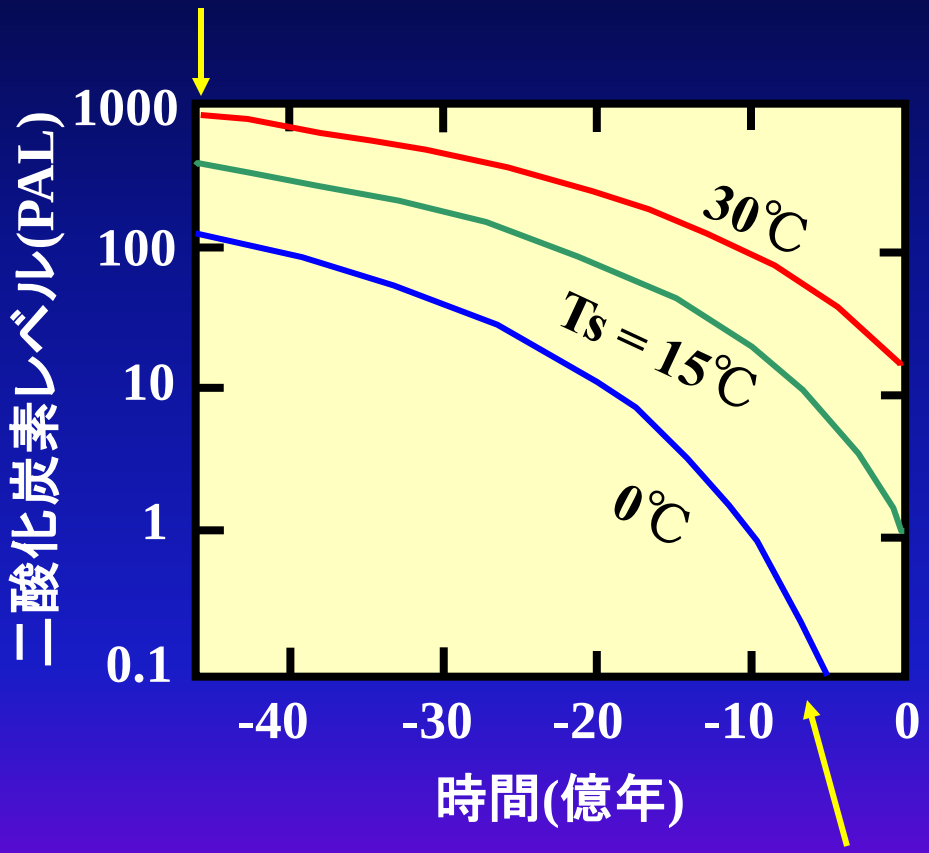
[2] 炭素循環と気候進化

1. 初期大気

CO_2大気の進化

1．初期に大量の二酸化炭素が存在し得たか？



2．実際にはどのように減少してきたのか？

地表における炭素の分布

リザーバー	無機炭素	有機炭素	文献
大陸地殻	7410	1480	(1)
海洋地殻	1860	280	(1)
海洋	3.33	—	(2)
大気	0.058	—	(2)
陸上生物圏	—	0.0375	(3)
海洋生物圏	—	0.0006	(3)
陸上有機物(Soil carbon)	—	0.0583	(3)
海洋有機物(DOC+POC)	—	0.03-0.06	(4)
合計	9273	1760	(x 10^{18} mol)

＊合計 1.1×10^{22} mol (CO_2 換算～90気圧相当)

(1) Ronov and Yaroshevsky (1967), (2) Holland (1978), (3) Bolin (1970), (4) Sundquist (1985)

大気を持つ地球型惑星の表層環境

	地球	地球†	金星	火星
大気組成(体積%)				
N_2	78.1	1.0	3.5	2.7
O_2	20.9	—	—	—
Ar	0.93	0.01	0.007	1.6
CO_2	0.035	99.0	96.5	95.3
大気圧	1気圧	～90気圧	95気圧	0.006気圧
惑星アルベド	0.3	> 0.3	0.77	0.15
有効放射温度	-18 ˚C	-18 ˚C	-46˚C	-56˚C
全球平均温度	15˚C	200 ˚C	460˚C	-53˚C
水の存在量	270気圧相当分		極微量	(不明)
水の存在形態	海洋	海洋・水蒸気	水蒸気	極冠

† 現在の地球大気から生物起源のO_2を除き，堆積岩に含まれる炭素をCO_2として加えた場合

巨大衝突

火星サイズの原始惑星が原始地球と衝突

→ 地球の場合，それまでの大気は吹き飛ばされる

[Genda and Abe, 2005]

＊マグマ中に金属鉄が存在する場合

$$\frac{H_2}{H_2O} \sim 1 \qquad \frac{CO}{CO_2} \sim 5$$

→ 初期大気は還元的～弱酸化的な組成

大気の初期進化

■ 還元的大気から酸化大気へ

水蒸気の光分解によるOHラジカルの生成と還元気体の酸化

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + 1/2H_2$$
$$CH_4 + 2OH \rightarrow CO_2 + 3H_2$$
$$NH_3 + OH \rightarrow 1/2N_2 + H_2O + H_2$$

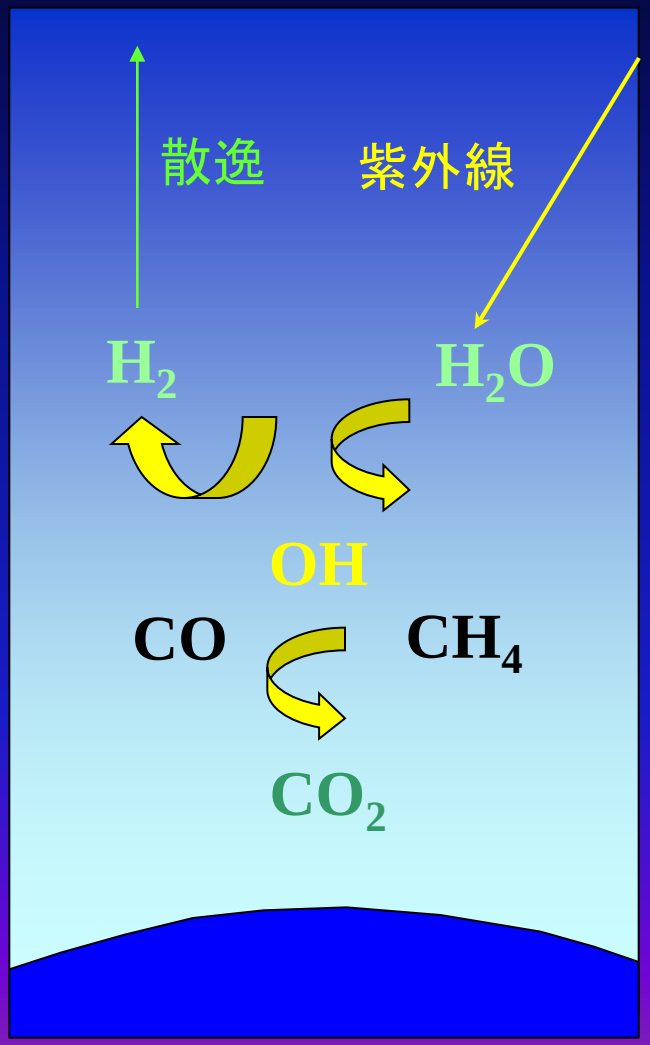
→ 数～数10気圧程度のCO_2大気?

＊CO_2大気への移行は，H_2の宇宙空間への散逸によって律速される

→ 1億年? 10億年??

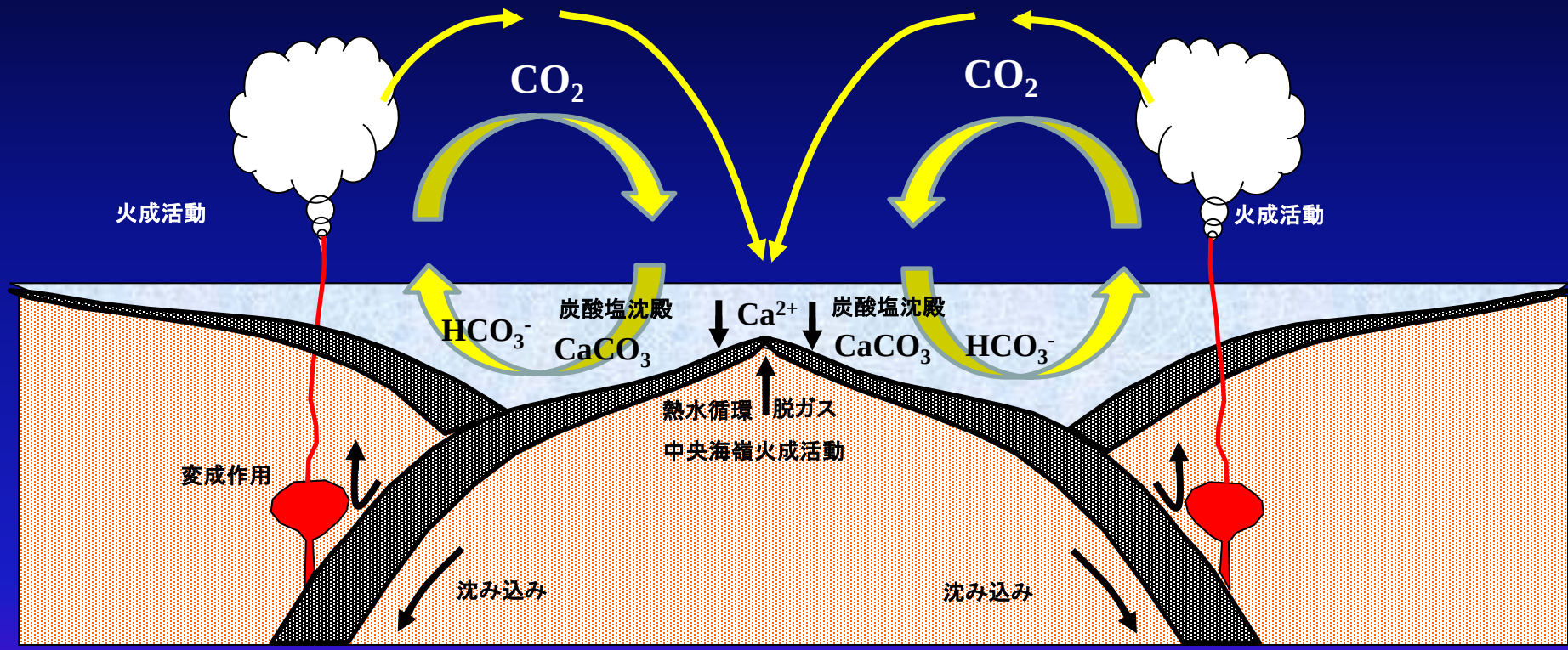
[Tian et al. (2005) Science]

＊生命の起源との関係?



