

# 火星の内部進化と脱ガス

小河正基（東京大学）

火星では45億年前に地殻が形成され、そののち数億年にわたり固有磁場があった。その後37億年前頃のヘスペリアンの時代に活発な火山活動が起こり、表層に温暖な気候をもたらした。しかし、この火山活動はその後急速に減衰し、表層環境も寒冷・乾燥化した。この歴史における一つの謎はヘスペリアンより前の火山活動史である。火星内部の熱史モデルからは、この時代には活発な火山活動があり、それによる脱ガスのため表層環境も温暖であったと期待されるが、そのような観測事実は現在のところ報告されていない。そこで、初期の火山活動やそれによる脱ガスがどのようなものであったかを解明することを目的として、火成活動・マンテル対流結合系の数値シミュレーションを行った。

本研究で得られた火星内部進化モデルのうち最も観測事実と適合するものによると、火星のマンテルは四段階で進化したことが予想される。第一段階では、マンテルは高温で大規模に溶融するため地殻が形成され、その一部はリサイクルしてコア・マンテル境界に溜まる。また、これと同時にマンテルは化学成層する。この成層のため、続く数億年の間マンテル対流も火成活動も起こらない静穏期が第二段階として訪れる。しかし、この静穏期にマンテル深部では放射性元素の発熱のため温度が上昇し、やがてマンテルはブルームとそれによる火山活動が活発に起こる第三段階に入る。このブルーム火山活動は、マンテル湧昇流によりマグマが生成されるとその浮力により湧昇流そのものが加速されるという正のフィードバックにより駆動されており、パルス的に起こりマンテルに含まれる水（マンテルが還元であれば水素を含む）を大気に放出する。その放出量は、表層環境を温暖に保つのに十分な量であったと推定される。しかし同時に、このブルーム火山活動により、マンテルに含まれていた放射性元素は地殻に持ち去られ、その結果マンテル深部の温度は低下し、やがてブルーム火山活動自体が終息する。その結果、マンテルはその対流が熱対流として起こる第四段階に入る。火星のヘスペリアンに起こった火山活動や温暖な表層環境は第三段階のブルーム火山活動とそれによる脱ガスに対応すると考えられる。また、第二段階の静穏期からは、ヘスペリアンより前の時代の火星では、火山活動は起こったとしてもそれほど活発なものではなかったことが示唆される。

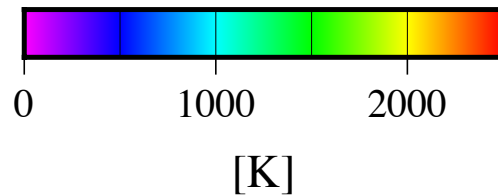
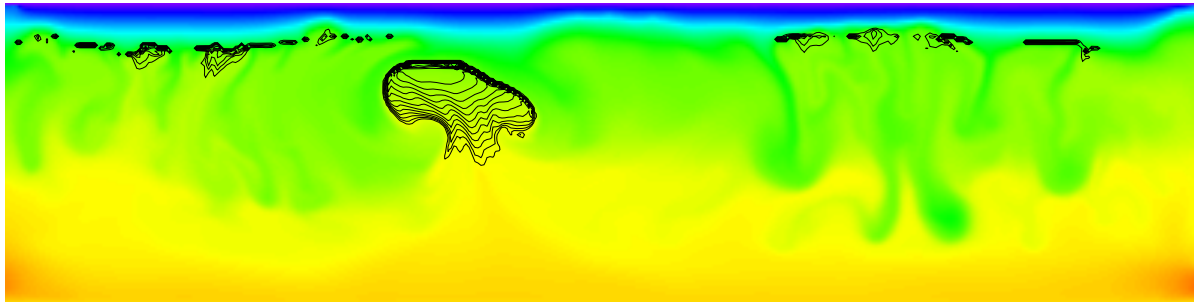
また、このモデルからは、火星において、マグマ・オーシャンにより生成された地殻の量と固有磁場の歴史に密接な関係があることが予想される。生成された地殻の量が多すぎると、大量の地殻物質がリサイクルしコア・マンテル境界に厚い層を形成してコアからの熱の流れを遮断し、コア・ダイナモは1億年足らずのうちにその機能を停止してしまうことがモデルから予測される。しかし実際には、火星の固有磁場は40億年前頃まで存在していたことが知られており、このことから、最初に生成された地殻の量はそれほど多くはなかったことが予想される。

# 火星の内部進化と脱ガス

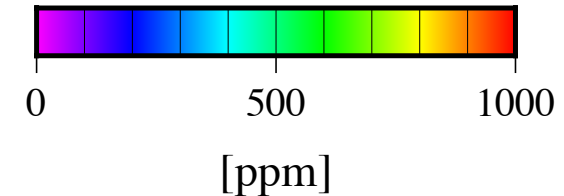
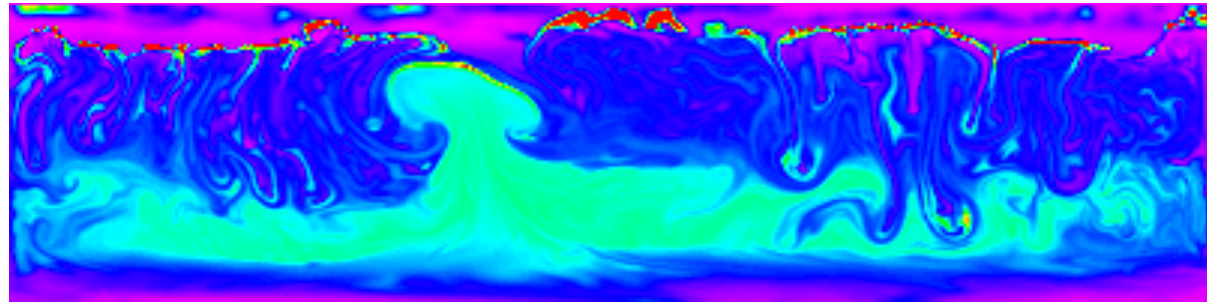
小河正基 (東京大学総合文化研究科)

火山活動とマントル対流の数値モデルに基づいて

T & magma



water content



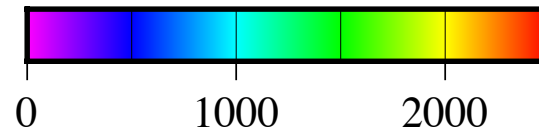
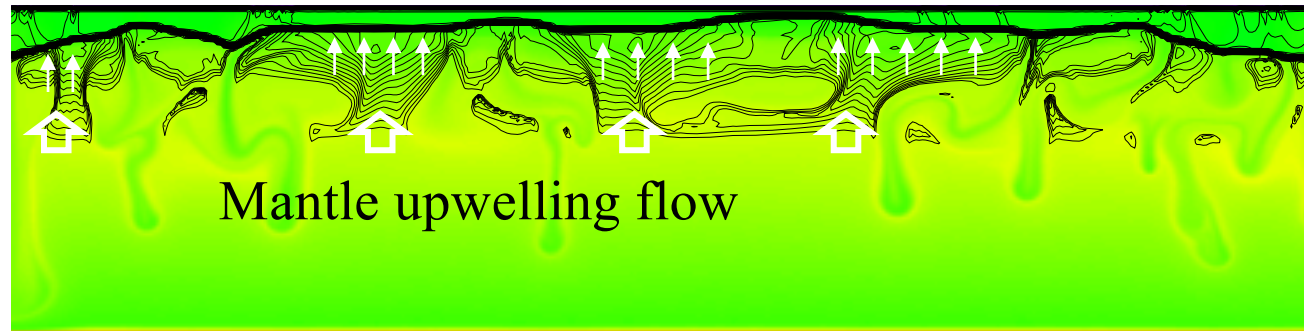
# Magmatism & surface environment on Mars

45億年前の地殻形成後数億年の間、火星には磁場があった。その後およそ37億年前のヘスペリアンの時代に活発な火山活動が起こり、表層に温暖な気候をもたらした。しかし、この火山活動はその後急速に減衰し、表層環境も寒冷・乾燥化した。問題は、ヘスペリアン以前の火山活動である。内部の熱史モデルからは、この時代活発な火山活動があったことが予想され、それによる脱ガスのため、表層環境も温暖であったと期待されるが、そのような観測事実は、現在のところ報告されていない。

そこで、初期の火山活動やそれによる脱ガスがどのようなものであるかを解明することを目的として、本研究では火成活動・マンテル対流結合系の数値シミュレーションを行った。

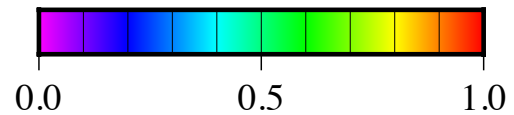
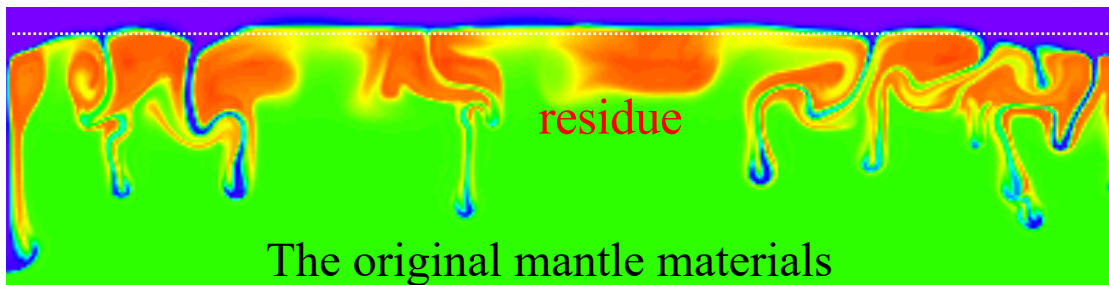
# A numerical model of magmatism & mantle convection

