

# 海に降る雪 マリンスノー 二酸化炭素の運び屋とその追跡方法

(2009年10月17日 第102回地球情報館公開セミナーより)



海洋工学センター  
先端技術研究プログラム 基盤技術研究グループ 技術研究主幹

## 本多 牧生

ほんだ まきお。1961年、大阪府生まれ。北海道大学水産学部卒業後、同大学院水産化学研究科修士課程を修了し、1986年、海洋研究開発機構に入所。1992年より1994年まで米ウッズホール海洋研究所の駐在員兼在外研究員。2009年より現職。専門は化学海洋学。自動試料採集装置やセンサーを海中に設置し北西部北太平洋の生物活動による二酸化炭素吸収能力の観測研究に従事。博士(地球環境科学)。

私は海中を浮遊する粒子状物質の研究をしています。海の粒子には数十メートルのクジラから魚やプランクトンまで、さまざまなものが含まれますが、私の研究対象は直径1cmにも満たない海中の浮遊物「マリンスノー」とよばれるものです。近年、この小さな粒子が地球温暖化、とりわけ二酸化炭素の吸収に関して非常に大きな役割を果たしていることが分かってきました。世界中の海洋学者が、この小さな「二酸化炭素の運び屋」の役割に注目しています。今日はその研究について、お話ししたいと思います。

## 海に降る雪、マリンスノーの正体

潜水船やスキューバダイビングで海に潜ると、地上に降る雪のように上から降ってくる白いものに気づくはず。これはマリンスノーとよばれるもので、命名したのは日本の科学者です。1951年、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の有人潜水調査船「しんかい6500」ができる前、北海道大学が中心となって開発した「くろしお号」という潜水艇に乗船した研究者が名付けたのです。同大学の雪氷学者、中谷吉郎教授の研究にあやかるともいわれます。以来、マリンスノーという言葉は世界中で用いられるようになりました。

マリンスノーは、植物プランクトンや動物プランクトンなどの生物の死骸や排泄物、陸上からの土砂などが集まった、ちょうど五目ご飯でつくったおにぎりのような固まりです(図1)。



図1 マリンスノー  
マリンスノーの顕微鏡写真

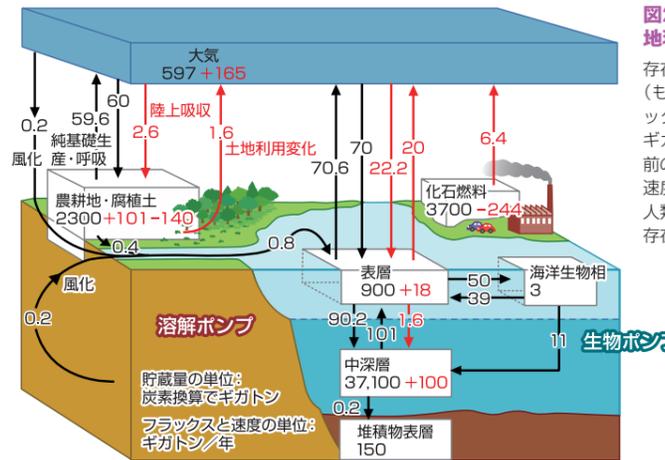
(Honjo, 1997, ウッズホール海洋研究所発行「OCEANUS」フォトギャラリーより引用)

その構成成分は海域によっても異なりますが、主成分は大きく4つからなります。生物起源である有機物、炭酸カルシウム、生物起源のケイ酸塩(オパール)、そして陸上由来の粘土鉱物です。主成分である生物の死骸や排泄物は、いずれも植物プランクトンが二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を使って生産した有機物(炭素化合物)や、それを食べた動物プランクトンの残骸です。そして、このマリンスノーは海洋生物の貴重なエサとなる一方で、地球温暖化の原因といわれる大気中のCO<sub>2</sub>の制御に大いにかかわっているのです。

## 地球温暖化で海洋の果たす役割

マリンスノーのお話をする前に、地球温暖化問題について整理しておきます。

地球の気温は、18世紀に起きた産業革命以降、急激に上昇しています。IPCC



(IPCC AR4, 2007. Sarmiento and Gruber, 2006の図をもとに作成)

