

水路を遡上する波動流れと物体輸送に対する 3次元多相場の数値解法 (3D MICS) の適用性

Applicability of 3D MICS to the wave flows
running up in open-channels and their transportation of solid objects

牛島 省*・牧野 統師**・瀬津 家久***

Satoru Ushijima, Osashi Makino and Iehisa Nezu

*正会員 工博 京都大学大学院助教授 社会基盤工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

**京都大学大学院 社会基盤工学専攻 修士課程

***フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻

The wave flows running up in open channels and the transportation of solid objects due to the flows are investigated with basic experiments. A computational method for multiphase flows, 3D MICS (Multiphase Incompressible flow solver with Collocated grid System), was applied to the experimental results and its applicability was discussed. As a result of the computations, it has been shown that the wave velocities, the changes in wave heights, and the transportation of a sphere in the flows are successfully predicted.

Key Words : MICS, free-surface flow, wave flow, object transportation, CFD

1. はじめに

河口部に到達した津波は船舶などの漂流物を伴う遡上流れとなって、橋梁などの周辺構造物に被害をもたらす場合がある。このような現象は、波と流れが共存する場における物体輸送に相当し、取り扱いが容易ではない。本研究では、このような開水路の下流端から入射する波動流れの挙動と物体輸送を対象として水理実験を行い、その基本的な特性を把握するとともに、実験結果を用いた数値解法の検証を行う。

数値解法としては、3次元固気液多相場の解法である 3D MICS (Multiphase Incompressible flow solver with Collocated grid System) を利用する。MICS は、多相場を構成する各流体を混ざり合わない非圧縮性流体、また物体を剛体と仮定して、場全体を一流体モデルで表現する解法である。MICS では、物体に作用する流体力を評価する際に、抗力係数などの経験定数が不要であることが 1 つの特徴である。

MICS を用いる遡上流れの計算例としては、ドライエリアに浸入する波動流れ¹⁾や構造物間に浸入する流れ²⁾を対象としたものがあり、またドライエリアおよび静水中に流入する波動流れと物体輸送の計算³⁾が行われている。本研究では、これらの既往研究と異なり、水路部分において遡上と逆方向に向かう流れがある条件を対象とする。

2. 数値解析手法の概要

MICS は、固体・気体・液体が含まれる多相場に対して、固体を剛体と仮定し、さらに気体と液体が非圧縮性流体であるとして、これら各相の挙動を数値的に予測する手法である。各相は、図-1 に示すように、物性値が異なる複数の混ざり合わない非圧縮性流体の混合体 Ω として扱われ、この混合体の挙動に対して非圧縮性流体計算を行う。

混合体に対する質量と運動量の保存則は、気液および液液混相流体、あるいは混合気体の一流体モデル⁴⁾として用いられているものと同様であり、詳細な基礎式の導出過程は既報³⁾に示されている。

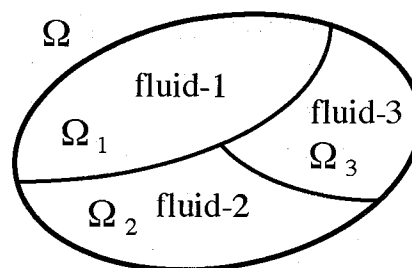


図-1 複数の流体を含む領域 Ω

2.1 基礎方程式

基礎式は、以下のような Euler 表記された質量保存則と非圧縮条件、そして運動方程式から構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) &= f_i + f_{s,i} \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu u_j) \right] & \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ρ は体積平均された密度、 u_j は質量平均された x_j 方向の流速成分である。また、 f_i と $f_{s,i}$ はそれぞれ外力と表面張力に起因する加速度成分、 p と μ はそれぞれ体積平均された圧力と粘性率である。なお、本報の計算では表面張力は考慮されていない。

2.2 計算手順の概略

基礎方程式の計算手順は、コロケート格子を用いる非圧縮性流体の計算法⁵⁾と同様である。セル中心に定義された流速成分 u_i を用いて、保存系の運動方程式の圧力項を除く部分からセル中心における流速の推定値を計算する。計算時間を短縮化するために陰的解法である C-ISMALC 法⁶⁾を用いる。

次に、セル境界に空間内挿された流速の推定値に圧力勾配を考慮した流速成分を用いて、C-HSMAC 法⁷⁾により連続性を満足する流速成分と圧力場を求める。本研究の計算では、水・空気という密度が大きく異なる場を同時に扱うが、このような密度場においても圧力計算に用いる基礎式を適切に離散化することで、C-HSMAC 法による収束解を安定に求めることが可能である。圧力計算で用いられる離散化式の安定性に関する詳細は文献⁸⁾に述べられている。

