

# Effect of Bottom on Added-Mass of Settling Fish Aggregation Device

by

Yoshiharu MATSUMI, Akira SEYAMA and Tadahiro YOKOYAMA

Department of Ocean Civil Engineering

(Received September 1, 1987)

This study aims at clarifying the numerical simulation technique to analysis the behaviors of the settling fish aggregation device (FAD) considering with the effect of vortices generated behind it, the effective method to set up the FAD thrown down from a ship on the designed position most accurately, the effect of bottom on the added-mass of settling FAD.

**Key words :** Fish aggregation device, Settling behaviors, Discrete vortex approximation, Added-mass

## 1. 緒言

魚礁はその耐用年数を通じて魚礁としての機能を維持できるように魚礁の製作から運搬、沈設並びに設置後の流体力、洗掘・埋没等の諸外力要因に対して安全設計がなされる必要がある。従来、魚礁の安定性については、種々の実験的・理論的な研究が行われ、その研究成果を基に現行の沿岸漁場開発整備事業構造物設計指針<sup>1)</sup>が作成されているが、その設計指針には完全に確立されていない問題が数多く残されている。そこで、本研究はその残された問題の1つである魚礁沈設時における設置精度の問題並びに着底時の衝撃破損に着目したものである。

## 2. 本研究の背景

魚礁の沈設には作業船のデッキクレーンによる吊下げ法と投入法があり、前者の方法は沈設精度及び着底衝撃力による破損の点から優れ、一般に大型の組立魚礁に適用されている。一方、小型の魚礁ブロックは経費及び労力の点から後者の方法が主に採用されているが、この投入法は設置精度の悪さ及び着底衝撃力による破損が常に問題となる。この後者の問題については、中村・上北ら<sup>2)</sup>が理論的考察より着底時の衝撃力の算定式を提案し、その研究成果が設計指針に取り上げられている。すなわち、彼らの方法は着底衝撃力が魚礁の海底に衝突した時の地盤の押し込みに伴う地盤反力 $R$ によるものと考え、この地盤反力に関して式(1)で示すFROLICHの理論を適用し、その地盤反力を考慮した衝突時の魚礁に関する運動方程式より地盤の最大変位 $\epsilon_{MAX}$ に関する代数方程式を式(2)のように導き、この式により算定される $\epsilon_{MAX}$ を式に(2)に代入することによって着底時の衝撃力を算定するものである。

$$R = K_R \epsilon_{max}^2 \quad (1)$$

$$\frac{g K_R \epsilon_{max}^2}{3 \omega_0 V} - \left\{ g \left( \frac{\sigma_G}{\omega_0} - 1 \right) - \frac{C_D A}{4V} v^2 \right\} \epsilon_{max} - \left( \frac{\sigma_G}{\omega_0} - C_{MA} \right) \frac{v^2}{2} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $K_R$ は海底地盤の反力係数、 $g$ は重力加速度、 $\sigma_G$ 、 $\omega_0$ は魚礁部材及び海水の単位体積重量、 $A$ 、 $V$ は魚礁の落下方向に直角面の遮蔽面積及び体積、 $C_D$ 、 $C_{MA}$ は抗

力係数及び付加質量係数、 $v$ は着底時の速度である。この着底時の落下速度 $v$ については、鉛直真下に落下している魚礁の運動方程式より求まる終端速度で与えているが、魚礁のような非球形物体の落下の特徴である回転運動とそれに伴う水平方向への動揺を考えるならば、彼らの方法では着底瞬間の魚礁の落下速度を精度良く算定され得るか疑問を残す。また、式(2)の抗力係数及び付加質量係数については、従来の海洋構造物における値が準用されているが、着底直前の流体抵抗力に及ぼす底面効果を考慮するならば妥当とは言い難い。

一方、後者の設置精度の問題については、従来数多くの実験的研究が行われており、その内容は魚礁の形状や部材の比重の違いによる散乱範囲について検討されたものである<sup>3),4)</sup>。このような魚礁構造を直接変化せしめ散乱範囲を低減しようとする方法は、魚礁本来の目的である集魚効果の側面から考えた場合、魚礁の構造が魚の要求によって決められるものであるから、最適な方法とは言い難い。そして、投入法による配置精度について現在とられている対策は、作業船の位置決めに関する規定があるだけである<sup>5)</sup>。しかし、着底時の魚礁の散らばりは、上述した非球形物体特有の動揺現象に関係付けられるものであり、その動揺は投入時の魚礁の初期条件(例えば海面からの位置、姿勢)及び海象条件に起因すると判断される。従って、従来あまり着目されていなかった投入時の魚礁の初期条件及び海象条件と動揺との関連を明確に把握することは、投入法による設置精度の向上を図るための本質的な解決を与えるものと言える。

本研究では、まず投入時の魚礁の初期条件を種々変化させて水中での挙動と着底位置の計算を行い、この結果から着底時の散乱を最も小さくする投入時の初期条件について検討を加え、ついで、着底時の衝撃力の算定に必要となる着底直前の魚礁の落下速度、魚礁の付加質量係数及び抗力係数に対する底面効果等について考察を行うものである。なお、魚礁の落下挙動に関する数値シミュレーション手法については前報<sup>6)</sup>において報告したが、前報の解析方法を改良することによりさらに精度良く落下挙動を予測することができるようになったのでここで再度付記しておく。

