魚礁の水中落下挙動の数値シミュレーションについて

加納　慎二

1．まえがき：　現在人工魚礁沈設の方法は，作業日数及び経済性の点より投入法が広く採用されている．この投入法による沈設方法においては，設計時に決定された配置に精度良く設置すること、回転を伴った落下運動であることから魚礁着底時の魚礁の姿勢による衝撃力の大きさの変動に関する評価法についても問題があり，その解決が望まれている．本研究は，投入法による着底時の衝撃力の低減も考慮した精度良い沈設を行うための魚礁の初期条件（海面からの位置及び姿勢，波の位相等）の解明を目指し，波動場中の魚礁の落下挙動の数値シミュレーションを開発するものである．

2．解析方法：　波動場を落下する魚礁の動揺については，流体場の波動運動並びに落下に伴い魚礁周辺に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．本解析は，落下する魚礁表面上の圧力分布を落下する魚礁周辺の流況の数値シミュレーションより算定し，その圧力分布より求められる魚礁に作用する流体抵抗力と魚礁の落下に関する運動方程式より落下挙動をシミュレーションするものである．なお，本研究で対象とする魚礁は図1に示す立方体の魚礁を2次元化した有孔角柱モデルである．

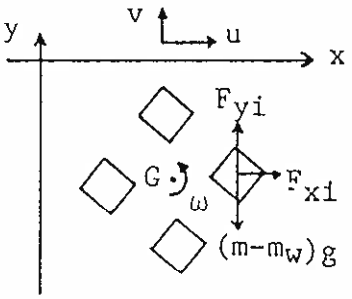

図1　運動条件

運動方程式：魚礁の落下に伴う水平，鉛直方向の運動及び回転に関する運動方程式は図1に示す運動条件を参照し，以下のように与えられる．

$$M\,dU_G/dt = \sum_{i=1}^{4} Fx_i$$

$$M\,dV_G/dt = \sum_{i=1}^{4} \{Fy_i-(m-m_w)g\} \qquad ①$$

$$I_r\,d\omega/dt = \sum_{i=1}^{4} (x_i'Fy_i-Y_i'Fx_i)$$

ここに，M ：魚礁の単位幅あたりの質量，Mw：魚礁の単位幅あたりの体積を水に置換した時の質量，m=M/4，$m_w=M_w/4$，Ir：慣性モーメント，Fxi,Fyi：魚礁に作用する流体抵抗力のx，y方向成分，xi',yi'：流体抵抗力の作用点と重心とのx，y方向の距離，UG,VG：魚礁の落下速度のx，y方向成分，ω：角速度（左廻りを正），g：重力加速度である．

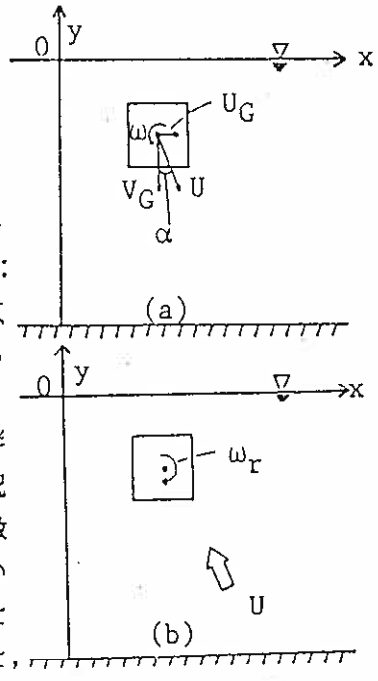

図2　魚礁周辺の流れ場

流体場の表示：式①中の流体抵抗力 Fxi,Fyiの算定に際しては，落下に伴って発生する渦を考慮した魚礁周辺の流況を明らかにする必要がある．流況の数値シミュレーション手法における魚礁背後に生じる渦の表示には，複数渦糸モデル法を採用し，魚礁表面表示に対してはわき出し分布法を用いている．これらの渦糸及びわき出しの複素速度ポテンシャルは，流体場の底面と自由表面を固定壁に近似して取り扱った中村ら(30回海講)の方法にならうと，z平面上での複素速度ポテンシャルω_z は以下のように与えられる．

$$\omega_z=\omega_w+\omega_{Rz}+\omega_{Vz}$$

$$=\omega_w+\frac{1}{2\pi}\oint_c D_m(Z_m)\{\log(e^{c_0z_m}-e^{c_0z})+\log(e^{c_0\bar{z}_m}-e^{c_0\bar{z}})\}dc$$

$$+\frac{i}{2\pi}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{P}\Gamma_{jk}\{\log(e^{c_0z_{jk}}-e^{c_0z})-\log(e^{c_0\bar{z}_{jk}}-e^{c_0z})\} \qquad ②$$

