

ハマチ *Sariola quinqueradiata* 養殖場における沈降粒子束多田 邦尚,^{1*} 門谷 茂,² Veeraporn Suksomjit,¹ 広瀬 敏一,¹ 一見 和彦³

(2008年9月24日受付, 2008年12月9日受理)

¹香川大学農学部, ²北海道大学大学院環境科学院,³香川大学瀬戸内圏研究センター庵治マリンステーションSettling flux at Yellowtail *Sariola quinqueradiata* aquaculture farmKUNINAO TADA,^{1*} SHIGERU MONTANI,² VEERAPORN SUKSOMJIT,¹TOSHIKAZU HIROSE¹ AND KAZUHIKO ICHIMI³

¹Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki, Kagawa 761-0795, ²Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0810, ³Aji Marine Station, Seto Inland Sea Regional research Center, Kagawa University, Takamatsu, Kagawa 761-0130 Japan

We conducted 21 replications of sediment trap experiments at a yellowtail *Sariola quinqueradiata* farm in Uwajima Bay, Shikoku Island, western Japan. Settling fluxes (mass per unit time and unit area) varied from 2.52 to 62.8 g/m²/day and those of the low temperature season (November, December and January) were higher than those of the warm and stratified season (March to August), probably due to vertical mixing in the water column. Yellowtail were provided food as either dry or moist pellets. The settling fluxes where dry pellets were used were lower than those where moist pellets were used. Additionally, the settling flux was determined under an alternative feeding method where fishermen gradually fed yellowtail by hand. Although this technique requires more effort at first, fish neither struggled nor jumped as they acclimated to the feeding regime (non-jump aquaculture method). Our results indicate that organic loading is limited if fish are provided dry pellets under the non-jump aquaculture method.

キーワード：魚類養殖場, セジメント・トラップ, 沈降粒子束, ハマチ

わが国の漁業生産において、沿岸での増養殖・漁業生産は大変重要であり、生産の場としての沿岸・内湾水域の環境保全の必要性はますます高まっている。¹⁾ 海面養殖業の生産額は2005年には4,400億円に上っており、そのなかで魚類養殖が1,900億円で、海面養殖生産金額の約45%を占めている。²⁾ 従って、魚類養殖は沿岸漁業の中でも重要な地位を占めると共に産業としての基盤を確立していると言える。

しかし、一方で、魚類養殖は生簀周辺への有機物負荷を増大させることとなり、漁場の環境の悪化、即ち、自家汚染の問題も指摘されてきた(例えば、窪田³⁾あるいはPawar *et al.*⁴⁾)。また、このような自家汚染の影響は生簀周辺に限られるものの、底泥動物相にもおよぶことが報告されている(例えば、Lumb⁵⁾あるいはWeston⁶⁾)。このような事態に対処するためには漁場汚

染の機構を解明し、適切な管理技術や防除技術を確立することが重要である。そのことは、魚類養殖を将来にわたって持続的に維持・発展させていくことにもつながるはずである。

近年、わが国の魚類養殖場の環境については、上出^{7,8)}が底泥環境について詳しく検討を行っている。しかし、生簀周辺の海域からの底泥への負荷、即ち、沈降粒子についての研究は非常に少ない(例えば Tsutsumi *et al.*⁹⁾)。本研究では、魚類養殖(ハマチ)の盛んな愛媛県宇和島湾において過去行った計21回のセジメント・トラップ実験の結果について整理し、季節や使用する餌の違いによる沈降粒子束の差を明らかにするとともに、環境への有機物負荷の少ない魚類養殖についての検討を行ったので報告する。

