

# 『地質試料から見た生命・地球表層環境の経年変化』

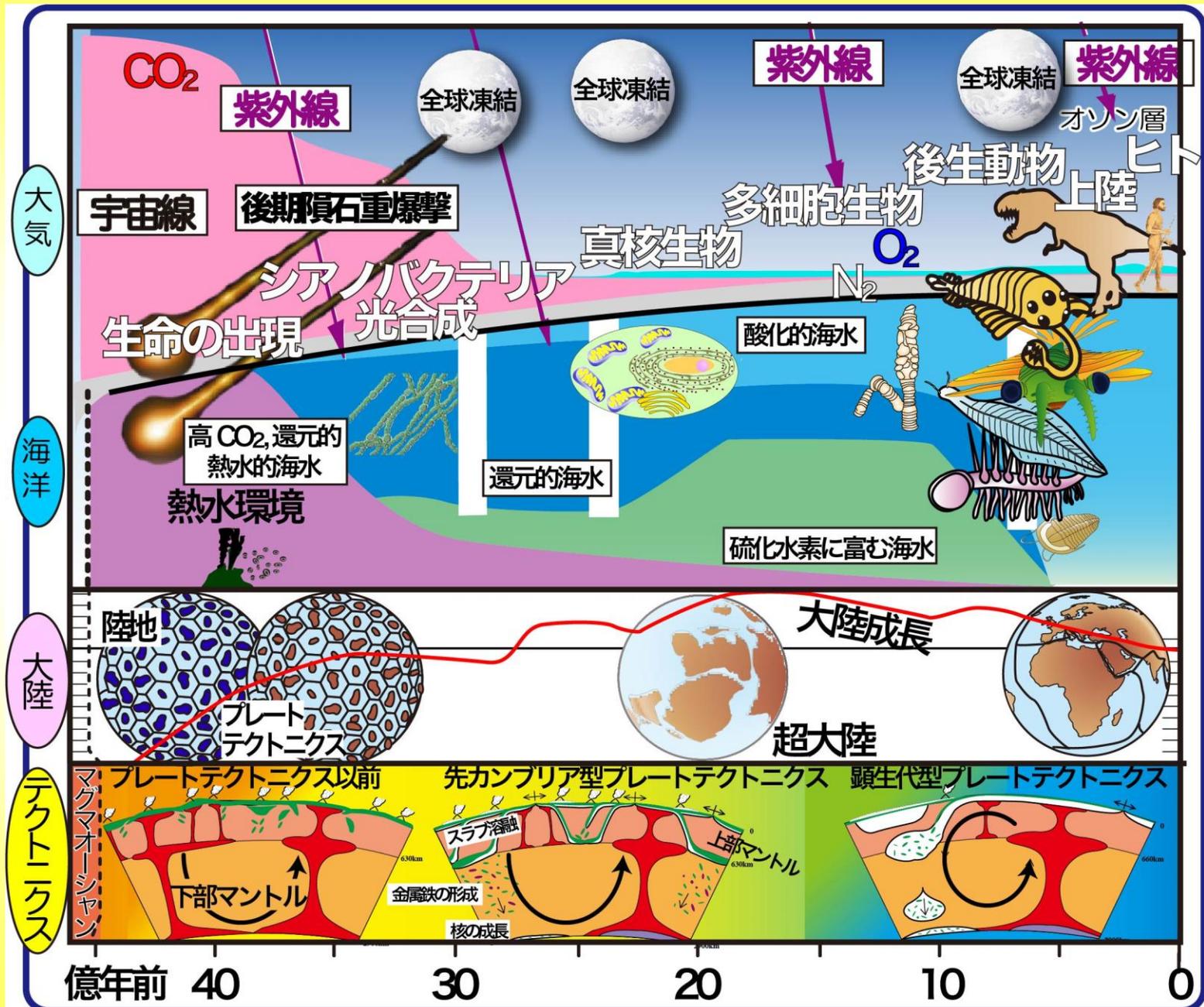
東京大学総合文化研究科：

小宮 剛

# 内容

- ①初期生命の証拠
- ②初期地球環境とアルカリ熱水作用
- ③地球史を通じた表層環境の酸化還元と海洋組成の経年変化

# 地球・生命進化概要



# 世界の地質と38億年前以前の地質体

アカスタ片麻岩

40.3

イスア表成岩帯

38.1

アキリアの表成岩

38.3

サグレック岩体  
ヌリアック表成岩類

>~39

ヌブアギツク  
表成岩帯

~42億年前 ( $^{147}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ )

or

>38.2 (U-Pb zrn)

アンシヤン

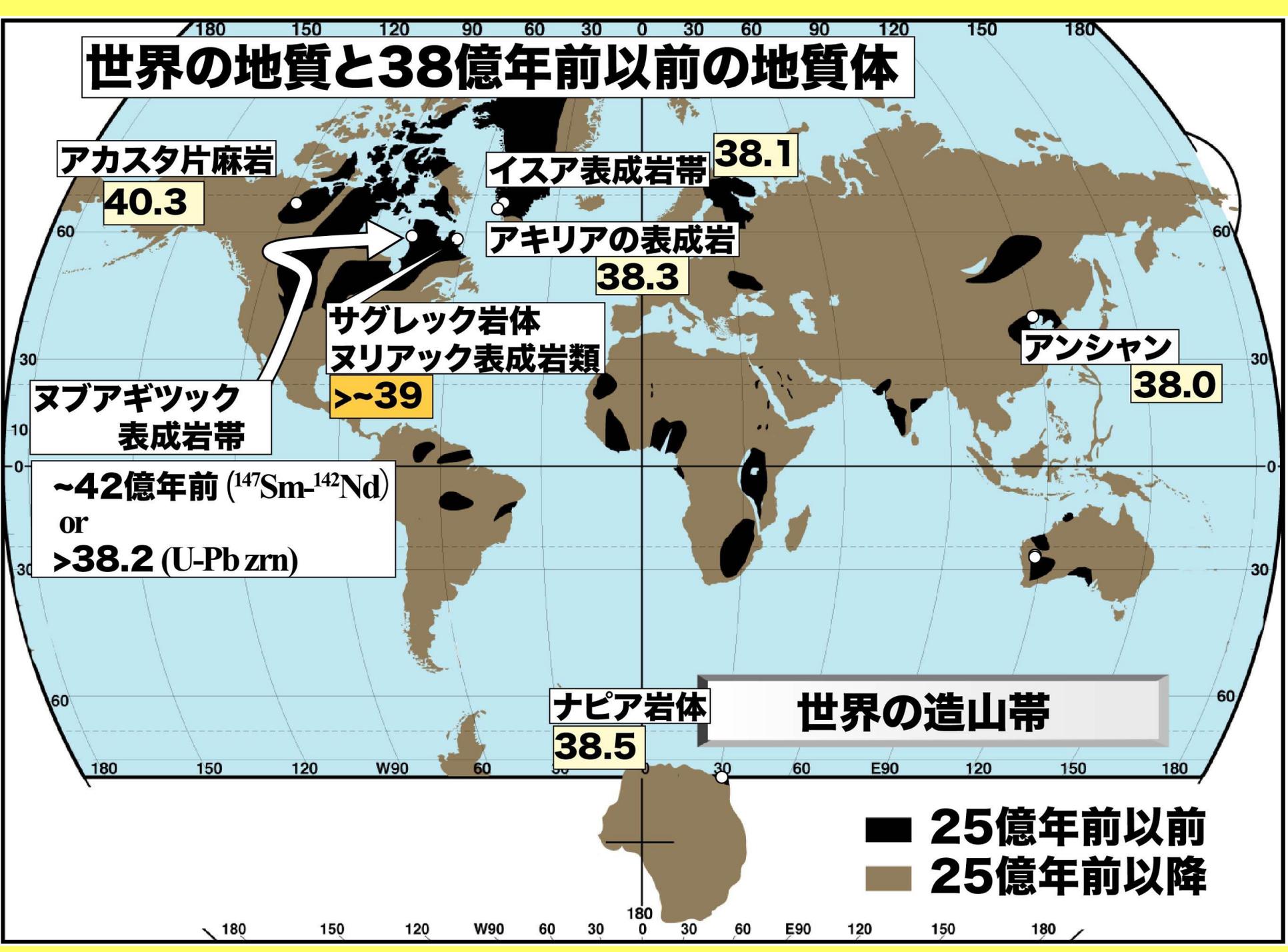
38.0

ナピア岩体

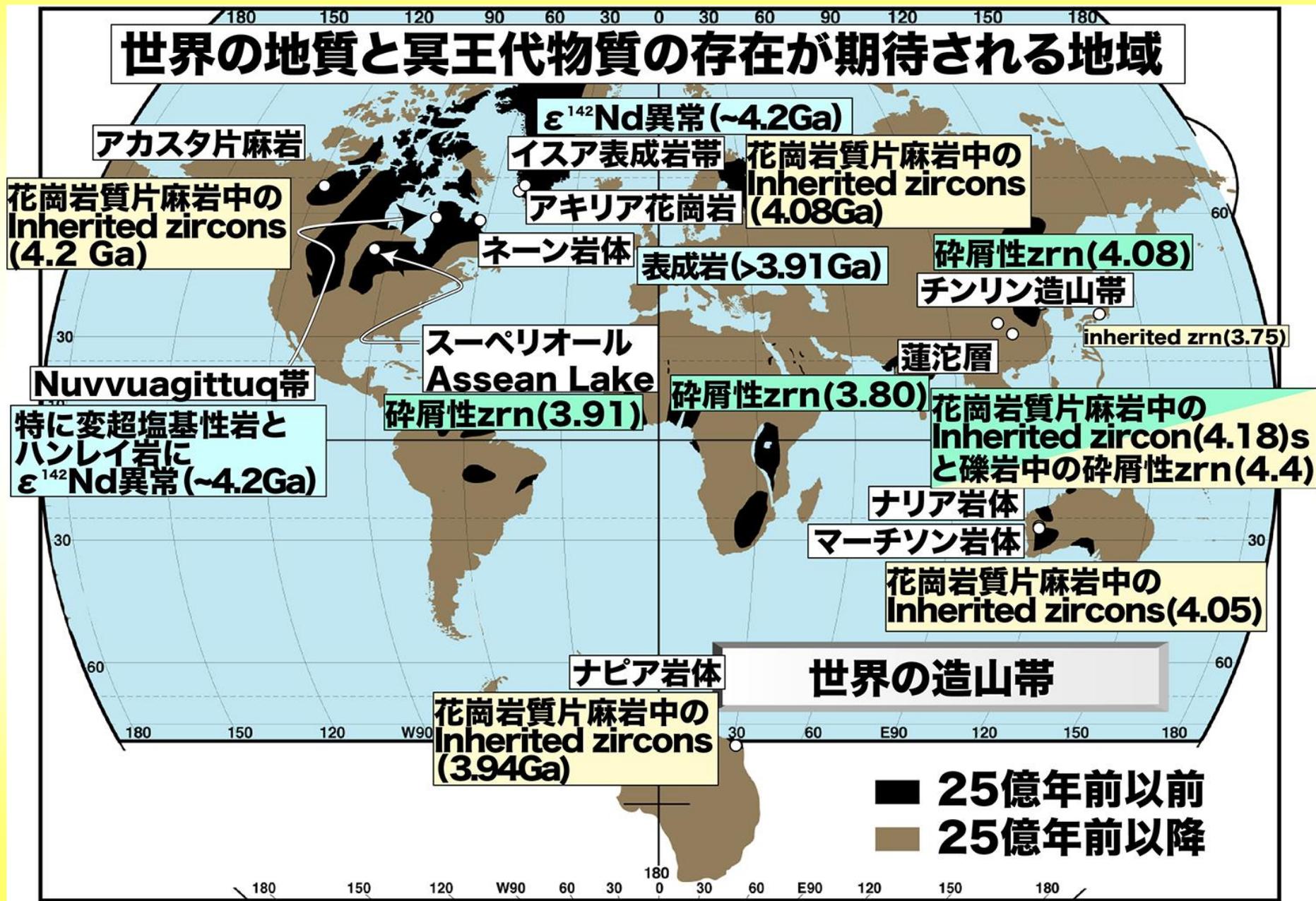
38.5

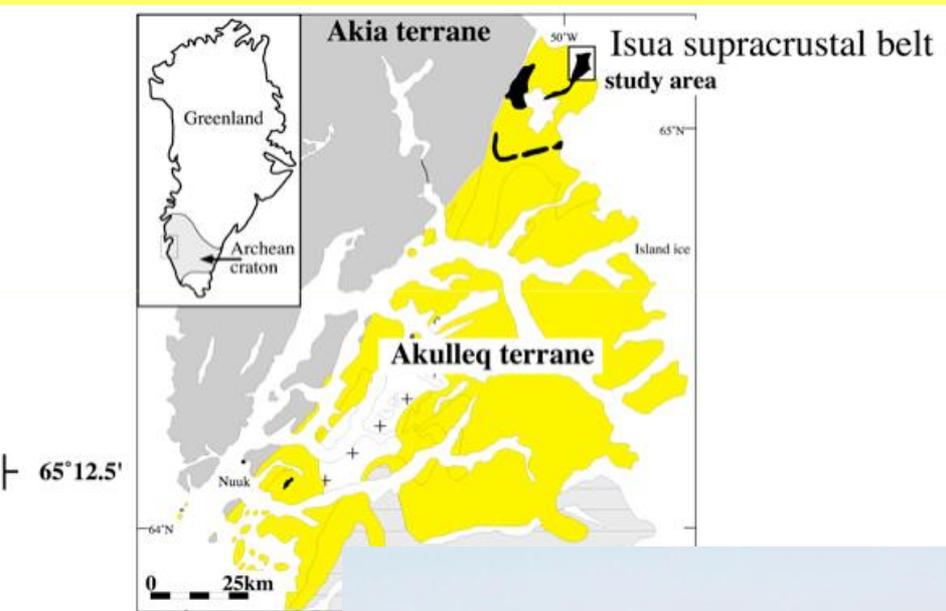
世界の造山帯

■ 25億年前以前  
■ 25億年前以降



# 初期地球物質(38億年前以前)





# イスアの地質 (グリーンランド 38億年前)

—プレートテクトニクスの開始、  
海洋の存在と生命の痕跡—



# 水の存在！



## 水中での溶岩の噴出 枕状玄武岩



# 水の存在 2

水中での

化学沈殿堆積物

チャート ( $\text{SiO}_2$ )

炭酸塩岩 ( $\text{CaCO}_3$ )

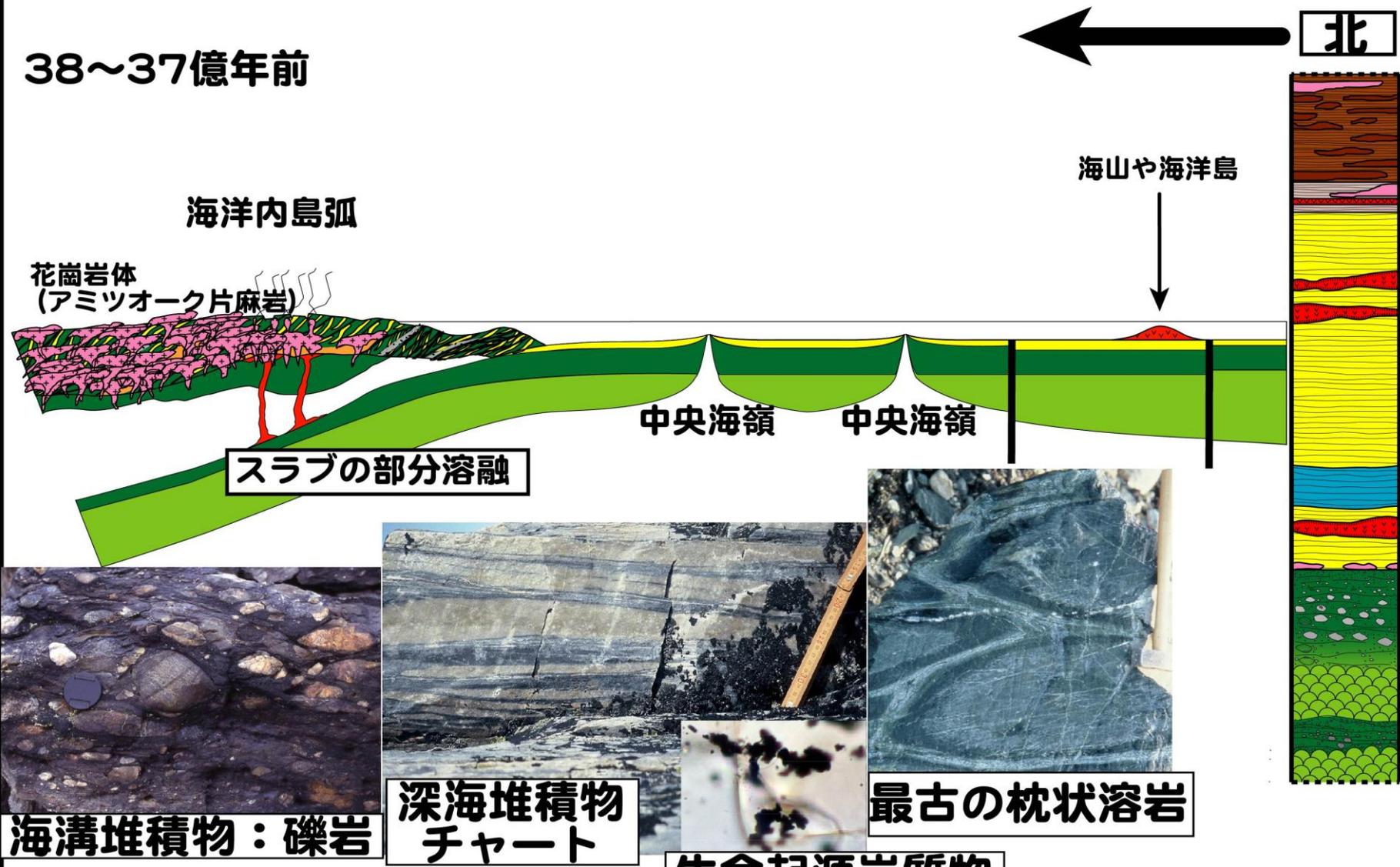
縞状鉄鉱層 ( $\text{FeO}(\text{OH})$ )



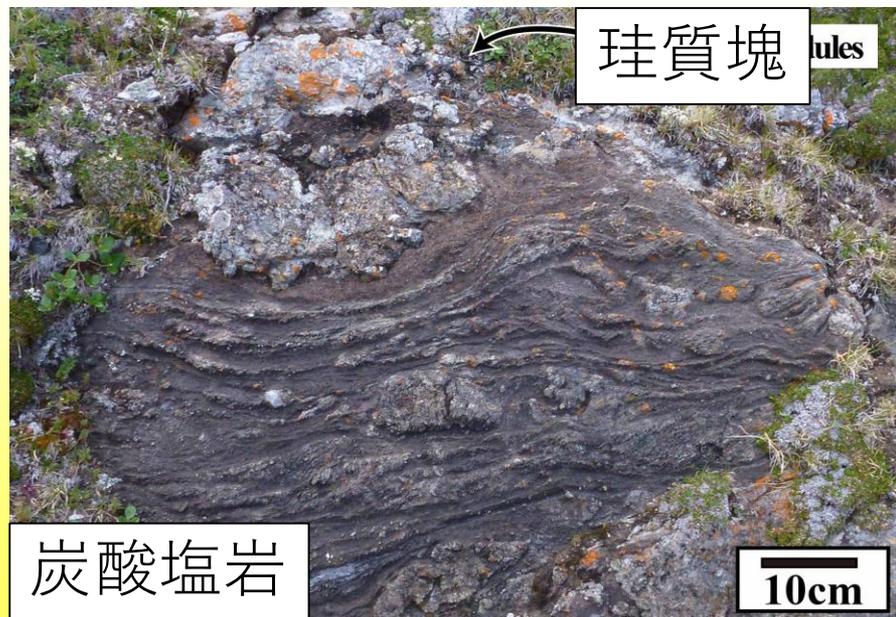
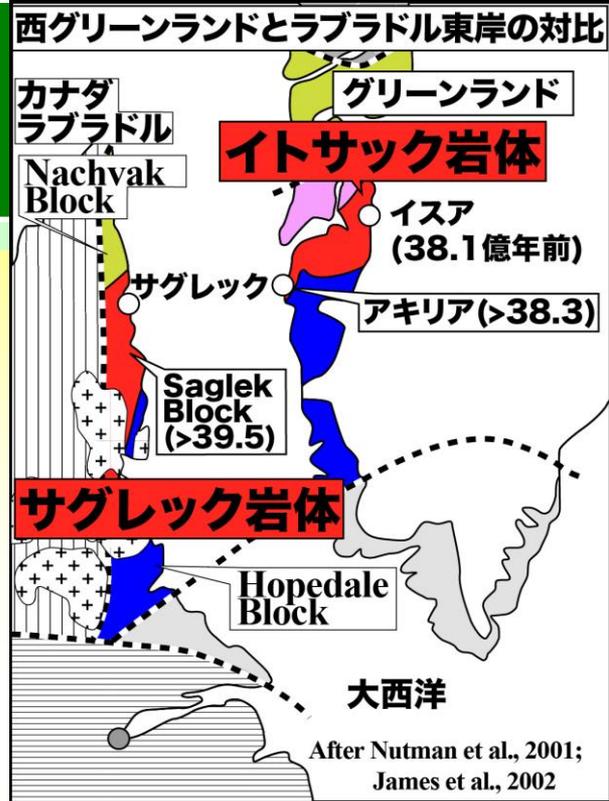
# 海洋プレート層序と付加体・プレートテクトニクス (38億年前)

最古の“海洋”とプレートテクトニクスの証拠(38億年前)

