

円柱群に作用する波動流れの 流体力に関する数値解析

NUMERICAL PREDICTION ON FLUID FORCES
OF WAVE-INDUCED FLOWS ACTING ON MULTIPLE CYLINDRICAL OBJECTS

吉川 公正¹・牛島 省²・中村 元太¹

Norimasa YOSHIKAWA, Satoru USHIJIMA and Genta NAKAMURA

¹ 学生員 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)

² 正会員 工博 京都大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラス)

The fluid forces acting on multiple cylindrical objects were measured in wave-induced flows and a computational method was applied to the experimental results to confirm its applicability. The free-surface flows including multiple cylinders were treated with the computational method, MICS, which is a solver for incompressible multiphase fields. The solid objects included in the flows are represented with the tetrahedron elements, while the basic equations for the multiphase field are solved with the Eulerian fluid cells. The fluid forces against the objects are predicted with the momentum equation for the solid area which is assumed as the incompressible fluids. The prediction method was applied to the experiments, in which a water tank equipped with multiple cylinders was accelerated in one direction and the fluid forces on the cylinders were measured. The agreements between predictions and experiments on the time-histories and peak values of fluid forces were generally good, while the effects of multiple objects, such as the shielding effects, were not clearly observed within the present conditions.

KeyWords : multiple cylinders, fluid force, free-surface flow, MICS

1. はじめに

近年，局所的集中豪雨の増加によって河川氾濫が頻発し，河川計画や洪水対策は過去のそれよりも重要性と難解性を増している．特に，河道内樹木は大きな粗度となり，洪水時には水位上昇の一因となる．また，流木の発生源ともなって出水時の被害を拡大させる要因にもなり得る．しかし，環境保全の観点から河道内樹木を保護することは河川計画の中で無視することのできない項目となっている．

一方，沿岸域における津波災害に対しては，防潮林などの植生による減災効果が知られている．防潮林を活用することは，自然環境に配慮された有効な手段であると考えられている．防潮林による波の低減効果に関しては，実験的な検討や簡易な数値計算が海岸工学分野等で進められている¹⁾．

このように，洪水災害や津波災害に関連して，樹木群が流れに及ぼす影響を評価することは重要である．特に，樹木群に作用する自由水面流れの流体力を把握することは重要な水工学上の課題であると考えられる．このような課題に対する，既往の実験的な検討例とし

ては，円柱群内のある特定の円柱に作用する流体力を直接計測して円柱群の抵抗則を検討した研究²⁾，高木群落モデルを用いた実験的な検討³⁾などが行われている．また，現地規模の研究では洪水時の樹木内鉛直流速の観測や⁴⁾，流速分布に河道内樹木が及ぼす影響の調査⁵⁾が行われ，貴重な結果が得られている．さらに，樹木群の影響下にある自然風の流速資料から樹木群の流体抵抗特性量を推定する方法⁶⁾も提案されている．

本報では，自由水面形状が非定常的に変化する波動流れの中に設置された円柱群に作用する流体力に着目し，これを計測するための水理実験と，数値解法の適用性の検証を行う．水理実験では，円柱群を設置した水槽を一方向に加速し，内部に水面変動を発生させ，円柱群に作用する力を，歪みゲージを用いた装置により計測した．一方，数値計算では，円柱群周辺の流れと自由水面の挙動を直接計算する解法として，多相場の解法 (MICS)⁷⁾ を利用する．数値解法では円柱群は剛体であると仮定し，四面体要素を用いたモデルにより表現する．多相場の計算から得られた各四面体に作用する流体力から，円柱群に作用する流体力を求め，実験結果と比較し，解法の適用性等を考察する．

2. 数値解析手法

(1) 円柱群を含む波動流れの計算法

円柱群を含む波動流れの計算を行うために、多相場に対する解法である MICS を用いる。既報⁷⁾に示されたように、この解法では、最初に気相と液相のみから構成される多相場の基礎式を解き、次に得られた計算結果に物体の密度を考慮して物体に作用する流体力を定める。気相と液相から構成される場の基礎方程式は、次のように表される。

