



地球惑星環境進化学

田近 英一

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻

tajika@k.u-tokyo.ac.jp

惑星科学フロンティアセミナー2011

「地球惑星環境進化学」

■ 予定

11月10日(水)

第01回 水惑星環境システムの安定性

第02回 炭素循環と気候進化

第03回 大気進化と酸素

第04回 全球凍結イベント

11月11日(木)

第05回 物質循環と気候変動

第06回 海洋無酸素イベント

第07回 天体衝突イベント

第08回 ハビタブルプラネット

■ 参考書

DOJIN選書「地球環境46億年の大変動史」(化学同人) 田近英一

新潮選書「凍った地球」(新潮社) 田近英一著

第1回惑星科学フロンティアセミナー（1992年）

日程：1992年7月18日～20日，於草津セミナー・ハウス（会場：草津ナウリゾートホテル）

世話人代表：田近 英一（東大・気候システム研究センター）

吾妻 瞬一（東大・理），倉本 圭（東大・理），中本 泰史（東大・理）

「惑星初期進化／原始地球環境と生命の起源」

(1) 生化学の基礎講座

生命とは何か－生命の起源を理解するために－（朝原治一／宇宙研）

(2) 原始地球環境

- a) 大気・海洋・地表面状態（阿部 豊／東大・理）
- b) 隕石重爆撃とその地球表層環境に対する影響（杉田精司／東大・理）
- c) 原始地球環境についての地質学的な情報について（萩谷 宏／東大・理）

(3) 生命の起源

- a) 模擬原始地球環境下での生体有機物質モノマーの合成（小林憲正／横浜国大・工）
- b) 模擬原始地球環境下でのポリペプチドの生成（伊藤雅彦／名大・水圏研）
- c) 生命起源論の新しい展開（柳川弘志／三菱化成生命科学研究所）

(4) 総合討論

2011年惑星科学フロンティアセミナー

「地球惑星環境進化学」

この宇宙にはハビタブルな惑星が多数存在するだろう。
しかし、それにはどのような条件が必要なのか？

地球は「典型的」なハビタブルプラネットではないかも知れないが、ハビタブルプラネットの唯一の実例である。
地球のハビタビリティを理解することは、そうした問題を考える上で必要不可欠であろう。

本セミナーでは、地球環境の形成と進化及び変動、生物進化との関わりについて、比較惑星環境学的視点で考えてみたい。



[1] 水惑星環境システムの安定性

1. ハビタビリティと水惑星

ハビタビリティ(生命の生存可能性)

■生命の存在

これまで知られている地球上のすべての生命は、液体の水が必要不可欠

■水が液体状態で存在可能な惑星

= 水惑星

≈ ハビタブルプラネット (生命存在可能惑星)

→ 水惑星の存在条件は？

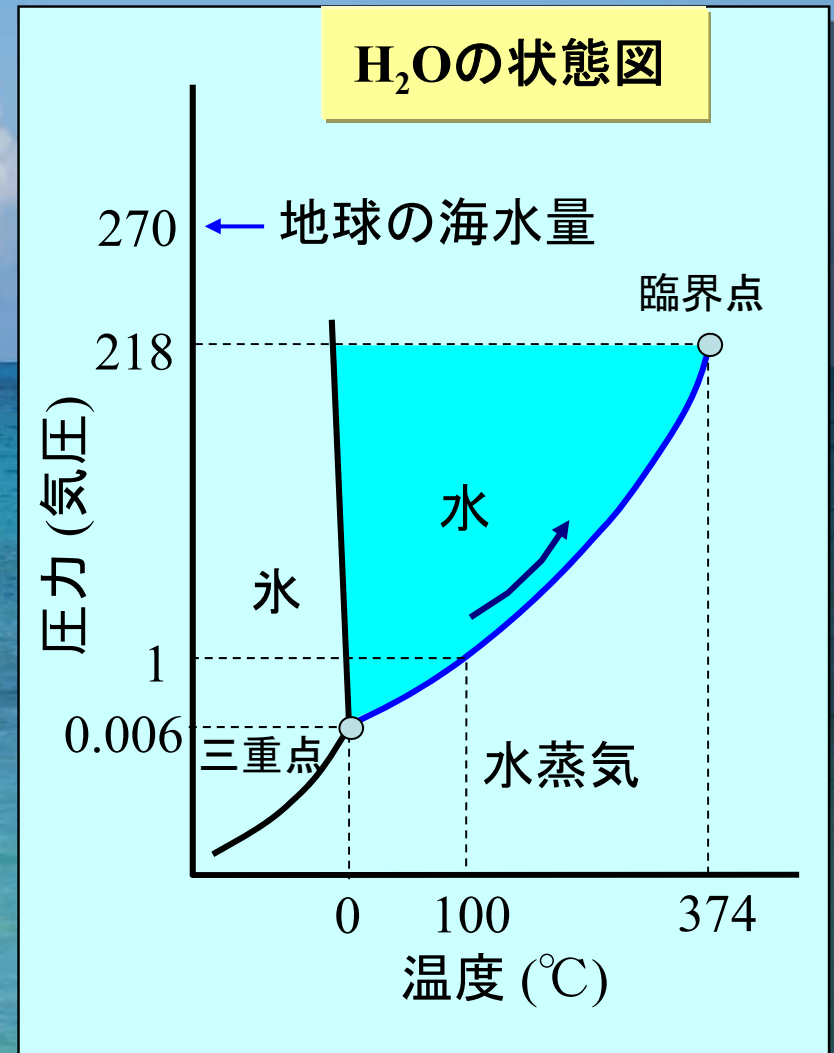
液体の水(海)の存在条件

■ 温度条件

~0 °C (三重点) < 温度 < 374 °C (臨界点)

