

# 射流の減勢および合流に対する MPS 法の圧力擾乱抑制方法の比較検討

## Comparison of Attenuation Method for Pressure Fluctuation by MPS method for Energy Dissipation and Confluence of Supercritical Flow

浪平 篤  
NAMIHIRA Atsushi

### 1. 研究の背景と目的

長野県の梓川右岸地区では、近年、土地利用の変化や降水傾向の変化の影響により、既設の排水路では流下能力が不足する場合が生じている。その対策のため、開水路系排水路の拡幅改修、および、住宅地の近隣に位置する場合等の理由で改修が困難な区間では無圧トンネルと暗渠から構成されるバイパス排水路の新設を主な目的として、県営かんがい排水事業（平成 24～32 年度）が実施されている。

このバイパス排水路は、現地の地形や土地利用状況から、既往の事例ではみられない下記①～⑥の条件を満足させなければならない。①2つのバイパス排水路（本線と支線）を合流させる。②支線と合流前の本線は無圧トンネル（円形）、合流後の本線は暗渠（矩形）とする。③いずれの水路も射流状態で等流となる急勾配とする。④合流前の両水路の床高は、支線の方が本線の径の倍程度高くなり、落差を伴う合流となる。⑤合流前の両水路は、平面的に約 0.2 rad の角度をもって合流する。⑥落差を伴う合流であるが、合流後の本線内に減勢のための水クッションや減勢池等を設置するスペースを確保できない。これら①～⑥の条件に対応可能な合流施設は、土地改良事業<sup>1)</sup>や下水道事業<sup>2)</sup>には存在しない。そこで著者らは、このような条件に適用可能な合流施設の形状を文献調査と水理模型実験を行って検討し、多段自由落下式高落差工を做った減勢方式によって、支線からの流れを十分に減勢させながら落下させた後、本線の流れに合流させる新たな合流施設を開発した（Fig. 1）<sup>3)</sup>。

この合流施設の基本的な考え方は、上記地区に類似の現場条件において同様の合流施設を整備しなければならない地区が現れた際に、参考となることが期待される。しかしながら実施設計にあたっては、個々の地区の現場条件に基づく詳細な検討が別途必要となる。その際、地区によっては時間的もしくは予算上の制限によって水理模型実験の実施が困難な可能性もあることから、このような合流施設内の流れを再現できる数値解析手法があれば、有効な設計検討手法になると考えられる。

そこで本研究では、自由水面の大変形や水滴の飛沫等を安定して解析できる MPS 法<sup>4)</sup>に着目し、梓川右岸地区の合流施設内の流れへの適用性の検討の第一段階として、同施設の鉛直 2 次元モデルにおける射流の減勢および合流を対象に、MPS 法では不可避である圧力の擾乱を抑制する各方

法の比較検討を行う。

### 2. 解析の方法

#### 2.1 解析モデル

計算時間の短縮のため、合流施設の鉛直 2 次元モデルを対象に解析を行うこととした。モデル化にあたり、同施設のうち合流前の 2 つの水路の平面的な角度をゼロとする、円形断面の水路を矩形に変更する、水路幅は全て多段自由落下式高落差工部分と同一にする等の修正を行っている。多段自由落下式高落差工部分のステップの数および各ステップの長さについては、水理模型実験により最適な形状が選定されているが、予備計算をもとに、鉛直 2 次元モデルにおいて最も減勢効果が発揮されると考えられる別の形状（Fig. 1）を解析の対象とすることとした。

#### 2.2 MPS 法の概要

MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法<sup>4)</sup>とは、流体や構造物を有限個の粒子で近似してラグランジュ的に解く粒子法と呼ばれる数値解析手法の一つである。特徴として、非圧縮性流れを対象とした手法であること、連続式として密度一定条件を粒子数密度一定条件と置きかえた式を用いること、支配方程式における微分演算子を粒子間相互作用モデルによって表現すること等がある。粒子の配置によって複雑な形状の構造物を容易に表現できる、空間を格子分割する有限差分法や有限要素法と比較して自由水面の大変形や水滴の飛沫等を安定して解析できる等の利点がある。

