

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

牛島省*・山田修三**・瀬津家久***

自由水面の変動を伴う流れにより水深と同程度のスケールの物体が輸送される現象を数値的に評価する手法について検討を加えた。本報で扱う数値解法は、固気液多相場の解法である MICS を 3 次元化および並列化したものである。検証データを得るため、造波水槽を用いて、波動流れにより直径 40 mm の複数のアクリル球体が輸送される状況を把握した。障害物（ボックス）の配置を換えた実験を行い、球体の分布パターンを数値解と比較した結果、各条件において球体輸送がほぼ適切に再現されることが確認された。

1. はじめに

津波や高潮等の災害時に、自由水面の変動を伴う流れによって船舶や家屋材などが輸送され、漂流物を含む流れに人が巻き込まれたり、輸送物が建造物等に衝突して被害が生ずる事例がある。本報では、このような波動流れにより、水深と同程度の大スケールの物体が輸送される現象を評価する数値解法について検討を加える。

津波により生ずる流体力や輸送される物体の衝撃力に関しては、実験的な研究(松富ら, 2004; 池野ら, 2001)が行われており、物体輸送の数値解法の検討も進められている(今村ら, 2001)。既往の数値解法においては、物体が存在しないときの流速を用いて相対速度を見積もり、抗力係数等の経験定数を用いて流体力を算出するか、あるいはそれに類した手段が用いられることが多いのである。しかしながら、物体に作用する流体力は自由水面変動や後流渦等の周囲流の圧力の影響を受けること、また物体自体が移動するため相互作用が複雑化することなどにより、上記の解法では正確な数値予測は困難である。すなわち、数値解法では抗力係数などの経験定数を用いずに、後流渦などの周囲流を正確に評価することによって流体力を算定することが不可欠であり、さらに自由水面の挙動や移動する物体を適切に扱うことが必要である。本報では、MICS(牛島ら, 2003)を 3 次元化および並列化した手法を用いて、造波水槽で得られた球体運動の実験結果に対する計算を行い、その適用性を検討する。

2. 数値解法

多相場の数値解法 (Yabe ら, 1991) で行われているように、大スケールの物体を含む自由水面流れを物性値が異なる非圧縮性流体の混合体として扱う。Lagrange 表示された質量保存則、非圧縮条件、保存形の運動方程

式は次式のように表される (牛島ら, 2005)。

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu u_j) \right] \dots\dots (3)$$

ここで、 ρ は体積平均密度、 u_i は質量平均速度成分、 p は体積平均圧力、 μ は体積平均粘性率、 f_i は体積力 (重力加速度) である。これらにコロケート格子を用いる非圧縮性流体計算法を適用する。移流項に高次精度の保存形スキームを用い、圧力計算には C-HSMAC 法を用いる。流体計算の結果を用いて物体に作用する流体力を求め、3 次元個別要素法モデルにより評価された接触力を加えて、物体の運動方程式を数値積分する。これらの詳細は 2 次元計算 (牛島ら, 2003) とほぼ同様である。

3 次元場では計算負荷が増大するため、上記の解法に MPI を用いた並列計算法を導入した。計算領域を 3 次元領域分割し、領域間に重合格子点を設ける形で SPMD 型の計算法とした。図-1 にいくつかの圧力計算法に対する

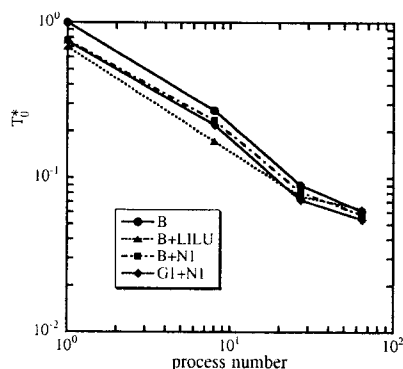


図-1 正規化された計算時間 T_0^* とプロセス数の関係 (B=BiCGSTAB 法, G1=GCR(1) 法, LILU=不完全 LU 分解前処理, N1=打ち切りノイマン展開前処理)

