

湧昇流発生機能を有する着底式人工魚礁に関する研究

小 野 正 順*

近年、水産資源の持続的確保のため、沿岸域の生物生産の増大を目的として多くの人工魚礁が設置されてきている。最近の人工魚礁は、漁場環境の改善を目的とした海域環境改善構造物の一つとして設置される。本研究では、海底付近に停滞している水質的に悪化した水塊を湧昇させ移流拡散させることのできる海域環境改善機能を持ち、さらに種々の魚を集魚させることのできる着底式人工魚礁を提案し、数値計算により魚礁周辺の流況について検討を行った。その結果、魚礁の遮蔽率が小さすぎると魚礁内に局所的な強い流れが発生し魚礁として問題が生じるため、遮蔽率は 0.6 以上としてできるだけ多くの空隙を有するような魚礁形状にすることが望ましいことがわかった。

1. はじめに

近年、水産資源の持続的確保のため、また浅海域の生物生産の増大を目的として、多くの人工魚礁が設置されてきている。昔は豊富に水産資源があったため、効率的に魚を漁獲するために集魚させることを主目的として人工魚礁は設置されてきた。しかしながら、最近の人工魚礁は、生物生産の増大や魚場環境の改善を目的とした海域環境改善構造物の一つとして設置される。一方、閉鎖性水域や内湾域などの静穏な海域の海底の極近傍では貧酸素水の薄層が観測されている海域があり、海底面付近に堆積するヘドロと同じく海底環境の悪化として大きな問題となっている。

本研究では、こうした海底付近の水質的に悪化した水塊を湧昇させ移流拡散させることのできる海域環境改善機能を持ち、さらに種々の魚を集魚させることのできる魚礁機能を有する着底式の海洋構造物を考えた。そして、構造物周辺の流況や湧昇流量などの水理機能について数値計算によって検討を行った。

2. 人工魚礁の集魚効果

人工魚礁へ集魚する魚は、魚種あるいは成長段階によりその集魚の仕方が異なる事が知られており、「人工魚礁漁場造成計画指針」(全国沿岸漁業振興開発協会, 2000)にも明記されている。それによると人工魚礁へ集魚する魚は、魚礁内部に体を接触させる I 型魚種、魚礁周辺を遊泳する II 型魚種、魚礁から離れた中・高層に滞留する III 型魚種に分けられること、またそれぞれの魚種の集魚量に関係する魚礁形状は、I 型魚種は魚礁底面積、II 型魚種は魚礁の包絡表面積、III 型魚種は礁高に関係することが記述されている。

