

◆サブシステム間の物質循環：炭素循環

炭素のリザーバー

無機炭素 ●

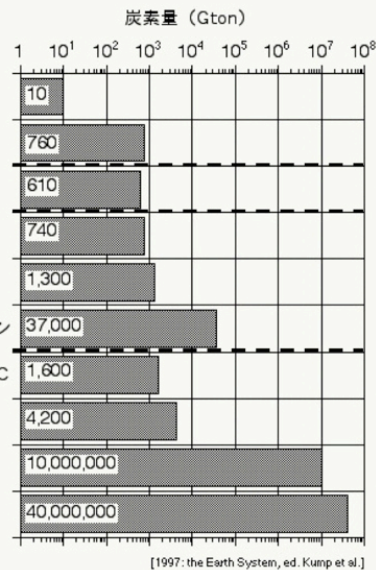
CO₂
CO₃²⁻, HCO₃²⁻
CaCO₃,
CaMg(CO₃)₂

有機炭素 ○

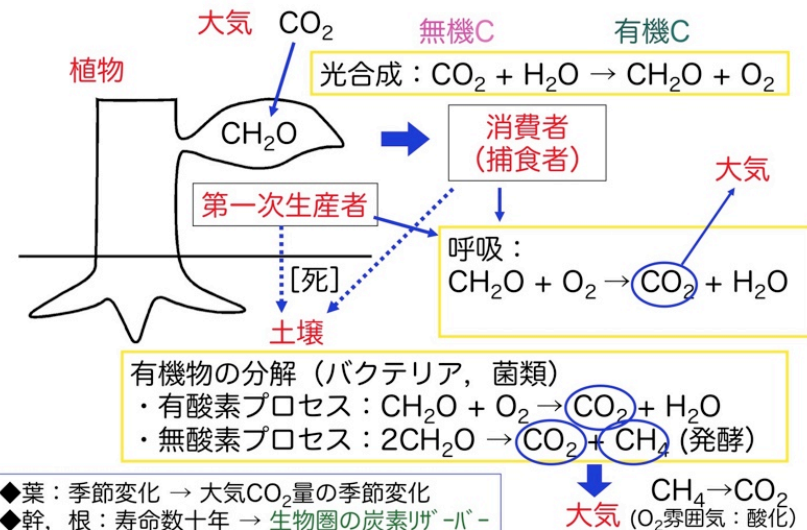
C-C, C-Hの結合
有機物：CH₂O
CH₄

[炭素リザーバー]

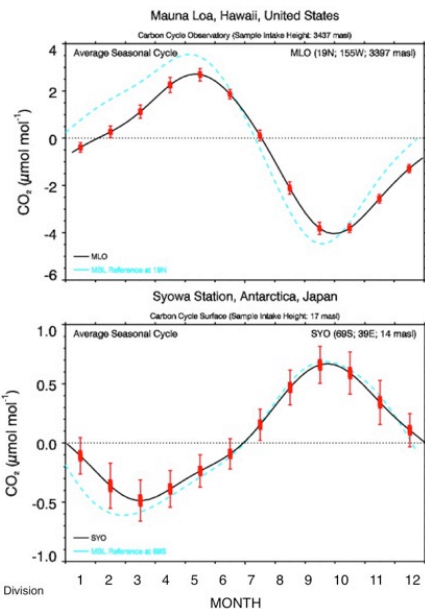
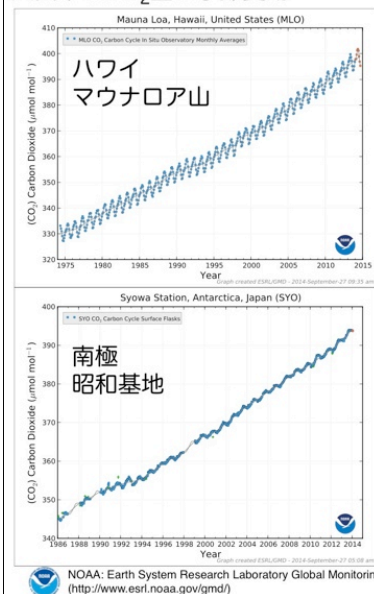
- 気圏
 - 大気：CH₄
 - 大気：CO₂
 - 生物（バイオマス）
- 水圏
 - 海水：溶解 H₂CO₃
 - 海水：炭酸塩イオン CO₃²⁻
 - 海水：炭酸水素イオン HCO₃⁻
- 岩圏
 - 土壌・堆積物：有機C
 - 化石燃料
 - 堆積岩：有機C
 - 堆積岩：石灰岩 CaCO₃, CaMg(CO₃)₂



