惑星地球科学2
(第8回目)

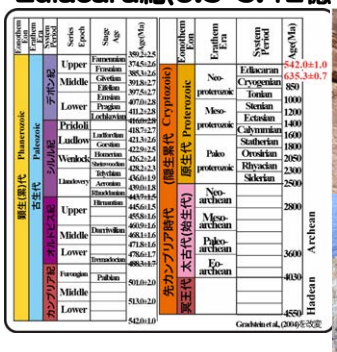
地球史3：全球凍結と生命進化

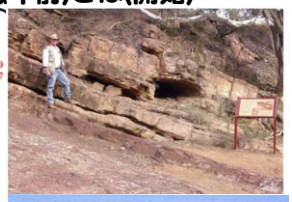
東京大学総合文化研究科：
小宮　剛　准教授

2017/11/29

komiya@ea.c.u-tokyo.ac.jp
http://www43.tok2.com/home/isua/

Ediacara紀(6.3~5.42億年前)とは(開始)



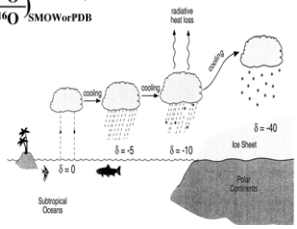


スノーボールアース（Snowball Earth、全球凍結、全地球凍結）とは、地球全体が赤道付近も含め完全に氷床に覆われた状態をいう。

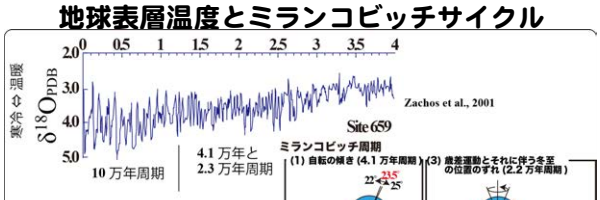
氷河期：地球の気候が長期に渡って寒冷化する期間で、極地の氷床や山地の氷河群が拡大する時代である。
(1) 南半球と北半球に氷床がある時期。現在も氷河期。
(2) 北アメリカとヨーロッパ大陸に氷床が拡大した寒冷期について用いられる。
最後の氷期は1万年前に終了した。
氷河期の中の寒い時期を氷期、暖かい時期に間氷期という。

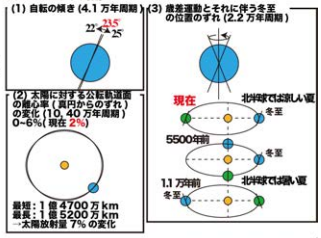
$$\delta^{18}O = \left\{ \frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{sample}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{SMOWorPDB}} - 1 \right\} \times 1000\ (‰)$$

図2　最終氷期最盛期の頃の北半球に存在した巨大な氷床
アメリカ大陸や北欧は，厚さが2 km 以上あるような氷床にすっぽりと覆われていた。(Denton and Hughes, 1981 改変)。



地球表層温度とミランコビッチサイクル

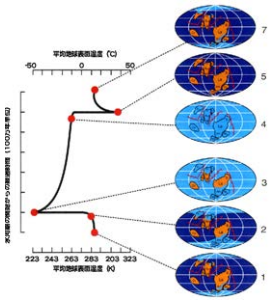




(1) 深海底生有孔虫 (炭酸塩) の酸素同位体比変動
(2) およそ８℃の変動幅で温暖と寒冷が繰り返す
(3) 周期はミランコビッチサイクルの周期と一致

地球全体の太陽定数は変化しないので、なぜ北半球の寒冷時が地球全体の寒冷期になるのかは不明

全地球凍結(7.5と6.3, (5.8)億年前)

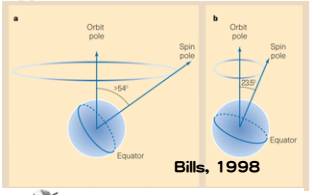


低緯度地域の超大陸
太陽光度が低い
CO_2やCH_4などの
温室効果ガスの減少

Tillite
(氷河性堆積物)

