

暗い太陽のパラドックスと全球凍結

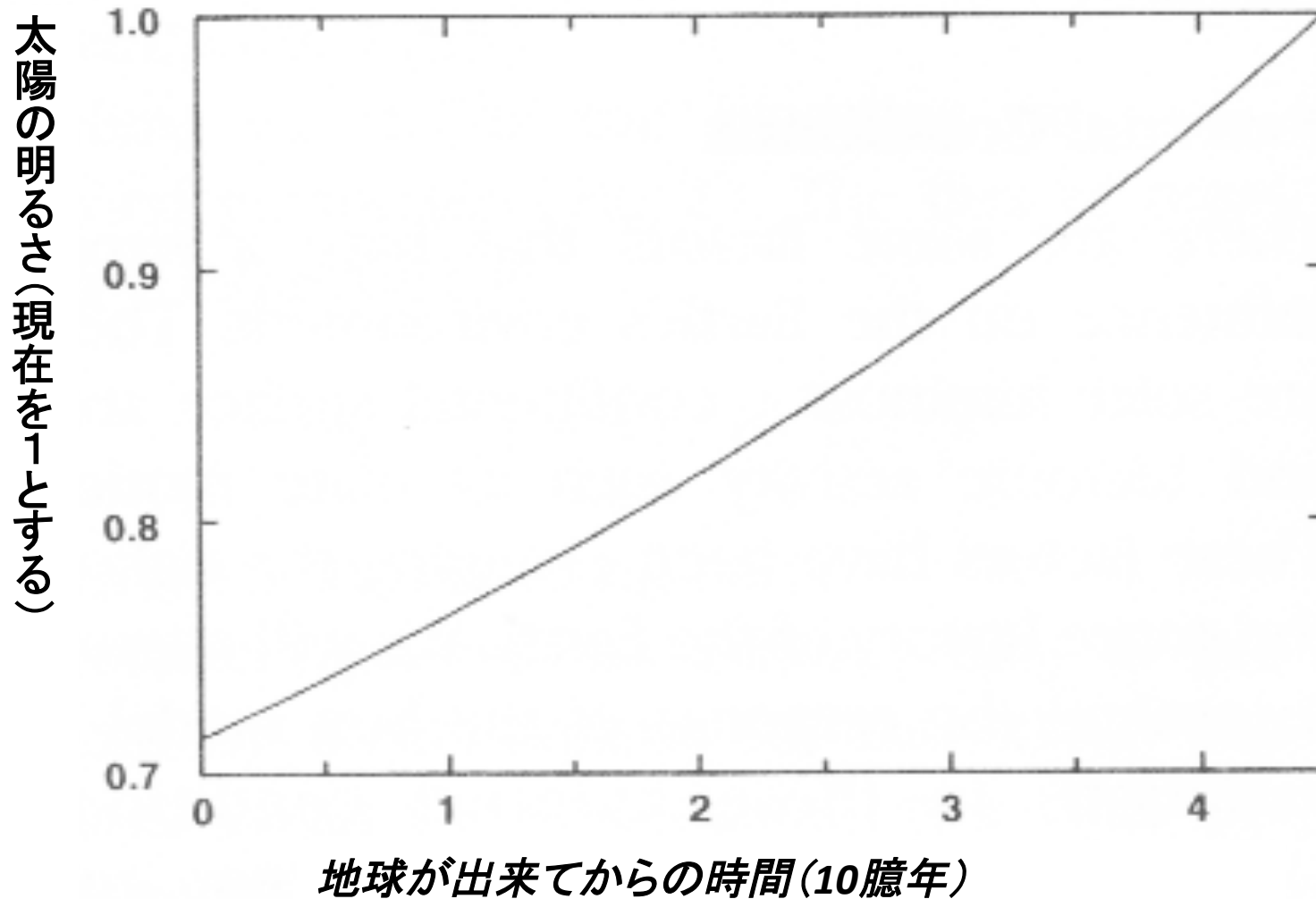
地質記録によれば、38億年前以降、海はずっと存在し続けた。

一方、恒星進化論によれば、45億年前の太陽は、現在より30%暗かった。

その場合、大気組成が現在と同じであれば、地球表面は全面凍結してそこから抜けだせない筈である。

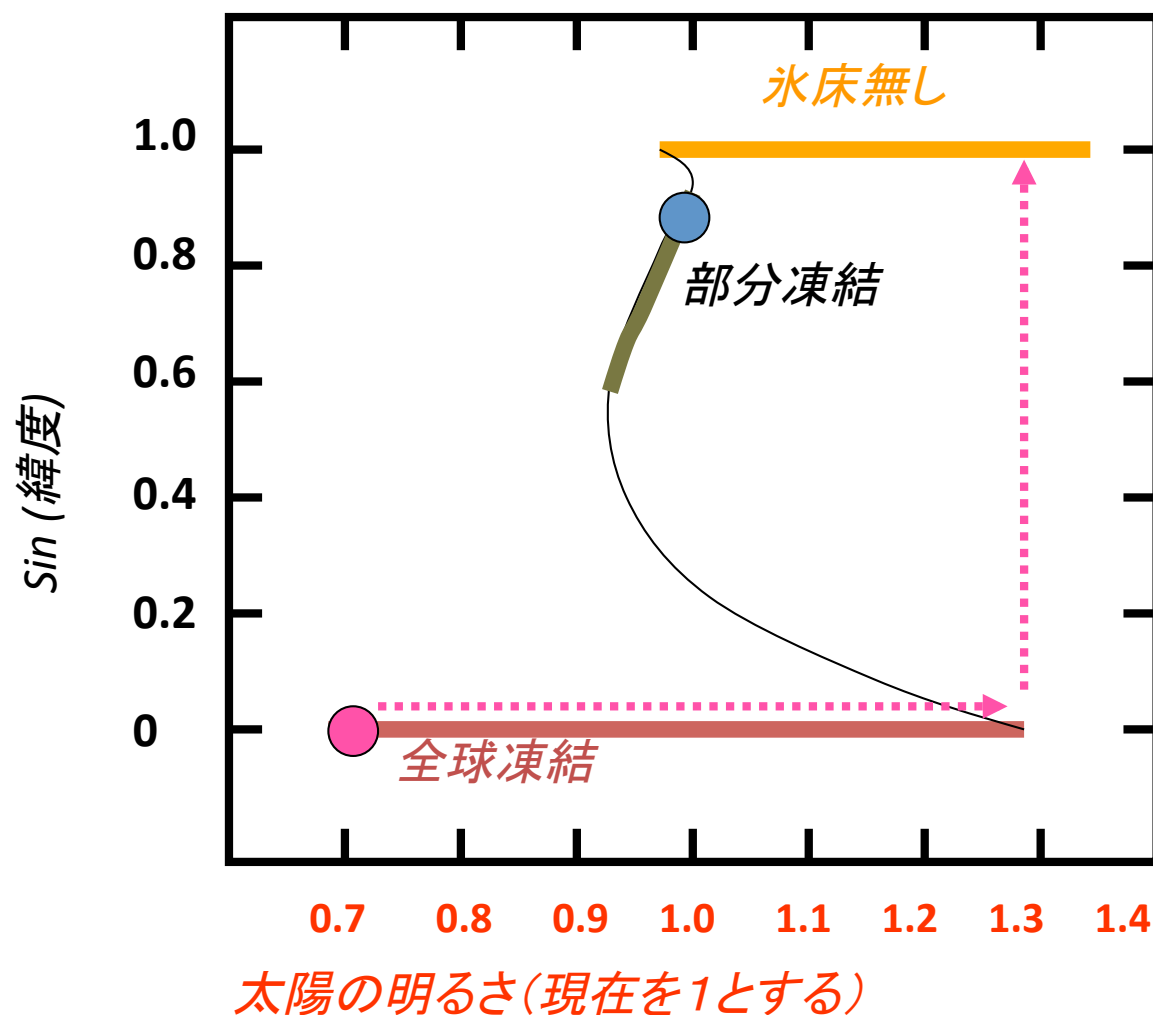
これは、現在の地球の状態と矛盾する。

44億年前の太陽は、現在より30%暗かった



- ・ 太陽の内部で、核融合反応により水素が燃焼してヘリウムが合成され、太陽中心部の熱、密度が上昇し、次第に明るくなる。(恒星進化論)

