

湾曲部流れへのFEMマルチレベルモデルの適用

Application of a 3D FEM multi-level model to flow analysis in the curved region

張 敏燕¹⁾、川崎 俊太²⁾、上原 七司³⁾

MinyYan ZHANG, Syunta KAWASAKI, Shichishi UEHARA

A 3D multi-level model using the finite element method has been developed in this study. For investigating the effectiveness of this model, the analysis was carried out using an example of the Rozovskii hydraulic model with a curved channel and those results were compared to the experimental data. It is showed that the results on cross sections are agreed with the experimental data. And a simulation of arranging vane work into the hydraulic model mentioned previously was made. The results show that a vectorial distribution of velocity is similar to experimental one. As a result, practical usefulness of this model for simulation of flow in the curved region was certified.

Keywords: FEM, 3D multi-level model, Rozovskii model, curved region.

1. はじめに

河川・海岸分野において環境問題の解決のためには、自然現象と人工構造物の相互作用に関し詳細なる調査・検討が必要とされる。従来の技術では、この相互作用に関し、実用上1D・2Dモデルで対応してきたが、一般構造物のより細かな作用や効果を把握するためには、不明確な点が多く、経験にたよる部分が多く存在することが実態である。したがって、今後環境問題をより詳細に評価する⁽¹⁾ためには、3Dモデルの開発が不可欠であると考え⁽²⁾、⁽³⁾。

これまでに、著者らは自然の河川の流況をできる限り正確に再現したいと考え、いろいろな3次元流体力学解析モデルの開発を行なった。例えば、流れの橋脚への影響を調べるため、流れ場に置かれた直立円柱のモデルを用いて、円柱まわりの流況をN-S方程式を直接解く方法で検討した⁽⁴⁾。また、FEMマルチレベルモデルによりシミュレートするため、実河川に洪水流が流下する時の状況も解析した⁽⁵⁾。

さて、現在、任意の河道形状に対する流れや河床形状の制御の目的で開発され、通常使用されている数値解析モデルは、多くは準3次元モデルである。これらのモデルの特徴としては、測量や観測を含めた全体システムの精度がそれほど高くないことを踏まえ、1) ほぼ流れの方向をひとつの軸として直交曲線座標を用いる、2) 縦(Z)方向に特別な流速分布モデルを仮定している^{(6) - (8)}、等の仮定により、計算を単純化し、実用上満足できるとしている。

1) 正会員 工博、日本建設コンサルタンツ株式会社

(〒141 東京都品川区東五反田5-2-4)

2) 正会員 工修、日本建設コンサルタンツ株式会社

2) 正会員 工博、日本建設コンサルタンツ株式会社

今回用いるFEMマルチレベルモデルの場合、上記の1)、2)に対して、(i) 特別な座標変換を必要とせず、一般座標系において流れが求まることと、(ii) 鉛直成分(W成分)の分布を仮定せず、構造物周辺の流れの特性がより一般的に求まること、において改善がなされている。

本研究では、湾曲部の流れを例に、本モデルを適用し検討した結果、3次元流れの再現において優れた手法であることが判ったので報告する。また、ペーン工を模した(ペーン工と仮称する)施設を想定したケースを応用例として、計算を試みた。

2. 解析方法

マルチレベルモデルは、図1に示すように、3D流体モデルを深さ方向に層区分した複数の層(レベル)内で鉛直積分し、各層内の平均量に関する流体の基礎方程式系を構成するものである。一般に、N層に層区分した際の第i層内の各状態量に関する方程式を以下に表わす。

連続式：

$$\rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial q_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{yi}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

