



全地球凍結イベント

～地球環境の特異な変動現象～

田近 英一

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

†:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

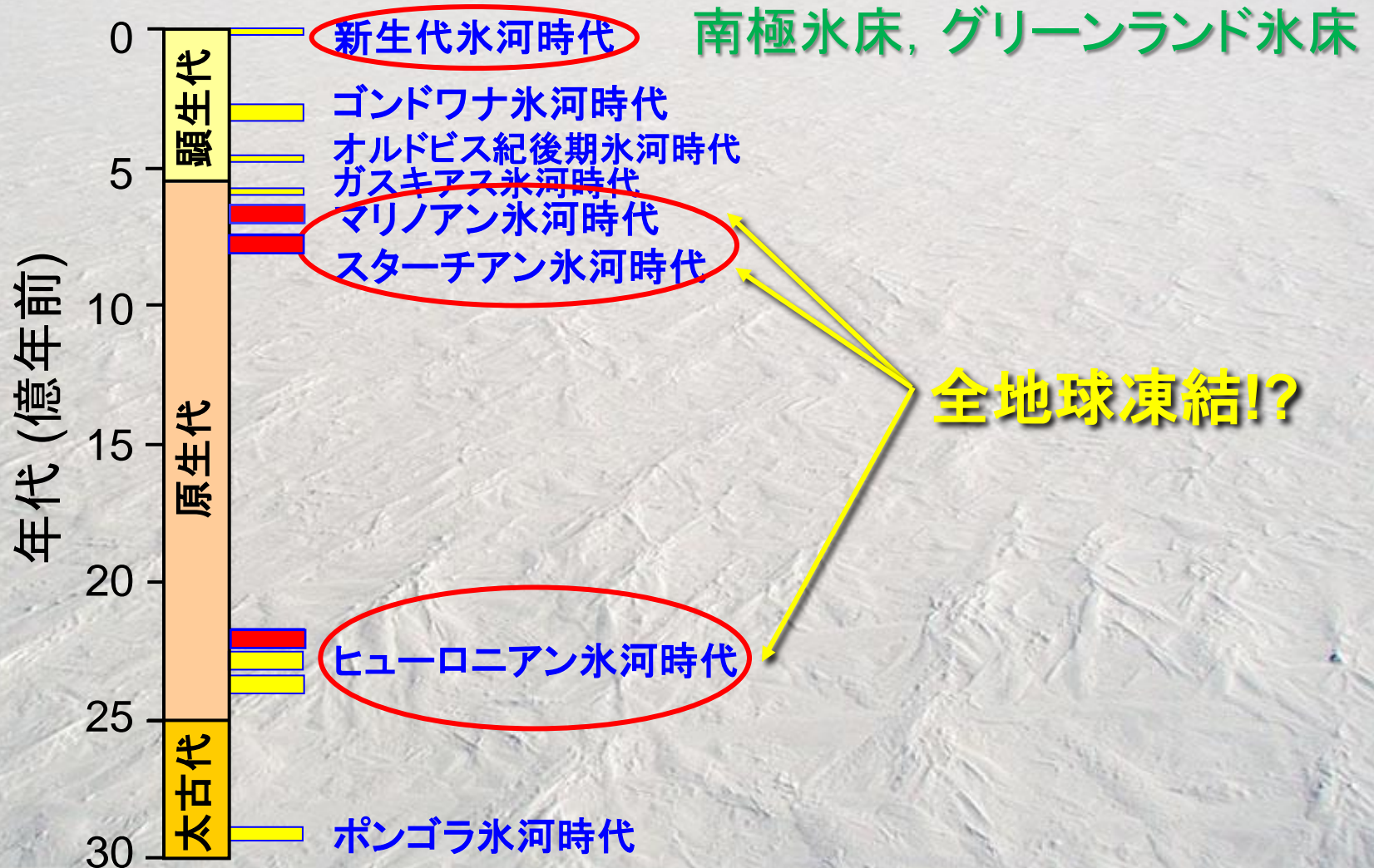
1. 地球史における氷河時代

氷河時代とは？

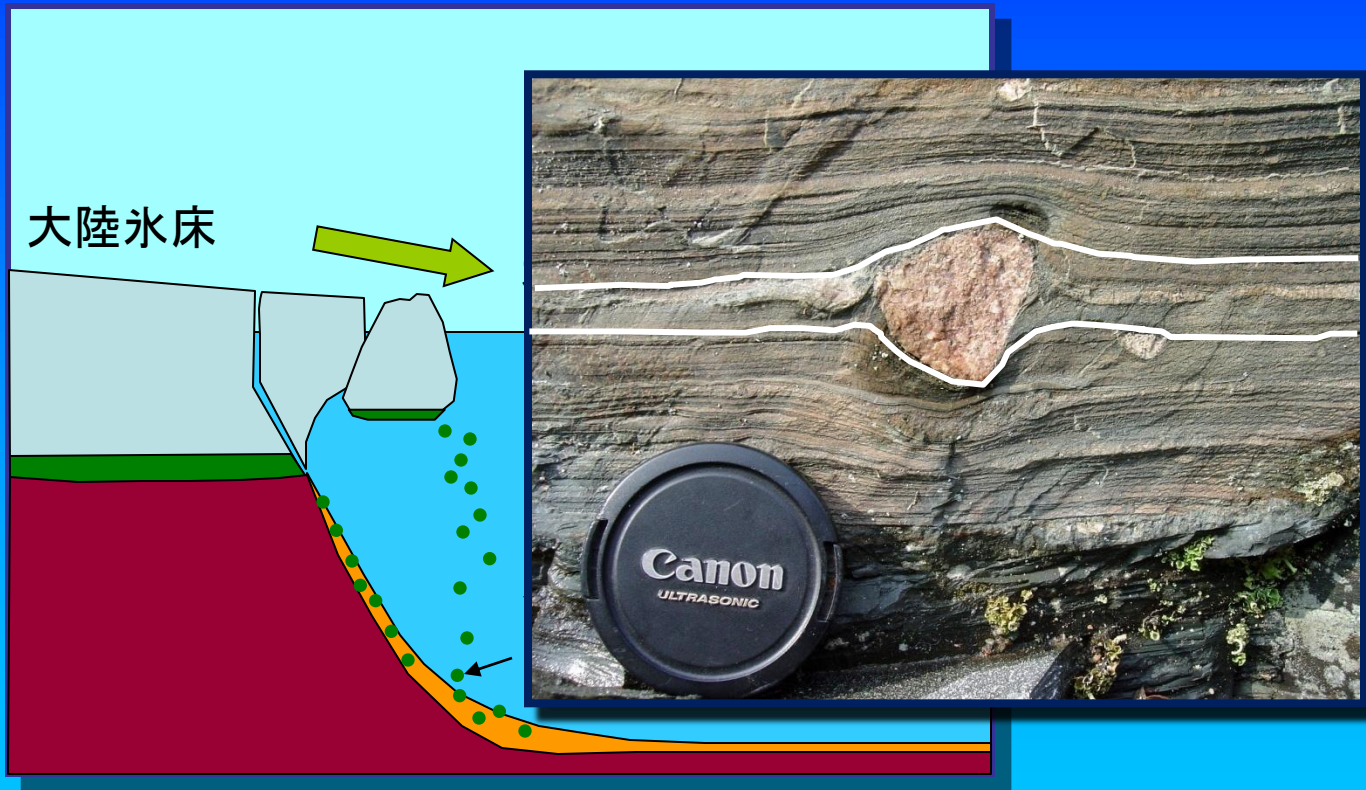
= **氷床** (大陸氷床, 大陸氷河) が存在する時代

* **氷床**とは, 氷河の形態のひとつで, 基盤の地形に影響されずに氷河自身が形態を作る大規模なもの

地球史における氷河時代



大陸氷床の証拠 “ドロップストーン”



* 氷床の流動によって削り取られた岩石が、
氷山によって沖合まで運ばれたもの

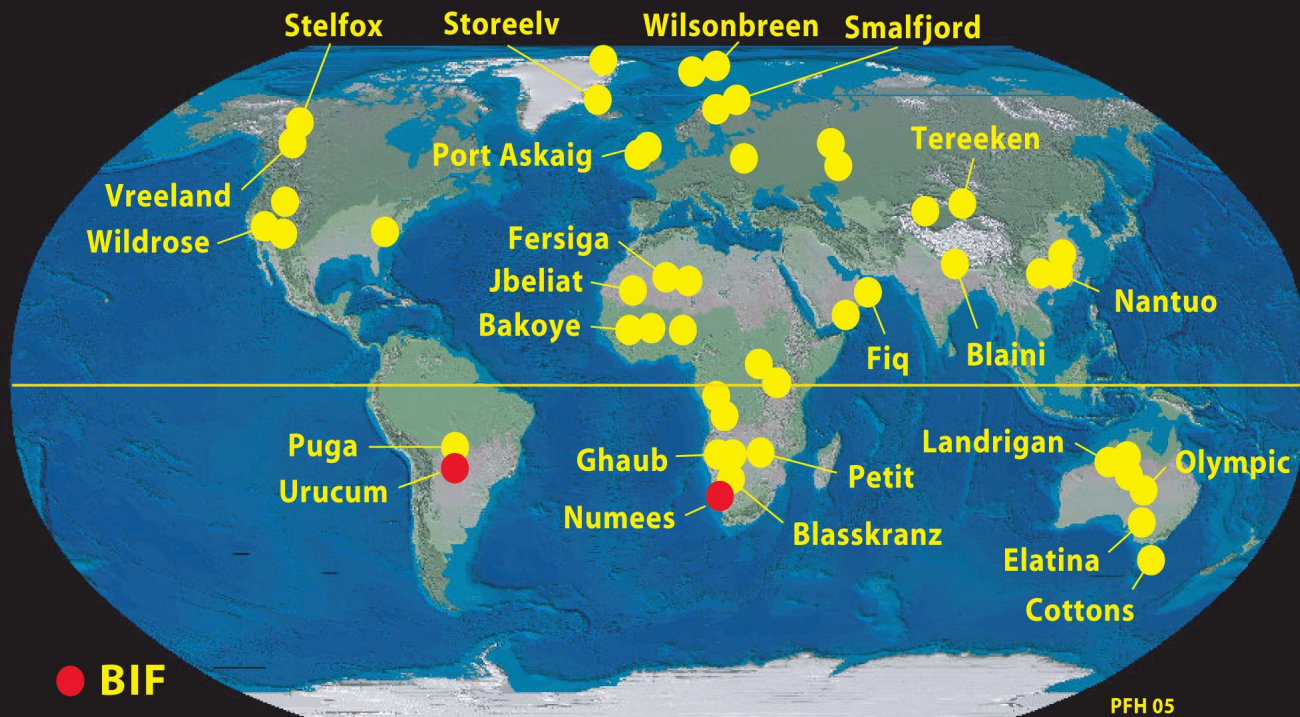
大陸氷床の証拠 “ダイアミクタイト”