## 3. 魚礁の落下挙動の予測手法

### 3.1 解析方法

波浪場を落下する魚礁の動揺は、流体場の波動運動及

び落下に伴い発生する渦による魚礁周辺の圧力変動に起因するものと考えられる。従って、本予測手法は、魚礁周辺の圧力分布を計算する部分とこの圧力を基に魚礁の回転と落下運動の計算を行う2つの部分よりなる。波動場を落下する魚礁周辺の流況は、波動場に対するポテンシャル理論と渦流の表示に対して採用した複数渦糸モデル法を重ね合わせることで計算を行うことにした。その際、魚礁表面の境界面表示に関しては湧き出し分布法を用いて近似している。以下に、解析方法を説明する。

### (1) 落下する魚礁周辺の流体場の表示

いま、波浪場を落下する魚礁周辺の流況モデルとして図-1に示すように入射波と魚礁モデルのP個の剥離点より発生したN個の任意の強さの渦糸よりなる流れを想定する。本研究では入射波として微小振幅波を仮定していることから流体場の自由表面の変動がほぼ無視できることになり、直線に近似することができる。従って、このような物理平面における上述した流況モデルの複素速度ポテンシャル $\omega$ については、まず、容易に複素速度ポテンシャルが求められる平板上(ここでは $\lambda$ 平面と呼ぶ)に物理平面を写像する変換式をSchwartz-Christoffelの定理を用いて式(3)のように求めておき、その平板上の $\eta=0$ の固定境界面を満足せしめるように鏡像法を適用して求めた複素速度ポテンシャルを式(3)を用いて物理平面に写像変換することにより式(4)のように表すことができる。

$$\lambda = -\exp(C_0 z); C_0 = \pi/h \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \omega_z &= \omega_W + \omega_V + \omega_R \\ &= \frac{\omega H}{2k \sinh kh} \sin \{k(ih+z) - \omega t\} \\ &+ \frac{i}{2\pi} \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \Gamma_{jk} \{ \log(e^{C_0 z_{jk}} - e^{C_0 z}) \\ &\quad - \log(e^{C_0 z_c} - e^{C_0 z}) \} \\ &+ \oint_C D(z_c) G(z, z_c) dc \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\omega$ ,  $H$ ,  $k$  は波の各周波数、波高及び波数、 $h$  は水深、 $P$  は渦糸の発生位置の個数(ここでは $P=8$ )、 $z_{jk}$ ,  $\Gamma_{jk}$  は $j$ の剥離点位置より発生した第 $k$ 番目の渦糸の位置

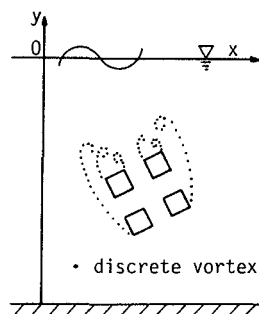


図-1 流況モデル

とその循環(右廻りを正)、 $z_c$ ,  $D(z_c)$  は魚礁表面上 $c$ に分布させた湧き出しの位置とその強さ、 $i$  は共役複素数を示す。また、 $G(z, z_c)$  は次式で与えられるグリーン関数である<sup>7)</sup>。

$$\begin{aligned} G(z, z_c) &= \frac{1}{2\pi} \{ \log(e^{C_0 z_c} - e^{C_0 z}) \\ &\quad + \log(e^{C_0 \bar{z}_c} - e^{C_0 z}) \} \end{aligned} \quad (5)$$

魚礁表面上に分布せしめた湧き出しの強さは、魚礁表面上における流体の法線方向の速度が魚礁表面の運動の法線方向の速度に等しいとなる境界条件より決定され、湧き出し強さに関する決定方程式は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \text{Real} \left\{ \frac{\partial \omega_W}{\partial n} \right\} + \text{Real} \left\{ \frac{\partial \omega_V}{\partial n} \right\} + \text{Real} \left\{ \frac{\partial \omega_R}{\partial n} \right\} \\ = (u_G + u_r) n_x + (v_G + v_r) n_y \end{aligned} \quad (6)$$

(魚礁表面上)

ここに、 $\omega_W$ ,  $\omega_V$ ,  $\omega_R$  は式(4)における入射波、渦糸及び湧き出しの複素速度ポテンシャル、 $n$  は魚礁表面における外向きの単位法線ベクトル( $n = n_x + i n_y$ )、 $\text{Real}[\ ]$  は実数部を表す。また、 $(u_G, v_G)$  及び $(u_r, v_r)$  は魚礁の並進運動及び回転運動による $x$ ,  $y$ 方向の移動速度成分である。そして、法線微分が $\partial/\partial n = \partial/\partial x \cdot n_x + i \partial/\partial y \cdot n_y$  で表示されることに注意すると、式(6)は次のように導ける。

$$\begin{aligned} \oint_C D(z_c) \left\{ \frac{\partial G'(z, z_c)}{\partial x} n_x + \frac{\partial G'(z, z_c)}{\partial y} n_y \right\} dc \\ = (u_G + u_r - u_W - u_V) n_x + (v_G + v_r - v_W - v_V) n_y \end{aligned} \quad (7)$$

(魚礁表面上)

