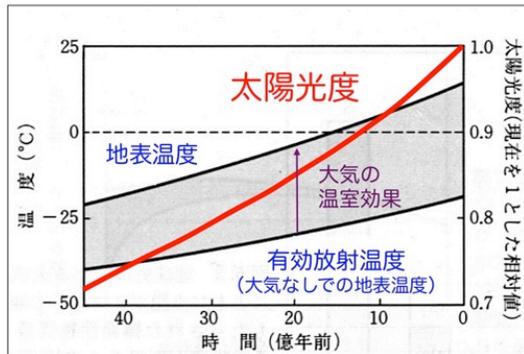


地球史における気候変動・氷河時代・無氷河時代（長期的変動）

太陽光度の地球史における変化



現在の大気組成を仮定

約20億年前より以前は全球凍結？

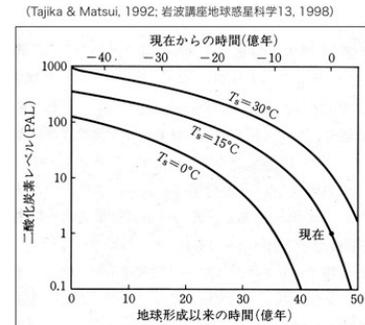
水の存在：38億年前

“暗い太陽のパラドックス”

地球初期多量のCO₂ → 温室効果：大

(Sagan & Mullen, 1972; 地球惑星科学13, 1998)

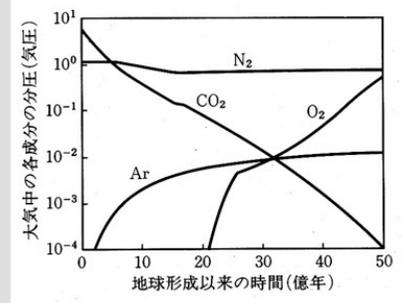
太陽光度の増大に対して、地球環境を温暖に保つために必要なCO₂量の時間変化



地球環境：長期的傾向
・太陽光度の増加
・大気CO₂の減少 → 初期地球の高温の状態からの冷却

スムーズな気候変化？
氷河時代・無氷河時代
[長い温暖期 / 短い寒冷期]

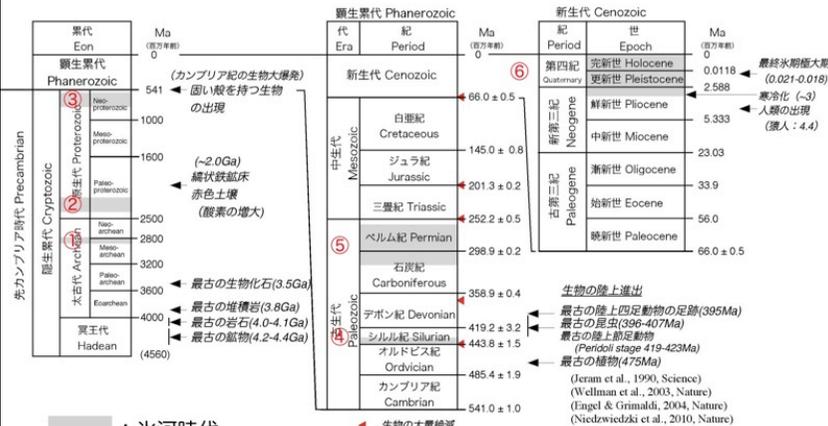
地球史にわたる大気の変化



(Tajika and Matsui, 1992; 岩波講座地球惑星科学13, 1998)

- ・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

地質年代尺 Geological Time Scale (Gradstein et al., 2012)

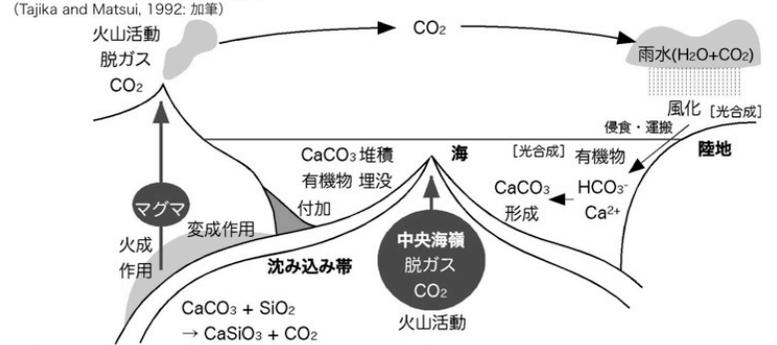


- 氷河時代
- ①: 2.9-2.8Ga ポンゴラ氷河期
 - ②: 2.4-2.2Ga “ヒューロニア氷河期”
 - ③: 0.8-0.6Ga 原生代末氷河期
 - ④: ~ 440 Ma オルドビス紀末氷河期
 - ⑤: 320-260 Ma “ Gondwana氷河期”
 - ⑥: 3 Ma以降
- (Harland et al., 1989; Kump et al., 1999)