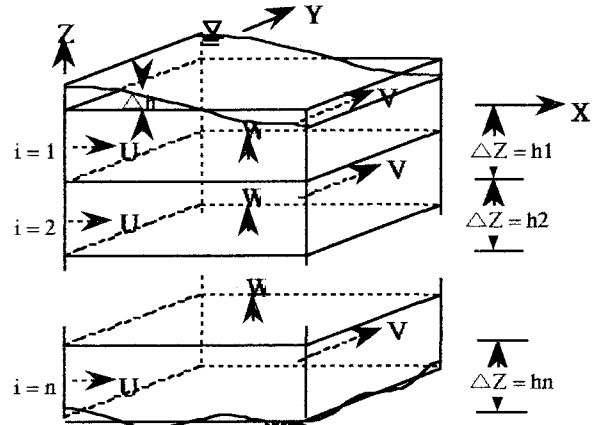


図1 マルチレベル流動モデル

X方向の運動式：

$$\frac{\partial q_{xi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_{xi}^2}{\rho_i \Delta h_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_{xi} q_{yi}}{\rho_i \Delta h_i} \right) = -\rho_i g \Delta h_i \frac{\partial h_i}{\partial x} + v_H \frac{\partial^2 q_{xi}}{\partial x^2} + v_H \frac{\partial^2 q_{xi}}{\partial y^2} + \rho_i \tau_x^{i-1, i} - \rho_i \tau_x^{i, i+1} + u_i \left(\frac{\partial q_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{yi}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Y方向の運動式：

$$\frac{\partial q_{yi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_{xi} q_{yi}}{\rho_i \Delta h_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_{yi}^2}{\rho_i \Delta h_i} \right) = -\rho_i g \Delta h_i \frac{\partial h_i}{\partial y} + v_H \frac{\partial^2 q_{yi}}{\partial x^2} + v_H \frac{\partial^2 q_{yi}}{\partial y^2} + \rho_i \tau_y^{i-1, i} - \rho_i \tau_y^{i, i+1} + v_i \left(\frac{\partial q_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{yi}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

連続式から、Z方向の流速：

$$\rho_i w_i = - \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial q_{xj}}{\partial x} + \frac{\partial q_{yj}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

ここで、 q_x, q_y は単位幅当たりの流量(M^2/Sec)、 h_i は表面層水位(M)、 Δh_i は層の間隔、 v_H は渦動粘性係数、 ρ は水の密度(M^3/Sec)、 τ_x, τ_y はせん断応力、 u, v, w はX方向、Y方向、Z方向の流速(M/Sec)である。

式(2)及び(3)では、せん断応力 τ_x, τ_y が存在するので、以下に底面でのせん断応力と層間のせん断応力はそれぞれ表われる。

$$\text{底面でのせん断応力：} \quad \frac{1}{\rho} \tau_x = \gamma_b^2 u_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}$$

$$\frac{1}{\rho} \tau_y = \gamma_b^2 v_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2} \quad (5)$$

$$(6) \quad \frac{1}{\rho} \frac{d^2 u}{dy^2} = \gamma_b^2 (v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}$$

ここで、 γ_b 、 γ_i^2 はそれぞれ底面摩擦係数と層間摩擦係数である。

式(1)-(3)を重み残差法を用いて有限要素法により離散化を行なう。水位と各層の流量をRunge-Kutta-Gill法で時間積分を行なって求める。

3. 実験結果との比較

上述したマルチレベルモデルの適用性を検討するため、矩形断面の湾曲水路の計算例として、図2に示すにRozovskii 実験水路の実験結果⁽⁹⁾との比較を行う。Rozovskii 実験水路の実験条件を表1に示す。

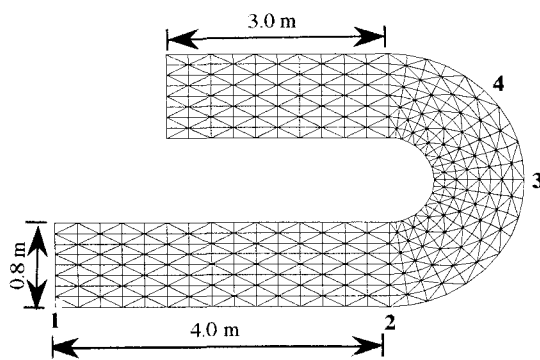


図2 Rozovskii 実験モデル

表1 Rozovskii の実験条件

流量 (m /sec)		12.3
水路勾配		水平
水路幅 (m)		0.8
湾曲部の 曲率半径 (m)	内岸	0.4
	中央	0.8
	外岸	1.8
断面形状		矩形
下流端水深 (m)		0.053

