

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

榎 木 亨*・後 野 正 雄**

1. ま え が き

近年我が国の各地で人工魚礁が設置されているが、この魚礁の水理機能に関する研究例は極めて少なく、またその集魚機能も十分な判定が得られていない。しかしながら数少ない魚礁の研究報告から、その集魚効果は魚礁の背後流況変化にあることが指摘されている。本研究はこの背後流況変化に着目し、その基礎的研究の第1段階として振動流中の魚礁背後に生じる後流渦の数値シミュレーションを行ない、形状にともなう後流域の変化をとらえようとしたもので、それらの数値シミュレーション結果をさらに実験によって検証し、その問題点を明確にしようとするものである。

2. 計 算 手 法

剝離を伴う物体回りの流れの状況を数値シミュレーションで求める場合、一般に次の2通りの方法が考えられる。

(i) N-S 方程式を差分法または有限要素法で解いていく方法

(ii) ポテンシャル流を仮定して渦糸モデルを用いて近似してシミュレートする方法

著者の一人¹⁾は先に円柱回りの背後渦の形成を(ii)の方法で求め良好な結果を得ているので、本研究においても同一手法を用いて行なうこととした。

(1) 半円型魚礁に対する計算式

主流中に $2N$ 個の任意の強さの渦糸を有する空間的に一様な流れを想定し、その中に円柱が2次元平面と直角

に置かれた場合を考える。 $2N$ 個の渦糸の位置及び循環の強さが図-1のように x 軸に対して対称であるとする。この場合 x 軸より上半分の流況は水平床に半円筒型魚礁を設置した場合の流れの場合と同じであると考えることができよう。図-1に示す対称渦糸モデルにおける流れの場の複素速度ポテンシャル $w = \phi + i\psi$ は次のように表わされる²⁾。

$$\begin{aligned} w = \phi + i\psi = & U \left(z + \frac{a^2}{z} \right) \\ & + \frac{i}{2\pi} \left[\sum_{n=1}^N \Gamma_n \log(z - z_n) \right. \\ & + \sum_{n=1}^N \Gamma_n \log \left(z - \frac{a^2}{\bar{z}_n} \right) \\ & - \frac{i}{2\pi} \left[\sum_{n=1}^N \Gamma_n \log(z - \bar{z}_n) \right. \\ & + \sum_{n=1}^N \Gamma_n \log \left(z - \frac{a^2}{z_n} \right) \Big] \\ & z = x + iy \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに ϕ は速度ポテンシャル、 ψ は流れ関数、 U は主流速度、 a は魚礁の半径、 Γ_k は k 番目の渦糸の循環、 z_k は k 番目の渦糸の位置であって、座標軸は水平床を実軸とし魚礁の中心を通り鉛直上方を虚軸とする。(1)式において、第1項は渦糸がない場合の複素速度ポテンシャル、第2項は主流中の渦糸による影響を表わし、第3項は実軸上での境界条件を満足するために与えられた鏡像渦糸(図-1の下半面にある渦糸)の影響を表わしている。また第2項、第3項の後半部分は魚礁上の境界条件を満足するために付加された渦糸の影響を示している。

この各渦糸の運動をあらわす方程式は以下のように入れられる。すなわち、1つの注目する渦糸の移動速度に対しては他の渦糸のみが影響を与え、その渦糸自体はその渦糸の移動速度に影響しないものとする。したがって任意の k 番目の渦糸の運動を示す方程式は次式のようになる。

$$u_k - iv_k = \frac{d}{dt} \left\{ w - \frac{i}{2\pi} \Gamma_k \log(z - z_k) \right\} \Big|_{z=z_k} \dots\dots\dots (2)$$

ここに u_k, v_k はそれぞれ k 番目の渦糸の実軸方向、虚

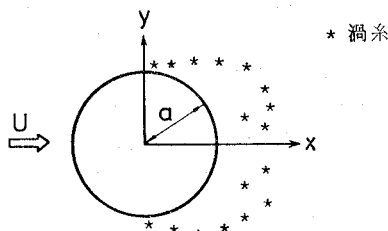


図-1 対称渦糸モデル

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 大阪大学助手 工学部土木工学科

軸方向の速度成分である。

流れのなかに発生する渦糸は魚礁表面上の境界層内で形成される渦度によって供給されるものと考えられるので、渦糸の発生位置は剝離点の境界層外縁とし、境界層内で生じる渦度流束 K より各発生渦糸の循環を決定する。この場合の渦度流束 K は Roshco³⁾ の提案した次式を用いることとした。

$$K = \frac{\partial \Gamma}{\partial t} \bigg/ U^2 = \frac{1}{2} U_b^2 / U^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに U_b は境界層外縁の流束である。

