

海水中におけるサブミクロン粒子状物質の動態

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 篠村, 理子, 鈴木, 款, Casareto, Beatriz E. メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000361

海水中におけるサブミクロン粒子状物質の動態

篠村理子¹・ベアトリス カサレト²・鈴木 款¹

The behavior of sub-micrometre particles in sea water

Yoshiko SHINOMURA¹, Beatriz E. CASARETO² and Yoshimi SUZUKI¹

Abstract Sub-micrometre particles (SMP) are one of the important forms of organic matter pools in sea water, because these particles are present in sea water as transit states between dissolved and large particles of organic matter. It is considered that large particles play an important role in the carbon cycle incorporated to the biological pump, but little is known about SMP. Recently, it has been reported that SMP are present very abundant in sea water. In this study, the vertical and temporal distributions of SMP with the size range from 0.6 to 200 μm from warm core ring (the western North Pacific ocean) were measured using a Coulter Counter Multisizer II. The total volume of SMP showed maximum value of $9.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3/\text{ml}$. These results are compared with planktonic and non-living compositions. The total volume of SMP increased during night as non-living particles. The results suggest that SMP is correlated with biological processes, especially microbial food-web, but the whole vertical distribution of SMP might be determined primarily by physical structures that is the depth of the pycnocline in the ocean.

Key words: sub-micrometre particles, biological pump, non-living particles

緒言

海洋における粒子は、操作上 0.45 μm の粒径で溶存態と粒子に分けられている。一般に、海水中の有機物を得るには、高温で燃焼し有機物を除去した GF/F (Whatman 製) 等のガラス繊維ろ紙を用いて海水をろ過し、ろ液を溶存部分、ろ紙上に捕集されたものを粒子物質として、それぞれ測定を行っている。このようにして得られた結果から、海水中に存在する有機物は、存在量が非常に微量であり、海洋全体での有機炭素量は粒子よりも溶存態の部分にその多くが存在していることが解っている (LIBES *et al.*, 1992)。しかし、実際の GF/F ろ紙の孔径は 0.7 μm であり、ガラス繊維を重ねたろ紙であるため、必

ずしも正確な粒径に分けられているものではない (鈴木, 1994)。近年、溶存態の有機物の中でも、コロイドと呼ばれる分子量 $10^3 \sim 10^8$ の粒子部分に非常に近い溶存有機物が注目されている。このコロイド部分にある有機炭素量は、溶存態の半分を占めているという試算がなされている (LIBES *et al.*, 1992)。しかし、それらの量や構成物質を調査するのは容易ではない。なぜならこれらは通常のろ過では分画することは不可能であるため、cross-flow ultrafiltration という特殊なろ過法を用いて分画する試みが行われている (Guo *et al.*, 1997)。しかし、前述したように溶存態有機物質は非常に微量であるため、正確なコロイド状有機炭素量を得るには、試料を大量に必要とし、また汚染も重要な問題である。現在こ

¹ 静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷 836.

² (株)水圏科学コンサルタント, 145-0064 東京都大田区上池台 1-14-1 明伸ビル 1.

¹ Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka 422-8529, Japan.

² Laboratory of Aquatic Science Consultant, Meishin-Biru, 1-14-1 Kamiikedai, Otaku, Tokyo 145-0064, Japan.

E-mail: r5744004@ipc.shizuoka.ac.jp (Y.S.), casaretobe@aol.com. (B.C.), seysuzu@ipc.shizuoka.ac.jp (Y.S.)

れらを解決する方法が検討されている (BUESSELER *et al.*, 1995). また, ろ過という手段を用いることで, 実際の海水中における弱い結合形態を壊したり, あるいは結合し粒径を大きくさせる可能性もあり, これらの真の粒径や化学組成, 存在量を特定するには, 依然様々な問題が残されている.

粒子状有機物は粒径 $10\ \mu\text{m}$ を越えると沈降粒子と呼ばれ, 海水中から海底へ沈降するのに十分な大きさであると定義される (角皆, 1983). これらは, 表層から有機物を深層へ運ぶ形態として, 海洋の炭素循環において非常に重要な存在である. だが海洋全体の有機炭素量としてはこれらの占める割合は小さい. もし海水中により多く存在していると考えられているコロイド状物質が, 粒子態にまで大きくなったり, あるいは逆により小さな真の溶存物質へ移行したりするような粒径の変化が活発に起こり得るならば, コロイド状物質の動態は, 表層から深層への輸送という点で, 海洋の炭素循環にこれまで考えられていた以上に大きく影響を与える可能性がある. そのため, コロイドと粒子状物質間の関係はどのようなものであるのか, すなわち粒径の変化がどのように起こるのか, そして, その変化を調節しているものは何かを知ることが必要である.

本研究では, 非常に小さなサブミクロン粒子というものの動態を探ることを目的としている. サブミクロン粒子とは通常粒径数 μm 以下の粒子のことを示し, これらはちょうどコロイド状物質と隣接する粒径の粒子である. これらの粒子の存在量, および粒径の分布, 特にサブミクロンより大きな沈降粒子との相互関係を調べる事は, 溶存-粒子間の関係を論じる上でも必要不可欠である.

海水中のサブミクロン粒子の研究は近年, KOIKE *et al.* (1990) などによって行われ, その実態について議論されている. 本研究は, 実際の海洋におけるサブミクロンから数百 μm の沈降粒子までの粒径分布を, 異なる海域, 深さ, 時間を通じて調査し, サブミクロン粒子がどのような挙動をしているのか, またこれらの分布を調節しているものは何かを考察する.

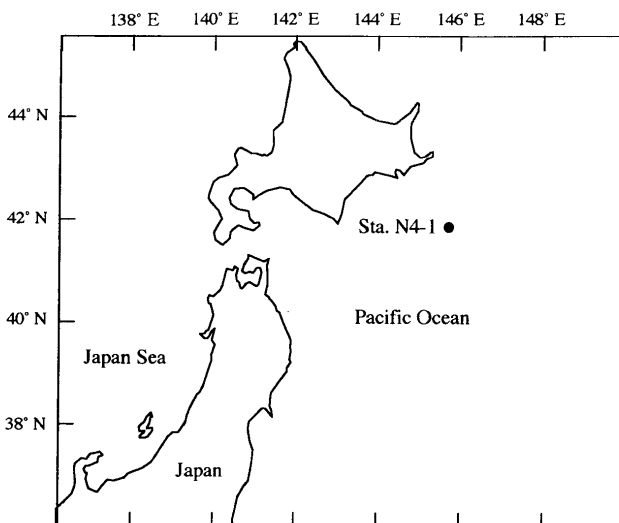


図1 太平洋北西部の暖水塊における観測地点.
Fig. 1 Study area in warm core ring (the western North Pacific ocean).

採水地点

観測は1997年10月24日から11月11日に東京大学海洋研究所所属「白鳳丸」KH97-4次航海にて行った. 観測点を図1に, 試料採取の時間と深さおよび測定値を表1, 2に記す. KH97-4次航海は三陸沖に存在する暖水塊とその周辺域における海洋構造と生物生産について調査を行うことを目的としたものである.

この暖水塊は1993年2月に黒潮統流から常磐沖で分離し形成されたものである. 暖水塊は時々周辺の海水の流入によって変質を受けながらも半閉鎖的な性質を保っている. またこの暖水塊は1週間に1回転の程度で時計回りに循環する. しかし本調査期間中は, 親潮水や, 暖水を巻き込み変化しつつあり, 形ははじめ南東-北東方向に約200km, 南西-北東方向に約160mの楕円形をしていたが, 10月27日には細長くなり, 11月1日頃には長軸が南北方向に変化した. この暖水塊の動きに合わせて, 常に暖水塊中心を捉えるために観測点の位置は随時移動した. この海域は, 一般に表層で栄養塩が豊富で生物生産の高い親潮の影響を受けた親潮海域と, これよりも生物生産の低い黒潮から分離した暖水塊が共存している場所である (鈴木, 1998). 一般に北半球のこのような時計回りの暖水渦は, 栄養塩の少ない表層水を循環の中心に引き込むので中心は低生産である (LALLI *et al.*, 1996). この暖水塊では水温躍層が50m付近まで形成され, 1997年11月には北緯41度50分付近に暖水塊の中心が見られた. 図2に暖水塊における水温の南北断面図 (東経145度, 北緯40度から45度) を示す.