長期的傾向・太陽光度の増加、大気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



- 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

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

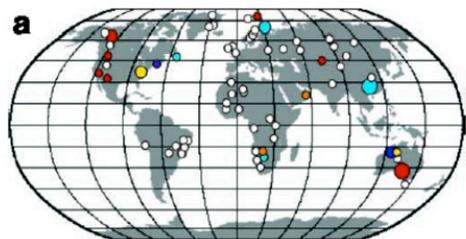
縞状炭酸塩岩層

GLACIAL DEPOSITS

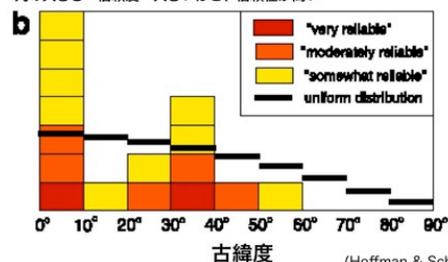
(Hoffman & Schrag, 1999)

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

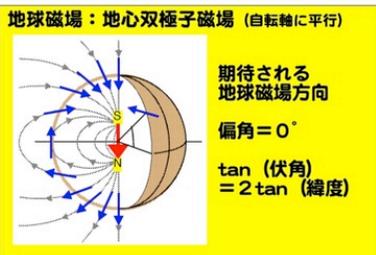
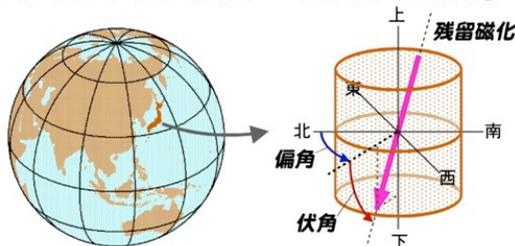


氷河堆積物が形成された古緯度
● 0-10°, ● 10-20°, ● 20-30°, ● 30-40°, ● 40-60°, ○ データ無し
丸の大きさ: 信頼度・大きいほど、信頼性が高い



(Hoffman & Schrag, 2002)

- 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。



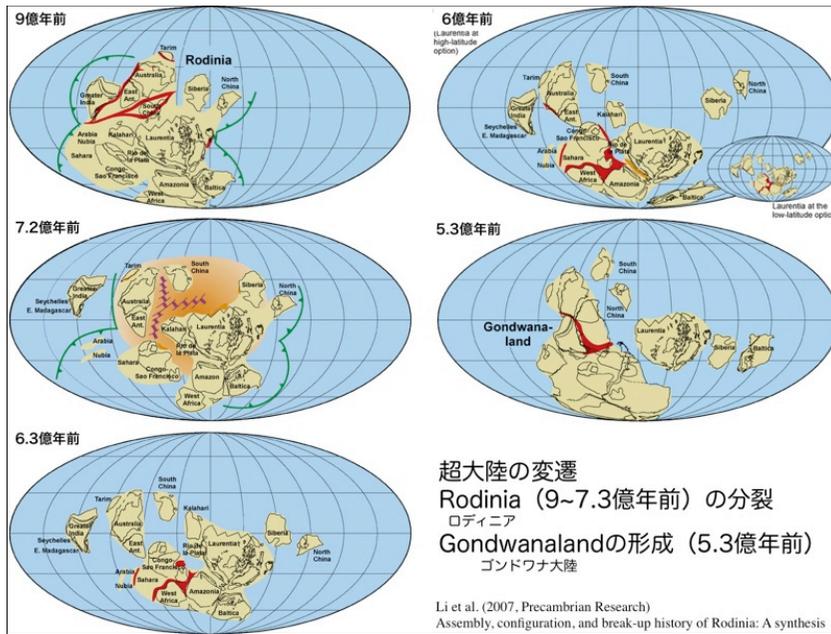
岩石の残留磁化の
伏角から、
岩石形成場所の
過去の緯度
(古緯度)
が推定できる。

約6億年前の大陸分布



(Hoffman & Schrag, 1999)

