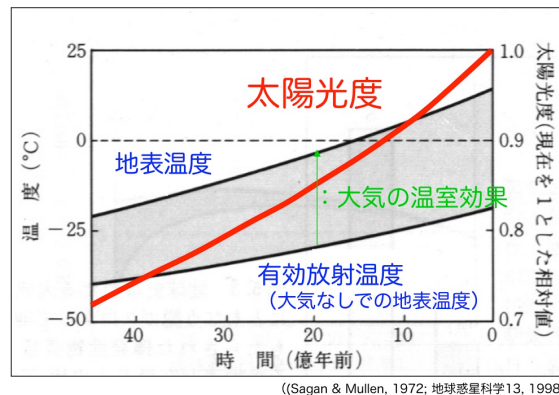
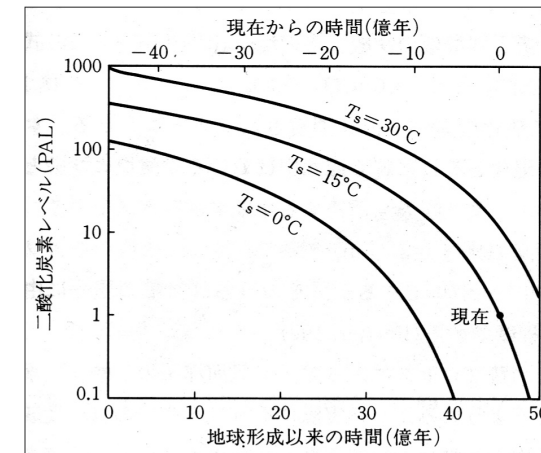


地球史における気候変動

太陽光度の地球史における変化

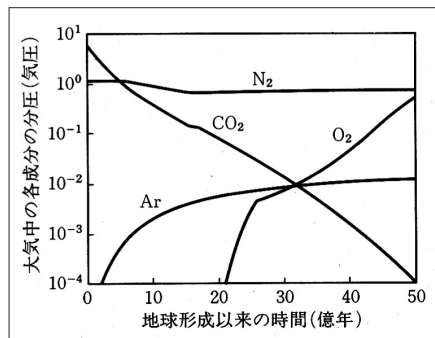


太陽光度の増大に対して、地球環境を温暖に保つために必要なCO₂量の時間変化



地球史にわたる地球環境の変動

◆地球史にわたる大気の変化の推定



- ・ 太陽光度の増加
- ・ 大気のCO₂の減少

地表環境
初期、高温の状態からの冷却

スムーズな気候変化?

氷河時代と無氷河時代

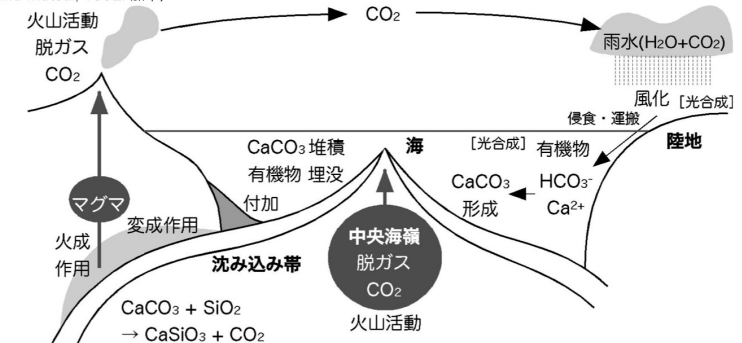
- ・ 長い温暖期 (greenhouse)
- ・ 短い寒冷期 (icehouse)
(大規模氷床が存在した時期)

- ・ CO₂の減少
- ・ O₂の増加 (生物活動)
- ・ Arの蓄積 (40K放射壊変・脱ガス)
- ・ N₂の相対的な安定性

長期的傾向・太陽光度の増加、大気のCO₂量の減少

長期的減少傾向に対するゆらぎ
[CO₂量の変動] → 寒-暖の変化

グローバルな二酸化炭素の循環
(Tajika and Matsui, 1992: 加筆)