流体中に含まれる物体運動の計算方法の概略は以下のとおりである。物体の並進運動と回転運動の方程式には、外力として流体力と浮力に加えて、他の物体あるいは壁面との接触力が考慮される。物体に作用する流体力は、流体の運動方程式の数値計算結果から算出される力の成分を用いて定めるため、抗力係数などの経験定数が不要となる。この解法では、空間内に固定された計算セルの間を計算セルより大きい物体が移動していくことになるが、各計算セルに含まれる物体部分の体積の算出にはサブセル法⁸⁾を使用する。接触力 h_i は、個別要素法⁹⁾を3次元化したモデルにより評価する。

3. 計算手法の基本的な検証

3.1 ポテンシャル流中における円柱の振動

ポテンシャル流理論によれば、静止した流体中で円柱が振動する場合には、円柱が周囲の流体を動かすことによって生じる力のみが円柱に作用するのに対し、静止した円柱の周りの流体が振動する場合には、物体の存在に関わらず圧力勾配が生じているため、水平浮力と呼ばれる流体力が付加される。円柱の場合にはどちらの流体力も $-\rho V dv_x/dt$ となるので、 $\rho V |dv_x/dt|$ で流体力を無次元化すると、付加質量係数 (C_a) と水平浮力の係数はともに 1 となり、それらの和の係数、すなわち質量係数 (C_m) は 2 となる。このように、振動流体中に置かれた円柱に働く流体力 (付加質量に基づく力と水平浮力の和) は、静止流体中を振動する円柱に働く流体力 (付加質量に基づく力のみ) の 2 倍となる。

この2つの状態を MICS により計算し、KC 数ごとに質量係数 C_m を求めたものを図-2 に示す。これにより、適切に質量係数が評価されていることが確認される。なお、KC 数とは、振動流中におかれた物体に作用する流体力に作用する流体力の諸係数を支配する無次元量として、Keulegan & Carpenter¹⁰⁾により提案された無次元量であり、 $KC = U_0 T / D$ と表される。ここで、 U_0 は流速の振幅、 T はその周期、 D は円柱の直径である。ただし、円柱が振動する場合は、 U_0 は円柱の速度の振幅、 T をその周期としている。

図-3 に振動の方向に作用する流体力の時系列を示す。また、図-4 は、同方向の流体力と振動の加速度の関係を表したものである。流体が振動している場合は、円柱が振動している場合の 2 倍の流体力が作用している様子を忠実に再現できている。

3.2 球体の背後の流れと抗力係数

空間に固定された単一球体周辺の流れに関する計算は既報⁸⁾で検討され、図-5 に示すように粒子レイノルズ数が 3000 程度までは MICS により抗力係数を適切に再現できることが示されている。

球の背後の流れに関しては、Sakamoto ら¹¹⁾、Achenbach ら¹²⁾の研究があり、実験により多少の相違があるが、概ね粒子レイノルズ数が約 300 を越えると非定常後流渦が形成されることが報告されている。ここでは、MICS により得られた球体の背後の流線を描き、後流渦の挙動を確認した。図-6 に示すように、粒子レイノルズ数が 300 の場合には、最初に軸対象な渦が形成され、それが非定常渦に移行する状況が再現された。