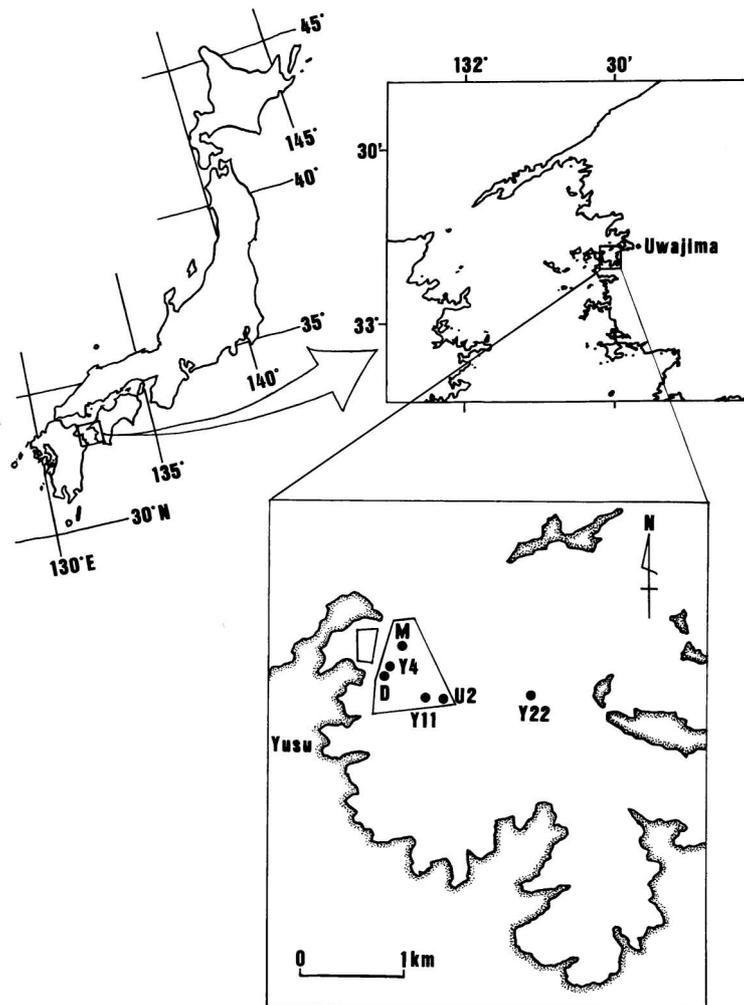


Fig. 1 Map of the observation area. Enclosed areas in the map show fish farms.

試料および方法

魚類養殖場 愛媛県宇和島湾は深い入り江と半島が交錯したリアス式海岸が続いており、その地理的な利点を活かして古くから水産養殖が営まれてきた。調査対象としたハマチ養殖場は、宇和島湾の南部に位置する遊子の地先の海域にある (Fig. 1)。本湾は日本有数の真珠の産地として有名であり、Fig. 1 に示した魚類養殖場の周りには、真珠養殖場がある。1984年から1989年にかけて調査を行ったハマチ生簀では、ドライペレットとモイストペレットの2種の給餌飼料が用いられた。各生簀のサイズは10×10×8 mであった。

また、2007年には、上記の1984年から1989年にかけて調査を行った生簀とは異なる給餌法 (ハマチが摂餌時に飛び跳ねない給餌法) を行っている生簀で調査を行った。その給餌法とは即ち、養殖初期のモジャコノ期間から約1年間は給餌の際に給餌機械を用いずに時間をかけて手で少しずつ餌を与えるものである。この給餌方

法をとることにより、後に、モジャコやツバスが成長して給餌機械を用いて給餌を行う際にもハマチは摂餌の際に飛び跳ねることがなくなる。ハマチが飛び跳ねない事は、摂餌時のエネルギーロスを防ぎ、増肉係数の増加につながる。さらに、ハマチの摂餌の際の水流も穏やかになり、給餌した餌が水流により生簀の外へ放り出されることもなくなり餌効率も増すことになる。なお、このハマチが摂餌時に飛び跳ねない給餌法では各生簀のサイズは12×12×8 mであり、餌はドライペレットのみが用いられた。

沈降粒子の捕集 1984年から2007年にかけて、魚類 (ハマチ) 養殖場内にセジメント・トラップを設置し、沈降粒子を捕集測定した。沈降粒子捕集には、Montani *et al.*¹⁰⁾ のトラップを一部改良した M 型トラップを用いた。このトラップシステムは直径 8 cm、深さ 30 cm のアクリル製の筒を 6 本装着しており、実験の際には、捕集された粒子の筒内での舞上りを防止するため、筒の底に高さ 5 cm で 1 cm × 1 cm のプラスチック製のグ