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

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

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

ここで、 t は時間、 x_i は直交座標系の座標成分、 u_i は気相と液相の質量平均速度であり、 p 、 ρ_f 、 μ は順に気相と液相の体積平均圧力、密度、粘性係数である。また、 f_i は外力加速度の x_i 成分である。これらの基礎式は、コロケート格子配置の元で有限体積法により離散化される。解法は既報⁷⁾に示されるとおりであり、式(3)をコロケート格子上で離散化し、MAC系解法⁸⁾に基づく演算を用いる。予測段階では、陰的解法である C-ISMALC 法⁹⁾、圧力計算段階では、C-HSMALC 法¹⁰⁾を利用する。

(2) 物体に作用する流体力

固体部分を含む流体計算セル内では、次式が成り立つとする。

$$\begin{aligned} \frac{Du_i}{Dt} &= -\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_b} g \delta_{3,i} - \frac{1}{\rho_b} \frac{\partial \phi^*}{\partial x_i} \\ &+ \frac{1}{\rho_b} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu u_j) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 g は重力加速度、 x_3 は鉛直上方に向かう直交座標系の成分、 $\delta_{i,j}$ はクロネッカーのデルタである。また、 ρ_b はセル内に占める物体部分の質量が考慮された多相場の密度であり、四面体サブセル法¹¹⁾により定められる。また、ここに、 p_0 は静水圧、 ϕ^* は圧力計算により定められる静水圧からの偏差である。

流体中に存在する物体は、本報では剛体であると仮定し、四面体要素の集合として表現する。図-1に、本報で扱う円柱群の数値モデルの一例を示す。合計9本の各円柱が、四面体要素により表されている。四面体要素は CAD ソフトウェアで外形を形成した後、格子

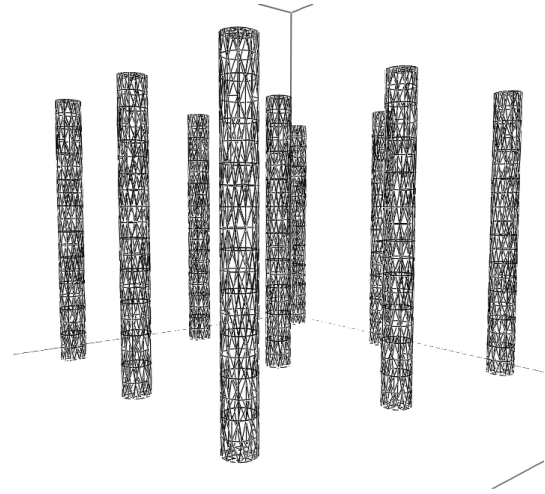


図-1 円柱群に対する四面体要素モデル

生成ソフトウェアを用いて生成される。このため、円柱以外の任意形状物体を扱うことも可能である¹²⁾。

四面体要素の集合として表された物体に作用する流体力は、式(4)右辺から定められる。図-2に概略的に示すように、ある流体計算セル C 中に含まれる、物体 k を構成する四面体要素 m の体積割合を α_{Ckm} とする。この物体部分に作用する x_i 方向の流体力成分を F_{Ckm}^i とする。この F_{Ckm}^i は、セル体積 V_C 、四面体サブセル法により求められた α_{Ckm} を用いて次式から求められる。

$$F_{Ckm}^i = \alpha_{Ckm} \rho_b V_C \cdot R \quad (5)$$

ここに、 R は、式(4)右辺を表す。物体 k のすべての四面体要素 m とそれを含む流体計算セル C に関して、この F_{Ckm}^i の総和を求めた値が、物体 k に作用する流体力 F_k^i となる。

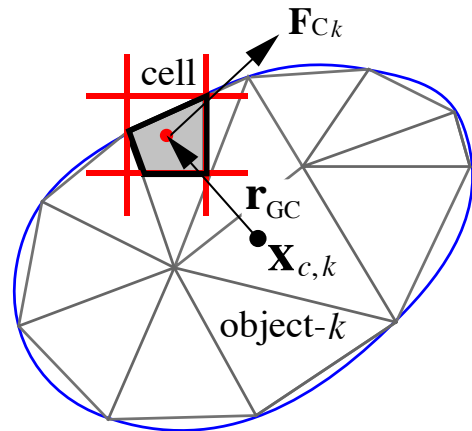


図-2 物体を構成する四面体と流体計算セルの概略的な関係

3. 水理実験

円柱群に作用する波動流れの流体力を計測することを目的とする水理実験を行った。この実験では、水槽内に円柱群を設置し、水槽を加速運動させて内部に水面変動と流れを発生させ、円柱群の上部に設置した鋼板に取り付けた歪みゲージで流体力を計測する。

