海域制御システムのための 数値モデルによる流動環境 と生物環境との相互作用に 関する調査・実験

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INTERACTION BETWEEN FLOW AND BIOLOGICAL ENVIRONMENT BY USING NUMERICAL MODEL FOR THE OCEAN CONDITIONS CONTROL SYSTEM

末永慶寛 ——— *1
畔柳昭雄 ——— *2

Yoshihiro SUENAGA
Akio KUROYANAGI

In Japan, where about 1/3 of fishery is imported from various foreign countries, techniques for increasing and nurturing fishery resources are required. In order to enhance productivity in the seas by Japan. This need a results from an increase in demand and coastal fishery restrictions in these foreign countries. And the development of optimal utilization of ocean space has also become necessary. Through marine observation, the authours be decided to evaluate changes in both the physical and biological environment by installing a structure in the sea. Further, we studied of the interaction between flow and biological environment by using numerical model.

キーワード：
海域環境制御, 人工魚礁, 生物効果, 浮遊幼生, 渦流, 数値モデル

Keywords :
control of marine environmental conditions, artificial reef, biological effect, larvae, eddy current, numerical model

1 序 論

海洋空間の有効利用やウォーターフロント開発など沿岸域の高度利用に係わる開発が推進される中で、沿岸域における生態系に対する関心が高まりを見せてきている。沿岸域の陸域や水域には、植物、動物など貴重な生物資源が生息しているため、これらを持続的に利用できるよう生態系のバランスを維持することは、今日きわめて重要なこととなっている。そのため、近年、生態系の再生能力を損なうことなく生物が生息できるようなビオトープ（小生活圏）の形成や多孔質な環境形成のための施工技術の開発や、開発に伴う環境変化の軽減、緩和を図るためのミチゲーション（環境緩和措置）の検討やそのための生物環境制御技術が注目されてきている。一方、沿岸に構造物を設置した場合、その周辺部に魚類が蟄集する習性のあることは古くから確認されている。最近ではこの習性を利用して生物との調和に配慮した構造物も製作されるようになってきている。また、魚類の蟄集を促進するものとしては、既に水産資源の増加・育成技術として人工魚礁が開発されたり、海域環境を構造物によって制御するシステムの開発も進められてきている。しかし、構造物内部およびその周辺に形成される生物蟄集効果については、魚貝類

の習性に対する研究は進んでいるものの、構造物への生物の着生など、海域の物理環境変化およびそれに伴う生物の生息環境の状況を把握することについては、各々の分野で研究が進められ、相互関係の把握に関する研究は、僅かに杜多らが行った実験室内での例¹⁾があるだけである。また、現地観測データから数値モデルを用いた物理環境変化に伴う生物の資源変動予測を試した研究を中田ら²⁾が行っている。しかし、海域の物理、生物環境の相互作用に関する実証的研究は極めて少なく、その成果蓄積が期待されている。

そこで、著者らは、実海域において波や流れを制御する構造物と、その周辺に生物の付着基質となる構造物を配置することによって生物浮遊幼生（以下、ラーバ）が着生する効果と生物が蟄集する効果を合わせて調査した。その結果から、流動環境と生物環境との相互作用について、3次元移流・拡散方程式による数値モデルを用いて構造物設置による流動場の変化および生物環境への有効性を検証することとした。

2 現地調査および実験概要

実海域における実験は、Fig. 1 に示す山口県下関市の北西 12 km 沖合の響灘に位置する蓋井島の地先で行った。島の地先には、投石

*1 東京大学海洋研究所 技術補佐・工博
*2 日本大学理工学部 専任講師・工博

*1 Research Assistant, Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo Dr. Eng.
*2 Lecturer, College of Science & Thechnology, Univ. of Nihon Dr. Eng.

によるアワビ増殖場が造成されている。構造物の設置は島の南西部にある漁港区域内であり、漁港から150 m程離れた水深10~15 mの地点である。湾内の海底地形は、水深10 m付近まではなだらかな傾斜地形であり、その付近を過ぎると急傾斜をなし起伏に富んだ地形になっている。底質は、海岸から水深15 m付近までは礫が多く天然礁も形成されている。それ以深になると粒砂・中砂・細砂が広く分布している^{3),4)}。実海域に海域制御構造物として設置した構造物は、Fig. 3に示す2種類のものがあり、1つは流動制御構造物として中央部が立ち上がったコンクリートフレーム上に自然石を積載したものである。この構造物は、流れに対して壁面を形成し湧昇流を発生させる他、積載された自然石は生物の保護・育成場となり構造物内部は魚類の生息場となるものである^{5),6)}。もう1つは、海底面と水平なコンクリートフレームの角型石積み構造物で、フレーム上の自然石が生物付着基質の役割を果たすものである。設置位置は、流動制御構造物を中心に前後5 mの間隔で生物付着基質構造物を配した。

