

群体魚礁周辺の流況特性について

松 見 吉 晴*・瀬 山 明**

1. ま え が き

魚礁背後に形成される後流渦は、魚の餌になるプランクトンの封じ込め、周辺の流況変動、さらには発生源などを引き起こし、これらが刺激要因となって集魚に効果があると云われている¹⁾。群体魚礁（単体魚礁が集合したもの）の場合、個々の魚礁背後に形成される後流渦は魚礁相互の間隔により変動し、1つあたりの後流渦の空間的な拡がりや魚礁間隔により単体魚礁の場合より狭くなったり、広くなったり変動すると考えられる。現在の着底式魚礁の設置間隔は、水産研究者の長年の観測の結果に基づく経験的なものであり、その内容は「設置された魚礁の投影面積が魚礁設置区域の約 10% 以上を占める範囲内とする」²⁾と云ったもので、魚礁相互の干渉効果による周辺の流況変動等を考慮した水理学的な根拠を持つ合理的な指針でない。著者の 1 人は、ここ数年来魚礁の集魚効果に及ぼす支配的な要因は上述した後流渦およびそれにより特徴づけられる魚礁背後の流体特性であると考えて来た。この見地に立ち、流体力学的な妥当性を持つ魚礁の最適配置決定の指針を確立するためには、魚礁間隔による周辺の流況変化並びに変動領域の範囲等を明らかにする必要がある。本研究は、潮流が卓越するような流れ場に設置される群体魚礁周辺の流況変動に与える単体魚礁相互の干渉効果について、特に魚礁間隔による周辺流況変化並びに変動領域の範囲を可視化実験によって明らかにし、ついで群体魚礁周辺の流況の数値シミュレーションを行い、その結果の妥当性を実験結果との比較より検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した水槽は、長さ 6.6 m、幅 0.5 m、高さ 0.6 m の片面および底面ガラス張りの小型循環水槽で、水路流入部には流れの一様性を保つため金網式整流板 1 枚とスリット式整流板（格子間隔 1 cm、幅 3 cm）1 枚を設けた。魚礁背後に形成される代表的な渦流には、底面に対して水平な回転軸をもつ水平渦流並びに鉛直な回

転軸を有する鉛直渦流がある。この実験では単体魚礁との差を明確にするための群体魚礁モデルとして、図-1に示すような 3 個の単体魚礁モデルを流れに対して縦列並びに並列に配置したものを取りあげた。すなわち、図-1(A)の縦列モデルでは前後の魚礁の影響に伴う中央の魚礁モデル背後の水平渦流の変化を検討し、同図(B)は左右の魚礁からの鉛直渦流に及ぼす影響を検討することを目的とした群体魚礁モデルである。実験に使用した魚礁モデルとしては、現在着底式魚礁において数多く使用されている立方体型コンクリート魚礁を取りあげ、それを 2 次元化した一辺 $a=5\text{ cm}$ の角柱である。その有孔性については、魚礁モデルを構成する 4 本の角柱部材の径を変化させることによって、単位体積空隙率 $\gamma=0, 64, 84\%$ を示す 3 種類の魚礁モデルについて実験を行った。魚礁モデルの設置間隔 l は、縦列配置(A)の場合が $l/a=2\sim6$ の範囲で、並列配置(B)の場合が $l/a=1\sim4$ の範囲でそれぞれ 1 刻みに変化せしめた。魚礁モデル周辺の流況は、トレーサとして水素気泡を用いて可視化し、それを水槽側面並びに底面よりカラービデオカメラで録画した。実験時の水深は、縦列配置(A)の場合が 40 cm、並列配置(B)の場合が 30 cm であり、流速は Re 数 $(=Ua/\nu)=5\,000\sim10\,000$ の範囲で行った。ただし U は、断面平均流速である。

3. 群体魚礁背後の後流渦特性

3.1 群体魚礁周辺の流況パターンについて

本研究において後流渦領域とは、著者が先に単体魚礁に関する研究³⁾で行ったものと同様、魚礁背後の水平方向の流速成分が主流方向と逆向きになっている領域を

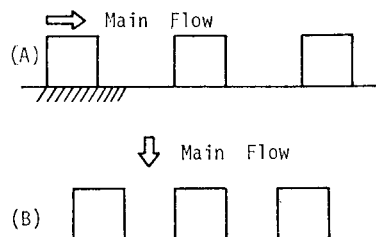


図-1 群体魚礁モデル

* 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部海洋土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

