

二酸化炭素の行方と炭素循環(その1) :
海洋の生物過程と有機物循環の役割

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-05-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 鈴木, 款 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00025186

二酸化炭素の行方と炭素循環 (その1) ～海洋の生物過程と有機物循環の役割～

鈴木 款*

はじめに

「大気中の二酸化炭素の増加」が気候変化と地球の生態系の変化にどのような影響を与えるかが、ここ数十年間多くの研究者により研究、調査、あるいは議論されている。1900年代後半からの人間活動による化石燃料の消費と熱帯林等の破壊による大気中への二酸化炭素の放出と増加は、人類と生態系が生き残るためには「地球規模」でこの問題の解決に取り組まざるを得ないと理解している。この問題の解決のために多くの科学的、技術的方向が提案されている。このうちの一つは、極めてあたりまえであるが、化石燃料の消費を削減すると同時に新しいクリーンなエネルギー源を確保することである。しかしながら、この方向に踏み出すことは容易ではないことはIPCCの議論を見れば明らかである。そこで、大気中に放出された二酸化炭素を自然のシステムを用いて吸収固定しようとする考えで、サンゴ礁、円石藻等の生物による固定や深海への海洋貯留による処分を進めるための調査研究が行われている。また、放出している二酸化炭素を放出源で水素と反応させてアルコールに変換しようとする科学的な方法、あるいはバイオリクターを利用する藻類による生物的方法により吸収固定しようとする考えのもと研究が行われている。はじめのうちは、この問題を解決することは何らかの技術開発あるいは対策により可能であると私たちは考えてきた。人間は科学技術の開発と進歩により多くの問題を現在まで解決してきたし、これからも解決できると確信してきた。というのは「地球環境問題」も、初めは「科学技術」対策の可能な範囲の問題であると理解した。しかしながら、実際に「技術対策」の可能性についての研究をスタートしてみると、なかなか「対策」の可能性が見えてこないことが分かってきた。その理由は「地球環境問題」とは、もともと自然現象をどのように理解し、どのように予測するかに関係している。すなわち、解決のために「技術対策」を的確にするためには「科学的理解」が必要条件である。

「科学的理解」とは「二酸化炭素問題」においては「炭素循環の科学的理解」ということになる。そこで、ここでは、まず炭素循環の理解のための基本である炭素循環図についてどこまで理解できているのか、どこまで正確であるのか、何が問題であるのかについて検討することにした。

現在まで、地球規模の炭素循環を理解するためにさまざまな炭素循環図が提案されている。しかしながらほとんどの炭素循環図は循環図に記された数字に多少の違いはあるにせよ、構成要素および循環経路においてそれほど大きな差があるわけではない。炭素循環図を描く際に基本となる構成要素は大きく2つである。その1つは現存量あるいは貯蔵量であり、もう1つは移動量である。前者はReservoir, BurdenあるいはPoolとか呼ばれている。後者はFluxと呼ばれている。次にどのようなReservoirを炭素循環図に採用するのか。一般的に地球規模の炭素循環を描くのに必要だとされてい

