



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大型の凝集粒子（マリンスノー）生成の実験的研究
Author(s)	梶原, 昌弘; KAJIHARA, Masahiro
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 49, 151-156
Issue Date	1987-03-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.49.151
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14164
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p151-156.pdf



大型の凝集粒子（マリンスノー）生成の実験的研究*

梶原昌弘

北海道大学水産学部北洋水産研究施設
(昭和61年11月25日受理)

A Note on Formation of Macroscopic Aggregates (Marine Snow) in the Laboratory

By Masahiro KAJIHARA

Research Institute of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University
(Received November 25, 1986)

Macroscopic aggregates (marine snow) were experimentally formed in samples of coastal seawater held under turbulent condition in an apparatus which applied thermal circulation. Since the formed aggregates were too fragile to be collected intact, they were sampled (100 ml) along with the surrounding seawater after stopping circulation and settling out aggregates into the lower layer of a recirculating tube of the apparatus. Concentrations of nutrients in seawater from the lower layer within the tube where aggregates formed as well as those in seawater from the upper or middle layer were measured.

Chemical characteristics of marine snow formed in the laboratory were compared with those formed in the sea as reported by Shanks *et al.* (1979) who used 5 ml *in situ* samples. Nutrient concentration, assuming that the settled aggregates in the laboratory involved a 5 ml of sample water was calculated. Nutrient enrichment of the laboratory formed marine snow (nutrient concentration in the lower 5 ml sample/nutrient concentration in the upper or the middle layer sample) was of the same order obtained by Shanks *et al.*

I. はじめに

海水中を浮遊する大型の懸濁粒子は、北海道大学水産学部の潜水探測機「くろしお号」によって初めて観察され、その水中での形態の類似からマリンスノー (marine snow) と名付けられた (Suzuki and Kato, 1953). しかし、大気中の雪が大部分結晶体であるのにたいし、マリンスノーは空隙率の高い (Kajihara, 1971) 非結晶の不定形であり、且つ構造的に非常に脆い。そのため、いわゆる採水器によってマリンスノーを採集することは殆んど不可能である。このような採集の困難さはマリンスノーの研究に対する大きな障壁であったが、スキューバ ダイビングや潜水船による現場からのマリンスノーの採集によって、マリンスノーの特性やその重要性が明らかになってきた。すなわちマリンスノーは動植物起源の物質を主とした集塊で (Silver *et al.*, 1978; Silver and Alldredge, 1981), 微生物の繁殖の場でもある (Alldredge and Youngbluth, 1985; Alldredge *et al.*, 1986). 従って周囲海水と比較してクロロフィル a や懸濁態有機物の

* 北海道大学水産学部北洋水産研究施設業績第 187 号
(Contribution No.187 from the Research Institute of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

濃度が高く (Trent *et al.*, 1978 ; Alldredge, 1979 ; Alldredge and Cox, 1982), 溶存栄養塩濃度も高い (Shanks and Trent, 1979). これらの事実は, その大きな沈降速度 (Kajihara, 1971 ; Shanks and Trent, 1980) と相まって, マリンスノーが海洋における物質除去, 物質循環に重要な役割をはたしていることを示している. またその組成として懸濁態有機物を豊富に含んでいることから, 魚貝類の餌料としても無視できない. しかし依然として残るマリンスノー採集の技術的な制約は, とりわけマリンスノーの海洋における分布や生成過程についての研究を遅らせている. このような研究へのアプローチとして, 潜水船からの観察や (Manheim *et al.*, 1970) 水中写真 (Honjo *et al.*, 1984), またいろいろな海洋条件のもとでの懸濁粒子の粒径分布の測定からマリンスノーの分布に検討が試みられている (Kajihara, 1986). しかし, より適格なアプローチは人工的にマリンスノーを生成することであろう.