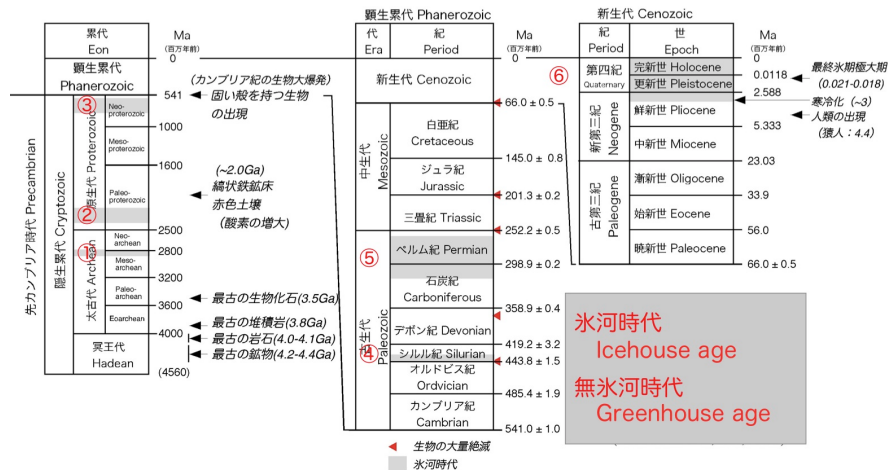


大気中の二酸化炭素

- ・ 消費・陸域での風化作用 (化学的)
- ・ 炭酸塩 (CaCO₃)の形成・堆積
- ・ 有機物の形成・埋没
- ・ 供給・火山活動

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



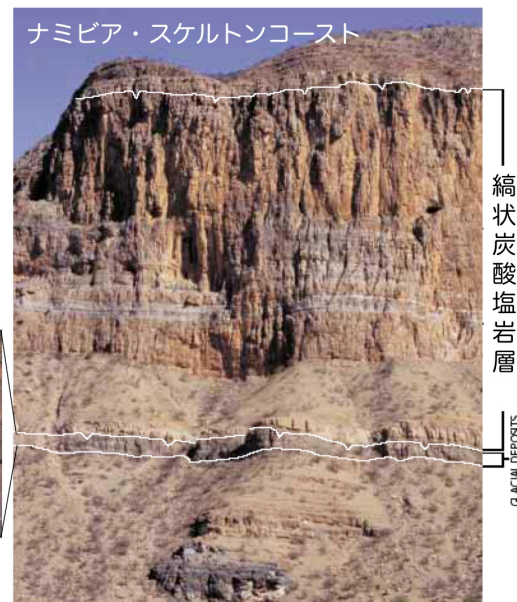
- ① : 2.9-2.8Ga ポンゴラ氷河期
- ② : 2.4-2.2Ga “ヒューロニア氷河期”
- ③ : 0.8-0.6Ga 原生代末氷河期
「全地球凍結 Snowball Earth」
・スターチアン氷河期 0.75 Ga
・マリノアン/ヴァランガー氷河期 0.6 Ga
- ④ : ~ 440 Ma オルドビス紀末氷河期
- ⑤ : 320-260 Ma “ゴンドワナ氷河期”
- ⑥ : 3 Ma以降

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



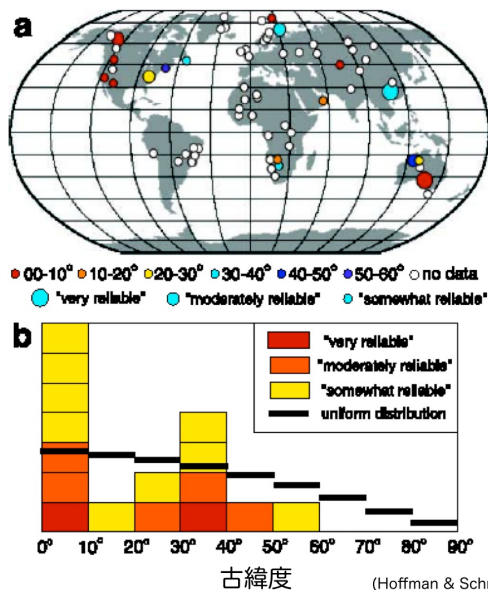
氷河堆積物



(Hoffman & Schrag, 1999)

