

メッシュレス法による貯水池内の流れ解析

九州産業大学大学院 学生員○甲斐啓介 九州産業大学 正会員 加納正道
福岡大学 黒木健実 九州産業大学 正会員 赤坂順三

1. はじめに 貯水池における問題として富栄養化や底層水塊の貧酸素化が挙げられるが、これらの問題に対する対策・予測評価のためには、流況および物質拡散を表現し得る数値解析が必要と考えられる。一方、近年の計算機の高性能化に伴い、大規模かつ複雑な数値解析が実現可能となっているが、その反面、解析のためのモデルづくり、すなわち要素分割に多大な時間を要するようになっている。そこで Navier-Stokes 方程式 (N-S 式) にペナルティ法を適用したメッシュレス法 (ML) と呼ばれる要素情報を必要としない解析手法を提案する。格子、及び境界を必要とせず、重み付差分法や有限要素法と比較して、モデルづくりが容易に行える特徴がある。本報では解析対象として A 貯水池をとりあげ、昨年行った、室内水理模型を実験の実測値と他の解析結果とを、ML 数値解析と比較することにより、ペナルティ法を適用した ML 流れ解析手法の収束性と精度を検討する。また、底層における貧酸素化を改善する目的で我々が共同開発した水中型気液溶解装置を導入した場合にこの装置周辺の流れについて数値解析を行い検討した。

2. 貯水池水理模型実験装置概要 A 貯水池を想定した水理模型実験装置の概要を図 1 に示す。

現地の貯水池長さ 2500m, 平均幅員 230m, 平均水深 22m の領域を x, z 方向それぞれ約 3.22m, 0.44m とし、水平縮尺 1/775、鉛直縮尺 1/62、幅員 0.2 m の歪模型である。流入口より流速 0.01m/s で流入させ、旧工事用道路がある場合とない場合の 2 パターンで流れの可視化を行った。流れの可視化については、アルミニウム薄片が浮遊した模型装置を暗室化した実験室内でストロボ照射し、デジタル VTR で流跡を撮影している。

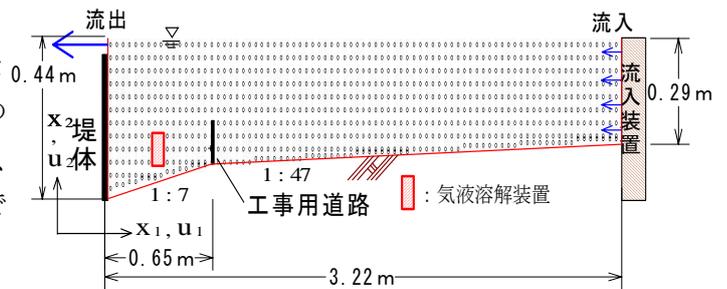


図 1 貯水池水理模型実験装置と解析領域

3. 基礎式 N-S 式を用いて流れを解析する場合、圧力境界条件を与えることが困難なので、この対策の一つとして、圧力条件を除いてペナルティ法 (文献[1]) を適用している。即ち、式(1)に示すように大きな値(10³程度)を持つ係数 λ を圧力項に導入することにより、流れの連続性が近似的に満たされ、式(2)に示すように N-S 式から圧力項が消去される。圧力項が消去できたので、前述のように、定義することが容易ではないところの圧力に関する境界条件を考慮しなくてもよいメリットを実現できる。

$$P = \lambda(u_{1,1} + u_{2,2}) \quad (1) \quad \rho u_j u_{i,j} - \lambda(u_{1,1} + u_{2,2})_j \delta_{ij} - \mu(u_{i,j} + u_{j,i})_j = 0 \quad (2)$$

$$u_1 \cdot u_{1,1} + u_2 \cdot u_{1,2} - \lambda(u_{1,11} + u_{2,21}) - v(u_{1,22} + u_{2,12} + 2u_{1,11}) = 0 \quad (3)$$

$$u_1 \cdot u_{2,1} + u_2 \cdot u_{2,2} - \lambda(u_{1,12} + u_{2,22}) - v(u_{2,11} + u_{1,21} + 2u_{2,22}) = 0 \quad (4)$$

また、時刻(t- Δt)の既知流速 (u_1, u_2) を用いれば、式(3), (4)に示すように時刻(t)の未知流速 (u_1, u_2) が RBF 法(文献[2])に基づくメッシュレス法により解析することができる。具体的には、以下の①~③に示す 3 段階による。即ち、①未知数 (u_1, u_2) を式(5)で表される X_j を用いて方程式(6), (7)として表す。②これらの式(6), (7)を式(3), (4)へ代入することで α_j, β_j に関する連立方程式が得られる。③この連立方程式を解いて求めた α_j, β_j を式(3), (4)に与えれば未知数 (u_1, u_2) が計算できるものである。ここに、c は RBF 法の定数、r は 2 点 i, j 間の距離を示す。

$$X_j = (r^2 + c^2)^{-1/2} \quad (5)$$

$$u_1 = \alpha_j X_j = \alpha_j / (r^2 + c^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$u_2 = \beta_j X_j = \beta_j / (r^2 + c^2)^{1/2} \quad (7)$$

4. 実験結果

模型実験装置に一定の流量で水を流入させた場合、図2・図3の両方で流入口付近では穏やかな流れがみられたが、流出口付近では上層にのみ速い流速が観測され、堤体に近い低層部より流れが小さくなった。また図3の工事用道路付近で上に向かう流れが観測でき、堤体から工事用道路の間では回転流が確認できた。