マリンスノーが海洋で生成され, 存在するのは基本的には物理現象である. まずマリンスノーの生成には "素、となる個々の粒子が海水中で接触することが必要である. この接触機会は海水中の懸濁粒子の粒子数密度, 比重と粒径分布がもたらす沈降速度の差, 乱れによるランダム運動, 粒子の持つ電荷による吸引力に依存するであろう. そして生成されたマリンスノーの形態は個々の粒子を結び付けようとする力と, 粒子の生長を抑制しようとする力の平衡によって保たれると考えられる. 前者は電気化学的な力, バクテリアの関与, 動植物起源の粘性物質による粘着力であり, 後者は海水中の乱れの運動に伴う力である. このようにマリンスノーの生成には "素、となる粒子の特性とともに, 乱れが大きく関与していると考えられる.

これまで人工的にマリンスノーを生成しようとする試みは Kranck ら (Kranck and Milligan, 1980) によって行なわれている. しかし彼女らの装置は凝集粒子を乱れの中ではなく, むしろ個々の粒子の沈降差による接触から生成させようとしたものである. そこで著者は乱れの中での, 粒子の凝集を生じさせようとして実験的に試みた. まず第一段階として沿岸海水を用いて実験を行なったので報告する.

II. 実験装置

マリンスノーは熱循環によって海水を流動させ, 生成させた. 装置の模式図は Fig. 1 に示した. 内径 45 mm, 長さ 85 cm のガラス管の両端をシリコン栓で閉じ, この管 (外管) の内側に内径 25 mm, 長さ 80 cm のガラス管 (内管) を下部のシリコン栓から 2.5 mm 浮かせ, 外管との間に隙間を作って封入している. 内管の下部には, ガラス管に封じ込めた抵抗値 263 Ω のニクロム線のヒーター H が挿入されている. 上部の T は水温制御用サーミスター, また S は採水用のコック付きガラス管である. この装置に海水を満たすが, その容量は約 1.3 l である. 装置 2 組をインキュベーター (サンヨー, MIR-250 型) にセットして冷却し, ヒーターで加熱することによって熱循環を生じさせた. 温度平衡に達した時の水温は, 内管上層で 15.8°C, 外管下層で 12.5°C であった. 内管の海水の上昇速度は管の部位によって多少異なるが, 1.65~2.10 cm/sec であった. 従ってレイノルズ数からこの内管の海水流動は層流の条件となるが, しかし染料によって流線を観察してみると, 外管から内管へと海水が循環する際に下部の隙間で生じた渦は, 減衰しながらも層流に遷移することなく保持されて内管上部から外管へと循環していた.

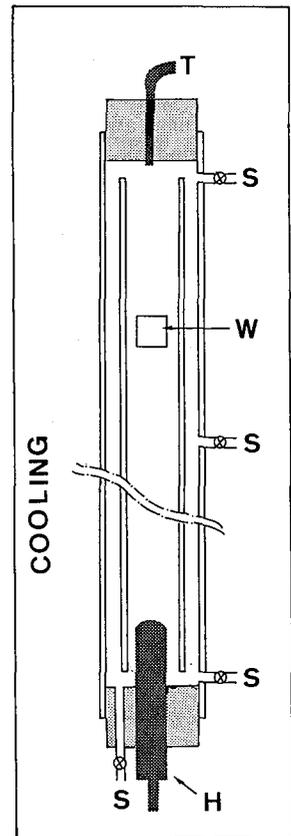


Fig. 1. An experimental setup for turbulence generation.

