

§4 大気中 CO₂ 濃度上昇化石燃料燃焼原因仮説の検討

1. CO₂ 地球温暖化仮説の CO₂ 濃度上昇モデルは非定常

地球環境のように比較的安定した系は、何らかの擾乱に対してこれを吸収あるいは分散して新たな安定状態（定常状態）に速やかに遷移する機能を持つと考えられます。

CO₂地球温暖化仮説では大気中に含まれる CO₂濃度は人為的に放出された CO₂の半量程度 ($r=1/2$) が『選択的に』蓄積されたことによって上昇しているとしています。最初に、CO₂地球温暖化仮説の想定する CO₂濃度上昇過程は、比較的安定した地球環境を表現するためには欠陥モデルだということを示しておきます。

現在の大气中 CO₂の総炭素重量を $A(\text{Gt}\cdot\text{C})$ 、最近の平均的な人為的な CO₂の年間放出量を $a(\text{Gt}\cdot\text{C}/\text{y})$ だとします。これが n 年間継続した場合の大气中の CO₂の総炭素重量は次式で与えられます。

$$A_n = A + a \times r \times n \quad (\text{Gt}\cdot\text{C})$$

これが CO₂地球温暖化仮説の想定する大气中 CO₂濃度の増加過程を表した式です。あくまでも仮定の話ですが、このモデルでは $a > 0$ であれば n を限りなく大きくしていくと、大气中の CO₂の総炭素重量は定常状態に収束することなく無限大に発散することになります。

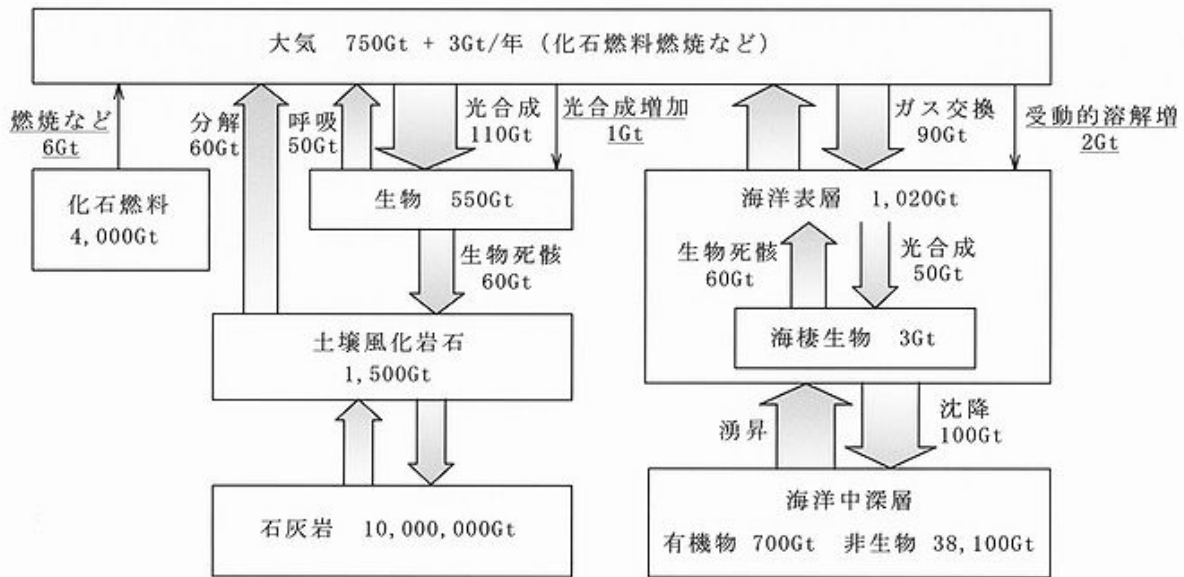
つまり、CO₂の発生源からの排出量にある有限量の増加があると、それだけで系の安定性は崩れて、限りなく CO₂が増加する非定常系になることを示しているのです。これは比較的安定した地球環境では考えられないことです。また、一旦大気に放出された CO₂は発生源の如何にかかわらず、地球の大气循環にしたがって移動するものであり、人為的に排出された CO₂の一定部分が選択的に大気中に留まり続けるとは考えられません。また、このモデルでは、CO₂の吸収側の変化をまったく考慮していないことも大きな問題です。

