

ノート

江田島湾の底質特性とカキ養殖が底質に与える影響について

山本 哲也, 伊達 悦二, 小田 新一郎*

Characteristics of Sediment in Etajima Bay and Influences of Oyster Cultivation on Sediment

TETSUYA YAMAMOTO, ETSUJI DATE and SHINICHIROU ODA*

(Received September 30, 2010)

Sediment Oxygen Demand(SOD) under the oyster cultivation raft in Etajima Bay was estimated to be 0.138-0.735gO/m²/day, and was the same level as in Hiroshima Bay. It was higher in high temperature than in low temperature. SOD was expressed by the formula: $y=0.0446e^{0.1085x}$ (y:SOD, x:Temperature of sediment). Nutrient releases from the sediment were higher in low oxygen concentration and high temperature than in high oxygen concentration and low temperature. The maximum release rate of nitrogen and phosphorus from sediment in Etajima Bay was estimated to be 75.6mgN/m²/day, 24.8mgP/m²/day respectively, and both of them were approximately 1.4 times higher than in Hiroshima Bay. Oyster feces were slightly better decomposed in high oxygen concentration than in low oxygen concentration. So, it showed that the decomposition of sediment was not remarkably accelerated even if the oxygen was supplied to the sediment forcibly.

Key words: Sediment Oxygen Demand(SOD), Nutrient release, Oyster feces

緒 言

江田島湾は江田島と能美島に囲まれ湾口幅450mと極めて狭い閉鎖的内湾であり, また流入河川の規模も小さいという地理的な条件から [1], 潮流は微弱であり, 波浪の影響だけでなく付着生物の影響を受けにくい特異な環境を持つ。このため, 本湾は県内のカキ生産者の約1/2を占める広島湾海域の生産者にとって台風や付着生物の被害を回避するための非常に重要な越夏漁場となっており, 春から夏にかけて2千台近いカキ養殖筏が集中する [2]。しかし近年, 養殖されているカキ及び, その付着生物の落下と排泄される糞により漁場環境の悪化が進行している。特に夏場には, 海底で貧酸素水塊が発達して海域の浄化能力が低下することにより, 環境悪化が更に進行するという悪循環に陥っている [1]。同一箇所についての底質について, 昭和45年と平成11年を比較するとCODはほぼ同等であったが, 全硫化物は平成11年の方が高かった [1]。

江田島湾は元来栄養に乏しく赤潮が発生しにくい海域

であったが, 平成9年以降は時々赤潮の発生が見られるようになった [1]。新興赤潮生物のヘテロカプサは, 高温・高塩分, 低海水交換率の他, 貧酸素水塊の発達等の要因により出現するとされており [3], 近年, 江田島湾においても養殖カキが大量斃死するリスクが高まっている。生産者からは, 夏場のヘテロカプサ赤潮を主な原因とした平成10年の大量斃死のような事態の再発を危惧する声が多く, カキ養殖方法の具体的改善策が求められている。

そこで, 江田島湾における底質特性として底泥の酸素消費速度と栄養塩溶出速度の検討を行うとともに, カキ養殖が底質に与える影響を把握するため筏からの落下物(主にカキ排泄物)の分解特性について検討したので報告する。

実験方法

1 底泥酸素消費速度 (Sediment Oxygen Demand : SOD)

SODに温度が与える影響を見るため室内実験を行っ

* 現広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター : Present Address, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, Fisheries and Marine Technology Center

た. 実験に用いる底泥試料として, カキ養殖筏下と筏外の各1箇所から不攪乱コア泥を採取した (Fig.1). 筏下については2007年10月と2008年2月にダイバーにより採取し, 筏外については2007年8月にHR型不攪乱柱状採泥器 (離合社) により採取した (Table 1). コア泥はアクリルパイプ (内径11cm, 長さ50cm) に採取し, 泥が乱れないよう中蓋をして持ち帰った. コア泥上層の海水をサイフォンで除去した後, 採泥地点の底層水をメンブレンフィルター (孔径 $0.45\mu\text{m}$) によりろ過し, その1Lをサイフォンでコア泥の上層に静かに注いだ. コア内の上層水に酸素ガスを通気し, 酸素飽和にした後, 上層水表面が空気に接しないよう中蓋をして恒温室内に1週間静置し, この間ほぼ24時間おきに溶存酸素 (DO) を測定した. 実験の温度条件は筏下については10, 20, 25℃の3条件で, 筏外は20℃とし, 光条件は暗条件で行った (Fig.2). DOの測定にはDOメーター (YSI/Nanotech社550A) を用いた. SOD ($\text{gO}/\text{m}^2/\text{d}$) は上層水中のDO濃度の変化から1日当たり, 底泥面積当たりとして求めた.