原生代後期 氷河堆積物の 分布と古緯度

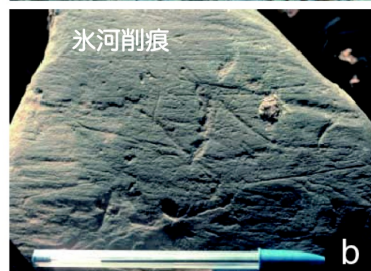
- 氷河堆積物が汎世界的に分布する
- 過去に低緯度で形成された



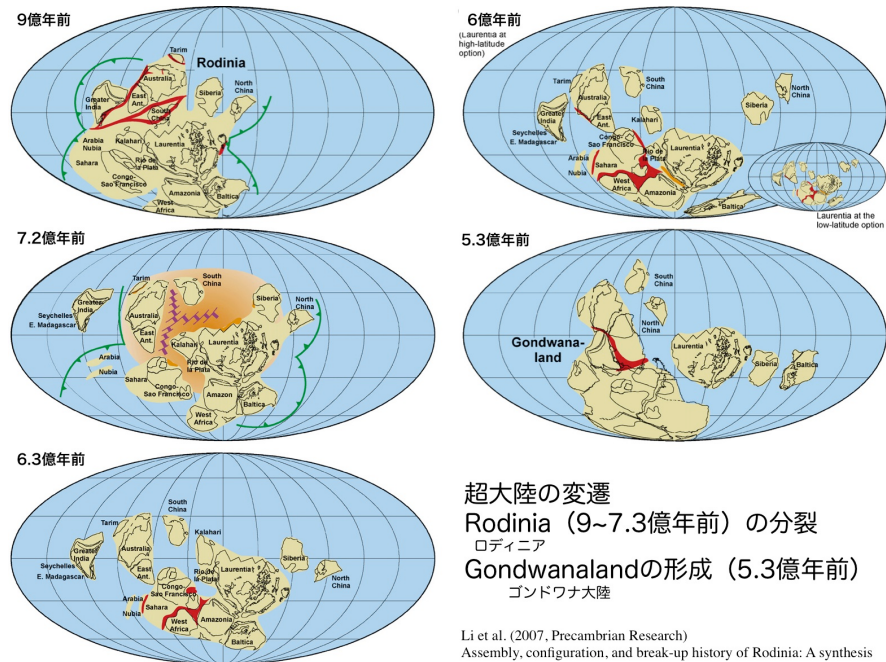
(Hoffman & Schrag, 2002)

氷河堆積物

氷河により運搬され堆積した岩屑・砂礫物。
分級が悪い。大小角礫、亜円礫と粘土分に富む細粒物が混在



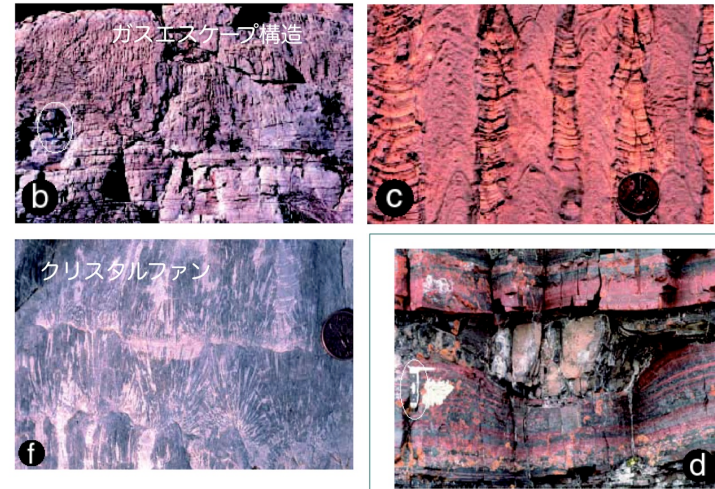
(Hoffman & Schrag, 2002)



