

神戸大学 学生員 ○松井聰知

神戸大学 正会員 中山昭彦

1. はじめに

水面が大きく変化をする流れは河川流、水面波等工学上で重要な例が多い。特に河川では下流側の条件によって様々な水面形を有し、こういった流れの解析をすることは、工学上にも非常に重要である。水面形の変動が小さい場合の計算には水深を未知関数として扱う方法が主であるが、水面の急変する跳水や碎波などの計算は不可能で水の占める領域を直接扱う方法が必要となる。Hirt and Nichol¹⁾による SOLA-VOF法はこういった流れの計算に有効で、最近この方法を用いた計算が幾つか報告されている^{2,3)}。本研究では、自由水面を有する二次元開水路流れである、段落ち流れ、床の急変する流れの解析が SOLA-VOF法を適応する事により、どの程度可能であるかを調べた。実際の応用では殆ど乱流であるので、乱流モデルを用いた。

2. 計算方法

基礎方程式は運動方程式として2次元開水路乱流に適応されるレイノルズ方程式、乱流モデルとして低レイノルズ数改良型 $k-\varepsilon$ 2 方程式⁴⁾、水面の取り扱いに VOF法のドナーアクセプター法を組み合わせたものである。すなわち

$$\frac{DU}{Dt} = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{\partial P}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right) - \left(\frac{\partial \overline{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y}\right) \quad (1)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{\partial P}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right) - \left(\frac{\partial \overline{vu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vv}}{\partial y}\right) \quad (2)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \left[\frac{\partial((v + v_t/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial((v + v_t/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial y})}{\partial y} \right] - (\overline{u^2}\frac{\partial U}{\partial x} + \overline{uv}(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}) + \overline{v^2}\frac{\partial V}{\partial y}) - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial((v + v_t/\sigma_\varepsilon)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial((v + v_t/\sigma_\varepsilon)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y})}{\partial y} - C_{\varepsilon 1}(\varepsilon/k)(\overline{u^2}\frac{\partial U}{\partial x} + \overline{uv}(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}) + \overline{v^2}\frac{\partial V}{\partial y}) - C_{\varepsilon 2}f_\mu(\varepsilon/k) \quad (4)$$

$$v_t = C_\mu f_\mu k^2/\varepsilon \quad (5)$$

ここで (U, V) は平均流速ベクトル、 k, ε はそれぞれ乱流運動エネルギーとその散逸である。VOF法は水面勾配が急な場合はもちろん水面高が水平位置の多価関数になる複雑な場合にも最適である。

数値計算法は食い違い格子上でSMAC法に基づいたものを用い、時間進行は陽解法、圧力は連続式を満たすような反復法で求められる。計算格子は直行系であるが不等間隔で壁面、水面近辺に密にとってある。格子数は計算ケースによるがおよそ 80×40 程度である。

3. 計算例

まず始めに段落ち流れに適応し実験値と比べ計算法の

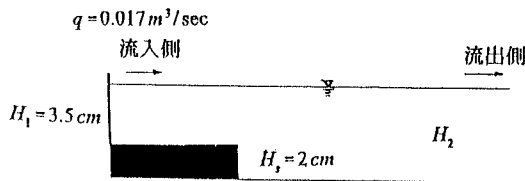


図-1 段落ち流れ場計算領域

図-1 段落ち流れ場計算領域

検証を行う。計算領域は図-1のようなものである。段落ち部分の高さ H_s は2cmで流入側の水面高を段上から3.5cmと一定とし、単位幅流量 $q=0.017\text{m}^2/\text{s}$ とすることにより富永らの実験⁵⁾の数値と合わせ比較できるようにした。また、段落ちの影響の及ばない位置に堰を設け、その堰の高さを調節することによりいろいろな下流条件を満たすようにした。メッシュは水が占めると予想される領域を包括するようにとっている。図-2は実験結果である。この図から見て取れるように開水路の段落ち流れでは、上流側のフルード数や下流側の水深に応じて水面が様々な形を作り出す非常に複雑な流れとなる。Case-1では段落ち付近で急に水位が下がり下流で射流となっている。Case-2では段落ちを過ぎて一度水位が低下するが、その直後跳水が起こり水位が増加している。文献⁵⁾によればこのCase-2の解析が最も難しいものと思われる。そしてCase-3は段落ち後はCase-2程水位は低下せず波打つようにして後流へと流れている。このCase2 と Case3 の計算結果を図-3(a),(b)に示してある。Case-2では、段落ちの上流側から水位が落ちはじめ段落ち直前に最低水位をとり、そこから跳水が起こり後流へと流れている。段落ち直後に最低水位をとる実験結果と少し異なっているが跳水の高さなどは実験とよく合っている。Case-3では、段落ち付近で少し水位が下がり徐々に水位が上がっていくが、実験結果のように波打つような水面形は得られなかった。また段落ち下流の再付着点の位置については実験より上流側になっているがこれは乱流モデルの問題であると思われる。

4. おわりに

水面の急変する開水路乱流をVOF法を $k-\epsilon$ 法に組み込みいくつかのケースについて計算を行った。水面急変のある段落ち流れで、跳水を起こすような場合でも定性的には実験と合う結果が得られた。しかし局部フルード数が大きくなるにつれ計算が不安定になるため今後安定計算が行えるスキーム、また乱流モデルもまだ改良が余地がある。

参考文献

- 1) Hirt, C.W. and Nichols, B.D.: Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Computational Physics*, Vol 39, 201-225, 1981.
- 2) 中山、市成、栗真：造波装置による自由水面流の解析、水工学論文集第38巻 505-510, 1994.
- 3) 米山、守屋：VOF法を用いた自由液面の数値解析法、水工学論文集第39巻 373-378, 1995.
- 4) 安部、永野、近藤：日本風工学会誌、1992.
- 5) 富永、神谷、瀬津：第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集、1994.

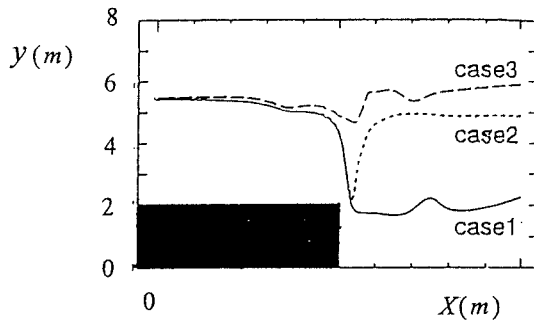
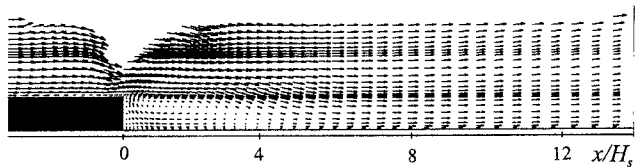


図-2 実験結果(富永ら⁴⁾)

(a) Case-2



(b) Case-3

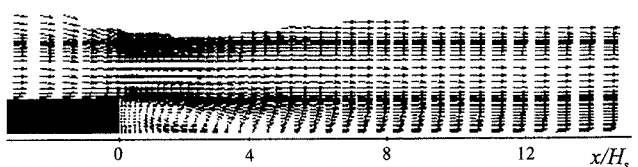


図-2 段落ち流れの計算結果