

MPS 法を用いたプールタイプ魚道の流況解析

Flow analysis of a pool and weir type fishway using MPS method

前野詩朗*・富田晃生**・玉川勝也**

Shiro Maeno, Akio Tomita and Katsuya Tamagawa

*工博 岡山大学教授, 環境学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

** 岡山大学環境学研究科博士前期課程 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

Hydraulic structures such as dams and weirs divide the habitats of anadromous fishes. It is therefore very important to improve the fishway not only for the protection of fisheries resources but also for the preservation of river ecosystem. Although many researchers have carried out analytical researches about the fishway, only the simple structures were treated in their studies because of the complicated flow with free surface around the complicated fishway structure.

In this research, two dimensional analysis of a pool type fishway was conducted as a basic study aiming at three-dimensional flow analysis using the MPS (Moving Particle Semi-implicit) method which can solve rapidly change flow around fishway in sufficient accuracy. First, the parameter which determines the situation of the flow was optimized. Then, applicability of the numerical analysis was examined using the overflow type and the underflow type fishway. Furthermore, treatment method of the periodic boundary was introduced to increase an efficiency of the numerical analysis.

Key Words : numerical fishway, velocity distribution, particle method, MPS

1. はじめに

魚類等の生態系を保護する目的で、堰等の河川を横断する水理構造物の付帯施設として魚道が設置されている。魚道の設置に際しては、あらかじめ設置後の流況を十分把握した上で、より魚類が遡上・降下し易い構造を採用する必要がある。しかし、魚道の流れは自由表面を含む大変複雑な流況を呈するため、流れの詳細を把握することは簡単なことではない。従来より、このような水理構造物を設計する際には、縮尺模型を用いた実験が行われてきた。水理模型実験は実際の流況を比較的忠実に再現することが可能であるが、構造条件や境界条件等の変更に相当の時間や費用を要することや、測定上の問題点などから水理構造物を設計する際に必要となる情報を水理実験からのみ得ることには限界がある。

このような背景のもと、複雑な流況を解析するために様々な数値解析手法が用いられているが、その一つとして激しい水面の変化や水塊の分裂・合体を精度良く解くことのできる MPS (Moving Particle Semi-implicit Method) 法¹⁾がある。この MPS 法を用いて、後藤ら^{2),3)}は、デニール式魚道の流れの 3 次元解析を行い、MPS 法の有用性を確かめている。しか

し、実際の魚道は規模が大きく、魚道内すべてを対象として数値解析的に流況を得ようとする、大変多くの計算時間とメモリが必要となる。このような場合、魚道中流部分の流れは周期境界で解析できることを前野ら⁴⁾は示している。MPS 法を用いた魚道の流れの解析の際に周期境界を適用した例は見あたらない。そこで本研究では、MPS 法を用いて周期境界を取り扱うための基礎として、階段式プールタイプ魚道を対象として、鉛直 2 次元解析を実施し、中流部を 1 つのプールで代表させることにより複数のプールが連結された魚道全体の流況を得る周期境界の取扱い手法を提案する。その際、解析で用いる数値魚道内の流速分布を支配するパラメータは既往の研究による推奨値が通常用いられるが、本研究では、より精度の高い水面形および流況を得ることを目的として、前野ら^{4),5)}の行った水理模型実験の結果と解析結果を比較することにより、パラメータの最適化も合わせて行った。その後、越流流れに加えて魚道の隔壁下部に潜孔のある流れ場への適用性も合わせて検討した。さらに、流入境界付近の水位の自動調整手法も新たに提案した。

2. 数値解析の概要¹⁾

2.1 基礎式

非圧縮性流れの支配方程式を以下に示す.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

式(1)は質量保存則で、連続の式である. 式(2)は運動量保存則で、ナビエ-ストークス方程式である. ここで、 ρ は流体密度、 t は時間、 $\mathbf{u}$ は x 方向の流速ベクトル、 P は圧力、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトルである.

非圧縮性流れでは、流体の密度は一定である. したがって、粒子数密度も一定でなければならず、この一定値を n^0 と書くことにする. n^0 を具体的に求めるには、初期粒子配置において重み関数の半径 r_e の中に自由表面がない粒子の粒子数密度を計算し、計算中はこれを使い続ける.

粒子 i の圧力項および粘性項は、次のように示される.

$$-\frac{1}{\rho}\langle\nabla p\rangle_i = -\frac{1}{\rho}\frac{D_0}{n^0}\sum_{j\neq i}\left\{\frac{p_j - p_i}{|r_{ij}|}\left(r_{ij}\right) \cdot w\left(|r_{ij}|\right)\right\} \quad (3)$$

$$\nu\langle\nabla^2 u\rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n^0\lambda}\sum_{j\neq i}(u_j - u_i)w\left(|r_{ij}|\right) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j\neq i}w\left(|r_{ij}|\right)|r_{ij}|^2}{\sum_{j\neq i}w\left(|r_{ij}|\right)}, \quad r_{ij} = r_j - r_i$$

ここで、 D_0 は次元数、 r_i は粒子 i の位置ベクトル、 λ はモデル定数、左辺の $\langle \rangle$ は粒子間相互作用モデルであることを表すために用いる記号である.

重み関数 ω を導入し、粒子間相互作用モデルにはこの重み関数を利用する.

$$\omega(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r \leq r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 r は粒子間距離である. したがって、式(5)の重み関数を用いると、粒子間距離がパラメータ r_e より短い場合のみ粒子間で相互作用することになる. このパラメータ r_e を影響半径、影響半径内の領域に粒子の中心が位置する粒子を、粒子 i の近傍粒子と呼ぶ. 影響半径 r_e は、以下の式で表わされる.

$$r_e = l_0 l_r \quad (6)$$

ここで、 l_0 は初期の粒子配置における粒子間距離、 l_r は l_0 の比で、影響半径比と呼ぶ.

