



**アストロバイオロジーの舞台  
としての火星表層環境の特異性  
—比較惑星学的視点から—**

**関根 康人**

**東京大学 大学院新領域創成科学研究科**

**火星研究の現状と将来：2012年2月13日**

© JAXA/NHK

# 21世紀の惑星探査のゴールは？

地球以外に生命を宿す天体は存在するか？  
惑星や生命の多様性・可能性の理解

## 生命とは？

1. 自己と外界との隔離
2. 自己の増殖
3. 自己の維持

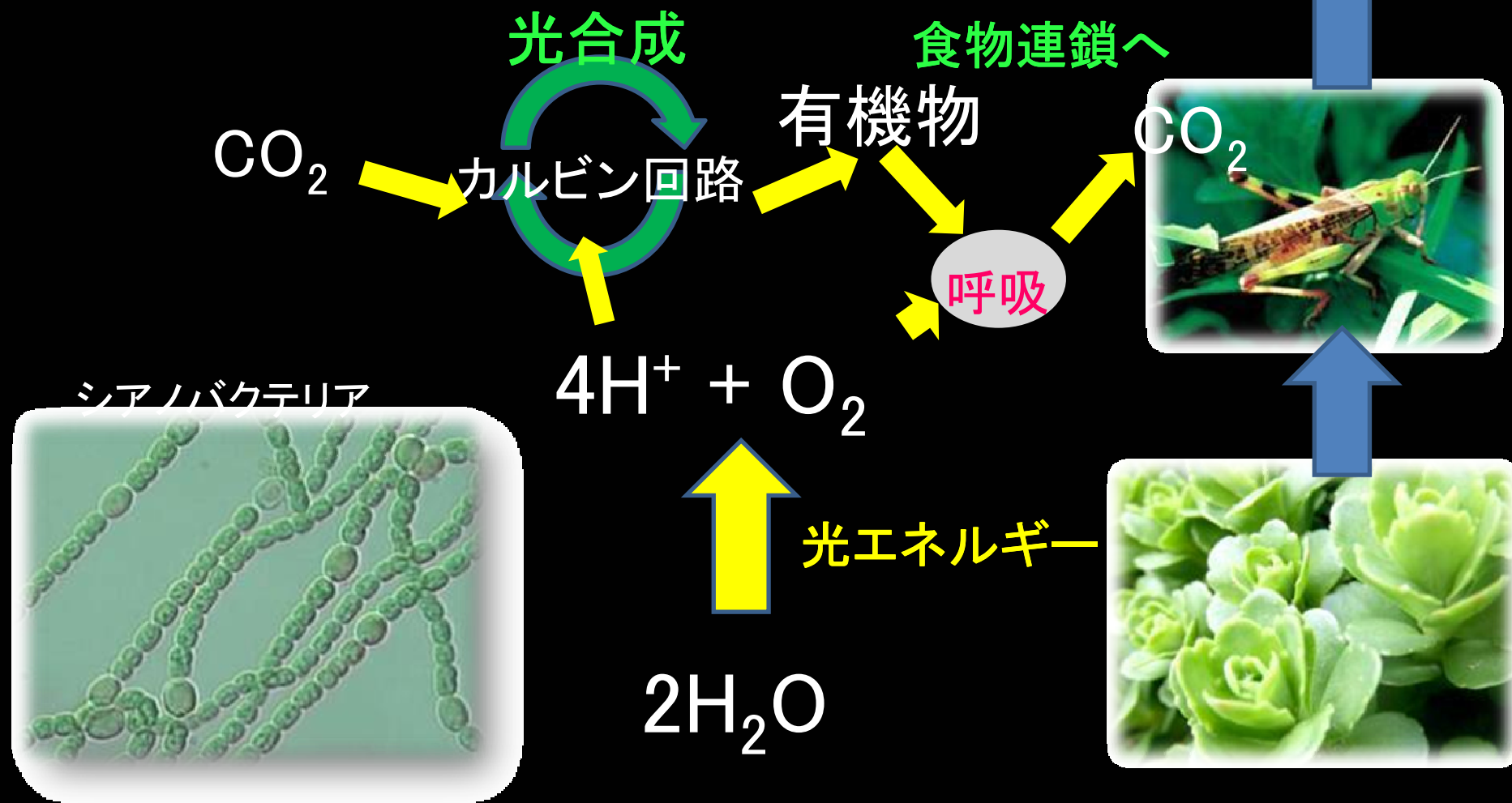
機能を持った物質  
(水・有機物)

化学反応とエネルギーの持続(水  
⇔ 水素と酸素)

# 地球生命圏

## 太陽依存型生命圏

一次生産者＝光合成独立栄養生物





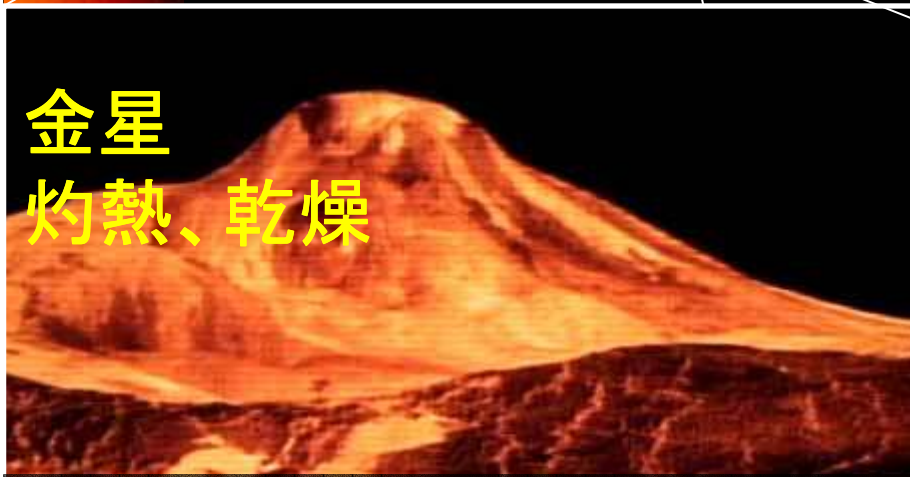
# 宇宙に第2の地球を探す

- 黎明期 (60-70's) の太陽系惑星探査

“ハビタブルゾーン”

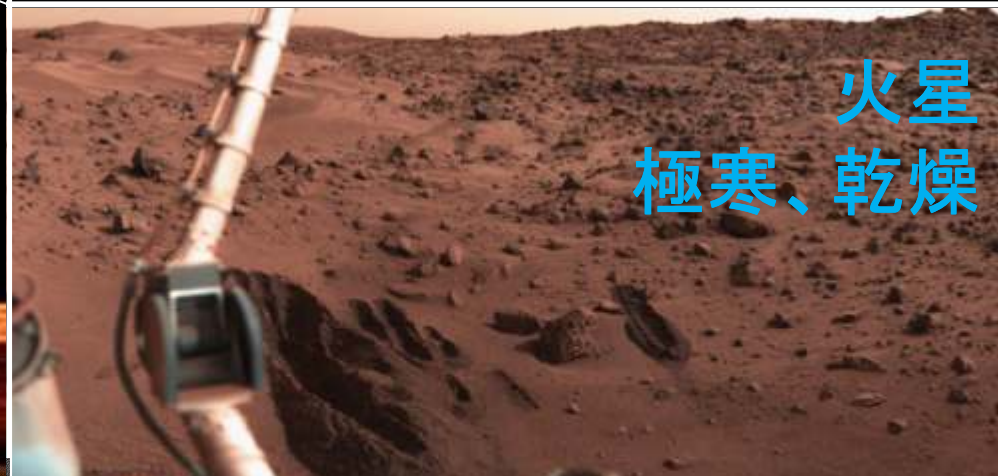


金星  
灼熱、乾燥



ベネラ・パイオニア探査 (1970-1978)

火星  
極寒、乾燥



バイキング探査 (1975)

# 地球科学からの新パラダイム提示

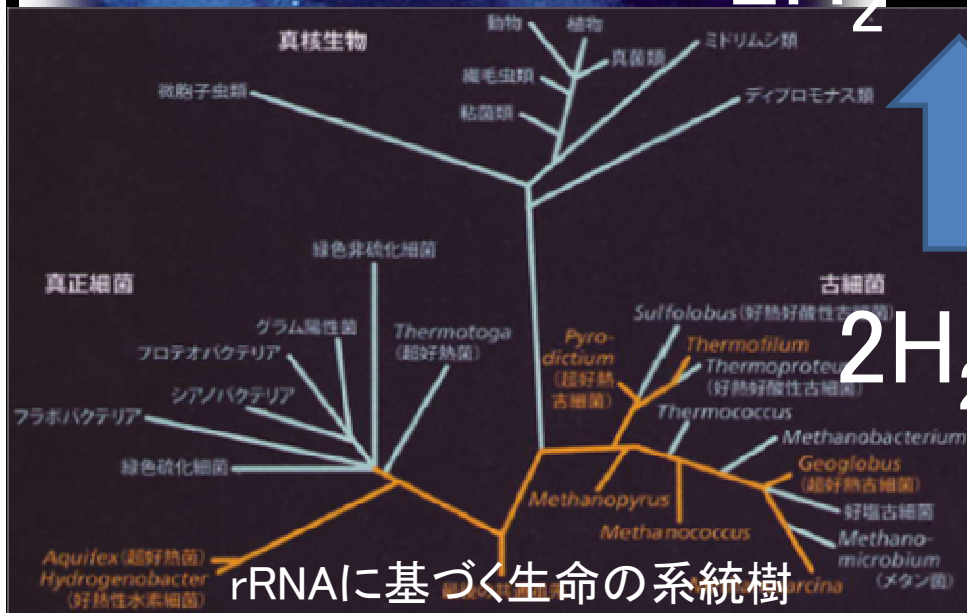
## 内部依存型生命圏

一次生産者 = 化学合成独立栄養生物

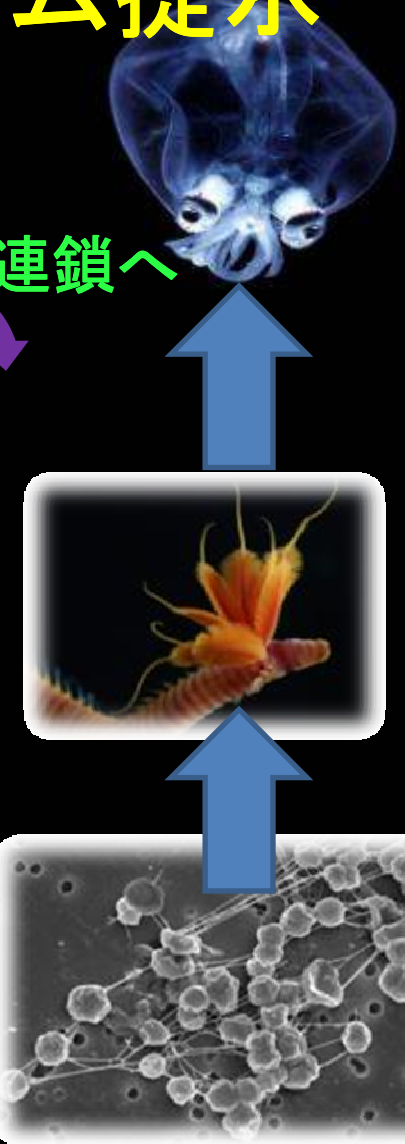
食物連鎖へ



嫌氣的酸化



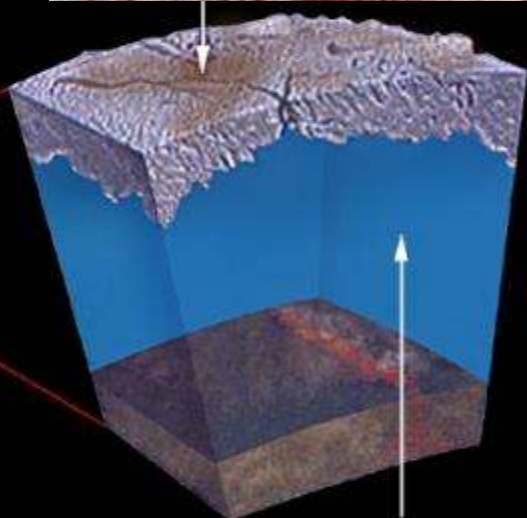
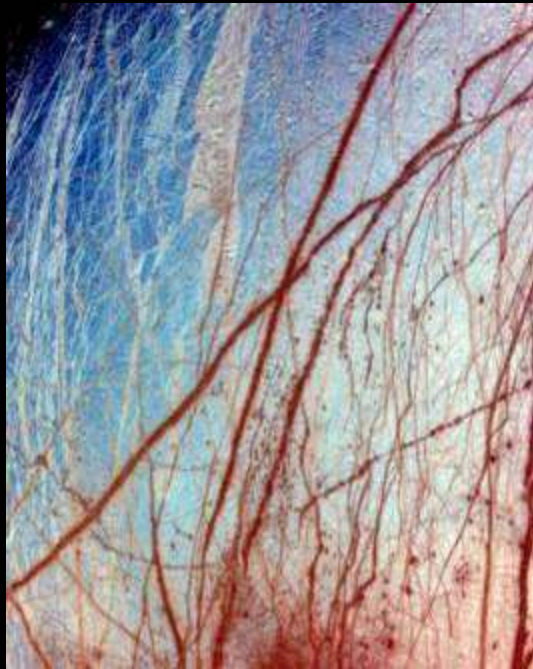
rRNAに基づく生命の系統樹



