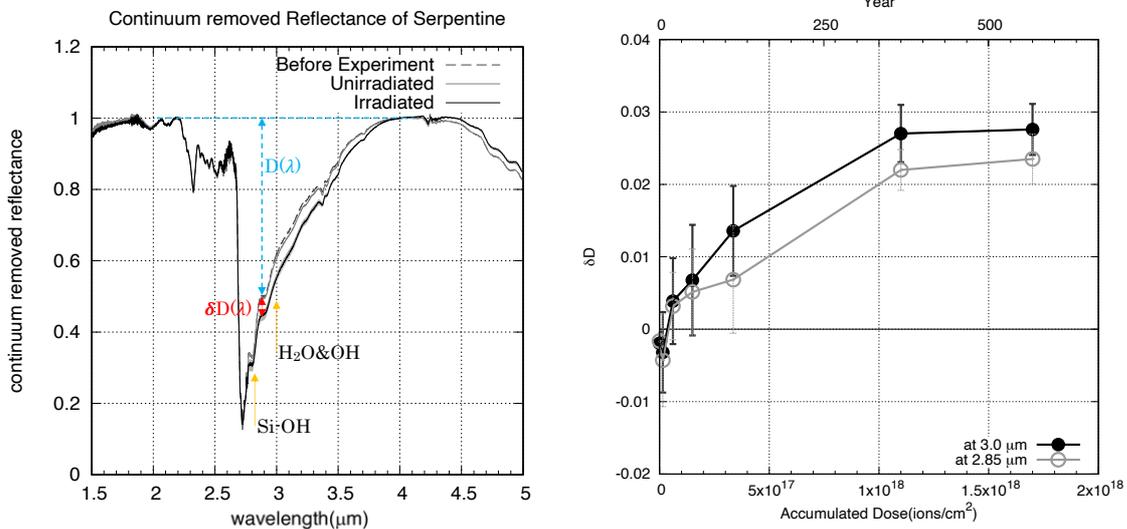
Y. Nakauchi et al., 2021 : 先行研究でH<sub>2</sub>Oが観察できなかったのは、照射量不足であると考えている

H. Tang et al., 2021 : PlagioclaseのみでH<sub>2</sub>Oが観察できたのは、SiO四面体の表面密度が高いためとしている

→ SiO四面体と照射Hの反応頻度などで整理が可能となるかもしれない。

8

### OH, H<sub>2</sub>Oの生成が飽和するまでの速度 [Nakauchi et al. 2021]

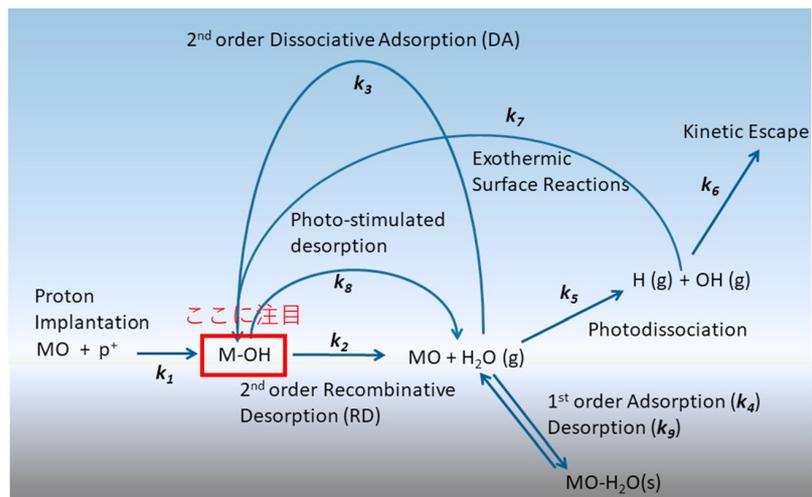


スペクトル吸収強度の変化量  $\delta D$  は  $\sim 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> で止まる  
 → OH, H<sub>2</sub>Oの生成は  $10^2-10^3$  yrで飽和する。