影響半径 r_e が小さいほど、相互作用する粒子の数が減るため、計算時間は短くなる. しかし、小さすぎると計

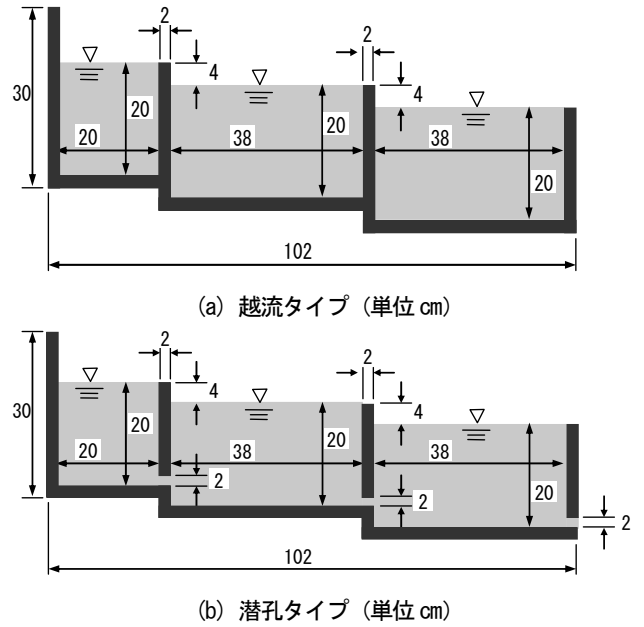


図-2.1 解析モデル

算が不安定になり解析精度も低下してしまう. そのため、それぞれの粒子間相互作用モデルについて、解析モデルの再現性が認められる影響半径 r_e の値を決定する必要がある.

粒子 i およびその近傍粒子 j の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_i$ 、 $\mathbf{r}_j$ とし、粒子の位置における重み関数の和をとったものを粒子数密度と呼ぶ.

$$n_i = \sum_{j\neq i}\omega\left(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|\right) \quad (7)$$

粒子間相互作用モデルには次の勾配モデルおよびラプラシアンモデルを用いる.

$$\langle\nabla\phi\rangle_i = \frac{d}{n^0}\sum_{j\neq i}\left[\frac{(\phi_j - \phi_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)\omega\left(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|\right)\right] \quad (8)$$

$$\langle\nabla^2\phi\rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0}\sum_{j\neq i}[(\phi_j - \phi_i)\omega\left(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|\right)] \quad (9)$$

ここで、 d は空間次元数、 ω は式(5)の重み関数である.

2.2 解析対象モデルおよび解析方法

図-2.1に階段式プールタイプ魚道を模擬した解析対象モデルを示す. 図-2.1(a)は越流タイプ、図-2.1(b)は隔壁下部に高さ2.0cmの潜孔を設けた潜孔タイプの魚道を模擬しており、プールはどちらも3段である. 初期条件は、図のように水を満たした状態で全ての水粒子の流速を0(m/s)とした. 上流端の壁をsoluble moving wall(可溶性移動壁)として一定流量を与え、流出境界は自由流出としている. 初期の粒子間距離は6.66mm、総粒子数は5229個である.

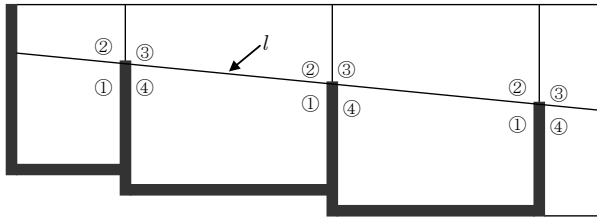


図-2.2 領域の設定

(1) 壁付近の粒子の取扱い

粒子間相互作用モデルを用いる場合、隔壁付近に位置する粒子*i*の影響半径内に、隔壁の反対側に位置する粒子を含んでしまうことある。そこで、本解析では図-2.2のような魚道隔壁先端付近に①～④の領域を設け、粒子*i*が位置する領域によって、*i*に影響しないと考えられる不要な粒子を計算対象から除外することとした。図中の直線*l*は、隔壁の上部を連ねた直線である。

図-2.3 (a)のように、中心粒子*i*が直線*l*より下に位置する場合、壁粒子より右側に位置する粒子とは互いに影響を受けることはないと考え、これを除外することとした。図-2.3 (b)のように、中心粒子*i*が直線*l*より上に位置する場合、壁粒子より右側で、かつ直線*l*より下に位置する粒子とは互いに影響を受けることはないと考え、これを除外することとした。また、図-2.3 (c)、図-2.3 (d)の場合は、それぞれ図-2.3 (a)、図-2.3 (b)と同様に不要な近傍粒子を排除した。

(2) 解析モデルのパラメータ値

パラメータの値によって粒子の挙動は変化し、それにより計算モデルの再現性は大きく左右される。そのため、計算精度の向上にはパラメータの最適化が必要である。

本モデルでは、お互いに接近した粒子同士がこれ以上の接近を許さないよう衝突計算を行うが、本研究では、この衝突計算を開始する2粒子間の距離 d_c と、接近し合う粒子の反対方向に与えられる反発速度 V_c を最適化する。距離 d_c と、反発速度 V_c は次のように表す。

$$d_c = l_0 d_{cr} \quad (10)$$

$$V_c = V_r (1 + C_c) \quad (11)$$

ここで、 d_{cr} は初期の粒子間距離 l_0 に対する比、 V_r は2粒子の速度で決まる値、 C_c は反発係数である。解析条件として l_0 の比である d_{cr} と、反発係数 C_c を変えて解析を行う。

