

弾性体群に作用する波動流れの流体力に関する3次元数値解析

3D numerical prediction for fluid forces due to wave-induced flows
acting on multiple elastic bodies

中村 元太*・吉川 教正**・牛島 省***・黒田 望****

Genta Nakamura, Norimasa Yoshikawa, Satoru Ushijima and Nozomu Kuroda

*学生会員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻修士課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラス)

**アイシン精機株式会社 (〒448-8650 愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地)

***正会員 工博 京都大学教授 学術情報メディアセンター (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

****学生会員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻修士課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラス)

This paper presents a computational method to predict the fluid forces due to wave-induced flows acting on multiple elastic bodies. This method is based on a solver for multiphase fields (MICS), which can deal with the movements and deformations of solid bodies included in free-surface flows. It was demonstrated that the fluid forces acting on multiple rigid cylinders are adequately predicted in our previous studies. Thus, in this paper, the computational method is applied to multiple elastic cylinders and square pillars that can be deformed due to the fluid forces. The deformations of elastic bodies are assumed to be infinitesimal and their values on the node points of tetrahedron elements are calculated with FEM. To confirm the validity of the prediction method, it was applied to the fluid forces against elastic bodies in wave-induced flows measured in experiments. As a result, it was shown that the fluid forces acting on multiple elastic cylinders and shielding effects in multiple elastic square pillars are reasonably predicted.

Key Words : fluid-solid interaction, free-surface flow, elastic body, shielding effects

1. はじめに

洪水時や津波来襲時には、陸上に存在する種々の物体が自由水面流れの影響を受ける。特に、河岸付近や海岸周辺の樹木や草本類などは、流れの抵抗となり、水位や流速を変化させる場合があるため、その効果を適切に把握することは重要な課題である。

このような問題に対して、これまでに、円柱群に作用する流体力に関する実験^{1), 2)}、洪水時における現地規模での検討^{3), 4)}、個別要素法による検討⁵⁾、流体-構造連成問題の数値的な検討^{6), 7)}などが行われている。既往研究のうち、数値解析による検討では、植生は剛体とされることが多かったが、本報では流れによる植生群の変形を考慮するため、これらを弾性体として取り扱い、弾性体として扱える植生群に作用する流体力を予測する計算手法の有効性を検討する。

本報で用いる数値解法は、多相場の解法であるMICS⁸⁾に、弾性体の変形を微小変形理論に基づいて有限要素法(FEM)で計算する固体モデルを導入したものである⁹⁾。この手法の精度を上げるため、既報¹⁰⁾では固体モデルに2次要素を導入した。さらに、この解法を用いて、弾性単体角柱に作用する流体力の評価を

剛性単体角柱と比較して妥当性を検討した¹¹⁾。一方、これまでの検討では単体の物体に作用する流体力を計算対象としていたが、既報¹²⁾では剛体円柱群に作用する流体力の評価を行った。これに対して、本報では複数の弾性体に対して解法の検討を行うこととする。

本研究では、波動流れに置かれた弾性円柱群および弾性角柱群に対して、前者に対しては円柱群全体に作用する流体力、また後者に対しては角柱群内部の遮蔽効果に着目し、実験結果との比較を通じて、計算手法の有効性を確認する。実験結果との比較を通じて、解法の有効性を議論する。

2. 数値解析手法

2.1 基礎方程式

本研究で扱う3次元多相場の解法であるMICSでは、物体を含む自由水面流れ場を物性値の異なる混ざり合わない非圧縮性流体の混合体として扱う。この多相場に対する基礎式を以下に示す。

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

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

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

式(1)はEuler表記による質量保存則、式(2)は非圧縮条件、式(3)は保存形表示された運動方程式である。\$t\$と\$x_i\$は時間と3次元直交座標系の座標成分を表す。\$\rho\$、\$\mu\$、\$p\$は順に計算セル内の体積平均操作によって求められる密度、粘性率、圧力である。また、\$u_i\$はセル内の質量平均された流速成分である。\$f_i\$は外力(体積力)の加速度成分を表す。基礎式の導出過程は既報¹³⁾に示されている。

計算方法の概要は以下のとおりである⁸⁾。最初に、四面体サブセル法¹⁴⁾により、流体計算セルに含まれる物体体積を算出し、体積平均された物性値等を求める。次にコロケート格子を用いる非圧縮性流体計算法に従い、まず、セル中心で流速の推定値を求める。この予測段階の計算では、陰的解法であるC-ISMALC法移流項の計算には、5次精度TVDスキーム¹⁵⁾を利用する。次に、流速の推定値をセル境界に空間内挿して圧力勾配を考慮し、C-HSMALC法¹⁶⁾による圧力計算を行う。自由水面形状は、式(1)を保存形スキームで解いて求める。

