

地球と生命

第4回：初期地球環境 (+火星)

レポート課題解答

1. 地球と金星の大気圧からそれぞれの惑星の大気質量を計算せよ. それぞれの惑星の大気圧 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $9.2 \times 10^6 \text{ Pa}$, 重力加速度 9.8 m s^{-2} , 8.9 m s^{-2} , 惑星半径 $6.4 \times 10^6 \text{ m}$, $6.1 \times 10^6 \text{ m}$ を用いてもよい.

地表での大気圧, 大気質量, 重力加速度, 惑星半径をそれぞれ p_s , M_{atm} , g , R とおく.

$$M_{\text{atm}} = \frac{4\pi R^2 p_s}{g} \text{ — (1) より, 地球: } 5 \times 10^{18} \text{ kg, 金星: } 5 \times 10^{20} \text{ kg.}$$

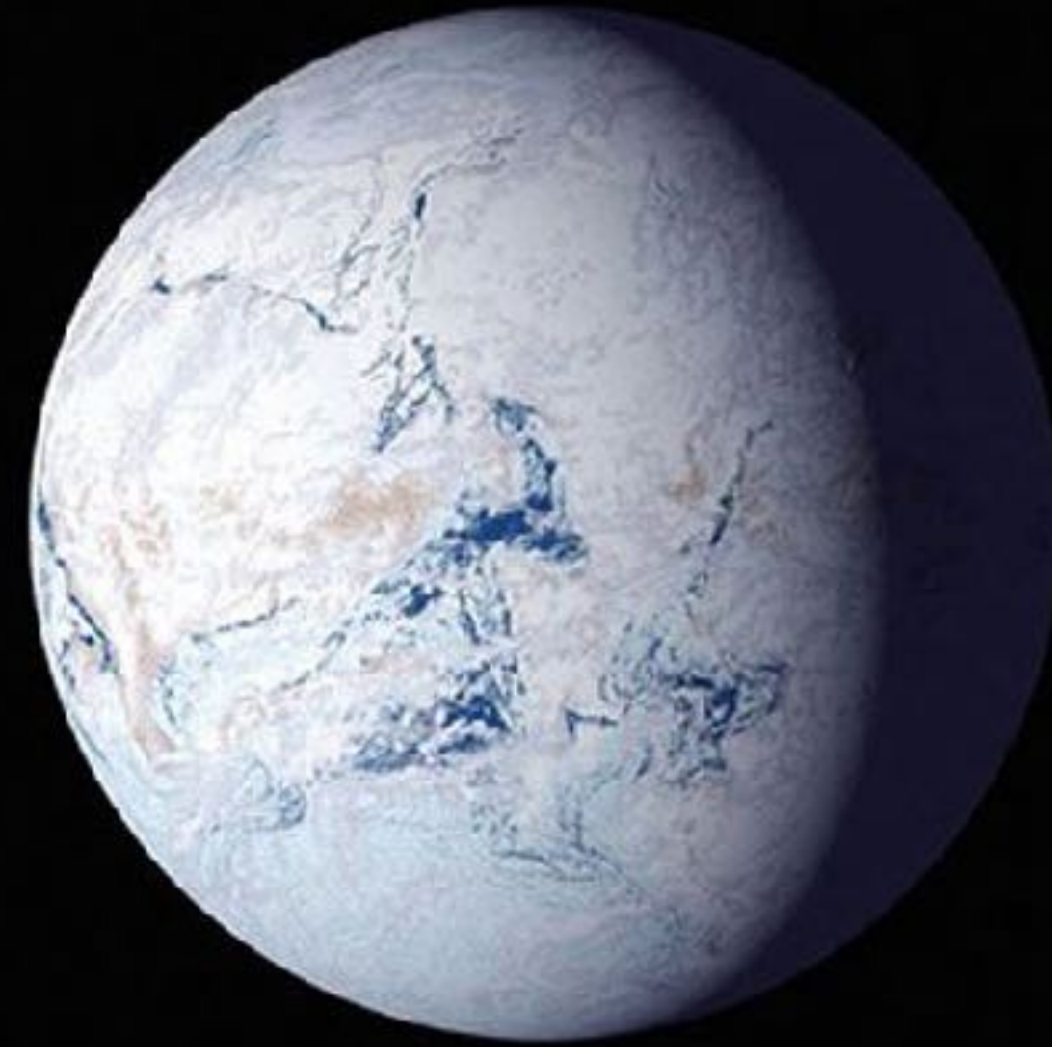
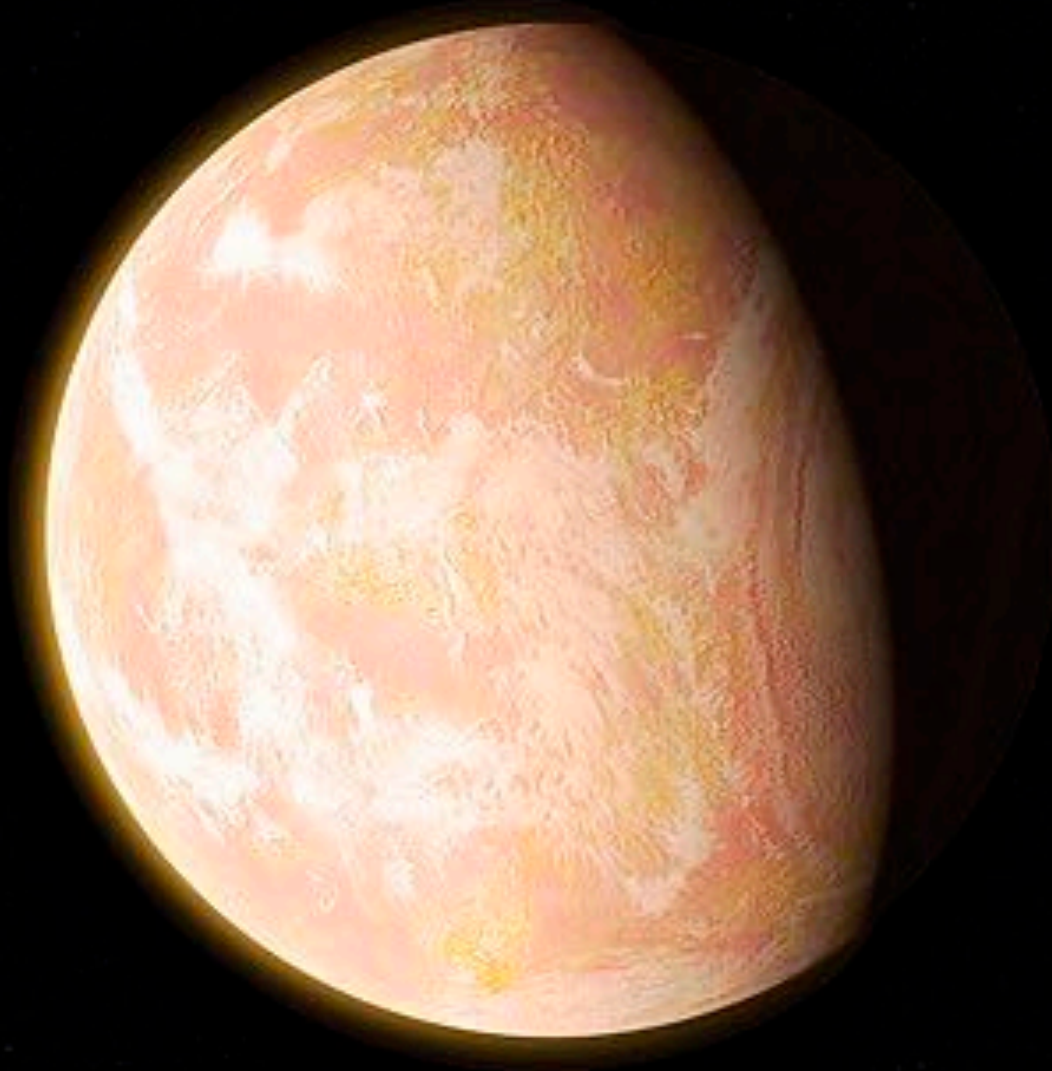
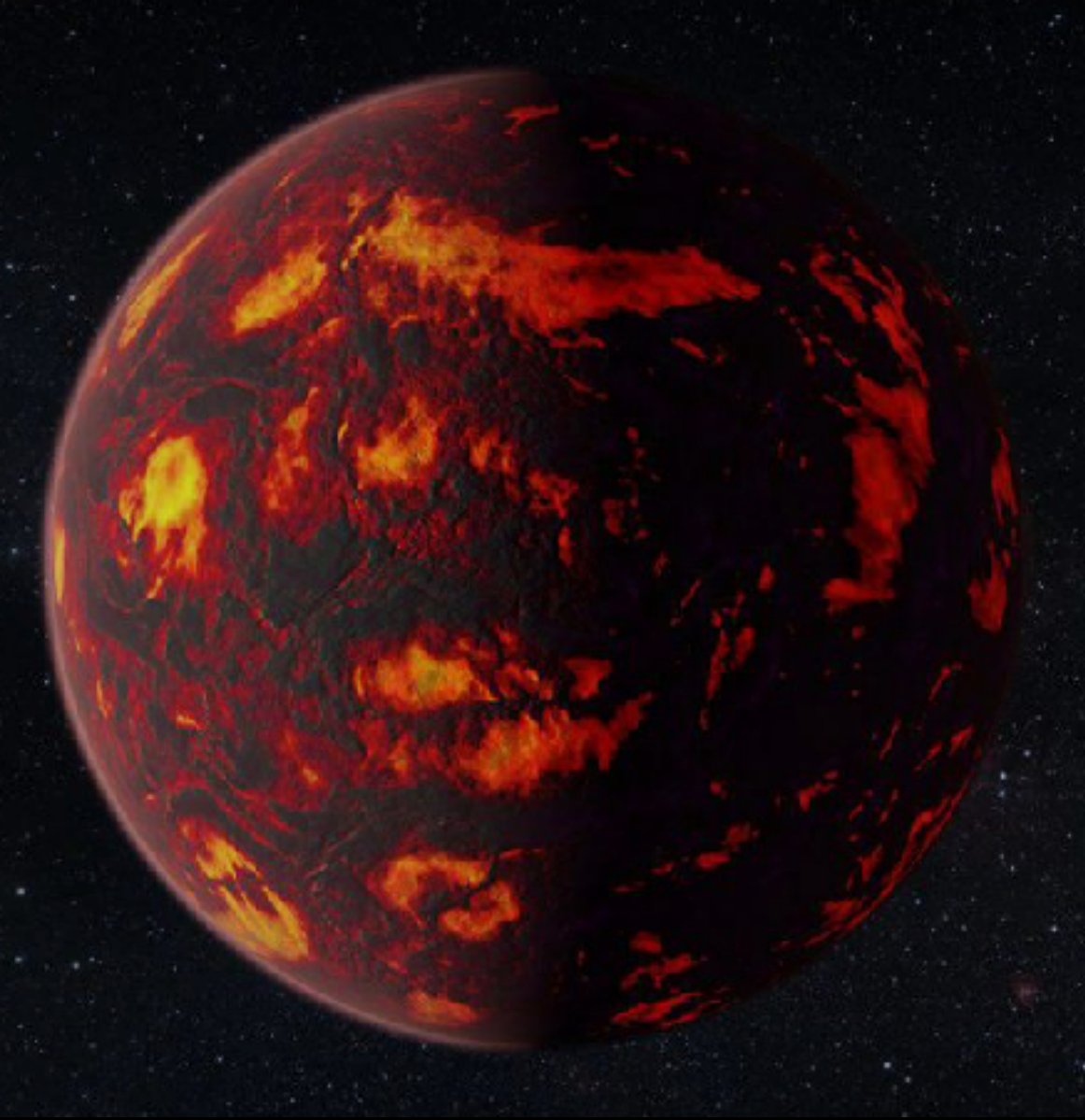
2. 地球の地殻中には $3.6 \times 10^{20} \text{ kg}$ の炭酸塩岩が含まれていると見積もられている. この炭酸塩は原始地球において大気中の二酸化炭素 CO_2 が固定されたものである. 炭酸塩岩をすべて炭酸カルシウム CaCO_3 であると近似する時, 原始地球の大気圧を見積もれ.

石灰岩の質量のうち, $44/100$ が CO_2 となることから, 原始地球大気質量は

$$M_{\text{atm}} = 3.6 \times 10^{20} \text{ kg} \times 44/100 + 5.3 \times 10^{18} \text{ kg} = 1.6 \times 10^{20} \text{ kg.}$$

したがって, (1)より, $p_s = 3 \times 10^6 \text{ Pa}$.