* 静岡大学理学部生物地球環境科学科

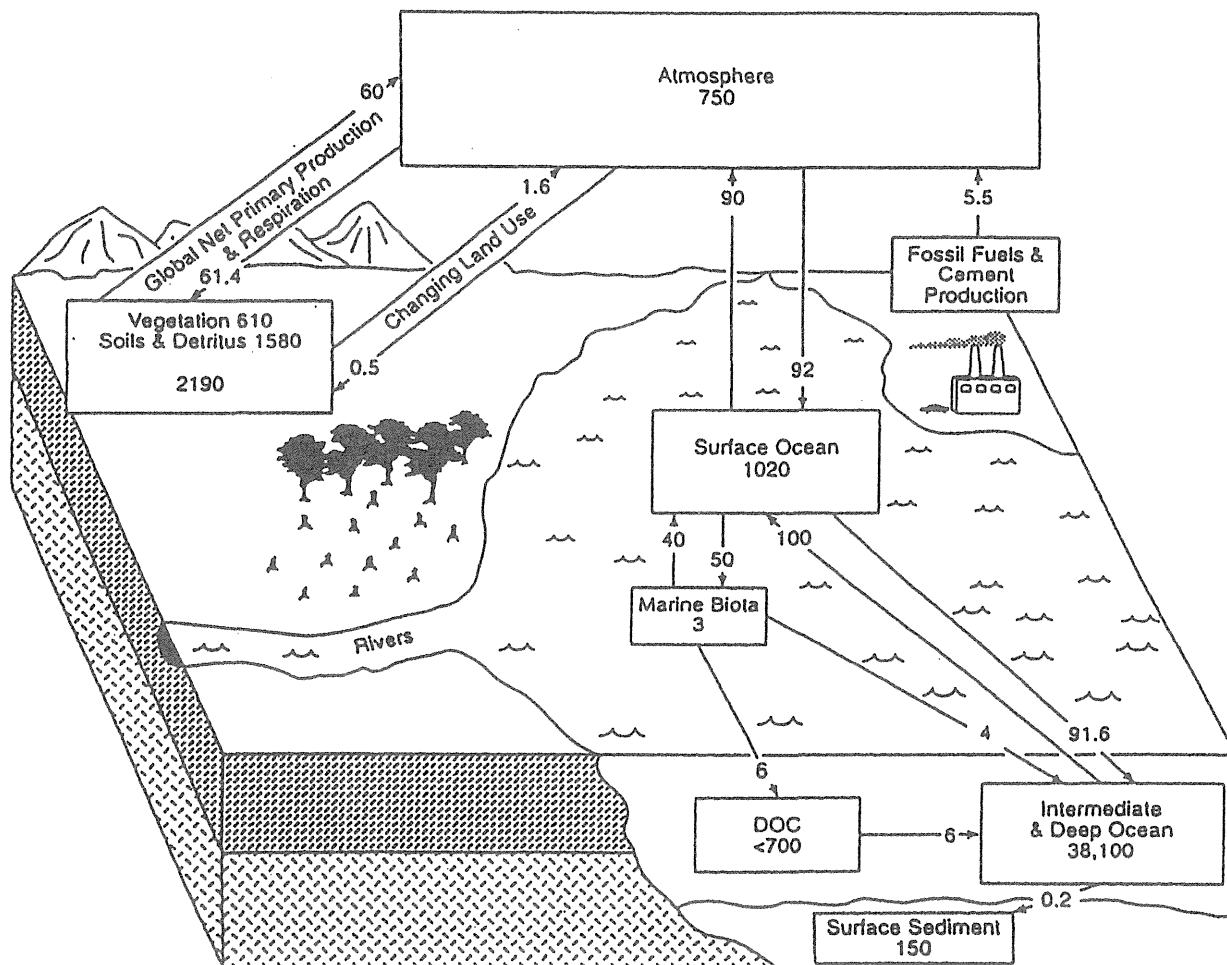


図1 地球規模の炭素収支

る Reservoir は陸域生物群集 (Land Biota)、土壤あるいは非生物有機物 (Soil and Detritus)、大気圏 (Atmosphere)、海洋表層 (Surface Ocean)、海洋中深層 (Intermediate and deep waters)、生物群集 (主に植物プランクトン) (Biota)、溶存有機炭素 (DOC) と堆積物 (Sediment) である。しかしながらこれらはミニマムの必要項目である。何をどのように議論するかにより Reservoir はいくらでも細かくすることができる。ただ、あまり細かくしても、その Reservoir の役割が評価できなければ意味はない。現在までに提案されている炭素循環の代表的な図を図1に示す。この図は IPCC のレポート (Watson et al., 1990) と Siegenthaler and Sarmiento, Nature (365, 119-125, 1993) に掲載されている。

炭素のリザーバー

炭素の海洋において最も大きいリザーバーは炭酸イオン、重炭酸イオン、溶存炭酸ガスからなる無機炭素化合物である。次に大きいリザーバーは溶存有機物である。この図において、最も確かな数値は大気中に二酸化炭素として存在している炭素の Reservoir の量 (750 Gt) と増加量 (3.4 Gt/yr)、海水中の無機炭素の炭素量 (表層の 1020 Gt と深層の 38100 Gt) である。これらは共に観測値から計算されている。海水中の溶存有機炭素のリザーバーの量は 700 Gt と示されているが、後で述べるように海

水中の有機炭素の分析値に関してはまだ多くの問題があり、確定できないでいる。しかしながら、海洋における有機物のリザーバーとしては溶存有機炭素が最大のプールである。粒子状有機炭素のリザーバーは溶存有機炭素のおよそ10分の1と考えられる。したがって、70 G_t程度になる。次に生物量については、外洋においては植物プランクトンの量が地球規模でどのくらいあるのかについてはほとんど報告例はない。IPCCの報告では「Biota」として3 G_tが示されている。炭素循環においては、生物は「Biota」としてしか考慮されていない。年間という時間スケールにおける炭素循環においては個々の生物種を考慮する必要がないと考えている。生物の量は海水中に溶存している有機あるいは無機炭素の量、あるいは堆積物中の炭酸カルシウムや有機物の量に比べて小さい。さらに、生物種は他のリザーバーと比べて日変化、季節変化等変化の時間スケールが短いなどの理由から、一つにまとめられている。この3 G_tの値はどのような根拠から計算されたのか？ IPCCの報告あるいは Siegenthaler and Sarmiento, Nature (365, 119-125, 1993) の論文においても明確な根拠は示されていない。Koblents-Mishke (1977) が海洋のバイオマスとして富栄養海域として 500 mgC/m³、中栄養海域として 2.5 mgC/m³、貧栄養海域として 0.01 mgC/m³ を報告している。この値と面積(理科年表)と深さ200メートルを用いて計算すると約15 G_tとなる。IPCCの報告値とはかなり異なる。現在のところこの値を正確に見積もることは非常に困難であるとされている。このためにはできるだけ、生物種を個々にその現存量を積み上げていく以外にない。

海洋における生物種としてはプランクトン(植物および動物)以外にバクテリア、藻類、サンゴ、底生生物の現存量が多く、もし、これらを生物群集の現存量として加えると、「Biota」としての量はさらに大きなものになることが予想される。

炭素のフラックス

次に各リザーバー間における炭素のフラックスについては海洋の吸収量である2 G_t/yr に関しては models (Sarmient, et al., 1992; Siegenthaler and Joos, 1992), pCO₂の測定とバランス計算 (Enting, et al., 1993)、1970年と1990年の同じ場所と季節での炭素の安定同位体比の測定 (Quay, et al., 1992) から推定されている。この誤差として±0.6 G_tとしている。この吸収量の計算はまだ、正確さにおいては問題がある。海洋の吸収量である2 G_tは二酸化炭素濃度のおよそ2 ppmに相当する。海水中の二酸化炭素分圧の変化は海域により異なるものの、1日でさえ数十ppmの変化がある。したがって、観測事実から、海洋の吸収量を確定するのは簡単ではない。さらに、生物活動に関係している部分については、さらに不確かである。このうち、比較的確かなのは、基礎生物生産の50 G_t/yr であると考えられるが、これについても、基礎生産量の測定方法に関して、従来の放射性炭素を用いる瓶法は過小評価している可能性が指摘されている。さらに、酸素法あるいは酸素同位体法等の比較においても一致しないことから基礎生産の推定に関してはまだ検討の必要がある。さらに、呼吸量を差し引いた、純生産量については、ほとんど海水中の溶存酸素濃度の増加と減少の日変化から計算されているが、どのくらい、実際の有機物の増加と減少に対応しているかはよく分からない。したがって、現在報告されている基礎生産量については実際にはもっと大きい生産量であると予想される。さらに大きな問題は表層海水中で40 G_tが1年間で分解するとしている。この数値は、深層に有機物(粒子状と溶存態)

