

# 外洋における生物を通じた炭素循環研究の現状

山室真澄<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

現在、地球規模で進んでいる温暖化は、主として化石燃料の使用による二酸化炭素濃度の増加が原因であると考えられています。産業革命以前の二酸化炭素の濃度と較べて現在の濃度は約25%大きく、さらに年0.5%ずつ増加しています。二酸化炭素を初めとする温室効果気体(メタン、フロンなど)に対して削減対策を全く立てなかった場合、地球全体の平均気温は10年間で0.3℃ずつ上昇すると予測されます。これは過去10,000年間に生じた気温変化の中で、最も大きい上昇速度です。

現在の温暖化現象は、このように急激に生じている点に問題があります。なぜなら、長い地質時代の間には現在より気温が高かった時期もあり、生物はそのような環境の変化に適応しながら存続してきたからです。ところが今回の温暖化はあまりにも急激で、生物の適応はおろか、人間の社会システムさえ追いつけない可能性がでてきました。例えば水質の安全管理やウイルス・バクテリアなどに対する防疫などは、各地域ごとにこれまでの気候に対応して確立されたものです。ところが最近の急激な温暖化で、それまでは生息していなかった高地までマラリアを伝染する蚊の分布が拡がってしまい、免疫がない住民へ被害が及ぶことが懸念されています。また、温暖化によって高緯度地域では農業生産が増加する可能性があります。低緯度地域、特に沿岸地域では、海水準の上昇による浅海漁場の減少が心配されています。魚類はアジアの人々にとって動物性タンパク質の40%を依存している大切な食糧源です。温暖化はこの地域の人々の栄養状態をさらに悪化させる可能性が極めて高いのです。

このように急激な温暖化の弊害が深刻であることから、排出の削減だけでなく、既に放出された大気中の二酸化炭素を吸収するための研究も不可欠となってきました。そこで現在地球上に成立している炭素循環の中から二酸化炭素の吸収源とその速度を調べ、その吸収作用を増強することを目指した研究が進められています。実

際、化石燃料の使用によって放出された二酸化炭素の推定値と二酸化炭素濃度の観測結果とを較べると、放出された二酸化炭素の42%は大気以外のどこかで吸収されていることとなります。この、大気中の二酸化炭素を吸収する場として、海洋が注目されているのです。

## 2. 海洋における炭素循環

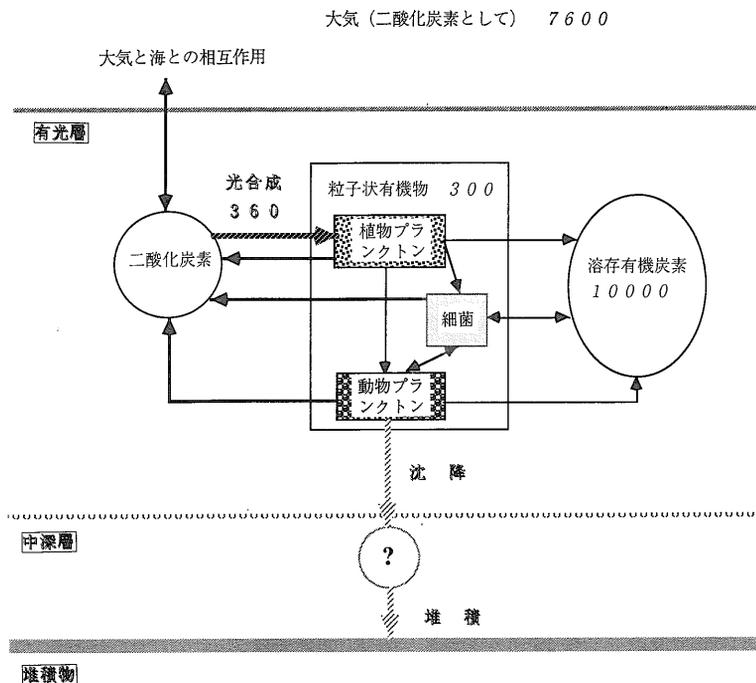
第1図に海洋における炭素循環の概念図を示しました。極く大まかに言えば、大気と、それと平衡にある海水中との二酸化炭素の分圧の差が0より小さければ、大気から海洋へ二酸化炭素が吸収されます。従って海水中の二酸化炭素が減少するようなメカニズムが活発化すれば、大気から海洋への二酸化炭素の吸収も促進されることとなります。海水中の二酸化炭素を削減する働きとして最も重要なのが光合成、すなわち植物が光エネルギーを用いて二酸化炭素から有機物を合成する働きです。第1図でこの光合成による有機物生産(以下、一次生産と呼びます)の速度が年間360億t Cとあるのは、年間1m<sup>2</sup>当たり100g Cという速度を仮定した場合の推定値です。一方、海洋には二酸化炭素を増やす機構も存在します。生物による呼吸作用です。このほかにも様々な過程があって、全体として二酸化炭素がどれくらい吸収されているのかについては、まだ不明の部分が多いのです。そこで以下では海洋における炭素循環について、どのようなことが調査されているのかをみていきます。