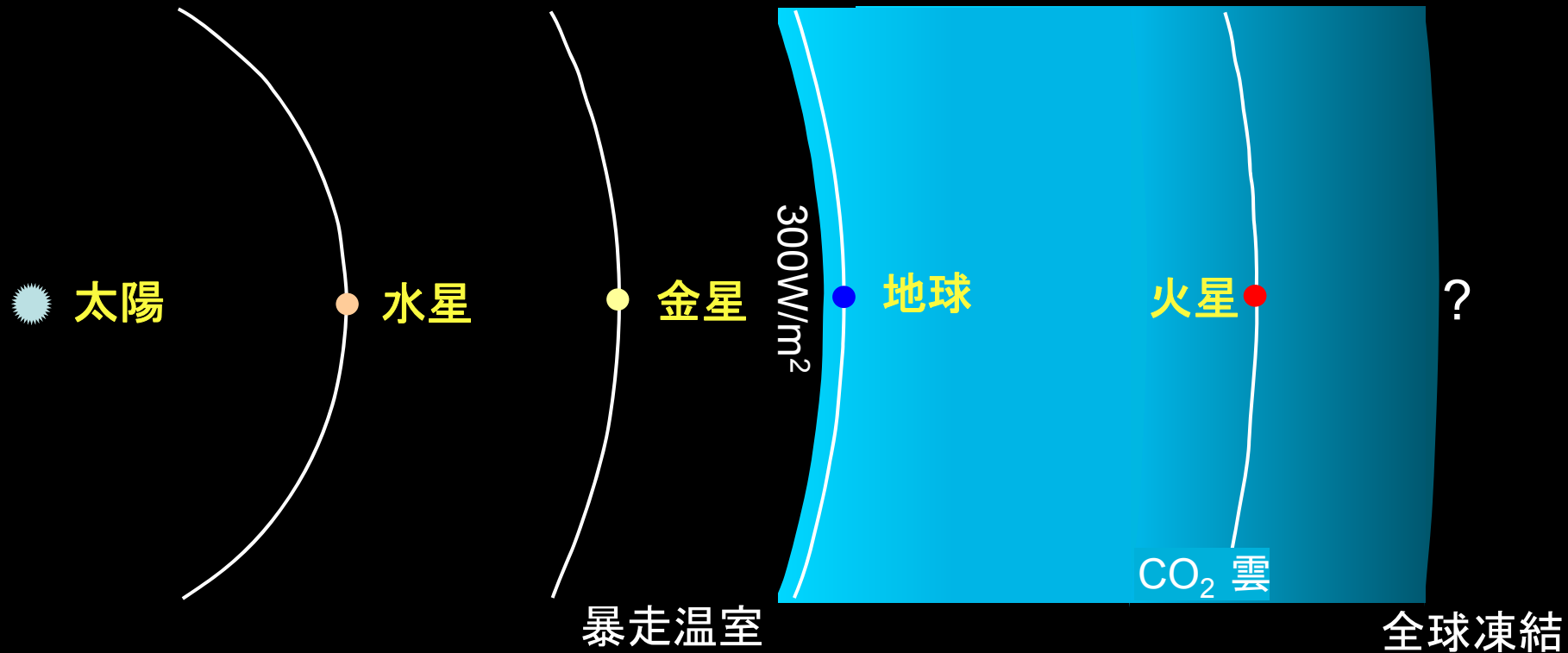
■ 条件を満たさない場合

- 1) 海が蒸発してしまう
暴走温室状態
- 2) 海が凍結してしまう
全球凍結状態



太陽系におけるハビタブルゾーン

* 生命に必須な液体の水が存在できる軌道領域



しかし... 火星もハビタブルゾーンにあるのに酷寒の惑星！

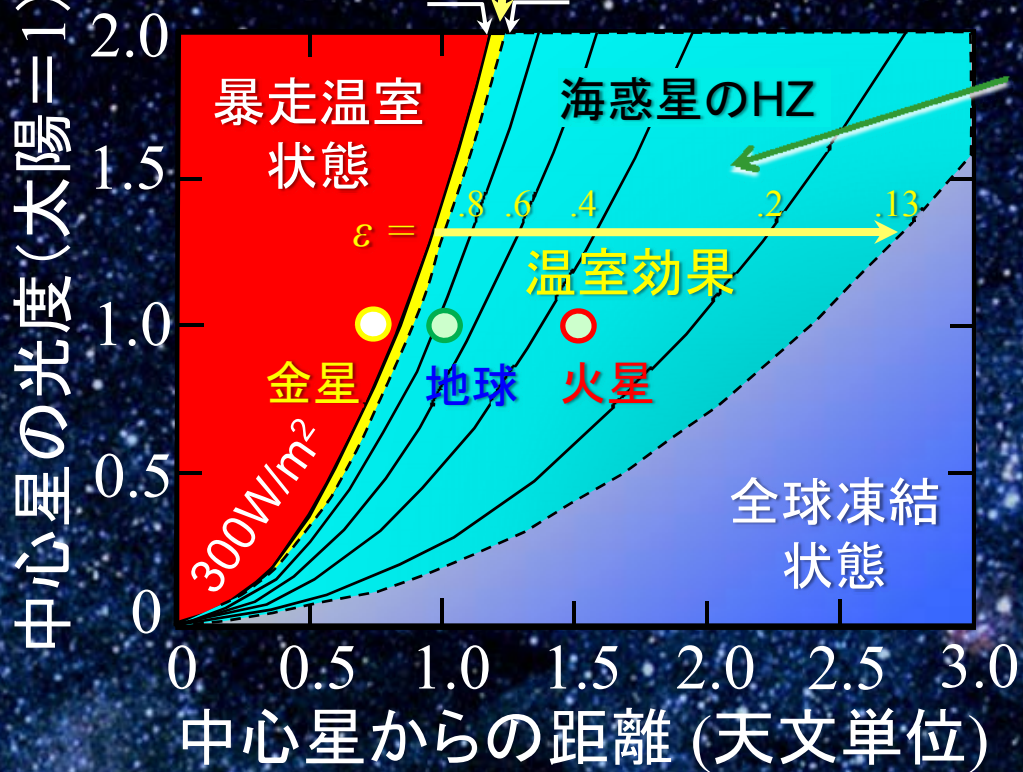
地球もかつて全球凍結していた!?

ハビタブルゾーン (HZ)

■ 液体の水が存在可能な軌道条件

液体の水が必ず存在できる条件

水蒸気大気の射出限界 | 平衡温度=273 K



温室効果の低下によって全球凍結

液体の水が存在
可能とは限らない
(例:火星)

* HZとは水惑星が存在できる「必要条件」であって十分条件ではない

ハビタブルプラネットの存在条件

■ 海洋の存在条件を満たす

(太陽放射, 惑星アルベド, CO_2 分圧, 海水量など)

(a) ハビタブルゾーン内部に形成

(b) 十分な温室効果

■ そのような環境が長期(10^9 年)にわたって維持される

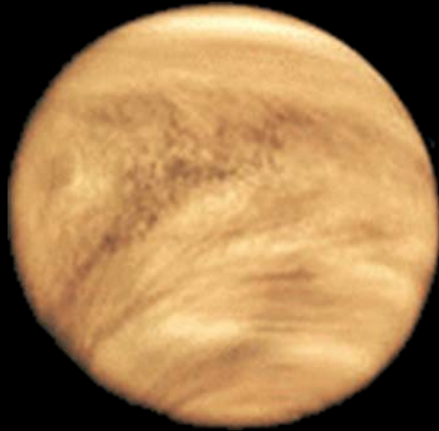
* 表層環境の維持・安定化機構が必要

2. 地球環境の特色

地球型惑星の環境

	金星	地球	火星
大気圧	95気圧	1気圧	0.006気圧
全球平均温度	460°C	15°C	- 60°C
水の存在量	極微量	270気圧相当	(不明)
水の存在形態	水蒸気	海洋	氷(極冠, 永久凍土)

水惑星



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Venuspioneeruv.jpg>



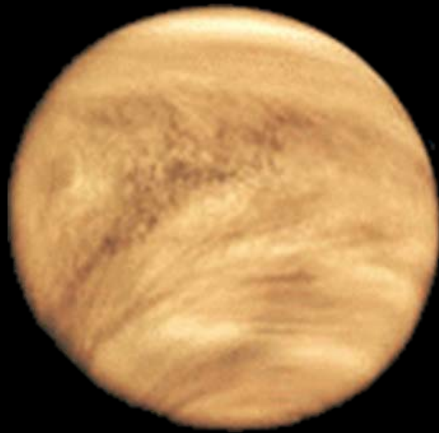
http://www.astro.osu.edu/~pogge/TeachRes/Ast161/EarthMoon/Earth_galileo.jpg



http://ca.wikipedia.org/wiki/File:Mars_Hubble.jpg

地球型惑星の大気組成

	金星	地球	火星
窒素(N ₂)	1.8	78.1	2.7
酸素(O ₂)	—	20.9	—
アルゴン(Ar)	0.02	0.93	1.6
二酸化炭素(CO ₂)	98.1	0.035	95.3



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Venuspioneeruv.jpg>



http://www.astro.osu.edu/~pogge/TeachRes/Ast161/EarthMoon/Earth_galileo.jpg



http://ca.wikipedia.org/wiki/File:Mars_Hubble.jpg

地球環境の3つの特徴

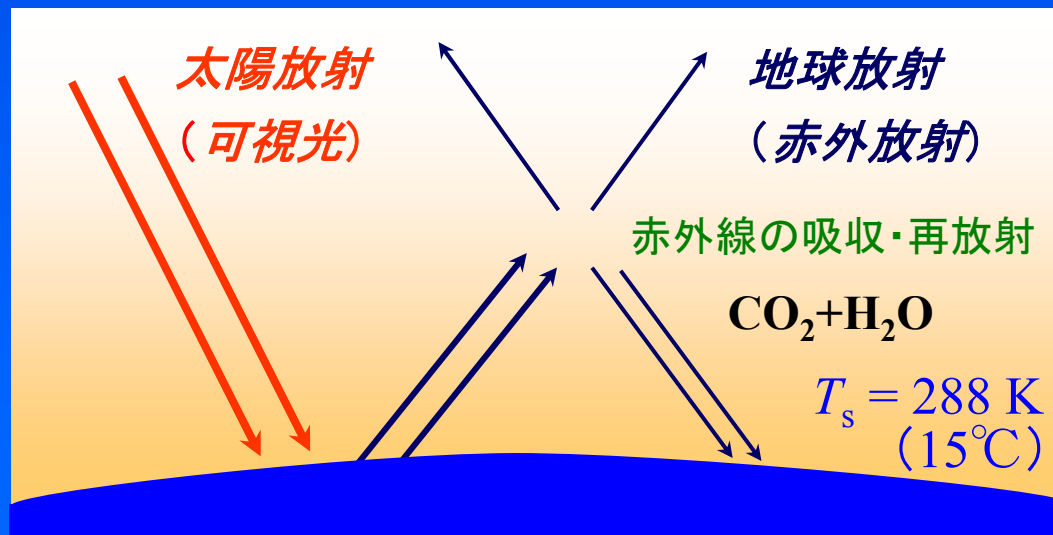
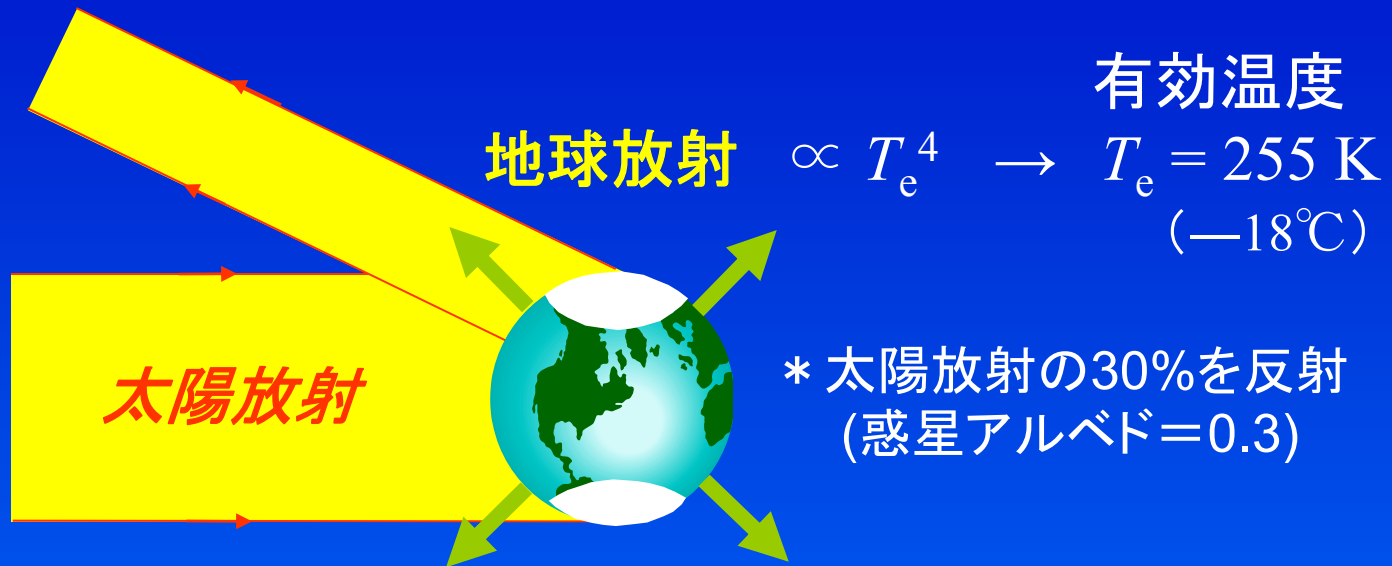
1. 二酸化炭素が大気の主成分でないこと
2. 酸素が大気の主成分であること
3. 地表に液体の水(海洋)が存在すること
(温暖湿潤な気候)



A photograph of a crescent moon in a dark sky, positioned above a bright blue and white horizon line. The moon is a thin, curved sliver of light against the black background. The horizon line is a sharp, bright white line that separates the dark sky from a lighter blue area below it.

