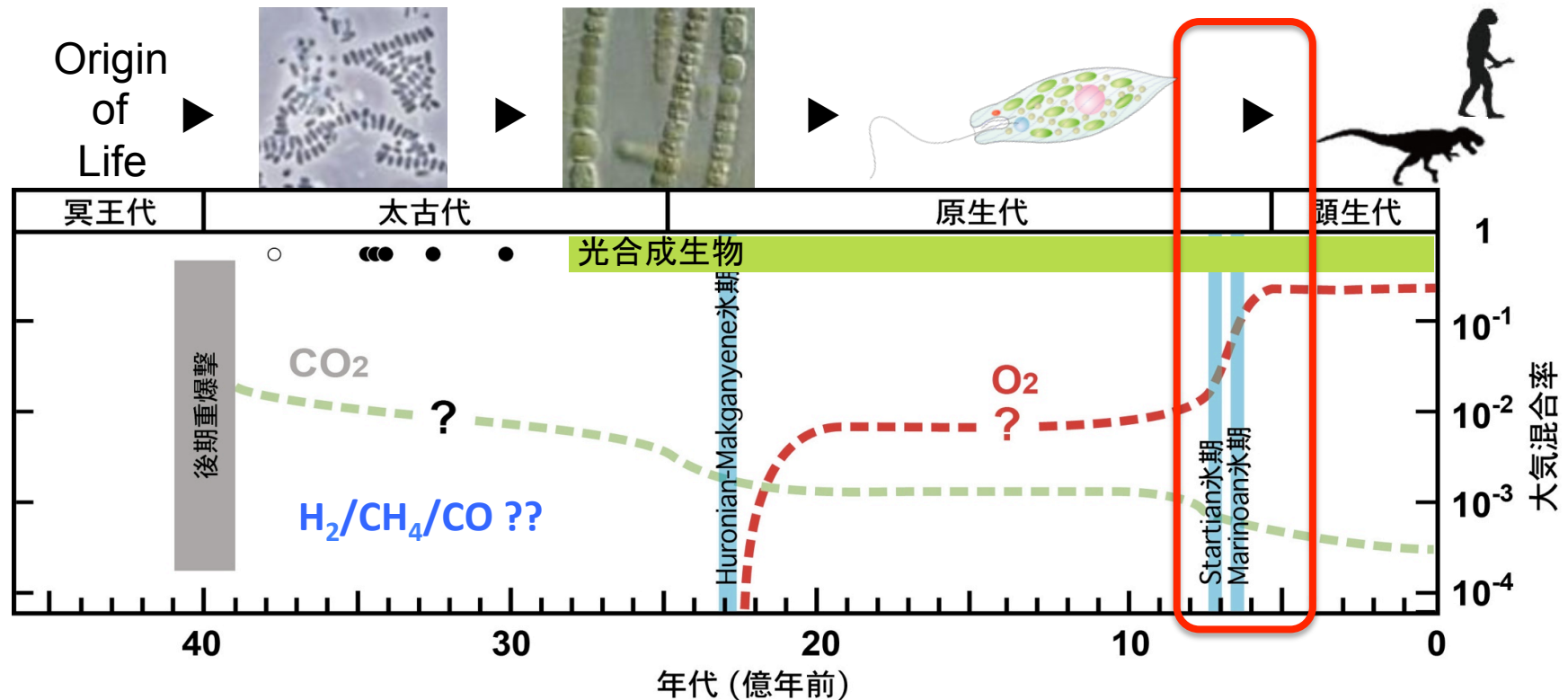


初期地球環境と生物進化

上野 雄一郎 (東工大・地惑専攻准教授 / 地球生命研究所API)

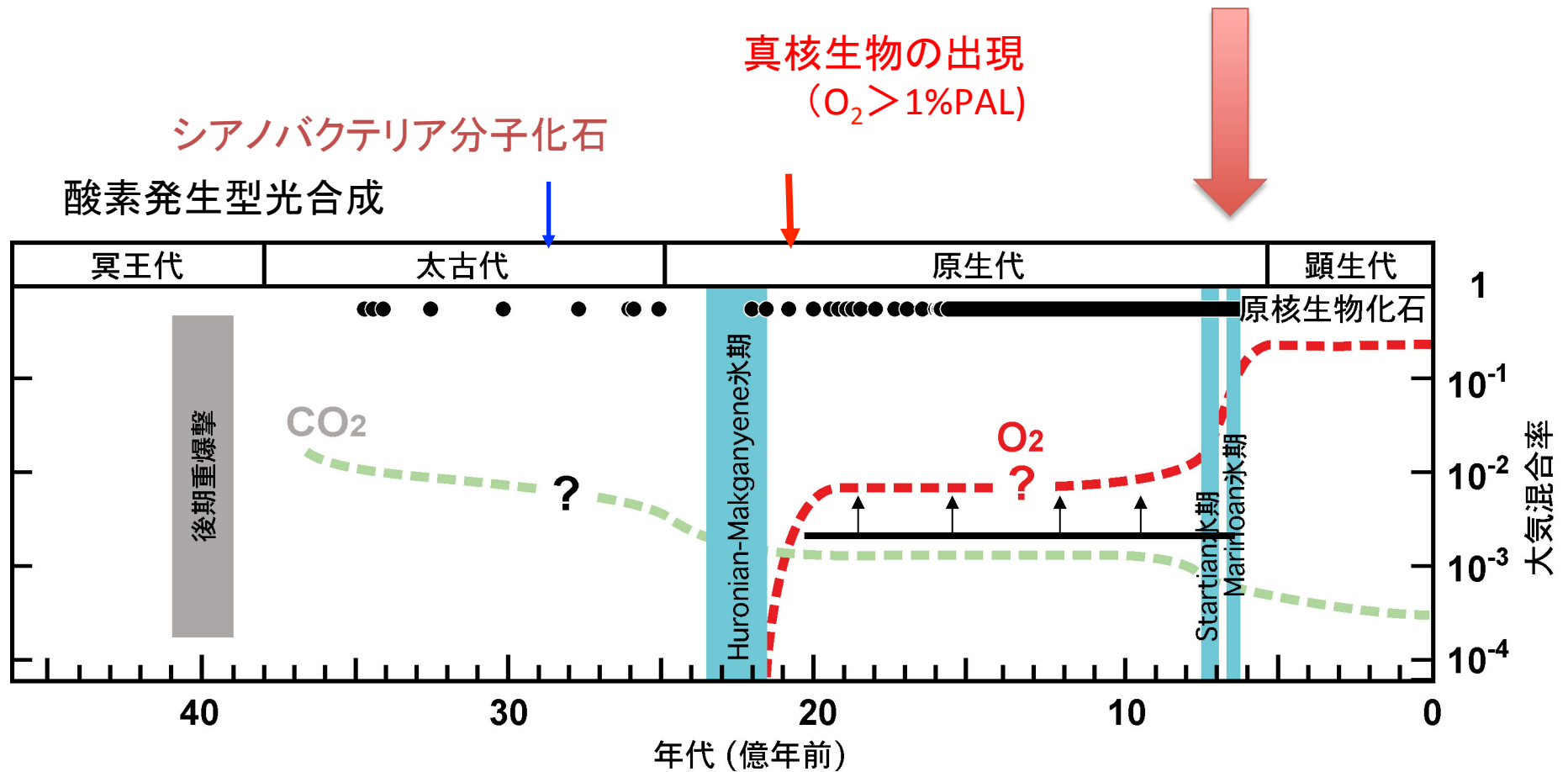
- 1日目午後 (1) 地球形成と初期大気 (冥王代)
- 2日目午前 (2) 地球生命の起源
- 2日目午後 (3) 光合成と酸素上昇 (太古代/原生代)
- 3日目午前 (4) **カンブリア爆発 (原生代/顕生代)**



二度目の酸素上昇と全球凍結

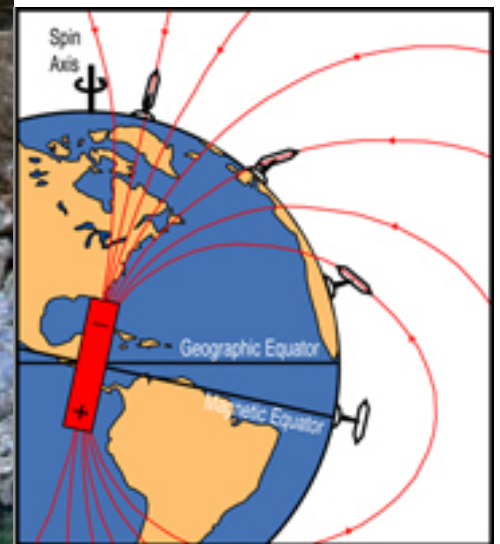
* 長期的な気候の安定性と変動

後生動物の出現



キャップ炭酸塩岩

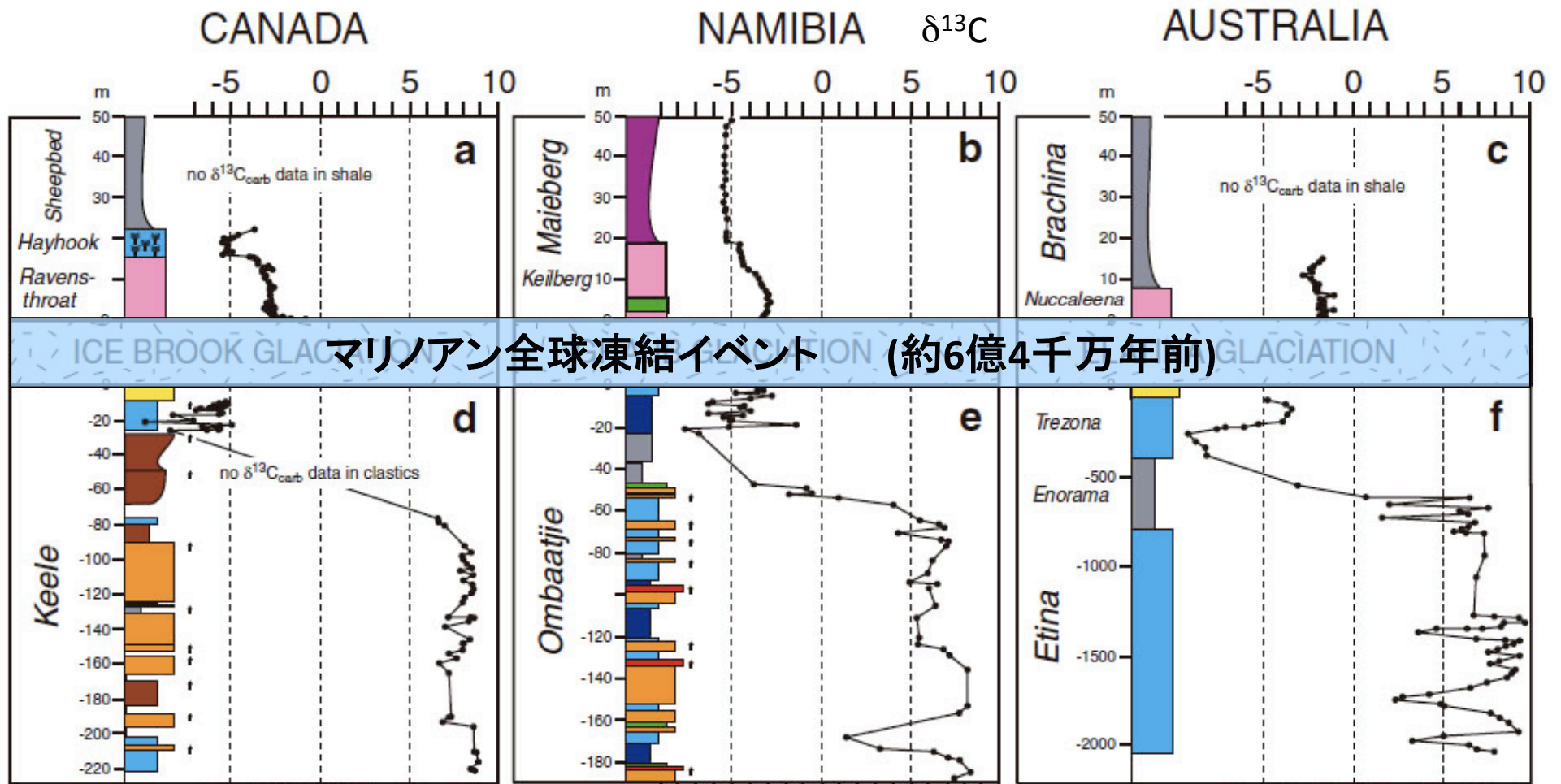
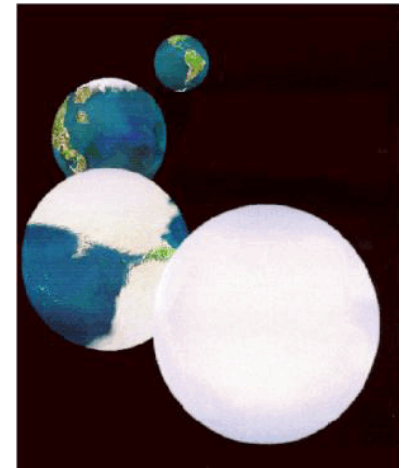
氷礫岩



全球凍結前後の炭酸塩 $\delta^{13}\text{C}$ プロファイル

凍結前： 高 $\delta^{13}\text{C}$ (生物生産が高い)