38~37億年前



# カナダ・ラブラドル・サグレック岩体(>39億年前)



# カナダ・ラブラドル・ サグレック岩体(>39億年前)

チャート

LAF972

縞状鉄鉱層

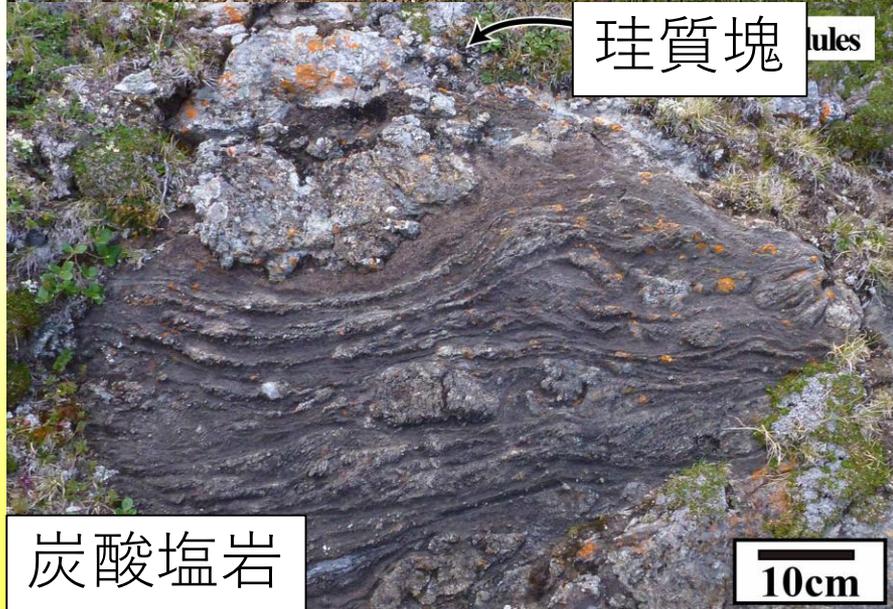
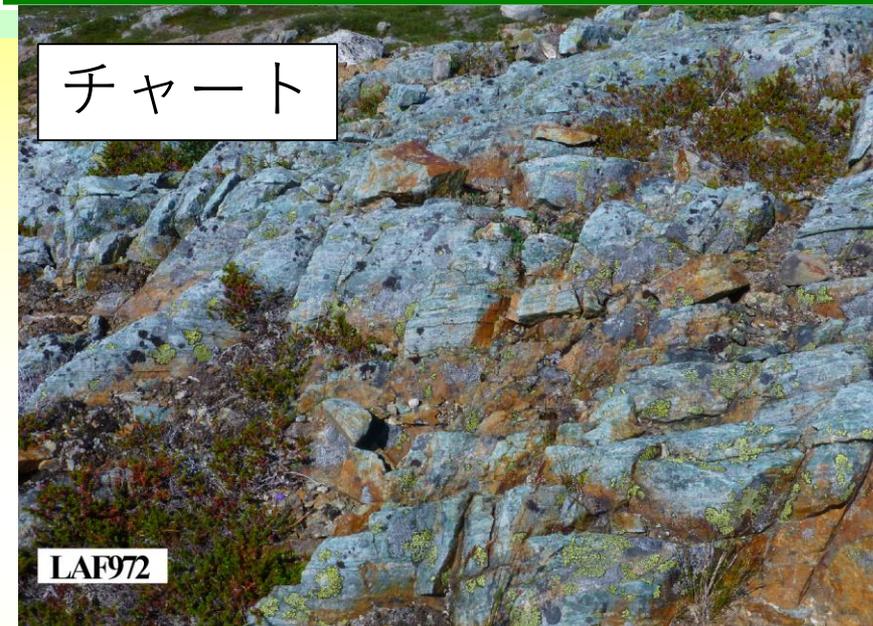
LAA112

泥質岩

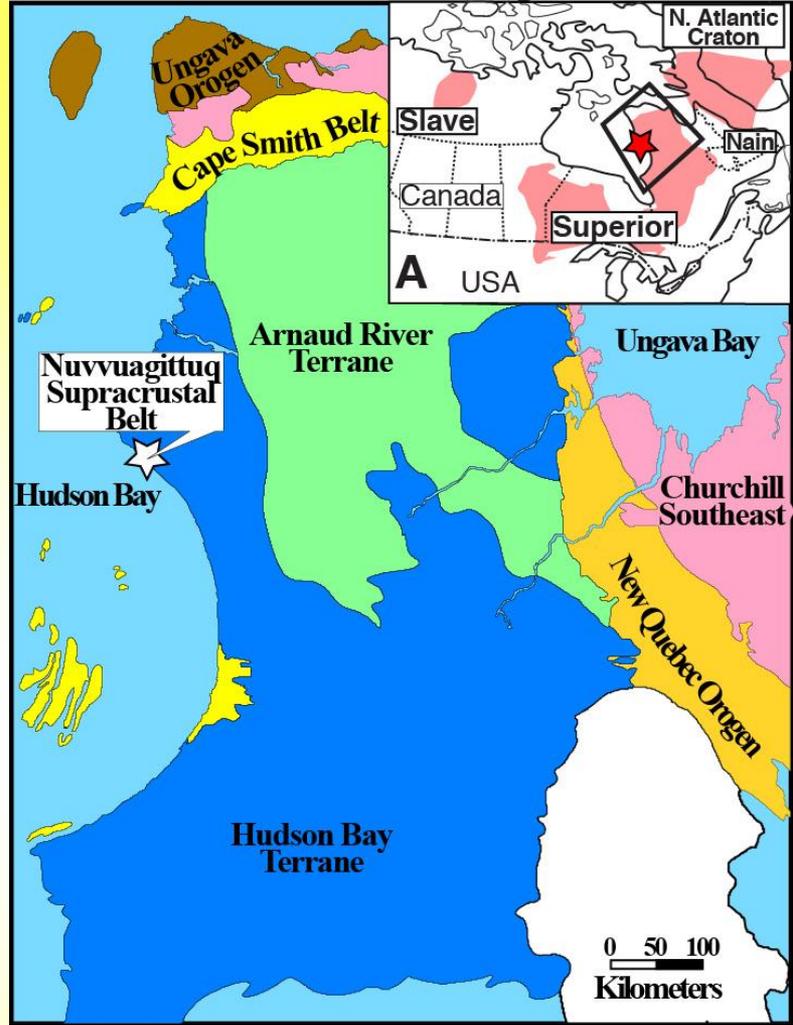
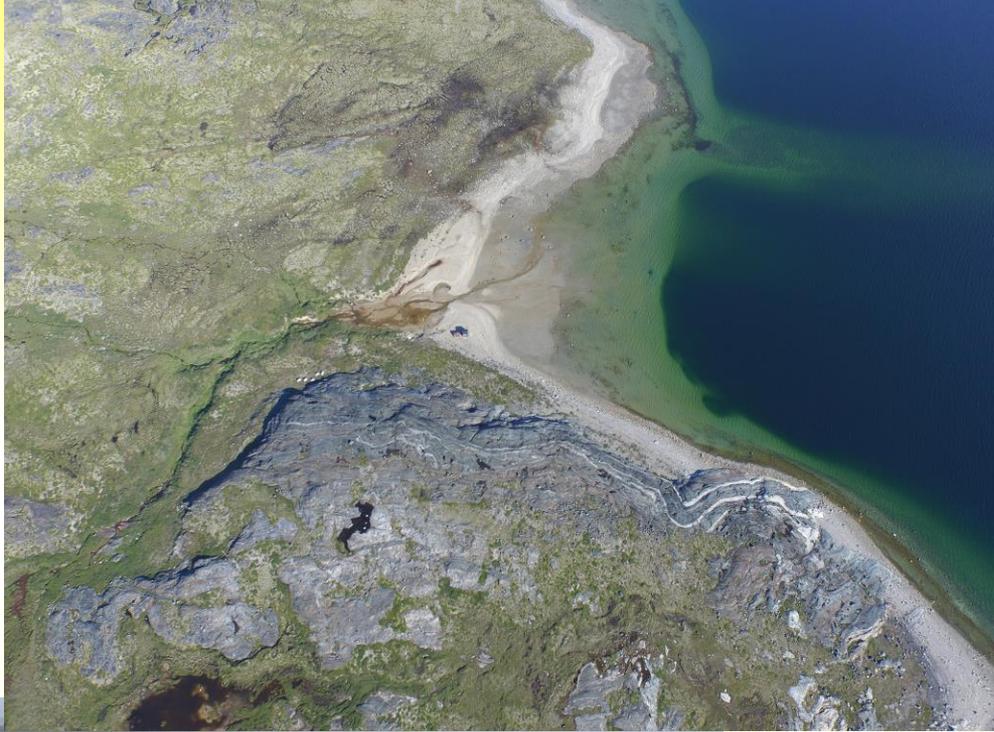
珪質塊 quartzites

炭酸塩岩

10cm

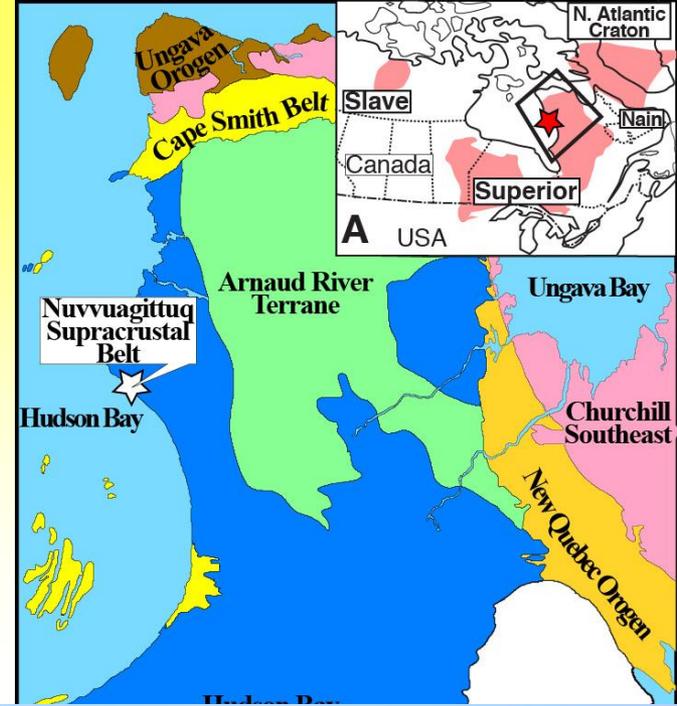
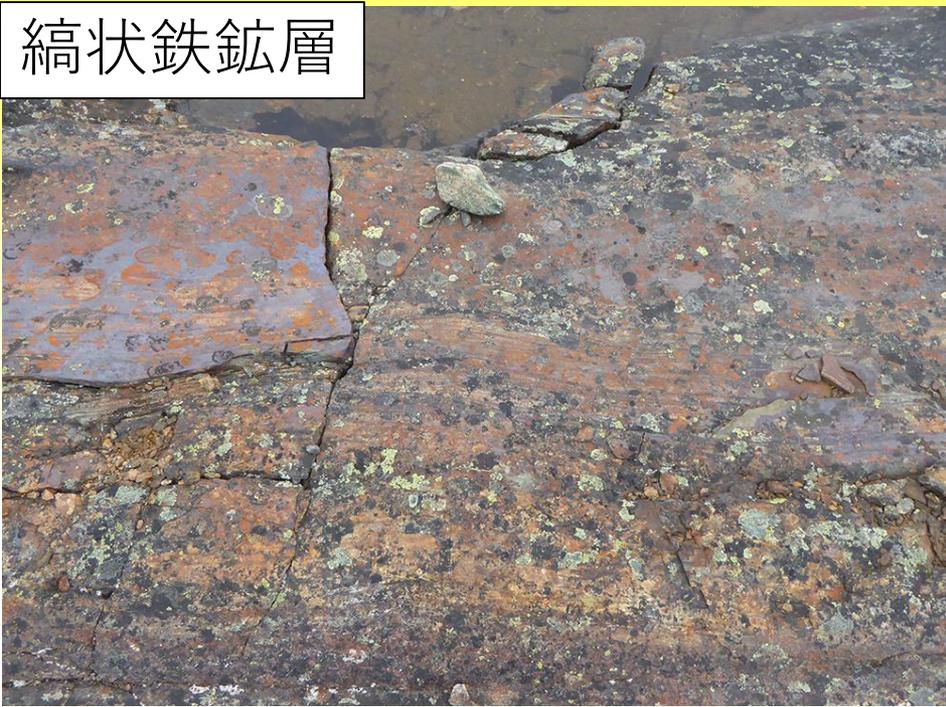


# ヌブアギツク表成岩帯 (>38億年前)



# ヌブアギツク表成岩帯

縞状鉄鉱層



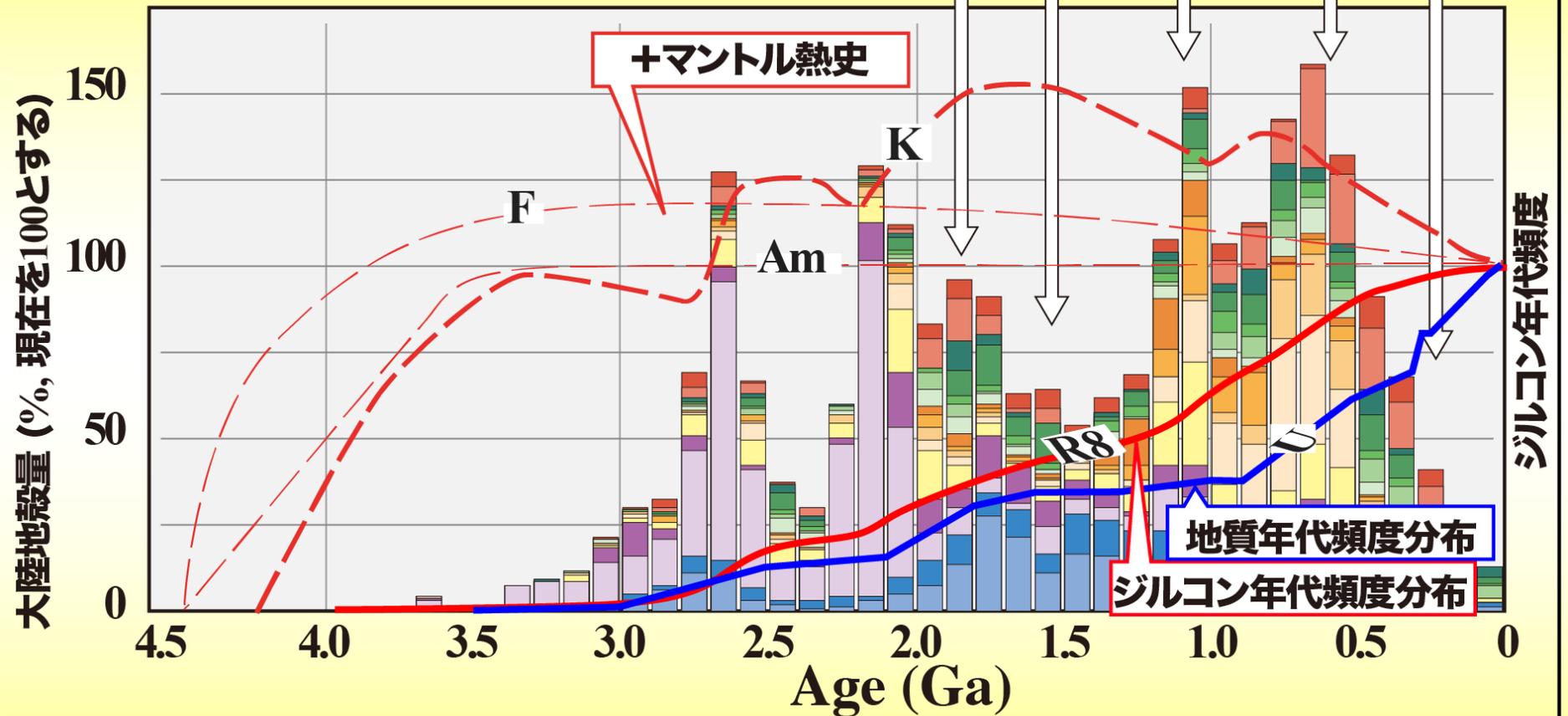
NSC162

チャート



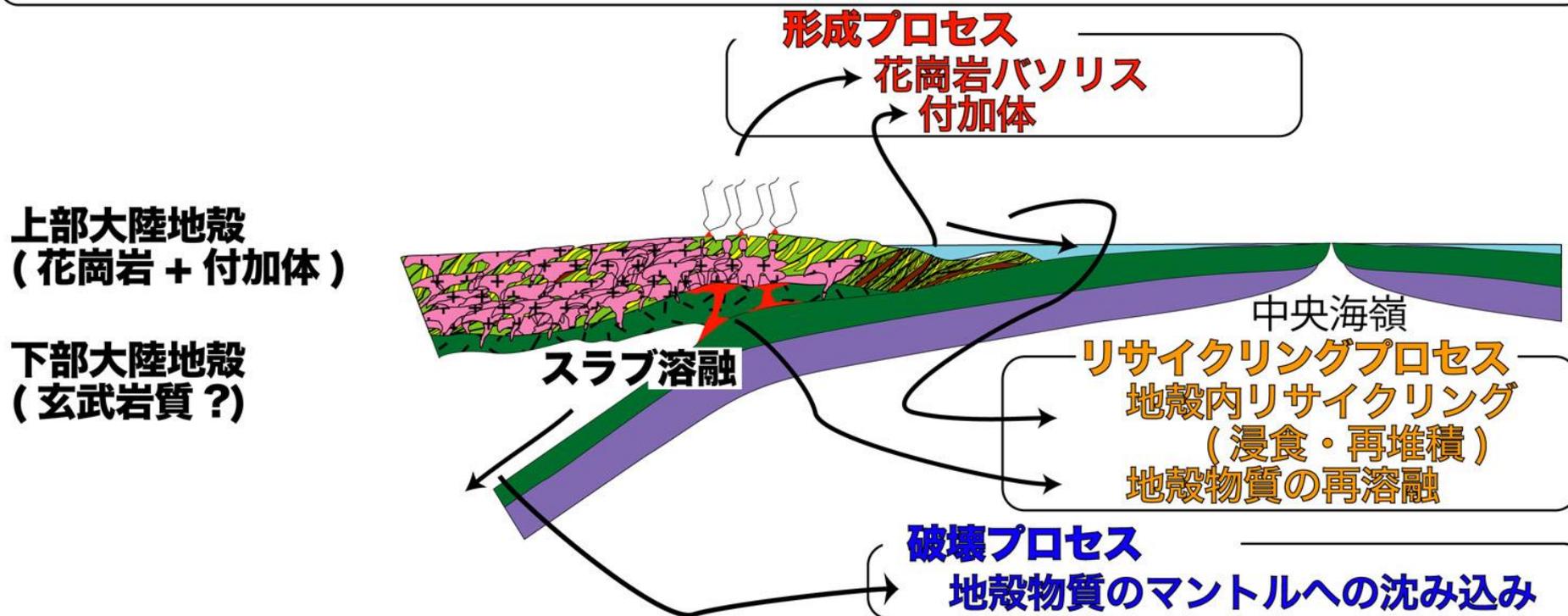
# 地球熱史を考慮

超大陸 N C R G P



Rino et al., 2004, 2008; Iizuka et al., 2006; Komiya, 2011

# 大陸地殻成長：大陸地殻の**形成**，**破壊**とリサイクリング

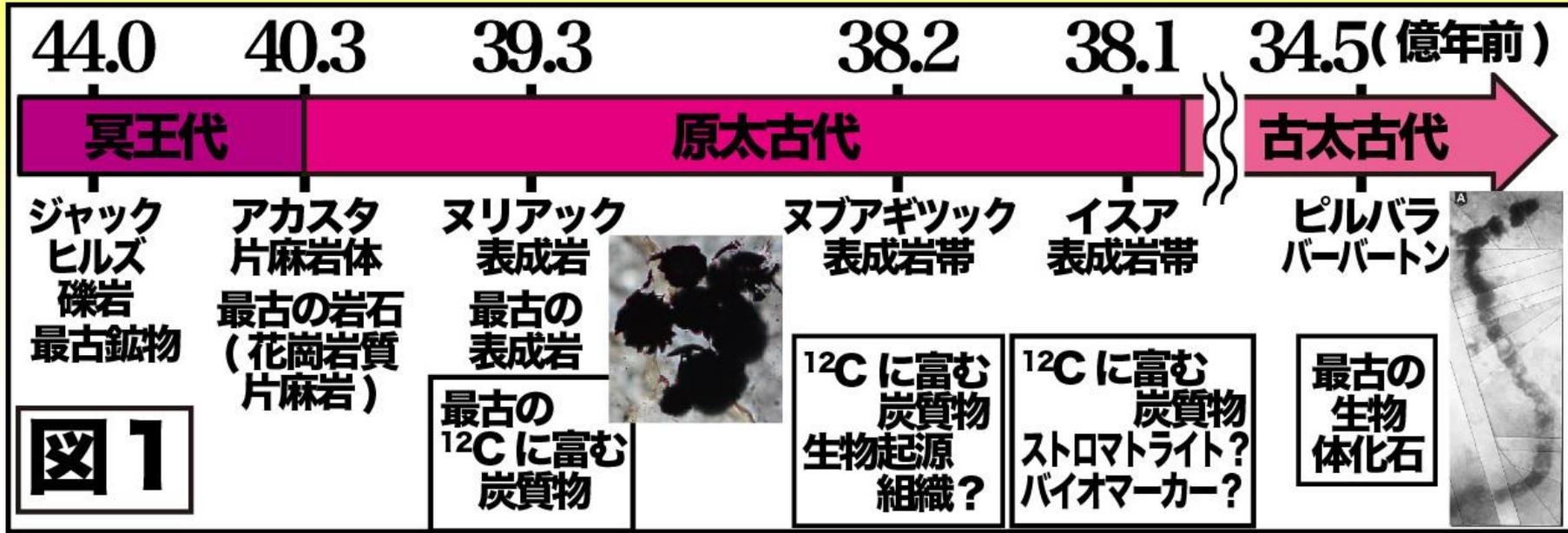


# 内容

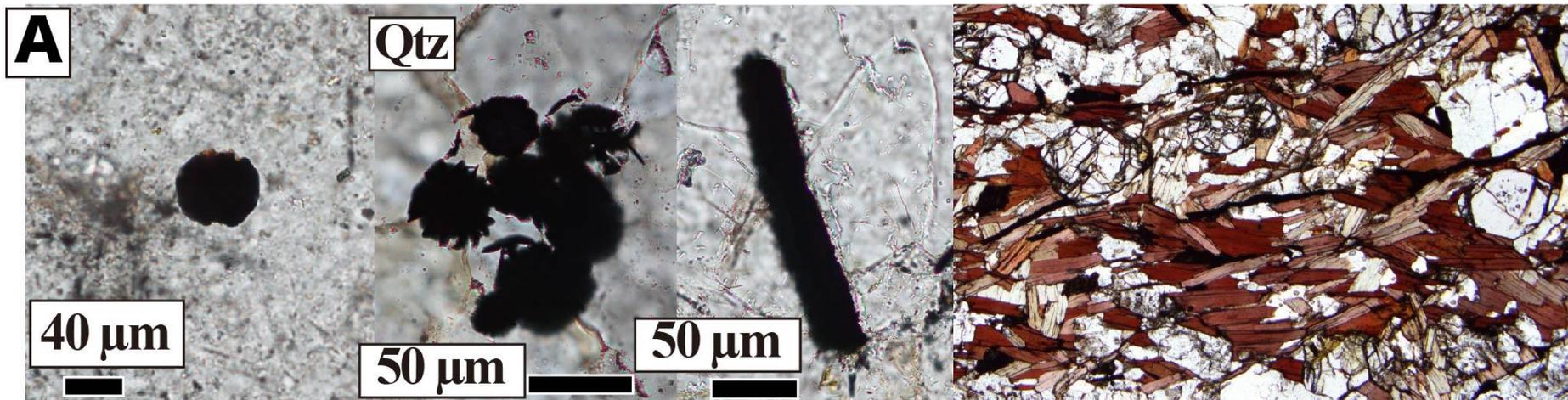
- ①初期生命の証拠
- ②初期地球環境とアルカリ熱水作用
- ③地球史を通じた表層環境の酸化還元と海洋組成の経年変化



