

地球環境の変遷から 宇宙における第二の地球の条件を探る

東京大学

大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

田近 英一

地球惑星科学

専門分野：地球惑星環境システム科学

- 地球惑星環境システムの進化・変動・安定性
- 地球環境と生命の共進化
- ハビタブル惑星/アストロバイオロジー

多圏間相互作用

- 物理過程
- 化学過程
- 生物過程



- 地球惑星環境変動
- 生命活動
- 地球惑星内部変動

地球環境の特色

	金星	地球	火星
大気圧	95気圧	1気圧	0.006気圧
全球平均温度	460°C	15°C	-60°C
窒素(N ₂)	3.5	78.1	2.7
酸素(O ₂)	—	20.9	—
アルゴン(Ar)	0.007	0.93	1.6
二酸化炭素(CO ₂)	96.5	0.040	95.3

単位: %



地球環境の特色

1. 液体の水(=海)

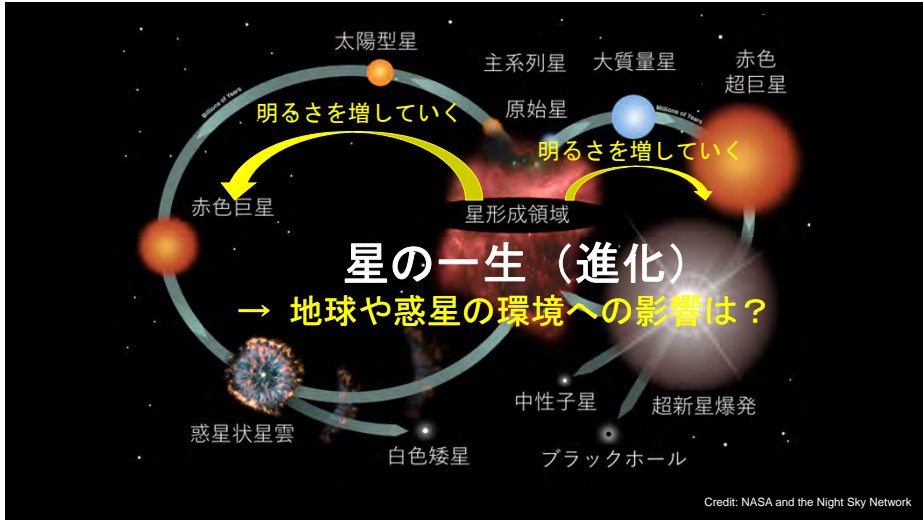
海が46億年間維持されてきた

→ 気候が安定している

2. 酸素に富み二酸化炭素に乏しい大気

生物の活動?

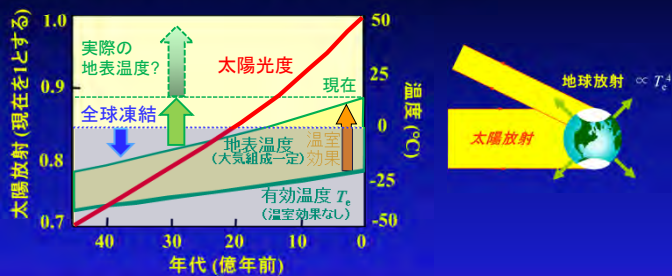
1. 暗い太陽のパラドックスと地球環境の進化



Credit: NASA and the Night Sky Network

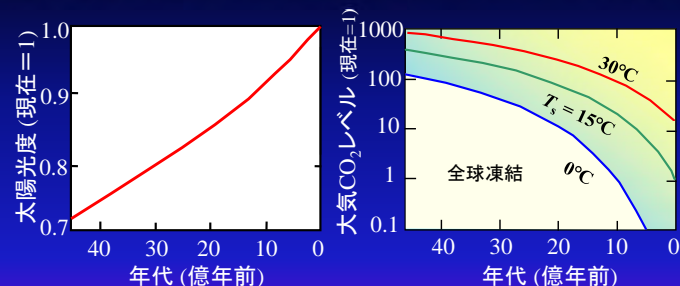
“暗い太陽のパラドックス”

矛盾？



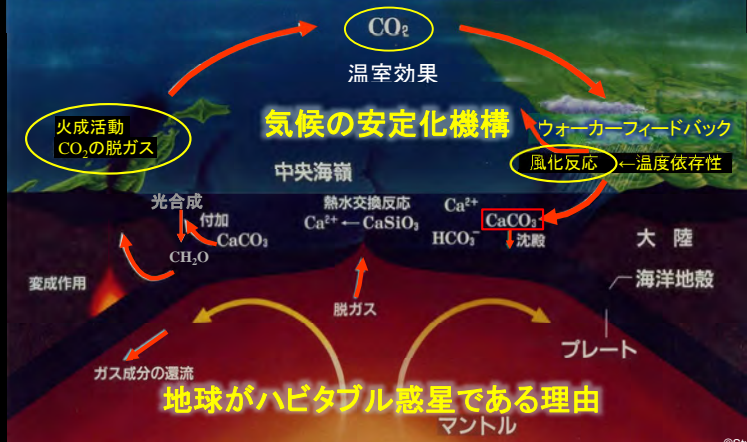
もし大気組成が現在と同じならば
 約20億年前以前は全球凍結していたことになる!
 しかし、30億年前以前の海水温は60°Cを越える高温環境だった!