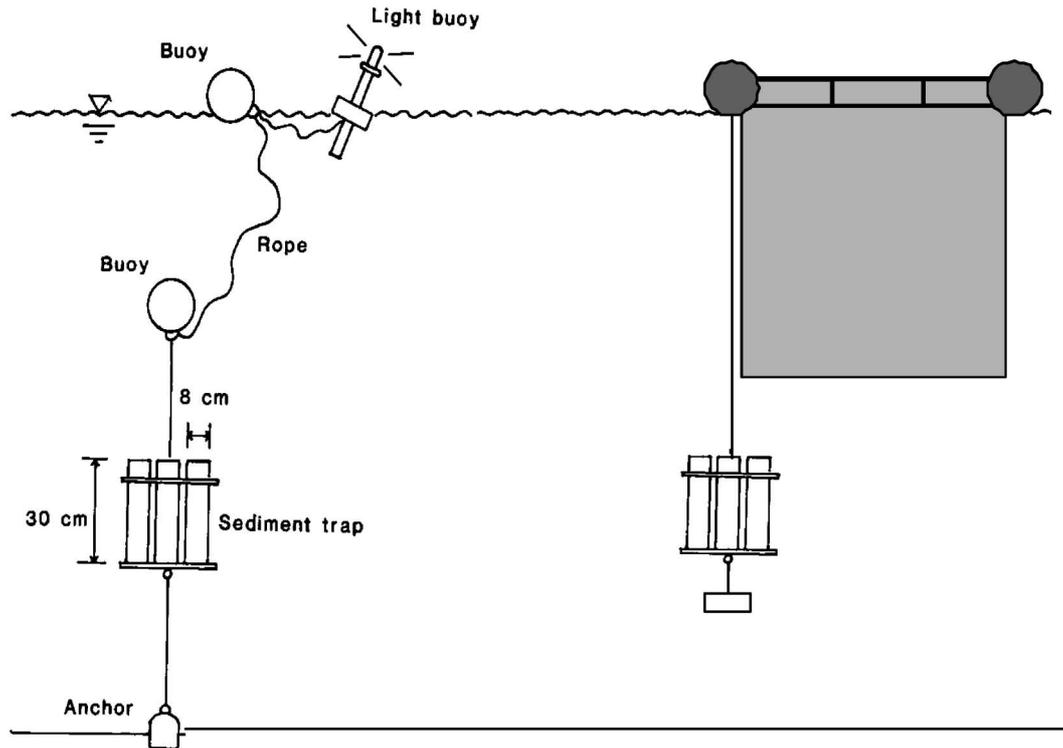


Fig. 2 Illustration of the sediment trap system.

リッドを使用した。沈降粒子捕集の際には、このトラップシステムを Fig. 2 のように錘と中間ブイを係留した。また、養殖生簀の観測点では、直接、生簀から係留した。なお、沈降粒子捕集の際には、24 時間係留し、トラップ容器内には防腐剤等は使用しなかった。

沈降粒子は捕集後、速やかに実験室に持ち帰り、トラップの筒を静置してサイフォンで上澄液を取り除き、予め強熱処理 (450°C, 2 時間) した Whatman GF/F フィルター上に吸引ろ過して捕集 (ろ過法) した。フィルターは直ちに凍結後、凍結乾燥して後の分析に供した。なお、一部の試料についてはろ過法ではなく、遠心分離法 (3000 rpm, 15 min.) により、海水と沈降粒子を分離した。

試料の分析 沈降粒子中の有機態炭素・窒素を元素分析計を用いて測定した。1984 年から 1989 年にかけて採取された試料については、柳本社製 Yanaco MT-5 を、また 2007 年に採取されたものについては、J Science Rabo 社製 JM 10 を用いて有機態炭素・窒素を同時測定した。

また、一部の試料については沈降粒子中のリンを測定した。1984 年から 1989 年にかけて採取された試料については、Menzel and Cowin¹¹⁾ の方法で過硫酸分解後モリブテンプルー法¹²⁾ で測定した。また、2007 年に採取された試料については Aspila *et al.*¹³⁾ Solorzano and Sharp¹⁴⁾ の方法に基づく Suzumura *et al.*¹⁵⁾ の方法でリン

を測定した。

結果および考察

魚類養殖場における沈降粒子束と沈降粒子の有機物含量 本研究において、実施した計 21 回の沈降粒子束の測定結果および沈降粒子の化学組成を Table 1 に示した。測定された沈降粒子束は、1.49~62.8 g/m²/d であった。魚類養殖場における残餌や糞などの沈降物質の沈降・堆積は、餌料の形態、漁場の流速および水深に密接に関係するとされており、¹⁶⁾ 単純に他の養殖漁場との比較はできない。従って、ここでは、今回得られた沈降粒子束の結果から、その季節変動、養殖の内外における差、および給餌飼料による違いなどに注目してみる。