太陽輝度と安定な地表状態との関係

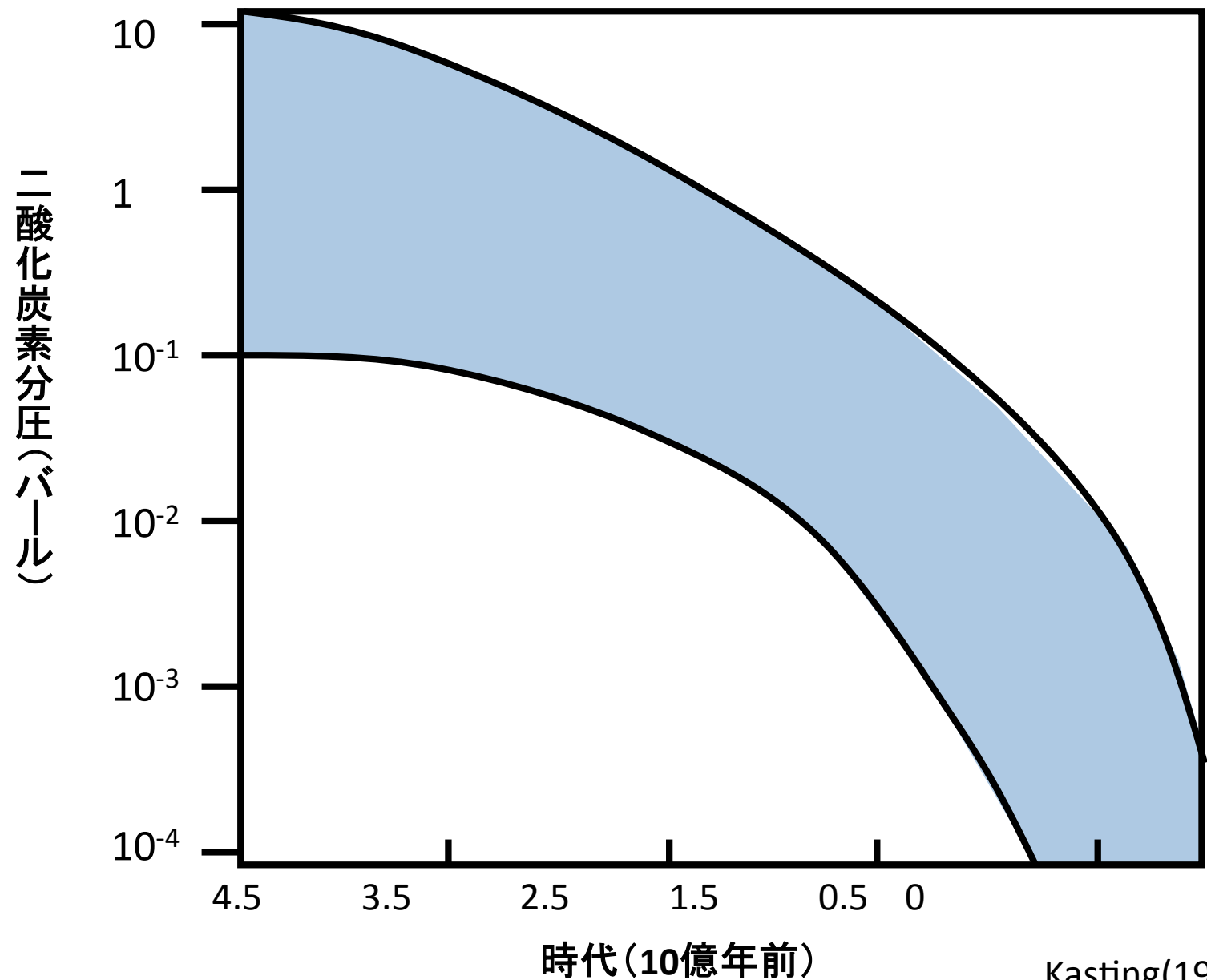


南北一次元エネルギーバランスモデルによる安定解
(現在の大気組成を仮定) North (1981)に加筆

セーガンは、～40億年前の地球大気が強い温室効果を持っていたため、全球凍結を免れたと考えた。

その後40億年間、海が存在し続けたなら、なんらかのメカニズムが地球大気組成を調整し、～30%の太陽輝度の増加の影響を相殺する様に、大気組成を変化させてきた事になる。

海が凍結したり蒸発したりせずに存続し続ける為には、太陽輝度の増大を打ち消す様に、大気中のCO₂が減少しなければならない。



Kasting(1992)を改変

その様な自動制御メカニズムは存在したか？
存在したとすれば、どの様なメカニズムか？

それを知るには、水惑星ステージの地球の大気組成が、
どの様に維持されているのかを理解する必要がある。

表 5.3 大気を持つ地球型惑星(地球, 金星, 火星)の表層環境の比較.

	地球(現在)	地球*	金星	火星
大気組成(体積%)				
N ₂	78.1	1.0	1.8	2.7
O ₂	20.9	—	—	—
Ar	0.9	0.01	0.02	1.6
CO ₂	0.035	99.0	98.1	95.3
大気圧	1 気圧	~80 気圧	90 気圧	0.006 気圧
惑星アルベド A	0.3	>0.3****	0.77	0.15
入射太陽放射 S	1370 W/m ²	1370 W/m ²	2620 W/m ²	590 W/m ²
正味入射太陽放射**	240 W/m ²	< 240 W/m ²	150 W/m ²	125 W/m ²
有効放射温度***	-18°C	-18°C	-46°C	-56°C
全球平均温度	15°C	~200°C****	450°C	-30°C
水の存在量	270 気圧相当	270 気圧相当	極微量	(不明)
水の存在形態	海洋	海洋, 水蒸気	水蒸気	極冠, 永久凍土

地球大気進化: 大気は、地球環境進化過程で、CO₂主体の大気から窒素、酸素主体の大気へと変わって行った。
それは、主にCO₂の固定とO₂の放出による。

地球におけるCO₂の固定とO₂の放出過程

CO₂の固定:

1) 岩石の化学的風化と石灰岩の堆積



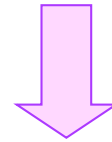
2) 光合成による有機物の形成と堆積



O₂の放出:

