



松江工業高等専門学校
木村 一郎

1. はじめに

地球上の水の存在形態のうち、河川、湖沼、海域の水は人間活動にとって関わりが大きく、防災、環境などの種々の側面で多くの問題を提起している。これらの比較的大規模な水域の諸問題にアプローチする方法には、現地観測による方法、室内実験による方法、数値シミュレーションによる方法などがある。このうち、数値シミュレーションによる方法は、現象をモデル化した基礎方程式系を、数値解析手法を駆使して近似解を得る方法であり、他の手法に比べて特に経済性の点で優れている。近年のパーソナルコンピュータの高性能化、低価格化の波は、数値解析手法の発展とあいまって数値シミュレーション手法をより魅力的なものとしつつある。最近では流体の数値解析分野にも商用コード、商用ソフトウェアが登場し、これを用いれば数値解析に関する知識がほとんど無くともとりあえずシミュレーションを実行して解を得ることが可能であり、本手法の普及を加速した。このように、これまでは高度な知識と技術を持った一部の研究者、技術者のためのものであった数値シミュレーションは、安価で比較的手軽に「それらしい解」が得られる便利なツールとして一般に認知され、その裾野を急速に広げつつある。ところで、シミュレーションが手軽なものになればなるほど、われわれはその結果の扱いには慎重を期さねばならない。シミュレーション手法というもの未だ完成されたものではない。シミュレーションのための多くのモデルや手法が提案されているが、あらゆる現象に対して一律に良好な近似解を与えるものは存在しない。このため、モデル化を誤れば現象とは全く異なった、もはや近似解と呼べる代物ではない解が得られる場合も珍しくない。シミュレーション結果はあくまでもコンピュータ上の仮想世界の解であり、現地観測結果や実験結果との照合を通じて結果の妥当性を確認し、必要に応じてモデルに改良を加えるという作業が不可欠なのである。

ところで、河川や湖沼の流れに関する問題は、流体力学の一分野と捉えることができる。流体力学の数値シミュレーションに関わる学問を CFD (Computational Fluid Dynamics) と呼ぶ。河川、湖沼などの問題は CFD という広い分野の中ではどのような特徴があるだろうか。主なものを挙げてみよう。

- ① 扱う流れ場がほぼ 100%乱流であること。
- ② 水平方向のスケールに比べて鉛直方向のスケールが比較的小さいこと。
- ③ 自由水面の存在、気象、海象の影響などにより、境界条件が一般に複雑となること。

などとなるか。①については、乱流は「古典力学の唯一の未解決問題」といわれ、乱流のモデル化 (=乱流モデル) の選択が結果を大きく作用する。②については、例えば宍道湖の場合、平均水深 ($\approx 5\text{m}$) に対する水平方向の最大スケール ($\approx 15\text{km}$) の比がおおよそ $1/3000$ であり、これは宍道湖が一枚の葉書ほどの薄っぺらな形状であることを意味する。本来、水の流れは 3 次元的なものであるが、このような場合には水平方向 j の 2 次元性が卓越する場合が多く、「平面二次元モデル」と呼ばれる水深方向に積分した形式の基礎式系に基づく軽快なモデルが便利に使われる。③については、特に自由水面の変形をいかに表すかが問題となり、数多くの手法が提案されている。

以上に述べたように、数値シミュレーション手法は、仮想世界の解であるという限界を考慮し、対象とする現象に応じた適切なモデル選択がなされたときに初めて強力なツールとなり得るのである。

2. 開水路流れの数値シミュレーションの基本的考え方

水のように圧縮性のない流体の運動を記述する方程式系は、質量保存側に対応する連続式と運動量保存則に対応する運動方程式より構成される。このうち運動量はベクトルであるから 3 次元場では当然 3 つの運動方程式が必要となる。ただし、前述の平面二次元モデルでは水深方向に積分された基礎式系を用いるので運動方程式は水平面内の 2 方向に対応する 2 個となる。一方、質量はスカラーであるから連続式はいずれの場合も 1 個ですむ。これらの方程式は連立偏微分方程式系を構成し、一般的には解析的に解くことができないため、数値解析的手法によらざるをえない。差分法や有限体積法などの一般的な数値解析法では、計算領域を計算格子

と呼ばれる仮想の格子で分割し、各格子の決められた点において流速、圧力などの物理量を求めるという方法がとられる。計算格子の切り方、特に格子数は計算精度を大きく作用し、一般に格子数が多いほど高精度の解が得られるが計算時間や必要な計算機容量は膨大となる。数値解析手法の詳細については文献¹⁾を参照されたい。