まず、魚類養殖場の外側で行った値を除外したもの、即ち魚類養殖場内でのみ行った沈降粒子束の測定結果 (計 17 回) を Fig. 3 に示した。前述のように、調査を行った生簀では、ドライペレットとモイストペレットの 2 種の給餌飼料が用いられており、また、中にはセジメント・トラップを、生簀に直接係留した場合の値 (1985 年 8 月, 2007 年 7 月) も含まれているが、これらすべてを含めた大まかな傾向を見てみると、沈降粒子束は、2.52~62.8 g/m²/d (平均値 18.7 ± 15.9 g/m²/d, $n=29$) であり、1 月, あるいは、11 月, 12 月の低水温期に高い傾向が認められた ($p < 0.001$)。また、沈降粒子束を有機物沈降量 (炭素沈降量・窒素沈降量) に換

Table 1 Total flux and organic carbon and nitrogen contents of settling matter

Observation	Month	Moon's age	Location	Depth (m)	Trap setting depth (m)	Total flux (g/m ² /d)	Settling matter			C/N (mol/mol)	N/P (mol/mol)	
							(mgC/g)	(mgN/g)	(mgP/g)			
1984	Aug.	10.6	Stn. U2	45	25	4.26	164.5	20.00		9.6		Yellowtail farm
					40	10.04	79.5	9.10		10.2		
1985	May	10.4	Stn. U2	45	30	2.17	255	30.70		9.7		Yellowtail farm
					45	4.33	67.4	10.50		7.5		
	Aug.	19.1	Stn. U2	45	30	4.95	168	18.00		10.9		
					45	5.87	132	16.70		9.2		
Dec.	26.4	Stn. U2	45	25	29.2	48	5.78		9.7			
				40	31.6	25	4.22		6.9			
1985	Aug.	19.1			25	18.5	250	24.20		12.1		below the cage of yellowtail farm
					25	16.5	292	32.90		10.4		
1987	Jun.	4.4	Stn. Y11	47	15	4.79	232	44.00		6.2		Yellowtail farm
					42	2.52	148	25.20		6.9		
	Jul.	1.2	Stn. Y12	49	15	2.93	73.6	9.80		6.9		
				44	52.6	26.3	3.20		5.7			
1987	Jun.	4.4	Stn. Y22	55	15	1.49	110	15.20		8.4		Outside of farm
					50	1.53	73.8	8.80		9.8		
	Jul.	1.2	Stn. Y22	55	15	2.23	87.9	12.30	2.19	8.3	12.4	
				50	6.67	44.3	5.60	1.84	9.2	6.7		
1988	Mar.	26.4	Stn. Y11	47	15	8.04	103	12.40	2.40	8.6	11.4	Yellowtail farm
					42	7.68	94.9	19.90	1.00	7.8	44.1	
	Jul.	5.7	Stn. Y4	42	7	23.83	206.2	31.30	41.70	7.7	1.7	
				37	24.16	219.7	30.10	21.20	8.5	3.1		
1988	Mar.	26.4	Stn. Y22	55	15	2.11	135	17.80	2.00	8.8	19.7	Outside of farm
					50	3.34	99.3	11.30	1.20	4.5	20.9	
1989	Jan.	9.2	Stn. Y11	47	12	21.2	39.7	3.30	25.7	14.0	0.3	Yellowtail farm
					42	37.0	66.4	6.70	24.1	11.5	0.6	
	Jul.	2.8	Stn. D	45	10	3.67	299	45.70		7.6		Yellowtail farm (Dry pellet)
					20	8.74	192	21.10		10.6		
					40	7.75	86.7	11.00		9.2		
	Jul.	2.8	Stn. M	45	10	14.8	166	31.20		6.2		Yellowtail farm (Moist pellet)
					20	12.8	186	32.20		6.7		
					40	17.5	141	18.30		9.0		
	Jul.	20.8	Stn. D	45	10	9.44	199	25.70		9.0		Yellowtail farm (Dry pellet)
					20	10.9	163	18.60		10.2		
					40	20.01	96.6	11.30		10.0		
	Nov.	2.4	Stn. D	45	10	38.0	78.5	9.80		9.3		Yellowtail farm (Dry pellet)
20					41.4	71.1	8.60	0.77	9.6	0.9		
40					62.8	61.7	6.80	0.72	10.6	0.6		
Nov.	2.4	Stn. M	45	10	38.7	85.3	11.00	0.44	9.0	1.2	Yellowtail farm (Moist pellet)	
				20	45.3	82.0	10.00	1.10	9.6	1.0		
				40	40.1	70.1	8.70	1.03	9.4	0.9		
1989	Jan.	9.2	Stn. Y22	55	21							Outside of farm
					51	11.2	39.2	3.90	0.60	11.7	0.3	
2007	Jul.	11.9		60	15	4.69	172.5	12.70	4.75	15.8	0.8	below the cage of yellowtail farm
					*15	5.06	177.7	16.50	3.12	12.6	1.3	