2) の過程は、酸素の放出過程でもある

しかし、 CO_2 が大気中から一方的に固定され、 O_2 が大気に一方的に放出されている訳ではない。



炭素、酸素は地球システム内で循環している

そして、地表温度および大気中の CO_2 濃度が高まる程、化学風化速度も早くなる

地球規模での炭素循環

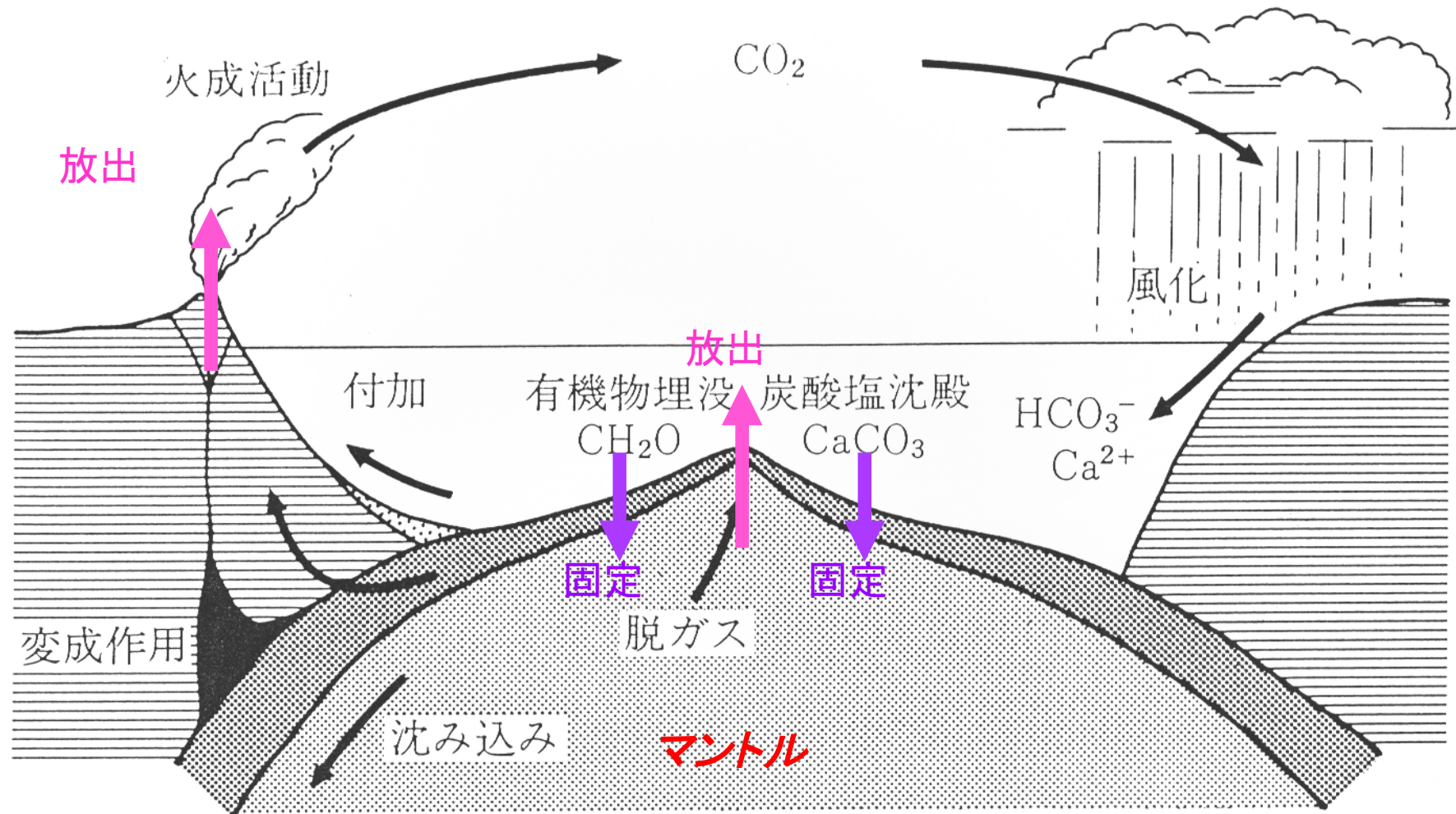
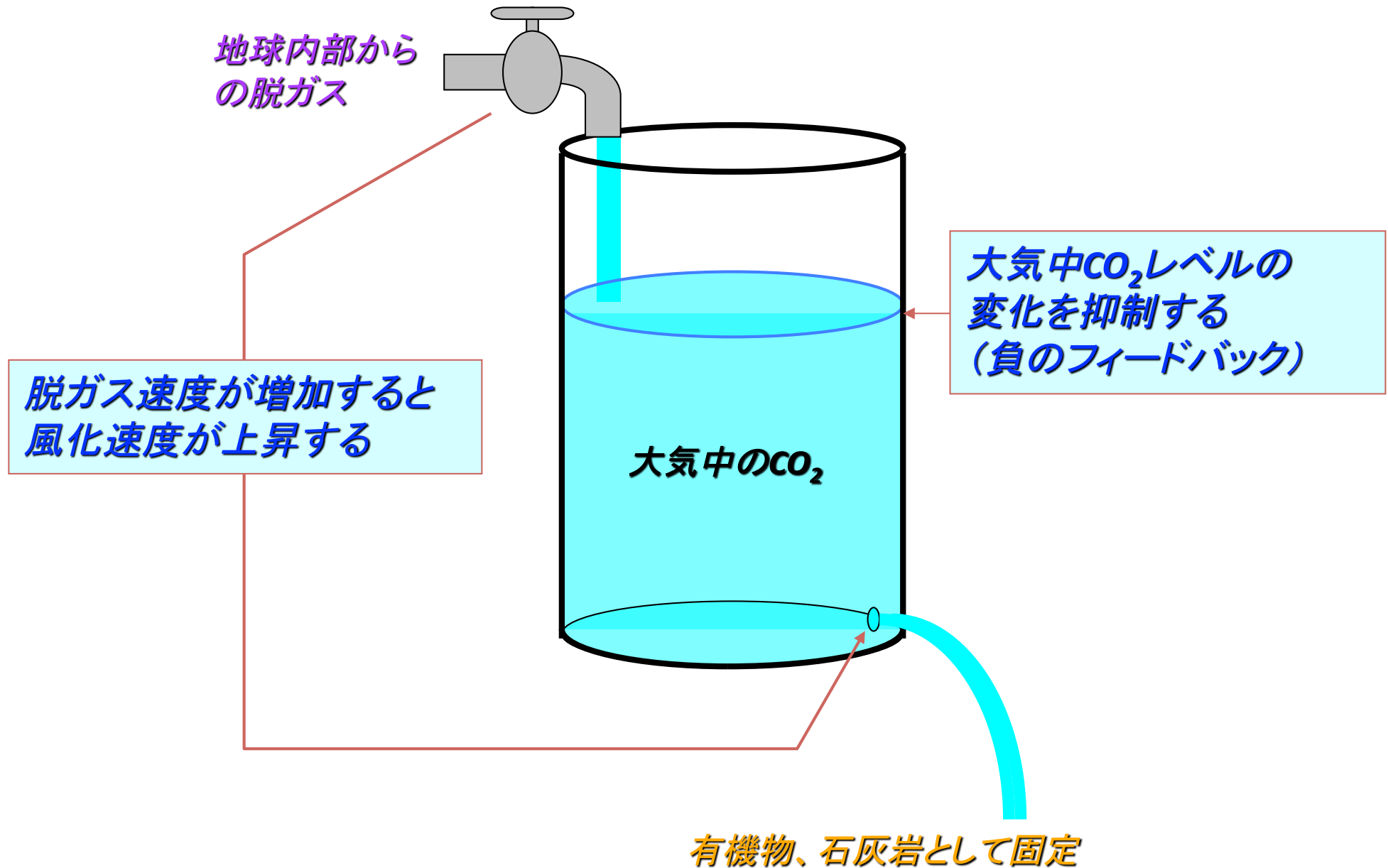
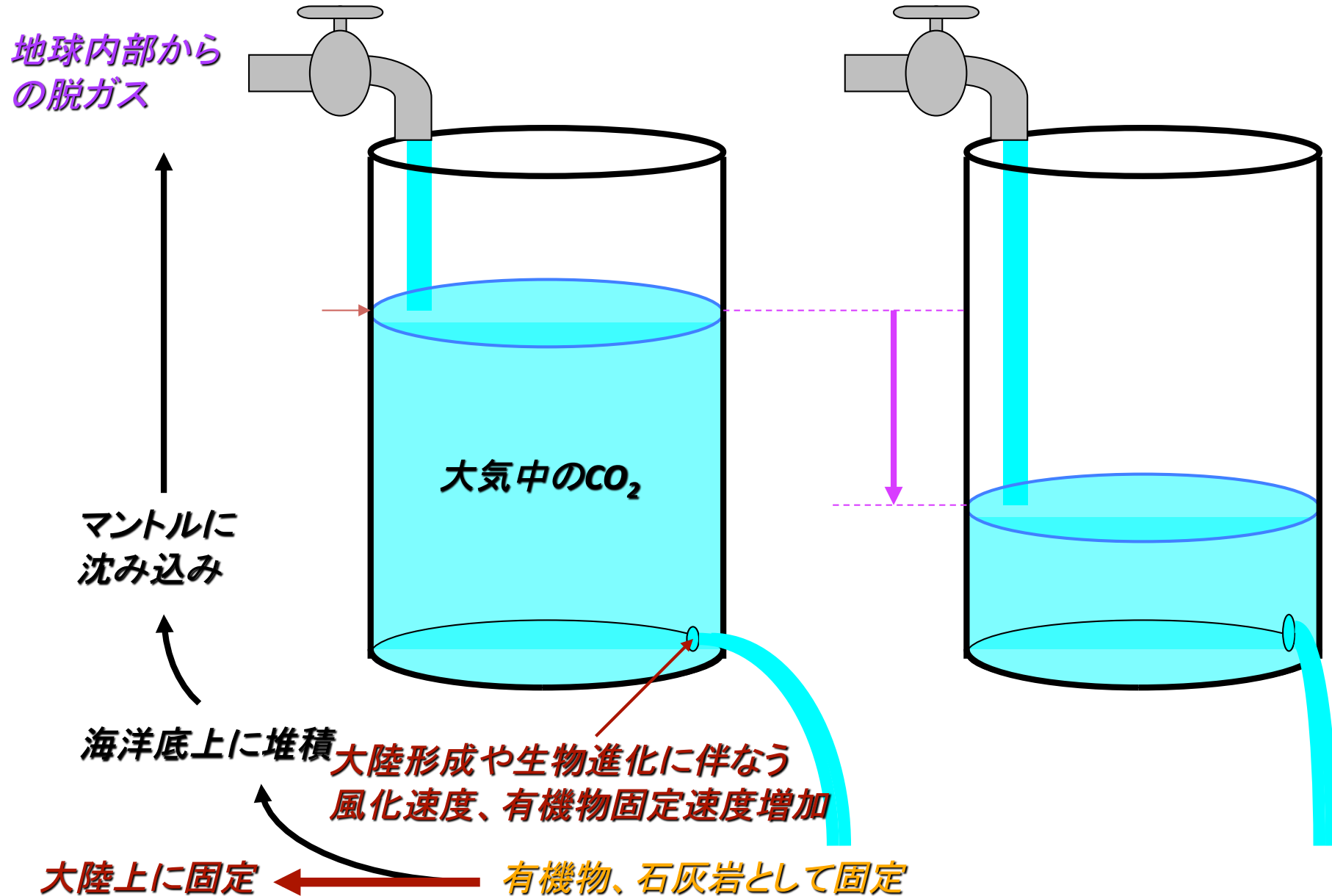


図 5.7 グローバル炭素循環の概要 (Tajika and Matsui, 1992 にもとづく).