図-3 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 および 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。水槽に加えらるる加速度は、移動開始から 0.224 秒までが 1 m/s^2 であり、その後 0.224 秒から 0.448 秒まで -1 m/s^2 の加速度を加えて停止させる。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ずる。一方、円柱群は水槽とともに移動せず、静止しているため、水槽が移動後に静止したときには、水槽の移動距離分だけ図の左方向に移動している。移動距離 x_0 は、約 50 mm である。なお、円柱下端と水槽底面には約 2 mm の間隙を設けており、模型と水槽底部の摩擦力は生じない。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。

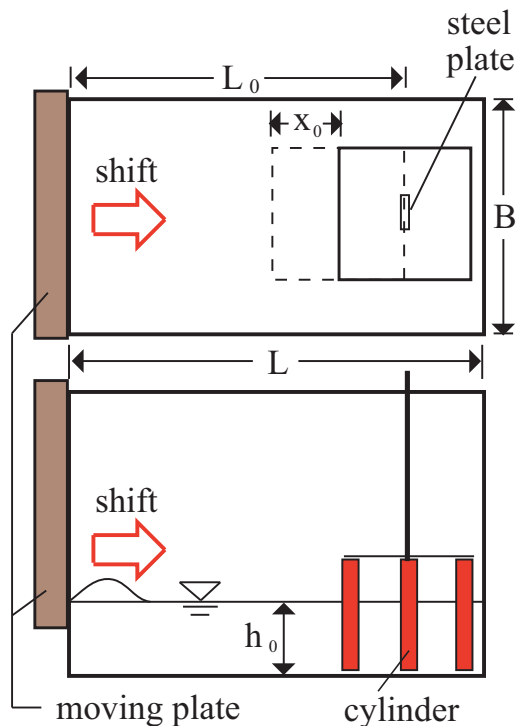


図-3 実験装置の概要

円柱群は、図-4 に示すように、アクリル板に固定されており、その中央部分に支持鋼板が取り付けられている。円柱の配置は、図-5 に示す通りであり、円柱の直径 D は 8 mm、長さ l は 87 mm 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、3, 4, 5 本配置する 3 条件とした。これらを順に、case-3×3, case-4×4, case-5×5 とする。図-4 は、case-5×5 の円柱群を表し、図-5 は、case-3×3 の配置を示す。各条件の d の値は、約 50 mm, 33 mm, 25 mm となる。



図-4 円柱群と固定アクリル板および鋼板

アクリル板は、一辺の長さ 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 枚貼り付け、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。

