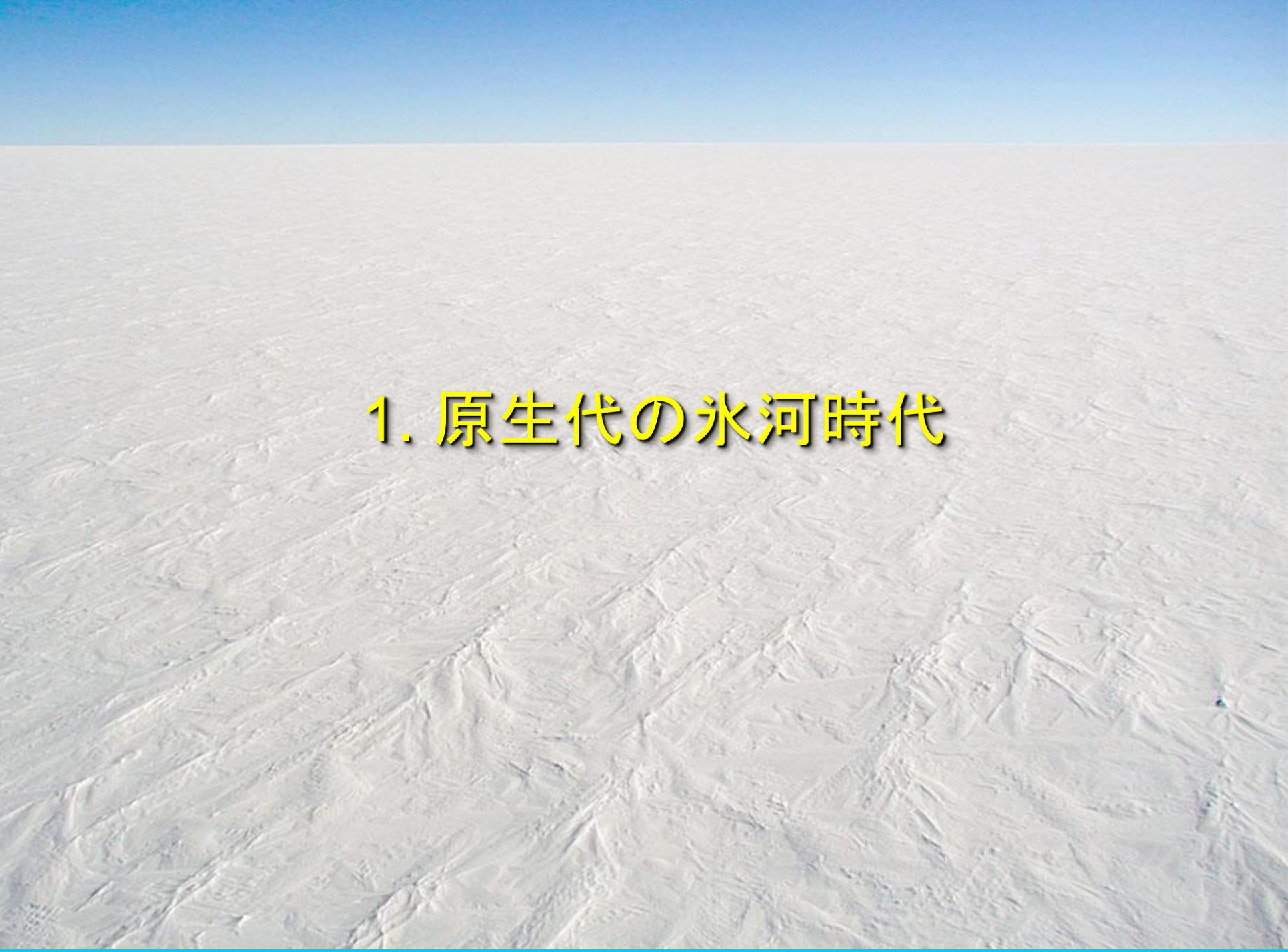
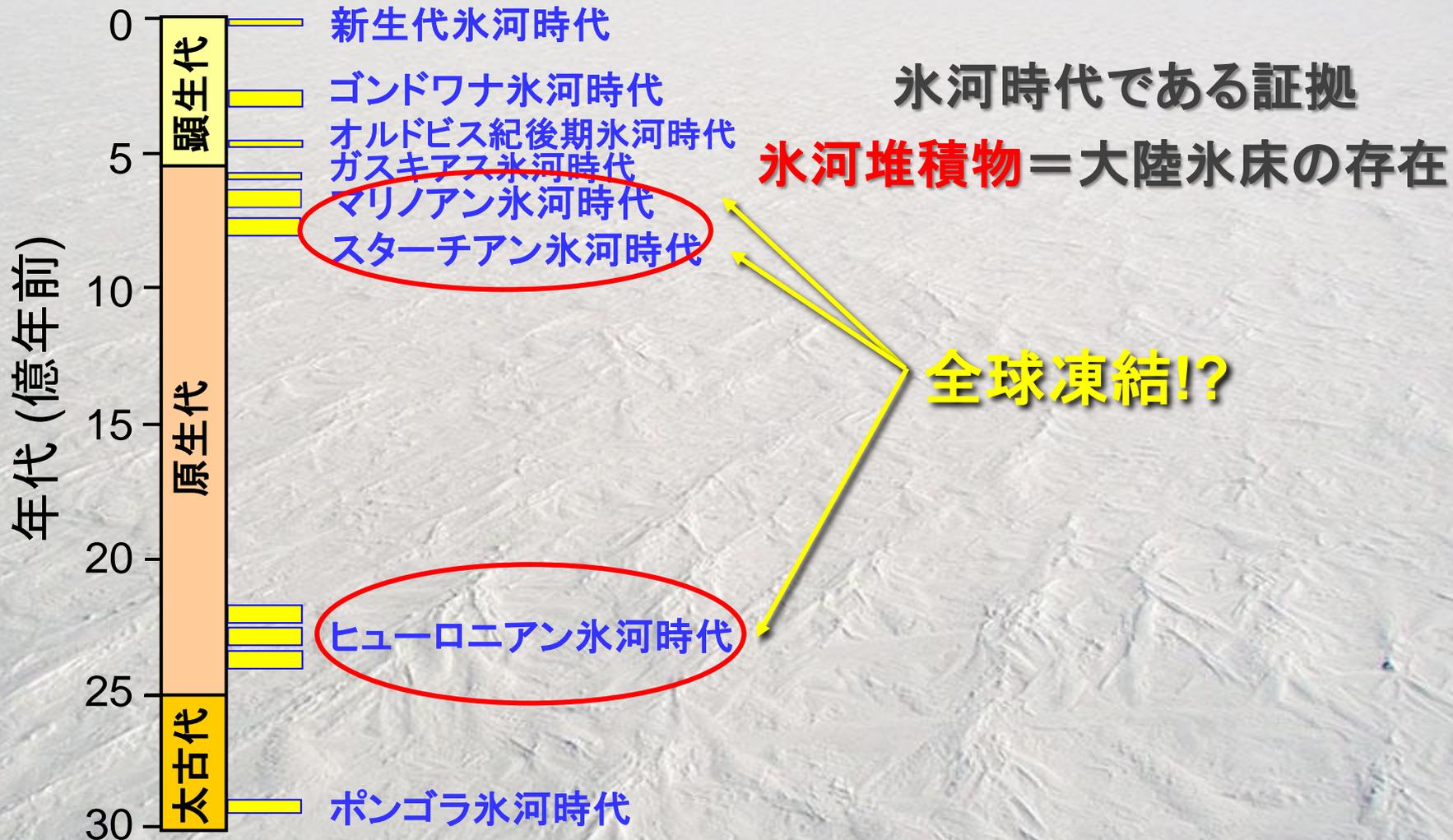


## [4] 全球凍結と生物進化



# 1. 原生代の氷河時代

# 地球史における氷河時代



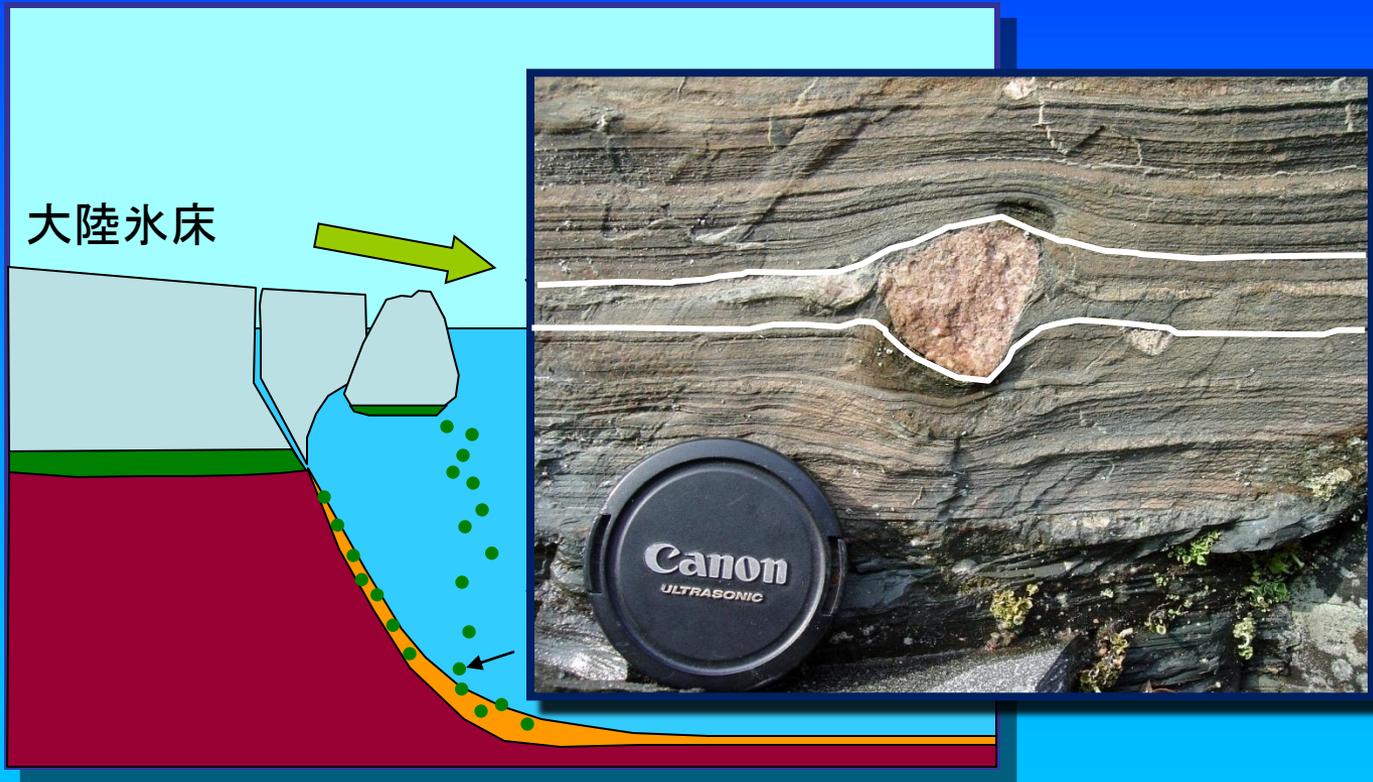
# 大陸氷床の証拠 “ダイアミクタイト”



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)

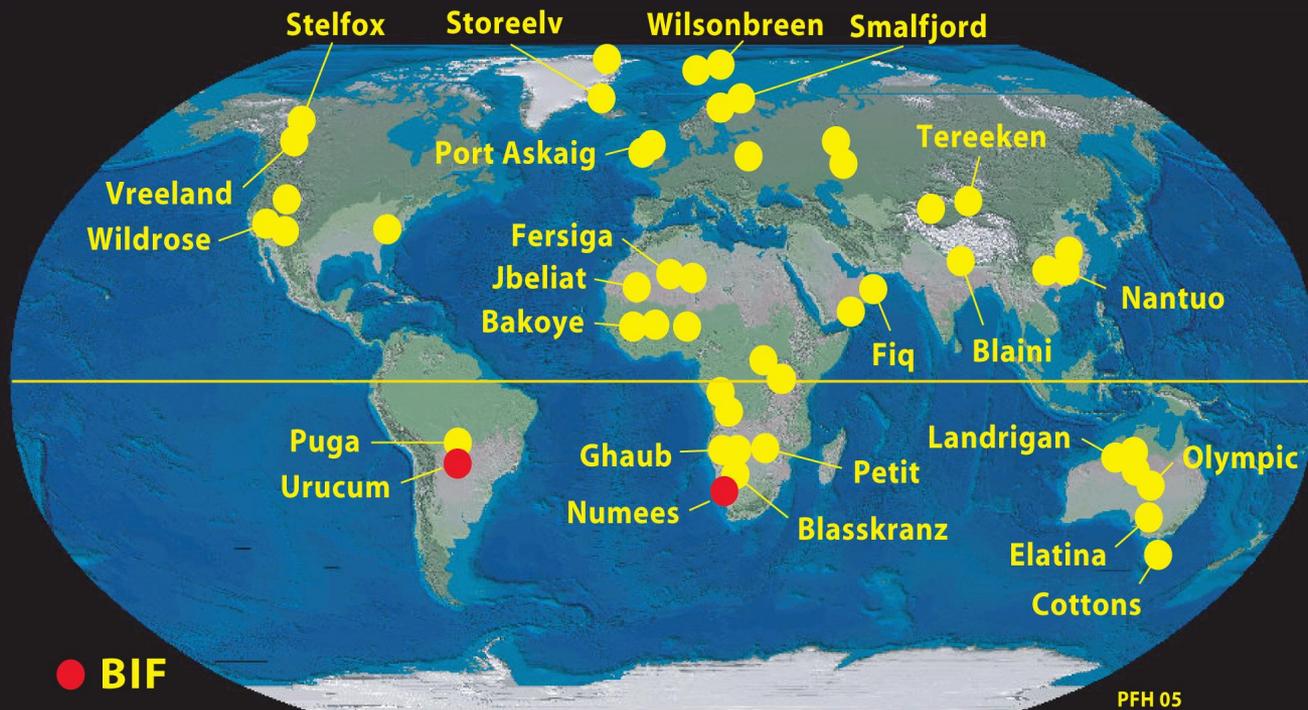
\* ダイアミクタイト: 粘土から巨大な岩塊までを含む、塊状無構造の碎屑生堆積岩についての一般的かつ記載的名称。成因に無関係の語。漂礫岩(ティライト)のほか、斜面崩壊に起因する堆積物や土石流堆積物、海底地滑り堆積物などさまざまなものが含まれる。

# 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

# 原生代後期(約6億5000万年前)の氷河作用の痕跡

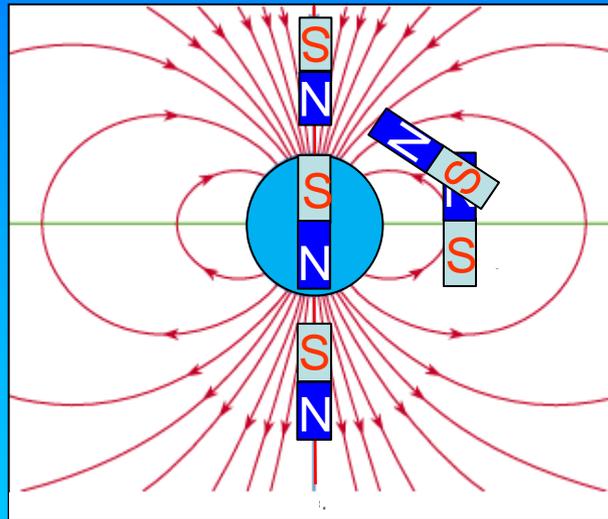


[<http://www.snowballearth.org> より]

\* 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

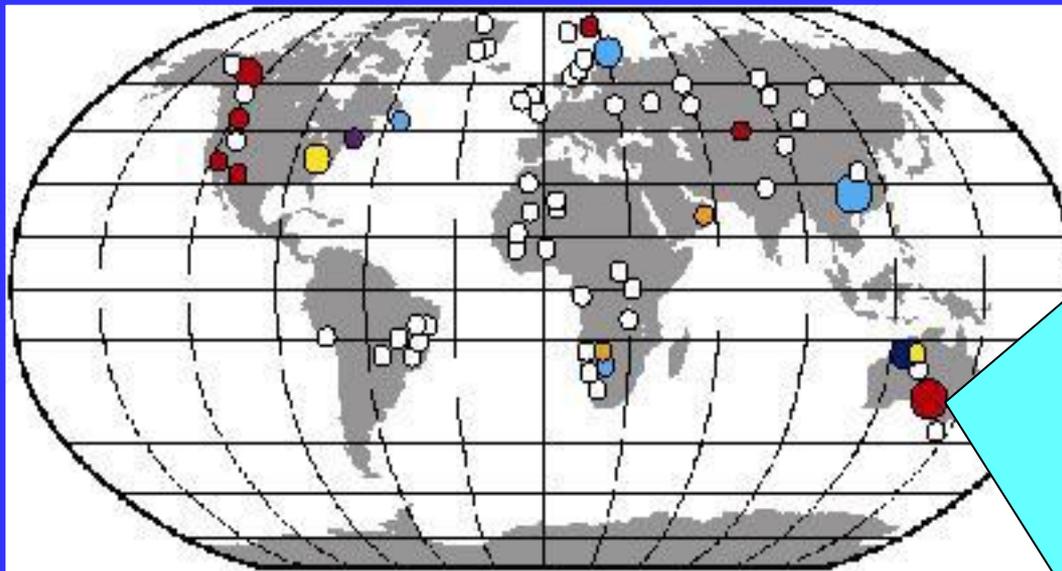
- 地球磁場の方向は緯度によって異なる
  - ・赤道では地面と平行
  - ・磁極では地面と垂直方向
- 岩石は、形成時の地球磁場の方向を記録している