T & magma

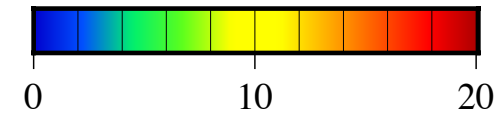
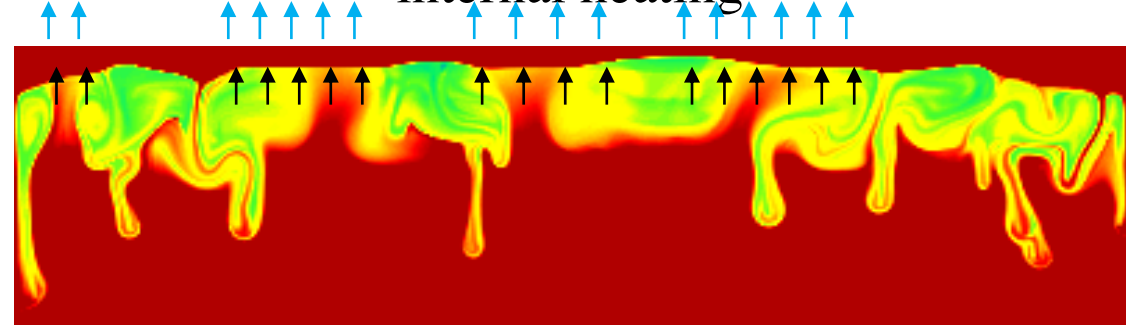


[K]