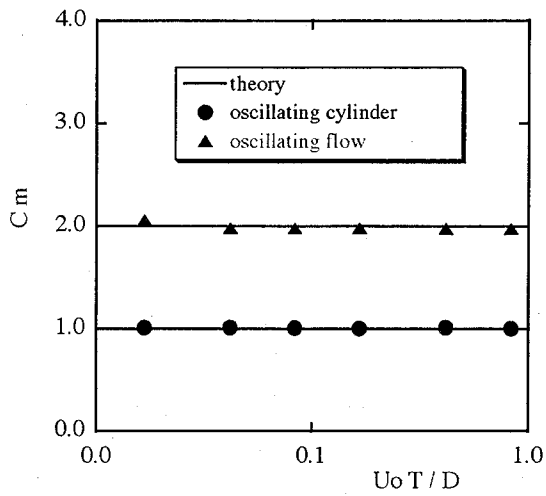


図-2 質量係数

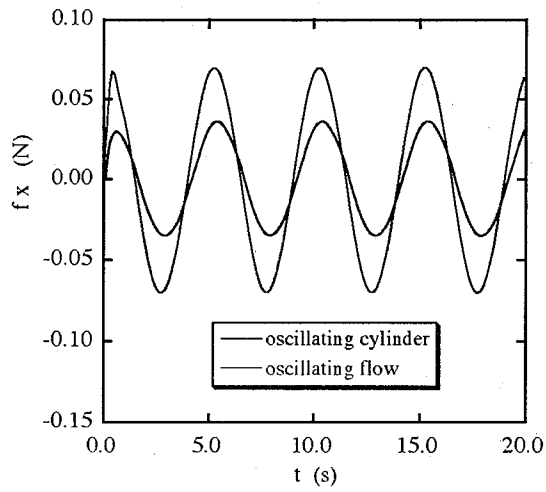


図-3 流体力の時系列

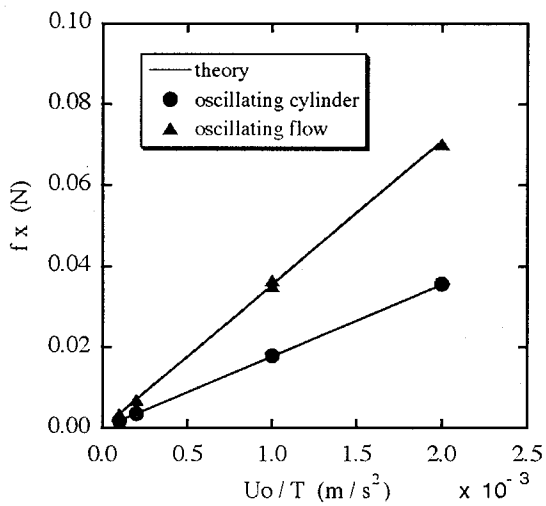


図-4 流体力と振動の加速度

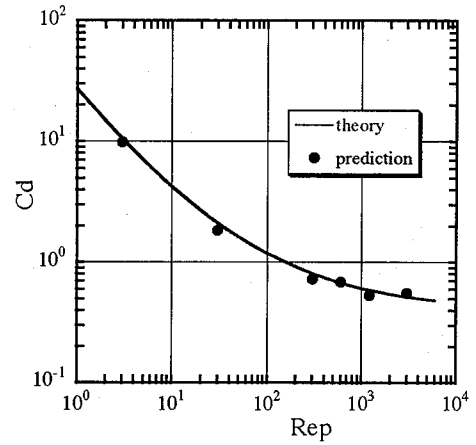
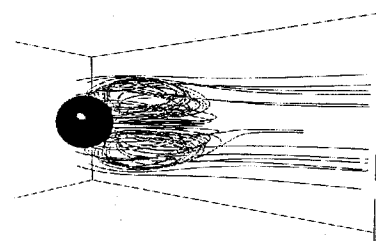
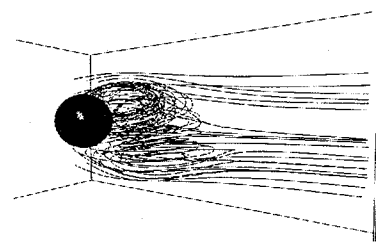


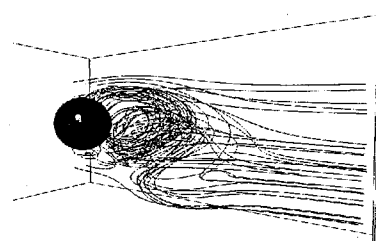
図-5 球に対する抵抗係数



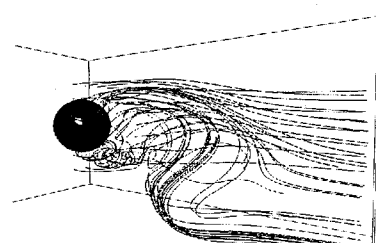
(a) $t = 12.2$



(b) $t = 15.0$



(c) $t = 16.1$



(d) $t = 16.5$

図-6 球の背後に形成される流線 ($Rep = 300$)

4. 水路を遡上する波動流れの実験

河川を遡上する津波のように、上流から下流へ向かう水流中を遡る波動流れとその物体輸送に関しては、詳細な数値計算が行われた例は十分多いとは言えず、その適用性に関しても不明な点が多い。このため、本研究では、現象の特性を把握するための水理実験を行い、この結果を利用して数値解法の検証を進める。

4.1 実験水槽

本研究では、図-7に示される造波装置と循環ポンプが備えられた水槽を用いて、波と流れが共存する場における自由水面流れの挙動を計測し、その特性を把握する。

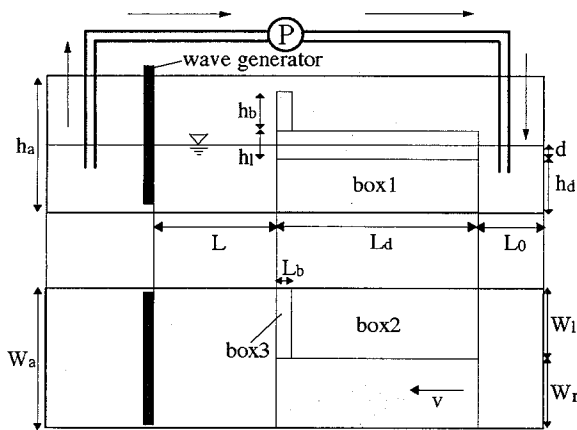


図-7 実験装置 (側面図と平面図)

実験水槽はアクリル製で、水路長約 2.0m、幅 0.19m、高さ約 0.4m である。図-7の右側が上流部であり、下流側の左端付近に造波板が設置されている。この造波板はオリエンタルモータ社製のパルスモータ内蔵スライダとコントローラ (EMP400) により、PC で作成した簡単なプログラムにしたがって駆動される。造波板の動作は、本実験では往復運動ではなく、1 回のみの一方向の動きとした。すなわち、造波板を移動速度 V で距離 d_w だけ上流方向に平行移動させ、そこで停止させる条件とした。造波板の移動速度が一定になるまでの立ち上がり時間および停止までの時間はいずれも十分短い時間となるように設定した。また、本実験ではすべての条件で $d_w = 0.15 \text{ m}$ とした。