このように魚種あるいは成長段階で、人工魚礁への集魚状況が変化するのは、それぞれが人工魚礁の利用方法が異なるためと考えられる。

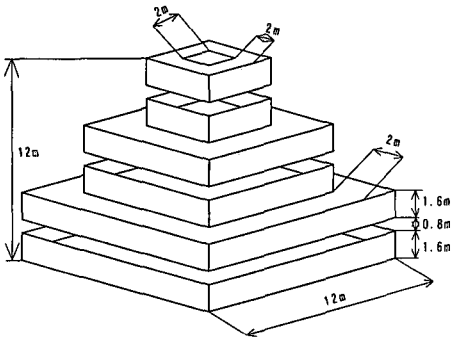
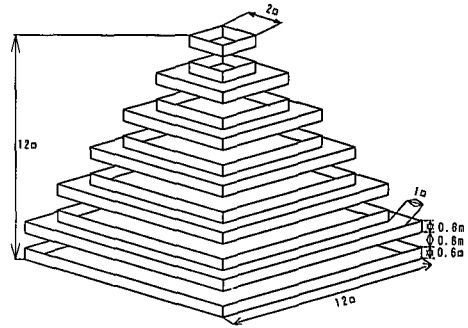
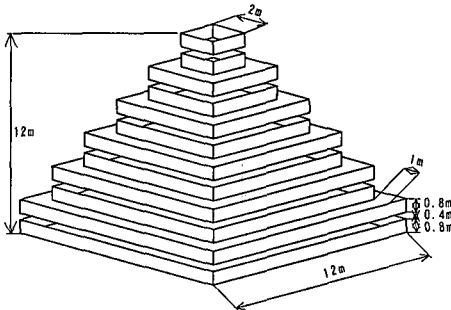
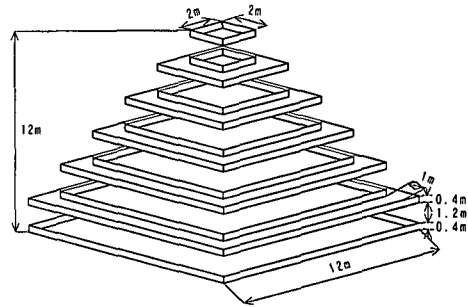
I 型魚種は、魚礁内の空間でほとんど生活している魚が多い。すなわち、魚礁内の空間を生活・居住空間として利用している。II 型魚種は、人工魚礁の付着生物やその周辺に集まるアミ類を捕食したり、外敵から身を守るため人工魚礁の陰に隠れたり、人工魚礁を餌場、隠れ場として利用している。その他にウマズラハギやマダイなどのようにあまり遊泳能力の高くない魚種は、流れからの避難場としても利用している。III 型魚種は、回遊魚であり肉食性の魚類から身を守るため、群れを作って回遊する。そして、II 型魚種と同様に、人工魚礁を餌場、あるいは隠れ場として利用していると考えられる。

3. 人工魚礁形状の検討

人工魚礁は、量的に多くの魚を集魚させる事だけでなく、より多くの種類の魚を集魚させる事が必要となる。それぞれの魚は、それぞれの生活史・成長速度を持つため魚によって魚礁への集魚量が季節的に変動する。より多くの種類の魚を集魚させることで季節的な漁獲の変動を抑えることができる。従って、量的に多くの魚を集魚させるだけでなく、より多くの種類の魚を集魚させることが、人工魚礁の評価指標の一つとして重要である。

本研究では I 型から III 型魚種にわたる多くの種類の魚を集魚させる人工魚礁として、円錐台形状の人工魚礁を考えた。円錐台としたのは、どのような方向から流れを受けても同じような流況が形成され、流れを受ける方向によって集魚効果があまり影響を受けないようにするためである。数値計算では正方メッシュで計算するため、図-1 あるいは図-2 に示すような四角錐台の形状とした。

I 型魚種について集魚量を増やすために魚礁を台形型とし、できるだけ底面積を大きくとった。II 型魚種については、包絡表面積、内容積が大きくなるような魚礁形状とした。礁高は、通常大きな乱れを発生させようとすれば水深の 10% 以上で設計される。III 型魚種が視覚的にも人工魚礁が認識できるように、できるだけ礁高も高かった。

図-1 3段魚礁の魚礁形状 ($\epsilon=0.8$)図-3 6段魚礁の魚礁形状 ($\epsilon=0.6$)図-2 6段魚礁の魚礁形状 ($\epsilon=0.8$)図-4 6段魚礁の魚礁形状 ($\epsilon=0.4$)

4. 人工魚礁周辺の流況に関する数値計算

人工魚礁まわりの流速分布を詳細に検討するため、数値計算を行った。数値計算は、人工魚礁周りの渦流れが再現できるように Navier-Stokes の式を直接計算する SOLA 法 (高橋, 1982) を用いた。計算に用いた基礎方程式は、次に示す連続の式と Navier-Stokes の運動方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = D = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 u , v , w はそれぞれ x , y , z 方向の流速, ρ は水の密度, g は重力加速度, p は圧力, ν は動粘性係数

($2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) を示す。 D は発散を示し非圧縮性流体では 0 となる。数値計算には差分法を用いた。運動方程式の移流項には doner 差分を用い、重み係数 α の値は 0.5 に設定した。粘性項については、2 次の中央差分を用いた。