→ 岩石試料に記録された地磁気の方向を測定し、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

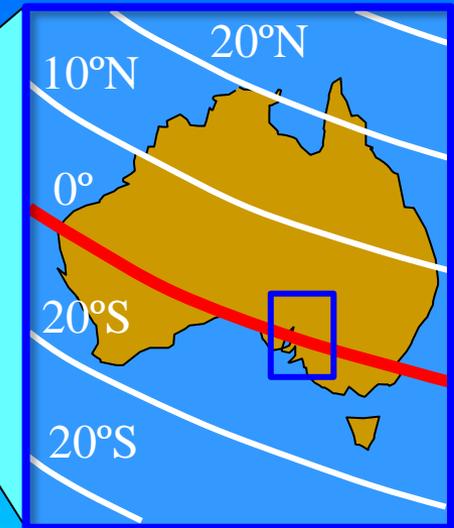


● 00-10° ● 10-20° ● 20-30° ● 30-40° ● 40-50° ● 50-60° ○ no data

● 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]

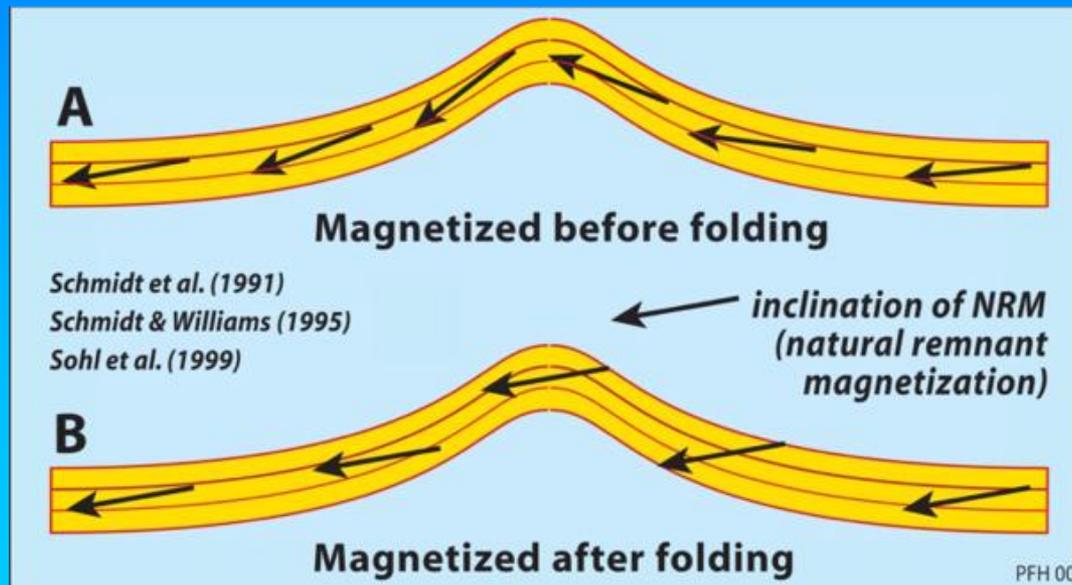


**\* 当時の赤道域に大陸氷床が存在していた!**  
(約6億5000万年前, 約7億年前, 約22億年前)

# Soft-sediment fold test

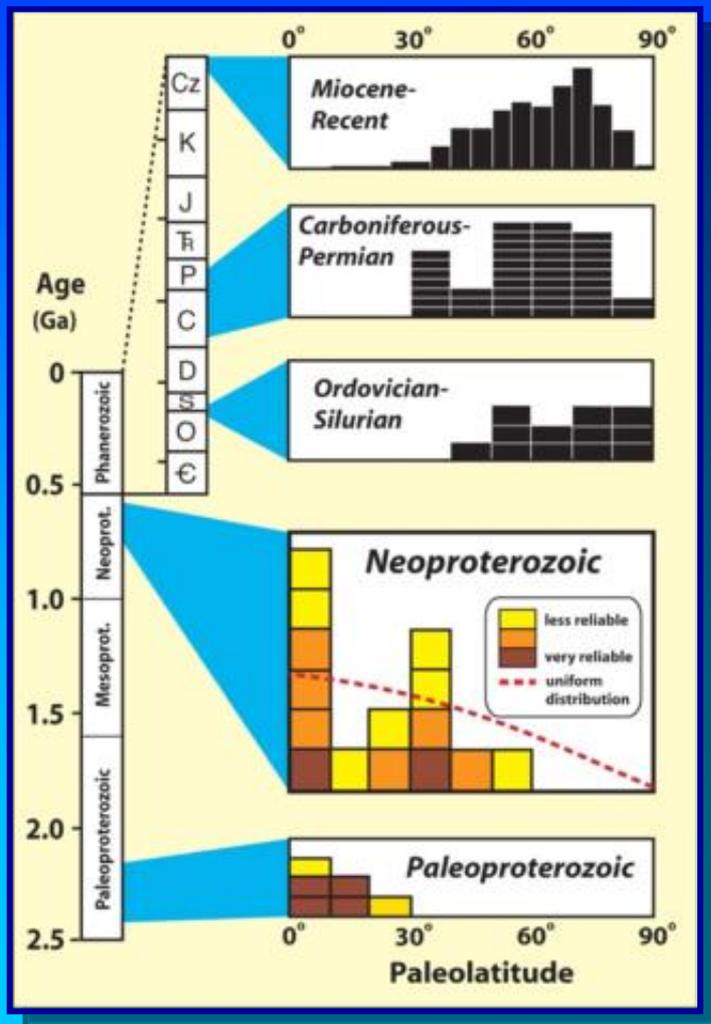
Glacial Varves **Elatina Fm.** (South Australia)

古地磁気の方角が褶曲に沿って折れ曲がっていることから、地磁気が記録されたのは褶曲が生じる以前である。褶曲は、まだ堆積物が固化する以前であると考えられることから、この方位はオリジナルな情報であることが示唆される。



<http://www.snowballearth.org/slides/Ch2-8.gif>

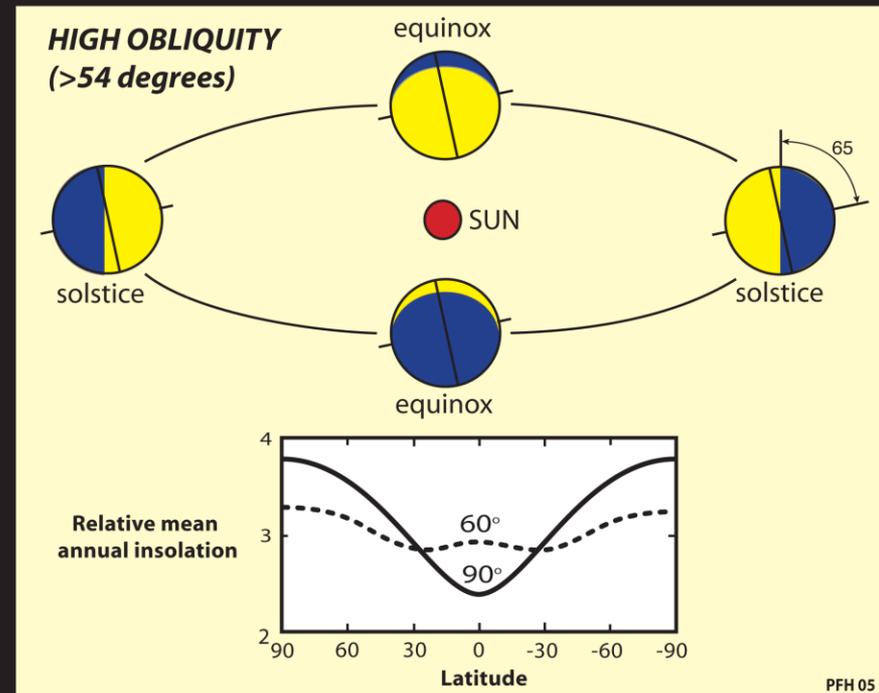
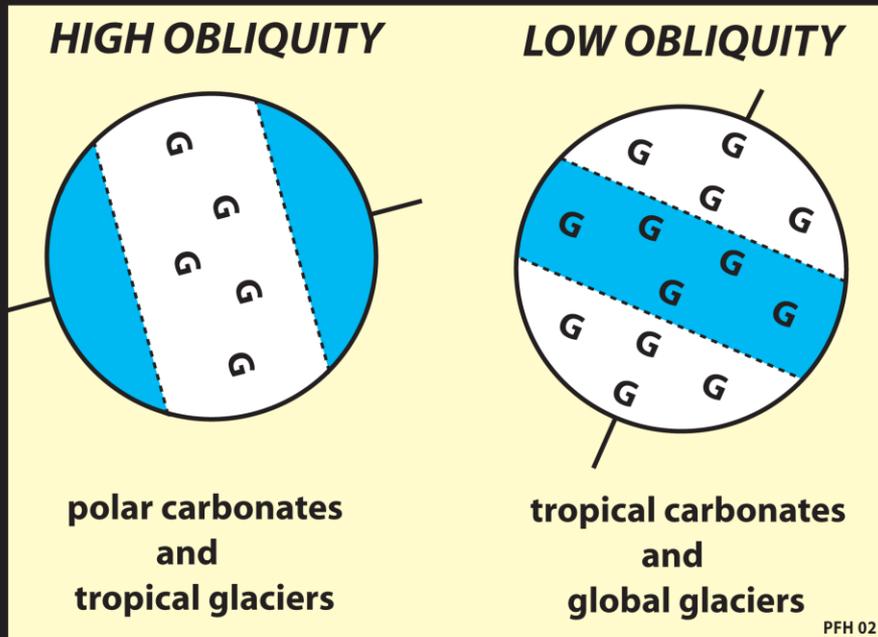
# 氷河堆積物の緯度分布



原生代の氷河時代には、  
高緯度に氷河堆積物の  
証拠がない!?

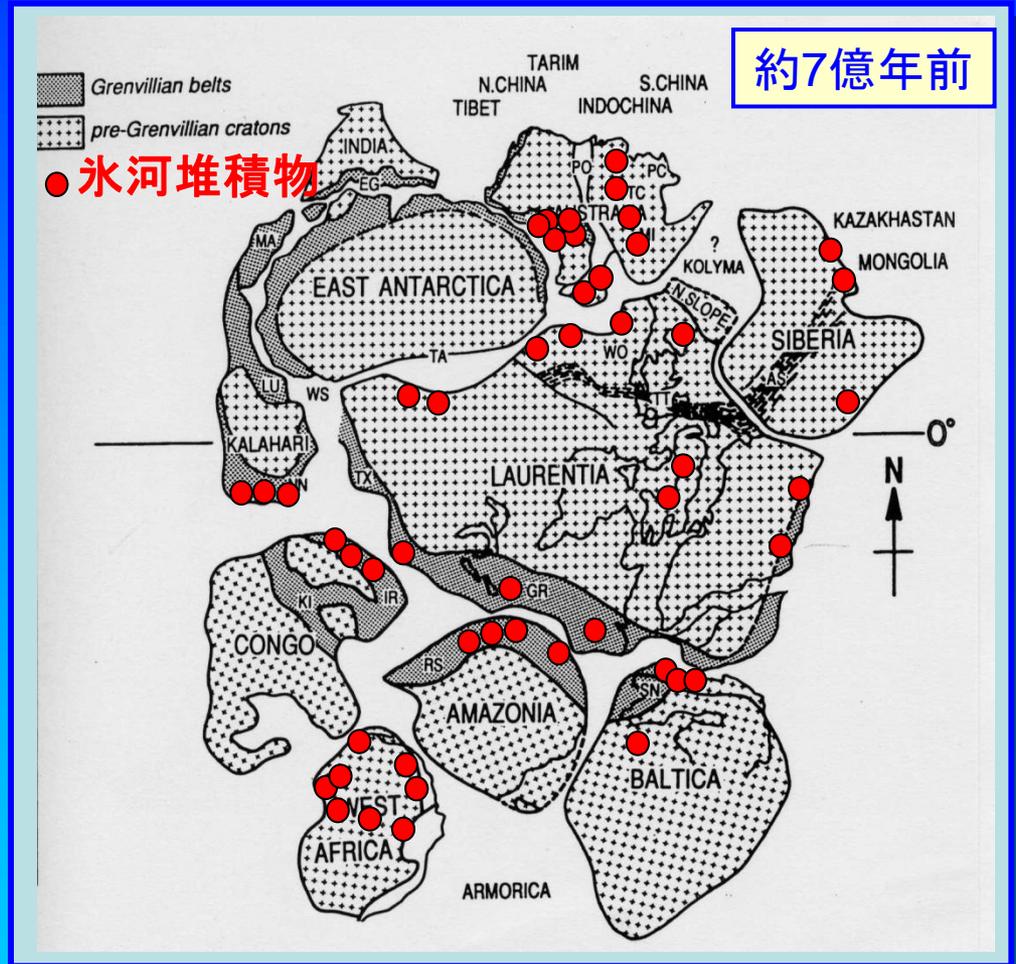
→ 高緯度よりも低緯度の  
方が寒冷的な気候だった!?

# 自転軸傾斜角が大きかった?



\* 自転軸傾斜角が54度以上傾くと、極よりも赤道が受け取る日射量の方が年平均では小さくなる

# 原生代後期の大陸配置と氷河堆積物

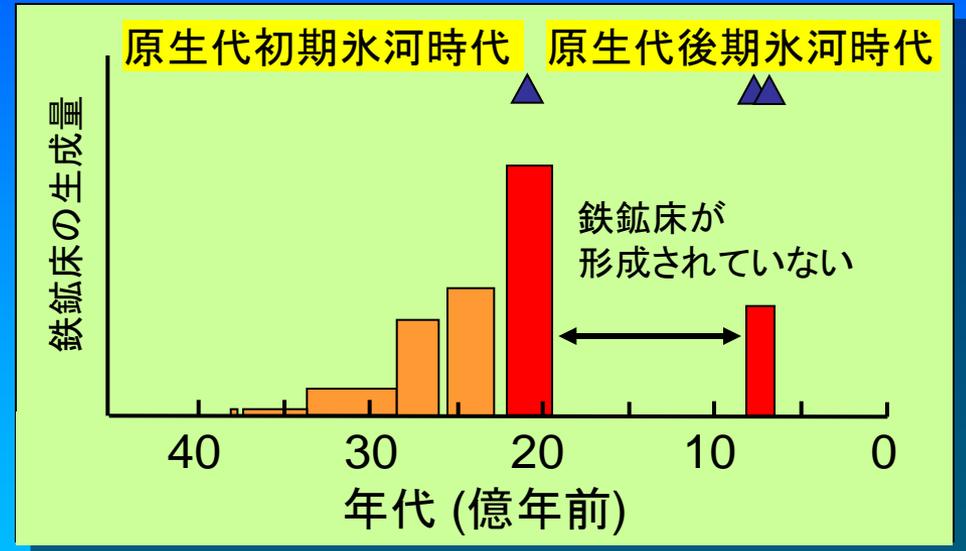


超大陸“ロディニア”

