

惑星科学セミナー2015

- 初日午前
- 0 この講義の概要、
- 1 古典的太陽系惑星形成理論と系外惑星の発見
- 2 地球の起源: ABELモデル
- 3 タンデム惑星形成理論の概要と今後
- 初日午後
- 4 冥王代表層環境
- 5 生命の起源
- 6 科学革命の構造

- **二日目午前**

- 1 地球史概観(太古代から原生代)
- 2 地球史概観(顕生代)
- 3 地球史概観(人類の起源と未来)

- **二日目午後**

- 4 生命進化論(放送大学第14回)
- 5 宇宙生命学の概要－1(同上第15回)
- 6 宇宙生命学の概要－2(同上第15回)

1 古典的太陽系惑星形成理論と系外惑星の発見

2 地球の起源：ABELモデル

第5回 地球の起源と形成プロセス

1 太陽系誕生と古典的惑星形成論

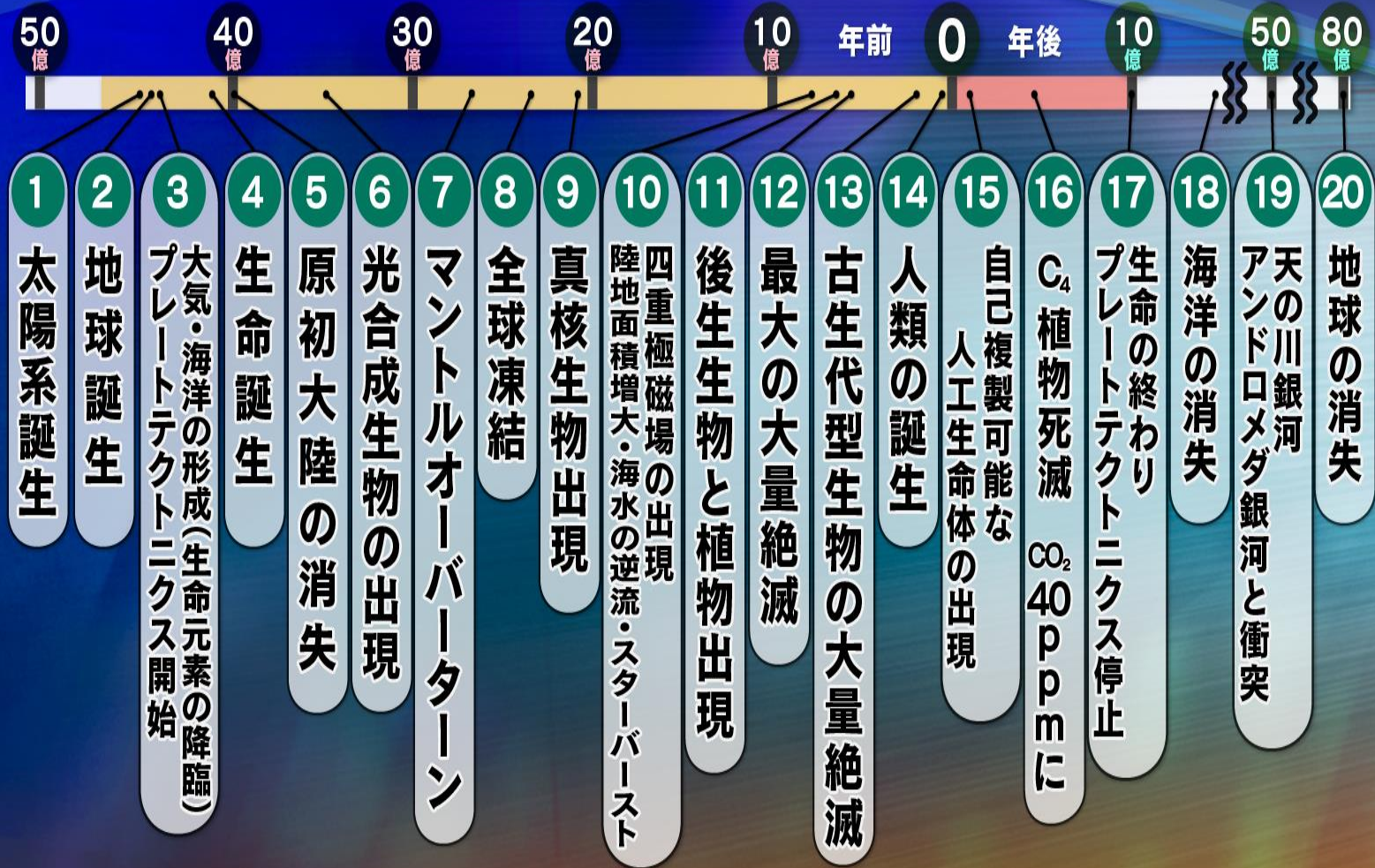
2 系外惑星の発見ラッシュ

3 太陽系惑星研究の進展

① 小惑星帯 ② 隕石学 ③ 冥王代の地球と月

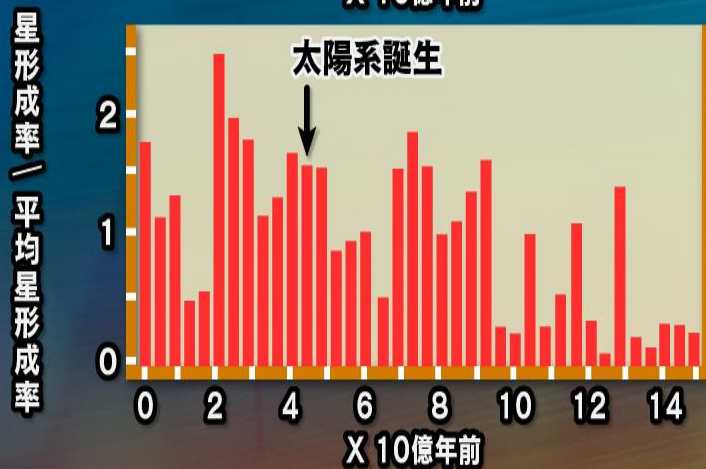
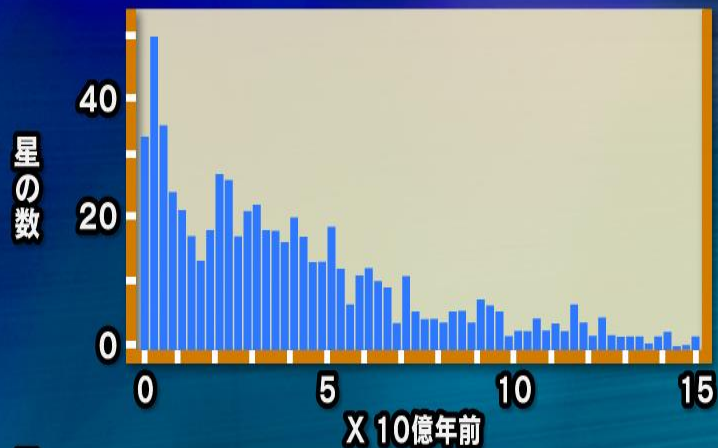
4 地球の2段階形成モデル

地球史20大事件



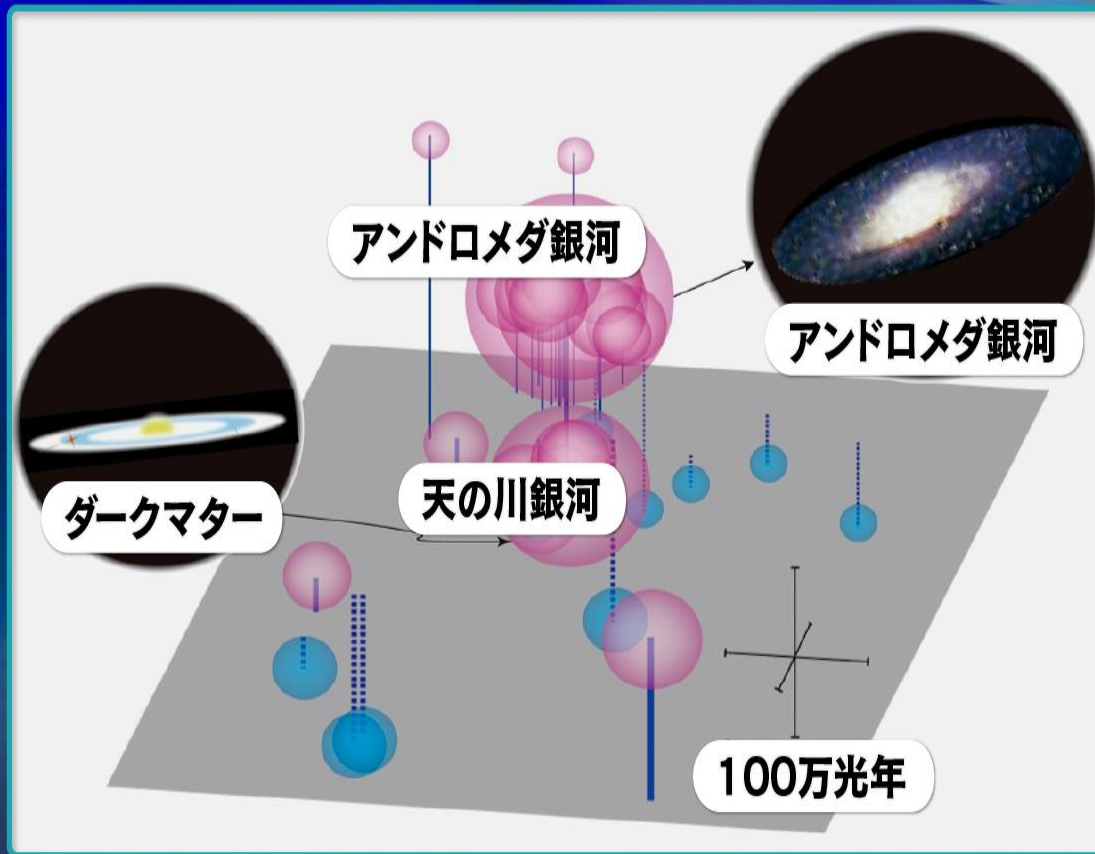
天の川銀河における星形成の歴史

太陽系はスターバーストの時代に誕生した



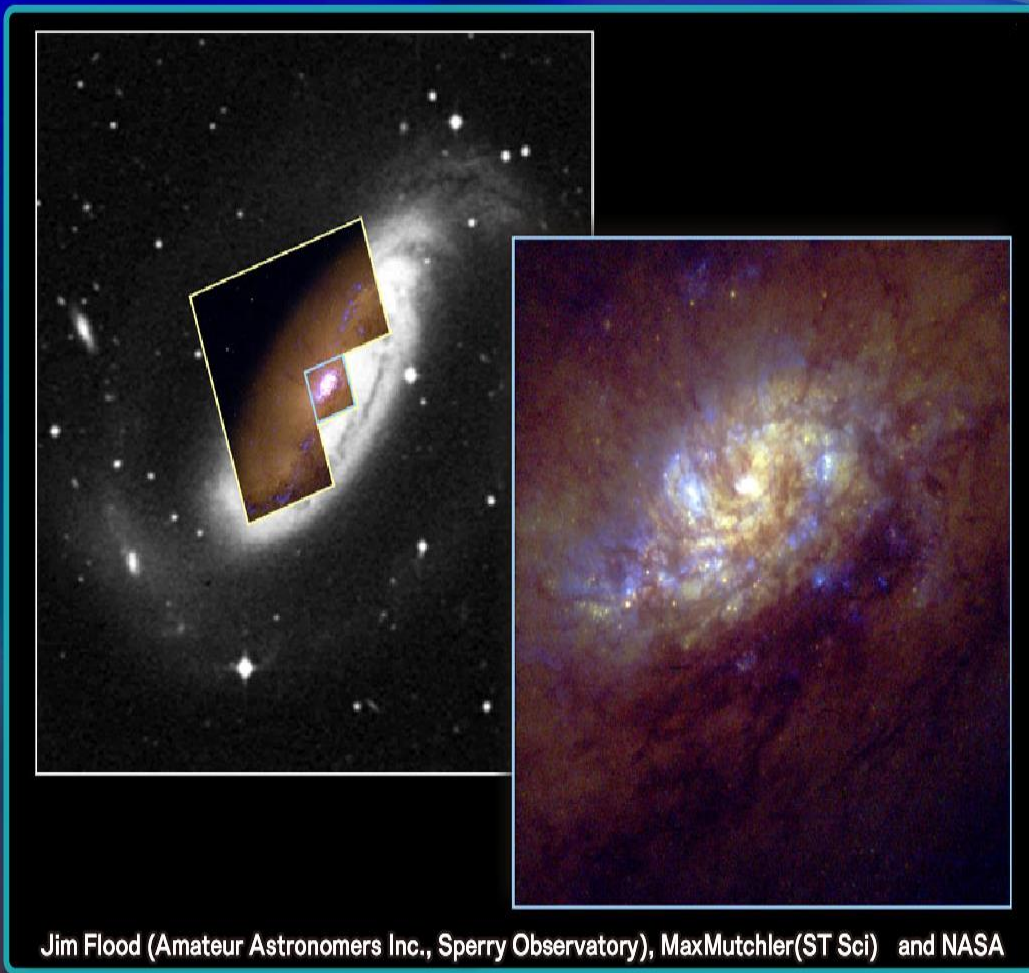
Rocha-Pinto et al., (2000a,b)

天の川銀河周辺の矮小銀河の分布図

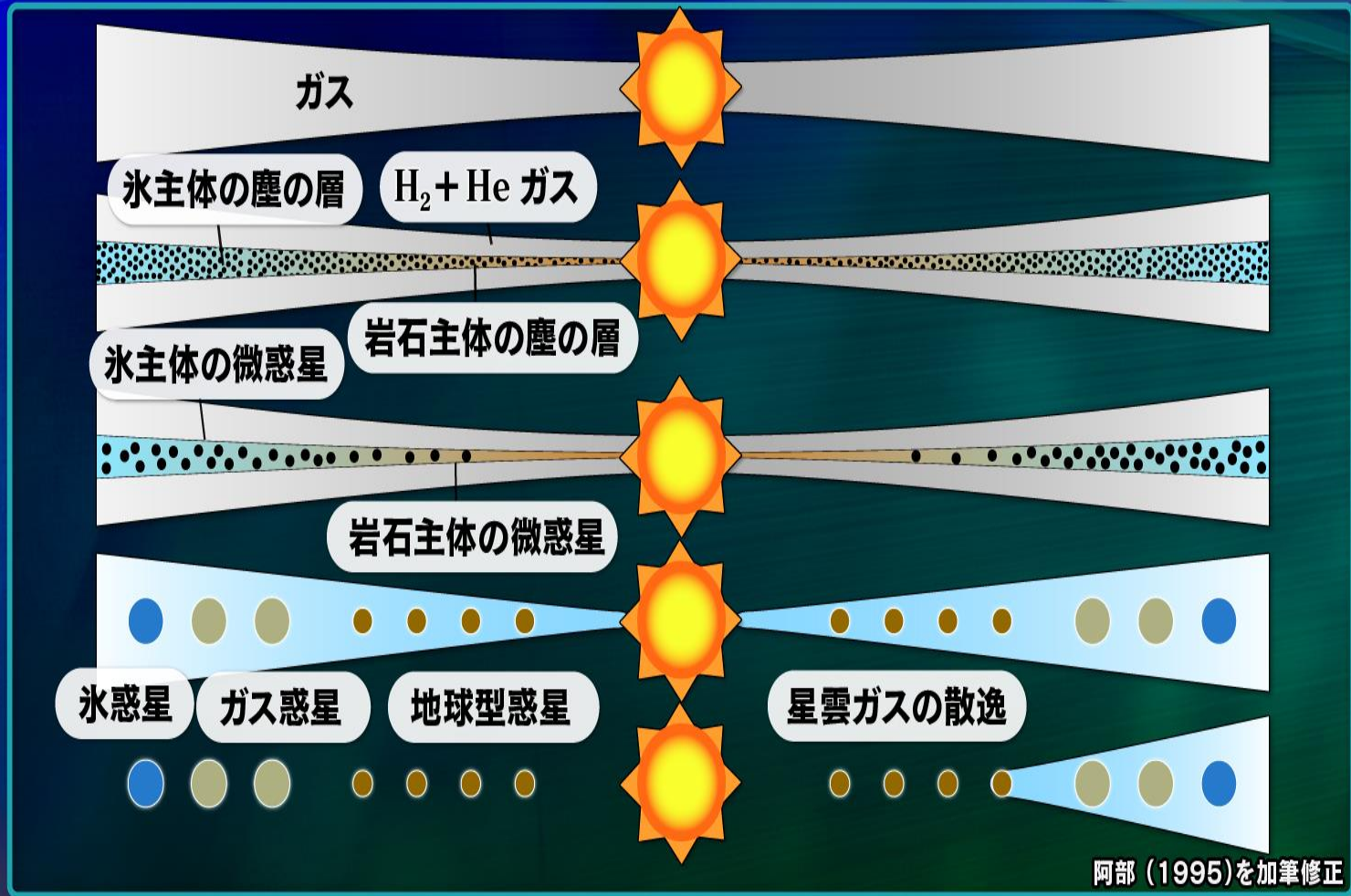


The Galaxies of the Local Group
(<http://www.atlasoftheuniverse.com/galaxies.html>)
のデータをもとに作成

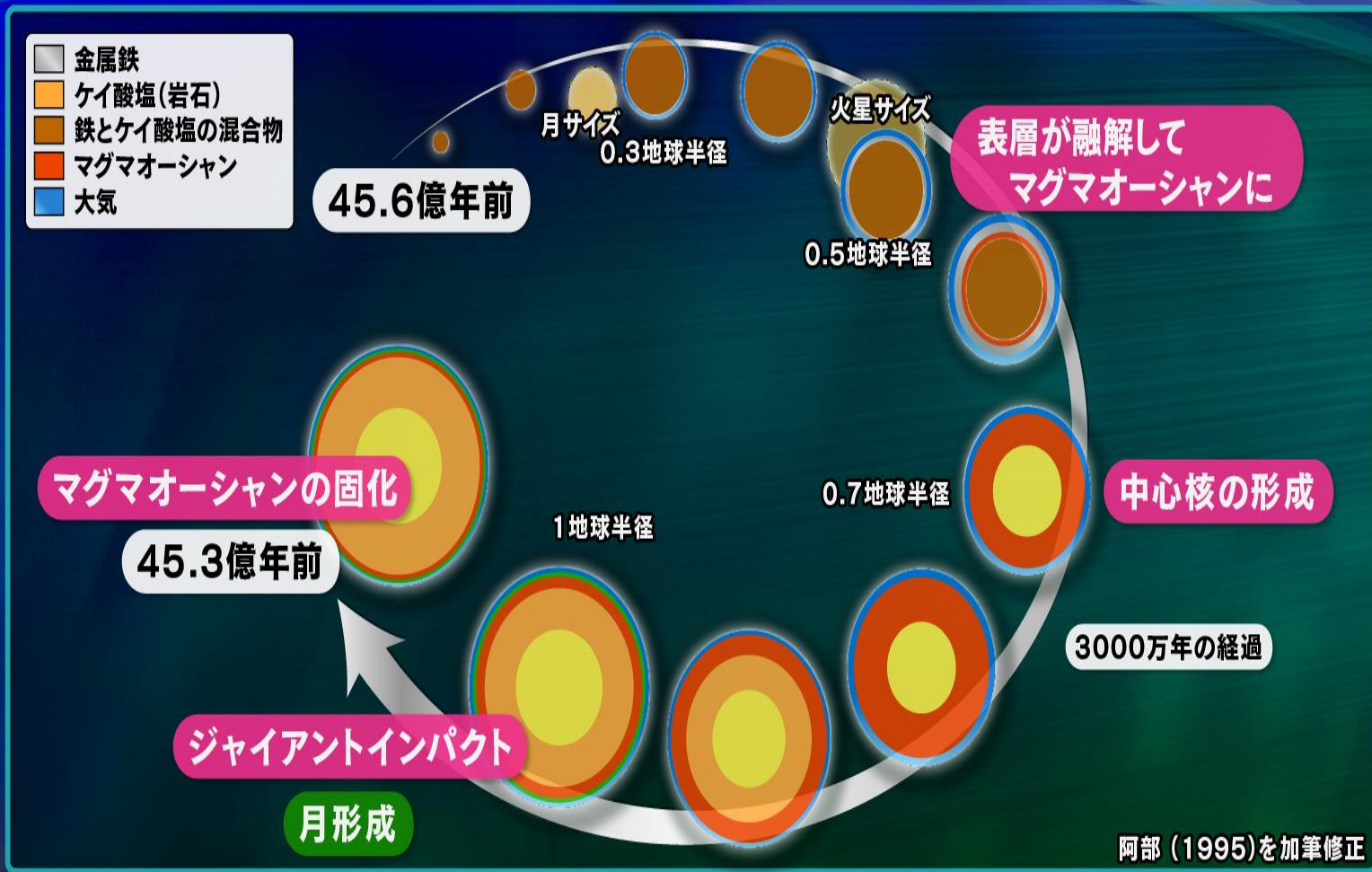
銀河と矮小銀河の衝突現場：スターバースト



原始太陽系惑星の形成シナリオ

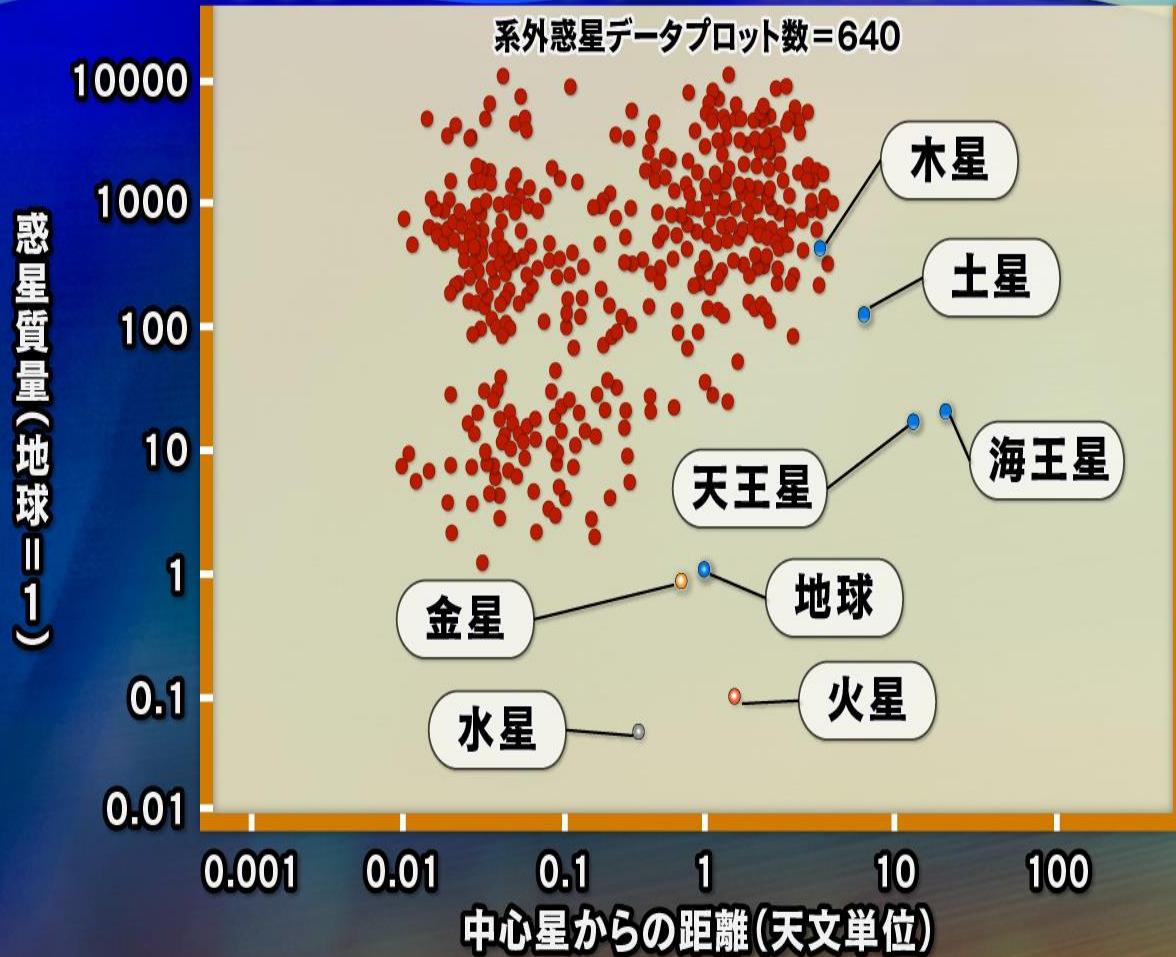


微惑星から地球の層状構造の形成まで



阿部 (1995) を加筆修正

系外惑星の質量と公転軌道半径



データ出典:Wright et al., The Exoplanet Orbit Data

化学組成累帯構造の形成と そこから生まれる惑星の化学組成

粘土鉱物線? 有機物線(2.1)



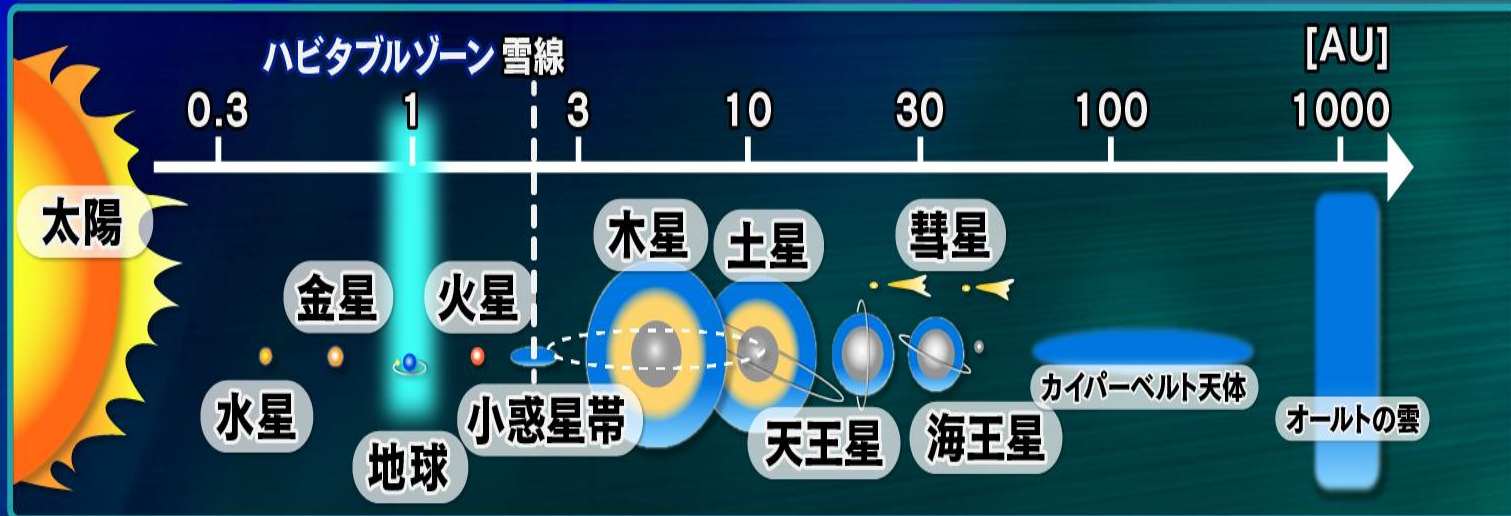
地球の水の起源の候補

候補1 彗星

候補2 小惑星帯

候補3 太陽大気

候補4 雪線外からの地球の移動



雪線の内側で地球ができた場合



裸の岩石惑星

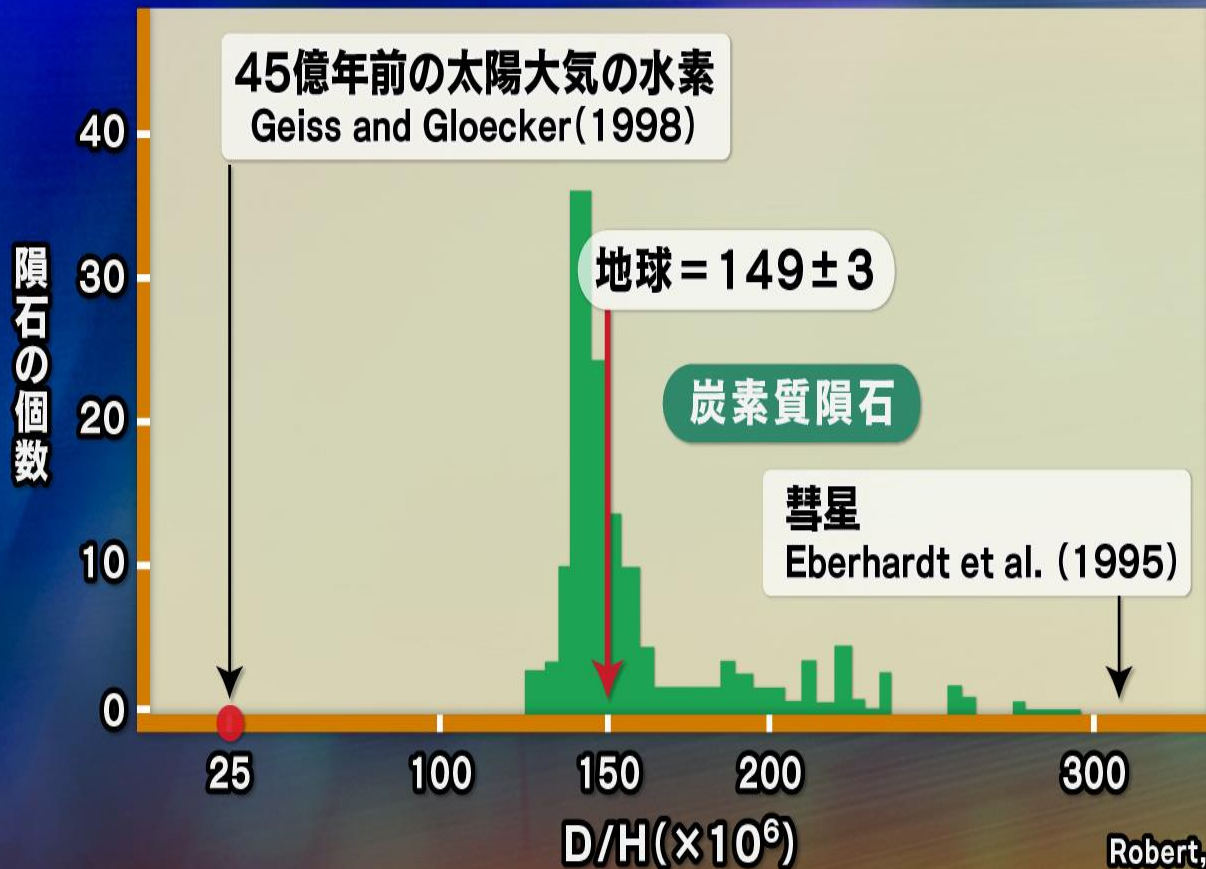
雪線の外側で地球ができた場合



400kmの深さの海洋ができる

重水素/水素比 (D/H) から見た地球の水の起源

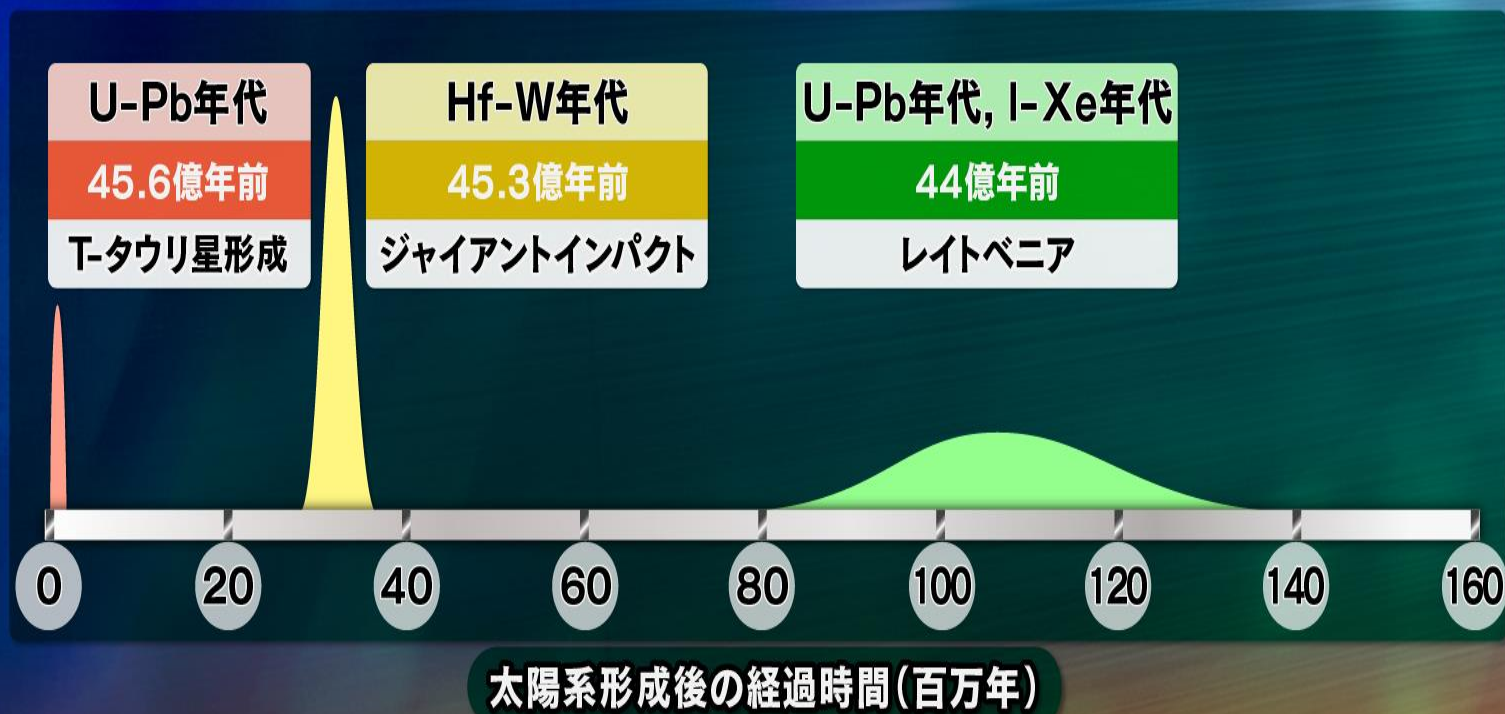
小惑星帯の炭素質隕石からやってきた



Robert, F. (2001)を加筆修正

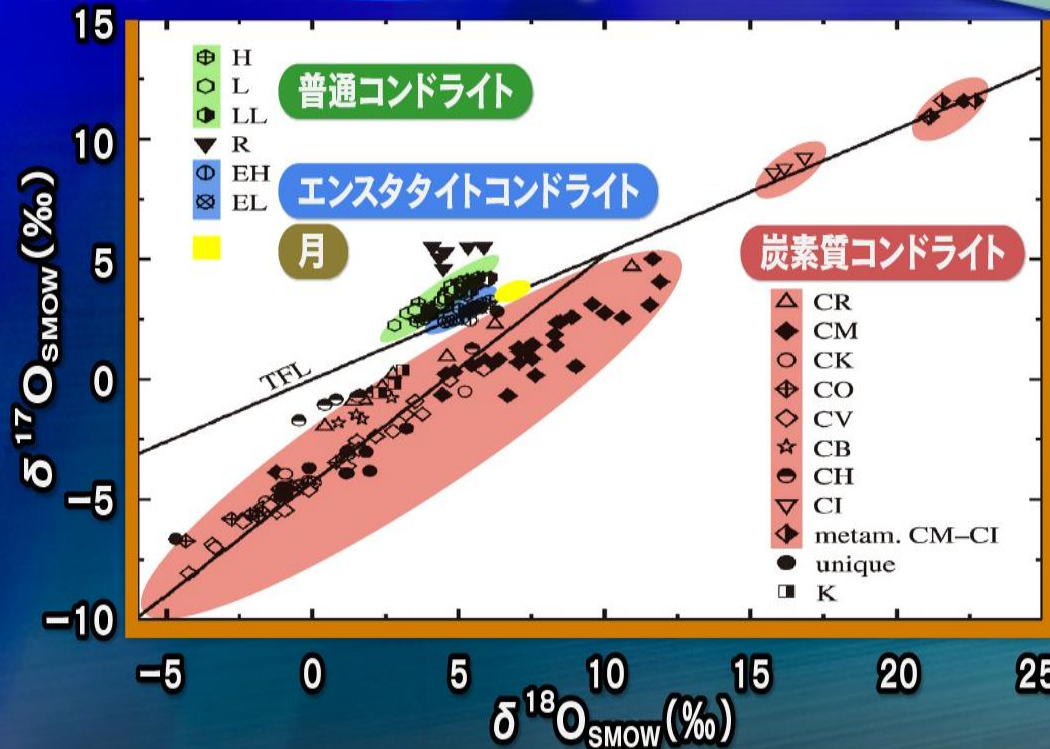
隕石の同位体地球化学から推定した 二段階地球形成モデル

第1段階 45.3億年前に無水の地球-月系が形成された



Albarede (2009)

地球 - 月系の起源物質は, エンスタタイトコンドライト



Clayton (2005)

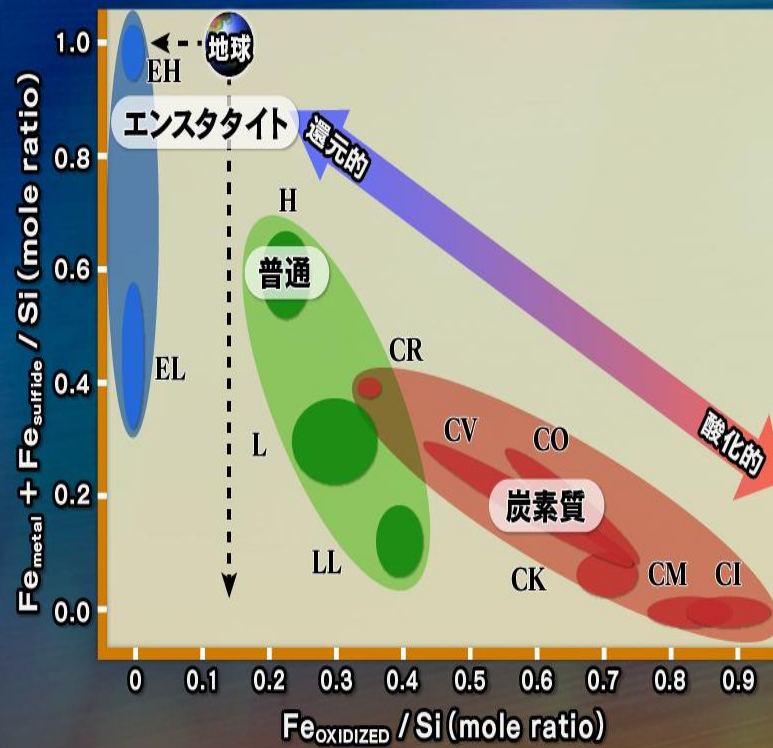


Krot et al., (2005)

エンスタタイトコンドライトは最も還元的な隕石

➡ 大気海洋成分がない

裸の惑星はエンスタタイトコンドライトからしか作れない。一方、大気・海洋は炭素質コンドライトからしか作れない。これら二つを満足させるのが2段階モデル

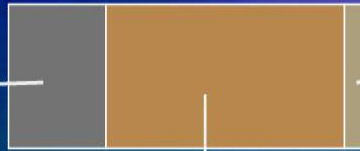


after Krot et al., (2005)

地球形成の2段階モデル

エンスタタイトコンドライト(還元的)

金属鉄 + 硫化鉄



その他 Fe₃P など

エンスタタイト MgSiO₃

1 固体地球内部の分化

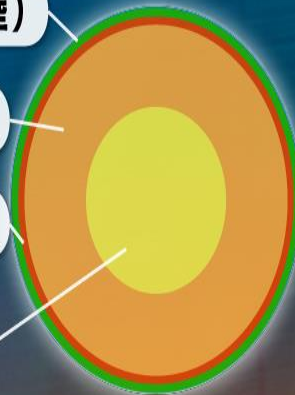
2 大気・海洋成分の付加

SiO₂ (原初大陸)

マントル Mg₂SiO₄

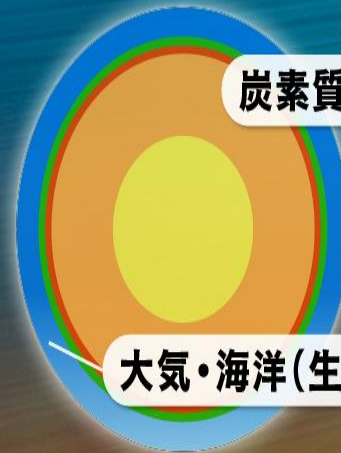
KREEP (下部地殻)

核 金属鉄



炭素質コンドライト(酸化的)

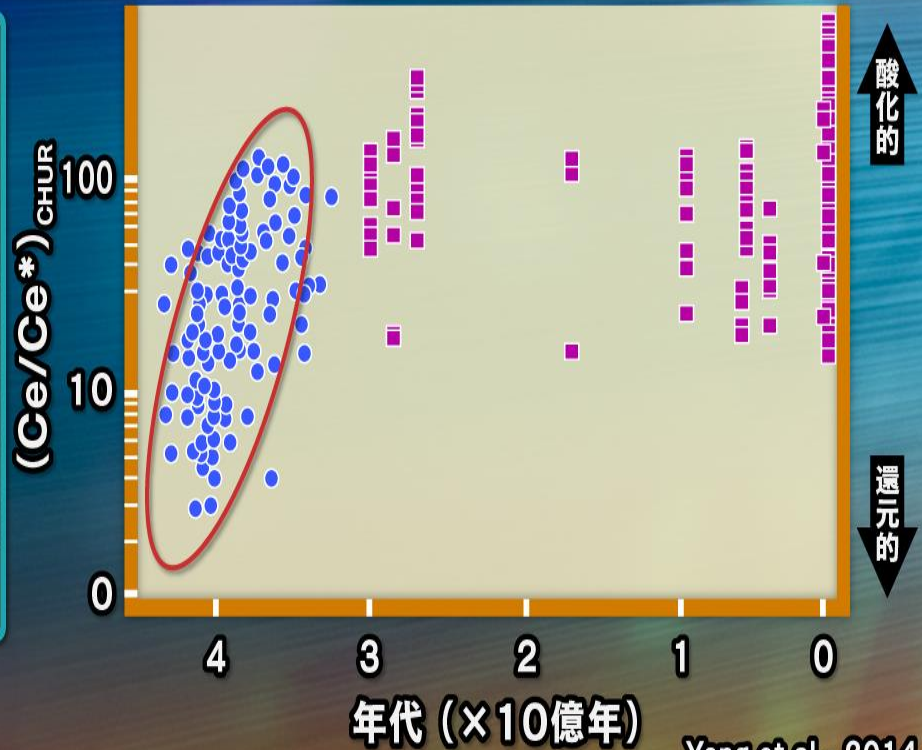
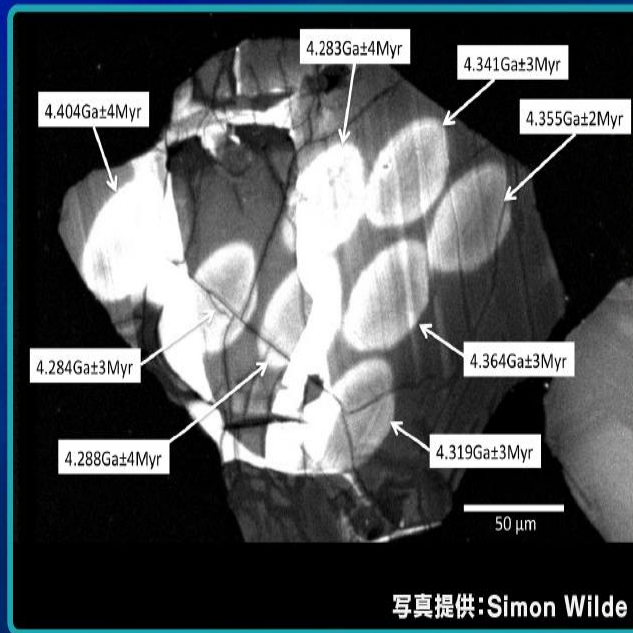
大気・海洋(生命主要構成元素)