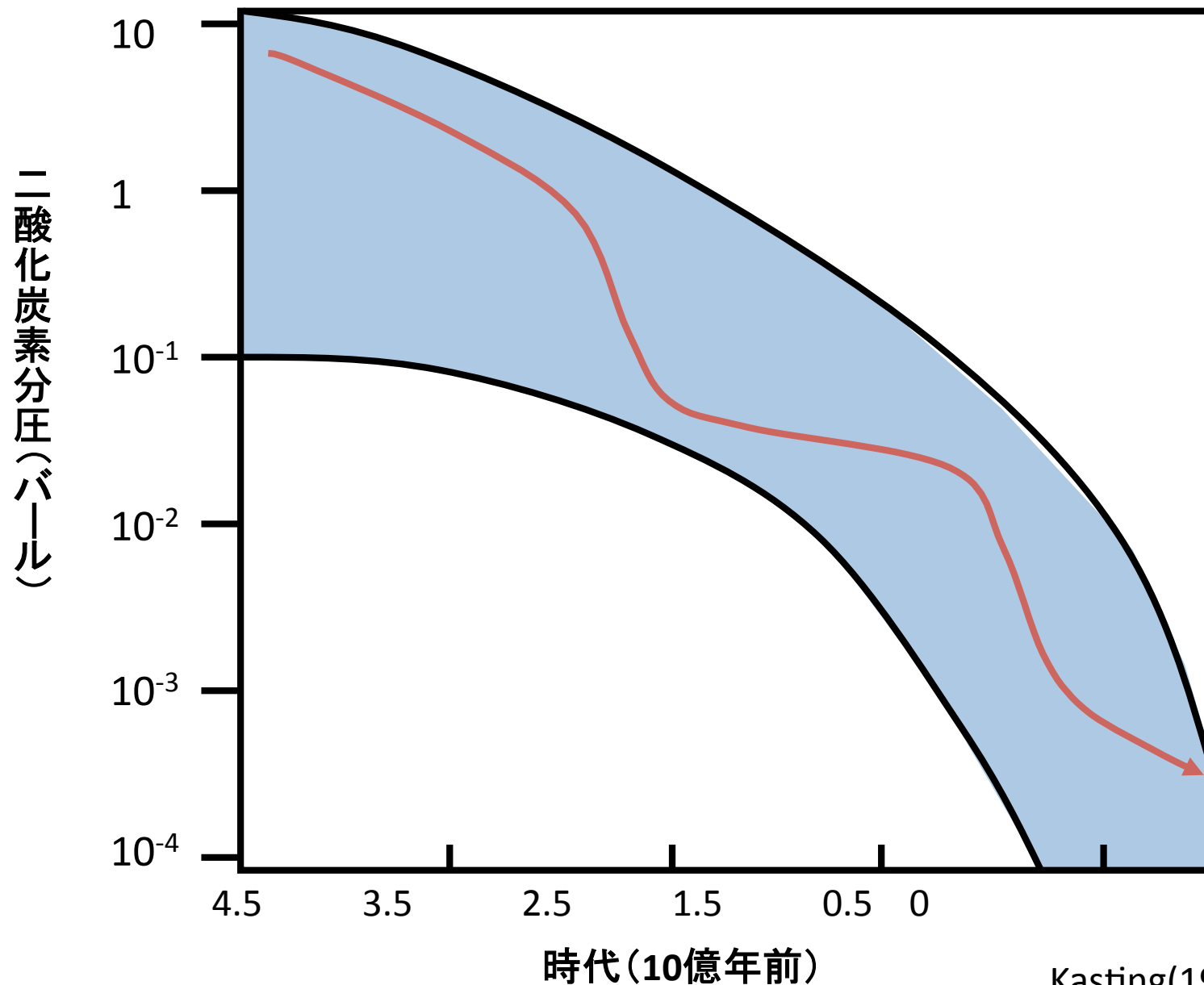
大気中のCO₂レベルは動的平衡で決まる



太陽輝度増加を相殺する様に 風化効率が増加した？



この様に大気組成が**絶妙に**コントロールされて、
地球環境が維持されてきた？



Kasting(1992)を改変

雪玉地球仮説

全球凍結が、本当に起こったのではないか？

24～22億年前、9～6億年前に、大陸氷床が赤道付近の海岸まで広がっていた地質学的証拠が見つかった。

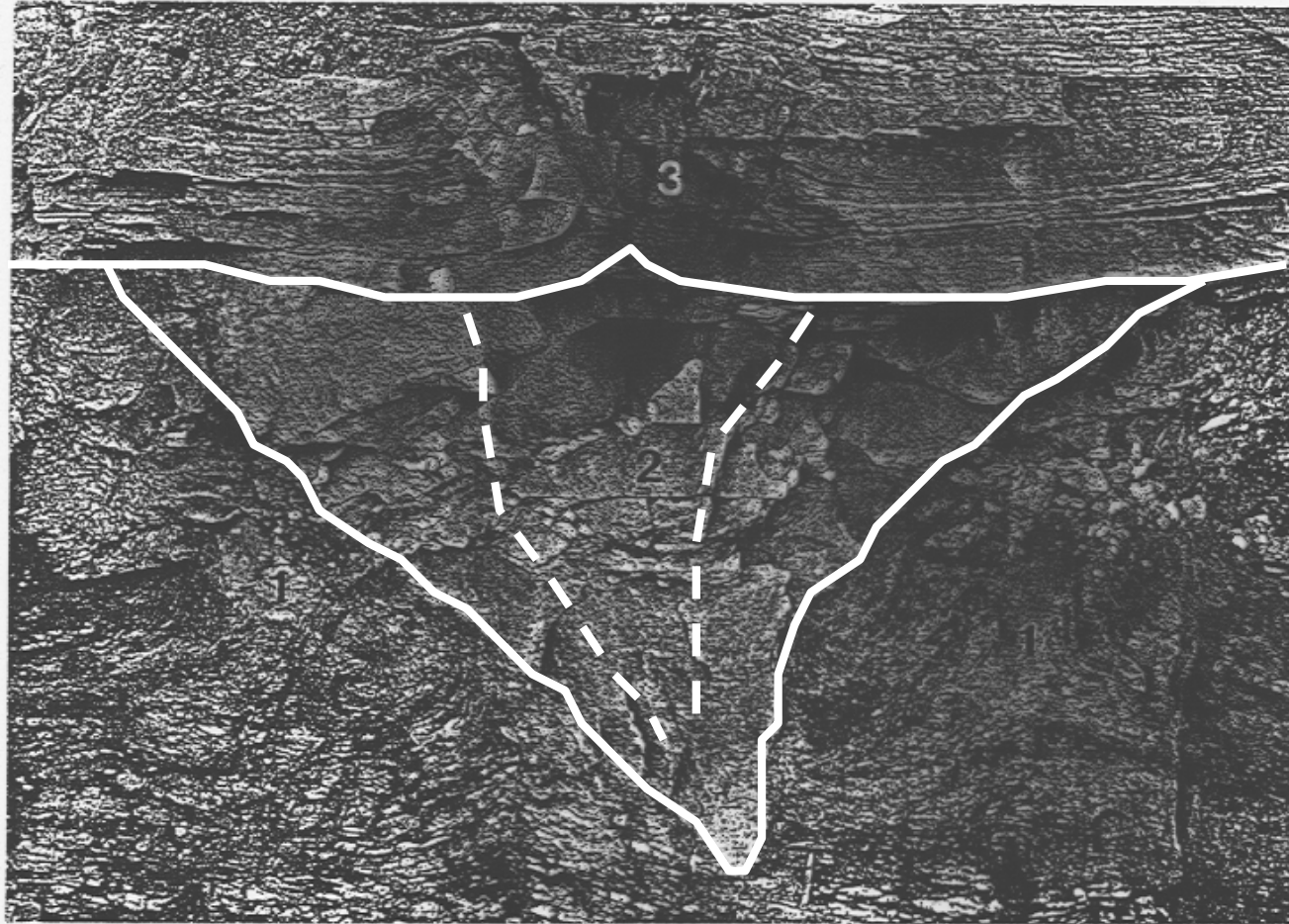


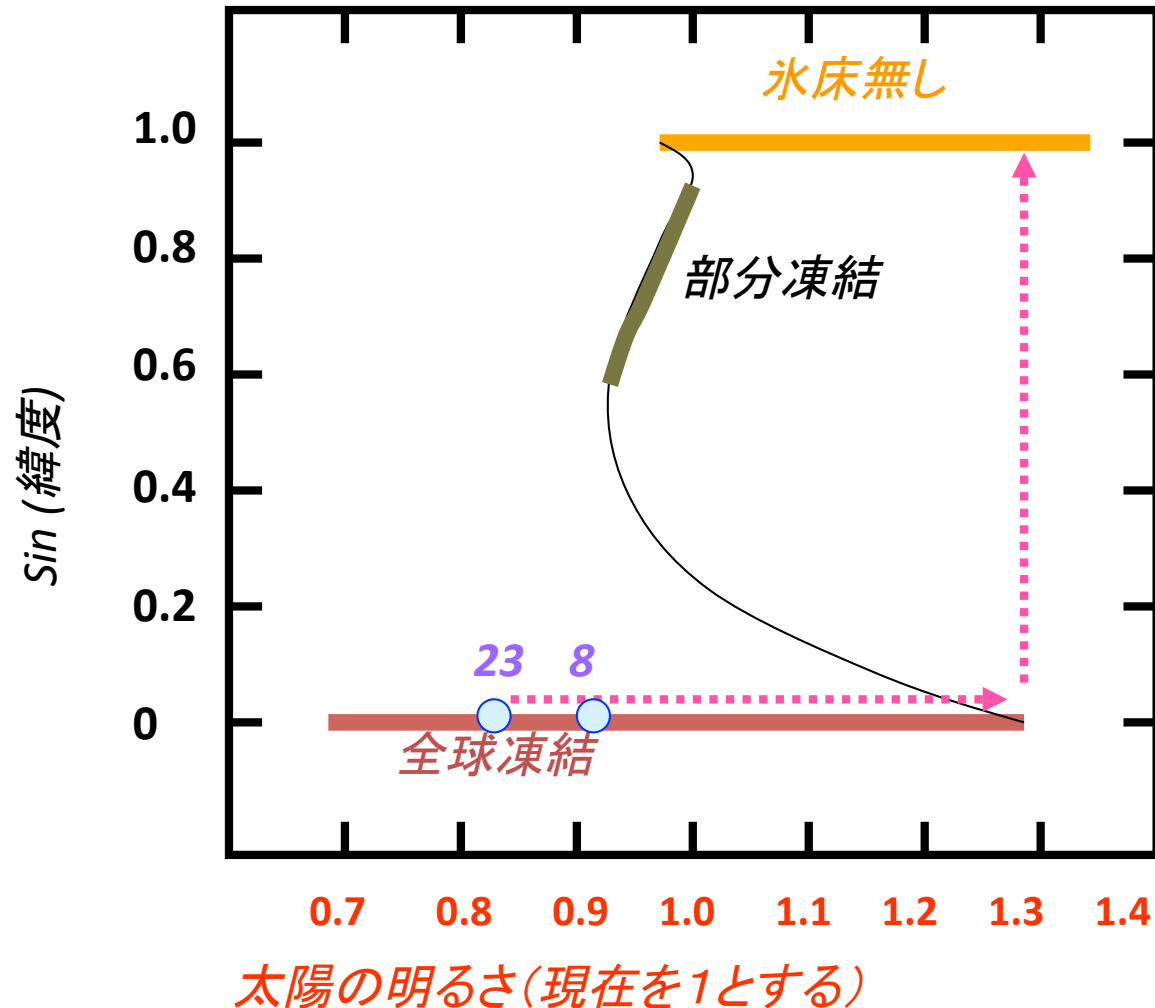
Fig. 4. Vertical exposure of a Late Proterozoic (~ 650 Ma) periglacial sand wedge 3 m deep (2) in brecciated mid-Proterozoic quartzite at the Cattle Grid copper mine, South Australia. A near-vertical, diverging lamination that parallels the wedge margins is discernible within the wedge. Deformed sand wedges of an earlier generation (1) occur within the breccia and a third-generation wedge (3) occurs within overlying Late Proterozoic aeolian sandstone (Whyalla Sandstone) and the uppermost part of the large wedge. Bedding in breccia and sandstone is turned upward adjacent to the wedges. Numerous such sand wedges formed near sea level in the area bordering the Adelaide Geosyncline during the Marinoan Glaciation at ~ 650 Ma. Identical sand wedges are forming today in the periglacial dry valleys of Antarctica and in the Arctic. The structures indicate a very cold, arid, strongly seasonal climate.

