



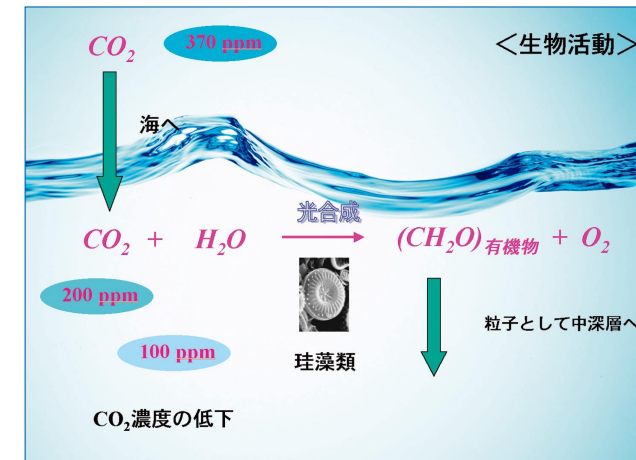
二酸化炭素を吸収する海洋の仕組み

地球温暖化で注目される海洋の果たす役割

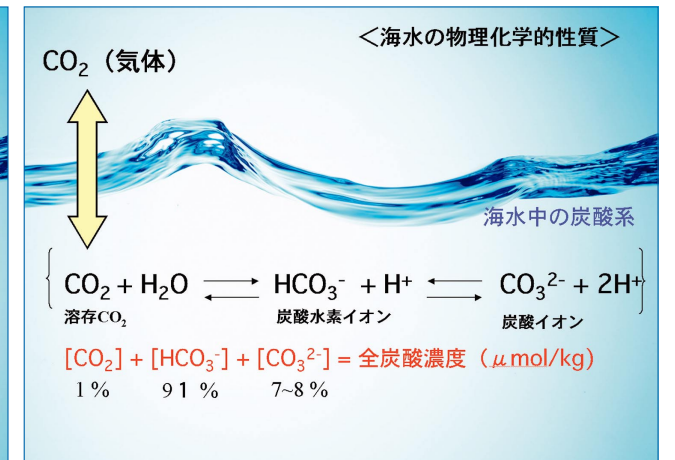


取材協力：
村田 昌彦 研究員
 地球環境観測研究センター
 海洋大循環観測研究プログラム
 化学トレーサグループ

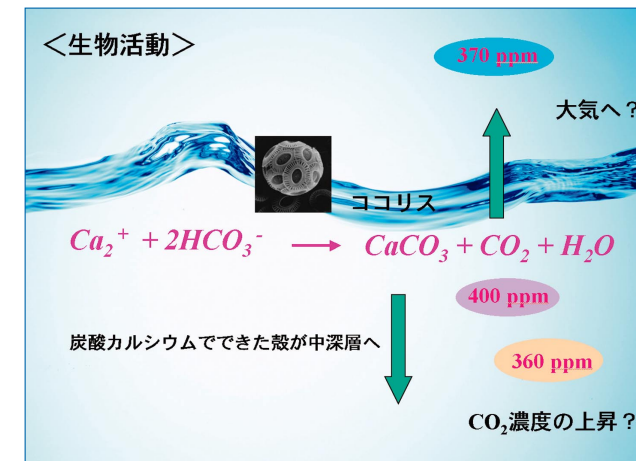
地球温暖化に大きな影響を及ぼすとされる温室効果ガス。そのなかでも最も大きく関与していると考えられているのが二酸化炭素だ。IPCCの報告によれば、産業革命前の1750年に約280ppmだった大気中の二酸化炭素濃度は、その後増え続け、1999年には約367ppmにまで達した。特に20世紀の増加率は、過去2万年間で前例のないほど高いといわれている。だが、石油等の化石燃料の消費など、人間活動によって大気中に放出された大量の二酸化炭素は、全てがそのまま大気中に蓄積されるわけではない。陸域で森林等の光合成の働きによって二酸化炭素が吸収されることはよく知られている。さらに、より重要な吸収源と考えられているのが海洋だ。IPCC第三次評価報告書によれば、1年間に大気中に排出される量は炭素換算で約5.4ギガトン(1ギガトン=10億トン、1980~1989年のデータによる)であり、そのうち森林など陸域で吸収される量が約0.2ギガトンであるのに対し、海洋では約1.9ギガトンが吸収されると見積もられている。こうした二酸化炭素の収支については、まだ分からないことも多いが、海洋が二酸化炭素の吸収源として非常に大きな役割を果たしていることは間違いないといわれている。海洋は、どのようにして大量の二酸化炭素を吸収しているのだろうか。ここでは、その仕組みを紹介するとともに、今後温暖化が進んだとき、その働きがどのように変化するかを考えてみたい。