計算手順は、式 (2)~(4) の運動方程式を用いて、各流速成分を時間発展で求める。しかしながらこのようにして求めた各流速成分は式 (1) の連続式を満たさない。各セルの発散 D は式 (1) により求め、各セルの発散 D が 0 になるように圧力 p と各流速成分 u , v , w が修正される。

解析を行なった魚礁形状としては、図-1 に示す 3 段魚礁と図-2 に示す 6 段魚礁について行った。また、遮蔽率 ϵ をそれぞれ 0.4, 0.6, 0.8 の 3 種類に変化させて検討した。図-1, 2 は、それぞれ遮蔽率 ϵ が 0.8 の 3 段魚礁と 6 段魚礁を示している。6 段魚礁の ϵ がそれぞれ 0.6, 0.4 のものを図-3, 4 に示す。人工魚礁に作用させた流れは潮汐流を想定し、1.0, 0.5 m/s の 2 種類の一方向流を作用させた。このとき流れ方向の遮蔽長さを代表長さとするレイノルズ数は $2 \sim 16 \times 10^4$ の範囲である。人工魚礁の評価は、上方への湧昇流量と魚礁周辺の流況によって行った。魚礁周りの流況の数値計算は、30 秒後と 40 秒後の計算結果を比較して、それ程違いが見られなかったため 40 秒後の計算結果を用いて検討した。

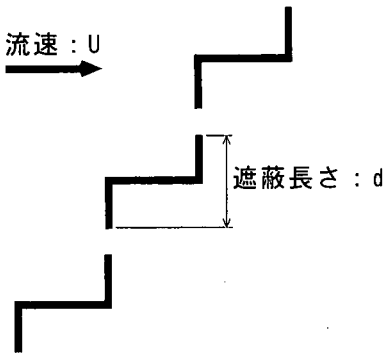


図-5 人工魚礁の遮蔽：d の定義

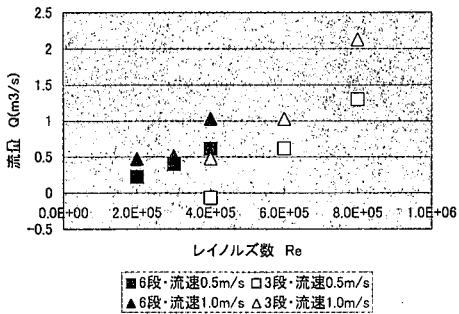


図-6 魚礁上面からの流出流量とレイノルズ数の関係

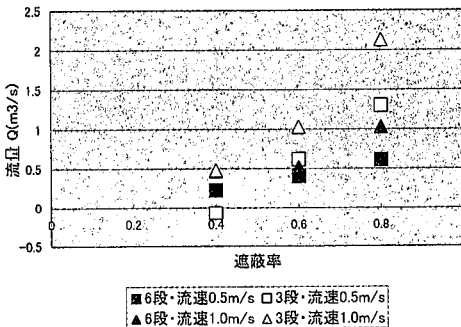


図-7 魚礁上面からの流出流量と遮蔽率の関係

5. 人工魚礁上面からの流出流量の特性

本研究で対象とする人工魚礁の特性として、魚礁側面の空隙より海水が流入し、魚礁上面から魚礁内の海水が抜ける事で、海底に滞留している貧酸素水塊などを湧昇させる機能を有している。その湧昇機能を評価するために、魚礁上面からの流出流量を求めた。解析対象とした各魚礁上面の空隙は 2 m 四角の空隙で合わせている。

図-6 は魚礁上面からの流出流量 Q とレイノルズ数 Re の関係を示す。図中の記号で三角印が流速 1.0 m/s の場合を示し、四角印が流速 0.5 m/s の場合を示す。また