オーストラリア東部8.5億年前のSand Wedge (from Williams, 1993)



24～22億年前の氷河堆積物 (Canada)

では、いかにして全球凍結状態から脱出できたのか？



南北一次元エネルギーバランスモデルによる安定解
(現在の大気組成を仮定) North (1981)に加筆

その鍵は、炭素循環にあった。

全球凍結が起こると、化学風化が停止する。



一方、地球内部からのCO₂脱ガスは続く。



その結果、大気中のCO₂濃度は上昇し続け、
ついには氷床の融解が起こり、
全球凍結状態から脱出できる。

何らかの理由で $p\text{CO}_2$ が1桁下がる

化学風化再開し $p\text{CO}_2$ 減少

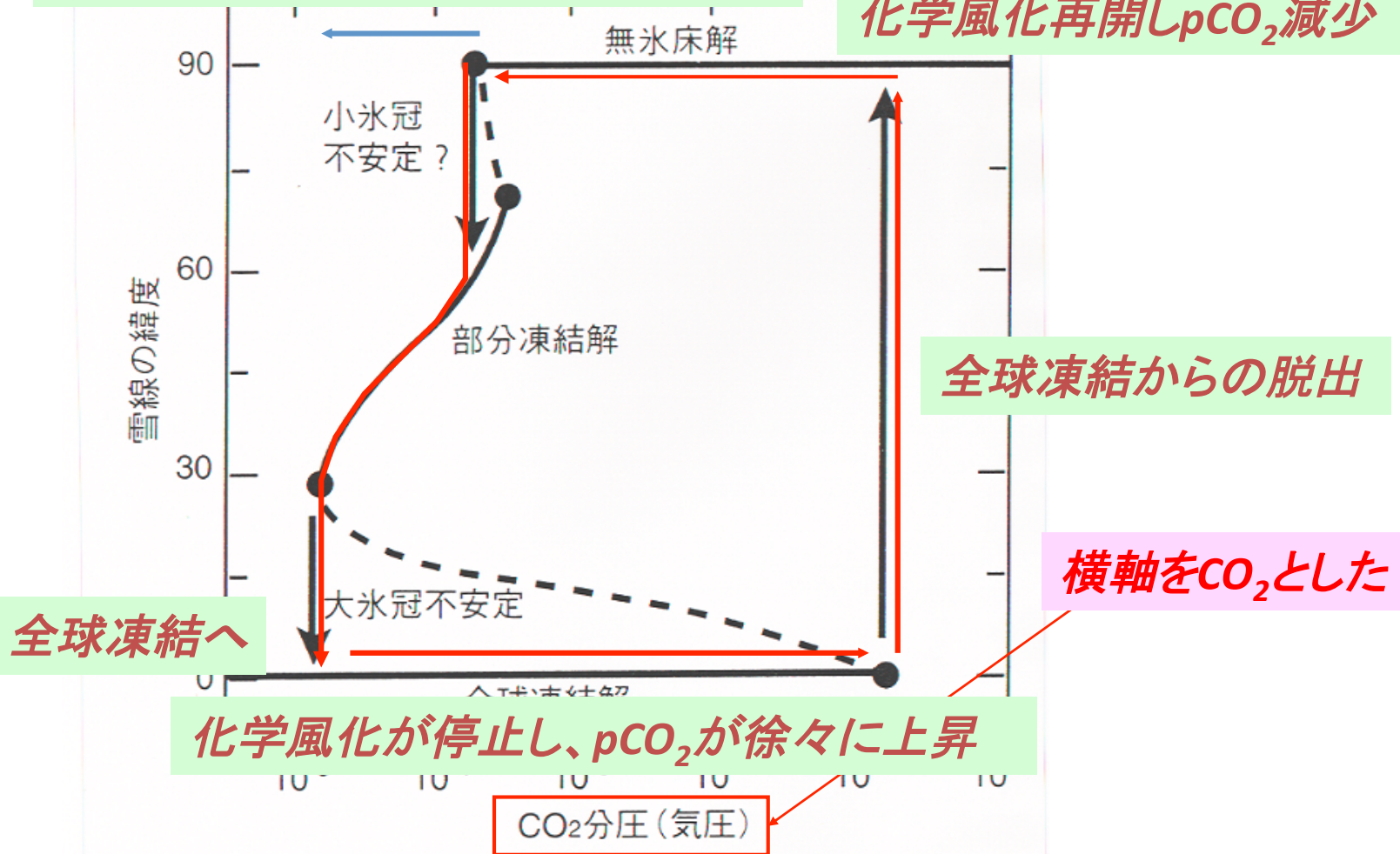
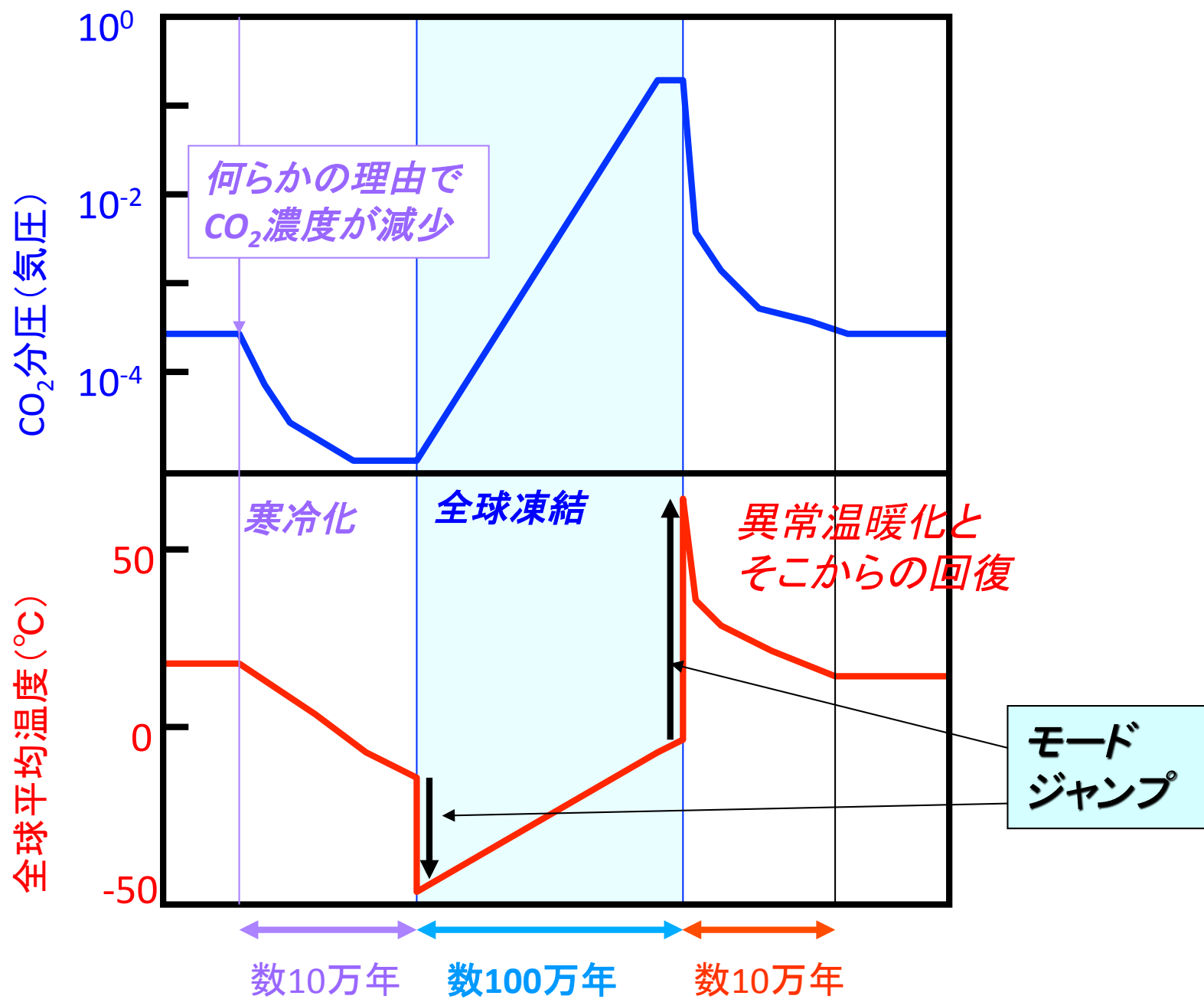


図2 地球放射の二酸化炭素分圧依存性を考慮した南北1次元エネルギーバランス気候モデルから得られた定常解。大気中の二酸化炭素分圧に対する雪線(雪氷圏の広がり)の緯度が示されている。実線は安定解、破線は不安定解、黒丸印は安定解が消失する臨界点、実線矢印は気候ジャンプを表わす。

(田近、2000)



(田近、2000)

