

魚礁背後の流況特性について

榎 木 亨*, 松 見 吉 晴**

1. はじめに

人工魚礁の施工は既に数多くの地点で行われており、一応その集魚効果は認められている。その集魚効果のうち、人工魚礁の背後に形成される水平渦流（ここでは後流渦と呼ぶことにする）の効果については、魚類の餌となるプランクトンの封じ込め・発生源・流況変動などに関する重要な水理量であることを数多くの水産研究者によって指摘されている。しかしながらこの魚礁背後の後流渦による集魚効果はその規模なのか、また渦の強さによるものなのか現在十分な判明がなされていないし、魚礁のいかなる形式が最も集魚効果を高めるのか、あるいはいかなる魚礁群の配置が最適であるかどうかについては全くわかっていない。

魚礁背後の後流域の規模に関しては、著者らは先に現在人工魚礁において数多く用いられている立方体モデルと半円球モデルの単体について実験を行い、数値シミュレーションによる推定方法を発表した¹⁾。さらに年次学術講演会などで、その背後に形成される後流渦の二次元的な拡がり、およびそれに対する有孔性の効果について発表してきた^{2),3)}。本研究では、集魚効果に関する重要な因子である渦の強さについて、後流域と主流域の境界面で発生する単一の大きな渦（ここでは卓越渦と呼ぶことにする）の強さおよび後流渦の強さを実験的に評価することによって、それぞれの渦の特性および後流渦領域の規模との関係を検討したものである。

2. 実験および解析方法

2.1 実験方法

本実験は潮流および波動流による振動流下での魚礁背後に形成される渦の強さを明らかにすることを目的としていることから、正弦的な時間変化を示す振動流を発生せしめるU字管振動流発生装置を用いて行った。魚礁モデルは魚礁周辺の流況を二次元的にとらえるため魚礁モデルの長軸方向の長さをU字管水槽幅(20 cm)にほぼ等しくなるように立方体魚礁は直方角柱モデルに、半円球

魚礁は半円柱モデルに置き換えて行った。その有孔性に関しては直方角柱モデルの各側面に長方形の孔を設けることによって単位体積空隙率 γ を 43.7, 56.0, 68.0, 80.6% の 4 種類に変化せしめた。卓越渦と後流渦の強さはそれぞれ 図-1 に示すように渦の回転速度分布から

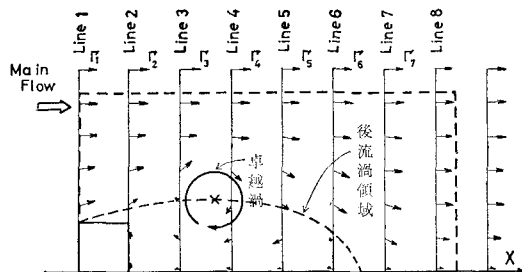


図-1 魚礁背後の流況模式図

と魚礁背後の各位置における流速ベクトルから求めるものとした。したがって各位置での流速ベクトルを測定するために 図-2 に示すようなキンク状に折り曲げた水素

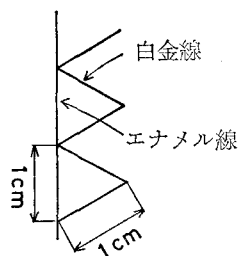


図-2 キンク状白金線

気泡発生装置を魚礁前面に 1 本および背後に 2 cm 間隔で 10 数本設置し、その先端部より 0.1~0.2 秒間隔で発生する水素気泡を 16 mm シネカメラで毎秒 16 コマの速度で撮影し解析した。

実験は魚礁モデルの代表長（半径あるいは角柱の一辺を a とし） $2a=D$ とした場合の K-C 数 (UT/D) が 6.73~23.05, Re 数 (UD/ν) が $3 \times 10^3 \sim 11 \times 10^3$ の範囲で行っている。

2.2 撮影結果の解析方法

本研究では卓越渦および後流渦の強さを循環で評価することとした。したがって前者については渦の中心およ

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

び回転速度分布を求めるための流速ベクトルを読み取り、ランキン渦の仮定より循環を求める。一方後者については図-1に示しているように、渦の影響がなく流れが主流と同方向の水平方向成分だけを有するようなコントロールボリューム(図-1の点線部)を設定し、その流速ベクトルをそれぞれ読み取りコントロールボリューム内の各区分および全体の循環を得た。なおコントロールボリュームの決定法および循環の決定法については後述することにする。