(気候変動に関する政府間パネル)は、地球の気温は20世紀の100年間で平均0.7℃上昇し、2100年までに1.5~4℃上昇するかもしれないと発表しています。

気温が上がれば海水温も上昇します。これまでの研究によると、過去50年で表層から水深3,000mまでの海水温度は平均で約0.037℃上昇したと報告されています。数字としてはわずかですが、それだけの量の海水を0.037℃温めるのに必要な熱量は、気温をなんと35℃(!)も上げる熱量に相当します。つまり、海のおかげで気温の上昇は抑えられているのです。一方、水温の上昇は海水を膨張させ、海面上昇を引き起こしています。このように、地球温暖化に伴う極地の氷の減少、サンゴの白化、海面の上昇、異常気象の増加などさまざまな地球環境の変化と人類への影響が心配されているのです。

## CO<sub>2</sub>急増の解明が温暖化を解く鍵

地球温暖化の主な原因は大気中のCO<sub>2</sub>の増加だといわれています。大気中CO<sub>2</sub>濃度の、精度の高い観測がハワイ島で始まった1958年から現在までの変化を見ると、1年間に平均約1.5ppmという急激な速さで増加し、産業革命前に約280ppmだった大気中のCO<sub>2</sub>濃度は現在では380ppmを超えています。これを地球の気温上昇のグラフと重ねてみると非常によく一致します。

では、CO<sub>2</sub>が増えるとなぜ気温が上昇するのでしょうか。地球には常に太陽放射が降り注いでいます。これは大気を通してまず地表を温め、次に赤外線となって宇宙に戻ります。赤外線は、酸素や窒

## 図2 1990年代における地球上のCO<sub>2</sub>循環過程

存在量は炭素換算でギガトン(もしくは10億トン)。フラックスや速度は年間あたりのギガトン。黒字は産業革命以前の自然のCO<sub>2</sub>存在量と循環速度で赤字は産業革命以降の人類活動の影響を受けたCO<sub>2</sub>存在量の増減と循環速度。

素のように同じ原子が結合したものは素通りしますが、CO<sub>2</sub>やメタンなどの温室効果ガスには吸収されて温度を上昇させます。ただし、地球に温室効果ガスがまったくなかったら気温は-18℃まで下がるとい試算もあります。温室効果ガスは絶妙なバランスで大気を適温に保ってきたのです。

また、南極の氷に含まれる太古の大気の解析などから、地球は過去40万年間に10万年周期で4回の氷期を経験し、そのたびに気温が低下(南極で約10℃)し、それに同調してCO<sub>2</sub>濃度も低下(最寒期には約80ppm)したことが明らかとなりました。このようにCO<sub>2</sub>は人為的な原因以外でも増減するため「現在のCO<sub>2</sub>濃度の増加を気にする必要はない」という意見もあります。しかし、現在の大気中CO<sub>2</sub>濃度は、少なくとも過去数百万年の間は地球が経験したことのない高濃度で、その

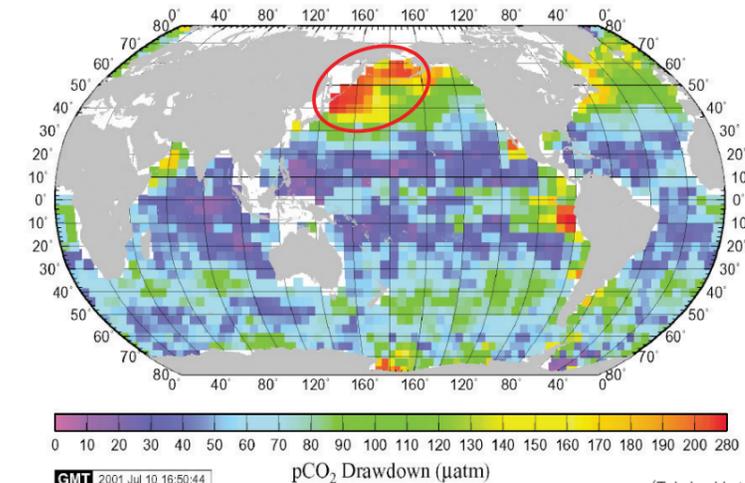


図3 「生物ポンプ」による海水中CO<sub>2</sub>濃度の低下量

北西部北太平洋(赤丸)では、「生物ポンプ」の活動が活発な海域であることが分かる。

(Takahashi et al., 2002)