“進化”する地球



マグマオーシャン

有機物ヘイズ？

スノーボールアース

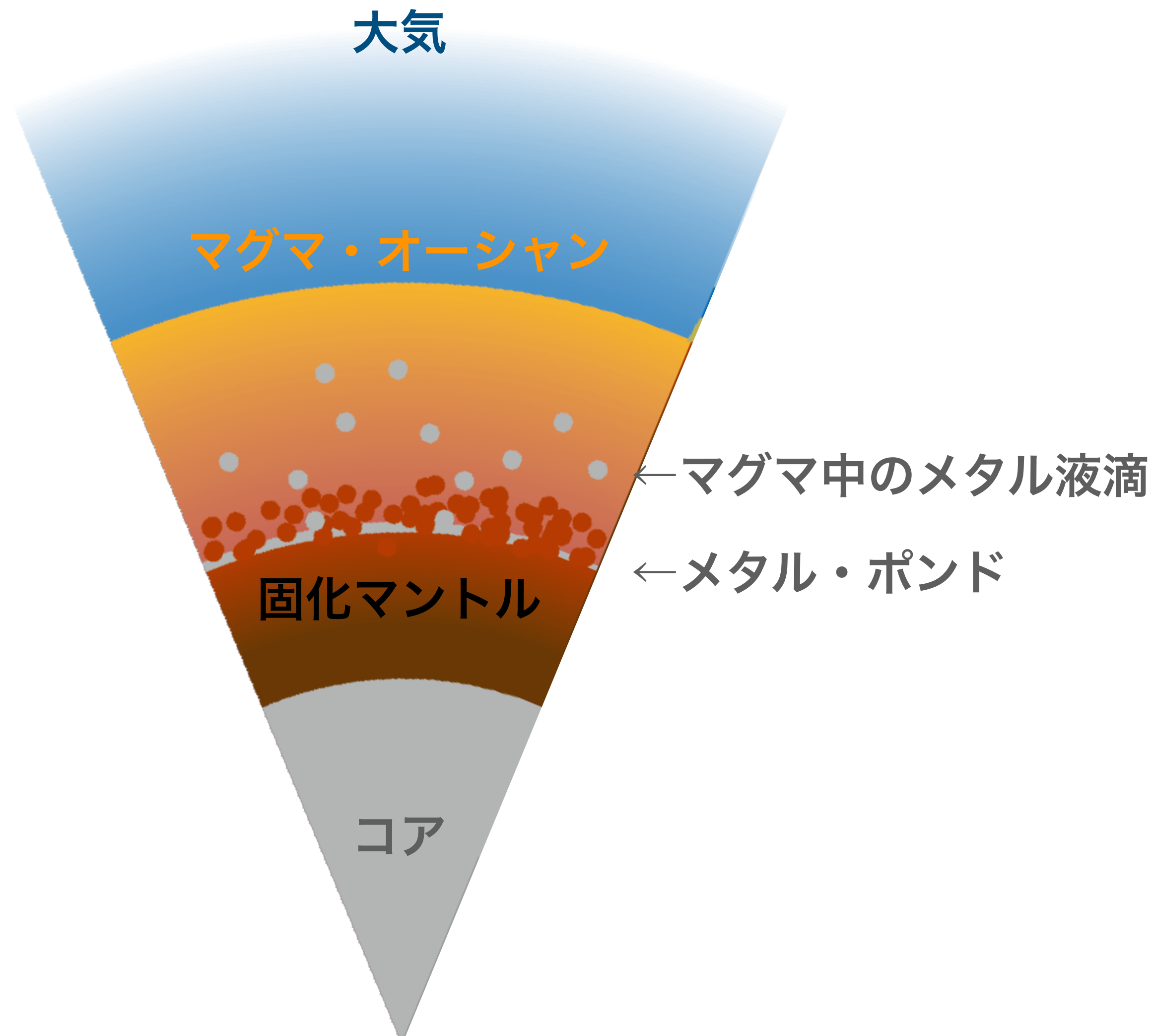
現在の地球

→ 時間

- 地球は歴史を通じてその姿を変えてきた
- 大気組成・気候・水量・大陸地殻…

4.1 分化と初期進化

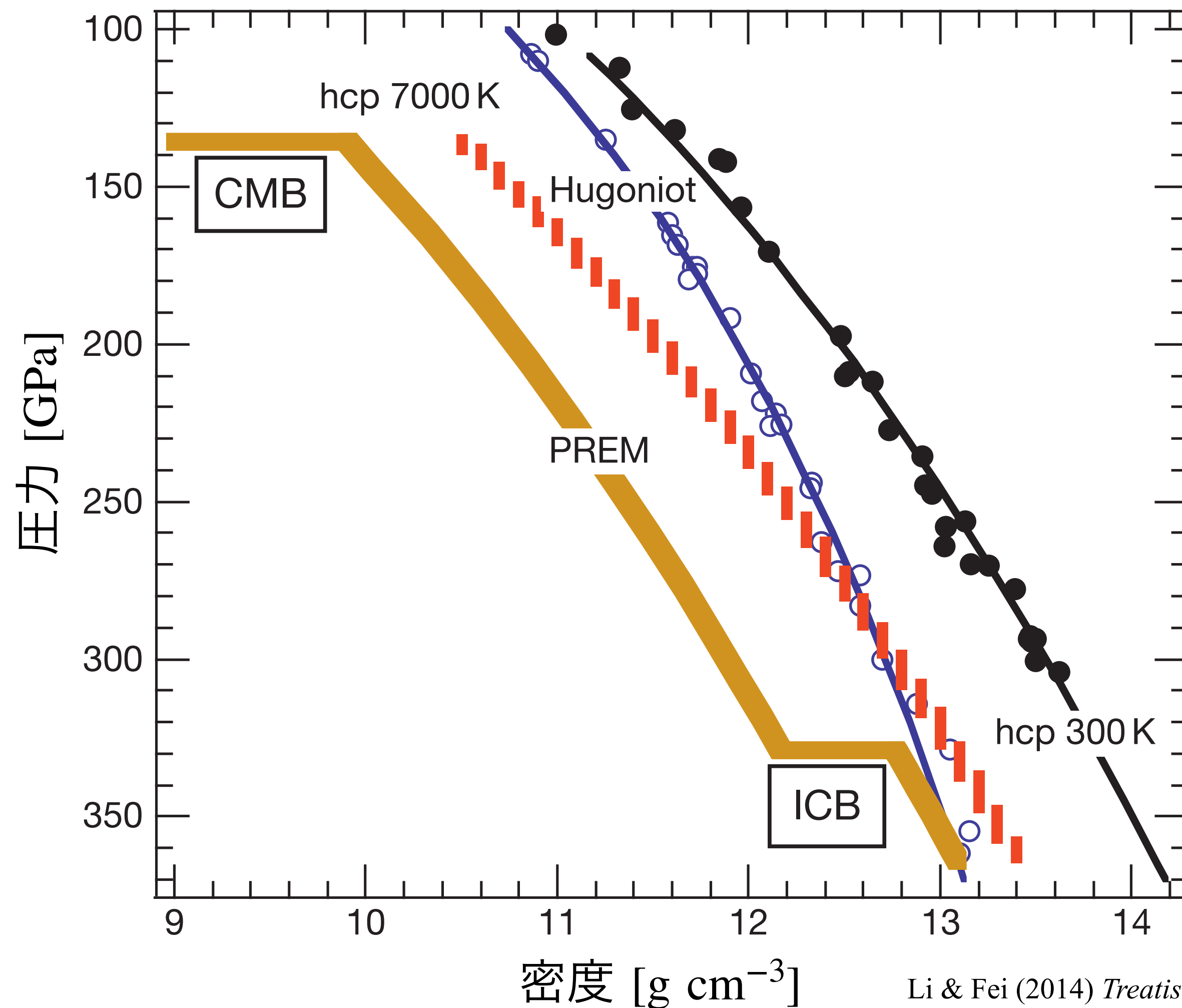
溶融状態で誕生した地球



- マグマオーシャン：全球的に溶融した岩石の層
- コアの分化
 - メタルの液滴が沈降
 - サイズ ~1 cm (Rubie et al. 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.*)
 - 固化マントルの上に蓄積(メタル・ポンド)
 - メタルと固化マントルの密度差があるため、ある程度蓄積すると不安定となり、コアへ
- 揮発性元素 (H, C, N, ...) の分配
 - 大部分がコアへ取り込まれたかもしれない
 - マグマオーシャンに残った揮発性元素は固化に伴い脱ガス → 厚い原始大気の形成

コアの軽元素

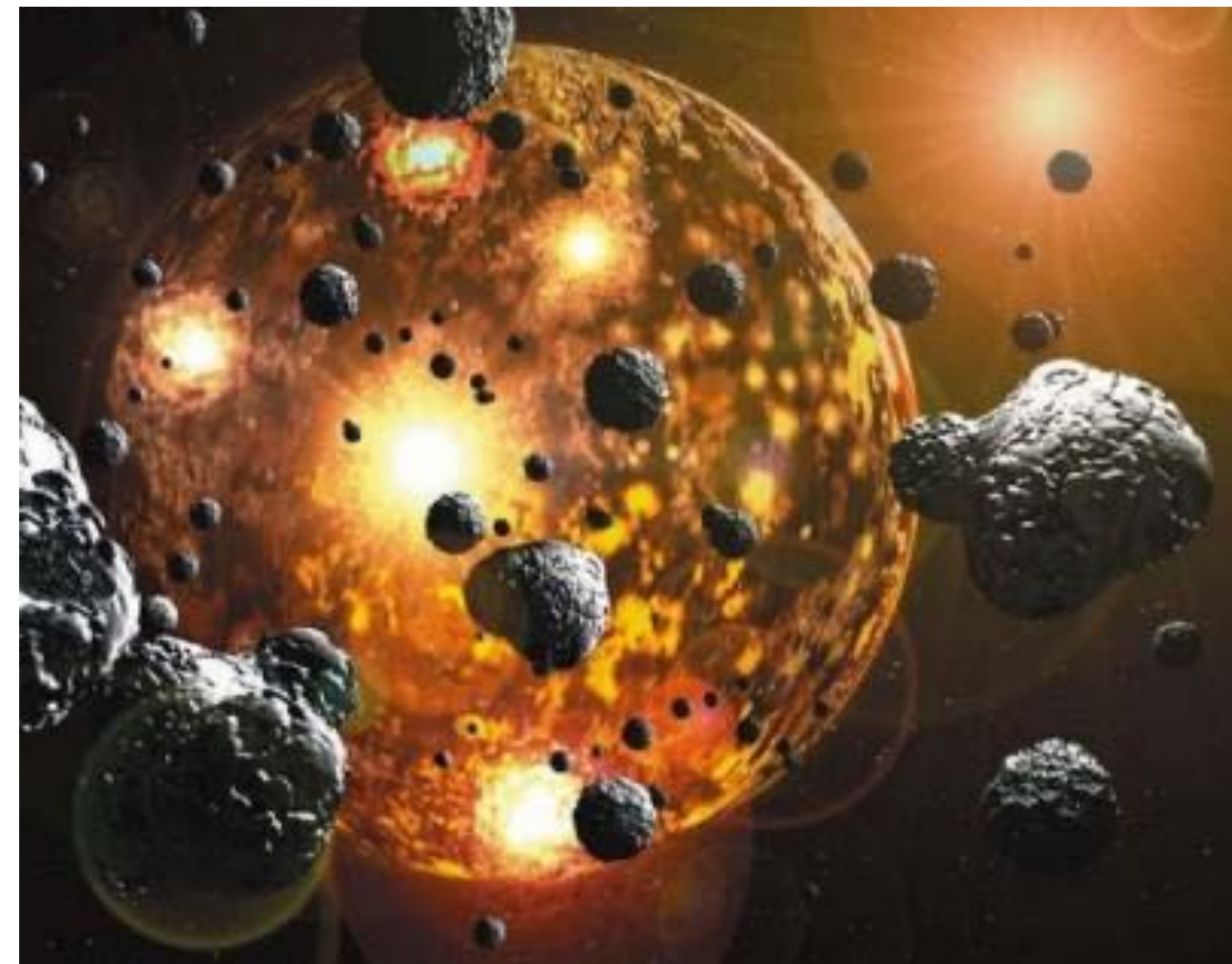
PREMと純鉄(異なる温度3通り)の密度の比較



Li & Fei (2014) *Treatise on Geochemistry 2nd Edition*

- コアの密度は純鉄の密度より ~ 10% 小さい (温度による不定性あり)
→ 軽元素 (低密度化する元素) の存在
- 候補 : Si, S, O, H, C
- 地球コア中の軽元素質量
~ $M_{\oplus} \times 1/3 \times (10^{-2} - 10^{-1}) \sim (10^{22} - 10^{23})$ kg
≫ 海洋 1.4×10^{21} kg, 大気 5.1×10^{18} kg
→ コアへの軽元素の取り込みは地球表層環境を左右する
- 最近, 火星コアも低密度だと判明

一次大気と二次大気



大気の2つの起源

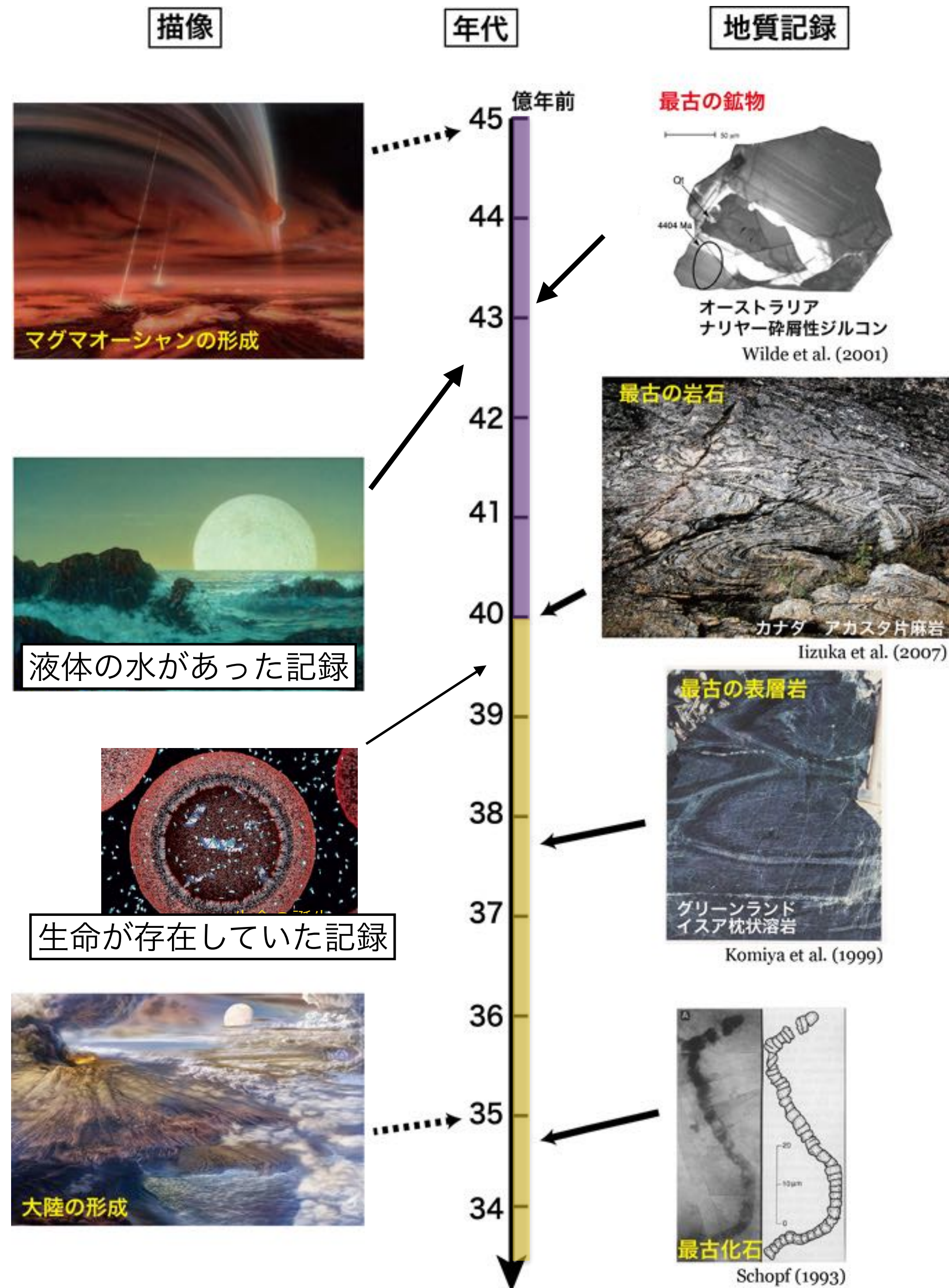
- 原始惑星系円盤ガス(一次大気, 木星型) : 太陽組成でH, Heに富む
- 集積天体中の揮発性元素(二次大気, 地球型) : C, Nなど重たい元素に富む

4.2 地球史

地球史

累代	期間	特徴
冥王代	46億-40億年前	岩石や地層記録なし 天体衝突頻度大
太古代	40億-25億年前	貧酸素・CO ₂ に富む大気？ 化学合成(+光合成?)原核生物
原生代	25億-5.42億年前	酸素濃度上昇, 大陸地殻増加 酸素発生型光合成, 真核生物
顕生代	5.42億年前-現在	酸化的な大気 生物化石豊富, 生物大型化

冥王代



- 古い地殻はプレート運動で失われる
- 冥王代：岩石記録がない時代
- 43億年前のジルコン結晶
低温の水と反応した証拠 (酸素同位体)
→ **海が存在した?** (Wilde et al. 2001)
- 39.5億年前の炭素の低い $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比
(生物有機物の特徴)
→ **生命が誕生していた?** (Tashiro et al. 2017)