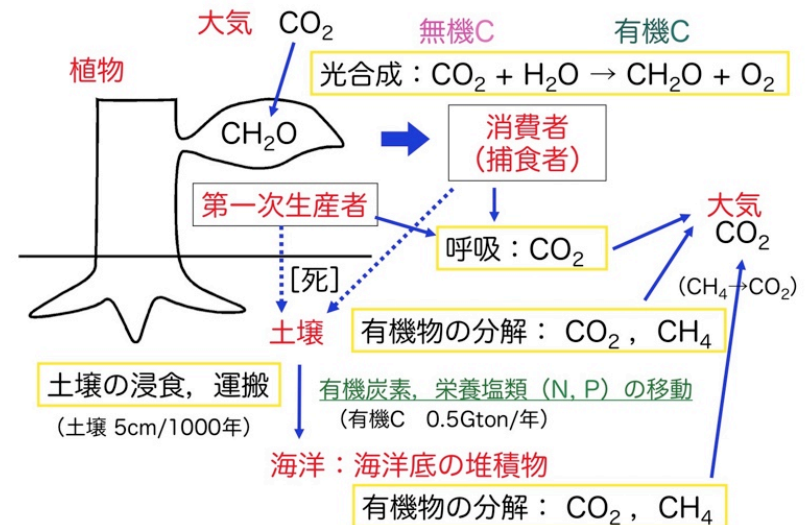
有機炭素の循環：陸上



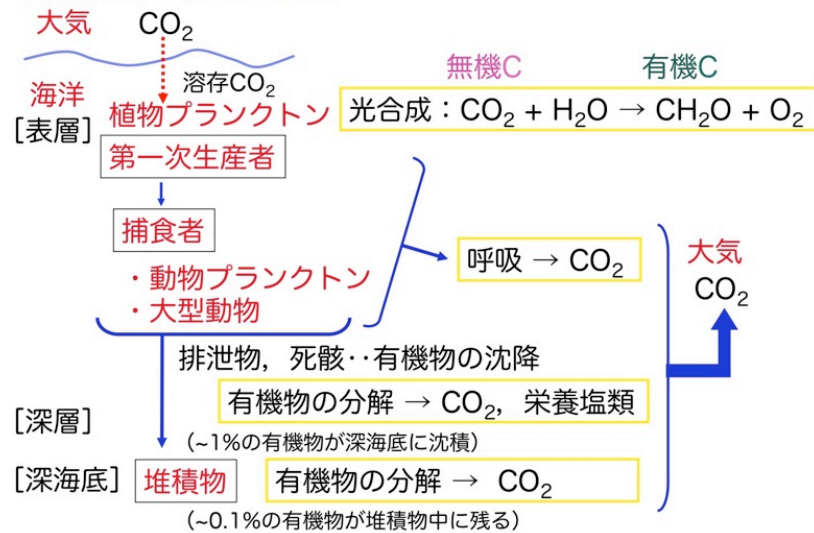
大気中のCO₂量の季節変動



有機炭素の循環：陸上



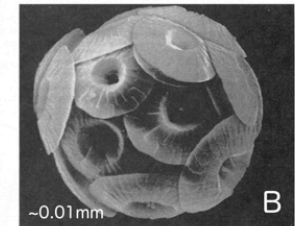
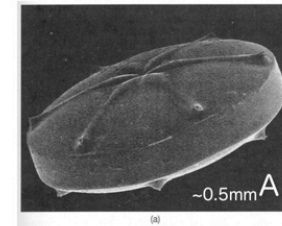
有機炭素の循環：海洋



プランクトン

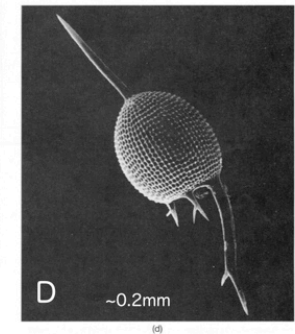
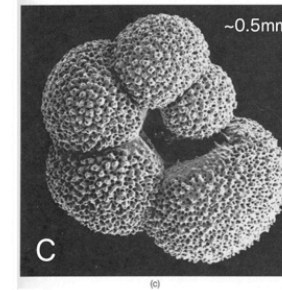
植物プランクトン

- A. 珪藻 (SiO_2 の殻)
B. ココリス (CaCO_3 の殻)



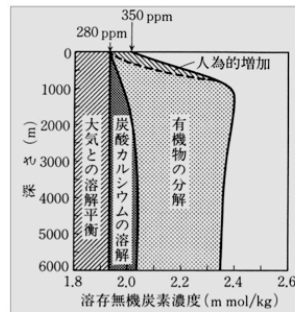
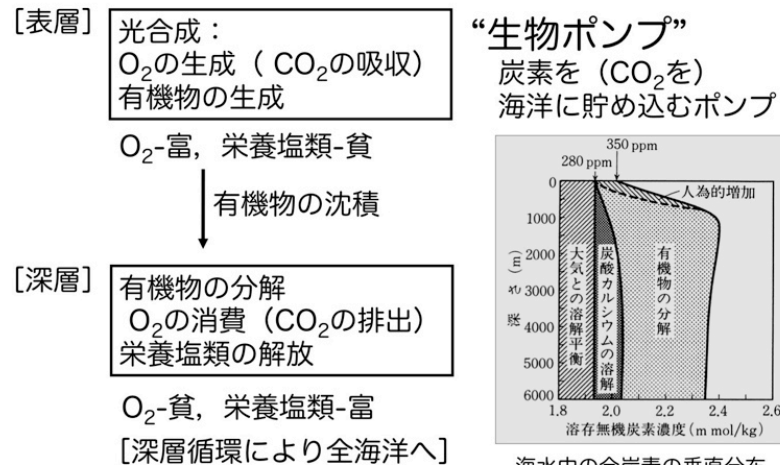
動物プランクトン

