



[7] ハビタブルプラネット



1. 温暖湿润環境の成立条件  
～水惑星システムの挙動特性～

# 地球環境の普遍性と特殊性

## ■ 水惑星としての地球

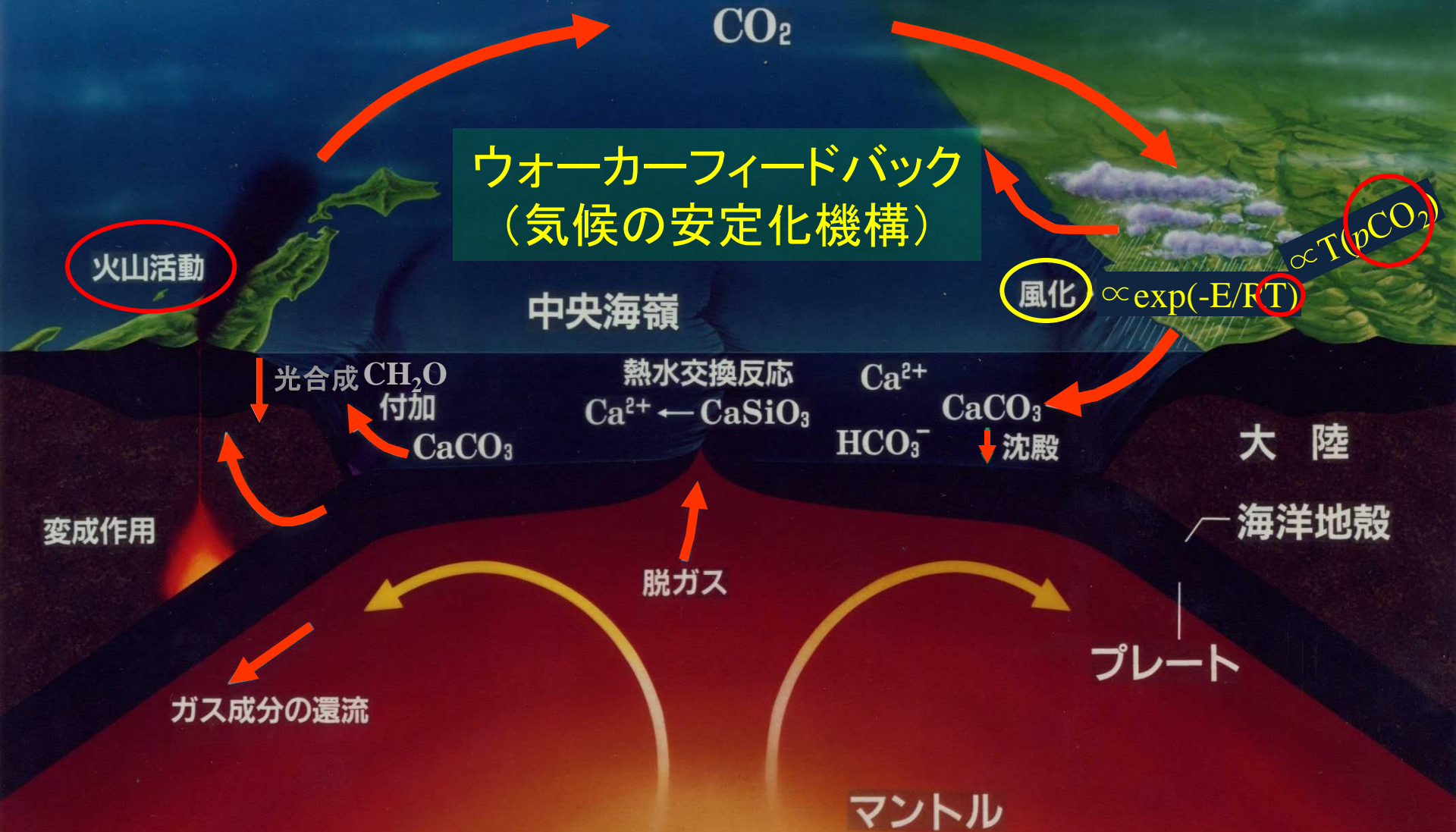
液体の水(海)の存在, 生命の存在

= 温暖湿潤環境

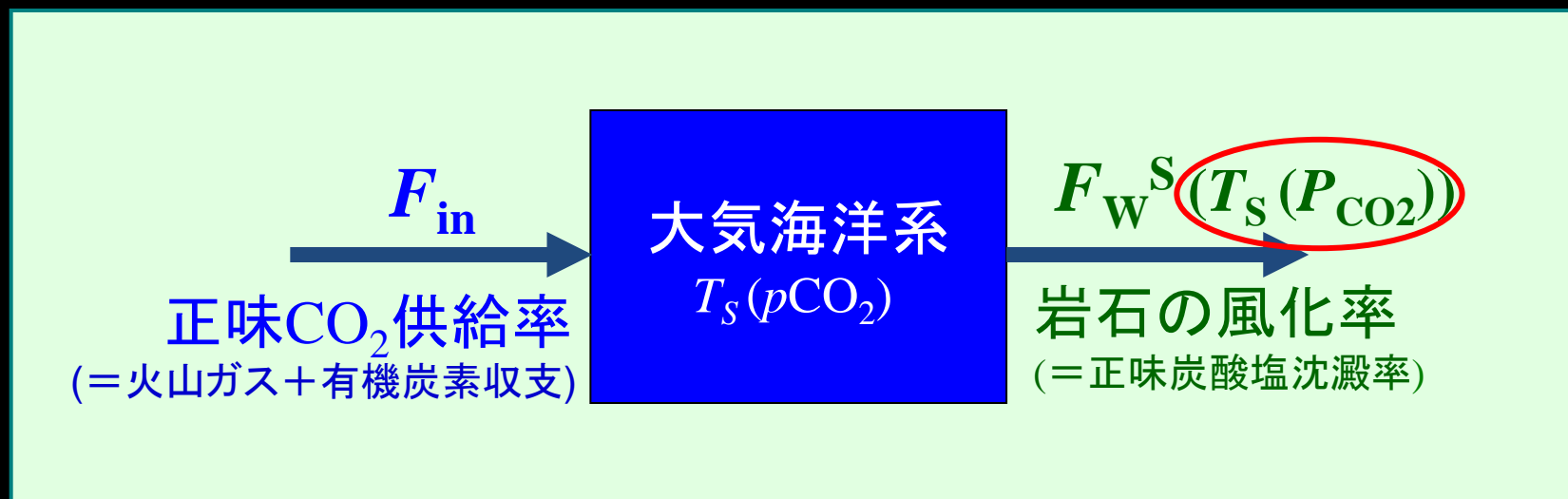
## ■ 水惑星システムの挙動

- ・ 温暖湿潤な気候の維持メカニズム
- ・ 維持メカニズムの限界／外力の変動規模
- ・ “水の存在量”は普遍的か？

# 炭素循環と地球環境の安定化



# 正味CO<sub>2</sub>供給率と気候変動



正味CO<sub>2</sub>供給率増加/低下  
(e.g., 火成活動の活発化/停滞  
有機物埋没率の減少/増加)