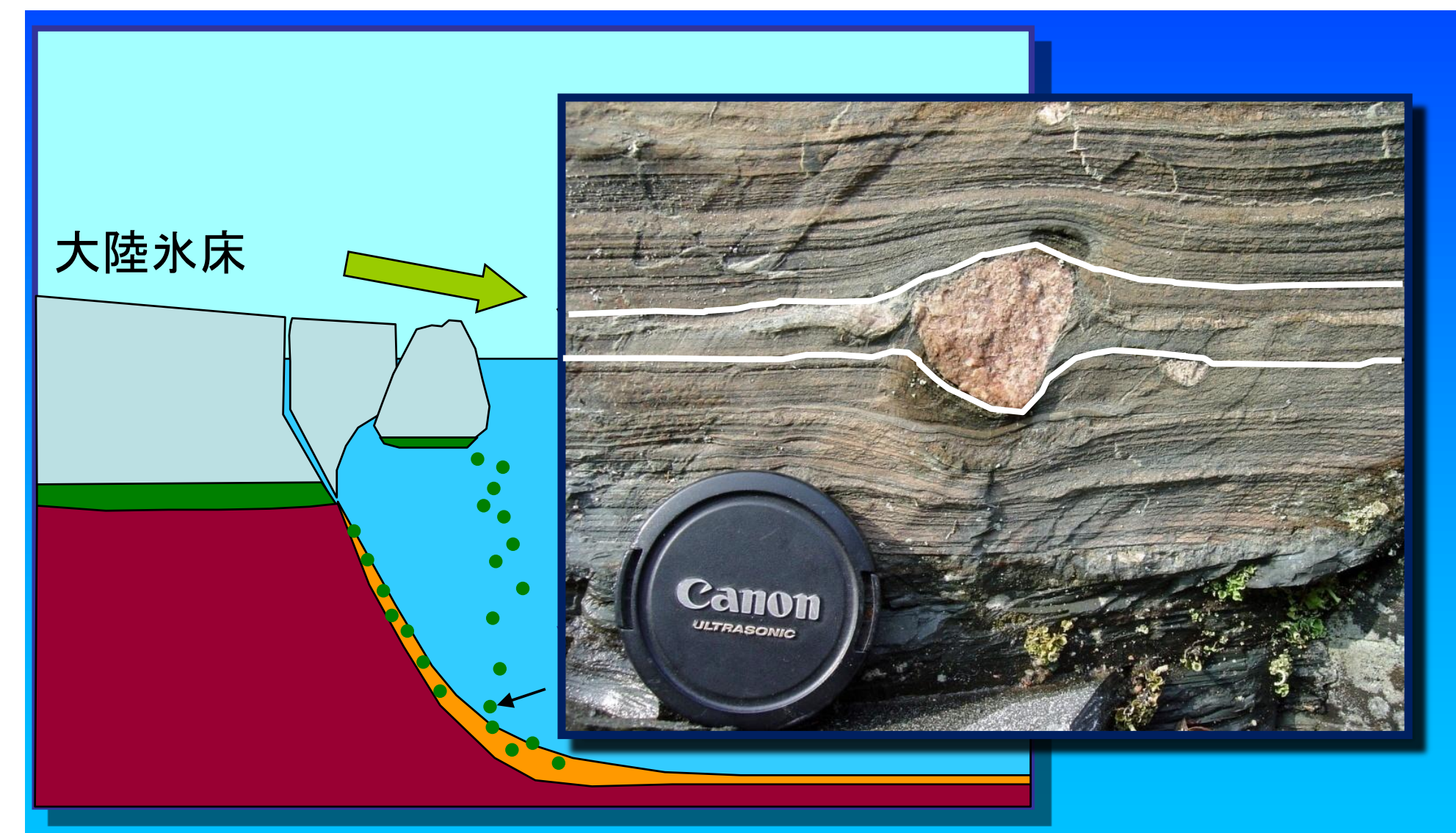
図は 飯塚 (2015), 東京大学大学院地球惑星科学専攻ウェブマガジン を改変
<http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/webmagazine/wm006.html>

太古代

- 海が凍らない程度には温暖だった (どの程度かは議論がある)
 - ※ 氷河時代を除く (29-27.8億年前：ポンゴラ氷河時代)
- 酸素に乏しい大気
- 現在より小さな大陸
- ストロマトライト (藍藻類の化石)



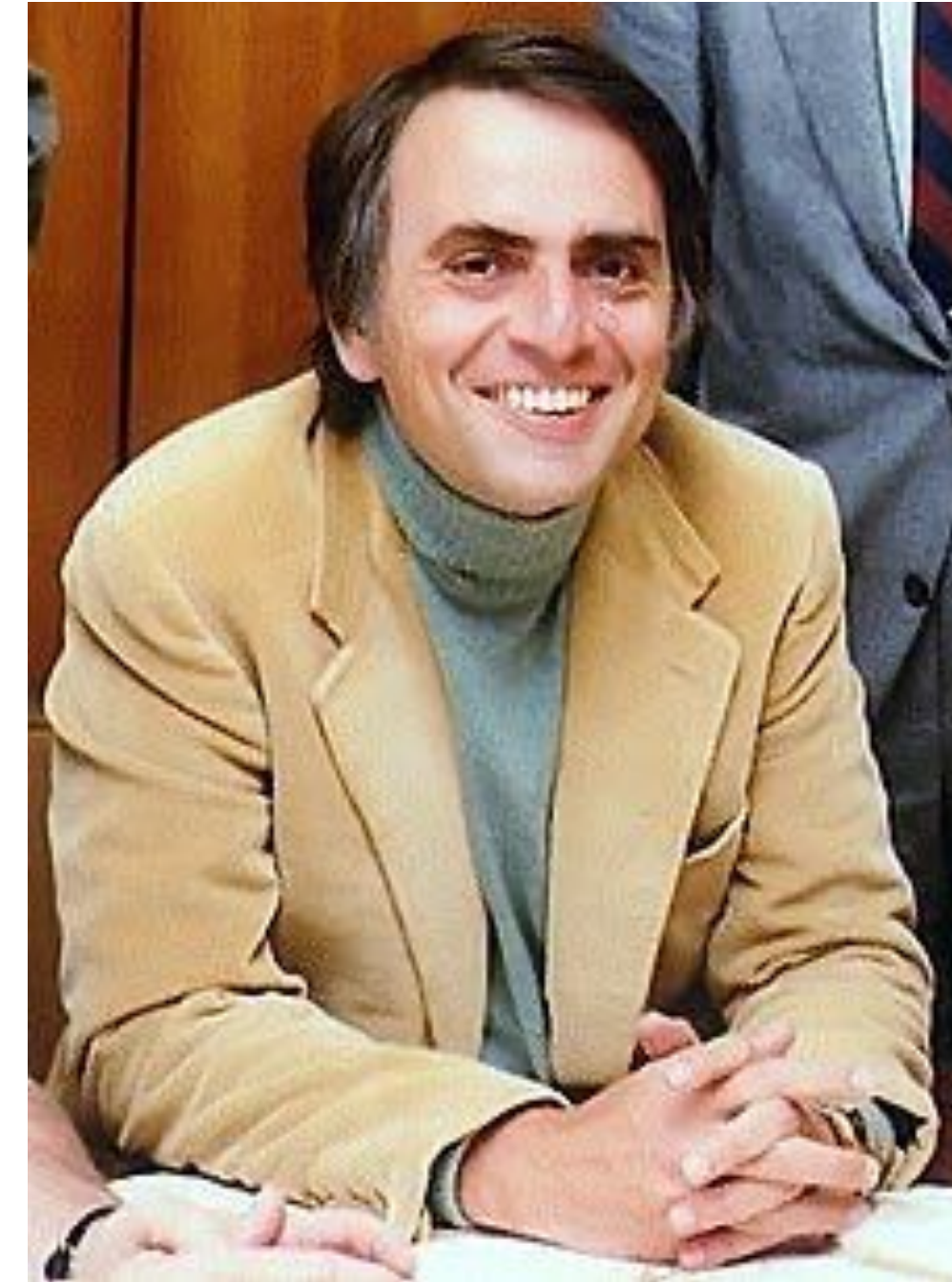
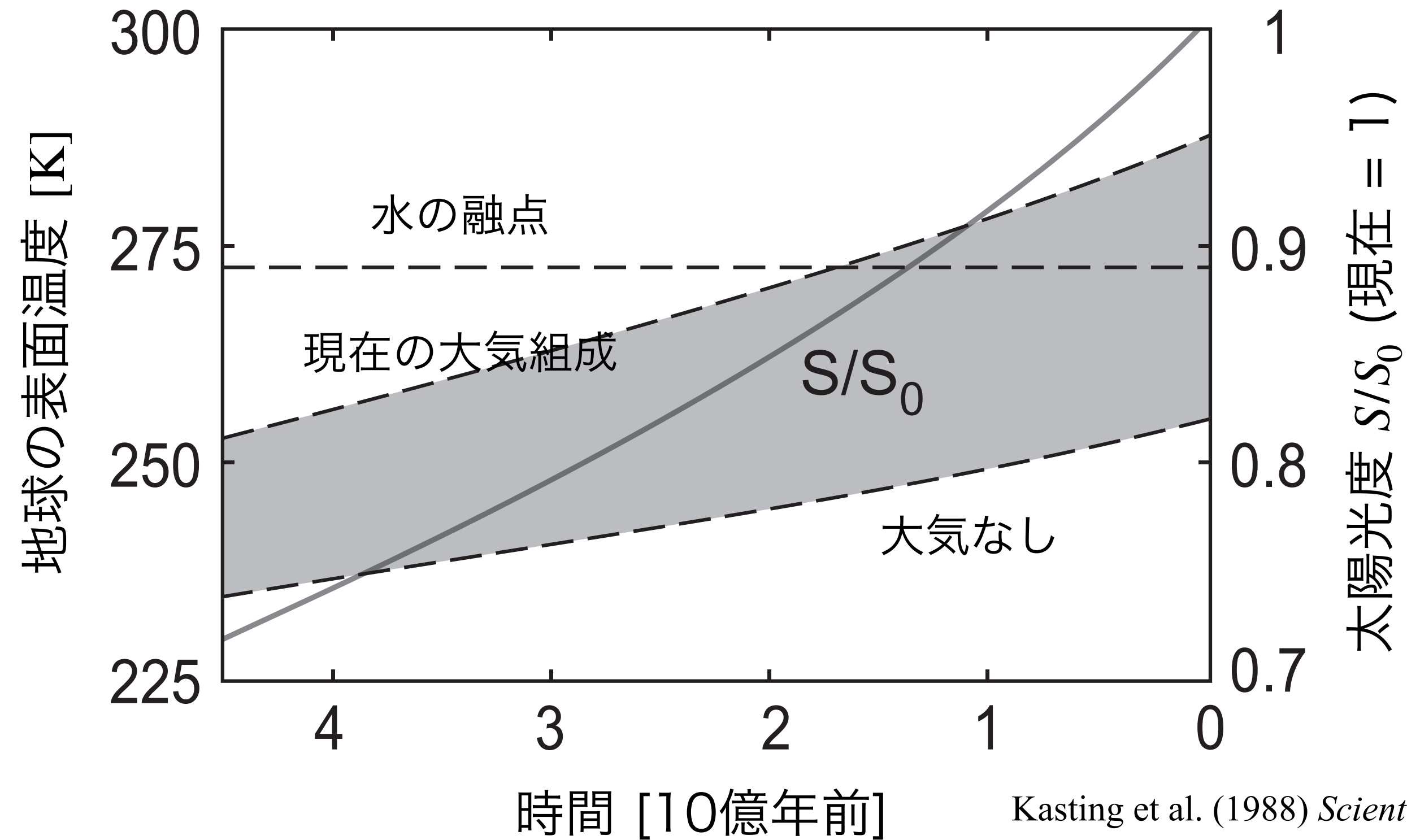
左：現代, 右：太古代のストロマトライト
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ストロマトライト>



氷河堆積物
田近英一氏2011年フロンティアセミナー資料より

暗い太陽のパラドックス

太陽光度と地球の表面温度の進化(モデル計算)



Carl Sagan

40億年前の太陽光度は現在の 70% しかない

→ 現在と同じ大気組成を仮定した場合, 20億年以上前の地球は凍りついてしまう

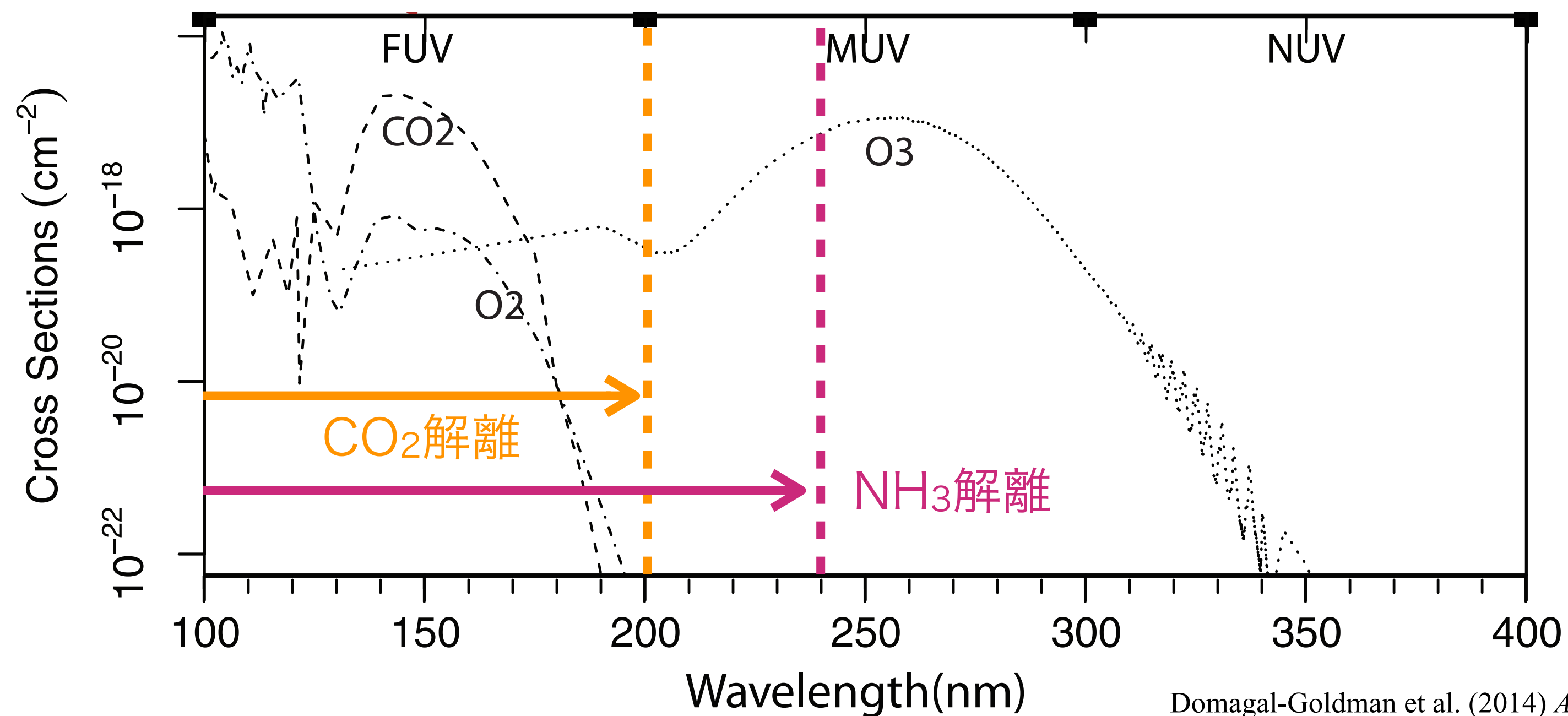
↔ 海が存在した地質学的証拠と矛盾 (Sagan & Muller 1972, *Science*)