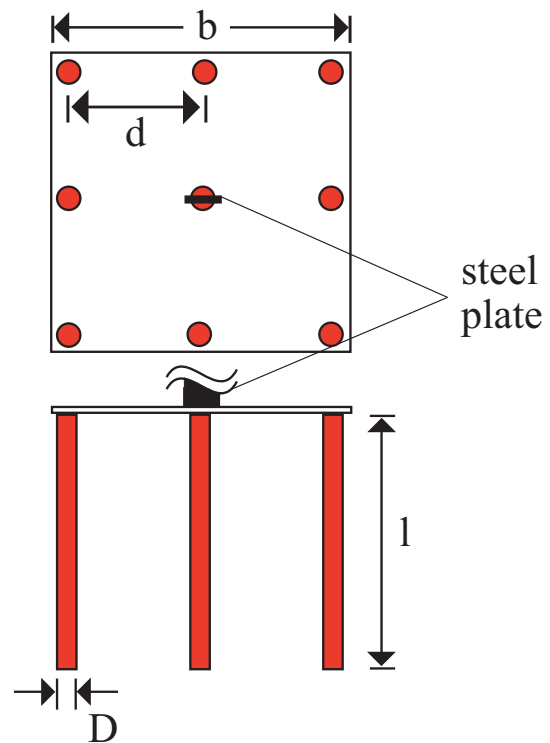


図-5 円柱の配置

4. 数値解析結果

(1) 計算条件

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 $90 \times 60 \times 30$ の流体計算セルを設定した。各方向の流体計算セル幅は、約 $3.3 \times 2.8 \times 5$ mm となる。また、流体中に置かれた各円柱は、図-1 に示したように、計算では四面体要素により表現される。1 本の円柱に対する四面体の節点数と要素数は、それぞれ 1,471 および 436 である。計算では、水と空気の密度はそれぞれ 1.0×10^3 kg/m³ および 1.0 kg/m³ とした。また、動粘性係数はそれぞれ 1.0×10^{-6} m²/s および 1.0×10^{-5} m²/s とした。

計算の初期条件は実験と同一として、静水深を 50 mm とし、円柱群を初期位置に設定した。一方、計算では水槽を移動させず、水槽加速時には、水平加速度を与えた。すなわち、0 から 0.224 秒までは -1.0 m/s²、0.224 から 0.448 秒までは 1.0 m/s² の水平加速度を加えた。また、この加速度を用いて円柱群の速度を数値積分して定め、その速度をさらに数値積分して円柱群の各時刻の位置を定めた。すなわち、計算では水槽が基準となって静止しており、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。

(2) 計算結果と実験結果の比較

図-6 と図-7 に、それぞれ計算で得られた case-3×3、case-5×5 の条件における自由水面形状と、水槽底面付近から高さ 5 mm における水平断面内の流況および円柱の配置を示す。各図は、時刻 0.7 秒 から 0.1 秒 ごとに計算結果を示しており、これは水槽の加速移動によって生じた図面右向き波動が右端の水槽壁面に衝突して、その反射波が図の左へ向かうときの状況を表している。円柱群の存在により、自由水面には細かい擾乱が生ずるとともに、円柱近傍には複雑な流況が発生していることがわかる。case-5×5 では、円柱群による流体抵抗のため、case-3×3 と比較すると、波の進行が若干遅くなっている。

次に、図-8 に、円柱群全体に作用する流体力の時系列を示す。各時系列の正および負のピーク値は、水槽左右の側壁面で反射された波動流れが通過するときに発生する最大流体力に相当する。図-8 (a) に示される case-3×3 では、流体力の時系列は概ね実験値と計算値でよい一致を示している。一方、case-4×4 と case-5×5 では、第 2 波目の負のピーク値と、時系列の位相に若干の相違が見られた。これには、実験結果に含まれる鋼板の固有振動や、円柱モデルの各構成部分に生ずる歪み、時刻原点の設定に関する誤差などの影響が作用していると考えられる。数値計算では、円柱モデルの