ここに、 $(u_W, v_W)$ 、 $(u_V, v_V)$ は各々の $\omega_W$ 、 $\omega_V$  によって魚礁表面上で誘起される $x$ 、 $y$ 方向の流速成分で、

$$u_W = \frac{H\omega}{2} \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \cos(kx-\omega t) \quad (8)$$

$$v_W = \frac{H\omega}{2} \frac{\sinh k(h+y)}{\sinh kh} \sin(kx-\omega t)$$

$$u_V = \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \frac{C_0 \Gamma_{jk}}{2\pi} \left\{ \frac{\sin C_0(y-y_{jk})}{\cosh C_0(x-x_{jk}) - \cos C_0(y-y_{jk})} - \frac{\sin C_0(y+y_{jk})}{\cosh C_0(x-x_{jk}) - \cos C_0(y-y_{jk})} \right\}$$

$$v_V = - \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \frac{C_0 \Gamma_{jk}}{2\pi} \left\{ \frac{\sinh C_0(x-x_{jk})}{\cosh C_0(x-x_{jk}) - \cos C_0(y-y_{jk})} - \frac{\sinh C_0(x-x_{jk})}{\cosh C_0(x-x_{jk}) - \cos C_0(y+y_{jk})} \right\} \quad (9)$$

と表される。さらに、式(7)の $\partial G^1(z, z_c) / \partial x$ 、 $\partial G^1(z, z_c) / \partial y$ は式(5)より次式のように導ける。

$$\frac{\partial G^1(z, z_c)}{\partial x} = \frac{C_0}{4\pi} \left\{ 2 + \frac{\sinh C_0(x-x_c)}{\cosh C_0(x-x_c) - \cos C_0(y-y_c)} + \frac{\sinh C_0(x-x_c)}{\cosh C_0(x-x_c) - \cos C_0(y+y_c)} \right\}$$

$$\frac{\partial G^1(z, z_c)}{\partial y} = \frac{C_0}{4\pi} \left\{ \frac{\sin C_0(y-y_c)}{\cosh C_0(x-x_c) - \cos C_0(y-y_c)} + \frac{\sin C_0(y+y_c)}{\cosh C_0(x-x_c) - \cos C_0(y+y_c)} \right\} \quad (10)$$

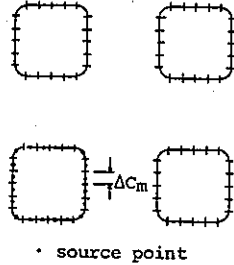


図-2 湧き出しの位置

本解析では、式(7)の積分計算を行うに当たって、図-2に示すように魚礁表面を合計 $M$ 個の線素分  $C_i$  ( $i=1 \sim M$ ) に分割し、その各線素分の中心に湧き出し点を置くことにより次式のように数値積分を行っている。なお、魚礁モデル隅角部は曲率半径 $r=0.005d$  (ただし $d$ は部材径)の円弧で近似している。従って、湧き出しの強さ $D(z_i)$ は式(11)の $M$ 元の連立一次方程式の解として求まる。

$$\sum_{i=1}^M D(z_i) A_{im} = \left\{ (u_G + u_r - u_W - u_V) n_x + (v_G + v_r - v_W - v_V) n_y \right\} \quad (11)$$

$i = 1 \sim M, \quad x = x_m, \quad y = y_m$

ここに、 $(x_m, y_m)$ は湧き出し点の位置、 $A_{im}$ は式(8)及び式(9)より $z = z_c$ の特異点における逆数型の特異関数の取り扱いに注意して式(12)、(13)で与えられる。

[ $i \neq m$ の場合]

$$A_{im} = \left\{ \frac{\partial G^1(z_i, z)}{\partial x} n_x + \frac{\partial G^1(z_i, z)}{\partial y} n_y \right\} \Delta C_i \quad (12)$$

$x = x_m, \quad y = y_m$

[ $i = m$ の場合]

$$A_{im} = \frac{C_0}{4\pi} \left( 2n_x + \frac{\sin C_0 y_i}{1 - \cos 2C_0 y_i} n_y \right) \Delta C_i + \frac{1}{2} \quad (13)$$

$x = x_m, \quad y = y_m$

式(4)における渦糸の位置に関しては、次の渦糸の運動学的条件から与えられる。すなわち、注目している渦糸の運動は他の渦糸からしか影響を受けないので、例え

ば第jk番目の渦糸の移動速度( $u_{jk}, v_{jk}$ )は

$$u_{jk} - i v_{jk} = \frac{d}{dz} \left\{ \omega_z - \frac{i \Gamma_{jk}}{2\pi} \log(e^{C_0 z_{jk}} - e^{C_0 z}) \right\} \Bigg|_{z=z_{jk}} \quad (14)$$

として表される。そして、時間ステップ  $\Delta t$  後の渦糸の位置  $z_{jk}(t + \Delta t)$  は式(14)及び次式で与えている。

$$z_{jk}(t + \Delta t) = z_{jk}(t) + (u_{jk} + i v_{jk}) \Delta t \quad (15)$$

式(14)に含まれる未知量である渦糸の循環については、物体表面の境界層内で形成される渦度の集積によって与えられるものと考え、Roshkoの提案式<sup>8)</sup>に基づいて次式で与えている。

$$A_{im} = \left\{ \frac{\partial G'(z_i, z)}{\partial x} n_x + \frac{\partial G'(z_i, z)}{\partial y} n_y \right\} \Delta C_i \quad (16)$$

ここに、 $U_G$ は各渦糸の発生位置における流速である。また、渦糸の循環は時間的に保存されるものとして計算を進めている。そして、各渦糸の発生位置は、魚礁モデルが角柱であることより流れの剥離点が部材の隅角部に固定されることを考慮し、各隅角部より振動流の境界層厚さ  $\delta$  ( $=\sqrt{2\nu/\omega}$ ,  $\nu$ : 動粘性係数) だけ離れた位置とした。その際、各隅角部からの方向は、図-3に示すように魚礁の落下方向と魚礁モデルの傾きを考慮して各計算ステップに置いて逐次決定している。

