

ホタテ貝殻礁に蛸集した生物の変遷と 浄化効果について

EFFECTS OF ARTIFICIAL REEFS OF SCALLOP SHELL WITH
CONSIDERATION OF THE SPECIES SWARMING IN THE REEFS

岡本健太郎¹・山本 潤¹・牧野昌史²

Kentaro OKAMOTO, Jun YAMAMOTO and Masashi MAKINO

¹正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム
(〒062-0931 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²(独) 土木研究所 寒地土木研究所 道東支所 (〒085-8551 北海道釧路市幸町10丁目3番)

As a measure of water pollution and sediment contamination in ports and harbors, authors' team developed the artificial reef that used scallop shell. The reef creates the biotope for detritus feeders to the space between shells and it is useful for the removal of organic pollutant in the port. We studied experimental reefs installed at Ochiishi fishing port in Hokkaido. The species swarming the reefs were identify, counted and analyzed. We have developed an ecosystem model in the port, considering detritus feeder's biological process. The organic removal capacity and their purification rates in the area were estimated. From the results of the calculation, it can be seen that the COD near the reef decreases by the species activities in comparison with those of no reef area.

Key Words : scallop shell, artificial reefs, species swarming, ecosystem model

1. はじめに

港内泊地の底質改善手法として、著者らの研究チームでは水産廃棄物であるホタテ貝殻を利用したホタテ貝殻礁を提案し(写真-1)、北海道内の港湾・漁港内において効果の実証試験を行っている¹⁾。これは貝殻の空隙に蛸集した生物の摂餌行動による底質浄化を期待するものであり、これまでに生物の蛸集状況の観測や蛸集生物の一種であるヨコエビの同化量を把握する実験を行い、その効果について評価した。しかし、これまでの検討ではホタテ貝殻礁の経年劣化や沈下、それに伴う蛸集生物種の変遷について考慮しておらず、長期的な浄化能力を評価する際に支障があることが指摘されていた。そこで本調査では、ホタテ貝殻礁が沈下した状況を想定して、貝殻礁の下側をあらかじめ底質内に埋没した状態で設置し、海底面上及び底質内の各層における生物蛸集状況を調査した。また、ヨコエビに加えて、底泥内に埋没した部分の蛸集生物にも有機物浄化能があることが知られており²⁾、これらを測定してホタテ貝殻礁の浄化能力を算定した。本稿では、こうして

設置したホタテ貝殻礁の現在までの層別の生物蛸集状況の変遷と、蛸集生物の摂餌行動による浄化効果について報告する。

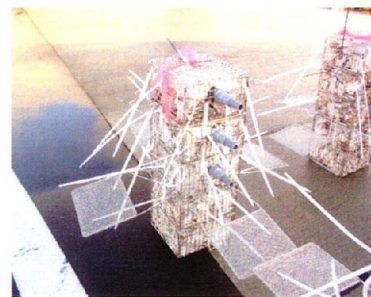


写真-1 ホタテ貝殻礁

2. 調査概要

(1) ホタテ貝殻礁の設置

2006年11月に北海道根室市落石漁港の写真-2に示した泊地内にホタテ貝殻礁の試験礁を10基設置した。設置したホタテ貝殻礁は5層構造であり、1層分の寸法は高さ10cm、底面20cm×20cmの大きさであり、

ホタテ貝殻礁が波浪等で転倒しないように、ホタテ貝殻礁の四隅に固定棒を埋め込み、インシュロックでホタテ貝殻礁を固定棒に固定した。

設置後、ホタテ貝殻礁の自重による沈下の発生が予想されるので、対策としてホタテ貝殻礁の2層目と3層目の間に網目状のストッパーを設置し、金属カゴ1～2層目は地中に、3～5層目は海底面上に露出するように設置位置を調節した。また、ホタテ貝殻礁内の水質調査のため、3～5層目にはあらかじめ筒状のパイプを設置し、容易に採水できるようにした。このような対策を施した上でホタテ貝殻礁を写真-3のように設置した。



