3D-MPS 法による 数値魚道の構築に関する基礎的検討 DEVELOPMENT OF NUMERICAL FISHWAY BY 3D MPS METHOD

後藤仁志¹・五十里洋行²・酒井哲郎³・望月貴文⁴ Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Tetsuo SAKAI and Takafumi MOCHIZUKI

「正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻(〒606-8501京都市左京区吉田本町)
 ²学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 都市環境工学専攻(〒606-8501京都市左京区吉田本町)
 ³フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻(〒606-8501京都市左京区吉田本町)
 ⁴学生会員 京都大学大学院修士課程 都市環境工学専攻(〒606-8501京都市左京区吉田本町)

A design method of a fishway has been established on the basis of experimental hydraulics. However, a more rational design is enabled if a computational hydrodynamics, which has progressed rapidly in late years, is utilized. In this paper, a numerical fishway by three dimensional particle method is proposed to express two characteristics of fishway as follows: a three dimensional locally rapidly changing flow under complicated boundary condition of fins; and a free surface flow with a fragmentation of water, or a splash. As for a stream-type fishway, a vertical distribution of flow velocity calculated by the numerical fishway agrees well with results of previous hydraulic experiments. And a circulating flow cell in a transverse cross section is calculated for a further investigation of flow structure in a fishway.

Key Words: stream-type fishway, velocity distribution, circulating flow cell, numerical fishway, CFD, particle method

1. はじめに

ダム・堰等の河川横断型水理構造物は,遡河性魚 類のハビタートを分断することがあり,水産資源の 保護だけでなく河川生態系保全の面からも魚道の整 備が重要である.魚道には様々な形態のものがあり, 膨大な水理模型実験や現地でのモニタリングの継続 によって蓄積された経験的水理学に基づく設計法が 確立されている(例えば,廣瀬・中村¹⁾).既存の設 計概念・設計手法は充分に合理的なものではあるが, 従来から最新の解析法を積極的に取り込んできた水 工水理学の発展の経緯に鑑みれば,近年の水理学の 数値流体力学的側面の進歩を反映させた魚道設計に ついて模索することは,やはり重要な課題であると 考える.

水理学的観点から魚類の遡上可能性を判断するに は、1)対象魚の遊泳速度以下(少なくとも瞬発速度 以下)の流速領域が充分に断面内に確保されている か、2)対象地点の維持流量に対して適切な水深が確 保できるか、という点に注目する必要がある.一般 に、複雑な3次元急変流である魚道内流れは数値解 析が困難であり、水理実験に依存した設計が行われ てきた.しかし、断面内流速分布を支配する物理的 機構の把握が可能となれば、魚道内流れの普遍的理 解が進んで、従来より更に合理的な設計法の提案へ の道を拓くこととなるはずである.辻本ら²¹は、従 来の魚道の水理設計で扱われてきた流下方向に平均 化された流れの構造を再現することを目的に、準3 次元流れの支配方程式に阻流板(フィン)による抗 力項(フィンスケールの空間平均的抗力)を導入し た数値解析を提案し、ストリーム型魚道の流速分布 構造の再現を試みた.

魚道の水理的特徴は、1) 阻流板等の複雑境界条件 下の3次元の局所的急変流であること、2) 水塊分裂・ 飛沫の発生を伴う自由表面流であること、3) 大量の 気泡を連行した気液混相流であること、等である. 辻本らの解析では、阻流板の存在は流下方向に平均 化された抗力として表現されているが、阻流板の流 下方向密度が高く、阻流板高さ(相対粗度)が極め て大きい魚道内流れでは、流れの流下方向変化は著 しく、流下方向の平均化の妥当性は明確ではない. また、辻本らの解析では、自由表面は固定境界とし て扱われているが、現実には激しい水面変動が存在 し、自由表面流解析が不可欠である.

