マガキえらによる懸濁微小粒子の捕捉^{*1}

楠 木 豊

(1977 年 6 月 15 日受理)

Retention of Small Particles by the Gills of the Japanese Oyster

Yutaka KUSUKI^{*2}

Efficiency of the retention of small particles by the gills of the Japanese oyster was investigated. From the results thus obtained and measurements of the size distribution of particulate material suspended in sea water, estimation of the quantity of particulate matter as food for oysters was also discussed.

Particle filtration by the oyster was studied in the 1.5 to 6.0 μ size range in relation to naturally occurring particles. The oyster usually retained particles larger than 3 μ , but could retain particles of sizes down to 2.0 or smaller when larger particles became scarce. There was a sharp increase in removal efficiency as particle size increased from 1.5 to 3.0 μ . Larger sizes showed no evidence of further change in efficiency. The particulate matter in Hiroshima Bay consisted mainly of particles smaller than 40 μ in diameter and this portion accounted for more than 90% (dry basis) of all particulate matter.

Therefore, the particulate matter measured by filters such as Whatman GF/C and Ultra fine filter that could retain particles larger than 1 μ is estimated to be quantity of food for oysters, but for more precise measurements Nuclepore or metal filter of 3 μ pore size would be preferable.

マガキ *Crassostrea gigas* の成長は、その餌料量によつて大きく左右されることは議論の余地のないところであろう。マガキは懸濁物摂食動物であり、海水をえらでろ過し、懸濁物を捕捉している。したがつて、マガキの餌料としての懸濁物は、マガキがえらで捕捉しうる大きさの範囲の懸濁物でなければならない。マガキが捕捉しうる懸濁物のうち、大きな粒子は胃内容物の調査から推定できるが、微小粒子については、どの程度の大きさの粒子まで捕捉できるかは明らかにされていない。そこで、マガキが捕捉しうる微小粒子の下限の大きさを測定する目的で実験を行つた。この研究結果と、懸濁物の粒径分布調査とから、マガキが捕捉しうる懸濁物量、すなわち餌料量についても検討を行い、若干の知見が得られたので、その結果を報告する。

実 験 方 法

懸濁粒子の粒径分布調査は、広島県安芸郡音戸町地先カキ養殖場と、佐伯郡宮島町地先カキ養殖場の2カ所で行つた。音戸町地先では1969年6月から1970年3月まで、宮島町地先では1969年7月から12月まで、毎月1回調査した。海水20 l採取し、300 μ と40 μ の網目のプランクトンネットで順次ろ過した後、このろ過海水3 lを、孔径1 μ のメンブランフィルターでろ過した。このろ紙と、プランクトンネット上の残渣は秤量瓶に移し、105°Cで恒量とした後、重量を測定した。

マガキが捕捉できる懸濁微小粒子の限界の大きさを研究する目的で、流水式と止水式の2つの実験を行つ

^{*1} 広島県水産試験場業績。

^{*2} 広島県水産試験場 (Hiroshima Fish. Exp. St., Ondo, Aki-gun, Hiroshima Pref., Japan).

た。流水式では、採フン器¹⁾の個室を5個、階段水槽状に並べたものを作製して実験に供した。各個室にマガキを1個ずつ入れ、1番上の個室に生海水を毎分0.5 lの割合で注水した。この海水が順次下の個室に流れてゆき、この間に懸濁粒子がマガキによつて捕捉され、減少してゆく状態を調べた。実験は1970年10月に24時間調査し、一定時間毎に、各個室に入る水を採水し、個室別に水を集めた。これから、各個室に入る海水中の懸濁物量をUltra fine filterでろ過して求め、また6 μ 以下の微小粒子数を大きさ別に計数した。供試マガキは殻高約4.5 cmで、実験前に、*Chlamydomonas* sp.を用いて間接法によるろ過水量²⁾(filtration rate)を測定した。また、実験中の排せつ物を採集し、脱塩後乾燥重量を測定した。

止水式の実験は、10 l水槽に生海水を8 l入れ、これに殻高4.3 cmのマガキを1個静かに置き、生海水中の6 μ 以下の微小粒子数の時間的減少状態を調べた。実験は1971年10月に行い、水温は約20°Cであった。

