

3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と 波作用下での漂流物の動的解析

Development of Three-Dimensional Numerical Model of Multiphase Flow “DOLPHIN-3D”
and Dynamic Analysis of Drifting Bodies under Wave Actions

川崎浩司¹・袴田充哉²

Koji KAWASAKI and Mitsuya HAKAMATA

The main purpose of this study is to newly develop a three-dimensional numerical model of multiphase flow “DOLPHIN-3D” using a CIP method and an extended SMAC method based on irregular mesh size grids, which introduces a DTM method of a highly accurate turbulence model based on the LES and the dynamic motion analysis of multiple rigid bodies. The validity of the model is verified by applying it to dynamic analysis of drifting bodies under wave actions and comparing with the laboratory experiments. The results reveal that the model is capable of simulating three-dimensional multiphase flows and time-changing wave pressures acting on drifting rigid bodies with high accuracy. The model would be, therefore, useful in discussing complex physical phenomena with solid-gas-liquid interaction.

1. 序 論

津波、高潮・越波による災害など沿岸域災害に対する防災・減災対策を有効に講じるためには、まずその物理機構を詳細に明らかにすることが必須である。そのため、沿岸域の物理環境場の解明を目的とした数多くの研究が系統的にこれまで実施されてきた。しかしながら、沿岸域の物理環境場は、構造物、漂砂、風、波浪、流れなど固相・気相・液相の多相場が複雑に絡み合って形成されており、十分な解明にまで至っていない現象が現在もなお存在している。

近年、高速演算処理機器の目覚ましい性能向上と高精度な数値スキームの開発に伴い、理論・水理模型実験に代わる物理解明手段として、数値計算の役割が高まりつつある。複雑な物理環境場である気液混相・固気液多相流動場を対象に数値解析を行った既往の研究例としては、Level Set 法を用いて水柱崩壊と静止流体中の単一上昇気泡の流体解析を行った由比ら(1998)、オイラー・ラグランジュ混合型数値モデルとして GAL-LES モデルを開発し、水柱崩壊問題に適用した二瓶・灘岡(2000)、C-CUP と Dynamic LES を組み合わせて固気液共存場に対する数値計算手法を開発した陸田(2000)、LES 乱流モデルを組み込んだ VOF 法に基づく気液二相流モデルを構築した谷本ら(2004)、気液二相流型 MPS 法を提案し、碎波・遡上解析に適用した五十里ら(2004)などの研究がある。また、川崎ら(2001)、川崎・中辻(2002)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 法を駆使した 2 次元・3 次元多相流

数値モデルを構築し、その有用性を確認した。しかし、同モデルには質量の保存性や乱流モデルを取り入れていないなど問題点があった。そこで、川崎・袴田(2005)は密度関数の取り扱いを変更し、Smagorinsky モデルに基づく乱流モデル LES を導入することにより、新たな 2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を開発した。そして、川崎ら(2006)は、固定・非固定状態の矩形物体に段波が衝突した際の作用波圧に関する実験結果と比較し、2 次元モデルの妥当性を定量的に検証した。しかし、同モデルは等間隔格子に基づいているため、計算負荷上の欠点がある上、2 次元場のみに限定されていた。また、単数剛体の運動解析しか扱うことができず、さらに Smagorinsky モデルに基づく簡易な乱流モデルを使用しているなど、未だ改良すべき問題が残されていた。

本研究では、計算負荷の低減のため不等間隔格子を採用するとともに、複数剛体の運動解析法、高精度な乱流モデルの一つである dynamic 二変数混合モデル DTM (Dynamic Two-parameter Mixed model) に基づく LES を導入した新たな 3 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D (Dynamic numerical model Of multi-Phase flow with Hydrodynamic INteractions-3 Dimension version) を開発することを主たる目的としている。そして、ピストン型造波による浮体の動揺問題、水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流問題に同モデルを適用し、モデルの有用性・妥当性を検証する。

2. 3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D

(1) 基礎方程式

本モデルで用いる基礎方程式は、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)、運動方程

1 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

2 正会員 修(工) 静岡県建設部河川砂防局河川海岸整備室

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。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \rho)}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{f_{si}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\tau_{ij} + 2\frac{\mu}{\rho} S_{ij} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} = -\rho C_{Is}^2 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi_I}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