* 正 会 員 工博 京都大学助教授社会基盤工学専攻
** 正 会 員 (株)竹中土木
*** フェロー 京都大学教授社会基盤工学専攻

プロセス数と計算時間の関係を示す。プロセス数の増加に伴い計算時間が短縮化されることが確認された。

3. 計算手法の適用性

(1) 一様流中に置かれた球に対する抗力係数

本研究の数値解法では、抗力係数などの経験定数を用いずに物体に作用する流体力を評価することができる。この点に関する基本的な検証を行うため、一様流中に置かれた球体に対する抗力係数を計算で求めて、その結果を既往の実験結果を近似する曲線(White, 1991)と比較した。両者は図-2に示すように一致しており、数値解法により流体力がほぼ妥当に算定されることが示された。

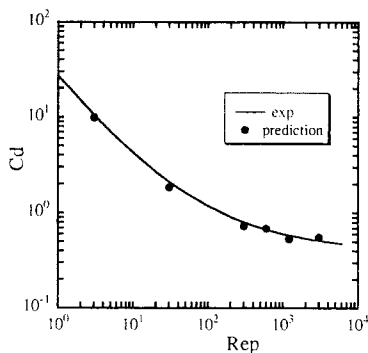


図-2 球に対する抗力係数の比較

(2) 水理実験の概要

波動流れにおける物体輸送に対する基礎的な実験データを得るため、造波装置の付いた水槽を用いて複数のアクリル球体の移動状況を調べる水理実験を行った。水槽の概略形状を図-3に示す。

パルスモータ内蔵スライダにより平板を下流側へ平行移動させることによって造波を行う。造波板の移動パ

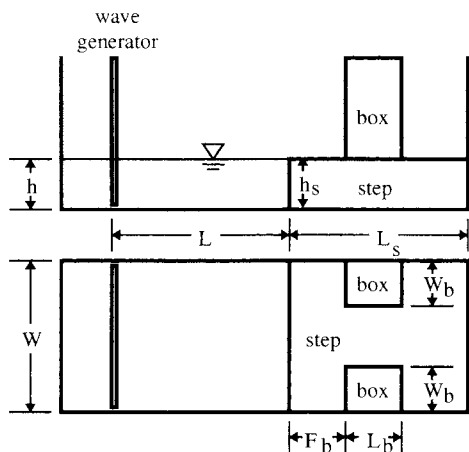


図-3 造波水槽の概形

ーンは、0.2 m/sの移動速度で下流側へ d_w だけ移動させ、そこで停止させる条件とした。水槽の下流側にはステップが設置されている。ステップ上には最大2個までボックスを設置することが可能である。ボックスは水槽に固定され、流れによって移動することはない。

水槽の形状は、 $W = 0.19$ m, $L = 0.9$ m, $L_s = 0.4$ mである。ボックスの大きさは $w_b = 0.06$ m, $L_b = 0.1$ mであり、設置する際の位置は $F_b = 0.18$ mとした。ステップの高さは $h_s = 0.1$ mである。

(3) 波動流れの再現性

最初に、アクリル球体が置かれていない条件において、自由水面の挙動が適切に再現されることを確認する。このために、水槽内にステップのみを設置し、上流側水深を $h = 0.14$ m, 造波条件を $d_w = 50$ mmとして、ステップの前縁付近の波高を容量式波高計で計測した。

波高計により計測された水深の最大値 h_p の到達時刻と水深の変化を図-4と図-5に示す。図-4の t^* は $\sqrt{h/g}$ で正規化された時刻であり、図-5では h_p は計測区間中の最大値 $h_{pm} = 0.155$ mで正規化されている。

水槽内にはステップがあるため、その先端($x/h \approx 6.43$)近傍で波速が変化し、また波高はステップ先端より上流側で極大となり、その下流側では低下するという実験結果が得られた。図中の破線は数値計算であり、実