ヒューロニアン累層群ゴウガンダ層 (カナダ・オンタリオ州)

2. 原生代後期氷河時代の謎

原生代後期(約6億5000万年前)の氷河作用の痕跡

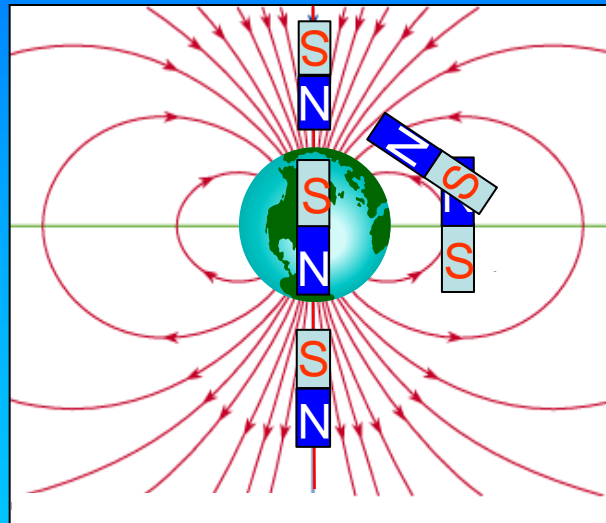


‡ [<http://www.snowballearth.org/>]

* 汎世界的に氷河堆積物が分布している!

古地磁気学による“古緯度”の推定

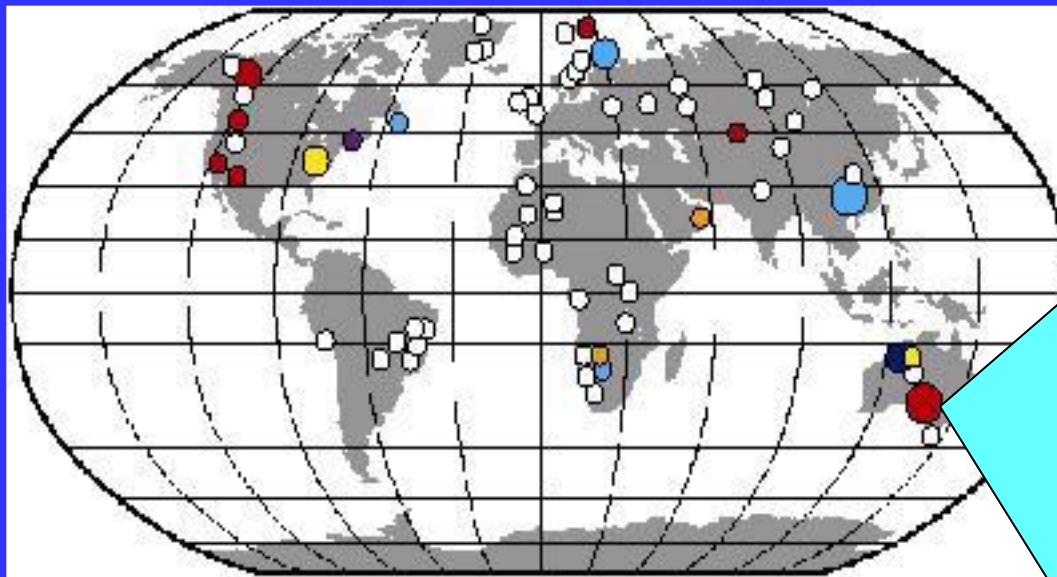
- 地球磁場の方向は緯度によって異なる
 - ・赤道では地面と平行
 - ・磁極では地面と垂直方向
- 岩石は、形成時の地球磁場の方向を記録している



→ 岩石試料に記録された地磁気の方角を測定し、その傾きから**当時の緯度(古緯度)**を推定できる！

原生代後期の氷河時代の謎 (1) 低緯度に大陸氷床が存在

約6億5000万年前

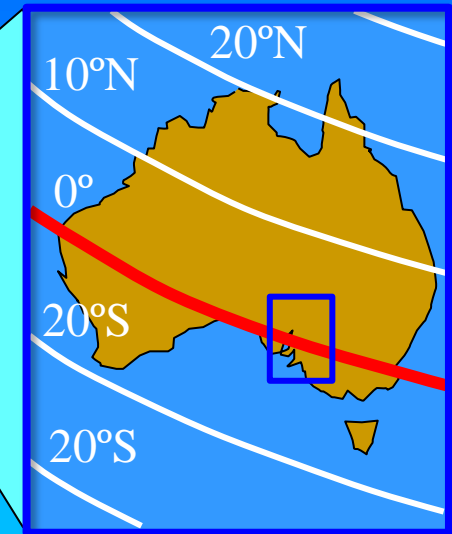


● 00-10° ● 10-20° ● 20-30° ● 30-40° ● 40-50° ● 50-60° ○ no data

● 非常に信頼できる ● ほぼ信頼できる ● まあ信頼できる

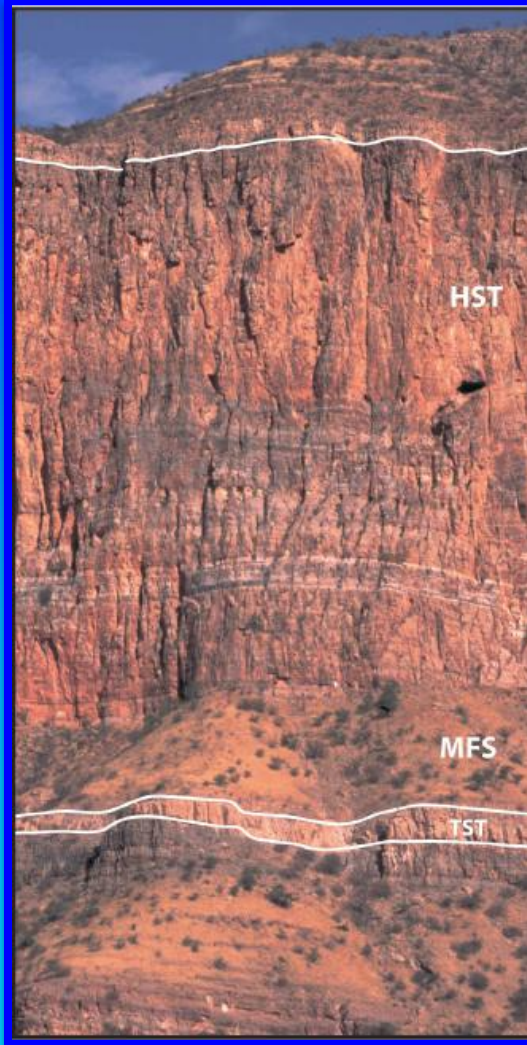
*** 当時の各場所の緯度を推定した結果**

[Evans (2000) Am. J. Sci., 300, 347-433. に基づく]



*** 当時の赤道域に大陸氷床が存在していた!**
(約6億5000万年前, 約7億年前, 約22億年前)

原生代後期の氷河時代の謎 (2) “謎”のキャップカーボネート



原生代後期(約6億5000万年前, ナミビア)

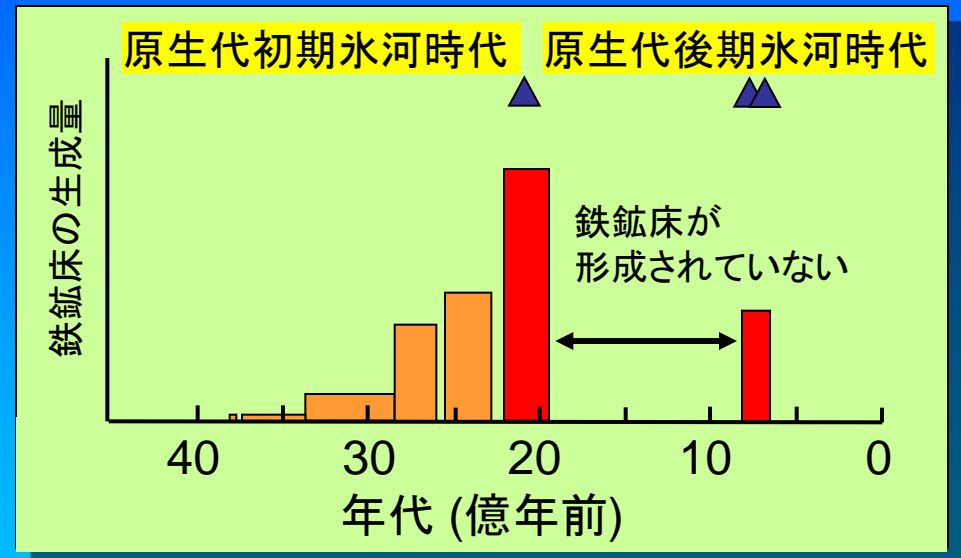
キャップカーボネート
(炭酸塩岩)
熱帯環境

氷河堆積物
極域環境

原生代後期の氷河時代の謎 (3) 縞状鉄鉱床の形成



‡ [http://www.snowballearth.org/ より]



[Kirschvink et al. (2000) PNAS, 97, 1400-1405. に基づく]