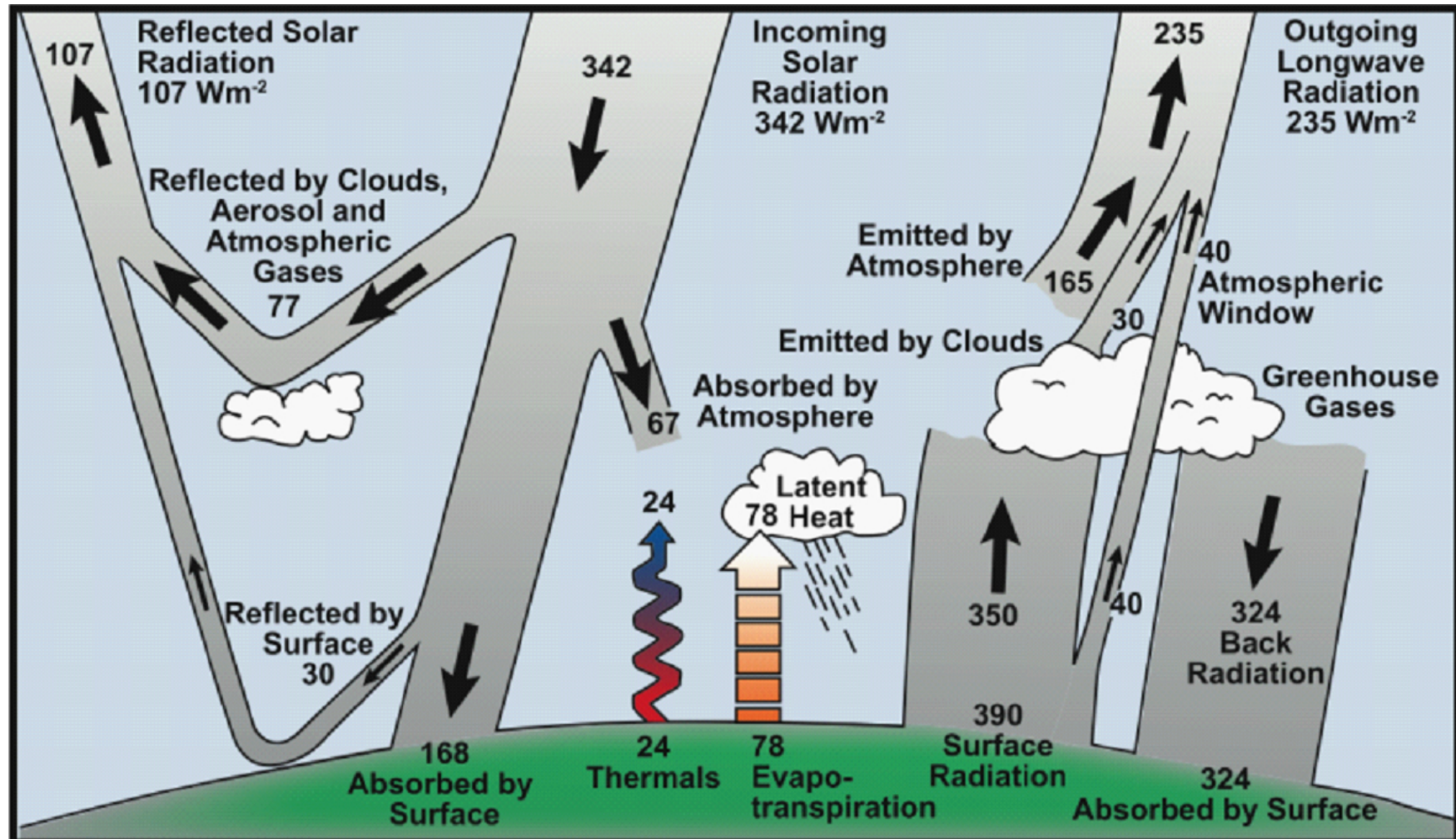
凍結後： 低 $\delta^{13}\text{C}$ (生物生産が落ちた!?)



なぜ地球は凍った?: 気温を決める要因

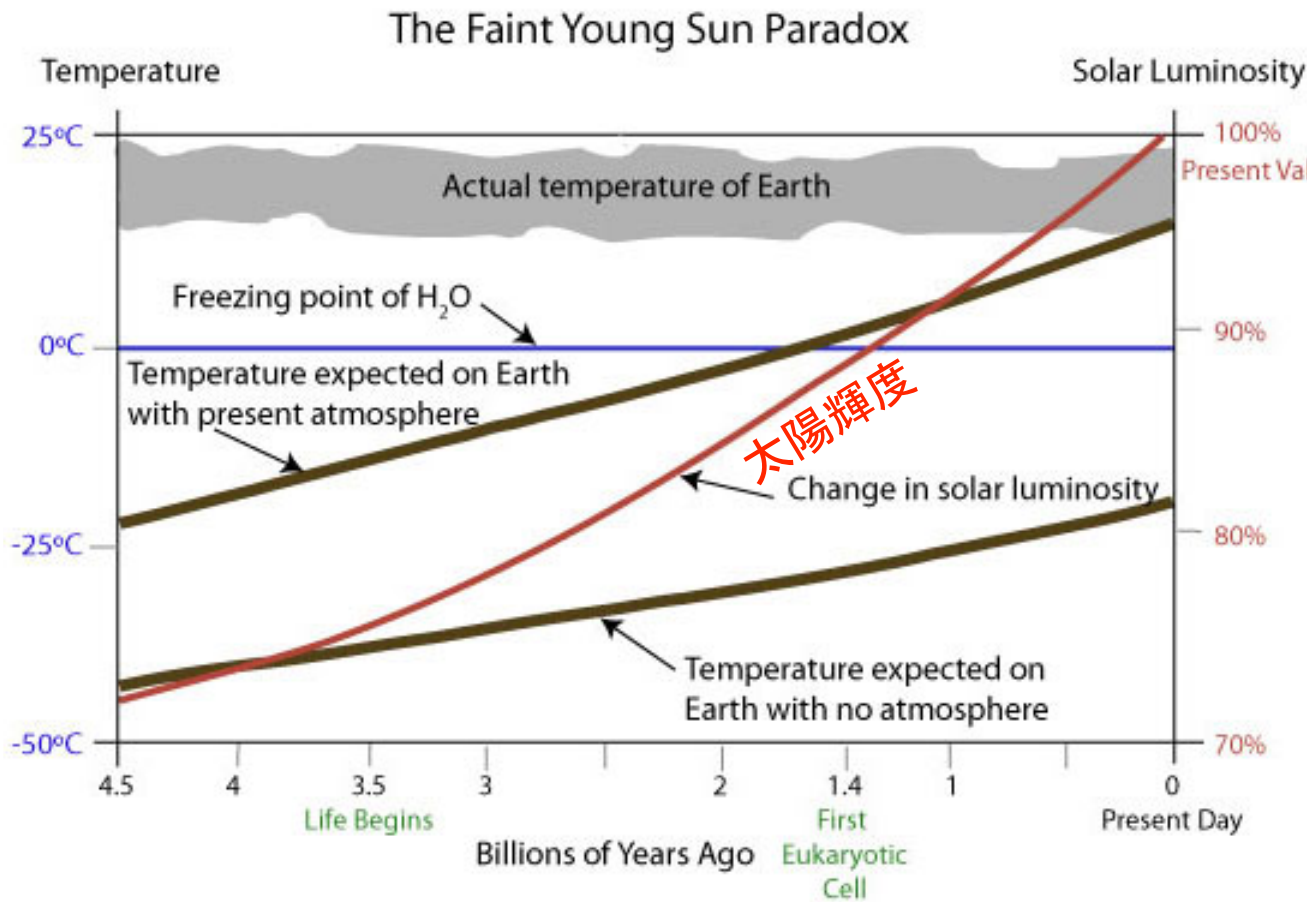
地表面温度 $T_S = [S(1-A)/4\sigma(1-f)]^{1/4}$

太陽フラックス(S)・アルベド(A)・温室効果(f)

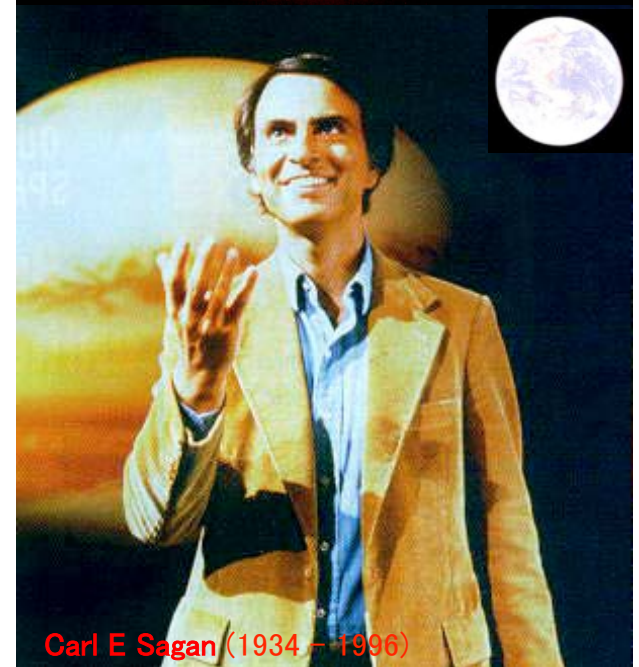
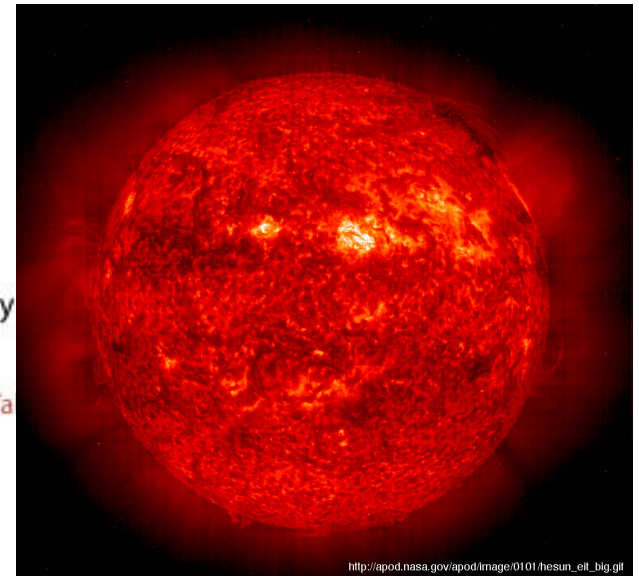


“暗い太陽のパラドックス” (Sagan & Mullen, 1972)

25~40億年前の太陽は現在より20~30%暗い
しかし、当時の地球は凍結していない地質証拠がある
(液体の水: fluvial sediments, pillow lava, etc.)
古大気は現在より多くの温室効果ガスを含んだはず

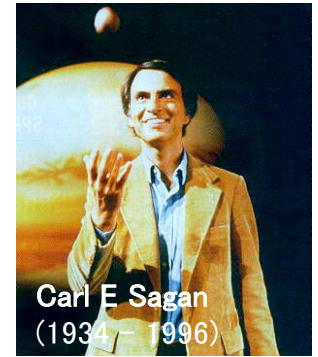


Even though the Sun was about 30% dimmer than it is now, the temperature on Earth has been more or less stable.



Carl E Sagan (1934 - 1996)

温室効果ガスの候補 (いずれも問題有り)



- >1 ppm NH_3

(*Sagan & Mullen, 1972; Sagan & Chyba, 1997*)

x 簡単に光解離してしまう。(適当なUVシールドがない場合)

- >30% CO_2

(*Owen et al., 1979; Walker et al., 1981; Kasting, 1993*)

x 炭酸塩の欠如: それほど高 CO_2 でない<1% (*Rye et al., 1981*)

x 高 CO_2 大気(酸化的)はMIFの保存にも適さない

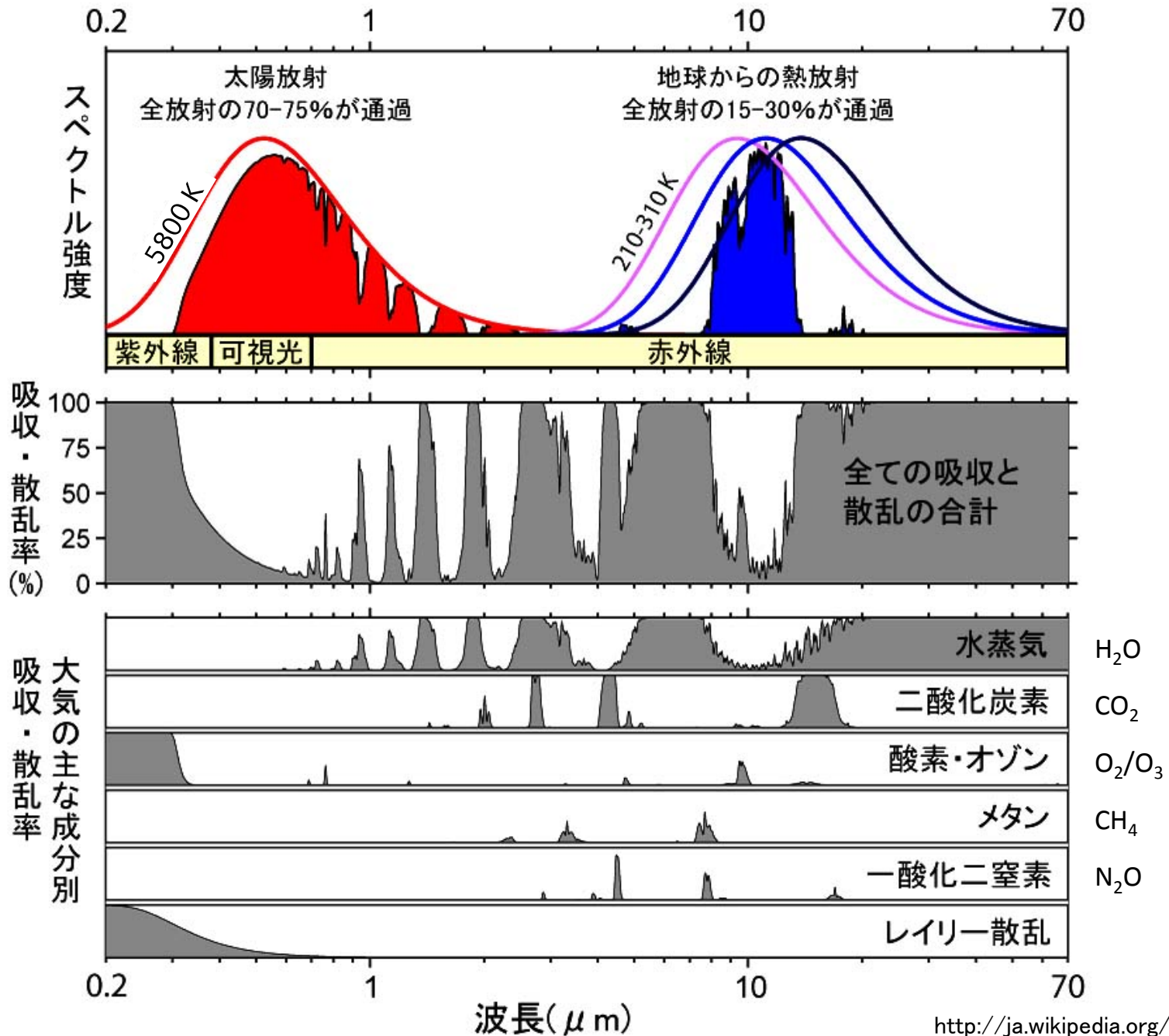
- >1000 ppm $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$