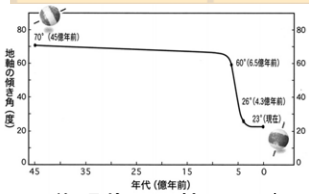
Cap carbonate

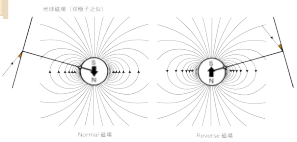
赤道域に氷河性堆積物が存在する理由



Bills, 1998

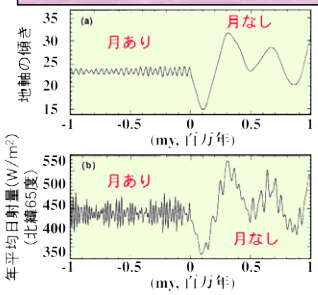
地軸の傾きが54°以上
→赤道域が最も寒冷





物理的に可能？→ジャイアントインパクト

地軸が大きく傾いていたモデルの検証



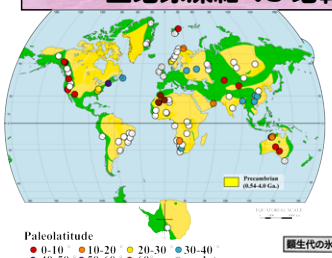
地軸の傾きが54°以上
→赤道域が最も寒冷

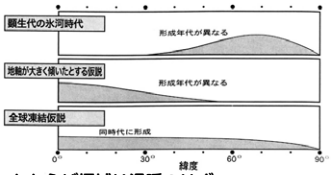
(1)物理的に可能２？

月がなければ容易に地軸は大きく傾く

⇔月があるとあまり変化しない
Laskar et al., 1993

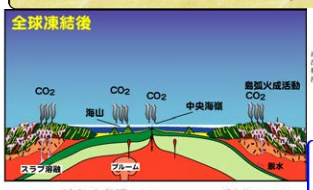
全地球凍結 vs 地軸の傾きの変化

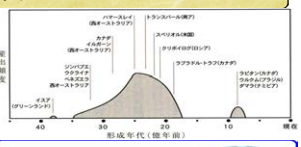


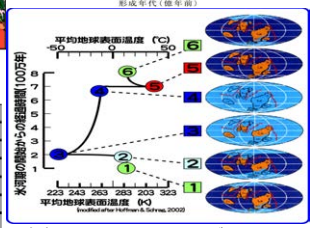


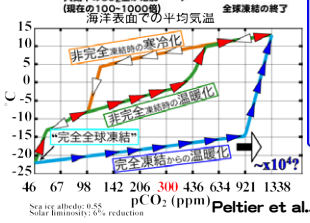
地軸が大きく傾いていたならば極域は温暖のはず

全球凍結









Peltier et al., 2004

(2) methane hydrateが分解し、大気中のCO_2やCH_4が増加

全地球凍結：原因はいまだ不明

温室効果ガス

(1) ロディニア超大陸の分布，熱帯域での大規模火成活動と風化によるCO_2の急減 (Donnadieu et al., 2004; Goddéris et al., 2003)

(2) 大規模な風化に伴うCO_2の減少とメタン発生型生物の衰退 (Schrag et al., 2002)

(3) 超大陸の周りに大陸縁が発達し、有機炭素が埋没し、大気中の炭素量(すなわちCO_2も)が減少+暗い太陽 (Hoffman et al., 1998)

海洋循環とアルベド

(4) 超大陸が赤道域に分布しアルベドの上昇と熱帯域をまたぐように超大陸が分布し海洋循環を妨げる (Smith & Pickering, 2003)

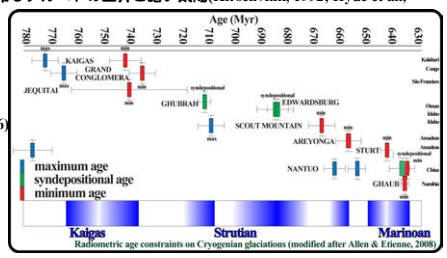
(5)超大陸が赤道域に分布しアルベドの上昇と暗い太陽(Kirschvink, 1992; Hyde et al., 2000)

地球外や地球内部

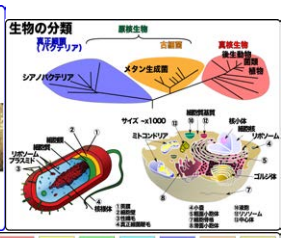
(6) 暗い太陽 (Hyde et al., 2000)

