# 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

NUMERICAL PREDICTION FOR FLUID FORCES ACTING ON 3D COMPLICATED-SHAPED OBJECTS IN FREE-SURFACE FLOWS

## 牛島 省<sup>1</sup>・吉川 教正<sup>2</sup>・米山 望<sup>3</sup>・禰津 家久<sup>4</sup>

Satoru USHIJIMA, Norimasa YOSHIKAWA, Nozomu YONEYAMA and Iehisa NEZU

# <sup>1</sup> 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 クラスタ) <sup>2</sup> 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 クラスタ) <sup>3</sup> 正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄) <sup>4</sup> 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 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスタ)

This paper deals with the applicability of the computational method to predict fluid forces acting on complicated-shaped solid objects included in free-surface flows. The computational method, MICS, predicts the fluid forces from the pressure and viscous terms of the incompressible multiphase fields. A solid object is represented by multiple tetrahedron elements and their volume fraction included in a fluid computational cell is estimated with a sub-cell method. The predicted results were compared with the measured fluid forces acting on a wave breaking block placed in free-surface flows. The validity of the computational method was shown through the quantitative comparison with the experimental results.

KeyWords : fluid force, free-surface flow, flood, tsunami, wave breaking block, MICS

#### 1.はじめに

津波や洪水時には,沿岸あるいは河岸付近の建造物 や樹木などが自由水面流れによる流体力を受けて,損 壊や倒伏を起こすという被害が発生する場合がある. また,そのような災害時には,流送された物体が衝突 したり,それらが堆積して流況に影響を与えて,2次 的な被害が生ずることもある.

このような現象を把握するには,複雑形状物体に作 用する流体力を適切に評価することが不可欠である. 物体が自由水面流れから受ける流体力に関しては,こ れまでに多様な条件における実験的な検討が数多く行 われているが<sup>1),2)</sup>,本研究では,複雑形状物体に作用 する流体力を数値的に求める手法について検討を加え, その適用性について定量的な検証を行う.

物体に作用する流体力の数値的な評価方法としては, 境界適合格子や非構造格子を用いて物体表面形状を表 現し,流体計算結果として得られた物体表面近傍の圧 力と粘性応力を表面積分するという方法が一般的であ る.このような手法は,一様流中に置かれた円柱や静 止物体周りの流れなどの比較的単純な条件の計算に利 用され,良好な結果が得られている.

一方,冒頭に述べたような水工学分野への数値解法

の応用を考える場合には,物体形状が複雑になると同 時に,自由水面の挙動を考慮する必要があり,さらに 物体の運動や衝突などの影響が加わるため、上記のよ うに物体と流体を明確に区分して表面積分により流体 力を求めるという処理は難しくなる.このような流体 と物体の相互作用に関する,より複雑な問題に対して は,物体を含む流れ場を多相流場として捉える解法<sup>3),</sup> <sup>4) 5)</sup>が有効であり,計算結果の妥当性が各種の問題に 対して示されている.既報<sup>6)</sup>等で筆者が検討を加えて きた多相場の解法である (MICS) では,水中を移動す る物体の挙動や,自由水面流れにより衝突を伴いなが ら輸送されるブロックの運動などがほぼ妥当に計算さ れることが示されている.しかし,対象とする問題が 複雑になるにつれ,検証のための実験結果を得ること も容易ではなくなり,定性的な比較により,計算手法 の妥当性を議論することが多くなっている.

本報では,複雑形状物体を扱う多相場の解法に対す る定量的な検証を行う.このため,四脚の消波プロック 模型に鋼製の支柱を付け,歪みゲージを用いてブロッ クに作用する流体力を計測するという実験を行った. 四面体要素により物体を表現して流体力を評価する手 法の概要と,実験結果との比較を示し,この計算手法 の妥当性について検討を加える.

# 2.数值解析手法

#### (1) 物体を含む自由水面流れの計算法

物体を含む自由水面流れを固気液多相場として捉え る解法である MICS では,四面体要素から構成される 固体モデルとして物体を表現する<sup>6)</sup>.四面体要素を用 いる場合には,要素分割を適切に行えば,物体形状を 精度よく近似することが可能である.物体に作用する 流体力は,これらの四面体要素に作用する流体力から 求められるので,物体を球体の集合と見なす球体連結 モデルと比較して,流体力を合理的かつ精度よく求め ることが可能である.

