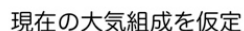
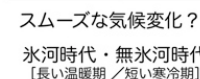


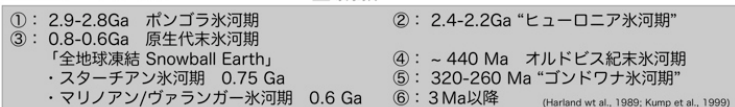
太陽光度の地球史における変化



地球初期
多量のCO₂
→ 温室効果：大



- ・ CO_2 の減少
- ・ O_2 の増加 (生物活動)
- ・ Ar の蓄積 (^{40}K 放射壊変・脱ガス)
- ・ N_2 の相対的な安定性



大気中の二酸化炭素量の変動の要因

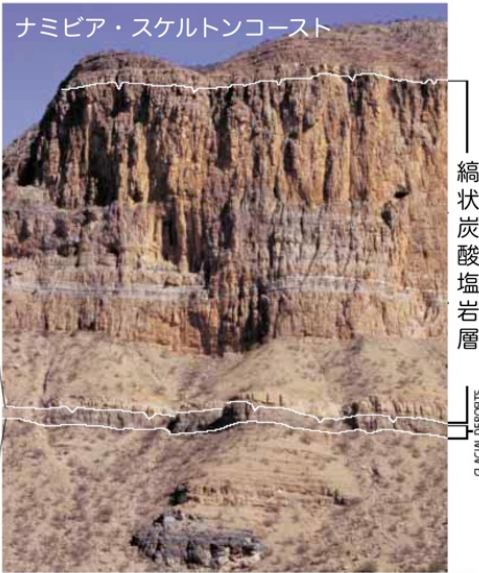
- ・陸域の面積、大陸の分布
- ・火成活動（火山活動）
- ・生物作用

原生代末氷河時代 「全球凍結仮説」

- 氷河堆積物
- 縞状炭酸塩岩層
“キャップカーボネート”
- 縞状鉄鉱床 (BIF)
- 炭素同位体比の負異常



氷河堆積物



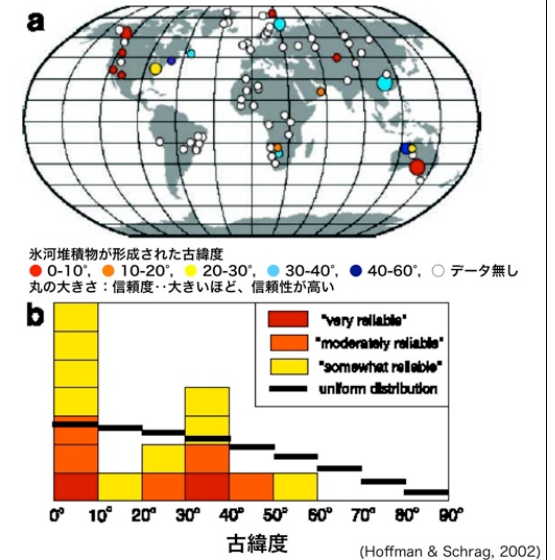
ナミビア・スケルトンコースト

縞状炭酸塩岩層

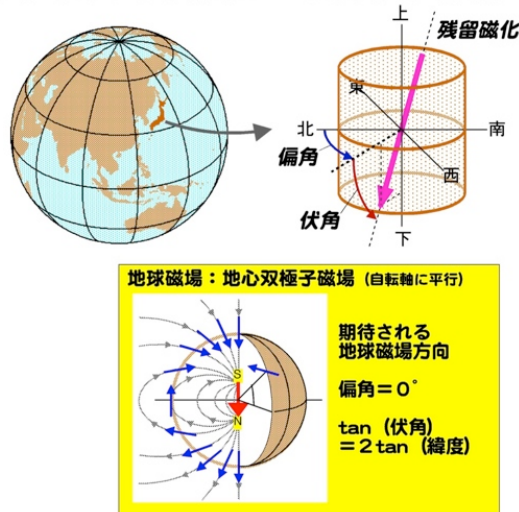
(Hoffman & Schrag, 1999)

原生代後期 氷河堆積物の 分布と古緯度

- 氷河堆積物が
汎世界的に分
布する
- 過去に低緯度
で形成された



- 岩石は磁化を持つ（残留磁化）。
その磁化は、岩石形成時の地球磁場の方向の記録である。
- 平均的な地球磁場は「地心双極子磁場」である。



岩石の残留磁化の
伏角から、
岩石形成場所の
過去の緯度
(古緯度)
が推定できる。

約6億年前の大陸分布



(Hoffman & Schrag, 1999)