3. 柱状構造物周辺の開水路流れのシミュレーション

3.1 流れ場の概要・・・カルマン渦と馬蹄渦

角柱、円柱などの柱状構造物周辺の流れ場は、橋脚などの河川構造物や流水中の立ち木の周辺などにおいてごく一般的にみられる。柱状構造物周辺の流れ場の様子を図-1に示した。この図に見るように、柱状構造物周辺の流れ場はカルマン渦と馬蹄渦という2種類の渦に特徴付けられる。カルマン渦は構造物後流部に生じる周期的な渦の発振であり、馬蹄渦は柱の底面付近の上流部から柱を巻くようにU字型に生じる渦である。これらの渦運動は流れの抵抗を変化させるとともに、局所洗掘などの河床変動にも影響を及ぼす。特に橋脚周辺の局所洗掘現象により橋梁が倒壊するという大事故も報告されており、橋脚周辺の流れ構造の解明が急務となっている。

3.2 数値シミュレーションの概要

(1) 計算の条件

まず、検証のための実験を実施し、実験と同条件で数値計算を行う。実験では、幅20cm、長さ10m、勾配1/1000の可傾斜開水路を用い、水路の中央付近に一边が4cmの角材を設置し、通水した。実験における流れ場の概念図を図-2に、水理諸量を表-1に、計算格子の平面図を図-3にそれぞれ示した。

(2) 数値解析モデルの概要

数値解析にあたっては、三次元モデルと前述の平面二次元モデルの2通りを適用し結果を比較することとした。また、流れ場が乱流であるため、乱流モデルの適用が必要となり、三次元モデルでは非線形 $k-\varepsilon$ モデルと呼ばれるモデルを用いた。このモデルでは、連続式と運動方程式の他に、乱れ量に関する2つのスカラーの輸送方程式を別個に解いて乱流による効果を評価しようとするもので、二方程式モデルと呼ばれる種類の乱流モデルに属する。一方、平面二次元モデルでは、より単純なゼロ方程式モデルと呼ばれるモデル（輸送方程式を他に用いずに乱流の影響を評価）を用いている。その他、解析方法の詳細については文献³⁾を参照されたい。

3.3 結果の考察

(1) カルマン渦と馬蹄渦の再現性

実験では後流域にカルマン渦がみられた。一方、数値解析においてもいずれのモデルでもカルマン渦が再現された。図-4は瞬間的な流速ベクトル（流れの様子をベクトル（矢印）で表現したもの）を比較したものである。平面二次元モデルの方が渦の間隔が小さく、また渦の発振の位置も角柱側に近いところから始まっている。この理由は不明であり、今後さらに結果の妥当性を検討する必要がある。

一方、馬蹄渦は3次元現象であるため、平面二次元モデルでは再現が不可能である。図-5は三次元モデルによる角柱の

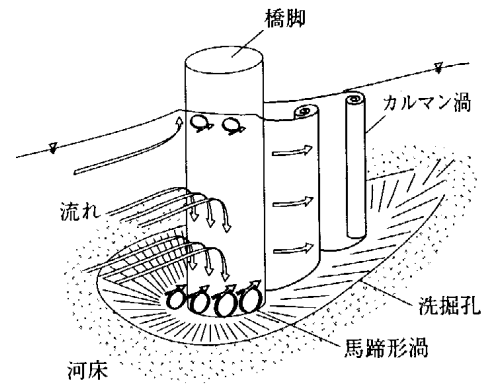


図-1 柱状構造物周辺の流れ²⁾

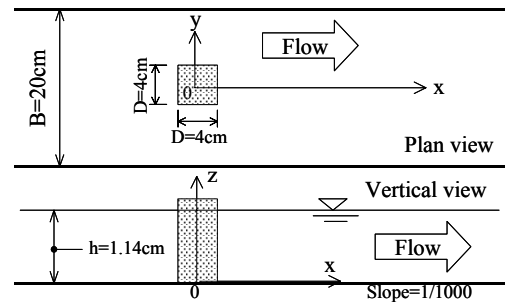


図-2 流れ場の模式図

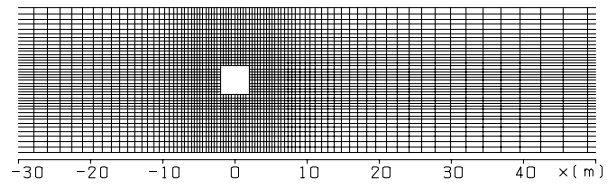


図-3 角柱近傍の計算格子(x-y平面内)

表-1 流れ場の水理条件

h (cm)	U_0 (cm/s)	D (cm)	B/D	h/D	Re	Fr
1.14	18.18	4.0	5	0.285	8400	0.54

h: depth, U_0 : mean velocity, D: side-length of cylinder B: channel width, Re: Reynolds number ($=U_0D/\nu$), Fr: Froude number ($=U_0/\sqrt{gh}$)