2. 炭素循環

地球の炭素循環の詳細は必ずしも明らかになっていません。大気と海洋の間の CO₂の移動は、海洋表層を通して海洋の中深層にまで及ぶ大きな循環構造を持っています。

大気とこれに接する海洋表層水の直接的な CO₂バランスはヘンリーの法則で表される化学平衡を満足するように遷移しようとしていると考えられます。

大気中の CO₂濃度が安定している場合は、地球の全海域を平均的に見れば海洋からの合計の CO₂放出量と吸収量は均衡し、ヘンリーの法則に従う化学平衡状態に近いように見えるでしょう。しかし実際には盛んに CO₂を吸収する海域から逆に放出する海域まで大きな幅があり、より正確には吸収と放出の反応速度が平衡している定常状態だと考えるべきでしょう。



炭素循環は解明され尽くしているわけではありませんが、年間の CO_2 の大気から海洋への移動速度と海洋から大気への移動速度はほぼ等しく、炭素重量（以下 Gt-C と表記）で 90Gt-C/y 程度だと見積もられています。

大気と海洋の界面において、海洋と大気間の CO_2 の移動方向とその速度を規定する点において、ヘンリーの法則に基づく化学平衡状態からの偏りの大きさが大きな意味を持つことは当然予想されます。しかし、単に海洋表層水と大気とのヘンリーの法則に基づく無機的な化学平衡だけで 90Gt-C/y もの大量の CO_2 の移動を説明することは到底出来ません。

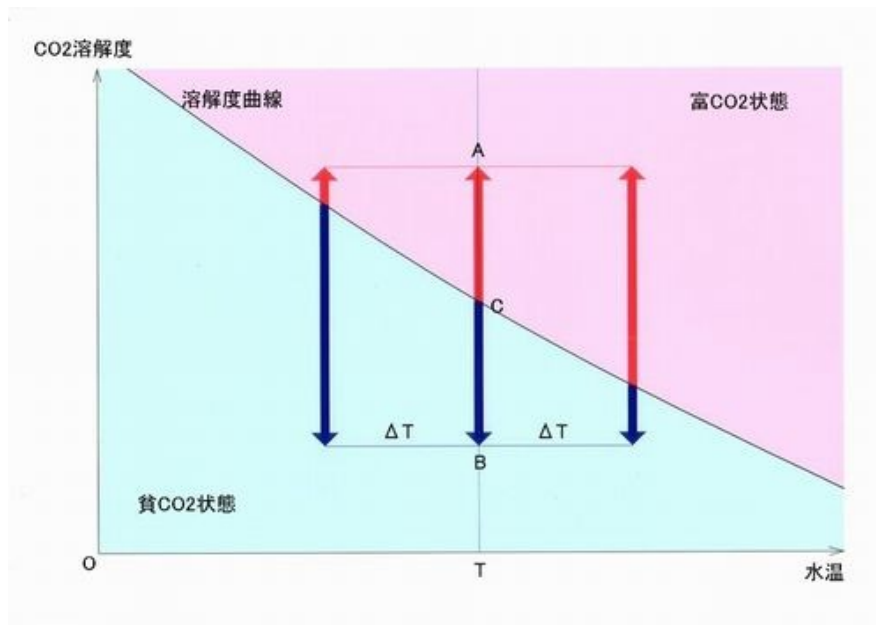
むしろ大気～海洋間の CO_2 移動方向と速度を大局的に規定しているのは海洋表層の静的な状態ではなく、海洋表層における有機炭素の生成・分解の速度だけでなく中深層との物質交換を含めた海洋全体の炭素循環の性状によると考えられるのです。

例えば、海面水温の高い海域であっても、海洋表層において活発に CO_2 の消費による生物学的な生産が卓越する場合や、あるいはその他のポンプ作用で中深層に炭素を活発に供給する海域では、むしろ大気中 CO_2 の吸収が起きるはずで、逆に海面水温の低い海域であっても、湧昇流の強い海域では中深層から供給される有機炭素を活発に分解することによって大気中に CO_2 を放出することになります。

大気と海洋における CO_2 バランスを考えると、海洋表層だけでなく中深層も含めた海洋全体の性状を考慮することが必要なのです。しかも、海洋は大気に比較して圧倒的に巨大な炭素の貯蔵圏なので、その性状に少しでも変化があれば大気中 CO_2 濃度を劇的に変化させる可能性があるのです。