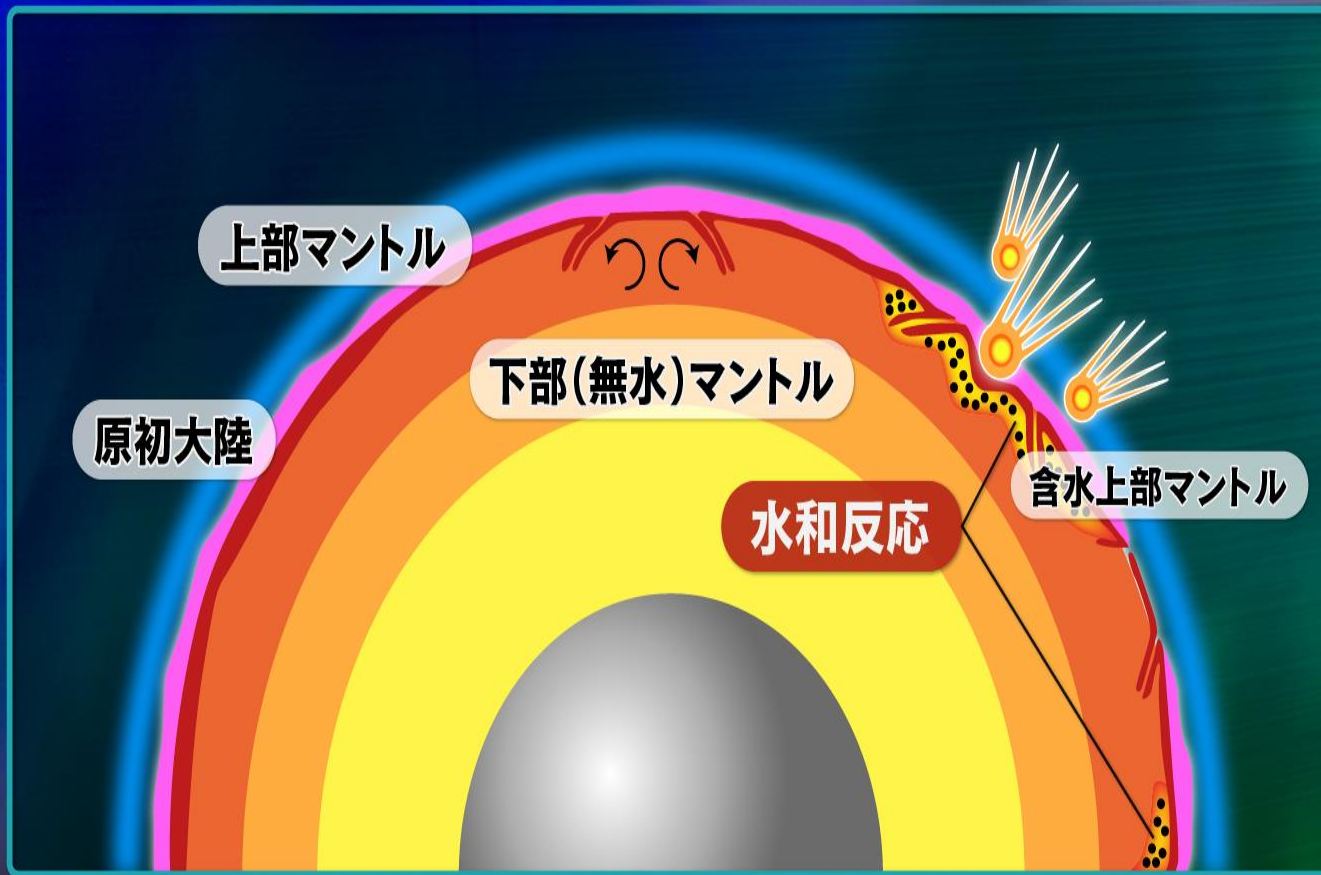
冥王代ジルコンの酸化還元状態の変化

大気海洋成分が約44億年前に付加されたことを実証するデータ

上部マントル中の酸素が徐々に増加していったことが読み取れる
水は、岩石に対して酸化剤として働く



大気・海洋(生命主要構成元素)成分の付加プロセス



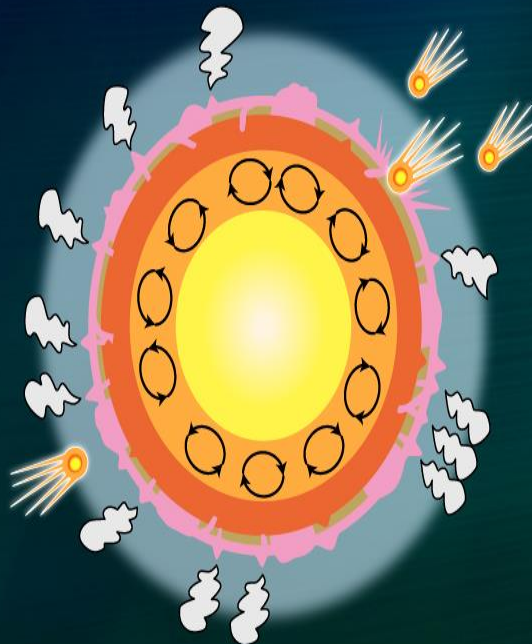
地球形成の2段階モデル

ジャイアントインパクト、
地球-月系の形成



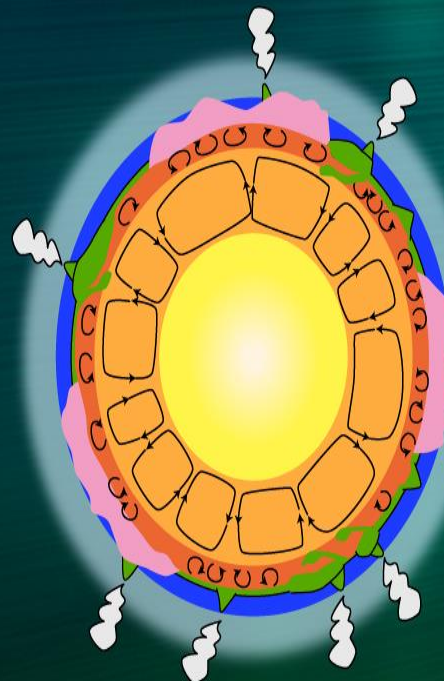
45.3億年前

小惑星の衝突と
大気海洋成分の付加



44億年前

地球の冷却に伴う
海洋の形成



44~40億年前

まとめ

① 現在、太陽系惑星の古典的形成理論が系外惑星の発見により「惑星の移動と落下問題」によって揺れている

② 小惑星帯の惑星探査, 隕石学, 冥王代地球・月地質学の発展から, 固体地球と大気・海洋の起源が分かった。
その結果, 地球の二段階形成説が提案された

ABELモデル, Maruyama 2014

③ 地球二段階形成説

- 最初(45.6~45.3億年前)は無大気・無海洋の裸の岩石惑星として誕生
- 44億年前頃に大気・海洋(生命主要構成元素)成分が付加した

3 タンデム惑星形成理論の概要と今後

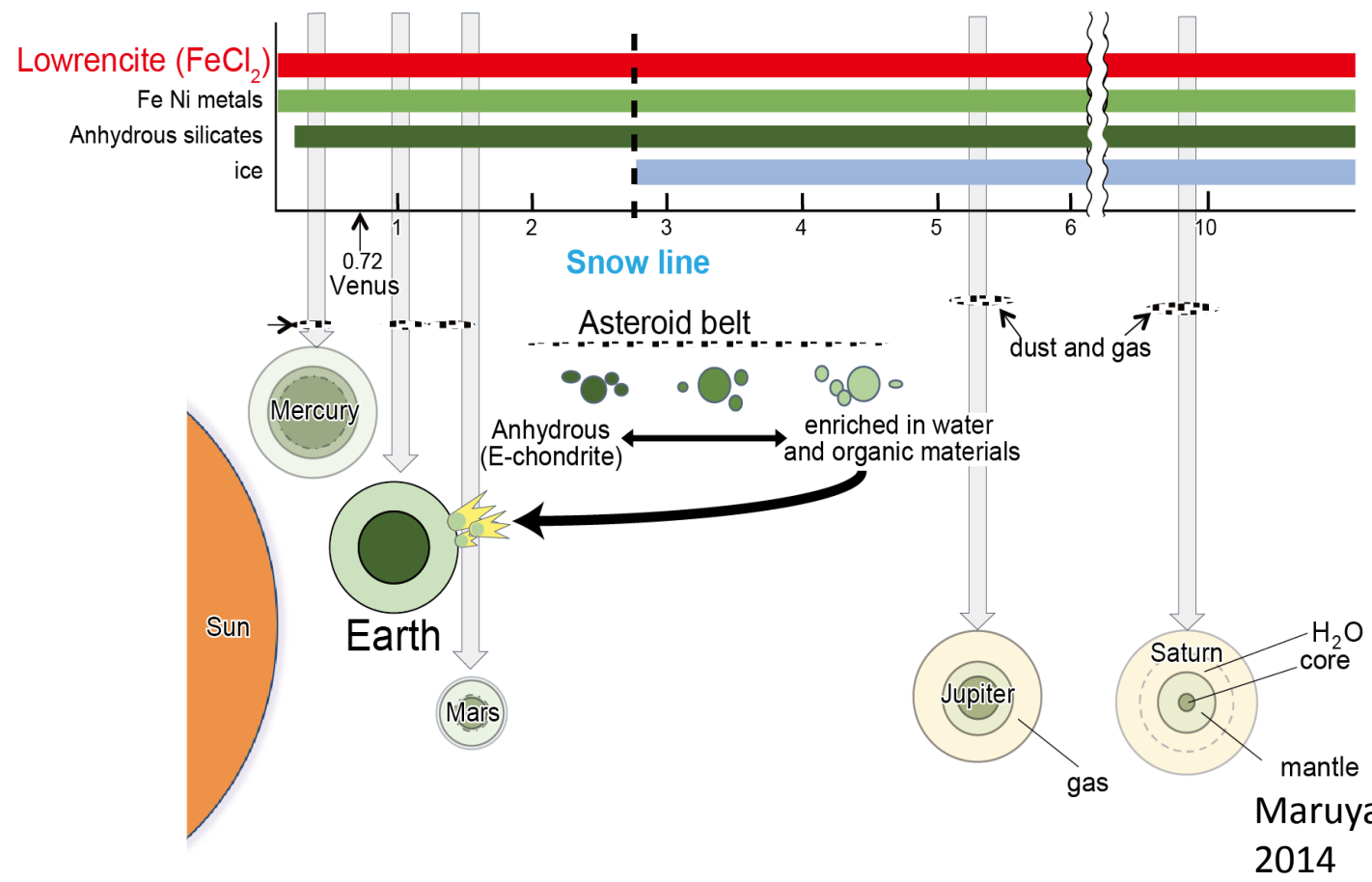
戒崎モデル

4 冥王代表層環境

地球形成の二段階モデル

「大気・海洋成分は44億年前に小惑星帯から付加した」

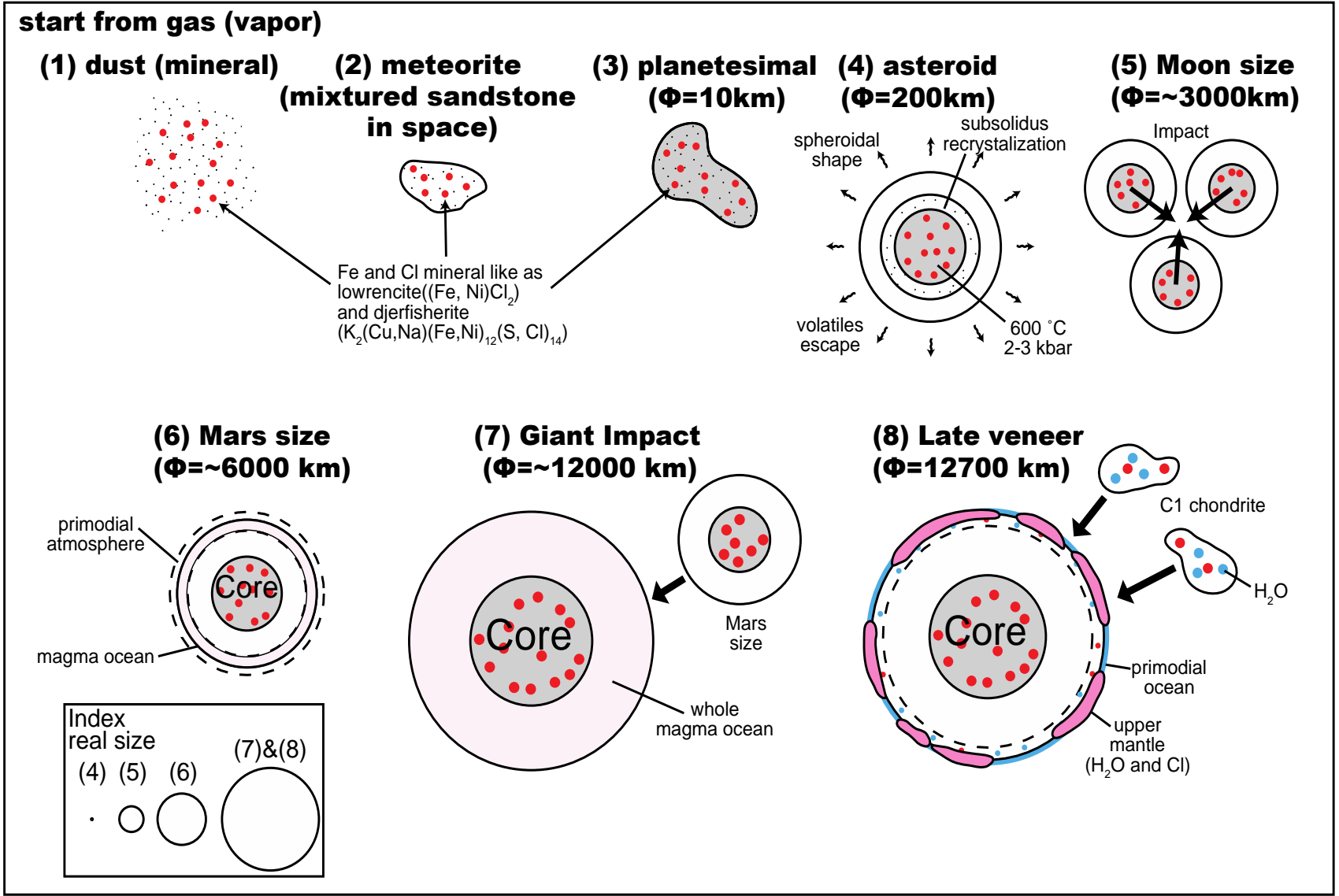
原始惑星系円盤中の化学組成累帯とローレンサイト(FeCl_2)の安定領域



塩素は鉄と塩化物を形成し、幅広い領域で安定に存在する事ができる。
⇒地球形成時に塩素が地球に大量に持ち込まれた？

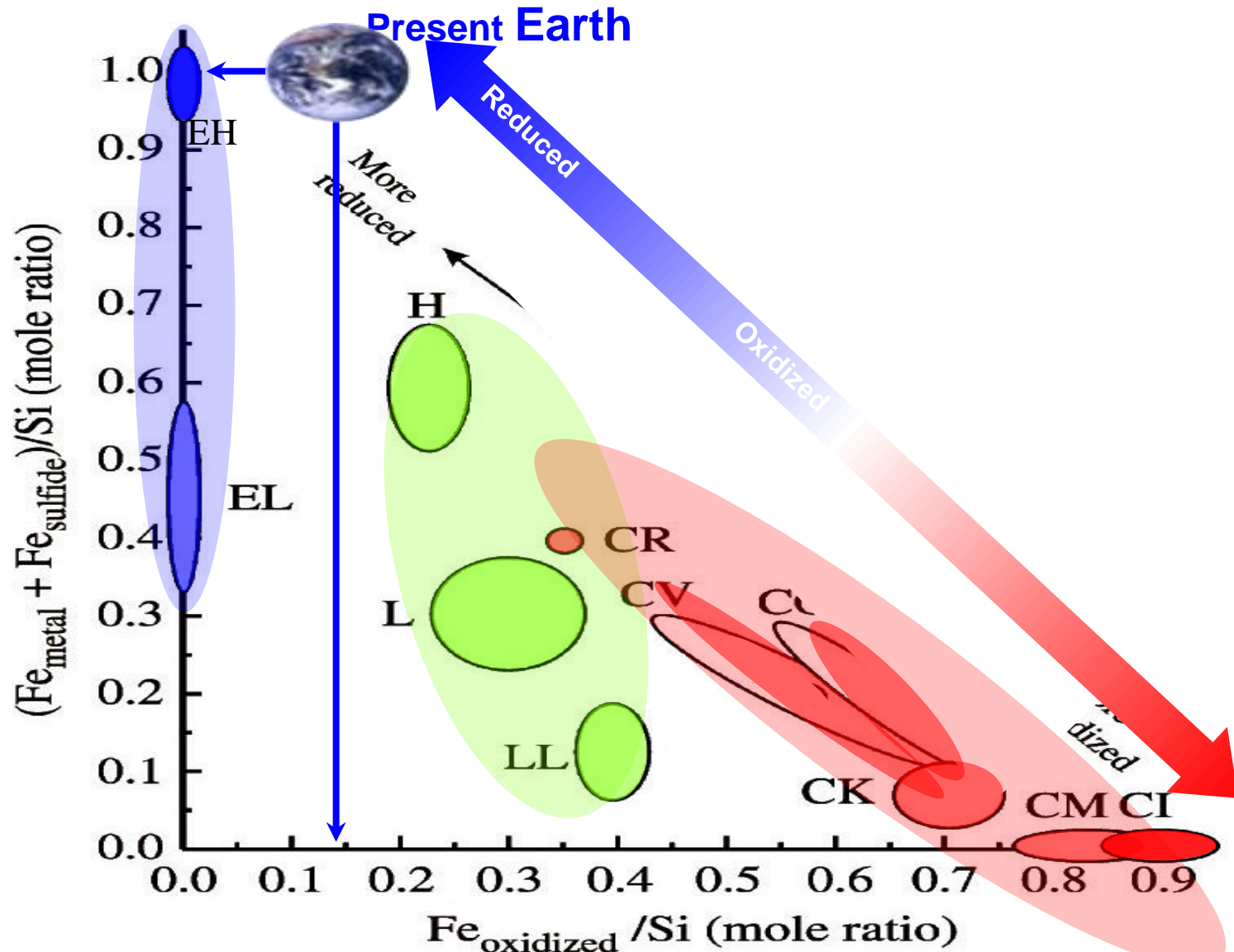
コアに塩素が取り込まれる？

Accretionary process of Earth



地球形成過程を考慮すると、Clはコアにも軽元素として取り込まれる。

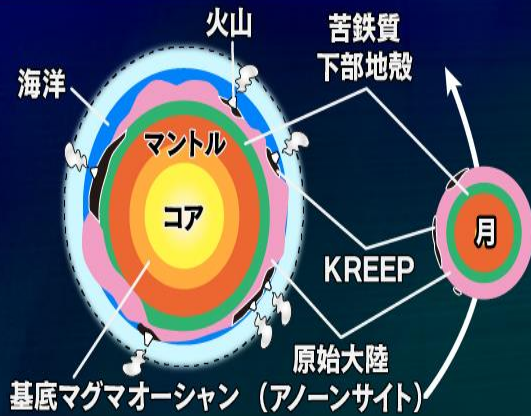
Dry and highly reduced Earth



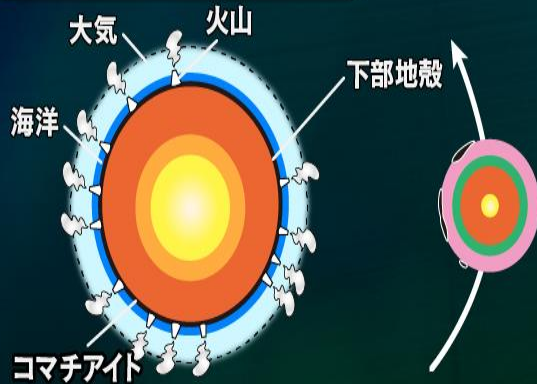
after Krot et al. 2005

地球形成モデル

I 原初大陸があった

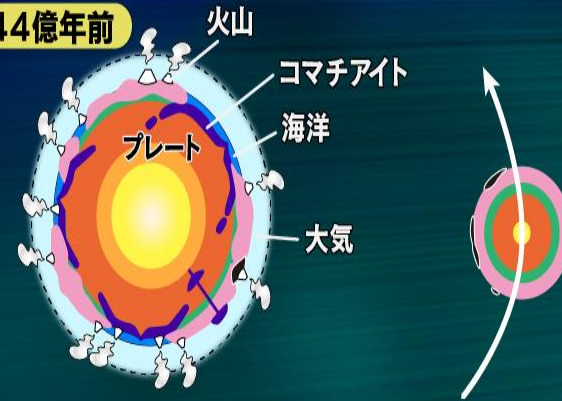


II 原初大陸はなかった

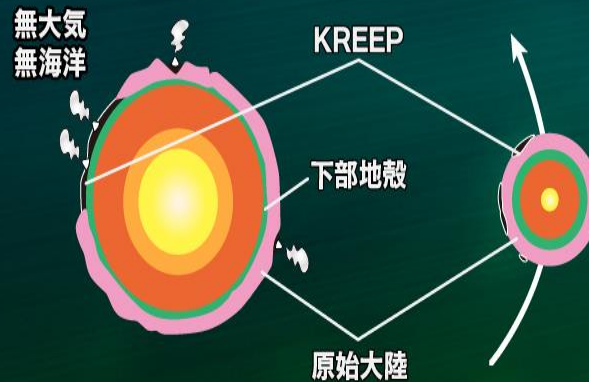


III ABELモデル

44億年前



45.3億年前

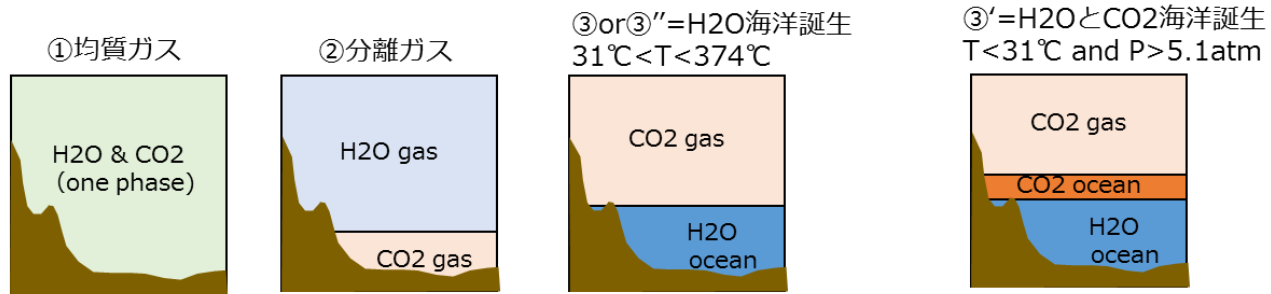


ABELモデル

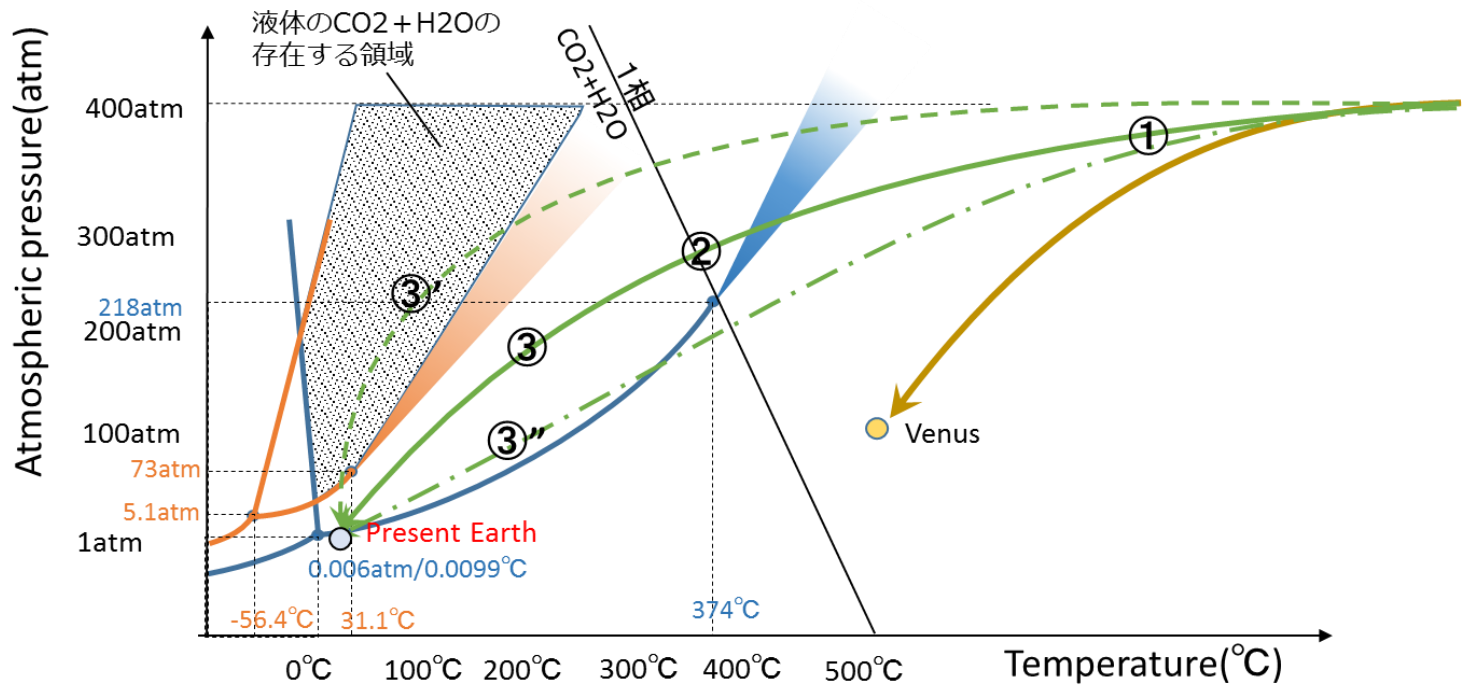
- 1 根拠(8種の元素同位体の制約:地球-月系はエンスタタイトコンドライト起源だが水は炭素質コンドライト)起源
- 2 まず無水・無海洋の裸の地球が生まれ45.3億年前に固化し、44億年前に大気・海洋が誕生した)
- 3 炭素質コンドライトから100気圧CO₂, 300気圧海洋をどのようにして創るか？

金星と地球の差：CO₂海洋

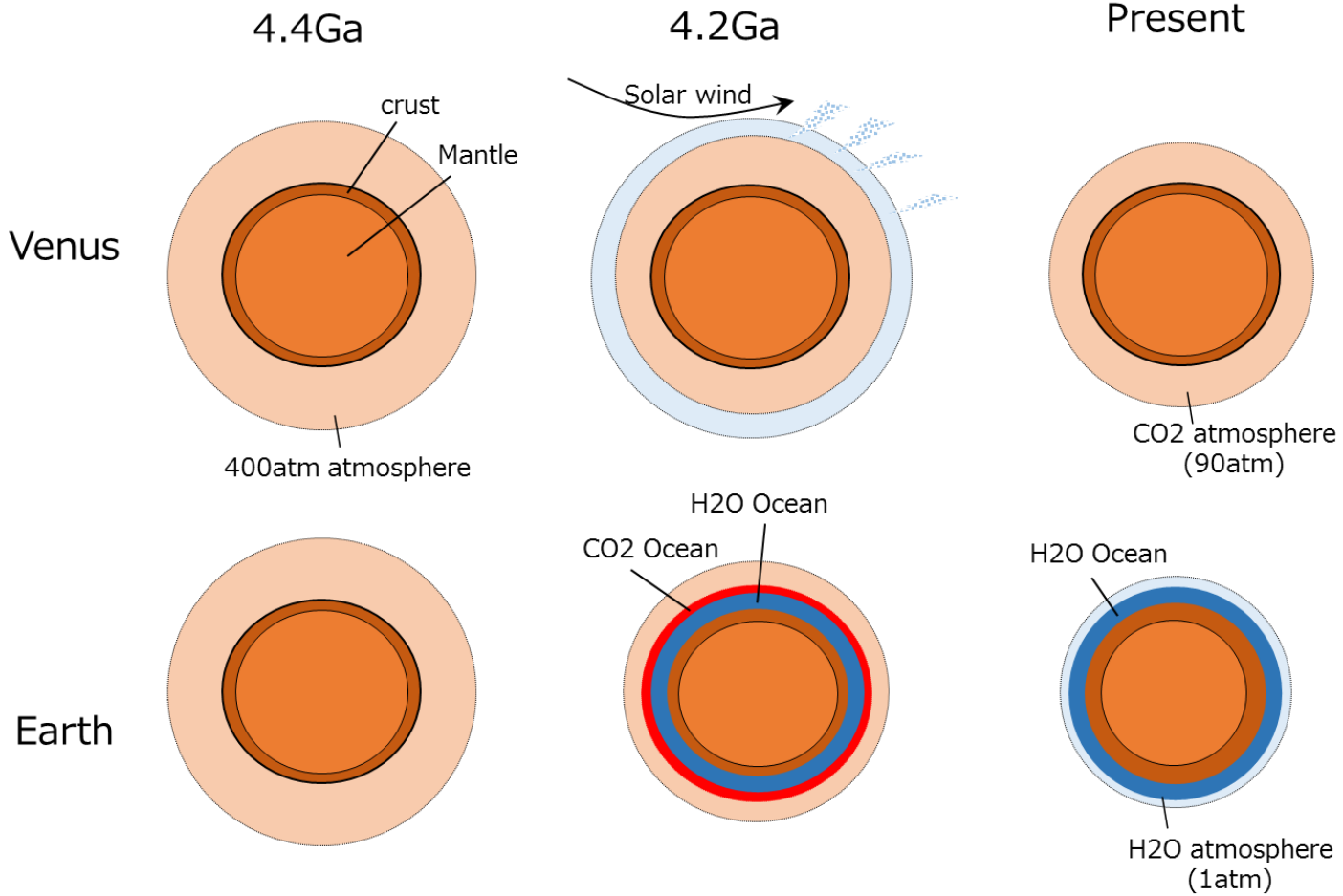
- 大気と海洋の初期進化



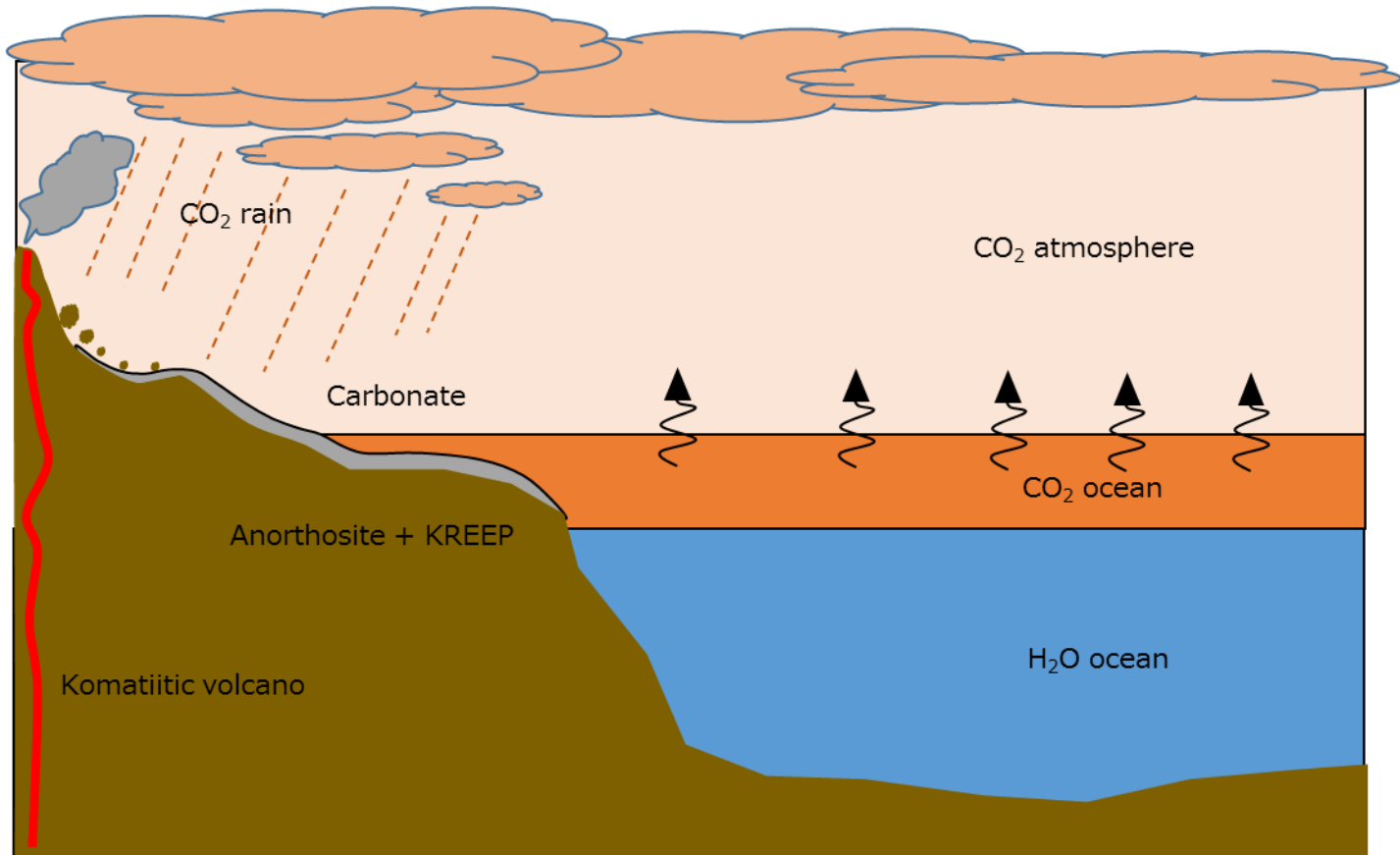
注意点：大気と岩石の反応はないものと仮定する



History of Venus and Earth



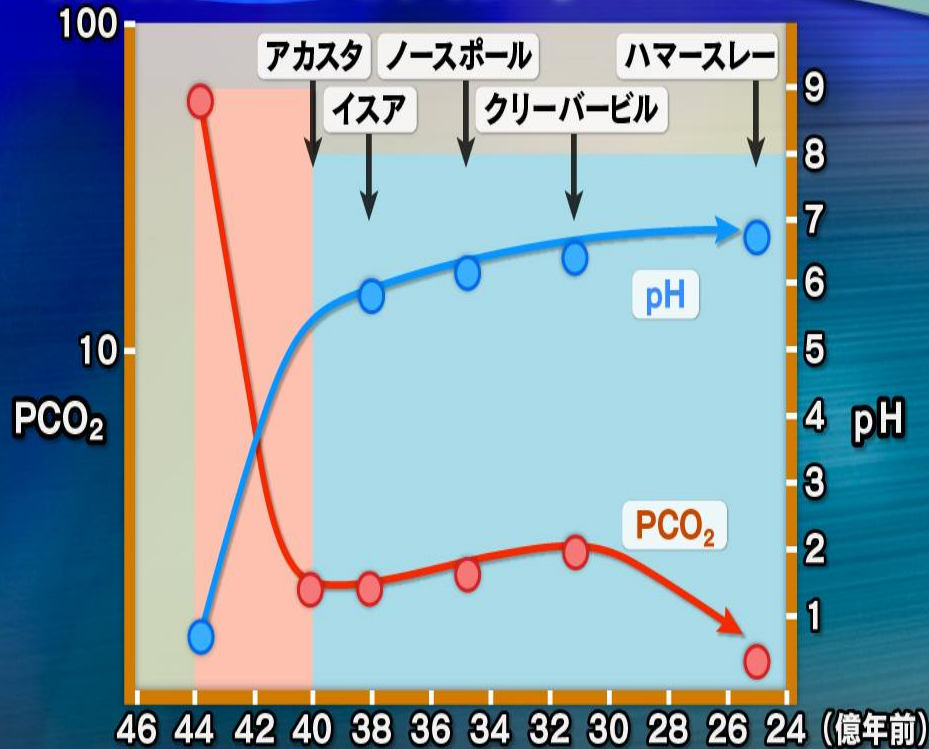
CO₂ circulation



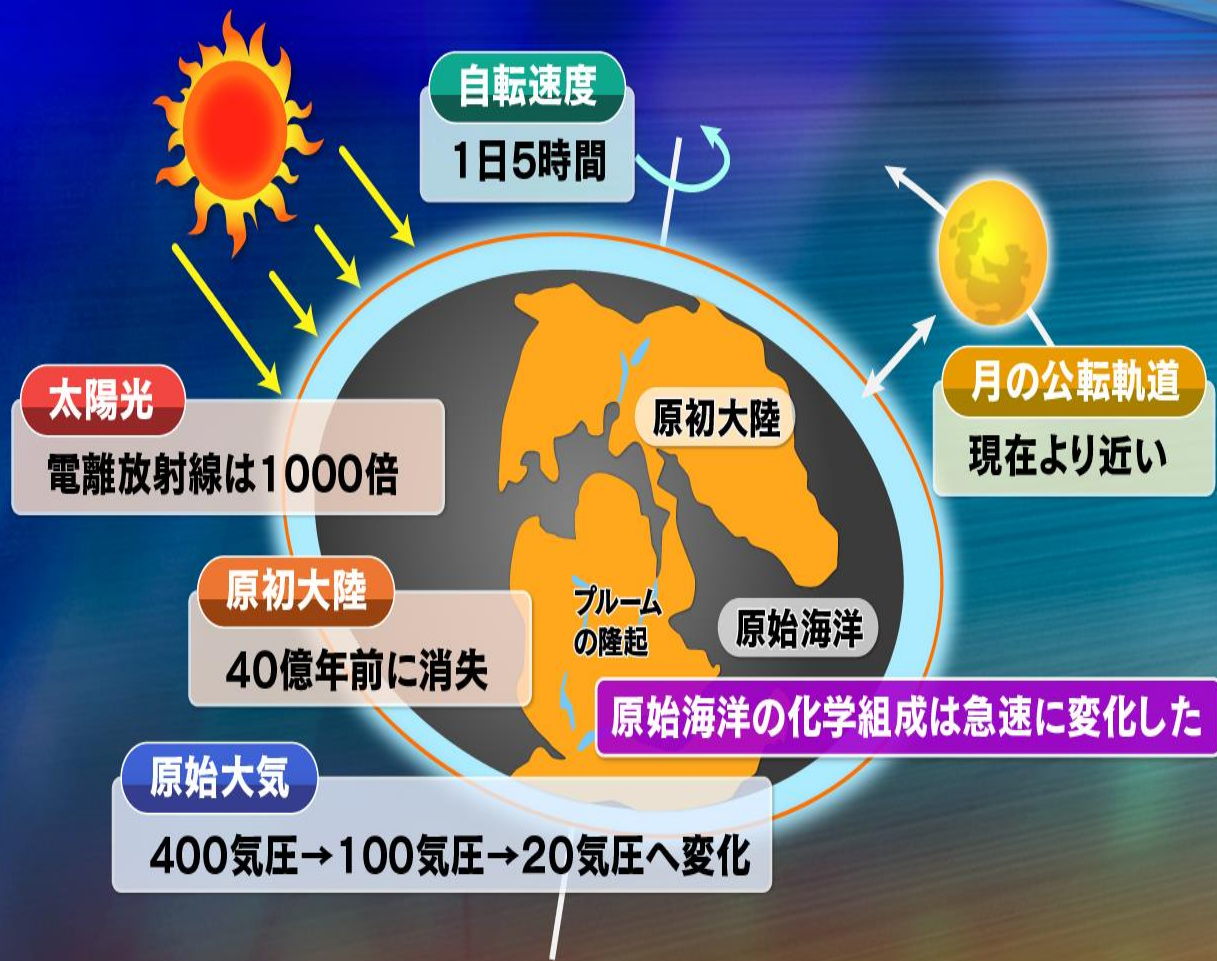
冥王代表層環境

- 1 45.6ー44億年前: 大気・海洋無し環境でマグマオーシャンが固化し、還元物質が地表に露出(原初大陸+FeSx)
- 2 44億年前: ①大気+海洋の誕生(400気圧)、②CO₂海洋(+H₂O海洋)の誕生とCO₂循環(プレート運動開始)、大陸の離合集散、褶曲山脈とリフト形成、激しい火山活動と表層物質循環(スーパーハリケーン)、③物質循環が海洋の組成浄化(pH中性へ)、大気の色と質の変化(太陽が地表から見え始める)、④強い磁場誕生、⑤生命誕生へ

原初大陸を実証するには？



多様な表層環境3：地球外要因と高速自転

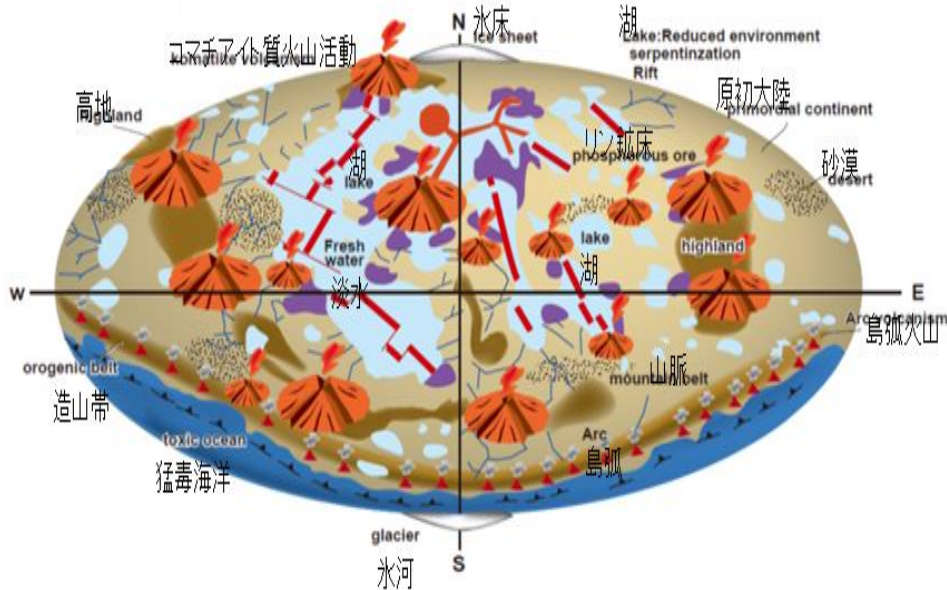


多様な表層環境1：自然地理と表層地質

40-44億年前

Formation of Ocean & Atmosphere

44億年前：大気・海洋の形成



砂漠
 山脈
 湖
 河川
 山岳氷床
 湿地帯
 緯度方向の大きな気温差
 多様な地質
 (KREEP、コマチアイト、
 アノーソサイト、Fe₃P、
 ウラン鉱床)



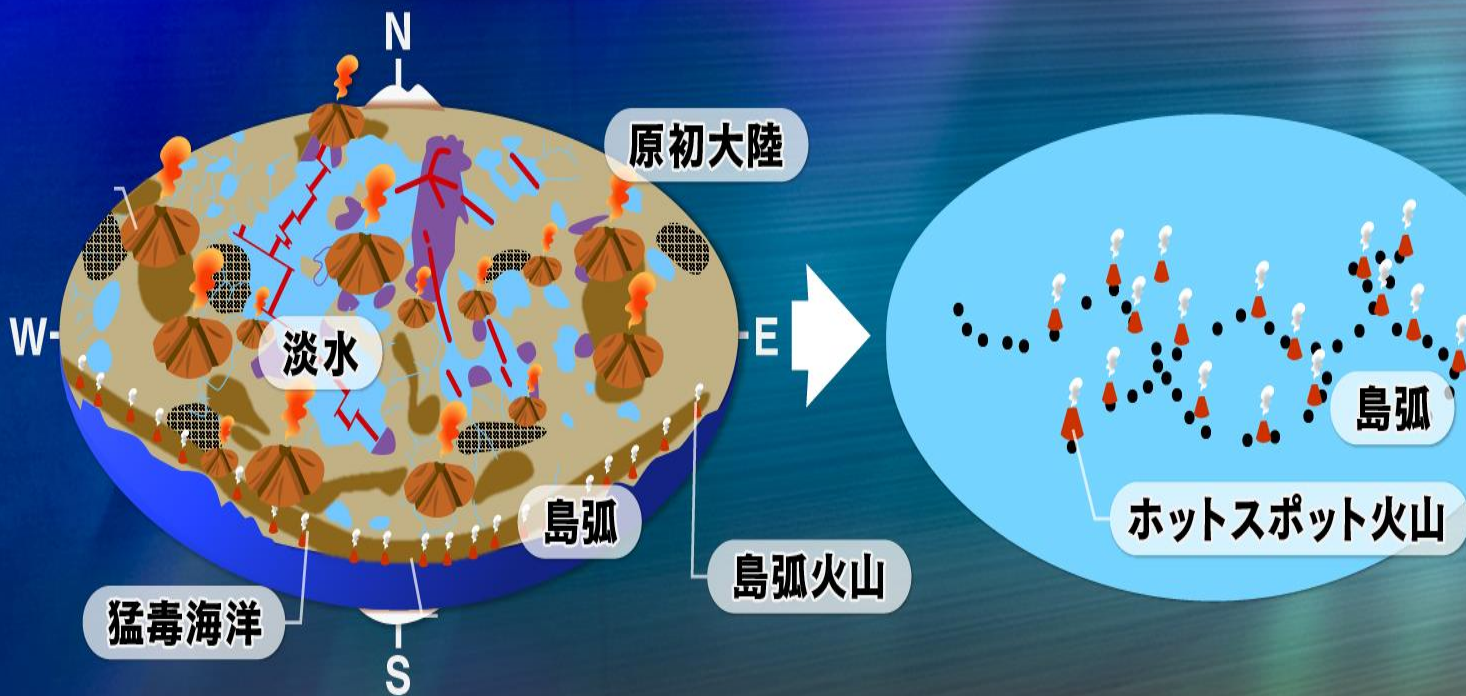
ダイナミックな表層環境変動

- 当時の表層環境復元図＋鉱物を新しく描く

原初大陸消失

冥王代

太古代

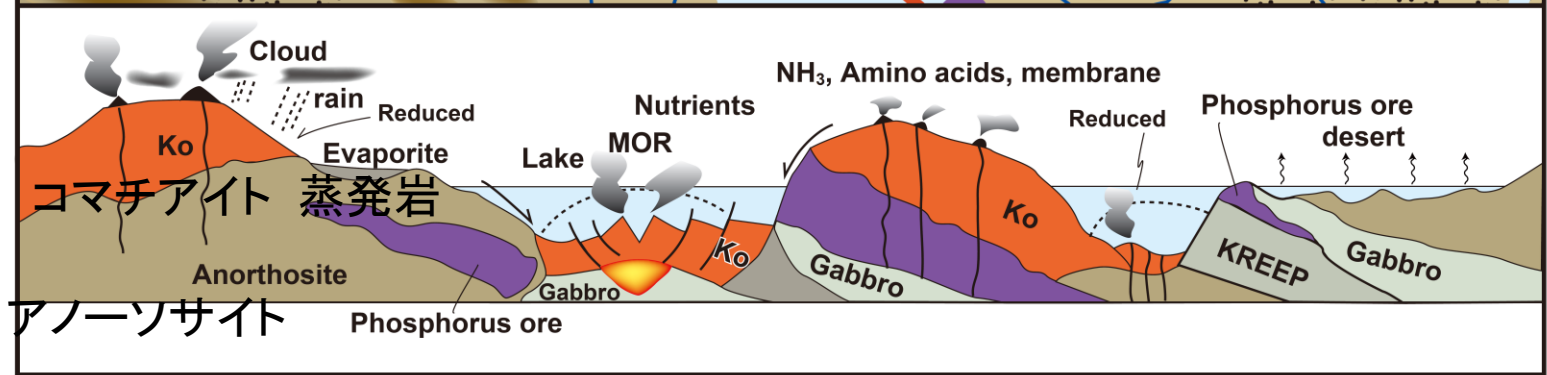
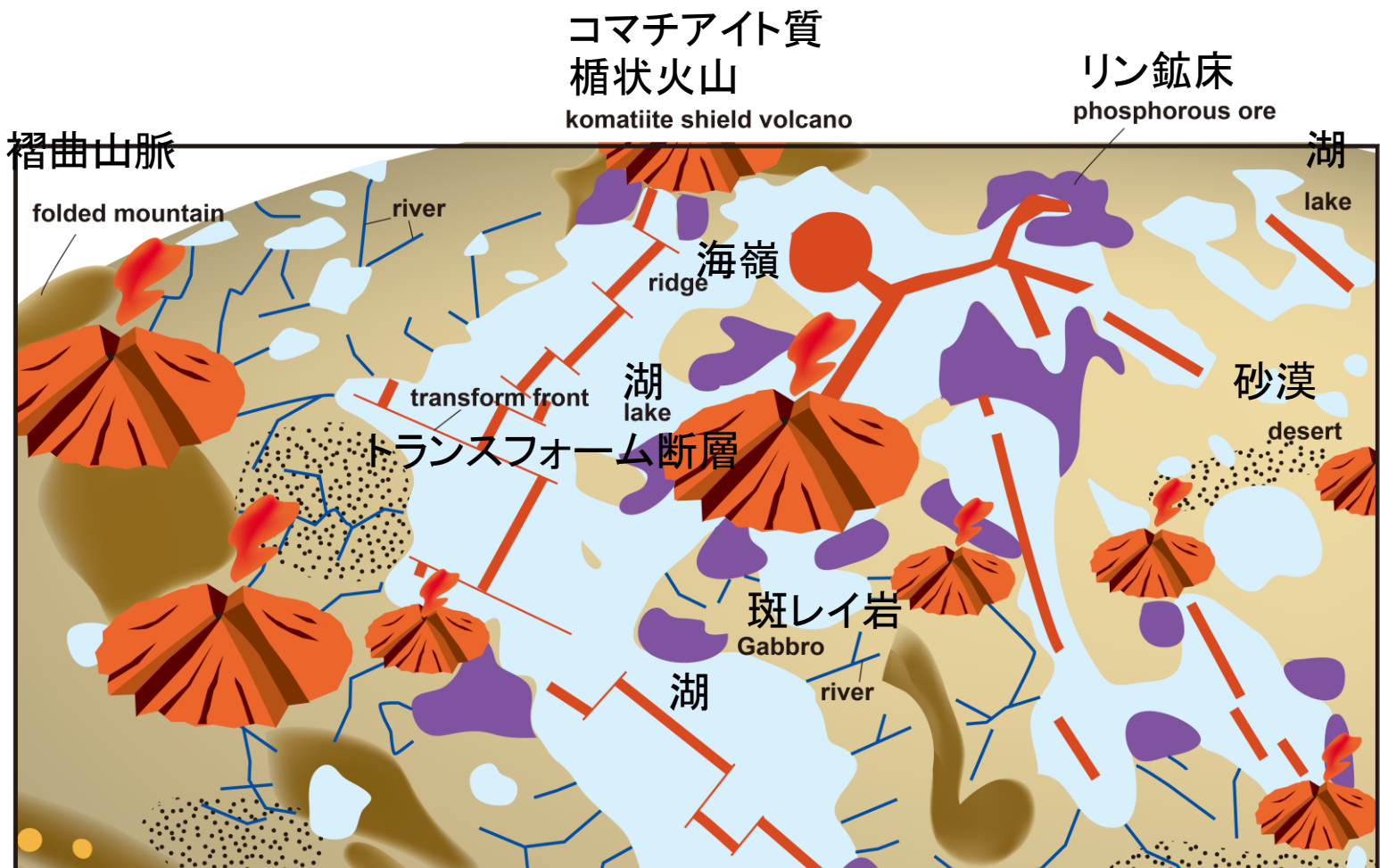


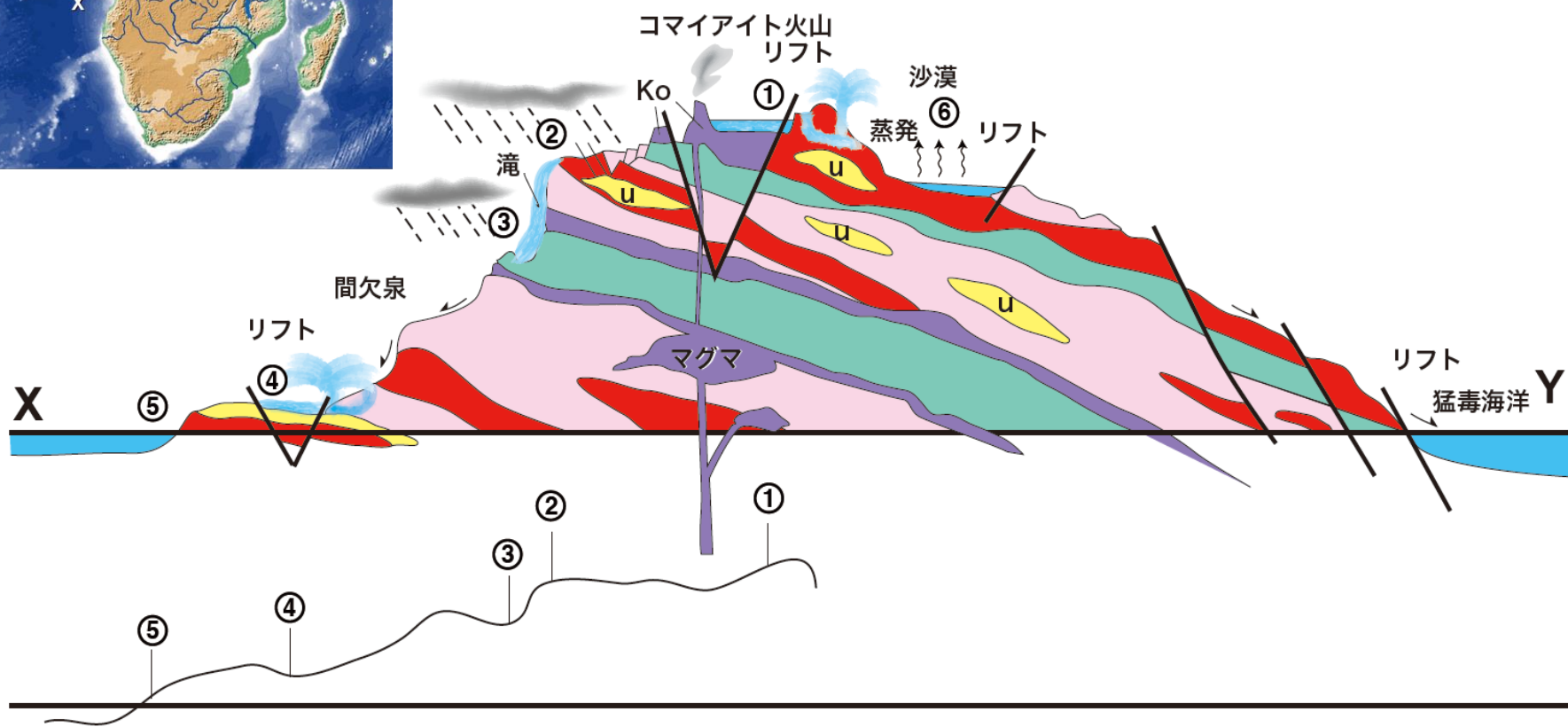
構造浸食

沈み込む側のプレートが上盤側のプレートを強制的に削剥・浸食しマントルへ引きずり込む作用

冥王代表層環境の復元

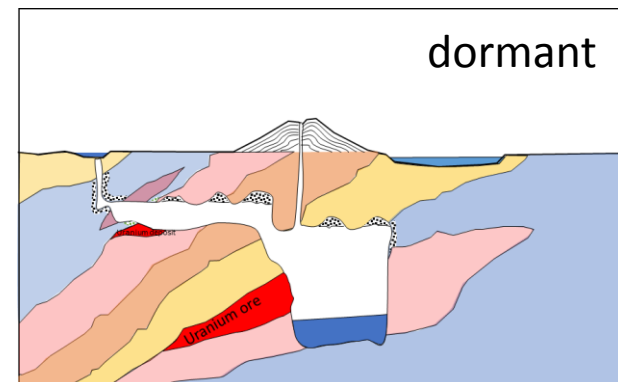
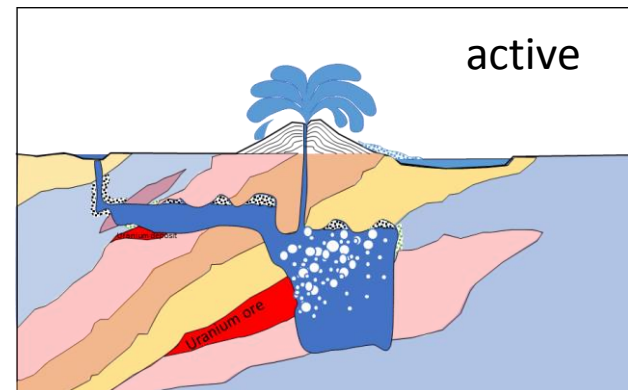
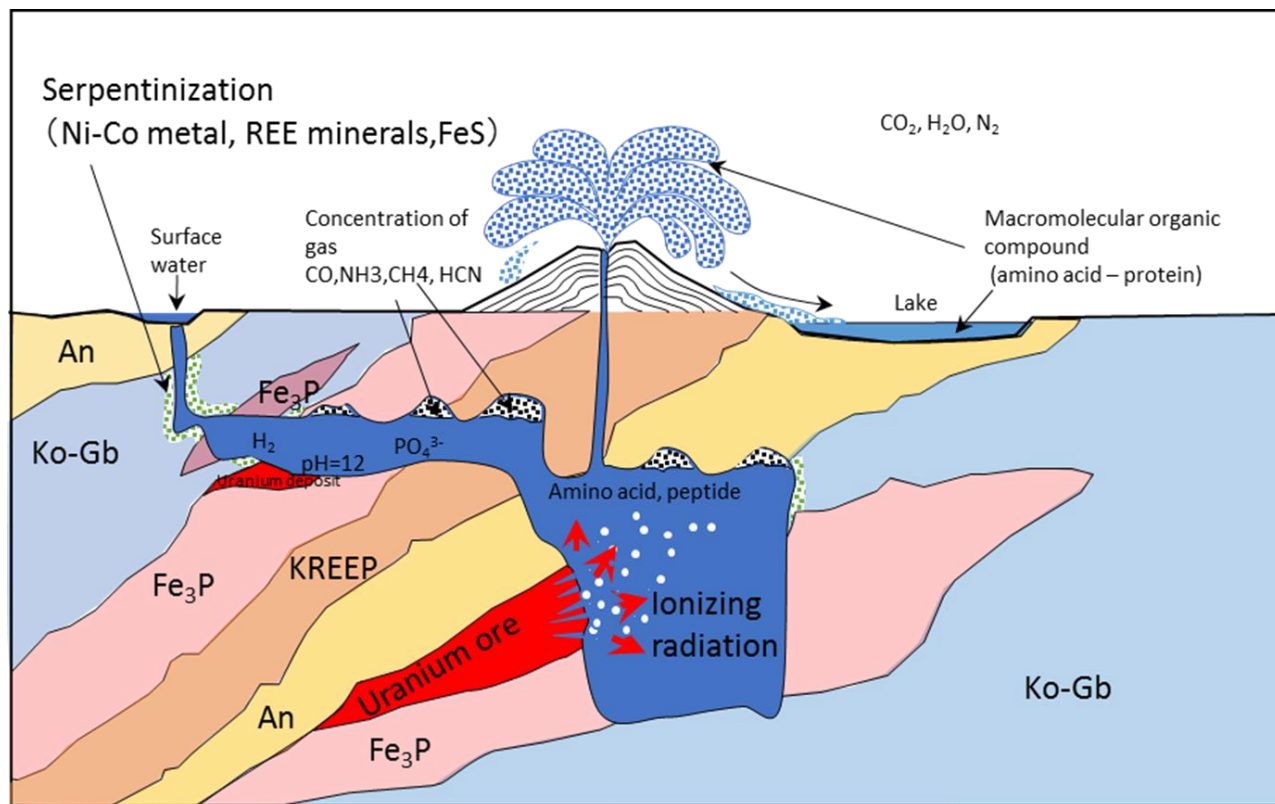
- 1 月、火星、地球の地質の復元がデータソース
- 2 惑星形成実験(マグマ)
- 3 惑星形成理論
- 4 隕石同位体





Natural Nuclear Reactor

ただの温泉(=MOR)ではダメ:非熱的エネルギー源が必要
(紫外線、X線、放射線、 γ 線、高エネルギー粒子=電離放射線)

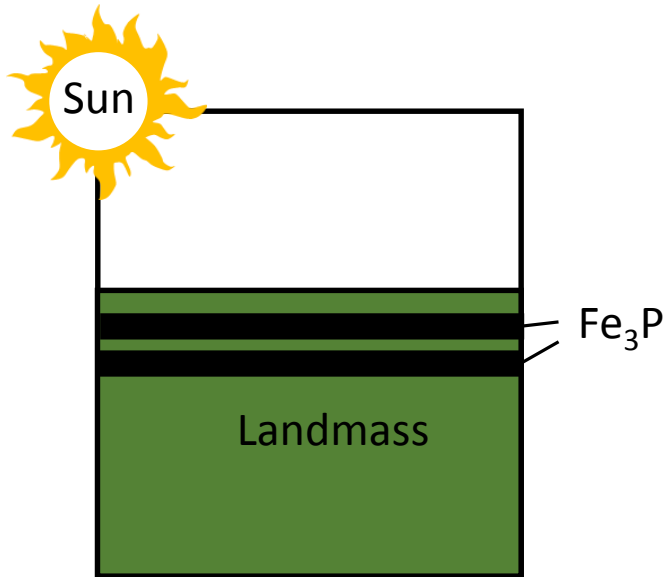


ABEL is the beginning of chain reaction of life

Advent of Bio-element landing

①

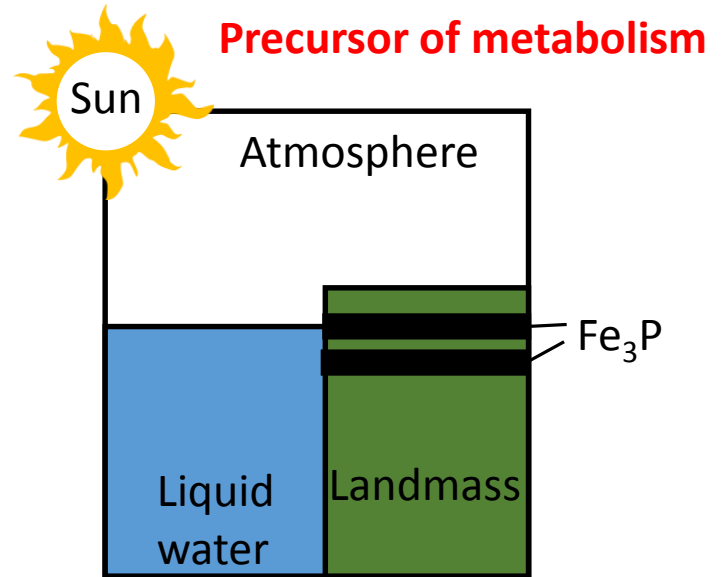
Primordial continent was formed from final residue of anhydrous magma (4.53Ga)



No atmosphere nor ocean

②

Ocean/Atmosphere components were delivered from asteroid belt (4.4Ga)