指す。群体魚礁周辺の流況は、図-2 に示すように縦列および並列配置ともに魚礁の有孔性によって (A) と (B), (C) と (D) の2種類の後流渦パターンに分類でき、さらに縦列配置は l/a の変化により (A) の1, 2, 3 並びに (B) の1, 2 に細分できることがわかった。なお、縦列配置の $l/a=5$ の後流渦パターンは Re 数の増大に伴って 図-2 (A-2) から (A-3) のパターンに遷移することが認められた。有孔縦列配置並びに並列配置の渦流の特徴は、非対称性の強いカルマン渦列の様相を示し、特に並列配置の各魚礁背後の後流渦領域は 図-2 (C), (D) に実線と破線で示すように流れに対し直角方向に揺れることが認められた。そして、有孔魚礁の空隙内での顕著な渦の発生は認められず、縦列配置の有孔モデルの場合、図-2 (B) の斜線部の流体運動は死水域に近い状態であった。また、並列配置において魚礁間隔が広い場合、魚礁間を通過する流れは渦列とはっきり区別できるが、魚礁間隔が狭くなるに伴って魚礁間を通過する流れは魚礁背後で渦列と明確な区別が付きにくくなる。

3.2 後流長および後流渦面積

ここでは、魚礁間隔による群体魚礁周辺の流況変化を

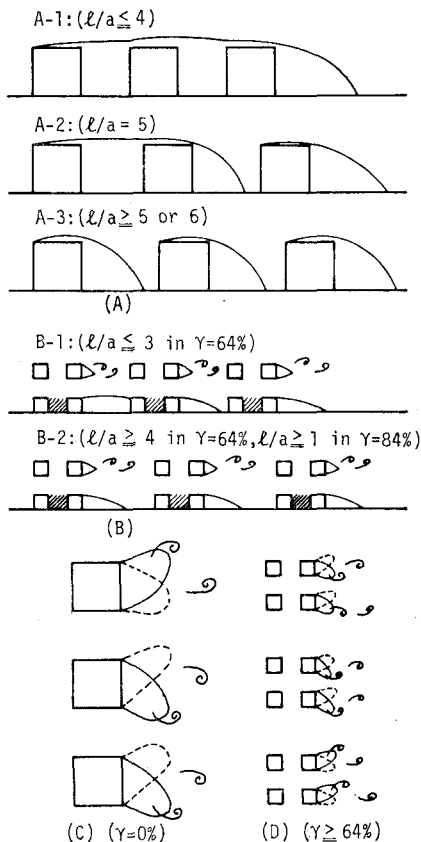


図-2 群体魚礁の後流渦パターン

定量的に評価するため、魚礁間隔と各群体モデルにおける中央部の魚礁モデル背後の後流長および後流渦面積の関係について検討を加える。なお、後流長は魚礁モデル後端から後流渦領域後端までの距離とし、後流渦面積は後流渦領域の面積である。

図-3 は、各群体モデルにおける後流長と魚礁間距離の関係を示したもので、図中 L_{CG}/L_{CS} および L_{PG}/L_{PS} は縦列配置、並列配置における群体モデルの後流長と同じ構造の単体魚礁の後流長との比を表わす。なお、図中 γ 印を付けたものは並列配置の結果を示すが、 $\gamma=84\%$ の場合、後流渦が完全なカルマン渦列状態を示すため明確な後流渦領域が決定できなかった。図-3 より、並列配置の L_{PG}/L_{PS} の値は、 l/a の変化にかかわらず顕著な変動を示さないが、縦列配置の L_{CG}/L_{CS} は $l/a=4$ まで増大し、その後 l/a の増加に伴って減少してやがて一定値になる傾向を示すことがわかる。また、他の2種類の Re 数 (約 6 000, 10 000) における結果も 図-3 に示す変化傾向と同様の結果を得ている。

図-4 は、魚礁間隔による後流渦面積の変化を群体モデルの後流渦面積と単体魚礁のそれとの比 A_{CG}/A_{CS} (縦列配置) および A_{PG}/A_{PS} (並列配置) で示したものである。この図からも $l/a=4$ における後流渦領域が他の魚礁間隔より大きいことが認められる。図-3 および 図-4 において、特に L_{CG}/L_{CS} および A_{CG}/A_{CS} の l/a による変動は、前方魚礁で形成された水平渦流の流下消滅までの移動距離並びに後方魚礁が中央魚礁で形成された水平渦流の流下に対する阻止の度合いに関係付けられるものであると考えられる。しかし、この点に関しては十分な結論を得るまでに至らず群体魚礁周辺の流況変動に影響を及ぼす魚礁間の干渉効果を明らかにするための今後の検討課題の一つである。群体魚礁の最適配置については、対象魚の生態、魚礁の設置個数等の問題を残すが、魚礁間隔を決定する際の一つの指標として魚礁背後

