

第64回火星勉強会

**Review of
The Climate of Early Mars
(初期火星の気候)**

by Robin D. Wordsworth

Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 44, 381–408 (2016)

黒田剛史 (東北大学)

2020年6月5日

要旨

初期火星の気候の特徴は、惑星科学における主要な未解明の「問い」の一つであるが、この10年の間に周回軌道・その場観測と気候モデルの改良により理解が進んできた。

地質に残る証拠から、Noachian後期～Hesperian初期(30～40億年前)は(少なくとも一時的には?)暖かい地表だったことが示されているが、初期太陽の放射は弱く、また当時的大気成分(CO_2 など)も温暖化に効率的とは言えず、定常な初期火星気候はおそらく冷たかったと考えられる。

濃密な CO_2 大気は地表の寒冷化をもたらし、 H_2O 氷の堆積を赤道域の高地や南半球にもたらしした。一時的な温暖化が雪や地表の氷を融解し、一時的に水循環が活発になり、valley networksや他の流水地形を作ったと考えられる。

ただしその一時的な温暖化のメカニズムは明らかではない。隕石衝突、火山、軌道強制力などが可能性として考えられる。

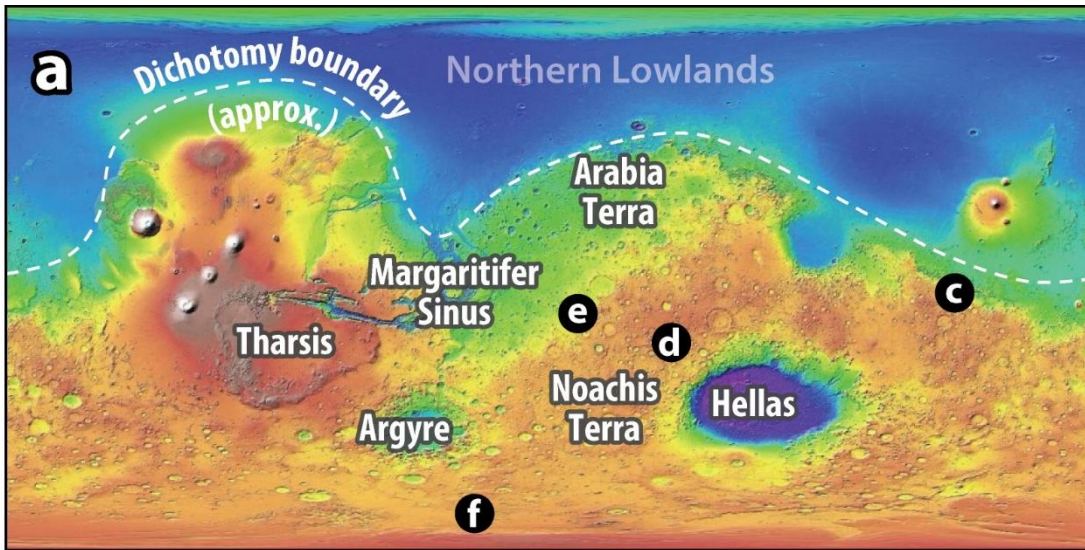
古い火星地表には氷河の痕は見られず、よってNoachian後期の地表の水量は北半球に海を維持するには十分ではなかった。とはいえ、初期火星が微生物を作るのに適した環境であった可能性はある。

1. Introduction

- 火星には1960年代のマリナーフライバイ以来、11の周回線と7の着陸機(2020年6月時点では12周回線、8着陸機)が成功裏に観測を行い、地球地上からの観測と合わせてその大気と表層についてはかなり理解が進んでいる。
- 最大の謎は30～40億年前の初期火星の気候
冷たいはずなのに、液体の流水痕が数多くある
- 火星にはプレートテクトニクスがない、海がない、生物圏がない
だから30～40億年前の地形が現在にそのまま残っている
- 初期火星の気候を研究する意義:
 - 単純な未知のことに対する興味
 - アストロバイオロジー見地(生命の痕跡を見つけるにあたりどこを探せばいいか)
 - 地球とのシナジー(火山や隕石衝突の気候への影響)
 - 系外惑星研究に向けたテストケースとして

2. Geologic Evidence for Liquid Water on Early Mars

- 火星地質は周回軌道からのpassive/activeリモートセンシングとその場観測から理解、地形学的→最近は鉱物学的理解も

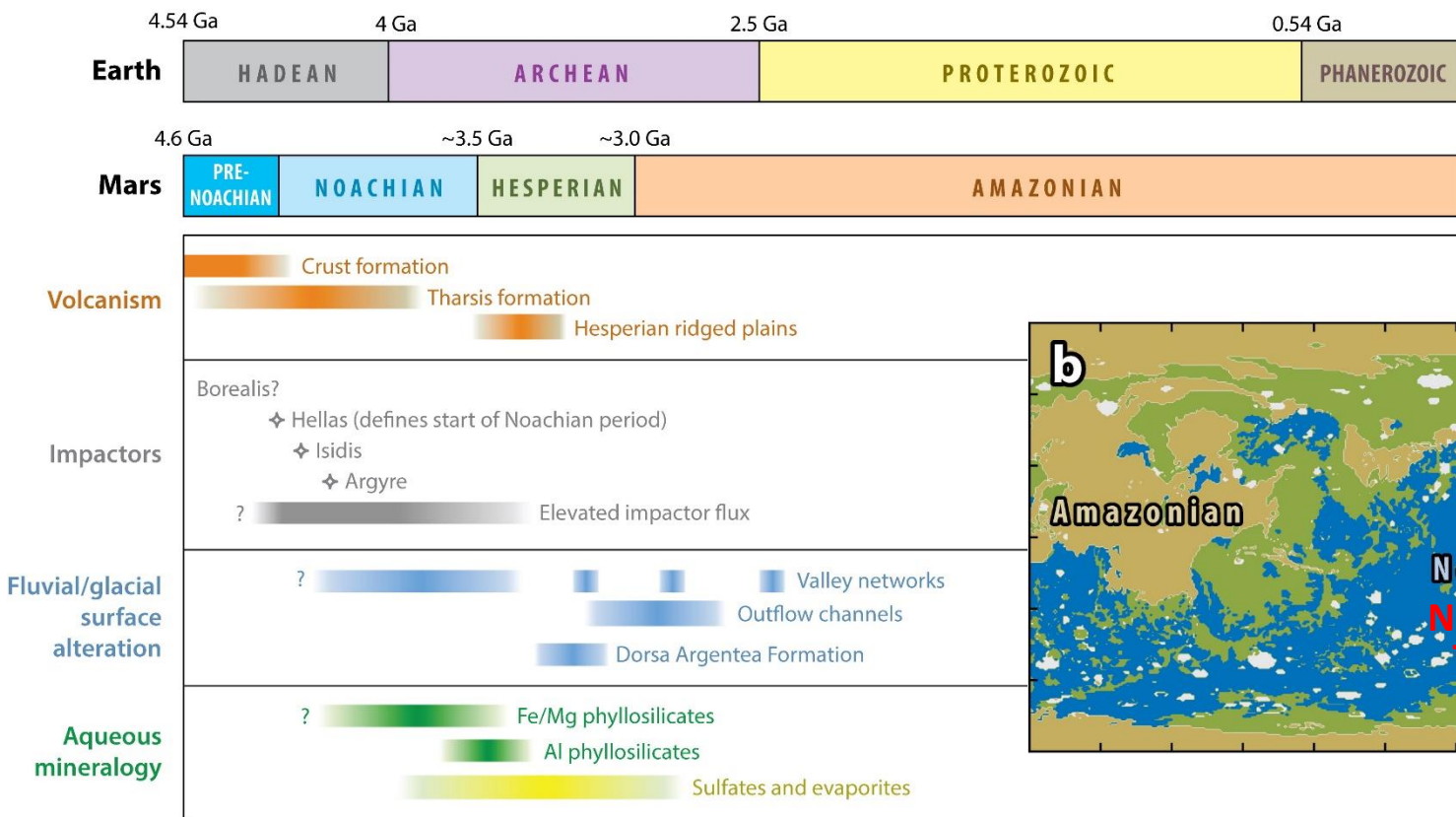


火星地形の大きな特徴4点

1. 南北二分性
2. Tharsis山地
3. Hellasクレーター
4. Argyreクレーター

- 地形は気候や水循環に大きな影響を与えるから、これらの地形がいつできたかはとても重要
- 火星には地質年代学的データがないので、表層の相対的年代はクレーターのサイズ・頻度分布から(クレーター統計学)、絶対的年代は衝突対フラックスモデルから求めるが、不確定性大