では、全球凍結のきっかけとなった
大気中CO₂分圧の減少は、何故起こったのか？

超大陸の形成に伴なう火山活動の低下？

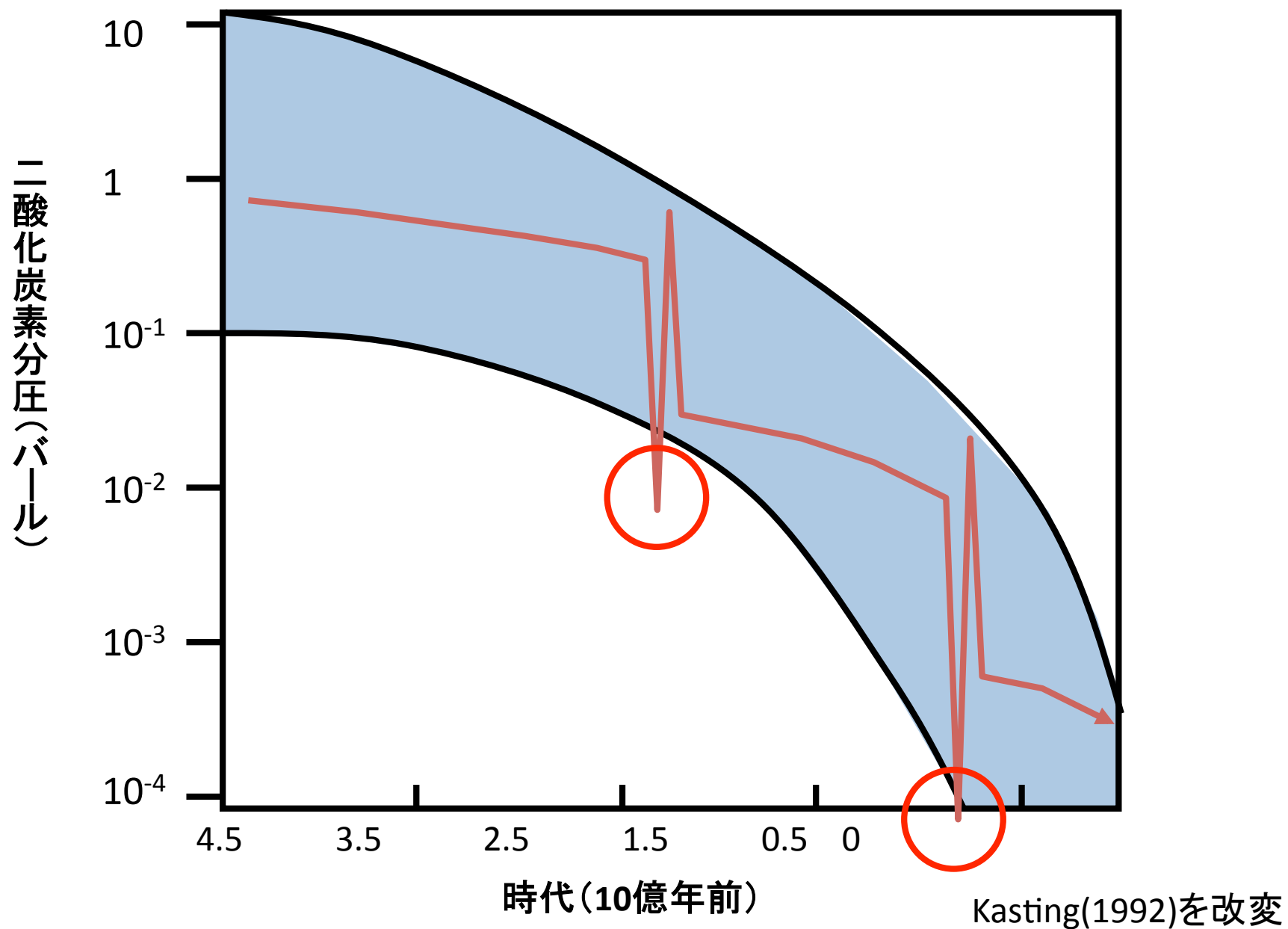
生物の進化に伴なう炭素固定効率の増加？

大気酸素レベルの上昇に伴なう風化効率の増加？

(まだ、明らかにされていない)

いずれにせよ、炭素循環境界条件の非可逆的变化により、
地球の気候モードがジャンプしたものと考えられる。

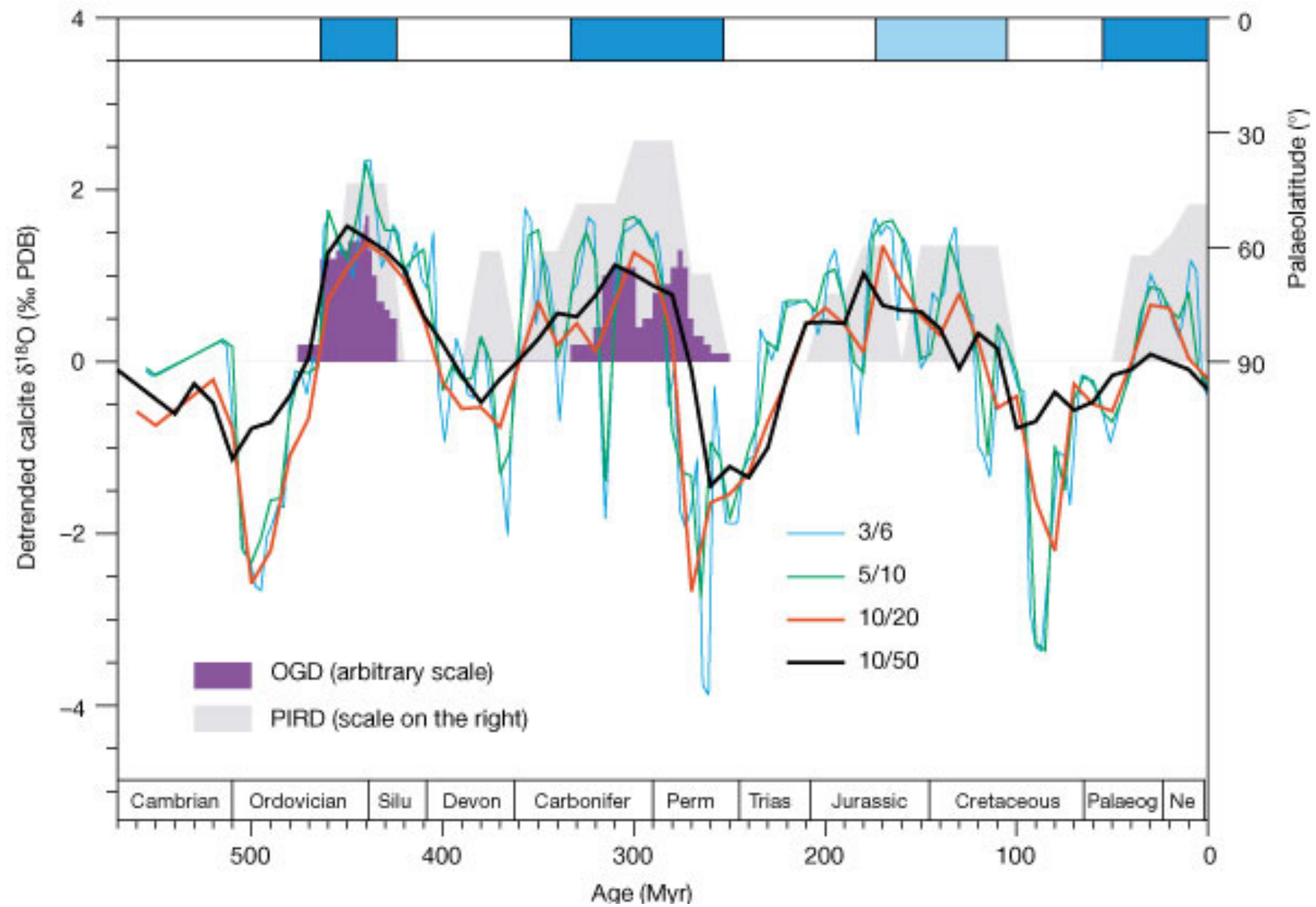
炭素循環モードの不可逆的变化によりCO₂分圧が不連続的に減少



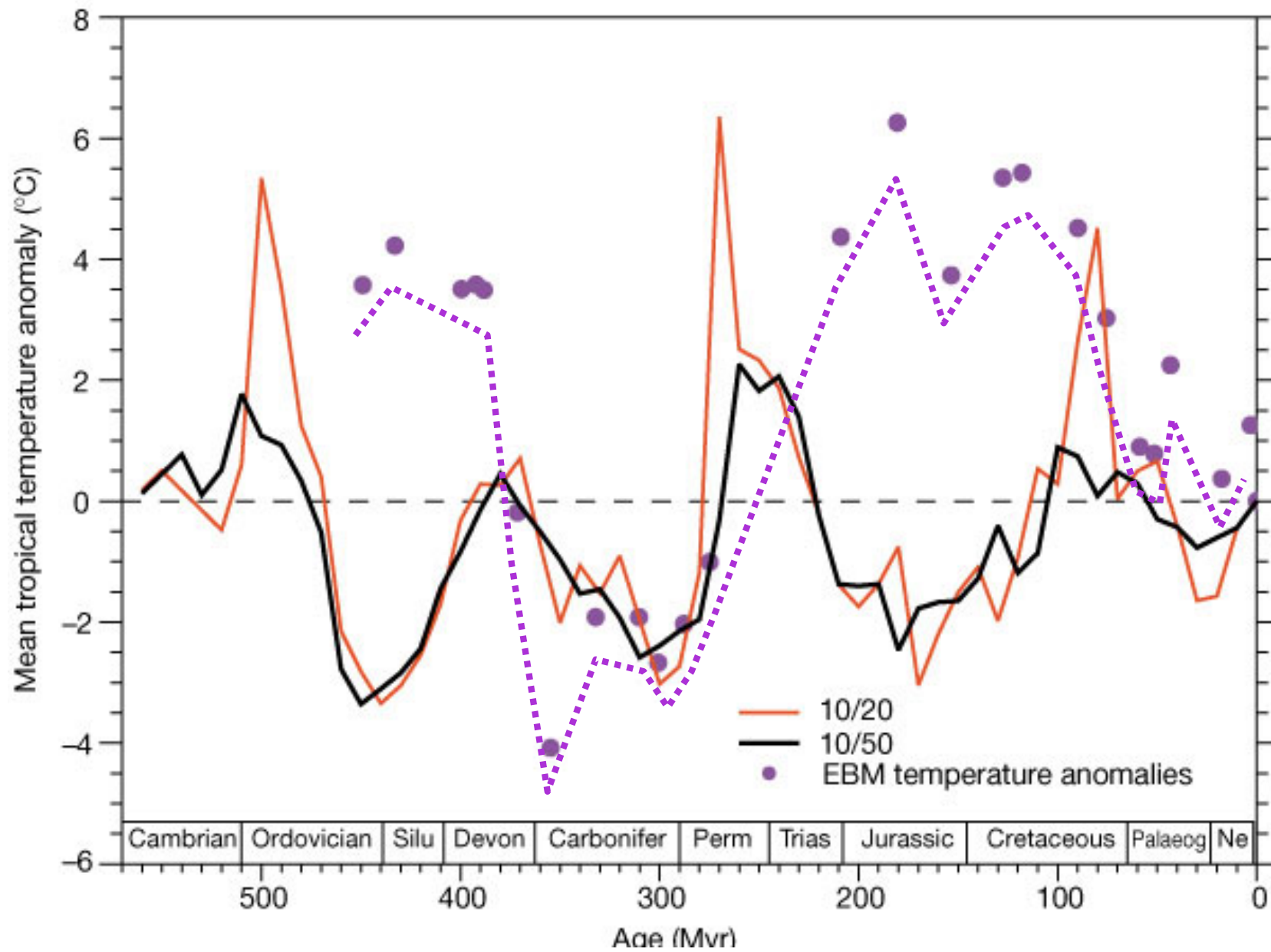
ここまでのまとめ(1)

