VOF法による水理構造物周辺流れの数値解析に関する基礎的研究

岡山大学大学院　学生員　○宮内　洋介
（株）ニュージェック　正会員　尾上　博則
岡山大学環境理工学部　正会員　前野　詩朗

1．はじめに

河川などの水環境中に存在する人工の水理構造物が流れに及ぼす影響は大きく、構造物を設置する際にはあらかじめその影響を考慮しなくてはならない。近年、このような構造物設置に伴う流況の変化を数値解析的に得る方法が多く用いられているが、構造物周辺の流れは自由表面を含んだ非常に複雑な流れとなるため、流況を正確に再現するために３次元的な解析が必要となる[1)]。したがって、自由表面を含む水理構造物周辺の流れを３次元的に数値解析可能なモデルを構築することは工学上重要な課題である。そこで本研究は、自由表面の形状を最もよく再現するとされているVOF法を用いた鉛直２次元解析により、水理構造物周辺の複雑な流況を精度良く再現可能な解析モデルを確立することを目的として、計算結果に大きな影響を与える運動方程式における移流項の差分スキームの取り扱い方法について検討するものである。

2．実験および数値解析の概要

数値解析によって得られる解を比較、検討するためにプールタイプ魚道を２次元的にモデル化した図１と同じスケール(奥行き40cm)の装置を用いた実験を行い、プール内の水深と流速を計測した。実験は、２つの流量（10.443 $l/s{\cdot}m$，17.420 $l/s{\cdot}m$）について行った。

解析に用いる基礎式は、運動方程式、連続の式及びVOF関数Fの移流方程式である。これらの式を右に示す。自由表面の表現方法としてはVOF法を用いている。VOF法では、流体の存在比率をVOF関数Fとして表し、自由表面形状をFの値と差分セル内での自由表面の向きによって表現するものである。また、数値解析法としては、圧力PおよびVOF関数Fなどのスカラ量をセルの中央で、流速ベクトルをセル界面で定義するスタッガード格子における有限差分法を用いている。圧力はSMAC法を用いた時間積分による収束計算を行い求めている。VOF関数Fの移流方程式には、ドナー・アクセプタ法を用いている。解析は、図１に示す領域をメッシュ間隔1cmで分割し、解析領域内に斜線で示される隔壁を障害物として設置して行った。初期条件は、図１に示すように水を満たした状態で解析領域全体の流速u,vを０とした。上流端からの一定流入流速は実験結果より得られた流量を考慮して与えた。また、下流端条件は一定圧力境界条件

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+g_x+\nu\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+g_y+\nu\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right]$$

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

Fの移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t}+u\frac{\partial F}{\partial x}+v\frac{\partial F}{\partial y}=0$$

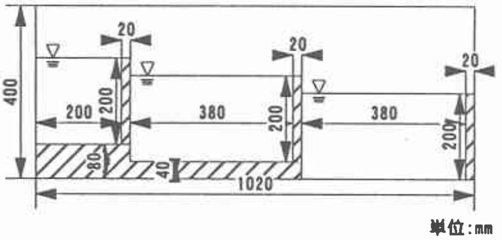


図１　解析モデル

表１　解析条件

Run	Q (l/s)/m	移流項の差分方法
Run1-1	10.443	一次風上差分
Run1-2	17.420	一次風上差分
Run2-1	10.443	一次風上差分及び二次中央差分
Run2-2	17.420	一次風上差分及び二次中央差分
Run3-1	10.443	一次風上差分及び QUICK 法
Run3-2	17.420	一次風上差分及び QUICK 法

