

第Ⅱ部門

移動境界適合シグマ座標を用いた自由水面流の数値解析

神戸大学工学部建設学科 学生員 ○三村 豪

神戸大学大学院工学研究科 正会員 中山 昭彦

1. 諸言

自由水面流の計算に関して様々な手法が研究されているが、境界適合座標系を用いた手法は Hodges and Street¹⁾により研究されたが、それ以来ほとんど発展していない。理由の一つとして砕波や飛沫などの複雑な動きを含む解析に適さないということが挙げられるが、河川などへの適用ではそのような動きは無視できる。また、境界適合座標系では自由表面を厳密に定義し、常に自由表面近傍で格子を密にすることができる。そこで、本研究では河川への適用を目指し、砕波などの動きを含まない自由水面を有する乱流を対象とした境界適合シグマ座標系を用いた解析手法を提案する。さらに、波状底面開水路へ適用することで流れの乱流構造、自由水面を評価し、本手法の有効性を検証する。

2. 数値解析手法

本研究では、Hodges and Street の手法を基に、境界適合座標を用いた LES 計算法を構築する。基礎方程式は、非圧縮性流体の空間フィルタを施した質量保存式である連続の式と Navier-Stokes の運動方程式である。乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルを用い、変数の格子配置にはコロケート配置、座標系には鉛直方向に直線の座標軸を持つシグマ座標系を用いている。

自由水面の位置はその高さについて計算する。解析対象とする流体は等温とし、気相側では運動量なしとして、自由水面でのせん断応力をゼロ、気相側の圧力をゼロで一定とする。自由水面の移動に伴って計算格子の生成が必要であるが、シグマ座標用い、鉛直方向のみ変動させることにする。本手法では、あらかじめ水深に対して格子に割り振る比率を決めておき、時間ステップ毎にその比率を乗算するだけで格子を生成でき、計算効率が良い。

3. 適用例

本研究の提案手法を波状底面開水路へ適用する。初期の平均水深 $H=1.0$ 、平均流速 $U=1.0$ 、 $T=H/U$ とし、計算領域は(主流方向長さ,[初期]水深長さ,幅)=($3.0H, 1.0H, 1.6H$)、格子数は(主流方向 x , 鉛直方向 y , 奥行方向 z)=($150, 72, 80$)、時間刻みは $0.005T$ である。境界条件として、主流方向、横断方向は周期境界、底面は粘着条件を課す。図-1 のように計算格子全体に $\theta = 0.00$ の勾配があり、重力加速度を $g = 9.8$ とする。底面の位置は $y = 0.05 \cos(2\pi x)$ で表される。無次元化パラメータは次式のように設定した。

$$\text{レイノルズ数 } Re = UH / \nu = 6760$$

$$\text{フルード数 } Fr = U / \sqrt{(g \cos \theta) H} = 0.319$$

$$\text{ウェーバー数 } We = \rho U^2 H / \sigma = 13736$$

ただし、 ρ は密度、 ν は動粘性係数、 σ は表面張力係数である。

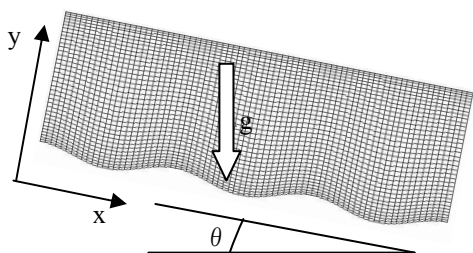


図-1 計算格子

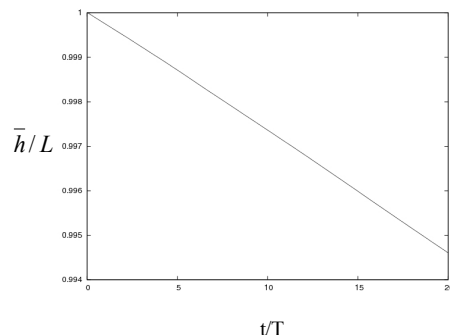


図-2 平均水深の時間変化

3. 結果

まず、図-2 に平均水深の時間変化を示す。時間進行とともに平均水深が減少し、体積が減少しているが、 $t=20.0T$ で 0.54%の減少であり、計算結果の検証にはあまり影響はないと考えられる。

図-3 に $t=16.8T$ における水深、流速ベクトルを示す。底面での乱れの様子がわかる。

図-4 に平均水深に対する変化率の RMS 値を示す。時間 $t=14.0T$ から RMS 値は 0.005 あたりを振動している。これにより、波状底面開水路の特有の流れになったと考えられる。