また、影響半径 r_e について、2次元の水柱の崩壊の問題を用いて行われた研究の結果、 r_e として、粒子数密度と勾配モデルに対して $2.1l_0$ を用い、ラプラシアンモデルに対して $4.0l_0$ を用いることが推奨されている⁹⁾が、この影響半径 r_e は、計算精度に直接的な影響を与える重要なパラメータであるため、本研究では最適化の対象とした。

(3) 流入・流出境界

流入境界としては、Ghoto ら⁹⁾による soluble moving wall (可溶性移動壁)を用いた。これは、速度を持たせた流

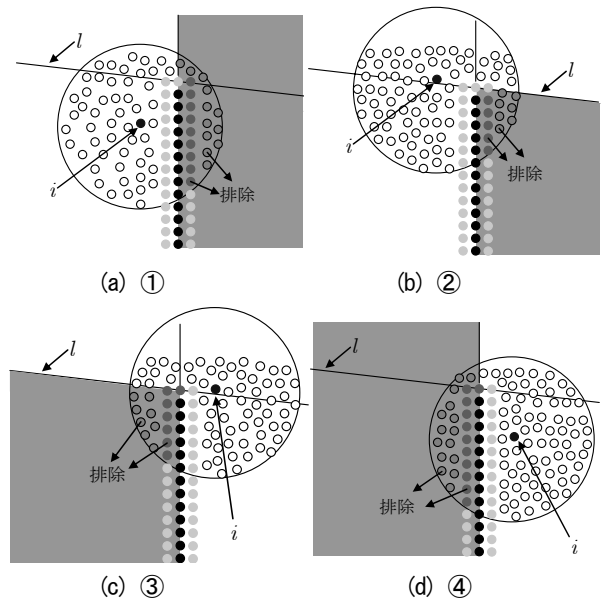


図-2.3 粒子の取扱い (①～④は図-2.2 参照)

入壁粒子を流入境界へ向けて移動させ、最内側の流入壁粒子の位置が流入境界を通過後、その粒子を流入壁粒子から水粒子へと変換する方法である。同時に、流入壁粒子の最後列に新たな粒子を生成し、これを繰り返すことで次々に水粒子を流入させる。

移動する流入壁粒子の速度と、新たに発生する水粒子の数を調節することで、任意の流量を与えることができる。ただし、移動する流入壁粒子の速度と新たに発生する水粒子の数を一定値にすると、流れが発達した後の境界付近の水面高さを事前に予想する必要があり、煩雑である。そこで、本モデルでは、新たな水粒子が流入する度に流入境界から流下方向に微小な一定区間の水粒子の最高高さを判定し、それに合わせて次回流入時の流入粒子数と流入壁粒子の速度を設定し直す手法を新たに提案する。これによって上流端境界から水粒子をなめらかに流入させることができる。本研究では、微小な一定区間として、予備計算の結果 $3.0l_0$ とした。

流出境界では、境界から領域外に出た粒子は、以後の計算から除外する。ただし、流入境界で新たに生成する流入壁粒子として再利用するために、粒子を一時的にメモリ上に貯めておき、流入壁粒子を生成する際に復活させてメモリの節約を図った。

(4) 周期境界

魚道の中流部の計算などでは、計算時間やメモリの節約のため周期境界として取り扱うと都合がよい。本研究では、以下の方法による周期境界を提案する。

周期境界では、一方の面と他方の面がつながっていると考える。すなわち、MPS法で周期境界を再現するためには、周期境界付近の粒子の影響半径内に、対応する周期境界付近の粒子が含まれていることが必要である。これを実現するために、周期境界面の外側に重み関数の影

表-2.1 解析条件

ケース名	解析モデル タイプ	流入流量(l/s)	衝突計算開始 距離比 d_{cr}	反発係数 C_c	勾配モデルの 影響半径比 l_r
Run-PF-1	越流	4.18	0.5	0.2	4.0
Run-PF-2			0.5	-0.8	
Run-PF-3			1.0	0.2	
Run-PF-4			1.0	-0.8	
Run-PF-5			1.0	-0.8	6.0
Run-PF-6					8.0
Run-O-6.97	越流	6.97	1.0	-0.8	8.0
Run-OU-15.0	越流+潜孔	15.0			
Run-OC-4.18	越流	4.18			
Run-OC-6.97		6.97			

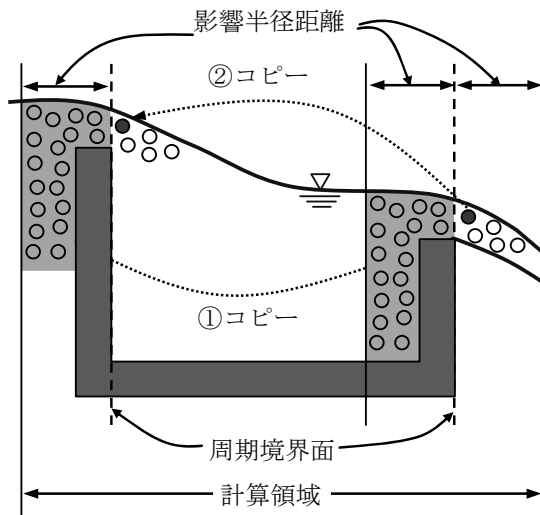


図-2.4 周期境界

影響半径までの領域を余分にとる。図-2.4①に示すように、下流の周期境界面から上流側の影響半径までの間に存在する水粒子を、上流の周期境界面の外側へコピーする。さらに、②のように下流の周期境界面から流出した直後の粒子を上流の周期境界面の内側へコピーする。この時生成される粒子は、圧力や速度、近傍粒子など、コピーされる元の粒子と同じ情報を持っている。ここで、同じコピー粒子であっても、前者①のコピー先粒子は計算ステップ毎に上書きされるが、後者②のコピー先粒子は、その後は独立して運動を続ける。ただし、周期境界条件を導入した計算の第1ステップでは、粒子同士が重なり合って異常な挙動を示すことがある。そこで本研究では、計算の第1ステップでのみ、上流境界面内における境界面付近に位置する粒子をいくつか取り除き、第2ステップからスムーズに計算が開始されるようにした。