本航海では, 暖水塊のほぼ中心部に位置する北緯41度50分, 東経145度6~42分の観測点N4-1にて観測を行った. 昼から夜, そして翌日のほぼ同時刻における粒子の鉛直分布を比較するため, 採水は1997年10月28日13時, 18時から29日の3時, 17時の計4回行った. 図3に暖水塊Sta. N4-1における4回の採水時の温度, 塩分の鉛直分布を示す. 図3を見ると, 各採水時間における温度, 塩分の鉛直分布は, 28日の13時, 18時, 29日3時までの間では大きく異ならずほぼ同じである. 29日の17時の分布は, 表層で温度がやや高くなっており, おそらく前回よりも暖水塊の中心部分により近い場所であると考えられる. また深さ30~50mのところでは低塩分, 低温度の海水の貫入が顕著に見られた. しかし連続

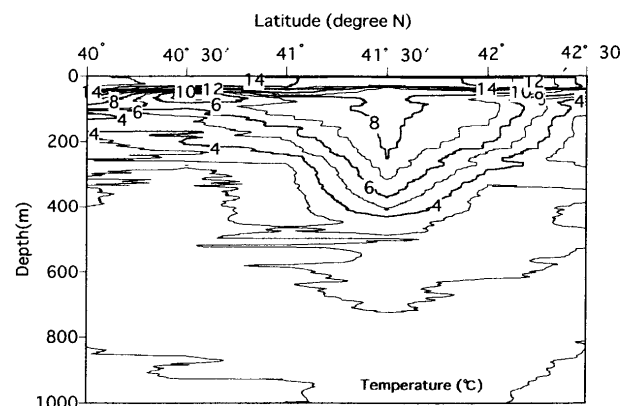


図2 暖水塊における水温の断面図 (東経145度線上, 北緯40度から45度間).
Fig. 2 Distribution of temperature in warm core ring along the line of 145°E from 40°N to 45°N.

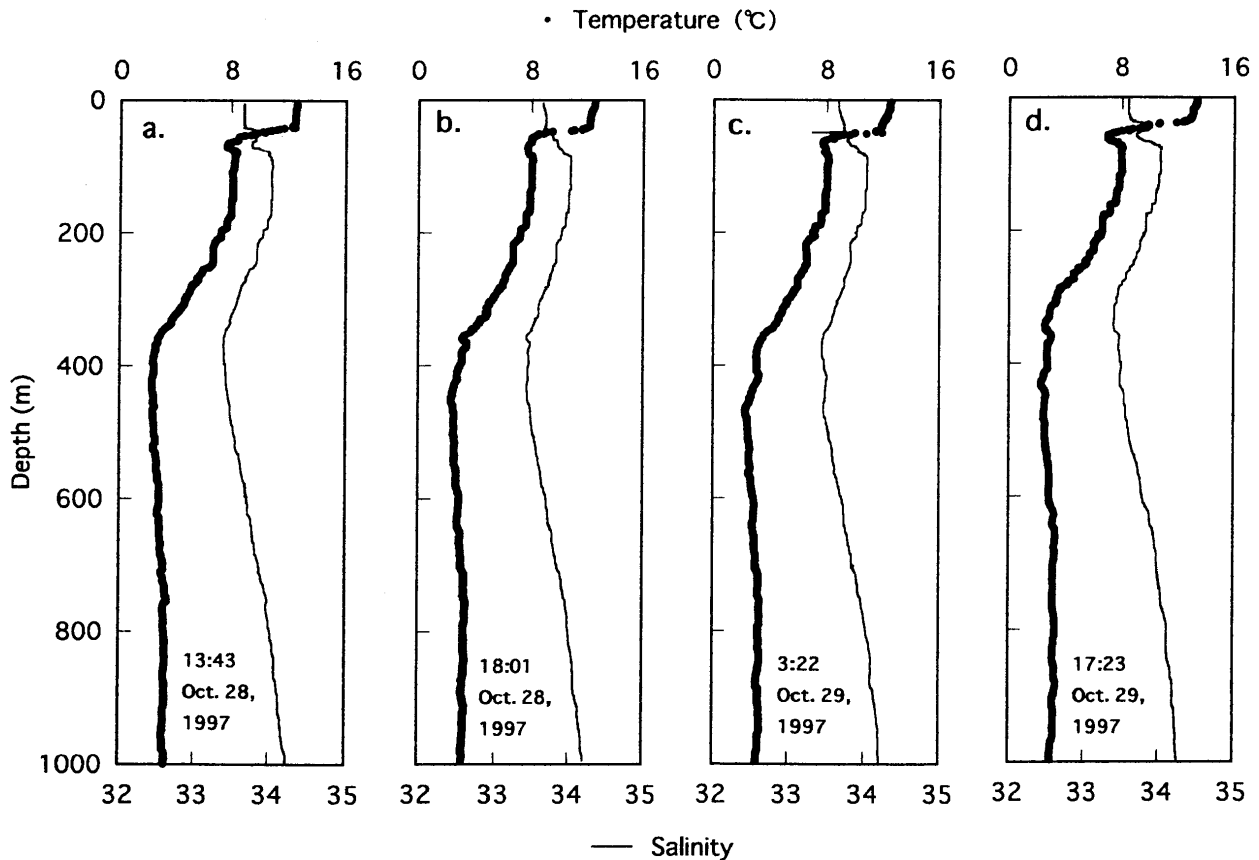


図3 水温および塩分の鉛直分布.
Fig. 3 Vertical distributions of temperature.

した4つの採水の間では温度、塩分の鉛直分布には極端な違いはみられず、観測点は暖水塊の中心部分付近を外れておらず、同じ水塊を捉えていると言える。

測定方法

海水試料は、バケツで採取した表面海水を0mとし、その他の深さの海水は、CTD-RMSに10 l Niskin Bottleを装備してBottle内に採取した。

採取した試料はすべて、酸洗浄済みのプラスチック製の容器に封入した後、測定まで冷暗所に保管した。

粒子の粒径と個数の測定

粒子の径と個数の測定は、Coulter Counter Multisizer II (Coulter製)という装置を用い船上にて行った。Coulter Counterはアパチャーと呼ばれる細孔の両側に電極を配し、粒子が細孔を通過する際生じる電気抵抗の変化量(これは粒子体積に比例する)を測定することによって粒子の数と粒径を計測するものである。アパチャーは15, 50および560 μ m径のものを使用し、粒径0.6 μ mから200 μ mの範囲の粒子について測定を行った。15および50 μ m径のアパチャーを用い測定する際は、そのままの海水では粒子数が非常に多く測定が困難であるため、電解液(Isoton II, Coulter)で10倍に希釈した。また、15 μ m径のアパチャーを使用する際、大きな粒子が多く孔がつまる場合には、25 μ m径のステンレス製のろ過器で試料のろ過を行い、得られたろ液を電解液

で希釈して測定した。560 μ m径のアパチャーを使用する際は、試料の希釈は行わず直接測定を行った。

粒子状有機炭素およびクロロフィル-aの測定

試料は船上にてGF/Fでろ過し、得られたろ紙を冷凍保存して持ち帰り、クロロフィル-aおよび粒子状有機炭素(POC)についてそれぞれ測定を行った。

クロロフィル-aは抽出蛍光法を用い、Spectrofluorophotometer RF-5300PC (Shimadzu製)にて測定を行った。粒子状有機炭素についてはN/C Analyzer Sumika 90 A (Sumika Chemical Analysis Service製)で測定した。

生物粒子の採集

20 lのプラスチック製容器に採取した海水試料を、500, 106, 25 μ mの3種類のステンレス製ふるいに順に通過させ、得られたろ液(<25 μ m)のうち5 lを取りホルムアルデヒド液を添加した。この試料は一日静置したのち、チューブを用いて静かに上澄みを取り除き、液量を約500 mlに減少させた。また3種類のステンレス製ふるい上に残った粒子は、それぞれGF/Fでろ過した海水を用いて洗い取り、液量を40 mlに調整した後、20 mlをプラスチック製容器に入れホルムアルデヒド液を添加した。このようにして船上にて<25, 25-106, 106-500, >500 μ mの4つの大きさに分画したこれらの試料は持ち帰り、生物粒子の種組成と数について、CASARETO (submitted)の方法で測定を行った。生物粒子はnon-living

表 1 採水地点と粒子状有機炭素・窒素, クロロフィル-a および Coulter Counter を用いた粒子体積 (粒径 0.6 から 200 μm) の測定値.Table 1 Sample descriptions, particle organic carbon (POC) and nitrogen (PON) concentrations, chlorophyll-a concentrations and volume of particles (size range from 0.6 to 200 μm) determined by Coulter Counter.