この方法で測定した卓越渦の流速ベクトルは卓越渦による回転速度成分と主流による変動速度成分の合成されたものであるから卓越渦の回転成分を正確に表わしてはいないと考えられる。そこで卓越渦の回転速度としては撮影結果より得られた流速ベクトルを卓越渦の回転方向に投影した補正流速ベクトルを用いることとした。

3. 卓越渦の特性

3.1 卓越渦の実義について

上述した水素気泡発生装置で魚礁周辺を可視化した場合、既に著者らが定義している後流渦(流体中の物体の下流側において鉛直断面内の水平方向流速が主流と逆方向となる領域)とは別に、ある1点を中心として明確に回転運動をしている1個の大きな渦を観察できる。このほぼ円形に近い渦をここでは卓越渦と呼んでいる。撮影結果より卓越渦を決定するに当たっては次の方法による。すなわち卓越渦が存在する領域で発生した水素気泡は、流下方向に流されることはなく卓越渦の回転方向に回転し、他の領域に比して水素気泡の密度が高くなっている。したがってこの水素気泡の密度の高低差および移動方向より卓越渦の領域を決定する。なおこの卓越渦はすべてのケースで発生するものではなかったが、今回はその発生条件については十分な結果が得られておらず後日あらためて報告することとしたい。

3.2 卓越渦の回転速度分布について

図-3は上述の解析方法によって得られた各時間位相(ωt)における卓越渦の回転速度分布を各魚礁モデルにつ

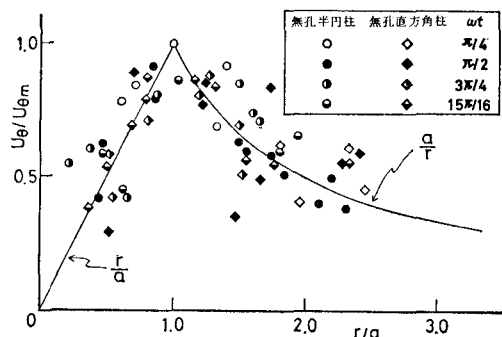


図-3 卓越渦の速度分布(無孔モデル)

いて示したものである。図中 $U_{\infty m}$ は各時間位相における最大回転速度、 a は $U_{\infty m}$ が生じる地点と卓越渦の中心との距離、 r は渦の中心からの距離を示す。また実線はランキン渦の速度分布を示したものである。この図から実験結果は多少のばらつきはあるが、魚礁の形状変化および時間位相に関係なくほぼランキン渦に近い速度分布を示していることがわかる。また有孔モデルに関しても同様の結果を得たことから、魚礁モデル背後に形成される卓越渦をランキン渦と仮定しても十分といえよう。

3.3 卓越渦の循環について

卓越渦は先に述べたようにランキン渦と仮定することができるので、その循環 Γ_0 は

$$\Gamma_0 = 2\pi a U_{\infty m} \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。図-4は無孔半円柱、無孔直方角柱および有孔直方角柱モデルの卓越渦の循環 Γ_0 の時間位相変化に伴う変化を示したものである。図-4より Γ_0 は形状

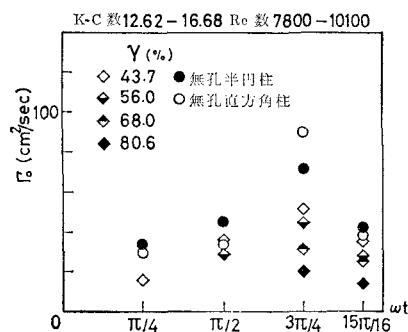
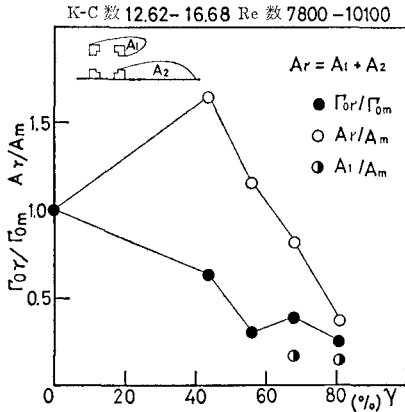