構造物設置は、平成元年10月23日に流動制御構造物、平成2年7月23日に付着基質構造物をそれぞれ沈設した。その後、ラーパ付着量や生物増殖効果を継続的に調査するため、構造物上あるいは周辺にラーパ付着用採集器を設置した。

Fig. 1 Test Field

Fig. 2 Location of the Structure

Fig. 3 Sunken Structures

3 生物増殖効果の経年変化

構造物に関する生物増殖状況については、魚類、有用磯根資源、海藻、ラーパについて平成元年より平成7年4月まで延べ15回の調査を行った。調査方法は潜水目視による観察、計数および水中カメラ撮影である。

魚類についてはFig. 4に示したように、特に岩礁性の魚類が構造物内部および周辺に多量に増殖していた。これは隣接した東側の天然礁よりも増殖量が多くなっていた。また、餌料性魚類の増殖が顕著であった。西側の砂地に設置した構造物の着底角部に異体類（ヒラメ）が確認されたが、これは主産卵期における浅海域への移動行為であると推察される。さらに、Table 1に示した魚類増殖量の経年変化の結果から、初期に設置した流動制御構造物だけの場合に比べ、前後に付着基質構造物を設置した場合、魚類増殖効果の高くなることが明かとなった。

有用磯根資源については、1×1 mの枠を用いた坪刈り^{7),8)}を行い、Fig. 5に構造物上の成貝増殖状況の変化を示した。これまでの調査では構造物上の自然石間および内部に0.2 pcs/m²（pcs：構造物上の単位面積当たりの個体数）のアワビ成貝と1.5 pcs/m²のサザエ成貝が確認されている。それに対して平成7年3月（設置後5~6年）の調査時には0.2 pcs/m²のアワビ成貝と1.7 pcs/m²のサザエ成貝が確認されており、成貝の増殖量については増加していることが判る。

Fig. 4 The Result of Research for Biological Effect in March 1995

Table 1 Yearly Changes of Fish Aggregation in and Around the Structures

魚種名	1990年4月		1991年4月		1995年4月	
	体長(cm)	尾数	体長(cm)	尾数	体長(cm)	尾数
アミナギ	○ 3	3	—	—	—	—
ウスサコ	○ 10	2	—	—	—	—
ソラスズメダイ	○ 2-3	20	—	—	—	—
ニサダイ	—	—	○ 10	8	—	—
カサゴ	—	—	○ 5	5	○ 5	6
メダナ	—	—	○ 8-15	15	○ 10-15	20
カサゴ	—	—	—	—	○ 10-20	30
アイゴ	—	—	○ 8-10	70	○ 10	80
カサゴ	—	—	—	—	○ 5	6
スズメダイ	○ 5-8	100 <	○ 3-5	5	○ 3-5	100 <
キンツツガイ	—	—	○ 5	100 <	○ 5	100 <
ハコ	○ 8-10	5	○ 8-15	6	○ 8-15	100 <
カミナリハ	○ 8-10	20	—	—	—	—
キンハ	—	—	○ 5-8	8	○ 5-8	15
ウツノハ	○ 10	3	○ 10	10	○ 10	10
オオシロイソ	—	—	○ 8	8	○ 8	10
ヒラメ	—	—	—	—	○ 40	2

Fig. 5 Yearly Changes in Marine Organisms on the Structures

海藻については、構造物周辺にホンダワラ類の藻場が形成され、各構造物上の自然石やコンクリートフレーム上にはクロメ、カジメ等の大型の海藻が繁茂し、藻場が形成されつつあった。

ラーバの分布量は、冬期の主産卵期に設置した採集器を引き上げ、ホルマリンで固定した後、計数法⁸⁾による付着量の解析を行った。その結果、従来の調査より蓋井島では、沿岸に造成された増殖場内から産卵されたラーバが湾内の流動により沖側に運ばれ、そのほとんどが流失することが確認されている。そのため沿岸に造成された増殖場内では僅か1~2 pcs/m³であった。一方、中央の流動制御構造物上では、6~10 pcs/m³、前後の付着基質構造物上では4~6 pcs/m³の着生が確認され、特に沿岸より100~150 m地点の構造物設置場所付近で着生量の多いことが確認された。このことから、構造物が地先に設置されたために、そこに流れの滞留域が発生し、ラ