火星の地質時代

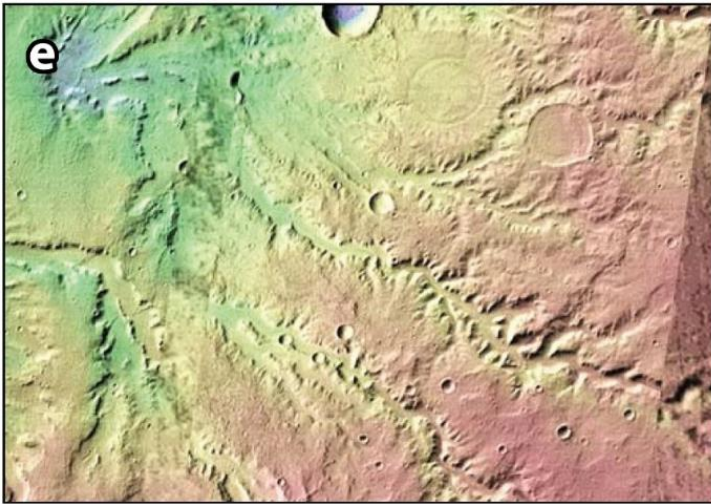


- Amazonian (30億年前～現在): 乾燥・酸化した地表で風化は極小
- Hesperian (35～30億年前): 火山活動と大規模洪水があった
今の北半球表層の大部分はこの時に流れた溶岩か
- Noachian (41～35億年前): 水による表層変化が最大
南半球のクレーター地形の大部分はこの頃のものが残っている
ヘラス等を含む大規模地形はほとんどこの間にできた
(名前は南半球の高地Noachis Terraより:「ノアの土地」の意)

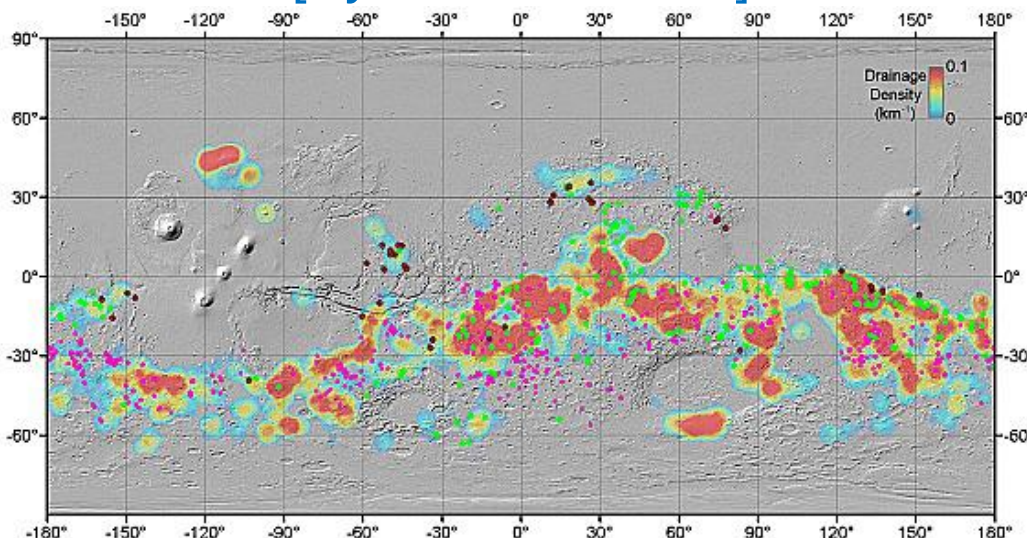
2.1. Geomorphology

Valley networks

- 樹木状に分岐した溝
- 降水の存在を強く示唆する
(地下水の掘り崩しや氷床が解けてできたものとは考え難い)
- ほぼNoachianの表層のみに見られる(HesperianやAmazonian表層では稀)



Valley networksの分布
[Hynek et al., 2010]

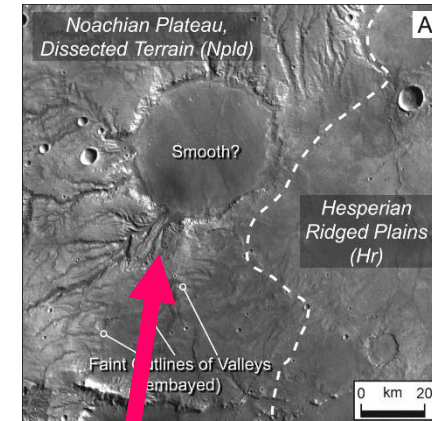


- 60°S～10°N の低緯度域に分布
- 地形進化モデルによると、地球の乾燥地帯のような気候が10万～1000万年くらい続けばできる

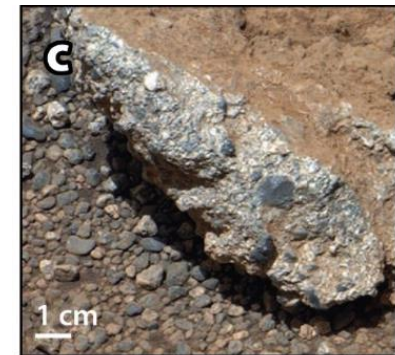
Crater lakes

Open crater lakeの一例(多分)
[Fassett and Head, 2008]

- クレーターに流水が流れ込んで湖になる
- 流量が多いとopen crater lakeになる(淵が決壊)
- closed crater lakeに対するopen crater lakeの割合が多いほど、降水量・地表流水量は多かったと見積られる
- 南半球のopen crater lakeの割合はclosed crater lakeに比べて圧倒的に少ない
→そこまで流水は激しくなかっただろう
- 場所依存性もあり、Arabia TerraやHellasの北側ではopen crater lakeの割合が大きく、比較的wetだったと思われる
- Curiosityがその場で見つけた礫岩(右図c)を化学的に分析すると、水による化学的変性は小さめ、open crater lakeの辺りの地質も同様
→Noachian後期及びHesperianにおいて地表流水があった期間はそんなに長くはなさそう

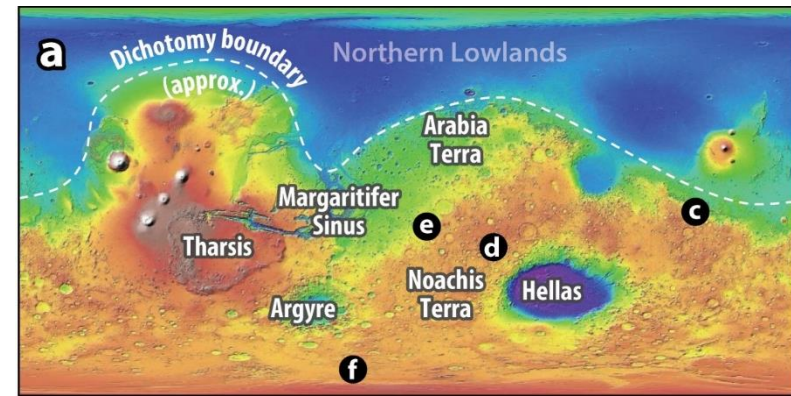


おそらくこういう
「淵が決壊した痕」が
ポイント？

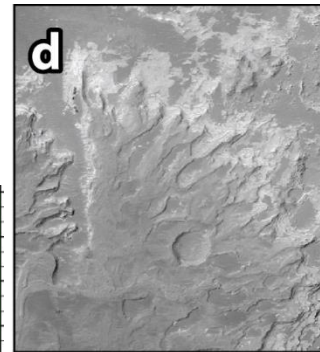
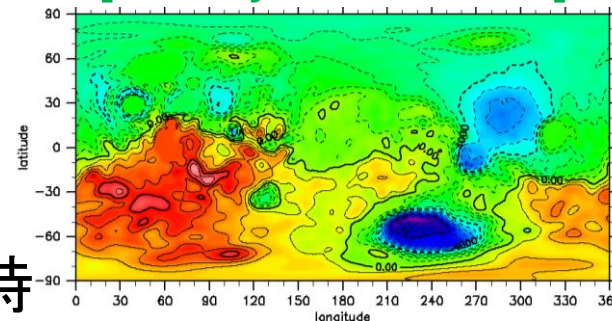