3. 水惑星気候の多重性

地球のエネルギー収支



温室効果

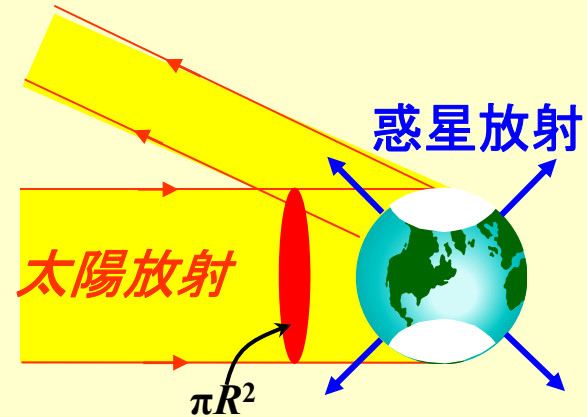
$$\begin{aligned}\Delta T &= T_s - T_e \\ &= 33 \text{ K}\end{aligned}$$

エネルギー収支

正味太陽放射＝惑星放射

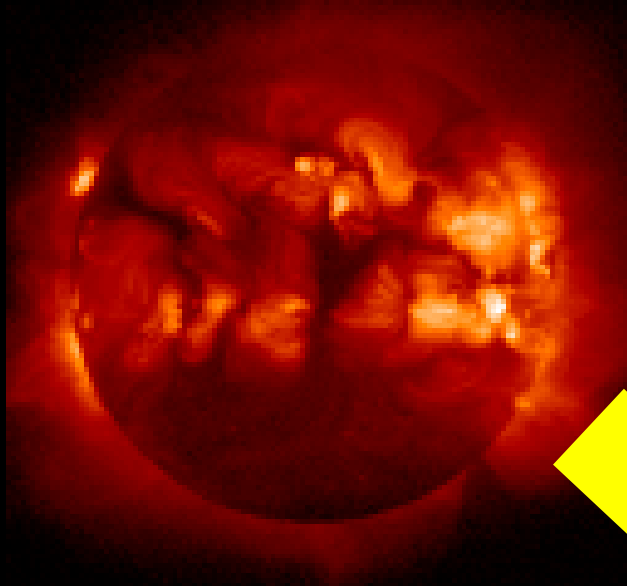
$$\pi R^2(1-A)S/d^2 = 4\pi R^2\sigma T_e^4$$

R : 惑星半径, A : 惑星アルベド(反射率),
 S : 太陽定数, d : 太陽からの距離(AU),
 T_e : 有効温度,
 σ : ステファン・ボルツマン定数



	太陽からの 距離 d (AU)	太陽定数 $1/d^2$	アルベド A	正味太陽放射	有効温度 T_e (K)	地表面温度 T_s (K)
金星	0.72	1.93	0.77	0.44	227	737
地球	1.00	1.00	0.30	1.00	255 → 288	
火星	1.52	0.43	0.15	0.37	217 33K	220

惑星環境を支配する要因



太陽光度
(大気上端での太陽放射)

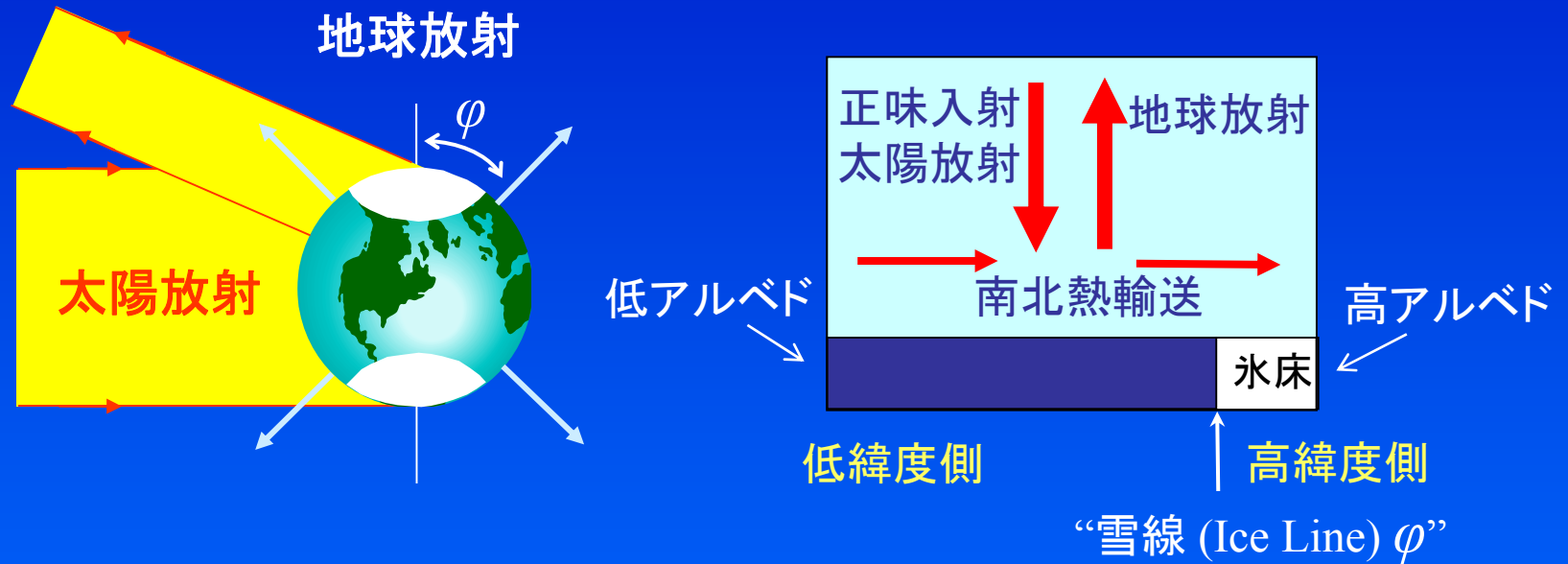
<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/x-ray.htm>

惑星アルベド(反射率)

大気の温室効果
(大気組成・量)