暗い太陽のパラドックス解決策一覧

1. CO₂の温室効果 (次ページ)
2. CO₂-CH₄ 大気 (e.g., Pavlov et al. 2000)
3. 少ない大陸地殻と雲 → 低いアルベド (e.g., Rosing et al. 2010)
4. N₂-H₂の衝突励起吸収 (Wordsworth & Pierrehumbert 2013)
5. 厚い N₂ 大気の pressure broadening (Goldblatt et al. 2009)
6. OCSの温室効果 (Ueno et al. 2009)
7. CH₄-NH₃ 大気 (Sagan & Muller 1972)
8. 太陽は重たく明るかった (e.g., Whitmire et al. 1995)

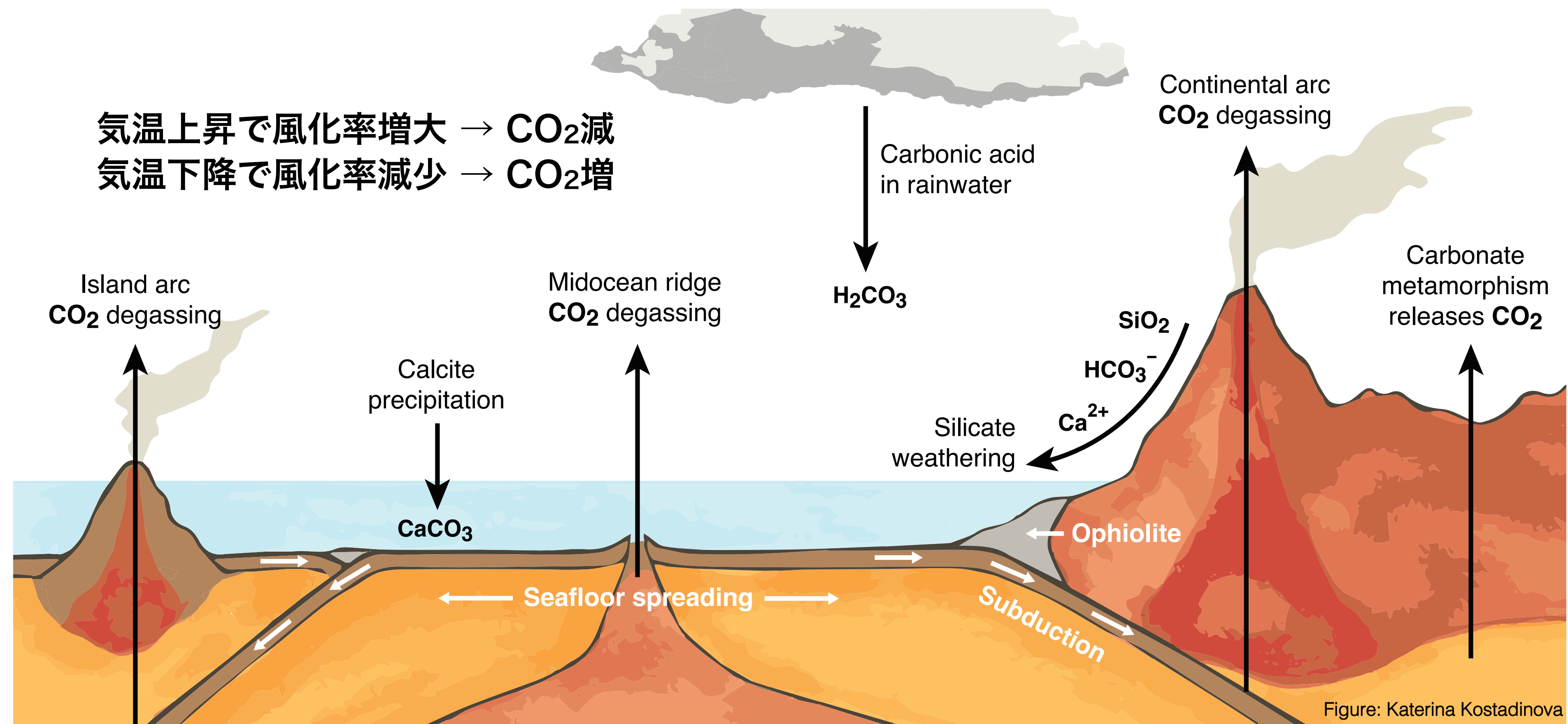
還元的な初期大気モデル

- 近代的な惑星形成モデルが確立する前に好まれていた
- 生命誕生につながる有機化学進化に有利 (Millerの放電実験)
- 暗い太陽のパラドックスを還元的な $\text{CH}_4\text{-NH}_3$ 大気で解決？
 - NH_3 10 – 100 ppmv で十分な温室効果 (Sagan & Mullen 1972). しかし…
 - 地球形成モデルは CO_2 大気を予想
 - O_2 に欠乏した大気中では, NH_3 は $< 230 \text{ nm}$ の紫外線で解離・分解 (Kasting, 1982; Kuhn & Atreya, 1979)



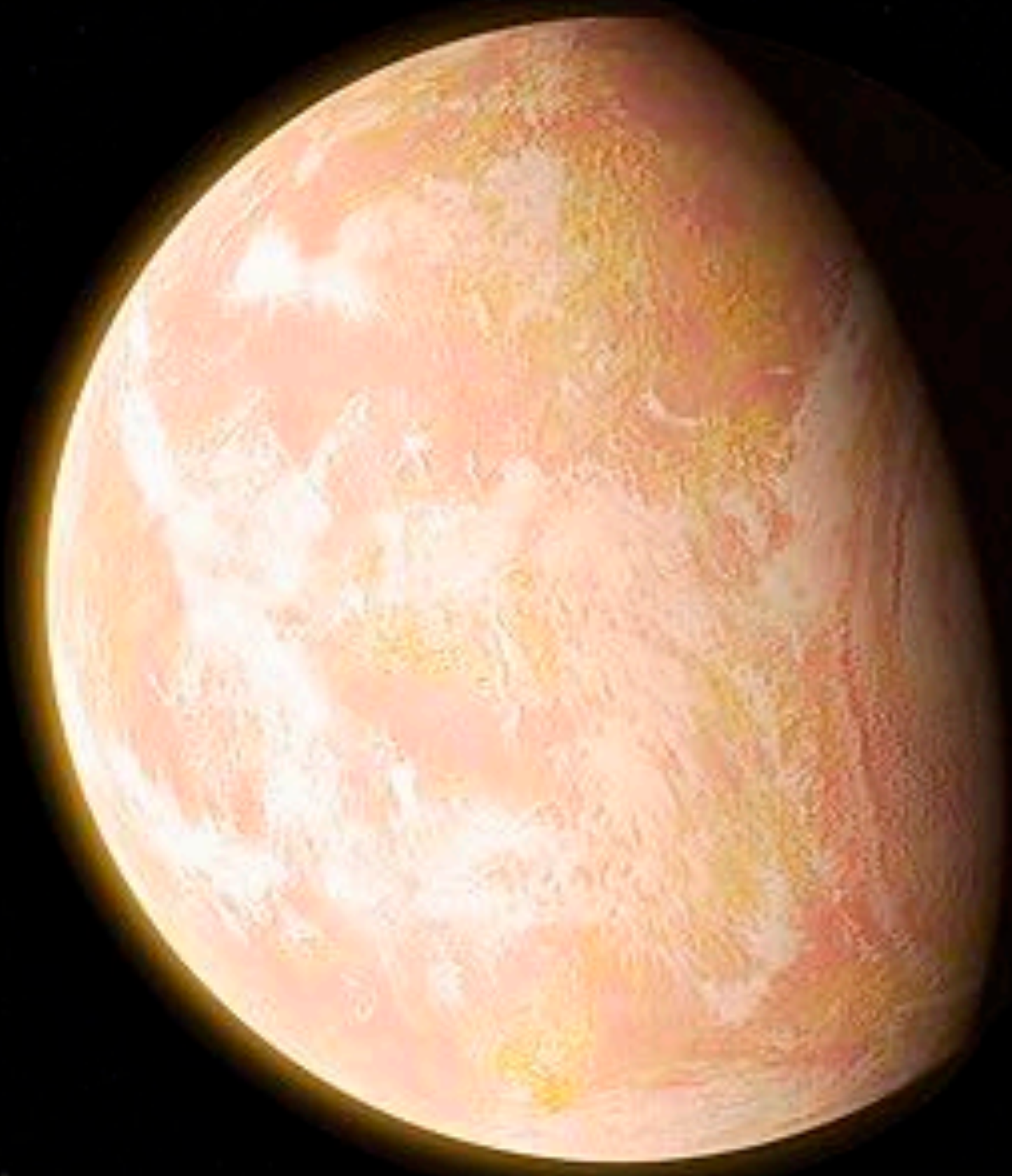
Domagal-Goldman et al. (2014) *Astrophys. J.*

炭素循環 (carbonate-silicate cycle)



- CO_2 の脱ガスと炭酸塩岩への固定のサイクル (時定数 $\sim 10^{6-7}$ 年)
- 太陽光度変化($\sim 10^{8-9}$ 年)の影響を打ち消すように働く (Walker et al. 1981 *J. Geophys. Res.*)

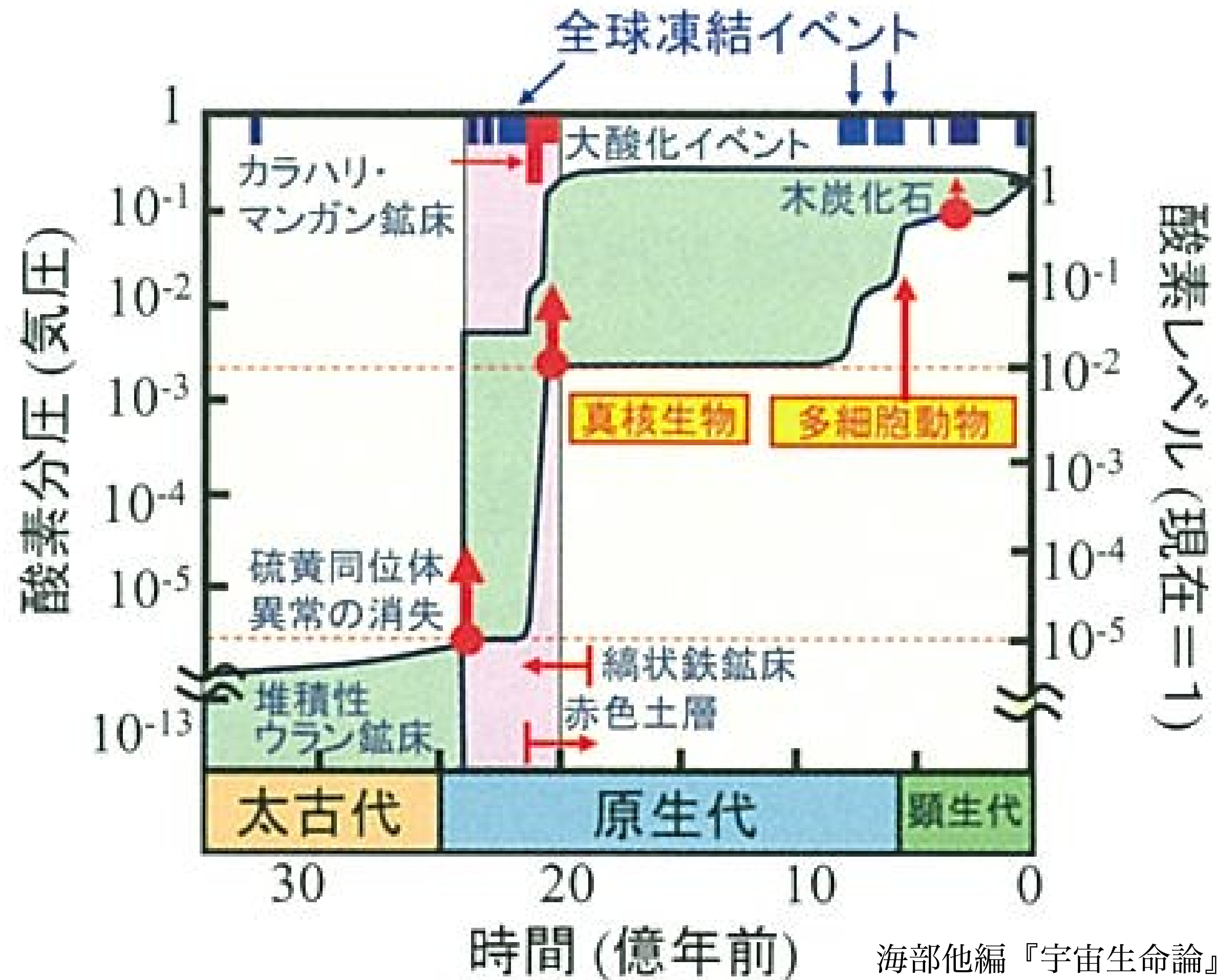
初期地球のメタン大気？



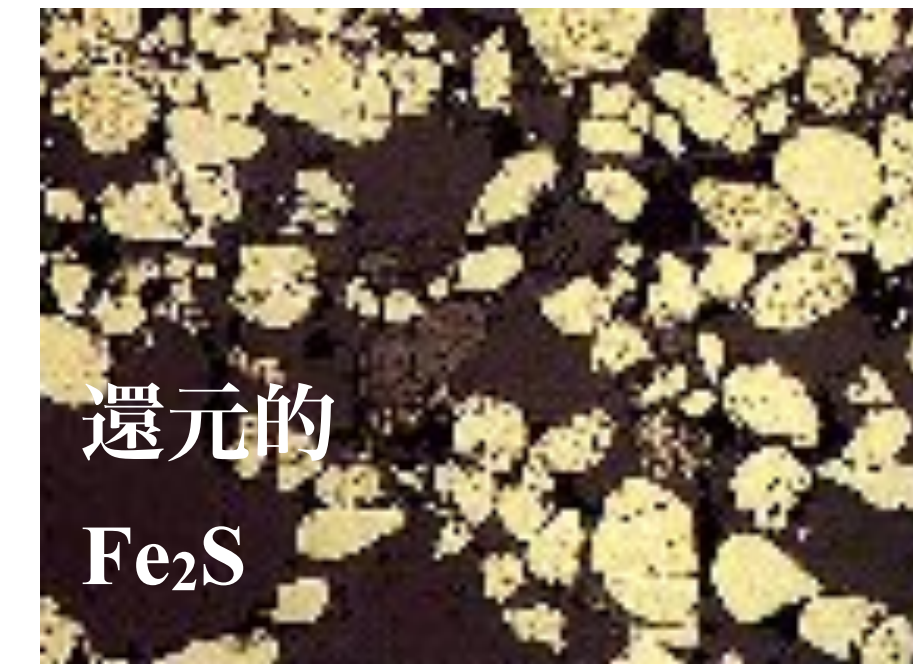
- 温室効果ガスとしてCH₄は着目されてきた (e.g., Pavlov et al. 2000)
- [CH₄]/[CO₂] \geq 0.1 で有機物ヘイズ (e.g., タイタン大気) が生成 (e.g., Trainer et al., 2006)
- CH₄による温暖化 or ヘイズによる寒冷化？
(e.g., Pavlov et al. 2001; Arney et al. 2016)