本稿では、これら2点(上記水理的特徴の1)お よび2))を陽に記述するため、ストリーム型魚道を 対象に、3次元粒子法による数値解析を実施する. 辻本らの解析は、当時の解析技術を充分に生かして 魚道内流れの普遍的理解を目指した意義深い研究で あることには疑念はないが、約10年前に実施され たものであり、この間の自由表面流解析の進歩を反 映した解析を実施して、state of the art を示すことは 有意義であると考える.また、上記3)の気泡混入 に関しても重要であるが、現在の汎用計算機の演算 性能に照らして考えると、3次元気液混相流解析は 依然として高負荷であり、本稿では、単相流モデル による解析を行うこととした.

2. 非均一粒子径型 MPS 法の概要

本研究では,薄肉固定壁を扱うために非均一粒子 径型 MPS 法³⁾を用いる.

支配方程式は, Navier-Stokes 式

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + v\nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{g}$$
(1)

である. ここに、u: 流速ベクトル、p: 圧力、p: 流体の密度、g: 重力加速度ベクトル、v: 動粘性係 数 (=1.0×10⁶ m²/s) である. MPS 法⁴⁾ では、計算領 域に多数の粒子(計算点)を配置し、個々の粒子の 周囲に設定した影響域内での粒子間相互作用として 基礎式の各項を離散化する. 非圧縮条件は、粒子数 密度を一定値 n_0 に保つことにより満足される.

非均一粒子径モデルにおける粒子 i の圧力項およ び粘性項は,

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_{i} = -\frac{1}{\rho} \frac{D_{0}}{V_{i} n_{0}} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{p_{j} - p_{i}}{\left| \mathbf{r}_{ij} \right|^{2}} \left(\mathbf{r}_{ij} \right) V_{j} \cdot w \left(\left| \mathbf{r}_{ij} \right|, \mathbf{r}_{ei} \right) \right\}$$
(2)

$$v \langle \nabla^2 \boldsymbol{u} \rangle_i = \frac{2v D_0}{V_i \Lambda_i} \sum_{j \neq i} (\boldsymbol{u}_j - \boldsymbol{u}_i) \frac{V_j w (|\boldsymbol{r}_{ij}|, \boldsymbol{r}_{ei}) + V_i w (|\boldsymbol{r}_{ij}|, \boldsymbol{r}_{ej})}{2}$$
(3)

$$\Lambda_{i} = \sum_{j \neq i} \left[\left| \mathbf{r}_{ij} \right|^{2} \frac{V_{j} w \left(\left| \mathbf{r}_{ij} \right|, \mathbf{r}_{ei} \right) + V_{i} w \left(\left| \mathbf{r}_{ij} \right|, \mathbf{r}_{ej} \right)}{2 V_{i}} \right]$$
(4)

$$V_i = \left(d_i\right)^{D_0} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{r}_{ij} = \boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i \tag{6}$$



図-1 薄肉壁近傍における流体の相互作用

と記述される (*D*₀: 次元数, *r_i*: 粒子 *i* の位置ベクトル)³. 粒子間相互作用の及ぶ範囲(影響球)は, 重み関数

$$w(r, r_{ei}) = \begin{cases} \frac{r_{ei}}{r} - 1 & for \quad r \le r_{ei} \\ r & \\ 0 & for \quad r > r_{ei} \end{cases}$$
(7)

により規定される.パラメータ r_{ei} は粒径の定数倍であり,粒子の持つ粒径によって異なる.また,粒子数密度は重み関数を用いて,

$$n_{i} = \sum_{j \neq i} \left[\frac{V_{j} w(|\mathbf{r}_{ij}|, \mathbf{r}_{ei}) + V_{i} w(|\mathbf{r}_{ij}|, \mathbf{r}_{ej})}{2V_{i}} \right]$$
(8)

と定義される.