Station	Collection			POC ($\mu\text{g}/\ell$)	PON ($\mu\text{g}/\ell$)	Chlorophyll-a ($\mu\text{g}/\ell$)	Volume of particles 0.6-200 μm ($10^6 \mu\text{m}^3/\text{m} \ell$)
	Depth(m)	date time	Latitude Longitude				
N4-1 C							
4431	Oct. 28 1997	41° 50' 31" N	0	87.7	17.1	0.55	9.95
	13:43	145° 06' E	10	93.6	19.1	0.87	8.55
			25	73.0	15.7	0.98	
			50	33.3	8.5	0.29	10.39
			100	13.3	3.5	0.04	6.53
			150	15.3	3.4	0.01	4.10
			200	11.5	4.5		
			300	16.7	3.4		
			500	12.0	2.4		
			600	8.4	2.5		6.54
			800	5.3	2.7		
			1000	11.8	3.6		5.25
N4-1 D							
4534	Oct. 28 1997	41° 50' 07" N	0			0.51	15.23
	18:01	145° 09' E	10			0.74	11.98
			25			0.81	
			50			0.16	5.54
			100			0.01	5.40
			150			0.01	14.04
			200			0.00	
			300			0.01	
			500			0.01	
			600			0.00	7.02
			800			0.00	
			1000			0.01	6.21
N4-1 I							
9658	Oct. 29 1997	41° 51' 06" N	0	117.8	15.3	0.89	13.84
	3:22	145° 16' E	10	77.5	16.1	0.83	15.41
			25	79.7	17.0	1.15	
			50	56.4	11.8	0.70	15.83
			100	9.6	2.5	0.01	8.84
			150	13.7	2.8	0.01	7.38
			200	14.2	2.9	0.00	
			300	11.4	2.7	0.01	
			500	26.8	4.1	0.00	
			600	6.2	2.1	0.06	6.04
			800	8.0	2.0	0.00	
			1000	15.1	2.5	0.00	3.73
N4-1 M							
5722	Oct. 29 1997	41° 50' 37" N	0			0.71	12.18
	17:23	145° 43' E	10			0.81	17.37
			25			0.83	
			50			0.17	10.31
			100			0.01	8.16
			150			0.01	6.42
			200			0.00	
			300			0.02	
			500			0.00	
			600			0.00	3.91
			800			0.00	
			1000			0.00	3.50

表 2 採水地点と顕微鏡観察によるプランクトンおよび non-living 粒子の計数値.

Table 2 Sample descriptions and individual number of phytoplankton, non-living particles and zooplankton determined by microscopy.

Station	Collection			Phytoplankton (number / ℓ)	Non-living particles (number / ℓ)	Zooplankton (number / ℓ)	
	Depth(m)	date time	Latitude Longitude				Depth (m)
N4-1 B	4798	Oct. 28 1997 12:00	41° 48' 92" N	0	6812	30995	123
			145° 02' E	10	9412	55248	73
				50	5471	21897	165
				100	9113	27679	30
				150	6966	17815	12
				600	4147	26569	1
			1000				
N4-1 H	9712	Oct. 29 1997 1:47	41° 50' 38" N	0	5990	11334	207
			145° 14' E	10	9976	36318	463
				50	32578	100088	356
				100	4190	53234	34
				150	1779	40717	50
				600	2558	21913	11
			1000	37	14202	12	

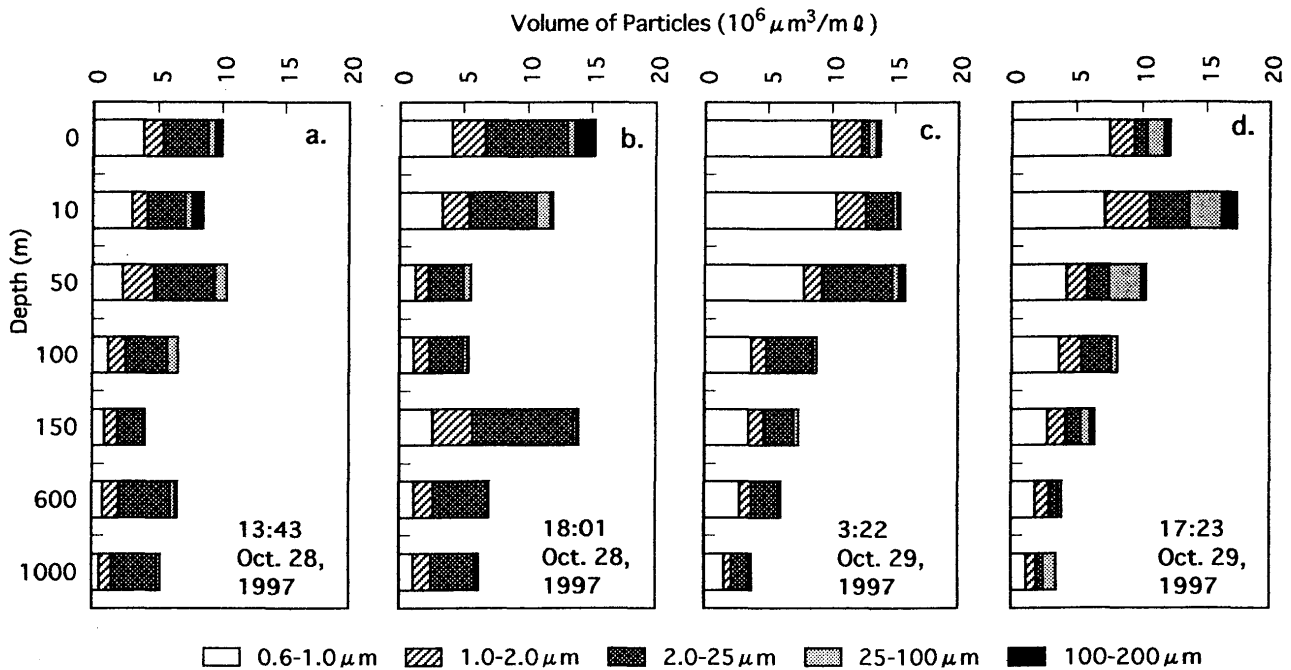


図 4 Coulter Counter で測定した粒子体積の分布.
Fig. 4 Distributions of volume of particles determined by Coulter Counter.