写真-2 貝殻礁設置箇所

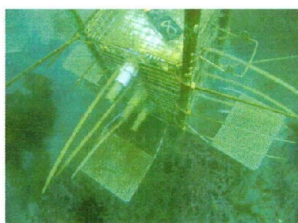


写真-3 貝殻礁の設置状況

(2) ホタテ貝殻礁の回収と生物蛸集状況

ホタテ貝殻礁の蛸集状況を確認するため、設置から約2年間にわたりこれまでに貝殻礁を9基回収した。ホタテ貝殻礁の回収は、潜水士が水中にて貝殻礁にネット（58GG、目合い0.3mm）をかぶせ、生物が蛸集しているホタテ貝殻礁を各層ごとに回収した。得られた試料は、0.3mm目合いのふるいを用いて選別し、ふるい上に残った生物をホルマリンで固定してサンプルとし、種の同定、種別個体数の計数および湿重量を測定した（写真-4）。



回収したホタテ貝殻礁



ホルマリンに浸した貝殻礁



同定したスピオ科の1種



蛸集生物の種の同定作業

写真-4 ホタテ貝殻礁の回収作業から

蛸集生物の同定作業までの流れ

(3) 蛸集生物の有機物浄化効果

ホタテ貝殻礁に蛸集が多数確認された環形動物のスピオ科の1種について、室内試験を行い有機物浄

化能力について検討した。室内試験はスピオ科の1種、堆積物、海水を入れた容器（生物添加区）を用意し、対照区として堆積物、海水のみを入れた容器を用意した（写真-5）。試験条件は表-1のように設定し、試験開始前、試験後12日、25日、40日、55日、70日に堆積物を採取し、TOC、T-Nの分析をした。



写真-5 スピオ科の1種による摂餌試験の状況

表-1 室内試験条件

項目	生物添加区	対照区
飼育容器	直径5cm 容器120mLの容器	
堆積物	10g湿泥	
海水量	100mL	
スピオ科の1種	1個体添加 (平均0.085g/匹)	添加なし
海水交換	1日1回 1/3量(30mL)交換	
曝気	行わない	
水温	5±2℃（スピオ科の1種を採取した時の海水温に合わせた）	
試験期間	70日（2007年12月～2月）	

(4) ホタテ貝殻礁に蛸集した生物の変遷状況

多数の蛸集生物が確認されたホタテ貝殻礁について、設置から現在までの生物相の違いを把握するためにクラスター分析による構造解析³⁾を行った。用いたデータは2006年12月から2008年9月までに回収したホタテ貝殻礁の各層で得た蛸集生物と、貝殻礁近傍での採泥で得た底生生物のデータである。類似度指数としてWhittaker百分率（Bray-Curtis）を用い、クラスタリング手法は群平均法とした。打ち切り基準は閾値を0.5とし、得られたクラスター毎の特徴を検討した。

3. 調査結果と考察

(1) ホタテ貝殻礁内の溶存酸素

ホタテ貝殻礁の設置で貝殻礁に堆積した懸濁物の目詰まりや貝殻礁での海水交換が不十分であることから、貝殻礁の溶存酸素が欠乏することが予測された。そこでホタテ貝殻礁設置から2008年9月まで、貝殻礁の内部の水質を採水し、溶存酸素の測定をした。測定の結果、2007年9月の測定で濃度が4.6mg/Lまで低下したが、水産用水基準⁴⁾に記載されている内湾漁場での維持管理に必要な濃度4.3mg/Lを上回っており、現時点では、ホタテ貝殻礁の内部での溶存酸素の欠乏はないと考えられる。

(2) ホタテ貝殻礁の生物増殖状況

図-1にホタテ貝殻礁に増殖した生物の分類・同定作業の結果を示した。分類の結果、海底より上層（3～5層目）では、かいあし類やヨコエビ類などの懸濁態食者である節足動物の増殖が多数確認され、増殖個体数はその後も増加傾向であった。特に、設置後7ヶ月である2007年6月の調査では約48,000匹の節足動物が増殖した。これは、今まで確認できなかったコノハエビ（写真-6左）が貝殻礁に集まり、産卵・孵化したコノハエビがホタテ貝殻礁の隙間に増殖したと考えられる。海底より下層（1・2層目）では、スピオ科の1種（写真-6右）などの堆積物食者である環形動物の増殖が確認され、節足動物の増殖と同様に増殖個体数は増加傾向であり、ホタテ貝殻礁に多数の生物が増殖していることが確認された。