2.3 解析条件

解析条件を表-2.1に示す。表中の記号のPFはParameter Fitting, OはOverflow type, OUはOverflow and Underflow type, OCはOverflow type with Cyclic boundaryを意味する。まず、Run-PFでは、越流タイプにおいて流入流量4.18 l/sを与え、衝突計算開始距離比、反発係数、勾配モデルの影響半径比を変えて解析を行う。これによって得られた解析結果を実験結果と比較することにより、本解析モデルに最適なパラメータの組み合わせを検討する。以後はその最適化されたパラメータを使って解析を行う。なお、影響半径比が大きいほど精度がよくなる程度推定されるが、影響半径比の増加は計算負荷の著しい増加を招くため、影響半径比の大きな計算ケースを極力少なめにした。つまり、従来のモデルで用いられている影響半径比4.0を用いて衝突計算開始距離比と反発係数の最適化を行い、その後、最適化された衝突計算開始距離比と反発係数を用いて影響半径比の最適化を行った。

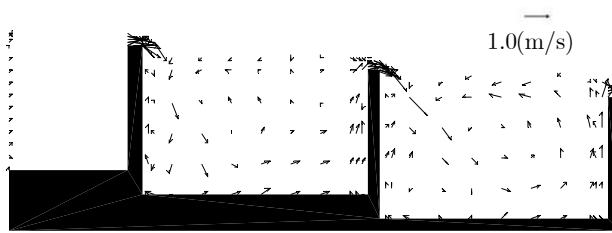
Run-O-6.97では、越流タイプにおいて、流入流量を6.97 l/sに増やした場合について解析を行い、実験結果と比較する。次に、Run-OU-15.0では、越流と潜孔流を同時に含むタイプにおいて流入流量15.0 l/sを与えた。潜孔を有する場合の実験結果が無いので、本研究では流体解析ソフトFLOW-3Dの解析結果と比較することにより、MPS法の有用性を検討する。最後にRun-OCでは、越流タイプにおける最下流プールを対象として、2ケースの流入流量を設定して、周期境界の再現性を検討する。

3. 解析結果および考察

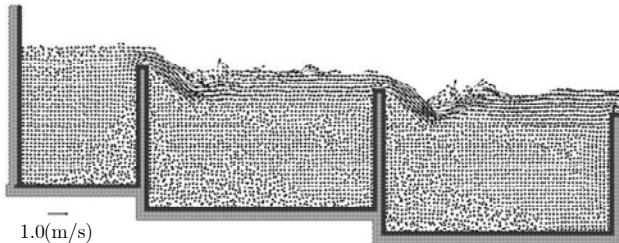
3.1 パラメータの最適化

(1) 衝突計算開始距離比と反発係数の最適化

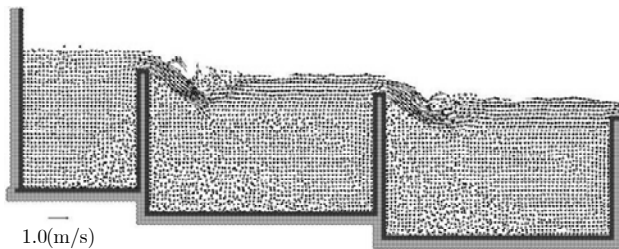
図-3.1は、実験値とRun-PF-1, Run-PF-2, Run-PF-3,



