

*海域制御構造物による海域環境変化の定量的研究

末永慶寛・高木儀昌*・畔柳昭雄**

QUANTITATIVE RESEARCH OF THE CHANGES IN MARINE ENVIRONMENT BY MARINE CONDITIONS CONTROL STRUCTURES.

Yoshihiro SUENAGA, Norimasa TAKAGI and Akio KUROYANAGI

The development of optimal utilization of ocean space along coastal zone has become necessary.

Especially in the fishery, where about 1/3 of fishery catch is imported from various foreign countries, many kinds of techniques for increasing and nurturing important fishery resources are required in Japan. In order to enhance productivity in the seas controlled by Japan. This need a result from an increase in demand and coastal fishery restrictions in these foreign countries.

Through marine observation, the authors be decided to evaluate changes in both the physical and biological environment by installing a marine conditions control structure in the sea.

Further, we examined of the interaction between flow and biological environment by using field observation data and numerical simulation model.

And we suggested utility system for important fishery resources in the coastal area.

Key words : marine conditions control structure, fishery resources, numerical model, larvae, quantitative evaluate.

1. 緒 言

我が国では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、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な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バイオトープ（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、開発に伴う環境改変の軽減、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。

また、魚介類の増殖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増殖効果については、魚介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

* 水産庁水産工学研究所 〒314-04 茨城県鹿島郡波崎町海老台

Facilities for Aquaculture Section, National Research Institute of Fisheries Eng., Ebidai, Hasaki, Kasima-Gun, Ibaraki 314-04

** 日本大学理工学部 〒274 千葉県船橋市習志野台7-24-1

College of Science & Technology, Nihon Univ., 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba 274

境の相互関係の定量的な把握に関する研究は極めて少なく、成果の蓄積が期待されている。

そこで、著者等は、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蛸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し、有用水産資源の保護・育成システムを考察することとした。

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12km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150m程離れた水深10~15mの地点である。湾内の海底地形は、水深10m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15m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¹²⁾。

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³⁴⁾。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卵、海藻孢子等の付着基質の役割を果たすものである。設置位置は、Fig. 4 に示したように流動制御構造物を中心に前後5m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、ラーバ付着量や生物蛸集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バ付着用採集器を設置した。

3. 生物蛸集効果の経年変化

構造物に関する生物蛸集状況については、魚類、有用磯根資源、海藻、ラーバ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、特にメバル、カザコ等岩礁性魚類が構造物内部および周辺に多量に蛸集していた。これは隣接した東側の天然礁よりも蛸集量が多くなっていた。また、餌料性魚類の蛸集が顕著であった。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、魚類蛸集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、魚類蛸集効果の高くなることが明らかになった。

有用磯根資源については、Fig. 5 に構造物上の成貝蛸集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0.2ind/m²のアワビ成貝と1.5ind/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0.2ind/m²のアワビ成貝と1.7ind/m²のサザエ成貝が確認されており、成貝のの蛸集量については増加していることが判る。

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

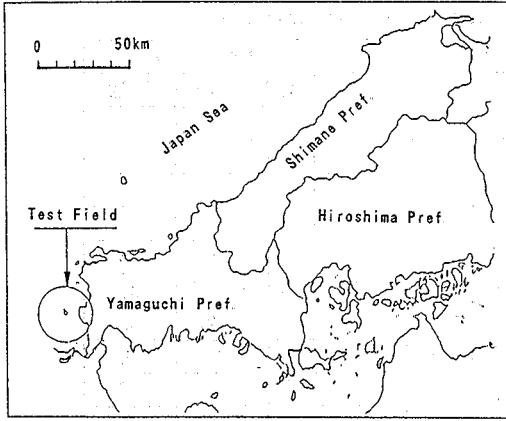


Fig. 1 Test Field

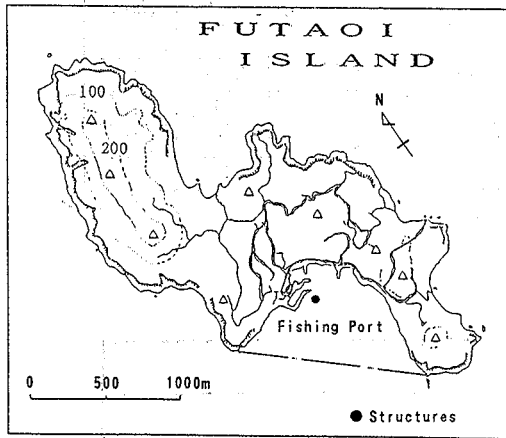
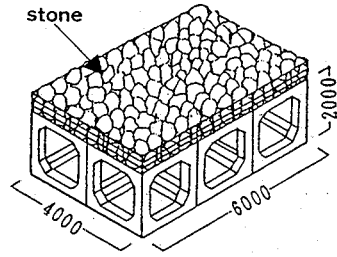