III. 測定方法及び測定結果

海水は函館近郊の立待岬では表層水をバケツで採水し、一方噴火湾では7 l バンドン採水器によって30 m 層から採水した。試水は1 l を直径25 mmのGF/Cワットマンフィルターで濾過し、元素分析計(日立026型)による懸濁態有機物の測定に供し、2~3 l は直径47 mmのウクレポアフィルターで濾過してセストンの乾燥重量測定に供した。ウクレポアフィルターの濾過海水は一旦別容器に保存し、一方フィルター上の残存塩分は4%ギ酸アンモニウム水溶液で脱塩して乾燥秤量した。なおフィルターの乾湿状態による重量測定の誤差補正は、ブランクフィルターを4%ギ酸アンモニウム水溶液で同様に処理し、補正值を算出して行なった。

さて、用意した2組の装置に、各々濾過海水と濾過処理をほどこしていない海水を満たした。熱循環は海水の急激な水温上昇を避けるため、水温が約5°Cに冷却されるのを待って加熱を開始して生じさせた。水温は加熱後徐々に上昇し、前述のように12.5~15.8°Cで外管の冷却とバランスする。この熱循環を継続していくと、海水中の懸濁粒子の特性によって視認可能な凝集粒子が形成された。この凝集粒子は天然のマリンスノー同様に脆いため、形態を壊さずに採集することが困難である。そこで、マリンスノーの間隙水の栄養塩濃度が周囲の海水と異なることに着目し、次の方法から凝集粒子の生成を検討した。

先ずインキュベーターから装置を取り出し、加熱を停止して静置する。そして1時間後に内管の上層水及至は中層水をビニールチューブを付けた50 ml シリンジによってチューブ末端まで吸引し、次にシリンジをはずしサイフォンによって100 ml の試水を採水した。下層水は下端の採水管から同じく100 ml を採水した。試水はGF/Cワットマンフィルターで濾過した後、濾液に含まれる亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、アンモニア態窒素をオートアナライザー (Technicon) によって分析した。1 μM 濃度における測定誤差は各々±1%, ±3%, ±10%である。測定結果はTable 1に示した。測定された亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の濃度は1 μM より少なく、従って測定誤差も大きく見積らなければならないが、未濾過海水を用いた

Table 1. Nutrient concentration (μM) in seawater

Exp. No.	Sampled layer	NO ₂		NO ₃		NH ₃		Sampling Location Period for Experiment
		A	B	A	B	A	B	
1	middle		0.23		0.6		10.5	Tachimachi (surface)
	lower		0.30		0.8		14.6	9 May~22 May, 1979
2	orig.		0.09		0.3		1.6	Funka Bay (surface)
	middle		0.16		0.8		5.1	6 Sept.,~26 Sept., 1979
	lower	0.54	0.22	5.3	0.9	21.4	5.4	
3	orig.		0.13		1.0		2.2	Funka Bay (30-m depth)
	upper	0.22	0.13	2.5	1.6		7.8	19 May~5 Jun. 1980
	lower	0.22	0.15	2.5	1.6		8.7	
4	orig.	0.15	0.14			2.0	6.6	Funka Bay (30-m depth)
	upper	0.04	0.07			15.5	3.9	24 July~29 July, 1980
	lower	0.08	0.24			13.4	5.7	
5	upper	0.03	0.06	0	0.34	4.4	2.7	Funka Bay (30-m depth)
	lower	0.03	0.05	0	0.35	4.1	2.7	30 Aug~12 Sept., 1980
6	orig.	0.23	0.25	0.55	0.11	1.42	1.26	Tachimachi (surface)
	upper	0.17	0.22	0.47	0.57	2.41	3.76	12 Nov.~22 Nov., 1980
	lower	0.19	0.23	0.94	0.55	2.27	4.31	

orig. : original seawater

upper (middle, lower) : sampled from upper (middle, lower) layer in the tube of apparatus

A : used filtrated seawater

B : used original seawater

実験では Exp. No. 1, 2, 4 で亜硝酸態窒素の濃度に有意な差が生じ、硝酸態窒素では Exp. No. 1, 2 に、またアンモニア態窒素では Exp. No. 1, 3, 4, 5 に有意差が認められた。一方、濾過海水を用いた場合には実験前後の濃度に有意な差は認められなかった。

使用した未濾過海水中の懸濁物質特性は Table 2 に示した。乾燥重量 (D. W.) は 0.3~0.4 mg/l であるが、Exp. No. 6 のみや、高い C/N 比を計算して