二酸化炭素の温室効果によって解決？



* 過去の地球大気は二酸化炭素濃度が高かった?
 → 太陽放射の増大に合わせて都合良く減少してきたのか?

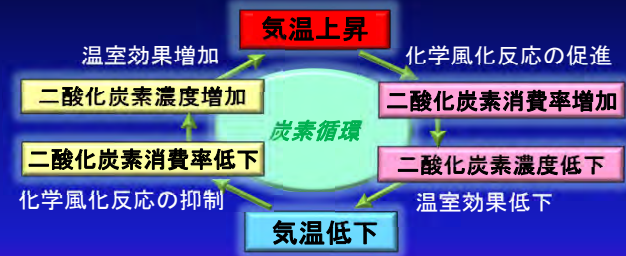
地球は気候の自己調節機能を持っている！



©Studio L / Studio R

地球環境の安定化機構

* 火山活動による二酸化炭素供給率は10万年スケールでは一定と仮定する



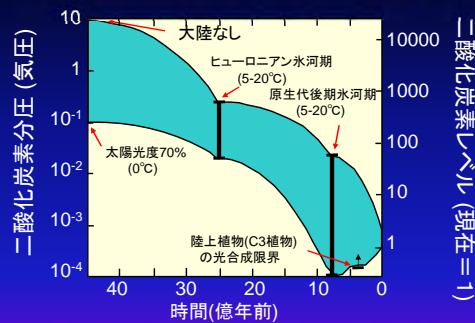
“ウォーカー・フィードバック”

(地表温度に対する負のフィードバック機構)

* 100万年以上の時間スケールで有効な安定化機構

[Walker et al. (1981) JGR]

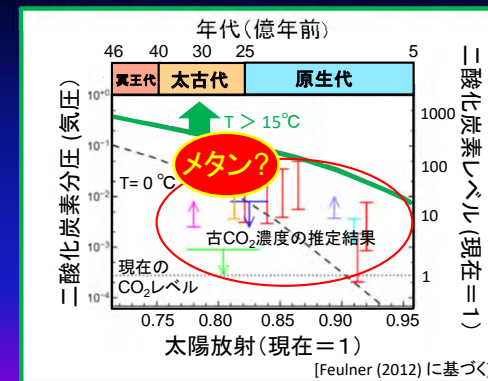
二酸化炭素大気の進化



太陽光度の増大に対応して二酸化炭素濃度は低下してきた！

[Kasting (1993) Science]

古二酸化炭素濃度の地球化学的推定



[Fulmer (2012) に基づく]

二酸化炭素だけでは温暖気候を説明できない？ → メタン？

炭素循環とメタン

■ 現在の地球：好気環境

有機物の大部分は酸素で分解されるが

嫌気環境においては有機物は嫌氣的に分解され

メタン菌がメタンを生産

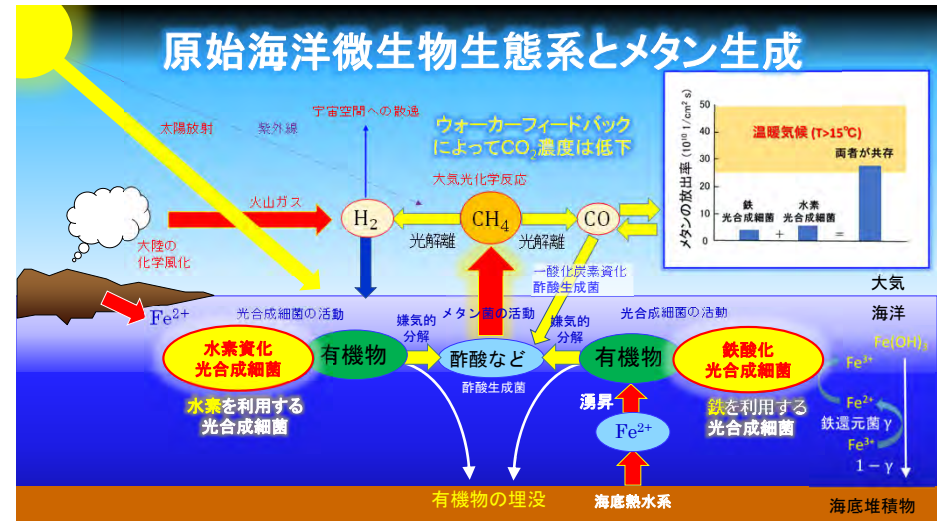
有機物 → メタン



■ 30億年前の地球：嫌気環境

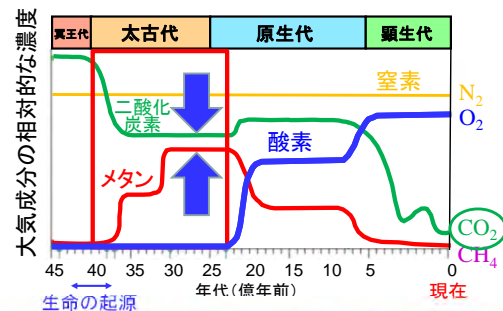
メタンの放出率(大気メタン濃度)は現在よりずっと高い?