## 原生代後期の氷河時代の謎 (2) 縞状鉄鉱床の形成



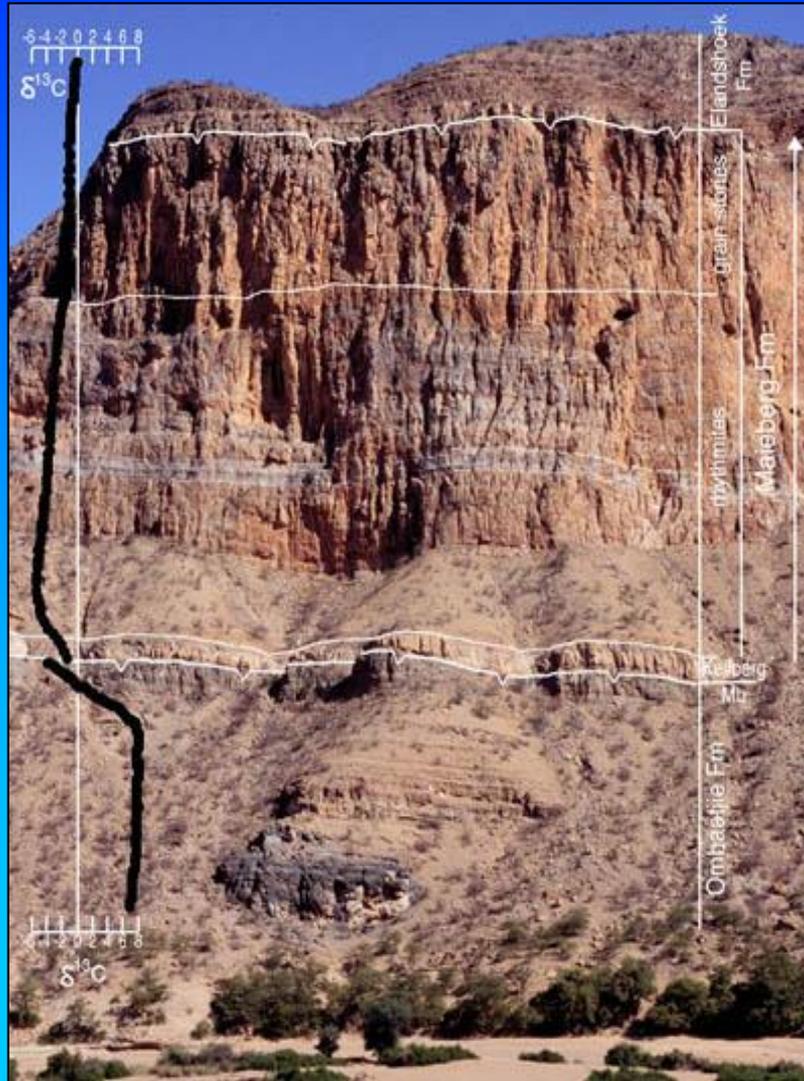
[<http://www.snowballearth.org/> より]



[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 (3) “謎”のキャップカーボネート



キャップカーボネート  
(炭酸塩岩)  
熱帯環境

ダイアミクタイト  
(氷河堆積物)  
極域環境

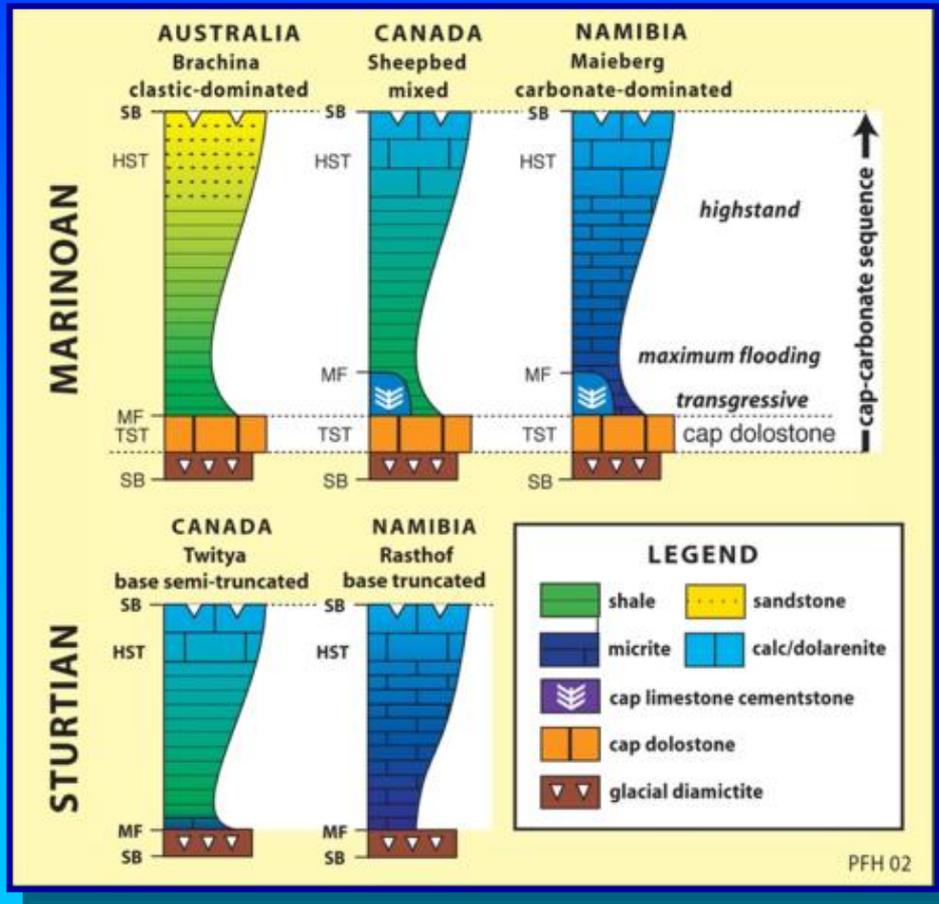
原生代後期(約6億5000万年前, ナミビア)

## 急激な気候変動？



- \* ダイアミクタイトとキャップカーボネートの境界は非常にシャープ  
→ 急激な環境変化(極域環境から熱帯環境へ)?

# キャップドロストーン



氷河期後の海水準上昇  
地殻の長期的な沈降

← キャップドロストーン

- ・ 厚さ 3 - 30m
- ・ 海進期堆積体  
(Transgressive system tract)
- ・ ラミナが発達
- ・ ハンモック状斜交層理

# キャップドロストーンにみられるチューブ構造



\* Stromatolitic (microbial) origin → 急激な成長？

# Giant Wave Ripples



Giant wave ripples, Namibia

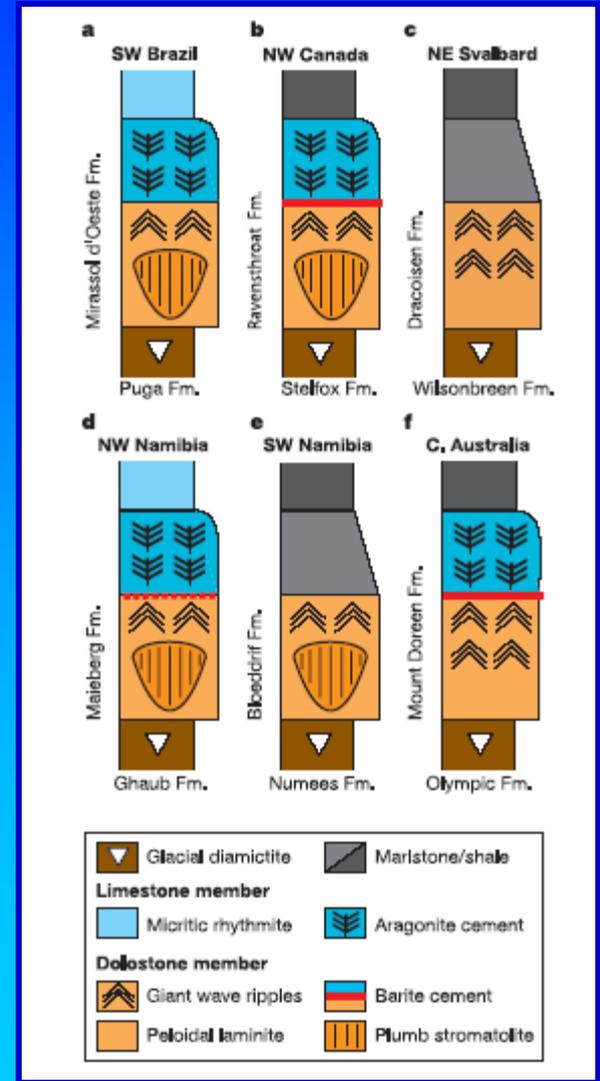
波長: 数メートル(通常は20cm以下)

高さ: 数十センチメートル

→ 波の周期: 21-30 秒

風速 > 20 m/s

[Allen and Hoffman, 2005]



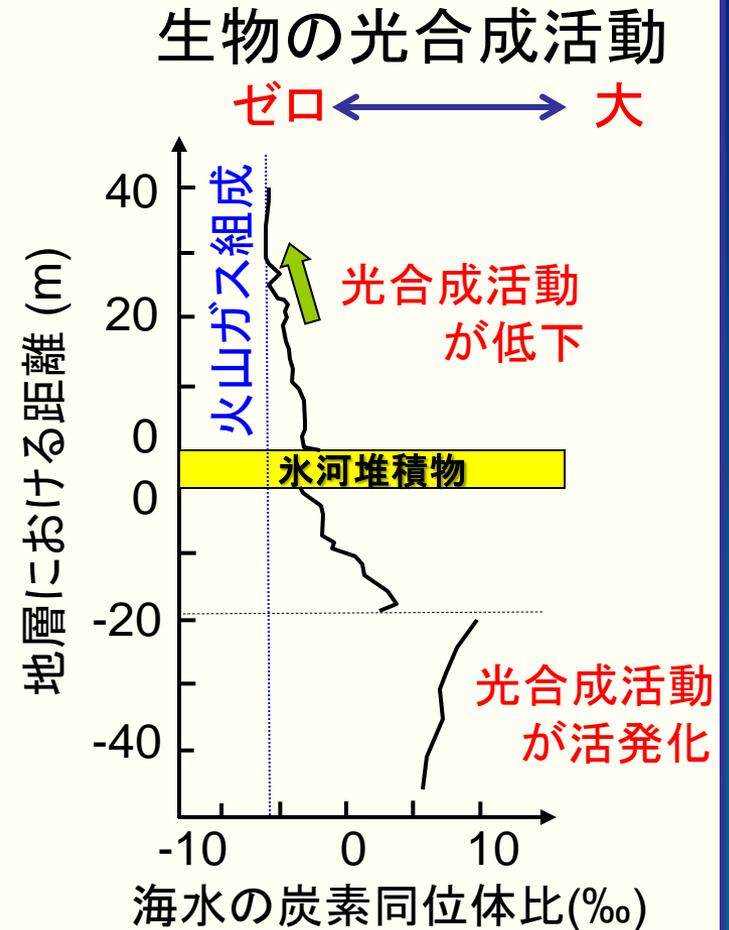
# 原生代後期の氷河時代の謎 (4) 生物活動が完全に停止？

## ■ 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( $^{12}\text{C}$ )**をより多く固定する
- 海水には**重い炭素( $^{13}\text{C}$ )**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



## 2. スノーボールアース仮説

# “スノーボールアース”(全球凍結)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)

Joseph L. Kirschvink 教授



Paul F. Hoffman 教授

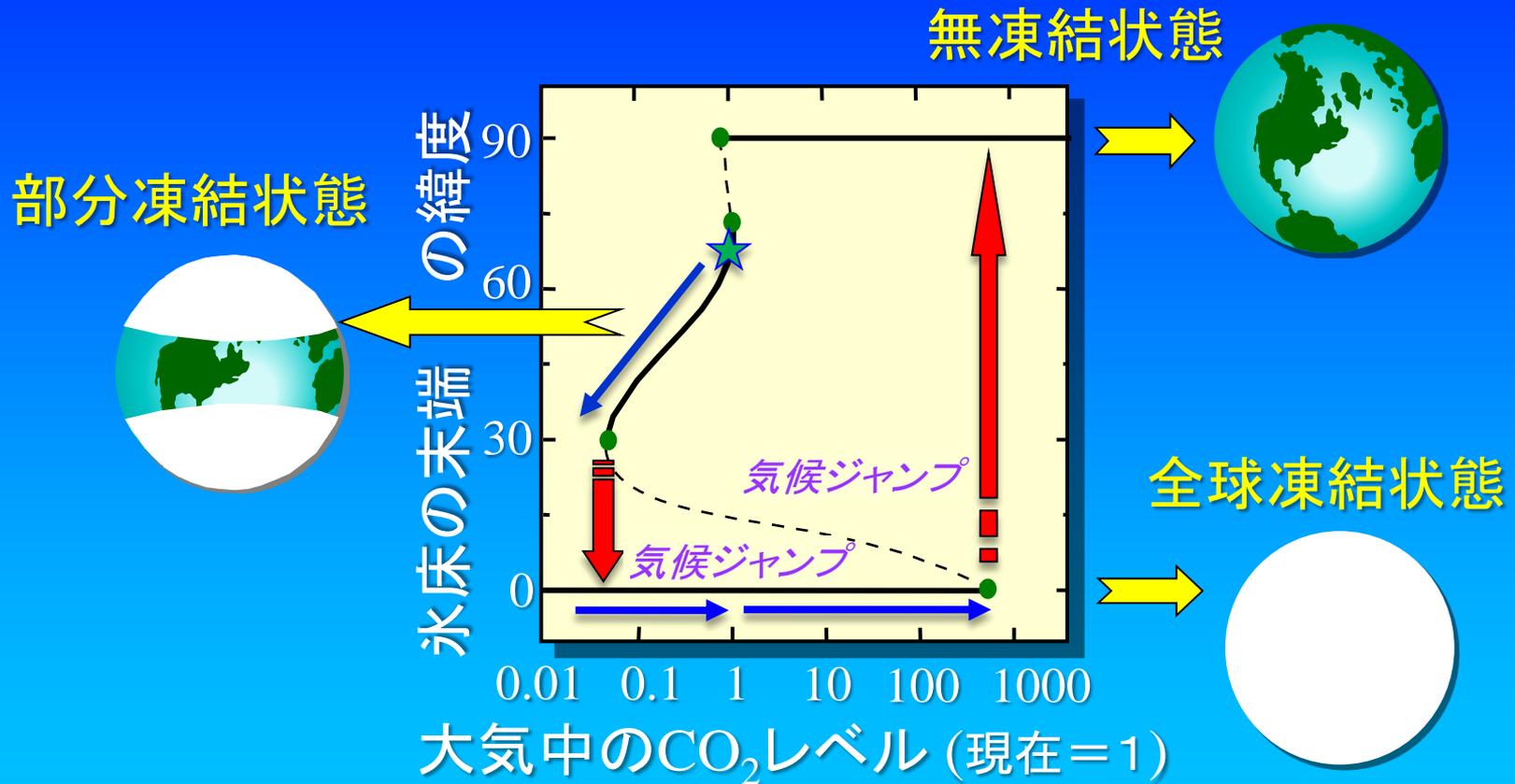
<http://environment.harvard.edu/about/faculty/paul-f-hoffman>