CH₄由来の有機物ヘイズに覆われた地球
'Pale Orange Dot' (Arney et al. 2016)

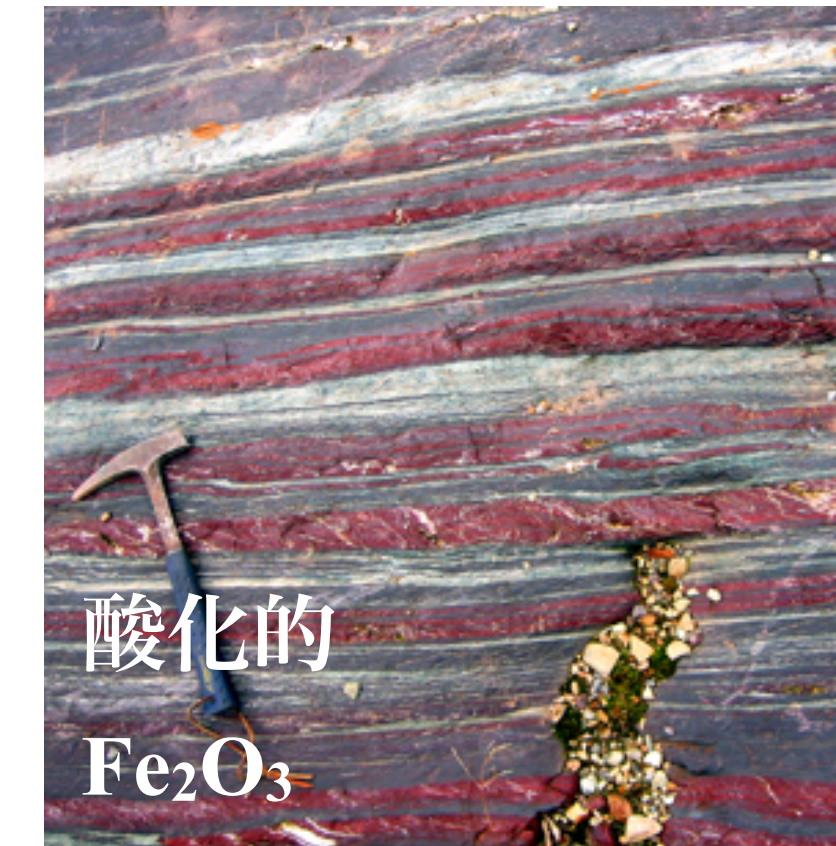
(弱)還元的な太古代大気と大酸化イベント



碎屑性黄鉄鉱(detrital pyrite)

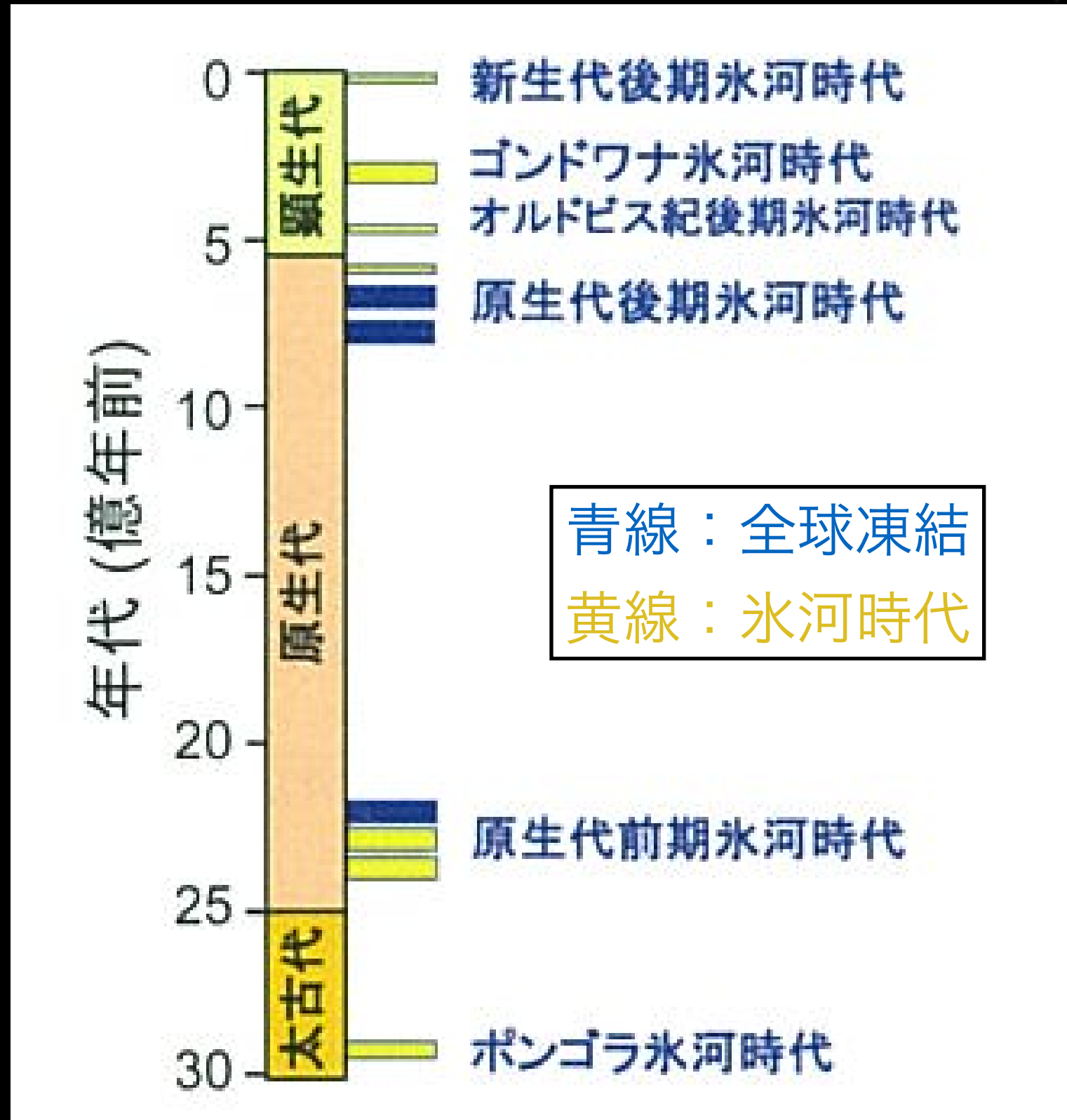


縞状鉄鉱層(BIF)



- 太古代大気は O_2 に乏しい
- 24億年前に O_2 濃度が2-3桁上昇する大酸化イベント (光合成 O_2 の蓄積)

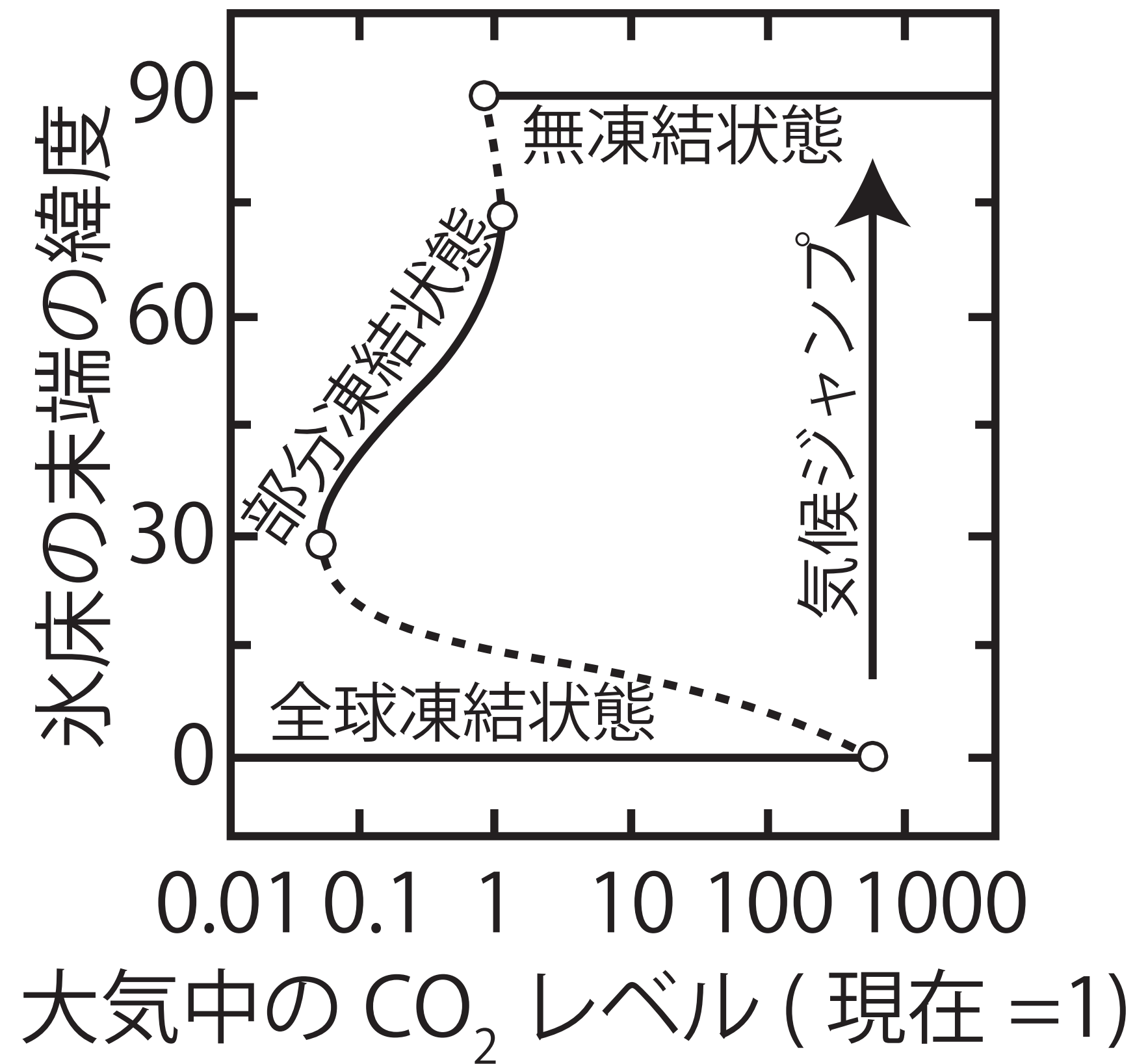
全球凍結(スノーボール・アース)



海部他編『宇宙生命論』

- 赤道域まで氷河に覆われる全球凍結を複数回経験
- 全球凍結から回復するためには、継続的な温室効果ガスの供給(CO₂脱ガス)が必要
- 全球凍結状態になる原因は未解明
- 24億年前の大酸化イベントと同時期に全球凍結
→ 還元的な温室効果ガスが酸化で失われた？

地球気候の多重平衡解



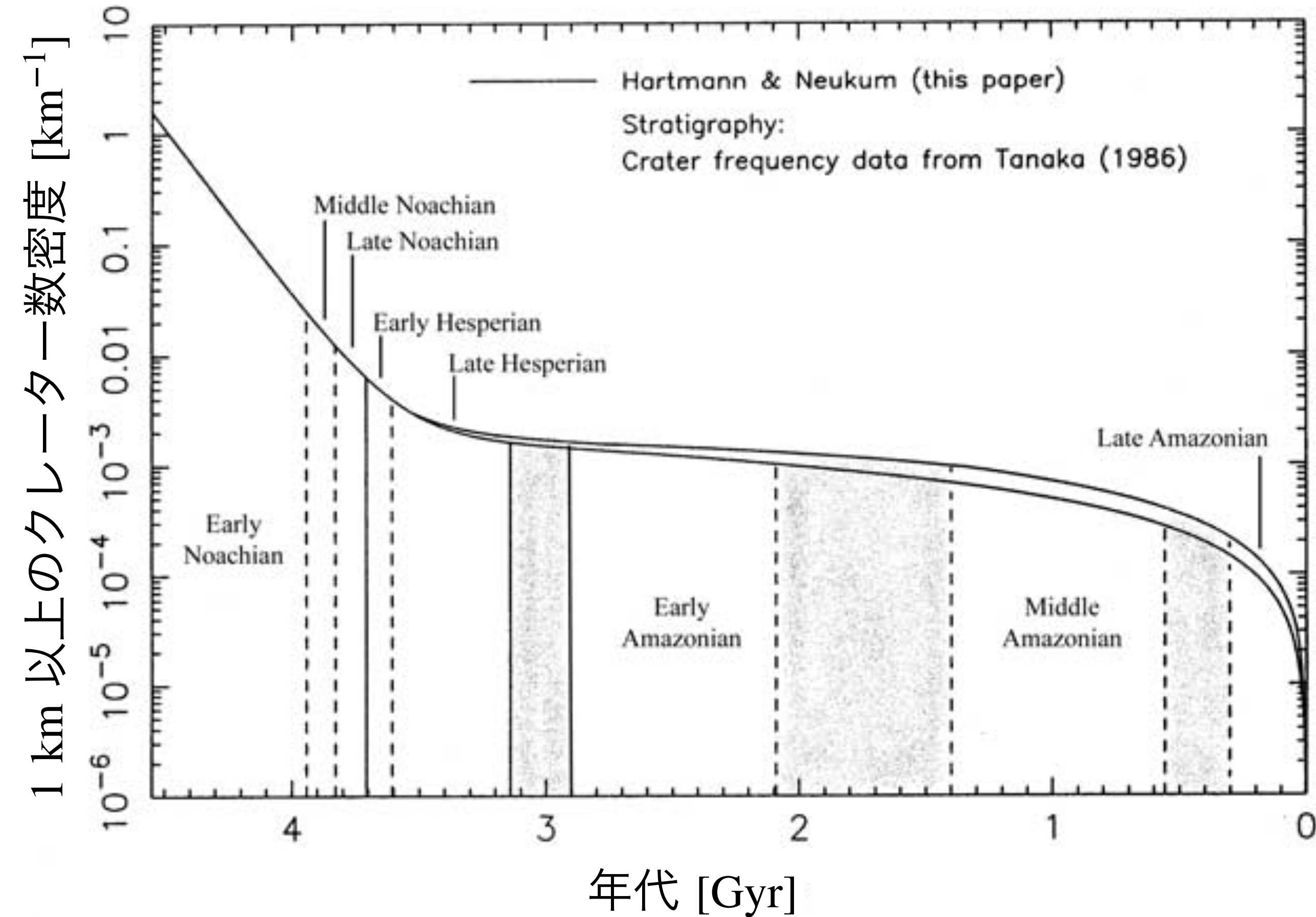
門屋他 (2012) 日本惑星科学会誌, Vol. 21, No. 3.