### 2.1 一次生産

第1図にあげた数字は海洋全体での値ですが、このうち粒子状有機物が高密度に存在し、それらを巡る物質循環が活発に行なわれているのが有光層といわれる部分です。植物が無機物から有機物を合成する際に光が必要であることから、まず植物プランクトンの分布が有光層に集中し、それを食べる動物プランクトンや動植物の遺骸を分解する細菌なども、この層に多く分布します。

まず海水中の二酸化炭素を減少させる第一のステップである、光合成による一次生産について見てみましょう。

1) 地質調査所 海洋地質部



第1図 海洋における生物を通じた炭素循環の概念。ゴシックの数字は海洋全体での推定速度 (億 t C/年), 斜字体の数字は海洋および大気全体での推定存在量 (億 t C), 矢印は炭素の流れの方向を示す。

外洋では一次生産は植物プランクトン中のクロロフィルという色素で行なわれます。このクロロフィル色素の量は人工衛星による画像解析で、地球規模で分布を測定できるようになりました。さらにクロロフィル色素の量は生産速度とも相関が高いので、これまでに実際に現場で測定された値を整理した結果を踏まえて、海洋における一次生産速度の平均像がかなりよく分かってきました。

第1表に海域ごとの有機物生産速度を示しました。外洋では単位面積当たりの速度は小さいものの、全体の面積が大きいことから、海洋での有機物生産の場として最

も重要であることが分かります。さらに外洋での一次生産速度は、その潜在能力の1/5~1/10に押さえられていることが分かりました。これは外洋では一次生産に必要な栄養物質(窒素, リン, 鉄など)が不足しているためと考えられています。各海域で不足している栄養物質が何かについては、まだ議論が分かれるところです。

### 2.2 溶存有機炭素

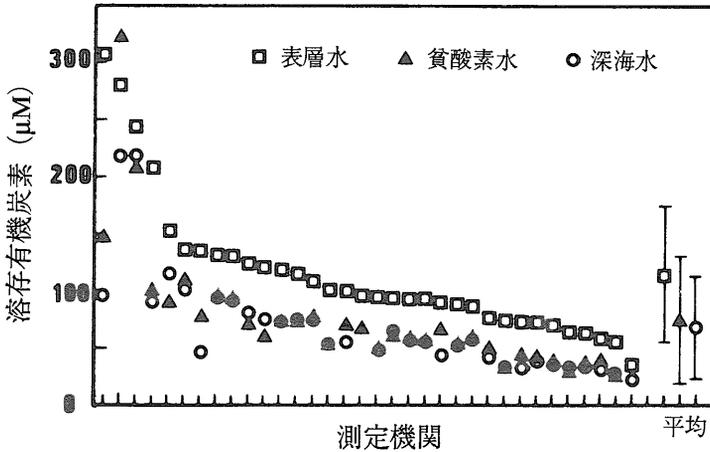
一次生産で二酸化炭素が有機物に固定されても、それだけでは安心できません。第1図には海水中の二酸化炭素を増加させる3本の矢印が描かれています。一度は植物プランクトンに同化された炭素も、その植物プランクトン自身の呼吸によって二酸化炭素に戻り、また動物プランクトンに食べられて、その動物プランクトンの呼吸に使われたりします。また細菌によって分解されても、やはり二酸化炭素が発生します。

これに対して、植物プランクトンに固定された炭素が二酸化炭素に戻りにくいような経路もあります。そのひとつは溶存有機炭素につながる経路、もうひとつは沈降して、いずれは堆積物に取り込まれる経路です。

まず溶存有機炭素につながる経路について見てみましょう。第1図には海洋中の溶存有機炭素が10,000億 t Cとあります。大気の量が7,600億 t Cですから、ずいぶん大きい値です。このように存在量が大いことから、その増減速度は炭素循環において極めて重要であると予測されますが、実は溶存有機炭素は測定方法がまだ確立