低緯度に集中した大陸分布

酸素の同位体：

^{16}O (99.76%) , ^{17}O (0.04%) , ^{18}O (0.20%)

酸素同位体比： $\delta^{18}\text{O}$

$$= \frac{(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}) [\text{試料}] - (\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}) [\text{標準海水}]}{(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}) [\text{標準海水}]} \times 1,000 \text{ (‰)}$$

(千分率, パーミル)

水蒸気： ^{16}O (軽い酸素) が多く含まれる [同位体分別]
 ・ ・ ・ 雨、雪、淡水は軽い酸素が多い

◆大陸氷床が発達 (寒冷)

海水中から軽い酸素が取り除かれる ・ ・ 海水 $\delta^{18}\text{O}$ ー大

◆大陸氷床が縮小 (温暖)

海水中に軽い酸素が流れ込む ・ ・ ・ ・ ・ 海水 $\delta^{18}\text{O}$ ー小

◆炭酸塩岩層, 鉄鉱床, マンガン鉱床の形成

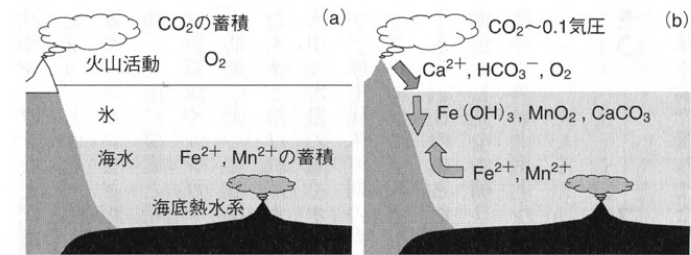


図6 スノーボールアース仮説による, 鉄鉱床・マンガン鉱床およびキャップカーボネートの形成過程 (進化する地球惑星システム, 2004)

(a) 全球凍結時には海洋表層は凍結し, 大気と海水の間でのガス交換が遮断される。大気中では二酸化炭素が, 海水中では鉄イオンやマンガンイオンが蓄積する。

(b) 氷が溶けると, 酸素の供給や地表の風化によって, 鉄やマンガンの酸化物 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, MnO_2) およびキャップカーボネート (CaCO_3) が形成される。

◆炭酸塩岩の炭素同位体比の負の異常

寒冷化で, 光合成の低下。凍結時は, 光合成の停止

◆縞状鉄鉱床・海洋酸欠状態が存在し, その後, 酸素の供給により形成

◆炭酸塩岩層・大量の二酸化炭素の固定により形成

全球凍結仮説

◆氷河堆積物の堆積

汎世界的, 低緯度にも

・ ・ 全地球的な寒冷気候

◆縞状炭酸塩岩層の形成

“キャップカーボネート”

・ ・ 急速な堆積

大量の CO_2 の固定

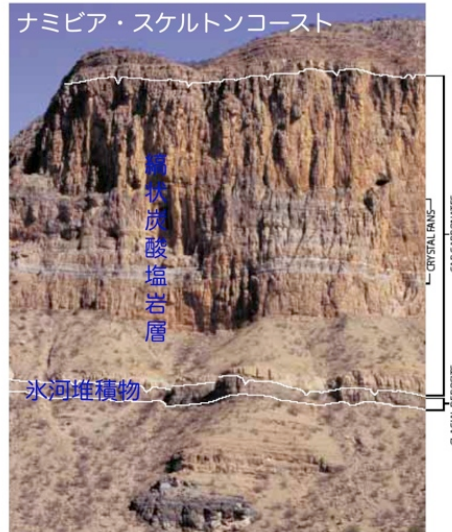
◆炭酸塩岩層の

炭素同位体比の負異常

・ ・ 光合成の停止

◆縞状鉄鉱床 (BIF) の形成

・ ・ 海洋酸欠状態の存在



(Hoffman & Schrag, 1999)

全球凍結のシナリオ

炭酸塩岩の堆積 (大気 CO_2 の除去)
 縞状鉄鉱床の堆積 (Feの酸化・沈積)

光合成の再開
 風化作用の再開 ・ ・ 大気 CO_2 の減少

高温状態 ($\sim 40^\circ\text{C}$) ・ ・ 大量 CO_2 (温室効果)
 解凍

大気 CO_2 の蓄積 ・ ・ 温室効果UP (火山活動: 継続)

