

磯焼けの話⑰ 二酸化炭素の排出と吸収について（Ⅲ）

～海洋におけるCO₂の排出と吸収について～

技術士（衛生工学・建設・環境） 鍵谷 司

はじめに

沿岸部の「磯焼け」（藻場喪失）に着目し、その原因や対策などについて調査した結果、その原因は主に海水温の上昇等であった。他方、藻場回復事例として「鉄散布」に大きな効果が確認されている。さらに、海洋における鉄散布でも植物プランクトンの発生に大きな効果があり、これにより海中の二酸化炭素（以下、CO₂）が低減することが実証されていることを紹介した。つまり、海中のCO₂濃度の低下は、大気中のCO₂がさらに溶存するので、大気中濃度が低下する。このことから「地球温暖化対策」の一環として世界的に注目されている。

地球温暖化防止のためにはCO₂等の大気中濃度を低減させることが第一義であり、このため排出削減を中心に取り組まれている。他方、大気中濃度を抑制、低減するためには、当然、CO₂の吸収量を増やすことも大きな効果が期待できる。このような視点から前号では森林におけるCO₂吸収に焦点を当てて寄稿した。

当然、海洋にも大気からCO₂が大量に溶け込む。地球の7割を占める海には膨大な海水が存在し、これまでは排出されたCO₂の約30%が吸収されているといわれている。地球温暖化は、海水の温度上昇を招くことになるが、海水温の上昇は、海水が膨張するので海水位の上昇、軽くなるので対流の阻害、あるいは水温が高くなるとCO₂の大気への放出などが懸念されている。

今回は、海洋における炭素の循環について調べてみた。なお、排出と吸収に関する知見が関連するので、以下にこれまで連載したタイトルと要旨

を記載する。

【散歩のみち⑮；環境施設 第162号；2020.12】

I. 温室効果ガスとその排出量；ガスの種類や温室効果、CO₂排出量について解説

【散歩のみち⑯；環境施設 第163号；2021.3】

II. 温室効果ガスの吸収量；CO₂吸収量の推移、吸収源の定義、森林の吸収量と具体的な計算方法を紹介

【散歩のみち⑰；環境施設 第164号；2021.6】

III. 地球上の炭素の賦存量及び大気圏、地圏、海域における炭素循環、特に海洋における炭素循環とその影響について解説

1. 地球における炭素循環について

CO₂問題を地球規模で考える場合、CO₂を構成する炭素の循環として捉える必要がある。つまり、炭素は、CO₂の源ではあるが、化学反応、生物反応あるいは物理的な性質により、気圏では気体（二酸化炭素）、地圏では固体（岩石、樹木等）、海域では液体（水中の炭酸イオン等）として存在している。そして様々な化学形態の炭素が、気圏、地圏、海域で放出と吸収を繰り返して循環する。

1. 1 地球上における炭素の賦存量について

IPCCの第一次評価報告書（1992年）に基づいて、地球規模における炭素分の存在を図1に示した。以下に図1の炭素量を億トンの単位に変換（ギガトン；Gtは10億トン）して述べる。大気圏との関わりを有する全地球の炭素存在量は、大気圏に7,500億トン、陸圏に2兆500億トン、海洋に39兆トンの総計で約43兆トンが賦存する。つまり、海

洋に90%強が存在する。

放出量；大気圏には、7,500億トンで総量の約1.8%が存在し、人間活動に伴う化石燃料使用により50億トン、森林減少に伴う植物体分解による520億トン、土壌・有機堆積物から500億トン、海洋から900億トンの合計1,970億トンが大気へ供給された。

吸収量；大気から植物体へ1,020億トン、海洋への溶解に920億トンの1,940億トンが吸収される。つまり、大気への蓄積量は、供給量と吸収量の差である年間30億トンが増加することになる。なお、交換や移動が起こりにくい地殻内には石灰岩（炭酸カルシウム）が膨大（約240倍）に賦存する。

つまり、①大気と海洋との間のCO₂交換、②海洋の「表層水」と「深層水」の循環による「深層の長期貯蔵庫」との間のCO₂交換、③土地利用の変化により生ずるCO₂吸収または排出（森林破壊など）、④陸上の植物の光合成によるCO₂吸収、木材や土壌内の長期貯蔵庫への植物炭素の移動がある（1994年：IPCC特別報告書）。