- C. 有孔虫 (CaCO_3 の殻)
D. 放射虫 (SiO_2 の殻)



(Kump et. al., The Earth System, 1999)

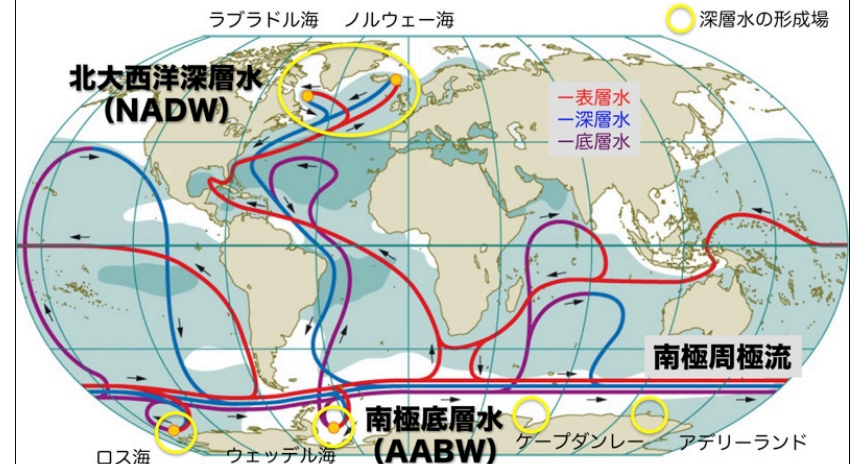
海洋での有機炭素の循環における生物作用



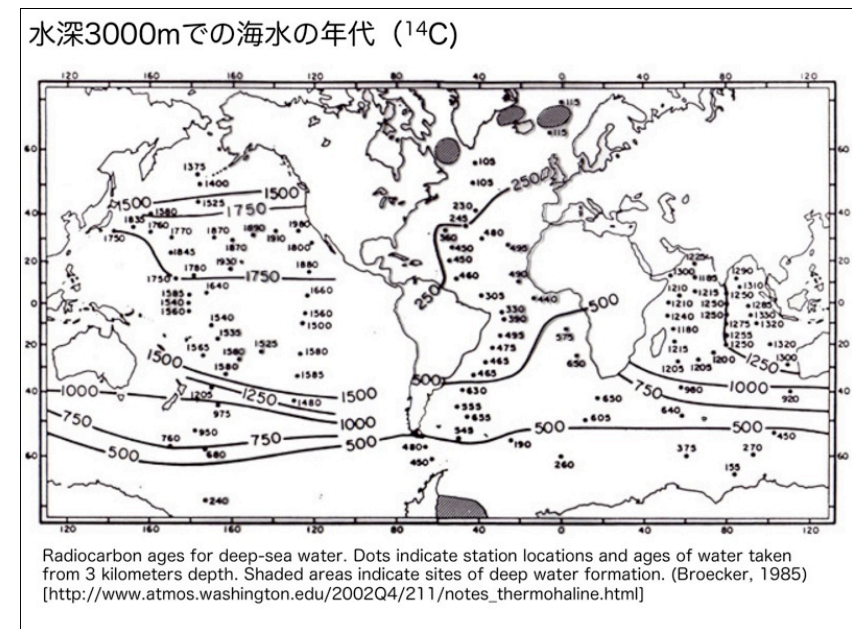
