



地球と生命 第3回 惑星大気の起源と進化

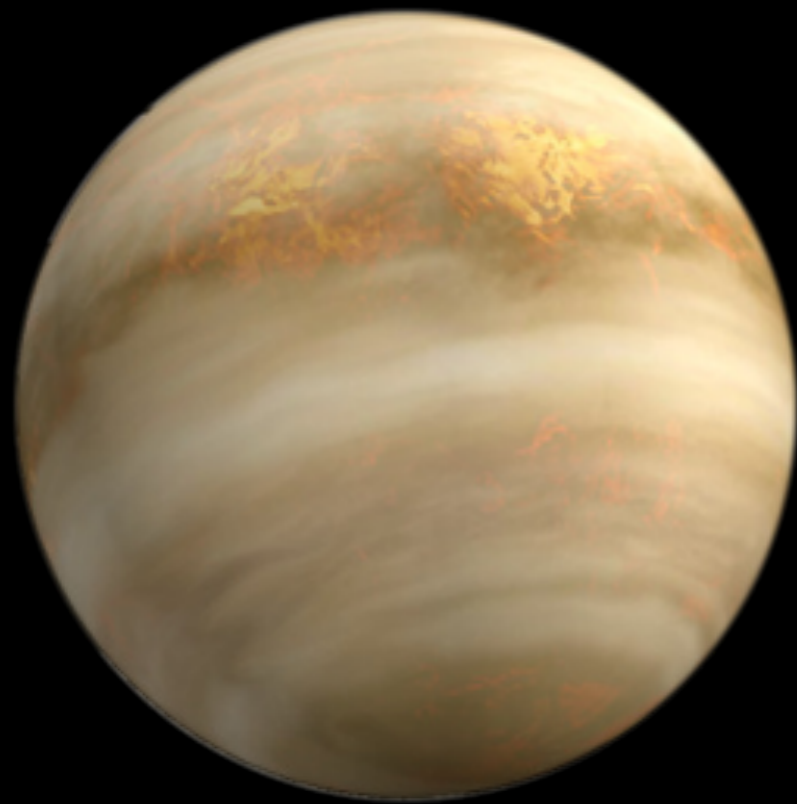
担当：黒川 宏之 (ELSI)

今日の資料は以下に掲載されています

https://members.elsi.jp/~hiro.kurokawa/lecture_files/EPS_EarthLife_Atmospheres.pdf

大気組成の多様性

岩石惑星

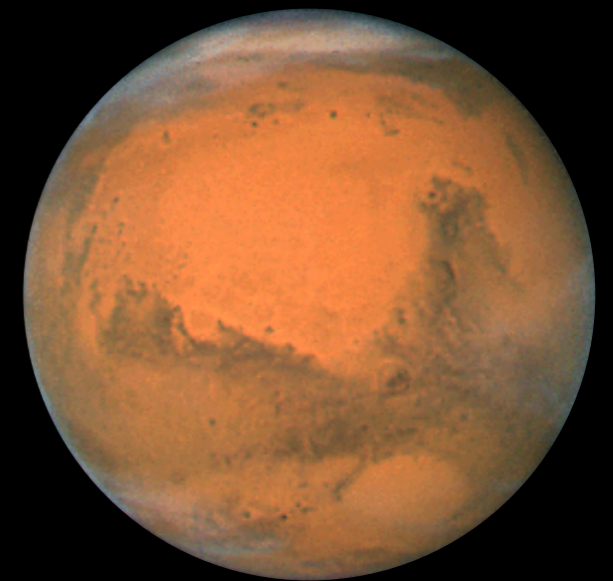


金星

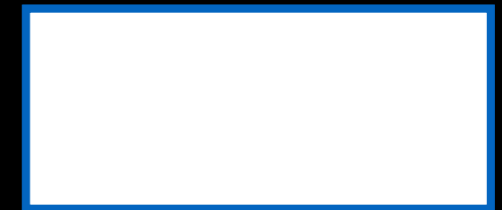


地球

N_2, O_2



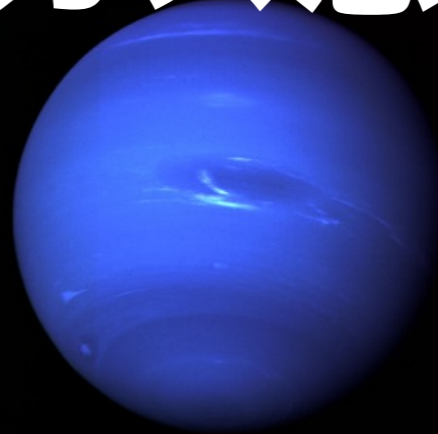
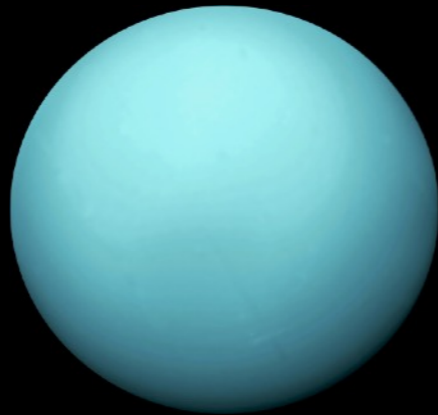
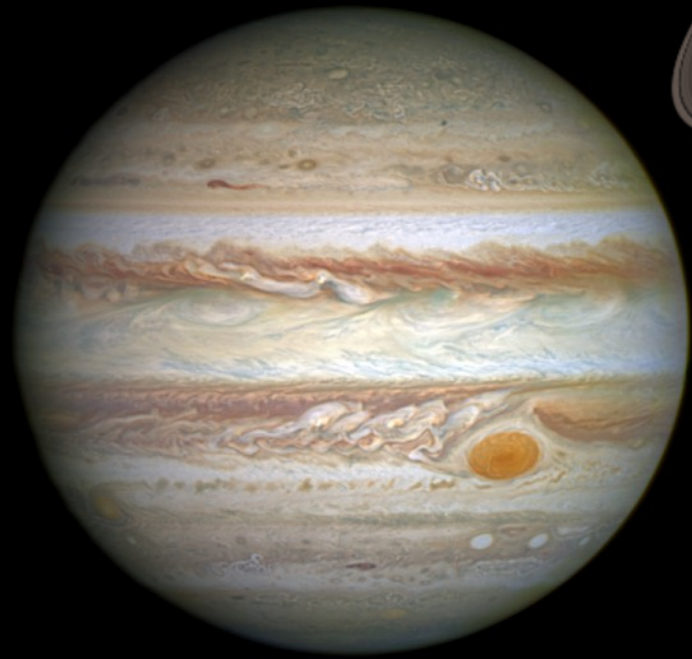
火星





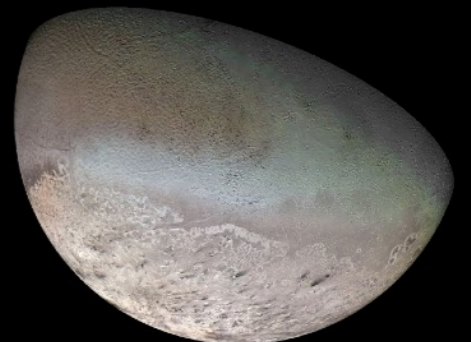
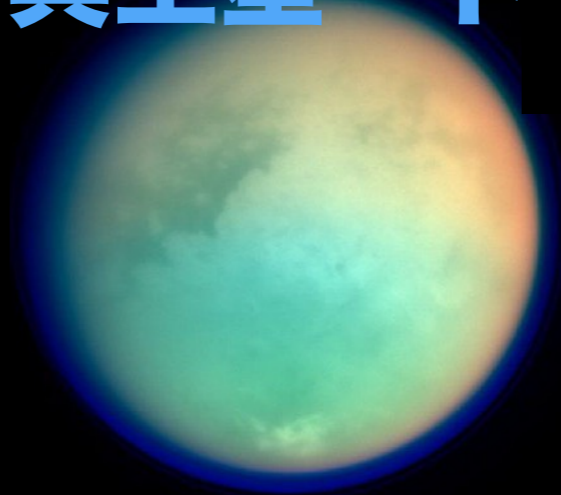
巨大ガス惑星・氷惑星

H₂, He

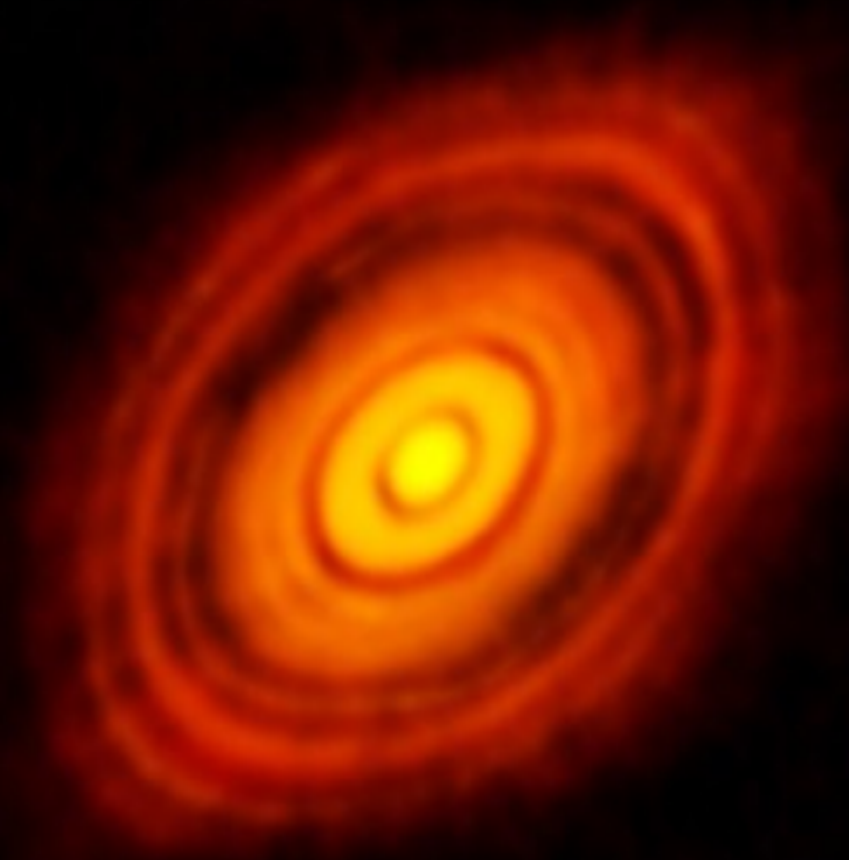


氷天体(タイタン・冥王星・トリトン)