2. 炭素循環と二酸化炭素大気の進化

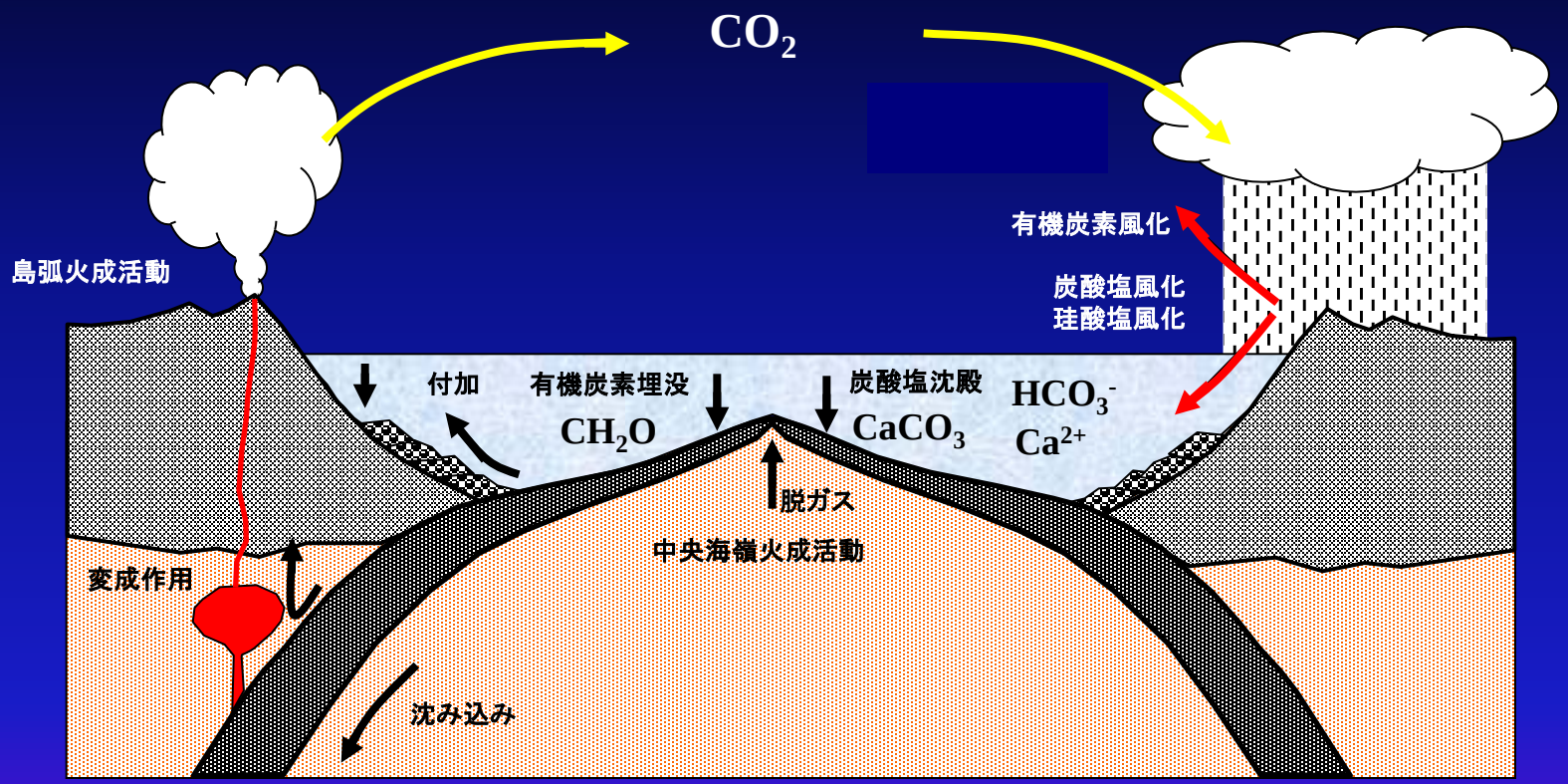
初期地球の炭素循環?



二酸化炭素濃度が高いレベル（～10気圧）で維持される？

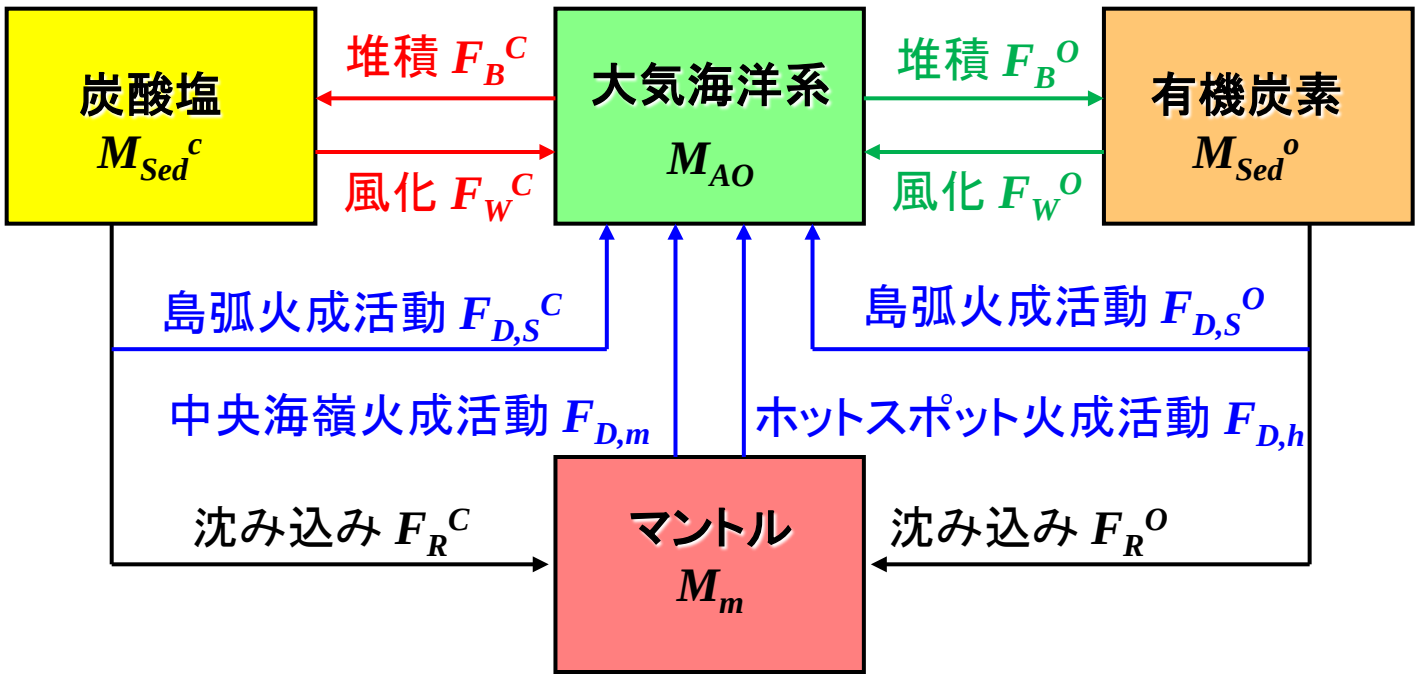
[Walker, 1985, 1989]

長期的な炭素循環



炭素循環システムの変動 ⇔ { システムの内的変動(火成活動など)
システムの境界条件の変動(太陽放射など)

炭素収支

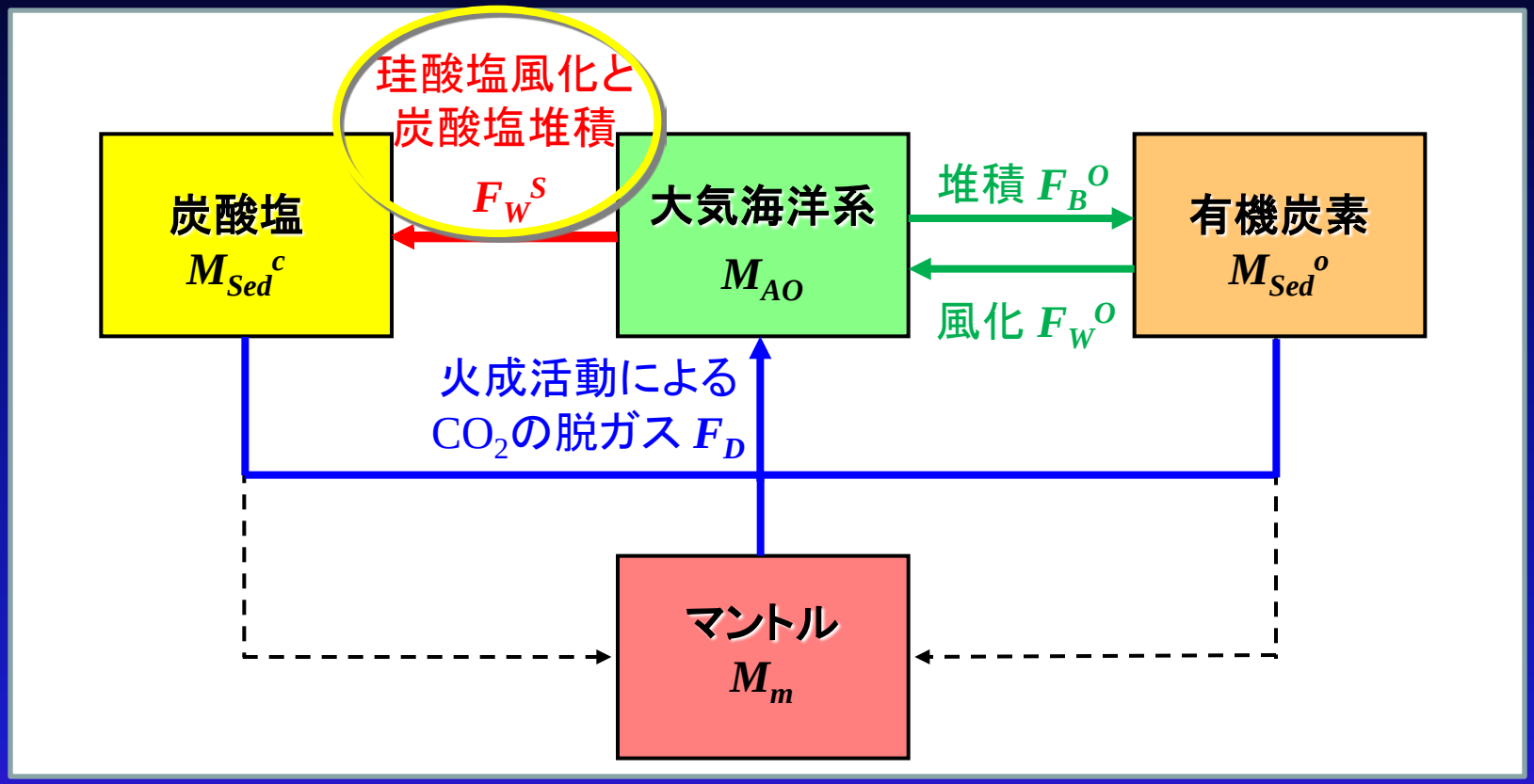


＊大気海洋系の炭素に関する質量バランス方程式

$$\frac{dM_{AO}}{dt} = F_{D,m} + F_{D,h} + F_{D,S}{}^{C} + F_{D,S}{}^{O} + F_W{}^{C} - F_B{}^{C} + F_W{}^{O} - F_B{}^{O}$$