剝離点決定に際しては、円柱に対する振動流境界層の剝離限界が未だ明らかにされていないので、ここでは次式で示す定常流の層流剝離の条件を用いる。

$$\frac{\partial u_b}{\partial y_b} \bigg|_{y_b=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに u_b は境界層内の魚礁に沿う速度成分、 y_b は魚礁表面上の法線方向座標である。計算においては上式中の u_b に Schlichting⁴⁾ による層流境界層内の水粒子速度の円柱に沿う成分を代入した式より剝離点を決定した。

(2) 計算上の仮定

本研究では以上のシミュレーションを行なう場合に、以下のような仮定を設けている。すなわち、

(a) 魚礁周囲の流れは最初の境界層剝離が生じるまで渦無し流れである。

(b) 渦糸の循環の大きさは、境界層の剝離点より各時間ステップ内に発生した循環量に等しく、与えられた渦糸の循環量は減衰することなく時間的に一定である。

(c) 各時間ステップ内に発生した渦糸の初期位置は、角度については各時間ステップ内の始めと終りにおける剝離点角度の平均値で与え、動径距離については半径 a に境界層の厚さ $\sqrt{2\nu/\omega}$ を加えた $(a + \sqrt{2\nu/\omega})$ により与えるものとする。

(d) 発生過程にある渦糸は、他の発生している渦糸や境界層の剝離に影響を及ぼさない。

(e) 主流の流速は $U = U_m \sin \omega t$ で与えられるものとするここに $\omega = 2\pi/T$ で T は振動流の周期、 U_m は最大流速である。

以上の仮定に基づき、(2) 式の N 個の方程式を (3) 式の渦度流束方程式と (4) 式の剝離点決定方程式とを用いて解けば各時間ステップにおける渦糸の位置と循環が決定できる。また計算に当たっては時間ステップの間隔は $0.1a/U_m$ とした。ここに a は半円型魚礁の半径である。

(3) 角型魚礁に対する計算

角型魚礁においては、剝離点が隅角部に固定され、上流側および下流側の2つの隅角部から常に剝離が生じているものと考えられる。したがって計算においては、(4) 式における剝離点決定の必要はなく、計算の第1ステッ

プから剝離が生じていると仮定してさしつかえない。また計算は角型に対する結果を求めたのではなく、円型魚礁に対して剝離点を固定したものを対象に行ない、その結果を Schwarz-Christoffel 変換を用いて角型魚礁に対する解を求めた。したがって円型魚礁上で固定した剝離点も変換後角型魚礁の隅角部に相当する点を用いている。

3. 計算結果とその実験的検証

(1) 実験装置と実験方法

以上述べてきた数値シミュレーションの結果を検証するために振動流を発生せしめるU字管を用いて検証実験を行なった。魚礁のモデルとしては円型、角型の2種類に対してそれぞれ直径 10 cm の半円筒、5 cm 角の角柱を用い、振動流発生装置の水路方向と直角に固定した。また2次元性を保つためモデルは水路幅と同じ長さとし、水路壁面と魚礁モデルの間をパテで埋めて側壁の効果をなくしている。流況はアクリル板を通して目視観測が可能であり、水素気泡発生装置を用いて流況を可視化し、16 mm カメラを用いて流況をとらえて解析した。水素気泡発生用の白金線は水路壁面の擾乱を捕捉しないよう水路中央部に設置してある。

(2) 後流渦の判定基準

魚礁背後の流況においてその特徴的なのは、数値シミュレーションでも明らかのようにその後流渦の発生である。しかし後流渦そのものの定義は十分明確ではないので、実験結果より後流渦の領域を求めるに当たっては次のような定義を用いた。すなわち“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を後流渦領域とする。”図-2はこのように定義さ