2.2 固体部分の取り扱い

本研究では、流体中に存在する物体を四面体要素により表現する。この固体モデルの概要を以下に示す。

1. 対象とする物体を四面体要素に分割する。
2. 物体の体積、質量や慣性テンソルなどの物性量を各四面体要素の値に基づいて評価する。
3. 物体に作用する流体力は、多相場の計算結果を用いて、圧力項と粘性項の体積積分により評価する。
4. 物体間の接触判定には、固体モデル表面近傍に配置した接触判定球を用いる。

図-1に、本論文で扱う円柱群に対する固体モデルの一例を示す。円柱群に対しては、これらを剛体と扱った既報¹²⁾と同様の四面体要素を用いている。物体を表現する四面体要素は汎用CADソフトウェアで外形を形成した後、格子生成ソフトウェアを用いて生成される。このため、より複雑な形状の物体を扱うことも可能である。

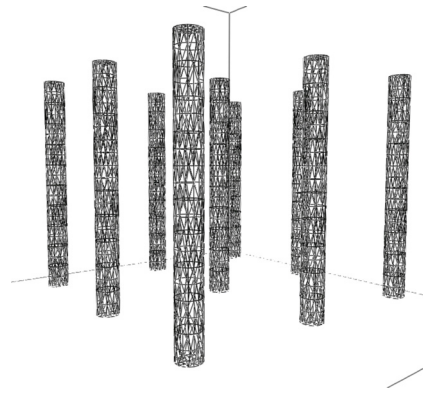


図-1 円柱群に対する四面体要素モデル

2.3 弾性体モデル

本研究では、流体中に存在する物体を線形弾性体と仮定し、その微小な動的挙動をFEMにより計算する。物体は図-2に示すような四面体2次要素を用いて表現される。四面体2次要素では、図-2のように1要素に10個の節点を設け、その各節点の変位を計算する。各節点の3次元変位を成分とするベクトルを\$d\$とすれば、物体の動的挙動に関する支配方程式は次式となる。

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + F_{int} = F_{ext} \quad (4)$$

上付きのドットは、時間微分を表す。ここで、\$M\$は質量マトリックス、\$C\$は減衰マトリックス、\$F_{int}\$は、次式で表される内力ベクトル、\$F_{ext}\$は流体力などの外力ベクトルである。

$$F_{int} = \int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega \quad (5)$$

ここに、\$\sigma\$は応力ベクトル、\$B\$は形状関数で表現されるひずみ変位マトリックスである。質量マトリックス\$M\$の要素は、一般に\$\rho_b\$に形状関数を乗じて、これを四面体要素内で積分して得られた行列から構成される。本報では、集中質量を対角要素とする集中質量マトリックスを用いる。

式(4)の減衰マトリックス\$C\$は質量マトリックスと同様に、減衰係数と形状関数の積を要素内で積分して得られた行列から構成される。本報では集中質量マトリックスと同様に、対角行列として表される減衰マトリックスを利用する。動的応答の基礎式である式(4)を時間積分することにより、節点の速度\$\dot{d}\$と変位ベクトル\$d\$が得られる。

2.4 物体に作用する流体力

物体を構成する四面体領域に作用する流体力は以下のように計算する⁹⁾。図-3に概略的に示すように、流

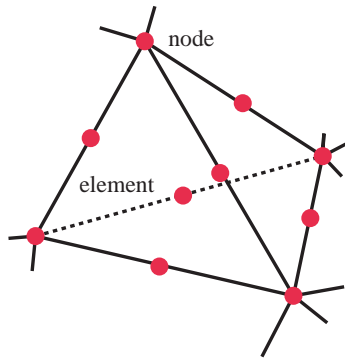


図-2 四面体要素と節点

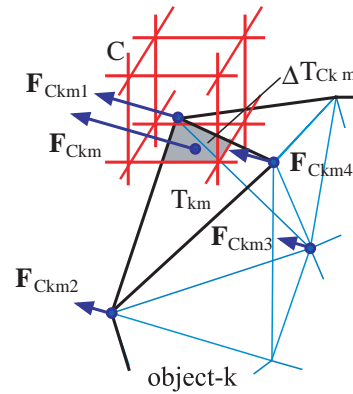


図-3 物体に作用する流体力の評価方法

体計算セル C 内の多相流体が，セル内に含まれる物体 k の m 番目の四面体要素 T_{km} あるいはその一部分の体積 ΔT_{Ckm} に及ぼす流体力を F_{Ckm} とし，その x_i 方向成分を F_{Ckm}^i と表す． ΔT_{Ckm} は四面体サブセル法により求められる． F_{Ckm}^i は物体 k の密度 ρ_{bk} を用いて，式 (3) の圧力勾配項と粘性拡散項を体積積分することで，次式により求められる．

$$F_{Ckm}^i = \rho_{bk} \Delta T_{Ckm} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu u_j) \right\} \right] \quad (6)$$

式 (6) から得られる F_{Ckm} の総和を求め，その結果を式 (4) 右辺の外力 F_{ext} とする．

物体の動的応答計算の結果は，図-4 に概略的に示すように多相流場に反映される．四面体要素 T_{km} の速度ベクトル v_{km} を用いて，次式よりセル内の質量平均流速 u を定める．

$$u = \frac{1}{m_C} \left(m_f u_f + \sum_k \sum_m \rho_{bk} \Delta T_{Ckm} v_{km} \right) \quad (7)$$

