

# 不等間隔格子と複数剛体の運動解析法を 導入した多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3Dの構築

DEVELOPMENT OF MULTIPHASE FLOW MODEL "DOLPHIN-2D/3D"  
WITH IRREGULAR MESH SIZE GRIDS AND DYNAMIC MOTION  
ANALYSIS OF MULTIPLE RIGID BODIES

川崎浩司<sup>1</sup>・袴田充哉<sup>2</sup>・小木曾圭祐<sup>3</sup>  
Koji KAWASAKI, Mitsuya HAKAMATA and Keisuke OGISO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 静岡県建設部河川砂防局河川海岸整備室 (〒420-8601 静岡市葵区追手町9-6)

<sup>3</sup>学生会員 学(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Two- and three-dimensional numerical models of multiphase flow with solid-gas-liquid phase interaction 'DOLPHIN-2D/3D' are newly developed in this study based on a CIP method and an extended SMAC method so that irregular mesh size grids and the dynamic motion analysis of multiple rigid bodies can be taken into account. The utility of the model developed here is confirmed by applying it to collision problems between water collapse-induced bore and two floating bodies in two-dimensional and three-dimensional multiphase flow fields. The results reveal that the model can compute multiphase flow fields with the dynamic behavior of multiple rigid bodies appropriately and is capable of reducing the computation time in comparison with the results with fine regular meshes.

**Key Words :** *multiphase flow numerical model, irregular mesh size grids, multiple rigid bodies, bore-floating body collision*

## 1. 序論

周囲を海に囲まれる我が国では、近年、東海・東南海・南海地震をはじめとする巨大地震による津波災害への警戒が高まっている。津波災害に関しては、津波による直接的な1次被害のみならず、津波による漂流物が沿岸周辺施設に衝突することにより、さらに被害が拡大するなどの2次被害が懸念されている。このように、津波をはじめとする沿岸域での海象現象は、固相・気相・液相の多相場が複雑に絡み合って形成されている。よって、固気液多相流動場を精緻に評価することは、現象解明のみならず、沿岸構造物の設計・維持管理上、極めて重要である。

川崎ら<sup>1)</sup>、川崎・中辻<sup>2)</sup>は、これまで複雑な多相流動場を高精度に数値解析することを目的に、CIP法と拡張SMAC法を駆使しながら、2次元場と3次元場を対象とした固気液多相流数値モデルDOLPHIN-2D/3D (Dynamic numerical model Of multi-Phase flow with Hydrodynamic Interactions - 2-/3-Dimension) を構築し、その妥当性・有用性を検

証してきた。さらに、川崎・袴田<sup>3)</sup>は従来のモデル<sup>1), 2)</sup>に対して、密度関数の取り扱い方を修正し、Smagorinskyモデルに基づく乱流モデルLES (Large Eddy Simulation) を導入するなど、モデルの高精度化を図った。そして、川崎ら<sup>4)</sup>は、固定・非固定状態にある矩形物体に段波が衝突した際の物体への作用波力・波圧特性を水理実験と比較することにより、モデルの妥当性を定量的に検証した。しかしながら、これまでの多相乱流数値モデルは等間隔格子に基づいたモデルであり、現象の細部構造まで解明する際、計算領域全体の格子間隔を細かく設定する必要があり、膨大な計算時間を要するといった計算負荷上の欠点があった。また、同モデルは、単数剛体のみの取り扱いで、複数剛体の運動解析を行うことができず、モデルの汎用性という面で問題があった。

本研究では、これまで構築してきた2次元および3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-2D/3Dに、不等間隔格子を導入するとともに、複数剛体の運動解析が可能となるようにモデルを改良し、その有用性を検証することを目的としている。

## 2. 多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D

### (1) 基礎方程式

本研究で扱う多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D の基礎方程式は、以下に示すように、圧縮性粘性流体に対する質量保存式(1), Navier-Stokes 方程式(2), 圧力方程式(3), 異相間の割合を示す密度関数の移流方程式(4), バロトロピー流体に対する状態方程式(5)から構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f}_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\phi_I) = 0 \quad (4)$$

$$\rho = f(p) \quad (5)$$

ここで、 $\rho$ は流体の密度、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル、 $p$ は圧力、 $\mu$ は粘性係数、 $C_s$ は局所音速、 $\mathbf{f}_e$ は重力、表面張力、LES モデルの SGS 応力を含む外力項、 $t$ は時間を示す。また、 $\phi_I$ は  $I$  相 ( $I=1\sim 3$ ;  $\phi_1$ : 固相,  $\phi_2$ : 液相,  $\phi_3$ : 気相) の密度関数であり、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1 (0 \leq \phi_I \leq 1)$  の関係を満たす。