# 初期生命の証拠



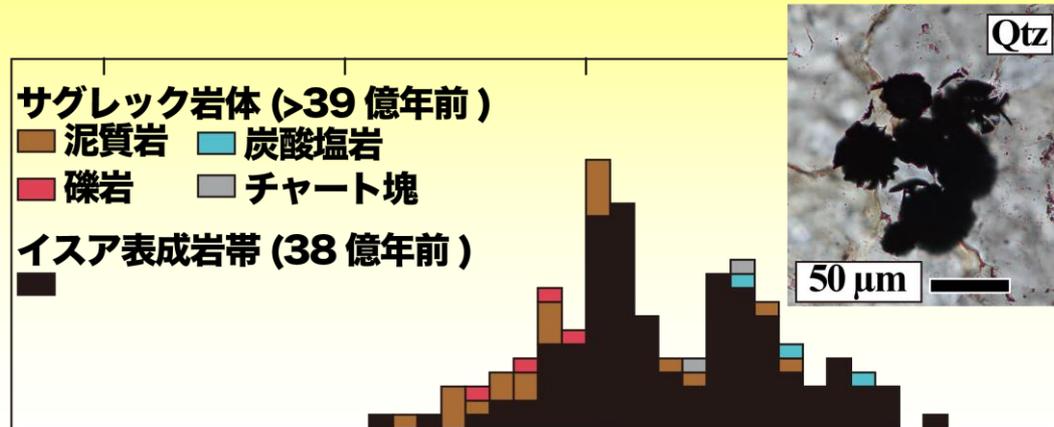
## Labrador 炭質物産状



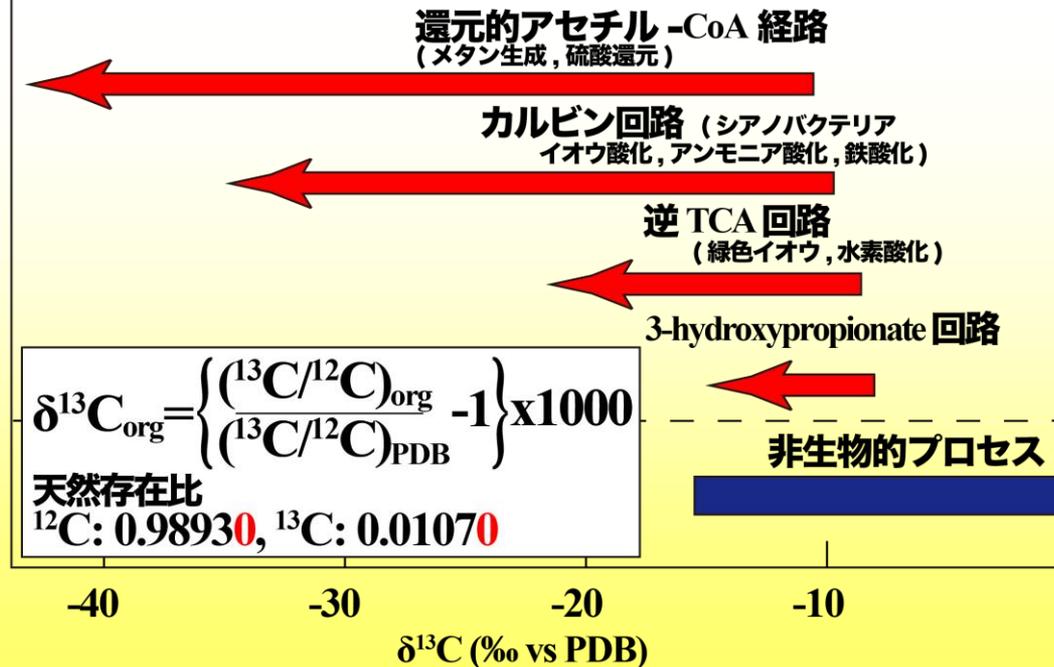
# 最古の生命の証拠

ラブラドル・ヌリアック表成岩類 (>39 億年前)

イスア表成岩帯 (38 億年前)



各炭素固定法のとり得る  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  値



# 初期生命種の特定と生命進化研究の課題

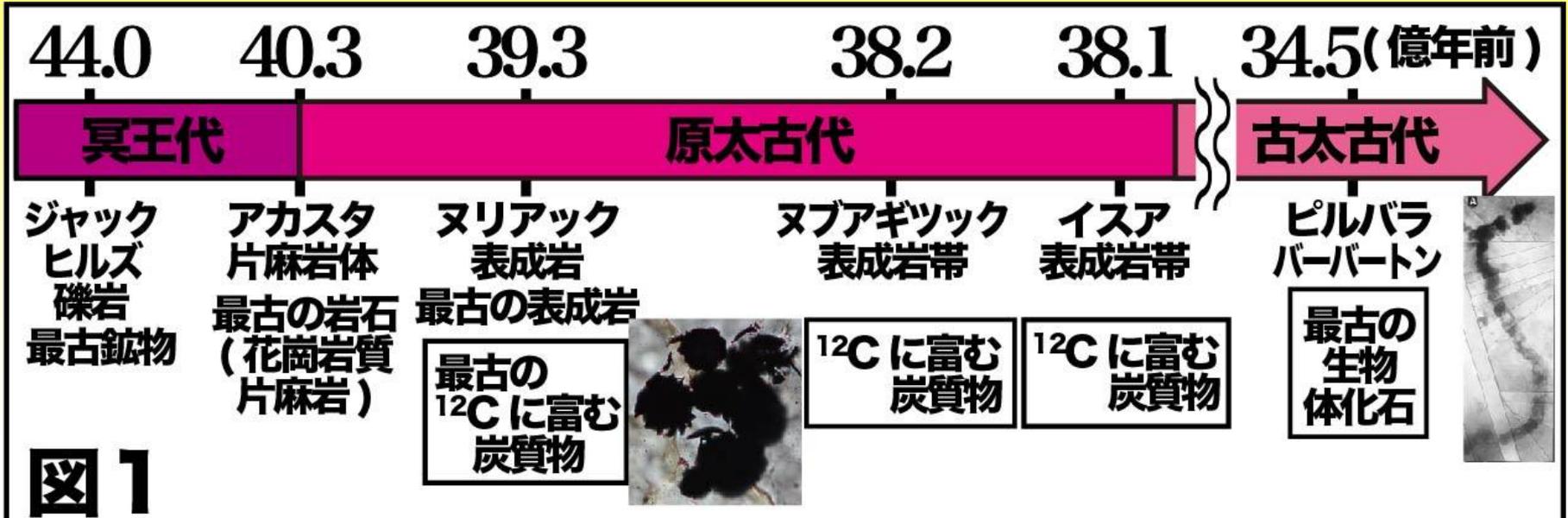


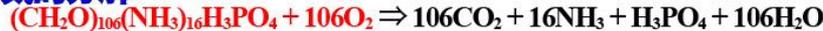
図 1

## 図 2: 初期地球における生物進化研究の課題

- (1) 生物種の出現時期 (生命進化のテンポ)
- (2) 初期地球での生物多様性
- (3) 生命・生態系と環境の共進化

## 有機物の微生物による分解

### 好氣的分解

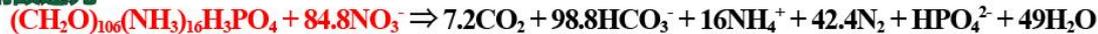


### 嫌氣的分解

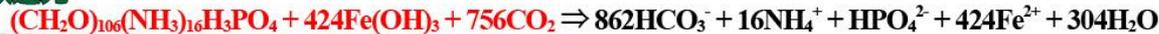
#### マンガン還元



#### 硝酸還元



#### 鉄還元



#### 硫酸還元



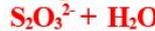
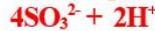
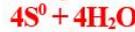
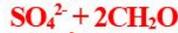
#### メタン生成 (炭酸還元)



#### 発酵



#### イオウを含む代謝系



#### メタンを含む代謝系



硫酸還元

硫酸還元

イオウ不均化反応

亜硫酸不均化反応

チオ硫酸塩不均化反応

メタン酸化 (好氣的メタン酸化)

メタン生成 (酢酸開裂型メタン生成)

## 微生物による有機物の固定

### 窒素固定



### 炭素固定

#### 光合成鉄 (Fe<sup>2+</sup>) 酸化



#### 嫌氣的化学合成鉄 (Fe<sup>2+</sup>) 酸化



#### 光合成



酸素発生型光合成

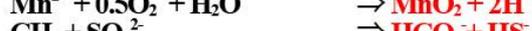
#### イオウを含む代謝系



#### メタンを含む代謝系



#### 化学合成独立栄養



嫌氣的光合成・硫化物酸化

嫌氣的光合成・硫化物酸化

嫌氣的光合成・イオウ酸化

メタン酸化 (嫌氣的メタン酸化)

メタン生成 (炭酸還元型メタン生成)

化学合成・鉄酸化

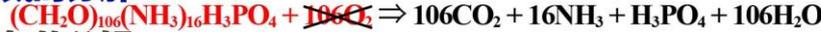
化学合成・鉄酸化

メタン酸化 (嫌氣的メタン酸化)

# 参考

## 有機物の微生物による分解

### 好氣的分解

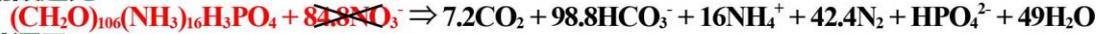


### 嫌氣的分解

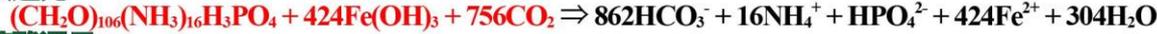
#### マンガン還元



#### 硝酸還元



#### 鉄還元



#### 硫酸還元



#### メタン生成 (炭酸還元)



#### 発酵



#### イオウを含む代謝系



硫酸還元

硫酸還元

イオウ不均化反応

亜硫酸不均化反応

チオ硫酸塩不均化反応

#### メタンを含む代謝系



メタン酸化 (好氣的メタン酸化)

メタン生成 (酢酸開裂型メタン生成)

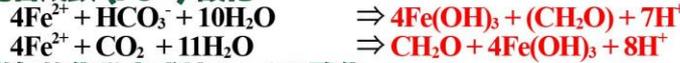
## 微生物による有機物の固定

### 窒素固定



### 炭素固定

#### 光合成鉄 (Fe<sup>2+</sup>) 酸化



嫌氣的光合成・鉄酸化

嫌氣的光合成・鉄酸化

#### 嫌氣的化学合成鉄 (Fe<sup>2+</sup>) 酸化

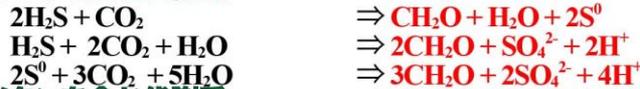


### 光合成



酸素発生型光合成

#### イオウを含む代謝系



嫌氣的光合成・硫化物酸化

嫌氣的光合成・硫化物酸化

嫌氣的光合成・イオウ酸化

#### メタンを含む代謝系



メタン酸化 (嫌氣的メタン酸化)

メタン生成 (炭酸還元型メタン生成)

#### 化学合成独立栄養

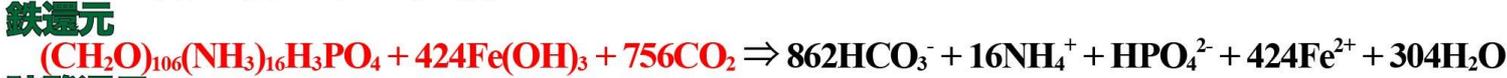


化学合成・鉄酸化

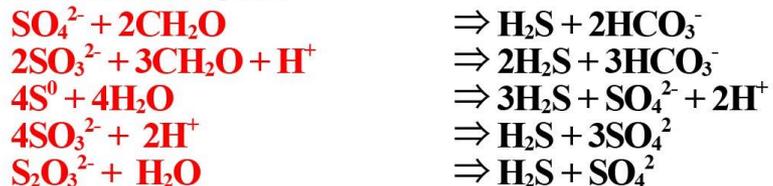
化学合成・鉄酸化

メタン酸化 (嫌氣的メタン酸化)

### 有機物の微生物による分解



#### イオウを含む代謝系



硫酸還元  
 硫酸還元  
 イオウ不均化反応  
 亜硫酸不均化反応  
 チオ硫酸塩不均化反応

#### メタンを含む代謝系



メタン生成 (酢酸開裂型メタン生成)

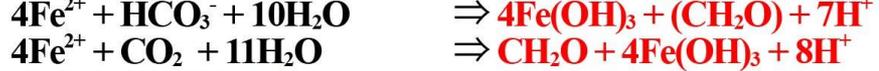
### 微生物による有機物の固定

#### 窒素固定



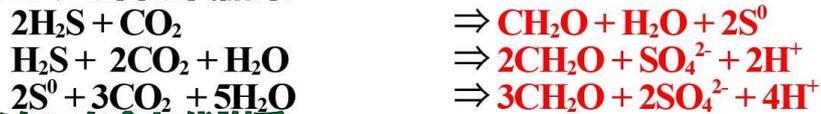
#### 炭素固定

##### 光合成鉄 (Fe<sup>2+</sup>) 酸化



嫌気的光合成・鉄酸化  
 嫌気的光合成・鉄酸化

##### イオウを含む代謝系



嫌気的光合成・硫化物酸化  
 嫌気的光合成・硫化物酸化  
 嫌気的光合成・イオウ酸化

##### メタンを含む代謝系



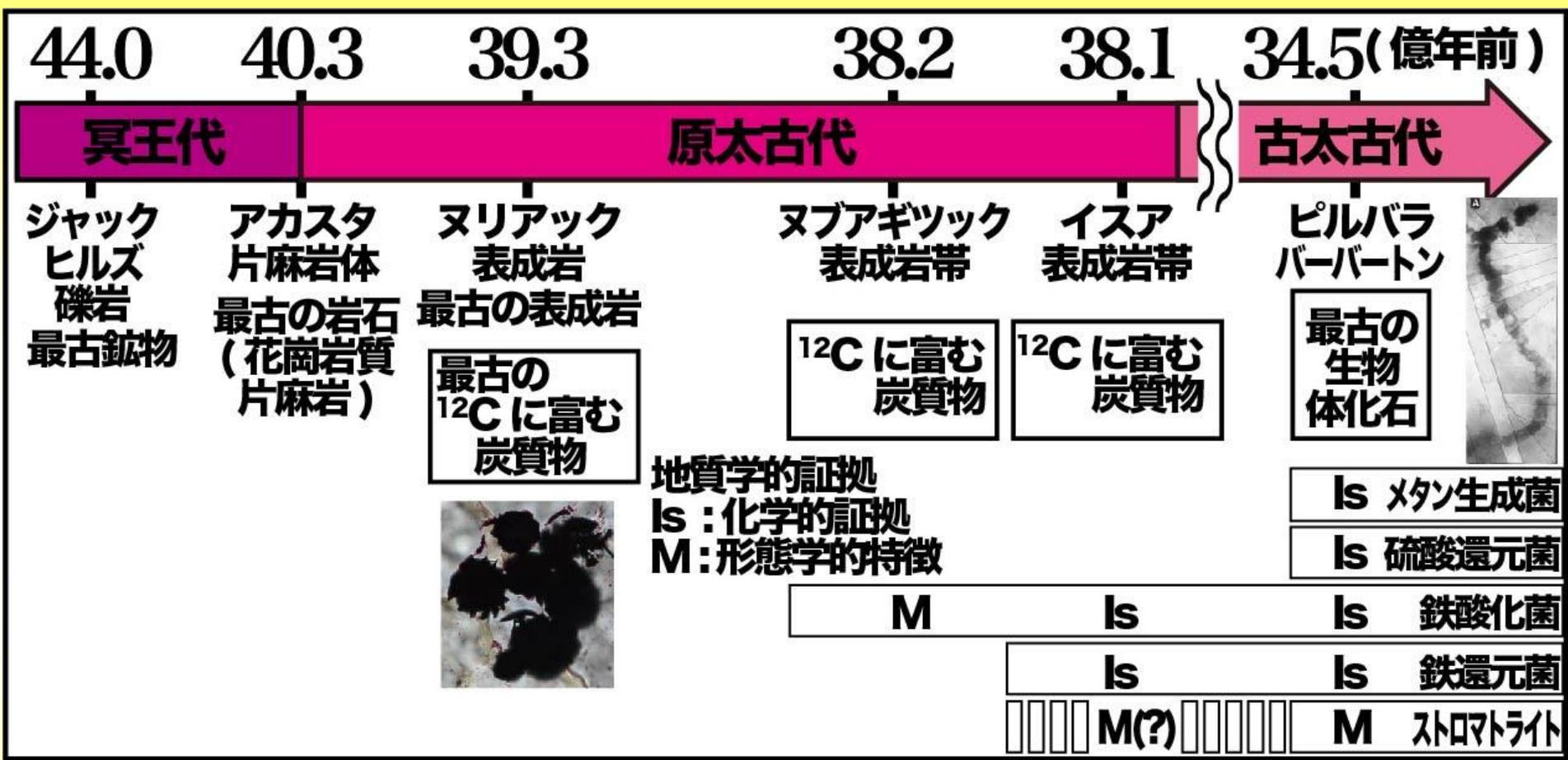
メタン酸化 (嫌気的メタン酸化)  
 メタン生成 (炭酸還元型メタン生成)

##### 化学合成独立栄養



メタン酸化 (嫌気的メタン酸化)

