

Groundwater hydrology and water-rock reactions around Gale Crater on early Mars

初期火星ゲイルクレータ周辺の地下水循環と水-岩石反応

Symposium on Planetary Science 2019

2019/2/21

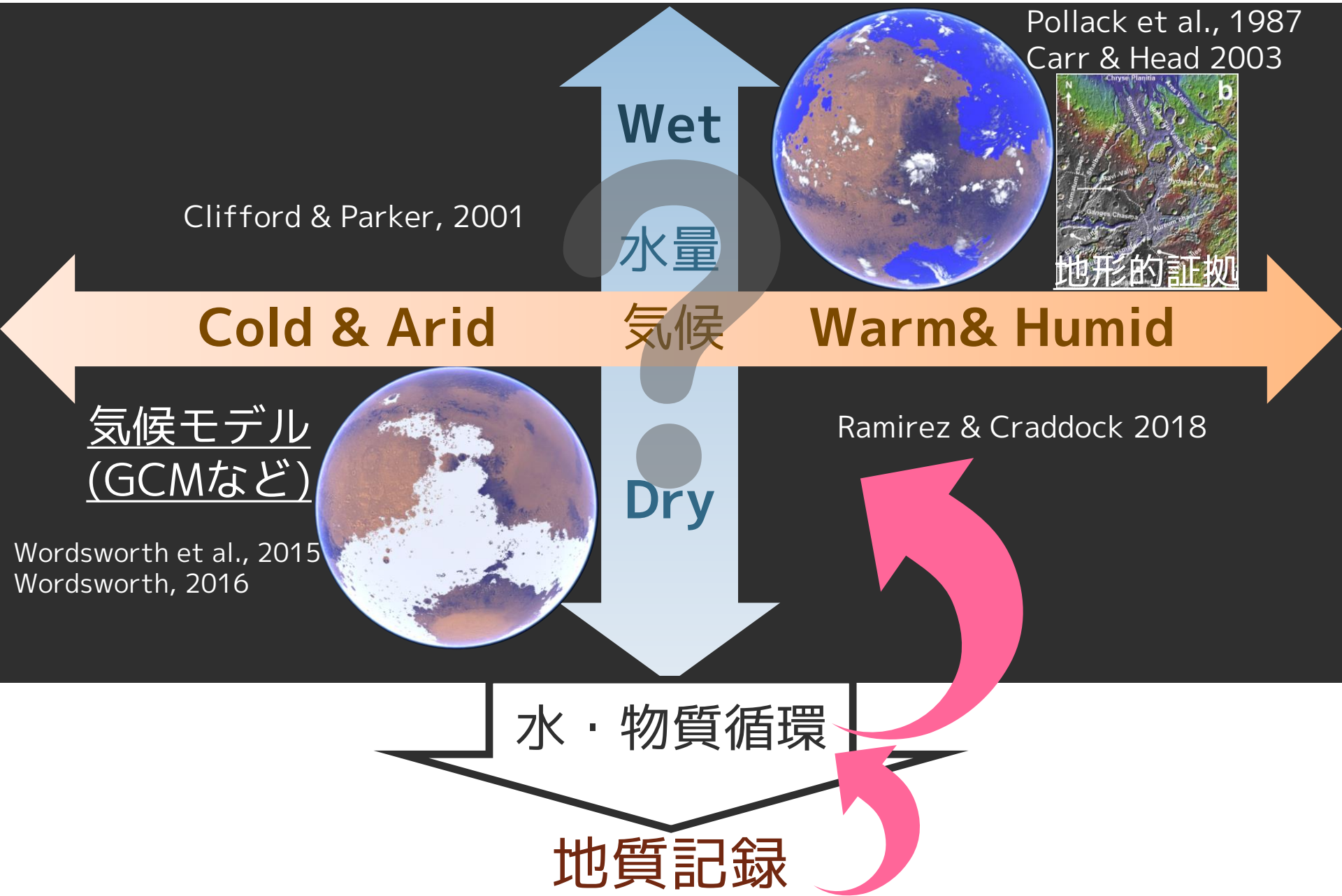
野田夏実^{1,2}, 関根康人¹, 丹秀也^{1,2}, 渋谷岳造³, 玄田英典¹

¹東京工業大学地球生命研究所,

²東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻,

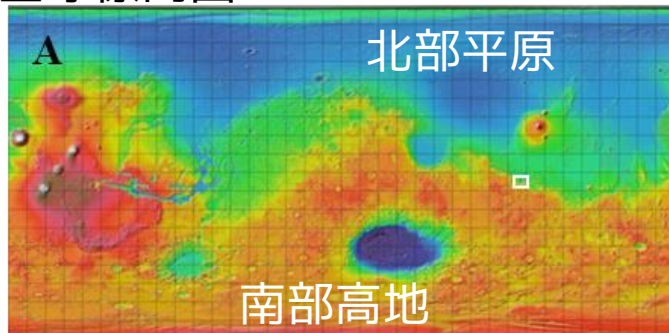
³海洋研究開発機構

背景: 初期火星の気候や水量は未解明

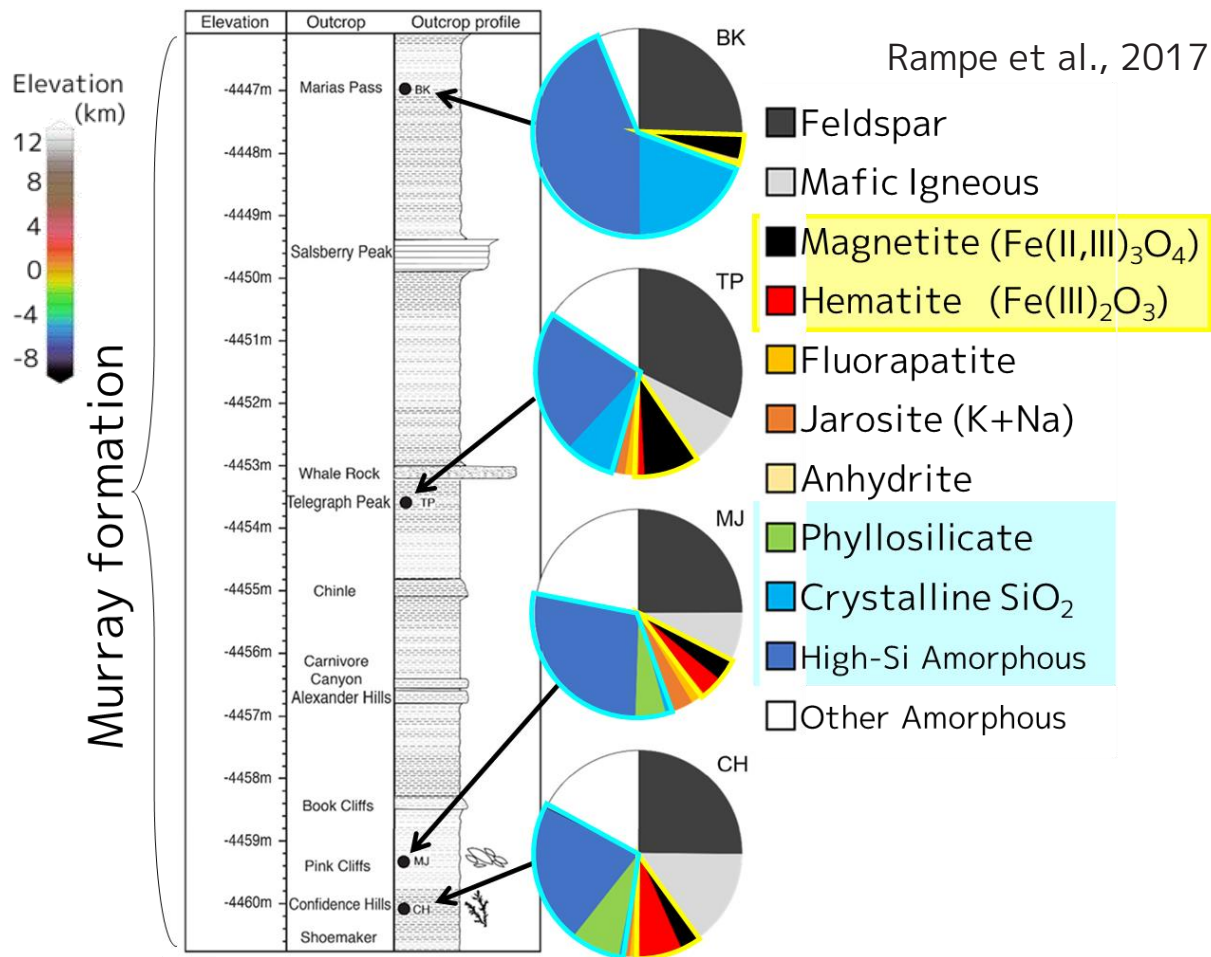
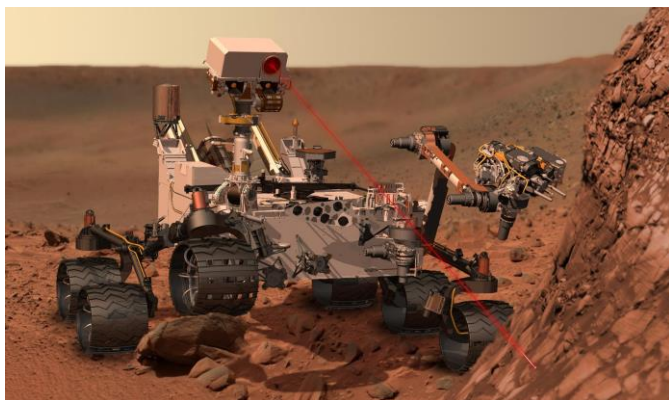
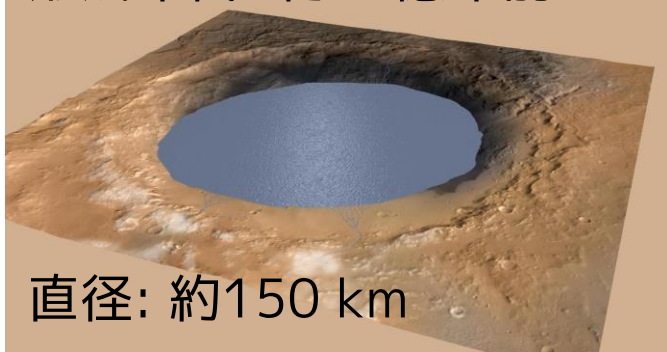