### (2) 計算アルゴリズム

本モデルの計算フローチャートを図-1 に示す。本モデルでは、時間分離解法により、質量保存式、運動方程式、圧力方程式を移流段階と非移流段階に分割して数値解析を行う。まず、初期条件・境界条件の設定を行う。そして、各物理量  $\rho$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $p$  の移流段階計算に、物理量の移流を高精度に計算可能な CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法<sup>5), 6)</sup>を適用する。一方、非移流段階に関しては、非圧縮性流体のみならず圧縮性流体まで解析できるように展開した拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法を用いて各物理量を算定する。なお、気液界面で生じる表面張力の影響は、Brackbill et al.<sup>7)</sup>が考案した CSF (Continuum Surface Force) モデルにより評価した。また、乱流量については、Smagorinsky モデルに基づく LES モデルにより算定した。そして、非移流段階を計算した後、後述する複数剛体の動的挙動を取り扱うことができるよう単数剛体の運動解析法を改良した手法により剛体解析を行う。その後、固気液相全ての密度関数の移流計算を CIP 法により行う。その際、気相、液相の密度関数の移流計算には、算定された固相の移動速度と質量の保存性を考慮した修正速度を用いた。そして、最終的にすべての物理量を更新し、次の時間ステップへと移行する。

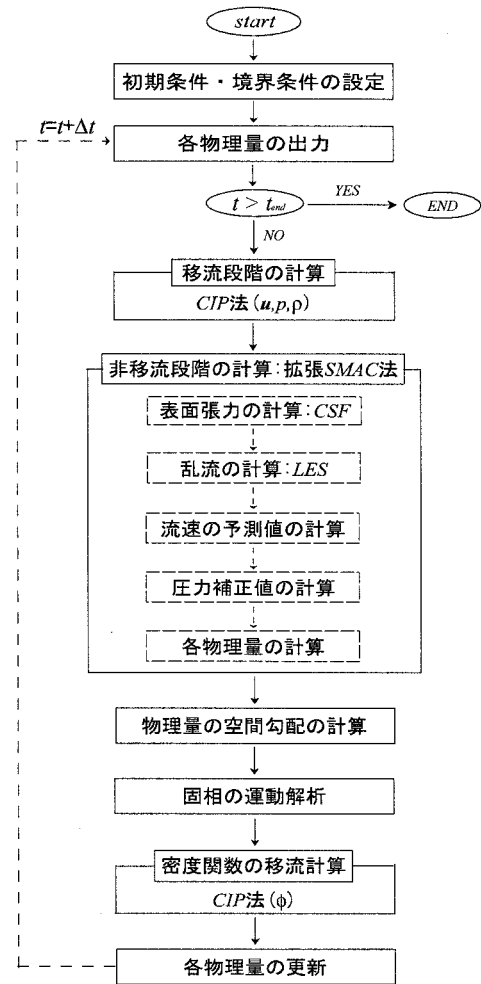


図-1 計算フローチャート

上述した計算を、適切な境界条件下で繰り返し行うことにより、固相・気相・液相の相互干渉を伴う多相乱流場を数値解析することが可能となる。

### (3) 複数剛体の運動解析

本モデルでの剛体の運動解析は、Xiao et al.<sup>8)</sup>と同様に取り扱っている。具体的には、固相群は剛体であり、その運動形態は並進移動と回転の両方から構成されるという仮定の下で解析を行う。解析方法として、まず、固相を高粘性流体と考え、全相に対して上述した流動解析を行う。そして、得られた固相領域内の圧力を用いて、Newton の第 2 法則より、剛体内部の加速度  $d\mathbf{u}/dt$  を求めた後、個々の剛体の重心における移動速度と角速度を算定する。その後、剛体形状を保持するように固相に対してのみ相対的位置を修正する。