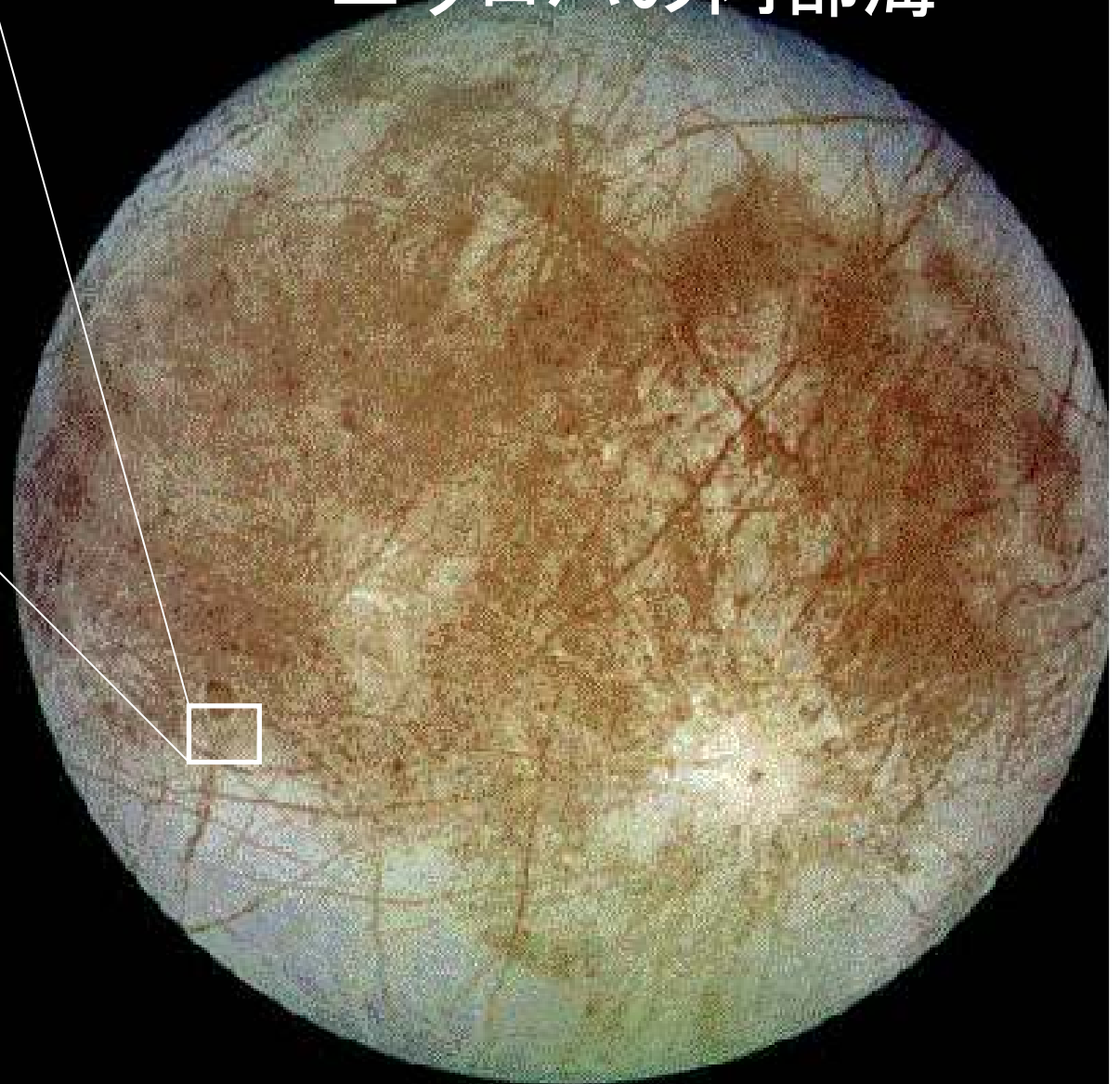
(e.g., Parkes et al., 1994, Summit & Baross, 2001, Keller et al., 2001; 2005, Martin & Russell, 2002)

# 氷衛星と生命存在可能性

- エウロパの内部海



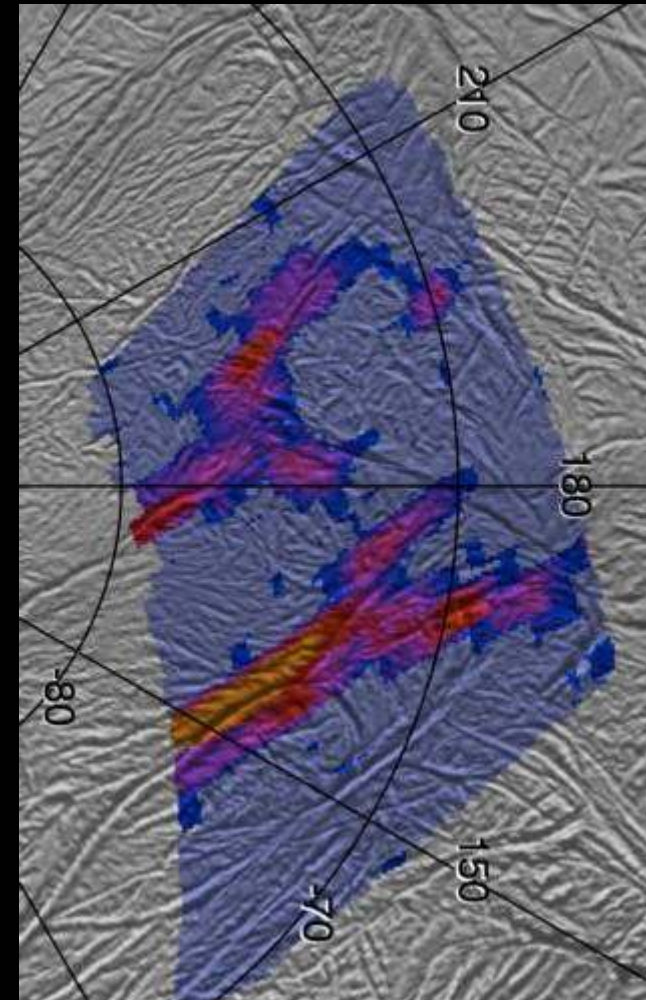
Liquid Ocean Under Ice



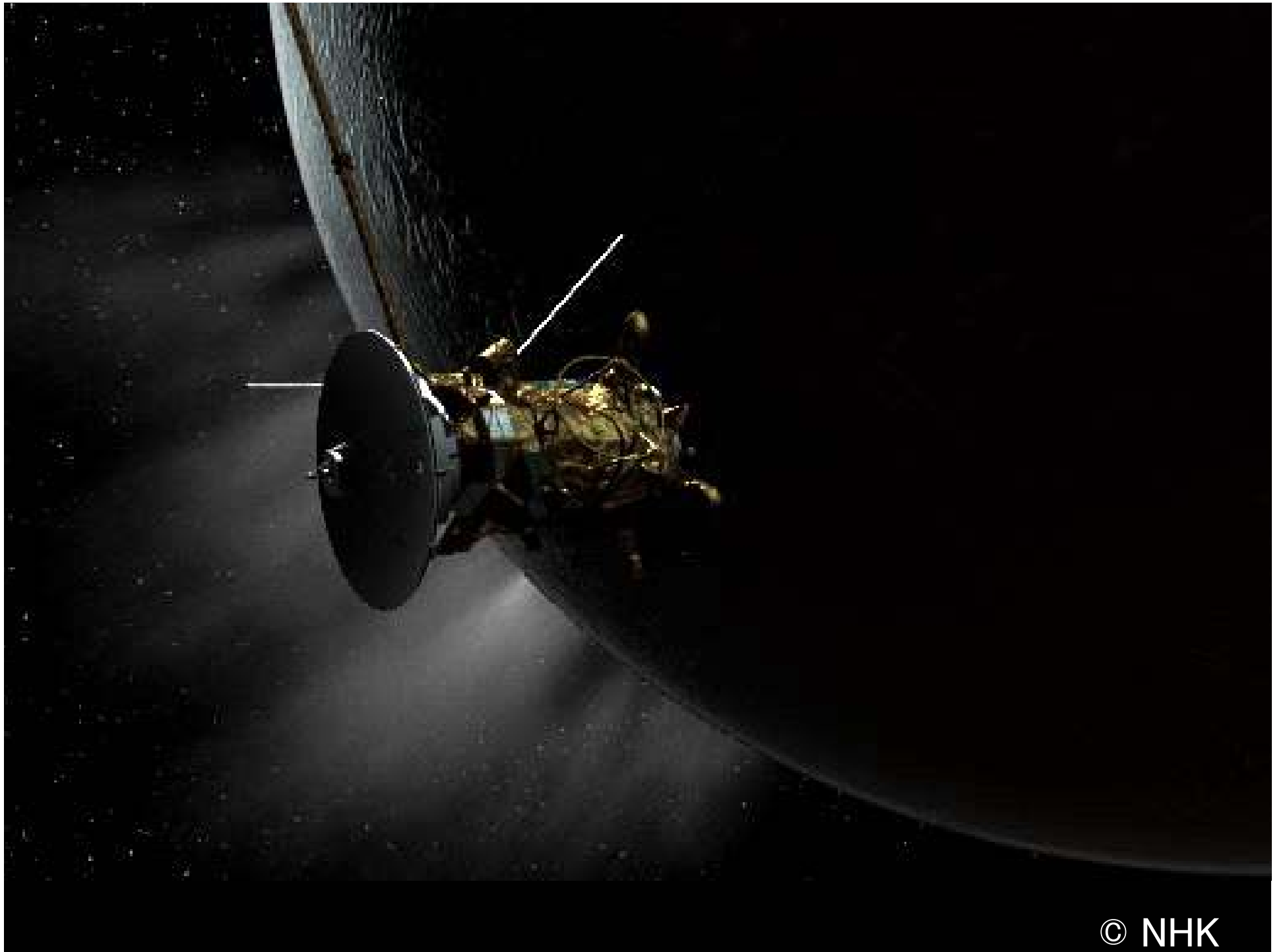


# 土星の衛星：エンセラダス

周囲（マイナス200°C）  
より暖かい割れ目  
（マイナス100°C）



(Porco et al., 2006)