ウォーカー・フィードバックによって 二酸化炭素濃度は低下



地球大気の進化

二酸化炭素—メタン—酸素の変遷

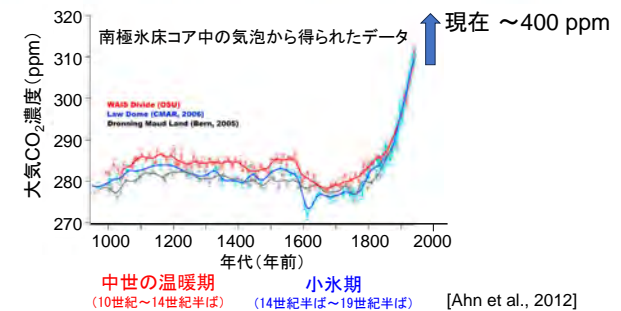


太陽光度の増大に対応して二酸化炭素濃度は低下してきた

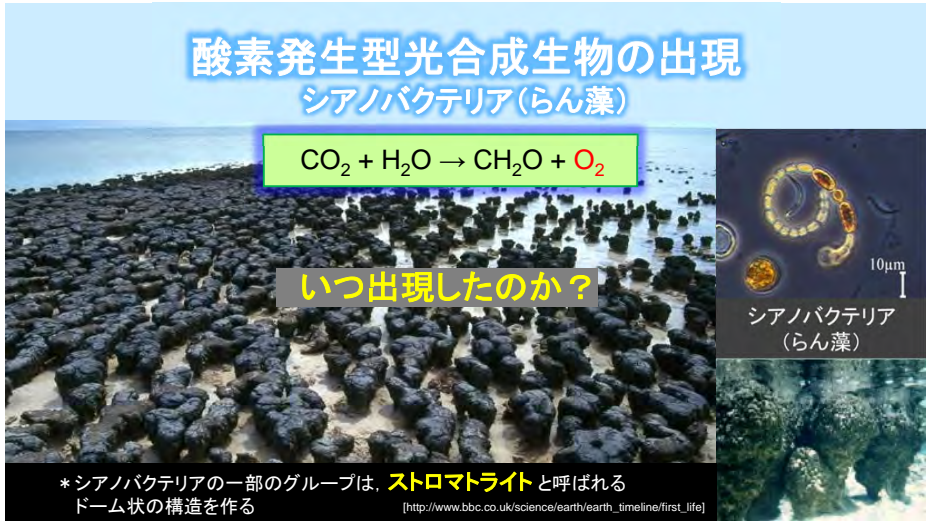
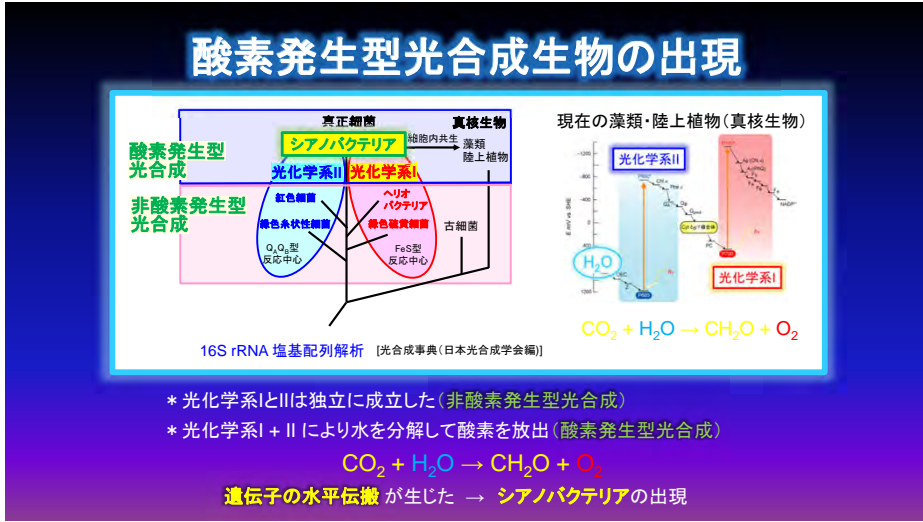
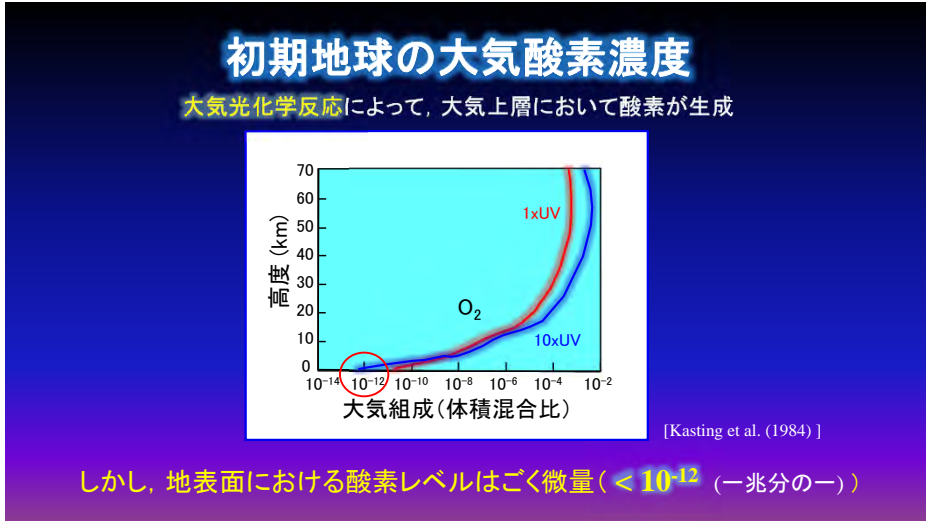
[Kasting (2005) Sci. Am. に基づく]