ここで， m_C と m_f は，それぞれ着目する流体計算セル内の全質量および気相と液相の質量， u_f は気相と液相の混合体の流速ベクトルである．

3. 水理実験と解法の検証

3.1 弾性円柱群に作用する流体力

既報¹²⁾では，剛体円柱群全体に作用する流体力について計算手法の有効性の検討を行った．本報では，これとほぼ同一条件のもとで，弾性円柱群に関する実験結果と計算結果を比較して，計算手法の適用性を確認する．

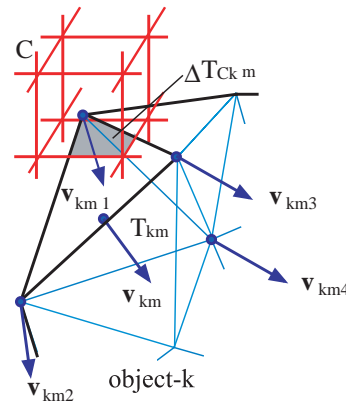


図-4 物体の動的挙動を多相場に考慮する方法

図-5 に，実験装置の概要を示す．水槽長さ L と水槽幅 B は，それぞれ 300 mm 及び 170 mm である．この水槽を，PC 制御された移動板により，図の右方向へ加速運動させる．水槽に与えた加速度は，0 から 0.224 s までが 1.0 m/s^2 ，0.224 から 0.448 s までが -1.0 m/s^2 でその後停止させる．初期水深 h_0 は 50 mm であり，上記の加速により水槽内には波動流れが生じる．

水槽内には，図-6 に示すような円柱群がアクリル板に設置されている．その中央部分に支持鋼板 (steel plate) が取り付けられている．アクリル板は，1 辺の長さ b が 110 mm の正方形であり，厚さは 2 mm である．鋼板上部には，共和電業製の歪みゲージを軸方向に 4 枚取り付け，それらの出力をセンサインタフェースで取り込み，PC にデジタル値として収録した．取得したデータには移動平均を作用させて支持板の固有振動を除去した．鋼板の形状は， $300 \times 15 \times 2 \text{ mm}$ であり，ヤング率は $5.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ，固有周期は 0.03 s である．実験によって求めた減衰定数は 0.01 s^{-1} である．

円柱群は水槽とともに移動せず，外部のフレームに固定されているため，水槽移動後には，水槽の移動距離分だけ図の左方向に相対的に移動した状態となる．移動距離 x_0 は，約 50 mm である．水槽左端から円柱群

を支持する 鋼板の初期位置までの距離 L_0 は、225 mm である。

図-7 に、実際に実験で用いた弾性円柱群の模型を示す。円柱の直径 D は 8 mm、長さ l は 87 mm で質量は 6 g である。円柱はその中心間隔 d を等しく配置されており、アクリル板 1 辺に、それぞれ 2, 3, 4, 5, 6 本配置する 5 条件とした。各条件における円柱の中心間隔 d はそれぞれ 100, 50, 33, 25, 20 mm である。1 辺に m 本の円柱が配置された実験ケース名を、以下では case- $m \times m$ と表記する。



図-7 実験で用いた弾性円柱群の写真

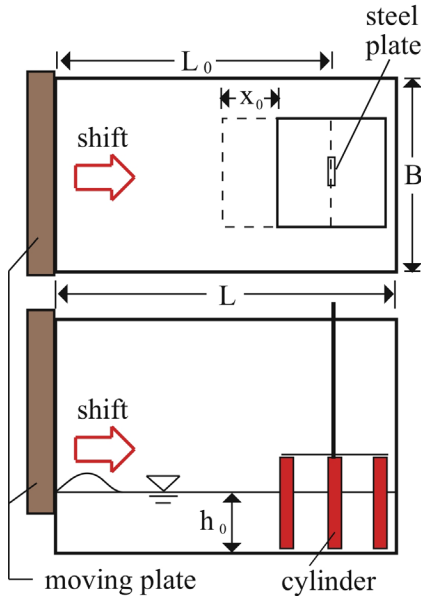


図-5 実験水槽の概要 (上=側面図, 下=平面図)

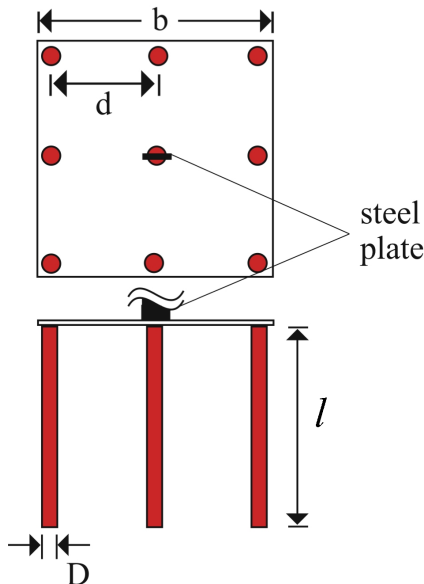


図-6 円柱の配置

計算対象領域は、水平方向は水槽内寸と同一の 300×170 mm、鉛直方向は空気部分を含む底面から高さ 150 mm までの領域として、それぞれ 90×60×30 の

