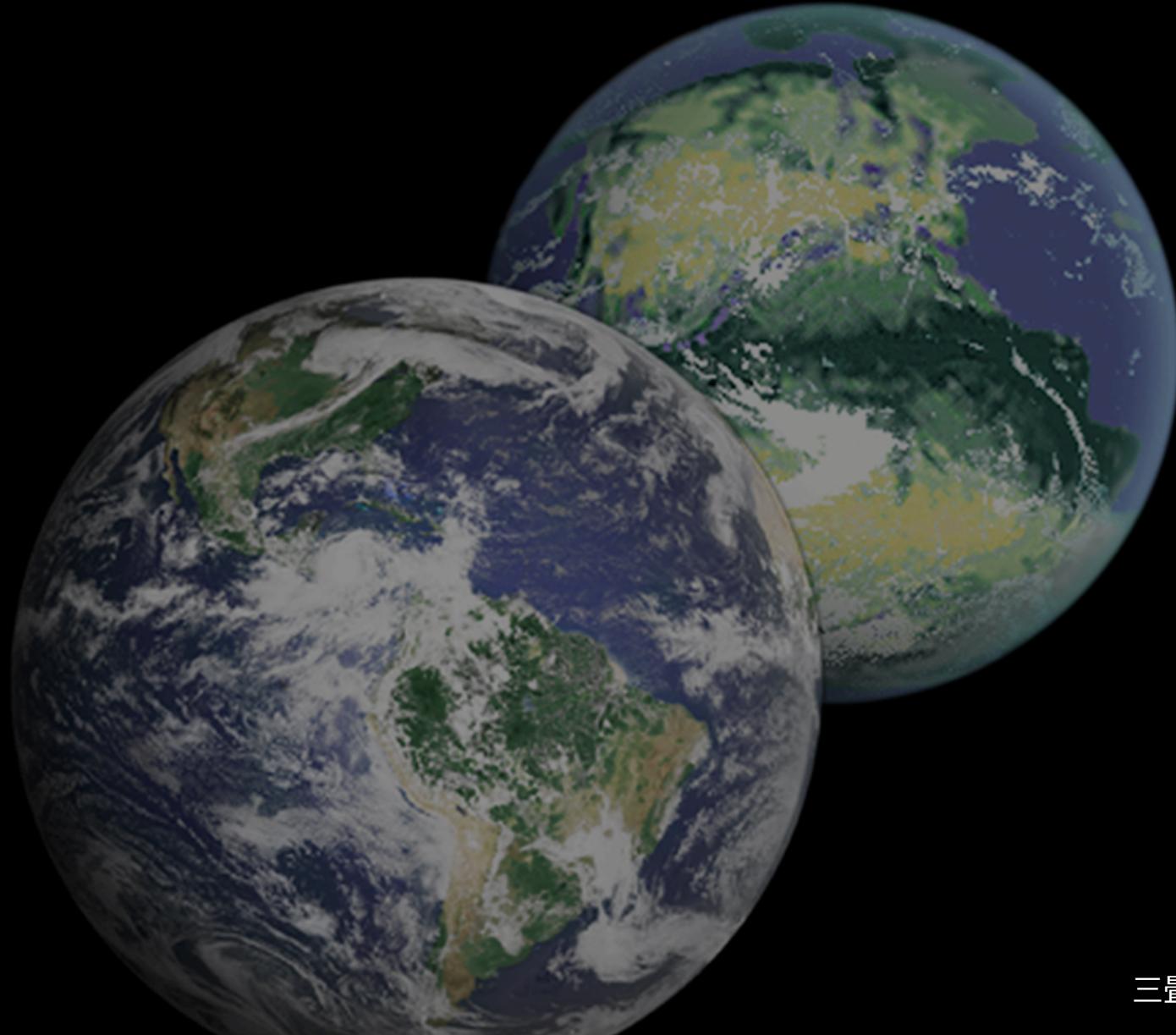
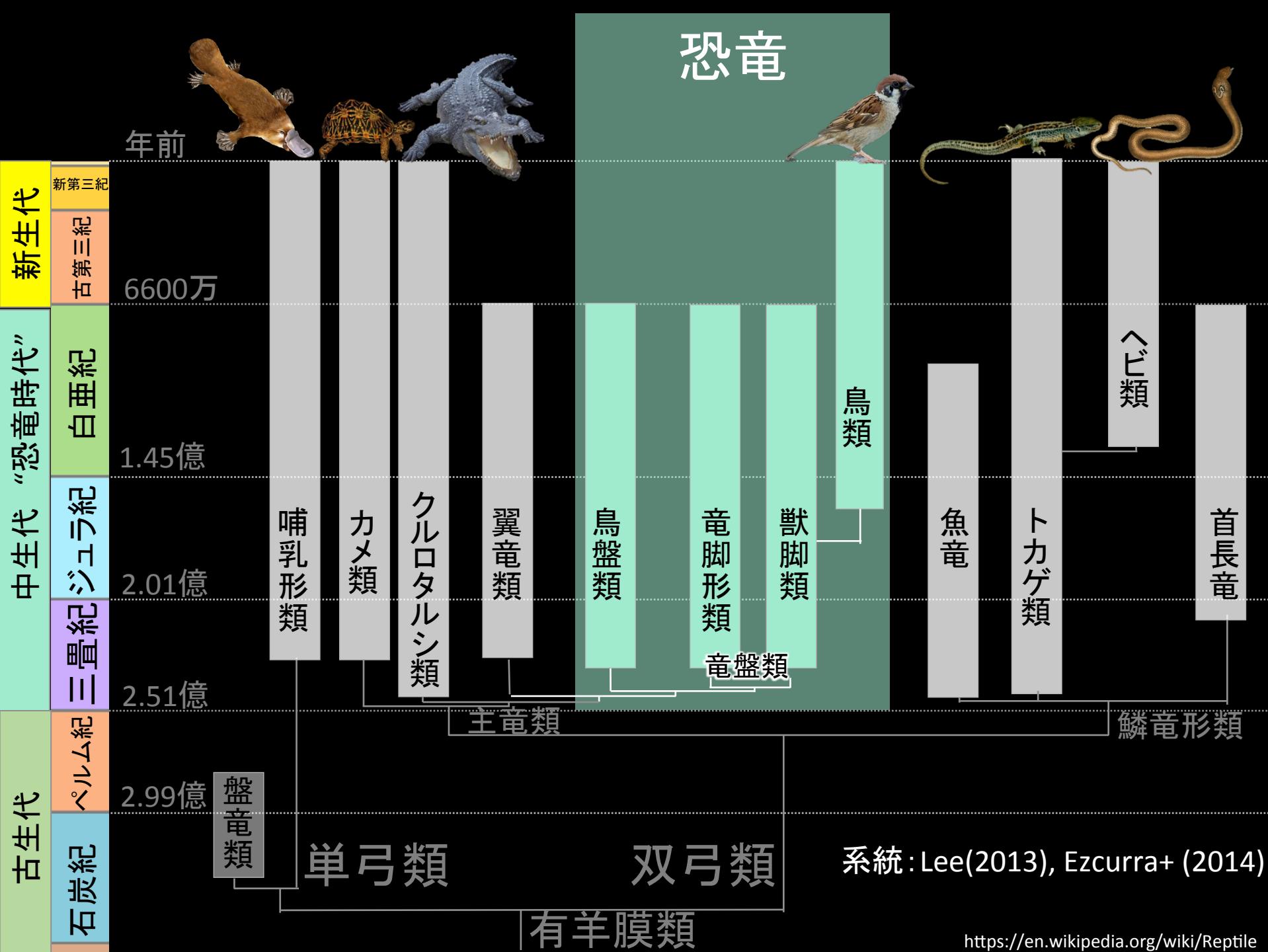


# 恐竜時代の地球環境と生態系



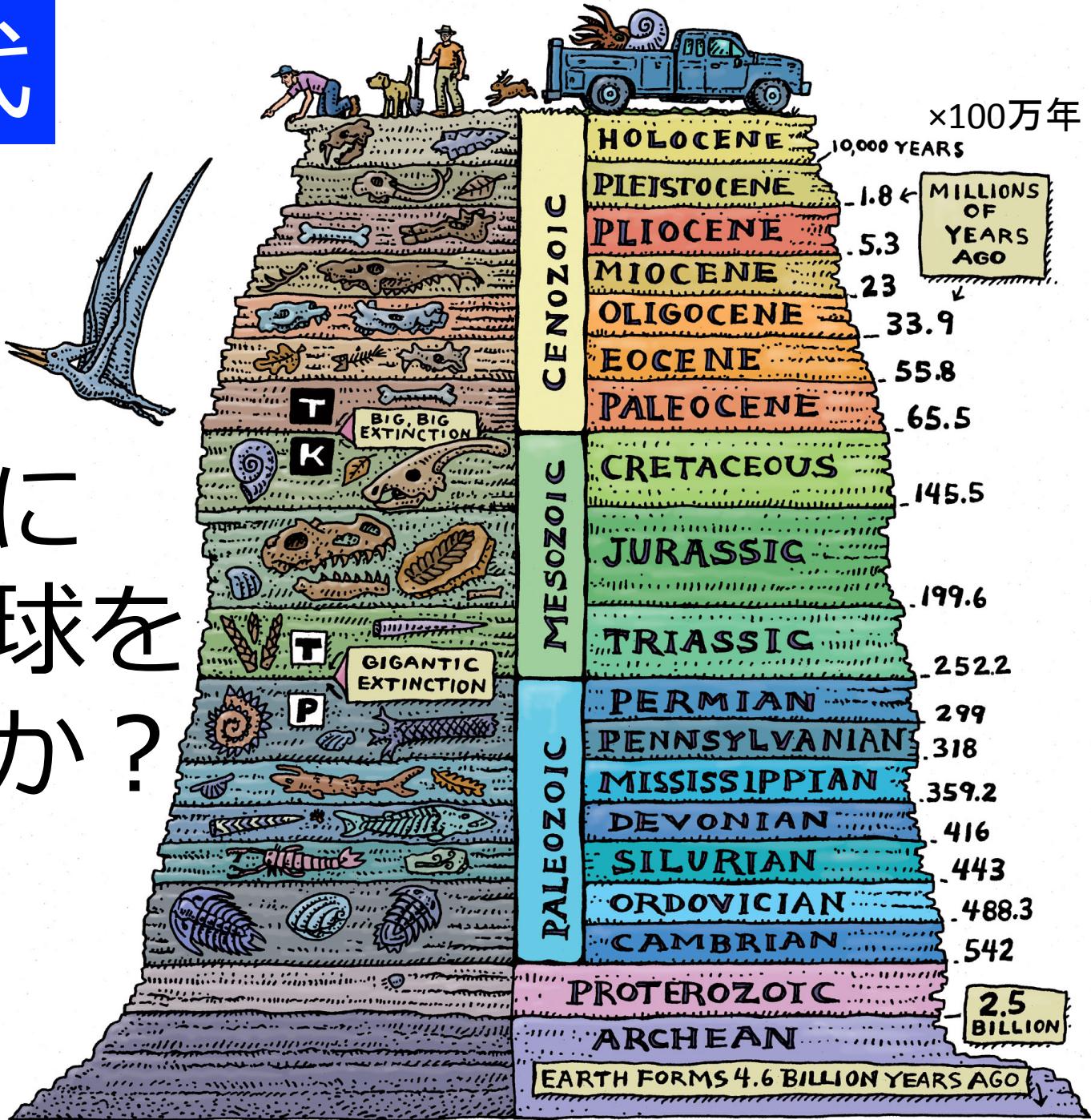
三畳紀の古地理（2億年前）



# 地質時代



どのように  
過去の地球を  
読み解くか？



# 絶対年代の不確定性

要因：測定可能層の少なさ  
測定誤差の大きさ

年代不確定性 (100万円)

uncertainties in myr

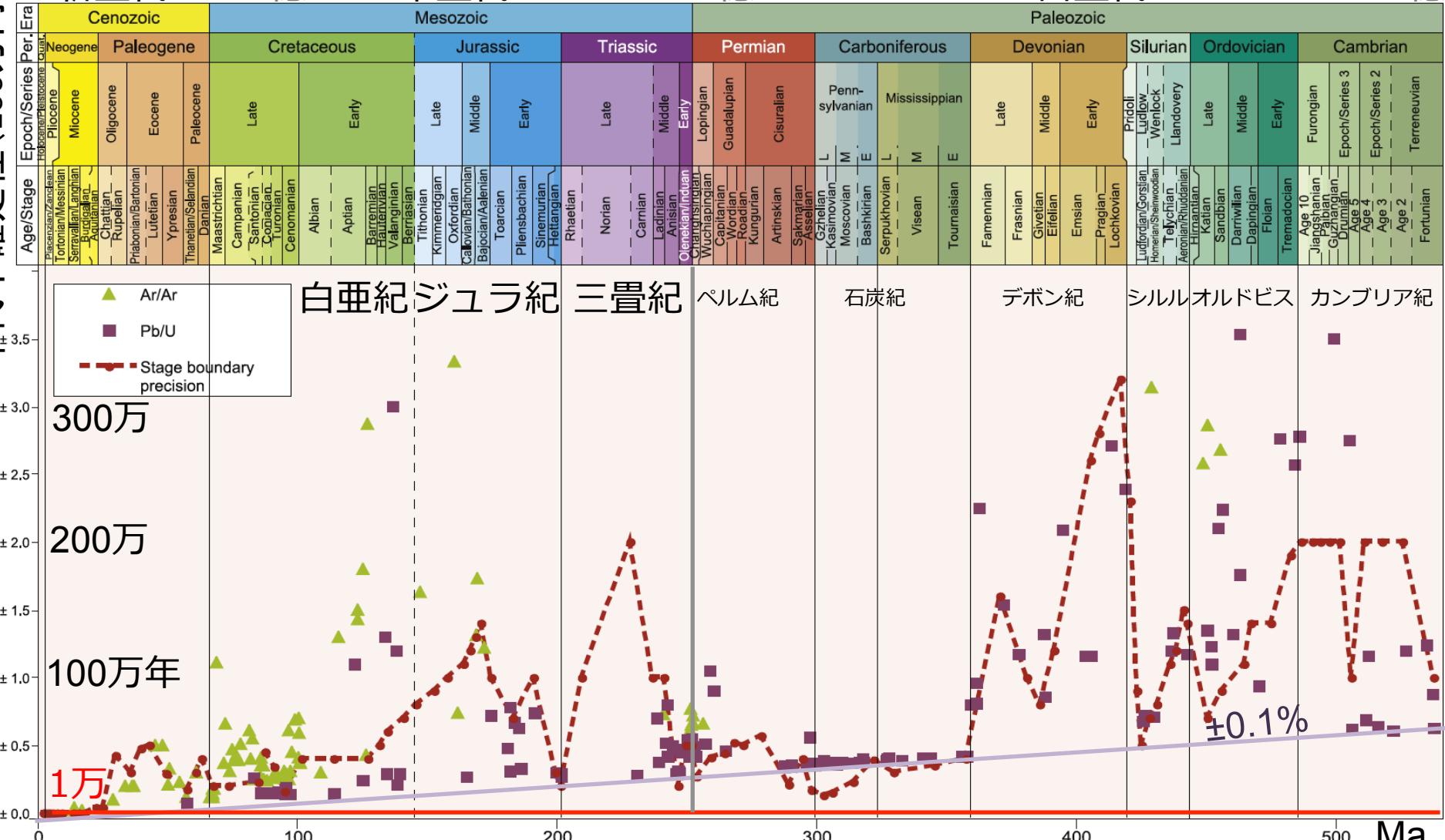
新生代 0.66億

中生代

2.5億

古生代

5.4億

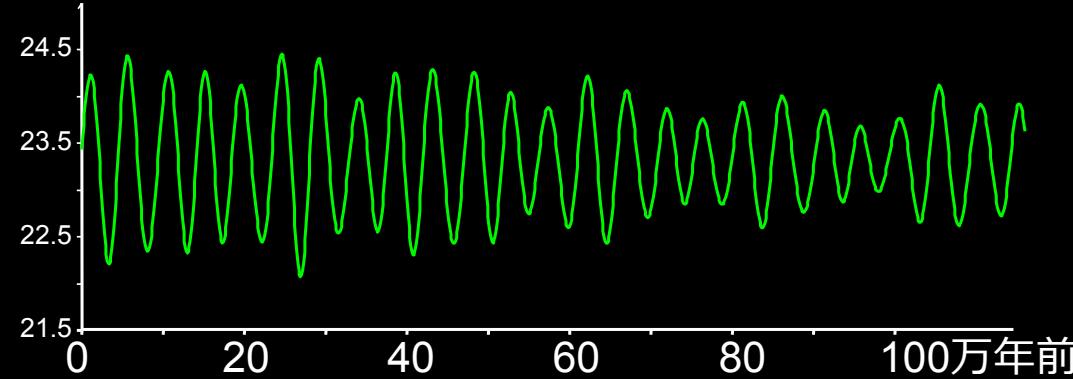


天文学的周期

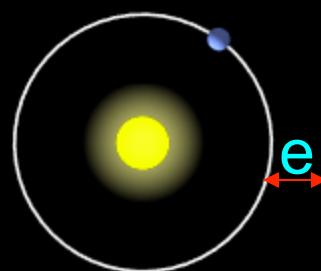
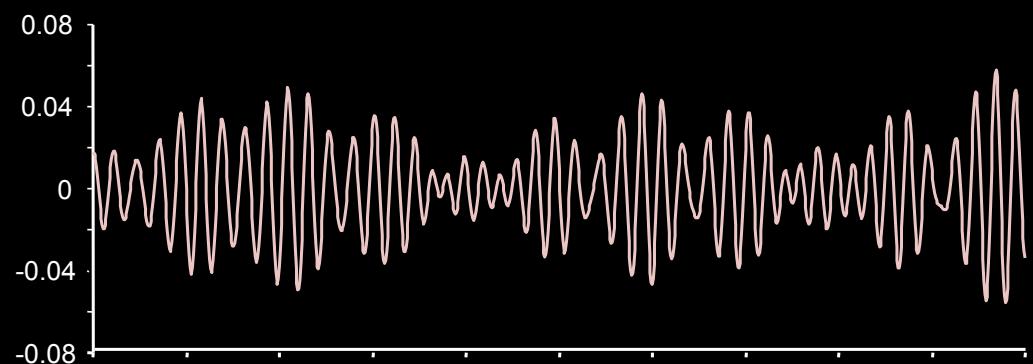
Hinnov and Hilgen (2012)



**地軸傾動 : 4.1 万年**

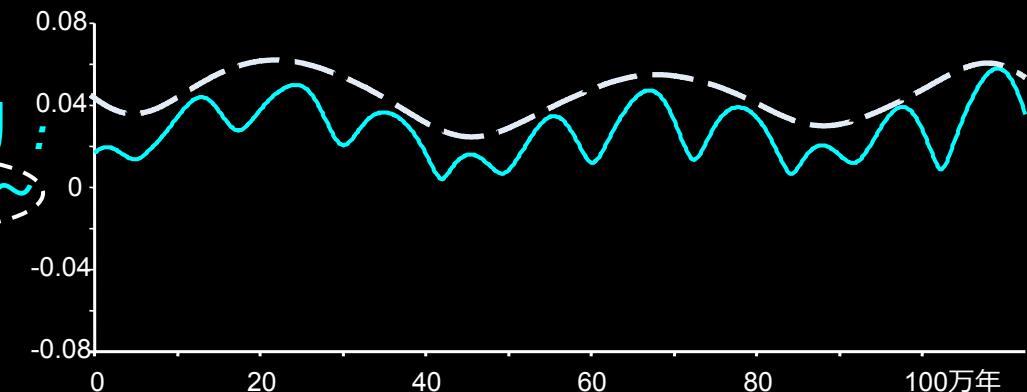


**歲差運動 : 1.9-2.3 万年**

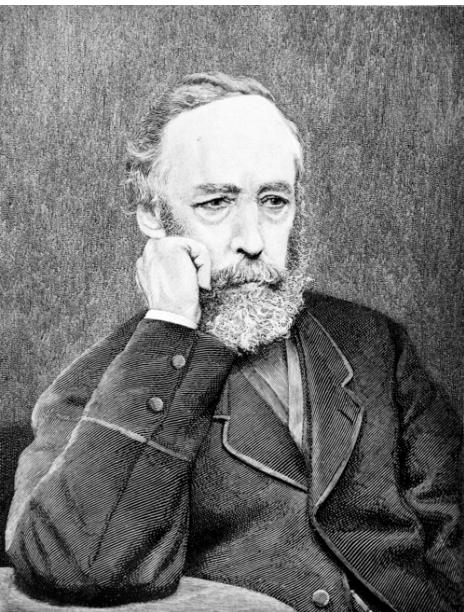
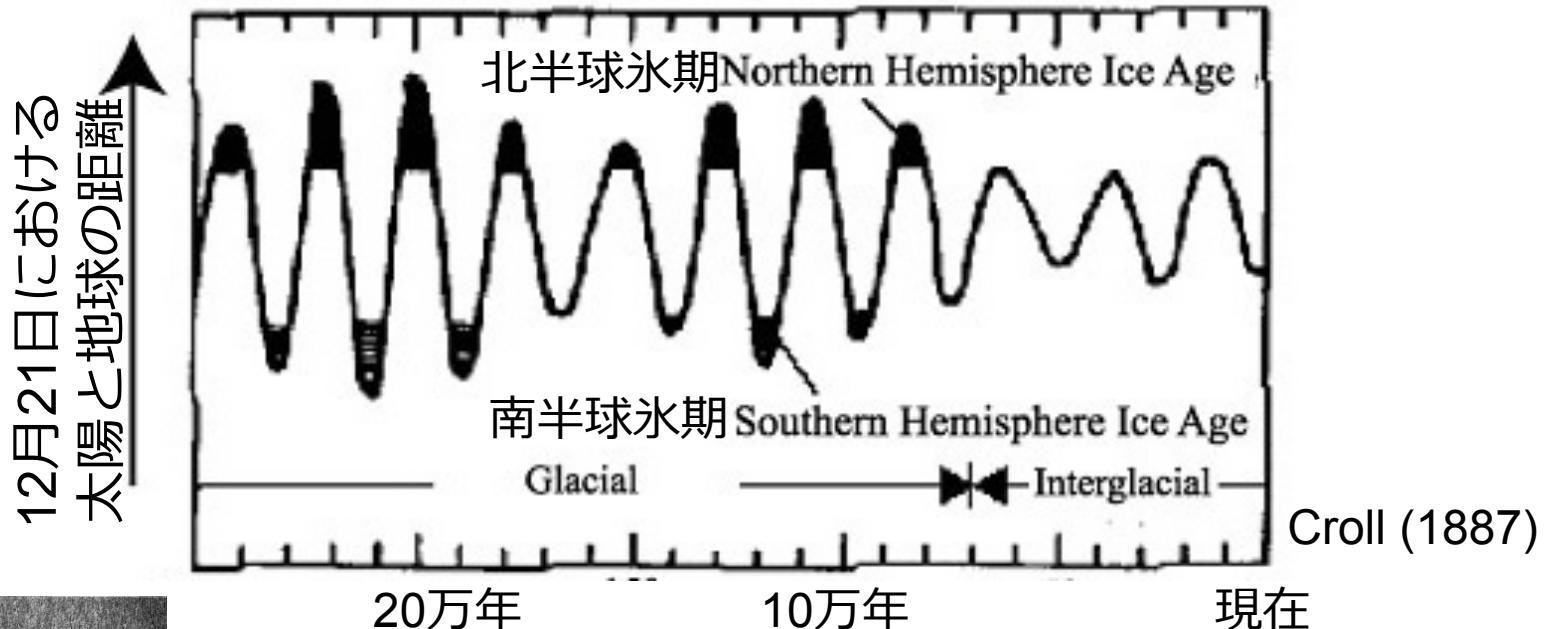