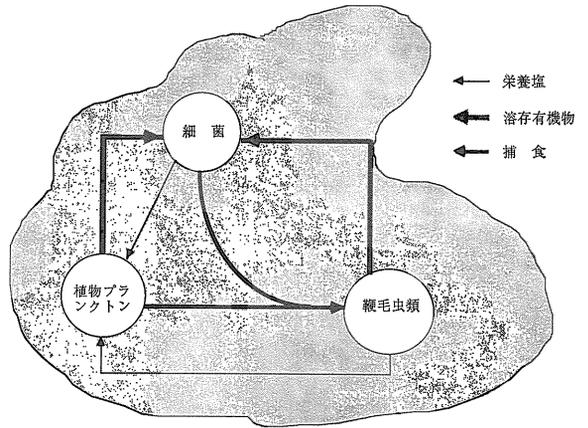
第1表 生物圏における一次生産者の生物量と純一次生産量 (ホイッター (1979) を改変)

	面積 (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	生物量		純一次生産量			
		範囲 (gCm <sup>-2</sup> )	平均 (gCm <sup>-2</sup> )	全量 (10 <sup>6</sup> tC)	範囲 (gCm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	平均 (gCm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	全量 (10 <sup>6</sup> tCyr <sup>-1</sup> )
外洋	332.0	0-2.3	1.4	450	0.90-180	57	19000
湧昇流海域	0.4	2.3-45	9.1	3.6	180-450	230	91
大陸棚	26.6	0.45-18	910	91	91-270	160	4400
藻場・サンゴ礁	0.6	18-180	910	550	230-1800	1100	730
入江	1.4	4.5-180	450	640	91-1800	680	950
海洋の合計	361		4.5	1800		70	25000
地球の合計	510		1600	840000		150	78000



第2図  
測定機関による3種類の海水の溶存有機物濃度の違い。測定機関は左から高い値を出した順に並べてある。右端は全体での平均値と標準偏差。Williams (1991) を改変。

されていないという問題があります。第1図の10,000億t Cというのは、仮に海水中での溶存有機炭素の濃度を  $700 \mu\text{gC l}^{-1}$  とした場合の総量なのです。第2図はこの問題を検討するために、世界中の研究所で同じサンプルの溶存有機炭素濃度を測定した結果です。測定機関の違いによって表層水、貧酸素水、深海水ともに、最大10倍前後の差があることが分かります。また3種類の海水のそれぞれで、測定機関によって値のバラつき方が異なります。このことは、総量を求めるときだけでなく、表層から深層へのフラックスを計算するにも問題が生じることを示しています。



第3図 アモルファスな懸濁物中での溶存有機物を含む物質循環のダイアグラム。Mann (1988) を改変。

また溶存有機炭素がどのくらいの速度で無機化して二酸化炭素になるのか、いまのところほとんど分かっていません。溶存有機炭素を有機物として利用できるのは細菌です。最近の研究では、溶存有機物を利用する細菌は植物プランクトンや非常に小さな動物プランクトンなどとともにアモルファスな懸濁物に付着して、その中で半閉鎖的なシステムを作って、溶存有機物を含む物質循環が成立していると考えられています。第3図はそのようなシステムを模式的に示したものです。溶存有機物を利用する細菌は、その有機物を無機化した栄養物質(第3図では「栄養塩」という言葉を使っています)を植物プランクトンに供給し、また自身の体は動物プランクトンである鞭毛虫類の餌となります。鞭毛虫類は植物プランクトンや細菌を捕食する形で有機物を取り入れ、無機化したものは植物プランクトンが、また無機化できなかった溶存有機物は細菌が利用します。植物プランクトンは細菌や鞭毛虫類から無機物である栄養物質(栄養塩)を受け取って、光合成を通じて有機物にします。このとき有機物の一部は溶存態の形で放出され、細菌に利用されます。しかし実際にこのような微細な系で循環している物質のフラックスを測定するためには、解決すべき問題が

