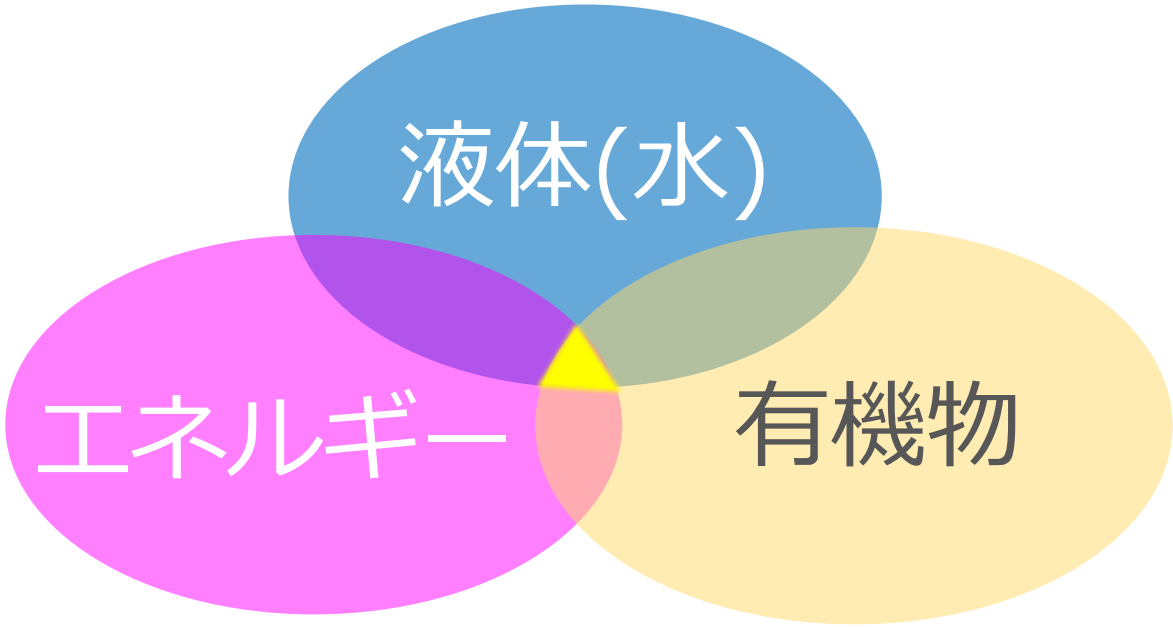
変動する初期火星環境

関根 康人

東京工業大学　地球生命研究所(ELSI)

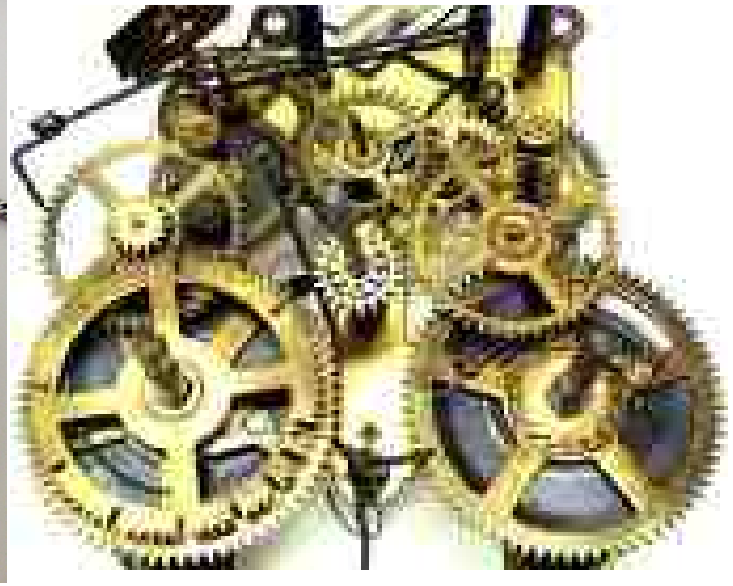
生命を育む星は宇宙にあるのか？

生命科学の古典的定義
　自分と外界と隔離（細胞膜）
　自己増殖 (DNA)
　自己の維持（酵素,たんぱく質）
→ **機能を持つ複雑な物質**



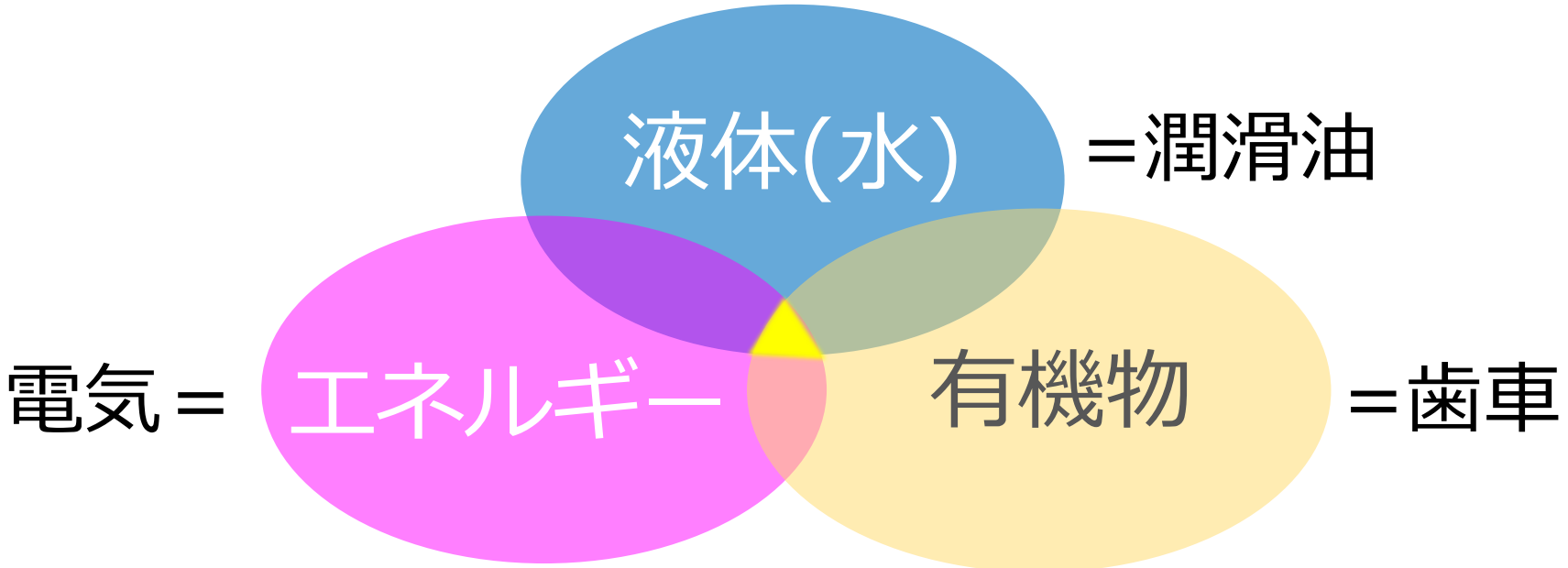
機能を持つ分子は多様性があり、地球生命のものが唯一ではない
だが、共通点はどれも不安定である
→ 変質する前に生命は**絶えず作り替える宿命**
合成する**エネルギー**と**物質循環**が継続的に必要

生命とは何か？ 時計の中の動く歯車



生命は動的平衡にあるシステムである

福岡伸一「動的平衡―生命はなぜそこに宿るのか」



生命を育む惑星のシステム

酸化剤 (“酸素”)

SO_4
CO_2
O_2
ClO_4^-
NO_3…

還元剤 (“食料”)

Fe^{2+}
H_2
CH_4
CH_2O
H_2S…

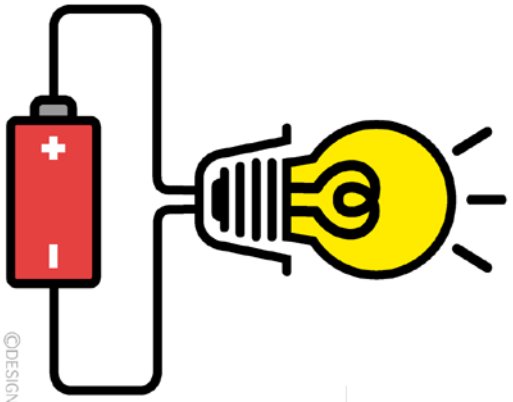
?

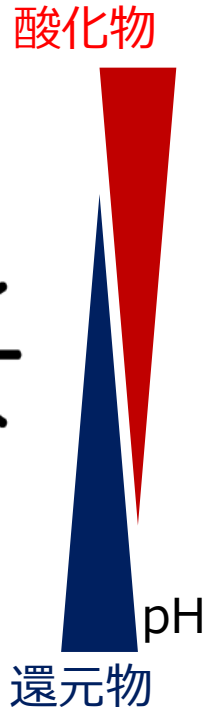
バイオマーカー

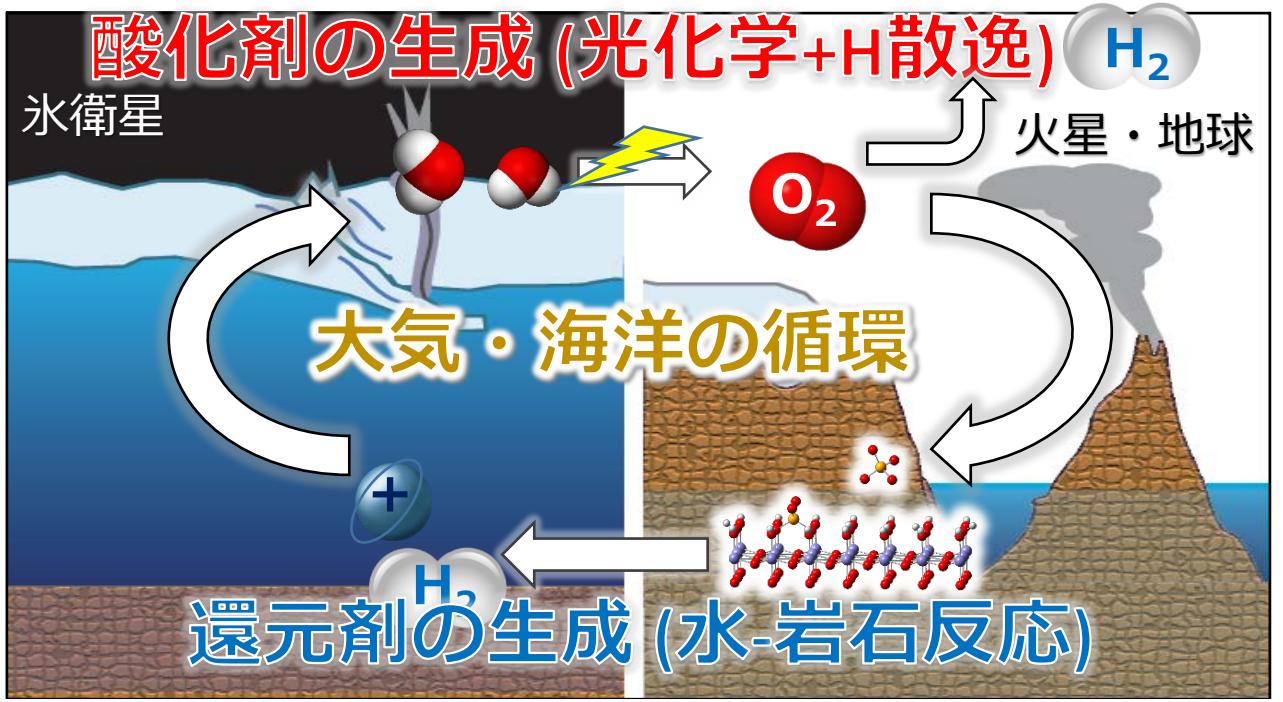
$$CO_2 + H_2 \rightarrow CH_4 + \Delta G \text{ (kJ/mol)}$$

$$\Delta G \text{ (kJ/mol)} \times \underline{F \text{ (mol/yr)}} \div A \text{ (g/kJ)} = \underline{M \text{ (g/yr)}}$$

供給速度　　生成エネルギー　　バイオマス







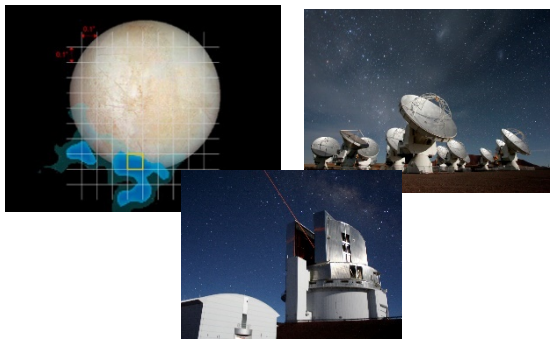
理論

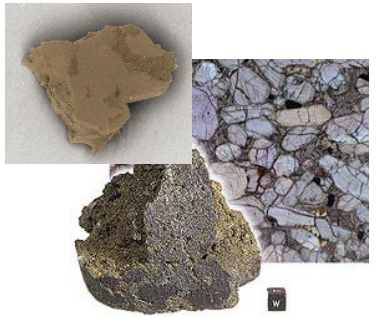
©DESIGNALIKIE

生命を育む惑星のシステム

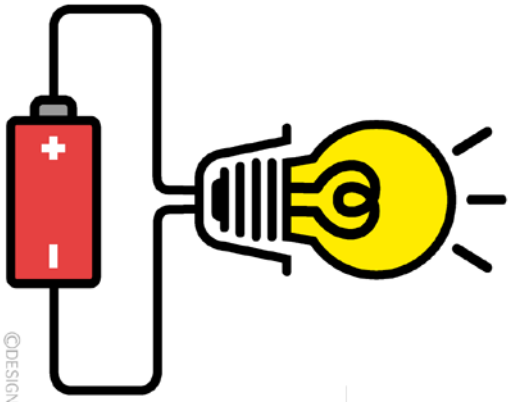
2015年以降

望遠鏡観測　太陽系探査　地球外試料分析





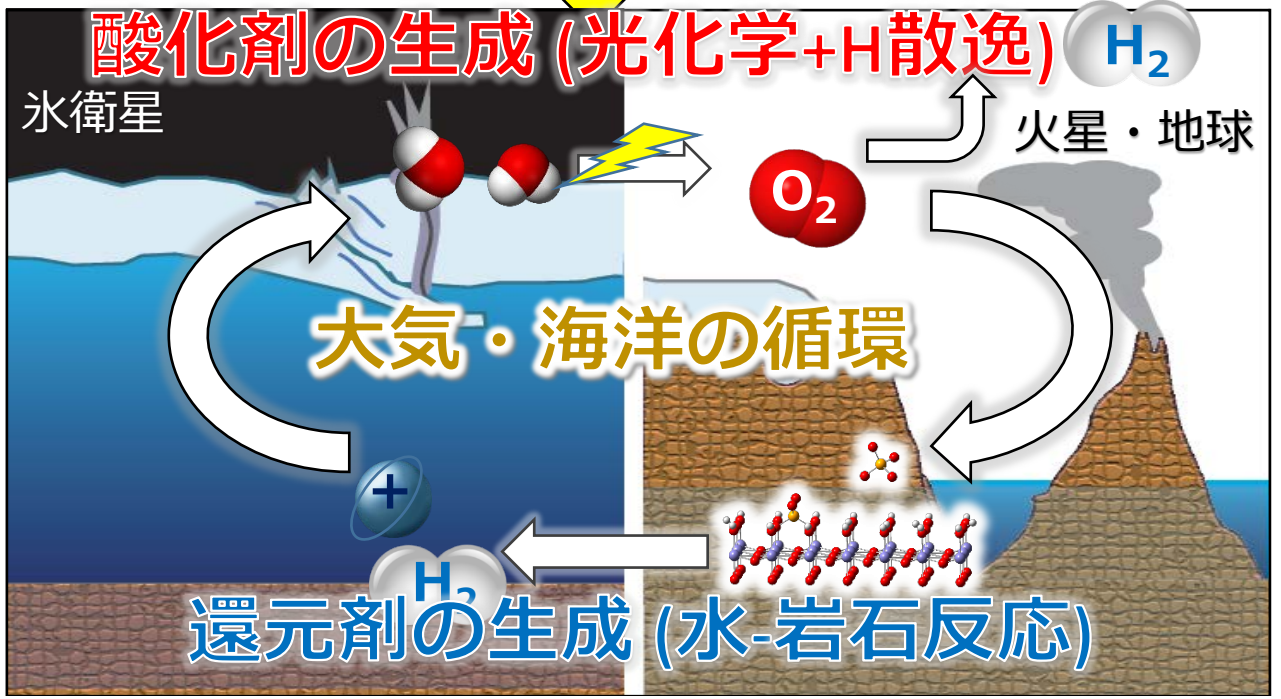
実証



酸化物

pH

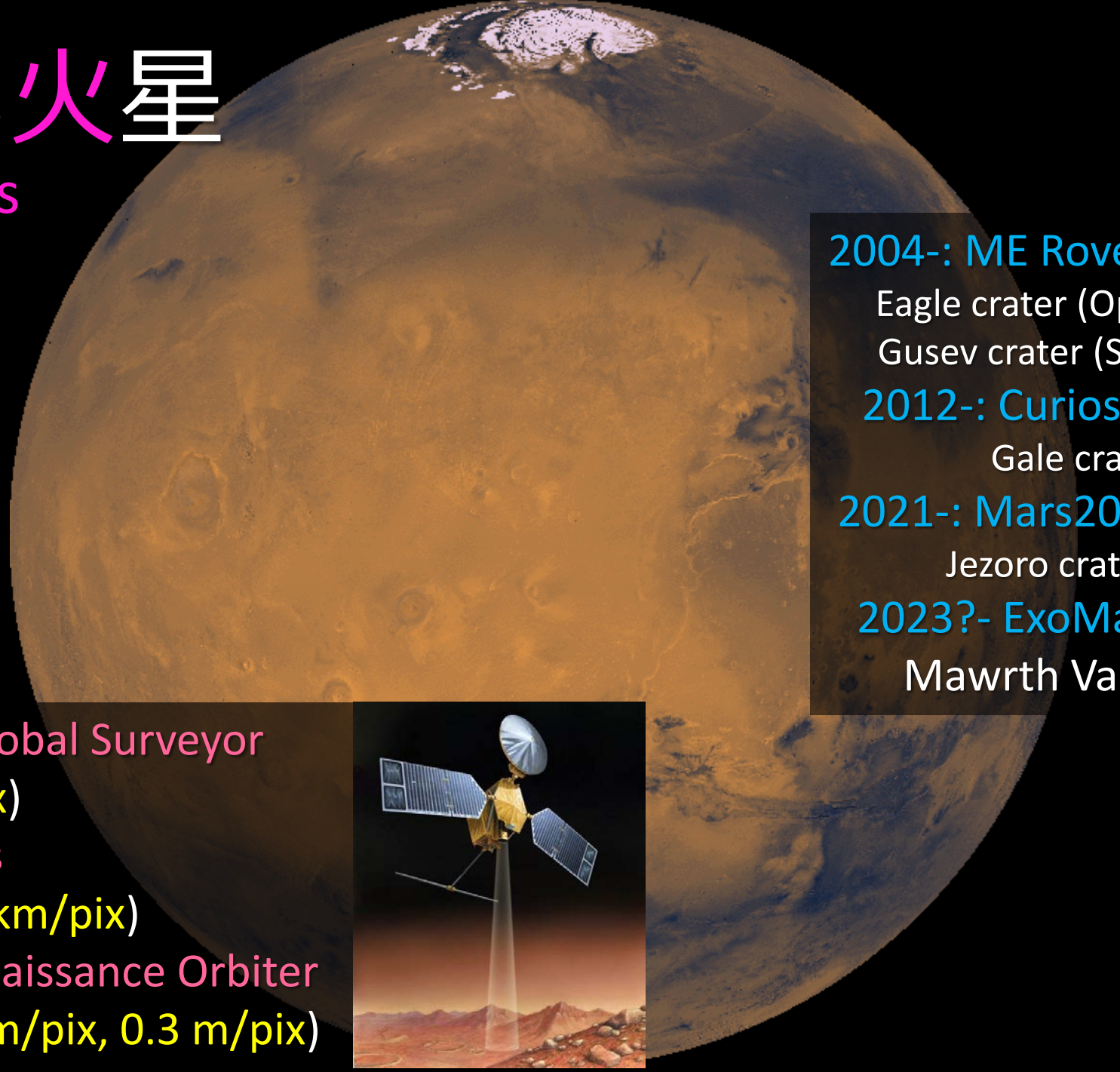
還元物



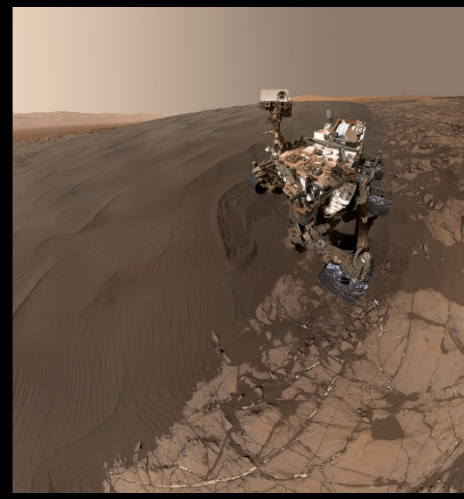
理論

©DESIGNALIKIE

変動する火星
Evolving Mars

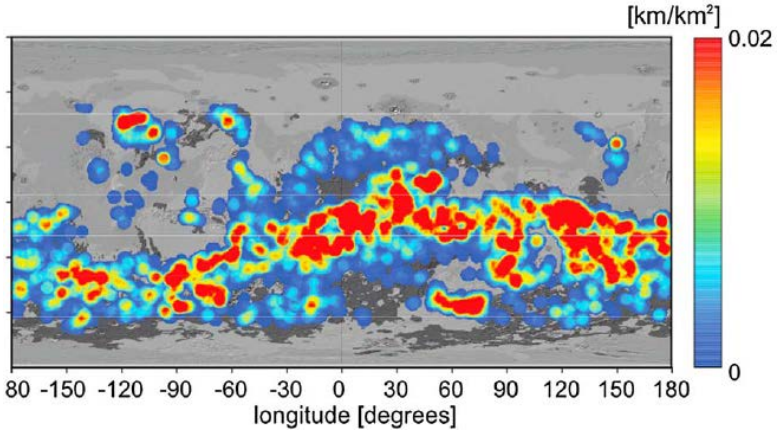


2004-: ME Rovers
Eagle crater (Opp)
Gusev crater (Spt)
2012-: Curiosity
Gale crater
2021-: Mars2020
Jezoro crater,
2023?- ExoMars
Mawrth Vallis