**離心率変動**

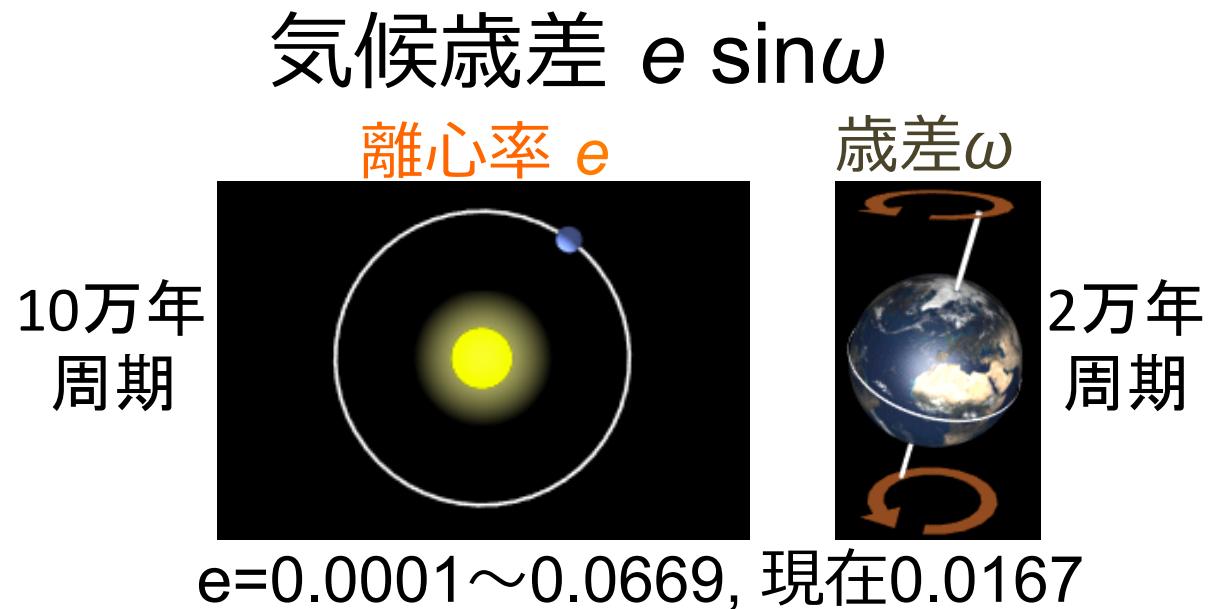
**10-12.5 & 40 万年～**



# 氷期サイクルの要因：離心率変動と歳差運動



James Croll 1821-1890



# 白亜紀の年代推定に天文年代を適用!?

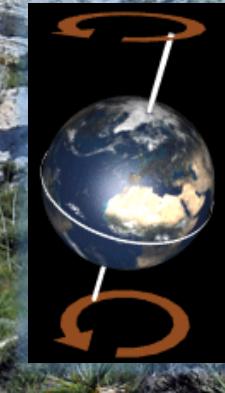
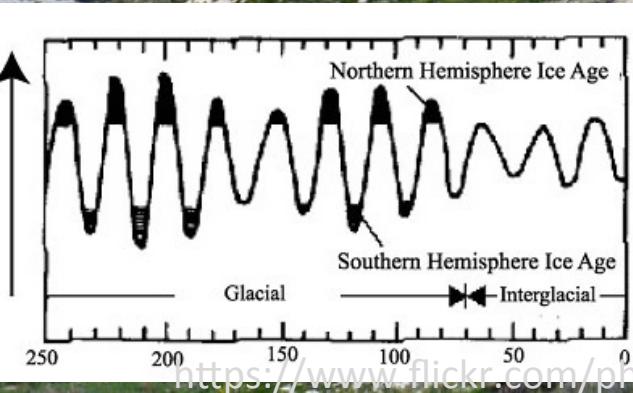


白亜紀の地層は  
1枚1万年!

Gilbert (1895)

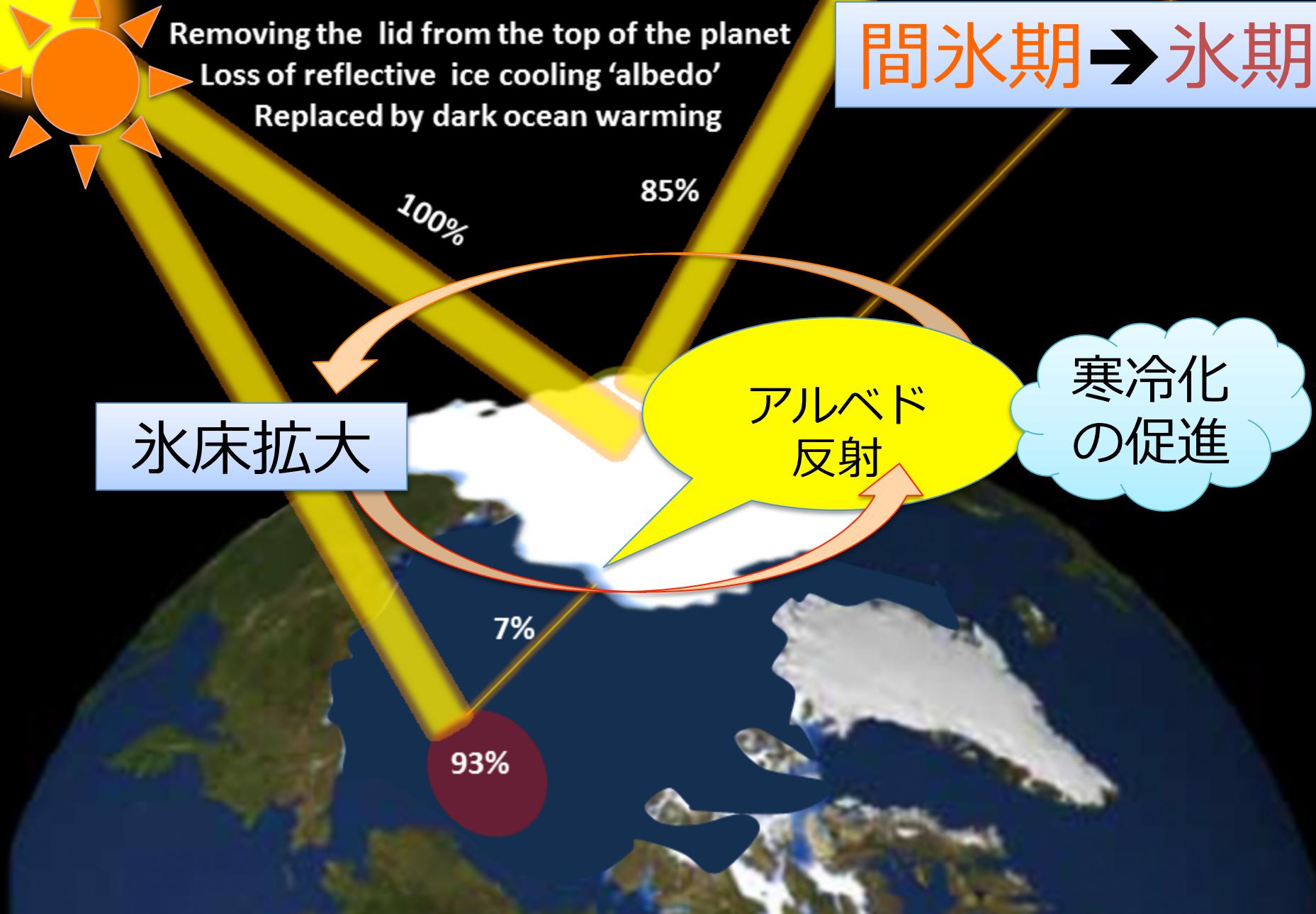
米Niobrara石灰岩

Grove Karl Gilbert  
1843-1918



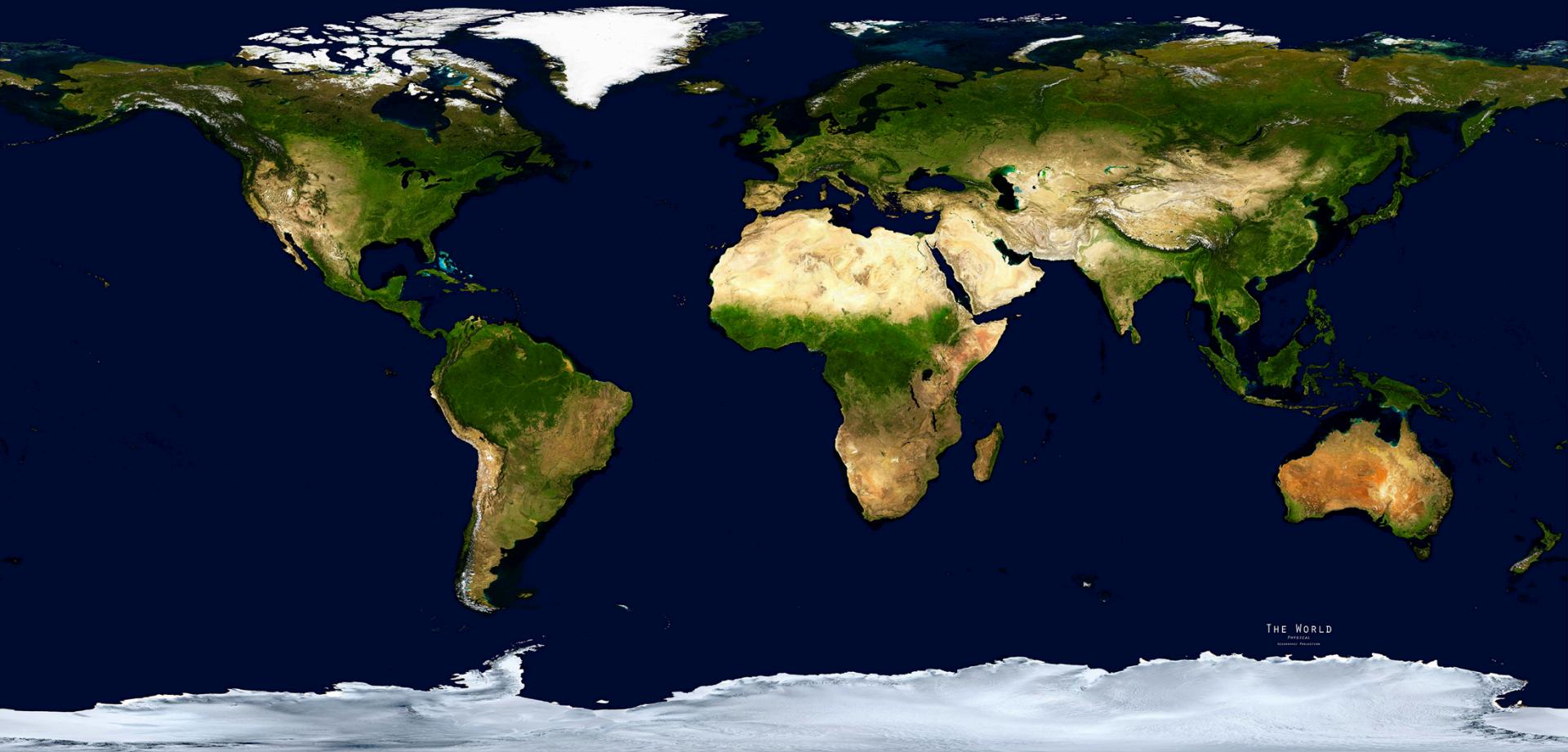
間氷期 → 氷期

Removing the lid from the top of the planet  
Loss of reflective ice cooling 'albedo'  
Replaced by dark ocean warming

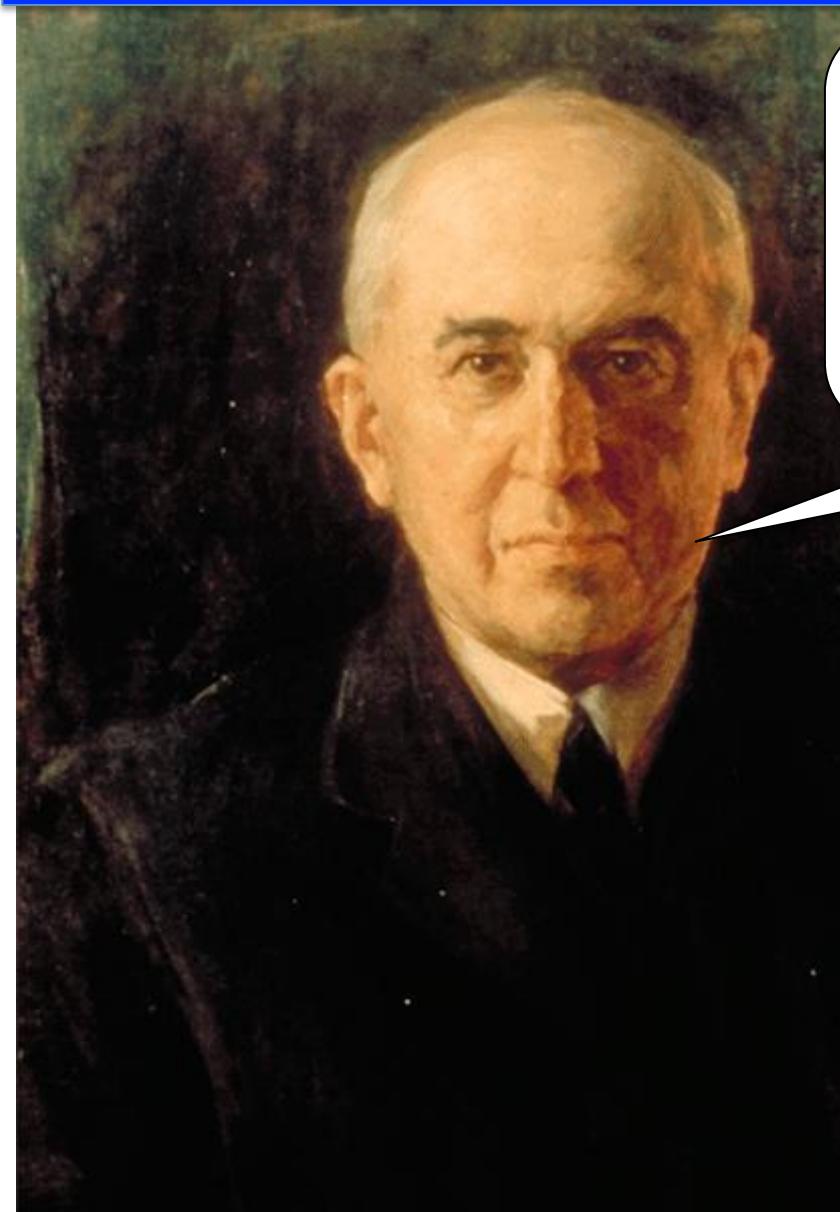


氷-アルベドの正フィードバックで氷床拡大加速

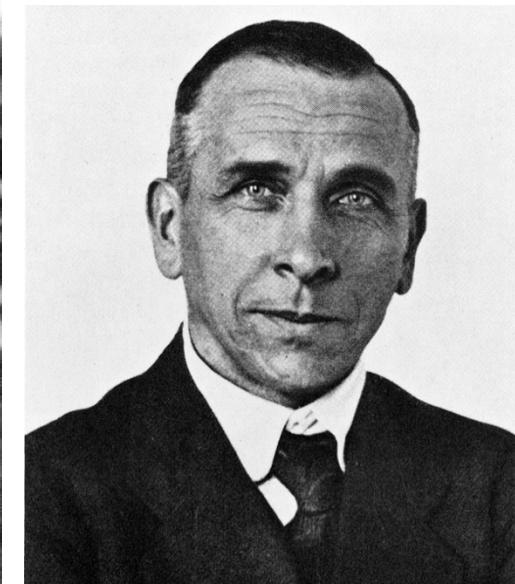
# 氷床形成と氷床崩壊,どちらが重要?