6 μ 以下の懸濁微小粒子の計数は、血小板ユニットを付属させたマイクロセルカウンター1002型(東亜特殊電機株式会社)を用いた。検出器は1G075(孔径80 μ)で、*Monochrysis lutheri*とプラチェック³⁾を標準粒子として、粒子の直径と感度別ディスクリミネーター値との関係を、SHELDON and PARSONS⁴⁾にならつて求めた。本器の感度の切換はCoulter counterほど正確にはできていないので、感度ごとに粒子の大きさとディスクリミネーター値との関係を求めておき、これから大きさ別に粒子数を計数した。

結 果

懸濁物の粒径分布 広島湾周辺の2箇所で行つた懸濁物の粒径分布調査結果は、Table 1にまとめて示した。これから明らかなように、300 μ より大きな粒子は極めて少ない。300~40 μ の大きさの粒子も少なく、これが粒径1 μ 以上の大きさの全懸濁物中に占める割合は、約10%以下にすぎない。ただ、宮島養殖場の7月だけは0.8 mg/lと多く、全懸濁物中に占める割合は約20%に達している。40~1 μ の大きさの微小粒子は、全懸濁物中約90%を占め、懸濁物の主体をなしている。

大きさ別の懸濁物量を合計し、1 μ 以上の大きさの全懸濁物量を求めると、音戸、宮島両養殖場で1.0~6.9 mg/lの範囲にある。しかし2~3 mg/lの場合が多く、全懸濁物量の年間の変化は少ないほうである。ただ夏季に多い傾向がみられるが、これは赤潮などのプランクトンの大増殖⁵⁾によるものと考えられる。

マガキによる微小粒子の捕捉 階段水槽を用いた実験で、まず懸濁物量についてみると、注水した生海水の懸濁物量は1.20 mg/lであるが、個室を流下するにしたがつて、懸濁物はマガキに捕捉されて次第に減少し、5番目の個室に入るときには、0.61 mg/lと少なくなつていく (Table 2)。排せつ物量は、上から3番目までの個室のマガキは、110~130 mg/日とあまり変わらない。4・5番目の個室のマガキの排せつ物量

Table 1. Size distributions of suspended matter in sea water (mg/l)

St.	Size (μ)	1969					1970				
		Jul. 22	Aug. 26	Sep. 26	Oct. 22	Nov. 27	Dec. 22				
Miyajima	>300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				
	300-40	0.8	0.3	0.2	0.1	0.2	0.0				
	40- 1	2.9	2.2	1.4	1.8	2.1	1.0				
	Sum	3.7	2.6	1.6	1.9	2.3	1.0				
		1969					1970				
		Jun. 26	Jul. 28	Aug. 21	Sep. 20	Oct. 26	Nov. 21	Dec. 19	Jan. 24	Mar. 5	Mar. 26
Ondo	>300	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
	300-40	0.2	0.2	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
	40- 1	2.1	3.3	6.4	1.5	2.4	2.0	1.8	1.4	2.2	1.2
	Sum	2.3	3.5	6.9	1.7	2.6	2.1	2.0	1.6	2.3	1.4

Table 2. Decrease of the suspended matter in troughs connected in series and the subsequent decrease in faecal production from oysters (October, 1970)

Trough No.	Shell height (mm)	Suspended matter (mg/l)	Filtration rates (l/hr)	(A) Suspended matter removed (mg/day)	(B) Faeces produced (mg/day)	B/A
1	47	1.20	6.9	198.7	132.3	0.67
2	45	1.05	7.7	194.0	129.8	0.67
3	45	0.90	12.6	272.2	110.5	0.41
4	44	0.74	5.3	94.1	63.5	0.67
5	47	0.61	8.8	128.9	64.8	0.50

Table 3. Number and volume of particles of different size fractions per ml of natural sea water

Particles		No. of particles	Particle volume
Diameter (μ)	Volume (μ^3)	per ml	per ml ($\times 10^3 \mu^3$)
1.5	1.76	53,600	94
2.0	4.19	21,500	90
2.5	8.20	9,700	80
3.0	14.2	8,200	116
4.0	33.5	5,100	171
5.0	65.7	3,000	197
6.0	113.4	1,300	147
7.0	180.1	300	54