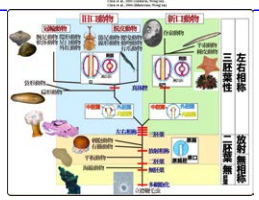
(7) 低い火成活動度 (Tajika, 2004)

(8) 地球磁場の低下 (Maruyama & Liou, 2006)

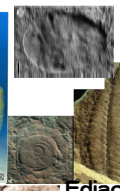


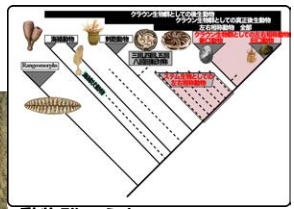
全地球凍結後の生命の爆発的進化



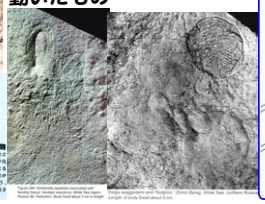


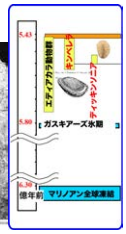
Ediacara動物１



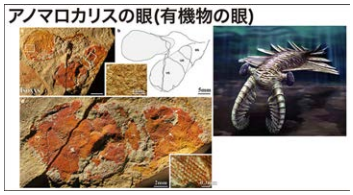


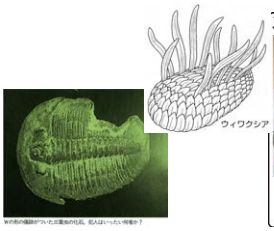
Ediacara動物群のうち動いたもの



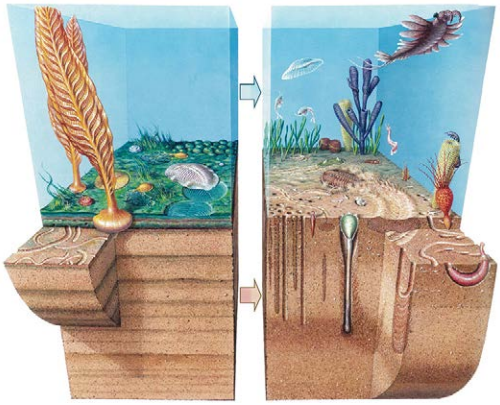


カンブリア型（顕生代型）動物群ー硬骨格と左右相称ー



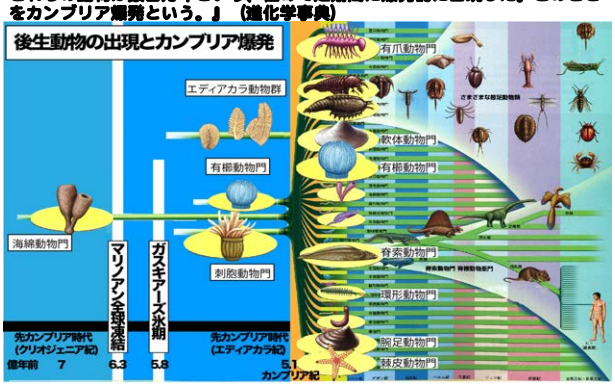


エディアカラ型からカンブリア型の生態系へ



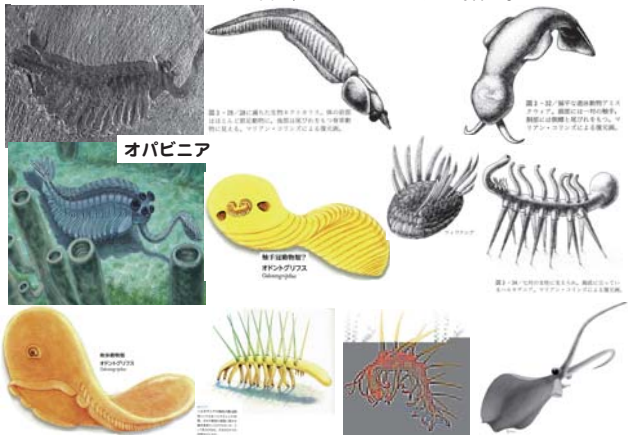
カンブリア爆発とは

『カンブリア紀と先カンブリア時代の境にあたる。およそ５億４千万年前の地層から多細胞動物の化石が突如出現し、現在の門に相当する動物が出そろった。これらの動物は数百万年という、極めて短期間に爆発的に出現した。このことをカンブリア爆発という。』（進化学事典）