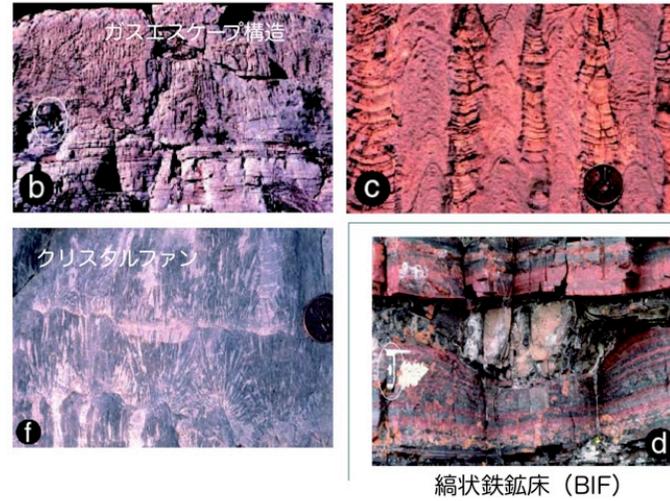
低緯度に集中した大陸分布



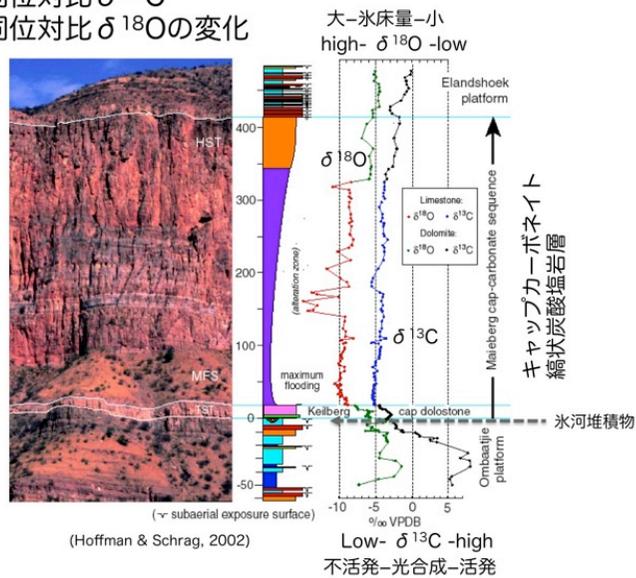
「全球凍結」事件を示す地質学的証拠

縞状炭酸塩岩層：急速な堆積

(Hoffman & Schrag, 2002)



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 ($1.4 \times 10^{-10}\%$)

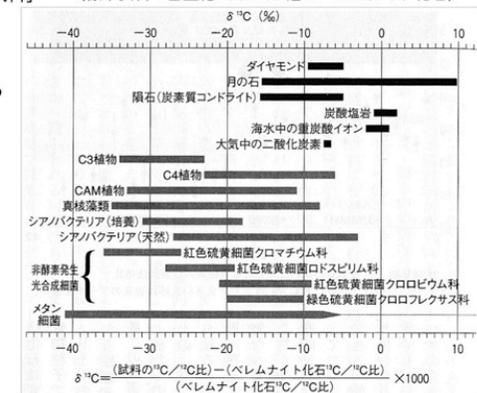
炭素同位体比： $\delta^{13}\text{C}$

$$= \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{[試料]}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{[標準試料]}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{[標準試料]}}} \times 1,000 \text{ (‰)} \text{ (千分率, パーミル)}$$

(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)



(川上, 2003)

酸素の同位体：

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

酸素同位体比： $\delta^{18}\text{O}$

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

(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 $\delta^{18}\text{O}$ —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 $\delta^{18}\text{O}$ —小

◆炭酸塩岩層, 鉄鉱床, マンガン鉱床の形成

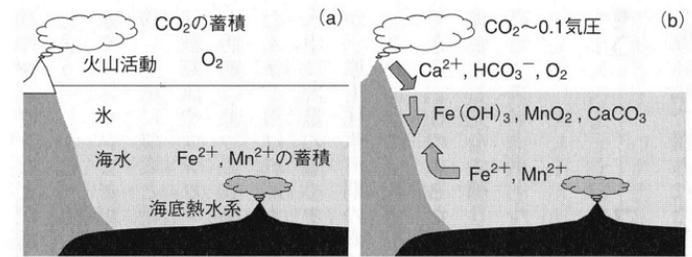


図6 スノーボールアース仮説による, 鉄鉱床・マンガン鉱床およびキャップカーボネートの形成過程 (進化する地球惑星システム, 2004)