「全球凍結」事件を示す地質学的証拠

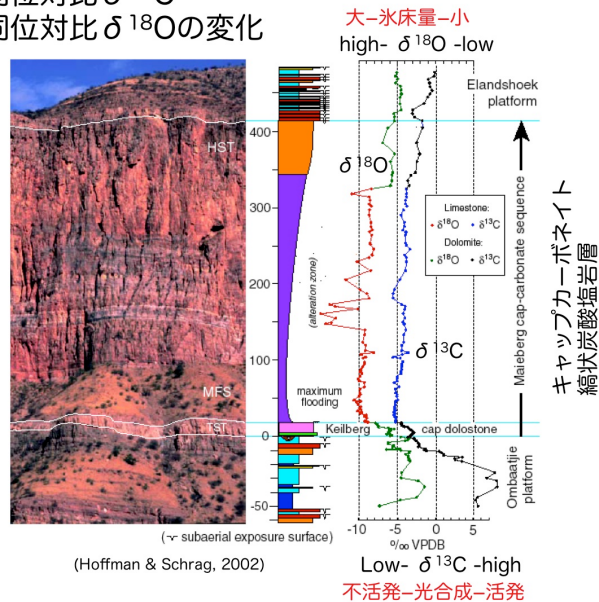
縞状炭酸塩岩層：急速な堆積

(Hoffman & Schrag, 2002)



縞状鉄鉱床 (BIF)

炭素同位対比 $\delta^{13}\text{C}$ 酸素同位対比 $\delta^{18}\text{O}$ の変化



炭素同位体比

炭素の同位体: ^{12}C (98.89%), ^{13}C (1.11%), ^{14}C ($1.4 \times 10^{-10}\%$)

炭素同位体比: $\delta^{13}\text{C}$

$$= \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) [\text{試料}] - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) [\text{標準試料}]}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) [\text{標準試料}]} \times 1,000 \text{ (‰)}$$

(千分率, パーミル)

(標準試料: 白亜紀Pee Dee 層のベレムナイト化石)

光合成 (有機物生成)

^{12}C (軽い酸素) が多く使われる

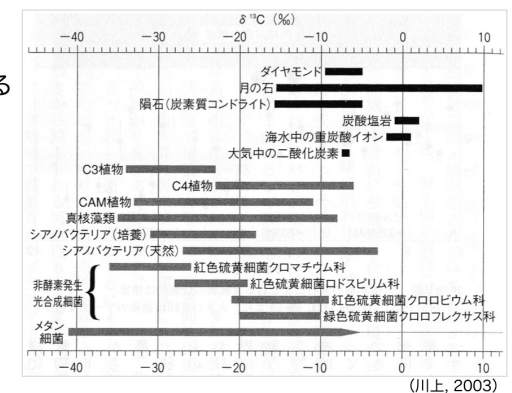
* 有機物: $\delta^{13}\text{C}$ - 小

(同位体分別)

光合成活発 (不活発)

→ 海水中の $\delta^{13}\text{C}$ - 大 (小)

炭酸塩岩の $\delta^{13}\text{C}$ - 大 (小)



酸素同位体比

酸素の同位体：

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

酸素同位体比： $\delta^{18}\text{O}$

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

(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

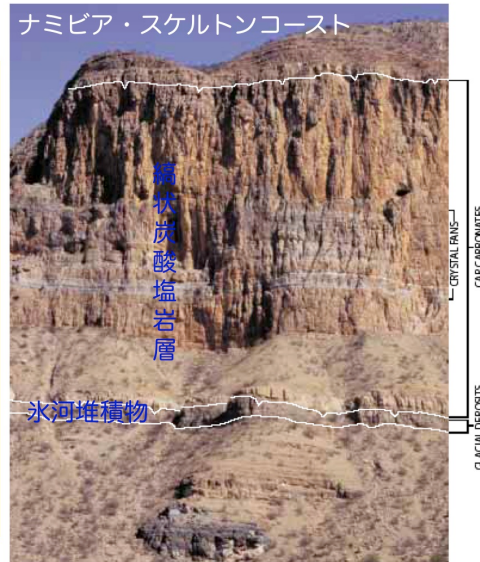
◆大陸氷床が縮小 (温暖)

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

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
- 縞状鉄鉱床 (BIF) の形成
海洋酸欠状態の存在
- 炭酸塩岩層の
炭素同位体比の負異常
光合成の停止

↓
“全球凍結仮説”



(Hoffman & Schrag, 1999)