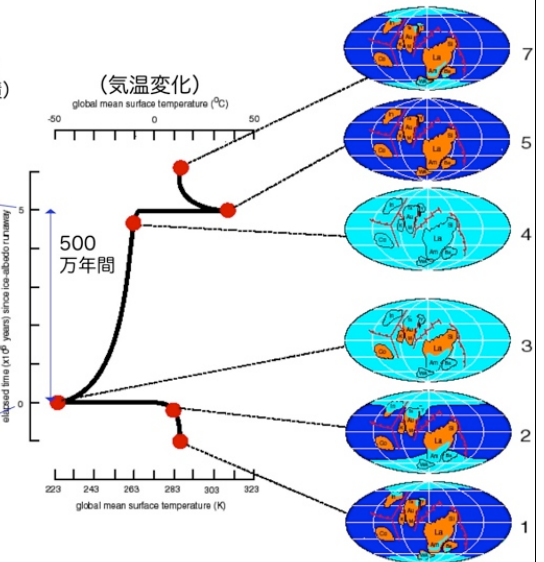
海洋: 光合成停止, CO_2 溶解無し
 酸素欠乏 (Fe^{2+} の溶存)

風化作用の停止

全球凍結 ($\sim -50^\circ\text{C}$)
 30°N/Sを越える (氷アルベドフィードバック)

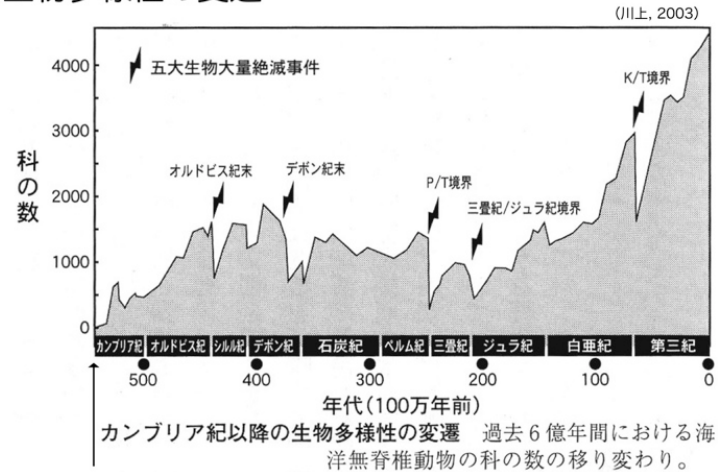
寒冷化 ・ 氷床の発達

風化の促進 ・ ・ 大気 CO_2 の減少
 低緯度域の大陸分布



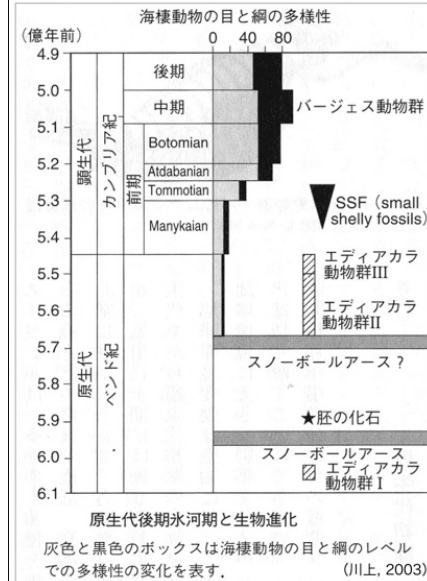
(Hoffman & Schrag, 2002)

生物多様性の変遷



硬組織をもった生物の出現
(炭酸カルシウム, リン酸カルシウム) “カンブリア紀大爆発”

「全球凍結事件」後の生物進化



原生代末期:
エディアカラ生物群
全球凍結後
→ 酸素の増大
(シアノバクテリアの繁茂)
・浅海域の拡大

カンブリア紀:
硬組織をもった生物の出現
バージェス動物群
“カンブリア紀大爆発”
酸素の増大
→ コラーゲン合成
→ 硬組織

先カンブリア末期

エディアカラ生物群: 大型・シート状, 硬組織無し (印象化石)



カンブリア紀初期
バージェス動物群
多細胞生物, 硬組織



(池谷・北里, 2004)



酸素同位体比

試料：生物遺骸

(炭酸カルシウム、リン酸カルシウムの殻・骨格を持つ生物)