ABEL モデル

二段階形成モデル

第一段階 Fe_3P (シュライバサイト)が普遍的に存在

第二段階 そこに生命構成主成分元素が降臨

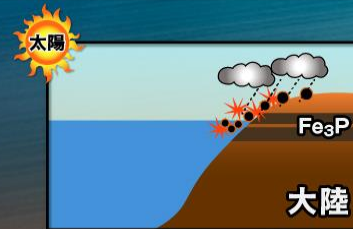
Fe_3P が、裸の地球(原初大陸)上に存在

海洋誕生時(44億年前)の地上でリンと水が激しく反応

多種多様な高分子有機物が生まれ、生命合成反応が開始

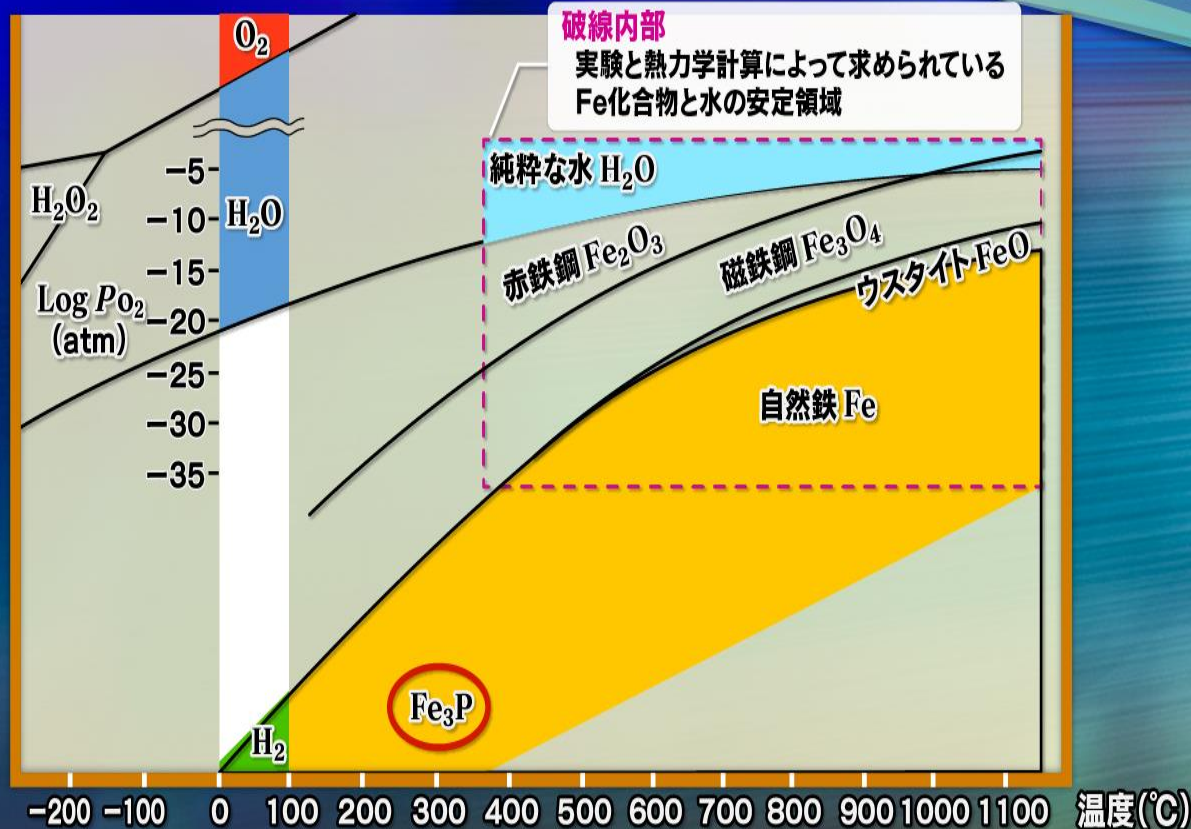


大気・海洋なし



大気・海洋あり

安定領域が極端に違う物質の化学反応



生命現象に至る前駆的化学進化は CO_2 、 N_2 、 H_2O が Fe_3P と化学反応することから始まり、その後誕生した生命はさらに40億年以上絶え間なく連鎖反応し続けた

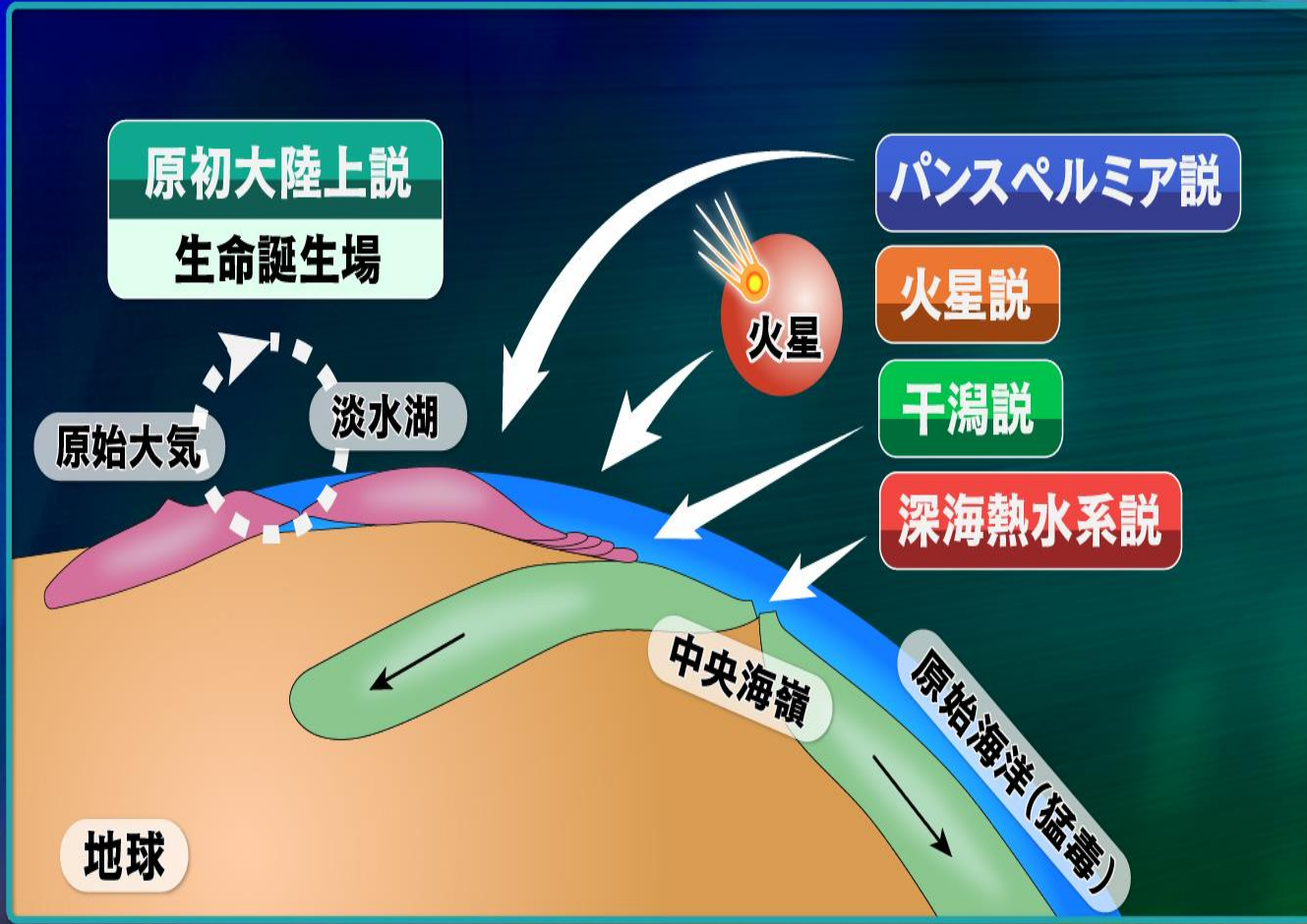
- 酸化場と還元場：超還元場が生まれる場所
- アルカリpHが生まれる場所
- 凍結－熱水場循環
- 毒性がない、きれいな水組成
- 乾湿サイクル(アミノ酸の重縮合と膜の析出場：過飽和環境)
- 高エネルギー核酸(Fe₃P鉱物の存在)
- 反応を駆動し続けるエネルギー場(原子炉：軽水炉と水和電子供給)
- 原子炉エネルギーから太陽エネルギーへの移行

生命誕生場は一か所

- 1 途中までは広域だが全域で途中で停止する。
例えばタール問題(化学平衡)。
- 2 最後の場所は1カ所でそこでは常に水和電子の供給が必要(原子炉間欠泉)
- 3 その後で、太陽エネルギーへの切り替えが起きる(酸素を出さない光合成→やがて酸素を出す光合成へ)

5 生命の起源

生命誕生場の諸説

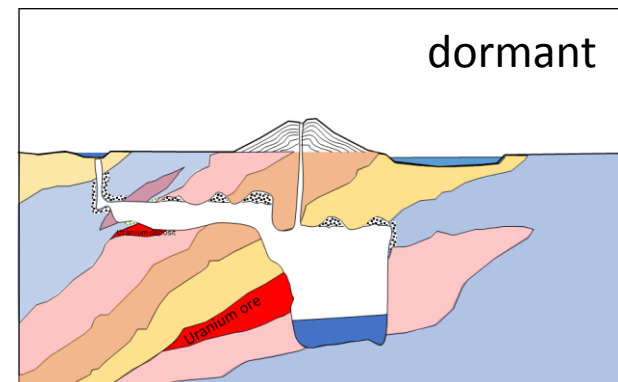
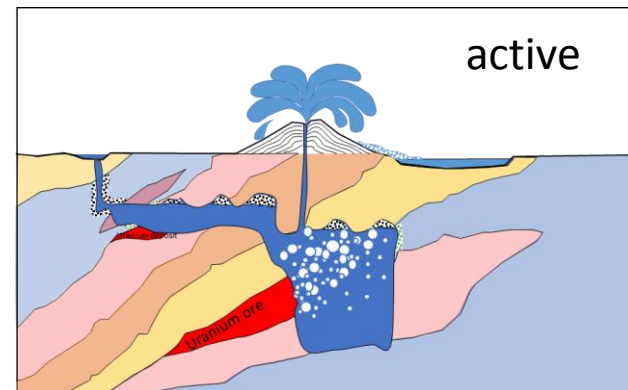
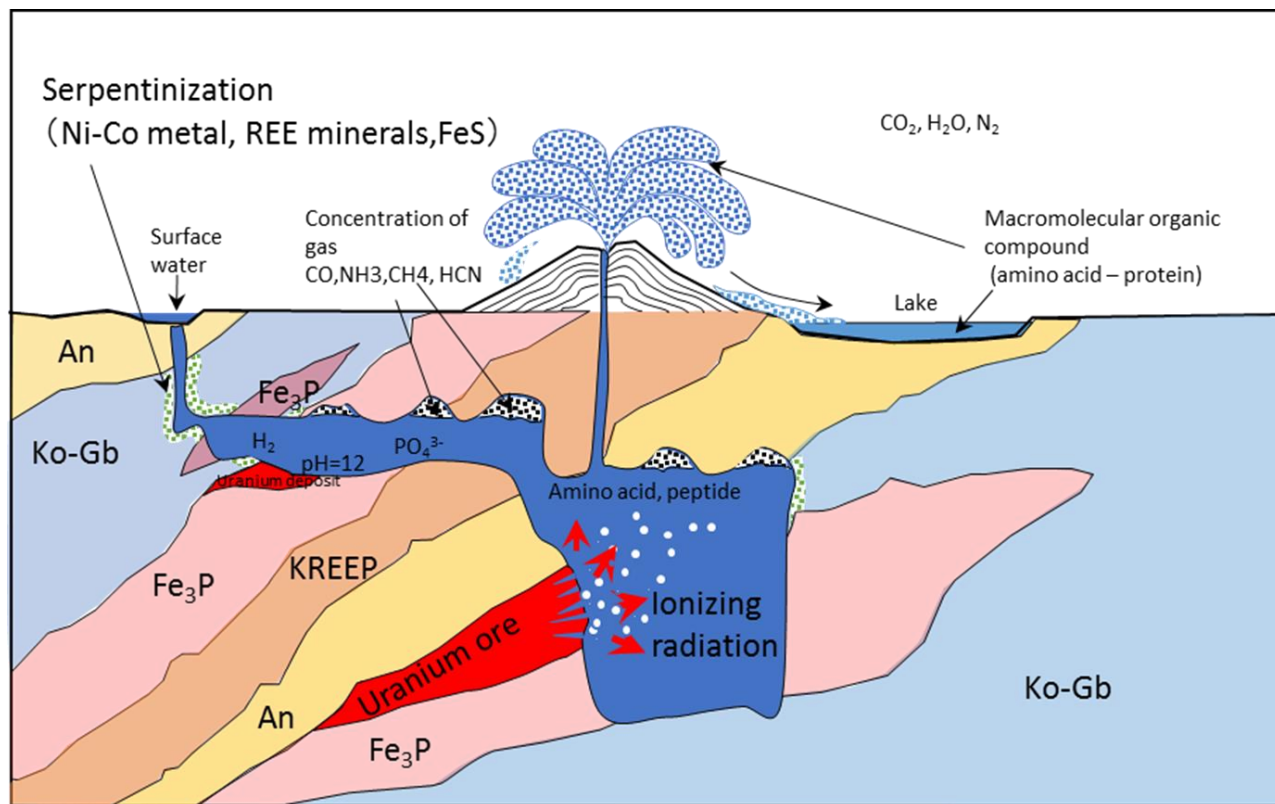


生命の誕生場はどこか？

環境的要素	原始大陸上 温泉説	中央海嶺 熱水系説	火星説	宇宙説
酸化的大気(CO ₂ -H ₂ O, O ₂ なし)	○	×	○	×
窒素の供給	○	×	○	×
局所還元的アルカリ熱水系	○	○	?	×
乾湿反復環境	○	×	○	×
多様な鉱物 (Ni,Co,Fe3P)	○	△	?	○
KREEP玄武岩	○	×	?	×
ウラン鉱床	○	×	?	×
放電 (落雷)	○	×	?	×
太陽エネルギー	○	×	○	×
低温アンモニア合成(An+)	○	×	?	×
還元的気体の高濃度化	○	×	?	×
周期性のある環境	○	×	?	×
エネルギー供給源 (太陽が使えない)	○	×	?	×

Natural Nuclear Reactor

ただの温泉(=MOR)ではダメ:非熱的エネルギー源が必要
(紫外線、X線、放射線、 γ 線、高エネルギー粒子=電離放射線)



Low Radiation level

戒崎、2015

inorganic

organic

H_2O

HCHO

CO_2

HCN

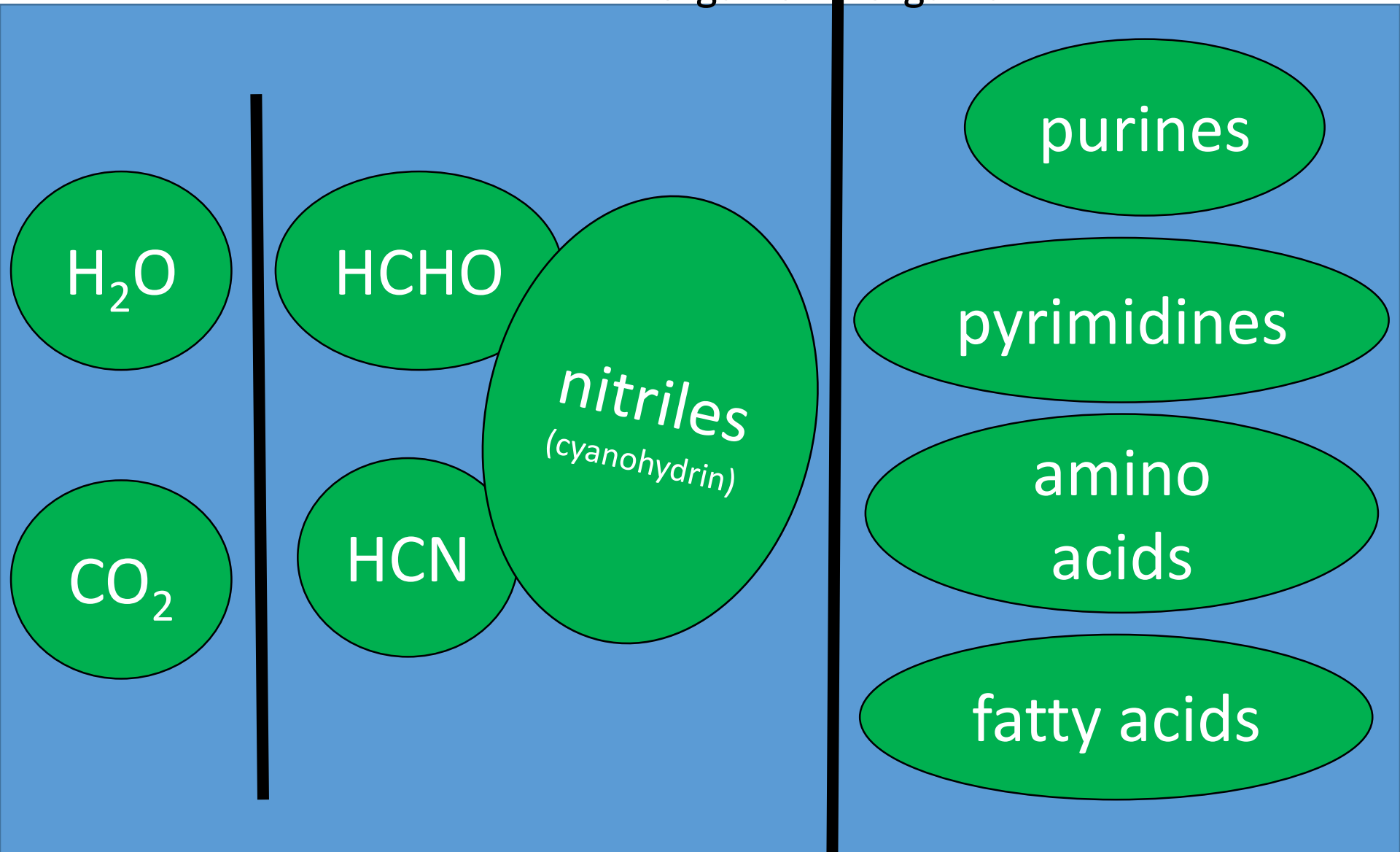
nitriles
(cyanohydrin)

purines

pyrimidines

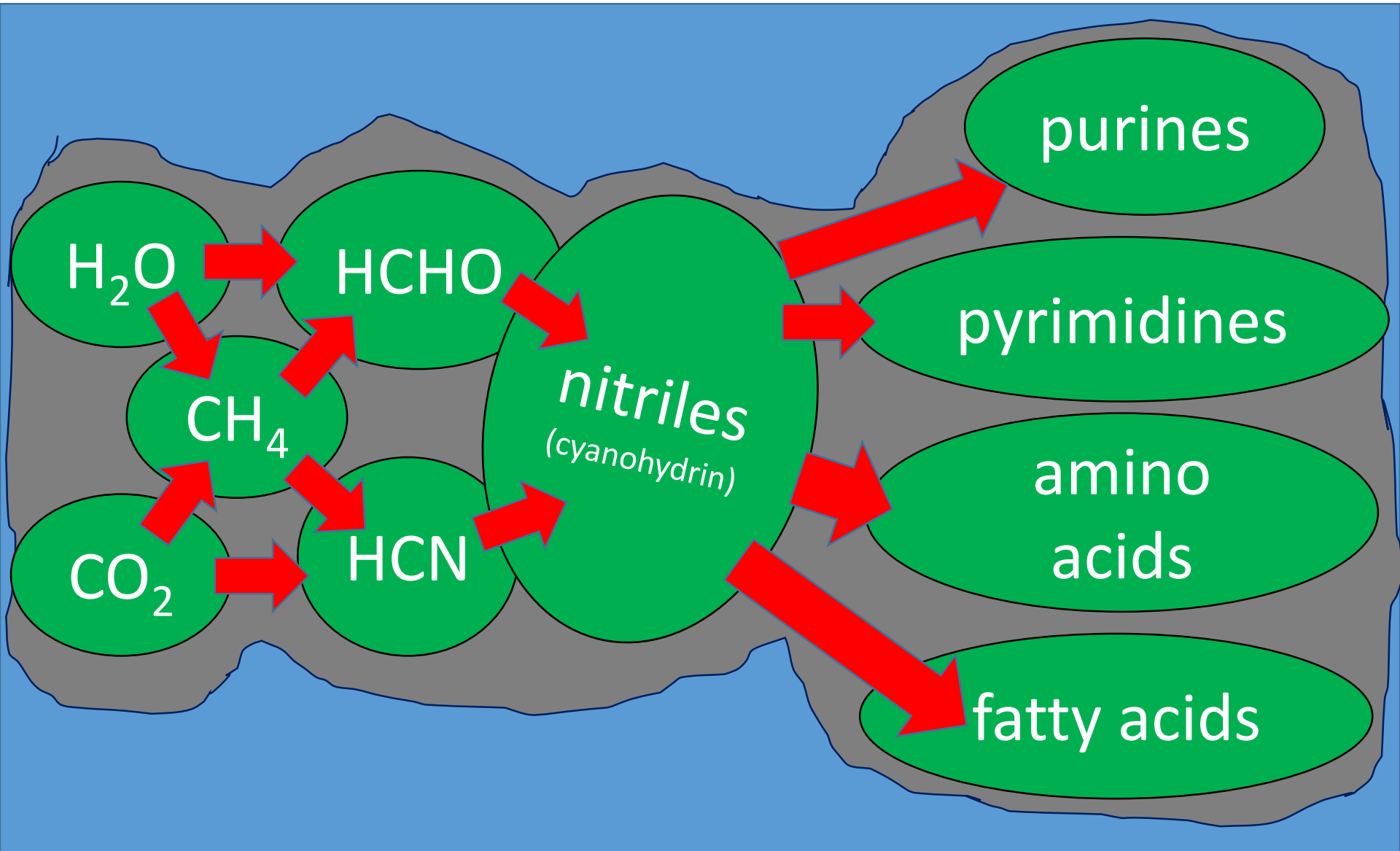
amino
acids

fatty acids



High Radiation level

戒崎、2015



Necessary conditions to
bear life

生命の誕生場はどこか？

環境的要素	原始大陸上 温泉説	中央海嶺 熱水系説	火星説	宇宙説
酸化的大気(CO ₂ -H ₂ O, O ₂ なし)	○	×	○	×
窒素の供給	○	×	○	×
局所還元的アルカリ熱水系	○	○	?	×
乾湿反復環境	○	×	○	×
多様な鉱物 (Ni,Co,Fe3P)	○	△	?	○
KREEP玄武岩	○	×	?	×
ウラン鉱床	○	×	?	×
放電 (落雷)	○	×	?	×
太陽エネルギー	○	×	○	×
低温アンモニア合成(An+)	○	×	?	×
還元的気体の高濃度化	○	×	?	×
周期性のある環境	○	×	?	×
エネルギー供給源 (太陽が使えない)	○	×	?	×

核の歴史

- 1 これまでの通説
- 2 困った観察事実(①固体内核の組成不均質、②核の温度が低すぎる)
- 3 新説:①核は誕生時は固体として誕生した(低温説)②誕生後にD層(第3大陸)に加熱されて上から融解した。③内核は溶け残り、小惑星の核で、最初期の組成多様な低圧固体核で一度も溶融していない。

生命誕生の歴史

- 1 前駆的化学進化反応と表層環境の関係: ほぼ収束: 膜にRNAが取り込まれるまで
- 2 最古の酵素反応と活性中心の金属イオンクラスターの起源: 実験材料の提供
- 3 OD-1: 最古の生態系誕生まで; Top-down

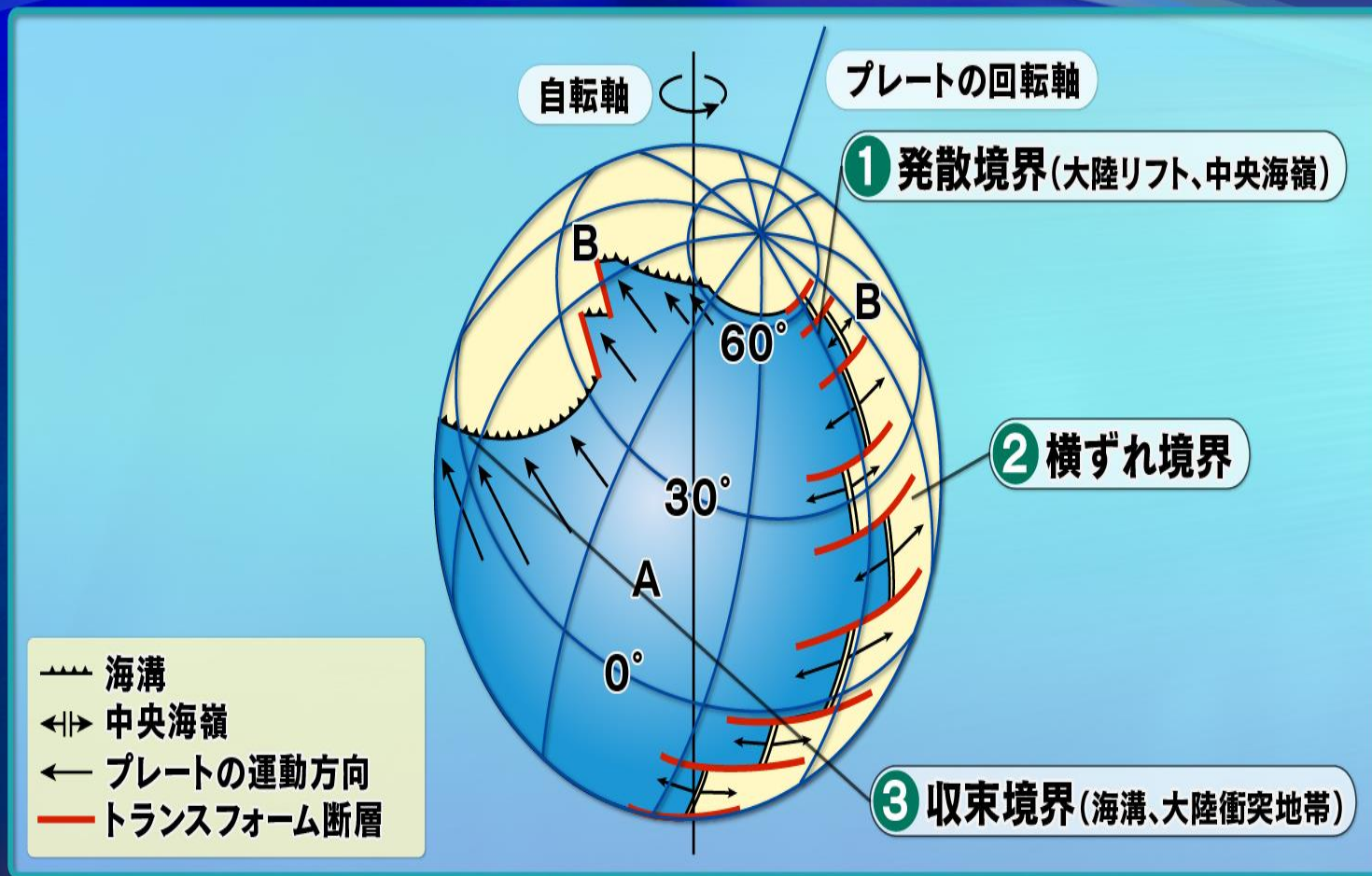
OD-1

- 1 古細菌とバクテリアの中間の意味
- 2 門レベルと遺伝子不足：外部共生の意味
- 3 最初の生命体は外部共生
- 4 それ以前に自己複製RNA世界
- 5 外部共生体が一つの生命体へ
- 6 ウイルスはそれに失敗した残骸？

6 科学革命の構造

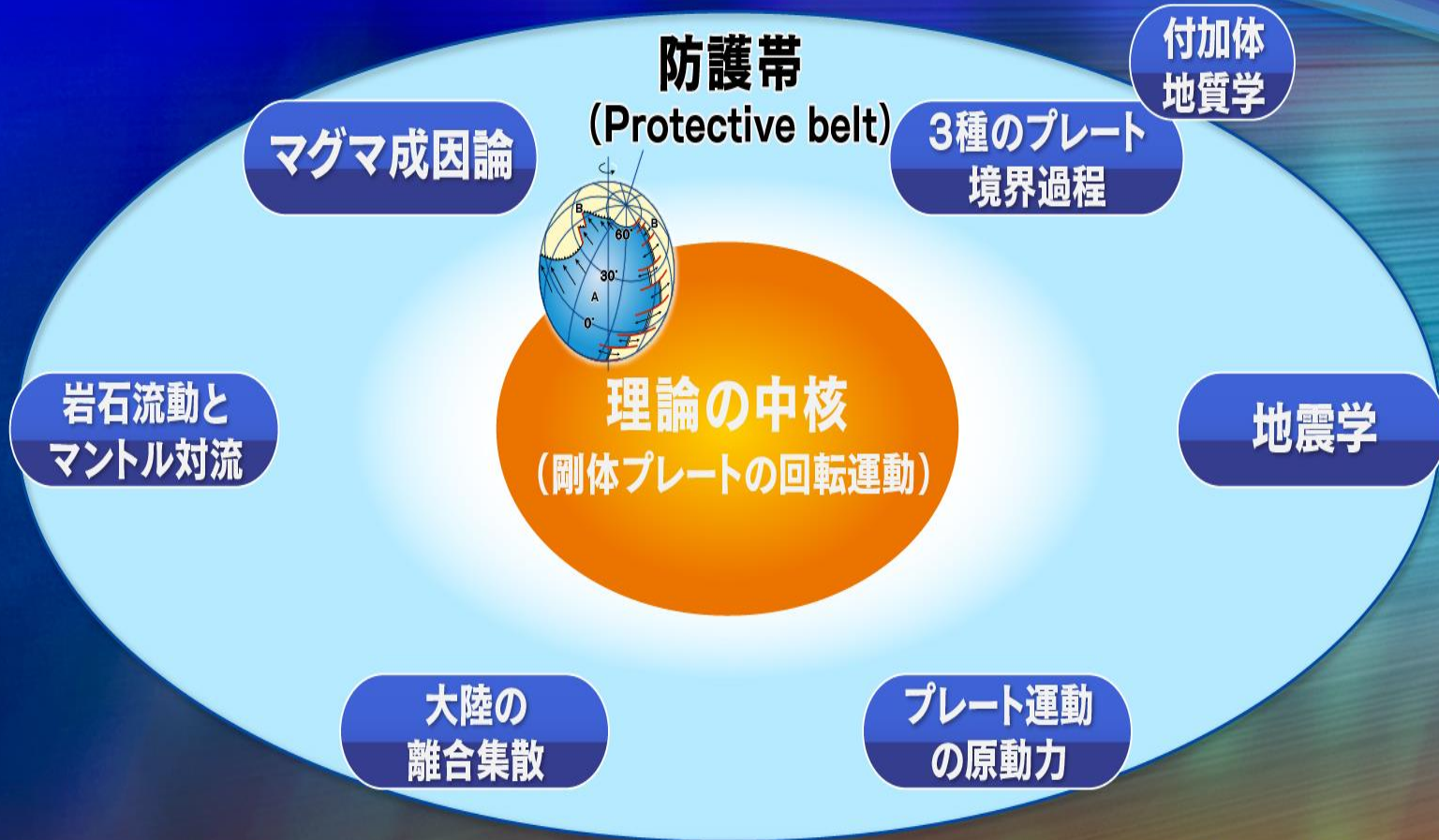
- 1 パラダイムとパラダイムシフト (T. Kuhn)
- 2 科学における理論の構造: 演繹的階層構造を持つ科学と複雑系科学 (熱力学、電磁気学など)
- 3 プレートテクトニクスは演繹的階層構造を持たない (ラカトシュの科学プログラム)
- 4 科学哲学: 『ある』は実証できるが『ない』は実証不能; これは正しいか?
- 5 複雑系の科学: 反証可能性とモデルの提唱
- 6 生命誕生場の論争の未来

プレートテクトニクス の 原理



上田(1989)を修正

プレートテクトニクスの理論構造



都城(1998)をもとに作成

生命の誕生場はどこか？

環境的要素	原始大陸上 温泉説	中央海嶺 熱水系説	火星説	宇宙説
酸化的大気(CO ₂ -H ₂ O, O ₂ なし)	○	×	○	×
窒素の供給	○	×	○	×
局所還元的アルカリ熱水系	○	○	?	×
乾湿反復環境	○	×	○	×
多様な鉱物 (Ni,Co,Fe3P)	○	△	?	○
KREEP玄武岩	○	×	?	×
ウラン鉱床	○	×	?	×
放電 (落雷)	○	×	?	×
太陽エネルギー	○	×	○	×
低温アンモニア合成(An+)	○	×	?	×
還元的気体の高濃度化	○	×	?	×
周期性のある環境	○	×	?	×
エネルギー供給源 (太陽が使えない)	○	×	?	×

まとめ1: 物質科学の発展
が新しい惑星形成論の提
案を加速、もう一つの情報
ソースが地球史

1990年に日本で全地球史 解読研究を開始したのは 何故か？

地球史研究とは何か？

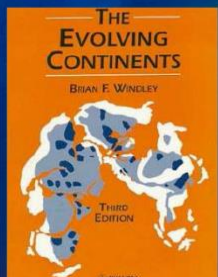
実証科学になるか？

これまでの地球史モデル

The Evolving Continents (1977, 1984, 1995)



Brian F Windley



出版社: John Wiley & Sons Ltd
(上記写真は1995年版)

- ① イントロダクション
- ② プレートテクトニック・パラダイム
- ③ 古地磁気と大陸テクトニクス
- ④ 古気候と化石記録
- ⑤ リフトから海洋へ
- ⑥ 島弧
- ⑦ 大陸縁造山活動：西アメリカ
- ⑧ アルプスと新生代のヨーロッパの変形
- ⑨ ヒマラヤと新生代のアジア変形
- ⑩ パンゲア：ペルム～トリアス紀
- ⑪ バリスカン造山帯
- ⑫ カレドニア～アパラチア造山帯～
- ⑬ 原生代後期の超大陸、盆地、貫入岩、氷河期、および生命の形態
- ⑭ 原生代後期の造山帯
- ⑮ 原生代中期の超大陸とグレンビル造山帯
- ⑯ 原生代初期の造山帯、火成活動、堆積岩
- ⑰ 原生代の地殻の進化
- ⑱ 太古代後期の盆地、貫入岩、層状貫入岩体
- ⑲ 太古代緑色岩～花こう岩帯～
- ⑳ 太古代グラニュライト～片麻岩帯～
- ㉑ 太古代の地殻の進化
- ㉒ 進化する大陸

Brian F. Windley

- 1 Greenland anorthosite Ph.D
- 2 Geol. Surv. Greenland
- 3 Univ. Leicester, Prof. Dept. Geology
- 4 Evolving Continents, v.1;1977, v.2; 1985, v.3; 2004, v.4; 2016

はじめに

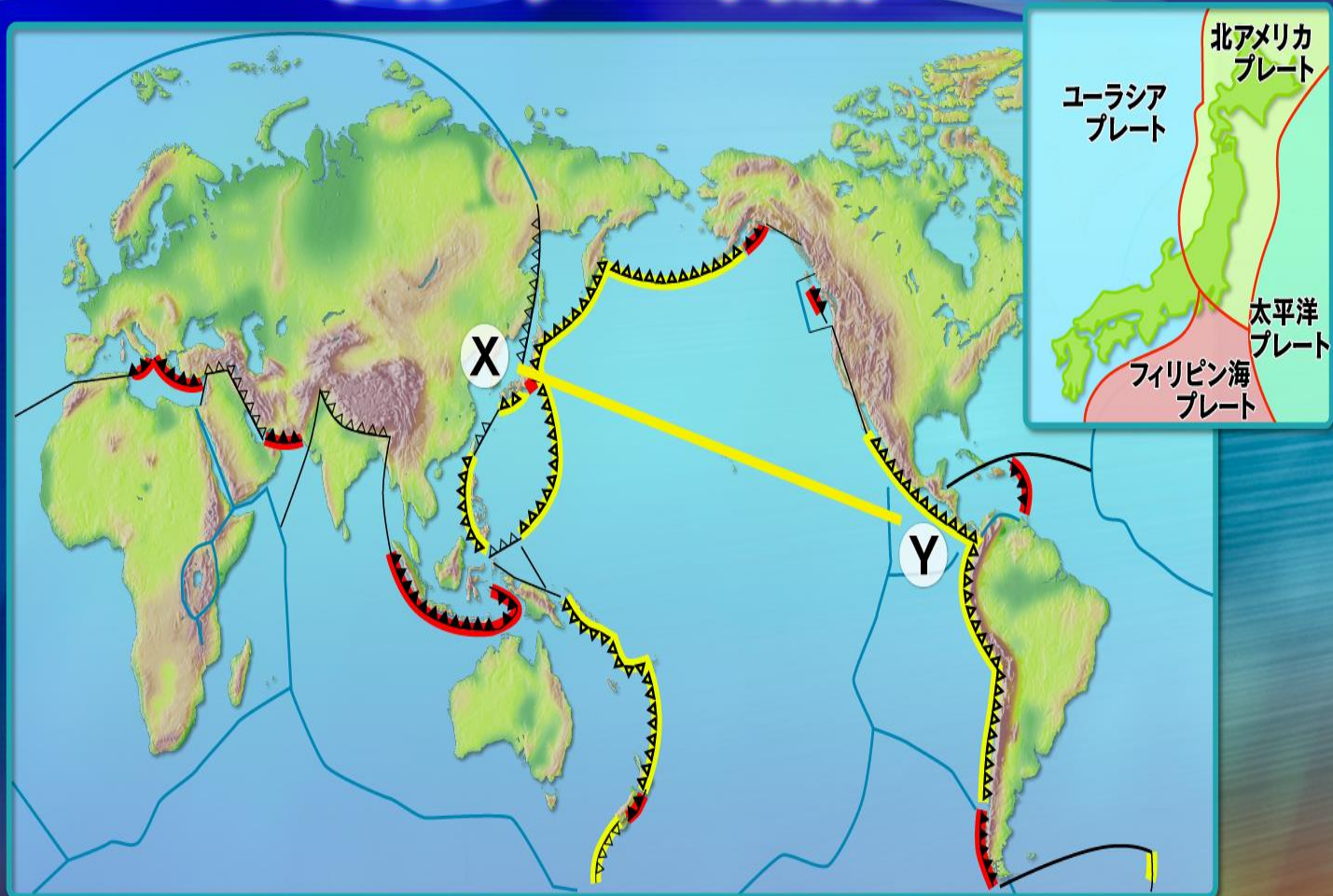
- 1 地球史研究とは、先カンブリア時代の地質体の研究を指すのではない。
- 2 日本列島地質構造発達史も地球史の一部。
- 3 地球史研究とは地球の誕生から現在までの歴史の研究。
- 4 それを地球断面図で示す研究は日本にはなかった。→植民地科学から輸出科学へ

革新的な新手法の導入

- 1 コンパイル→世界標準岩体研究(実証科学):地質体の選定と実証科学
- 2 野外地質:付加体地質学(海洋プレート物質を過去40億年前に遡り収集)=コアから宇宙変動までの情報解読
- 3 分析機器(世界最先端)=SIMS, Laser ICPMS+ジルコン分離工場
- 4 グループ研究:国外だけで28か国48研究機関、25年間
- 5 研究資金;全地球史解読、科技庁スーパープログラム、COE, GCOE、冥王代生命学

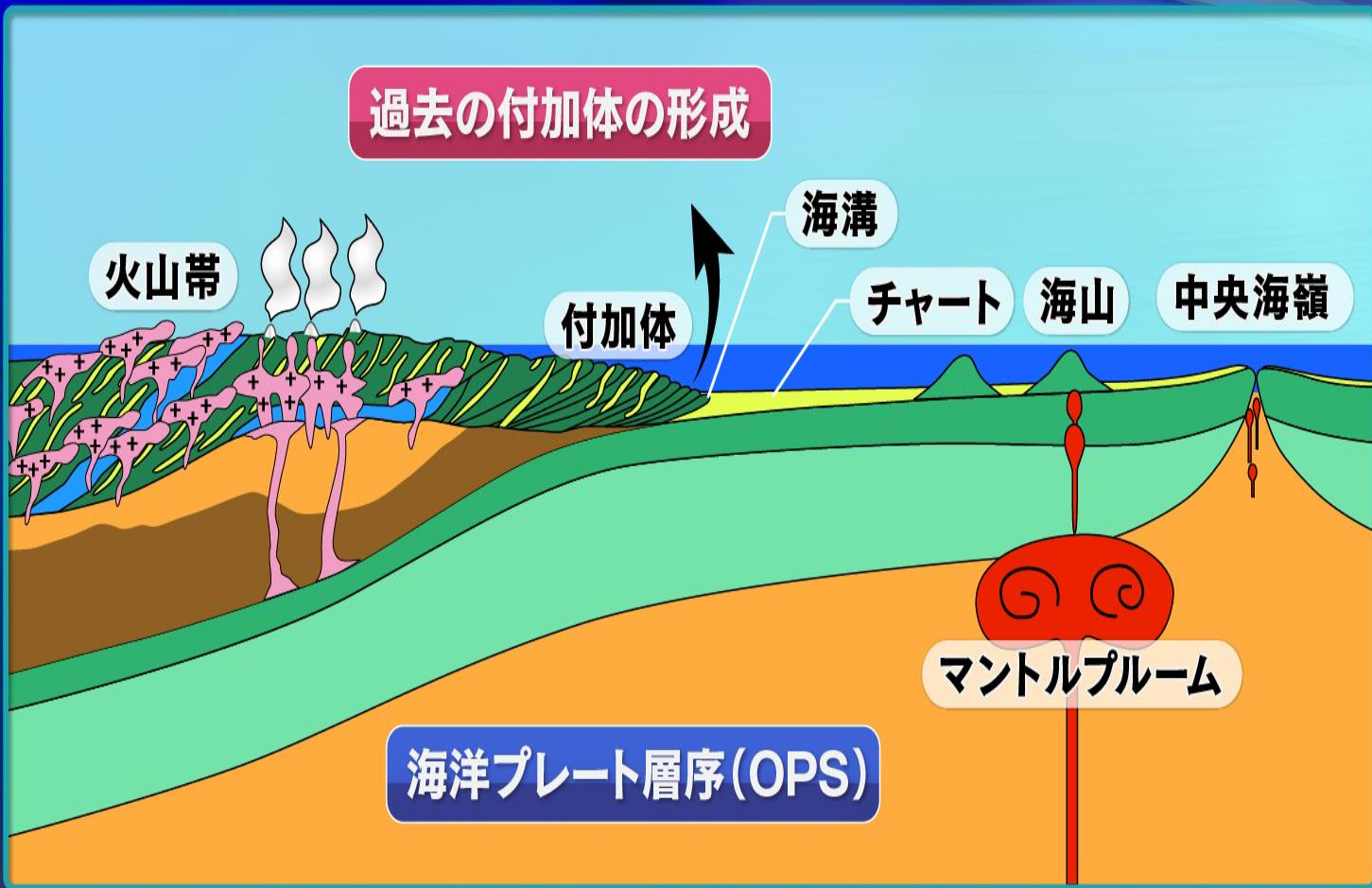
- 1 他に例がない→世界で独走
- 2 地球史世界標準モデルの提案
- 3 宇宙史を組み込んだシステム変動史

世界のプレート境界

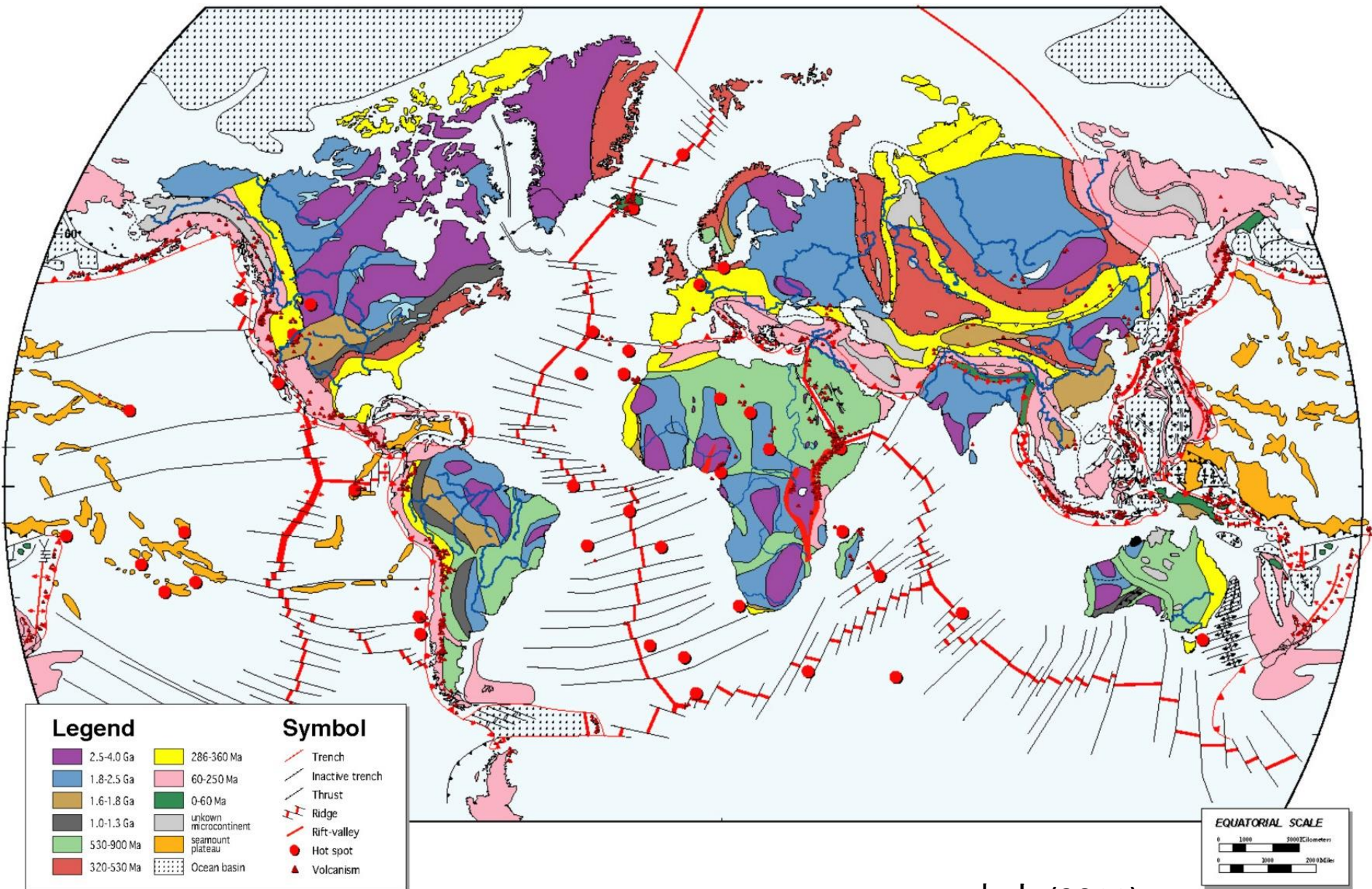


山本(2010)

収束境界（海溝）で起きること



世界の地質



丸山 (2011)

研究資金計画



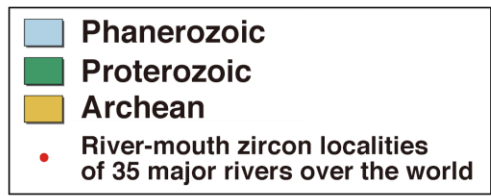
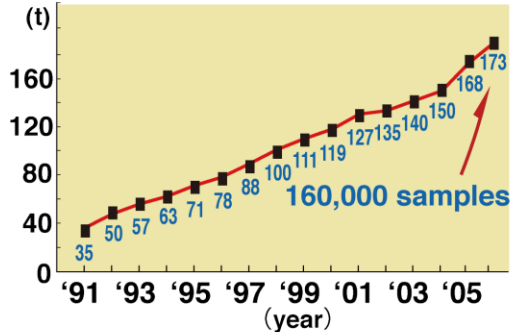
9000 45
地球環境保全

駐

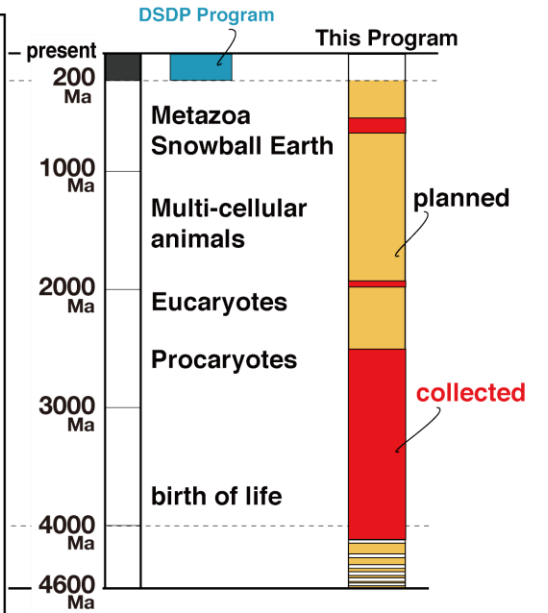
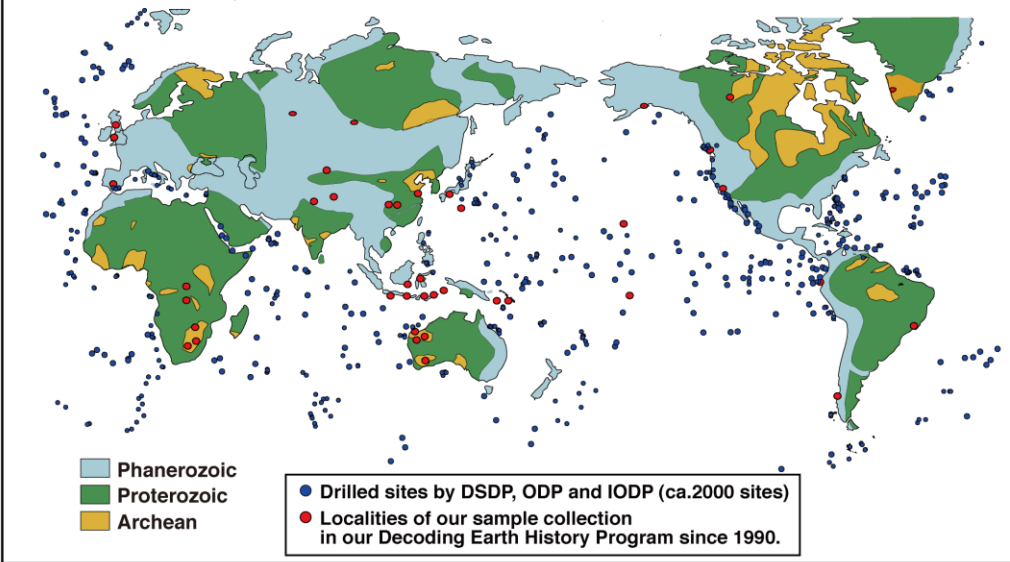
Sample collection for decoding the whole history of the Earth



Total number of samples

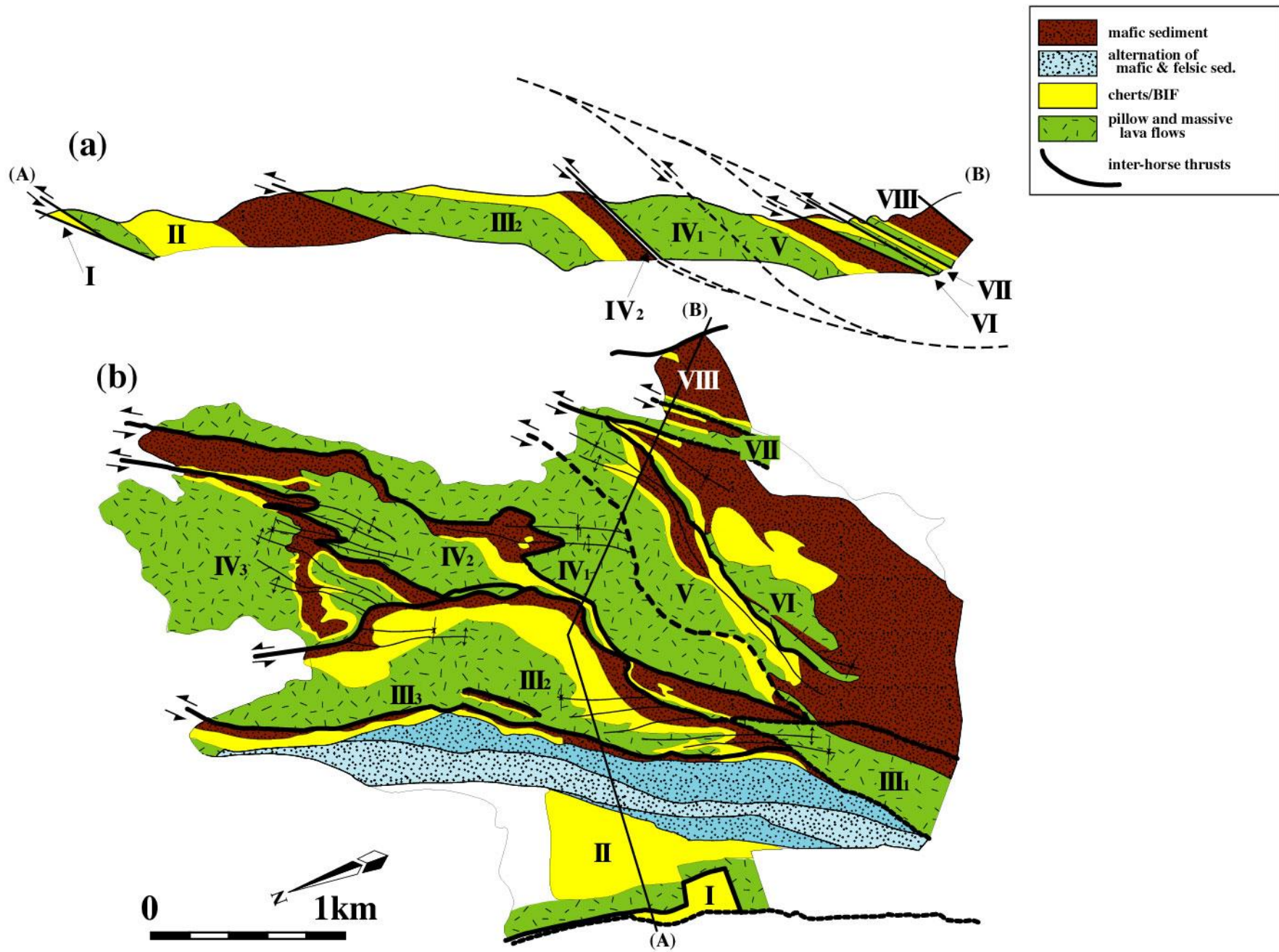


Ocean-floor Drilling Program covered ca.2000 sites since 1968, but only younger than 200Ma.