が輸送される量は 10 Gt/yr とモデル計算から推定し、その差として 40 Gt が与えられている。この深層に輸送される 10 Gt/yr の根拠にしても、観測により実測できるのは Sediment Trap による粒子状物質の輸送量だけである。ただし、この値にしても、実際には図 2 に示したように季節、場所により変動幅が大きく、簡単に確定できるものではない。現在、その量としておよそ 4 Gt/yr が採用されている。さらに、溶存有機炭素の深層への輸送量の計算に関しては、正確な濃度差（表層と深層の間）と海水の鉛直混合の速さに依存していて、現在ではまだ正確な計算ができていないが、IPCC 報告では、 6 Gt/yr としている。したがって、粒子状および溶存態の深層への輸送量は 10 Gt/yr ということになる。従来“新生産”として定義されていたのは、表層からの粒子状有機物の深層への輸送量であったが、溶存態有機物の量も含めて考えるべきである。しかしながら、溶存有機物の深層への輸送量の見積りは鉛直混合拡散の速さと正確な濃度差に依存しているために、正確な見積りは容易ではない。

したがって、炭素循環における生物活動に関係した炭素の Flux として、少し確かなのは、生物の基礎生産量と sediment trap により捕集された粒子状物質の平均的 Flux だけで、他の Flux に関しては、ほとんど確からしいものはないと言える。さらに、深層における溶存有機炭素の分解量においても 6 Gt/yr としているが、この値も、表層からの溶存有機炭素の深層への輸送量にバランスさせているだけで独立して計算されているのではない。IPCC 報告に見られるように、地球規模の炭素循環を考える空間的、時間的スケールでは常に炭素のリザーバー間のフラックスは定常状態にあると仮定して計算している。しかしながら、実際には、例え 1 年のスケールでも、生物過程が関与している炭素循環は定常状態にはないと考えられるけれども、現在の測定あるいは計算の精度では、バランスにおけるわずかな差を検出することは容易ではない。

図 3 の炭素循環図は Longhurst (1991) により、Moor と Bolin (1986) の炭素循環図を改良したものである。この図は図 1 の IPCC に採用されている図に比べ、より細かく、かつ誤差(±)がより詳細

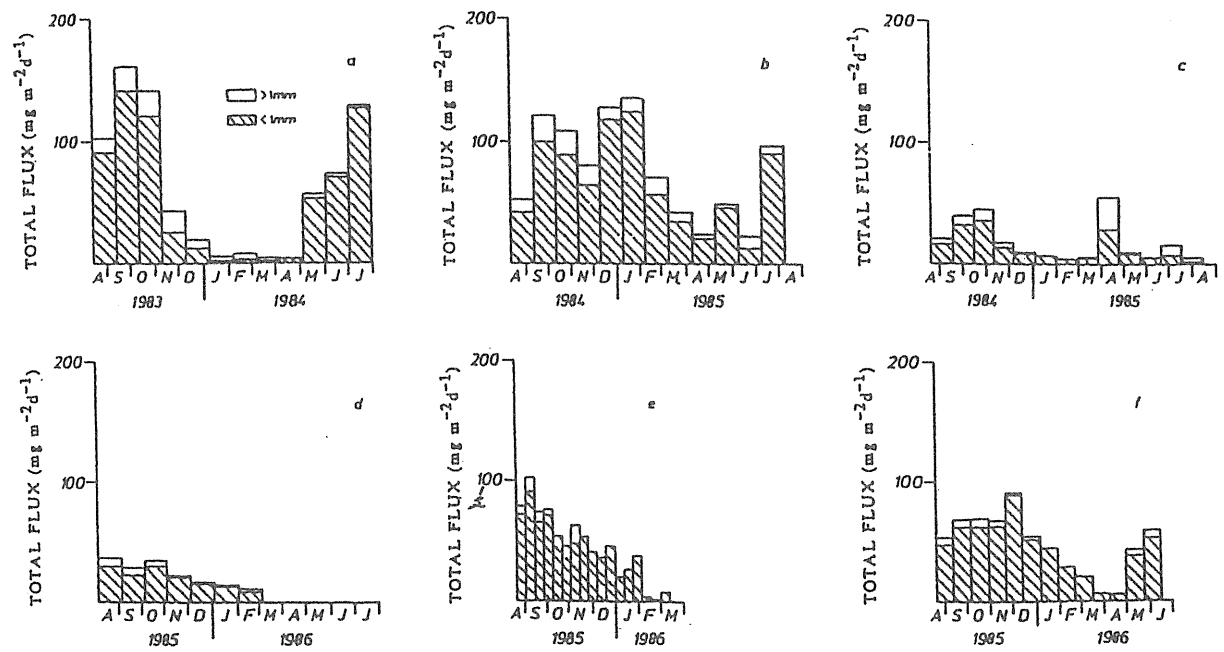


図 2 海域別の沈降粒子態有機炭素のフラックス

に検討されている。現在用いられている海洋の炭素循環図の中では、海洋の生物活動がどの程度炭素循環に影響を及ぼしているのかを理解するには適切な図である。図3においてはプランクトンの基礎生産量を $32.3 \pm 11.8 \text{ Gt/yr}$ 、表層での分解再生量を $25.7-27.3 \pm ? \text{ Gt/yr}$ としている。この差は最大で 18.8 Gt/yr 、最小で 5.0 Gt/yr となる。前にも述べたように、この数値を検証するのは簡単ではない。表層における有機物の Recycling の量を知るためには、正確な有機炭素の変動量を測定し、且つ水塊の移流混合拡散による有機炭素の変化量を差し引く必要がある。多くの研究は深層への有機物の輸送量を求めることに重点をおき、これと生物生産量との差から、表層における分解量を推定しているが、この図3では POC については $7-9 \text{ Gt/yr}$ となっているが、DOC については? となっている。Longhurst (1991) の論文では $25.3-27.3 \text{ Gt/yr}$ に関する計算あるいは推定の根拠は示されていない。