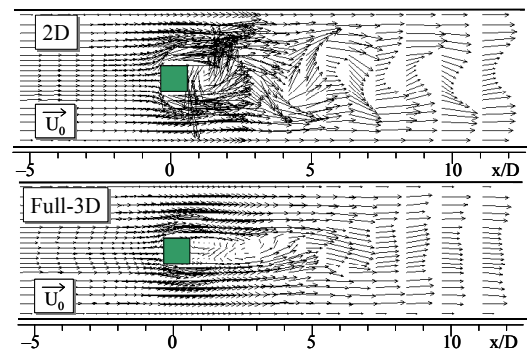


図-4 水平面内の瞬間的な流速ベクトル (上: 二次元モデル, 下: 三次元モデル)

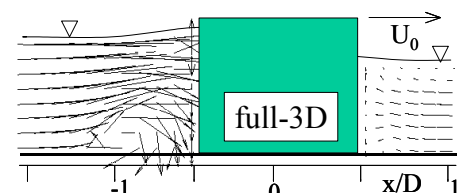


図-5 鉛直断面内の時間平均流況 (三次元モデル, 中心軸上)

中心軸上の縦断面における時間平均された流速ベクトルを示したものである。角柱の上流側に時計周りの渦がみられ、馬蹄渦の上流側の断面を表している。図-6 は三次元モデルにおける圧力の動水圧（水圧分布から静水圧分布（水が静止状態と過程したときの圧力分布）を差し引いたもの）の分布を描いたものである。この図をみると、角柱を取り囲むように U 字型の低圧力部分が見られる。これは、馬蹄渦付近で渦の遠心力により動水圧が低下したためと思われる。以上より、三次元モデルでは少なくとも定性的には馬蹄渦が再現されていることが確認された。

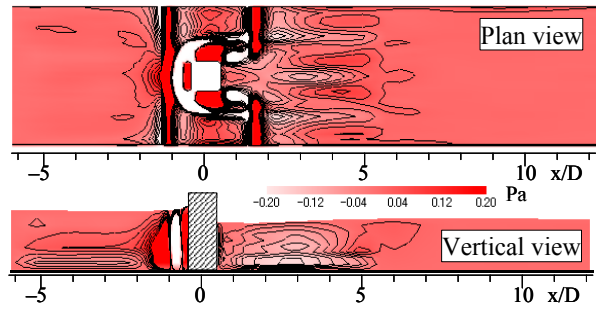


図-6 三次元モデルによる時間平均動圧分布

(2) 水位堰上げ効果

橋脚周辺の水位分布は、洪水時には橋脚上流側における堤防越水などにつながる可能性があり、治水上重要である。図-7 は、二次元および三次元モデルによって再現された水面変動の 20 秒間の時間平均値である。一見して、二次元モデルが角柱下流側の水面の窪みを大きく再現しており、三次元モデルでは比較的平坦な水面形となっている。この理由については原因については現在のところ不明であり、乱流モデルの選択も含めて今後検討していく必要がある。

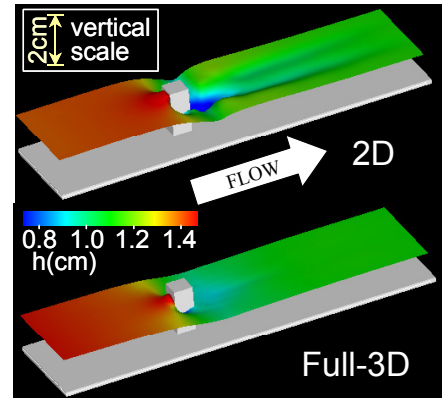


図-7 時間平均水面分布

(3) 計算時間の比較

本研究では Dual Xeon 2.4GHz, RAM:512Mb の PC により、OpenGL による並列計算により計算を実行している。各モデルによる実時間 10(s) の計算に要した CPU 時間は、二次元モデルが 1.7(min)、三次元モデルが 364(min)であった。二次元モデルは経済性の点で非常に優れていることがわかる。