# 天文学者 ミランコビッチの仮説



北緯65度の夏の  
日射量変動が  
氷床崩壊を引き起こす



ミランコビッチ（天文学者）

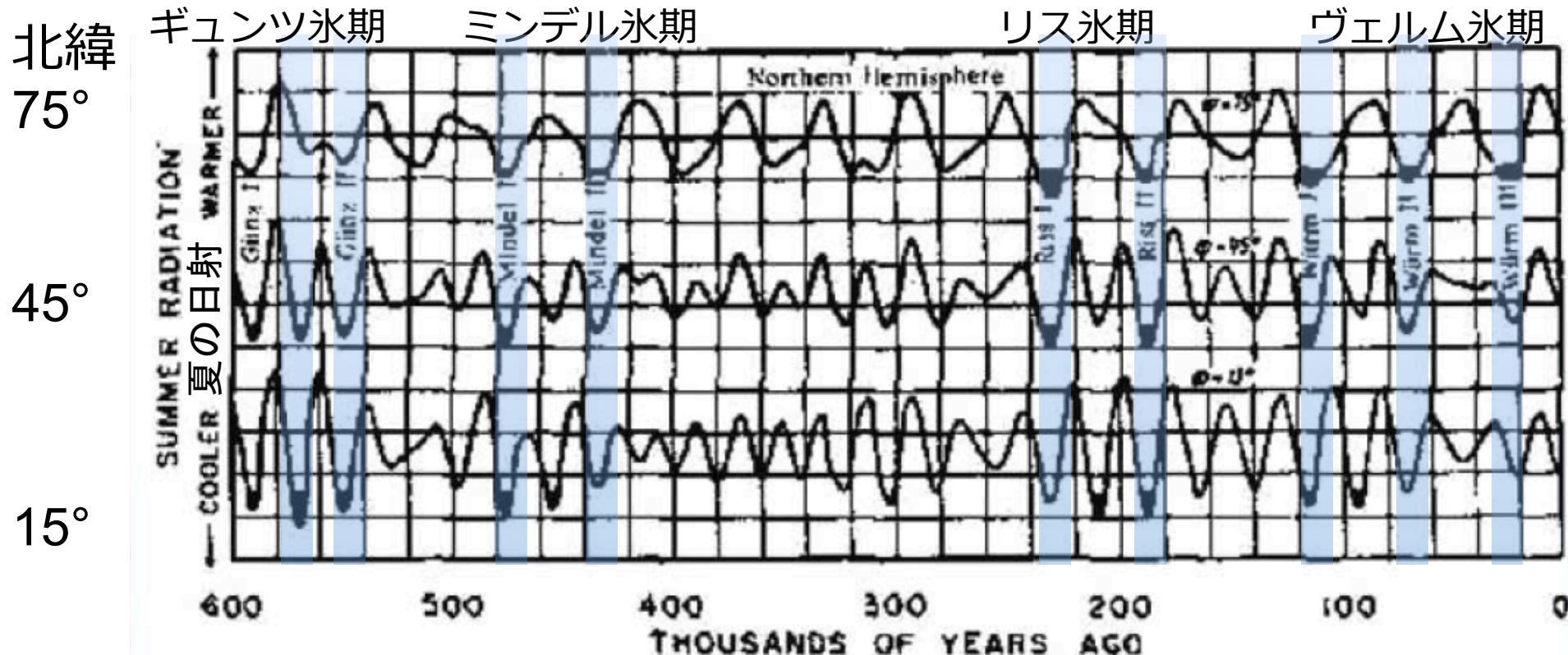
ケッペン（気候学者）

ウェグナー（気象学者）

# ミランコビッチの天体計算と氷期予測

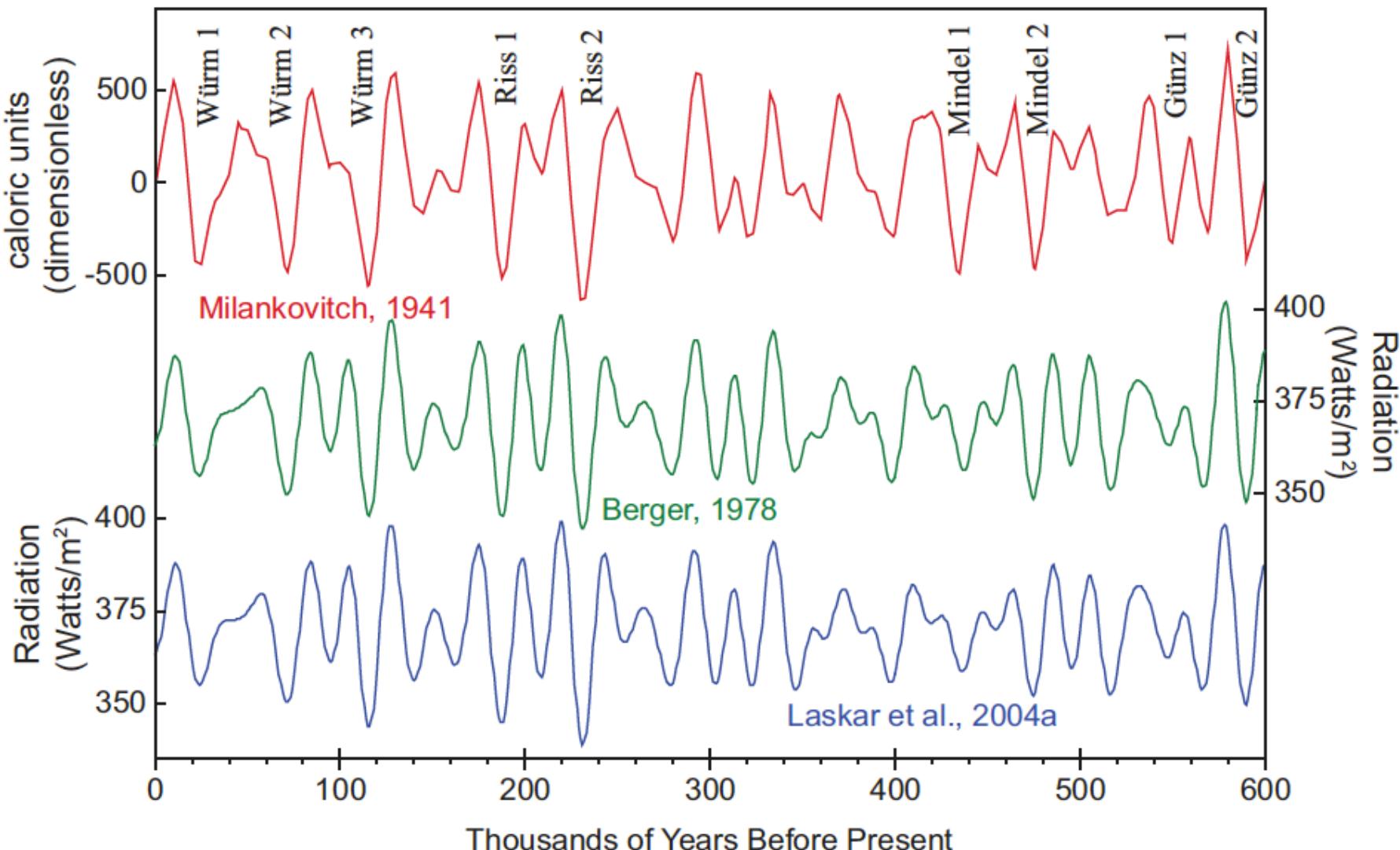
緯度毎の夏の日射変化を推定

●:氷期

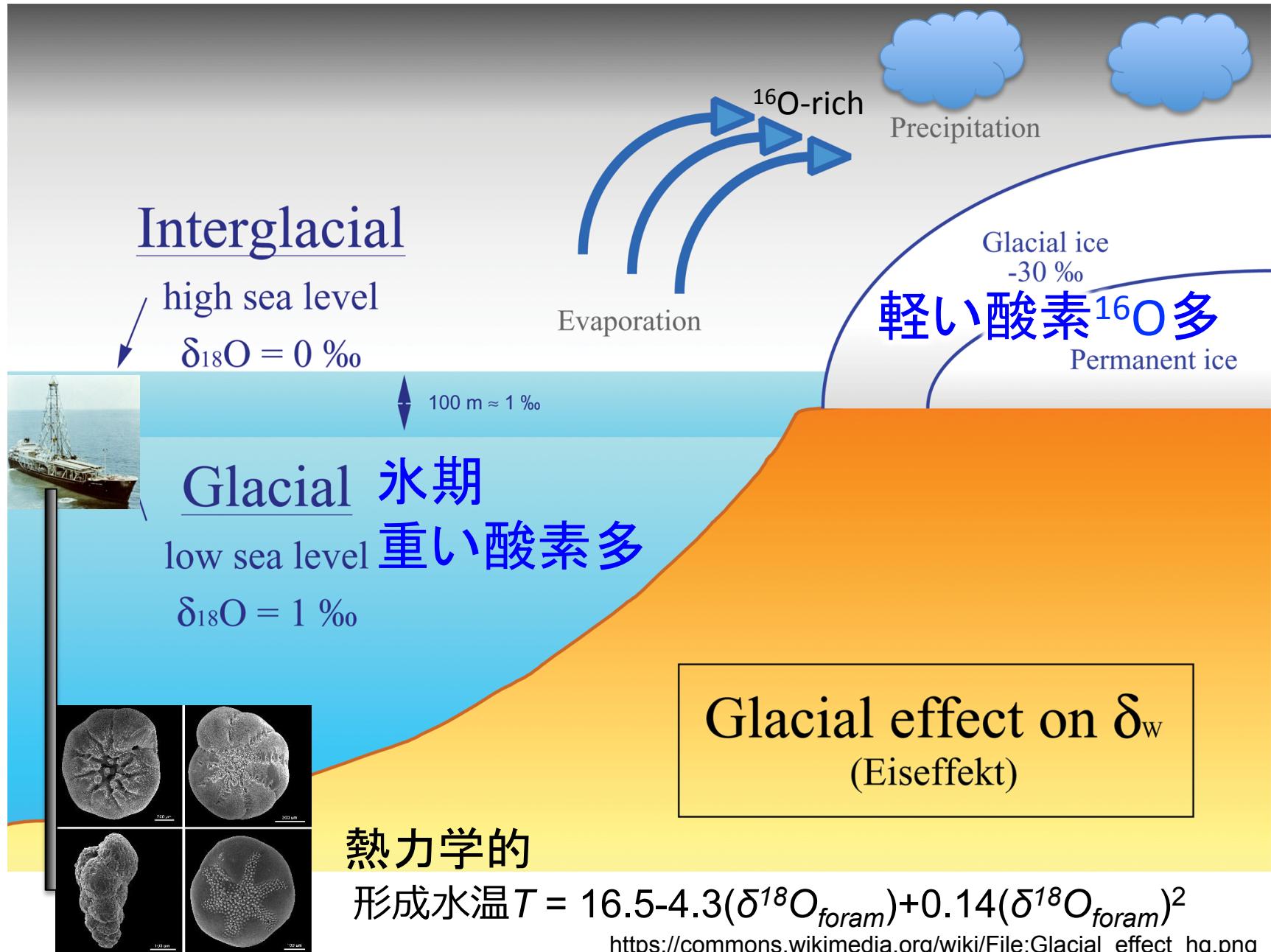


氷河性堆積物の年代推定に適用

# ミランコビッチの天体計算の正確さ

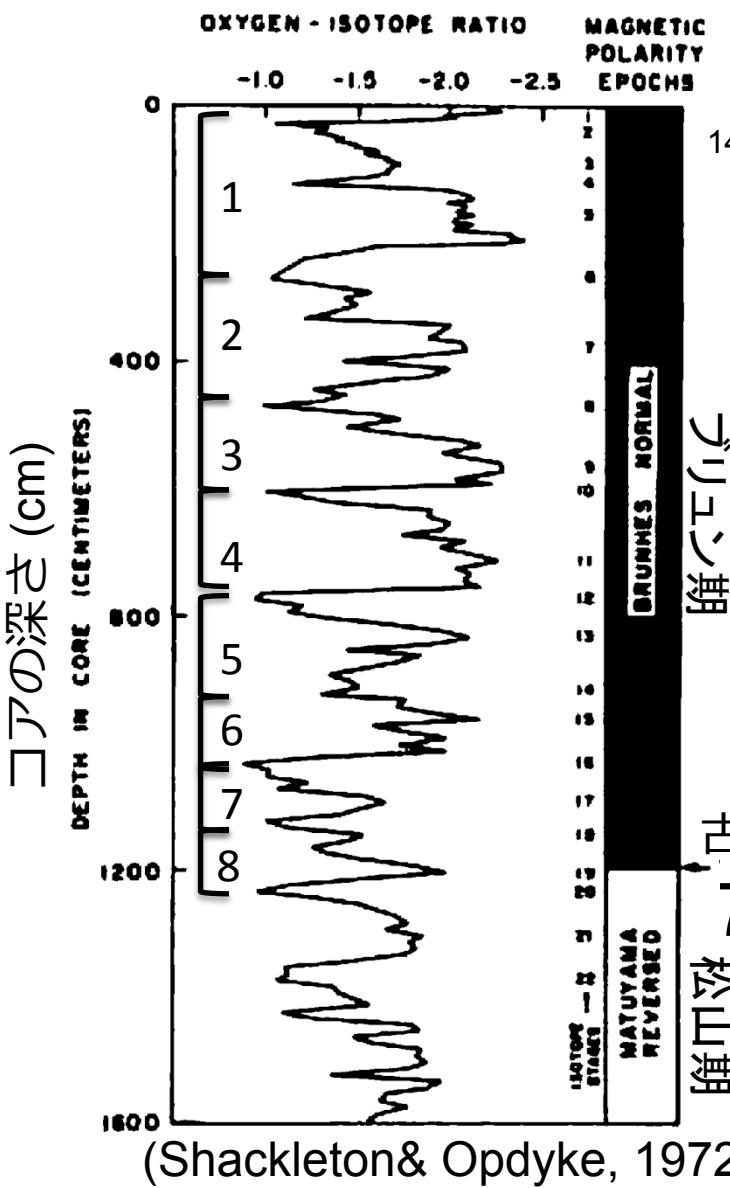


# O同位体比によるミランコビッチ仮説検証



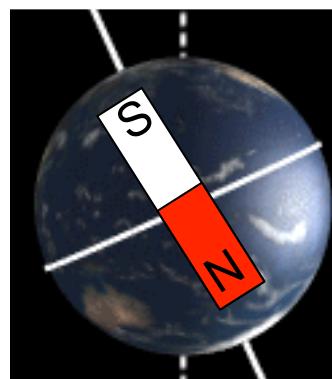
# 氷期サイクルの定量化

有孔虫 酸素同位体比

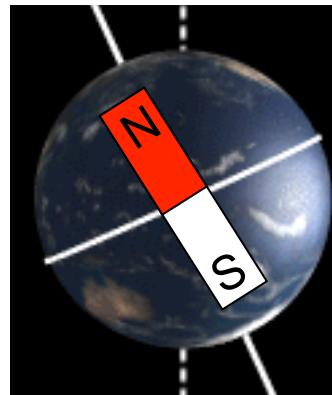


78万年 ÷ 8 = 10万年サイクル？

正磁極  
(現在と同じ)



逆磁極  
(現在と逆)

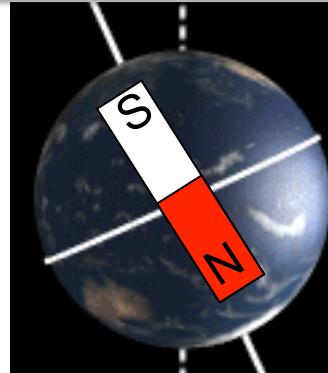


# 最後の古地磁気逆転 チバニアン

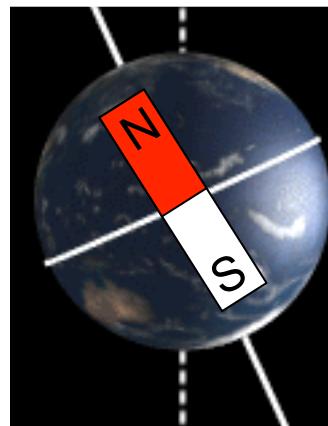
中期更新世(チバニアン?)



チバニアン



カラブリアン



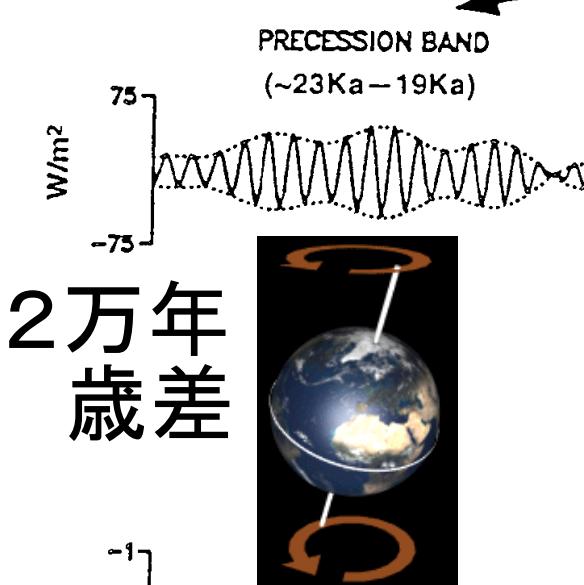
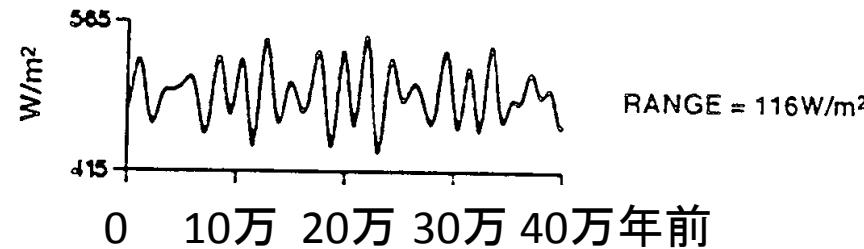
第四系／紀

完新統／世	present
	0.0117
	0.126
上部／後期	0.781
チバニアン？	1.80
カラブリアン	2.58
ジェラシアン	

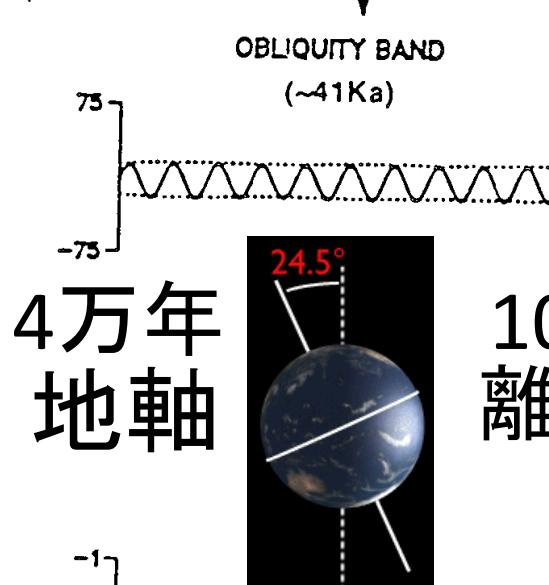
present  
0.0117  
0.126  
0.781  
1.80  
2.58

# ペースメーカーとしての地球軌道要素

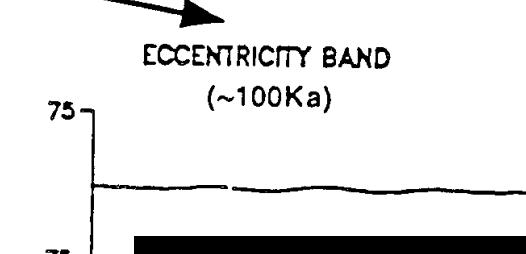
北緯65度  
夏の日射量



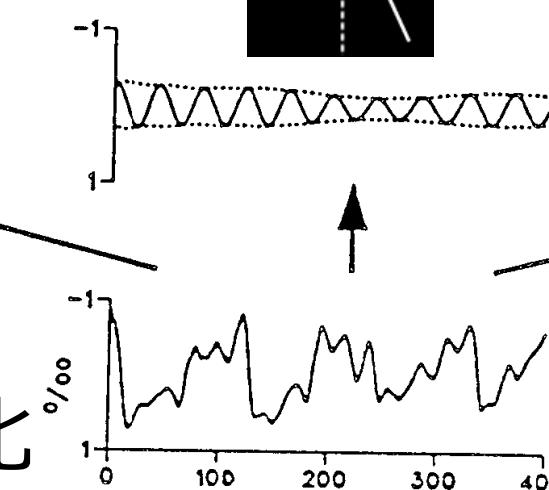
2万年  
歳差



4万年  
地軸



10万年  
離心率



有孔虫  
酸素同位体比

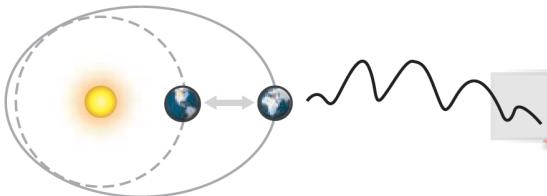
Hays et al. (1976 Science)

# 軌道ペースメーカー

Orbital pacemaker  
(input)

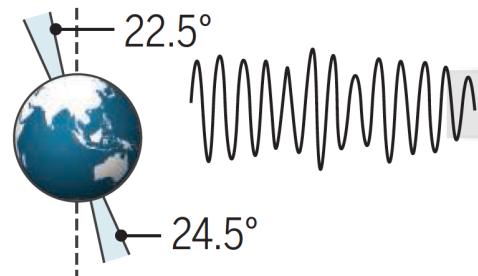
Eccentricity

離心率



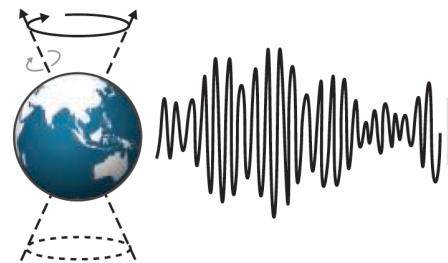
Obliquity

地軸傾動



Precession

歳差



# 気候システム

Climate system

フィードバック,  
增幅, 減衰, 位相変化

日射変化

Seasonal  
insolation

大気  
Atmosphere-ocean  
circulation  
海洋循環

温室効果ガス

Greenhouse  
gases

$\text{CO}_2$

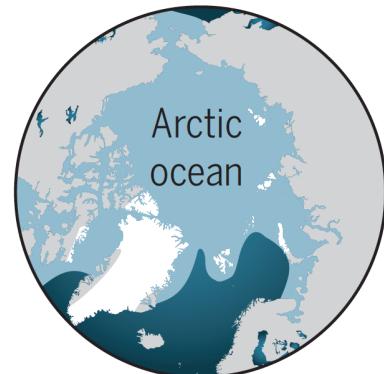
(Feedback, amplification,  
phase alteration)

# 氷床応答

Ice sheet response  
(output)

Arctic  
ocean

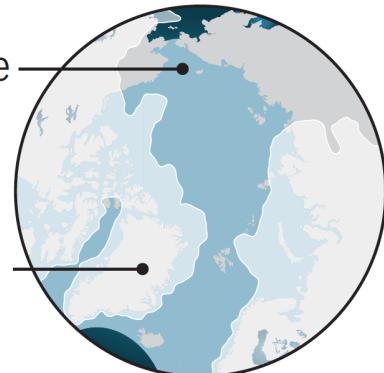
Interglacial  
(warmer)



Glacial  
(cooler)

Sea ice

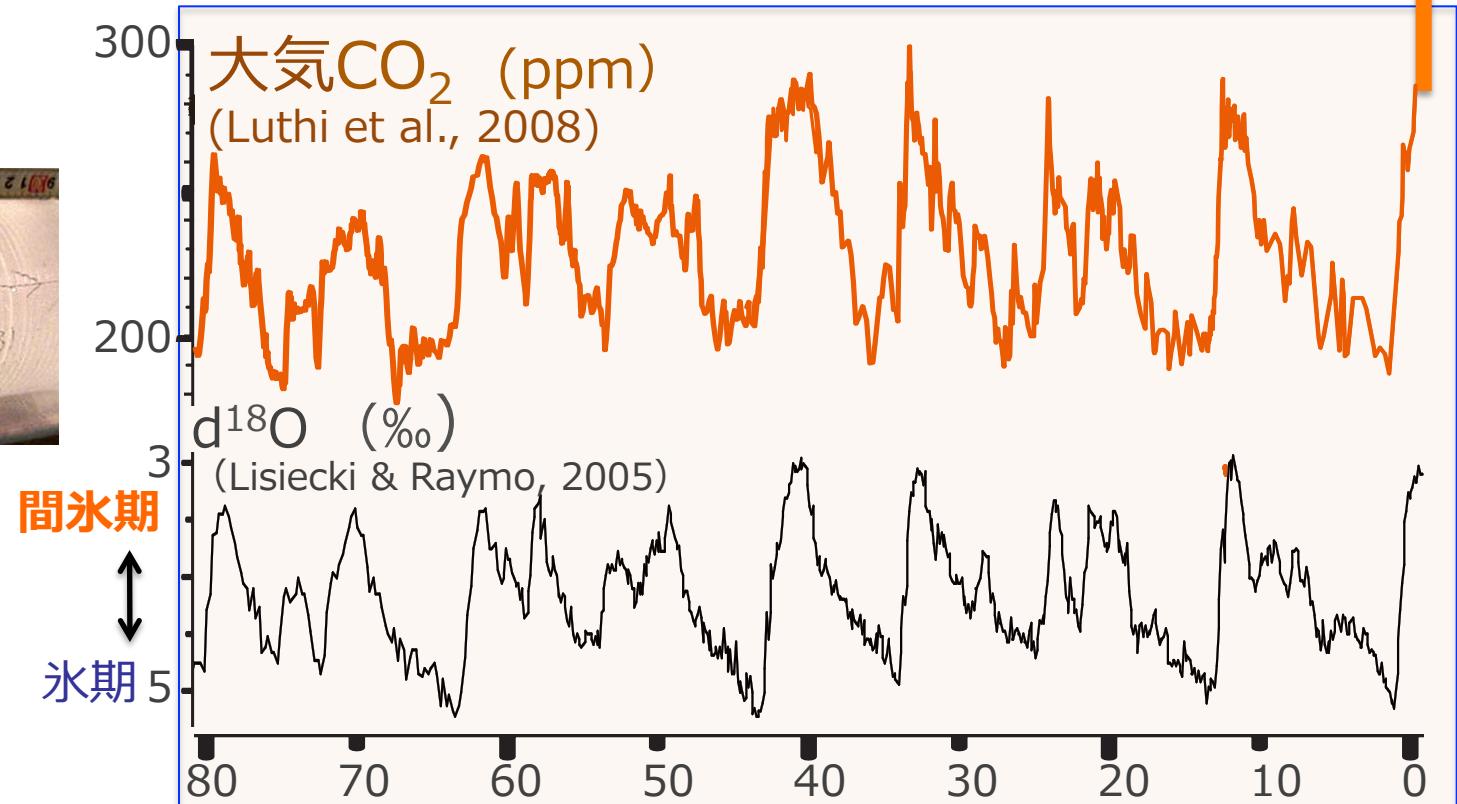
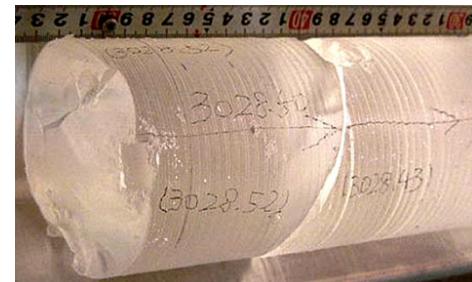
Glacial  
ice