Fig. 2 Locatio of the Structure

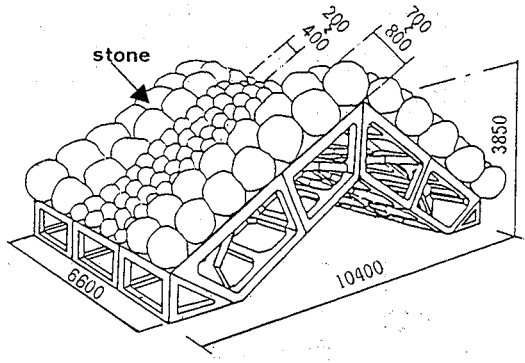


Fig. 3 Sunken Structures

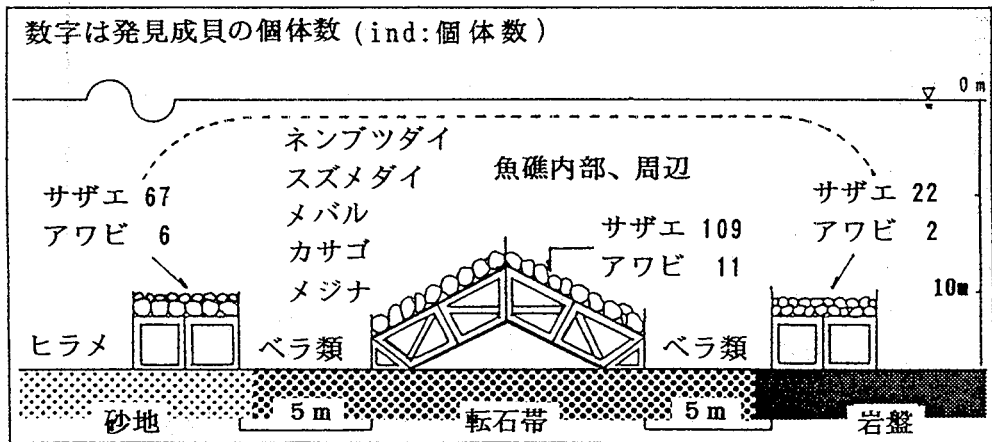


Fig. 4 The Result of Research for Biological Effect in March 1995

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
アミハギ	○ 3	3	—		—	
ウミタナゴ	○ 10	2	—		—	
ソラスズメダイ	○ 2-3	20	—		—	
ニザダイ	—		○ 10	8	—	
カワハギ	—		○ 5	5	○ 5	6
メジナ	—		○ 8-15	15	○ 10-15	20
カサゴ	—		—		○ 1-20	30
アイゴ	—		○ 8-10	70	○ 10	80
カワハギ	—		—		○ 5	6
スズメダイ	○ 5-8	100<	○ 3-5	5	○ 3-5	100<
ネンブツダイ	—		○ 5	100<	○ 5	100<
メバル	○ 8-10	5	○ 8-15	6	○ 8-15	100<
カミナリベラ	○ 8-10	20	—		—	
ホンベラ	—		○ 5-8	8	○ 5-8	15
ササノハベラ	○ 10	3	○ 10	10	○ 1	10
オオスジイシモチ	—		○ 8	8	○ 8	10
ヒラメ	—		—		○ 40	2