basaltic crust composition

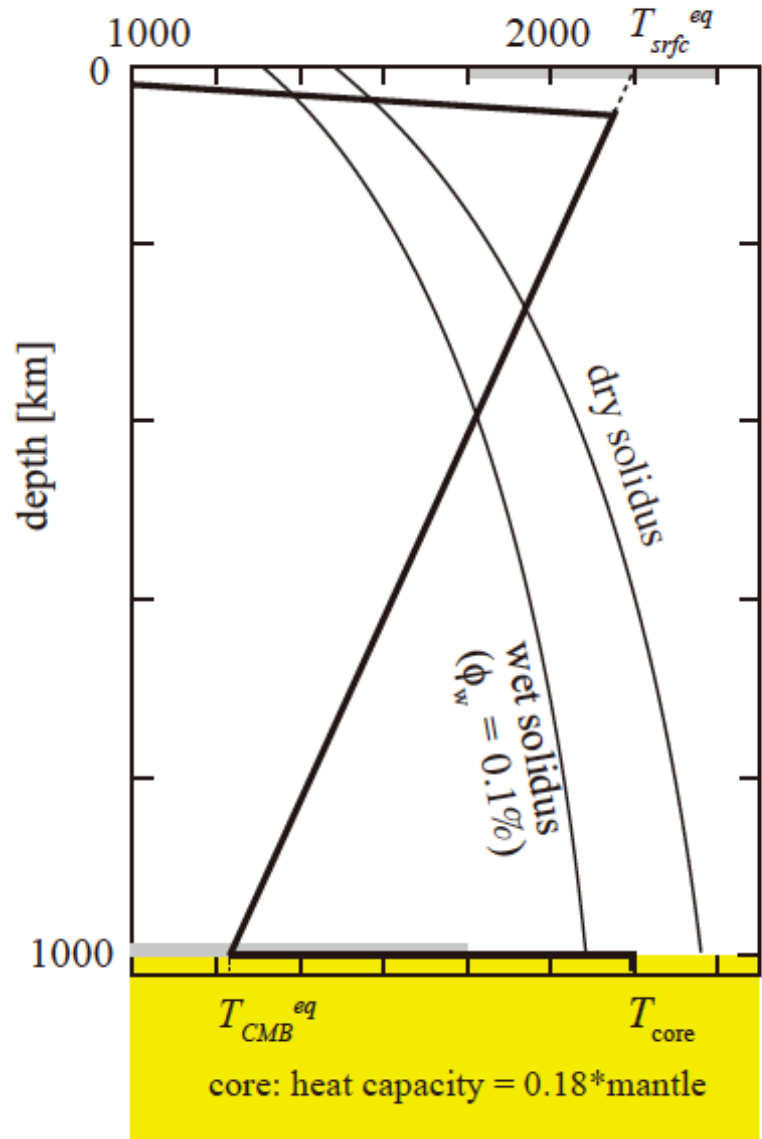


degassing internal heating

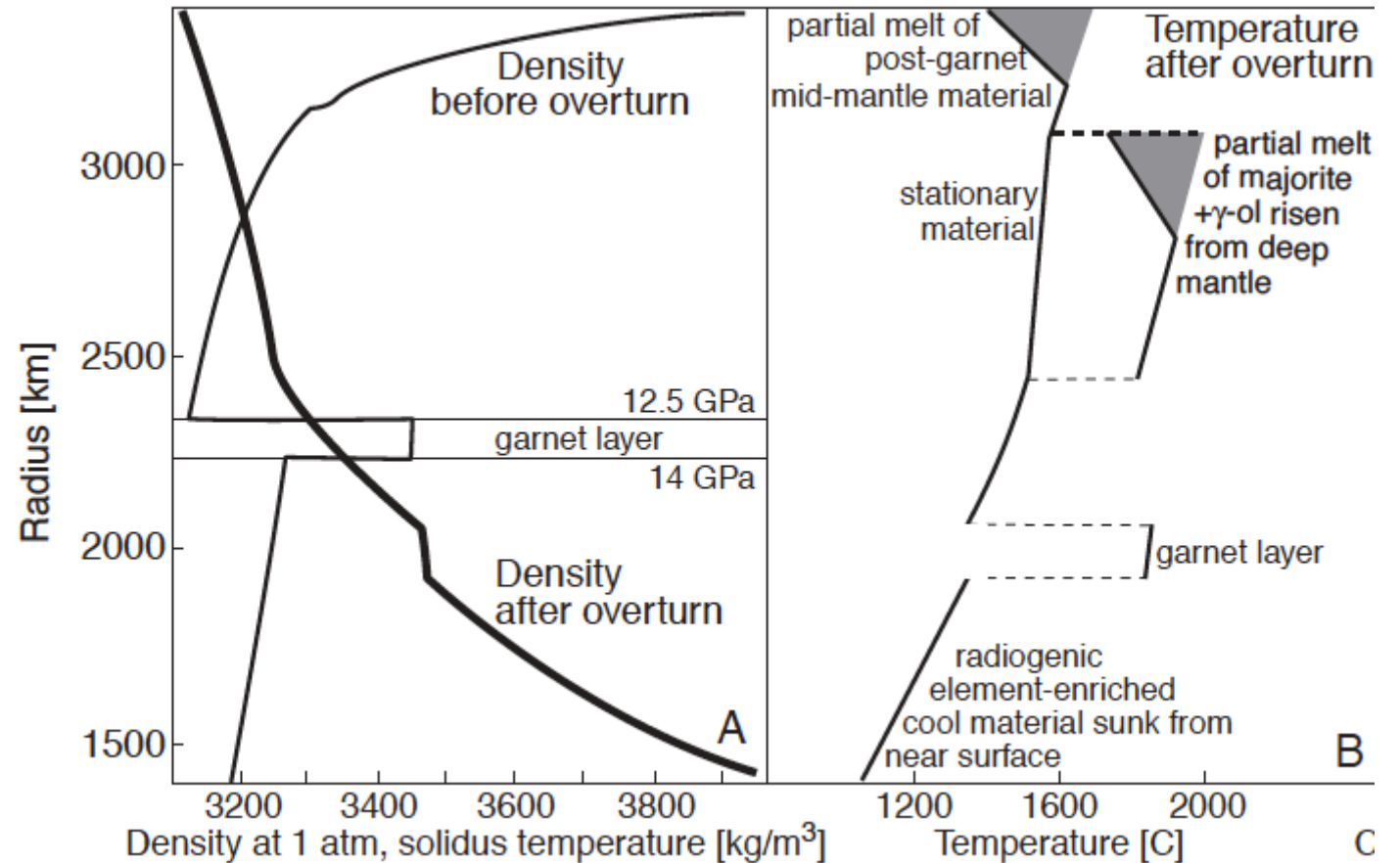


# The initial thermal state of the mantle

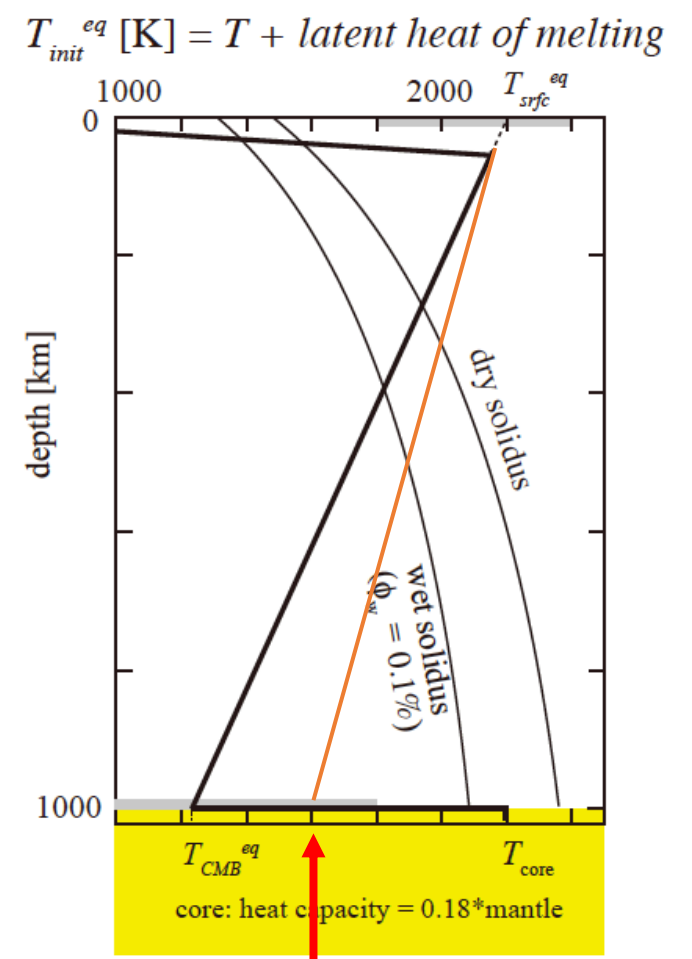
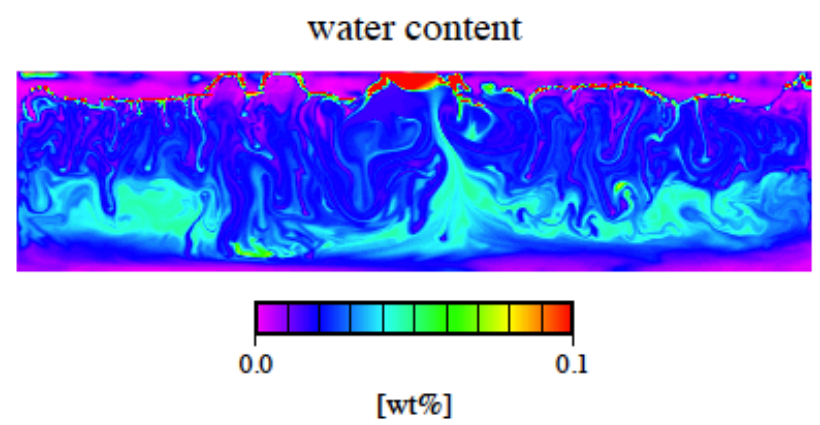
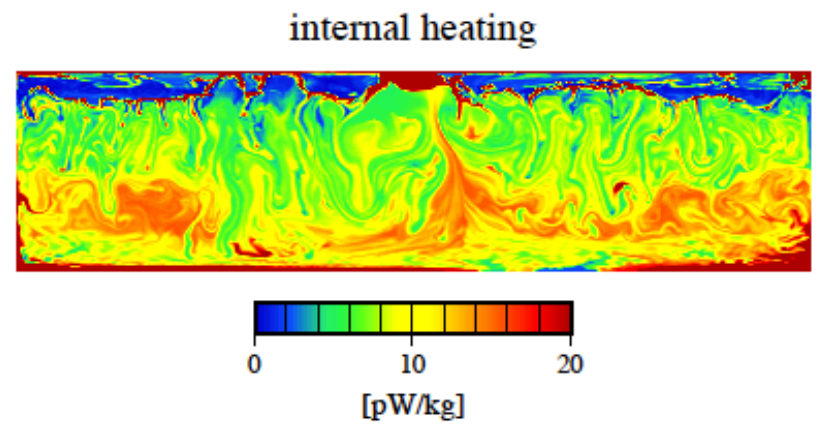
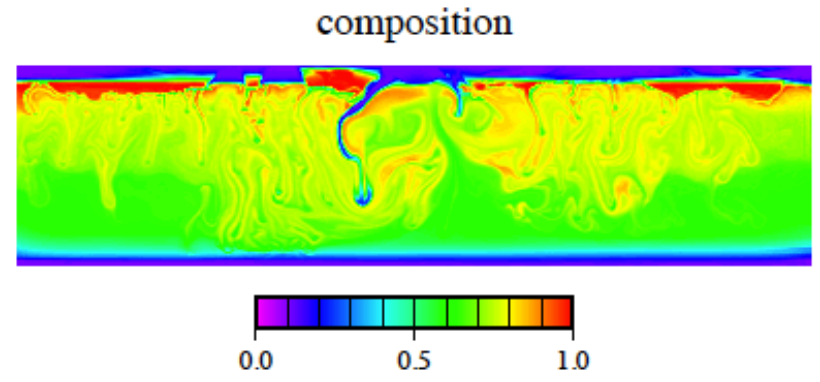
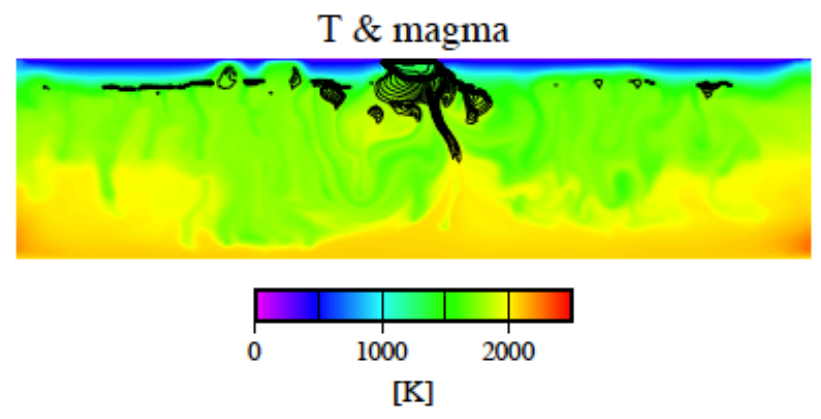
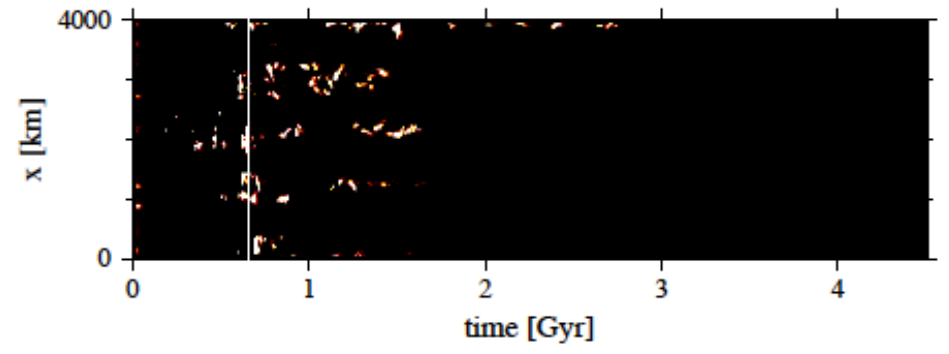
$$T_{init}^{eq} [K] = T + \text{latent heat of melting}$$



## Mantle overturn

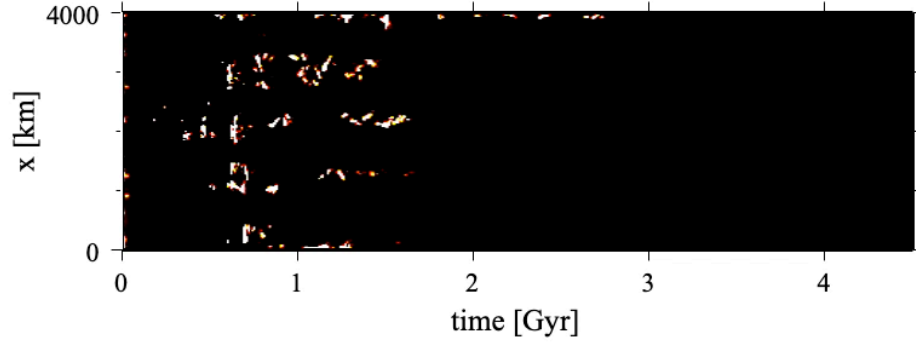


# The reference model

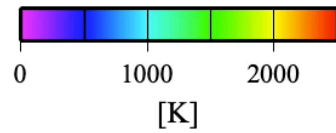
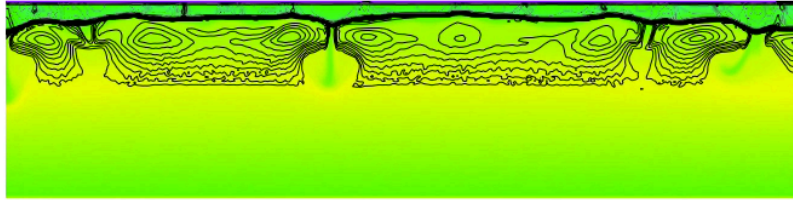


1600 K  
 $\phi_w = 500 \text{ ppm}$

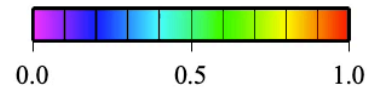
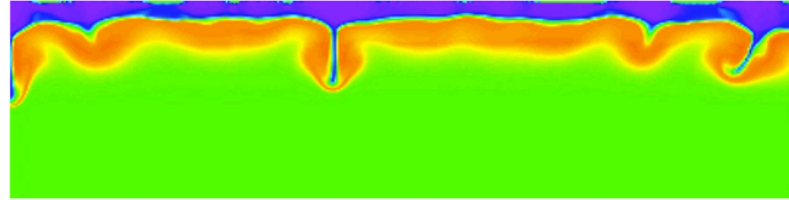
# The mantle evolves in four stages.