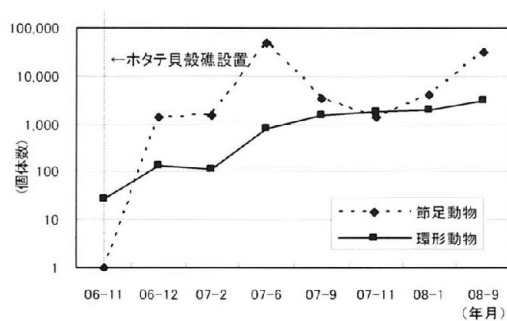


図-1 ホタテ貝殻礁に増殖した節足動物と環形動物の増殖個体数

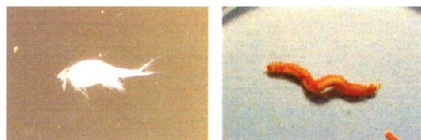


写真-6 ホタテ貝殻礁に増殖した増殖動物
左側：コノハエビ
右側：スピオ科の1種

(3) 増殖生物の有機物浄化効果

スピオ科の1種による室内試験の結果、表-2に示すように、ほとんどの生物添加区において対照区よりTOC、T-N値が低い値を示しており、スピオ科の1種が摂餌行動することで有機物が浄化されていることが確認できた。

表-2 堆積物分析結果

	対照区 (C ₁)		生物添加区 (C ₂)		差 (C ₂ -C ₁)	
	TOC	T-N	TOC	T-N	TOC	T-N
試験前	22.8	4.5	—	—	—	—
12日目	19.6	4.1	19.5	3.9	0.1	0.2
25日目	20.5	3.6	18.7	3.4	1.8	0.2
40日目	22.1	4.3	19.7	4.0	2.4	0.3
55日目	22.0	4.2	21.3	4.5	0.7	-0.3
70日目	22.3	5.8	20.9	4.3	1.4	1.5

TOC,T-N値の単位：mg/g

表-2よりスピオ科の1種1gあたりの有機物浄化量Q mg/dayは(1)式のように算出した。

$$Q = \left[\sum_{n=1}^5 (C_2 - C_1) \times \frac{1}{(T - T_0)} \div 5 \right] \times \frac{1}{W_0} \quad (1)$$

ここで、Qは有機物浄化量、C₁、C₂は対照区・生物添加区の分析結果、T₀は前回分析した日、Tは今回分析した日、W₀はスピオ科の1種の平均湿重量0.085gであり、(1)式より、スピオ科の1種1gあたりの浄化能力は炭素4.07mg/day、窒素1.13mg/dayであることが確認された。

室内試験で得た個々の生物の浄化能力から、ホタテ貝殻礁全体に多数増殖する節足動物と環形動物の有機物浄化能力を算出した。各調査時の有機物浄化能力は、ホタテ貝殻礁に増殖した節足・環形動物の湿重量に節足・環形動物1gあたりの有機物浄化能力を乗じた値で算出した。有機物浄化能力は、増殖生物の優占種であるヨコエビ類（節足動物）、スピオ科の1種（環形動物）を対象に算出し、スピオ科の1種は室内実験値を、ヨコエビ類1gあたりの有機物浄化能力は、佐藤による室内試験⁵⁾より得られた炭素20.0mg/g/day、窒素0.33mg/g/dayを準用した。各調査時の有機物浄化量は表-3、4に示した。また、ホタテ貝殻礁近傍での有機物負荷量を把握するために、セジメントトラップによる調査を行い、炭素0.351mg/day/cm²、窒素6.66×10⁻²mg/day/cm²の負荷量が確認された。

そこで、増殖生物の摂餌行動で貝殻礁近傍に沈降する有機物が浄化される割合を浄化率として示した。これは表-3、4の有機物浄化能力をセジメントトラップで測定した負荷量で除したものであり、図-2、3に示した。炭素については2007年6月以降で浄化率が100%を超え、窒素についても2007年9月以降で浄化率がほぼ100%に達し、ホタテ貝殻礁の増殖生物が貝殻礁付近の有機物を浄化できることが確認できた。

表-3 ホタテ貝殻礁に増殖した

節足動物による有機物浄化量

調査時期 (年月)	設置後 (ヶ月)	節足動物の 増殖量 (g)	節足動物の 有機物浄化量 (mg/day/cm ²)	
			炭素	窒素
2006-12	1	0.435	2.17×10 ⁻²	3.60×10 ⁻¹
2007-02	3	0.080	3.98×10 ⁻³	7.00×10 ⁻⁵
2007-06	7	8.584	0.429	7.02×10 ⁻³
2007-09	10	2.172	0.108	1.78×10 ⁻³
2007-11	12	5.707	0.285	4.67×10 ⁻³
2008-01	14	3.098	0.154	2.53×10 ⁻³
2008-09	22	5.952	0.297	4.87×10 ⁻³