のうち390億トンが分解されて大気に戻る  
ので、残りの110億トンがマリンスノーとして表層（約100m）から海洋内部に運ばれている計算です（図2）。しかし、海底に落ちる途中で食べられたり分解されたりして、水深1,000mまで到達できるマリンスノーは全海洋平均でわずか1%、海底に堆積するのはたった0.1%にすぎません。ただし、マリンスノーの分解速度は、その成分や季節、海域などに左右されます。分解されたマリンスノーは海水に溶け、再び表層へ浮上して植物プランクトンの栄養分となります。

### 海域や季節によっても異なる海CO<sub>2</sub>輸送システム

ここで気をつけなければいけないのは、大気と海洋のCO<sub>2</sub>交換量には海域差や季節変動、年変動があるということです。海域で見ると、北大西洋や南極はCO<sub>2</sub>を吸収する海域です。これらの高緯度海域は水温が低いのでCO<sub>2</sub>が溶けやすく、さらに冷たく重くなった海水が深海に沈み込んで深層水を形成するため「溶解ポンプ」が活発に働きます。一方、赤道付近はCO<sub>2</sub>の放出海域です。赤道域ではCO<sub>2</sub>をたっぷり含んだ冷たい中層（亜表層）の海水が湧昇し、表層で温められてCO<sub>2</sub>を放出します。しかし、この海域を年変動で見ると、エルニーニョの発生年には海水の湧昇が抑えられるため、CO<sub>2</sub>の放出量が低下します。



図4 セジメントトラップとマリンスノー  
セジメントトラップ(上)。電源、コンピュータ内蔵のケースは耐圧6,000m。下の写真は1999年5月～2000年5月まで時系列的に捕集されたマリンスノー。

季節変動で見ると、たとえば北西部北太平洋では、冬はたくさんのCO<sub>2</sub>をもつ亜表層から海水が湧昇するため、CO<sub>2</sub>の放出域になります。春になると植物プランクトンが増殖して「生物ポンプ」が活発に働くため、晩春から初秋にかけて今度はCO<sub>2</sub>の吸収域になります。そして秋になると表層の海水温が低下し亜表層の海水の湧昇が始まるため、再び翌春までCO<sub>2</sub>の放出域になるのです。この海域はCO<sub>2</sub>濃度の季節変動の解析から「生物ポンプ」が世界で最も活動している海域であることが分かっています（図3）。

このように、地域や季節による変動の詳細を解明するためには、地球規模で季節を通した海洋調査が必要となります。調査で取得したデータは、スーパーコンピュータのシミュレーションなどにも反映され、地球環境変動の再現や将来予測の研究に役立てられるのです。

### マリンスノーを計測する

「生物ポンプ」の季節変動データを得るために、私は北西部北太平洋でマリンスノーを自動的に集めるセジメントトラップ

という装置を使って観測研究を行っています（図4）。セジメントトラップは海洋のCO<sub>2</sub>研究の代表的な観測機器です。横から見ると円錐状の大きな漏斗のような形で、この上部からマリンスノーが入り、下の防腐剤入りの捕集カップに溜まります。カップは回転板に21本装着され、あらかじめセットされた時間に自動的に回転・交換して、各季節のマリンスノーを時系列で捕集することができます。これを深さごとに海底から立ち上げたワイヤーロープに取り付けて、ほぼ1年間設置して回収し、分析するのです。この装置で調査したマリンスノー中の有機炭素と、水中光測定システムで推定した植物プランクトンの光合成の量（基礎生産力）の季節変動を見ると、6月末から急増しています（図5）。また、各水深で計測した有機炭素量が時間差をもって増加していること、マリンスノーが水深約5,000mに到達するのに、約1カ月半かかることなどが分かり、「生物ポンプ」の働きを、まるごと同時に観測できた世界でも希少な観測結果となりました。