図-5 に $t=16.0T$ から $t=20.0T$ までの奥行方向、時間に関して平均した水深の主流方向の値を示す。波状底面と同様に大きな 3 つの山が見られるが、周期境界付近で完全にはまだ山の形状が不十分であると考えられる。

4. まとめ

適用例において、計算時間が不十分であり、流れの特性を十分に評価することはできなかった。しかし、乱流、自由水面ともに得られた結果に問題はなく、さらに計算時間を長くし結果を再検討するべきである。

連続の式を満たすことにより平均水深は常に 1.0 となると考えられるが、厳密にはそれを満たさなかった。水深の減少率が重力加速度、時間ステップにほぼ比例することはわかっているが、明確な原因は分からないため、今後さらに異なる条件での解析をして検証することにより、原因を解明しなければならない。

また、水深の値が振動していた。さて、高さ関数法は次式のように表される。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = \bar{v} - \bar{u} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} - \bar{w} \frac{\partial \bar{h}}{\partial z} \quad (1)$$

(u : 主流方向速度、 v : 鉛直方向速度、
 w : 奥行方向速度、 h : 水深)

本手法は、LES により空間平均された式に対して乱流モデルを用いることにより解析しているため、高さ関数法の式も空間平均したものとされるが、この式にはモデルはない。そのため、適切なモデルを開発する必要がある。

参考文献

- 1) Ben R. Hodges and Robert L. Street: On Simulation of Turbulent Nonlinear Free-Surface Flows, Journal of Computational Physics 151,425-457(1999)

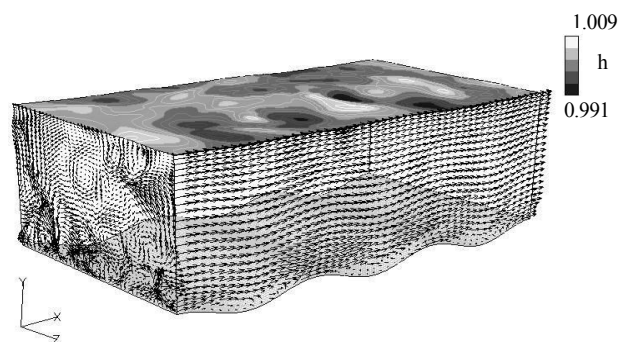


図-3 瞬時の流れ場($t=16.8T$)

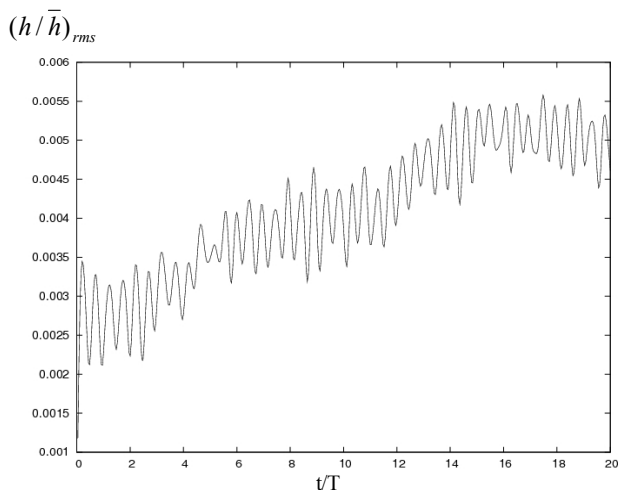


図-4 平均水深に対する RMS 値の変化

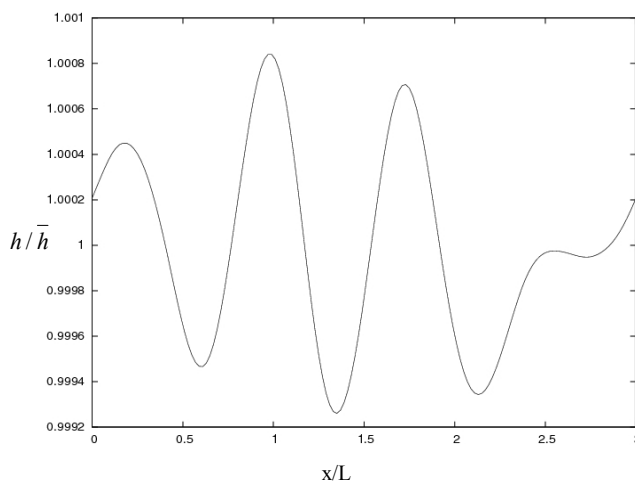


図-5 平均水深の時間平均