N₂



惑星形成の場：原始惑星系円盤



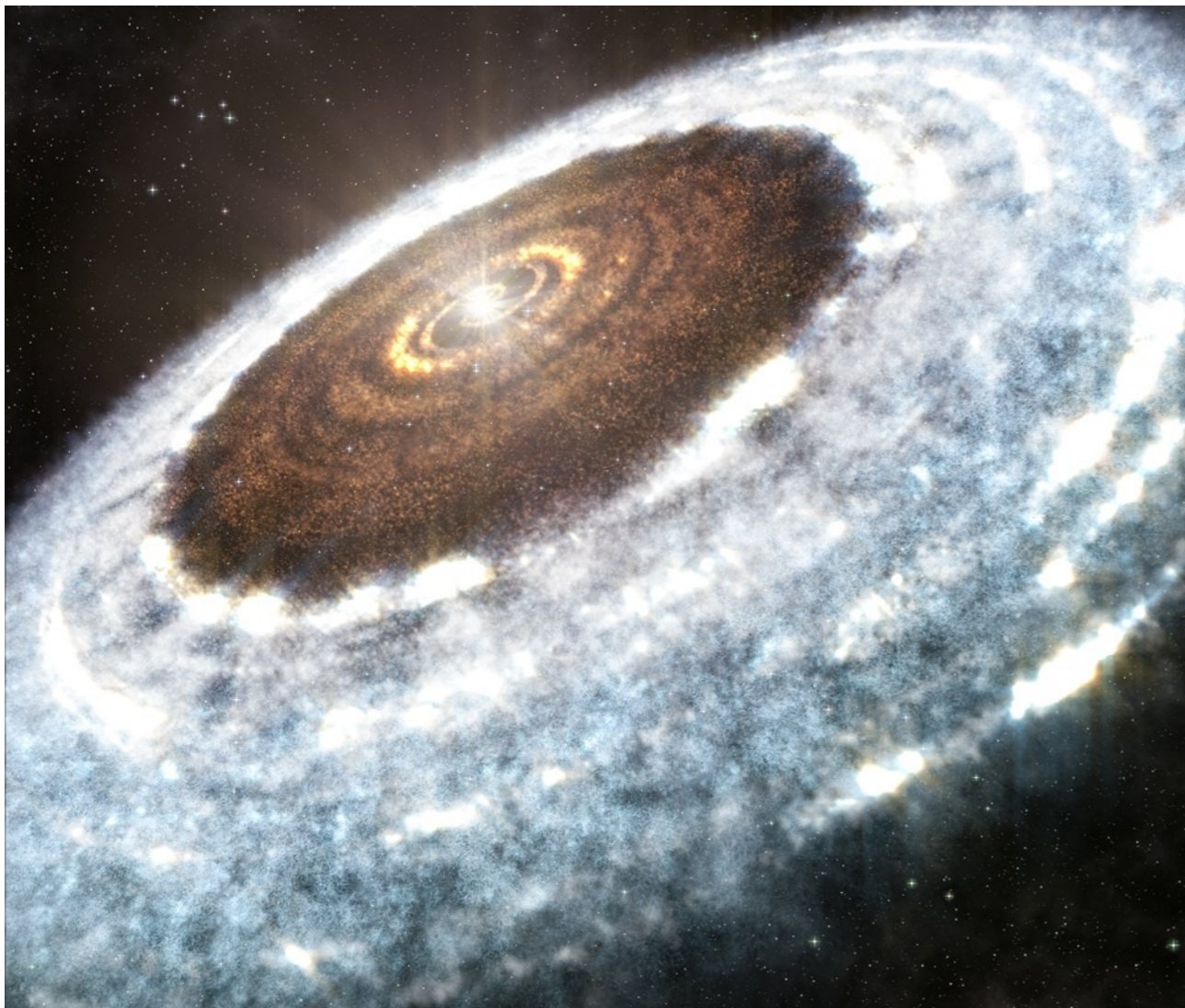
アルマ望遠鏡によるHL tauのミリ波観測
Image credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

惑星形成の場：原始惑星系円盤

組成：水素・ヘリウムガス主成分、質量比1%程度のダスト(塵)

スノーライン(雪線)：2-3 au?

を境に水蒸気が氷になる



巨大ガス惑星・巨大氷惑星：
円盤ガスを捕獲した大気

氷天体：

スノーライン以遠で形成し
揮発性物質をたくさん含む

岩石惑星：

スノーライン以遠の物質が
“少しだけ”もたらされた

彗星



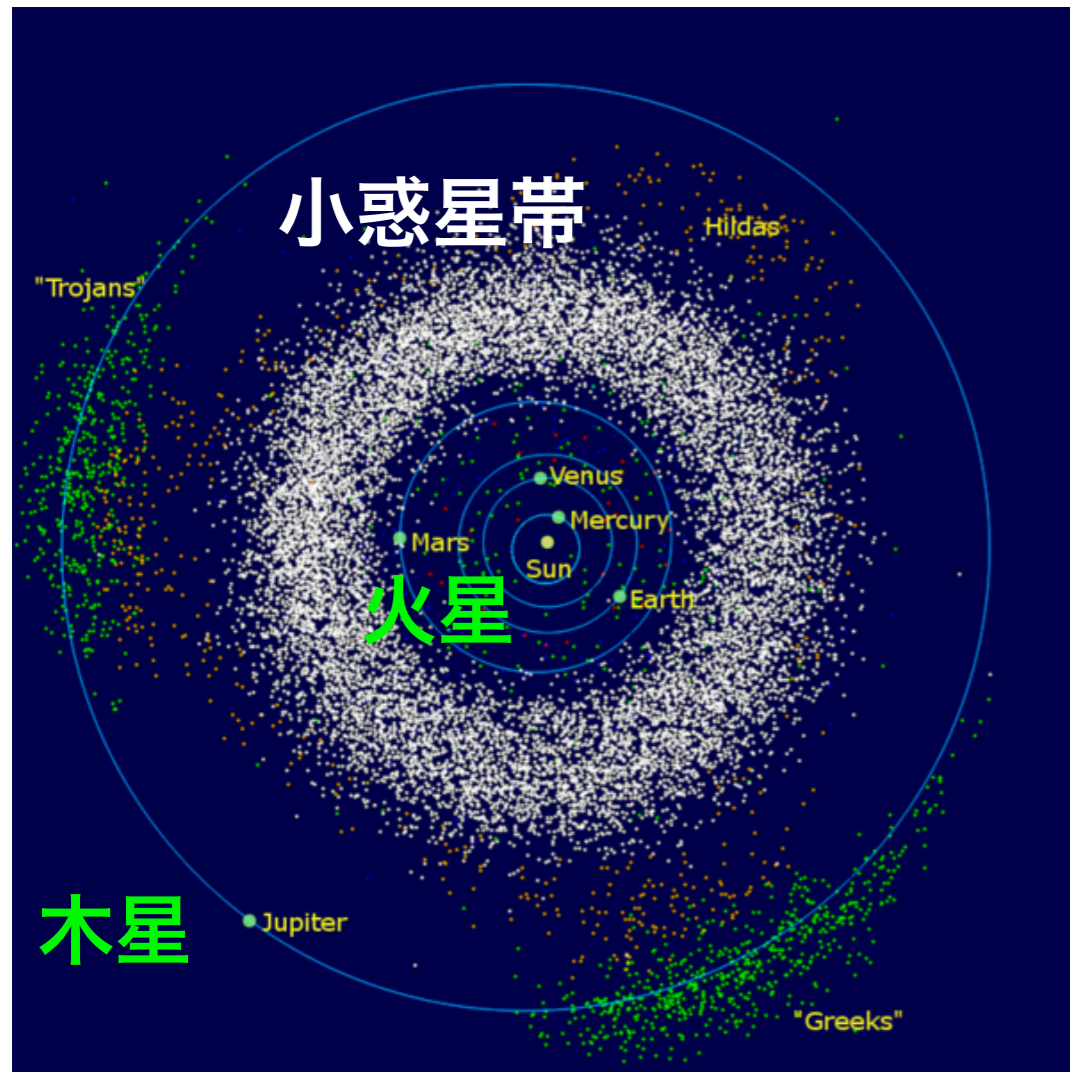
ヘールボップ彗星(1997年)

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halebopp031197.jpg>



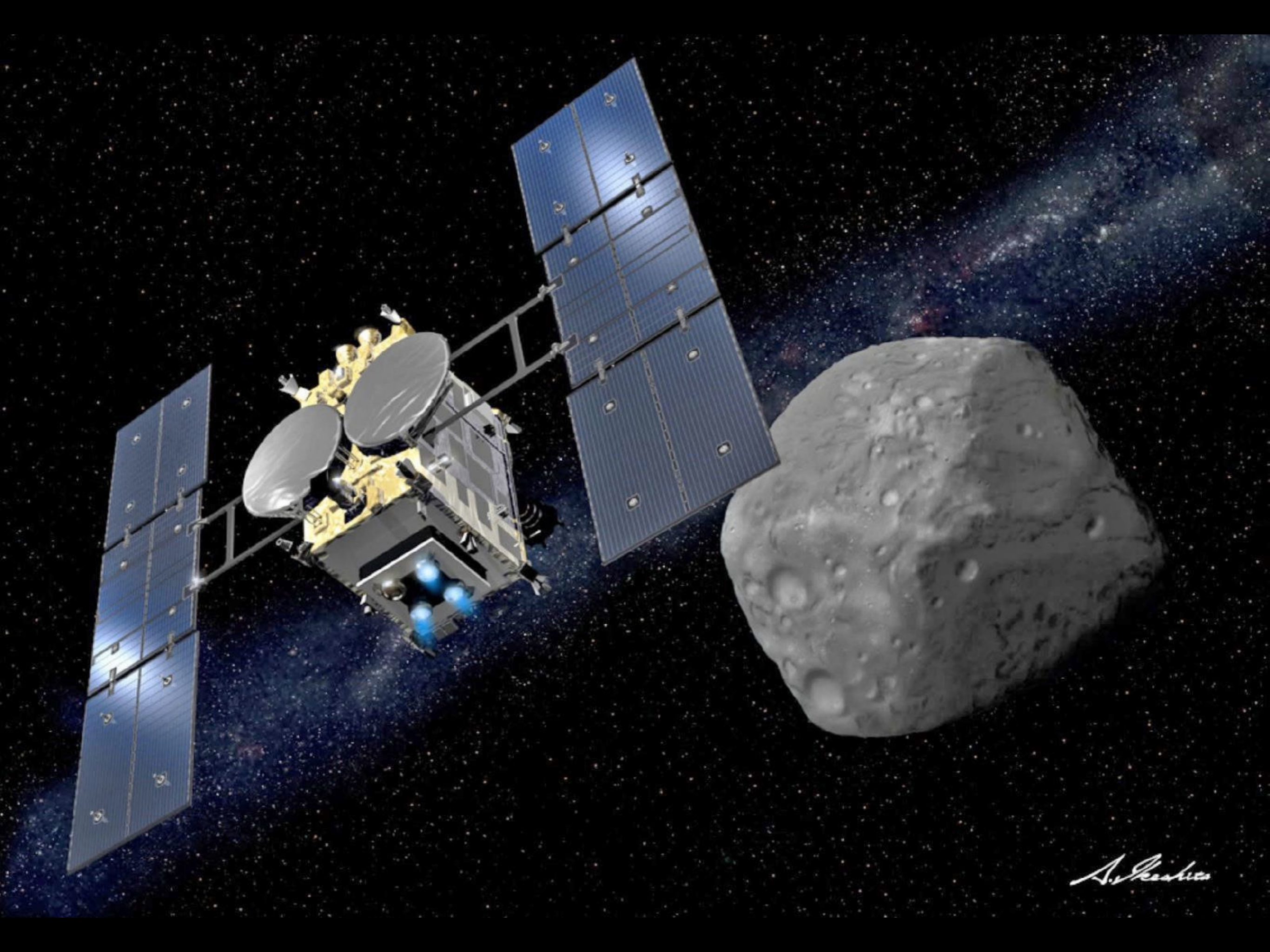
- 太陽の影響で塵やガスを放出する, 氷と岩石のかたまり
- 岩石惑星に水や有機物をもたらした? (否定的な意見もある)

小惑星帯



探査機 Dawn が撮影

- 火星と木星の間にある小惑星群
- 1km以上のものは約100万體。総質量は地球の約 分の1
- 水や有機物を含むものもいる
⇒ 岩石惑星への揮発性元素(水・大気・有機物のもと)供給？