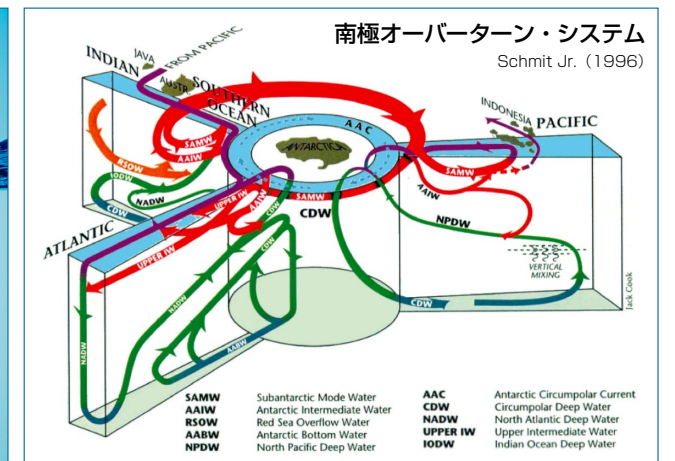
生物活動によるCO₂吸収の仕組み(生物ポンプ)



海水の物理化学的性質によるCO₂吸収の仕組み(溶解ポンプ)



円石藻(ココリス)等、CO₂吸収にあまり貢献しない植物プランクトンも



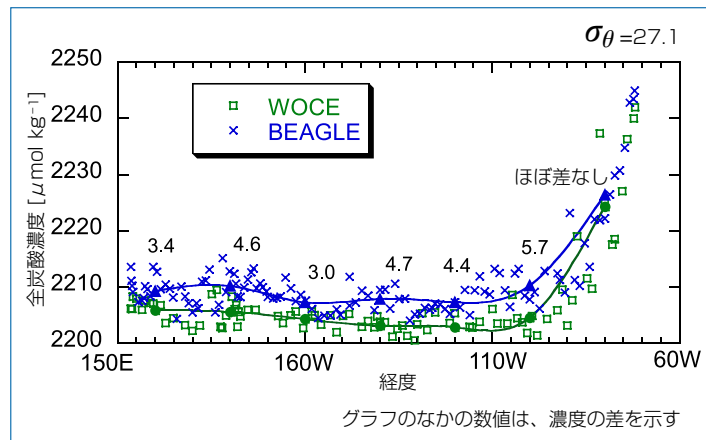
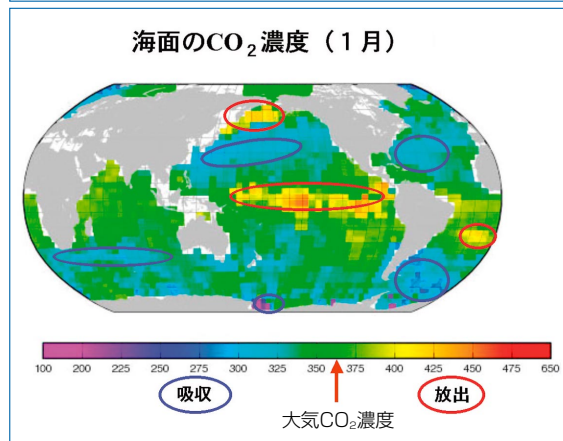
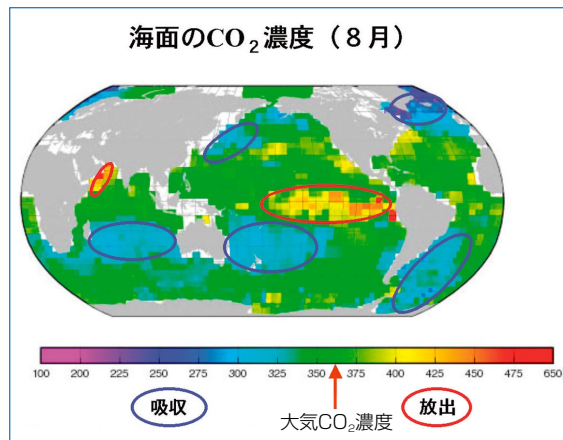
海洋大循環は海水をかき混ぜる働きによりCO₂吸収・排出に影響を及ぼすとされる