一方、粒子法全般の課題であるが、圧力の擾乱の発生は不可避である。これは、粒子同士が互いに排斥力を及ぼし合うことで個々の位置が維持されるようモデル化されているために起こりうるものである。この課題に対し、MPS 法では近年多くの研究が行われている。

#### 2.3 MPS 法における圧力擾乱の抑制方法

MPS 法における圧力の擾乱の抑制を目的とした研究成果のうち、大きな効果が確認されている主な方法として、以下のものが挙げられる。

①CMPS<sup>5)</sup> 標準型 MPS 法の圧力勾配項の粒子間相互作用モデル（式(1)）を対称型（式(2)）に修正することで、運動量の保存性を向上させる方法である。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{i \neq j} \left\{ \frac{(p_j - p_i')(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} w(|r_j - r_i|) \right\} \quad (1)$$

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{i \neq j} \left\{ \frac{((p_j + p_i) - (p_j' - p_i'))(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} w(|r_j - r_i|) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $i$  は粒子の番号、 $p$  は圧力、 $d$  は次元数、 $\mathbf{r}$  は位置ベクトル、 $n_0$  は密度一定条件を満足するための粒子数密度(一定値)、 $p_i'$  は粒子  $i$  の圧力  $p_i$  およびその近傍の複数の粒子  $j$  の圧力  $p_j$  のうち最低値、 $w$  は粒子間相互作用に関する重み関数(式(3))である。

$$w(r) = \begin{cases} r_e/r - 1 & \text{for } 0 \leq r < r_e \\ 0 & \text{for } r \geq r_e \end{cases} \quad (3)$$

式(3)の  $r_e$  は粒子間相互作用の及ぶ範囲を示すパラメータであり、初期配置における粒子間距離を基準に設定される。

②HS<sup>5)</sup> 圧力の Poisson 方程式(式(4))の生成項を、粒子数密度の偏差ではなく、周囲粒子の相対的な移動情報を用いて評価(式(5))することで、高精度化する方法である。

$$\langle \nabla^2 p \rangle_i^{HS} = \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \quad (4)$$

$$\langle \nabla^2 p \rangle_i^{HS} = \frac{\rho}{n^0 \Delta t} \sum_{i \neq j} \left\{ \frac{r_{ij}}{r_{ij}^3} (x_{ij} u_{ij} + y_{ij} v_{ij}) \right\} \quad (5)$$

ここで、 $k$  は計算時間ステップ、 $n$  は粒子数密度、 $r_{ij}$  は粒子  $i, j$  間の距離、 $(x_{ij}, y_{ij})$  および  $(u_{ij}, v_{ij})$  はそれぞれ粒子  $i, j$  の相対座標と相対速度(ともに2次元の場合)である。

③HL<sup>5)</sup> 圧力の Poisson 方程式の Laplacian に対して高次の粒子間相互作用モデルを適用する方法である。

④近藤・越塚の方法<sup>6)</sup> HSと同様、圧力の Poisson 方程式(式(4))の生成項に着目し、新たな定式化(式(6))を行った方法である。

$$\langle \nabla^2 p \rangle_i^{HL} = \alpha \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^* - 2n^k + n^{k-1}}{n^0} + \beta \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^k - n^{k-1}}{n^0} + \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^k - n^0}{n^0} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha, \beta, \gamma$  は係数である。静水状態とダムブレイク流れに対する最適値は、それぞれ 0.96, 0.096, 0.00096 と確認されている。

これらの方法は圧力の擾乱の抑制に大きな効果が確認されているが、射流の減勢および合流が検証の対象とされた事例はないことから、前述の鉛直2次元モデルにおける流れを対象に、最も効果的な方法について比較検討を行う。

