13 SGSモデルによる直角合流部流れの数値シミュレーション

岐阜大学 河村 三郎 大連理工大学 程 亮[○]
岐阜大学 藤田 一郎 中谷 剛

Numerical Simulation of the Flow at a Right-Angled Confluence by SGS Model

Saburo Komura^{*}, Cheng Liang^{**}, Ichiro Fujita^{***} and Tsuyoshi Nakatani^{*}

A cell averaged large-eddy simulation model is used to calculate the confluence flow with vertical intersection in the channel. The finite difference scheme used in the simulation is that of fractional volume of fluid (VOF) method. A simple SGS turbulence model is used and large scale eddies are computed directly.

The computational results for discharge ratio of branch channel to main channel $Q_r=0.6$ with the same kind of channel width ratio $Br=2/3$ at Reynold's number $Re=90000$ are presented and compared with experimental results. The velocity field, recirculating region and the large scale structures of the confluence flow are well simulated.

1. まえがき

合流部における流れの構造の解析は、基本的にも実用的にも非常に重要であり、これまで実験的、解析的、そして数値解析的な研究がいくつか行われてきている。ただし、数値解析による研究は、合流部の流れが非常に複雑なためにこれまであまり行われていない。開水路における合流部の三次元解析を最初に行ったのは Tamai と Ueda (1987) である。その解析は一般座標系における方程式と $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用い、Patankar と Spalding の SIMPLE アルゴリズムによって計算されている。その結果、循環領域の発生しない合流角 30° における一対のらせん流的な二次流が得られている。最近、標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた一般座標系の三次元方程式と二次元の水深平均方程式による解析が Weerakoon (1990) によって行われ、実験水路と実河川におけるデータとの良好な一致が得られている。ただし、合流点下流の循環領域の大きさは、実際よりも小さく計算されている。この傾向は二次元の直角合流部の $k-\varepsilon$ モデルによる著者らのシミュレーション (1991) によっても得られている。小さな循環領域が得られる理由は、Rodi ら (1986) が指摘しているように標準 $k-\varepsilon$ モデルにおける ε 方程式のモデル化に問題があるためである。したがって、合流部の流れに関しては、まだ十分な解析が行われていないのが現状と考えられる。

本研究では、二次元直角合流部における大規模渦の発生とその発達過程を流量比 $Q_r=0.6$, $Re=9 \times 10^4$ の流れについて検討した。開水路における実験値との比較は良好であった。

^{*} Faculty of Engineering, ^{***} College of Technology, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu, 501-11, Japan, ^{**} Dalian University of Technology, P. R. China.

2. 計算モデルと解法手順

計算モデルは、次のセル平均のナビアーストックス方程式にもとづいている。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij}) \quad (2)$$

ここに、 p と u_i は圧力と流速、 τ_{ij} は subgridスケールの乱流せん断応力、 ρ は密度、 ν は動粘性係数。

本研究では、Smagorinsky の subgridスケールの乱流モデル (SGSモデル) を二次元の計算に適用した。gridの間隔は十分に小さくはないが、再循環流域の計算結果は比較的大きな渦運動に対するこの手法の適用性が良好であることを示している。このSGSモデルは次の方程式によって表わされる。

$$\tau_{ij} = -\nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right| \quad (4)$$

ここに、 C_s はモデル定数、 Δ は各格子間の平均間隔。

本研究では、C.W.Hirtらによって提案されたVOF法を用いた。移流項の差分スキームにはドナーセルと中央差分近似を組み合わせたものを用いた。圧力場は速度と圧力を同時に調整した。

計算領域は長方形のスタaggerド格子に分割し、固定壁で密なメッシュとなるように x , y 方向で格子間隔を変化させた。固定壁では、no-slipの境界条件、流出境界では Φ を変数として $\partial \Phi / \partial x = 0$ を用いた。

3. 計算結果

流路幅比 (支流幅 / 主流幅) = 2 / 3, 流量比 (支流流量 / 全流量) = 0.6 の合流流れを $Re = 9 \times 10^4$ のケースについて計算した。初期にはポテンシャル流を与え、流入条件はある時間ステップ内に実測の流入流速分布となるように徐々に変化させた。その後、粘性作用を考慮し、非定常な流れの計算を行った。

Fig.1には、無次元時間で0.115から19.115までの2周期の間の19の瞬間的流速ベクトルを示す。Fig.1は渦の発生、発達、合体、放出などの過程を良く表わしている。この過程は同一のレイノルズ数における開水路での実験 (Fujita, 1990) で観測されたものとはほぼ同様のものではあった。その過程は、おおよそ次のように表わされる。まず、合流点の下流側の隅で微小な渦が形成される。この渦は上流から連続的に供給される小さな渦を吸収しながら発達し、流下する。この渦が流下するとその後を補うように別の渦が形成され、徐々に下流に移動する。ある時間が経過すると (およそ $t = 7.115$ で) 十分に発達した再循環

Fig.1 Velocity distributions at $Re=90000$

Fig.2 Mean velocity distribution (calculation)

Fig.3 Mean velocity distribution (experiment)

Fig.4 Comparison of zero-velocity lines

領域が形成されるが、その場合、基本的に3つの同一方向の回転の渦と逆回転するいくつかの渦がこの領域に含まれている。最下流の渦は、上流側の渦からの運動量を吸収して流下方向に伸び、次に横断方向に発達し、それから不安定になって下流に放出される。これで渦放出の1サイクルが終了し、このサイクルは連続的に繰り返される。

Fig.2は2サイクル間の平均流速ベクトル、Fig.3は対応する実験結果を示す。ゼロ流速線の比較をFig.4に示す。流れの構造はマクロ的には同一だが、再循環領域内では多少異なっている。すなわち、実験では大きな一つの渦が見られるのに対し、計算では二つの回転方向の異なる渦が現れている。これは、実験が開水路で行われており、流れの三次元構造と水面の影響が二次元計算では計算されていないためと考えられる。

5. あとがき

S G Sモデルによって、渦領域を含めた合流部の流れを良好にシミュレートすることができたが、今後は三次元性や水面の影響を取り入れて解析を進めていく考えである。

参考文献

1. 玉井・上田, 水理講演会論文集, Vol.31, 1987.
2. Weerakoon, S.B., Ph.D. Thesis, Tokyo University, 1990.
3. Cheng Liang, et al., 土木学会第46回年次学術講演会講演概要, 1991.
4. Rodi, W. and Scheuerer, G., Transactions of the ASME, Vol.108, 1986.
5. 藤田・河村, 水工学論文集, Vol.34, 1990.