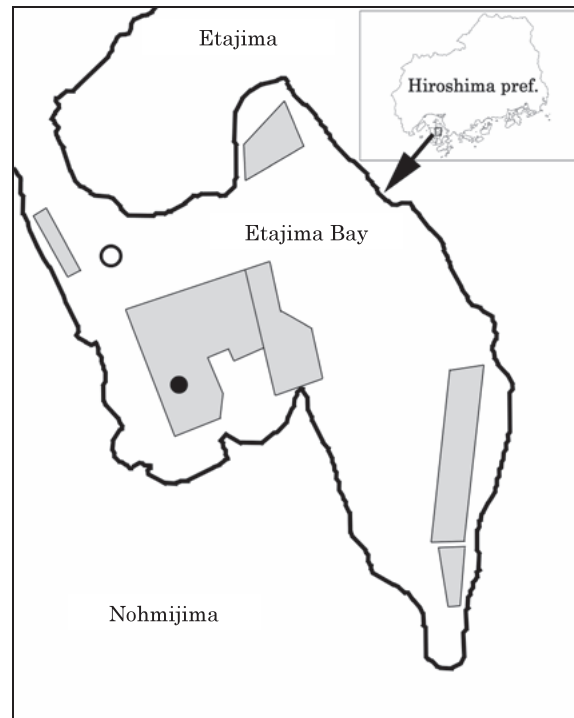


Fig.1 Map of Etajima Bay and sampling stations. Gray zone shows oyster raft zone. ●: Under raft, ○: Outside raft

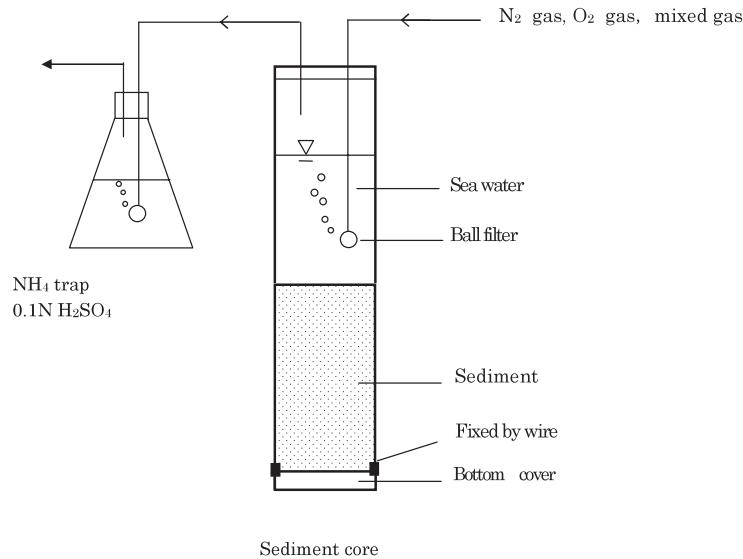


Fig.2 Equipment for nutrient release from sediment.

Table 1 Sediment sampling condition and experiment temperature condition

Station	Sampling date	Sampling methods	Experiment temperature condition	
			SOD	Nutrient release
Under raft	Oct-07	Diver	20, 25℃	20℃
	Feb-08	Diver	—	25℃
	Jun-08	Diver	—	10℃
Outside raft	Aug-07	HR undisturbed sediment core sampler	20℃	20℃