(*Pavlov et al., 2000; Kasting & Catling, 2003*)

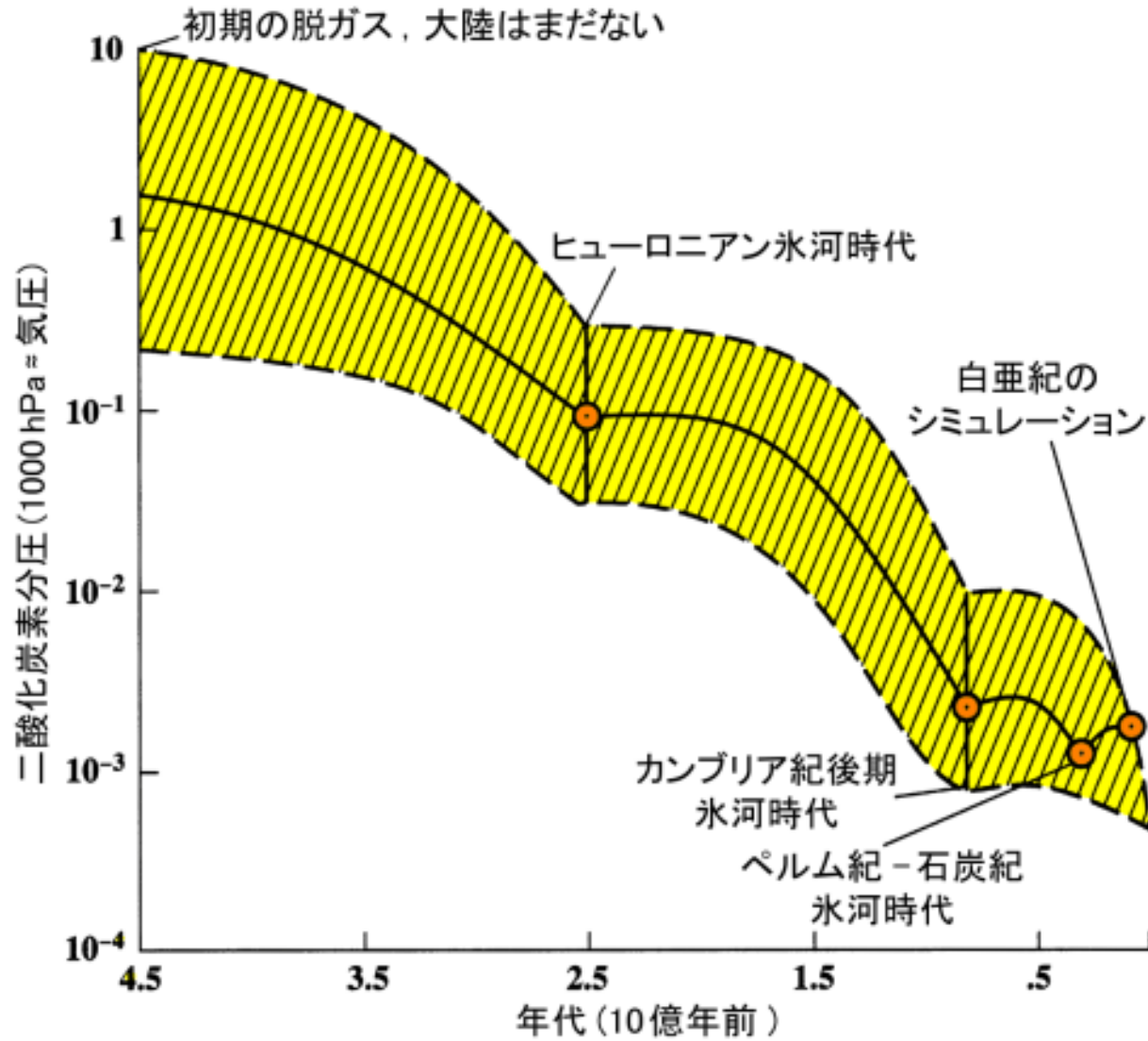
△ CH_4 高濃度だと($\text{CH}_4/\text{CO}_2 > 1$)炭化水素スモッグができ寒冷化要因となる。

太古代の大気に十分な CO_2 はあったか?

大気通過後の放射スペクトル分布



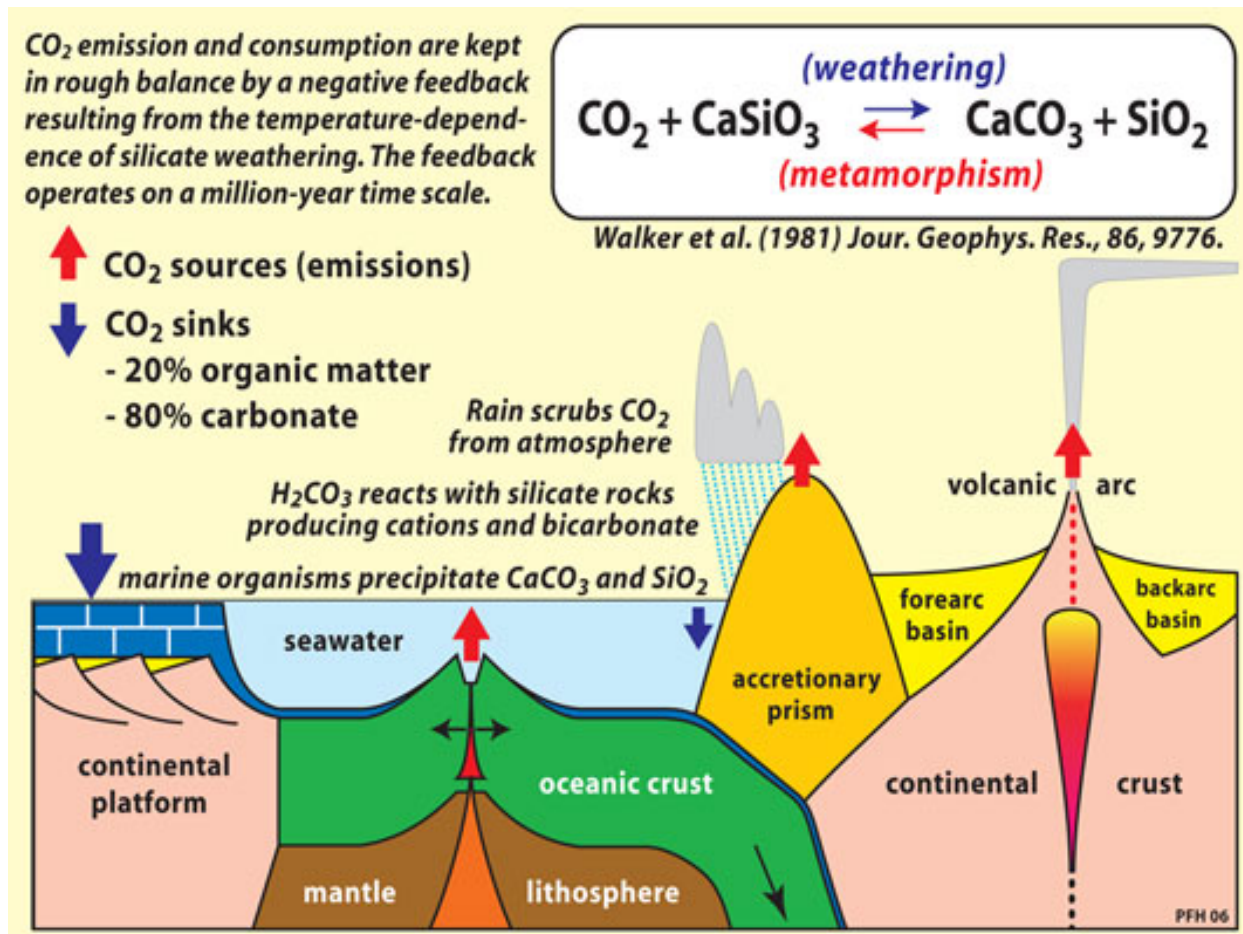
地球を凍らせないために必要なCO2分圧(温室効果)見積もり



田近 (Kasting, 1991 改変)

長期的にはCO₂が気候(表層の気温)を調節してきたというアイデア “Urey Cycle” / “Walker Mechanism”

温度上昇→風化促進→CO₂減少→温室効果減→温度下降



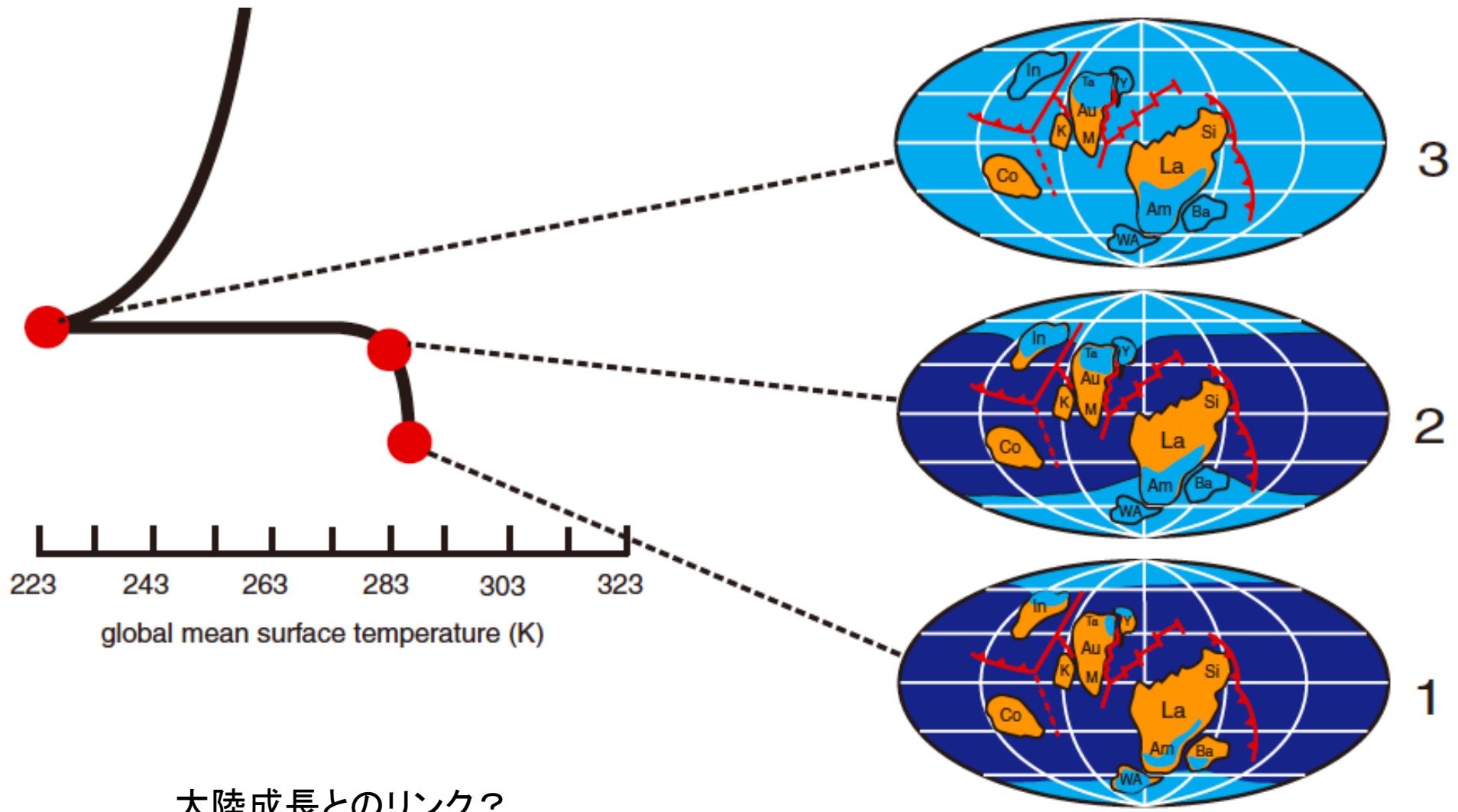
Harold Urey

Urey HC (1952) The Planets: Their Origin and Development. Yale Univ. Press, New haven, 242pp

Walker JCG, Hays PB & Kasting JF (1981) A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. JGR 86. 9776-9782

なぜ全球凍結に陥ったか？（不明）

仮説：赤道に集まった大陸配置。風化によるCO₂除去卓越



大陸成長とのリンク？

Hoffman & Schrag, 2002

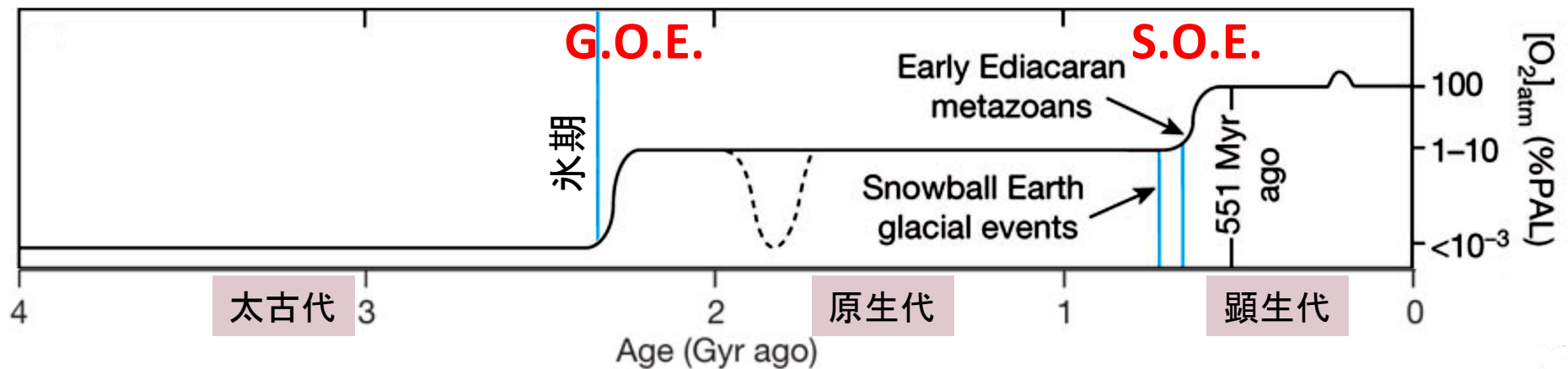
地球と生命の共進化

* 酸化還元分化



- **光合成** → 大気酸素 (生命→環境)
- 酸素上昇 → 真核生物誕生
動物誕生(呼吸)
化学合成生態系 (環境→生命)