(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

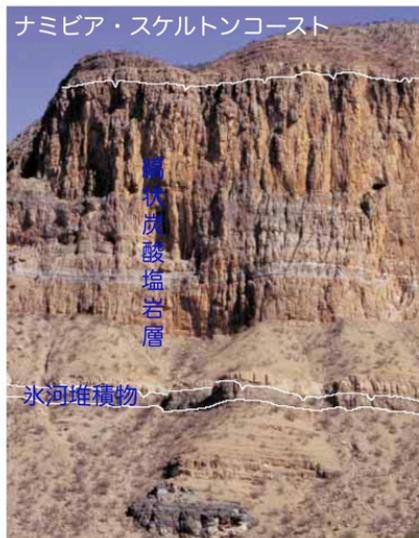
◆炭酸塩岩層の

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
解凍 (温室効果)

↑
大気 CO_2 の蓄積・温室効果UP
(火山活動: 継続)

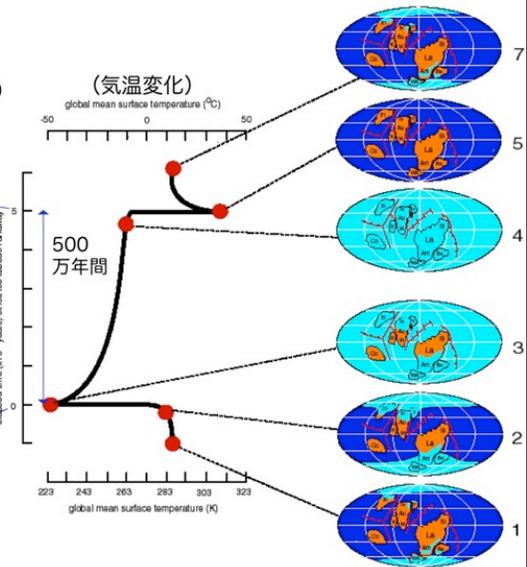
↑
海洋: 光合成停止, CO_2 溶解無し
酸素欠乏 (Fe^{2+} の溶存)

↑
風化作用の停止

↑
全球凍結 ($\sim -50^\circ\text{C}$)

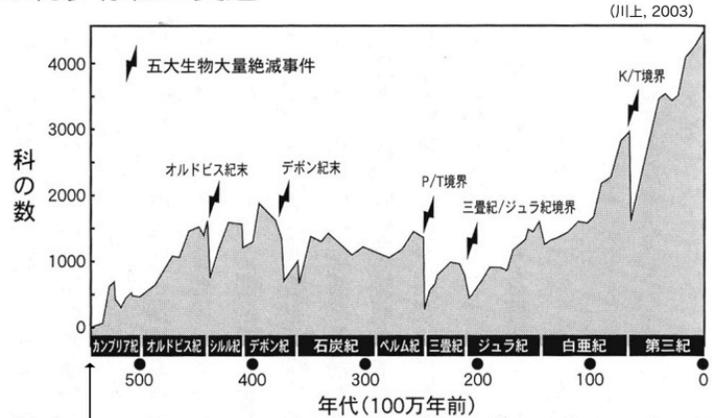
↑
30°N/Sを越える
(氷アルベドフィードバック)

↑
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)

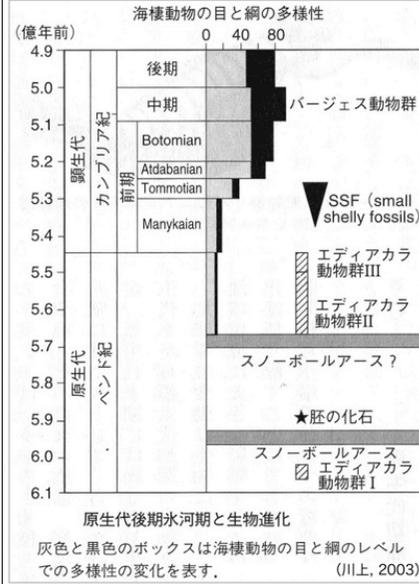
生物多様性の変遷



カンブリア紀以降の生物多様性の変遷 過去6億年間に於ける海洋無脊椎動物の科の数の移り変わり。

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

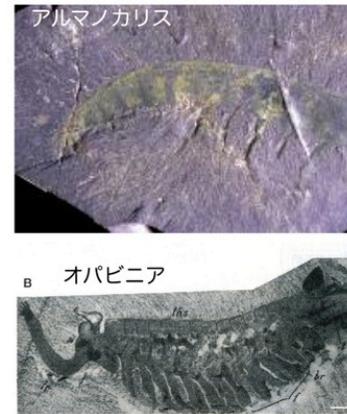
カンブリア紀：
硬組織をもった生物の出現
バージェス動物群
“カンブリア紀大爆発”
酸素の増大
→ コラーゲン合成
→ 硬組織