ここで, x_i は座標ベクトル (x, y, z), u_i は i 方向の流速成分, ρ は流体密度, p は圧力, g_i は重力加速度ベクトル ($0, 0, -g$), f_{si} は CSF (Continuum Surface Force) モデルによる表面張力, τ_{ij} は DTM による SGS 応力, μ は粘性係数, S_{ij} はひずみ速度テンソル ($\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i$)/2, C_{Is} は局所音速, t は時間を示す. ϕ_I は I 相 ($I=1 \sim 3$; ϕ_1 : 固相, ϕ_2 : 液相, ϕ_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

図-1 は 3 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の計算フローチャートを示す。本モデルでは、時間分離解法により、基礎方程式のうち質量保存式、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計算を行う。なお、基礎方程式の離散化・差分化は不等間隔格子に基づいて行った。まず初期条件と境界条件を設定した後、物理量の移流計算を高精度移流計算スキーム CIP 法 (Yabe・Aoki, 1991) により行う。ついで、非移流段階を非圧縮性・圧縮性流体を同時解析可能な拡張 SMAC 法を用いて各物理量を求める。なお、気液界面で生じる表面張力を、Brackbill et al. (1992) が考案した CSF モデルにより算定した。また、乱流量を、後述する Salvetti・Banerjee (1995) が開発した dynamic 二変数混合モデル DTM に基づく LES モデルによって評価した。非移流段階の計算後、次節で述べる複数剛体の運動解析法により各固相の移流速度 U_i を求める。その後、密度関数 ϕ_I の移流計算を、固相 ϕ_{1l} に対しては U_i を用いて、液相 ϕ_2 , 気相 ϕ_3 には U_i を考慮した修正流速を使って CIP 法により計算する。最終的に各物理量を更新し、次の時間ステップへ移行する。

上述の計算過程を時間ステップごとに繰り返し実施することにより、異相間の相互干渉を考慮した複数物体が混在する多相流体場の数値解析を行うことができる。

(3) 複数剛体の運動解析

本モデルでは、Xiao et al. (1997) と同様、複数剛体に対

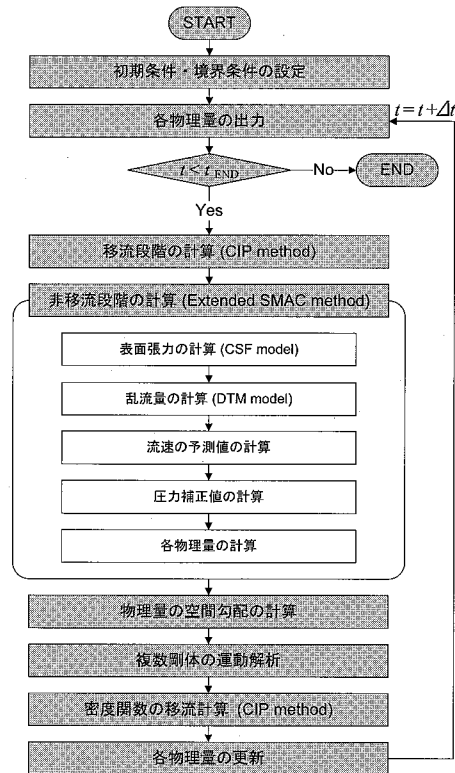


図-1 計算フローチャート

して独立に運動解析ができるよう、従来の単数剛体の運動解析法に個々の剛体に対する固相密度関数 ϕ_{1l} を導入する。なお、1つのセル内における固相の密度関数 ϕ_1 と各剛体に対する ϕ_{1l} は式 (6) の関係を満足する必要がある。