2回の酸素上昇イベント



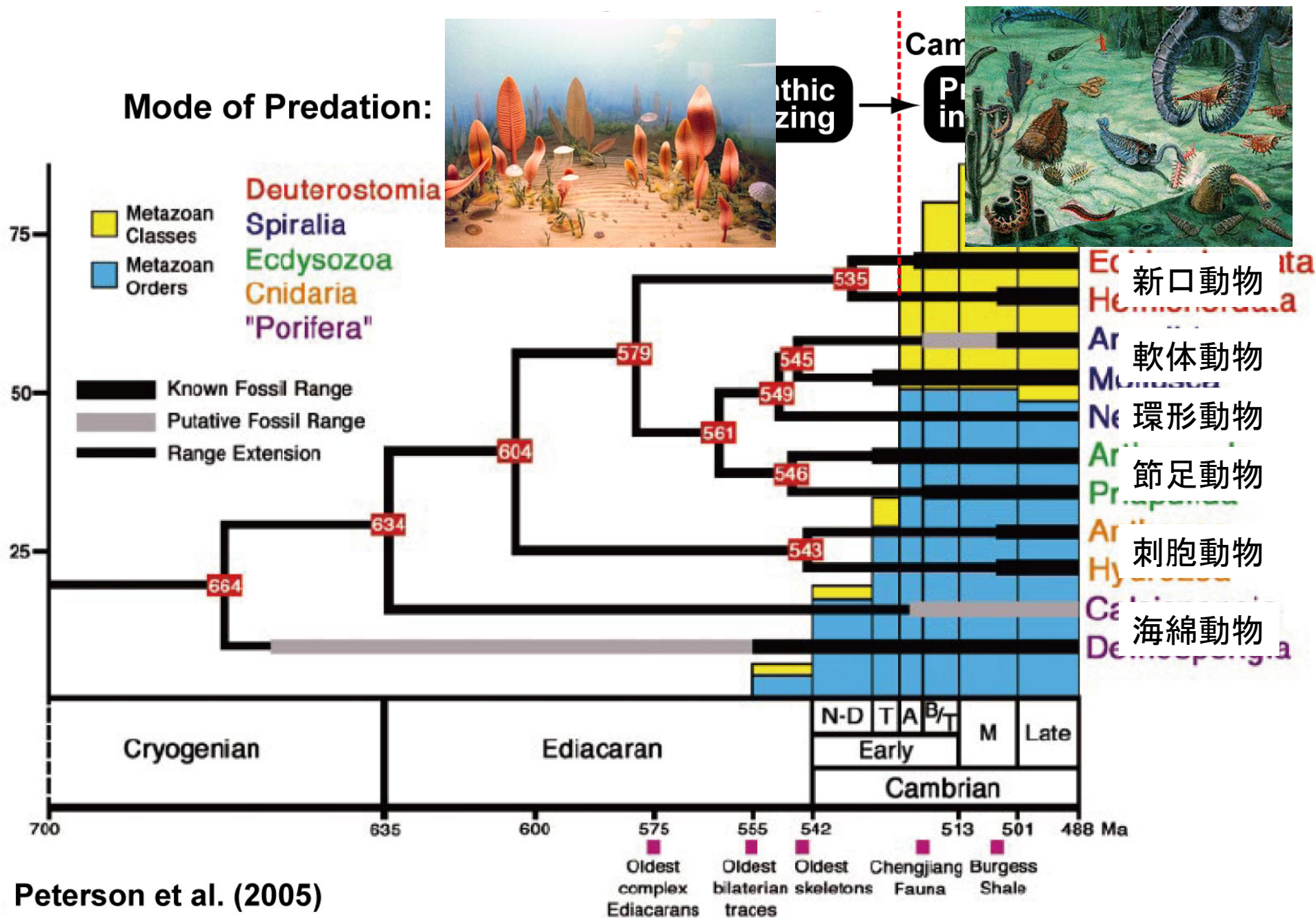
Sahoo et al. (2012)

二度目の酸素上昇：動物の出現をもたらした

後生動物の出現：約6億年前



“カンブリア紀の爆発” 約5.3億年前：全動物門が出そろおう



Peterson et al. (2005)

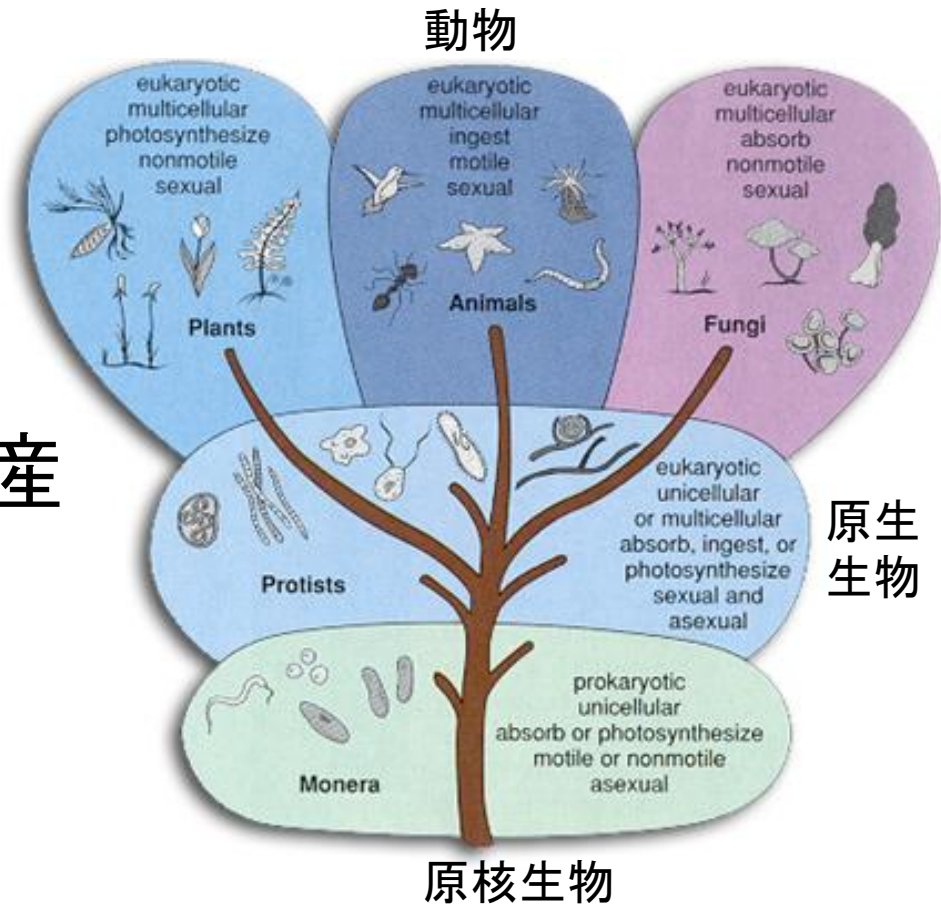
なぜ後生動物(多細胞動物)は出現したか？

環境要因

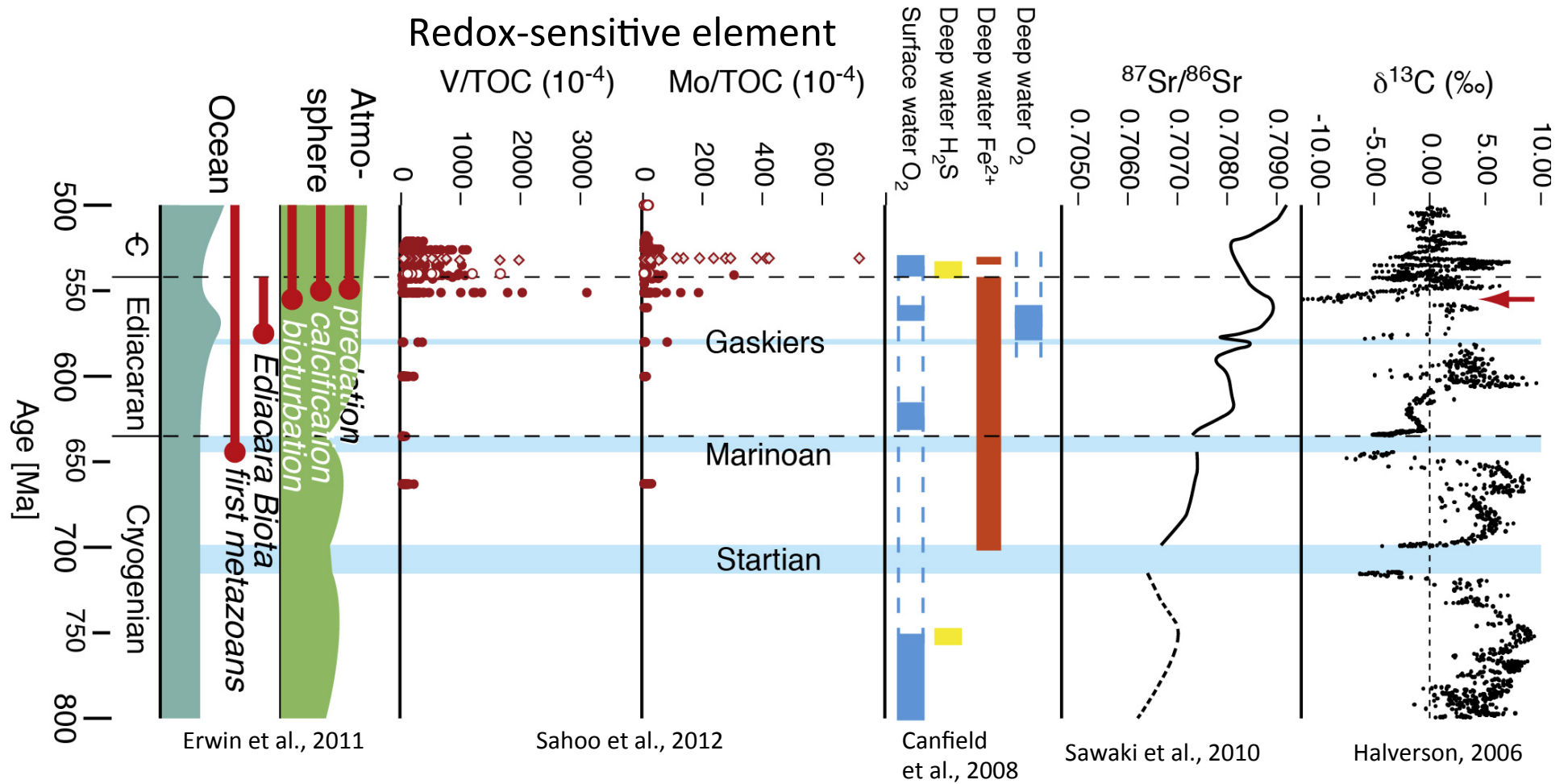
- **酸素**濃度上昇
(→運動性)
- 栄養塩供給/有機物生産
- 全球凍結 (絶滅)

生物要因

- 遺伝的影響(←放射線等)
- 捕食/大型化/硬殻(シリカ・炭酸塩)



後期原生代：酸素濃度が上昇した(20%へ)