は、約 64 mg/日と急に少なくなっている。3 番目の個室のマガキは、間接法によるろ過水量の値は 12.6 l/hr で、他の個室のマガキに比べて著しく高いため、1 番目、2 番目の個室より懸濁物量は減っているのに、排せつ物量はあまり変わらぬ量になったものと考えられる。各個室に入る海水中の懸濁物量と、その個室のマガキのろ過水量（間接法）とから捕捉量²⁾ (Table 2, A) を算出し、排せつ物量 (Table 2, B) との比 B/A の値をみると、0.4~0.7 の範囲にある。3 番目の個室のマガキの B/A 比の値が 0.41 と特に低いが、これは、ろ過水量が多いので、一部で再ろ過が起っているのかもしれない³⁾。1, 2, 4 番目の個室のマガキの B/A 比の値はいずれも 0.67 であるが、5 番目の個室のマガキでは 0.50 と、やや低い値となつてい

る。階段水槽に注水した生海水中の懸濁微小粒子の粒径別粒子数は、Table 3 に示したように、小さな粒子ほど多く、直径 1.5 μ の粒子は 1 ml 中に 54,000 個と多いが、7 μ の粒子は僅かに 700 個に減る。しかし容積でみると、直径 5 μ の粒子が 197,000 μ^3 と、最も多い。

この生海水中の微小粒子が、個室を通るにしたがつて、どのようにマガキに捕捉されてゆくかを、粒径別に示したのが Fig. 1 (upper) である。ここでは粒径別に、マガキに捕捉されて減った粒子数を、生海水中の粒子数に対する百分率として示した。1 番上の個室を通り、2 番目の個室に入る海水、すなわち、マガキ 1 個の捕捉を受けた海水中の微小粒子を、生海水のそれと比べると、2 μ 以下の粒子は捕捉されていない。3 μ の粒子は 20%、4 μ の粒子は 30%、5~6 μ の粒子は約 50% が捕捉されており、大きな粒子ほど捕捉率が高い。2 個のマガキを通り、3 番目の個室に入る海水では、2 μ の粒子は 40% が捕捉される。3 μ の粒子は、1 番目のマガキの捕捉と合わせて 55%、5 μ の粒子は 60% が捕捉される。1 個のマガキを通った海水と比べて、2~3 μ の粒子がよく捕捉されている。3 個のマガキを通り、4 番目の個室に入る海水は、2 個のマガキの捕捉と合わせて、2 μ の粒子は 50%、3 μ の粒子は 70%、6 μ の粒子では約 80% の粒子が捕

Fig. 1. Efficiency of removal by the filtering activity of the Japanese oyster of natural particles of different size fraction. Upper; per cent decrease in number of particles in the water entering four troughs, which were connected in series, each holding an oyster. Lower; hourly decrease in number of particles in a 8 l-trough holding a single oyster.

必要がある。一般的には、捕捉量に対する排せつ物量の比 B/A の値は、0.7~0.8 から1近くまでの範囲が正常な値と考えられる²⁾。今回の、階段水槽を用いた実験で得られたこの比の値は 0.4~0.7 で、上述の正常値より低い。上から1, 2, 4番目の個室のマガキの B/A 比の値は約 0.7 で正常値と考えられるが、3番目の個室のマガキでは 0.41 と特に低く、5番目のマガキも 0.50 と少し低い。

WALNE⁹⁾ は、流水量と間接法によるろ過水量との間には正の相関関係が成立することを示した。しかし HILDRETH and CRISP⁶⁾ は、流水量の少ないときのろ過水量の低下は、流水量が少ないために、供試動物に注水水を十分に供給することができず、再ろ過が起ることによる見掛け上の低下であることを報告している。そして、流水量をろ過水量の5倍にしても、なお見掛け上の低下が起ると述べている。今回の流水式による実験では、懸濁粒子の捕捉状態を調査する目的から、注水量を 30 l/hr と少なくしている。このため、ろ過水量の多い3番目のマガキでは、再ろ過が一部起つて、 B/A 比の値は 0.41 と低くなつたのではないかと考えられる。このことと、実験開始前1夜静置しているので、供試マガキの摂餌は正常に行われており、また下限粒子の捕捉も、正常な状態を反映していると考えられる。したがつて、今回の両実験から、マガキが捕