- 海洋は大気中の約52倍のCO₂を貯蔵！
- 大気－海洋、大気－陸域では絶えず大量のCO₂を交換！
- 海洋と陸域は、人間活動によって放出されるCO₂の吸収源（＝温暖化を緩和）！

なお、IPCCの評価報告書は数年に一度、新しい知見に基づいて公表されている。

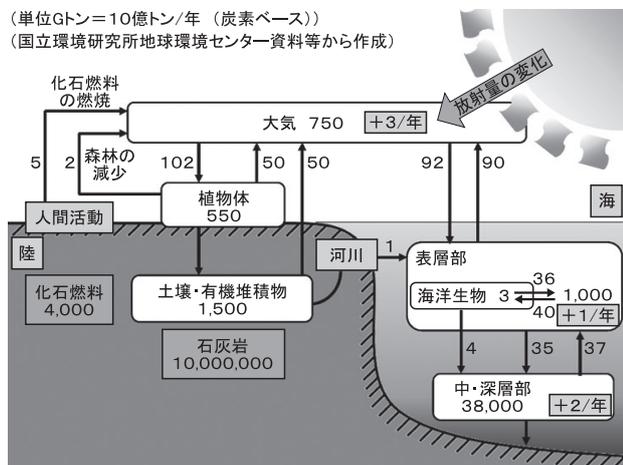


図1 地球上の炭素循環モデル (第1次評価報告書；1992)

1.2 地球上の炭素循環について

地球上に存在する炭素は、大気圏内のCO₂をはじめとして陸域、海域のあらゆる場所に、様々な状態で存在する。例えば、陸上における動植物、化石燃料（石油、石炭等）や岩石（炭酸塩類）、土壌中の有機物、海水や河川・湖沼水に溶けているCO₂や有機物、石灰質の生物体やその遺骸などを挙げることができる。つまり、炭素分は大気、陸地、海洋に存在し、それぞれの圏内で存在（貯蔵）している炭素分が、化学反応、物理的、生物的な活動を介して交換・移動、つまり循環することを「炭素循環」と呼んでいる。

図2は、2013年のIPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価報告書に基づいた炭素の収支を示す。この報告書では、20世紀半ば以降の世界平均気温の上昇はほとんど人為起源の温室効果ガスの増加によりもたらされた可能性が極めて高いと結論している。人類活動によって大気中に排出されたCO₂の分配（2000年～2009年の平均）を、数字は炭素換算重量（単位：億トン/年）を示す。なお、図1は1992年、図2は2013年のデータであり、見直しにより10億トン増となっている。

例えば、大気と海洋間では、大気中のCO₂と海洋に溶けているCO₂の分圧差により炭素の交換が行われる。つまり、大気中のCO₂濃度が高くなると、海水中に溶解し、大気中のCO₂濃度が低下してバランスを保ち、排出量の約26%が吸収される。

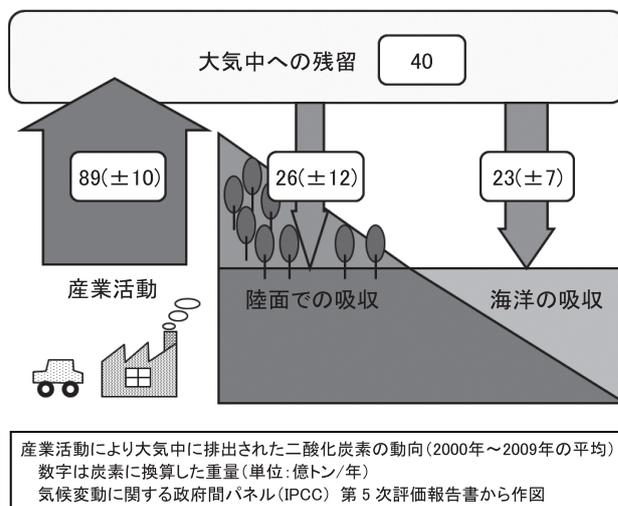


図2 人為起源の炭素収支 (億トン/年)^{1)~3)}

一方、大気と陸域における生態系間では、植物による光合成等によってCO₂が固定され、排出量の約30%が吸収（固定）される。そして、陸域と海洋間では、主に河川などを通して陸域から海洋へ炭素が移動する。その結果、大気中には、総排出量の約45%が貯留する。このうち、産業活動に伴う人為的排出量が78億トンであり、森林減少が11億トンであるので、人為起源のCO₂排出量の約半分が大気中に貯留されることになる。