図-4 Γ_0 の時間位相変化

変化および空隙率変化にかかわらず時間位相 $\omega t = 3\pi/4$ まで増大し $\omega t = 3\pi/4$ でピークを示し、減少していることがわかる。すなわち Γ_0 の最大を示す時間位相は主流の最大流速を示す $\omega t = \pi/2$ より $\pi/4$ だけずれた時間位相で発生する。これは魚礁モデルから剝離する境界層の影響とも考えられるがまだ充分明らかでない。

3.4 有孔性による卓越渦の変化について

卓越渦の循環 Γ_0 は図-4からわかるように魚礁の空隙率によって当然変化する。図-5は直方角柱モデルにおける空隙率 γ と $\omega t = 3\pi/4$ における卓越渦の循環の最大値との関係を示したもので、図中の Γ_{0m} と Γ_{0r} はそれぞれ無孔モデルと有孔モデルにおける循環を表わす、なお図中の A_r/A_m は著者らの先の実験で得た後流渦領域の面積比で、 A_m および A_r はそれぞれ無孔および有孔直方角柱モデルの後流渦面積を表わす。また空隙率の増大に伴って後流渦領域が上下2つに分離される場合の上部後流渦面積 A_1 (図-5参照) と A_m の比も同時に併記している。図-5からも明らかなように Γ_{0r}/Γ_{0m} は $\gamma = 56\%$ 程度までは急激に減少し、それ以上の空隙率に対してはほぼ一定の Γ_{0r}/Γ_{0m} を示すようになる。一方後流渦面積

図-5 Γ_0 の空隙率変化

は空隙率に大きく左右され、後流渦の面積変化と Γ_{0r} との間には明確な相関関係は見出せない。しかし空隙率が増大して後流渦領域が 2 つに分離される場合の Γ_{0r} と A_1 との間には相関関係が認められる。この場合の Γ_{0r} ($\gamma \geq 68\%$) は上部後流渦の面積の大きさによって決定されるものなのか、またはこの逆に Γ_{0r} が A_1 を決定するものかについては明確でない。

4. 後流渦の特性

4.1 後流渦の循環の決定法について

魚礁モデル背後の流れとしては今まで述べてきた卓越渦のみではなく、それ以外に可視化不可能な大小複数の渦も考えられる。しかしこの可視化不可能な渦が、どの程度魚礁モデル背後に存在しているかについては明らかでない。そこでこの点を定量化するために著者らは次のように考えた。すなわち「ある領域内に渦が存在すれば、その領域内に循環が生じる」という事実に基づいて、魚礁背後に卓越渦および後流渦を取り囲む領域（コントロールボリューム）を設定し、その循環をもって魚礁モデル背後の渦を定量化することにした。コントロールボリュームは図-1 に示す点線で囲まれた領域であり、その設定においては以下の項目を満足するものとする。

i) 水平方向は魚礁モデル前端から後流渦領域を越えて主流方向と同じ流向をとりはじめる測線までとする。

ii) 鉛直方向は水槽底面より後流渦領域を越えて流れが一様に主流方向（水平方向）を向いている測線までとする。またコントロールボリューム内は、渦がどの範囲にどの程度存在するかも検討するため、図-1 中に併記している Line 1, Line 2, ..., で分割している。

いま実験結果から各 Line 上の流速ベクトルが

与えられると、コントロールボリューム内の各区分および全体の循環は次式で与えられる。

$$\Gamma_k = \oint_C V_i dl_i \dots \dots \dots (2)$$

$$\Gamma_L = \sum_{k=1}^{N-1} \Gamma_k \dots \dots \dots (3)$$

ここに Γ_k は Line k と Line $k+1$ の間の循環、 Γ_L は Line 1 から Line N までの循環（コントロールボリューム全体の循環）、 V_i はある測点 i における流速ベクトルの dl_i 方向成分、 dl_i は測点間距離（図-6 参照）である。したがって式 (3) は渦の循環の場所的な累積値を表わすものである。