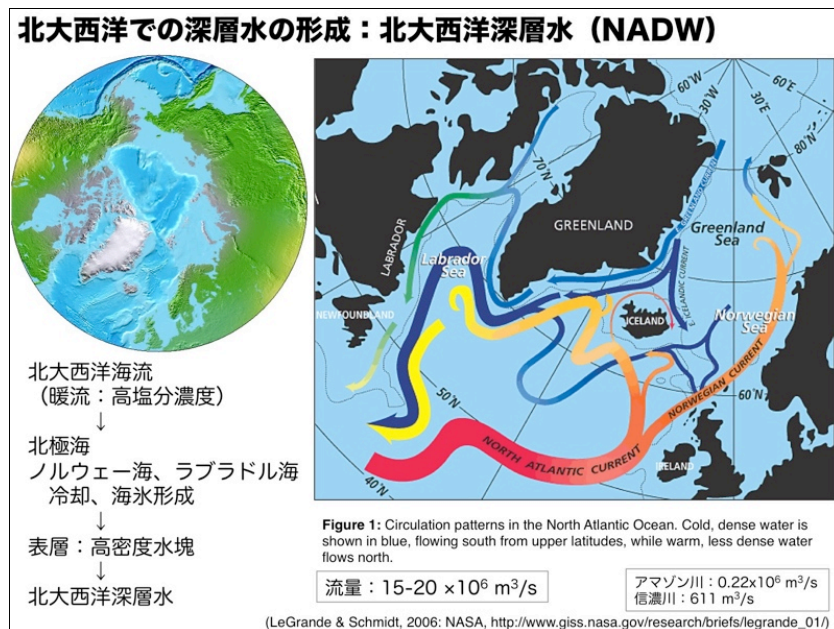
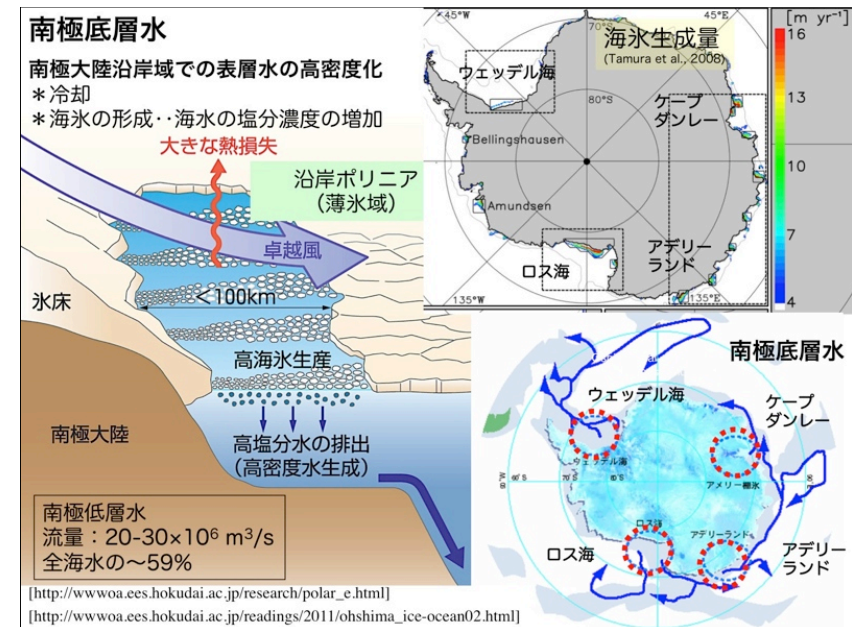
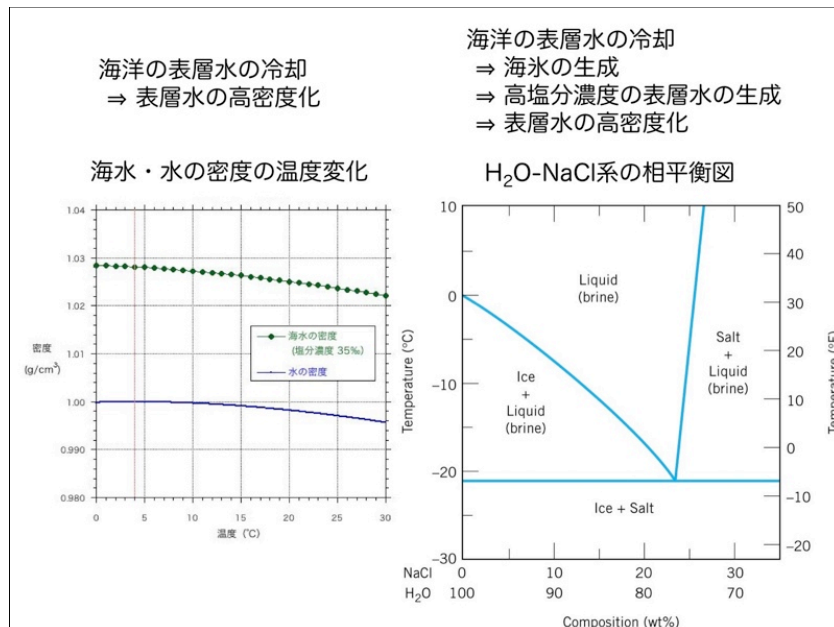
海水中の全炭素の垂直分布
(野崎, 1994; 岩波講座地球惑星科学3, 1996)