MICS では,物体を含む自由水面流れの各相 Ω<sub>i</sub> を, 図–1 に概略的に示すように,混ざり合わない非圧縮性 流体と考える.この多相場に対する基礎式<sup>5)</sup>を以下に 示す.

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

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

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

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.  $t \ge x_i$  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 内の質量平均により算出される流速成分である. $f_i$  は 外力の加速度成分を表す.

基礎式は,空間中に固定された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.基礎式の解法



図-1 MICS における多相場モデル

は,非圧縮性流体の計算法である SMAC 系の解法と 同様であり,予測段階,圧力計算段階,修正段階の3 つの手順から構成される.予測段階では,除的解法で ある C-ISMAC 法を用いて,セル中心における流速の 推定値を求める.次に,これをセル境界へ空間内挿し, CBP 法にしたがう圧力勾配項の取り扱いを行った後, 圧力計算を行う.この圧力計算段階では,C-HSMAC 法<sup>7)</sup>を利用する.自由水面形状は,式(1)を5次 TVD スキームと数値拡散を防ぐフィルタで解いて求める. (2)物体に作用する流体力の算定

上記のようにして,式(1)から式(3)の数値解が得られる.物体に作用する流体力は,圧力と粘性応力を 合わせた単位面に働く面積力を面積積分することによ り得られるが,ここでは多相場の数値解が得られてい るので,ガウスの発散定理に基づいて,流体力を体積 積分から求める.すなわち,式(3)の計算で得られた 圧力勾配項と粘性拡散項に物体部分の質量を乗ずるこ とにより流体力が定められる.

流体計算セル C 内の流体が物体 k に及ぼす流体力 を  $F_{Ck}$  とし, その  $x_i$  方向成分を  $F_{Cki}$  とする.また, 流体計算セル中に占める四面体要素の体積比を  $\alpha_k$  と する.このとき,  $F_{Cki}$  は次式から計算される.

$$F_{Cki} = \alpha_k \sigma_k \Delta C \left[ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu u_j) \right\} \right]$$
(4)

ここに,  $\Delta C$  は流体計算セル体積,  $\sigma_k$  は物体密度である. 四面体要素から構成される固体モデルが, 剛体である場合には,上記のようにして各セルごとに算出された流体力の総和を求めて,物体全体に作用する力を定め,物体重心点の並進運動の計算に使用する.

図-2に,物体を構成する四面体要素と流体計算セルの関係を概略的に示す.実際の計算は3次元であるが, ここでは四面体要素を三角形,直方体の流体計算セル を四角形で表現している.

図-2のように,1つの四面体要素が複数の流体計算 セルにまたがって存在する場合がある.このときに, 流体計算セル中に占める四面体要素の体積  $\alpha_k$  を求め るには,図-3のように流体計算セルをさらに再分割し たサブセルを設定する.四面体要素内にサブセルの中 心点が含まれるものをカウントし,その値から  $\alpha_k$ の 近似値を求める.図-3では,物体部分と判定されたサ ブセルを灰色のセルとして表している.既報<sup>8)</sup>で検討 されたように,サブセルを小さくすることで,十分な 精度が得られる.また,四面体体積の理論値と,同一 四面体に対する  $\alpha_k$  の総和を比較して,誤差が大きい 場合には,再帰処理により十分な精度の  $\alpha_k$  が得られ る処理を加えている.



図-2 物体に作用する流体力の評価方法



図-3 四面体サブセル法 (太線が流体計算セル,細 線がサブセルを表す)

# 3. 流体力計測のための水理実験

## (1) 実験装置と実験条件

本実験では,四脚の消波ブロック(テトラポッド)模型を利用し,造波水槽内で自由水面流れを発生させ, ブロック模型に作用する流体力を計測する.

図-4に,実験水槽の概略を示す.実験水槽左端には, PCで動作が制御可能な電動スライダに取り付けられ た造波板がある.また,水槽右端側には,ボックスが固 定されており,造波により生じた波動は,ボックス上 で自由水面流れとなる.ボックス上部には,鋼製の支 持板で上部が支えられたブロック模型が設置されてい る.ブロック模型とボックス間で摩擦力が生じないよ うに,ブロック模型の下端とボックス上面には約4mm の隙間を設けている.