二酸化炭素を吸収する3つの仕組み

大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度が増加している今日、その吸収源としての海洋の果たす役割が大きな注目を集めている。海中に存在するCO₂の量は、大気中のおよそ60倍に及ぶ。そして、人間活動によって大気中に放出されたCO₂の30%以上を、海洋が吸収していると見られている。今年発表された報告のなかには、約48%を海洋が引き受けているとするものもある。地球の表面積の約70%を占め、13億立方キロメートル以上の体積を持つ海洋は、大きなCO₂吸収のキャパシティを持ち、吸収源として大きな働きをしていると考えられている。では、海洋はどのような仕組みでCO₂を吸収しているのだろうか。

海洋がCO₂を吸収する主な仕組みとして、次の3つをあげることができる。「海水の物理化学的性質」、「生物活動」、「海洋大循環」だ。海水の物理化学的性質による吸収は、「溶解ポンプ」とも呼ばれる。これは、大気中のCO₂が海面で海水に溶け込む過程をさす。CO₂は、もともと酸素や窒素などの気体に比べて水に溶けやすい性質を持っており、大気と海洋は、常にCO₂(気体)のやり取りを行っている。大気と接している海面で、海水のCO₂濃度が大気濃度より低ければ、CO₂は海水に吸収され、高ければ逆に海水から大気中に放出される。つまり、濃度差をなくそうとする物理化学的性質が駆動力となって、吸収・排出が行われるのだ。海面の状態も吸収・排出に大きく関

係している。静かな海面よりも、強い風の影響等で海が荒れているほうがCO₂は混ざりやすく、そのやり取りも大きくなる。さらに、水温が低いほど、CO₂の溶解度は高くなり、吸収は促進される。そのため、一般に水温の低い高緯度海域ではよく吸収され、赤道周辺のように海水温の高い低緯度海域では放出されやすくなる。このように、海洋は大気中のCO₂を一方向的に吸収するわけではなく、海面の状態によって、吸収したり、排出したりしている。したがって、海面で吸収されたCO₂が下層に運ばれたり消費されて濃度が下がれば、海洋はより多くのCO₂を吸収することができるわけだ。また、こうして海洋に溶け込んだCO₂は、そのまま溶存CO₂(約1%)としてだけでなく、炭酸イオン(約8%)、炭酸水素イオン



太平洋における海中のCO₂濃度の変動
 1990年代半ばにWOCE（世界海洋循環実験）で観測されたCO₂濃度と2003年のBEAGLE 2003で観測された同じ観測線でのCO₂濃度を同じ密度面で比較したもの。大気中のCO₂濃度の増加と同様に、海中でもほぼ同様の濃度の増加が確認された。

海洋のCO₂吸収の動きは一樣ではなく、海域や季節などによって大きく異なる。また、全ての海域で吸収されているわけではなく、CO₂を大気中に放出している海域もある。（Takahashi et al., 2002）