現在の地球温暖化

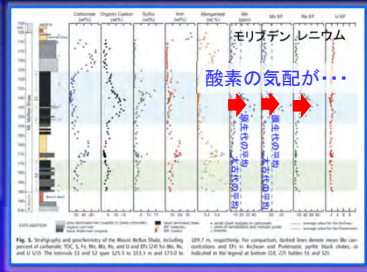
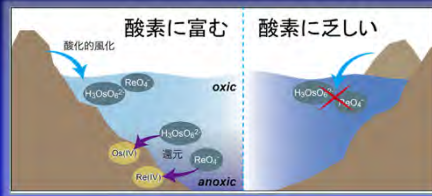
～過去1000年間の大気三酸化炭素変動～



急激な人間活動の影響が自然環境を変えている



25億年前以前に酸素のかすかな痕跡？ “Whiff”



“酸化還元敏感元素”
(モリブデン(Mo), レニウム(Re) など)

[Anbar et al. (2007) Science]
西オーストラリア 約25億年前

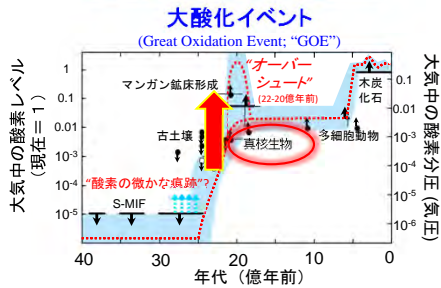
約27億年前頃までには出現していた？

縞状鉄鉱層の形成

酸化鉄(Fe₂O₃)に富む層とシリカ(SiO₂)に富む層が縞状に互層
陸源物質や海底熱水系に由来した溶存二価鉄を含む貧酸素の深層水が
富酸素の表層水と接触することで酸化鉄が沈澱？
その形成は約24.5億年前に最大、18億年前以降のものは例外的



酸素濃度の増加



- * 酸素濃度は太古代末にかすかに上昇
- * 酸素濃度は原生代の初めに急上昇(“大酸化イベント”)
- * 酸素濃度は原生代の初めにオーバーシュート？

最古の真核生物化石
約21億年前



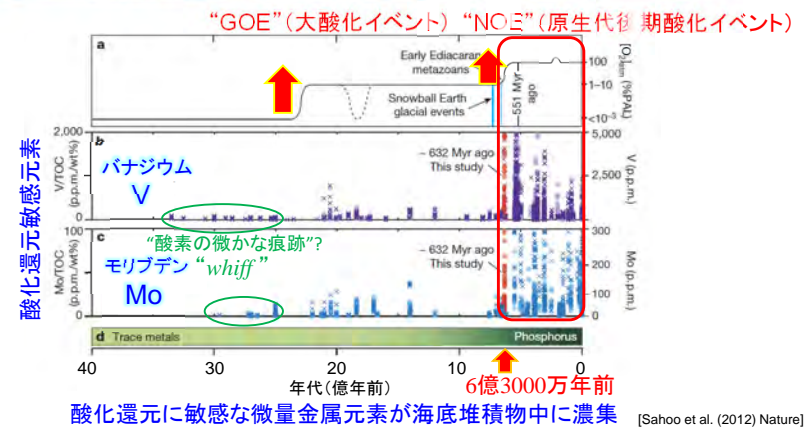
[Han and Runnegar (1992) Science]

最古の多細胞生物化石
約21億年前



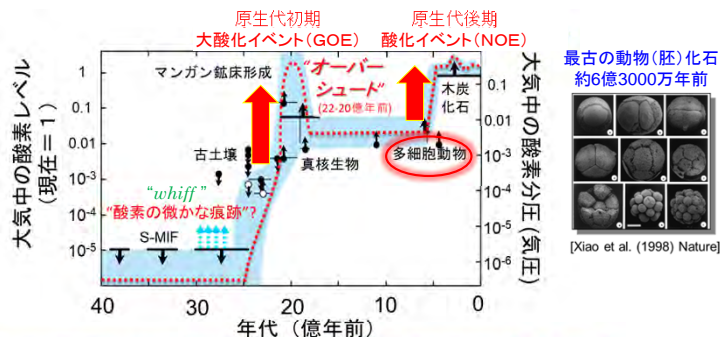
[Albani et al. (2010) Nature]

原生代後期にも酸素濃度の急激な上昇



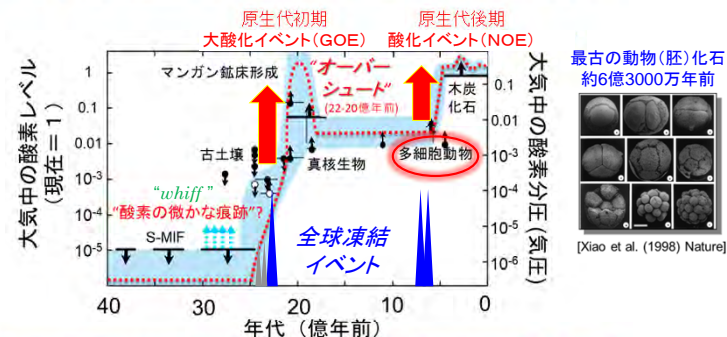
酸化還元敏感微量元素が海底堆積物中に濃集 [Sahoo et al. (2012) Nature]