参考；二酸化炭素と炭素の換算

図1は、炭素重量で示しているのので、これをCO₂の重量に変換すると下式で示される。炭素に2個の酸素が結合して重くなるので、3.67倍の重量になる。つまり、40億トンの炭素は、約150億トンのCO₂量に相当する。資料等では、炭素あるいはCO₂で表示するので、比較する場合は要注意である。また、これまで排出された炭素あるいはCO₂の総量で表示するケースと年間の排出量や吸収量で評価するケースがあることにも留意する必要がある。

[換算方法]

モル数：CO₂…44、炭素C…12

①二酸化炭素 ⇒ 炭素

$$\text{CO}_2 \Rightarrow \text{C} \quad \text{C}/\text{CO}_2 = 12/44 = 0.273$$

②炭素 ⇒ 二酸化炭素

$$\text{C} \Rightarrow \text{CO}_2 \quad \text{CO}_2/\text{C} = 44/12 \approx 3.67$$

2. 海洋中の炭素循環について

大気中の炭素の増加（放出）や減少（吸収）は、陸域及び海洋での活動に伴って変動する。大気中には、人為起源の炭素分の4割強が貯留され、樹木等に約3割、海洋に約3割弱が移動する。とくに、海洋における炭素の賦存量は9割以上を占めており、その炭素の放出及び吸収が大気中の炭素濃度に大きく影響すると考えられるので、海洋中の炭素循環について検討した。ここでは2013年のIPCCによる第5次評価報告書に基づいた収支について紹介する。

2. 1 海洋中における炭素循環について

図3は、図1より大気と海洋部分を抜粋して炭素循環を示した。数値は炭素の賦存量（貯留量）であり、矢印は炭素の放出と吸収を、四角内の数値は年あたりの炭素量（単位；10億トン）を示す。大気-陸域生態系間では植物による光合成や呼吸などにより、大気-海洋間では、大気中のCO₂と海洋に溶けているCO₂の分圧差により交換が起きる。陸域-海洋間では主に河川などを通して陸域から海洋へ炭素が移動し、大気中には年間30億トンの炭素が増加する。

大気中のCO₂の濃度の上昇に伴い海洋への吸収量が増えており、排出量（89億トン）の約26%（23億トン）とされ、これらは海洋の循環により中深層部へと運ばれる。海洋の表層部では、炭素分は太陽光により植物プランクトンの光合成により有機物となる。これらが生物に取りこまれ、その排泄物や死骸等が沈降あるいは分解して海洋の深層部へと沈降し堆積する。このような流れにより海洋中には、大気中の約50倍もの炭素が貯留されている。なお、この働きは「生物ポンプ」と呼ばれる。