（約91%）として安定したかたちで海中に存在している。

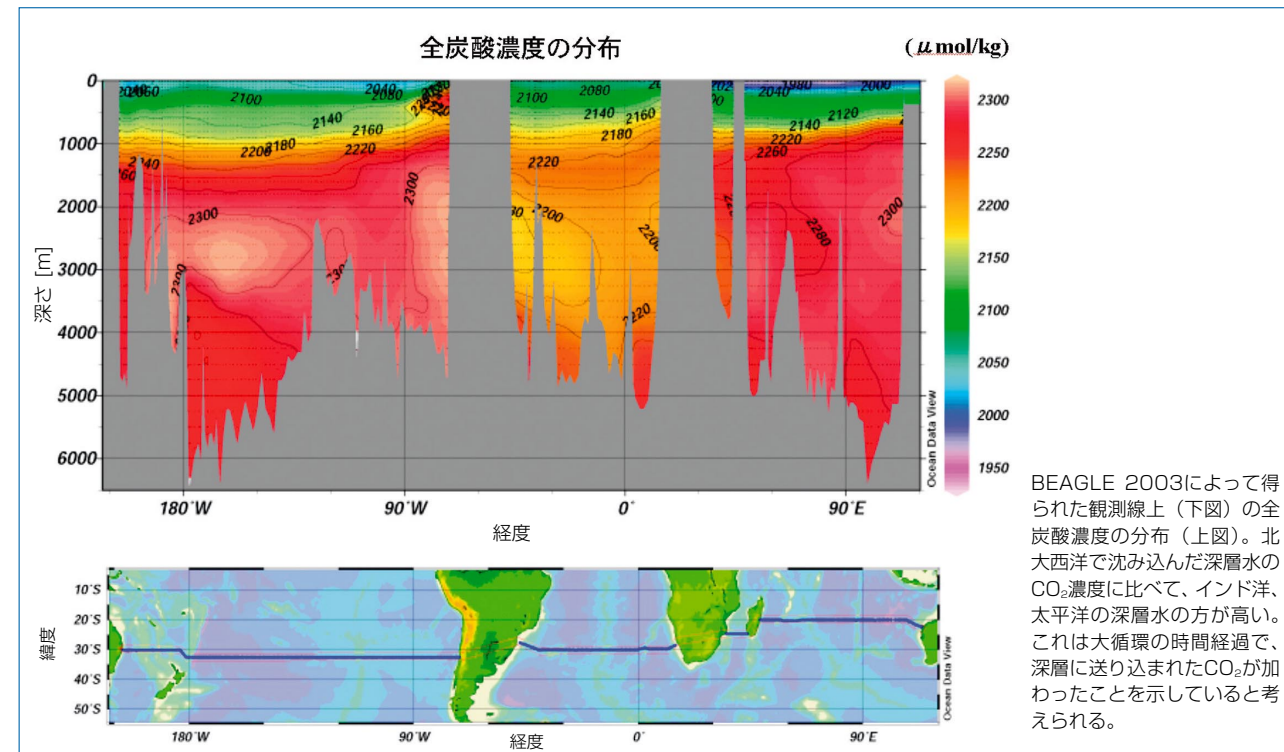
生物活動は、「生物ポンプ」とも呼ばれる。陸域において森林等が光合成によってCO₂を吸収するのと同様に、海中でも植物プランクトンが海水に含まれる窒素やリンなどの栄養塩を使って光合成を行い、有機物をつくり出している。そして、その過程でCO₂が利用される。海洋表層で植物プランクトンが活発に活動すれば、海中のCO₂濃度は低下し、その分だけ大気から溶け込みやすくなる。また、植物プランクトンは、海中の生物の食物となり、やがてはマリンスノーのように有機物の粒子として中深層へと運ばれていく。こうしたCO₂吸収の過程が生物ポンプだ。もちろん、こうして深海へと運ばれたCO₂（炭素）は、その全てが海底に堆積するわけではない。有機物が分解される過程で生まれる深海のCO₂が、湧昇流などによって再び表層に押し上げ

られ、大気中に放出される場合もある。つまり、CO₂は循環しているのだ。

植物プランクトンのなかで、CO₂を効率よく吸収するものとして知られるのがケイ藻類だ。北海道沖では、春先から初夏にかけてブルームといわれるケイ藻の大増殖が見られ、CO₂の大きな吸収源となっている。一方、同じ植物プランクトンでも、円石藻類（ココリス）のようにCO₂吸収にあまり貢献しないものもある。円石藻は、海中のカルシウムイオンと炭酸水素イオン（あるいは炭酸イオン）から炭酸カルシウムの殻をつくる。その過程でCO₂が発生するため、条件にもよるが、円石藻が増えると海洋表層のCO₂濃度が増加してしまうこともある。円石藻類は、栄養塩の比較的小さい海域でも繁殖することができるため、海洋表層の水温が比較的高く中深層の海水と混ぜにくい（成層構造が強く、上下の混合が少なくなるため、深層から栄養塩の多