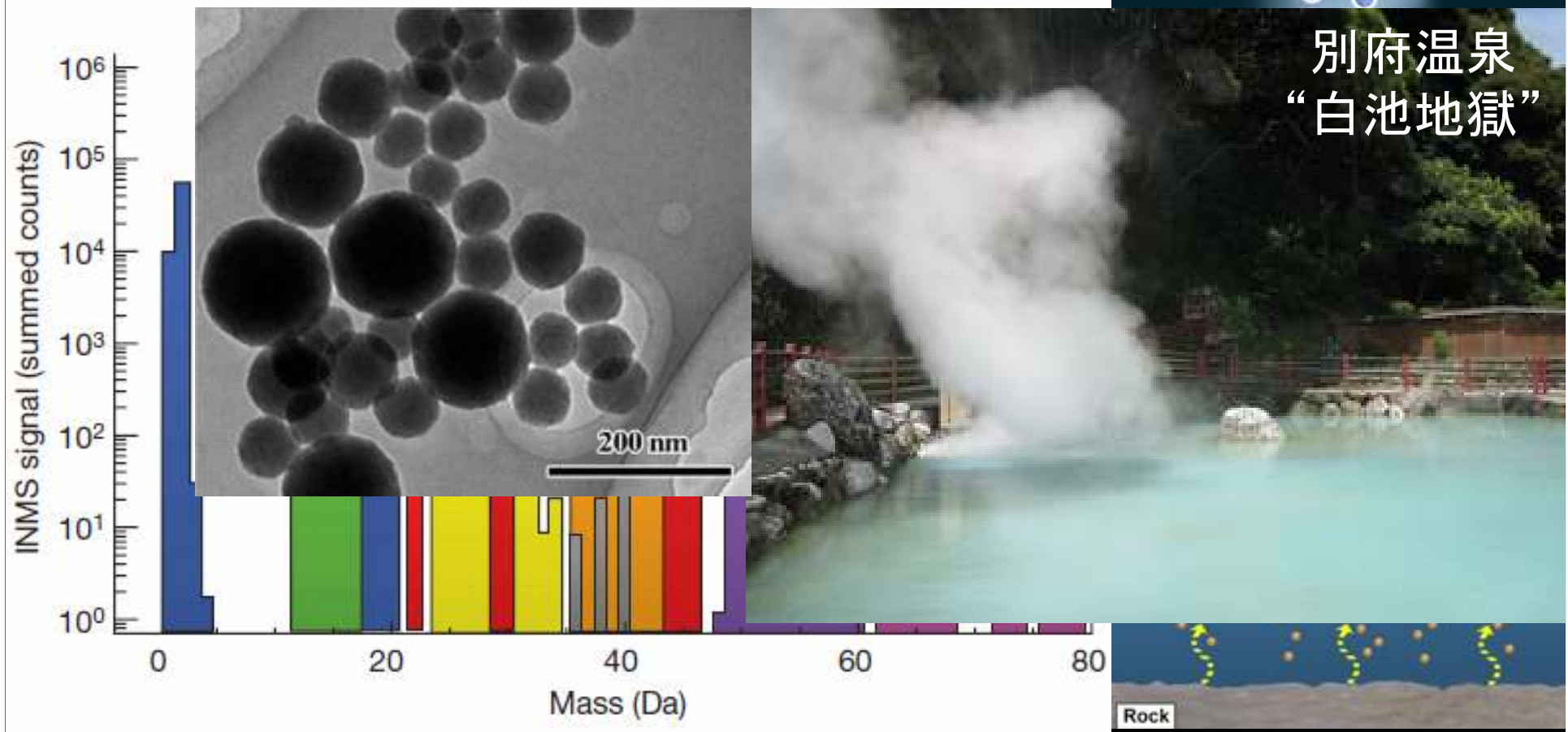


# プリュームと内部海物質

ガス成分 (Cassini INMS, CDA)

(Waite et al., 2009; Postberg et al. 2012)

有機物、シアン化合物、アルデヒドなど  
塩化物やシリカなど岩石との反応の証拠も



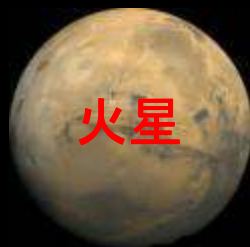
## 内部依存型生命圏



エウロパ



ガニメデ



火星



トリトン



エンセラダス

どちらが宇宙でメジャーな



海洋保持天体か？  
生命圏のあり方か？

## 太陽依存型生命圏

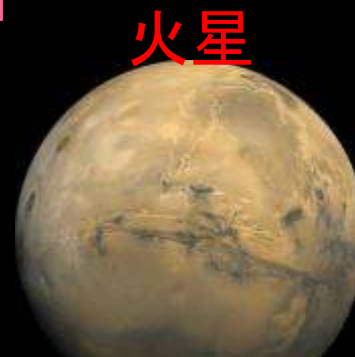


タイタン

現在、メタン循環あり



地球



火星

過去に水循環あり

# 火星

- ・地表温度:平均 $-60^{\circ}\text{C}$
- ・大気圧:数 mbar

流水地形(バレーネットワーク)

水が存在していたらあってしかるべき、  
粘土鉱物や塩化物、炭酸塩が見当たらない



# 火星

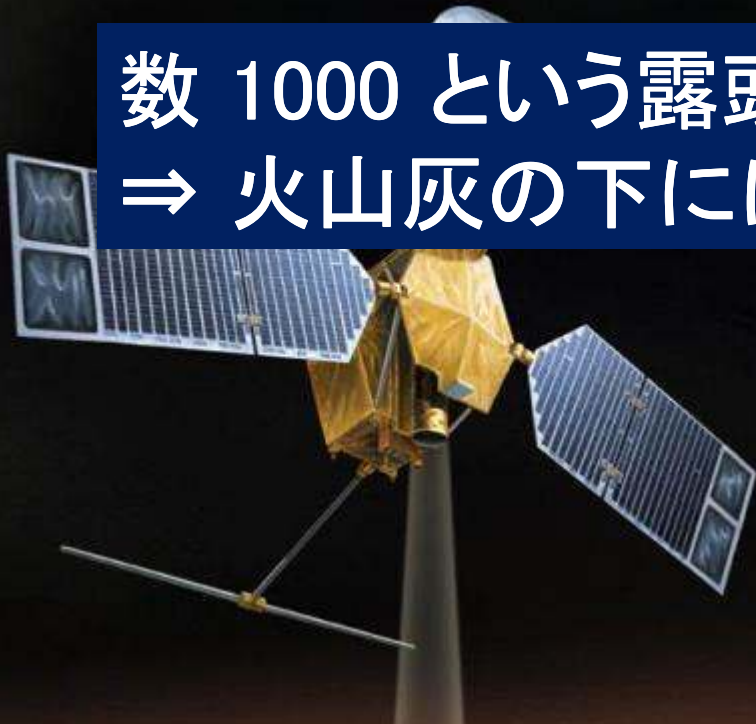
数 1000 という露頭に粘土など堆積岩  
⇒ 火山灰の下には古環境記録が眠っていた

Gusev crater (Spt)

1996–2006: Mars Global Surveyor  
(TES: 6 km/pix)

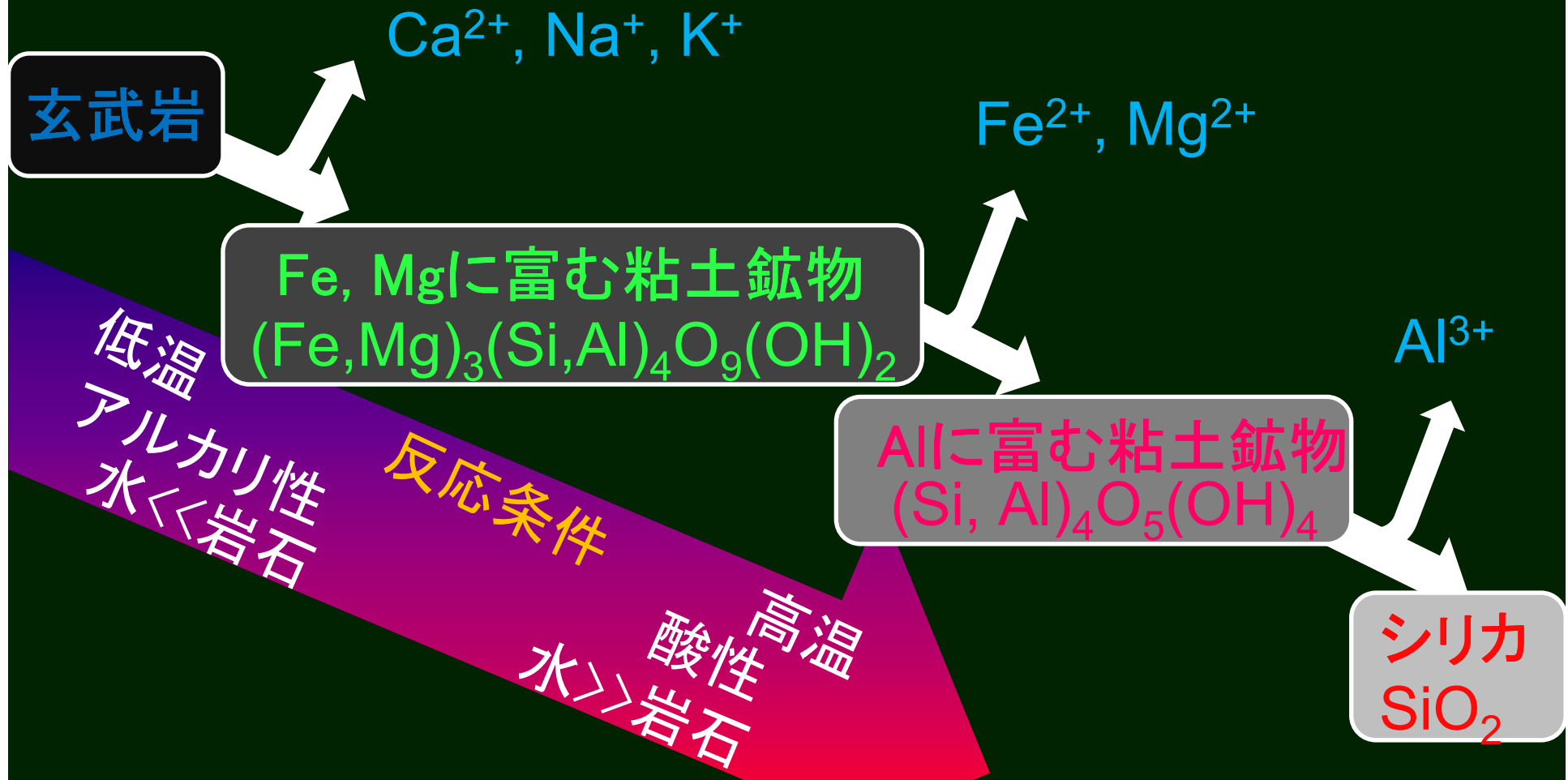
2003–: Mars Express  
(OMEGA: 0.3–2 km/pix)

2008–: Mars Reconnaissance Orbiter  
(CRISM, HiRISE: 18 m/pix, 0.3 m/pix)

