

1. 序論

河川や海域で見られる流れのように自由水面を持つ流れ問題が通常の流れ問題と著しく異なる点は、支配方程式である偏微分方程式を解かねばならない領域、すなわち解析対象領域の中に、時々刻々と形状を変化させる未知境界としての自由水面が含まれるという点である。しかし現在、身近でかつ重要な流れであるにもかかわらず、河川等の自由水面を有する開水路流の乱流構造に対する理解はあまり進んでおらず、既往の3次元LESを用いた開水路流の計算では、水面の変動は考慮されていない (Bradbrook et al.¹⁾)。

水面変動の計算法は近年精度ある方法がいくつか提案されている。本研究では今後LESやDNSに応用するため、3次元流れにおいて「緩やかな水面形状の変化を捉えることのできる計算プログラムを作成すること」を目的とし、比較的計算が単純で境界条件も設定しやすい高さ関数法を用いてシミュレーションを試みた。

2. 計算法

数値計算法には、野田²⁾の方法を基に、3次元差分法を用いて基礎支配方程式を離散化し、スタッガードメッシュを用いて計算を行った。圧力解法にはHSMAC法を採用し、対流項には3次精度の風上差分であるUTOPIAスキームを用い、対流項以外の空間項には2次中心差分を用いた。時間進行には2次精度Adams-Bashforth法を採用した。

自由水面の取り扱い手法には、流体の運動を領域に固定した計算メッシュで自由水面の形状を間接的に表現し、比較的計算が単純で、穏やかな水面形状の流れを対象とする場合に境界条件の設定し易い「高さ関数法」を用いている。境界条件については、流入条件は主流方向に一樣流入、流出条件は放射流出とし、河床壁面境界条件は滑り無し条件とした。

3. 水面境界条件

運動学的条件はある瞬間に自由水面上に存在していた流体粒子は、常に自由水面上に存在するという質量保存則に対応する条件であり、高さ関数法を用いた場合、 $h(x, y, t)$ を時間 t 、水平位置 (x, y) での水深とすると、式(1)で表わせる。 h の支配方程式を解くことにより自由水面の位置が求められる。

$$(1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial h}{\partial y} = W$$

ここで (U, V, W) は水面での速度成分である。

力学的条件は水面上において圧力 P が大気圧に等しく、せん断応力がゼロという条件である。自由水面を上下に挟む圧力定義点での圧力を $P_{i,j,HT}$ 、 $P_{i,j,HT+1}$ とすると、 $P_{i,j,HT+1}$ の値は、図-1のように水面上での内挿値が大気圧に等しいことにより得られる。

また、粘性応力や、表面張力は無視しているので、自由水面上でのせん断応力はゼロとなり、図-2のように水面より上に出ている

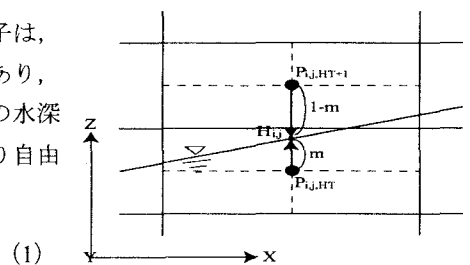


図-1 水面上の圧力の定義

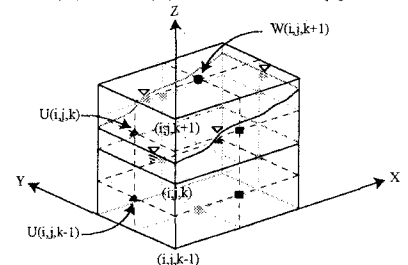
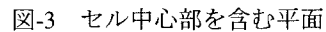
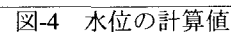


図-2 水面上のせん断応力の定義

自由水面の計算は HSMAC 法により新しい時間での速度が求められた後行った。離散化値はセル中心部での水面の高さの値とし、図-3 のように水面での速度 U_s を $U_{i,j,k}$ と $U_{i+1,j,k}$ との平均値、 V_s を $V_{i,j,k}$ と $V_{i,j,k+1}$ の平均値、 W_s を $W_{i,j,k}$ と等しいとした。その後、式 (1) を前進オイラー法により時間積分し、新しい時間での自由水面での位置を決定した。



まず水面の変動の計算が正しく行えているか確認するため、図-5 のような平坦な水路に置かれた堤体を過ぎる開水路流のシミュレーションを行った。時間刻みは 0.001 秒、計算格子の間隔は x, y, z 方向全て 5cm であり、格子数は、 $30 \times 15 \times 17$ である。レイノルズ数は平均流入速度 1.0m/s、堤体の高さ 0.2m によって定義し、1000 である。初期状態は水路全体の流速を 1.0m とし、水深 0.3m の水平な水面を与えた。図-4 は計算開始から 1 秒後 (タイムステップ 1000 回) に相当する水面の値を表わしたものである。図-5, 6 は同時刻の流速ベクトル分布である。図-5 の点線内で水面の変化が顕著に見られる。図-6 の(a), (b)より、流下方向の位置によって水面の高さの変化が確認できる。



5. まとめ

図-5 $y=0.4\text{ m}$ の鉛直断面内での流速ベクトル分

5. まとめ

(a) $x=0.9m$ (b) $x=1.4m$

図-6 開水路の流下方向から見た流速ベクトル

1) Bradbrook, K.F., Lane, S.N., and Richards, K.S.: Large Eddy Simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences *Journal of hydraulic research*, Vol.38, No3, pp.207-215, 2000.

- Hiroyuki Fujii, Nakayama