Isaac A. Hilburn



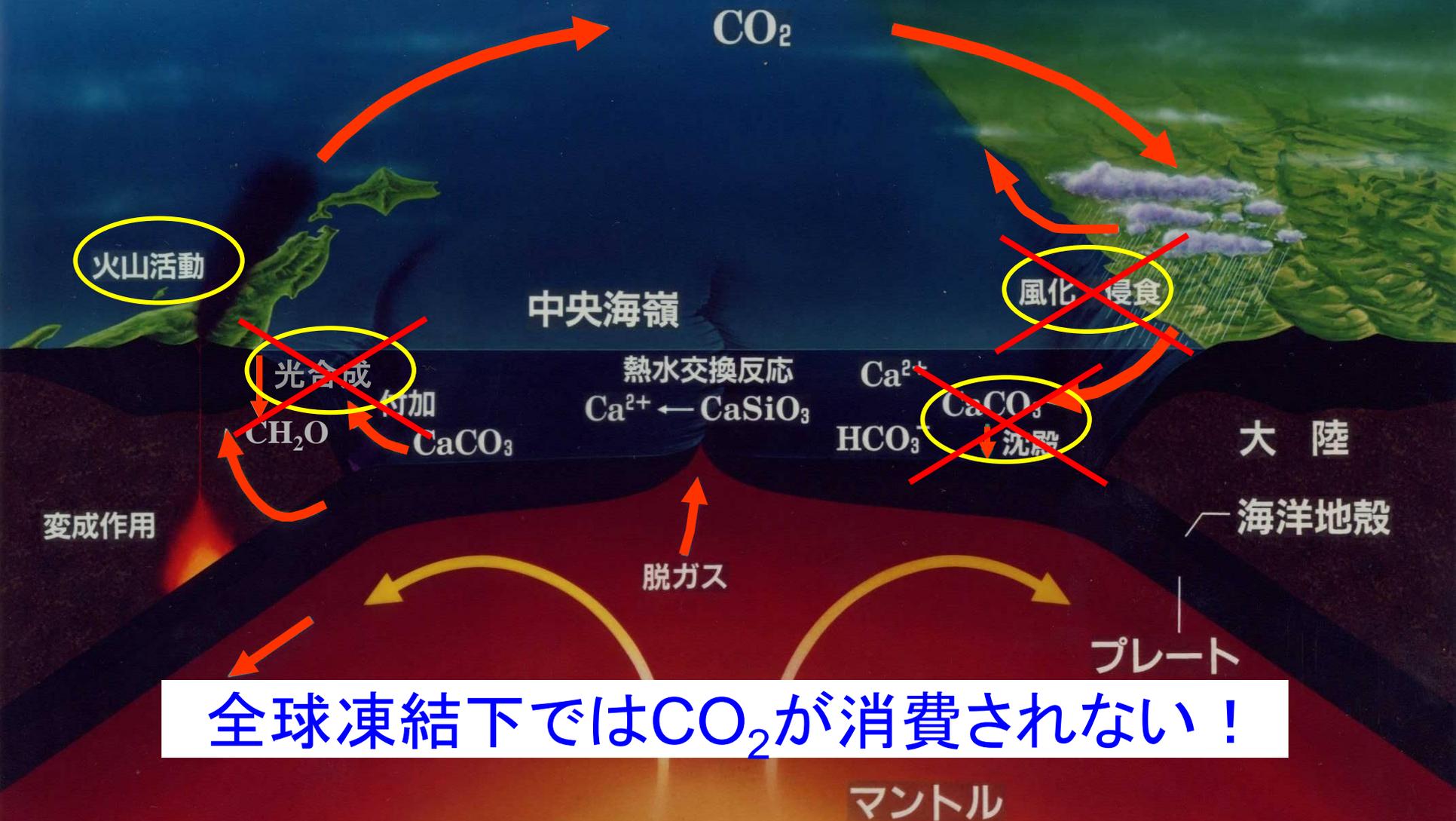
# 地球環境システムの3つの安定状態



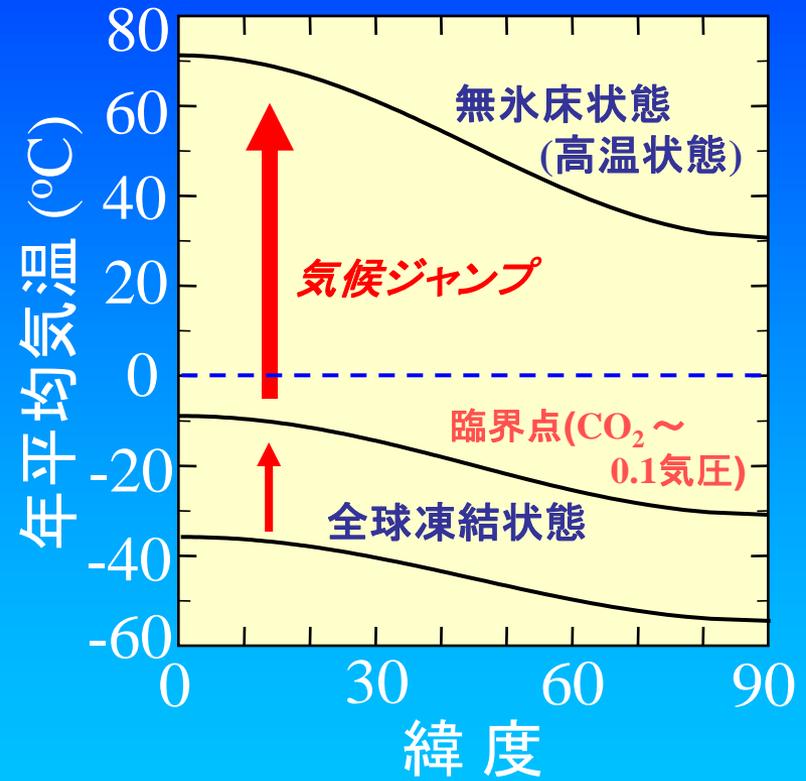
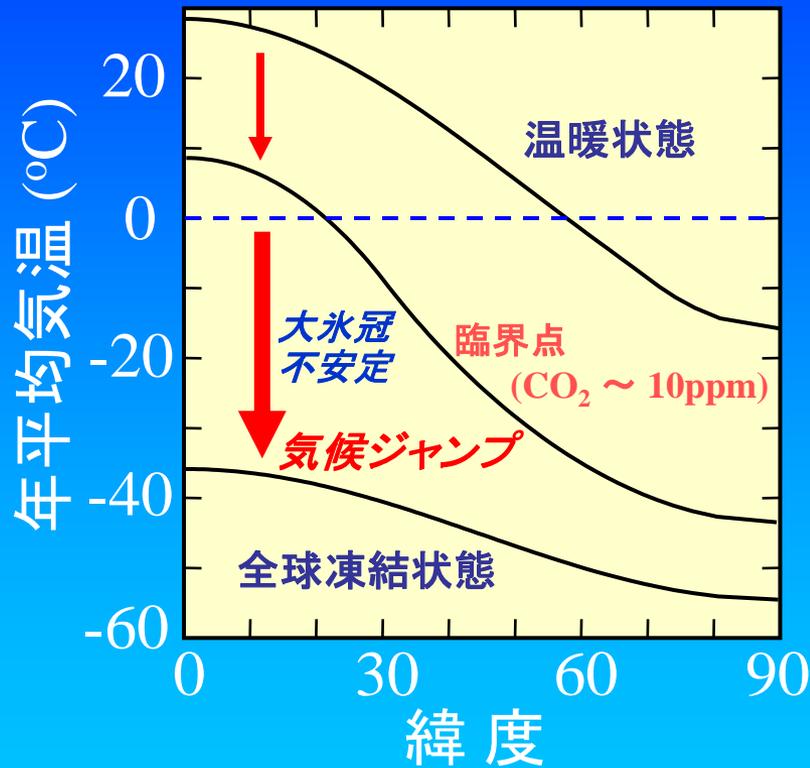
\* 実線は安定な状態 (破線は不安定な状態)

\* 温室効果の低下によって**全球凍結解**に陥る！

# 全球凍結しても脱出可能！

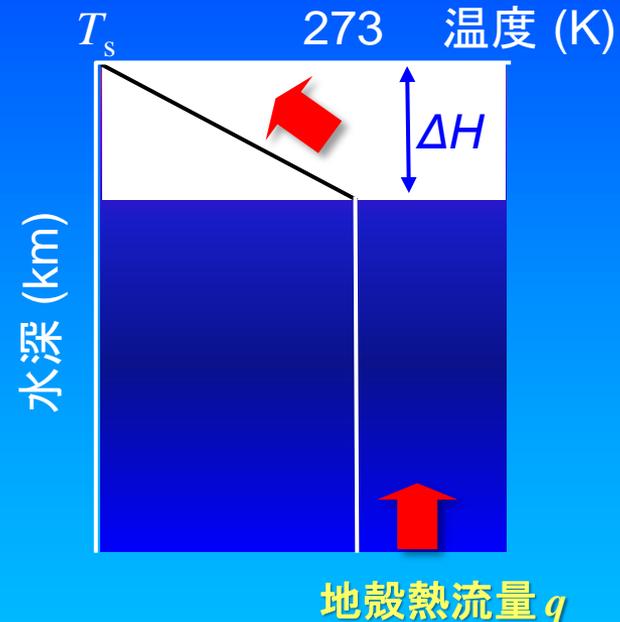
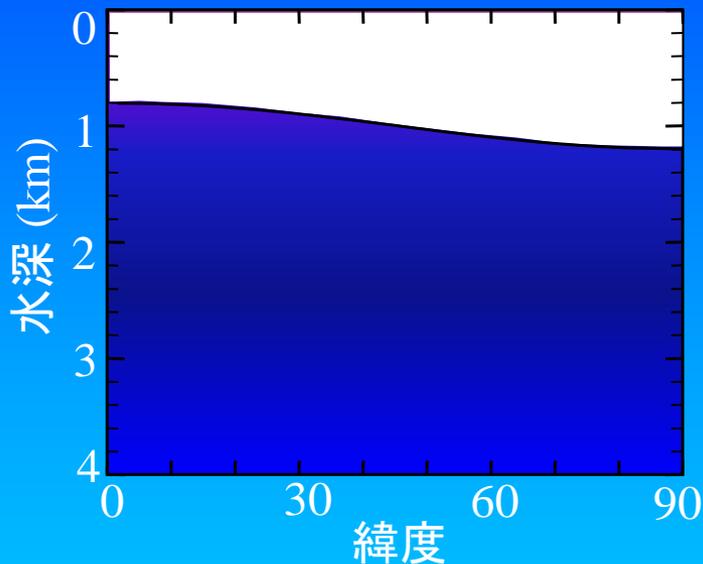


# 全球凍結現象における地球環境変化



平均気温  $-40^{\circ}\text{C}$  の寒冷環境から  
 $+60^{\circ}\text{C}$  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状態に達する
- \* 全球凍結の継続期間は1000万年間程度

# “スノーボールアース”仮説による説明

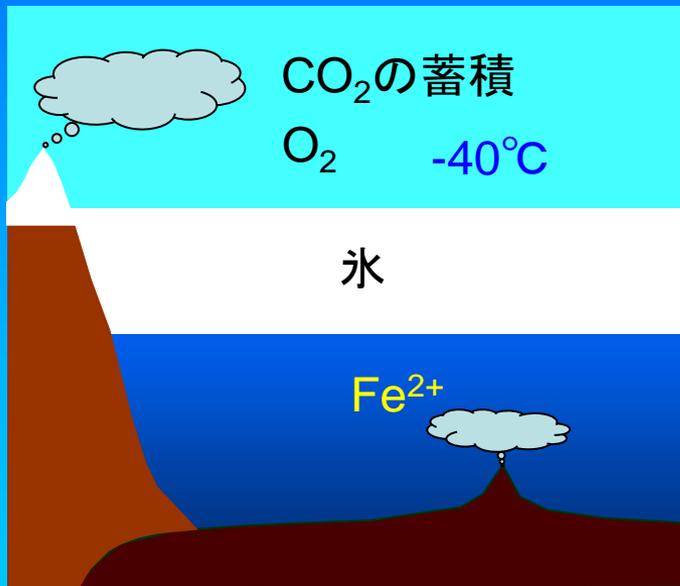
## ● 原生代の氷河時代の特徴

- (1) 低緯度に大陸氷河が存在した  
→ 全球凍結したと考えれば当然
- (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) 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

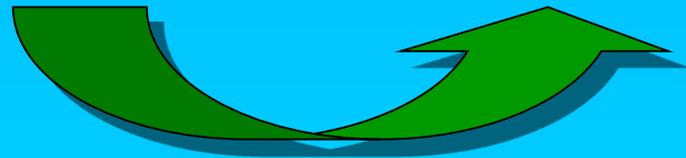
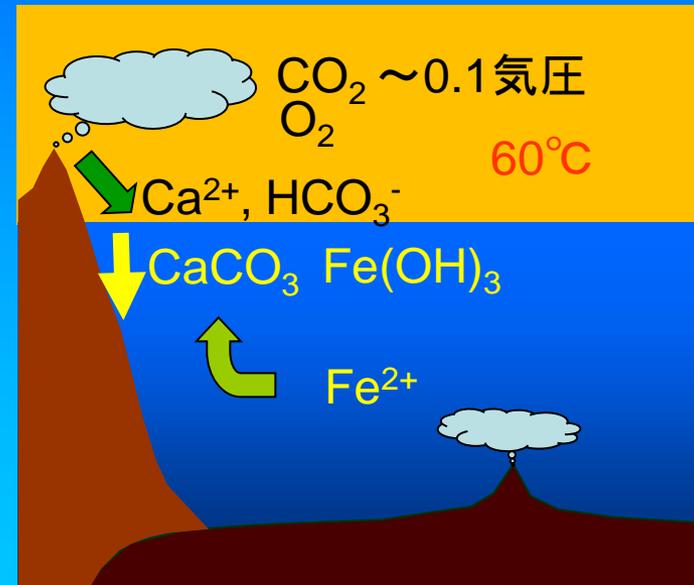
## (a) 全球凍結中

- ・火山活動で $\text{CO}_2$ 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

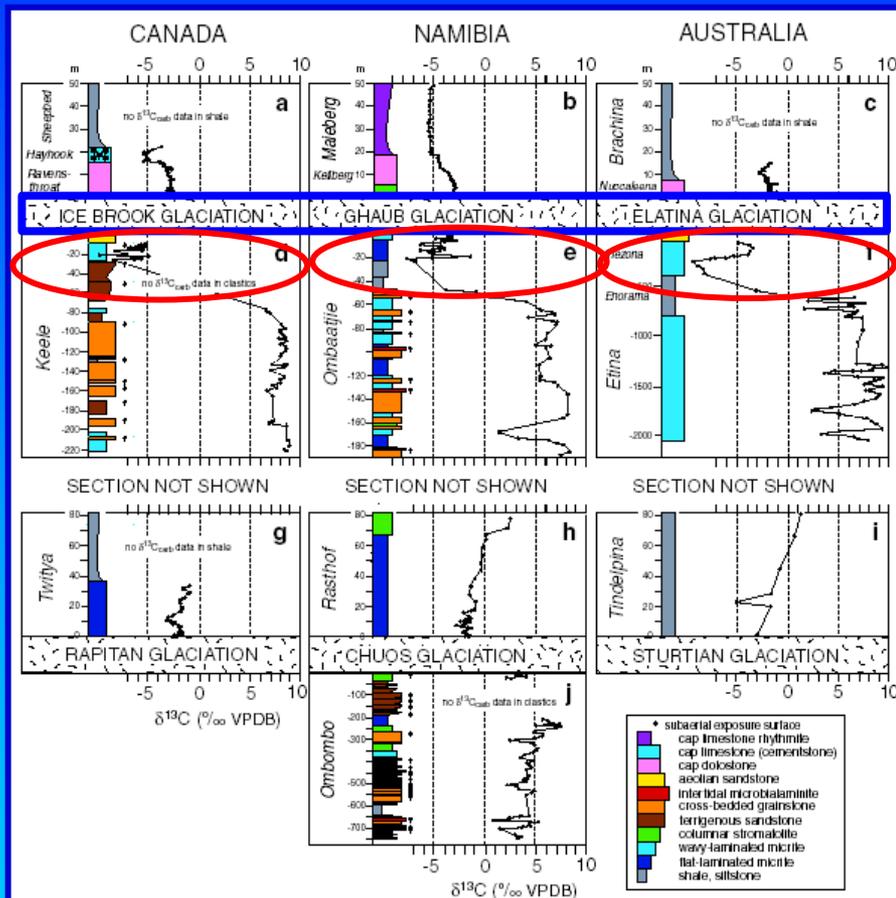


## (b) 全球融解直後

- ・風化で大量の陽イオンが供給  
→ 炭酸塩の沈殿
- ・深層水が湧昇して鉄イオンが酸化  
→ 酸化鉄の沈澱



# 炭素同位体比の変動



**Fig. 8** Representative  $\delta^{13}\text{C}$  profiles for carbonates bounding the older and younger Neoproterozoic glacials (Table 1) in the northern Canadian Cordillera (left), the Otavi platform in Namibia (centre), and the Adelaide succession in South Australia (right). Note high values ( $> 5\text{‰}$ ) before glaciation and low values ( $< 0\text{‰}$ ) afterwards, and the drop in values that leads the younger glaciation. Correlation follows Kennedy *et al.* (1998). Sources of data are (a) James *et al.* (2001) Redstone section, (b) unpublished Khowarib Schlucht section, (c) unpublished Parachilna Gorge section, (d) unpublished Stone Knife River section, (e) Hoffman *et al.* (1998b) and unpublished Keiserfontein section, (f) McKirdy *et al.* (2001), (g) unpublished Stone Knife River section, (h) unpublished Ombonde River section, (i) McKirdy *et al.* (2001), (j) unpublished Omutirapo section. Note non-uniform thickness scales in panels d-f.