い海水が上がってこない）中低緯度の海域や、ケイ藻類のブルームが終わった後に栄養塩が減少してから増殖する現象も見られる。

もうひとつの海洋大循環は、いわば海洋中の大きな流れであり、表層の海水を深層に運ぶ動きによって、海洋のCO₂吸収を条件づけている。そして、上記の2つよりも、もっと長い時間の流れを考えたときに重要な動きを行う仕組みだ。「海洋コンベアベルト」の名前でよく知られるこの海洋の大きな循環は、北大西洋（グリーンランド付近）で沈み込んだ重い（密度が高い）海水（北大西洋深層水）が、深層海流として大西洋を南下し、南極周辺で変質を受け、さらにインド洋・太平洋を北上しながら上層の海水と混ぜられ、浮上して、やがて再び北大西洋へ戻っていくというもの。風によって駆動される海流とは異なり、水温や塩分の違いによって駆動される循環だ。海洋は、海



BEAGLE 2003によって得られた観測線上（下図）の全炭酸濃度の分布（上図）。北大西洋で沈み込んだ深層水のCO₂濃度に比べて、インド洋、太平洋の深層水の方が高い。これは大循環の時間経過で、深層に送り込まれたCO₂が加わったことを示していると考えられる。

水の密度によって成層化しやすく、そのままでは上下方向に混ぜにくい性質を持っている。海洋大循環は、まさにベルトコンベアとしてこれを混ぜる役割（鉛直混合）を果たし、表層で吸収されたCO₂を深層へと運んでいく。

温暖化が進むとCO₂は吸収されにくくなる!?

海洋は大気中のCO₂を吸収する大きな役割を担っているが、さらに大気中のCO₂が増加しても、同じように機能してくれるのだろうか。一般に、海洋のキャパシティは大きく、まだ今後も海洋は増加するCO₂を吸収してくれると推察されている。しかし、現在進行している温暖化が今後とも続いたら、状況は変わるのではないかと考えられている。

物理化学的な性質を考えた場合、温暖化によって海洋全体の表層の水温が上昇すれば、溶解度は低下してしまい、CO₂は吸収されにくくなる。生物活動については、温暖化によって生物の活動がどのように変化するかは、まだ

明らかになっていない点が多い。だが、海洋表層の水温が上昇することによって成層化が進み、より下層の海水と混ぜにくくなった場合、中深層からの栄養塩の供給が減少する可能性がある。このとき、CO₂吸収に大きく貢献するケイ藻類に代わって、貧栄養環境に強い円石藻類が増殖すれば、CO₂は吸収されにくくなることが予想される。海洋大循環についても、温暖化によって北大西洋で冷たく重い海水が生じにくくなった場合、沈み込みが弱まる可能性が指摘されている。これによって海洋の鉛直混合が弱まり、成層化が進行すれば、海洋のCO₂の吸収能力に影響を与えることが考えられる。これらはまだ推測の域を出ず、不確定要素も多く存在するが、総合的にとらえると、温暖化の進行は、海洋のCO₂吸収の仕組みを変えたとともに、その能力を低下させる可能性があるといえるだろう。

こうした海洋による大気中のCO₂吸収の動きを明らかにするために、高精度な海洋観測の果たす役割は大きい。現在、国際的な協力のもとで、大洋を

横断・縦断する大規模で高精度な海洋観測が進められている。すでに本誌でも何度か紹介している、昨年から今年にかけて海洋研究開発機構が実施した南半球周航観測航海（BEAGLE 2003）もそのひとつだ。BEAGLE 2003では、CO₂（全炭酸濃度）についても詳細で高精度の観測が行われており、現在、地球環境観測研究センターにおいて、観測航海で得られた膨大な観測データの解析が進められている。そして、海洋のCO₂吸収メカニズム解明、地球温暖化予測に大きく貢献する研究成果に大きな期待が寄せられている。



海洋地球研究船「みらい」に設置された全炭酸の分析機器（写真/マリン・ワーク・ジャパン）