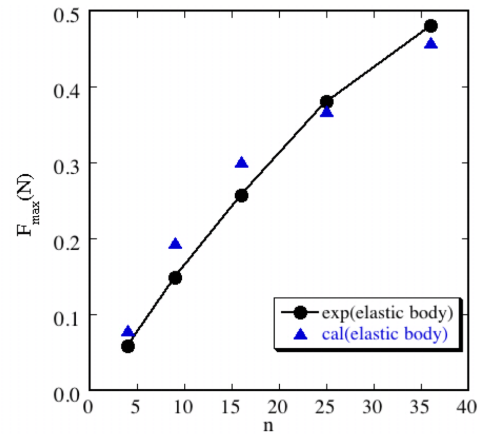


図-8 円柱の本数 n と円柱全体に作用する最大流体力 F_{max} の関係

流体計算セルを設定した。各方向の流体計算セル幅は、約 3.3×2.8×5 mm となる。1 本の円柱に対する四面体の節点数と要素数は 1730 および 915 である。また、弾性円柱のヤング率は実験で求めた 4.7×10^5 Pa とした。弾性円柱の固有周期、波長の減衰比の対数を取り 2π で割ることにより算出された減衰定数は、0.11 s、0.08 s^{-1} である。計算で用いた減衰係数は、減衰定数から求められる。計算の初期条件は実験と同一であるが、計算では水槽を移動させず、水槽加速度時には、水平加速度を与えた。すなわち、0 から 0.224 s までは -1.0 m/s^2 、0.224 から 0.448 s までは -1.0 m/s^2 の水平加速度を加えた。すなわち、計算では水槽が基準となつて静止しており、これに水平加速度が加えられると同時に円柱群が移動するものとした。

図-8 に、水槽加速後に発生する第 1 波の流体力のピーク値 F_{max} と円柱の本数 n の関係を示す。実験と計算に若干の相違があるものの、両者は概ね一致している。 n と F_{max} は線形な関係ではなく、 n が増加すると流体力が減少する傾向が見られる。これは、円柱本数密度が増加すると円柱群の遮蔽効果が大きくなるためであると考えられるが、この傾向は数値計算結果でも再現されている。

