

# マリンスノー発生装置の製作と 海洋炭素循環研究への適用

下田臨海実験センター 和田 茂樹

## はじめに

海洋は人間活動によって放出された二酸化炭素の約1/3を吸収する炭素シンクであることから、海洋の炭素循環の解明は近年注目が集まっている研究分野の一つである。海洋に吸収された二酸化炭素は、生物学的および非生物学的プロセスを介して複雑な動態を示すが、特に生物活動によって炭素が有機態に変換されると、有機炭素としてのその化学的形態は無機炭素と比較して多岐に渡ることとなる。その結果、海水中における有機炭素の動態は非常に複雑なものとなっている。

海水中の有機炭素の研究を実施する際に行われるアプローチの一つとして、有機炭素のサイズによる分画は最も広く用いられている手法の一つである。このような分画方法が採用されてきた経緯としては、粒子サイズが有機物の動態に影響を及ぼすことが挙げられる。特に、海水中において小さな粒子サイズの物質はコロイドとして懸濁するのに対し、大型化した粒子は沈降によって深層に輸送されるため、鉛直的な炭素の輸送において有機物のサイズは非常に重要なファクターとされている。

このような沈降粒子の研究において、マリンスノーの存在を無視することはできない。マリンスノーは、潜水艦の調査によって最初に見いだされたもので、深海をライトで照らした際に照らし出される粒子であり、雪のように深層へ沈降し続けている。これらのマリンスノー粒子は様々な有機炭素を含有し、表層から深層へ沈降することで海洋表層からの炭素の除去に寄与している。表層か

らの炭素の除去は、大気から海洋への炭素の吸収を促進することから、地球上の炭素循環に深く関与するとされている。さらに、海底に沈降したマリンスノーは、深海底に生息する生物によってエネルギー源として利用されることも知られており、海洋生態系の維持においても欠かすことのできない重要性を有している。

マリンスノーの存在は50年以上前から既に知られており、当初は生物の死骸や動物の糞などを主要な構成成分とすると考えられてきた。しかしその後、ゲル状の不定形粒子がマリンスノーの構成成分として大きな寄与を有することが指摘され始めている。ゲル状の粒子は様々な海域に普遍的に存在しているが、どのようなプロセスによって生成されるのか、長い間明らかとされていなかった。1990年代になって、有機物の組成解析やゲル状粒子の染色手法の開発（図1）などを通して、これ

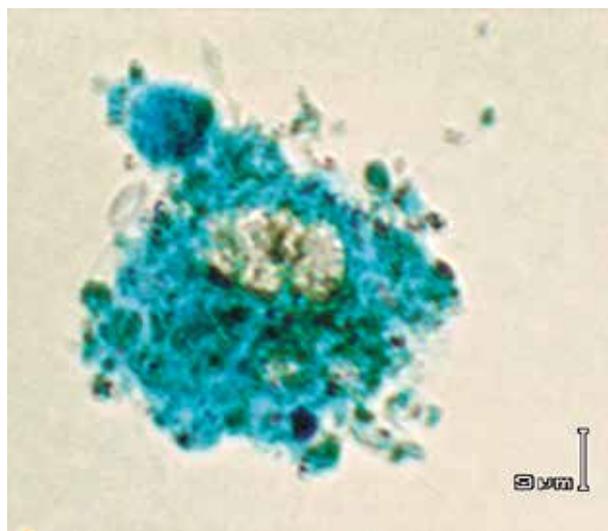


図1 染色によって可視化されたマリンスノー  
アルシアンブルー染色によって青く染まって見える。

らが海水中のコロイド態の有機物を起源とし、コロイド粒子同士が吸着・凝集して大型化したものであることが明らかとなってきた。

### コロイド態有機物からのマリンスノー形成メカニズムと本実験装置

海水中に水の流れが生じたとき、コロイド態有機物は流れに伴って動き、時に粒子同士で衝突する。衝突の際に、粒子同士が吸着する場合と離れる場合があるが、特に吸着する場合には粘着性有機物が糊のような役割を果たすことが多い。二つの粒子が一度の衝突で吸着する確率を $\alpha$  (%) とし、時間 $t$ における水中の粒子数密度を $C_t$ としたとき、Kiorboeら<sup>[1]</sup>によると、 $C_t$ は理論的に水の流れの力 (shear :  $G_m$ ) と粒子の体積濃度 ( $\Phi$ ) から以下の式で決定される。

$$C_t = C_0 \times \exp^{-(7.82\alpha \times \Phi \times G_m / \pi) \times t}$$

上記の式で用いられている $G_m$ という値はshearと呼ばれており、shearを定量的に生じさせることでマリンスノーの生成条件を制御する試みがなされている。いくつかの装置が提唱されているが、特に二重構造を有する円筒状の装置はしばしば用いられている装置であり、Couette Chamberとも呼ばれている<sup>[2]</sup>。本稿では便宜上、Couette Chamberをマリンスノー発生装置と呼ぶことにする。この装置を用いる際には、内側の円筒と外側の円筒の間に試料海水を満たし、外側の円筒のみを一定速度で回転させる。外側の円筒の内壁に近い海水は回転に引きずられて動くのに対し、内側の円筒の外壁に近い海水はほとんど動かない。このように、容器内で海水の動きが異なることによってshearが生じ、shearの大きさは容器の大きさと回転速度から、下記の式を用いて求めることが可能である。

$$G_m (s^{-1}) = 4\pi \times \omega \times r_2 \times r_1 \times (r_2^2 - r_1^2)^{-1}$$