# (1) 初期生命の証拠



# (1) 初期生命の証拠

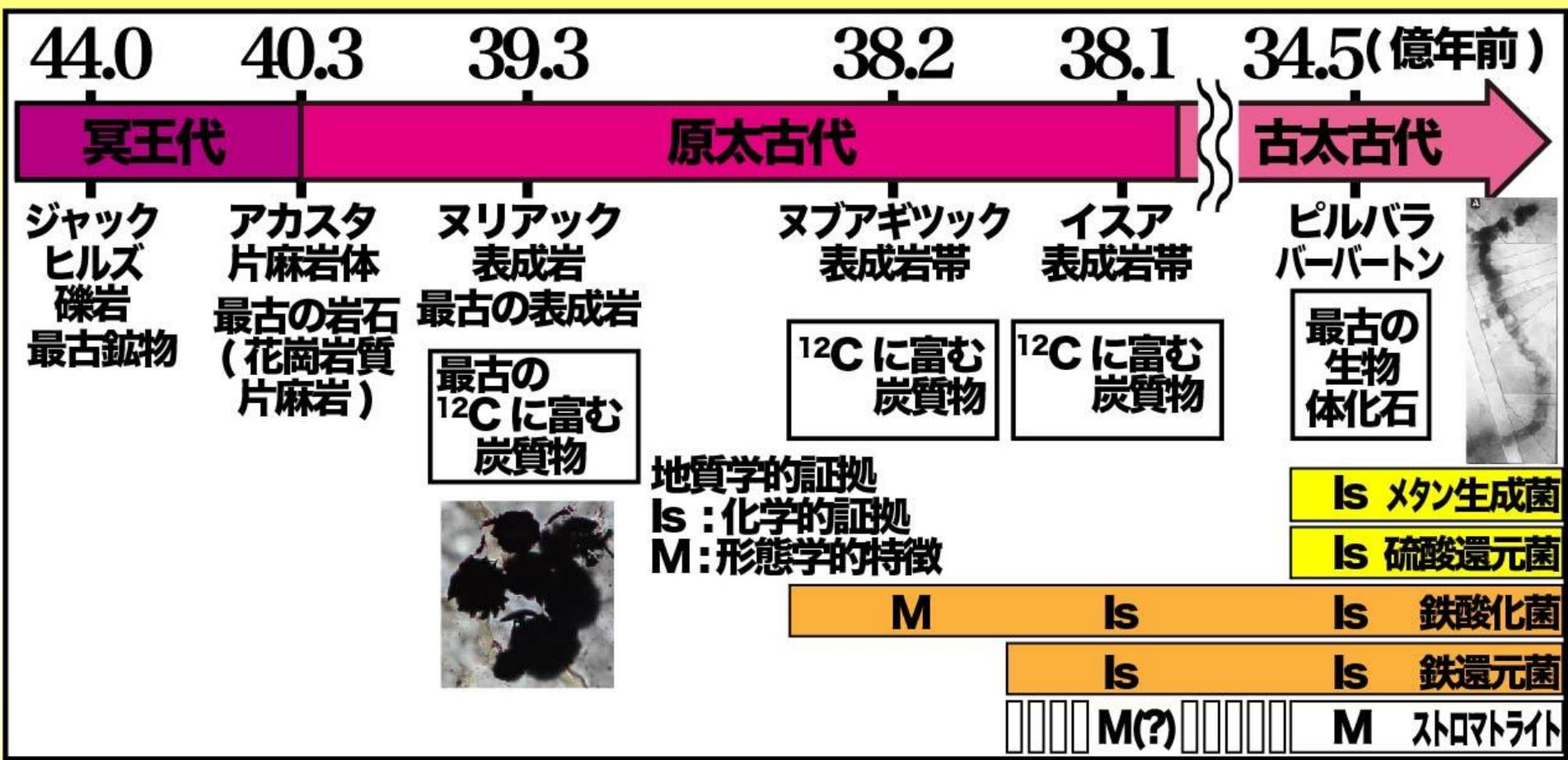
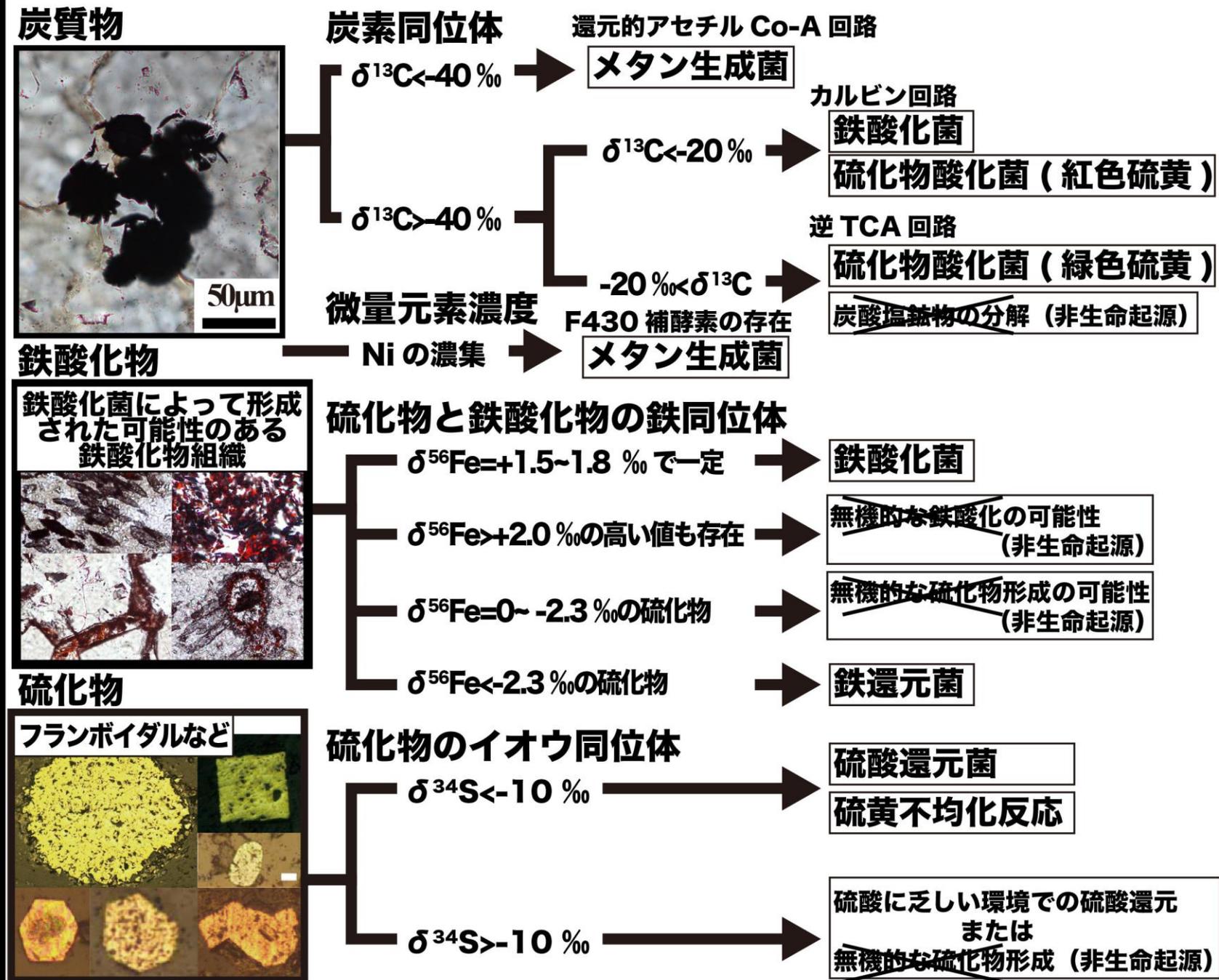
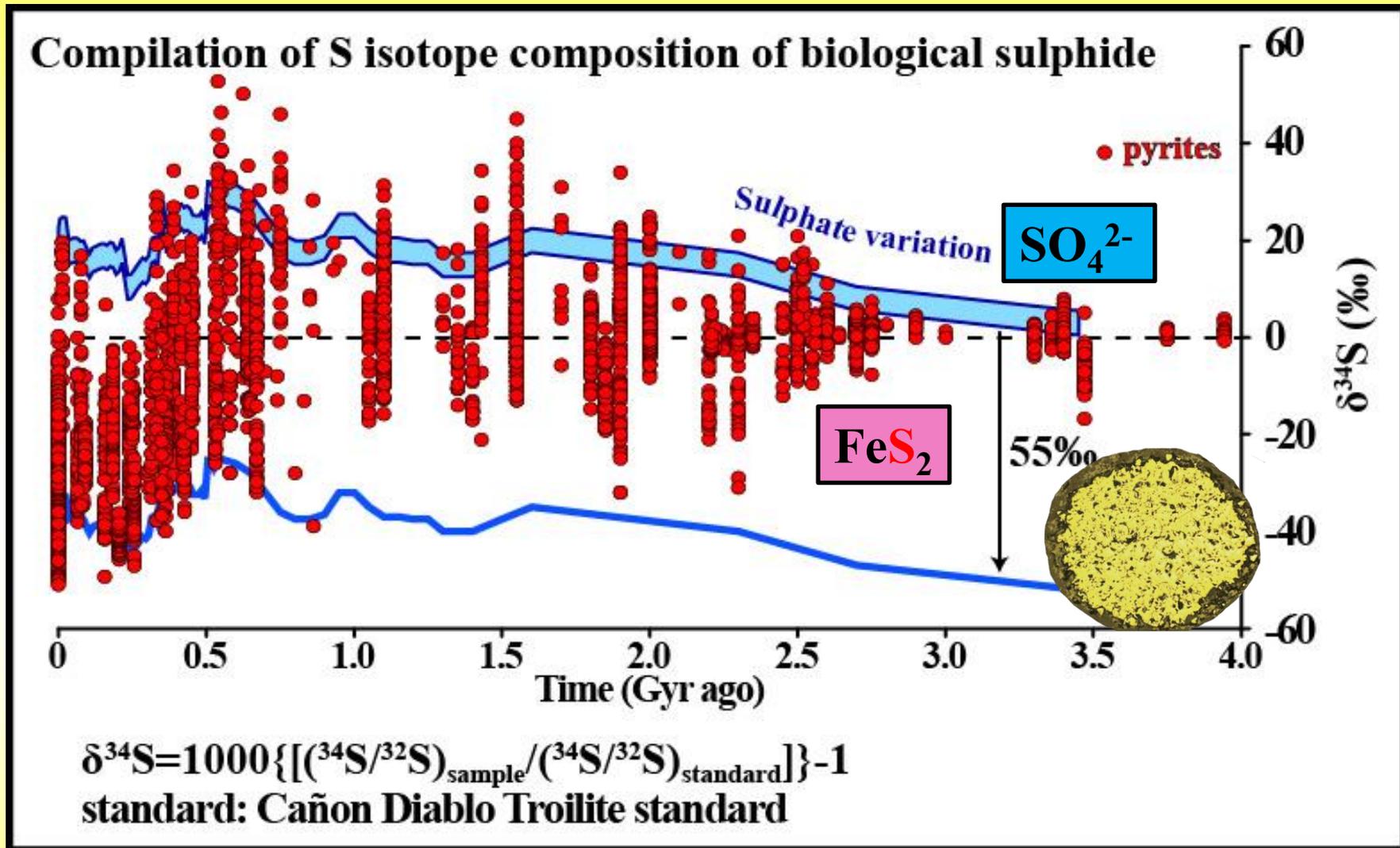




図8：化学指標に基づく生命種の推定



# (1) 硫黄代謝の証拠：イオウ同位体



硫酸還元： $\text{SO}_4^{2-}$  (重い同位体に富む)

→  $\text{S}^{2-}$  ( $\text{FeS} \rightarrow \text{FeS}_2$ ) (軽い同位体に富む)

# イオウの非質量同位体分別と表層物質のリサイクル

イオウ同位体:  $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{36}\text{S}$

$$\delta^{34}\text{S} = \left\{ \frac{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}}}{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} - 1 \right\} \times 1000$$

$$\delta^{33}\text{S} = \left\{ \frac{(^{33}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}}}{(^{33}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} - 1 \right\} \times 1000$$

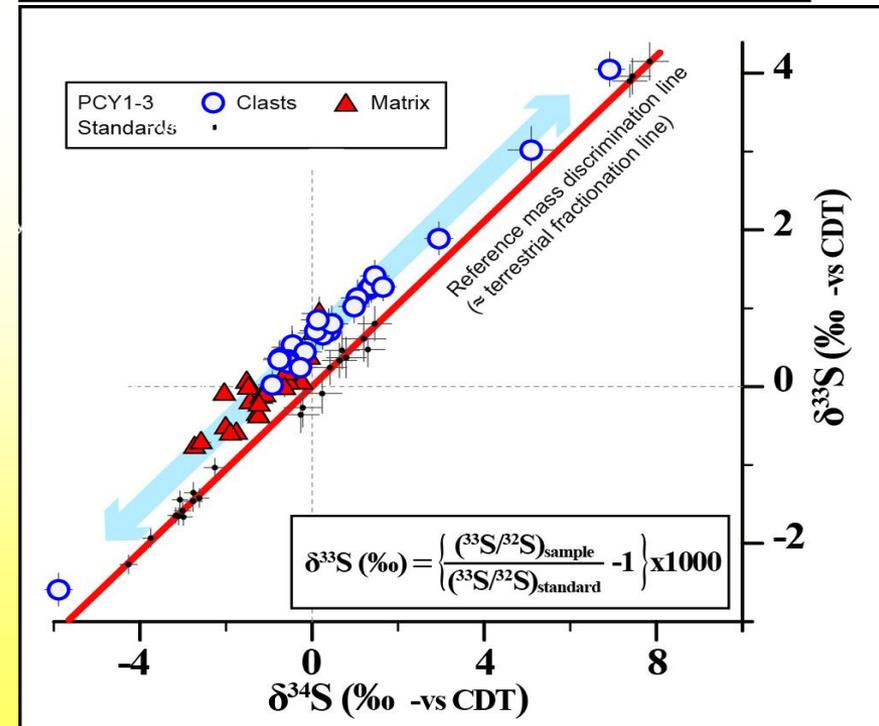
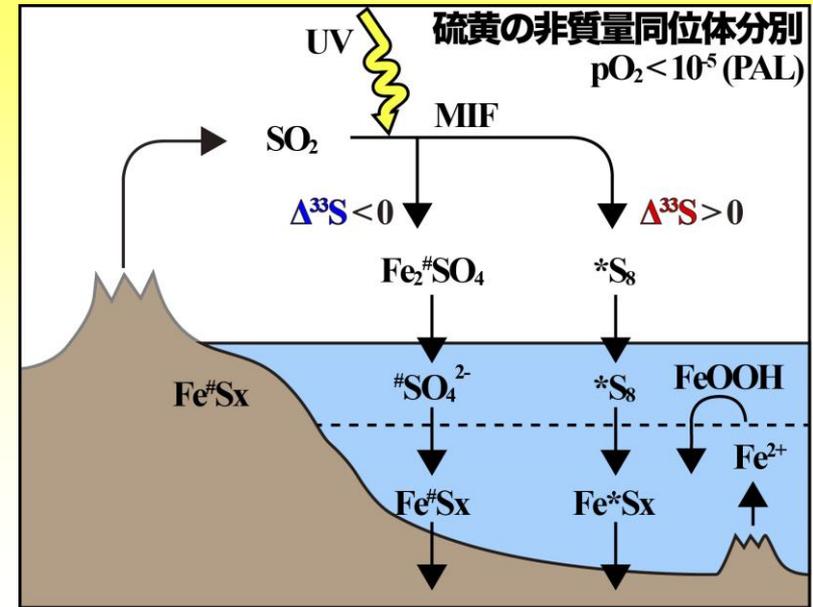
$$\delta^{36}\text{S} = \left\{ \frac{(^{36}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}}}{(^{36}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} - 1 \right\} \times 1000$$

天然存在比

$^{32}\text{S}$ : 0.9493,  $^{33}\text{S}$ : 0.0076,  $^{34}\text{S}$ : 0.0429,  $^{36}\text{S}$ : 0.0002

$$\Delta^{33}\text{S} = \delta^{33}\text{S} - \left\{ \left( 1 - \frac{\delta^{34}\text{S}}{1000} \right)^{0.515} - 1 \right\} \times 1000$$

$$\Delta^{36}\text{S} = \delta^{36}\text{S} - \left\{ \left( 1 - \frac{\delta^{34}\text{S}}{1000} \right)^{1.91} - 1 \right\} \times 1000$$



# イオウの非質量同位体分別と表層物質のリサイクル

イオウ同位体:  $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{36}\text{S}$

$$\delta^{34}\text{S} = \left\{ \frac{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}}}{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} - 1 \right\} \times 1000$$

$$\delta^{33}\text{S} = \left\{ \frac{(^{33}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}}}{(^{33}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} - 1 \right\} \times 1000$$

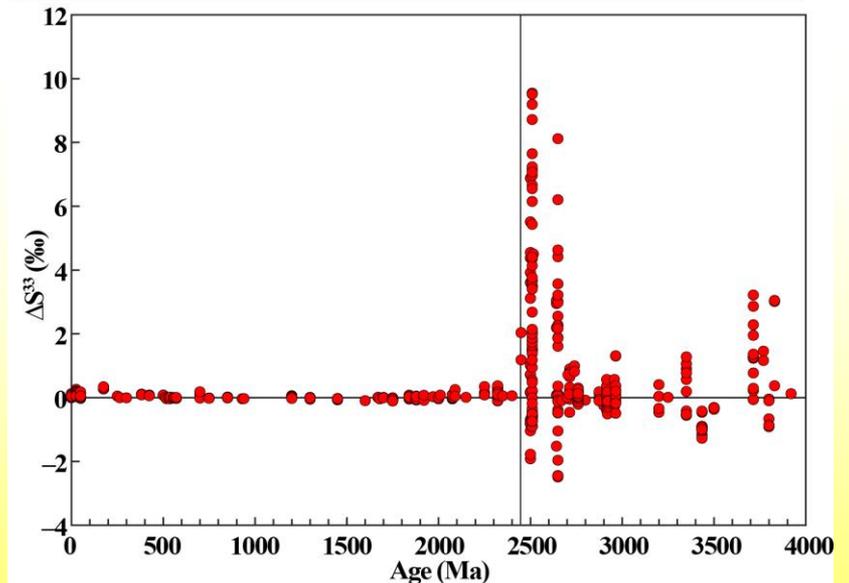
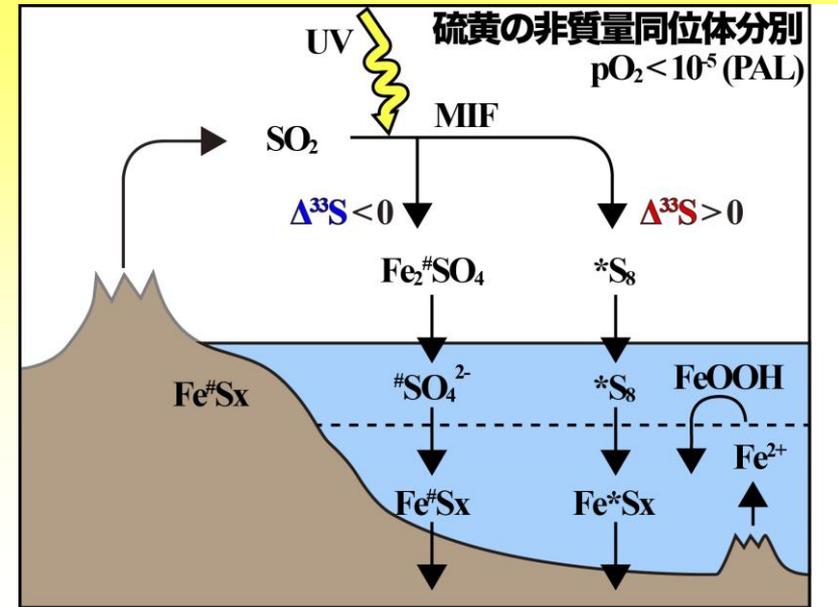
$$\delta^{36}\text{S} = \left\{ \frac{(^{36}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{sample}}}{(^{36}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} - 1 \right\} \times 1000$$

天然存在比

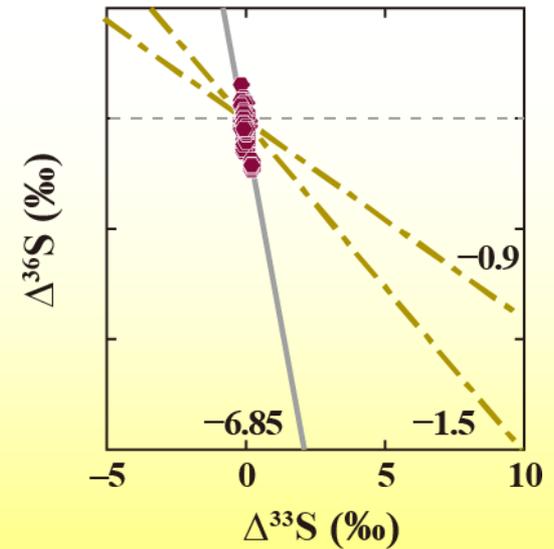
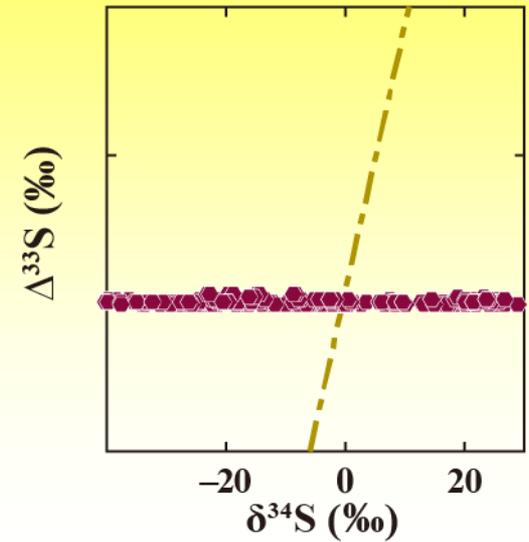
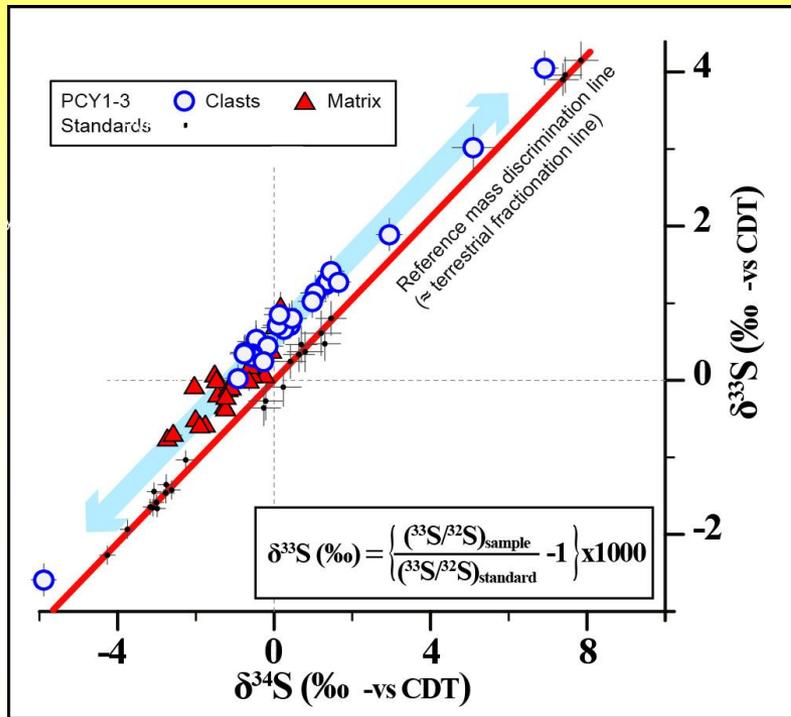
$^{32}\text{S}$ : 0.9493,  $^{33}\text{S}$ : 0.0076,  $^{34}\text{S}$ : 0.0429,  $^{36}\text{S}$ : 0.0002

$$\Delta^{33}\text{S} = \delta^{33}\text{S} - \left\{ \left( 1 - \frac{\delta^{34}\text{S}}{1000} \right)^{0.515} - 1 \right\} \times 1000$$

$$\Delta^{36}\text{S} = \delta^{36}\text{S} - \left\{ \left( 1 - \frac{\delta^{34}\text{S}}{1000} \right)^{1.91} - 1 \right\} \times 1000$$