3. 複雑固定壁境界の構築

標準型 MPS 法における壁面条件は,壁面付近の 粒子の粒子数密度を正しく計算するために,水粒子 と接する壁表面粒子の他に2層以上のダミー壁粒子 を配置することが必要となる.しかし,本研究で扱 う阻流板のような薄肉構造物の構成を3層の粒子の 配列で行うと,必然的に粒径を小さくせざるを得な くなり,その分だけ計算負荷も増加するので得策で はない.したがって本研究では,Chikazawaら⁵と 同様の方法によって,1層の壁粒子のみで薄肉構造 物を構成する.壁を1層の粒子で構成する際には, その壁近傍に存在する粒子において,ダミー粒子の 寄与分を別に与える必要が生じる.具体的には,

$$n_i = \sum_{j \in \text{fluid}} w(|\mathbf{r}_{ij}|) + \sum_{j \in \text{shell}} w_s(|\mathbf{r}_{ij}|)$$
(9)

$$w_{s}(|\mathbf{r}_{ij}|) = w(|\mathbf{r}_{ij}|) + w_{D}(|\mathbf{r}_{ij}|)$$
(10)

として計算する (w_D : 薄肉壁背後の寄与分). 本研究で 扱う薄肉壁は剛体であるので, 薄肉壁の背後に規則的 に配列された仮想的なダミー粒子が存在すると仮定し



図-2 デニール型数値魚道

て w_Dを計算する.また,薄肉壁の表面と裏面それぞれ に接する流体に対して,表裏で別の圧力を与えるために, 薄肉壁粒子1個につき2個の圧力変数を導入する.薄 肉壁近傍の粒子に対しては,その粒子が何れの側に存在 するのか判定し,表ないし裏の圧力変数を用いて相互作 用を計算することで,安定した計算が可能になる.

薄肉壁近傍の粒子は、その影響範囲内に壁の裏側 の粒子を含むことがあるので、互いの影響を受けな いように、裏側の粒子の寄与分を排除して計算す る必要がある.ただし,阻流板のエッジ付近にお いては排除される粒子の判定に工夫を要する.図-1 は、流路を水平方向に切断した断面(x-z 平面に平 行;図-3参照)を図に示したものである. まず, 阻 流板近傍の水粒子に最も近い阻流板構成粒子との距 離および水粒子と阻流板エッジ部の粒子(図中のF) との距離を測定する.両者を比較して、粒子Fとの 距離の方が遠い場合は阻流板の裏側に非影響範囲を 設定する.図で言えば、粒子Cは本来の影響範囲内 に粒子 E を含むが、粒子 E とは粒子間相互作用を計 算しない. 同様に、粒子Bは粒子Dに影響を与え ない. 一方, 粒子 A は粒子 F 自体が最近傍の阻流板 構成粒子であるから非影響範囲が設定されず、粒子 Dとの相互作用が計算される.

4. デニール型魚道の数値模擬

(1) デニール型魚道の流況

図-2に数値魚道の諸元を示す. 左端の底面の流入

境界から 0.3 m の水平床を経て, 勾配 1/5, 長さ 2.0 m の下り斜面を接続する. さらに, 0.5 m の水平床 を下流端に設置する. 流路幅は 0.22 m である. 下 流端には, 高さ 0.1 m の堰が設けてある. 阻流板 は,斜面に対して 45°の角度を成すように, 0.1 m 間隔で 15 枚設置した. なお,計算領域の Katopodis et al.⁸⁾ に対する幾何縮尺は 2/5 であり,水理条件は Froude 相似を満足するように算定した. 流入境界に は,Gotoh ら[®] による soluble moving wall(可溶性移 動壁)を用い,常に一定の流量(*q*=0.044 m³/s)を 水路に供給した. 下流端(最下流の阻流板から 0.8 m の地点)には,段落ちを設けた. 基準粒径は 1.0 cm,阻流板構成粒子の粒径は 0.5 cm とした. 総粒 子数は約 400,000 個である.