＊大気と海洋の混合時間　～　1000年オーダー程度

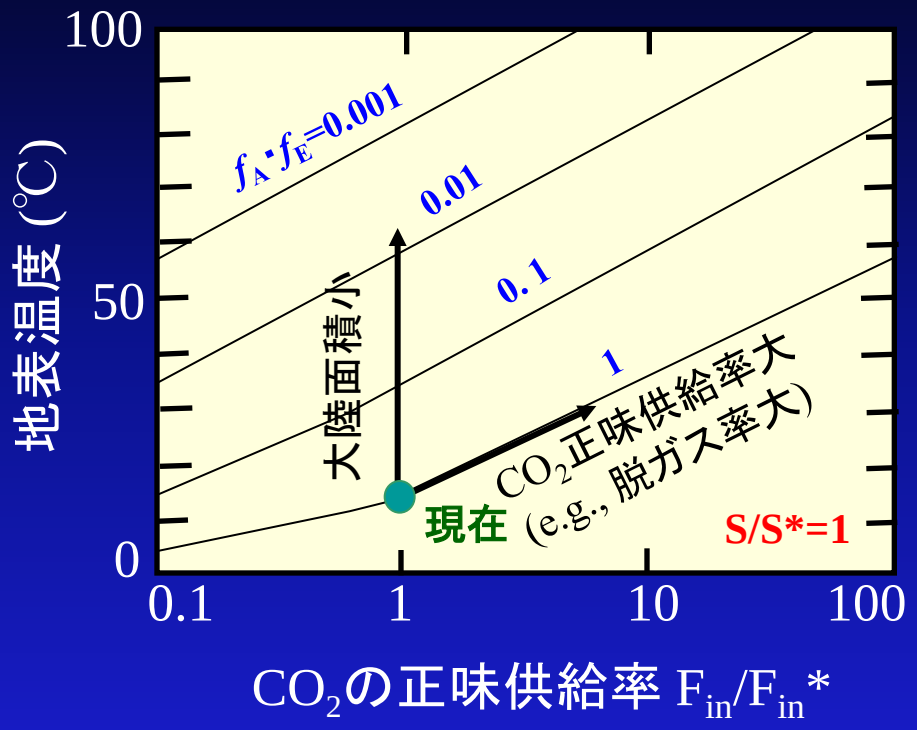
大気海洋系からみた炭素収支



$$\frac{dM_{AO}}{dt} = F_D - F_W^S + F_W^O - F_B^O = F_{in} - F_W^S = 0$$

脱ガス vs 珪酸塩風化　有機炭素の収支

二酸化炭素分圧・地表温度の定常解



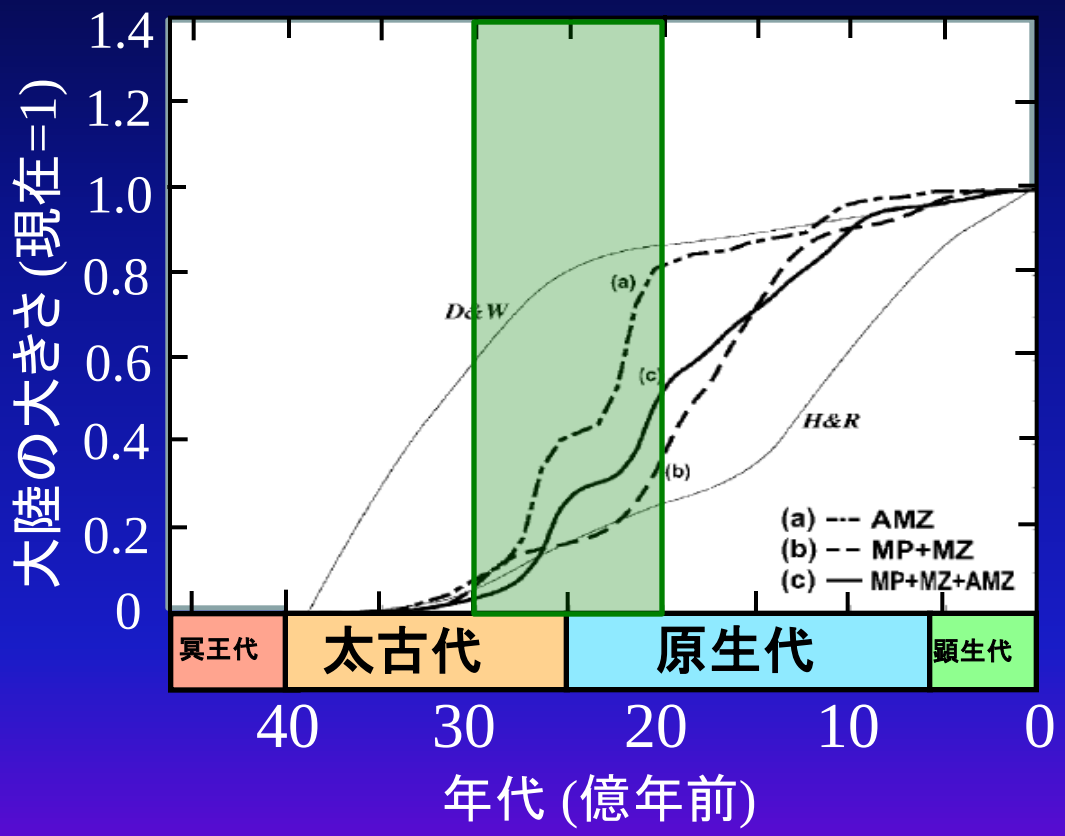
f_A: 大陸面積
(現在=1)
f_E: 土壌生物活動度
(現在=1)
S : 太陽定数
(現在=S*)

脱ガス率 F_{in} 大(火山活動度大) → 温暖化
大陸面積 f_A 小 (風化効率小) → 温暖化

定常状態 : $F_{in} = F_W^S \cdot f_A \cdot f_E \cdot f_B(P_{CO2}, T_S)$

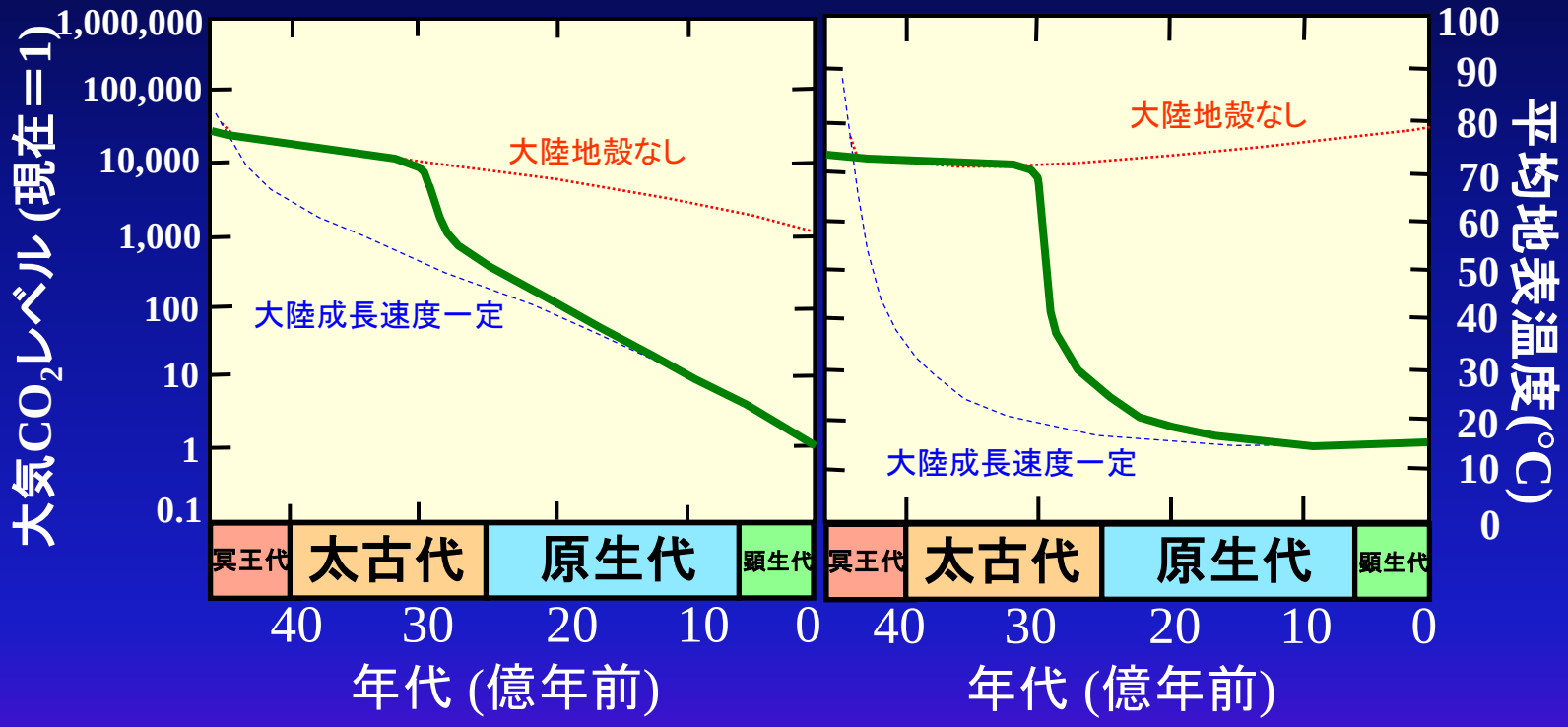
[Tajika and Matsui, 1993]

大陸地殻の急成長
(約30億～約20億年前)



[McLennan and Taylor, 1982 ; Rino et al., 2004]

二酸化炭素大気の進化



＊ 地球環境の進化

太陽光度の増大，火山活動度の低下，大陸地殻の成長

[Tajika and Matsui, 1990, 1992]

過去の地球環境指標

- 連続的な海洋の存在 (0 ℃ < *Ts* < 374 ℃)
- 連続的な生命の存在 (*Ts* < 60 K) [Brock, 1985]
- 過去35億年間，石膏が沈澱 (i.e., <58℃) [Holland, 1978; Walker, 1982]

  → 地球史を通じて現在と似たような環境が維持されてきた

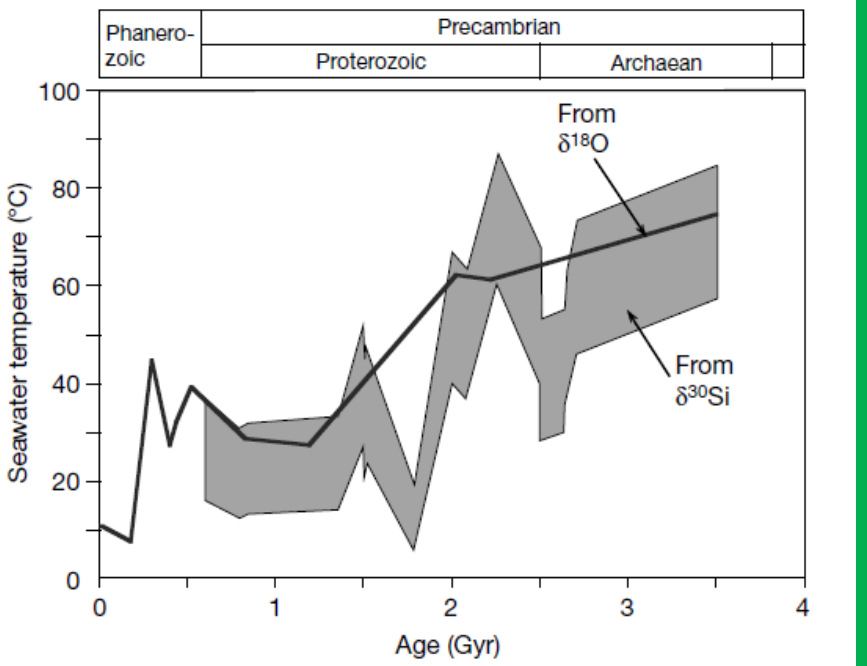
- 堆積岩の酸素同位体は30億年前以前の海水温は60–120℃

  [Robert and Chaussidon, 2006 ; Karhu and Epstein, 1986; Knauth and Epstein, 1976]
- 全生命の共通祖先は超好熱菌 [e.g., Pace, 1991]
- 大陸氷床の最古の確実な証拠は24.5億年前 [Eyles, 1993]

  → 地球史前半は高温環境だった?

海水温の変遷

チャートの酸素同位体比及びシリカ同位体比からの推定（左）
系統発生学的手法で復元したタンパク質の熱安定性からの推定（右）



[Robert and Chaussidon (2006) Nature]

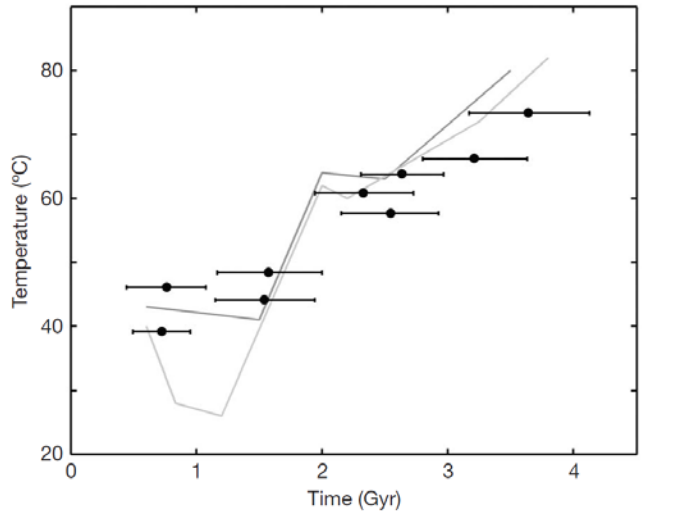


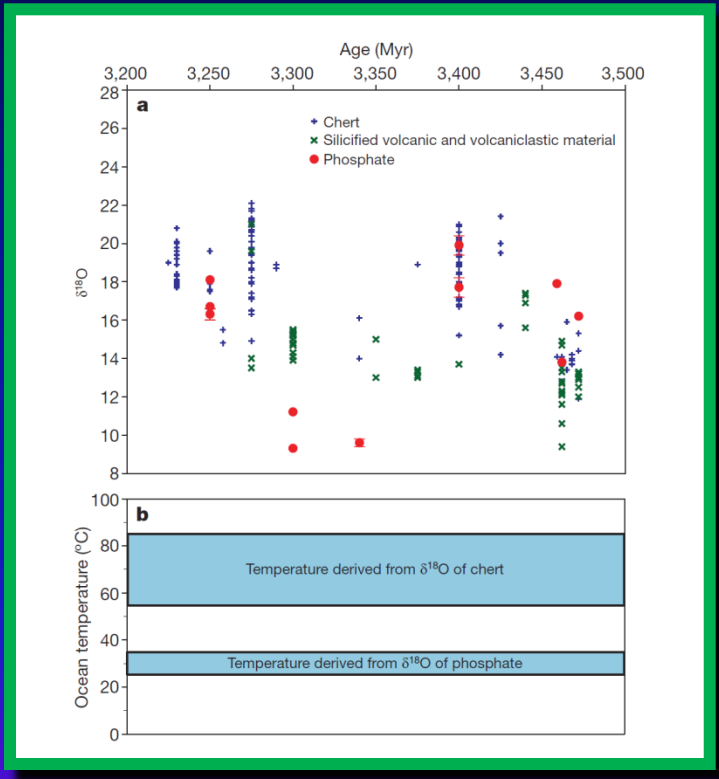
Figure 3 | Plot of ancestral EF melting temperatures against geological time. Molecular clock estimates are shown with their confidence intervals (horizontal bars) from ref. 16, using a 2.3-Ga minimum constraint for the Great Oxidation Event. Solid lines are temperature curves of the ancient ocean inferred from maximum $\delta^{18}O$ (light grey[3,4], dark grey[5]). Although not shown, an analogous trend is seen with $\delta^{30}Si$ isotopes[5].