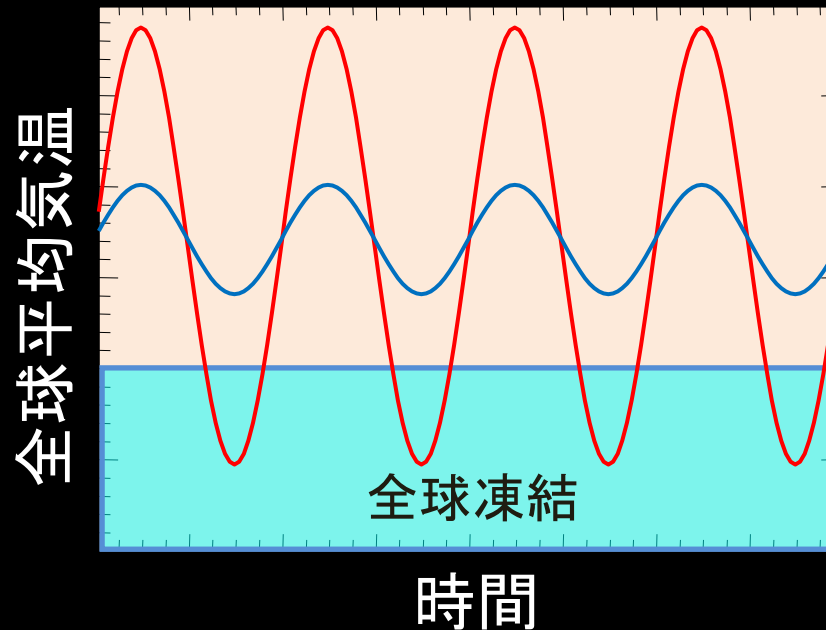


風化率増加/低下  
=CO<sub>2</sub>濃度の増加/低下  
=温暖化/寒冷化

# 海惑星の環境変動の振幅

## ■ 気候システムへの擾乱

正味CO<sub>2</sub>供給率(火山活動度等)の変化 → 気候変動



- \* 変動の振幅が重要 → 何が決めているのか？  
→ 固体惑星の活動？

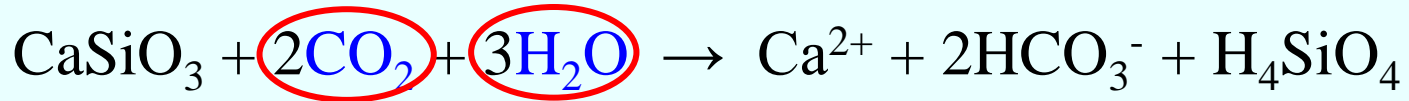
# 海惑星のパラドックス

■ **海惑星** = 液体の水の存在 = 温暖湿潤環境

CO<sub>2</sub>の温室効果によって実現可能だが・・・

**CO<sub>2</sub>は液体の水の存在下では不安定！**

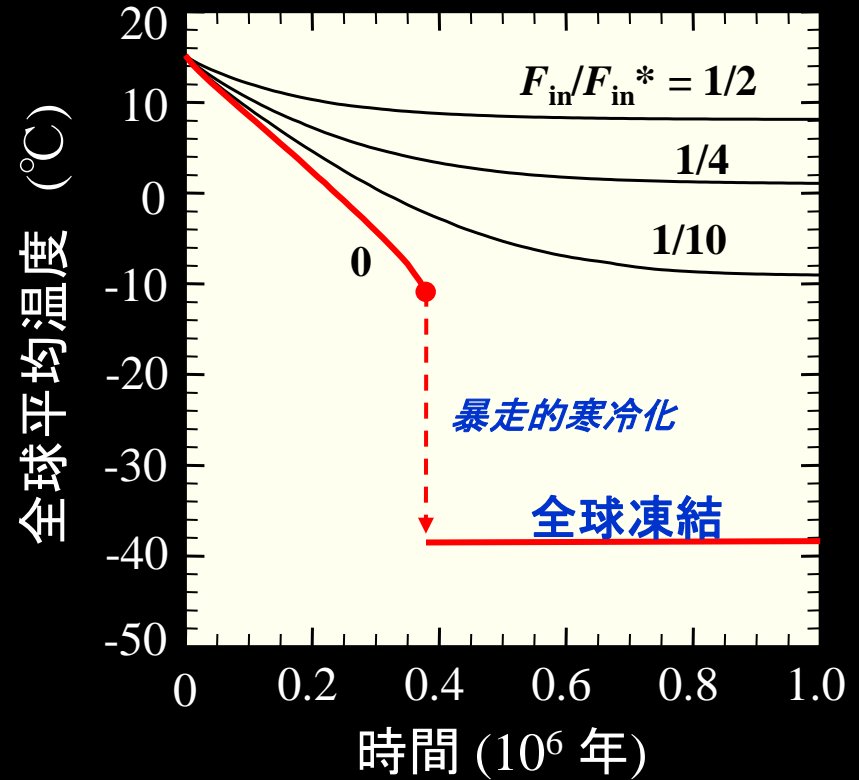
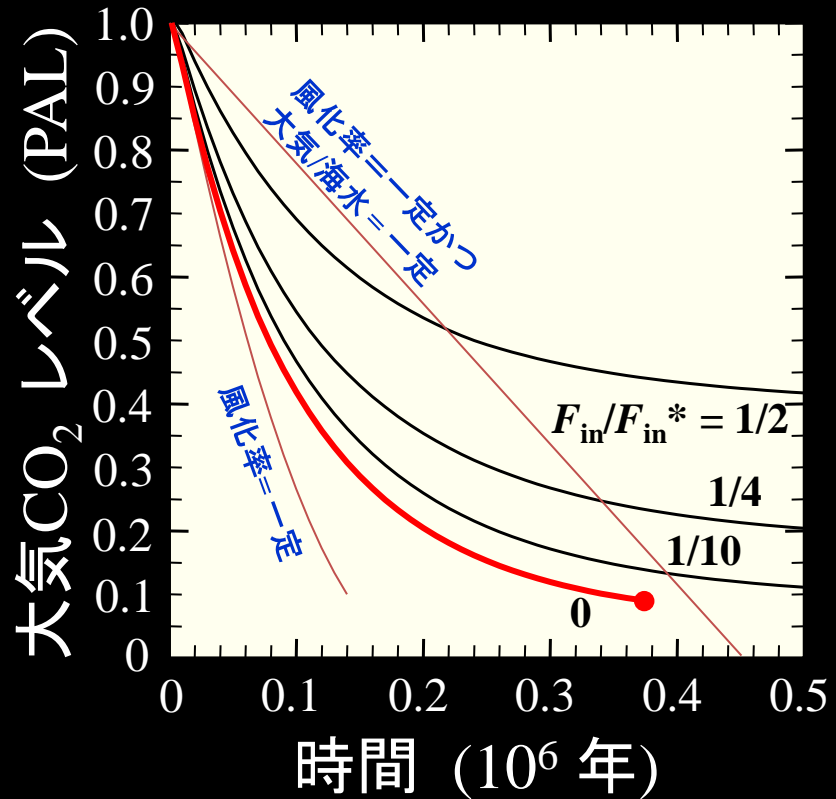
\* 珪酸塩鉱物の化学風化 + 炭酸塩鉱物の沈殿によりCO<sub>2</sub>消費