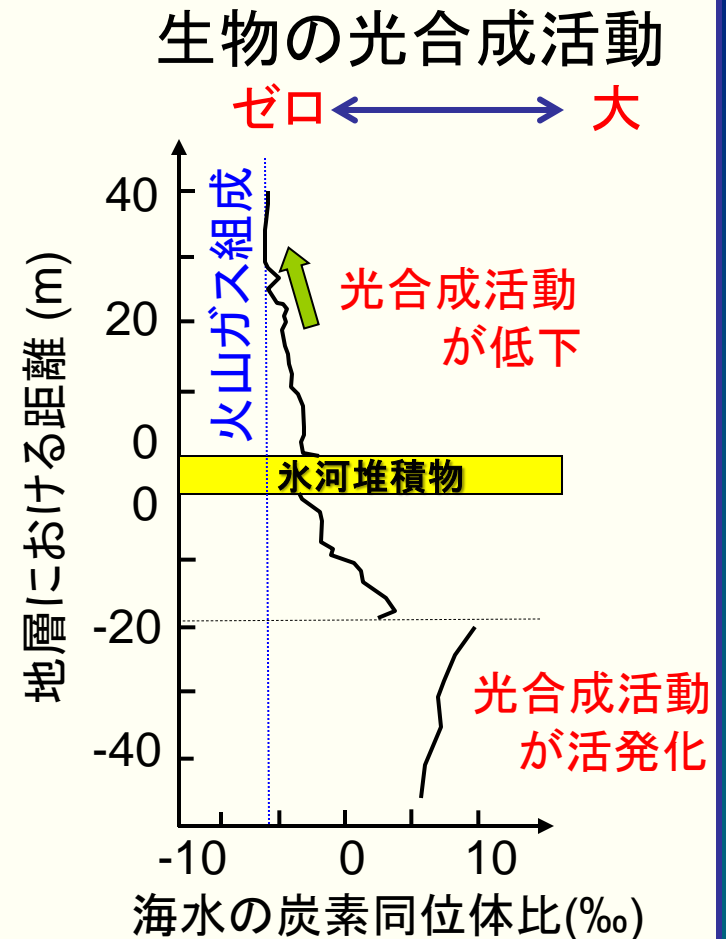
* 約10億年ぶりに縞状鉄鉱床が形成されている!?

原生代後期の氷河時代の謎 (4) 生物活動が完全に停止？

- 海水の炭素同位体比の低下
 - 光合成活動の低下
 - 光合成活動が完全に停止!?

* 炭素同位体比の変化

- 光合成の際，生物は軽い炭素(^{12}C)をより多く固定する
- 海水には重い炭素(^{13}C)が多くなる
 - 生物活動によって，海水の炭素の同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)が変化する



“スノーボールアース”(全地球凍結)仮説

■ 原生代後期の氷河時代の特徴

- (1) 赤道域にまで氷床が発達
- (2) 氷河性堆積物直上に熱帯性の炭酸塩岩
(キャップカーボネート)
- (3) 縞状鉄鉱床が形成
- (4) 光合成活動の停止(炭素同位体比の負異常)

■ 仮説

★ 当時, 地球の表面全体が氷に覆われていた!?

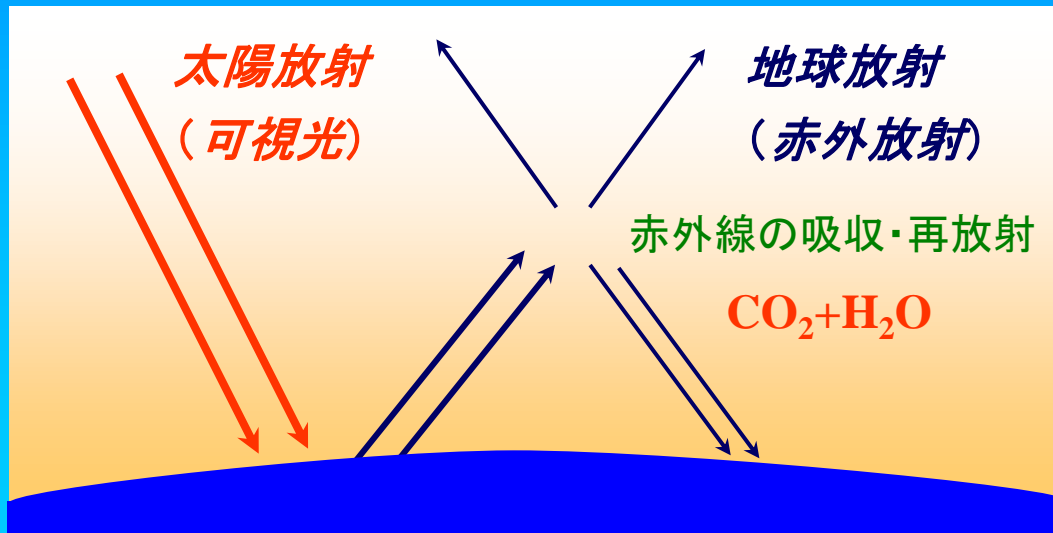
“スノーボールアース”(全地球凍結)仮説

1992年 ジョセフ・カーシュビnk教授 (米国・カリフォルニア工科大学)

1998年 ポール・ホフマン教授 (米国・ハーバード大学)