個々の剛体運動解析に関しては、固相群を剛体とし、その運動形態は並進と回転の両方から構成されると仮定して解析を行う。まず固相を高粘性流体と考え、全相に対して 2 (2) 節で述べた流動解析を行う。そして、得られた固相領域内の圧力を用いて個々の剛体の重心における並進速度 V_i と角速度 Ω_i を式 (7), 式 (8) より算定し、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。なお、式中の du/dt の項は、Newton の第 2 法則より、剛体内部の圧力を用いて単位質量あたりの力として算定している。

$$\phi_1 = \sum_{l=1}^L \phi_{1l} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{M_i} \int_V \frac{du}{dt} \phi_{1l} \rho_{sl} dV \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{d\Omega_i}{dt} = \frac{1}{I_i} \int_V R_i \times \frac{du}{dt} \phi_{1l} \rho_{sl} dV \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$R_i = x - x_{0i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$U_i = V_i + \Omega_i R_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで, L は剛体の総数, 剛体 l に対する x_{0l} は重心へ

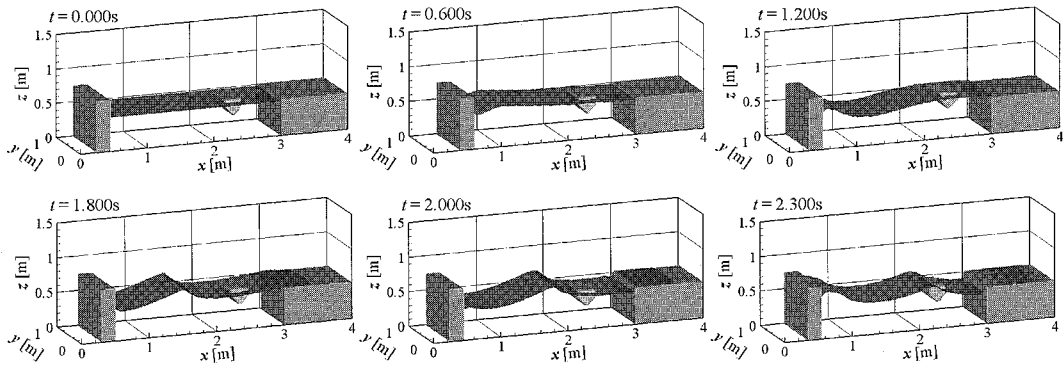


図-2 ピストン型造波による浮体の動揺解析結果

クトル, M_i は質量, ρ_{si} は密度, V_i は並進速度ベクトル, Ω_i は角速度, I_i は慣性モーメントである. x , u はそれぞれ任意の位置・速度ベクトルで, R_i は剛体 i の重心からの位置ベクトルを示す.

(4) dynamic 二変数混合モデル DTM

本研究で導入する dynamic 二変数混合モデル DTM は, モデル係数を定数として与える Smagorinsky モデルと異なり, GS 成分を利用して2つのモデル係数を動的に決定するため, エネルギーの逆輸送を考慮でき, 局所的な数値不安定になりにくいなどの利点をもつ高精度な乱流モデルである.

以下に DTM の概要を示す. 詳細は Salvetti・Banerjee (1995) などを参照されたい. まず SGS 応力 τ_{ij} を修正 Leonard 応力 L_{ij}^m , 修正 cross 応力 C_{ij}^m , 修正 SGS Reynolds 応力 R_{ij}^m の3つの成分に分解し, C_{ij}^m が L_{ij}^m に比例すると仮定する. そして, 陸田(2000)が用いた Dynamic LES モデルと同様, グリッドフィルターとテストフィルターを施し整理すると, 以下に示す非等方性成分の SGS 応力 τ_{ij}^a が誘導される. なお, モデル係数 C_L , C_S はグリッド/テストフィルター後の流速値より算定できる.

$$\tau_{ij}^a = C_L L_{ij}^{ma} - C_S |S| \bar{S}_{ij} \dots \dots \dots (11)$$

$$L_{ij}^m = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \dots \dots \dots (12)$$

ここで, 上付きバーはグリッドフィルター, $|S|$ はひずみ速度テンソルの大きさであり, 上付きの a は非等方性成分 $\tau_{ij}^a = \tau_{ij} - \delta_{ij} \tau_{kk}/3$ を表す.

3. ピストン型造波による浮体の動揺解析

波作用下での漂流物の動的解析の一つとして, ここではピストン型造波による浮体の動揺問題を取り上げる.