(3) Burgess動物群(アノマロカリス)

カンブリア大爆発,現世にいない門が頻出。



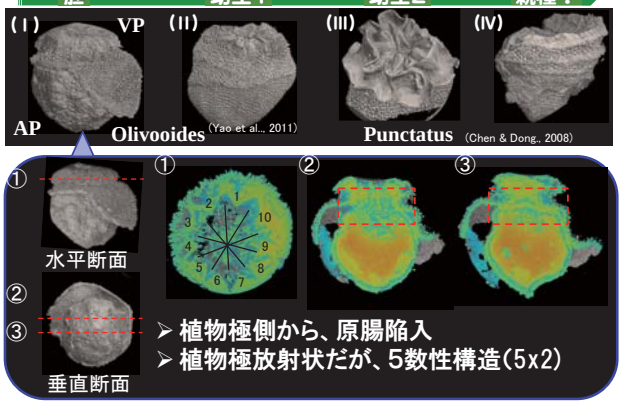
カンブリア大爆発の原因

Darwin (1859):
"Non-Explosion"
地層の欠損とか
(時間分解能が悪い)

Gould (1973):
"Single Episode"
いわゆる
カンブリア大爆発

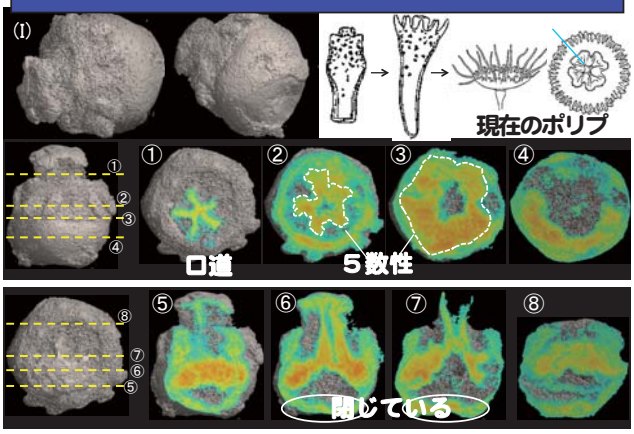
Fortey *et al* (1997):
"Deep roots, Two Episodes"
見つかっていない
化石があるだけ

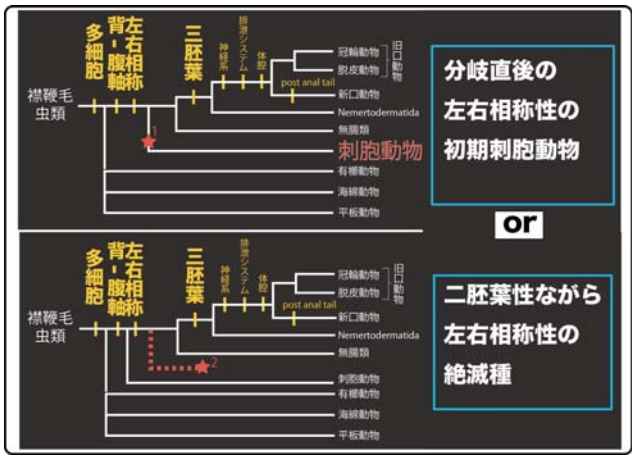
Olivooides-Punctatus化石 (刺胞動物)の内部構造



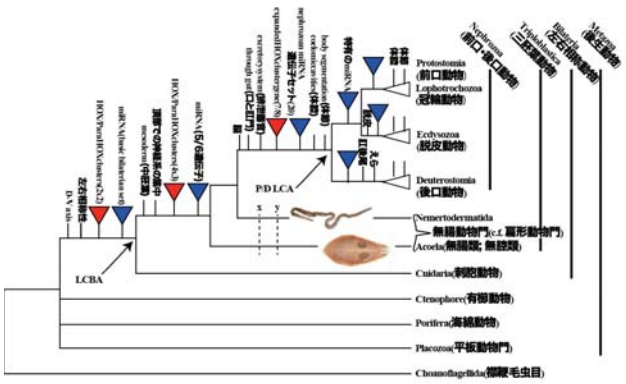
- 植物極側から、原腸陥入
- 植物極放射状だが、5数性構造(5x2)