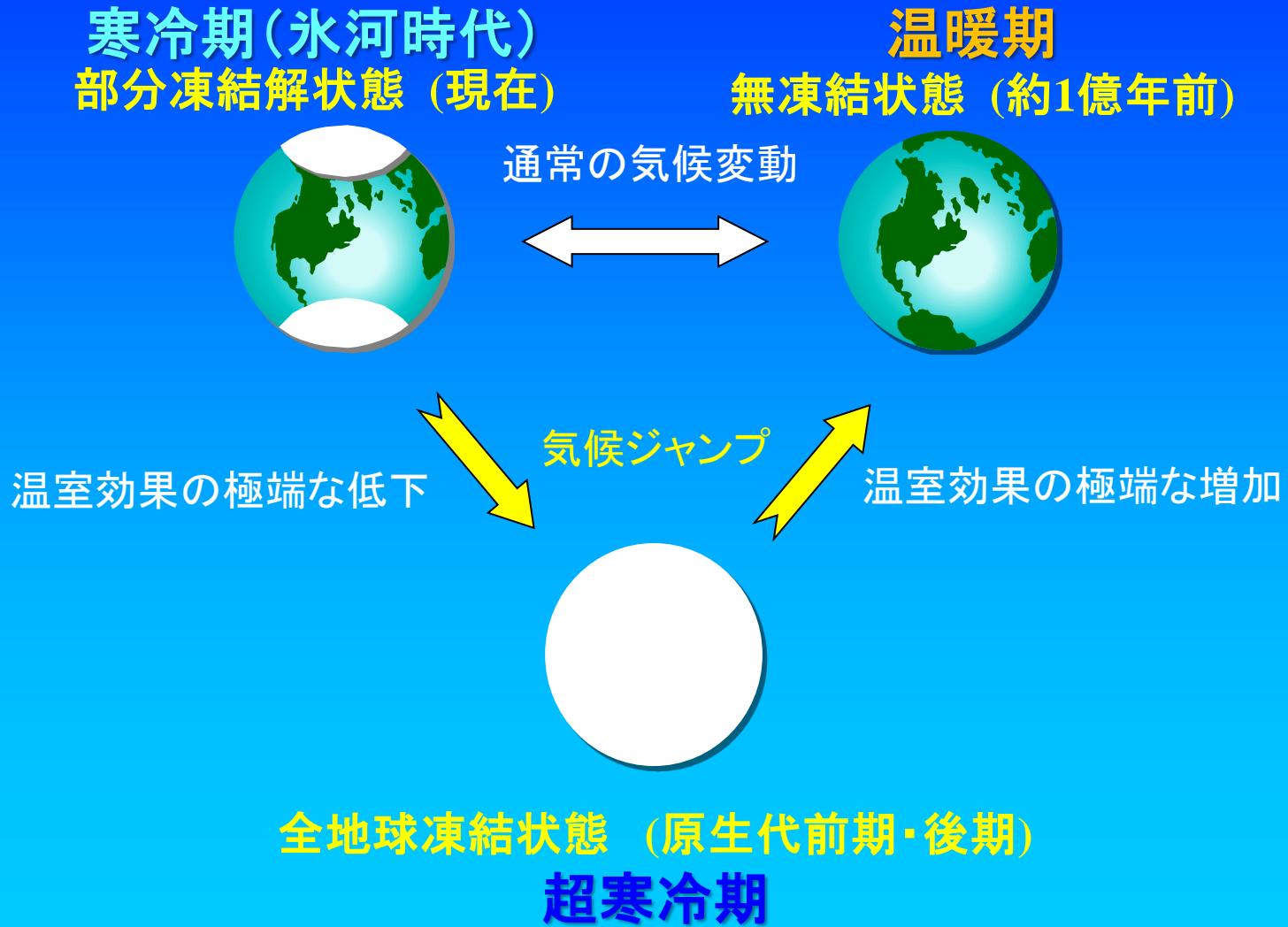
3. 全地球凍結仮説

地球のエネルギー収支

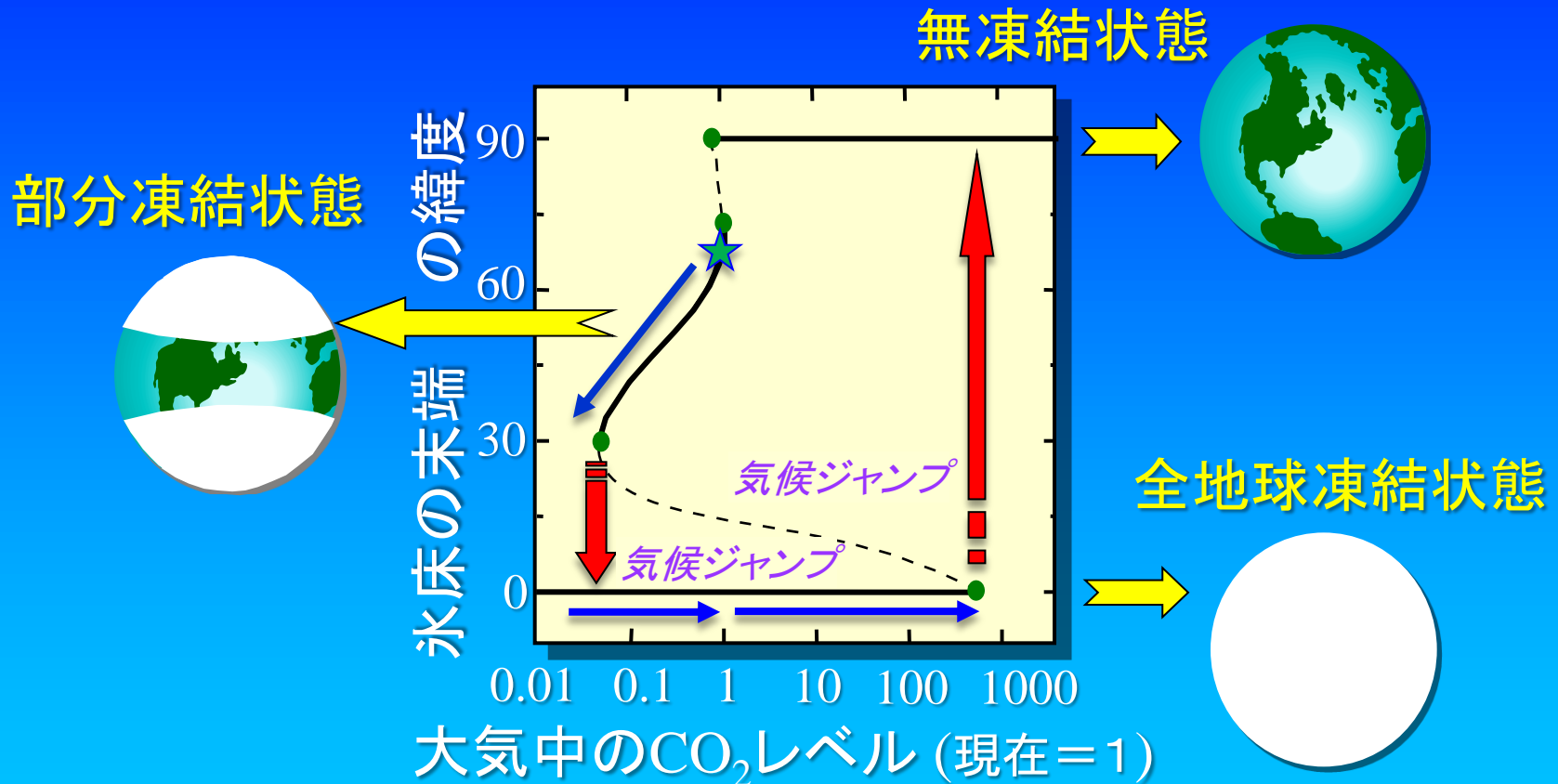


温室効果

地球環境システムの3つの安定状態



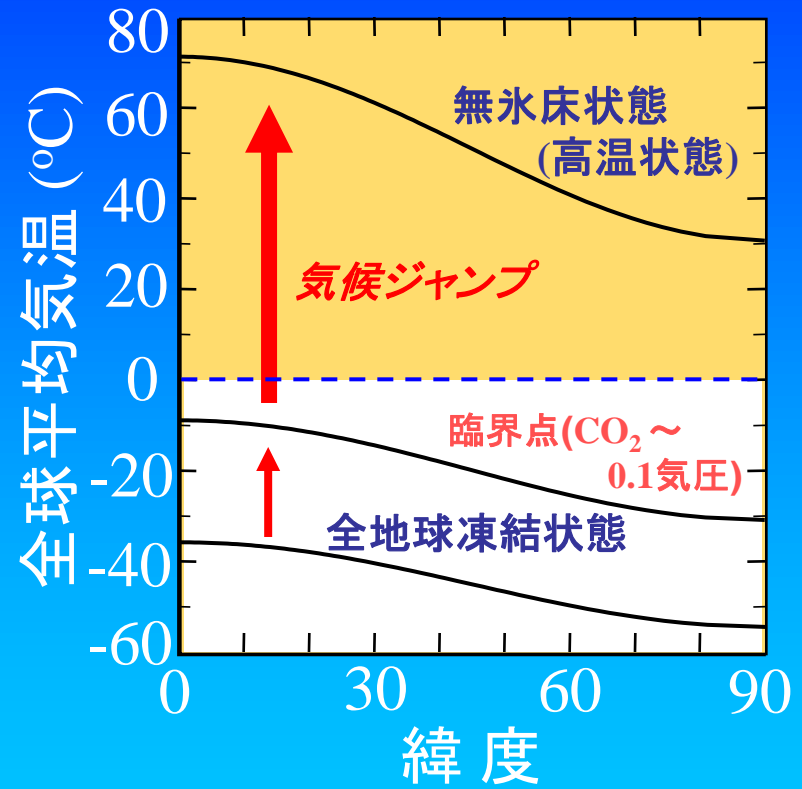
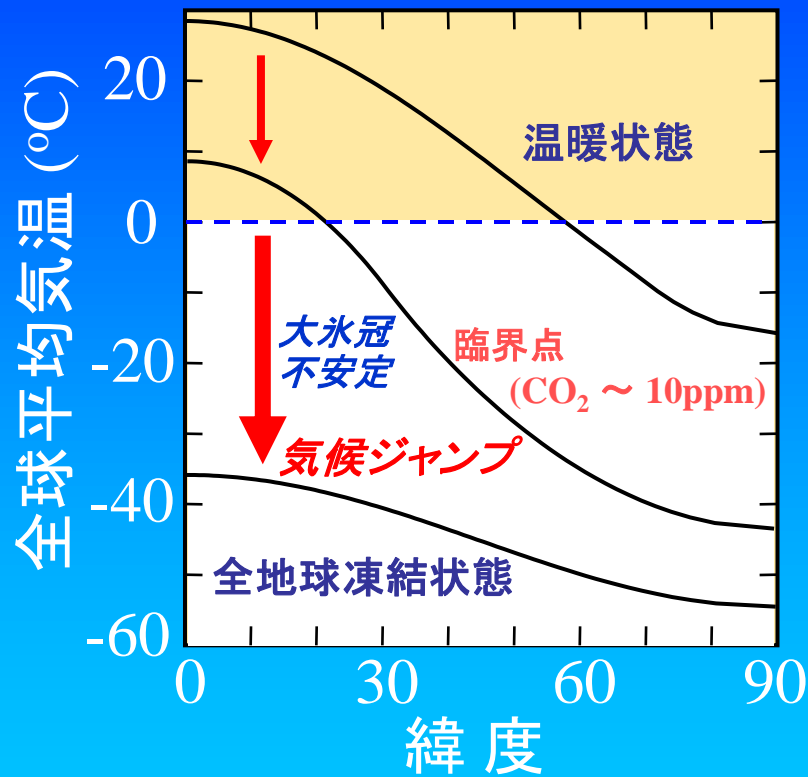
地球環境システムの3つの安定状態



* 実線は安定な状態（破線は不安定な状態）

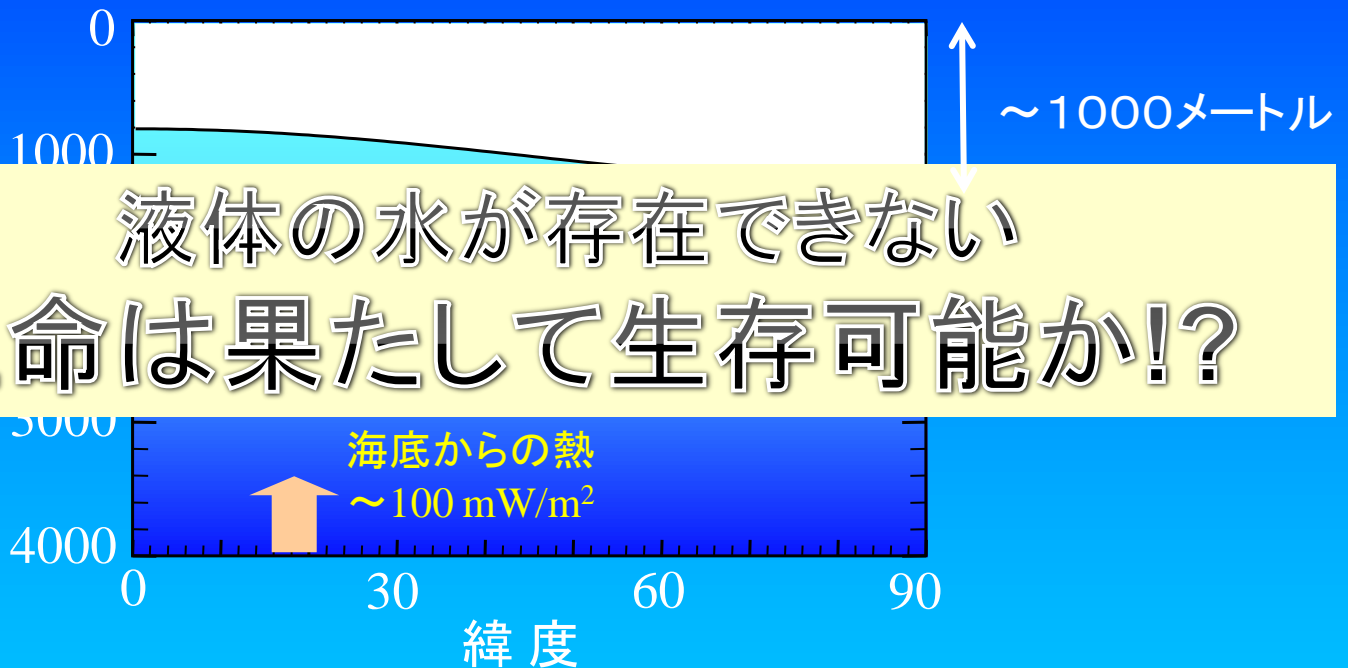
- * 温室効果の低下によって**全地球凍結解**に陥る！
- * CO₂が現在の数百倍になると**全地球凍結**から脱出できる！

全地球凍結現象における地球環境変化



平均気温 **マイナス40°C** の寒冷環境から **プラス60°C** の高温環境へ!