— : No data

2 底泥からの栄養塩溶出速度

栄養塩溶出速度に与える DO 濃度および温度の影響を見るため、室内実験を行った。実験に用いる底泥試料は「1 底泥酸素消費速度」と同じ採泥方法で2007年10月、2008年2月、6月に江田島湾内のカキ養殖筏下の海底及び2007年8月に筏外の海底から底泥コアを採取し (Fig. 1), 持ち帰った。コア泥上層の海水をサイフォンで除去した後、採泥地点の底層水をメンブレンフィルター (孔径 $0.45\mu\text{m}$) によりろ過し、その2Lをコア泥上層に静かに注いだ。コア内の上層水に標準混合ガス (酸素と窒素の混合)、窒素ガスを通気し、DO 濃度条件を0, 5, 10mg/Lとし、温度条件は、筏下は10, 20, 25℃, 筏外は20℃として (Fig. 2), 最大12日間静置した。この間24時間毎に上層水10mLを採取し、デイスポーザブルメンブレンフィルター (孔径 $0.45\mu\text{m}$) でろ過し、クロロホルムを1~2滴加え分析に供し、採泥地点のろ過海水を採取量だけ補充した。

採取した上層水中の無機態窒素 (DIN) 及び無機態リン (DIP) をオートアナライザーにより測定した (Table 2)。

3 カキ養殖場における落下物の分解特性

(1) 落下物の酸素消費速度実験

2008年6月に江田島湾内のカキ筏1台にセディメントトラップ (内径10cm 長さ50cm) を水深10mの深度に

10本24時間設置し、カキ糞等の落下物を捕集した。落下物からカキ殻等の異物を除去した後、海水250mLと混合したものを落下物試料として実験に供した。この試料1mLを102mL容 DO 瓶の底に入れ、メンブレンフィルター (孔径 $0.45\mu\text{m}$) でろ過したろ過海水を静かに注入し満水とした。温度条件を10, 20, 25℃の3条件に設定した恒温槽に入れて暗条件で最大5日間静置し、ほぼ24時間毎に DO 濃度を滴定法により測定した。

(2) 落下物の分解特性

(1)と同様の方法で2008年6月、10月に落下物を捕集し、持ち帰った。落下物から異物を除去した後、海水250mLと混合したものを落下物試料として実験に供した。ガラス繊維ろ紙 (Whatman 社製 GF/C) でろ過した海水500mLを1Lガラス瓶に注入し、落下物試料10mLを1Lガラス瓶の底に入れた。

落下物の分解に温度条件と酸素条件 (特に高濃度酸素) が及ぼす影響を見るため、それらを段階設定して0, 7, 14, 28, 56日経過後の落下物の炭素、窒素、リンを測定した (Fig. 3)。落下物の測定にはガラス繊維ろ紙 (Whatman 社製 GF/C) でろ過したろ紙上の残渣を4分割もしくは8分割して用いた。

温度条件は20℃ (6月採取), 25℃ (10月採取) とし、酸素条件は窒素ガス、窒素と酸素の標準混合ガス、酸素ガスを用い、酸素濃度条件として嫌気 (約0.8

Table 2 Materials and instruments

Sample	Materials	Instruments
Nutrient Release rate	DIN	Auto analyzer(Bran-Luebbe Traacs2000)
	DIP	
Oyster Feces	TC	CHN corder (Yanagimoto MT3)
	TN	
	TP	Auto analyzer(Bran-Luebbe Traacs2000)

DIN=Dissolved Inorganic Nitrogen($\text{NH}_4\text{-N, NO}_2\text{-N, NO}_3\text{-N}$)

DIP=Dissolved Inorganic Phosphorus($\text{PO}_4\text{-P}$)

TC=Total Carbon

TN=Total Nitrogen

TP=Total Phosphorus(decomposed by $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ digestion method as pretreatment)

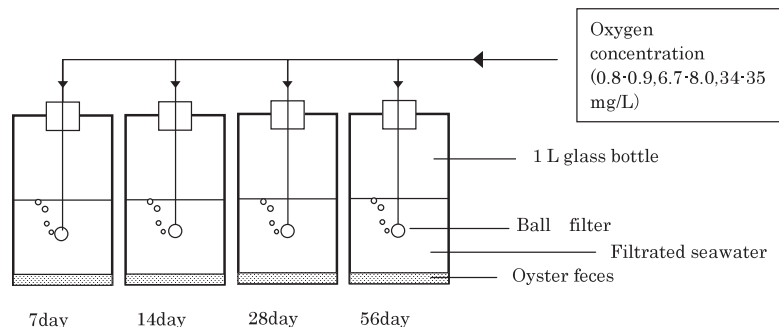


Fig.3 Equipment for decomposition of oyster feces.