酸素濃度の上昇



酸素濃度は22-20億年前と8-6億年前に急上昇！

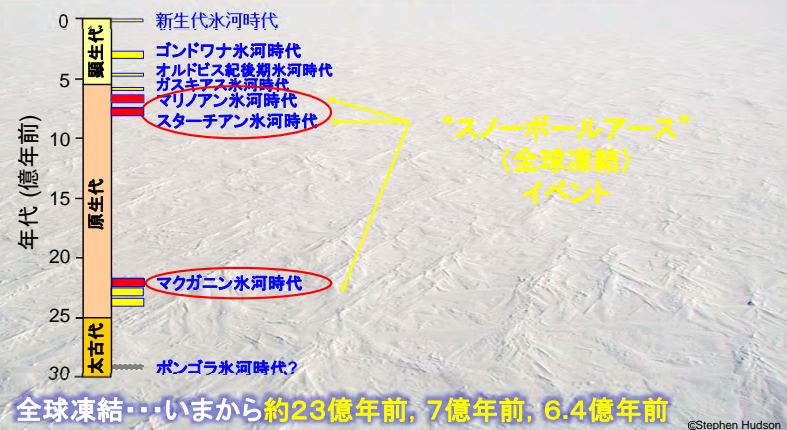
全球凍結直後に酸素濃度が上昇？



酸素濃度は22-20億年前と8-6億年前に急上昇！
それらの直前で全球凍結イベントが生じている！？

3. 全球凍結イベントと酸素濃度の上昇

地球史における氷河時代と全球凍結



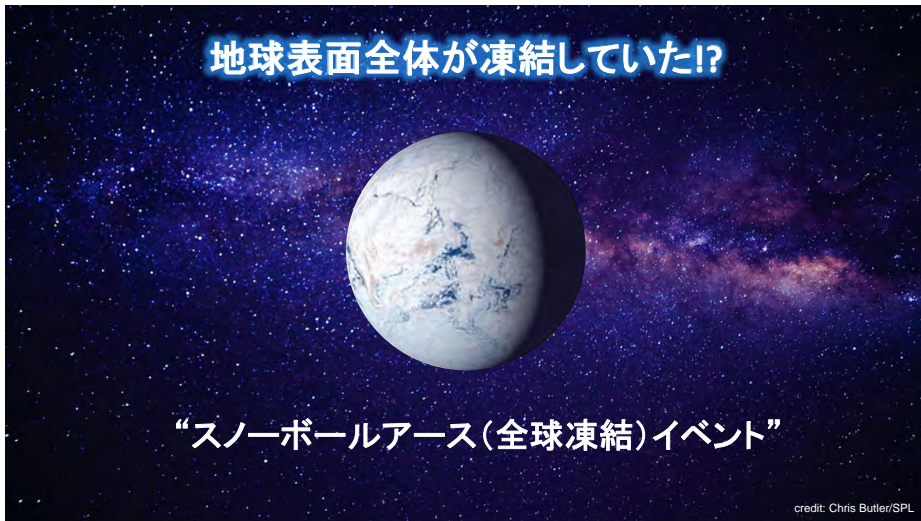
大陸氷床の証拠 “ダイアミクタイト”



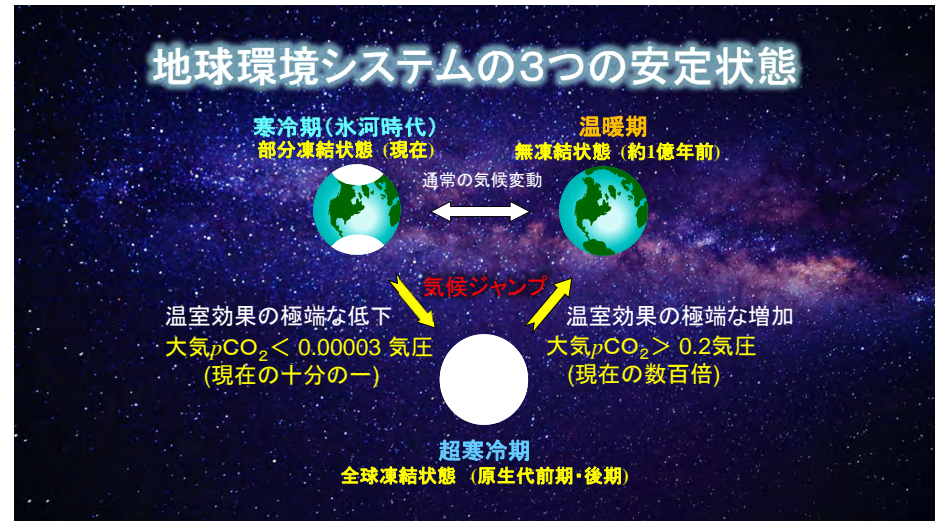
“低緯度氷床”の証拠を発見！



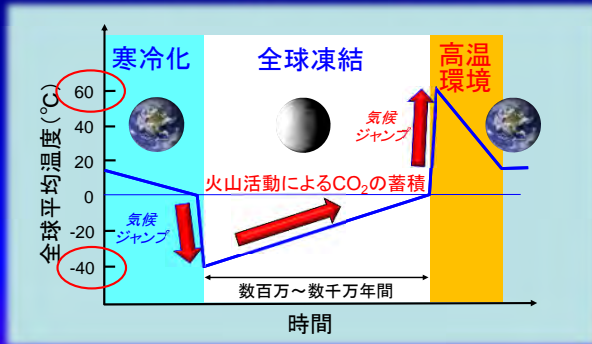
地球表面全体が凍結していた!?