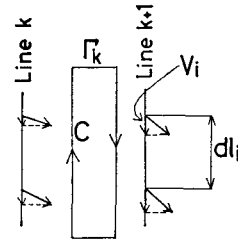
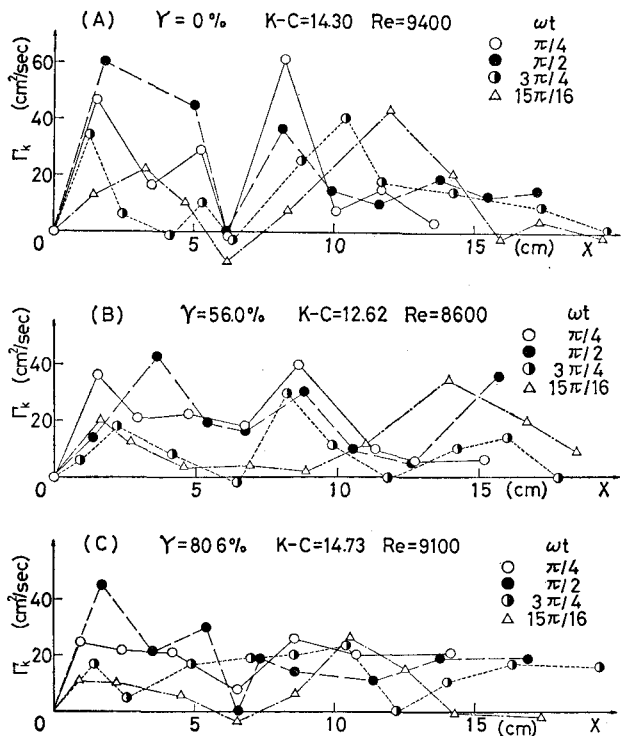


図-6 記号の説明図

4.2 後流渦の循環の場所的变化について

図-7 は無孔モデルおよび有孔モデルの直方角柱モデルについて、各時間位相ごとの区分循環 Γ_k の場所的变化を示したものである。なお X は魚礁前端よりの距離

図-7 Γ_k の場所的变化

を示したものである。これらの図よりいずれの ωt の値に対しても Γ_k は X の変化に伴って急激に変化する。このことは渦が連続的に存在しているのではなくて間歇的に存在していることを示しているものと考えられる。すなわち、まず最初のピーク値は魚礁モデル前方隅角部の剝離点より発生した渦のため現われるものであろう。次にこのピークの位置およびピークの値は ωt の増大に伴って流下方向に移動して減少している。このことは後流渦が主流によって掃流されて消滅していくことを示すものであろう。また上述の卓越渦の発生地点が $X=8\sim 12\text{ cm}$ であることから、図-7の Γ_k の第2ピーク値はほとんどが卓越渦の影響によるものと考えられる。一方(c)の $\gamma=80.6\%$ の場合は前者とは異なった傾向を示し、 Γ_k の値は場所的变化に対してそれほど急激な変動を示していない。このことについては次のように考えられよう。すなわち $\gamma=80.6\%$ の魚礁モデルはモデル各側面に設けた孔が広くなることから、魚礁はもはや1つのモデルとは考えられず4本の直方角柱部材からなる構造となり、モデルの孔から流出する流れは主流と同程度の流速を持って噴流状態のようになって流出している。この場合、流れは疑似定常流のようになり魚礁モデル背後に掃き出される渦はカルマン渦列のような状態になることから、図-7の(c)に示している Γ_k が場所的にそれほど顕著に変動することがないのではなからうか。

4.3 後流渦の循環の空隙率変化について

以上述べたように後流渦の循環は空隙率 γ によっても当然変化する。図-8は $\omega t=3\pi/4$ における直方角柱モ

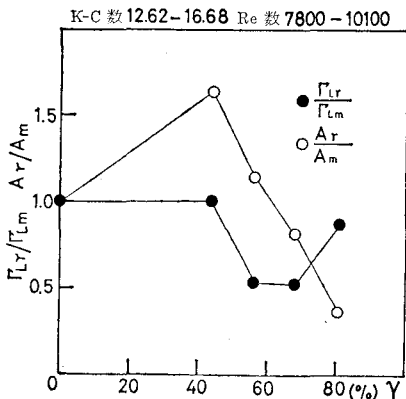


図-8 Γ_L の空隙率変化

デルについて式(3)より求めた全循環 Γ_L の空隙率に伴う変化を示したもので、図中の Γ_{Lm} と Γ_{Lr} はそれぞれ無孔モデルと有孔モデルにおける全循環を表わす。なお同図には先の図-5と同様 A_r/A_m の変化も併記してある。図からも明らかなように、有孔モデルの全循環は $\gamma=43.7\%$ においては Γ_{Lm} とほぼ同程度であるが、 $\gamma=56, 68\%$ では減少を示す。しかしながら $\gamma=80.6\%$

