

惑星科学フロンティアセミナー 2011

地球惑星表層環境進化

講演者： 田近英一

東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

ノート係: 渡邊吉康, 門屋辰太郎

2011年7月13日, 14日

■本講義の目的

地球環境の形成と進化及び変動, 生物進化との関わりについて, 比較惑星環境学的視点で考える.

■参考書

1. DOJIN 選書「地球環境46億年の大変動史」(化学同人) 田近英一著
2. 新潮選書「凍った地球」(新潮社) 田近英一著

目次

1. 水惑星環境システムの安定性	3
1.1. ハビタビリティと水惑星	3
1.2. 地球環境の特色	4
1.3. 水惑星気候の多重性	5
1.4. 暗い太陽のパラドックス	7
1.5. 炭素循環と地球環境の安定性	9
2. 炭素循環と気候進化	11
2.1. 初期大気	11
2.2. 炭素循環と二酸化炭素大気の進化	12
2.3. 古二酸化炭素濃度の推定	14
2.4. メタンの存在	15
2.5. 暗い太陽のパラドックスの再燃	16
2.6. まとめ:	17
3. 大気の進化と酸素	18
3.1. 酸素の収支	18
3.2. 地球史における酸素濃度の増加	19
4. 全球凍結と生命進化	24
4.1. 原生代の氷河時代	24
4.2. スノーボールアース仮説	26
4.3. 全球凍結と酸素濃度の増大	28
4.4. 原生代初期全球凍結と酸素濃度増大を結ぶミッシングリンク	29
4.5. 地球環境と生命の共進化	29
5. 物質循環と生物	31
5.1. 顕生代における生物進化と気候変動	31
5.2. 顕生代の酸素濃度変動	31
5.3. 海洋無酸素イベント(Ocean Anoxic Events; OAEs)	32
6. 天体衝突イベント	35
6.1. 天体衝突の普遍性	35
6.2. K/T 境界における衝突	35
6.3. チチュルブ衝突	37
7. ハビタブルプラネット	39
7.1. 温暖湿潤環境の成立条件 ~水惑星システムの挙動特性~	39
7.2. スノーボールプラネット	40
7.3. 水惑星の多様性	41
7.4. まとめ	42

1. 水惑星環境システムの安定性

1.1. ハビタビリティと水惑星

□ ハビタビリティ(生命の生存可能性)

● これまで知られている地球上のすべての生命には、液体の水が必要不可欠である。水が液体状態で存在可能な惑星を”**水惑星**”と定義し、**ハビタブルプラネット**(生命存在可能惑星)と捉える。

水惑星の存在条件とはどのようなものか？

□ 液体の水(海)の存在条件

- 0 °C(三重点) < 温度 < 374 °C (臨界点)
- 条件を満たさない場合

海が蒸発してしまう→**暴走温室状態**

海が凍結してしまう→**全球凍結状態**

□ ハビタブルゾーンの範囲

● **ハビタブルゾーン**: 惑星表層に液体の水が存在しうる軌道領域のこと。

1. 内側境界: 暴走温室の有無で決められる境界。(正味太陽放射が 300 W/m² 以上)
2. 外側境界: CO₂ 雲の形成の有無で決められる境界。(不確定要素あり)CO₂ の凝結により、雲が形成される。この雲のアルベドが高いことにより、温室効果が有効的に働かなくなる。

✚ 質問

Q. 生体において水の果たす役割とは？

A. 反応の促進. 溶媒としての働き.

Q. 水以外の物質の可能性は？(タイタンはどうなるのか?)

A. メタンなど他の有機溶媒の可能性を論じる議論はあるが、わからない。水素結合など、水の持つ特異的な性質が重要であり、液体なら何でもいいわけではないのかも知れない。ハビタブルプラネットを考える上では重要。

Q. 水を利用するには温度が高いほうが良い？

A. 化学反応の速度を考えると、重要かもしれない。

Q. CO₂ 雲には温室効果もある？

A. CO₂ 雲の性質がよくわかっていないため、外側領域に関しては一概に決められない。ただし、火星に液体の水の証拠が存在することを考えると、少なくとも火星軌道よりは遠いという制約は与えられる。

日射量だけの釣り合いを考えた場合、地球には水が液体として存在できない。温室効果を考えて初めて、地球はハビタブルゾーンの中に入る。つまり、温室効果を持っているか、持ち続けられるかという問題を考えて初めて、ハビタブルゾーンに入るかどうかという問題を解くことができる。

Q. ハビタブルゾーンは惑星の条件に大きく左右されるのではないかな？

A. ハビタブルゾーンに入っていれば必ずハビタブルであるわけではない。(中心星からの距離のみに依存しているわけではない)

□ ハビタブルプラネットの存在条件

- ハビタブルゾーン内部に形成され、かつ**十分な温室効果**があること(=海洋の存在条件)、そのような環境が**長期にわたって維持される**($\sim 10^9$ 年: 生物進化のタイムスケール)こと。すなわち、表層環境の維持、安定化機構が必要！

1.2. 地球環境の特色

□ 地球型惑星の大気組成

	金星	地球	火星
N ₂	1.8	78.1	2.7
O ₂	-	20.9	-
Ar	0.02	0.93	1.6
CO ₂	98.1	0.035	95.3

- 金星や火星では CO₂ 大気が主成分であるが、地球のみ異なる。しかし、地球には炭酸塩岩が豊富にあることが知られており、これらのソースとして、初期地球には CO₂ 大気が存在していた可能性がある。

□ 地球環境の3つの特徴

1. 二酸化炭素が大気の主成分でない。
2. 酸素が大気の主成分。

3.地表に液体の水(海洋)が存在.

1.3. 水惑星気候の多重性

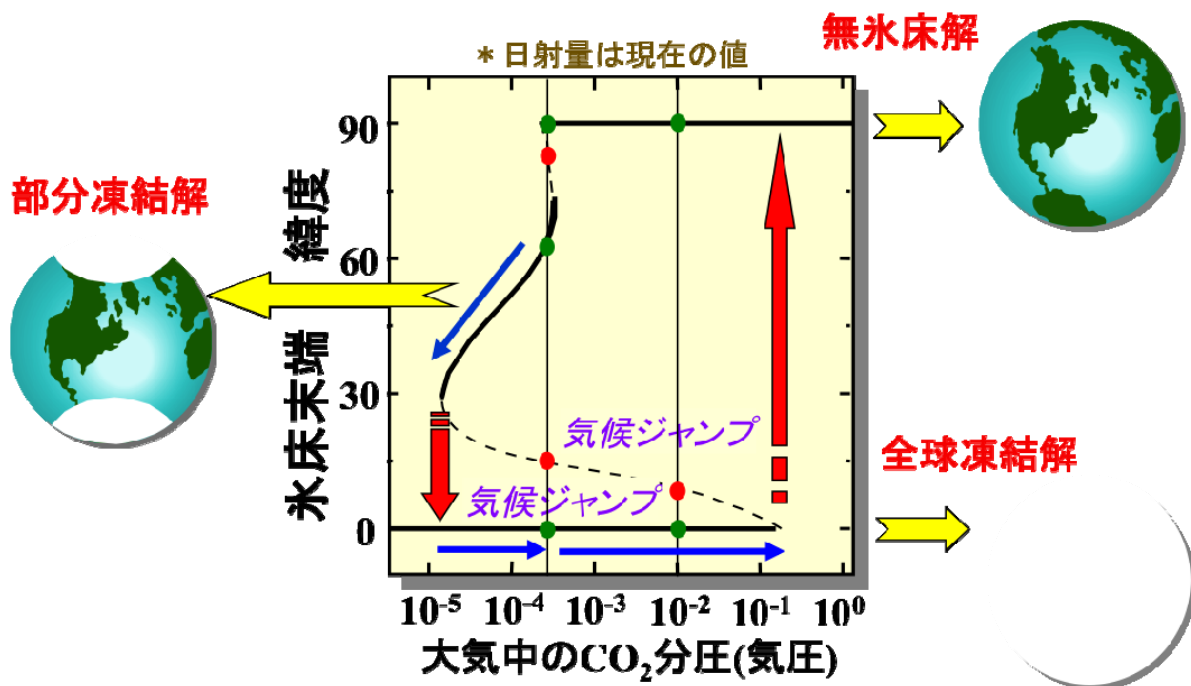
□ 地球のエネルギー収支

- 太陽放射と地球放射の釣り合いにより, 地球の平衡温度 255 K が求まる.
正味の太陽放射は, アルベドに依存しており, 氷, 砂漠, 雲などでは高い.
地球放射: 温室効果の上乗せ ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ による赤外線吸収, 再放射)
ここに温室効果が加わり, 地球の表層平均気温は 288 K となっている.

□ 惑星環境を支配する要因

- 主に, 太陽光度, 惑星アルベド, 大気の温室効果

□ 地球環境システムの3つの安定解



実線: 安定解(物理的に存在しうる解)

破線: 不安定解(擾乱を与えると発散する解)

- 各々の状態でアルベドが異なるため, **多重安定解**が存在する.気候状態の変化はヒステリシス(履歴)を持つ.

- 地球の環境システムは3つの安定解;温暖期(約1億年前),寒冷期(現在),超寒冷期(約22億,7億,6.5億年前)を行き来してきた.

🚩 質問

Q. 惑星アルベドを決定する要因は?

A. 地表面のアルベドと雲の効果. これらの組み合わせであるため予想が難しい.

Q: 現実の地球ではどうなるのか?(大陸配置の違いにより安定解の構造は変わる?)

A: 基本構造は変わらない.

<基本構造>

温室効果・太陽放射が低すぎる→全球凍結

温室効果・太陽放射が中程度→多重解が存在

温室効果・太陽放射が高い→全球無凍結

Q: 全球凍結からの脱却にはどうすればよいか

A: 例えば二酸化炭素分圧を上げてやれば, 無氷床解に移行する.

Q: 地球の現在の日射量であれば CO₂ 雲の心配はしなくて良い?

A: しなくてよい

Q: 気候ジャンプのタイムスケールはどれくらい?

A: わからない(100年程度?? 全球凍結(全球1000mの氷床)→無氷床:1000年??)

凍らせるよりも, 融かすほうが長い時間を要する.

Q: 全球凍結時の温室効果は CO₂? 水蒸気は関係ない?

A: 主に CO₂ を考える.

Q: 全球凍結時は CO₂ 雲が形成されないのか?

A: 現在の日射量ではない. 20億年前にはできた可能性がある. しかし雲の温室効果が働いていた可能性はある.

Q: 氷衛星のアルベドはどれくらい?

A: エウロパ: 0.8, カリスト: 0.5, ガニメデ: 0.3. 氷の粒子による. (氷の粒径が大きい程, 多くの光を透過するため, アルベドが小さくなる.)