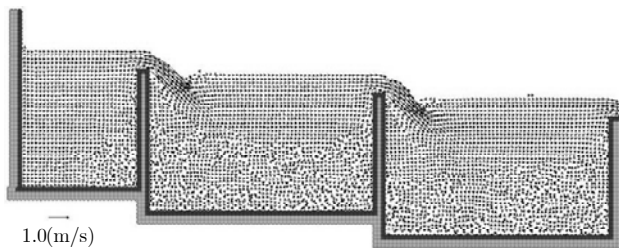
(a) 実験結果 $Q=4.18(l/s)$



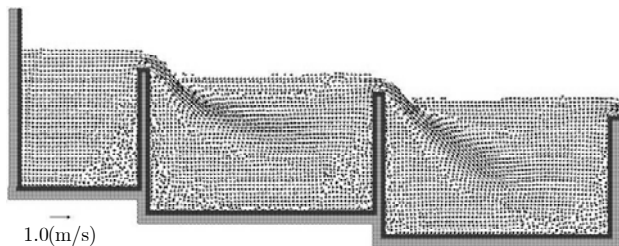
(b) Run-PF-1 $Q=4.18(l/s)$



(c) Run-PF-2 $Q=4.18(l/s)$



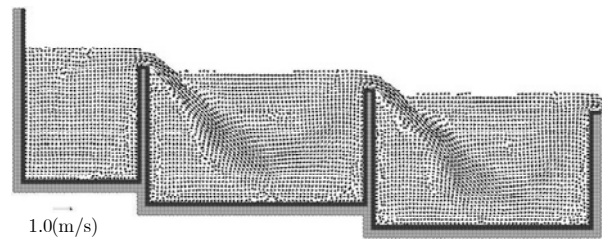
(d) Run-PF-3 $Q=4.18(l/s)$



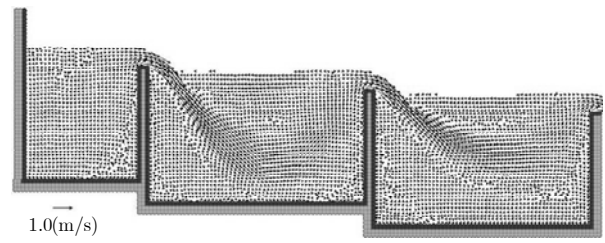
(e) Run-PF-4 $Q=4.18(l/s)$

図-3.1 衝突計算開始距離比と反発係数の最適化

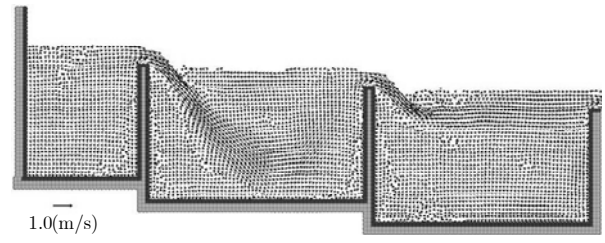
および Run-PF-4 の解析結果である。図-3.1 (b), (c), (d) は定常状態になった時、図-3.1 (e) は 3 段目のプールで、流れが最も底部に進入した時における流速分布図 (0.2 秒間の時間平均値) である。図-3.1 (a) に示すように、実験値では、上流端から流入した流れは、堰を越えてプール底部まで進入し、2 段目および 3 段目のプールで反



(a) $t=6.0$ 秒

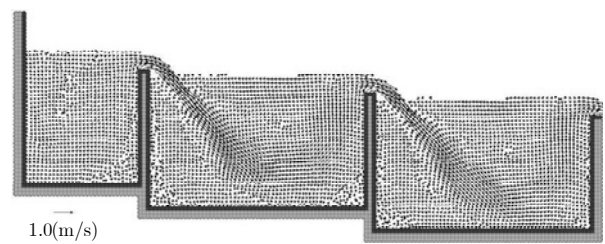


(b) $t=12.0$ 秒

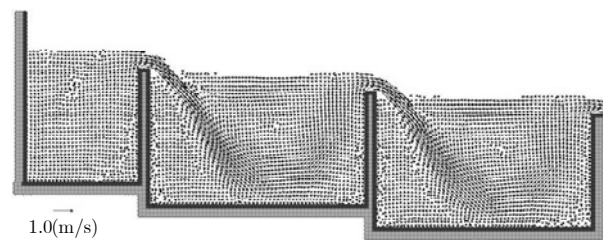


(c) $t=15.0$ 秒

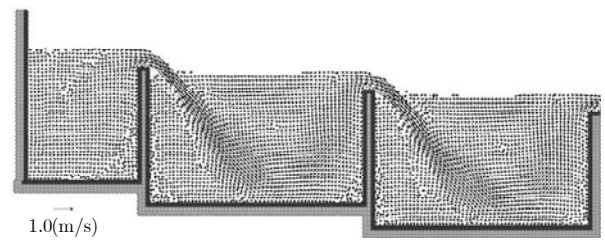
図-3.2 Run-PF-5 $Q=4.18$



(a) $t=6.0$ 秒



(b) $t=12.0$ 秒



(c) $t=15.0$ 秒

図-3.3 Run-PF-6 $Q=4.18$

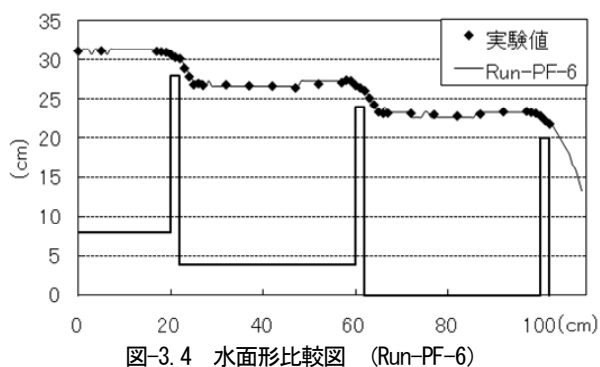
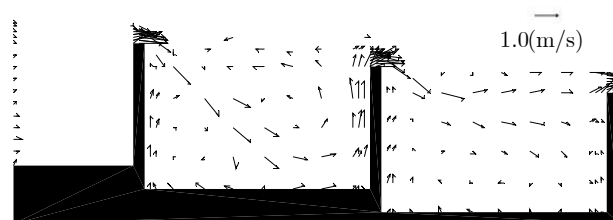


図-3.4 水面形比較図 (Run-PF-6)

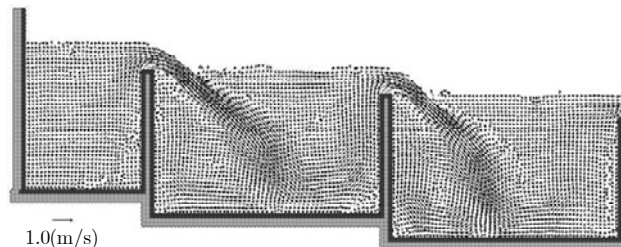
時計回りの渦を発生させている。図-3.1 (b), (c)に示すように、Run-PF-1 および Run-PF-2 では水面形が乱れ、計算開始直後からストリーミングフローが発生し、渦は発生しない。Run-PF-3 では、水面形は安定しているが、Run-PF-1 および Run-PF-2 と同様に計算開始直後からストリーミングフローとなり、渦は発生しない(図-3.1 (d))。Run-PF-4 では、水面形が安定している上に、明確ではないが、3段目のプールで渦が発生し(図-3.1 (e))、その後ストリーミングフローへと移行する。このことから、衝突計算開始距離比 d_{cr} が大きいほど水面形を安定化させ(図-3.1 (d), (e))、反発係数 C_c が小さいほど上流から流入した流れを底部まで進入させる流れとなることからわかる(図-3.1 (c), (e))。よって、以後は衝突計算開始距離比 d_{cr} には1.0、反発係数 C_c には0.8を用いる。