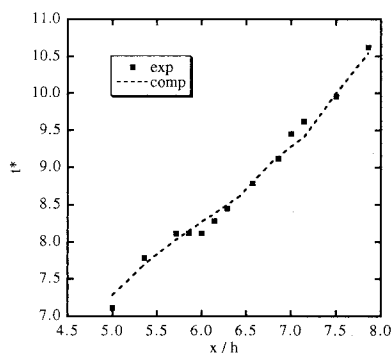


図-4 最大水深の到達時刻

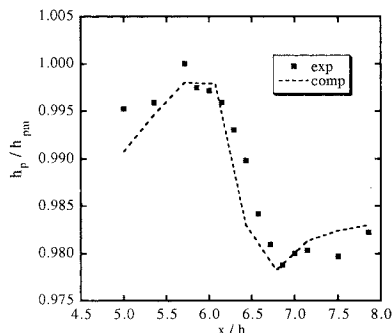


図-5 流下方向の最大水深の変化

験結果と概ね一致している。この結果から、自由水面の挙動は適切に再現されていると考えられる。

(4) 球体運動に対する数値計算と考察

次に、ステップ上に直径40 mm、比重約1.2のアクリル球体を置き、それらが造波により生じた波動流れによって輸送される状況を把握する実験を行った。図-6に示すように、ステップ上流側に9個の球体を設置する。図-6中に示される球体中心点の初期位置は、 $a = 25$ mm、 $b = c = 50$ mmとした。既報(牛島ら, 2005)では、ボックス数を1と固定したが、本報ではボックスの個数を0, 1, 2と変化させ、合計3ケースの実験を行った。造波条件は $d_w = 0.1$ mとした。上流側水深は $h = 0.1$ mとし、ステップ高さと同しくした。このため、ステップ上は実験開始時にはドライな状態であり、造波によって生じた波動流れがステップ上に乗り上げて球体に当たり、これらを下流側へ移動させることになる。

実験では、球体の運動を水槽上部に設置したビデオカメラで撮影し、画像を解析することで球体位置を求めた。図-7は撮影された球体分布の例である。ボックスが1個の場合には非対称な球体の分布が生じ、2個の場合には多くの球体がボックスに衝突する一方、ボックス間を通り抜ける球体があることが観察される。

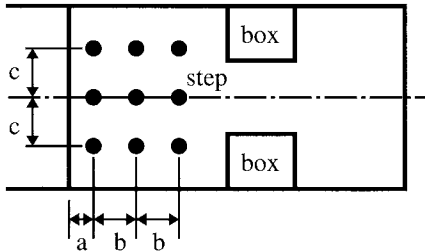


図-6 球体初期位置とボックスの配置

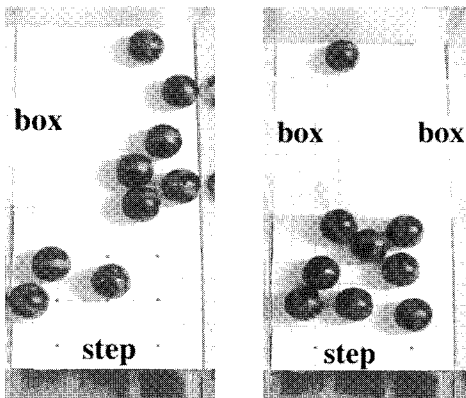


図-7 実験で計測された球体分布の例
(手前が上流側、左=ボックス1個、右=ボックス2個)

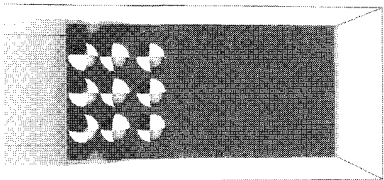
数値計算では、格子間隔をいずれの方向にも10 mmとし、時間増分 Δt は0.01 sとした。予測段階の計算には、C-ISMALC法による陰解的解法(牛島・瀬津ら, 2002)を利用した。水の動粘性係数と密度は 1.0×10^{-6} m²/s および 1.0×10^3 kg/m³とし、空気に対してはそれぞれ1/10, 1/1000の値を用いた。1ステップ間の圧力変化量である ϕ に対する連立1次方程式は、前処理付きのBiCGSTAB法を用いて解き、残差ベクトルのしきい値は 1.0×10^{-8} とした。C-HSMAC法における連続性の誤差のしきい値は 1.0×10^{-10} とした。

図-8, 図-9および図-10に、それぞれボックス数を0, 1, 2としたときの計算結果を示す。これらはいずれも左側が水槽上流側であり、鉛直上方から計算結果を見た表示となっている。ボックスが設置されない条件では、9個の球体は前後の間隔を狭めながらほぼ一群となって下流側へ移動して下流端付近で停止する。これに対して、ボックスが1個設置された場合には、球体はボックスに衝突して反対側のスペースに展開する。ボックスが2個の場合には、下流端中央の球体とその上流側の球体がボックス間を通り抜けて下流端へ達する。それ以外の球体はボックスおよび他の球体に衝突してボックス前面で停止する。