ホタテ貝殻礁の底面積 20×20=400cm²

表-4 ホタテ貝殻礁に蠕集した

環形動物による有機物浄化量

調査時期 (年月)	設置後 (ヶ月)	環形動物の 蠕集量 (g)	環形動物の 有機物浄化量 (mg/day/cm ²)	
			炭素	窒素
2006-11	直後	0.562	5.72×10^{-3}	1.59×10^{-3}
2006-12	1	6.328	6.43×10^{-2}	1.78×10^{-2}
2007-02	3	4.271	4.34×10^{-2}	1.20×10^{-2}
2007-06	7	15.955	0.162	4.50×10^{-2}
2007-09	10	26.648	0.271	7.52×10^{-2}
2007-11	12	25.014	0.254	7.06×10^{-2}
2008-01	14	22.837	0.232	6.45×10^{-2}
2008-09	22	27.159	0.276	7.67×10^{-2}

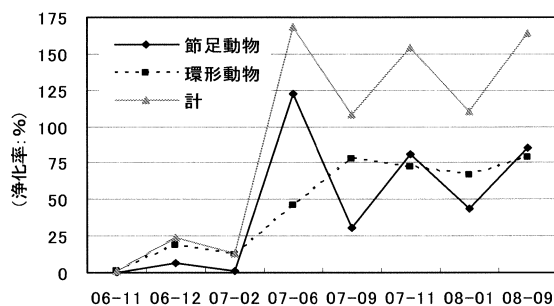
ホタテ貝殻礁の底面積 20×20=400cm²

図-2 蠕集生物による炭素浄化率

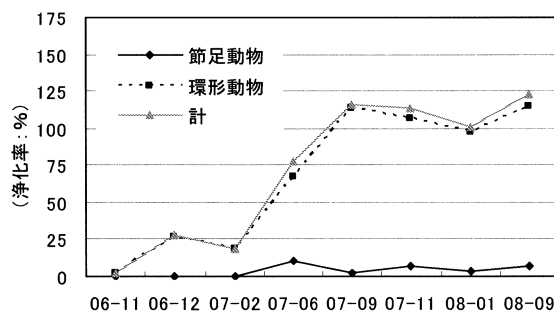


図-3 蠕集生物による窒素浄化率

(4) ホタテ貝殻礁に蠕集した生物の変遷状況

クラスター分析より、ホタテ貝殻礁の蠕集生物を11群に分割することができた。群分けで得た各群別の主要な出現種について、各群の上位2種類の優占種を表-5に、ホタテ貝殻礁の層別の生物の蠕集状況の経時変化を表-6に示した。表-6によると、貝殻礁の海底面上の層（3～5層目）で出現する群は、調査回毎に出現する優占種は異なっていたが、優占する種類はイソミジン科の1種、コノハエビ、ミナソコミジン科の1種、ハナフジツボであり、いずれも懸濁物食性の節足動物であった。貝殻礁の上方の層に蠕集する生物は、設置後から2年経過した後も大きく変化することなく、一貫して貝殻礁の上方の層では懸濁態食性の種類が優占し、蠕集生物による有機物浄化が維持されていることが確認できた。

3層目ではホタテ貝殻礁の設置当初は節足動物の蠕集が主であったが、徐々に1, 9群に含まれる環形動物が優占してきた。図-4に示したように設置後10～14ヶ月では、環形動物が節足動物の蠕集数を上回り、ホタテ貝殻礁にはこれまでと異なった多種多様の生物が蠕集している。一方、海底面下の層（1・2層目）では出現する群に変化はなく、スピオ科の1種を含む環形動物の蠕集が確認された。