→ CO<sub>2</sub>は急速(～10<sup>5</sup>年)に消費されて**全球凍結**

→ 大気への**連続的なCO<sub>2</sub>供給**が不可欠！

# 暴走的寒冷化

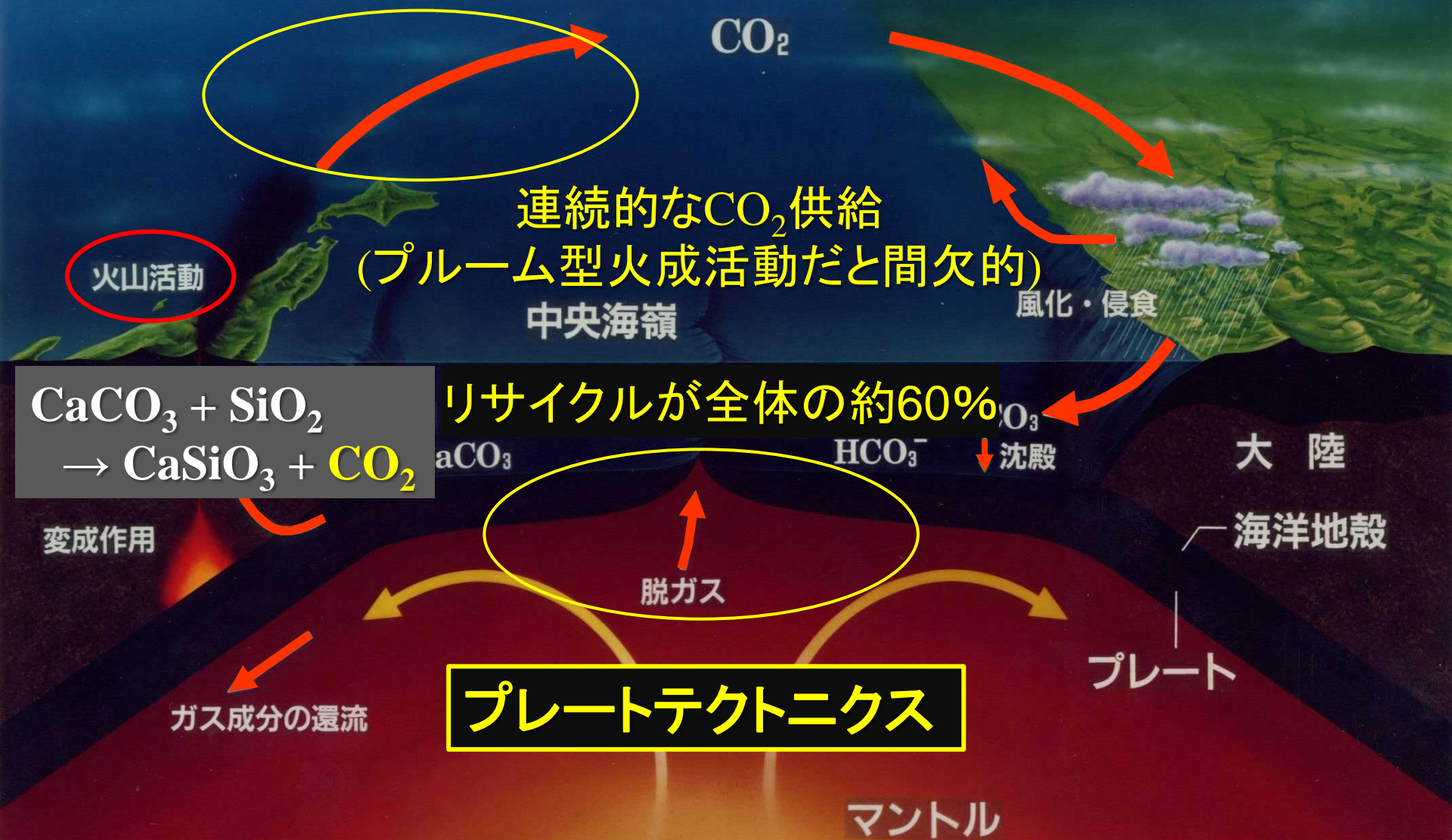


正味CO<sub>2</sub>供給率が約1/10以下 (CO<sub>2</sub>脱ガス率が約1/6以下) になると、数十万年程度で全球凍結状態へ落ち込む

\* 正味CO<sub>2</sub>供給率 = 脱ガス率 + 有機物酸化率 - 有機物埋没率



# 炭素循環と地球環境システム



# 温暖湿潤環境の維持

## ■ 温暖湿潤環境の持続性

CO<sub>2</sub>供給が連続的 (CO<sub>2</sub>消費の時間スケール~10<sup>5</sup>年)

(1) **プレートテクトニクス型火成活動** (地球)

連続的 → 温暖湿潤環境を維持

(2) **マントルプルーム型火成活動** (金星, 火星 etc.)

間欠的 → 急速に寒冷化 (全球凍結)

→ **プレートテクトニクスが重要**

# 海惑星の成立条件

## (1) 海洋の存在条件を満たす

- ・ハビタブルゾーン内部に形成
- ・十分な温室効果

## (2) 長期( $10^9$ 年)にわたってその環境が維持される

- ・環境の維持・安定化機構の存在  
→ 炭素循環 + 連続的な $\text{CO}_2$ 供給

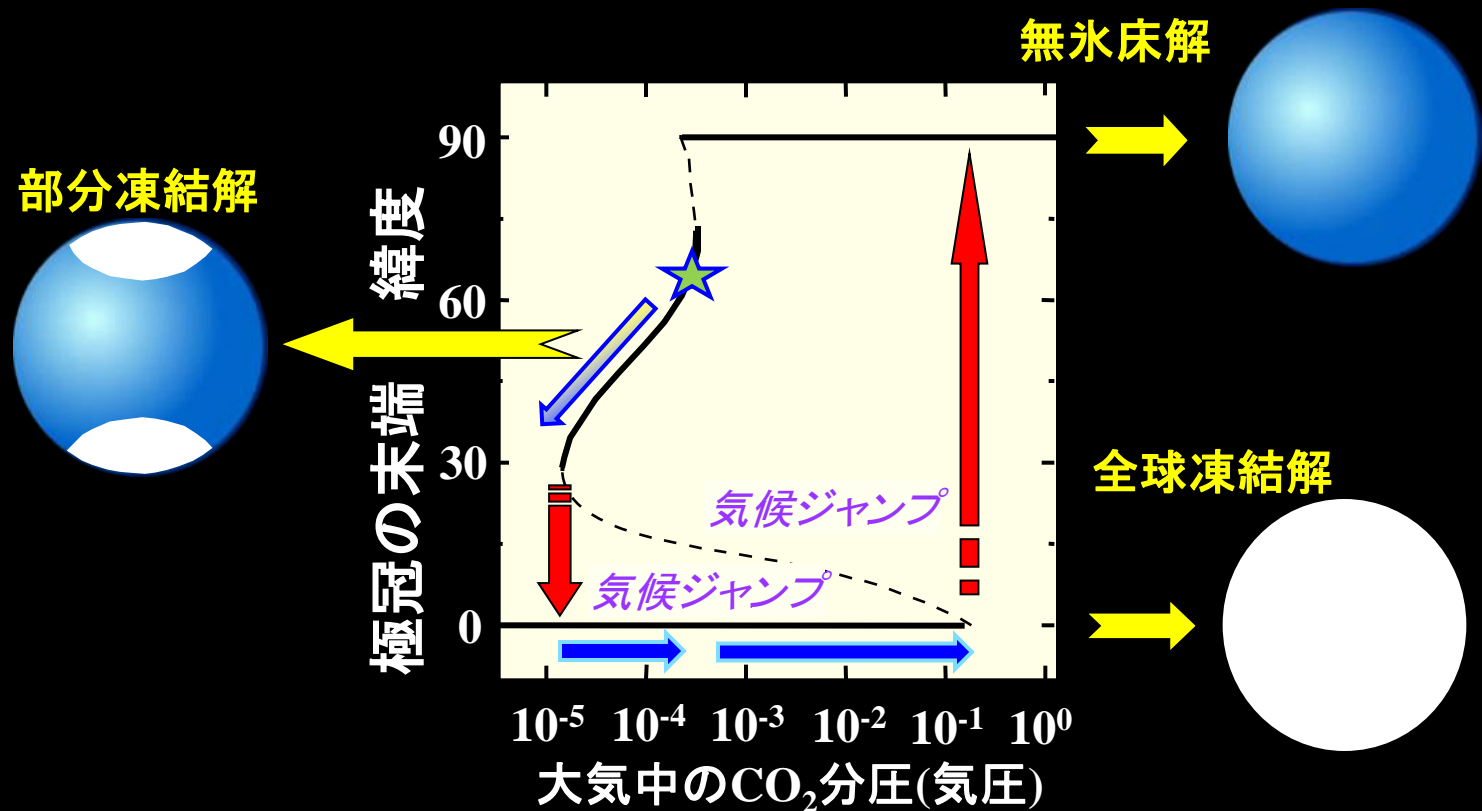
**\* 以下の場合には、全球凍結する！**

$\text{CO}_2$ が連続的に供給されない、 $\text{CO}_2$ の供給率が不十分、温室効果が足りない、ハビタブルゾーン以遠に形成 等

A bright sun in a clear blue sky over a vast, flat, light-colored landscape. The sun is positioned in the upper right quadrant, casting a strong glow across the scene. The landscape below is a uniform, light-colored expanse, possibly snow or a salt flat, extending to the horizon. The overall atmosphere is bright and clear.