$$\mathbf{x}_{oI} = \frac{1}{M_I} \int_V \mathbf{x} \phi_{I1} \rho_{sl} dV \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_I = \frac{d\mathbf{x}_{oI}}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{d\mathbf{V}_I}{dt} = \frac{1}{M_I} \int_V \frac{d\mathbf{u}}{dt} \phi_{I1} \rho_{sl} dV \quad (8)$$

$$\frac{d\Omega_l}{dt} = \frac{1}{I_l} \int_V \mathbf{R}_l \times \frac{d\mathbf{u}}{dt} \phi_{l1} \rho_{s1} dV \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_l = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{0l} \quad (10)$$

$$\mathbf{U}_l = \mathbf{V}_l + \Omega_l \mathbf{R}_l \quad (11)$$

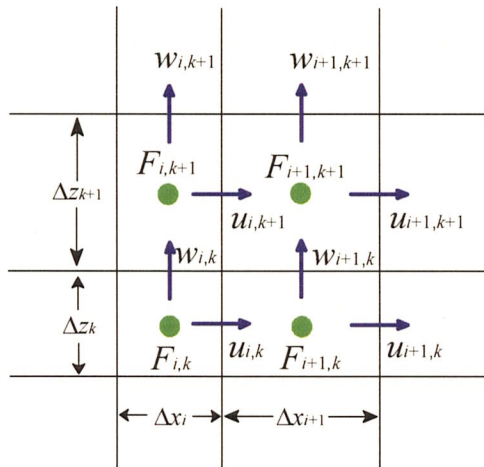
ここで、剛体  $l$  に対する  $\mathbf{x}_{0l}$  は重心ベクトル、 $M_l$  は質量、 $\rho_{s1}$  は密度、 $\mathbf{V}_l$  は並進速度ベクトル、 $\Omega_l$  は角速度、 $I_l$  は慣性モーメントである。また、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$  はそれぞれ任意の位置・速度ベクトルであり、 $\mathbf{R}_l$  は剛体  $l$  の重心からの位置ベクトルを示す。

上記の計算を個々の剛体に対して独立に実施することにより、複数剛体の運動解析を考慮した多相流場の数値解析を行うことができる。また、複数剛体解析のため、本モデルでは個々の剛体に対する固相密度関数  $\phi_{l1}$  を定義した。なお、1セル内における固相の密度関数  $\phi_1$  と各剛体に対する  $\phi_{l1}$  は式(12)の関係となっている。ここで、 $L$  は剛体の総数を表す。

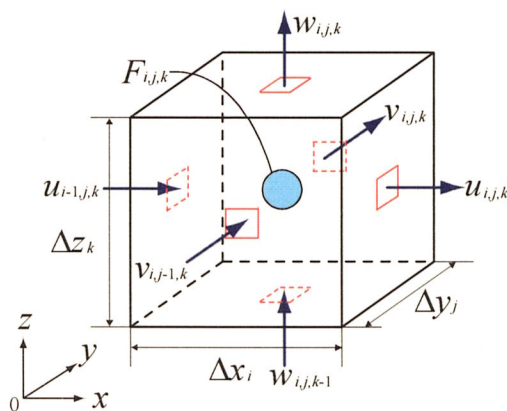
$$\phi_1 = \sum_{l=1}^L \phi_{l1} \leq 1 \quad (12)$$