4. 水制周辺の流れ場の数値シミュレーション

4. 1 流れ場の概要

水制とは河川において堤防から川の流心方向に向かって突き出すように設置される構造物である。水が水制の上を越えるか否かによって越流型、非越流型に区分され、また水制内部を水が透過するか否かによって、透過型、非透過型に区分される。水制は元来、舟運の航路確保のために流れを川の中心部に寄せて水深を確保することと、堤防から流速の大きい流れを離し、堤防の根固め部を保護することなどを目的とした構造物であった。近年では、近年は河川環境向上のための構造物という意味合いが強まってきている。例えば、木曾川等では約 100 年前に設置された水制周辺にワンド群が形成され、図-8 に示すような良好な河川環境が創出されている。最近では、人工ワンドの形成を主目的とした環境指向型の水制設置の試みも行われ始めた。水制等の構造物を河道中に設置するにあたっては、治水と環境の両面から周辺の局所洗掘や土砂堆積に対しての検討が必要であることはいまでもなく、このためには構造物周辺の流れ構造を詳細に知る必要がある。



図-8 木曾川のワンド群

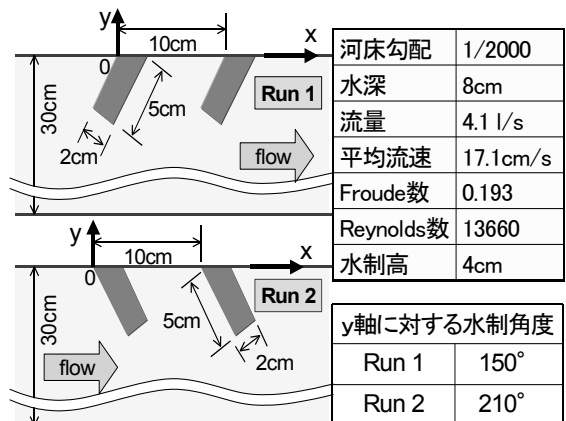


図-9 富永らの実験(2001)における水理条件

4. 2 数値シミュレーションの概要

(1) 計算の条件

計算は富永らによる実験と同条件で行うこととし、上流向きと下流向きにそれぞれに 30° 傾いた2本1組の越流型水制周辺の流れ場を対象とする。流れ場の模式図を図-9 に、

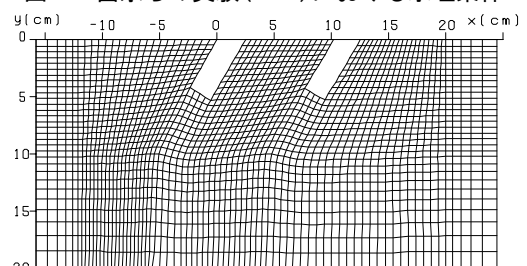


図-10 Run 1 の計算格子 (Run 2 は左右を反転)

Run 1 の水制周辺の計算格子を図-10 に示した。

(2) 解析モデルの概要

本シミュレーションでは越流型の水制を対象としているので流れ場が三次元的になることが容易に予想される。したがって平面二次元モデルは適切なモデル選択とはいえず、三次元モデルを用いる必要がある。そこで、3 で述べた三次元モデルとほぼ同様な解析手法を用いることとする。詳細は文献⁴⁾を参照されたい。

4. 3 計算結果の概要

(1) 底面付近の流れ

底面付近の流れは、特に流砂輸送を予測する上で重要となり、ワンド形成過程にも関連性が高い。図-11 は、底面付近の時間平均された流れの様子を Run 1 と Run 2 で比較したものである。これより、上流向き水制では底面付近で水制間へ流入する流れが卓越し、下流向き水制では逆に水制間から流出する流れが卓越する様子がわかる。したがって、水制間に土砂を堆積させたい場合は水制を若干上流向きに設置することが有効であることが予想される。

(2) 流れの非定常性

図-12 は2つの水制の先端を結ぶ線上のほぼ中点における横断方向の流速の時間変化を示したものである。Run 1 では、実験、シミュレーションともに流れがほぼ定常であるのに対し、Run 2 では非定常な振動が発生している。図-13 は Run 2 における流れ場の時間変化を流速ベクトルと水深分布で表したものである。これより、Run 2 では上流側水制の先端部より周期的な渦が発振している様子がわかる。このような流れの非定常性は水制周辺の生態系にも影響を及ぼすことが予想されるため、水制の設計にあたっては配慮が必要といえる。