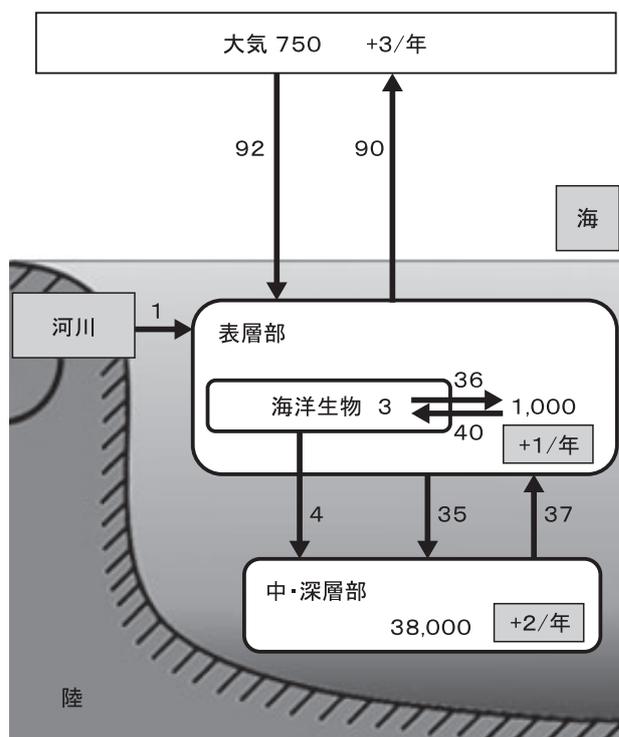


図3 海洋における炭素の循環（図1より）

一方、堆積した膨大な炭素分は、海流が湧昇した場合に、中深層部に堆積していた炭素分などの栄養分を表層部へ運ぶ。表層部では太陽光による光合成が起こり、植物プランクトンが膨大に発生する。つまり、海洋の炭素分は、主に沈降と湧昇による表層移流、光合成による植物プランクトン発生を通じて循環するのである。

人類活動によって大気に放出されたCO₂は、一部は大気に蓄積され大気中CO₂濃度の上昇に寄与し、残りは陸域生態系及び海洋によって吸収される。陸域生態系では、植物が、大気中のCO₂と土壌中の養分（無機物）と水から光合成により有機物として固定する。一方、海洋でも、表層海水にCO₂が溶解しており、光合成により植物プランクトンが増殖し、有機物として固定される。それが様々な過程を経て、下層への沈降、無機炭素への分解というプロセスを経て炭素の蓄積が起きるのである。

2. 2 海水温と二酸化炭素の溶解について

気体（ガス）は、水温が高くなると溶解度が小さくなる。図4は、1気圧のCO₂が水1リットルに溶解する量をモルで示した。なお、CO₂の1モルは44gであるので、0℃では0.0768モル、重量で3.37g溶存し、20℃では0.039モル、1.7gしか溶解しない。仮に海洋表層水の海水温が20℃とした場合、海水温が1℃上昇するとCO₂の溶解量はおよそ2%程度減少することになる。このことは、

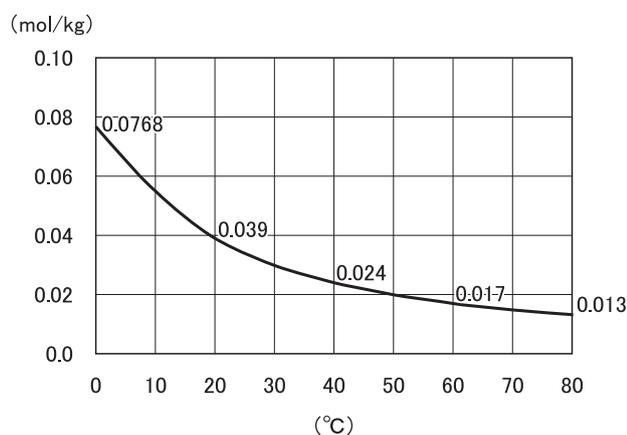


図4 水温と二酸化炭素の溶解度の関係

図1に示した海洋表層水の炭素貯留量が1,000Gt（1兆トン）とすると20Gt（200億トン）の炭素が大気へ放出されることを意味する。

また、海洋における深度方向の水温分布は、4℃までは水温が低くなるにしたがって密度が大きくなるので低くなる（図5）。水温が低いほどCO₂の溶解度が大きくなるので、たくさん溶存している。つまり、中深層水が湧昇して水温が高くなると、CO₂の溶解度が小さくなるので、大気へ放出することを意味する。当然、表層水も水温が上昇するとこれまで溶存していたCO₂が大気へ放出されることになる。

なお、水は4℃で最も重くなるので、水深1,000m以深では一定になる。つまり、いくら温度が下がっても深海は4℃以下に下がらないので、凍らないのである。

3. 二酸化炭素の溶解に伴う海洋の酸性化

大気中のCO₂濃度が上昇するとその分圧に応じて海洋へ溶存する。海水中のCO₂は炭酸イオンとなるが、次第に解離して水素イオンを生成し、水素イオン濃度が高くなる。水素イオン濃度の逆数を対数で表した数値をpH（ピーエイチまたはパー