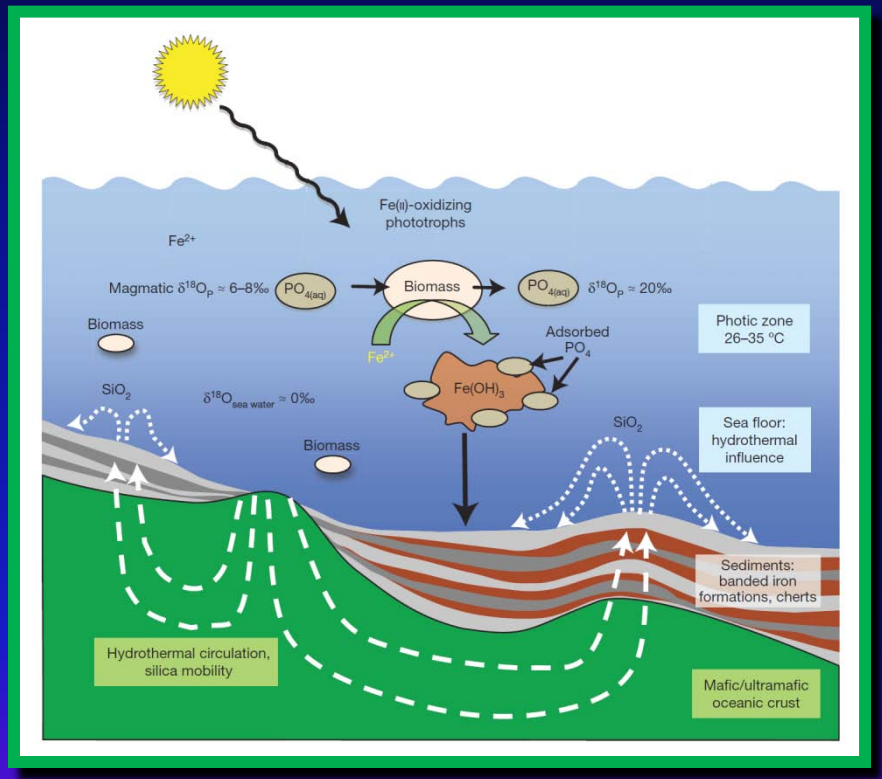
[Gaucher et al. (2008) Nature]

＊35億年前の海水温は高温（～70℃）だった

海水温の変遷

リン酸塩の酸素同位体比



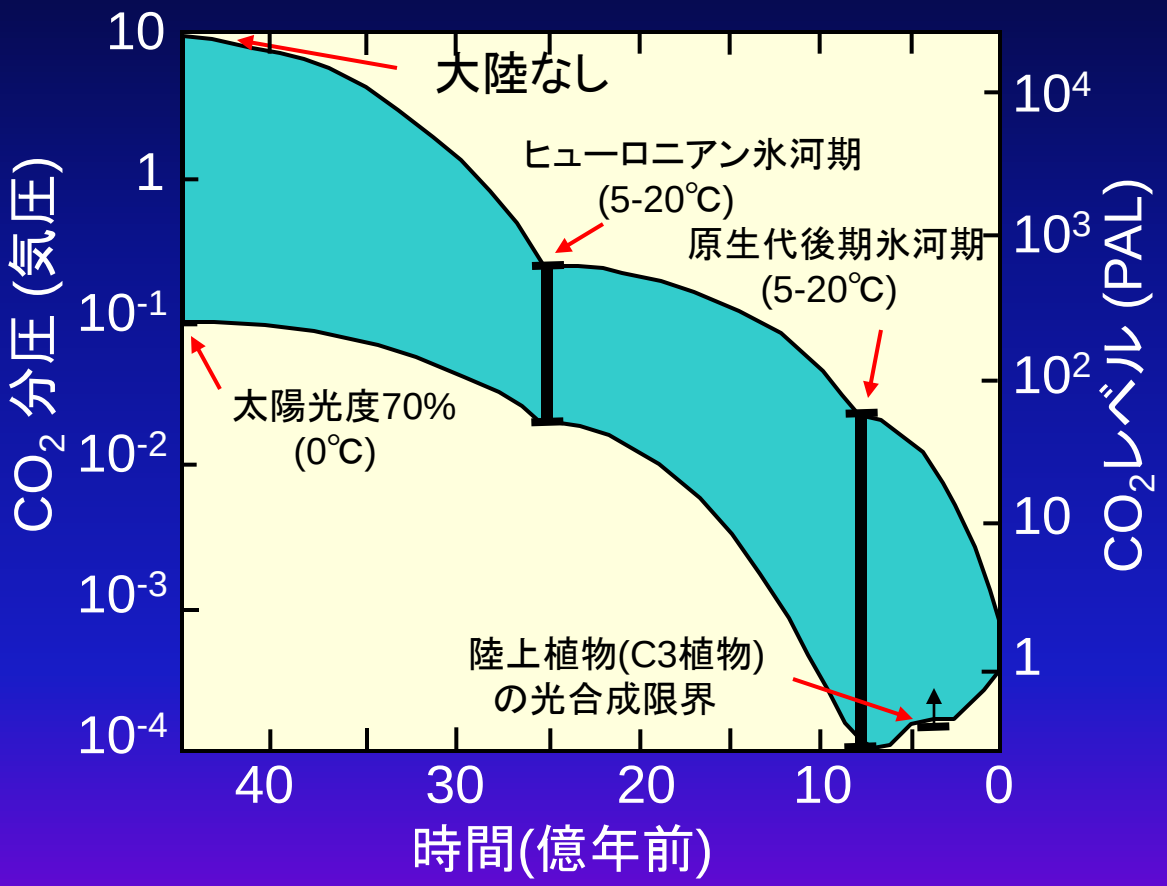


＊35億年前の海水温は～30℃程度だった？

[Blake et al. (2010) Nature]

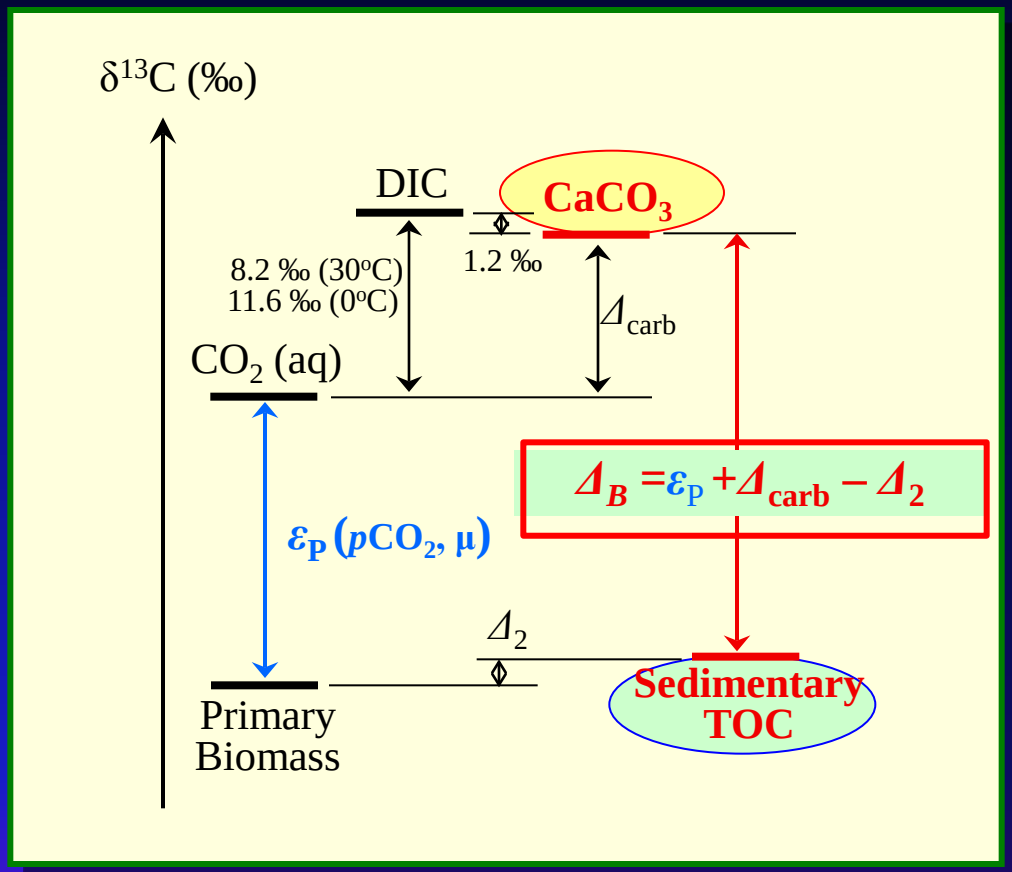
3. 古二酸化炭素濃度の推定

CO_2大気の進化



[Kasting, 1993]

炭素同位体分別効果



$$\delta^{13}C = \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)_{sample}}{(^{13}C/^{12}C)_{standard}} - 1\right] \times 1,000 \quad (‰)$$

- 植物プランクトンの光合成における炭素同位体分別効果 ε_p

  - 海水の溶存CO_2濃度 ($\rightarrow pCO_2$)
  - 栄養塩濃度
  - 成長速度 μ
  - 体積/表面積比(V/S)

などに依存 [Law et al., 1995, 1997; Pop et al., 1998; Birdigare et al., 1999]

DIC=dissolved inorganic carbon 溶存無機炭酸

光合成時の炭素同位体分別効果ε_pは，無機炭素と有機炭素の炭素同位体比の差Δ_Bを，溶存炭酸種間の同位体分別効果などを補正して得られる

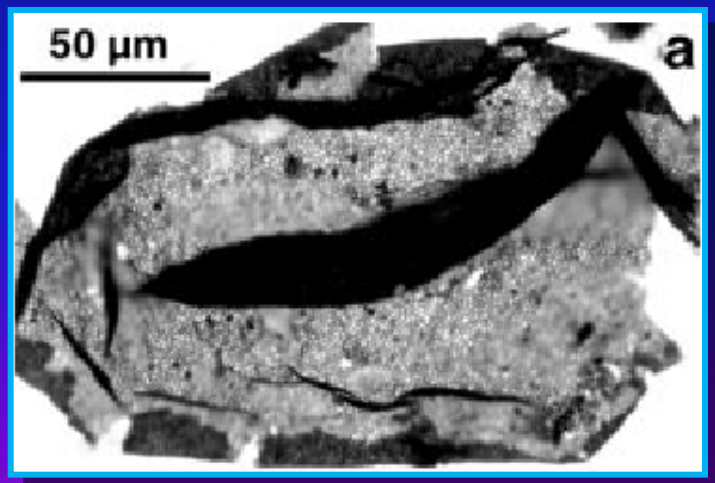
過去のpCO_2の推定(1)

試料：アクリターク (*Dictyosphaera delicata*)
年代：～1,400 Ma (Ruyang Group in Shanxi Province, China)

有機物の炭素同位体比測定 → $\delta^{13}C$ = -34.9 ‰ (平均値)
同層準の無機炭素の同位体比 約 -1 ‰
→ 溶存CO_2の同位体比は -8 ～ -10 ‰ (温度が15-30℃と仮定)
→ 光合成による炭素分別効果は，23.4～28.4‰

Figure 1 Shot on site — an outcrop of the Ruyang Group in Shanxi Province, China.