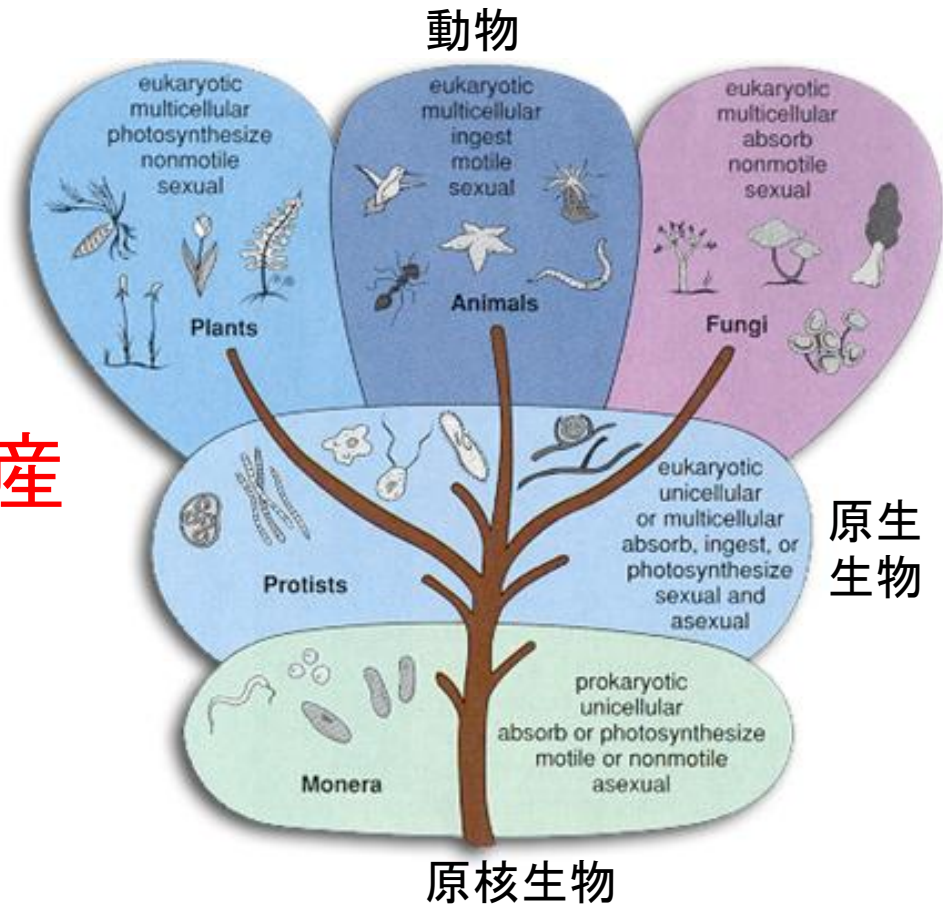
なぜ後生動物(多細胞動物)は出現したか？

環境要因

- **酸素濃度上昇**
(→運動性)
- **栄養塩供給/有機物生産**
- **全球凍結 (絶滅)**

生物要因

- **遺伝的影響 (←放射線等)**
- **捕食/大型化/硬殻 (シリカ・炭酸塩)**

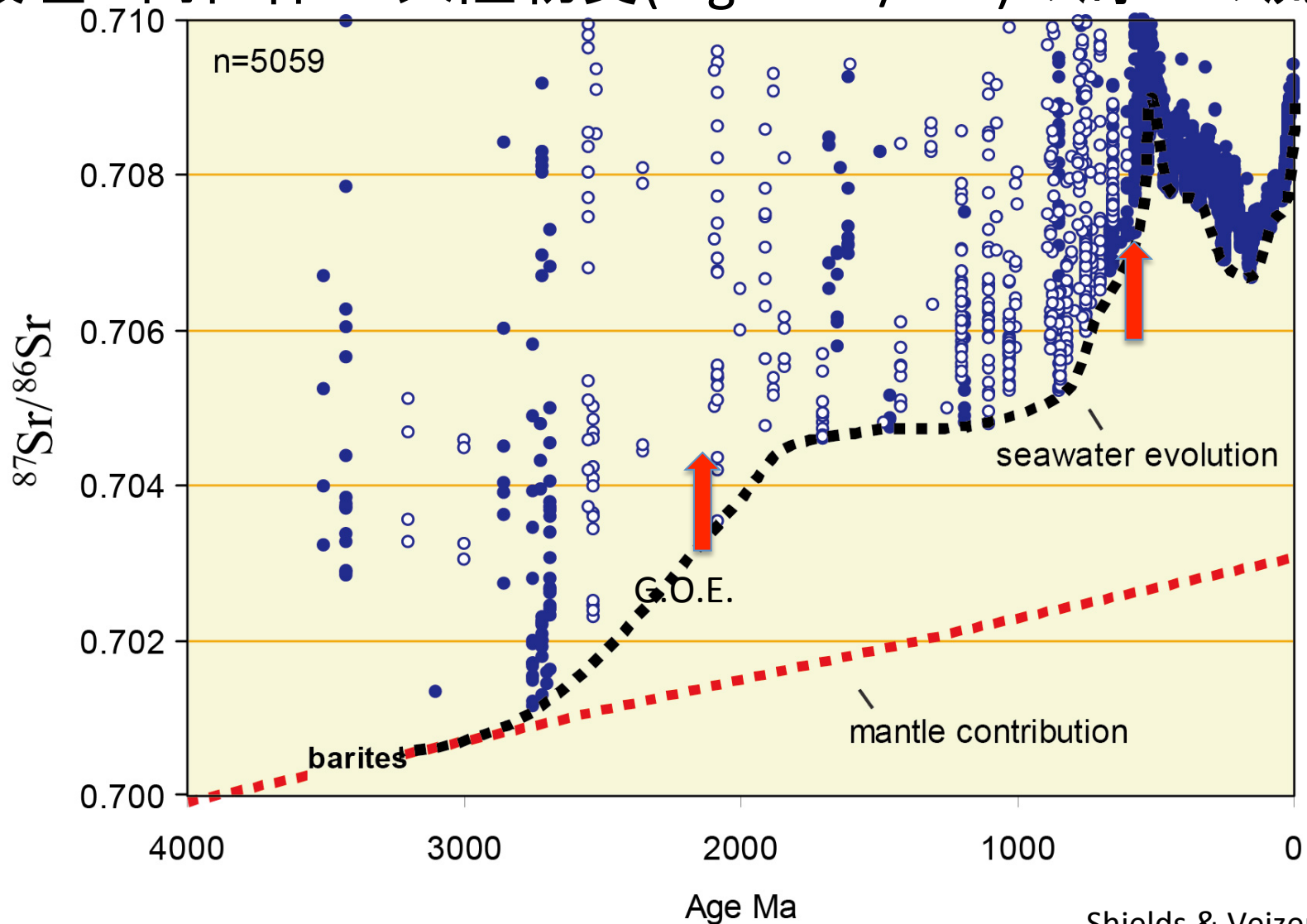


いつ増えた？ (古典論)

大陸成長

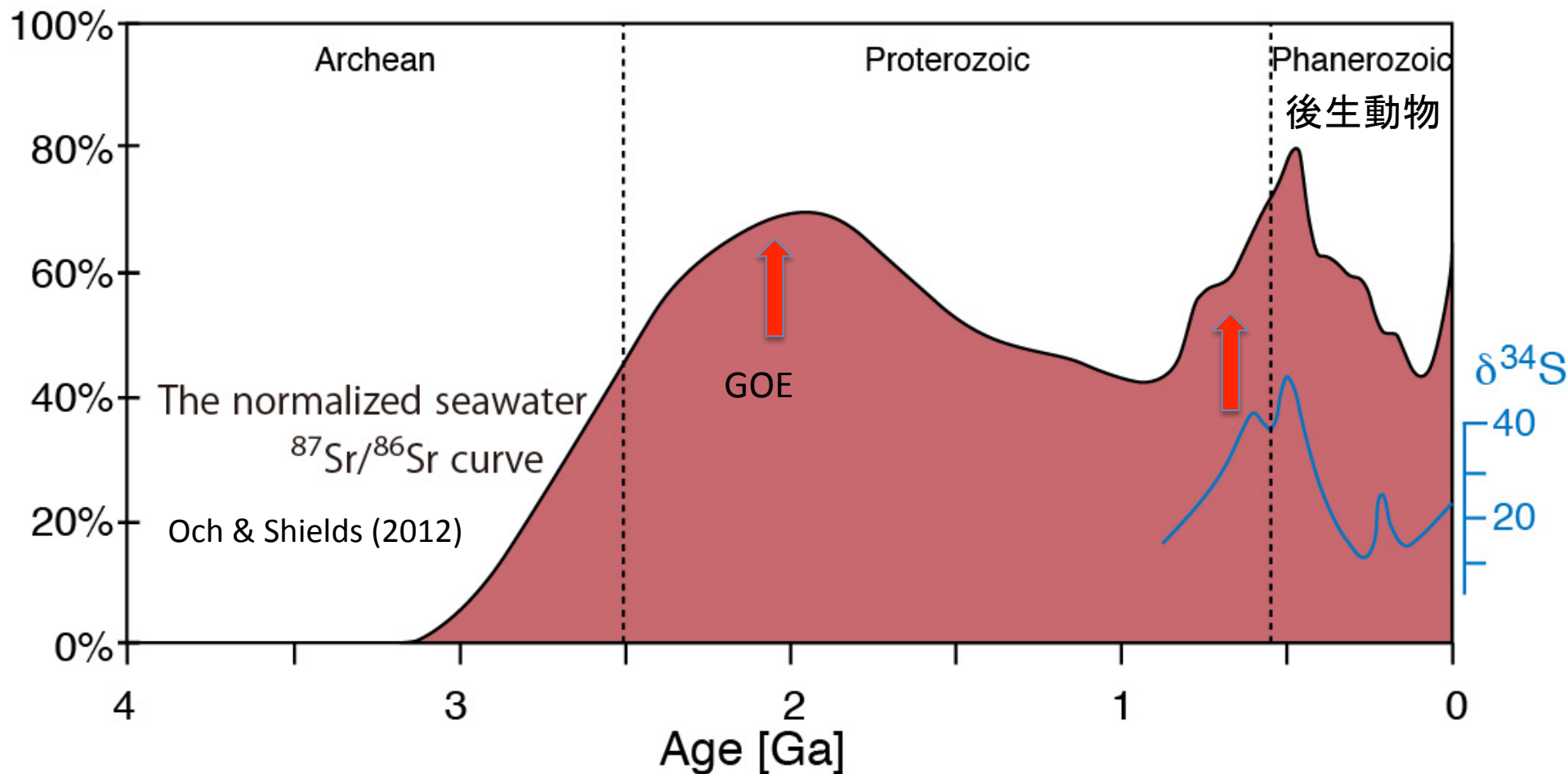
(栄養塩供給・基礎生産・埋没量を支配)

炭酸塩Sr同位体：大陸物質(high- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)の海への流入



大陸物質の流入だけで20%の酸素濃度まで達成できるか？

海洋への陸源Sr供給率（年代効果補正＋端成分推定）



* 6億: 大陸inputは増えたが、GOEの時とさほど変わらない。

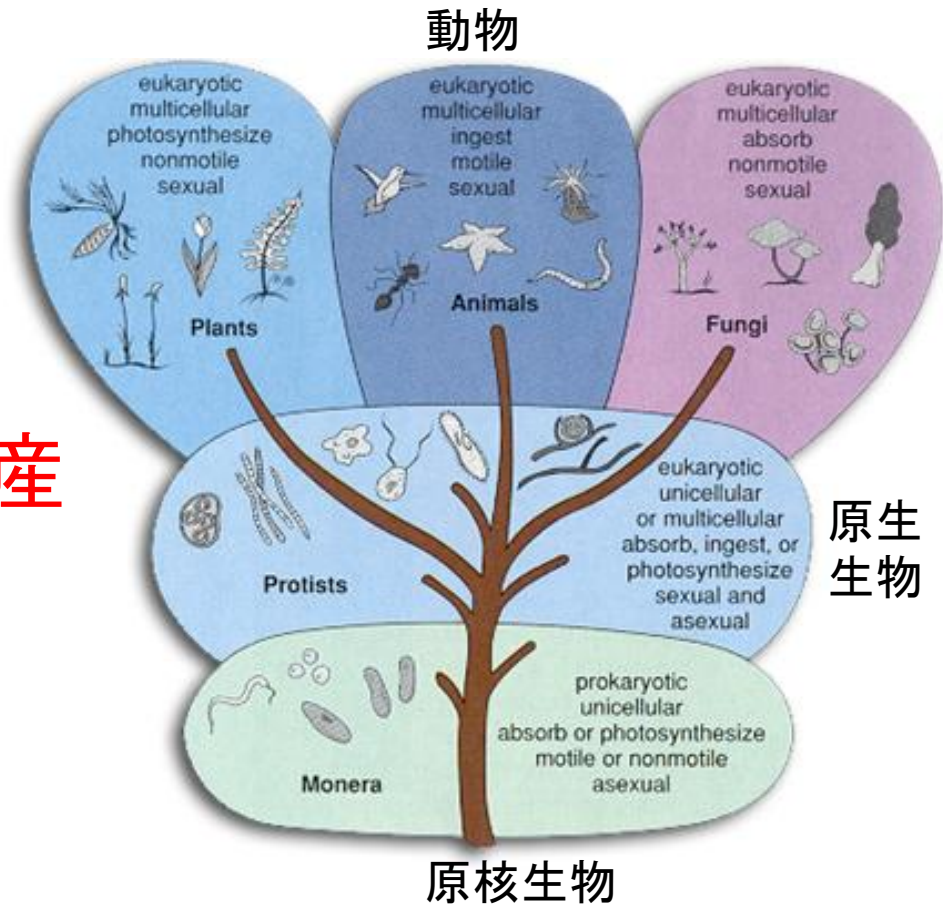
なぜ後生動物(多細胞動物)は出現したか？

環境要因

- **酸素濃度上昇**
(→運動性)
- **栄養塩供給/有機物生産**
- **全球凍結 (絶滅)**

生物要因

- **遺伝的影響**(←放射線等)
- **捕食/大型化/硬殻**(シリカ・炭酸塩)

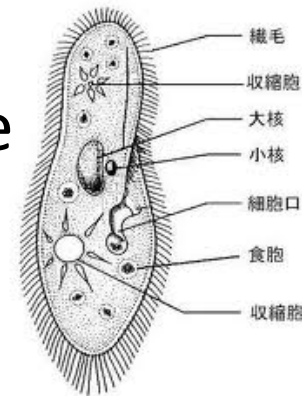


動物はスポンジ(海綿)から

単細胞 繊毛虫(ゾウリムシ) 仮説

- **Syncytial ciliate hypothesis**

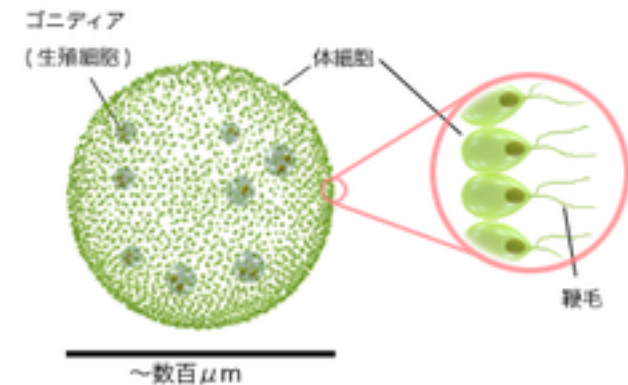
- Ancestor is single celled ciliate with multiple nuclei



鞭毛虫 コロニー 仮説

- **Colonial flagellate hypothesis**

- Ancestor is colonial flagellate like *Volvox*

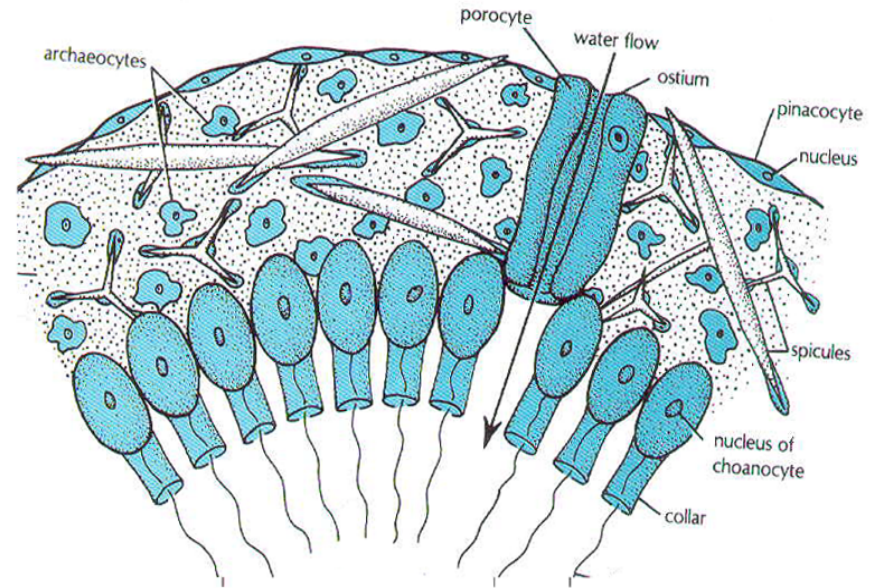
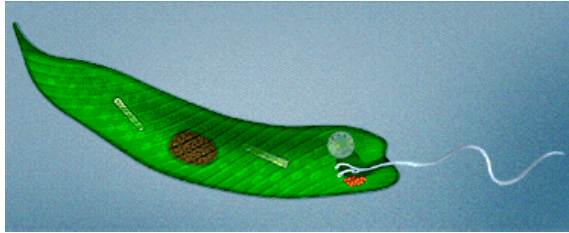