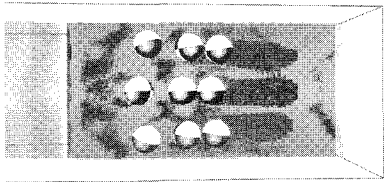
いずれの実験条件においても、下流側へ移動した球体は波動流れの影響が減衰するとそこで停止する。図-11から図-13は、球体が停止したときの分布を実験と計算で比較したものである。これらの図中に示された実験結果は、複数回の試行結果を重ね書きしたのとなっており、各ケース9個以上の球体位置が示されている。実験では球体の初期位置やステップ上面の平滑度など、いくつかの要因により試行毎に分布がわずかに異なるが、実験で得られた平均的な分布状況と計算結果は概ね一致していると見ることができる。

4. おわりに

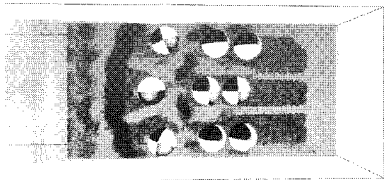
自由水面の変動を伴う流れにより水深と同程度のスケールの物体が輸送される現象を数値的に評価するために、固気液多相場の解法であるMICSを3次元化および並列化した手法の適用性について検討を加えた。3次元MICSの1つの特徴は、物体周辺の流れを適切に再現することにより、抗力係数等の経験定数を使用せずに物体に作用する流体力を評価できる点にある。波動流れによって生ずる複数のアクリル球体の分布状況は3次元MICSによりほぼ良好に再現されたが、今後は流体力に関するより詳細な検証を行うとともに、実用的な問題への応用を進めつつ、解法の有効性の確認を行うことが必要と考えられる。



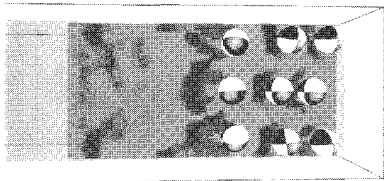
(a) $t = 1.2\text{s}$



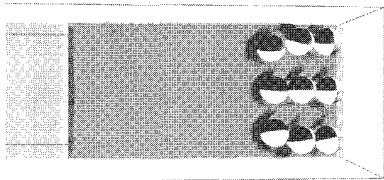
(b) $t = 2.5\text{s}$



(c) $t = 3.0\text{s}$

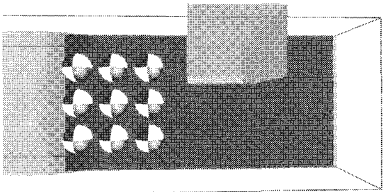


(d) $t = 4.6\text{s}$

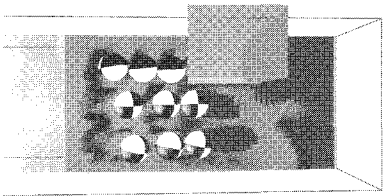


(e) $t = 6.0\text{s}$

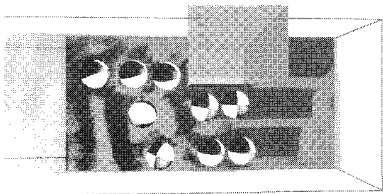
図-8 数値計算結果(ボックスなし)



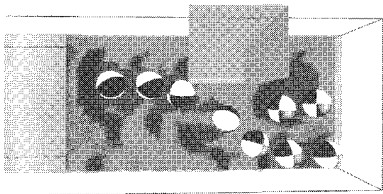
(a) $t = 1.0\text{s}$



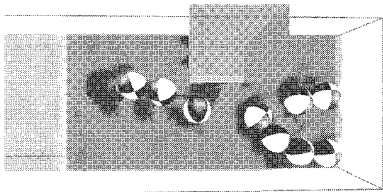
(b) $t = 2.2\text{s}$



(c) $t = 3.0\text{s}$



(d) $t = 4.7\text{s}$



(e) $t = 6.0\text{s}$

図-9 数値計算結果(ボックス1個)