Q: 全球凍結時の降水量は？

A: 全球をフレッシュな表面に保つほどは降らない。(ハドレーセルの上昇域ではそれなりに降る。) 10 万年で 1000m くらいの厚さになるくらいの量。

Q: 無氷床—部分氷床の気候ジャンプはあるのか

A: 無いという説もある。氷床の安定性を考えると、気候ジャンプはあるのではないかと考えられる。

1.4. 暗い太陽のパラドックス

□ 暗い太陽のパラドックス

- 太陽はその進化とともに、だんだん明るくなっている。つまり、昔の太陽は現在よりも暗い状態であった(形成当初の太陽光度は、現在の 0.7 倍程度)。惑星環境決定の三大要因を考えると、太陽放射の変化は大きな問題である。仮に、大気組成を固定した場合、**地球史の前半は全球凍結状態である**という結果になる。また、このような条件では、一度全球凍結を経験すると、現在の太陽光度になっても、全球凍結状態から抜け出せない。しかし、現実には **38 億年前から海洋が存在していた**ことが、縞状鉄鉱床、枕状溶岩、礫岩の存在などから分かっている。これより、**大気組成、惑星アルベドが現在と違って**いた可能性が考えられるようになった。

□ 暗い太陽のパラドックスの解

- 解1: アルベドが低かった？

暗い太陽のもとでは海水が凍結するが、このような状況では、**惑星アルベドが高くなる**。また、雲の効果でアルベドが低くなるという説もあったが、この場合、表層気温は低いままであり、過去の地球が温暖であったという地質記録に反する。

- 解2: 大気中に温室効果気体が大量に含まれていた？

NH₃: 温室効果が強く、また原始地球が還元環境であったため有力候補であった (Sagan & Mullen, 1972)。しかし、光化学的に不安定であり、短期間(～1000 万年)で現在大気中に存在する量に相当する窒素を生成してしまう。(Kuhn & Atreya, 1979, etc.)

CH₄: 光化学的に不安定。(Kasting, 1983)

H₂O: 全球凍結状態では大気中に大量に存在しない。

CO₂: 一時否定されるが、光化学的に安定であり、地表に大量に存在することから有力候補に。
(Owen et al., 1979, etc.)

□ 暗い太陽のパラドックスはまだ解決していない？

- CO₂ レベルが予測ほど高くないという地質記録が発見された。その代替案として、**CH₄ + NH₃** の温室効果が考え出された。CH₄ の光分解で生成された有機物のもやが大気上層で太陽紫外線を吸収することにより、NH₃ が長期的にわたって安定に存在できるためである(Sagan & Chyba, 1997)

□ CO₂ の増減と地球環境

- 高温環境では、海洋が全部蒸発し、暴走温室状態になる。しかし、**CO₂ を増加させても暴走温室状態にはならず**、正味入射太陽放射の増大によって生じうる (F > 300W/m²)。また、60°C以上では微生物しか生存できなくなるが、これは、**CO₂ の増大によって起こり得る**。
- 低温環境では、海洋が凍結してしまう(全球凍結状態)。これは、**CO₂ の減少によって起こり得る**。原生代において実際に生じた(全球凍結イベント)可能性がある。
→ CO₂ はどのように変化してきたのか？

✚ 質問

Q: 窒素にとって大気がリザーバー？

A: 常識的には、大気が窒素のメインのリザーバー。そうではないという話も出た。

Q: CO₂ を否定した理由？

A: 温室効果が弱い + 大気中の CO₂ 分圧の決定機構がよく分からなかった。

Q: 海水組成変化による凝固点降下の影響は？

A: 海水量を考えるとそれほど影響しない

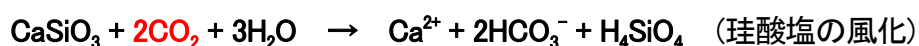
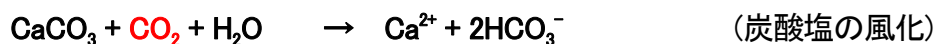
1.5. 炭素循環と地球環境の安定性

□ 100 万年スケールでの炭素循環

大気中の二酸化炭素は、火成活動に伴う脱ガスによる供給と風化による除去のバランスで維持される。

□ 二酸化炭素の除去過程

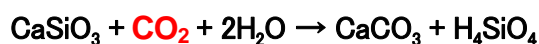
〈風化反応(陸上)〉



〈炭酸塩沈殿反応(海洋)〉



〈正味の反応〉



ここで、炭酸塩岩の風化沈殿は単純な逆反応であるから、**二酸化炭素分圧には寄与しない**。長期的な二酸化炭素の消費プロセスとしては、**ケイ酸塩の風化反応**が重要。

□ ウォーカー・フィードバック -地球環境の安定化機構-

- 珪酸塩溶解反応の速度は $\exp(-E_a/RT_s)$ に比例し、**温度依存性**がある(温度上昇→反応速度増加, 温度低下→反応速度低下)。すなわち、上記の、二酸化炭素の除去過程は正の温度依存性を持つ。その一方で、脱ガスにはそのような依存性がない。このため、何らかの影響で温度が上昇したとしても、それに伴い風化が卓越し、大気中の二酸化炭素分圧が減少することで、温度は再度低下する。このような負のフィードバックを**ウォーカー・フィードバック**と呼ぶ(Walker et al. 1981)。このフィードバックは、100 万年以上のタイムスケールで有効な安定化機構である。このように、火成活動の変動が長期的な気候変動を支配する。(火成活動の変動は固体地球の進化変動が決定していると考えられる。)

□ 地球環境の安定性

- 地球環境の進化は、太陽進化、生物進化、大陸進化、地球内部進化の影響を受けて

きた。つまり、ウォーカー・フィードバックが存在するからといって、ハビタブルな条件が常に維持されるとは限らない。また、気候変動の振幅を決める要因も理解されていない。

Q 温度を変えた場合の正味反応の平衡は、どのように変化する？

A 変化しない。

Q 風化の逆反応がなぜ起こるのか？

A 陸上では Ca^{2+} に不飽和であるため、正反応が起こる。それに対し、海洋では過飽和であるため、逆反応が起こる。

Q 海洋での反応の温度依存性は？

A 海洋の条件はあまり変わらないと考えると、影響しない。(飽和しているため、過剰なものは即沈殿すると考えられる。)

Q 風化率も固体地球の影響をうけるのでは？

造山運動や大陸面積の変化からも影響をうけている。生命の活動からくる影響もある。実際には、種々のフィードバックが存在して複雑。

Q 気候変動の振動解はどこから生じる？

A 境界条件の変動。例えばプレート運動の活発化によって生じる。

Q ウォーカー・フィードバックのタイムスケールは？

A 大気海洋のリザーバーのレジデンスタイムによって決まる。おおよそ 10 万年オーダー。

2. 炭素循環と気候進化

2.1. 初期大気

□ CO₂ 大気の進化

- 地球史を理解するためには、初期に大量の二酸化炭素が存在し得たのか、実際にはどのように減少してきたのかを理解することが重要。

□ 地表における炭素の分布

合計 1.1×10^{22} mol (CO₂ 大気に換算すると **90 気圧相当**)

- 大陸地殻 7.41×10^{21} mol(無機炭素), 1.48×10^{21} mol(有機炭素)
海洋地殻 1.86×10^{21} mol(無機炭素), 2.8×10^{20} mol(有機炭素)

海洋: 3.33×10^{18} mol(無機炭素)

大気: (5.8×10^{16} mol)(無機炭素)

陸上生物圏: 3.75×10^{16} mol (有機炭素)

海洋生物圏: 3.75×10^{14} mol (有機炭素)

陸上有機物: 5.83×10^{16} mol (有機炭素)

海洋有機物: $3-6 \times 10^{16}$ mol(有機炭素)

Q:CO₂の初期の存在形態は?

A:もともと大気に存在していたと考えられる。この量が 90 気圧相当である。

□ 大気を持つ地球型惑星の表層環境

- 大気圧が 90 気圧の CO₂ が存在していた場合、全球平均温度 200 °Cになる

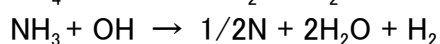
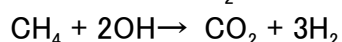
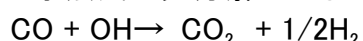
Q. マントル中の carbon は含まれている?

A. マントル中の carbon は考えられていない。表層のみ。マントル中の炭素は表層の数倍ほど存在していると考えられる。もともと表面にあったと考えてもおかしくない。

□ 大気の初期進化

1.地球の場合、火星サイズの天体の衝突により、それまでの大気は吹き飛ばされる。そして、マグマ中に金属鉄が存在する場合、初期大気は還元的～弱酸化的な組成となる。

2.水蒸気の光分解による OH ラジカルが生成し、還元的な気体は酸化される。



これにより、数～数十気圧程度の CO₂ 大気が生成される?

・CO₂大気への移行は、H₂の宇宙空間への散逸によって律速される。→1億年～10億年??

・この初期進化は、生命の起源と関係している？

2.2. 炭素循環と二酸化炭素大気の進化

□ 初期地球の炭素循環？

- 大気中の二酸化炭素濃度は、大陸地殻の風化がどれだけ起こりうるのかで大きく決まっている。(Walker 1985 ; Walker 1989)
- 初期の地球では、陸がないため、海底風化も主要なプロセスと考えられる。中央海嶺付近では 1000 万年程度の炭酸塩の沈殿という特殊な条件。これにより、大気中の二酸化炭素濃度が高いレベルで維持される。(定常状態として $p\text{CO}_2 \sim 10$ 気圧)
- 大陸がない場合、炭素は、海洋、内部に分配される。これは、海洋底拡大速度に大きく依存している。

Q: 海洋底での風化度は一定であるとして計算するのか？

A: 温度依存性はある。陸は風化が起こるたびに浸食され、地表面が更新されていくが、海洋底では、そのようなことが起こらない。

Q: 炭素の分配の様子は？

A: 大気 10bar, 残りは海洋。

CO₂ 分圧が高くなると、海洋の pH 低くなる。陸のない状況だと、大陸と海洋の炭素分配比はコンパラ? C.f. 現在: 1:50.