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

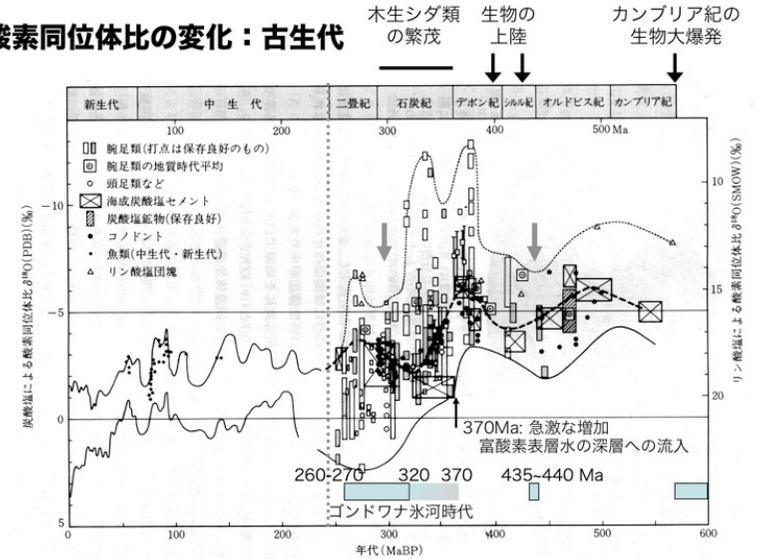
◆ 海水温

低温：殻は¹⁸Oを多く取り込む → 殻はδ¹⁸O高

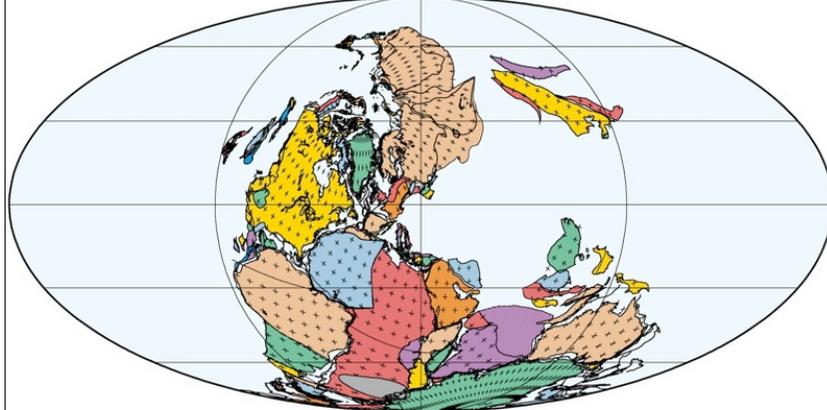
*低温 → 殻はδ¹⁸O高

*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

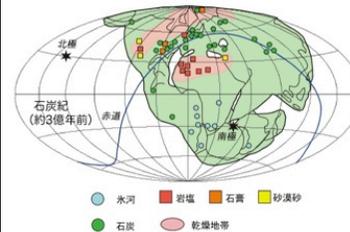


アルフレッド・ウェグナー (ドイツ、気候学者：1880-1930年) は、大西洋を挟む大陸の海岸線の形状の相補性に着目し、地質学、古生物学、古気候学の資料に基づいて、約三億年前にはひとまとまりの大きな大陸、超大陸パンゲア、が存在し、それが分裂・移動をすることで現在に至ったと考えた。大陸移動説を提唱：1912年 大陸と海洋の起源：第1版1915年～第4版1929年

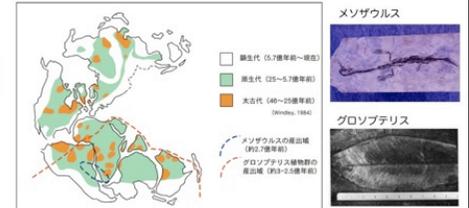
ウェグナーの復元図：石炭紀 (約3億年前)