9

### 太陽風により生成されたOHの濃度推移 [B.M. Jones et al., 2018]

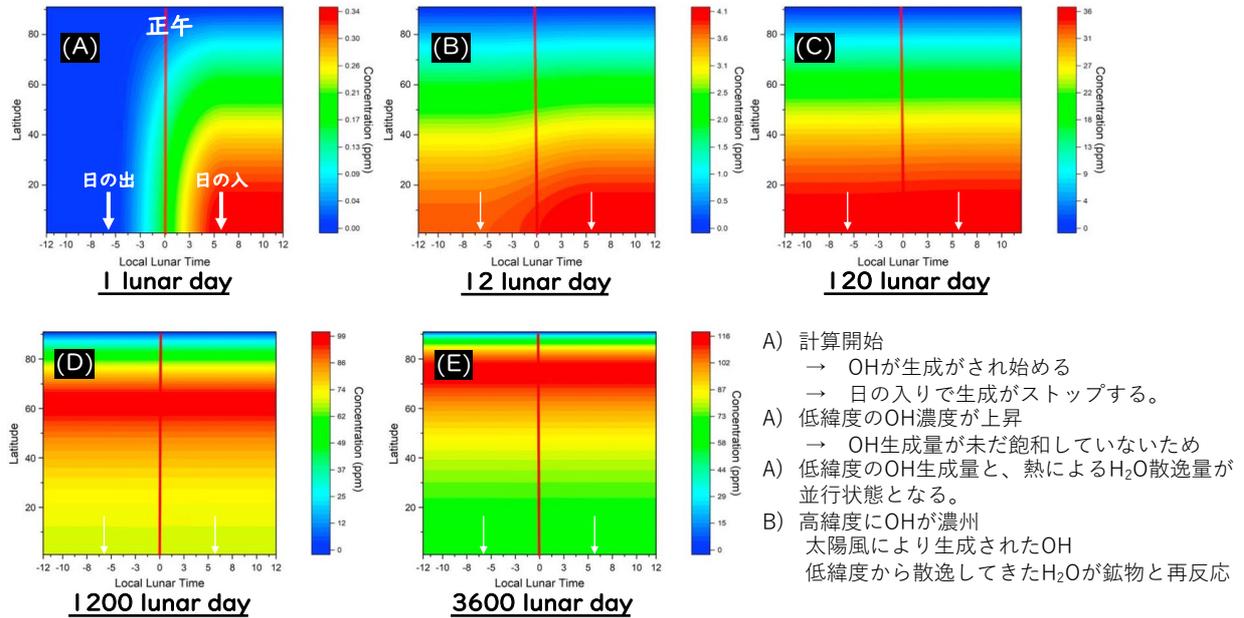
月面上のOH/H<sub>2</sub>Oの長期的な進化をシミュレートする化学速度論モデルが提案された。



- モデルには2つの基本的な仮定
- 結合した水酸基(M-OH)は太陽風のプロトン注入によって形成される。
  - 気相水は主に二次熱脱着によって生成され、二次熱吸着と光解離によって破壊される。

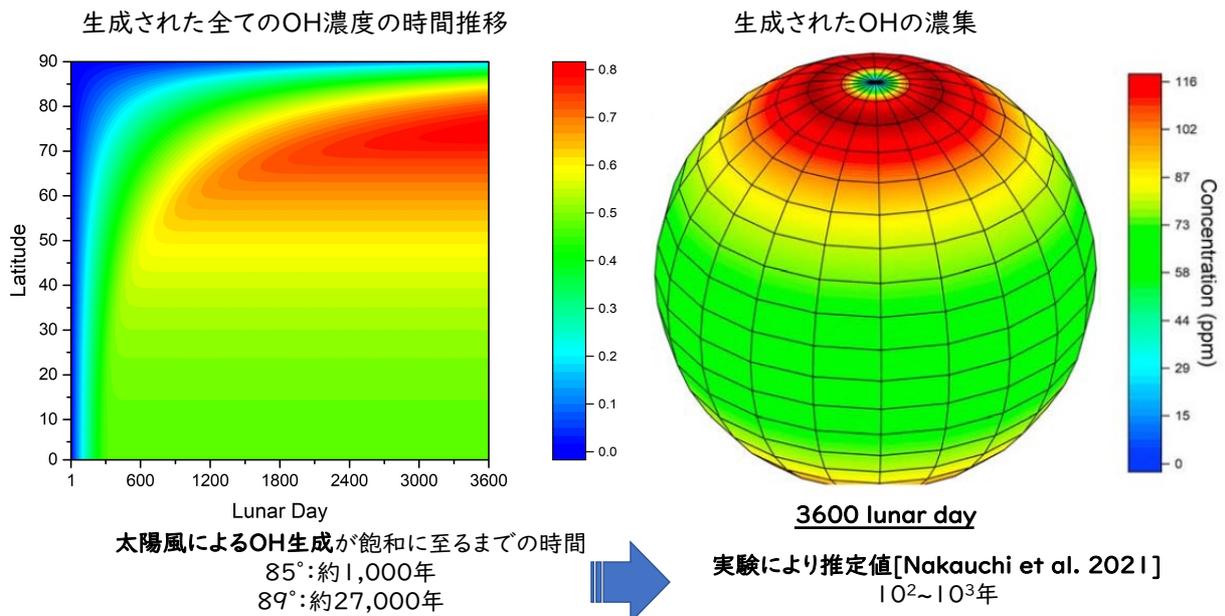
10

太陽風により生成されたOHの濃度推移[B.M. Jones et al., 2018]