される。5番目の個室に入る海水中の微小粒子数は、4番目の個室に入る海水中のそれに比べて、少し捕捉率が高まる傾向がみられたが、大きな差はなかつた。

止水中で、すなわち水槽にマガキを1個入れ、この中の海水中の懸濁微小粒子の時間的減少状態を、粒子の大きさ別に、生海水中の各々の大きさに対する百分率で示したのが Fig. 1 (lower) である。1時間後には、2 μ の粒子は生海水のその35%、3 μ より大きな粒子では約 45% が減り、3 μ 以上の粒子がよく捕捉されることを示している。2時間後では、2 μ の粒子は生海水のその55%、3 μ 以上の粒子は 70% が捕捉され、1.5 μ の粒子も約 40% が捕捉される。3時間後には、1.5 μ の粒子は 45%、2 μ の粒子は 60%、3 μ 以上の粒子は 80% が捕捉される。

以上2つの実験から、海水中の懸濁粒子数が多い場合には、3 μ 以上の粒子がよく捕捉されることを示している。粒子数が少なくなるにしたがつて、2 μ 以下の粒子も捕捉されるようになってくる。したがつて、生海水中の粒子数に対する捕捉率は、3 μ 以上の粒子では高いが、2 μ 以下の粒子では、小さな粒子ほど低くなる。マイクロセルカウンターでは 1 μ 以下の粒子は計数できなかったもので、今回の実験では 1.5 μ の粒子まで測定した。

考 察

マガキの摂餌は、外囲の変化に対して極めて敏感である^{2,7)}。したがつて、今回の実験で、マガキの摂餌が正常に行われていたかどうかを検討す

Table 4. Comparison of the suspended matter (in mg/l), using various filters

	1971	1972	
	Oct.	Feb.	Oct.
Whatman GF/C	1.4	1.3	3.8
Ultra fine filter	1.4	1.4	3.6
Membrane filter (0.45 μ)	2.1	1.9	3.6

捉できる下限粒子の大きさについては、次のように述べることができる。すなわち、懸濁粒子が十分に存在する状態では、主として 3μ 以上の大きさの粒子を捕捉し、懸濁粒子が減少するにしたがつて 2μ 以下の粒子も捕捉するようになる。この場合でも、 3μ 以上の粒子の捕捉率は高く、 2μ 以下の粒子では、小さな粒子ほど捕捉率は低くなる。そして、粒径別捕捉曲線 (Fig. 1) からみると、 1μ の粒子の捕捉は極めて少ないと考えられる。

カキによる懸濁物捕捉の下限粒子の大きさに関する研究はアメリカガキ *Crassostrea virginica* で行われており、JØRGENSEN and GOLDBERG⁹⁾ は、 $1\sim 2\mu$ の粒子はほとんどえらを通過するが、 $2\sim 3\mu$ の粒子はよく捕捉されると述べている。また HAVEN and MORALES-ALAMO¹⁰⁾ は、Coulter counter を用いて実験し、捕捉できる最小粒子は 0.8μ であるが、捕捉率の高いのは $3\sim 4\mu$ 以上の大きさの粒子であり、これより小さい粒子は捕捉率が低くなると報告しており、いずれも今回の実験結果と一致する結果が得られている。

次に、マガキが捕捉している大きなものを、マガキの胃内容物から調べると、*Coscinodiscus* が多数見られることから、かなり大きな粒子でもえらで捕捉され、摂餌されていると考えられる。アコヤガイでは、二枚貝の幼生が多数排せつ物の中に見られ、大きなものでは 200μ に達するものもあると報告¹¹⁾されている。