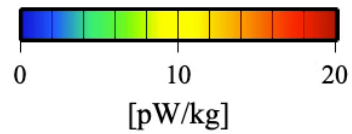
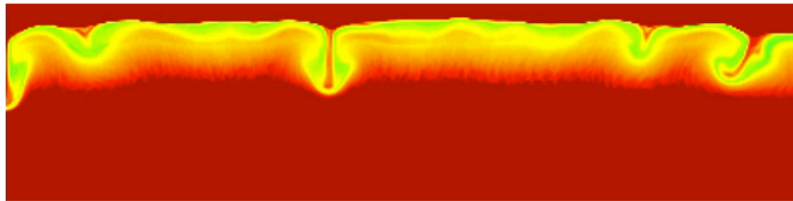
T & magma



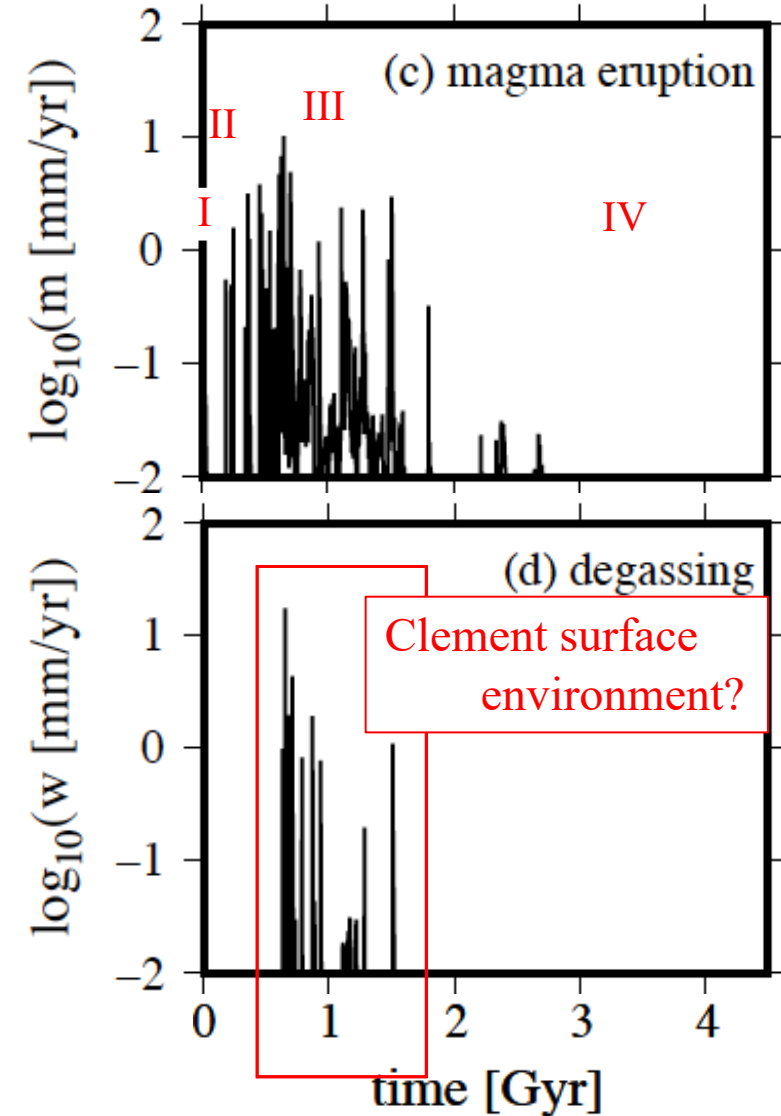
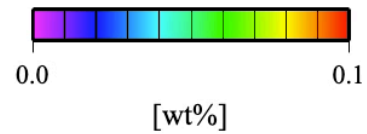
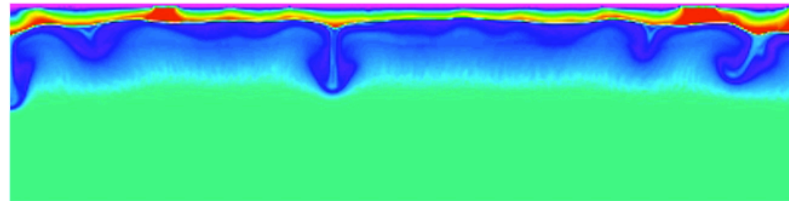
composition