殻に取り込まれる酸素同位体比は、海水の同位体比と海水温に左右される。



有孔虫
CaCO₃の殻

◆ 海水の同位体比

低温：大陸氷床発達 → 氷床に¹⁶Oが多くいき、海水には¹⁸Oが多い
→ 海水δ¹⁸Oは大 → 殻はδ¹⁸O高

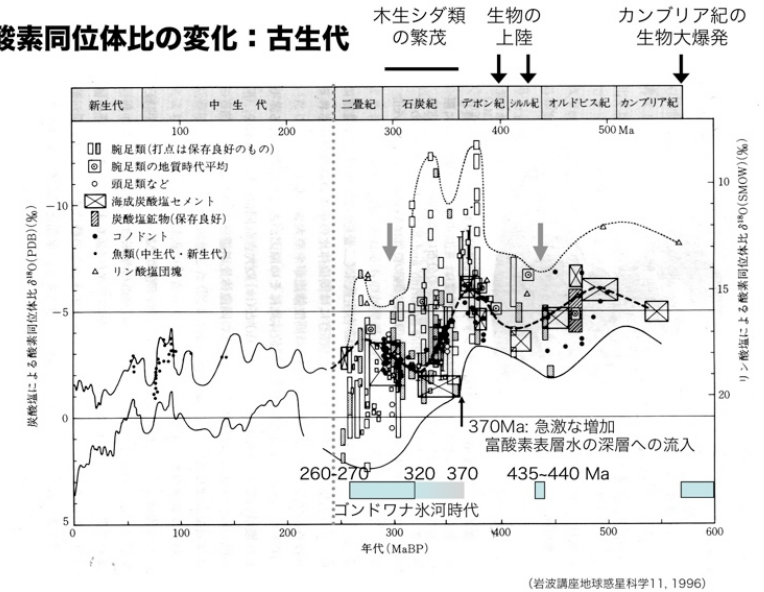
◆ 海水温

低温：殻は¹⁸Oを多く取り込む → 殻はδ¹⁸O高

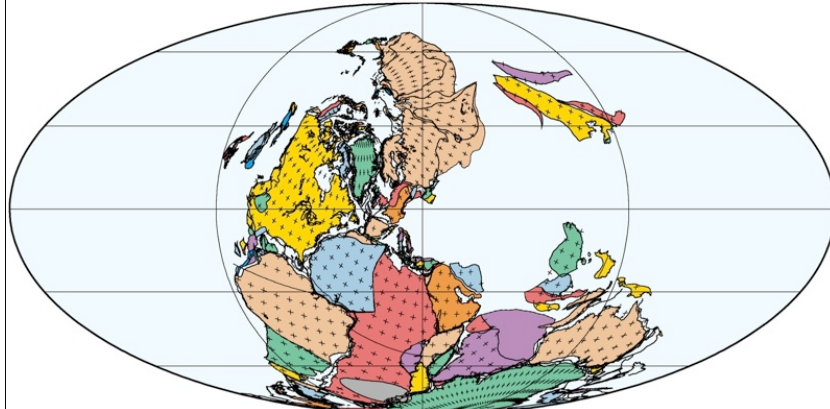
*低温 → 殻はδ¹⁸O高

*酸素同位体比・大陸氷床量・古海水温／古気温の指標

酸素同位体比の変化：古生代



超大陸パンゲア (3.2~1.8億年前)



3億年前の大陸分布

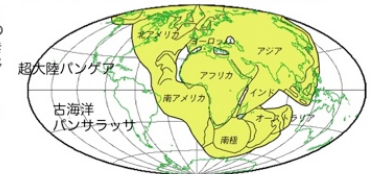
Lawver et al. (2009, University of Texas Institute for Geophysics)
"PLATES: 2009 Atlas of Plate Reconstructions"

アルフレッド・ウェグナー… 超大陸の存在, 大陸移動

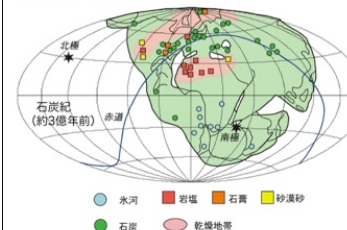


アルフレッド・ウェグナー (ドイツ、気候学者：
1880-1930年) は、大西洋を挟む大陸の海岸線の形
状の相補性に着目し、地質学、古生物学、古気候学
の資料に基づいて、約三億年前にはひとまとまりの大
きな大陸、超大陸パンゲア、が存在し、それが分裂・移
動することで現在に至ったと考えた。
大陸移動説を提唱：1912年
大陸と海洋の起源：第1版1915年～第4版1929年