#### (4) 不等間隔格子の導入

本研究では、計算負荷の低減とともに部分的に



(a) 2次元場



(b) 3次元場

図-2 不等間隔格子の概略図

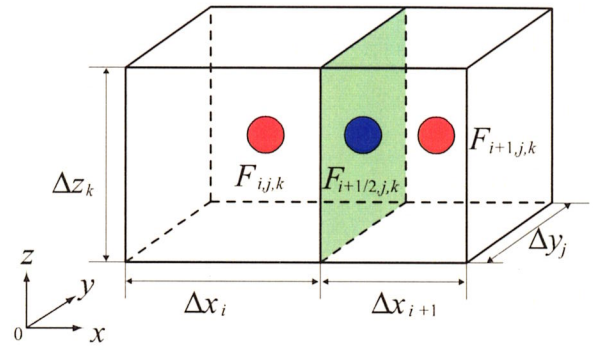


図-3 不等間隔格子による差分の一例

詳細な計算ができるように不等間隔格子を導入した。基礎方程式の差分化については、図-2 に示す不等間隔格子に対応したスタッガード格子を使用した。各物理量の定義位置は図-2 に示すとおりである。なお、図-2 中の  $F$  は密度、圧力、密度関数など流速を除く物理量を表す。また、不等間隔格子では、計算格子幅を考慮して、物理量の定義位置以外での値や空間差分値を算定する必要がある。不等間隔格子に基づいた差分の計算例を図-3 に示す。同図より、物理量  $F_{i+1/2,j,k}$  は式(13)で、 $(i+1/2, j, k)$  での 1 次空間微分  $FX_{i+1/2,j,k}$  は式(14)で評価することができる。

$$F_{i+1/2,j,k} = \frac{F_{i+1,j,k} \times \Delta x_i + F_{i,j,k} \times \Delta x_{i+1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \quad (13)$$

$$FX_{i+1/2,j,k} = \frac{2(F_{i+1,j,k} - F_{i,j,k})}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \quad (14)$$

### 3. 2次元場における多相乱流数値解析

水柱崩壊に伴う段波が形状の異なる 2 つの浮体に衝突する問題に、本研究で構築した 2 次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を適用した。表-1 に計算条件を示す。不等間隔格子の設定を示す図-4 からわかるように、 $x$  方向の格子サイズは、それぞれ  $x=0.0\sim 0.3\text{m}$ ,  $0.3\sim 0.5\text{m}$ ,  $0.5\sim 1.15\text{m}$  の計算領域で、 $\Delta x=0.02\text{m}$ ,  $0.01\text{m}$ ,  $0.005\text{m}$  と設定した。また、 $z$  方向に関しては、 $z=0.0\sim 0.25\text{m}$ ,  $0.25\sim 0.4\text{m}$ ,  $0.4\sim 0.5\text{m}$  の範囲で、それぞれ  $\Delta z=0.005\text{m}$ ,  $0.01\text{m}$ ,  $0.02\text{m}$  と設

表-1 2次元計算条件

計算領域	1.15m×0.50m
メッシュ数	165×70
計算ステップ間隔	0.0001s
静水深	0.14m
水柱の大きさ	0.20m×0.24m
水の密度	1000.0 kg/m <sup>3</sup>
空気の密度	1.25 kg/m <sup>3</sup>
物体の密度	800.0 kg/m <sup>3</sup>
重力加速度	9.80665 m/s <sup>2</sup>