## 2. スノーボールプラネット

# 水惑星の3つの安定な気候状態

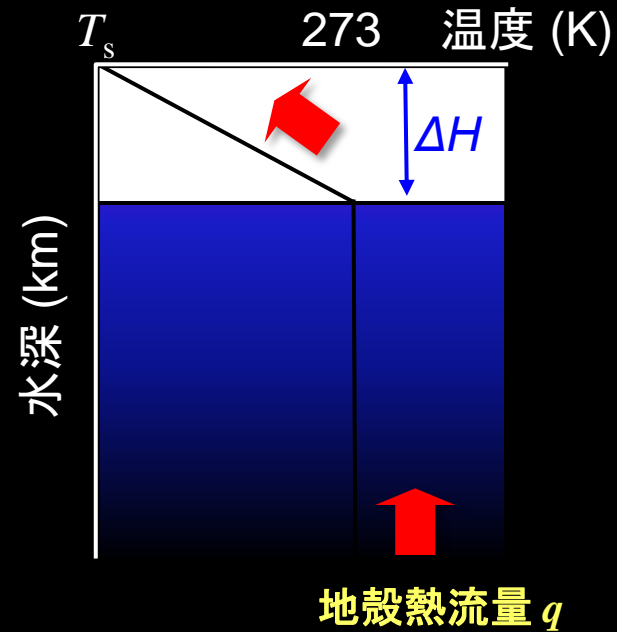
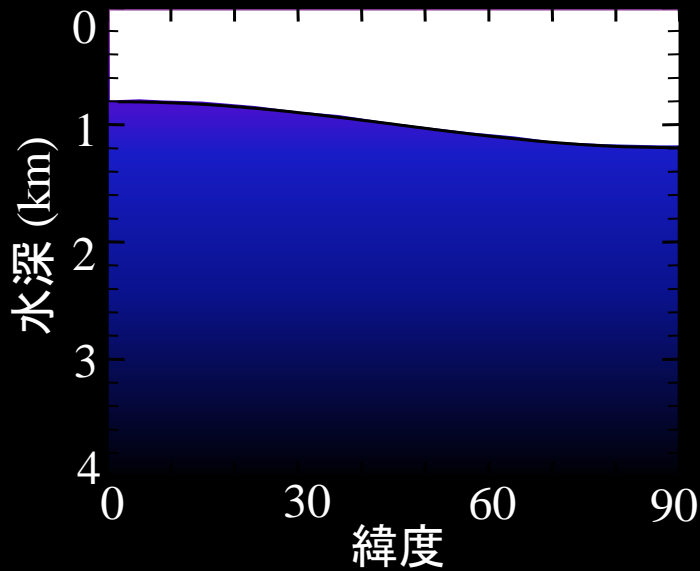


\* 実線は安定な状態（破線は不安定な状態）

南北1次元エネルギーバランス気候モデルで年平均日射量を与えた場合の定常解

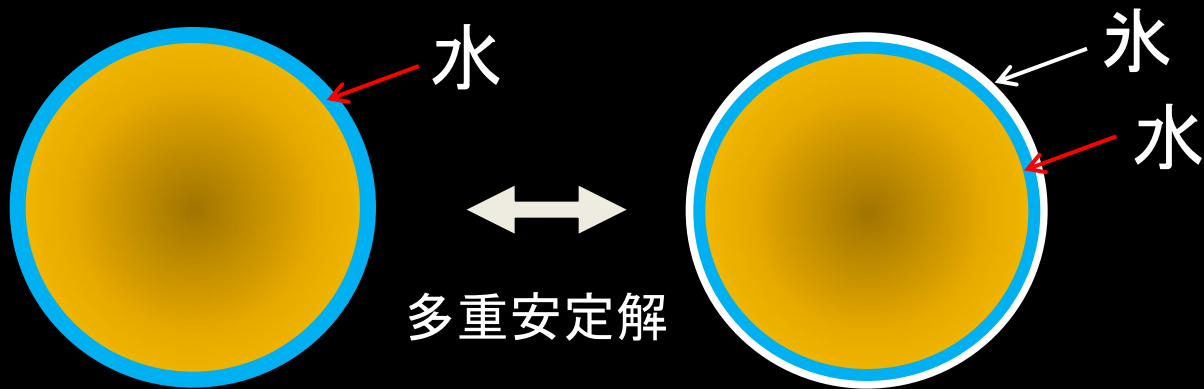
# 原生代後期のスノーボールアース・イベント

■ 全球凍結・・・ だが、海洋は完全には凍結しない



# 水惑星の2つのカテゴリ

- 水惑星
- (1) “オーシャンプラネット(海惑星)”  
温暖湿潤環境 地表に海
  - (2) “スノーボールプラネット(雪玉惑星)”  
寒冷環境 氷の下に海



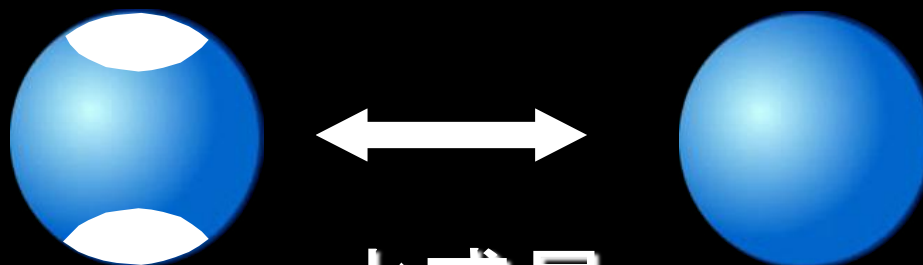
どちらも惑星表層に液体の水が存在

# 水惑星の安定状態

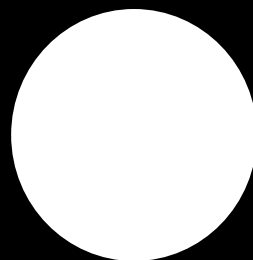
“オーシャンプラネット (海惑星)”

部分凍結解状態

無凍結状態



水惑星



全球凍結状態

“スノーボールプラネット (雪玉惑星)”



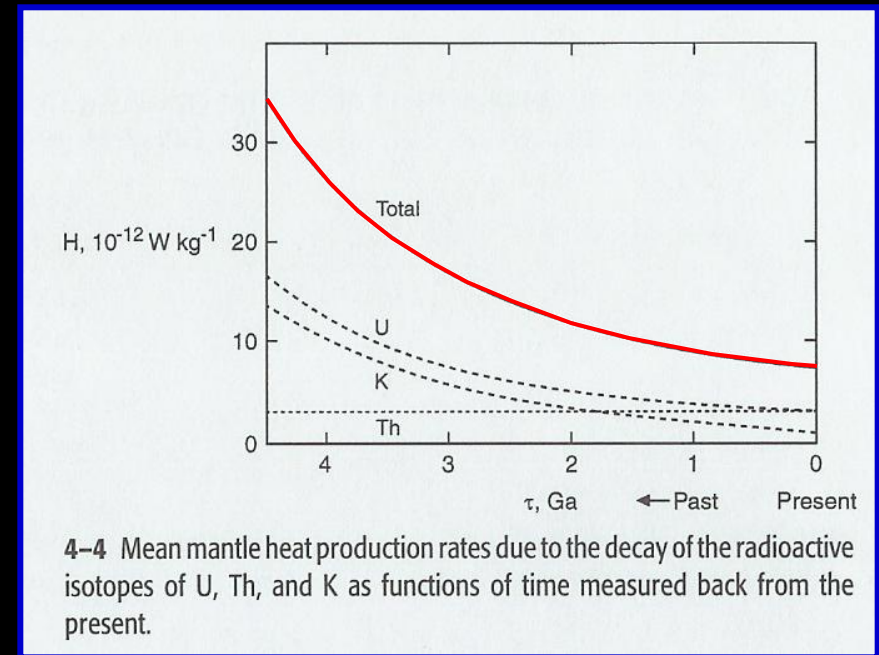
# 惑星の熱進化(熱史)