(2) 流体抵抗力

魚礁に作用する流体抵抗力は、圧力方程式を介して求められる。その際、圧力方程式の速度ポテンシャルの時間微分項  $\partial \phi / \partial t$  における湧き出し強さの時間変化については、式(6)を時間微分した次式に示す条件式より決定される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_W}{\partial n} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_V}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_R}{\partial n} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (u_G + u_r) n_x + \frac{\partial}{\partial t} (v_G + v_r) n_y \quad (17)$$

(魚礁表面上)

そして、式(6)に含まれる変数が全て時間  $t$  をパラメータとする変数であることに注意すると、式(17)は次のよ

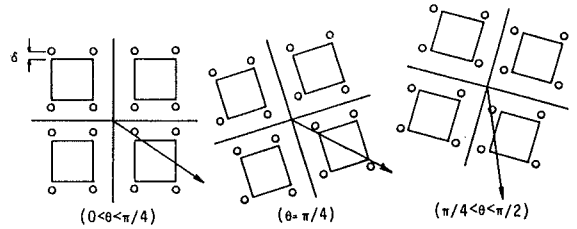


図-3 渦糸の位置

うに展開して表される。

$$\begin{aligned} & \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_W}{\partial t} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_W}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_W}{\partial n} \frac{dn}{dt} \right) \\ & + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_V}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_V}{\partial z_{jk}} \frac{dz_{jk}}{dt} \right) \\ & + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_V}{\partial z_{jk}} \frac{dz_{jk}}{dt} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_V}{\partial n} \frac{dn}{dt} \right) \\ & + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_R}{\partial D} \frac{dD}{dt} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_R}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) \\ & + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_R}{\partial z_i} \frac{dz_i}{dt} \right) + \text{Real} \left( \frac{\partial \omega_R}{\partial z_i} \frac{dz_i}{dt} \right) \\ & = \left( \frac{du_G}{dt} + \frac{du_r}{dt} \right) n_x + \left( \frac{dv_G}{dt} + \frac{dv_r}{dt} \right) n_y \\ & + (u_G + v_r) \frac{dn_x}{dt} + (v_G + v_r) \frac{dn_y}{dt} \quad (18) \end{aligned}$$

(魚礁表面上)

ここに、

$$\Omega_W = \frac{\partial \omega_W}{\partial n}, \quad \Omega_V = \frac{\partial \omega_V}{\partial n}, \quad \Omega_R = \frac{\partial \omega_R}{\partial n}$$

魚礁表面を分割する各線素分長に渡って作用する流体抵抗力の  $x, y$  方向成分  $F_{x_i}, F_{y_i}$  は、それぞれ圧力方程式を介して算定された線素分の midpoint での圧力  $P$  を用いて次式で与えている。

$$\begin{aligned} F_{x_i} &= -P_i n_{x_i} \Delta C_i \\ F_{y_i} &= -P_i n_{y_i} \Delta C_i \end{aligned} \quad (19)$$

(3) 落下する魚礁の運動方程式

落下する魚礁の水平、鉛直方向並びに回転に関する運動方程式は、それぞれ図-4を参照して次式のように表示できる。

$$\begin{aligned}
 M_a \frac{du_G}{dt} &= \sum_{i=1}^4 F_{xi} \\
 M_a \frac{dv_G}{dt} &= \sum_{i=1}^4 \{ F_{yi} - (m_a - m_w)g \} \\
 I_r \frac{d\omega_r}{dt} &= \sum_{i=1}^4 (x'_i F_{yi} - y'_i F_{xi})
 \end{aligned} \tag{20}$$

ここに、 $M, M_w$  は魚礁の単位幅当りの質量及び水に換算した質量、 $I_r$  は重心まわりの慣性モーメント、 $\omega_r$  は角速度、 $x'_i, y'_i$  は流体力の作用位置と重心との $x, y$ 方向の距離である。また、計算の各時間ステップにおける魚礁の重心位置 $(x_G, y_G)$ 及び回転角 $\theta$ は次式で求めている。

$$\begin{aligned}
 x_G(t+\Delta t) &= x_G(t) + u_G(t)\Delta t \\
 y_G(t+\Delta t) &= y_G(t) + v_G(t)\Delta t \\
 \theta(t+\Delta t) &= \theta(t) + \omega_r(t)\Delta t
 \end{aligned} \tag{21}$$

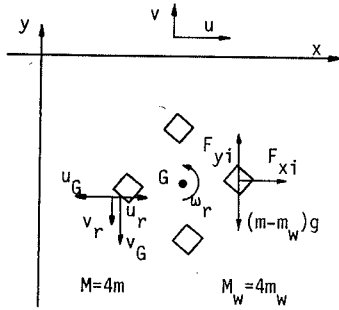


図-4 運動の条件

#### 4. 落下挙動の予測手法の再現性

上述した解析手法に基づき、計算は先に行った実験条件に対応するべく水深81cm、入射波高1.5cm、周期1sec、魚礁モデルが1辺  $a=3\text{cm}$  の空隙率64%で密度1.38とした場合の落下挙動の数値シミュレーションを行った。ここでは、水中を落下する魚礁の挙動に関する本予測手法の妥当性の検証を行うため、計算結果より得られた後述する魚礁の横揺れの指標と角速度の関係、並びに落下速度について実験結果との比較検討を行う。ついで投入時の初期角 $\theta_0$ を種々変化させたときの落下挙動及び動揺機