Hodell (2016 Science)

# 氷期サイクルと大気CO<sub>2</sub>変動

何故、大気CO<sub>2</sub>濃度が増減したか？



10万年周期でCO<sub>2</sub> 100ppm変化

万年

# 氷-アルベド- CO<sub>2</sub>の正フィードバックで退氷加速

日射が閾値を超えると

海洋からCO<sub>2</sub>が放出

氷床崩壊

アルベド  
反射減

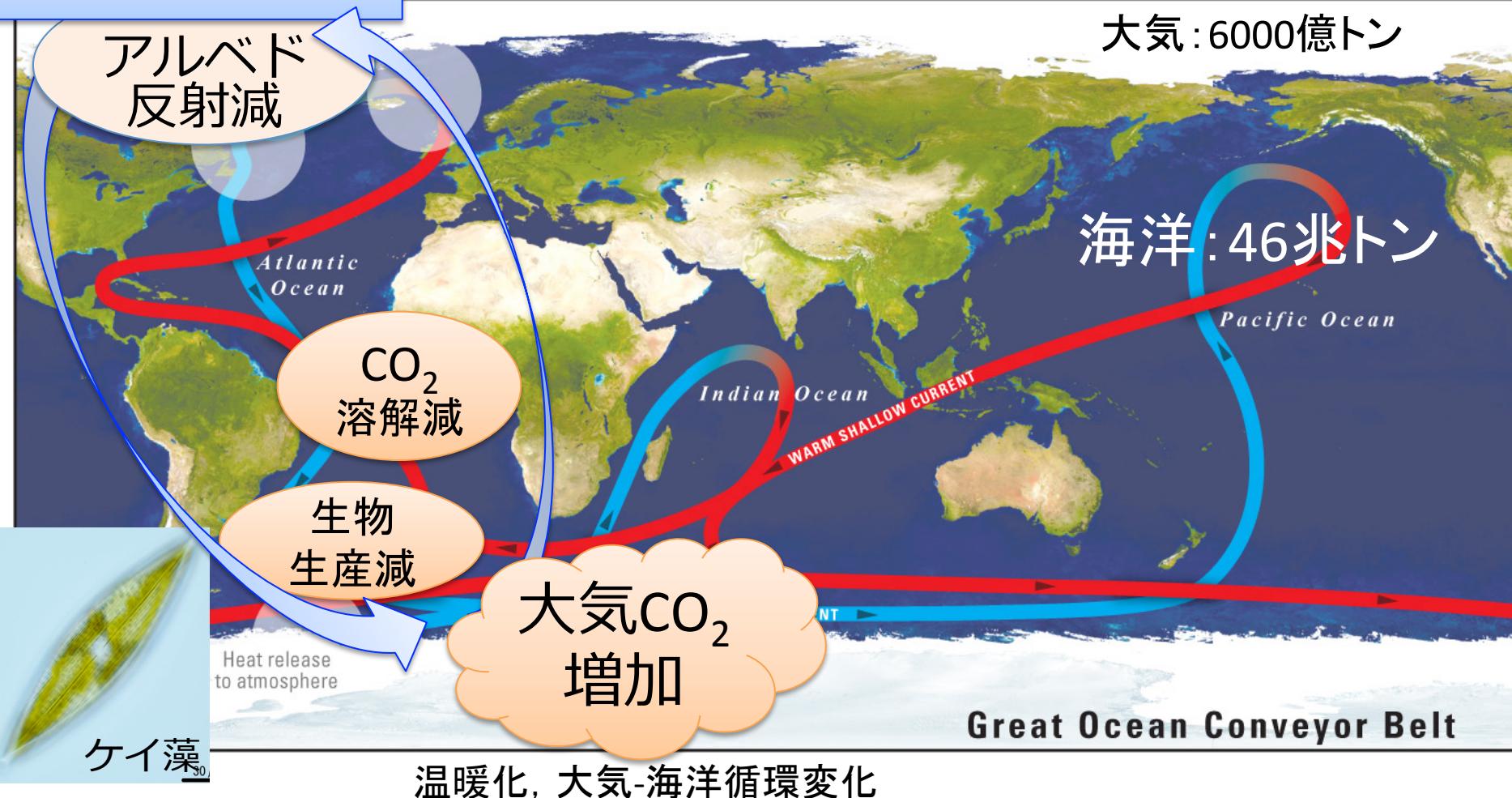
CO<sub>2</sub>  
溶解減

生物  
生産減

大気CO<sub>2</sub>  
増加

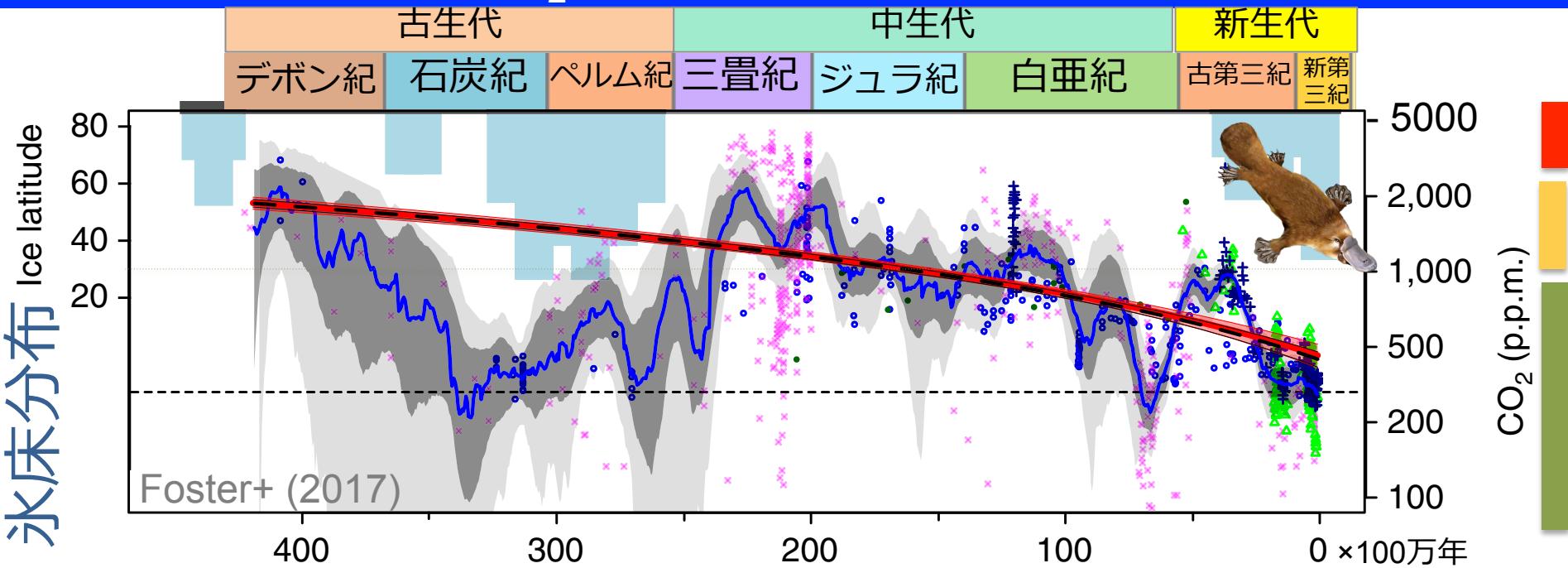
大気: 6000億トン

海洋: 46兆トン

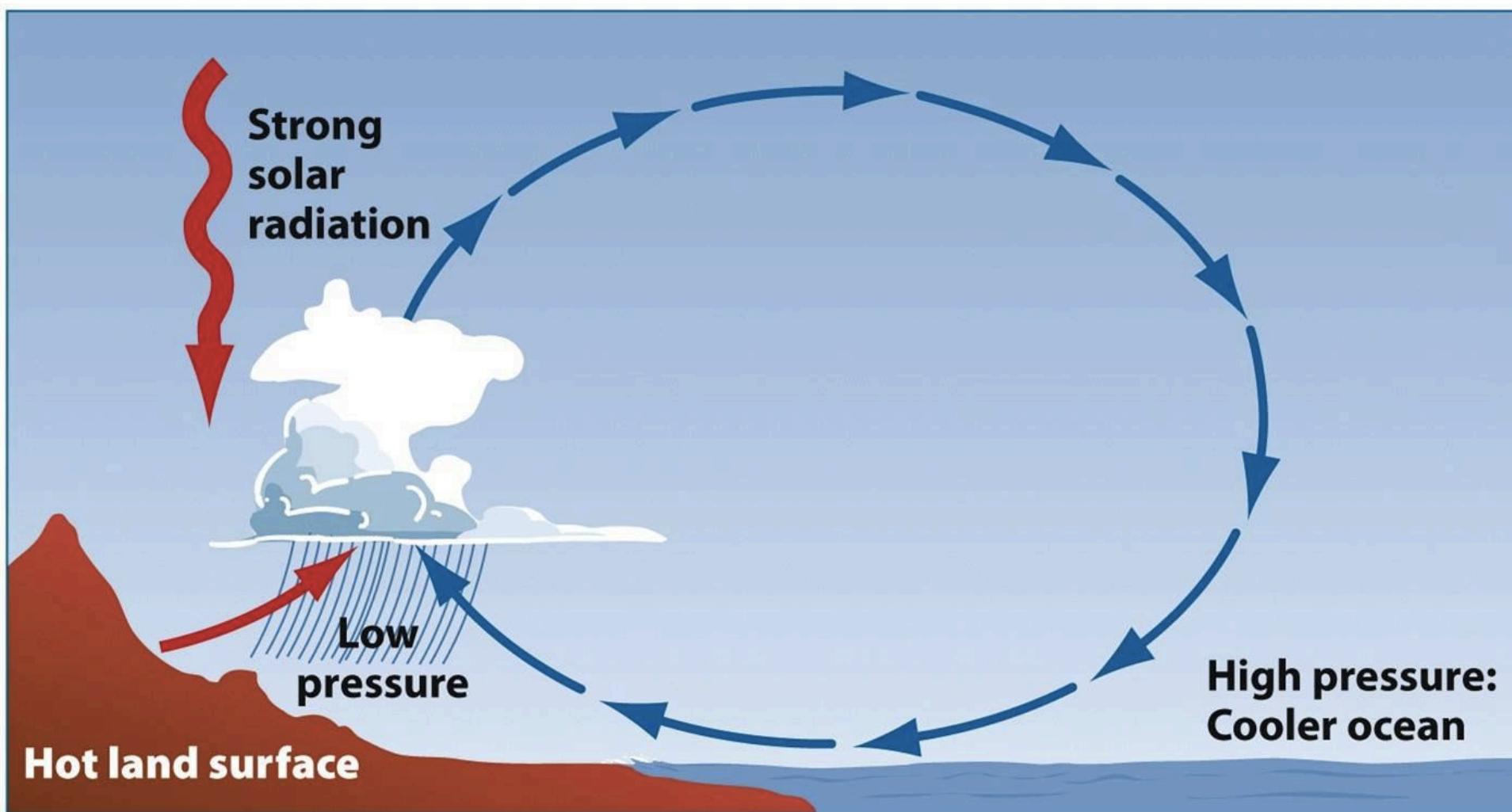


温暖化、大気-海洋循環変化

# 過去4億年間の大気CO<sub>2</sub>と気候変化



# 中低緯度のモンスーン：季節風に伴う物質循環



Summer monsoon

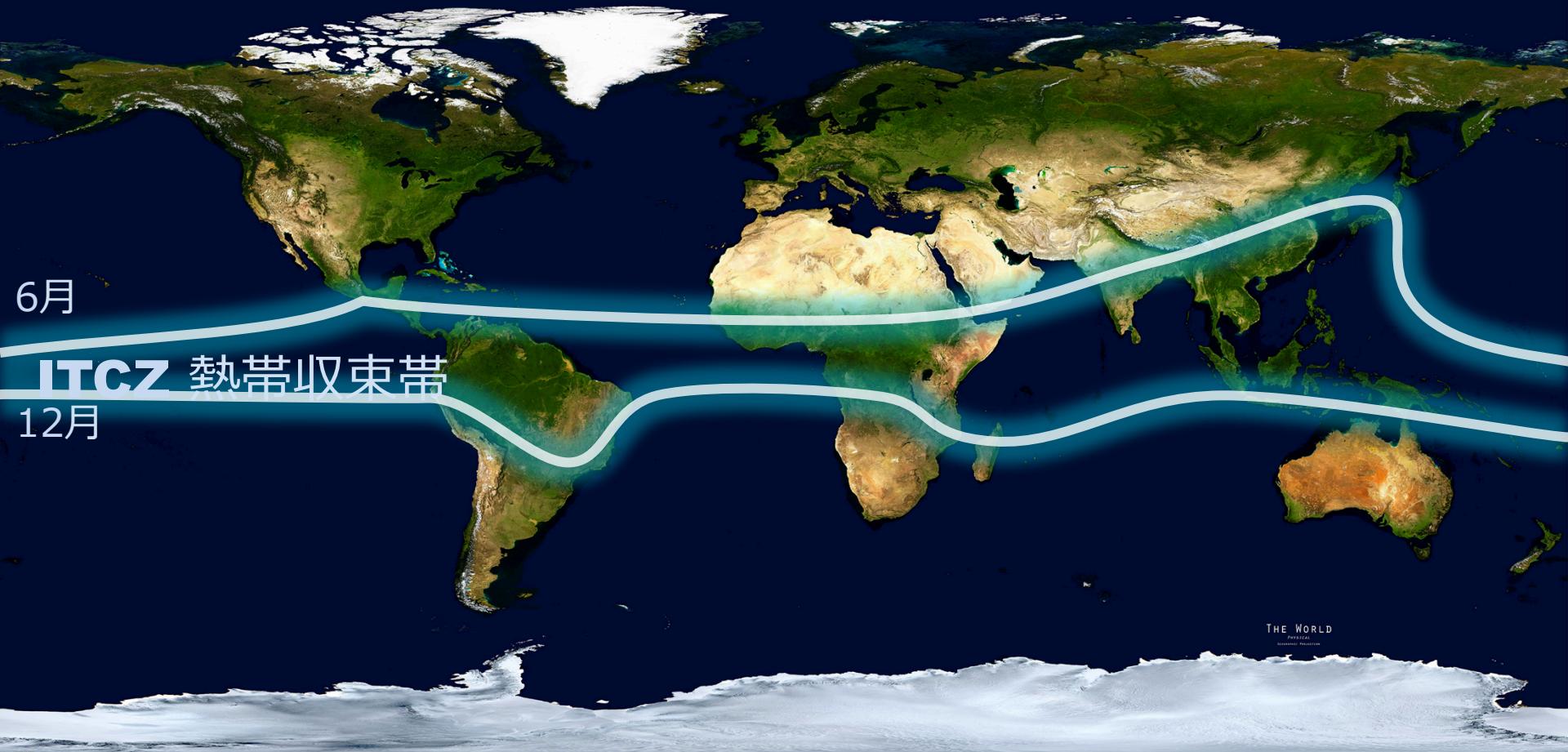
氷床なくともモンスーンあり

Figure 8-1

*Earth's Climate: Past and Future, Second Edition*

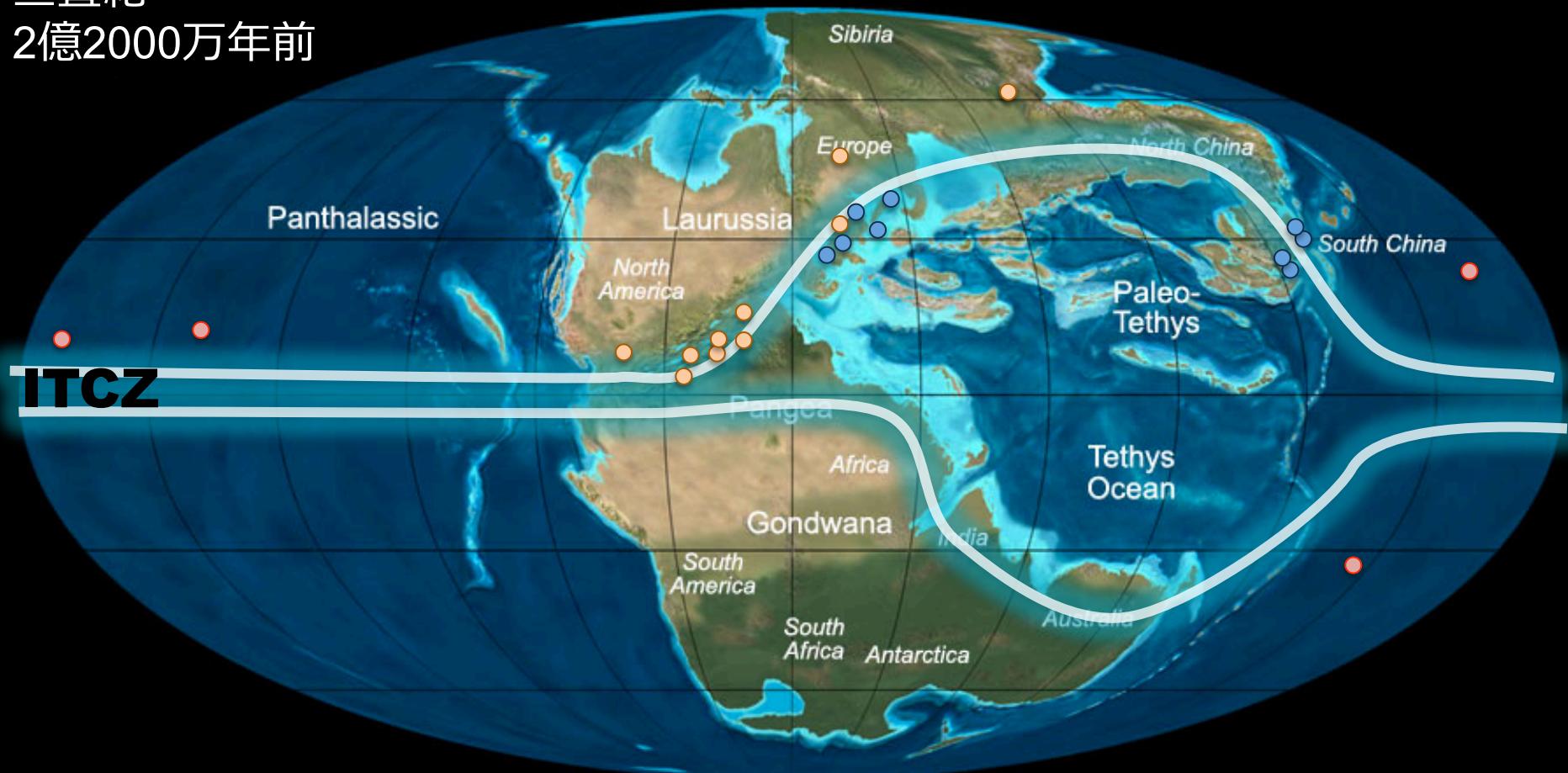
© 2008 W.H. Freeman and Company

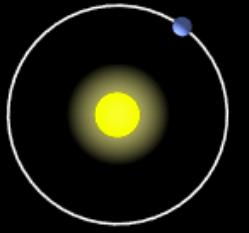
# 現在のモンスーンシステム



# 三畳紀のメガ モンスーンシステム

三畳紀  
2億2000万年前

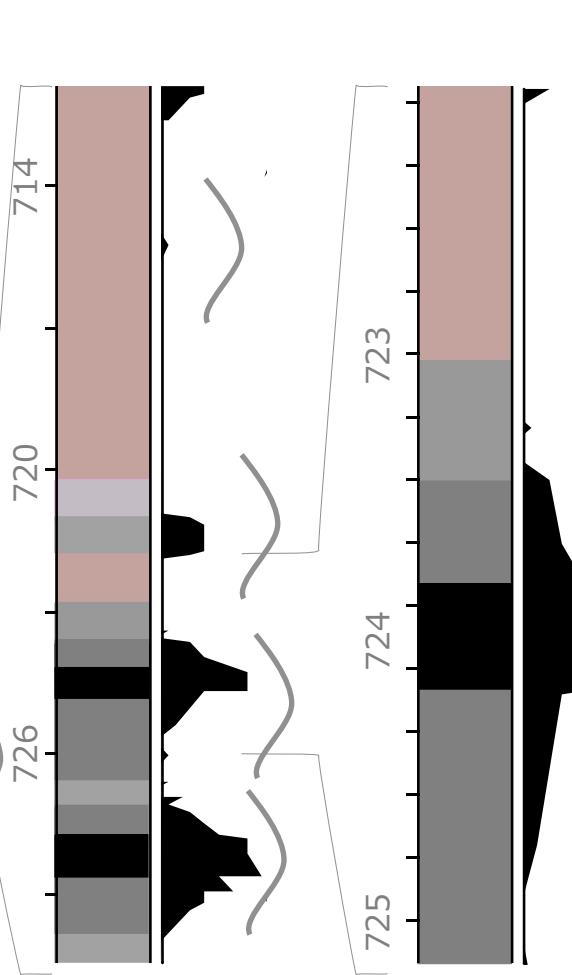
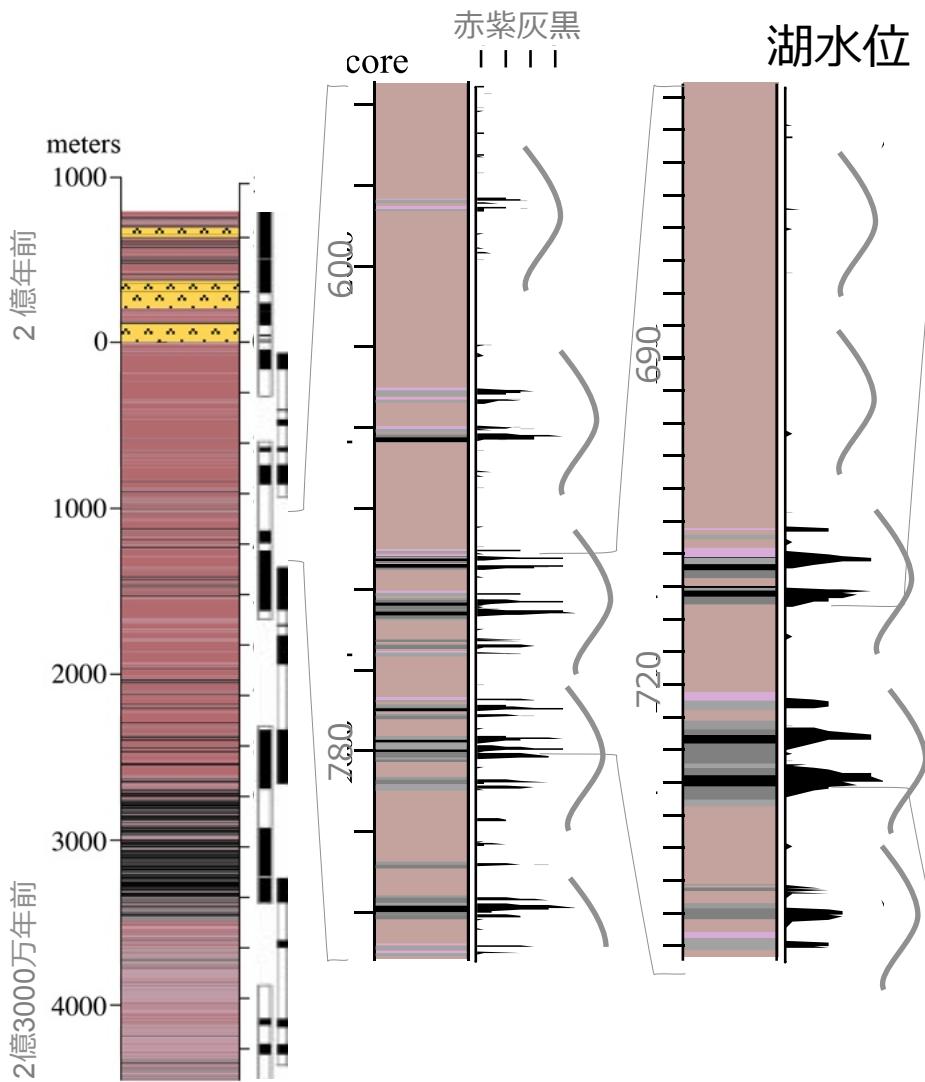