背景: ゲイルクレータにおける湖底堆積物の情報

全球標高図



形成年代: 約37億年前



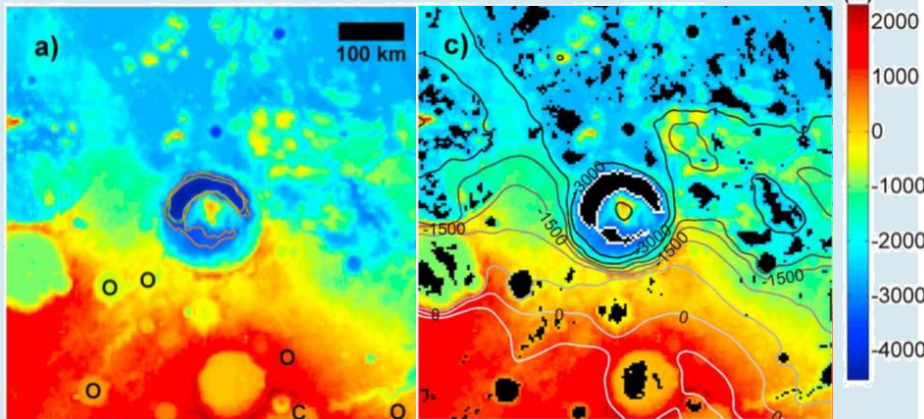
シリカや鉄酸化物に富む層準
→ 地下(熱)水による供給?

本研究で初めて着目

先行研究の問題点

水循環モデル

水循環モデルで気候と水分布の関係を制約



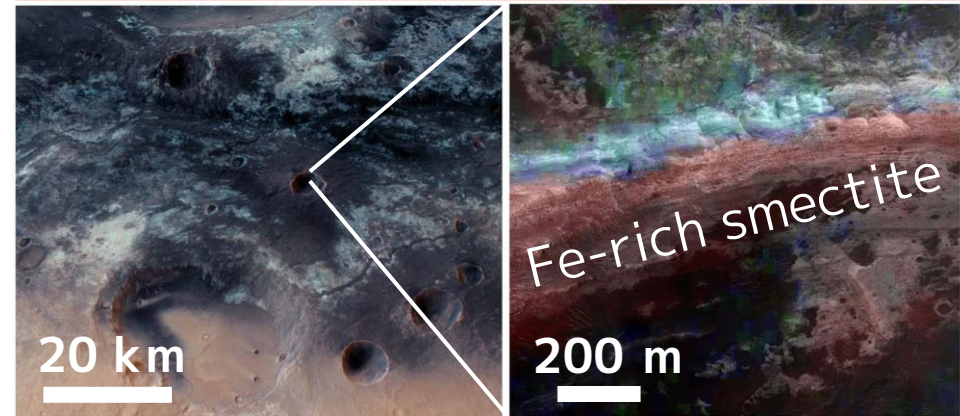
(Horvath & Andrews-Hanna, 2017)

地下を一層として扱うモデル

3次元的な地下水流動は不明

熱水-岩石反応

鉄の多い粘土鉱物が全球的に検出



(Bishop et al., 2018)

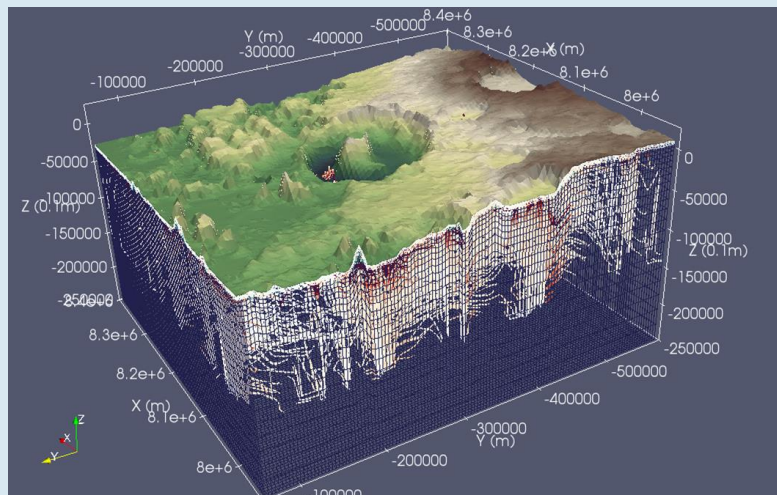
地下での熱水-岩石反応は
鉱物組成で示唆されるのみ

溶存組成は不明

本研究の目的・解決方法

水循環モデル

湧昇の有無をシミュレーション



3次元水循環モデルに
重力可変機構を追加開発

目的1 地下水流動を解明

地下水が湧昇する条件は？

目的2 溶存組成を解明

Si, Fe濃度の支配要因は？

目的3 地下水湧昇はシリカや鉄を供給したか？

それはどのような気候・水量を意味するか？

熱水-岩石反応

初期火星地下での反応を再現



模擬岩石を用いた熱水実験

手法: モデル“GETFLOWS”の概要

入力データ

地形(標高)

地質(透水性・空隙率等)

気候(蒸発量・降水量等)

- 表層水と地下水を同時解析
- 完全陰的風上差分法により安定かつ高速に計算

+ 重力加速度(初めて可変に)

支配方程式

• 質量保存則

• ダルシー則(地下水)

$$\text{流速 } v = - \frac{\text{透水性 } K}{\text{粘性係数 } \mu} \nabla(P - \rho g Z)$$

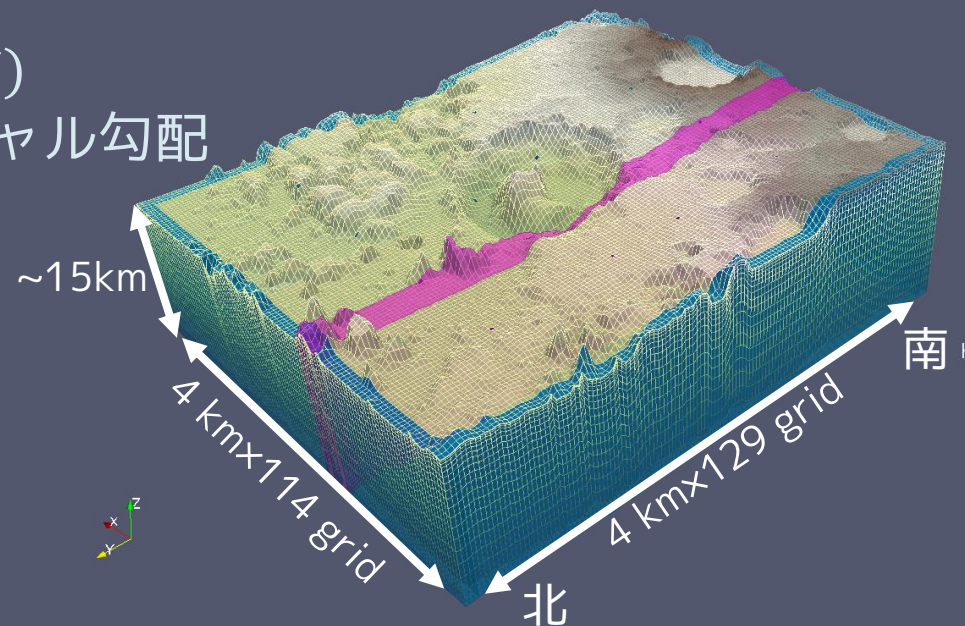
ポテンシャル勾配

• マニング則(地表流)