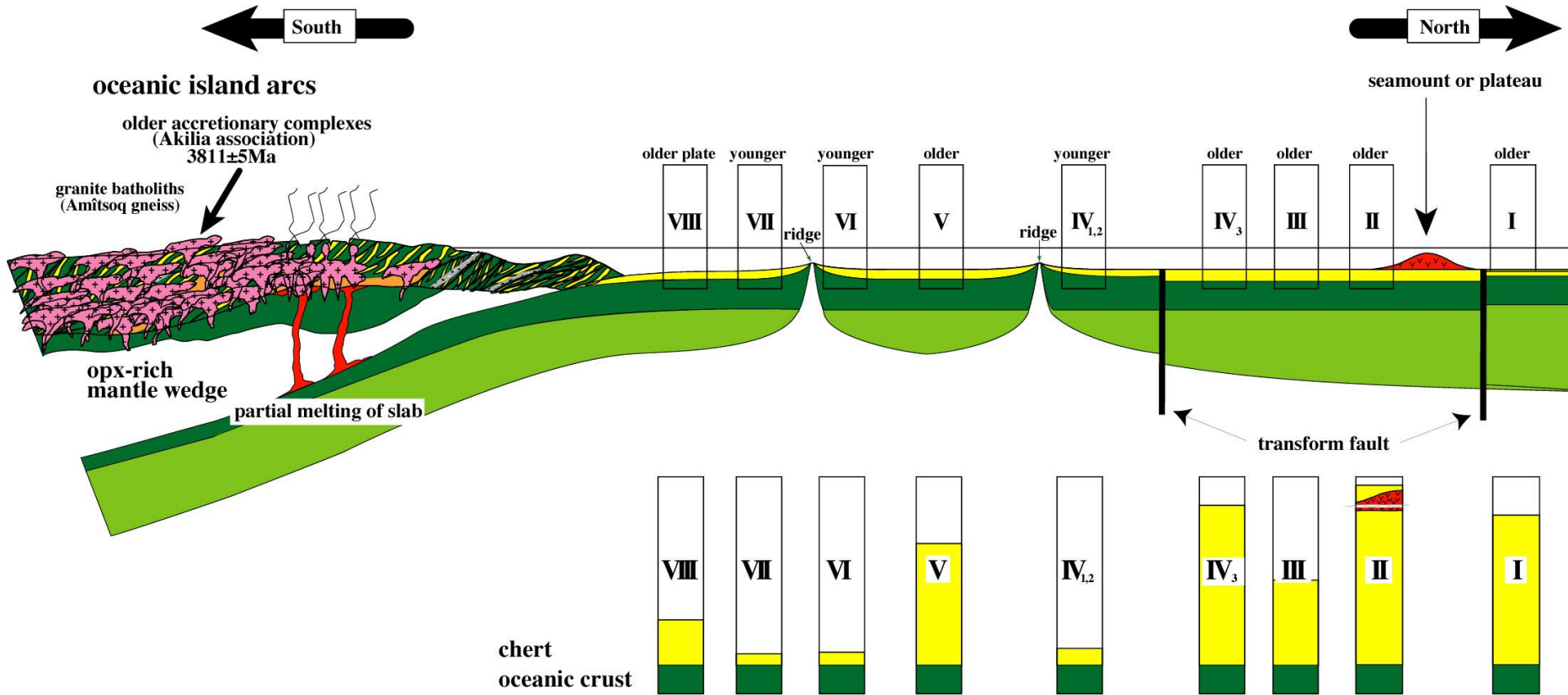
Our Program aims to collect samples older than 200Ma, back to 4.56Ga.

Cooperative works over 25 countries with 48 Res Institutes for the last 25 years



Maruyama and Komiya (2011), Fig. 4

3.8-3.7Ga



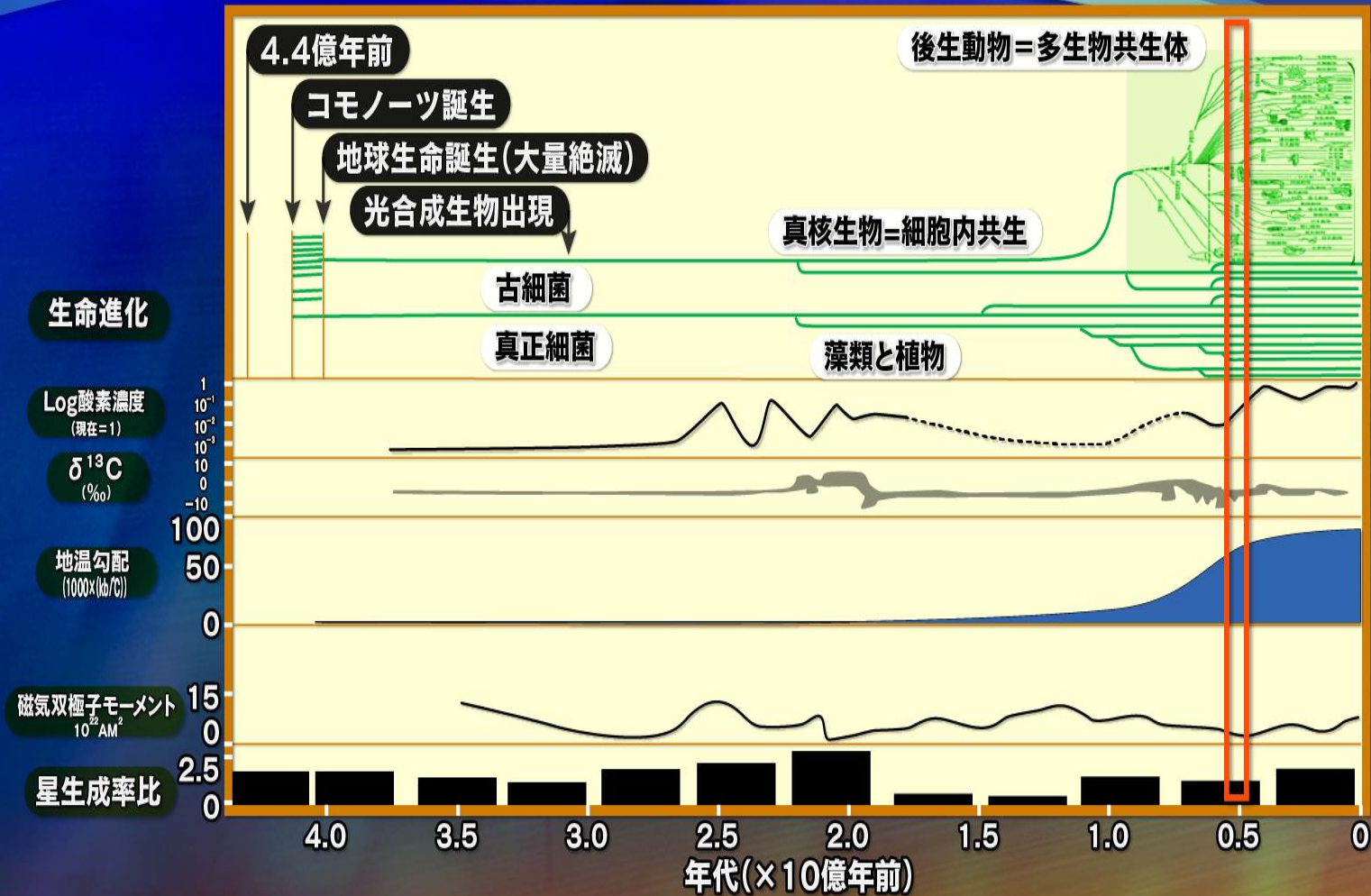
Research Project(>25 years with 25 countries & 48 Res. Institutes)

- ①横軸46億年研究(時間分解能1億年)
- ②特異点研究(陸上掘削:時間分解能1000年/1mm)
- ③収集した試料数>15万個、掘削コア25本
- ④研究参加人数(丸山関係だけで国内70人、外国研究者100)
- ⑤論文数(丸山:400、全体で1000+)

横軸46億年研究の例

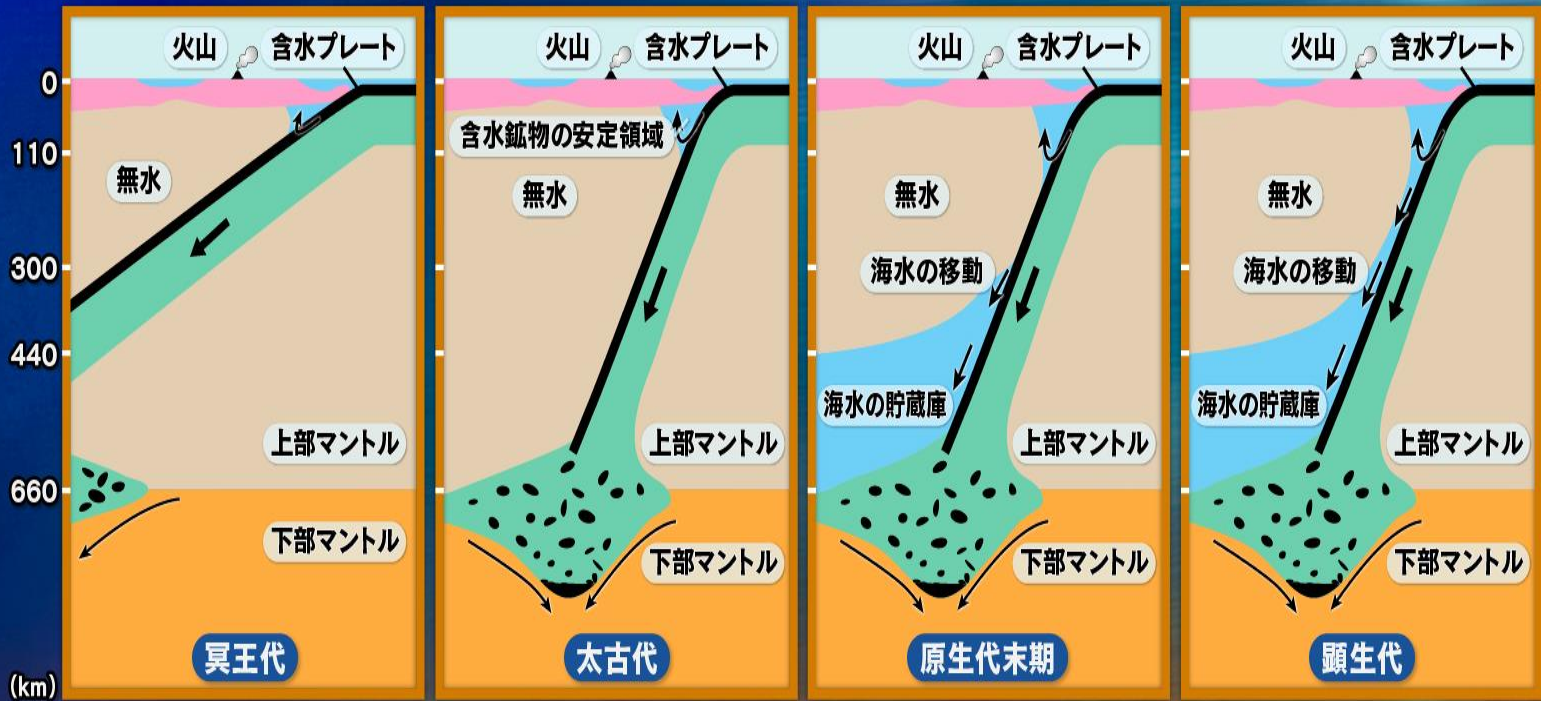
縦軸103項目

カンブリア紀の概観



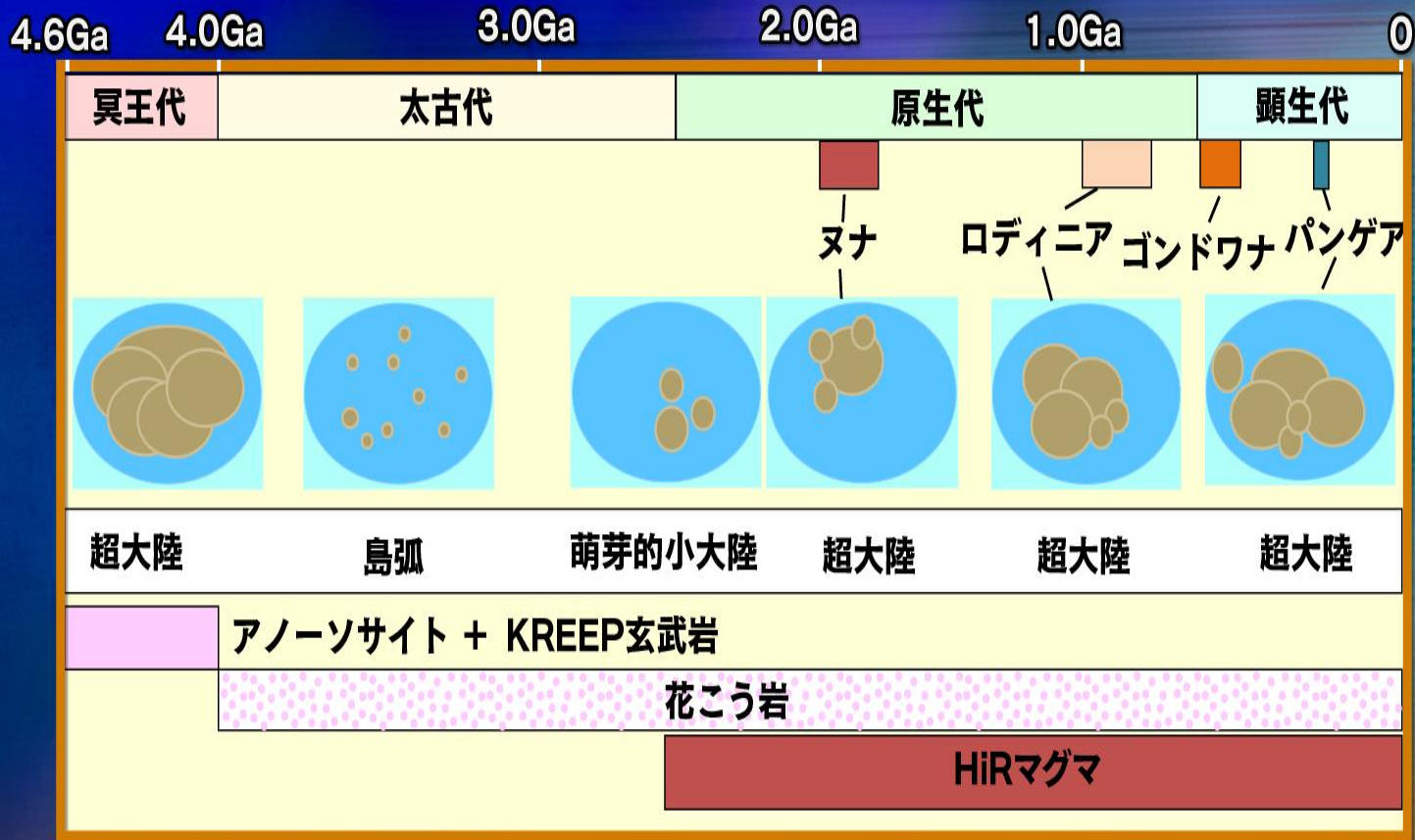
水の循環と海水の逆流

	冥王代	太古代	原世代末期	顕世代
表層の水の量	100	100	97	83
マントル内に取り込まれた海水の量	0	0	3	17

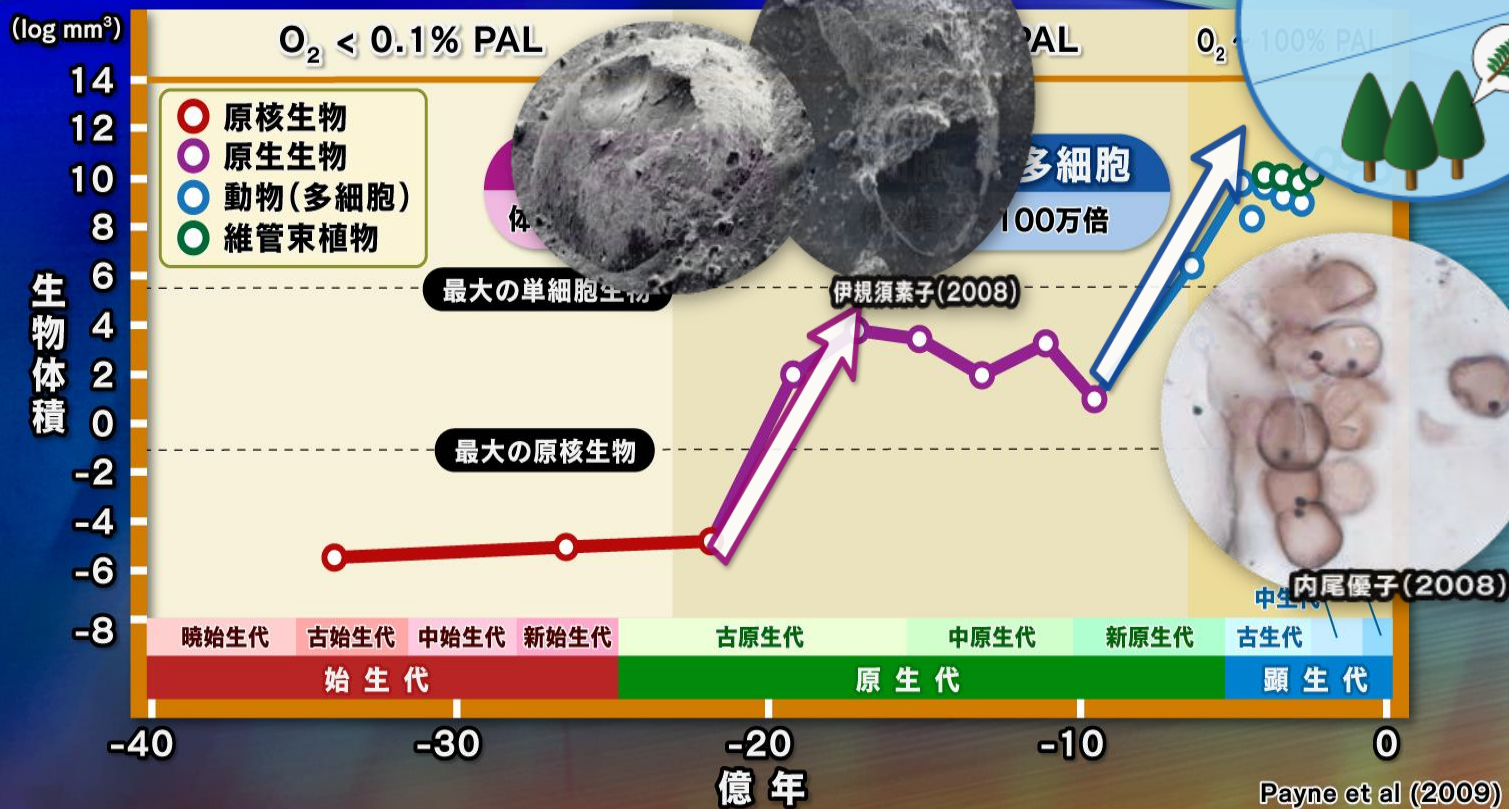


Maruyama & Okamoto (1998, 2001)

原生代の大陸成長と配置



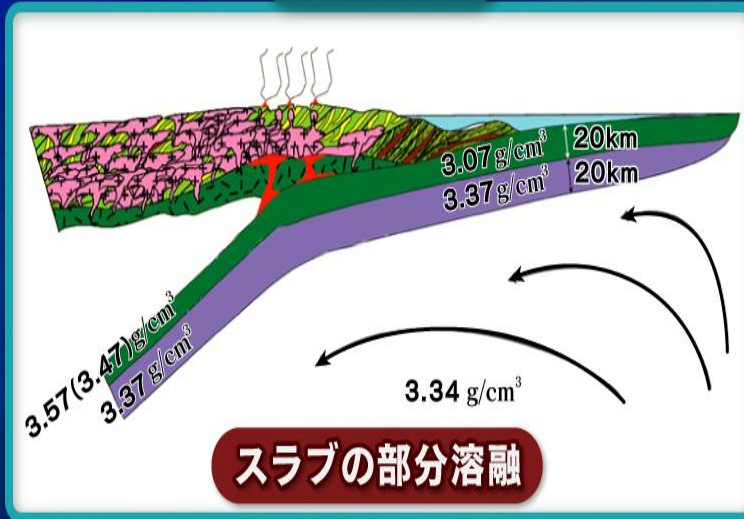
原核細胞と多細胞生物は、生物量で1兆倍の差



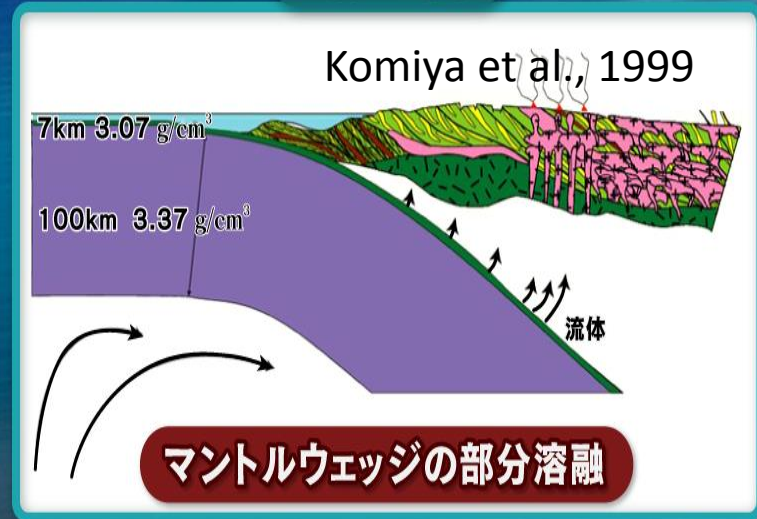
マントルの温度と組成

2 プレートの厚さ、海洋地殻の厚さが分かる

太古代



顕生代



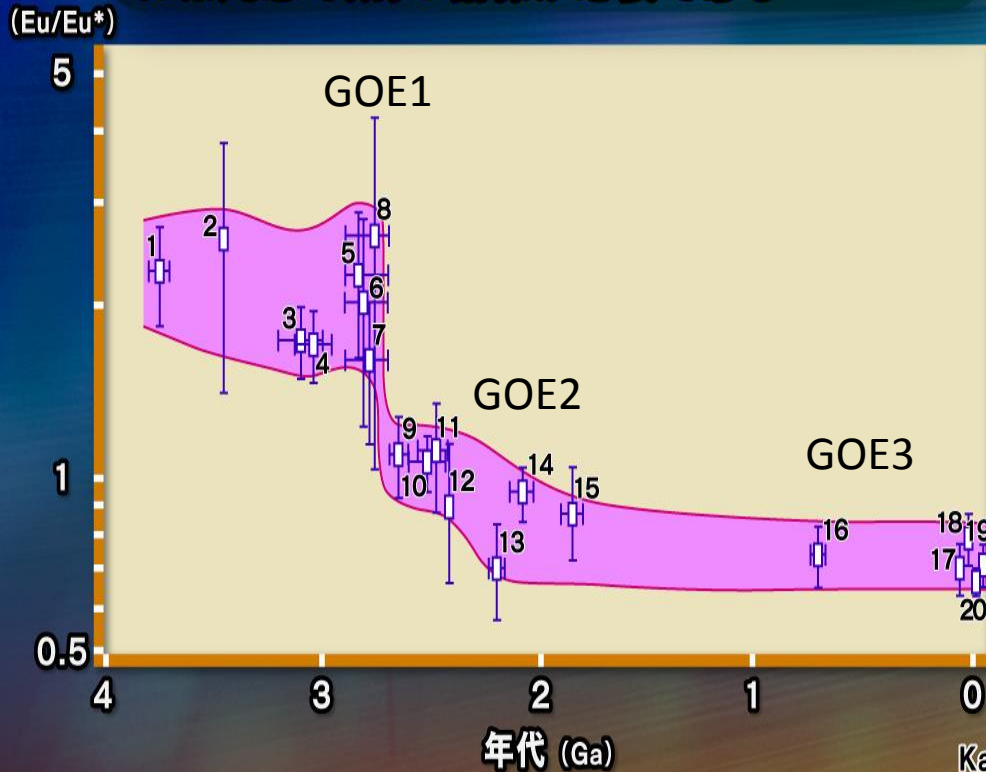
横軸46億年研究の例 の組み合わせ

メカニズムが分かる

酸素の歴史

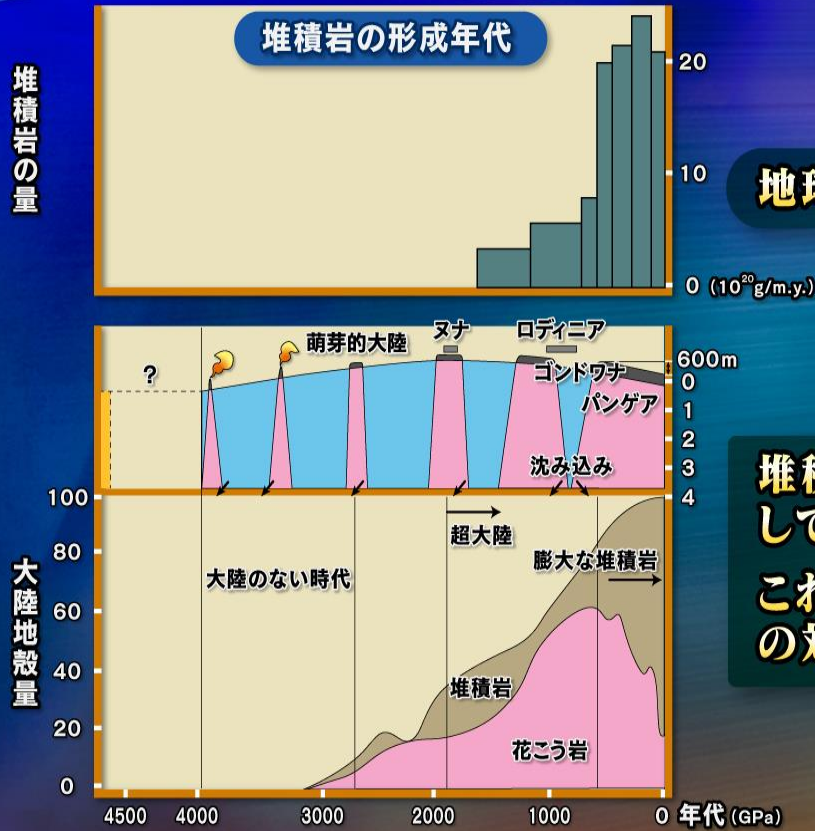
深海堆積物チャートのEu/Eu*比は 海洋の酸素濃度を反映する

ただし、顕生代の大きな酸素濃度変化レベル
には鈍感で、別の指標が必要である



Kato (2003)を元に丸山が作成

堆積岩ができた時代と量の変化



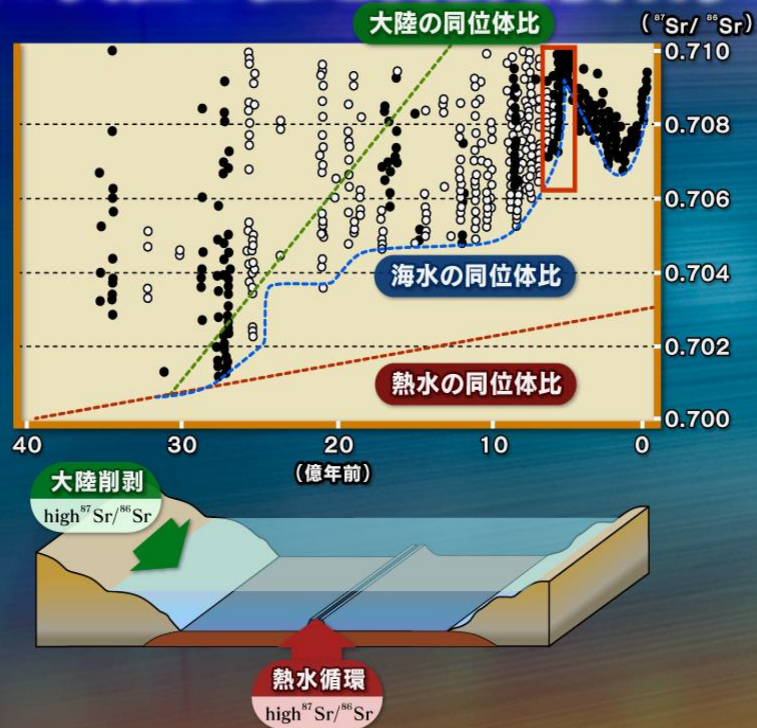
地球地質図から計算して求める

Ronov et al (1991)

堆積岩の形成年代は、時代に依存して大きく変化したことを示す。
これは酸素濃度の変化の歴史と正の対応関係を示す

Maruyama et al., 2013

炭酸塩岩のSr同位体比は 過去の大陸の陸地面積を反映する



Shields and Veizer (2002)

① 太古代(35億年)

酸素濃度 < $\frac{1}{1,000}$ PAL



酸素ポンプ

小規模

同期するのは何故か？

- ① 堆積岩の量
- ② 海水のSr同位体比
- ③ 海水の酸化度
- ④ 生物のサイズの変化

② 原生代(21億年)

酸素濃度 < $\frac{1}{100}$ PAL



酸素ポンプ

中規模

酸素ポンプの原理

太陽エネルギー



シアノバクテリア
(藻類、植物)

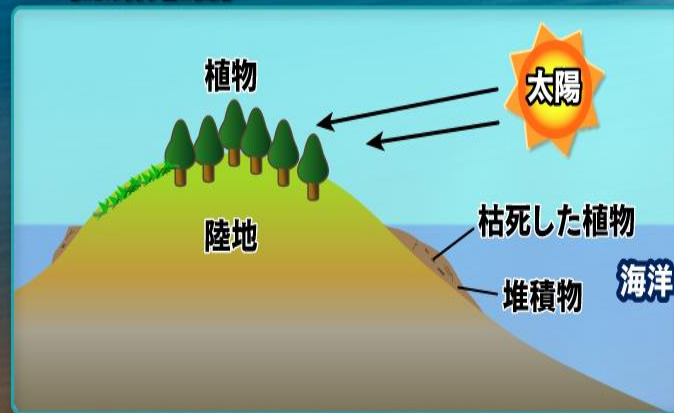
③ 顕生代(5,4億年)

酸素濃度 < 1 PAL



酸素ポンプ

巨大化



特異点研究 1 :

南中国プロジェクト

南中国の原生代末期の地層

- 浅海から深海まで様々な堆積場
- 豊富な化石
- 不整合(地層の欠如)が少ない
- 変質・変成作用を殆ど受けていない



6地域で21本の掘削試料

- 風化の影響が少ない
- 完全連続試料



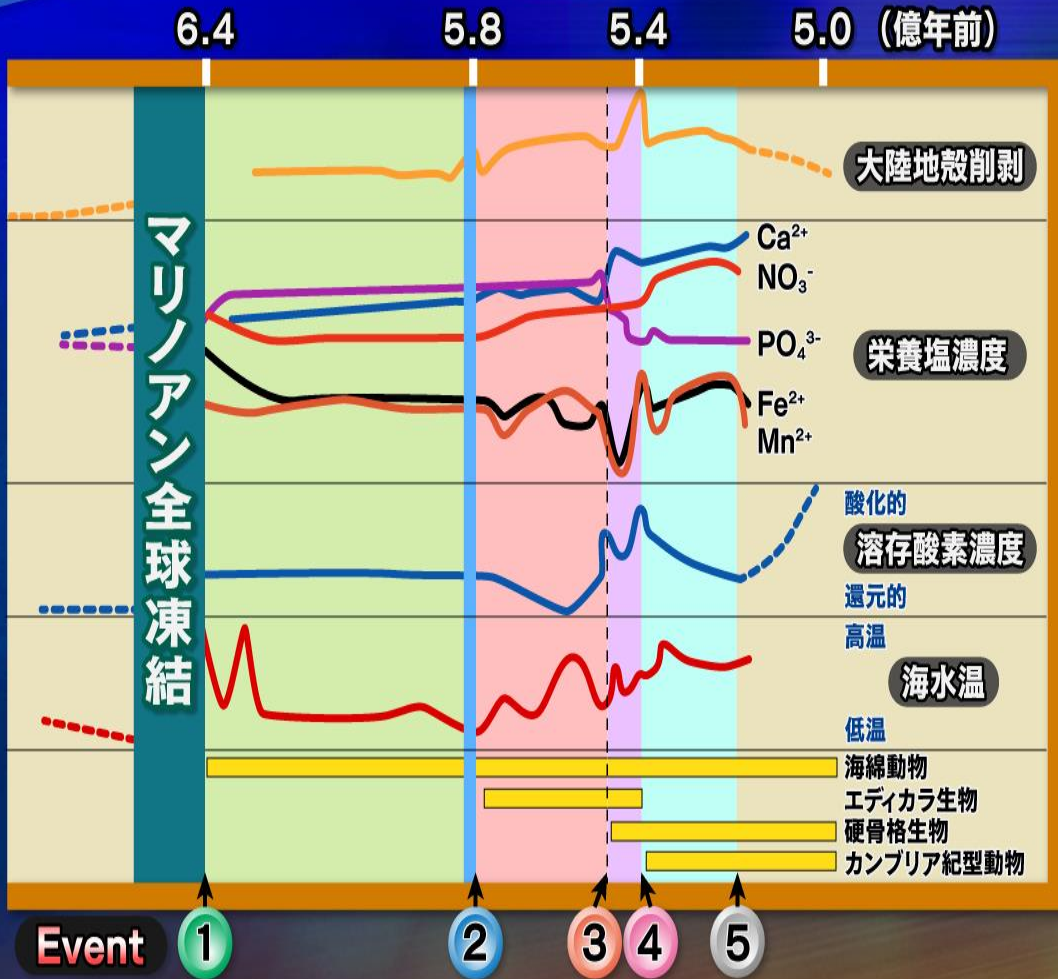
多元素、多同位体分析

C, O, N, P, Ca, Fe, Mn, Sr, Mo, REE



原生代末期の環境変動を読み解く

掘削試料を細かく分析精度を上げて測定



1 6.4億年前

海綿動物の出現
大陸削剥増、 PO_4^{3-} 増

2 5.8億年前

エディカラ動物の出現
大陸削剥増、 NO_3^- 増

3 5.5億年前

硬骨格生物の出現
酸素増、 Ca^{2+} 増
 PO_4^{3-} 減、 Fe^{2+} 減

4 5.4億年前

カンブリア紀型生物の出現
大陸削剥最大、 NO_3^- 増

5 5.2~5.0億年前

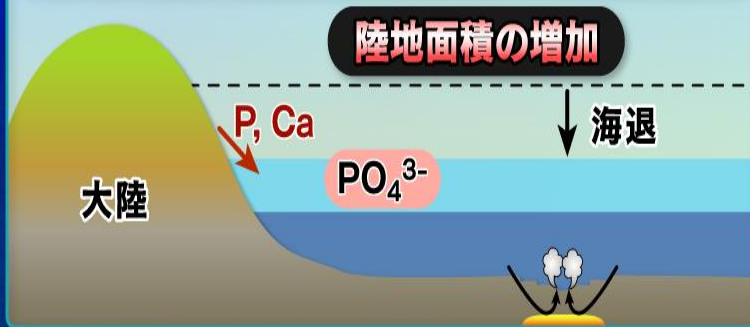
カンブリア紀の爆発的進化

澤木(2011)、石川他(2008)

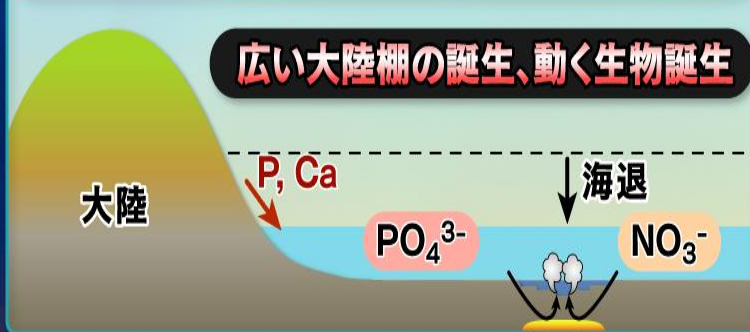
原生代末期の環境変動

Event 0 マリノアン全球凍結(6.4億年前まで)

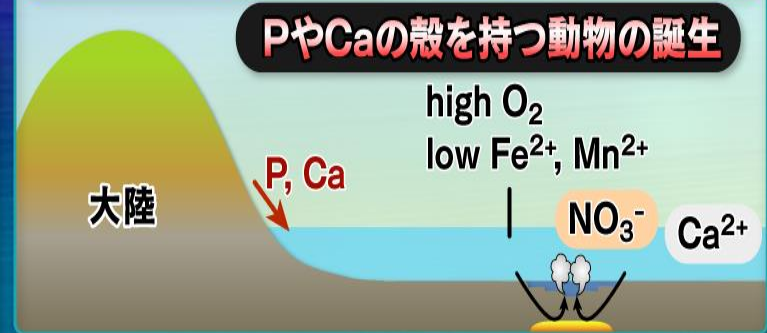
Event 1 海綿動物出現(6.4億年前)



Event 2 エディアカラ生物出現(5.8億年前)



Event 3 硬骨格生物動物出現(5.5億年前)



Event 4 カンブリア紀型生物出現(5.4億年前)

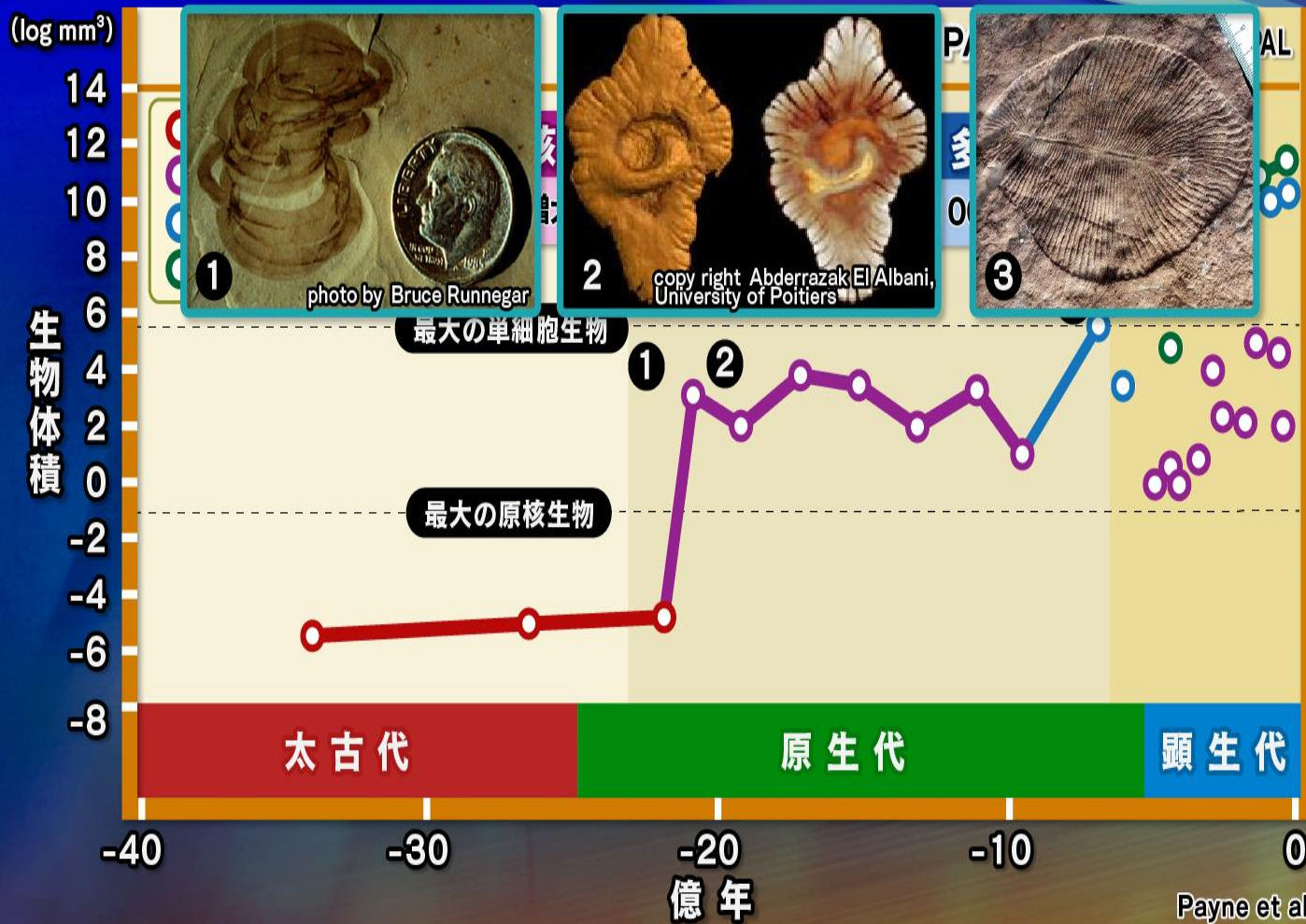


Event 5 カンブリア紀の爆発的生物進化
全ての動物門の出現、大型化(5.2~5.0億年前)

特異点研究2:21億年前

横軸46億年研究も原生代が不足

生命進化:2回の巨大化

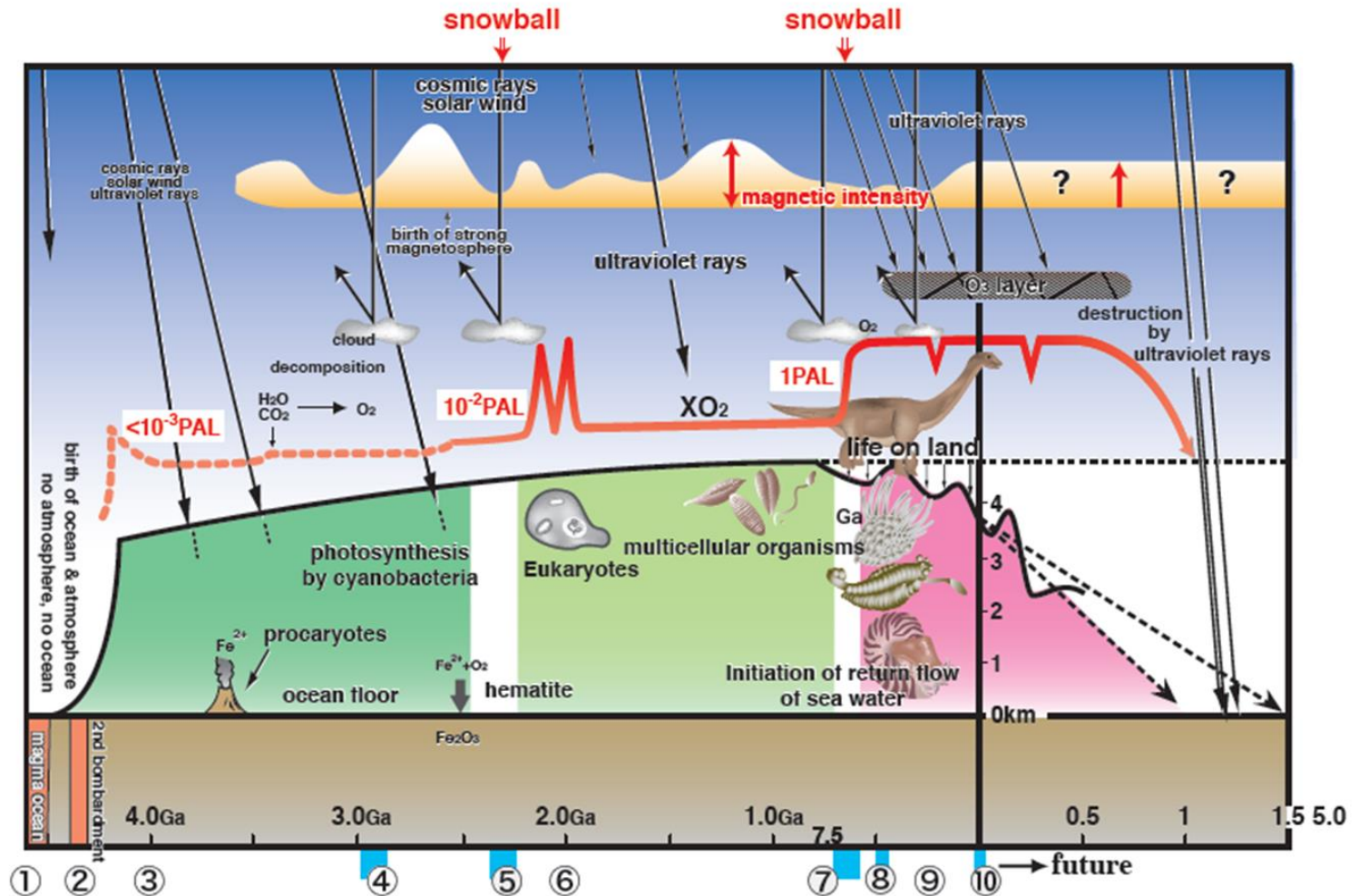


世界標準モデル：生命 と地球の歴史

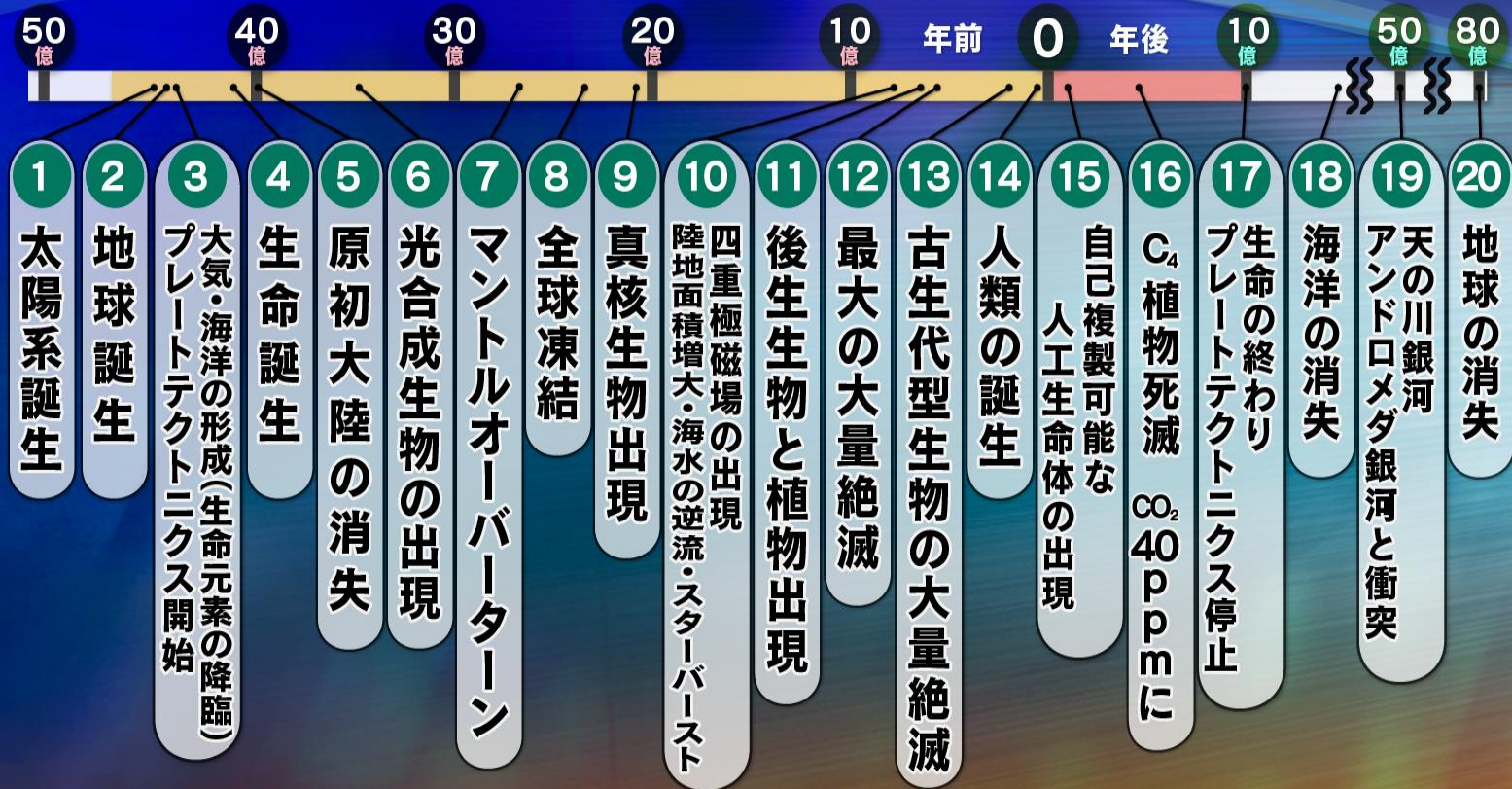
Springer, 2016

The basic study for Astrobiology

Unraveling of the Earth history

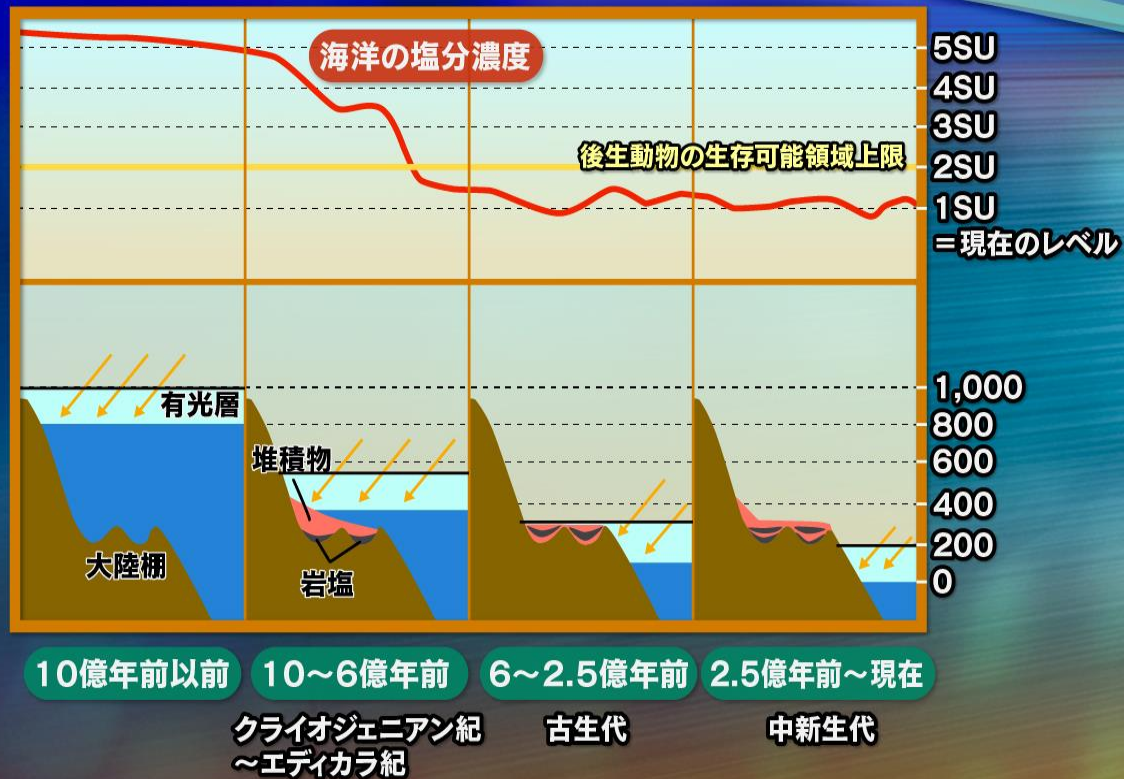


地球史20大事件



不連続的な変動(繰り返さない)、一方向性、始まりと終わり(PT、生命など)