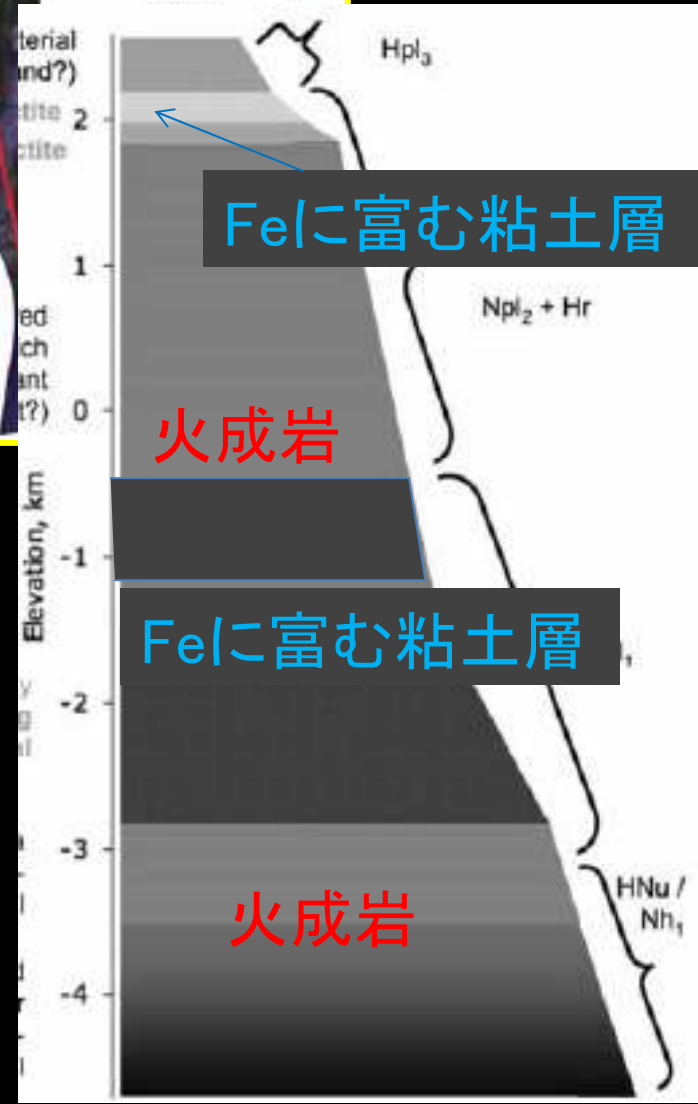
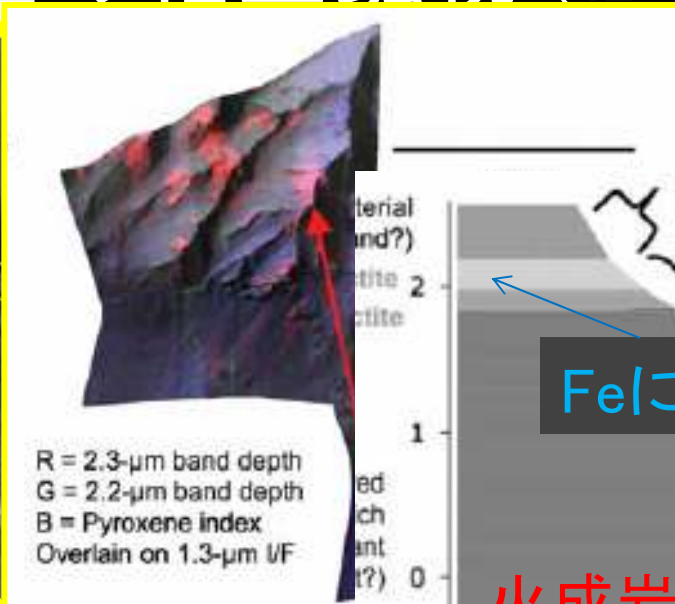
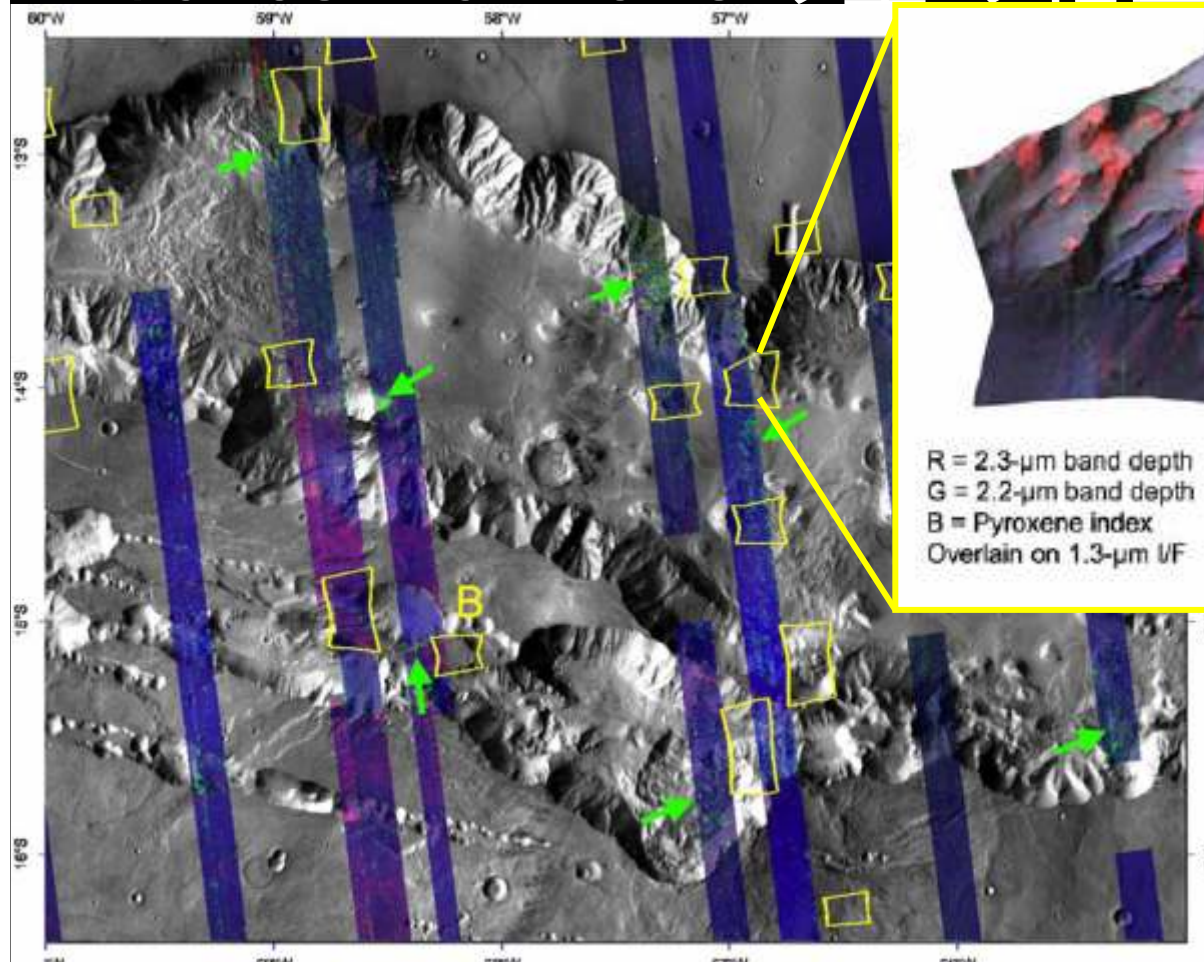


# 鉱物・化学組成から古環境を読み解く

- **化学風化**: 岩石と水との化学反応
- **反応条件**: 温度、pH、閉鎖/開放、水:岩石、酸化還元



# Valles Marinerisの壁の粘土鉱物 (42-40億年前)



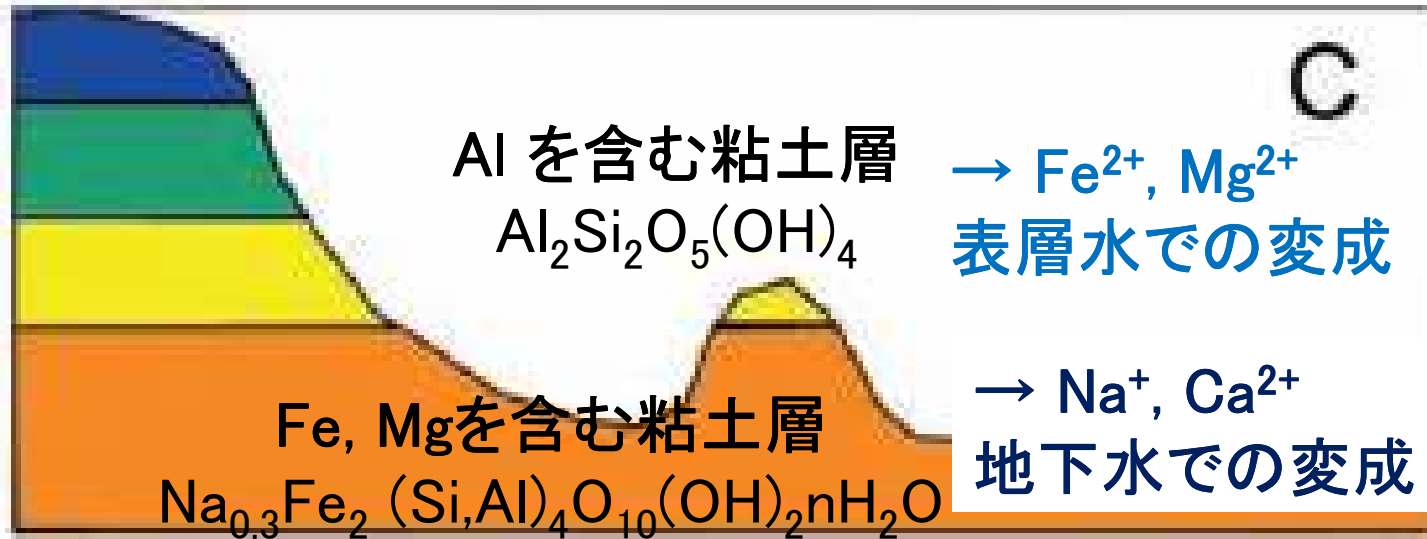
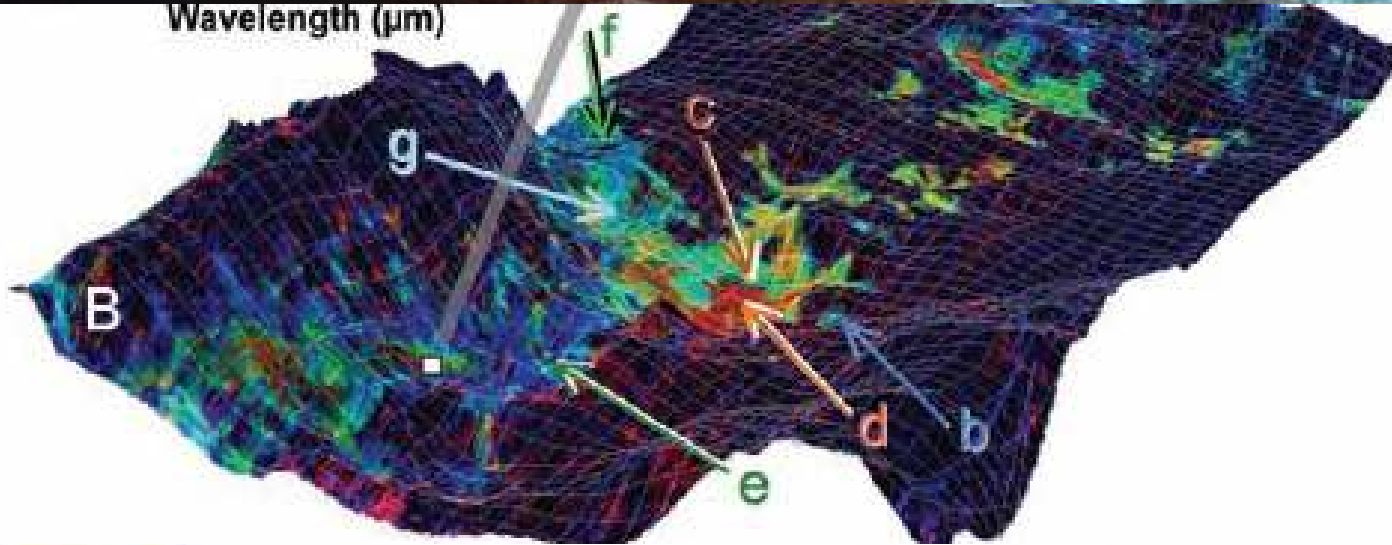
数 kmのFe, Mgに富む粘土鉱物層  
閉鎖的な地中での地殻熱水反応?

Murchie et al., 2009; Ehlmann et al., 2011

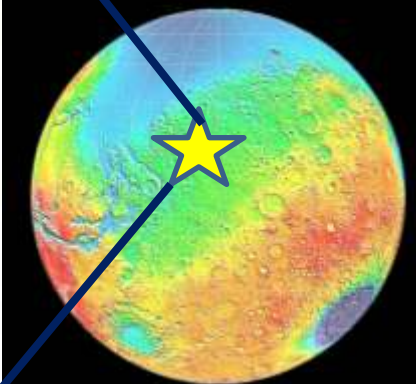


# クレーター内壁の粘土鉱物層(40億年前)

Wavelength (μm)