出力データ

各グリッドの

気相圧力・水相飽和率



手法: 本研究のセッティング

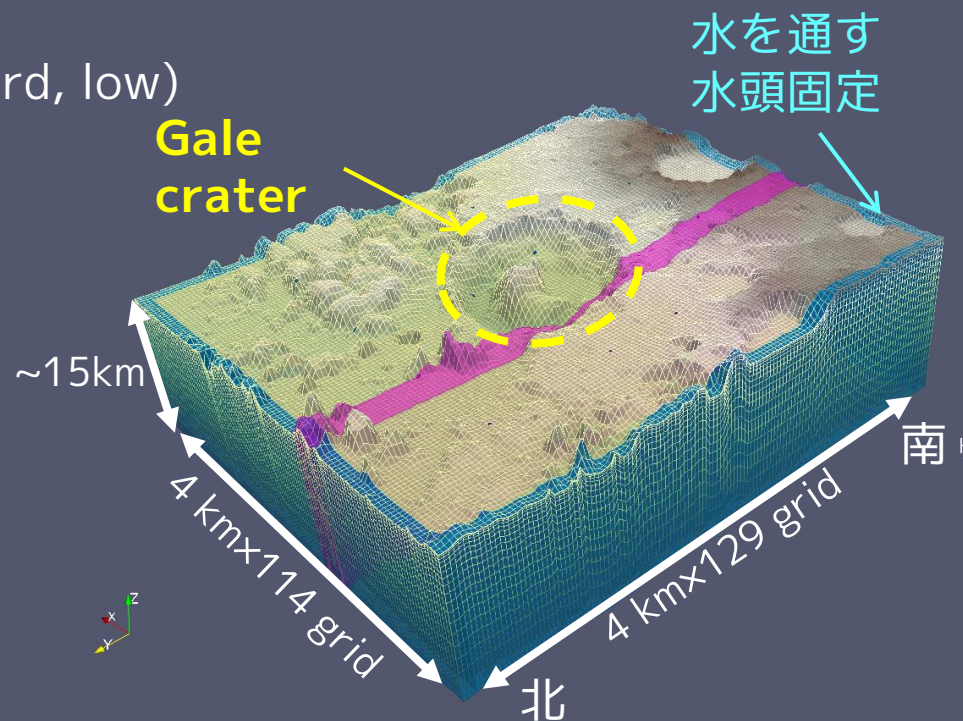
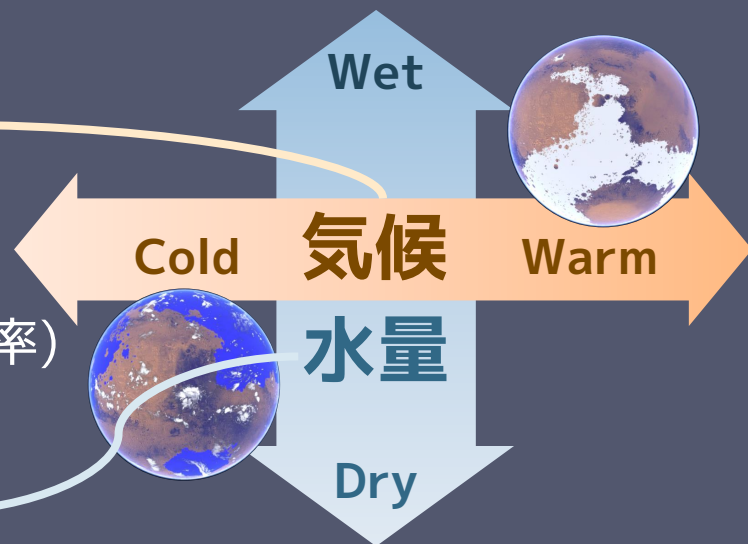
19の異なる条件で計算

- 正味の蒸発率 E_{net} (=蒸発率 - 降水率)
(0, 0.1, 1, 10 mm/day)
- 周囲の地下水頭の深さ d_0
(地表から0, 0.5, 1, 2 km)
- 透水率 K の鉛直変化 (high, standard, low)