ウェグナーの復元図：石炭紀 (約3億年前)



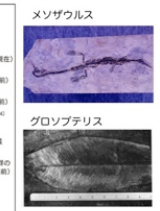
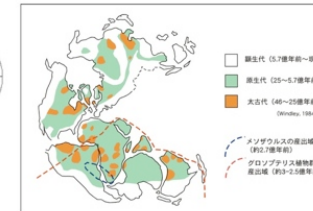
古気候学的な証拠



超大陸パンゲアの上に昔の気候を示す物の分布をプ
ロットすると、赤道や極の位置をずらすことによって、
現在と同じような気候区分が現れる。

石炭：熱帯気候
氷河：寒冷気候 (極域)
岩塩、石膏、砂漠砂：乾燥気候

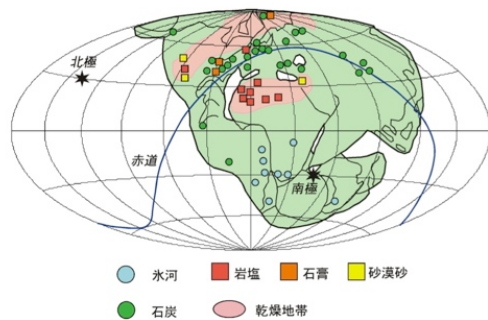
地質学的・古生物学的な証拠



大陸を集めて超大陸パンゲアを作ると、同じ年代の岩石の分布
や化石の分布の繋がりが良い。メソゾウルス (小型の淡水性爬
虫類) やゴロンゴリス (シダ植物) は海を渡って大陸間を移
動したと考えにくく、大陸が繋がっていたと考える方がもっ
ともらしい。

古気候学指標物： Gondwana氷河時代

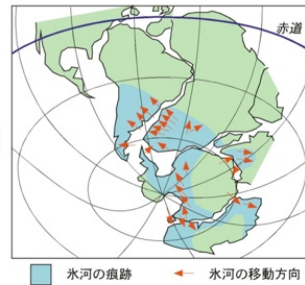
石炭紀（約3億年前）



超大陸パンゲアの上に昔の気候を示す物の分布をプロットすると、赤道や極の位置をずらすことによって、現在と同じような気候区分が現れる。

石炭：熱帯気候
氷河：寒冷気候（極域）
岩塩、石膏、砂漠砂：乾燥気候

氷河の痕跡：2.8億年前

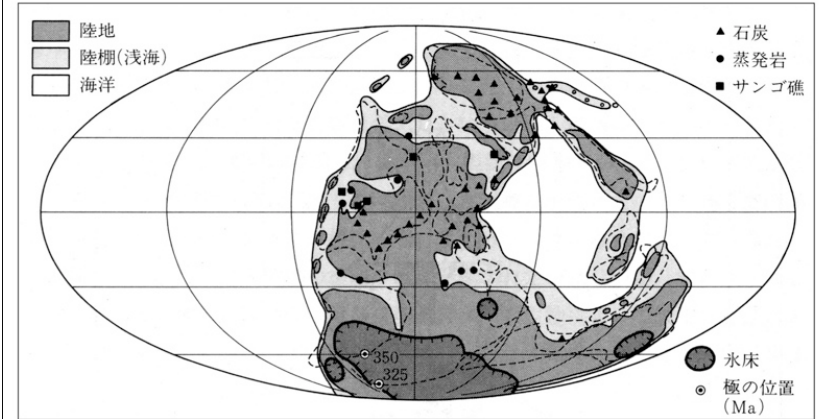


(別冊サイエンス、1975)

Gondwana氷河時代

パンゲア超大陸の形成

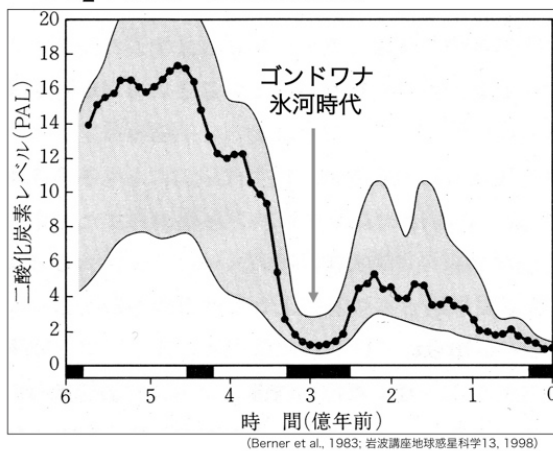
- ・火成活動の低下 [CO₂の供給減]
- ・海水準の低下・陸地面積の増加 (風化作用の影響-高) [CO₂の消費増]