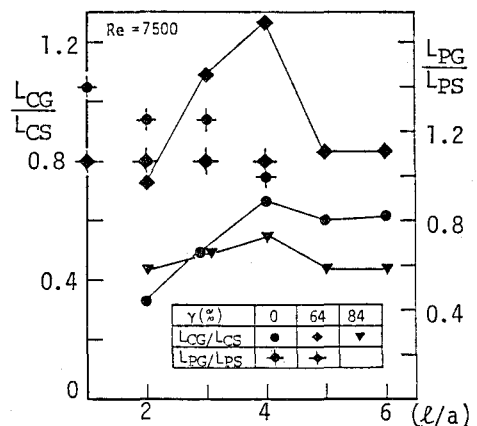


図-3 魚礁間隔による後流長の変化

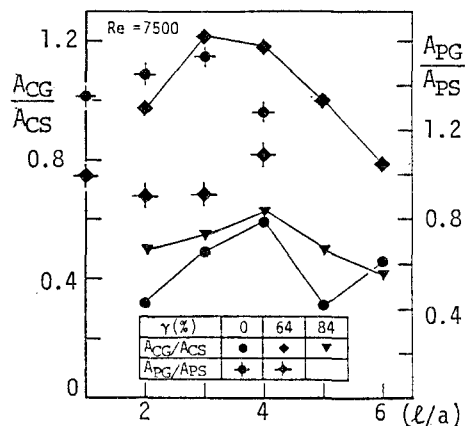


図-4 魚礁間隔による後流渦面積の変化

の後流渦領域の大きさを取るならば、以上の結果をもとに $l/a=4$ が特に水平渦流による後流渦領域拡大の適正魚礁間隔と言えよう。

4. 群体魚礁周辺の数値シミュレーション

流況の数値シミュレーションは、中村ら⁴⁾が任意形状物体の境界面表示に適用しているわき出し分布法と物体背後の後流渦を渦糸の集合体でモデル化する複数渦糸モデル法を併用した手法で行った。すなわち、魚礁表面の表示は、図-5に示すようにわき出し位置における法線方向の流速成分がゼロになるような強さを持ったわき出しを魚礁表面上に分布せしめることにより行った。流況モデルとして、空間的に一様な主流と P 個の剝離点より発生した N 個の任意の強さの渦糸からなる流れを想定すると、縦列および並列配置の複素速度ポテンシャル ω_G および ω_P は次式で表示される。

(縦列配置の場合)

$$\omega_G = Uz + \frac{i}{2\pi} \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \Gamma_{jk} \log(z - z_{jk}) - \frac{i}{2\pi} \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \Gamma_{jk} \log(z - \bar{z}_{jk}) + \omega_R \quad \dots(1)$$

(並列配置の場合)

$$\omega_P = Uz + \frac{i}{2\pi} \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \Gamma_{jk} \log(z - z_{jk}) + \omega_R \quad \dots(2)$$

ここに、 U は主流流速、 Γ_{jk} 、 z_{jk} は j 位置より発生した k 番目の渦糸の循環と位置、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\bar{}$ は共役複素数を示す。式(1)の右辺第3項は $y=0$ の固定境界条件を満足するように付加した鏡像渦糸の複素速度ポテンシャルである。また、 ω_R はわき出しの複素速度ポテンシャルで、次式で与えられる。

$$\omega_R = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^m D(z_n) \log(z - z_n) \quad \dots(3)$$