古気候学的な証拠



地質学的・古生物学的な証拠



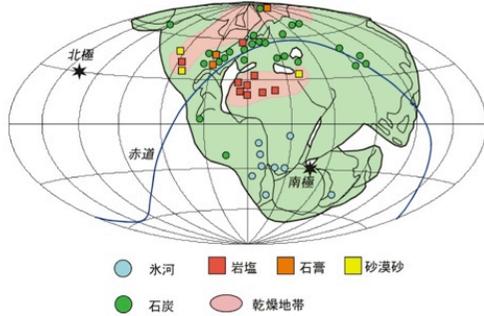
超大陸パンゲアの上に昔の気候を示す物の分布をプロットすると、赤道や極の位置をずらすことによって、現在と同じような気候区分が現れる。

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

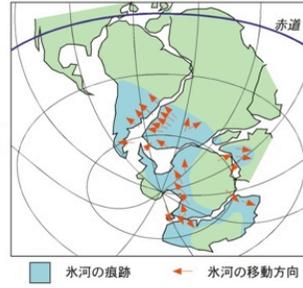
大陸を集めて超大陸パンゲアを作ると、同じ年代の岩石の分布や化石の分布の繋がりが良い。メソゾウムス (小型の淡水性爬虫類) やゴロンプテリス (シダ植物) は海を渡って大陸間を移動したとは考えにくく、大陸が繋がっていたと考えの方がもっともらしい。

古気候学指標物： Gondwana氷河時代

石炭紀 (約3億年前)



氷河の痕跡：2.8億年前



(別冊サイエンス、1975)

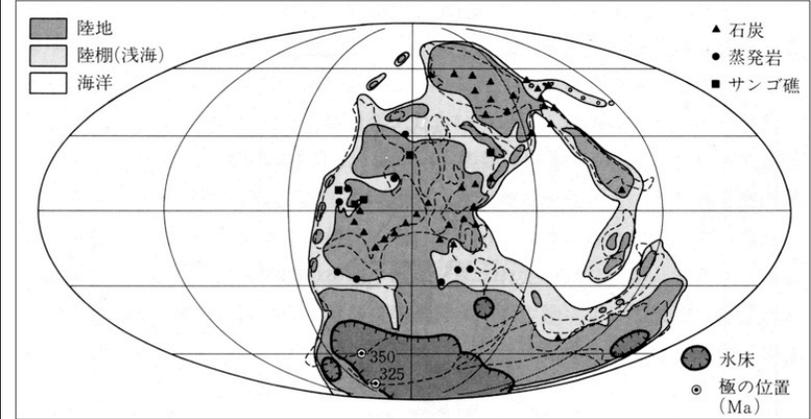
超大陸パンゲアの上に昔の気候を示す物の分布をプロットすると、赤道や極の位置をずらすことによって、現在と同じような気候区分が現れる。

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

Gondwana氷河時代

パンゲア超大陸の形成

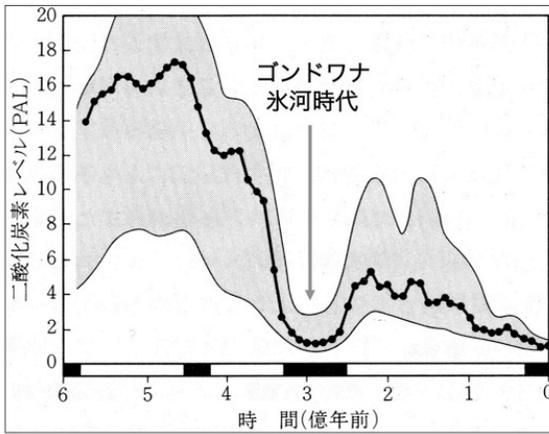
- ・火成活動の低下 [CO₂の供給減]
- ・海水準の低下・陸地面積の増加 (風化作用の影響-高) [CO₂の消費増]



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

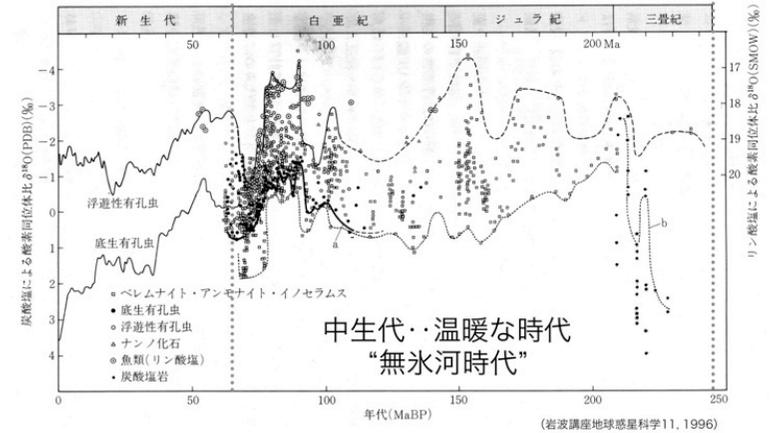
パンゲア超大陸の形成
火成活動の低下
[CO₂の供給減]
海水準の低下
陸地面積の増加
(風化作用の影響-高)
[CO₂の消費増]