海洋表層1000メートルが凍結する！



- * 海洋は表面から凍結していく！
- * ただし、表層の1000m程度が凍結すると熱平衡に達する
- * 全地球凍結の継続期間は1000万年間程度

全地球凍結仮説の利点

● 原生代の氷河時代の特徴

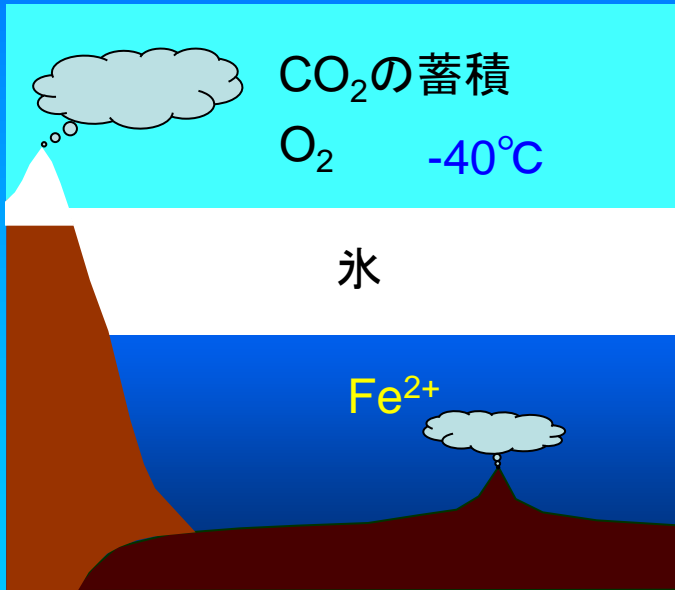
- (1) 赤道域に氷床が存在した
→ 全地球凍結したと考えれば当然
- (2) 氷河堆積物直上に熱帯性の炭酸塩岩
(キャップカーボネート)
- (3) 縞状鉄鉱床が形成
- (4) 生物活動が完全に停止 (炭素同位体比の負異常)
→ 生物が大量絶滅したと考えれば説明可能

原生代後期の氷河時代の謎 (2, 3)

キャップカーボネートと鉄鉱床の形成

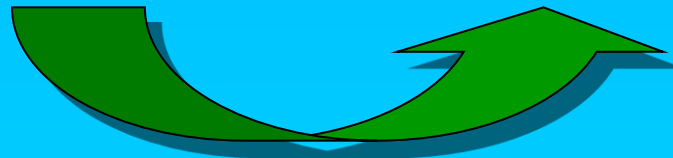
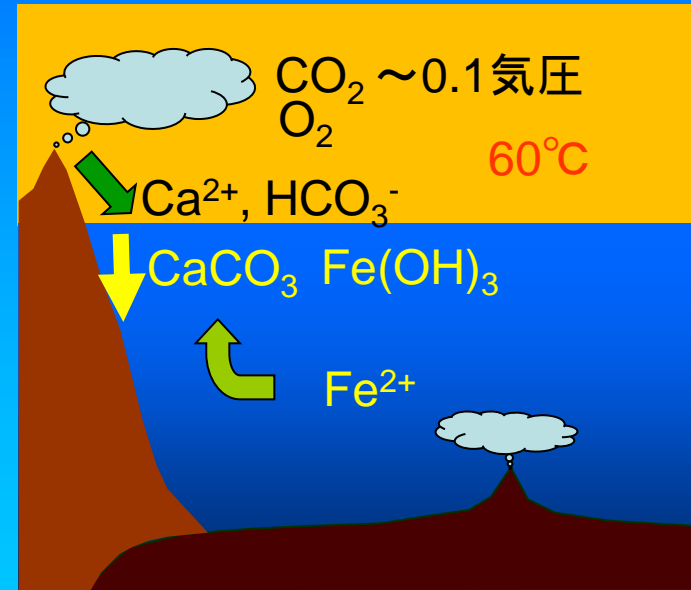
(a) 全地球凍結中

- ・火山活動で CO_2 が脱ガス
→ 大気中に蓄積
- ・海底熱水系から鉄イオンが供給
→ 海水中に蓄積



(b) 全球融解直後

- ・風化で大量の陽イオンが供給
→ 炭酸塩の沈殿 (キャップカーボネート)
- ・深層水が湧昇して鉄イオンが酸化
→ 酸化鉄の沈澱 (縞状鉄鉱床)