ここに、 m はわき出し点の個数、 z_n 、 $D(z_n)$ はわき出し

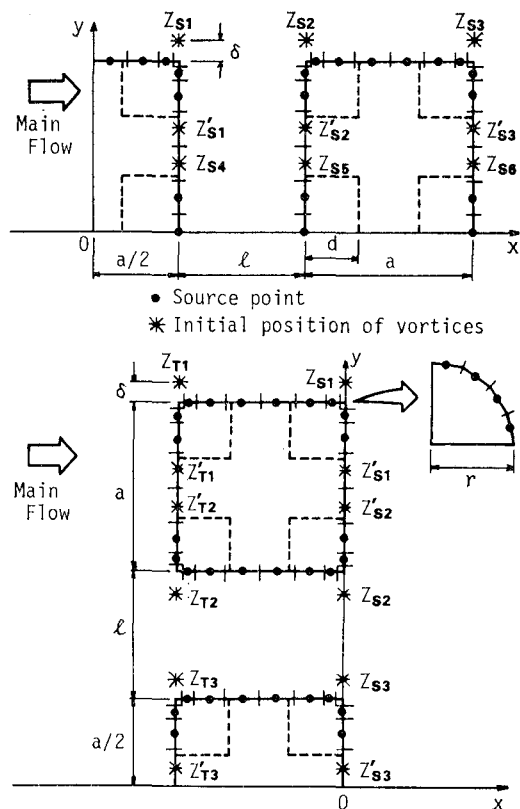


図-5 わき出し点の位置・渦糸の発生位置

点の位置およびその強さであり、魚礁表面上に分布させたわき出し点 z_n における法線方向の速度成分がゼロとなる境界条件から決定される⁴⁾。魚礁モデル隅角部については図-5に示すように小さな曲率半径 ($r/a=0.02$) の円弧で近似している。なお、図-5に示す縦列配置および並列配置は、それぞれ y 軸および x 軸に関して対称であり、破線は有孔モデルを表わす。

渦糸の運動に関しては、注目している渦糸の移動速度が主流、わき出しおよび他の渦糸からしか誘起されないことから、第 jk 番目の渦糸の移動速度 (u_{jk} , v_{jk}) は次式によって表わされる。

$$u_{jk} - iv_{jk} = \frac{d}{dz} \left\{ \omega_G - \frac{i\Gamma_{jk}}{2\pi} \log(z - z_{jk}) \right\} \Big|_{z=z_{jk}} \quad \dots(4)$$

計算時間ステップ Δt 後の渦糸は式(4)および次式で求めている。

$$z_{jk}(t + \Delta t) = z_{jk}(t) + (u_{jk} + iv_{jk})\Delta t \quad \dots(5)$$

渦糸の循環量は、著者の1人³⁾が既に発表した Roshko の提案式に基づく渦糸の回転方向も考慮した次式で与えることにした。

$$\partial \Gamma / \partial t = U_B |U_B| / 2 \quad \dots(6)$$

ここに、 U_B は各渦糸の発生位置における流速である。

渦糸発生位置に関しては、従来様な流れ場に置かれた矩形断面物体から掃流する渦の数値シミュレーション⁵⁾にならない、魚礁隅角部より主流方向に直角に δ (無孔モデルでは $\delta=a/10$, 有孔モデルでは $\delta=d/10$ ただし d は部材径) だけ離れた位置に固定した。有孔モデルの渦糸の発生位置は、魚礁モデルを構成する全ての部材の隅角部より渦糸を発生させたならば、かなりの計算時間を要することから、ここでは前述した実験結果を参照して図-5 に Z_S, Z'_S, Z_T, Z'_T で示す点とした。

並列配置および縦列配置の有孔モデルの上部構成部材より放出される渦流は、3. の実験結果で述べたように非対称な渦列になることから、数値シミュレーションにおいては人為的に非対称渦を発生させる初期擾乱を与える必要がある。この初期擾乱の導入の方法には、Clements⁶⁾ の流体運動の初期状態に微小擾乱項を導入する方法並びに Sarpkaya ら⁶⁾ の発生渦糸の循環量を物体の上面下面で変化させる方法等があるが、本手法では実験結果にもとづいて非対称渦の形成に貢献すると思われる渦糸の発生位置を選び、その位置での渦糸を Δt 毎に交互に発生させて非対称渦列の発生を試みた。具体的には図-5 において Z_{Si} と $Z_{Si'}$ (並列配置の場合 $i=1\sim 6$, 縦列配置の場合 $i=1\sim 3$) で示している発生位置からの渦糸について上述の手法を施した。

本研究では、主流を定常流としているので渦糸の時間経過に伴う減衰は、Schaefer ら⁷⁾ にならない渦糸の流速分布を粘性渦モデルのそれに置き換えて計算を行った。なお、計算では $t=0$ から渦糸を放出した。