(2) 勾配モデルにおける影響半径比の最適化

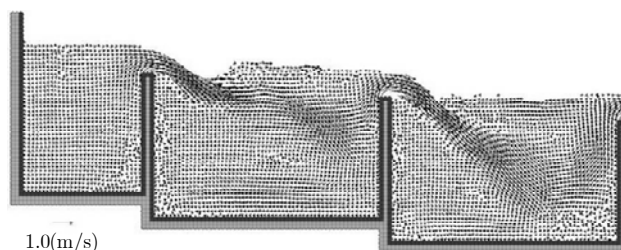
図-3.2 および図-3.3 は、Run-PF-5 および Run-PF-6 の場合における、計算開始後のプール内での流況の変化を示したものである。Run-PF-5、Run-PF-6 は共に、 $t=6.0$ 秒ではっきりとした反時計回りの渦を発生させる(図-3.2 (a)、図-3.3 (a))。しかし、Run-PF-5 の3段目のプールは徐々にストリーミングフローへと移行し、最終的に時計回りの渦を発生させて定常となった(図-3.2 (b), (c))。一方、Run-PF-6 では、2段目および3段目のプールではっきりとした反時計回りの渦を発生させた状態で定常となり、実験値の流況とほぼ一致する(図-3.3 (c))。これは、勾配モデルの影響半径比の違いによるもので、圧力勾配を算出する際にはある一定程度以上広範な粒子を考慮する必要があると考えられる。図-3.4 に、Run-PF-6 の定常状態における解析値と実験値の水面形を示す。この図から、実験値と解析値の水面形はよく一致しており、Run-PF-6 の再現性の高さがわかる。このことから、圧力勾配を算出する際に、どこまで離れた粒子を計算に加えるか決定する勾配モデルの影響半径は、初期の粒子間距離 l_0 の8.0倍以上が望ましいことがわかる。ただし、影響半径比 l_r をいたずらに大きくすると計算負荷が増大してしまうため、以後は、勾配モデルにおける影響半径比 l_r として8.0を用いる。



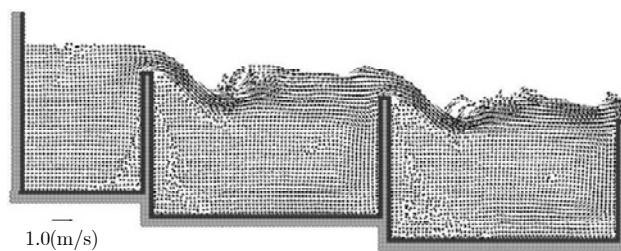
(a) 実験結果 $Q=6.97$ (l/s)



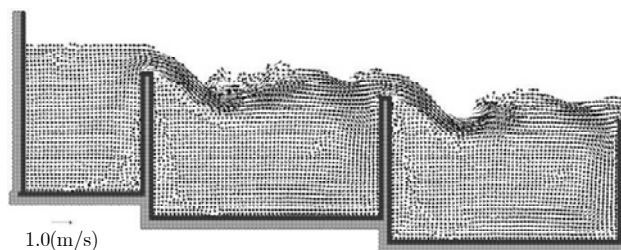
(b) $t=3.0$ 秒



(c) $t=7.0$ 秒



(d) $t=10.0$ 秒



(e) $t=15.0$ 秒

図-3.5 Run-0-6.97の流速分布

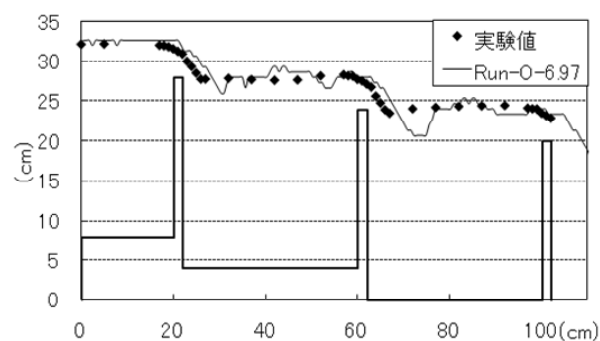
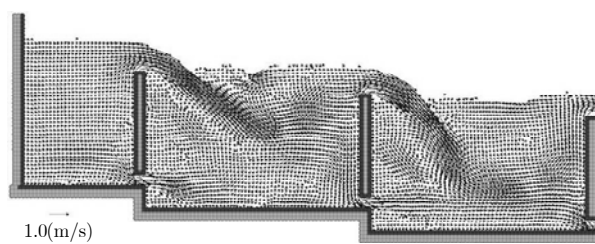
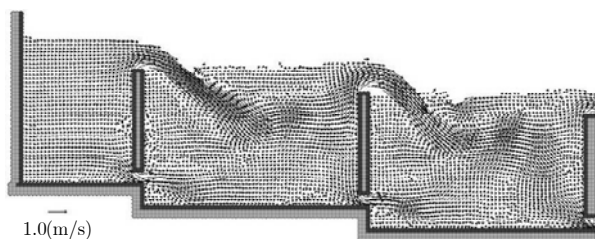


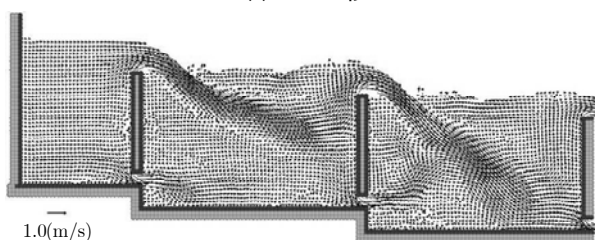
図-3.6 水面形比較図 (Run-0-6.97)