## ■ 内部熱源：放射性元素の壊変エネルギー

( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ )

同位体	発熱量 $H$ ( $10^{-5}$ W/kg)	半減期 $\tau_{1/2}$ (億年)	濃度 $C$ ( $10^{-9}$ kg/kg)
-----	------------------------------	--------------------------	------------------------------

$^{238}\text{U}$	9.46	44.7	30.8
$^{235}\text{U}$	56.9	7.04	0.22
$^{232}\text{Th}$	2.64	140	124
$^{40}\text{K}$	2.92	12.5	36.9



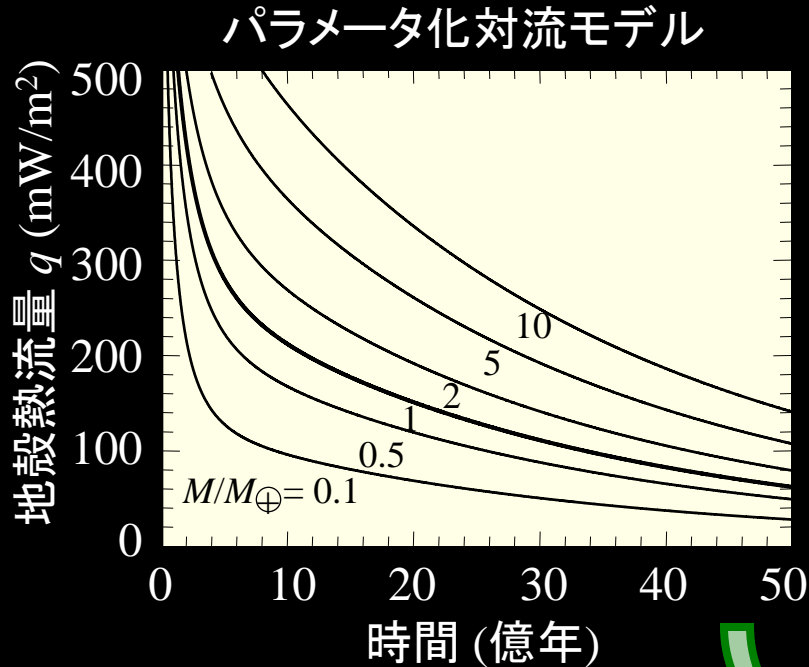
D. L. Turcotte and G. Schubert (2002)

\* 地球と同じ元素存在度を仮定

\* 総発熱量:  $E = \Sigma \int C_0 H \exp(-t/\tau_{1/2}) dt \sim 10^{31} \text{ J}$

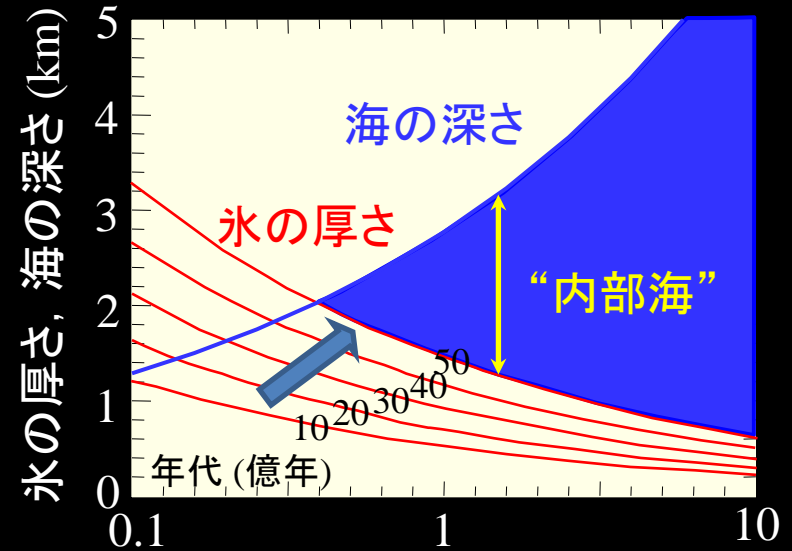
# スノーボールプラネット

## ■ 地球型惑星の熱進化



$M_{\oplus}$ : 地球質量  
放射性元素存在度が地球と同じ

## ■ 氷の下の海(内部海)の深さ



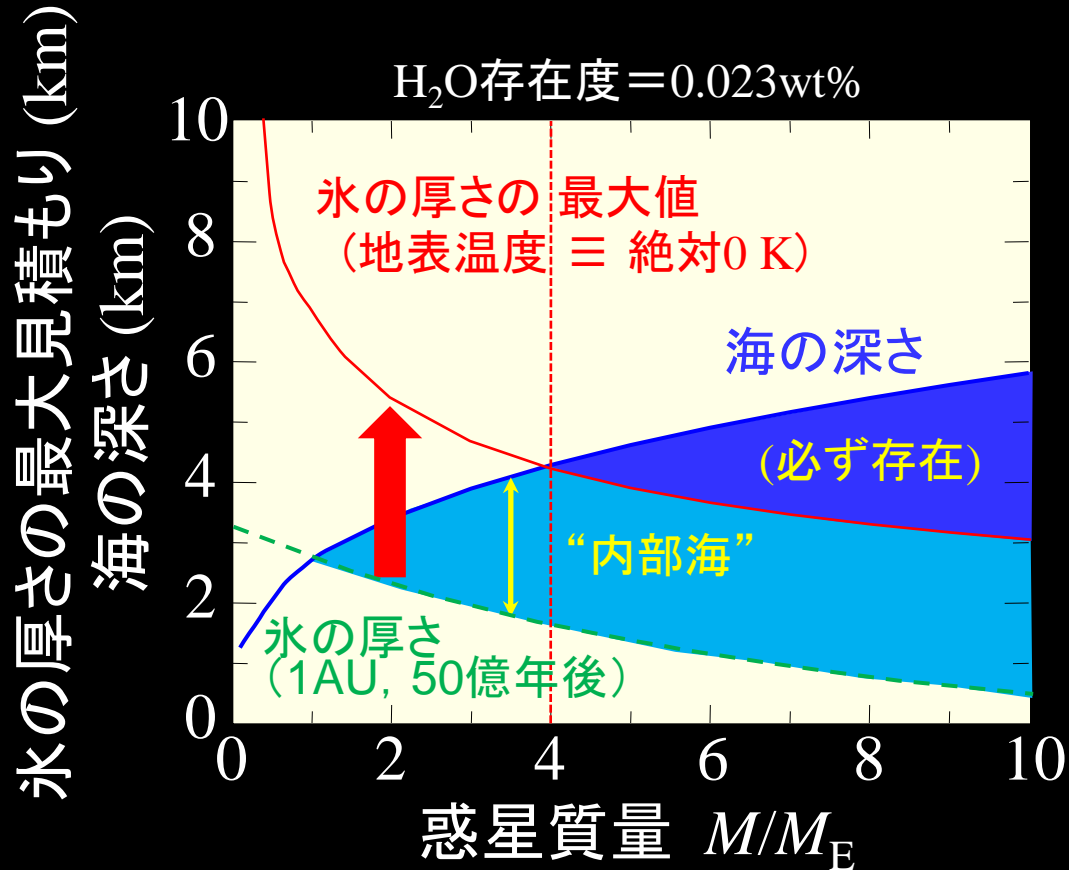
惑星質量 ( $M/M_{\oplus}$ )