～0.9mg/L), 飽和 (6.7～8.0mg/L), 高濃度 (約34～35mg/L) の3段階に設定して通気した。通気の強さは、1L ガラス瓶の底に沈着した落下物は攪乱しない程度とした。

落下物の全炭素 (TC) 及び全窒素 (TN) は、CHNコーダーにより、全リン (TP) は落下物を酸分解後、オートアナライザーにより測定した (Table 2)。

結果及び考察

1 底泥酸素消費速度

筏下においては0.138～0.735gO/m²/日のSODを示した (Table 3, Fig. 4)。楠木 [4] は広島湾北部のカキ養殖筏下の調査 (1978～1979年) からSODは0.09～0.73gO/m²/日と報告しており、その最大SOD値は本調査の江田島湾と同程度のレベルであった。広島湾奥部から厳島沖の4地点 (筏外) では、0.15～0.49gO/m²/日で、地点間のばらつきは小さく夏・秋に比べ冬・春が半分程度という季節変動が見られ、平均的には0.3～0.4gO/m²/日であった [5]。本調査から江田島湾は夏場の最大SOD値0.735gO/m²/日を除けば広島湾と同程度と考えられた。また、20℃での筏下と筏外ではSODに大差はなかった (Table 3)。

温度の影響を見ると、温度が高いほどSODも高く、夏場での底泥の酸素消費が顕著であることが認められた。SODに与える温度の影響を検討した結果、 $y = 0.0446e^{0.1085x}$ の関係式 (y: SOD [gO/m²/日], x: 温度) が得られた (Fig. 4)。楠木 [4] は広島湾北部の筏内の調査で、SODは温度により指数関数的に上

Table 3 Results of SOD (gO/m²/day)

Station	Temperature(°C)		
	10	20	25
Under Raft	0.138	0.342	0.735
Outside Raft	-	0.351	-

- : No data

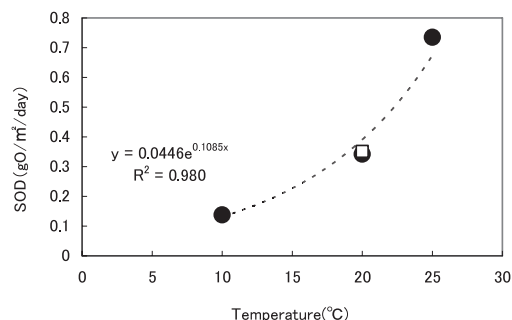


Fig.4 Relationship between SOD and temperature.
●: Under raft, □: Outside raft

昇すると仮定して、回帰式 $y = 1.046 \times 1.091^x$ (y: SOD [mgO/m²/時], x: 温度) を求めている。このように両方の関係式において、SODは温度により (線形関数的でなく高温域でより上昇率の高い) 指数関数的に上昇することが示された。

2 底泥からの栄養塩溶出速度

底泥からの最大溶出速度は窒素、リンともに25℃、DO濃度0.7mg/Lの時それぞれ75.6mgN/m²/日、24.8mgP/m²/日で、20℃に比べ25℃での溶出速度が高い傾向があり (Table 4, 5)、夏場に溶出速度が高くなることを示唆した。

溶出速度に及ぼすDO濃度の影響を見ると、窒素、リンともDO濃度と溶出速度との間に負の相関関係があり (r = -0.95～-1.00)、嫌氣的になるほど窒素、リンとも栄養塩溶出速度が高いことが認められた (Fig. 5, 6)。

以上のことから高温かつ低DO濃度の条件で溶出速度が大きくなることを示した。すなわち夏季に貧酸素状態であれば底泥からの溶出速度が大きくなることを示唆された。

井澤ら (1994) は嫌気条件下では窒素、リンともに溶出速度は温度に比例して増加し、好気条件下では、リンの溶出速度は温度に比例して増加したが、窒素はほとんど溶出がみられなかった [6] ことを報告している。これらの原因はリンについては底泥の有機物分解に対する温度の影響、窒素については脱窒によるものとしている。

一方、筏下と筏外の最大溶出速度の比較 (20℃のみ) をすると、窒素、リンでそれぞれ44～48mgN/m²/日、6～8mgP/m²/日と両者に大きな違いはなかった (Table 4, 5, 6)。