粒子および植物、動物プランクトンの3つに大別して表示した。non-living 粒子とは、ここでは糞粒や動植物体の破片、甲殻類の脱皮殻などの有機物片（デトリタス）などを主に指している。

結果

粒子の鉛直分布と時間変化

海洋において粒子の体積量を増加させる要因として

は、1) 河川および大気からの粒子の流入、2) 一次生産、3) 日周鉛直移動、4) 移流などによる海水の流入、5) 上層からの沈降粒子の付加、6) 溶存態から粒子への変換、また海底に近い所では7) 海底の堆積物の再懸濁の7つが挙げられる。一方、粒子量を減少させる要因としては、1) 分解、2) 日周鉛直移動、4) 移流などによる海水の流入、5) 下層への沈降粒子の除去、6) 粒子から溶存態への変換の6つが挙げられる (WOTTON, 1990)。

調査海域では、沿岸や海底から十分離れた位置で採水

しており、海底の堆積物の再懸濁の影響は無視できると考えられる。また、河川および大気からの粒子の流入も、本調査を行った一日という短い期間では、粒子の分布に大きく影響を与えないと考えられる。

図4に Coulter Counter で測定した粒子体積濃度の鉛直分布を示す。28日13時(図4a)において、粒子体積は表層で高く、深い方に向かって緩やかに減少していく傾向が見られた。粒径組成を見ると、0.6~2.0 μm の粒径の微小粒子は深くなるにつれ減少していくが、2.0 μm 以上の粒子にはこのような傾向は見られない。各深度における粒径の組成は、深いほうで粒径の大きな粒子が占める割合が増加しているのが見られた。

5時間後の28日18時における粒子の分布(図4b)は、表層の深さ0, 10mにおいて全体に13時の約1.5倍に増加するものの、深さ50, 100mでは減少した。しかし深さ600, 1000mではほとんど変化していない。また150mでは急激に粒子体積濃度が増加した。この増加の原因は良く解っていないが、おそらく移流の影響と思われる。

9時間後の29日3時における粒子分布(図4c)は、18時のものと比べ、特に深さ50mでの増加が顕著に現れ、0から50mまでは粒子体積濃度はほとんど変わらなかった。全体に6~2.0 μm の粒径の粒子に富んでいる。一方100mから深いほうでは徐々に粒子が減少していく傾向が現れた。

これら一連の時間変化の様子を見てみると、0.6~2.0 μm の粒径の粒子と2.0 μm 以上の粒子の変化の傾向が異なる。13時から18時にかけて2.0 μm 以上の粒子は表層で増加しているのが見られるのに対し、0.6~2.0 μm の粒子の分布は特に大きな変化がみられなかった。

一方18時から3時にかけて、特に50m以浅で0.6~2.0 μm の粒子は非常に顕著に増加しているのに対し、2.0 μm 以上の粒子は表層で急激に減少し、また深い600や1000mでも減少傾向が見られた。全体に3時に2.0 μm 以上の粒子は減少しているものの、深さ50mでは18時の約2倍に増加しており、この深さだけ他の変化と異なる傾向を示した。

また、28日の18時(図4b)と29日の17時(図4d)を比較すると、粒子の鉛直分布は異なり、必ずしも前日

と同じ分布をしないことが示された。

生物粒子の組成および鉛直分布の時間変化

粒子が生物である場合、粒径2.0 μm 以下ではバクテリアや原生生物の大きさに相当し、2.0 μm 以上は植物プランクトン、動物プランクトンの大きさにおおよそ相当する。本調査では粒子分布におけるこれら生物の影響を考察するために、粒子状有機炭素、クロロフィル-aおよびプランクトン種組成について、28日昼、29日夜の2回において調査を行った。クロロフィル-aの分布を図5に、粒子状有機炭素濃度および測定を行った粒径(0.6~200 μm)の粒子体積の分布を図6に示す。図7に25 μm 以下のプランクトンの組成とCoulter Counterで測定した2~25 μm の粒子個数を示す。なお、動物プランクトンは非常に少数であるため、図に記載していない。

日中13時における粒子とプランクトンの分布(図7a)では、全体としては深さ10mで極大を示すものの、鉛直方向に大きな変化は見られなく、またこれらを構成しているのがおもに植物プランクトンとnon-living粒子であることがわかる。一方14時間後の夜3時(図7b)では、表層0mで粒子は日中13時よりも減少するが、50mでは増加し最大値を示した。そして、そこから深さと共に減少していく傾向が見られた。特に深さ50mでは、植物プランクトンおよびnon-living粒子の増加が顕著に見られた。特徴的な点は、50m以深では日中より夜間において植物プランクトンが減少しているのに対し、non-living粒子は夜間に豊富に出現していることである。これらの鉛直分布の時間変化は、Coulter Counterで測定された2.0 μm 以上の粒子分布と酷似している。しかしながらプランクトンの計数と、Coulter Counterで測定された粒子個数は、必ずしも一致せず、Coulter Counterで測定された粒子個数の方が、プランクトンの計数より1から5倍程度多く計測されていた。この計数結果の違いは、プランクトン計数のための試料の採取の際、ろ過など多くの過程を経て粒子を収集するため、粒子の損失や粒径の変化が起りやすく、また試料の均一性にも問題があるのに対し、Coulter Counterでは海水試料を希釈するだけで測定でき、その結果粒子の欠損が起りにくく、さらにプランクトンの計数では

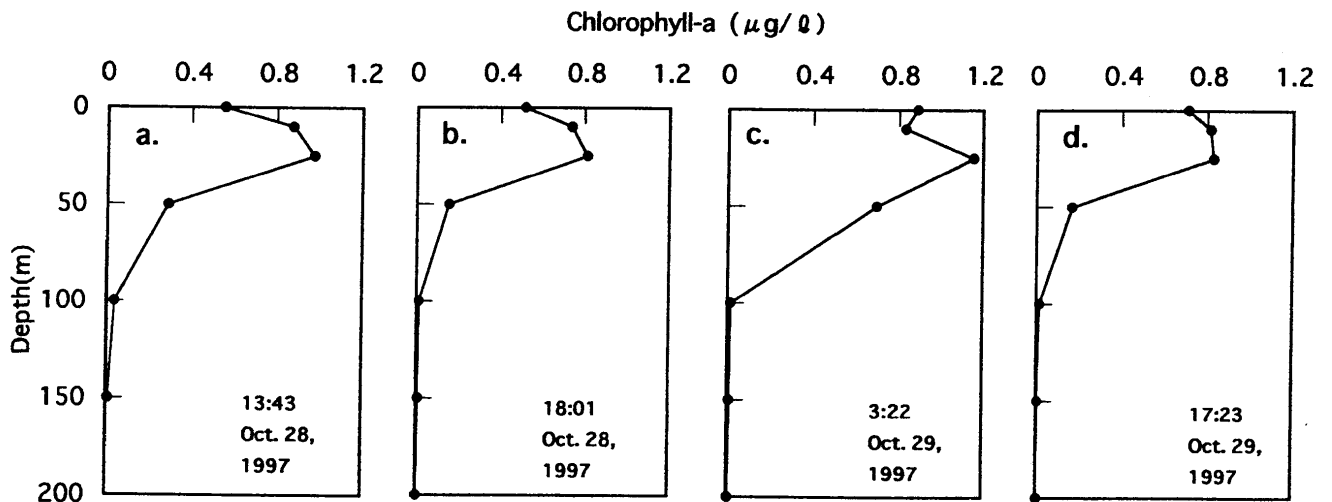


図5 クロロフィル-a濃度の鉛直分布。

Fig. 5 Vertical distributions of chlorophyll-a concentrations.

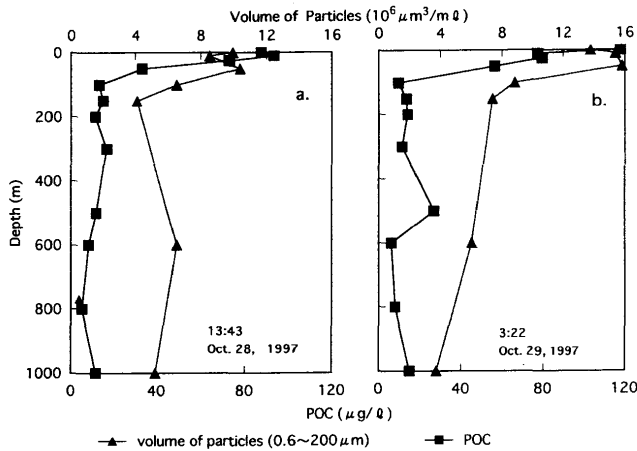


図 6 粒子状有機炭素濃度と粒子体積 (粒径 0.6 から 200 μm) の鉛直分布。
 Fig. 6 Vertical distributions of particle organic carbon concentrations and volume of particles (size range from 0.6 to 200 μm).