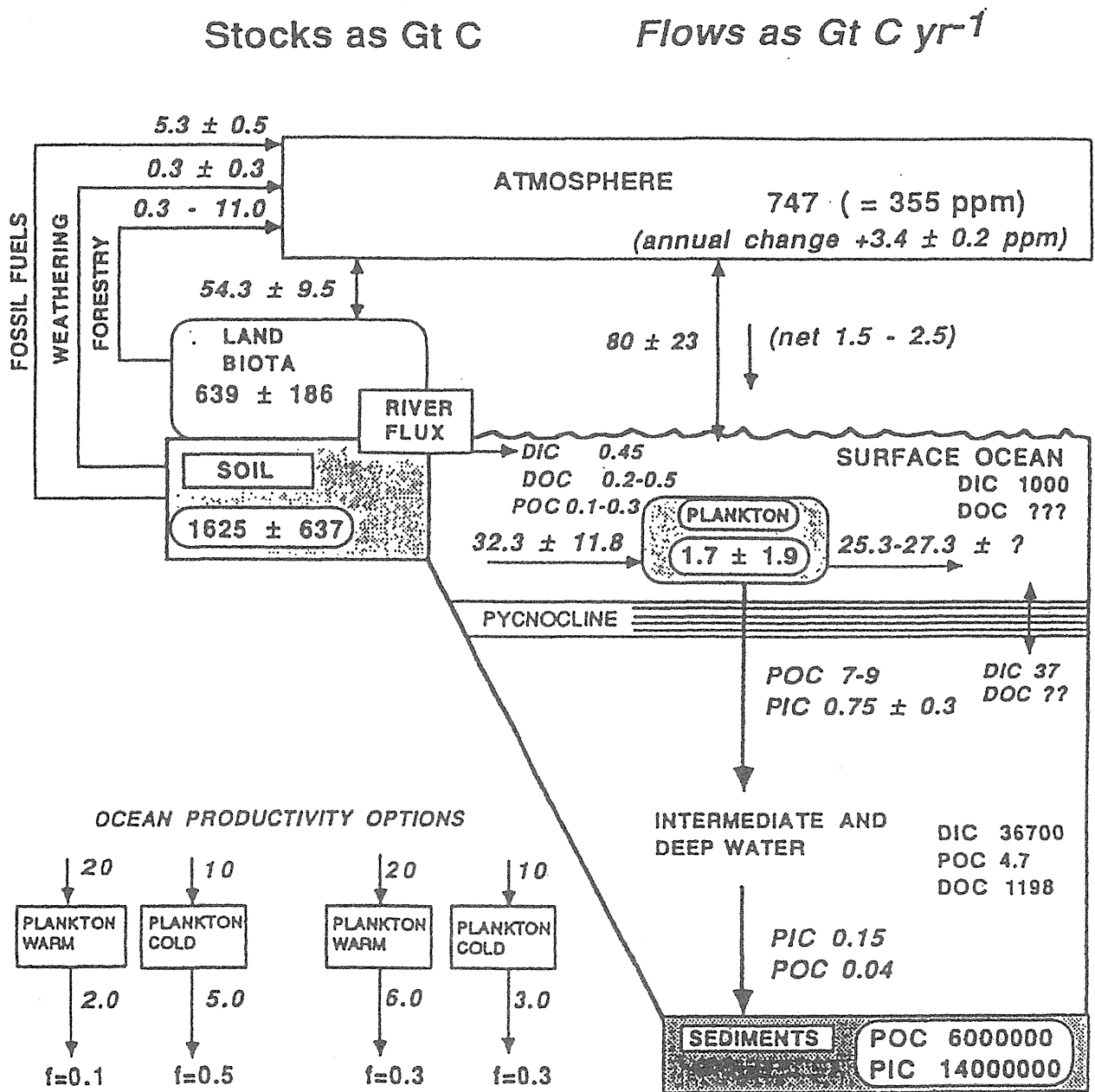


図3 生物過程を考慮した海洋の炭素収支

しかしながら数字の不確定さ、および変動の大きさから見る限り、人間活動により放出された二酸化炭素の“Missing Sink”である $0.5\text{--}2\text{ Gt/yr}$ を確定することは、現状では非常に困難であることが分かる。この問題は実は、循環の時間スケールにも関係している。海洋における生物活動は陸上に比べれば、表1の平均滞留時間に見られるように、0.06年と非常に短い。この短い時間スケールを年間の炭素収支においてどのように考慮するのかが、炭素循環における生物活動をどのくらい確からしく評価できるのかという問題に関係している。

図4にさまざまな時間および空間スケールと現象との関係について示した。すべての自然現象はさまざまな時空間スケールの重なりあいの結果であることを常に考慮する必要がある。前に述べたように、生物活動の関与している炭素収支では、時間スケールが時間のものから年のものまで様々である。どの時間スケールでバランスしているかを確定することは非常に重要な問題であるが、IPCC報告、あるいは他の様々な炭素循環に見られるように、そのような炭素循環図は提案されていない。一般的に、二酸化炭素問題に関係した炭素循環図を理解しようとするときは、時間スケールについてはそれほど注意を払っていない。どの時間スケールならば、炭素循環は定常状態あるいはバランスしていると扱えるのであろうか。ましてや、炭素循環における生物活動の役割を評価しようとするれば、炭素循環における非定常状態をどのように理解するかにかかっている。

IPCC報告あるいは多くの炭素循環図においてももう1つ重要な問題は炭酸カルシウムの生成量および溶解量がほとんど示されていない点である。図3のLonghurstの図においてはPICとして示しているのが、それに相当する。深層への輸送量は有機物に比べて10分の1である。ただし、海底に到達する量はPOCのおよそ4倍である。海底堆積物中の炭酸カルシウムと有機物の割合を見ると、およそ2:1である。IPCC報告ではこの部分の議論はなされているのか。報告を見る限り、この点については記載されていない。

炭素循環における生物活動の役割を定量的に評価するためには生物活動の部分をさらに細かくする必要がある。例えば、植物プランクトン、動物プランクトン、バクテリア、藻類、サンゴ等に分けて