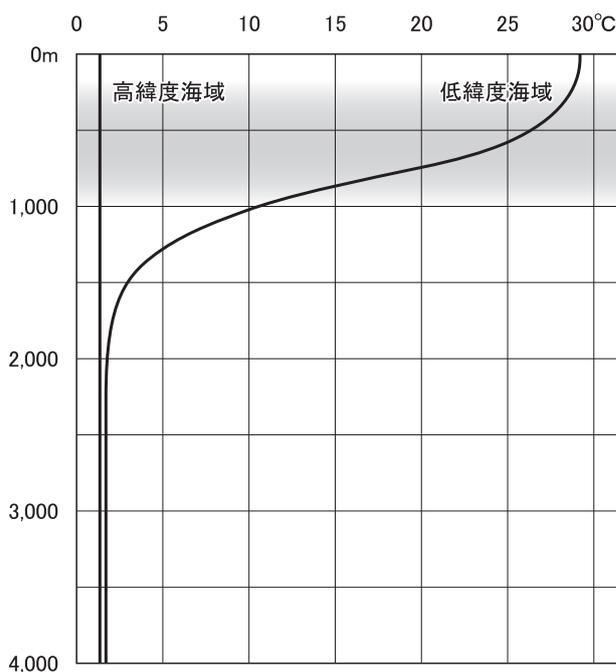


図5 海洋の深さと海水温度⁵⁾

ハー) という。数値が大きいほど水素イオン濃度が低いのでアルカリ性を、高くなるほど酸性を、7は中性を表す。

海中のpHが変わると物質の溶解性が変わるので、自然、生態系に大きな影響を及ぼす。

3. 1 海洋の酸性化について

大気中に放出されたCO₂が海洋に溶解することにより「海洋酸性化」が問題になっている。

海洋中に溶けたCO₂は炭酸(H₂CO₃)となり(式(1))、炭酸(H₂CO₃)は、海洋中では水素イオン(H⁺)が解離した炭酸水素イオン(HCO₃⁻)や炭酸イオン(CO₃²⁻)になる。式(2)と式(3)で表される反応により化学平衡の状態を保っている。しかし、大気中のCO₂が増えると、海水に溶け込むCO₂も増え、式(1)と式(2)の反応が式(3)に進んで、水素イオン(H⁺)を生成する。生成したH⁺の大部分は式(3)の(1)と(2)の反応にも進んで消費されるが、一部のH⁺はそのまま残るのでpHは低下し、酸性化が進む。

- CO₂ + H₂O ⇌ H₂CO₃…………… (1)
- H₂CO₃ ⇌ H⁺ + HCO₃⁻…………… (2)
- H⁺ + HCO₃⁻ ⇌ 2H⁺ + CO₃²⁻…………… (3)

ところで、通常、海水表層のpHはおおよそ8.1程度で弱アルカリ性であるが、深くなるにしたがってpHは低下し、酸性化が進む。一般的に図6に示したように水深が深くなるにしたがって水温が低下するのでCO₂の溶解度が大きくなる、つまり、炭酸イオンが高い濃度で存在するためと推測できる。北西太平洋亜熱帯域では水深1,000m付近で約7.4と最も低くなる海域もある。

pHは、水素イオン濃度の逆数の対数で定義される値であり、水素イオン濃度が増えるとpHは下がる。海面のpHは、産業革命前に比べてすでに0.1程度低下していると推定されている(IPCC; 2013)。pHが0.1低下することは、水素イオン濃度が約26%の増加することを意味する。海洋に吸収されたCO₂は、海洋の循環や生物活動により海洋内部を移動するので、海洋内部における海洋酸性化が懸念されている。