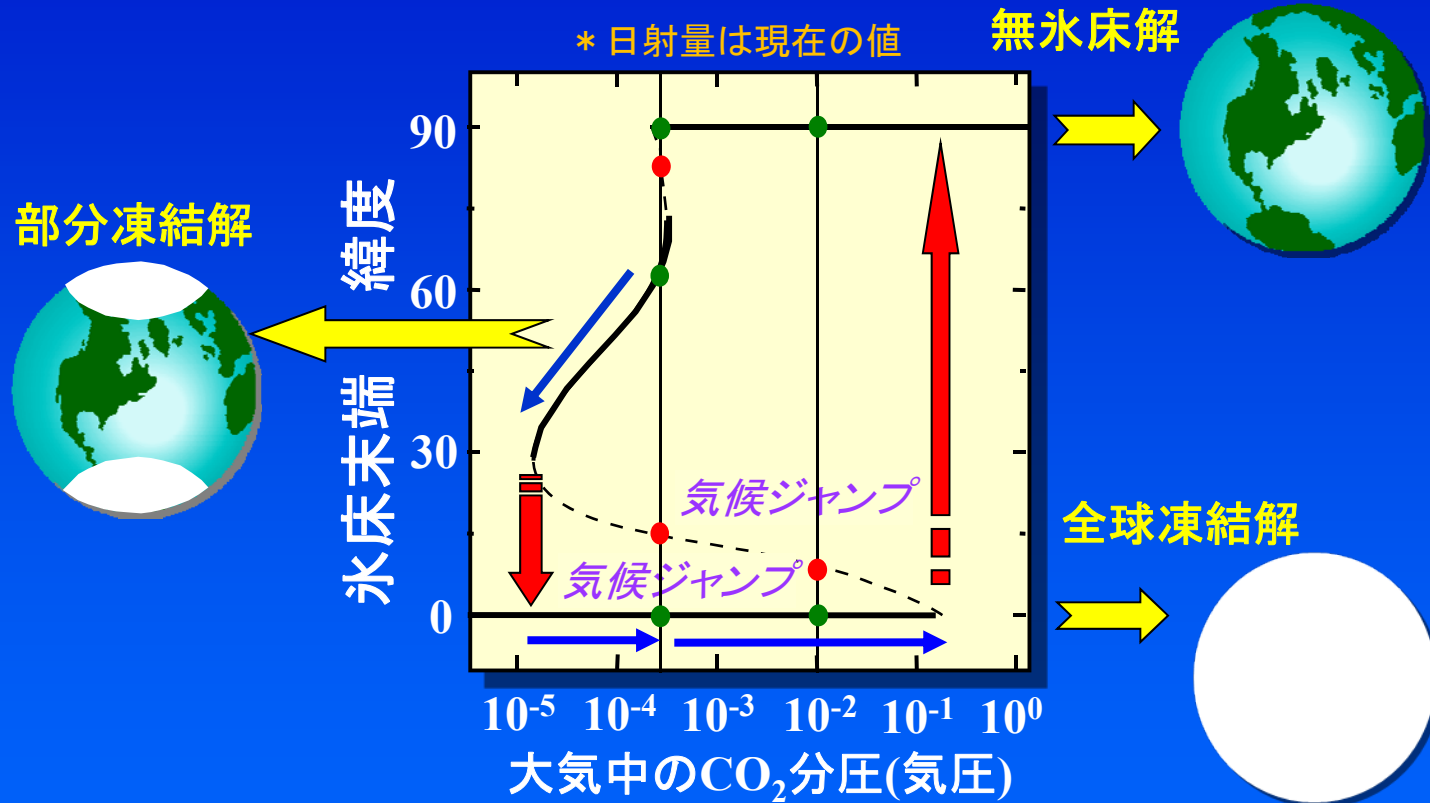
<https://moonkam.ucsd.edu/photos>

南北1次元エネルギー収支モデル



$$\rho C \frac{dT}{dt} = \underbrace{Q_s(x)}_{\substack{\text{正味入射} \\ \text{太陽放射}}} - \underbrace{I(p\text{CO}_2, x)}_{\text{惑星放射}} - \underbrace{\text{div } F_{\text{adv}}(x)}_{\text{南北熱輸送}}$$

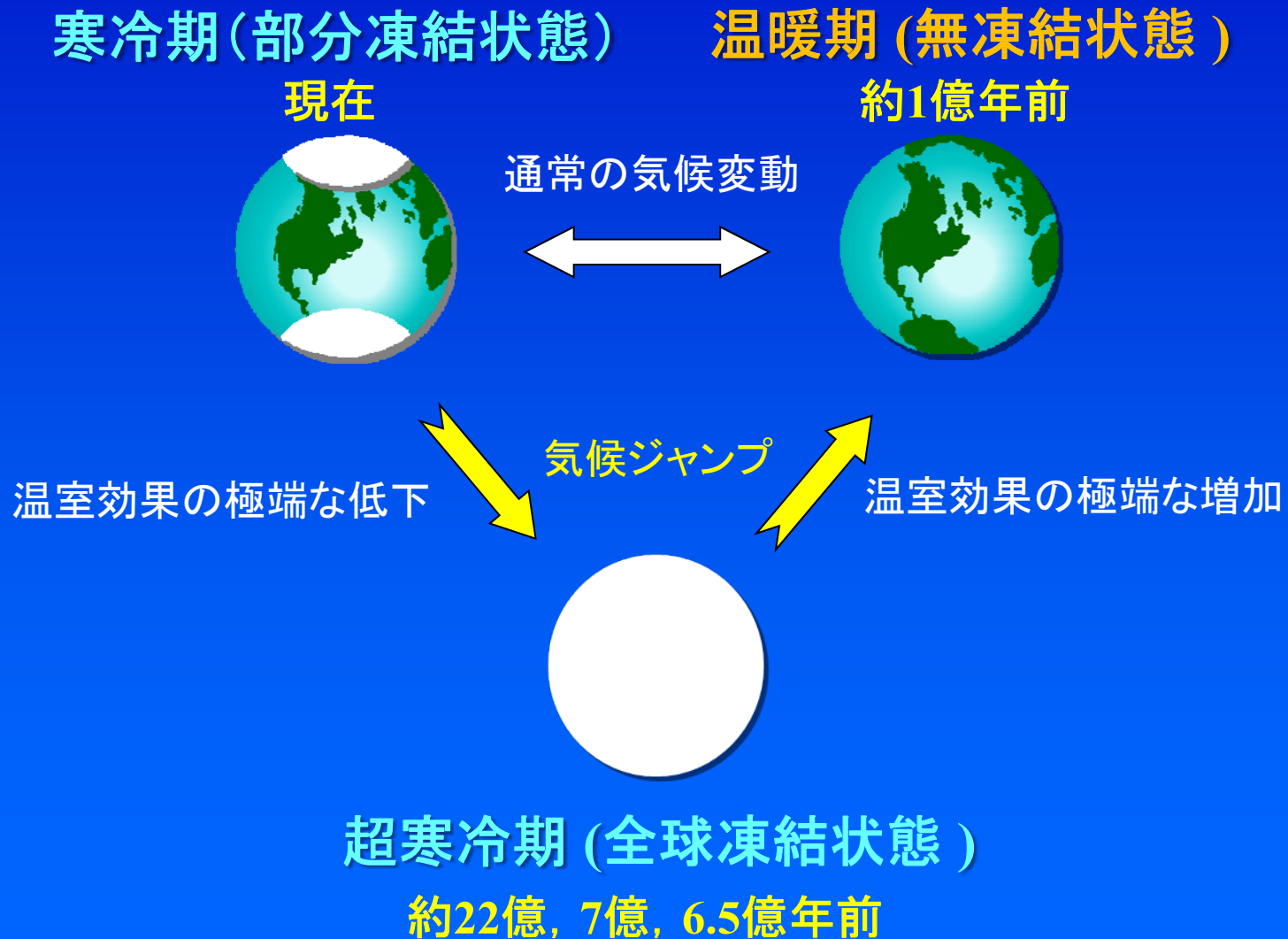
地球環境システムの3つの安定解



- * 地球環境システムは多重安定解を持つ
- * 気候状態の変化は履歴(ヒステリシス)を持つ

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

地球環境システムの3つの安定解

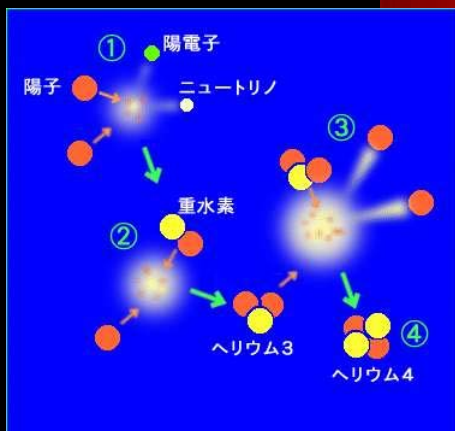


4. 暗い太陽のパラドックス



コア
コロナ
光球
プロミネンス

太陽の進化



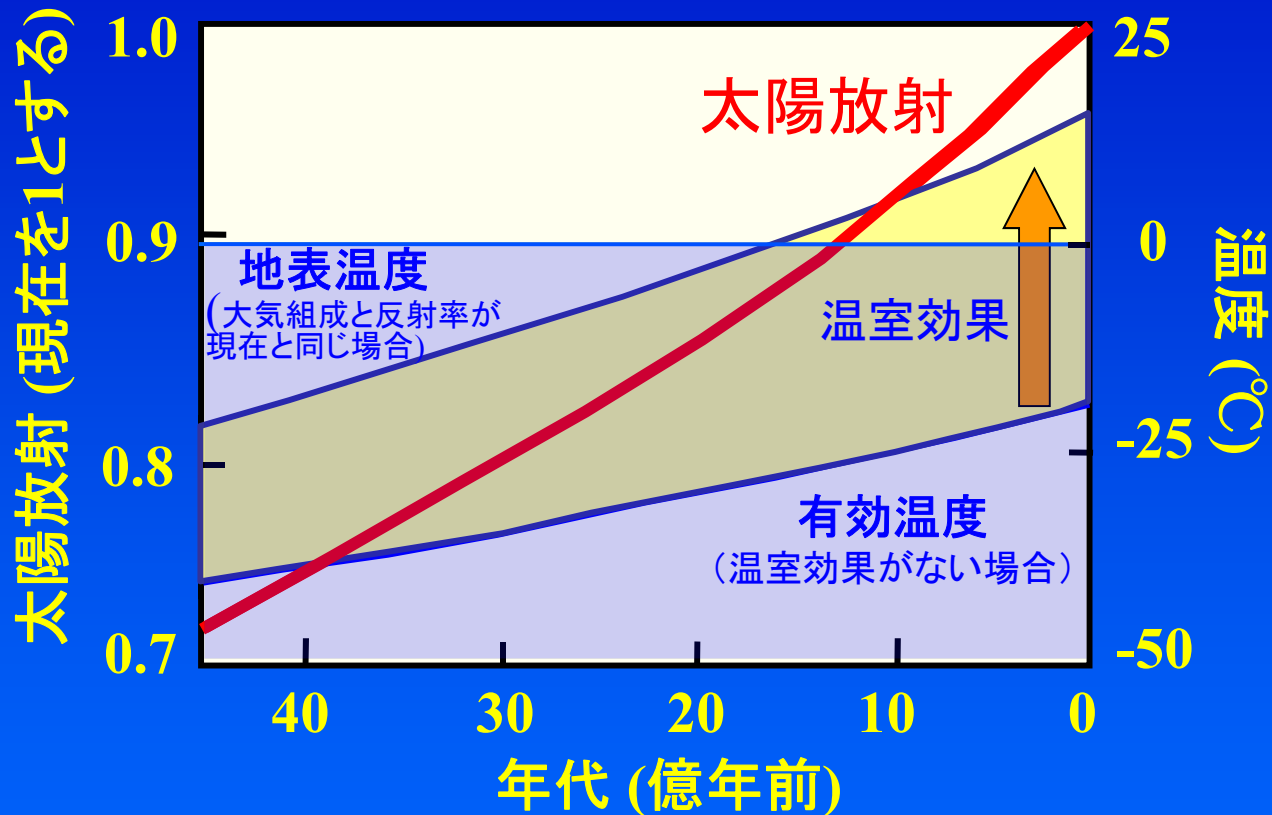
<http://www.palette.furukawa.miyagi.jp/space/sun.html>

中心核(コア)で核融合反応
→ 平均分子量増加
→ 中心部の密度・温度上昇
→ 核融合反応効率が増加

核融合反応は、時間とともに加速される
→ 太陽はその進化とともに、だんだん明るくなっている!