Northern ocean

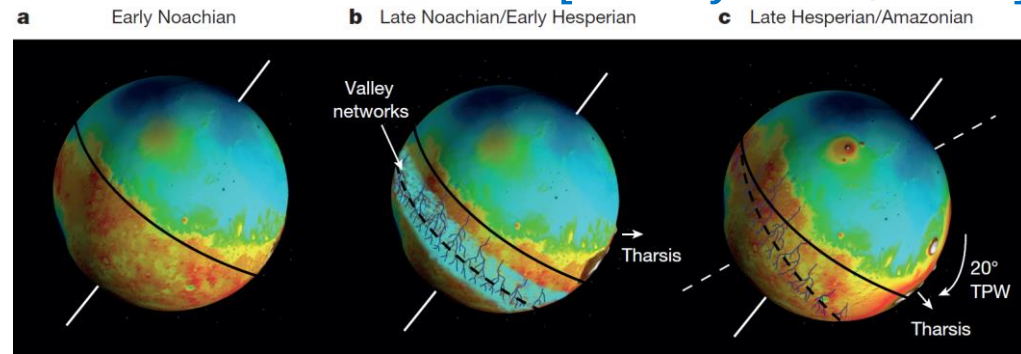
- 北半球の低地(右上a参照)の淵に海岸線の痕のようなものがある
- それは数kmに渡る鉛直方向の変動がある(静水圧平衡とは整合しないが、true polar wander (TPW) による地表変形では説明可能)
- ただ、標高-2.54kmの辺りに三角州のような堆積痕が多く見つっている(右図d):これがNoachian時代の海岸線だとしたら
 - 火星の地形はTPWでは変化しなかった
 - 火星はglobal equivalent layer (GEL)換算で550mの地表水があった



TPW前の地形
[Bouley et al., 2016]



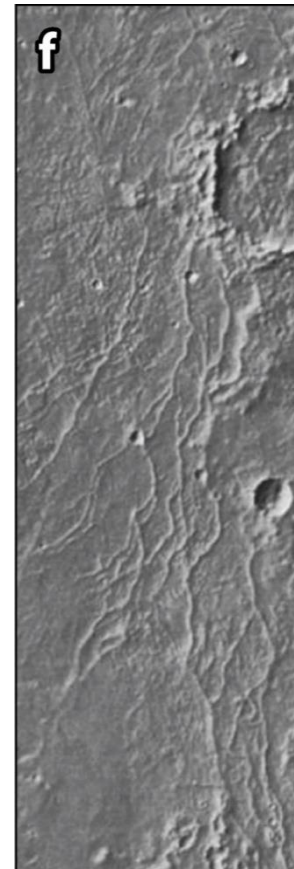
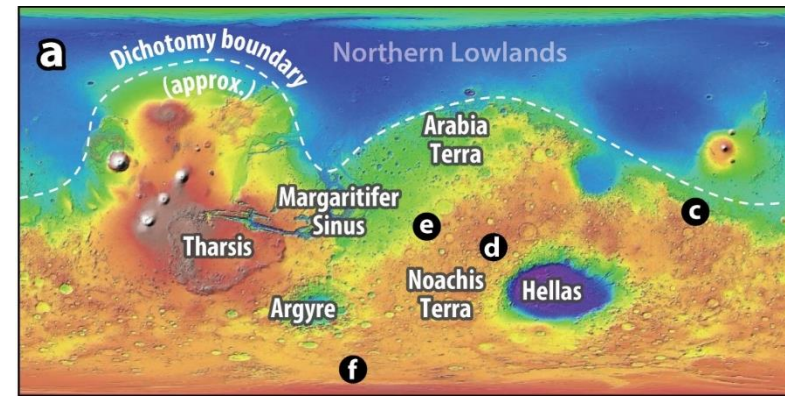
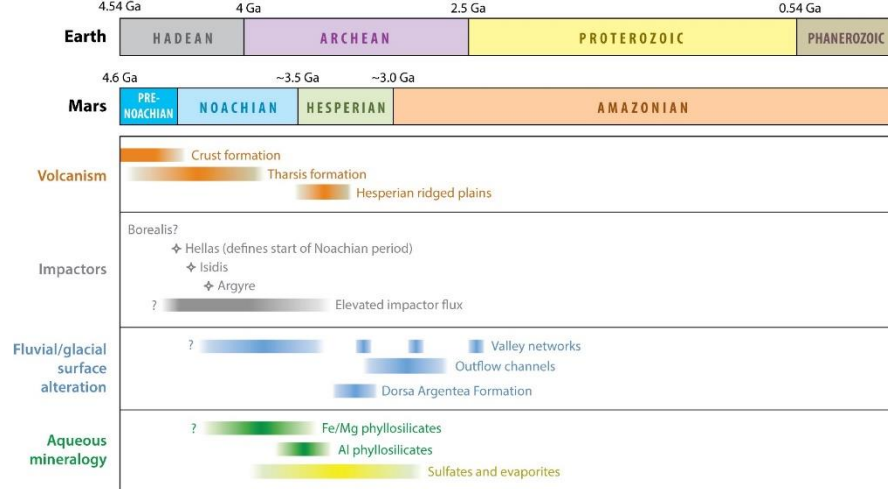
TPWについて[Bouley et al., 2016]



Formation of the dichotomy, heavy bombardment, dichotomy boundary in equatorial position

Tharsis dome formation, tropical precipitation with valley networks formation

Tharsis formation causes a TPW, valley networks on a small circle, Tharsis bulge on the equator



Glaciation

- 南極域にHesperian中期(DAF)にできたと思われる氷河の痕(esker: 氷河の下を流れる川の堆積物によりできる盛り上がった筋地形、右図f)がある
- Hellas及びArgyre盆地の辺りにも多くの氷河の痕と思われる地形
- 氷床力学モデルによると、このような地形ができるにはDAFよりも前の極域の地表温度が現在より20~50K高かった必要がある
- 赤道域のNoachianやHesperian地質にはほとんど氷河の痕はない

2.2. Geochemistry

鉄・マグネシウム・アルミニウム

- 1960年代から行われていたGeomorphology的な観測に加えて、この10～15年の周回船・ローバー観測で理解が進んだ
- Noachian地質では鉄・マグネシウムを多く含むフィロケイ酸塩：存在には液体の水の存在と中性であることが要求され、「温暖・湿潤」な気候であった必要があると考えられてきた
- しかし最近ではそれは地熱で温められた水の少ないシステムでできるという議論もある、またその場でできたものではなく、別の場所から運ばれたものではないか
- 別の場所ではカオリナイトなどのアルミニウムが豊富な土も鉄・マグネシウム土に覆い被さって観測されている
- それは地表が湿潤だった証拠とされる(鉄・マグネシウムイオンが濾過されて下に落ちる)、あるいはより酸化的で寒冷な環境(鉄ミョウバンが近くにあるところ)か

※東工大関根先生「出涸らしがどれだけ出たかが水量のヒント」

硫黄・炭酸塩

- 硫黄の存在は特に興味深い：火山活動との絡み、酸性だったり塩分ありだったりの可能性も出てくるので
- Hesperian表層には排他的ではないがprimaryに硫黄が含まれている
- CO_2 が主成分の大気にも関わらず、表層の炭酸塩の少なさは目を引く特徴： SO_2 が溶けて酸性になった表層水のおかげで生成が抑えられた？
- しかし酸性の温暖・湿潤気候の説明は、効率的な中和の効果がある鉄・マグネシウムレゴリスの存在下では難しい
→炭酸塩の少なさは、初期火星が暖かかったのは一時的だったか、あるいは非常に乾燥していたことを示すのでは
- ただしNili FossaeやGusev Crater、隕石衝突により近くが掘り返されているところでは炭酸塩が見つかっている
→地殻深部に大気 CO_2 が吸収されている？