図-3 および図-4 に計算結果の瞬間像を示す. 左 端より魚道内に侵入した流水が, 阻流板と衝突し, 飛沫を上げながら流下していく. ただし,本研究で は単相流で再現計算を実施したため,実験で見られ るような水中への気泡の混入は再現できない.

図-5に、上流側から5番目と6番目の阻流板の間で計測した水位を示す.赤色の線が水路中央,青色と緑色の線はそれぞれ両側の壁から2.5 cm離れた点で計測された値である.水路中央と壁際2点との間に5.0 cm程度の水位差が生じているが、このことは既往の実験ⁿにおける水位測定から知られている事実と一致する.なお、流れが充分に発達した時刻*t*=8.0 sにおいて、上流側から9番目と10番目の阻流板の間での平均値(断面平均流速、水深)を用



図-3 デニール式魚道流下過程

いて算定した Froude 数と Reynolds 数は, Fr=0.326, Re=1.9×10⁵ であった.

(2) デニール型魚道の流速分布

図-6 に水路中央断面における主流速方向流速の鉛 直分布を Katopodis ら⁸⁾の水理実験結果と比較して 示す. 図中の u'_m は y=0.75d における主流速方向流速 u である. y/d=0.4 以下の領域では計算値が若干小さ くなるものの,実験値との対応は概ね良好である.

図-7 に、上流から数えて9番目と10番目の阻流 板間の各断面の鉛直流速分布(時刻 t=8.0 s から 1.0 s 間のインターバル平均)を示す.図-7の上図は、主 流(x 軸)方向成分 u について、下図は鉛直(y 軸) 方向成分 v について各断面における鉛直分布を併示 している.まず、縦断面 A(水路中央)において横 断面 a,b,c,dを比較すると、u、vの何れにも断面ご との差異は見られない.主流方向成分 u は、底面か



ら y=0.2 m 付近までは緩やかに増加し, y=0.2 m で 勾配を変化させ,水面に向って急増する.鉛直方向 成分 v は,底面から y=0.09 m まで増加し,y=0.09 m 付近でピークを示して水面に向かって減少する.す なわち,y=0.09 m 付近において上昇流速が最大とな る.一方で,縦断面 B (阻流板のエッジ近傍)では, 主流方向成分 u については横断面 a,b,c,d で大きな差 異は見られない. u 成分は,y=0.03 m 近辺から急増 し,y=0.07 m 近傍でピークをとった後に減少に転じ, y=0.19 m 付近で極小値をとった後に再び増加に転じ て水面に達する.このような傾向(y=0.09 m 近傍で のピークの存在)は,図-9 に示した辻本ら²⁰の計 算による流速の等値線図からも読み取ることができ る.鉛直方向成分 v については,y=0.0-0.08 m の領



図-6 鉛直流速分布 (実験との比較)







域において断面 a および b と断面 c および d とで傾向が異なり,断面 a および b ではほぼゼロ近傍の値を示すのに対して,断面 c および d では明らかに負の値を示す. これは,断面 c と d が底面近傍(それ ぞれ y=0.06 m と y=0.03 m)で阻流板と交差しており,その周辺で阻流板に沿う下降流が生じるためと考えられる.

(3) 鉛直断面セル構造

次に, 鉛直断面内の流況について注目した. 図-8 には, 図-7 中の横断面 a,b,c,d における断面内流速ベ クトル図と, 主流方向流速の強度分布図(両図とも 図-7 と同様の時間のインターバル平均)を示した. それぞれの図は, y軸 z 軸ともに 1.0 cm 間隔で格子 状に配置された Euler 観測点の時間平均値を表示し ている. Euler 観測点において, 観測点近傍(粒子径



の 1.5 倍の範囲) に MPS 法の標準的自由水面粒子の 判定条件 ($n_i < \beta n_0$; 定数 β =0.97) を満足する粒子し か存在しない場合には, 観測値を表示していない. したがって, z軸方向に水位は一定ではないので, y軸方向の観測点の水面近傍の定義域は z方向に異な る. ベクトル図中の緑色のラインは阻流板を表す.