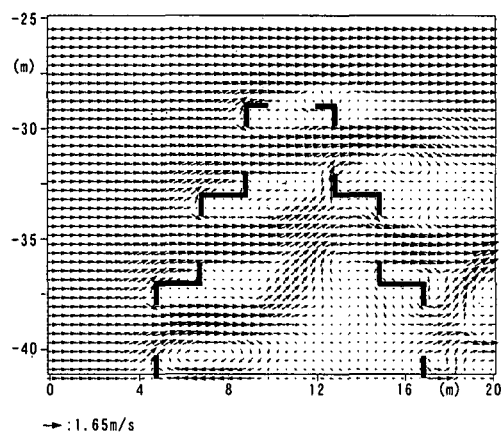
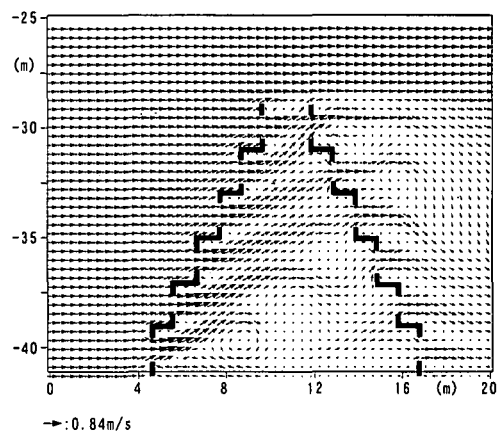
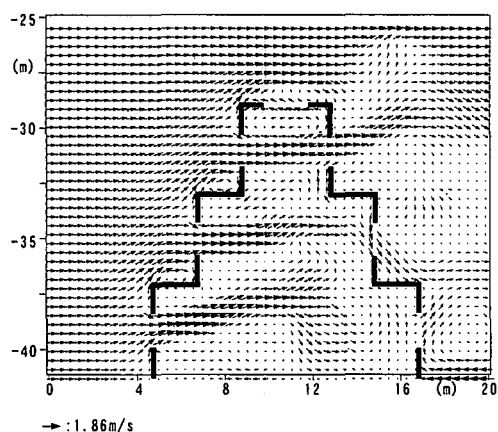
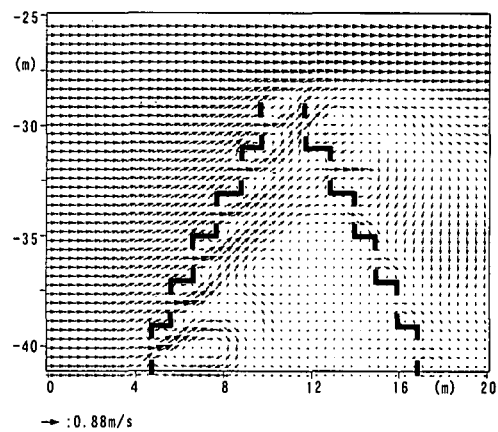
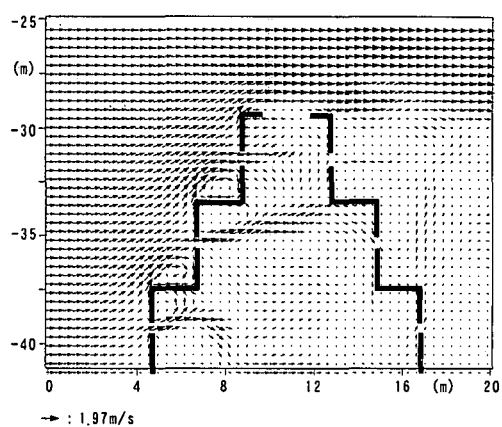
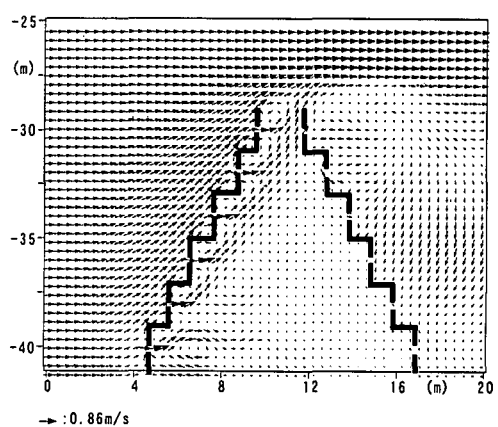
白抜き記号が 3 段魚礁の場合を示し、黒塗りの記号が 6 段魚礁の場合を示す。レイノルズ数 Re の代表流速は主流の流速 U をとり、代表長さは図-5 に示すように流れに対して直角方向の魚礁部材の遮蔽長さ： d をとっている。

