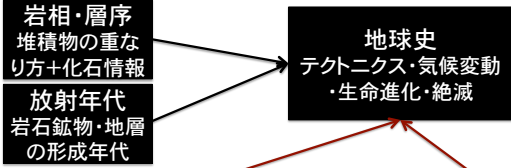


層序地質学

第7回 地磁気層序と化学層序

岩相・化石層序と放射年代は地球史を復元するための両輪。



しかし、他にも重要な情報を提供する「層序」がある。

地磁気層序：地層や岩石が保有する形成時の磁気情報

化学層序：地層の化学成分・同位体成分は保有する環境情報

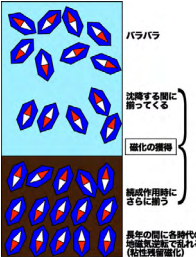
古地磁気とは

岩石や地層に残留磁化として、残される過去の磁気情報

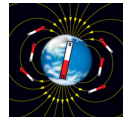
①熱残留磁化 (キュリー温度)

マグネタイト：575°C
チタノマグネタイト：200~400°C
(マグマから蒸発するTiを含むマグネタイト)

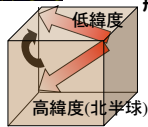
鉱物自体が磁化される



②堆積残留磁化



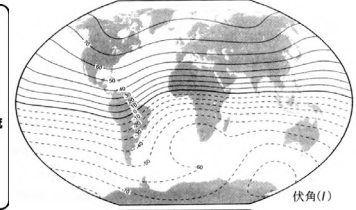
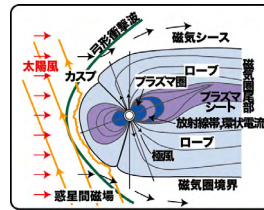
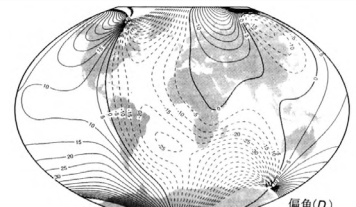
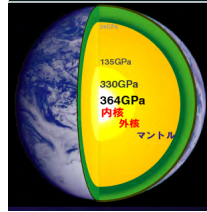
磁化された鉱物が配向⇒



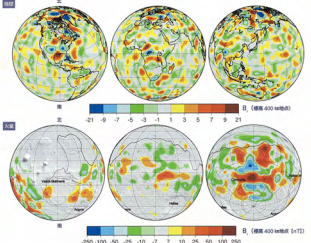
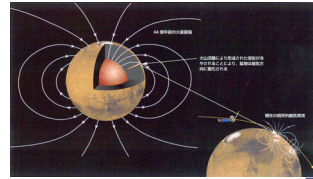
形成時の磁場情報は岩石の磁性鉱物に記録される