Q: Ca の供給源は？

A: 熱水交換, 岩石と水の反応により Mg などが Ca に置換される。Carbonate の沈殿,

□ 長期的な炭素循環

- 炭素循環のシステムの変動は、火成活動などによるシステムの内的変動、太陽放射などのシステムの境界条件の変動に左右される。大陸面積が大きいと炭素循環の効果はドミナントになる。

□ 炭素収支

- 大気と海洋の混合時間は 1000 年オーダー程度。大気海洋系の炭素に関する質量バランス方程式を解く。

□ 大気海洋系から見た炭素収支

- $dM_{AO} = F_D - F_W^s + F_W^o - F_B^o = F_{in} - F_W^s = 0$

$F_D - F_W^s$: 脱ガス vs (ケイ酸塩風化と炭酸塩堆積)

$F_W^o - F_B^o$: 有機炭素の収支

□ 二酸化炭素分圧, 地表温度の定常解

- 脱ガス率 F_{in} (火山活動度) が大きいと, また, 大陸面積 f_A (風化効率) が小さいと温暖化しやすい.
- 定常状態: $F_{in} = F_W * f_A$ (大陸面積) * f_e (土壌生物活動度) * $f_b(pCO_2, T)$ [Tajika and Matsui, 1993]

□ 大陸地殻の急成長

- 約30億~約20億年前にかけて大陸地殻が急成長。(東工大モデル, ジルコンの統計により制約.)

Q: 大陸地殻の浸食の様子はどのようにして制約されるのか?

A: 昔の堆積物の組成変化から制約.

Q: 地球上の水の量は昔どうだったか?

A: 多くても現在の2倍と見積もられている.

□ 二酸化炭素大気の進化

- 太陽光度の増大, 火山活動度の低下, 大陸地殻の成長が連動して, 地球環境が進化してきた.

□ 過去の地球環境指標

- 35 億年前~現在
 - ・連続的な海洋の存在 ($0\text{ }^\circ\text{C} < T_s < 374\text{ }^\circ\text{C}$)
 - ・連続的な生命の存在 ($T_s < 60\text{ K}$) [Brock, 1985]
 - ・過去 35 億年間, 石膏が沈澱してきた, (i.e. $< 58^\circ\text{C}$) [Holland, 1978; Walker, 1982]すなわち, 地球史を通じて現在と似たような環境が維持されてきた.
- 30 億年以前
 - ・堆積岩の酸素同位体は 30 億年前以前の海水温は $60\text{--}120^\circ\text{C}$ [Robert and Chaussidon, 2006; Karhu and Epstein, 1986; Knauth and Epstein, 1976]
 - ・全生命の共通祖先は超好熱菌 [e.g., Pace, 1991]
 - ・大陸氷床の最古の確実な証拠は 24.5 億年前 [Eyles, 1993]すなわち, 地球史前半は高温環境だった?

□ 海水温の変遷:

- チャートの酸素同位体比, シリカ同位体比からの推定が可能.
 - 系統発生的手法で復元したタンパク質の安定性からの推定.
- これらより, 35 億年前の海水温は高温(
- $\sim 70^\circ\text{C}$
-)だった.

- リン酸塩の酸素同位体比より, 35 億年前の海洋温度は 30°C程度だったと考えられている. (Blake et al. (2010))
- 氷河堆積物は, 24 億年前で初めて出てきた. それ以前は高温環境.

2.3. 古二酸化炭素濃度の推定

□ CO₂ 大気の進化

CO₂ 分圧

地球形成初期: 10⁻¹ bar – 10 bar

ヒューロニアン氷河期(5–20°C): 2*10⁻²bar – 2*10⁻¹?bar

原生代後期氷河期(5–20°C): 10⁻⁴bar – 2*10⁻²?bar

・地球史を通じて CO₂ 分圧は減少.

□ 推定方法—炭素同位体分別効果—

- $\delta^{13}\text{C} = ((^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}} - 1) 1000\text{‰}$

・初期地球での植物プランクトンの光合成における炭素同位体分別効果は栄養塩濃度, 成長速度, 堆積できる面積. 海水の溶存酸素などに依存.

・光合成の時の炭素同位体分別効果は, 無機炭素と有機炭素の炭素同位体比の差を溶存炭酸種間の同位体分別効果などを補正して得られる.

□ 過去の pCO₂ の推定

アクリターク期の化石の炭素同位体分析から年代 1.4Ga の pCO₂ を推定したところ, (Kaufman and Xiao, 2003) pCO₂ > 10 – 200 PAL

PAL : Present Atmospheric Level (大気圧の現在量との相対値)

□ 古二酸化炭素濃度の推定

有機物の炭素同位体比を測定したところ, 少なくとも20億年以降の酸化的大気においては, CO₂ の温室効果は重要だったという結論が得られた. Kasting の推定とも調和的.

□ 古土壌からの推定.

2.2Ga–2.75Ga の古土壌(paleosol)中には, FeCO₃ (Siderite) は存在しない. これより, 土壌水の CO₂ 濃度, すなわち大気中の pCO₂ は低かったと想定できる. pCO₂ < 10^{-1.4} bar (133PAL; 1PAL=300ppm)

この値は Kasting (1993) の推定と比べると低い値. CH₄ などの他の温室効果気体が必要?

Q:古土壌は隔離されたサンプル? 変質されているか?

A:この時代については, 地層がどれだけの変成作用を受けているかが分かっている. それ

を加味して分析.

2.4. メタンの存在

□ メタン生成菌とメタン

[現在のメタン収支]

- 有機物が嫌気性細菌によって CO_2 と H_2 に分解される.
 - メタン生成細菌が CO_2 と H_2 からメタンを生産($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$)
 - メタン酸化細菌が O_2 か SO_4 を使い大部分を消費($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$,
 $5\text{CH}_4 + 4\text{SO}_2 = 5\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{S} + 6\text{H}_2\text{O}$)
- :現在のメタン濃度は 1ppm に安定.

[太古代～原生代初期のメタン収支]

- 酸素濃度が低く, 陸上の硫化物の酸化が起こらないため, 海水の硫酸イオンも低くなる. そのような時代には, メタン酸化菌の活動はほとんど生じない. すなわち, CH_4 のフラックスが現在よりもずっと高かった可能性があり, 大気中の CH_4 濃度が高かったと思われる.

□ メタンと二酸化炭素

- メタン菌はおおよそ 35 億年前に出現し, 大量のメタンを放出する. メタン濃度は数百 ppm まで増加. この濃度はメタンの温室効果を起こすのに十分な量である(Kasting et al., 2001). それでもウォーカークーフィードバックは機能し, CO_2 濃度は低下する.
→酸素濃度が増加する 24.5 億年以前の地球環境は, $\text{CO}_2 - \text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$ の温室効果によって維持されていた??

□ メタンの温室効果

Pavlov et al., (2000), Kasting, (2001)によれば, CH_4 のフラックスが現在の 10 倍程度では, 混合比が 10^{-4} (100ppm)以上となり, CO_2 分圧が低くても, 地球を温暖な環境にすることが可能である. しかし, Haqq-Mistra et al. (2008) によれば, その計算が間違っているとし, メタンの温室効果が弱い, すなわち $\text{CO}_2 - \text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$ の温室効果では太古代の地球を暖かくできないと結論づけた.

□ 有機物のもやの生成とその影響

- メタンが増えると有機物のもや(organic haze)が生成.
e.g.タイタンの大気中では, 炭化水素エアロゾル(C_4H_2 , C_5H_4 , etc.)が生成.
- “もや”の生成条件は, 光学的に薄い(もやの形成開始)場合は, $f(\text{CH}_4)/f(\text{CO}_2) \sim 0.1$, 光学的に厚い場合は $f(\text{CH}_4)/f(\text{CO}_2) \sim 1$ 程度.
- 地球でも, 有機物のもやが生成されうる. これは, CH_4 の光反応で生成された有機物エアロゾルが大気上層で太陽紫外線を吸収することにより, NH_3 が長期にわたって

安定に存在できる可能性があるため。(Sagan and Chyba Science 1997)これより、地球も火星も温暖化が可能。

- 有機物のもやの影響:Pavlov 2001
- *太陽紫外線の吸収量:非常に小さい
- *非常に速く光分解されるため、混合比は 10^{-9} で、 10^{-5} よりも十分小さい。
- 温室効果は小さい? Sagan and Chyba の主張のようにはいかなそう?

□ 有機物のもやの反温室効果

***反温室効果** (Antigreenhouse effect)(McKay et al., 1991):有機物の“もや”によって、日射(可視光)が成層圏で吸収され、赤外放射が成層圏から射出されるため、地表を温めるためのエネルギーが低下する効果。

- 有機物のもやができると、暖かく出来ない:Haqq-Mistra et al.(2008)によれば、 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ に C_2H_6 (エタン)の温室効果まで考慮すると温暖になる。しかし、さらにもやの反温室効果を入れると、寒冷になる。これでは、 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ の温室効果では太古代の地球を暖かくできない!地質学的制約が謝っているのではないか?という結論に至った。

- 有機物のもやはフラクタル:有機物のもやはフラクタルな凝集物
紫外線は吸収し、可視光は透過する。 $(\tau_{uv}/\tau_{vis} \sim 24.4)$; τ は光学的厚さ。
→ NH_3 は下層大気に存在可能である!(寿命→ $7 \times 10^7 \text{year}$)
→暗い太陽のパラドックスは解決!?

- やっぱり Sagan は正しかった?:初期大気中には混合比 10^{-5} 以上の NH_3 が存在し、その温室効果で温暖機構を実現できる。生命の誕生にも寄与しうる。(Chyba, 2010)

□ 火星大気中にメタンブルーム(@北半球の夏)

ソースは??メタン菌?熱水活動?

2.5. 暗い太陽のパラドックスの再燃

- 有機物のもやのフラクタルな性質を考慮すれば、紫外線は吸収される。一方、反温室効果はなくなる。これにより、 NH_4 が安定に存在可能になる。

□ 暗い太陽のパラドックスはパラドックスではない??