まだまだ多いのが現状です。

### 2.3 沈降粒子

次に沈降していく経路についてみます。表層で一次生産によって固定された炭素がひとたび中深層まで沈降してしまうと、中深層水が再び表層まで上昇する数千年後までは、相当する炭素は大气に戻ることなく保存されることとなります。そこで表層で固定された量に対して、どれくらいの炭素が沈降していくのかを調べるのが重要になりますが、そのために用いられるのがセジメント・トラップです(巻頭写真)。最近様々な海域でセジメント・トラップによる沈降粒子量の測定が行なわれ、表層で固定された量の1割位が中深層まで達していると考えられるようになりました。ただし、このような知見が増えるにつれて、セジメント・トラップにも大きな問題があることが分かってきました。そのひとつは、セジメント・トラップに入る粒子の全てが鉛直方向に沈降して

きたわけではないことです。海洋には水平成分の流れもあり、それによって開口部付近に渦が生じ、本来沈降しない粒子まで捕捉されてしまうのです。また“遊泳者問題”もあります。動物プランクトンなどの遊泳能力のある生物が、生きている状態でトラップの中へ飛び込んでくるのです。これらの中には明らかに“遊泳者”として除けるものもありますが、中にはマリン・スノーをまわっているものもいて、話は複雑になります。その動物がトラップの中で死んだ後、沈降して捕捉されたマリン・スノーとの区別が難しいからです。現在も多くの海域でセジメント・トラップによる沈降粒子量の測定が進行中ですが、その結果の解釈には、このような基本的な問題も踏まえた慎重な検討が必要になります。

#### 2.4 埋積

中深層にまで沈降した粒子の一部は分解され、堆積物表層までたどりつくのは表層で固定された有機物の1%、さらに堆積物表層でも分解作用を受け、最終的に堆積物中に埋積される炭素は表層で固定された量の0.03%と見積られています。このうち堆積物表層での分解速度は、粒子の沈降速度や堆積物の堆積速度から見積られたものが多く、現場で直接分解速度を測定した例はまだ少数派です。

現場での測定方法として初期に行なわれていたのは、筒状に採取した堆積物を船上で一定間隔に切り分けて間隙水を分離し、その中の溶存物質の濃度の堆積物における鉛直変化を求める方法でした。溶存物質の移動が拡散によってのみ行なわれていると考えれば、濃度勾配と拡散係数を用いて、有機物の分解に伴って濃度が変化する物質、例えば酸素や無機態窒素・無機態リンなどの堆積物からの溶出速度を計算し、現場での分解速度を推測することができます。ただしこのようにして求められた値は、以下の理由で不確定性の高いものでした。まず、間隙水中の溶存成分の濃度は温度や圧力の変化によって変化することが分かりました。その為、深海から船上に移動する際に濃度勾配が変わってしまっていたのです。また海底での分解が最も盛んなのは有機物が降り積もる堆積物の極く表層、特に海底の水との境界に当たる境界層なのですが、このような極く表層での濃度勾配を求められるほど、堆積物を薄く切断することはできません。このような理由から最近では、堆積物があるその場所で濃度勾配を測定できる装置が開発されています。特に酸素については電極を用いて測定できることから、境界層における濃度勾配をmm単位で測定した報告が出されるようになりました。

濃度勾配を求める方法のほかに、一定面積の海底の上部を囲って閉鎖系にし、閉鎖系内部の水の濃度変化から

フラックスを求める方法があります。この方法ですと、電極で測定できない物質も含めて同時に複数成分のフラックスを求めることができますが、装置はかなり大がかりになります。例えば米国のウッズホール海洋研究所が開発した装置では、アクリル管を堆積物にゆっくりと差し込んで閉鎖系にし、一定時間毎に内部の水を採水し、濾過による前処理をして保存する仕組みになっています。そのため複雑な動作を制御するコンピューターやバッテリーなど、様々な装置が搭載されています。日本では浅海の堆積物からのフラックスを測定した例はありますが、深海で使えるような装置はまだ開発されていません。今後、日本の技術力がこの分野でも発揮されることが期待されています。

堆積物における有機物の分解について、100年の間は分解のプロセスは変わらないとして平均的な量を検討するだけならば、粒子の沈降速度や堆積物の堆積速度から見積った従来の方法でも充分でしょう。しかし分解の具体的なプロセスを解明するには、現場での直接測定が不可欠になります。特に最近では二酸化炭素の深海投棄案が出されていますが、それによって堆積物表層での炭素の挙動がどのような影響を受けるのか評価するうえでも、現在のプロセス、特に境界層でのプロセスの解明は不可欠です。海洋における物質循環の研究を積極的に進めている米国でも堆積物表層でのプロセスを重視しており、研究の目的を「生元素のサイクルを海洋表層から堆積物まで完結させること」としています。