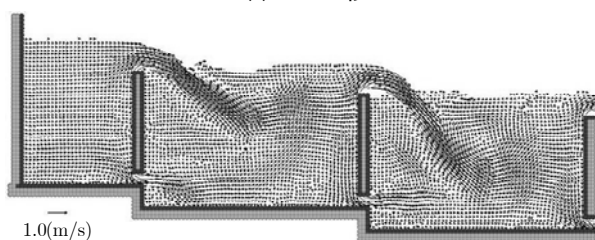
(a) $t=3.0$ 秒



(b) $t=6.0$ 秒

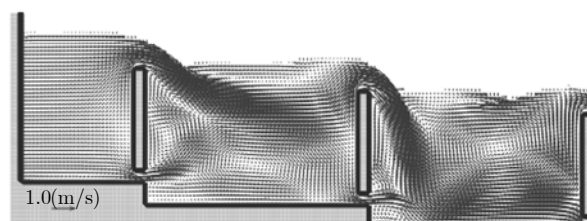


(c) $t=9.0$ 秒

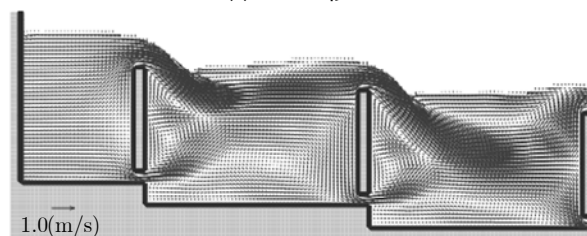


(d) $t=14.0$ 秒

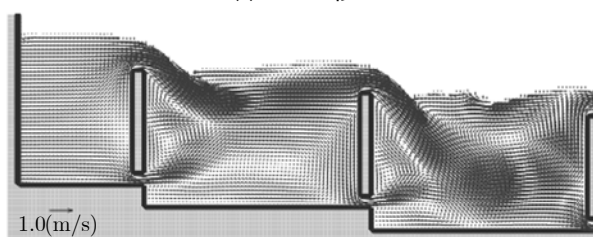
図-3.7 Run-OU-15.0の流速分布



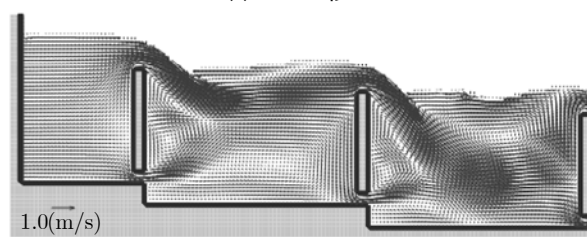
(a) $t=3.0$ 秒



(b) $t=6.0$ 秒

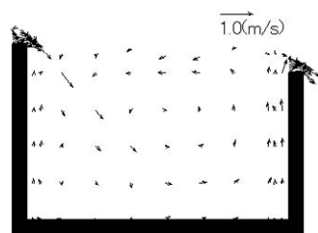


(c) $t=9.0$ 秒

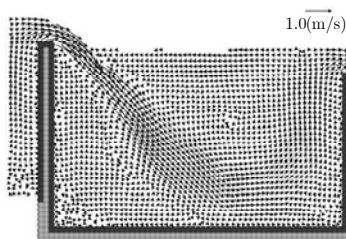


(d) $t=14.0$ 秒

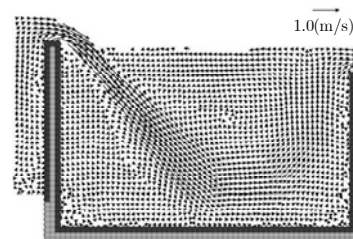
図-3.8 FLOW-3D 解析で得られた流速分布



(a) 実験結果

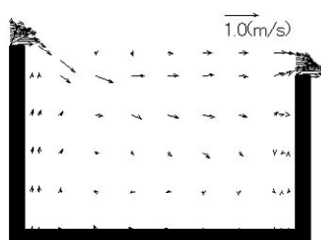


(b) $t=6.0$ 秒

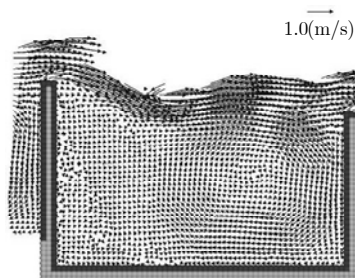


(c) $t=15.0$ 秒

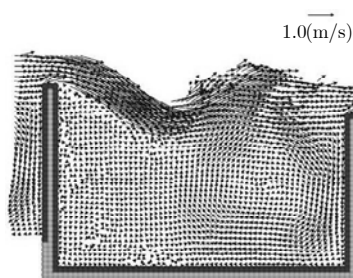
図-3.9 Run-OC-4.18の流速分布



(a) 実験結果



(b) $t=13.0$ 秒



(c) $t=14.0$ 秒

図-3.10 Run-OC-6.97の流速分布

3.2 越流タイプ魚道流れの再現

図-3.5 は、実験値と Run-O-6.97 における、計算開始後のプール内での流況の変化を示したものである。実験値では、上流端から流入した流れは、1 つ目の隔壁を越えて 2 段目のプール底部まで進入し、反時計回りの渦を発生させる。そして 2 つ目の隔壁を越えた 3 段目のプールではストリーミングフローを形成し、時計回りの渦を発生させている (図-3.5 (a))。Run-O-6.97 では、計算開始後約 3 秒で Run-PF-6 の定常状態と似た流況になるが (図-3.5 (b))、その後、2 段目のプール、次いで 3 段目のプールの順に流れはストリーミングフローへと移行する (図-3.5 (c), (d))。それ以降は、2 段目のプールで発生した周期的な水面のうねりが 3 段目のプールへ伝播し、15 秒の間に定常状態にならなかった (図-3.5 (e))。図-3.6 は、計算開始後約 15 秒後の水面形と、実験で得られた水面形を比較した図である。この図からは、解析値の越流水深は実験値のそれよりも全体的に高く、また、水面形も解析値の方が実験値に比べて激しく乱れているのがわかる。これは、圧力計算された最内側の壁粒子と、水粒子の圧力勾配項の計算が影響しているものと考えられる。つまり、隔壁上部へ接近した水粒子は、圧力勾配項の計算により、壁から跳ね返される力が働く。これにより、隔壁を越流した粒子が隔壁上部の下流側で剥離し、プールに粒子が侵入する際の水平速度成分が実際の現象よりも大きくなり、ストリーミングフローを形成し易くなったと考えられる。この問題を解消するためには、水粒子と壁粒子との間に表面張力を考慮する必要があると考えられる。

3.3 潜孔タイプ魚道流れの再現

前節では、越流のみが存在するプールタイプ魚道を対象として MPS 法の適用性を検討した。しかし、現地では、カニ等の河床付近を移動する生物や呼び水効果を発揮させるため、例えばアイスハーバー型魚道のように、隔壁底部に潜孔を設ける場合がある。そこで、本節では、越流と潜孔流を同時に含む流れへの適用性を検討する。本来、流量や形状が異なる魚道を対象として解析を行う場合、精度の良い結果を得るためにパラメータや粒子径を変える必要があると考えられる。しかし、ある程度固定されたパラメータを用いることが実際上要求されている。そこで本研究では、3.1 で行ったパラメータの最適化により、魚道内の流れはかなり改善されたと考え、最適化されたパラメータを流量や形状のある程度似かよった本潜孔タイプ魚道に対して適用した。また、検証実験が行われていないため、本研究では、流体解析ソフト FLOW-3D による結果と比較検討した。