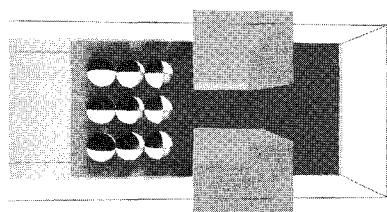
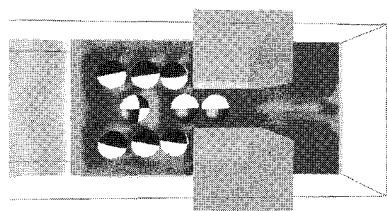
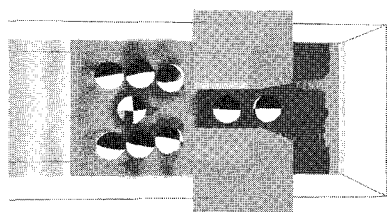
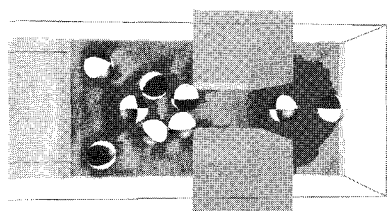
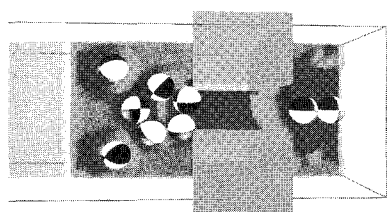
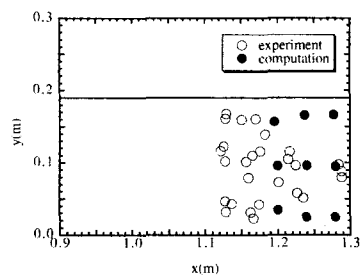
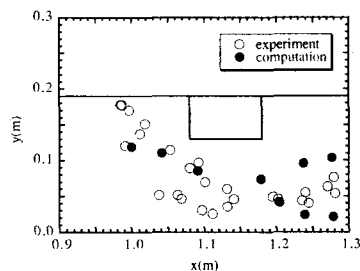
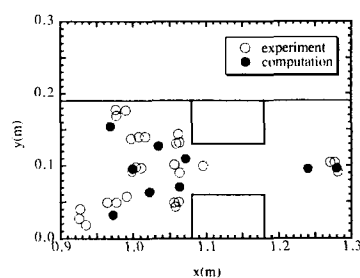
(a) $t = 1.4s$ (b) $t = 2.5s$ (c) $t = 3.5s$ (d) $t = 4.9s$ (e) $t = 6.0s$

図-10 数値計算結果(ボックス2個)

図-11 球体分布の比較(ボックスなし,
 $t = 6.0s$, 実験は複数回の結果を表示)図-12 球体分布の比較(ボックス1個,
 $t = 6.0s$, 実験は複数回の結果を表示)図-13 球体分布の比較(ボックス2個,
 $t = 6.0s$, 実験は複数回の結果を表示)

参 考 文 献

- 池野正明・森信人・田中寛好(2001): 碎波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝撃力に関する実験的研究, 海岸工学論文集第48巻, pp. 846-850.
- 今村文彦・吉田功・アンドリュウ・ムーア(2001): 沖縄県石垣島における1771年明和と大津波と津波石移動の数値解析, 海岸工学論文集第48巻, 346-350.
- 牛島省・竹村雅樹・山田修三・棚津家久(2003): 非圧縮性流体解析に基づく粒子-流体混合系の計算法(MICS)の提案, 土木学会論文集 No.740/II-64, pp. 121-130.
- 牛島省・棚津家久(2002): 陰解法を用いたコロケート格子による高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.
- 牛島省・山田修三・藤岡奨・棚津家久(2005): 3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解法, 土木学会論文集(投稿中).
- 松富英夫・大向達也・今井健太郎(2004): 津波氾濫流の構造物への流体力, 水工学論文集第48巻, pp. 559-564.
- White, F. M.(1991): Viscous fluid flow. McGraw-Hill.
- Yabe, T. and P. Y. Wang(1991): Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid, J. Physical Soc. Japan 60(7), pp. 2105-2108.