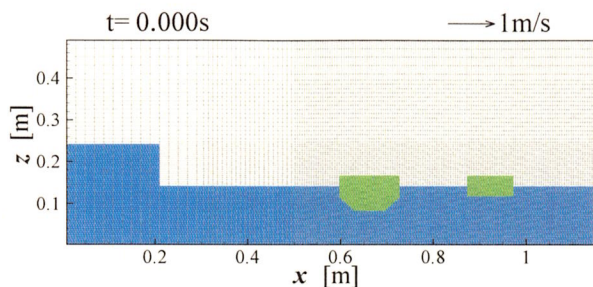


図-4 不等間隔格子の設定

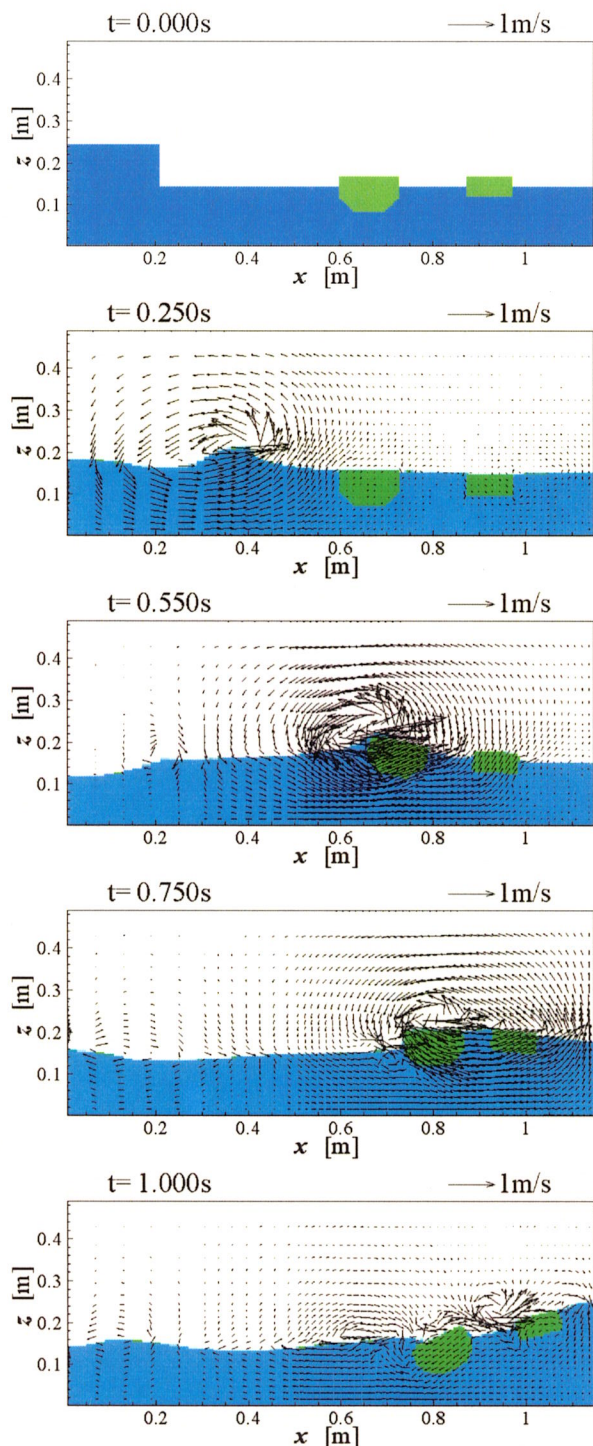


図-5 2次元場における段波と複数剛体の衝突計算

定した。したがって、2つの剛体付近では、 $\Delta x = \Delta z = 0.005\text{m}$  といった最も細かい計算格子が配置されることになる。また、計算で使用した2つの剛体形状は六角形と長方形であり、それぞれの大きさは高さ  $0.130\text{m} \times$  幅  $0.085\text{m}$ 、高さ  $0.100\text{m} \times$  幅  $0.050\text{m}$  と設定した。また、初期状態における2つの剛体間の水平距離は  $0.145\text{m}$  である。

図-5 は 2 次元場における段波と複数剛体の衝突計算結果を示す。同図より、計算開始と同時に水柱が崩壊し、それに起因して段波が生じている。時刻  $t=0.250\text{s}$  では、段波がその波峰付近に反時計回りの大きな渦を伴いながら右方向に伝播する様子がみられる。そして、時刻  $t=0.550\text{s}$  で、段波が六角形浮体に衝突する。その後、六角形浮体は僅かながら時計回りの回転を伴い、右方へ移動し始めている。また、六角形浮体と長方形浮体の間隔が狭くなり、浮体間および長方形浮体の右側背後での水位が急激に上昇している様子が時刻  $t=0.750\text{s}$  から確認できる。段波が右壁に衝突した時刻  $t=1.000\text{s}$  では、水位上昇により、2つの浮体が大きく変動している。

紙面の制約上、本論文では図面を割愛するが、計算領域全体に格子サイズ  $\Delta x = \Delta z = 0.005\text{m}$  (メッシュ数  $230 \times 100$ ) の細かい等間隔格子を用いて、同様な計算を行った。なお、図-4 に示す不等間隔格子数は等間隔格子の約 50% に相当する。時刻 3.0s までの衝突計算に対する両者の計算時間を比較すると、不等間隔格子、等間隔格子の場合、それぞれ約 1 時間、約 2 時間となり、約 50% の計算時間の短縮が確認された。また、両計算結果に差異があまりみられないことも踏まえると、計算負荷の低減に対する不等間隔格子の導入の有用性が実証される。なお、解析で使用した計算機は CPU: Intel Core2 Duo E6600 (2.40GHz)、RAM: 2GB である。