広島湾周辺の海水中の懸濁粒子の粒径分布は、 40μ 以下の粒子が約 90% を占めており、これより大きな粒子は僅かに 10% にすぎない。海洋懸濁物は、微小粒子の割合が高いことが多く報告されている¹²⁻¹⁵⁾。ただし、これは乾燥重量での測定結果であり、生の粒子の容積でみれば、 40μ 以上の大きさの粒子の占める割合は高くなると考えられる¹⁶⁾。しかし、 40μ 以下のものが多いことには変わりがないであろう。また、 300μ 以上の大きなものは極めて少ない。したがって、マガキの餌料量としては、大き過ぎて捕捉できないような懸濁物量は少なく、この量を分けて考える必要はないであろう。したがって、 3μ 以上の大きさの懸濁物量を測定すれば、それがマガキの餌料量とみなすことができるであろう。養殖場が多数存在し、 2μ 以下の粒子の捕捉率が高くなるような所では、 $1\sim 2\mu$ 以上の懸濁物量を測定すればよいと考えられる。

懸濁物量の測定には孔径 0.45μ の Membrane filter または Millipore filter (HA) が使われているが、これらのろ紙では、マガキが捕捉できないような小さな粒子までもが測定される。Whatman GF/C と Ultra fine filter は、約 1μ までの粒子を保持する¹⁷⁾ので、マガキの餌料量測定に使用できる。広島湾の懸濁物量を、3種のろ紙で測定した結果を比較すると、Table 4 に示したように、Whatman GF/C と Ultra fine filter で測定した懸濁物重量は大差ないが、Membrane filter (0.45μ) で測定した懸濁物重量は、他の2種のろ紙による測定値より重く、 1μ 以下の粒子で、マガキが捕捉できないような微小粒子も、かなり存在することを示している。これらのろ紙では、公称孔径よりも小さな粒子までも除くので¹⁷⁾、 3μ 以上の大きさの懸濁物量を正確に測定するには適していない。このためには、screen type で孔径 3μ の Nucleopore か metal filter を使用する必要がある。

本文を終えるにあたり、マイクロセルカウンターの使用に便宜をあたえられた東亜特殊電機株式会社柴田昌広、谷 正道両氏に深謝の意を表します。

文 献

- 1) 楠木 豊: 本誌, **43**, 163-166 (1977).
- 2) 楠木 豊: 同誌, **43**, 1069-1076 (1977).
- 3) 岡田徳弘: ミクロセルカウンターの畜産分野使用例文献集 (1), 1-7, 東亜特殊電機株式会社学術センター。
- 4) R. W. SHELDON and T. R. PARSONS: A practical manual on the use of the Coulter counter in marine science. Coulter Electronics, Ontario, 66 pp. (1967).
- 5) 木村知博・溝上昭男・橋本俊将: 日本プランクトン学会報, **19**, 82-112 (1973).
- 6) D. I. HILDRETH and D. J. CRISP: *J. Mar. Biol. Assoc.*, **56**, 111-120 (1976).
- 7) C. B. JØRGENSEN: *Biology of Suspension Feeding*, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, 1966, pp. 90-102.
- 8) P. R. WALNE: *J. Mar. Biol. Assoc.*, **52**, 345-374 (1972).
- 9) C. B. JØRGENSEN and E. D. GOLDBERG: *Biol. Bull.*, **105**, 477-489 (1953).
- 10) D. S. HAVEN and R. MORALES-ALAMO: *Biol. Bull.*, **139**, 248-264 (1970).
- 11) 太田 繁: 国立真珠研報, **5**, 443-449 (1959).
- 12) D. S. HAVEN and R. MORALES-ALAMO: *Sedimentary Geol.*, **2**, 141-145 (1968).
- 13) L. A. HOBSON: *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 642-649 (1967).
- 14) T. R. PARSONS: *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, **25**, 172-181 (1969).
- 15) G. A. RILEY: *Limnol. Oceanogr.*, **8**, 372-381 (1963).
- 16) R. W. SHELDON, A. PRAKASH, and W. H. SUTCLIFFE, Jr.: *Limnol. Oceanogr.*, **17**, 327-340 (1972).
- 17) R. W. SHELDON: *Limnol. Oceanogr.*, **17**, 494-498 (1972).