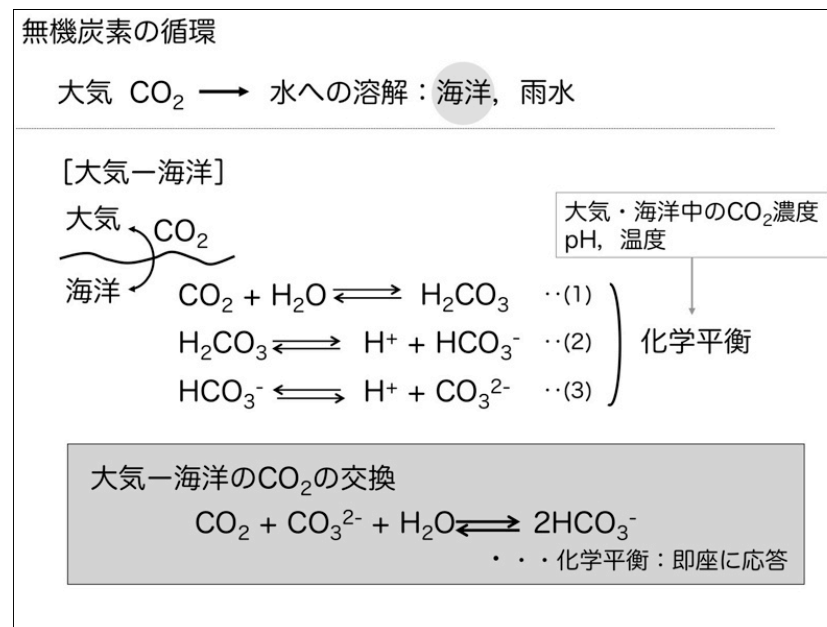
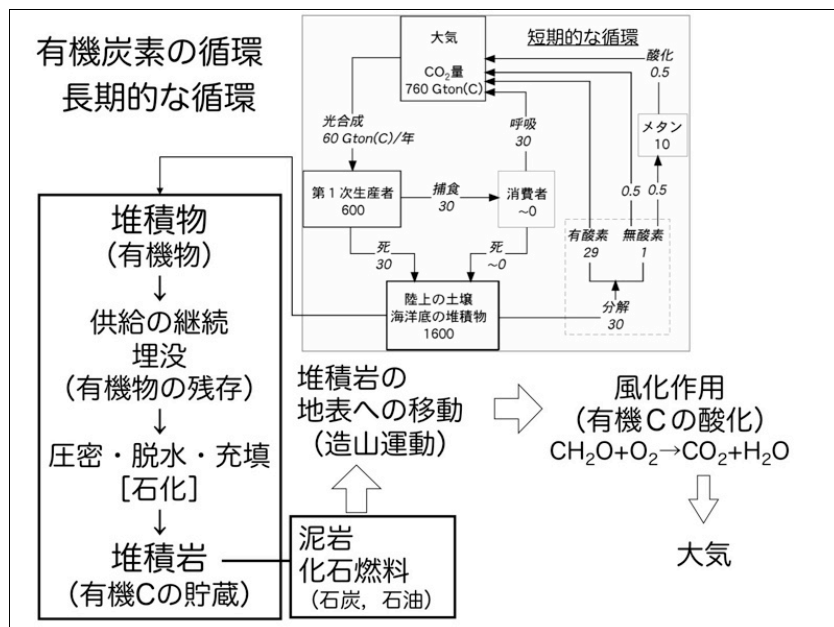
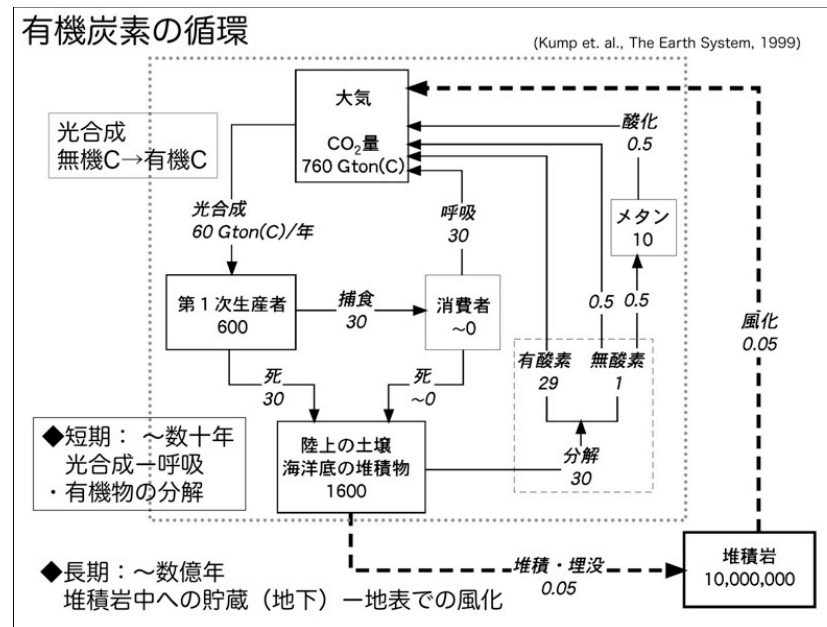
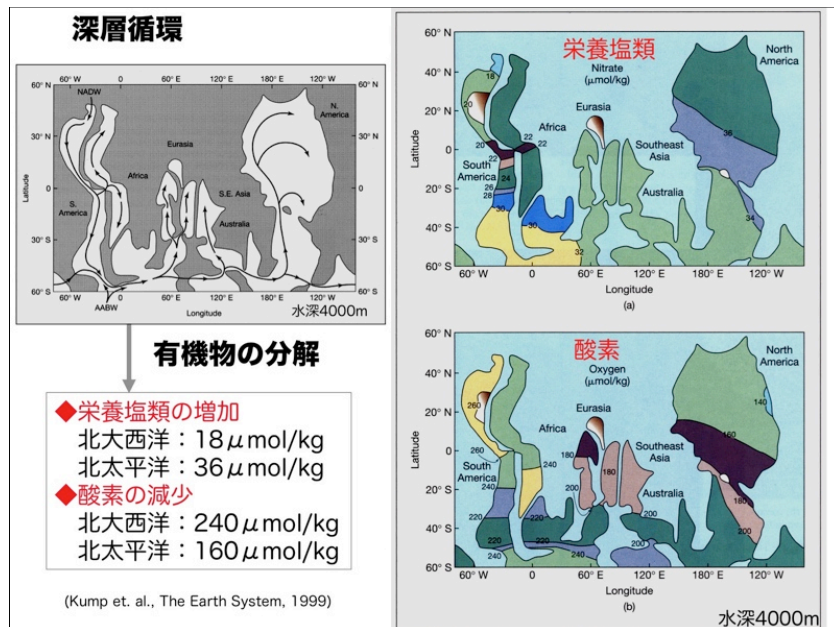
海洋深層循環 (熱塩循環)