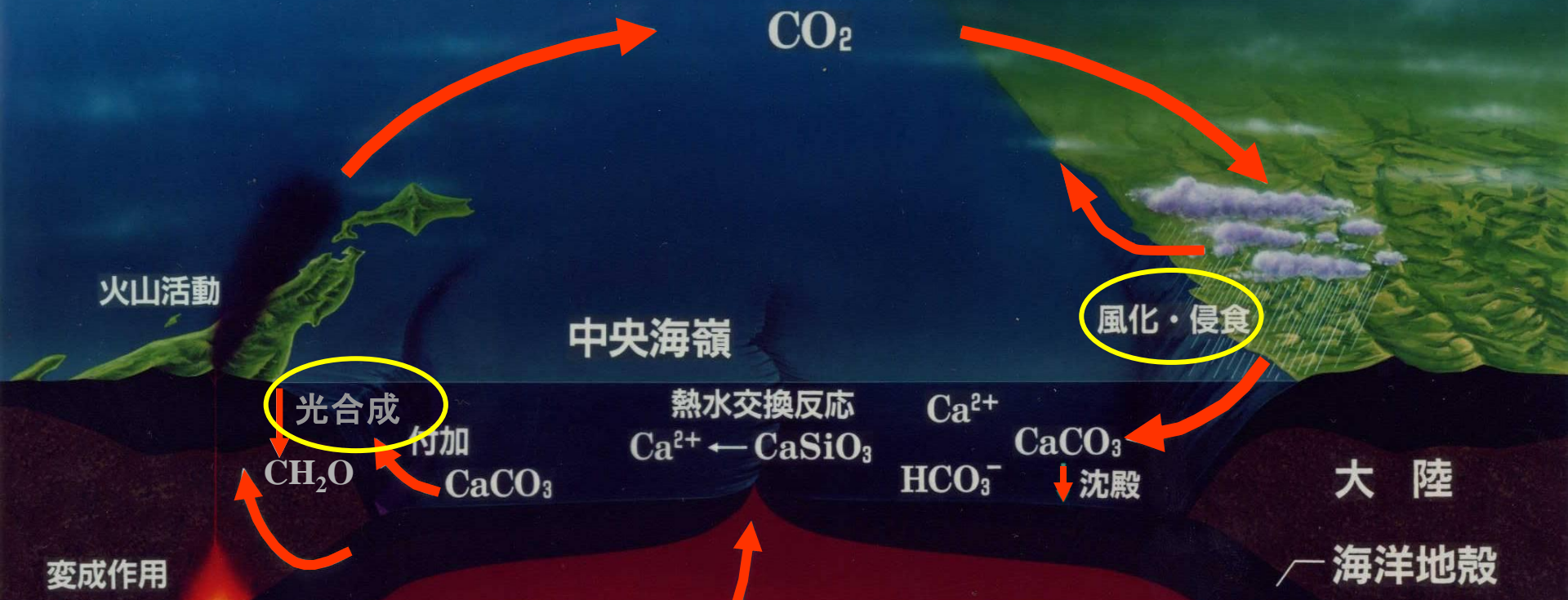
地球はなぜ全球凍結したのか？

→ 大気の温室効果が激減した？

→ 二酸化炭素濃度の低下？

- a) 二酸化炭素の消費が増加？
- b) 二酸化炭素の供給が減少？

100万年スケールでの炭素循環

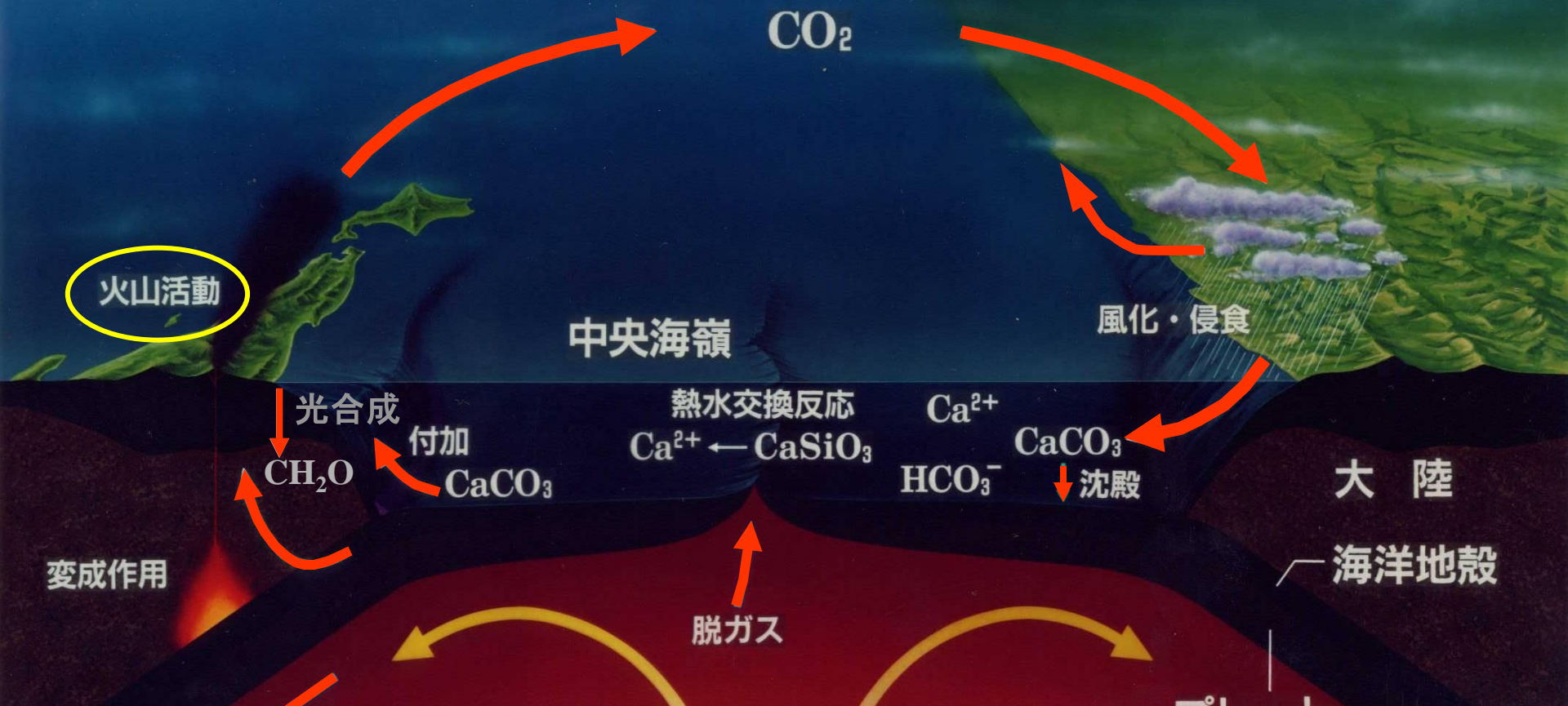


* 二酸化炭素の消費が増加した？

→ 風化率が増加？ ×

光合成活動が活発化？ ×

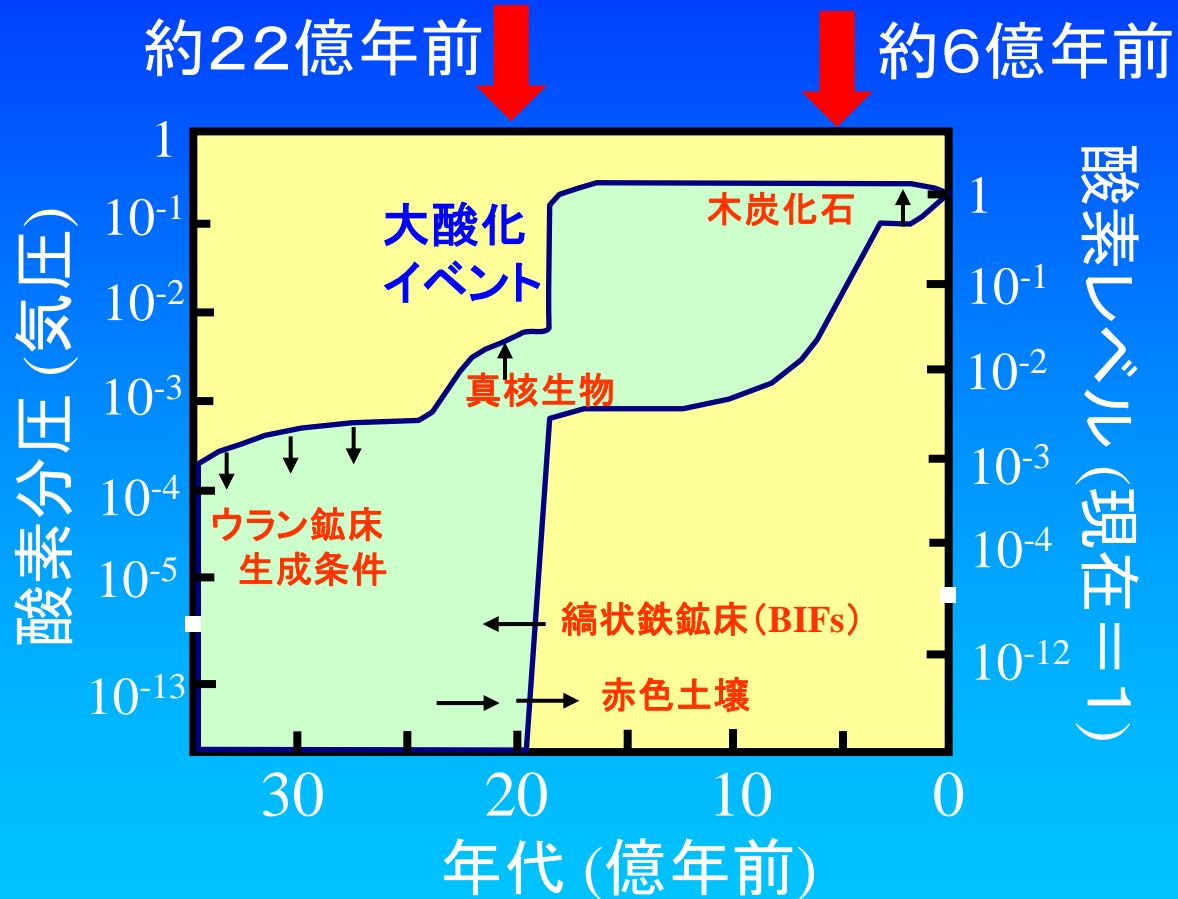
100万年スケールでの炭素循環



* 二酸化炭素の供給が低下した？
→ 火山活動が停滞していた？

4. 全地球凍結と酸素濃度の増大

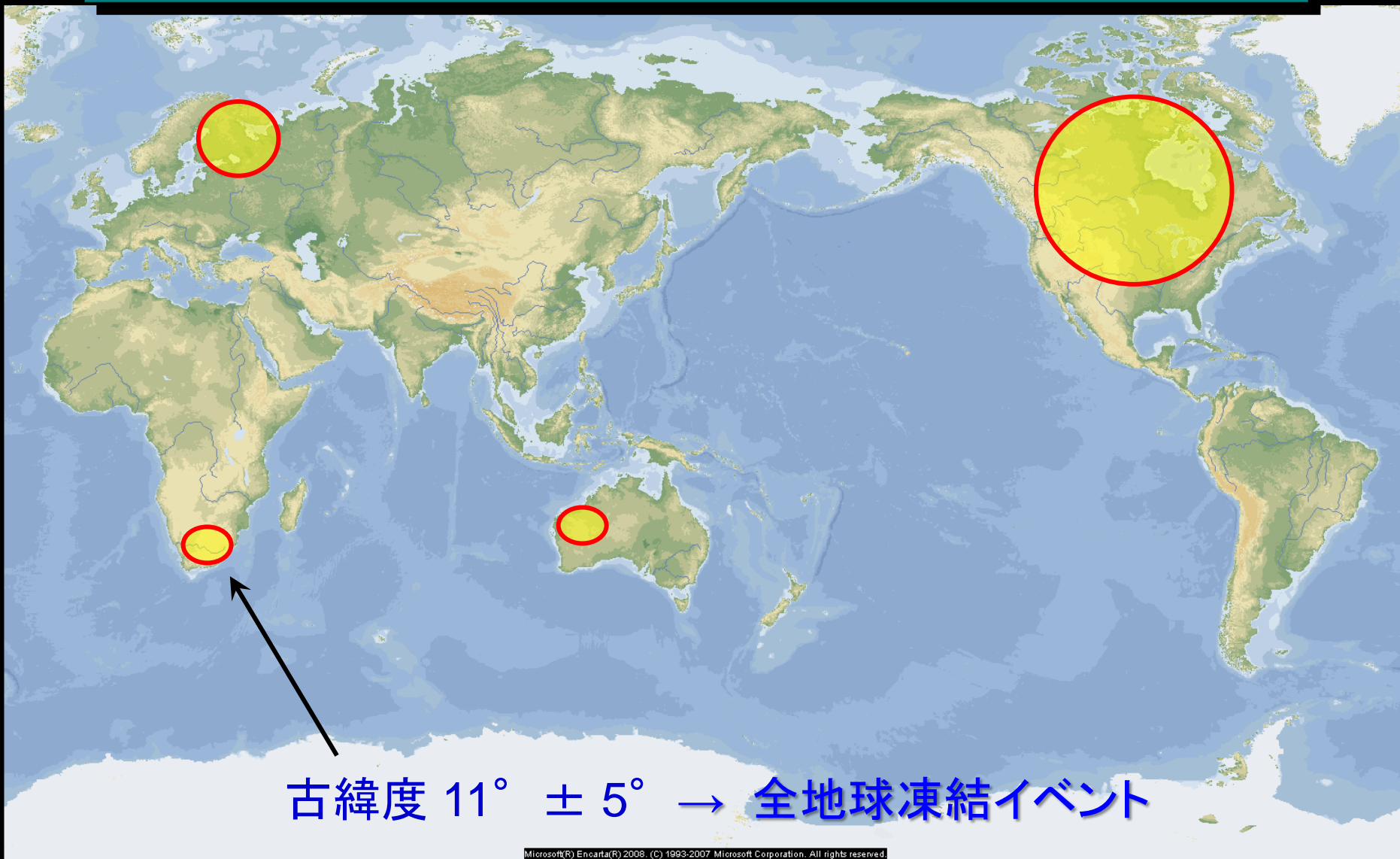
原生代における酸素濃度の増大



[Kasting (1993) Science, 259, 920-926. に基づく]