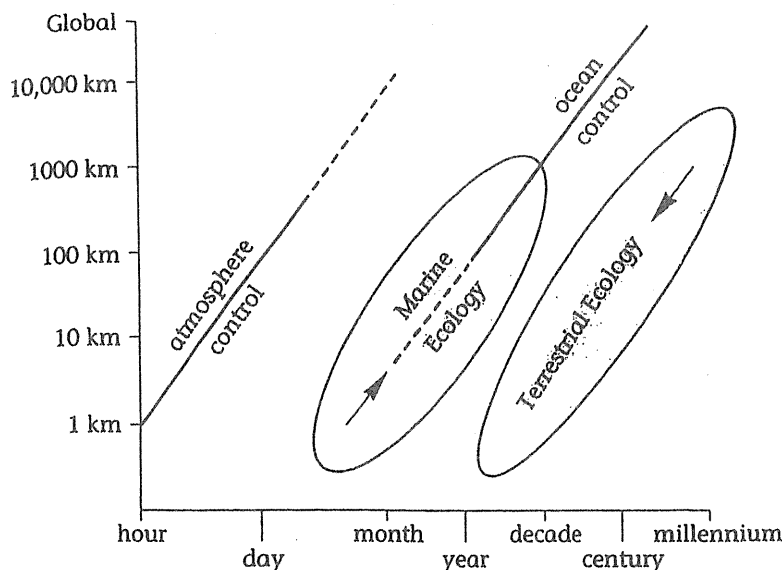


図4 地球規模の様々な時間・空間スケール

議論する必要がある。沿岸域における生物による炭素固定量を評価するためには“Biota”として1つに扱うのではなく、様々な生物種の相互関係を考慮して評価する必要がある。問題はこれらを含む炭素循環の時間スケールは非常に短いものであるにもかかわらず、炭素収支はどのような時間スケールでも成立しているという前提に基づいていることに関係している。

例えば、図1における炭素循環における海洋生物に関係したフラック

スという点で、表層の生物生産量に関連した深層への輸送量をモデルによる評価から $10 G_t$ /年としている (この量が New Production でもある)。これは平均的な意味での輸送量であり、実際の海洋表層から深層への有機物の輸送は季節変化および日変化の時間スケールをもち、年という時間スケールで平均化することは適当ではない。年変化でさえ図2に示されているように、毎年、同一の場所でさえ、同一の輸送量ではない。これらをもとに考えれば、生物活動を考慮した炭素収支をバランスしている、あるいはさせるという点で議論するには、あまりにも平均像と実際像の間には大きなギャップがある。

さらに生物活動により自然的リサイクルの炭素量の変化は非常に大きい (例えば海洋の基礎生産は年間で $30-40 G_t$) ために、人間活動により増加した二酸化炭素濃度がどの程度生物基礎生産 (これによる年間の平均の変化量は最小 $0.0 G_t$ から最大 $2 G_t$) を増加させているのかどうかを正確に検出することは非常に難しい。したがって、海洋の炭素収支にはほとんど影響を与えないと考えて取り扱われている。海洋の炭素循環において生物活動をどう取り扱うかは、炭素収支を理解する上で非常に重要な問題であり、その重要なポイントは生物の様々な短い時間スケールの扱いにある。

さらに海洋の炭素循環における問題点は有機物の動態に関する研究の不十分さと不確かさにある。海洋の有機物に関する研究は、後述するように、有機物の生産量、分解量、深層への移動量について、定量的にはほとんど確からしいデータは得られていない (図5)。現在までの炭素循環では生物生産において消費された無機炭素の量と分解された有機物量 (粒子状および溶存態) の間には年間を通してバランスしているという取り扱いである。実際に海水中の全炭酸濃度は毎年一定であるかということ、そうではない。しかし年間を通してどの程度の濃度変化の幅が自然の変動の範囲でほぼ一定であると決めるのは容易ではない。

大気中の人間活動により放出された二酸化炭素の「Missing Sink」

表1に地球上の主な炭素の貯蔵庫とフラックスを示してある。この表では現存量とフラックスが定常状態であると仮定して滞留時間の計算結果も示してある。大気と海洋との炭素の分配比率は $1 : 60$ であり、また陸上の生物の現存量である $560 G_t$ に対する純基礎生産量は $65 G_t$ 、海洋生物の現存量である $3 G_t$ に対する純基礎生産量は $45 G_t$ 、海洋における炭素の生物活動による交換の速さは、陸上のそれに比べて約 160 倍大きい。さらに、二酸化炭素の大気・海洋間の交換により海洋は $78 G_t$ の交換量がある。これらのことから、海洋は二酸化炭素の溶解度に依存する交換と、生物生産に依存する交換との

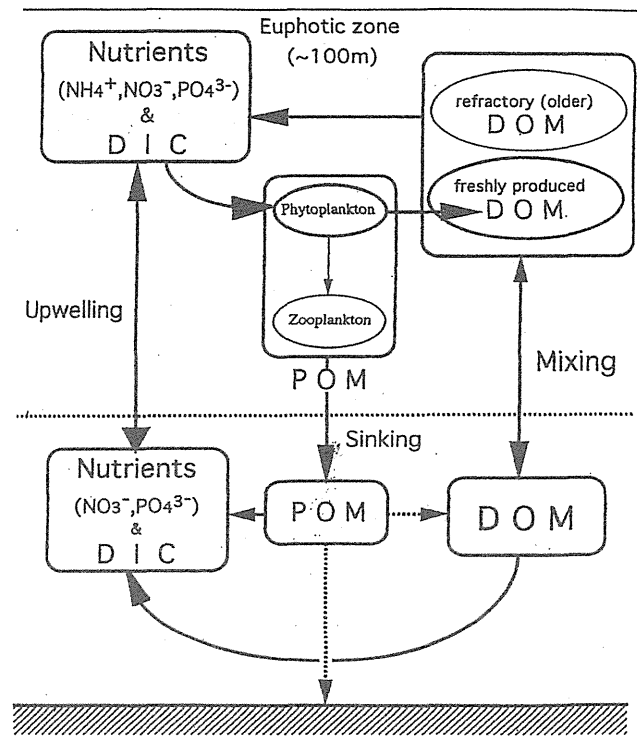


図5 海水中の有機物の循環

双方で、二酸化炭素濃度の調節を行っていると考えられる。

この自然のサイクルは人間が介入して乱しはじめる前までは、毎年固定される炭素量と生物の呼吸や分解等のプロセスによって二酸化炭素の形で放出される炭素量とはバランスがとれていたとしている。ただし、海洋の植物プランクトンと陸上の植物には、陸上植物は大気中から直接に二酸化炭素を吸収利用しているが、植物プランクトンは海水に溶解した二酸化炭素（重炭酸イオン、炭酸イオン、溶存二酸化炭素）を利用している。海洋生物および陸上生物は大気中の炭素とそれぞれ交換をしながら一つの独立した炭素循環システムを構築してきた。しかし近年、人間活動による化石燃料の燃焼あ