### 3. 解析の結果と考察

比較検討の結果、近藤・越塚の方法では抑制効果が非常に強く流れが鈍ること、CMPS および HS では抑制効果が不十分であること、CMPS と HS の併用(CMPS-HS<sup>5)</sup>) が最適であること等が確認された。HLについては未検討である。また、いずれの方法も、標準型 MPS 法では粒子間距離(=粒子径)の0.5倍とされている粒子間の許容接近距離について、調整を行う必要があることが確認された。鉛直2次元モデル化とした合流施設内の特徴的な流れを最も再現していると考えられる解析結果を Fig. 2 に示す。

今後は、3次元解析を行い、長野県の梓川右岸地区の合流

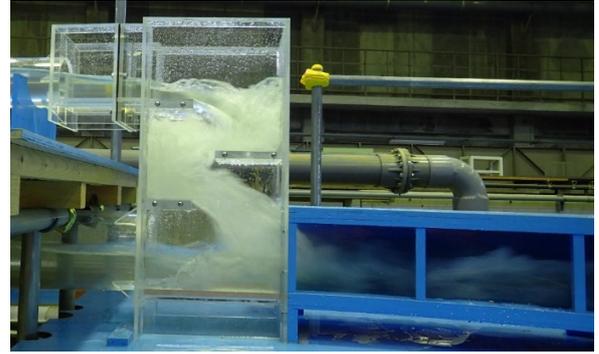


Fig. 1 水理模型実験による合流施設内の流況  
Flow regime in confluent facility by hydraulic model experiment

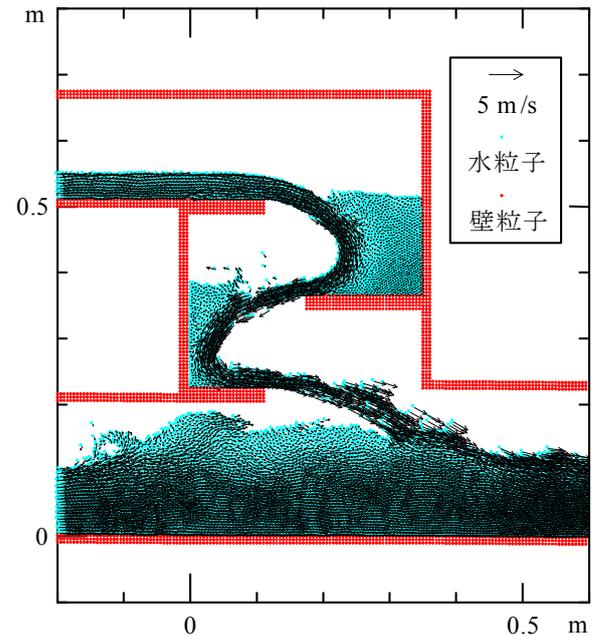


Fig. 2 MPS法による合流施設内の流況  
Flow regime in confluent facility by MPS method

施設についての水理模型実験の結果に対する再現解析を行い、本研究で効果が確認された圧力擾乱の抑制方法の検証を行う。

### 引用文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課(2015): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」, 農業農村工学会, 495-508, 593-624, 688-692.
- 2) 日本下水道協会(2009): 下水道施設計画・設計指針の解説 前編—2009年版一, 日本下水道協会, 196-203, 227-231.
- 3) 浪平篤, 中田達, 中嶋成樹, 重盛玲二, 樽屋啓之(2017): 水路床高の大きく異なる急勾配無圧トンネルの合流施設の水利設計のための実験的検討, 農業農村工学会論文集, 304, II\_7-II\_15.
- 4) 越塚誠一(2005): 粒子法, 丸善.
- 5) 土木学会海岸工学委員会数値波動水槽研究小委員会(2012): 数値波動水槽—砕波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して—, 80-82.
- 6) 近藤雅裕, 越塚誠一(2008): MPS法における不自然な数値振動の抑制, 日本計算工学会論文集, 2008, 20080015.