石炭紀後期（約3億年前）の古地理と古気候
(氷床分布：3.2億年前)

(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

CO₂の変動：過去6億年間



(Berner et al., 1983; 岩波講座地球惑星科学13, 1998)

生物による風化の促進
・根による機械的破壊
・有機酸による岩石の溶解
・土壌中のCO₂濃度の増加

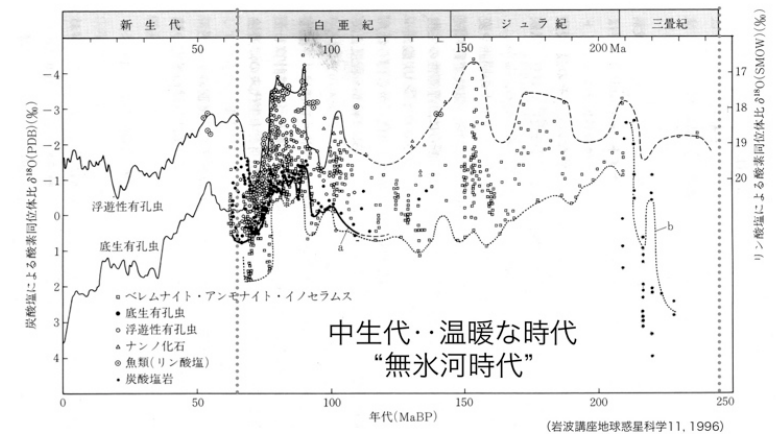
パンゲア超大陸の形成
火成活動の低下
[CO₂の供給減]
海水準の低下
陸地面積の増加
(風化作用の影響-高)
[CO₂の消費増]