構より着底時の散乱範囲を低減する初期角について考察する。

図-5~8 は、投入時の初期角 $\theta_0=0, \pi/16, 3\pi/16, \pi/4$ に変化させたときの鉛直方向の落下速度 $u$ と加速度 $A_y$ 並びに魚礁の横揺れを表す指標 $D_x/D_y$ (図-9を参照)と角速度 $\omega$ を示したものである。まず各図の(A)の $v$ の落下に伴う変化を見ると、各図ともに落下初期における加速度運動と $y/a=-3$ 付近から定速度落下を示し、さらに落下して底面に近づくにつれて底面の影響に伴って落下速度の低減または変動が認められる。この底面の影響による落下速度の変化は、 $A_y$ が底面近くで正負に大きな変化を示すことからわかる。次に、同図(B)の $D_x/D_y$ について説明しておく、 $D_x/D_y > 0$ では魚礁が図面向かって右下方向の落下を表し、 $D_x/D_y < 0$ ではその反対であり、また、 $|D_x/D_y| > 1$ では水平方向への動揺量が鉛直方向の落下距離より大きく、 $|D_x/D_y| < 1$ では鉛直方向への落下が顕著に現れていることを意味するものである。

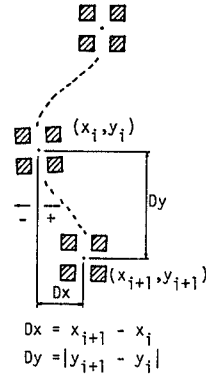


図-9  $D_x/D_y$ の説明図

そこで、各図における(B)の $D_x/D_y$ の値より判定できる魚礁の横揺れの方向は $\omega_r$ の正負の値と良く対応していることがわかる。さらにまた、 $\omega_r$ と $D_x/D_y$ の変曲点の間にタイムラグが認められる。すなわち角加速度の方向の反転に伴って少し遅れて魚礁の横揺れの方向に変化が現れる現象は、実験結果の1例を示した図-10に見られる現象と良く一致し、本予測手法により魚礁の落下挙動を予測し得るものと言える。

図-11~14は、それぞれ図-5~8に対応する魚礁の落下挙動を示したものである。これらの図より、 $\theta_0$ の値によって落下挙動が大きく異なり、投入時の魚礁の初期姿勢が散乱範囲を規定する重要な要素となることが確認で

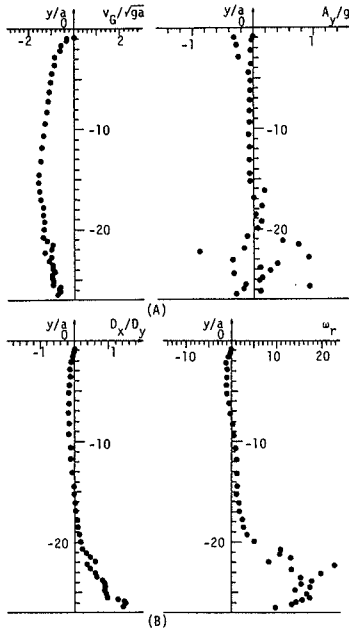


図-5 魚礁の落下動揺 ( $\theta_0=0$ )

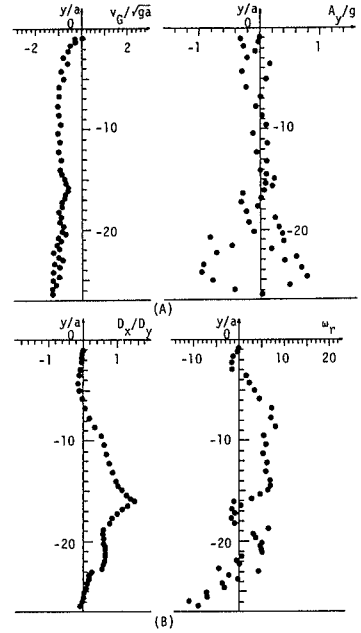


図-7 魚礁の落下動揺 ( $\theta_0=3\pi/16$ )

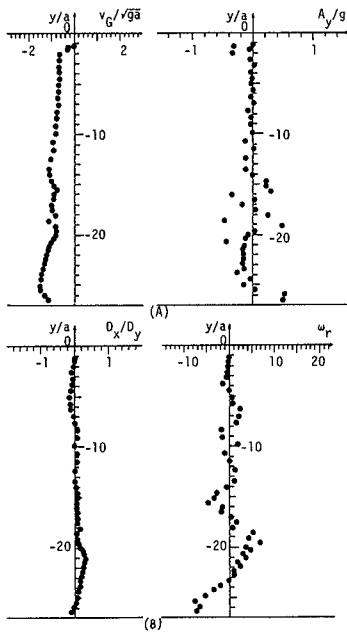


図-6 魚礁の落下動揺 ( $\theta_0=\pi/16$ )

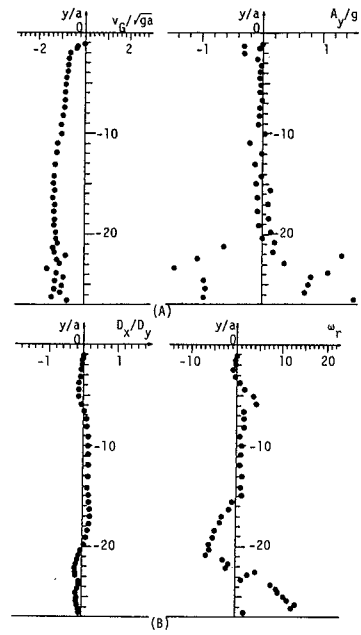


図-8 魚礁の落下動揺 ( $\theta_0=\pi/4$ )