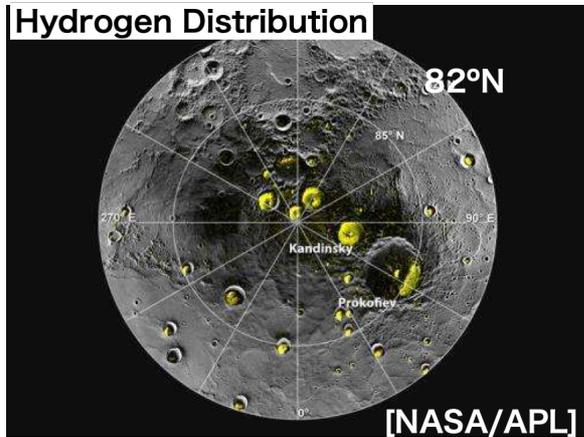
11

太陽風により生成されたOHの濃度推移[B.M. Jones et al., 2018]



12

## 水星の極域の氷？



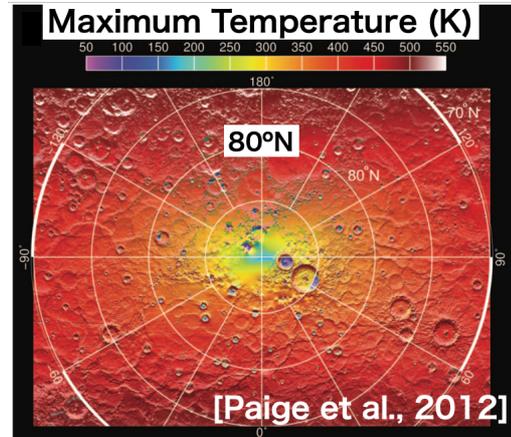
水星の北極域に水氷の存在可能性

Neutron Spectroscopy :

detected hydrogen atoms [Lawrence(2012)]

Radar :

detected high radar backscatter [Neumann(2012)]



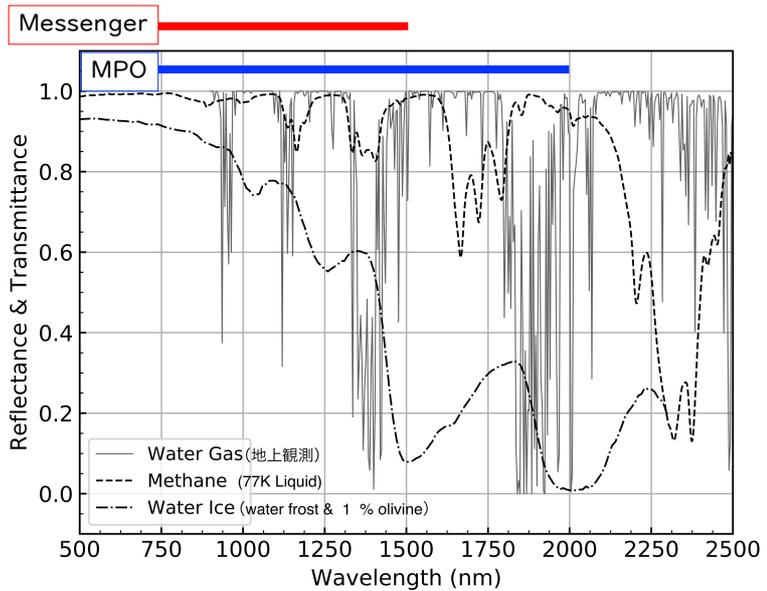
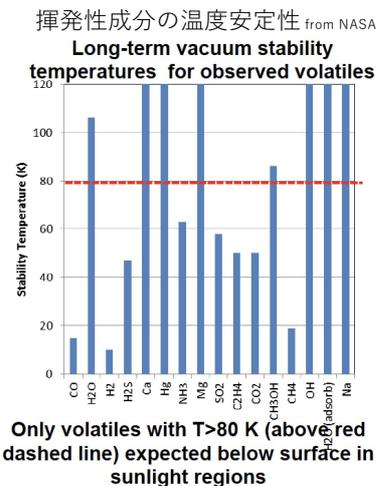
水星の北極域の温度環境でも水氷の存在可能 [Paige(2012)]