- ①古地磁気の伏角から過去の緯度が分かる (古地磁図を作る時の有力な証拠)
- ②水平面上の成分から過去の磁気極性が分かる (どっちがN極?)
- ③磁場強度

地磁気層序

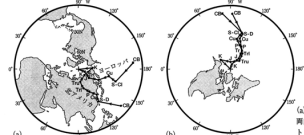


火星の磁場とプレートテクトニクス

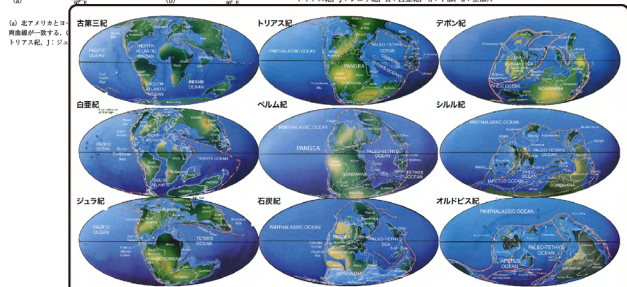


偏角の情報：古緯度→大陸移動や全球凍結モデル

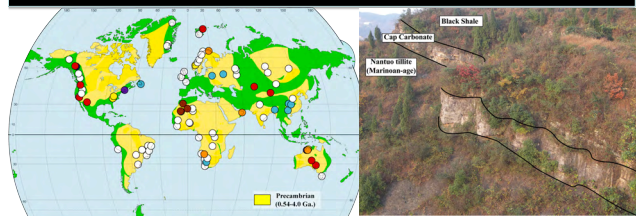
見かけの極移動と真の極移動



(a) 北アメリカとヨーロッパからの表の大陸移動軌跡。 (b) 大陸移動軌跡に基づいて北太平洋を閉じた場合、真極位が一致する。 (B: カンブリア紀, S: シルル紀, D: デボン紀, C: 石炭紀, P: ペルム紀, T: トリアス紀, J: ジュラ紀, K: 白亜紀, G: 第三紀, Q: 第四紀)



古緯度情報のインパクトの例



約6億5千万年前には高緯度～低緯度まで氷河性堆積物が広く発達

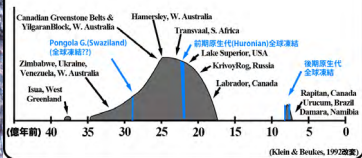
↓
全球凍結!

Hoffman & Schrag, (2002)

全球凍結により海洋循環が停止:縞状鉄鉱層の堆積

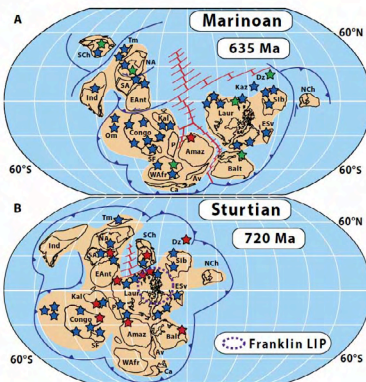


縞状鉄鉱層の形成時期



還元的な(Fe²⁺に富む)海水が間欠的に表層近くの酸化的な水と反応するとFe³⁺になり、Fe(OH)₃やFeO(OH)で沈殿

全球凍結時の古地理



Hoffman et al. (2017)

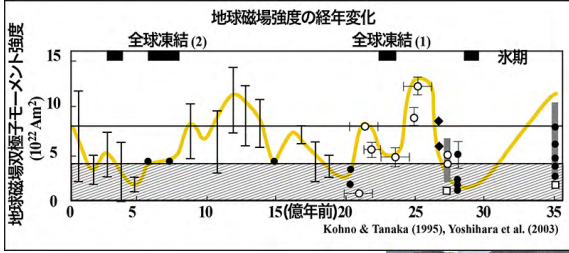
各地の古地磁気データ(緯度情報)から、氷河堆積物の多くが低緯度地域にあることが確認された。

- ★ 氷河堆積物
- ★ 後氷期金属鉱床
- ★ 後氷期バライト

クリオゲニア紀には地球は二度凍結した。

地球磁場強度の経年変化

浅海域に大規模に光合成生物(シアノバクテリア)が出現
→海水/大気中の酸素の増加



- ① 内核の誕生
- ② 表層での生物活動



環境(気候)の周期(地球磁場の変動)

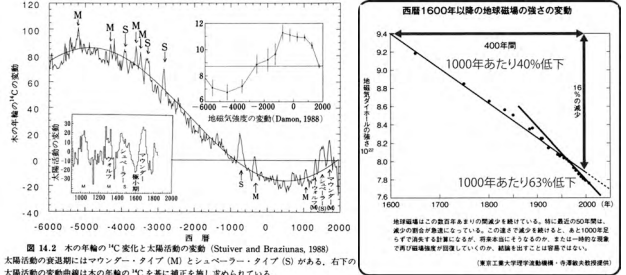


図 14.2 木の年輪の¹⁴C変化と太陽活動の変動 (Stuiver and Braziunas, 1988)
太陽活動の寒冷期にはマウンダー・タイプ (M) とシュベレー・タイプ (S) がある。右下の太陽活動の変動曲線は木の年輪の¹⁴Cを基に補正を施し求められている。