V/S～25
→ pCO_2 > 10-200 PAL



アクリターク：生活史の一時期に休眠期を必要とする
真核生物の独立栄養性プランクトン？

[Kaufman and Xiao, 2003]

古二酸化炭素濃度の推定(1)

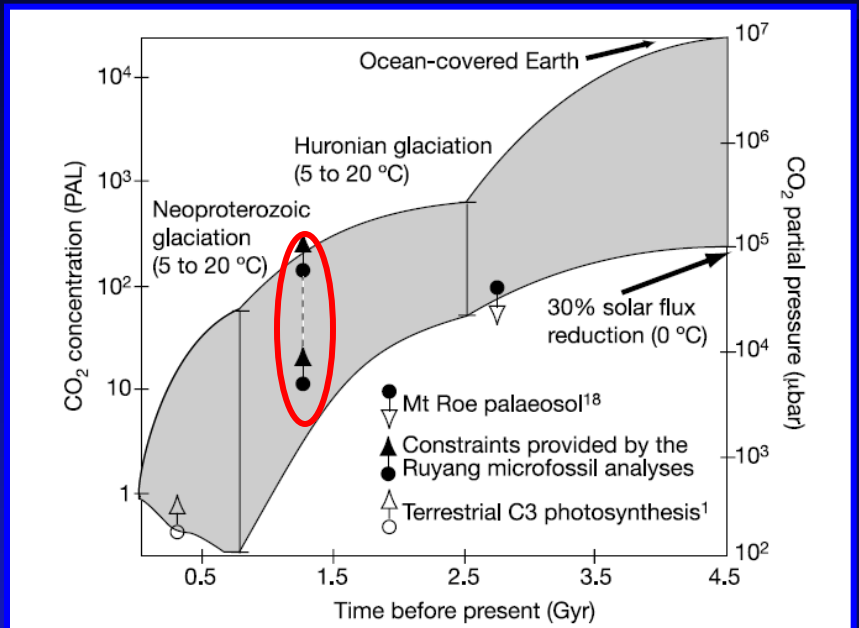


Figure 3 Atmospheric p_{CO_2} levels in the Archaean and Proterozoic. Shaded area, modelled in ref. 1. Empirical constraints for Archaean (from Mt Roe palaeosol)[18] and middle Proterozoic (this study) atmospheric p_{CO_2} levels are indicated. The two connected upward-pointing arrows at 1.4 Gyr ago relate to p_{CO_2} estimates based on the possible *V/S* of *D. delicata* (see text). After ref. 1.

約14億年前における光合成の炭素同位体分別効果（$\Delta\delta^{13}C$）から推定

→ Kastingの推定範囲と調和的

→ 少なくとも，20億年以降の酸化的な大気においては，
CO_2の温室効果は重要だった

[Kaufman and Xiao, 2003]

古二酸化炭素濃度の推定(2)

■ 22～27.5億年前の古土壌 (paleosol)

鉄に富む緑泥石が豊富だが，シデライト(siderite, $FeCO_3$)が存在しない
→ 土壌水中のCO_2濃度，すなわち大気中のpCO_2は低かったはず

$pCO_2 < 10^{-1.4}$ 気圧 ～ 133 PAL (1 PAL = 300 ppm)

＊ Kasting (1993) の推定($10^{-0.7}$ 気圧 ～ 666 PAL)と比べると低い
→ CH_4 などの他の温室効果気体が必要?

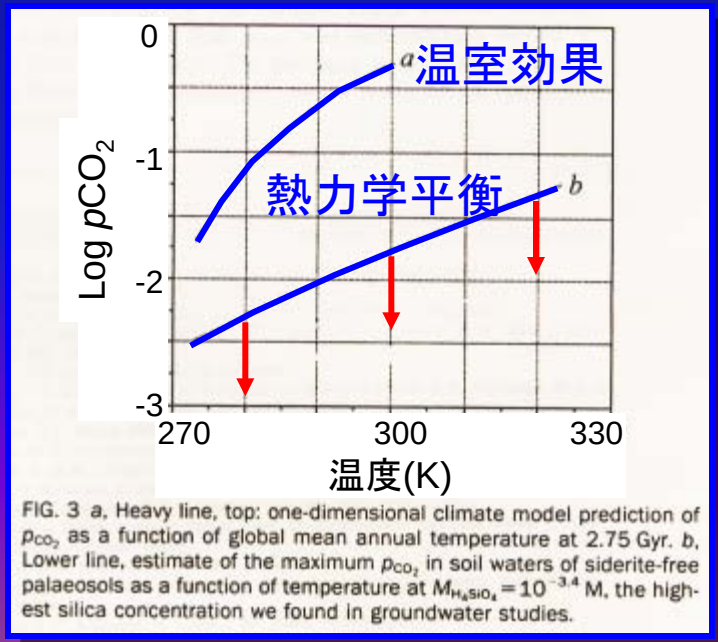


FIG. 3 a, Heavy line, top: one-dimensional climate model prediction of p_{CO_2} as a function of global mean annual temperature at 2.75 Gyr. b, Lower line, estimate of the maximum p_{CO_2} in soil waters of siderite-free palaeosols as a function of temperature at $M_{H_4SiO_4} = 10^{-3.4}$ M, the highest silica concentration we found in groundwater studies.

[Rye et al., 1995]

4. メタンの存在

メタン生成菌とメタン

■ 現在のメタン(CH_4)収支

有機物が嫌気性細菌によってCO_2とH_2に分解される

メタン生成細菌がCO_2とH_2からメタンを生産

$$CO_2 + 4H_2 = \mathbf{CH_4} + 2H_2O$$

メタン酸化細菌がO_2かSO_4を使い大部分(>90%)を消費

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$

$$5CH_4 + 4SO_4 = 5CO_2 + 4H_2S + 6H_2O$$

超好熱メタン菌
(*Methanopyrus kandleri*)
[http://ja.wikipedia.org/]

■ 太古代～原生代初期

酸素濃度が低い

→ 海水の硫酸イオンも低い (陸上の硫化物の酸化が起こらないから)

→ そのような時代には，メタン酸化菌の活動がほとんど生じない

→ CH_4のフラックスが現在よりもずっと高かった可能性

→ 大気中のCH_4濃度が高かった!?

[Kasting, 2001; Pavlov et al., 2003; Kharecha et al., 2005]

メタンと二酸化炭素

■メタン菌の出現　約35億年前?　[Ueno et al., 2006]

→ 大量のメタンの放出

→ メタン濃度増加 (～数百ppm)

→ メタンの温室効果 [Kasting et al., 2001]

■それでもウォーカー・フィードバックは機能

→ 二酸化炭素濃度は低下

＊酸素濃度が増加する24.5億年前以前の地球環境は，CO_2-CH_4-H_2Oの温室効果によって維持されていた？

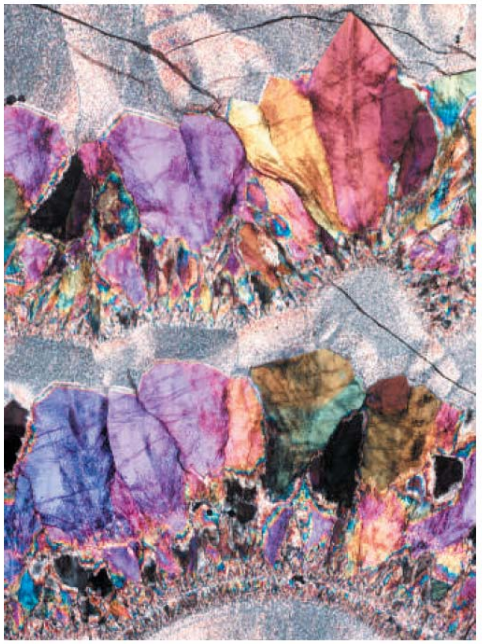


Figure 1 | Inclusive evidence. This optical photomicrograph shows quartz from the Dresser Formation in cross-polarized light. The coloured crystals are coarse-grained quartz, which contain the tiny fluid inclusions analysed by Ueno *et al.*[2]. (Image courtesy of Yuichiro Ueno; width is about 3 mm.)

[Canfield, 2006]

メタンの温室効果

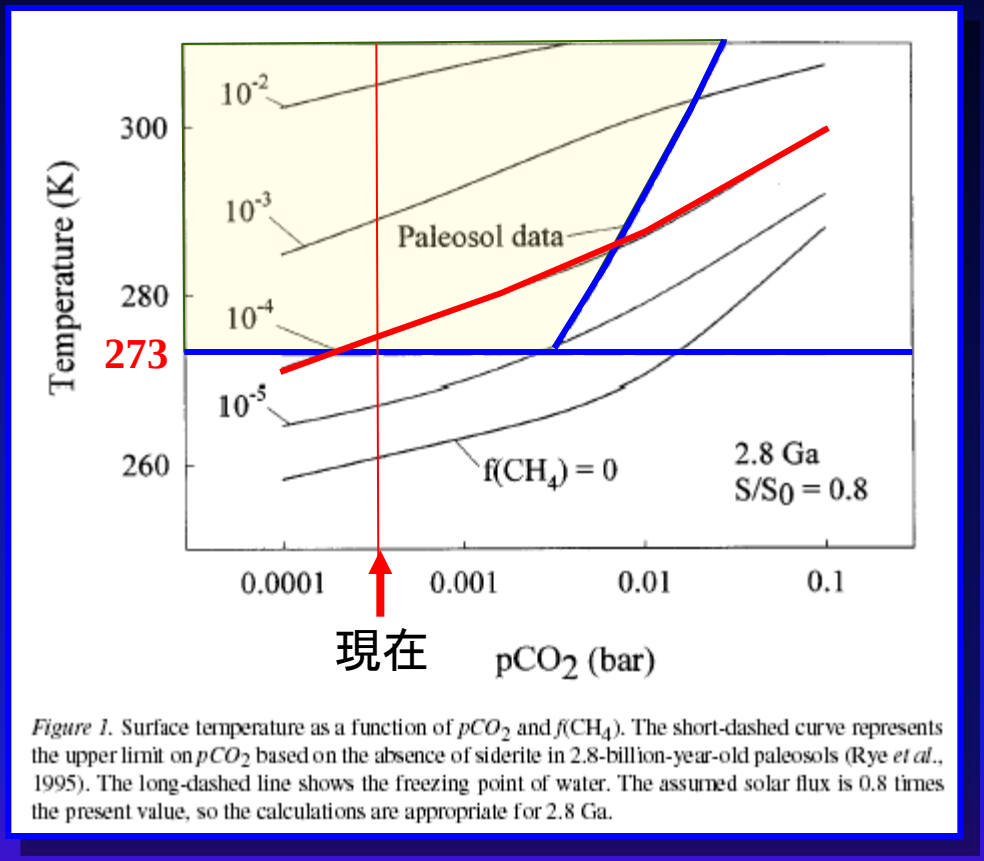


Figure 1. Surface temperature as a function of pCO_2 and $f(CH_4)$. The short-dashed curve represents the upper limit on pCO_2 based on the absence of siderite in 2.8-billion-year-old paleosols (Rye *et al.*, 1995). The long-dashed line shows the freezing point of water. The assumed solar flux is 0.8 times the present value, so the calculations are appropriate for 2.8 Ga.