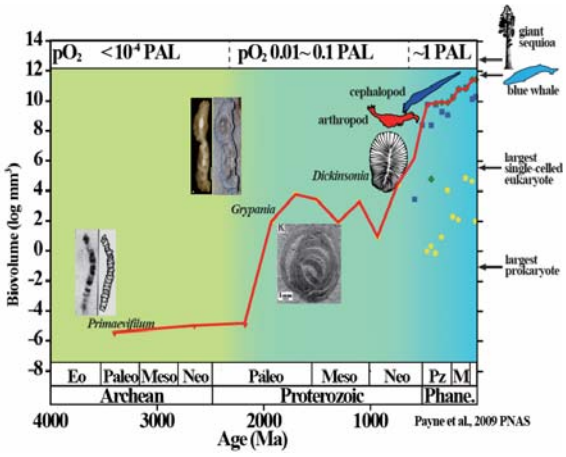
刺胞動物ポリプ化石の内部構造



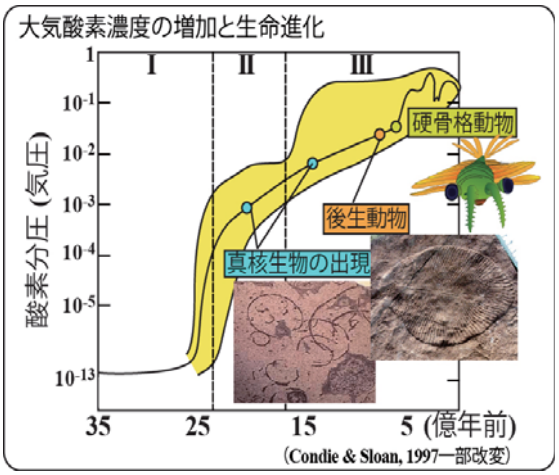


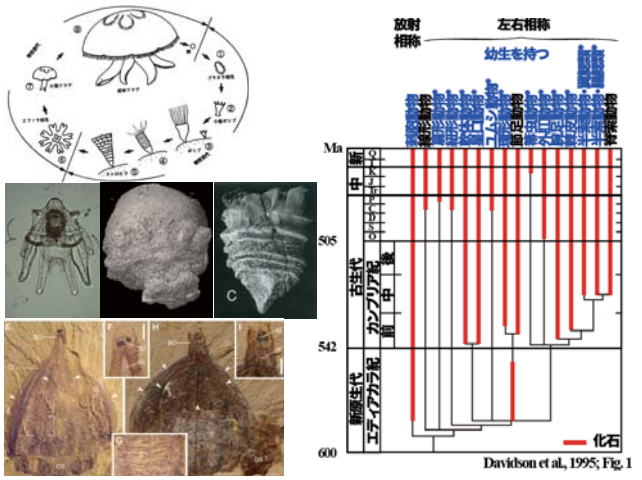
刺胞動物の形態遺伝子セット

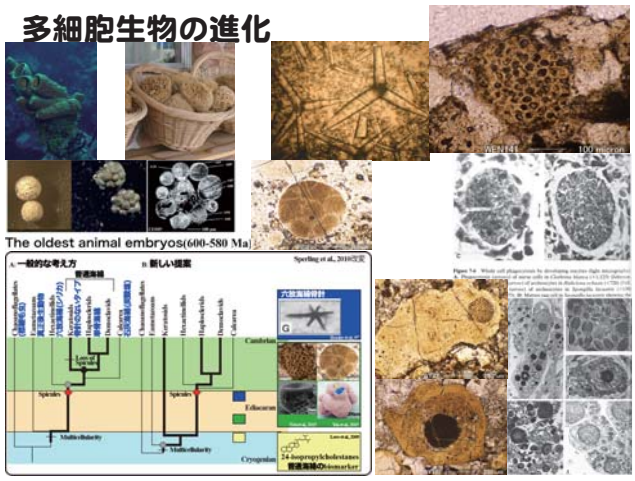


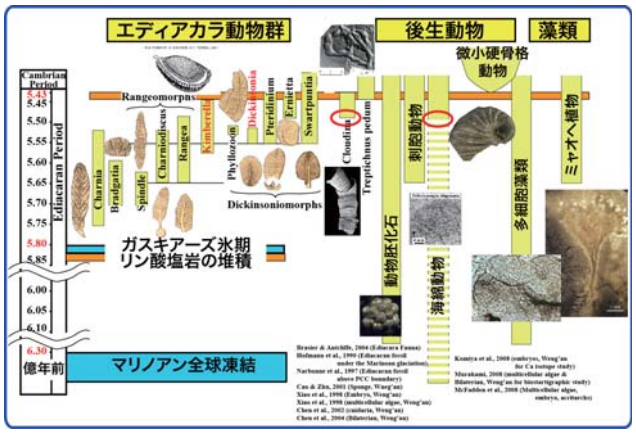


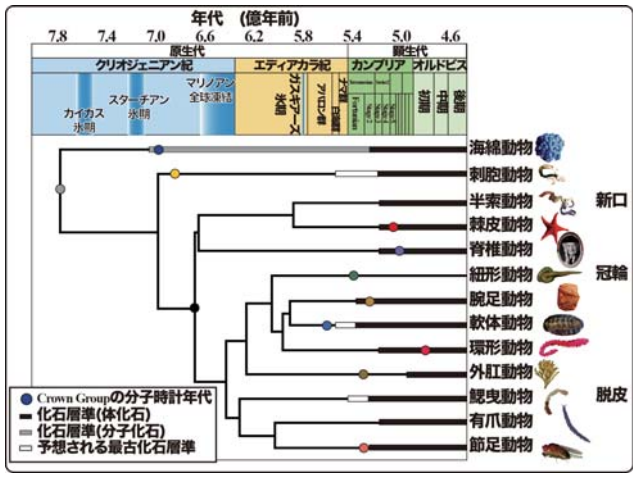
大気酸素濃度の増加と生命進化