Fig. 6 The Calculated Velocity around the Structure

ーバが着生したものと推察される。

そこで、こうした構造物により生じる流動場の変化と生物の着生、滞留との関係を数値モデルにより検討することとした。

4 数値モデルによる検討

構造物設置に伴う湾内流動環境の変化と生物浮遊幼生の着生量について、静水圧近似を仮定した3次元移流・拡散方程式を用いて数値モデル^{9)~11)}を作成し計算することとした。この方程式を差分近似し、非定常項は前進差分、移流項は二次精度上流差分、拡散項は中心差分を用いて、これまでに例の少ない海域で生物が産卵した後の浮遊幼生について、流動環境制御と構造物への付着量との関係について検討した。

計算に用いたモデルは、蓋井島の地先海域を構造物設置地点を中心に水平方向に100×25格子、鉛直方向には7層に区切り、格子幅は2 mとした。流入流速は、蓋井島冬季における調査結果⁷⁾より卓越方向から1.0 m/secを与えた。

生物量については、Delury法⁸⁾により蓋井島海域に生息するアワビ資源量から産卵期における平均ラーバ濃度は50 000 pcs/m³と推察された。そこで、角型構造物上のアワビ成員がラーバを産卵したと仮定し、浮遊卵期が約7日であることを考慮して、(1)式~(6)式によりFig. 6中に示した★印に50 000 pcs/m³の濃度を与え、投入7日後までの流況およびラーバ濃度分布の計算結果をFig. 6, 7に示した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_0 v \\ & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - f_0 u \\ & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz' - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot C) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot C) - \frac{\partial}{\partial z}(w \cdot C)$$

Fig. 7 The Calculated Distribution of Larvae (After 7 Days, unit: pcs/m³)

$$+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\cdot\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\cdot\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\cdot\frac{\partial C}{\partial z}\right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho=\rho(S, T) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 u, v, w は x, y, z (鉛直上向きを正) 方向の流速、 T は水温、 S は塩分、 ρ は海水の密度、 f_0 はコリオリパラメータ、 g は重力加速度、 ζ は水面変位、 P_0 は大気圧、 H は平均水深、 N_x, N_y, N_z は x, y, z 方向の渦動粘性係数、 K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向の拡散係数、 C はラーバ濃度、 t は時間軸である。状態方程式としては Knudsen の式を用いた。(拡散係数および渦動粘性係数については、現地における具体的な観測事例が無いため、関門海峡および豊後水道における数値モデルの結果⁹⁾を参考にした。)

計算に用いた主なパラメータを Table 2 に示す。

Table 2 Parameters used in the numerical simulation

drag coefficient at the sea surface	$\gamma_s = 1.3 \times 10^{-3}$
drag coefficient at the bottom	$\gamma_b = 2.6 \times 10^{-3}$
horizontal eddy viscosity	$N_{x,y} = 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
vertical eddy viscosity	$N_z = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
horizontal diffusivity	$K_{x,y} = 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
vertical diffusivity	$K_z = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
coriolis parameter	$f_0 = 8.13 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

流動場の計算結果から、中央の流動制御構造物前方から上昇する流れが発生し、構造物背後では 0.2 m/sec 以下の微弱な流域が形成されていることが判る。さらに構造物背後には下降流による流入方向とは逆向きの流れがあり、時計廻りの渦流域が形成され、構造物による流動制御がなされていることが判る。また、中央の高さを持った構造物を設置しない場合では渦は形成されないという結果も合わせて得られた。構造物を設置した場合の計算に先立ち、構造物が無い場合について濃度分布の計算を試みた。その結果、ラーバ濃度はほとんどの領域で 1.0 pcs/m^3 となり、流失してしまうことが明らかとなった。これに対し、Fig. 7 に示した産卵 7 日後を想定した計算結果では、分布の中心は中央の構造物前方の上昇流によりずれているものの、構造物背後では 1/2 以下となり濃度の拡散が抑制されていることが判る。また下流側の構造物上には 4.0 pcs/m^3 以上の分布域が現われている。これは中央の構造物による流動制御に伴う構造物背後に形成された微弱な流れおよび渦によりラーバ濃度の滞留が促進されているものと考えられる。さらに計算結果から、水深 8 m 付近の場所で産卵されたラーバの内、うまく渦に取り込まれたラーバのみが貝類資源へ加入できると推察された。これは先に行った現地でのラーバ分布量調査の結果⁷⁾とほぼ一致している。