# 湖成層の湖水位変動



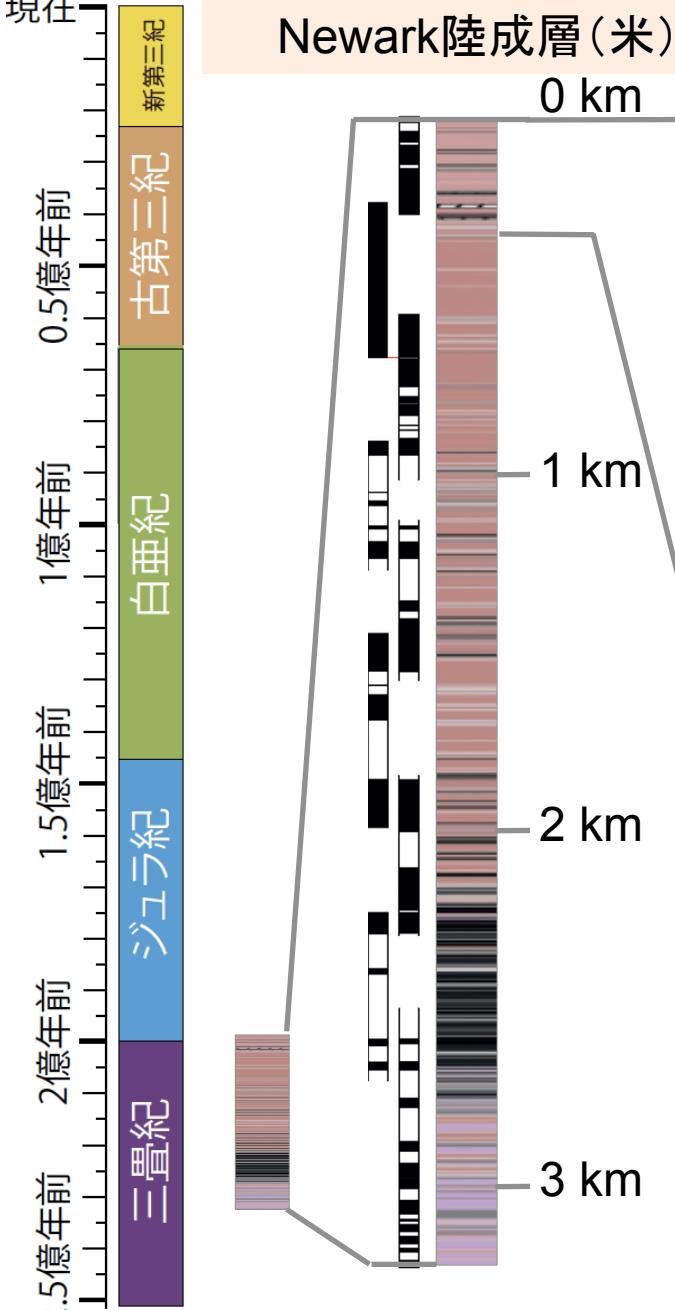
180万年周期 40万年周期 10万年周期 約2万年周期



Olsen (1986*Science*)