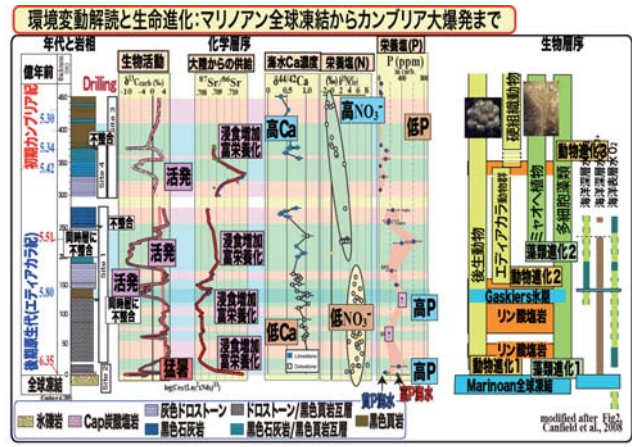


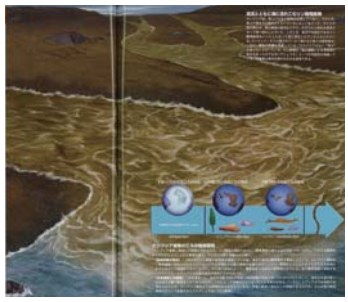

放射相称
左右相称
幼生を持つ
Ma
505
542
600
古生代
カンブリア紀
エディアカラ紀
新原生代
化石
Davidson et al., 1995; Fig. 1

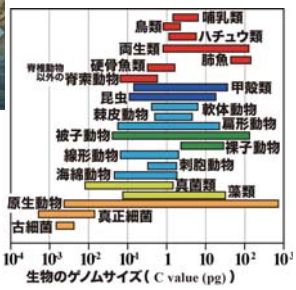

多細胞生物の進化
The oldest animal embryos(600-580 Ma)
Sperling et al., 2010改変
Cambrian
Ediacaran
Cryogenian