3. Faint Young Sun, Cold Young Planet?

表層には明らかに流水の痕が刻まれている、
なのに流水をもたらす表層過程は不明瞭。

- 火星が得る太陽フラックスは地球の43% (軌道長半径1.524AU)
Noachian後期以降、軌道長半径が大きく変わる要素はない
- 軌道離心率や軌道傾斜角はカオス的に変化するか、それでもそれぞれ0~0.125、10°~60°の間: 年平均日射量は変わらなくても、これらのパラメータの変動による日射パターンの変化は気候に影響を与える(夏の気温が変わる→水輸送や融雪が変わる)
- 初期太陽の光度は今より小さい(核融合が進むほどコアのモル濃度が増して温度が上がり、光度が増す)
恒星物理進化モデルを解いて周辺の恒星の観測と照らし合わせた結果、38億年前の太陽の光度は現在の約75%と見積もられる(初期に大量の質量放出があったとしたらもっと強かったかもしれないけど、その可能性は極めて低いだろう)
- 上記を仮定すると初期火星の平衡温度は210K(アルベド0の場合)

3.1. A Denser Early Atmosphere

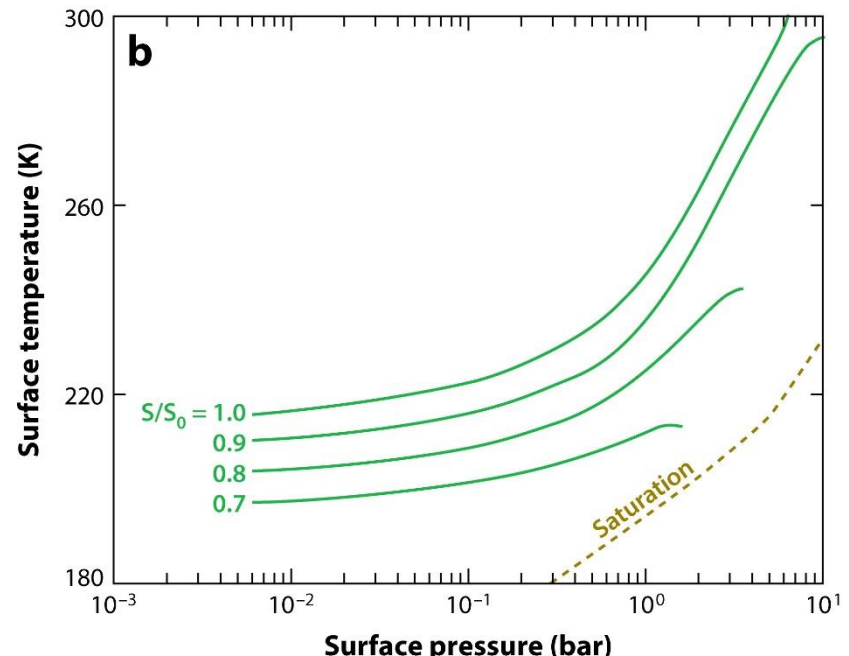
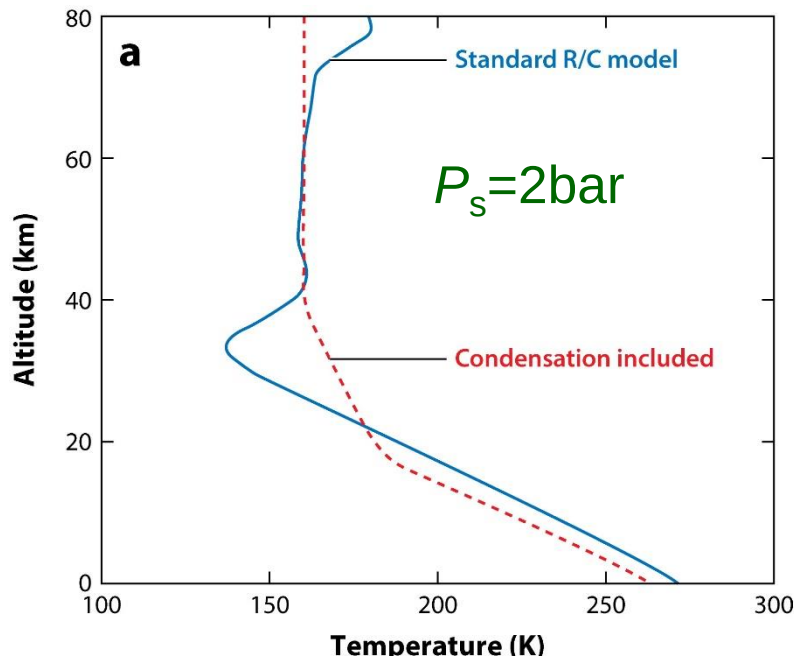
- Noachian後期の大気状態を考える
- Source: 火山活動
CO₂脱ガスは火山活動・マントル化学組成に依存、強く制約はできてないが大部分はpre-NoachianとNoachianに起こった
この頃に70mbar～13bar、後のタルシス形成時に40mbar～1.4bar(この値はマントルの化学逸脱性で決まる、最も還元的な状態を仮定)
- Sink: 大気散逸
HesperianまでのCO₂散逸率は不明
始原大気の多くはごく初期になくなった(希ガスの同位体比より)
CO₂脱ガスもNoachian後期まではXUVによりすぐに散逸されたか(散逸率はCO₂光解離過程に依存するはずだが、よくわからない)
40億年前以降の散逸量は高々数百mbar
(後のMAVEN観測からの見積もりでも同程度、Jakosky et al., 2018参照)

- 隕石衝突はsourceとsinkどちらにも影響する
- Sink: CO₂の地殻への吸収
前述の通り、火星表層の炭酸塩は非常に少ない
ただし、地殻奥深くには結構あるかもしれない
(隕石衝突で掘り起こされたところから見つかっている)
Noachian後期以降のCO₂吸収量は高々500mbarという観測からの見積もりもある、が地殻深部の熱水循環によるCO₂除去過程は地球でもよくわかってないことなので、将来ミッションで深く掘ってみるしかないだろう
- 大気量は古い表層のクレーターのサイズ分布から見積もることでもできる(最小のクレーターサイズから大気圧のupper limitがわかる)
→Gale Crater辺りを見たら、36億年前の大気圧upper limitは0.9~3.8bar(随分幅があるな...)
- 結局のところまだよくわからないけど、大気散逸と地殻吸収による可能なsinkの量を考慮すると1~2barくらいだった可能性はあるが、それ以上あったとは考え難い