水槽の全体の長さ  $(L_1 + L_2)$  は 1.4m であり, ボック ス部分の長さ  $L_2$  は 0.7m である.また, ボックスの高 さ  $h_b$  は 0.1m, 水槽幅 B は 0.19m である.また, 初



図-4 造波水槽の概要 (上=側面図,下=平面図)

期水深 h<sub>0</sub> は, 0.104m とし, ボックス上の水深が 4mm となり, 水表面がブロック模型下端に接する状態とし た.ブロック模型は,硬質ゴム製で,比重は約 2.14 で あり,三脚を接地させたときの高さは約 56mm であ る.ボックス左端からブロック模型中心までの距離は 約 0.1m とした.

図-5 (a) にブロック模型と支持板の写真を示す.支 持板はブロックに切り欠きを作り,そこに固定した. 支持板上部には,共和電業製の歪みゲージ(KFG-2N-120-C1-11)を軸方向に4枚貼り付け,それらの出力を センサインタフェイス(同社製 PCD-300AS1)で取り込 み,これに接続した PC にデジタル値として収録した.

なお,収録したデータから支持板の固有振動を除去 するため,ブロック模型を自由振動させたときの時系 列データを求めて,これを消去する移動平均のウイン ドウ幅を定めた.取得したデータには,得られたウイ ンドウ幅の移動平均を作用させた.



(a) ブロック模型 (写真) (b) ブロックの姿勢

#### 図-5 ブロック模型とその姿勢

実験では,ボックス左端から造波板側 0.1m の位置 における最大波高を $h_m$ と定義し,3種類の $h_m$ に関 する実験条件を定めた.また,ブロックは3脚を水平 とし,図-5 (b)のように,そのうち1脚が造波板側 へ向かい,水路幅方向に対称となる状態を姿勢Aと し,その向きを逆にした2脚が造波板側に向かう状態 を姿勢Bとする.姿勢Aと姿勢Bに対して,それぞ れ $h_m = 125, 135, 147 (mm)$ となる造波条件の実験 を行い,最初の1波から生ずる自由水面流れによる流 体力を計測した.

#### (2) 計算条件

MICS による計算では,水槽内の空気部分を含む領 域に対して,140×38×50の計算セルを設定し,時間 増分  $\Delta t \ge 1.0 \times 10^{-2}$  秒として,実験と同じ初期水深 の静水状態から非定常計算を行った.造波条件は,造 波板の速度と同様の流速を計算領域左端面に与えるこ とで模擬した.

計算時間は, ブロック模型が最初の1波による流体 力を受ける 1.5 秒までとした.単一 CPU(Pentium4, 2.66GHz) による演算で,計算時間は約40分であった.

ブロック模型に対する固体モデルを図-6に示す.この固体モデルは,四面体要素の集合体として表されており,CADで外形を描画して,その出力結果に格子生成ソフトウエアを適用することにより作成した.図-6の固体モデルの四面体要素数は416であり,節点数は152である.四面体サプセル法におけるサブセル分割数は,3次元の各方向に5とし,1つ流体計算セルに対して125のサブセルを設定した.

計算では,水と空気の動粘性係数をそれぞれ $1.0 \times 10^{-6}$  および $1.0 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s とした.また,水と空気の密度は,それぞれ $1.0 \times 10^{3}$ および1.0 kg/m<sup>3</sup> とした. し体モデルの密度は実験模型と同じ値とした.



図-6 計算で用いる固体モデル

#### (3) 実験結果と計算結果の比較

計算で得られた最大波高 h<sub>m</sub> と実験条件との比較を 表-1 に示す.両者はほぼ同じ値となっている.表-1 に は,各条件の名称 (ケース名)を合わせて示した.