とする。解析条件は表１に示す。全てのケースにおいて、２つの流量について数値解析を行った。

３．解析結果及び考察

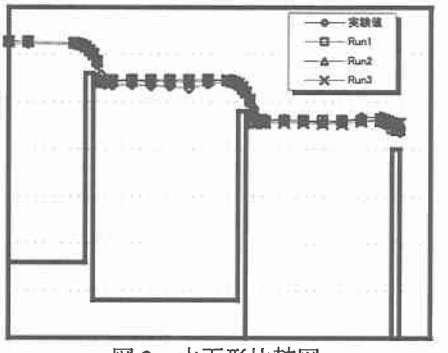
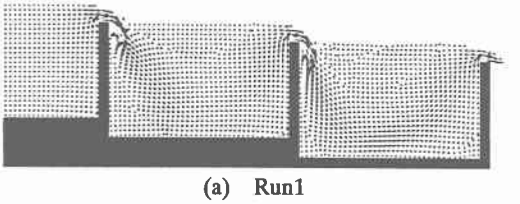


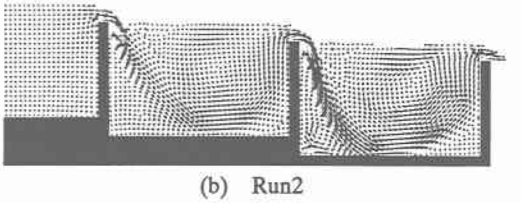
図２　水面形比較図

図２は、定常状態の水面形について Run1,Run2 及び Run3 の解析結果と実験結果を比較したものである。この図より、水面形に関しては移流項にどの差分スキームを用いても精度良く再現できることがわかった。

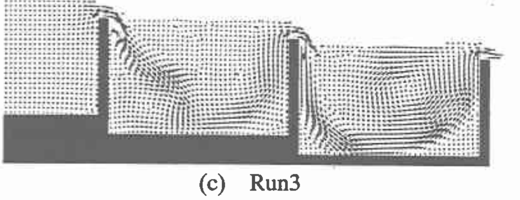
図３は、流量の少ない場合の定常状態における流況について Run1,Run2 及び Run3 の解析結果と実験結果を比較したものである。全てのケースにおいて、上流側のプールでは実験結果と同様に落下水流の両側に渦が生じている。下流側のプールについて見ると、流入してくる水流の流入角が実験結果よりも下向きの落下流となっているため、水流の下側に形成されている渦が小さくなっている。図には示していないが、流量の多い場合については、すべてのケースにおいて上流側、下流側のどちらのプールでも表面流が発生している。しかし、実験結果では表面流が発生しているのは下流側のプールのみであった。また、計算終了時まで流況が安定せず、定常状態にならなかった。これらの事から考察すると、流況に関しては精度よく再現できたとはいい難いが、結果として Run1 よりは Run2 及び Run3 の方が精度良く再現できたと言える。Run1 で解析に用いた一次風上差分スキームは上流側のみについて考慮しており、上流側だけでなく下流側についても考慮する二次風上差分スキームや QUICK スキームを用いた Run2 及び Run3 とは、渦の発生過程や流量に違いが出たためと考えられる。



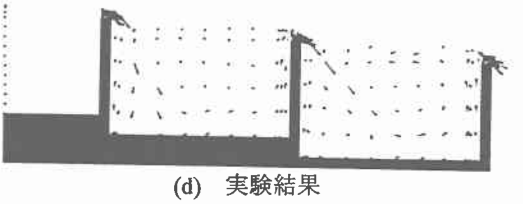
(a)　Run1



(b)　Run2



(c)　Run3



(d)　実験結果

図３　流況比較図

４．おわりに

本研究で取り扱った解析モデルにおける自由表面を有する流れをあらゆる面において精度良く再現することのできる移流項の差分スキームを得ることはできなかったが、流体解析において、移流項の適否が解析結果に与える影響は大きいということを再確認することができた。

移流項の取り扱いにはまだ改善の余地があり、より高精度の差分式を用いることや、$k-\varepsilon$ 乱流モデルを導入するなどの方法が考えられる。さらに、移流項のみでなく粘性項などについても改善を行うことによって、より現実に近い水理構造物周辺の流れの３次元解析への拡張が可能であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、（財）中国電力技術財団より援助を得た。ここに記して感謝の意を表する。

〈参考文献〉1)富士総合研究所編：汎用流体解析システム HUJI-RIC/α-FLOW