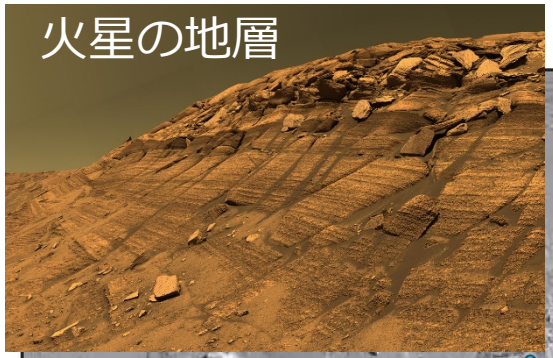
1996-2006: Mars Global Surveyor
(TES: 6 km/pix)
2003-: Mars Express
(OMEGA: 0.3-2 km/pix)
2008-: Mars Reconnaissance Orbiter
(CRISM, HiRISE: 18 m/pix, 0.3 m/pix)

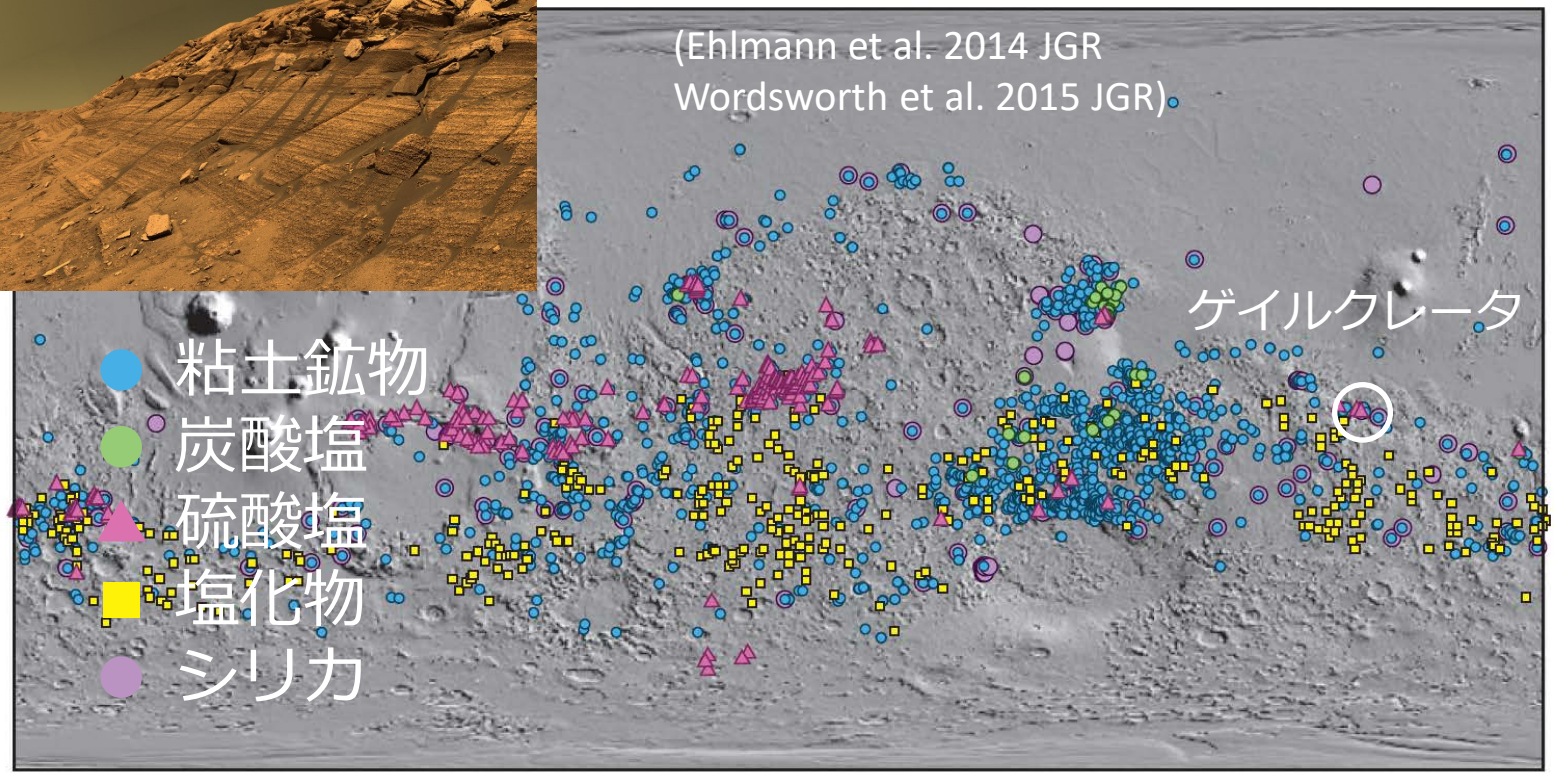
火星に広がる水の痕跡

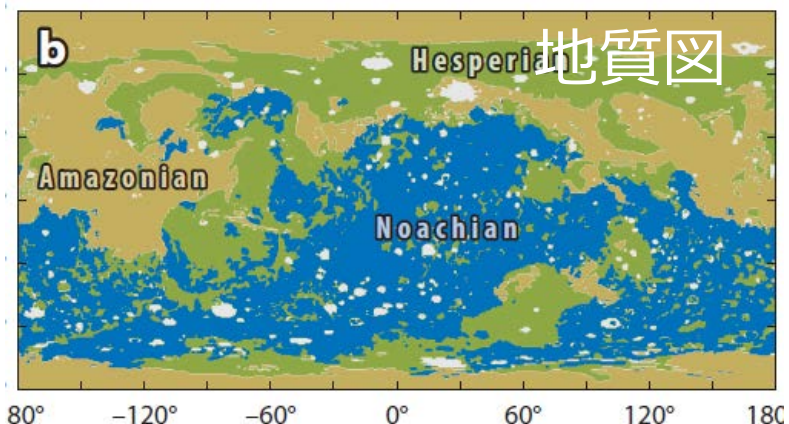


バレーネットワーク
（河川地形）

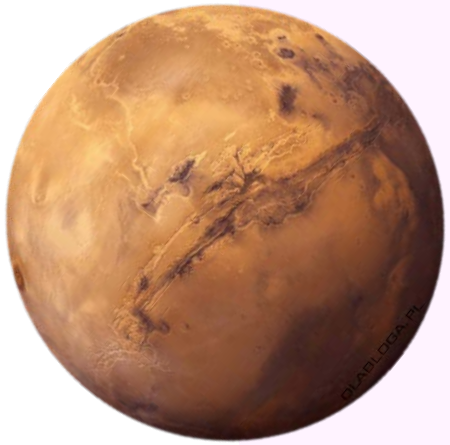
火星の河川地形

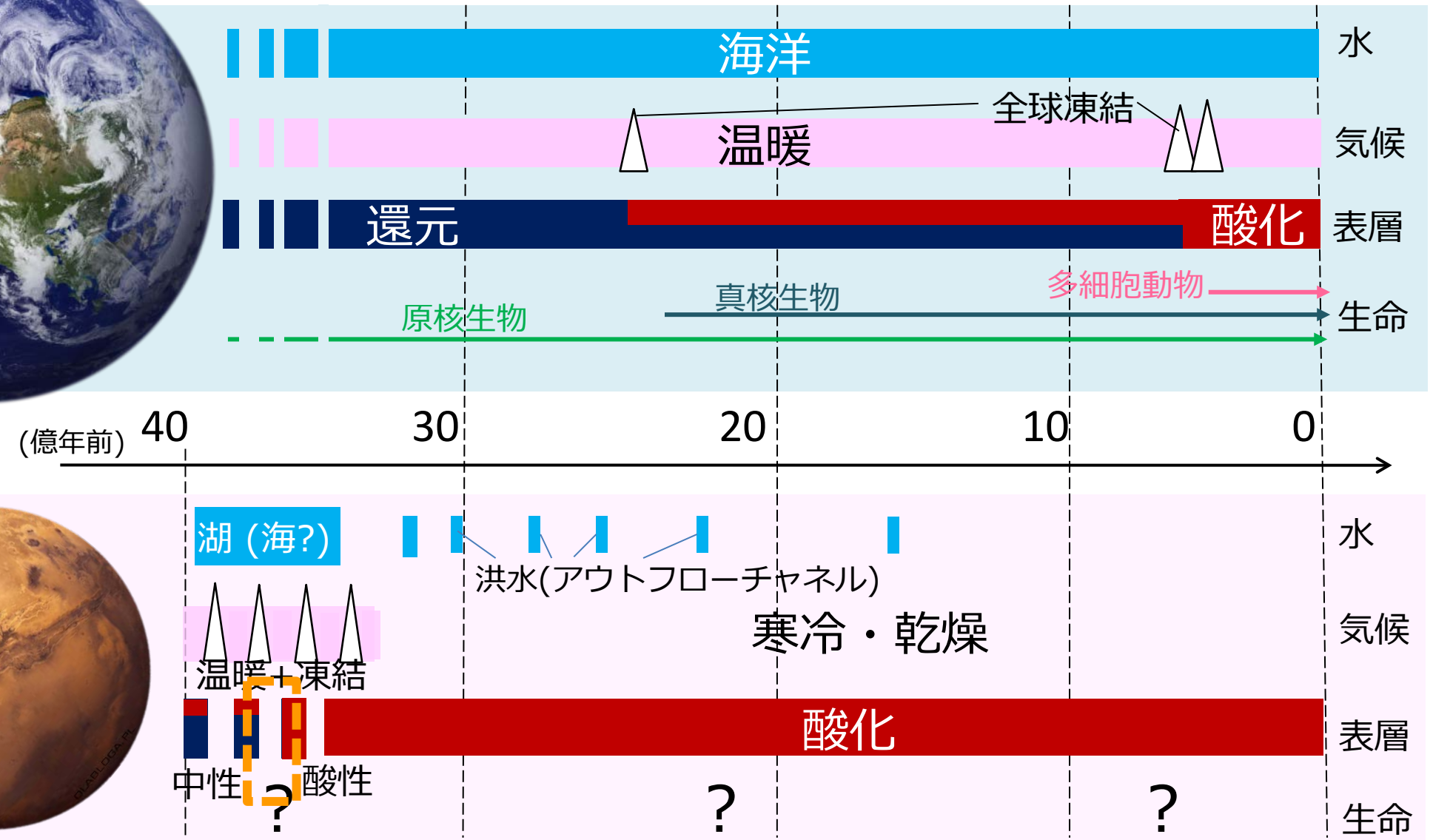




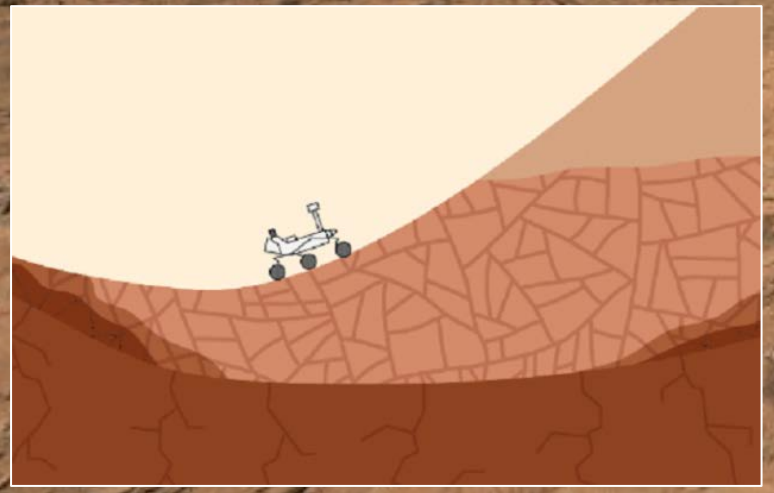


地球・火星の環境進化史

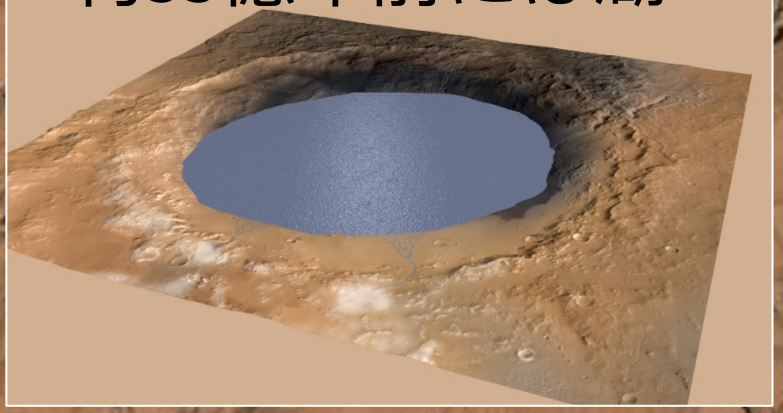


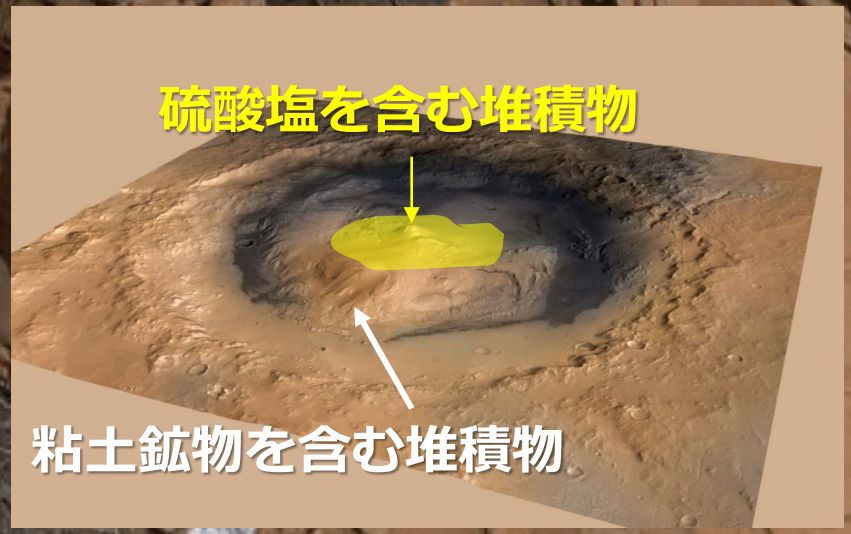

水
気候
表層
生命
海洋
全球凍結
温暖
還元
酸化
多細胞動物
真核生物
原核生物
(億年前)
40
30
20
10
0
湖 (海?)
洪水(アウトフローチャネル)
寒冷・乾燥
温暖+凍結
酸化
中性
酸性
?
?
?