計算条件としては、メッシュの分割は、流下方向に0.2mずつ分割、横断方向に0.1mずつ分割、深さ方向に4分割、平面は三角形、全体は三角柱とした。初期条件は実験条件と同じく与え、境界条件は内側と外側はスリップ、出口側は固定水位とした。時間刻み幅は0.1Sec、時間ステップは500を設定した。

図3は流下方向流速及び横断方向流速の断面内分布の実験結果と計算結果との比較を示したものである。同図より、流下方向流速 u 及び横断方向流速 v の断面内分布をみると、横断方向流速 v は実験結果と計算結果に若干の差が見られるが、計算結果は、実験結果の特徴をよく表わしている。図4に、表面層と底面層の平面流速分布を示す。表面層では、湾曲部の出口で内岸側の流速が速くなり、流速が外岸側に向いているが、底面層では、流速が内岸側に向いていることなど、実験結果をよく表わしていることがわかる。以上より、本研究のマルチレベルモデルによって三次元流れを十分精度よく表現することが可能であることがわかる。

4. 応用例

上述したマルチレベルモデルの適用性を評価した上で、上記の湾曲水路の湾曲部外側にバーン工を設置した応用例の計算を行ってみた。

バーン工の機能としては、図6に示すように、水面近傍での大きな運動量を持った流れがバーン工の内岸側に集まるので、最大流速はバーン工の内岸側で発生し、その結果外岸近傍での流速は低減することである⁽¹⁰⁾。そのシミュレーションを行なうため、計算条件としては、メッシュの分割は、流下方向に0.05mずつ分割、横断方向に0.02mずつ分割、深さ方向に4分割、平面は三角形、全体は三角柱とした。また、湾曲部入口から90°曲がる範囲で外岸側に向き11個、高さは深さの1/4であるバーン工を設置した(図6)。初期条件は表1に示した実験条件と同じく与え、境界条件には、内側と外側及びバーン工の周辺はスリップ、出口側は固定水位とした。時間刻み幅は0.01Sec、時間ステップは3,000を設定した。