顕微鏡を使用するため、Coulter Counter よりも、より微小な粒子を計測しにくいことが原因と考えられる。だが、全体の傾向は両方とも良く類似している。このことから 2.0 μm 以上の粒子は、植物プランクトンやデトリタスといった生物起源粒子に関係した物で構成されていることを示し、これらの粒子の分布は生物活動による影響を大きく受けていると推測される。

生物粒子の粒径分布

植物および動物プランクトンと non-living 粒子の粒径分布を図 8 に示す。植物プランクトンは、日中 13 時において (図 8a) 全体に 25 μm 以下の粒径のものが多く、夜間 3 時 (図 8b) になると 50 m より浅いところで 25~106 μm のやや大きい粒径のものが非常に増えている。また、non-living 粒子の分布 (図 8c, d) は植物プランクトンの分布に似ており、夜間 50 m を頂点にして増加しているものの、その多くは 25 μm 以下のもので構成され、植物プランクトンでみられたような大きい粒径の増加は顕著に現れていない。またこのとき、少数であるが、動物プランクトンも 50 m 以上の浅い層において、日中 (図 8e) より夜間 (図 8f) で全ての粒径が増加しているのが見られた。すべての生物粒子で共通して見られる傾向は、夜間、深さ 50 m における急激な増加傾向である。また、夜間の分布では深さ 50 m を境に分布の傾向が変化しており、この深さには何か特別な要素が関わっていると推察される。

考 察

密度および溶存酸素濃度の分布と粒子分布の関係

図 9 にポテンシャル密度と溶存酸素濃度の鉛直分布を示す。深さ 40~50 m 付近に明瞭な密度躍層が形成されている。海水中の粒子の沈降を考えると、海水よりも粒子の密度が大きくならなければ、沈降は起こらない。そのため密度躍層は、密度が急勾配で増加する場所であるため、躍層上部に粒子が溜まりやすい。躍層の存在により、日中有光層で光合成生産された多くの有機物粒子が、深さ 50 m の躍層上部に集積し、夜間に粒子の極大

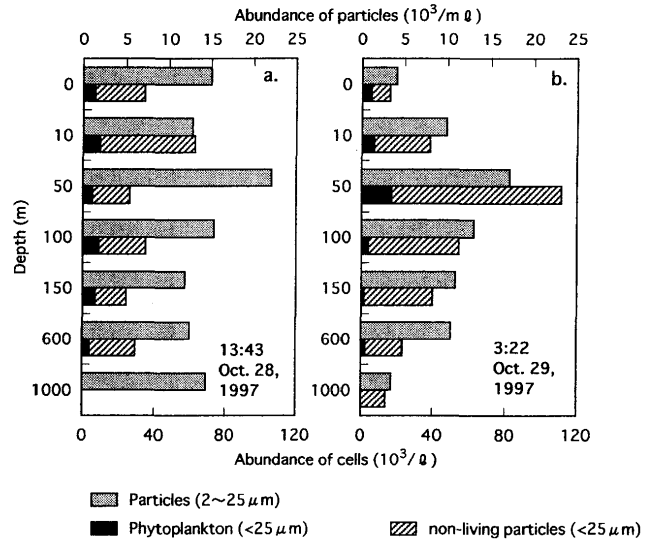


図 7 顕微鏡観察による 25 μm 以下の粒径の植物プランクトンおよび non-living 粒子の分布と Coulter Counter で測定した 2.0 から 25 μm の粒径の粒子数の分布。
 Fig. 7 Distributions of phytoplankton and non-living particles (<25 μm) by microscopy and volume of particles (size range from 2.0 to 25 μm) determined by Coulter Counter.

層が出現すると考えられる。有機物粒子の沈降速度は非常に遅く (約 10 m/day), そのため深さ 50 m で停滞する粒子を構成するものは、ごく表層で生産された新鮮な植物プランクトンが 50 m まで沈降することよりもむしろ、その大部分は深さ 50 m 付近において、日中光合成により生産されたもので構成されていると考えられる。また沈降によって躍層上部にもたらされる有機物粒子は、数日経過した古い粒子であるだろうと考えられる。しかしながら、これら生物粒子のなかでも植物プランクトンは海水よりも密度が大きく、またケイ藻や円石藻など殻を持つものの沈降速度は大きい。ケイ藻では約 30 m/day, 死んだ細胞ならこの 2 倍の沈降速度を持つとの報告もあり (LALLI *et al.*, 1996), 種によって沈降速度が大きく異なる。

図 8 b に示した植物プランクトンの粒径組成を見ると、夜間において、大きい粒径の粒子が深さ 50 m に多く出現している。顕微鏡観察から、これらを構成しているのは 90% 以上がケイ藻であることが示されている。よって沈降速度の速いケイ藻のなかでも、大きな粒径のものが 50 m に出現していることになり、これらは躍層上部にもたらされる粒子がより表層に近い所から沈降してくる可能性が高いことを示唆している。さらに夜間において動物プランクトンが躍層上部で増加することも、日中の光合成生産によって餌の豊富になった 50 m 以浅の有光層に、日周鉛直移動によって動物プランクトンが夜間集まってきたものと考えられる。また、non-living の粒子が深さ 50 m で増加することも、日中光合成生産されたものがデトリタスとなって 50 m 付近に溜まり、同時に摂食や分解によってこれらが急速に細粒化されると考えると調和的である。

2.0 μm 以上の粒子については、プランクトンの挙動と光合成生産の 2 つによってその分布を説明することができる。しかし、2.0 μm 以下のサブミクロン粒子の分布