地磁気の逆転

"normal" (today)

"reversed"

地球の中心に棒磁石があるとすると、棒磁石の極性は数10万年に1回の割合で逆転する。これを反映して岩石や地層に残される地磁気水平成分の方向も逆転する。

地磁気逆転のプロセスについては良く理解されていない

地磁気逆転時には一時的に磁場が弱くなり、宇宙線照射量が激増し、生態系に大きな影響を与えるという説もある。しかし、地磁気逆転現象と大量絶滅の間には因果関係はない

地磁気層序学

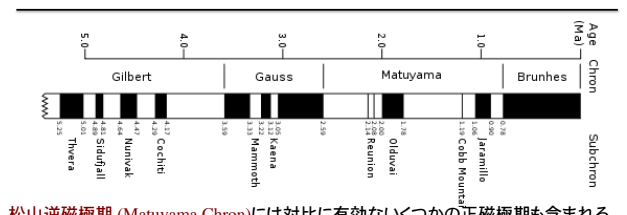
地磁気層序は他の年代層序と併用され、層序対比の信頼性を大きく高める

プレートテクトニクス (海洋底拡大説) の実証にもつながった

松山基範(1884~1958年)



1918年: 京都帝国大学大学院で博士学位取得
1922年: 同理工科大学地質学鉱物学第一講座(理論地質学講座)教授
1929年: 地球磁場の反転説を世界で初めて唱えた。世界の学界からはほぼ無視
1950年代: イギリスを中心として古地磁気学が大きく発展し、磁場反転は認められることとなった。これを初めて提唱した功績により、地質時代で最後の逆磁極期(249万~72万年前)は松山逆磁極期と名付けられた。ちなみに一つ古い時期はガウス正磁極期と呼ばれる。



松山逆磁極期 (Matuyama Chron)には対比に有効ないくつかの正磁極期も含まれる。

古地磁気層序(ジュラ紀以降)

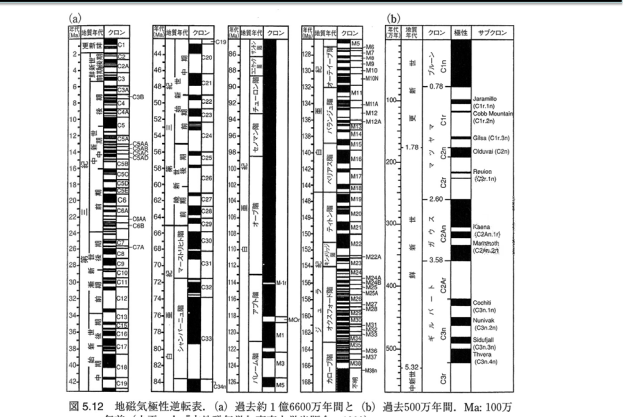


図 5.12 地磁気極性遷移表。(a) 過去約1億6600万年間と (b) 過去500万年間。Mn: 100万年前 (小玉一「古地磁気学」東京大学出版会, 1999)

化学層序とは

層序記録に残されている元素・同位体組成を用いて、層序対比やグローバルな環境変動を議論する層序学の新分野

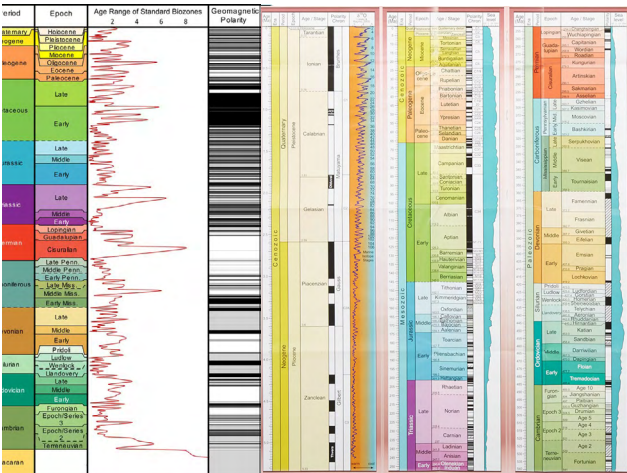
向いている
S³⁴同位体・炭素同位体・酸素同位体など

様々な元素で化学層序が試みられているが、何でも良いわけではない。

1. 堆積物の性質によって影響されない
2. 環境変動や環境条件の影響を受けやすい(滞留時間がある程度短い)
3. 均一になりやすい(滞留時間がある程度長い)
4. 海水の組成を反映している