# (1) 硫黄代謝の証拠：イオウの同位体分別

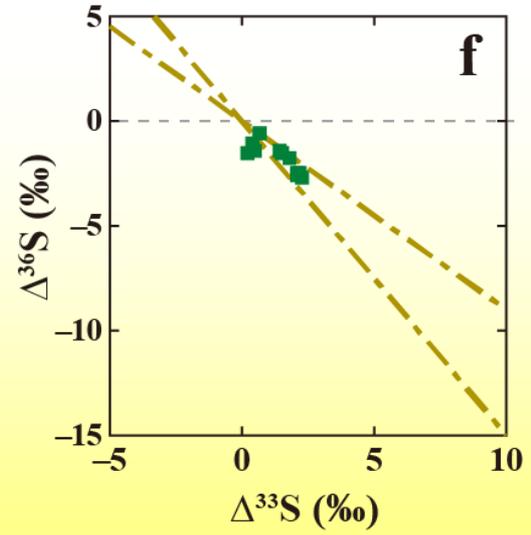
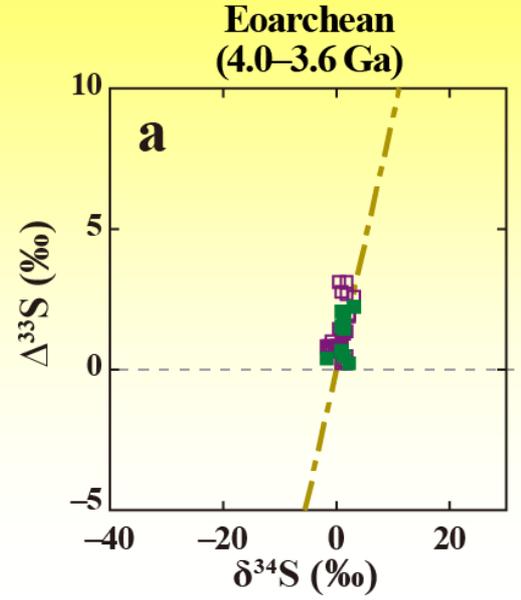
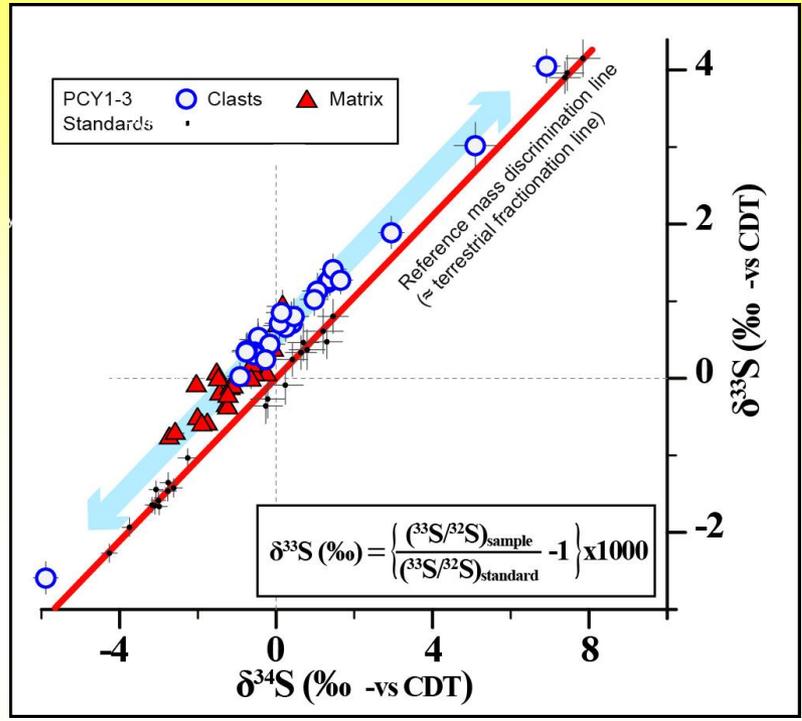


$$\Delta^{33}\text{S} = \delta^{33}\text{S} - \left\{ \left( 1 - \frac{\delta^{34}\text{S}}{1000} \right)^{0.515} - 1 \right\} \times 1000$$

$$\Delta^{36}\text{S} = \delta^{36}\text{S} - \left\{ \left( 1 - \frac{\delta^{34}\text{S}}{1000} \right)^{1.91} - 1 \right\} \times 1000$$

硫酸還元  
 $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{S}^{2-}$

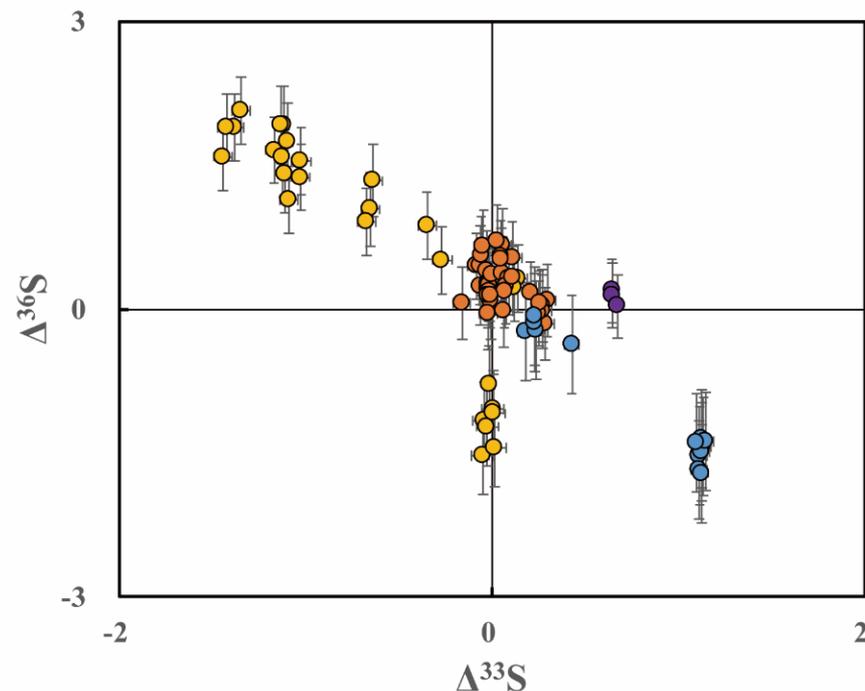
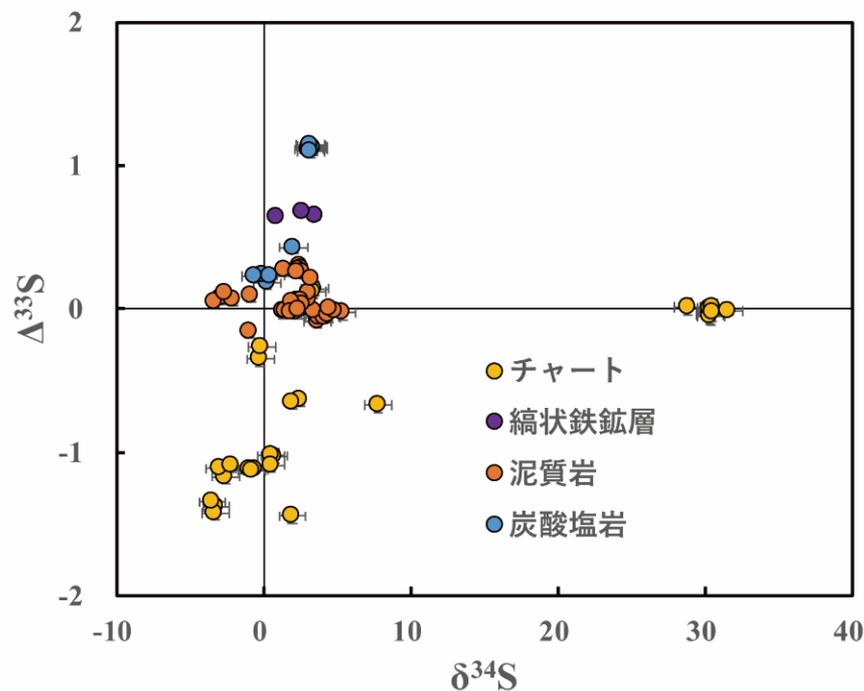
# (1) 硫黄代謝の証拠：イオウの同位体分別



# (2) メタン生成の証拠： イオウの同位体分別

傾きの変化:メタンヘイズ  
c.f. 大気組成: CO

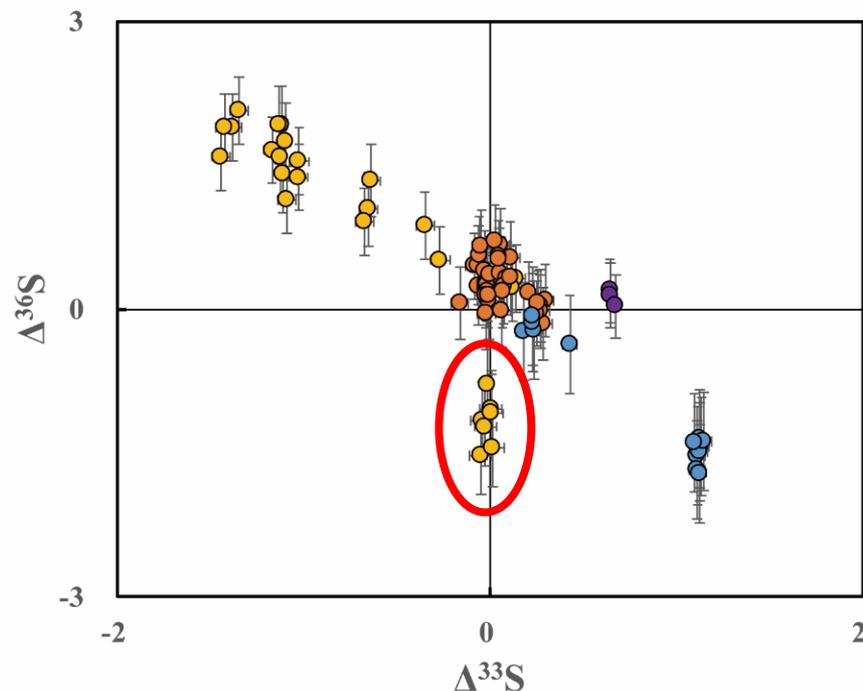
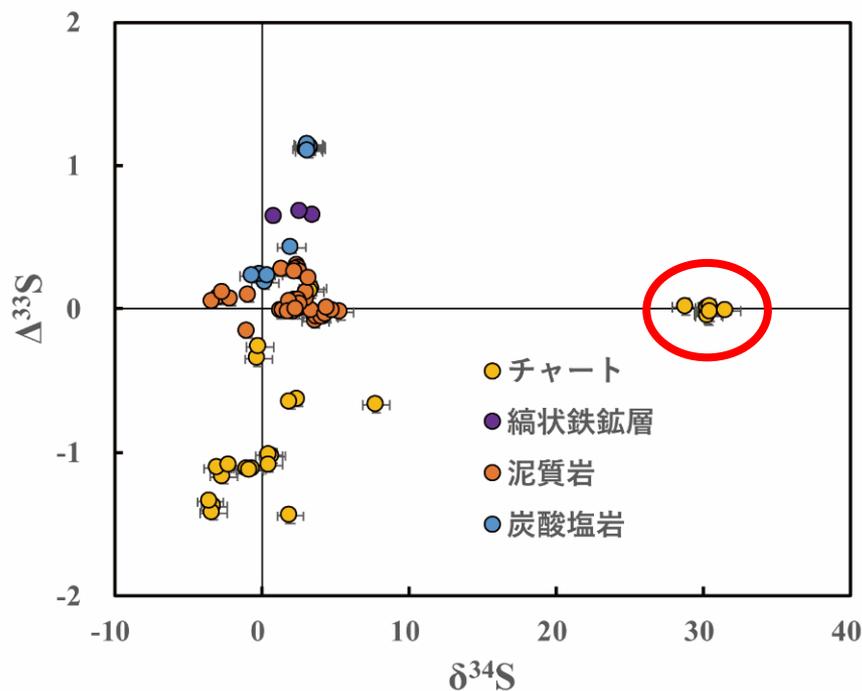
# ラブラドルの堆積岩中の硫化鉱物 4種硫黄同位体組成



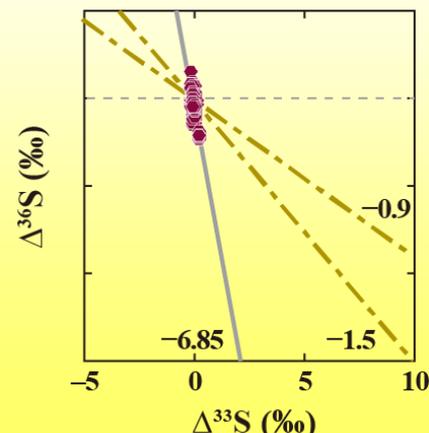
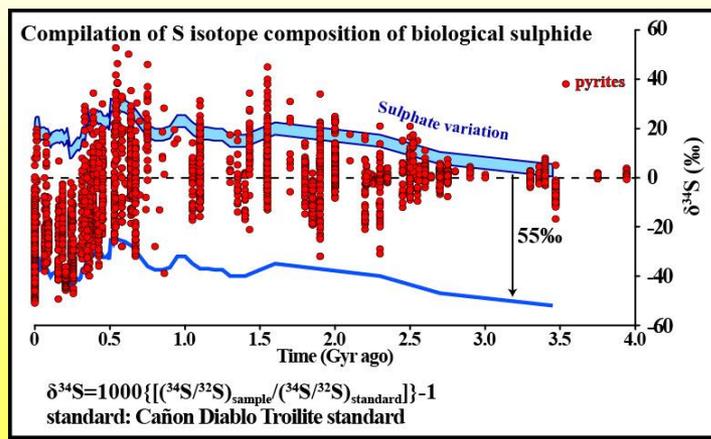
岩石種と同位体組成に関連あり → 海洋硫黄循環



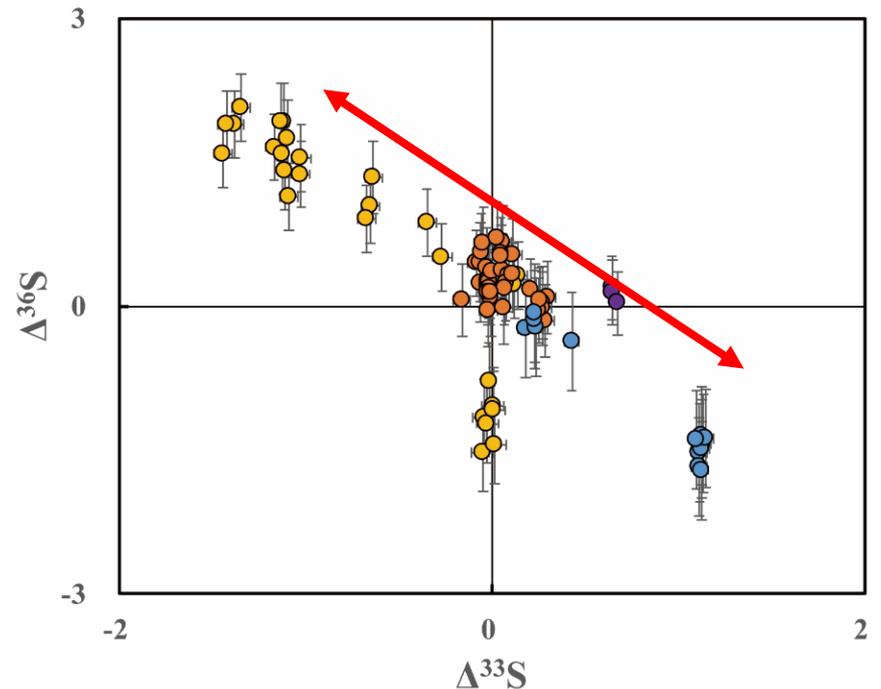
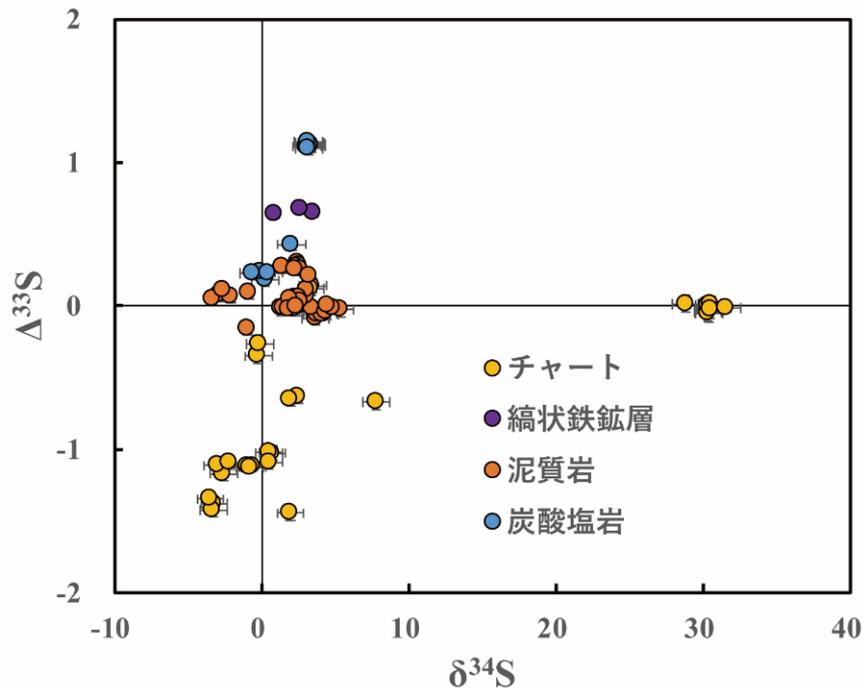
# ラブラドルの堆積岩中の硫化鉱物 4種硫黄同位体組成



大きな同位体異常 → 生物硫酸還元 (MSR)

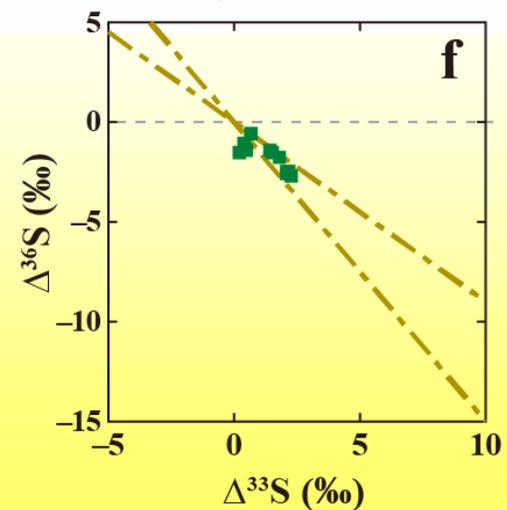


# ラブラドルの堆積岩中の硫化鉱物 4種硫黄同位体組成



$\Delta^{33}\text{S}$ と $\Delta^{36}\text{S}$ の傾き (-1.4)

⇒メタンヘイズの存在?