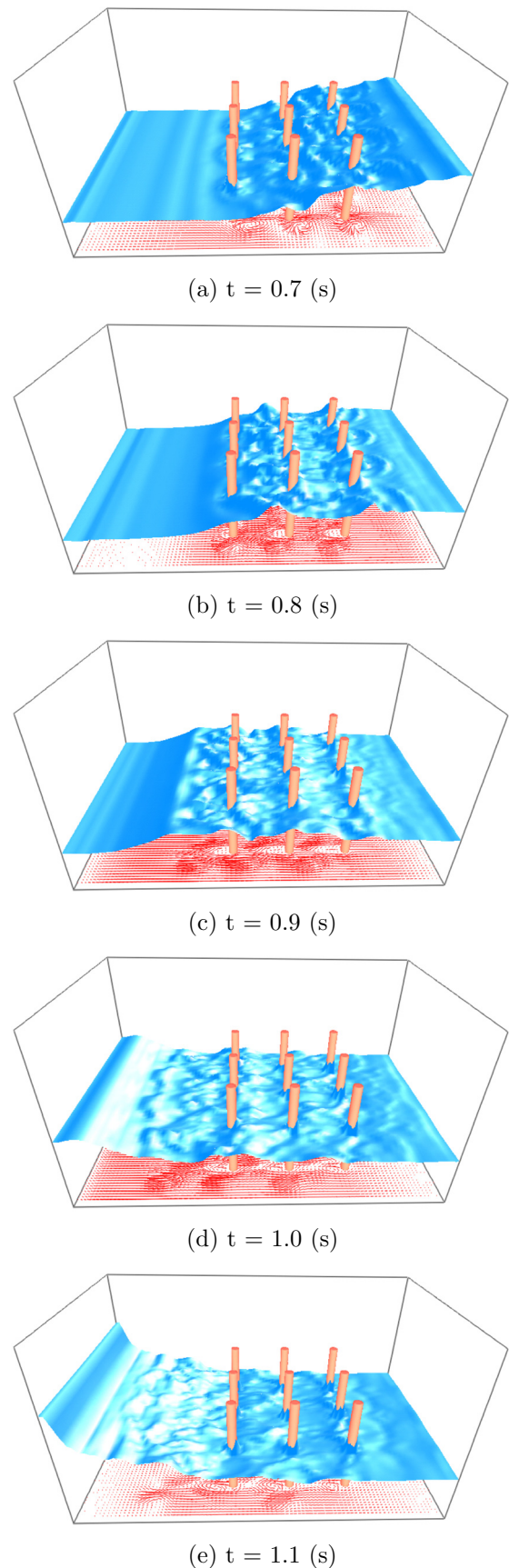
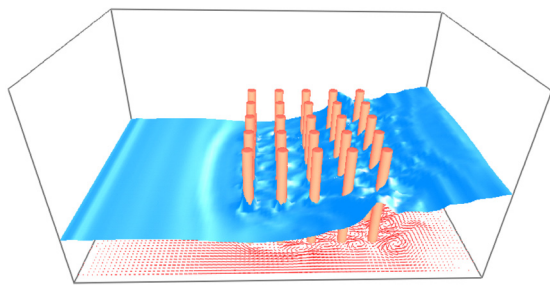
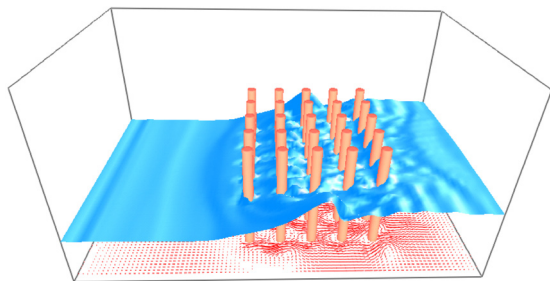


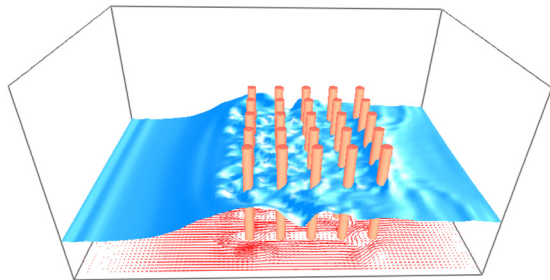
図-6 波動流れの計算結果 (case-3×3)



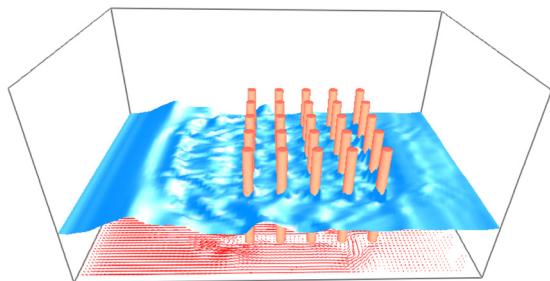
(a) $t = 0.7$ (s)



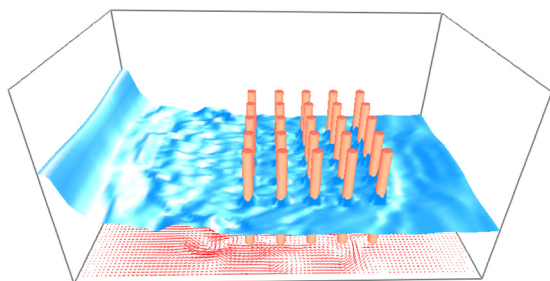
(b) $t = 0.8$ (s)