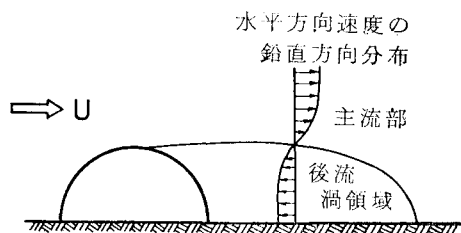


図-2 後流渦領域

れた後流渦領域の模式図であって、剝離点を始点として水平方向流速がゼロとなる点を結んだ等ポテンシャル線の内側が後流渦の定義域を表わす。

また、実験によって発生しうる流速変化が完全な正弦運動ではないため、実験においては各位相ごとの変化をとらえるのではなく、後流渦の長さが最大となると思われる位相角 $\omega t = 120^\circ$ 付近のフィルムより最大後流渦領域の形状を求めている。

(3) 計算結果

2. で述べた手法により円型魚礁に対する数値計算結

果の1例を 図-3A~C に示す。図中の矢印は各点の流速ベクトルを表わし、* 印は計算で求めた渦糸の存在位置を示している。また座標軸は後流渦領域の大きさがわ

かるように魚礁下流端を原点とし円型魚礁の直径で無次元化して表示してある。図-3は $K-C$ 数 24.4, Reynolds 数 9400 の場合で、A, B, C はそれぞれ位相角 ωt が

60°, 90°, 120° の結果である。この計算結果によると剝離点が時間とともに上流側へ移動し、それに伴って後流渦の発達していく様子が明確にあらわれている。

(4) 実験結果との比較

図-4 は $K-C$ 数 39.5, $\omega t = 120^\circ$ の計算結果である。図-3C 及び 図-4 中に前述した後流渦の定義に従って計算によってえられた後流渦領域を一点鎖線で、実験より求められた後流渦領域を実線で示してある。計算結果と実験結果を比較すると剝離点位置、および魚礁に近い部分の形状に大きな差異が見られ、実験の方が剝離点は下流側に表われている。この差異の原因としては以下のような理由が考えられる。その1つは、剝離点およびその近傍は渦度が境界層より掃き出された直後であり 図-3C, 図-4 に見られる Ground Roller に類似した渦に発達する前の一種の遷移領域に相当する。したがって実験的にはこの遷移領域が十分判定しにくいのである。つぎに考えられる原因としては実験における主流速度が比較的大きく、魚礁上の境界層が乱流境界層となっていたと考えられる。数値シミュレーションにおいては層流境界層を仮定しているが、乱流境界層の場合は層流境界層に比して剝離がしにくくなり、したがって剝離点が下流側にずれることは十分考え得る。

以上剝離点近傍の一致度は十分ではないが、渦が十分発達したと考えられる後流渦領域の後半部分では実験値と計算値は比較的よく一致している。この後半部分においても後流域最終端は実験結果が計算結果よりわずかではあるが大きくあらわれている。これはフィルムの解析の際に水平方向流速の逆転位置を正確に捕えることができず、水素気泡列の乱れ始める点より下の部分を後流渦領域であるとしたために実際の後流渦領域より大きい領域を実験結果として用いたためであろう。