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

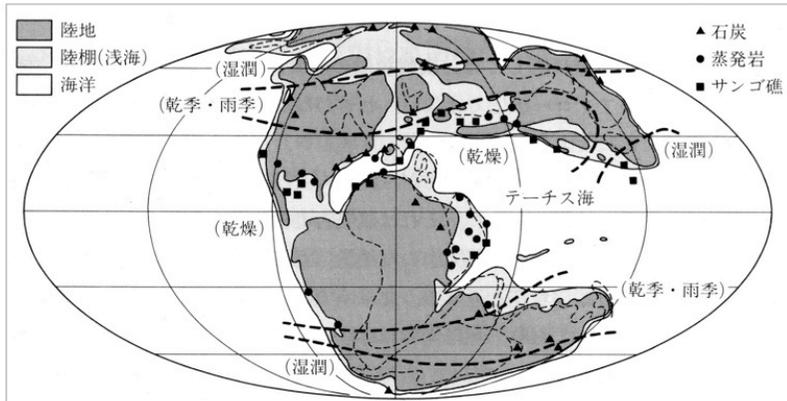
酸素同位体比の変化：中生代



中生代・温暖な時代
“無氷河時代”

(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

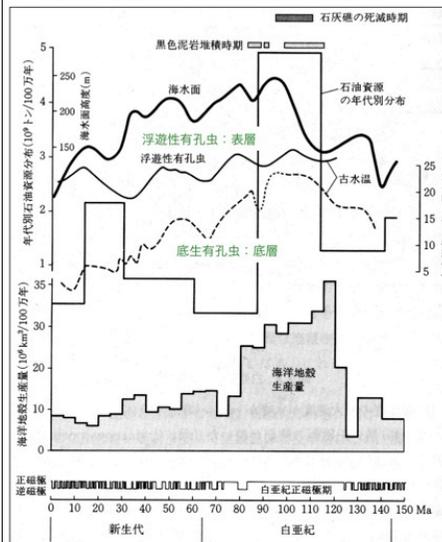
ジュラ紀末（約1.5億年前）の古地理と古気候



無氷河時代：中生代温暖期

(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

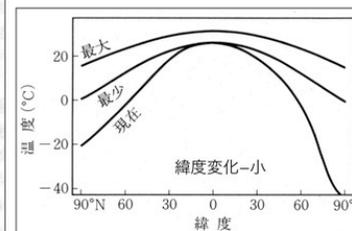
無氷河時代：温暖な白亜紀



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）

白亜紀中期（100 Ma）の気温の緯度変化



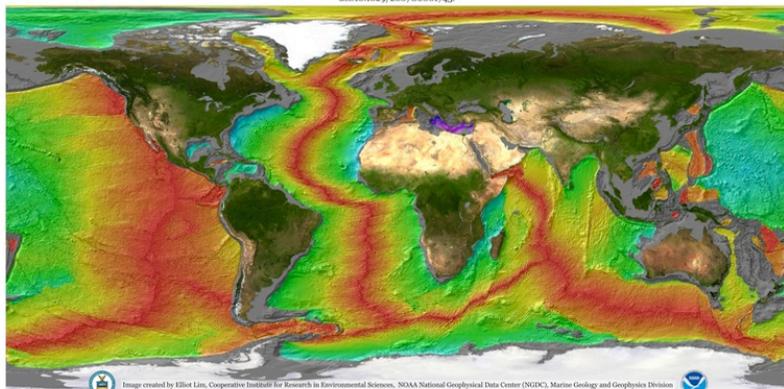
(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

黒色泥岩：有機物に富む堆積物・無酸素状態の海底

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 asymmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC006743