エディアカラ動物群
後生動物
藻類
Cambrian Period
Ediacaran Period
Rangeomorphs
Charnia
Bradgatia
Spindle
Charnodiscus
Rangea
Kimberella
Phyllozoon
Dickinsonia
Pteridinium
Ernietta
Swartpuntia
Dickinsonniomorphs
Cloudina
Treptichnus pedum
微小硬骨格動物
刺胞動物
動物胚化石
海綿動物
多細胞藻類
ミャオ植物
ガスキアーズ氷期
リン酸塩岩の堆積
マリノアン全球凍結
億年前


年代 (億年前)
7.8
7.4
7.0
6.6
6.2
5.8
5.4
5.0
4.6
原生代
顕生代
クリオジェニアン紀
エディアカラ紀
カンブリア
オルドビス
カイニス氷期
スターチアン氷期
マリノアン全球凍結
ガスキアーズ氷期
海綿動物
刺胞動物
半索動物
棘皮動物
脊椎動物
紐形動物
腕足動物
軟体動物
環形動物
外肛動物
鰓曳動物
有爪動物
節足動物
新口
冠輪
脱皮
Crown Groupの分子時計年代
化石層準(体化石)
化石層準(分子化石)
予想される最古化石層準


環境変動解読と生命進化:マリノアン全球凍結からカンブリア大爆発まで
年代と岩相
化学層序
生物層序
億年前
Drilling
生物活動
大陸からの供給
海水Ca濃度
栄養塩(N)
栄養塩(P)
P (ppm)
初期カンブリア紀
後期原生代(エディアカラ紀)
全球凍結
不整合
活発
浸食増加
富栄養化
高Ca
低Ca
高NO3-
低NO3-
低P
高P
猛暑
氷河期
Cap炭酸塩岩
灰色ドロストーン
ドロストーン/黒色頁岩互層
黒色石灰岩
黒色石灰岩/黒色頁岩互層
黒色頁岩
後生動物
エディアカラ動物群
多細胞藻類
藻類進化2
動物進化2
Gaskiers氷期
リン酸塩岩
動物進化1
藻類進化1
Marinoan全球凍結
modified after Fig.2 Canfield et al., 2008




哺乳類
鳥類
ハチュウ類
両生類
肺魚
硬骨魚類
脊椎動物以外の脊索動物
甲殻類
昆虫
軟体動物
棘皮動物
扁形動物
被子動物
裸子動物
線形動物
刺胞動物
海綿動物
真菌類
藻類
原生動物
真正細菌
古細菌
生物のゲノムサイズ(C value (pg))

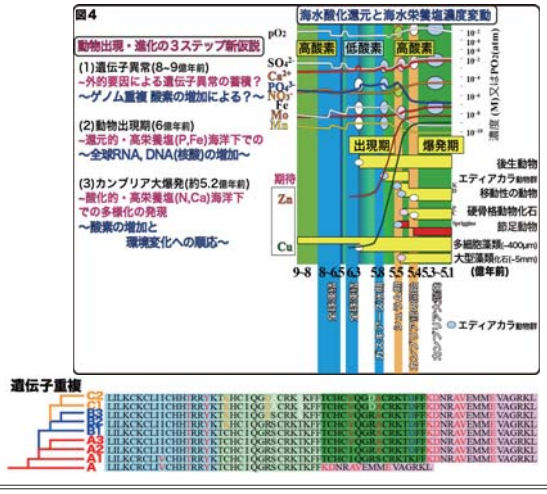


図4
動物出現・進化の3ステップ新仮説
(1)遺伝子異常(8~9億年前)
~外的要因による遺伝子異常の蓄積?
~ゲノム重複 酸素の増加による?~
(2)動物出現期(6億年前)
~還元的・高栄養塩(P,Fe)海洋下での
~全球RNA, DNA(核酸)の増加~
(3)カンブリア大爆発(約5.2億年前)
~酸化的・高栄養塩(N,Ca)海洋下
での多様化の発現
~酸素の増加と
環境変化への順応~
海水酸化還元と海水栄養塩濃度変動
高酸素
低酸素
高酸素
出現期
爆発期
後生動物
エディアカラ動物群
移動性の動物
硬骨格動物化石
節足動物
多細胞藻類
大型藻類化石
9-8 8-6.5 6.3 5.8 5.5 5.4 5.3-5.1 (億年前)
遺伝子重複
C2
B3
B2
B1
A3
A2
A1
A