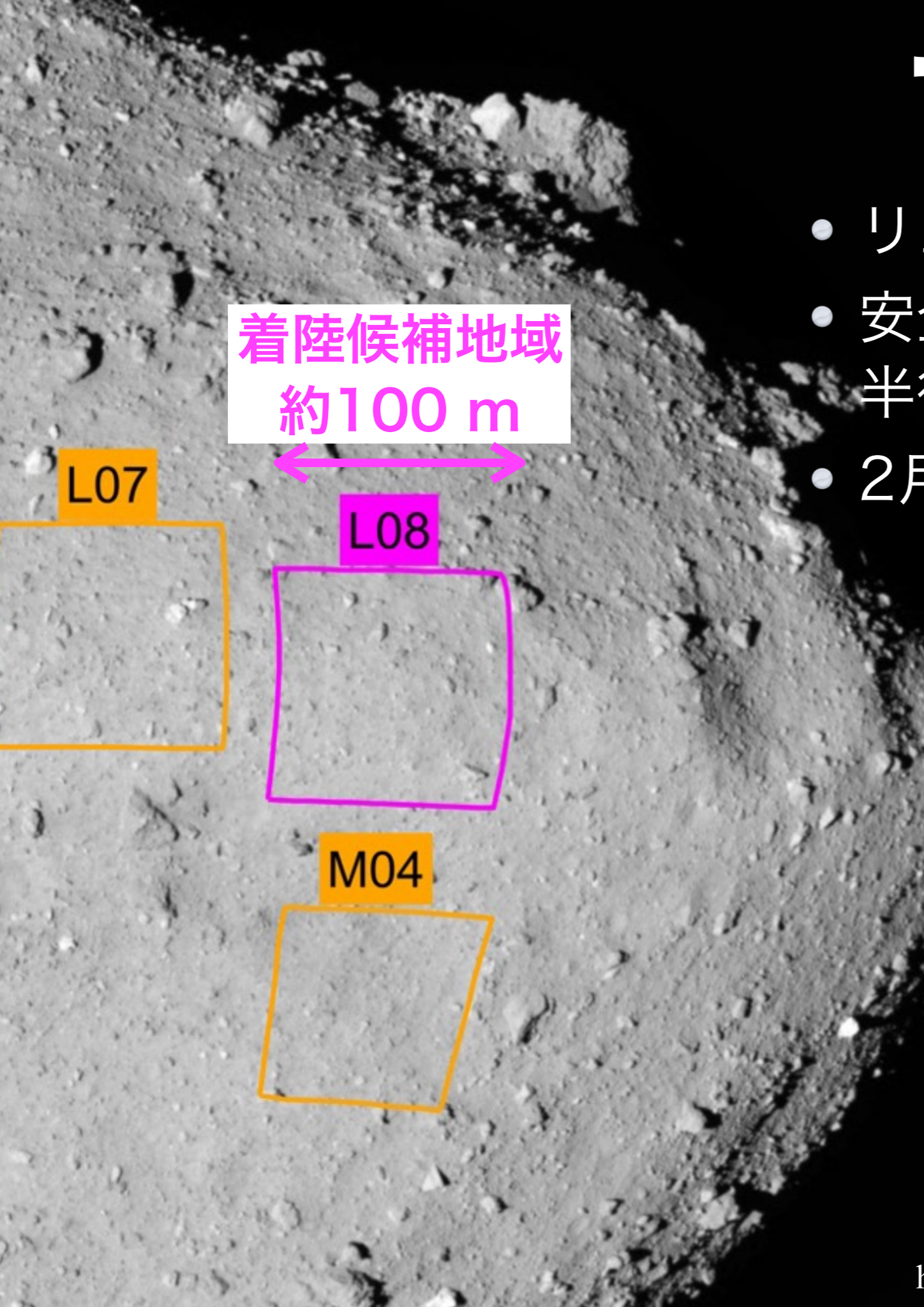


A. Koshka

サンプル採取

- リュウグウ表面は岩だらけ
- 安全性を重視した候補地点選定
半径 100 m → 3 m に予定変更
- 2月サンプル採取, 2020年末期間

半径約 3 mのタッチダウン地点周辺

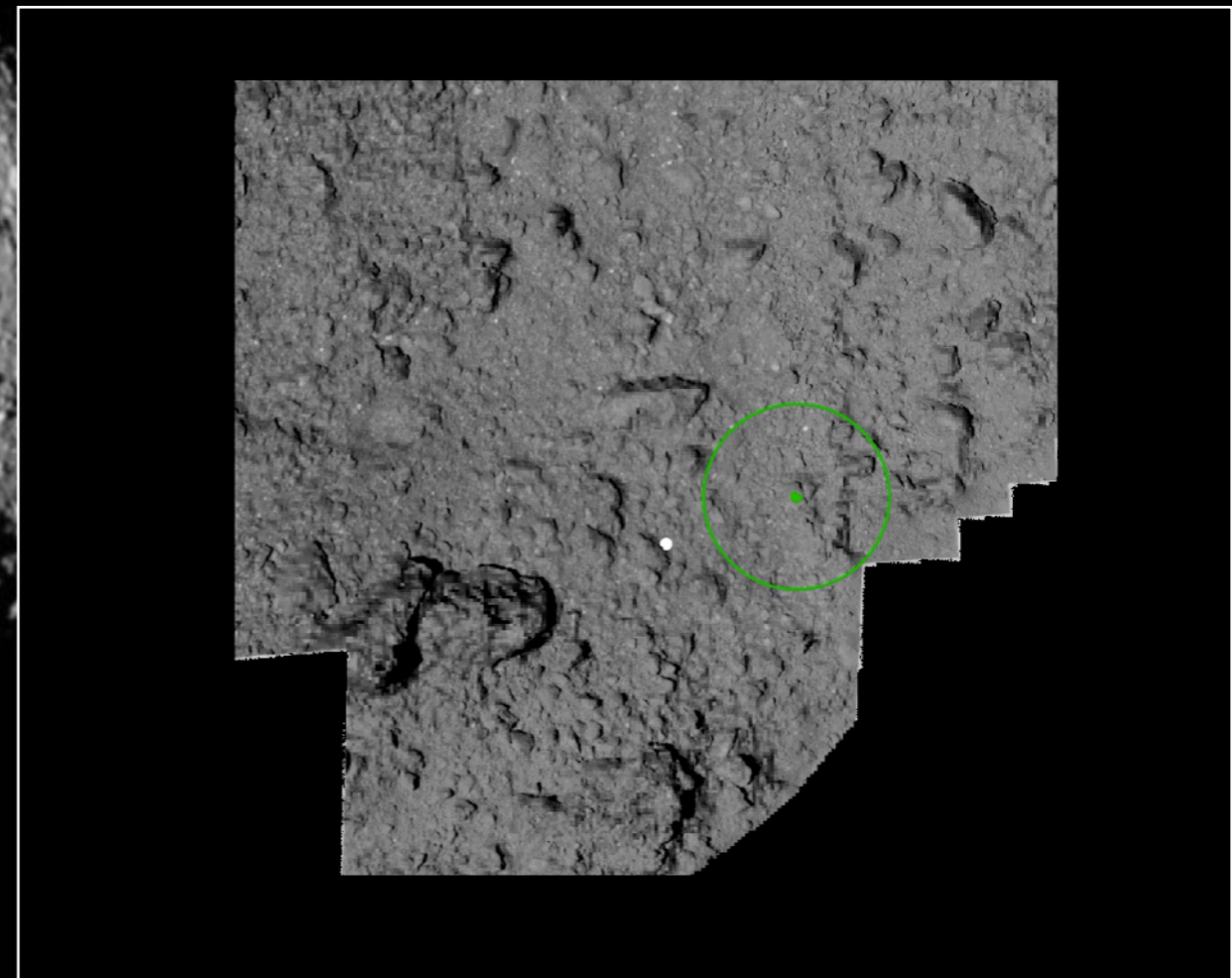


着陸候補地域
約100 m

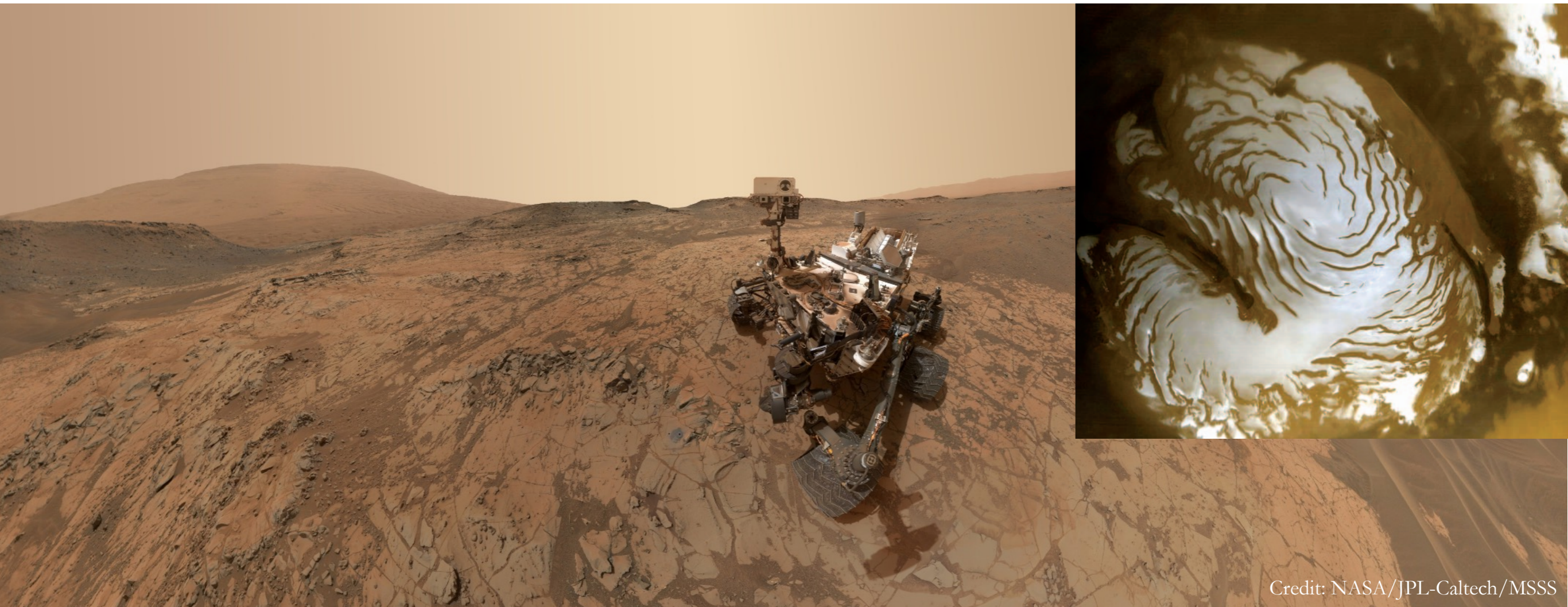
L07

L08

M04



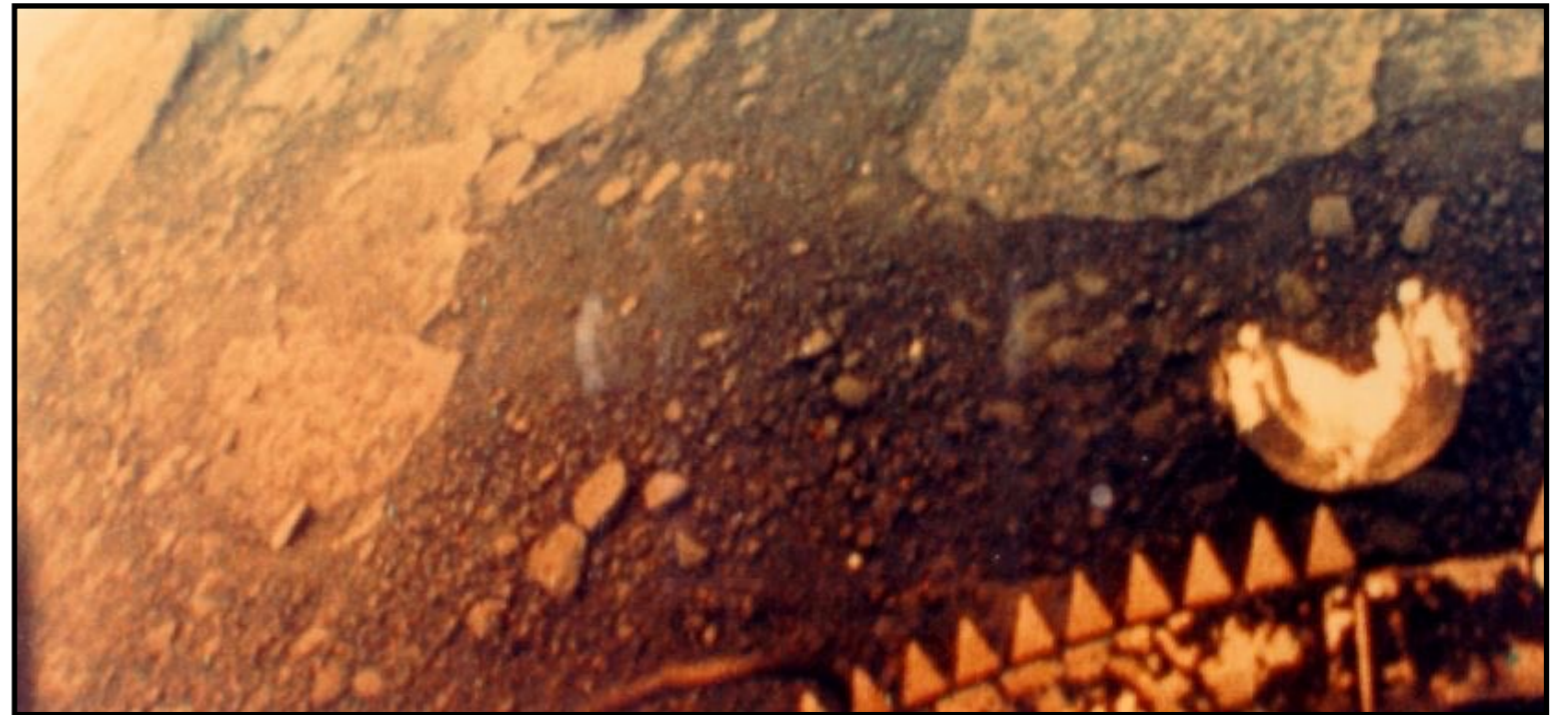
火星：冷たく乾燥した惑星



Credit: NASA/JPL-Caltech/MSSS

- 平均気温 約 -60°C \leftrightarrow 地球 約 15°C
- **希薄な CO_2 大気** 約 気圧 \rightarrow 温室効果小
- 乾燥した地表, **北極・南極に僅かな氷**があるのみ
全球平均 mの海に相当 \leftrightarrow 地球 約 km