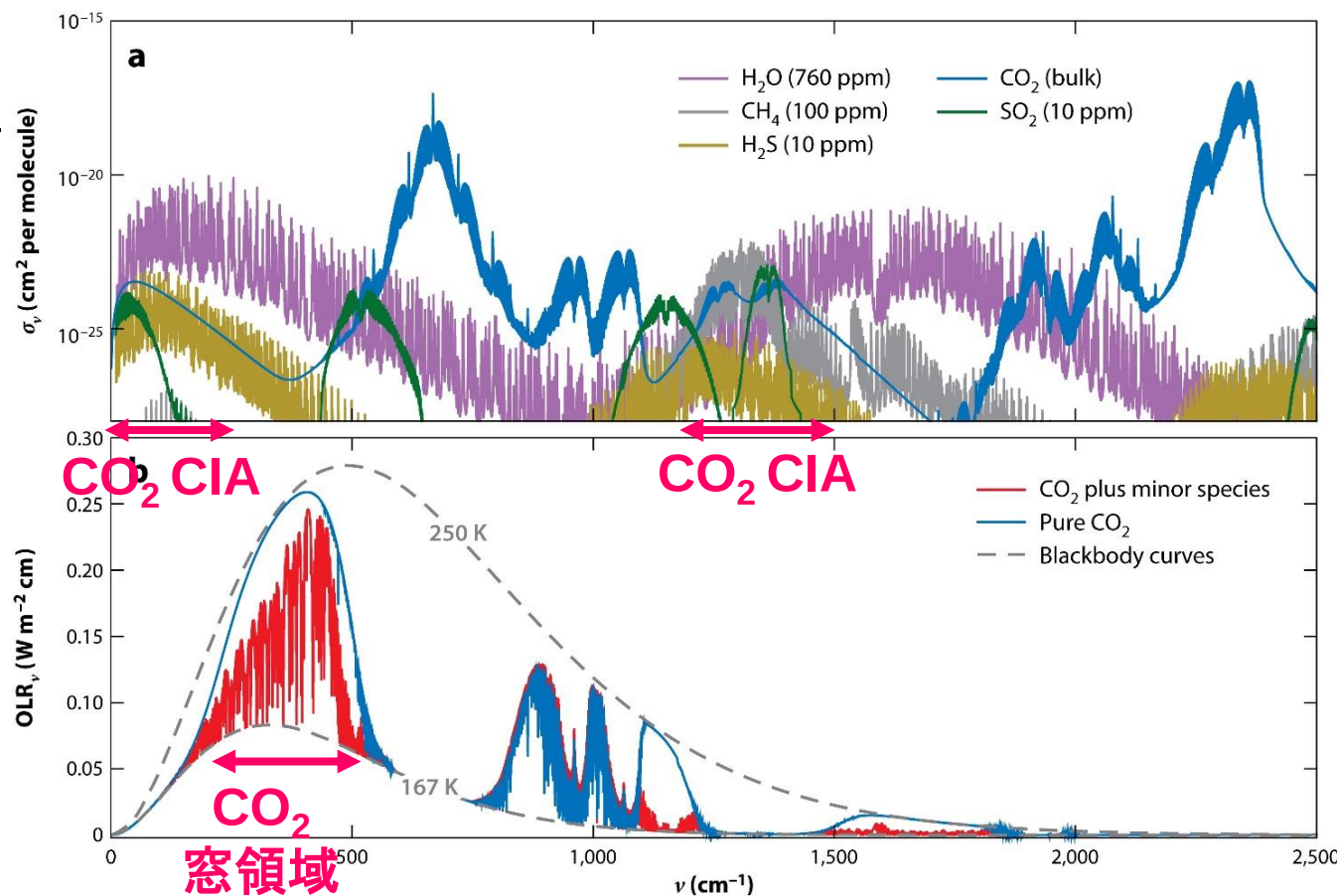
3.2. The Failure of the CO₂ Greenhouse

初期火星に液体の水が存在するには、最低65Kの温室効果
(現在地球の約2倍、現在火星の約9倍)が必要

- CO₂-H₂Oのみのクリア大気では、どれだけ大気量があっても必要な温室効果は得られない
 - CO₂気体はレイリー散乱の効果が大きいからアルベドが上がる
 - CO₂気体は低温で凝結する(ドライアイス)から、温度減率が浅くなって温室効果が弱まる(大気コラプス: 左下図参照)



- CO_2 (&他微量物質) 温室効果と波長依存性
 - 厚い CO_2 気体には collision-induced absorption (CIA) の効果が生じる
 - CIA は outgoing longwave radiation (OLR) を抑えるが、それでも窓領域は残る → 微量物質 (特に H_2O) の吸収で埋まるところもあるが、 H_2O のモル濃度は温度で決まるので、低温だと効果は小さい
- 結局、モデル計算によると CO_2 - H_2O のみのクリア大気の仮定では 225 K よりも高温にはできない



3.3. Alternative Long-Term Warming Mechanisms

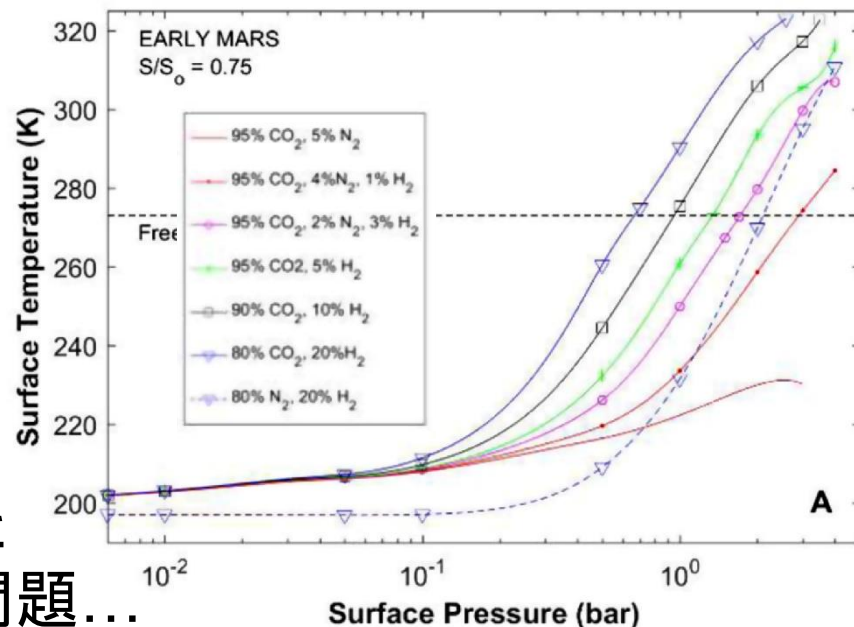
では、これだけの制約条件の中でどうすれば温暖化は起こせる？

- 放射効果の評価は1次元radiative-convectiveモデル(line-by-lineかk-distribution)による計算が主体(雲はとりあえず無視)
- CH_4 は吸収のピークが 1300cm^{-1} なので、冷たい火星の黒体放射に対してはあまり意味はない
- NH_3 や硫化カルボニルは強い放射効果をもたらさうが、火星環境では生成メカニズムがなく、また安定に存在できない
- そこで H_2 に着目

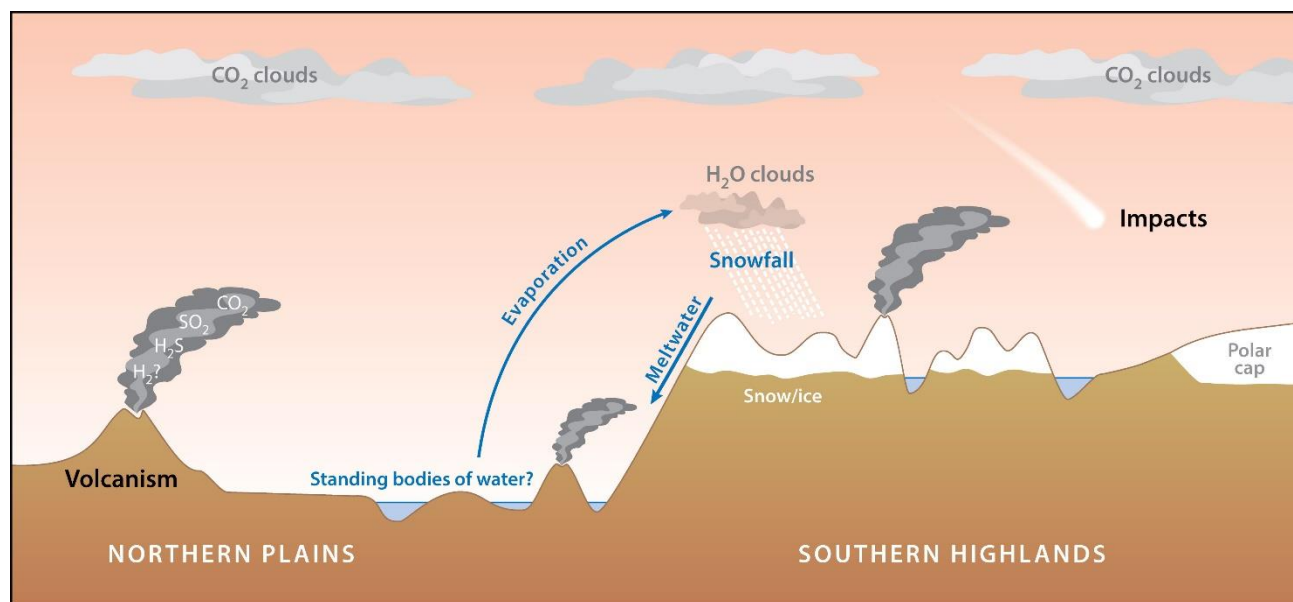
- N_2 - H_2 CIAは微量でも窓領域を埋めて効果をもたらさう

- CH_4 - H_2 CIAは十分な温暖化効果
 H_2 はすぐに散逸するので、急速な脱ガス(還元的なマントルと高頻度の火山活動)が必要、しかし当時の火星マントルや地殻が還元的だったとするのは観測事実と反するのが問題...