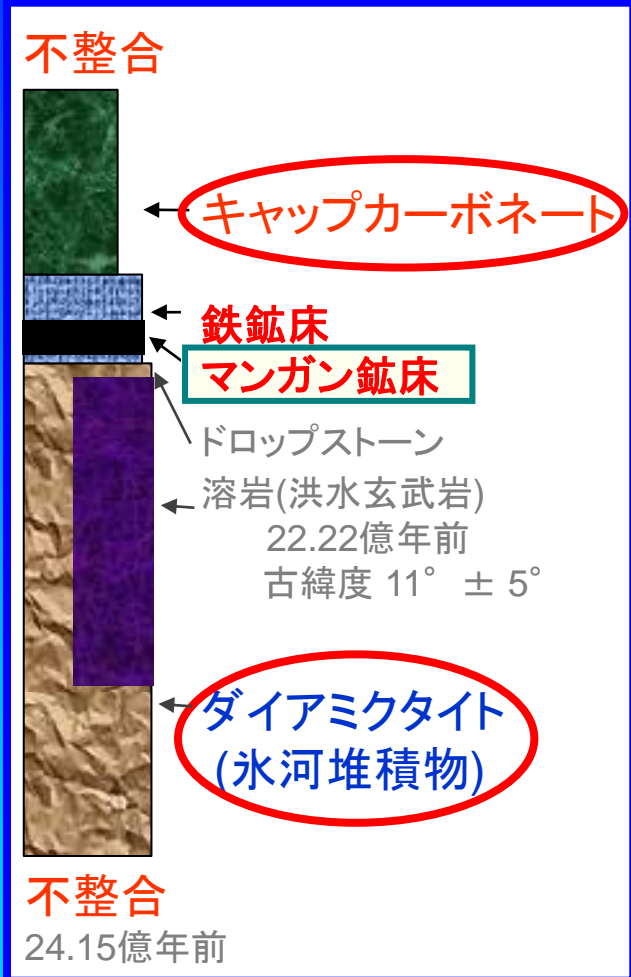
* 大気中の酸素濃度は、
原生代前期(22億年前頃)と後期(6億年前頃)に増加

原生代初期(約22億年前)の氷河堆積物の分布

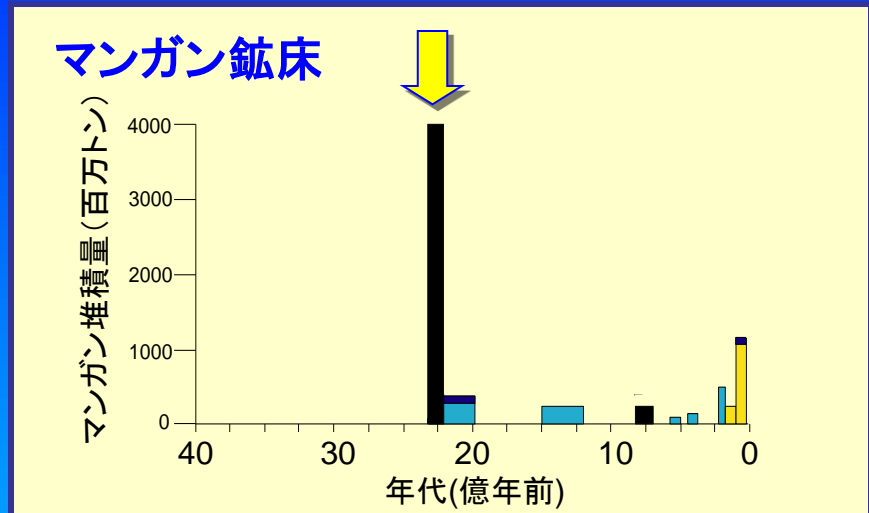


古緯度 $11^{\circ} \pm 5^{\circ}$ → 全地球凍結イベント

全地球凍結とマンガン鉱床



トランスバーク累層群
南アフリカ共和国

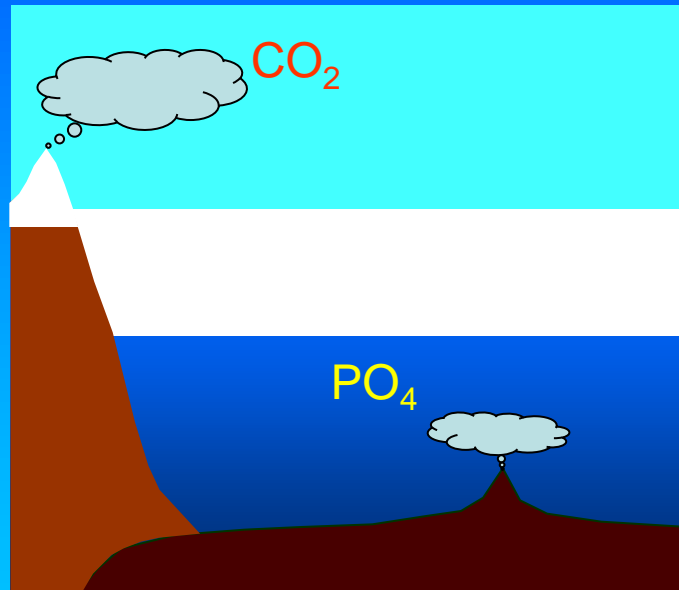


- ・ 約22億年前の氷河堆積物の直上に
地球史上最初のマンガン鉱床が形成
 - ・ マンガンを酸化するためには、
酸素分子が必要不可欠
- * 全地球凍結直後に酸素濃度が増加!?

酸素大発生メカニズム

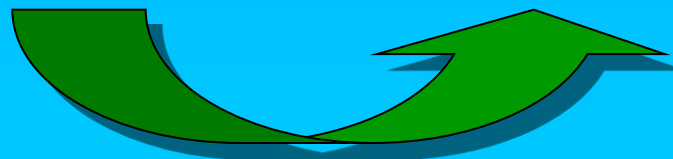
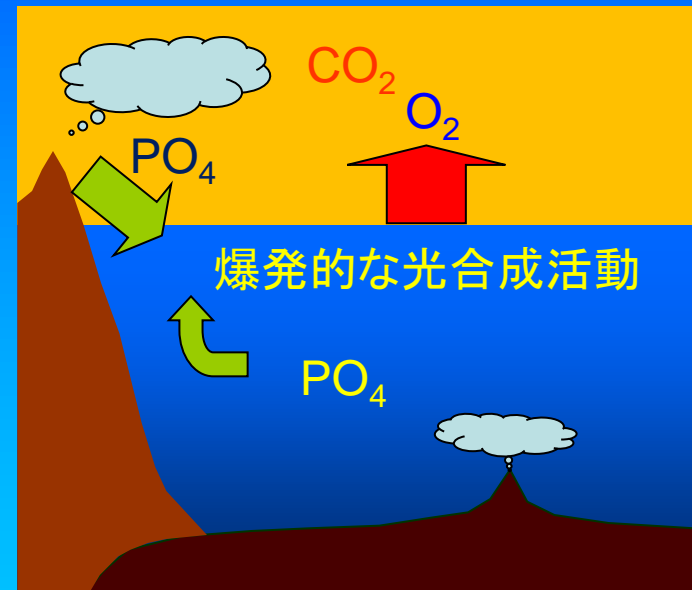
(a) 全地球凍結中

栄養塩の蓄積
(~数千万年間)



(b) 全球融解直後

温暖化と栄養塩の供給増加
大酸化イベント



海外学術調査 (南アフリカ, カナダ, アメリカ合衆国, フィンランド)



5. 地球環境と生命の共進化

全地球凍結仮説の問題点

陸も海も完全に氷で覆われる → 生命大絶滅の危機!?