Mawrth Valles



Bishop et al., 2008

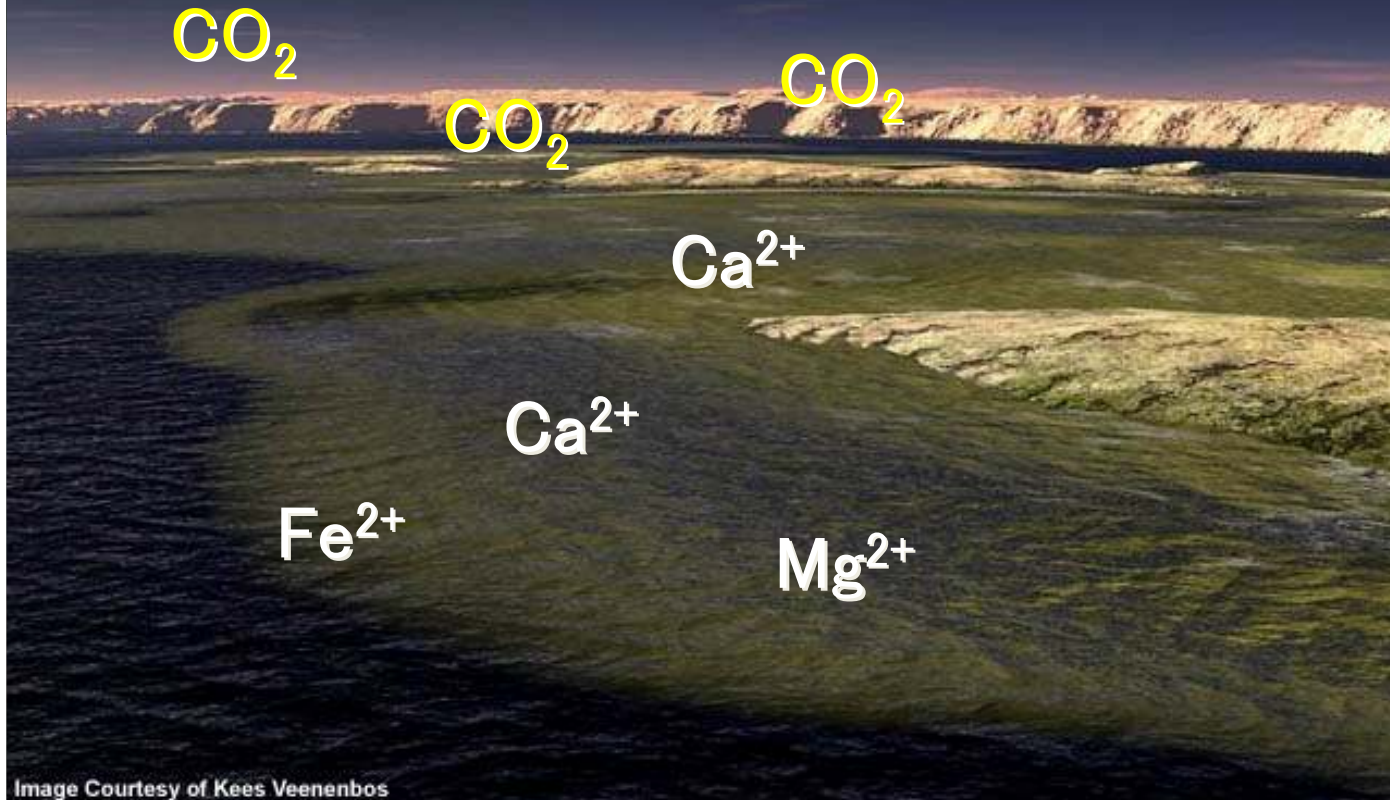


b

# クレーター内の炭酸塩岩層(40億年前)

d 40 m

40億年前の火星の風景？  
→ バレーネットワークとも調和的



粘土鉱物層

炭酸塩岩層  
 $\text{FeCO}_3, \text{CaCO}_3$

Syrtis Major

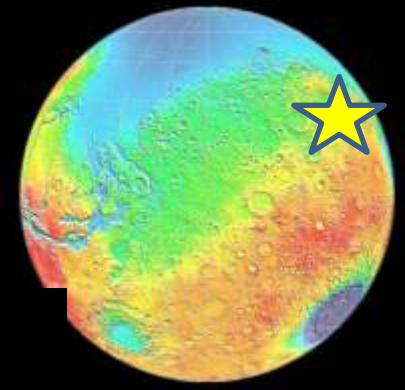


Image Courtesy of Kees Veenbos



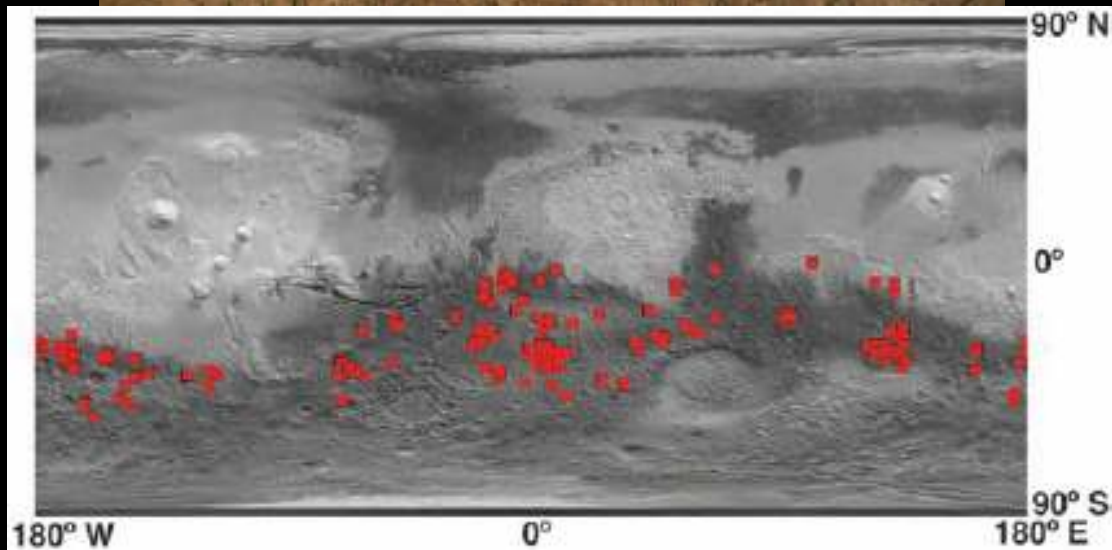
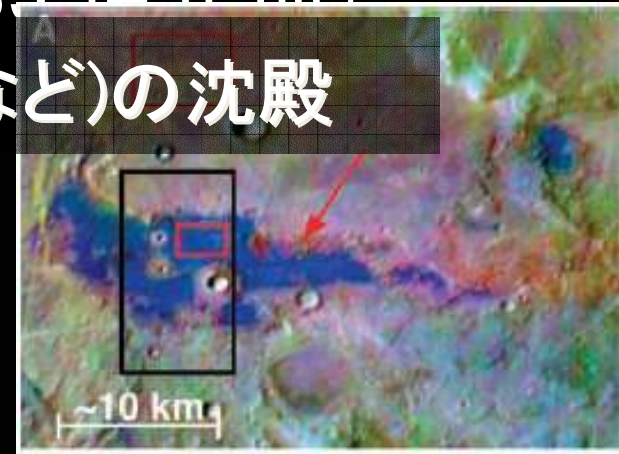
Michalski & Niles, 2010



# 塩化物の沈殿 (40-35 億年前)

## 表層水の蒸発と塩化物 (NaCl など) の沈殿

インド・ロナクレーターと塩水湖





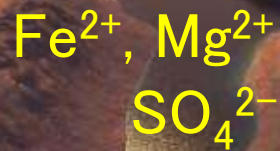
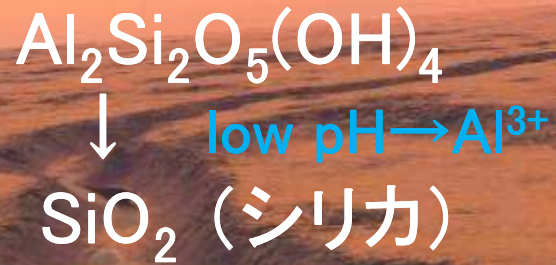
# シリカ-硫酸塩層 (35-30億年前)

Milliken et al., 2008;

Murchie et al., 2009

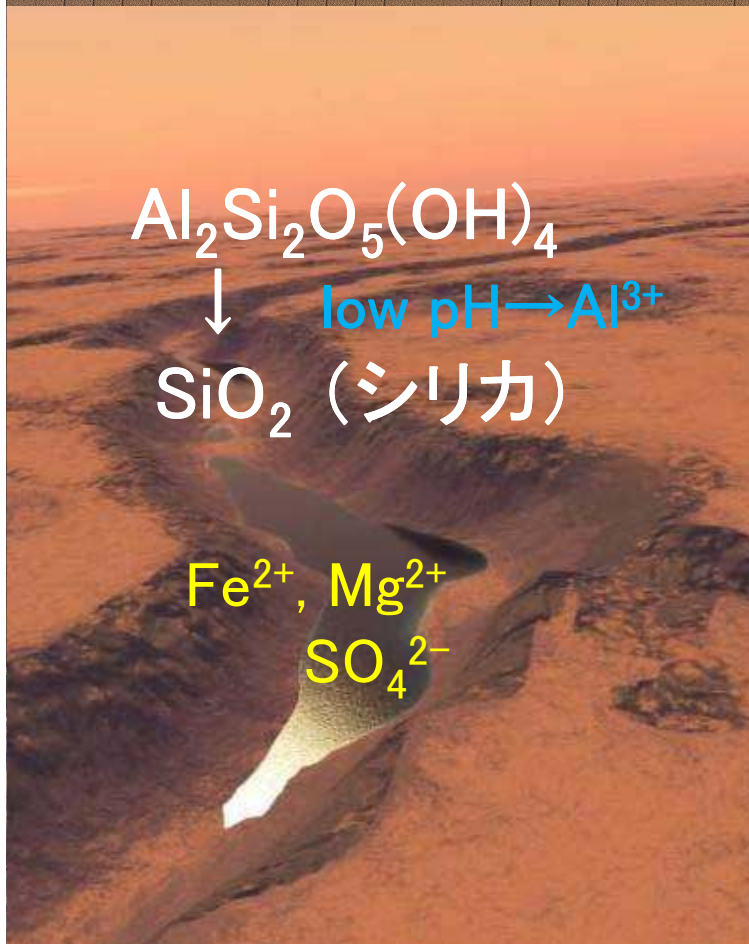
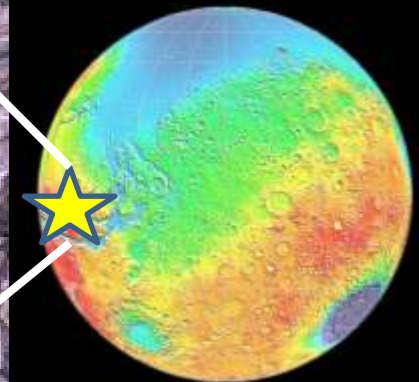
酸性の湖 (pH=1-3) が蒸発して残った堆積物

硫酸塩 ( $\text{FeSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )



シリカ ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )