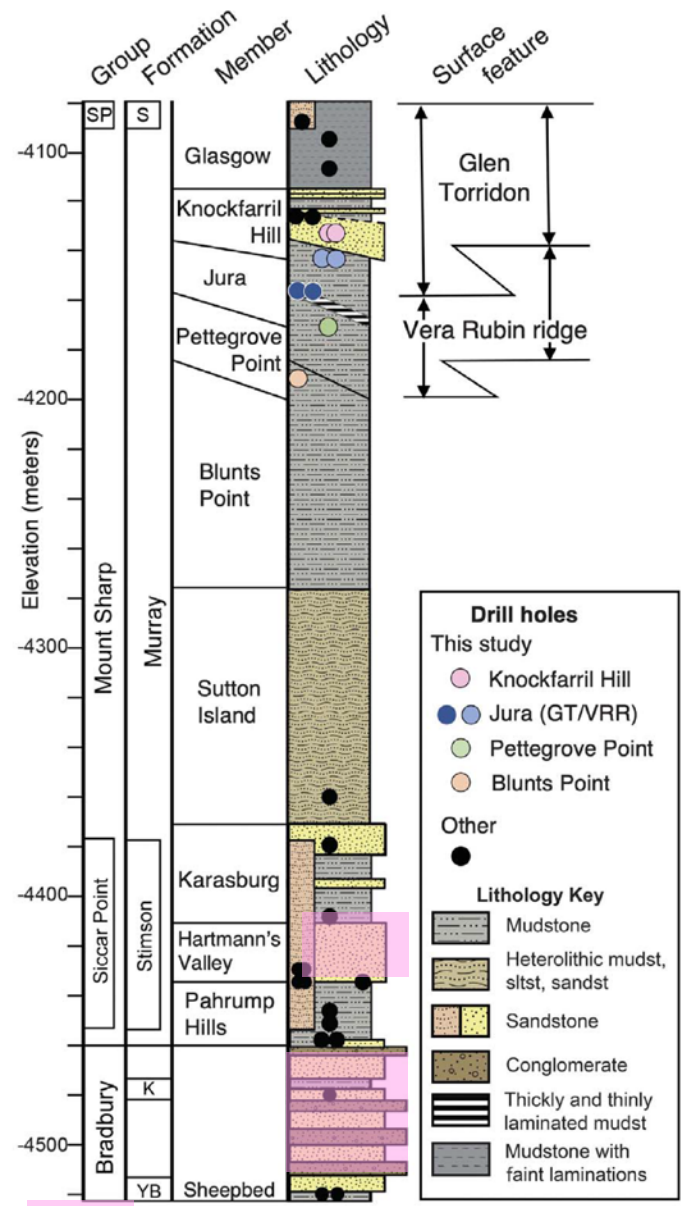
火星探査車キュリオシティ



約35億年前には湖

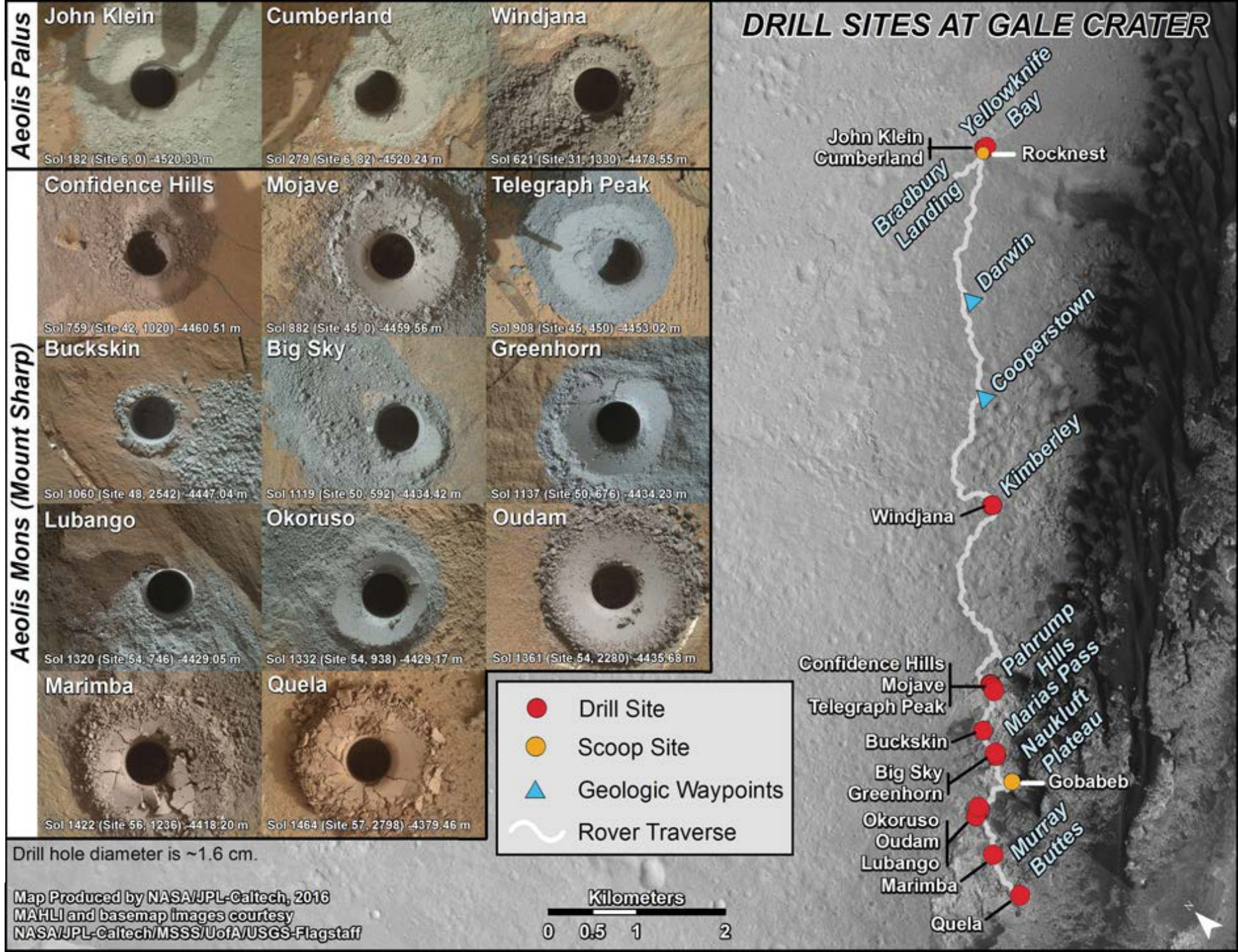






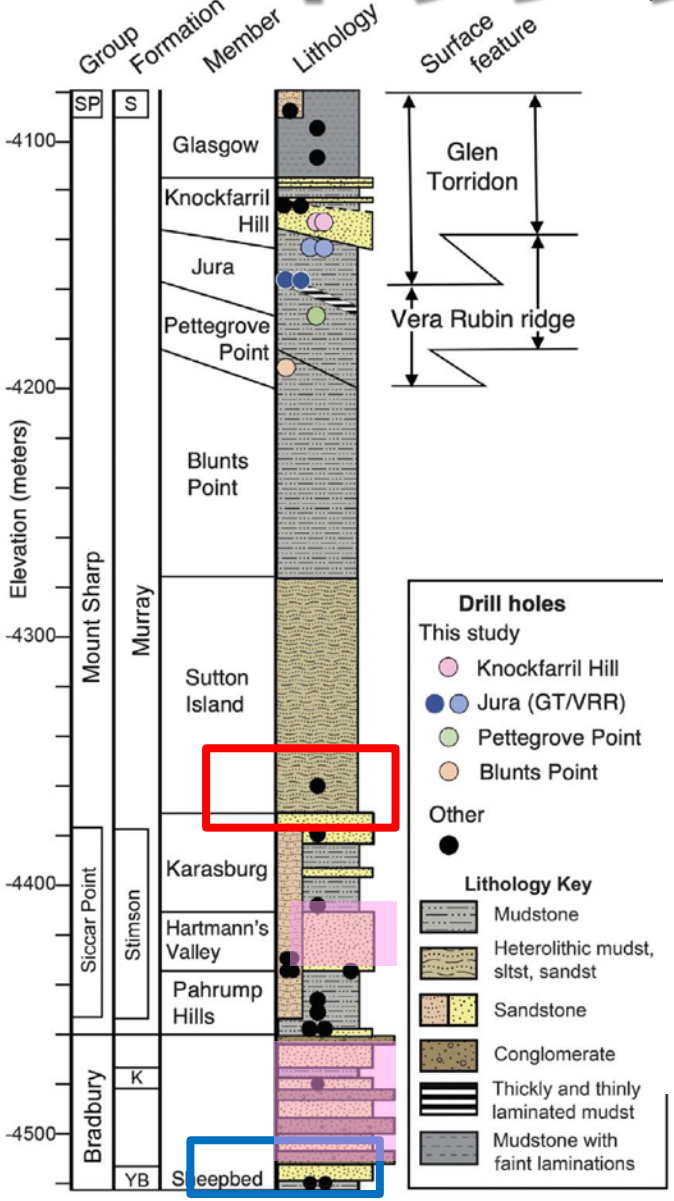
風成層

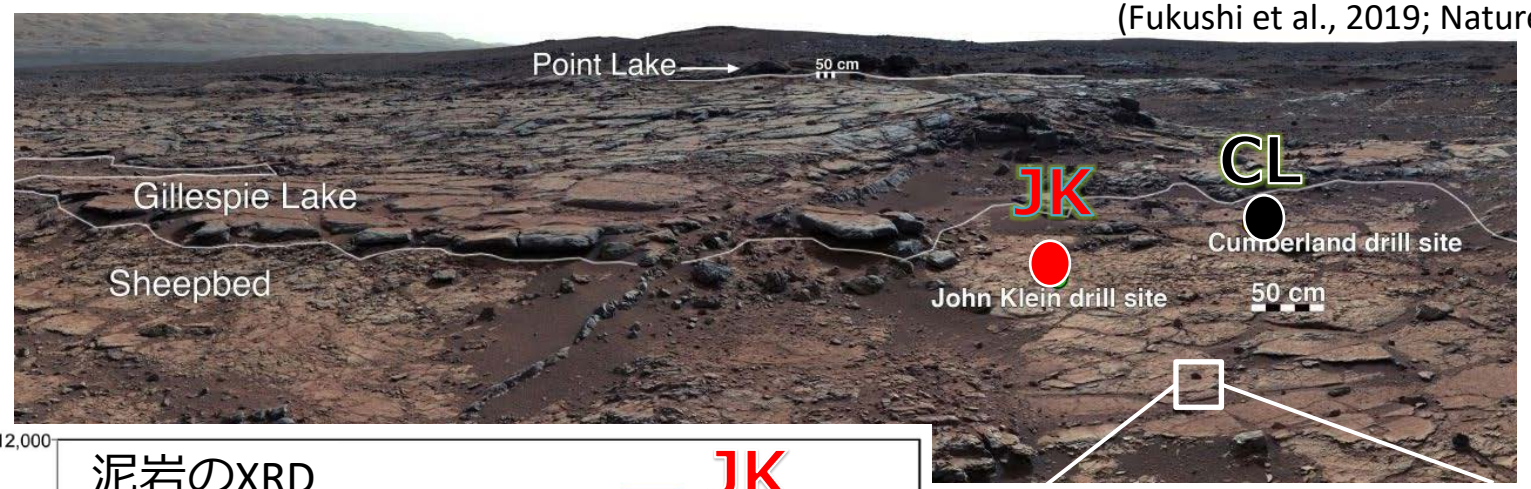
(Bristow et al., 2021)

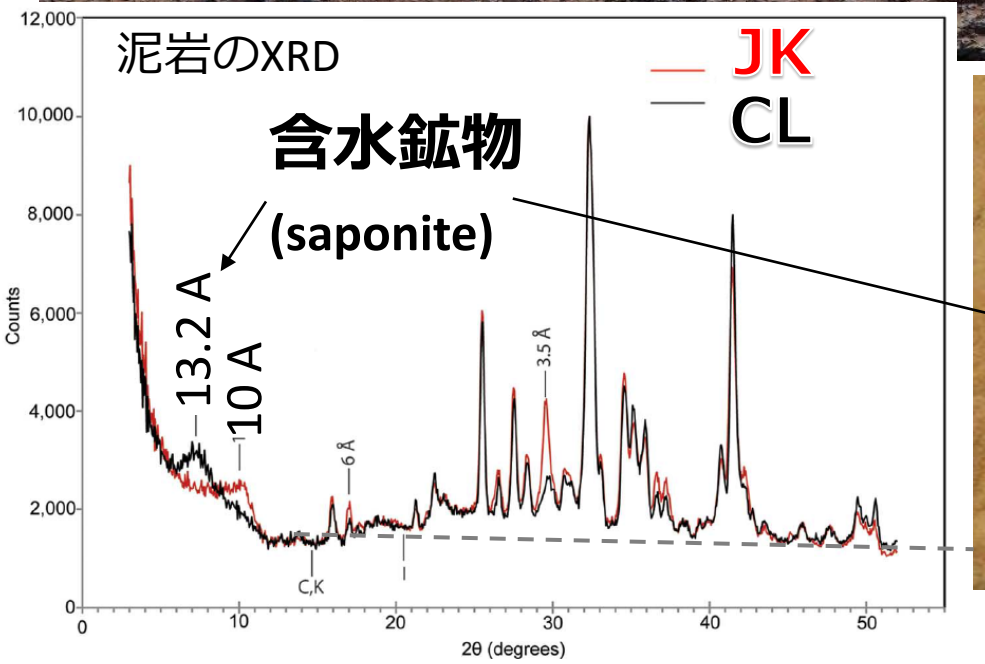


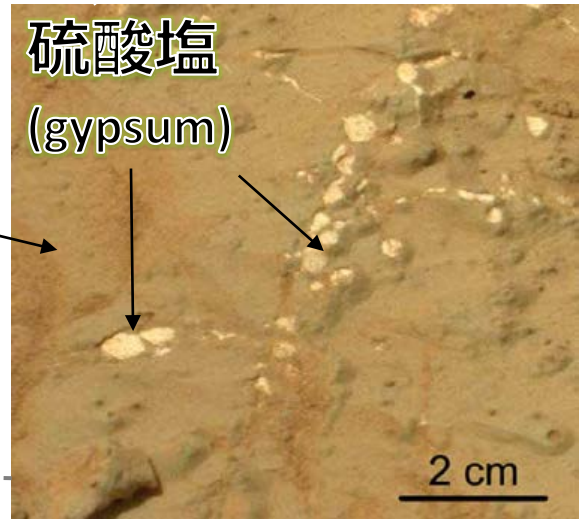
トップダウン：湖成層から水環境復元

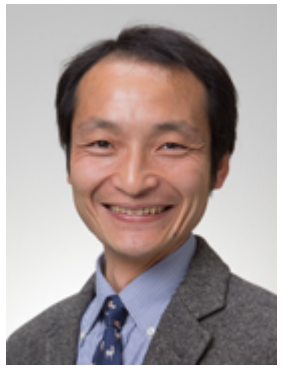
(Fukushi et al., 2019; Nature Comms)









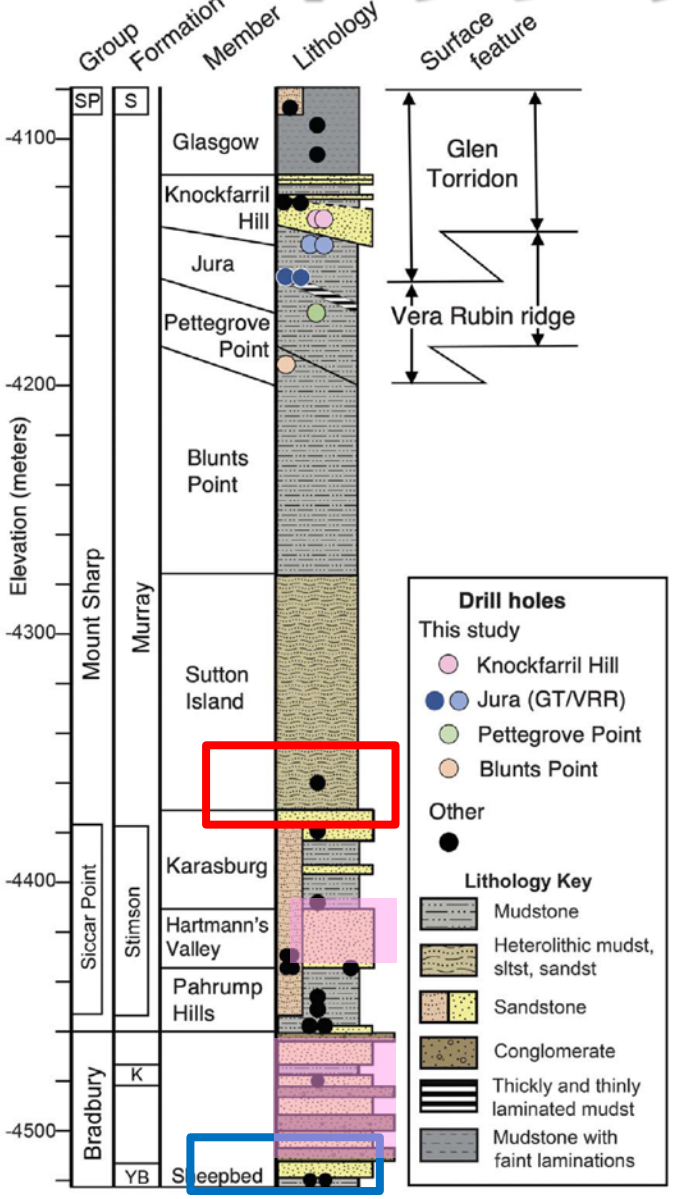


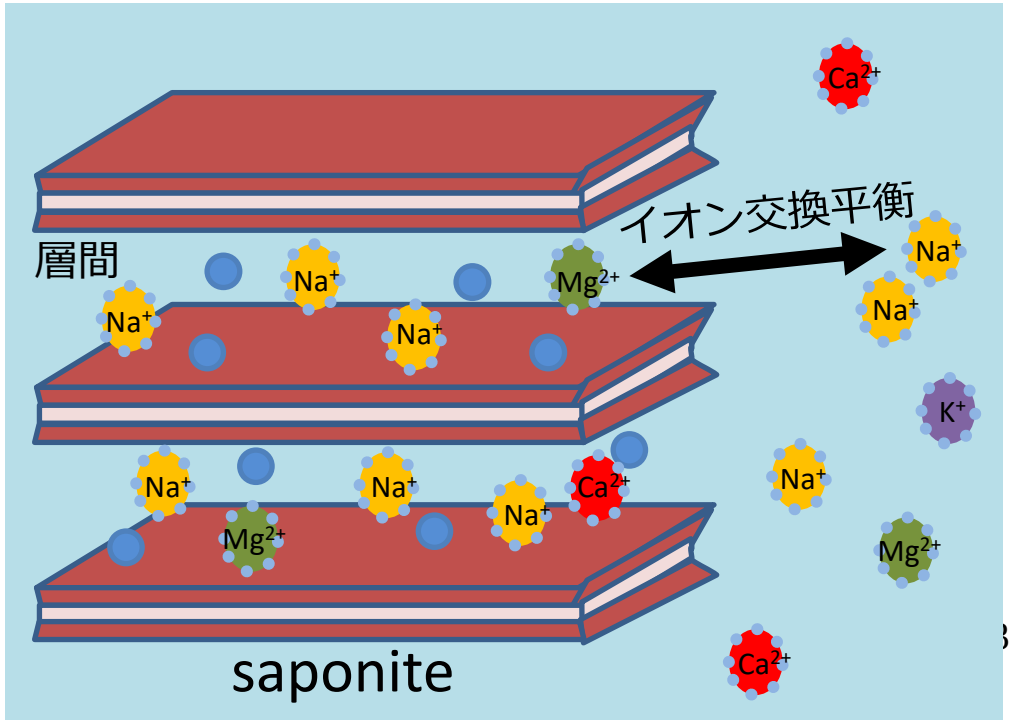
福士圭介
(金沢大)

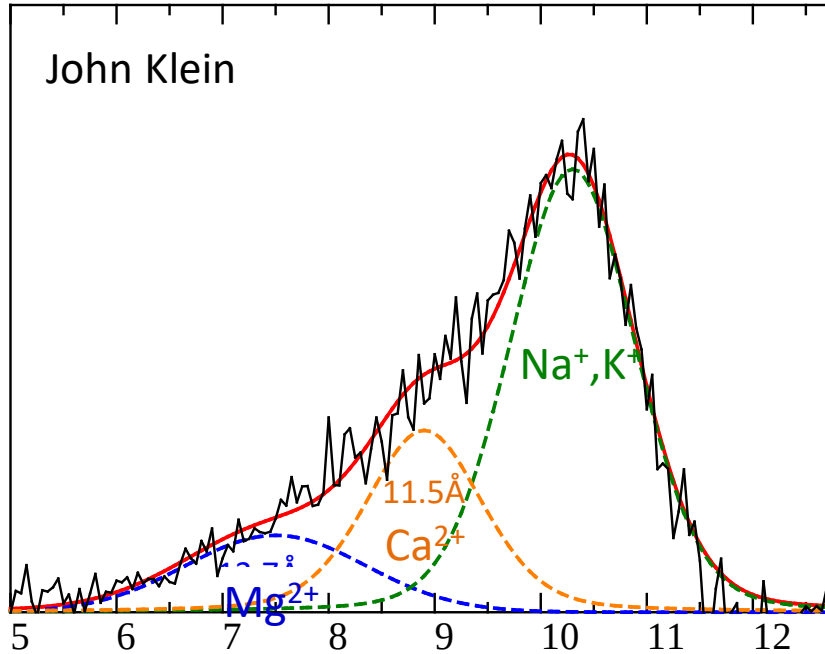
- 含水鉱物など含む泥の堆積
- 堆積後に流体貫入、硫酸塩沈殿

トップダウン：湖成層から水環境復元

(Fukushi et al., 2019; Nature Comms)



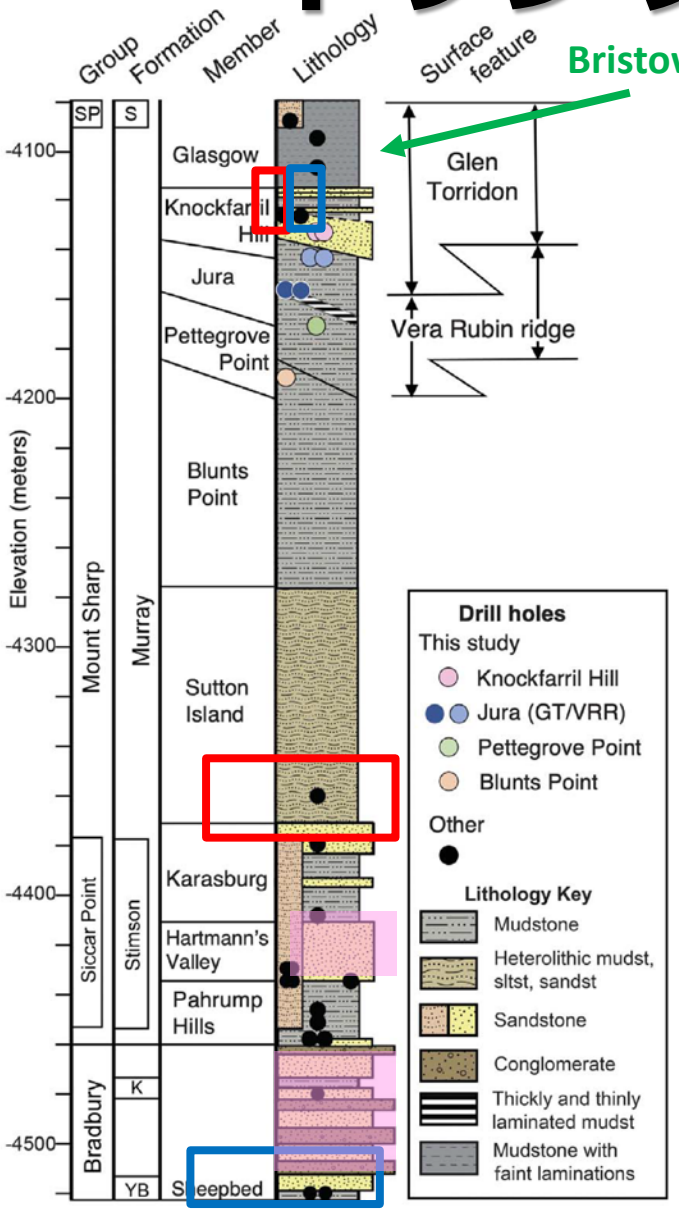




- 粘土鉱物(saponite)の層間陽イオン組成比
- 自生鉱物組み合わせ
  - 硫酸塩($CaSO_4$)存在 ↔ $K = [Ca^{2+}][SO_4^{2-}]$
  - 炭酸塩($CaCO_3$)不在 + サポナイトが存在 ↔ pH
  - アカガネアイト(Fe(III)O(OH,Cl))が存在 ↔ $[Cl] > [SO_4^{2-}]$