新生代

中生代

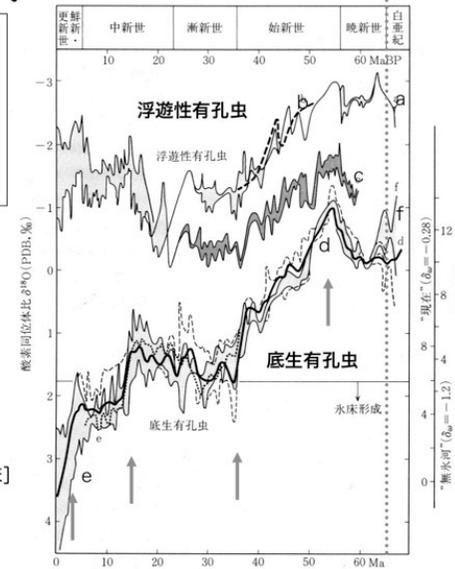
酸素同位体比の変化：新生代

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



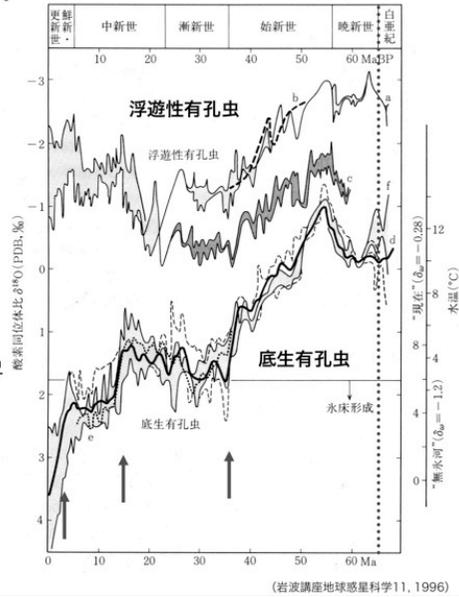
(岩波講座地球惑星科学11, 1996)

酸素同位体比の変化：新生代

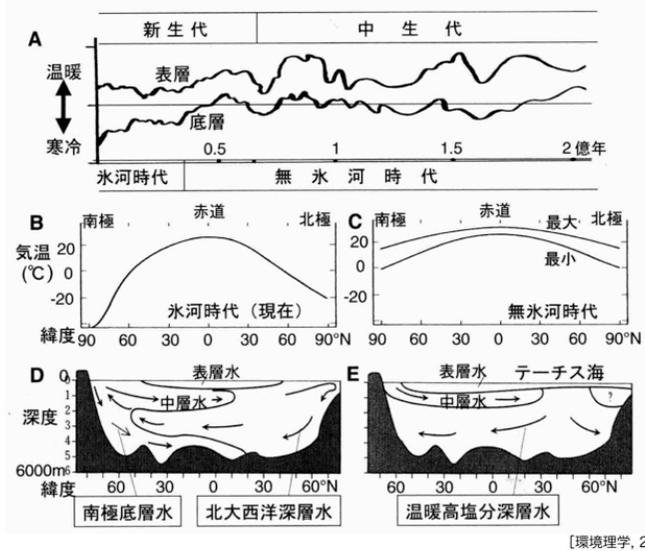
◆ 顕著な寒冷化

- 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

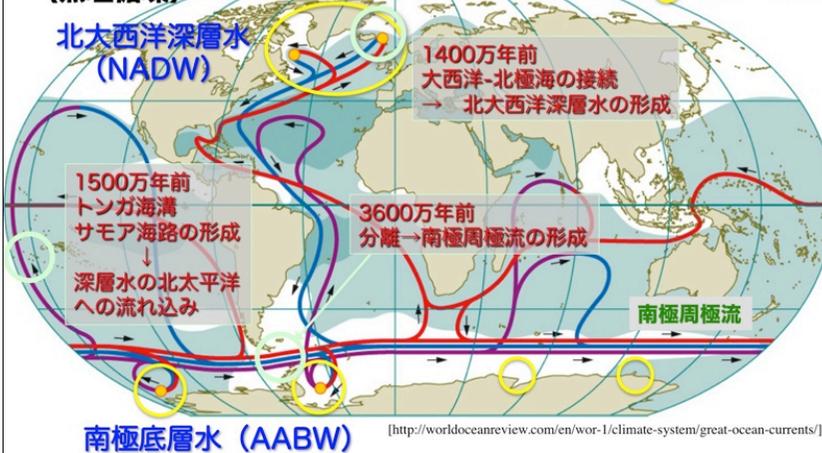


白亜紀と現在の気温の緯度変化と海洋循環



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

3Ma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
北半球に本格的氷床の出現 [氷河時代へ]
- ・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