塩分濃度の経年変化

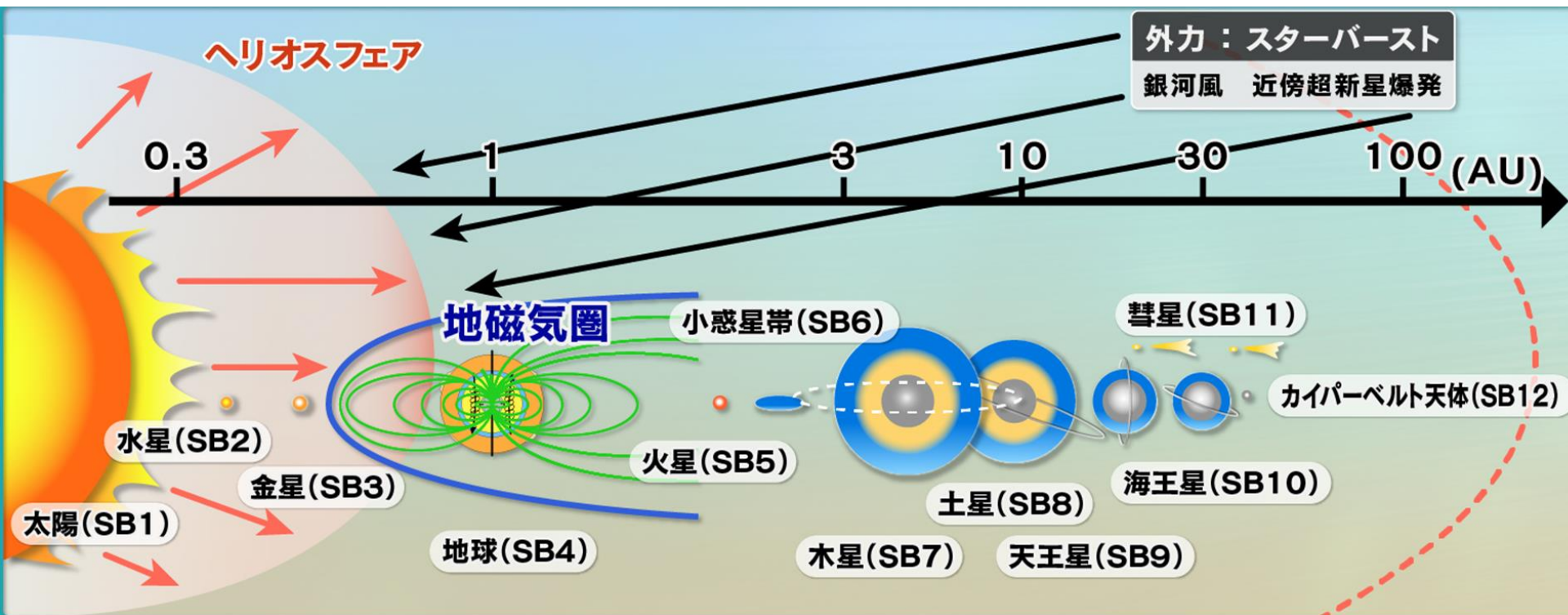


大量絶滅と宇宙変動

図を入れる

1回目の全球凍結

スターバースト(外力)に対する地球システムの応答



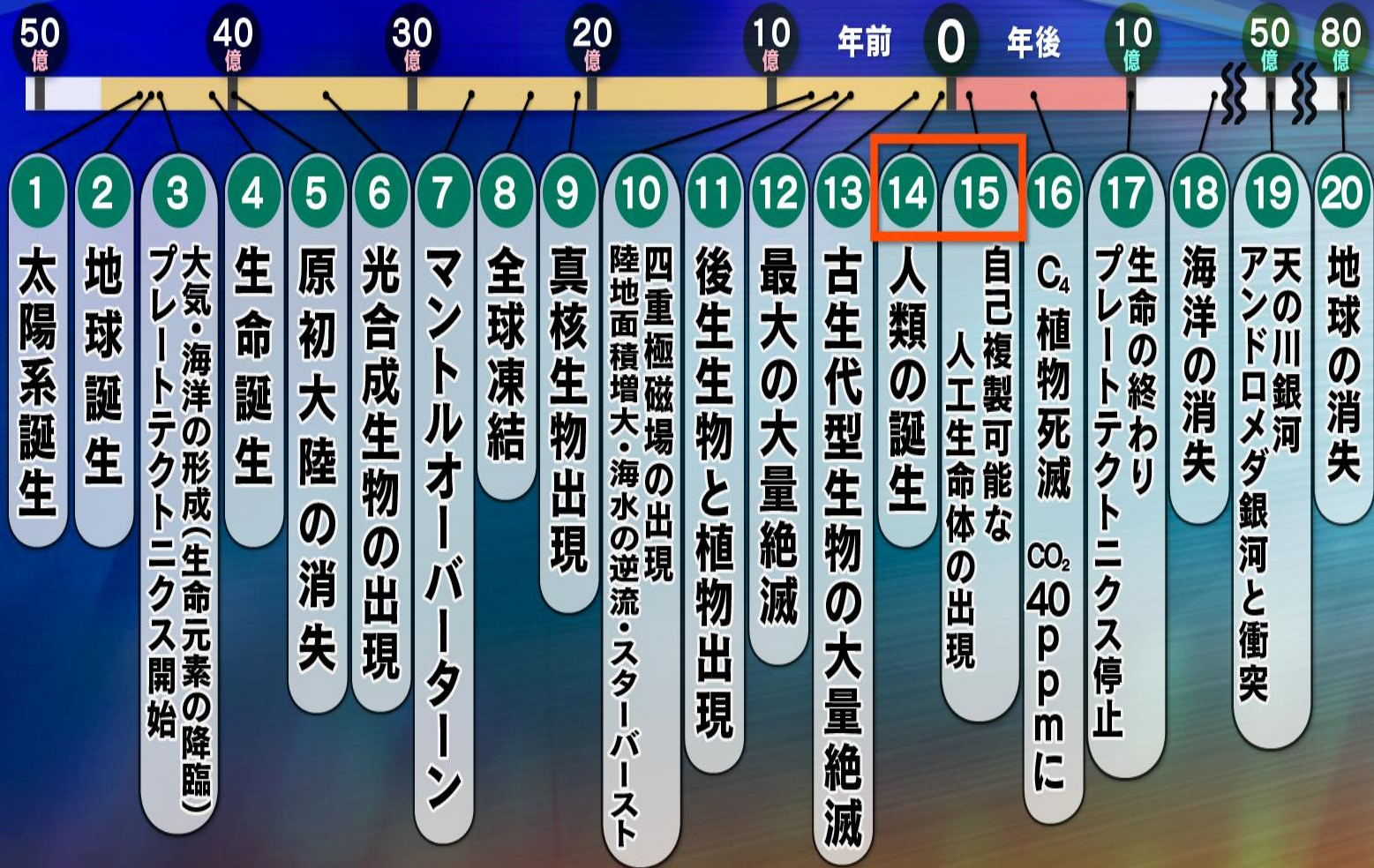
第13回 人類代：文明の構築と未来

1 人類の誕生と進化：生物学的側面

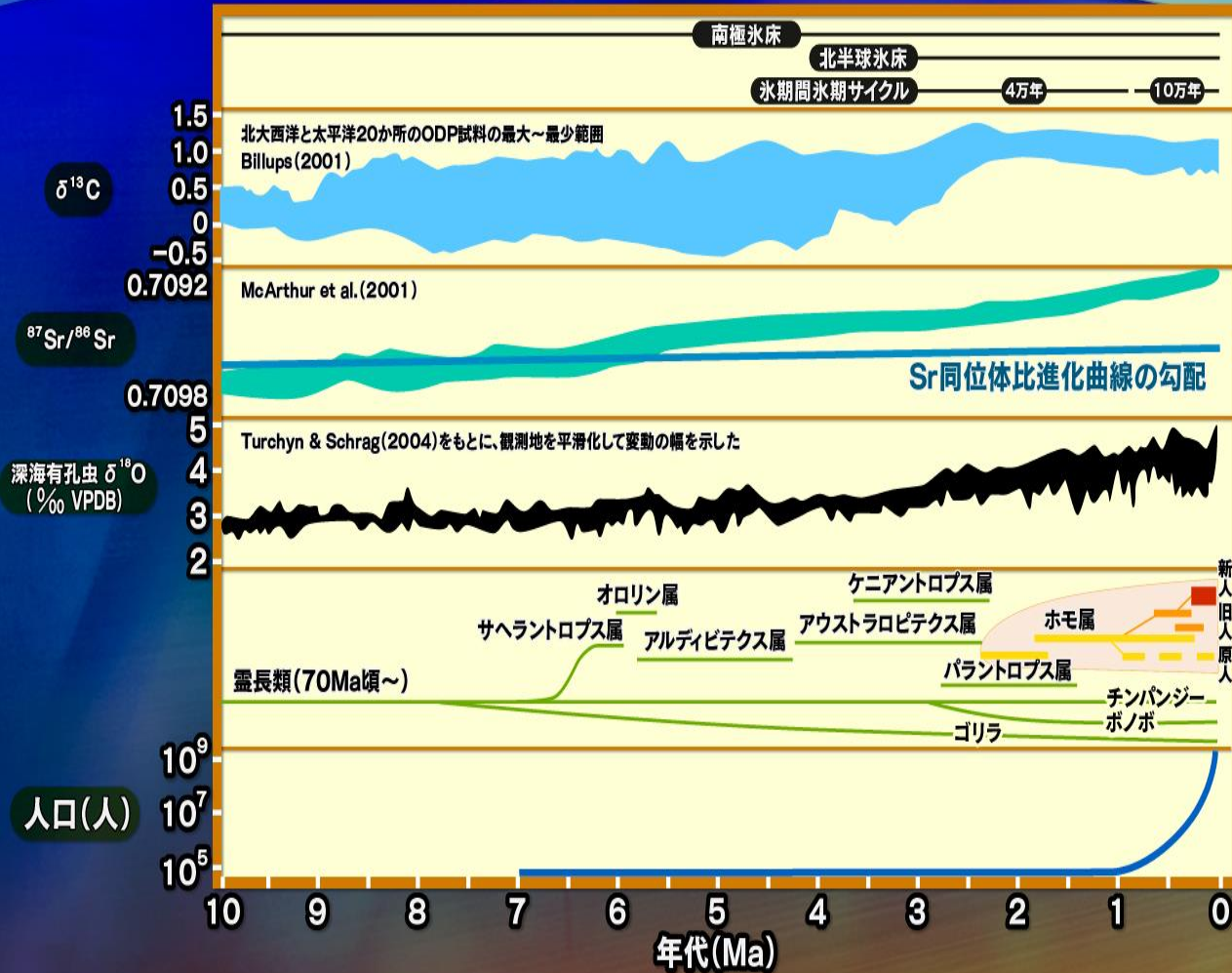
2 文明の歴史

3 文明の近未来（自然変動と国際社会）

地球史20大事件



過去1000万年の概要



第4の生物 人類の誕生

① 世界拡散

(大型多細胞生物では人類だけが赤道から両極まで拡散)

② 文明の構築 (科学と技術の発明)

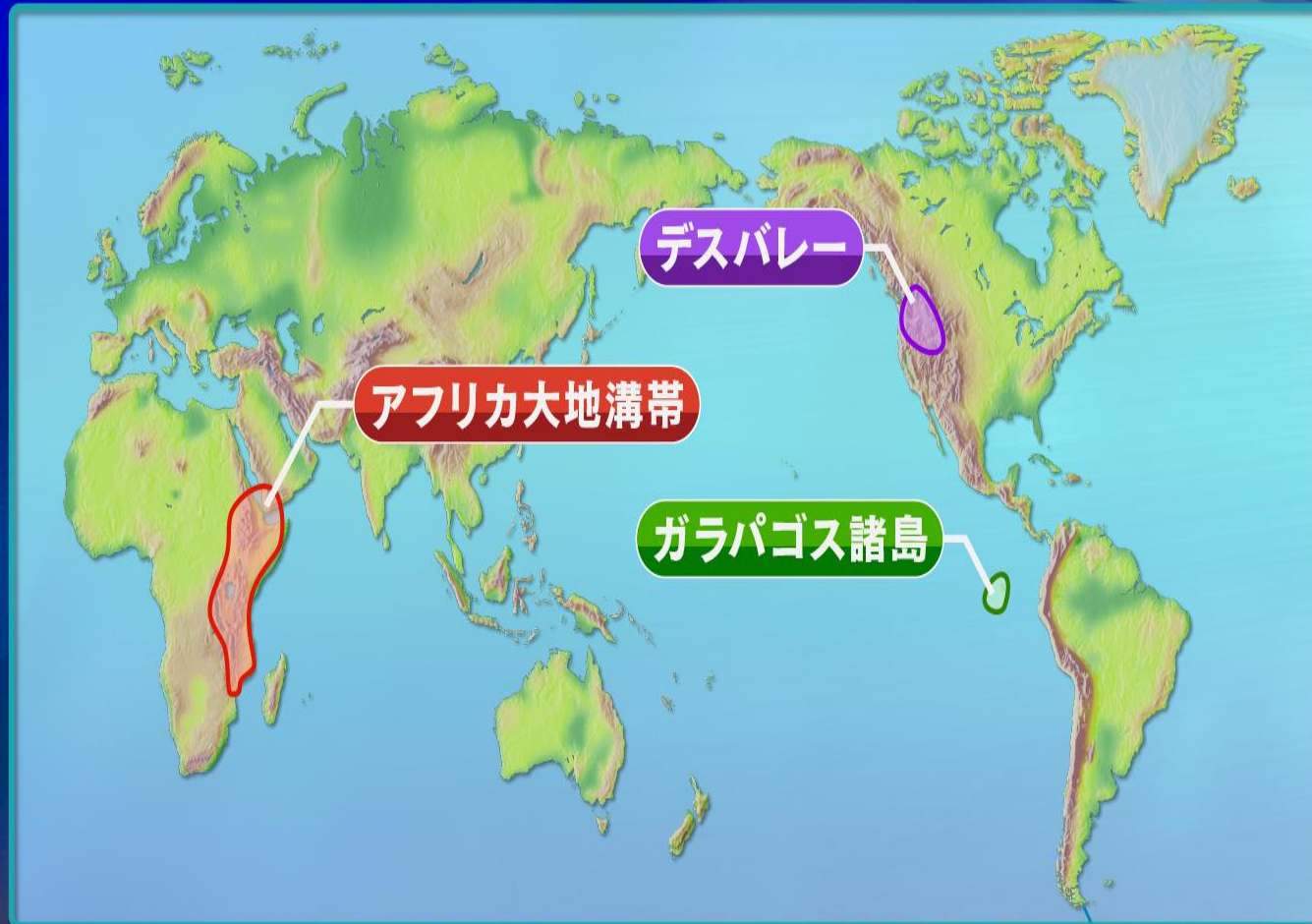
③ 道具を作るために道具を製作

(例:一万回のステップで車、宇宙船をつくる)

④ 脳の発達 (1~3を可能にした)

さらに指数関数的に進化発展中 ➡ その未来は、なにか？

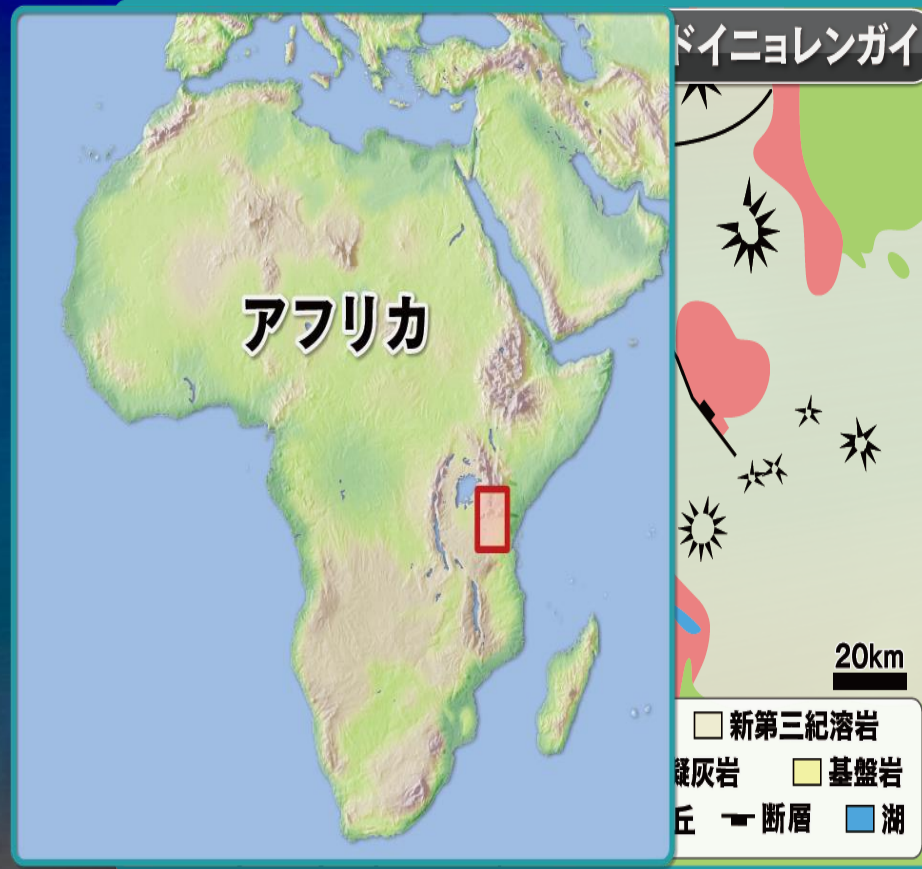
現在進行中の進化のスポット



山本(2010)に加筆修正

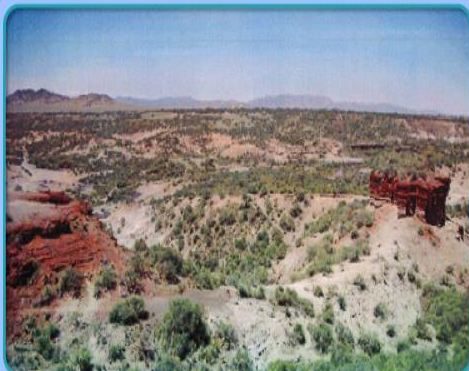
進化のホットスポット

HiRマグマ: 栄養塩供給 (カーボナタイト) と局所絶滅 (ステムエボリューション)



人類の誕生場

新種は大陸のリフトで生まれる



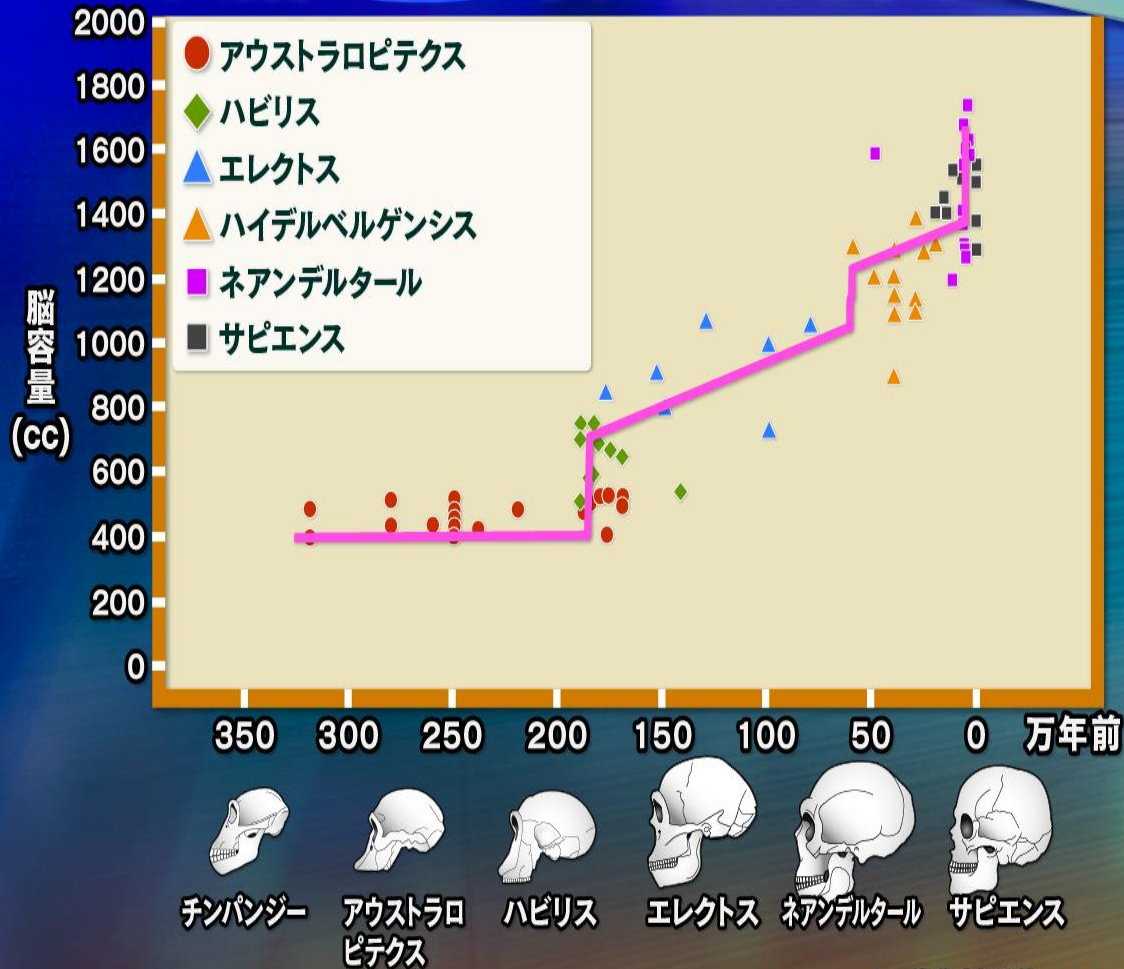
オルドバイ溪谷

- 地溝帯
- チンパンジーとゴリラの分布域
- ボノボの分布域
- アウストラロピテクス属の化石のおもな出土域



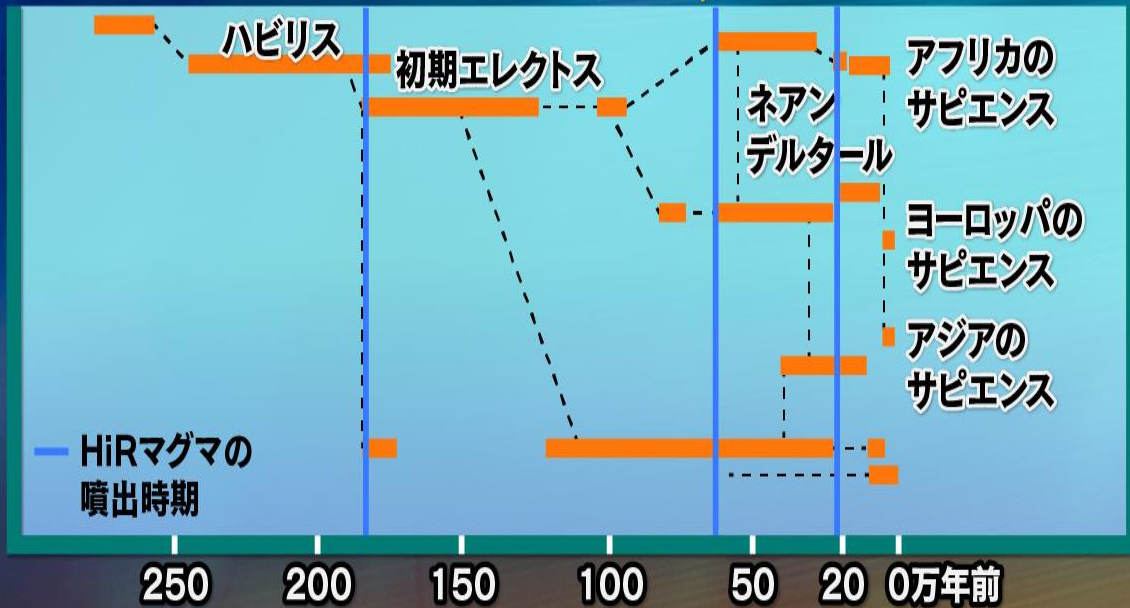
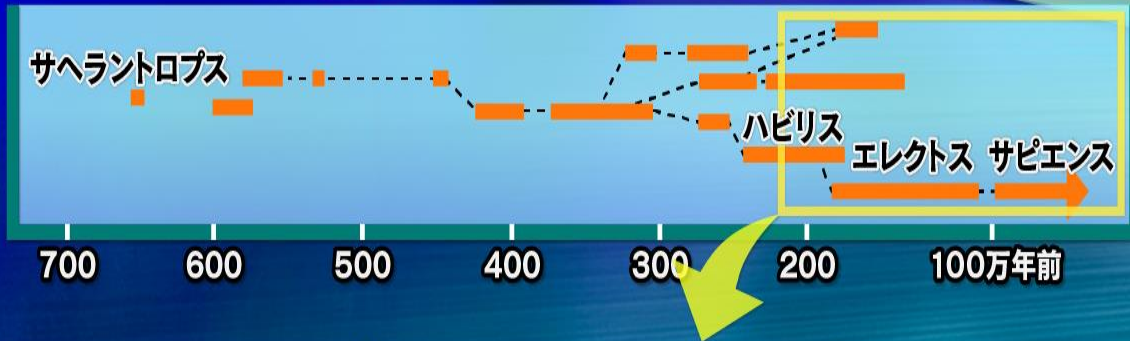
0.2Ma
0.6Ma
1.8Ma
7Ma
HiRマグマの噴出時期

人類の脳の不連続的な巨大化



ヒトの進化(齋藤他、2006、岩波書店シリーズ進化学5)

人種の多様化の年代

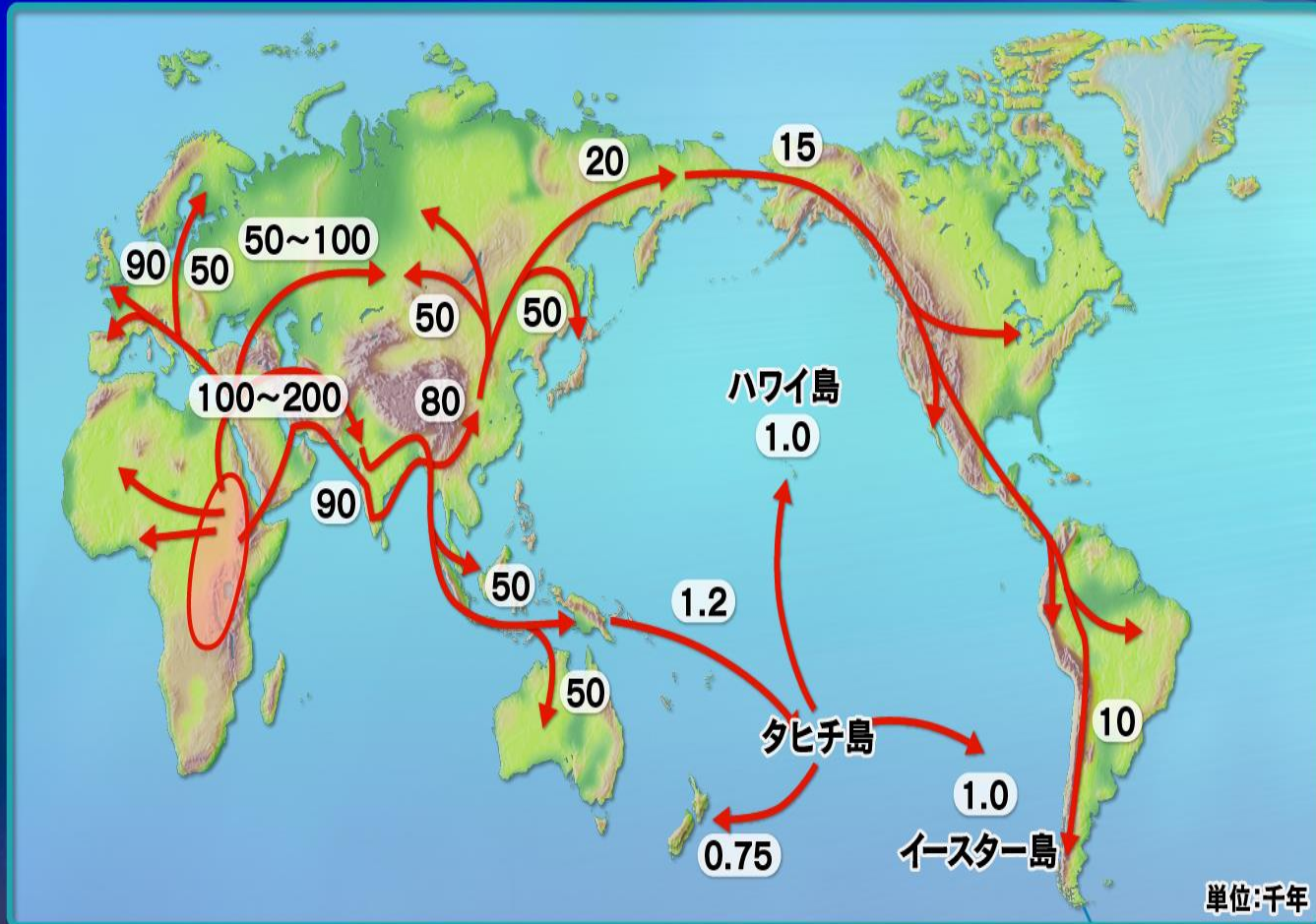


HARゲノム領域

HARとは

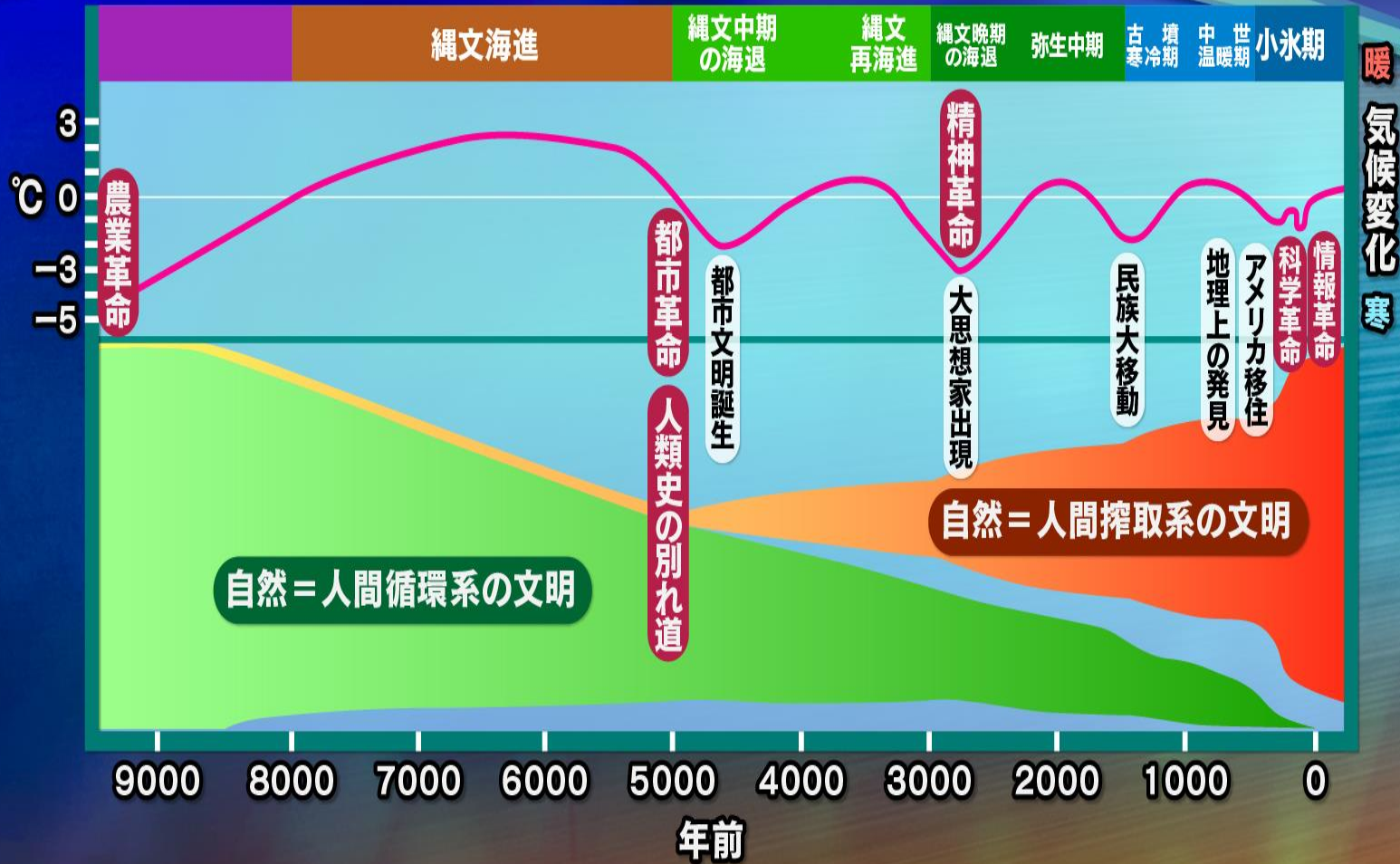
- Human Accelerated Regionの略称
- 人と他の霊長類で差異が特に著しいゲノム領域
(現在までに202個報告)
塩基配列の違いが極めて大きい
 - ➡ 分子進化の速度が異常(突然変異の集中)
- 大脳皮質の形成と発達を支配する
- HiRマグマにより進化したと考えられる(化石証拠との照合)
 - ➡ 言語によるコミュニケーションと道具の利用

人類の拡散



ヒトの進化(齋藤他、2006、岩波書店シリーズ進化学5)に加筆

文明の画期と環境変動



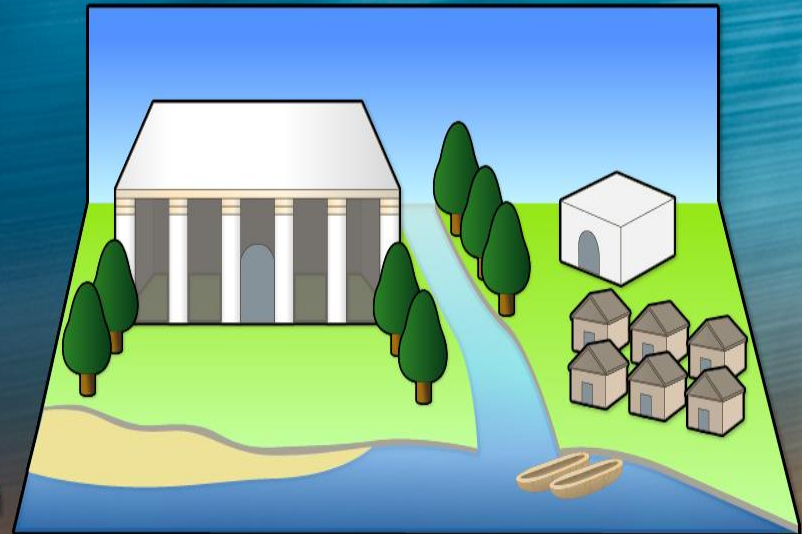
農業・牧畜革命 1万年前

- 飢餓からの解放と
人口増加の開始



都市革命 5000年前

- 都市・国家の発明
(職業分化、経済、文字、記録媒体、
法律、裁判、警察、共同体の組織)
- 国家闘争の開始



宗教・哲学革命：2400～2000年前

共同体で生きる知恵の発露：精神革命

	リーダー	国民	他国に対して
王政国家	国王(世襲)	不自由・不平等 人権抑圧	——
宗教国家	宗主 政治と宗教が一致	人権抑圧 不自由	——
軍国覇権主義国家	独裁・世襲 一党独裁	不自由・不平等 人権侵害	攻撃侵略して領土化 国民を奴隷化
民主主義国家	国民から選挙 で選ばれる	自由・平等 基本的人権	——

産業革命 300年前

- エネルギー消費の
加速と物質文明の構築
- ➡ 世界人口の
爆発的増加の開始



コンピューター (情報)革命

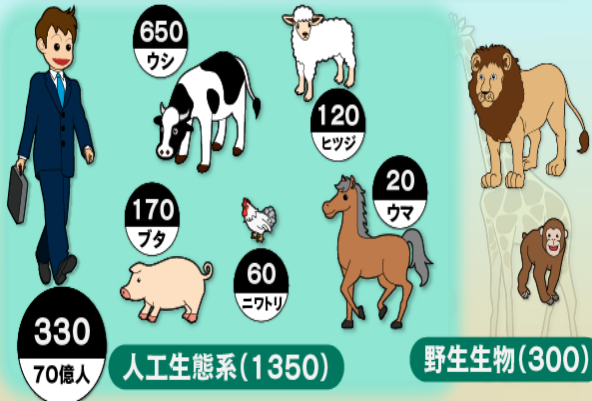
20世紀

- インターネットの普及に伴う
世界の縮小化
宇宙への進出

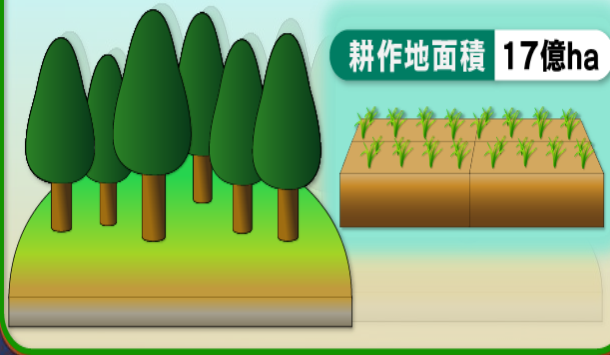


地球生態系はすでに人工生態系

現在の地球生態系 1650(Tg)

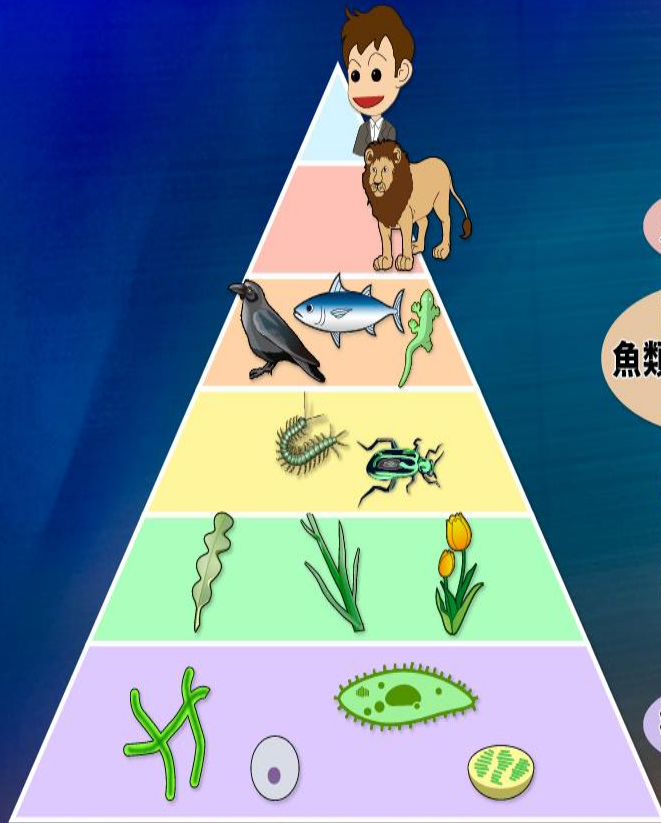


現在の森林面積 40億ha



不安定な生態ピラミッド

300年前まで



現在



人間

ホ乳類

両生類

魚類

鳥類

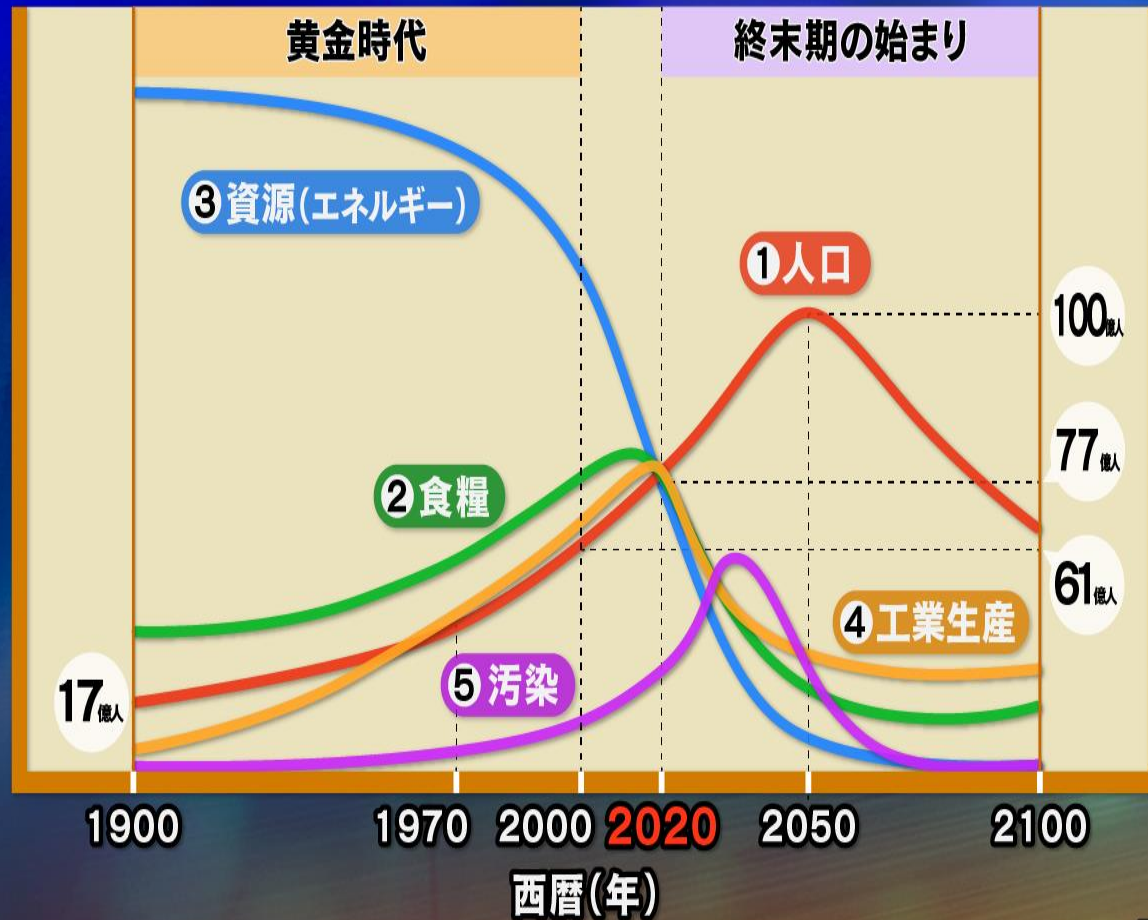
爬虫類

昆虫

植物

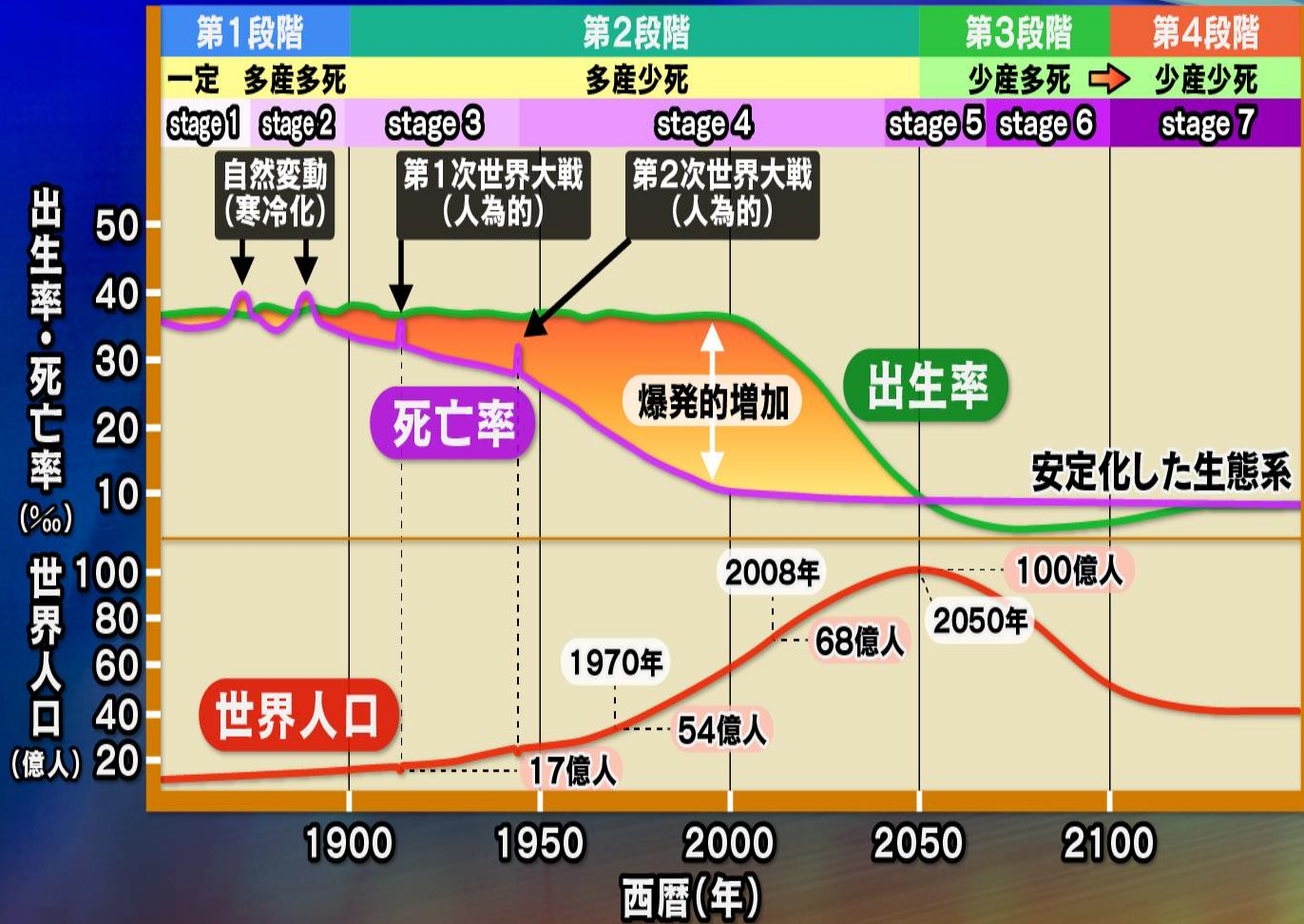
微生物

2020年問題と2050年までの課題



ローマクラブ(1972)

人口問題



食糧増産の努力

① 品種改良

19世紀の交配という手法

➔ 突然変異を利用した方法から遺伝子組み換えまで

- 気候変動と病気に強い品種の開発
- 他の生物(昆虫)の撃退

② 食糧生産の速度の加速

成牛になるまで5年~1.5年へ短縮

③ あらゆる生物の食糧化

特に昆虫の食糧化

新エネルギー

- 太陽エネルギー
- 風力、地熱、潮汐、温度差発電
- バイオ燃料
 - 石油生成バクテリア
 - 熱帯のヤシからとれる植物オイル
- シェールガス(石油) → 今後200年OK

エネルギー消費の効率化

- 省エネ自動車、電気自動車、水素自動車
- スマートグリッド(エネルギー消費システムの効率化)
- 巨大都市の構造革命(エネルギー消費のミニマム化)

国家の形態

5000年前

4000年前

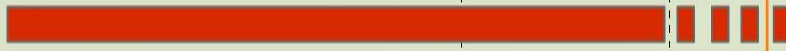
2000年前

300年前

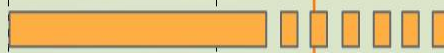
現在

21世紀

王政国家



宗教国家



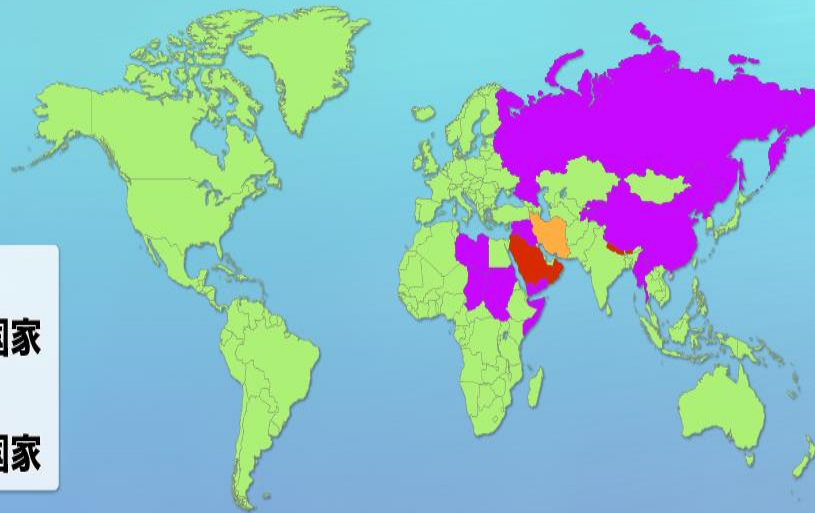
軍国覇権主義国家



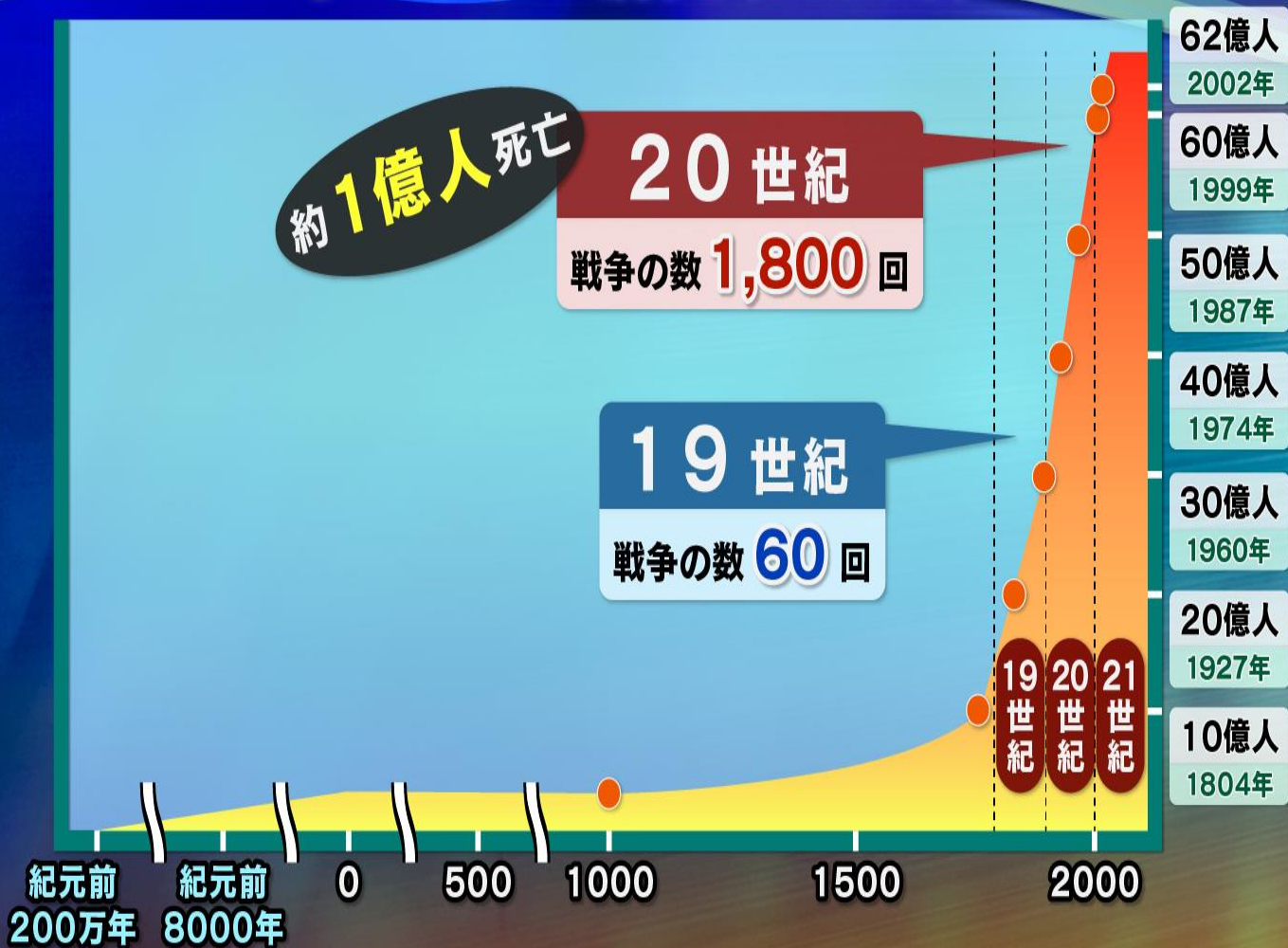
民主主義国家



- 王政国家
- 覇権軍事国家
- 宗教国家
- 民主主義国家



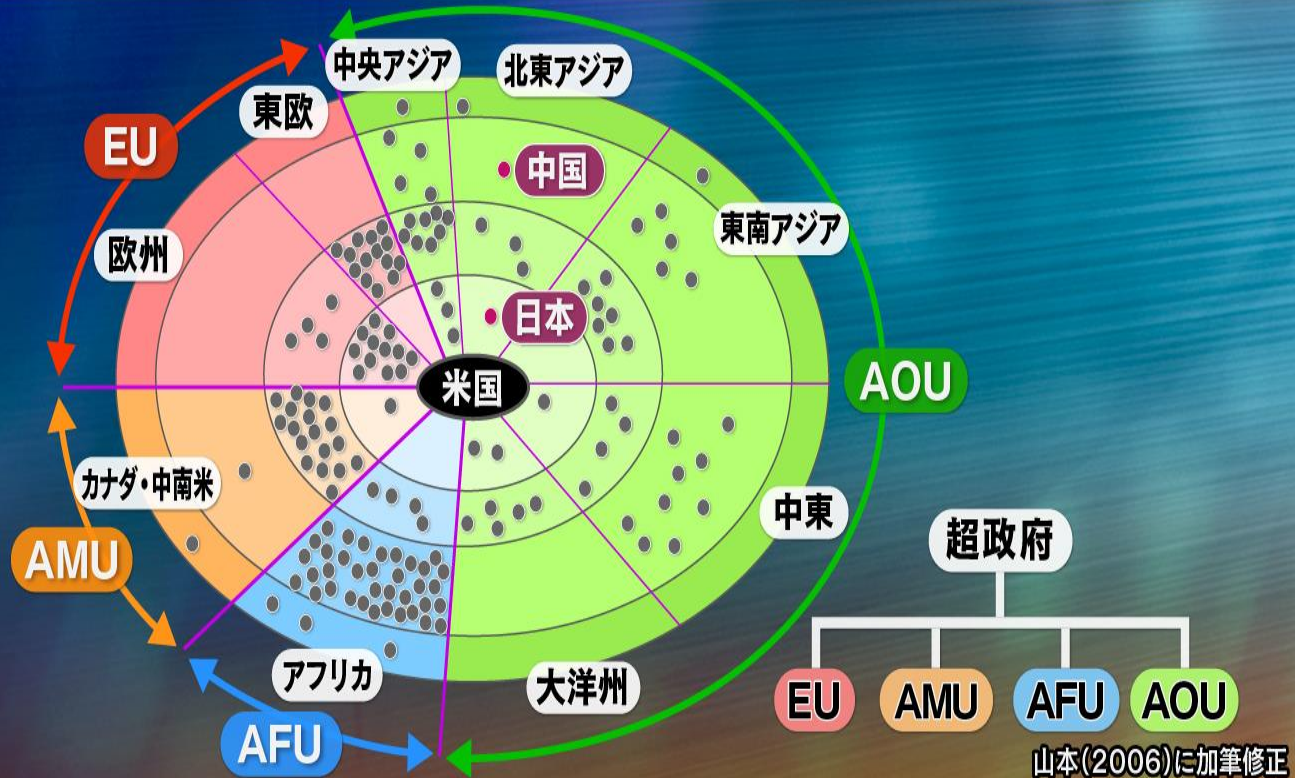
ラセットの研究(1994年)