トップダウン：湖成層から水環境復元

Bristow et al. (2021: Science)



(Fukushi et al., 2019; Nature Comms; 2021 submitted)

	Quela	Cumberland
Na (mol/kg)	0.14–2.2	0.094–0.12
K (mol/kg)	0.0080–0.31	0.0014–0.0044
Ca (mol/kg)	0.021–0.21	0.024–0.045
Mg (mol/kg)	<0.136	0.035–0.060
Fe(II) (mol/kg)	<0.063	0.00012–0.0058
Cl (mol/kg)	0.096–2.6	0.11–0.25
SO_4 (mol/kg)	0.048–0.33	0.044–0.072
DIC (mol/kg)	N/A	0.0023–0.016
pH	3.6–5.6	6.9–7.3
Eh (V)	>0.22	Disequilibrium
pCO_2 (bar)	N/A	0.006–0.04

二次的な流体による上書き　　初生湖水の情報に近い

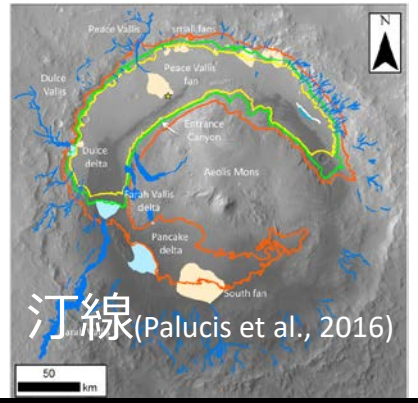
- **塩分増加の謎**：塩湖化？ 二次的な付加？
- **酸性化の謎**：湖酸性化？ 二次的な酸性流体？

初生湖水の塩分は何を意味するか：古気候状態

(Fukushi, Sekine, et al., 2019, *Nature Comms*)

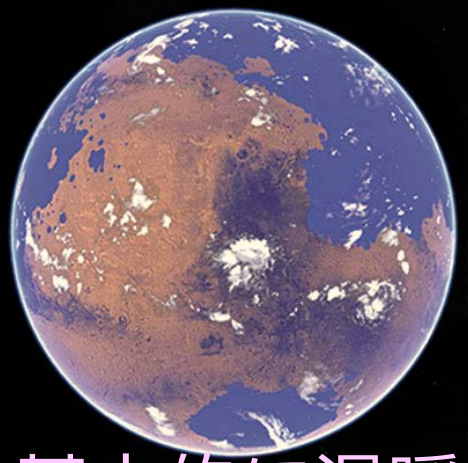
Na質量バランス　$W_{lake} \times S_{lake} = C_{g.w} \times F \times time$

- W_{lake}：湖水量
- S_{lake}：湖水塩分 (0.14 M)
- $C_{g.w}$：地下水塩分 (地球の値)
- F：水フラックス (GCMから算出)



汀線(Palucis et al., 2016)

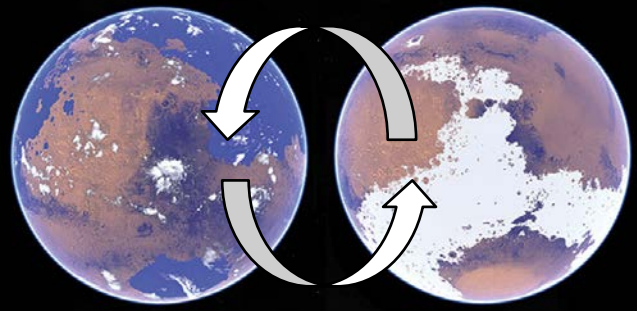
⇒ *time*(水循環継続時間) = 0.1–1 Myr



基本的に温暖

(Ramirez et al. 2017; Ramirez & Craddock, 2018)

VS

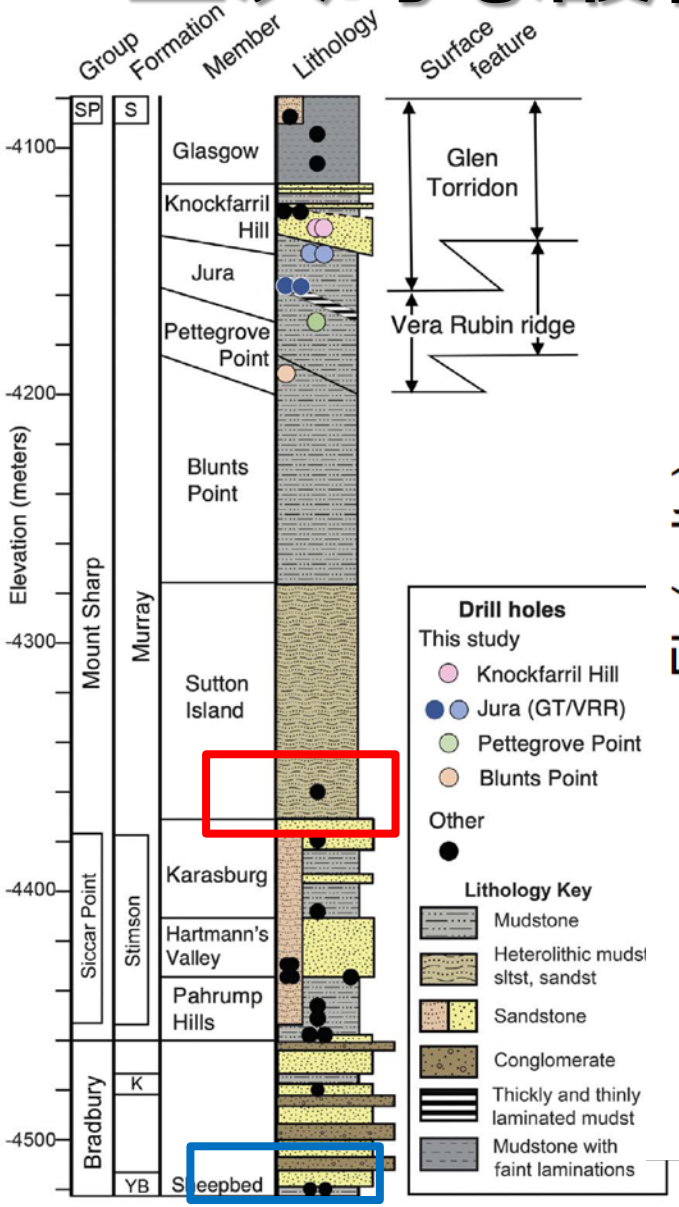


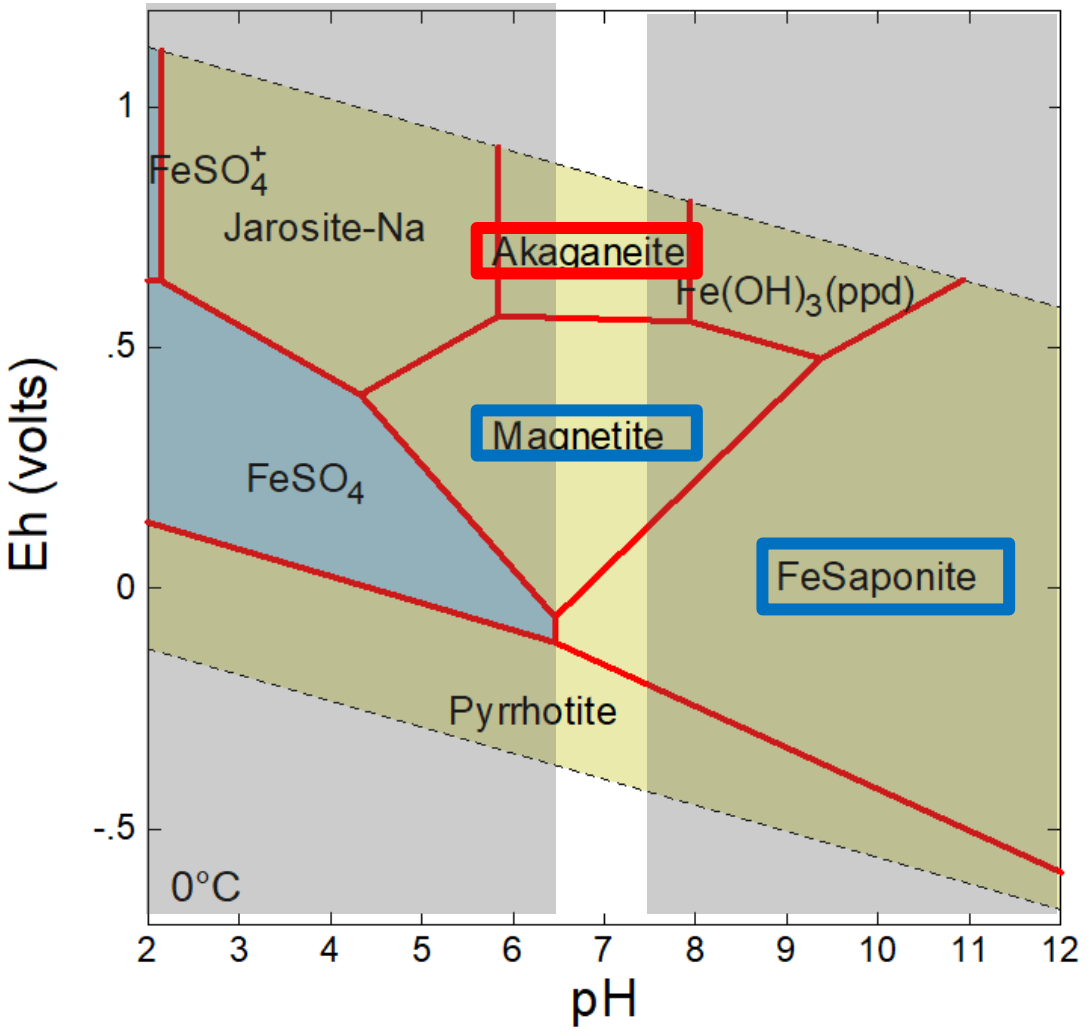
基本は寒冷・一時的に温暖 ↔ H_2 CH_4放出 (火山, クラスレート)

(Wordsworth et al. 2017; Bishop et al., 2018)

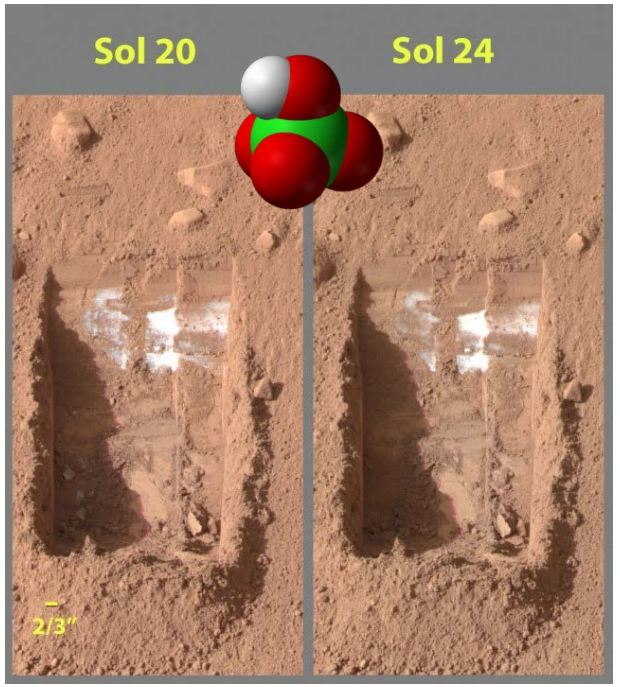
二次的な酸性/酸化流体の水質は何を意味するか

(Fukushi, Sekine, et al., 2019, *Nature Comms*)



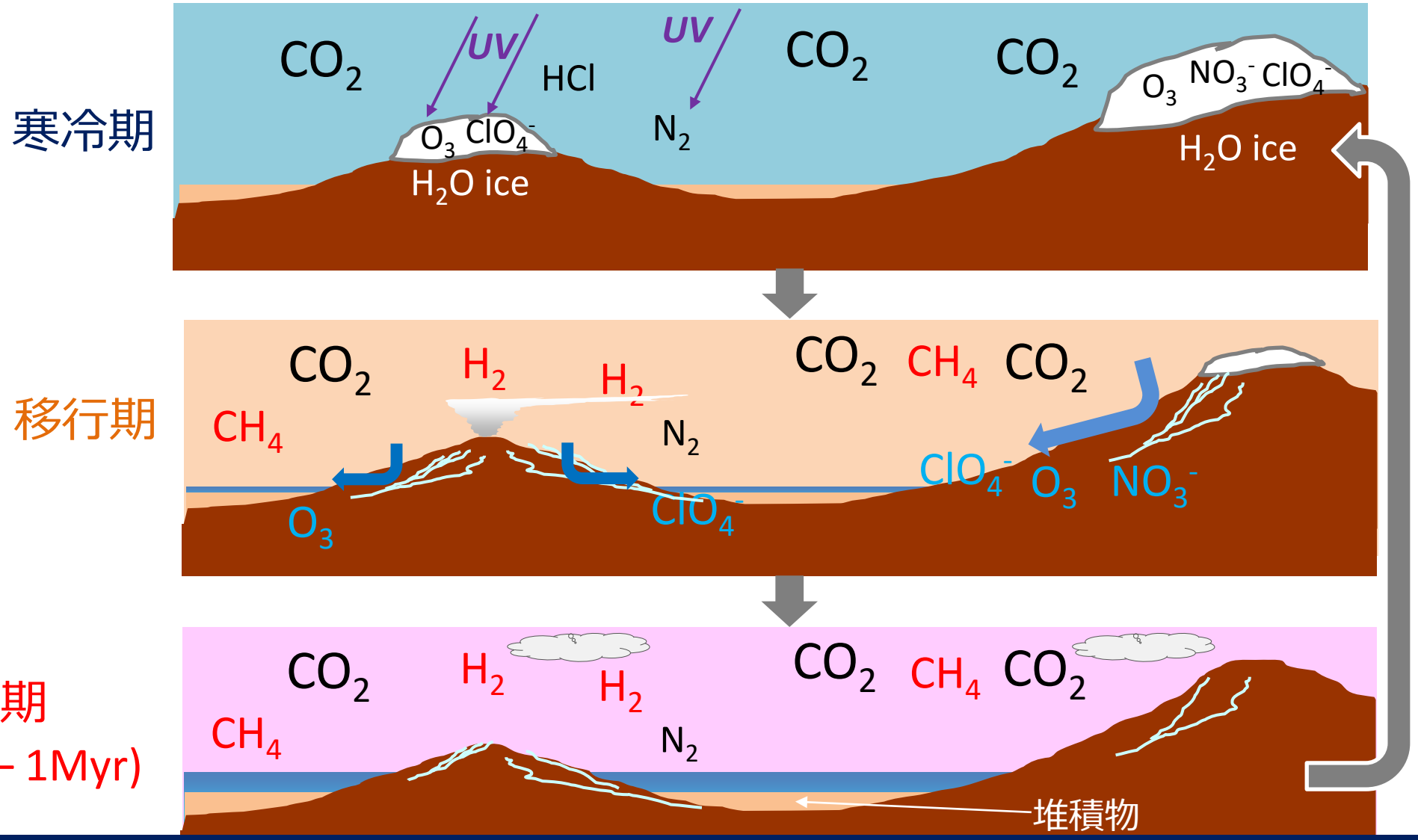


- ✓ 還元的な湖成層に酸性・酸化流体貫入
- ✓ Eh>0.6 V ↔ 強酸化剤 O_2, ClO_4, O_3, H_2O_2, NO_3
- ✓ 光化学反応生成物



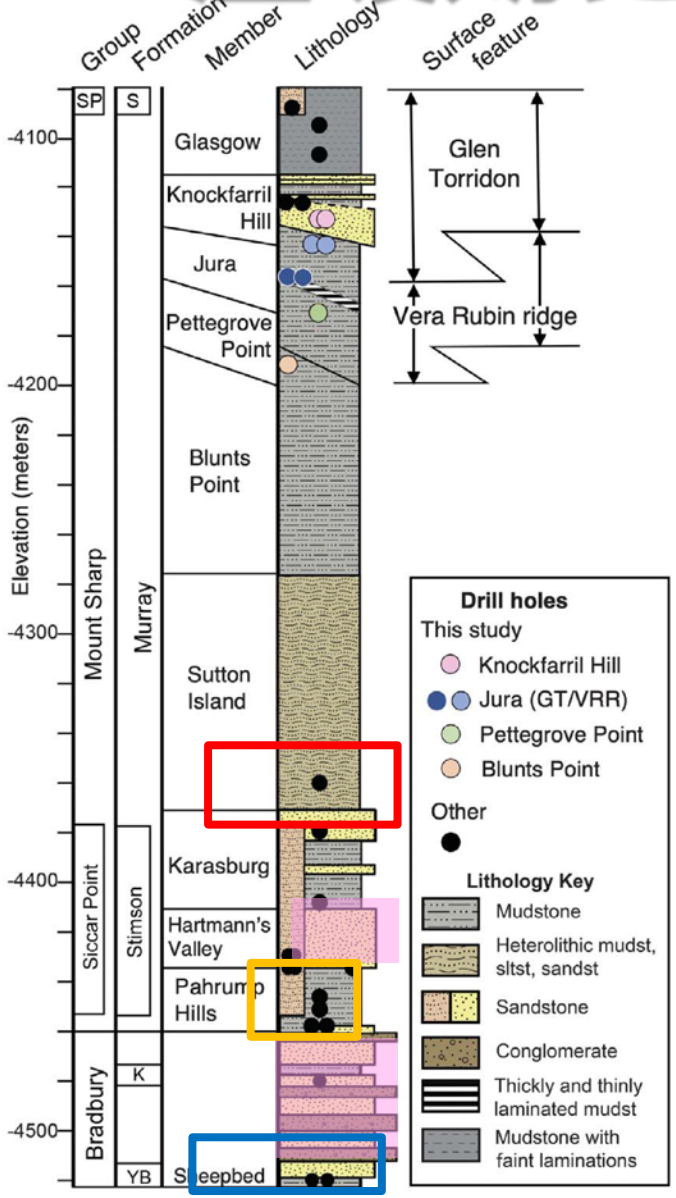
高緯度(60N)に着陸したフェニックスが凍土と共存する過塩素酸塩($NaClO_4$)発見 (Hecht et al., 2009)