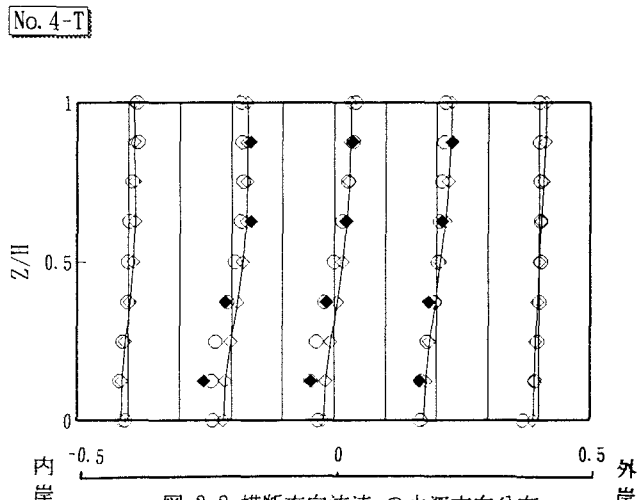
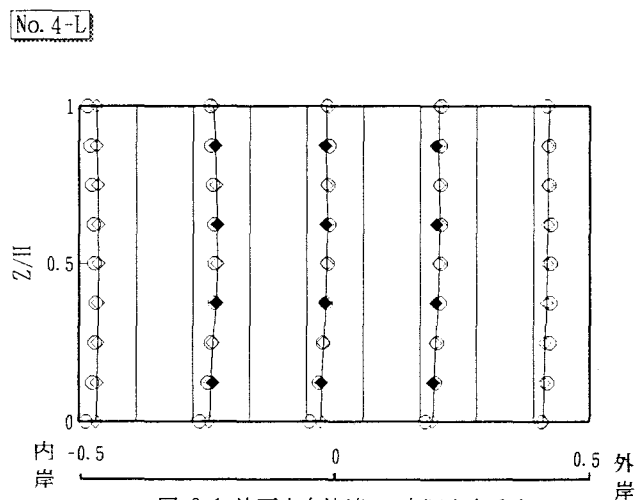
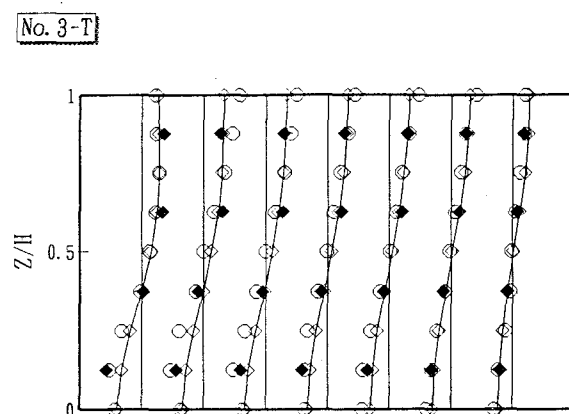
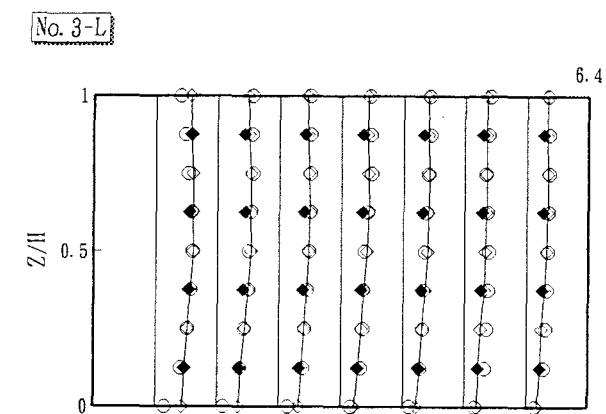
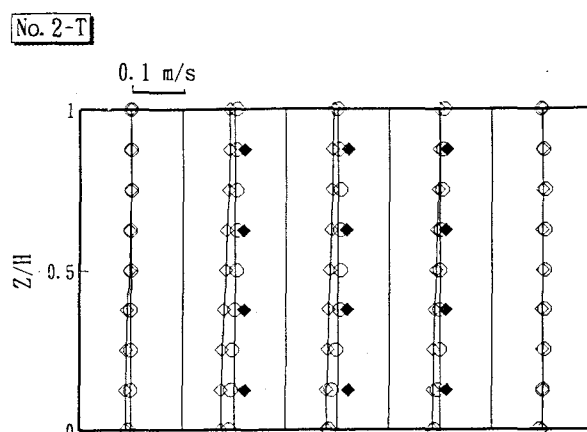
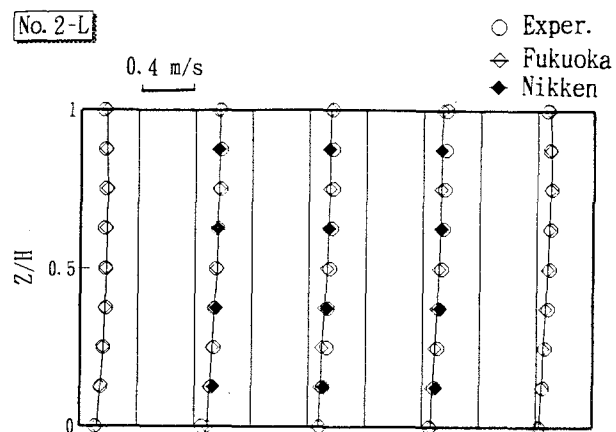