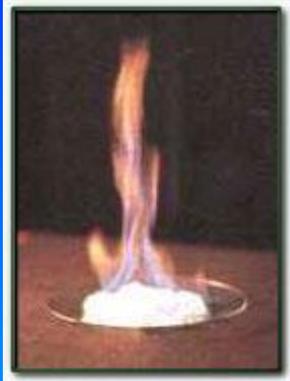
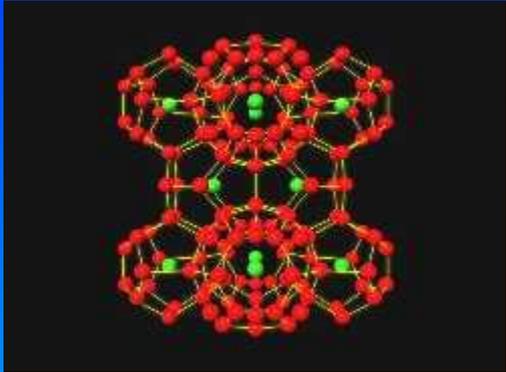
マリノアン氷河期の直前に  
炭素同位体比が急激な減少  
→ 氷河期直前に何らかの  
環境変動？

・生物生産性の低下？  
[Hoffman *et al.*, 1998]

・メタンハイドレートの崩壊？  
[Schrag *et al.*, 2002]

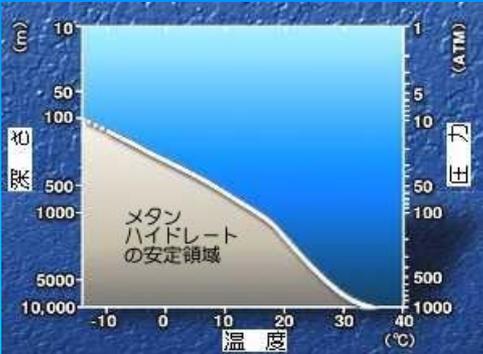
[Hoffman and Schrag, 2002]

# メタンハイドレートとは？

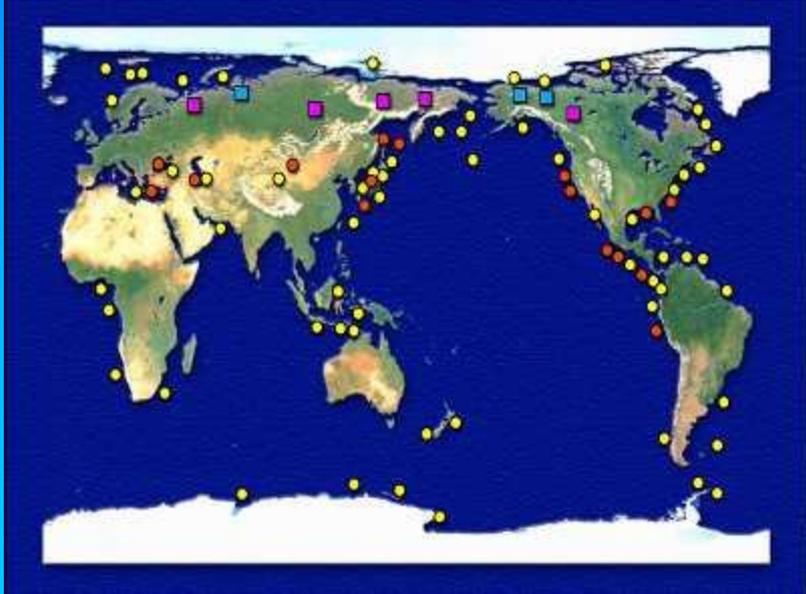
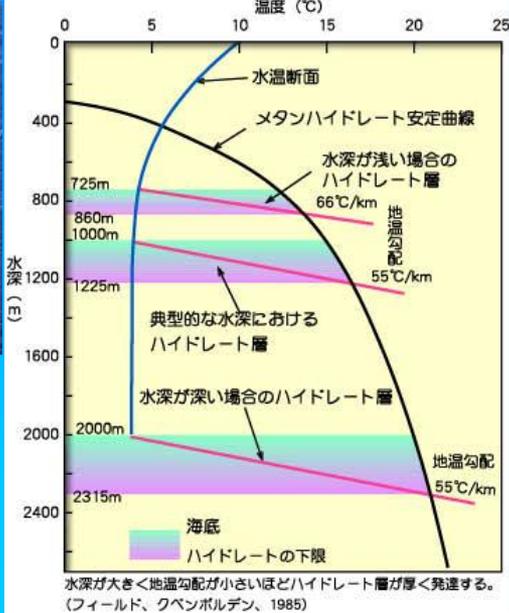


メタン分子と水分子から成る氷状の固体物質。永久凍土層の下や深度約500m以深の海底堆積物中に存在

\* きわめて軽い炭素同位体比を持つ ( $\delta^{13}\text{C} = -60 \sim -70 \text{ ‰}$ )



メタンハイドレートの安定領域



メタンハイドレートの分布

## 原因：メタンハイドレート？

### ■ 原生代後期の海水の炭素同位体比の正異常

- 大量の有機物が埋没
- 大量のメタンハイドレートが生成

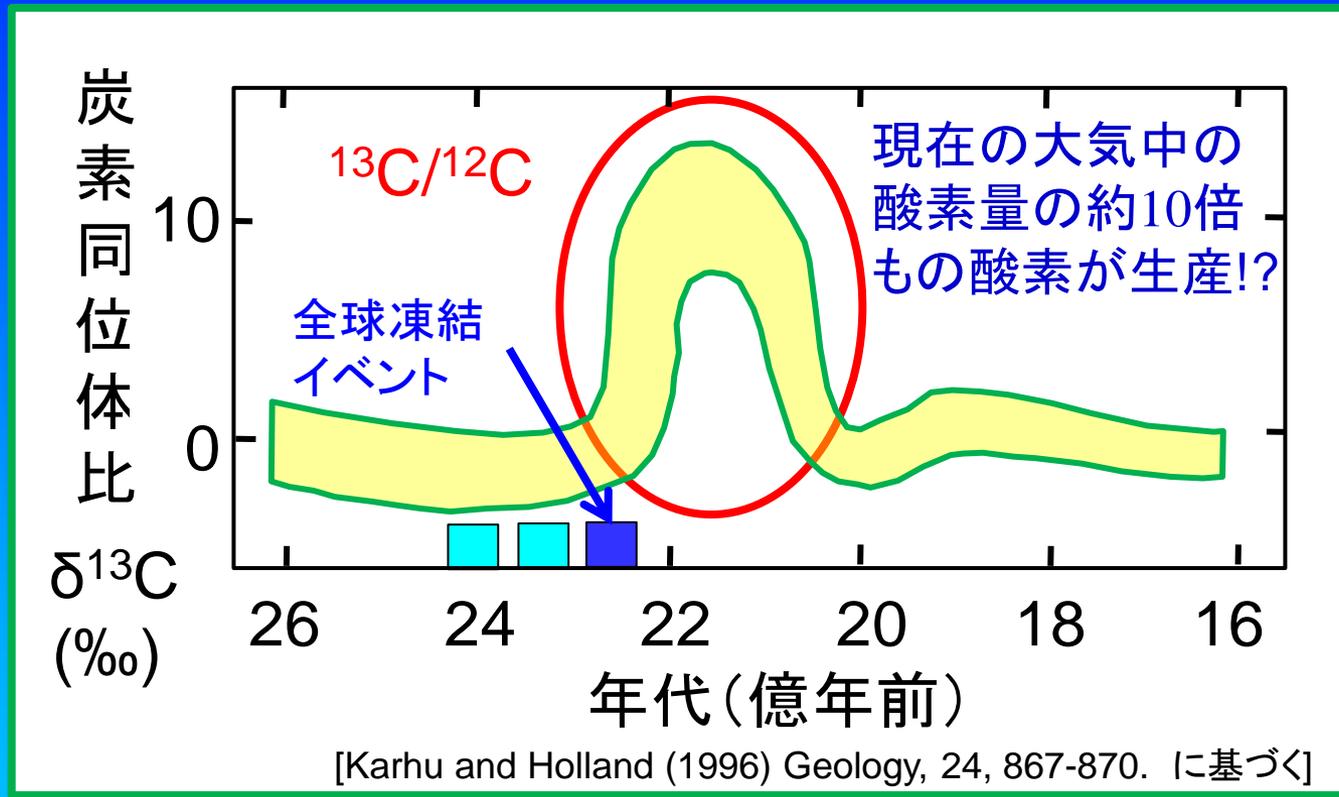
### ■ 全球凍結直前の炭素同位体比の負異常

- メタンハイドレートの持続的(～数十万年間)分解
- 大量のメタンの放出(炭素同位体比～ - 70‰)
  - メタン濃度の増加
  - 二酸化炭素濃度の低下 (Walkerフィードバックによる)
  - メタンハイドレートの枯渇
  - 温室効果の消失
  - 全球凍結？

[Schrag et al., 2002]

### 3. 全球凍結と酸素濃度の増大

# 大酸化イベント (Great Oxidation Event; GOE)



\* 22~20億年前に炭素同位体比の増加 (有機炭素が大量に埋没)  
→ 酸素が大量に放出!

全球凍結イベントと大酸化イベントの間に因果関係?

# 酸素濃度の制約因子

## ■ 酸化還元敏感元素 (redox sensitive elements)

25.1億年前	モリブデン, レニウム, バナジウム	酸素増
24.5億年前	堆積性ウラン鉱床( $U^{2+} \rightarrow U^{3+}$ )	貧酸素
24.5億年前	堆積性パイライト鉱床( $Fe_2S$ )	貧酸素
25~20億年前	縞状鉄鉱床( $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ )	富酸素
22.2億年前	赤色土層( $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ )	富酸素

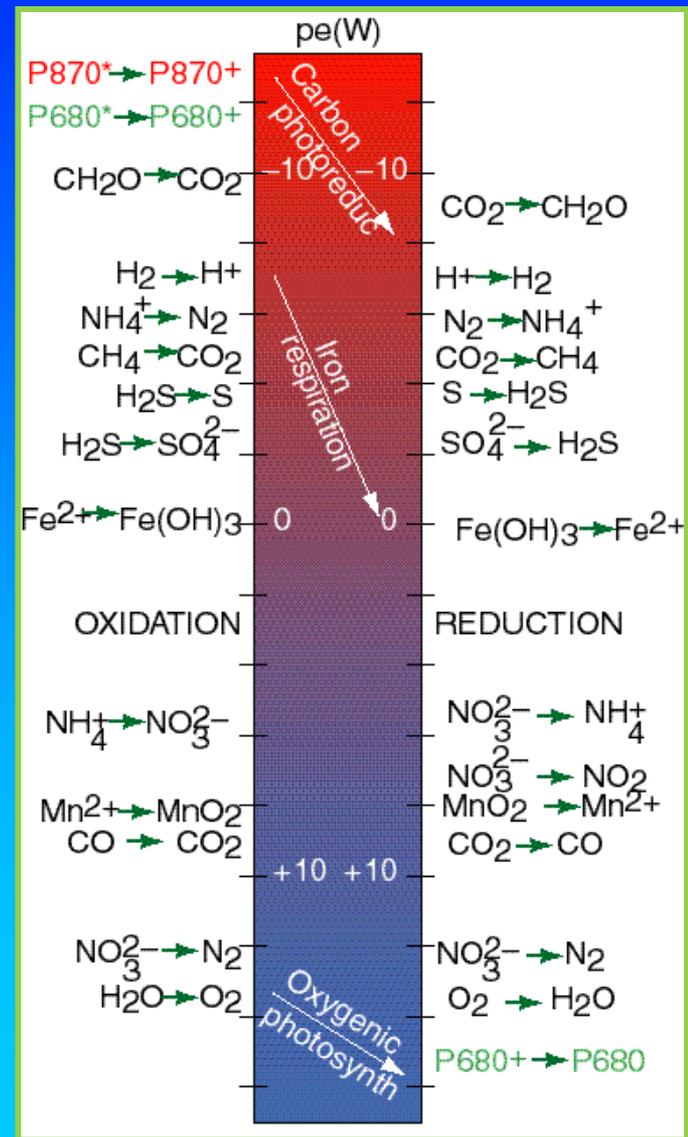
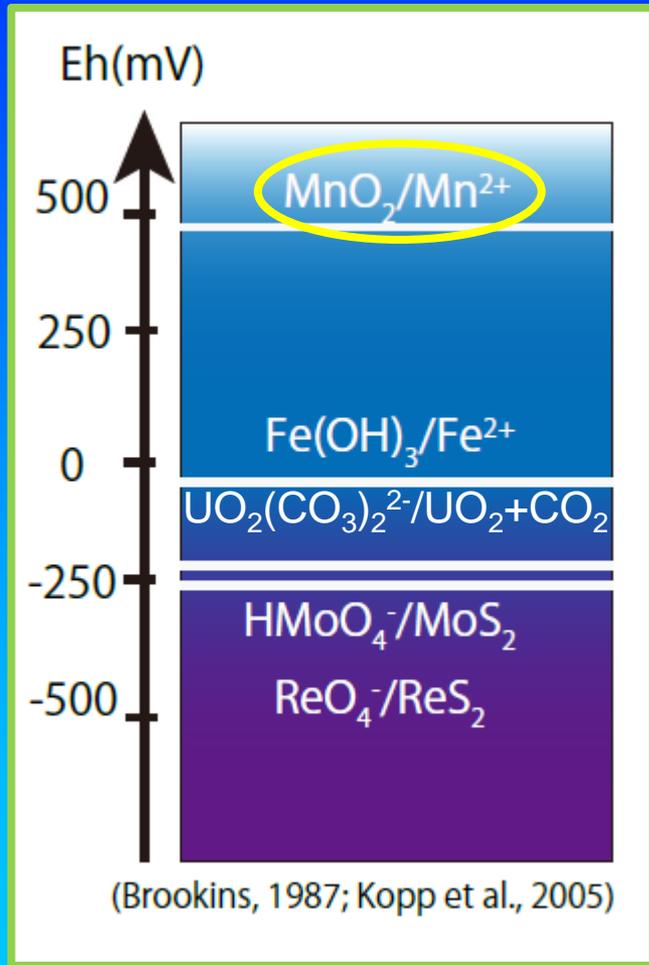
## ■ まったく独立の証拠

硫黄同位体比の質量非依存性分別効果

(Mass-independent fractionation; MIF)

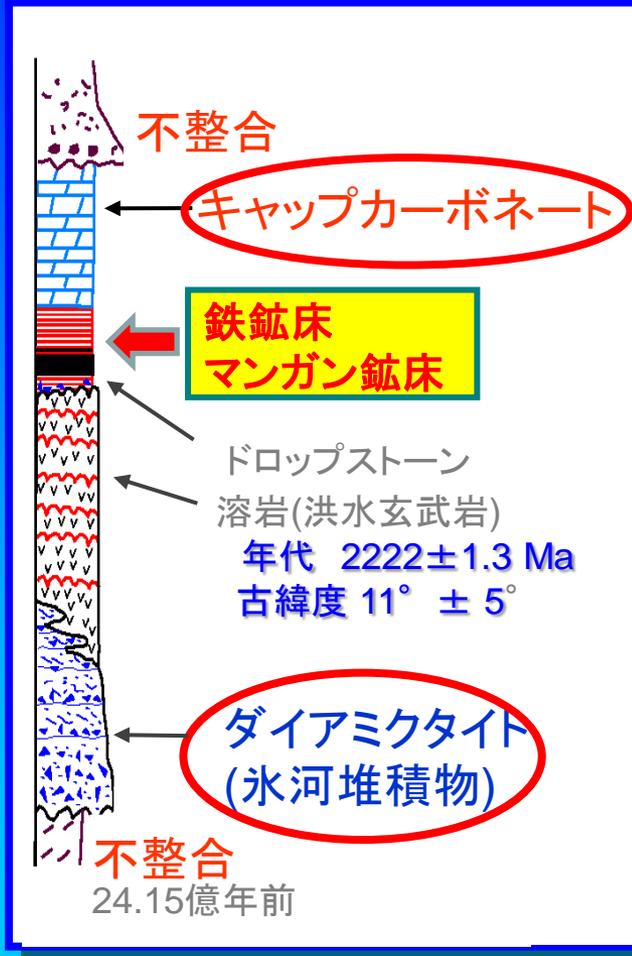
炭素同位体比の正異常 (Great Oxidation Event; GOE)

# 酸化還元電位

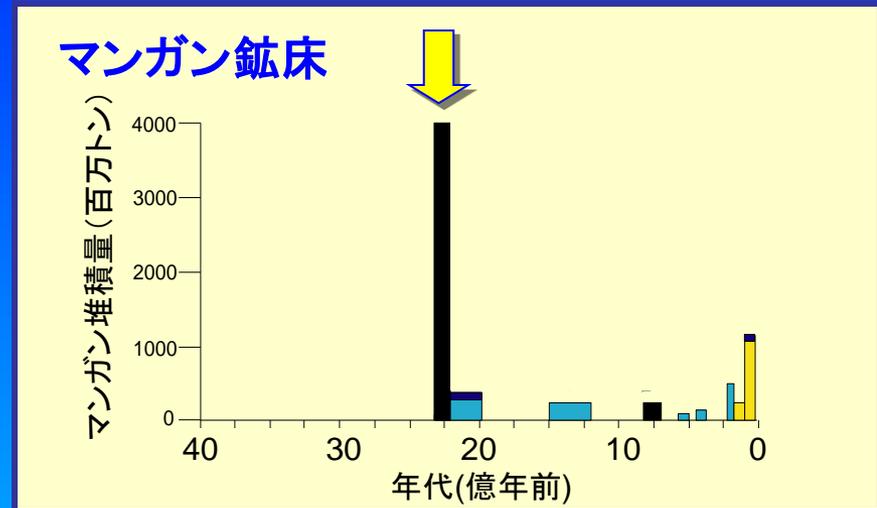


[Gaidos et al., 1999]