生命(とくに光合成藻類)はどこで生き延びたのか？

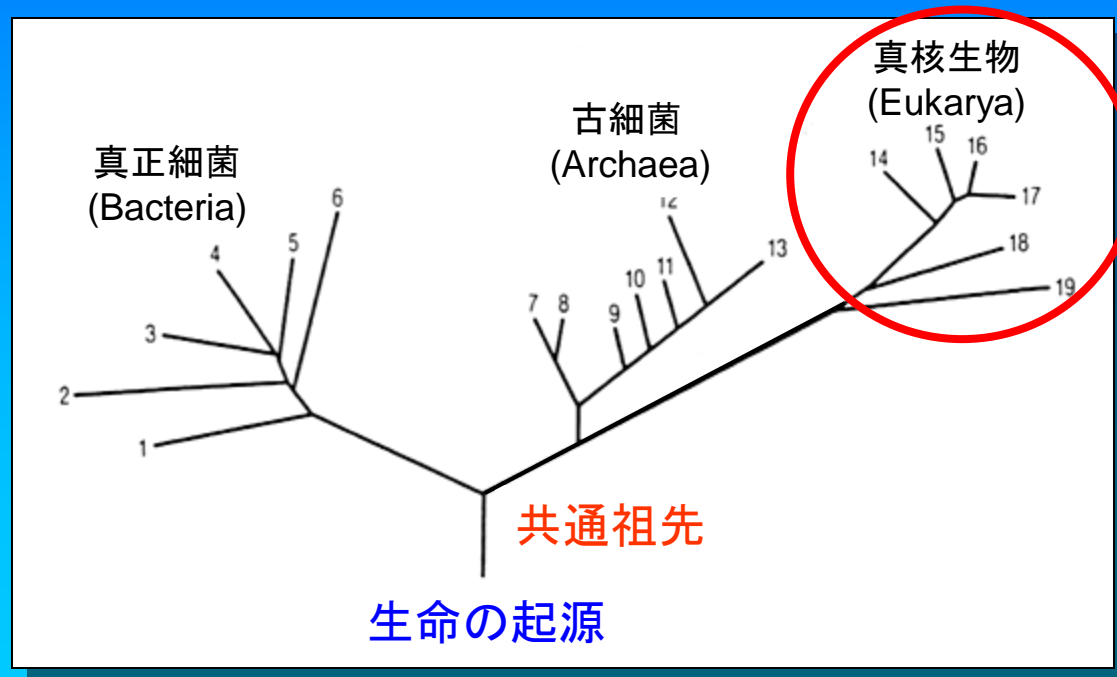
考えられる可能性

1. 赤道域の海洋は凍結しなかった？
2. 赤道域の氷は非常に薄かった？
3. 火山地域では氷が融けていた？

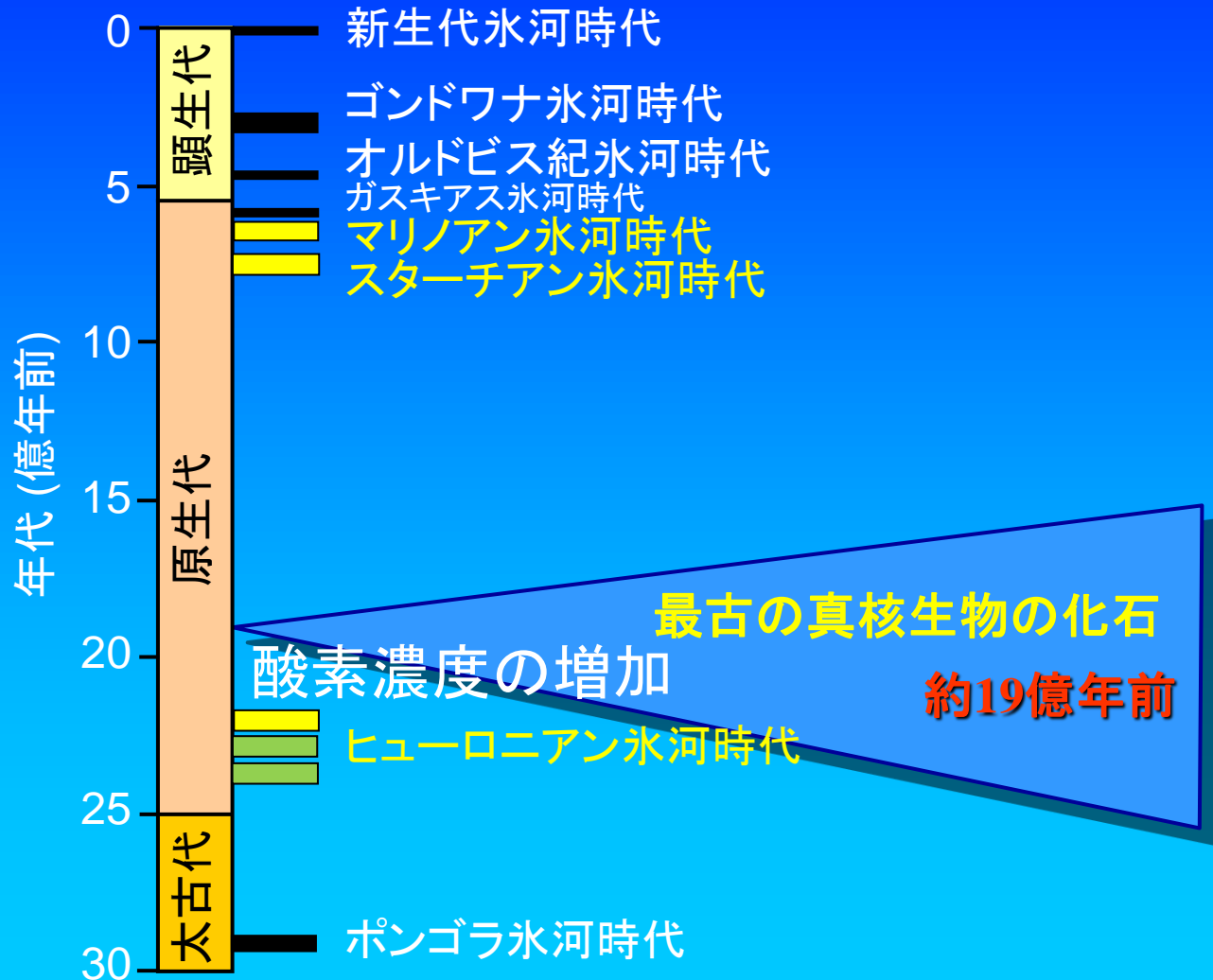
生命の系統分類

リボソームRNAに基づく系統解析

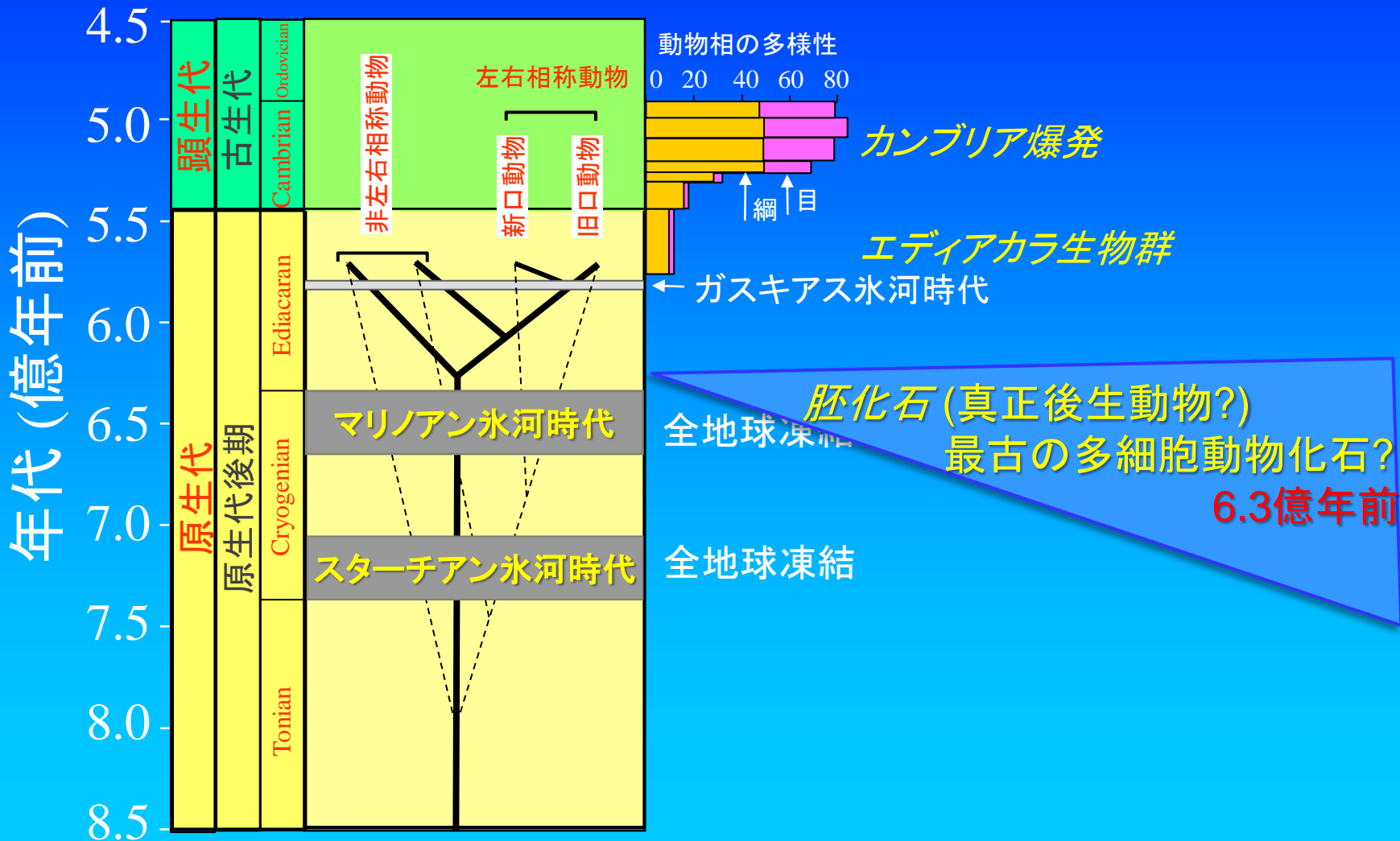
- ・真正細菌 (Bacteria) … 細菌 (大腸菌, シアノバクテリアなど)
- ・古細菌 (Archaea) … 好熱菌, 高度好塩菌, メタン生成菌
- ・真核生物 (Eukarya) … 植物, 動物, 原生動物, 菌類



全地球凍結と生物進化の謎

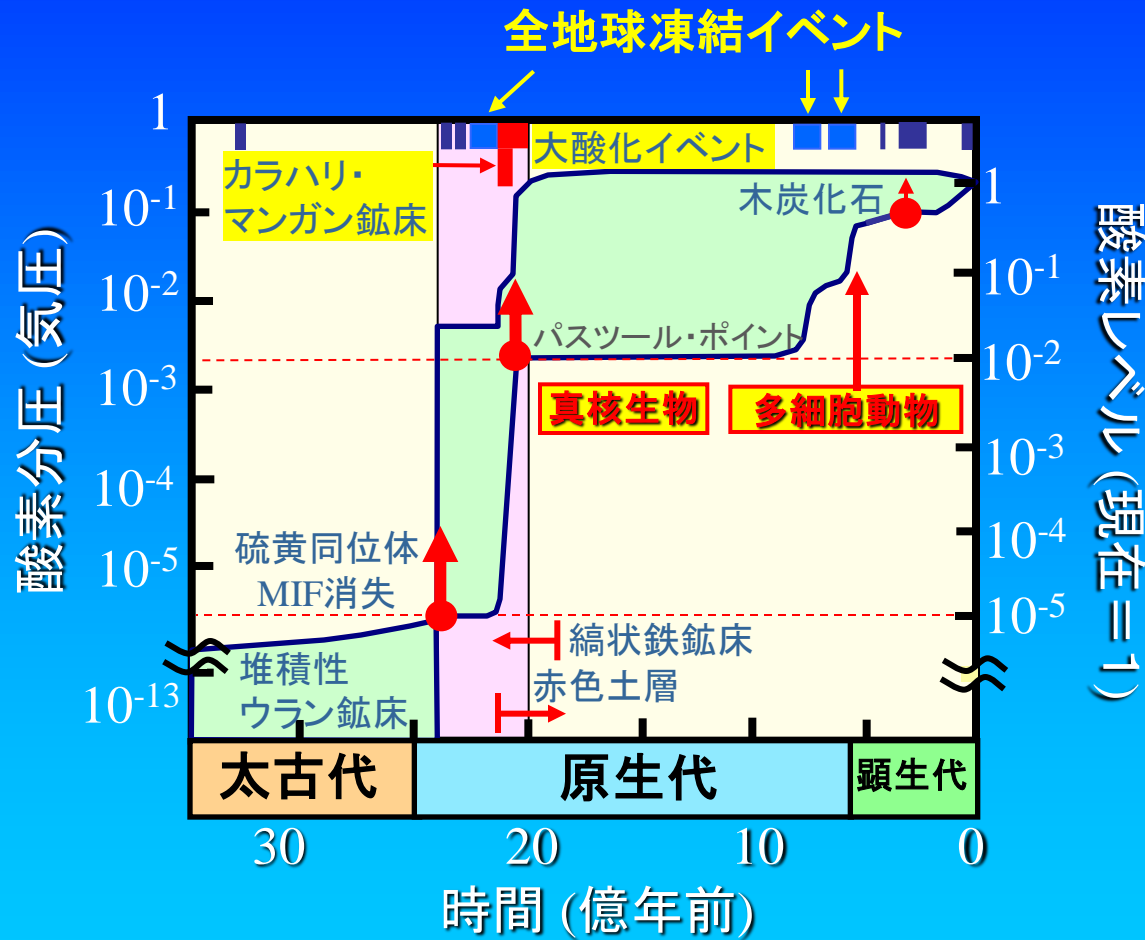


全地球凍結と多細胞生物の出現の謎



全地球凍結直後に多細胞動物が出現!?

全地球凍結 — 大気進化 — 生物進化のリンク



全地球凍結 と 酸素濃度の増大 と 生物の大進化 が密接に関係？

地球環境と生命の共進化

地球環境の破局的変動 → 生物の大規模絶滅 → 生物の大進化？