地球環境システムの3つの安定状態

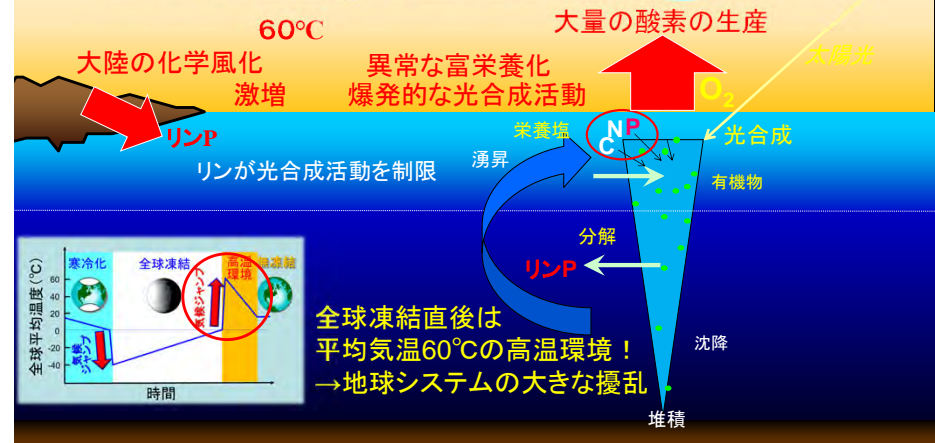


全球凍結イベントにおける気候変動



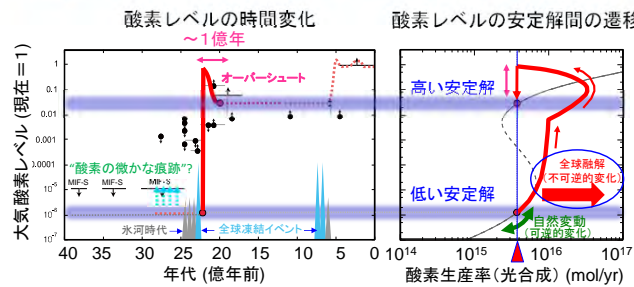
→ 全球平均気温マイナス40°Cからプラス60°Cへ!

全球凍結直後の酸素濃度上昇メカニズム



全球凍結直後は平均気温60°Cの高温環境!
→地球システムの大きな擾乱

全球凍結直後に酸素濃度が上昇?



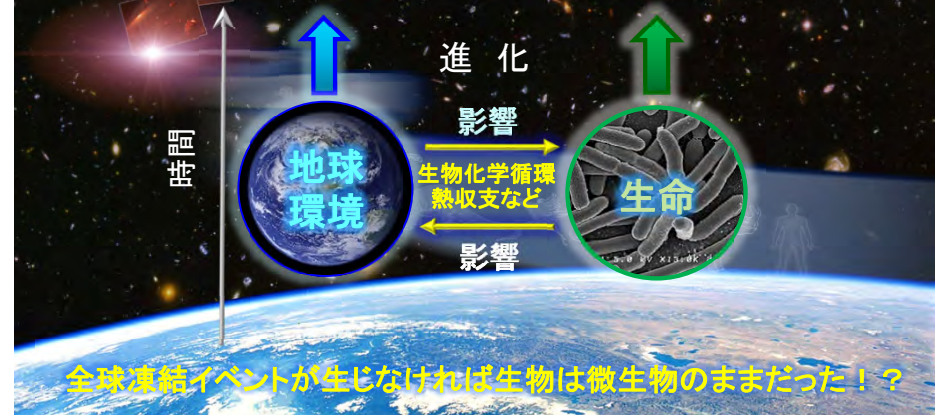
自然変動では小さな擾乱しか生じない

全球凍結直後の大規模な地球システム擾乱(高温環境下での激しい風化)

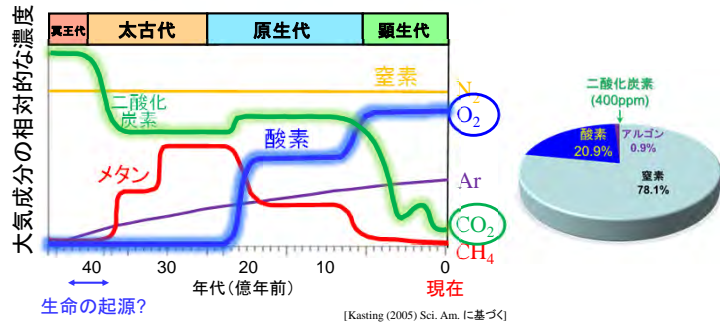
→ 全球凍結が生じなければ酸素は増えなかった!?