- **Polyphyletic hypothesis**

- There may be multiple ancestors

スポンジの起源

* どうやって多細胞動物が生まれたのか？



多細胞動物に必要な要素

for colonial system

- **Cell adhesion (細胞接着)** * スポンジより前？

for integrated system

- **Immune system (細胞間の伝達)**
- **Apoptotic system (細胞死)**

Urmetazoanは3つ持っていたらしい(遺伝子系統解析)

Müller, 2003

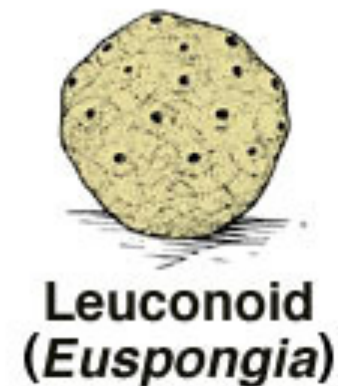
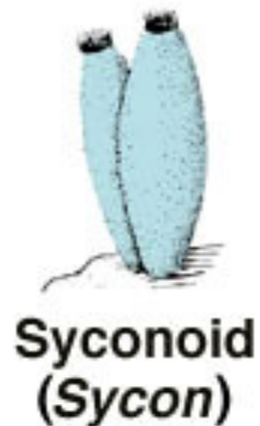
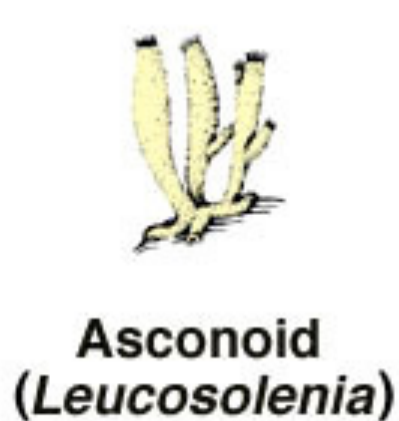
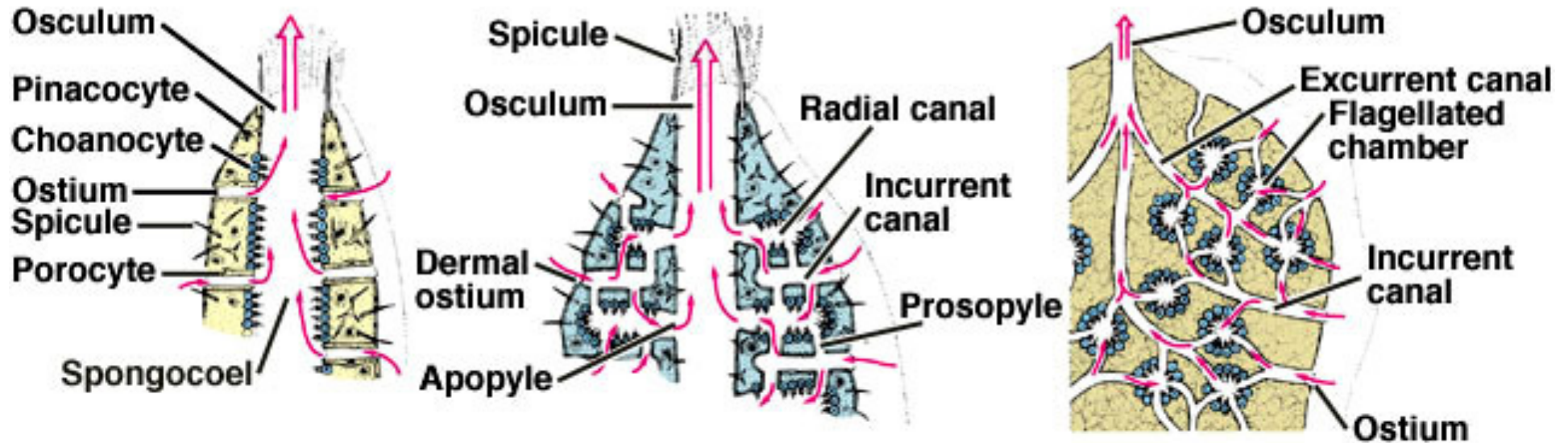
The Origin of Metazoan Complexity: Porifera as Integrated Animals



スポンジの濾過摂食： 海中の溶存有機物を濾し取る

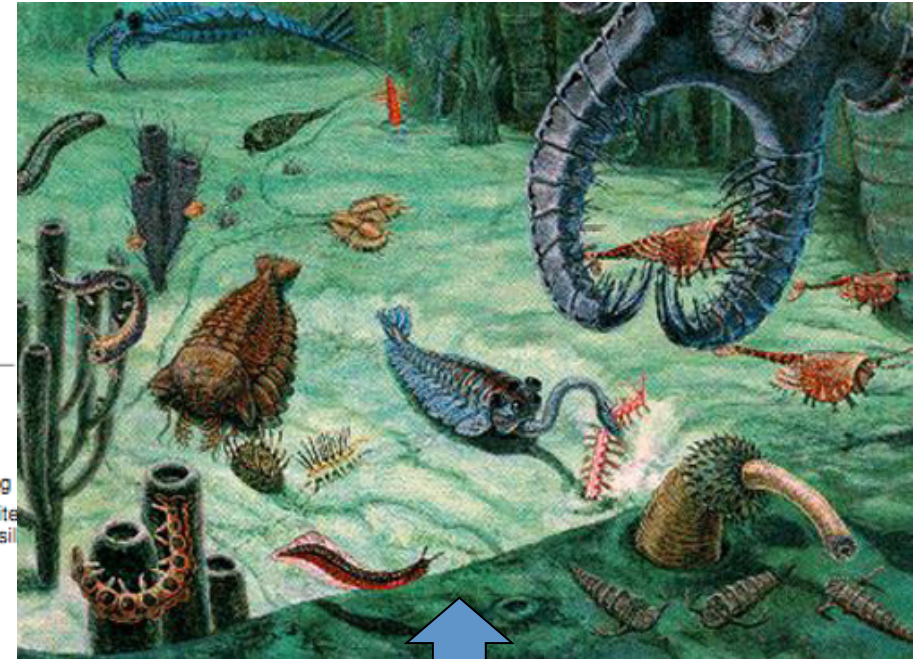
Types of sponge structure

Water Canal System

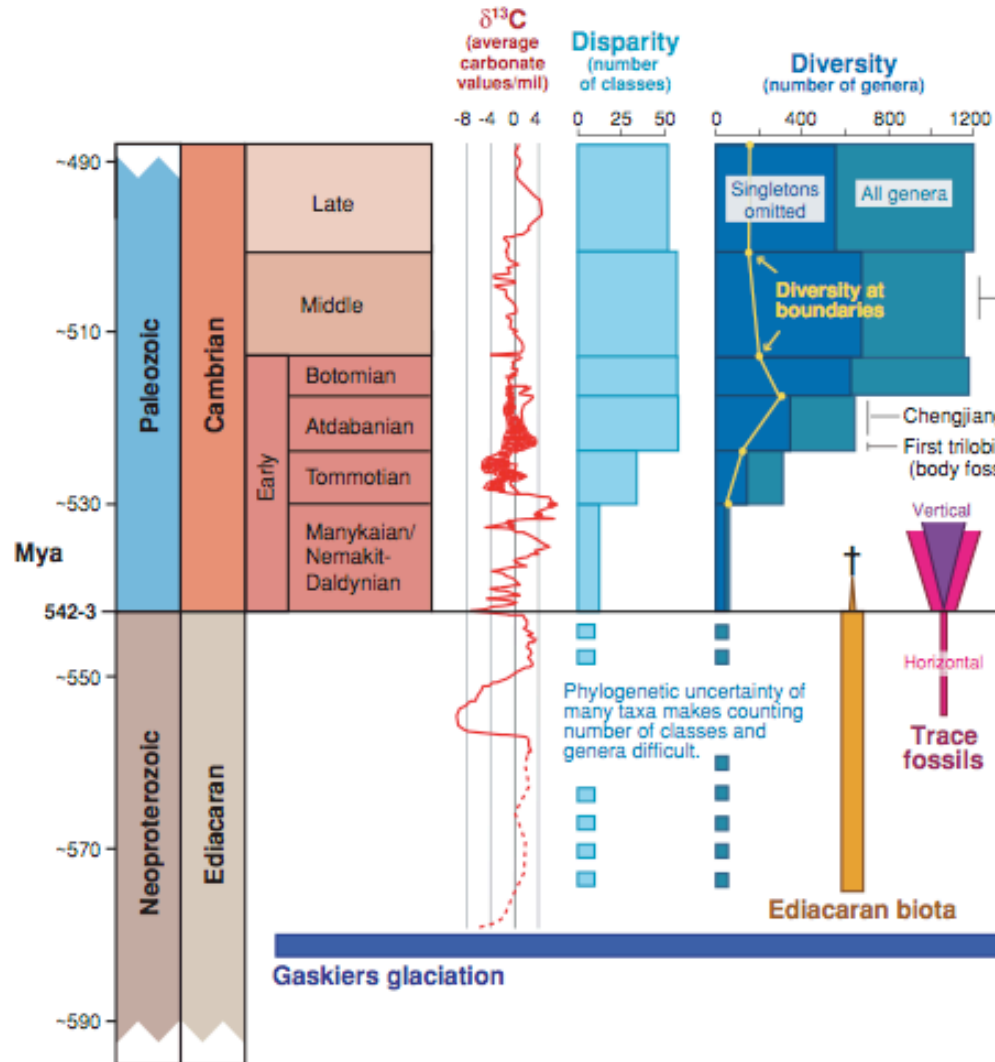


エディアカラ紀から カンブリア紀へ(顕生代)

カンブリア型 遊泳性 捕食



エディアカラ型 固着 Osmotrophy





動物プランクトン: 有

栄養塩 (N/P)