表層水の分布や
地下水湧昇の有無を比較

目的1 地下水が湧昇する条件は？



結果：表層水分分布

低

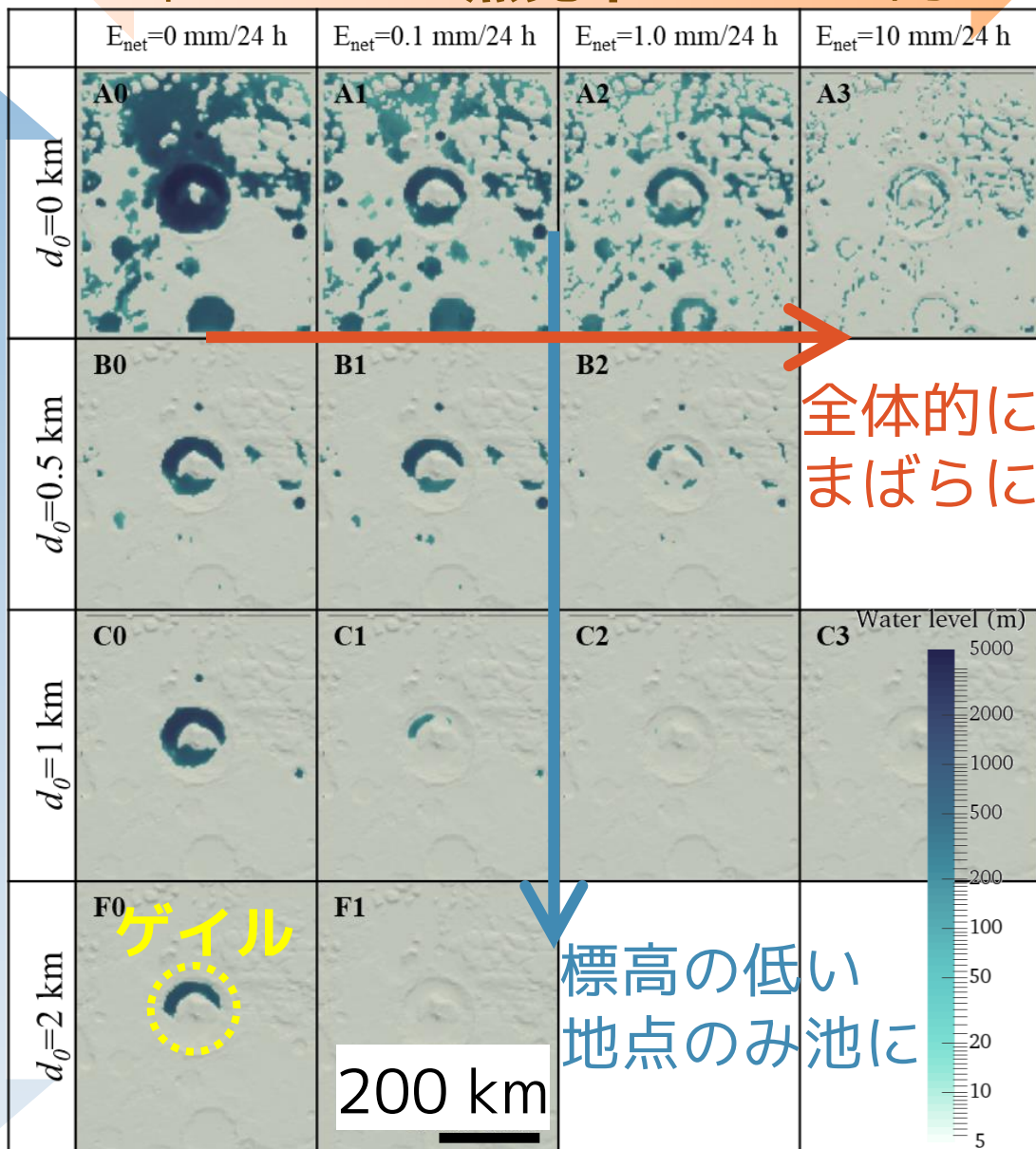
蒸発率

高

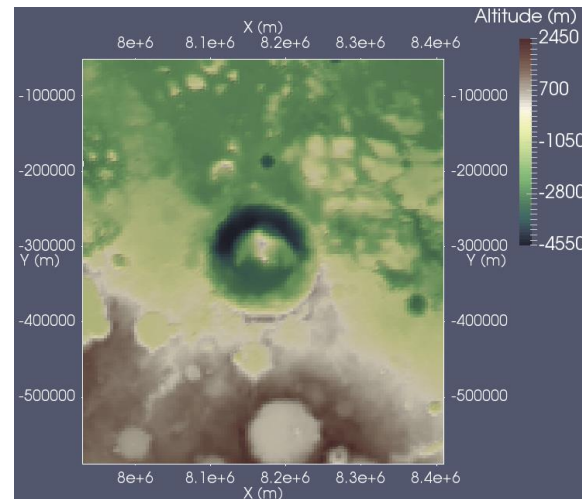
浅

地下水頭

深



標高図



ゲイルが湖となっても
蒸発の有無により
周囲の水分分布に差異

結果：蒸発が変化した場合

低

蒸発率

高

浅

地下水

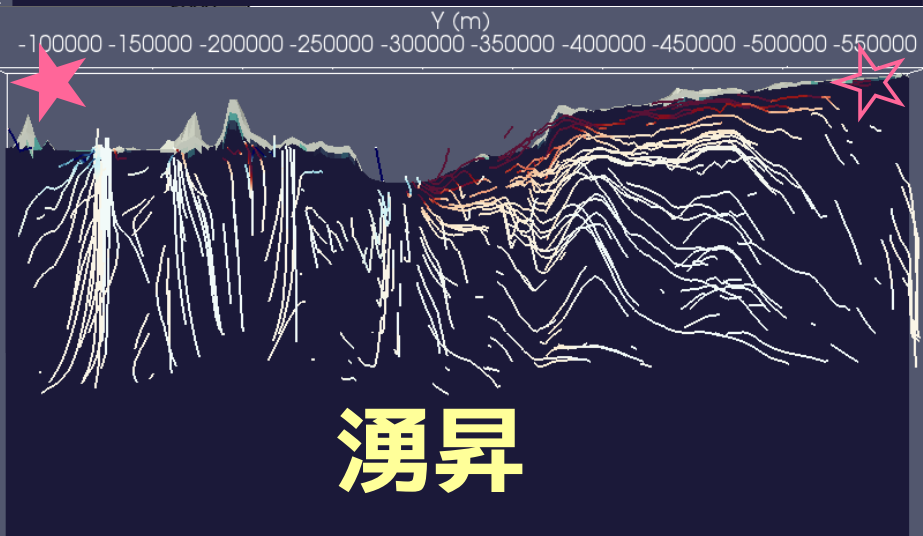
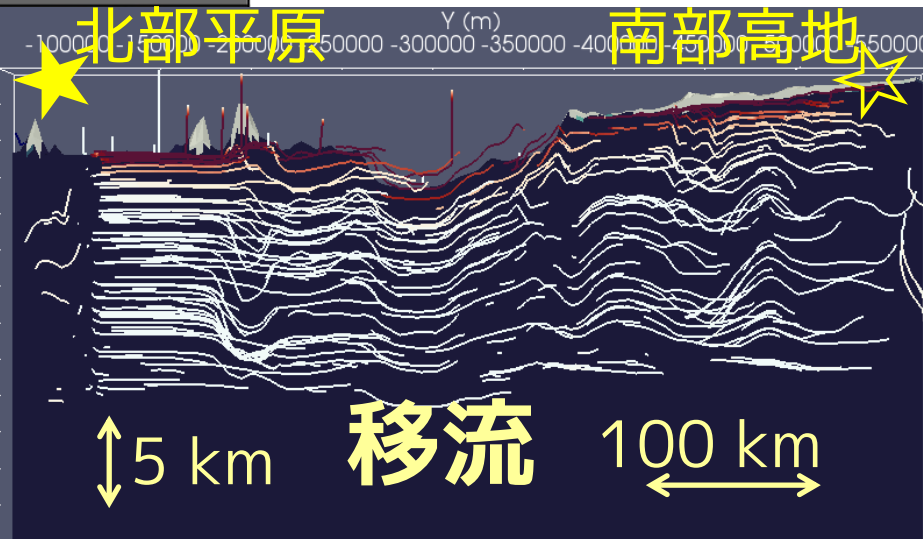
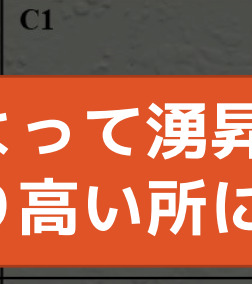
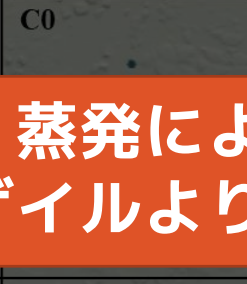
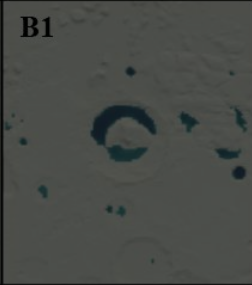
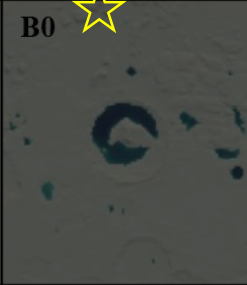
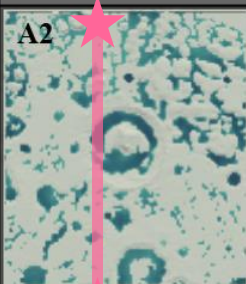
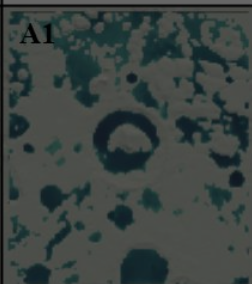
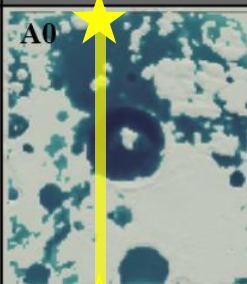
深

$E_{net}=0$ mm/24 h

$E_{net}=0.1$ mm/24 h

$E_{net}=1.0$ mm/24 h

$E_{net}=10$ mm/24 h



蒸発によって湧昇
→ゲイルより高い所にも湖

F0

F1

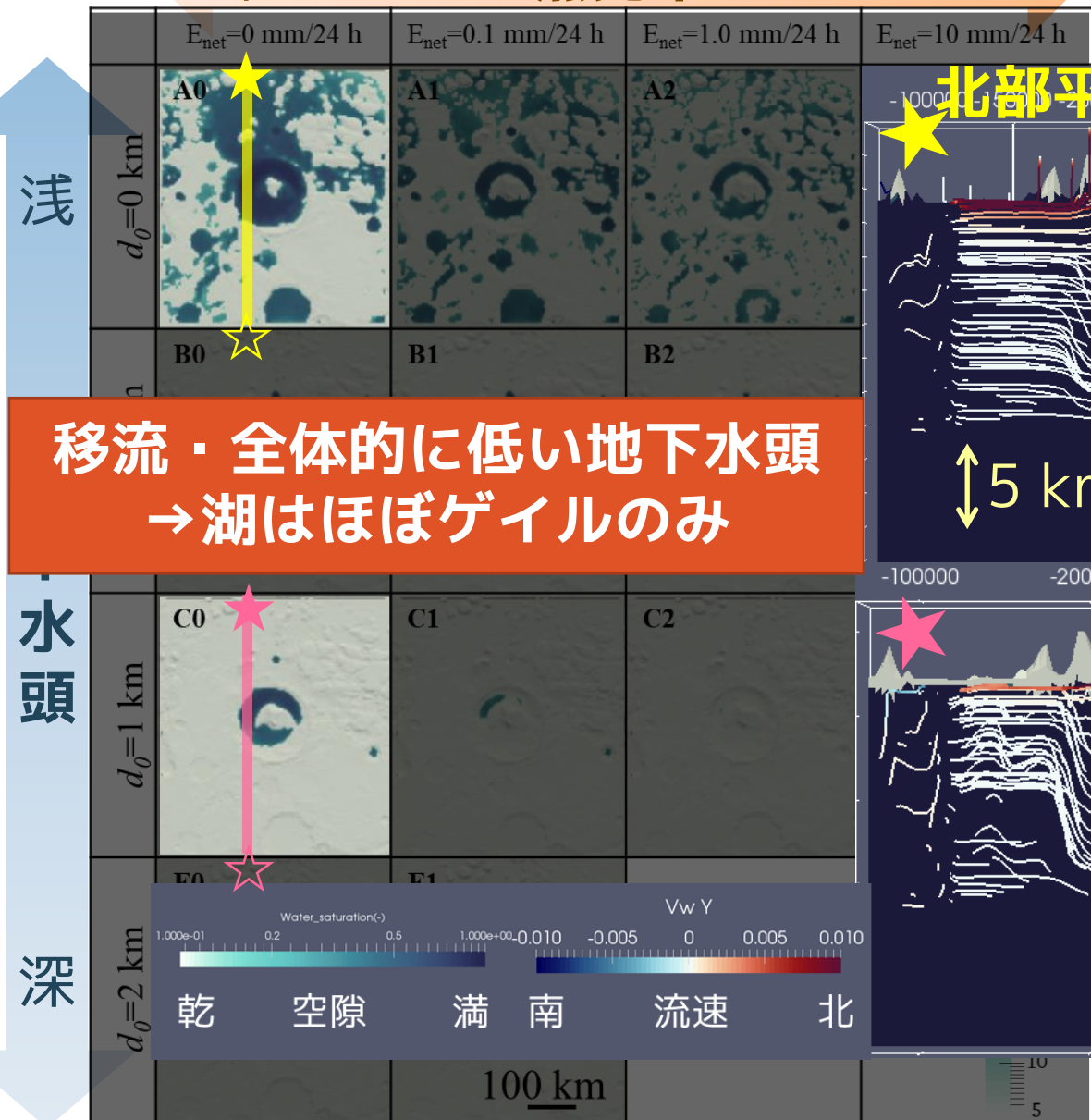
Water_saturation(-) 1.000e-01 0.2 0.5 1.000e+00 0.010 -0.005 0 0.005 0.010