# 放射年代による天文年代層序の検証

現在



# Newark陸成層(米)

0 km

# 歲差運動

放射年代

2億  
100万年前

2億  
150万年前

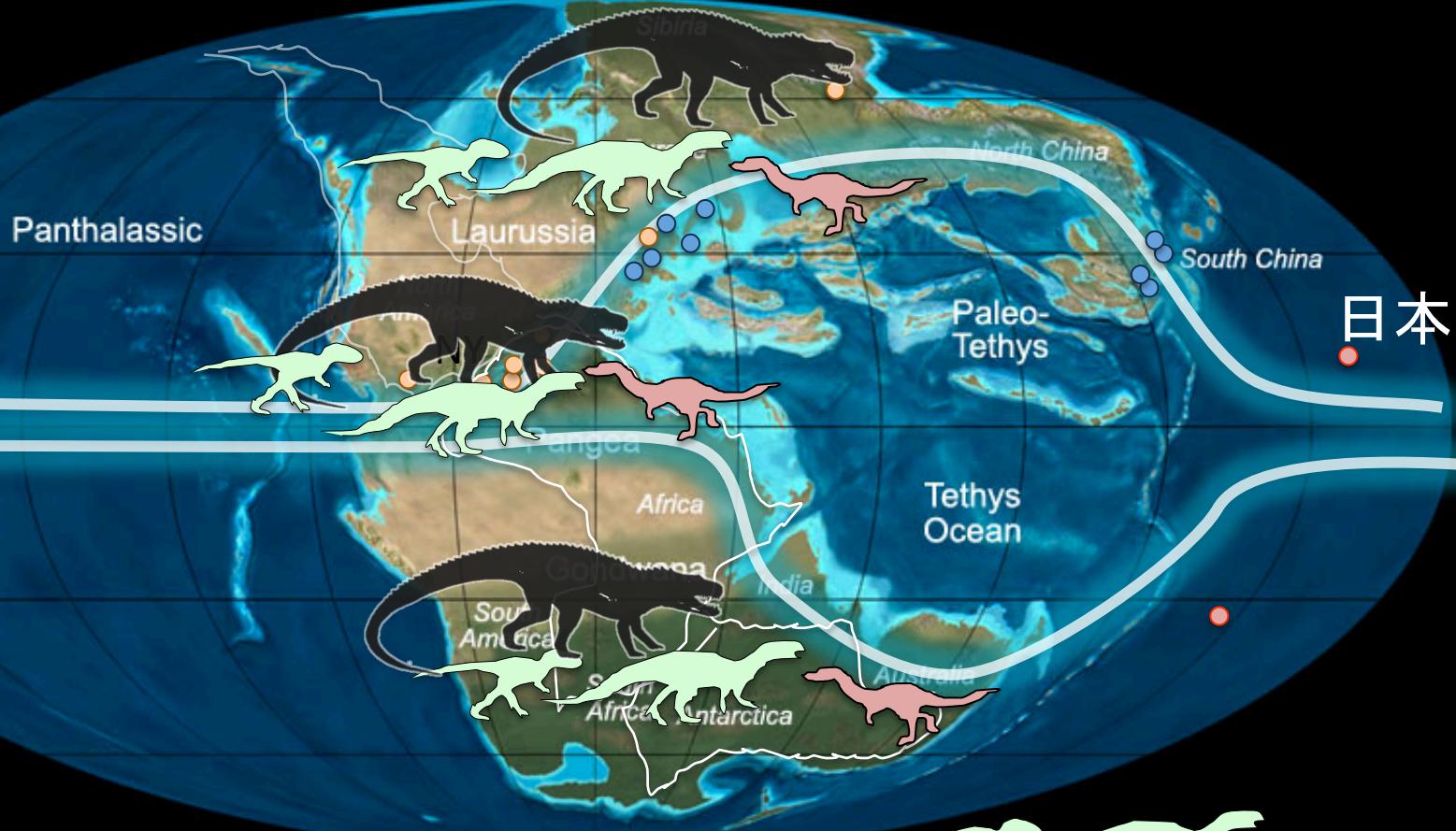
2億91.6万 ±3.4万年前

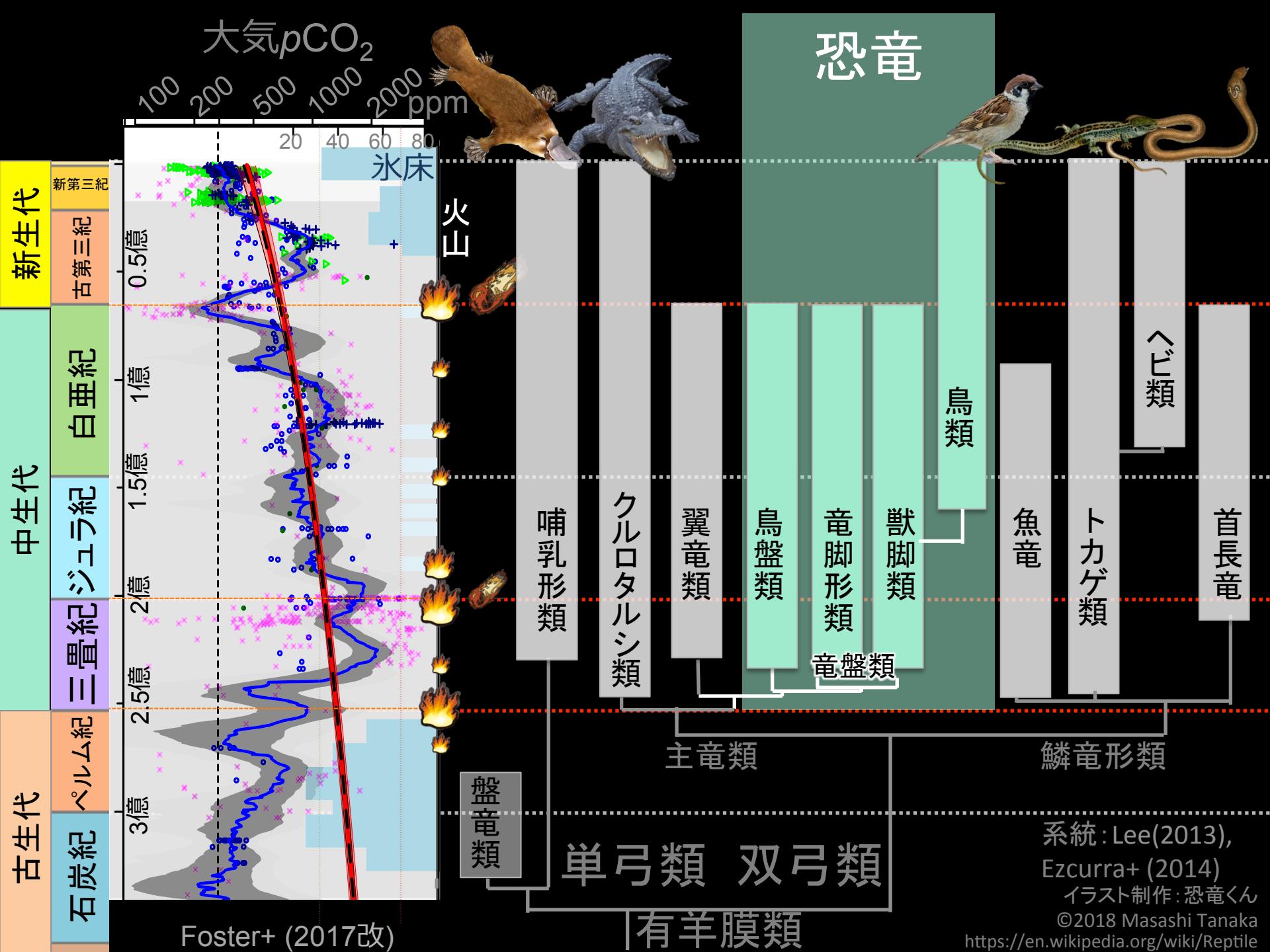
2億127.4万 ±3.2万年前  
2億123.5万 ±3.4万年前

2億156.6万 ±3.1万年前

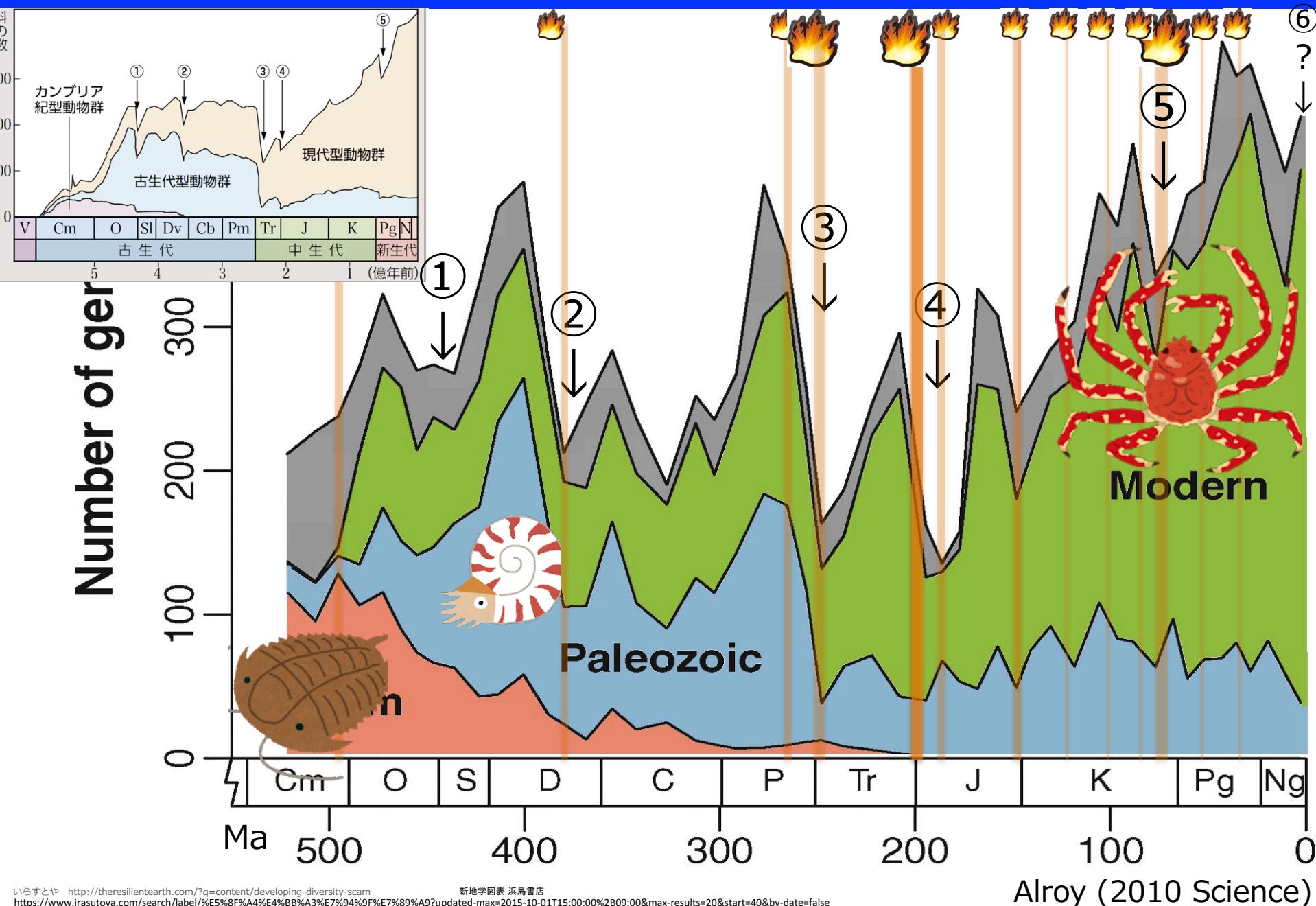
# 三畳紀の地球環境と陸域脊椎動物

2.1億年前



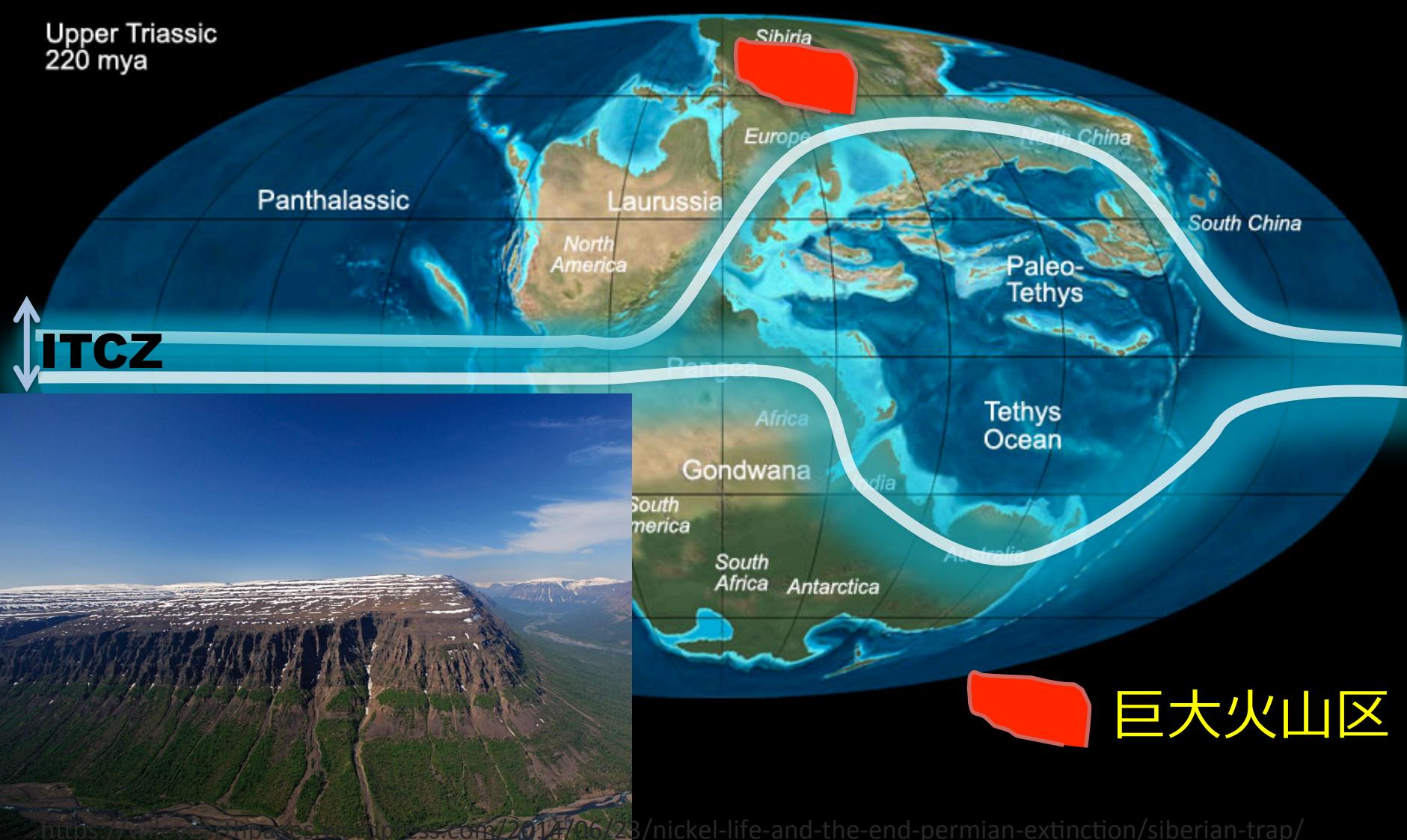


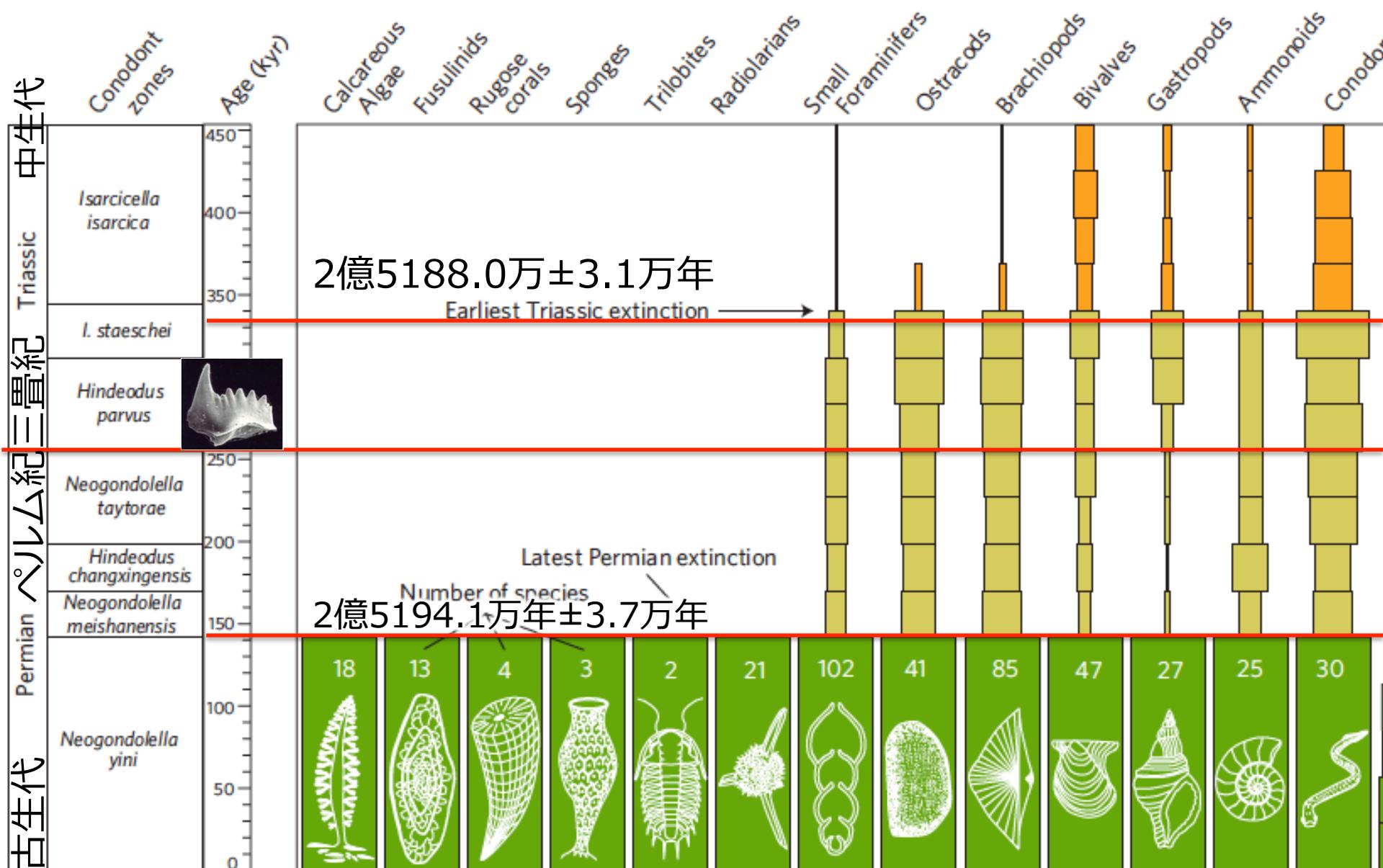
# 生物多様性変動と五大絶滅



# ペルム紀末大量絶滅

シベリア洪水玄武岩と同時期？





火山活動は

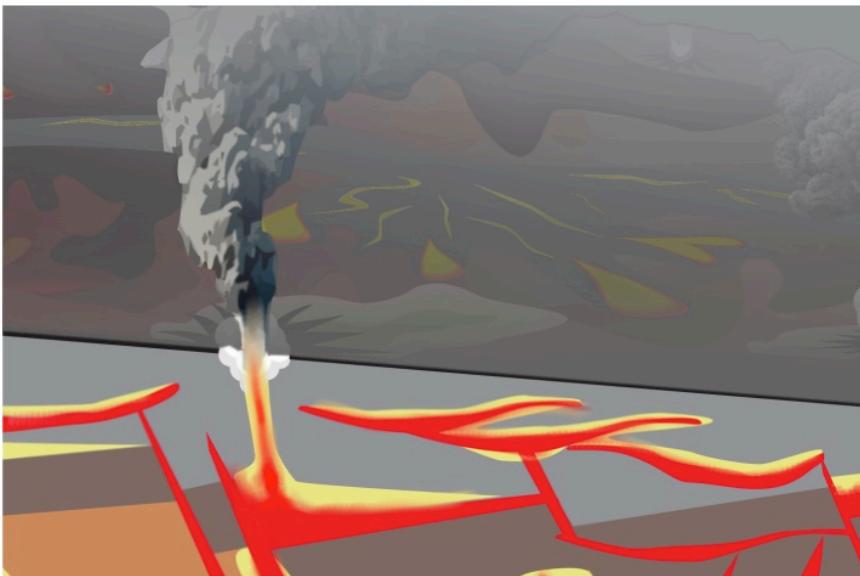
2億5190.7万±6.7万年前までに溶岩の3分の2が噴出し、

2億5190.1万±6.1万年前頃から貫入開始(Burgess+, 2015 Science Adv.)

Song+ (2012 Nature geo)

# 温室効果ガスの放出メカニズム

巨大火山噴火



石炭層や $\text{CaCO}_3$ の燃焼

現在



化石燃料の燃焼

大気 $\text{CO}_2$ 濃度の増加により温暖化

# ペルム紀末の大量絶滅メカニズムと回復過程

シベリア  
洪水玄武岩

温暖化

風化促進

栄養増加

富栄養化

植生崩壊

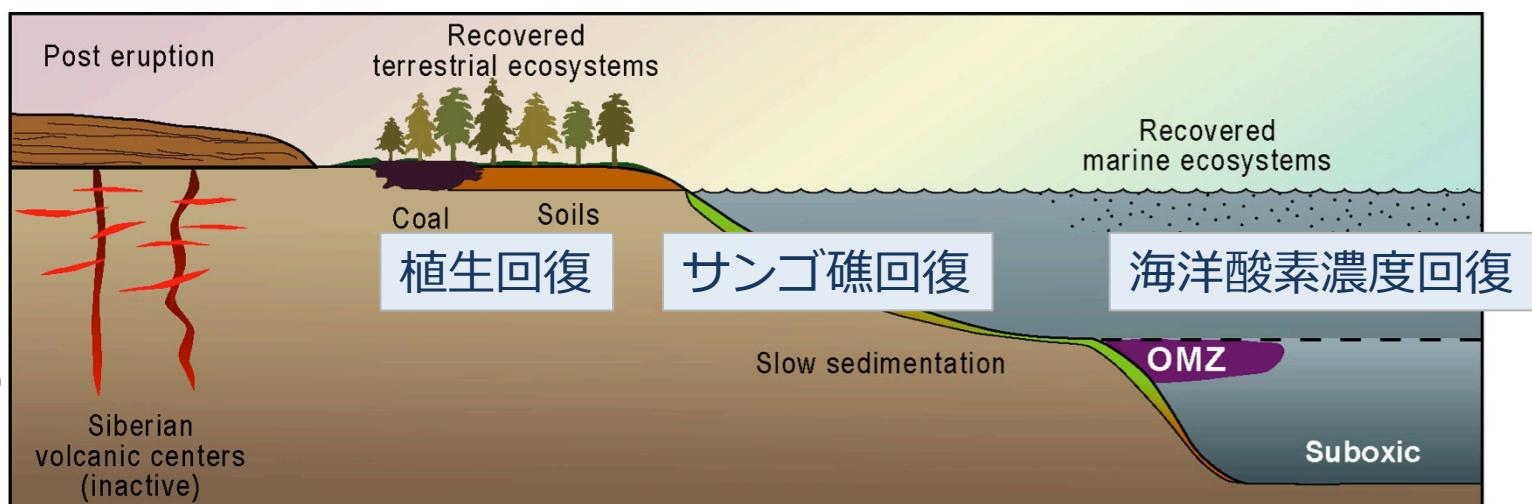
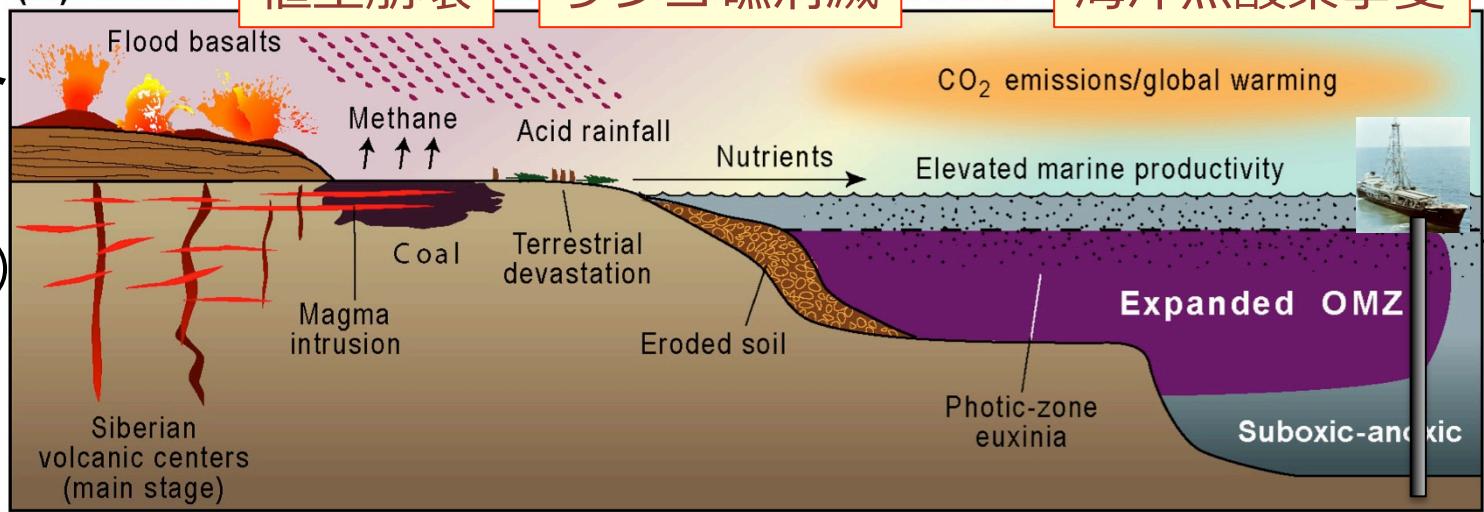
サンゴ礁消滅

海洋無酸素事変

P/T境界  
絶滅期  
(2億5200年前)

700  
万年  
?

生態系  
回復期  
(2億4500年前)



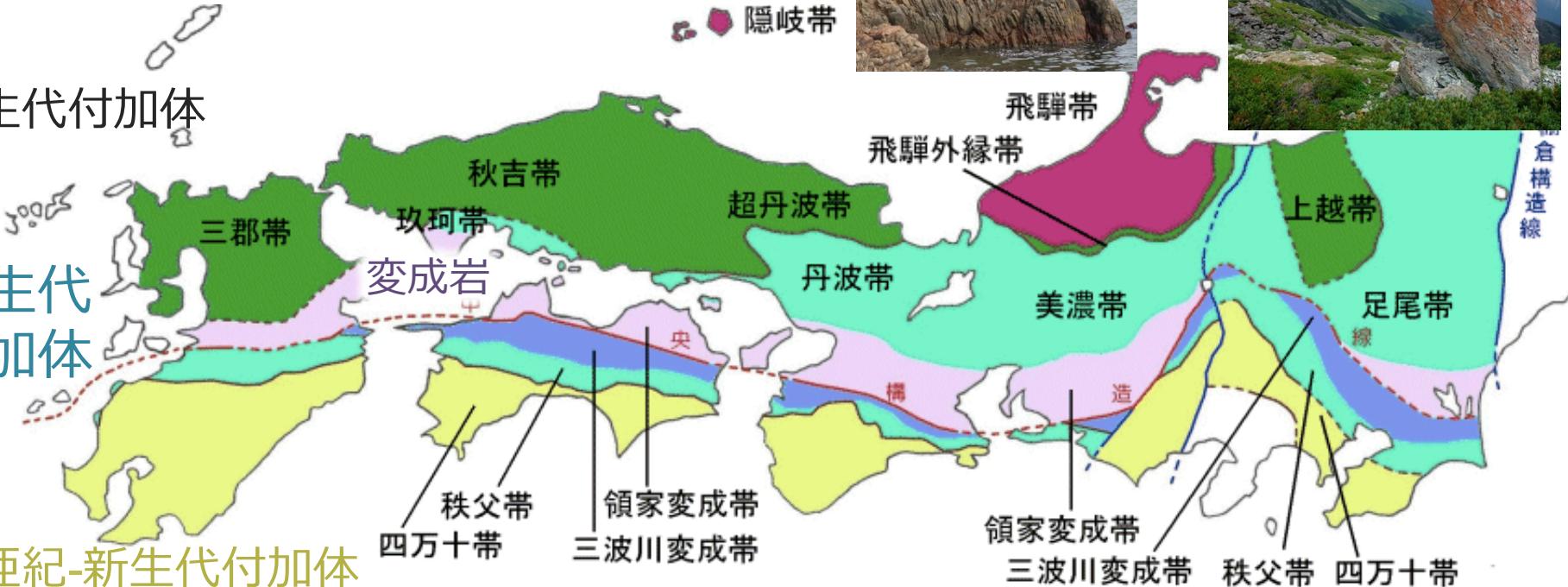
# 失われた深海層



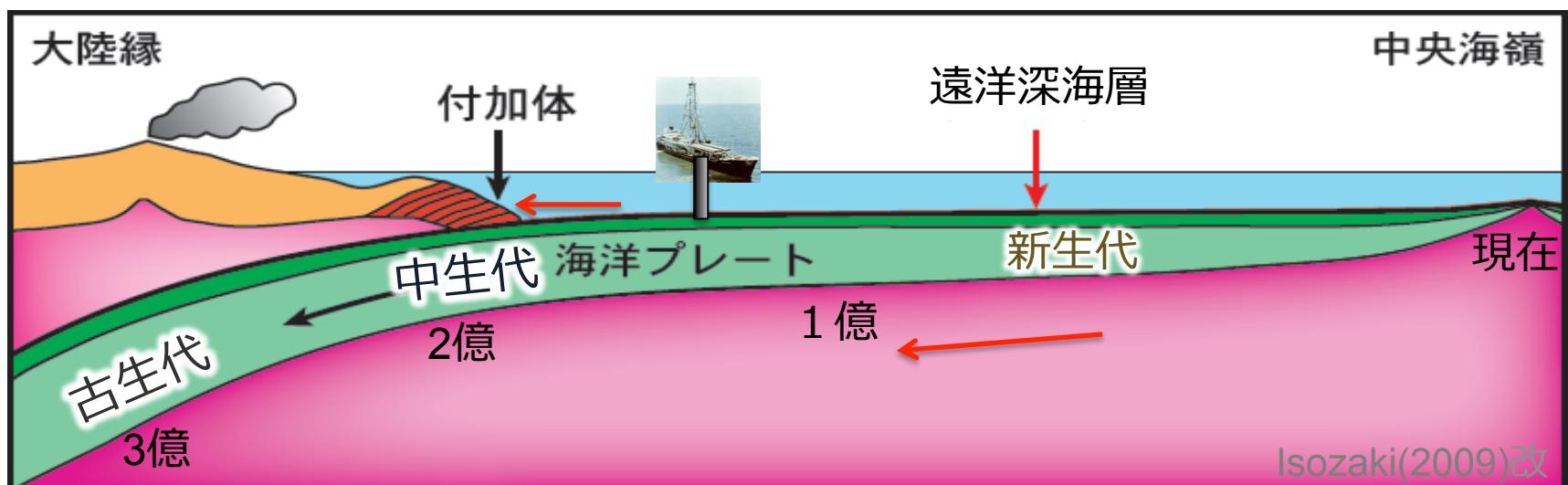
赤石山脈



古生代付加体

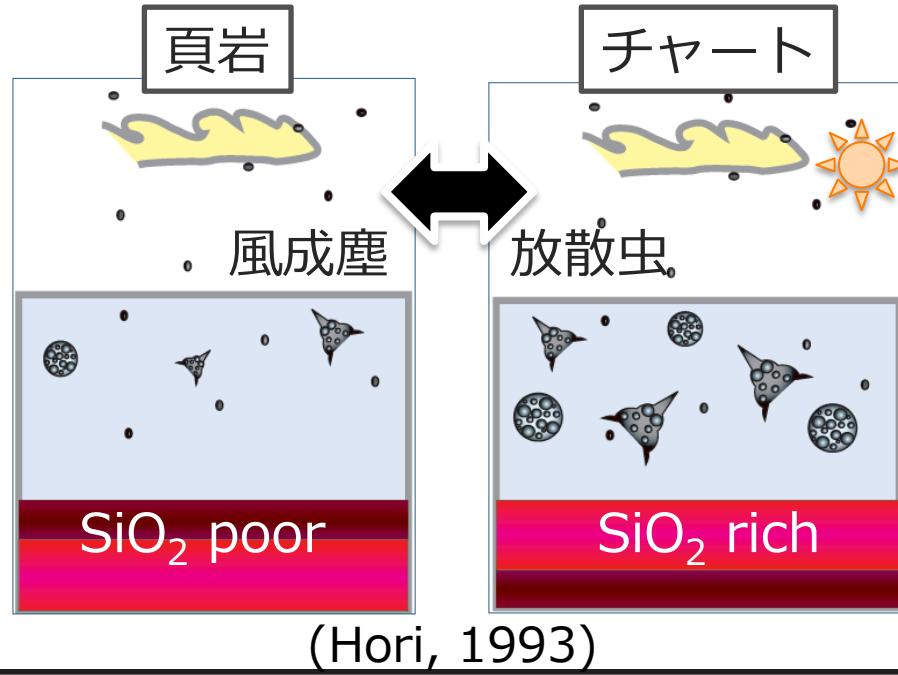


白亜紀-新生代付加体



Isozaki(2009)改

# 深海層のミランコビッチサイクル



大陸縁  
チャート・頁岩 ≈ 歳差周期

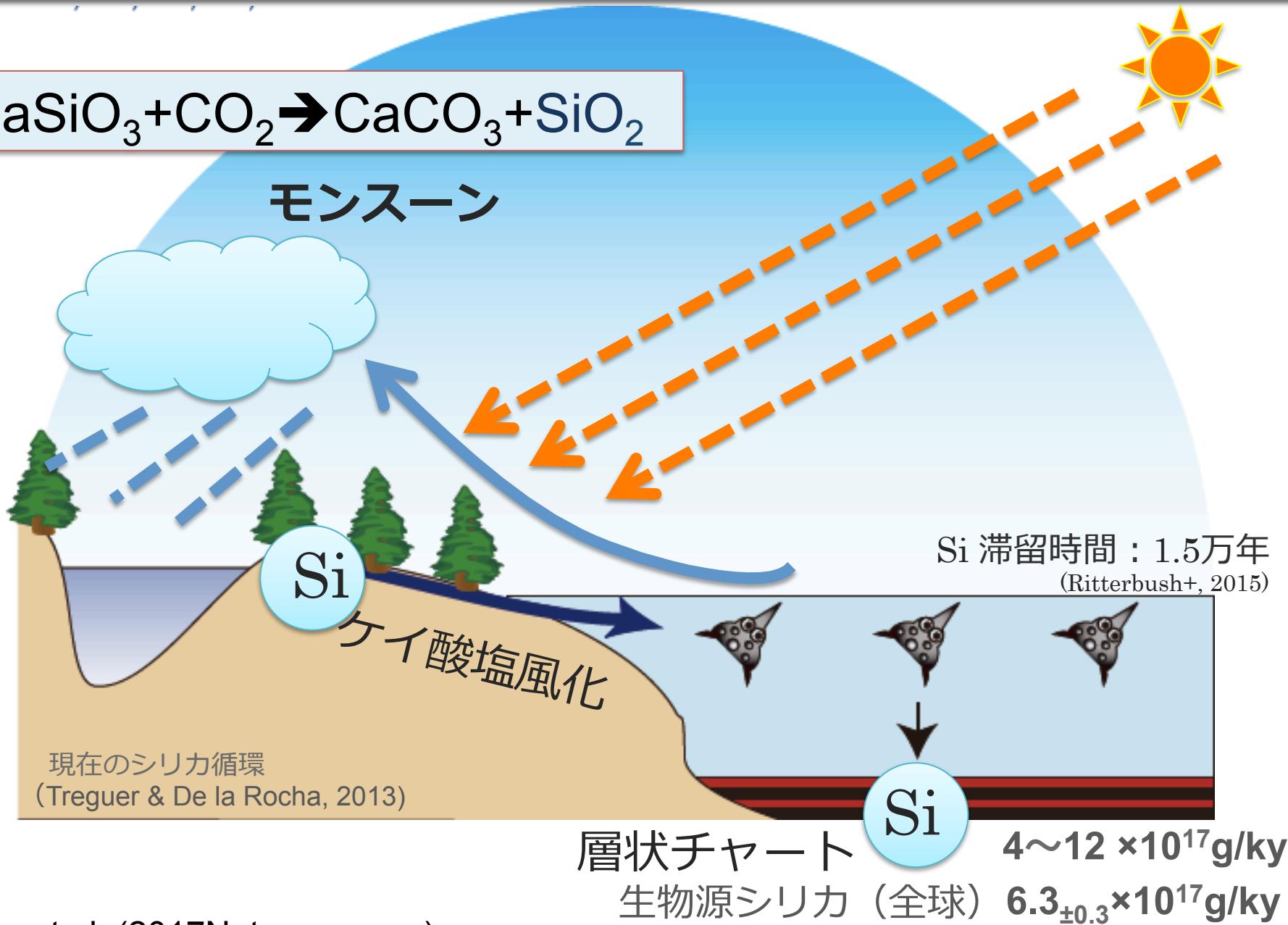


チャート層厚 ≈ 離心率周期

(シリカ堆積速度)