一方、海洋の表層付近に自動採水装置

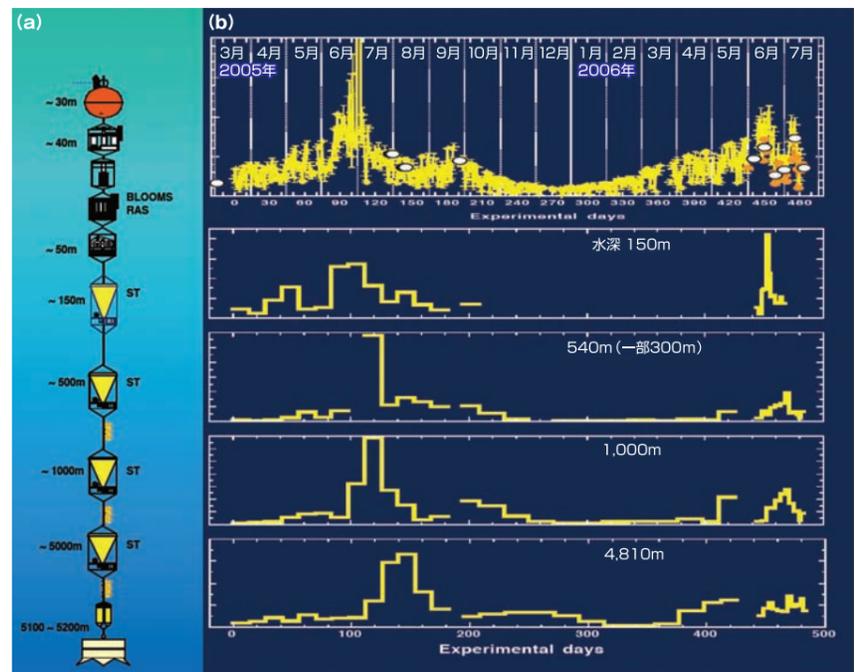


図5 植物プランクトンの基礎生産力の季節変動の観測結果  
(a) セジメントトラップ(ST)、水中光測定システム(BLOOMS)、自動採水装置(RAS)を搭載した係留系  
(b) 2005年3月～2006年7月における基礎生産力と、水深150m、540m(一部300m)、1,000m、4,810mにおけるマリンスノー(有機炭素)の季節変動。(Honda et al., 2009をもとに作成)  
2005年3月に観測を開始。最初は低かった基礎生産力が6月下旬～7月上旬にかけて急増し、10月頃に若干増加し冬に再度低下。翌年より徐々に増加し6月、7月に再び増加している。また、基礎生産力の増加に対応して、水深150m、540m、1,000m、4,810mの各地点で有機炭素量が時間差で増加する様子が観測された。このことから、海洋表層で固定されたCO<sub>2</sub>は、海流に左右されることなく海洋深層へ鉛直的に輸送されていることが明らかになった。

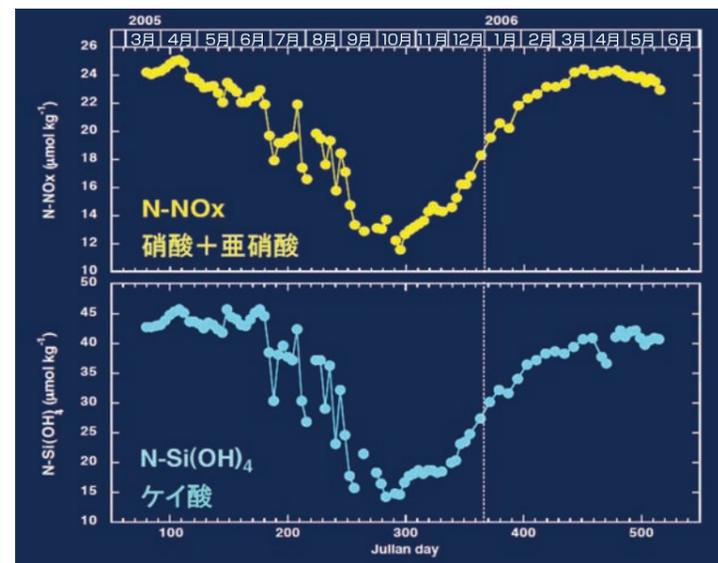


図6 栄養塩の季節変動  
2005年3月～2006年6月に自動採水装置で観測された海水中栄養塩(硝酸+亜硝酸、ケイ酸濃度)の季節変動を示す。この自動採水が成功するまで数年を要したが、外洋域における1年半の定期的な海水採集の世界初の観測となった。

を設置してマリンスノーのもととなる栄養塩濃度の季節変動も観測しました。自動採水が成功するまで数年かかりましたが、努力の甲斐あって、外洋域で1年半、4～8日ごとの海水採集に世界で初めて成功しました。観測の結果、栄養塩濃度は春から秋に減少し、秋から翌春に増加すると分かりました（図6）。春から秋は植物プランクトンが非常に増えて栄養塩が消費され、秋から翌春は海洋表層が冷やされて海が攪乱され、亜表層から表層に栄養塩が供給されたためと推定できます。この栄養塩濃度の変化は同時期(6月下旬から7月上旬)のマリンスノーの増加とほぼ同調しています。