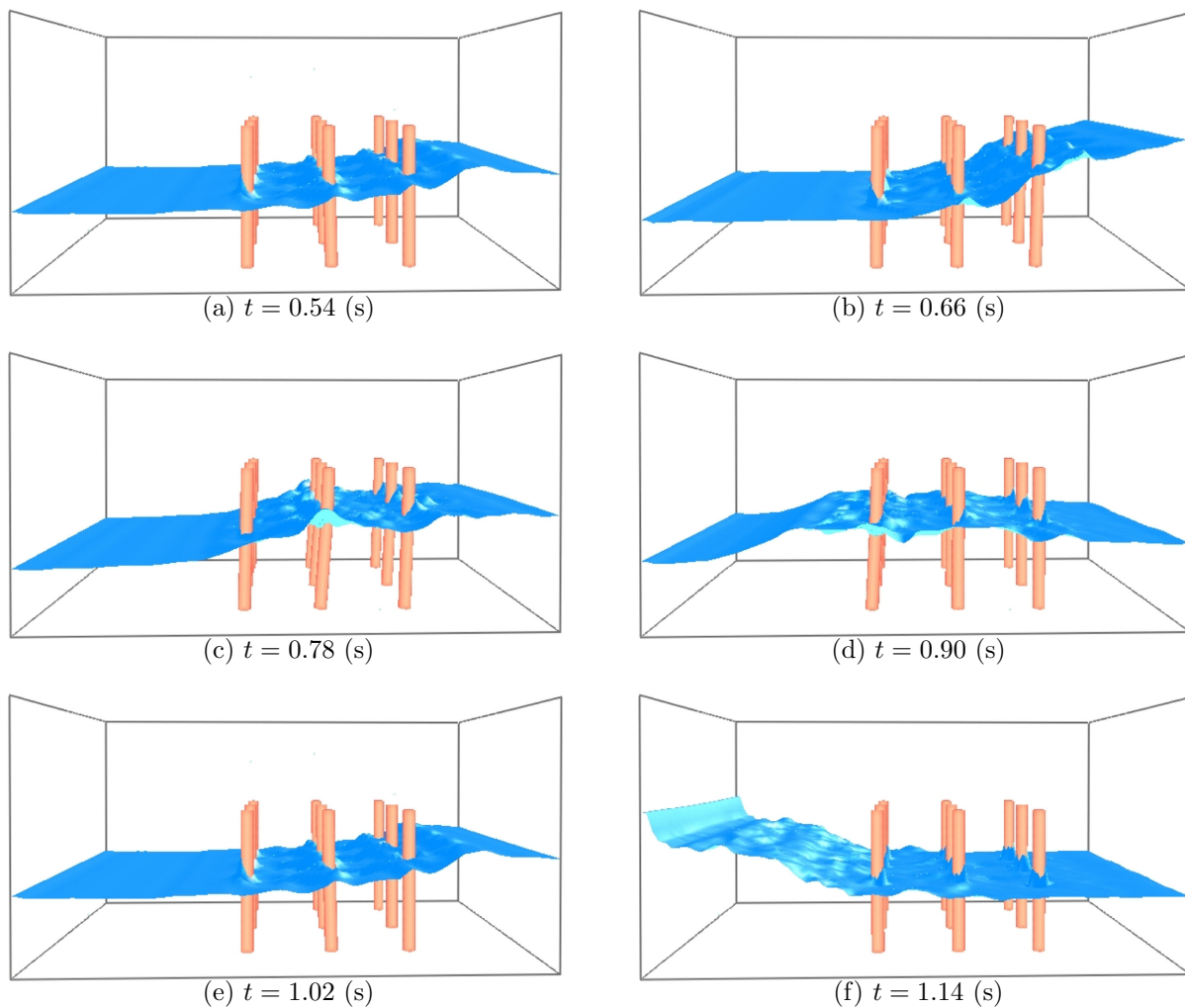


図-9 波動流れの計算結果 (case-3×3)

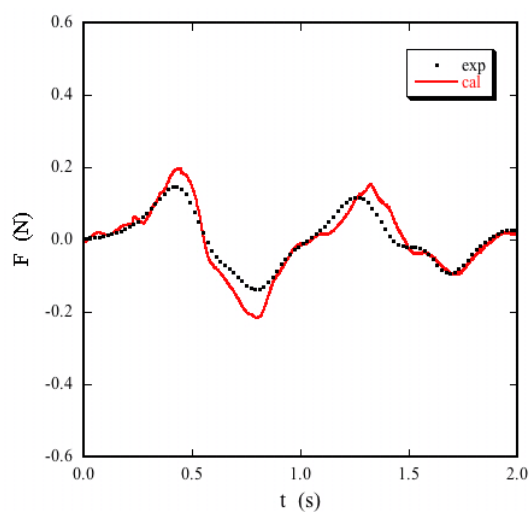


図-10 円柱群全体に作用する流体力の時系列 (case-3×3)