[Ramirez, 2017]



- 雲の放射効果も間違いなく重要だが、制約は難しい
- CO₂雲
 - 高高度でCO₂の雲ができることは考えられる(下図)
 - CO₂雲の赤外散乱は温暖化をもたらしうるが、全球がほぼ100%覆われないと意味はなく、GCM計算でもそんな状態は再現できない
 - 2-stream法(GCM等での雲・エアロゾルの放射計算に通常用いられる方法)ではCO₂雲の赤外散乱を過大評価する傾向にあると、multiple-stream散乱モデル計算による指摘もあり
→結局のところそんなに重要ではなさそう
- H₂O雲
 - GCM計算では高高度のH₂O雲はOLRを大きく減少させる
 - 一方で低高度のH₂O雲はアルベドを上げて寒冷化に寄与



3.4. Episodic Warming

地表に残る証拠から見て、「温暖・湿潤」な期間は
そんなに長くなったのだから...

隕石衝突

- Noachian後期は隕石衝突が多かった時期でもある
なので隕石衝突が気候に影響を与えた可能性は高そう
- 隕石衝突は10m分の水を蒸発させ、降雨をもたらし浸食に寄与した、
またそうしてできた熱水蒸気大気がOLRを著しく減少させたおかげ
でこの温暖化は結構長く続いた、説
- しかし上記の説には主に2つの反論がある
 - こうした衝突で得られる降水量から見積もられる浸食率は、観測されているvalley networkの生成に必要なそれと大きく食い違う
 - 熱水蒸気大気は物理的にあり得ない、下層大気における非常に大きな過飽和を考慮しないといけないから

火山活動

- 火山噴火で放出される SO_2 や H_2S の温室効果は？
- SO_2 は 518cm^{-1} に吸収のピークがあり、10ppmもあれば窓領域を埋めてOLRの減少に寄与する
1000～1500 cm^{-1} にも吸収はあるが、 CO_2 CIAと重なる部分が多い
- H_2S はマントルが還元的であったならかなりの量放出されていたと思われるが、 H_2O や CO_2 と吸収線が重なることから、温室効果への寄与は非常に小さい
- SO_2 は光分解する、lifetimeは数百年以下、また硫酸エアロゾルのもとになり、アルベドを上げて寒冷化に寄与する
(地球のピナツボ火山噴火のように)
- 鉛直1次元放射対流計算では、クリアな CO_2 - H_2O 大気に SO_2 を1～2ppm足すと平衡温度が250Kにまで上がる
→赤道域の昼間には273Kを超えうる？
- しかし水平循環の入ったGCM計算では、10ppm以下の SO_2 は融雪にほとんど寄与せず、逆にエアロゾル効果で寒冷化した結果も
- 結局のところ、単純な問題ではない

4. Deciphering the Late Noachian Water Cycle

鉛直1次元放射対流計算では雲の効果が解けない、
地域別の差が解けない、ひいては惑星規模の水循環が解けない
→GCM計算からNoachian後期の火星水循環に迫る

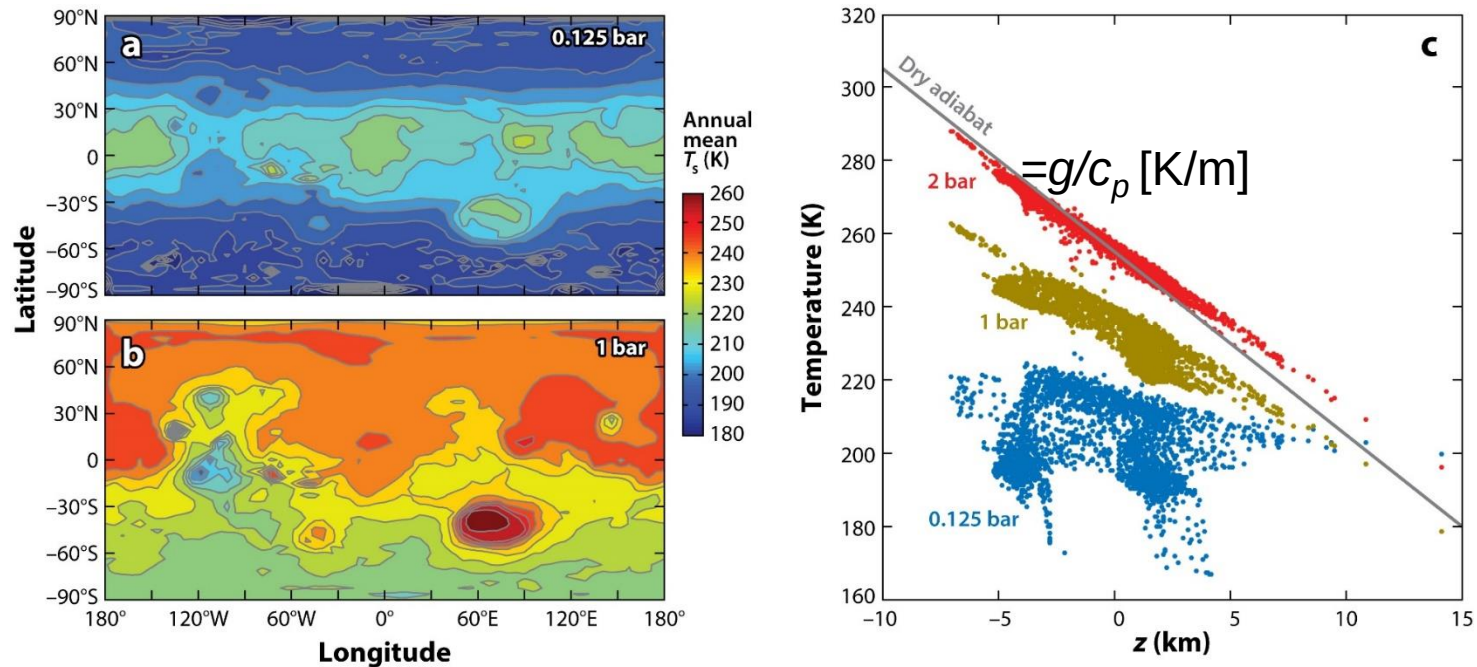
- CO_2 雲・ H_2O 雲は雲の割合と粒径が放射効果の鍵
- 軌道傾斜角 20° 以下、地表気圧3bar以上では CO_2 が凝結して大気コラプスが起きる
(ここには書いてないけど0.5bar以下でも大気コラプスは起きるので、初期火星における CO_2 大気が安定する大気量は0.5~2barの間)
- 放射activeなダストの循環を入れたら、80mbarくらいの大気量で軌道傾斜角が大きい条件ではコラプスを抑える効果がある

4.1. Adiabatic Cooling and the Icy Highlands Hypothesis

GCM計算を通して表層水循環を見る

- 冷たい惑星において、水循環は表層氷が安定する場所 (cold traps: 通常は年平均地表温度最小のところ)へ輸送される
→初期火星におけるcold trapsの場所を突き止めれば、一時的な昇温が起きた時にそこで流水が生じる
- 今の火星(平均地表気圧600Pa、軌道傾斜角 25.2°)において cold trapsは極域→氷床は極に集中
- ただし軌道傾斜角を大きくしたGCM計算ではcold trapsは低中緯度に移動する
- 大気量にも依存する

考えられる初期火星のcold trapsはどこか (現在の75%太陽放射、軌道傾斜角41.8°計算)