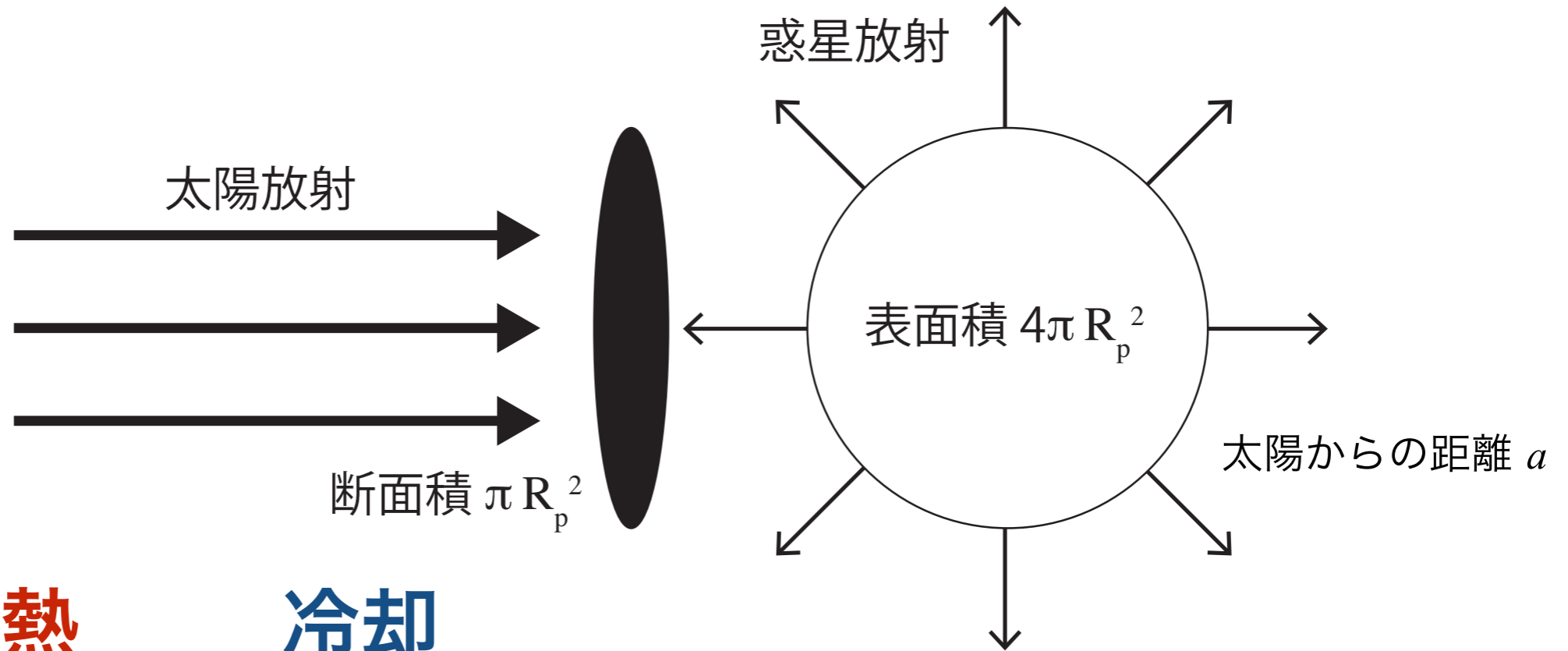
金星：乾燥した灼熱の惑星



探査機ベネラ13号が
撮影した金星の地表 (credit: NASA)

- 平均気温 約 470°C \leftrightarrow 地球 約 15°C
- ぶ厚い CO_2 大気 約 気圧 \rightarrow 温室効果大
- 濃硫酸の雲に覆われている
- 乾燥した地表 水蒸気を水換算すると深さ

天体の平衡温度



加熱

冷却

$$(1 - A) \frac{L_{\odot}}{4\pi a^2} \pi R_p^2 = \sigma_S T^4(a) 4\pi R_p^2$$



$$T(a) = 256 \cdot \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{K}$$

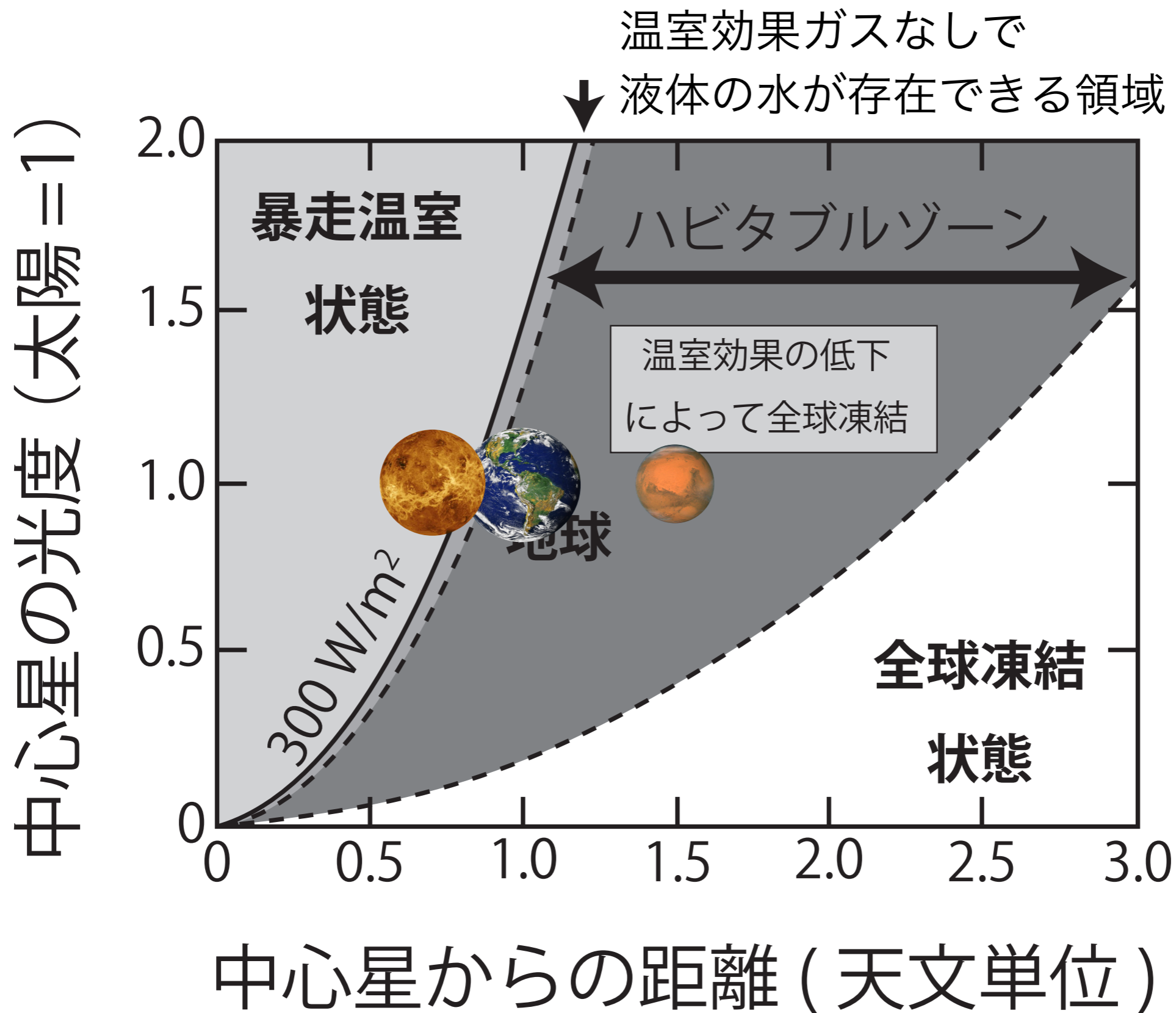
シュテファン・ボルツマン定数

$$\sigma_S = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$$

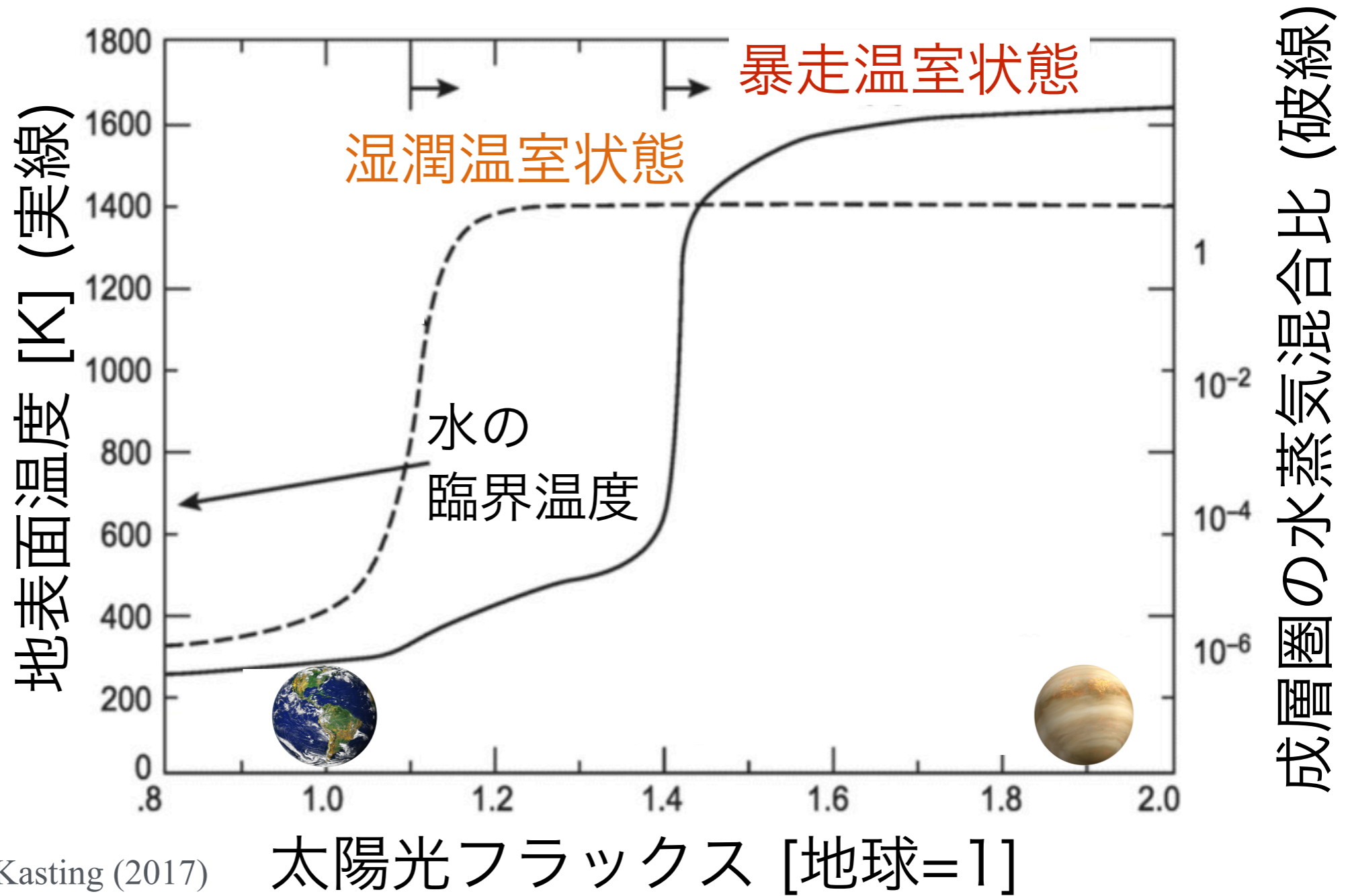
太陽光度 $L_{\odot} = 3.839 \times 10^{26} \text{ W}$