生物作用

4.2億年前
植物の上陸
(維管束を持つ植物)
3.7億年前~
シダ類の繁茂・埋没
・石炭形成
石炭紀
3.7-2.9億年前

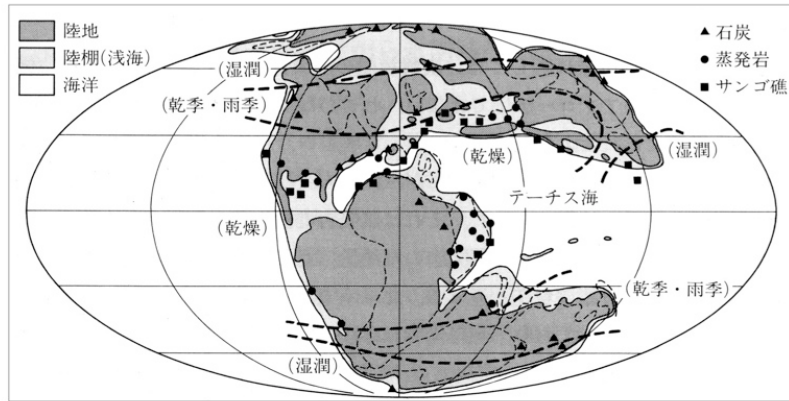
風化の促進
有機物の埋没
・CO₂の消費増

酸素同位体比の変化：中生代



(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

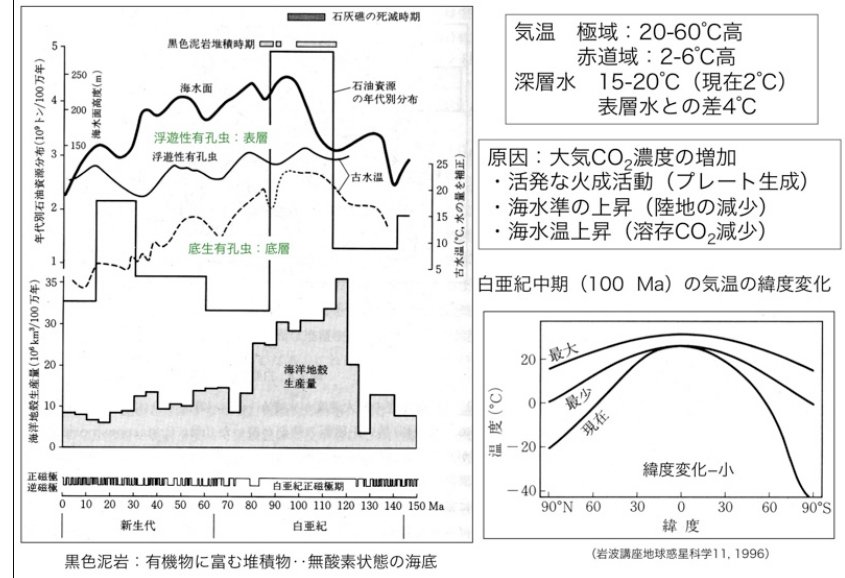
ジュラ紀末（約1.5億年前）の古地理と古気候



無氷河時代：中生代温暖期

(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

無氷河時代：温暖な白亜紀

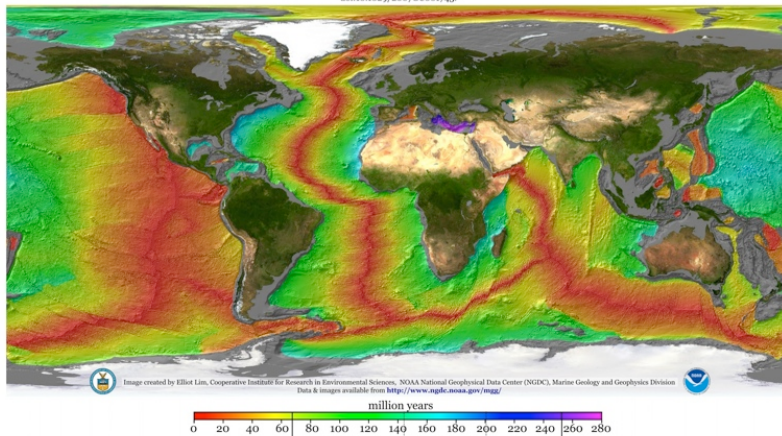


海洋地殻の年代（単位：百万年前）

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)

(Muller et al., 2008)

Data source:
Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geophys.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.



新生代 中生代

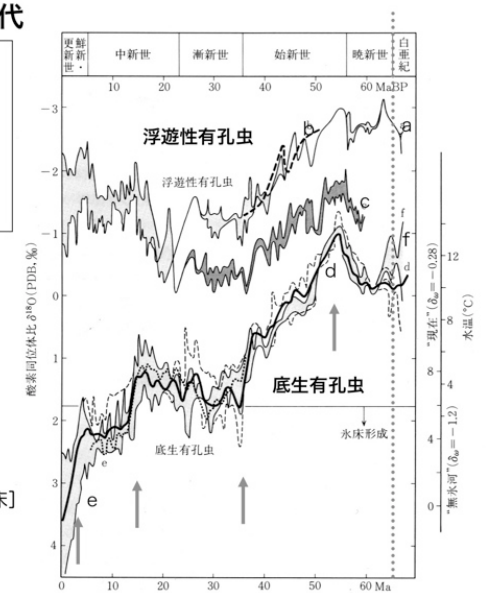
酸素同位体比の変化：新生代

- 有孔虫化石の殻の酸素同位体比
- 浮遊性：中緯度（低緯度に換算）
 - 浮遊性：大西洋（破線）
 - 浮遊性：赤道及び中央太平洋
 - 底生：南大西洋（太線）
 - 底生：赤道太平洋
 - 底生：中緯度（低緯度に換算：点線）

- ◆ 現在までの寒冷化
中生代の温暖気候からの転換
・火成活動の鈍化
海洋の表層と深層との
温度差が拡大〔深層の寒冷化〕

- ◆ 顕著な寒冷化
- 52 Ma頃 [45.5Ma:南極氷床の出現]
 - 36 Ma頃 [南極氷床の形成]
 - 15-14 Ma頃 [現在規模の南極氷床]
 - 3 Ma頃 [北半球に氷床形成]