図-6 より、主流の流速が大きくなる、あるいは遮蔽率を大きくすることで遮蔽長さが大きくなるほどレイノルズ数が大きくなり、魚礁上面からの流出流量が大きくなることがわかる。また、図-7 の魚礁上面からの流出流量 Q と遮蔽率 ϵ の関係より、同じ遮蔽率でも 6 段魚礁よりも 3 段魚礁の方が魚礁上面からの流出流量が大きくなる傾向を示し、この傾向は遮蔽率が大きくなるほど顕著に現れている。これは 3 段魚礁の方が流入口の個数が 6 段魚礁の半分であり、流入量が少ないために魚礁内の流速が小さく主流との流速差が大きくなり、魚礁上面からの流出流量が大きくなるものと考えられる。完全に遮蔽してしまうと魚礁上面から流出する流量が供給されなくなるため流出流量は減少すると予想されるが、本研究で解析した遮蔽率が 0.8 までの流出流量は、増加する結果となった。

6. 人工魚礁周辺の流況特性

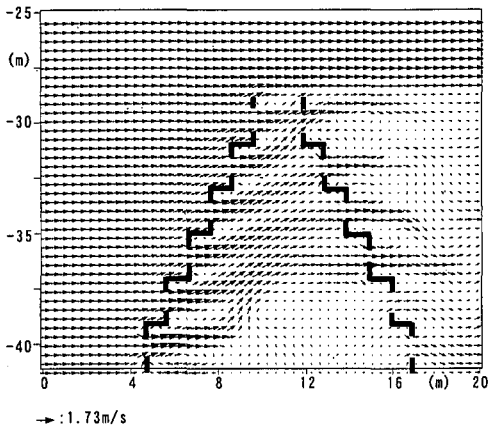
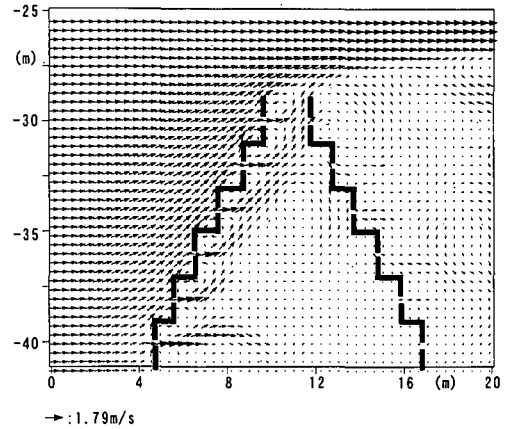
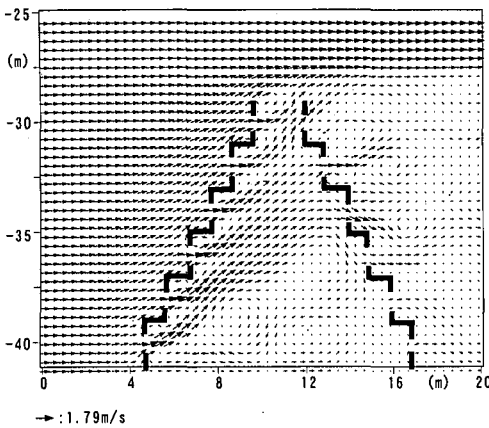
図-8～図-10 はそれぞれ遮蔽率 0.4, 0.6, 0.8 の 3 段魚礁における主流方向断面の流速ベクトル図を示す。主流の流速は 1.0 m/s の場合を示す。遮蔽率の小さい 0.4 のケースである図-8 より、魚礁前面の開口部から流入した海水はそのまま魚礁背後の開口部から流出している状況がわかる。魚礁内でもほとんど湧昇流が見られない。遮蔽率 0.6 のケースである図-9 においても最も海底に近い開口部からの流入は魚礁内で混合されているが、他の開口部からの流入は背後の開口部から流出している。遮蔽率 0.4 の場合と比較すると魚礁背後での流況の空間的乱れは遮蔽率 0.6 の方が大きい。しかしながら、両者共に魚礁内において開口部からの局所的な強い流れがあり、魚礁としての流れ環境は悪い。遮蔽率 0.8 のケースである図-10 においては、前の 2 ケースと比較すると魚礁内の流れ環境は静穏である。特に、海底付近の開口部から水質の悪化した海水が流入してくるが、魚礁内への流入量は少なく、魚礁内部でも湧昇流は明確には現れていない。その代わり、魚礁前面で駆け上がりが見られる。