図-3.7 は、Run-OU-15.0 の場合における、計算開始後のプール内での流況の変化を示したものである。図-3.8 は、Run-OU-15.0 との比較のために、FLOW-3D を使用し

て、同じ数値魚道について解析を行った結果を示している。FLOW-3D の解析では、LES (Large Eddy Simulation) モデルを用いて解析した。これらの図から、各計算時間における流況は概ね一致しており、MPS 法は、潜孔タイプ魚道にも適用可能であると言える。

3.4 周期境界

図-3.9 および図-3.10 は、Run-OC-4.18 および Run-OC-6.97 の場合における解析結果と、実験値を示している。Run-OC-4.18 では、Run-PF-6 で定常状態と判断された $t=6.0$ 秒の状態から計算を開始した。Run-OC-6.97 では、Run-O-6.97 で、十分発達した流れの確認された $t=10$ 秒の状態から計算を開始した。

その結果、Run-OC-4.18 では、計算開始から 9 秒後の $t=15$ 秒において、定常状態を保っていることが確認された (図-3.9 (b), (c))。これによって、周期境界とした場合においても、実験値で見られるプール魚道の流れが十分再現できており、本研究で提案した周期境界の取り扱いの妥当性が確認できる。Run-OC-6.97 では、ストリーミングフローとなる状況が再現されており、実験結果と一致している (図-3.10 (b), (c))。解析結果の方が、水面を激しく乱しながらうねりを発生させているが、これは、本解析モデルにおいて、先にも述べたが表面張力などが考慮されていないことが要因の一つと考えられる。

4. 結論

本研究では、MPS 法を用いた階段式プールタイプ数値魚道におけるパラメータの最適値を明らかにし、越流タイプに加えて潜孔流を伴う流れへの適用性を検討した。また、計算効率化のために周期境界の再現性を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 衝突計算開始距離比 d_{cr} が大きいほど水面を安定化させ、反発係数 C_c が小さいほど上流からの流れをプール下部へと侵入させることを明らかにした。
- 2) 勾配モデルの影響半径比 l_p が流況に影響を与えることを明らかにし、本解析条件における最適値として 8.0 を得た。
- 3) 流量が小さい場合は実験値と良く一致するが、流量が大きくなると実験値と解析結果の整合性が低下する。これは、プール隔壁部分を越えた流れが剥離し、流れの水平成分が大きくなり、ストリーミングフローとなりやすくなることが原因であると考えられる。
- 4) 越流部と潜孔部の両者を有する魚道流れの解析に対して本解析法の有効が確認された。
- 5) 提案した周期境界の取扱いにより、周期境界を再現することができた。

謝辞

本研究では、「粒子法コードユーザーグループ」から提供を受けた MPS 解析コードを基に改良したプログラムを用いた。開発者である東京大学大学院越塚誠一教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 越塚誠一：計算力学レクチャーシリーズ⑤ 粒子法，日本計算工学会，2005.
- 2) 後藤仁志，五十里洋行，酒井哲郎，望月貴文：3D-MPS 法による数値魚道の構築に関する基礎的検討，水工学論文集，第 50 巻，pp.853-858，2006.
- 3) 五十里洋行：粒子法による自由ストリーミングフローの数値解析とその水工学への応用に関する研究，2007.
- 4) 前野詩朗，尾上博則，宮内洋介：VOF 法による階段式魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第 45 巻，pp.421-426，2003.
- 5) 前野詩朗，小川信：プールタイプ魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第 46 巻，pp.421-426，2004.
- 6) Gotoh, H., Shibahara, T. and Sakai, T. : Sob-particle-scale turbulence model for the MPS method -Lagrangian flow model for hydraulic engineering-, *Comp.Fluid Dyn.J.*,9-4, pp.339-347,2001.

(2009 年 4 月 9 日受付)