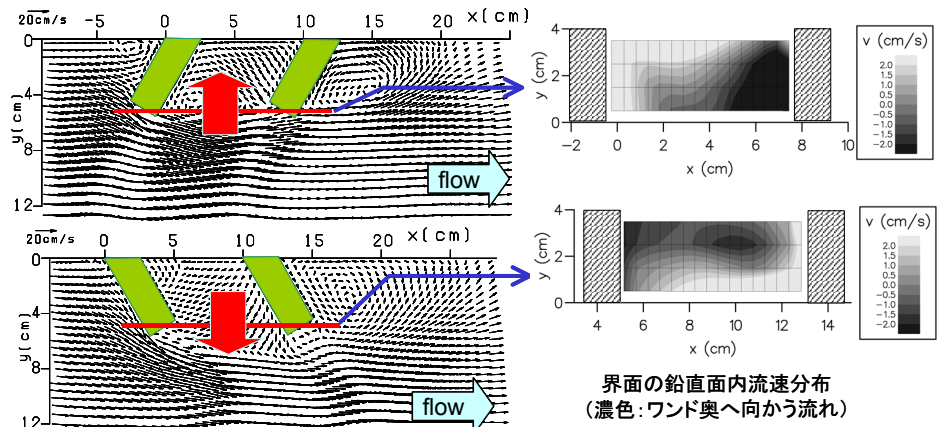


図-11 水制角度と底面付近の流れの方向の関係

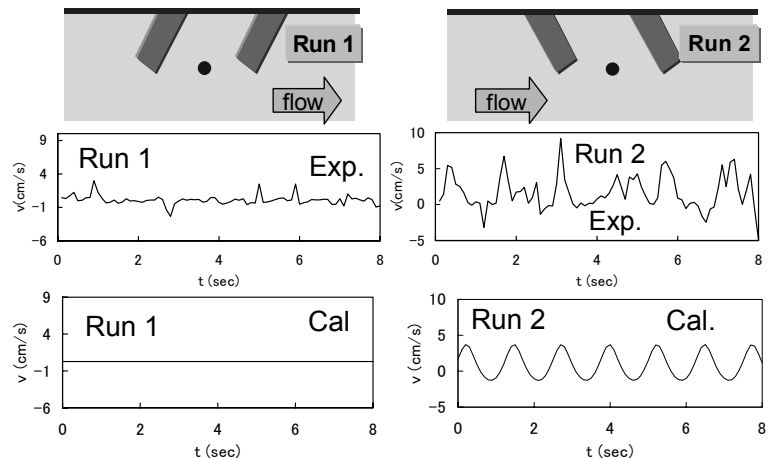


図-12 横断方向の流速変動(z=3.5cm, 平面位置は上の模式図の●点)

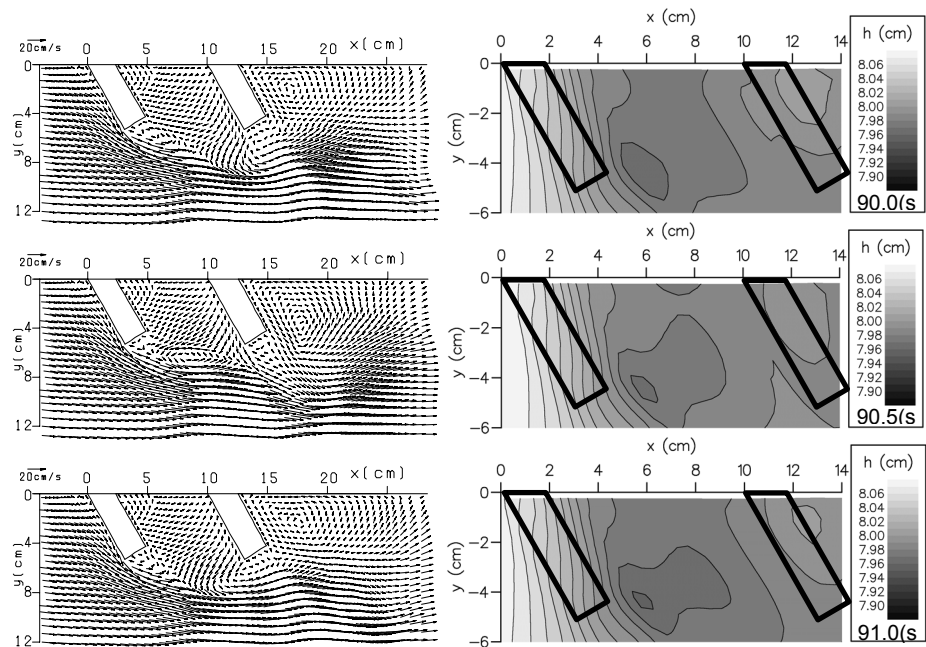


図-13 周期渦形成(Run 2, 三次元モデル, z=5mm, 左:流速ベクトル, 右:水深分布)