# 全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22.22億年前の氷河堆積物の直上に  
**地球史上初のマンガン鉱床**が形成
- ・ マンガンを酸化 ( $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$ ) するためには、**酸素分子が必要不可欠**  
→ **全球凍結直後に酸素濃度が増加!?**

# The Project on Paleoproterozoic Glaciation and Oxidation

Ontario (Canada)

Michigan, Wyoming (USA)

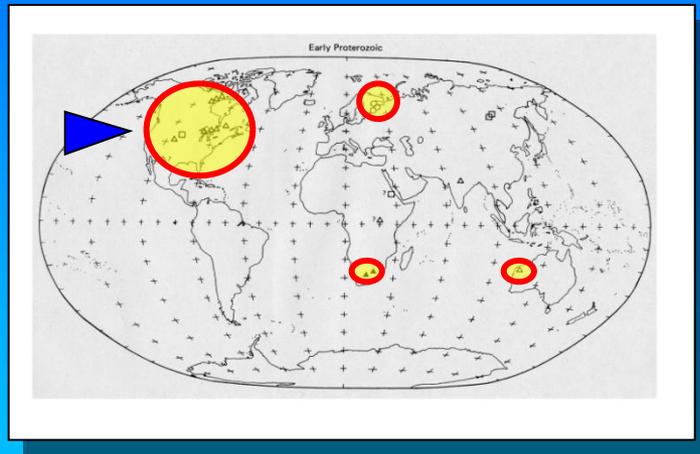
Koli (Finland)

Griquatown West (South Africa)

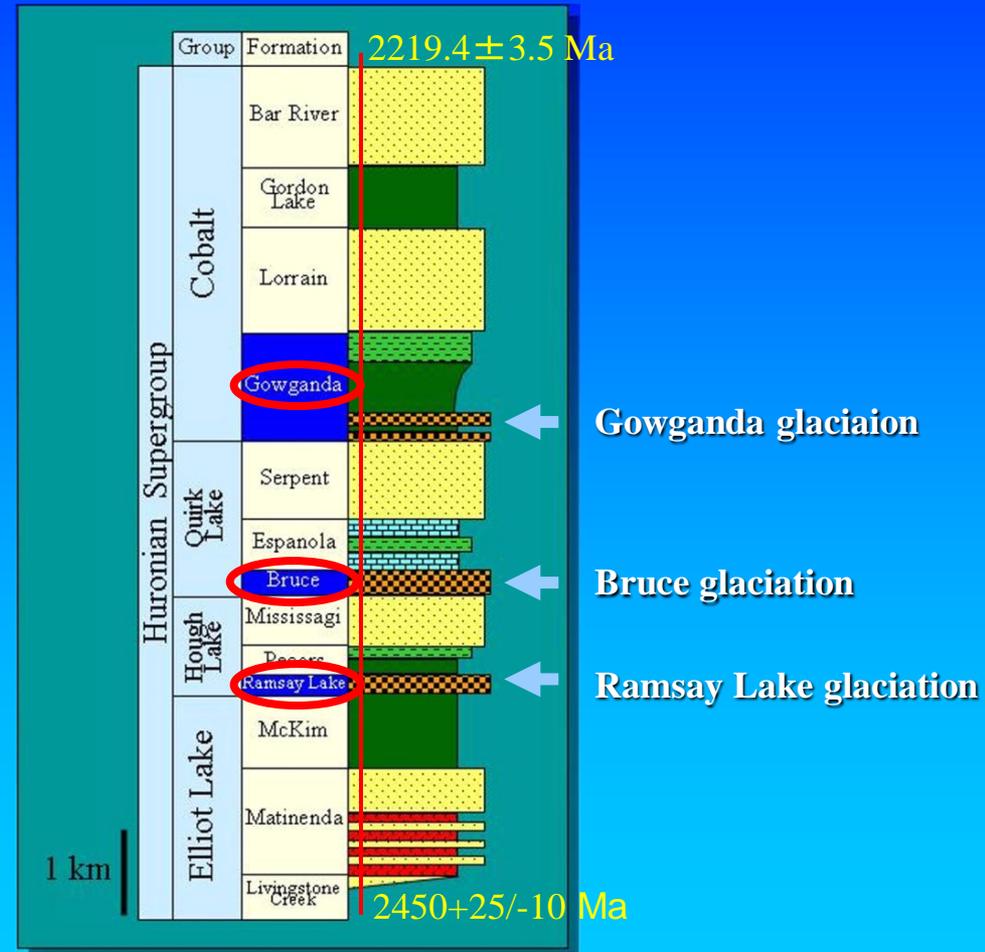


# ヒューロニアン累層群 (カナダ, オンタリオ州)

Distribution of Paleoproterozoic sedimentary rocks

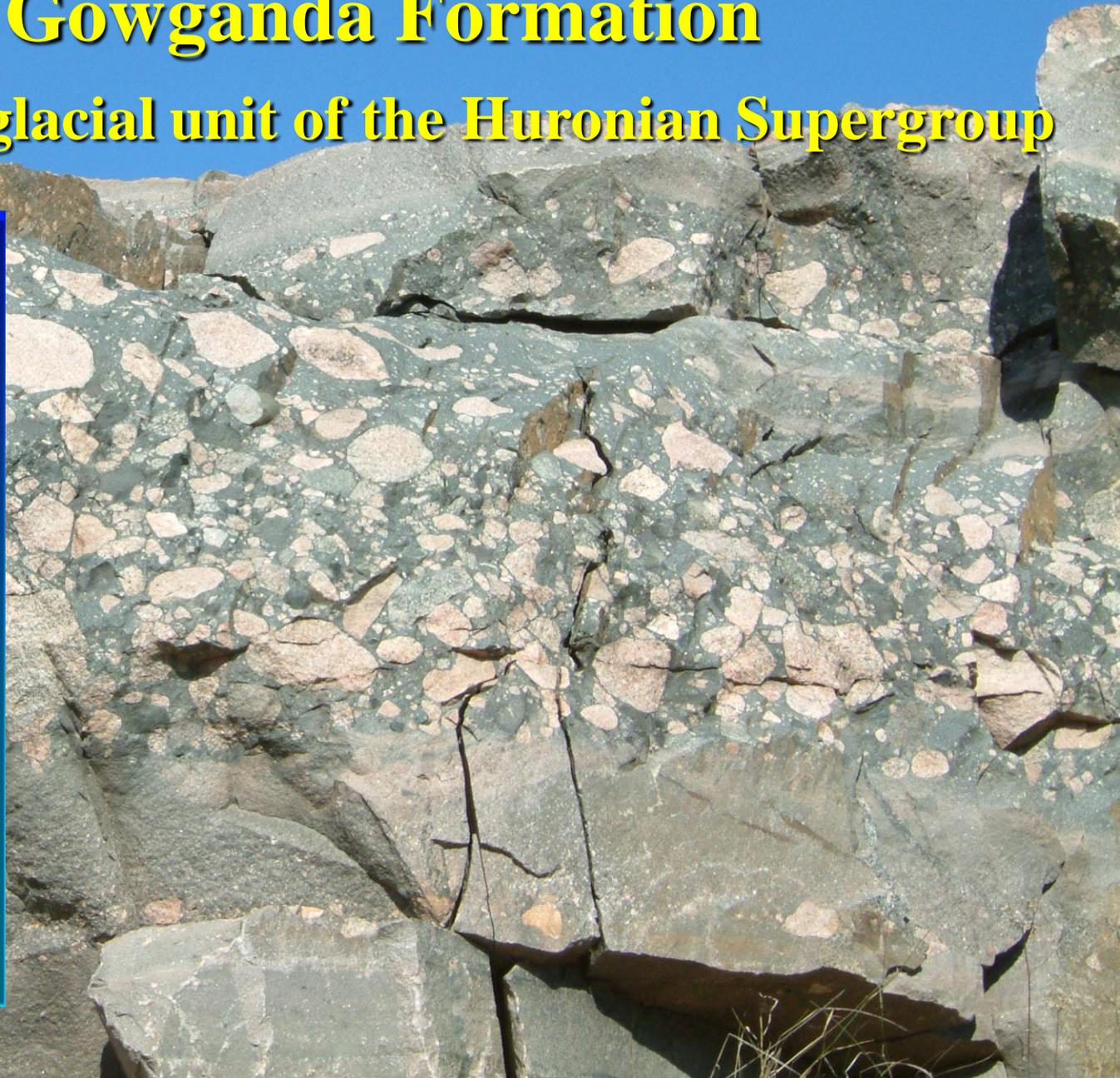
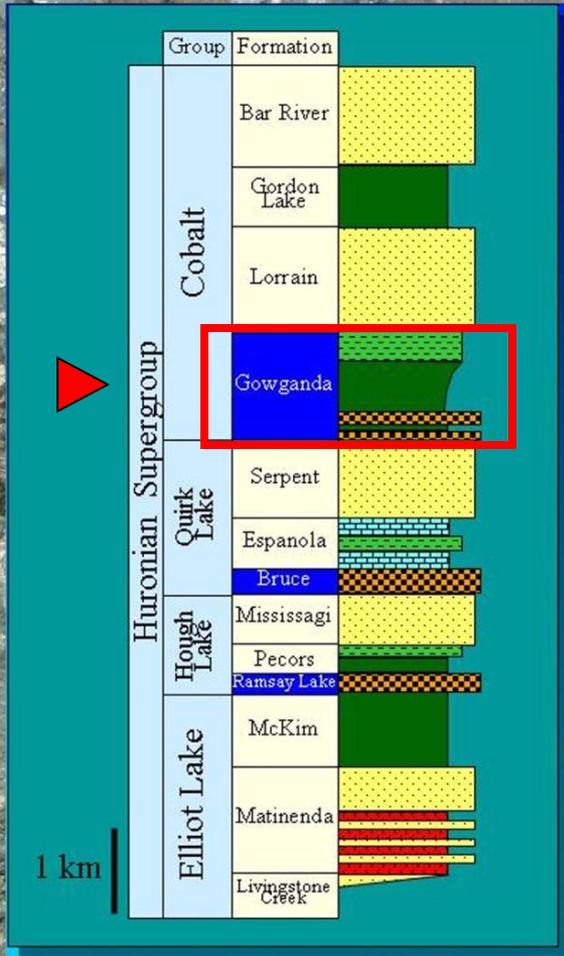


[Hambrey and Harland, 1981]

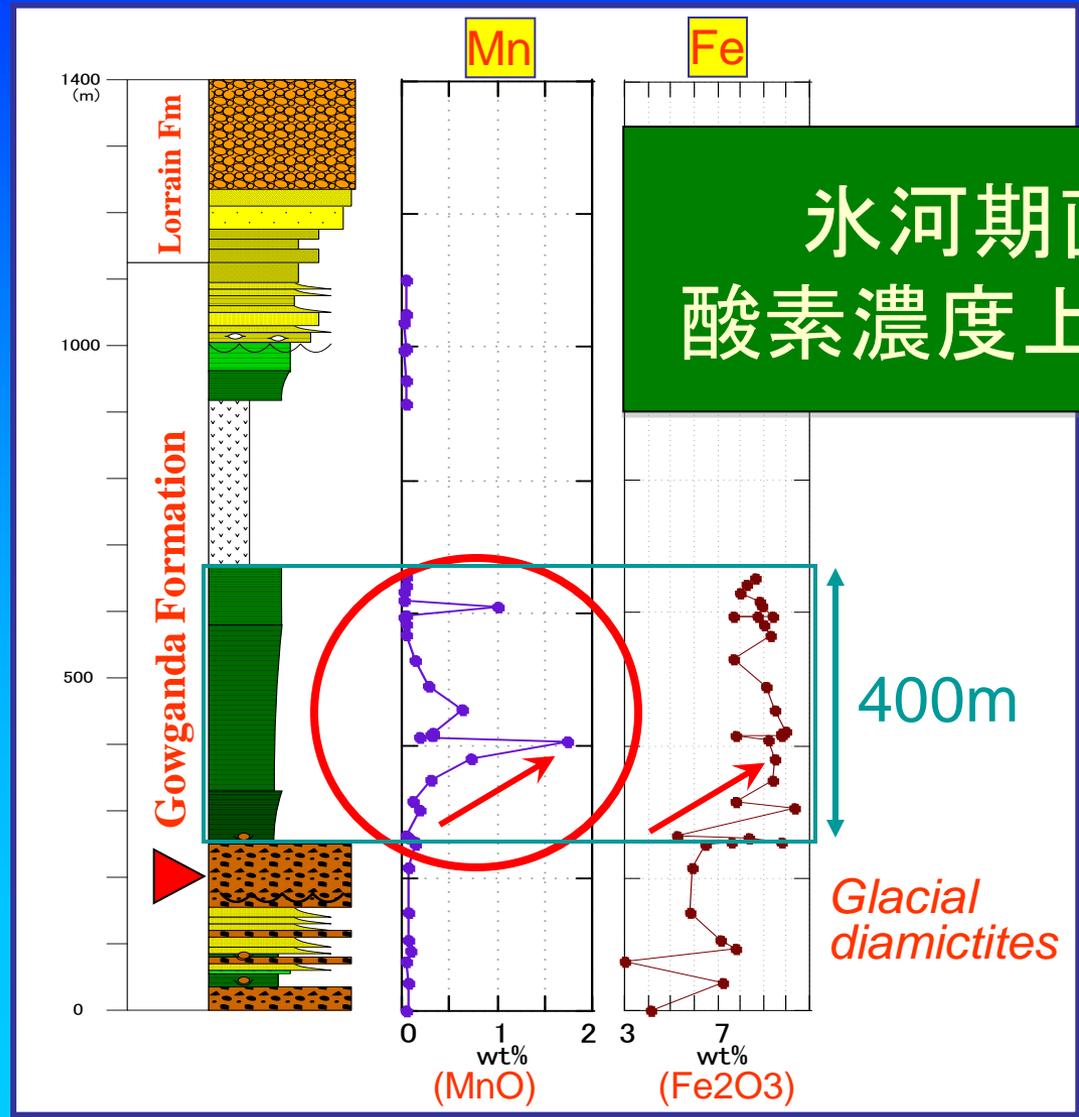


# The Gowganda Formation

The uppermost glacial unit of the Huronian Supergroup



# Discovery of Mn Anomaly in the Huronian Supergroup, Canada



氷河期直後の  
酸素濃度上昇を支持

Core samples from  
Cobalt area, Ontario,  
Canada

legend

- argillite
- siltstone
- sandstone
- conglomerate
- diamictite
- intrusion

# カナダと南アフリカ共和国の対比

## Mnの総堆積量

	カナダ	南アフリカ共和国
含有量	低い (2 wt%)	高い (20-50 wt%)
層厚	厚い (400 m)	薄い (3-45 m)

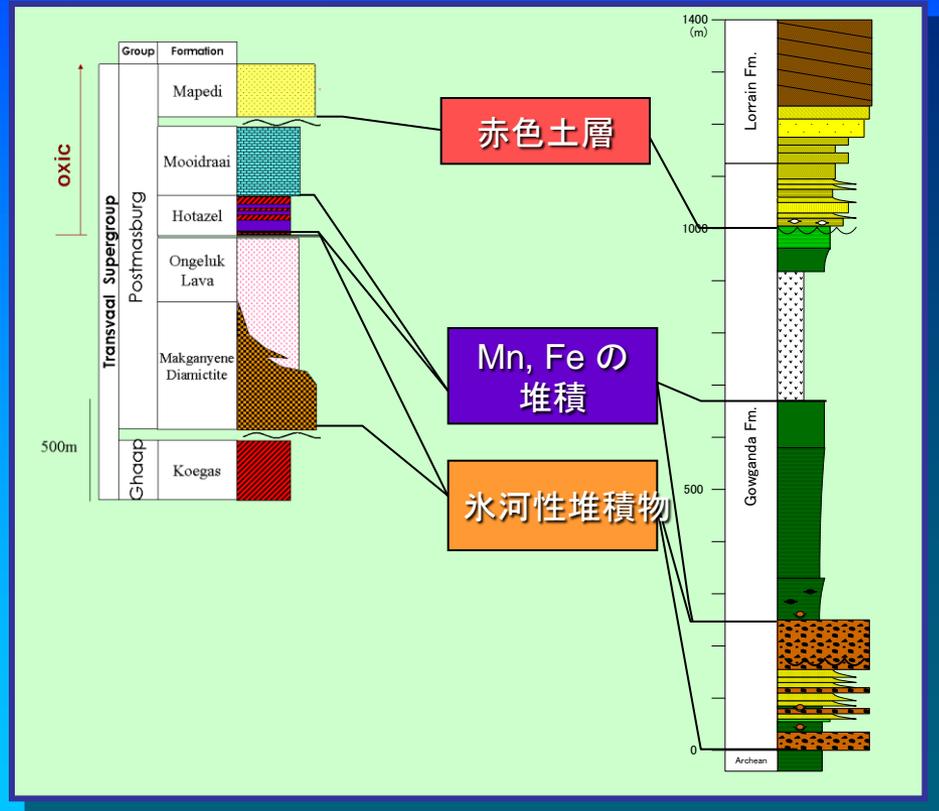
↓

\*ヒューロニアン累層群 (カナダ) における 単位面積当たりの Mn 堆積量は、トランスバル累層群 (南ア) の 20 ~ 80 % に相当！

## 層序の類似性

トランスバル累層群  
(南アフリカ共和国)