- Rosing et al. (2010)によれば、初期惑星のアルベドは低かった。これは、大陸面

積が小さいこと、生物生産が低いことから CCN(雲凝結角)密度が低く、CCN のサイズが大きくなり、短波放射の散乱が小さく(光学的厚さ小)なることが原因。これにより、温暖にできる可能性が指摘されている。ただし、Rosing et al.(2010)には、多くの問題あり。

□ 暗い太陽のパラドックスの再燃

- von Paris et al.(2008)によれば、CO₂の温室効果を新しい吸収係数データと放射対流平衡モデルを用いて再計算したところ、Kastingらの推定結果よりも温室効果がずっと強いということになり地質学的制約条件との矛盾も解消。だが、Haqq-Misra et al.(2008)によれば、ほぼ同じ推定結果。
- Goldblatt et al.(2010)によれば、初期地球大気中の窒素が現在の2-3倍程度あったとすれば、CO₂とCH₄の吸収線の圧力効果により、より温暖であった可能性が考えられる。
- Rondanelli(2010)によれば、アイリス仮説(温暖化によって熱帯巻雲が減少するという負のフィードバック作用)により、太陽光度が0.8以上(2.9Ga以前)ならば温暖気候を維持できる。
- Goldblatt and Zahnle(2011)によれば、低層雲の減少+上層雲の増加だけでは太陽光度の低下分を説明できそうにない。いずれにせよ、雲だけでは説明できない。(太古代には氷河堆積物はほとんど発見されていない。)

2.6.まとめ

- 1.炭素循環と二酸化炭素の温室効果は長期的な気候を安定化する役割の根幹を担っていた。
- 2.メタン生成バクテリア活動によって大気がCH₄を含むであろうことも必然的。
- 3.CO₂とCH₄の量比が0.1-1になると有機物のもやが生成され、アンモニアも安定に存在可能になる。
→地球史前半の大気組成はとても複雑だったかも知れない。

3. 大気の進化と酸素

□ 地球大気中の酸素

- 酸素は地球の大気の主成分。
 - 酸素は熱力学的に非平衡であるから、常に供給され続けなければならない。→ バイオマーカー？
- 酸素はいつから大気の主成分になったのか？

3.1. 酸素の収支

□ 酸素の生成

- 光合成: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}(\text{有機炭素}) + \text{O}_2$
- 呼吸・分解: $(\text{CH}_2\text{O})_{\text{生物組織}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- 酸化的風化: $(\text{CH}_2\text{O})_{\text{ケロジェン}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- 酸素が大量に供給されれば、不安定ながら酸素が大気中に存在しうる。生命が死ぬと光合成の逆反応が起こり、酸素が除去される。酸素が全体として生成されるためには、有機物が堆積物中に埋没しなければならない。

□ 酸素収支

- 酸素の放出過程
 - 有機炭素の埋没: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$
 - パイライトの形成: $15\text{CH}_2\text{O} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 16\text{Ca}^{2+} + 16\text{HCO}_3^- + 8\text{SO}_4^{2-} \rightarrow 4\text{FeS}_2 + 16\text{CaCO}_3 + 23\text{H}_2\text{O} + 15\text{CO}_2$
- 酸素の消費過程
 - ・ケロジェン(過去の有機物)の酸化的な風化: $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - ・パイライトの酸化的風化(硫酸還元菌によりパイライトの生成): $4\text{FeS}_2 + 16\text{CaCO}_3 + 8\text{H}_2\text{O} + 15\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 16\text{Ca}^{2+} + 16\text{HCO}_3^- + 8\text{SO}_4^{2-}$
- 酸素の生成は生命の光合成反応によるが、正味の酸素放出は有機炭素やパイライトの埋没による。

□ 炭素同位体分配効果

- 光合成の暗反応(カルビンベンソン回路)には軽い炭素同位体(^{12}C)をより多く取り込む性質がある。つまり、**同位体の負異常があれば、生命が光合成によって起こしたものだ**と考えられ、生命の存在を示す。

□ 地球史における炭素同位体比

- **無機炭素と有機炭素の同位体比は、地球史を通じてほぼ一定**(無機炭素: 0 ‰, 有機炭素: -25 ‰)。しかし、その平均的な値から正異常として外れるイベントがいくつか存在する。これは、生命活動の活発化(e.g. Great Oxidation Event)により有機物が占める割合が増えることが原因。
Cf. 酸素発生型の光合成は一般的ではない!(酸素を出さない光合成も存在)

□ 酸素発生型光合成生物の出現

- シアノバクテリアが最初の生物.
- 光合成の明反応(光化学系1, 2)は独立に成立.
合同することで, 酸素発生型光合成ができた.(38億年前)

□ ストロマトライト

- 生物礁. 太古代にも存在. シアノバクテリアが生成? 27億年.

□ 最古の生命化石?

- シアノバクテリア様の形態(西オーストラリア, 34.65億年前)
浅海性? 酸素発生型光合成?
 - 35億年前から酸素発生→酸素が大量に大気中にたまったのは20億年前.(なぜ15億年もたまらなかったのか?)
- 深海底の熱水性のVein内. シアノバクテリアではないが, 好熱菌かもしれない.

□ 火星の生命化石

- 1996年8月, NASAは火星で見つかった隕石(ALH84001)の中に生命の痕跡らしきものがあると発表.
- 形態のみから生命の存在を認定してはいけない!?
- 無機的に生成されることがある.
- 生物がバイオミネラリゼーションを行い始めたのはたかだか6億年程度前.
この後, 微化石と言われてきたものが覆されつつある.

Q. 無機的に同位体の負異常は作れるのか

A. ある程度作られうる.

Q. 古代地球のシアノバクテリアの証拠は見つかっていないのか

A. 有機物が残るような特殊な状況が実現し得ない. 熱変性でよくわからないものに変化してしまう.

□ 最古のストロマトライト?

- 27億2400万年前(オーストラリア)
- 34億5000万年前(西オーストラリア)
幾何学的に対称性がいい物→無機的な物を疑う.(生物起源のものは非対称)

Q. 浅海性であることは確か?

A. 確か.

3.2. 地球史における酸素濃度の増加

□ 地球史における酸素濃度の増大

- 24億年前~22億年前にかけて変化
- ステージI: 大気, 海洋表層水, 海洋深層水の全領域で貧酸素状態

- ↓
- ステージ II: 海洋表層水 & 大気で富酸素状態 (海洋表層水中で光合成), 海洋深層水中で貧酸素状態

- ↓
- ステージ III: 大気, 海洋表層水, 海洋深層水の全領域で富酸素状態.

□ 鉱物学的制約条件

- 碎屑性ウラン鉱床, 黄鉄鉱床
流水のもとで分級されて堆積(粒状でよく円磨されている)した還元的な鉱物.
富酸素条件下ではすみやかに酸化されてしまうはず. (ステージ I)
約 24.5 億年前以降にはほとんど存在しない.
- 赤色土層
赤鉄鉱(Fe_2O_3)の皮膜に覆われた石英を主体とした細粒堆積物
富酸素条件下で地表鉱物が風化を受けて生成されたもの (ステージ II 以降)
最古の確実なものは 22.2 億年前以降
- 縞状鉄鉱床
酸化鉄($\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_2O_3)に富む層とシリカ(SiO_2)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的深層水が
富酸素的表層水と接触することで酸化鉄が沈殿した? (ステージ II?)
その形成は約 20 億年前に最大, 18 億年前以降のものは例外的

Q. 海洋の循環のタイムスケールは 2 千年程度だが, ステージ II が数億年存在する理由は?

A. 縞状鉄鉱層を形成するため.

Q. 鉄の 2 価イオン (貧酸素状況) と三価イオン (富酸素状況) が共存していなければならない?

A. 深海に酸素を供給するのは難しい. 途中の物質で酸素が加減されてしまう.

Cf. 海洋無酸素イベント

□ 縞状鉄鉱床(BIF)の形成

- ・ 鉄の酸化反応によって生成.
- ・ 海水中に大量の Fe^{2+} が溶存 → 沈殿.

□ 生物学的制約条件

- 酸素の増大
→ 生命の進化がなければ, 貧酸素状態に適応した生命はすべて絶滅してしまう.
→ 真核生物の出現 (19 億年前)

□ 真核生物の出現

- 真核生物: 核膜で覆われた染色体を持つ細胞からなる生物. (e.g. 植物, 動物, 原生動物, 菌類)
- 古細菌 (e.g. 好熱菌, 高度好塩菌, メタン生成菌) の細胞内に真正細菌 (e.g. 大腸菌, シアノバクテリアなどの菌類) が共生して生まれた
- シアノバクテリアの一種 → 葉緑体

-アルファプロテオバクテリア(好気性原核生物)→ミトコンドリア

□ 最古の”バイオマーカー”

・**バイオマーカー**: 特定の生物が生合成する有機化合物. (c.f. 分子化石)発見されれば, それを生産した生物種の存在を推定できる.

- 27 億年前のピルバラ(オーストラリア)の試料中から, シアノバクテリアのバイオマーカーである 2α メチルホパン, 真核生物のバイオマーカーであるステロールを発見. (Brocks et al. 1999)ただし, 後に 22 億年前以降の有機物の混入と判明. (Rasmussen et al. 2008)
- 24.5 億年前の地層からシアノバクテリアと真核生物のバイオマーカーを発見. (Dutkiewicz et al. 2008)

- 分子化石を見つければ, 確度は高い. (cf. 微化石は形状しかわからない)

Q. 10 年後になぜ覆ったのか?

A. より新しい(22 億年前)有機物のソースが取り込まれたということがわかった
第三者が検証して同じ結果が出るなど, 検証しなければならない!

□ 最古の真核生物の化石(*Grypania spiralis*(光合成植物))

- 21 億年(→19 億年前に修正)から産出. 実際の発生はこれより古い可能性が十分ある.

□ 地球史における酸素濃度の増大

- 20 億年前後を境に, 大気中の酸素分圧が急激に上昇した.

Q. 永続的に深海部は酸素が少なかったのか? 断続的に酸素が少なかったのか? @原生代

A. 断続的であった事は考えられる.

□ 酸素濃度増加のタイミング

- 同位体の分別効果は基本的に質量に依存して起こるものだが, 質量に依存しない硫黄同位体分別効果が 20-24 億年以前には存在していた. この反応は大気上空での光化学反応でなされるが, オゾン層が生成されている場合は, このような分別がなされない, もしくは落下中に酸化され海水中に豊富な硫酸イオンに紛れて見えなくなる. つまり, 20-24 億年を境に大気中の酸素濃度が増加した証拠となる. (Farquhar et al. 2000, 2003). この 24 億年前という値はウラン鉱床など他の記録とも整合的である.