- 地球表層の気候状態には、複数の安定モードが存在する。
- 各安定モードは、(炭素循環などの)負のフィードバックで維持されている。
- システムの境界条件(エネルギー供給速度、 CO_2 供給速度、 CO_2 固定速度など)がある敷居値を越えると、システムは不安定になり、環境モードは別のモードへと急激にジャンプする。

顕生代の気候は、地球外要因で制御
されたのか？

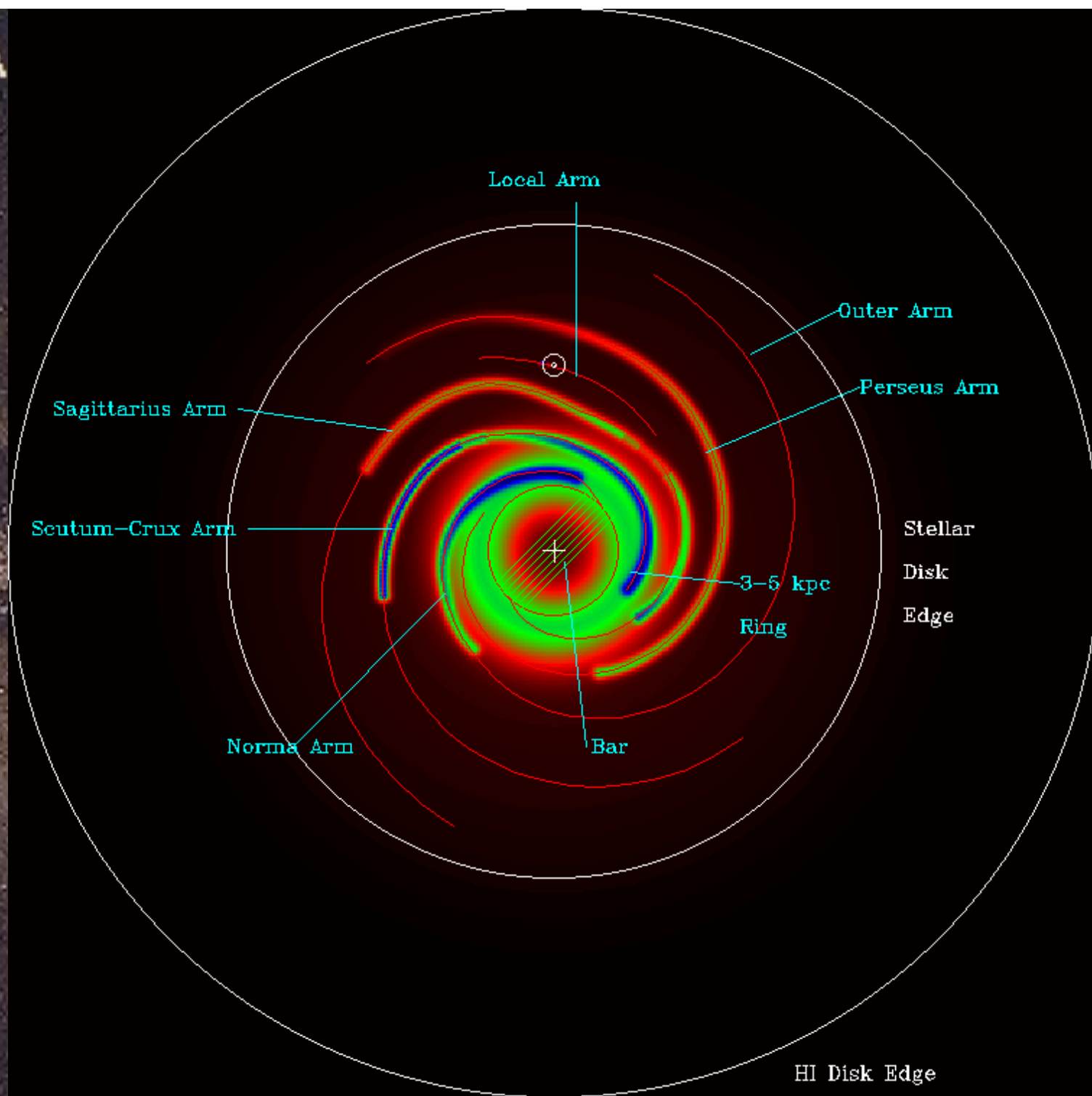


(from Veizer et al., 2000)



(from Veizer et al., 2000)

© A



g.gif

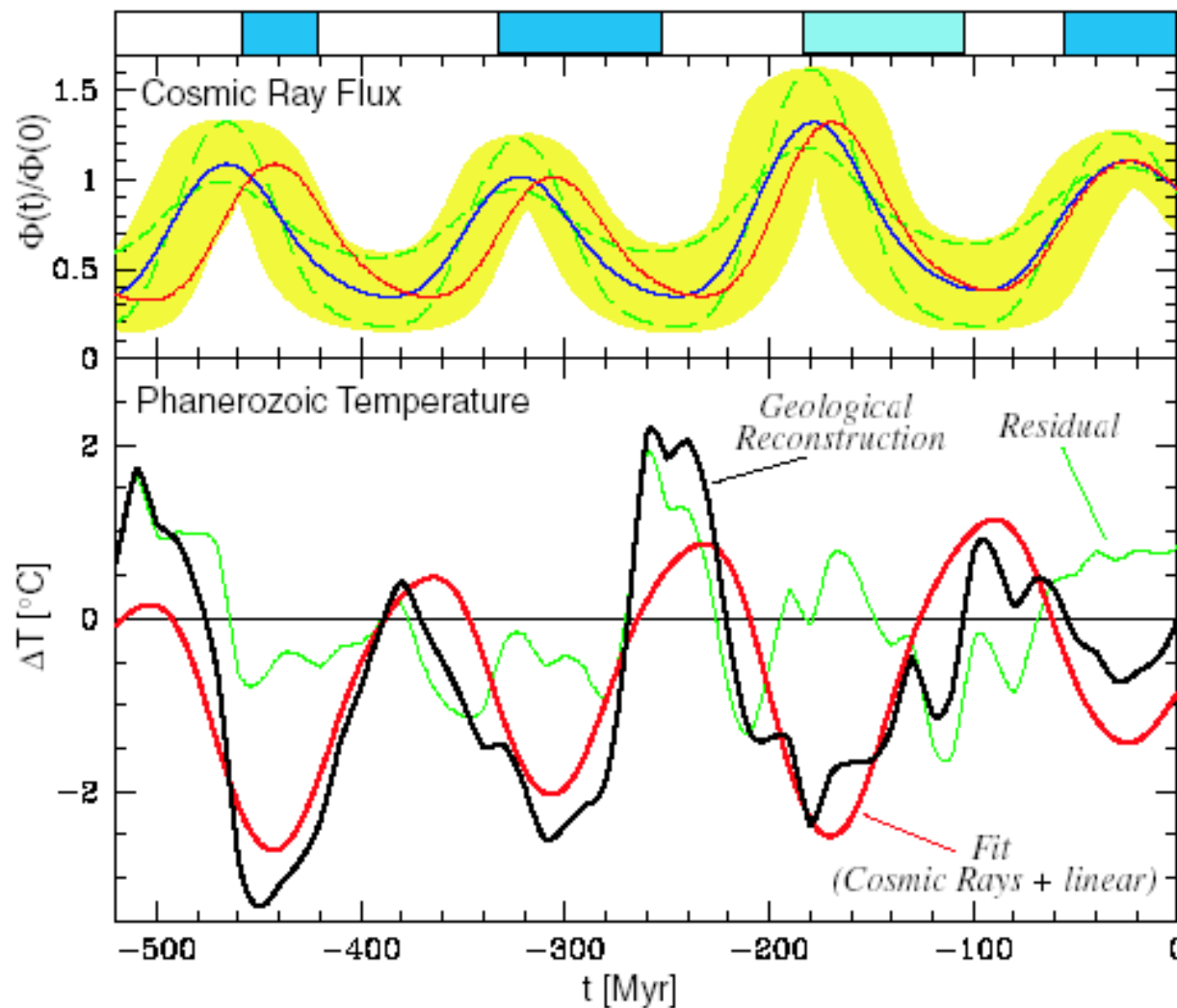


Figure 2. The cosmic ray flux (Φ) and tropical temperature anomaly (ΔT) variations over the Phanerozoic. The upper curves describe the reconstructed CRF using iron meteorite exposure age data (Shaviv, 2002b). The blue line depicts the nominal CRF, while the yellow shading delineates the allowed error range. The two dashed curves are additional CRF reconstructions that fit within the acceptable range (together with the blue line, these three curves denote the three CRF reconstructions used in the model simulations). The red curve describes the nominal CRF reconstruction after its period was fine tuned to best fit the low-latitude temperature anomaly (i.e., it is the "blue" reconstruction, after the exact CRF periodicity was fine tuned, within the CRF reconstruction error). The bottom black curve depicts the 10/50 m.y. (see Fig. 1) smoothed temperature anomaly (ΔT) from Veizer et al. (2000). The red line is the predicted ΔT_{model} for the red curve above, taking into account also the secular long-term linear contribution (term $B \times t$ in equation 1). The green line is the residual. The largest residual is at 250 m.y. B.P., where only a few measurements of $\delta^{18}\text{O}$ exist due to the dearth of fossils subsequent to the largest extinction event in Earth history. The top blue bars are as in Figure 1.