水槽中央部分には、3つのボックスを組み合わせた構造物を設けた。ボックス2は陸地部分を模擬しており、それより高さが低いボックス1の上面が水路部分の底面に相当する。水槽および各ボックスは水平に設置されている。また、ボックス3は防波堤の役目をす

るもので、造波装置で生じた波動流れが陸地部分に浸入することを防ぐ働きをする。図-7に概略的に示されているように、初期水面はボックス1の上面より高く、陸地部分より低く設定されている。このため、前報¹⁾のドライエリアを遡上する波動流れとは異なる実験条件となっている。

また、図-7に概略的に示されるように、造波板と水路下流壁の間に吸い込み部分を有し、水槽上流端の空間部分に流出部分を持つ循環装置を利用して、水路部分に上流から下流へ向かう流れを発生させることができる。水の循環には電動ポンプを用い、流出部分のバルブを調整することにより流量 Q が制御される。

実験装置の各部の寸法は、図中の記号を記号を用いて、 $h_d=10.5\text{cm}$, $h_l=6.8\text{cm}$, $h_b=5.0\text{cm}$, $W_a=19.3\text{cm}$, $W_l=9.6\text{cm}$, $W_r=9.6\text{cm}$, $L=63.8\text{cm}$, $L_d=76.8\text{cm}$, $L_o=44.2\text{cm}$, $L_b=8.0\text{cm}$, $h_a=0.4\text{m}$ である。

4.2 座標系と各部の記号

水路部分を遡上する波動流れの概略的な水面形状と座標系、各物理量を表す記号を図-8に示す。 x 軸は、ボックス1の上面の下流端に原点を置き、上流側に向かって水平に取る。また、 z 軸は鉛直上方を正とする。

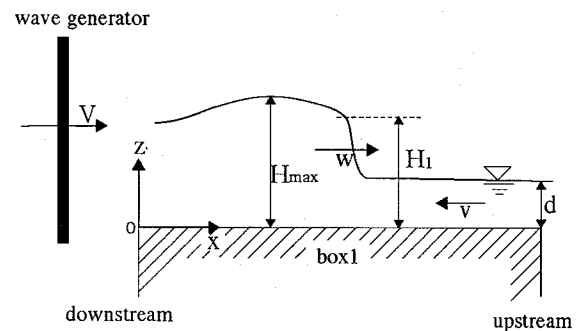


図-8 水路を遡上する波動流れの概念図

図-8の右側が上流側であり、水路部分の上流端水深を d とし、断面平均流速は下流に向かう値を正として v と表す。また、下流側から浸入する波動流れは、上流側に向かう波速を正として w とし、段波状となった水面形の先端付近の水深を H_1 、最大水深を H_{max} と表す。 H_1 は、後述するように、波形の画像から目視で定めており、値には多少の誤差が含まれる。

ランキン・ユゴニオの関係式では、本実験条件における波速 w は次式で表される。

$$w = \sqrt{\frac{gH_1(H_1 + d)}{2d}} - v \quad (4)$$

ここに、 g は重力加速度である。

4.3 実験条件と計測方法

実験では、水路部を流れる流量 Q と造波板の移動速度 V 、そして水路部分の上流端水深 d の3つをパラメータとして27種類の条件で計測を行った。流量 Q は、0.0, 69.2 cm³/s, 137.6 cm³/s の3種類の条件とし、実験ケース名として、これらを順に Q0, Q1, Q2 と表す。造波板の移動速度 V は、0.1, 0.25, 0.40 m/s の3条件とし、これらを V1, V2, V3 と表す。また、上流端水深 d は、1, 2, 3 cm の3種類とした。これらを d1, d2, d3 と表す。このような各実験条件のケース名を以下では Q0V1d2 のように記述する。

実験では、各時刻の水面形と、流れの中に物体が設置される場合には、各時刻の物体の位置を画像から計測した。水面形を計測する際には、水槽内の水を着色し、側面から1秒間に30フレームの画像を取得できるデジタルハイビジョンカメラで画像を記録した。また、物体位置の計測には、水槽上面から同様のカメラを用いて画像を記録した。これらの画像を解析して、水面形や波速、物体の移動速度などを求めた。

5. 実験結果と解法の適用性

5.1 計算条件

複数の実験ケースのうち、Q0V3d1 および Q2V1d3 という2ケースを選択して数値計算を行った。計算対象領域は、空気の部分を含む流下方向約1.7m、幅方向0.19m、高さ0.2mの部分とした。使用した格子数は、108 × 12 × 50 である。計算領域にはボックスが含まれるが、ボックスの境界面付近では、既報²⁾と同様に、計算セルを最小単位とする固体部分を積み木のように組み合わせて表現した。この固体部分は、空間中に固定されており、流体運動によって移動することはない。