[Harada, Tajika, and Sekine (2015)]

地球環境と生命の“共進化”

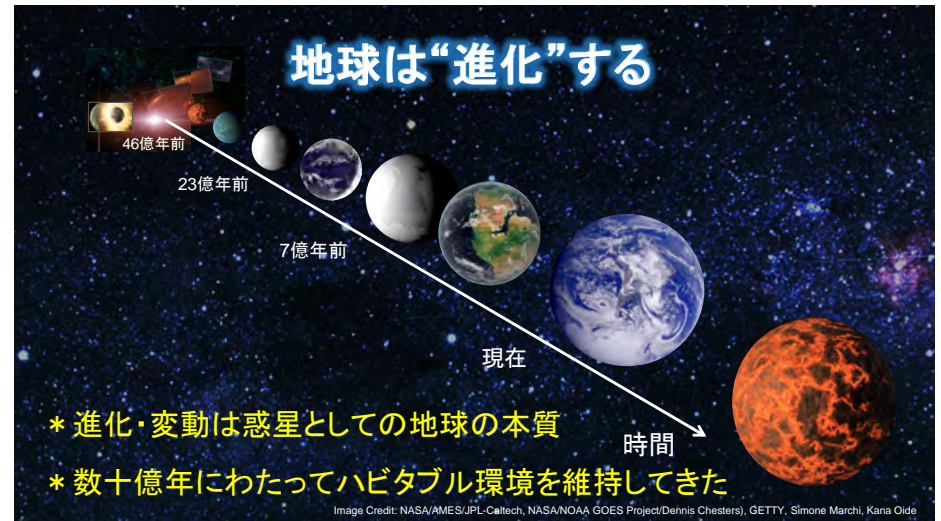


地球大気の進化

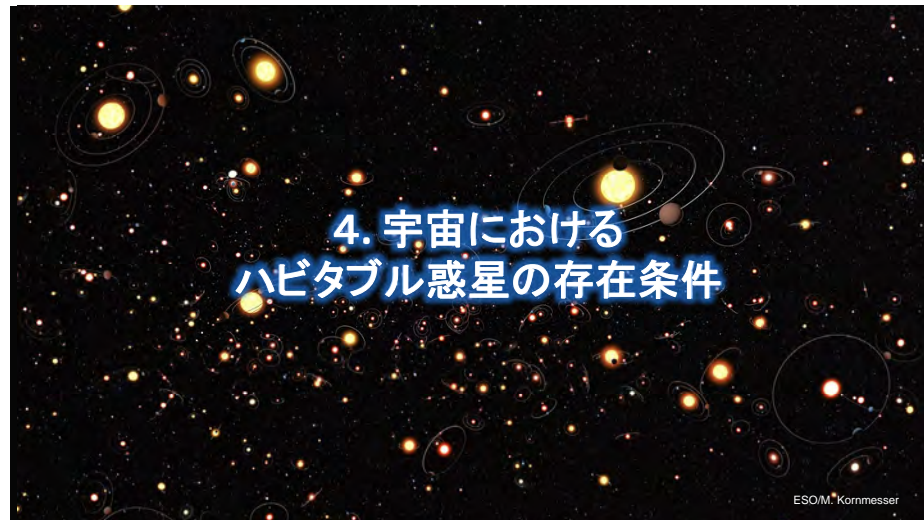


酸素に富み二酸化炭素に乏しい現在の大気は進化の結果

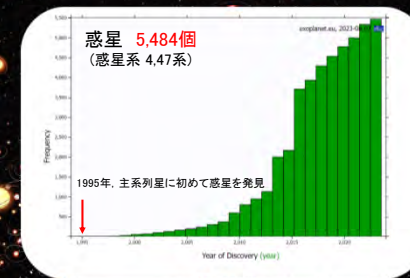
地球は“進化”する



4. 宇宙における ハビタブル惑星の存在条件



太陽系外に数千個の惑星が発見されている！



2023年8月7日現在 [太陽系外惑星エノサイクロペディア]

地球のようなハビタブルな惑星は存在するか？

[ESO/M. Kornmesser]

生命にとって
液体の水は必要不可欠

ハビタブル惑星
=水惑星(海を持つ惑星)

太陽系外に第二の地球は存在する！

Habitable Zone
ハビタブルゾーン

海は蒸発
(暴走温室条件)
TOO HOT

液体の水(海)が存在
(温暖湿潤条件)