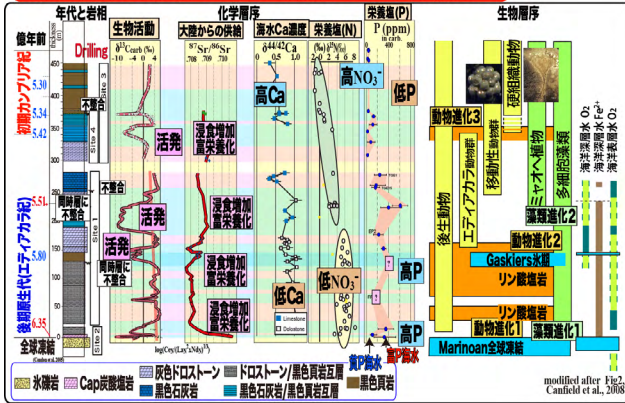
滞留時間 (Naを例にして) 海水中の総量=海水の総量×海水のNa⁺濃度
海洋の全体積: 1.37×10²¹L 海水のNa⁺濃度 = 1.37×10²¹ × 470×10⁻³ = 644×10¹⁸mol
河川水の年間流入量: 3.6×10¹⁶L/年 滞留時間 = 644×10¹⁸ ÷ (3.6×10¹⁶) = 78×10⁶年
1.37×10²¹ ÷ (3.6×10¹⁶) = 3.6×10⁴年

仮定: 海水中のNa⁺は主に河川水からくる
海水は定常状態にある
流入量=河川の流入量×河川のNa⁺濃度
= 3.6×10¹⁶ × 0.23×10⁻³ = 8.28×10¹³mol/年



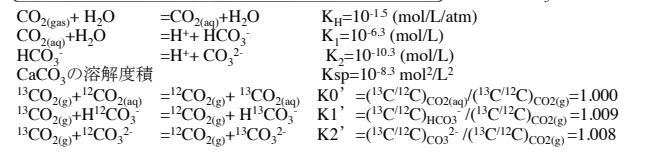
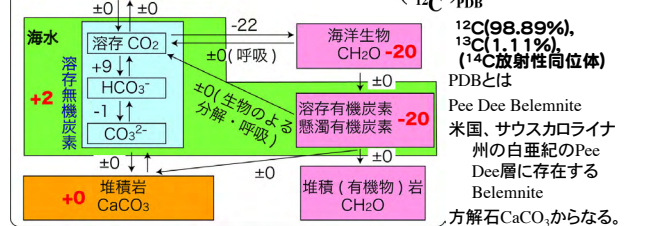
化学層序

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



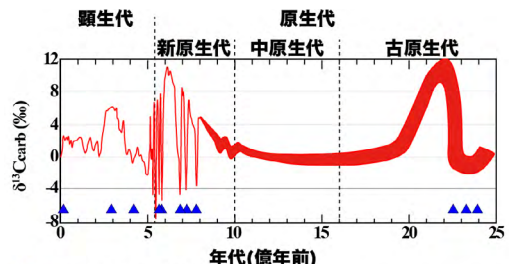
modified after Fig. 2 Canfield et al., 2008

$$\delta^{13}\text{C} = \left\{ \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{PDB}}} - 1 \right\} \times 1000 (\text{‰})$$