図-2 に示すように, 計算領域内に3つの剛体を配置し, 図面左から順に, 造波板, 浮体, エブロン (陸域) と定義する. 高さ 0.75 m, 幅 0.2 m の造波板を流速

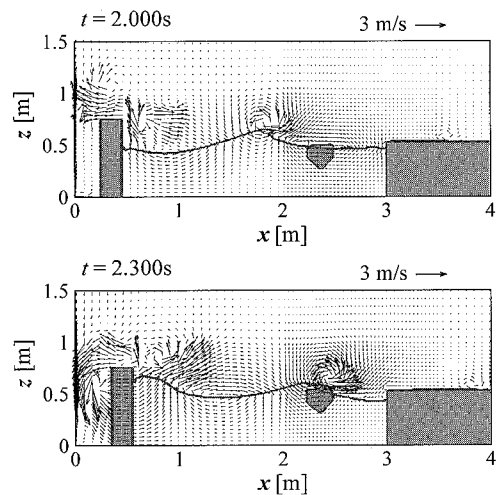


図-3 x-z 断面における水面変動と流速場

0.5 sin (2 πt) で周期的に強制振動させることにより, 水深 0.5 m の静水状態から造波させた. また, y 方向中央部に密度 800 kg/m³ の五角柱型浮体 (幅 0.25 m × 高さ 0.225 m × 奥行き 0.5 m) を非拘束状態で配置した. エブロンに関しては, 剛体内のすべての流速値を 0 m/s とすることで固定した. 計算格子間隔については, y 方向に $\Delta y = 0.025$ m の等間隔格子とし, x , z 方向に対して本モデルで導入した不等間隔格子を採用した. 具体的には, $x = 2.0$ m ~ 3.5 m の範囲で $\Delta x = 0.0125$ m, それ以外の範囲を $\Delta x = 0.025$ m とした. 一方, z 方向に対しては, $z = 0.0$ m ~ 1.0 m, 1.0 m ~ 1.5 m の各範囲で $\Delta z = 0.0125$ m, 0.025 m と設定した. なお, 時間ステップ間隔 Δt を 0.0001 s と一定に保ち, 水の密度 ρ_w を 1000.0 kg/m³, 空気の密度 ρ_a を 1.20 kg/m³, 表面張力係数 σ を 7.2×10^{-2} N/m, 重力加速度 g を 9.80665 m/s², 初期大気圧 p_a を 1013 hPa とした. また, 計算領域の上面には開境界条件を, それ以外の境界面に対しては slip 条件を課した.