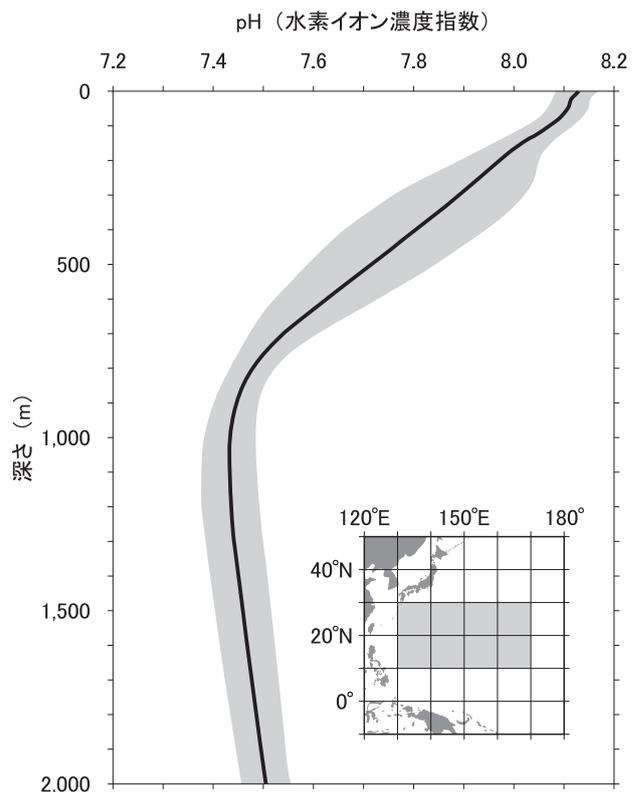


図6 水深と海中のpHの事例

3. 2 海洋酸性化による生態系への影響

海洋酸性化は、多くの海洋の生態系に対して深刻な影響が懸念されている。植物プランクトンの円石藻、貝類、ウニなどの棘皮(きょくひ)動物やサンゴなど、さまざまな海の生物は、海水中に溶解しているカルシウムイオン(Ca²⁺)と炭酸イオン(CO₃²⁻)から、水に溶けにくい炭酸カルシウム(CaCO₃)の骨格や殻を作っている。現在の海面付近では、pHがおおよそ8.1程度で弱アルカリ性であるので炭酸カルシウムは溶け難い環境下にあるので、生物は骨格などを作ることができる。

しかし、海洋酸性化が進んで海水中のpHが低くなり、水素イオンが増えると、pHが酸性になり、炭酸イオン(CO₃²⁻)が重炭酸イオンとなり(1)、低くなるので炭酸カルシウム(2)の殻の形成が困難、つまり、炭酸カルシウムが溶解しやすい環境に陥る。海洋酸性化の進行によって植物プランクトンや小さな動物プランクトンが生息、繁殖しにくい環境になると、有用な水産資源にも大きな影響を及ぼすと懸念される。



また、IPCC（2013）は海洋酸性化が進むと、海洋のCO₂の吸収能力が低下することも指摘している。海洋は大気からCO₂を膨大に吸収（溶解）しており、その能力低下は、大気中に残存するCO₂の割合が増えることを意味する。つまり、温暖化をさらに加速することが懸念される。

おわりに

全地球の炭素分の分布をみると、海洋に90%以上が賦存している。大局的に見ると、人類の活動に起因して大気中へ排出されたCO₂は、陸地では光合成による植物として固定され、大気濃度の上昇とともに海洋に溶存あるいは光合成による植物プランクトンの増殖により吸収され、最近では、人為的排出量の55%が吸収され、45%程度が大気中に残存すると報告されている。

とくに、海洋への吸収は膨大であり、温暖化を

緩和する効果は大きいですが、CO₂の溶解は、海の水素イオン濃度の上昇を招き、pHが低下して酸性化が問題になっている。海の酸性化により、大気からのCO₂溶解量を減らすことやカルシウム分を溶かすことからサンゴや貝類など炭酸カルシウムで骨格を作る海洋生物に多大な影響を及ぼすと懸念されている。

温暖化に伴い海洋表層の海水温が上昇することは、炭素などの栄養分の貯留庫となっている中深層海水の湧昇を阻害することが予想されている。とくに、海洋の深層流の変動は、地球環境に極めて重大な影響を及ぼすとされている。大局的には、温暖化⇒表層海水温上昇⇒対流・湧昇の抑制⇒地球気象異常に結びつく。

今回は、この海洋の深層流の影響について調査、寄稿することにし、「散歩のみち：磯焼けシリーズ」の最終回としたい。

〈引用・参考文献〉

- 1) 全球の海洋よる二酸化炭素吸収量に関する情報提供の開始について；気象庁報道発表資料（平成25年11月6日）
- 2) ICPP 第5次評価報告書の概要、第1作業部会（自然科学的根拠）；環境省（2014年12月版）
- 3) 公開国際シンポジウム；海と地球温暖化 ～IPCC 報告書から；鼻和公雄（2009.3）
- 4) 海洋の温室効果ガスの知識；気象庁