■CH_4フラックスが現在の10倍程度で混合比が10^{-4} (100 ppm)以上となり，CO_2分圧が低くても地球を温暖な環境にできる

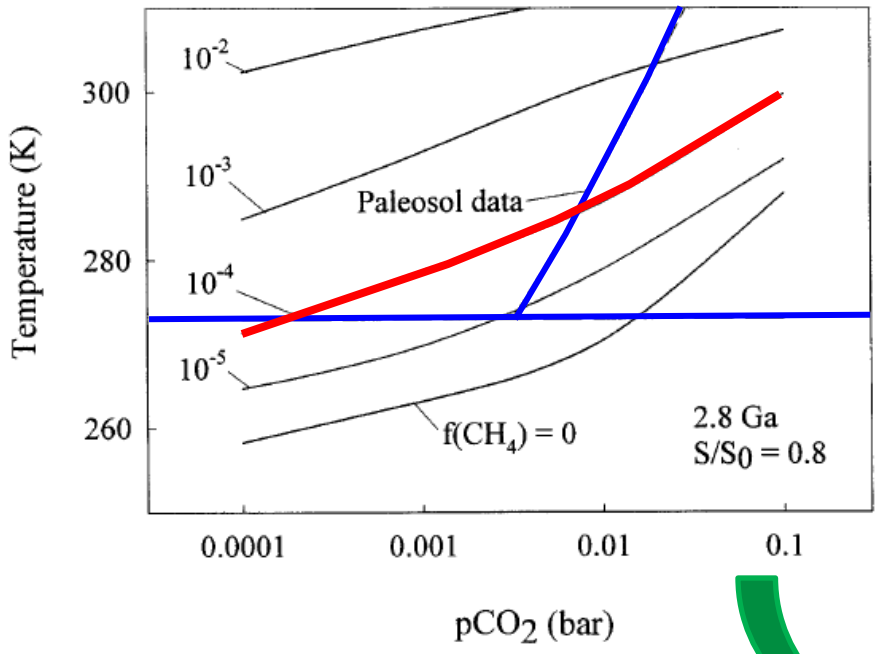
[Pavlov et al. (2000); Kasting (2001)]

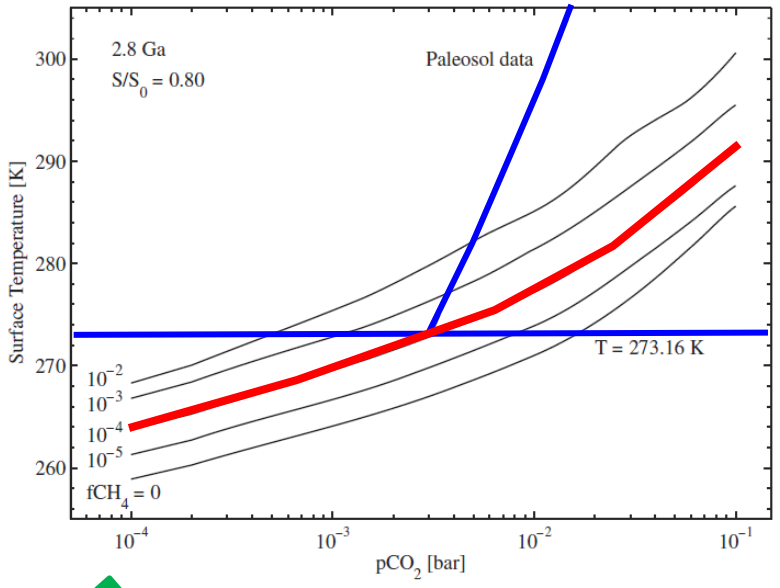
メタンの温室効果は弱かった・・・

- Haqq-Misra et al (2008) Astrobiology

Pavlov et al (2000) の計算は間違っていた・・・

“Unfortunately, their calculations have recently been found to be in error.”





[Kasting et al. (2001)]

[Haqq-Misra et al. (2008)]

＊CO_2-CH_4-H_2O の温室効果では太古代の地球を暖かくできない！

有機物の“もや”の生成

■メタンが増えると有機物の“もや” (organic haze) が生成

タイタンの大気中では，炭化水素エアロゾル

(C_4H_2, C_5H_4, etc.) の生成が知られている

＊生成条件：

$f(CH_4)/f(CO_2) \sim 0.1$

光学的に薄い（もやの形成開始）

$f(CH_4)/f(CO_2) \sim 1$

光学的に厚い

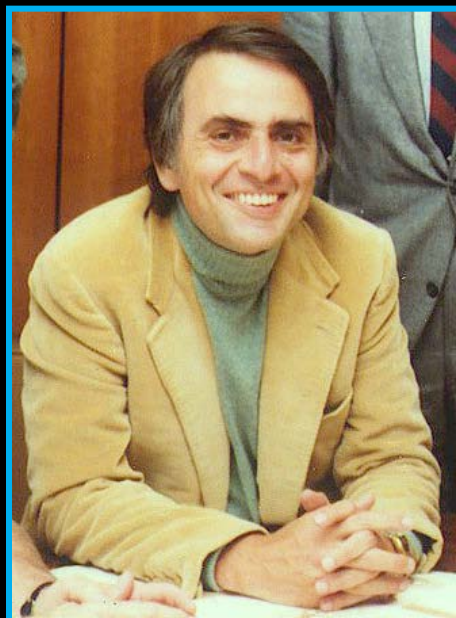
http://www.sonferrer.imfo/astronomia/solar_externo/titan.html

地球でも有機物の“もや”の生成

- Sagan and Chyba (1997) *Science*

  CH_4 の光反応で生成された有機物エアロゾルが大気上層で太陽紫外線を吸収することにより，NH_3が長期的にわたって安定的に存在できる可能性を指摘

→ 地球も火星も温暖化が可能



カール・セーガン
(1934年11月9日生～ 1996年12月20日没)

http://www. Teamrenzan.com/archives/writer/nagai/cosmo1.html

有機物の“もや”の影響

- Pavlov et al. (2001) JGR

  * 太陽紫外線の吸収量

    非常に小さい

  * CH_4と有機物のもやの存在下でのNH_3 濃度

    非常に速く光分解されるため，混合比は10^{-9} ($<< 10^{-5}$)

    温室効果は小さい？

→ Sagan and Chyba の主張のようにはいかなさそう？

有機物の“もや”の反温室効果

- “Antigreenhouse effect”　[McKay et al., 1991]

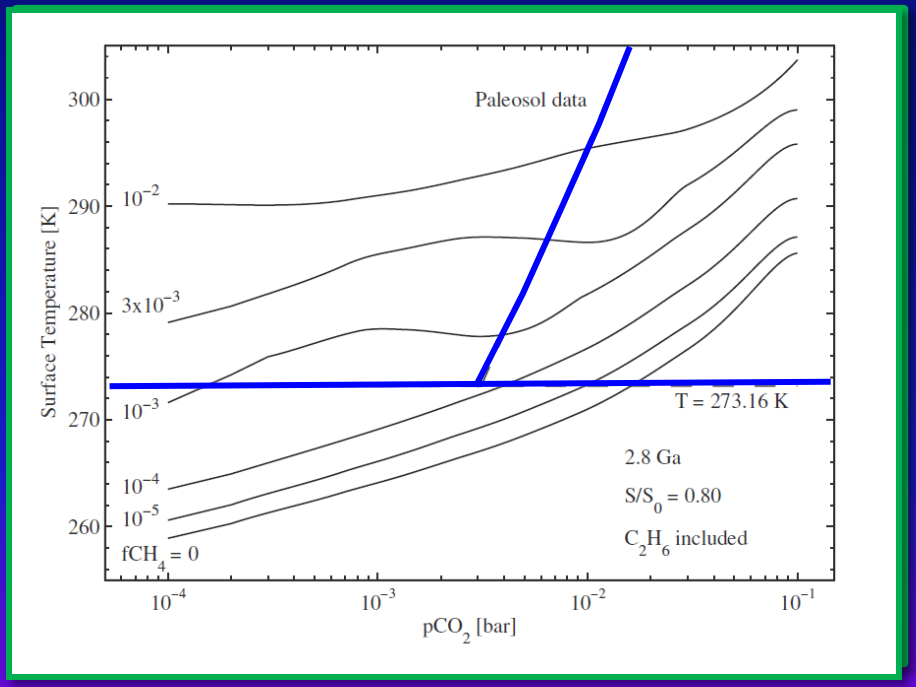
  有機物の“もや”によって，日射 (可視光) が成層圏で吸収され，赤外放射が成層圏から射出されるため，地表を温めるためのエネルギーが低下する効果.

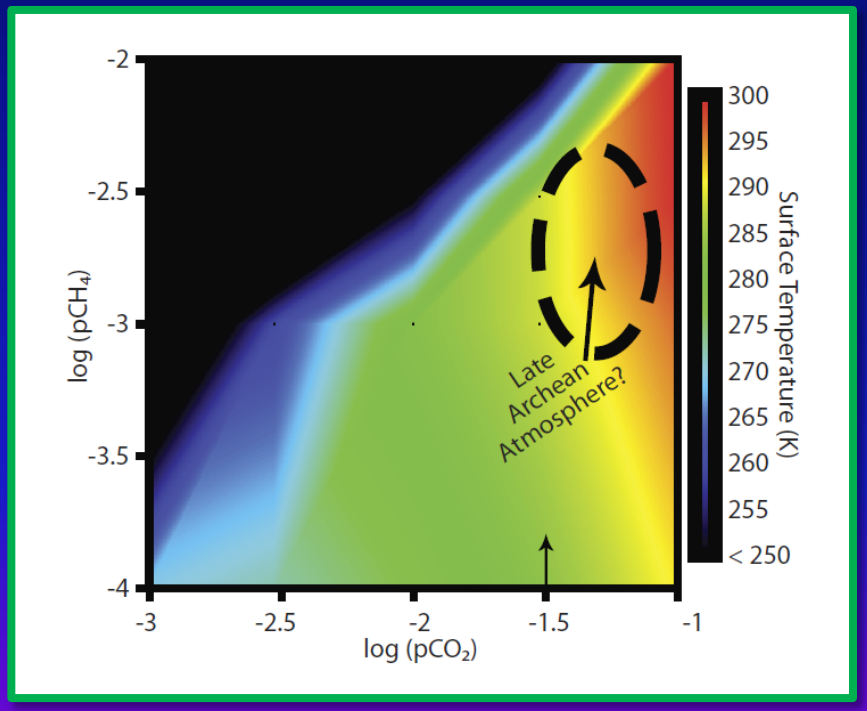
→ 大気中のメタンが増えて　$CH_4/CO_2 > 0.1$ になると，有機物の“もや”が生成しはじめ，反温室効果によって寒冷化が生じる

有機物の“もや”ができると暖かくできない

- Haqq-Misra et al (2008) Astrobiology

CO_2-CH_4-H_2O にエタン (C_2H_6) の温室効果まで考慮すると温暖
しかし，さらに有機物の“もや”の反温室効果まで考慮すると寒冷





＊CO_2-CH_4-H_2O の温室効果では太古代の地球を暖かくできない！

→ 地質学的制約が誤っているのではないか？

有機物の“もや”はフラクタル

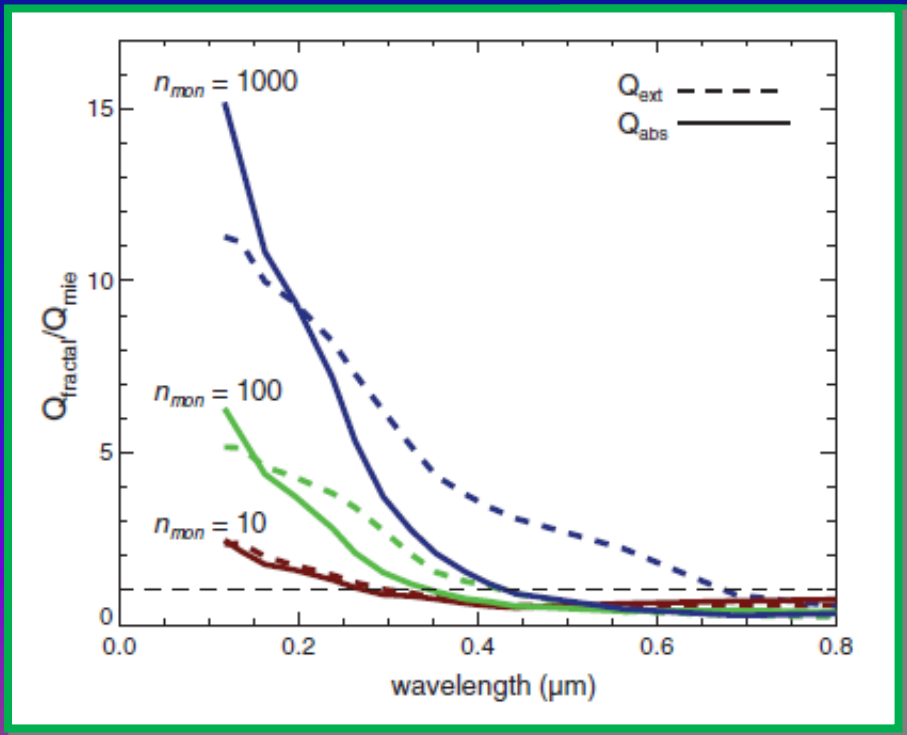
- Wolf and Toon (2010) *Science*

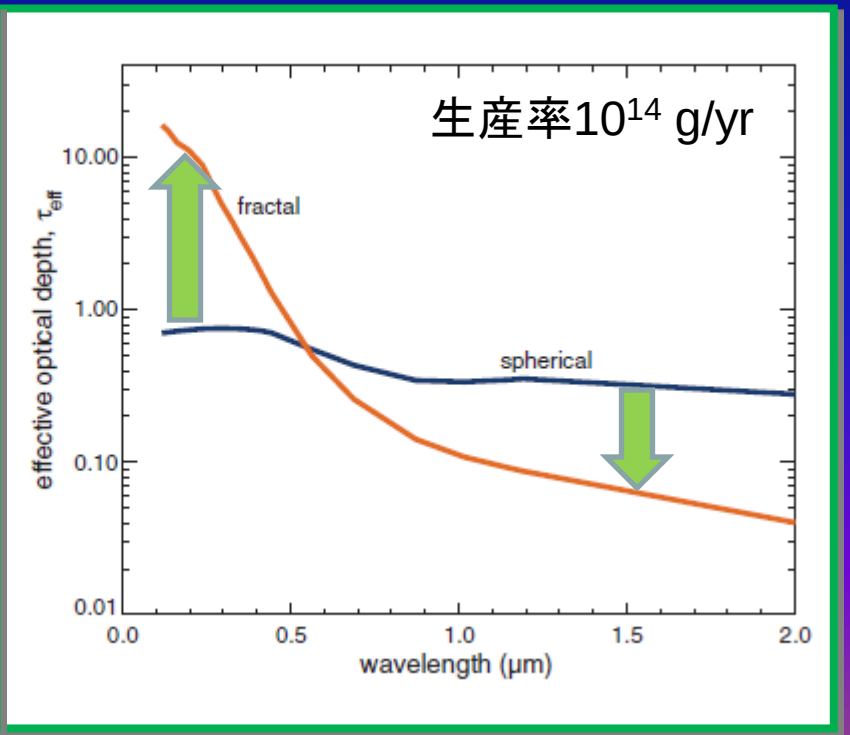
  有機物の“もや”はフラクタルな凝集物

  → 紫外線は吸収し可視光は透過する (τ_{UV}/τ_{vis}～24.4)