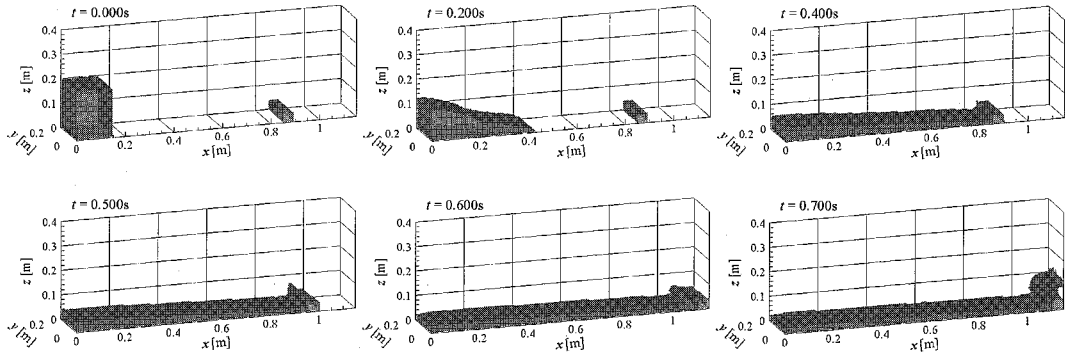


図-4 水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流解析結果

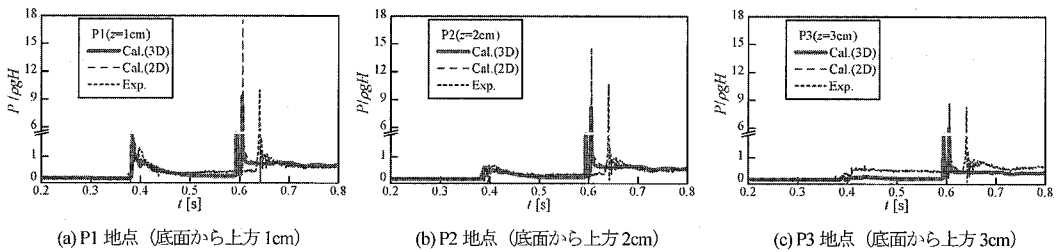


図-5 非固定剛体に作用する波圧の時系列変化

図-2 はピストン型造波による水位変動と浮体の動揺挙動の時間変化を示したものである。静水状態から発生する第1波(時刻 $t=0.6\text{ s} \sim 1.2\text{ s}$) は正弦波のように緩やかな波形で進行するが、時刻 $t=1.8\text{ s}$ 以降の第2波は浮体やエブロンからの反射波の影響で波峰が前傾し碎波している。特に時刻 $t=2.3\text{ s}$ では、碎波した波峰が浮体に覆い被さっている様子が確認できる。ついで、 y 方向中央 ($y=0.5$) における x - z 断面の水位変動と流速場の計算結果を示す図-3 をみると、前傾した波峰付近で反時計回りの渦が形成され、波谷付近では時計回りの緩やかな循環流が発生している。波峰が浮体と衝突する時刻 $t=2.3\text{ s}$ では、気相領域で反時計回りの強い渦の形成が認められる。このことは液相と固相の相互干渉が気相部にも大きな影響を及ぼしていることを示唆するものである。また、浮体は反時計回りに若干回転していることがわかる。

以上のことから、本モデルは、強制運動の剛体、非固定剛体、固定剛体といった異なる条件下の複数剛体の運動を良好に解析可能であることを明示した。複数剛体-水-空気の複雑な異相界面および流速場を安定して計算可能であることも確認された。また、水面波形や流速場に及ぼす不等間隔格子の影響はみられないことから、不等間隔格子の導入は計算時間の節約の観点からも良好であるといえる。

4. 水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流解析

ここでは、陸上遡上する津波によって漂流する木材やコンテナなどが沿岸周辺施設に衝突する場合を想定して計算を行う。具体的には、川崎ら (2006) が実施した水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流に関する水理実験および2次元計算と同一条件下で3次元数値解析を行う。そして、既往の結果との比較より、本モデルの妥当性を定量的に検証する。

図-4 は水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の動的挙動の時間変化を示す。同図より、段波との衝突後、漂流した剛体は回転を伴わず右方に並進運動し、計算開始から約 0.6 s 後、右壁に衝突する。その後、水塊が剛体の上方に打ち上がり、越流している様子が認められる。紙面の制約上、ここでは示さないが、水理実験で撮影したビデオ解析との比較から剛体の漂流挙動は良好であった。また、DTM のモデル係数 C_L , C_S の空間分布を調べたところ、両係数とも大きな変動はなかった。よって、Dynamic LES モデルの一欠点であるモデル係数の大変動による計算不安定性を解消するために導入した dynamic 二変数混合モデル DTM の有用性を確認した。

矩形剛体前面に作用する波圧の時間変化を図-5 に示す。時刻約 0.4 s に段波が剛体に衝突することにより発生する1回目のピークは底面近傍のP1地点で最大値を示し、底面から離れるにつれて小さくなり、P3地点で