反射率(アルベド) : 地球の場合 $A = 0.3$

液体の水の存在可能領域：ハビタブルゾーン(HZ)



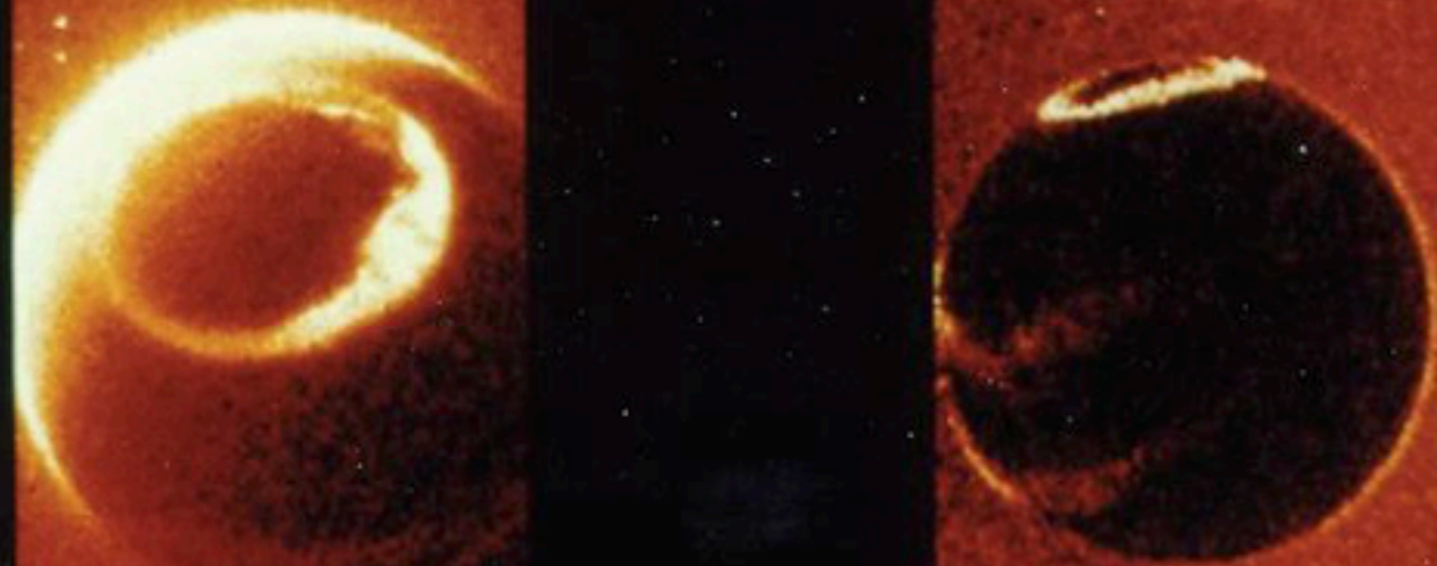
HZの内側境界：暴走温室状態



- 入射量↑ → 温度高↑ → 水蒸気(温室効果ガス)↑
- ある上限値を超えると**暴走温室状態** → 海が全て蒸発

宇宙空間に流出する惑星大気

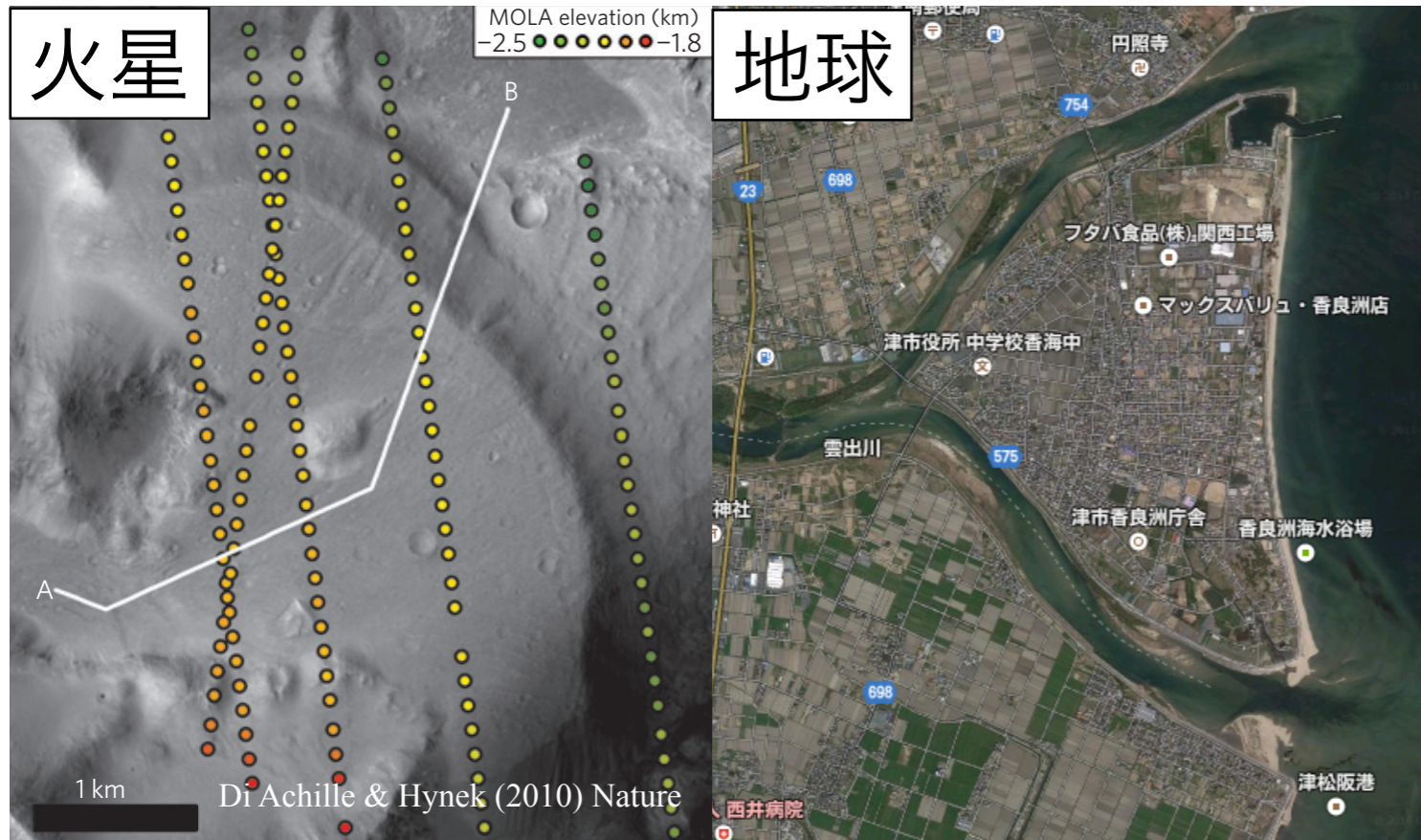
真空紫外線で撮像された地球 (100-200 nm)



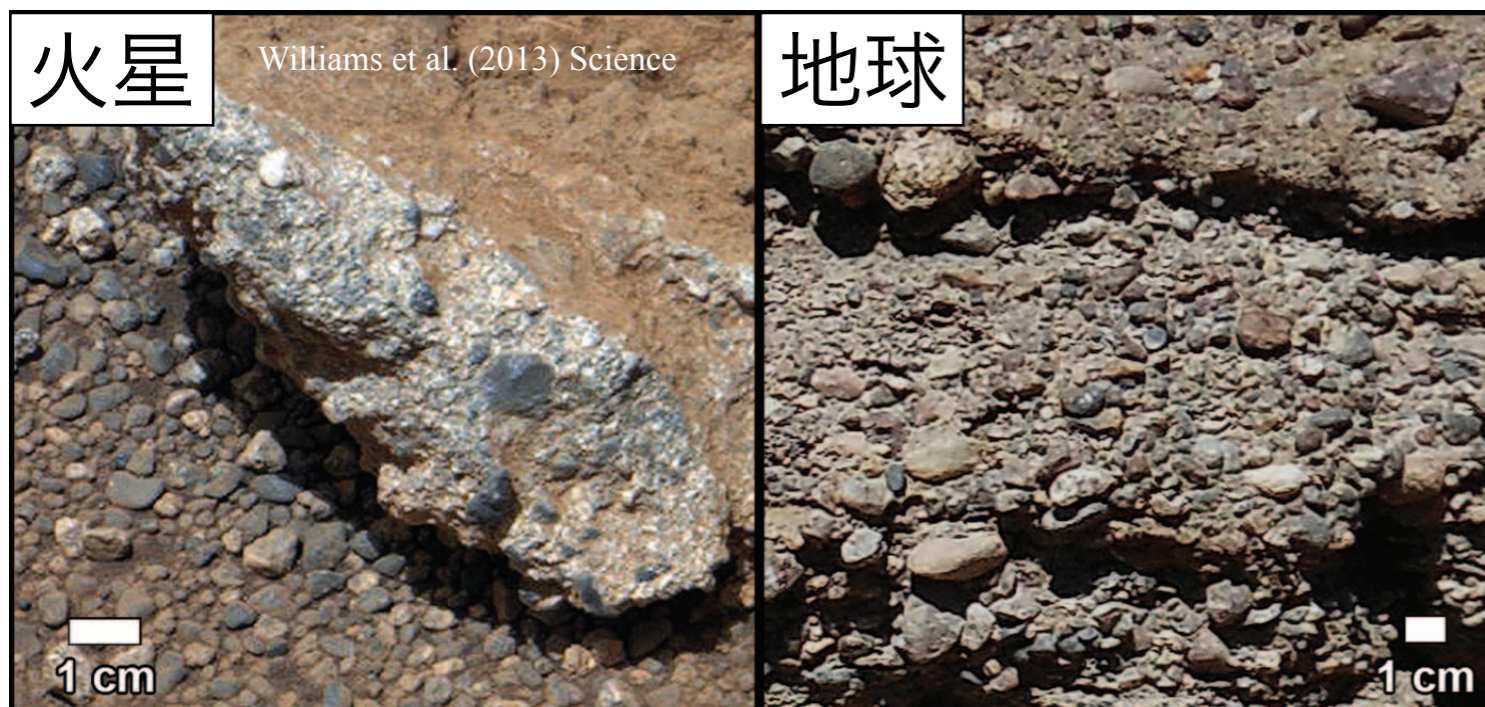
Rairden et al. (1986)

- 太陽光 (Lyman- α) を地球大気を取り囲んで広がる水素が散乱
→ 地球大気起源の水素が流出している
- 大気散逸は惑星大気と表層環境進化の要因の一つ
- 湿潤温室状態にあった金星から大量の水(水素)が失われた