#### 4. 3次元場における多相乱流数値解析

本章では、3次元多相場における水柱崩壊に伴う段波と2つの浮体構造物の衝突問題を取り上げる。

表-2 3次元計算条件

計算領域	$3.0\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.2\text{m}$
メッシュ数	$90 \times 30 \times 40$
計算ステップ間隔	$0.0001\text{s}$
静水深	$0.4\text{m}$
水柱の大きさ	$0.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.7\text{m}$
水の密度	$1000.0\text{ kg/m}^3$
空気の密度	$1.25\text{ kg/m}^3$
立方剛体の密度	$800.0\text{ kg/m}^3$
直方剛体の密度	$500.0\text{ kg/m}^3$
重力加速度	$9.80665\text{ m/s}^2$
立方剛体のサイズ	$0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$
直方剛体のサイズ	$0.4\text{m} \times 0.75\text{m} \times 0.2\text{m}$

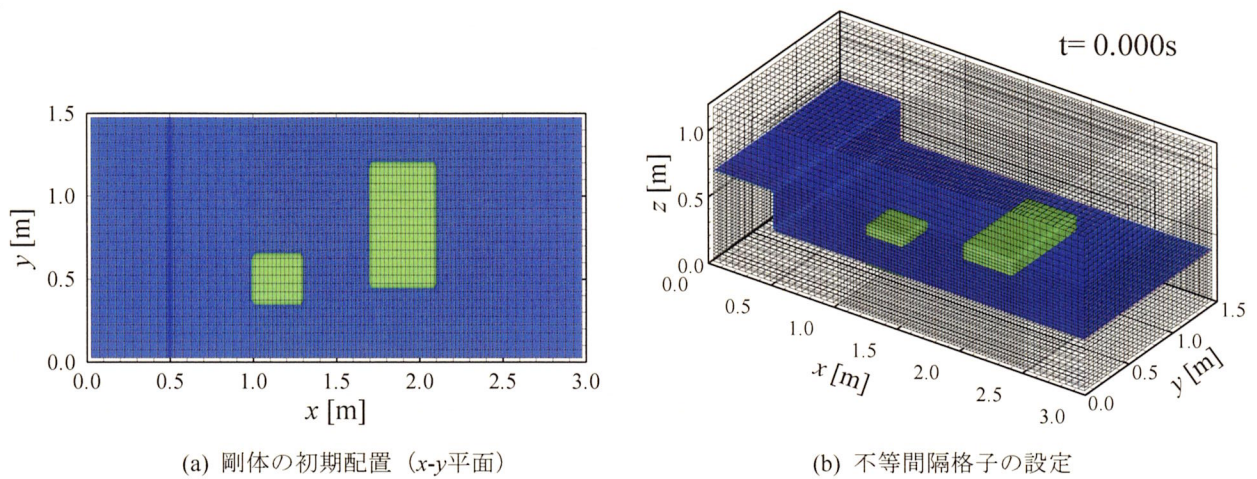


図-6 3次元場における剛体の初期配置と格子設定