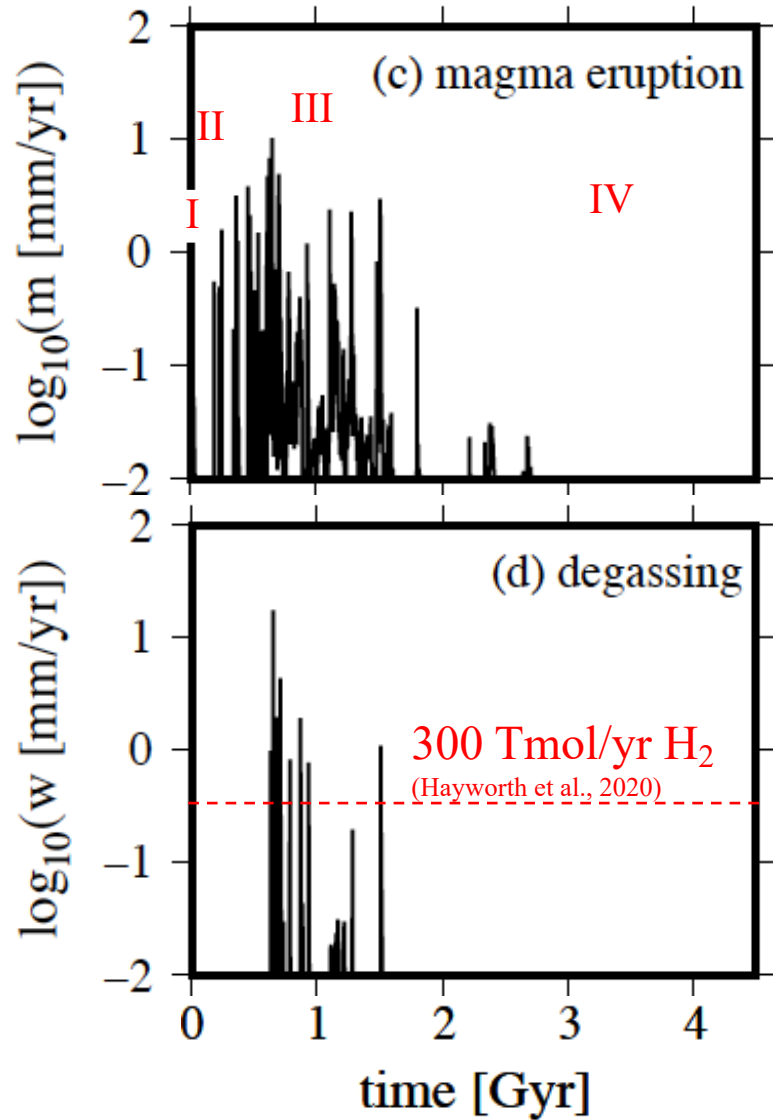
internal heating



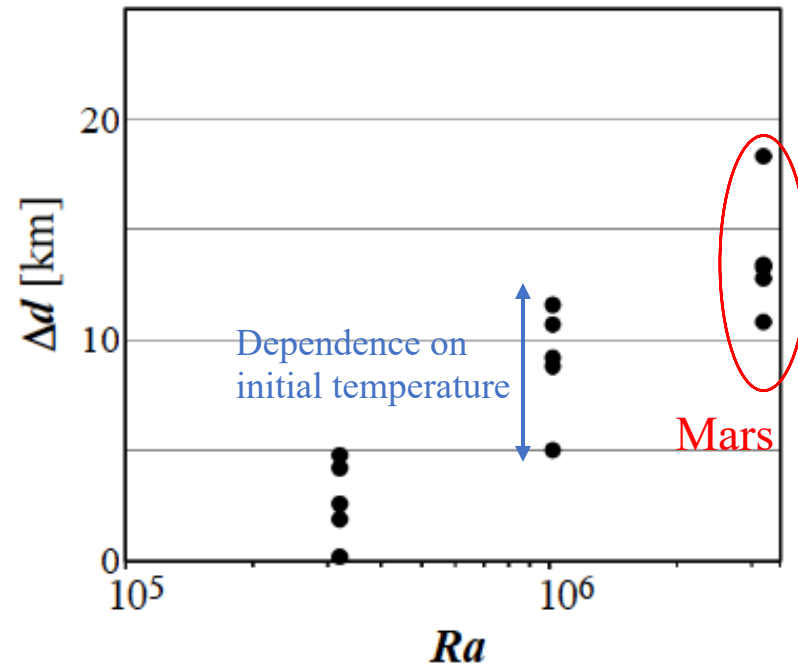
water content



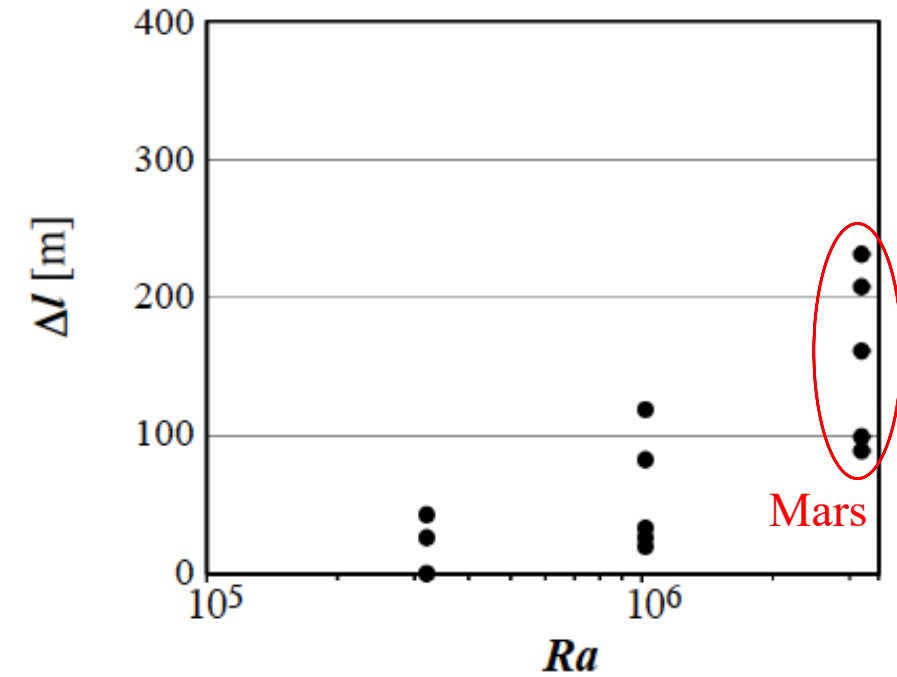
# Crustal growth and degassing on Stage III



(a) crustal growth on Stage III



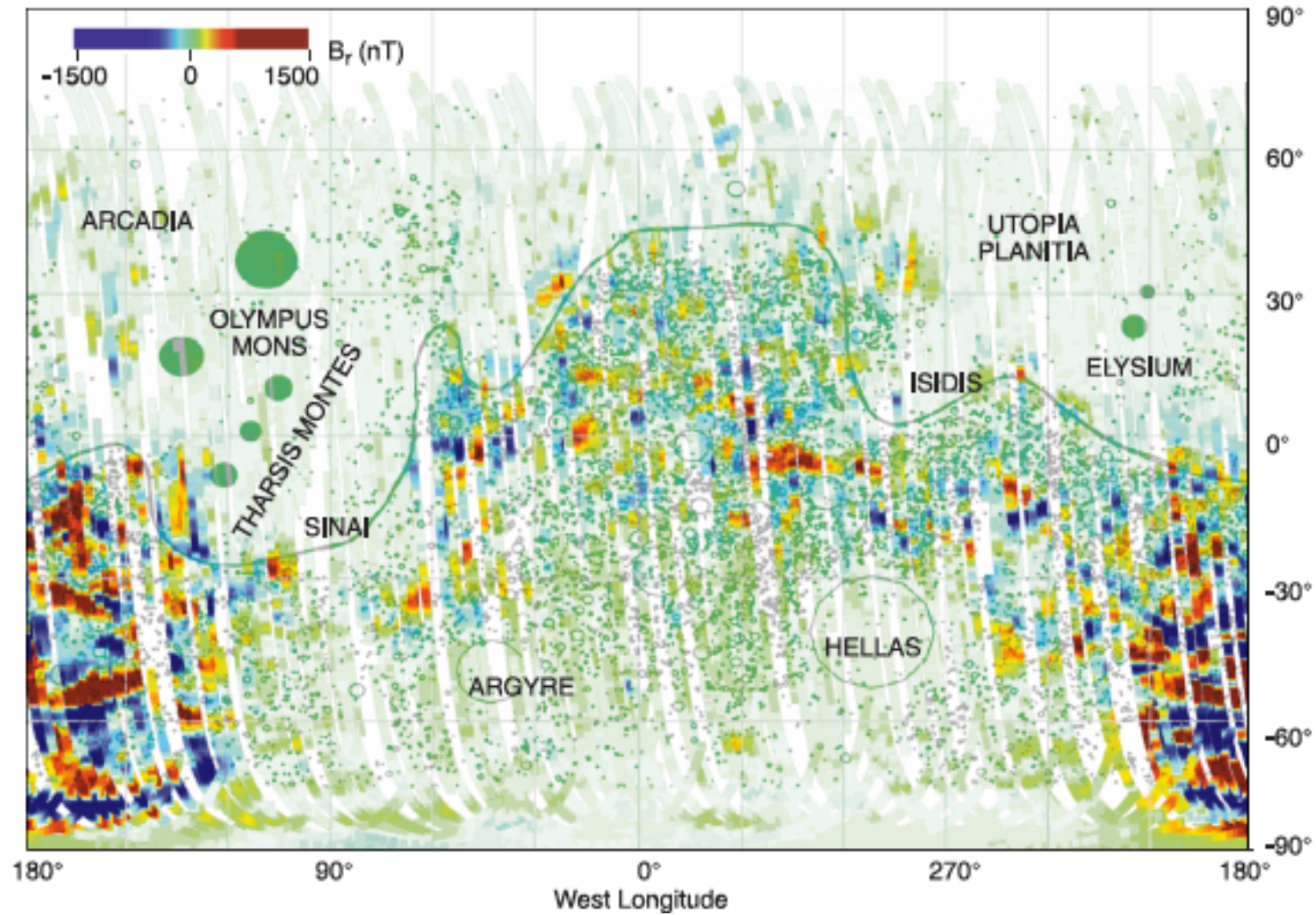
(b) degassing on Stage III



$$Ra \propto \frac{\text{depth}^3}{\text{mantle viscosity}}$$

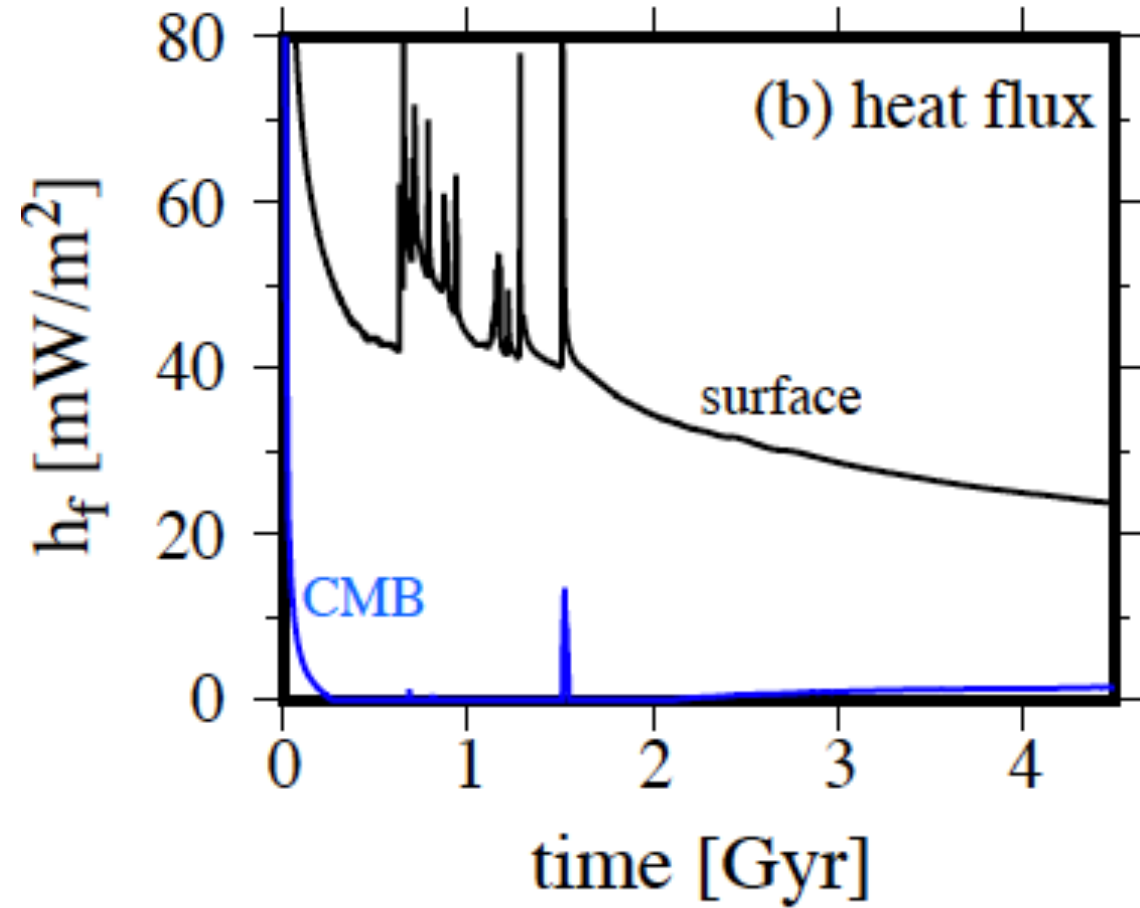
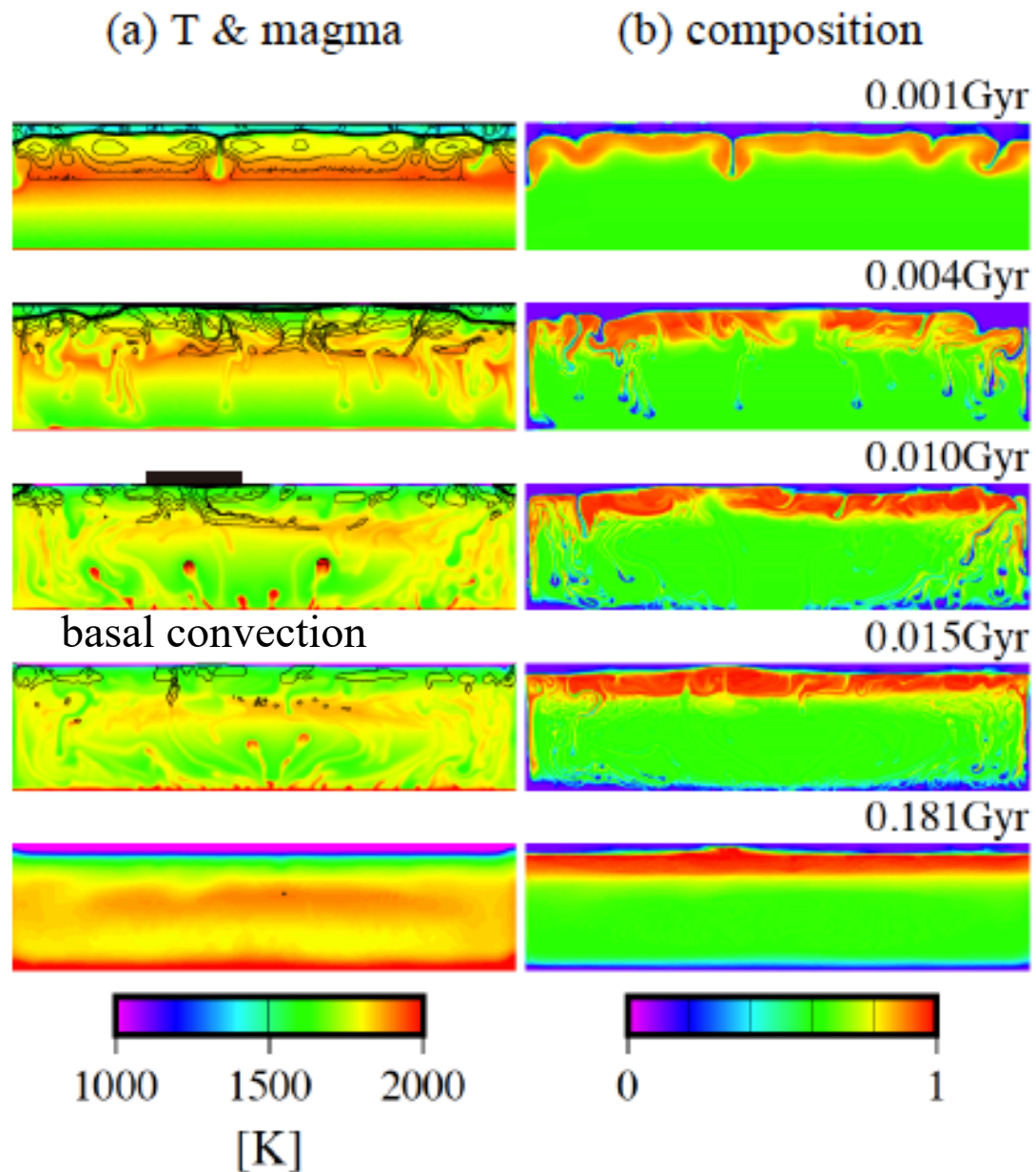