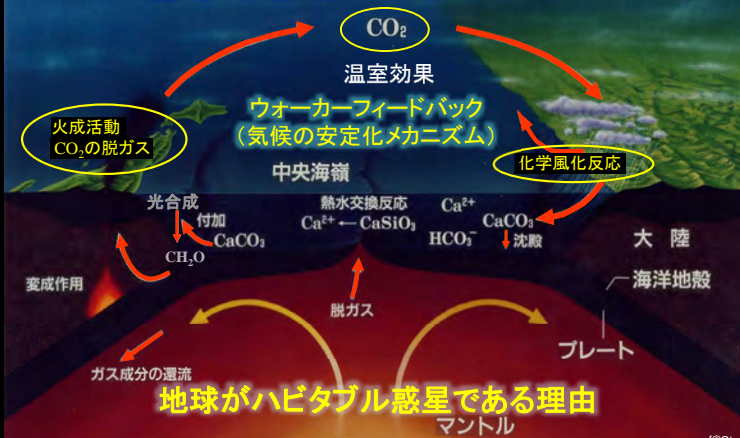
海は凍結
(全球凍結条件)
TOO COLD

温室効果が必要

ウォーカーフードバックが機能すれば
温暖湿潤環境を実現・維持できる

Modified original image©NASA

地球はなぜハビタブルか？



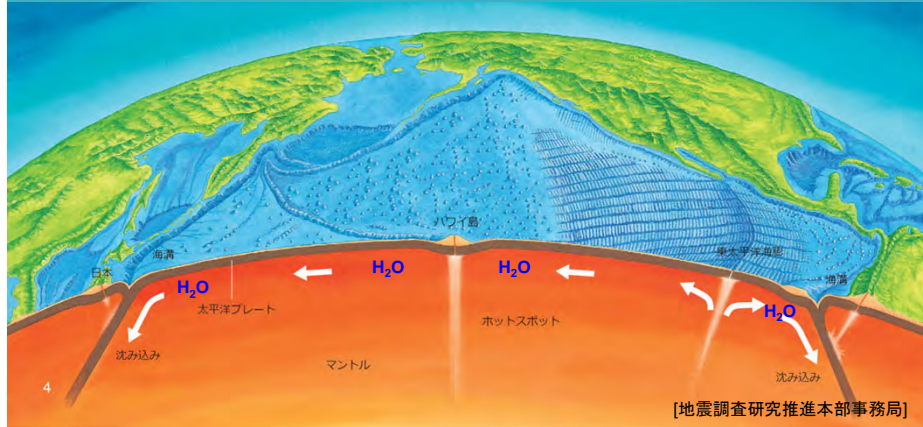
©Studio L / Studio R

火山ガスの放出

活発な火山活動 ← プレートテクトニクス

[USGS]

プレートテクトニクスには水が必要？



大陸 地球表面の30%！

地球環境を安定化！
生命必須元素の供給源！

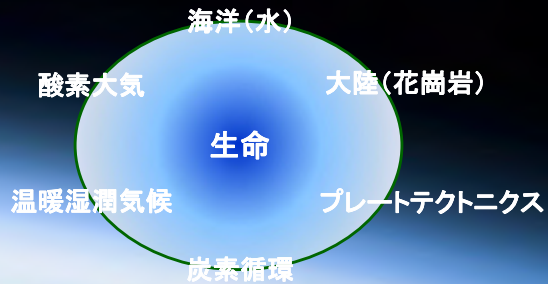
大陸 = 花崗岩

花崗岩の生成には水が必要
→ 海水+プレートの沈み込み！

©NASA

ハビタブル惑星の条件

=地球にしかみられない特色



これらの特色は互いに関係？

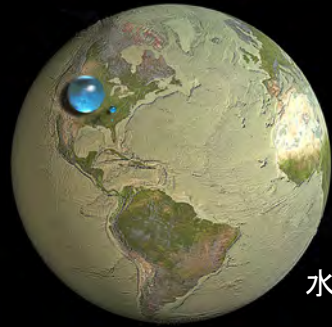
[Image credit: NASA]

太陽系外に数千個の惑星が発見されている！

地球のようなハビタブルな惑星が見つかるのは時間の問題？

[ESO/M. Kornmesser]

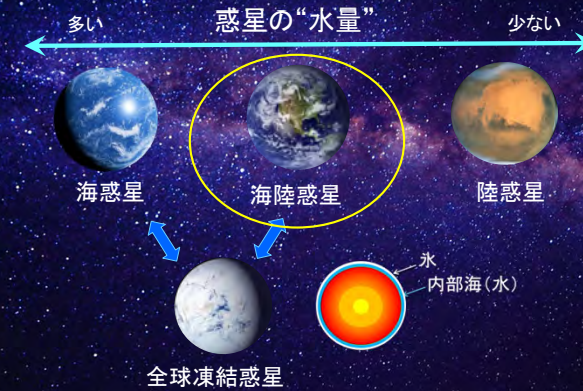
地球の水はわずか 0.023%



水量/地球質量
=0.023%

[Credit: Howard Perlan, USGS; globe illustration by Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution (©); Adam Nieman]

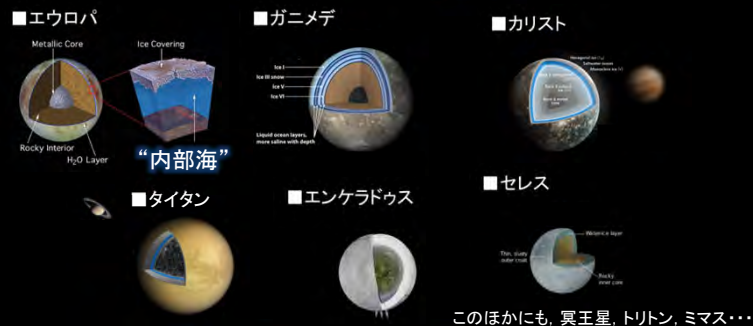
ハビタブル水惑星の多様性と進化



[Image credits: NASA, Chris Butler]

太陽系内にもハビタブル環境が存在する？

“内部海”を持つ太陽系天体(氷衛星)



“オーシャン・ワールド”

[Image credits: <http://www.jpl.nasa.gov/>, NASA/JPL-Caltech, Kelvinsong/CC BY-SA]

地球は普遍的な存在か？

[Image credit: NASA]