### 3. おわりに

以上で外洋における炭素循環については、まだまだ不明の部分が多いことがお分かりいただけたと思います。このような現状では、たとえ植物プランクトンによる一次生産を活発にする方法が開発されても、それが直接二酸化炭素の減少に結び付く保証はありません。もしかしたら一時的に細菌が附着しやすい懸濁物(植物プランクトン自身が懸濁物です)が増えることで細菌も増加し、それまで分解されていなかった溶存有機物まで二酸化炭素に分解されてしまう可能性もあります。また沈降の項で指摘したように、短期的には中深層まで有機物を落としてしまえば二酸化炭素は減るかも知れませんが、最終的に海洋から除去されるためには、堆積物の深部まで組み入れられるまでの、長期的なプロセスが必要なのです。

このように考えると、海洋における炭素循環研究の在り方も含めて、環境問題に関わる科学技術に対する姿勢の変化が必要ではないかと思われまます。これまでの姿勢は、どちらかというと対症療法的でした。胃が痛いとい

える患者に容体を聞き、内視鏡などで胃の様子を観察する。かなり表面が荒れている。胃潰瘍ですなと言って胃腸薬を処方する。これが今までの対症療法だとしますと、最近の医学では、もっと“本来の姿”を意識した治療が重視されつつあります。先ほどの患者は、薬の服用で一時的には痛みがとれても、またすぐ痛みます。どうもストレスがたまっているらしい。ストレスと様々な症状との因果関係は完全には解明されていなくても、ストレスを取り除くように胃だけではなく精神面も含めて検討し、バランスのとれた生活を指導する。老人医療にしても、病気になってからのことより、病気にならないようにするにはどのような生活をすべきなのか、トータルに検討する時代を迎えています。地球環境という病みつづめる患者についてもこの機会に、“本来の姿”を意識した対策が対症療法と併せて検討されるべきではないでしょうか。外洋を利用した二酸化炭素の削減にしても、例えば一次生産だけを人工的に増加させるという方向ではなく、本来は一次生産も含めてどのように炭素が循環していたのかを解明することを重視する姿勢、そして様々な海洋の生態系を利用するにしても、全体のバランスを崩さない姿勢が大切になると思います。痛み（二酸化炭素）を取り除こうと与えた薬のおかげで、生まれた子

供が障害を負ったなんてことになっては目もあてられません。

地質調査所はもともと地球上の諸現象を総合的に検討する視点を持った研究機関です。また堆積物の解析を通じて、人間の影響がなかったころの地球環境を復元することができます。今後、対症療法ではない地球環境の治療法を検討するうえで、地質調査所の今後の役割は益々重要になるものと思います。

#### 文 献

Mann, K.H. (1988): Production and use of detritus in various freshwater, estuarine, and coastal marine ecosystems. *Limnol. Oceanogr.*, 33 (4 part 2), 910-930.

ホイッター, R.H. (1979): 生態学概説—生物群集と生態系—(第2版). 培風館, 東京, 363p.

Williams, P.M. (1991): Scientists and industry reps attend workshop on measuring DOC and DON in natural waters. *U.S. JGOF NEWS*, 3, 1-11.

YAMAMURO Masumi (1992): Present studies on the carbon cycle in open ocean.

<受付: 1992年1月29日>

## 地学と切手

### オーストリー エルツベルグ鉱山切手



エルツベルグ鉱山はオーストリー南西部のアルプス山中にある菱鉄鉱の鉱床である。スタイエマルクのアイゼンエルツに近いエルツベルグと称されている。鉱床の発達するエルツベルグ山は海拔1,532mの高さであり、基底は硬砂岩からなり、その上を厚い古生代の石灰岩が覆っている。この石灰岩が交代作用を受けて、大規模な鉱床を形成している。石灰岩→アンケライト [Ca Fe (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]→菱鉄鉱の鉱化作用が良く観察される。この鉱床は付近にあるひん岩と関係があり、その後火成作用に

よる熱水液（炭酸鉄を溶かした）が石灰岩に作用したものと考えられている。空洞の中にはサンゴ状のアラゴナイトを産することで知られる。（加藤武夫「新編鉱床地質学」による。）

切手は1.50 sは1971年発行の産業国有化25年記念、4 gは1946年発行の普通切手で、いずれも露天掘風景が画かれている。3.50 sは1984年発行でサンゴ状アラゴナイトが示されている。

(P. Q.)