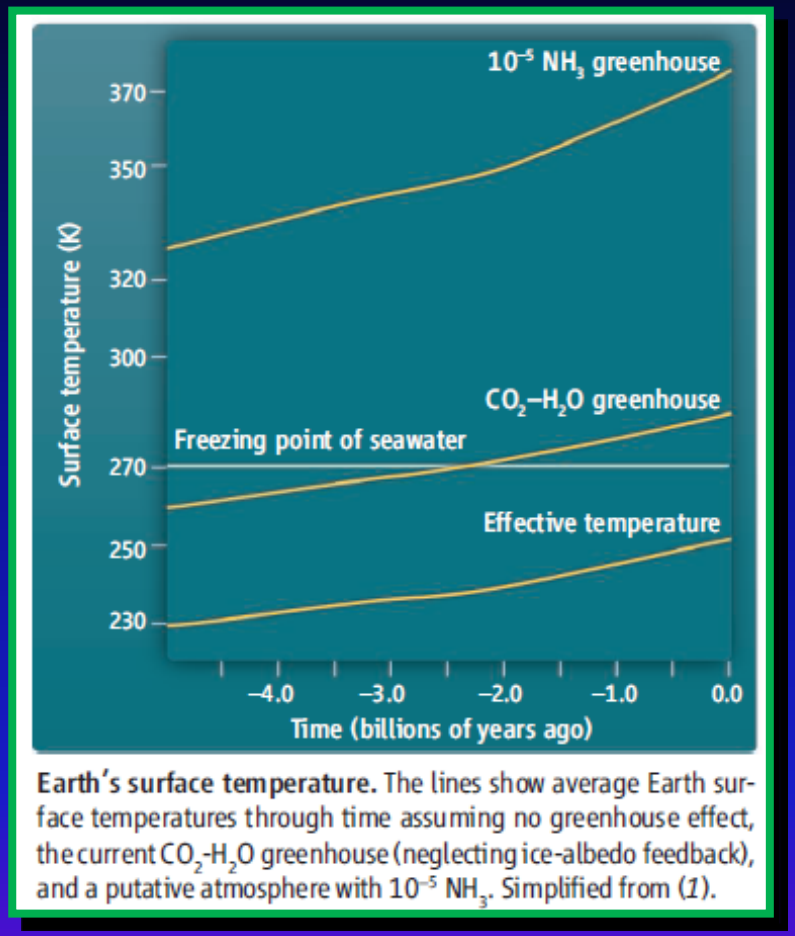
  → NH_3は下層大気に存在可能！（寿命～7x10^7 年）

  → 暗い太陽のパラドックスは解決!?





やっぱりセーガンは正しかった？



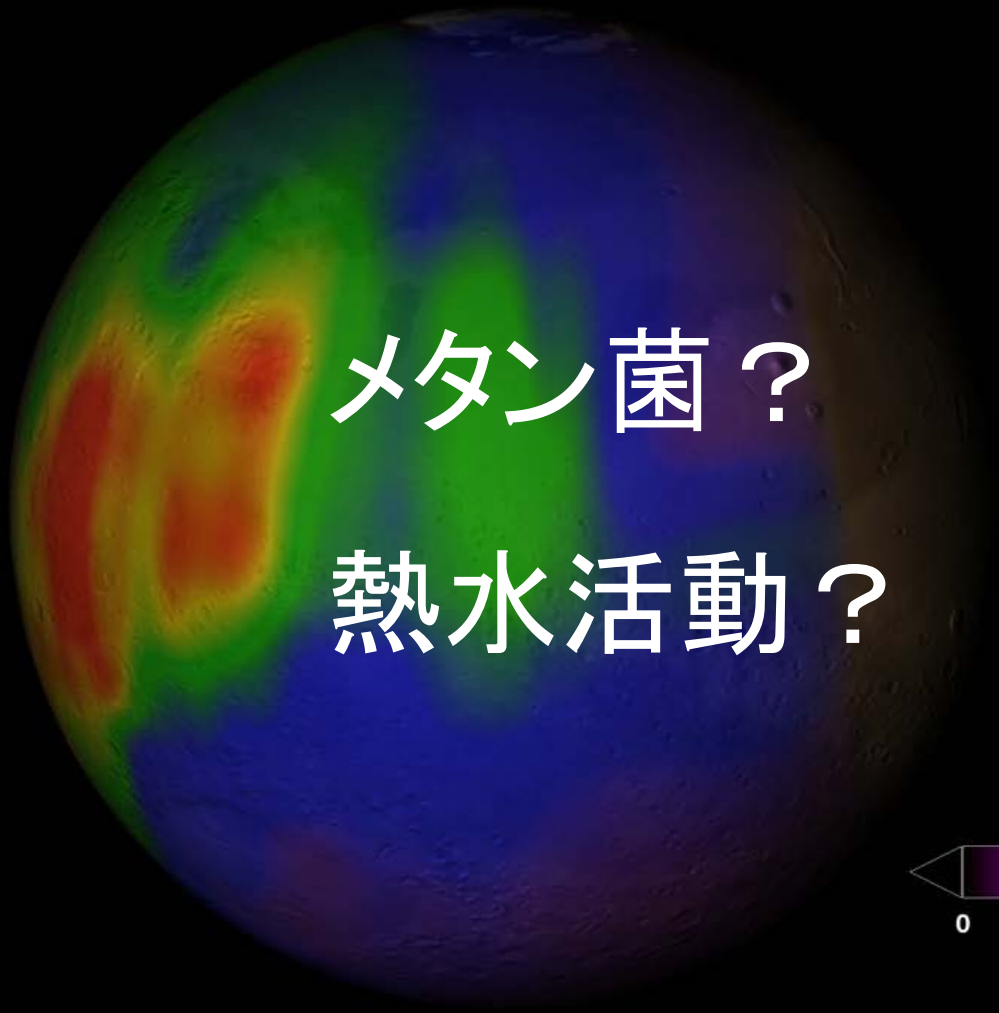
Earth's surface temperature. The lines show average Earth surface temperatures through time assuming no greenhouse effect, the current CO_2-H_2O greenhouse (neglecting ice-albedo feedback), and a putative atmosphere with 10^{-5} NH_3. Simplified from (*1*).

[Chyba (2010) Science]

過去の
火星も？

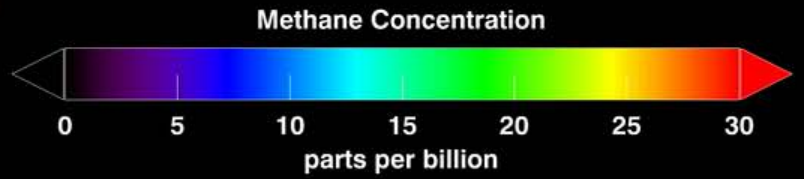
＊初期大気中には $>10^{-5}$ のNH_3に存在し，その温室効果で温暖気候を実現，また生命の誕生にも寄与！

火星大気中にメタンプルーム！



[Formisano et al. (2004) *Science*
Krasnopolsky et al (2004) *Icarus*
Mumma et al (2009) *Science*]

Methane release:
Northern summer



[http://www.nasa.gov/mission_pages/mars/news/marsmethane_media.html]

5. 暗い太陽のパラドックスの再燃

暗い太陽のパラドックスの再燃

- Wolf and Toon (2010)　*Science*, 4 June.
  Fractal organic hazes provided an ultraviolet shield for early Earth.

  有機物のもやのフラクタルな性質を考慮すれば，紫外線は吸収される
  一方，反温室効果はなくなる　→　NH_4が安定に存在可能！
  関連論文：Chyba (2010) Science, 4 June.

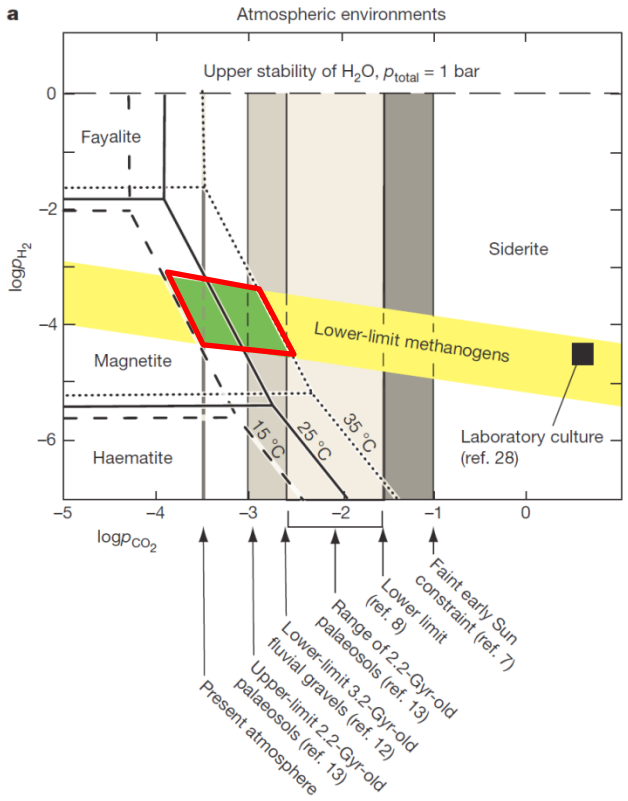
nature Vol 464|1 April 2010|doi:10.1038/nature08955

LETTERS

Nature, 1 April.