Seiki *et al.* [7] が調査した広島湾での窒素とリンのそれぞれの最大溶出速度、53.7mgN/m²/日、17.4mgP/m²/日と比較すると、江田島湾は75.6mgN/m²/日、24.8mgP/m²/日で窒素、リンとも約1.4倍大きいことを示した (Table 4, 5)。広島湾での窒素とリンの最大溶出速度は、底層水のDO濃度 (2～3mg/L程度) が低く一般的に温度も高い夏季に示されており [7]、本実験で得られた傾向と一致していた。

3 カキ養殖場における落下物の分解特性

(1) 落下物の酸素消費速度実験

落下物の酸素消費速度と温度との関係を見ると Fig. 7 に示すように正の相関関係が得られた。この結果、10～25℃の間では温度が高いほど酸素消費速度が大きくなることを認められ、SODと同じく夏季に酸素が多く消費されることが推察された。

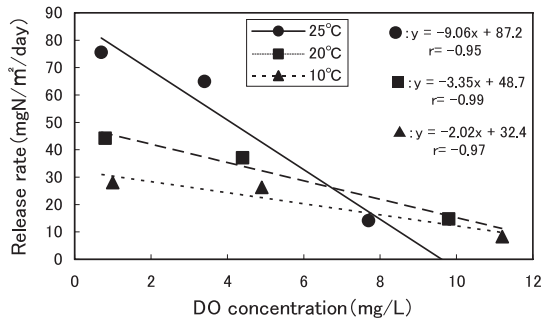


Fig.5 N release rate (under raft).

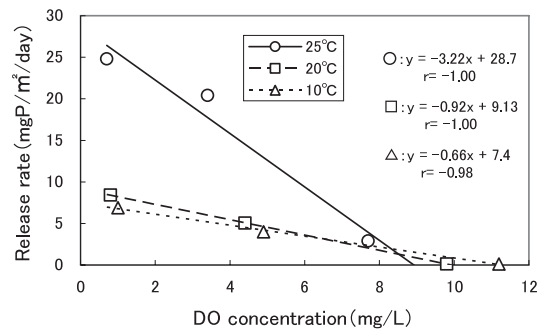


Fig.6 P release rate (under raft).

Table 4 N release rate (under raft: mgN/m²/day)

Temperature(°C)	DO(mg/L)								
	0.7	0.8	1.0	3.4	4.4	4.9	7.7	9.8	11.2
10			28.0			26.3			8.3
20		44.2			37.1			14.7	
25	75.6			64.9			14.1		

Table 5 P release rate (under raft: mgP/m²/day)

Temperature(°C)	DO(mg/L)								
	0.7	0.8	1.0	3.4	4.4	4.9	7.7	9.8	11.2
10			6.9			4.0			0.13
20		8.4			5.1			0.13	
25	24.8			20.4			2.9		

Table 6 Nutrient release (outside raft: mg/m²/day)

Matter	DO(mg/L)		
	0.4	1.8	9.0
N(20°C)	47.9	32.9	8.4
P(20°C)	5.98	3.47	1.49

(2) 落下物の分解特性

Table 7に現場落下物量及び落下物中の炭素, 窒素, リン含有量を示す. 捕集された落下物量は6月と10月でそれぞれ1.5g, 2.3gで, ややばらつきがあった. また, 落下物中の炭素, 窒素, リンの各成分含有量は両月で大きく異なった. すなわち6月は炭素, 窒素, リンでそれぞれ177, 27, 0.56mg/gに対し10月は52, 5.4, 2.6mg/gであった. 炭素: 窒素: リン比も6月が320: 48: 1に対し10月は20: 2.1: 1と異なった (Table 7). この違いは養殖筏のカキの養殖年数の違いに起因するのか, あるいは他の要因によるものかは不明である. 本実験で得られた落下物のC/N比は6月が6.6で, 10月が9.6であり, 楠木の調査による宮島と音戸の養殖場のカキ排泄物のC/N比 (約6~10) [8]と同程度であった.