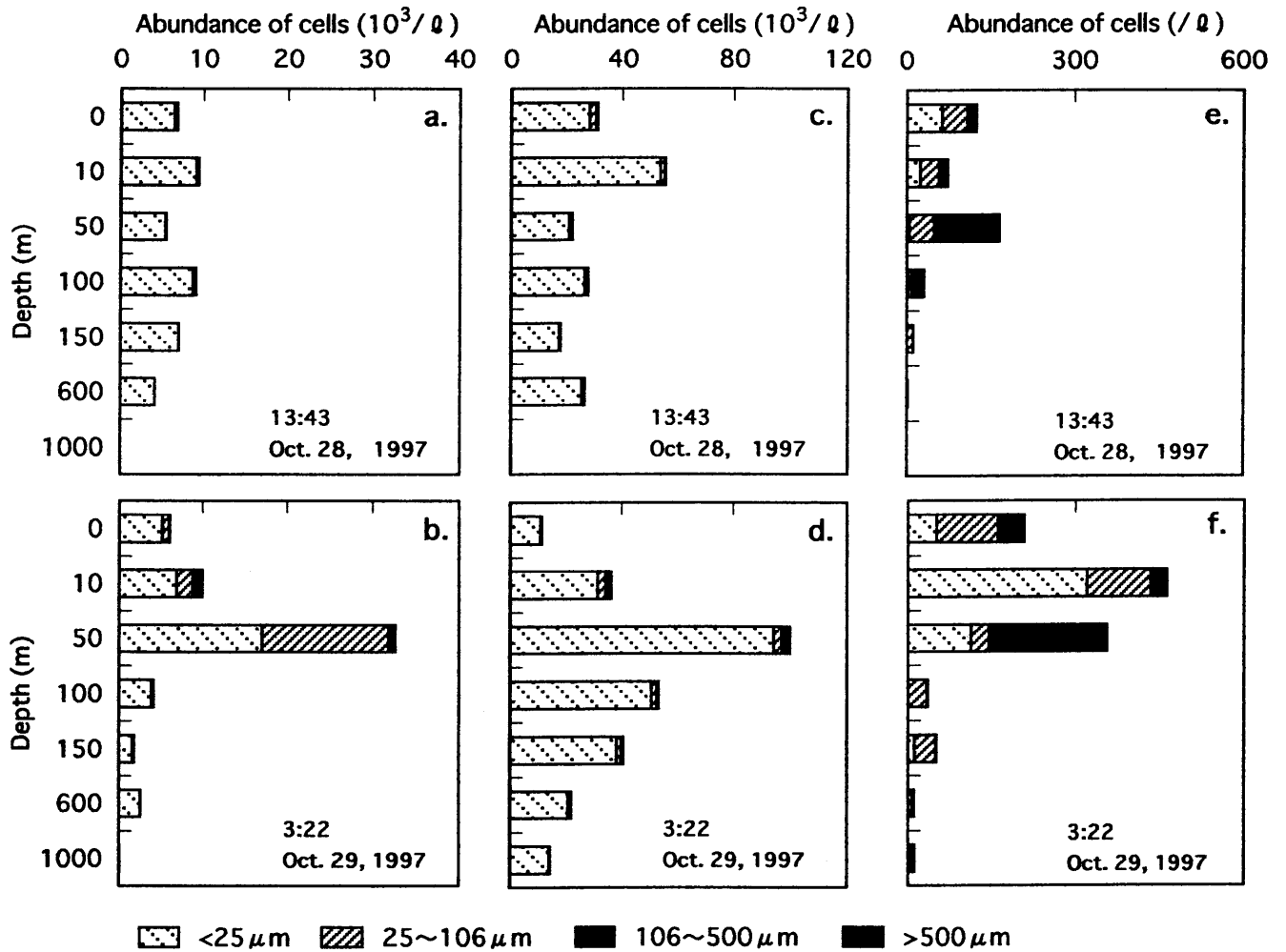


図 8 顕微鏡観察によるプランクトンおよび non-living 粒子の粒径分布。
 (a, b) 植物プランクトンの粒径組成, (c, d) non-living 粒子の粒径組成, (e, f) 動物プランクトンの粒径分布。
 Fig. 8 Size distributions of plankton and non-living particles determined by microscopy. (a, b) Phytoplankton, (c, d) non-living particles, (e, f) Zooplankton.

は、これらの挙動にあてはまらない。
 0.6~2.0 μm の粒子分布の特徴は、日中少なく夜間増加することである。またその増加は、表層に限らずどの深さでも見られたが、特に 50 m 以浅で特徴的な増加を示した。だが、2.0 μm 以上の粒子は夜間、表層で減少し、深さ 50 m で増加の頂点を持つ鉛直分布を示したのに対し、0.6~2.0 μm の粒子分布は表層 0 から 50 m までほぼ同じ分布を示し、非常に粒子に富んでいた。
 日中 13 時から 18 時では、0.6~2.0 μm の粒子は増減は少ないが、2.0 μm 以上の大きな粒子は表層 0, 10 m で特徴的に増加した。この増加は日中の光合成生産によって植物プランクトンが増加したためと考えられる。
 次に 18 時から 3 時にかけては、0.6~2.0 μm の粒子分布に大きな変化が現れ、特に 0 から 50 m において増加した。これとは対照的に 2.0 μm 以上の粒子が表層で減少し、50 m を頂点とする分布を示した。この時間は日が沈み、新たな光合成生産による粒子の付加は起こらないため、表層で減少した 2.0 μm 以上の粒子が 0.6~2.0 μm の粒子の増加をもたらしたと考えられる。すなわち、植物プランクトンや光合成生産物起源であるデトリタスが分解などによってより小さなデトリタスに移行したか、

あるいは密度躍層によって沈降を妨げられたか、または懸濁粒子として表層に多く残っていたデトリタスをえさとしてバクテリアが増加したため、夜間において 0.6~2.0 μm の粒子が増加したと考えられる。
 バクテリア数の増加は、バクテリア密度の計測を行わなかったため不明であるが、間接的にバクテリアが増加したという証拠がいくつか挙げられる。
 まず、夜間 10 m や 50 m の深さで、バクテリアを捕食する鞭毛虫類が非常に多く観察されたこと。これは日中には見られなかった。鞭毛虫類は餌となるバクテリアが増加しはじめるとただちに反応して捕食量と増殖速度を増すため (LALLI *et al.*, 1996)、鞭毛虫類が多く出現したということは、餌となるバクテリアが豊富であることを示唆している。
 また、溶存酸素の極小層が 50 m 付近の密度躍層の深さと同じ位置に形成されていること (図 9)。溶存酸素の極小層は、13 時には見られなかったが、18 時および 3 時には楔状に明瞭に現れた。よって、密度躍層では酸素を消費するような、呼吸活動やバクテリアによる分解が活発に行われ、これらが多く存在していることを示している。また、0.6~2.0 μm の粒子を構成するものとして、非

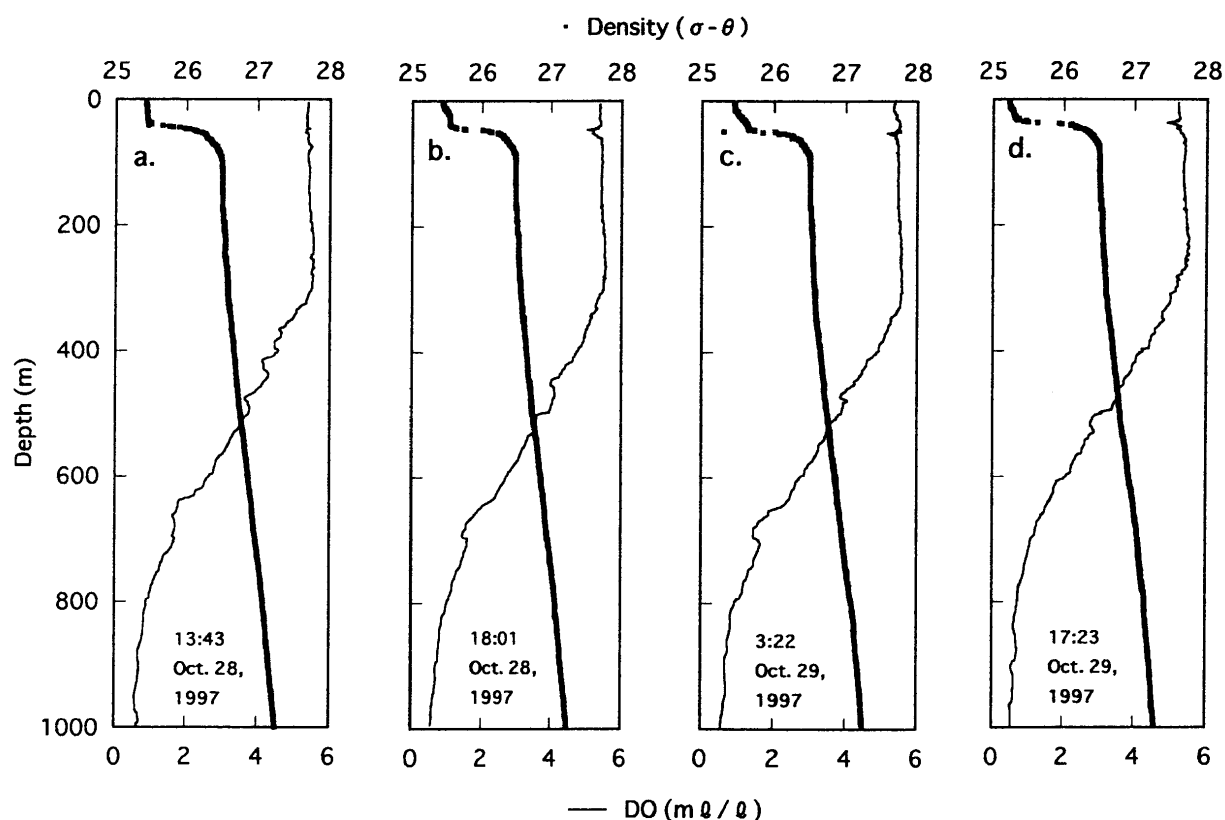


図9 暖水塊における海水の密度および溶存酸素濃度 (DO) の鉛直分布。
 Fig. 9 Vertical distributions of density and dissolved oxygen (DO) concentrations.