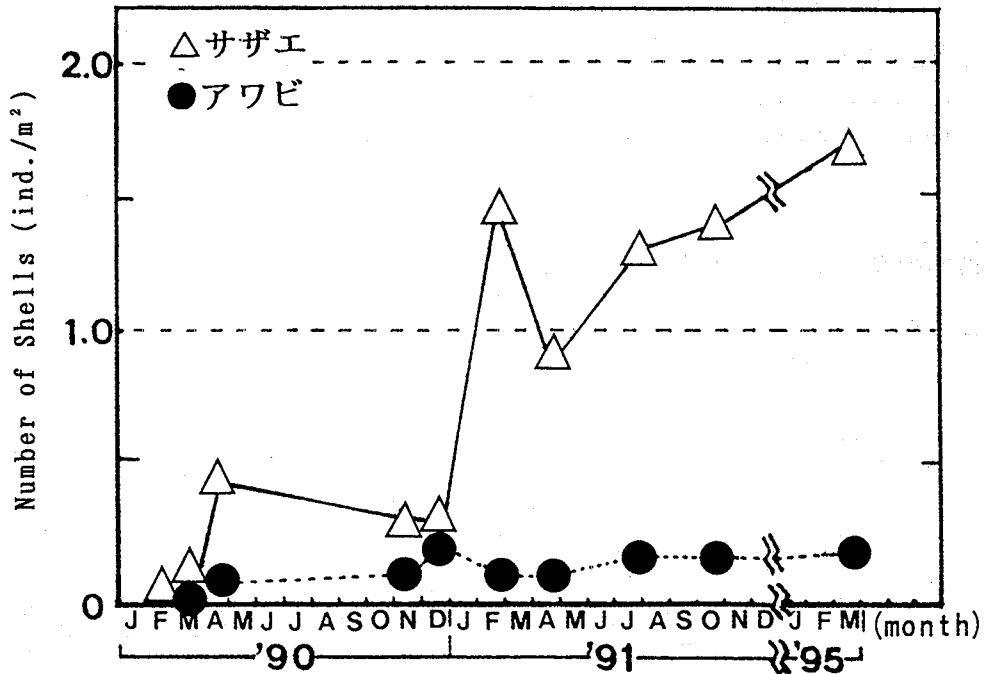


Fig. 5 Yearly Changes in Marine Organisms on the Structures

数法¹⁾による単位容積当たりの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 ind/m²であった。一方、中央の流動制御構造物上では、6~10 ind/m²、前後の付着基質構造物上では4~6 ind/m²の着生が確認され、特に沿岸より100~150m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、そこに流れの滞留域が発生し、ラ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⁵⁾⁶⁾を作成し計算することとした。この方程式を差分近似し、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(larvae)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2mとした。

流入速度は、蓋井島冬季における調査結果¹⁾より卓越方向から1.0m/secを与えた。

生物量については、Delury法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 ind/m²と推察された。そこで、角型構造物上のアワビ成貝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)~(6)式により Fig. 6中に示した★印に50,000 ind/m²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。

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

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

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (u \cdot C) - \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot C) - \frac{\partial}{\partial z} (w \cdot C) + \frac{\partial}{\partial x} (K_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (5)$$

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

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。計算に用いた主なパラメータを Table 1 に示す。

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 0.2m/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、構造物背後で流速は 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 4.0ind/m³ 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 8m 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することができると推察された。これは先に行った実験海域でのラーバ分布量調査の結果⁹⁾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ることで、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 6～7 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増集および重要な餌料となる海

Table 2 Parameters Used in the Numerical Simulation

drag coefficient at the sea surface	$\gamma_s^2 = 1.3 \times 10^{-3}$
drag coefficient at the bottom	$\gamma_b^2 = 2.6 \times 10^{-3}$
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	$K_z = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Colioliis parameter	$f_0 = 8.13 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

★ Spawning

1.0 m/s

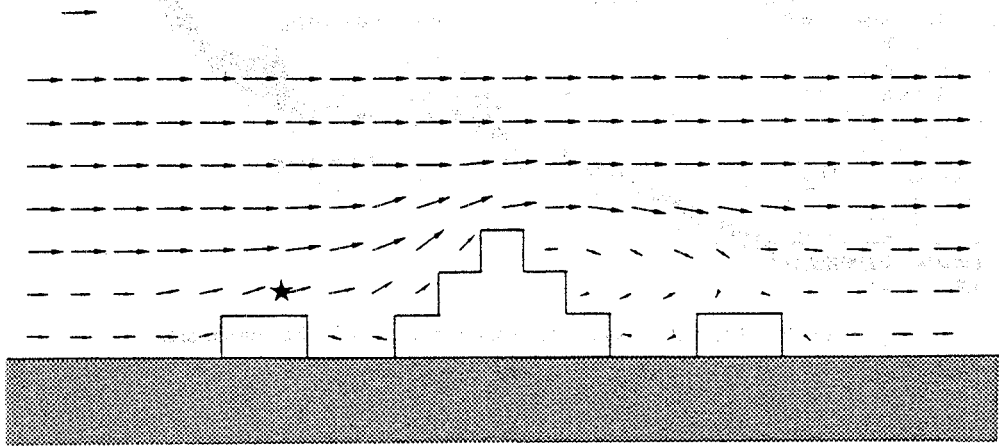
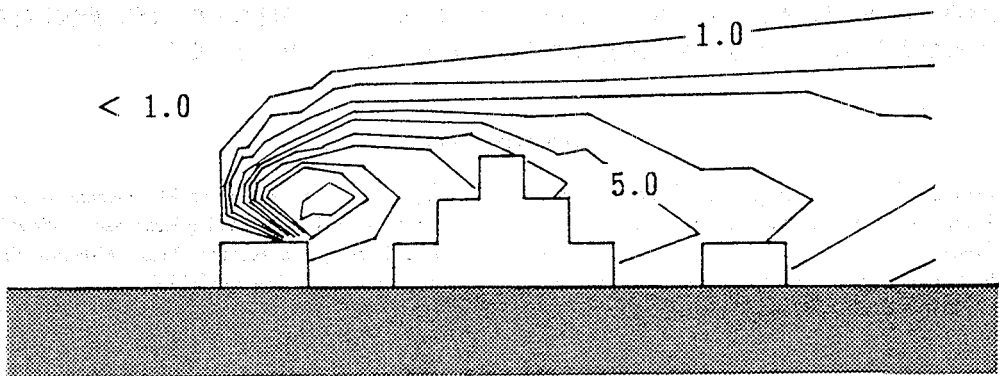