乾 空隙 満 南 流速 北

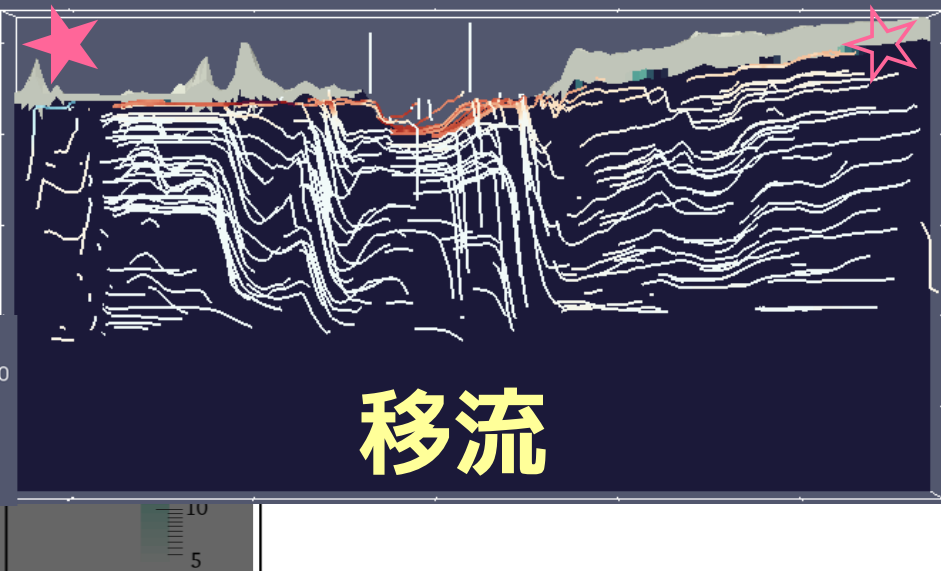
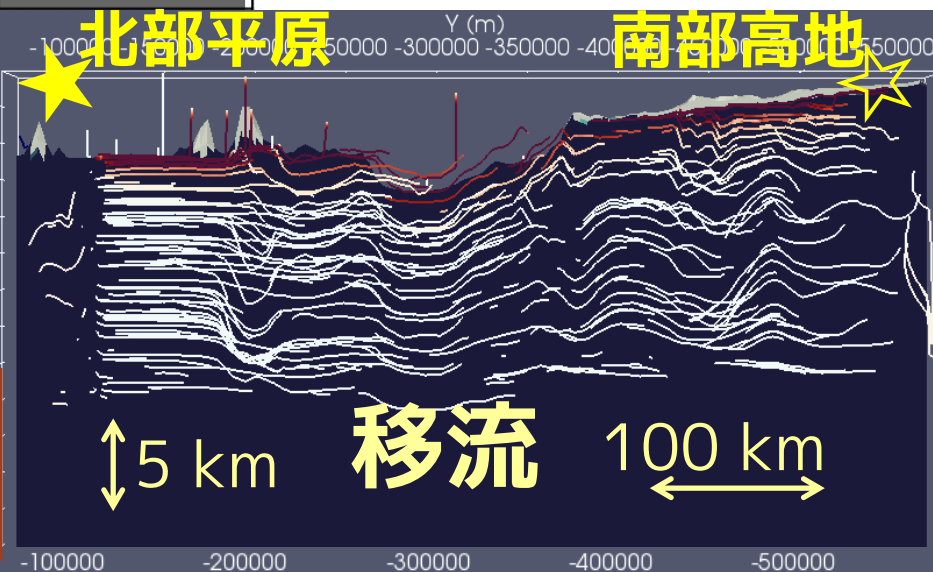
100 km

結果：地下水頭が変化した場合

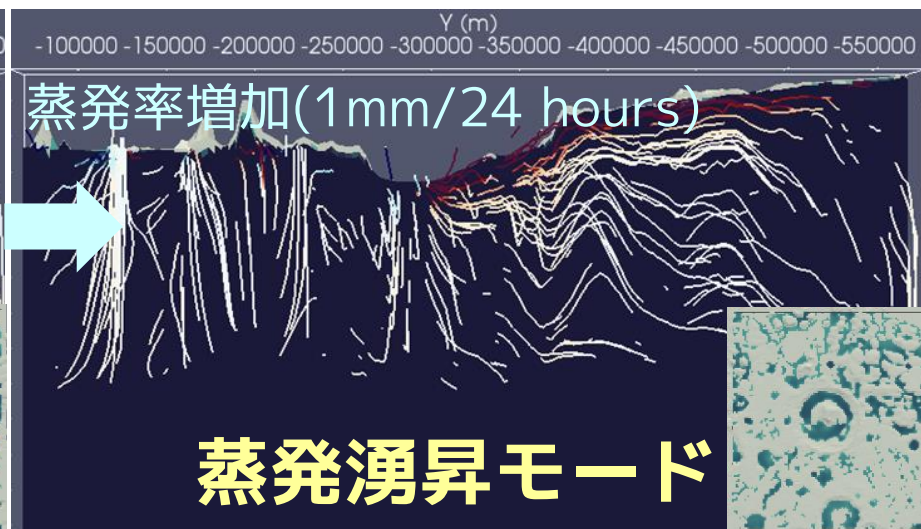
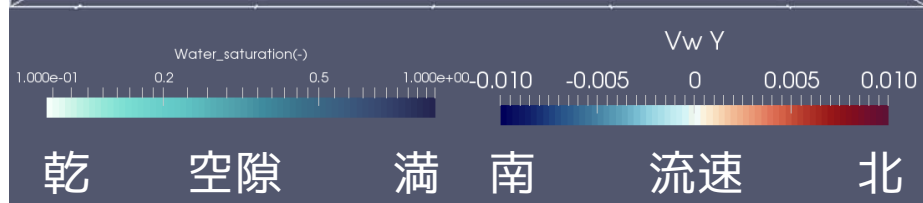
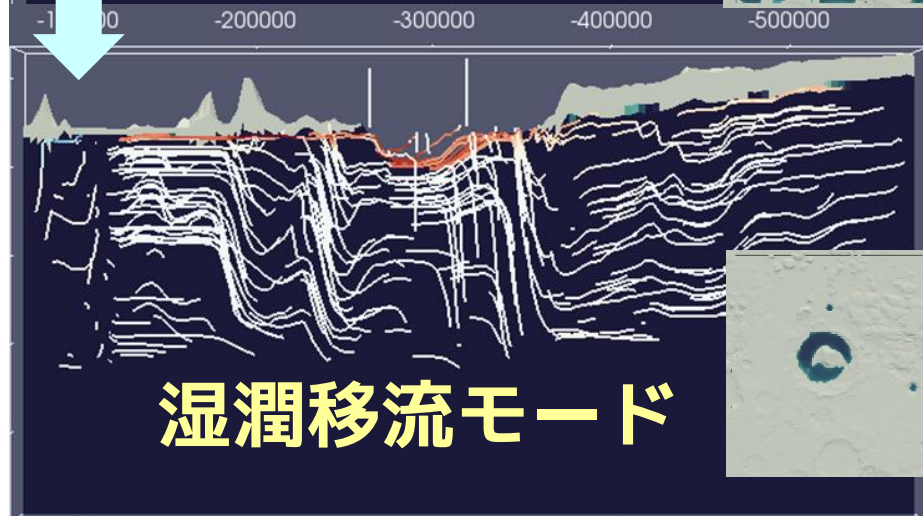
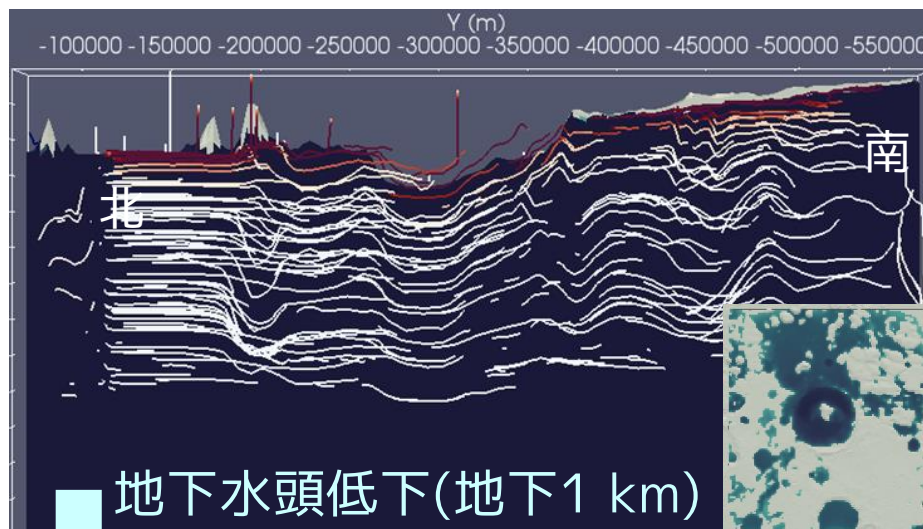
低 蒸発率 高