表層水: 冷却と海水形成 (塩分濃度増) により高密度化
 $\rightarrow$ 沈降して, 深層水となり全海洋に。約2000年の循環



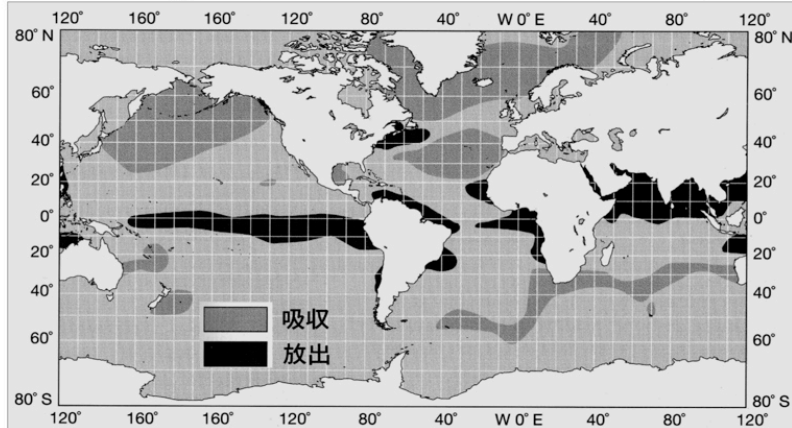
[<http://worldoceanreview.com/en/wor-1/climate-system/great-ocean-currents/>]





海洋でのCO₂の吸収・放出

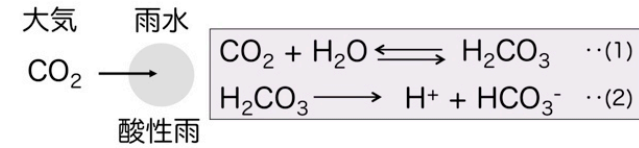
(Kump et. al., The Earth System, 1999)



CO₂吸収：北大西洋・北太平洋・・・第一次生産量大（活発な光合成＝貧CO₂）
CO₂放出：赤道域，大陸西岸・・・湧昇流（富CO₂の深層水の湧昇）

無機炭素の循環

大気 CO₂ → 水への溶解：海洋，雨水



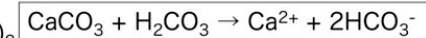
地表（地殻）・・・化学的風化

◆炭酸塩鉱物（CO₃²⁻）

カルサイト CaCO₃

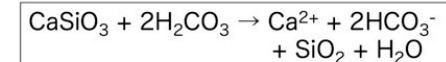
ドロマイト CaMg(CO₃)₂

〔岩石＝石灰岩〕



◆珪酸塩鉱物（Si-O）

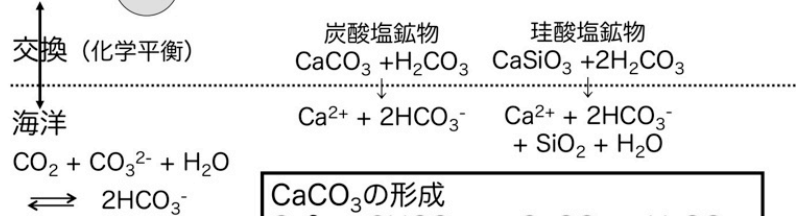
CaSiO₃ ウォラストナイト



無機炭素の循環

大気 雨水

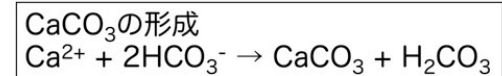
CO₂ → 酸性雨 → 地表（地殻）化学的風化



- ・化学的作用（沈殿・析出）
- ・生物活動：CaCO₃の殻・骨格を形成する生物
熱帯域・・・サンゴ
海洋表層・・・プランクトン（有孔虫，コッコリス）
〔SiO₂・・・生物により固定化（放散虫，珪藻，・・・）〕