Q. ヘイズの話との兼ね合いは?

A. ヘイズの生成領域と硫黄の光化学反応の起きる領域の高度が異なるため, 両説は競合しないが, 詳しい研究はこれから.

Q. ソースからの同位体比が変化している可能性は?

A. 隕石中の硫黄同位体比が一定であるため, マントル内の硫黄同位体比は一定であると考えられている.

□ 大酸化イベント(Great Oxidation Event)

- 大酸化イベント(22 億年前) 現在の大气中の酸素量の約 10 倍(3×10^{20} mol)もの酸素が過剰に生産された。

□ ・20-22 億年前に炭素同位体比の正異常

→有機炭素の埋没率の増大＝酸素放出率の増大？

- 世界中に点在するデータをコンパイルしたもののなので実際に起きたことを示すことは難しい。(複数のスパイク状のイベントが複合して見えているだけではないのか？)

Cf. 22 億年前→スノーボールイベント！(何らかの関係が？)

□ 酸素濃度急増の理由

- シアノバクテリアはそれ以前から存在していた。なぜ数億年間たまらなかったのか？

①還元物質の供給が低下した。

・初期のマントルは極めて還元的

→マグマ生成に伴う H_2O 脱ガスでマントルが徐々に酸化(H_2 は散逸)

→マントルの酸化のトランジションが22億年頃だった？

・もっともらしいが、証拠がない。反証はある(昔のマントルは還元的ではなかった)

②大規模火成活動(LIPs)が陸上で生じるようになった。

・海底火山活動は低温条件→ガス組成は還元的

・陸上火成活動は高温条件→ガス組成は酸化的

→LIPs が生じることで、酸素シンクが低下し、大気中に酸素が蓄積。

Q. 陸上の火山の脱ガスが多いことは共通認識なのか？

A. そのような火山がガスのリサイクルの場なので、多い。

Q. 海底と陸上の火山で実際にガス組成は違うのか

A. 実際にそのようなデータが残っている。(Kummp & Barkley 2007, Holland 2007)

Q. 系外惑星において酸素をバイオマーカーとして利用することはできるか？

A. リスキーである。時間的な効果、光合成がなされていても大気中に溜まっていないという状況などがありうる。

Q. オゾンは見えるのでは？

A. 存在量が微量である場合は難しい。

Q. 酸素濃度急増の理由に着目する理由は？

A. 酸素の増加には、徐々に増加したり増減を繰り返しながら増加したりするなど様々なパターンが考えられる。急増したのは、特別なイベントの存在を示唆している。

Q. バイオマーカーとしてレッドエッジを確認することは、何の観測を行っていることになる

のか？

A. 海洋のプランクトン(ブルーミング等)のレッドエッジを見る可能性が一番高いのではない
か. Cf. 陸上の植物が繁茂しだしたのは年代が経ってから(大部分は海洋の中での光合
成)

4. 全球凍結と生命進化

4.1. 原生代の氷河時代

□ 地球史における氷河時代

- 氷河堆積物: 大陸氷床が存在していた証拠. ヒューロニアン氷河時代に複数回 (証拠は世界的に見られる) 2.4Ga - 2.2Ga. 原生代後期にも, スターチアン, マリノアン氷河時代という大きな氷河時代あり.

Q.“氷河期と氷河時代の違いは?”

A.氷河時代が正式名称 “氷河期”は俗称.

□ 大陸氷床の証拠

- **ダイアミクタイト**: 粘土から巨大な岩塊までを含む. 塊上無構造の碎屑性堆積岩についての一般的かつ記載的名称. 成因に無関係の語. 漂礫岩(ティライト)のほか, 斜面崩壊に起因する堆積物や土石流堆積物. 海底地滑り堆積物などさまざまなものが含まれる.

- **ドロップストーン**: 氷床の流動によって削り取られた岩石が, 氷山によって沖合まで運ばれたもの. ラミナの存在により, 上から落ちて来たということが分かる.

Q.ドロップストーンが河口付近から流れてきた可能性はあるのか?

A.陸から離れた場所で, こんなに大きな塊が運ばれるのは不自然. 河口付近なら, そういう構造を保てる.

□ 原生代後期(0.65Ga)の氷河作用の痕跡

- 汎世界的に氷河堆積物が分布している.

□ 古地磁気学による“古緯度”の推定

- 地球磁場の方向は緯度によって異なる. (赤道では, 地面と平行, 磁極では地面と垂直方向)
- 岩石は, 形成時の地球磁場の方向を記録している.
→ 岩石資料に記録された地磁気の方向を測定し. その傾きから当時の緯度(古緯度)を推定できる.

□ 原生代後期の氷河時代の謎 (1)

- **低緯度に大陸氷床**: 当時の赤道域に大陸氷床が存在していた(6億5000万年前, 7億年前, 22億年前).

- Soft-sediment fold test: 初生的な磁気情報が判定する方法.

古地磁気の方位が褶曲に沿って折れ曲がっていることから、地磁気が記録されたのは褶曲が生じる以前である。褶曲は、まだ堆積物が固化する以前であると考えことから、Elatina 層 Glacial Varves に記録されている方位はオリジナルな情報であることが示唆される。

- 氷河堆積物の緯度分布: 原生代の氷河時代には、高緯度に氷河堆積物の証拠がない。高緯度よりも低緯度の方が寒冷な気候だった?
-仮説: 自転軸が大きかった?(横倒し): 自転軸傾斜角が 54° 以上傾くと、極よりも赤道が受け取る日射量の方が年平均では小さくなり、寒くなる。

- 原生代後期の大陸配置と氷河堆積物: 約 7 億年前には、赤道付近に集中している超大陸”ロディニア”が存在していた。

Q: その当時の中央海嶺の分布は?

A: 海嶺の情報が全く残っていないため、わからない。

Q: 地磁気の方法は現在のものと同じと考えて良いのか? Dipole として考えて良いのか?

A: 地磁気の方法は、逆転しても、自転軸の周りに沿うことが理論計算から分かっている。平均的に見れば、dipole で近似するのは悪くない。

□ 原生代後期の氷河時代の謎 (2)

- **縞状鉄鉱床の形成**

18 億年前から 7 億年前には縞状鉄鉱床が全く形成されず、7 億年前に約 10 億年ぶりに形成されている。

□ 原生代後期の氷河時代の謎 (3)

- **謎のキャップカーボネート**

キャップカーボネート(炭酸塩岩): 極域環境で形成されるダイアミクタイト(氷河堆積物)の上に熱帯環境で形成されるキャップカーボネートが堆積している。境界はシャープで整合。急激な環境変化が起こった証拠か?

Q: ダイアミクタイトからキャップカーボネートへ遷移するタイムスケールはどれくらいと見積もられているのか?

A: よく分かっていないが、100 年~1000 年のタイムスケール? もっと短い?

- **キャップドロストーン**: 厚さ 3 - 30m の海進期堆積体。氷河期後の海水準上昇、地殻の長期的な沈降の証拠。チューブ構造が見られ、Stromatolitic (microbial) origin。急激な成長?

- **Giant Wave ripple**: なみなみの構造、波長数 m (通常は 20cm 以下)、高さ数十 cm。ここより、波の周期 21-30s であり、風速 > 20 m/s と想定される。

□ 原生代後期の氷河時代の謎(4)

- **生物活動が完全に停止?**
- 海水の炭素同位体比が低下という記録(火山ガス組成の-6‰に近づく)から光合成活動の低下が考えられる。

Q:同位体比が低下したのは、氷河性堆積物の中?

A:キャップカーボネートの中。無機的な沈殿が起こっている。

4.2.スノーボールアース仮説

□ "スノーボールアース"(全球凍結)仮説

- 原生代後期の氷河期の4つの謎(赤道域にまで氷床が発達、氷河性堆積物直上に熱帯性のキャップカーボネート、縞状鉄鉱床が形成、炭素同位体比の負異常から見られる光合成活動の停止)を説明するための仮説。当時まで全球凍結状態に陥ったら、その状態から抜け出せないと信じられてきた。
- 全球凍結下では、風化、浸食が起こらず、 CaCO_3 の沈殿が起こらない。すなわち、大気中の CO_2 の消費が起こらない。光合成活動もなし。火山活動によって大気中に CO_2 分圧がたまり、 CO_2 の温室効果により、全球凍結状態を脱出できる。

□ 全球凍結現象における地球環境変化

- $\text{CO}_2 \sim 0.1$ 気圧で数百年~千年のタイムスケールで気候ジャンプ(平均気温 -40°C の寒冷環境から $+60^\circ\text{C}$ の高温環境へ"気候の相転移")が起こる。
- 海洋は表面から凍結していき、**表層の1000m程度が凍結**すると、熱平衡状態に達する。
- 全球凍結状態の継続期間は**1000万年程度**

□ 原生代後期の氷河時代の謎 1,4 の説明:

- 低緯度に大陸氷床が存在したのは、全球凍結したと考えれば当然の結果。
- 炭素同位体比の負異常(生物活動停止のシグナル)は、大量絶滅したと考えれば説明がつく。

□ 原生代後期の氷河時代の謎 2,3 の説明:キャップカーボネートと鉄鉱床の形成

- 全球凍結中:火山活動で CO_2 が脱ガスし、大気中に蓄積する。そして、海底熱水系から鉄イオンが供給され、海水中に蓄積する。
- 全球融解直後:非常に激しい水循環が起こり、風化で大量の陽イオンが供給される。それにより、大量の炭酸塩の沈殿が起こる。また、深層水が湧昇して鉄イオンが

酸化され、酸化鉄の沈殿が起こる。

Q. 縞状鉄鉱床が縞状になる理由は？

A. よく分かっていない。縞はシリカ、鉄の互層。よくある解釈として、季節変化を見ていて、ブルーミングの変化によるもの？

Q:氷河堆積物の前から、炭素同位体比の減少が見えるがなぜか？

A. よくわかっていない。とても大きな謎。

Q:スノーボールに陥った原因は結局何なのか？

A:定説は無い。可能性は幾つかあるが、裏付ける証拠がない。

□ 炭素同位体比の変動

- マリノアン氷河期の直前に炭素同位体比が急激に減少した。つまり、氷河期直前に何らかの環境変動が生じたということである。生物生産性の低下、**メタンハイドレート**の崩壊(もっと軽い同位体比のものが流れ込んだ？もっとも軽いメタンを入れる？温暖化？)が可能性として考えられる。

- **メタンハイドレート**:メタン分子と水分子からなる氷状の固体物質。永久凍土層の下や深度 500m 以深の海底堆積物中に存在。極めて軽い同位体比を持つ。($\delta^{13}\text{C} = -60\text{‰} \sim -70\text{‰}$)

- 原因:メタンハイドレート？

①原生代後期の海水の炭素同位体比の正異常の説明

大量の有機物が埋没したため、大量のメタンハイドレートが生成。

②全球凍結直前の炭素同位体比の負異常の説明

メタンハイドレートの持続的分解(～数十万年;ウォーカーフィードバックの時間スケール)が起こり、大量のメタンが放出し、メタン濃度が増加する。そして、ウォーカーフィードバックにより、二酸化炭素濃度が低下する。メタンハイドレートが枯渇し、温室効果が消失、そして全球凍結？

問題:メタンハイドレートが数十万年間持続的に分解することは厳しい。(メタンの分解はイベントとして起こりうる。)

Q:CH₄の温室効果はどれくらい？

A:CO₂の20倍。

Q:NH₃の温室効果は考えられるか？

A:大気に安定に存在できない。

Q:全球凍結を CO₂ 分圧の低下で説明しようとする、どれくらい下がれば良いものなの

か？

A:現在の二酸化炭素レベルなら、太陽が暗いため、原生代後期は全球凍結しうる。

4.3. 全球凍結と酸素濃度の増大

□ 大酸化イベント(OAE)