火星の水の痕跡

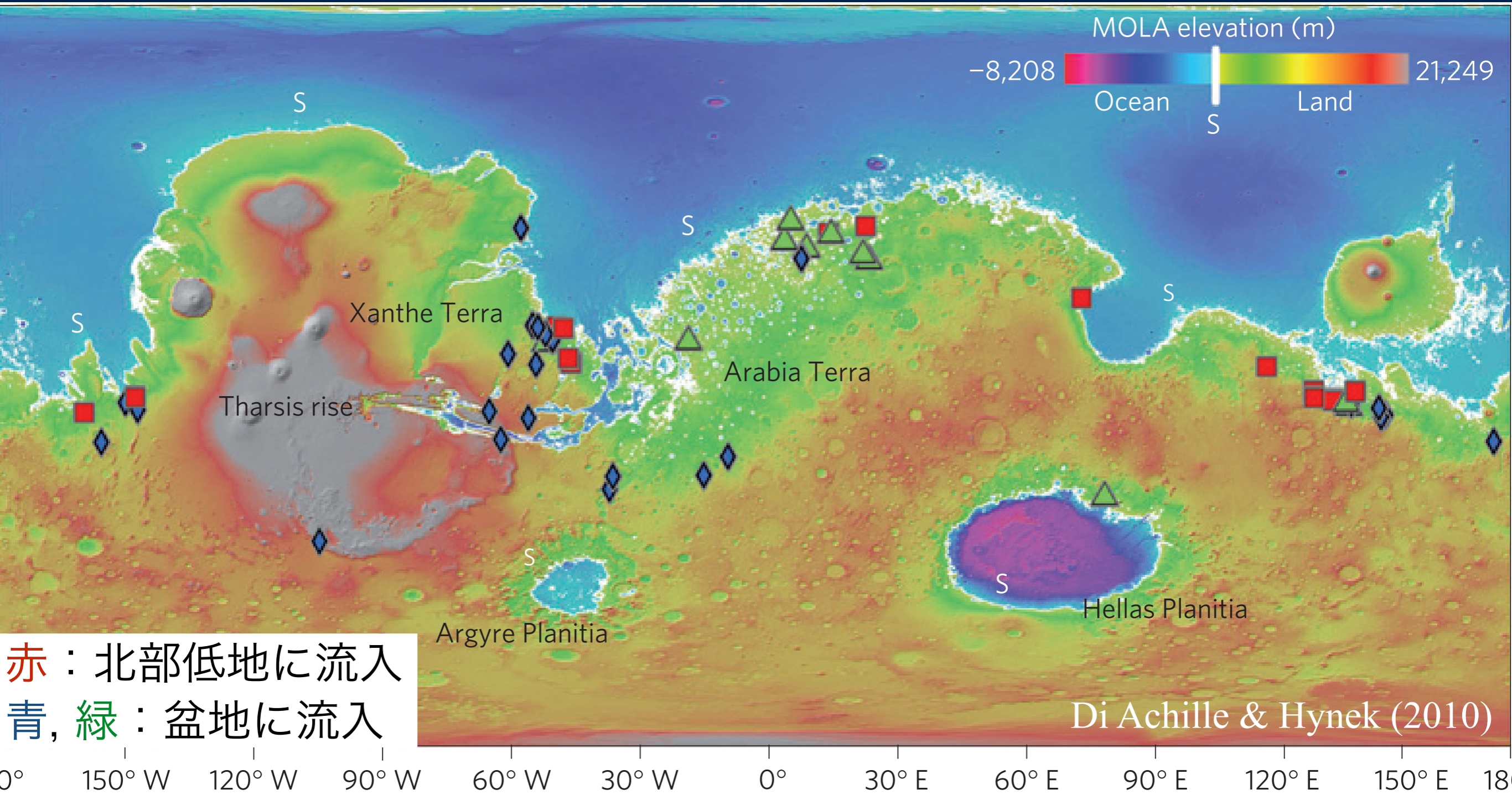


- 数多くの火星探査
 - Mars Global Surveyor, Curiosity, ...
- 水に関連した地形の発見
 - 溪谷,
 - 角の取れた小石, 堆積岩