Fig. 6 The Calculated Velocity Around the Structures

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

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。その例として、今後実海域での実験を計画している沿岸の有用水産資源保護・育成を考慮した海域環境制御システムの概略を Fig. 8 に示した。同時に、より現状に近い物理環境再現のための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。

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ことを付記する。

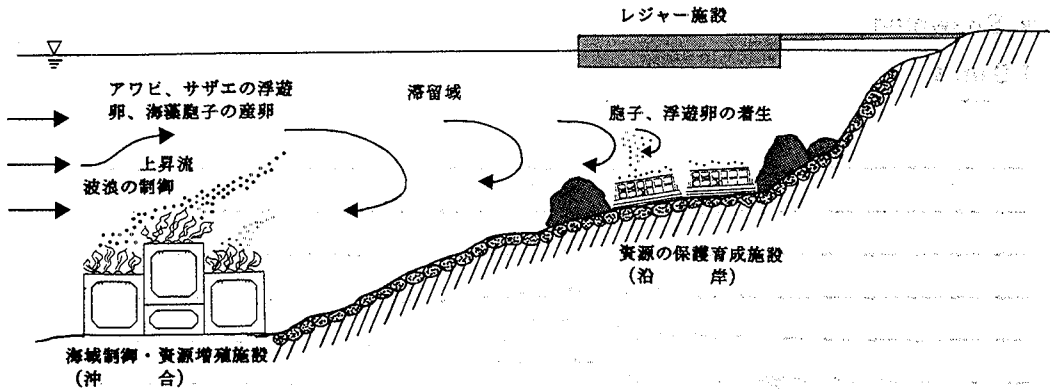


Fig. 8 The utility system for fishery resources in the coastal area

謝 辞

本研究を遂行するに際して貴重な御意見および多大な御協力を頂いた山口県水産部、中原民男参事、同県第二栽培漁業センター、由良野範義科長、同県内海水産試験場、立石健科長、同県外海水産試験場、角田信孝課長、国際水棲生物資源管理センター理事、藤谷超博士ならびに現地調査の際多大な御協力を頂いた黒瀬建設(株)、黒潮海洋開発(株)の皆様へ深く感謝いたします。

<References>

- (1) Regional Fishery Plan for Futaoi Island, Shimonoseki City, Yamaguchi Pref., 1-27 (1987).
- (2) Hydrographic Dept. of Marine Safety Agency: Basic maps and investigation report for coastal sea areas (1985).
- (3) Sakuta M., Y. Suenaga, N. Takagi: Investigation of biological aggregation conditions on multipurpose artificial reef, Proceedings of symposium of the Architectural Institute of Japan, 959-967 (1987).
- (4) Sakuta M., Y. Suenaga, N. Takagi, A. Kuroyanagi: Systems for control of environmental conditions in regional marine ecosystem, Resent advances in marine sci. & tech. 92, 371-379 (1993).
- (5) Fujihara M., S. Kubo and M. Yamamoto: A Numerical Model on Estimating Reasonable Inflow Rate in a Nursery Aquaculture Pond, Fisheries Eng., Vol. 30 No. 2, 119-128 (1993).
- (6) 末永慶寛：生物生産を考慮した海域環境変化予測手法に関する基礎的研究. pp. 1-198 (1993). [日本大学博士論文]
- (7) 末永慶寛, 中田英昭, 藤原正幸, 永澤亨：佐渡海峡におけるマガレイ卵・仔魚の輸送に対する風の影響の数値シミュレーション, 水産工学, Vol. 32 No.3, 219-228 (1996).

(1996年10月31日受理)