<http://kaganga.com/i-want-to-know/corona-sun.html>

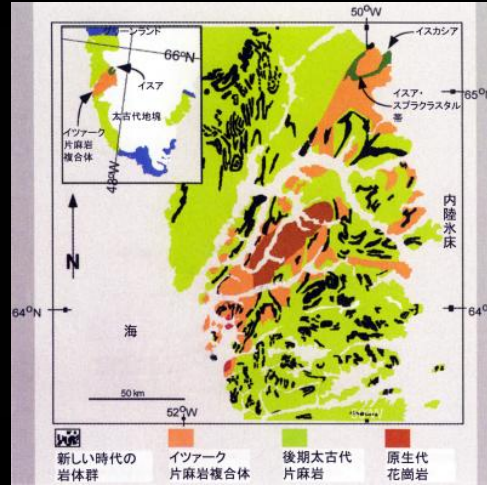
暗い太陽のパラドックス



* 太陽光度(太陽放射)は時間的に増大してきた！
もし大気組成と惑星アルベドが現在と同じならば
→ 約20億年前以前は全球凍結していたことになる!?

38億年前から海洋が連続的に存在

グリーンランド・イシュア



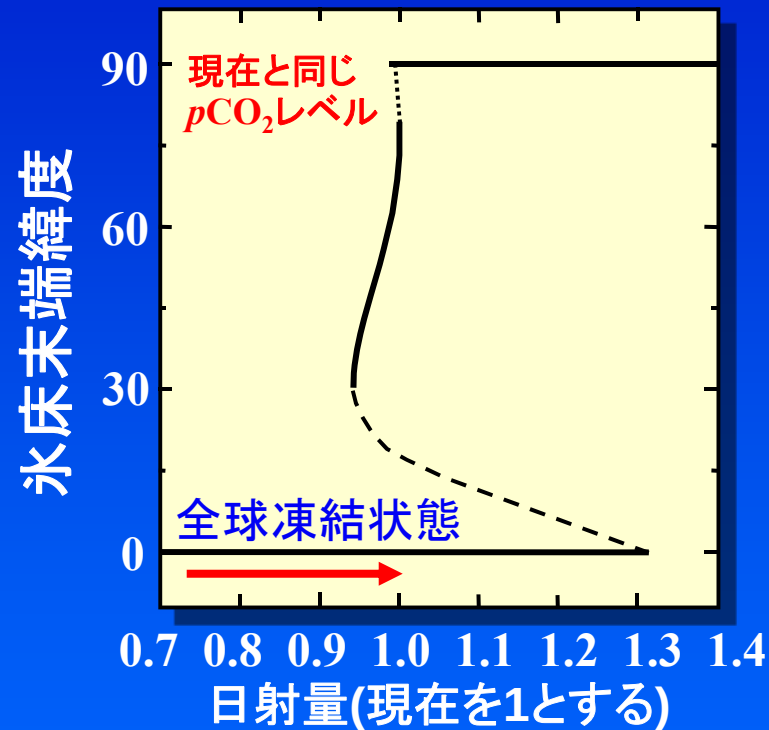
礫岩



縞状鉄鉱床

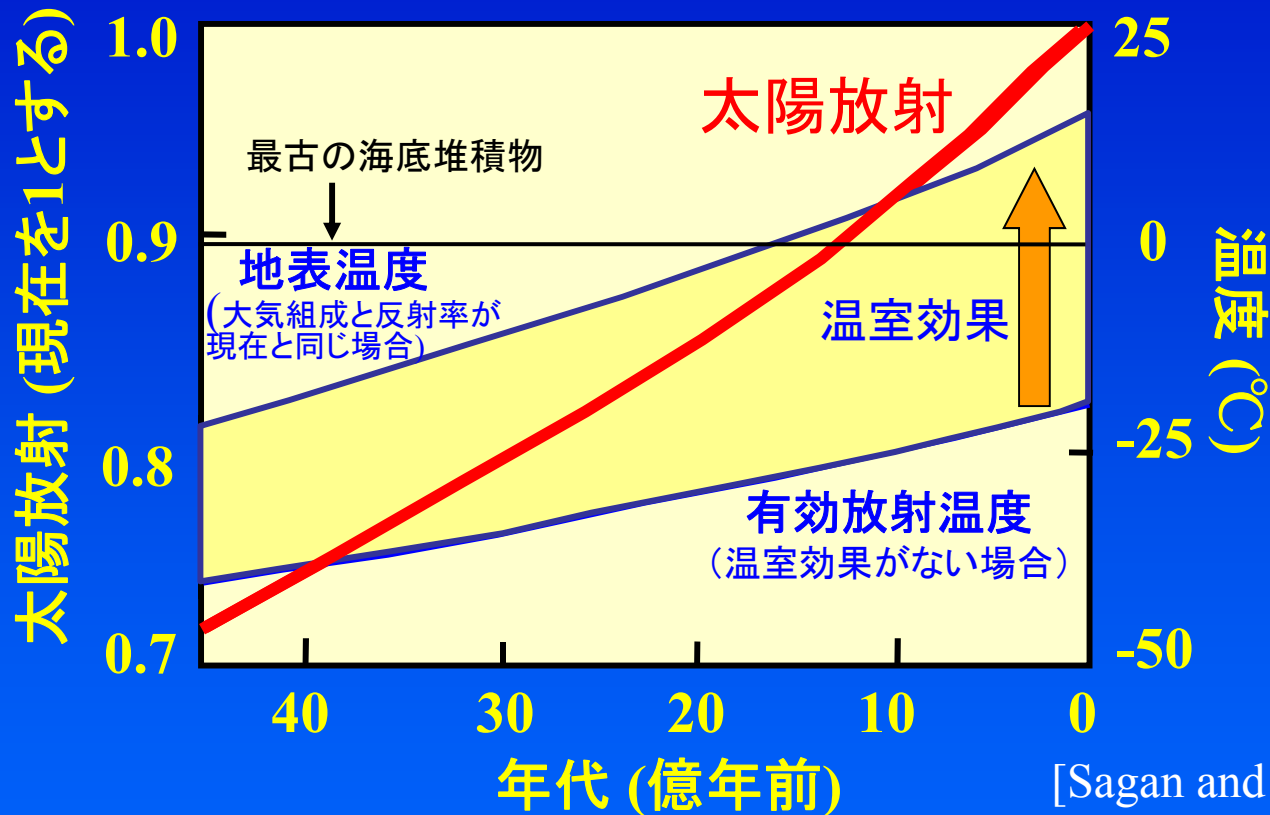
枕状溶岩

暗い太陽のパラドックス



大気組成が現在と同じであれば，地球形成期から現在まで，ずっと全球凍結状態であったことになる

暗い太陽のパラドックス



- * 太陽光度(太陽放射)は時間的に増大してきた！
- もし大気組成と惑星アルベドが現在と同じならば
 - 約20億年前以前は全球凍結していたことになる!?
 - 大気組成 and/or 惑星アルベドが現在と違っていた！

暗い太陽のパラドックスの解

■ 惑星アルベドが低かった？

暗い太陽のもとでは寒冷で海水が凍結するため、惑星アルベドはむしろ高くなるはず（つまり、逆センス）

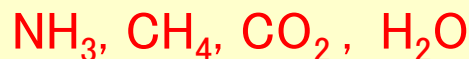
e.g., アルベドに注目した研究

[Henderson-Sellers, 1979; Rossow et al., 1982;

A. Henderson-Sellers and B. Henderson-Sellers, 1988]

■ 大気中に温室効果気体が大量に含まれていた？

温室効果気体の候補：



→ 微量（混合比 10^{-5} ）でも強い温室効果を持つ NH_3 が有力候補

[Sagan and Mullen, 1972]

カール・セーガン

(1934年11月9日生～1996年12月20日没)



アメリカの天文学者、作家、SF作家。元コーネル大学教授、同大学惑星研究所所長。
NASAにおける惑星探査の指導者。惑星協会の設立に尽力。
作品:「コスモス」、「コンタクト」、「惑星へ」その他多数

温室効果気体の安定性

■ NH_3 [Sagan and Mullen, 1972]

- NH_3 は水蒸気の光分解によって生成されたOHラジカルによって酸化されてしまう
(混合比 10^{-5} の場合で約10年, 火山ガスの供給があっても1000万年で現在量の窒素が生成してしまう)

[Kuhn and Atreya, 1979, etc]