# 内容

- ①初期生命の証拠
- ②初期地球環境とアルカリ熱水作用
- ③地球史を通じた表層環境の酸化還元と海洋組成の経年変化

# 縞状鉄鉱層



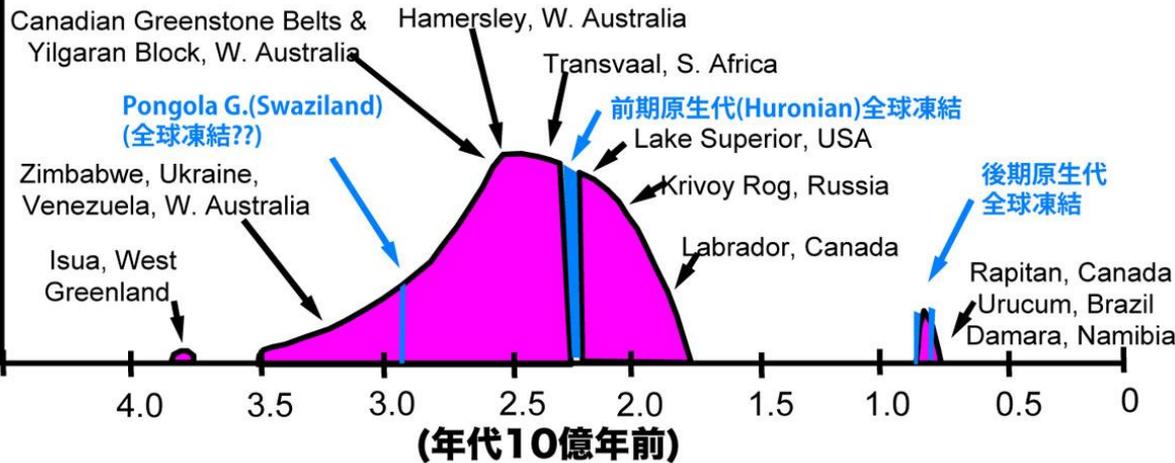
# 縞状鉄鉱層

18億年前以前に見られる  
(まだ海が還元的な時代)

海水中の $Fe^{2+}$   
が酸化されて、  
 $Fe^{3+}$ になり、  
沈殿( $FeO(OH)$ )



縞状鉄鉱層(BIFs)の形成時期  
(Klein & Beukes, 1992)



アルゴマタイプ  
➡海洋底変成作用  
に関連

スペリオールタイプ  
➡大陸棚の化学躍層  
に関連  
(25億年前以降)

# 海洋底熱水変成作用

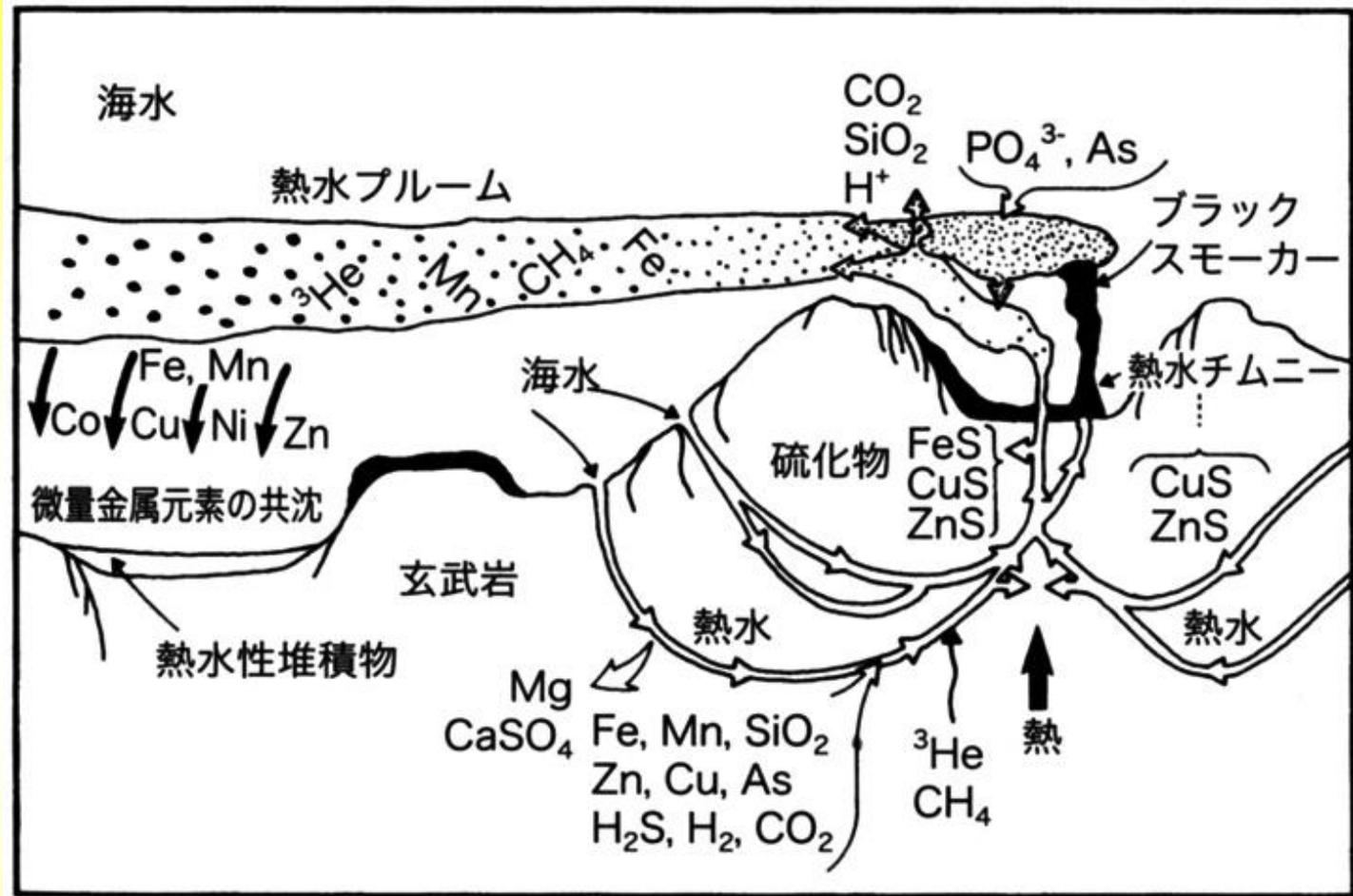


図 I-4-5 中央海嶺における熱水循環。(蒲生, 1996).

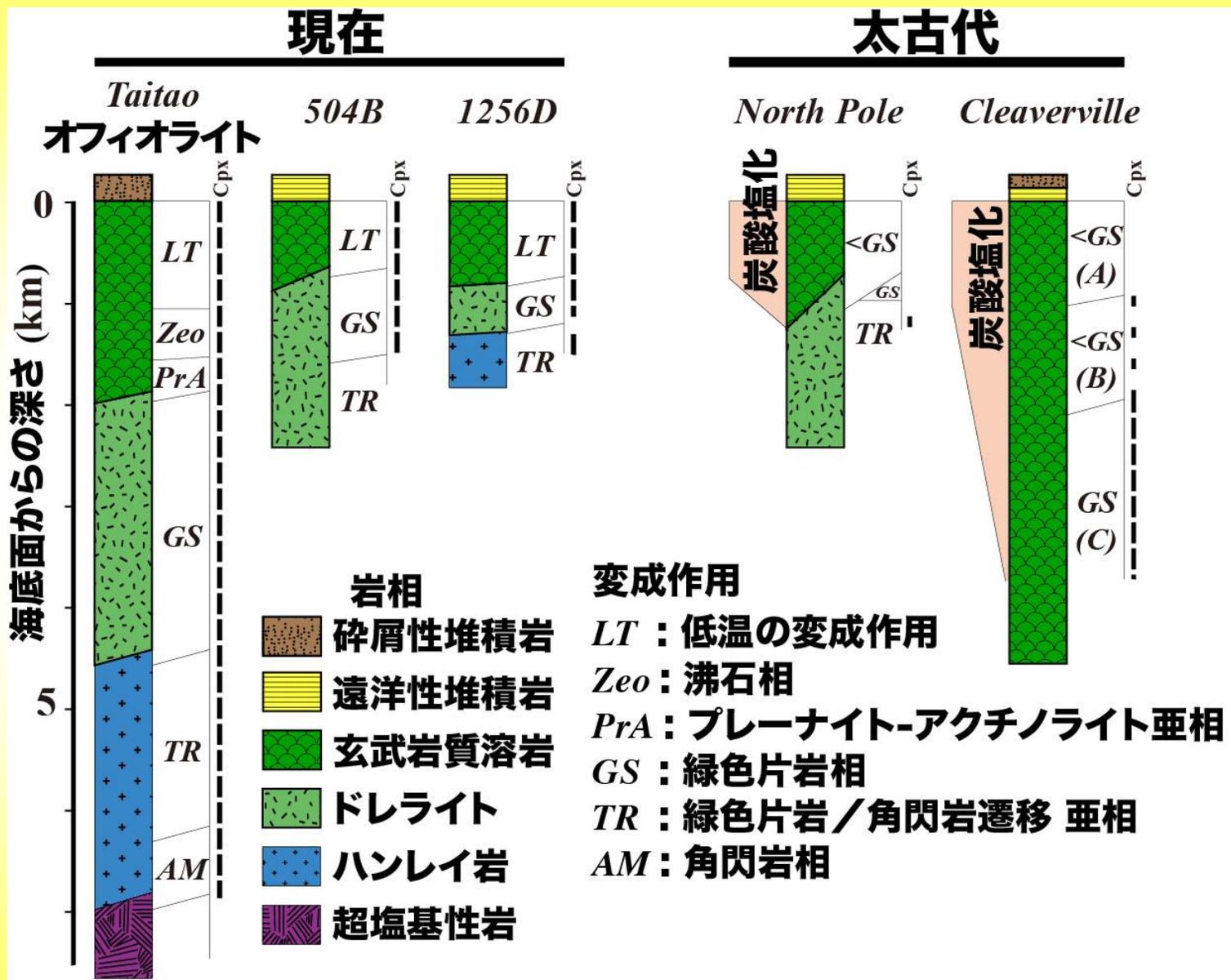
- ①酸化的な海水が、もともとのソース
- ②熱水と玄武岩との反応によって、酸性、還元的に。
- ③Fe, Cu, Znなどに富む。

# 炭酸塩岩化作用

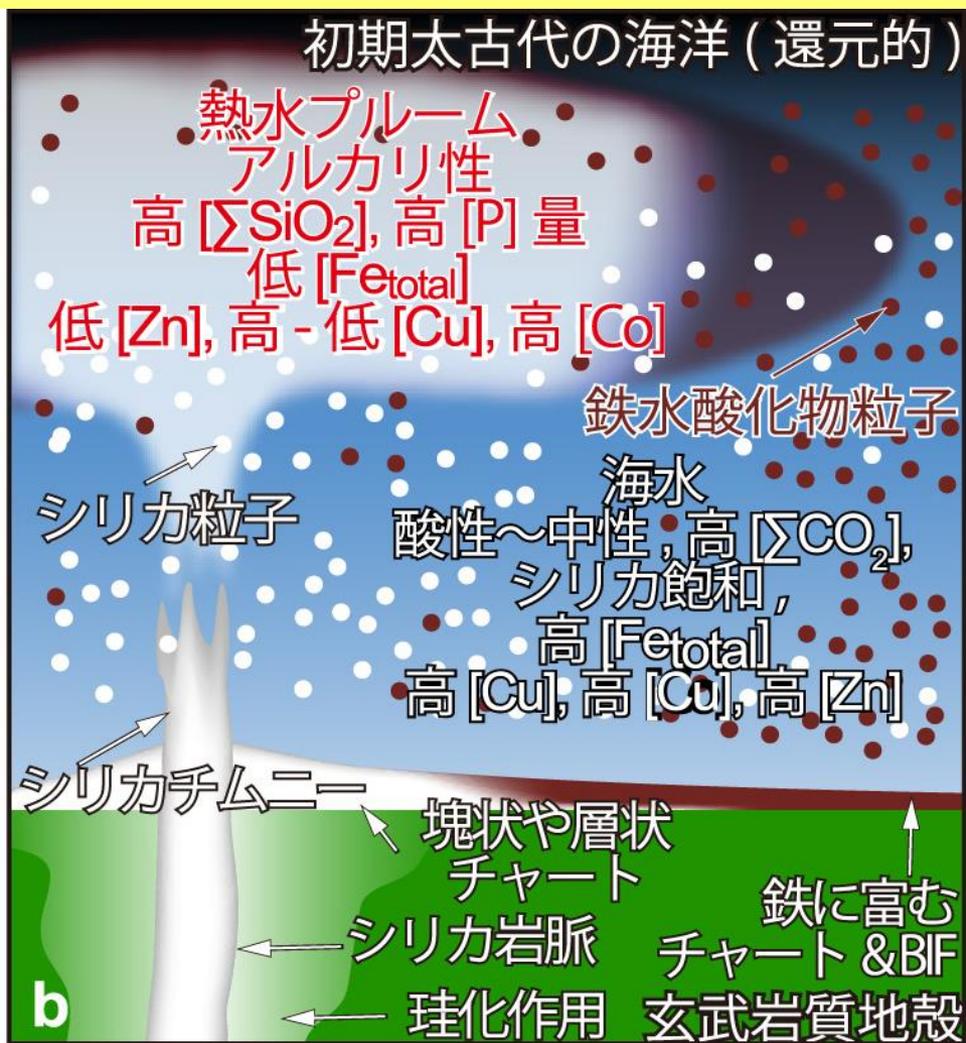
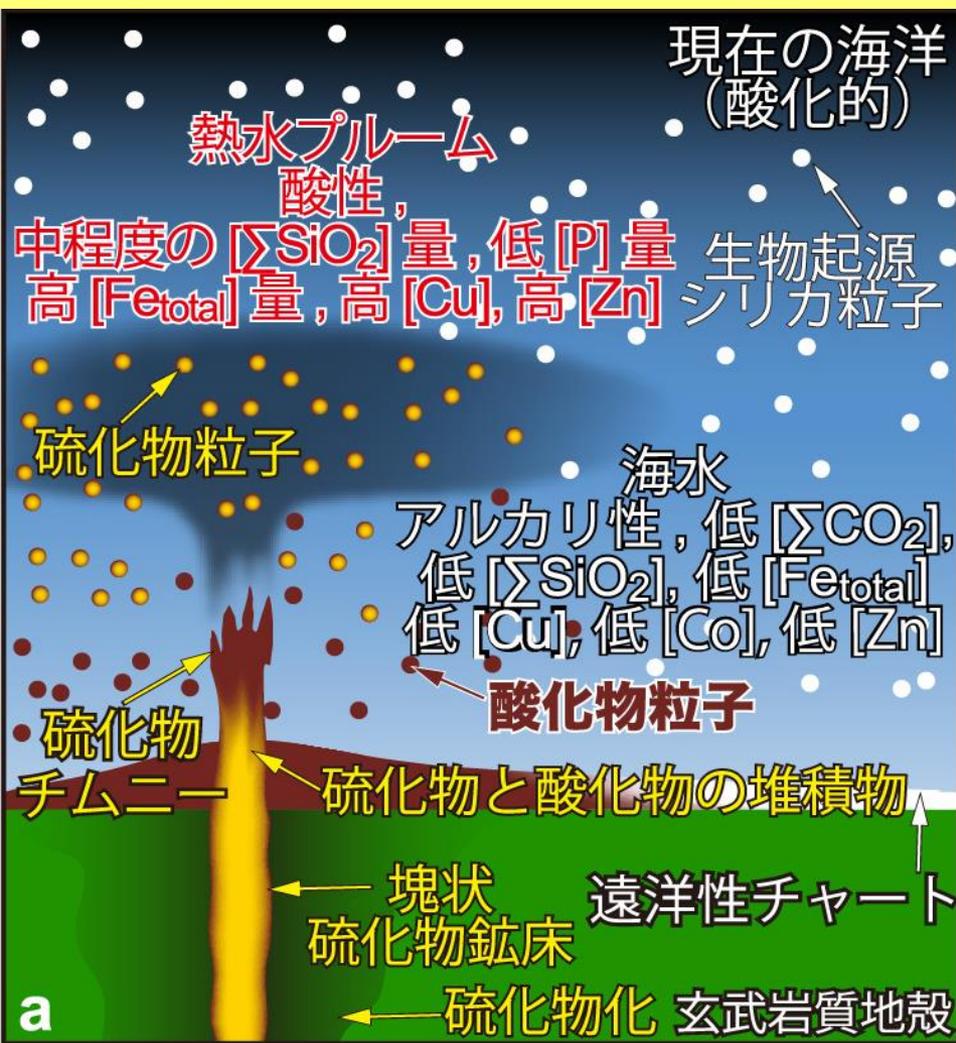


コマチアイト(超塩基性マグマ)

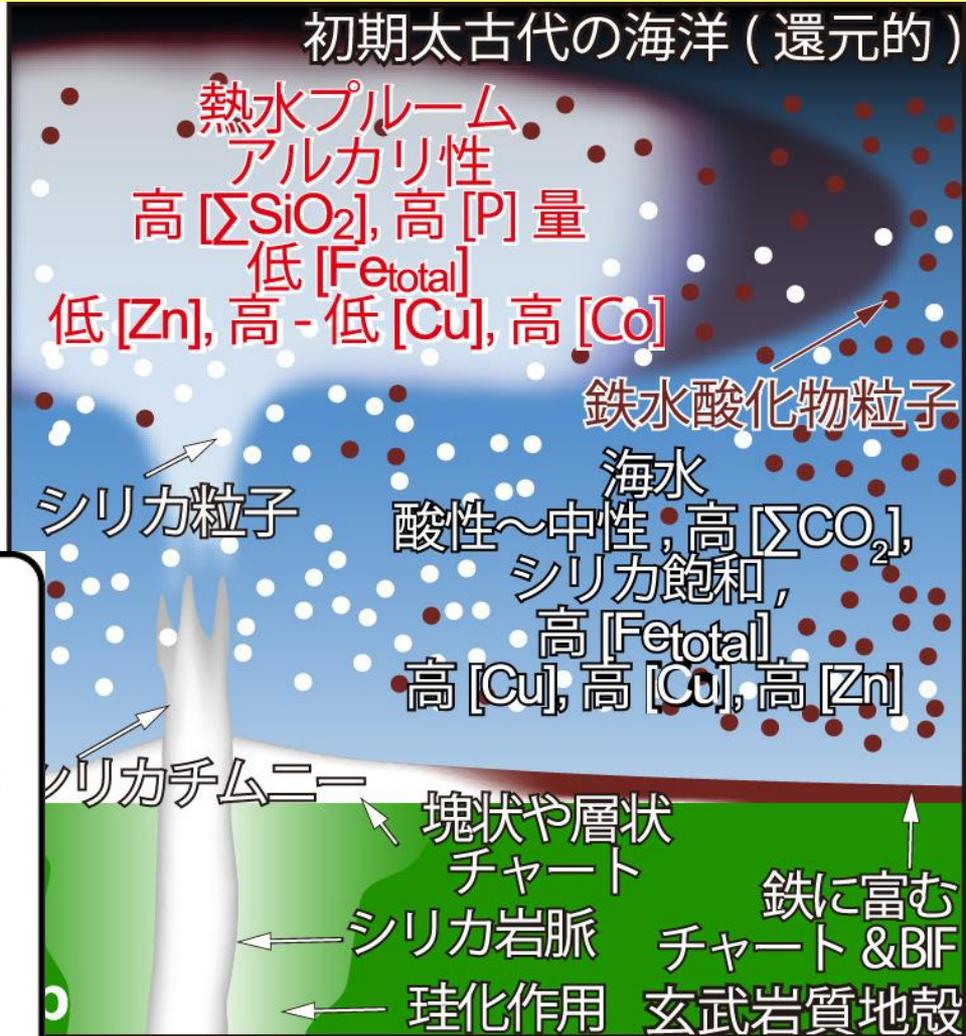
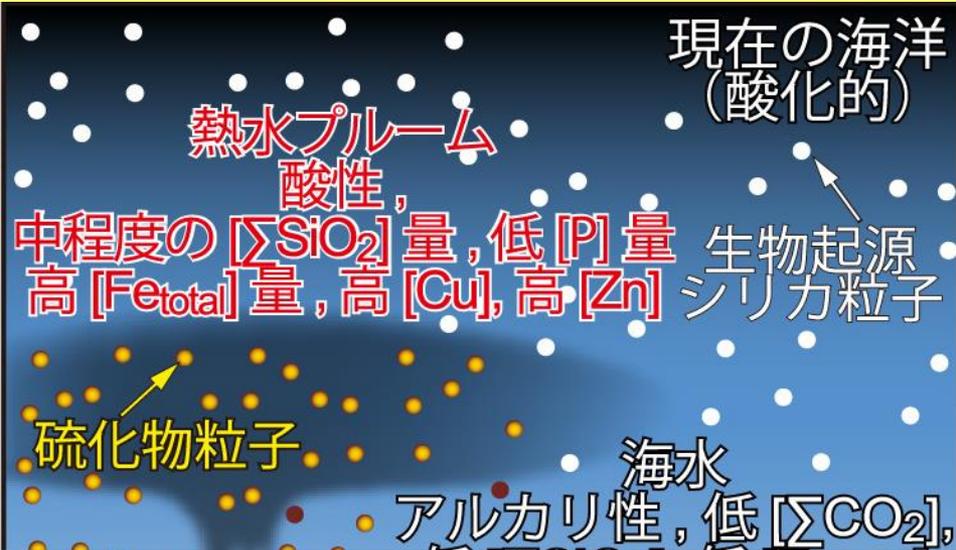
# 現在と太古代(高CO<sub>2</sub>期)の海洋底変成作用の違い



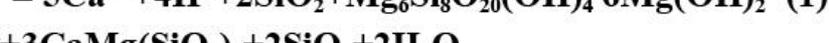
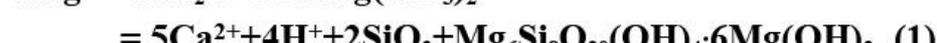
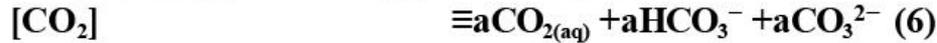
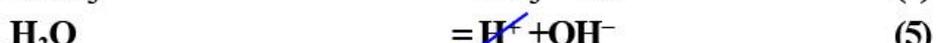
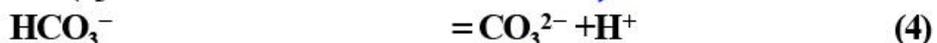
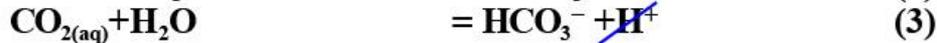
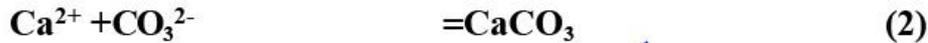
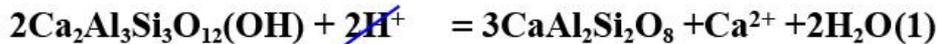
# 現在と太古代の海洋底玄武岩の変質の違い