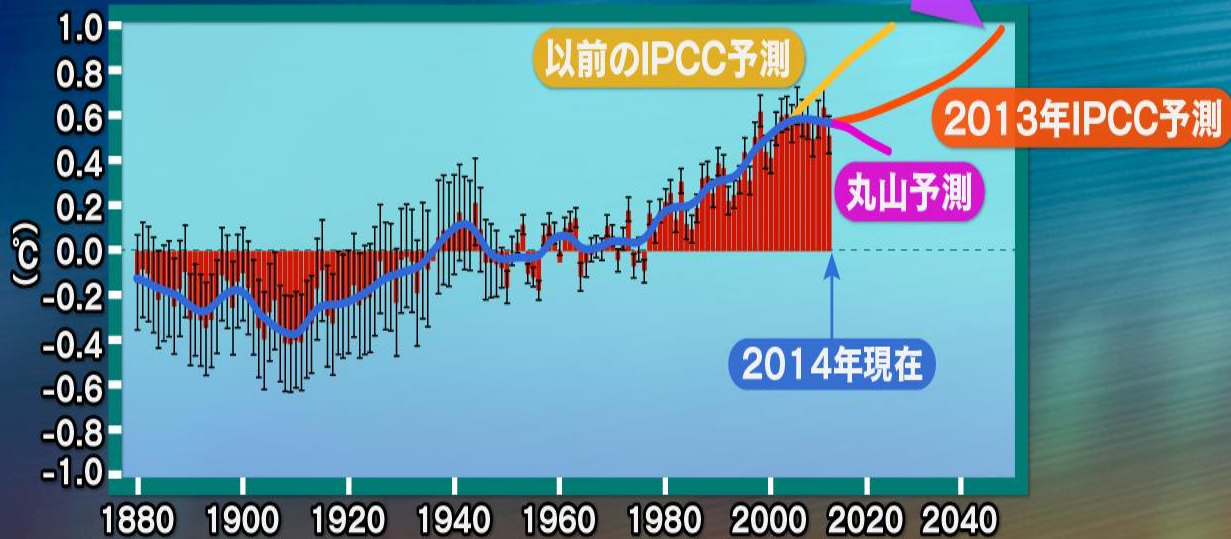
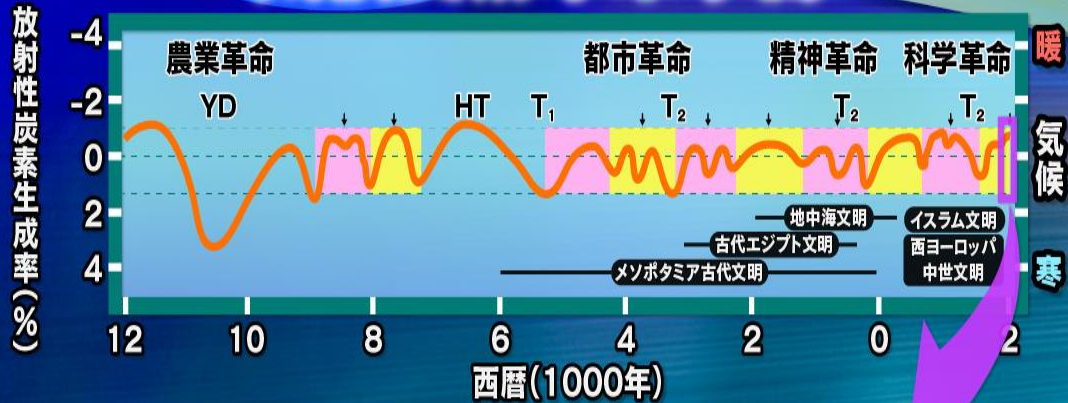
21世紀の国際社会の展望

インターネットの発明によって、世界が瞬時につながる
統一国家システムが機能しうる状況になった → 新しい国際社会秩序の構築

世界の地理空間における国民国家の民主化度と経済発展及び超政府ユニオン連合モデル

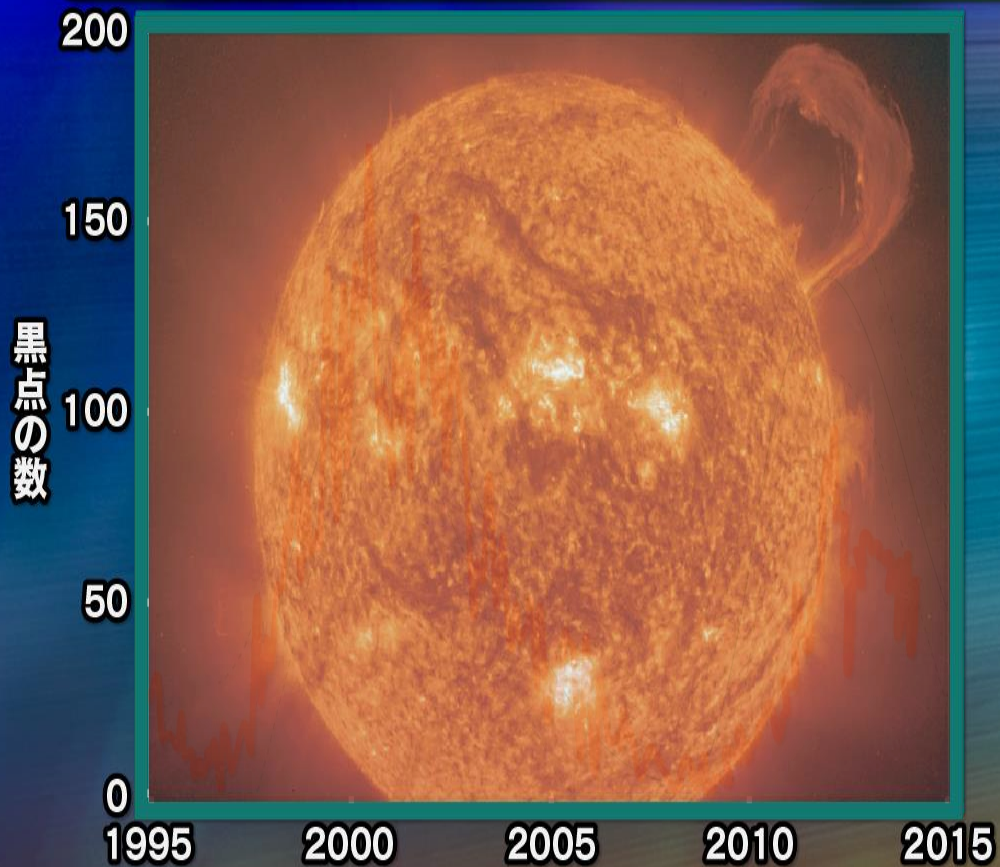


気候変動未来予測



スーパーフレアと現代文明の崩壊

キャリントンイベント再来 その時何が起きるか？



自己複製可能な人工生命体の出現

生命の起源の理解と人工生命学の発展の結果として、
奴隷としてのロボットの出現

さらに、ロボットが進化すると、ロボット自身が
自己複製可能な機械をつくる時代が来る

その時までが生物としての人類の役割

人工生命体は宇宙に進出して、新たな知的生命体の
時代が銀河というスケールで始まる

進化論

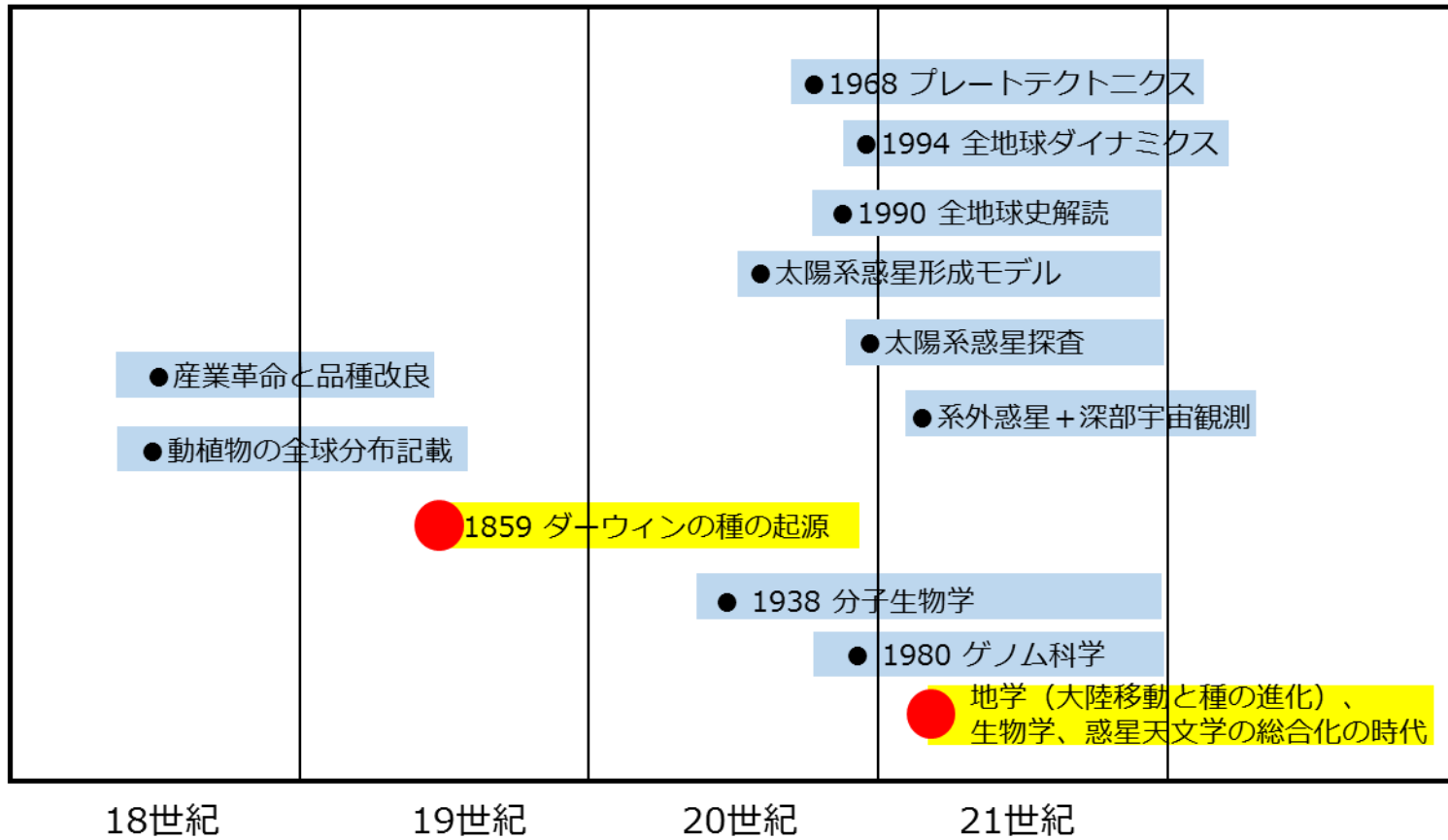
1. 生物学者が創り上げた進化論
- 2 総合科学として、化石、表層環境変動(宇宙まで)、大陸移動、ゲノム科学を組み込んだ新モデルを創ろう！

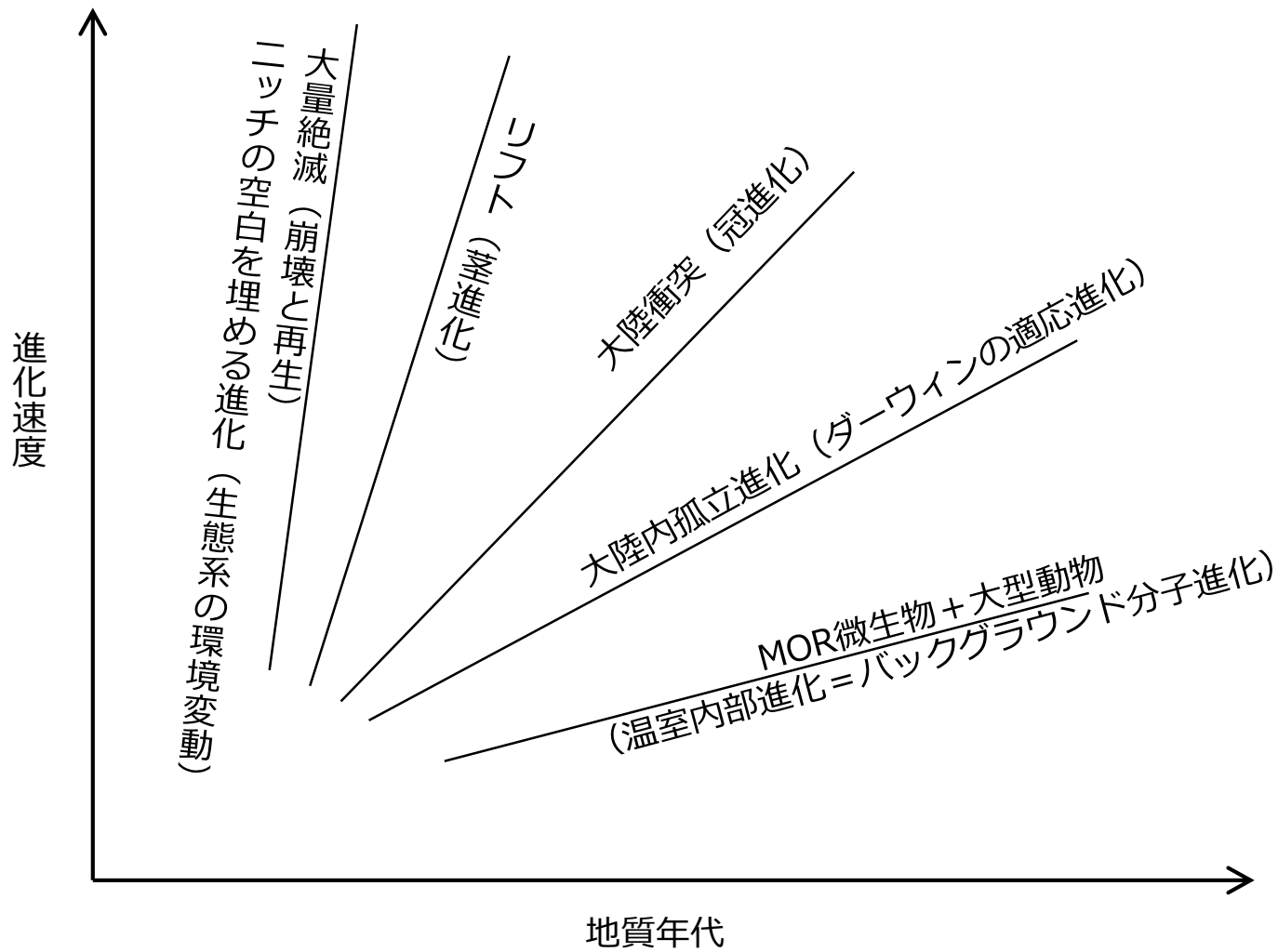
ダーウィン進化：自然淘汰
説：

バックグラウンドレベルの
進化

新しい進化論の構築

研究史と進化論の方法の変化





新しい生命進化史(本講義)の位置づけ

宇宙からゲノムまでの総合科学(俯瞰科学)



新しい生命進化論の構築

- ① 付加体地質学(第2回、3回):地球史解読の方法論
- ② システム変動(第4回)
- ③ ゲノム生物学(第10回、12回)
- ④ 大陸古地理総合図(第11回、第12回)

進化の3パターン



大陸リフトで起きる茎進化 (現在進行中の進化のホットスポット)

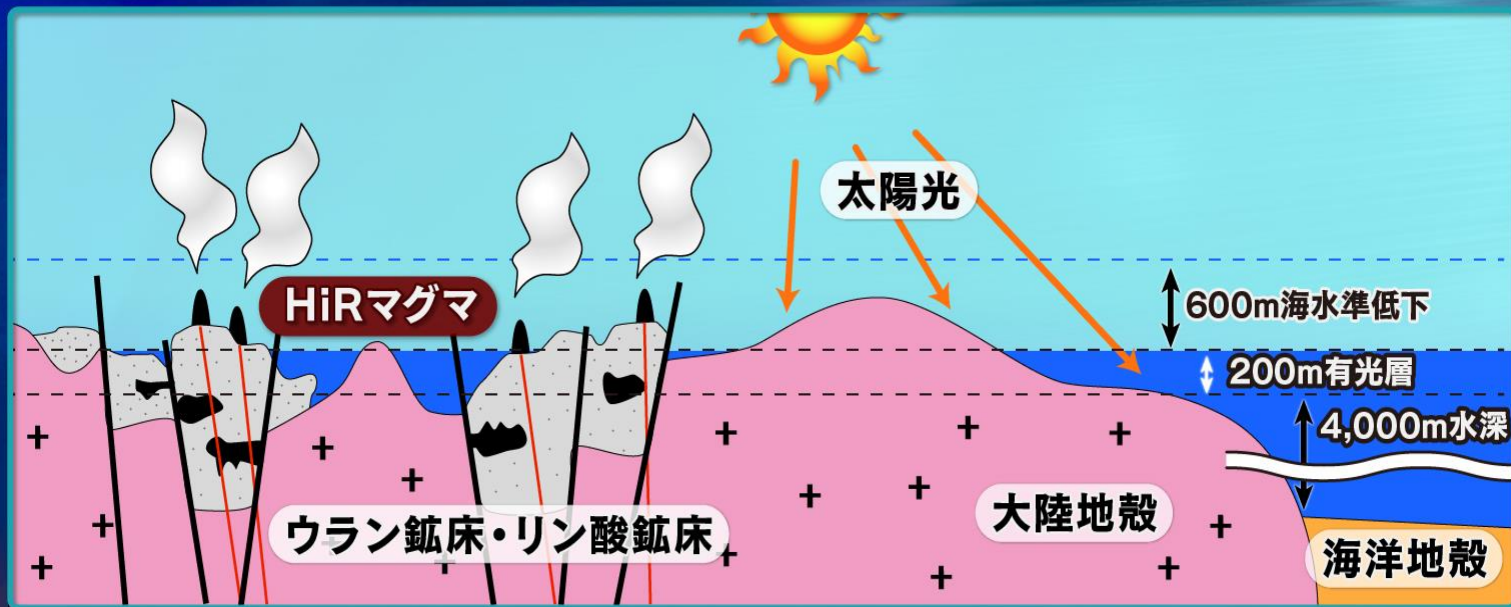
人類の誕生はアフリカ大地溝帯



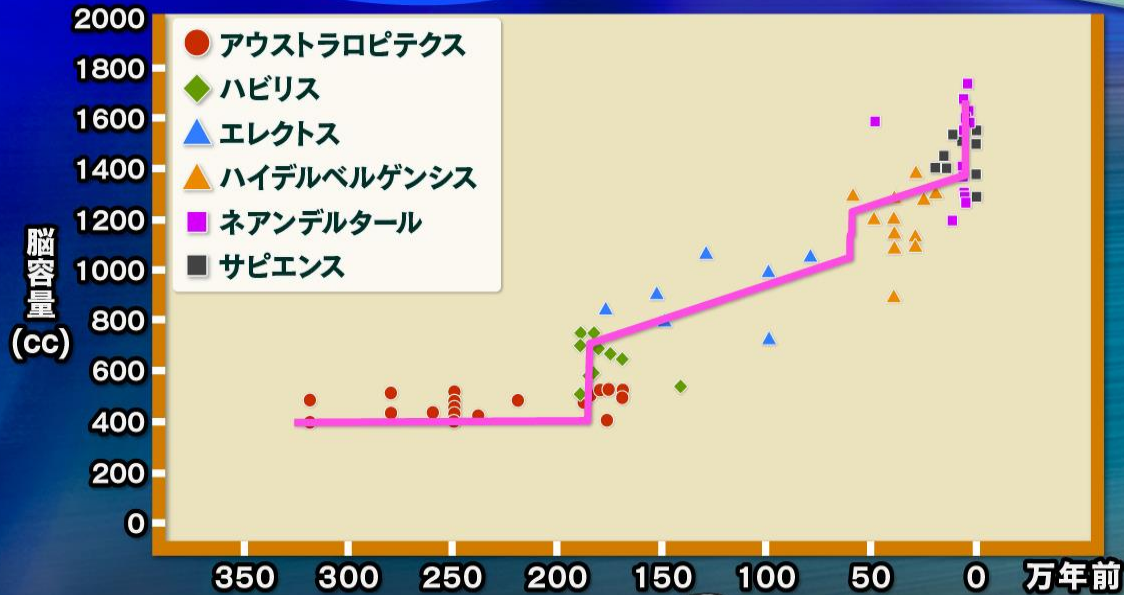
山本(2010)に加筆修正

莖進化:大陸リフトでのHiRマグマ噴出

- 局所絶滅による進化の加速
- ゲノム損傷と修復の繰り返しによる新種の誕生(莖進化)

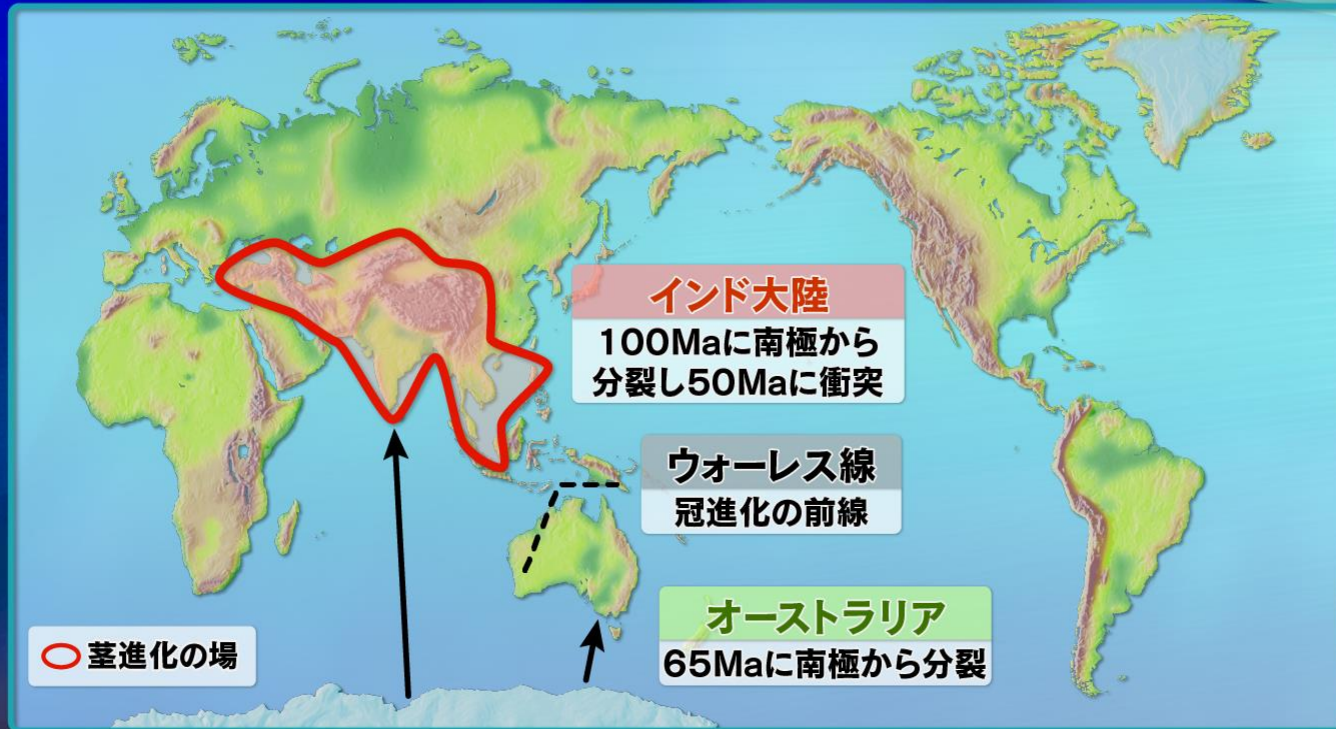


茎進化による人類進化：脳の不連続な巨大化



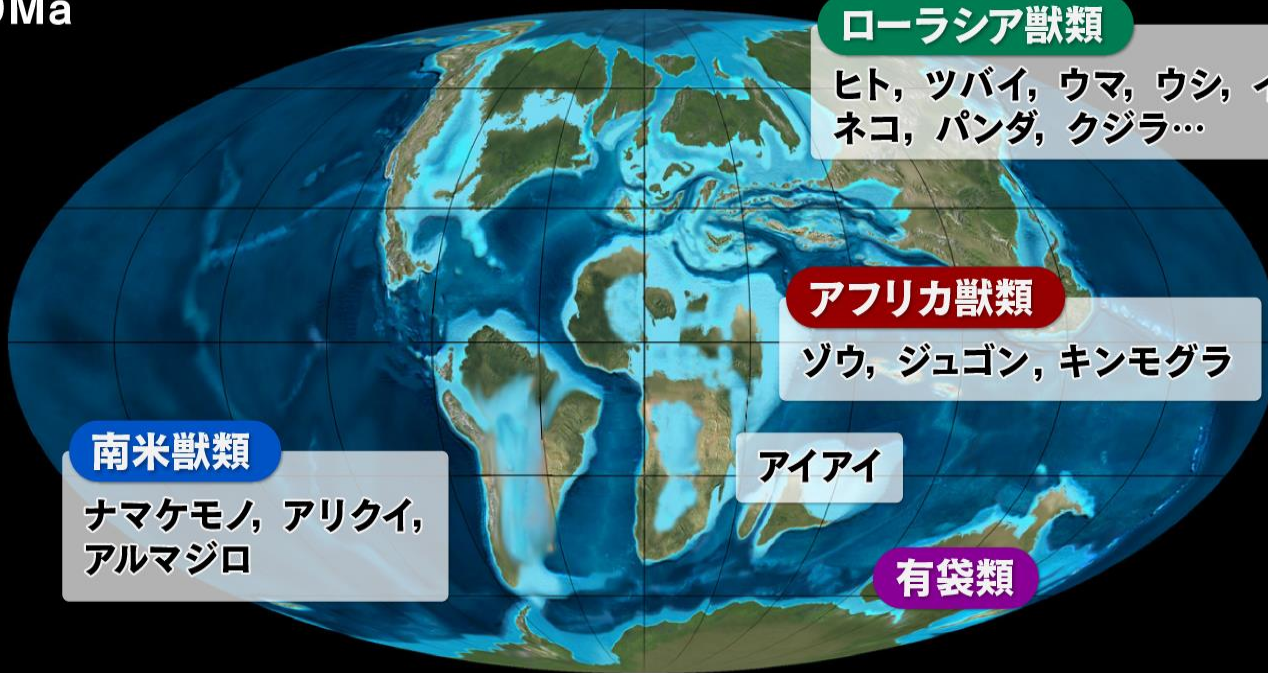
ヒトの進化(齋藤他、2006、岩波書店シリーズ進化学5)

大陸衝突によって進行する冠進化



大陸内部の孤立進化 (冠進化の前段階)

90Ma



ローラシア獣類

ヒト, ツバイ, ウマ, ウシ, イヌ,
ネコ, パンダ, クジラ...

アフリカ獣類

ゾウ, ジュゴン, キンモグラ

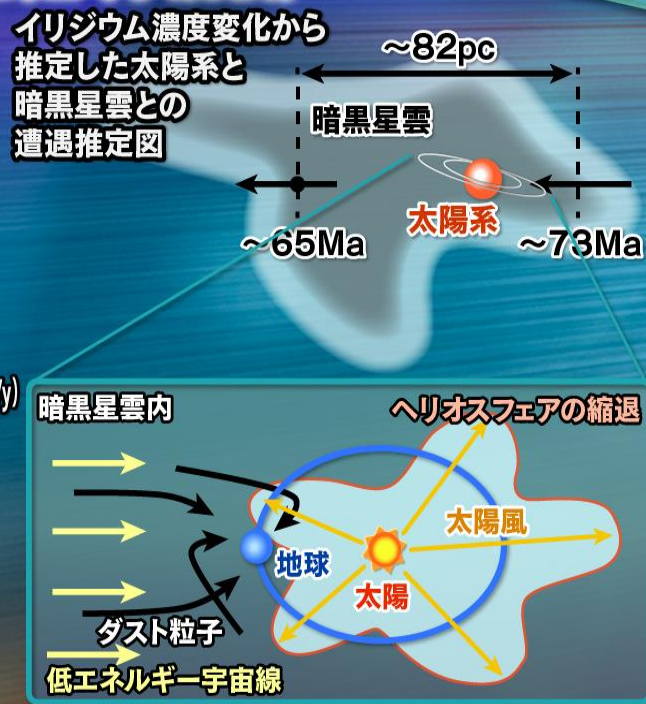
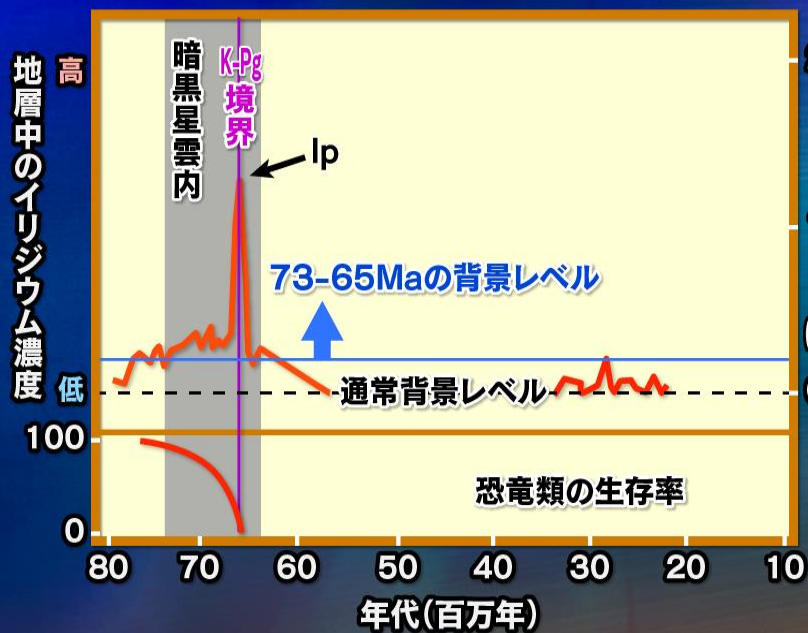
アイアイ

有袋類

南米獣類

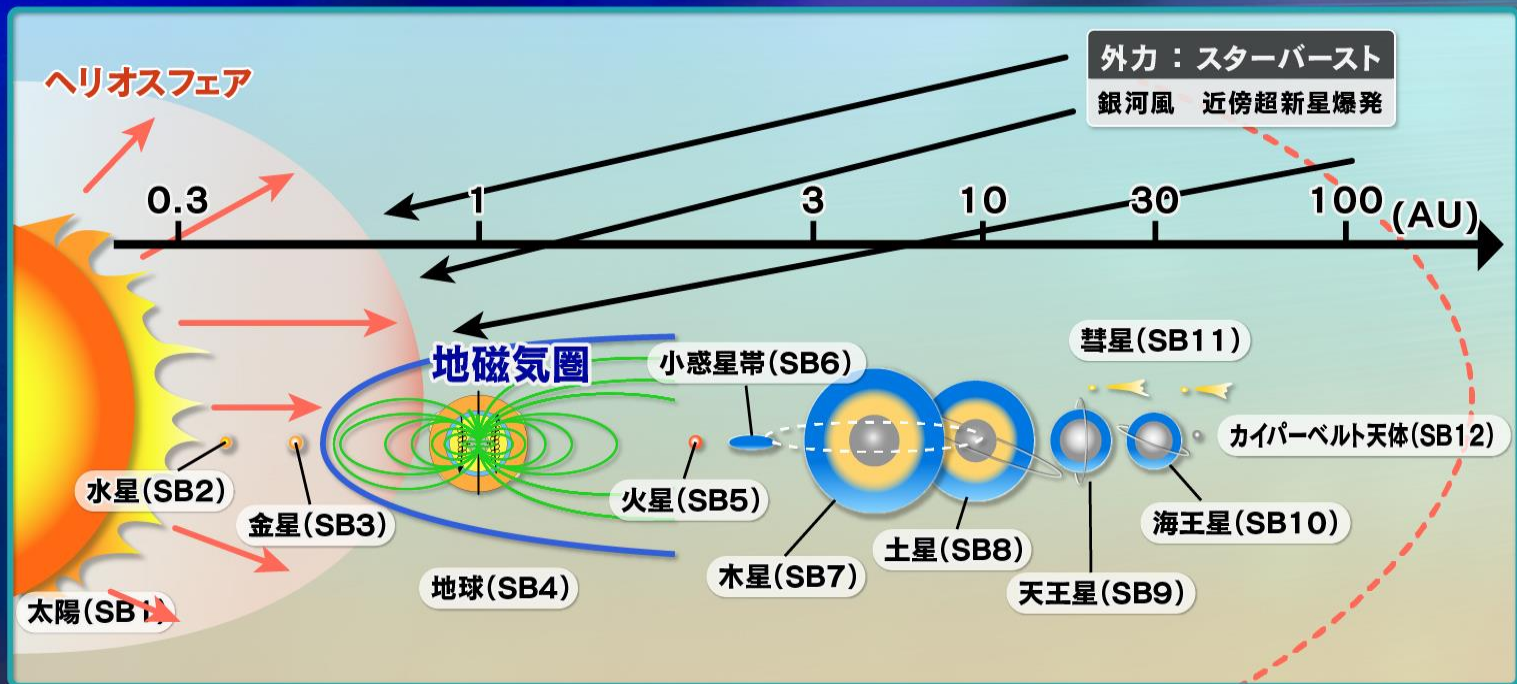
ナマケモノ, アリクイ,
アルマジロ

暗黒星雲と太陽系の遭遇に起因する 大量絶滅と進化の加速(小規模)

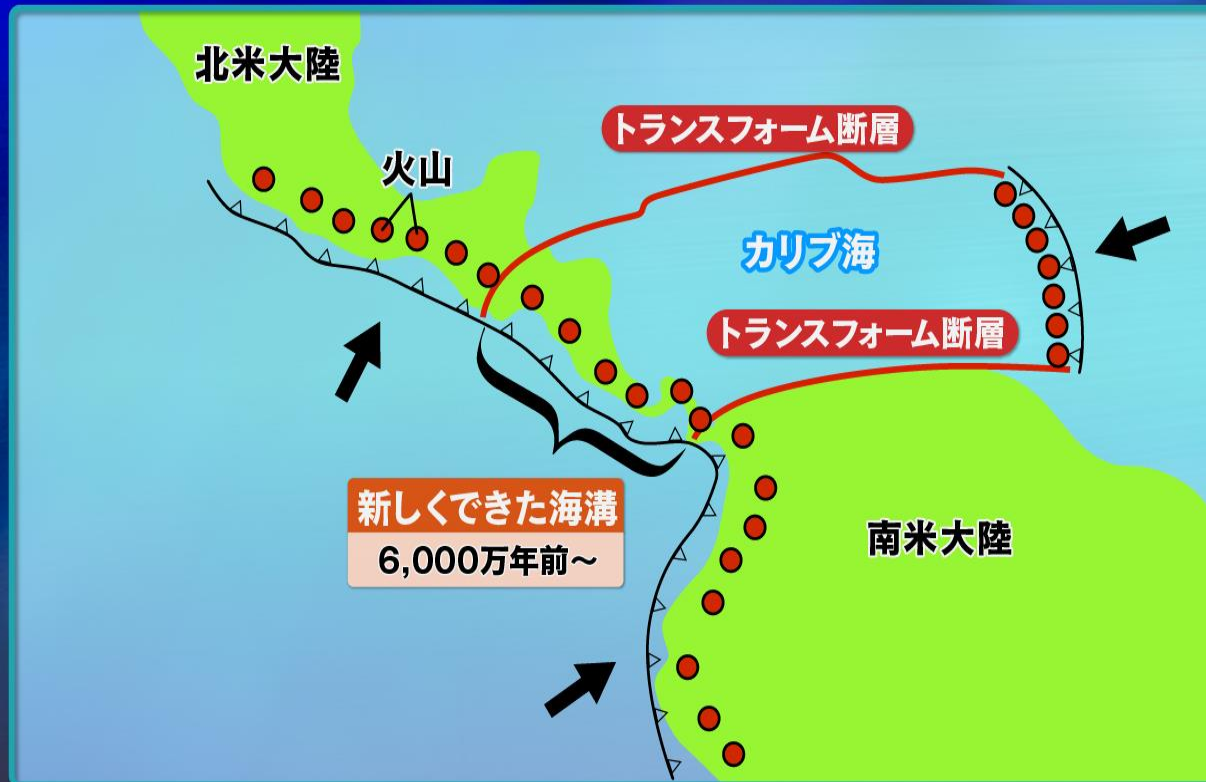


出典:Nimura et al (2015)

矮小銀河の衝突によるスターバーストに起因する 大量絶滅と進化の加速 (大規模)

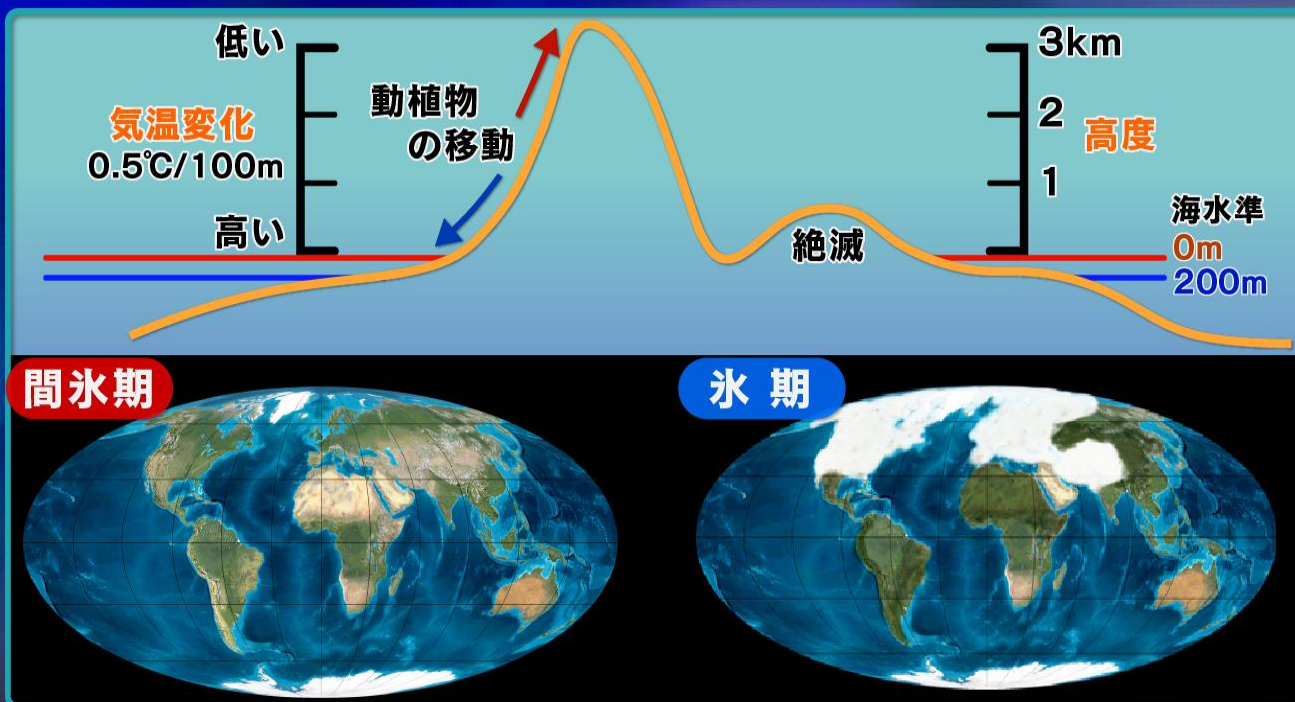


北米大陸と南米大陸の陸橋の完成による冠進化



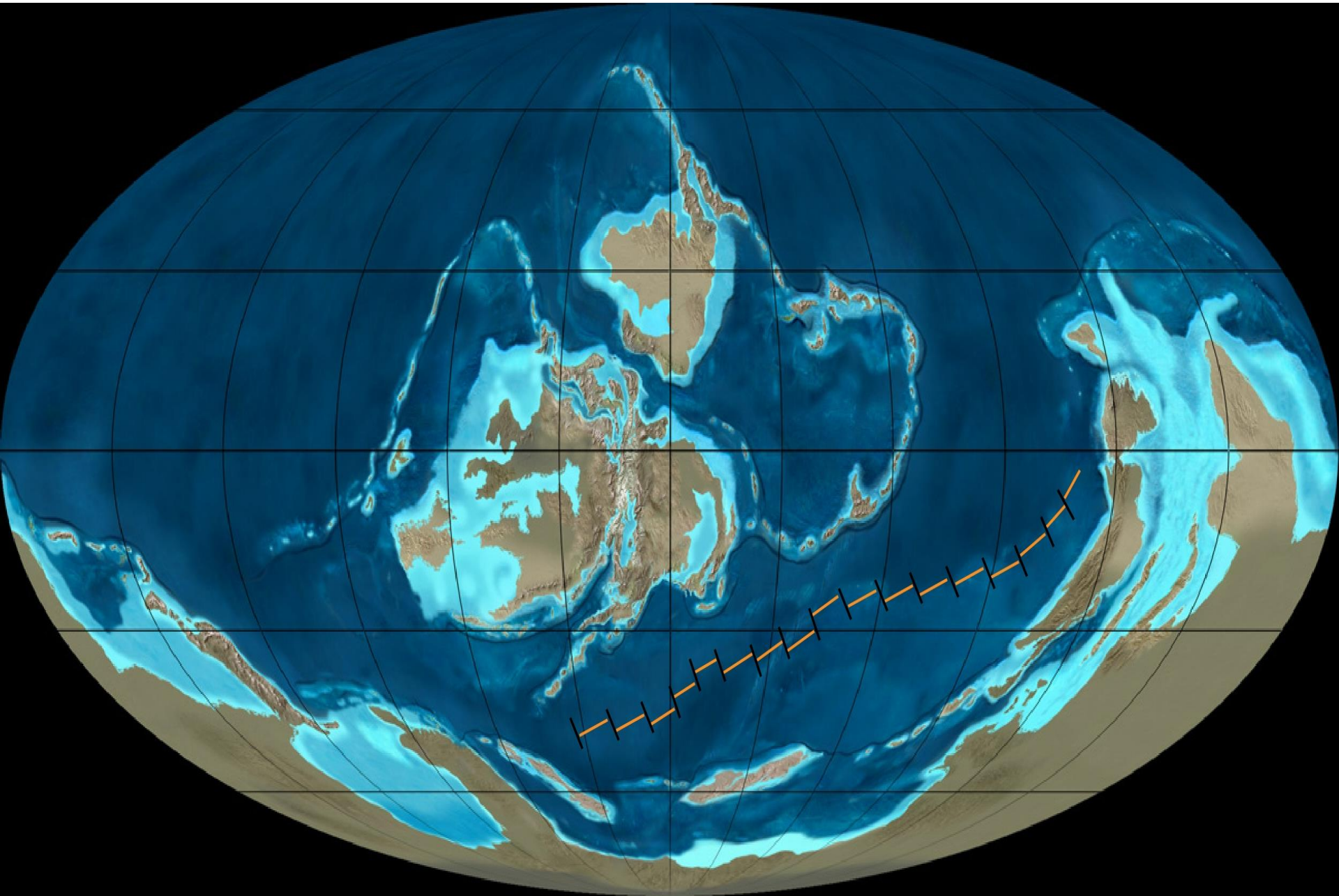
環境変動とダーウィン進化

第四紀変動が与えた短期間の極端な気候変動

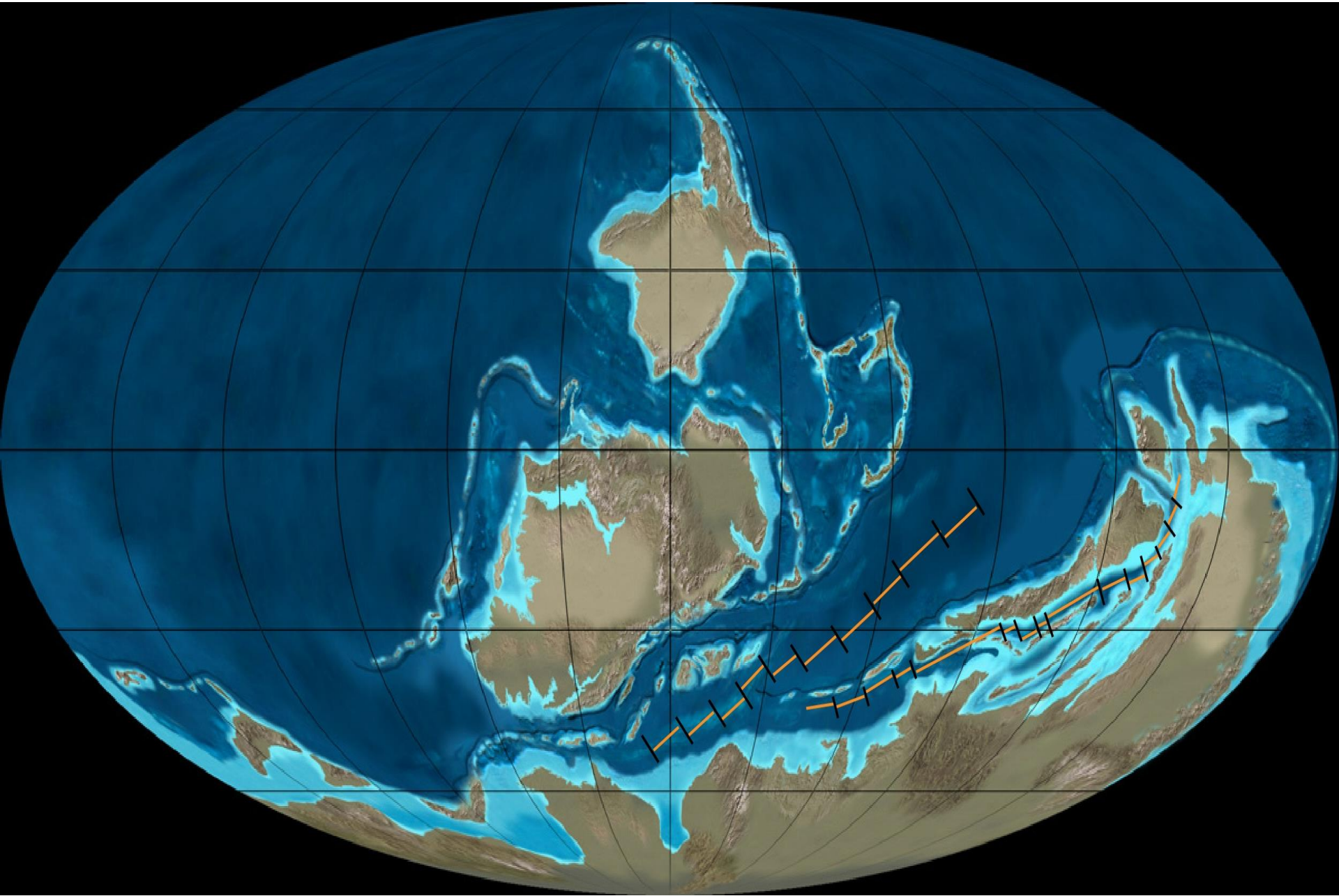


大陸古地理図と化石、及 びゲノム系統樹の合成

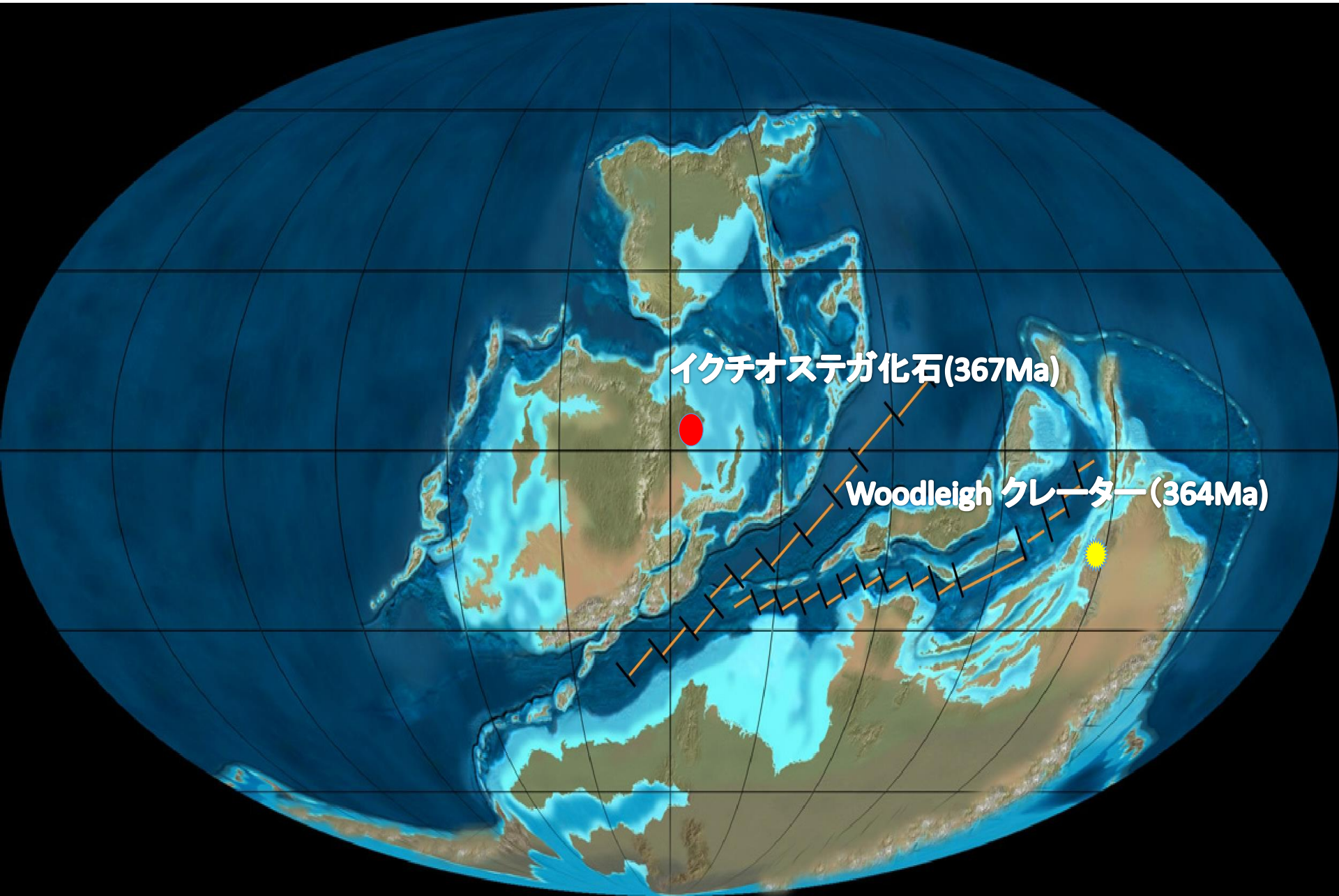
430Ma シルル紀



400Ma



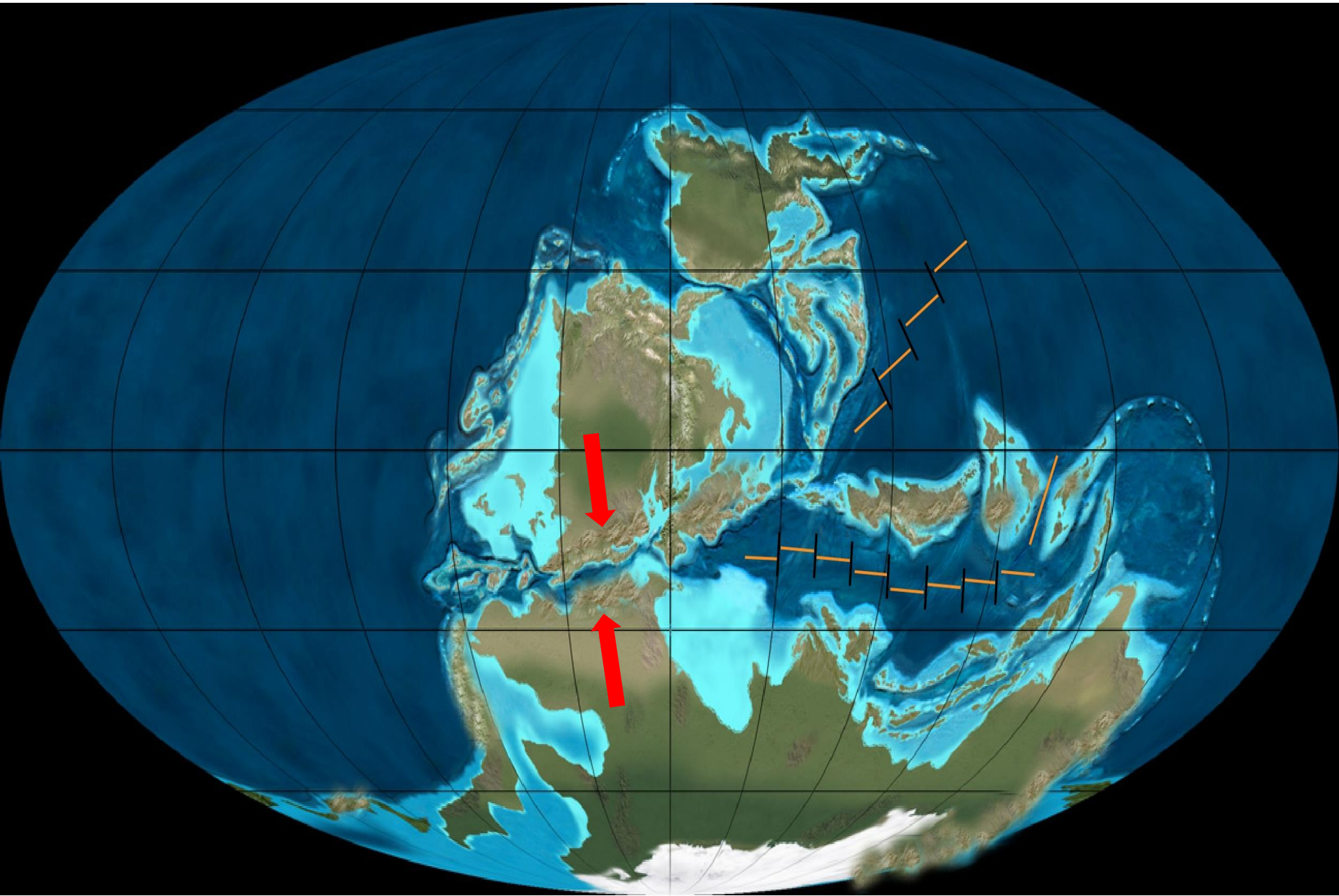
370Ma



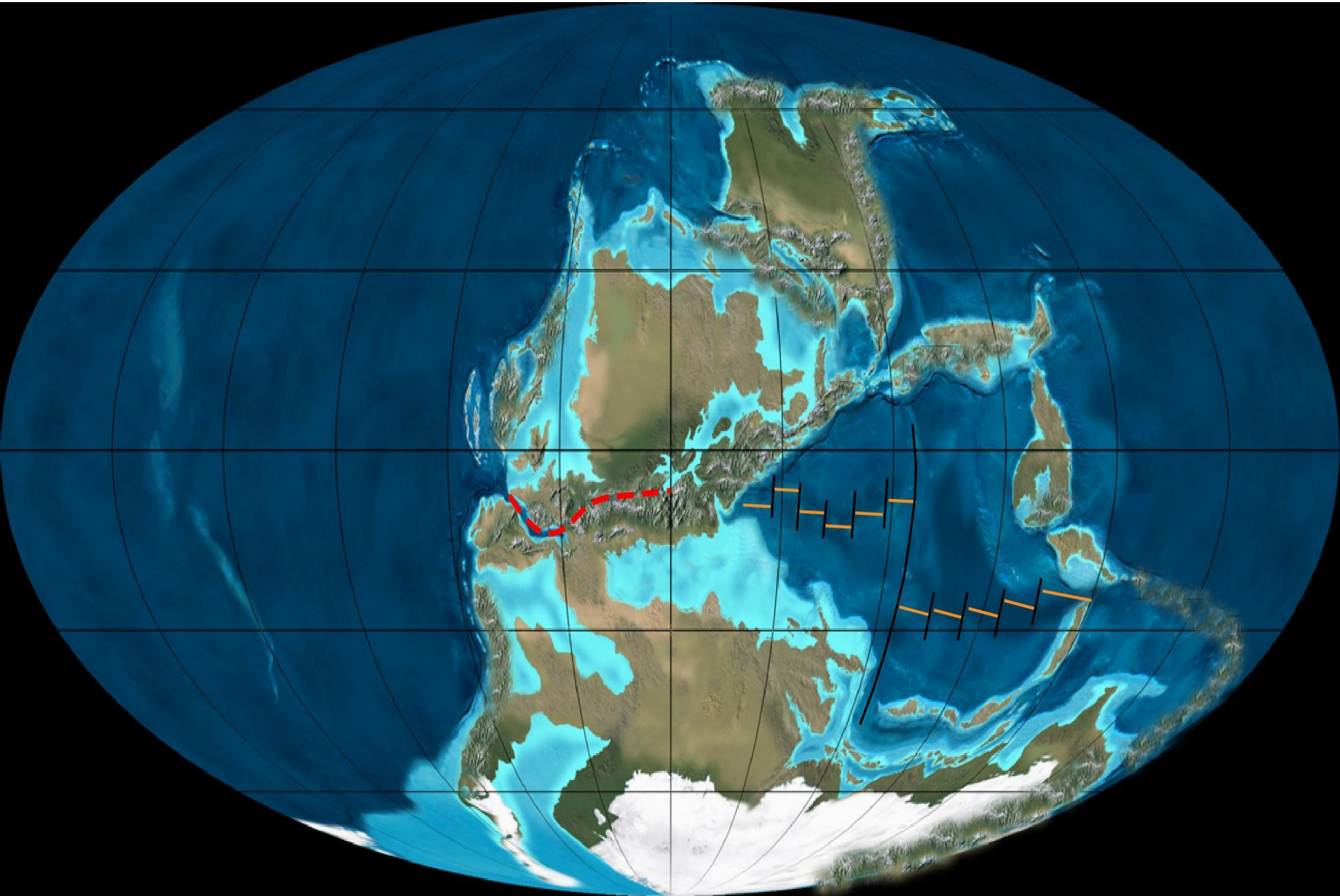
イクチオステガ化石(367Ma)