一方 図-5 は角柱に対する計算結果であり、図-4 と同様に実験結果、計算結果をそれぞれ実線、一点鎖線で示している。両者は半円型魚礁の場合と異なり大きな相異

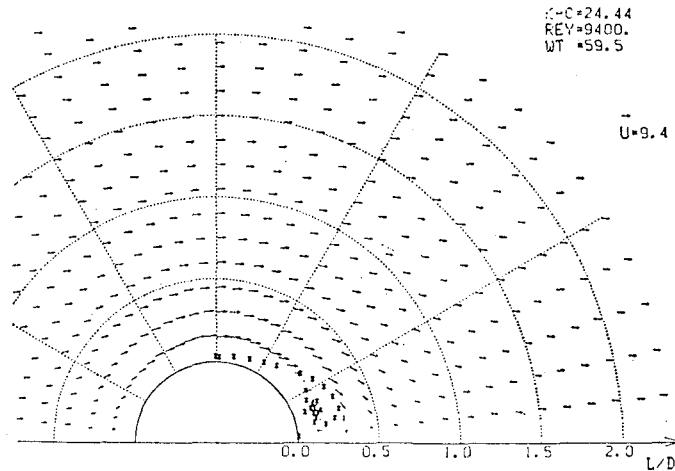


図-3A 半円型魚礁 $K-C$ 数 24.4 $\omega t = 60^\circ$

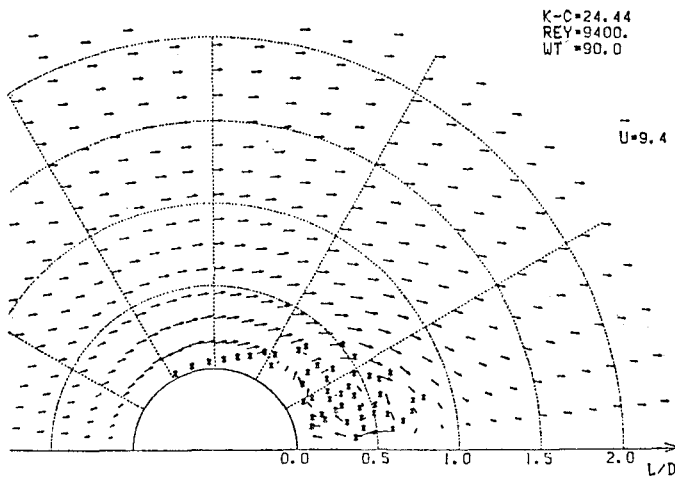


図-3B 半円型魚礁 $K-C$ 数 24.4 $\omega t = 90^\circ$

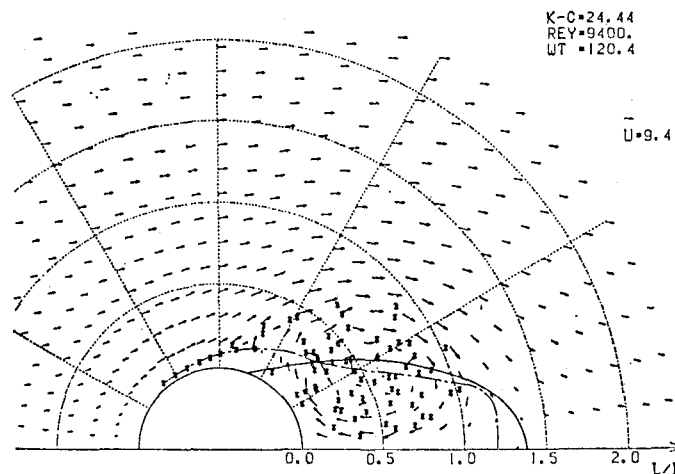
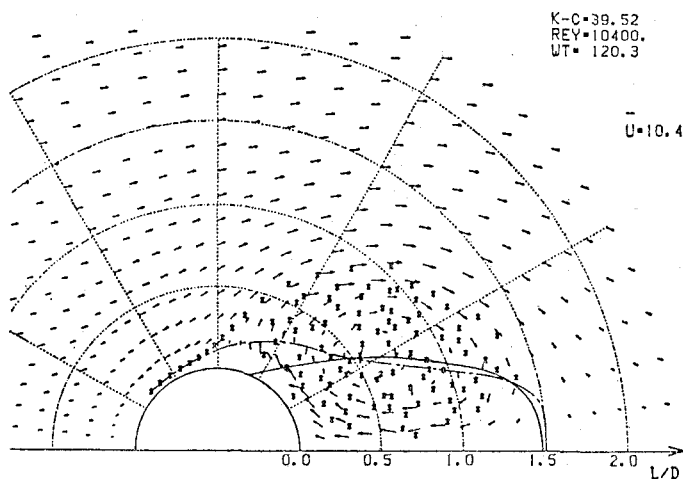
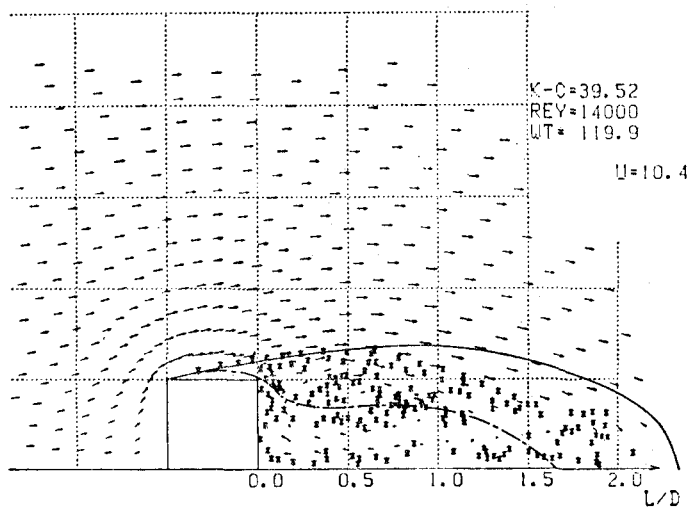