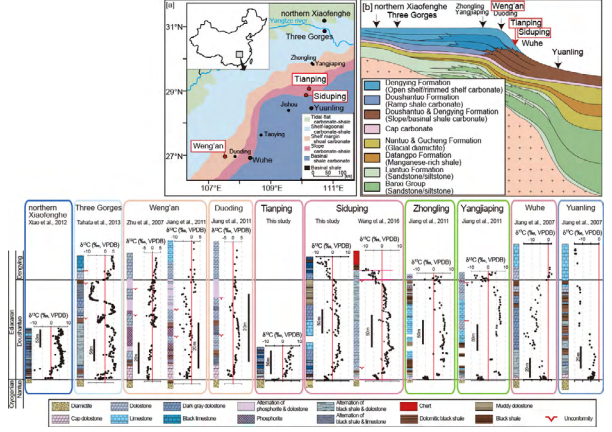
$^{12}\text{C} (98.89\%)$,
 $^{13}\text{C} (1.11\%)$
 $(^{14}\text{C}$ 放射性同位体)
 PDBとは
 Pee Dee Belemnite
 米国、サウスカロライナ
 州の白亜紀のPee
 Dee層に存在する
 Belemnite
 方解石 CaCO_3 による。

海水(炭酸塩)の炭素同位体比の歴史



- ▲ 氷河期または全球凍結
- ① 2500Maの正変動: 負の同位体比をもった生命起源の炭質物が埋没された。
→ O_2 と反応せずに埋没することになるので、大気中の O_2 の増加を引き起こす。
 - ② 原生代末の炭素同位体に負異常。
→ 全球凍結の直後: メタンハイドレートの分解や火山ガスの蓄積による。
 - ③ 原生代頃の炭素同位体の正への変動 → 生命活動による???
 - ④ 原生代-顕生代境界(540Ma)の負異常: 生命の絶滅による?

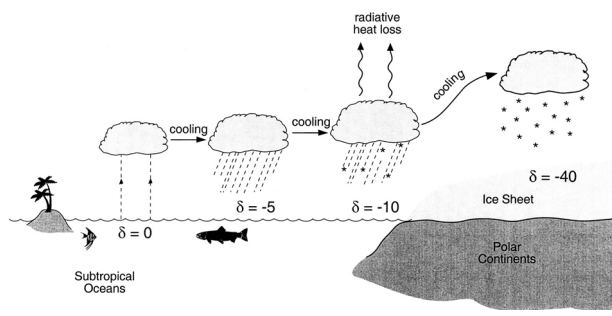
海水(炭酸塩)の炭素同位体比の対比による相対年代



酸素同位体

(1) 軽い同位体ほど蒸発などのときに、気体に濃集する。

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

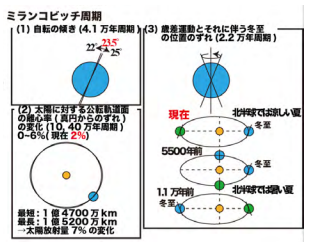


ミランコビッチ・サイクル

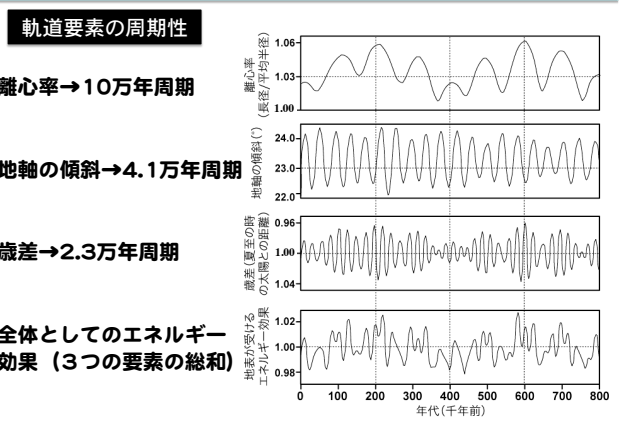
ミランコビッチ・サイクル(1920年)