光合成:
 $CO_2 + H_2O \rightarrow CH_2O + O_2$

動物プランクトン: 無

赤潮・貧酸素・ヘドロ

生物ポンプ： 炭素を深海へ運ぶ仕組み

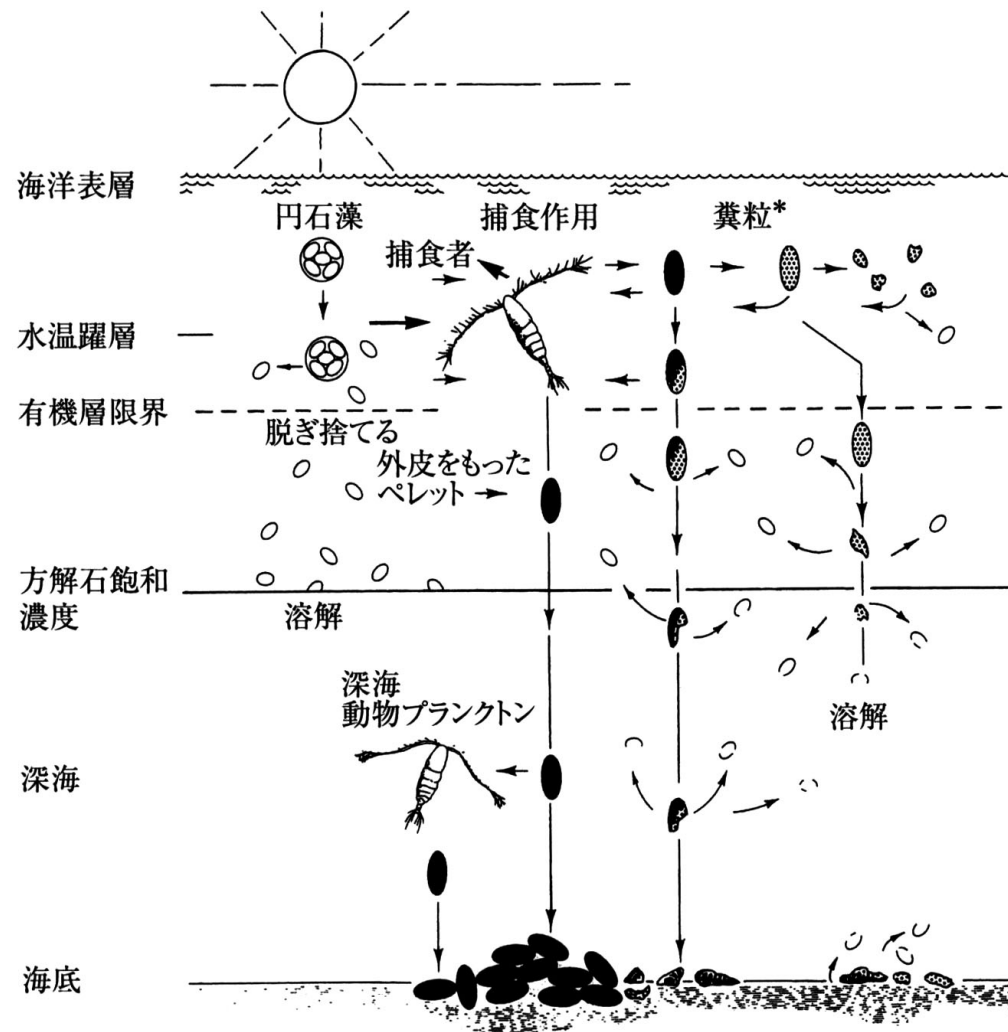
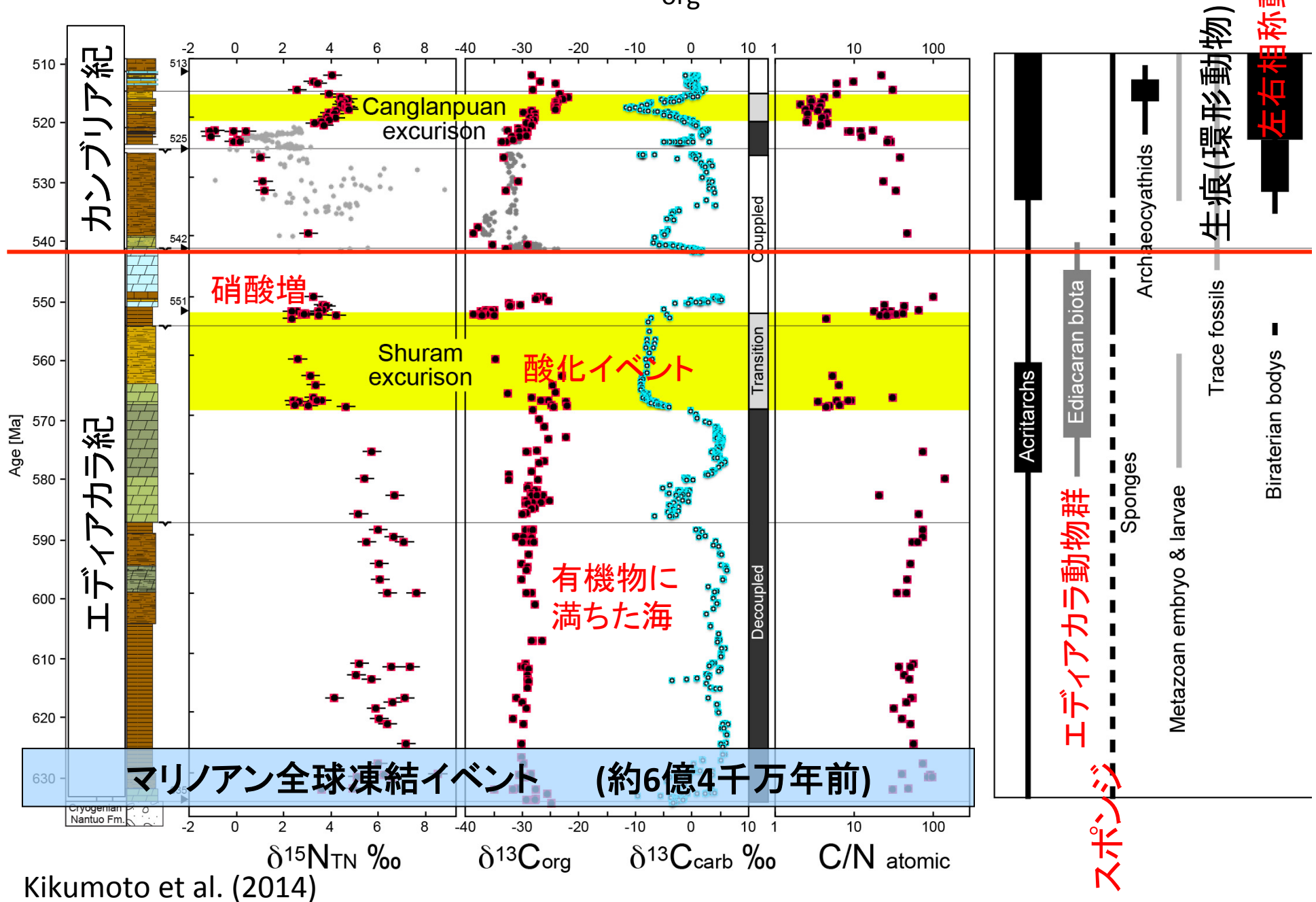


図7-2 海洋における鉛直方向の物質輸送 (Honjo, 1976 を簡略化)

円石藻のコッコリス一つ一つの粒子の沈降速度は 0.15 m day^{-1} であるが、コッコリスが集合した大粒子の場合の沈降速度は 160 m day^{-1} に増加する。糞粒とは、フィーカルペレット (fecal pellets) の訳。動物プランクトンの種類によって形状・大きさなど異なり、沈降速度にも影響を与える。

エディアカラ紀C-N循環変動: $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 一定 \rightarrow 有機物に満ちた海

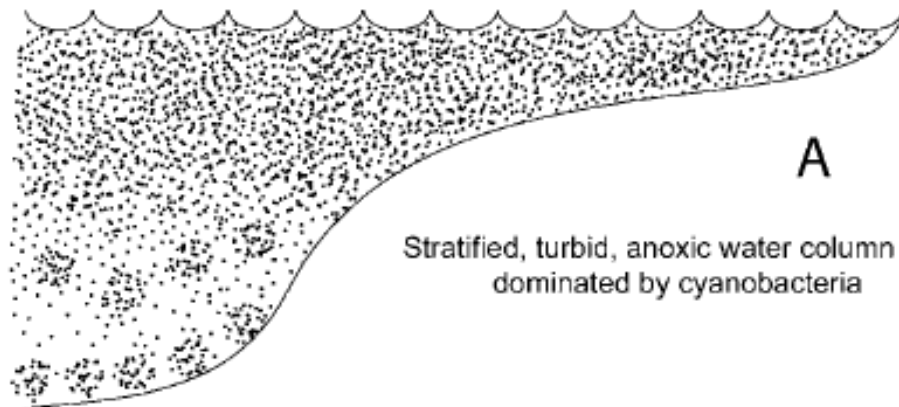


有機物に満ちた後期原生代海洋

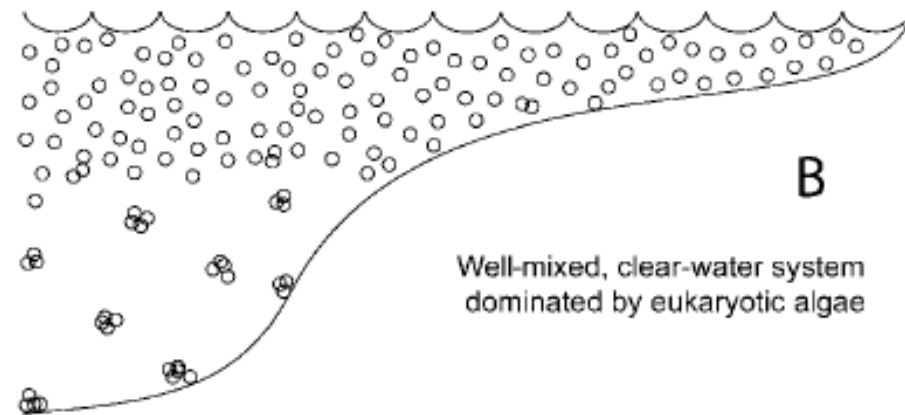
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission requir

生物ポンプ無し

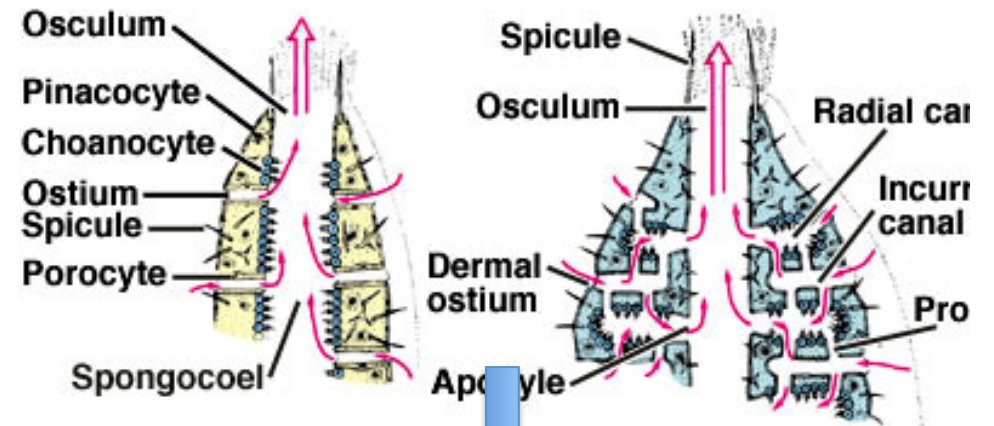
スポンジの登場
(濾過摂食)



Stratified, turbid, anoxic water column dominated by cyanobacteria



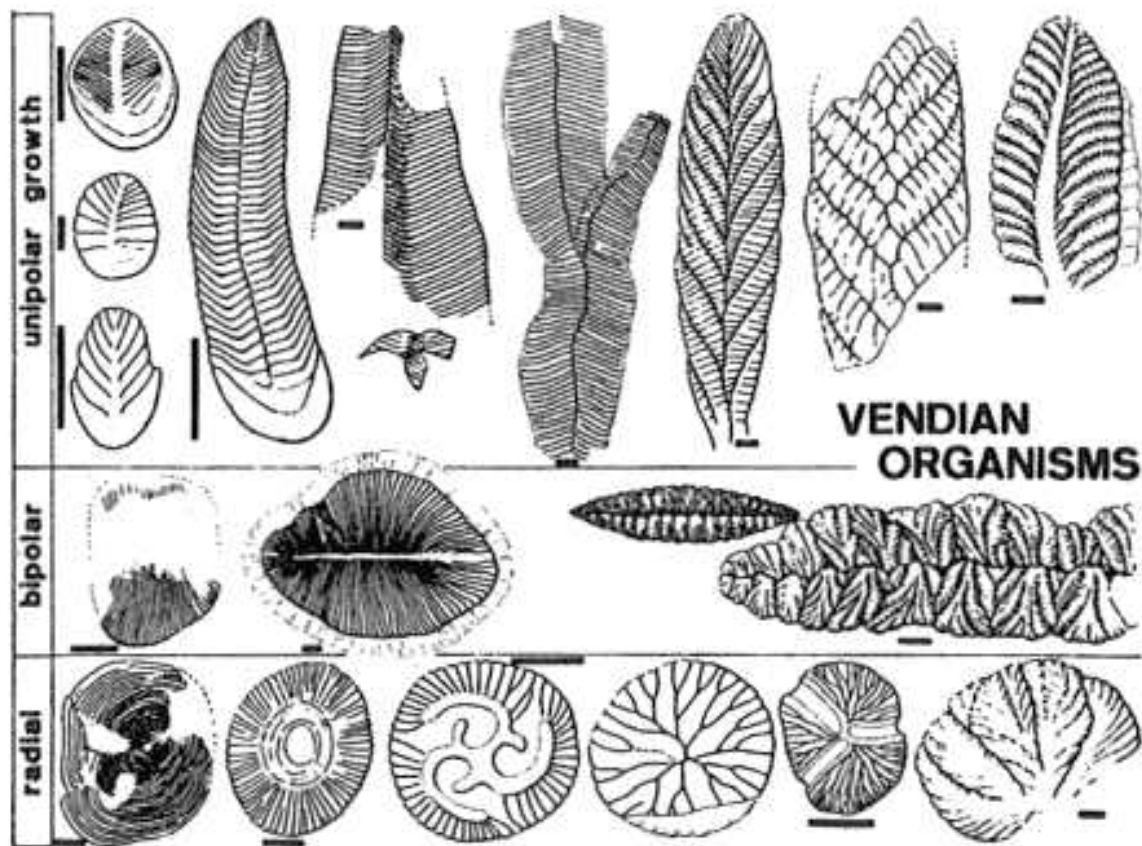
Well-mixed, clear-water system dominated by eukaryotic algae



次に刺胞動物

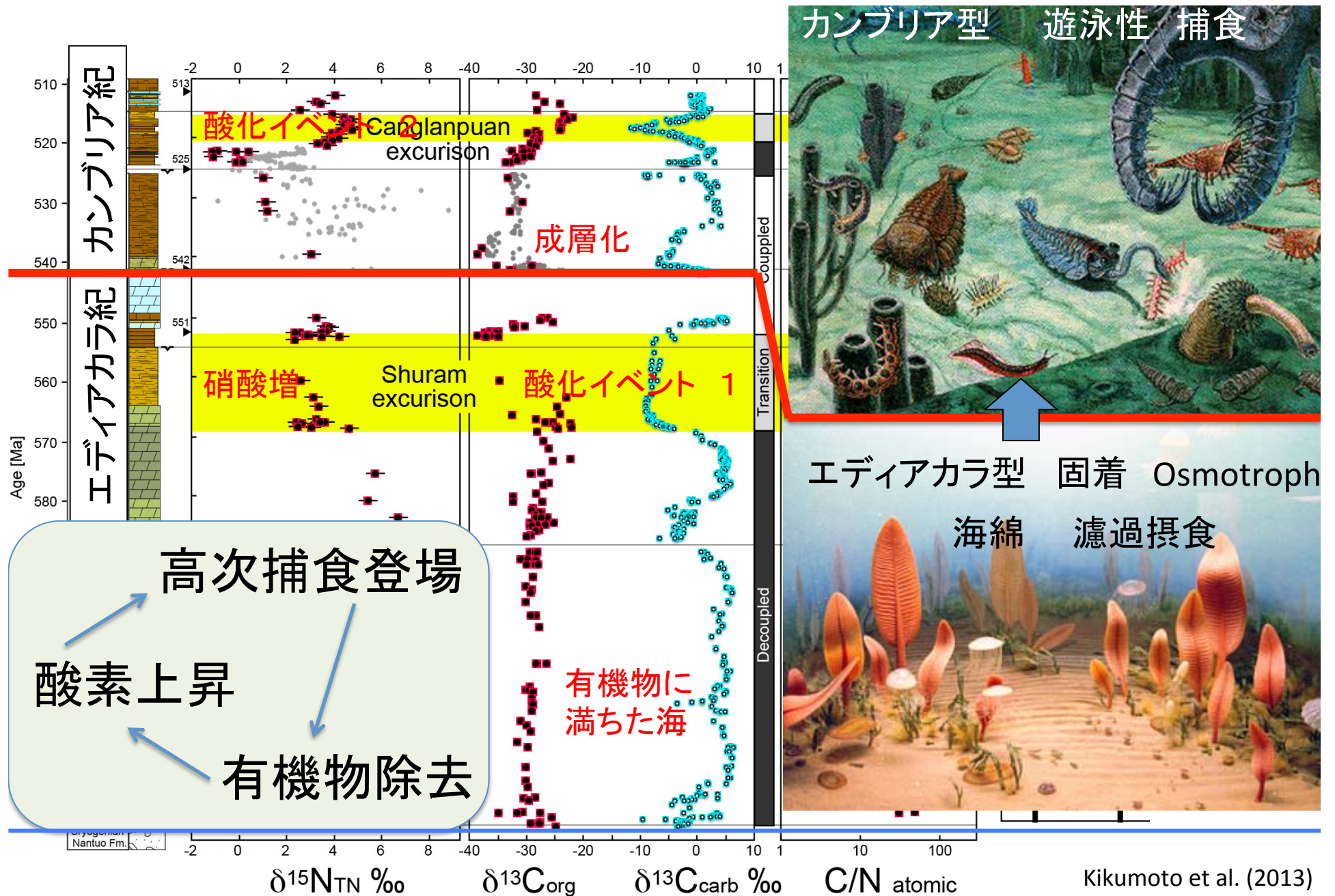
動物の出現 (5.8億年前)