ヒューロニアン累層群  
(カナダ)

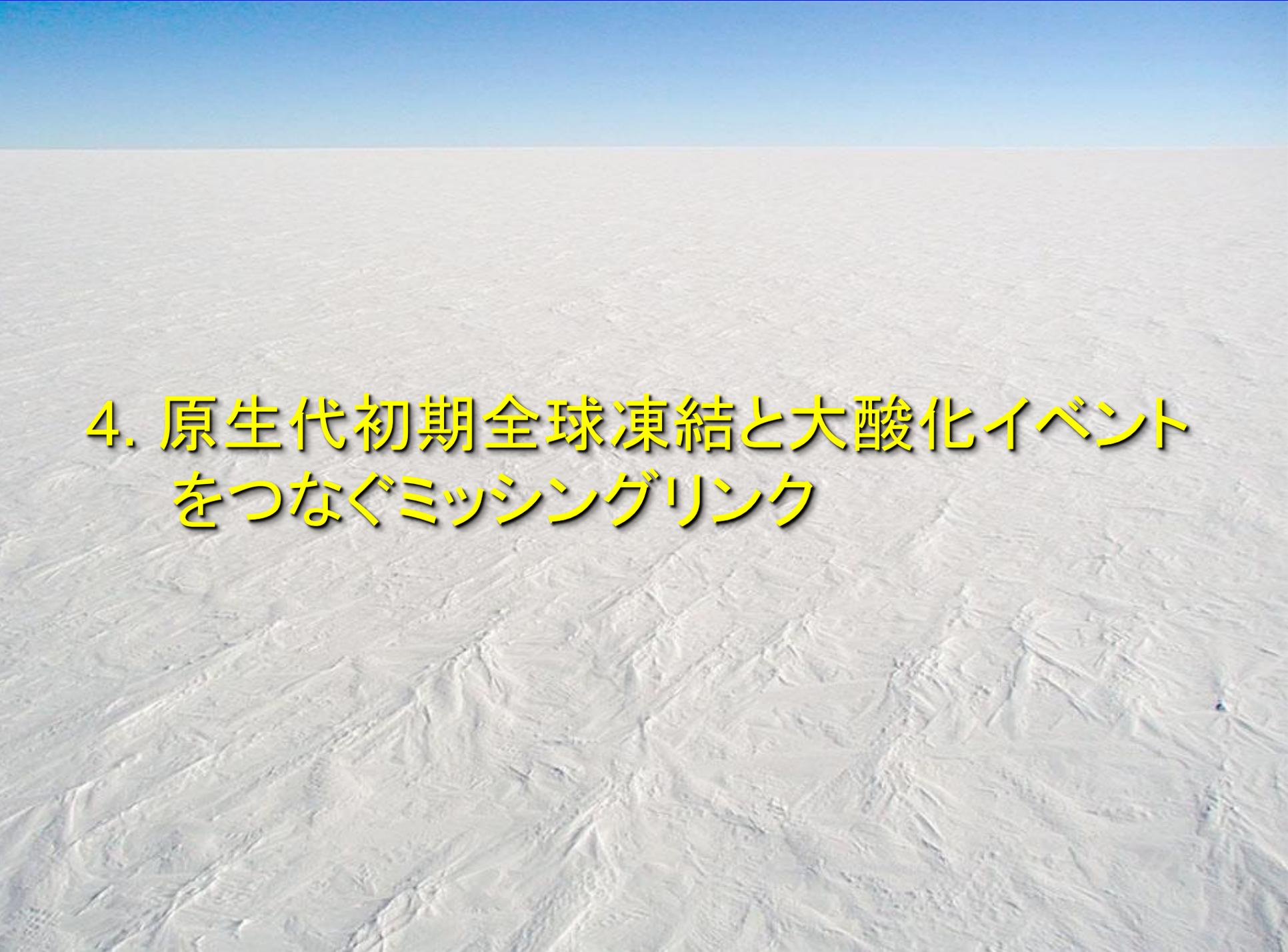


## 年代論

ゴウガンダ層 (カナダ) > 2219.4 ± 3.4 Ma

ホタゼル層 (南アフリカ共和国) 2222 ± 1.3 Ma

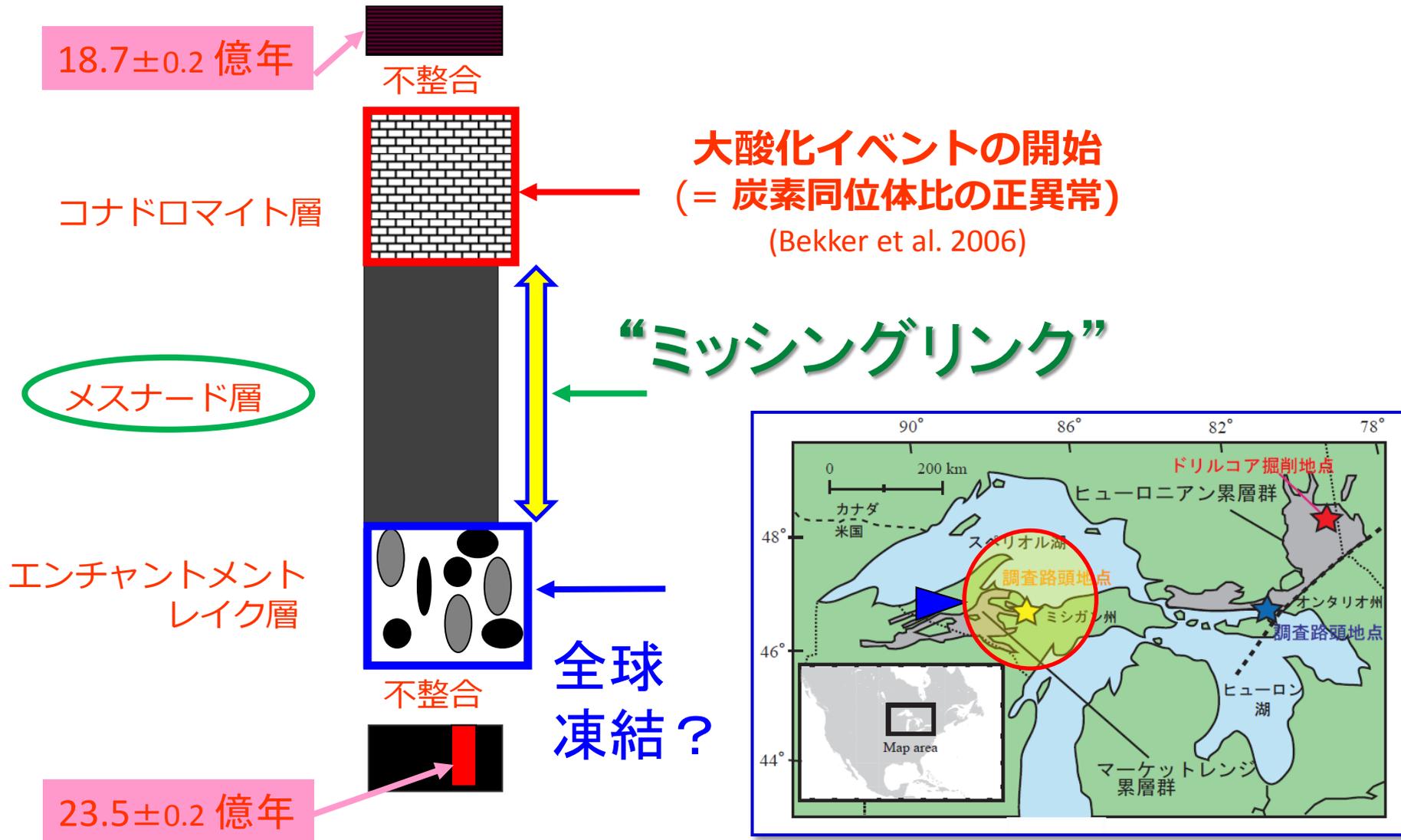
[Sekine et al. (2011) EPSL]

An aerial photograph of a vast, flat, light-colored landscape, possibly a salt flat or a desert, under a clear blue sky. The terrain is mostly uniform in color but shows some subtle textures and patterns, including what appears to be a network of small, interconnected ridges or channels. The horizon is a straight line separating the light-colored ground from the clear blue sky.

## 4. 原生代初期全球凍結と大酸化イベント をつなぐミッシングリンク

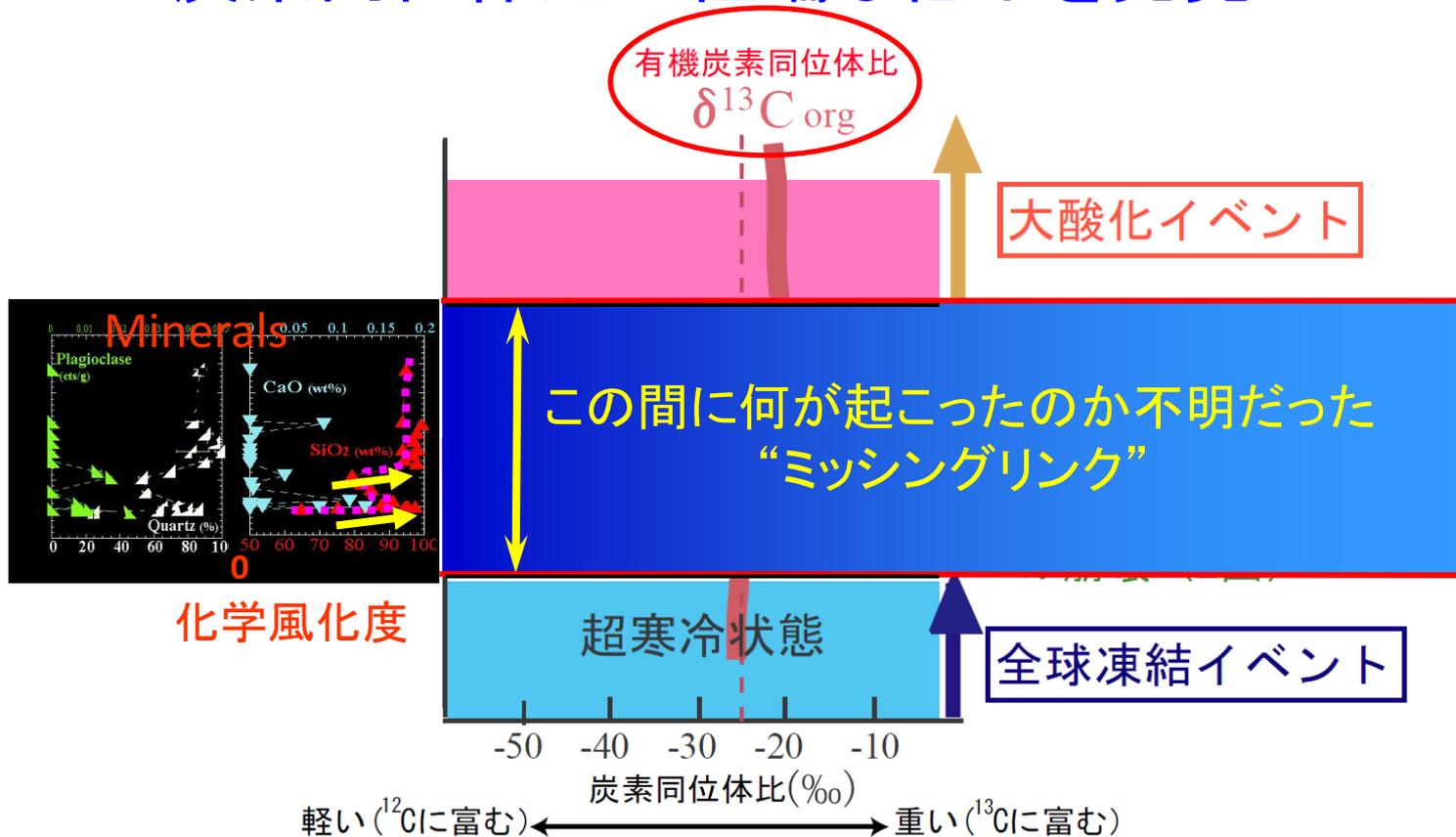
# 原生代初期(22億年前)氷河性堆積物(米国)

## ■マーケットレンジ累層群 (米国ミシガン州)



# 全球凍結と大酸化イベントとの因果関係

## 炭素同位体比の極端な低下を発見！

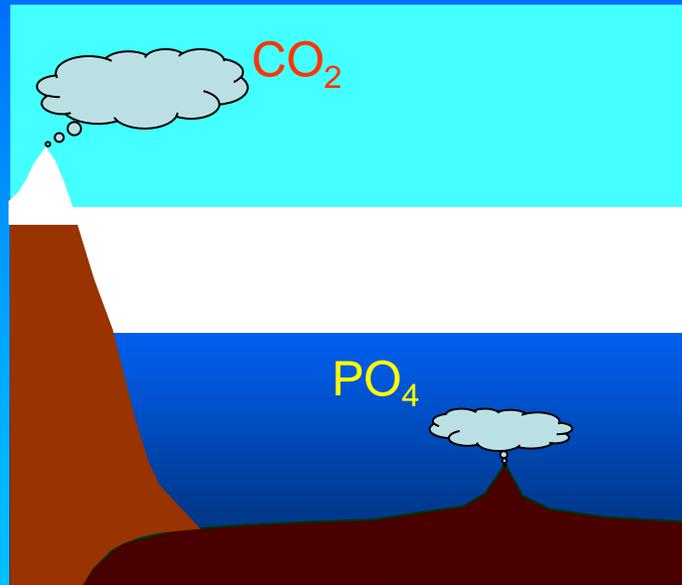


メタンハイドレートの分解 → 超温暖化 → 風化浸食率大  
→ リンの供給大 → 光合成活発化 → 大酸化イベント?

# 酸素発生シナリオ

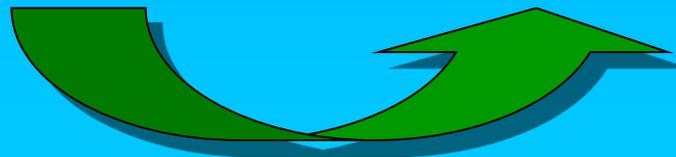
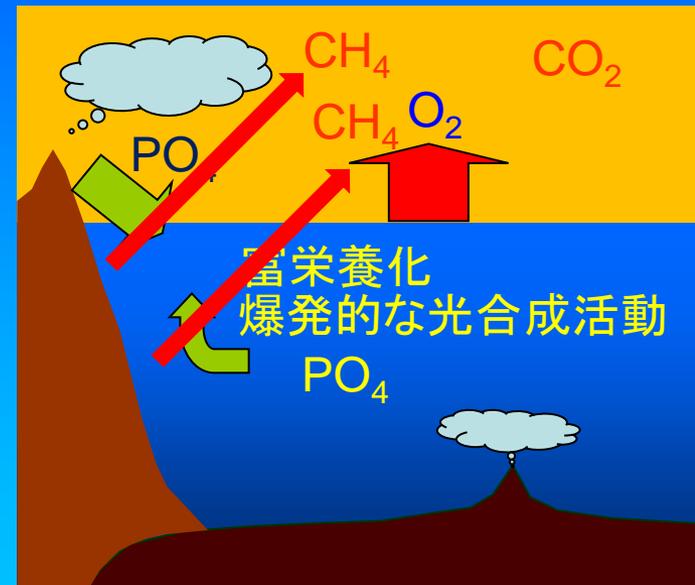
## (a) 全球凍結中