Juventae  
Chasma

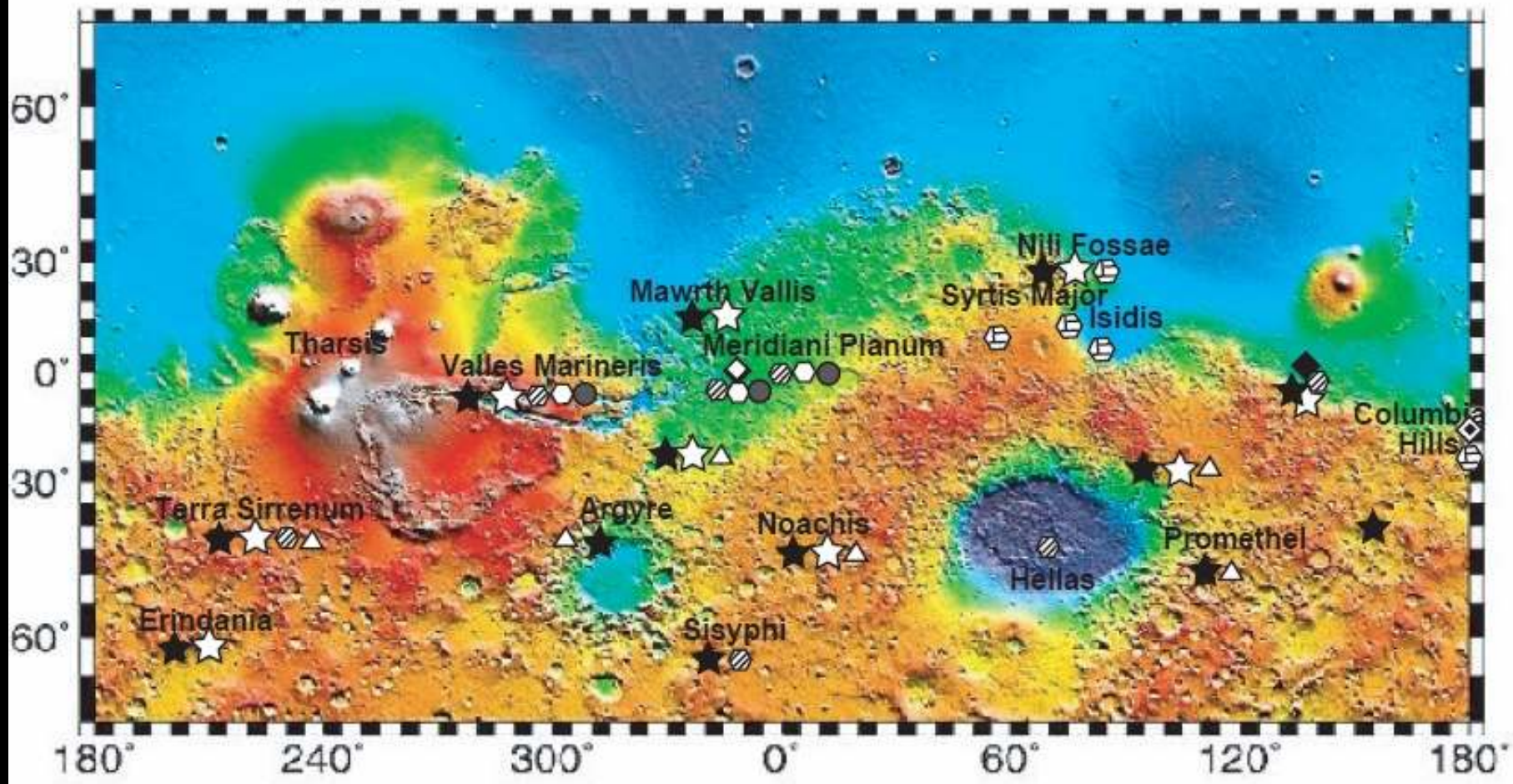




# 火星上の露頭分布

- ★ Fe-Mg 粘土鉱物
- ☆ Al-rich 粘土鉱物
- ⊕ 炭酸塩
- 酸化鉄
- ◐ 硫酸塩
- シリカ

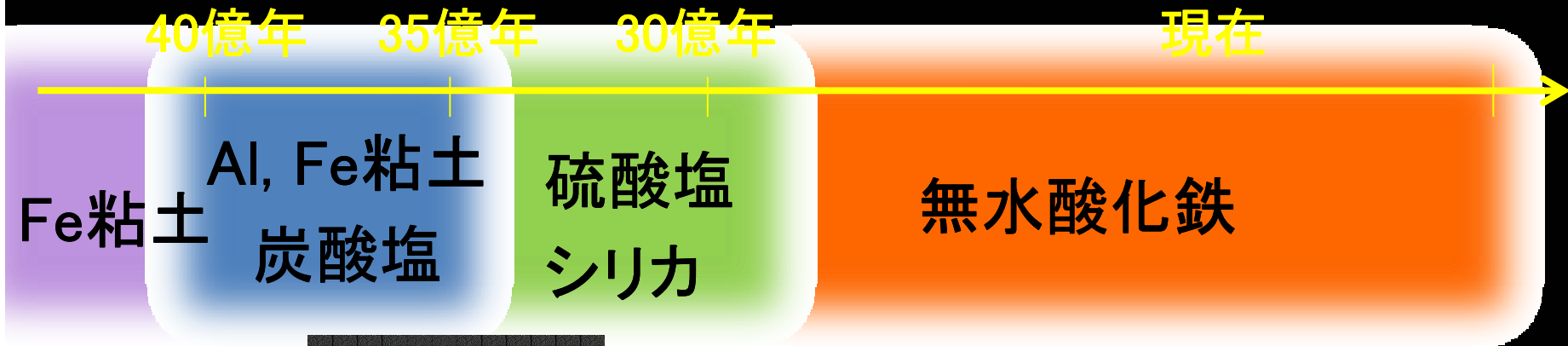
(関根. 2012 印刷中)



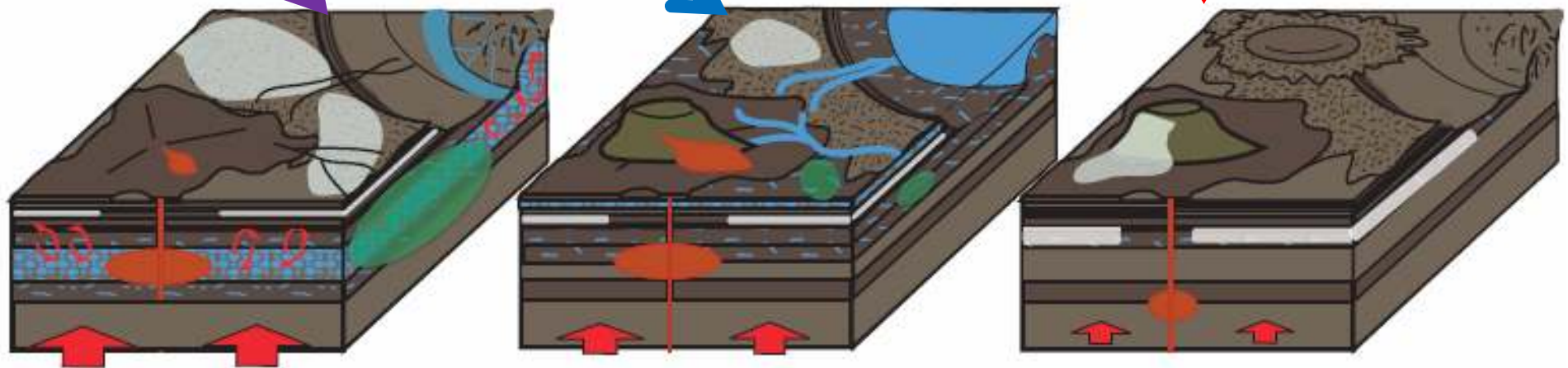
海だったと言われる北半球には水の証拠少ない？  
→ 地下に氷・堆積物がたまっている？(MARSIS) 海は凍結？

# 火星の表層環境史

地質時代



地下熱水? (pH~9)    温暖湿潤 (pH~7)    寒冷化酸性化 (pH~2)    乾燥寒冷



Geothermal heat flux

(Ehmann et al., 2011)



# 火星環境進化：残された謎

- 40億年前はどうして温暖だった？

一時的に温暖(火山、衝突) (Segura et al., 2002)

温室効果で長期( $\text{CO}_2$ ?  $\text{SO}_2$ ?) (Yung et al., 1997)

- なぜ表層環境は酸性・乾燥化？

タルシス火山と $\text{SO}_2$ 放出 (Bibring et al., 2006)

水量の減少 (Andrew-Hanna et al., 2007)

- 生命の存否は？進化？

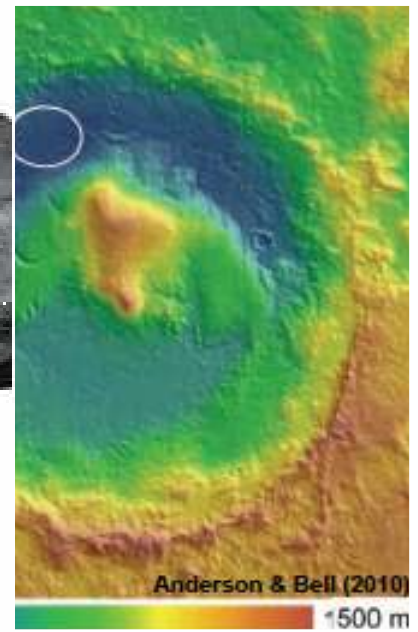
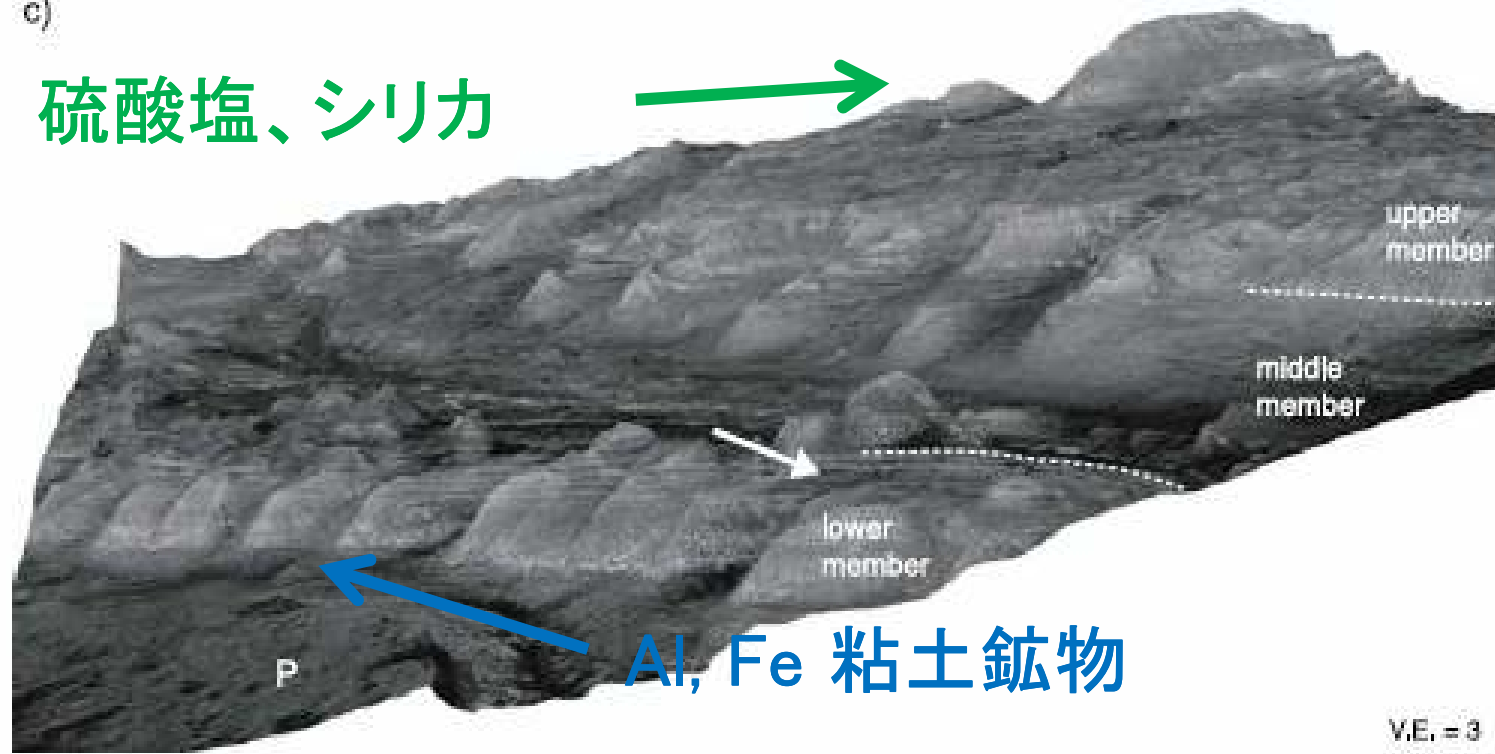


# Curiosity (MSL) 着陸地点:Gale crater



c)