# Magnetic field until ca. 4 Ga



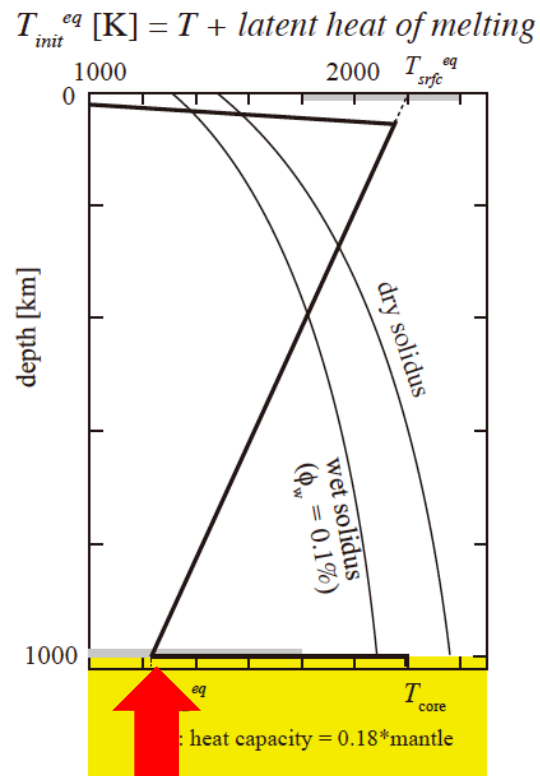
(Acuna et al., 1999)

# Crustal recycling & heat flow on the CMB

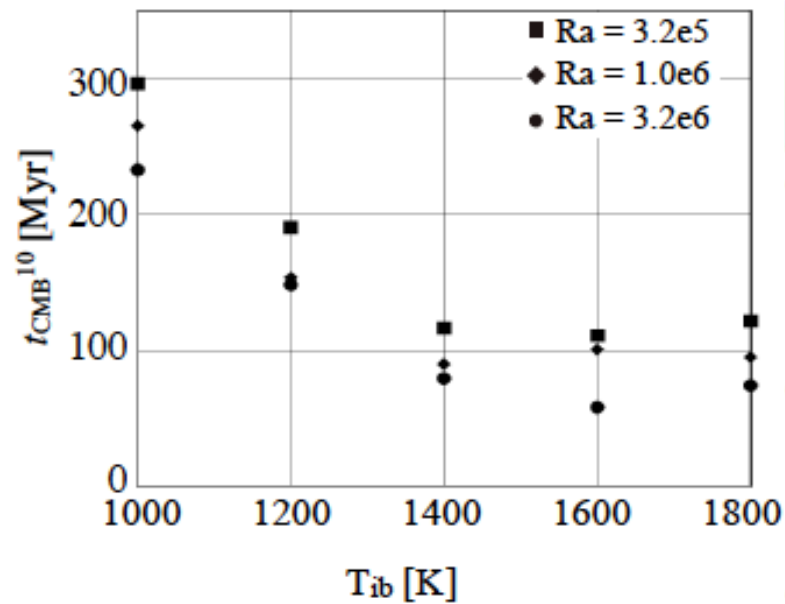


# Crustal recycling & the duration of high heat flow on the CMB

Constraints on the magma ocean?

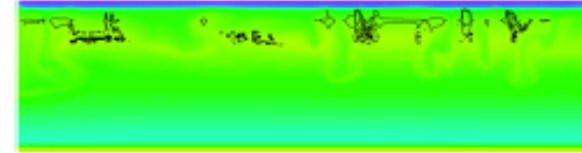


(a) duration of high  $h_{fCMB}$

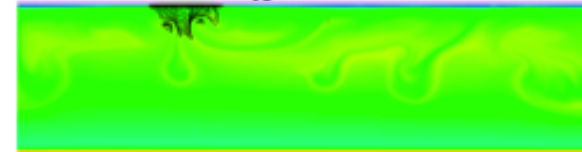


(b) T & magma

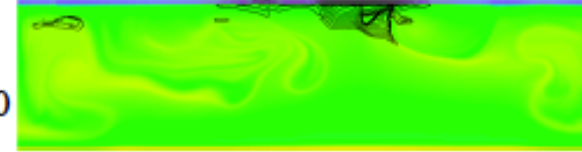
Case L10-05;  $T_{ib} = 1000$  K



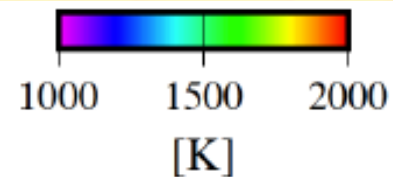
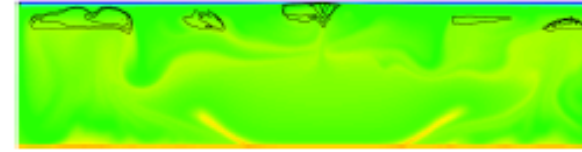
Case L12-050;  $T_{ib} = 1200$  K



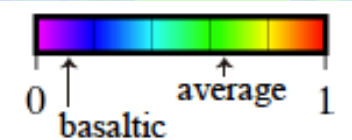
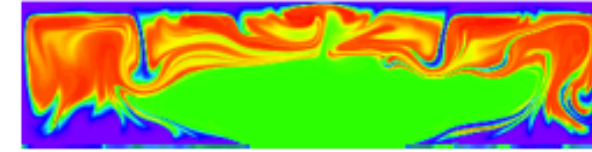
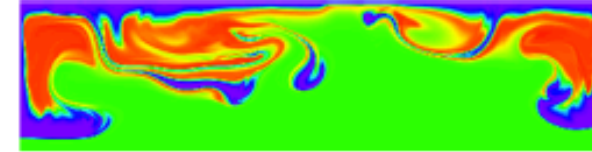
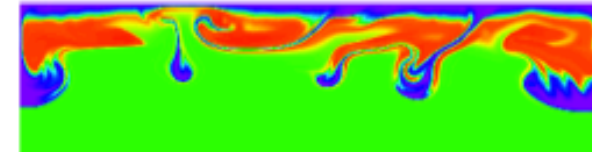
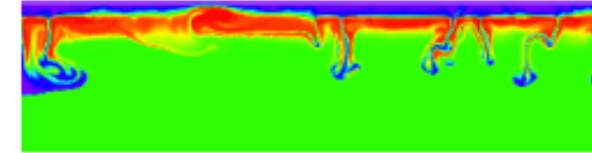
Case L14-050;  $T_{ib} = 1400$  K



Case L16-050;  $T_{ib} = 1600$  K



(c) composition

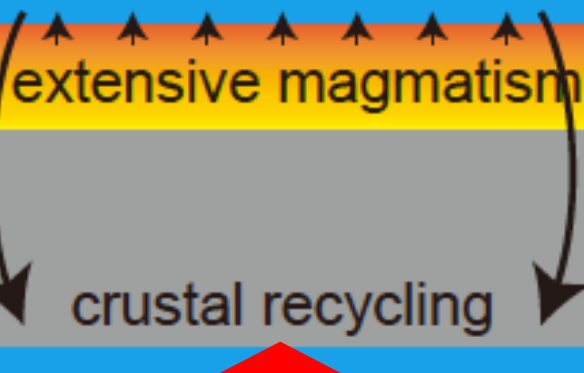


# Summary of Martian models

The mantle evolves in four stages.