移流・全体的に低い地下水頭
→湖はほぼゲイルのみ



結果: 地下水流の2つのモード

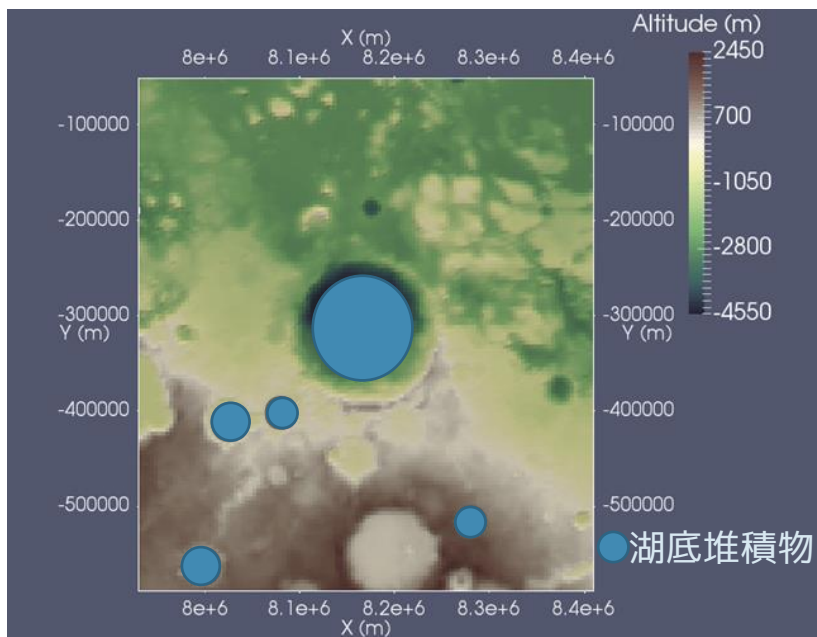


蒸発が強いと
湧昇が引き起こされる。

蒸発が弱いと
移流が卓越する。

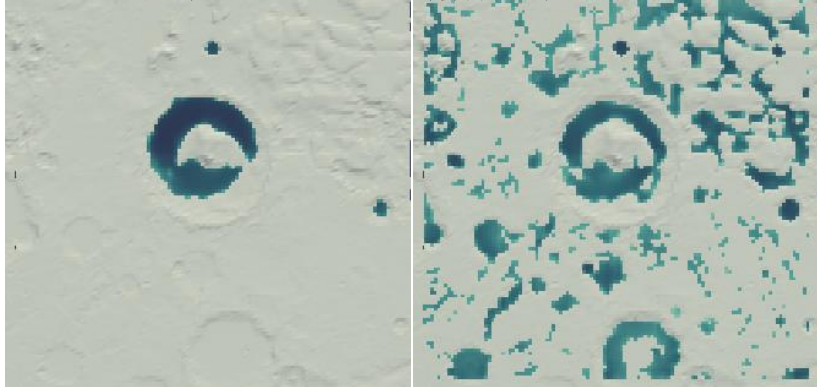
正味蒸発率0.1-1 mm/day
を境界にモード変化

地質記録との比較と初期火星気候への示唆



湿潤移流モード

蒸発湧昇モード

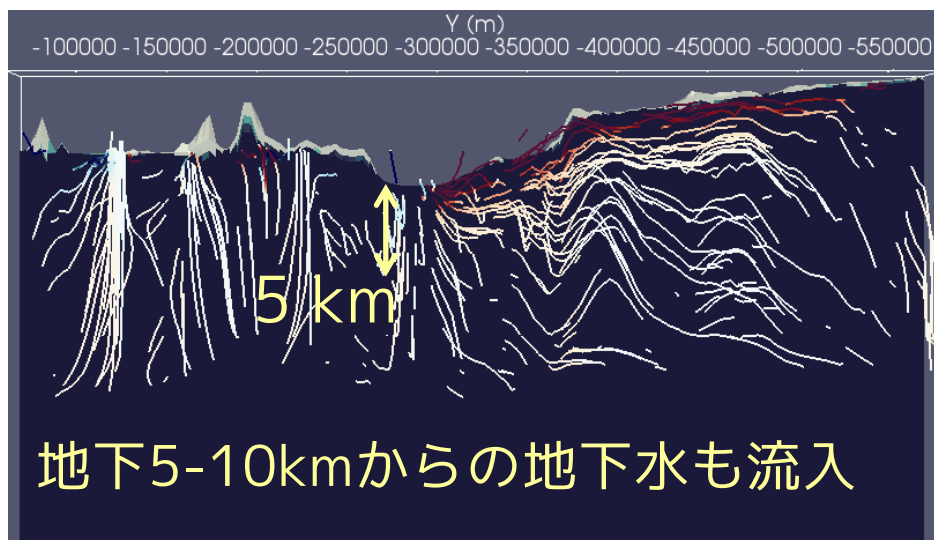


明らかになったこと

ゲイル周辺の湖の痕跡は
地表への湧昇を引き起こす

乾燥気候($> \sim 1$ mm/day)
浅い地下水頭($< \sim 1$ km)

の存在を支持する



初期火星の**地温勾配**(10-20 K/km)
を考えると、**50-100°C以上**を経験

手法: 合成模擬岩石を用いた熱水実験

目的2 Si, Fe濃度の支配要因は？

実験条件

200°C 100 Mpa (地下10-20km)

初期物質



礫岩の組成を再現
(Mangold et al., 2016)

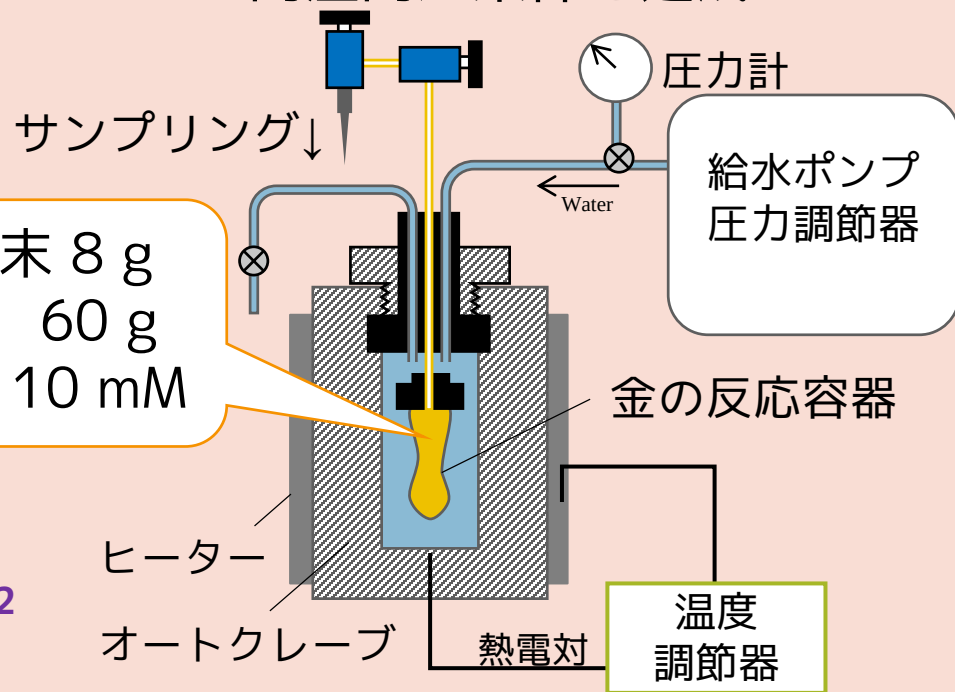
分析

溶液サンプル

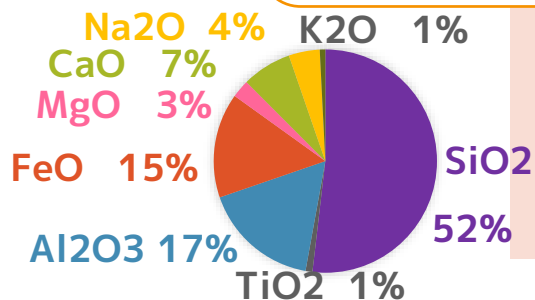


溶存イオン濃度 (ICP-AES)
CO₂・H₂濃度
(ガスクロマトグラフィー)
pH (pHメーター)