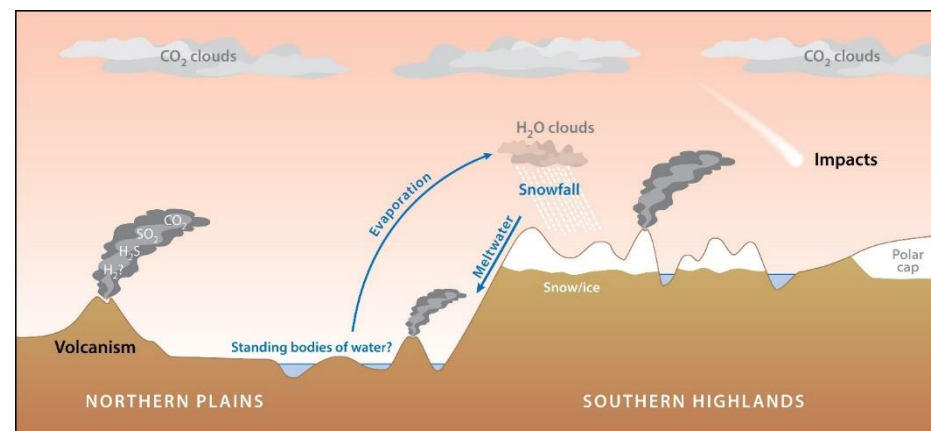
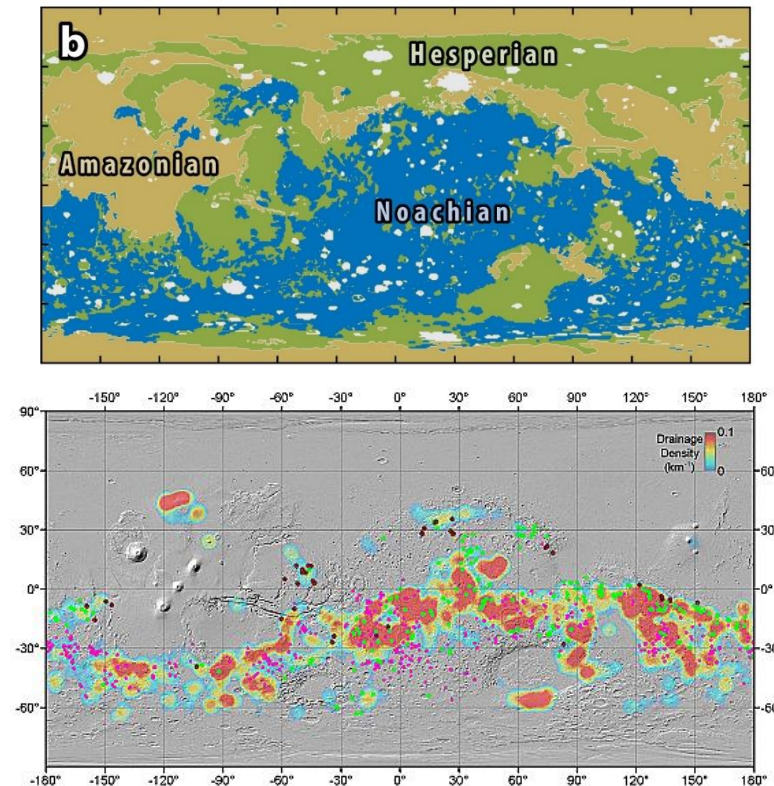


- 気圧低い場合は地表温度は太陽放射に依存→cold trapsは高緯度
- 気圧高くなるほど地表温度は標高に依存→cold trapsは高地境界層での大気・表層間の相互作用が大きくなる
- 地表からの顕熱 F_{sens} は大気密度に比例
- 水星のような大気がない惑星では $F_{\text{lw},\downarrow} = F_{\text{sens}} = 0$
大気が厚くなるほど $F_{\text{lw},\downarrow}$ と F_{sens} は増加、境界層での大気・表層間の相互作用が大きくなり、温度は断熱減率に沿って標高に依存する

$$F_{\text{lw},\uparrow} = F_{\text{lw},\downarrow} + F_{\text{sw},\downarrow} + F_{\text{sens}},$$

$$F_{\text{sens}} = \rho_a C_D c_p |\mathbf{u}| (T_a - T_s)$$

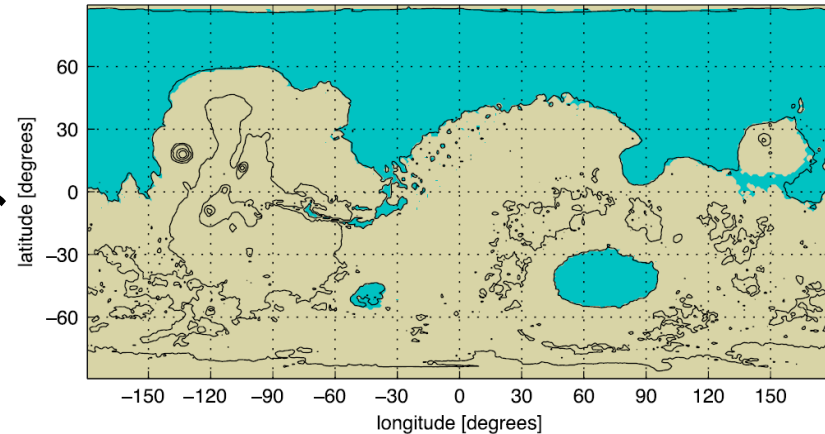
- 0.5bar以上の大気圧で軌道傾斜角も moderate なら、cold traps は赤道域の Noachian 地質の高地(ちょうど valley networks が集中している箇所): GCM 計算でもこの領域に氷が集まる
- 「icy highlands scenario」の提唱
今の valley networks の箇所に氷が集まり(過減衰状態)、一時的な温暖化で融解し低地へ水が移動(摂動状態)、断熱冷却で安定に向かう
GCM & 解析モデル結合で得られた地形要因による降水分布と valley networks 分布が一致
- 氷河の可能性: モデル計算では少なくとも現在の GEL の5倍以上の水がないと、この領域に痕がつくような氷河活動は起こらない



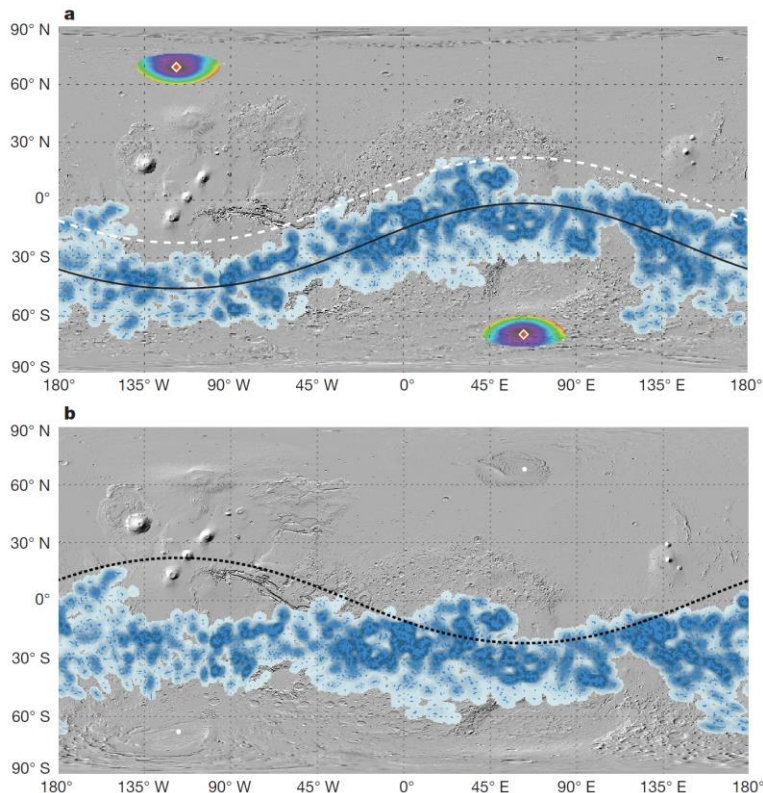
4.2. The Hydrological Cycle on a Warm and Wet Planet

「icy highlands scenario」は初期火星気候の有力説と言えるが、長期に渡る温暖・湿潤気候の維持を示す観測事実は説明できないので、他のシナリオの可能性も考える

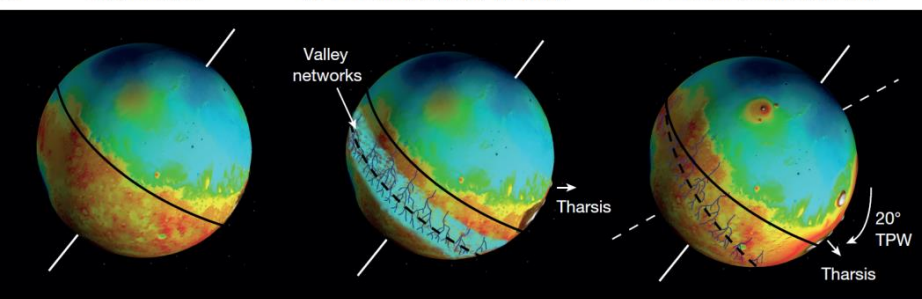
- 温暖・湿潤気候にするには、太陽放射を増やすか大気の赤外吸収を増やすしかない
- Wordsworth et al. (2015)は上記両方を使って初期火星を温暖にし、液体の海(右図)を置いて計算したが、降水分布はvalley networkの観測分布とは一致せず: Tharsis山地の存在が南東部分の降水を減らす
- ここでは上記の結果をもとに火星は温暖湿潤ではなかったと結論付けているが、実際はこの辺りの研究はこのレビュー論文の出版後にかなり進んでいる