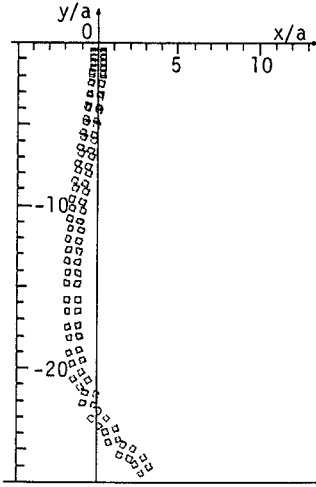


図-11 魚礁の落下挙動 ( $\theta_0 = 0$ )

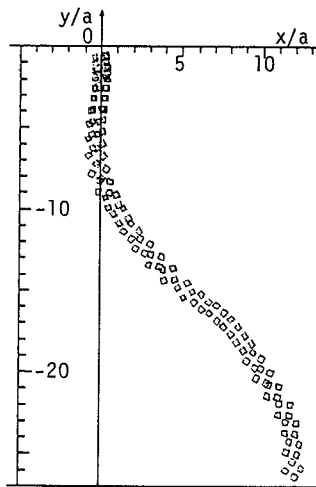


図-12 魚礁の落下挙動 ( $\theta_0 = \pi/16$ )

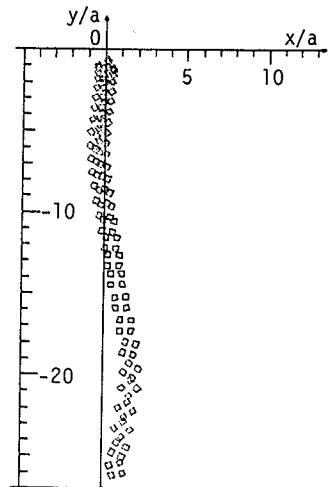


図-13 魚礁の落下挙動 ( $\theta_0 = 3\pi/16$ )

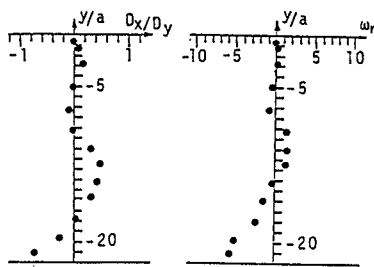


図-10 魚礁の落下動揺に関する実験結果

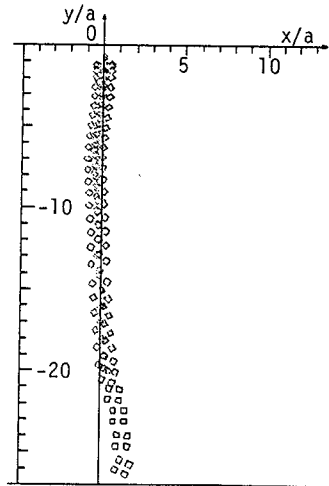


図-14 魚礁の落下挙動 ( $\theta_0 = \pi/4$ )

きる。また落下挙動を上述した魚礁の角速度の変化と対応させて見ると、図-5~8(B)の $\omega_r$ が同一符号で、かつ連続的にある程度の大きさの値を示している図-5、7の $\theta_0 = 0, \pi/16$ の場合、図-11、12の魚礁の落下挙動が大きく横に滑っている。一方、 $\omega_r$ の値が大きくてもその符号が特に断続的に変化する $\theta_0 = \pi/4$ の場合、図-14からも明らかのように魚礁が縦軸を軸として左右に少しの横揺れを生じながらほぼ真下に落下している様子が認められる。従って、着底時の設置精度を向上させるためには、投入時の魚礁の初期姿勢を海面に対して $45^\circ$ 傾ければ良いと言える。さらにまた、魚礁につば等の付着

物を取り付けることにより、落下に伴う魚礁の回転運動を抑制するか、または一方向の回転運動を制御する方法も考えられる。

5. 付加質量係数に及ぼす底面効果

5.1 解析方法



物体が流体場を非定常運動するときの物体を含めた流体場の全運動エネルギーは、物体の運動に伴ってその周辺に流体運動を誘起するため、必然的に物体だけがもつ運動エネルギーより増加することになる。その増加する運動エネルギー $E_M$ は、物体の体積を $V$ 、付加質量係数を $C_{MA}$ 、物体の速度を $v_0$ とすると、次式で表示される9)。

$$E_M = \frac{\rho}{2} C_{MA} V v_0^2 \quad (22)$$

ここに、 $\rho C_{MA} V$ は付加質量である。

一方、ポテンシャル論より流体のもつ運動エネルギーは $T_W$ 、速度ポテンシャルを $\Phi$ とすれば、

$$T_W = -\frac{\rho}{2} \oint \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (23)$$

と与えられる10)。ここで対象としている魚礁モデルは2次元モデルの角柱タイプであるため、魚礁の軸方向の単位幅当たりの運動エネルギー $T_W$ は $dS=1 \cdot dc$ より次式で与えられる。

$$T_W = -\frac{\rho}{2} \oint \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dc \quad (24)$$