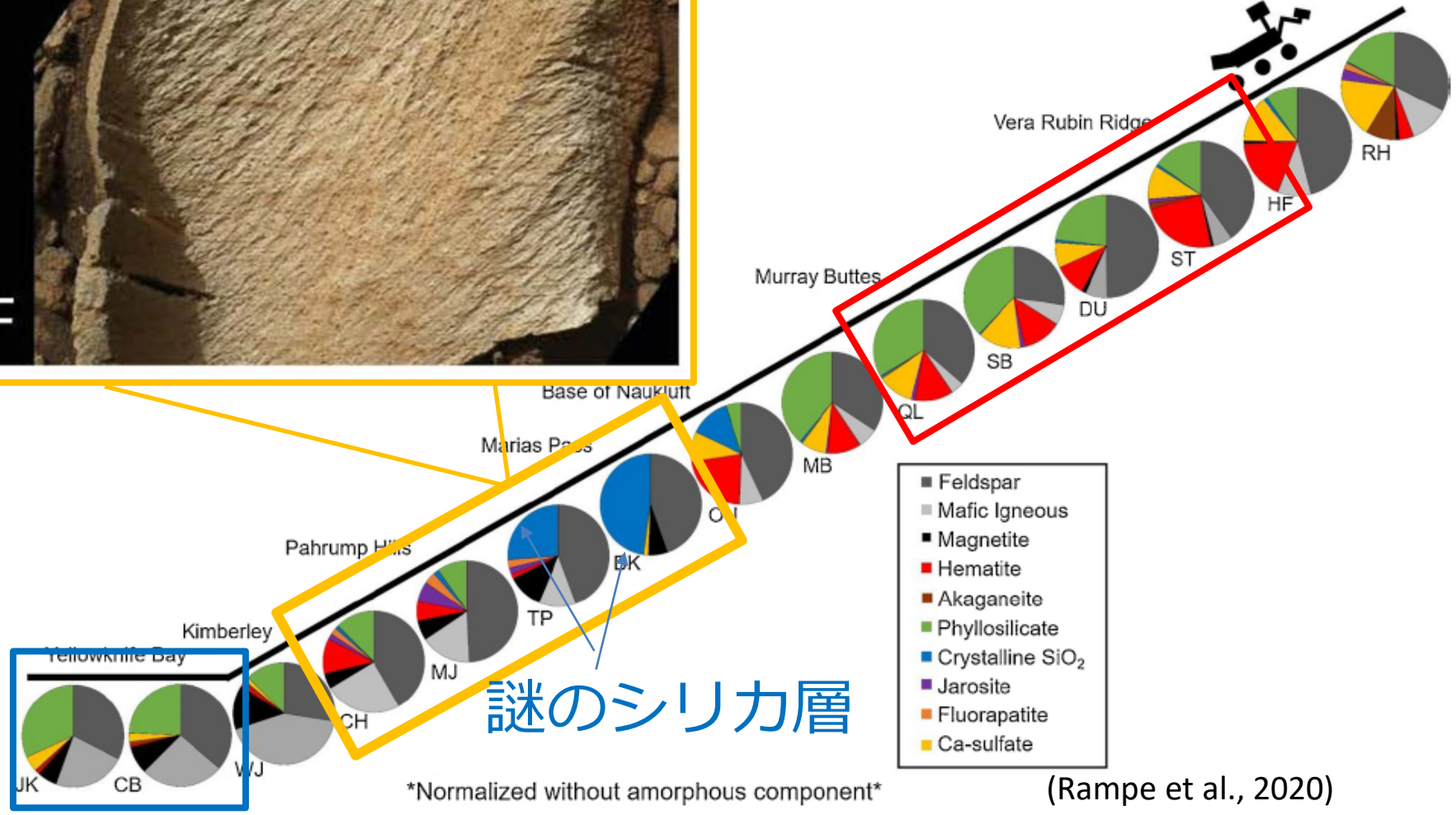
初期火星の動的な酸化還元進化



寒冷期に蓄えられた酸化剤が温暖化に伴って供給？

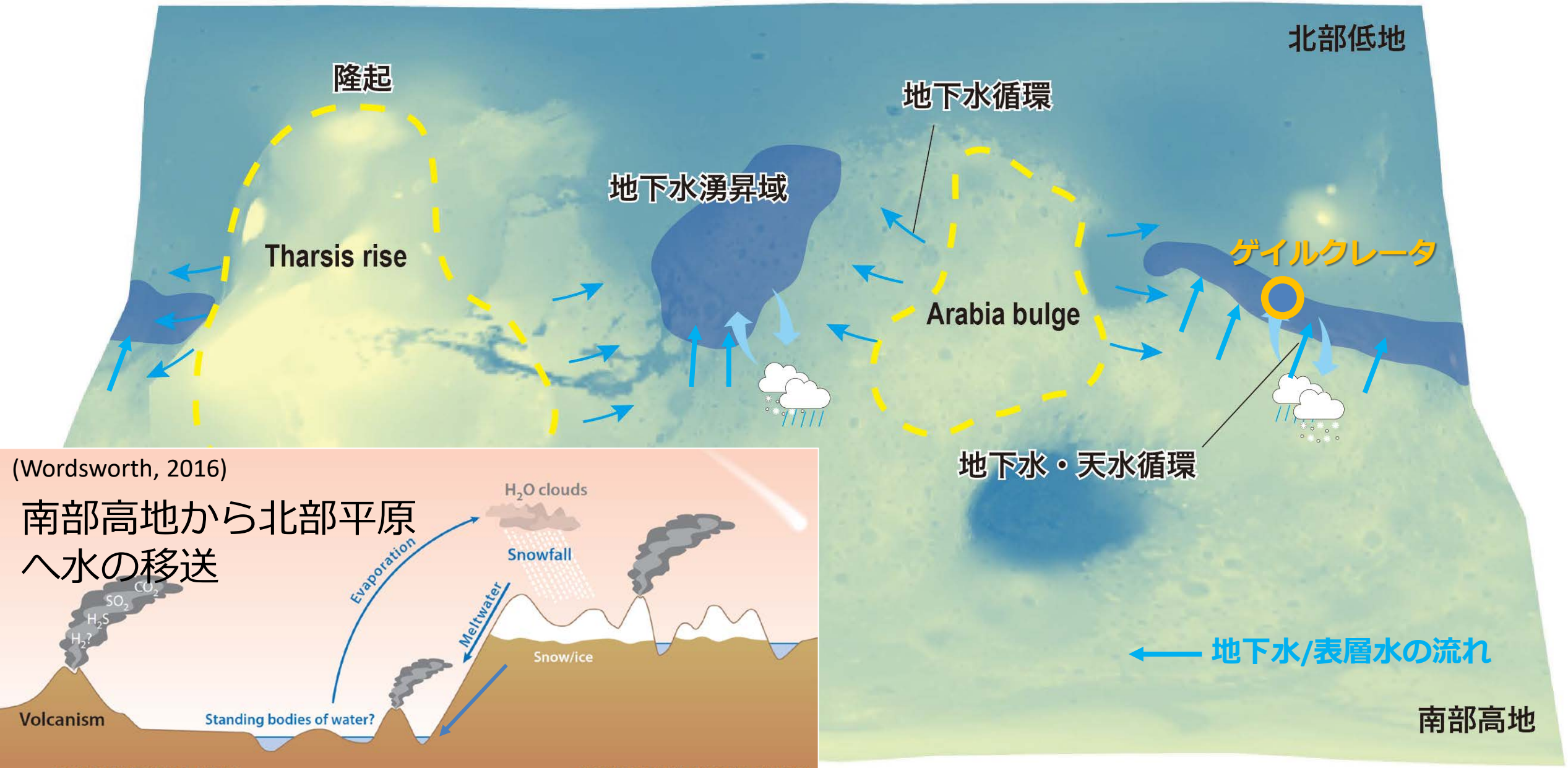
温暖期にはどんな水環境・物質循環？





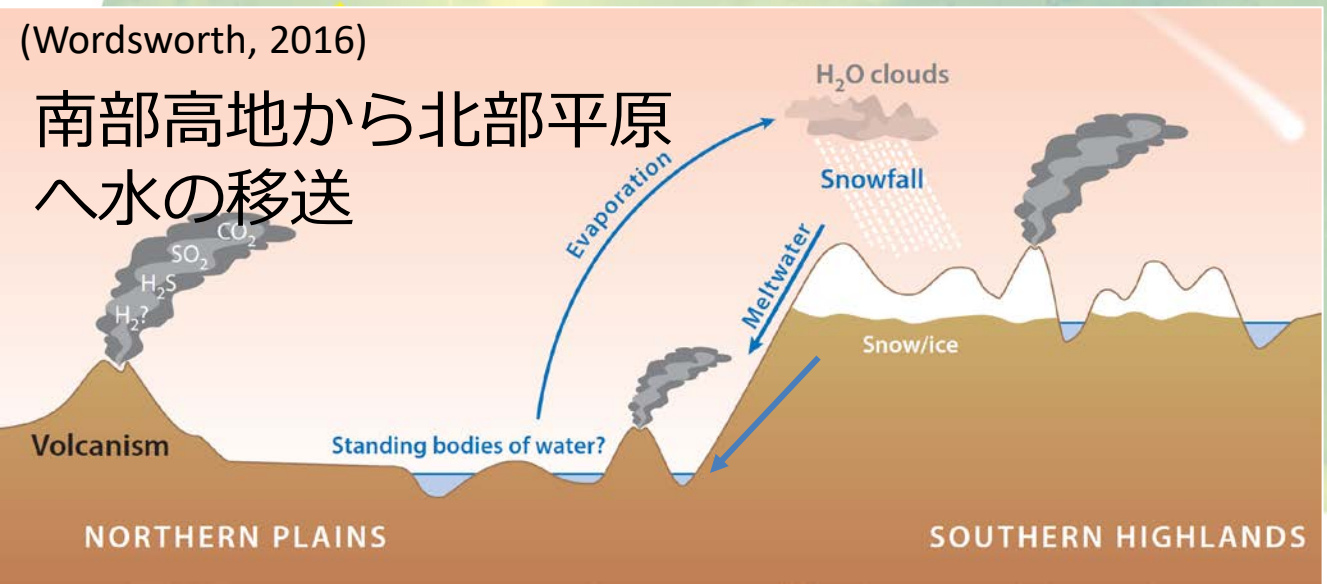
(Rampe et al., 2020)

全球的な温暖期の水循環モデル



(Wordsworth, 2016)

南部高地から北部平原へ水の移送



ボトムアップ：3次元流体シミュレーション

多相多成分3次元流体シミュレーションコード “GETFLOWS”
(GEneral purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator) を重力可変改良

インプット

高度マップ
地質情報 (空隙率, 透水率)
気候 (降水/蒸発,時間変化)

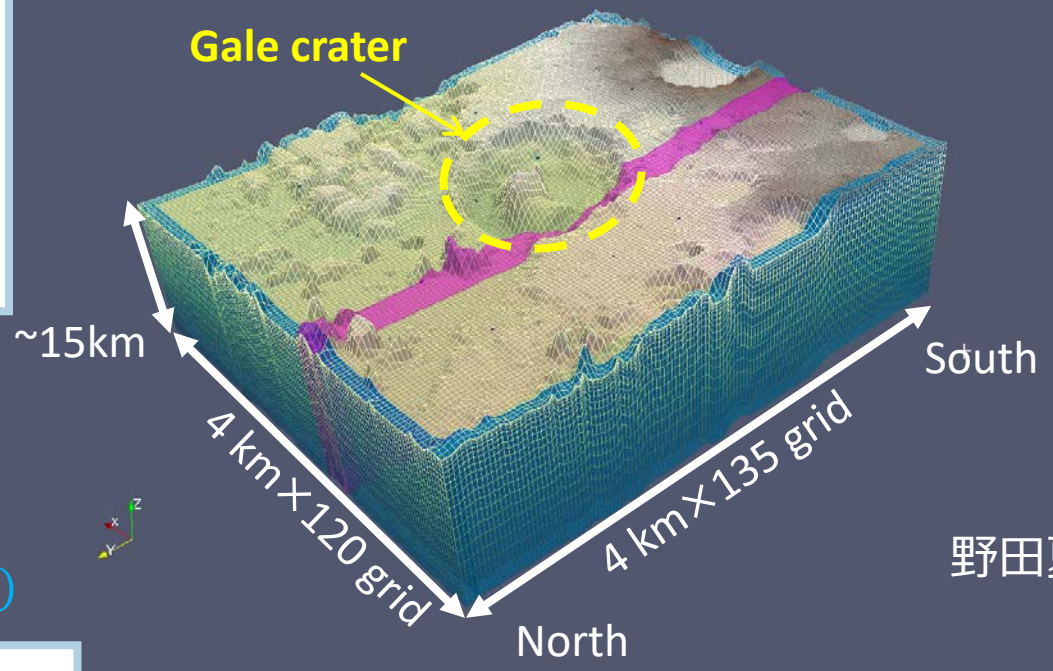
基礎方程式

・質量保存則
・ダルシー則

$$\boldsymbol{v} = -\frac{k}{\mu}(\nabla P - \rho \boldsymbol{g})$$

アウトプット

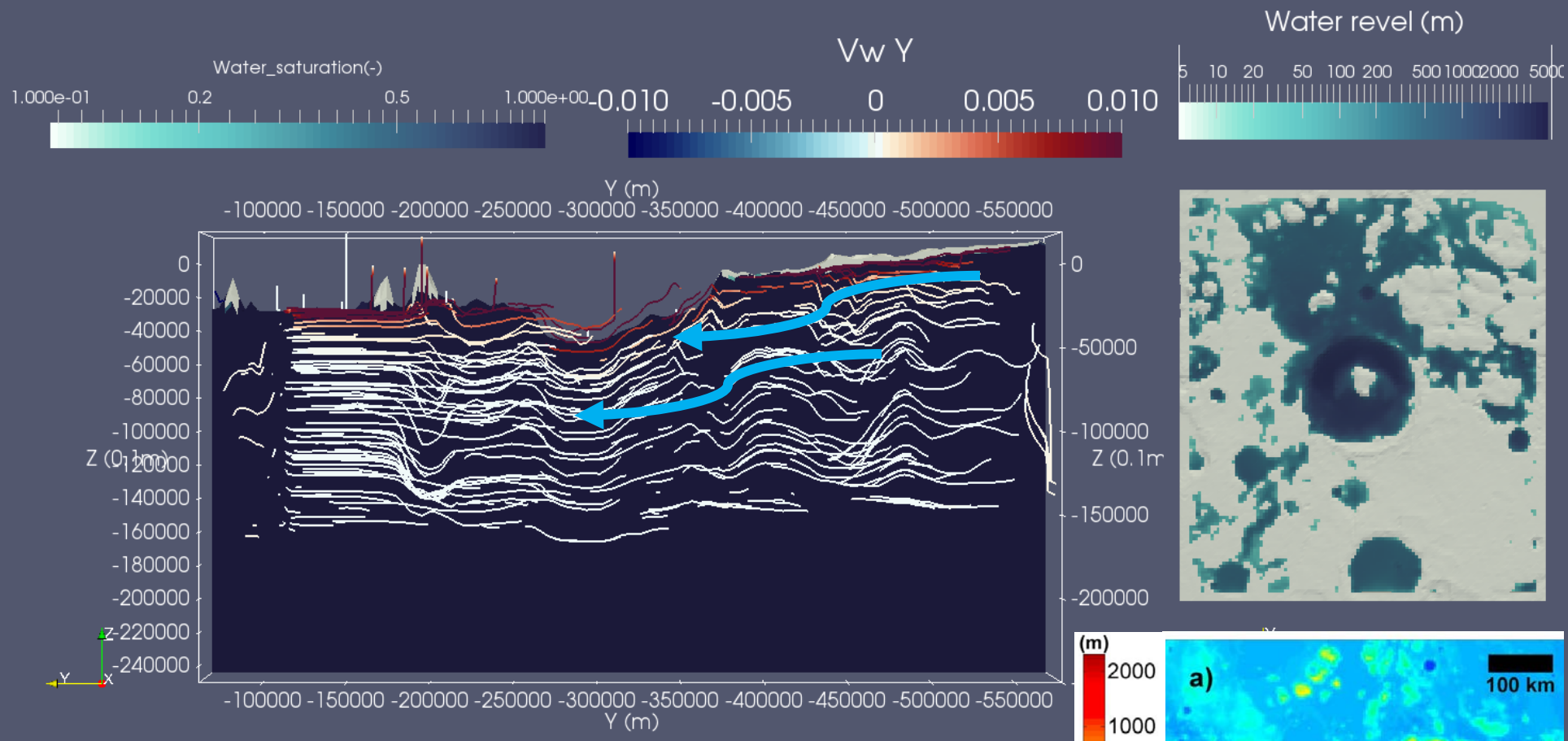
地下水飽和度
表層水量
地下水移動速度・ベクトル
時間進化も計算可能

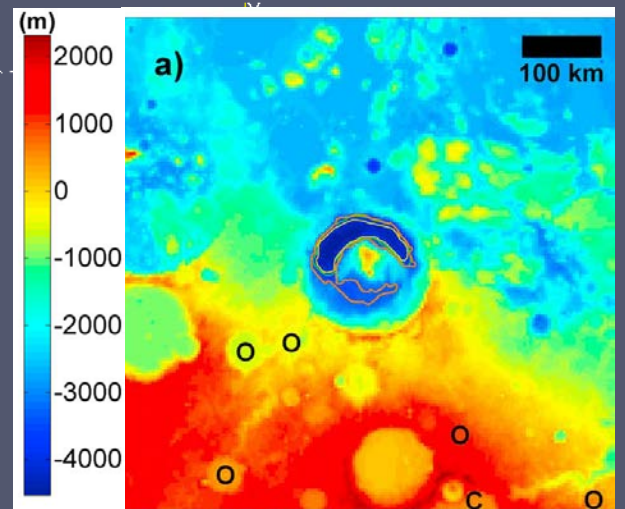


野田夏実D3 (東大/東工大)