◆炭酸塩岩層, 鉄鉱床, マンガン鉱床の形成

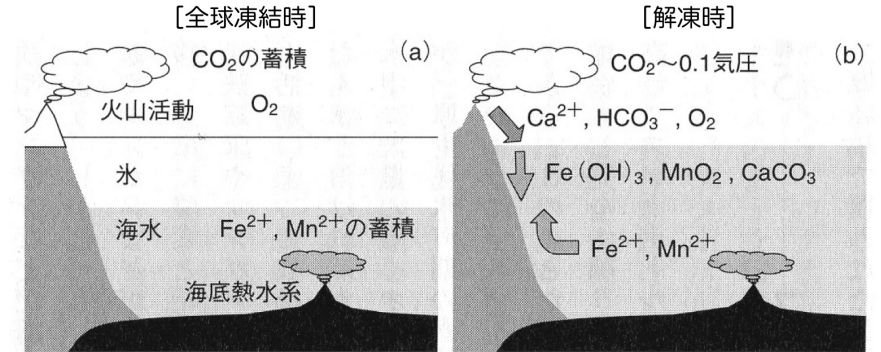


図6 スノーボールアース仮説による, 鉄鉱床・マンガン鉱床およびキャップカーボネートの形成過程
(進化する地球惑星システム, 2004)

◆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

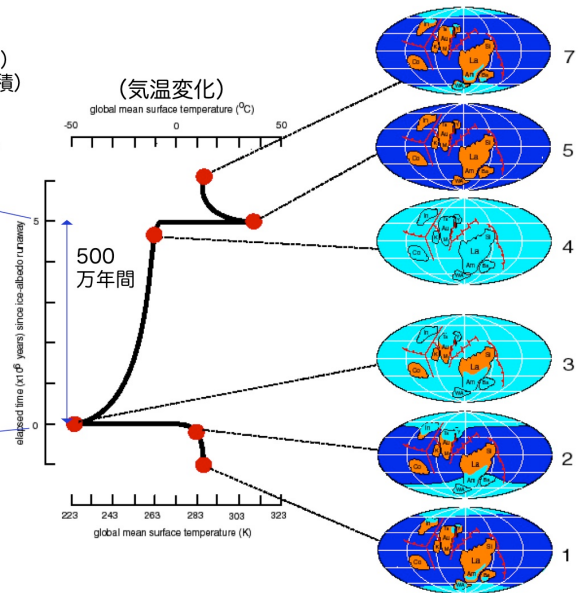
大気 CO_2 の蓄積・温室効果UP
火山活動の継続
風化作用停止

海洋：光合成停止
酸素欠乏 (Fe^{2+} の溶存)
海洋への CO_2 の溶解なし

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

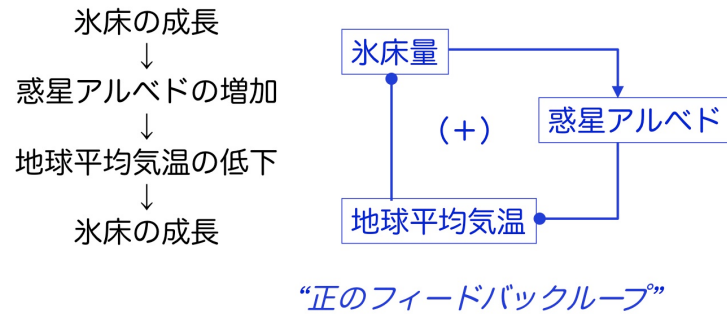
低緯度域の大陸分布



(Hoffman & Schrag, 2002)

気候変動に関わる相互作用

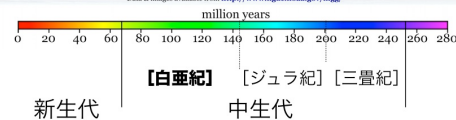
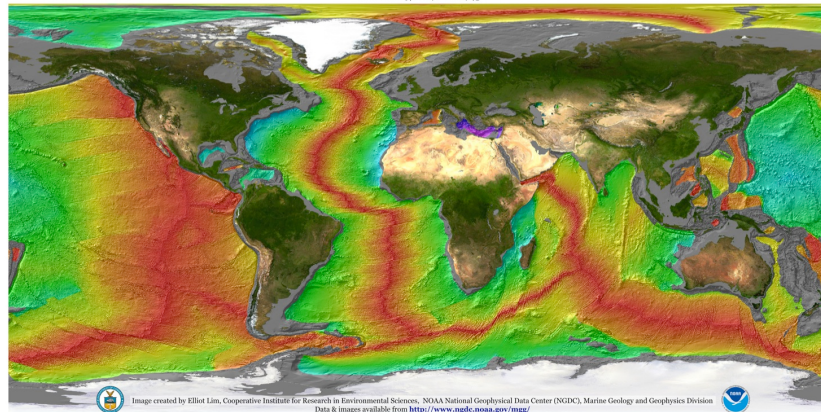
◆氷-アルベド・フィードバック