5. 計算結果

図-6 および 図-7 は、 Re 数 5000 での無孔並列配置および無孔縦列配置モデルの $t=6$ 秒後における渦糸パターンの計算結果を示したものである。図-6 の渦糸の回転方向は図中に魚礁上流側の上下に示す $+$ (右廻りが $+$) で、矢印は渦糸の集合群より判定した渦流とその回転方向を示すものである。まず、 $l/a=1.0$ の場合の図-6 (A) においては、両端の魚礁から発生した渦糸は中央の魚礁背後に混合するようになり、中央の魚礁より発生した渦糸の主流と直角方向への拡がりや魚礁間隔の広い場合に比べて顕著に現れている。このことは、3. で述べた魚礁間隔が狭くなると中央魚礁背後において魚礁間を通過する流れと渦列との区別が出来なくなる流況を再現しているものと考えられる。そして、魚礁間隔が広くなるに伴って (図-6 (B)) 各魚礁背後の渦糸群は隣接魚礁の影響が無くなり、各魚礁背後の渦糸群はほぼ同様のパターンを示し、魚礁後方において非対称性の強い渦列を形成していることがわかる。このことより本解析手法において非対称渦列を再現するために用いた渦糸の発

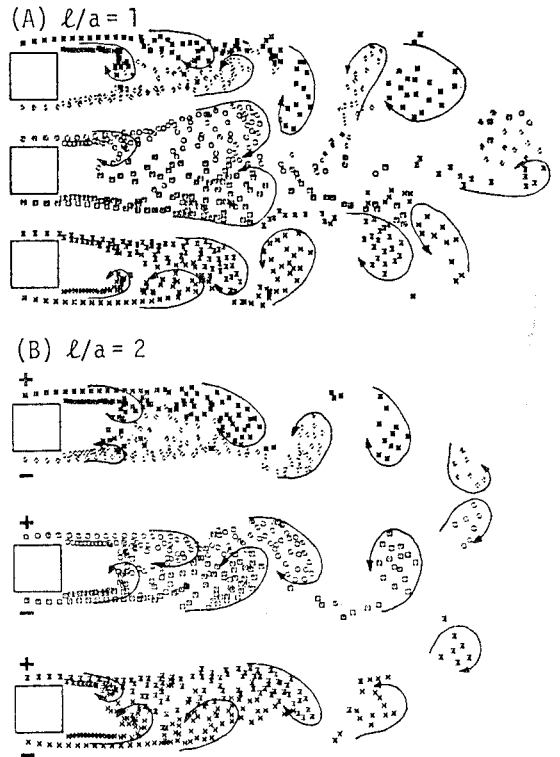


図-6 並列配置の魚礁間隔による渦糸パターン変化

生間隔を計算の時間ステップ毎に交互にする方法の妥当性が一応認められる。一方、無孔縦列配置モデルの図-7 において図面左側の魚礁より発生した渦糸に注目すると、(A) では中央の魚礁背後に散在するとともに、魚礁間隔の長い場合の (B), (C) に比べ渦糸の流下距離が長く図面右側の魚礁背後まで到達している。(B), (C) に示す魚礁間隔が広い場合、各魚礁から発生した渦糸は魚礁背後にトラップされるようになり、発生した渦糸群は (A) の魚礁間隔が狭いものと異なり魚礁の背後にそれぞれ独立した後流渦パターンを形成するようになる。図-7 と 図-2 (A) を比較すると各 l/a の渦糸パターンは、実験結果の A-1, 2, 3 の後流渦パターンとはほぼ一致している。以上のことから無孔並列および縦列モデル背後の後流渦パターンは本解析手法に基づいてほぼシミュレートできる。しかし、有孔モデルについては実験結果との対応が良好でなく、計算時間の短縮化も含めて今後の課題である。

図-8 は、図-6 に示した無孔並列配置モデルの計算結果より得た $x/a=2, |y/a|\leq 3.5$ における x 方向の流速分布を示したもので (座標系は 図-5 参照)、図中 $|y/a|\leq 0.5$ が中央の魚礁幅に当る。図から、まず $0\leq y/a\leq 0.5$ における各 l/a の u/U を比較すると、魚礁間隔が狭くなると $y/a=0$ 付近で u/U が負の値を取り、