*: No feeding day

算すると、炭素・窒素の沈降量は、それぞれ、 $1.88 \pm 1.42 \text{ gC/m}^2/\text{d}$ 、 $0.239 \pm 0.186 \text{ gN/m}^2/\text{d}$ であり、図には示していないが、炭素・窒素沈降量も、沈降粒子束の季節変化とほぼ同じ傾向が認められた。

次に、沈降粒子の有機物含量に注目してみる。高い沈

降粒子束が観測された11月、12月および1月の沈降粒子とそれ以外の月の沈降粒子の炭素・窒素含量を比較した結果をTable 2に示した。両期間で、有機態炭素・窒素含量ともに、11月、12月および1月の方が有意に低かった(炭素、窒素についていずれも $p < 0.001$)。即ち、

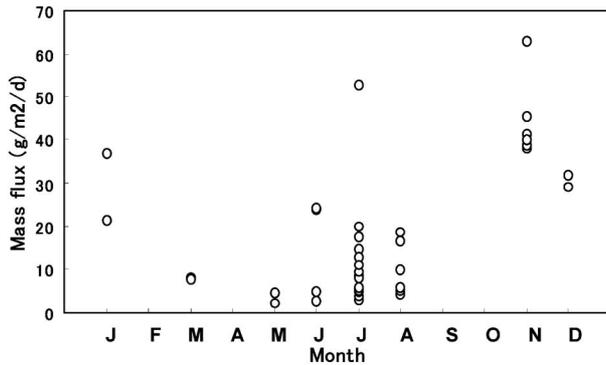


Fig. 3 Seasonal variations of total mass flux at yellowtail farm.

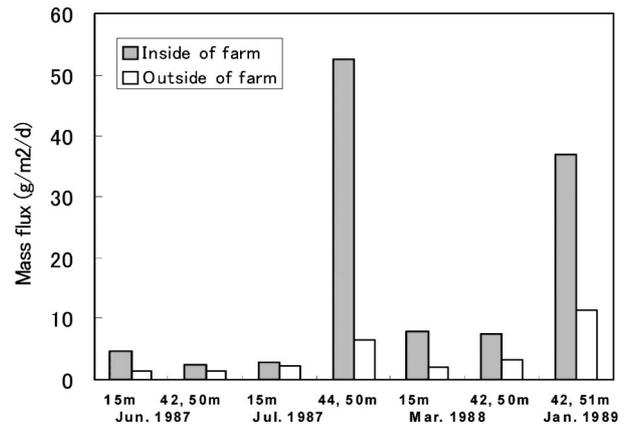


Fig. 4 Total mass flux inside and outside of yellowtail farm.

Table 2 Organic carbon and nitrogen contents of settling particles

Period	Total flux		Settling matter		C/N
	(g/m ² /d)	(mgC/g)	(mgN/g)	(mol/mol)	
Jan., Nov. and Dec. n=10	38.5±11.0	62.8±19.5	7.49±2.56	10±1.8	
Mar. to Aug. n=29	11.0±10.2	164±67.5	21.3±10.3	9.2±2.2	

11月、12月および1月の沈降粒子束は3月から8月の値に比べて高く、沈降粒子中の炭素、窒素含量は逆に低い。このように低水温期に沈降粒子束が高く、有機物含量の低い粒子が沈降していることは、以下のように解釈される。論文中の図には示していないが、調査を実施した海域では、水塊構造は1月、11月および12月の間（低水温期）は鉛直混合している。¹⁷⁾そのため、鉛直混合期には、底層あるいは底泥から巻き上がった粒子がセジメント・トラップに捕集されたためと考えられる。特に、海底から5m直上に設置したセジメント・トラップには特に海底からの巻き上がりの影響が大きかったと考えられる。更に、その事は、低水温期の沈降粒子束がそれ以外の時期に比べて大きいにもかかわらず、逆に沈降粒子の炭素・窒素含有量がそれ以外の時期に比べて低くなっていることから支持される。即ち、低水温期には海底から、炭素・窒素含有量の低い粒子が底泥から巻き上がり、セジメント・トラップに捕捉されていると考えられる。Tsutsumi *et al.*⁹⁾は、熊本県本渡市のマダイ養殖場で周年を通して沈降粒子束を測定しており、有機物の沈降粒子束は生簀での餌使用量の変化とは必ずしも一致せず、秋季に海水の鉛直混合が起きる時期に年間の最大値に達したと報告している。上記のことは、この報告ともよく一致している。