### 同じ植物でも役割が異なる珪藻と円石藻

海洋のCO<sub>2</sub>循環を考える上で重要な植物プランクトンは珪藻と円石藻です（図7）。どちらも光合成でCO<sub>2</sub>を吸収します。また、珪藻はガラス質のケイ酸塩の殻(オパール)をつくります。珪藻は円石藻よりも大きく、分泌する粘液でプランクトンの死骸などを絡め取って大粒のマリンスノーとなり、比較的速い速度で沈んでいきます。一方、円石藻は炭酸カルシウムの殻をつくりますが、そのときにCO<sub>2</sub>もつくって海水中のCO<sub>2</sub>濃度を高めます。その結果、せっかく光合成をしてもCO<sub>2</sub>吸収効率を下げてしまいます。セジメントトラップによる北西西部太平洋域での観測結

果を見る限り、CO<sub>2</sub>の吸収においては円石藻より珪藻の方が効率的だと考えられます。しかし、多くの欧米の研究者は、オパールより高密度な炭酸カルシウムの殻をもつ円石藻の方が、深海へ有機炭素を運ぶ(おもり)錘(パラスト)としての働きが大きいと考えており、議論となっています。いずれにしても、現在、海洋の温暖化、成層化、酸性化が進行中で、それが栄養塩の供給や円石藻の繁殖に大きな変化をもたらす可能性も指摘されています。ですから、海洋の変化が植物プランクトンの種組成をどのように変化させ、海の「生物ポンプ」がどのように変わるのかを観測研究することが今後の課題といえるでしょう。

### マリンスノーを“採る”から“撮る”へ

今後の課題として、マリンスノーをセジメントトラップで捕集することなく、現場でその量や質、分布状況を観測する手法の導入も検討しています。たとえば、数年間、定期的かつ自動的に海中を上下して水温、塩分、酸素などを測定するアルゴフロート\*に、プランクトンやマリンスノーの量を推定できる濁度計を搭載して季節変動を観測します。北大西洋ではすでに同様の試みが行われていますので、これをぜひ北太平洋でも試してみたいのです。さらに、マリンスノーを写真撮影して画像を解析し、その鉛直分布や季節変動などを明らかにしようという新たな試みもあります。JAMSTECが開発した深海生

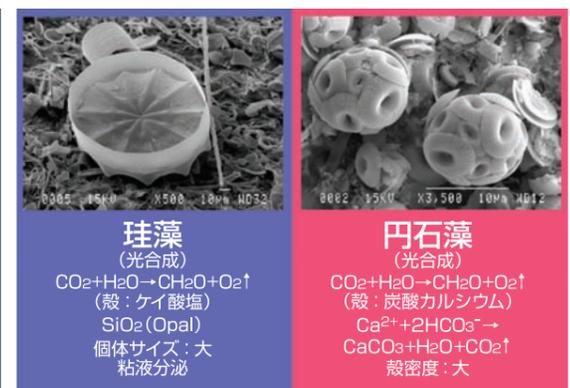


図7 海洋の炭素循環に大きくかわる珪藻と円石藻  
写真提供：ウッズホール海洋研究所 本庄正名名誉教授



図8 ビジュアルプランクトンレコーダー  
写真提供：JAMSTEC Lindsay博士

物追跡調査ロボットシステム「PICASSO(ピカソ)」やビジュアルプランクトンレコーダー「VPR」はクラゲなど中深層に生息する深海生物の観測機器ですが、使ってみたらマリンスノーの映像が圧倒的に多く撮れました（図8）。そこで、その映像データの解析を始めたのです。現在は粒子の数、形状、大きさが解析されていますが、改良を重ねてマリンスノーの微妙な色が解析できるようになれば、マリンスノーの種類まで判別できると考えています。1回の潜航で何十万枚もの画像データが撮れるので、新しい発見が得られるのではないかと期待しています。

このように、地球の気候システムには海洋が大きな働きをしており、そこにはほんの数ミリの小さなプランクトンたちの営みも反映されています。地球温暖化という壮大なスケールの難問も、極小の世界の研究を積み重ねることで明らかになっていくのです。

\*アルゴフロート…世界中の海の水温・塩分・酸素・栄養塩などの計測を自動的に行う国際科学プロジェクト「ARGO(アルゴ)計画」で使用されている観測ブイ。計画にはわが国も参加し、JAMSTECが観測を実施している。現在、世界中の海洋に3,000個のブイが投入されている。