無機炭素の循環

海洋〔表層〕



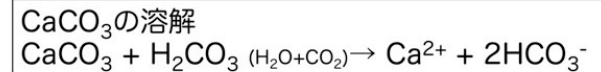
・生物作用：CaCO₃の殻・骨格を形成する生物

死 → 遺骸（CaCO₃の殻・骨格）

沈降 ↓

〔深層〕

富CO₂
（有機物の分解）



溶け残り

すべて溶解

〔海洋底〕

炭酸カルシウム
補償深度
（CCD）

CaCO₃の堆積

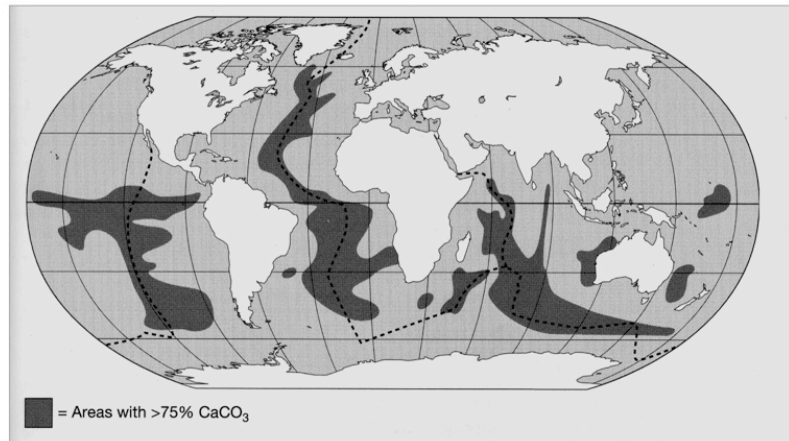
プレート
運動

CaCO₃の無堆積

CaCO₃の堆積物の溶解

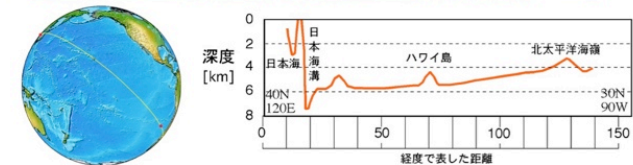
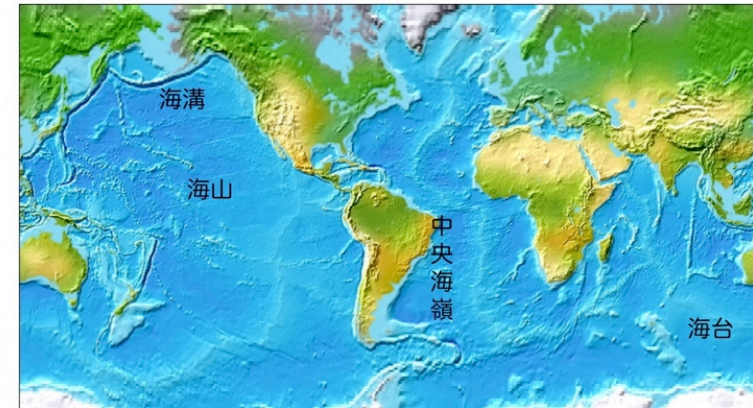
～ 4000 m

海洋底のCaCO₃に富む堆積物の分布



(Kump et. al., The Earth System, 1999)

海洋底の構造



炭酸塩鉱物・珪酸塩鉱物の風化と大気CO₂の固定

◆大気-海洋・雨水： $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$

◆炭酸塩鉱物

風化： $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

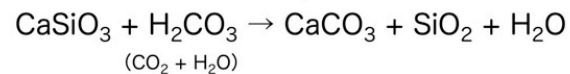
海洋： $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$ (炭酸塩鉱物の形成)

大気・海洋中CO₂量に影響なし

◆珪酸塩鉱物

風化： $\text{CaSiO}_3 + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

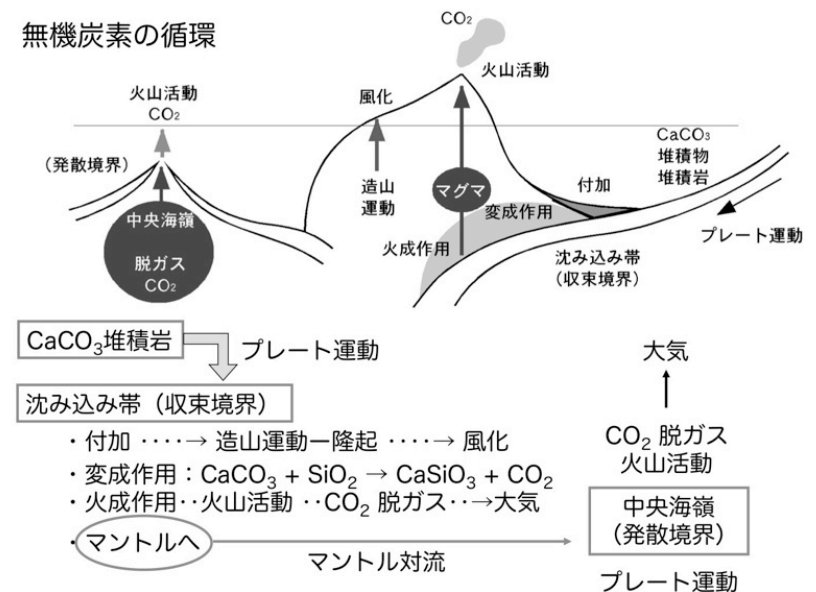
海洋： $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$ (炭酸塩鉱物の形成)



★ $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$

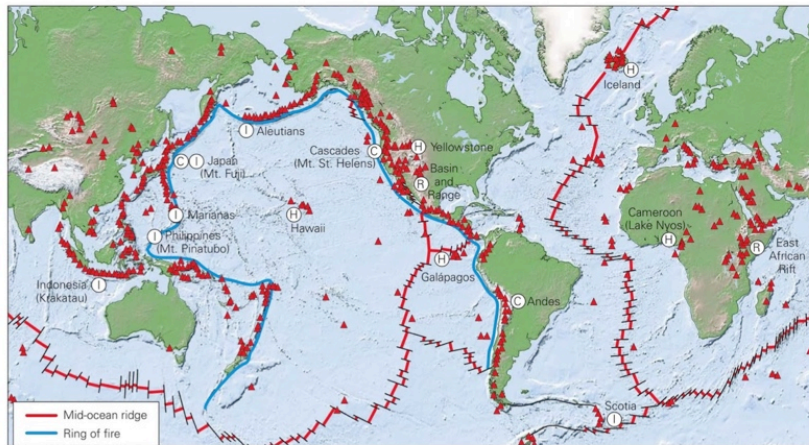
珪酸塩鉱物の風化 → 大気CO₂の固定 (大気からの除去)
0.03 Gton/年