Woodleigh クレーター(364Ma)

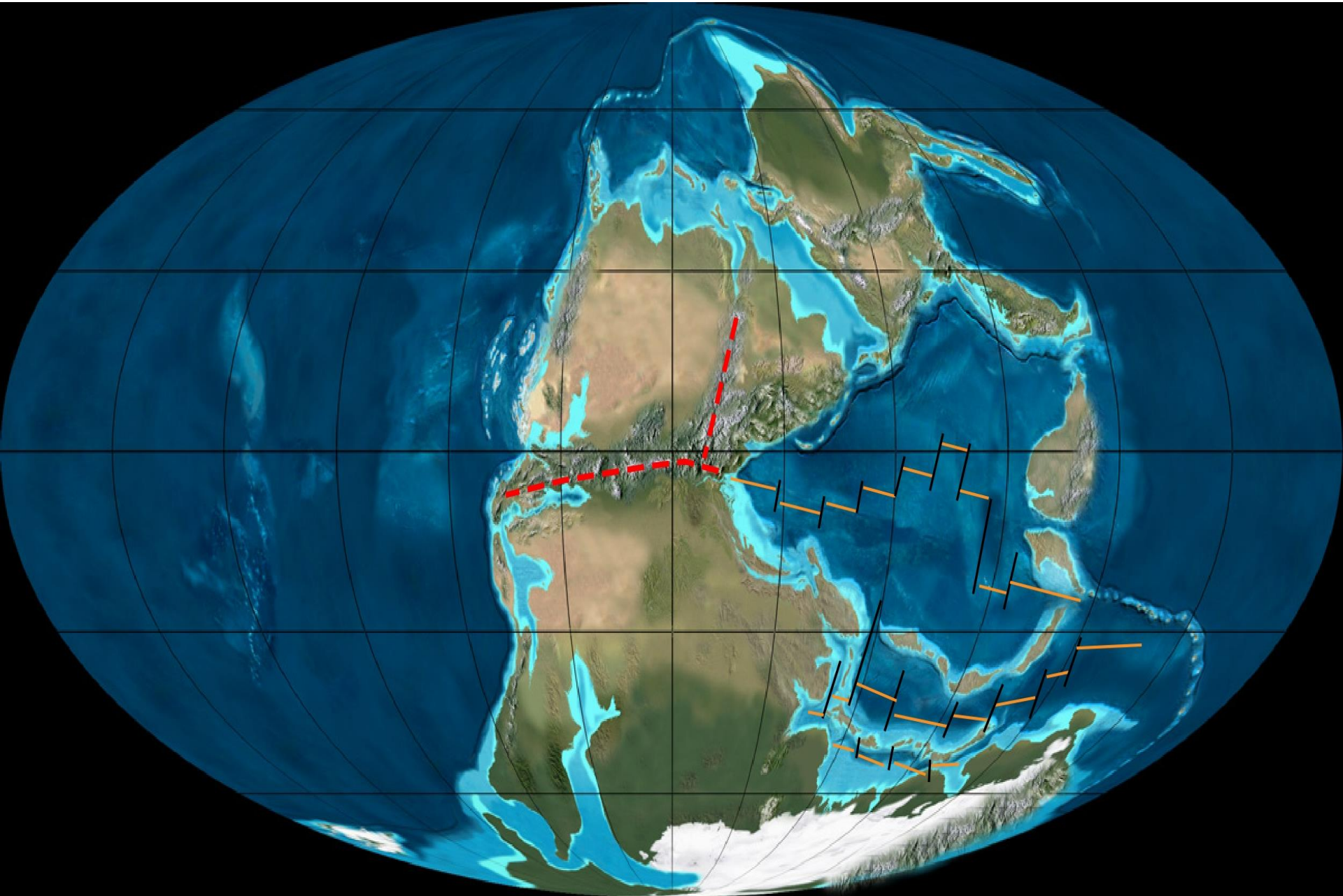
340Ma



300Ma

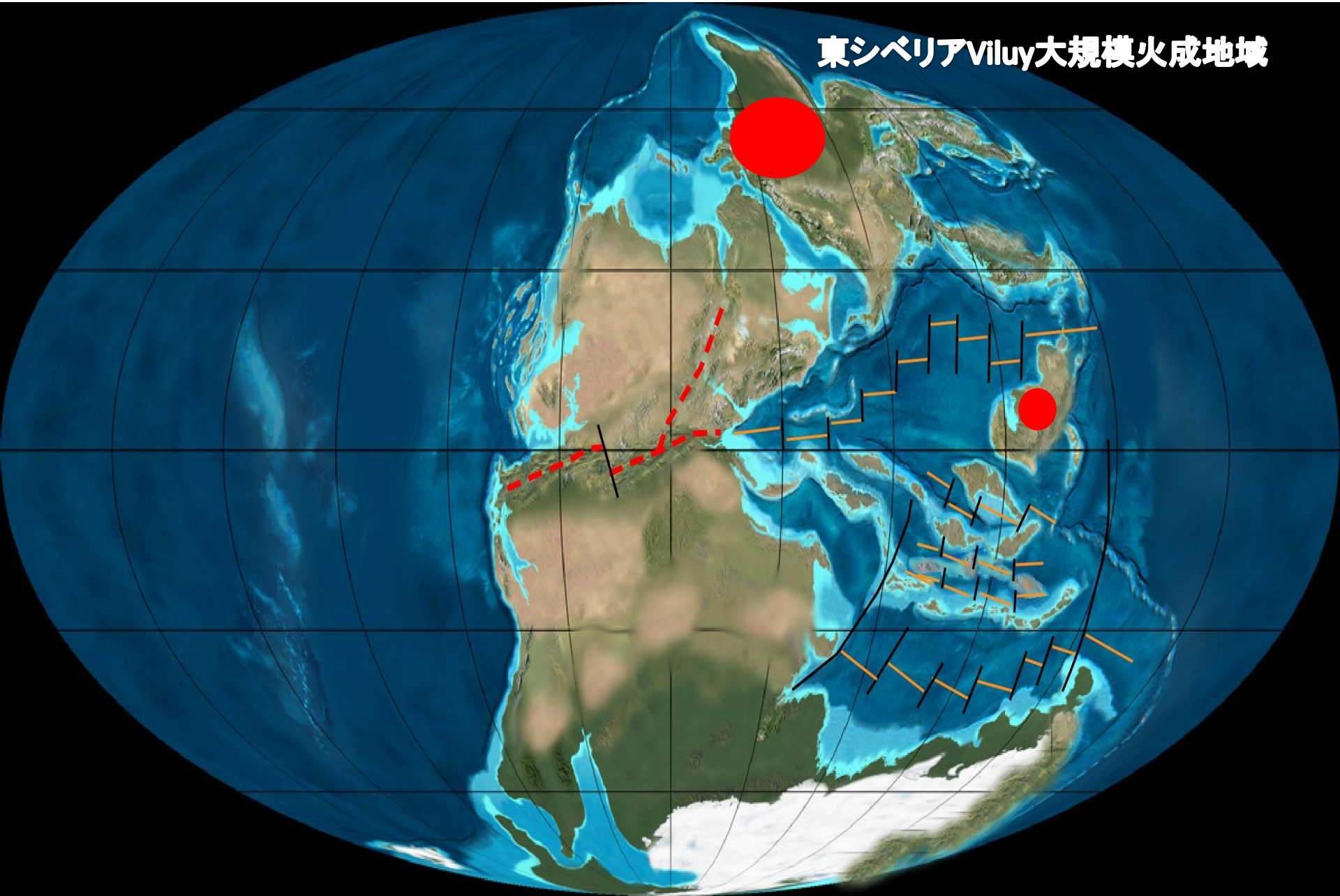


280Ma



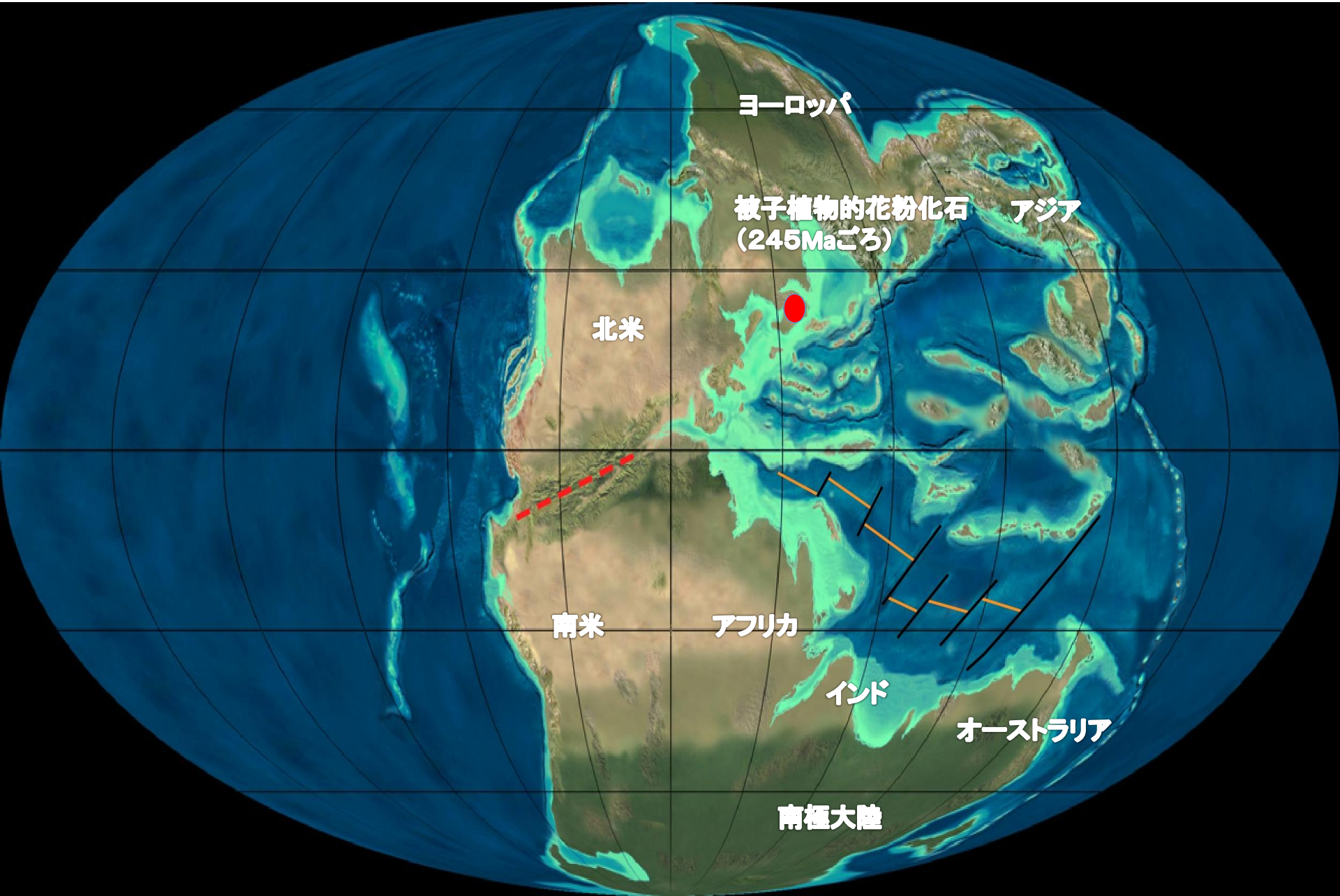
260Ma

ペルム紀末寒冷期

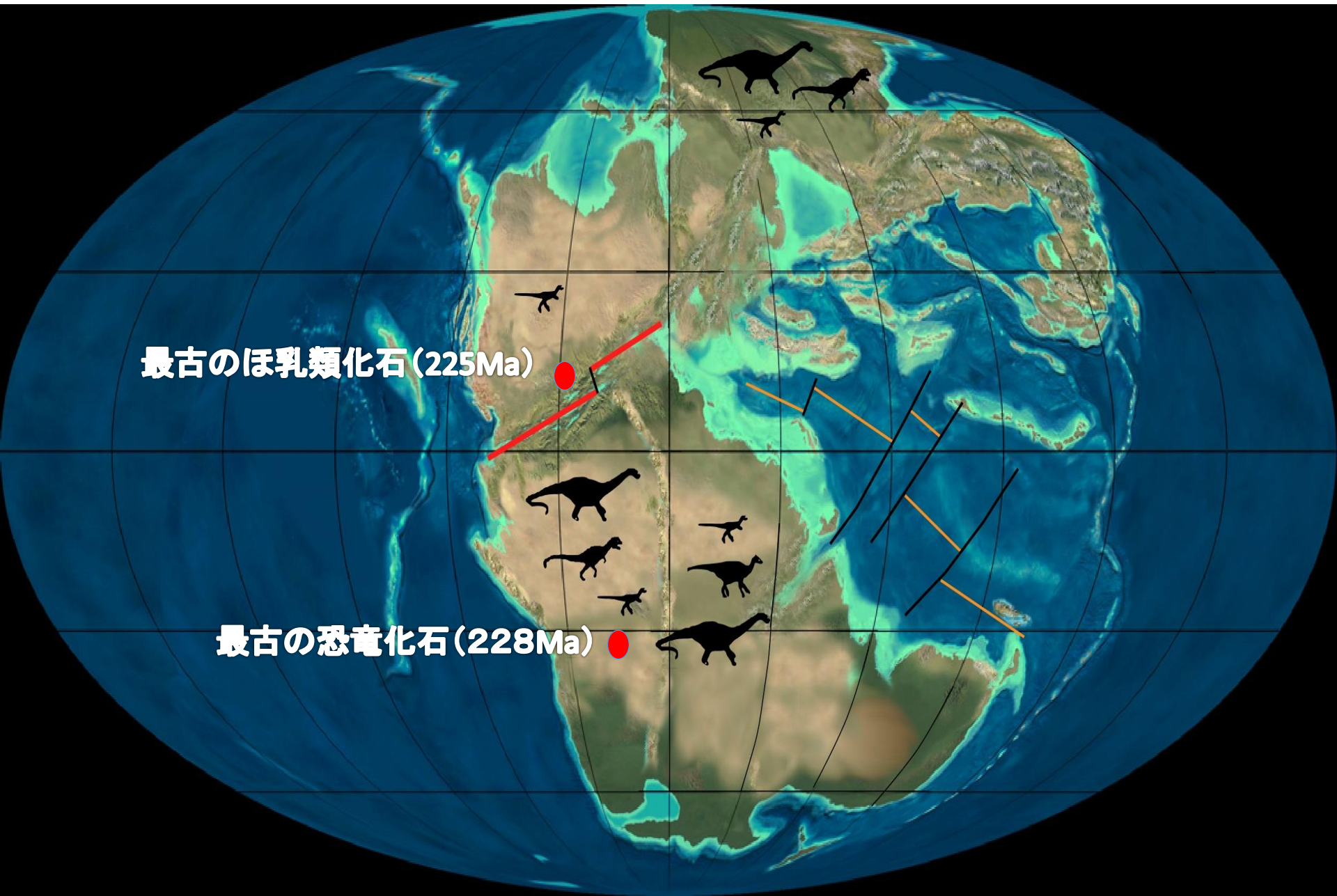


240 Ma

被子植物的花粉化石の位置変更



220 Ma

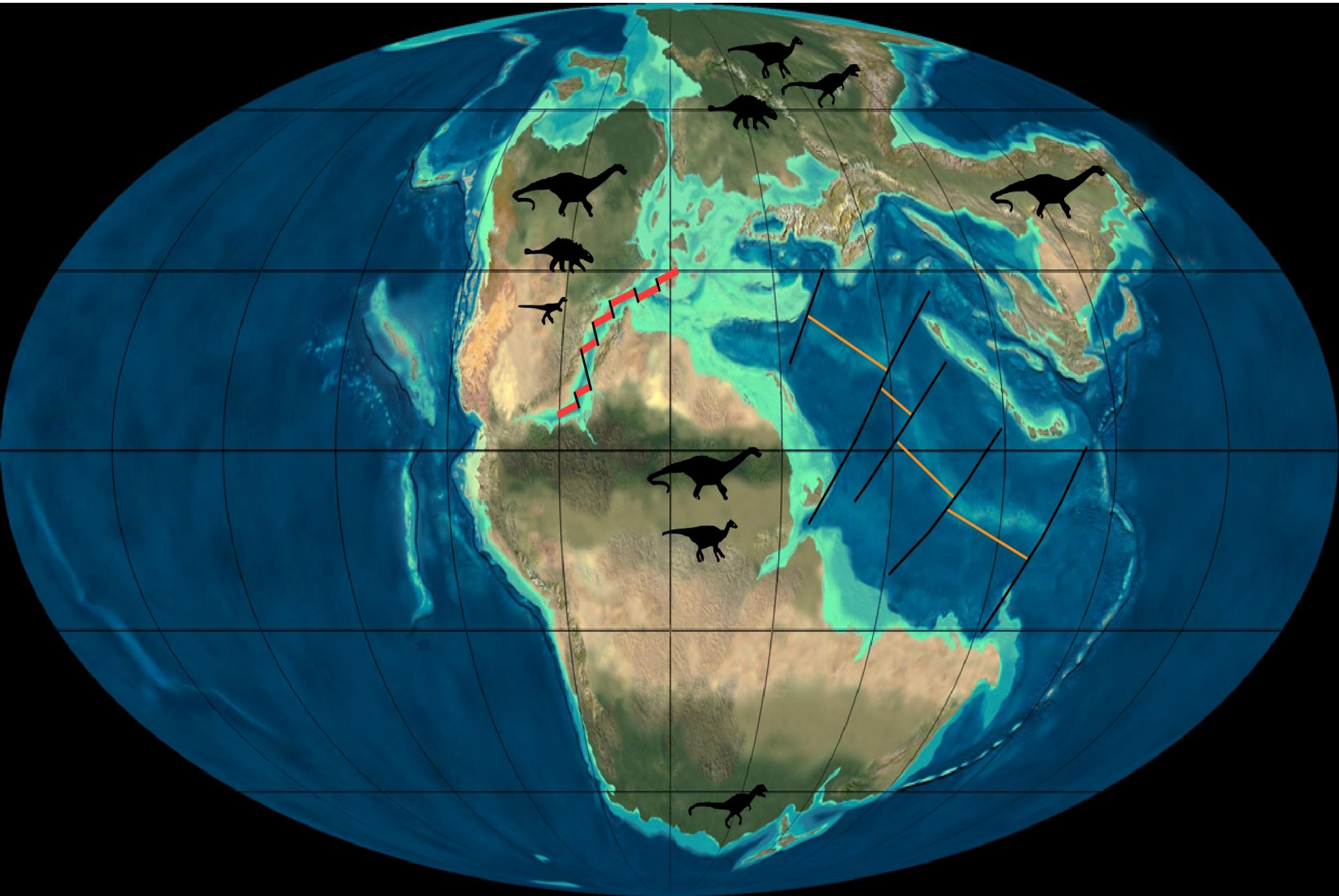


最古のほ乳類化石(225Ma)

最古の恐竜化石(228Ma)