速度ポテンシャルより求めた $T$ と魚礁の落下運動に伴って生じる流体運動による運動エネルギー $E_W$ が等しいことから、式(22)及び式(24)より付加質量係数は次の計算を行うことによって求まることになる。

$$C_{MA} = -\frac{\oint \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dc}{V v_0^2} \quad (25)$$

式(24)の速度ポテンシャル $\Phi$ については、ここでは流体場として固定底面を有する半無限の静止流体場を、また落下する魚礁の表面境界表示に対して先に述べた湧き出し分布法を採用したため式(26)のように表される。

$$\Phi = \text{Real} \left\{ \oint_c D(z_c) \{ \log(z-z_c) + \log(z-\bar{z}_c) \} dc \right\} \quad (26)$$

ここで、 $D$ は湧き出し強さで、前述したように魚礁表面上の流体速度と魚礁表面の運動の法線速度が等しくなる条件より決定される。また、式(24)の $\Phi$ 、 $\partial \Phi / \partial n$ の積分計算については、図-2で示したように魚礁表面を $M$ 個の線素分に分割し、その中点 $i$ に湧き出し点を置くことによってそれぞれ式(27)及び式(28)のように数値積分した。

$$\Phi = \sum_{i=1}^M \frac{D(z_c)}{2\pi} \{ \log|z-z_i| + \log|z-\bar{z}_i| \} \Delta C_i \quad (27)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{D(z_i)}{2\pi} \{ \log\left(\frac{\Delta C_i}{2}\right) - 1 + \log 2y_i \} \Delta C_i \quad (28)$$

ただし、特異点 $z=zi$  ( $x=xi, y=yi$ )では次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \sum_{i=1}^M \frac{D(z_i)}{2\pi} \left\{ \frac{(x-x_i)n_x + (y-y_i)n_y}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right. \\ \left. + \frac{(x-x_i)n_x + (y+y_i)n_y}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right\} \Delta C_i \quad (29) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = D(z_i) \left\{ \frac{1}{2} (n_x + n_y) + \frac{1}{4\pi y_i} \right\} \Delta C_i \quad (30)$$

### 5.2 計算結果とその考察

まず、上述した本解析手法の妥当性を検証するため底面の影響が及ばないような位置における $C_{MA}$ について算定した結果を示すのが図-15である。この図は底面から $h_5/a=150$ における $C_{MA}$ の魚礁空隙率 $\gamma$ の変化を示したもので、 $\gamma=0\%$ の $C_{MA}$ の値は1.19を示して従来の角柱の付

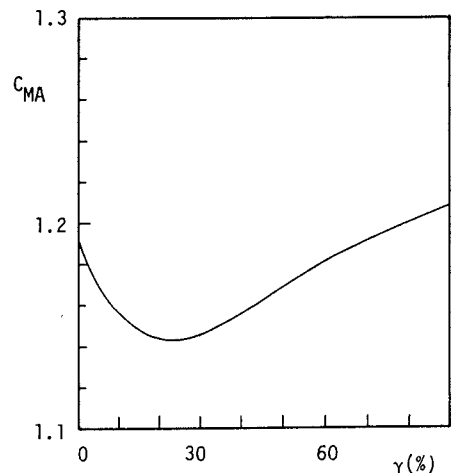


図-15 付加質量係数の空隙率変化

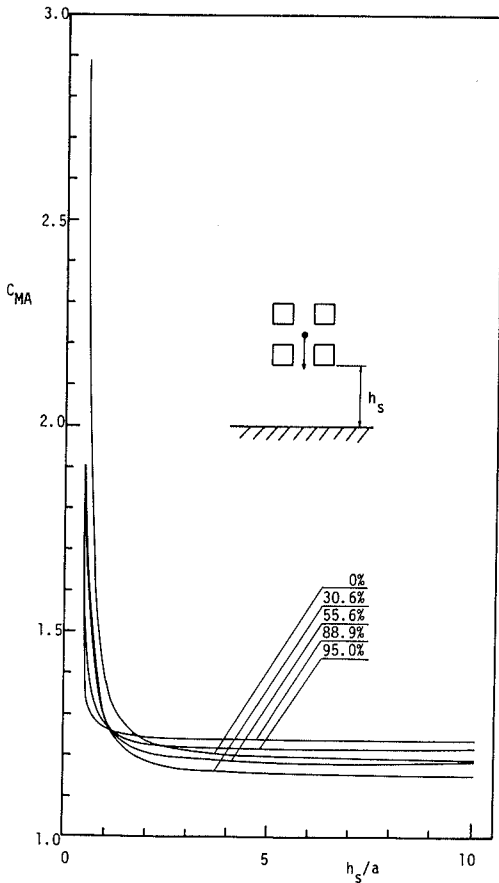


図-16 付加質量係数に及ぼす底面効果 ( $\theta_f=0$ )

加質量係数1.19<sup>11)</sup>と一致し、本解析手法の妥当性が確認される。また、図から明らかのように魚礁の空隙率によっても  $C_{MA}$  は変化し、 $C_{MA}$  に及ぼす魚礁を構成する部材間の干渉効果が認められよう。

図-16は、式(24)により求めた  $C_{MA}$  の底面からの距離  $h_s$  による変化を示したものである。この図によると、底面からの距離が魚礁1辺の4倍以上では、 $C_{MA}$  に対する底面の影響がほとんどなく図-15に示した半無限位置での結果と同じ値を示す。また逆に底面に近づくと空隙率の小さいものから順に底面の影響を受け始めて  $C_{MA}$  の値が急激に増大する。そして、 $h_s/a=0.5$  では各  $\gamma$  における  $C_{MA}$  の値は、表-1に示すように  $h_s/a=150$  での  $C_{MA}$  の1.4~2.3倍の値を取ることがわかる。このように空隙率によって底面の影響を受け始める  $h_s/a$  の値に差を生じたことにつ