- アルベド(反射率)が高く寒冷な全球凍結状態は安定解
- 何らかの要因によって温室効果が低下すると全球凍結
- 再び温室効果ガスが蓄積すると温暖な解に移る

4.3 火星史

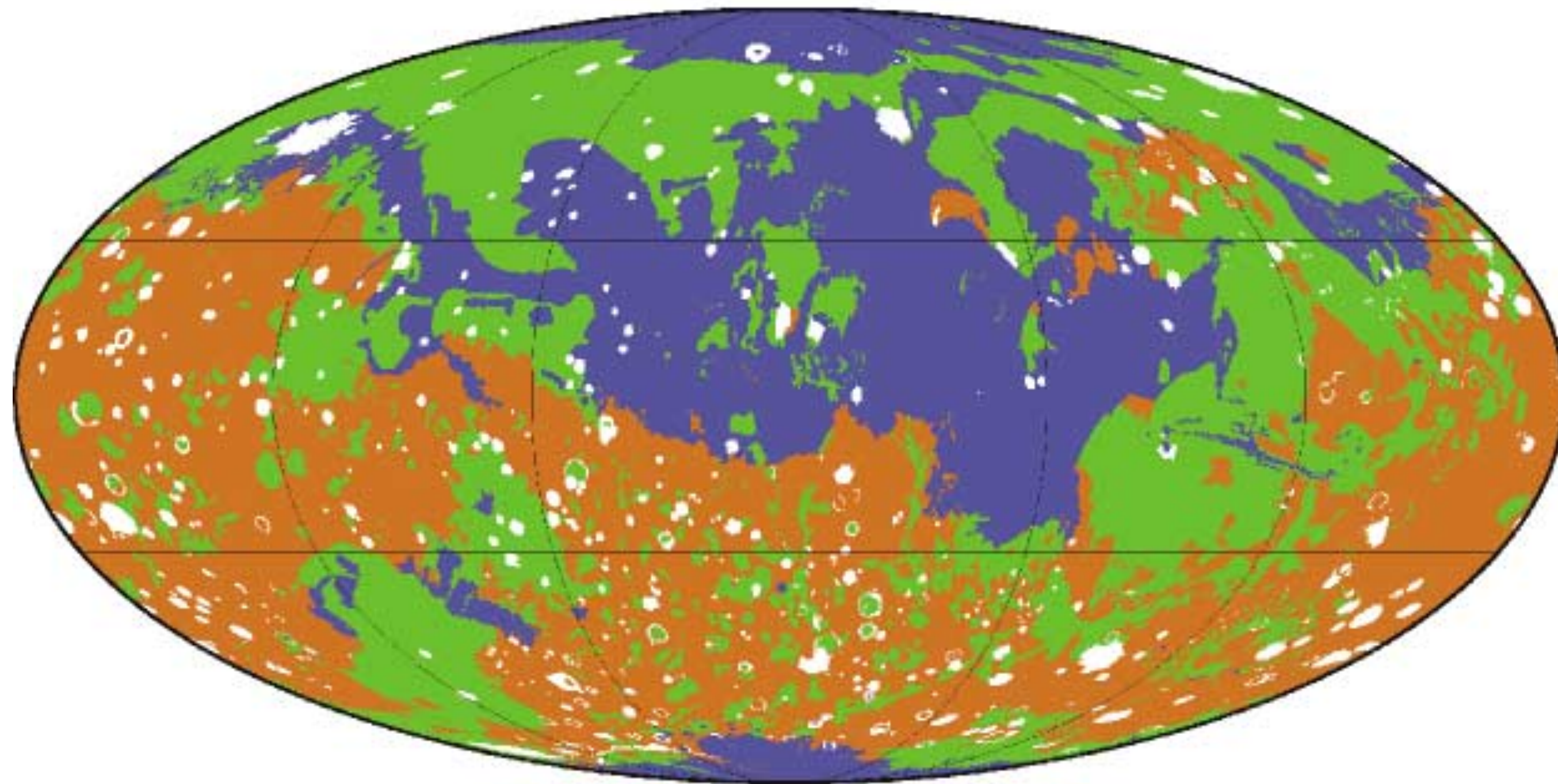
クレーター一年代

月データから構築された火星のクレーター密度-年代モデル



- 火星：直接的な表面物質の年代測定がない (Curiosity着陸地点のみ; Farley et al. 2014)
- ↔ 月：Apollo 試料の年代測定
- 月と火星への天体衝突頻度比にもとづいて火星のクレーター密度-年代モデルを作成

火星表面の年代マップ



■ Amazonian ■ Hesperian ■ Noachian

Solomon et al. (2005) *Nature*

プレ・ノアキアン	45 - 42 億年前
ノアキアン	42 - (37-35) 億年前
ヘスペリアン	(37-35) - (33-29) 億年前
アマゾニアン	(33-29) 億年前 - 現在

- 古い地殻が全球的に残っている
cf.) 地球：海洋地殻~1億年，大陸地殻~20億年
- 南半球が古く，北半球が新しい

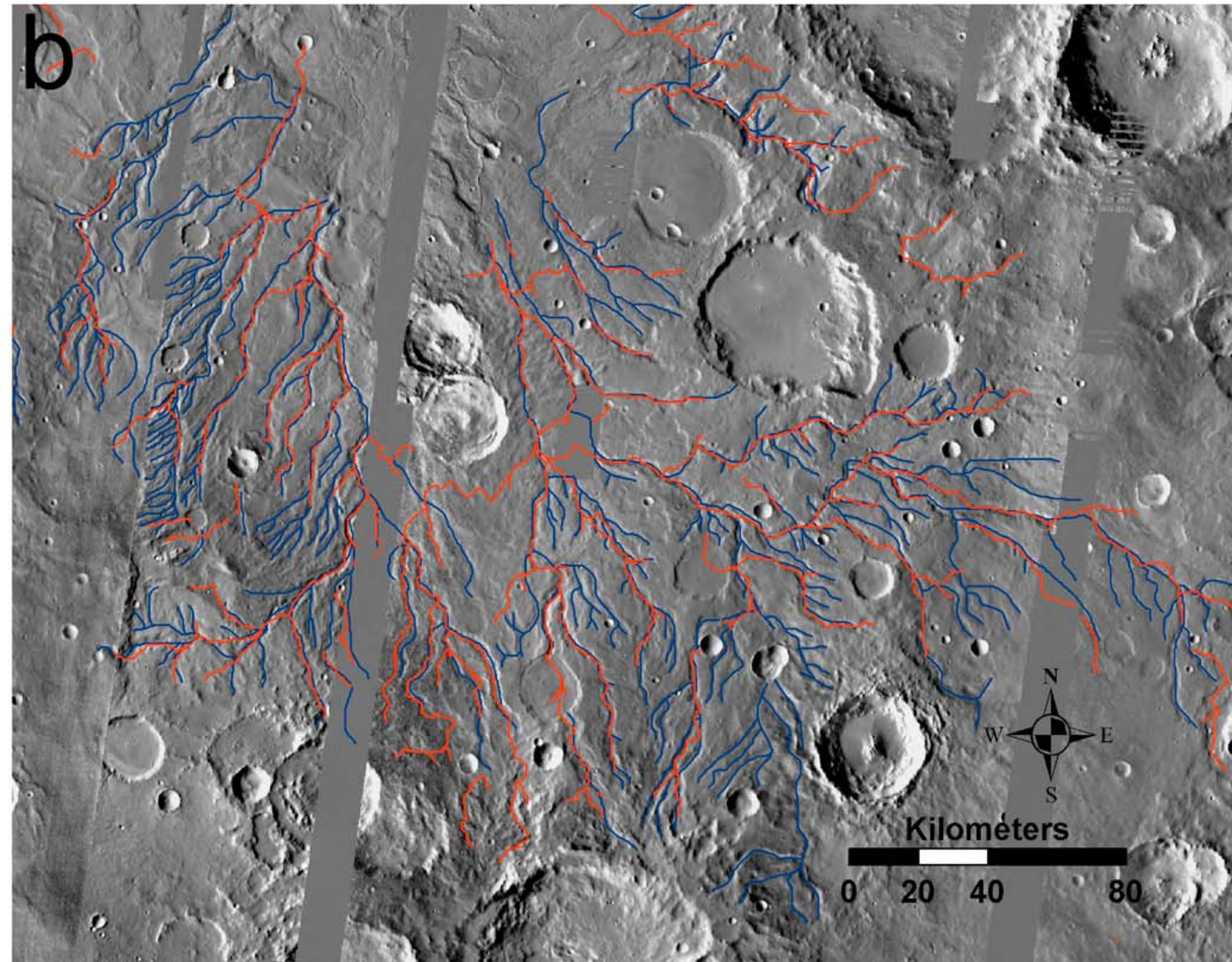
地表記録にもとづく火星史の概要



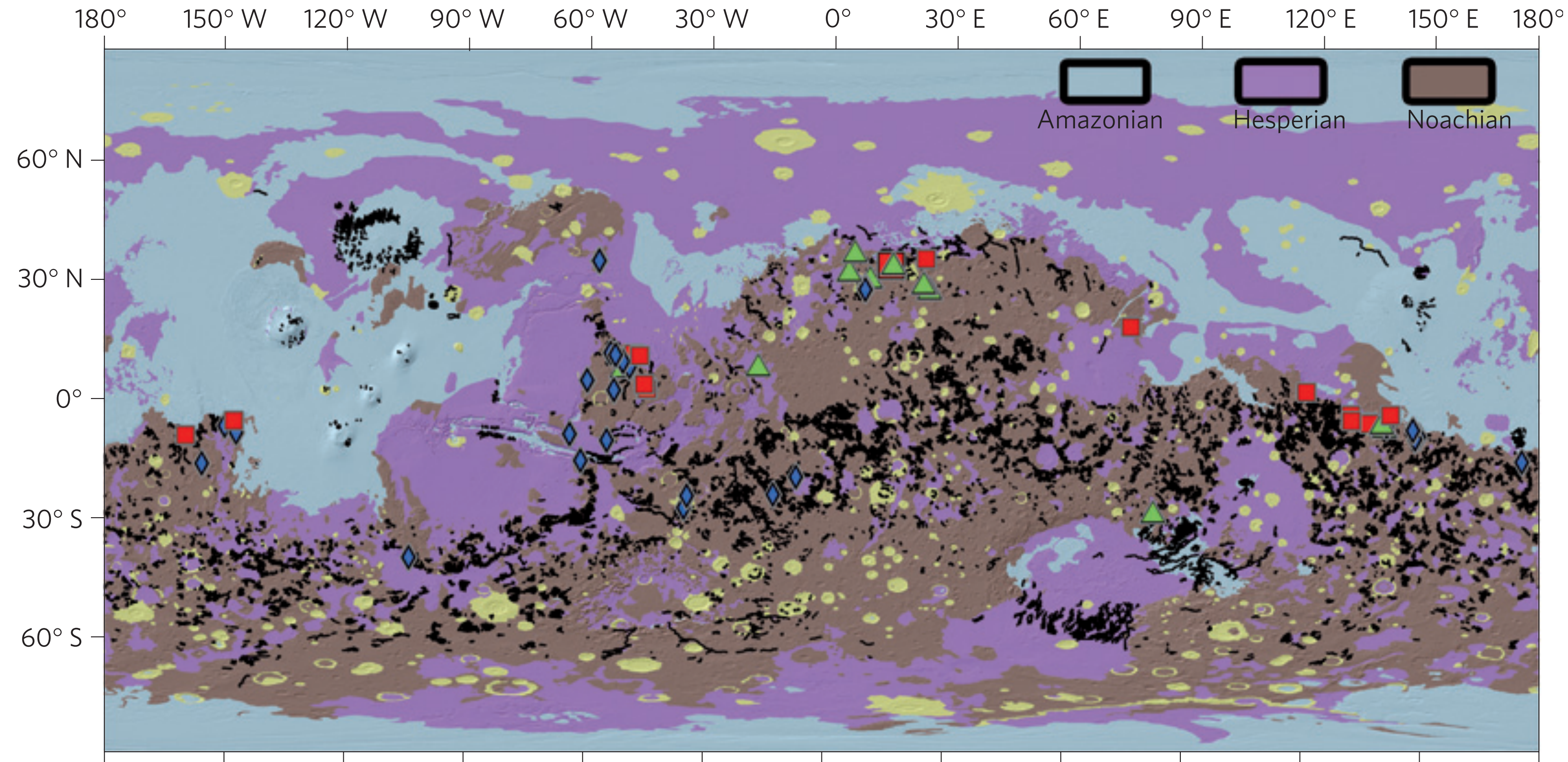
バレー・ネットワーク (網目状溪谷)

バレー・ネットワーク(青). 赤は別の研究のマッピング

バレー・ネットワーク分布 (黒). 他のシンボルは三角州



Hynek et al. (2010) *J. Geophys. Res.*

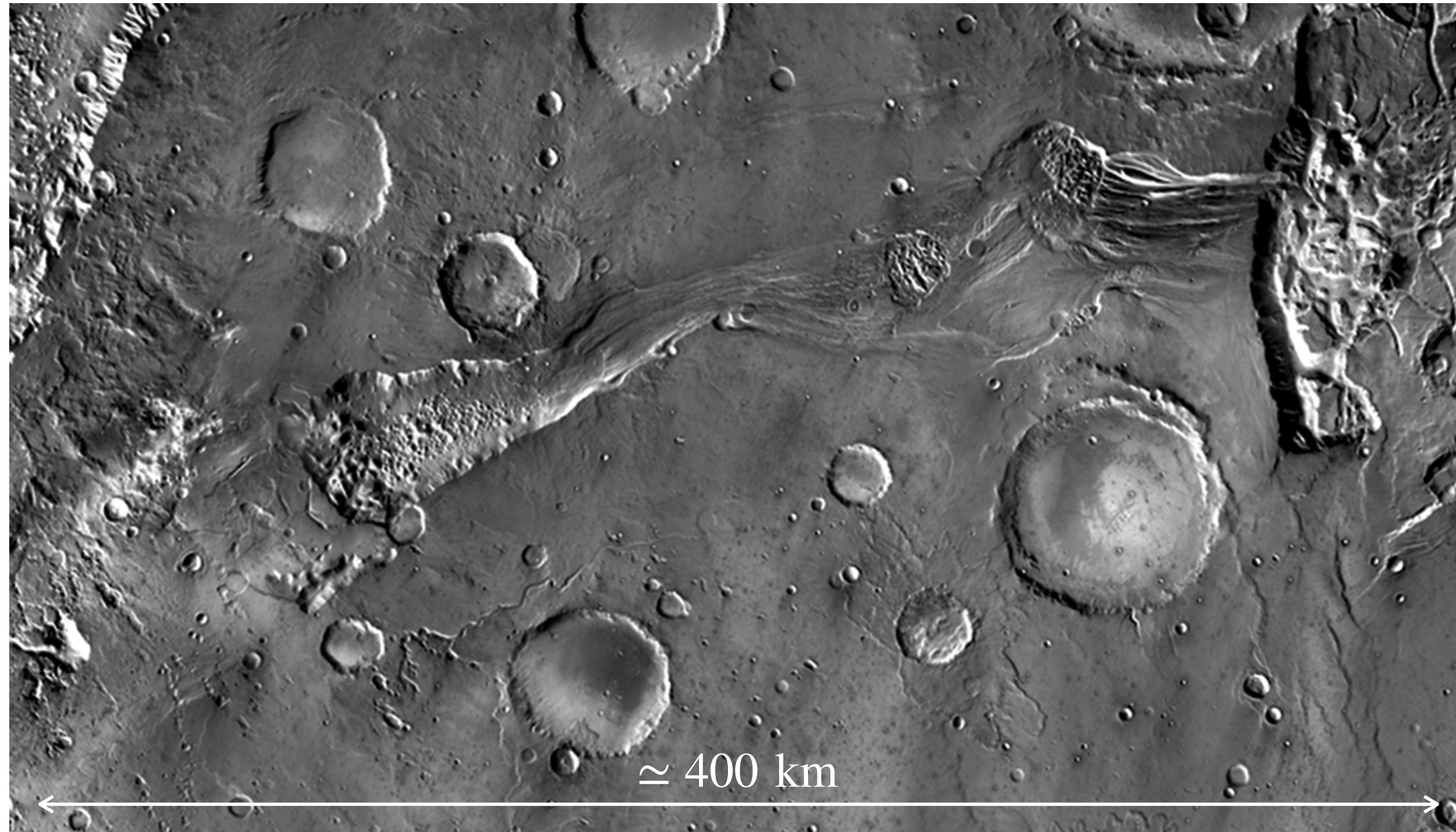


Di Achille & Hynek (2010) *Nature Geosci.*

- ノアキアンに多く存在
- 積算 $> 10^5$ yr の水の流れによって形成 (Kite et al. 2019, *Space Sci. Rev.*)