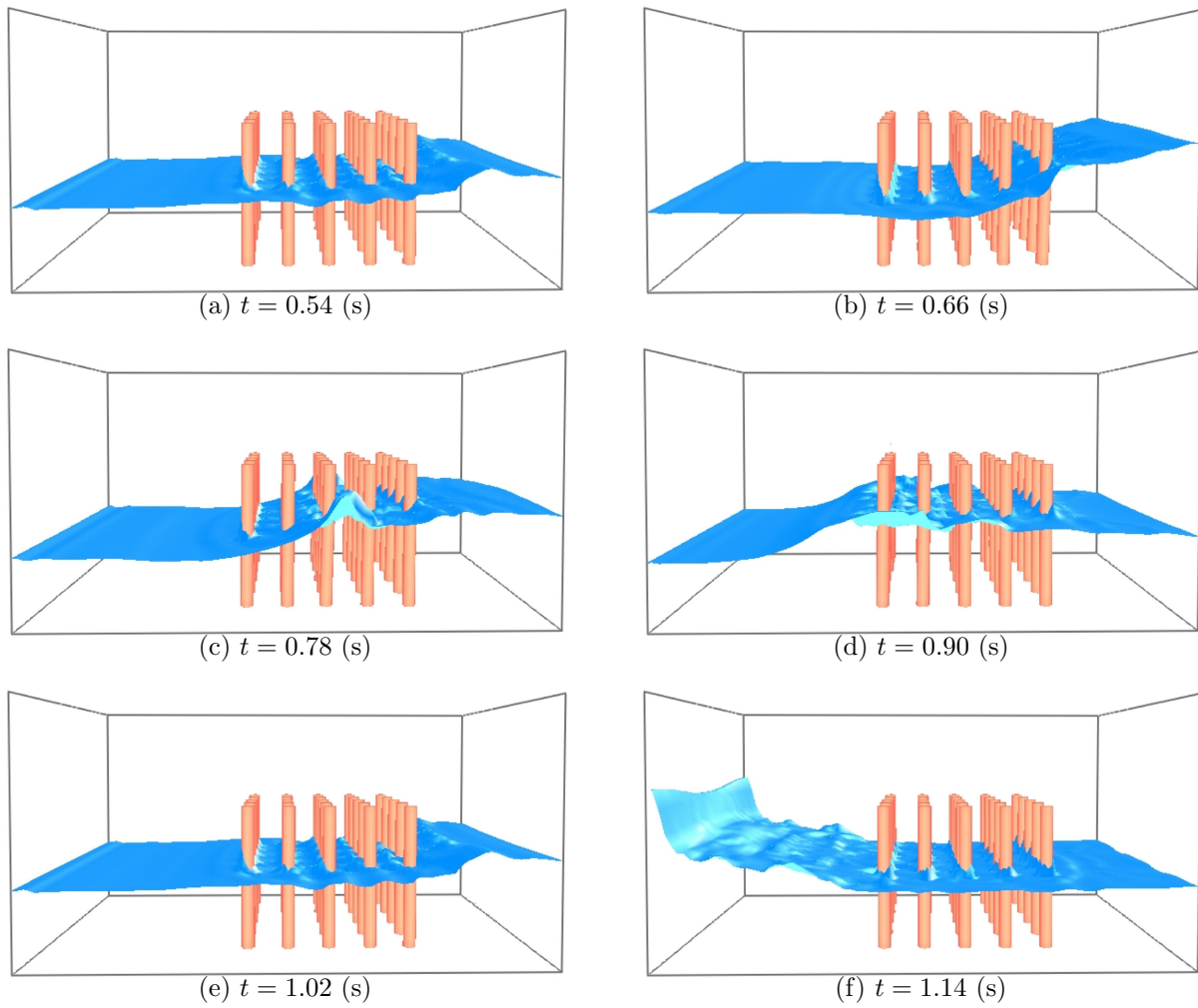


図-11 波動流れの計算結果 (case-5×5)

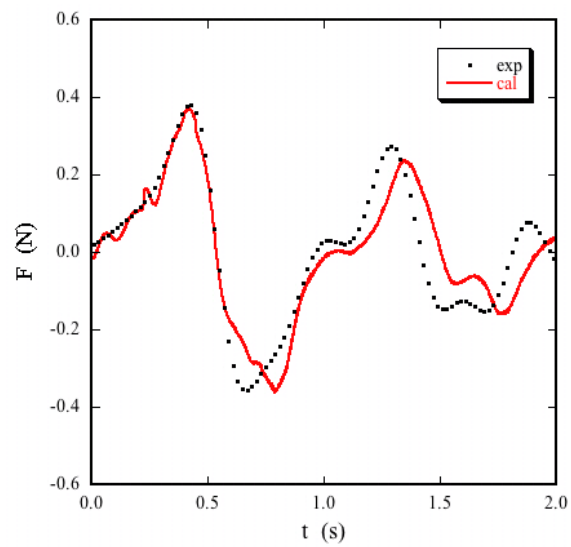


図-12 円柱群全体に作用する流体力の時系列 (case-5×5)

次に、図-9は、case-3×3の条件による波動流れの計算結果であり、図-10は、計算で得られた流体力の時系列である。一方、図-11は、case-5×5の条件による波動流れの計算結果であり、図-12は、計算で得られた流体力の時系列である。自由水面上には、円柱群の存在により波長の短い乱れが生じ、流体力によって円柱が変形する様子のごく微小ではあるが再現できている。流体力の時系列は、よく一致しているが、わずかに振幅や位相の相違が見られる。こうした実験・計算の違いの要因としては、実験装置の精度の問題や計算格子の解像度の影響などが考えられる。

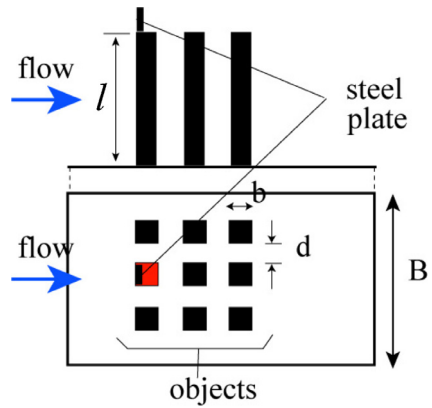


図-14 角柱群の概要

3.2 弾性角柱群の遮蔽効果

波動流れ中に存在する弾性角柱群内の1本の測定用角柱に作用する流体力を計測する実験を行った。実験で用いた水槽の概略を図-13に示す。実験水槽の造波装置側を上流側とする。角柱は横断方向と流下方向の配置数が同じになるように設置し、1辺に3および4本配置する2条件とした。各条件において、測定用角柱の位置を上流側から順番に変えていくことによって、これに作用する流体力を計測した。

測定用角柱の位置は、図-14に示すように、各ケースの左岸側から2番目とし、流下方向に順に位置を変えて計測を行った。この計測用角柱は下端が自由端であり、他の角柱の下端は固定されている。