次に落下物の分解特性をみるため, 炭素, 窒素, リンの各含有成分のDO濃度と温度の違いによる分解率の

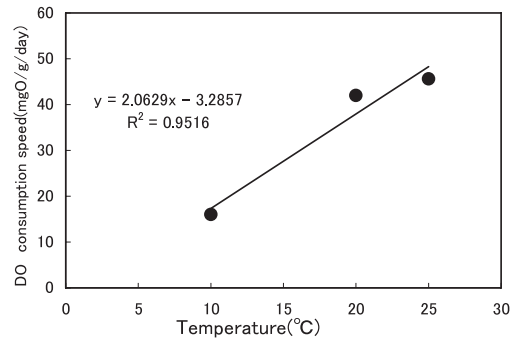


Fig.7 Relationship between DO consumption speed and temperature.

検討を行った.

Table 8に0日目の含有量を100とし, 56日目までの含有量の変化を百分率で示した. 20°C, 25°Cともに嫌気よりも好気条件で分解がより進行していることが示された.

好気条件 (飽和条件と高DO濃度条件)における分解率を20°Cと25°Cと比較すると両者に分解性の違いが若干見られた. すなわち, 分解率は炭素, 窒素では, 6月がそれぞれ55~71%, 66~75%で, 10月がそれぞれ6~

30%, 0~20%となり, 10月の分解性が劣っていた。一方, リンについては, 10月は32~36%の分解率を示したが, 6月の測定値は0~27%となり6月の分解性が劣っていた。

通常, 高温の方が分解率が高いとされるが, 本実験では総じて, 25℃よりも20℃での分解率が高い結果となった。6月と10月で対象とした筏が同一ではなかったことに拠る可能性が考えられる。楠木 [9] は, 広島湾のカキの糞の排泄量を6月が年間の最小期であり, それ以降急増して10月頃が年間の最大期であった(1個体当たり1日240mg)と, また楠木 [10] は同様に10月は, カキの糞排泄量の最大期であり403mgであったとしている。本調査の10月の筏はノコシとよばれる筏のためか, 捕集された落下物の量が少なく, コレクター当りの付着個体数を楠木 [9] と同じ24個体と仮定すると落下物量は1個体当たり1日10mg程度と推定された。山本ら [11] はシミュレーションにより, カキの養殖密度が排糞量に与える影響を推定し, 養殖密度を増加させると個体排糞量は次第に減少する, 等の結果を得ている。カキの養殖密度を推定すると楠木 [9] では筏1台当たり約58万個であり, 本調査では約62万個となり大きな違いはなく, 密度

が排糞量に影響を与えたとは考えられなかった。

嫌気・好気条件での分解性について楠木 [4] は, 嫌気的条件下では10℃と20℃では分解に差がなく, 好気的条件下で10℃より20℃の方が高いが, 温度による差より基質となる懸濁物の違いによる差が大きかったと考察している。本実験では物理的な衝撃で分解が促進されることのないように攪拌することで落下物溶液成分の均一化を図ったが, それにもかかわらず落下物試料を構成する成分が不均一であったことが考えられた。

筏から落下したマガキ排泄物の沈降速度について楠木 [12] は346~1555m/日の結果を得ている。このため平均水深14mの江田島湾においては [1], 排泄後の落下物はほとんどが分解されないうちに海底に到達し, その後, 海底上で分解を受けるものと考えられる。今回の実験からは, 好気条件下で分解が進むことが確認されたが, 夏季の江田島湾は水温躍層が形成され [1], その影響を受け海底は貧酸素状態にある。漁場環境改善手法として何らかの手法で底層に酸素の供給を行うことにより好気的環境にしても, 嫌気的環境との分解率(56日間)の差は炭素で最大30%, 窒素で20%であることから, 落下物の分解による効果的な底質改善を期待することは難し

Table 7 Oyster feces weight collected by sediment trap and initial content

	Feces dry weight(g)	Content(mg/g)			C:N:P ratio
		C	N	P	
June(20℃)	1.5	177	27	0.56	320:48:1
October(25℃)	2.3	52	5.4	2.6	20:2.1:1

Feces weight shows sum of 10 sediment traps

Table 8 Residual rate of C, N, P in oyster feces

Matter	Day	DO in June(mg/L: at 20℃)			DO in October(mg/L: at 25℃)		
		0.8	6.7	34	0.9	8.0	35
C	0	100	100	100	100	100	100
	7	82	54	80	92	81	66
	14	103	52	89	99	95	93
	28	58	39	74	76	85	79
	56	50	29	45	116	94	70
N	0	100	100	100	100	100	100
	7	68	52	69	95	80	-
	14	84	46	77	105	105	91
	28	47	35	55	-	-	80
	56	40	25	34	113	105	80
P	0	100	100	100	100	100	100
	7	-	-	75	71	83	94
	14	*	124	-	121	56	69
	28	125	65	54	85	62	69
	56	152	73	135	116	68	64

Percent remaining as initial weight is 100.