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



## 5. 地球環境と生命の共進化

## スノーボールアース仮説の問題点

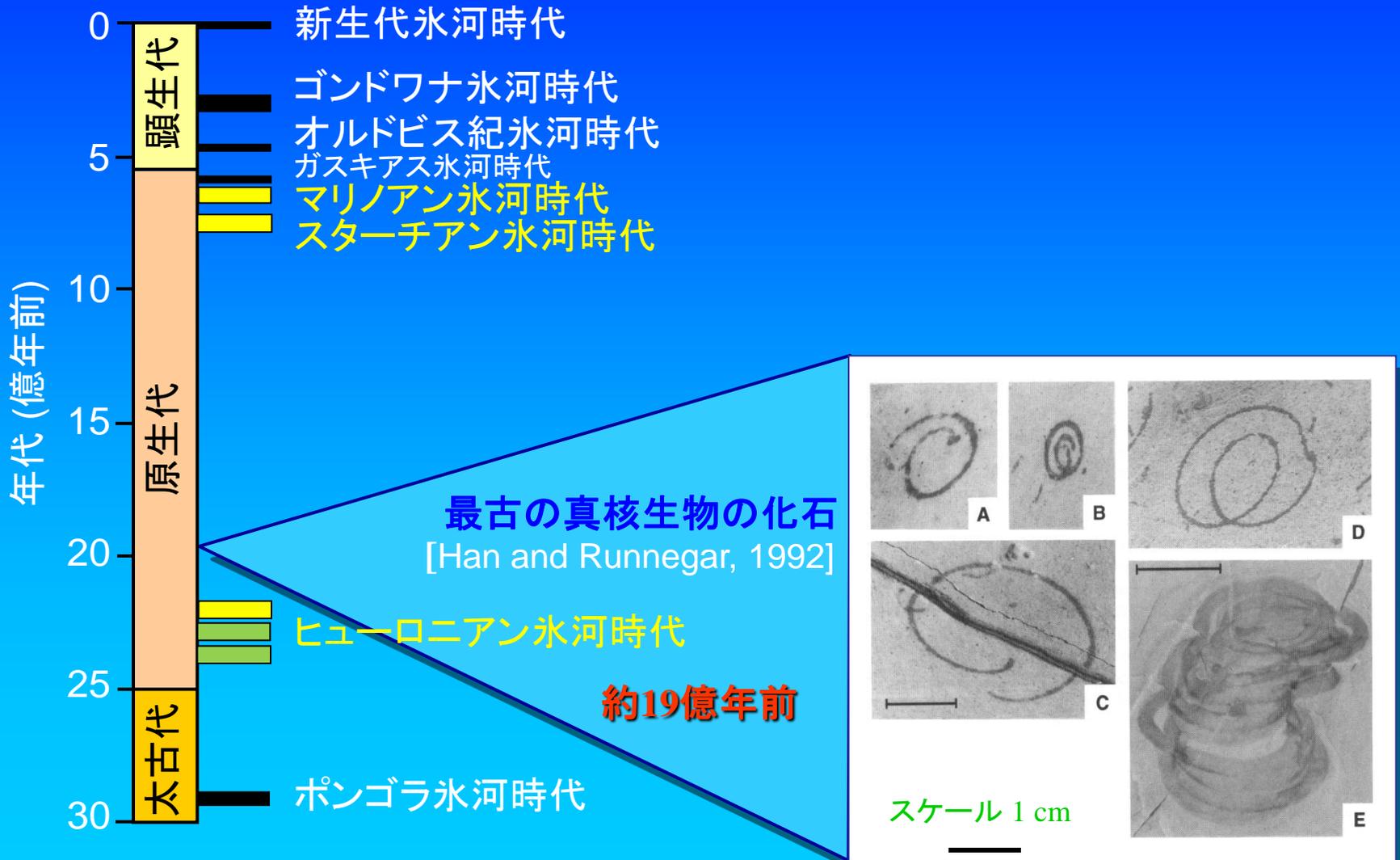
陸も海も完全に氷で覆われる → 生命大絶滅の危機!?

生命(とくに光合成藻類)はどこで生き延びたのか？

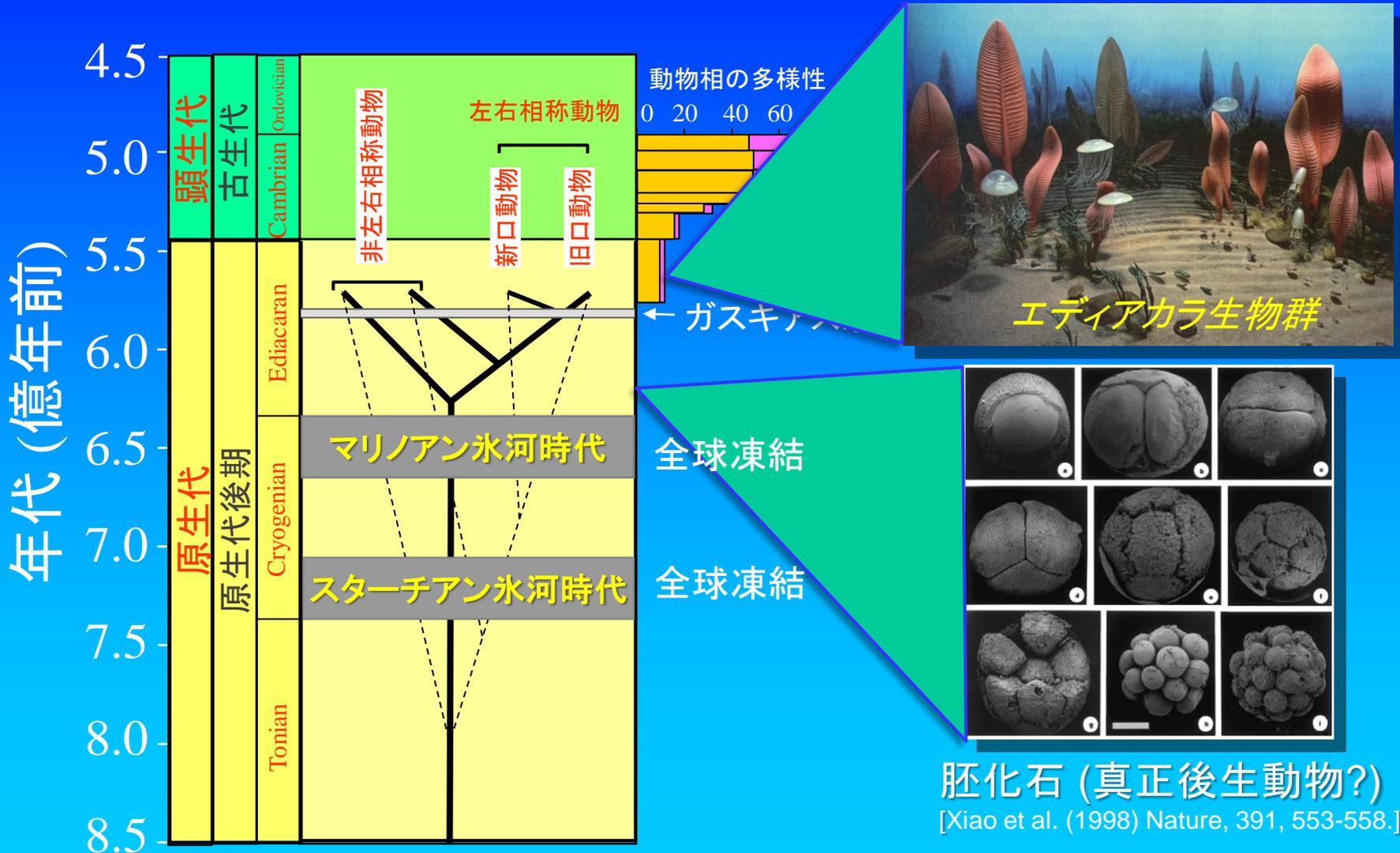
考えられる可能性

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. 火山地域に温泉が点在していた？

# 全球凍結と真核生物

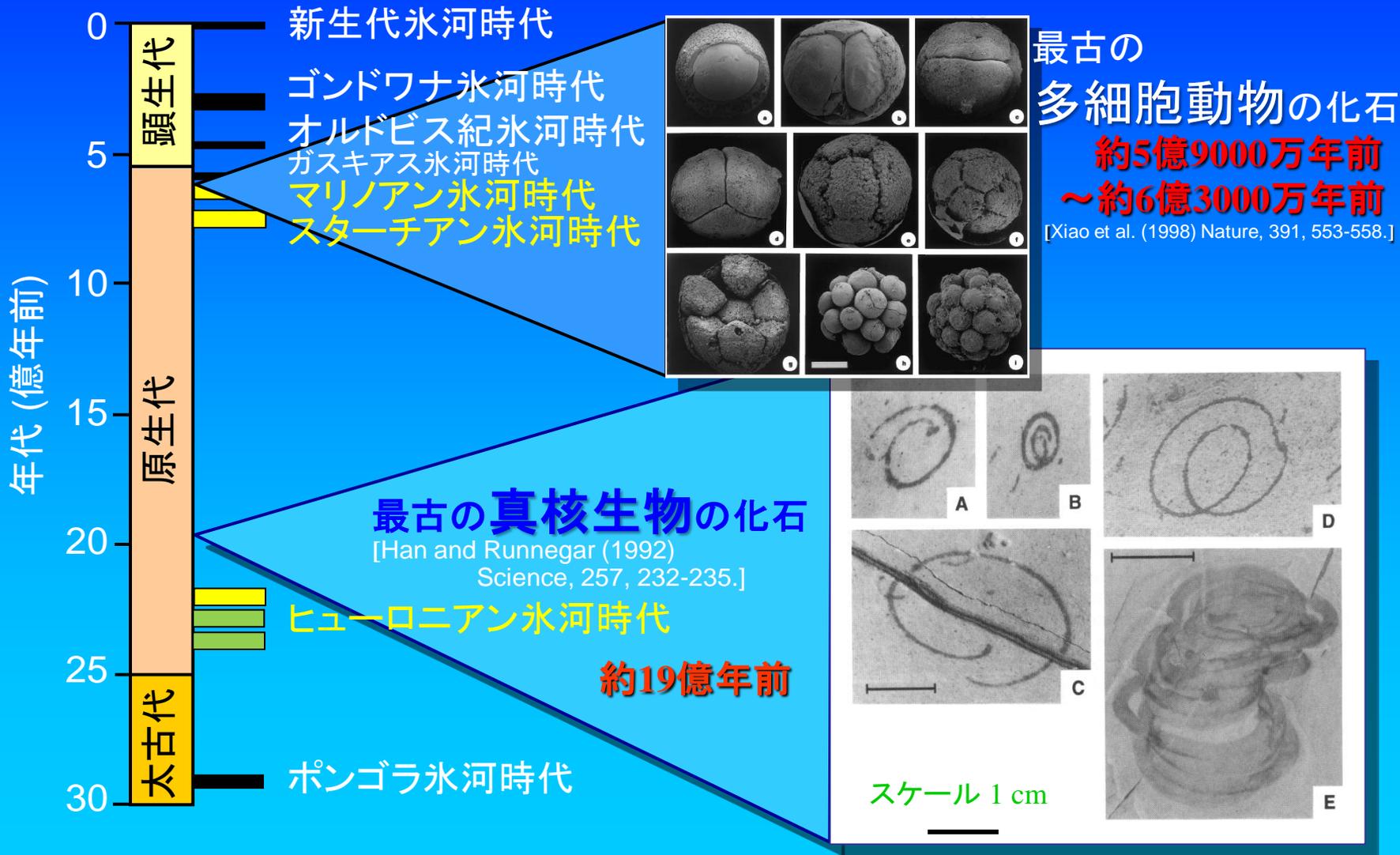


# 全球凍結と多細胞生物

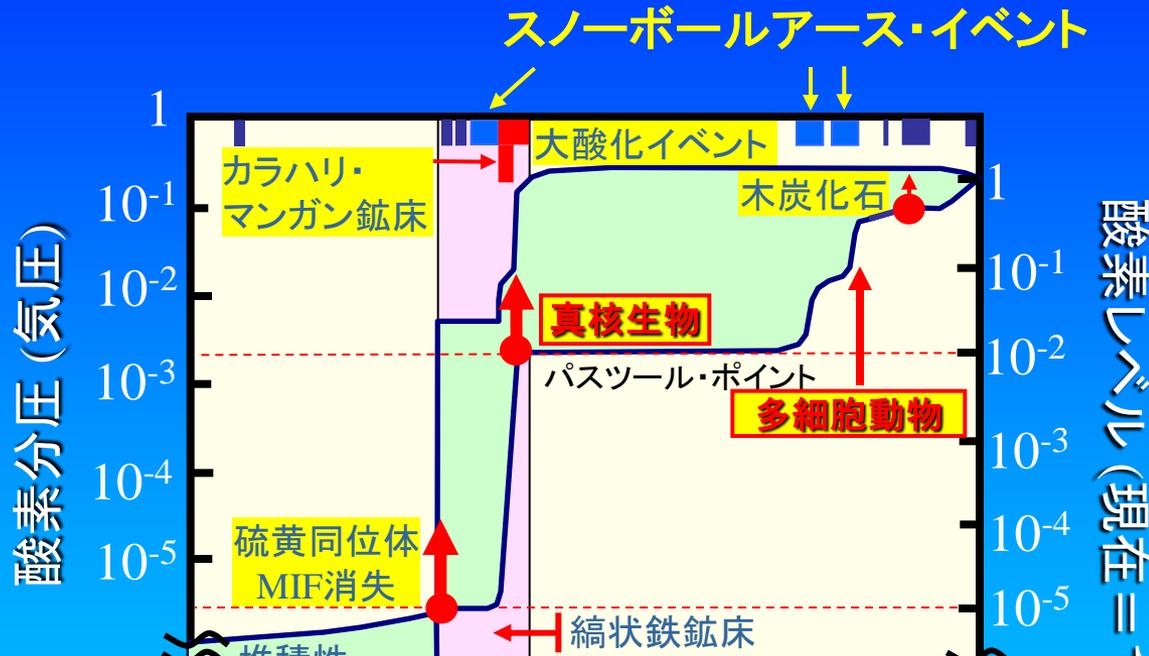


全球凍結直後に多細胞動物が出現 !?

# 全球凍結と生物進化に因果関係？



# 全球凍結 — 大気進化 — 生物進化のリンク



全球凍結と酸素濃度の増大と生物の大進化が密接に関係？

若い星の周りの地球型惑星大気を観測しても酸素は検出困難？

\* 地球形成から約24億年後になって0.1%オーダーに

\* 大気の主成分になるのは地球形成から約40億年後

## Reference

- David A D Evans, 2000: Stratigraphic, geochronological, and paleomagnetic constraints upon the neoproterozoic climatic paradox, *American Journal of Science*, Volume. 300, pp. 347-433.
- 川上紳一, 2000: 生命と地球の共進化 NHKブックス888, 日本放送出版協会, pp. 267.
- Kirschvink et al, 2000: Paleoproterozoic snowball Earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences, *Proceedings of the National Academy of Science*, Volume. 97, Issue 4, pp. 1400-1405
- Paul F. Hoffman HUCE, 2010:  
<http://environment.harvard.edu/about/faculty/paul-f-hoffman>
- Hoffman and Schrag, 2002: A major perturbation of the carbon cycle before the Ghaub glaciation (Neoproterozoic) in Namibia: Prelude to snowball Earth?, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Volume 3, Issue 6, pp. 1.
- Allen and Hoffman, 2005: Extreme winds and waves in the aftermath of a Neoproterozoic glaciation, *Nature*, Volume 433, Issue 7022, pp. 123-127.

## Reference

- Hoffman et al, 1998: A Neoproterozoic Snowball Earth, *Science*, Volume. 281, Issue. 5381, pp. 1342 .
- Schrag et al, 2002: On the initiation of a snowball Earth, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Volume 3, Issue 6, pp. 1.
- Bekker et al, 2006: Redox State of the Deep Ocean During the 2.22-2.1 Ga Carbon Isotope Excursion, American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract #U51A-03.
- Gaidos et al, 1999: BIOGEOCHEMISTRY: Life in Ice-Covered Oceans, *Science*, Volume. 284, Issue. 5420, pp. 1631
- Kirschvink et al, 2000: Paleoproterozoic snowball Earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences, *Proceedings of the National Academy of Science*, Volume. 97, Issue 4, pp.1400-1405
- 東京大学, 2003: 多圏地球システムの進化と変動の予測可能性, [http://wwwold.eps.s.u-tokyo.ac.jp/jp/COE21/results/h15about02\\_1.html](http://wwwold.eps.s.u-tokyo.ac.jp/jp/COE21/results/h15about02_1.html)

## Reference

- Sekine et al, 2011:Manganese enrichment in the Gowganda Formation of the Huronian Supergroup: A highly oxidizing shallow-marine environment after the last Huronian glaciation, Earth and Planetary Science Letters, Volume 307, Issue 1-2, pp. 201-210
- 関根 康人, 田近 英一, 多田 隆治, 大河内 直彦, 2010: 約22億年前の全球凍結イベントは大気・生命進化の起爆剤?: <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2010/30.html>
- Sekine et al, 2010:Anomalous negative excursion of carbon isotope in organic carbon after the last Paleoproterozoic glaciation in North America, Geochemistry Geophysics Geosystems, Volume 11, Issue 8, CiteID Q08019
- Han and Runnegar, 1992:Megascopic Eukaryotic Algae from the 2.1-Billion-Year-Old Negaunee Iron-Formation, Michigan, Science, Volume 257, Issue 5067, pp. 232-235
- Xiao et al, 1998:Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite, Nature, Volume 391, Issue 6667, pp. 553-558