と大きくなると、 Γ_{Lm} には完全にもどらないが大幅に回復している。現在使用中の立方体の魚礁の空隙率は約60%前後であることを考えると、現在使用中の魚礁は循環の面から考察すると、図-5に示すように卓越渦に関しては多少空隙率を大きくしてもそれほど循環には変化を与えないが、後流渦に関しては図-8に示すように大きな変化を与えることがわかる。一方、後流渦の面積変化と Γ_{Lr} の間には明確な相関関係は見出せない。魚礁の集魚効果が後流渦の規模なのか、または後流渦の強さなのか充分判明されていない現在、充分なことは言い難いが、魚が渦の中心に入ってプランクトンを取るため循環がそれほど強くなく、また後流渦領域が大きいためには $\gamma=56\%$ 程度が最も望ましい空隙率といえるかもしれない。

4.4 後流渦と卓越渦の関係について

先述したように式(3)によって表わされる Γ_L はコントロールボリューム内のすべての渦に関する累積循環値を表わすことから、ここでは Γ_L に対する卓越渦の循環 Γ_0 の占める割合について検討を加える。図-9は無孔直

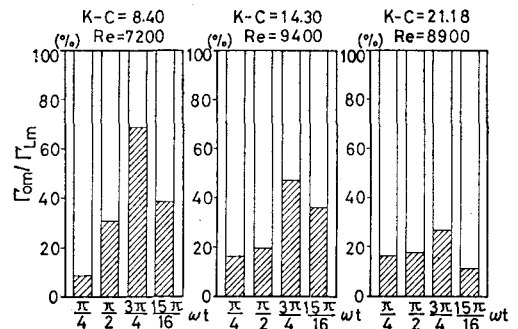


図-9 Γ_0 の全循環に占める割合

方角柱モデルの Γ_{Lm} に対する各時間位相における Γ_{0m} の割合を示したもので、図中の Γ_{Lm} としては式(3)で求められる最大値をとって表わしている。この図から卓越渦の Γ_{0m} は K-C 数の小さい場合には、全循環の70%にも達する場合があることがわかる。しかし K-C 数が大きくなるとこの割合は減少していくが、これは K-C 数が大きくなると魚礁からの渦の発生個数が多くなるためと考えられる。

5. あとがき

以上魚礁の集魚効果に関する重要な因子である魚礁背後の渦流についてとりわけ底面に対して水平方向の軸を有する卓越渦と後流渦に対して渦の強さの面からの検討を行い、魚礁の形状および有孔性によるそれぞれの渦の循環の変化、さらには時間位相に伴う変化に関する結果を報告した。しかしながら鉛直方向の軸を有する渦およ

び潮流などの K-C 数の大きい場合の渦の特性に関しては今回検討を行っていない。一方、これら単体魚礁の結果を参照して決定すべき魚礁群の最適平面配置の問題については単に推定の域を出ず、この点を実証づけるためにも上述した渦特性に関して十分な検討を進めていく必要がある。なお本研究は、文部省科学研究費（特定研究Ⅱ）および鹿島奨学金による研究成果の一部であることを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・後野正雄：人工魚礁の背後流況変化の数値シミュレーションについて，第 26 回海講論文集，pp. 673~676, 1979.
 - 2) 榎木 亨・松見吉晴：魚礁周辺の形状および空隙率変化に伴う流況変化について，第 35 回土木学会年講概要集（Ⅱ），pp. 67~68, 1980.
 - 3) 榎木 亨・松見吉晴：魚礁に対する有孔性の効果，昭和 55 年土木学会関西支部年講概要集，Ⅱ-77, 1980.
-