図 3-1 流下方向流速uの水深方向分布

図 3-2 横断方向流速vの水深方向分布

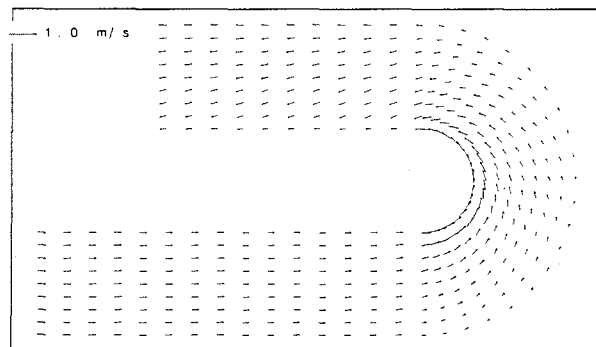
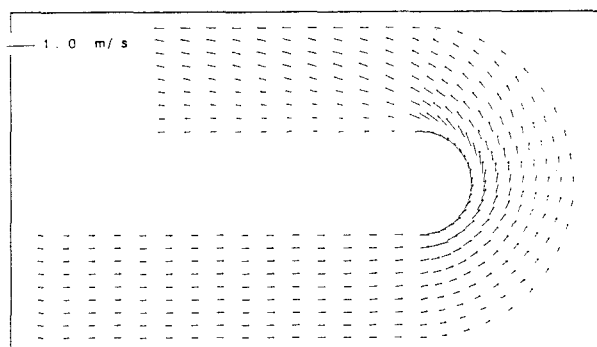


図 4-1 表面層での平面流速分布

図 4-2 底面層での平面流速分布

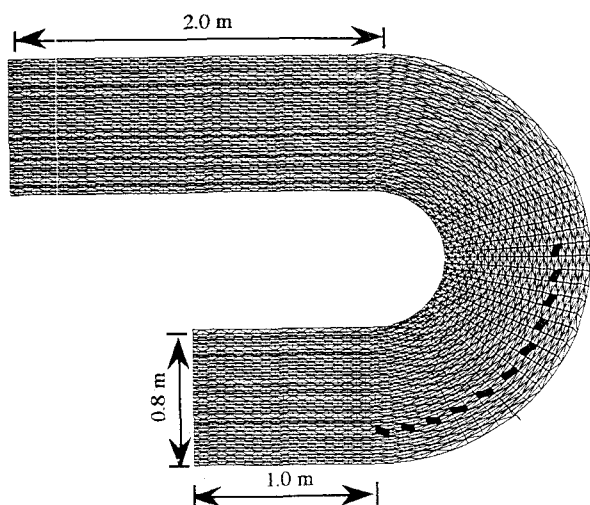
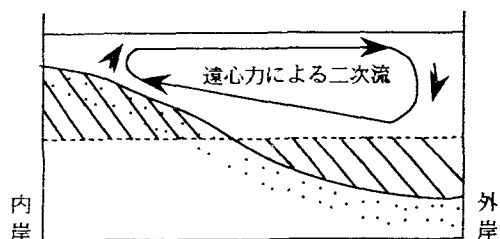
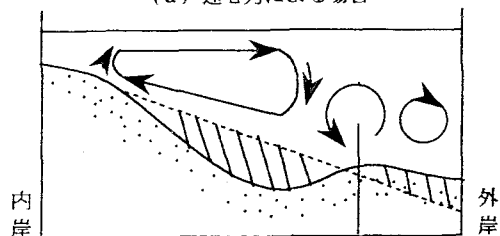