今回は
・地下水頭: h (km)
・正味蒸発: netE (mm/day)
をパラメタにする

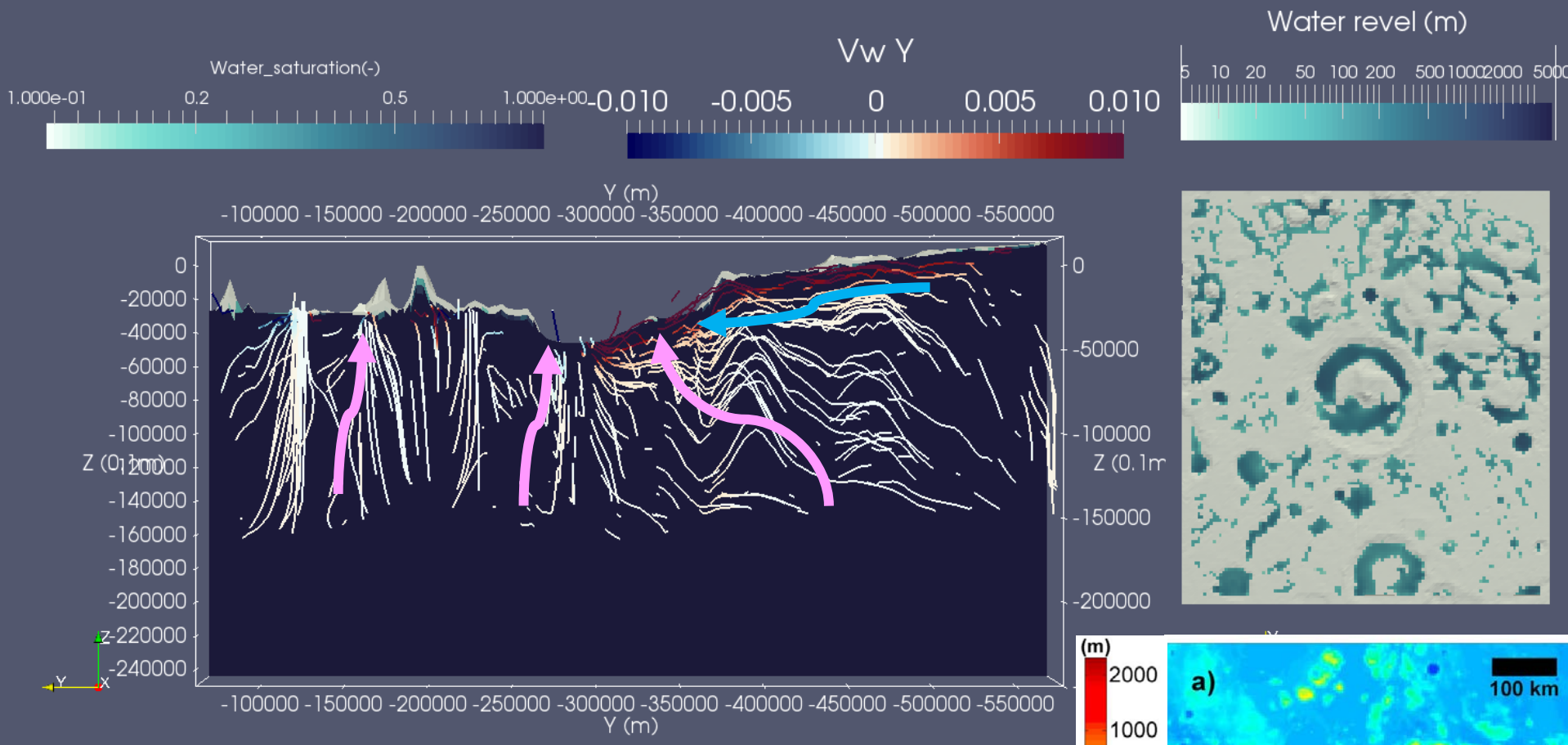
結果：地下水頭 0 km, 正味蒸発率 0 mm/day

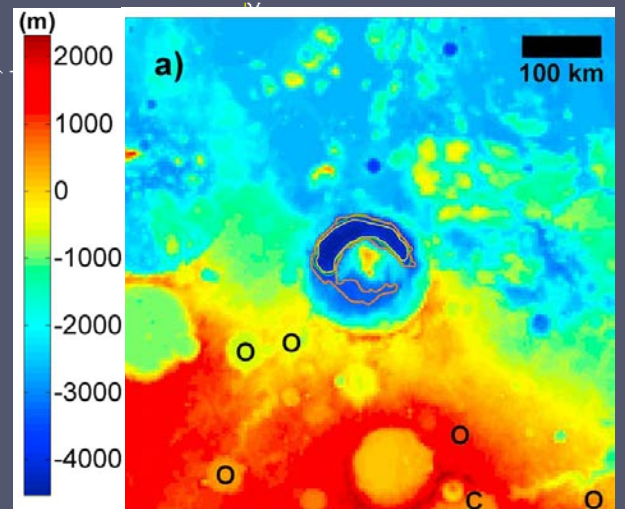




- 南から北への水平流(地下)
- 表面水量は合ってない

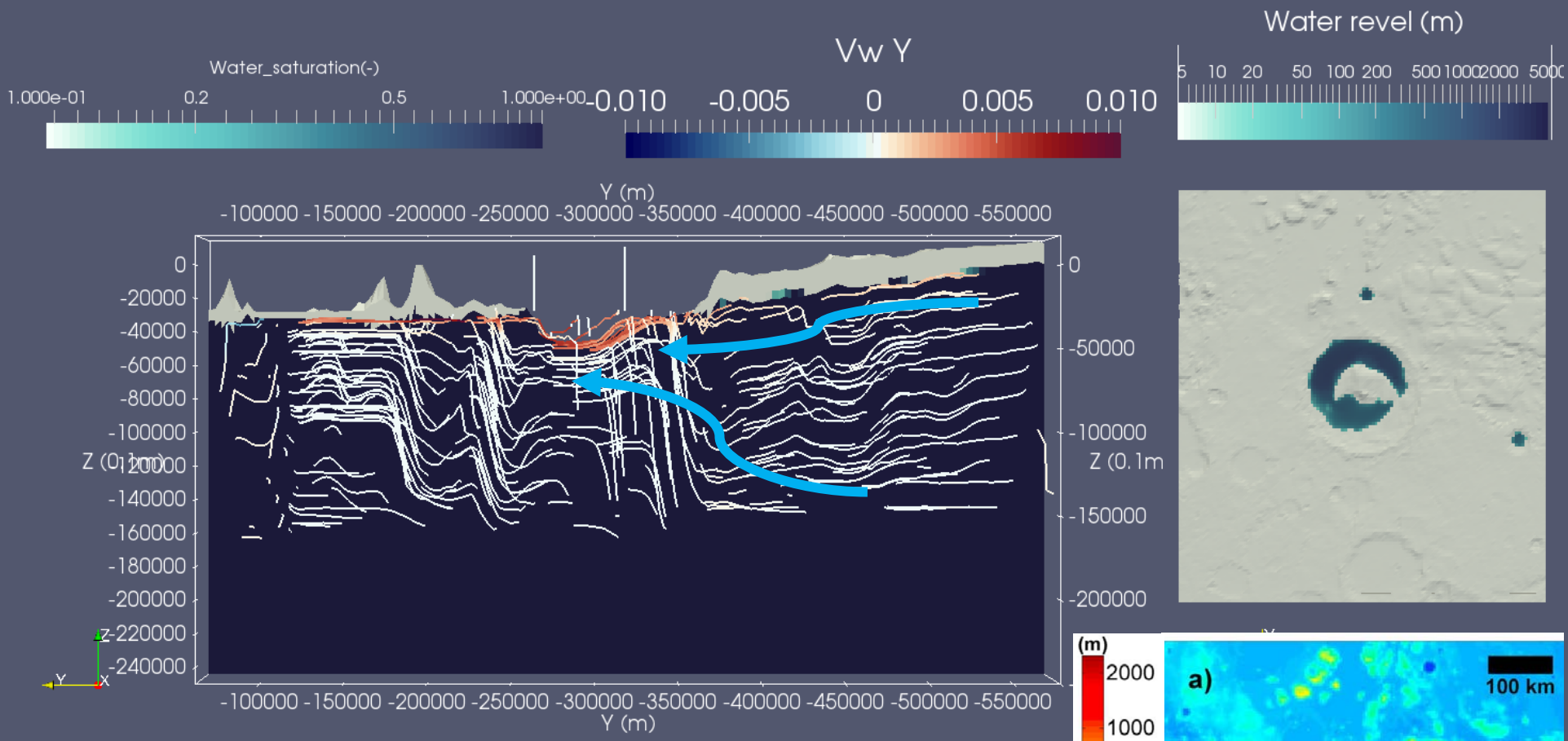
結果：地下水頭 0 km, 正味蒸発率 1 mm/day

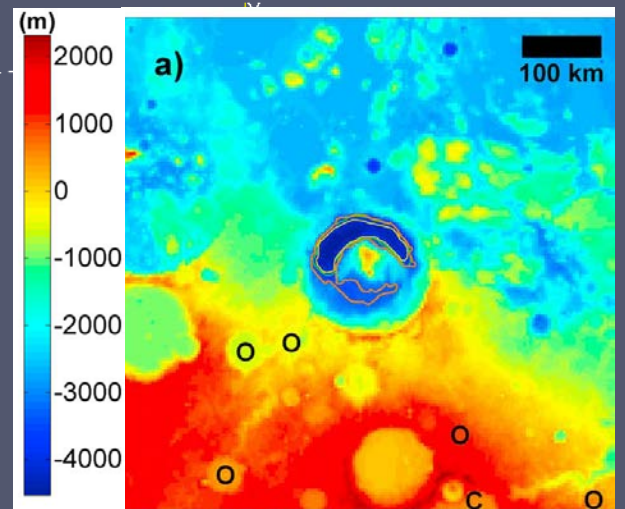




- 地下からの湧昇(+水平流)
- 10 km以深 (200℃熱水)
- 表面水量も比較的よい

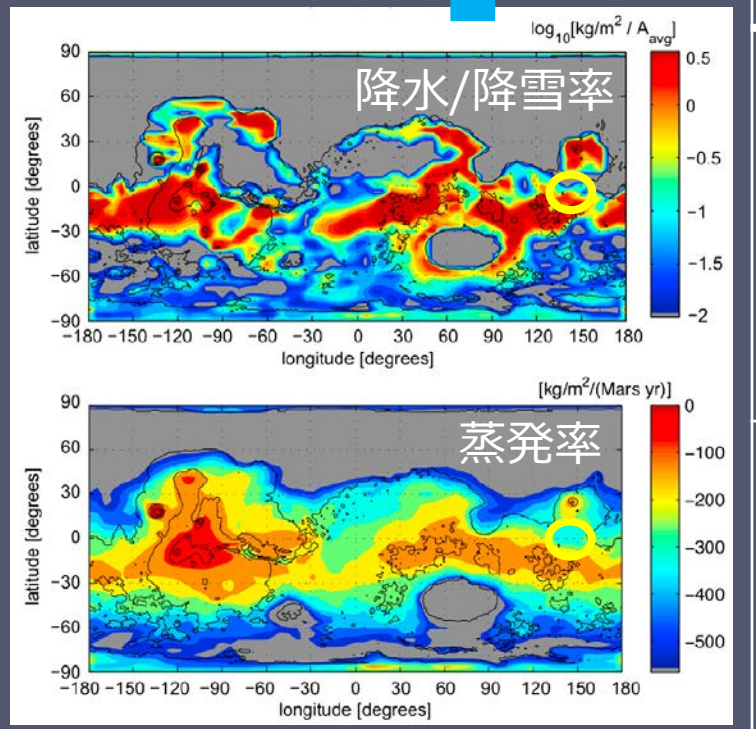
結果：地下水頭 1 km, 正味蒸発率 0 mm/day

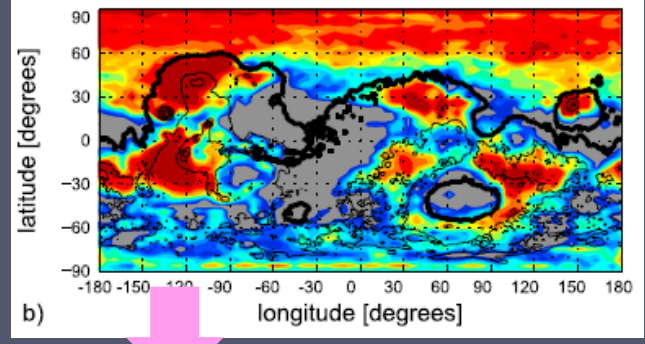




- 南から北へ水平流(地下)
- 湧昇も多少ある
- 表面水量よい(他の湖はよくない？)

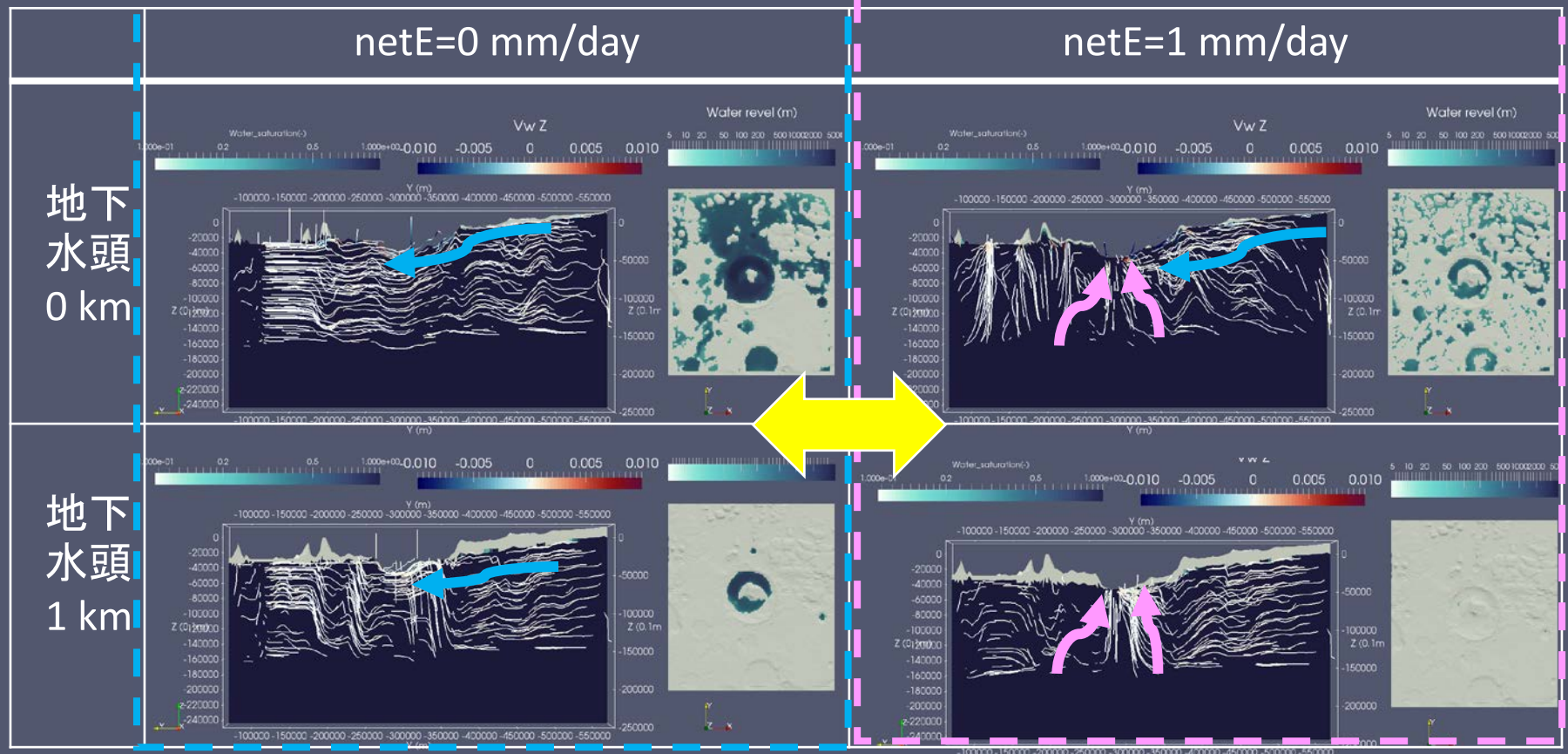
メソスケール地下水循環数値シミュレーションまとめ



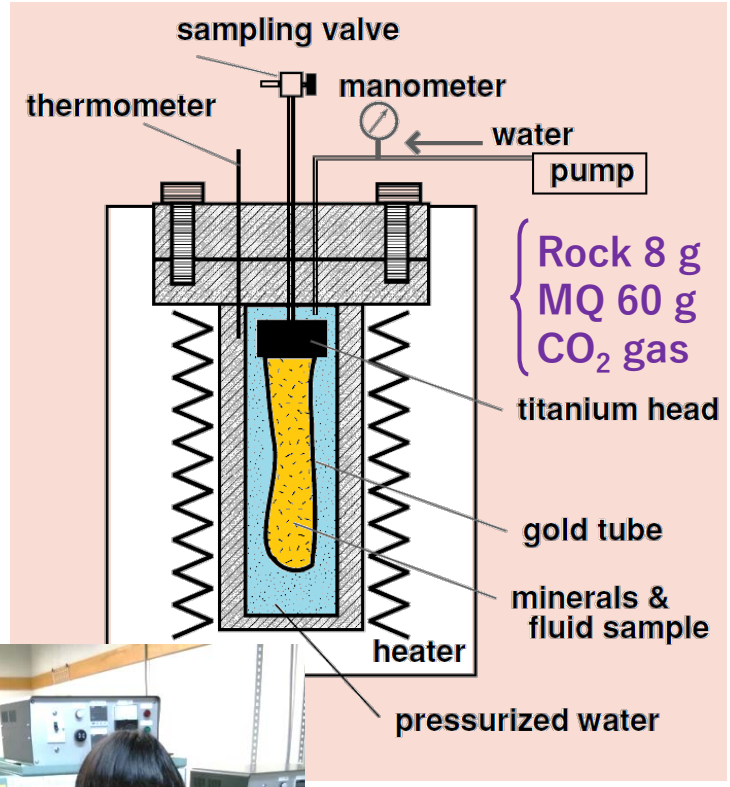


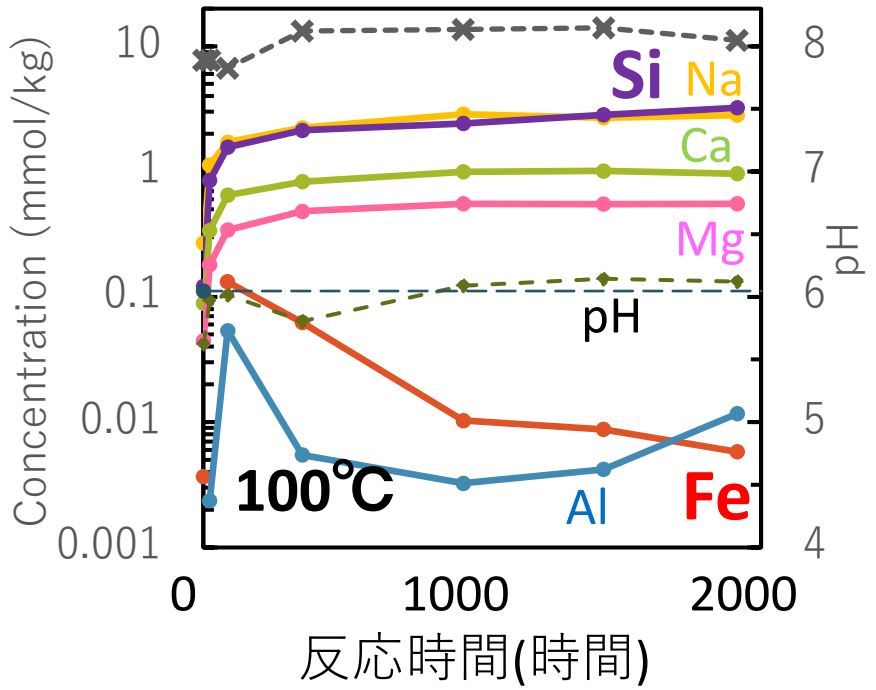
cold & icy (雪有)蒸発率
(Wordsworth et al., 2015)

warm & wet (海有)蒸発率
(Wordsworth et al., 2015)



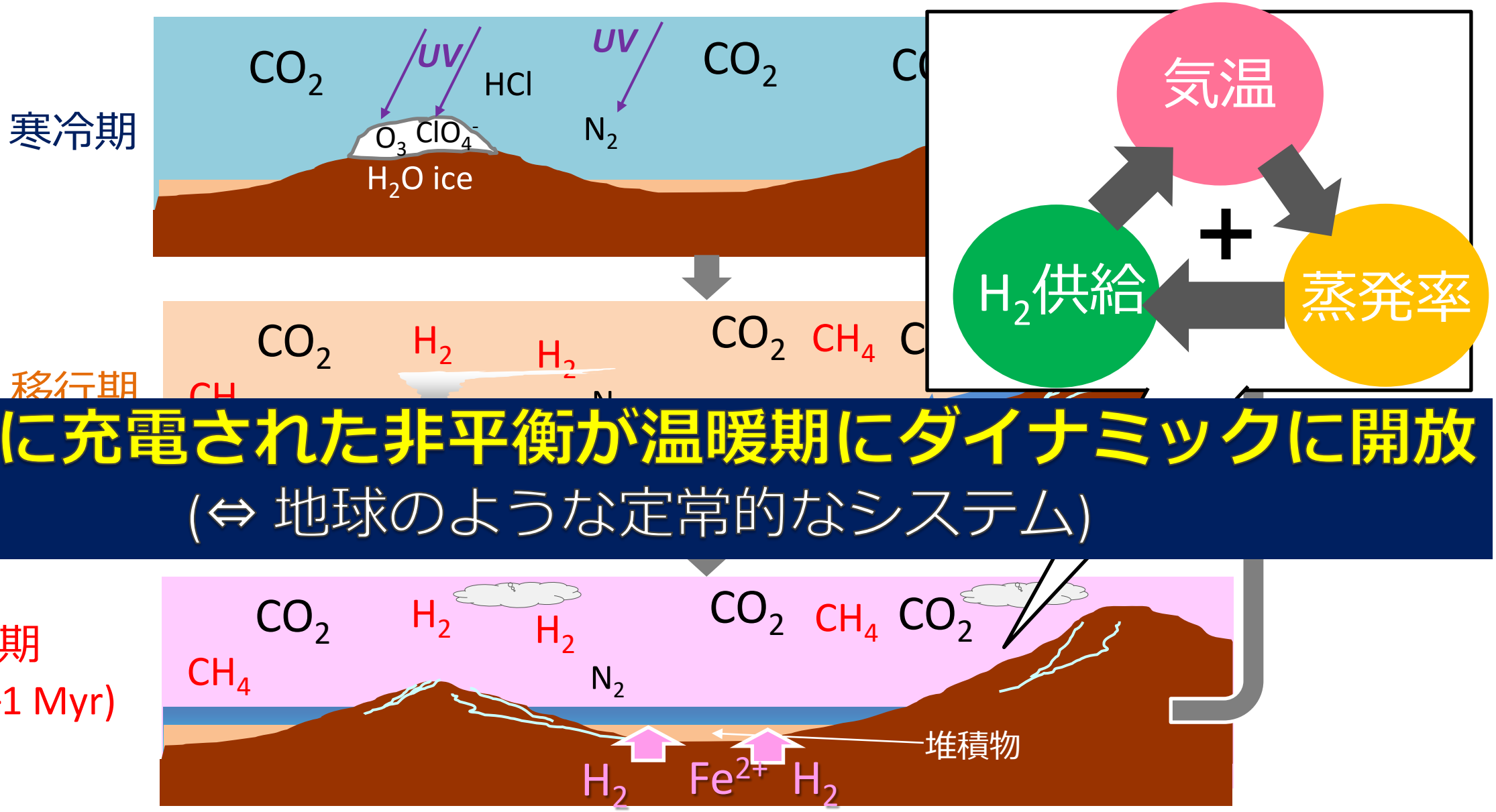
火星模擬地殻での熱水反応実験





- 溶存 SiO_2: ~2 mM@100-200℃
- 地下水湧昇 ~5 mm/day ⇒ シリカ沈殿 ~0.3 mm/year
  ラミナは年稿 (層厚100 m ~ $10^{5\text{-}6}$ year)
- 湧昇する地下水にはH_2, Fe^{2+}など還元剤も含まれる