まず、流速ベクトル図に関して、4 断面ともに共 通して水路中央軸に対してほぼ線対称な構造であ る. また, 水路中央で上昇流, 側壁近傍で下降流 が生じる渦構造が見られる.このような渦構造は. 和田ら⁷の実験による観測および辻本ら²⁾の阻流板 の抗力を主流方向に平均化して考慮した縦断面平均 型の境界条件下の k-E モデルによる計算結果と同様 の傾向を示している.4断面ともに渦構造は明瞭だ が、断面によって若干渦の形状が異なる. 渦の中心 の位置はほぼ不変であるが、断面 a および b に比べ て断面cおよびdはv軸方向に引き伸ばされた様相 を呈している. これは, 阻流板の上方では流れが阻 流板に衝突するために鉛直方向流速が減少すること と関係している, 阻流板に平行な断面内で見れば, 連続的な下降流が阻流板に沿って生じていることは 勿論である.

主流速強度分布図を流速ベクトル図と比較して見 ると、渦の中心の近傍で主流速の大きい領域が存在 することがわかる.水路中央は図-7からもわかる 通り、比較的流速の小さい領域が水面近くまで発達 しているので、その領域を取り囲むようにして主流 速の大きい領域がΩ字状に発達している.図-9に 辻本らの計算結果による主流速の等値線図と比較を 行った.辻本らのモデルでは水面変動が扱えないの で、計算結果は水面近傍を除外して表示されている. そこで本稿の結果も同じ領域の主流速値のみを表示 することとした. y=0.1 m, z=0.05 m 付近に見られる 流速のピーク等,良好な一致が確認できる.

5. おわりに

本研究では、3D-MPS 法を用いてデニール式数値 魚道を構築した.平均流速分布に関しては、既往の 水理実験結果との対応は良好であり、現時点で知ら れた実験事実に関しては充分な再現性が確かめられ たと言えるだろう.ストリーム式魚道内流れの持つ 複雑な流れ場を3次元計算し、実験や従来の計算方 法では得られない流れ場の詳細に関する数値情報を 得られたことの意義は小さくないと言える.

ただし,冒頭にも述べた気泡の混入や粒子径以下 の乱れの影響等,場の物理的メカニズムをさらに詳 細に再現するためのモデルを組み込んだ計算へと発 展させることが,今後計算力学的なツールとしての 本モデルの役割を明瞭にする上では必要であること は言うまでもない.

参考文献

- (1) 廣瀬利雄・中村中六:魚道の設計,山海堂,p376., 1991.
- 2) 辻本哲郎・泉 倫光・山本貴章:ストリーム型魚 道の流れの構造について、水工学論文集,第40巻, pp.731-736,1996.
- 池田博和・越塚誠一・岡 芳明:粒子法において局 所的に空間分解能を調節するための非均一粒子モデ ルの開発,第9回計算流体シンポジウム講演論文集, pp.461-462, 1998.
- Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y.: A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Comp. Fluid Dyn. J.*, 4, 29-46, 1995.
- Chikazawa, Y., Koshizuka, S. and Oka, Y. : Numerical Analysis of Three-dimensional Sloshing in an Elastic Cylindrical Tank using Moving Particle Semi-implicit Method, *Comp. Fluid Dyn. J.*, 9, 376-383, 2001.
- Gotoh, H., Shibahara, T. and Sakai, T. : Sub-particlescale turbulence model for the MPS method -Lagrangian flow model for hydraulic engineering-, *Comp. Fluid Dyn. J.*, 9-4, pp.339-347, 2001.
- 7) 和田 清・東 信行・中村俊六:デニール式およびスティープパス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動,水工学論文集,第42巻, pp.499-504, 1998.
- 8) Katopodis, C, Rajaratnam, N., Wu, S. and Tovell, D.: Denil Fishways of Varying Geometry, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123-7, pp.624-631, 1997. (2005.9.30 受付)