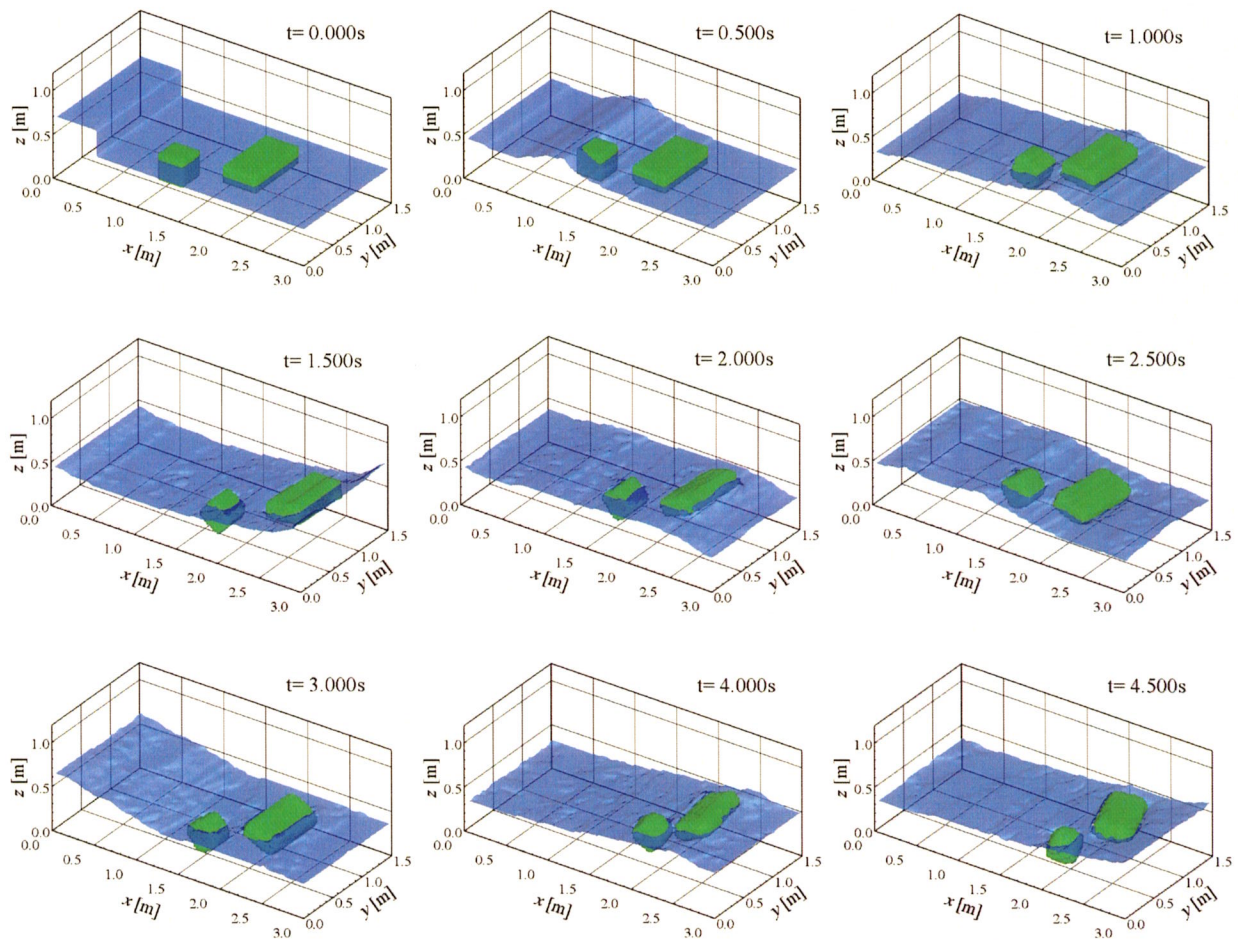


図-7 3次元場における段波と複数剛体の衝突計算

計算条件の詳細を表-2 に示す。図-6 は 3 次元場における剛体の初期配置と格子設定を図示したものである。x-y 平面上での複数剛体の初期配置を示す同図からわかるように、y 軸の中心線 ( $y=0.75$ ) からずらして、立方剛体と直方剛体を配置するとともに、不等間隔格子を用いて剛体近傍の格子サイズが

最も小さくなるように設定した。具体的には、x 方向の格子サイズは  $x=0.0\sim 1.0\text{m}$ ,  $2.5\sim 3.0\text{m}$  の計算領域で  $\Delta x=0.05\text{m}$ ,  $x=1.0\sim 2.5\text{m}$  では  $\Delta x=0.025\text{m}$  とした。奥行き y 方向に対しては、 $\Delta y=0.050\text{m}$  と一定に設定し、z 方向に関しては、 $z=0.0\sim 0.8\text{m}$ ,  $0.8\sim 1.2\text{m}$  の領域でそれぞれ  $\Delta z=0.025\text{m}$ ,  $0.050\text{m}$  と設定した。

よって、2つの剛体付近の計算格子のサイズは最小サイズ $\Delta x = \Delta z = 0.025\text{m}$ 、 $\Delta y = 0.050\text{m}$ となる。