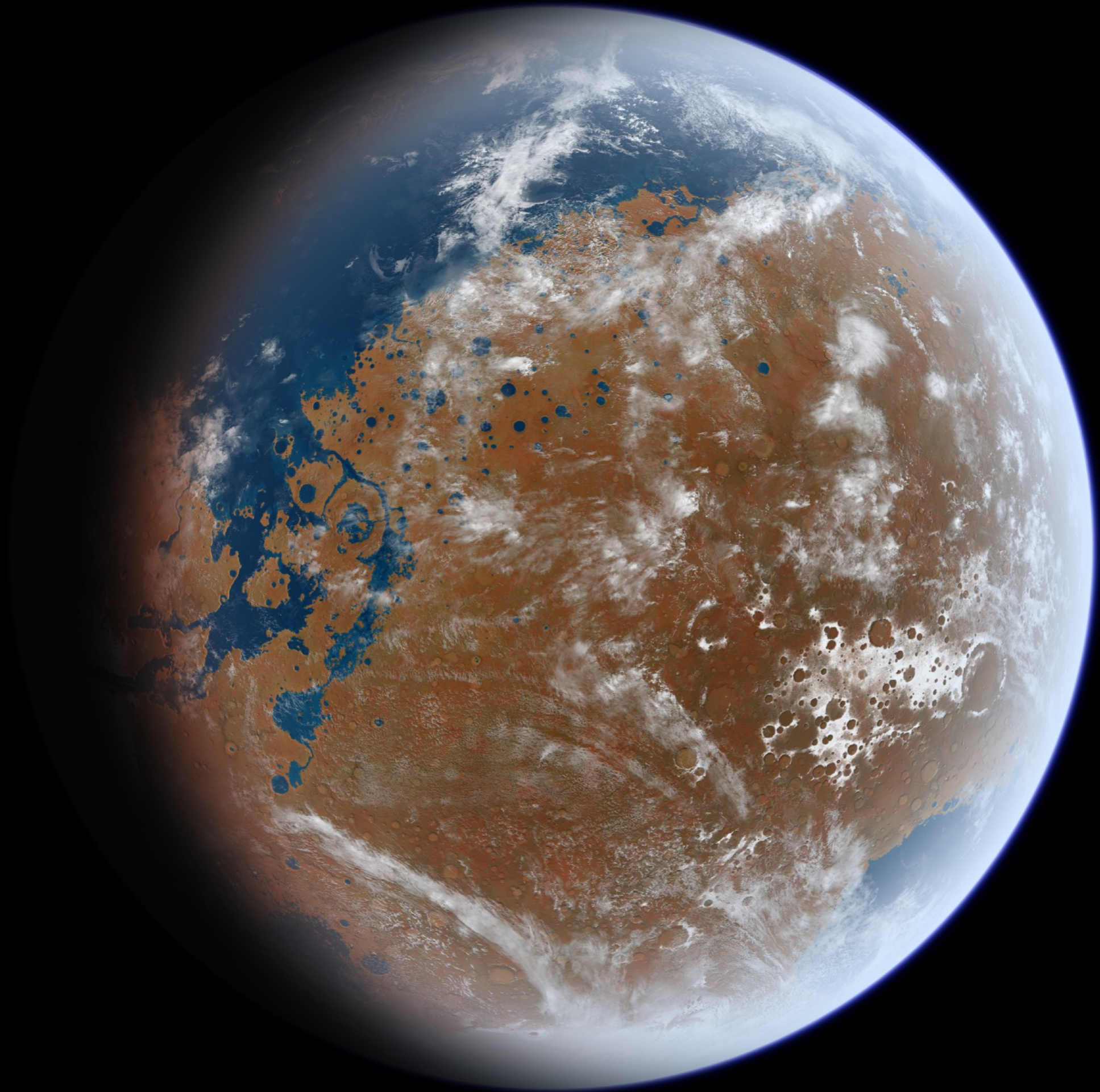


↔現在の火星は寒冷
平均気温 $>0^{\circ}\text{C}$ とするには
数気圧の CO_2 大気が必要

火星の三角州地形の分布

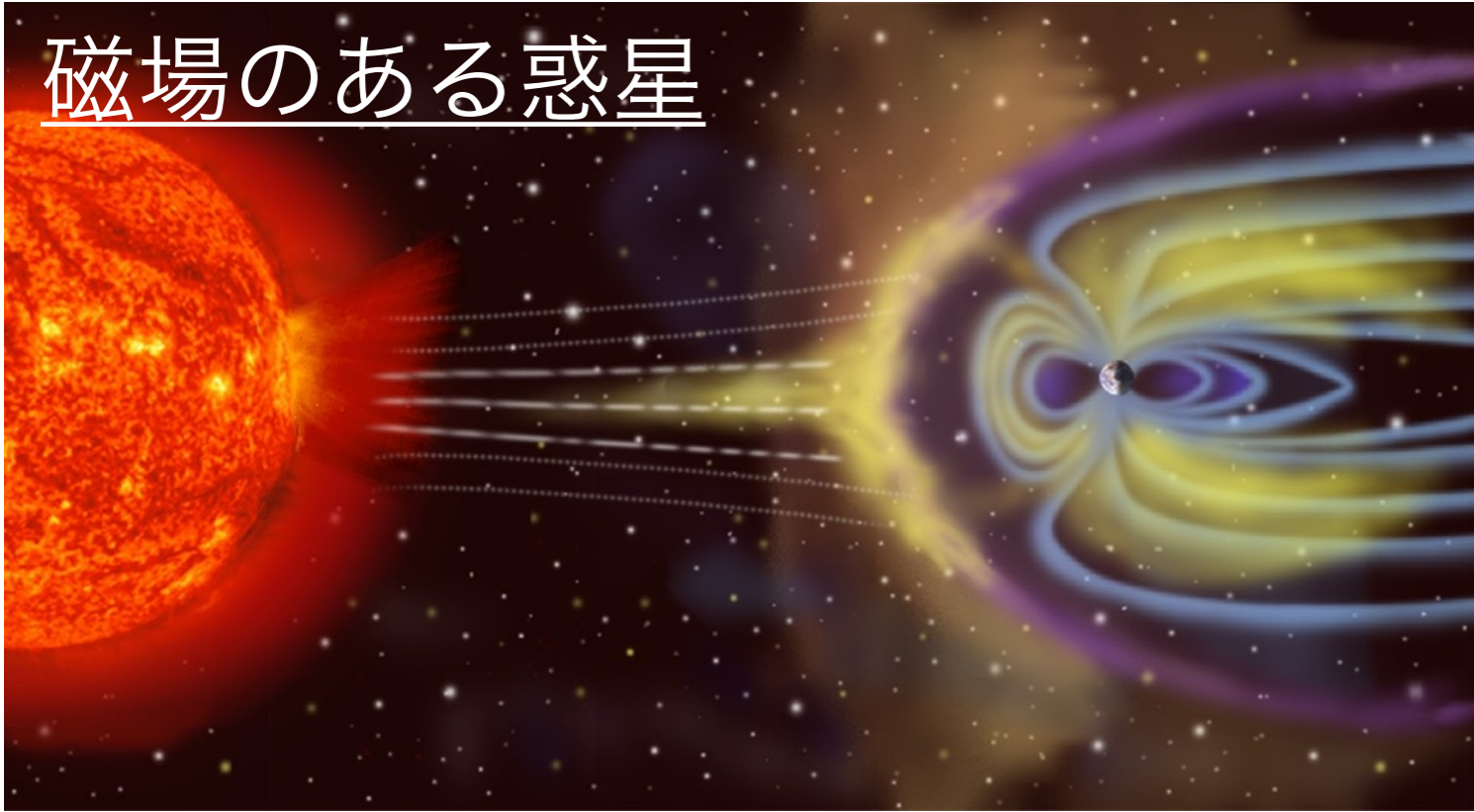


三角州は北部低地を取り囲むように存在 ⇒ かつての海？

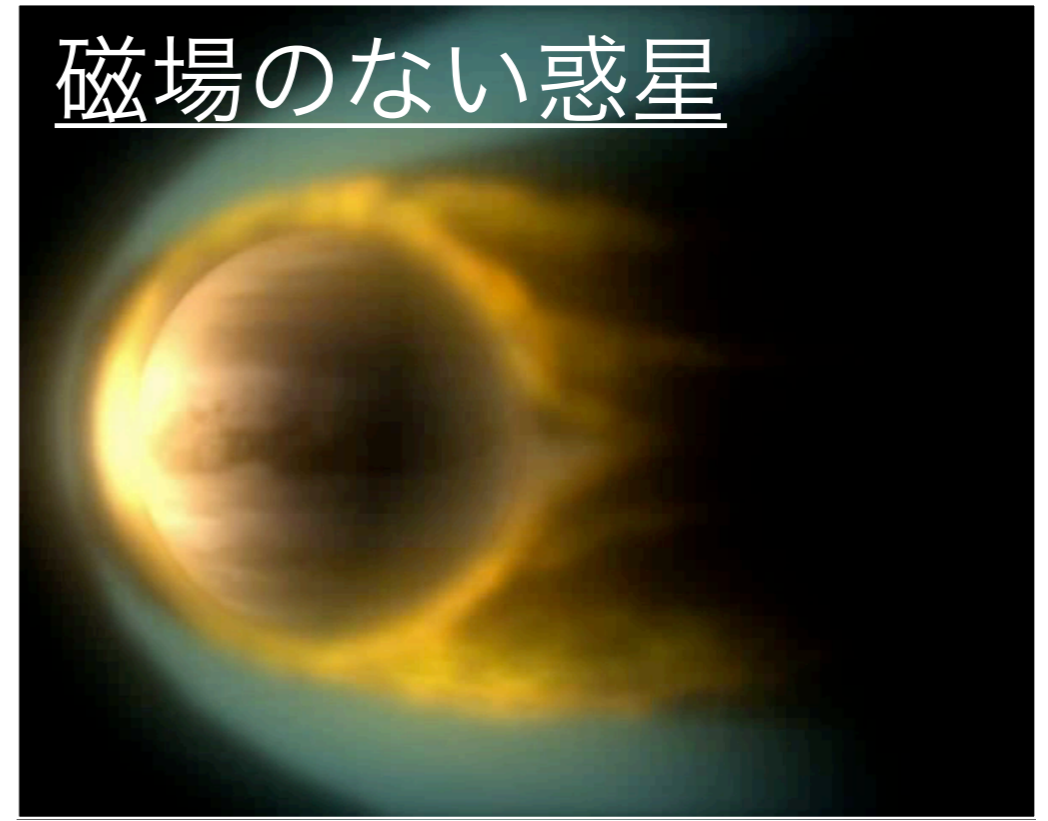


太陽活動による大気散逸

磁場のある惑星



磁場のない惑星

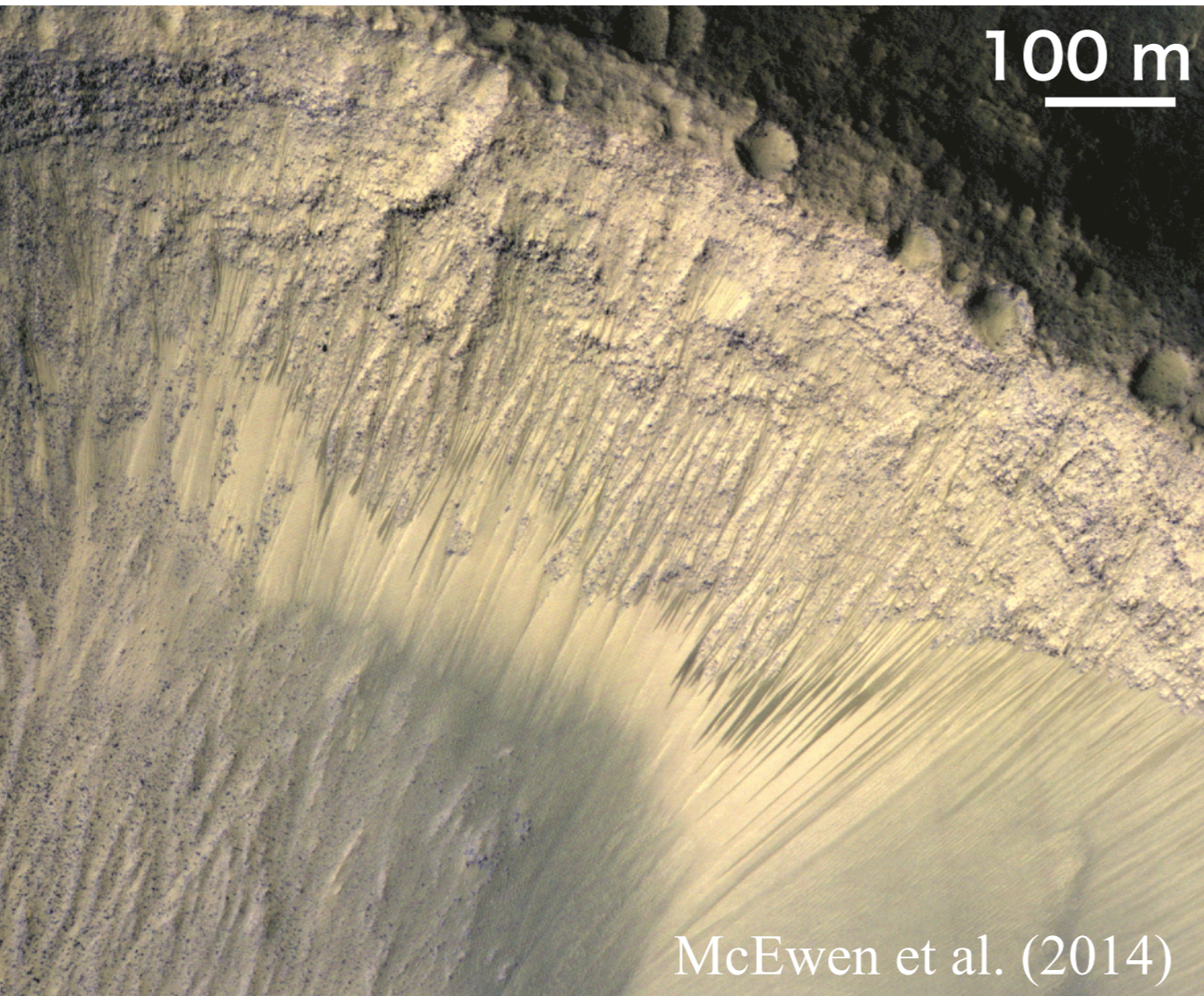


極端紫外線放射, 太陽風によって上層大気が流出

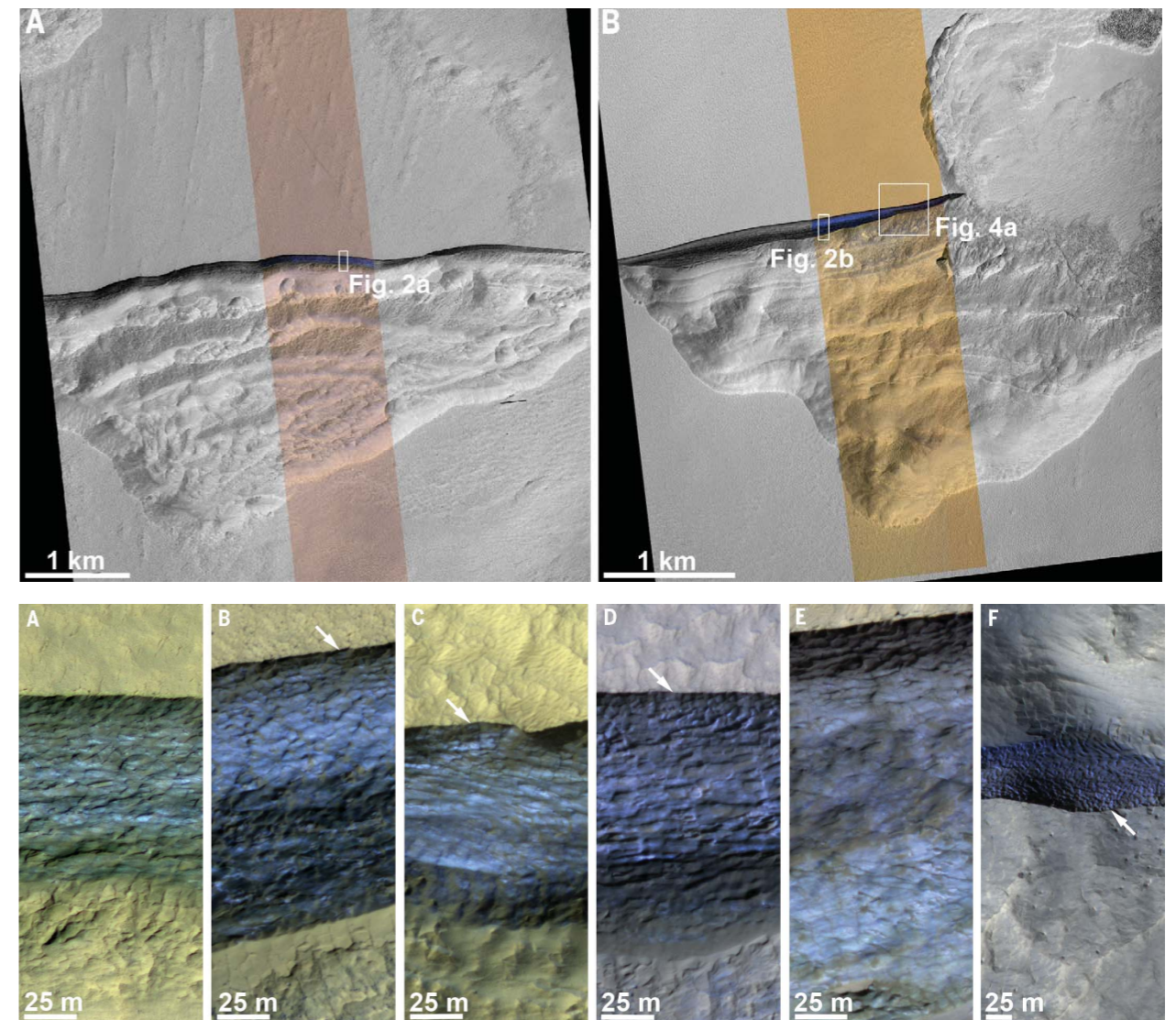
- 磁場がある(地球) ⇒ 太陽風が侵入しない**磁気圏**を持つ
- 磁場がない(火星, 金星) ⇒ 太陽風が大気に影響
- 地球磁気圏：地球半径の約 倍
- ↔ 金星・火星の電離圏界面：惑星半径の1/10以下(数100 km)

火星の水の行方

春夏に現れる流水(?)地形



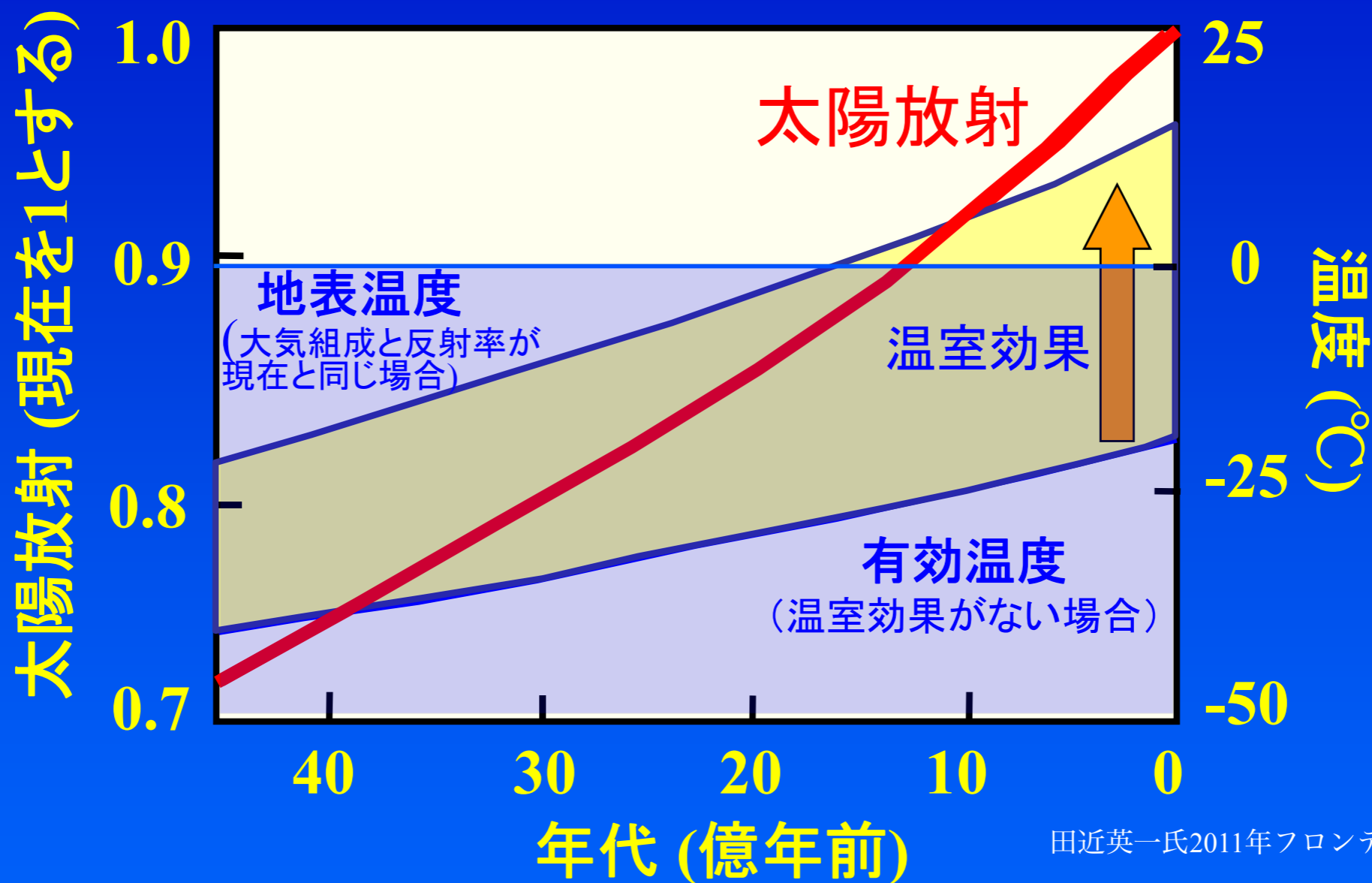
急斜面に露出した地下氷



Dundas et al. (2018)