常に微小なデトリタスも挙げられる。デトリタスについては、 $25\mu\text{m}$ 以下の非常に小さなものが夜間深さ50mを中心に増加していることを前に示した(図8c, d)。顕微鏡観察では数 μm 以下の粒子について計測を行うことはできないため、より微小な数 μm 以下のデトリタス粒子がさらに多く存在している可能性も大きい。よって、夜間における $0.6\sim 2.0\mu\text{m}$ の粒子の増加は、分解や摂食によりさらに細粒化された微小デトリタスと、これらを分解するバクテリアの増加が原因であると考えられる。

植物プランクトン量の指標であるクロロフィル-a(図5)を見ると、夜間において深さ0m, 50mで増加しており、日中と比べると表層で多い。バクテリアは、植物プランクトンが滲出する溶存有機物質を餌とする一方、デトリタスを分解する。暖水塊内部のような貧栄養の海域では、植物プランクトンとバクテリアは互いに栄養塩を競合しあうことが指摘されており、クロロフィル-a量とバクテリア数は必ずしも比例するとは言えないが、この結果は、バクテリアが増殖するために必要な植物プランクトン起源の餌が夜間多く存在していることを示している。

一般に、海洋の有光層におけるバクテリア密度は $5\times 10^6/\text{ml}$ 程度であるが、栄養物や捕食者などの相互関係によって $10^3\sim 10^8/\text{ml}$ の幅を持つ(LALLI *et al.*, 1996)。これらのうち、生きているものは1/3から2/3を占めていると言われている(小暮, 1994)。バクテリアは、鞭毛虫などの原生生物によって捕食され、その増殖を抑制されており、内湾などの表層付近では、従属栄養性鞭毛虫によってバクテリアは新たに生産された細胞のほとんどを捕食されてしまう。しかし、外洋海域や真光層以深で

は捕食者としての役割はそれほど大きくないという報告もあり、(鈴木, 1997)バクテリアが $0.6\sim 2.0\mu\text{m}$ の粒子増加に寄与する可能性は高い。

以上の結果から $0.6\sim 2.0\mu\text{m}$ の粒子がどのような組成であるか詳細は不明ではあるが、日中の光合成生産の影響を強く受けており、その多くが有機物であることが推察される。それではこのサブミクロン粒子と有機物量はどのような関係にあるのか。

サブミクロン粒子と有機物の関係

図10にクロロフィル-aと粒子状有機炭素濃度の相関図を示す。日中13時(図10a)と夜間3時(図10b)においてクロロフィル-a濃度と粒子状有機炭素濃度は一定の割合で相関関係を示す。この関係は光合成によって粒子状有機炭素が生産されていることを考えれば当然ではあるが、夜間光合成が行われていないときもこの関係は保存されていることが図10から推察される。

次にクロロフィル-aと $0.6\sim 1.0\mu\text{m}$ の粒子体積との昼夜の相関を図11a, bに、粒子状有機炭素と $0.6\sim 1.0\mu\text{m}$ の粒子体積との相関を図12a, bに示す。クロロフィル-aと粒子状有機炭素は $0.6\sim 1.0\mu\text{m}$ の粒子体積と互いに相関するものの、日中(図11a, 図12a)と夜間(図11b, 図12b)では傾きが異なり、夜間の方が傾きが大きい。このことは、夜間のほうが日中より少ないクロロフィル-aおよび粒子状有機炭素で、多くの粒子が生産されることを示している。また、この関係は粒子が日中と夜間で組成が異なる事を示している。すなわち有機炭素でいえば、1粒子あたりの炭素含有量が日中よりも夜間で少ないことを示している。実際に電子顕微鏡で粒子

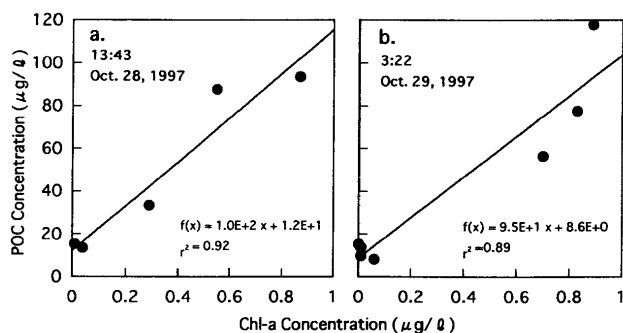


図10 クロロフィル-a と粒子状有機炭素濃度の関係。
Fig. 10 Relationship between Chlorophyll-a and POC concentration.

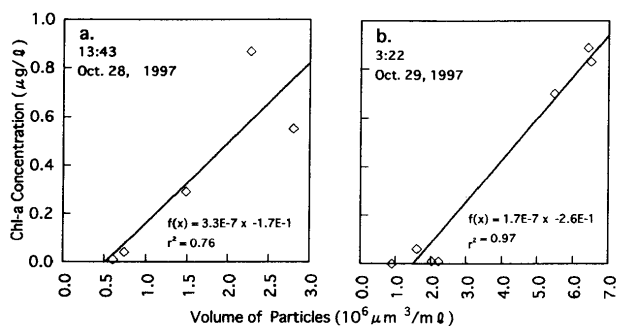


図11 クロロフィル-a 濃度と粒径0.6~1.0µmの粒子体積の関係。
Fig. 11 Relationship between Chlorophyll-a concentration and volume of particles (size range from 0.6 to 1.0 µm).

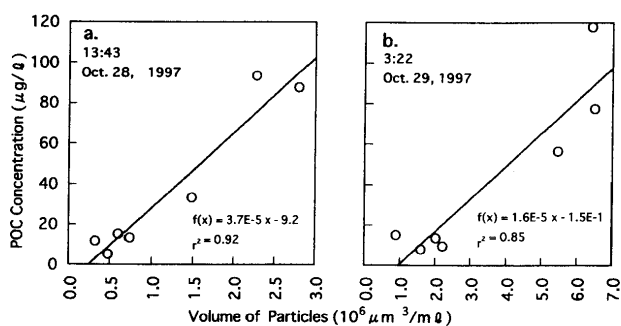


図12 粒子状有機炭素濃度と粒径0.6~1.0µmの粒子体積の関係。
Fig. 12 Relationship between POC concentrations and volume of particles (size range from 0.6 to 1.0 µm).

を観察した例 (ROMANKEVICH, 1984, BNNER *et al.*, 1997) があるが、同じ粒径の粒子であってもその形態は様々であり、この結果は、1体積あたりの重量がそれぞれの粒子で大きく異なる可能性を示唆している。またバクテリアの細胞の平均体積から炭素量に変換する際に使用する換算係数についても、20倍もの違いがあり、単位体積あたりの炭素量も、細胞が大きくなるにつれて低下するという報告もある (鈴木, 1997)。

これまで、有機物粒子の体積はバイオマスを表しているとみなされ議論が行われていた。しかしそれは、個々

の粒子の化学組成が時間や場所で大きく異ならないという前提がある場合に成立する。しかし、今回の結果から同じ有機物量であっても体積のみが日中と夜間で大きく異なり、そのため粒子体積は必ずしも有機物質の炭素重量を表さないことを示唆している。

翌日29日17時における粒子体積濃度の鉛直分布 (図4) は、前28日の18時の分布と比較すると、ほぼ同時刻であるのに、互いに類似した分布を示さなかった。29日の17時における分布は、前日の18時よりもむしろ夜の3時の分布に似ている。0.6~2.0µmの粒子の占める割合も前日の18時に比べ多い。しかし、同時に25~100µmの粒子も豊富に存在し、このような傾向はどの時間においても見られなかった。

このような違いを起こす原因として2つ挙げられる。一つは観測点の位置が異なり、前日と異なった海洋環境であったことである。29日17時の観測点は、その前の3回の観測点よりも暖水塊の中心に近いことを水温と塩分の分布 (図3) から前に述べた。また密度躍層の位置 (図9) もやや浅い位置に変化している。密度躍層下部には低塩分、低温度の海水の貫入が顕著にみられた。この水は親潮に起源をもつものであり、周囲よりも栄養塩の豊富な海水が供給されたことで、生物生産に影響を与えたと考えられる。

二つめは、粒子の粒径によって回転時間が異なることが挙げられる。2.0µm以上の粒子は主に一次生産物から構成されるため、日中光合成によって増加し、夜間に捕食や分解によって消費されると考えられる。翌日も水温・塩分および栄養塩濃度等が同じ状態ならば、前日と同様の現象を繰り返すはずである。観測を行った2日間において、これらに大きな違いは見られなかった。よって2.0µm以上の粒子は前日と同様の分布を示すはずである。