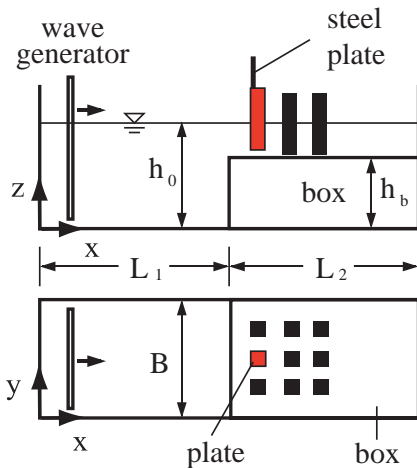


図-13 造波水槽の概要

角柱模型の形状は、 b が20 mmで、高さは150 mmであり、断面は正方形である。角柱模型の比重は0.255である。なお、角柱の変形による底面との接触を避けるため、計測用弾性角柱の下端とボックス上面には約2 mmの間隙を設けている。隣り合う角柱との間隔 d は、それぞれ28および18 mmで、側壁と角柱との距離は、38および28 mmである。実験では、ボックス左端か

ら造波板側0.1 mの位置における最大水深が200 mmとなるように造波条件を定め、最初の1波から生じる波動流れによる流体力を計測した。

計算では、造波板の速度と同様の流速を計算領域左端面に与える。計算対象領域は、水平方向は水槽内寸と同一の1400×190 mm、鉛直方向は空気部分を含む底面から高さ280 mmまでの領域として、それぞれ280×19×56の流体計算セルを設定した。時間増分 Δt は 2.0×10^{-3} 秒とした。1本の角柱を構成する四面要素数は56であり、節点数は163である。角柱のヤング率は、実験で求めた 3.5×10^5 Paとし、減衰マトリックスの要素の値である単位体積あたりの減衰係数は 2.0×10^4 Ns/m³とした。さらに固有周期は、0.19 sである。

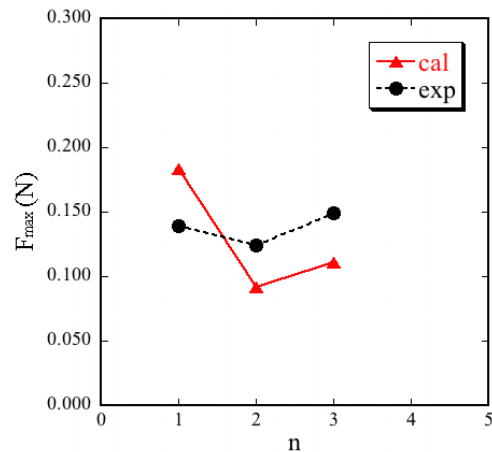


図-15 角柱に作用する流体力の最大値 F_{max} と位置 n 列目の関係(case-3×3)

図-15と図-16は、それぞれcase-3×3およびcase-4×4において、上流側から n 列目の位置の測定用角柱が受ける流体力の最大値 F_{max} を、計算と実験で比較したものである。両者には若干の相違が見られるが、前面の角柱に作用する流体力が大きく、内部では前面よ

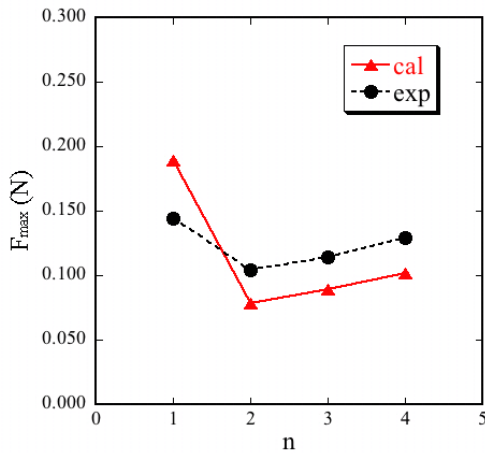


図-16 角柱に作用する流体力の最大値 F_{max} と位置 n 列目の関係 (case-4×4)

りも減少し、そして後面に向かうにつれて再び増加していくという傾向は、計算結果でもほぼ良好に再現されている。流体力の変化する要因として、遮蔽効果で内部の角柱に作用する流体力は低減されるが、角柱群背後の後流渦の影響で最後列の角柱に対する流体力が再び増加するためと考えられる。

実験及び計算結果の相違については、実験誤差や固体部分の四面体分割及び流体計算セルの分解能が十分でない可能性などが考えられる。また、各ケースあたりの計算時間が約 50 時間 (Pentium4, 2.66GHz) に及ぶため、計算時間の短縮が今後の課題であると考えられる。

なお、図-17 に、case-3×3 の上流側 1 列目に測定角柱を設置したときの計算結果を示す。実験で観察された結果と同様の水面変動が計算で再現されている。

4. おわりに

本報では、波動流れに置かれた弾性物体群に作用する流体力を対象として、解法の有効性を検討した。実験結果との比較により、弾性円柱群全体に作用する流体力や、弾性角柱群内部の遮蔽効果などが概ね良好に予測されることが示された。弾性円柱群においては、円柱本数密度が増加すると円柱群の遮蔽効果が大きくなる傾向が数値計算結果でも再現された。また、弾性角柱においては前面の角柱に作用する流体力が大きく、内部では前面よりも減少し、そして後面に向かうにつれて再び増加していくという傾向が計算結果でも良好に再現された。