表1 地域の主な炭素プールとフラックス

プー ル	G T C
大気：CO ₂ 1850年以前 約 280 ppm	594
1985年 345 ppm	732
他の気体 CH ₄ 1.7ppm	4
CO 0.1ppm	
海洋：無機炭素（全炭酸）	37,400
溶存有機炭素	2,700
海洋生物	3
地上生物圏：陸上動植物	560
土壌および腐植（先史時代200～500）	1,500
地下水：	450
堆積物：無機炭素	約 60,000,000
有機炭素	約 12,000,000
化石燃料	約 5,500
フラックス（全量）	GTC _y ⁻¹
大気－海洋 CO ₂ 変換	78
大気－陸上生物，光合成／呼吸（純基礎生産）	65
海洋光合成	45
海底堆積	0.2
火山作用	約 0.9
化石燃料燃焼1985	5.5
滞留時間：r=現存量/フラックス	年
大気（産業革命以前）：全交換	4
海洋との交換のみ	8
生物圏との交換のみ	9
地上生態系：光合成/呼吸	11
海洋生態系：光合成/呼吸	0.07
海洋：大気との交換	490
堆積のみ	180,000
気圏＋生物圏＋海洋：堆積	210,000

Bolin et al (1979), Bolin (1981), Clark (1982), 杉村, 鈴木 (1988)

るいは熱帯林の減少により、大気中に二酸化炭素が放出され、大気中の二酸化炭素濃度が増加している。大気中の二酸化炭素濃度と Rotty ら (1984) の化石燃料から計算される積算放出量についての関係では 1958 年以降二酸化炭素の積算放出量の増加と共に大気中の二酸化炭素濃度も増加している。毎年の積算放出量を対流圏の空気の量で割算し、大気残留率を計算すると、放出された二酸化炭素のおよそ 60%が大気中に残存していることが分かる。残りの 40%の行方を突き止めることができていない。化石燃料の消費による二酸化炭素の放出量は、1960 年代以降、加速度的に増加し、1990 年には約 $5.5 G_t$ に達している。一方、ブラジル、アフリカ、東南アジアの熱帯林等の燃焼により、1980 年代以降、約 $1.6 G_t$ の二酸化炭素が放出されている。全体で $7.1 G_t$ の二酸化炭素が大気中に放出されたことになる。60%の残留率を用いて "Missing Sink" の量を計算すると $2.84 G_t$ になる。この $2.84 G_t$ の二酸化炭素が海洋に吸収されたのか、それとも陸上の生物圏で消費されているのかは現在の研究段階では決めることはできない。「 $2.84 G_t$ 」という量の行方を明らかにすることは地球の気候変動の問題と生態系生存のためにも重要である。この問題解明のためには、1) 地上生物系は大気二酸化炭素と平衡にあるのか、2) 大気と海洋の間ではどうか、それぞれどのくらいの変動が自然幅にあるのかを知る必要がある。しかし、表 1 に示されているように、自然の炭素の貯蔵庫の量および循環の量は "Missing" している二酸化炭素の量に比べて、はるかに大きい量である。

表 1 の自然の炭素循環の純フラックスの全量は $189 G_t$ であり、これに人為的起源のフラックスを加えると $196 G_t$ になる。このうち "Missing" している $2.84 G_t$ は約 1.4% である。1.4% という数字はまた、この行方不明の炭素を定量的に確定するための検出の精度の最大をも示している。これに自然の変動幅を加えると、おそらく、どこにどれくらい人為的に加えられた二酸化炭素が吸収されたかを検出するためには 1% 以下の変動量を検出することが必要になる。この数字は、大気・海水中の二酸化炭素の測定および海水中の全炭酸の測定においては、現在その水準に達している。しかし、フラックスの計算を行う際に炭素循環のバランスを理解するためには、無機炭素の測定だけでは不十分で、有機炭素の測定が欠かせない。

大気と海洋間では常時二酸化炭素の交換が行われている。1960 年代半ばより、大気・海洋間の二酸化炭素の分圧が測定され (Takahashi, 1961; Miyake et al., 1968) 太平洋および大西洋での分圧差の分布図を得ることができるようになった。その結果に、風速による交換係数の変化を加えて計算すると、太平洋では南北中緯度は吸収域、赤道域および南太平洋東部では放出域、太平洋では放出量 $2 G_t$ /年、吸収量 $1 G_t$ /年となり、全体としては放出域である。しかし、大西洋は全体として吸収域であるため、地球全体ではほぼバランスしているように見える。しかしながら、この交換量の計算に用いられた交換係数は異なる海域および異なる季節で異なることが予測される。さらに、そのため表 1 に示した大気・海洋の交換の年間交換量である $7.8 G_t$ の 1 - 3% に当たる吸収あるいは放出のバランスを決めるのは容易なことではない。

大気・海洋の二酸化炭素交換を決めているドライブ側は海洋表層水の二酸化炭素分圧の変動であり、これを支配しているものは、海洋内部の炭素循環である。海洋の炭素循環の特徴をまとめると、1) 無機炭素化合物 (重炭酸イオン、炭酸イオンあるいは*溶存二酸化炭素) は海洋の植物プランクトンの基礎生産のために利用され、有機物 (粒子態および溶存態有機炭素) が生産される。2) 生産された