これにより、構造物による流動環境の変化は、特に構造物の背後に渦流域が形成され、それがラーバの滞留を促進していることを見い出せた。そのため、流動場を制御する構造物と付着基質となる構造物を組み合わせて設置することにより、生物の保護、育成に適した場が創造されるということを数値モデルにより確認できた。

5 結 言

以上より、設置後 5~6 年を経過した 2 種類の高さの異なる構造物を設置することにより作り出された場の生物効果は、岩礁性に限

らず回遊性の魚類や有用貝類の蛸集および重要な餌料となる海藻の繁茂状況も良好で生物の保護・生息場としての機能を果たしていることが現地調査により確認された。また、高さを持つ構造物を中心に配し、前後に低い構造物を配することにより作り出される渦流域の形成が生物卵・幼生の滞留および基質への付着を促進させることが調査より判った。さらに数値モデルにより、この渦流域について生物の着生量との相互関係を検証した。このことから、流動制御構造物と付着基質構造物を組み合わせることによって生物環境を生み出す海域制御システムの開発の可能性が見い出せた。今後は、より現状に近い物理環境再現のため、圧力勾配の変化および鉛直方向の拡散係数の変化を取り入れた数値計算手法を検討する予定である。

以上により、将来的には本システムを活用することによって沿岸域でのミチゲーションへの応用も期待できる。

謝 辞

本研究は、平成元年より 3 年間に渡り実施された日本大学総合研究で使用したフィールドで行った。研究を遂行するに際して構造物配置案をはじめ貴重な御指導を頂いた水産庁水産工学研究所、高木儀昌室長に深く感謝いたします。また、多大な御意見、御協力を頂いた東京大学海洋研究所、中田英明助教授、山口県水産部、中原民男参事、同県第二栽培漁業センター、由良野義範科長、同県外海水産試験場、角田信孝課長、蓋井島漁業協同組合、松本明参事ならびに黒瀬建設(株)、黒潮海洋開発(株)の皆様にも深く感謝いたします。

最後に、本研究の一部は日本大学理工学部研究助成金によって遂行されたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 杜多 哲：浮遊幼生の分散におよぼす流動環境の影響とその制御、養殖研究所研究報告, No. 16, pp. 1~82, 1989
- 2) 中田英昭, 末永慶寛：新潟沖のマガレイの資源変動に対する風の影響、水産海洋学会大会講演要旨集, pp. 45~46, 1995
- 3) 山口県：下関市蓋井島地域営漁計画書, pp. 1~27, 1987
- 4) 海上保安庁水路部：沿岸海域の基本図・調査報告書, 1985
- 5) 山口県外海水産試験場：昭和 62 年度事業報告書, pp. 1~31, 1988
- 6) 佐久田昌昭, 高木儀昌, 末永慶寛：多目的人工魚礁の生物蛸集状況調査, 日本建築学会大会講演梗概集, pp. 969~967, 1987
- 7) 末永慶寛, 高木儀昌, 畔柳昭雄, 佐久田昌昭：海域制御システムに関する基礎的研究, その 6 付着基質構造物の生物効果, 日本建築学会大会学術講演会講演梗概集, pp. 281~282, 1995
- 8) 日本大学理工学部：海洋制御システムに関する基礎的研究, 日本大学総合研究報告書, その 1, 1990, その 2, 1991, その 3, 1992
- 9) 柳 哲雄, 井川周三：沿岸海域の残差流モデル, 沿岸海洋研究ノート, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 108~115, 1992
- 10) M. Fujihara, S. Kubo and M. Yamamoto: A Numerical Model on Estimating Reasonable Inflow Rate in a Nursery Aquaculture Pond, Fisheries Eng., Vol. 30, No. 2, pp. 119~128, 1993
- 11) Y. Suenaga: Fundamental Study on a Regional Marine Environmental Impact Prediction Method Taking into Consideration Biological Productivity, Dr. Paper of the Graduate School of Science and Tech., Nihon Univ., pp. 9~18, 1993

[1995 年 6 月 28 日原稿受理 1995 年 8 月 25 日採用決定]