

神戸大学工学部市民工学科 学生員 ○吉田達也
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 中山昭彦

1. 緒言

河川流の数値解析は一般的に一次元不等流解析や二次元解析が主とされてきた。しかし、水面変動の考慮やそれによって発生するセルを確認することなどの課題を解消すべく、より複雑な三次元解析が必要となった。本研究では、矩形開水路乱流計算によって、水面変動を考慮した乱流シミュレーションであるLES(Large Eddy Simulation)の流況の再現を行い、既往の研究結果¹⁾とRANS法²⁾と比較検証を行う。

2. 計算手法

計算手法は猪熊・中山¹⁾の手法に準じ、基礎式は空間平均した非圧縮流の連続式とN-S式を用いる。SGS応力項に標準 smagorinsky モデルを適用する。変数配置はコロケート、座標系は境界適合シグマ座標を用いる。自由水面の鉛直位置を h 、自由水面における単位法線ベクトルを n 、直交する単位接線ベクトルを s 、 t (s が主流方向、 t が横断方向)とする。デカルト座標系における応力テンソルを T とすると、自由水面での垂直応力 τ_n 、およびせん断応力 τ_s 、 τ_t は式(1)(2)(3)のようになる。

$$\tau_n = n^T T n, \quad \tau_s = s^T T n, \quad \tau_t = t^T T n \quad (1), (2), (3)$$

気相側で接線方向の応力が 0、法線方向の応力は表面張力と釣り合うとして、3 式を連立することによって流速と圧力を解く。水面位置 h は前述の方法で得られた流速を式(4)に代入することによって求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = u_2 - u_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} - u_3 \frac{\partial h}{\partial x_3} \quad (4)$$

流入部には毎ステップで直線部下流の断面の流速分布を用いることで乱れを発達させる。流出は自由流出であり、底面での境界条件は No-slip 条件である。

水路床勾配は、図 1 の様にグリッド全体に角度 θ_1 の勾配があり、主流方向一般座標 ξ_1 とデカルト座標 x_1 との角度を θ_2 として N-S 式の重力項に次式で与える。ただし、本研究は直線開水路であるため、 $\theta_2=0$ としている。

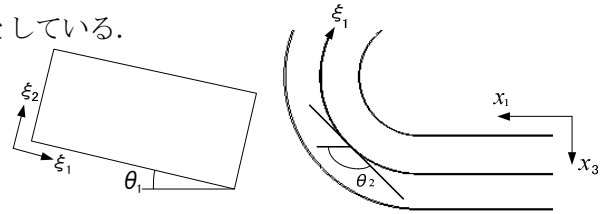


図-1 湾曲部の格子とグリッド全体の勾配

$$g_1 = g \sin\theta_1 \cos\theta_2 \quad (5)$$

$$g_2 = -g \cos\theta_1 \quad (6)$$

$$g_3 = g \sin\theta_1 \sin\theta_2 \quad (7)$$

流入部には毎ステップで直線部下流の断面の流速分布を用いることで乱れを発達させる。底面での境界条件は No-slip 条件である。

3. 計算条件

a) 本研究の計算領域

計算領域は、(主流方向長さ、鉛直方向長さ、奥行き方向長さ)=(8,1,2)とし、計算格子数は(主流方向、鉛直方向、奥行き方向)=(200,72,80)である。格子刻みは不等間隔で逆正接関数を用いている。勾配は 1/1000、 $Re=4.0 \times 10^3$ である。

b) 林らの計算条件

林ら²⁾の研究は DNS 法を用いており、計算領域は(主流方向長さ、鉛直方向長さ、奥行き方向長さ)=(8h,h,2h)とし、計算格子数は(主流方向、鉛直方向、奥行き方向)=(128,97,97)である。また、境界条件には、底面と側面において流速にノンスリップ条件、自由水面では u 、 w にスリップ条件を与え、圧力はすべての境界でノイマン条件を与え、主流方向については周期境界条件を採用している。