TPW(true polar wander)から valley networks分布を説明する [Bouley et al., 2016]



a Early Noachian **b** Late Noachian/Early Hesperian **c** Late Hesperian/Amazonian



Formation of the dichotomy,
heavy bombardment,
dichotomy boundary in
equatorial position

Tharsis dome formation,
tropical precipitation with valley
networks formation

Tharsis formation causes a TPW,
valley networks on a small circle,
Tharsis bulge on the equator



A coupled atmosphere–hydrosphere global climate model of early Mars: A ‘cool and wet’ scenario for the formation of water channels

A. Kamada^{a,*}, T. Kuroda^{a,b,**}, Y. Kasaba^{a,c}, N. Terada^a, H. Nakagawa^a, K. Toriumi^a

^a Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan

^b National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Japan

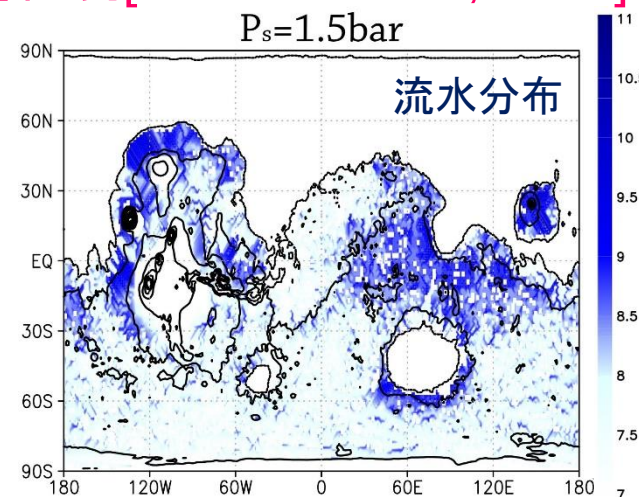
^c Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, Sendai, Japan

ABSTRACT

Martian water channels are considered evidence of a climate warm enough to allow the existence of long-term fluvial systems on early Mars during the Noachian and Hesperian boundary (3.85–3.6 Ga). Quantitative inferences of water channel formation from climate models are crucial to develop an accurate understanding of the early Martian environment. We present the results of a newly developed 3-dimensional Paleo Martian Global Climate Model (PMGCM) assuming a $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ atmosphere under the ‘Faint Young Sun’ condition (with a solar luminosity of $\sim 75\%$ of the current value) for surface pressures between 0.5 and 2 bar. The PMGCM has a hydrologic cycle module, which includes ocean thermodynamics and water vapor advection, convection, condensation and precipitation processes, as well as calculations of surface fluvial activities (e.g., fluvial activity and sediment transport) at a high horizontal resolution.

Our PMGCM results show that the early Martian surface environment could have been ‘cool’ (between ‘warm’ and ‘cold’); namely, the surface temperatures could have been high enough ($>273\text{ K}$) during summertime to allow seasonal melting of snow and ice deposits, and low enough ($<273\text{ K}$) during wintertime to produce considerable snow precipitation and accumulation, under the conditions of a mean surface pressure of approximately 1.5 bar and an H_2 composition of 3%. The results also indicate that a ‘wet’ surface environment should be characterized by precipitation and seasonal melting of snow and ice (neither ‘dry’ nor ‘permanently frozen’ states), and enough fluvial activity and sediment transport could have occurred in the low to middle latitudes to produce Martian valley networks within a relatively short time (less than tens of million years). Therefore, we suggest that a moderate climate, that is, ‘cool and wet’ conditions lying between ‘warm and wet’ and ‘cold and frozen’, best explains the fluvial activity on early Mars.

3%の H_2 で温暖化、季節的に降雨と降雪を繰り返す
「冷涼・湿潤」な状態を再現[Kamada et al., 2020]



4.3. Snowball Mars

「ice-albedo feedback」の影響はどうか？

(地球でも人為的温暖化やスノーボールアース説に関係する要素、温暖化を妨げる要素になりうるが、ちゃんと研究されていない)

- 初期火星の場合、海に対する陸の割合はどう見積もっても地球よりもはるかに大きい→snowball transitionはかなり困難
(地球の場合はほぼ全球を覆う海の凝結から暴走氷河作用に移行)
- 火星での可能性を考えると、高緯度域への氷の輸送のみならず、赤道域にTharsis(高地)があるので、そこがcold trapになりうる赤道域だから軌道傾斜角は関係ない
- 海面(-2.54km)～Tharsis頂上の高低差～8km
(火山群はAmazonianにできたものと考えられているので無視)
地表気圧1barの時は温度差～30Kくらいか
→海面の気温が30°C以上でない限り、Tharsisには雪が積もる
- この問題に迫ったGCM研究はまだない、でも重要なトピックだろう
(おそらく考慮すると寒冷化促進の方向に行く)

4.4. The Periglacial Paradox and the Noachian Surface Water Inventory

「周氷河パラドックス」

Noachian地質の高地に氷河の痕がないのは謎である

- GELが550mもあるなら(前述: Noachian初期についての見積もり)、一時的な温暖化で氷が解けると、可及的速やかに数km厚さの氷がNoachian高地に積もるはず
これだけ積もればどんなに冷たくても氷河活動はあるはず
- D/H比から初期火星の水のインベントリを制約した研究がある
(大気散逸や彗星衝突でも変化する要素だがそれは置いておく)
→Noachian後期のGELについて、137mとする観測研究や24mとする計算があり、どのみち地球よりかなり少ない

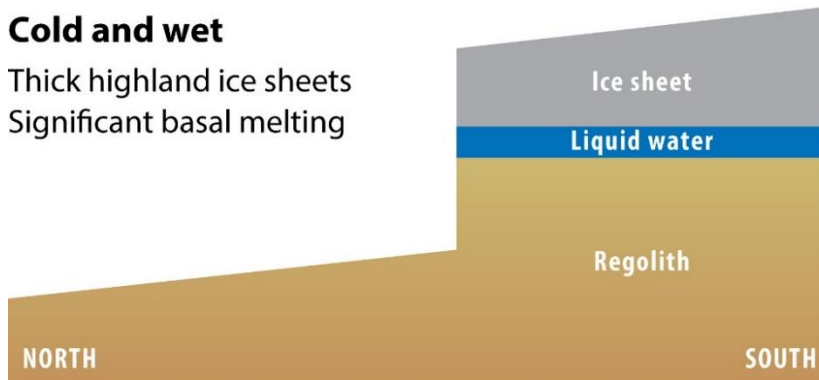
まとめると

これだとNoachian高地に
氷河の痕が残ってるはずだが
実際には見つからない

これは望みない
ice-albedo feedbackで
速やかに左の状態になる

Cold and wet

Thick highland ice sheets
Significant basal melting



Warm and wet

Extreme greenhouse warming required



>200 m GEL

<280 K >280 K

<200 m GEL

Steady-state mean T_s (K)

Cold and (relatively) dry

Thin highland ice/snow cover
Episodic melting events



一時的な温暖化とセットで考えれば
大体の表層観測と辻褃が合う

Warm and dry

Liquid water in low-lying areas
Low precipitation in highlands?



気候的に正当化が難しい
またvalley network地帯で
雨がほとんど降らない

5. Outlook

- 地形学的、地球化学的証拠から見るに、後期Noachianの水循環は断続的なもので、持続的なものではなかっただろう
- GCM、その他モデル、地球との比較などから見えてきたこととして、後期Noachian及び初期Hesperianの火星は寒冷で、水量も少なく、時折氷が融解するイベントが起きていたと考えるのがおそらく妥当
- それでもわからないことはまだまだ残っている
主には何が「一時的な温暖化」をもたらすか
CO₂雲、火山、隕石衝突、どの説も単独では問題を抱えている
ただおそらくはそれらが複合的に絡み合って、初期火星の気候は定義されたはず
- これからの研究では表層の地質学、三次元気候モデリング、水文モデリングが密接に絡んで進められるべき
- 温暖湿潤な火星が過去にも存在しなかったとしても、生命が存在した可能性は排除できない(ひどい環境でも存在する生命は地球でも見つかっている)、探求は続けるべき