Stage I:  
crustal formation

basaltic crust



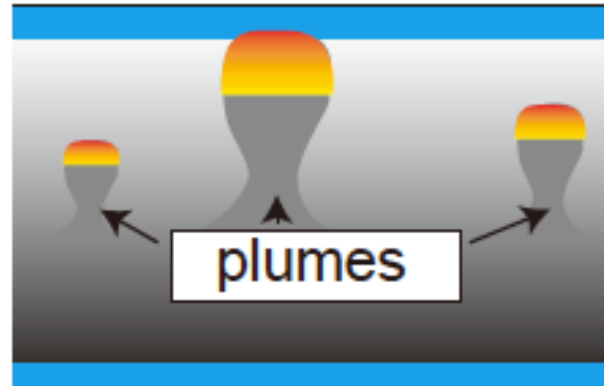
heat flow

Stage II:  
dormant era

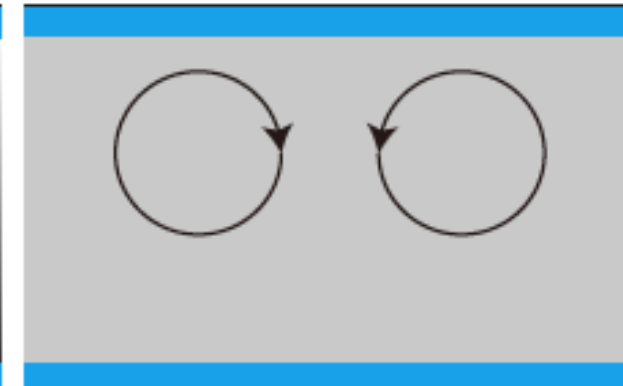
dry & depleted  
compositional  
stratification

wet & undepleted

Stage III:  
plume magmatism  
& degassing



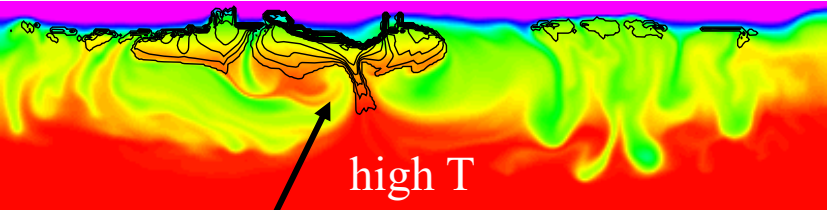
Stage IV:  
thermal convection



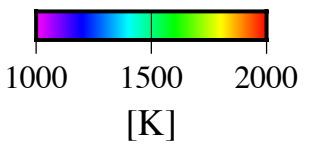
Degassing on Stage III  $\Rightarrow$  clement surface environment?  
The history of magnetic field constrains that of the magma ocean.

# How robust is Stage III?

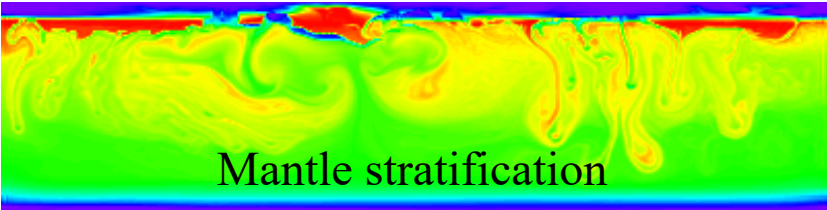
T & magma



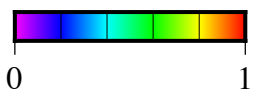
Plume in stratified mantle



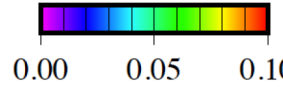
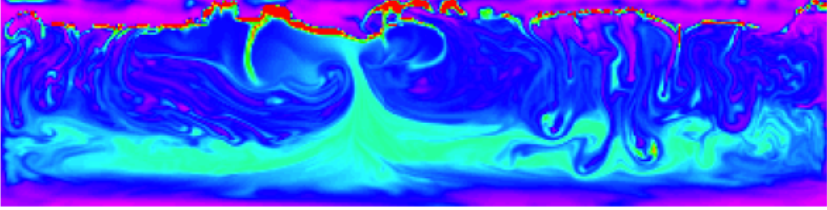
composition