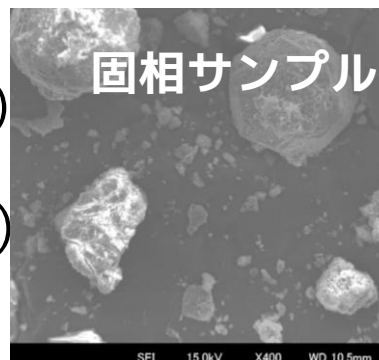
装置概要 給水ポンプ・ヒーターで
高温高圧条件を達成



岩石の粉末 8 g
超純水 60 g
CO₂ 10 mM

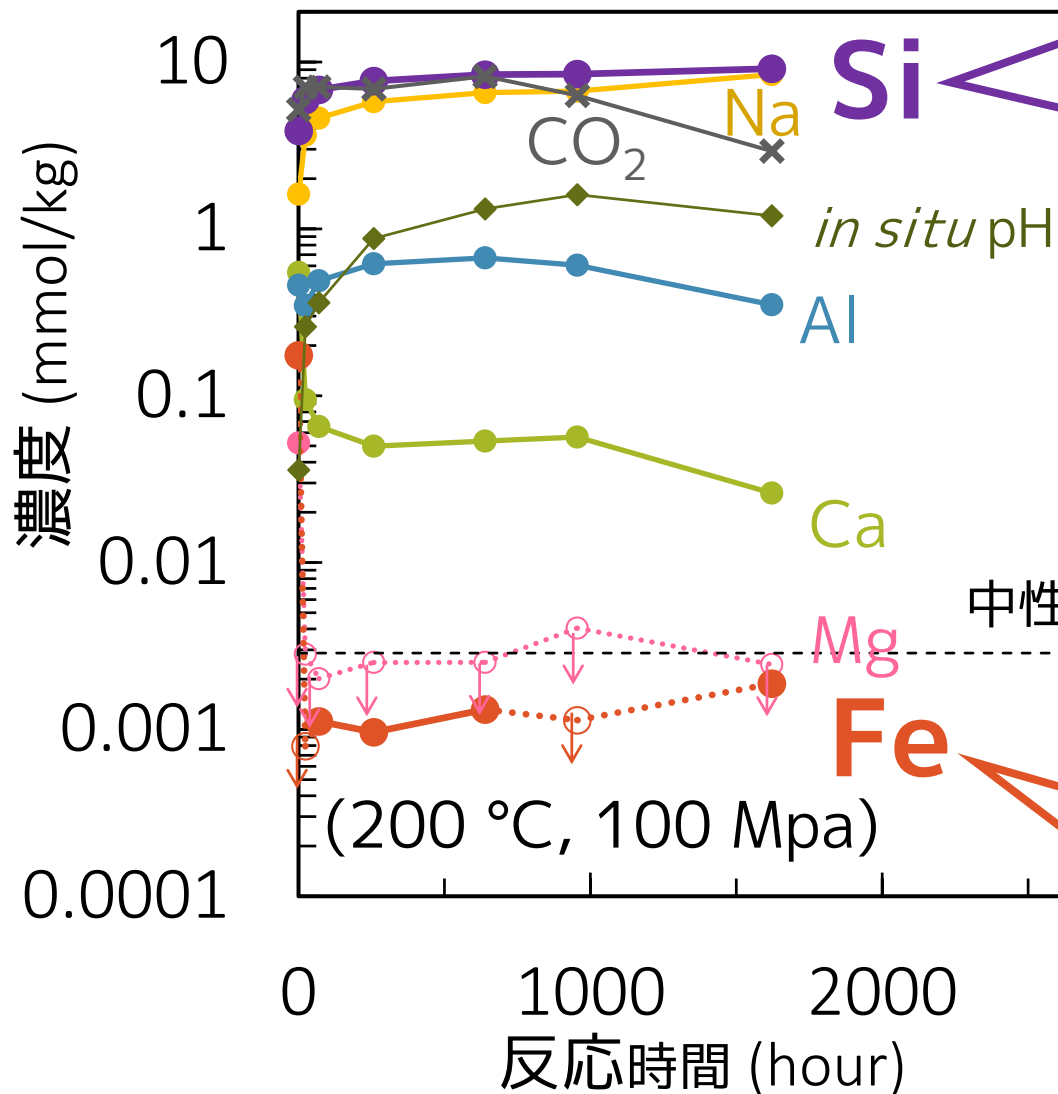


固相サンプル

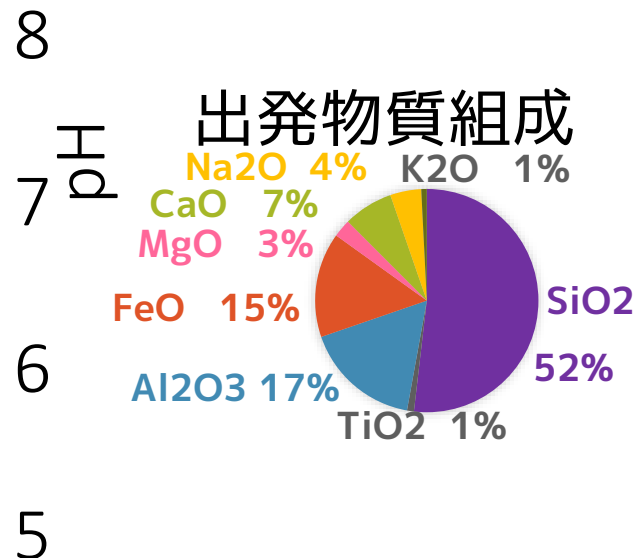


鉱物組成 (XRD)
化学組成・形態
(SEM-EDS)

結果：溶存種の時間変化

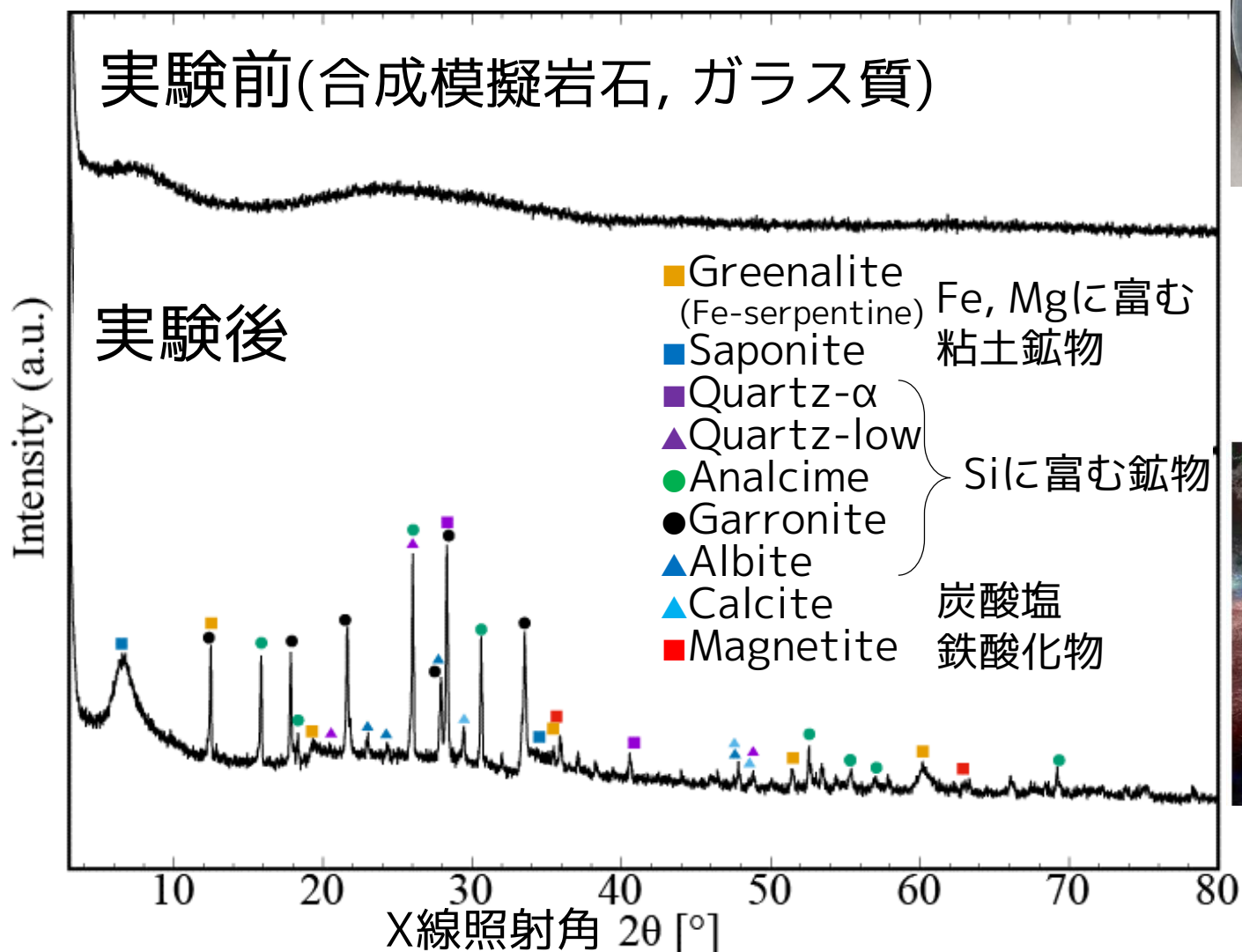


濃度変化は安定。
二次鉱物が生成し、
濃度がバッファーされる。

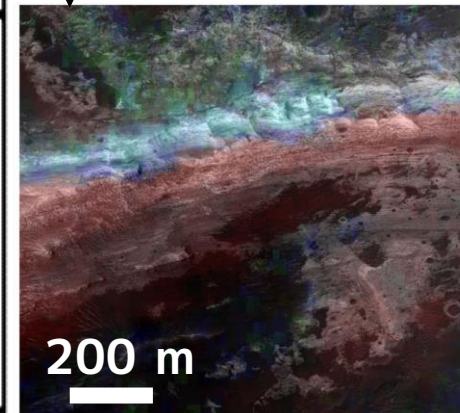


濃度は非常に低い。
アルカリ性の溶液では
固相でより安定。

結果：鉱物組成(XRD分析)