図 5 ベーン工を模したモデル



(a) 遠心力による場合



(b) ベーン工がある場合

図 6 横断河床形状の変化

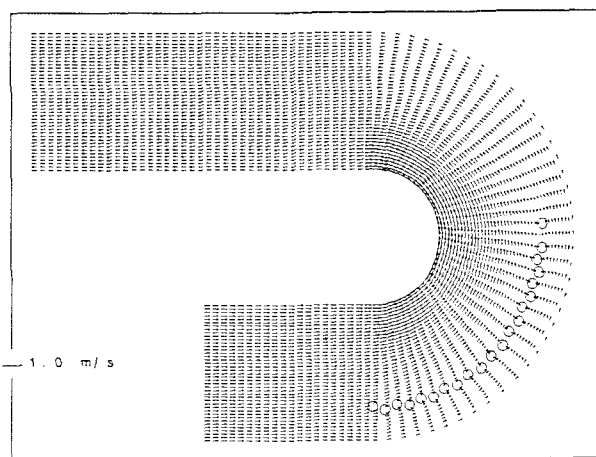


図 7 ベーン工を設置した場合の平面流速分布

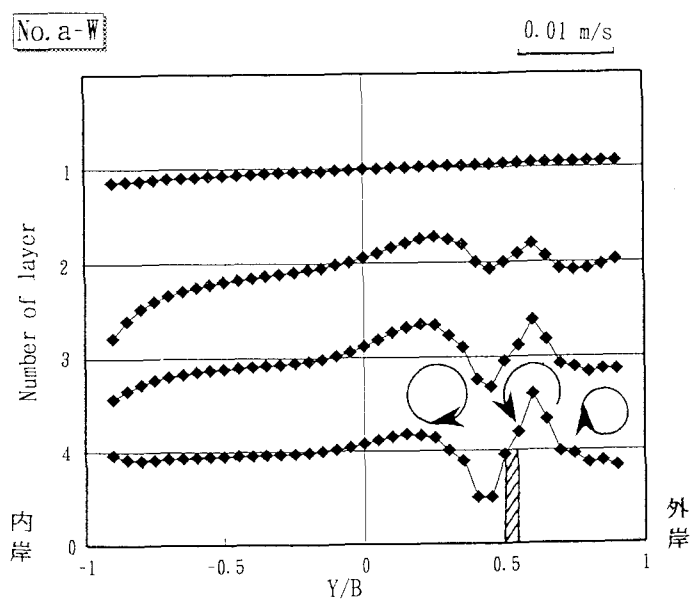


図 8 ベーン工を設置した場合の鉛直方向流速分布

図7に、底面層でベーン工を設置した流速の平面分布を示す。同図より、ベーン工の外岸側の流速が内岸側の流速より速くなることが見られる。図8に、湾曲部のAとB断面での横断面内鉛直方向の流速分布を示す。この結果は、図6-1bに示すように、ベーン工を設置している付近を中心として二次流の発生とこの逆向きの二次流の発生が認められる。

4. 結論

本研究では、FEMによるマルチレベルモデルを用いて3D流体解析コードを開発し、湾曲部の水路を計算例として解析を行ない、計算結果と実験結果との比較を検討し、モデルの適用性を評価した。また、応用例として、湾曲部でベーン工を設置した場合の計算を行なった。以下に結論を述べる。

(1) 本研究のマルチレベルモデルの計算結果はRozovskiiの実験結果を例とした場合、両者は比較的良好に一致しており、本研究は、湾曲部の三次元流れを十分表現することができる。

(2) 湾曲部でのベーン工を設置する場合の計算結果は、図6-1bに示されるような鉛直方向の流速分布の変化が表現できることがわかる。

今後、自動メッシュ分割が可能なメッシュの再設立モデルを開発し、実河川や実海岸の流況解析に役立てたい。

参考文献

- (1) 松梨順三郎、環境流体汚染、森北出版社、PP.165-284, 1993.
- (2) B. H. Johnson, et al: ASCE J. of Hydraulic Eng. Vol.119, No.1, PP.2-20, 1993.
- (3) J. J. Connor, et al: 流体解析への有限要素法の応用、サイエンス社、PP.193-209, 1988.
- (4) 奥田洋司、ほか3名：日本機械学会第6回計算力学講演会講演論文集、Vol.930-71, PP.314-315, 1993.
- (5) 張敏燕、ほか2名：第22回関東支部技術研究発表会講演概要集、PP.122-123, 1995.
- (6) Y-C Jin, et al: ASCE J. of Hydraulic Eng. Vol.119, No.1, PP.109-124, 1993.
- (7) K-C Yeh, et al: ASCE J. of Hydraulic Eng. Vol.119, No.7, PP.796-815, 1993.
- (8) 富所五郎、ほか2名：水理講演会論文集、Vol.26, PP.727-732, 1985.
- (9) 宇多高明、ほか3名：土木技術資料、Vol.37, No.1, PP.70-75, 1995.
- (10) 福岡捷二、ほか2名：水工学論文集、Vol.34, No.2, PP.337-342, 1990.