エディアカラ動物群



Osmotrophy: 溶存有機物の”浸透”摂取

カンブリア爆発へのPositive Feedback仮説



後期原生代

顕生代

動物出現
海洋酸化

生物ポンプ無し

生物ポンプあり

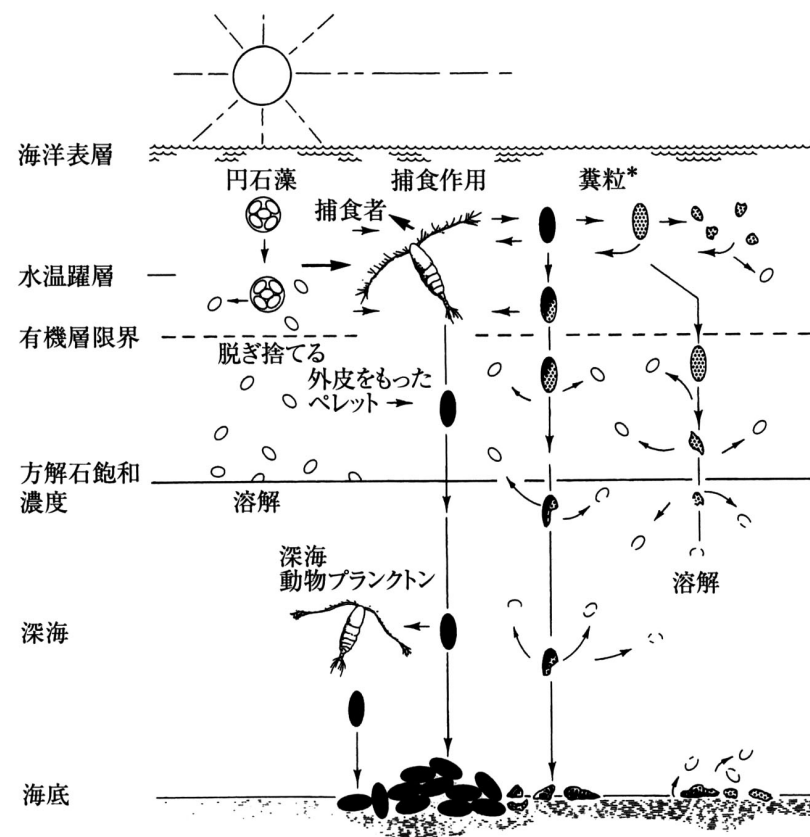
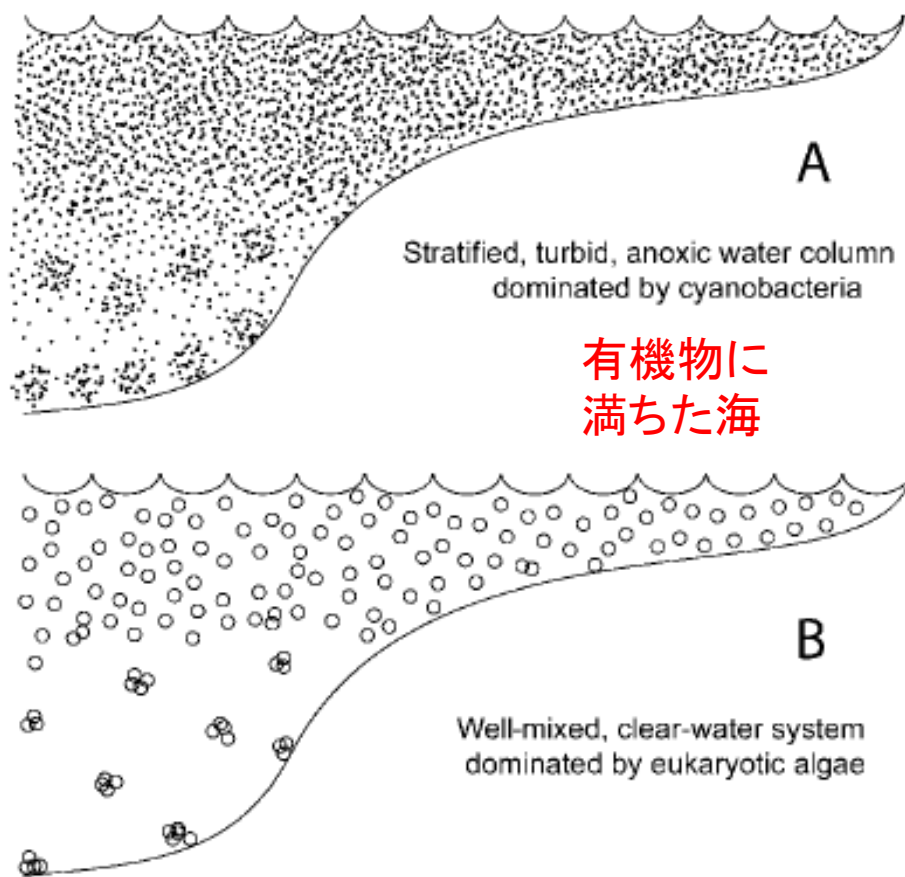
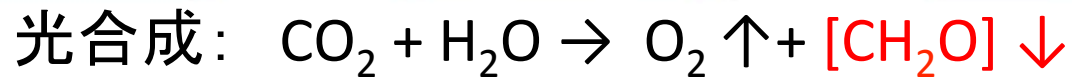
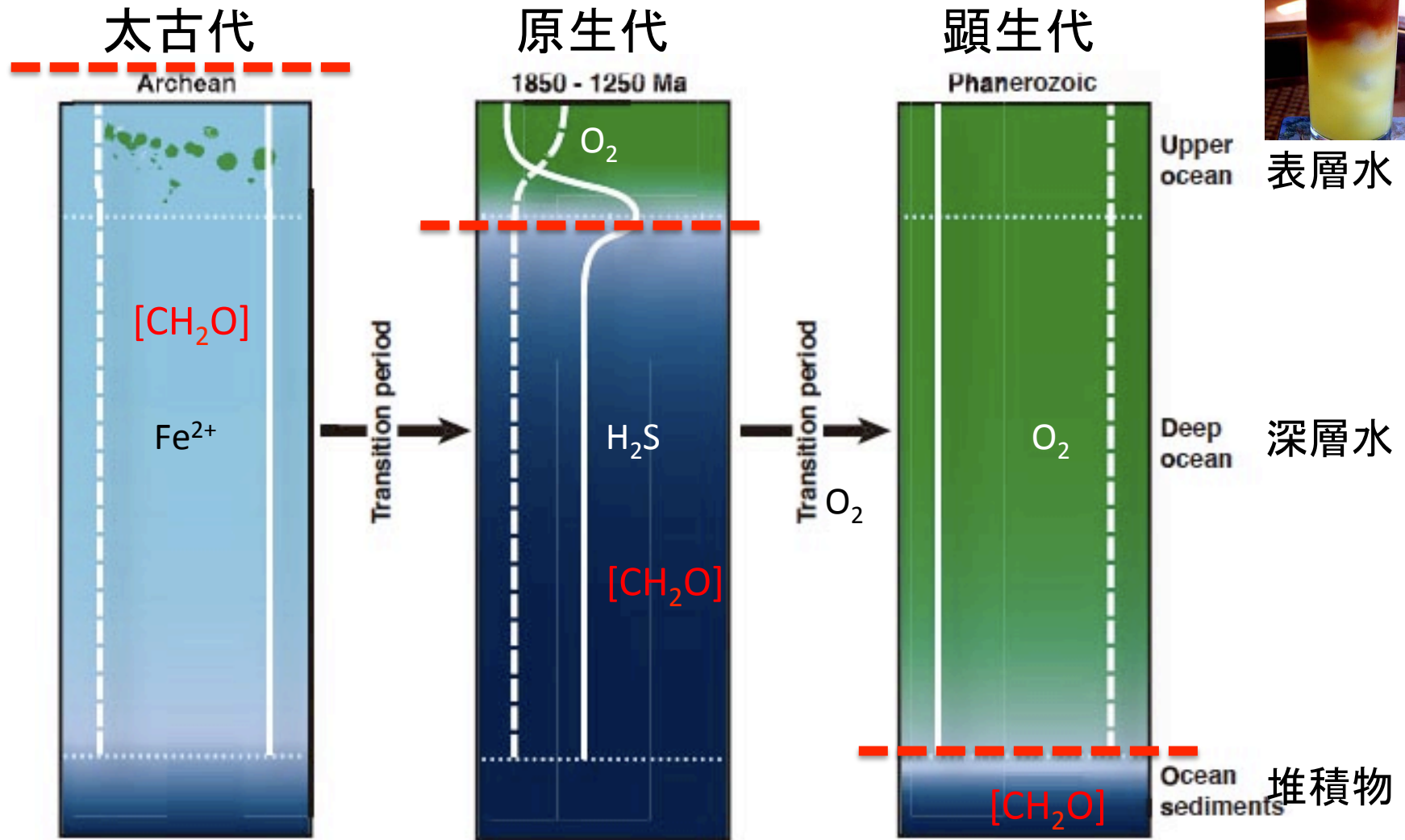


図7-2 海洋における鉛直方向の物質輸送 (Honjo, 1976 を簡略化)

円石藻のコッコリス一つ一つの粒子の沈降速度は 0.15 m day^{-1} であるが、コッコリスが集合した大粒子の場合の沈降速度は 160 m day^{-1} に増加する。糞粒とは、フィーカルペレット (fecal pellets) の訳。動物プランクトンの種類によって形状・大きさなど異なり、沈降速度にも影響を与える。

大気海洋の“酸化還元分化”



光合成は酸化力と還元力の分離をしているだけ
 真に大気海洋を酸化しているのは有機物の岩石圏への分離 (+α)
 動物出現-生物ポンプはそれを効率化する。酸素上昇と動物出現: 正のフィードバック?

惑星の比較：地球が生命の発生する惑星環境をもつ？

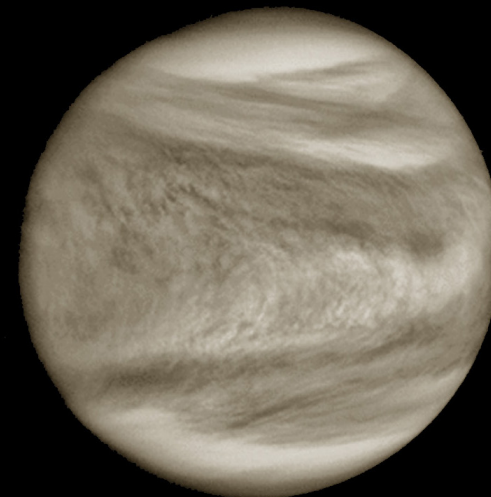
火星



地球



金星



太陽からの距離

1.524 AU

1 AU

0.723 AU

半径

3400 km

6400 km

6100 km

アルベド

0.3

0.3

0.65

表面温度

220°K (-53°C)

288°K (15°C)

737°K (464°C)

表面気圧

0.006 bar

1 bar

92 bar

大気組成

CO₂ : 95.3

N₂ : 78.0

CO₂ : 96.5

N₂ : 2.7

O₂ : 20.9

N₂ : 3.5

Ar : 1.6

Ar : 0.93

SO₂ : 0.015

O₂ : 0.13

H₂O_(v) : ~ 0.4

Ar : 0.007

H₂O_(v) : 0.03

CO₂ : 0.038

H₂O_(v) : 0.002

レポート課題:

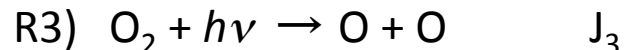
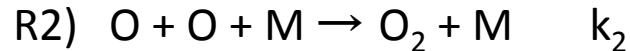
Q1) 地球内部から火成活動を通して大気海洋系に流入する炭素のフラックスは平均 8×10^{12} mol/year であり、その炭素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$) は -5‰ である。この炭素は長期的には光合成により固定された有機物の埋没と、炭酸塩の沈殿により大気海洋系から除去される。

1-1) 定常状態で大気海洋系から除去される有機炭素、炭酸塩炭素の全球平均同位体組成がそれぞれ -25‰、0‰ であったとする。このとき、同位体収支を考慮して、有機炭素の埋没フラックス (mol/year) を求めよ。

1-2) 1万年以上の長期タイムスケールでは、有機炭素の埋没が大気海洋系への酸素 (O_2) 供給過程と考えられる。その理由を説明せよ。また、これ以外にどのような酸素供給過程があるか1つ答えよ。

Q2) 火星大気中の酸素濃度について次の問いに答えよ。

2-1) まず火星大気が純粋な CO_2 であると考え、これに太陽からの紫外線が照射されると次の反応 R1~R3 が起き、酸素濃度が定常状態に達すると仮定する。



このとき酸素分子 O_2 と CO_2 の数密度の比 $[\text{O}_2]/[\text{CO}_2]$ を求めよ。ただし、 J_1 、 k_2 および J_3 を各反応の速度定数とする。また CO_2 濃度はほとんど減らないため、R3 の反応速度が R1 の光解離と比較すると無視できるほど遅いとしてよい。

2-2) 速度定数 J 、 k は光化学作用フラックスと温度に依存するため高度によって異なるが、仮に火星の高度 10 km で $J_1 = 1 \times 10^{-11}$ 、 $k_2 = 3 \times 10^{-32}$ 、 $J_3 = 2 \times 10^{-10}$ であるとし、これが大気を代表すると仮定した場合、酸素の体積混合率は何%になるか計算せよ。