図-7 に, ケース H147 における姿勢 A および姿勢 B のブロックに作用する流体力 Fw を示す.本実験の

表-1 実験と計算における h<sub>m</sub> の値 (単位 mm)

ケース名	H125	H135	H147
実験	125	135	147
計算結果	125	133	145



図-7 流体力の時系列



t = 1.0 (s)



t = 1.1 (s)



t = 1.2 (s)



t = 1.3 (s)

図-8 消波ブロック周辺の自由水面流れの計算結果 (姿勢 A,赤線はボックス上面から 2.5 mm の高さの水平面の流況を表す)



t = 1.0 (s)



t = 1.1 (s)



t = 1.2 (s)



t = 1.3 (s)

図-9 消波ブロック周辺の自由水面流れの計算結果 (姿勢 B,赤線はボックス上面から 2.5 mm の高さの水平面の流況を表す) 計測システムでは,造波板の移動方向の流体力成分 $F_w$ のみが得られる.図-7に示されるように,流体力 $F_w$ の最大値は,同じ波高条件でも,姿勢Bの方が大きくなる.実験結果と計算結果を比較すると,流体力 $F_w$ の最大値はほぼ一致している.時間軸方向には,ブロックに流体力が作用する時間が,計算結果の方がやや短い.このため,計算結果では,流体力の時間的な増加と減少が実験結果より大きいように見られるが,計算により得られた時系列の全体的な分布形状は,実験結果とほぼ一致していると考えられる.



図-10 各ケースの最大流体力  $F_{wm}$  とボックス 上面を基準とする波高  $w_h$ の関係  $(w_h = h_m - h_b)$ 

図-8と図-9は、ブロック周辺の流況を示す計算結果 である.ブロックが波動流れを受ける瞬間には、ブロッ ク前面の水深が背面側の水深よりも増加する.実験で は水面形状は計測していないが、計算と同様の傾向が 認められた.ブロックに作用する流体力としては、こ の水深の差に伴う水圧と、ブロック背面周辺に発生す る渦による流体力が関与していると考えられるが、流 体力としては前者が支配的であると推察される.図-9 に示される姿勢 Bの状態では、図-8の姿勢 A と比較 して、2本の脚部の前面に生ずる高水深領域の幅が広 い.このため、前後の水圧差も大きくなり、その結果、 図-7 で確認されたように、流体力の最大値は姿勢 B の 方が大きくなると考えられる.

ブロックに作用する最大流体力  $F_{wm}$  とボックス上面を基準とする波高  $w_h(=h_m-h_b)$ の関係を図-10 に示す.波高が増加するにつれ,最大流体力は増加する.また,いずれの波高でも,姿勢 B のブロックに作用する流体力が,姿勢 A における流体力より大きい.これらの傾向を計算結果は定量的にもほぼ良好に再現していると考えられる.

#### 5.おわりに

本報では,四脚のブロック模型に波動流れを作用さ せる実験を通じて,複雑形状物体を扱う多相場の解法 に対する定量的な検証を行った.この検討により,計 算手法の妥当性が確認されたと考えられる.

#### 参考文献

- 1) 重枝未玲,秋山壽一郎,石原仁. 常流あるいは射流中に置 かれた水没柱状物体に働く流体力.水工学論文集, Vol. 50, pp. 889-894, 2006.
- \* 林健二郎,今野政則,浜口憲一郎,阿部康紀. 突起高の大きい護岸ブロックに作用する流体力と流れに関する研究. 水工学論文集,Vol. 50, pp. 859–864, 2006.
- 3) F. Xiao, T. Yabe, T. Ito, and M. Tajima. An algorithm for simulating solid objects suspended in stratified flow. *Computer Physics Communications*, Vol. 102, pp. 147–160, 1997.
- 4) 梶島岳夫,瀧口智志,浜崎洋至,三宅裕. 渦放出を伴う粒 子を含む鉛直平行平板間乱流の構造. 機械学会論文集 B 編, Vol. 66, No. 647, pp. 1734–1741, 2000.
- 5) 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.
- 6) 牛島省,福谷彰,牧野統師,禰津家久.3次元流体中を運 動する接触と変形を考慮した任意形状固体モデルの数値 解法.応用力学論文集,Vol. 10, pp. 139–146, 2007.
- 7) 奥山洋平,牛島省. 非構造コロケート格子を用いる非圧 縮性流体計算の圧力解法に関する考察.水工学論文集, Vol. 48, pp. 703–708, 2004.
- 8) 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.

(2007.9.30 受付)