地球軌道  
 $\text{H}_2\text{O}$ 存在度 = 0.023wt%

海の深さ: 大陸なし → 最小見積もり  
氷の厚さ: 温室効果なし → 最大見積もり

**\* 水の存在度が地球並みならば, 氷の下には海が存在可能!**

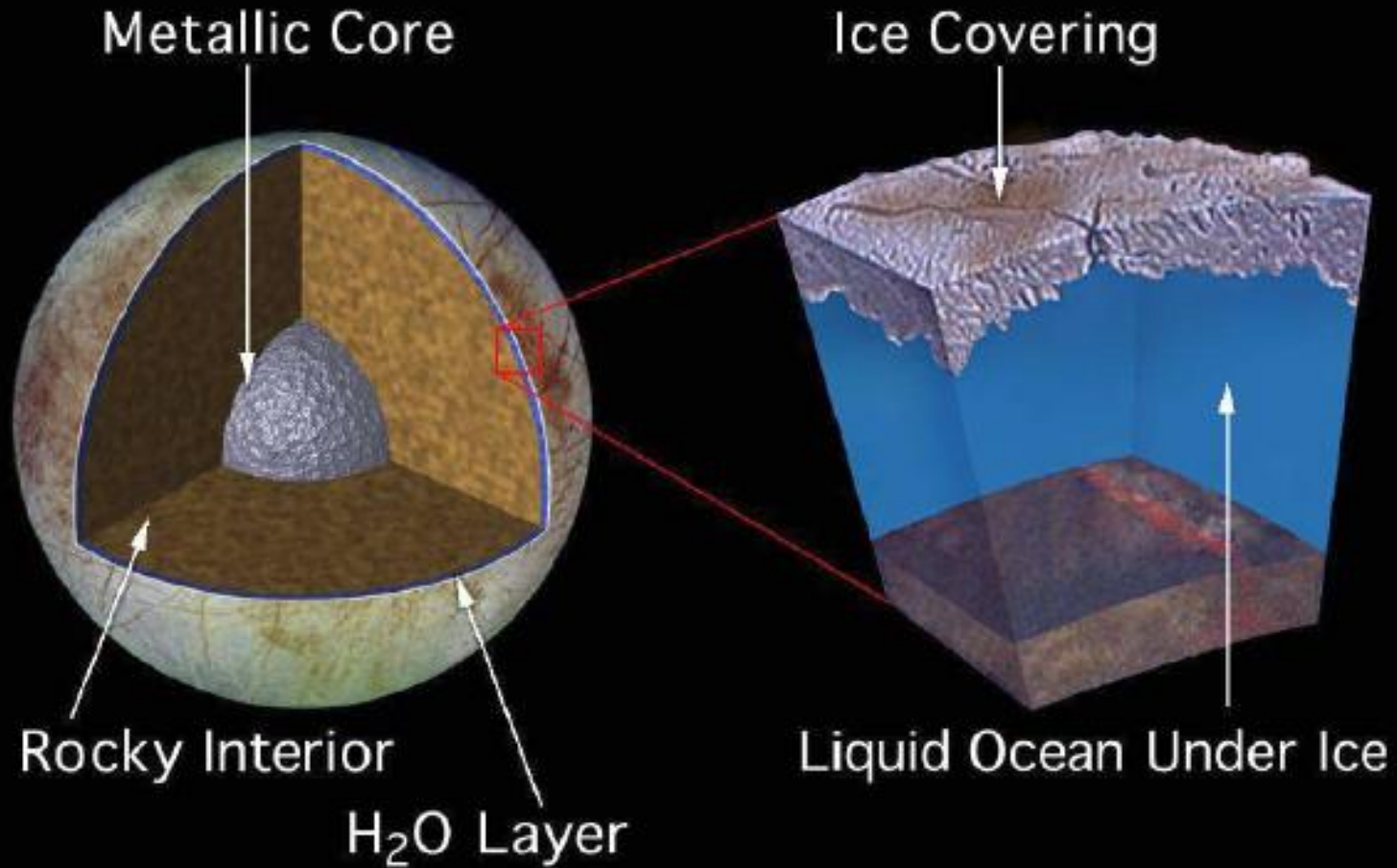
# スーパーアース



スーパーアースには液体の水が必ず存在する！  
(中心星の光度や惑星の軌道によらない！)

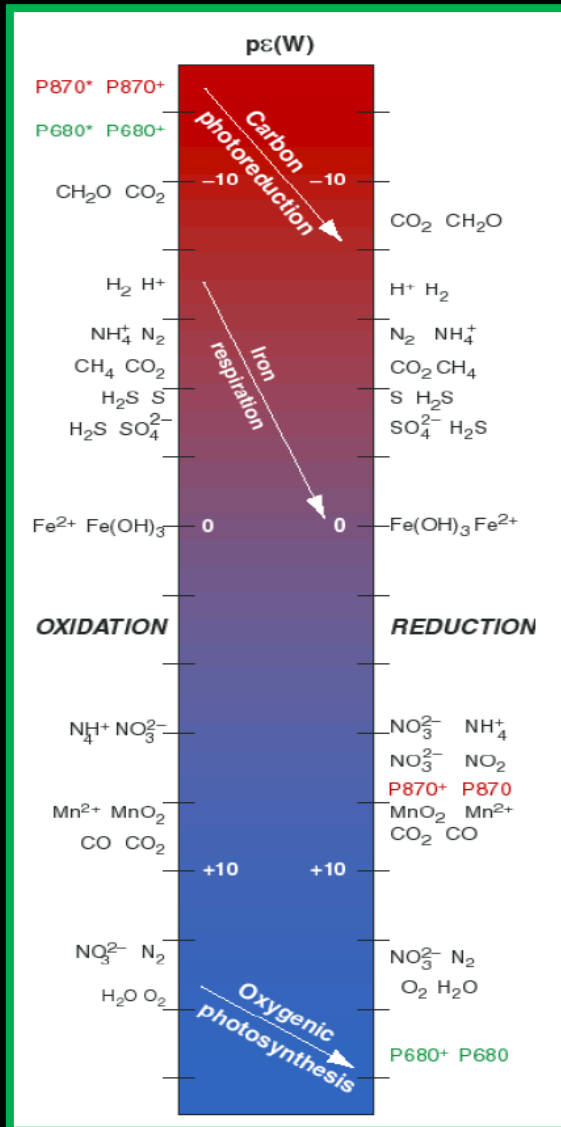
\* たとえ，“浮遊惑星”でも液体の水が存在

# エウロパ

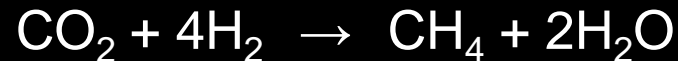


[<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01669>]

# Life in Ice-covered Oceans



火成活動 海底熱水系  
CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub> の放出

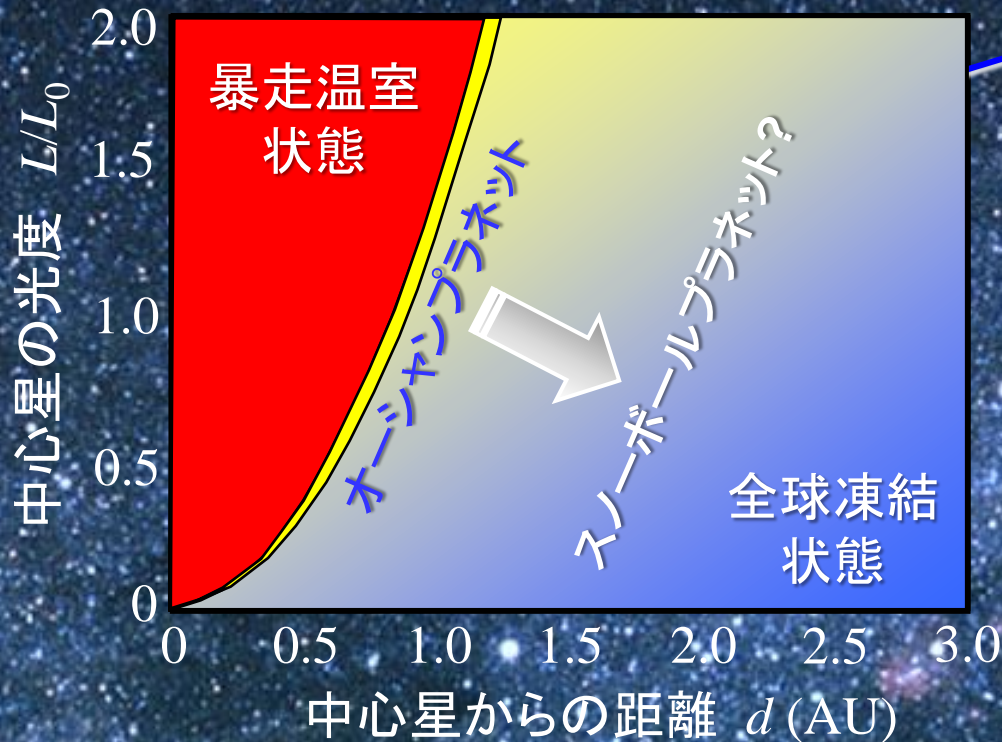


→ メタン生成バクテリア?  
硫黄酸化バクテリア?