ボックス表面では、圧力境界条件として、圧力の法線方向の勾配を0とするディリクレ条件を課す。図-9に概略的に示されるように、ボックスの角部のセルでは、接触する全ての流体セルに対してこの境界条件を満足するように圧力 ϕ_C を定める必要があるが、一般に ϕ_S と ϕ_T は一致しないので、このままでは境界条件の設定が困難である。このため、接触する流体セルの数に応じて境界条件を満たすために圧力変数を追加する方法²⁾を用いる。すなわち、図-10に示すように、角部のセルに圧力変数 ϕ_C^* を追加して、これを上面に接する流体セルに対する境界条件の設定に用いる。

運動方程式の予測段階の計算と密度の移流方程式の計算では、陰的解法であるC-ISMALC法⁶⁾を用い、時間刻み Δt は 1.0×10^{-2} 秒とした。水の動粘性係数と密度は 1.0×10^{-6} m²/s および 1.0×10^3 kg/m³ とし、

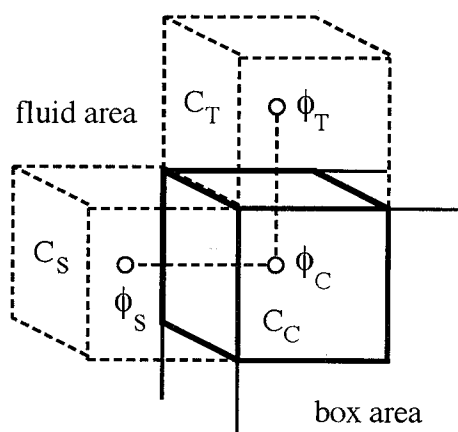


図-9 ボックス角部におけるセル中心点の配置

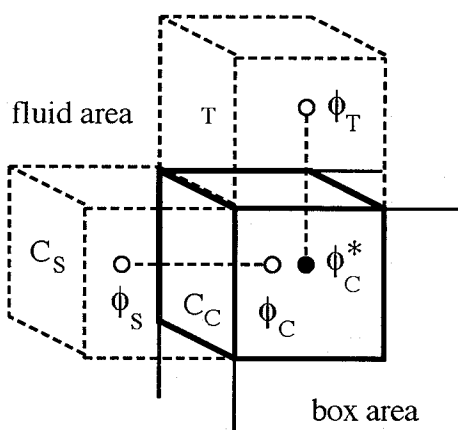
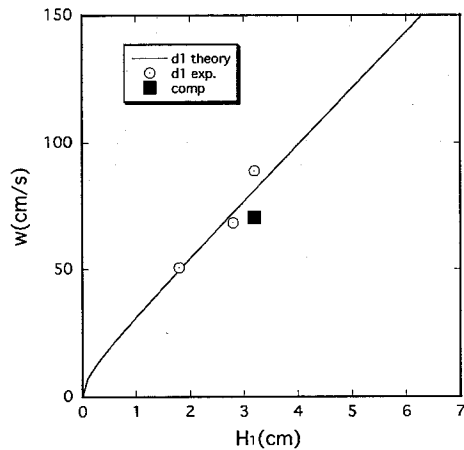


図-10 ボックス角部における圧力定義点の追加

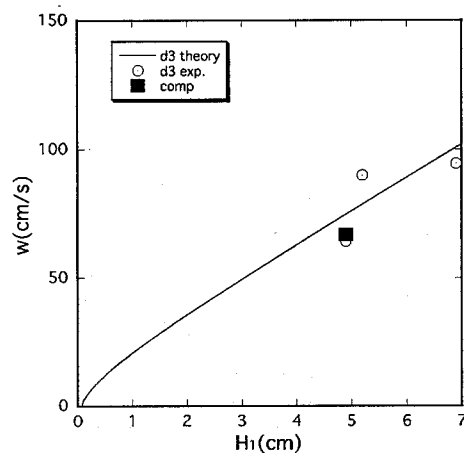
空気に対してはそれぞれ 1/10, 1/1000 の値を用いた。圧力の時間変化量 ϕ の連立1次方程式は、BiCGSTAB法¹³⁾を用いてC-HSMAC法により計算し、計算セルの連続性の誤差に対するしきい値は 1.0×10^{-10} とした。

5.2 波速の比較

実験ケース Q0V3d1 と Q2V1d3 において、水路部分を遡上する波動流れの波速を測定した結果を図-11に示す。図中には、式(4)の理論解を曲線で示し、また計算結果を合わせてプロットしている。式(4)の理論解は、条件を単純化して導かれたものであるにもかかわらず、本実験結果をほぼ良好に表現している。また、解析結果は、水路部分が静止水である場合(Q0V3d1)だけでなく、水路部分に流れがある場合(Q2V1d3)にも、実験結果と概ね一致していることが確認された。



(a) 水路部分に流れがない条件 (Q0V3d1)