表-1  $h_s/a=C_{MA}$  の値

$\gamma$ (%)	0	30.5	55.5	75.0	88.9
$C_{MA}$ at $h_s/a=150$	1.19	1.15	1.18	1.22	1.24
$C_{MA}$ at $h_s/a=0.5$	2.74	2.08	1.84	1.82	1.78

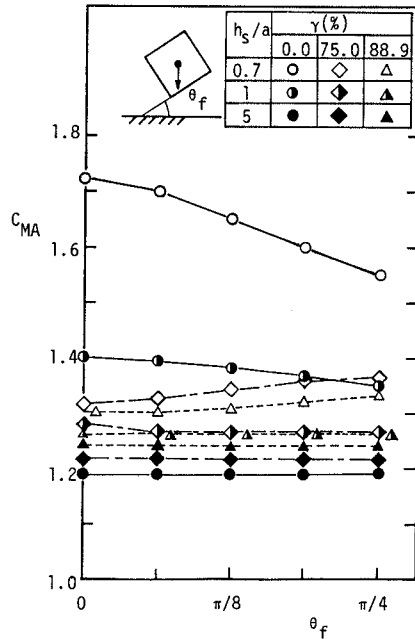


図-17 付加質量係数に及ぼす魚礁の底面に対する入射角の影響

いては、魚礁と底面との流体運動に対する魚礁の遮蔽面積の大きさに関係するものと考えられる。すなわち空隙率が大きい場合には魚礁内部を流体が通り抜け易いことから、 $C_{MA}$  に及ぼす底面の影響が生じ始める距離が短くなったものと言える。

上述したように魚礁と底面との流体運動を底面効果と考えると、 $C_{MA}$  は魚礁の底面への入射角によっても変化するものと推測できる。図-17は入射角  $\theta_f$  の違いによる  $C_{MA}$  の変化を示したものである。この図によると、底面との距離が近い位置での  $C_{MA}$  には  $\theta_f$  の影響が認められる。また、 $\gamma=0\%$  の無孔モデルの  $h_s/a=0.7$  における  $C_{MA}$  は、 $\theta_f$  の増加に伴い魚礁の底面に対する遮蔽面積が小さくなって底面との間の流体運動に及ぼす影響が弱まることから、 $\theta_f$  の増加に伴って減少する。一方、有孔モデルの  $C_{MA}$  は、 $\theta_f$  の増加に伴って遮蔽面積が増大することよ

り、増加傾向を示している。

以上のことより、2. で述べたように式(2)に基づいて着底時の衝撃力に関する安定計算を行う際に、 $C_{MA}$ に従来の海洋構造物における値をそのまま準用することは危険であることが確認できる。また抗力係数についても付加質量係数と同様に底面効果が含まれるものであり、現在著者らは抗力係数に及ぼす底面効果を検討中で、また別の機会に発表する予定である。

## 6. 結言

本研究では、魚礁沈設時の配置精度の向上並びに着底時の衝撃力の算定式の確立を目的として、まず落下する魚礁の動揺とそれに起因する魚礁周辺の渦を含む流れの予測手法の開発並びに投入時の魚礁の姿勢を種々変化させた計算を行い、魚礁の動揺量と落下挙動について一部実験結果との比較検討より予測手法の妥当性が確認できた。また、投入時の魚礁の姿勢と落下挙動との関連について考察を加え、着底時の散乱を低減せしめる魚礁の初期条件として $45^\circ$ を明らかにした。さらに、魚礁の付加質量係数 $C_{MA}$ については、各空隙率の半無限場における $C_{MA}$ の値を明らかにしたとともに、底面近傍においては半無限場での $C_{MA}$ の1.4~2.3倍の値となり、現行の着府衝撃力の算定式に用いられている付加質量係数に問題があることを指摘した。

## 参考文献

- 1) 日本水産資源保護協会：沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針（昭和53年度版），1978。
- 2) 中村 充・上北征男ら：海中落体の底着衝撃に関する研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp.483~487，1975。
- 3) 吉良八郎：人工魚礁の水理構造に関する実験的研究—静水中における人工魚礁模型の散らばり現象—，水産土木，第1巻，第2号，pp.13~18，1965。
- 4) 佐藤 修：人工魚礁に関する若干の問題点，水産増殖，臨時号7，pp.43~62，1968。
- 5) 佐藤 修編：人工魚礁，水産学シリーズ51，恒星社厚生閣，pp.123~124，1984。
- 6) Matsumi, Y. and Seyama, A.: Numerical Simulation of Behaviors of Settling Fish Aggregation Device. Reports of the Faculty of Eng. Tottori Univ., Vol.17, No.1, pp.131~143, 1986.
- 7) 中村孝幸・楨本太司・石本浩司：隅角部を有する浮体構造物まわりの渦形成と作用波力の算定法，第30回海岸工学講演会論文集，pp.415~419，1983。
- 8) Roshko A. : On the development of turbulent wakes from vortex street, NACA TN 2913, 1952.
- 9) 岩佐義朗：水理学，朝倉書店
- 10) 今井 功：流体力学，前編，裳華房
- 11) 土木学会編：水理公式集