No climate paradox under the faint early Sun

Minik T. Rosing[1,2,4], Dennis K. Bird[1,4], Norman H. Sleep[5] & Christian J. Bjerrum[1,3]



(1) BIFsにおいてシデライト($FeCO_3$)とマグネタイト(Fe_3O_4)が共存

→ 両者が共存できる熱力学平衡レベル

(2) メタン菌の活動に必要な最小H_2レベル

→ CO_2とH_2に対する強い制約
（pCO_2は現在の3倍以下程度）

暗い太陽のパラドックスはパラドックスではない？？？

■ Rosing et al (2010) *Nature*

惑星アルベドが低かった

1. 大陸面積小
2. 生物生産低い

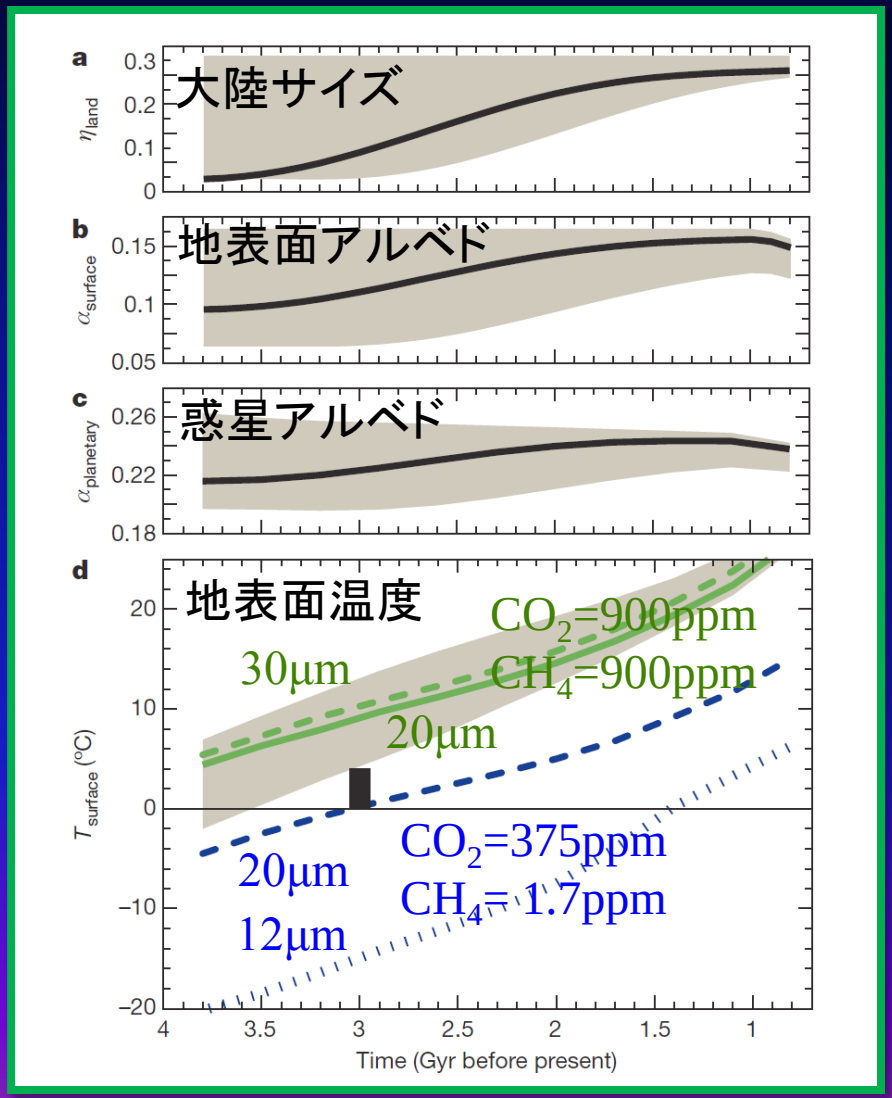
→ 雲凝結核(CCN)密度低い

→ CCNのサイズ大（雲は短寿命）
（12μm → 20～30μm）

→ 短波放射の散乱小
（光学的厚さ小）

→ 惑星アルベド小
（0.3 → ～0.23）

→ 温暖にできる！？



BRIEF COMMUNICATIONS ARISING

Kasting (2010) Nature, 1 April.
Reinhard and Planavsky (2010) Nature, 2 June.
Dauphas and Kasting (2010) Nature, 2 June.
Goldblatt and Zahnle (2010) Nature, 2 June.
Rosing et al. (2010) Nature, 2 June.

→ Rosing et al. (2010) には多くの問題がある

- 酸化鉄は後から（続成作用・変成作用で）生成
- 堆積場の化学条件は大気と同じではない
- DMSのCCNに対する寄与は3-10%程度
- CCNの有効半径は15μmより大きくなることはない
- 想定する条件では有機物のもやができるはず
- 実際には相当温暖化できなければ意味がない

etc.

暗い太陽のパラドックスの再燃

- von Paris et al. (2008) *Planet. Space Sci.*
  Warming the early Earth – CO_2 reconsidered.

  CO_2の温室効果を新しい吸収係数データと放射対流平衡モデルを用いて再計算したところ，Kasting らの推定結果よりも温室効果がずっと強いということになり，地質学的制約条件との矛盾も解消

  → 実は，ほぼ同じ推定結果（Haqq-Misra et al., 2008）

- Goldblatt et al. (2010) *Nature Geoscience*
  Nitrogen-enhanced greenhouse warming on early Earth.

  初期地球大気中の窒素が現在の2～3倍以上あったとすれば，CO_2とCH_4の吸収線の圧力効果 (pressure broadening) によってより温暖であった可能性

  → 本当にそんなに窒素があるのかどうかは不明

暗い太陽のパラドックスの再燃

- Rondanelli and Lindzen (2010) *JGR*
  Can thin cirrus clouds in the tropics provide a solution to the faint young Sun paradox?

  アイリス仮説 （温暖化によって熱帯巻雲が減少するという負のフィードバック作用） により，太陽光度が0.8 以上(2.9Ga以前)ならば温暖気候を維持できる．0.8以下でも熱帯域は凍らない．

- Goldblatt and Zahnle (2011) *Clim. Past.*
  Clouds and the faint young Sun paradox.

  低層雲の減少＋上層雲の増加だけでは太陽光度の低下分を説明できそうにない

→ いずれにせよ雲だけでは説明不可
（太古代には氷河堆積物はほとんど発見されていない）

まとめ

1. 炭素循環と二酸化炭素の温室効果は，
長期的な気候を安定化する役割の根幹を担っていた

2. しかし，メタン生成バクテリアの活動によって
大気がメタンを含むであろうことも必然的

3. 二酸化炭素とメタンの比が0.1～1になると
有機物のもやが生成され，アンモニアも
安定に存在可能に

→ 地球史前半の大気組成はとても複雑だったかも

参考文献

Ronov and Yaroshevsky (1967): Chemical structure of the earth's crust. Geokhimiya, p.1285-1309.

Genda and Abe (2005): Enhanced atmospheric loss on protoplanets at the giant impact phase in the presence of oceans, Nature, Volume 433, Issue 7028, p. 842-844

Tian et al. (2005): A Hydrogen-Rich Early Earth Atmosphere, Science, Volume 308, Issue 5724, p. 1014-1017

Walker (1985): Carbon dioxide on the early earth, Origins of Life, Volume 16, no. 2, p. 117-127

Tajika and Matsui (1993): Evolution of seafloor spreading rate based on Ar-40 degassing history, Geophysical Research Letters, Volume. 20, No. 9, p. 851-854.

McLennan and Taylor (1982): Geochemical Constraints on the Growth of the Continental Crust, The Journal of Geology, Volume 90, Issue 4, p. 347-361

Rino et al. (2004): Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands; implications for mantle overturns in the Early Precambrian, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 146, Issue 1-2, p. 369-394

Tajika and Matsui (1990): Evolution of Proto-CO2-Atmosphere on the Earth, The evolution of the terrestrial environment, LPI Conference on the Origin of the Earth, p. 347-370

Tajika and Matsui (1992): Evolution of terrestrial proto-CO2 atmosphere coupled with thermal history of the earth, Earth and Planetary Science Letters, Volume 113, No. 1-2, p. 251-266

参考文献

Brock (1985): Life at High Temperatures, Science, Volume 230, Issue 4722, p. 132-138

Holland (1985): The Role of Mesoscale Eddies in the General Circulation of the Ocean—Numerical Experiments Using a Wind-Driven Quasi-Geostrophic Model, Journal of Physical Oceanography, Volume 8, issue 3, p. 363-392

Robert and Chaussidon (2006): A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts, Nature, Volume 443, Issue 7114, p. 969-972

Karhu and Epstein (1986): The implication of the oxygen isotope records in coexisting cherts and phosphates, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 50, Issue 8, p.1745-1756

Knauth and Epstein (1976): Hydrogen and oxygen isotope ratios in nodular and bedded cherts, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 40, Issue 9, p.1095-1108

Pace (1991): Origin of life--Facing up to the physical setting. Cell 65:531-533

Eyles (1993): Earth's glacial record and its tectonic setting, Earth-Science Reviews, Volume 35, Issue 1-2, p. 1-248

Robert and Chaussidon (2006): A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts, Nature, Volume 443, Issue 7114, p. 969-972

Gaucher et al. (2008): Palaeotemperature trend for Precambrian life inferred from resurrected proteins, Nature, Volume 451, Issue 7179, p. 704-707

参考文献

Blake et al. (2010): Photoreactivity examined through incorporation in metal-organic frameworks, Nature Chemistry, Volume 2, Issue 8, p. 688-694

Kasting (1993): Earth's early atmosphere, Science, vol. 259, no. 5097, p. 920-926

Laws et al. (1995): Dependence of phytoplankton carbon isotopic com- position on growth rate and [CO2],,: theoretical consider- ations and experimental results. Geochim Cosmochim Acta 59:1131-1138

Laws et al. (1997): Effect of growth rate and CO2concentration on carbon isotopic fractionation by the marine diatom Phaeodactylum tricornutum Limnol Oceanogr 42:1552-1560

Pop et al. (1998): Charge equilibration mode as a open quantum system, Zeitschrift für Physik A Atomic Nuclei, Volume 329, Issue 3, p.357-364

Kaufman and Xiao (2003): Probing early atmospheres, Nature, Volume 425, p.249-251

Kaufman and Xiao (2003): High CO2 levels in the Proterozoic atmosphere estimated from analyses of individual microfossils, Nature, Volume 425, Issue 6955, p. 279-282

Rye et al. (1995): Atmospheric carbon dioxide concentrations before 2.2 billion years ago, Nature, Volume 378, Issue 6557, p. 603-605

Kasting (2001): A Coupled Ecosystem-Climate Model for Predicting the Methane Concentration in the Archean Atmosphere, Origins of Life and Evolution of the Biosphere, Volume 31, Issue 3, p.271-285

参考文献

Pavlov et al. (2003): Methane-rich Proterozoic atmosphere?, Geology, Volume 31, Issue 1, p.87

Kharecha (2005): A coupled atmosphere-ecosystem model of the early Archean Earth. Geobiology, 3, 53-76.

Canfield (2006): Biochemistry: Gas with an ancient history, Nature, Volume 440, Issue 7083, p. 426-427

Pavlov et al. (2000): Greenhouse warming by <formula>CH4 in the atmosphere of early Earth, Journal of Geophysical Research, Volume 105, Issue E5, p. 11981-11990

Haqq-Misra et al. (2008): A Revised, Hazy Methane Greenhouse for the Archean Earth, Astrobiology, Volume 8, Issue 6, pp. 1127-1137

Sagan and Chyba (1997): The early faint sun paradox: Organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases, Science, Volume 276, p. 1217-1221

Pavlov et al. (2001): UV shielding of <formula>NH3 and <formula>O2 by organic hazes in the Archean atmosphere, Journal of Geophysical Research, Volume 106, Issue E10, p. 23267-23288

McKay et al. (1991): The greenhouse and antigreenhouse effects on Titan, Science Volume 253, Sept. 6, 1991, p. 1118-1121

参考文献

Wolf and Toon (2010): Fractal Organic Hazes Provided an Ultraviolet Shield for Early Earth, Science, Volume 328, Issue 5983, p. 1266-

Chyba et al. (2010): Countering the Early Faint Sun, Science, Volume 328, Issue 5983, p. 1238-1239

Formisano et al. (2004): Detection of Methane in the Atmosphere of Mars, Science, Volume 306, Issue 5702, pp. 1758-1761

Krasnopolsky et al. (2004): Detection of methane in the martian atmosphere: evidence for life?, Icarus, Volume 172, Issue 2, p. 537-547

Mumma et al. (2009): Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003, Science, Volume 323, Issue 5917, p. 1041-

Rosing et al. (2010): No climate paradox under the faint early Sun, Nature, Volume 464, Issue 7289, p. 744-747

Kasting (2010): Early Earth: Faint young Sun redux, Nature, Volume 464, Issue 7289, p. 687-689

Reinhard and Planavsky (2010): The evolution of the marine phosphate reservoir, Nature, Volume 467, Issue 7319, p. 1088-1090

Dauphas and Kasting (2010): The evolution of the marine phosphate reservoir, Nature, Volume 467, Issue 7319, p. 1088-1090

参考文献

Goldblatt and Zahnle (2010): Faint young Sun paradox remains, Nature Volume 464, p. 744–747

Rosing et al. (2010): No climate paradox under the faint early Sun, Nature, Volume 464, Issue 7289, p. 744-747

von Paris et al. (2008): Warming the early earth—CO2 reconsidered, Planetary and Space Science, Volume 56, Issue 9, p. 1244-1259

Goldblatt et al. (2009): Nitrogen-enhanced greenhouse warming on early Earth, Nature Geoscience, Volume 2, Issue 12, p. 891-896

Rondanelli and Lindzen (2010): Can thin cirrus clouds in the tropics provide a solution to the faint young Sun paradox?, Journal of Geophysical Research, Volume 115, Issue D2, CiteID D02108

Goldblatt and Zahnle (2011): Clouds and the Faint Young Sun Paradox, Climate of the Past, Volume 7, Issue 1, 2011, p.203-220