みると Exp. No. 3 のみ 14.6 と大きく、この海水では非生体粒子が卓越していることを示唆している。その他の海水の C/N 比は 2.8~4.6 で、懸濁粒子として生体粒子が多いことを示唆している。

IV. 考 察

測定結果は未濾過海水を用いた場合、沈降した凝集粒子に起因すると考えられる栄養塩濃度の変動を示した。

海水中の懸濁粒子の沈降速度はプランクトンについて Smayda (1970) が、また凝集粒子については Hawley (1982) が測定結果を総括している。いずれの場合も粒径の関数としてはストークスの沈降則に従わないが、同一粒径に関して比較してみると凝集粒子の沈降速度が全般に大きい。装置の冷却、加熱を停止しても、管の上下に存在した水温差と装置の熱容量のために暫時は熱循環が継続されるが、一応この時点で海水の流動が停止したものと考えてみる。Hawley が統計的に求めた式から、1時間の静止時間内に 85 cm のガラス管から沈澱除去される凝集粒子は 47 μm 以上のサイズとなる。一方、Smayda の図から同様の条件で沈澱除去されるプランクトンのサイズを推定してみると約 400 μm 以上となる。勿論、これらのサイズより小さな粒子も、循環が停止した時点での粒子の位置に応じて沈降していることはいうまでもない。

さて、Shanks ら (Shanks and Trent, 1979) はスキューバ ダイビングによってマリンスノーをガラス管内に捕捉し、このマリンスノーを含む 5 ml の海水中の栄養塩濃度を分析し、マリンスノーを含まない周囲海水の栄養塩濃度と比較している。すなわち、Shanks らの測定値は空隙率の大きい 5 ml の体積のマリンスノーを仮定して測定しているのと同じことになる。

いま C_1 をマリンスノーを含まない周囲の海水中の栄養塩濃度、 C_2 をマリンスノーの間隙水の栄養塩濃度、 V をマリンスノーを含む海水の試水量、 v を試水 V に含まれていたマリンスノーの全体積、 p をマリンスノーの空隙率とする。採水と濾過のためにマリンスノーが崩壊し、その間隙水が放出されて試水中の栄養塩濃度が C_3 となったとすると、栄養塩の収支から

$$(V-v)C_1 + pvC_2 = \{V + (p-1)v\}C_3 \quad (1)$$

となる。そこで、 $C_3 - C_1 \equiv \Delta C$ とおくと、マリンスノーの間隙水の栄養塩濃度 C_2 は

$$C_2 = \frac{\Delta C \{V - (p-1)v\} + pvC_1}{pv} \quad (2)$$

となる。Shanks らの現場で採集したマリンスノーを含む試水の分析結果と、この実験で得た人工的に生成したマリンスノーを含む試水の分析結果とを比較するため、(2)式において $V=100$ (ml)、 $v=5$ (ml)、 $p=1$ 、また C_3 を内管上層乃至は中層で採水された試水の栄養塩濃度をとることにする。Table 1 で有意差の認められた測定結果について C_2 を算出し、合わせて周囲海水中の栄養塩濃度との比、つまり濃縮率も Table 3 に示した。ちなみに Shanks らが測定した C_2/C_1 は、亜硝酸態窒素 (3 例) では 13~140 倍、硝酸態窒

Table 2. Concentrations of particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON) and dry weight (D. W.) in original seawater

Exp. No.	POC ($\mu\text{g/l}$)	PON ($\mu\text{g/l}$)	D. W. (mg/l)
2	258	55.6	0.30
3	425	29.2	0.33
4	177	42.4	0.39
5	126	45.0	0.38
6	127	40.2	0.87