- **22-20 億年前(全球凍結イベントの後)に炭素同位体比が増加し**、現在の大気中の酸素量の 10 倍もの酸素が生産された。全球凍結イベントと大酸化イベントの間に因果関係はあるのか？

□ 酸素濃度の制約因子

- 酸化還元敏感元素

25.1 億年前	モリブデン, レニウム, バナジウム	酸素の増加
24.5 億年前	堆積性ウラン鉱床 ($U^{2+} \rightarrow U^{3+}$)	貧酸素
24.5 億年前	堆積性パイライト鉱床 (Fe_2S)	貧酸素
25-20 億年前	縞状鉄鉱床 ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$)	富酸素
22.2 億年前	赤色土層 ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$)	富酸素

- 酸素濃度が増加した独立の証拠

- ① **硫黄同位体比の質量比依存性分別効果**(Mass-independent fractionation; MIF)
- ② **炭素同位体比の正異常**(Great Oxidation Event: GOE)

- **カラハリマンガン鉱床**:世界最大のマンガン鉱床であり Mn の酸化により生成。マンガンはいつ酸化されたのか？

□ 全球凍結とマンガン鉱床

- 22.22 億年前の氷河堆積物の直上に地球史初のマンガン鉱床が形成された。マンガンを酸化するためには、酸素分子が必要不可欠なため、全球凍結直後に酸素濃度が増加したと予想される。

- 原生代初期の氷河堆積物の分布

古緯度 $11 \pm 5^\circ$ でマンガン鉱床が形成。ヒューロニアン累層群(カナダオンタリオ州)が最も広い地域で見られる。

- ヒューロニアン累層群中で Mn, Fe_2O_3 濃度の正異常を発見(Sekine et al., 2011)。これは、氷河期直後の酸素濃度増大を支持する。

□ カナダと南アフリカ共和国の対比

- Mn の総堆積量:ヒューロニアン累層群(カナダ)における単位面積あたりの Mn 堆積量は、トランスバル累層群(南アフリカ)の 20-80%に相当！

4.4. 原生代初期全球凍結と酸素濃度増大を結ぶミッシングリンク

□ 原生代初期(22億年前)氷河性堆積物(米国)

- マーケットレンジ累層群(アメリカ, ミシガン州)中のメスナード層において, 全球凍結, 大酸化イベントの開始の間のメスナード s 層がミッシングリンク

□ 全球凍結と大酸化イベントの因果関係

- 全球凍結イベントから大酸化イベントの間に何が起こったのか, ミッシングリンクがあったが, その間に炭素同位体比の極端な低下を発見.
- シナリオ:メタンハイドレートの分解により, 過度の温暖化が生じ, 風化, 浸食率が大きくなる. それにより, 海洋へ多くのリンが供給され, 光合成が活発化する. これにより, 大酸化イベントが生じた可能性がある.

□ 酸素発生シナリオ

- 全球凍結中に海洋中に栄養塩が蓄積. (数千万年間). 全球融解の直後には温暖化と栄養塩の供給が増加し, 海洋の富栄養化, 爆発的な光合成活動が生じる. これが, 大酸化イベントにつながる.

Q:全球凍結状態から抜け出すのに数千万年間もかかる理由は何故か?

A:原生代初期は現在と比べて太陽光度が弱いので, 全球凍結状態から抜け出すのに, 必要な時間が長くなる.

4.5. 地球環境と生命の共進化

□ スノーボールアース仮説の問題点

- 陸も海も氷で覆われることで生命大絶滅の危機が訪れると考えられる. 生命はどこで生き延びたのか?

可能性:

- ①赤道域の海洋は凍結しなかった?(ソフトスノーボール)
- ②赤道域の氷は非常に薄かった?(赤道域へ流動してくる?現在下火の説(Ex:現在の南極の氷))
- ③火山地域に温泉が点在していた?(スノーボールオアシス)

□ 全球凍結と真核生物

- 全球凍結後の約 19 億年前に最古の真核生物が出現.

□ 全球凍結と多細胞生物

- エディアカラ生物群, カンブリア爆発. : 全球凍結直後に多細胞動物が出現した?

□ 全球凍結と生物進化に因果関係?

- コラーゲンを作るもの, 酸素?
- 最古の多細胞動物の化石(590Ma-630Ma)
- 酸素濃度の増加が引き金になっている??

□ 地球史における酸素濃度の増大

- 全球凍結と酸素濃度の増大と生物の大進化は密接に関係している?

*25 億年-22 億年前と 8-6 億年前の2段階で増加.

*大気の主成分になるのは地球形成から約 40 億年後. すなわち, 系外惑星探査に応用するとき, 若い星の周りの地球型惑星大気を観測しても酸素は検出困難?

□ P-C-S-Fe 結合循環システムの挙動

- 大気中酸素レベルと酸素放出率(=鈴の供給率*利用可能効率)の関係により, システムの挙動が決まる?

- 大気中酸素レベル

小 → 全球凍結イベント, Anoxic Ocean, P-C-Fe cycle

中 → Euxinic (Sulfidic) Ocean, P-C-S-Fe cycle

大 → P-C-S-Fe-O cycle

Q:リンでなければならないのか?

A:だめ, As は現在は否定的.

5. 物質循環と生物

5.1. 顕生代における生物進化と気候変動

- 顕生代(5.42 億年前～現在)にはバイオミネラリゼーションを行う生物が発生しているため、化石が残り、結果的に相対年代的な議論ができる。

□ 二酸化炭素のゆらぎと気候変動

- 二酸化炭素レベルは外的強制力の変動に起因してゆらぎながら、長期的には減少してきた。

□ 過去約 6 億年間(顕生代)の気候変動

- 古土壌などの環境指標から、 pCO_2 の濃度が推定されている。他の地質学的証拠から温暖と制約できる時代(古生代前半, 中生代)では pCO_2 が高い。

□ 石炭紀後期(ゴンドワナ)氷河時代(約3億年前)

- 全球凍結に迫るような氷河時代。 pCO_2 は現在値とほぼ同じ。
 - pCO_2 が下がった理由: 生物(植物)の影響。石炭紀に植物が繁茂し、風化効率が增加。それにより大量の有機物の埋没したことが原因。

□ 陸上植物進化による気候の寒冷化

- 陸上植物進化により、全球的な風化率が増加。そして、平衡温度が低下。
- 植物の拡散時間が数千万年であり、そのタイムスケールで気候の変化が起きる。

□ 顕生代における海水の炭素同位体比

- 約 3 億年前の海水の炭素同位体比の正異常が見られる。新しい植物が生まれたため、それを分解する微生物が追いつかず、軽い炭素の固定が進んだ、すなわち有機炭素の正味の固定が増加したため。

5.2. 顕生代の酸素濃度変動

□ 顕生代の酸素濃度変動

- 約 3 億年前の酸素濃度は非常に高かった(モデル計算より約 35%)。炭素同位体比や硫黄同位体比の証拠もあり。
- 酸素濃度が高すぎると、森林火災が起きやすくなる。酸素濃度が低すぎる場合、森林火災は起きないが、継続的に森林火災が起きた証拠が残っている。

□ 酸素濃度の低下と大量絶滅

- 顕生代の五大絶滅中 KT 以外のものは、大量絶滅と酸素濃度低下のタイミングが一致。関連している？

□ 酸素濃度の増加と昆虫の巨大化

- 昆虫の巨大化は高酸素濃度(～35%)に理由があり。現在の飼育実験でも確認さ

れている。

□ 鳥類の気嚢システム

- T/J 境界が顕生代の中で最も酸素濃度が低い。
- 鳥類は気嚢システムにより、効率的な酸素呼吸が行える。低い酸素濃度への適応？

• 恐竜は鳥類と同じ気嚢システムを持っていた。これは、化石中の含気孔を現生の鳥類と比較することで分かったこと。脊椎動物で代謝に関わるような研究はこれからなされていこう。(e.g. タマゴの強度・厚さは酸素濃度に依存している。)

Q. 現在の鳥類は恐竜時代からの気嚢システムを飛行に応用？

A. 飛行に有利であるが、そこに応用しているのはたまたま。例えば pO_2 が 13% で周囲が山に囲まれると、生息域がその中に限られてしまう。

Q. 酸素が下がった理由は？

A. 酸素に関するフィードバックが解明されておらず、何が決めているのかがわからない。

Q. 森林火災のフィードバックは？

A. 嘘だと思われる。酸素のマスに対する植物のバイオマスが小さいため、有効に働かない。

5.3. 海洋無酸素イベント(Ocean Anoxic Events; OAEs)

- OAE は頻繁に起こっており、温暖期に頻発している。
Cf. Black shale (黒色頁岩)→海洋中の溶存酸素が少なくなり、有機物が分解されにくくなるために形成される。

□ 海洋生物化学循環

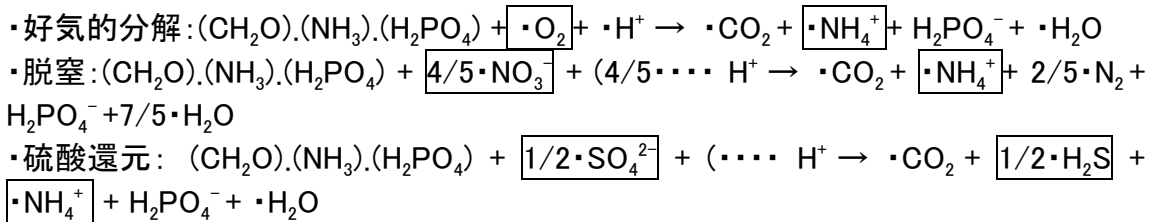
- **海洋生物化学循環**: 栄養塩 C, N, P は、生物にとって必須の元素。生物の死骸は沈降過程で酸化分解される(**生物ポンプ**)。それにより、C, N, P は深層部へ沈降する。そして、それらは物理的に湧昇し、海洋表層に供給される。
- 物質の鉛直分布は生物化学過程と物理過程の競合で決まる。

□ 海洋の鉛直構造

- 溶存酸素量は深さ1000m 辺りに極小帯をもつ。
- リンは表層で枯渇していて、1000m 付近で多い。生物死骸の酸化分解によってリンが供給されるため。
- 水深 1000m までに有機物の大部分が分解される。

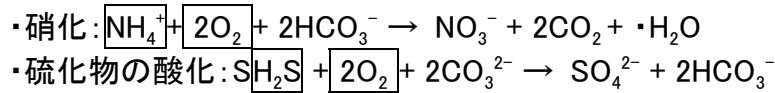
□ 海洋における酸化還元反応

- 粒子状有機物の分解



上式ほど富酸素環境, 下式ほど貧酸素環境

- 酸化反応



上式ほど富酸素環境, 下式ほど貧酸素環境

- 海洋循環, P の河川流入率と酸素の鉛直分布

- ・海洋循環が弱まると, 海洋は貧酸素化する.
- ・リンの河川流入率が大きくなるほど, 海洋は貧酸素化する.