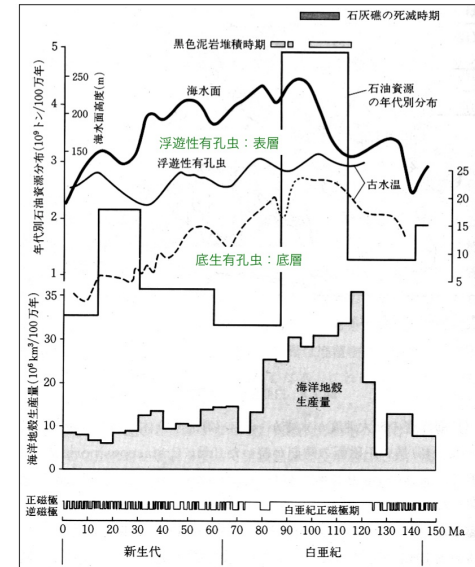
海洋地殻の年代 (単位: 百万年前)

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)

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. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743. (Muller et al., 2008)



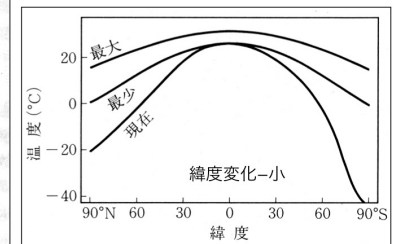
無氷河時代: 温暖な白堊紀



気温 極域: 20-60°C高
赤道域: 2-6°C高
深層水 15-20°C (現在2°C)
表層水との差4°C

原因: 大気CO₂濃度の増加
・活発な火成活動 (プレート生成)
・海水準の上昇 (陸地の減少)
・海水温上昇 (溶存CO₂減少)

白堊紀中期 (100 Ma) の気温の緯度変化



(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

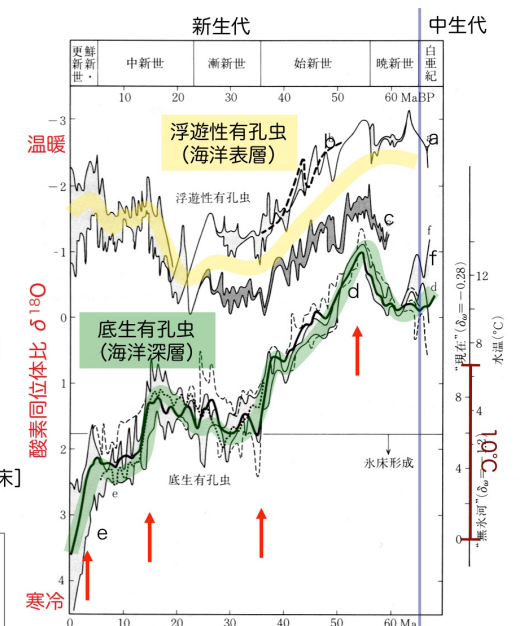
黒色泥岩: 有機物に富む堆積物・無酸素状態の海底

新生代の気候変動

堆積物・堆積岩に含まれる
化石の酸素同位体比
↓
海水温の変化
(地球表層温度の変化)

- ◆ 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]