ミランコビッチ (1879-1958)
 セルビアの地球物理学者
 地球の離心率、地軸の傾斜、歳差の周期的変動により地球が太陽から受け取るエネルギーが変化し、気候に影響を与えるという仮説

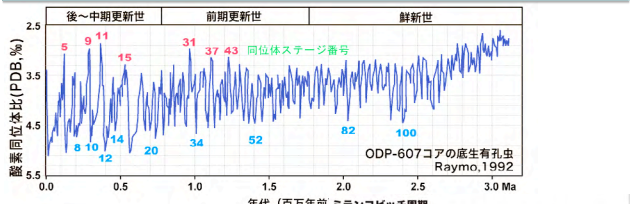
この仮説は長い間忘れ去られていたが、深海掘削で得られた試料から第四紀の周期的な気候変動が、ミランコビッチが示した周期性と良く合うことが示され、1980年代から気候変動に関連する地質学が急速に進歩した。



ミランコビッチサイクルの放射強制力への効果

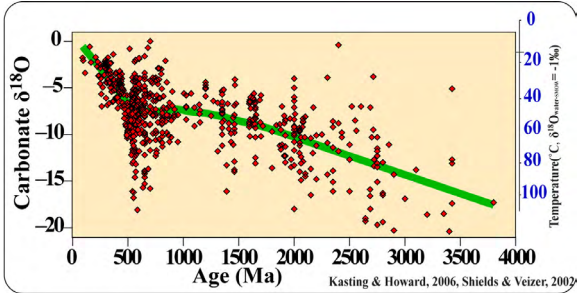


底生有孔虫δ18Oの変動とミランコビッチ・サイクル



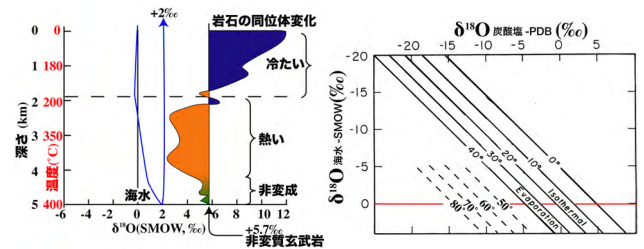
- ① 3つの軌道要素の総和曲線と酷似している(ミランコビッチ)
- ② 有孔虫の酸素同位体比(δ¹⁸O) 氷期→値が大きくなる 間氷期→値が小さくなる
- ③ 北半球が寒冷なモード: 氷期

Carbonateの酸素同位体と温度



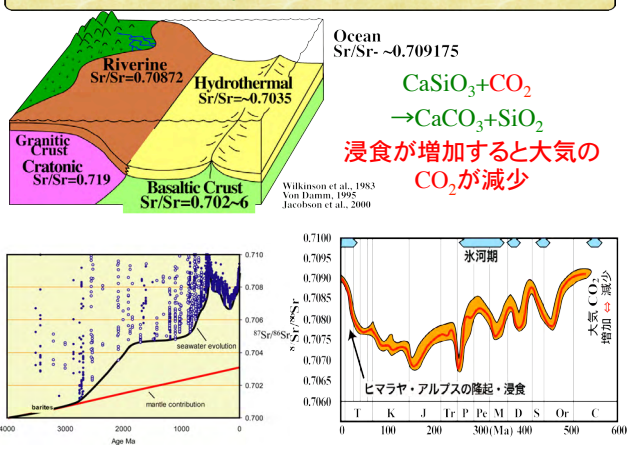
- (0) 昔は海水温が高かった?
 (1) 海水の酸素同位体の経年変化?
 (Veizer et al., 1999; Wallmann, 2001)
 ⇨ 海洋地殻の酸素同位体 (Muehlenbachs 1998 など)
 (2) 炭酸塩の二次的な酸素同位体移動

海水の酸素同位体比の経年変化?