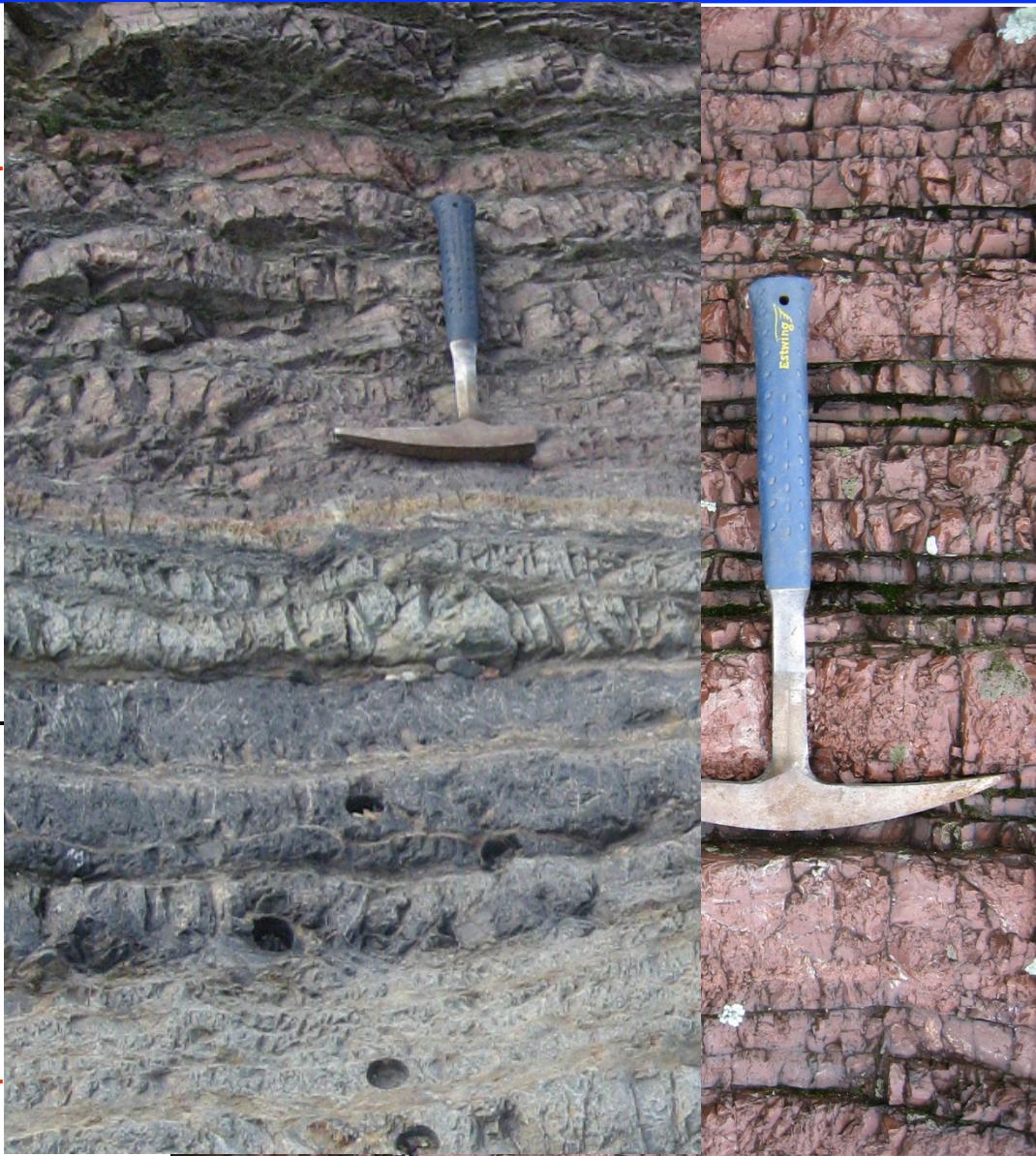
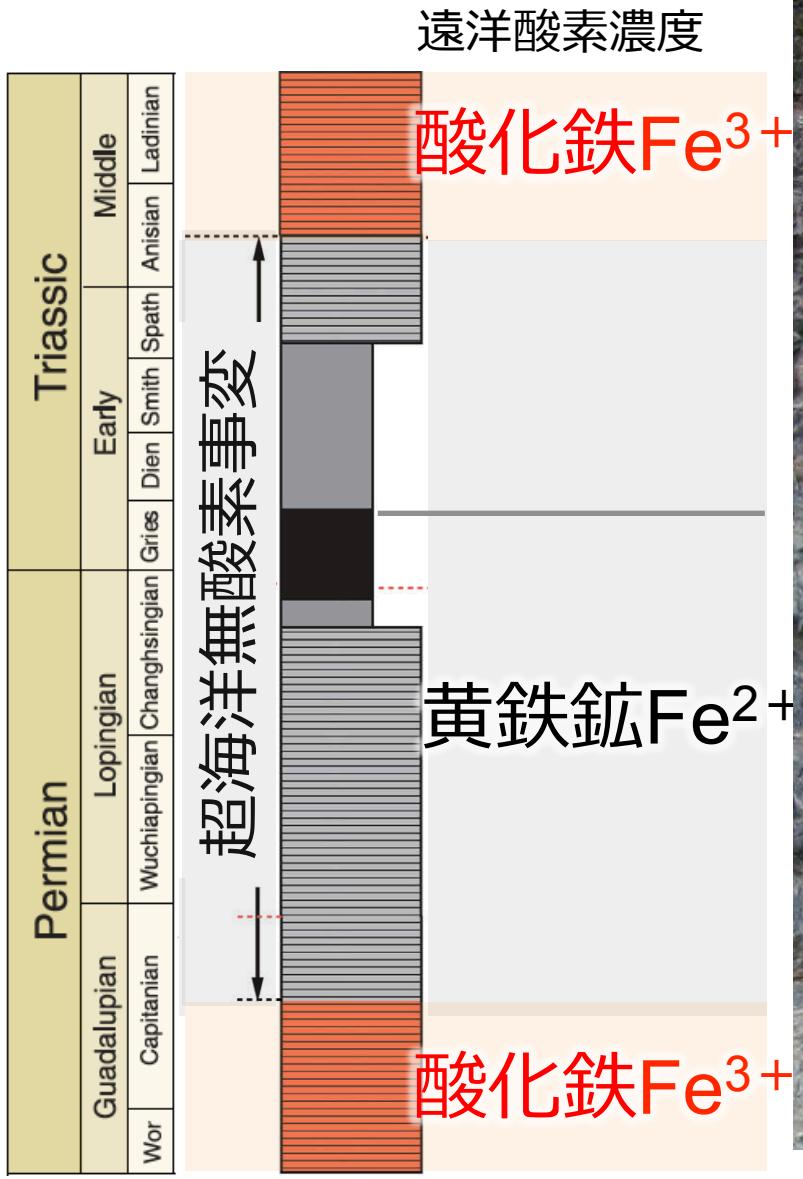
(Ikeda+ 2010, 2013, 2014EPSL )

# 深海層から推定される陸域環境変動

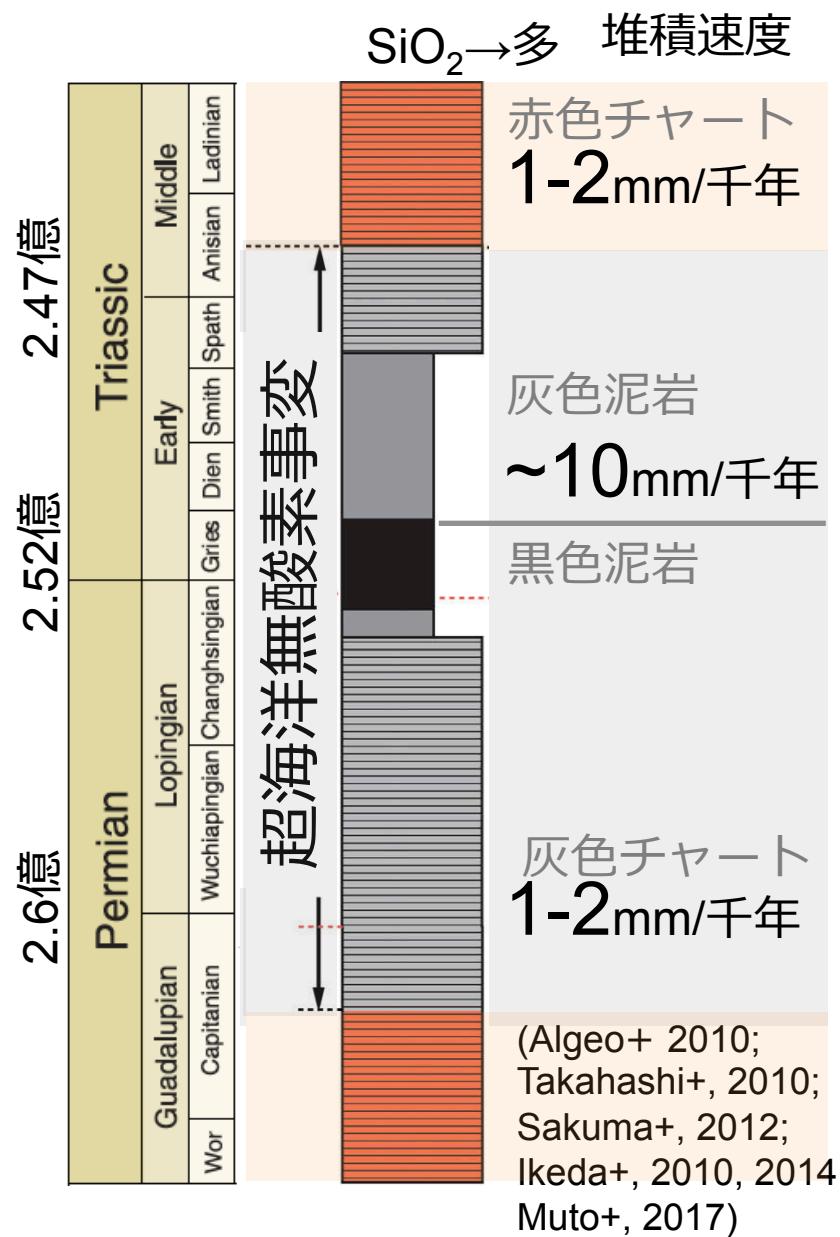


# PT境界は超期的な海洋無酸素事変

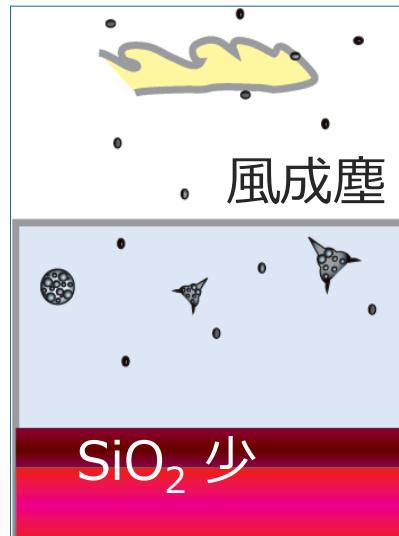
2.6億 → 2.52億 2.47億



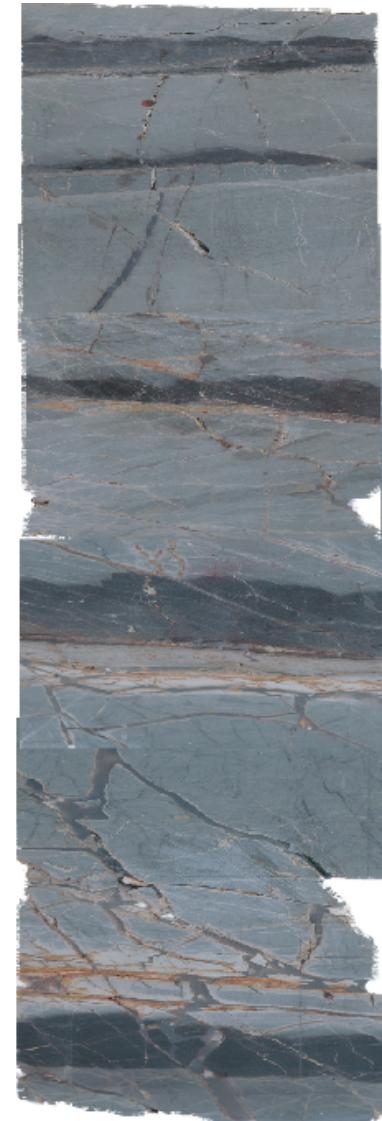
# PT境界のチャート無堆積



放散虫が減ったのではなく  
風成塵が増加



20cm



Sakuma+ (2012)