魚類養殖場の内外における沈降粒子束 1987年6月、

7月、1988年3月、および1989年1月に、魚類養殖場の内外で沈降粒子束を同時に測定し比較した (Fig. 4)。養殖場内での沈降粒子束は2.52~52.6 g/m²/d、養殖場外での沈降粒子束は1.49~11.2 g/m²/dであった。また、養殖場内での有機態炭素の沈降量は養殖場の内側と外側でそれぞれ、216~2,460 gC/m²/d、113~439 gC/m²/d、有機態窒素については、それぞれ、28.7~248 gN/m²/d、13.5~43.7 gN/m²/dであった。

以上のように、養殖場内での沈降粒子束は、養殖場外よりも常に高く、この傾向は、炭素・窒素沈降量でも同様であった。このことから、給餌に伴う有機物負荷が、海水中の沈降粒子束の増加という形で認められ、堆積物への粒子状有機物の直接負荷が確認された。ただし、その沈降粒子中の有機態炭素・窒素含量の間では、養殖場内外で有意な差は認められず、C/N比は7.7~8.7の値であった。Tsutsumi *et al.*⁹⁾は、ドライペレットとモイストペレットの乾燥重量あたりの炭素含量は、それぞれ46.49%、45.99%、窒素含量はそれぞれ7.38%、7.82%であり、両者の炭素、窒素含量は変わらないと報告している。このドライペレット、モイストペレットのC/N比は8.3である。山田ら（投稿中）も、ドライペレット、モイストペレットの乾燥重量あたりの炭素含量はそれぞれ44.9~49.6%、37.8~48.9%、窒素含量は7.72~9.72%、9.30~10.8%と報告しており、この値から計算するとドライペレット、モイストペレットのC/N比は、それぞれ5.4~7.5、4.7~5.3ということになる。これらのことをまとめると、沈降粒子中のC/N比は7.7~8.7の値であり、給餌飼料のC/N比の4.7~8.3 (Tsutsumi *et al.*⁹⁾ および山田ら（投稿中）よりは近い値であるが、目視の結果、セジメント・トラップに捕集された粒子のなかには残餌あるいは糞のようなものも観察されており、沈降粒子を構成するものが定量的に何であるかについては明らかではない。

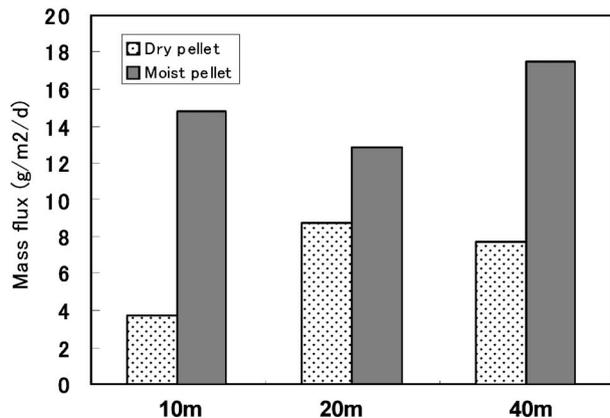


Fig. 5 Total mass flux at yellowtail farm where dry pellets and moist pellets were fed.

給餌飼料の違いによる沈降粒子束の差 1989年7月および11月に、ドライペレットとモイストペレットの2種の異なる給餌飼料を用いた生簀において、水深15mにおける沈降粒子束を同時に測定した。7月に観測されたドライペレット区の沈降粒子束は、3.67~8.74 g/m²/d、モイストペレット区の沈降粒子束は、12.8~17.5 g/m²/dであり、3段階のどの深さにおいても、ドライペレット区の沈降粒子束の方が小さかった (Fig. 5)。全層で平均すると、ドライペレット区とモイストペレット区でそれぞれ 6.72 ± 2.69 g/m²/d、 15.0 ± 2.36 g/m²/dであり、両者の生簀付近の海水中の栄養塩や懸濁粒子のレベルには差がないにもかかわらず (門谷ら¹⁸⁾)、ドライペレット区の方が有意に低かった ($p < 0.05$)。

一方、両区の沈降粒子中の炭素含量はドライペレット区とモイストペレット区でそれぞれ3層の平均は 193 ± 106 mgC/g、 164 ± 23 mgC/g、窒素含量では、それぞれ 25.9 ± 17.8 mgN/g、 27.2 ± 7.8 mgN/gであり、両区の間には有意な差は認められなかった。また、C/N比についてもドライペレット区とモイストペレット区でそれぞれ3層の平均が、 9.1 ± 1.5 、 7.3 ± 1.5 と両区の間には有意な差は認められなかった。