ここに，ω_w,ω_{Rz},ω_{Vz} はそれぞれ入射波，わき出し，渦糸の複素速度ポテンシャル，$\oint_c$ は曲線c周りの

積分，Γ_{jk}は渦糸の循環（右廻りが正），zm，Dm(zm)はわき出しの位置とその強さである．　　魚礁表面の境界条件：わき出し強さ Dm（zm）は魚礁表面上の法線方向の流速がゼロとなる条件より決定される．今，図２（ａ）に示すように魚礁が水平方向と($\pi/2-\alpha$）の角度をなし，速度U（$=\sqrt{U_G^2+V_G^2}$）でかつ角速度 ω で回転しながら落下しているとする．魚礁周辺の流れ場は，魚礁の重心に原点を置いた移動座標系から見た場合，図２（ｂ）に示すようにｘ軸に対して($\pi/2-\alpha$）［ここに，$\alpha=\tan^{-1}(U_G/V_G)$］だけ傾いた流速Uの一様流$\omega_U$と魚礁の回転に伴って生じる流れを表示する複素速度ポテンシャルω_rからなる流れ場に魚礁が固定された状態に置換することができる．したがって，図２（ｂ）の流れ場におけるDm(zc) の決定方程式は次式のようになる．

$$\mathrm{Real}[\partial\omega_{Rz}/\partial n]/c+\mathrm{Real}[\partial\omega_W/\partial n]/c+\mathrm{Real}[\partial\omega_{Vz}/\partial n]/c+\mathrm{Real}[\partial\omega_U/\partial n]/c+\mathrm{Real}[\partial\omega_r/\partial n]/c=0 \qquad ③$$

ここに，ｎは物体表面より流体中に延びる単位法線ベクトル，Real[]は実数部を示している．本計算では式③よりわき出し強さを算定する際，物体の断面曲線ｃをn 個の線素分ΔC_m（m=1～n)に分割し，ΔC_m にわたるわき出し強さを線素分ΔC_m の中点に置く数値化を行っている．

渦糸の発生位置，強さ：渦糸の発生位置については，魚礁モデルが角柱より流れの剥離点が魚礁モデル隅角部に固定されることを考慮し，各隅角部より流れの境界層厚さ離した位置に固定する方法を用いている．渦糸の発生位置の隅各部からの方向については，魚礁モデル表面における境界層の剥離現象を考慮し，図３に示すように魚礁モデルの傾きと落下方向の関係より決定している．図中◑●印で示す位置から発生させる渦糸は魚礁空隙部からの流れにより発生する渦を近似するための渦糸の発生位置である．渦糸の循環強さは，物体表面上の渦度流束に基づき渦糸の初期循環を$\partial\Gamma/\partial t=Us\cdot|Us|/2$より与えている．ここに，Usは渦糸の発生位置での流速である．なお，渦糸の移動については従来の渦糸に関する運動学的な方程式に基づき算定するとともに渦の強さの減衰については考慮していない．

流体力の算定：魚礁モデル表面上の圧力分布については，次式で示す圧力方程式に基づき算定する．

$$P_{z=zc}=-\{\rho\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{\rho}{2}(u^2+v^2)\}_{z=zc} \qquad ④$$

ここにρは流体の密度，φは速度ポテンシャル，ｕ，ｖは圧力算定点のｘ，ｙ方向の流速を表す．また，魚礁モデル表面上z_cに作用する流体抵抗力F_{xc}，F_{yc}は式④より求められる圧力Ｐｚを用いて次式で与えられる．

$$F_{xc}=-P_{zc}n_x\Delta c\ ,\quad F_{yc}=-P_{zc}n_y\Delta c \qquad ⑤$$

これらを式①の運動方程式に代入することにより各計算の時間ステップにおける魚礁の落下速度及び回転が算定され，落下挙動がシミュレーションできる．

３．計算結果：図４は計算結果の一例を示したもので，落下方向に対して左右への動揺を有しながら落下する現象が再現されている．なお，計算結果の詳細は紙面の都合上講演時に発表させて頂きます．

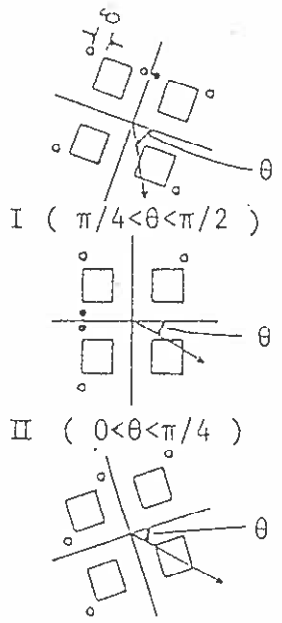

図３　渦糸の発生位置

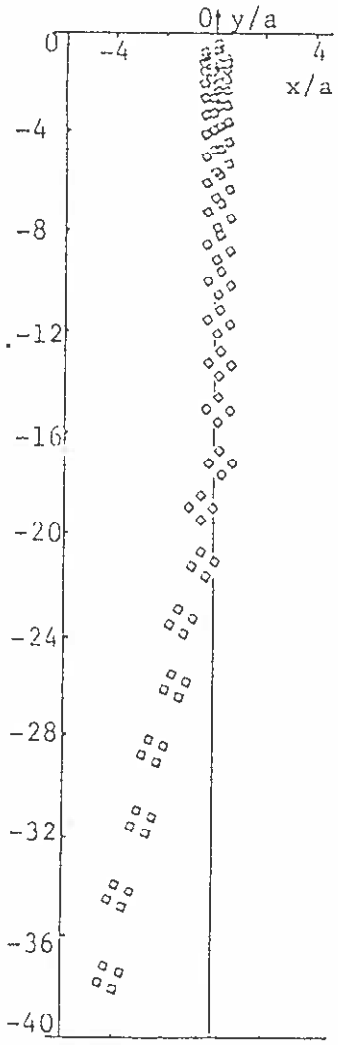

図４　計算結果（$\theta=\pi/6$）