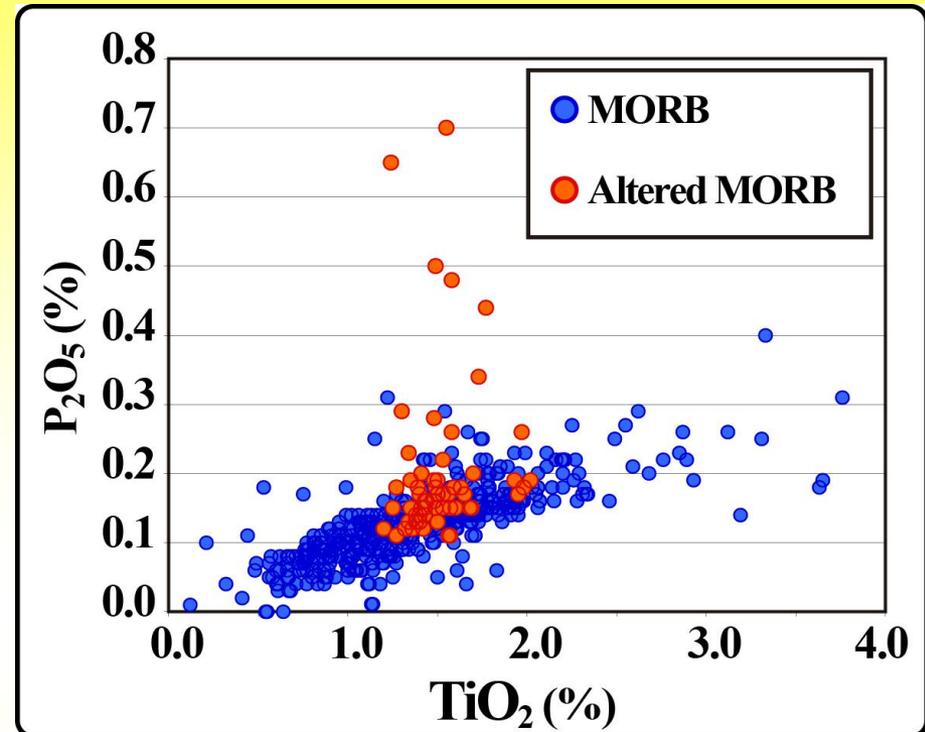
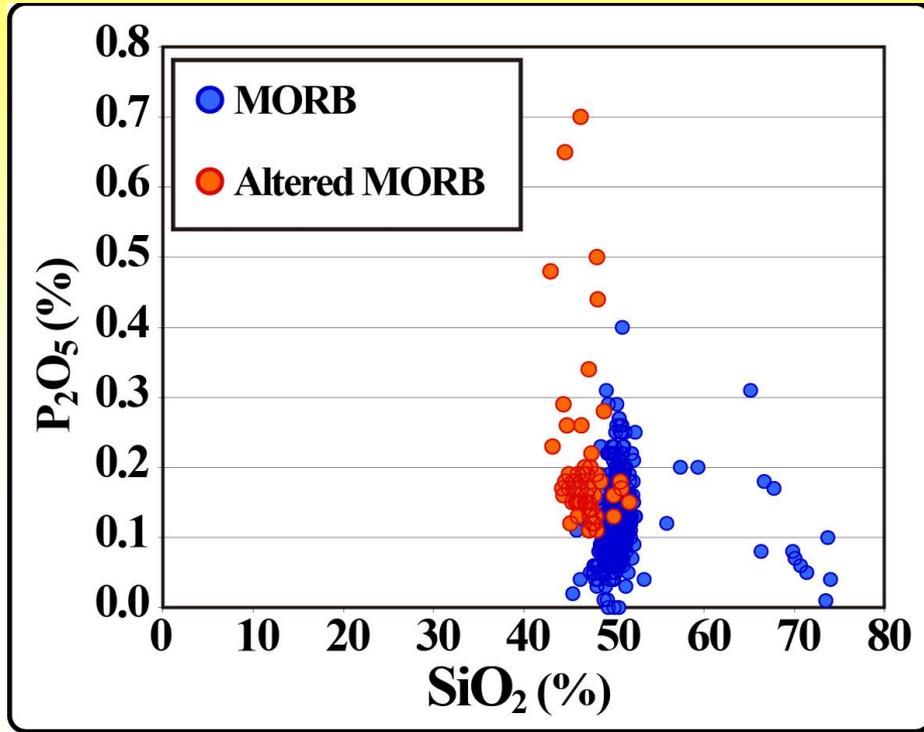
# 現在と太古代の海洋底玄武岩の変質の違い



Equilibrium reactions of anorthite, clinozoisite, calcite,  $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , and  $\text{H}_2\text{O}$



# 現在の海洋底変成作用によるリンの除去

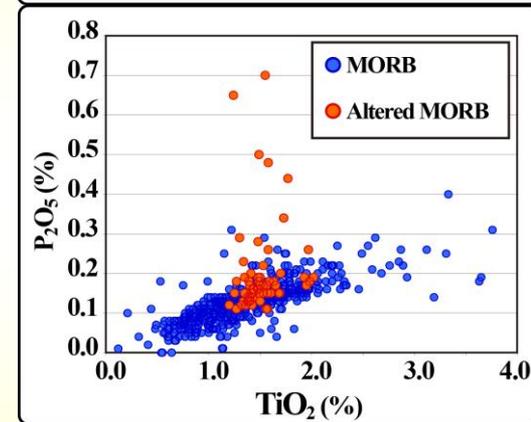
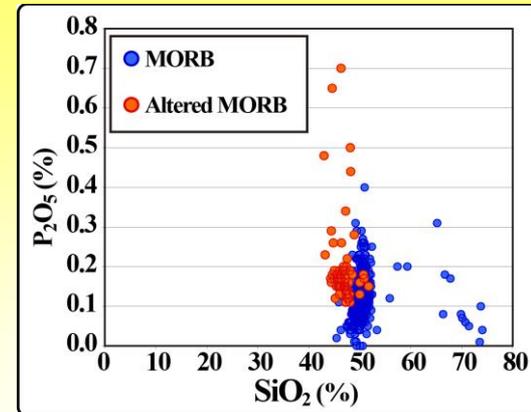
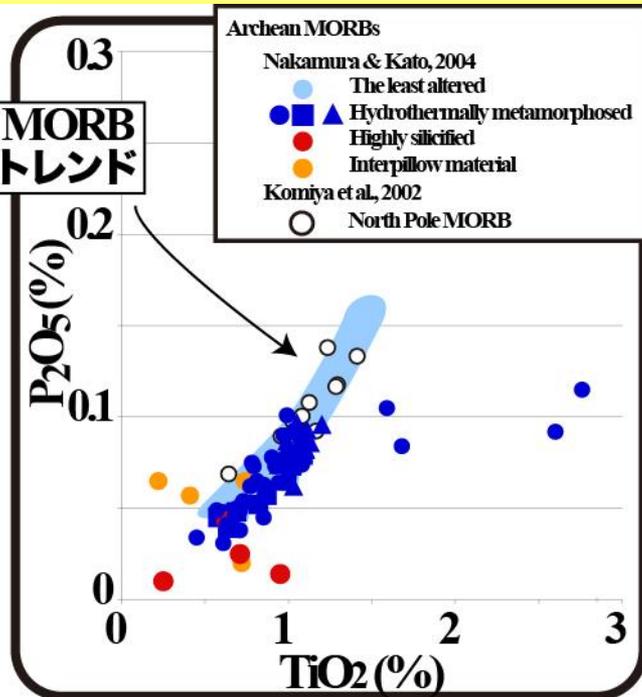
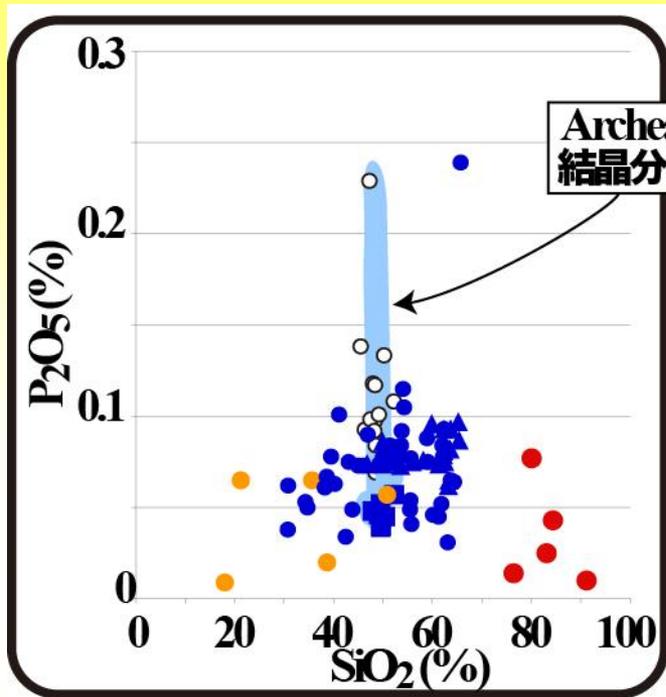


## 現在の海洋のリンの供給源

➡大陸

➡熱水はシンク

# 太古代の海洋底変成作用はリンの供給源



## 太古代の海洋底変成作用

- ➡ 炭酸塩岩化作用 (CaCO<sub>3</sub>の生成)
- ➡ Ca<sup>2+</sup>を炭酸塩に取られてしまう

# 珪化作用：炭酸塩岩化された部分が、 珪化作用による上塗り



珪化した  
枕状玄武岩

# 珪化作用：炭酸塩岩化された部分が、 珪化作用による上塗り

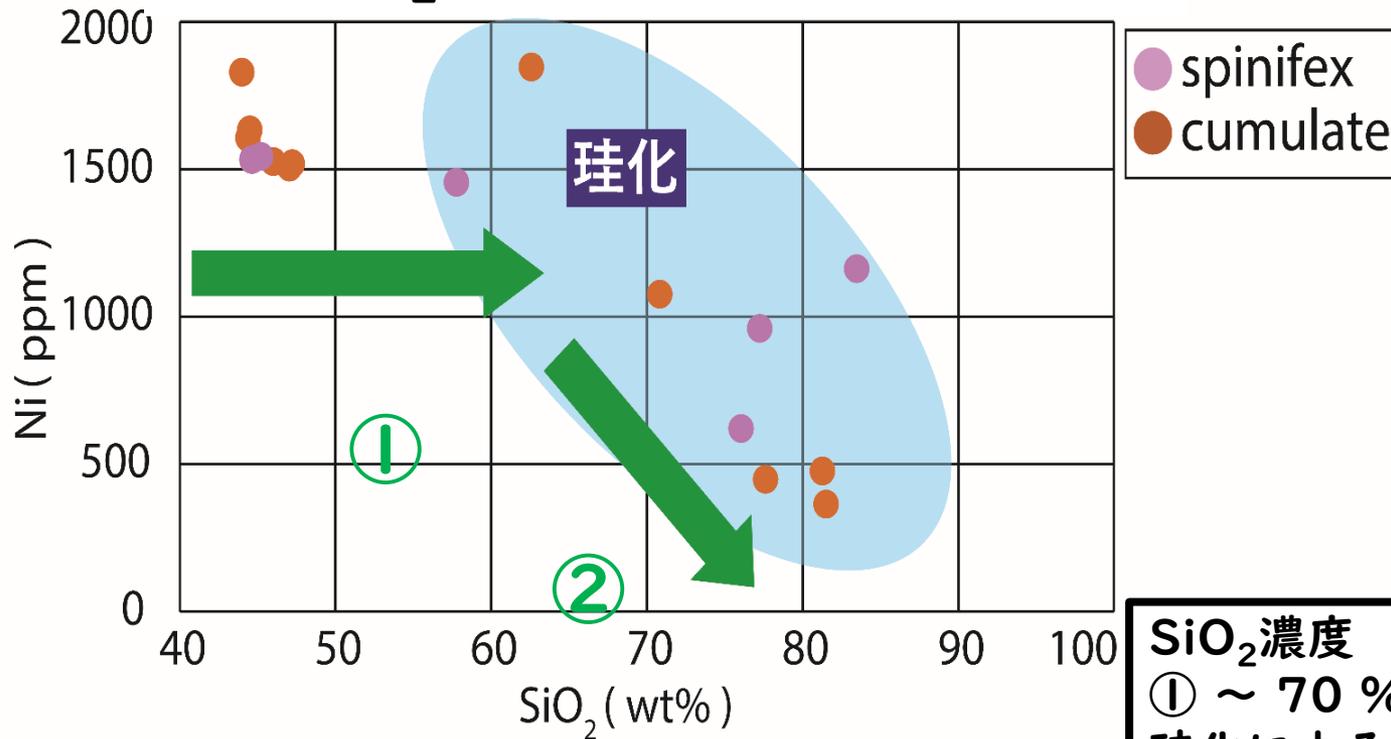
炭酸塩岩化  
された  
コマチアイトの  
沈積岩層

一部珪化も  
されている



# カンラン岩質コマチアイトからのNi放出

## 全岩SiO<sub>2</sub>濃度と全岩Ni濃度の関係



SiO<sub>2</sub>濃度

① ~ 70 %

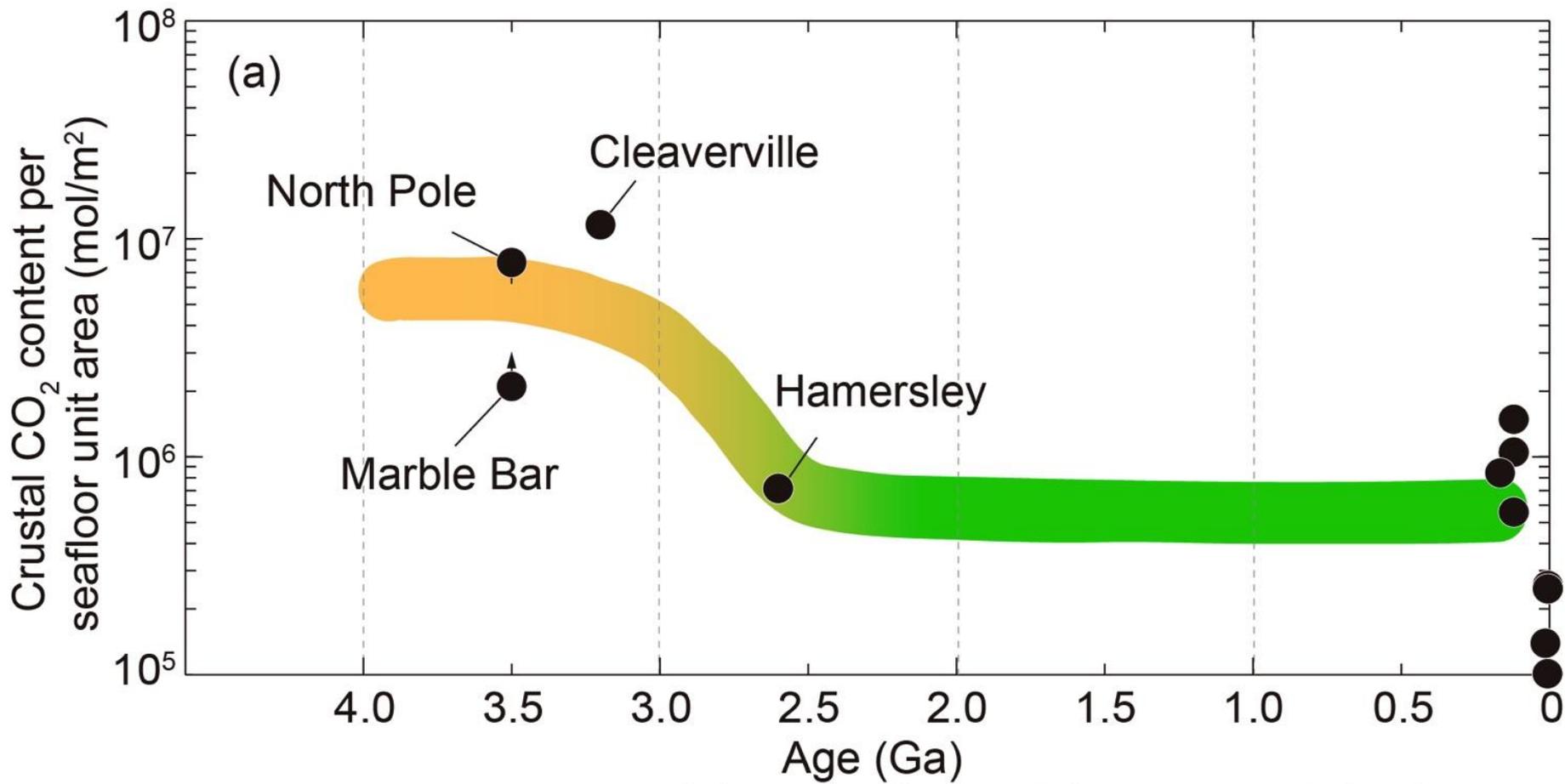
珪化による顕著なNi濃度の変化は見られない

② 70 % ~

全岩SiO<sub>2</sub>濃度の増加に伴いNi濃度が減少

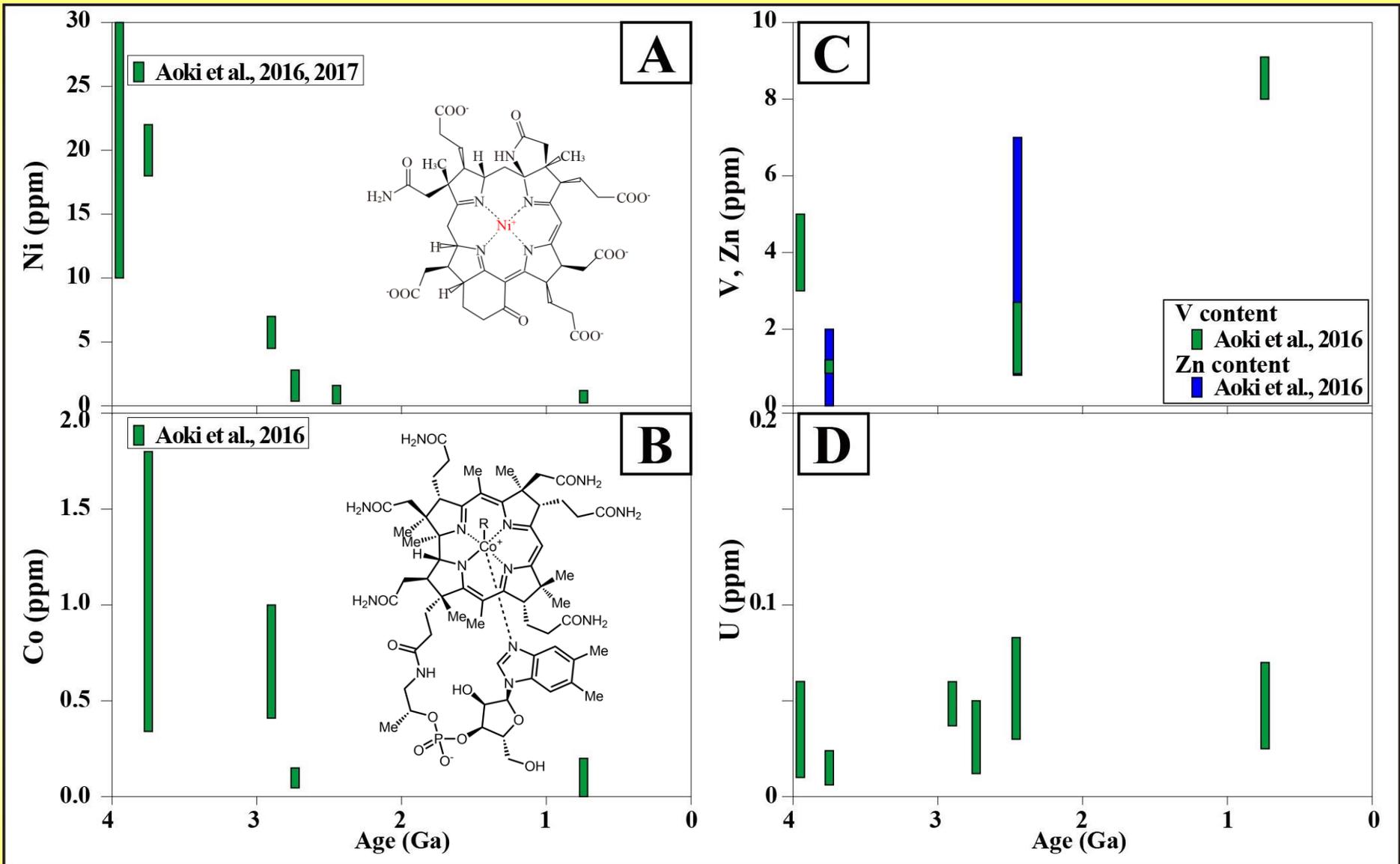
カンラン岩質コマチアイトが熱水による強い珪化変質を受け全岩SiO<sub>2</sub>濃度が70%以上になるとNiが岩石から放出される