11月に観測されたドライペレット区とモイストペレット区の沈降粒子束は、 $38.0 \sim 62.8$ g/m²/dで、7月に比べ明らかに高い値であった。また、両区における明確な差は認められなかった。このことは、前述のように、鉛直混合期には、底層あるいは底泥から舞い上がった粒子がセジメント・トラップに捕集されたためと解釈される。

以上のことから、ドライペレット区とモイストペレット区とでは、成層期には沈降粒子束はドライペレット区の方が有意に低い、有機物の質的には同じものが沈降していることが考えられた。

ハマチが摂餌時に飛び跳ねない給餌法と沈降粒子束

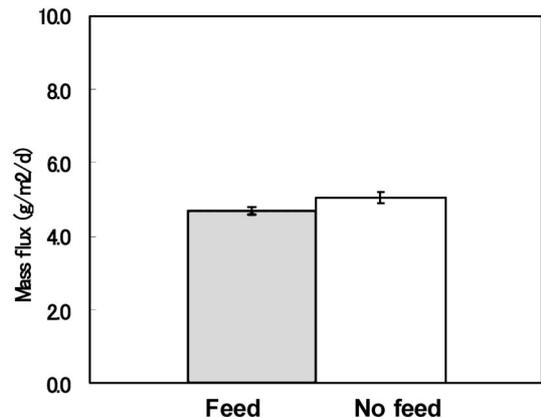


Fig. 6 Total mass flux at yellowtail farm on feeding and no feeding day.

2007年7月に、養殖初期における給餌の際に時間をかけて手で少しずつ餌を与え、ハマチが摂餌時に飛び跳ねることがなくなった生簀において、給餌日と非給餌日に生簀より直接セジメント・トラップを設置し沈降粒子束を測定した。給餌日と非給餌日の沈降粒子束は、それぞれ 4.69 ± 0.11 、 5.06 ± 0.15 g/m²/dであり、両者間に有意な差は認められなかった (Fig. 6)。また、同じ夏季である1985年8月に、ハマチの生簀より直接セジメント・トラップを設置し沈降粒子束を測定した結果 ($16.5 \sim 18.5$ g/m²/d)と比較しても、一桁低い値であった。

本生簀における沈降粒子中の有機態炭素含量は、給餌日と非給餌日で173、178 mgC/gとほぼ同程度で、C/N比は13~16であった。前述のように、Tsutsumi *et al.*⁹⁾ および山田ら (投稿中) の結果より給餌飼料のC/N比は、4.7~8.3であり、本生簀で得られた沈降粒子のC/N比 (13~16) は、給餌飼料のそれとは大きく異なっていた。即ち、給餌日にも投餌の影響は認められず、さらに給餌日にも非給餌日にも給餌飼料とは異なる有機物が同程度沈降していることが考えられた。

有機物負荷の少ない魚類養殖法 魚類養殖場では、これまでに排泄物や残餌による有機物や栄養塩の負荷が周辺水域や底泥等環境面に悪影響を与えていることが海外でも報告されている (例えば、Johnsen *et al.*¹⁹⁾)。また、魚類養殖場では、非養殖場と比べて水柱の栄養塩濃度や、有機物濃度が増大すること (例えば、Penczak *et al.*²⁰⁾ あるいは Philips and Beveridge²¹⁾)、さらに、底泥への有機物の堆積のために底泥の酸素要求量が高まり、その結果、水域の負酸素化、富栄養化が進行することが報告されている。²²⁾

一方、給餌養殖場における環境に対する有機物負荷を軽減させ、漁場を持続的にかつ適正に利用するための努力が続けられてきており、それらは、(1)転換効率のよい給餌飼料の開発、(2)漁場の特性に配慮した効果的な漁場

利用のための養殖環境評価法の開発, (3)漁場の総合的な環境管理のための指標の探索と漁場管理モデルの開発, (4)老朽化した漁場の再生と環境改善のための物理, 化学および工学的方法の開発などに整理される。¹⁾

本研究では, 鉛直的な粒子輸送の観点から, 有機物負荷の現状について考察した。その結果, 用いる餌料としてはモイストペレットよりも, ドライペレットを, また, 給餌方法としては, 給餌の際に時間をかけて手で少しずつ餌を与え, ハマチが摂餌時に飛び跳ねることがなくなる給餌方法の採用が環境への有機物負荷の軽減につながると考えられた。