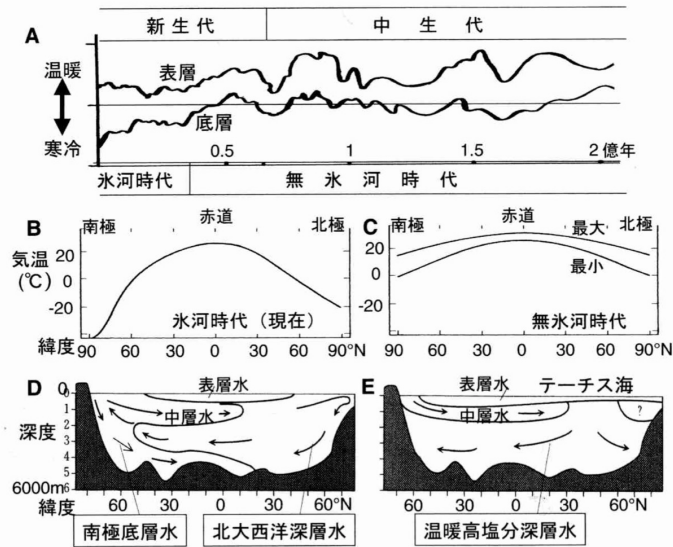
- ・ プレート運動による
大陸位置の変化
- ・ 海洋深層循環の変化
- ・ 海洋表層循環 / 大気循環の変化



(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

6600万年前

白亜紀と現在の気温の緯度変化と海洋循環

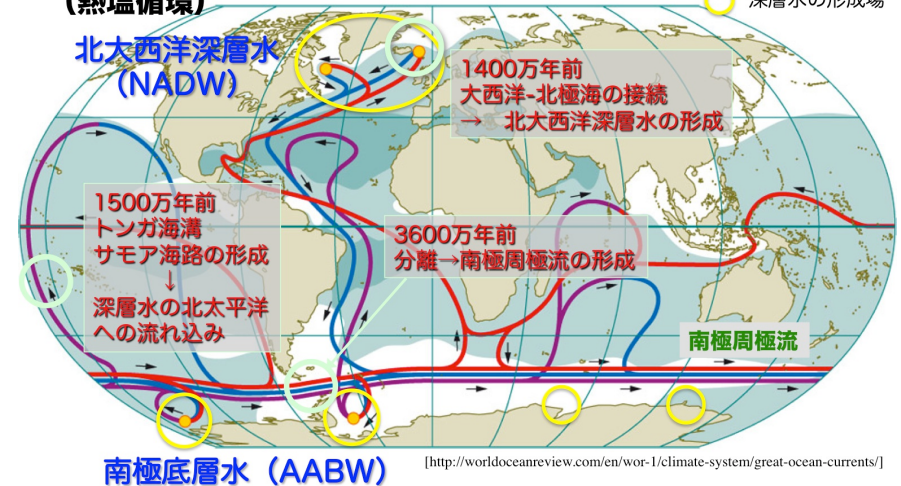


[環境理学, 2006]

海洋深層循環 (熱塩循環)

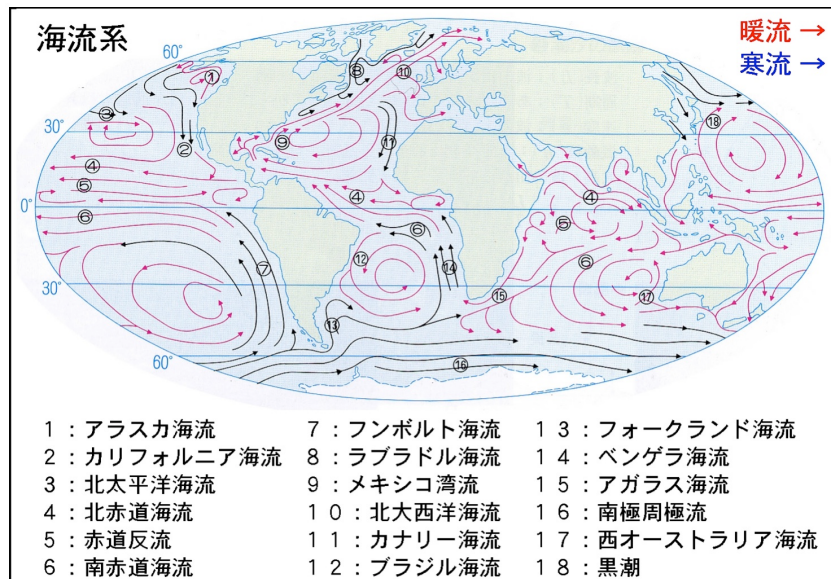
深層水：海洋深層の低温・高密度の水

深層水の形成場



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



海流系

新生代の気候変動

- ◆ 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
- ◆ 顕著な寒冷化
 - ・ 52 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・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