硫酸塩、シリカ



V.E. = 3

liken et al., 2009

# 生命活動の場としての火星環境進化



©1997 by Robert L. Hart roberthart@aol.com

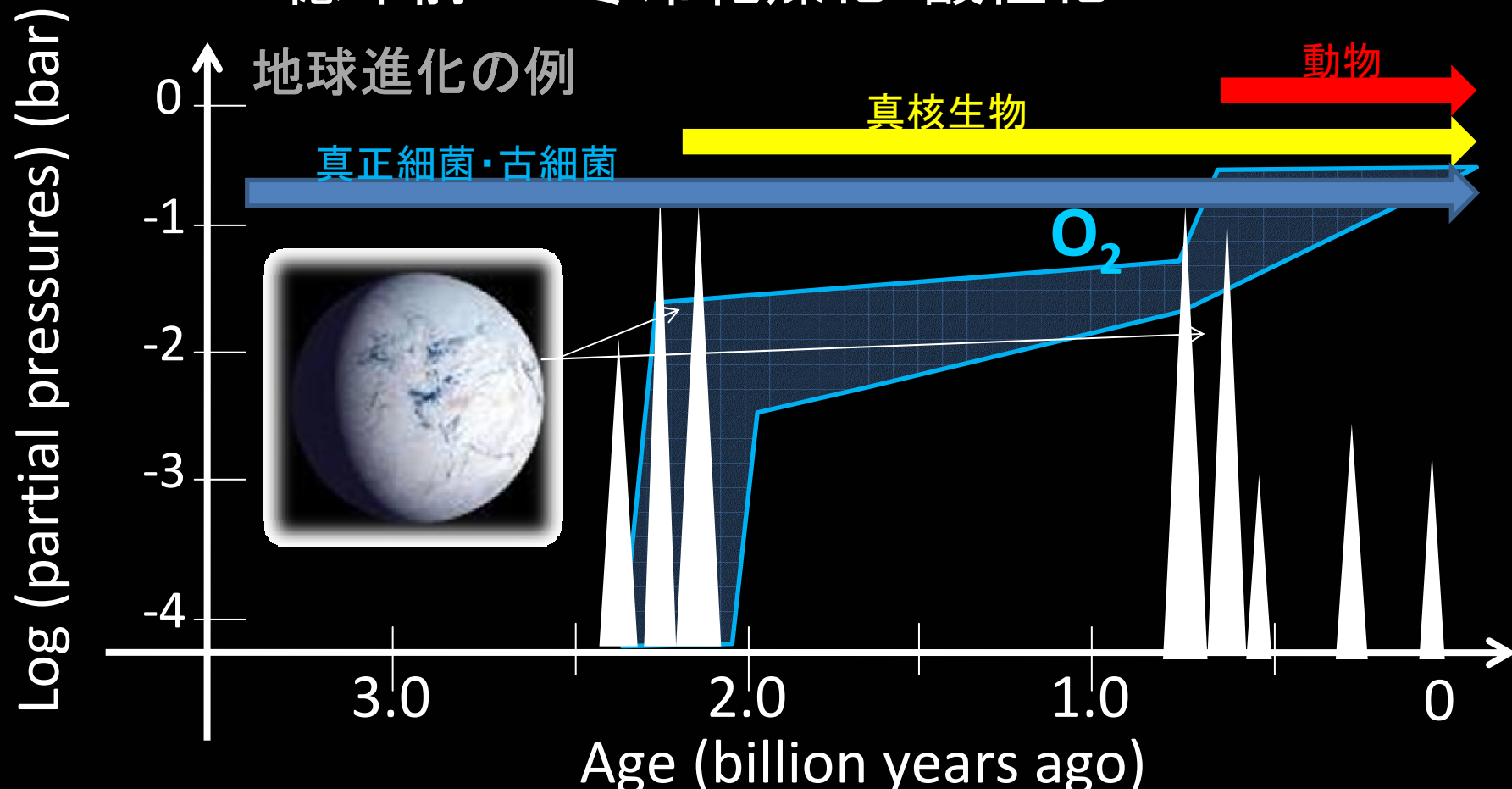


# 火星環境史 まとめ

45-40億年前 → 地下が生命と水の舞台？

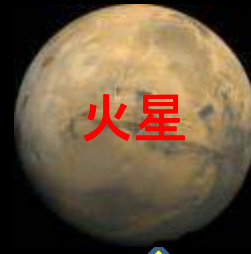
40-35億年前 → 地上にも大量の水

35-30億年前 → 寒冷乾燥化・酸性化



# まとめ：火星の特異性

## 内部依存型生命圏

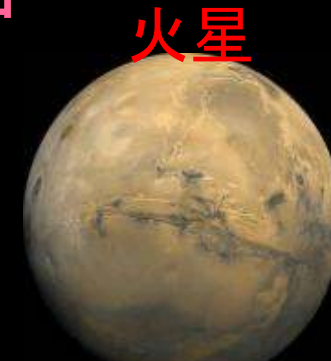


どちらが宇宙でメジャーな



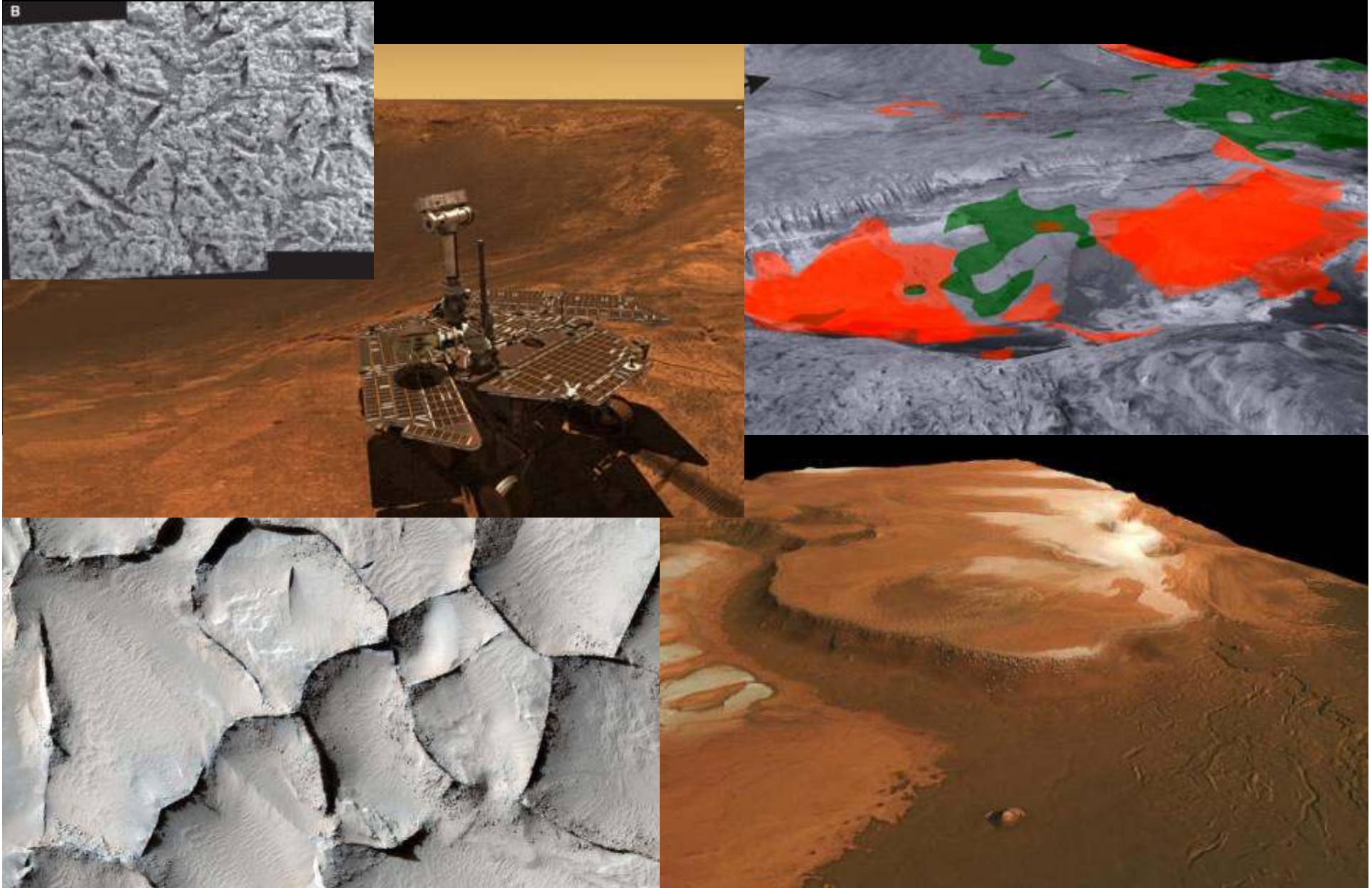
海洋保持天体か？  
生命圏のあり方か？

## 太陽依存型生命圏



過去に水循環あり