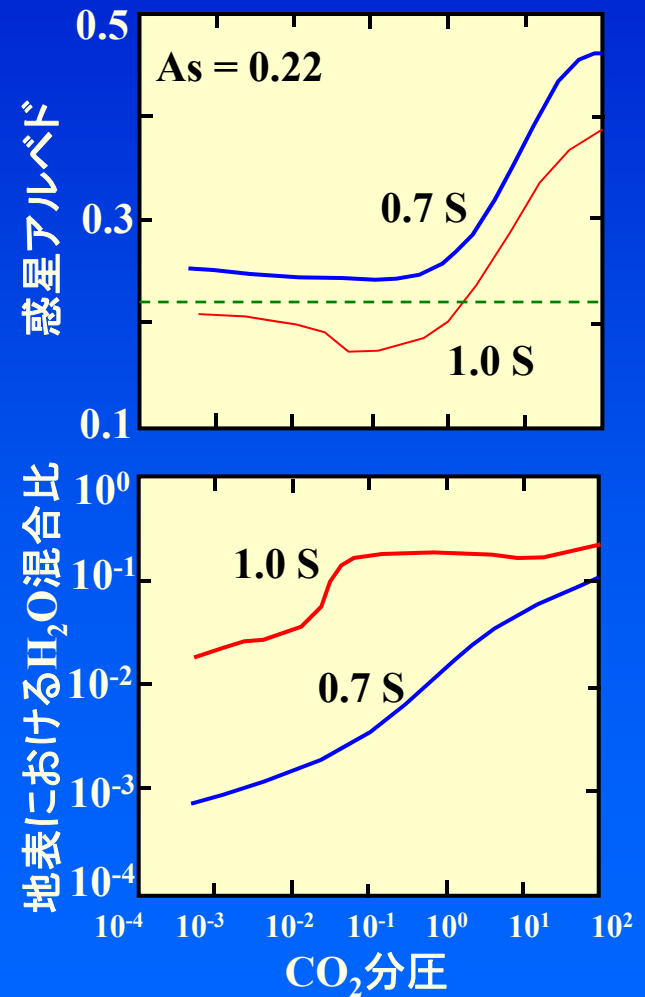
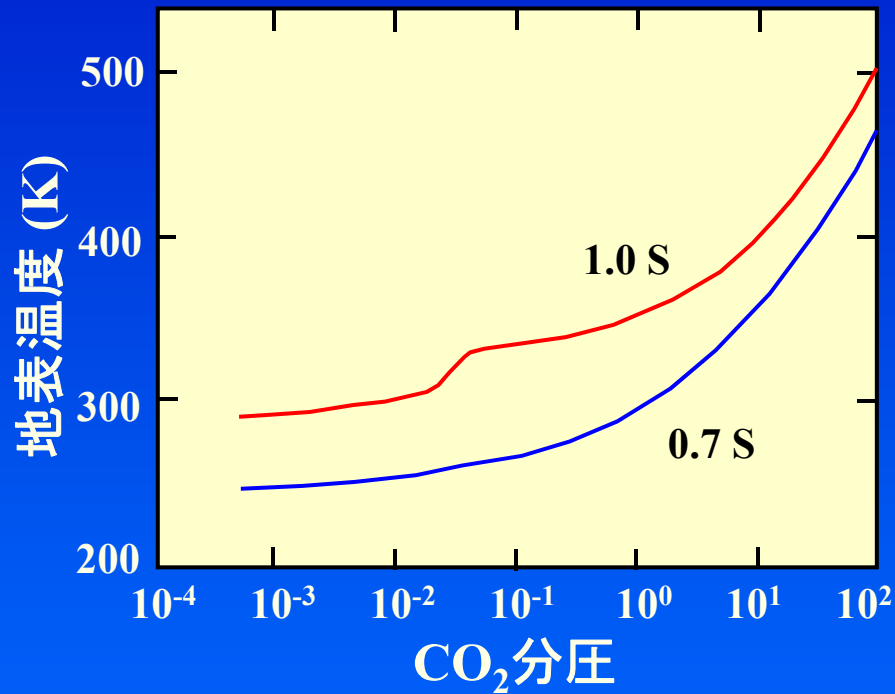
■ CH_4

- やはり光化学的に不安定 [Kasting, 1983]

■ CO_2

- 光化学的に安定, 地表に大量に存在, 温室効果
- 最有力候補 [Owen et al., 1979, etc.]

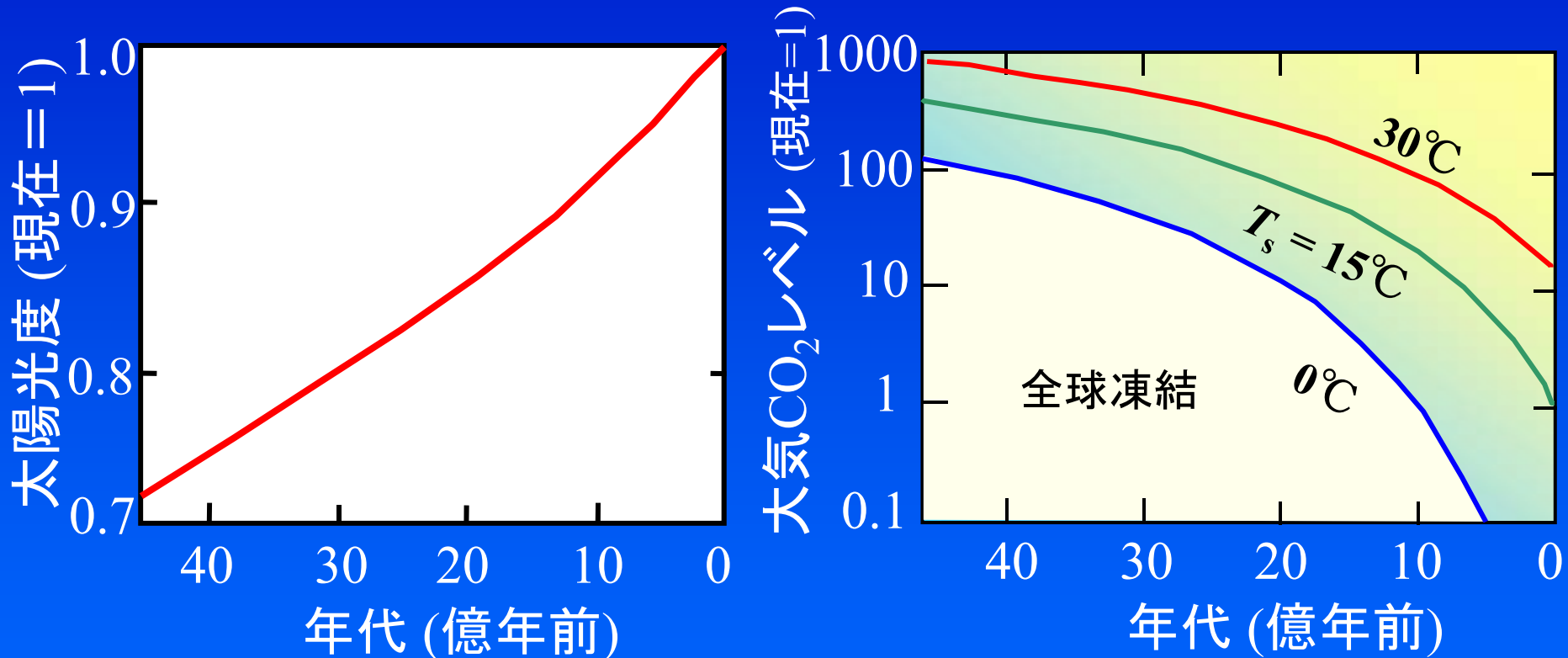
CO₂の温室効果



1次元放射対流平衡計算
[Kasting and Ackerman, 1986]

CO₂大気の進化

* CO₂が大気の温室効果を担ってきたとする場合



* 二酸化炭素は時間的に減少してきた?

(地球も最初は二酸化炭素大気だった!?)

→ 太陽放射の増大に合わせて都合良く減少してきたのか?

暗い太陽のパラドックスはまだ解決していない？

* CO₂レベルは予測ほど高くないという地質記録 !?

* CH₄ + NH₃!?

CH₄の光分解で生成された有機物のもやが大気上層で太陽紫外線を吸収することにより、NH₃が長期的に渡って安定に存在できる可能性を指摘 [Sagan and Chyba, 1997]

- * メタンは必然的に高濃度？
- * エタンの温室効果も？
- * 有機物のもやの光学的性質？
- * 窒素の圧力効果？
- * 雲フィードバック？
- etc. . .