5. 連結汽水湖への塩分遡上現象の数値シミュレーション

5. 1 流れ場の概要

宍道湖・大橋川・中海系はわが国の代表的な汽水湖であるとともに、連結汽水域としての特殊性をも併せ持

っている。宍道湖の汽水性を維持する機構は大橋川からある条件のもとで間欠的に高塩分水塊が遡上することによるが、この高塩分水塊が往々にして貧酸素であるため、しじみなどの生態系に打撃を与える場合があり、この点に関する詳細なメカニズムの解明と、塩分挙動の制御方法の構築が急務となっている。塩水遡上のメカニズムの基本は塩水楔と呼ばれる現象にある。すなわち、密度の大きい塩水が淡水の下にもぐりこむように侵入する現象である。図-14 は最も単純な塩水楔現象のシミュレーションの例であり、矩形水槽の左側に塩水、右側に淡水を入れて、ある瞬間に間仕切りを取り去ったときの流れの様子を表している。

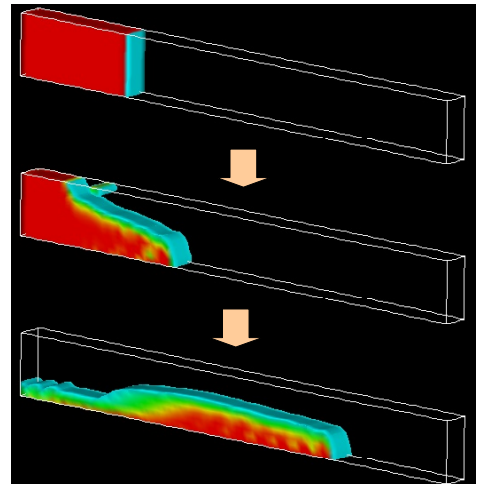


図-14 塩水・淡水混合シミュレーション

5. 2 数値シミュレーションの概要

(1) 数値解析の条件

大橋川を通じて生じる高塩分水塊の挙動とその制御方法を検討するため、地形を単純化した図-15,16 に示すようなアクリル製水槽を用いた実験を行った。この水路は、矩形水域を細い水路で結合した形状となっており、斐伊川・宍道湖・大橋川・中海・日本海系を想定し、1/25000 程度でスケールで単純化したものとなっている。ただし、鉛直方向と河川部について現象の見易さを考慮し、縮尺を大きくとった。また、今回の実験では斐伊川(river 2)と日本海(sea 1)に相当する部分には仕切りを入れて検討の対象外とし、二湖一河川(lake 1, lake 2, river 1)の最も単純な連結汽水域系を対象とした。

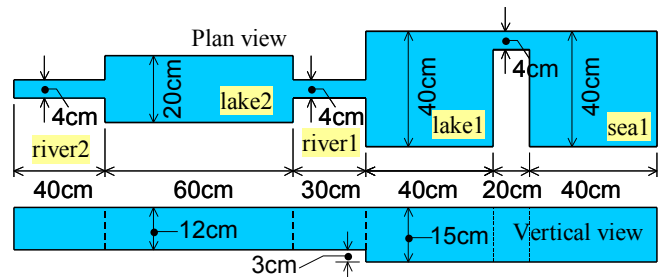


図-15 実験装置の平面図、立面図

実験にあたっては、中海と宍道湖の境界 (lake 1 と river 1 の境界) に相当する箇所に仮の仕切りを入れておき、中海 (lake 1) には着色した塩水を、それ以外の領域 (lake 2 および river 1) には淡水を同水深で入れ、ある瞬間に仕切りを取り除くことにより密度流を生じさせた。なお、淡水は水道水、塩水は食塩を水道水に溶かした濃度 3% のものを用いた。また、淡水と塩水の動きを可視化するため、塩水に緑色入浴剤で着色した。仕切りを取り去る瞬間を実験開始時刻 $t=0.0(\text{sec})$ とし、これ以降の流動の状況を側方からビデオカメラで連続撮影し、上方からはデジタルスチールカメラで 5.0(sec) おきに撮影した。図-17 は塩分遡上の様子の一例である。

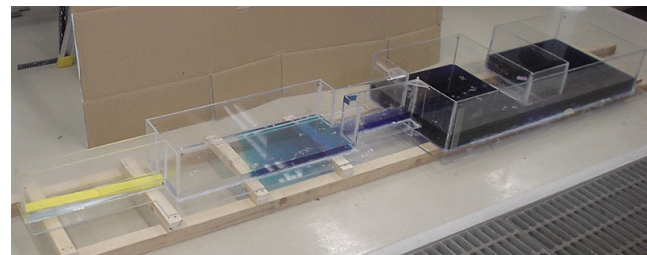


図-16 実験装置の写真

一方、高塩分水塊の遡上を制御する目的で、小松らの提案する 1/4 球型流況制御ブロックの効果についても検討した。このブロックは図-18 に示すようなもので、順流方向と逆流方向で抵抗を表す抗力係数が2倍以上異なるという特徴を持っている。図-19 に示すような3通りの配置により、塩分遡上特性への影響を検討した。数値解析はこの実験と同条件で行い、両者の結果を比較した。