Table 3. Calculated nutrient concentration C_2 (μM) and enrichment C_2/C_1

Exp. No.	NO_2		NO_3		NH_3	
	C_2	C_2/C_1	C_2	C_2/C_1	C_2	C_2/C_1
1	1.63	7.1	4.6	7.7	92.5	8.8
2	1.36	8.5	2.8	3.5	—	—
3	—	—	—	—	25.8	3.3
4	3.47	49.8	—	—	39.9	10.2
5	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	14.8	3.9

素 (1例) では 24 倍, アンモニア態窒素 (7例) では 85~860 倍であった。すなわち人工的に生成した凝集粒子, マリンスノーの栄養塩の濃縮率は現場で採集されたマリンスノーの濃縮率とほぼ近似した値であり, 類似した生成過程と特性を有するものと考えられた。

現在, 装置の一部に改良を加え, 天然海水の代りに懸濁粒子を含まない人工海水を用い, 添加する懸濁粒子もプランクトンを含め定量化して実験を行なっている。バクテリア関与についても合わせて検討を加えている。

文 献

- Allredge, A. L., 1979. The chemical composition of macroscopic aggregates in two neretic seas. *Limnol. Oceanogr.*, **24**, 855-866.
- Allredge, A. L. and J. L. Cox, 1982. Primary productivity and chemical composition of marine snow in surface water of the Southern California Bight. *J. Mar. Res.*, **40**, 517-527.
- Allredge, A. L. and M. J. Youngbluth, 1985. The significance of macroscopic aggregates (marine snow) as sites for heterotrophic bacterial production in the mesopelagic zone of the southtropical Atlantic. *Deep-Sea Res.*, **32**, 1445-1456.
- Allredge, A. L., J. J. Cole and D. A. Caron, 1986. Production of heterotrophic bacteria inhabiting macroscopic organic aggregates (marine snow) from surface waters. *Limnol. Oceanogr.*, **31**, 68-78.
- Hawley, N., 1982. Settling velocity distribution of natural aggregates. *J. Geophys. Res.*, **87**, 9489-9498.
- Honjo, S., K. W. Doherty, Y. C. Agrawal and V. L. Aspen, 1984. Direct optical assessment of large amorphous aggregates (marine snow) in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, **31**, 67-76.
- Kajihara, M., 1971. Settling velocity and porosity of large suspended particle. *J. Oceanog. Soc. Jpn.*, **27**, 158-162.
- Kajihara, M., 1986. Distribution of fragile particles in the sea determined by measurements by the Coulter Counter. *La mer*, **24**, 11-20.
- Kranck, K. and T. Milligan, 1980. Macroflocs: production of marine snow in the laboratory. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **3**, 19-24.
- Manheim, F. T., R. H. Meade, and G. C. Bond, 1970. Suspended matter in surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Code to the Florida Keys. *Science*, **167**, 371-376.
- Shanks, A. L. and J. D. Trent, 1979. Marine snow: microscale nutrient patches. *Limnol. Oceanogr.*, **24**, 850-854.
- Shanks, A. L. and J. D. Trent, 1980. Marine snow: sinking rates and potential roles in vertical flux. *Deep-Sea Res.*, **27A**, 137-143.
- Silver, M. W., A. L. Shanks and J. D. Trent, 1978. Marine snow: microplankton habitat and source of small-scale patchiness in pelagic populations. *Science*, **201**, 371-373.
- Silver, M. W. and A. L. Allredge, 1981. Bathypelagic marine snow: deep-sea algal and detrital community. *J. Mar. Res.*, **39**, 501-530.
- Smayda, T. J. 1970. The suspension and sinking of phytoplankton in the sea. p. 353-414, In: Oceanography and Marine Biology, An Annual Review, Vol. 8.

- Suzuki, S. and K. Kato, 1953. Studies on suspended materials marine snow in the sea : Part 1. source of marine snow. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, 4, 131-137.
- Trent, J. D., A. L. Shanks, and M. W. Silver, 1978. In situ and laboratory measurements on macroscopic aggregates in Monterey Bay, California. *Limnol. Oceanogr.*, 23, 626-635.