有機炭素化合物のうち 80%以上は有光層(0-200 m)とよばれる表層で分解され、無機炭素化合物に戻る。10-20%の有機炭素のうち粒子態(数ミクロン以上のサイズ)の有機炭素は中深層に沈降し、そこで分解された無機炭素化合物に戻る。また、溶存態の有機炭素は海水の鉛直混合により中深層に運ばれ、分解し無機炭素化合物に戻る。3) 無機炭素化合物は炭酸カルシウムとして生物の殻(ココリス、有孔中等)を作る。生物が死滅すると、その遺骸は炭酸カルシウムとして、中深層に沈降し、その大部分は深層において溶解する。そのため、海洋においては無機の炭素化合物の濃度は表層で低く、中深層で高い。反対に有機炭素化合物濃度は表層で高く、中深層で低い分布をしている。

“行方不明の二酸化炭素”を海洋に吸収させようとする、1) 水温の低下に伴う二酸化炭素の溶解度の増大、2) 生物生産の増大による二酸化炭素の固定の増加が考えられる。2) については、海洋の年間の基礎生産量 45 G_tが、もし 4-5% (2-3 G_t) 増加し、この行方不明の大気中の二酸化炭素量が海洋で有機物として固定貯蔵され、しかもそれに相当する量の有機炭素が中深層に輸送されると、説明できる可能性がある。

地球規模の炭素循環についての問題点のさらなるまとめ。

化石燃料の消費及び熱帯林の破壊による二酸化炭素の大気への放出、その結果としての大気中の二酸化炭素濃度の増加と増加に伴う温暖化問題への警告、さらに放出量の約半分の行方不明の問題、さらにメタン、一酸化炭素の増加の問題が加わり、炭素循環を中心とする問題は複雑な様相を呈している。問題をさらに複雑にしている要因は、大気は陸地と海洋の二つの間で相互に交換およびバランスしている系で、そのため大気中の二酸化炭素の研究は海洋のみならず、陸地をも含めて総合的に検討されなければならないにも拘らず、それらがなされていないことに起因している。それどころか、海洋学者は海洋学者で、陸地の生態森林学者は生態森林学者で、それぞれ行方不明の二酸化炭素は海洋だ陸地だと主張している。図1の炭素循環図にはこれらの「Missing Sink」についてほとんど記述がなされていない。

炭素循環における生物活動を評価する時の問題点をまとめてみると

1) フラックスの計算をする時のユニットの扱い方に問題がある。

特に炭素循環における生物活動の寄与を評価しようとする時は前に述べたように、季節変化、日変動等があるために、年間という場合、年間を通じての平均値に基づいて議論するか、あるいは各季節毎のフラックスを計算して、それらの合計から年間のフラックスを計算するほうがより確かである。このことは空間的な場合にも当てはまる。地球全体での議論あるいは計算では、現在議論の対象となっている炭素のバランスについて確定できない。この計算において、少なくとも、高緯度、中緯度、低緯度の外洋と沿岸域の6つに分けて計算する必要がある。そこで、各海域での季節変化、少なくとも春から夏と秋から冬の2つについて対象にすると $2 \times 6 = 12$ のケースについて計算する必要がある。

2) 「Biota」の種類として外洋においては植物プランクトンだけでなく、動物プランクトン、バクテリア、さらに沿岸および大陸棚ではさらにサンゴ、底生生物、海草、海藻についても考慮する必要がある。この際、これらの生物群集相互の関係についても考慮する必要がある。外洋における生態系を考慮した炭素循環図を図5に示した。この図に示されているように、表層における炭素循環を規定している生物過程は、植物プランクトンによる生物生産(Organic production)、動物プランクトンによ