アウトフローチャンネル(洪水河床地形)

アウトフロー・チャンネルの例

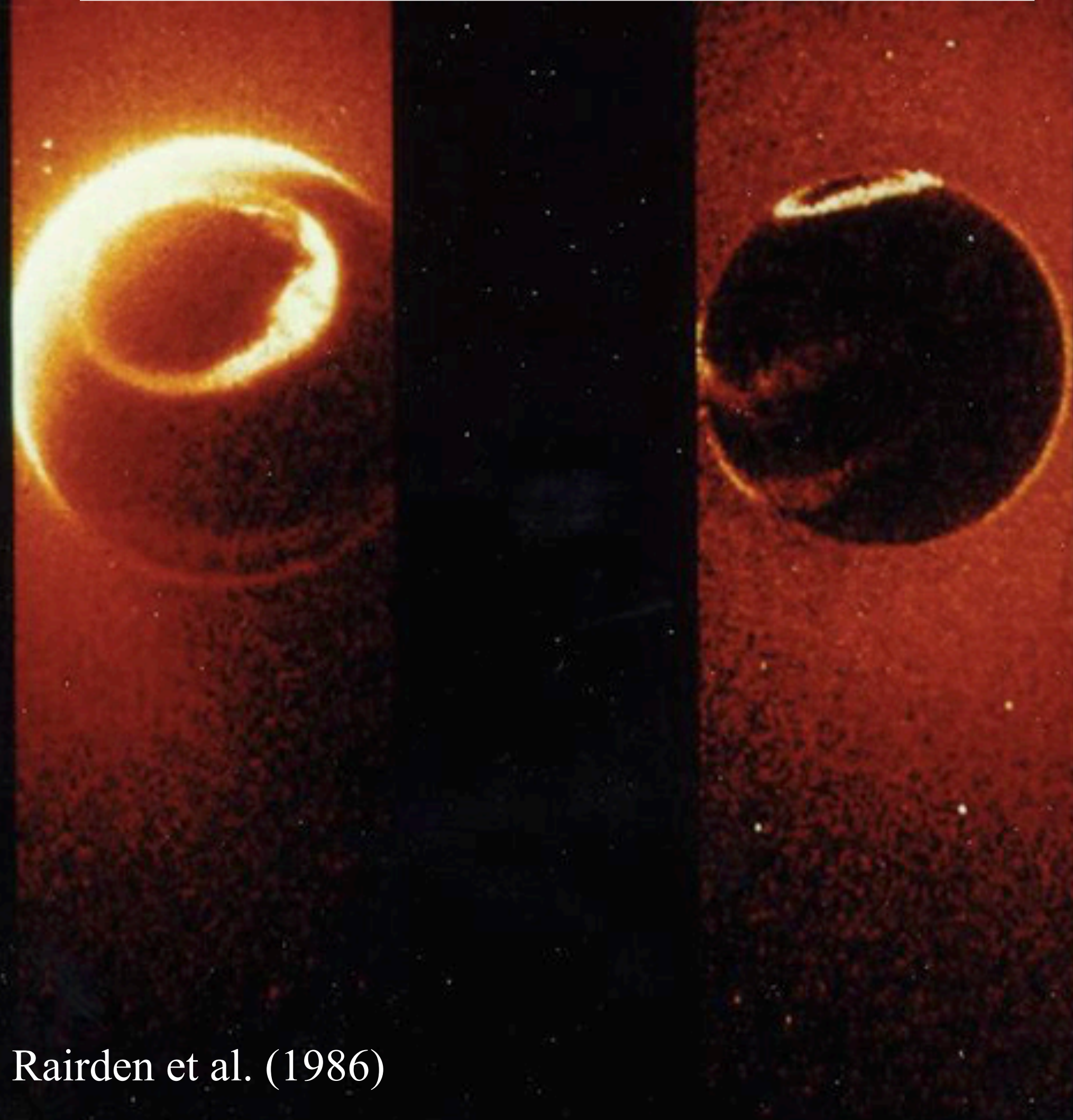


Courtesy: NASA/JPL/ASU

- ヘスペリアン ~ 初期アマゾニアン
- 大規模(幅: 20 – 100 km, 長さ: 1000 km)
- 大量の水が短期間に削った
- 地下水の湧き出し? (Baker, 2006; Baker et al., 2015)

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)

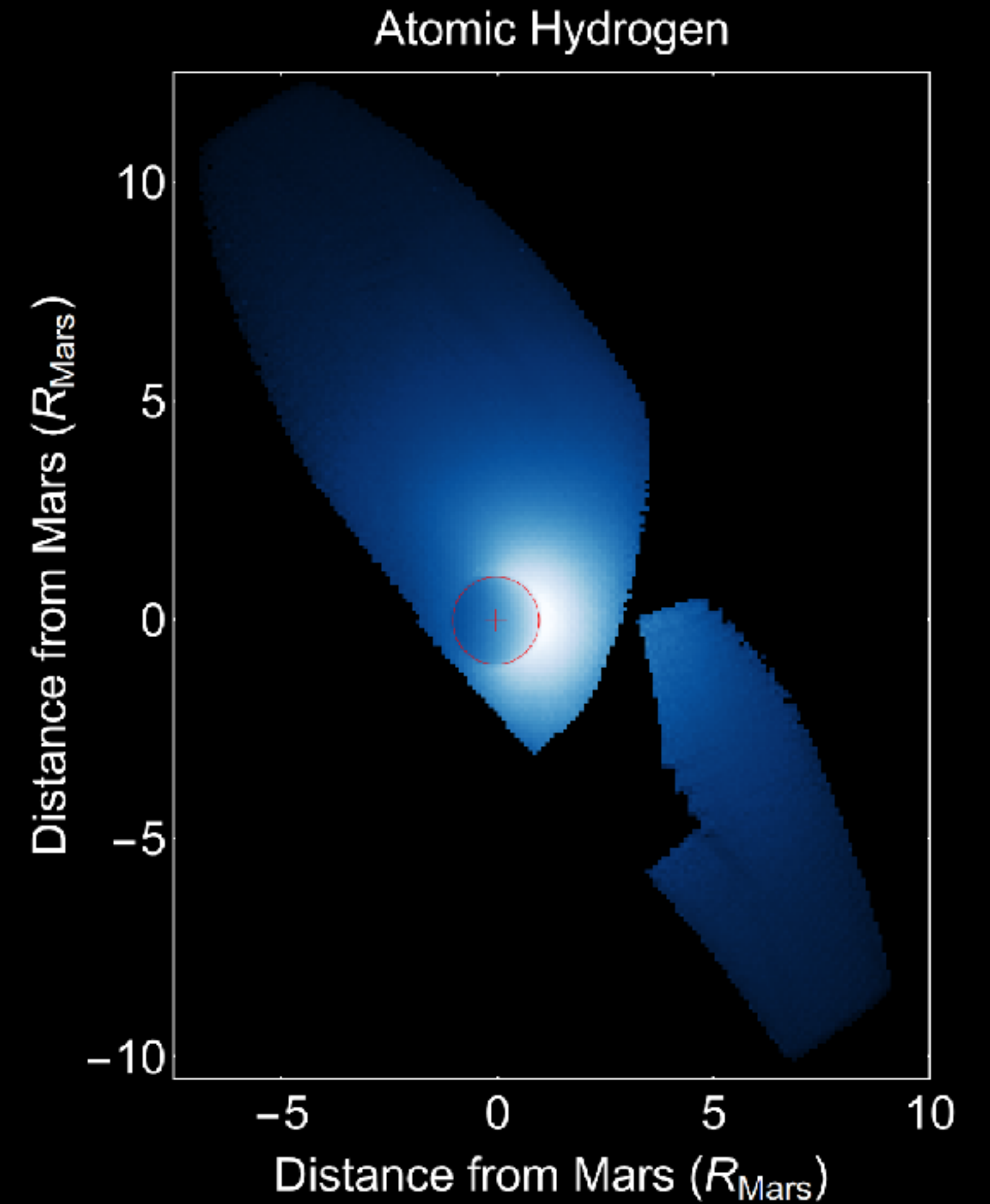
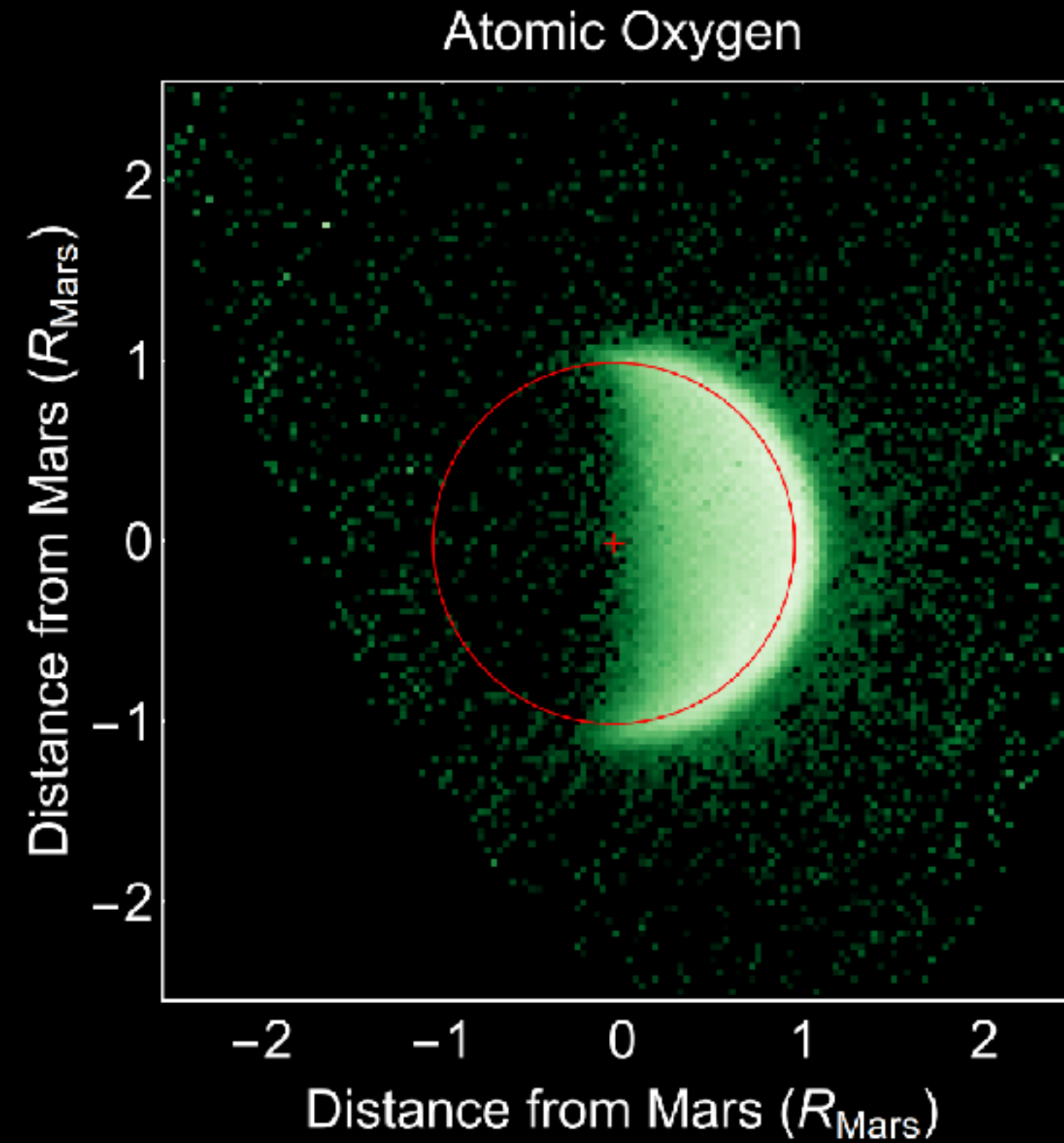
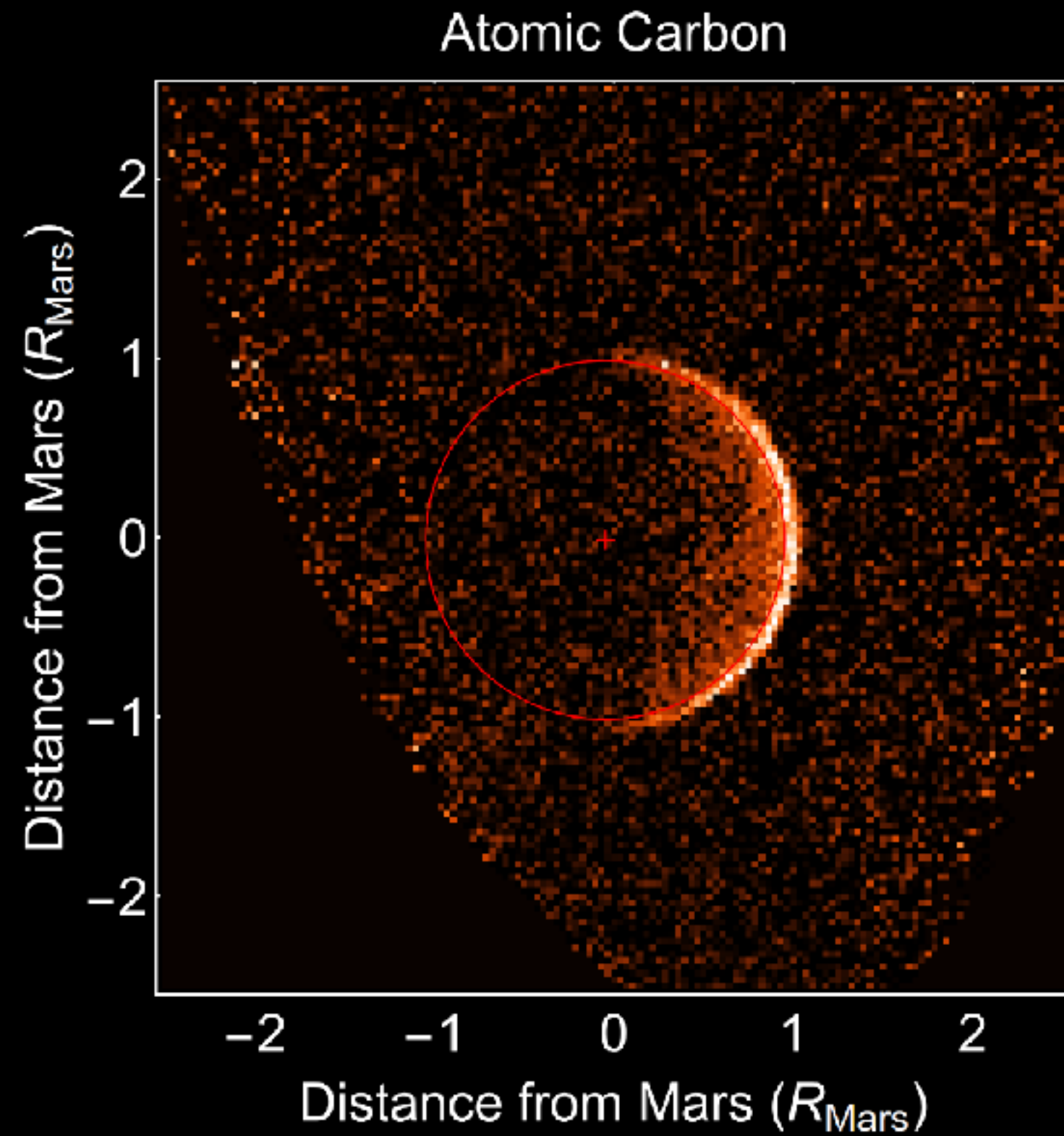