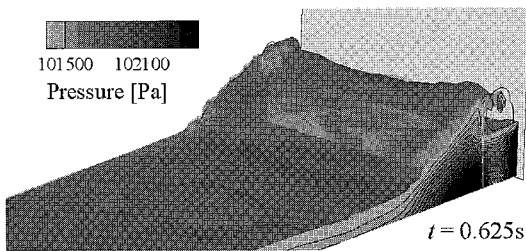


図-6 右壁衝突直後の剛体周辺の圧力空間分布

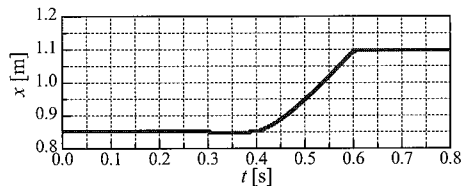


図-7 剛体前面の移動距離の時間変化

は明確なピークが確認できない。一方、漂流剛体が右壁に衝突した時刻約 0.6 s のときの最大波圧は段波が物体に衝突した波圧の 10 倍程度と非常に大きい。これは、両計算結果と実験結果においても同じ傾向を示す。計算結果と実験結果を比較すると、漂流剛体が右壁に衝突するまでに約 0.04 s の時間差が認められるものの、数値計算の再現性は良好である。なお、この差違の原因として、川崎ら (2006) も指摘しているように、底面および側面境界に slip 境界を課していること、水理実験ではゲートを上方に急開することにより段波を発生させており、段波の波形が若干異なることなどがあげられる。また、3次元計算結果は2次元計算結果より高精度に実験結果を再現しているといえる。図-6は右壁衝突直後の剛体周辺の圧力空間分布を示す。同図より、剛体と段波水塊あるいは右壁の接地面で急激な圧力の増加が確認される。また、剛体前面の移動距離の時間変化を示す図-7から明らかなように、剛体は段波との衝突から右壁への衝突の間に移動し、その後、静止している。このときの平均移動速度は約 1.25 m/s で剛体が急激に移動したことを示す。これからも、右壁衝突直後に剛体の作用波圧が急激に増加する理由がわかる。よって、計算結果は、段波の衝突に伴う剛体の作用波圧の実験結果を精度よく再現していると判断され、3次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の妥当性が定量的に検証された。

5. 結 論

本研究では、3次元場を対象に、固相-気相-液相の相互干渉を高精度に解析できる数値モデルとして、不等間隔格子、複数剛体の運動解析手法、dynamic 二変数混合モデル DTM を導入した、CIP 法と拡張 SMAC 法に基づく3次元気液多相乱流数値モデル DOL-

PHIN-3D を新たに開発した。そして、ピストン型造波による浮体の動揺運動を解析した結果、本モデルは複数剛体-水-空気の複雑な異相界面および流速場を安定して計算可能であることを明示した。また、水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流問題では、3次元計算結果は2次元計算結果に比べて実験結果を良好に再現しており、モデルの妥当性を定量的に検証した。よって、本研究で開発した DOLPHIN-3D は、風-波-流れ-構造物の相互干渉に伴う現象の解明を目的とした3次元数値波動水槽として活用できるといえる。

謝辞：本研究の一部は、(独法)日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究(B) (研究代表者：名古屋大学・水谷法美、課題番号：19360222)を受けており、深謝の意を表する。また、本研究を遂行するにあたり、名古屋大学・水谷法美教授、同大学大学院生 D3・中村友昭君、M1・小木曾圭祐君の貴重な助言・協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 五十里洋行・後藤仁志・酒井哲郎(2004)：気液二相流粒子法による碎波過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 111-115.
- 川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二(2001)：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.
- 川崎浩司・中辻啓二(2002)：3次元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.
- 川崎浩司・袴田充哉(2005)：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.
- 川崎浩司・山口 聡・袴田充哉・水谷法美・宮島正悟(2006)：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.
- 谷本勝利・Phung Dang Hieu・曹 雪飛・赤川嘉幸・齋藤将人(2004)：二相流モデルによる数値波動水路の開発，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 26-30.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫(2000)：GAL モデルに基づく移動境界流れ解析法の構築とその応用，土木学会論文集，No. 642/II-50，pp. 19-30.
- 陸田秀実(2000)：大規模碎波による気液混相流体場における高精度数値計算手法の開発，岐阜大学博士論文，198p.
- 由比政年・石田 啓・保智正和(1998)：界面の大変形に伴う気液二相流体場の数値解析，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 61-65.
- Brackbill, J. U., D. B. Kothe and C. Zemach(1992)：A continuum method for modeling surface tension, J. Computational Physics, Vol. 100, pp. 335-354.
- Salveti, M. V. and S. Banerjee(1995)：A priori tests of a new dynamic subgrid-scale model for finite-difference large-eddy simulations, Physics of Fluids, Vol. 7, No. 11, pp. 2831-2847.
- Xiao, F., T. Yabe, T. Ito and M. Tajima(1997)：An algorithm for simulating solid objects suspended in stratified flow, Computer Physics Communications, Vol. 102, pp. 147-160.
- Yabe, T. and T. Aoki(1991)：Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation I. one-dimensional solver, Computer Physics Communications, Vol. 66, pp. 219-232.