(c) $t = 0.9$ (s)

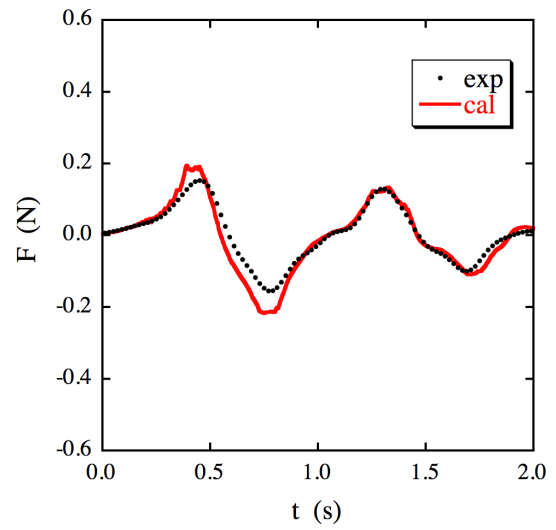


(d) $t = 1.0$ (s)

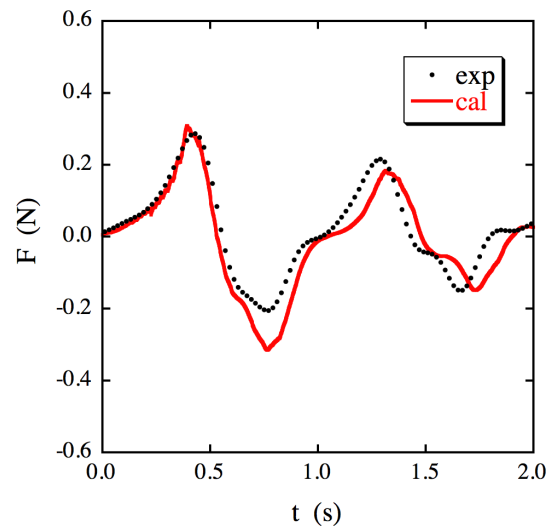


(e) $t = 1.1$ (s)

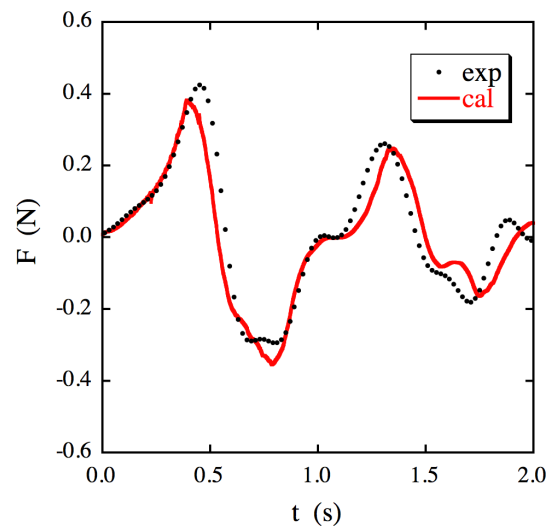
図-7 波動流れの計算結果 (case-5x5)



(a) case-3x3



(b) case-4x4



(c) case-5x5

図-8 円柱群に作用する流体力の時系列

四面体数がやや不足しており、流体力の算定に関する数値誤差などが影響している可能性もある。しかしながら、図-8 (b) および (c) においても、時系列の概形は再現できていると考えられ、一般には計算が難しいと考えられる円柱群に作用する非定常流体力が、本解析手法により比較的良好に再現されている。