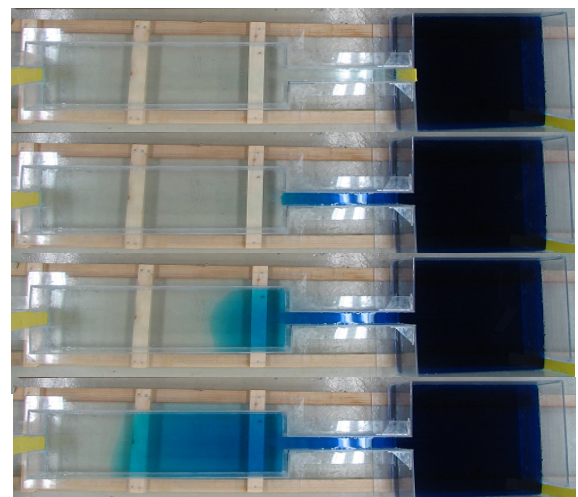


図-17 実験における塩分遡上の一様子(5秒間隔)

数値解析は密度の変化を考慮した三次元モデルを用い、乱流モデルには単純なゼロ方程式型の Munk & Anderson モデルを用いた。詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

(2) 数値解析モデル

数値解析は密度の変化を考慮した三次元モデルを用い、乱流モデルには単純なゼロ方程式型の Munk & Anderson モデルを用いた。詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

5. 3 結果の考察

図-20 は、ブロック無しの場合とブロックパターン BK1 の場合の塩分濃度分布を、底面における水平断面と水路中央に沿う鉛直断面についてカラーコンターで示したものである。これらの図は、計算開始後

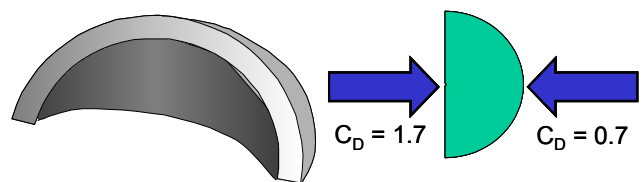


図-18 小松らの提案する 1/4-球型流況制御ブロック

t=10(sec), 20(sec), 30(sec)の3時刻について示している。これらの密度フロントの挙動を実験におけるビデオ画像や静止画像と比較すると本数値解析モデルは塩分遡上特性をほぼ妥当に再現していることがわかった。また、水平面内の分布に着目すると、流況制御ブロックを設置した場合は密度フロントのエッジが若干直線的になっていることがわかる。また、lake 2 中ではブロックによって密度フロントの進行速度が遅くなっていることがわかる。ブロックを通過後のフロントの進行速度の平均値の比較をすると、ブロックを設置したケースではブロックが無い場合に比べて9~15%の進行速度の低下が認められた。この特性は実験結果ともほぼ一致する。また、ブロックが成層の強度に及ぼす影響を検討するため、t = 100 (sec)における lake 2 の中央底面における濃度について比較すると、ブロックを設置したケースではいずれも約 4%の濃度の低下がみられた。これらの結果より、流況制御ブロックは、密度フロントの進行速度を低下させるとともに、成層状態を一部緩和する働きがあることが認められる。

図-21 は実際の中海・宍道湖の地形における中浦水門からの塩分侵入シミュレーションの一例である。中浦水門からの塩分が潮汐に応じて周期的に生じている様子がわかる。今後はこのような実スケールのシミュレーションにおいてブロックの効果をさらに検討する必要がある。

図-21 は実際の中海・宍道湖の地形における中浦水門からの塩分侵入シミュレーションの一例である。中浦水門からの塩分が潮汐に応じて周期的に生じている様子がわかる。今後はこのような実スケールのシミュレーションにおいてブロックの効果をさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、河村哲也：流れのシミュレーションの基礎！，山海堂，2002.
- 2) 土木学会関西支部編：川のなんでも小事典，講談社ブルーバックス，1998.
- 3) 木村一郎・細田尚・音田慎一郎：橋脚による堰き上げ効果の再現性に着目した数値解析モデルの比較，水工学論文集，第49巻，pp.559-564，2005.
- 4) 木村一郎・細田尚・音田慎一郎・富永晃宏：越流型水制周辺の三次元乱流構造に及ぼす水理パラメータの効果，水工学論文集，第48巻，pp.661-666，2004.
- 5) 木村一郎・小畑めぐみ・松崎健・寺本敦子・細田尚：連結系汽水湖に遡上する高塩分水塊の挙動とその制御について，日本流体力学会年会 2005 論文集，2005 (印刷中).