表-5 クラスター分析による優占出現種

群	優占種		組成比率
1	袋形動物	不明種（線虫綱）	81.1%
	環形動物	スピオ科の1種	4.0%
2	袋形動物	不明種（線虫綱）	37.6%
	節足動物	カワリソコミジン科の1種	28.5%
3	原生動物	不明種（有孔虫綱）	58.8%
	袋形動物	不明種（線虫綱）	36.3%
4	節足動物	イソミジン科の1種	78.7%
	節足動物	イシクヨコエビ科の1種	4.6%
5	節足動物	イソミジン科の1種	33.8%
	節足動物	キシベミジン科の1種	12.6%
6	節足動物	コノハエビ	58.3%
	節足動物	フトヒゲソコエビ科の1種	8.4%
7	節足動物	ミナソコミジン科の1種	29.6%
	節足動物	トゲメリタヨコエビ	11.3%
8	節足動物	ミナソコミジン科の1種	77.3%
	原生生物	不明種（有孔虫綱）	3.1%
9	環形動物	ライノサシバ	37.2%
	袋形動物	不明種（線虫綱）	23.4%
10	節足動物	ハナフジツボ	23.0%
	環形動物	ライノサシバ	18.2%
11	節足動物	キシベミジン科の1種	15.7%
	節足動物	イソミジン科の1種	11.6%

表-6 ホタテ貝殻礁の層別による蠕集状況

調査年月			06 12	07 2	07 6	07 9	07 11	08 1	08 9
設置後（ヶ月）			1	3	7	10	12	14	22
ホタテ貝殻礁	底面	5層目	4	5	6	7	10	11	8
		4層目	4	5	6	7	9	11	8
	土中	3層目	4	5	6	1	1	9	8
		2層目	1	1	1	1	1	1	1
		1層目	1	1	1	1	1	1	1
対照区			1	3	2	3	3	3	3

(表中の数字は表-5の群を示す)

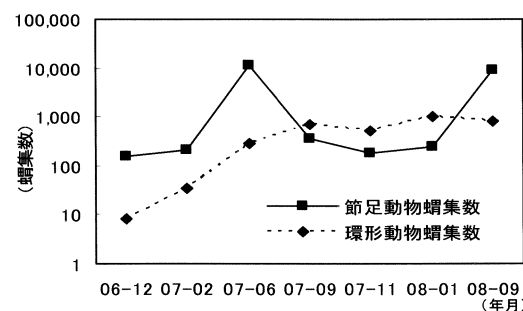


図-4 節足・環形動物の蠕集数（3層目）

4. ホタテ貝殻礁による浄化効果の予測

(1) モデルの概要

ホタテ貝殻礁の設置により、長期間にわたって貝殻礁に生物が蟬集し、蟬集生物の摂餌行動による有機物浄化効果が確認できた。これを用いてホタテ貝殻礁の設置による港内水域の環境変化予測を試みた。予測計算に使用する生態系モデルは中田によるモデル⁶⁾を用いて、図-5に示すようにモデル内にホタテ貝殻礁に蟬集した生物の動態を示したサブモデルを追加する構成とした。計算のフローは図-6に示すように領域全体のコンパートメントの動きを計算した後、ホタテ貝殻礁に設置した箇所にはサブモデルを適用し、生物化学変化を計算した後、全体のモデルに反映させた。