$G_m$  : shear stress

$r_2$  and  $r_1$  : radii (cm) of the outer and inner cylinder, respectively

$\omega$  : angular velocity ( $s^{-1}$ )

これまでコロイド粒子の衝突の再現には、shear以外にもブラウン運動 (Chen et al. 1998) や気泡表面への有機物の吸着 (Mopper et al. 1998) などが用いられているが、その物理力を定量的に示すことができるのはshearのみに限られている。すなわち、マリンスノーの生成条件をコントロールする上で、本装置の存在は必須条件と言える。

### 工作部門におけるマリンスノー発生装置の製作

工作部門にて製作していただいた本装置は (図2)、主に金属によって作られており、グリースの塗布などはほとんどなされていない。これは本装置の運用上非常に重要な点であり、その理由としては有機物の動態を知る際に有機成分を含むグリースの使用は、最終的に海水中に有機物が混入することで結果に深刻な影響をもたらすためである。このような装置は市販されているわけでもなく、外注すると相当な経費がかかってしまう。研究基盤総合センターの工作部門のご協力で、低予算で今回の装置を作成していただいたことは非常にありがたいことである。



図2 製作したマリンスノー発生装置 (モーター部は後付)

### 装置の運用とマリンスノーの生成

あらかじめガラス繊維ろ紙でろ過して、大型の粒子を除去したろ過海水を装置に導入し、一定時

間回転させた。また対照実験として、ろ過海水を同じ時間そのまま静置した。それぞれの海水を再度ガラス繊維ろ紙でろ過を行い、元素分析計を用いて生成した粒子の有機炭素量の測定を行った結果、本装置で回転させた海水中で多量の有機物粒子が生じることが見いだされた(図3、4)。これは、ろ過海水に含まれるコロイド粒子に含まれる有機物が、装置内で生じたshearによってマリンスノーとして大型化した結果と考えられる。この他、本装置の内部からの有機物の混入の有無を検証するため、純水を同様に装置に導入して回転した結果、多少の有機物の混入はあったものの海水試料を導入した際の半分程度であり、装置内部からの有機物の混入の影響は小さいことも確認された(図4)。

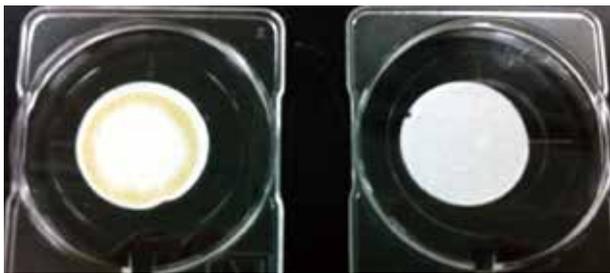


図3 ろ過によって捕集されたマリンスノー  
左の図は本装置で回転させたろ過海水を再度ろ過した際のろ紙。右の図は静置した海水を再度ろ過した際のろ紙。

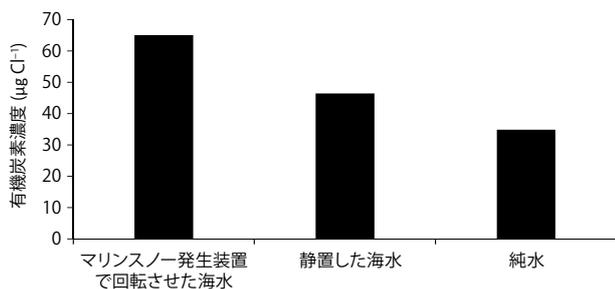


図4 生成した粒子の有機炭素量

## マリンスノー発生装置を利用した今後の研究の展開

マリンスノーの存在は古くから知られているにも関わらず、その生成プロセスの量的情報はほとんど無いのが現状である。特に我々が取り組もうと考えている、コロイド粒子からのマリンスノー生成プロセスは、定量的情報が最も不足している未解明な現象であり、その解明は炭素循環の概念に深く切り込む意義を持つ。今回作成いただいたマリンスノー発生装置を有効に利用し、海の物質循環の仕組みの解明につなげていきたいと考えている。

## 文献

- [1] A. Engel, *J. Plankt. Res.*, 22 (2000) 485
- [2] D. T. Drapeau, H. G. Dam, G. Grenier, *Limnol. Oceanogr.*, 39 (1994) 723