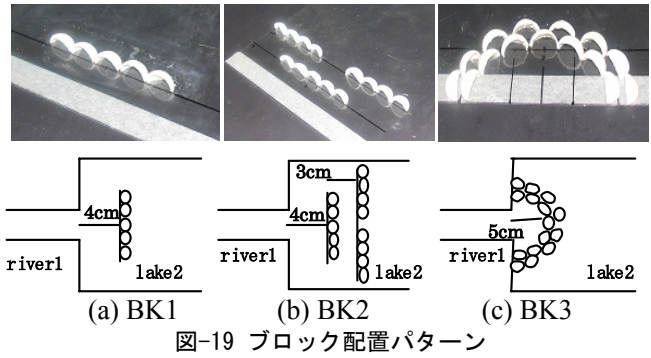


図-19 ブロック配置パターン

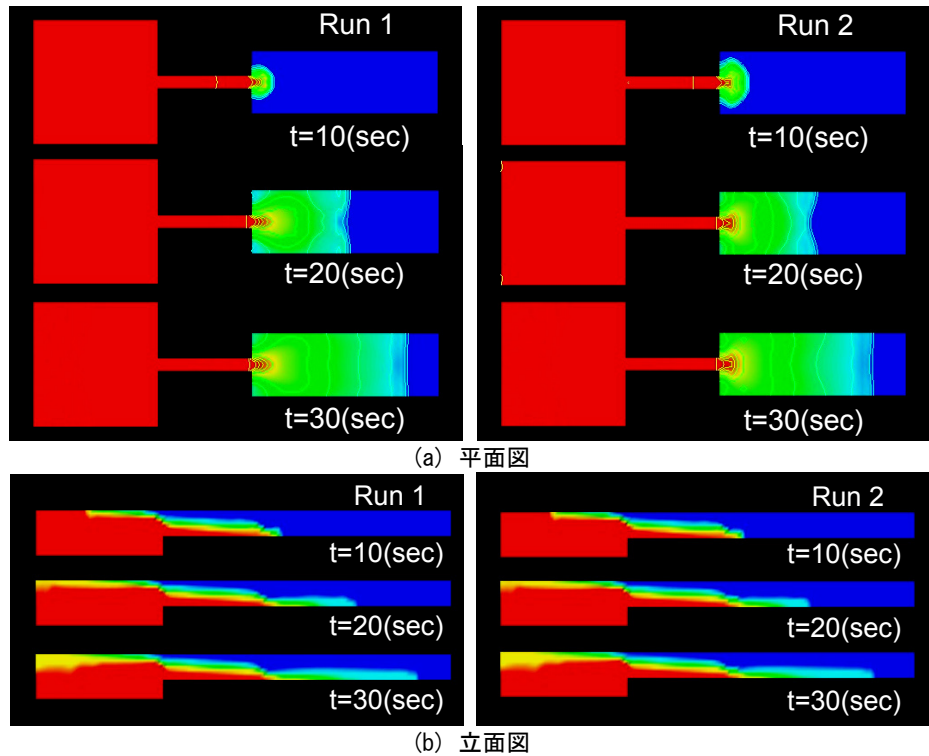


図-20 濃度コンターの比較 (左：ブロック無，右：ブロックパターン BK1)

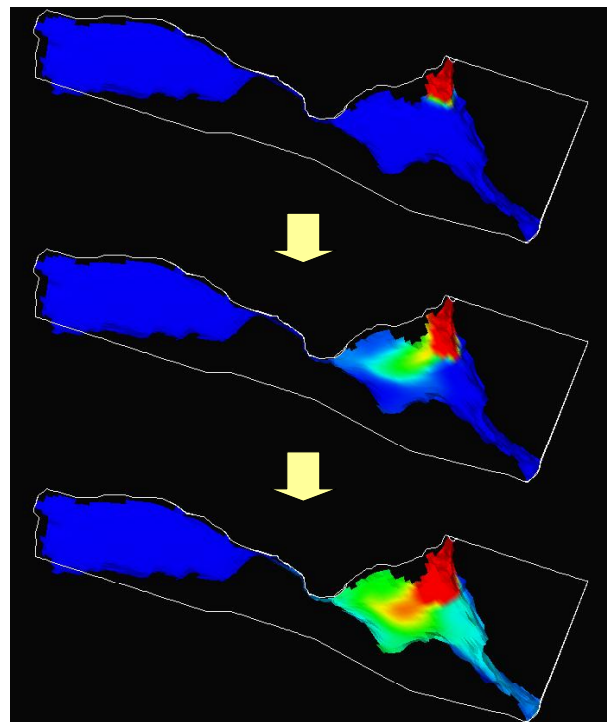


図-21 実地形による塩分侵入シミュレーション