(Shaviv and Veizer, 2003)

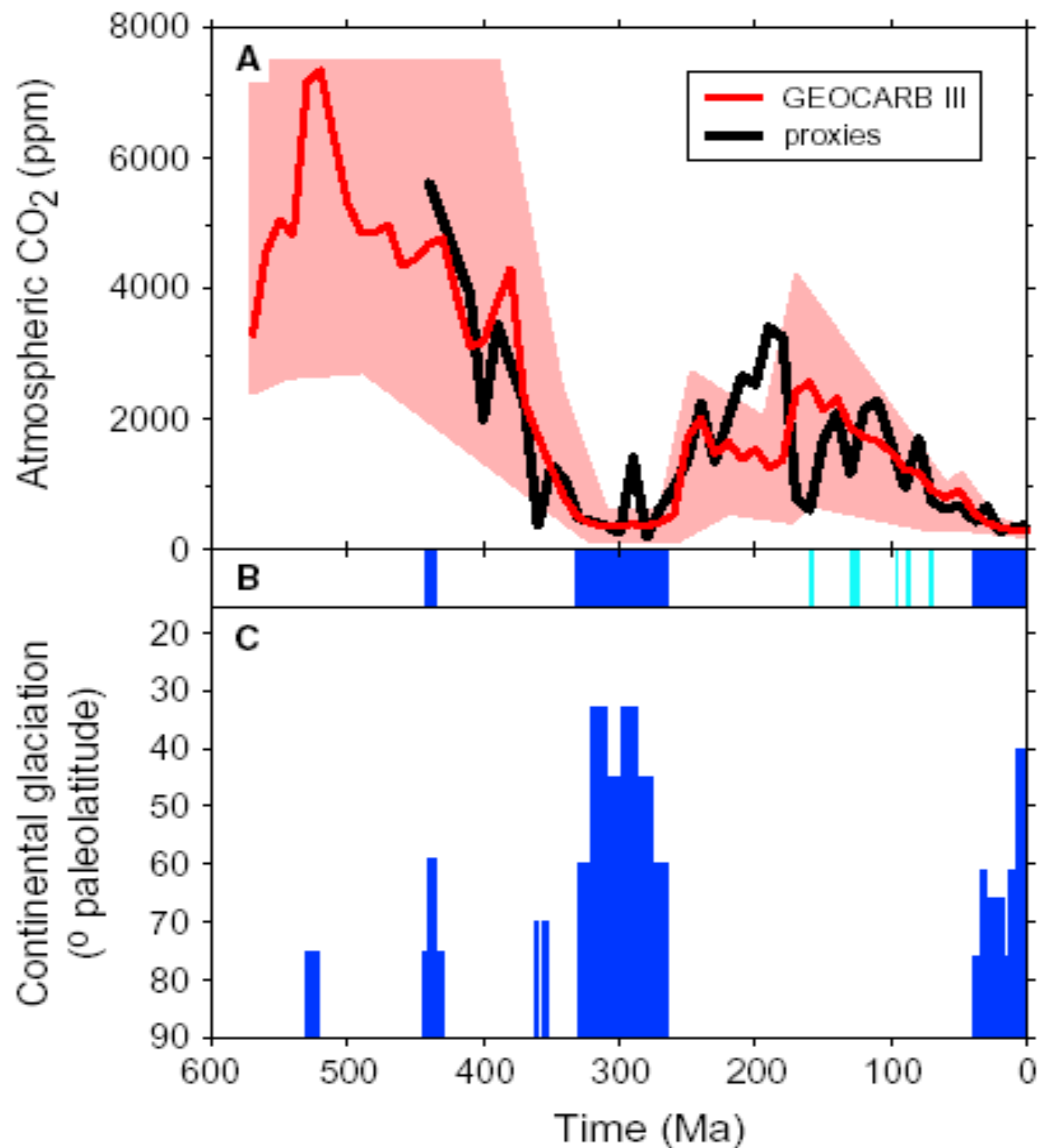


Figure 2. CO₂ and climate. **A:** Comparison of model predictions (GEOCARB III; Berner and Kothavala, 2001) and proxy reconstructions of CO₂. 10 m.y. time-steps are used in both curves. Shaded area represents range of error for model predictions. **B:** Intervals of glacial (dark blue) or cool climates (light blue; see text). **C:** Latitudinal distribution of direct glacial evidence (tillites, striated bedrock, etc.) throughout the Phanerozoic (Crowley, 1998).

(Royer et al., 2004)

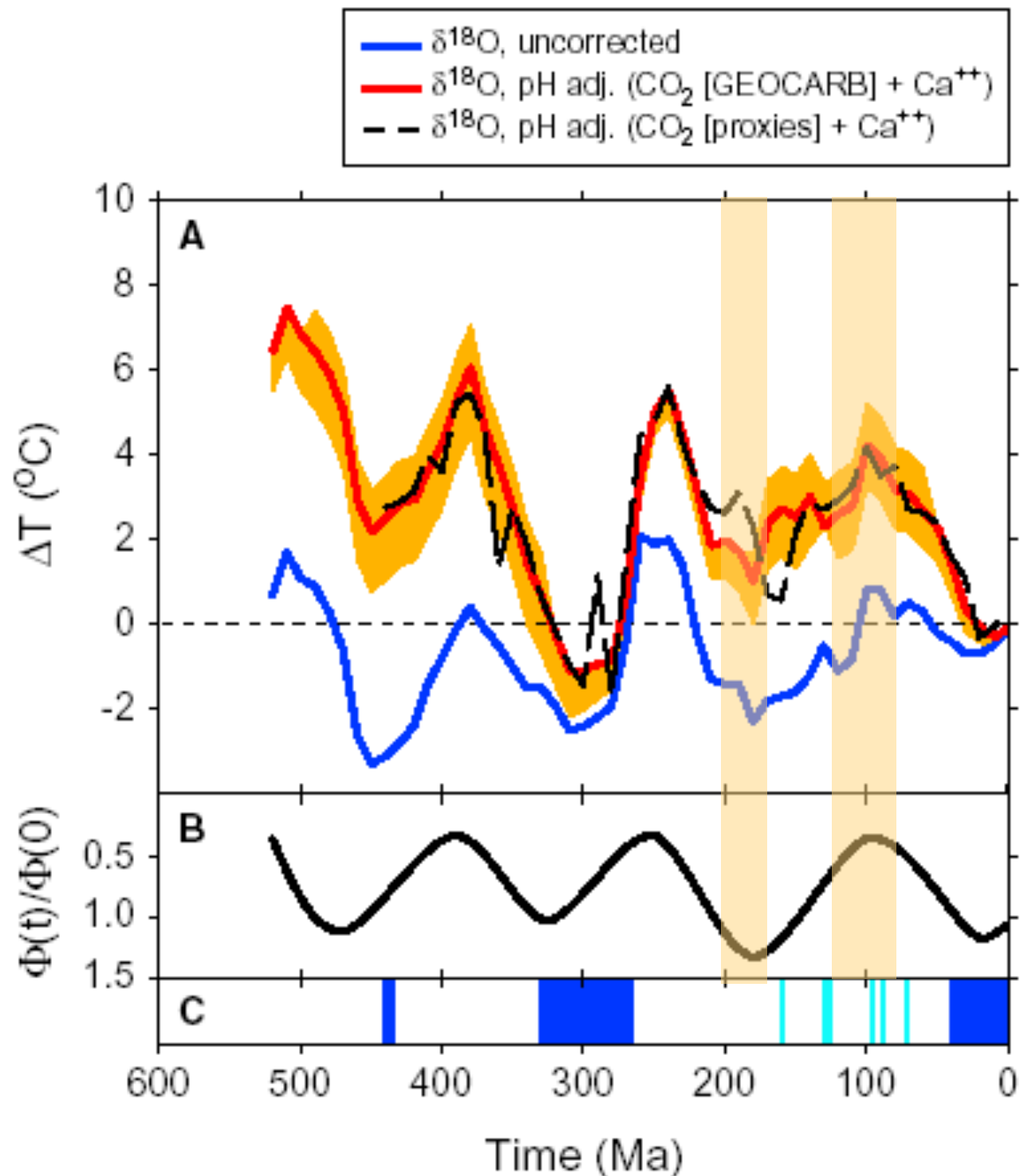


Figure 4. pH-correction for shallow-marine $\delta^{18}\text{O}$ carbonate curve. **A:** The blue curve corresponds to temperature deviations relative to today calculated by Shaviv and Veizer (2003) from the "10/50" $\delta^{18}\text{O}$ compilation presented in Veizer et al. (2000), where the original data (Veizer et al., 1999) were detrended and then averaged in 10 m.y. time-steps using a 50 m.y. moving window. In the two remaining curves, data from the blue curve have been adjusted for pH effects due to changes in seawater Ca^{++} concentration (after Horita et al., 2002), and CO_2 based either on GEOCARB III or proxies. A sensitivity analysis was performed on the GEOCARB + Ca^{++} curve by holding Ca^{++} levels constant (lower bound of orange band), or by allowing the saturation state of CaCO_3 in the ocean to vary through time (Ω ; upper bound; see text for details). **B:** Cosmic ray flux (relative to the present day) as reconstructed by Shaviv (2002). **C:** Intervals of glacial and cool climates, as in Fig. 2B.

(Royer et al., 2004)

参考文献

Shaviv and Veizer, 2003: Celestial driver of Phanerozoic climate, EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 – 11

Mann et al., 2009: Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly., Science, Volume 326, Issue 5957, pp. 1256