気温あるいは海洋表層水温の平年値からの偏差の短期的な変動に関してはヘンリーの法則に基づく化学平衡に従う傾向を示すことになるでしょう。

次に示す図は、大気中 CO_2 濃度の変動について説明するための溶解度曲線からの模式図です。



水温 T に対する CO_2 溶解度曲線上の点を C とします。これは水温 T においてヘンリーの法則を満足する平衡状態に相当します。ここでは海水面において大気中 CO_2 に対して吸収も放出もありません。

これに対してある海域 A では同じ海水温、同じ大気中 CO_2 濃度でもあるにもかかわらず、表層水の CO_2 濃度は C 点よりも高い値を示しています（富 CO_2 状態）。この海域では湧昇などによって供給される有機炭素が盛んに酸化されて CO_2 を生成していると考えられます。海域 A における CO_2 濃度の C 点に対する偏差の大きさは CO_2 の生成速度に依存し、偏差が大きいほど CO_2 生成速度は大きく、活発に CO_2 を大気中に放出（赤い上向きの矢印）することになります。

逆にある海域 B では表層水の CO_2 濃度は C 点よりも低い値を示しています（貧 CO_2 状態）。この海域では盛んに光合成あるいはその他のポンプ作用で表層水中の CO_2 を消費して中深層に送り込んでいると考えられます。海域 B における CO_2 濃度の C 点に対する偏差の大きさは CO_2 の消費速度に依存し、偏差が大きいほど CO_2 消費速度は大きく、活発に CO_2 を大気中から吸収（青い下向きの矢印）することになります。

ここで示したように、水温 T における溶解度曲線に対する実際の CO_2 溶解量のグラフの縦方向の偏りは、着目する海域の表層水の生物化学的な特性ないし海洋中深層との物質循環に基づく特性によって規定されると考えられます。この海域の特性は、短期的で微小な水温変化には鋭敏には反応せず、大気中 CO_2 濃度の長期的な変動傾向を支配する要因だと考えられます。

次に、微小で短期的な水温上昇 ΔT が生じると、それまで平衡状態にあった海域（点 C ）では平衡状態を回復するために CO_2 を大気中に放出します。

海域 A では、水温（ $T + \Delta T$ ）では溶解度曲線からのプラスの偏差が更に大きくなるために、更に活発に CO_2 を放出するようになります。海域 B では、溶解度曲線からのマイナスの偏差が小さくなり、吸収量は小さくなります。海域 B では、 ΔT がもう少し大きくなると逆に CO_2 を大気中に放出することになります。

微小で短期的な水温低下 ΔT が生じると、それまで平衡状態にあった海域（点 C）では平衡状態を回復するために CO_2 を大気中から吸収します。

海域 A では、水温 ($T - \Delta T$) では溶解度曲線からのプラスの偏差が小さくなるために、 CO_2 の放出は小さくなります。海域 A では、 ΔT がもう少し大きくなると逆に CO_2 を大気中から吸収することになります。海域 B では、溶解度曲線からのマイナスの偏差が大きくなり、更に吸収量が大きくなります。