# 地質情報・微小分析と組み合わせて制約

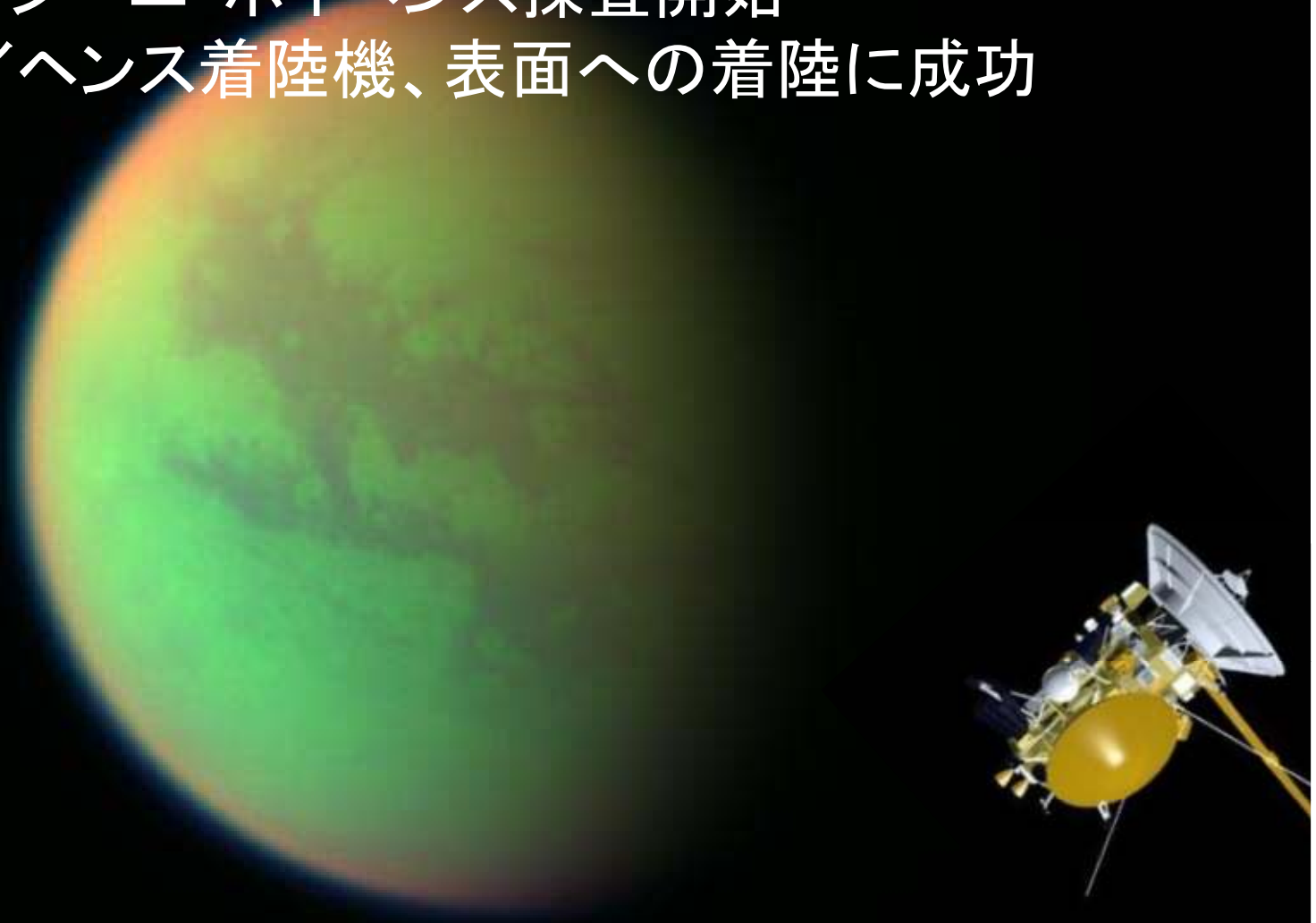




# タイタン

2004年：カッシーニ・ホイヘンス探査開始

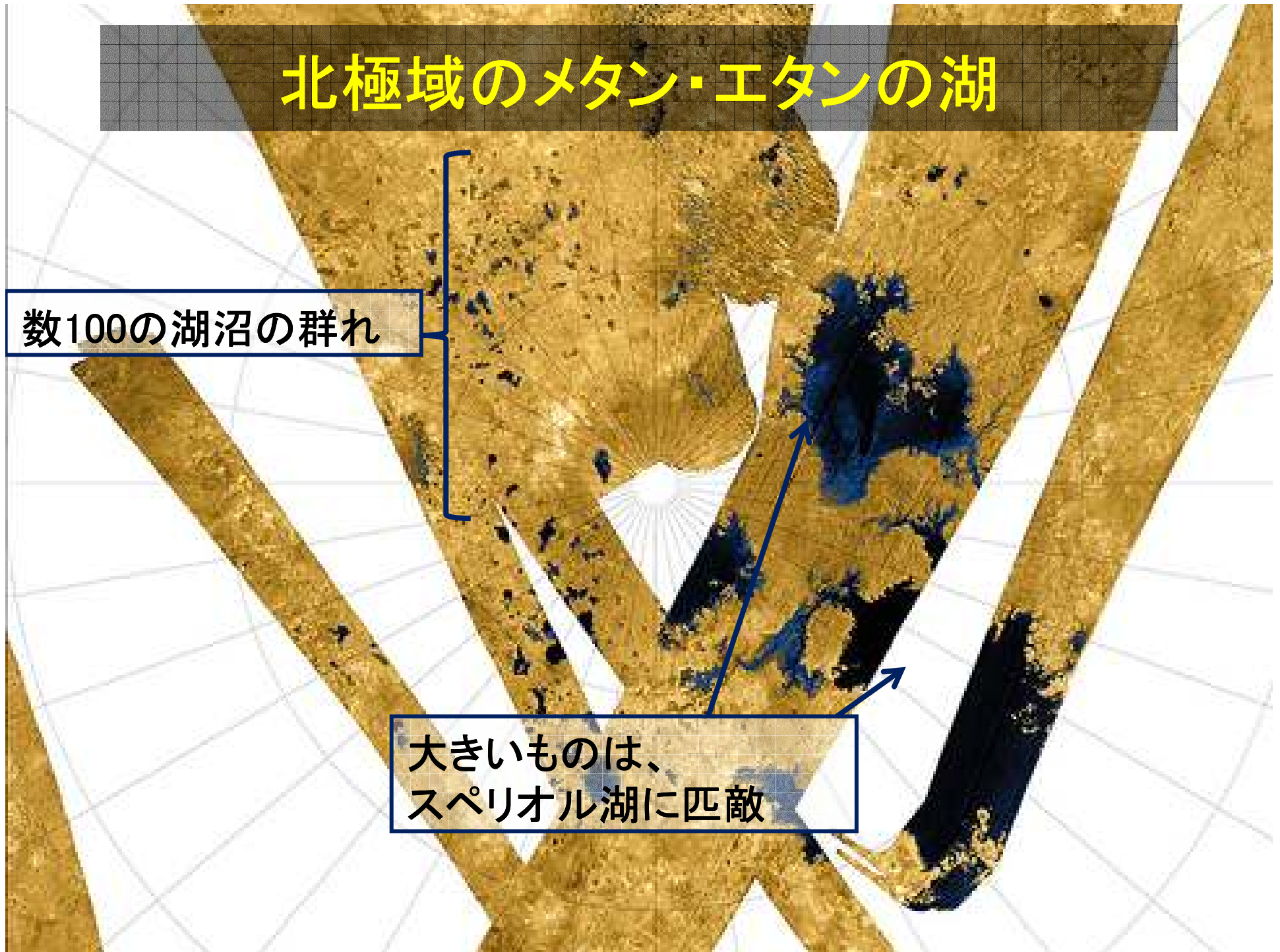
2005年：ホイヘンス着陸機、表面への着陸に成功



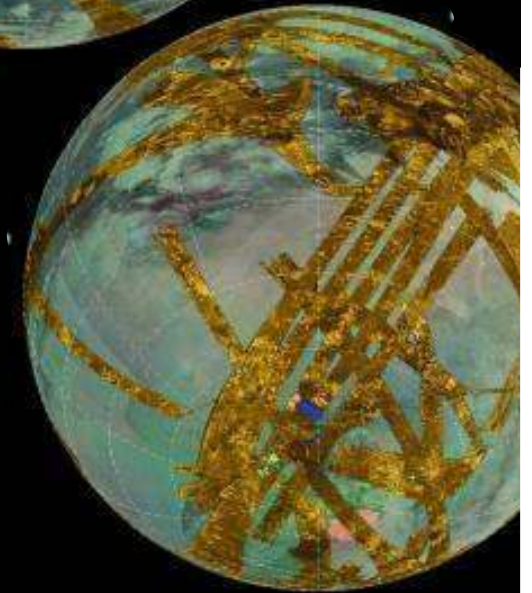
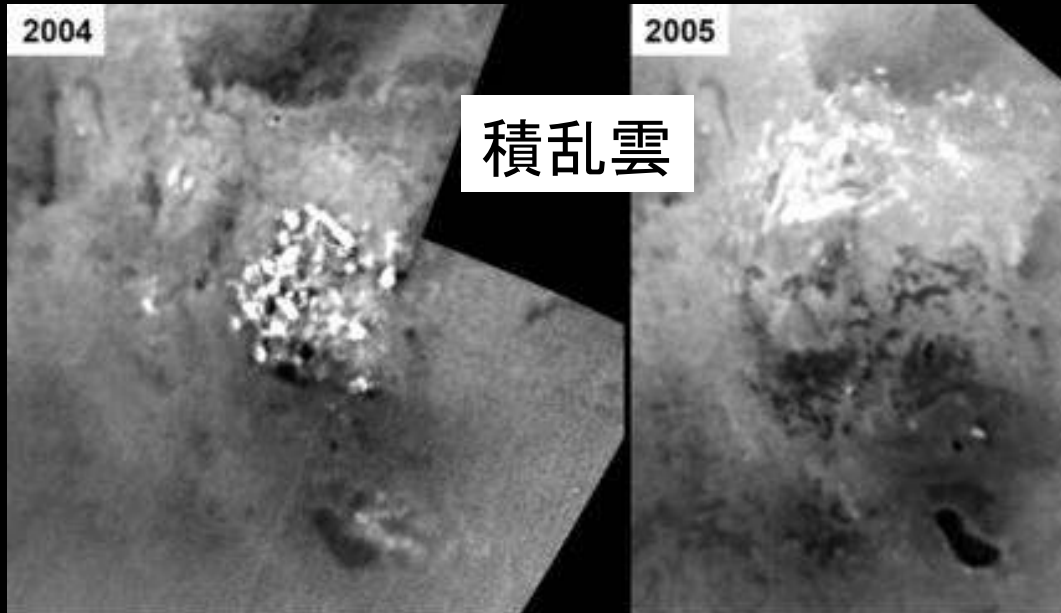
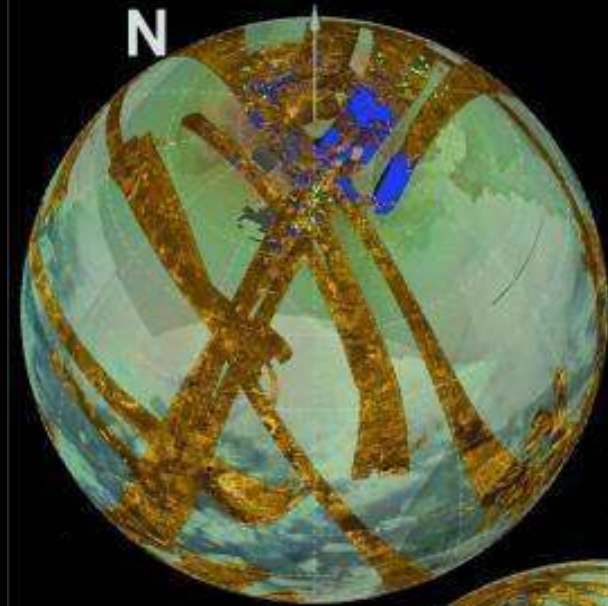
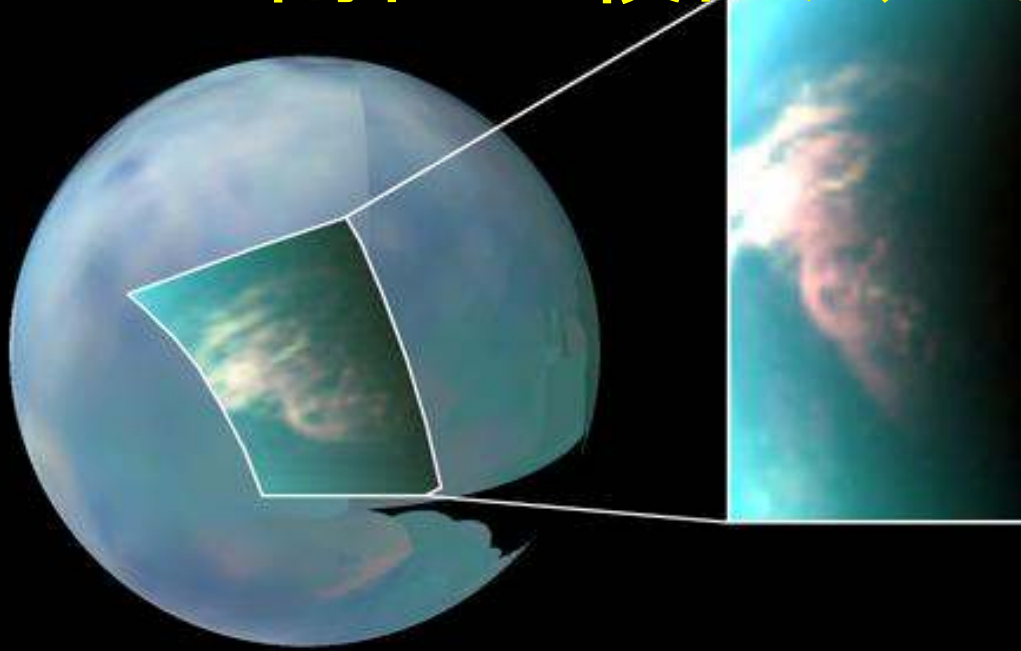
# 北極域のメタン・エタンの湖

数100の湖沼の群れ

大きいものは、  
スペリオル湖に匹敵



# 南極の積乱雲の出現と降雨

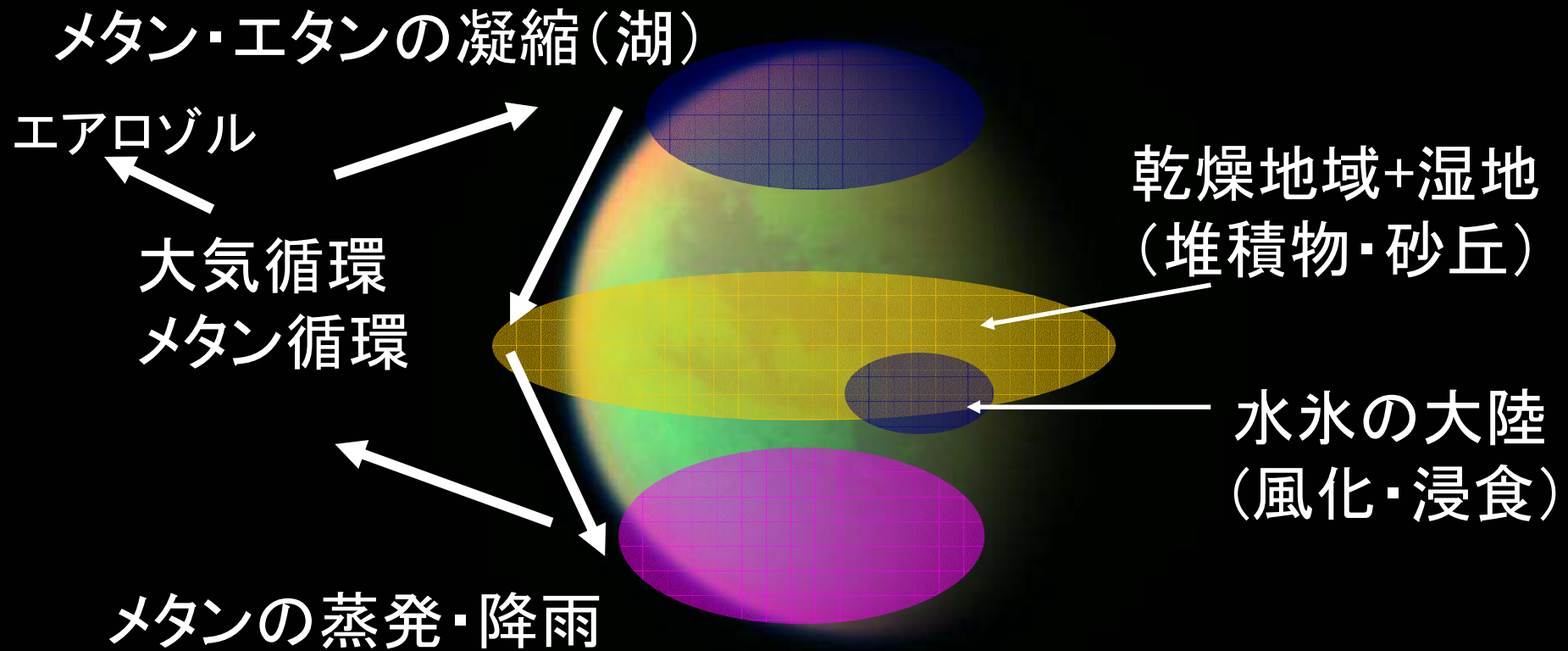




# タイタンとは？

ようやく見つけたもう1つの生きている天体

太陽エネルギーに依存した物質循環



太古の火星や陸惑星の気候の理解