- 無酸素海洋の 2 つのタイプ

- **中層水アノキシア**(IWA); 無酸素水塊が中層に分布.
- **深層水アノキシア**(DWA); 無酸素水塊が中層から深層にかけて分布.

- OAE(アノキシア)の発生条件

- リンの流入増加 (i.e. 化学風化増加) によって OAE が発生する. 温暖化が OAE の原因?
- 温暖化すると, 酸素溶解度が低下, アノキシアを引き起こす.

- リンの挙動

- 生物が利用できるリンは全リンの中のごく一部. (Cf. レッドフィールド比 C:N:P=106:16:1)
- リンの再生効率は, 周りの環境に強く依存する.
- 富酸素条件下:P の再生効率小, 貧酸素条件下:P の再生効率大.
- **アノキシア-生物生産フィードバック(A-P feedback)**: 貧酸素条件:P の埋没効率低下→海洋の P 濃度上昇→生物生産の増大→貧酸素水塊の拡大 という**正のフィードバックが働く**.

- リンの流入率増加が OAE をもたらす

- P の供給率増加→富栄養化(P 濃度上昇)→生物生産増加→無酸素水塊の拡大→P の再生効率増加→富栄養化(P 濃度上昇)→生物生産増加. . . **OAE は酸素濃度の増大をもたらす?**

- 地球温暖化と OAE

- 温暖化→化学風化促進→栄養塩供給率の増大→生物生産の増大
- 温暖化→海洋循環の停滞
- 温暖化→溶解度減少

上記すべて貧酸素環境をもたらす。

- 貧酸素環境では P の再生効率増加するため、正のフィードバック機構が働くと考えられる。

□ OAE と生態系

- OAE の地層からバイオマーカー(イソレニアレテン(緑色硫黄最近に由来),ジメチルホパノール(シアノバクテリアに由来))が検出された。
→有光層において硫化水素が存在するような海洋環境, 還元的水塊での脱窒反応(&アナモックス)により硝酸に枯渇した海洋表層環境をが考えられる。
- OAE 時には, 海洋有光層にまで酸化還元境界(有光層アノキシア/有光層ユーキシニア境界)が上昇?そして, 硫化水素が大気中に漏れ出し, 陸上生物の大量絶滅(P/T 境界イベント?)が引き起こされた可能性?

□ オーシャンデッドゾーン

- 現代の有光層アノキシア・ユーキシニア:黒海(Cf. アノキシア: 無酸素状態, ユーキシニア: (硫化水素が発生するような)強力な無酸素状態)
- オーシャンデッドゾーン:温暖化の影響による無酸素水塊の広がり:地球温暖化予測でも重要な研究課題

Q. PT 大量絶滅は本当に OAE で実現されるのか

A. わからないが, 他のアイデアが今のところない. 火山活動との関連は強く示唆される
→固体地球の活動が環境を支配している

Q. 火山活動の活発化になどによる CO₂ 以外で, OAE を実現できないか?

A. 原理的には, 色々な原因が考えられる.

大量絶滅は 5 回あるが, 各々の原因が何であるのかはつきりとは分からない.

Q. 植物の大量絶滅は?

A. K/T, P/T では絶滅しているよう. 植物を低酸素下だけで絶滅させるのは難しいかも.

Q. P/T での火成活動は何?

A. LIPs (Large Igneous Provinces: 洪水玄武岩)

Q. 低酸素からの回復はどのようにして起こったのか

A. 光合成による酸素の供給

6. 天体衝突イベント

6.1. 天体衝突の普遍性

□ 天体の地球への衝突

- ツングースカ大爆発(1908), ユタ州上空を飛び去った白昼の大隕石(1972)が最近のもので有名.

□ 地球上の衝突クレーター

- バリンジャークレーター(メテオクレーター), フレデフォート(南アフリカ共和国), マニコーガン(カナダ)

□ 衝突の証拠

- **衝突クレーター**
- 衝突起源物質・組織: **シャッターコーン, 高圧鉱物, 衝撃変成鉱物(PDFs), テクタイト**
- 地球外天体起源物質: **白金属元素の濃集**など

□ 地球上の衝突クレーター分布

汎世界的に見られる?

□ 衝突頻度

- 衝突エネルギーの大きな衝突ほど, 衝突頻度が低い
- 1年に数回の頻度で, 広島型核爆弾レベルの衝突エネルギーを持つ天体が年に数回, 大気圏に突入する.

□ 隕石と小惑星

- 隕石のもとの軌道は小惑星帯から.

□ 衝突現象の観測

- Shoemaker-Levy 9 の木星への衝突(1994年7月).

□ 地球へ衝突する小惑星の発見

- 2008/10/7 に, 2008TC₃が地球へ落下.

□ 集積フラックスの時代変化

- ³He, ¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os のフラックスの増加から, 太陽系内における大衝突イベントの記録がわかる.

6.2. K/T 境界における衝突

□ 白亜紀/第三紀(K/T)境界とは？

- K/T境界:6551万年,大量絶滅が起きた。

※数年前にTertiary(第三紀)が, Paleogene(古第三紀), Neogene(新第三紀)と分化したため, K/T → K/Pg(paleogene)と使われるようになった。

□ 天体衝突の証拠

- **白金属元素(イリジウム)の異常濃集**: 汎世界的に見られる。
- **衝突変成石英**
- **スフェルール**, (テクタイト:ガスが急冷されて生じる)
 - **衝突クレーター(The Chicxulub Crater)の発見**: メキシコ, ユカタン半島北東部: 重力異常, 地磁気異常が見られる。年代 6551 万年, 直径 195 km
- **衝突天体の破片の発見**: 衝突視点から9000km離れたところで, DSDP Hole 576 (炭素質コンドライトの破片)を発見。小惑星 Baptistina が 160My 前の衝突イベントで破壊された破片？

Q. クレーターの年代はどのようにして求めるのか？

A. スフェールのガラスと Ar-Ar 年代で求める, 組成も量る。

□ 衝突の冬仮説

- **"衝突の冬"**(impact winter): 衝突によって巻き上げられた塵が日射を遮ることによって, 光合成活動が停止し, 食物連鎖によって多くの生物種が絶滅した。(恐竜が絶滅した原因)核実験の観測によれば, 地面から巻き上げられたダストの他, 蒸発または熔融した物質が凝結することによってもダストが生成される。サイズの大きな粒子は速やかに大気から除去されるが, サブミクロンサイズの粒子が長期間(半年~数年)にわたって大気中にとどまり, 日射を遮る。この粒子は, 数ヶ月程度で雨で洗い流されると考えられるようになった。この期間は短過ぎる?エアロゾルによって遮られた?あまり良くわかっていないのが現状。

□ K/T境界における大量絶滅

- 絶滅の規模: 科のレベルで 20%, 属のレベルで 50%絶滅,
- 絶滅パターン: **海洋表層水型の絶滅**. 表層水に生息する浮遊性有孔虫の大部分(>90%)が絶滅した。中・深層水に生息する底生有孔虫はあまり絶滅していない。
→衝突の冬仮説(光合成生物を一次生産者とする食物連鎖の崩壊で大量絶滅が生じたとする考え)と整合的である。

□ K/T境界における炭素同位体比変動

- 表層水と深層水の炭素同位体比は収束する。すなわち, 海洋における炭素同位体比の鉛直分布が変化。
- 底生有孔虫の炭素同位体比も収束する。有機物の埋没が減少し, 間隙中の炭素同位体比が底層水と一致することを意味する。

- 炭酸塩鉱物の沈殿フラックスが減少する。(溶解ではない。)
- K/T 境界から, 回復初期まで, 50 万年間のタイムラグが存在する。

□ ストレンジラヴ・オーシャン

- 生物生産の停止: **生物ポンプ**の停止によって表層水と深層水の間での炭素同位体比の勾配は消失するはずである。K/T 境界における炭素同位体比の挙動は, 大量絶滅による生物生産の停止を意味するのではないか? →**ストレンジラヴ・オーシャン**

□ K/T 直後も生物生産は続いていた?

- もし, 完全に生物活動が停止した場合, 海洋の炭素同位体比は河川水や火山ガスとして流入する炭素の同位体比(〜-5‰)に漸近するはず。そうっていないのは生物活動が継続していたからと考えられる。
- 外洋域では, 有機物の埋没がほぼ完全に消滅したが, 浅海域では**白亜紀末と同程度の生物活動**があったとすれば炭素同位体比の勾配が無くなくなったこと, 海水の炭素同位体比の平均値が高いことを説明できる。

6.3. チチュルブ衝突

□ 海洋衝突

- 衝突地点は浅海域(<200m)だった? 衝突によって津波が発生した可能性あり。その津波堆積物が, メキシコ北東部に見られる。

Q. 有孔虫が選択的に絶滅してしまうのは何故か?

A. 海洋酸性化により, 有孔虫の Carbonate の殻が溶けてしまうため, という説がある。

□ Peñalver 層における層厚 200m の K/T 境界堆積物

- ホモジェナイト(深海性津波堆積物; 厚く均質な堆積物, 上方細粒化, 浸食面や流れの作用を示す, 堆積構造を持たない, 生物擾乱が見られない, 広範囲に分布)が重力流堆積物の上に堆積している。

□ 津波堆積物の堆積メカニズム

- 衝突由来の巨大地震により, 重力流堆積物の堆積, 衝撃石英の沈降が起こる。(1時間以内のタイムスケール), 数時間後には, 巨大津波が到達, それにより, 懸濁流発生。それにより, 上部ユニットが形成される。正逆方向の斜交葉理により, 津波が繰り返し起こったことが分かっている。層厚 800m の境界堆積物も存在。

□ 衝突による津波発生メカニズムと伝搬

- 大陸棚に穴が空き, そこに海水が流入することで津波が発生する。押し波と引き波の繰り返し。

□ クレーター内部への海水流入の証拠

- 衝突直後の堆積物に斜交葉理が発達していることを発見。これは、衝突直後に海水流が起きていた決定的な証拠である。

□ 衝突地点の非対称性

- 地震は探査の結果、衝突地点は北東へ傾いた斜面であった。(e.g. 西側の水深～100m, 北東側の水深～2000m) リサージによってリムが崩壊したと考えられる。