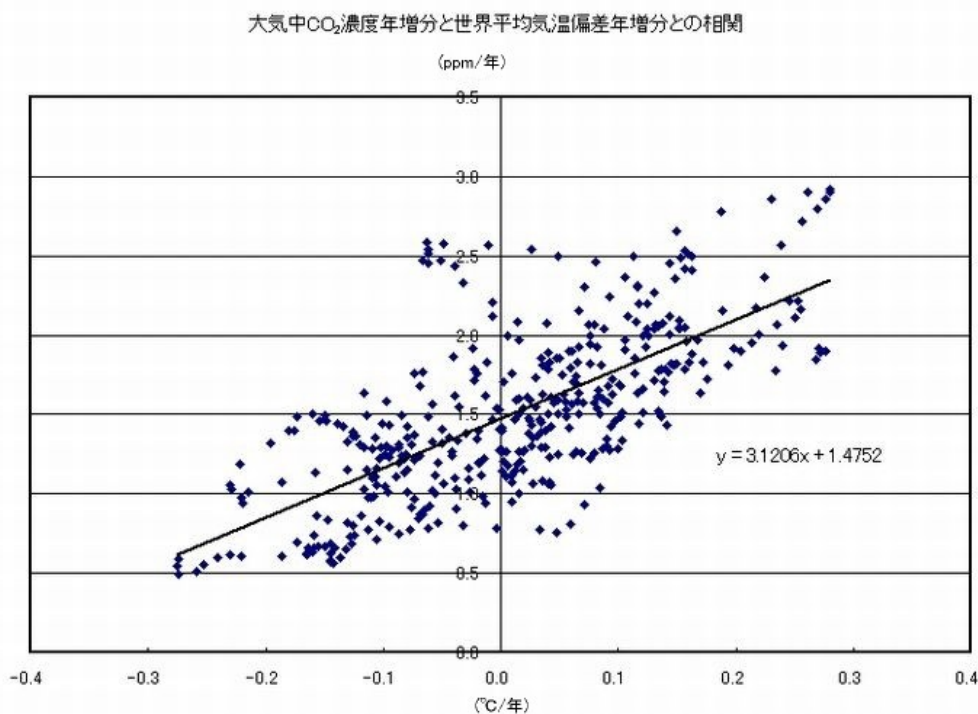
このように、短期的（温度変化によるフィードバックでその海域の表層水の生物化学的な特性ないし海洋中深層との物質循環に基づく特性が大きく変化しない範囲）な表層水温のプラスの変化に対して、 CO_2 を放出する海域では更に放出が活発化し、 CO_2 を吸収する海域では吸収が不活発化することになり、全体として大気中 CO_2 濃度は上昇傾向を示すこととなります。マイナスの変化に対しては逆のことが起こります。

表層水温の短期的な変化は、ヘンリーの法則に基づく化学平衡状態を変化させ、短期的な大気中 CO_2 濃度変動を引き起こすと考えられます。

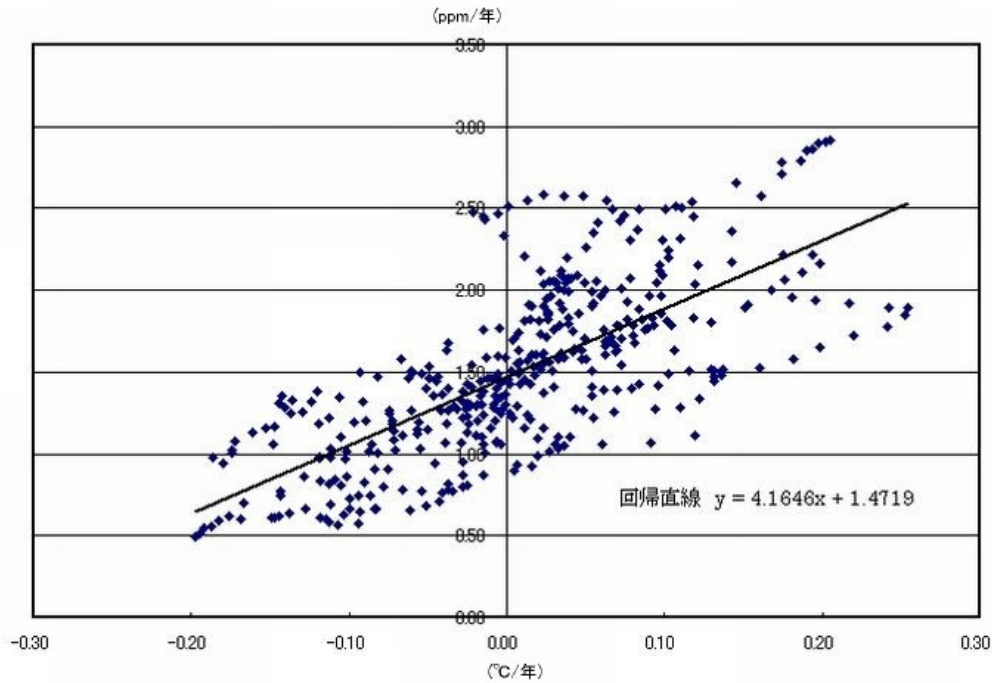
3. 観測結果の検討

ここで、レポート『大気中二酸化炭素濃度と海面水温・気温の関係（2006年近藤）』についてもう少し見ていくことにします。既に大気中 CO_2 濃度年増分と世界平均気温偏差年増分、平均海面水温偏差年増分との関係を時系列に沿ってみておきました。その結果、世界平均気温偏差年増分、平均海面水温偏差年増分の変動に続いて半年から1年程度遅れて大気中 CO_2 濃度年増分が変動することが分かりました。