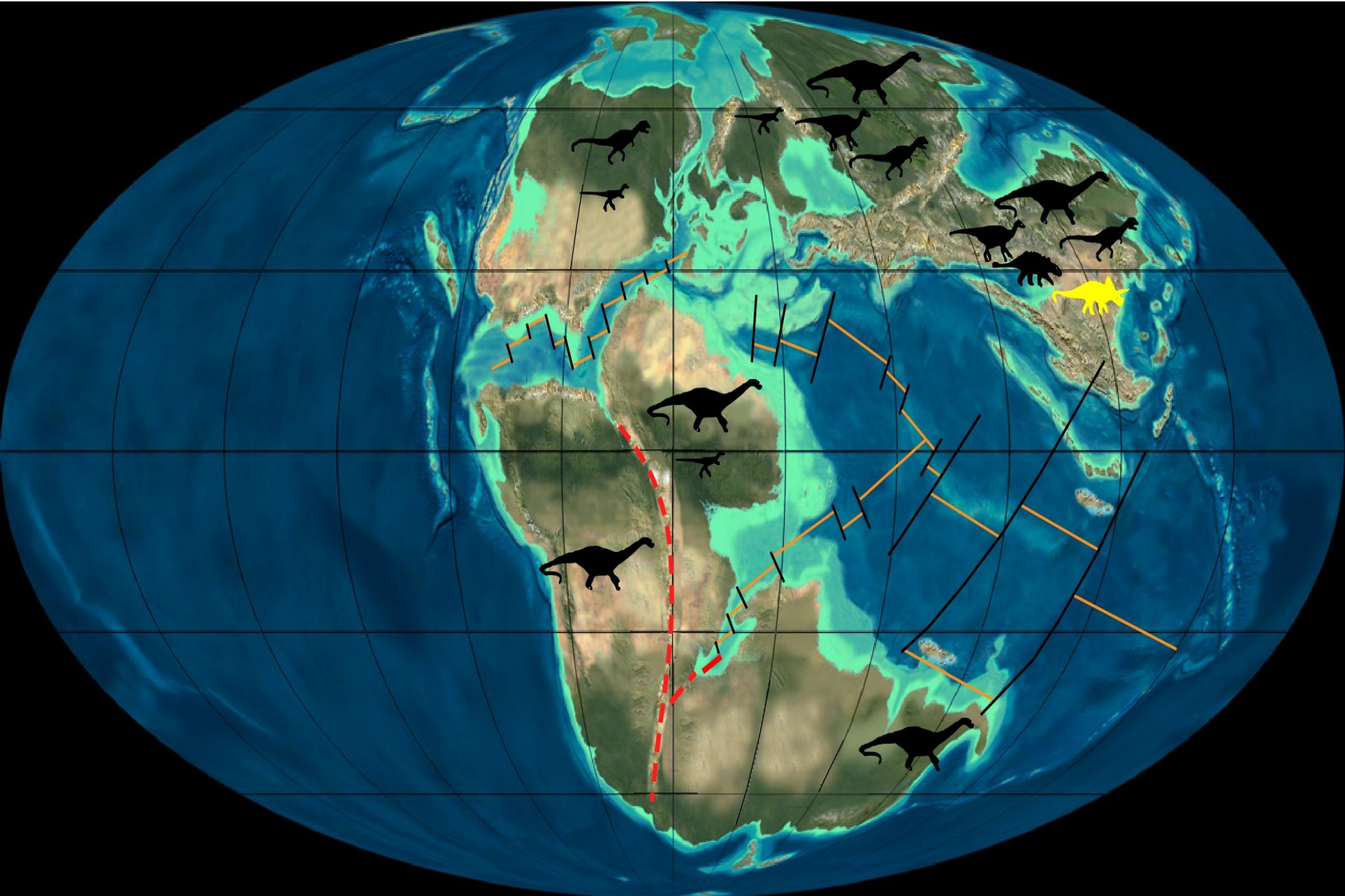
200 Ma

恐竜の拡散

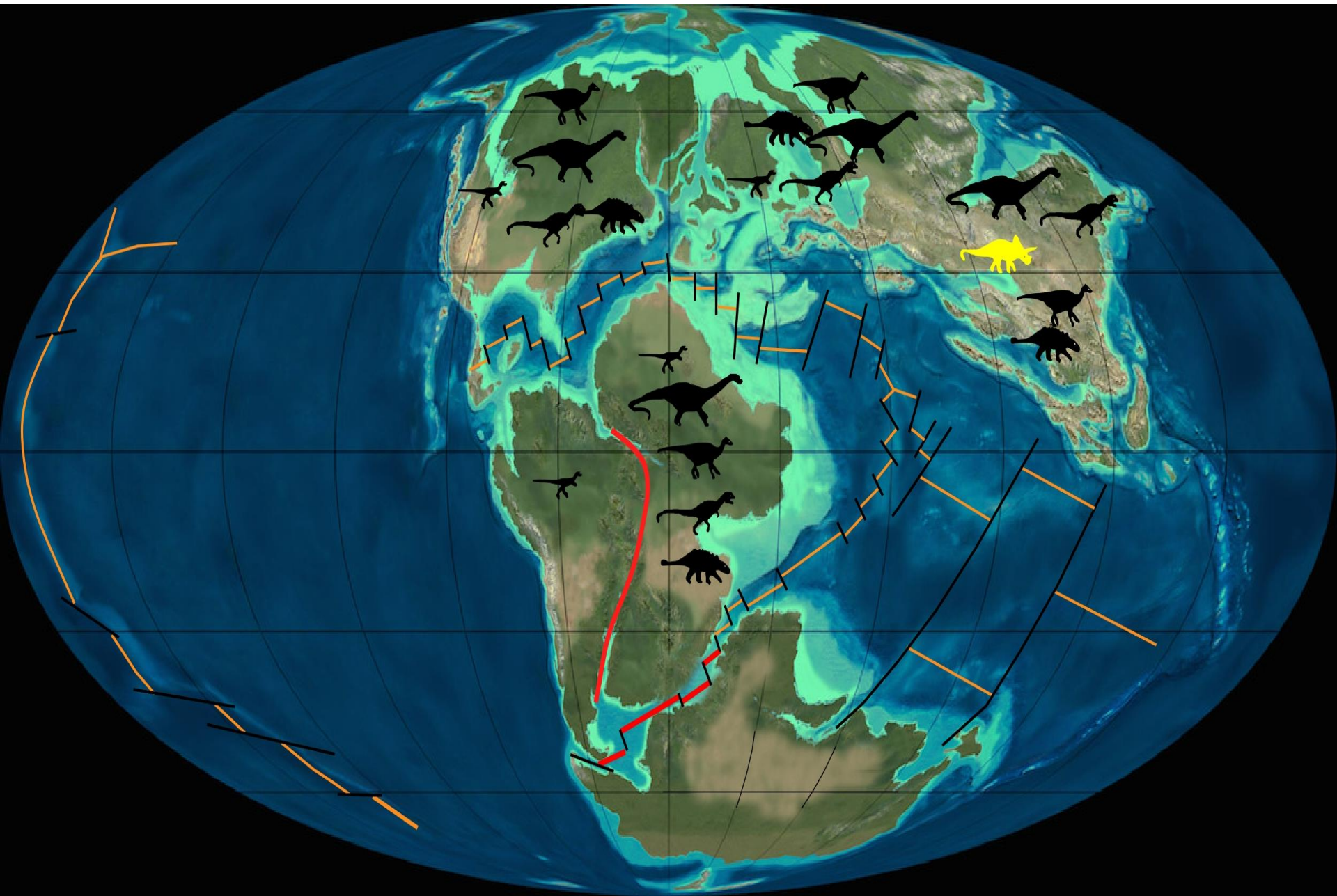


170 Ma

アジアで恐竜の多様化



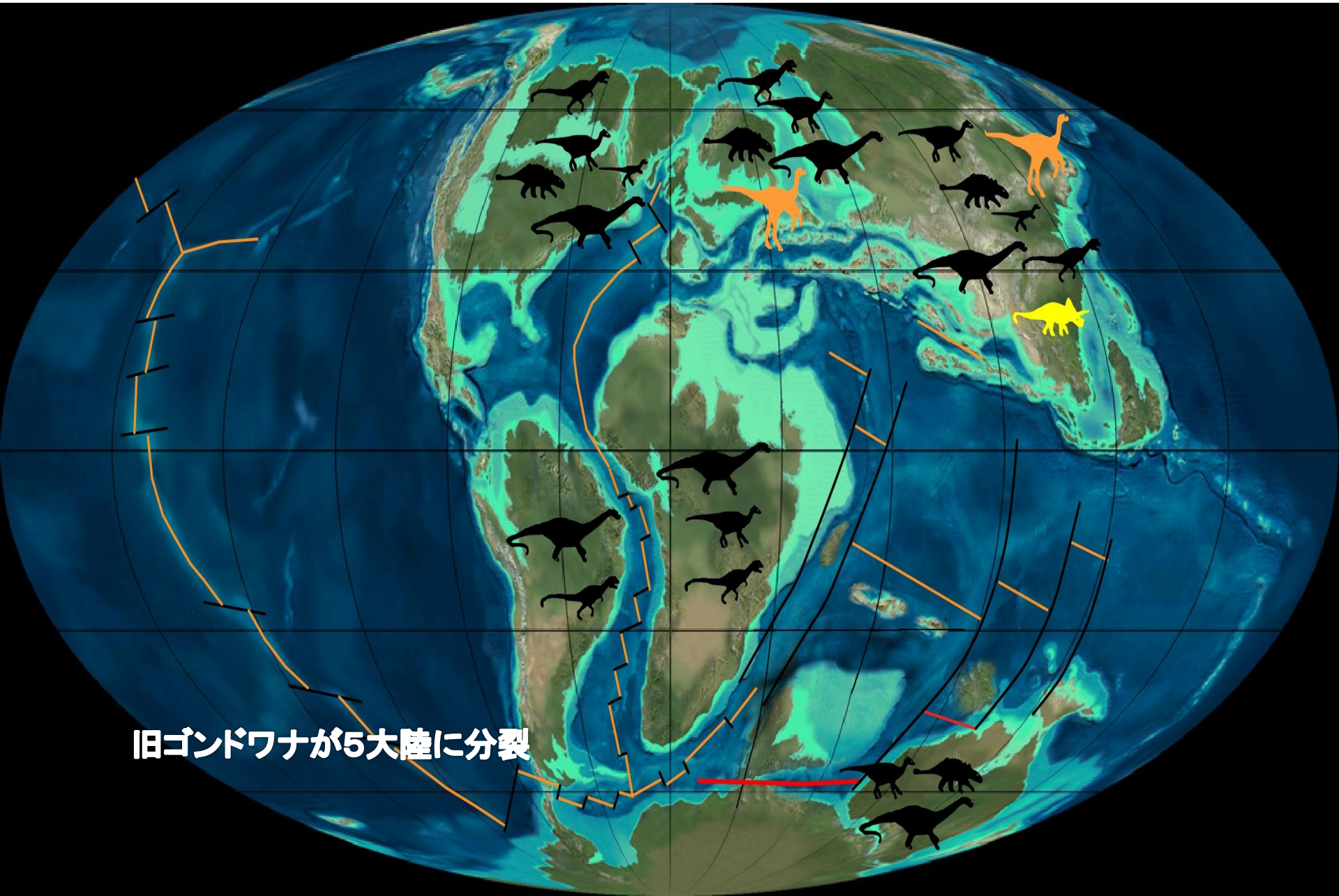
150 Ma



120 Ma

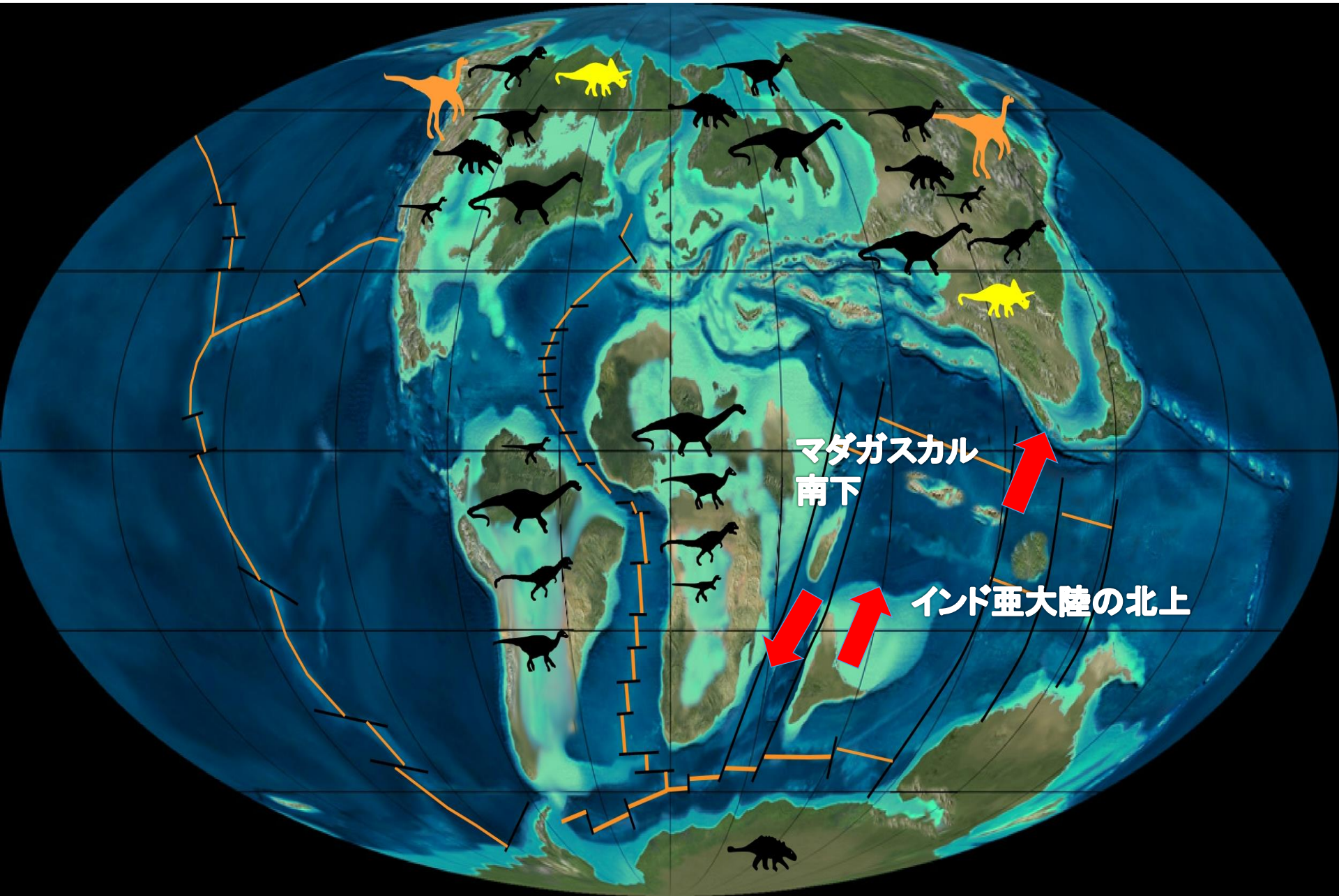


105 Ma



旧ゴンドワナが5大陸に分裂

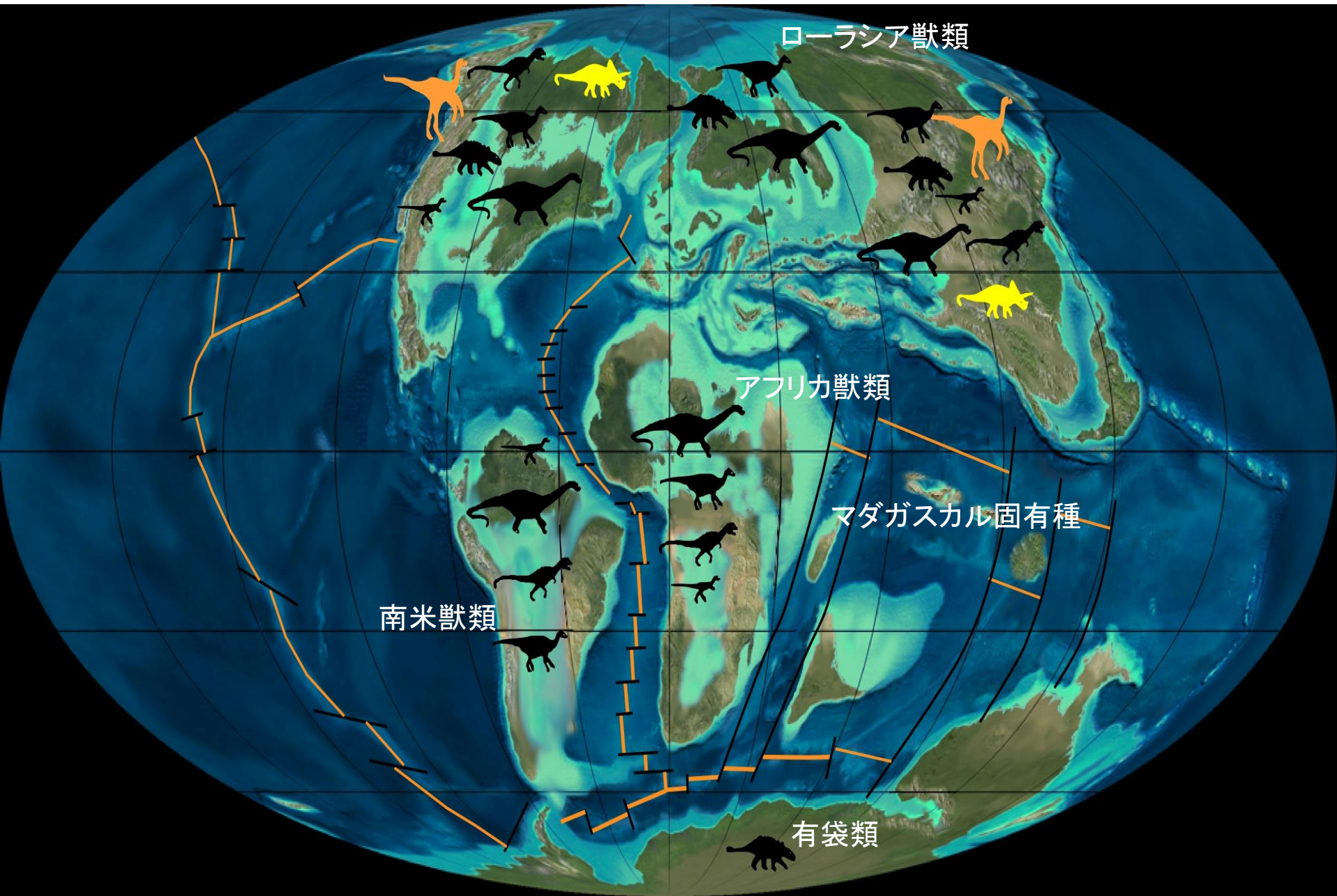
090 Ma



マダガスカル
南下

インド亜大陸の北上

090 Ma

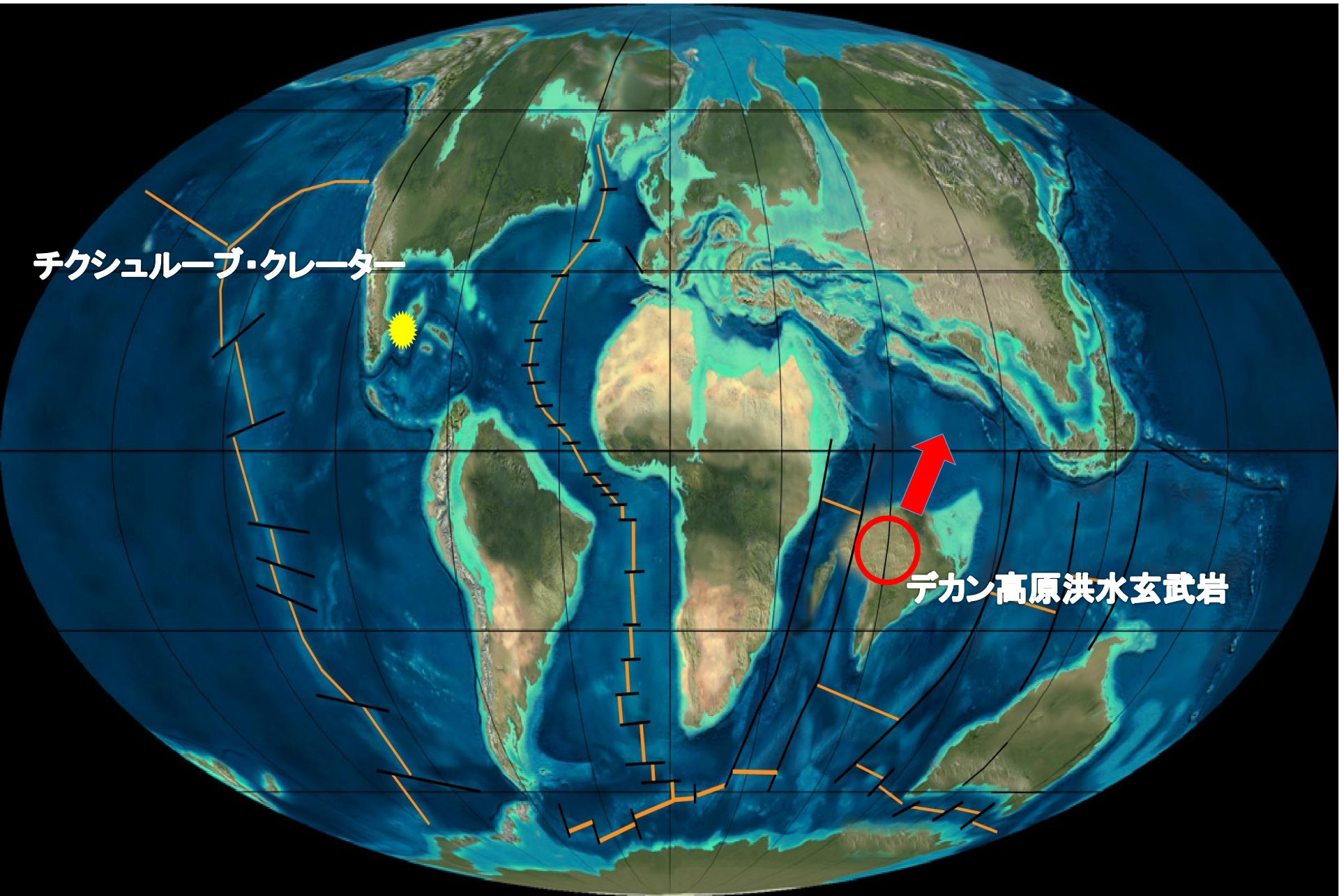


065 Ma

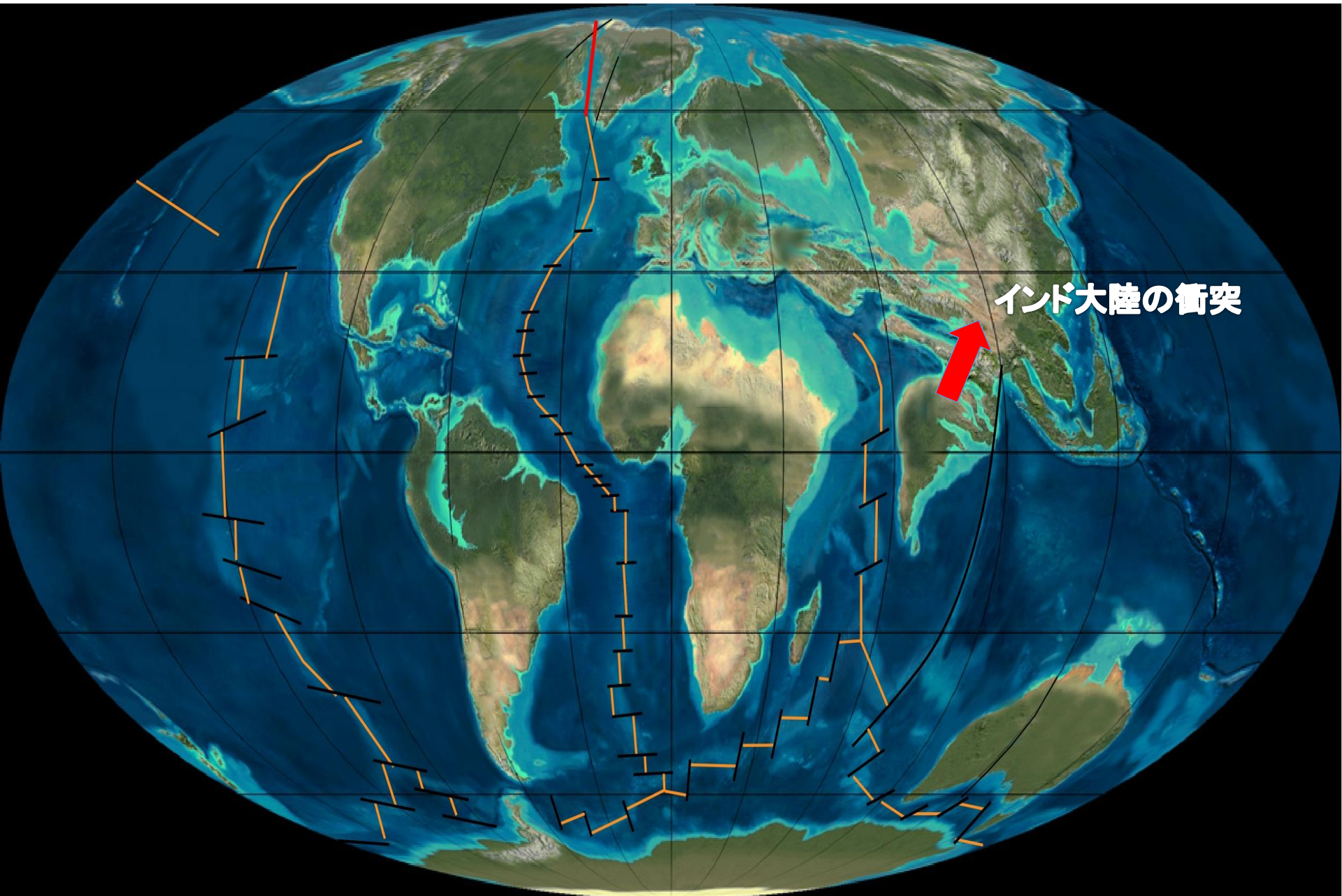
チクシュルーブ・クレーター



デカン高原洪水玄武岩



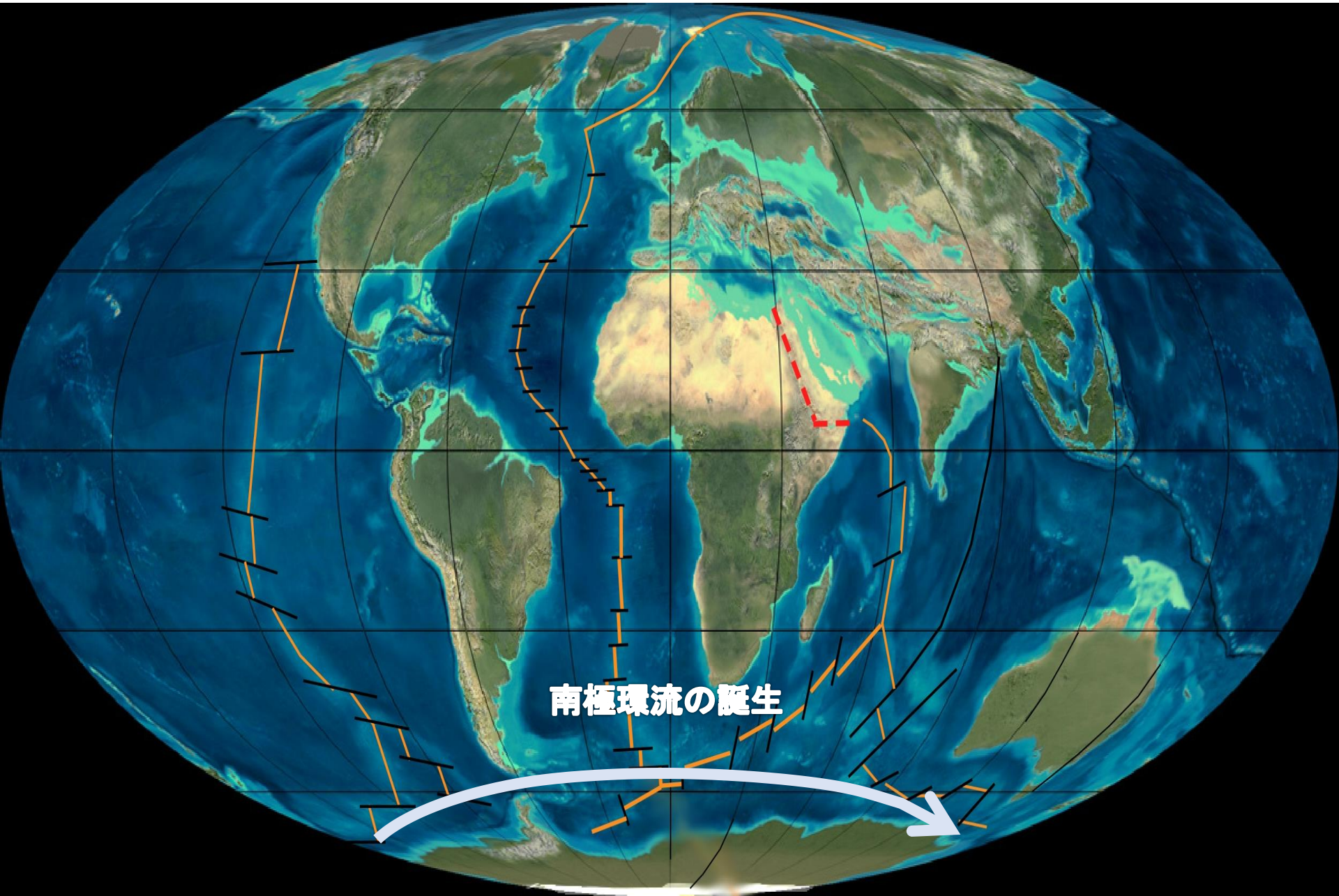
050 Ma



インド大陸の衝突

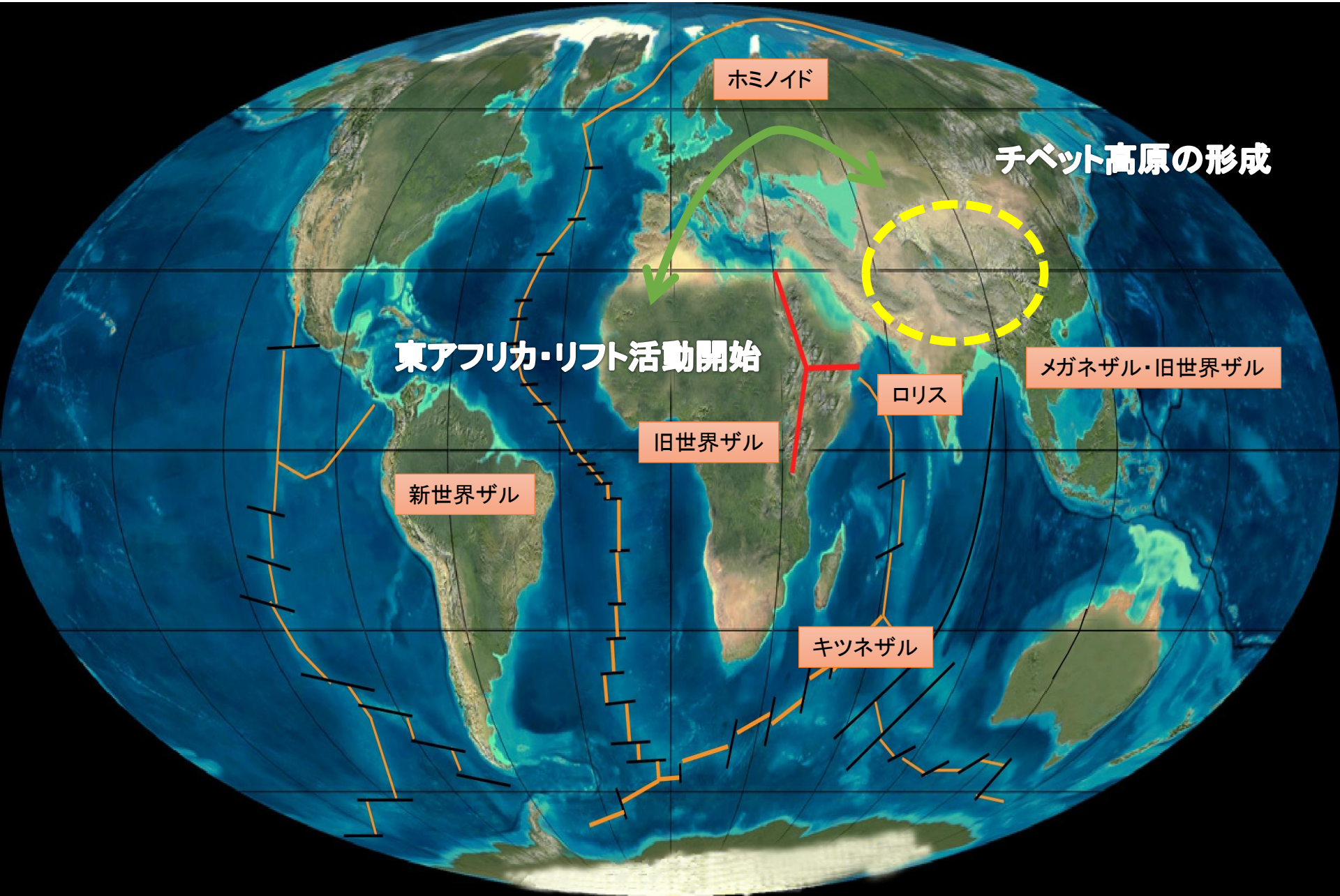
035 Ma

南極の孤立化・寒冷化の始まり



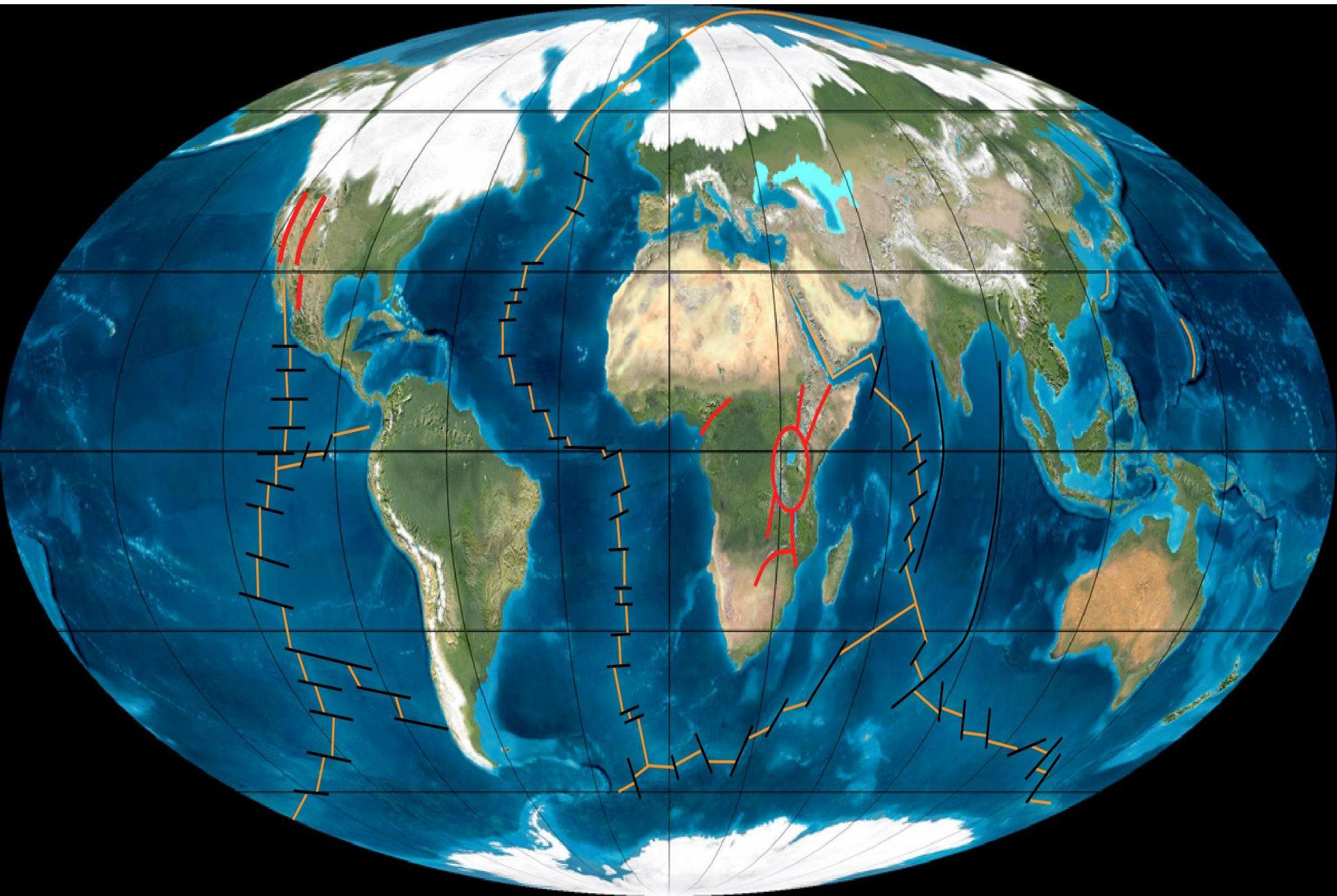
020 Ma

人類誕生前夜



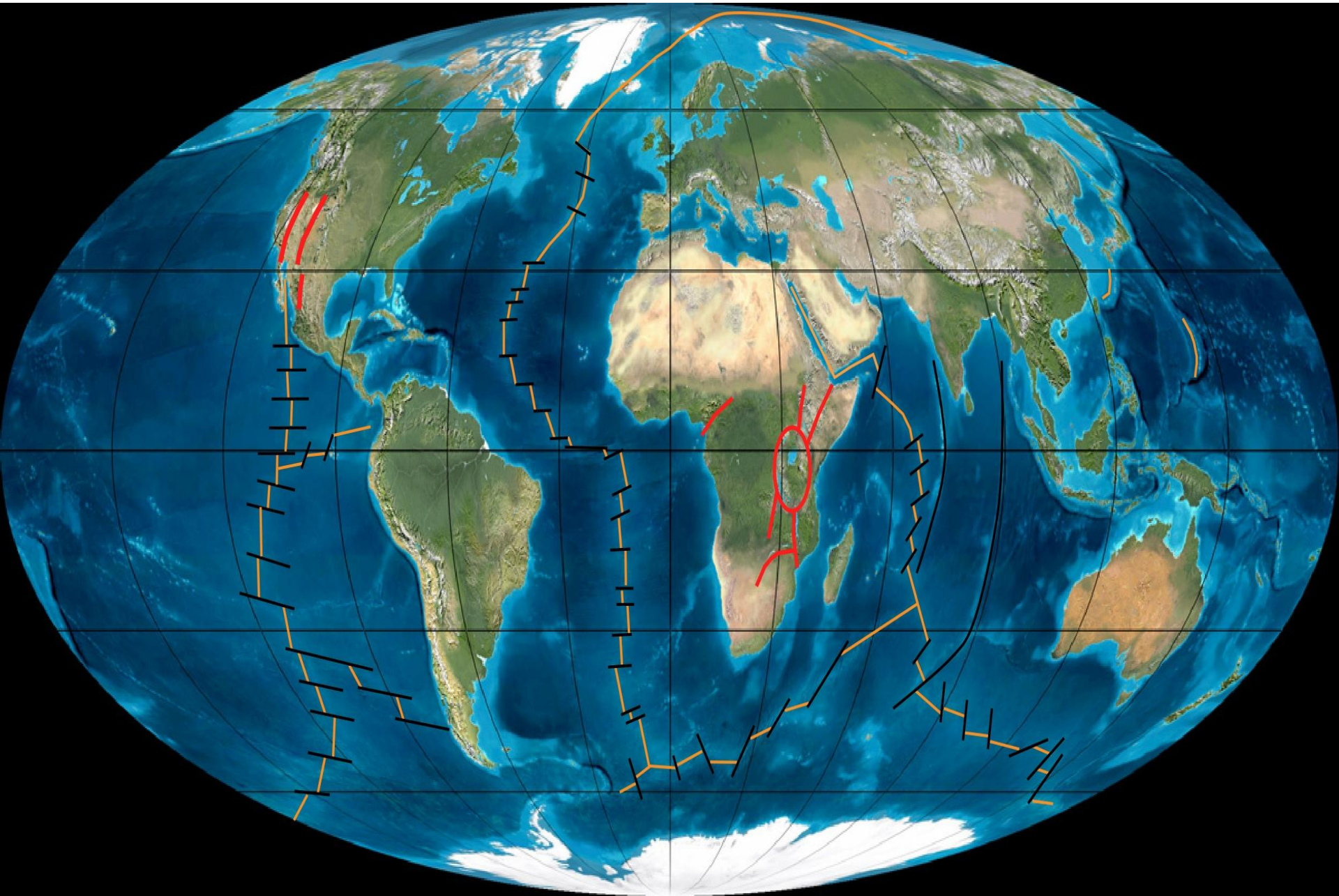
001 Ma

最近の寒冷化ピーク



000 Ma

間氷期の現在



宇宙生物学へ

生命惑星学の創成

生命惑星誕生のための条件

第1グループ

- 1 中心星の化学組成と大きさ
- 2 円軌道を持つ
- 3 惑星のサイズ (火星より大きくスーパーアースより小さい)
- 4 衛星を持つ
- 5 自転軸が傾斜している
- 6 惑星の2段階形成 (ABELモデル)
- 7 Fe_3P が存在する
- 8 適当な量の生命構成元素の付加
- 9 適当な量の原始大気
- 10 適当な量の窒素
- 11 液体の水の存在領域内に惑星が位置する
- 12 Habitable Trinity条件を満たす
- 13 適当な量の初期海洋質量
- 14 プレートテクトニクスの開始
- 15 海洋の浄化が進む
- 16 大気中の CO_2 の減少
- 17 生命構成元素の消費時間
- 18 構造浸食の度合い
- 19 ハビタブルトリニティ環境の維持時間
- 20 彗星落下の阻止 (巨大ガス惑星の存在)

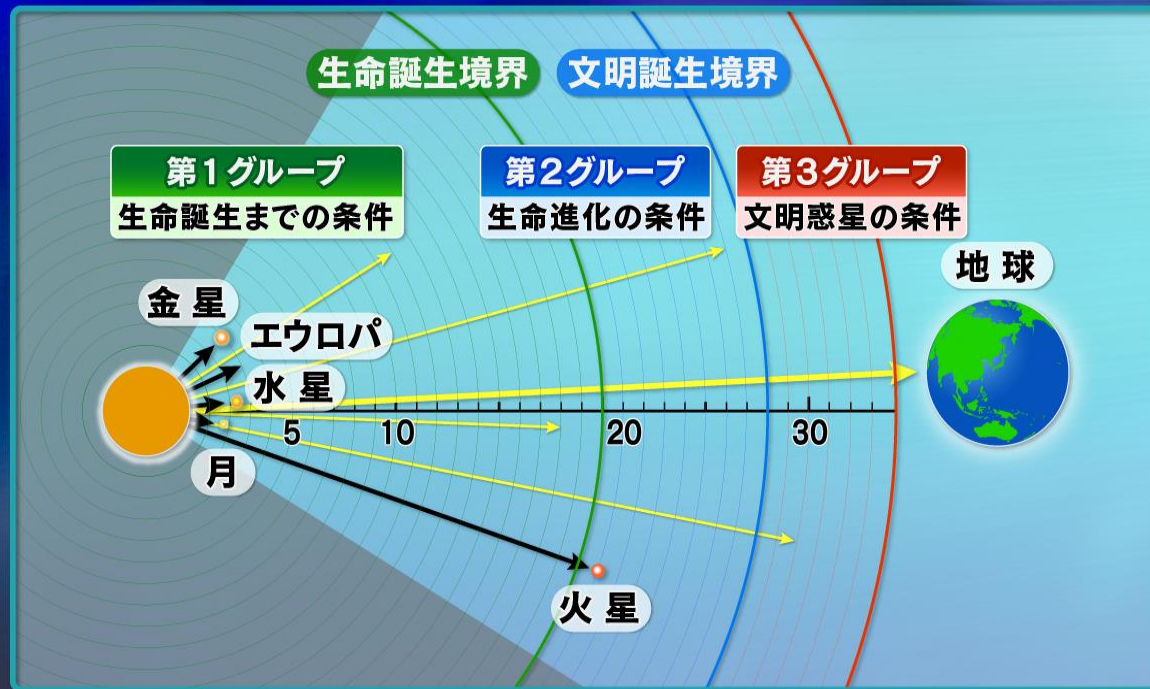
第2グループ

- 1 花こう岩質巨大陸地の存在
- 2 強い磁場の形成
- 3 海水のマントルへの逆流の開始時刻
- 4 生命進化の加速1 (宇宙:大量絶滅)
- 5 生命進化の加速2 (リフト:HIRマグマ)
- 6 後生動物への進化
- 7 オゾン層の形成
- 8 生命構成元素の寿命

第3グループ

- 1 脊椎動物への進化
- 2 哺乳類への進化
- 3 霊長類への進化
- 4 ホモサピエンスへの進化
- 5 脳の発達
- 6 生命構成元素の寿命

ハビタブルプラネットに進化するための条件

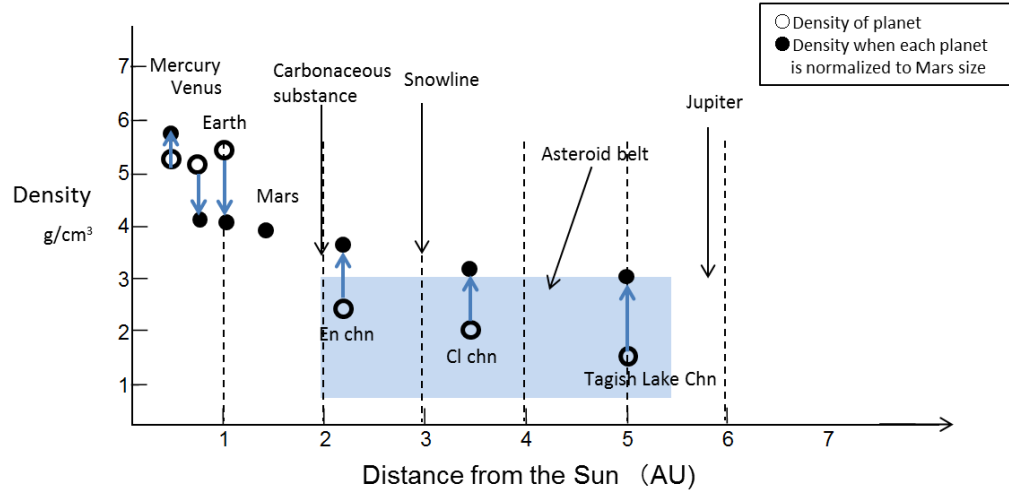


Towards the establishment of Astrobiology

→ Universal Formation Model of Habitable Trinity Planets

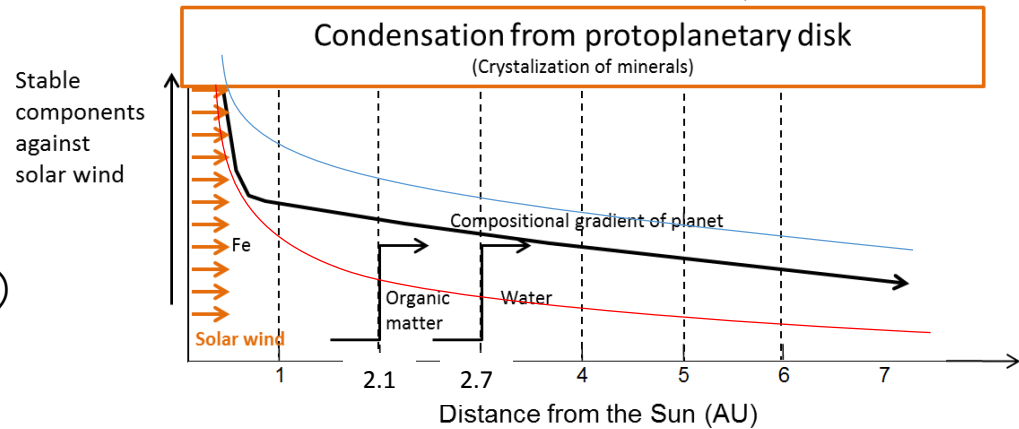
1st Step:

Bulk chemical composition of Solar Rocky Planets
 (中心星からの距離の関数 = 密度曲線)



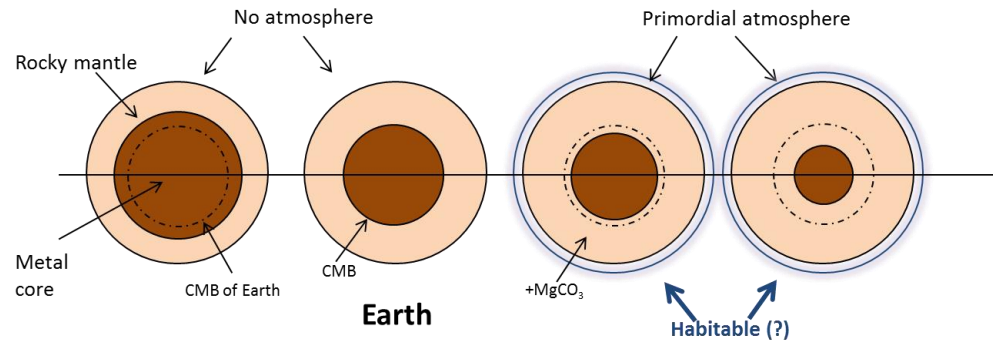
2nd Step:

Bulk chemical composition of Universal Rocky Planets determined as a function of Central Star (chemistry and size) and distance (from CS) (中心星の組成とサイズで密度曲線が変化)



3rd Step:

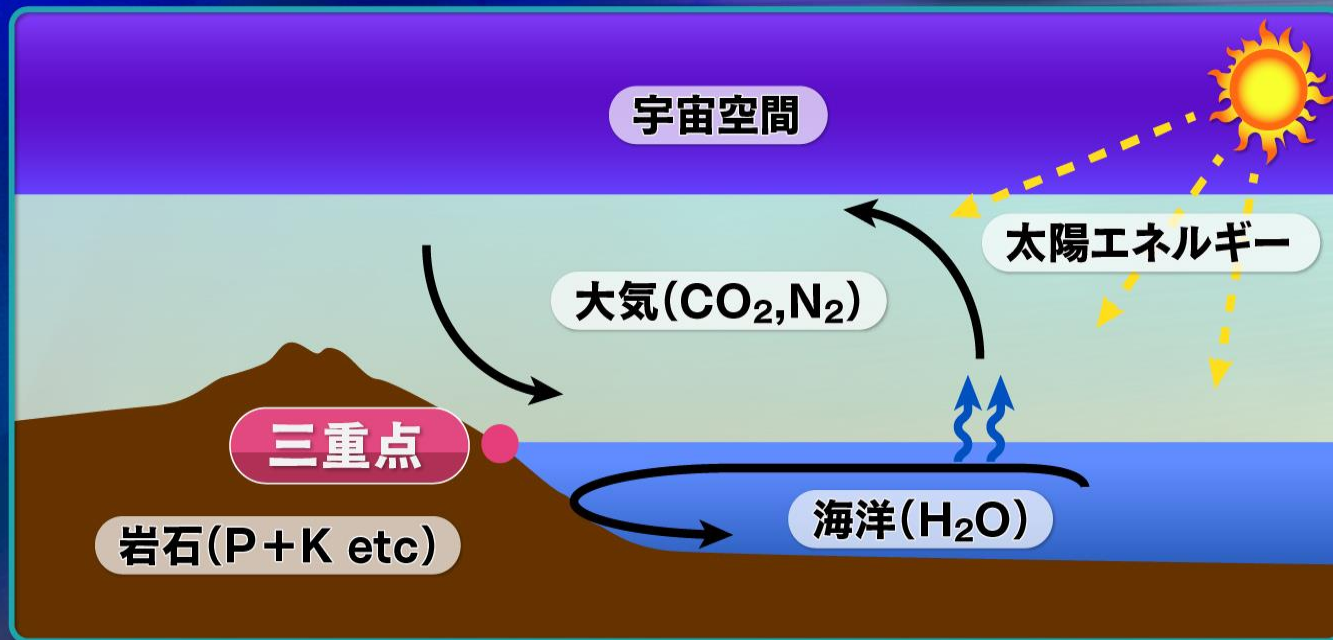
The birth and evolution of Habitable Trinity Planet are determined by internal dynamics of solid planet
 惑星内部の初期進化でHTPへ



系外惑星の中心星の化学
組成の多様性：太陽の組
成は異常

“Habitable Trinity” モデル

大気・海洋・大陸の共存と太陽エネルギーによる定常的物質循環



(Dohm and Maruyama, 2014)

ABEL モデル

二段階形成モデル

第一段階 Fe_3P (シュライバサイト)が普遍的に存在

第二段階 そこに生命構成主成分元素が降臨

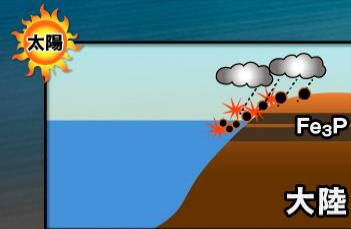
Fe_3P が、裸の地球(原初大陸)上に存在

海洋誕生時(44億年前)の地上でリンと水が激しく反応

多種多様な高分子有機物が生まれ、生命合成反応が開始



大気・海洋なし

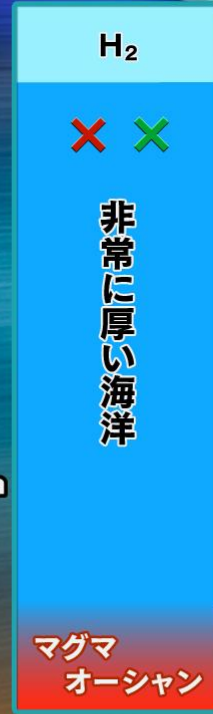
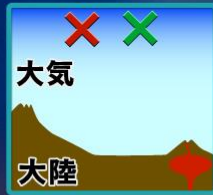


大気・海洋あり

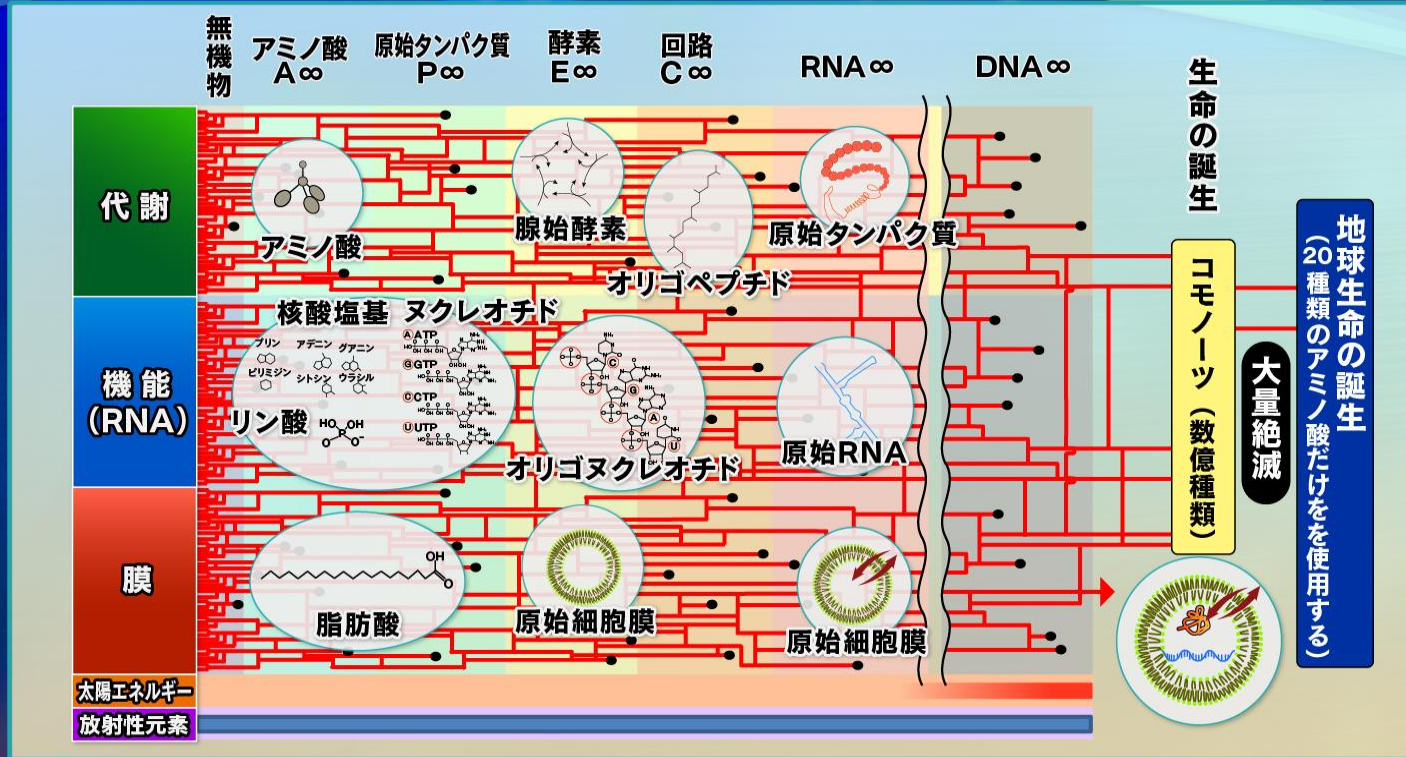
水惑星の分類

初期海洋質量が鍵

プレートテクトニクス ○ ×
生命 ○ ×



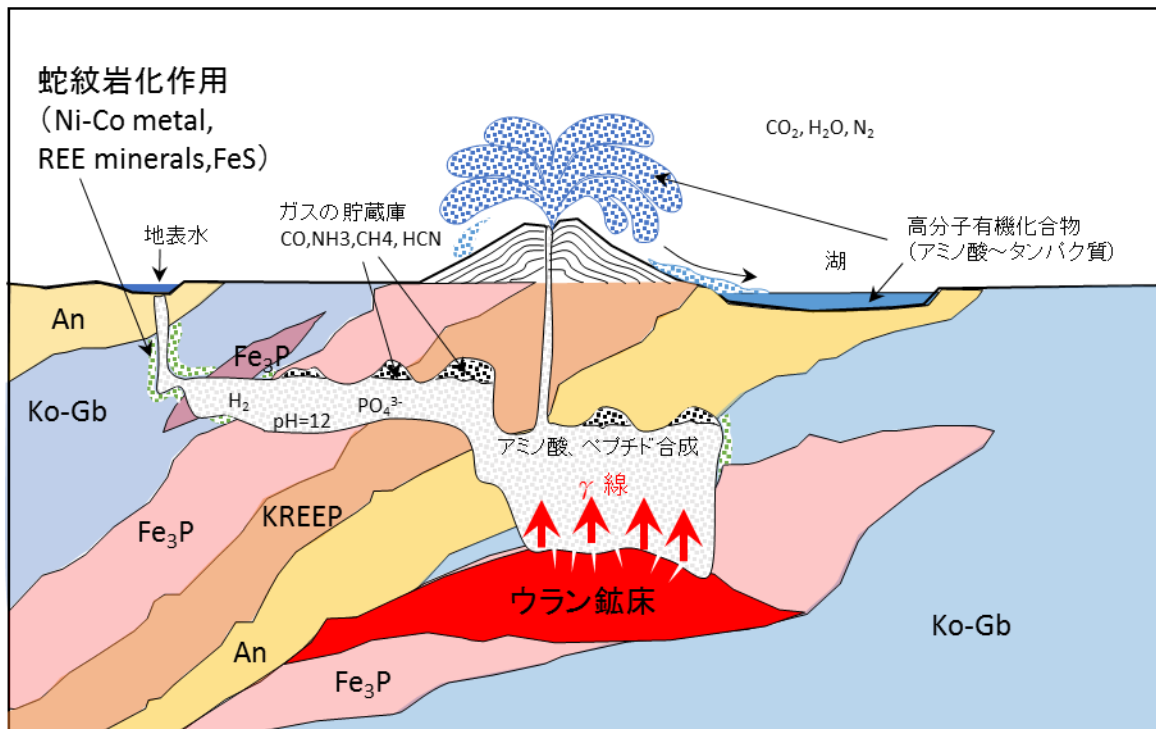
生命誕生までの道のり



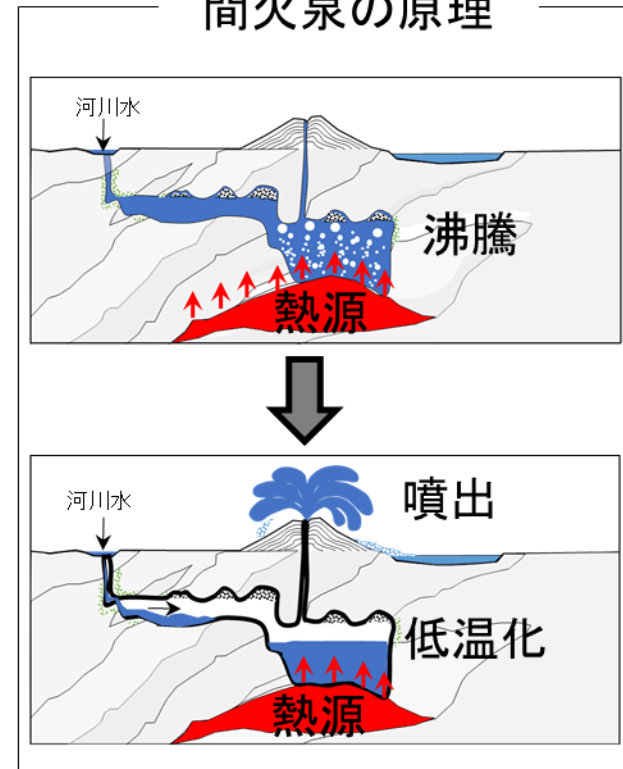
Geyser : Birth place of life

(Gas concentration, Energy source and periodicity)

気体成分の濃集と高分子有機化合物の合成



間欠泉の原理

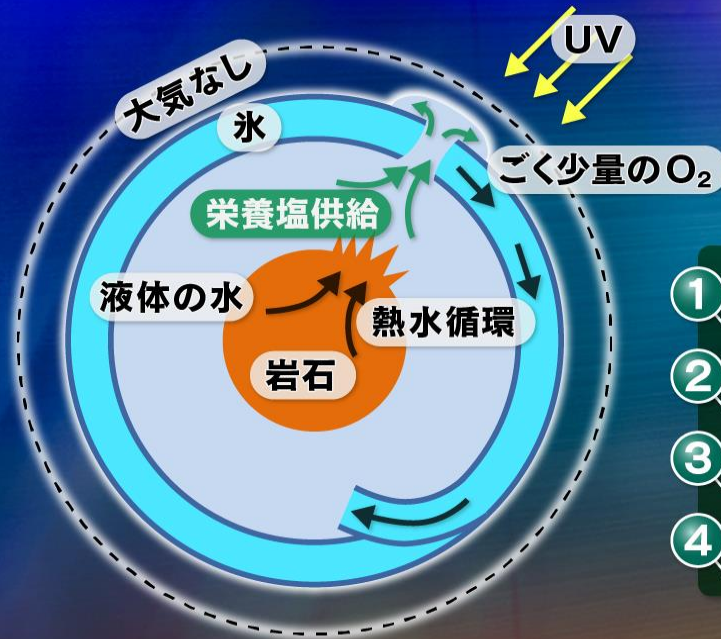


生命惑星誕生のための条件をクリアできるか

第1グループ条件	金星	月	火星	エウロパ	地球
1 中心星の化学組成と大きさ	○	○	○	○	○
2 円軌道を持つ	○	○	○	○	○
3 惑星のサイズ	○	×	○	×	○
4 衛星を持つ	×	×	○	×	○
5 自転軸が傾斜している	○	×	○	×	○
6 惑星の2段階形成(ABELモデル)	○	○	○	×	○
7 Fe ₃ Pが存在する	○	○	○	×	○
8 適当な量の生命構成元素の付加	○	○	○	×	○
9 適当な量の原始大気	?	×	?	×	○
10 適当な量の窒素	?	×	?	×	○
11 液体の水の存在領域内に惑星が位置する	×	×	○	×	○
12 Habitable Trinity条件を満たす	×	×	○	×	○
13 適当な量の初期海洋質量	×	×	○	×	○
14 プレートテクトニクスの開始	×	×	○	×	○
15 海洋の浄化が進む	×	×	○	×	○
16 大気中のCO ₂ の減少	×	×	○	×	○
17 生命構成元素の消費時間	×	×	○	×	○
18 構造浸食の度合い	×	×	○	×	○
19 ハビタブルトリニティ環境の維持時間	×	×	○	×	○
20 彗星落下の阻止(巨大ガス惑星の存在)	○	○	○	×	○

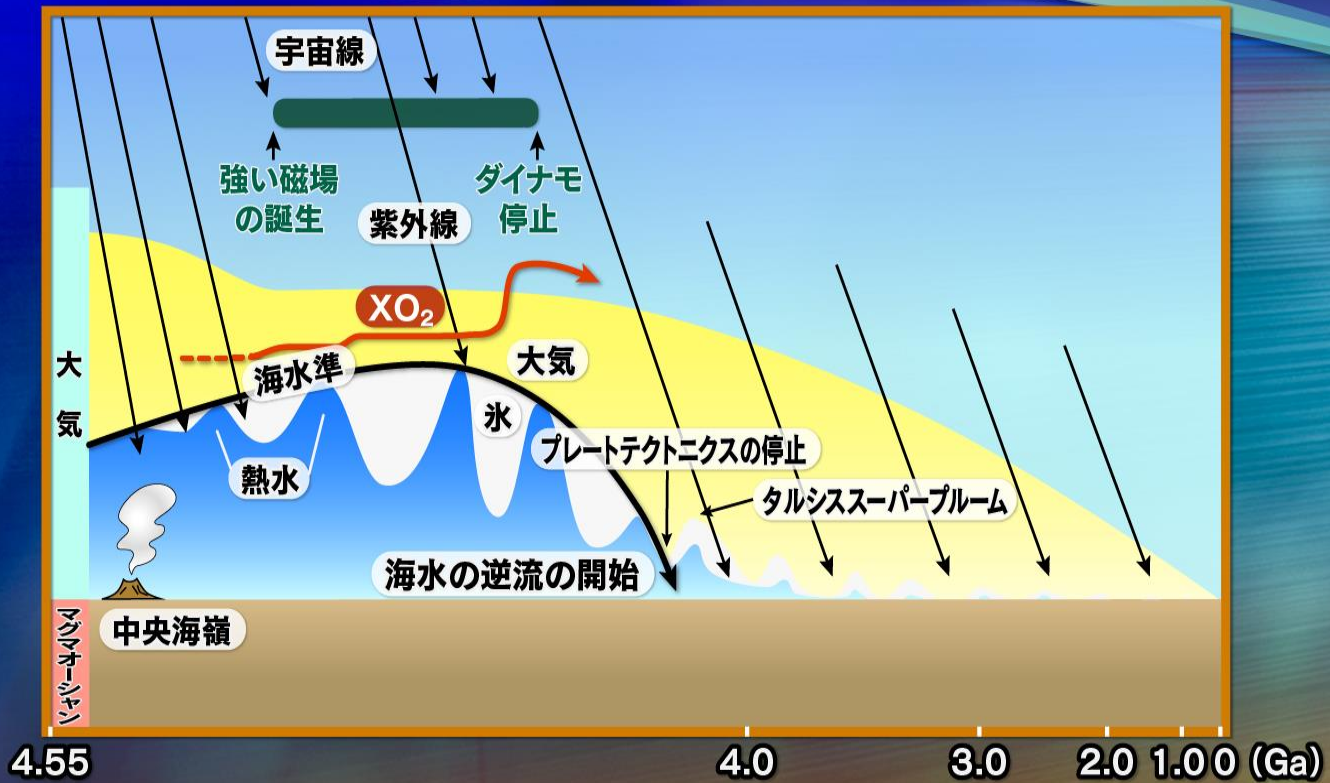
エウロパには生命はいない

エンケラドゥス、ガニメデも同様

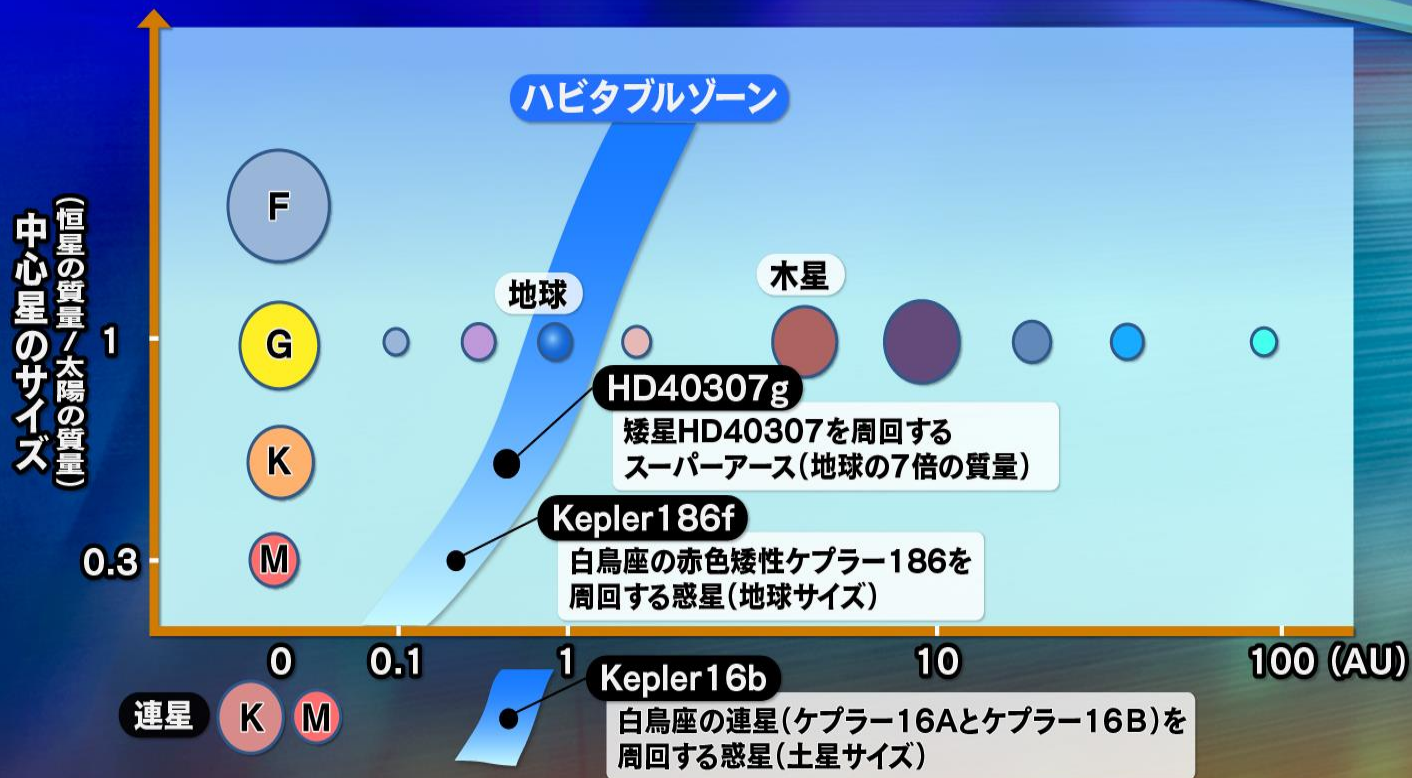


- ① **猛毒海洋**
- ② **窒素と炭素の供給がない**
- ③ **乾湿反復環境がない**
- ④ **環境多様性がない**

火星の歴史

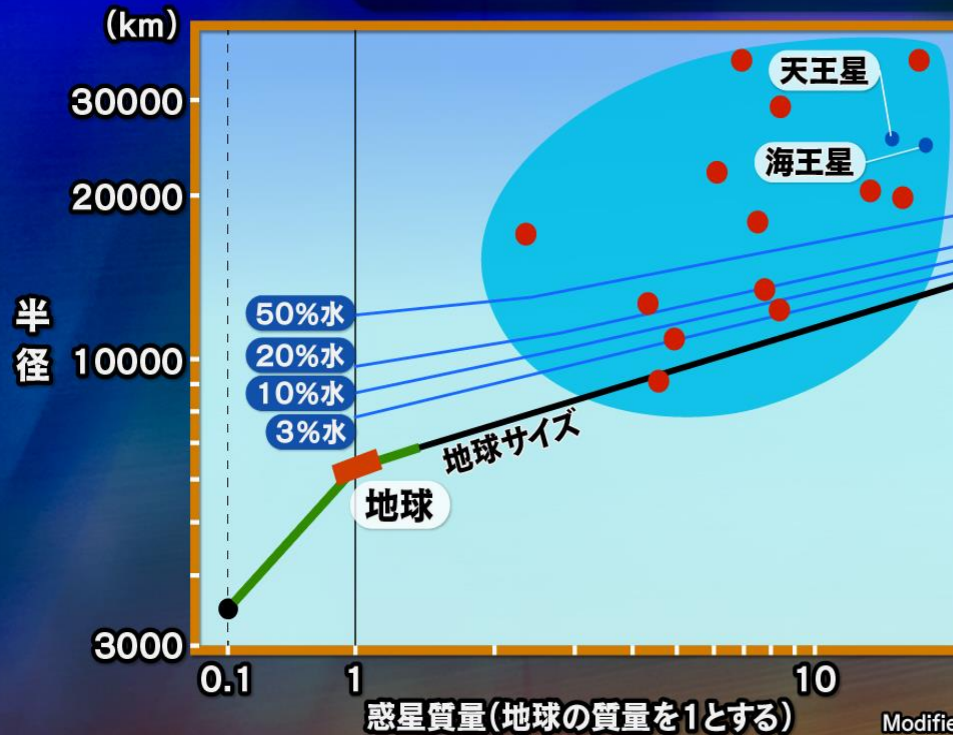


ハビタブルゾーンにあると考えられる3個の系外惑星



生命居住惑星探査のターゲット:地球サイズの惑星

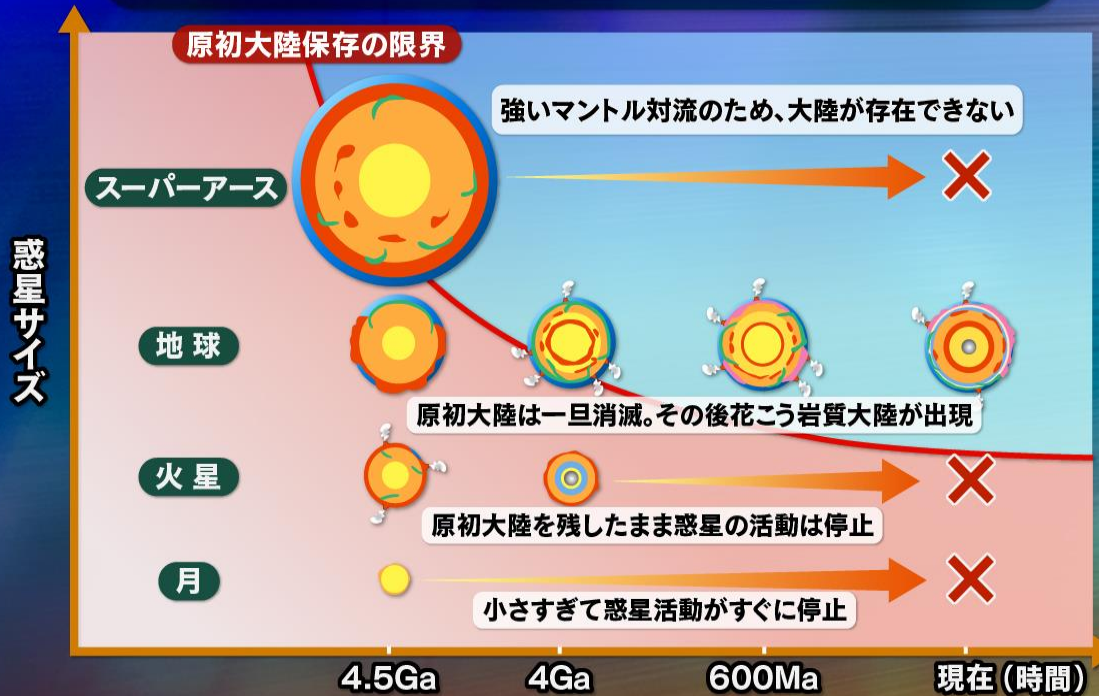
スーパーアースには生命はいない



Modified after Maruyama et al., (2013)

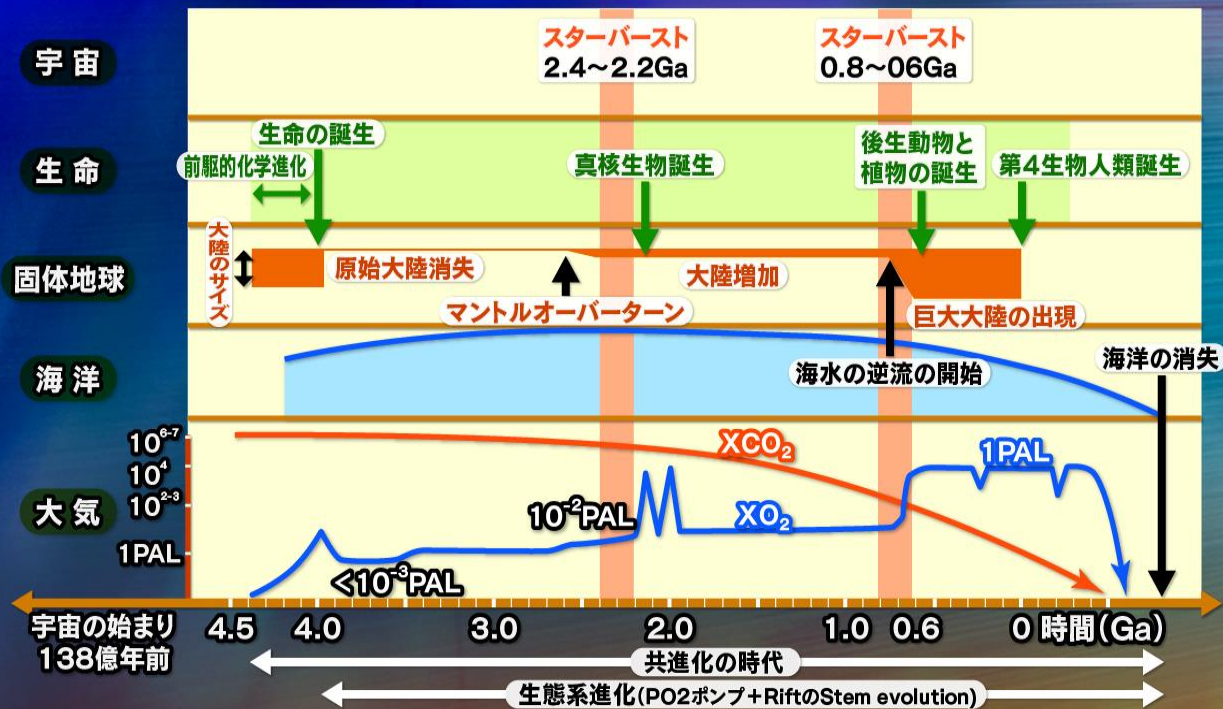
なぜ惑星のサイズが重要なのか

惑星サイズがハビタブルトリニティ環境を支配する



進化の為の時間

Habitable Trinity Planetの安定時間



宇宙に生物はいるか？

● いると思う理由

- 銀河系の恒星数の多さ

● いないと思う理由

- 生命誕生と進化に必要な条件の数の多さ
- 偶然的確率の多さ

例 月を創るSweet Spot(絶妙な角度)、初期海洋の質量の厳密な制限、海洋質量を保持した木星・土星の存在

確率は確率

参考文献

- A. V. Turchyn, D. P. Schrag, 2004, "Oxygen Isotope Constraints on the Sulfur Cycle over the Past 10 Million Years", *Science* 26, Vol. 303, no. 5666, 2004-2007.
- Albarede, F. 2009: Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications, *Nature* 461, 1227-1233
- Alexander N. Krot, 2005: Evolution of Oxygen Isotopic Composition in the Inner Solar Nebula, *Astrophys. J.* 622, 1333-1342
- B. F. Windley, 1977, "The evolving continents", John Wiley & Sons, Ltd.
- Clayton, 2005: *Treatise on Geochemistry* 1.06, 129
- Dohm, J. M., Maruyama, S. 2014, "Habitable Trinity", *Journal of Geoscience Frontiers*, 6, 95-101
- Helio, J. Rocha-Pinto, 2000: An Intermittent Star Formation History in a "Normal" Disk Galaxy: The Milky Way, *Astrophys. J.* 531, L115-L118
- J. L. Payne et al., 2009, "Two-phase increase in the maximum size of life over 3.5 billion years reflects biological innovation and environmental opportunity", *PNAS*, vol. 106, no.1, 24-27.
- J. M. McArthur., 2001, "Strontium Isotope Stratigraphy: LOWESS Version 3: Best Fit to the Marine Sr-Isotope Curve for 0-509 Ma and Accompanying Look-up Table for Deriving Numerical Age", *The Journal of Geology*, 2001, volume 109, p. 155-170.
- K. Billups et al., 2002, "Late Oligocene to early Miocene geochronology and paleoceanography from the subantarctic South Atlantic", *Paleoceanography*, Volume 17, Issue 1, Pages 4-1-4-11.
- K. J. Walsh et al., 2011, "A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration", *Nature*, 475, 206-209
- Kato, Y. and Nakamura, K., 2003, "Origin and global tectonic significance of Early Archean cherts from the Marble Bar greenstone belt" Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, vol. 125, 191-243.
- Maruyama et al., 2013, "The naked planet Earth: most essential pre-requisite for the origin and evolution of life", *Geoscience Frontiers*, 4, 141-165.
- Nimura, T., Ebisuzaki, T. and Maruyama, S., 2015, "Global cooling and mass extinction driven by a dark cloud encounter", *JpGU2015. Chiba*, 2015-05
- "NOAA National Centers for Environmental Information", <http://www.ncdc.noaa.gov/>
- Nohda, S. et al., 2008, "アルタイ炭酸塩岩にみるベント紀初期の海洋環境の変動", *Abstracts of Annual Meeting of the Geochemical Society of Japan* 55(0), 396-396.
- Okamoto, K., Maruyama, S., 1998, "Multi-anvil re-equilibration experiments of a Dabie Shan ultrahigh-pressure eclogite within the diamond-stability fields", *Island Arc* 7, 52-69.
- Okamoto, K., and Maruyama, S., 2001, "The eclogite-garnetite transformation in the MORB+H₂O system", *AGU Fall meeting*.

参考文献

- "Percival Lowell, No. 6", Library of Congress Prints and Photographs Division Washington, D.C. 20540 USA
- Ronov et al., 1991, "Chemical constitution of the Earth's crust and geochemical balance of the major elements (part I)", *International Geology Review*, 33, 941-1097.
- S. Maruyama, 2011, "地球の地質図", Tokyo Geographical Society, *Journal of Geography*, VOL. 120, Front cover
- S. Maruyama, T. Komiya, 2011, "The Oldest Pillow Lavas, 3.8-3.7 Ga from the Isua Supracrustal Belt, SW Greenland: Plate Tectonics Had Already Begun by 3.8 Ga", Tokyo Geographical Society, *Journal of Geography*, VOL. 120, 869-876
- S. Maruyama et al., 2011, "太平洋型造山帯—新しい概念の提唱と地球史における時空分布—", Tokyo Geographical Society, *Journal of Geography*, VOL. 120, 115-223
- Shields, G. and Veizer, J., 2002, "Precambrian marine carbonate isotope database: Version 1.1", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3.
- T. Ishikawa et al., 2008, "Carbon isotope chemostratigraphy of a Precambrian/Cambrian boundary section in the Three Gorge area, South China: Prominent global-scale isotope excursions just before the Cambrian Explosion", *Gondwana Research*, Volume 14, Issues 1-2, 193-208
- Xiaozhi Yang, 2014: A relatively reduced Hadean continental crust and implications for the early atmosphere and crustal rheology, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 393, 210-219
- Zhu, M. et al., 2003, "Sinian and early Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: an integrated approach", *Prog. Nat. Sci.* 13, 951-960
- 伊規須 素子, 2008, 顕微赤外分光法を用いた先カンブリア時代細菌化石中の生体分子探索とその保存過程模擬実験, 東京工業大学, 博士論文
- 上田 誠也. "プレート・テクトニクス", 岩波書店, 1989, pp.268
- 斎藤 成也他, "ヒトの進化(シリーズ進化学(5))", 岩波書店, 2006, pp.230
- 澤木 佑介, 2011, "溶存鉄に富んだエディアカラ紀海洋", 日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会, セッションID: T15-O-6.
- "世界遺産への旅" http://www.theworldheritage.com/twh/images/map_africa.jpg
- 都城 秋穂. "科学革命とは何か", 岩波書店, 1998, pp.347
- ドネラ H. メドウズ他, "成長の限界 - ローマ・クラブ「人類の危機」レポート", ダイヤモンド社, ISBN 4478870276, 1972-05
- 山本 伸次, 2010, "構造浸食作用—太平洋型造山運動論と大陸成長モデルへの新視点—", Tokyo Geographical Society, *Journal of Geography*, Vol. 119, 963-998.