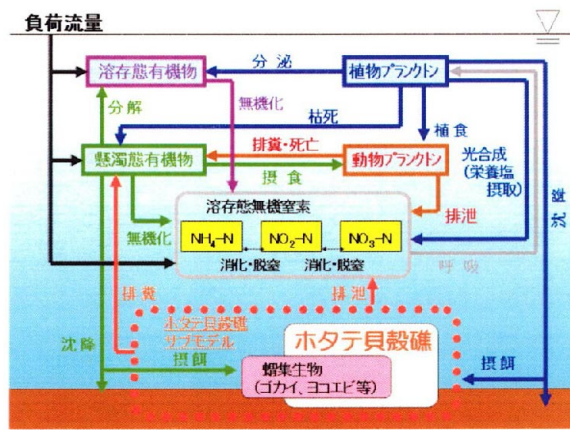


図-5 ホタテ貝殻礁の生態系モデル

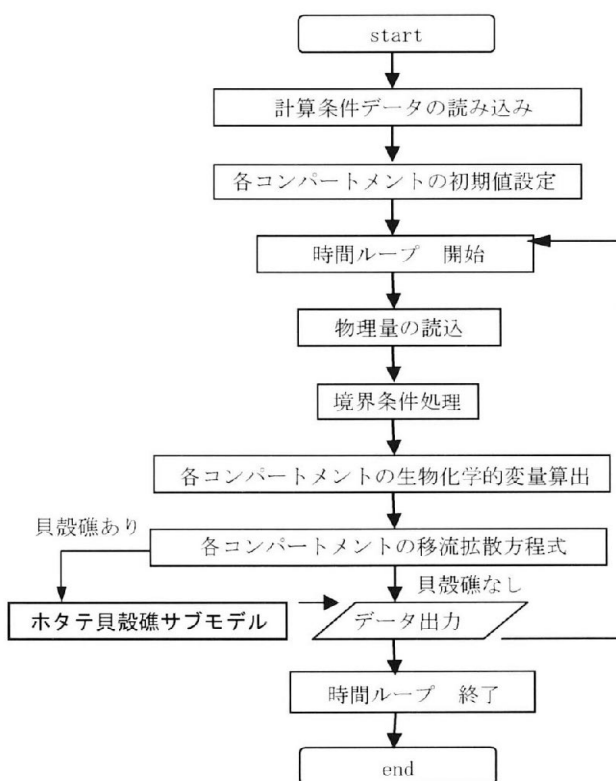


図-6 ホタテ貝殻礁の生態系モデルのフロー

サブモデルは以下の通りとした。

- ① 蟬集生物の動態は、動物プランクトンと同様に植物プランクトンの摂餌（ B_4 ）、懸濁態有機物の摂餌（ B_8 ）、排泄（ B_9 ）、排糞（ B_{10} ）、自然死亡（ B_{11} ）について考慮し、(2)式に示すとおりとした。

$$\frac{\partial ZH}{\partial t} = B_4 + B_8 - B_9 - B_{10} - B_{11} \quad (2)$$

ここに、 ZH は蟬集生物量であり、このうち蟬集生物による懸濁態有機物の摂餌（ B_8 ）については、懸濁態有機物（ POM ）と植物プランクトン（ P ）の摂餌割合と摂餌速度から導き、(3)式とした。

$$B_8 = \frac{POM}{\Sigma P + POM} \cdot V(P, POM) \cdot ZH \quad (3)$$

V は蟬集生物の摂餌速度を示し、水温に依存するものと仮定し、(4)で示した。

$$V = \alpha e^{\beta T} \quad (4)$$

ここに、 T 、 α 、 β は水温、最大摂餌速度、温度係数であり、 β については動物プランクトンの温度係数である0.0693とした。摂餌速度については佐藤らが室内試験で算出したヨコエビ類の有機物除去能力20mg-C/day/gとUye and Matsuda⁷⁾による炭素量比0.455から43.96mg/dayと算出した。 α については、室内試験の水温が15℃の場合の $\alpha = 1.555 \times 10^{-2}$ と設定した。

- ② 貝殻礁内でのCODの生物化学的変化量は(5)式のように植物プランクトン、蟬集生物、懸濁態有機物の変化量の総和で示した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial COD}{\partial t} = & \sum_{i=1}^{N_p} [COD : C_p] \left(\frac{dP}{dt} \right) \\ & + \sum_{j=1}^{N_z} [COD : C_{ZH}] \left(\frac{dZH}{dt} \right) \\ & + [COD : C_{POM}] \left(\frac{dPOM}{dt} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 N_p 、 N_z は植物プランクトン、蟬集生物の種類数、 $[COD : C_p]$ 、 $[COD : C_{ZH}]$ 、 $[COD : C_{POM}]$ は植物プランクトン、蟬集生物、懸濁態有機物のCOD対炭素重量比を示す。なお、ここでは中田によるモデルで使用された値を準用し、それぞれ 1.38×10^{-3} 、 1.46×10^{-3} 、 1.33×10^{-3} と設定した。

- ③ ホタテ貝殻礁内の生物の増加量は高次捕食者によって捕食されると仮定し、生物量を変化させないようにした。

(2) ホタテ貝殻礁による浄化効果の予測

現在、試験的に設置しているホタテ貝殻礁は港内水域に対して規模が小さく、港内物理場が外海の潮流に大きく依存していることを考慮すると、ホタテ貝殻礁の浄化効果を漁港内全体に与える影響は小さい。そこで、写真-2の箇所にホタテ貝殻礁を面積60m×60m、高さ0.5m、水深6.5mに大規模に設置した場合を仮定し、どのような環境変化になるか検討した。検討時期は海水温が高い2008年8月から9月までの1ヶ月間とした。ホタテ貝殻礁の蛸集量は2008年9月の観測結果である表-3、4に示した節足動物5.952g、環形動物27.159gを単位体積あたりに換算して用いた。地形条件は漁港内を20×20mの格子とし、潮位及び全日日射量等の海象・気象データは根室測候所から入手した。初期条件及び境界条件は現地観測値を入力し、CODの初期値については港内の表層・底層で1.8 mg/L、港外の表層・底層で1.7mg/Lであった。