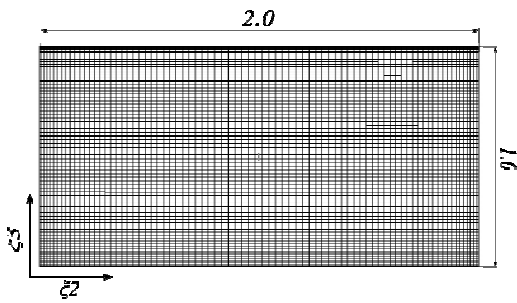


図2 断面アスペクト比2の計算格子

b)林ら²⁾の計算結果

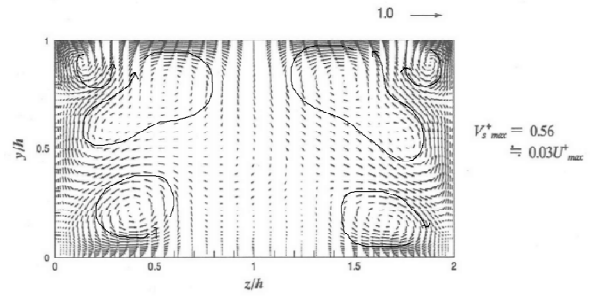
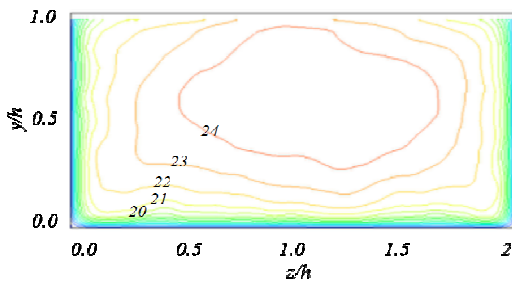


図-4 二次流ベクトル図

4. 計算結果

a)本計算結果



b)林ら²⁾の計算結果

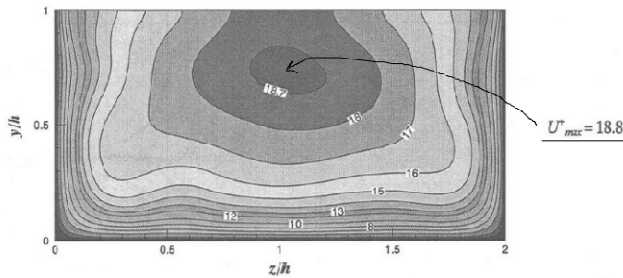


図-3 主流速 U^+ のコンター分布図

図-3 では、最大流速は $U_{max}=2.53(z=0.64, y=0.98)$ であった。また、最大流速点が水面下に下がる velocity-dip 現象は、比較対象同様捉えた。しかし、比較対象では見られる、最大流速点から底面隅角部に向け尖った形を示し、また、 $y=0.5, 1.5$ 付近では凹型となっている点は本計算結果では示すことができなかった。また、流速に差が見られ、本結果の方が大きくなった。

a)本計算結果

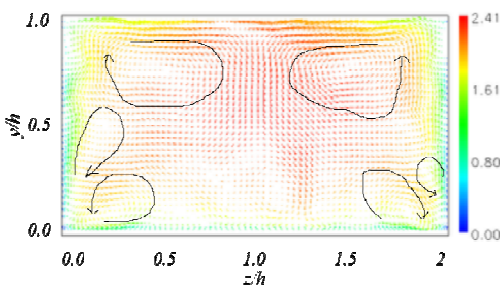


図-4 は二次流ベクトルを示し、比較対象では、3つの特徴的なセルが確認できる。1つ目は底面付近、半水深規模スケールの二次流セルである。2つ目は側壁から水面へ斜めに横長のピーナツ型で、半水深～水深程度のスケールを有するセル。3つ目は水面付近に約 1/4 水深以下スケールで小さく、かつ他セルと同程度の流速を有するセルである。底面隅各部では 1/4 水深スケールのセルが左右対称に2つずつ確認できる。また、水面隅各部では、半水深スケールのセルが確認でき、左右対称に存在している。しかし、約 1/4 水深以下の小さいセルは確認できなかった。

5. 結論

水面変動を考慮した LES 法を用いて矩形開水路乱流計算をし、河川の防災を検討する際に重要な要素となる水面変動を再現できたが、既往の研究結果と比較して、近い形にはなりつつあるものの、本 LES 法が矩形開水路乱流構造の解析に有効であることが示せたとまでは言えない結果であり、改善の余地があると考えられる。

参考文献

- 1) 猪熊祐司, 三村豪, 中山昭彦: LES による湾曲水路流れの2次流と水面変動の再現, 応用力学論文集 Vol.13, pp753-760, 2010.
- 2) 林俊一郎, 大本照憲, 本田逸郎: DNS 解析による矩形断面開水路乱流の組織構造に関する考察, Vol.6, pp.827-838, 2003.