

海の生物が炭酸ガス問題に果たす誤解のあれこれ

角皆静男(2004.9.15 海ロマン例会)

CO₂対策として、サンゴ礁 (CaCO₃) を増やす。

[サンゴ礁ができると、CO₂が放出される]

CO₂対策として、栄養塩を含む湧昇水中で植物を増やす。

[湧昇水は、有機物の分解で生成した栄養塩も炭酸も含む]

CO₂対策として、栄養塩 (肥料) を撒く。

[Si のない海の場合、CaCO₃が生成し、必ずしも効果的ではない]

CO₂対策として、鉄を撒く。

[鉄の働きは触媒的、撒かない時の栄養塩の行方と上記との複合が鍵]

CO₂対策として、植物に窒素固定を行わせる。

[リンが制限し、海洋全体では脱窒と窒素固定がバランス]

CO₂対策として、有機物生成分解時の Redfield 比のずれを利用する。

[量的にどの程度効果的か]

生物ポンプ

有機物生成・分解

炭酸塩生成・溶解 (アルカリポンプ)

物理ポンプ (溶解ポンプ)

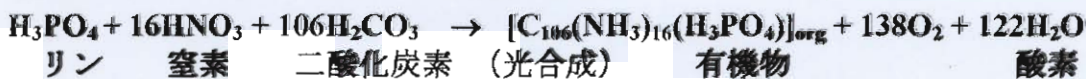
水温変化 (効果大)

塩分変化 (効果小、水温 1C 低下と塩分 1 単位減少で同程度)

大陸棚ポンプ (Tsunogai *et al.*, 1999)

大陸棚底層に CO₂ を多く含む重い水ができ、これが外洋水の下に入る

RKR モデル (レッドフィールド比)



欠乏状態、過剰状態における光合成

分解のされやすさ: P, N, C

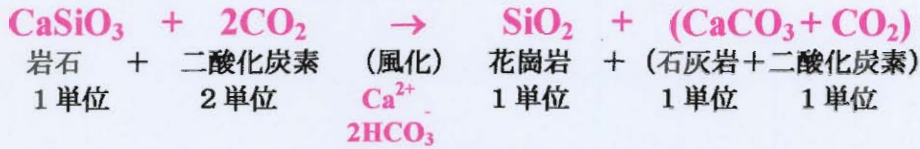
炭水化物 → 蛋白質 → 脂肪 C/P, C/N, C/O 比

鉄 $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$ 電子の授受 (酸化・還元)

大気中 CO₂ 濃度を支配する因子

長い時間スケール (風化と逆風化作用)

カルシウム (平均滞留時間: 数千万年): 岩石の風化



海洋性 (玄武岩性) の地殻が大陸性 (花崗岩性) の地殻に変わる
玄武岩の風化で花崗岩と石灰岩ができ、CO₂ が減る

やや短い時間スケール (海洋におけるリン)

リン (平均滞留時間: 十万年)

リンは岩石の風化で加わり、燐灰石 (生物作用)、堆積物へ
窒素は、窒素固定と脱窒反応により制限因子にならない
大気中に窒素ガスとして大量に存在する

より短い時間スケール (海洋水の循環と生物活動)

深層水循環: 千年

中層水循環: 百年

表層水の入れ代わり: 十年

太平洋深層水は、現在形成中の北大西洋深層水より多量の大气 CO₂ を吸収しうる。

Tsunogai (1999) は、この能力を Potential Sink Capacity (©) と名付けた。

この能力が大きくなる理由:

- (1) 南極海で、北大西洋深層水が太平洋深層水になるとき、海面での気体交換により、O₂ を得て CO₂ を失う。しかし、冬なので、栄養塩は使われない。後に湧昇してこの栄養塩が使われると、この時に大気に出た分だけ余分に CO₂ を吸収しうる。
- (2) 太平洋の深海 (低温、高圧、低 pH) では CaCO₃ が溶け、アルカリ性になる。この水が湧昇すると、大気 CO₂ を吸収する。
- (3) 現在の太平洋深層水は産業革命以前に形成しているので、その後に増加した大気中 CO₂ 濃度分だけ CO₂ が余分に吸収される。

上記の量を計算し、太平洋深層水の形成量を 15 Sv (1 Sv = 10⁶ m³/sec) とすると、

- (1) の効果は、50 μm/kg となり、毎年 0.29 GtC/yr となり、
 - (2) の効果は、90 μm/kg となり、毎年 0.52 GtC/yr となり、
 - (3) の効果は、60 μm/kg となり、毎年 0.35 GtC/yr となり、
- 合計は、200 μm/kg となり、毎年 1.16 GtC/yr となる。