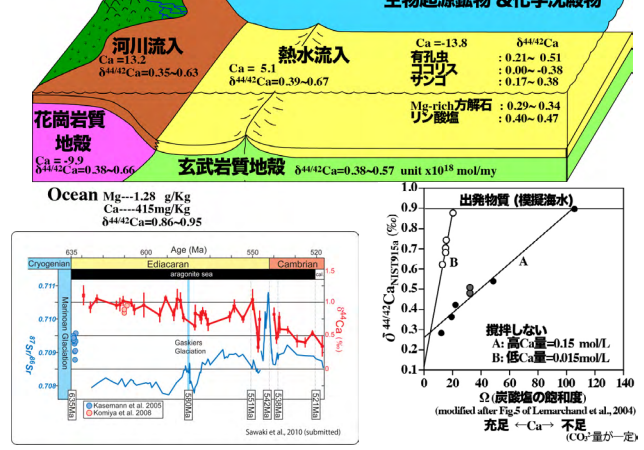


熱水場から現在よりも低い同位体比を持つ大量の熱水が噴出、海水の同位体比をより低く。
 ← マントルの温度が高いため、熱い玄武岩地殻が中央海嶺で形成されたから

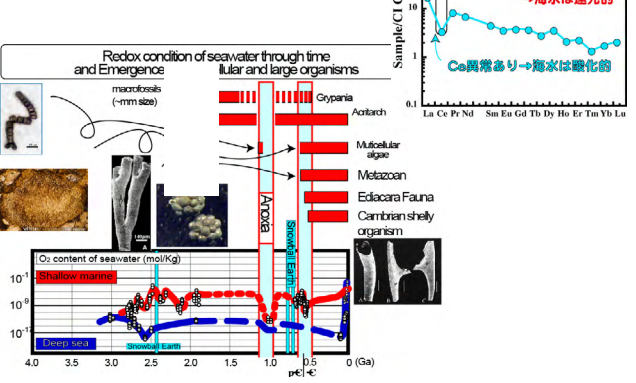
海水のSr同位体進化



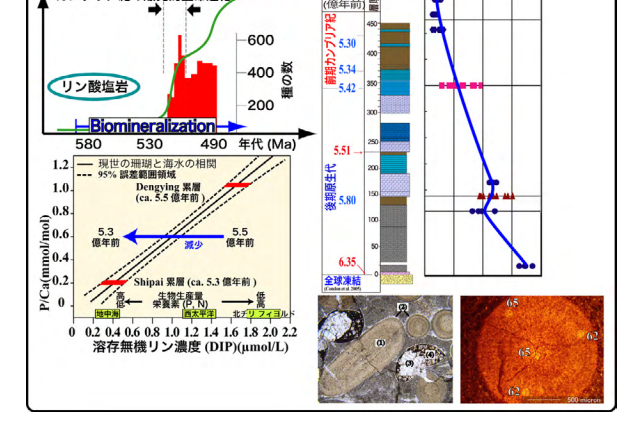
Ca同位体と分別プロセス



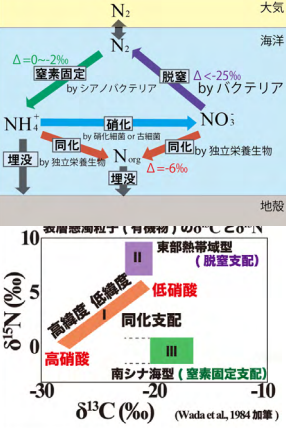
海水が酸化的だと、負のCe異常



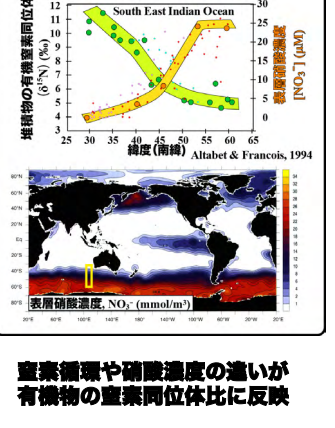
カンブリア紀の爆発的生命進化



窒素同位体比による分類



堆積物の有機窒素同位体(δ15N)と表層海水の硝酸濃度の相関



動物出現・進化の3ステップ新仮説