- 火星の水の一部は宇宙空間へ流出
- 極冠に加えて、低中緯度に地下氷層があるかもしれない

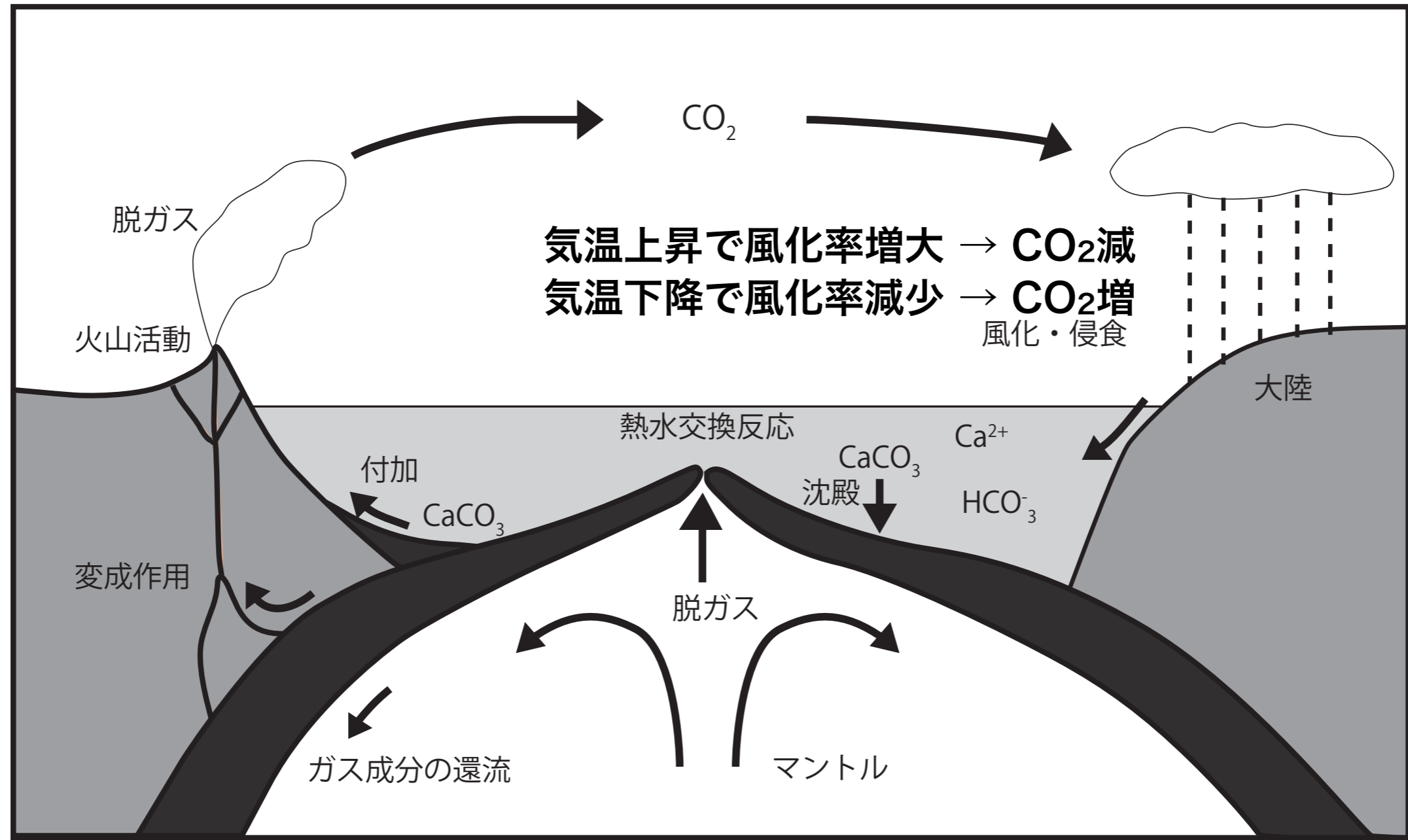
暗い太陽のパラドックス



40億年前の太陽光度は現在の70%

⇒大気組成が現在と同じ場合、20億年以上前は全球凍結

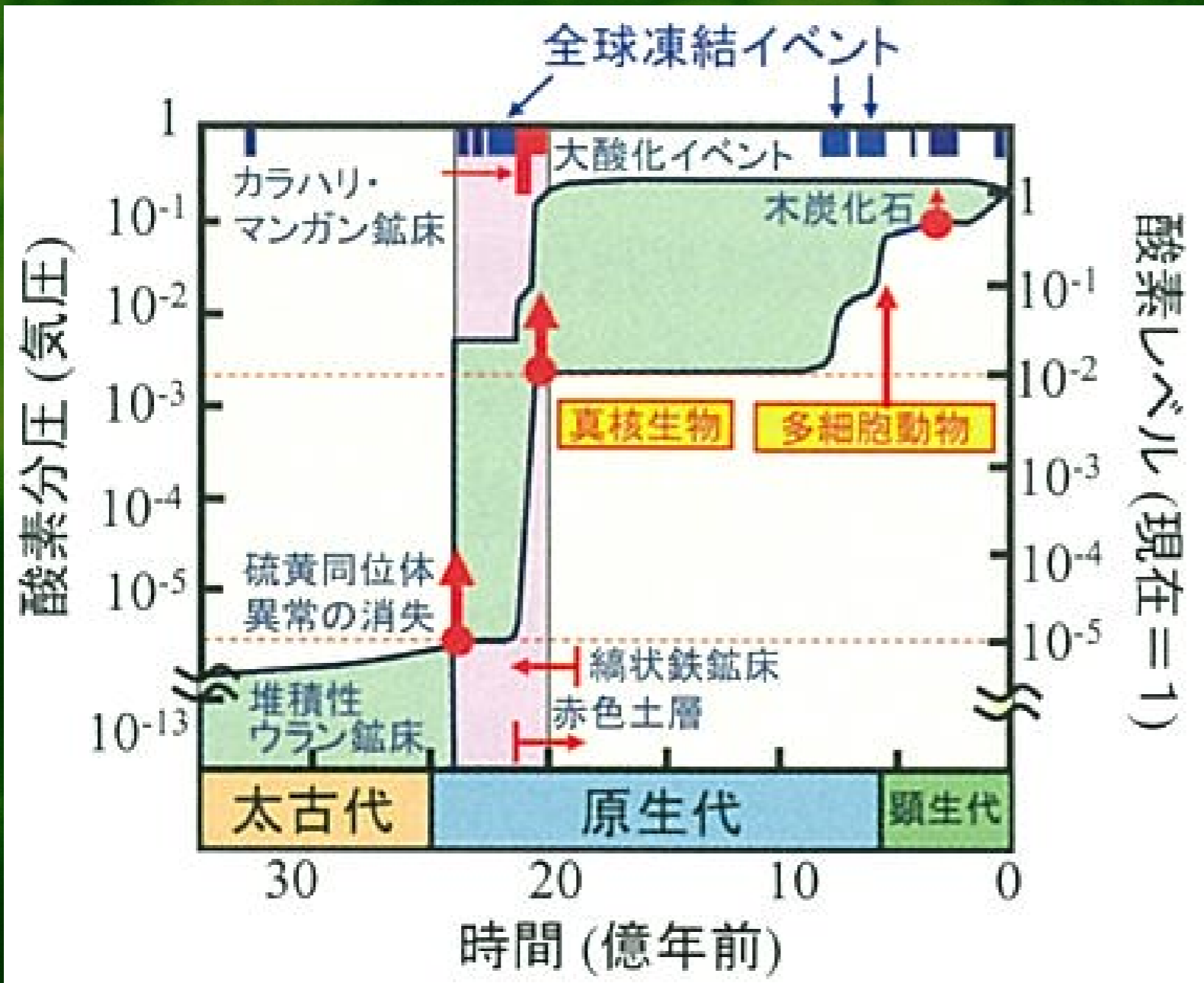
炭素循環による気候安定化



門屋他 (2012) 日本惑星科学会誌, Vol. 21, No. 3.

- 太陽が暗い時代は大気中のCO₂が多くなり地表を温暖に
- HZの外側境界：CO₂が氷になる軌道位置

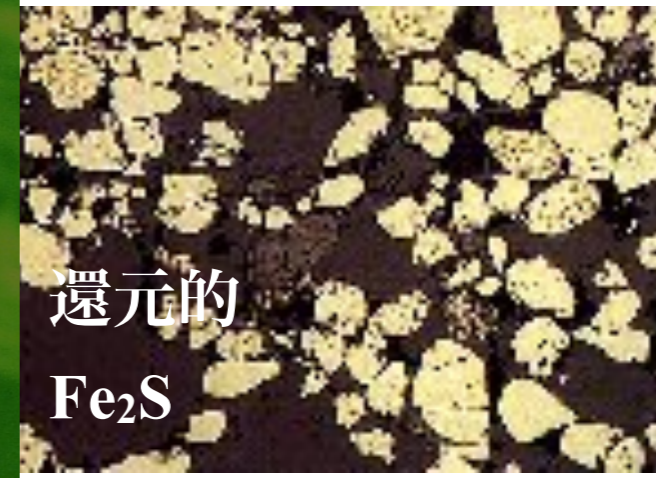
大酸化イベント



東京大学出版会『宇宙生命論』

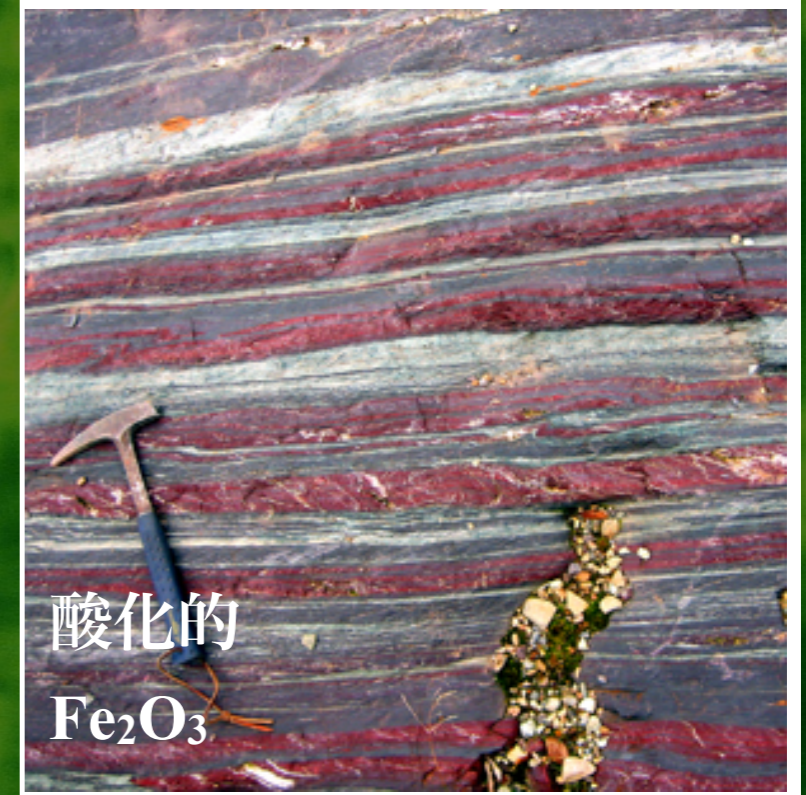
- * 酸素発生型光合成生物の活動により、約25億年前に酸素分圧が上昇

碎屑性黄鉄鉱(detrital pyrite)



還元的
Fe₂S

縞状鉄鉱層(BIF)



酸化的
Fe₂O₃

まとめ

大気の高多様性は惑星の形成・進化を反映

- * 巨大ガス惑星・巨大氷惑星 H_2 ・ He 大気：原始惑星系円盤ガス
- * 氷天体(タイタン・冥王星・トリトン) N_2 大気：
スノーライン以遠で形成し揮発性元素を大量に含む
- * 岩石惑星：雪線以遠で形成した小天体が少しだけ集積

金星・地球・火星の進化を隔てたもの

- * HZの内側境界：暴走温室, 外側境界： CO_2 の凍結
金星の暴走温室状態 → 水の大気散逸
地球の海形成と炭素循環による気候安定化 → N_2 , O_2 大気
- * 太陽風による大気散逸
火星の CO_2 大気の希薄化 → 寒冷化