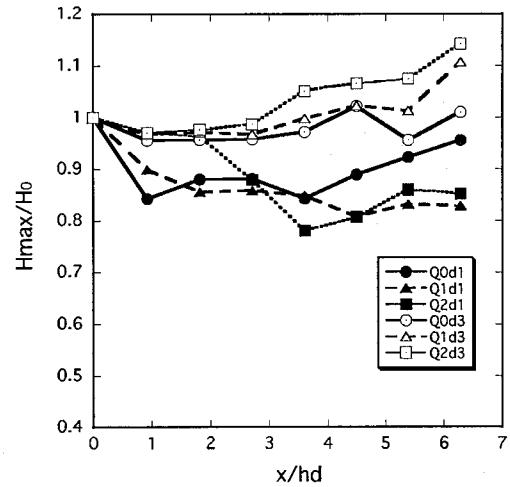
(b) 水路部分に流れがある条件 (Q2V1d3)

図-11 波速 w と H_1 の関係

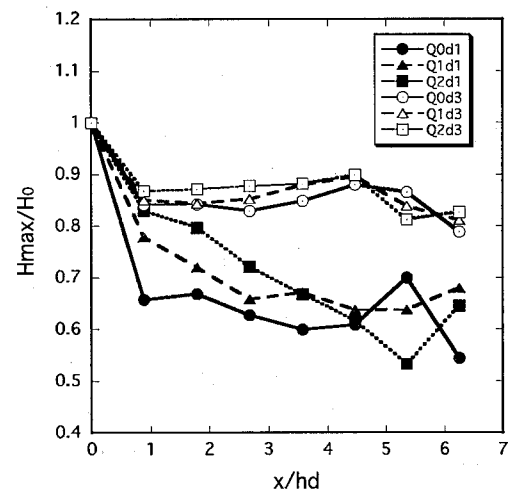
5.3 波高の比較

実験で得られた水路部分の各点における最大波高 H_{max} と x の関係を図-12 に示す。図中では、最大波高 H_{max} を $x = 0$ における波高 (以下、入射波高) H_0 で正規化し、また x をボックス 1 の高さ h_d で無次元化している。 H_0 の値は実験ケースにより異なるが、24mm から 92mm までの範囲にある。実験結果には計測誤差等によるばらつきが見られるが、一般的な傾向として、以下のような特性が見られる。

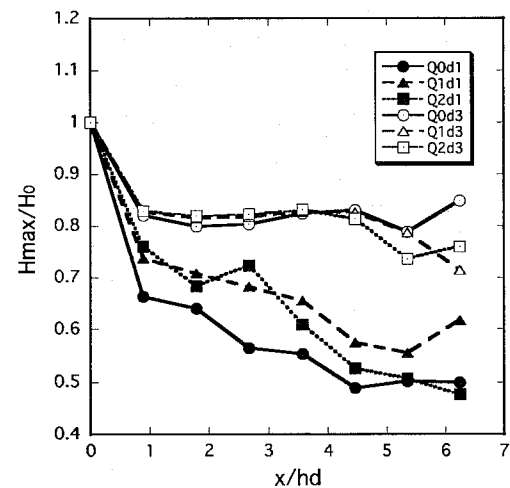
- 水路部分の水深が大きい場合には、波高の減衰は比較的小さい。
- 水路部分に流れがある場合には、波高の減衰が小さい。
- 造波板の移動速度 V が大きい、すなわち入射波高が大きい場合には、波高の減衰が大きい。
- 水深が大きく、水路部分に流れがあり、入射波高が比較的小さいケース (Q2V1d3) では、波高が入射波高より増大する場合がある。