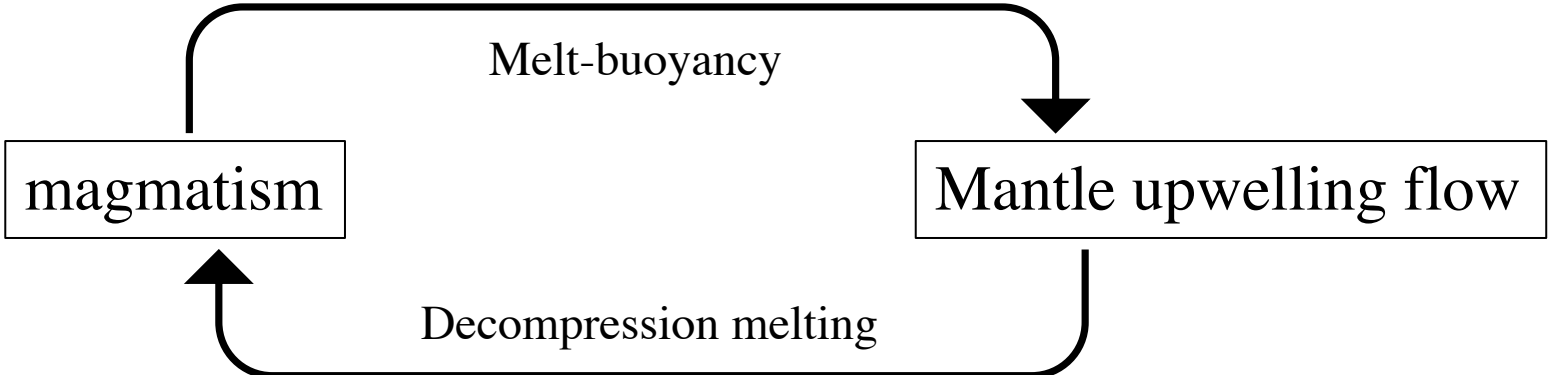
Mantle stratification



water-content



## The magmatism-mantle upwelling (MMU) feedback



**stronger at lower permeability**

地球·金星 low

permeability

high 月

Strong MMU  $\Rightarrow$  homogeneous interior

$\Leftrightarrow$  Martian meteorites

The four-stage evolution

No MMU

$\Rightarrow$  No later magmatism & degassing

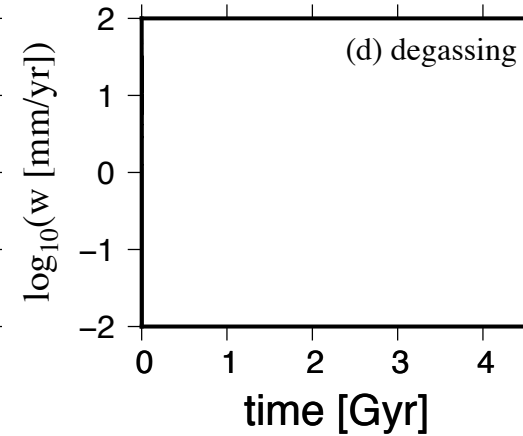
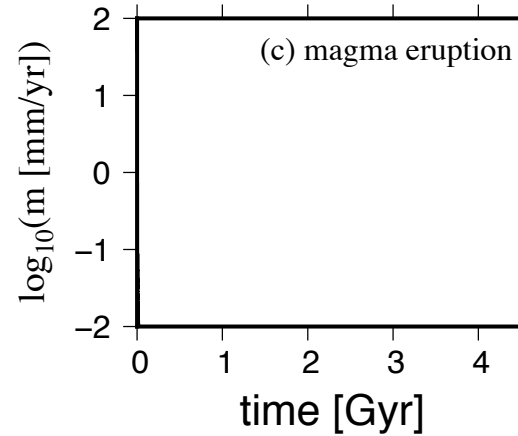
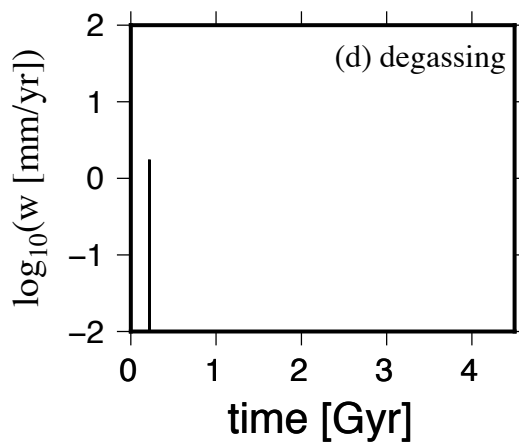
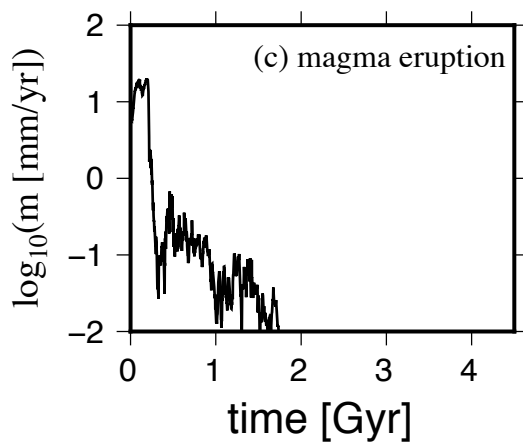
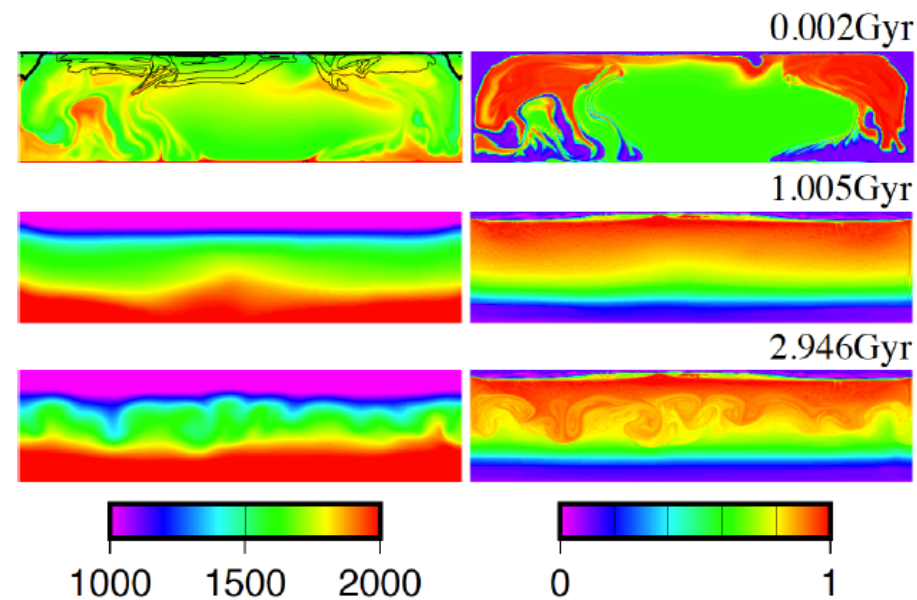
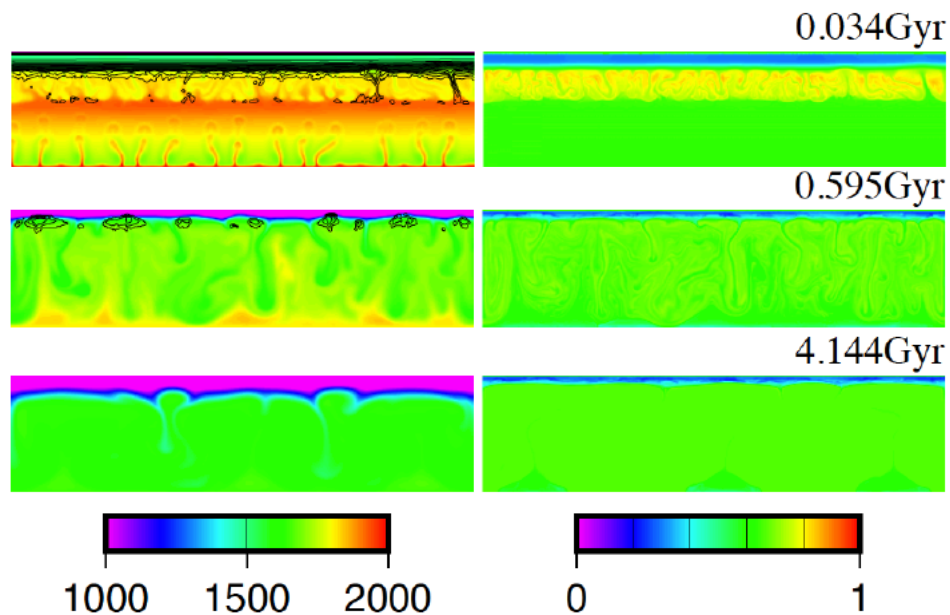
火星

(a) T & magma

(b) composition

(a) T & magma

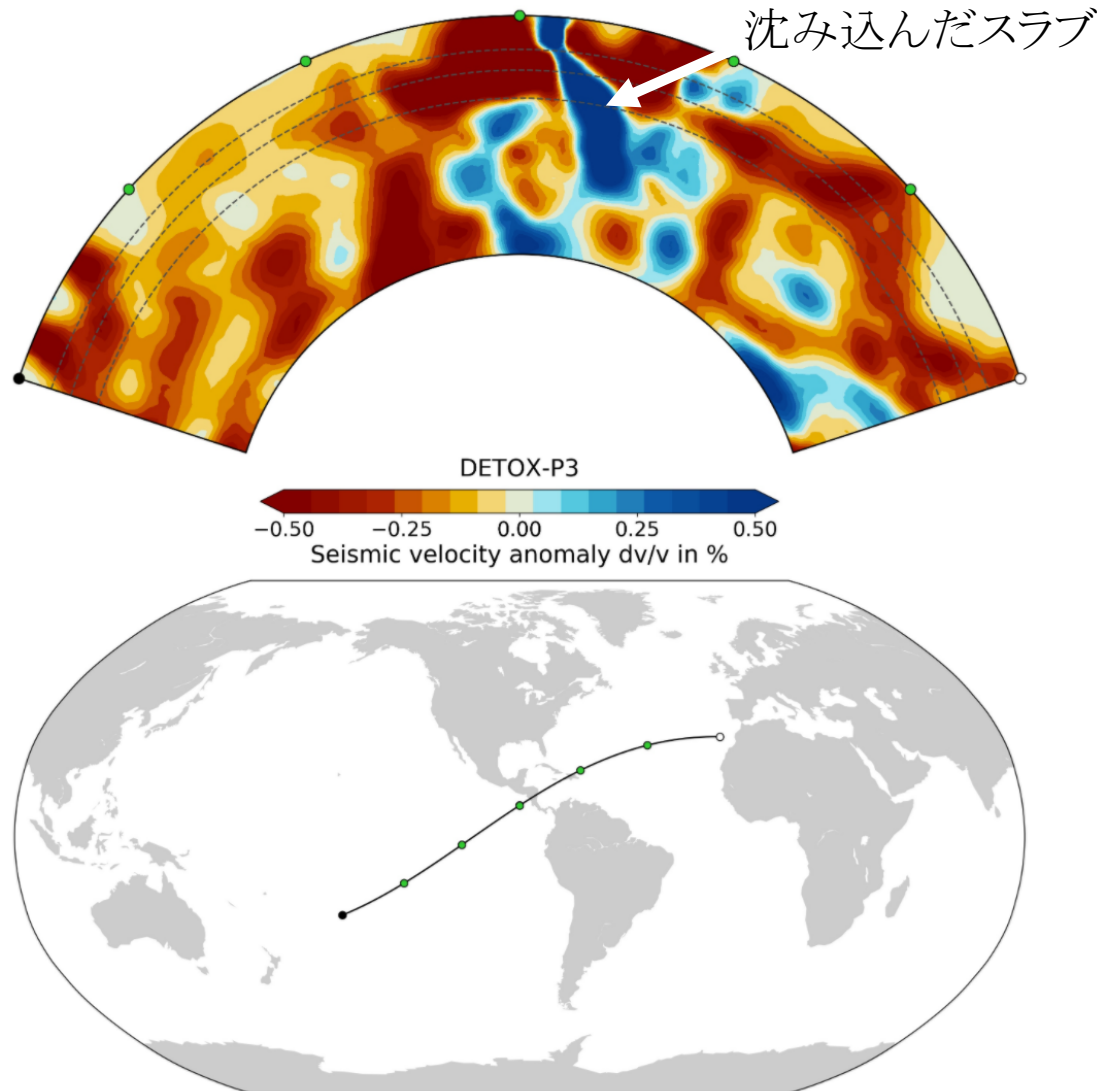
(b) composition



# 地球への展望

なぜ化学成層していない？

内部進化と表層環境の相互作用：火星⇒地球？



地球では内部進化に伴う大陸成長の様子の変化と表層環境史に密接な関係がある可能性が指摘されてきたが、決め手となる観測の裏付けがなかった。火星でそのような観測事実が見つければ、それは地球表層環境史を理解する上でも貴重な手がかりとなることが期待される。