無機炭素の循環



火山の分布：中央海嶺，沈み込み帯，ホットスポット

<http://geologylearn.blogspot.jp/2016/03/relation-of-volcanism-to-plate-tectonics.html>

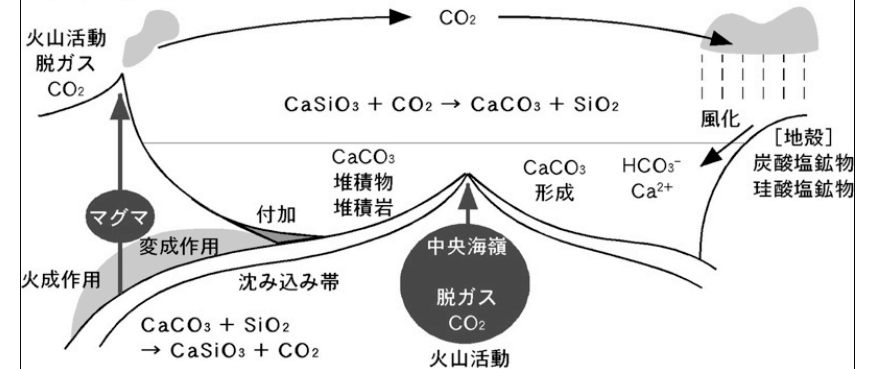


◆火山ガス（陸上：Stoiber, 1995）
 水蒸気：715 (10⁹kg/年)
 二酸化炭素：65
 二酸化硫黄：19, 塩化水素：3, フッ化水素：0.9

◆マグマ噴出量 (Crips, 1984) :
 中央海嶺：21 [km³/年]
 沈み込み帯：2.9~8.6
 ホットスポット：1.9~4.0

無機炭素の循環

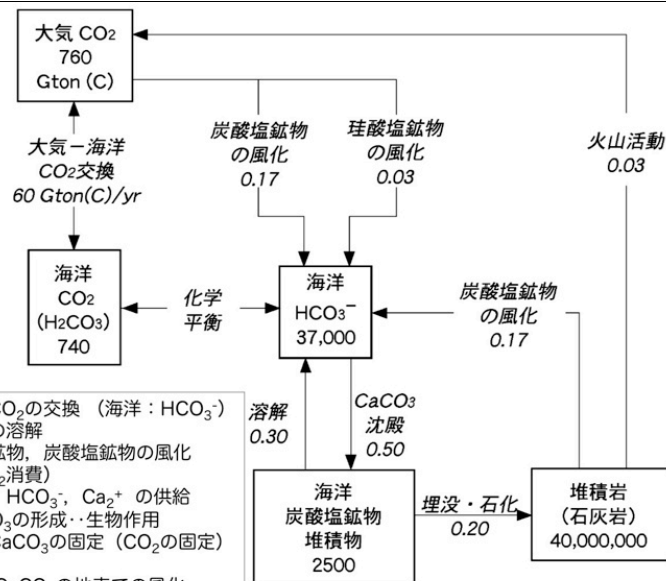
固体地球の関与



炭酸塩—珪酸塩の地球化学的循環

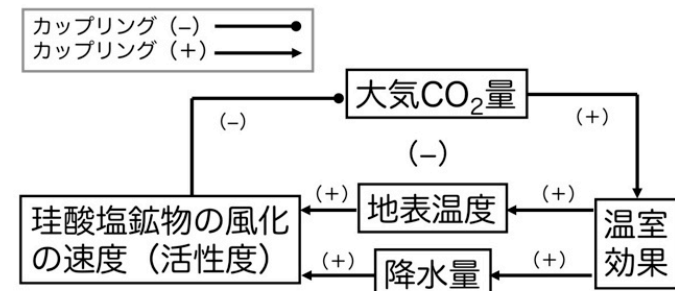
プレート運動が寄与

無機炭素の循環



- ・大気—海洋：CO₂の交換（海洋：HCO₃⁻）
- ・雨水へのCO₂の溶解
 - 珪酸塩鉱物，炭酸塩鉱物の風化（大気CO₂消費）
 - 海洋へ HCO₃⁻，Ca₂⁺ の供給
- ・海洋で，CaCO₃の形成・生物作用
- ・堆積物としてCaCO₃の固定（CO₂の固定）
- ・プレート運動
 - 造山運動→ CaCO₃の地表での風化
 - 火山活動→ CO₂の脱ガス（大気へ）

「珪酸塩鉱物の風化—大気CO₂量」に関わる相互作用（カップリング）・フィードバックループ



負のフィードバックループ