1. 大気中の二酸化炭素は、海水に溶けて炭酸となり、炭酸は重炭酸（炭酸水素）イオン、炭酸イオンに解離する。
2. その全量（全炭酸）に占める炭酸の割合は通常1%前後で、炭酸イオンも10%前後なので、大部分、90%前後は重炭酸イオンである。
3. 大気と平衡にある海水中の炭酸の濃度（平衡濃度）は、水温1°Cの低下につき約4%増加する。
4. 一方、全炭酸（2000 μM 程度）は、水温1°Cの低下につき約0.4%増加するにすぎない。従って、全炭酸に占める炭酸の割合は、水温の低下とともに増加する。
5. その結果、水温低下による全炭酸（平衡濃度）の増加は炭酸ほど大きくないだけでなく、大気中の二酸化炭素が一定量増加したときの全炭酸の増加量（増加率）は、水温低下とともに小さくなる。
6. すなわち、大気中の二酸化炭素が280 ppmから80 ppm増加した時、黒潮水中の全炭酸は30°Cでは60 μM 増加するが、0°Cでは40 μM 増加するにすぎない。だからといって、上述のように、冷やすと全炭酸が減るということはない。
7. 表層水中で炭酸塩粒子が作られると、大気へ二酸化炭素が出やすくなる。逆に、深層で炭酸塩を溶かした水は、表層に現れた時、大気中二酸化炭素を吸収しやすい。
8. 従って、太平洋深層水中では100 μM 程度の炭酸塩粒子が溶けているので、これが浮上した時、同程度の二酸化炭素を吸収することができる。北部北太平洋で湧昇した深層水が（栄養塩が使われた後）二酸化炭素を吸収しやすいのは、このためである。
9. 一方、表層水中で有機物粒子が作られると、大気中二酸化炭素が吸収されやすくなる。逆に、深層で有機物粒子を分解した水は、表層に現れた時、大気へ二酸化炭素を放出しやすい。
10. 従って、太平洋深層水中では200 μM 程度の有機物粒子が分解しているので、これが湧昇した時、水温上昇の効果も加わって大量の二酸化炭素を放出することになる。この例が東部熱帯太平洋である。
11. しかし、有機物分解時に再生した栄養塩が光合成で使われてしまい、水温が下がると、上で放出された二酸化炭素は、そっくり海に戻ってくることになる。その例が西北部北太平洋や湾流が冷やされている北部北大西洋である。
12. 実は、湧昇水中の栄養塩が使われてしまった時に海に戻ってくる量は、上の放出量よりもさらに多い。昔、南極海などで深層水ができた時、二酸化炭素を放出していたため、Preformed 栄養塩（空气中酸素で飽和した海水中的のモル濃度）はPreformed 炭酸塩以上に存在するので、栄養塩がなくなるとこの炭酸塩分だけ吸収できる。
13. ただし、気体交換平衡には、炭酸の方が酸素よりも時間がかかるので、その遅れ分だけは差し引かねばならない。
14. 上記には、太平洋深層水ができてから現在までの間に増加した大気中二酸化炭素によって溶けやすくなる効果が、さらに加わる。

15. つまり、太平洋深層水の湧昇量＝深層水形成量が大きければ大きいほど大気中の二酸化炭素は吸収されやすいことになる。
16. 大気と海洋の間での二酸化炭素の交換には時間がかかる。その障害となるのは、大気と海洋の間の境界面（海面）と海水の上下混合（成層化）である。
17. 100 m 前後の海洋表層（混合層）では、水はよく混ざっているとすると、気体交換に関わる時定数（完全に交換平衡になることはない）は、酸素や窒素で 20 日、炭素でその 10 倍、炭素の同位体でその 100 倍である。もちろん、海域や季節で大きく異なる。
18. 海水の上下混合に関わる時定数は 1000 年である。
19. 従って、量で 10 分の 1 よりかなり多い中層水が 100 年程度以内で循環していれば、ここ数十年以内の大気中二酸化炭素の増加に果たす役割は、ほぼ同様に形成されるなら、深層水より中層水の方が大きいことになる。
20. 鉄は、生物にとって必須の元素であるが、海洋での平均滞留時間が短い。すなわち、湧昇した深層水中には、沈降粒子から再生した栄養塩は残っているが、鉄は減っている。
21. 従って、湧昇水中で光合成させても、鉄不足で栄養塩が残ってしまうし、鉄を加えれば生物生産量が増える。
22. しかし、この水が表層にとどまっていれば、やがて鉄は大気や陸から供給され、湧昇した深層水中の栄養塩はすべて有機物に変わり、光合成が時間的に遅れただけのことである。
23. それ故、問題は、表層に出た栄養塩が使われないうちに再び潜り込むかどうかである。
24. 潜り込み方には二つ、中深層水の形成と鉛直渦拡散がある。北太平洋で鉄を撒布することに意味があるかどうかは、この点、つまり物理的過程にかかるといえる。
25. もう一つ、有機物に対する大気中二酸化炭素の級に際して逆向きに働く炭酸塩粒子形成の割合の問題がある。平均的には、モル比で 1 対 1 から 3 対 2 程度で有機物形成の効果の方がやや大きい。
26. 一般に、ケイ酸があると有機物に対する炭酸塩粒子の割合が小さくなる傾向があり、有機物粒子の方が速く分解する傾向がある。
27. その結果、ケイ酸の多い西部北太平洋での生物生産は、大気中二酸化炭素の吸収に効果的であるが、東部北太平洋の水深千米程度までの系ではほとんど効果がない。
28. さらに、ケイ酸は表面水にゆっくり供給される傾向があるので、速く生産させた場合とゆっくりの場合とで有機物対炭酸塩粒子形成の割合が変わり、ゆっくり生産させた方が、大気中二酸化炭素の吸収にとっては効果的になる可能性がある。
29. 上記すべてを合わせ考えると、北部北太平洋における鉄撒布は、ただ生物生産を早め、東部北太平洋の生態系をつくる可能性があり、その効果はあまり大きくないということになる。
30. もちろん、有機物の大部分は浅いところで分解されるので、効果があったとしても、鉄撒布を中断したとたんに二酸化炭素は大気に戻り、鉄は撒き続けなければならないという問題もある。