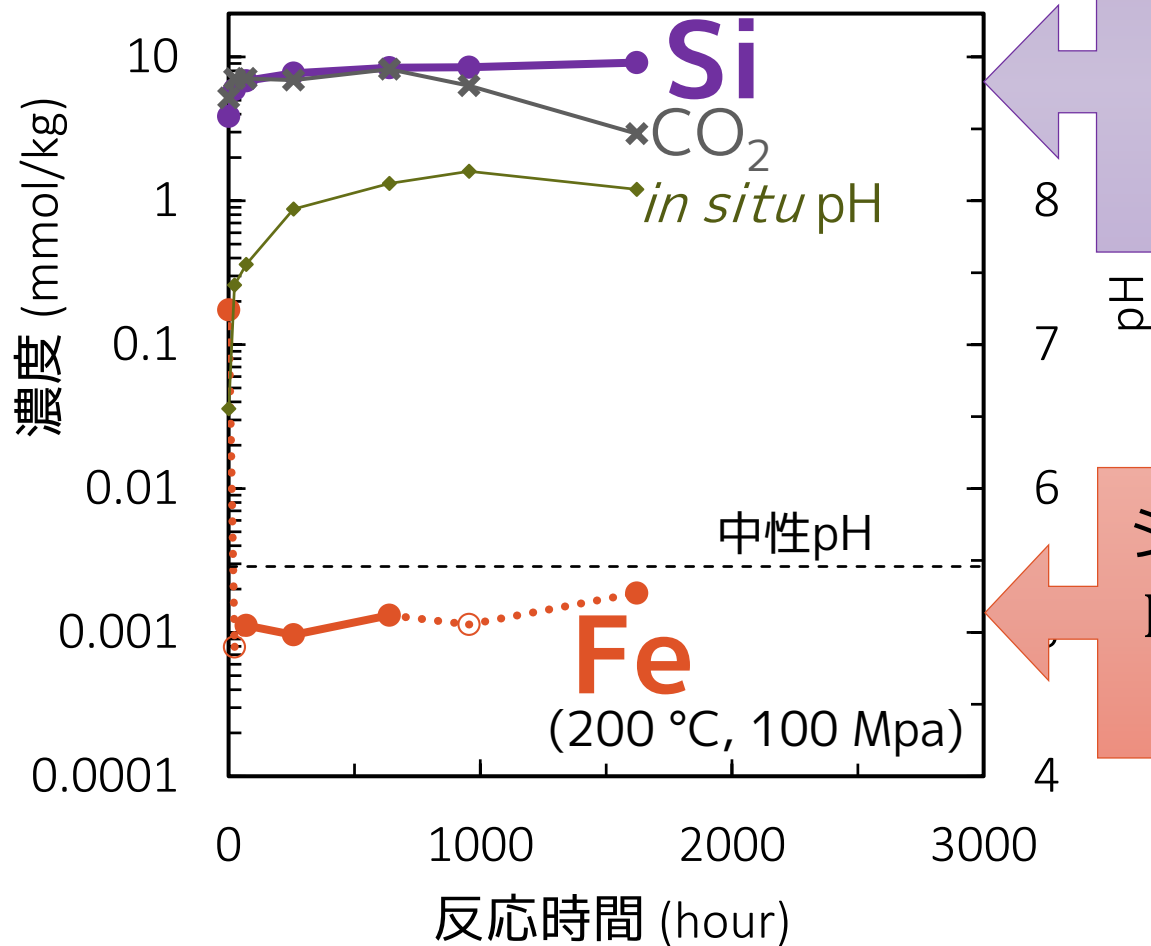
クレータ内壁の
鉱物組みあわせと
整合的



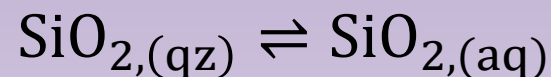
(Bishop et al., 2018)

解釈: SiO_2 , Feの濃度は何が決めるか？

候補となる二次鉱物との溶解平衡で
熱力学的に予測される濃度を、
実測値と比較



石英の溶解平衡



7.1 mmol/kg

シデライトの溶解平衡



1.4×10^{-3} mmol/kg

議論: 推定される堆積速度と期間

目的3 意味する気候・水量は？

水循環モデル

温暖乾燥気候

地下水湧昇フラックス:

$\sim 1 \text{ mm/m}^2 \cdot \text{day}$

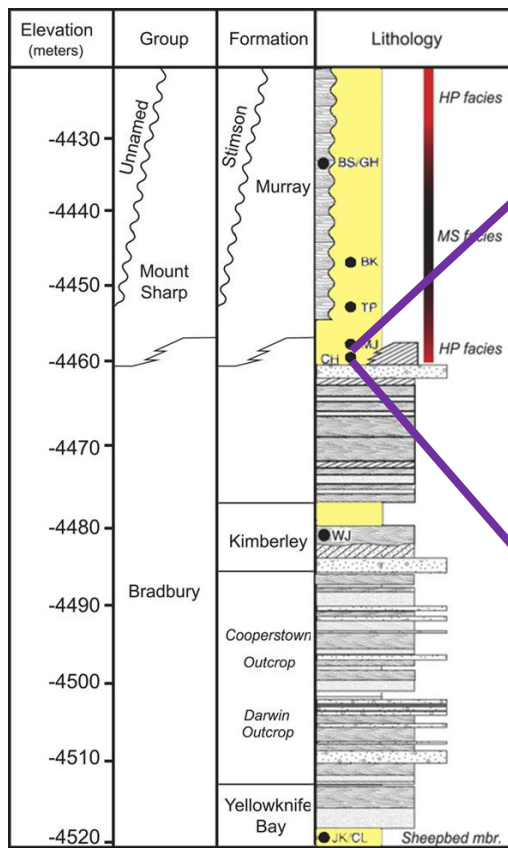
熱水-岩石反応

シリカの濃度: $\sim 1-10 \text{ mmol/kg}$

$= \sim 0.06-0.6 \text{ g/kg}$

シリカフラックス: $\sim 0.06-0.6 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$

堆積速度: $\sim 0.02-0.2 \text{ mm/Mars year}$



Grotzinger et al., 2014

地下水湧昇が起こる

ラミナ構造が年縞ならば、
Murray formation(150m)は

10^5 年かけて堆積

乾燥気候の持続期間

議論: 存在した総水量

目的3 意味する気候・水量は？

水循環モデル

地下水位の深さ < ~1 km
= 全球平均水位 > ~700 m

10000

本研究

Carr & Head, 2003
Head et al., 1999

海岸線

Di Achille & Hynek 2010

Carr & Head, 2003

Carr & Head, 2003

Head et al., 1999

Minimum estimate

深さ Z km

$$0.35 \exp\left(-\frac{Z}{2.82}\right)$$

空隙率

~500 m相当
地下氷などとして
残されている？

現在の極冠

火星では初期も現在も
地下水圏が重要なリザーバーである可能性

al., 2014

全球平均水位 (m)

議論：酸化還元のエネルギーが得られた？

水循環モデル

地下水の供給 $\sim 1 \text{ mm/m}^2 \cdot \text{day}$
 $F \sim 1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{day}$

維持されうる
バイオマスの
フラックス

熱水-岩石反応

湧昇水: 100°C , $[\text{Fe}^{2+}] = 3 \text{ } \mu\text{M}$
上層水: 0°C , $[\text{O}_2] = 5 \text{ } \mu\text{M}$

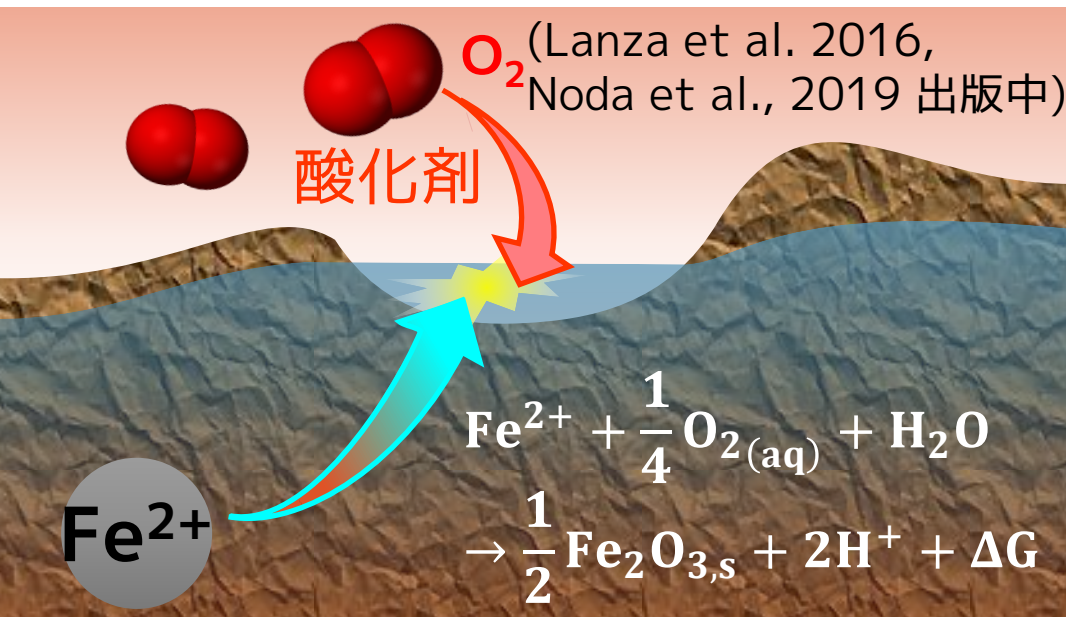
$\Delta G \sim 1 \text{ J/kg}$

$$= F \times \Delta G / A \sim 1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{Mars year}$$

地下水の 生成する 代謝に必要な
フラックス エネルギー エネルギー

$\sim 700 \text{ J/g cell biomass}$
(Amend et al. 2011)

堆積物中に $\sim 1000 \text{ ppm}$ の
有機物として観測できる可能性



まとめ

？ゲイル湖底堆積物中のシリカや鉄は、地下熱水起源か？
どんな気候・水量を意味するか？

3次元水循環モデル

地下水湧昇で周囲の湖が作られる
乾燥気候・浅い地下水頭を支持

熱水-岩石反応実験

シリカは石英、鉄はシデライト
マイナーな二次鉱物が
濃度をバッファーしうる