しかし、0.6~2.0µmの粒子が2.0µm以上の粒子よりも長い回転時間を持つならば、前日より粒子は多く存在すると考えられる。DUCKLOW (1992) はバクテリアの回転時間は植物プランクトンよりも実質的に長い、または利用可能な短時間の間に植物プランクトンや捕食によって有機炭素が供給されないとき、バクテリアのバイオマスが植物プランクトンのバイオマスよりも優占する可能性を示唆している。もし、バクテリアが0.6~2.0µmの粒子の多くを占めており、翌日の日中にも豊富に存在しているならば、翌日の日中に光合成によって生産された有機物のうち利用しやすい粒径の有機物を即座に分解してしまうため、これらは前日より減少する。逆に利用しにくい有機物はそのまま残る。そのため2.0~25µmの粒子が減少し、0.6~2.0µmの粒子とより大きな25~100µmの粒子が多く存在する分布を示すと考えられる。

暖水塊表層では栄養塩が涸渇しているため、日中は光合成で植物プランクトンが栄養塩を利用すると、バクテリアが利用できる部分が減少する。そのためバクテリアは植物プランクトンがある程度増加する夕方まで、増殖が制限されると考えられる。一方夜間においては、バクテリアは光合成生産物を分解、無機化しながら増殖していく。しかし、翌日までに植物プランクトンが十分に増加できるほどの栄養塩が再生されてないため、主に植物プランクトン由来の2.0µm以上の粒子の増加は日中でも制限され、一方バクテリア等が占める0.6~2.0µmの粒子が優占する粒子の分布が維持されると考えられる。表層で栄養塩の少ない海域では小型の植物が多く、捕食する動物プランクトンも小型でその糞粒なども沈みにく

いため、栄養塩類や炭素が表層中で効率良く再生される(鈴木, 1997)。そのため暖水塊では、少なくとも2日以上上のタイムスケールで粒子分布が繰り返されているのではないかと推察される。

まとめ

本研究は海洋におけるサブミクロン粒子の時間的な分布の変化を追った。その結果、サブミクロン粒子は暖水塊では表層で最大値 $9.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3/\text{ml}$ を示した。また、その鉛直分布はおおよそ深さと共に減少する傾向であった。また、数時間という期間でも大きくその分布、量を変化させる結果が示された。特に夜間50m以浅で増加し、non-living粒子の分布と酷似した。この結果から、粒子分布の変化は生物活動、とりわけ近年注目されている微生物ループと密接に関わっていると推察される。微生物ループはデトリタスを分解したり、溶存有機物を高い効率で利用してバクテリアが増殖し、これらを原生生物が捕食し、さらにこれらを動物プランクトンが摂食することで高次の食物連鎖へ有機物が導かれるものであり、植物プランクトンを起点とする食物連鎖と表裏一体の関係にある(清水, 1982)。

海洋における粒子の分布は、一次生産や微生物による分解などが粒子の量を規定している一方、海洋の物理構造、特に密度躍層の存在が全体の分布に影響を与えていると推察される。しかし、本研究ではサブミクロン粒子の組成については、生物、非生物などの区別や、バクテリア、デトリタスの存在量などについて、詳細を得ていない。また、移流などの効果によってこれら粒子の分布が変わることも、無視できない要素である。その他に懸濁態粒子の凝集によっても粒子粒径の変化が起こる(WOTTON, 1990)と考えられ、今後これらの効果について詳しく調べる必要がある。

YAMASAKI *et al.*, (1998) は $0.4 \sim 1 \mu\text{m}$ のサブミクロン粒子について測定し、 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の粒径に顕著なピークを捉えた。これらは生物的過程によって直接的に生産されたものであると推定している。本研究においても、 $0.60 \sim 0.62 \mu\text{m}$ の間にピークがあるものがいくつか確認された。しかし本研究の結果は、このピークをYAMASAKI *et al.*, (1998) が示したものと同一のものであると断定するには至らず、検討の余地が残される。なぜなら、粒子測定に用いたCoulter Counterは、本来 $0.5 \mu\text{m}$ まで測定可能であるが、この付近の測定は非常に電氣的ノイズの影響を受けやすく、特に船上で測定を行ったため、これらのバックグラウンドを完全に除くことができなかったからである。よってここに記載した値は、すべてノイズの影響を受けにくい $0.62 \mu\text{m}$ 以上の粒子についてバックグラウンドを補正した値で示している。YENTSCH *et al.*, (1992) も本測定装置で $0.6 \mu\text{m}$ 以下の測定に関しては信頼性に欠けると指摘している。

サブミクロン粒子は海水中に非常に豊富に存在しているが、その挙動についての研究は始まったばかりである。今後サブミクロン粒子の挙動を明らかにするためには、様々な海域において、より小さな粒径の粒子分布を詳しく調査するとともに、生物活動との関係を明らかにする必要がある。

謝辞

東京大学海洋研究所の杉本隆成教授には、海洋調査に

おいて多くの御助力を賜りました。

白鳳丸航海における観測では、滝雅人さん、高山力也さん、岩田樹哉さん、淡青丸航海においては中村昭彦さんにご協力いただきました。

引用文献

- BNNER R., BIDDANDA B., BLACK B. & MCCARTHY M. (1997), Abundance, size distribution, and stable carbon and nitrogen isotopic compositions of marine organic matter isolated by tangential-flow ultrafiltration. *Marine Chemistry*, **57**, 243-263.
- BUESSELER K. O., BAUER J. E., CHEN R. F., EGLINTON T. I., GUSTAFSSON O., LANDING W., MOPPER K., MORAN S. B., SANTSCHI P. H., VERNONCLARK R. & WELLS M. (1996), An intercomparison of cross-flow filtration techniques used for sampling marine colloids: Overview and organic carbon results. *Marine Chemistry*, **55**, 1-13.
- CASARETO B. E., YOSHIDA K. & SUZUKI Y. (submitted), Role of plankton community in the carbon cycle of a coral reef at Miyako Island, Japan.
- DUCKLOW H. W. & CARLSON C. A. (1992), Oceanic bacterial production. In: MARSHALL K.C. (ed.) *Advances in Microbial Ecology*, Vol. 12, Plenum Press, New York, 113-180.
- GUO L. & SANTSCHI H. (1997), Composition and cycling of colloids in marine environments. *Reviews of Geophysics*, **35**, 17-40.
- KOIKE I., HARA S., TERAUCHI K. & KOGURE K. (1990), Role of sub-micrometre particles in the ocean. *Nature*, **345**, 242-243.
- 木暮一啓 (1994), チミジン物語。微生物の生態19 (日本微生物生態学会編), 学会出版センター, 東京, 73-90.
- LALLI C. M. & PARSONS T. R. (1996), 生物海洋学入門, 講談社, 東京, 230 p.
- LIBES S. M. (1992), *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. John Wiley & Sons, New York, 734 p.
- ROMANKEVICH E. A. (1984), *Geochemistry of organic matter in the ocean*. Springer-Verlag, Berlin, 334 p.
- 清水 潮 (1982), 海の微生物たち。大月書店, 東京, 209 p.
- 鈴木 款・伊藤 博 (1994), 地球環境における炭素循環と海水中の溶存有機炭素の測定, *環境化学*, **4**, 1-18.
- 鈴木 款・岡崎恵規・高橋正征・及川武久・樋渡武彦・深見公男・石坂丞二 (1997), 海洋生物と炭素循環 (鈴木 款編), 東京大学出版会, 東京, 193 p.
- 鈴木 款・カサレト B.E. (1998), 黒潮親潮混合域における粒子態有機物の動態. *海洋号外*, **13**, 122-130.
- 角皆静男・乗木新一郎 (1983), 海洋化学—化学で海を解く (西村雅吉編). 産業図書, 東京, 278 p.
- WOTTON R. S. (1990), *The Biology of Particles in Aquatic Systems*. CRC Press, Boca Raton, 303 p.
- YENTSCH C. M. & YENTSCH C. S. (1992), Characterization of organic biogenic particles. In: Buffle, J. & van Leeuwen, H. P. (eds.) *Environmental Parti-*

cles, Vol. 1, Lewis Publishers, Boca Raron, 357-376.

YAMASAKI A., FUKUDA H., FUKUDA R., MIYAJIMA T., NAGATA T., OGAWA H. & KOIKE I. (1998),

Submicron particles in northwest Pasific coastal environments abundance, size distribution, and biological origin. *Limnology and Oceanography*, **43**, 536-542.