□ 海洋域での衝突

- 浅海衝突クレーター18個, 深海衝突の証拠1箇所

□ 海洋衝突による環境の影響

- 海水の蒸発: 成層圏へ水蒸気, 塩分に供給されることにより, オゾン層が激減する?(Klumov, 1999)
- 堆積物の蒸発: 炭酸塩岩から CO_2 が放出され, 温暖化をもたらす。また, 蒸発残留岩からは, SO_2 が放出され, 日射遮蔽, 酸性雨をもたらす。
- 衝突津波の発生

□ 海洋衝突現象

- 地球表面の大部分は海洋であるため, 30%は陸上衝突。70%は海洋衝突出で, そのうち 10%は浅海衝突(陸棚域), 60%は深海衝突(深海底)つまり, ほとんどの衝突は海洋域で生じる。海洋衝突現象とその環境への影響はこれからの重要な研究課題。

□ 深海衝突の証拠

- Bellingshausen 海 の The Eltanin Impact

7. ハビタブルプラネット

- 惑星と生物の共進化を考えることが重要

7.1. 温暖湿潤環境の成立条件 ～水惑星システムの挙動特性～

□ 地球環境の普遍性と特殊性

- “ハビタブル”であれば生命がいるのか、生命との相互作用を含めて”ハビタブル”と呼ぶのか？
- 水惑星としての地球には、液体の水(海)が存在している、また生命が存在している。温暖湿潤な環境のため。
- 水惑星システムの挙動(温暖湿潤な気候の維持メカニズム、維持メカニズムの限界/外力の変動規模、水の存在量は普遍性)を理解することが重要。

□ 炭素循環と地球環境の安定化

- ウォーカーフィードバックにより、長期的タイムスケールで気候が安定化されてきた。効いてくるのは、火山活動、及び風化。

□ 正味 CO₂ 供給率と気候変動

- 温暖化: 正味 CO₂ 供給率増加(e.g. 火成活動の活発化, 有機物埋没率の減少)により, 風化率が増加, すなわち CO₂ 濃度が増加
- 寒冷化: 正味 CO₂ 供給率低下(e.g. 火成活動の停滞, 有機物埋没率の増加)により, 風化率が低下, すなわち CO₂ 濃度が低下。

□ 海惑星の環境変動の振幅

- 気候システムへ擾乱を与えるものとして、正味 CO₂ 供給率(火山活動度等)の変化がある。気候システムの理解のためには変動の振幅が重要であるが、何がその変動の振幅を決めているのか？固体惑星の活動？
※地球は安定と考えられるが、これは変動の幅が小さいと理解するべき。

□ 海惑星のパラドックス

- **CO₂ は液体の水の存在下では不安定**である。これは、風化反応により CO₂ が大気中から除去されるため。そのため、CO₂ は急速(～10⁵ 年)に消費されて全球凍結してしまう。温暖湿潤な気候を保つには、**大気への連続的な CO₂ 供給**が不可欠である。

□ 暴走的寒冷化 -炭素循環と地球環境システム-

- 正味 CO₂ 供給率が約 1/10 以下(CO₂ 脱ガス率が約 1/6 以下)になると(すなわち間欠的な供給では)、**数十万年程度で全球凍結状態に落ちてしまう**。暴走的寒冷化が起きないためには、**プレートテクトニクスに伴う火山活動による連続的な CO₂ 供給**(CaCO₃ + SiO₂ → CaSiO₃ + CO₂)が、温暖湿潤な環境を維持するのに重要である。プルーム型火成活動だと間欠的であり、数十万年スケールの連続性はないと思われる。

Q. CO₂ の供給があれば全球凍結に陥らずに環境を維持できるのではないかな？

A. ある一定値以下であれば、全球凍結に陥ってしまう。数十万年スケールで火山活動の

停滞期が続くと、全球凍結に陥ってしまう。

Q. 温室効果ガスが存在しないで水が存在できる領域は？

A. 存在するが非常に狭い。

□ 温暖湿潤環境の持続性

- 火成活動には、**プレートテクトニクス型火成活動**(e.g.地球)、**マントルプルーム型火成活動**(e.g.金星、火星 etc.)の2種類がある。プレートテクトニクス型火成活動では、CO₂ の供給は連続的であり、温暖湿潤環境を維持できる。それに対し、マントルプルーム型火成活動では、CO₂ 供給が間欠的であり急速に寒冷化(全球凍結)が起きてしまう。温暖湿潤な環境を維持するには、**プレートテクトニクスが重要**。

Q. 火成活動の形態は CO₂ の固定プロセスには影響しないのか？

A. 影響しない。固定プロセスは基本的に化学反応に支配されている。

□ 海惑星の成立条件

- 1.海洋の存在条件を満たす(i.e. ハビタブルゾーン内に形成され、十分な温室効果がある)。かつ環境の維持・安定化機構の存在により、長期(10⁹ 年)にわたってその環境が維持される。
 - 全球凍結する条件:CO₂ が連続的に供給されない、CO₂ の供給率が不十分、温室効果が足りない、ハビタブルゾーン以遠に形成 など。

7.2.スノーボールプラネット

□ 水惑星の3つの安定な気候状態

- エネルギーバランスモデルの計算結果から、無氷床解、部分凍結解、全球凍結解の3つの安定解が存在する。

□ 原生代後期のスノーボールアース・イベント

- 全球凍結だが完全には凍結しない。これは地殻からの熱により温められ、内部海が形成するため。

□ 水惑星の2つのカテゴリ

- **オーシャンプラネット(海惑星)** :温暖湿潤環境 地表に海
 - **スノーボールプラネット(雪玉惑星)** :寒冷環境、氷の下に海。
- どちらも惑星表層に液体の水が存在している。

□ 惑星の熱進化

- スノーボールアースの氷厚は惑星内部からの熱流量によって決まる。その熱源は放射性元素の壊変エネルギー(²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, ⁴⁰K)。

□ 水の存在形態

- スノーボールプラネット:100mW/m² の熱流量が数十億年維持される場合、水の

存在度が地球程度ならば、氷の下には海が存在可能。(Tajika, 2008)

- **スーパーアース**: 中心星の光度や惑星の軌道によらず、(たとえ浮遊惑星でも、)液体の水が必ず存在する。
- エウロパ: 氷で覆われており、内部海が存在している。熱源は木星由来の潮汐加熱。

□ 氷に覆われた海での生命

- 太陽からのエネルギーを使えないため、化学的なエネルギー(酸化還元電位)を用いる。
- エウロパのような大きさでは、均質になり生物がいない?(Gaidos et al., 1999).
- 火成活動・海底熱水系→CO₂, H₂の放出, CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O →メタン生成バクテリア? 硫黄酸化バクテリア?

□ ハビタブルゾーンの拡張

- スノーボールプラネットは普遍的に存在する? もし生命が生存可能ならばハビタブルゾーンは大幅に拡張?

7.3. 水惑星の多様性

□ 水惑星

- 海洋, 花崗岩質大陸地殻, プレートテクトニクス, 生命, 炭素循環, 温暖湿潤気候, これらの要素が相互に依存して, 水惑星を形成している。
→これらは全て水惑星にとって必然的な特色なのか?

□ 水の存在量

- Solar Abundance の O は, C と反応し, CO を形成する。残りの O のうち, 金属によって酸化されなかった分が, H₂O として存在可能。H₂O は大量に存在しうる。

□ 水惑星の多様性

- **オーシャンプラネット (海惑星)**: 惑星表層に大量(>>0.023 wt%)の水が存在する惑星。大陸地殻はないか, あったとしても海面下に水没している。
- **オーシャン・ランドプラネット (海陸惑星)** = 地球: 惑星表層に地球程度(0.023 wt%)の水と陸が存在している惑星。水の分布が地形の高度分布によって決まるような惑星で, 海はつながっている。
 - **ランドプラネット (陸惑星)**: 惑星表層に水が少量存在, もしくはほとんど存在しない惑星。水の分布が大気循環によって決まる。水は局在化している(Abuku & Abe 2009)
- 地球は海と陸、両方がある点が本質的に重要

□ 炭素循環の観点から見た水惑星の分類

- オーシャンプラネット (海惑星): ・陸がまったく存在しないため, CO₂ 消費は**海底での風化作用+熱水作用**による。(太古代前半の地球システムに類似?)
- オーシャン・ランドプラネット (海陸惑星): ・海と陸が存在するため, CO₂ の消費

は**陸上での風化作用**による。(地球型システム)

- ランドプラネット (陸惑星): 海が存在しないため, CO₂ は**極冠として凝結**しうる。(火星型システム)

□ 様々なハビタブルプラネット

- 氷の存在, 自転公転周期, 紫外線や X 線フラックスの違い, 中心星の違い(銀河系では M 型星のほうが普遍的)により, 地球とは異なるハビタブル惑星が存在する可能性がある。重力マイクロレンズ観測, 地上からのドップラー法で観測可能。
- Leger et al. (2004)の海惑星: 海の深さ~数百 km 氷惑星~ガス惑星(地球型惑星ではない), 海底は氷であり, 風化作用・熱水作用等は起こらない。温室効果気体(CO₂ 等)の調節作用がない。
→海が存在できるかどうかは大気中の温室効果気体の量に左右される。

7.4. まとめ

1. 液体の水が存在するためには, その惑星がハビタブルゾーン内部に形成され, 十分な温室効果を持ち, さらに長期間にわたる環境維持メカニズムを持つ必要がある。
2. CO₂ が連続的に供給されない, CO₂ の供給率が不十分, 温室効果が足りない, ハビタブルゾーン以遠形成された場合には, 全球凍結する。
3. スノーボールプラネットは, ハビタブルかも知れず, ハビタブルプラネットやハビタブルゾーンの概念の拡張が必要になるかも知れない。

Q. 海惑星を区別する理由は?

A. 海底が岩石で構成されているか, 氷で構成されているかは, 生命にとって重要なため。

Q. 水の量は何によって決まっているのか。地球の水の量は何らかのプロセスによって望ましい値に調整されている?

A. 可能性はあるが, わかっていない。惑星内部まで含めた水循環で表層の水の量が調整されている可能性はありうる。

Q. 海惑星はハビタブルなのか?

A. ハビタブルでありうる

Q. スノーボールアースで酸素を見つけた場合どのように解釈されるのか?

A. 酸素の供給源による。

Q. スノーボールアースの気象?

A. 地球で現れるような大気循環が現れる(日射分布によって決まる)

<コメント>

- ・有機物量が多いと, 氷のアルベドが高いとは限らない
 - ー氷衛星→集積時に有機物が壊れない
 - ー地球サイズ→衝突時のエネルギーで壊れてしまう

- ・スノーボールアースでは酸素が無機的に(氷から供給された H₂O の光化学分解)生成
- ・スーパーアースでは水素が逃げなくなる

(了)