図-11～図-13 はそれぞれ遮蔽率 0.4, 0.6, 0.8 の 6 段魚礁における主流方向断面の流速ベクトル図を示す。主流の流速は 0.5 m/s の場合を示す。また、図-14～図-16 は同様に主流方向断面の流速ベクトル図で主流の流速が 1.0 m/s の場合を示す。遮蔽率が小さい 0.4 のケースでは、3 段魚礁の場合と同様に魚礁開口部からの流入が見られ、魚礁背後の開口部から抜けていることが

図—8 3段魚礁周辺の流況 ($U=1.0$ m/s, $\varepsilon=0.4$)図—11 6段魚礁周辺の流況 ($U=0.5$ m/s, $\varepsilon=0.4$)図—9 3段魚礁周辺の流況 ($U=1.0$ m/s, $\varepsilon=0.6$)図—12 6段魚礁周辺の流況 ($U=0.5$ m/s, $\varepsilon=0.6$)図—10 3段魚礁周辺の流況 ($U=1.0$ m/s, $\varepsilon=0.8$)図—13 6段魚礁周辺の流況 ($U=0.5$ m/s, $\varepsilon=0.8$)

わかる。3段魚礁の場合と異なり、魚礁内で多少上方に流れが曲げられている。遮蔽率を大きくすることで魚礁内の流れは更に上方に曲げられ、魚礁内側を這い上がる流れとなる。魚礁前面の開口部から流入した海水は、魚

礁内部で上方に湧昇されていることがわかる。また魚礁内部の流れは、遮蔽率0.4のケースにおいては静穏な空間が小さく、6段魚礁の場合は遮蔽率0.6以上のケースで、比較的広範囲に静穏な流れ空間が確保できることが

図-14 6段魚礁周辺の流況 ($U=1.0$ m/s, $\epsilon=0.4$)図-16 6段魚礁周辺の流況 ($U=1.0$ m/s, $\epsilon=0.8$)図-15 6段魚礁周辺の流況 ($U=1.0$ m/s, $\epsilon=0.6$)

7. 結 論

- ①海底付近のヘドロや貧酸素水塊などを湧昇させ移流拡散させる機能を持った人工魚礁として、円錐台（四角錐台）形状の人工魚礁を提案した。
- ②人工魚礁の形状を円錐台の形状にすることで底面付近の水塊は上方へ湧昇される。
- ③魚礁上部からの流出流量は、レイノルズ数、遮蔽率が大きくなるほど増加する傾向を示す。
- ④魚礁内部及び背後の遮蔽領域に局所的に強い流れが生じないような流れ環境を創造するには、魚礁の遮蔽率が0.6以上で、できるだけたくさんの空隙を有するような魚礁形状が望ましいことがわかった。

参 考 文 献

- 全国沿岸漁業振興開発協会(2000): 人工魚礁漁場造成計画指針, pp. 9-44.
- 高橋亮一 編著(1982): コンピューターによる流体力学〈演習〉, 株式会社設計研究所, 275 p.

わかった。