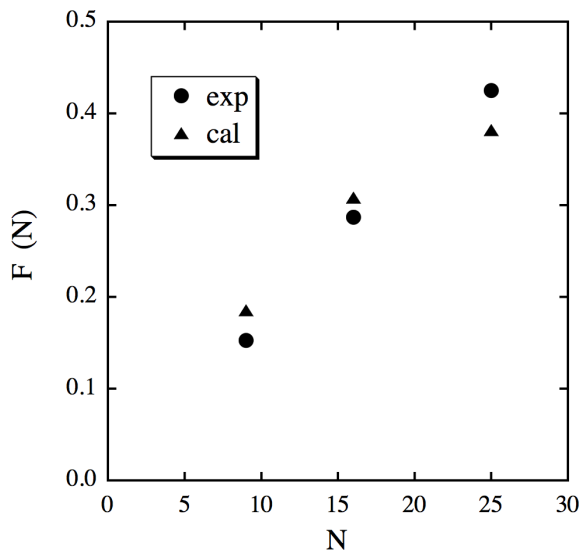


図-9 円柱の本数 N と円柱群全体に作用する流体力 F の関係

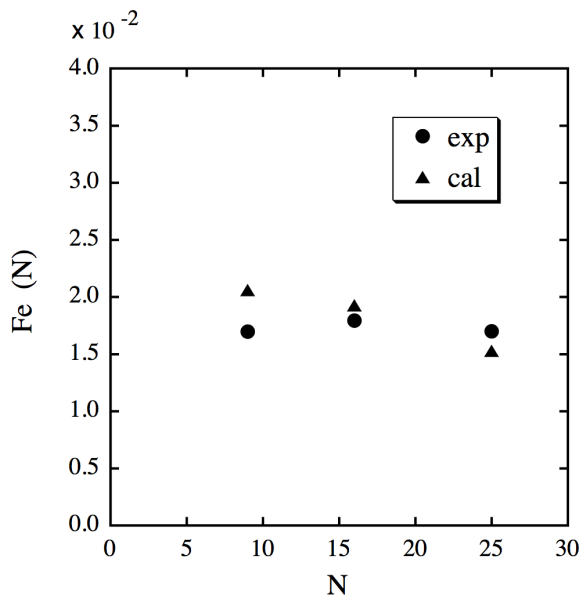


図-10 円柱の本数 N と円柱 1 本あたりに作用する流体力 F_e の関係

図-9 は、水槽加速後に発生する第 1 波の流体力のピーク値 F と円柱群の本数 N の関係を示したものである。実験結果と計算結果には若干の相違があるが、いずれも原点を通る直線上にあると見ることができる。

このため、本報の実験条件の範囲では、遮蔽効果などの影響は顕著には認められなかった。

一方、図-10 は、円柱 1 本あたりに作用する流体力 F_e と、円柱群を構成する円柱本数 N の関係を示す。計算結果では、 N の増加につれて、 F_e はわずかに減少する傾向があるように見えるが、実験結果ではそのような傾向は明確に見られない。今後、より広範な条件設定を行い、物体が群として存在する場合に、個々の物体に作用する流体力の変化について、より詳細に検討する必要があると考えられる。

5. おわりに

加速水槽内で発生する波動流れにより、円柱群に作用する流体力の計測を行い、数値計算結果との比較を行った。円柱群に作用する流体力の再現性は概ね良好であったが、今後より広範な条件設定を行って、複数の物体の個々の流体力の変化についてより詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 原田賢治, 油谷貴子, Latief Hamzah, 今村文彦. 防潮林の津波に対する減衰効果の検討. 海岸工学論文集, Vol. 47, pp. 366-370, 2000.
- 2) 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. 45, pp. 475-480, 2001.
- 3) 池田裕一, 岩松優二郎. 高木群落の鉛直構造による流速分布の遷移に関する基礎的研究. 応用力学論文集, Vol. 11, pp. 807-815, 2008.
- 4) 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.
- 5) 阿部修也, 渡邊康玄, 桑村貴志. 2005 年美唄川出水の樹木群落を含む流速鉛直分布の観測. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 1147-1152, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 牛島省, 竹村雅樹, 禰津家久. 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.
- 9) 牛島省, 禰津家久. 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, 2002.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 牛島省, 吉川教正, 米山望, 禰津家久. 自由水面流中の 3次元複雑形状物体に作用する流体力の数値解析. 水工学論文集, Vol. 52, pp. 955-960, 2008.

(2008.9.30 受付)