(a) 造波板速度が V1 のケース



(b) 造波板速度が V2 のケース

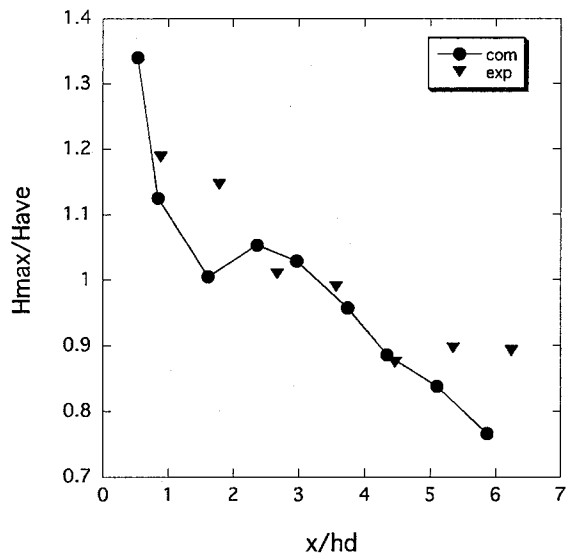


(c) 造波板速度が V3 のケース

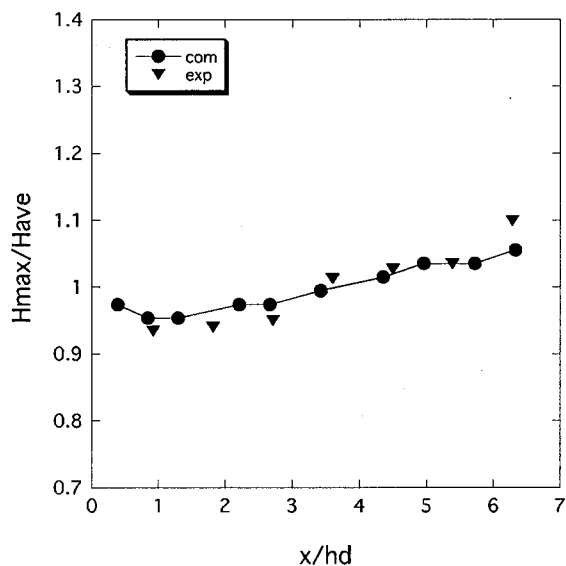
図-12 最大波高と流下距離の関係 (実験結果)

上記の実験結果のうち、水路部分における波高の増加および減少が顕著な例である Q0V3d1 と Q2V1d3 の 2 ケースについて、実験結果と計算結果を比較した。その結果を図-13 に示す。図中では、水路部分の各位置で得られた最大波高の平均値 H_{ave} を用いて、最大波高を無次元化している。

水路部分に流れがなく、比較的大きい波が入射するケース Q0V3d1 では、水路部分で波高は大きく減衰する。一方、これと対照的にケース Q2V1d3 では、遡上に伴い波高が増加する。いずれのケースでも、計算結果は波高に関するこれらの傾向をよく再現していると考えられる。



(a) ケース Q0V3d1 の結果



(b) ケース Q2V1d3 の結果

図-13 最大波高と流下距離の関係
(実験結果と計算結果の比較)

5.4 流れによる物体輸送

水路部分を遡上する波動流れによる物体輸送について実験と計算を行った。実験では、木製の球体 1 つを水路下流端付近に設置し、造波装置で発生させた波により球体が輸送される過程を計測した。初期状態で球体移動しないように、物体輸送に関する実験では、水路部の流量 Q を 0 とした。また、この実験では、 $d = 1.4\text{cm}$ 、 $V = 20\text{cm/s}$ という条件とした。

波速 w と球体の移動速度 v_p を実験と計算で比較した結果を図-14 に示す。波高は側面から、また球体位置は上面から同時に記録された画像を用いて求めたが、波高に関しては画像の記録範囲の制限のため、下流端近傍の結果しか得られていない。図-14 に見られるように、球体速度は波速の半分程度であり、両者には大きな差があることがわかる。計算結果は、波速および球体速度ともに概ね実験結果を再現しているが、細部を見ると、初期の球体速度などに関して相違があり、このような点に関しては今後詳細な検討が必要と考えられる。

球体が波動流れにより輸送される状況を図-15 に示す。球体は波動流れが到達した直後は浮遊して移動を開始するが、波は球体を追い越して先に進行していく。これは、図-14 に見られたように、波速が球体速度より大きいためである。球体はその後、一部水没するような挙動を示しながら波の進行方向へと移動する。

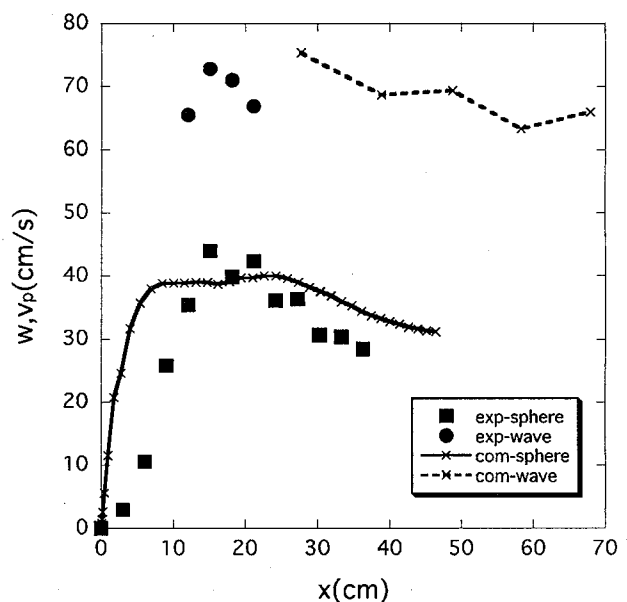


図-14 球速と波速の実験結果と計算結果 (●と破線が波速, ■と実線が物体速度)