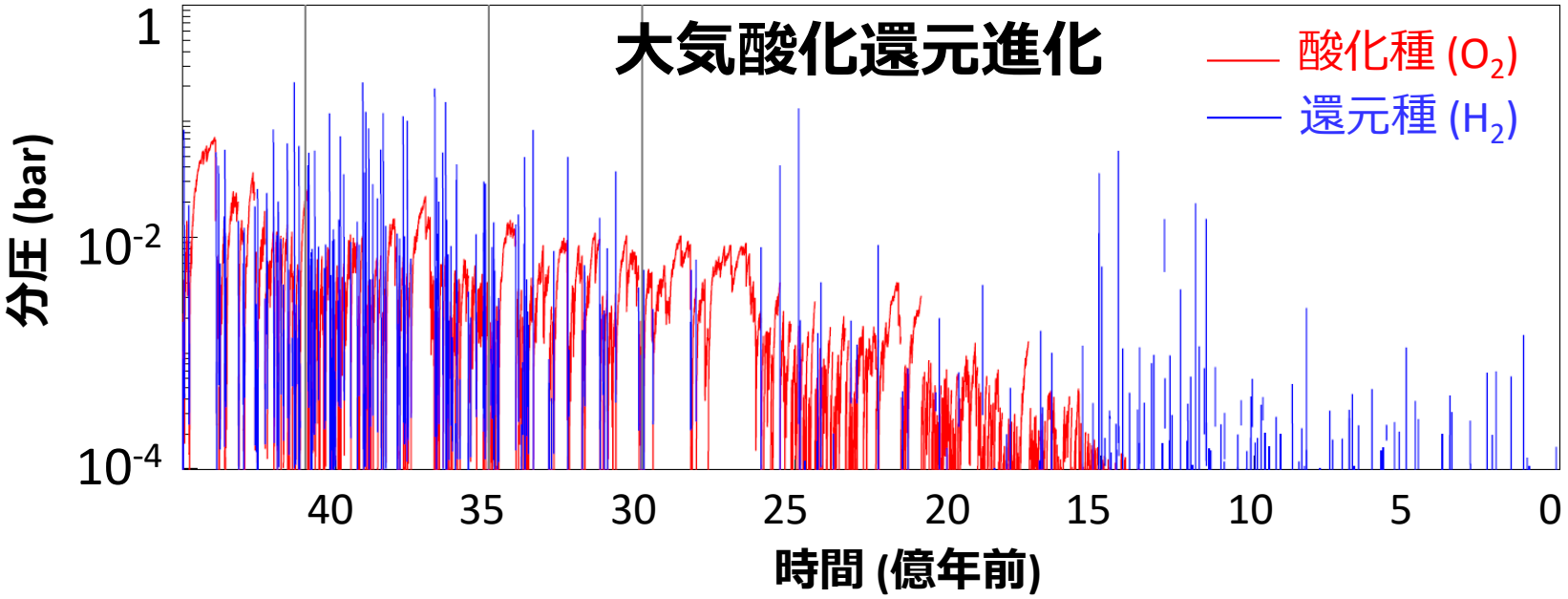
初期火星の動的な酸化還元進化

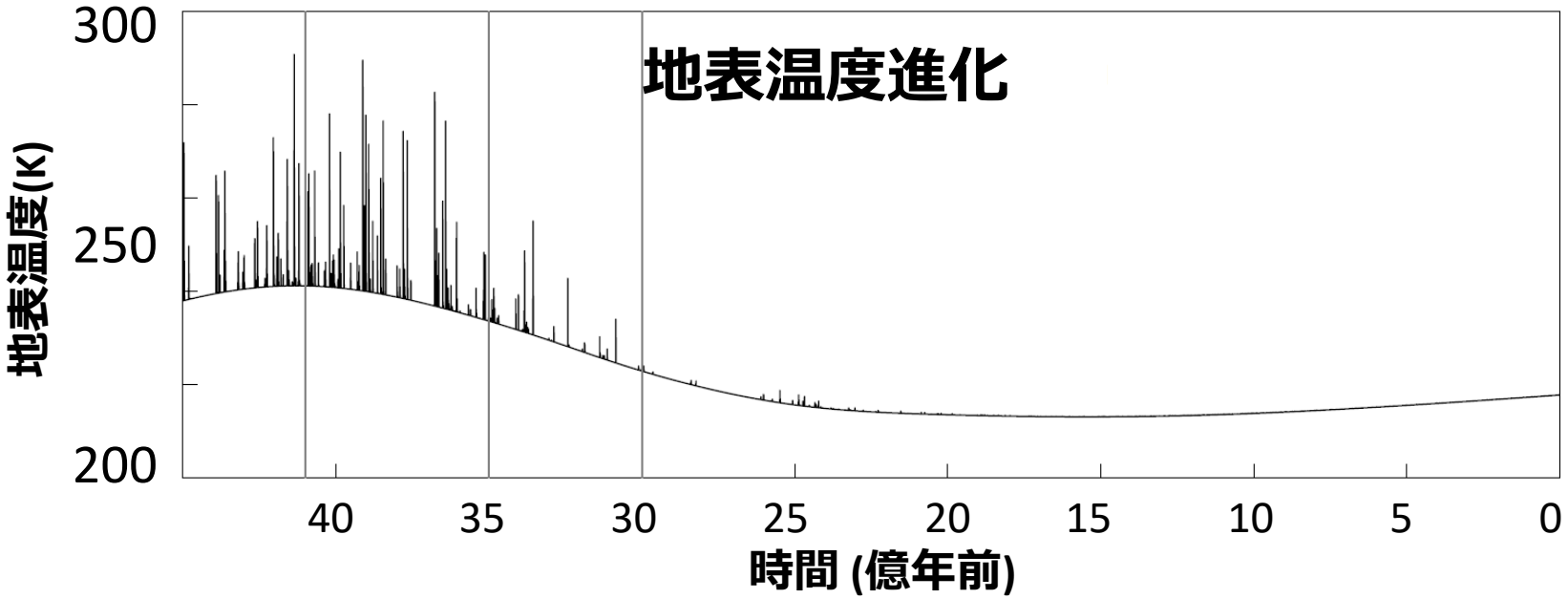


寒冷期に充電された非平衡が温暖期にダイナミックに開放

(⇔ 地球のような定常的なシステム)

内部進化が駆動する動的な酸化還元進化？





(Wordsworth et al., 2021, Nature Geosci.)

- ランダムに脱ガス(H_2)を与える
- 脱ガスに応じた短期間の温暖化
- H_2Oの光分解でO_2(や他の酸化剤)が残り、寒冷化に伴い酸化的な大気へ

火星システムの物質循環の特徴づけ

酸化剤 (“酸素”)

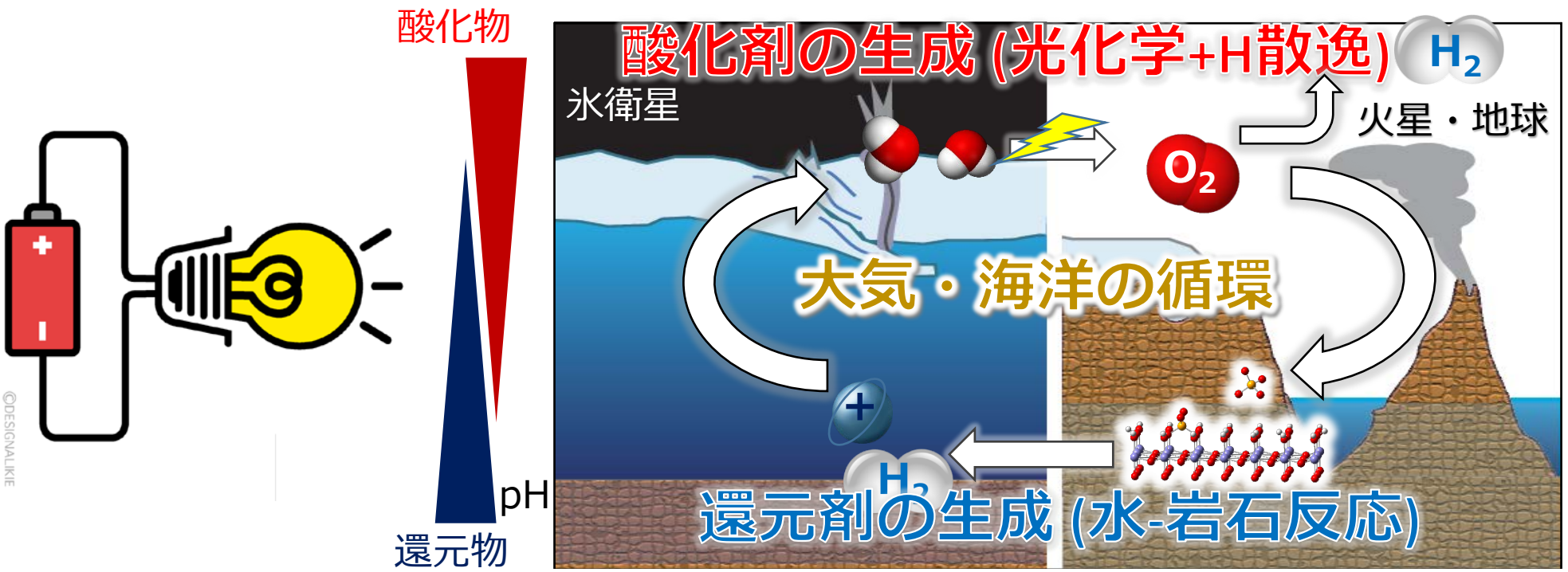
SO_4
CO_2
強酸化剤 [O_2
ClO_4^-]

還元剤 (“食料”)

CH_4
H_2S
Fe^{2+}
[H_2] 強還元剤

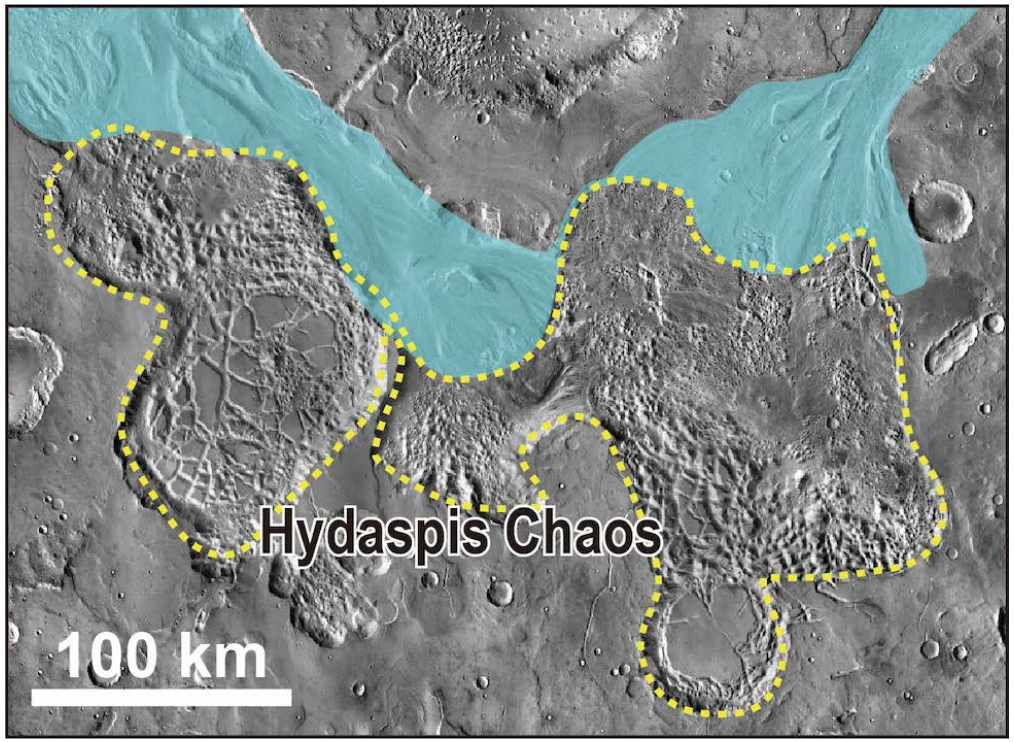
- 気候により動的に充電/放電されるシステム
- 地球生命起源へも新概念

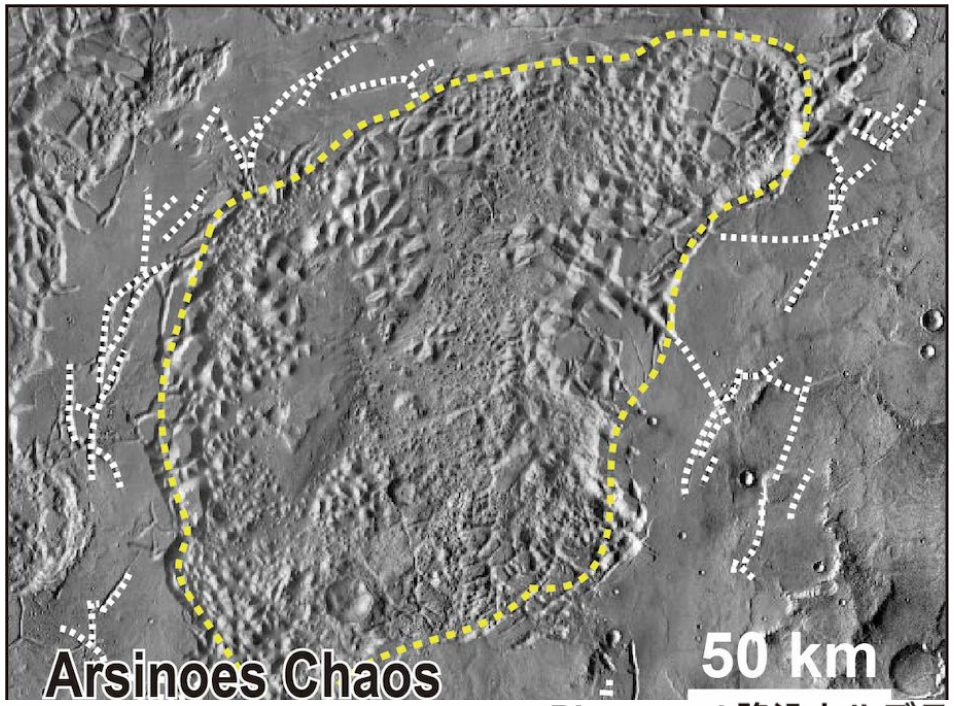
還元剤はどう検証？
現在や近過去にも駆動？



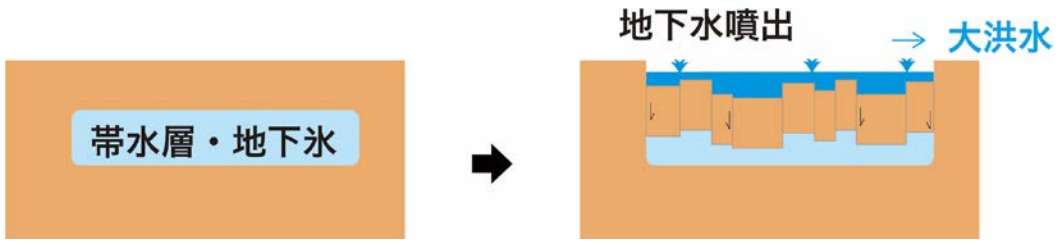
現在でもアクセス可能領域に地下水/氷はある？

カオス地形：Hesperian以降にも形成、地下氷の崩壊/融解でも形成

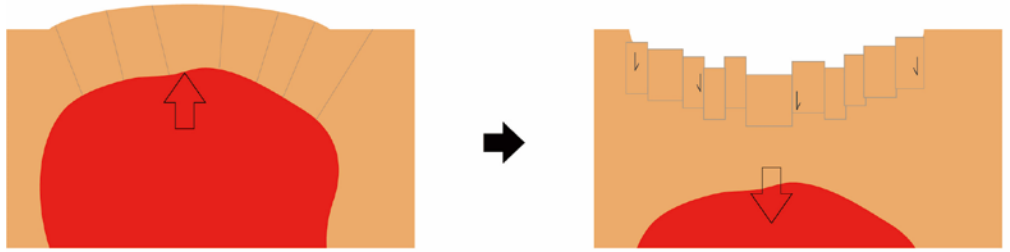




Piecemeal 陥没カルデラ

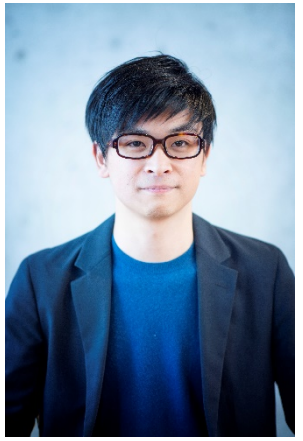


(e.g., Rodriguez et al., 2005)



(e.g., Luzzi et al., 2020)

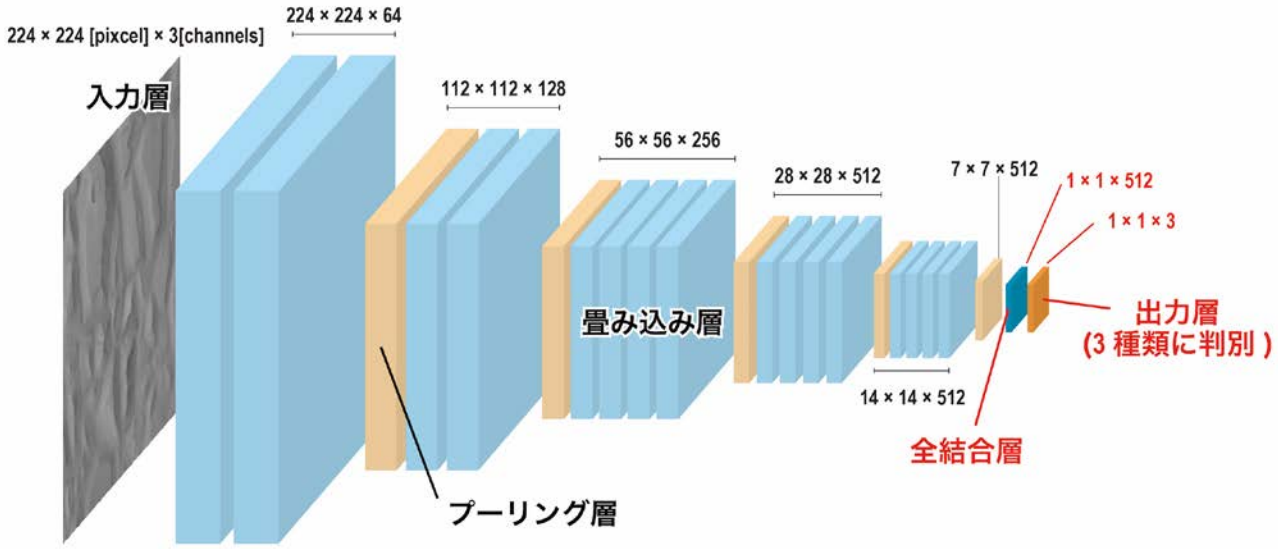
機械学習による自動カテゴリ化

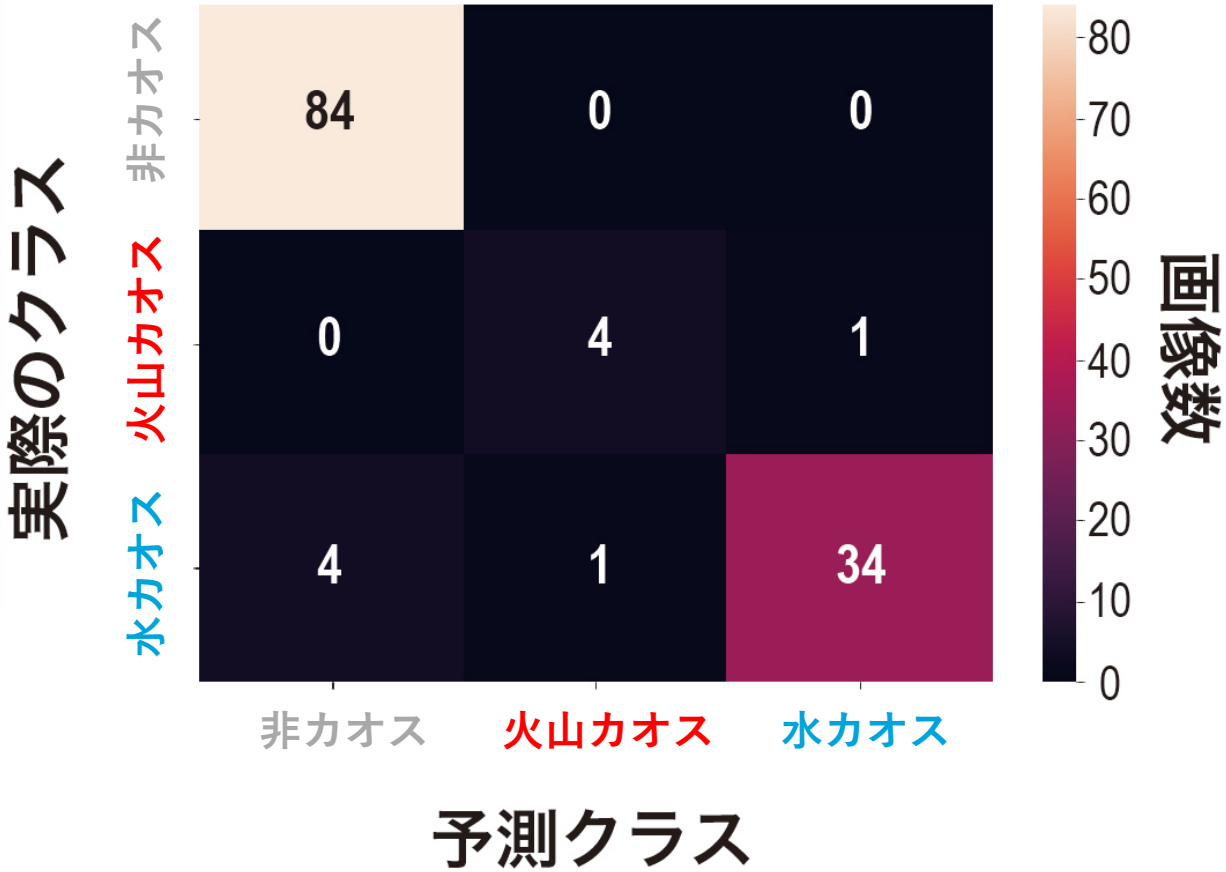


庄崎弘基D1 (東工大)

- **VGG19 (画像認識機械学習)** 19層の畳み込みニューラルネットワーク
  (Simonyan and Zisserman, 2014) .