今後は、流れ場に関する比較検討を行うことが課題として考えられる。さらに、並列化処理を導入して、計算時間を短縮させることが必要である。

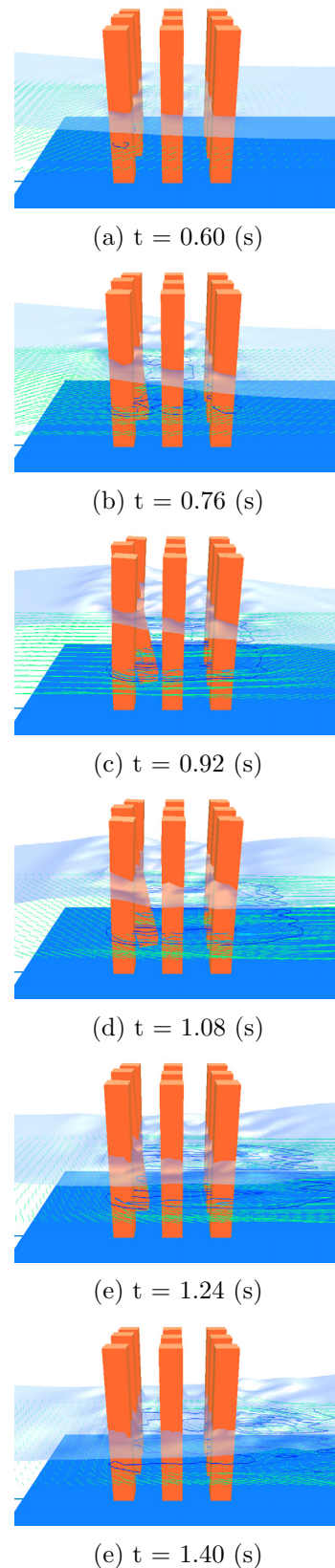


図-17 波動流れと弾性角柱群の計算結果 (case-3×3, 1 列目中央のみ下端が自由端の場合)

参考文献

- 1) 林建二郎, 藤井優宏, 重村利幸. 開水路中における円柱群に作用する流体力に関する実験. 水工学論文集, Vol. 15, pp. 475-480, 2001.
- 2) 林建二郎, 赤木俊仁, 藤間功司, 重村利幸. 開水路中における樹木振動と流体力に関する基礎的実験. 水工学論文集, Vol. 38, pp. 463-468, 1994.
- 3) 油川曜佑, 渡邊康玄, 石田洋一, 五十嵐拓, 玉館敦, 鈴木信幸, 三田村一弘. 洪水時における樹木内流速現地観測. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1159-1164, 2006.
- 4) 岡部健士, 山口義人, 竹林洋史. 風計測による河道内樹木群落の抵抗特性の推定. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1153-1158, 2006.
- 5) 清水義彦, 長田健吾, 高梨智子. 個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面 2 次元数値解析. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 787-792, 2006.
- 6) 橋本知久, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行. 流体力を受けて変形する 2 次元弾性モデルの形状と抵抗のシミュレーション. 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 72, pp. 9-16, 2006.
- 7) 馬替敏治, 榎田真也, 由比政年, 石田啓. 非対称振動中に設置された円柱周辺の流況および流体力の数値解析. 水工学論文集, Vol. 49, pp. 847-852, 2005.
- 8) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師. 3 次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法. 土木学会論文集, Vol. 64/II-2, pp. 128-138, 2008.
- 9) 牛島省, 黒田望, 禰津家久. MICS と有限要素法による自由水面流と弾性体の連成運動に対する 3 次元数値計算. 水工学論文集, Vol. 52, pp. 1033-1038, 2008.
- 10) 黒田望, 牛島省. 自由水面流中の変形を伴う物体に作用する流体力の数値計算. 応用力学論文集, Vol. 11, pp. 799-806, 2008.
- 11) 黒田望, 牛島省, 牧野統師. 剛体と弾性体に作用する流体力の数値計算. 水工学論文集, Vol. 53, pp. 1045-1050, 2009.
- 12) 吉川教生, 牛島省, 中村元太. 円柱群に作用する波動流れの流体力に関する数値解析. 水工学論文集, Vol. 53, pp. 1039-1044, 2009.
- 13) 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 禰津家久. 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.
- 14) 牛島省, 牧野統師, 禰津家久. 四面体サブセル法を用いる市街地に流入する氾濫流の 3 次元数値計算. 水工学論文集, Vol. 51, pp. 787-792, 2007.
- 15) S. Yamamoto and H. Daiguji. Higher-order-accurate upwind schemes for solving the compressible Euler and Navier-Stokes equations. *Computers Fluids*, Vol. 22, No. 2/3, pp. 259-270, 1993.
- 16) 牛島省, 奥山洋平. 非圧縮性流体計算における C-HSMAC 法と SOLA 法の収束特性. 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 197-202, 2003.

(2009 年 4 月 9 日 受付)