CO₂の増減と地球環境

(1) 高温環境

- 海洋が全部蒸発してしまう(暴走温室状態)

CO₂を増加させても暴走温室状態にはならない

- * 正味入射太陽放射の増大によって生じる ($F > 300\text{W/m}^2$)
地球形成期と将来を除いては起こらない

- 微生物しか生存できなくなる ($T_s > 60^\circ\text{C}$)

CO₂の増大によって起こり得る

(2) 低温環境

- 海洋が凍結してしまう(全球凍結状態)

CO₂の減少によって起こり得る

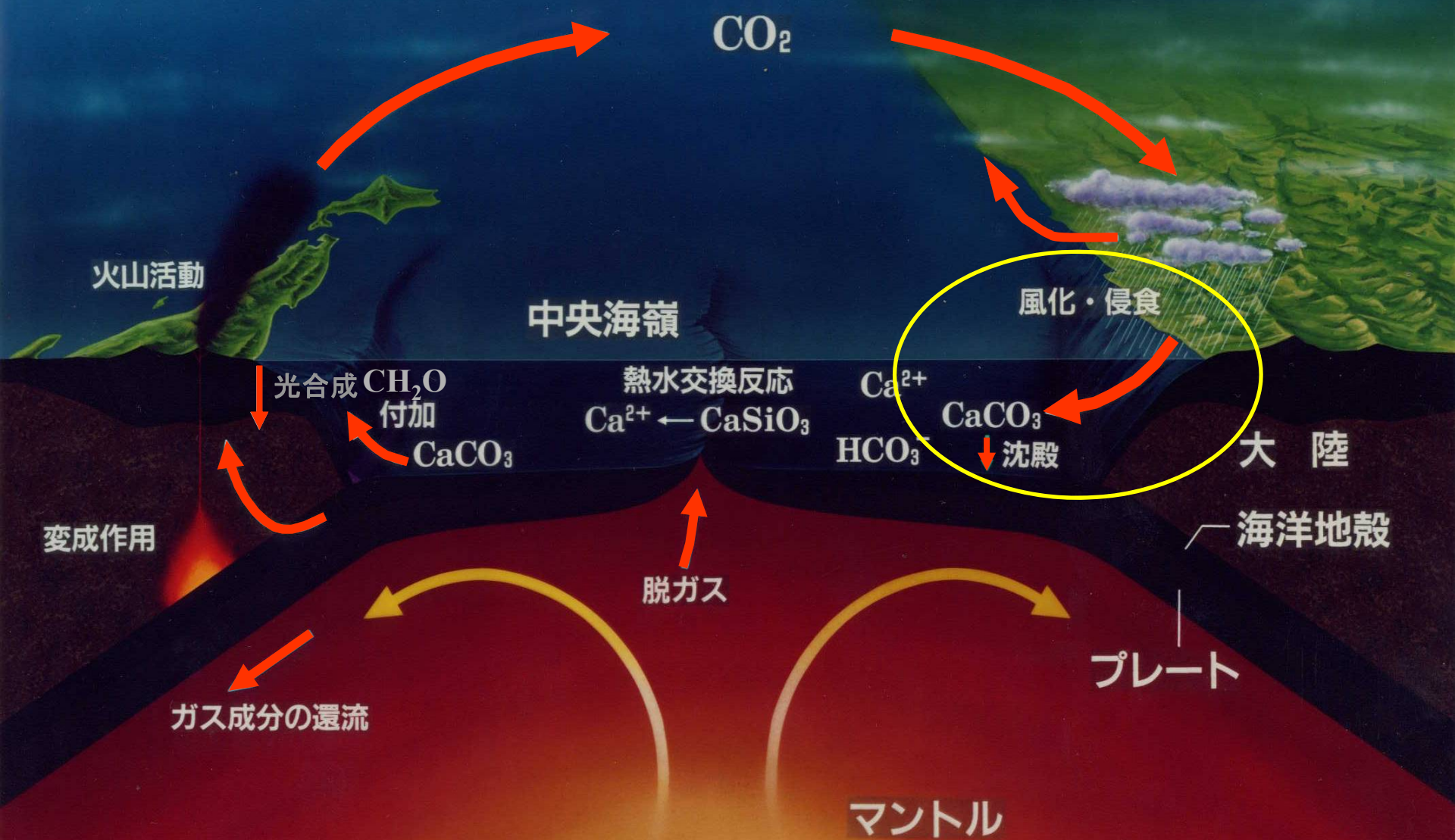
- * 原生代において実際に生じた?(全球凍結イベント)

→ CO₂はどのように変化してきたのか?

A photograph of a dense forest with tall, slender trees. Sunlight filters through the canopy, creating a dappled light effect on the forest floor. The overall tone is green and slightly hazy.

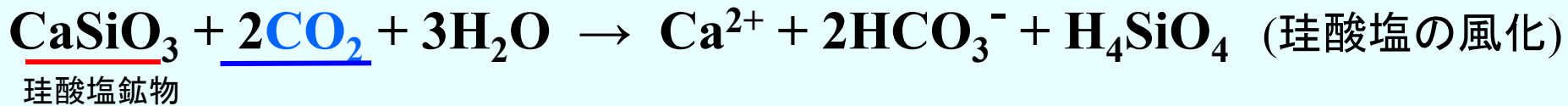
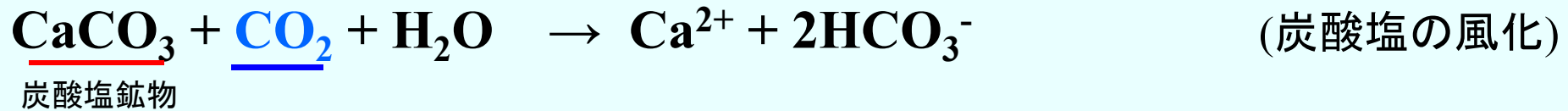
5. 炭素循環と地球環境の安定性

100万年スケールでの炭素循環



二酸化炭素の除去過程

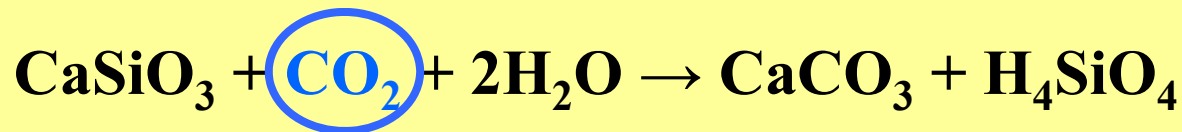
■ 風化反応 (陸上)



■ 炭酸塩沈殿反応 (海洋)