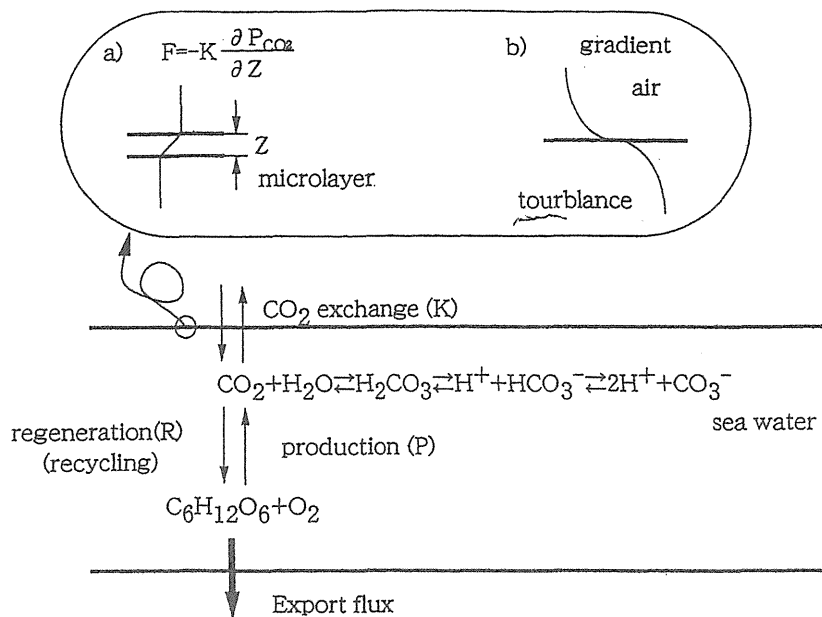


図6 二酸化炭素の大気・海洋間の交換の模式図

PSI-3 Seawater Sulfur Cycle

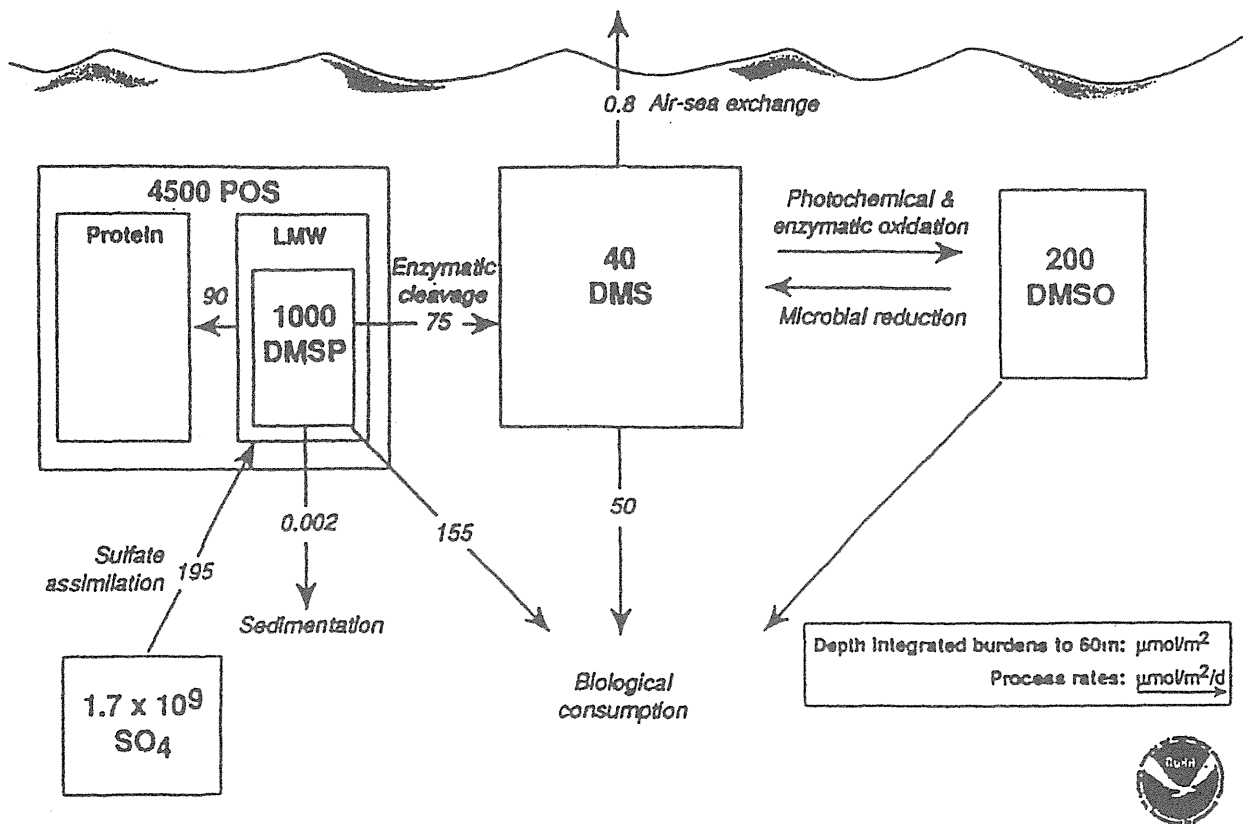


図7 海水中の揮発性イオウ化合物の循環とフラックス

る補食(Grazing)とバクテリアによる分解過程である。沿岸域および大陸棚は高生物生産海域であり、生産された有機物の行方を明確にすることも非常に重要である。特に、沿岸あるいは大陸棚から外洋にどのくらい有機物が輸送されるかということは重要な鍵である。

3) 二酸化炭素の大気・海洋間の交換量の計算と取り扱いに関しても大きな問題がある。図6に示したように、大気・海洋の交換の Potential に関しては、交換の速さと海洋内の循環の速さの競争により決まる。図の4でいえば、PとKの大きさによる。もし、Pが非常に卓越していれば、大気・海洋の交換量は見かけ上、非常に小さくなる。したがって、大気・海洋の交換量を計算するのに単に大気と海水の濃度差を用いると交換量の最大値として計算される。実際には海水中の二酸化炭素は光合成により消費されて有機物に変換されている。ただし、ここでも、たとえ有機物に変換されても有機物は分解されて再び二酸化炭素に戻るから、海水中の生物活動による炭素循環は balance していると考えられている。その限りでは、図6に示した、Fickの法則により交量を計算するのは間違いではない。しかしながら、前にも述べたように、表層海水中の有機炭素と無機炭素の移動量の間には必ずしも収支が成立していない。もし、大気・海洋の交換量を正確に計算しようとしたら、真の濃度勾配(図6のような)を観測し、それを用いるべきである。この良い例として、炭素ではないが、イオウの循環、特にDMS(ジメチルイオウ)の海洋から大気への放出に関してがある。図7にBatesら(1993)によるDMSの循環図を示した。この図にみられるように、海水中で生成されるDMSの98%以上は海水中で分解され、re-cycleしている。残りの数%が海水から大気中へ放出されている。もし、海水中のDMSの測定濃度を用いて、大気中へのDMSの交換量を計算すると、交換量は過大に評価している可能性がある。実際には海水中の濃度の数%だけが、大気・海洋の交換に関係している。この問題は二酸化炭素の大気・海洋間の交換に関して同様の問題を持っている。図6に示したように、海水中での二酸化炭素の再生速度と生産速度、および交換速度の3つの過程での競合の解明が重要である。

参考文献

- 1) Rotty, R.M., Marland, G. and Treat, N. (1984) : Pattern of fossil fuel CO₂ emissions, (DOE/OR/21400-2), USADOE.
- 2) Takahashi, T. (1961) : Carbondioxide in the atmosphere and in Atlantic Ocean water, J. Geophys. Res., 66, 479-494.
- 3) Miyake, Y. and Y. Sugimura (1968) : CO₂ in surface water and the atmosphere in the Pacific-Indian and the Antarctic Ocean areas, Rec. Oceanogr. Wks. Japan, 10, 23-28.
- 4) Keil, R.G. and D.L. Kirchman (1992) : Dissolved combined amino acid in marine waters as determined by a vapor-phase hydrolysis method, Marine Chemistry, 40, 235-243.
- 5) Williams, P.M. (1969) : The determination of dissolved organic carbon in sea water, a comparison of two methods, Limnol. Oceanogr., 14, 297-298.
- 6) Martin, J.H., Knauer G., Karl, D.M. and Broenkow (1987) : VERTEX, carbon cycling in the northeast Pacific, Deep-Sea Res., 34, 1293-1309.
- 7) Suzuki, Y. : Dynamic cycle of dissolved organic carbon and marine productivity, in Global Carbon Cycles of NATO-ASI, eds by M. Heimann (in press).