図-3C 半円型魚礁 $K-C$ 数 24.4 $\omega t = 120^\circ$

図-4 半円型魚礁 $K-C$ 数 39.2 $\omega t \approx 120^\circ$ 図-5 角型魚礁 $K-C$ 数 39.2 $\omega t \approx 120^\circ$

を示しており、むしろ渦糸の存在する領域の方が実験結果と一致しているように見える。これらの理由については現在のところ不明であるが、両者の実験結果のみを比較しても角型の場合の後流渦の大きさは半円型の場合より大きな領域を示すようである。このような後流域の拡大が集魚効果にいかなる影響をもつか明らかではないが領域内の渦強度も集魚効果には密接な関係をもつものと思われるので今後さらに検討を加えていかねばならない。

(5) 後流渦領域に及ぼす $K-C$ 数の効果

円柱回りの渦の発生発達において主流の $K-C$ 数が極めて大きな影響があることは既に円柱周辺の数値計算において指摘されている。著者らは上記数値シミュレーションを $K-C$ 数を変えてその後流渦領域を求めたが、 $K-C$ 数の変化に伴う l/D の変化の状況を示したのが

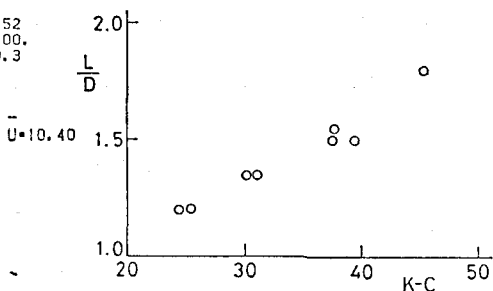
図-6 最大後流渦領域長と $K-C$ 数の関係

図-6であって、 $K-C$ 数の増加に伴って l/D が直線的に増加していることがわかる。一方 l/D と球体 Reynolds 数の関係についても求めてみたが ($Reynolds < 15000$) これについては十分な相関関係は見出されなかった。

4. あとがき

以上本研究では不透過な障害物が海底に存在する場合を魚礁と数値計算の手法とその計算結果について主として論議を進めてきた。しかしながら一般魚礁は魚の防御本能を満足せしめるためか有孔性のものが用いられることが多い。したがって本研究においても本実験のモデル魚礁以外に 10% 程度の表面空隙率を有する有孔性のモデル魚礁についても実験を行ない、後流渦領域が 30% 程度拡大する結果を得ているが、数値シミュレーションにおいてはこの有効性を考慮した解析は現在のところ不可能であって、この空隙に伴う流速変化、

渦度の強さの変化については実験に頼らざるを得ない。この有孔性による後流渦領域の変化に関する論議は後日改めて発表する予定である。なお本研究に際して実験計算に協力いただいた当時学部学生杉本良彦君に謝意を表するとともに本研究が文部省科学研究費(試験研究)の一部であることを付記しておく。

参考文献

- 1) Sawaragi, T. and T. Nakamura: Analytical study of wave force on a cylinder in oscillatory flow, Proc. of Coastal Structure's '79, ASCE, pp. 154-173, 1979.
- 2) Sarpkaya, T. and C. J. Garrison: Vortex formation and resistance in unsteady flow, Trans. ASME., Vol. 85, Series E, pp. 16-24, 1963.
- 3) Roshko, A.: On the drag and shedding frequency of two dimensional bluff bodies, NACA TN 3169, 1954.
- 4) Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, MacGraw-Hill, pp. 411-415, 1968.