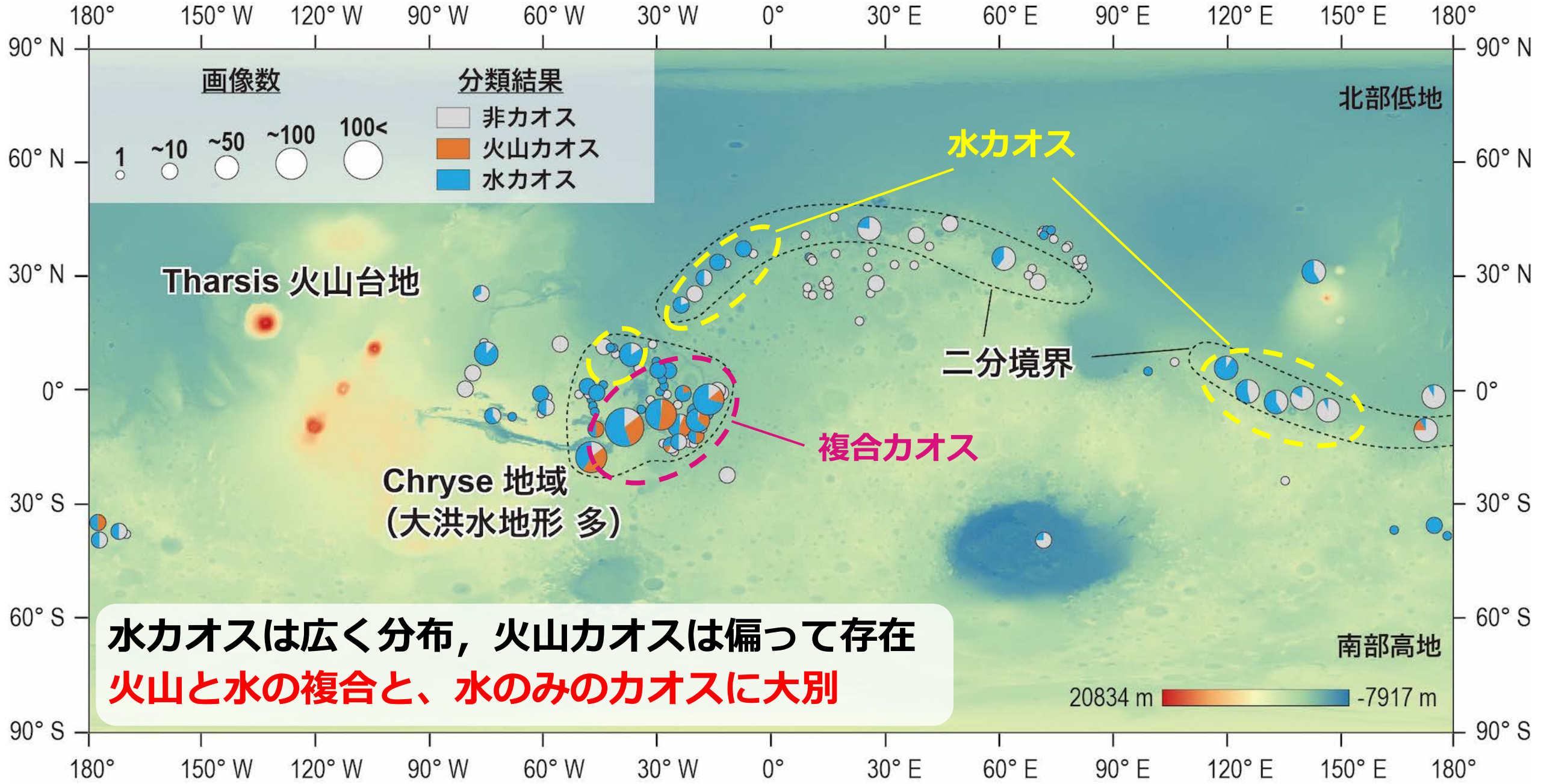
可視画像 (CTX), 熱慣性 (THEMIS), 高度 (MOLA) に対して修正
水カオス、火山カオス、非カオスにカテゴリ化





4000枚以上の画像を学習させ、90%以上の確度で分類する ”Classifier”開発

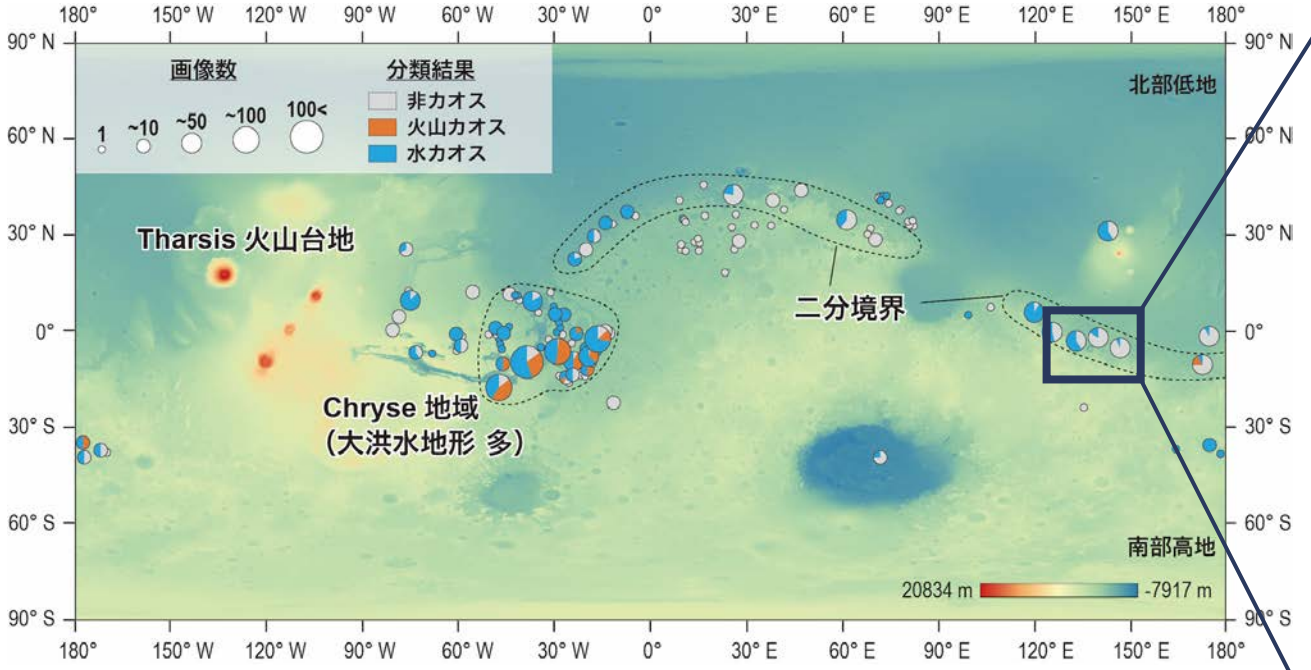
カオス地形分類結果

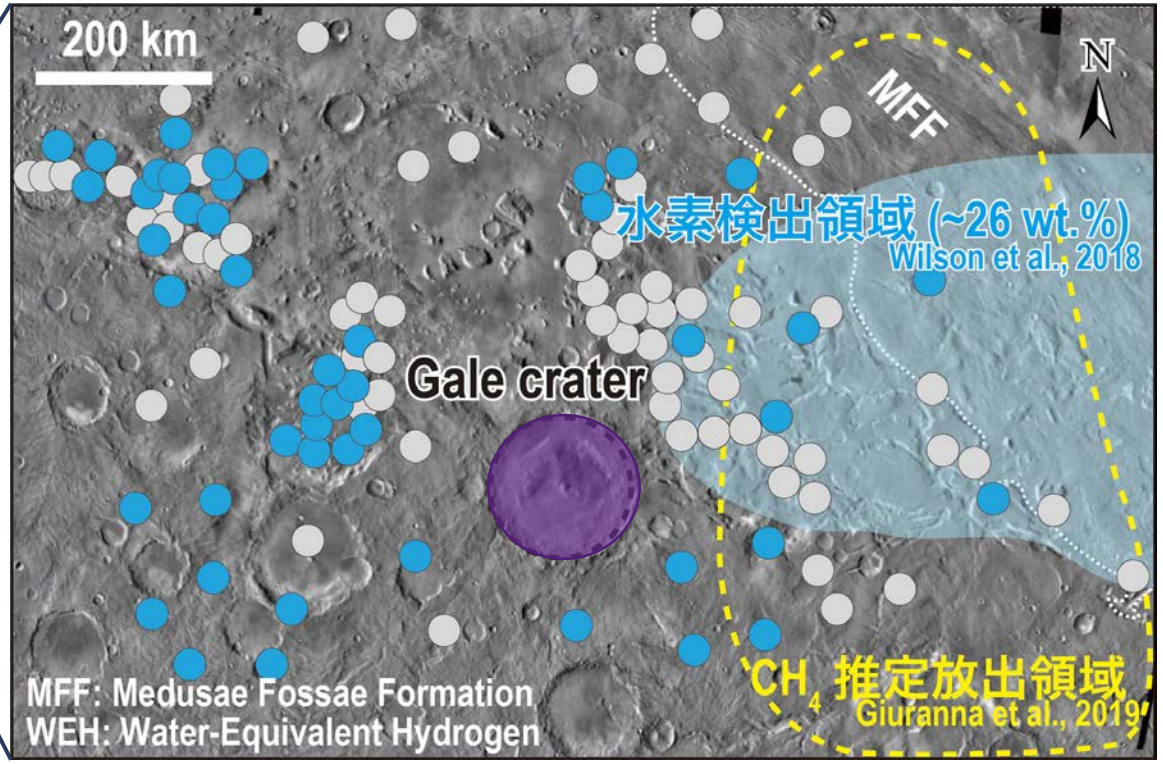


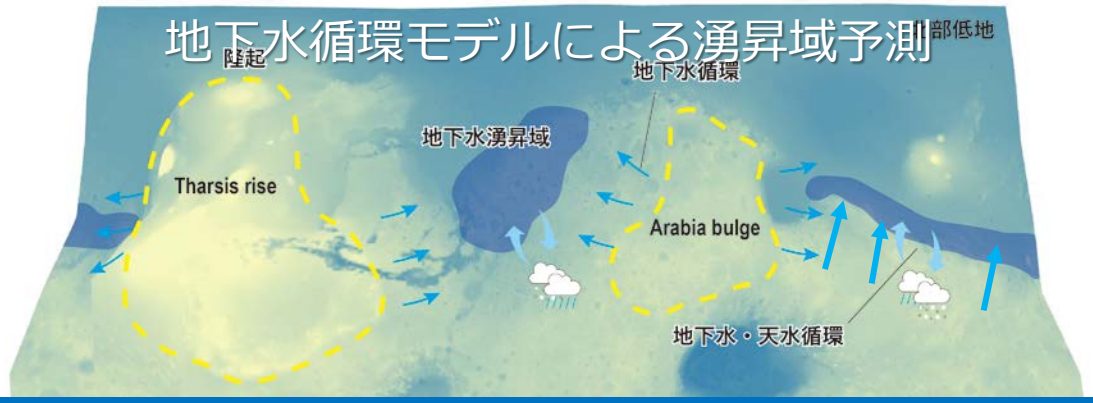
水カオスは広く分布，火山カオスは偏って存在

火山と水の複合と、水のみのカオスに大別

水カオス集中域と初期火星の地下水湧昇域は一致する







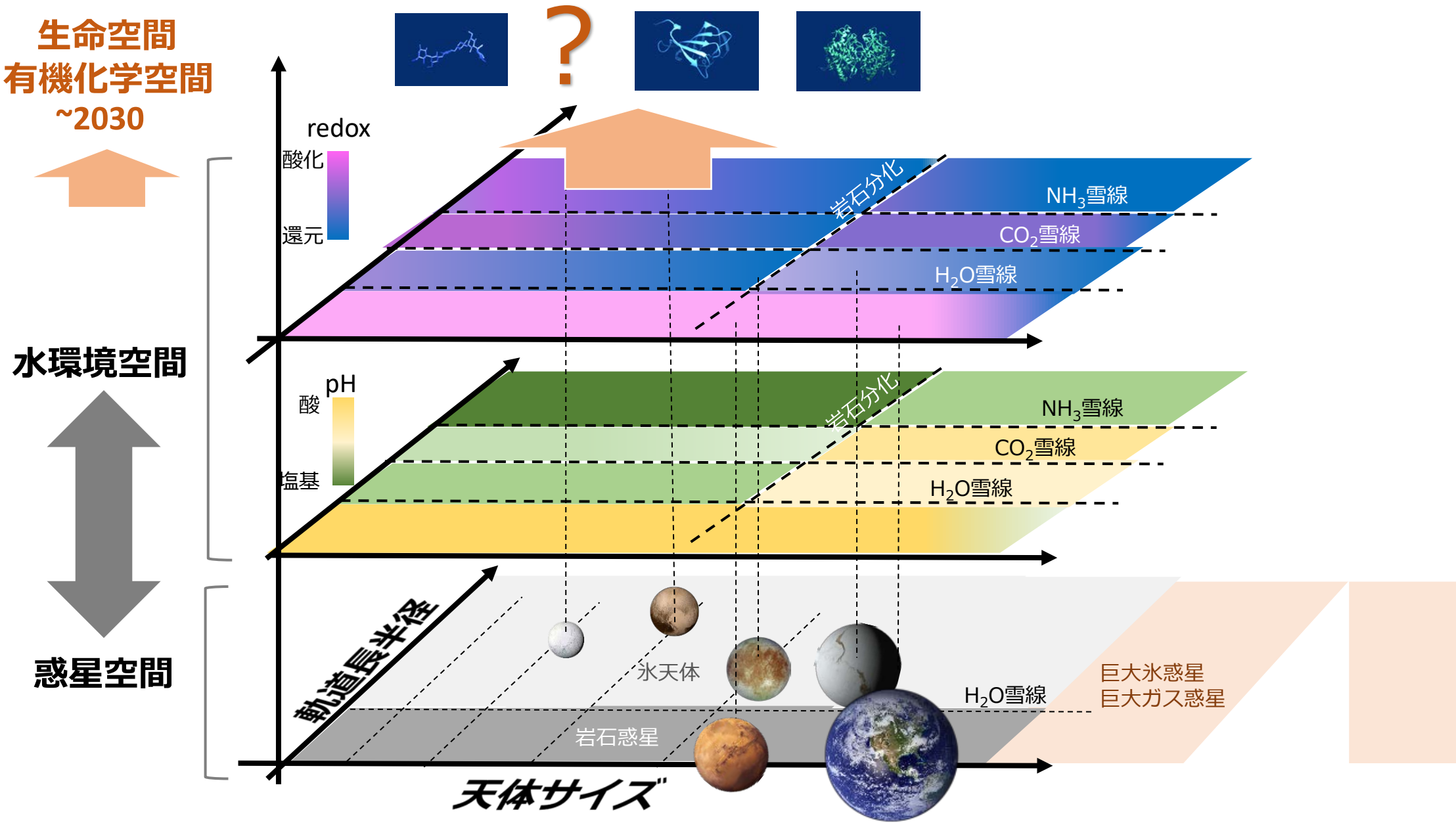
キュリオシティ検出のCH_4スパイクの推定放出領域と近接 (Giuranna et al., 2019).

中性子線分光によるH濃集とも重複 (Wilson et al., 2018)

過去の還元的な地下水が凍結し、地質活動に伴い放出？

現在、アクセス可能地域で現存生命がいる可能性最も大／将来の有人基地にも

まとめと今後　惑星群を水環境空間へ投影：汎化学進化論



まとめ

酸化剤 (“酸素”)

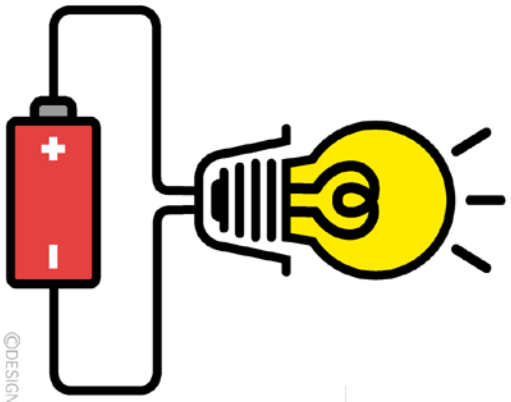
SO_4
CO_2
強酸化剤 [O_2
ClO_4^-

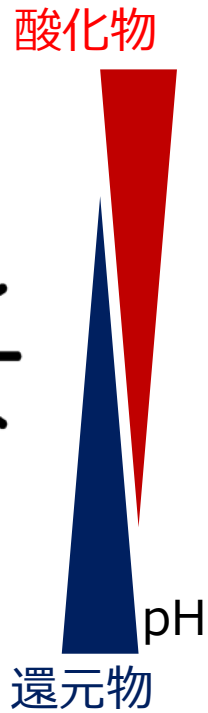
還元剤 (“食料”)

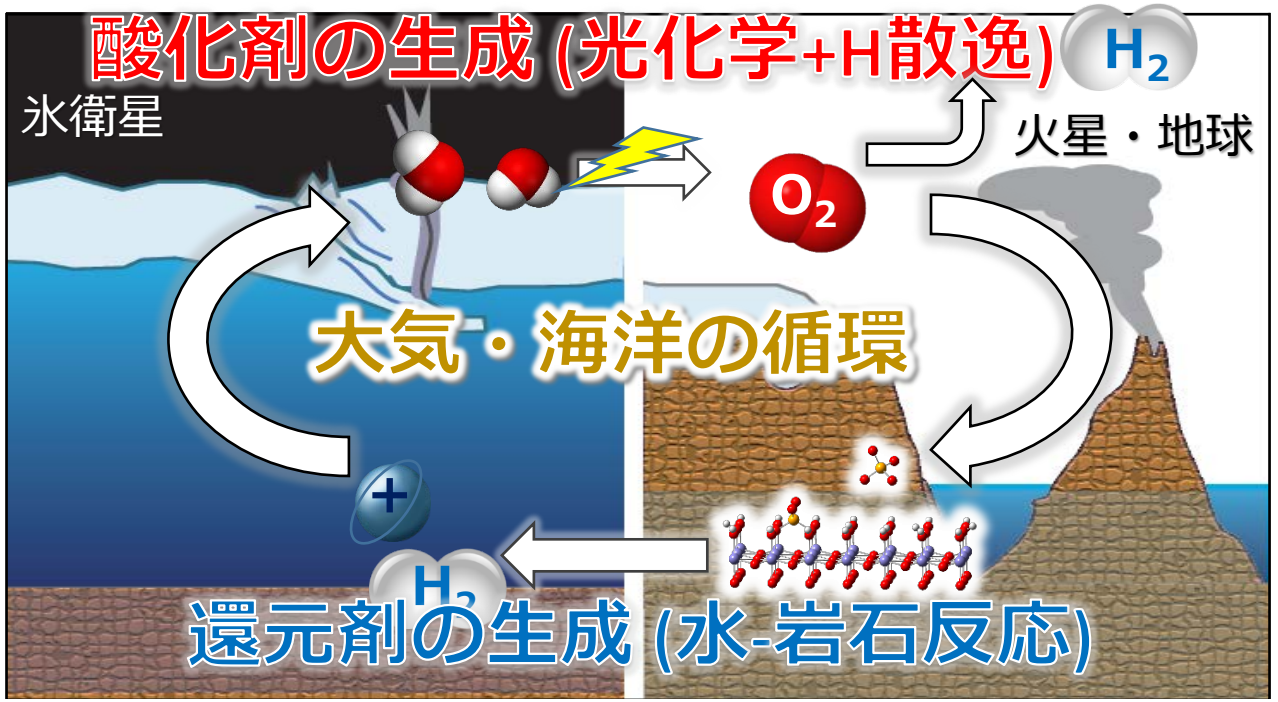
CH_4
H_2S
Fe^{2+}
H_2] 強還元剤

- 気候により動的に充電/放電されるシステム
- 地球生命起源へも新概念

還元剤はどう検証？
現在や近過去にも駆動？







©DESIGNALIKIE