- 地球を取り囲んで広がる水素が太陽光 (Lyman- α) を散乱
- 海水起源の水素が流出(**大気散逸**)している

Rairden et al. (1986)

火星の大気散逸

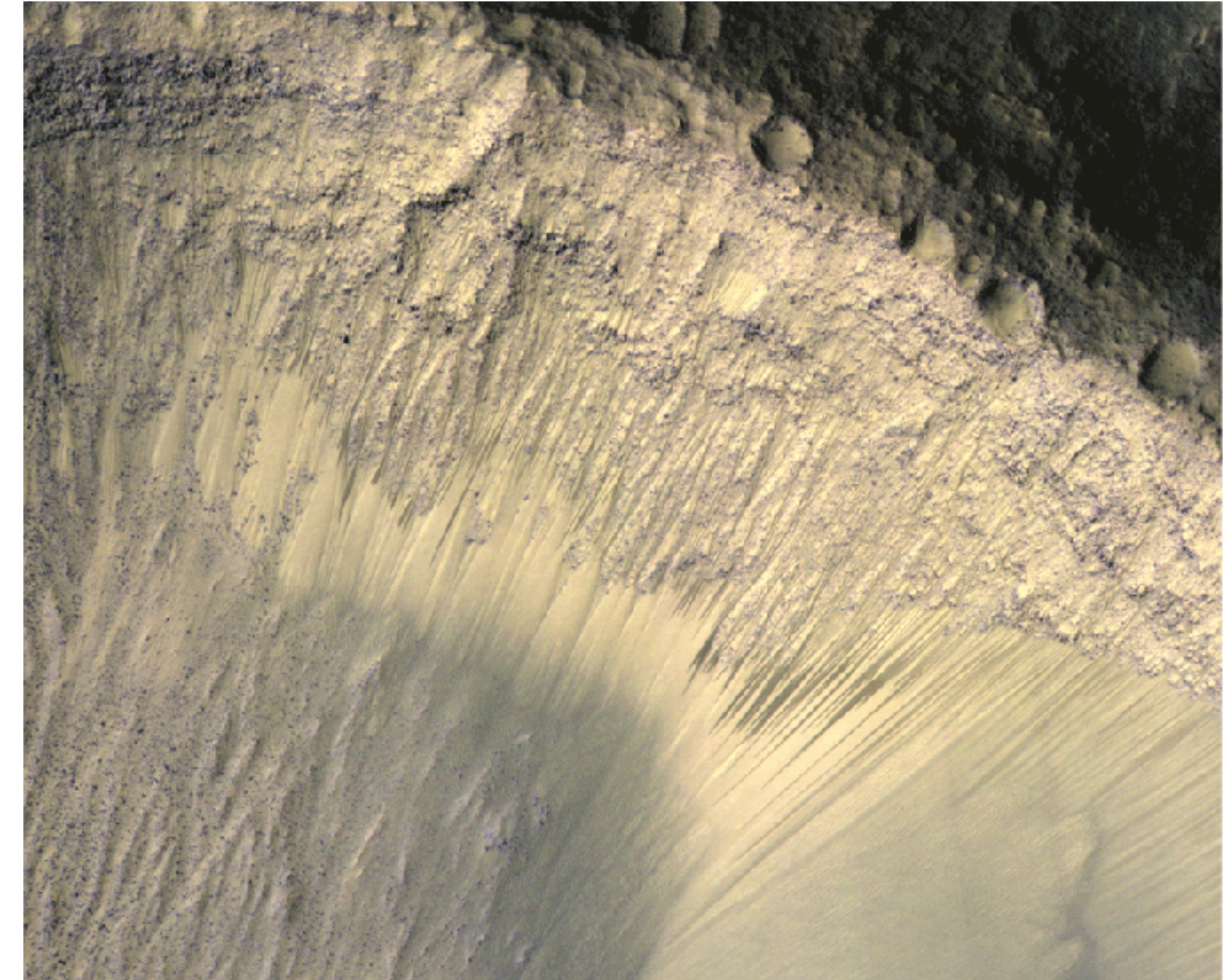
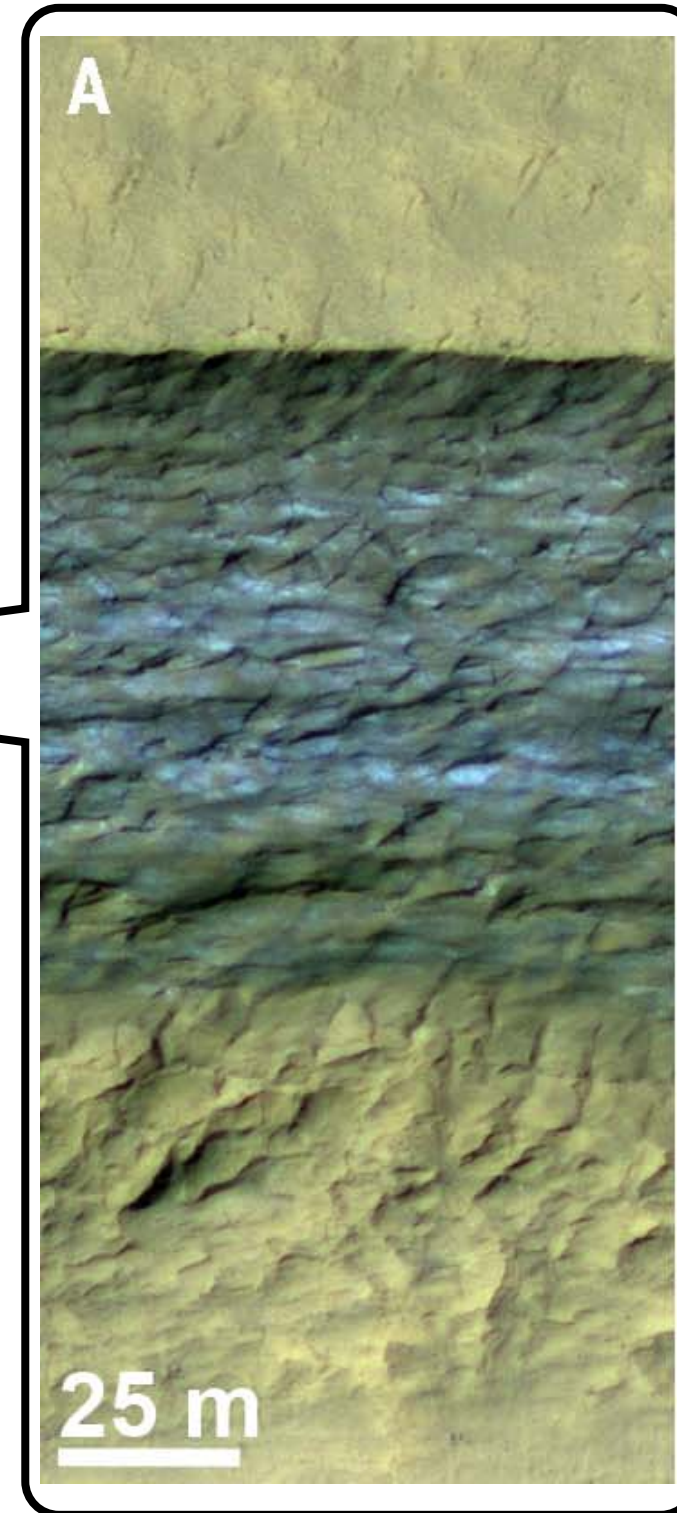
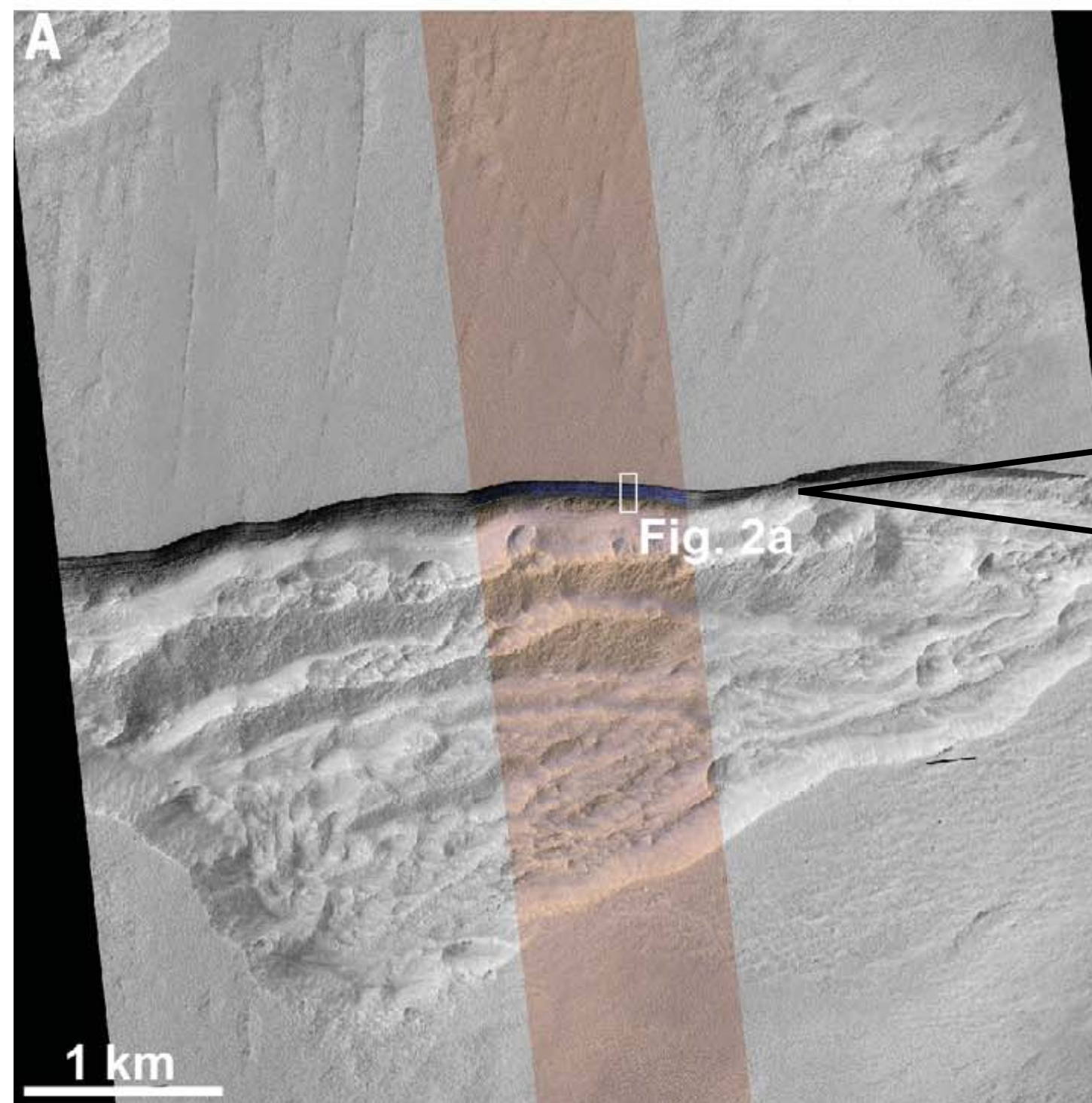
探査機MAVENによる火星の散逸大気観測 (credit: Univ. Colorado, NASA)



火星の地下水(氷)

中緯度の断崖に露出した氷 (Dundas et al. 2018)

中・低緯度の斜面に見られる流水(?)地形 (McEwen et al. 2014)



- 理論的には、中緯度 ($> 30^\circ$) では地下水が安定. 過去の表層水が貯蔵されている?
- 低緯度でも春・夏に水が流れているかもしれない地形 (Recurring Slope Lineae, RSL) がある
- 火星史を理解する上でも重要だが、将来の有人探査の資源としても着目されている

火星気候変動の原因は何か？

- 磁場の消失にともなって非熱的散逸で大気を失った、というのが古典的描像
- しかし、そもそも純粋なCO₂大気では平均気温が 273 K を上回らない
- 温室効果をサポートするもの
 - CH₄：初期火星では温室効果が非効率的 (前回の講義)
 - H₂S, SO₂：温室効果は期待できるが、エアロゾルを生成して寒冷化 (Tian et al. 2014)
 - H₂：温室効果は期待できるが、供給がないと熱的散逸で失われる
 - 高層雲 (Kite et al. 2021)：乾燥した火星でのみ機能
- 地形・含水鉱物の記録 → 温暖な時期があった (がずっと温暖でなくてもいい) (Ehlmann et al. 2011; Kite et al. 2019)
→ 長期的には寒冷な気候で、脱ガス (SO₂, H₂) や水の消失 (高層雲) に伴って一時的に温暖化？
(e.g., Wordsworth et al. 2021)

まとめ

惑星の形成と分化

- 惑星は溶融状態で誕生
- コアの分化, 揮発性元素の分配 → 惑星環境の初期状態を決定

地球史

- 海の形成と炭酸塩固定
- 暗い太陽のパラドックス → 炭素循環がCO₂温室効果を調整. 還元的なガス(CH₄, H₂)の寄与?

火星史

- 水の流れた跡: バレー・ネットワーク, アウトフロー・チャンネル
- 火星の気候変動の要因: 大気散逸?

レポート課題 (今日提出)

惑星の表層環境を左右する要素として、どのようなものが考えられるか、そう考える理由は何か、できるだけ多く書き出してみましよう。

(例：恒星からの距離 → 恒星から遠いほど受け取る光の量が少ないので寒冷)