**The thermodynamics of life.** Organisms harvest energy by coupling energetically favorable pairs of oxidation and reduction half-reactions. Reactions of common inorganic substrates are plotted according to their redox potential pε at 1 atm, pH = 7 and 25°C (41). [Fe<sup>2+</sup>] is taken to be 10<sup>-5</sup> M. Water and protons are not shown in the equations. Only redox reaction pairs with a negative net redox potential can provide energy. The primary donors of Photosystem I (P870) and II (P680) are strong reducers in their excited state and are used to fix carbon. In the oxidative (rest) state only P680 is capable of oxidizing water, producing oxygen.

# ハビタブルゾーン (HZ)

\* 生命に必須な液体の水が存在できる領域



スノーボールプラネットは普遍的に存在？  
もし生命が生存可能ならば HZ は大幅に拡張？

A bright sun with a starburst effect is positioned in the upper right quadrant of the image, shining over a vast, calm ocean. The sky is a clear, deep blue, and the water is a lighter, shimmering blue with gentle ripples. The horizon line is visible in the middle of the frame.

### 3. 水惑星の多様性

# 水惑星

海洋(水)

温暖湿润气候

花崗岩質大陸地殼

相互に依存？

炭素循環

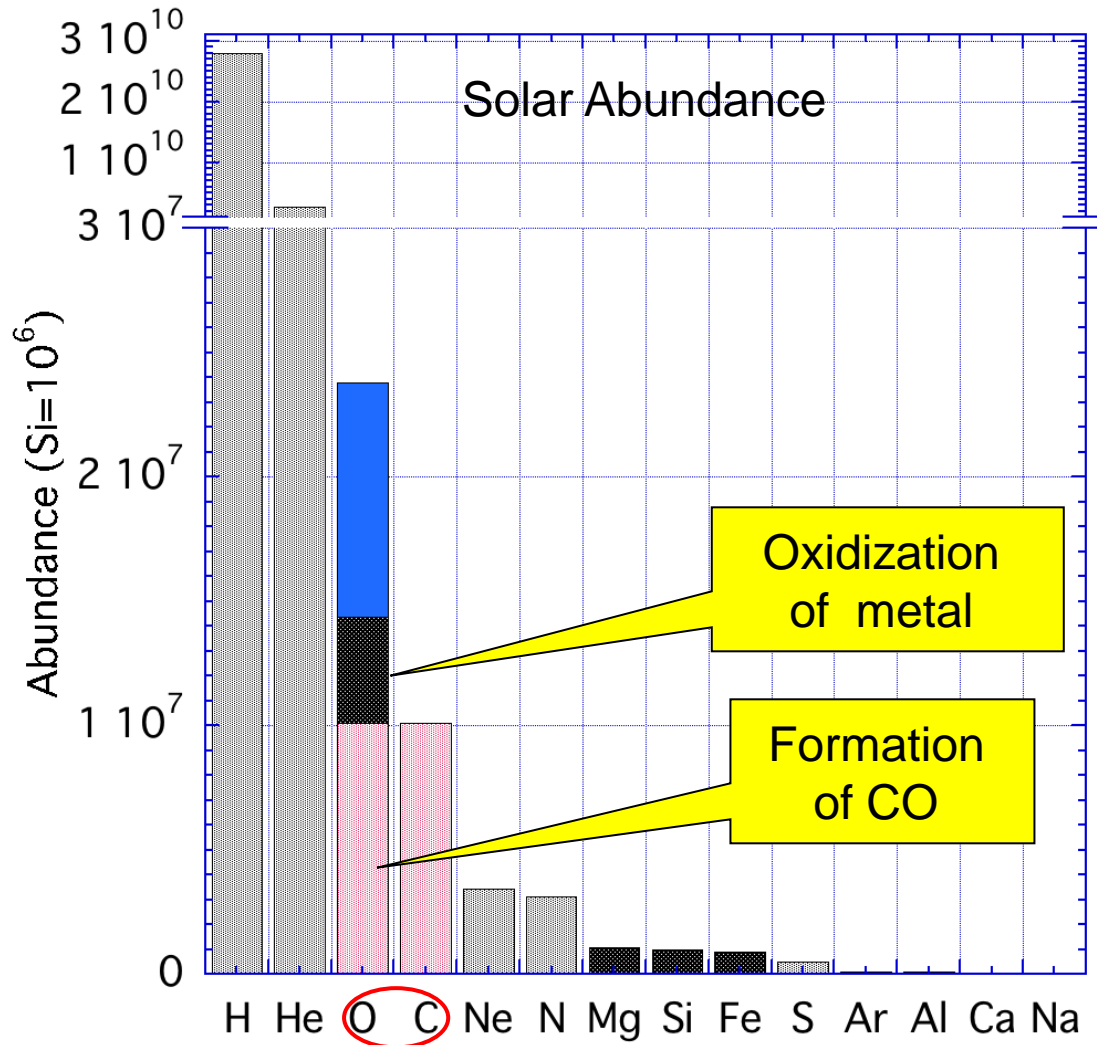
プレートテクトニクス

生命

これらはすべて水惑星の必然的特色なのか否か？



# 水の存在量



Abundant  $\text{H}_2\text{O}$  is formed unless O is removed by C

[東大・阿部豊さんのスライドを修正]

# 水惑星の多様性

## ■オーシャンプラネット（海惑星）

- ・惑星表層に大量( $\gg 0.023\text{wt}\%$ )の水が存在
- ・大陸地殻はないか、あっても海面下に水没

## ■オーシャン・ランドプラネット（海陸惑星） = 地球

- ・惑星表層に地球程度( $0.023\text{wt}\%$ )の水と陸が存在
- ・水の分布が地形の高度分布によって決まるような惑星  
= 海はつながっている

## ■ランドプラネット（陸惑星）

- ・惑星表層に水が少量存在もしくはほとんど存在しない
- ・水の分布が大気循環によって決まるような惑星  
= 水は局在化している [Abuku and Abe, 2009]

# 炭素循環の観点からみた水惑星の分類

## ■ 海惑星

- ・陸がまったく存在しない(太陽系には存在しない)
- ・CO<sub>2</sub>消費: 海底での風化作用+熱水作用  
(太古代前半の地球システムに類似?)