北半球に氷床の出現 ⇒ 氷河時代



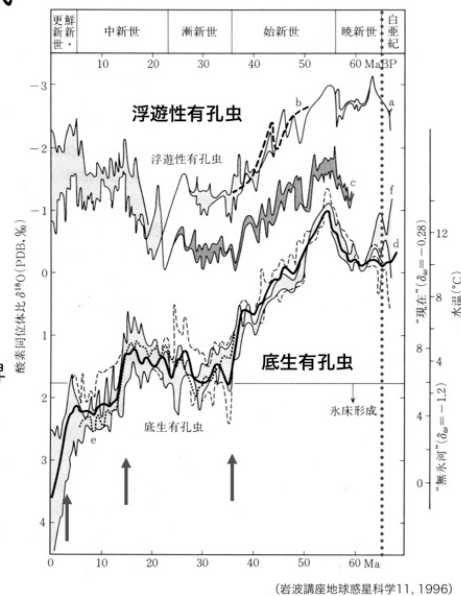
(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

酸素同位体比の変化：新生代

◆ 顕著な寒冷化

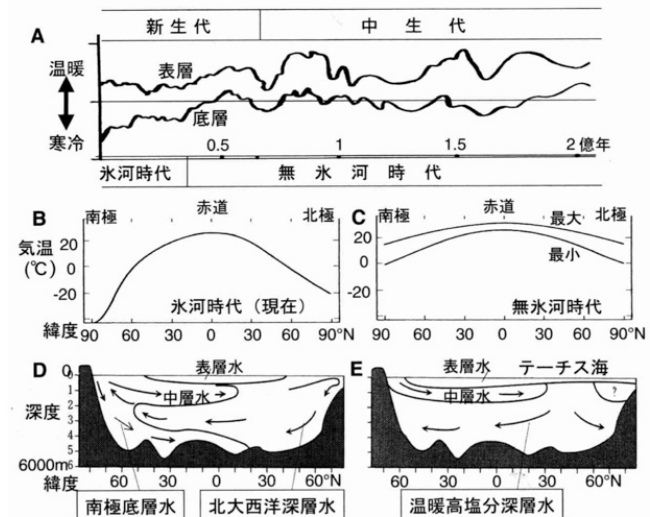
- 36 Ma頃
南極大陸/南米大陸の分離、
南極大陸の孤立化
→ 南極周極流の形成
- 15-14 Ma頃
トンガ海溝-サモア海路の成立
大西洋-北極海の接続
→ 北大西洋深層水の形成
- 3 Ma頃
パナマ地峡の成立
ヒマラヤ山脈、ロッキー山脈の上昇

固体地球圏の変動
(プレート運動、火成活動、…)
→ 海洋・大気循環の変化
→ 気候変動



(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

白亜紀と現在の気温の緯度変化と海洋循環

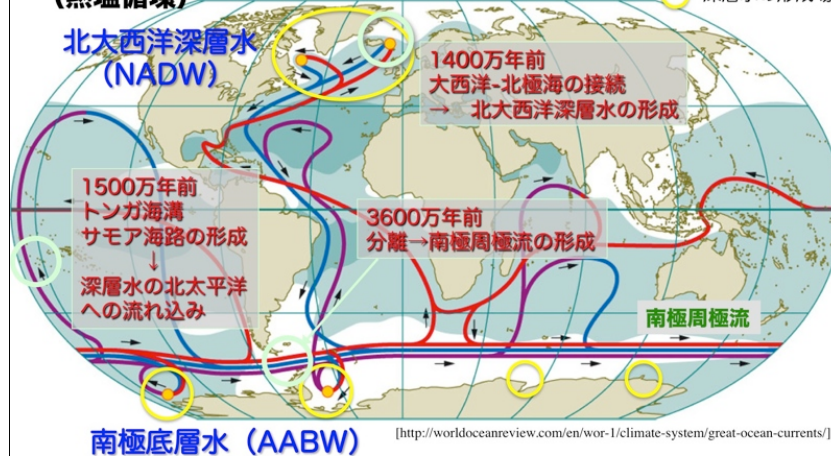


[環境理学, 2006]

海洋深層循環 (熱塩循環)

深層水：海洋深層の低温・高密度の水

深層水の形成場



[<http://worldoceanreview.com/en/wor-1/climate-system/great-ocean-currents/>]

プレート運動による海陸分布の変化

→ 現在の深層水の循環パターンの形成 → 寒冷化

3 Ma頃

- パナマ陸橋の成立
メキシコ湾流の北進・北大西洋沿岸域での降雪
東太平洋での深層水の湧昇
- ヒマラヤ山脈、ロッキー山脈の上昇 (15Ma開始)
岩石風化の促進、北半球の大気循環の変化

北半球に本格的
氷床の出現
[氷河時代へ]