# 海洋底玄武岩の面積あたりの炭酸塩(CO<sub>2</sub>)濃度の経年変化

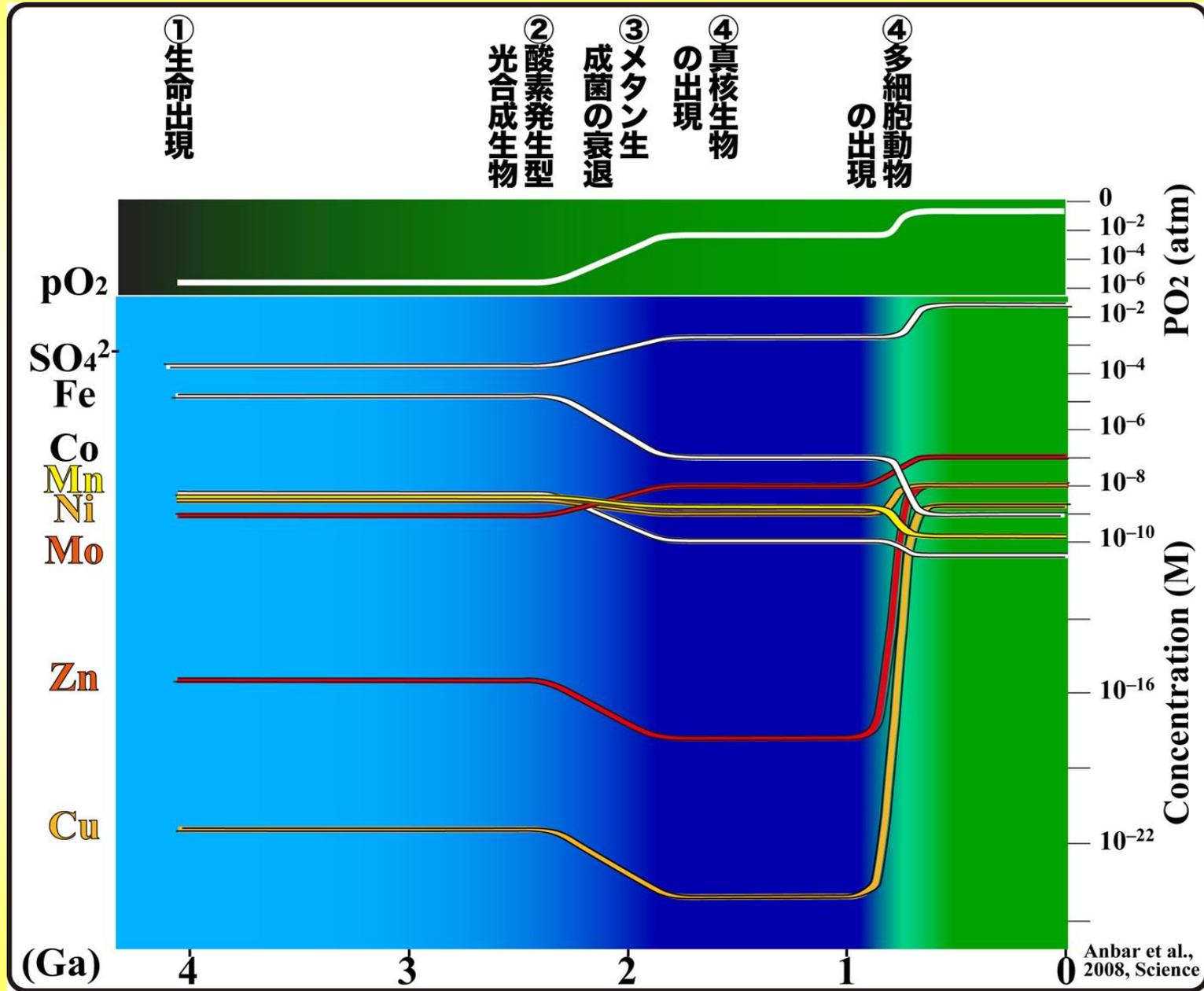


Shibuya et al. / Precambrian Research 236 (2013) 59–64

# 海洋組成の経年変化



# 海水の組成と生命進化(生命進化と海洋組成変化の関連)



# 海洋リン濃度の経年変化

## 従来の研究

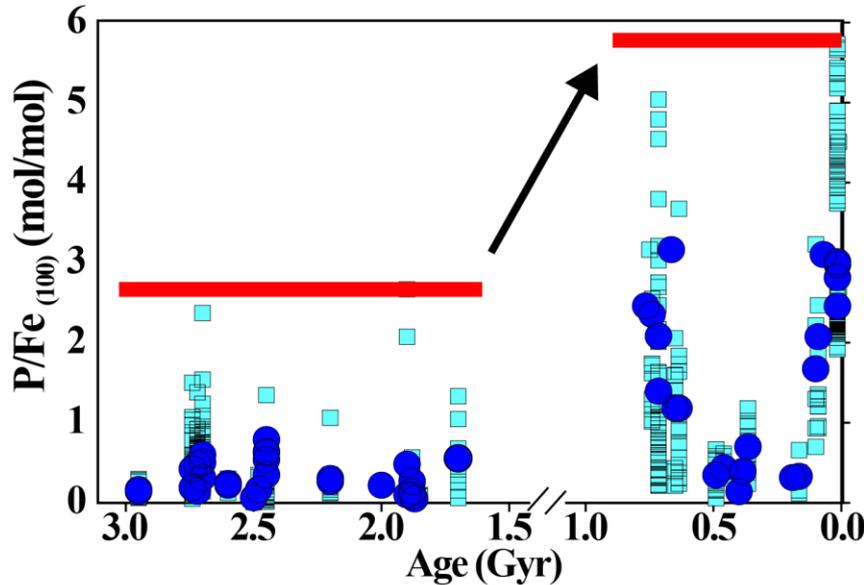
- ①縞状鉄鉱層中のリン濃度を用いた推定
- ②黒色頁岩中のリン濃度を用いた推定

# 海洋リン濃度の経年変化

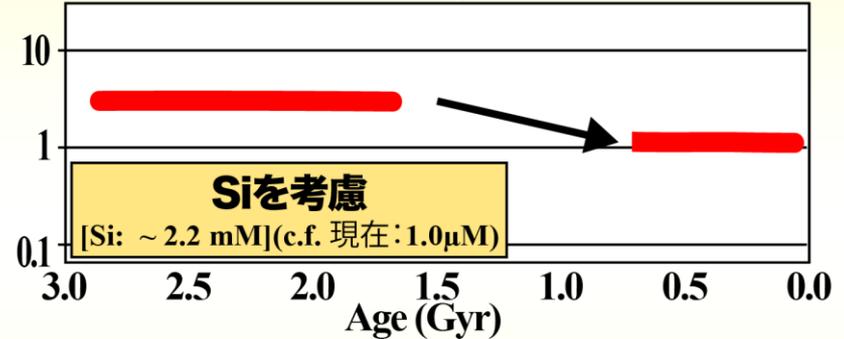
## 従来の研究

- ① 縞状鉄鉱層中のリン濃度を用いた推定
- ② 黑色頁岩中のリン濃度を用いた推定

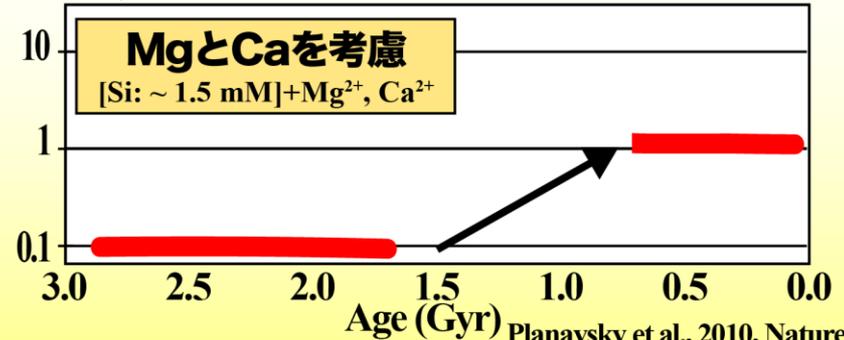
外洋性鉄酸化物に富む熱水堆積物や縞状鉄鉱層のP/Fe比の経年変化



(現在値との比) 鉄酸化物(縞状鉄鉱層)から推定した海洋P濃度



(現在値との比)



Planavsky et al., 2010, Nature

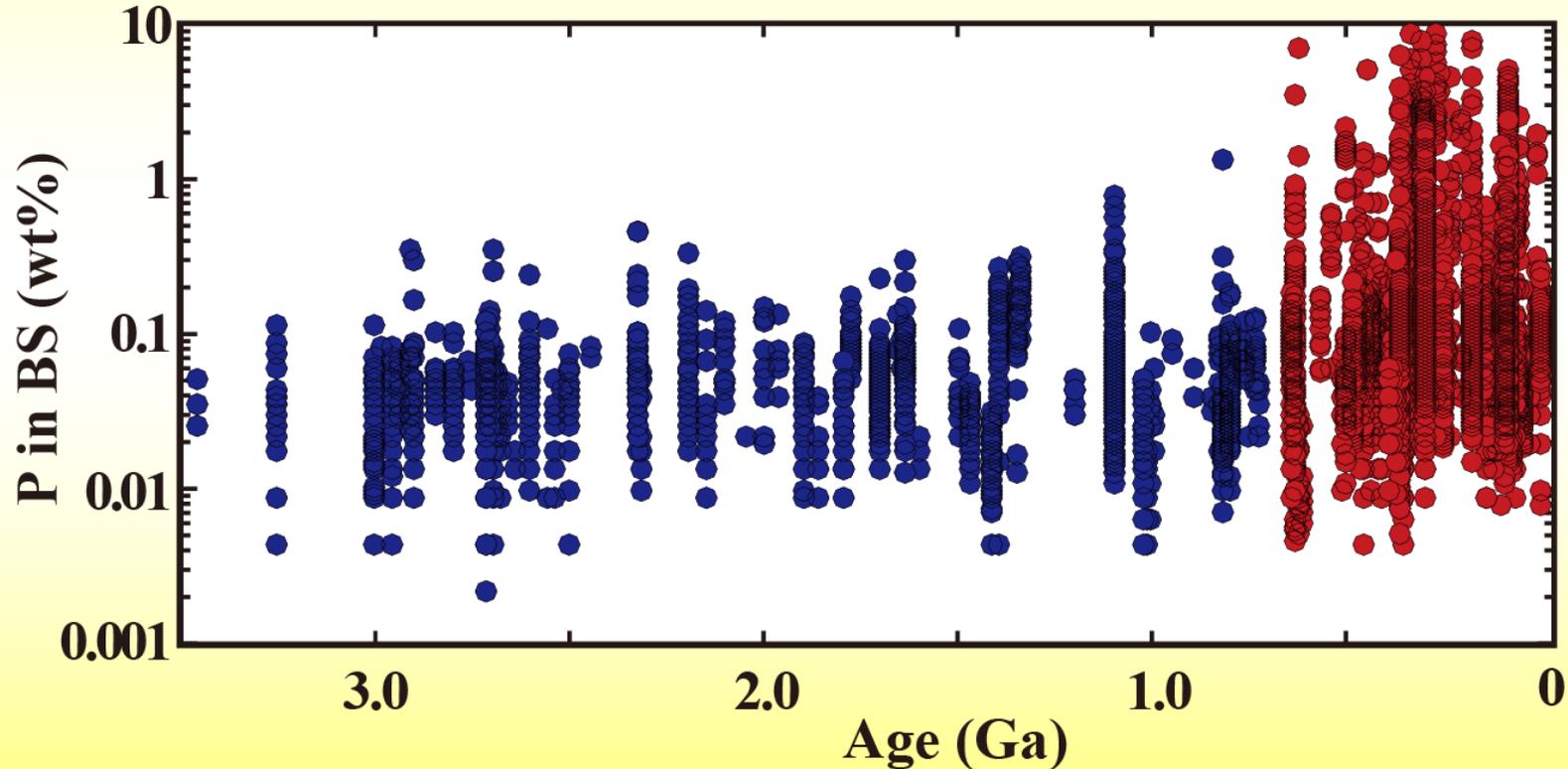
➡他の元素の濃度によって推定値が大きく変わる

# 海洋リン濃度の経年変化

## 従来の研究

① 縞状鉄鉱層中のリン濃度を用いた推定

② 黒色頁岩中のリン濃度を用いた推定



Reinhard et al., 2017

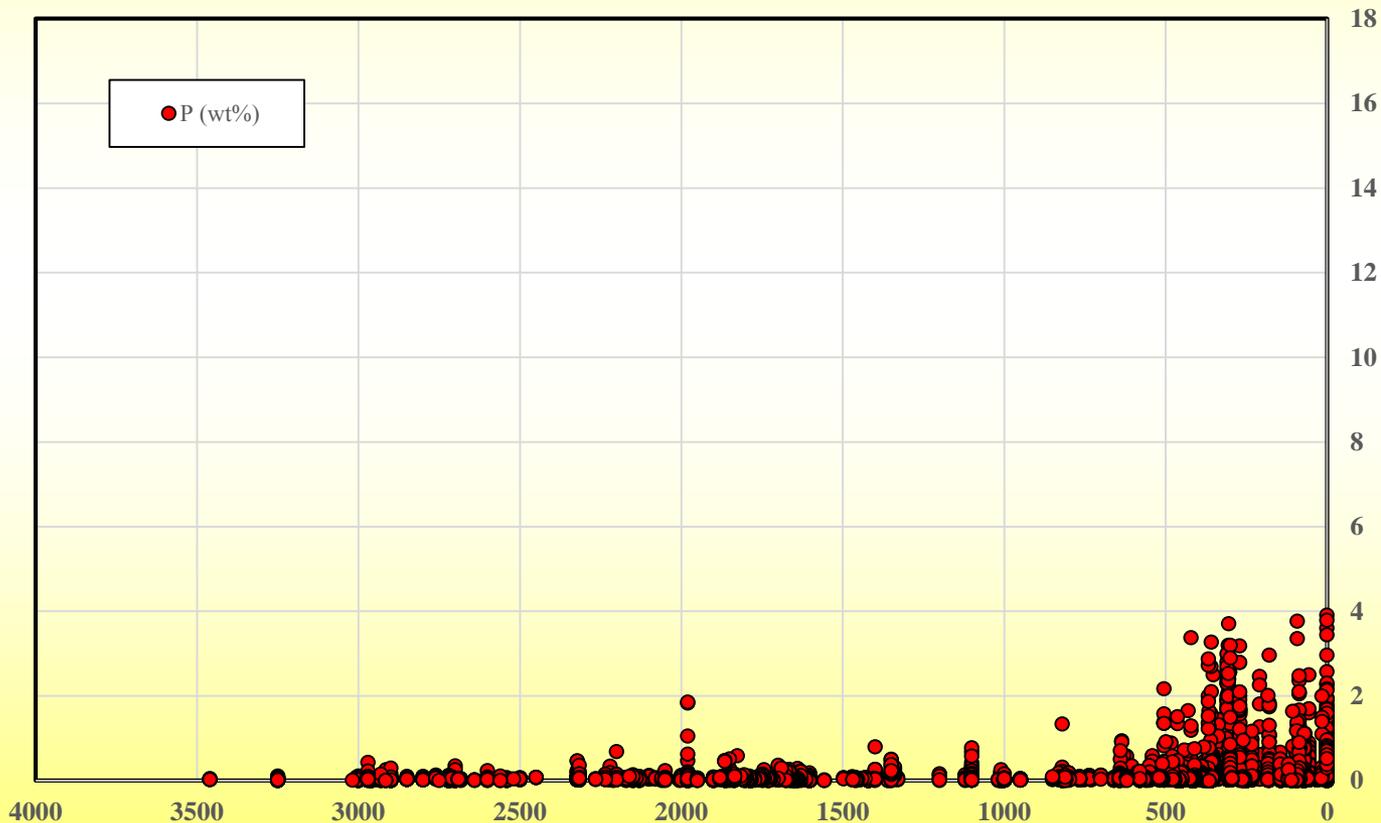
➡ 黒色頁岩中のリン濃度 (Redfield比) は海洋リン濃度と関連？

# 海洋リン濃度の経年変化

## 従来の研究

①縞状鉄鉱層中のリン濃度を用いた推定

②黒色頁岩中のリン濃度を用いた推定



➡黒色頁岩中のリン濃度(Redfield比)は海洋リン濃度と関連？

# 海洋リン濃度の経年変化

## 新たな研究手法の開発

### ③炭酸塩鉱物中のリン濃度を局所分析

①浅海環境中のリン濃度の推定

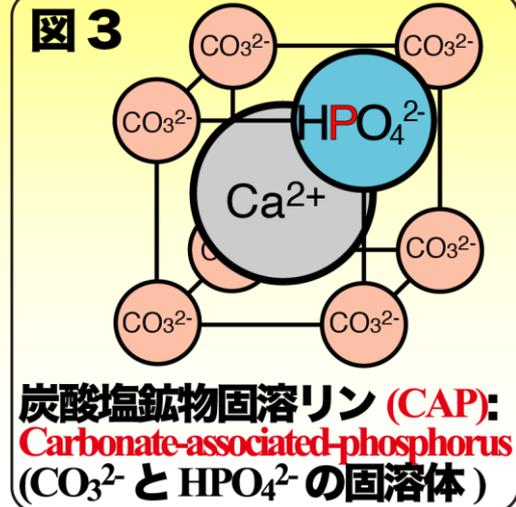
②リンは $\text{CO}_3^{2-}$ と置換 $\rightarrow$ 固溶体

③ストロマトライト:

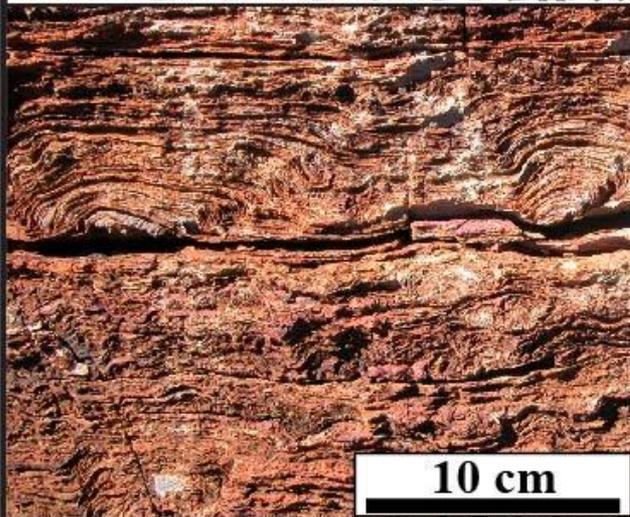
生物が関連するが、

無機的に沈澱(vital effectは無視)

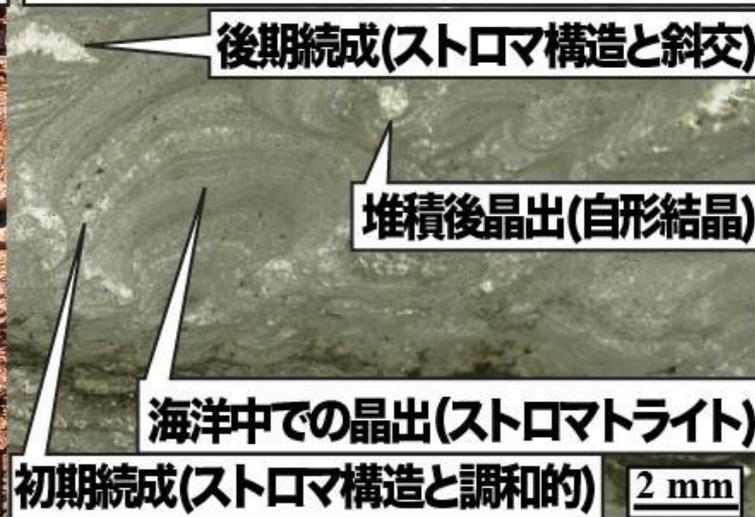
④堆積構造の保存 $\rightarrow$ 化学組成も保存?



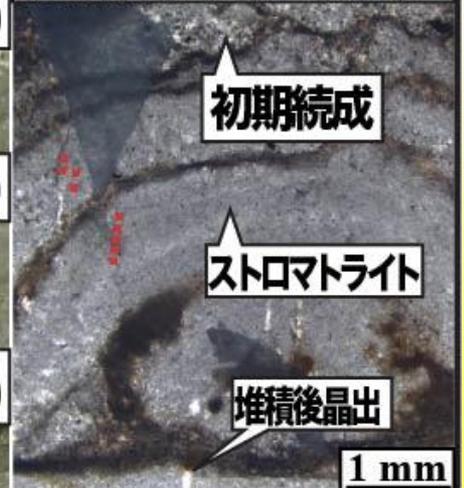
B: ストロマトライト露頭



C: 組織と炭酸塩鉱物晶出時期



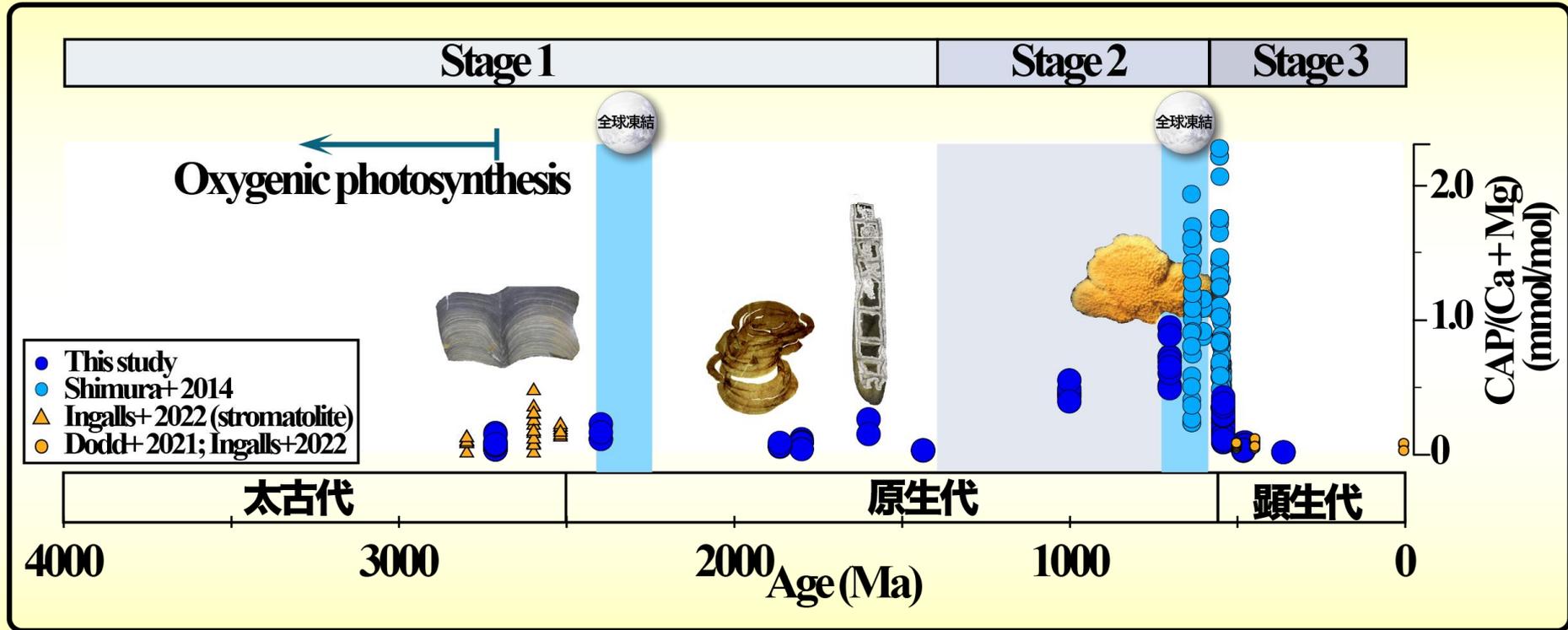
D: ストロマトライトと分析点  
(分析結果: 黄点@図A)



# 海洋リン濃度の経年変化

## 新たな研究手法の開発

### ③炭酸塩鉱物中のリン濃度を局所分析



- 太古代～中原生代のリン濃度(全球凍結直後は?) 現在以上
- 中原生代～初期カンブリア紀のリン濃度の急激な上昇
- 顕生代に急激な低下+現在程度に