# 脊椎動物の古生物地理

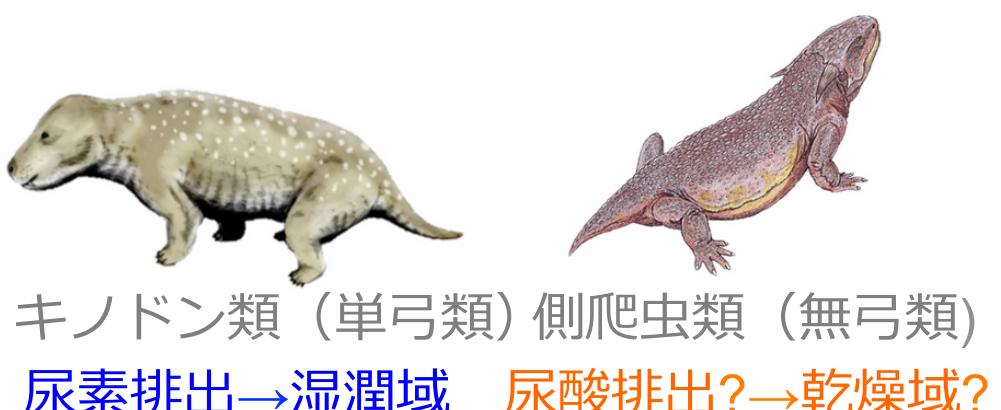
温暖化+乾燥域の拡大  
→生態系崩壊

2億5000万年前  
前期三疊紀

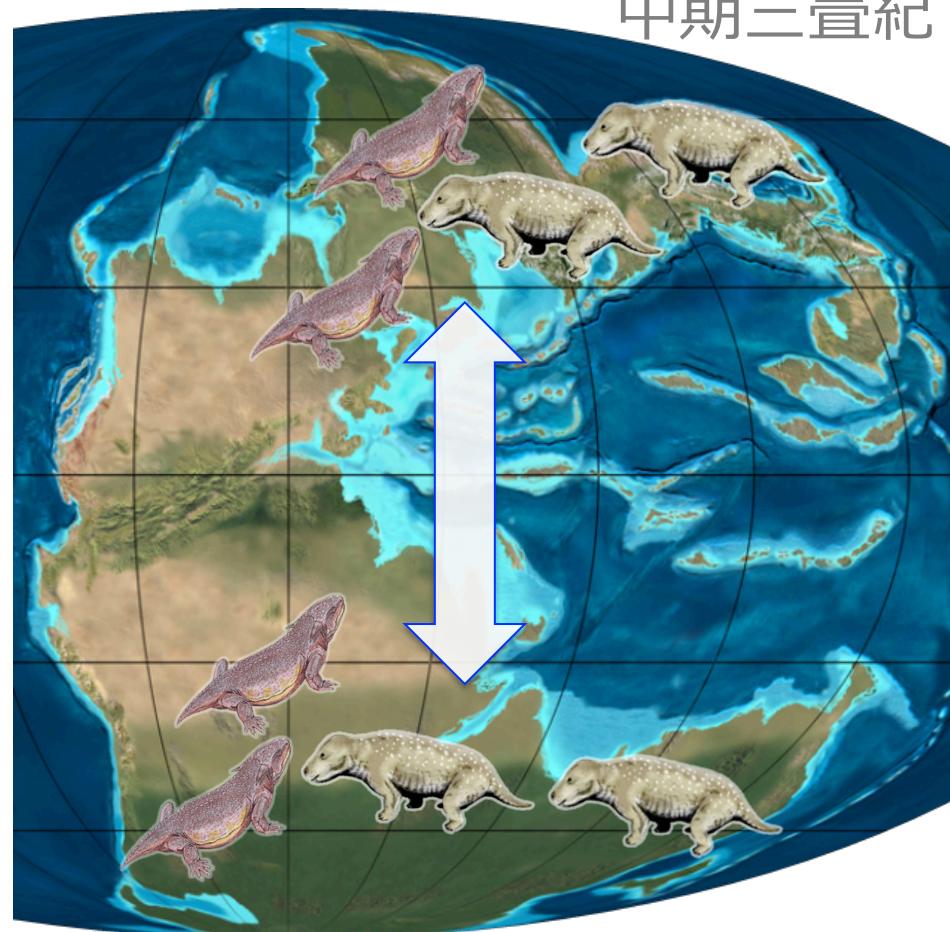


# 四足動物の古生物地理

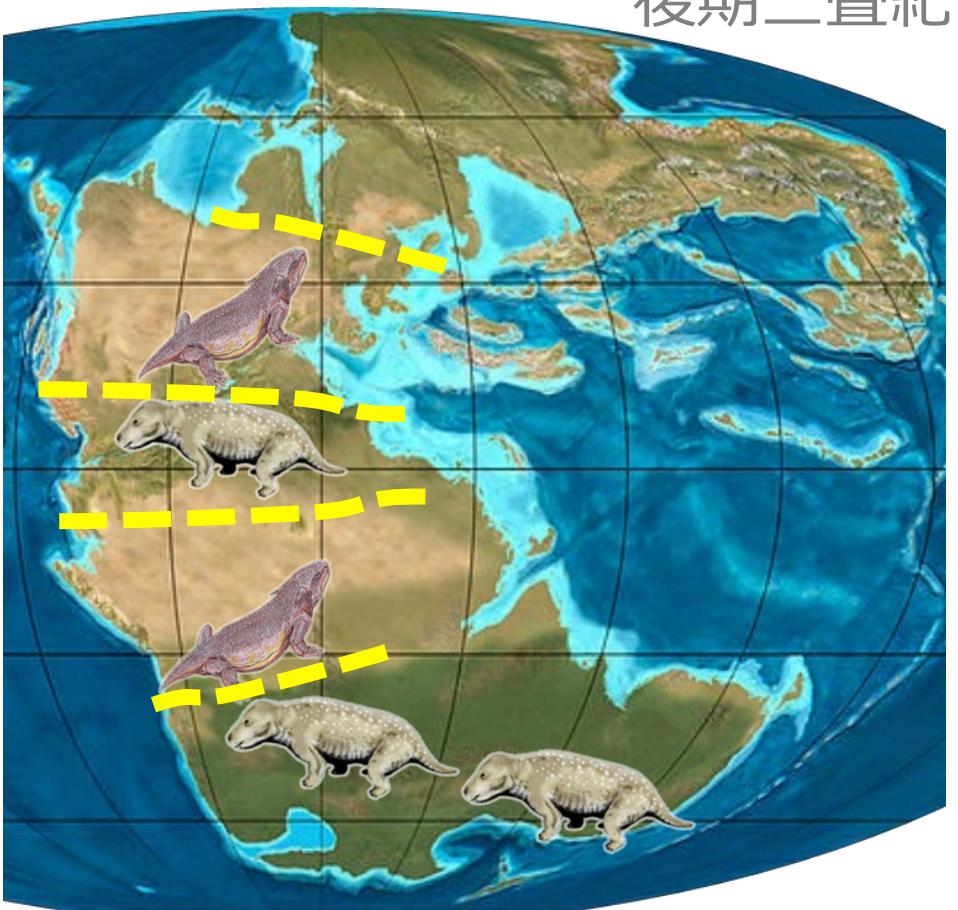
中緯度砂漠域の発達  
→生物地理区の再構築



中期三畳紀

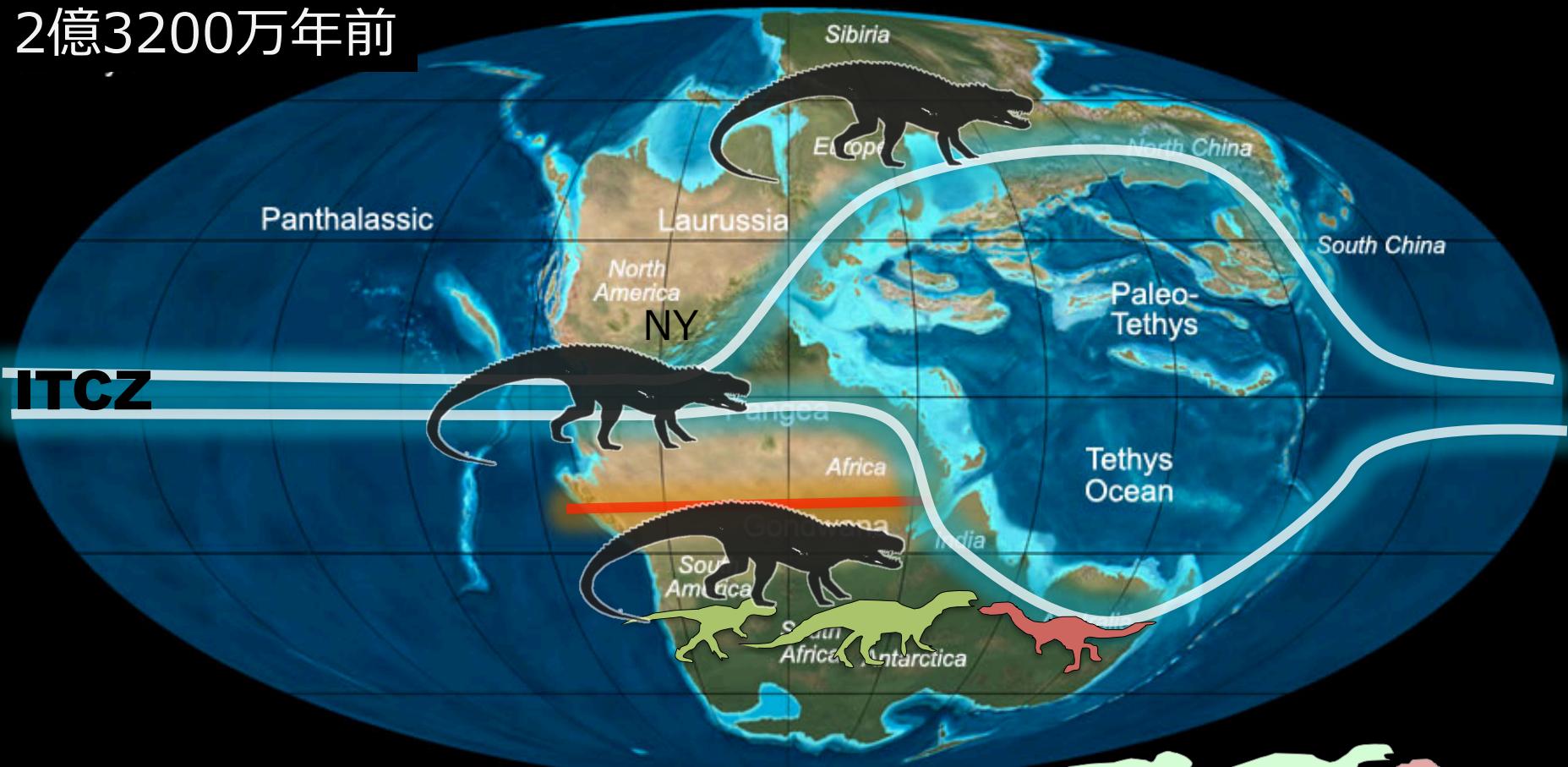


後期三畳紀



# 三畳紀後期の古生物地理と古気候

2億3200万年前



クレロタルシ類



鳥脚類



竜脚形類

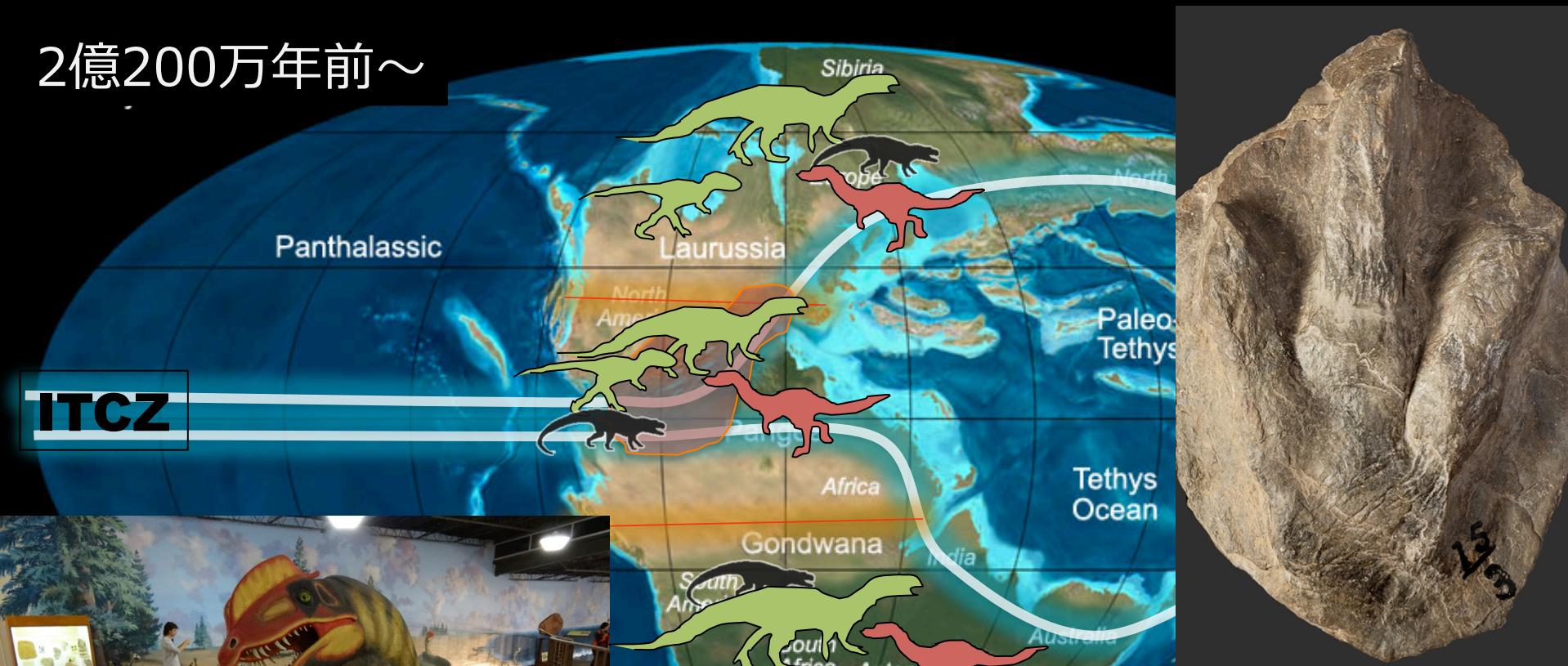


獸脚類

# ジュラ紀の恐竜繁栄

ジュラ紀～

2億200万年前～



クルロタルシ類



鳥脚類

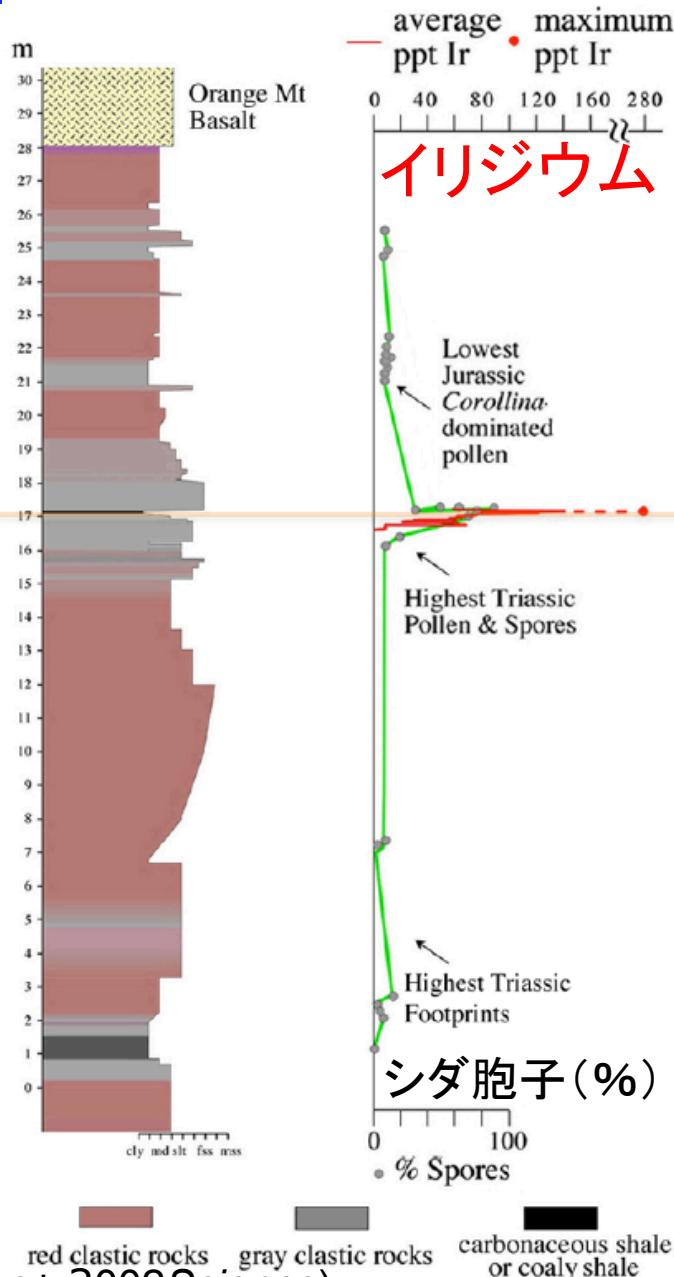


竜脚形類



獸脚類

# 三疊紀末絕滅



-1万年

# 三疊紀末絕滅



# 三疊紀型 針葉樹

# 日和見植物 シダ群集

# 侏羅紀型 針葉樹

イリジウム異常  
最大285ppt

+2万年

(Olsen+ 2002 Science)

# イリジウムの濃集要因

Irは地殻には乏しいが、地球内部や隕石には豊富

隕石衝突



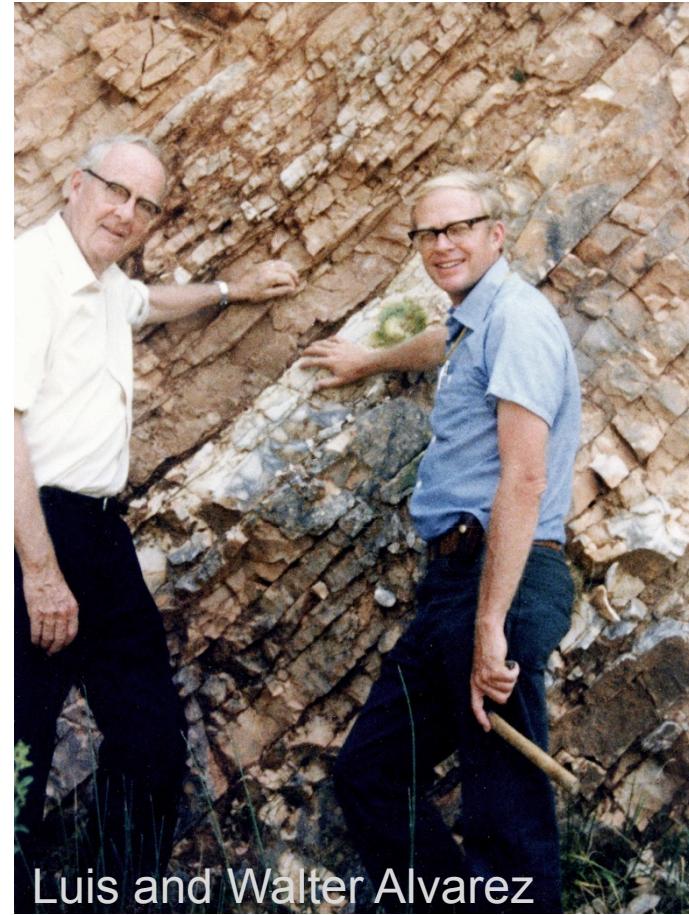
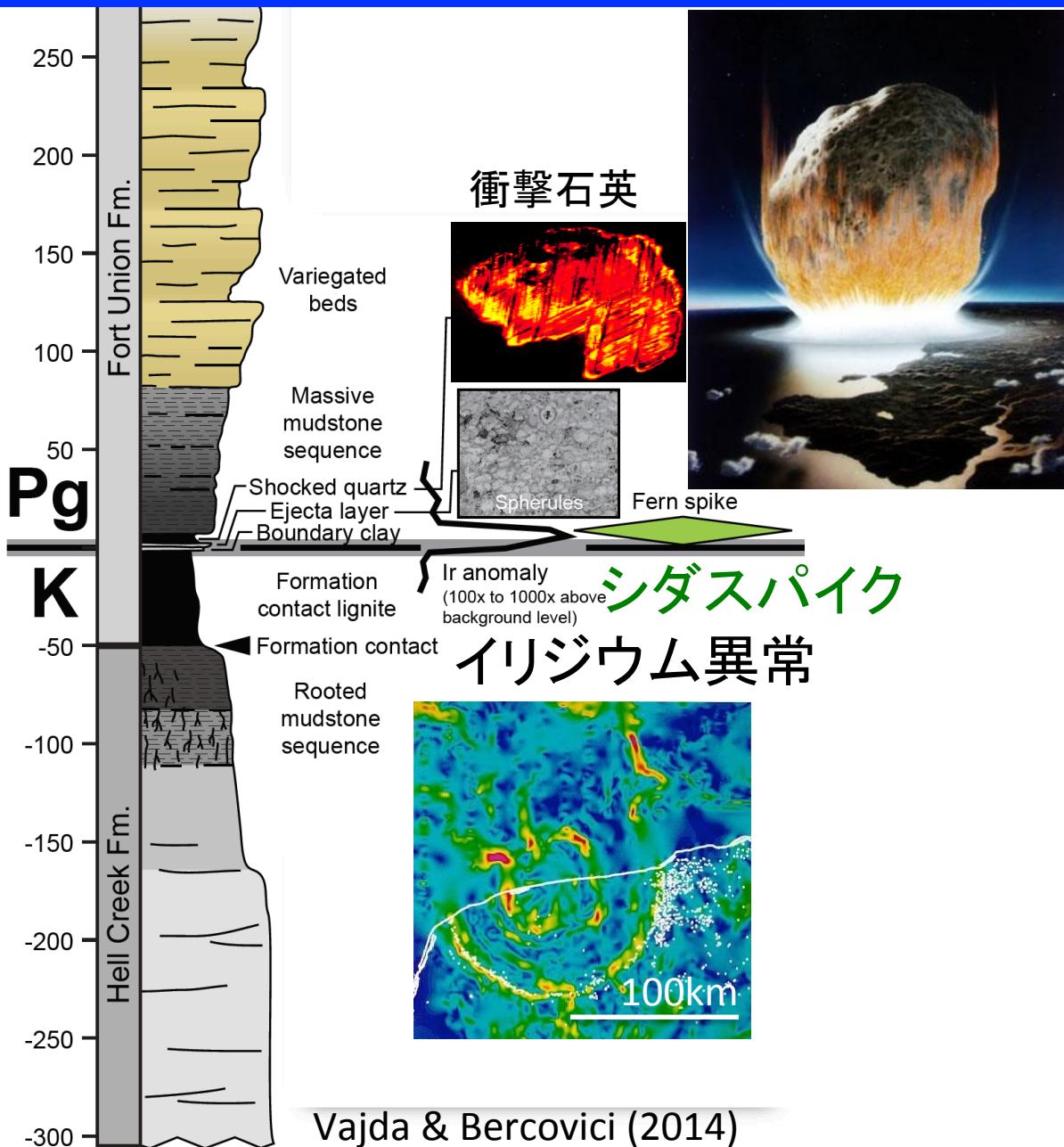
火山活動



[https://www.nikkei.com/article/  
DGXNZO68016130Z00C14A3CR8000/](https://www.nikkei.com/article/DGXNZO68016130Z00C14A3CR8000/)

<https://www.sciencedaily.com/releases/2014/02/140210161334.htm>

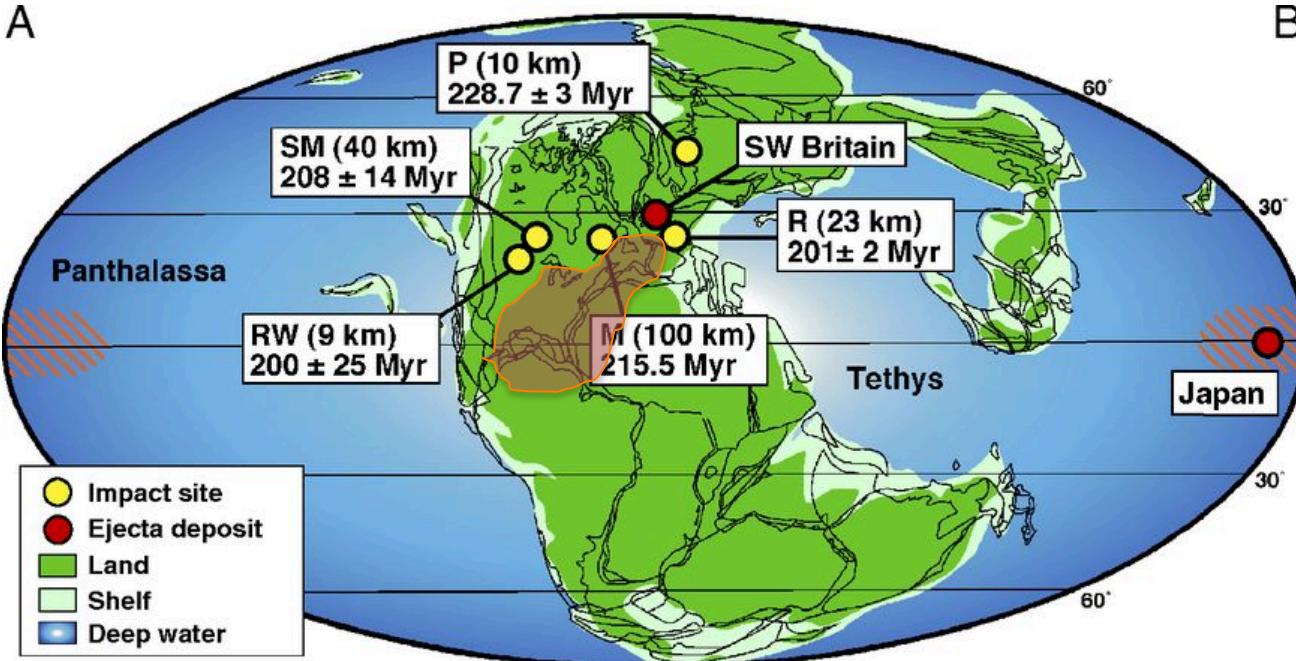
# 白亜紀末の隕石衝突



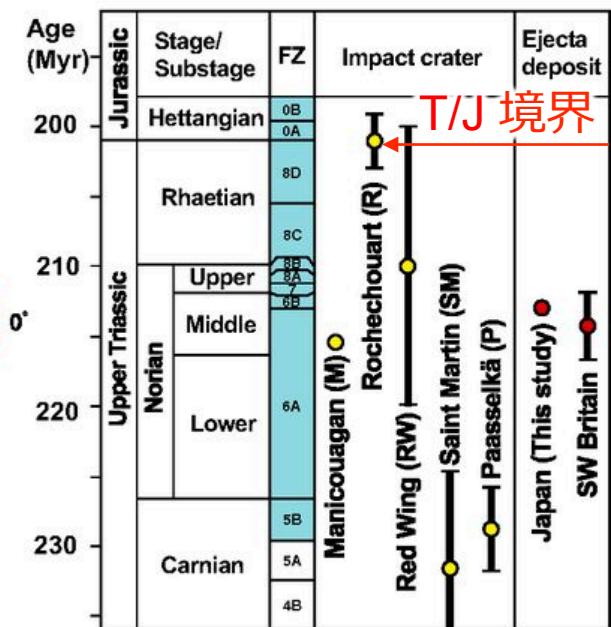
# 三畳紀末 隕石衝突の可能性

仮に2億100万±200万年前のクレーター(直径23 km)

A

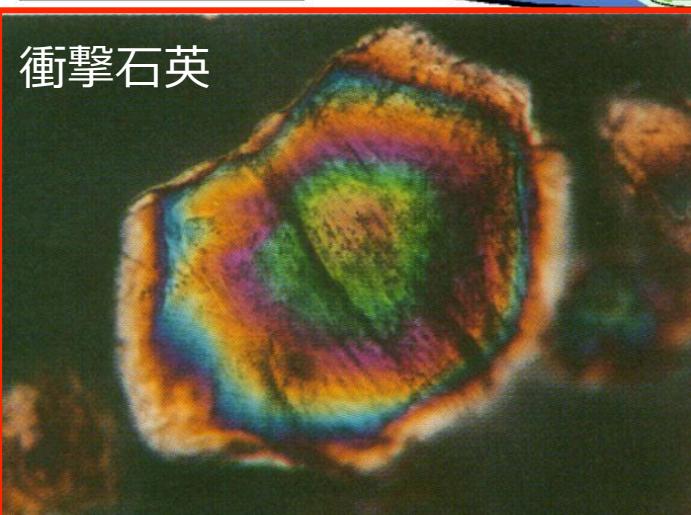


B



Onoue et al. (2012 PNAS)

衝撃石英

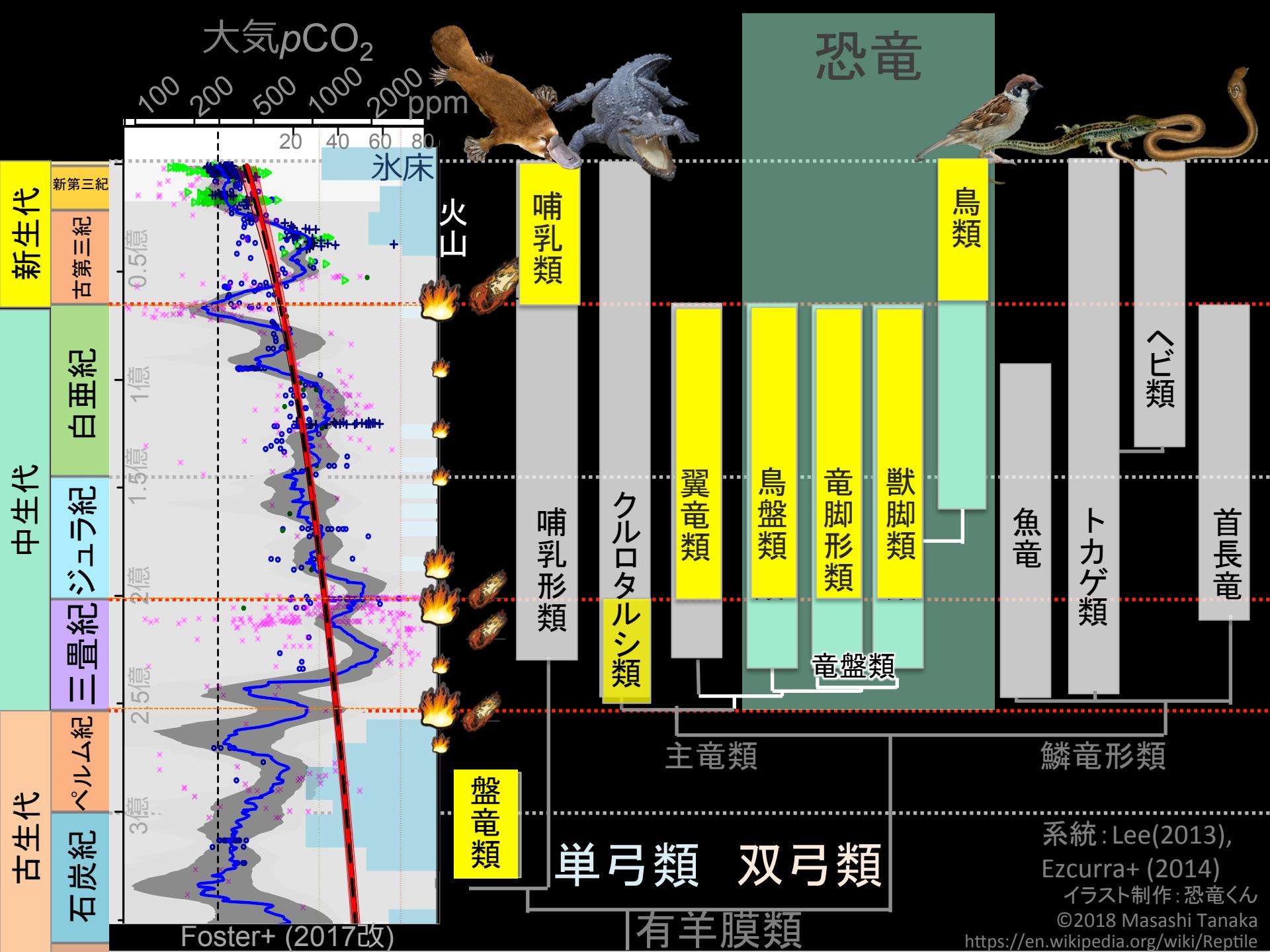


伊の三畳紀末層に衝撃石英

Bice et al. (1992 Science)

英の三畳紀末層に津波堆積物

Simms (2007)



# まとめ

## 恐竜時代の地球環境と生態系は地質記録から解読

- 放射性同位体と天文学的周期による年代推定  
+ 地層や化石から環境や生態系を復元

→ 高時間分解能で地球環境と生態系を解読

- 大量絶滅は大規模火山活動や隕石衝突と同期し,  
その後、生き残った生物が適応放散

(例：恐竜は三畳紀、ジュラ紀に適応放散,  
鳥類、哺乳類は新生代に適応放散)

→ 絶滅により空いたニッチェに進出！？

→ 環境変動がどう生態系に影響したか理解を進めるには  
さらなる高時間分解能での地質記録の解読が必要.