植物プランクトンの計算値を現地でのクロロフィル連続観測値と比較すると、図-7に示したように大きな差異は生じなかった。しかし、詳細な日周変動や変動のピークまでは再現できていない。以下、この計算精度でのCODの計算結果について論じる。

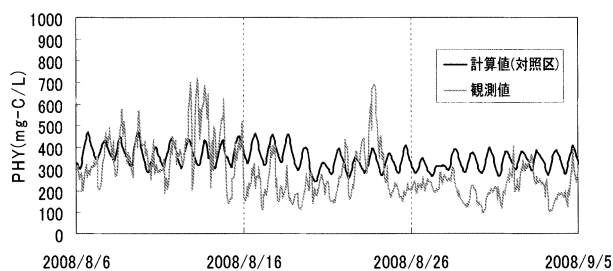


図-7 植物プランクトンの推移

ホタテ貝殻礁の設置による環境変化をCOD濃度で予測した結果、ホタテ貝殻礁を設置した直上のCOD濃度は、図-8に示したように対象区と比較して徐々に濃度が減少していき、ホタテ貝殻礁の設置による浄化効果が示された。しかし、実際にホタテ貝殻礁を大規模に設置していないため、現時点で浄化効果を現地観測等で実証ができない状況である。

このため、再現計算の精度を上げていくためには、さらに多くの観測値を得て計算結果の検証とパラメータ等の調整を行っていく必要がある。

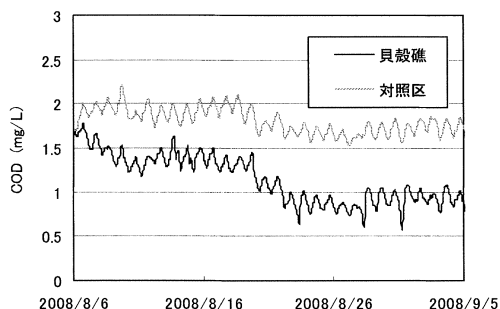


図-8 ホタテ貝殻礁の設置によるCOD値の推移

5. おわりに

ホタテ貝殻礁に蛸集する生物が、懸濁態及び堆積物に含まれる有機物を摂餌することで有機物が浄化されることが確認された。また、蛸集生物の変遷を考慮しても長期間、安定的に蛸集が確認されることから今後もホタテ貝殻礁の浄化能力が持続的に発揮できると言える。今後は、この手法の普及に向けて、実用化を想定したホタテ貝殻礁による現地実証や浄化効果の予測精度向上を進める予定である。

参考文献

- 1) 佐藤朱美, 牧田佳巳: ホタテ貝殻礁の底質浄化能力に関する現地試験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1276-1280, 2007.
- 2) 門谷 茂, 堤 裕昭: 魚類養殖場へのイトゴカイによる浄化法, 沿岸の環境圏, 平野 敏行監修, フジテクノシステム, pp. 1097-1105, 1998.
- 3) 園田 武, 中尾 繁, 高安克己: サロマ湖の多毛類群集の構造特性と漁場環境: 過去 20 年間の変化傾向, 汽水域研究, pp.19-30, 2002.
- 4) 社団法人日本水産資源保護協会: 水産用水基準 (2005年版) pp.16-17, 2006.
- 5) 佐藤朱美, 足立久美子: 貝殻礁に蛸集したヨコエビ群による有機物除去能力の試算, 平成17年度日本水産工学会, pp.107-108, 2005.
- 6) 中田喜三郎: 生態系モデル-定式化と未知のパラメータ推定法-, J.Adv.Mar.Tech.Conf.Vol.8, pp.99-138, 1993
- 7) Uya and Matsuda: Phosphorus content of zooplankton from the Inland Sea of Japan, J.Oceanogr.Soc.Japan,44,pp.280-286, 1988.