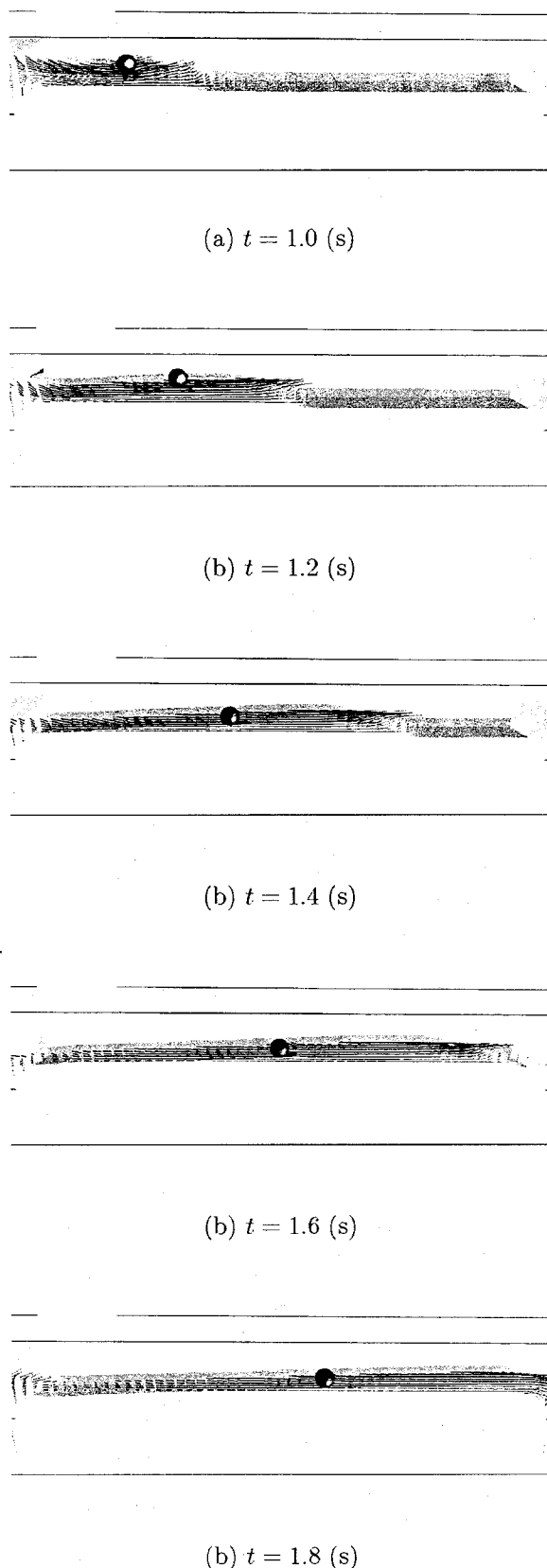


図-15 波動流れによる球体の輸送過程
(計算結果)

6. 結言

本研究では、水路部分を遡上する波動流れの特性と物体輸送過程を把握するための水理実験を行った。また、上記の現象を数値的に予測する多相場の3次元解法(3D MICS)について、基本的な検証を行うとともに、実験結果を用いて適用性を検討した。その結果、水路部分の波高の減衰あるいは増加の傾向や輸送される物体の速度などがほぼ妥当に再現されることが示された。

参考文献

- 1) 牛島省, 牧野統師, 円界正憲, 瀬津家久. 水路を遡上する波動流れとその氾濫流に対する3次元数値計算. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 679-684, 2006.
- 2) 牛島省, 牧野統師, 瀬津家久. 建物間に浸入する氾濫流に対する3次元多相場の数値計算法(3d mics)の適用. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 673-678, 2006.
- 3) 牛島省, 山田修三, 瀬津家久. 3次元MICSによる波動流れにおける物体輸送の並列数値計算. 海岸工学論文集, Vol. 52, No. (1), pp. 31-35, 2005.
- 4) 森岡茂樹. 混相流体の力学. 朝倉書店, 1991.
- 5) 牛島省, 竹村雅樹, 瀬津家久. コロケート格子配置を用いたMAC系解法の計算スキームに関する考察. 土木学会論文集, No. 719/II-61, pp. 11-19, 2002.
- 6) 牛島省, 瀬津家久. 陰解法を用いたコロケート格子による高次精度の流体解析手法の提案. 土木学会論文集, No. 719/II-61, pp. 21-30, 2002.
- 7) 牛島省, 奥山洋平, 藤田学, 瀬津家久. C-HSMAC法を用いる3次元非構造コロケート格子上の並列流体計算法. 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 347-354, 2004.
- 8) 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 瀬津家久. 3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解法(3D MICS)の提案と適用性の検討. 土木学会論文集, Vol. 810/II-74, pp. 79-89, 2006.
- 9) P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 10) G.H. Keulegan and L.H. Carpenter. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. *Jour. of Res. of the National Bureau of Standards*, Vol. 60, No. 5, 1958.
- 11) H. Sakamoto and H. Haniu. A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow. *J. Fluids Engineering*, Vol. 112, pp. 386-392, 1990.
- 12) E. Achenbach. Vortex shedding from spheres. *J. Fluid Mech.*, Vol. 62, pp. 209-221, 1974.
- 13) H. A. Van Der Vorst. BI-CGSTAB: A first and smoothly converging variant of BI-CG for the solution of nonsymmetric linear systems. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, Vol. 13, pp. 631-644, 1992.

(2006年4月13日 受付)