5. ML解析の結果

図4では、流入口から一定の距離までは緩やかな流れを示していますが、底面勾配が変化した辺りから小さな流れになっている。

また図5では、工事用道路の上部では流速が速くなっており、工事用道路を越えた後、中層から低層に潜り込むような動きを見せ、流出口に向けて流速が速くなっている。

6. 模型実験とML解析との比較

工事用道路を設置した場合と、設置しなかった場合の両方で模型実験とML法による解析の結果を比較しましたが、流入出口の周辺や工事用道路付近などでは実験で得られた流れと解析の結果が酷似している。

7. 気液溶解装置周辺

図6の水中型気液溶解装置周辺の流れ解析では、水平方向に低流速で吸引—吐出するので、本装置から離れれば循環流速は小さく、また底層の巻上げがない。但し、水平方向の十分な流速は確認される。即ち、本装置は吐出流による巻上げや上下循環流の発生は起きず高DO水を供給できることが推定される。

8. まとめ

本報では同一の対象領域に工事用道路の有無による二種類のケースを実験・解析する事ができ、全体的な流跡と低流速でのスムーズかつ合理的な流れが表現でき、ペナルティ法を盛り込んだML法の有用性が示す事ができた。気液溶解装置周辺の解析では吐出流による巻上げや循環流の発生は起こらないことを確認した。本研究の結果は今後の貯水池における水質改善の解析に役立つと考える。

参考文献

- [1] Kanoh, M., Nakamura, N. and Kuroki T., Boundary element method for the analysis of flow and concentration in a water reservoir, *Proc. of the 28th World Conf. on Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods*, ed. C.A. Brebbia, WIT PRESS, Skiathos, Greece, pp. 231-240, 2006.
- [2] Divo E., Kassab A., and Zahab El., Parallel domain decomposition meshless modeling of dilute convection-diffusion of species, *Proc. of 27th World Conf. on Boundary Elements and Other Mesh Reduction Method*, ed. C.A. Brebbia, WIT PRESS, Florida, USA, pp. 79-89, 2005.

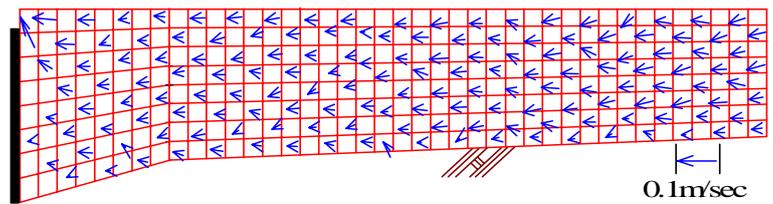


図2 模型実験装置による流れ (工事用道路なし)

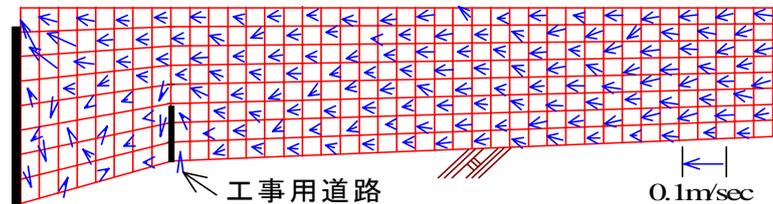


図3 模型実験装置による流れ (工事用道路あり)

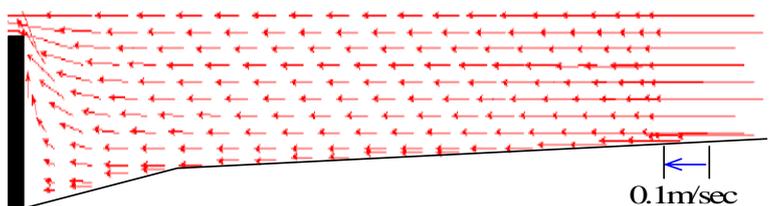


図4 ML解析による流れ (工事用道路なし)

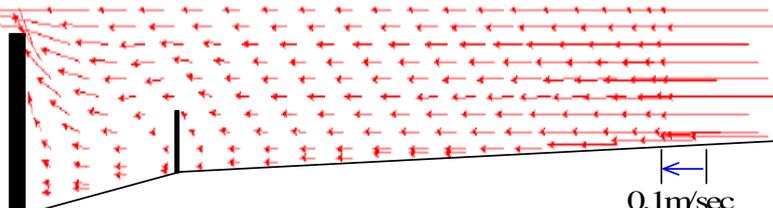


図5 ML解析による流れ (工事用道路あり)

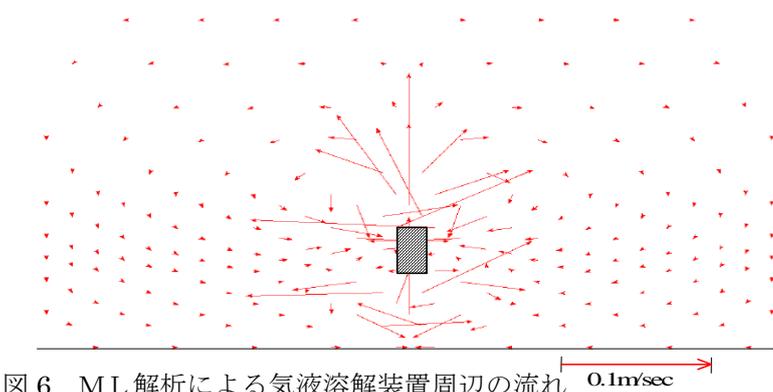


図6 ML解析による気液溶解装置周辺の流れ