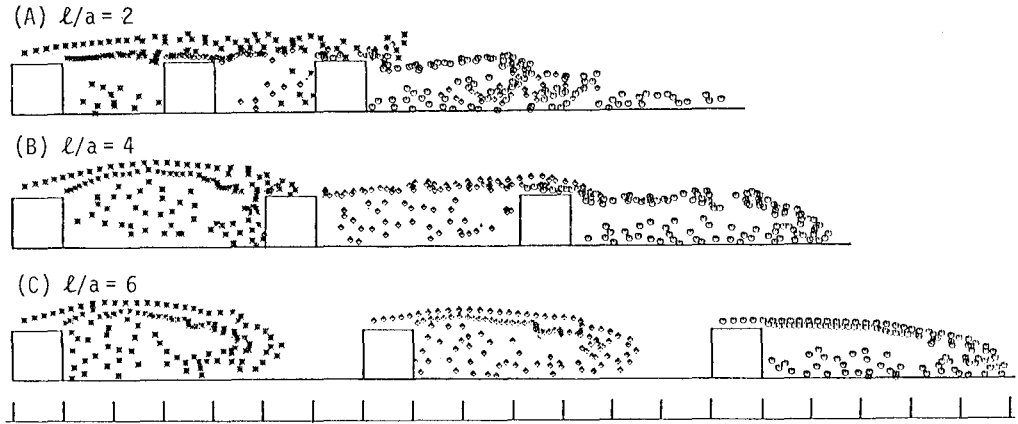


図-7 縦列配置の魚礁間隔による渦糸パターン変化

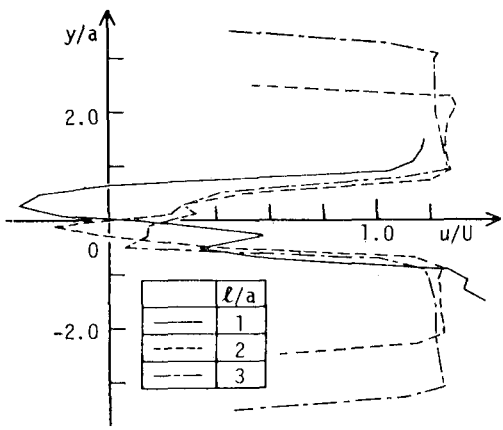


図-8 並列魚礁背後の水平方向流速分布

魚礁背後における流体が渦流の影響を受け主流と逆方向に流れるようになることがわかる。また、 $0.5 \leq y/a \leq 1.25$ では、 $l/a=2, 3$ の u/U は y/a の増加に伴ってほぼ $0.6 \sim 1.2$ 程度の値を示すが、同じ範囲の $l/a=1$ の値は図-6において上述したように隣接魚礁から発生した渦糸の影響を受け中央の魚礁より発生した渦糸の流下が押えられるため $u/U = -0.3 \sim 1.2$ と $l/a=2, 3$ の場合より小さい値を示し、魚礁間を通過する流れがかなり減速されていることがわかる。このことから、無孔並列配置の後流渦パターンに及ぼす魚礁相互の影響は、 $l/a \geq 2$ ではほぼ無くなると判断してもさしつかえないであろう。

6. あとがき

以上本研究は、魚礁の最適配置決定の際に必要な基礎資料になる群体魚礁の魚礁間隔による周辺の流況変動を実験および理論の両面より検討した。その結果、縦列無孔魚礁モデル背後の水平渦流による後流渦領域は $l/a=4$ の魚礁間隔において最も拡大され、並列無孔魚礁モデルの鉛直渦流に及ぼす隣接魚礁の影響は $l/a \geq 2$ ではほぼ無くなることが明らかになった。

最後に本研究を行うにあたり、種々の有益な御助言を賜った大阪大学工学部榎本亨教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 魚礁総合研究会：人工魚礁の理論と実際(Ⅱ)，水産増殖叢書，1976。
- 2) 水産工学研究所，水産庁振興部開発課：人工魚礁漁場造成計画指針，1981。
- 3) 榎本 亨・松見吉晴・林 健児：有孔魚礁周辺の流況の数値シミュレーション手法について，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 506～510，1982。
- 4) 中村孝幸・高橋和男・中山和典：わき出し分布法を用いた2次元物体まわりの波変形と流体力の解析法，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 462～466，1982。
- 5) Clements, R. R.: An inviscid model of two-dimensional vortex shedding, Jour. Fluid Mech., Vol. 57, pp. 321～336, 1973。
- 6) Sarpkaya, T.: An analytical study of separated flow about circular cylinders, J. Basic Eng., TRANS. ASME, Series D, Vol. 90, pp. 511～518, 1968。
- 7) Schaefer, J. W. and S. Eskinazi: An analysis of the vortex street generated in viscous fluid, J. Fluid Mech., Vol. 6, pp. 241～260, 1959。