同じデータについて、縦軸に大気中 CO_2 濃度年増分、横軸にそれぞれ世界平均気温偏差年増分、平均海面水温偏差年増分をとった散布図を紹介します。図中の直線は回帰直線を示しています。



平均海面水温偏差年増分と大気中CO₂濃度年増分の相関



回帰直線は右上がりとなり、いずれの場合も縦軸との切片の値は 1.47ppm 程度になっています。また、気温の 1°C の変動に対して大気中 CO₂ 濃度年増分の変化量は 3.12ppm 程度、海面水温の 1°C の変動に対して大気中 CO₂ 濃度年増分の変化量は 4.16ppm 程度だということが分かります。

注目すべき点は、気温、水温が前年と変化しなくても、この間（1970 年～2004 年）、大気中 CO₂ 濃度は平均的に年間 1.47ppm だけ増加しているのです。つまり、大気中 CO₂ 濃度の年間 1.47ppm の増加は気温の短期的変動とは独立の変化量だと考えられるのです。

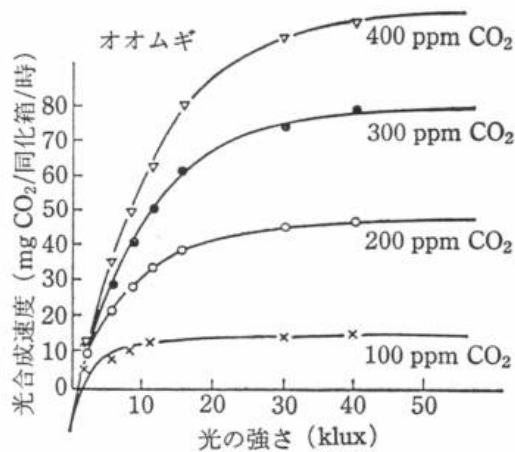
時系列のグラフを示したとき『この二つのグラフで注目すべき点は、世界平均気温偏差年増分と平均海面水温偏差年増分が 0°C の周りで変動しているのに対して大気中 CO₂ 濃度年増分は約 1.5ppm の周りで変動していることです。』と述べておきました。回帰直線との切片の示す 1.47ppm が時系列のグラフに示した大気中 CO₂ 濃度年増分の振幅の中心線を示しているのです。

これを前節の考察と考え合わせれば、観測されている大気中 CO₂ 濃度の変動のうち、年間 1.47ppm は中深層まで含めた海洋の性状あるいは陸上生態系の性状などに何らかの変化が起こり、相対的に CO₂ 放出側が卓越していることに起因していると考えられるのです。また、大気中 CO₂ 濃度から 1.47ppm を差し引いた残りの部分は、短期的な気温あるいは表面海水温の変動に伴い、ヘンリーの法則による化学平衡を満足するための変動だと考えられるのです。しかも気温・表面海水温の変動が大気中 CO₂ 濃度の変動に先行しているのです。これは見方を変えれば、大気中 CO₂ の温室効果は飽和状態に近く、気温変動を引き起こす要因になっていないことの傍証だとも考えられます。

4. 大気中 CO₂ 濃度変動モデル

冒頭において、CO₂ 地球温暖化仮説の想定する CO₂ 濃度変動モデルが地球環境の持つ定常性とは相容れない欠陥モデルだと述べました。ここではもう少し実態に近いモデルを紹介することにします。これは、植田によって7月6日に行われた環境経済・政策学会で提出されたモデルです。

大気中に放出された CO₂ は、発生源の種類を問わず、地球の炭素循環の中で循環すると考えられます。地表環境の主な吸収源は光合成を行う陸上植物と海洋です。植物は現在の大気の CO₂ 濃度では、ほぼ濃度の上昇に比例して光合成速度が速くなります。また、海洋表層水は大気中の CO₂ 濃度に比例して CO₂ の溶解量が決まります（ヘンリーの法則）。



したがって、大気から地表環境（海洋も含む）への CO₂ の吸収量は大気中の二酸化炭素濃度 \propto CO₂ のストック量に比例すると考えることはそれほど無理な仮定ではないでしょう。