★永久影以外では、85° 付近が月でのOH濃集領域と同程度の温度  
→先のシミュレーションのように、OHが形成されれば極域への水の輸送も可能性がある？ただし、表層鉱物種によりOH形成効率が異なる。

13

## BepiColomboで観測可能な揮発性成分は？

水氷の起源により観測できる成分が異なる  
太陽風のみ: OH基やH<sub>2</sub>Oのみ  
彗星など : 上記以外の揮発性成分



14

## まとめ

---

### 太陽風プロトンと天体表層鉱物の反応に注目し、実験を行った

- 太陽風プロトンの照射 “のみ” でH<sub>2</sub>Oが生成可能
- プロトン照射のみでH<sub>2</sub>Oが生成することが確認されている鉱物  
3種のみ: plagioclase, serpentine, saponite
- 太陽風プロトンの照射でOH/H<sub>2</sub>Oを形成するにはSiOがカギ?
- OH/H<sub>2</sub>Oの生成が飽和するのは 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup> yr  
(実験、シミュレーションで概ね一致)

### 水星の極域の水

- 水星でも月と同じような輸送プロセスを考えると、極域にOH/H<sub>2</sub>Oを輸送可能
- BepiColombo(MPO)に搭載の分光カメラの観測波長域には揮発性成分の吸収特徴が複数存在

15

ありがとうございました。

16

## 付録) 太陽風により生成されたOHの濃度推移[B.M. Jones et al., 2018]

Mineral	Pre-exponential values ( $\nu$ )	RD Activation Energies	Fraction of Regolith Analogue
SiO <sub>2</sub> [Gun'ko et al., 1998]	$4.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	100 kJ mol <sup>-1</sup>	50%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [Nelson et al., 1998]	$1.0 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$	96 kJ mol <sup>-1</sup>	20%
TiO <sub>2</sub> [Henderson, 1996]	$4.9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	75 kJ mol <sup>-1</sup>	15%
MgO [Stirniman et al., 1996]	$1.0 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$	63 kJ mol <sup>-1</sup>	15%

k <sub>1</sub>	Solar Wind Implantation	$4 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
k <sub>2</sub>	Recombinative Desorption	$\nu e^{(-E/RT)} \nu = 10^{13} \text{ s}^{-1}$ , $E = F(\theta)$
k <sub>3</sub>	Dissociative Adsorption	$f e^{(-E/RT)}$ , $f = 1 \text{ s}^{-1}$ , $E = 50 \text{ kJ/mol}$
k <sub>4</sub>	Adsorption	$f e^{(-E/RT)} \text{ s}^{-1}$ , $f = 1$ , $E = 0 \text{ kJ/mol}$
k <sub>5</sub>	Photodissociation	$6.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
k <sub>6</sub>	Kinetic Escape	$0.5 \text{ s}^{-1}$
k <sub>7</sub>	OH/H Radical Reaction	$f e^{(-E/RT)}$ , $f = 1 \text{ s}^{-1}$ , $E = 0 \text{ kJ/mol}$
k <sub>8</sub>	Photon Stimulated Desorption	$\sigma L_y$ , $\sigma = 6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , $L_y = \text{Lyman alpha flux at Latitude } L$
k <sub>9</sub>	Desorption	$\nu e^{(-E/RT)} \text{ s}^{-1}$ , $\nu = 10^{13} \text{ s}^{-1}$ , $E = 55 \text{ kJ/mol}$

$$\frac{d[MO]}{dt} = -k_1(1 - [MO]) \quad \text{eq(1)}$$

$$\frac{d[MOH]}{dt} = k_1(1 - [MO]) - k_2[MOH]^2 + k_3(1 - [MOH])^2[H_2O]_g + 2k_7(1 - [MOH])[OH]_g - k_8[MOH]^2 \quad \text{eq(2)}$$

$$\frac{d[H_2O]_g}{dt} = k_2[MOH]^2 - k_3(1 - [MOH])^2[H_2O]_g + k_8[MOH]^2 - k_5[H_2O]_g - k_4(1 - [MOH])[H_2O]_g + k_9[H_2O]_s \quad \text{eq(3)}$$

$$\frac{d[OH]_g}{dt} = k_5[H_2O]_g - k_7(1 - [MOH])[OH]_g - k_6[OH]_g \quad \text{eq(4)}$$

$$\frac{d[H]_g}{dt} = k_5[H_2O]_g - k_7(1 - [MOH])[H]_g - k_6[H]_g \quad \text{eq(5)}$$

$$\frac{d[H_2O]_s}{dt} = +k_4(1 - [MOH])[H_2O]_g - k_9[H_2O]_s \quad \text{eq(6)}$$