## ■ 海陸惑星

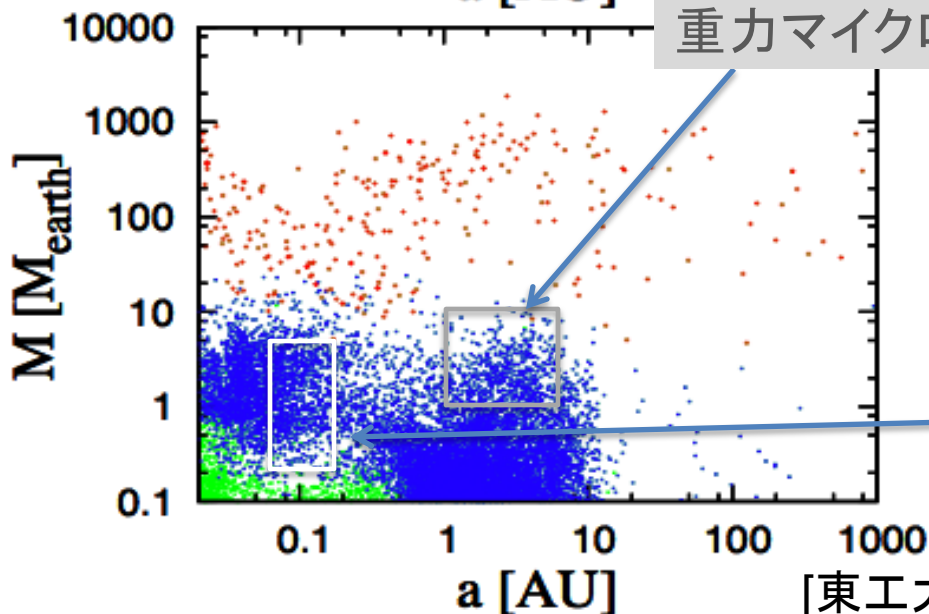
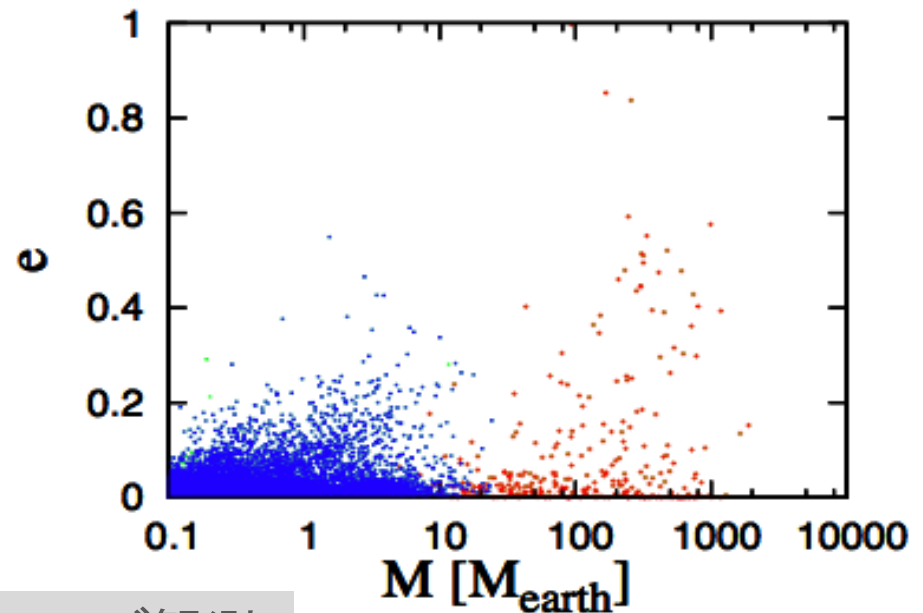
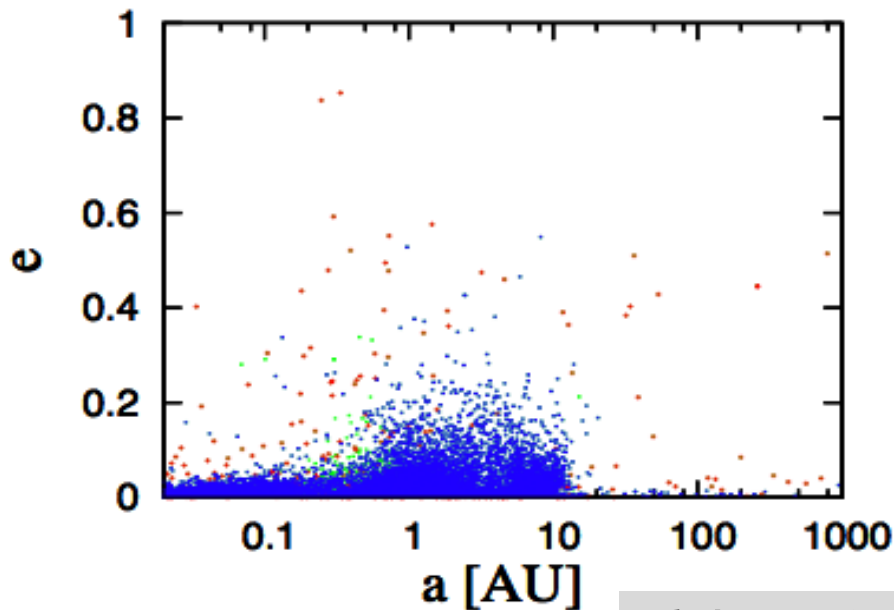
- ・海と陸が存在する(例:地球)
- ・CO<sub>2</sub>消費: 陸上での風化作用(地球型システム)

雪玉惑星

## ■ 陸惑星

- ・海が存在しない(例:月, 水星, 現在の火星)
- ・CO<sub>2</sub>消費: 極冠として凝結(火星型システム)

# M型星 ( $0.3M_{\text{sun}}, 0.01L_{\text{sun}}$ ) の理論予測



重力マイクロレンズ観測

- 地球とは異なるハビタブル惑星
  1. 氷? [GJ1214b]
  2. 自転・公転同期
  3. 紫外線・X線フラックス100倍
- 銀河系ではM型星のほうが普遍的
- 地上からドップラー法で観測可能 [すばる赤外分光器の開発中]

# Léger et al. (2004) の海惑星

## ■ 海惑星 (Ocean Planets)

- ・海の深さ～数百km 氷惑星～ガス惑星(地球型惑星ではない)  
海底は氷 → 風化作用・熱水作用等は起こらない？
- ・温室効果気体(CO<sub>2</sub>等)の調節作用がない？  
→ 海が存在できるかどうかは大気中に含まれている  
温室効果気体の量で左右される



# まとめ

1. 液体の水が存在するためには、その惑星が  
ビタブルゾーン内部に形成され、十分な温室効果  
を持ち、さらに長期間にわたる環境維持メカニズム  
を持つ必要がある。
2. CO<sub>2</sub>が連続的に供給されない、CO<sub>2</sub>の供給率が  
不十分、温室効果が足りない、ハビタブルゾーン  
以遠形成された場合には、全球凍結する
3. スノーボールプラネットは、ハビタブルかも知れ  
ず、ハビタブルプラネットやハビタブルゾーンの概念  
は拡張が必要になるかも知れない。

# 参考文献

- 田近英一, 1999: 連続脱ガスと地球環境の安定性: 地球化学的炭素循環モデルからの制約, *地球化学(日本地球化学会誌)*, **33**, 255-263.
- E. Tajika, 2003: Faint young Sun and the carbon cycle: Implication for the Proterozoic global glaciations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **214**(3-4), 443-453.
- D. L. Turcotte, G. Schubert, 2002: *Geodynamics*, Cambridge University Press pp456
- E. Tajika, 2008: Snowball planets as a possible type of water-rich terrestrial planets in the extrasolar planetary system, *Astrophysical Journal Lett.*, **680**, L53-L56.
- J. Gaidos, H. Nealson and L. Kirschvink, 1999: Life in Ice-Covered Oceans, *Science*, 284(5420), 1631-1633.

# 参考文献

- Y. Abe, CPS 6th International School of Planetary Sciences Planetary Atmospheres, 2010, Jan 8, lecture8.  
[https://www.cps-jp.org/~pschool/2010-01-04/08\\_Abe/lecture1/pub/Abe-Habitable-e3\\_with\\_reference.pdf](https://www.cps-jp.org/~pschool/2010-01-04/08_Abe/lecture1/pub/Abe-Habitable-e3_with_reference.pdf)
- 井田茂,2011: スーパーアース 地球外生命はいるのか, PHPサイエンスワールド新書 pp119