謝 辞

本研究を行うにあたり, ご協力頂いた愛媛県宇和島市の遊子漁業協同組合の皆さんに深く感謝致します。また, 環境への有機物負荷を押さえる養殖法の検討について, 多大なるご協力を頂いた, 広瀬マリン産業(株)社長の広瀬駒雄氏に深く感謝致します。尚, 本研究の一部は, 平成20年度香川大学プロジェクト研究経費によるものである。

文 献

- 1) 伊藤克彦. 環境にやさしい増養殖. 「水産学シリーズ103 水産と環境」(清水 誠 編) 恒星厚生閣, 東京. 1994; 19-28.
- 2) 農林水産省統計部. 平成17年漁業・養殖業生産統計年報, 東京. 2007; 37-48.
- 3) 窪田敏文. 魚類養殖場. 「水産学シリーズ21 浅海魚類養殖と自家汚染」(日本水産学会編) 恒星厚生閣, 東京. 1977; 9-18.
- 4) Pawar V, Matsuda O, Yamamoto T, Hashimoto T. Spatial and temporal variations of sediment quality in and around fish cage farms: a case of aquaculture in the Seto Inland Sea, Japan. *Fish. Sci.* 2001; **67**: 619-627.
- 5) Lumb CM. Self-pollution by Scottish Salmon farms? *Mar. Poll. Bull.* 1989; **20**: 375-379.
- 6) Weston DP. Quantitative examination of macrobenthic community changes along an organic enrichment gradient. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1990; **61**: 233-244.
- 7) 上出貴士. 田辺湾中央部漁場における魚類養殖の有機物負荷が海底堆積物の化学的特性及びマクロベントス群集へ及ぼす影響範囲. 日水誌 2007; **73**: 1065-1073.
- 8) 上出貴士. 和歌山県沿岸の養殖漁場における環境指標としての酸揮発性硫化物含量の有効性とその基準値の設定の試み. 日水誌 2008; **74**: 402-411.
- 9) Tsutsumi H, Srithongouthal S, Inoue A, Sato A, Hama D. Seasonal fluctuations in the flux of particulate organic matter discharged from net pens for fish farming. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 119-127.
- 10) Montani S, Tada K, Okaichi T. Purine and pyrimidine Base in Marine Particles in the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Chem.* 1988; **25**: 359-371.
- 11) Menzel DW, Cowin N. The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.* 1965; **10**: 280-282.
- 12) Murphy J, Riley JP. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 1962; **27**: 31-36.
- 13) Aspila KI, Agemain H, Chau ASY. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst* 1976; **101**: 187-197.
- 14) Solorzano L, Sharp JH. Determination of dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 1980; **25**: 754-758.
- 15) Suzumura M, Kokubun H, Arata N. Distribution and characteristics of suspended particulate matter in a heavily eutrophic estuary, Tokyo Bay, Japan. *Mar. Poll. Bull.* 2004; **49**: 496-503.
- 16) 荻野静也. 汚染物質の物理的挙動. 「水産学シリーズ21 浅海魚類養殖と自家汚染」(日本水産学会編) 恒星厚生閣, 東京. 31-41.
- 17) 門谷 茂, 三島康史, 川染浩幸, 岡市友利. 宇和島湾の化学環境Ⅲ, 昭和61年度宇和島湾浅海養殖場環境調査報告書, 遊子漁業共同組合, 愛媛. 1987; 19-31.
- 18) 門谷 茂, 藤野俊輔, 岡市友利. 宇和島湾の化学環境Ⅶ, 平成2年度宇和島湾浅海養殖場環境調査報告書, 遊子漁業共同組合, 愛媛. 1991; 34-39.
- 19) Johnsen RI, Nielsen OG, Lunestad BT. Environmental distribution of organic waste from a marine fish farm. *Aquaculture* 1993; **118**: 229-244.
- 20) Penczak T, Galicka W, Molinski M, Kusto E, Zalewski M. The enrichment of a mesotrophic lake by carbon, phosphorus and nitrogen from the case aquaculture of rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *J. Appl. Ecol.* 1982; **19**: 371-393.
- 21) Philips T, Beveridge M. Cage and the effect on water condition. *Fish Farmer* 1986; **9**: 17-19.
- 22) Wu RSS, Lam KS, Mackay DW, Lau TC, Yam V. Impact of marine fish farming on water quality and bottom sediment: case study in the sub tropical environment. *Mar. Environ. Res.* 1994; **38**: 115-145.