まず、大気中の CO₂ 初期ストック量を炭素重量で AGt-C、地表環境から大気中への年間 CO₂ 放出量を aGt-C/y、地表環境の CO₂ 吸収量 bGt-C/y が大気中の CO₂ 量に比例するものとして、その比例定数を r (0 < r < 1.0) とします。

大気中の CO₂ ストック量の変化はつぎのように求められます。

| 経過年 | 初期ストック量 | 1年目排出量 | 2年目排出量 | 3年目排出量 | | n 年目排出量 |
|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|---------|
| 0 | A | a | | | | |
| 1 | A(1-r) | a(1-r) | a | | | |
| 2 | A(1-r) ² | a(1-r) ² | a(1-r) | a | | |
| | | | | | | |
| n-1 | A(1-r) ⁽ⁿ⁻¹⁾ | a(1-r) ⁽ⁿ⁻¹⁾ | a(1-r) ⁽ⁿ⁻²⁾ | a(1-r) ⁽ⁿ⁻³⁾ | | a |

(n-1)年後の大気中の CO₂ ストック量は次式で計算されます。

$$A_n = A(1-r)^{(n-1)} + a(1-r)^{(n-1)} + a(1-r)^{(n-2)} + \dots + a(1-r) + a$$

$$= A(1-r)^{(n-1)} + a(1-(1-r)^n)/(1-(1-r))$$

n を十分大きな値にすると $(1-r) < 1.0$ より A_n は急速に収束します。収束したときの大気中 CO_2 ストック量は次式で求めることができます。

$$A_n = a/r \quad (\because (1-r)^n \rightarrow 0)$$

今、仮に人為的な化石燃料起源の CO_2 放出量をゼロとした場合のストック量 $A_n = 700\text{Gt-C}$ 、地表環境からの年間 CO_2 放出量 $a = 200\text{Gt-C/y}$ だと仮定することによって r の値を求めます。

$$700 = 200/r \quad \therefore r = 200/700 = 0.2857$$

以上より、地表環境の年間 CO_2 吸収量は次式で与えられます。

$$b = A_n \cdot r = 700 \times 0.2857 = 200\text{Gt-C/y}$$

つまり、地表環境の年間 CO_2 吸収量は年間放出量と同量になって定常状態になります。 r は地表環境の状態によって決まる特性値だと考えられます。

次に、一年間に化石燃料の燃焼に伴って大気中に放出される CO_2 の炭素重量を 6Gt-C/y とした場合について検討します。収束したときの大気中の二酸化炭素ストック量は、

$$A_n' = (200+6)/0.2857 = 721.\text{Gt-C}$$

6Gt-C/y の CO_2 放出量の増加による大気中ストック量の増加の上限は 21Gt-C であり、 6Gt-C/y のわずか 3.5 年分に過ぎないのです。明日香は産業革命以後の化石燃料の燃焼によって増加した大気中 CO_2 の炭素のグロス重量を 350Gt-C だと主張していますが、実際に蓄積されている量ははるかに小さいと考えられます。

観測されている大気中 CO_2 濃度がストック量に比例するとすれば、 6Gt-C/y の増加による大気中 CO_2 濃度の上昇は

$$21/700 = 0.03 = 3\%$$

この結果は、 CO_2 放出 206Gt-C の内、化石燃料起源の CO_2 が 6Gt-C で全体の 3%なので、これが大気中に蓄積された場合においても全体の 3%を占めるという極めて当然の結果を示しています。

700Gt-C に対応する大気中 CO_2 濃度を 300ppm と仮定すると、 6Gt-C/y の放出量の増加による大気中濃度の増加は、 $300 \times 0.03 = 9\text{ppm}$ で収束することになります。しかも A_n は急速に収束し、 CO_2 放出量に変動が起きて 10 年もすればほとんど最終状態と変わらなくなり

ますから、放出側の変化が大気中 CO₂ 濃度の変動として継続し続けることはないのです。

以上より、6Gt・C/y 程度の CO₂ 放出量の増加で近年観測されているような大気中 CO₂ 濃度の急激な上昇を説明することは無理なのです。大気中 CO₂ 濃度の上昇傾向は、炭素循環のバランスに何らかの変化が起こっていること、ここの検討では特性値「 r 」を非定常的に変化させるような事態（生態系の衰退や地表・海洋環境の物理・化学的変質など）が進行しているためと考えられます。