* 正味の反応: 珪酸塩の風化 + 炭酸塩の生成



* 長期的な二酸化炭素の消費プロセスとしては珪酸塩の風化反応が重要

珪酸塩風化反応の支配要因 ～ 温度依存性 ～

■ 珪酸塩溶解反応の速度論

$$\text{反応速度} \propto \exp\left(-\frac{E_a}{R(T_s)}\right)$$

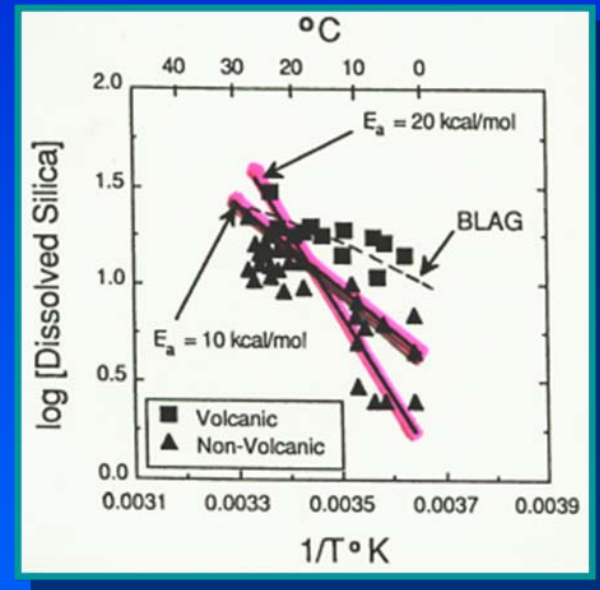
* 温度依存性がある！

* 活性化エネルギー（実験・観測）

$$E_a \sim 10\text{-}20 \text{ kcal/mol}$$

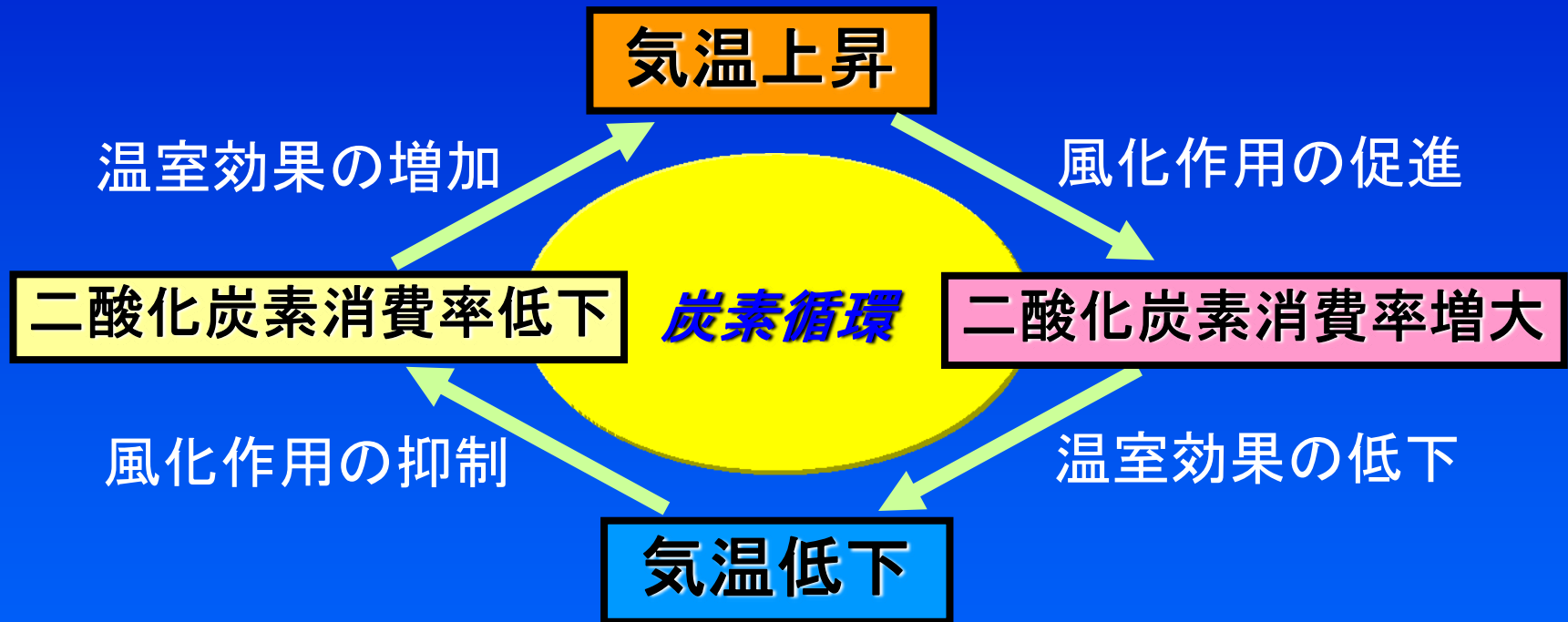
温度上昇 → 反応速度増加

温度低下 → 反応速度低下



地球環境の安定化機構

* 火山活動による二酸化炭素供給率は10万年スケールでは一定と仮定する

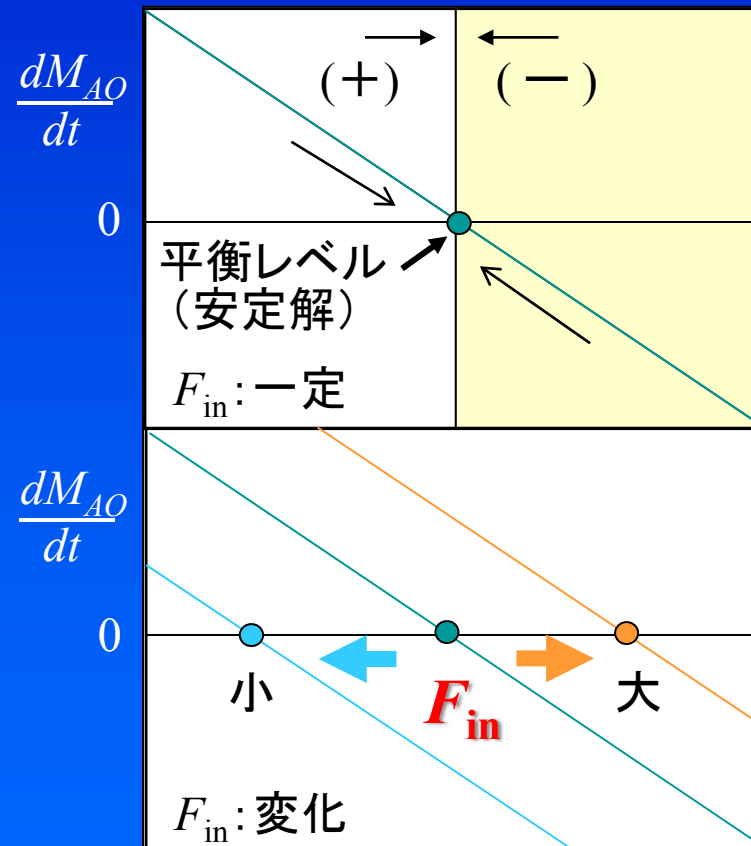


“ウォーカー・フィードバック”
(地表温度に対する負のフィードバック機構)

* 100万年以上の時間スケールで有効な安定化機構

フィードバックの意味

$$\frac{dM_{AO}}{dt} = F_{in} - F_w^s(T, pCO_2) = 0$$



寒冷 $\longleftrightarrow$ 温暖

正味CO₂供給率と気候変動



正味CO₂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
=CO₂濃度の増加/低下
=温暖化/ 寒冷化

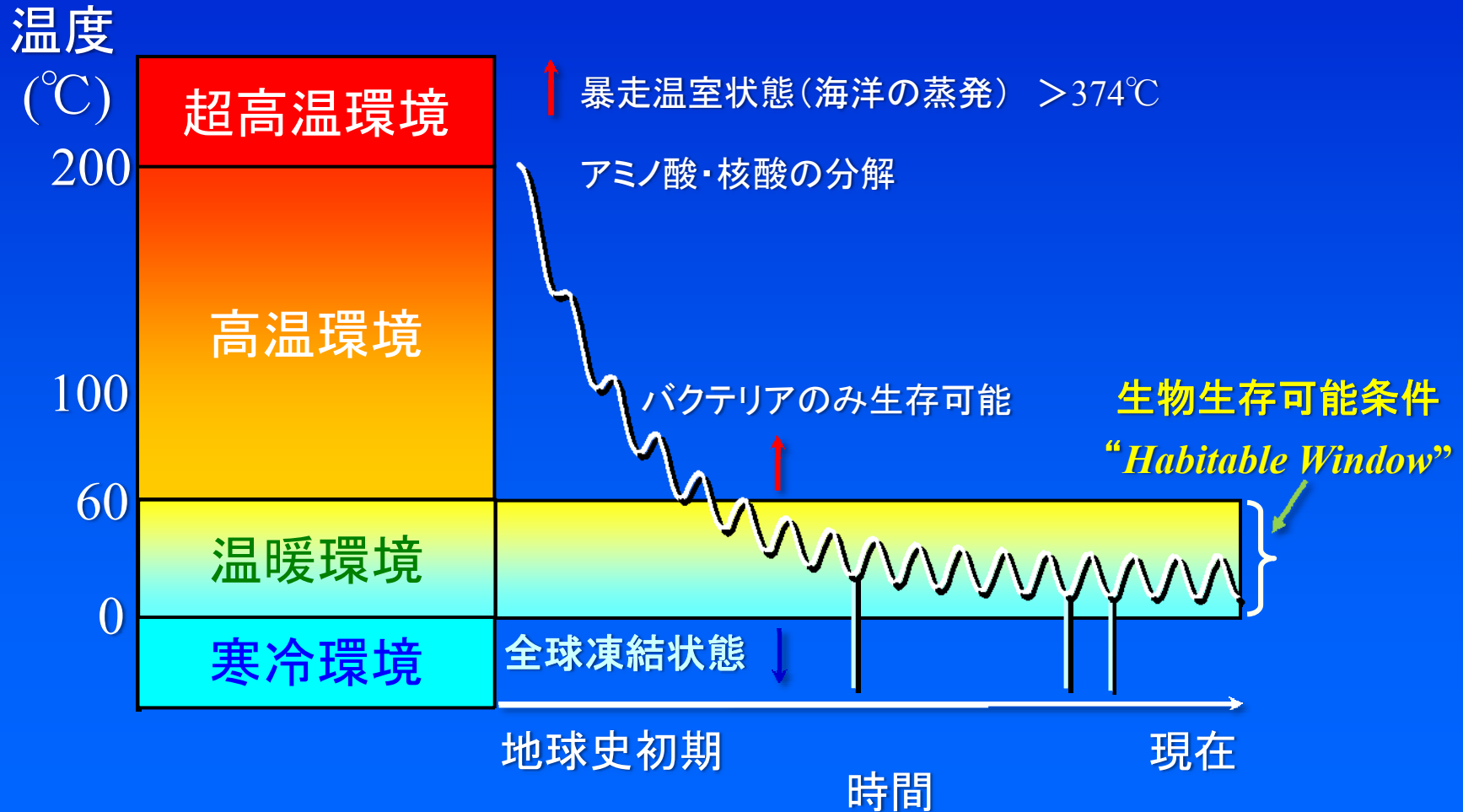


火山活動(CO_2 放出率)の変動が長期的な気候変動を支配する

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pyroclastic_flows_at_Mayon_Volcano.png

地球環境の安定性

太陽進化, 生物進化, 大陸進化, 地球内部進化 → 地球環境の進化



参考文献

- Henderson-Sellers, A. 1979: Clouds and the long-term stability of the Earth's atmosphere and climate: *Nature*, **279**, 786-788
- Henderson-Sellers, A. and Henderson-Sellers, B., 1988: Equable climate in the early Archaean: *Nature*, **336**, 117-118.
- Kasting, J.F., 1983: Photochemistry of methane in the Earth's early atmosphere: *Precambrian Res*, **20**, 121-148.
- Kasting, J.F. and Ackerman, T.P., 1986: Climatic consequences of very high carbon dioxide levels in the Earth's early atmosphere: *Science*, **234**, 4782, 1383-1385.
- Kuhn, W.R. and Atreya, S.K., 1979: Ammonia photolysis and the greenhouse effect in the primordial atmosphere of the earth: *Icarus*, **37**, 1, 207-213
- Owen, T., Cess, R.D., Ramanathan, V., 1979: Enhanced CO₂ greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early Earth: *Nature*, **277**, 640-642.
- Rossow, W.B., Henderson-Sellers, A., and Weinreich, S.K., 1982: Cloud feedback: A stabilizing effect for the early Earth: *Science*, **217**, 1245-124.
- Sagan, C., Mullen, G., 1972: Earth and Mars: evolution of atmospheres and surface temperatures: *Science*, **177**, 4043, 52-56.
- Sagan, C. and Chyba, C., 1997: The early faint sun paradox: Organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases: *Science*, **276**, 5316, 1217-1221.
- Walker, J.C.G., Hays, P.B., Kasting, J.F., 1981: A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of the Earth's surface temperature: *J. Geophys. Res.*, **86**, 9776-9782.