図-7に水柱崩壊に伴う2つの剛体の動的挙動の時間変化を示す。計算時間の経過とともに、水柱崩壊によって誘起された段波が右方向へ伝播し、立方剛体に衝突する様子が時刻 $t=0.500\text{s}$ で確認される。その後、段波の進行に伴い、立方剛体は時計回りの回転を伴いながら右方へ押し流される。そして、進行した段波が直方剛体に衝突し、その影響で直方剛体が僅かに傾きながら上昇している様子が時刻 $t=1.000\text{s}$ から認められる。時刻 $t=1.500\text{s}$ では、直方剛体も若干の時計回りの回転を伴いながら右方向に漂流し、直方剛体と右壁間の水位が段波により急激に上昇している。そして、時刻 $t=2.000\text{s}$ で、この水位上昇に起因して左方向の流れが発生し、2つの剛体は反時計回りの回転を伴いながら左方に押し戻される様子が認められる。さらに、時刻 $t=2.500\text{s}$ では、右壁からの反射波が通過した後、直方剛体は、水位低下に伴い、時計回りに回転しながら下降している。反射波が立方剛体を通過する時刻 $t=2.500\text{s}$ 以降、水位変動は複雑になり、2つの剛体は急接近し、直方剛体は $x$ - $y$ 平面において反時計回りに回転し、 $x$ - $z$ 平面においても、2つの剛体は個々に複雑な回転・並進運動をしている。

時刻 $t=1.500\text{s}$ では、細かい格子領域から粗い格子領域に直方剛体が移動していたが、剛体形状はほぼ維持されており、安定して計算されていることが確認でき、不等間隔格子の妥当性が検証される。

上記の結果と前章で述べた2次元場での計算結果をまとめると、本研究で構築した固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D は、2次元場、3次元場における段波と複数物体の漂流・衝突過程を良好に計算することができ、複数物体を含む多相乱流場を解析可能であることが定性的に示された。また、剛体付近のみに細かい格子を配置する不等間隔格子を導入することにより、計算負荷の低減とともに、詳細な現象を良好に再現可能であることを示した。しかしながら、2次元場および3次元場ともに、剛体の並進・回転運動に伴い、剛体隅角部周辺の形状が若干丸みを帯びる結果となっており、今後の改善課題といえる。

## 5. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に列挙する。

- (1) 固相・気相・液相が相互に干渉しあう複雑な多相乱流場を精緻に解析可能な数値モデルである2次元・3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D に、不等間隔格子を導入するとともに、複数剛体の運動解析ができるよう

にモデルを改良し、汎用性の高い新たな固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D を構築した。

- (2) 段波と複数浮体の衝突問題に固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D を適用した結果、複数物体の動的挙動を同時に解析可能であること、物体や気液界面付近の計算格子を細かくすることにより、固相の動的挙動、異相界面の挙動を良好に追跡できることなど、モデルの有用性を定性的に確認した。また、等間隔格子を用いた場合の計算結果との比較より、本モデルは大幅な計算時間の短縮も可能となることを示した。
- (3) 本研究で構築した新たな固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D/3D は複数構造物の動的応答を含む風・波・流れ場を解明する有効な解析手法の1つとして期待される。

なお、本モデルは、複雑形状を有する剛体の動的挙動を解析する際、隅角部の形状保持に若干の問題があるなど改善の余地が残されている。今後、さらなるモデルの高精度化を図るとともに、水理模型実験を実施し、モデルの妥当性を定量的に検証する予定である。

謝辞：本研究の一部は、(財)漁港漁場漁村技術研究所研究助成（研究代表者：名古屋大学・水谷法美）を受けていることを付記し、感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 川崎浩司, 大谷知樹, 中辻啓二: 固気液多相共存場に対する統一数値解法の構築と複雑水理現象への応用, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1026-1030, 2001.
- 2) 川崎浩司, 中辻啓二: 3次元固気液多相乱流数値モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.56-60, 2002.
- 3) 川崎浩司, 袴田充哉: 2次元多相乱流数値モデルによる漂流剛体の衝撃波力解析, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.726-730, 2005.
- 4) 川崎浩司, 山口 聡, 袴田充哉, 水谷法美, 宮島正悟: 段波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.786-790, 2006.
- 5) Yabe T, and Aoki T: Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation One-dimensional solver, *Computer Physics Communications*, Vol.66, pp.219-232, 1991.
- 6) Yabe T: Unified Solver CIP for Solid, Liquid and Gas, *Computational Fluid Dynamics Review 1997*, 1997.
- 7) Brackbill J.U., Kothe D.B., and C.Zemach: A continuum method for modeling surface tension, *J. Computational Physics*, Vol.100, pp.335-354, 1992.
- 8) Xiao F, Yabe T, Ito T, and Tajima M: An algorithm for simulating solid objects suspended in stratified flow, *Computer Physics Communications*, Vol.102, pp.147-160, 1997.