- : Outlier

* : Missing value

いと考えられる。

底層改善手法の一つである人工中層海底は落下物の海底への堆積を防止できる点、及び落下物を底層よりは高いDO条件下に置く点で有効な手法と考えられる。しかしながら山本ら [13] は、装置の設置後4ヶ月は海底堆積物の有機物量が減少したが、それ以降は、沈降物量が増加したと報告し、その理由として、冬季の水温低下によるバクテリアの有機物分解活性の低下、付着藻類や懸濁物食者の増加、が考えられたとしている。人工中層海底については更なる知見の蓄積が望まれる。

既存の手法である浚渫、堆砂については一時的な改善効果は期待できるが、筏からの落下物の防止策を講じなければ、それが堆積することにより底質が再び悪化すると考えられる。

結 語

江田島湾のカキ筏下の底泥のSODは0.138～0.735gO/m²/日で広島湾のカキ筏下の底泥と同レベルであり、SODに与える温度の影響を検討した結果、 $y = 0.0446e^{0.1085x}$ の関係式 (y : SOD, x : 温度) が得られた。栄養塩の最大溶出速度は75.6mgN/m²/日、24.8mgP/m²/日で窒素、リンとも広島湾の約1.4倍大きいことを示した。カキ筏からの落下物分解実験では、設定した条件下での糞等の落下物は、その50%以上が底泥に負荷される結果となり、分解の促進は強制的に酸素供給を行っても顕著には見込めないことが想定された。

なお、本調査は広島県開発研究課題「江田島湾におけるかき養殖適正化技術開発」の一環として実施したものである。

参 考 文 献

- [1] 広島県. 水産基盤整備調査事業報告書 (江田島湾をモデルとした漁場整備方策について). 2004.
- [2] 広島県水産試験場. かき養殖体系再構築技術開発事業—平成10～12年度とりまとめ報告書—. 2001.
- [3] 松山幸彦. 有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* に関する生理生態学的研究 (I) -*H. circularisquama* 赤潮の発生および分布拡大機構に影響する環境要因等の解明. 水産総合研究センター研究報告. 2003;7:24-105.
- [4] 楠木 豊. カキ養殖漁場における漁場老化に関する基礎的研究. 広島県水産試験場研究報告. 1981; 11:1-93.
- [5] Seiki T, Izawa H, Date E, Sunahara H. Sediment oxygen demand in Hiroshima bay. Water Res. 1994;28(2):385-393.
- [6] 井澤博文, 清木 徹. 広島湾の底泥をめぐる物質の代謝及びその動態的挙動 (2)—海底泥からの栄養塩溶出に及ぼす温度の影響—. 広島県環境センター研究報告. 1983;5:72-76.
- [7] Seiki T, Izawa H, Date E. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima bay. Water Res. 1989;23(2):219-228.
- [8] 楠木 豊. カキ養殖漁場における漁場老化に関する基礎的研究—II マガキの排せつ物の有機物含量. 日本水産学会誌. 1977;43(2):167-171.
- [9] 楠木豊. カキ養殖漁場における漁場老化に関する基礎的研究—I マガキの排せつ物量. 日本水産学会誌. 1977;43(2):163-166.
- [10] 楠木豊. マガキ排泄物量と懸濁物捕捉量との関係. 日本水産学会誌. 1978;44(11):1183-1185.
- [11] 山本民次, 前田 一, 松田 治, 橋本俊也. 広島湾マガキ *Crassostrea gigas* の成長および排糞に対する養殖密度の影響. 日本水産学会誌. 2009;75(2): 230-236.
- [12] 楠木 豊. カキ養殖漁場における漁場老化に関する基礎的研究—III マガキ・フンの沈降速度と運搬距離. 日本水産学会誌. 1978;44(9):971-973.
- [13] 山本民次, 笹田尚平, 原口 浩. 人工中層海底によるカキ養殖場沈降物量の軽減能評価—設置後半年間の調査から—. 日本水産学会誌. 2009;75(5): 834-843.

