

VOF 法による 3 次元数値水槽の開発

九州共立大学工学部 正会員 ○鄒 曙光

九州共立大学工学部 正会員 小島 治幸

九州大学大学院 正会員 吉田 明德

1. 研究の目的

近年、VOF 法に基づく数値波動水路¹⁾ (CADMAS - SURF) が急速に普及し、海岸構造物の設計のための波動場の予測にも活用される段階になりつつあるが、断面 2 次元での現象を捉えたものがほとんどである。実現象においては 3 次元性が顕著化する場面も少なくなく、海岸構造物周辺における 3 次元性が卓越する場での波動場の予測が求められている。本研究では、2 次元数値波動水路にならい、3 次元数値波動水槽の開発を行い、砕波を含む波動場現象を精度良く計算できる 3 次元モデルの構築を目標としている。

2. 数値解析

(1) 基礎方程式

3 次元数値水槽の基礎方程式は、数値波動水路¹⁾ にならい、式 (1) ~ (5) に示すポアラスモデルに基づいた 3 次元非圧縮流体の連続の式、N - S 方程式および VOF 関数 F の移流方程式を用いる。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - D_y v + S_v - R_y \quad (3)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_z - R_z - \gamma_v g \quad (4)$$

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (5)$$

ここで、 t は時間、 x, y は水平方向座標、 z は鉛直方向座標、 u, v, w は x, y, z 方向の流速成分、 ρ は密度、 p は圧力、 ν_e は動粘性係数、 g は重力加速度、 γ_v は空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は各方向面積透過率、 D_x, D_y, D_z はエネルギー減衰帯のための係数、 S_p, S_u, S_v, S_w は造波ソースに関する係数、 $\gamma_v, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は構造物から受ける慣性力効果を示したパラメータである。

時間方向の離散化は、Euler 法に基づく圧力項を陰的に評価する SMAC 法を用い、空間方向の離散化はコントロール・ボリューム法を用いて行った。ポテンシャル関数の Poisson 方程式を境界条件を含めて離散化すると非対称の連立 1 次方程式が得られる。本数値水槽では、収束性および安定性に優れた前処理付き BCGSTAB 法²⁾ という非対称の連立 1 次方程式の解法を採用した。

(2) 造波モデルと境界条件

造波モデルは、造波境界における造波用流速を用いる造波とセル中心位置に設定した造波ソースを用いる造波の二種類である。また、構造物からの反射波を無くして長時間の解析が出来るために、Sommerfeld の放射境界とエネルギー減衰帯の二つの無反射モデルを採用した。

3. 数値解析例

3 次元数値水槽の精度を検証するため規則波と不規則波を用いて計算を行った。規則波は長さ 43.78m (5

キーワード VOF 法, 数値水槽, ストークス波, 不規則波

連絡先 〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8 九州共立大学都市システム工学科 TEL 093-693-3236

波長) × 幅 8.756m (1 波長) × 高さ 2m (水深 1m) の 3 次元数値水槽で行った. 入射波は $kh=0.72$, $T=3.0s$, 波高 $H=0.18m$ の第 5 次ストークス波とし, 造波境界での造波を行った. 境界条件は水槽の側面をスリップ境界をとし, 反射波の影響が出ないように岸側の境界面を透過境界とした. 計算で用いたセルのサイズは水平方向 $\Delta x = \Delta y = 0.10945m$ (波長/80) とし, 鉛直方向 $\Delta z = 0.04m$ (水深/25) とし, セルの数は $400 \times 80 \times 50$ とした. 図-1 に, 造波境界および造波境界から 1, 2, 3 波長の位置における進行波の時間波形 (η) について理論値と計算値(本数値水槽(3D)と数値波動水路(2D))との比較を示す. 3D の計算値と理論値はよく一致しており, 2D による計算結果と同等の精度があり, 波形も安定していることが分かる. また, 図-2 は計算終了時における空間波形 (3D) の鳥瞰図を示す.

本数値水槽における不規則波の造波は数値波動水路の造波(マトリクスデータによる造波)と異なり, マトリクスデータを生成せず, 直接成分波の重ね合わせによる造波点の表面波形および水粒子速度を時々刻々に与えることにした. 図-3 のような長さ 61.292m (7 波長, 内 4 波長はエネルギー減衰帯) × 幅 8.756m (1 波長) × 高さ 2m (水深 1m) の 3 次元数値水槽の中心位置で造波ソースによる不規則波を起こした. 不規則波は規則波と同じ条件とし, 計算時間は 30 有義周期とした. 図-4 に, 造波ソースから左右 1 波長離れた位置における進行波の時間波形を示す. 造波ソースを中心に左右対称の位置における波形は完全に同じであることが分かる. 図-5 は計算終了時における空間波形の鳥瞰図を示す. 図から, 空間波形は造波ソースを中心に左右対称であり, エネルギー減衰帯では水位が徐々に減衰しその末端ではほぼ 0 に収束していく様子が分かる. このことから, 本数値水槽は境界からの再反射波を抑えながら安定した波動場の非定常 (3D) 計算を行うことが出来るといえる.

4. おわりに

本研究では, VOF 法に基づく 3 次元数値波動水槽を構築し, 規則波と不規則波における波の伝播の計算を行った. 計算結果から本数値波動水槽の妥当性と精度を有することが確認できた. 今後の課題として, 波と構造物との相互干渉問題, 越波問題などへの適用が挙げられる.

参考文献

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 296p.
- 2) 藤野清次 (1991): 熱流体解析で現れる非対称連立 1 次方程式の新解法, 第 28 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 II, pp622.

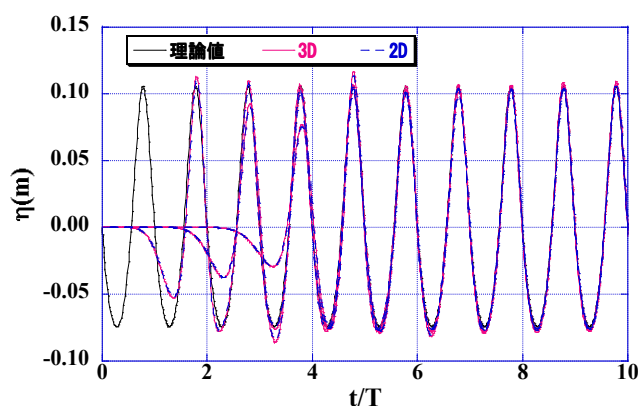


図-1 時間波形の比較図

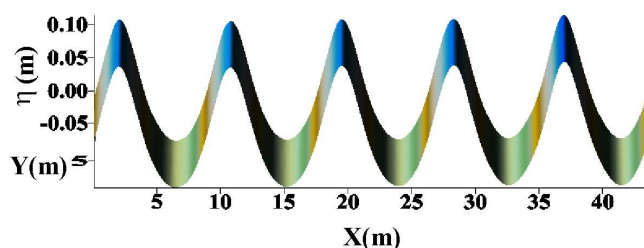


図-2 空間波形 (3D) の鳥瞰図

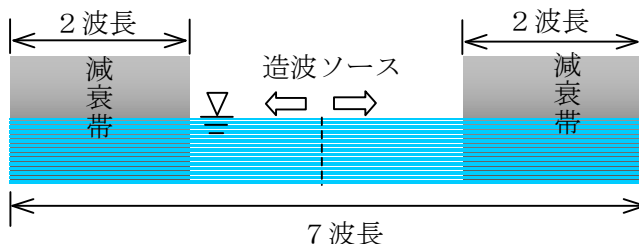


図-3 不規則波の計算領域の断面図

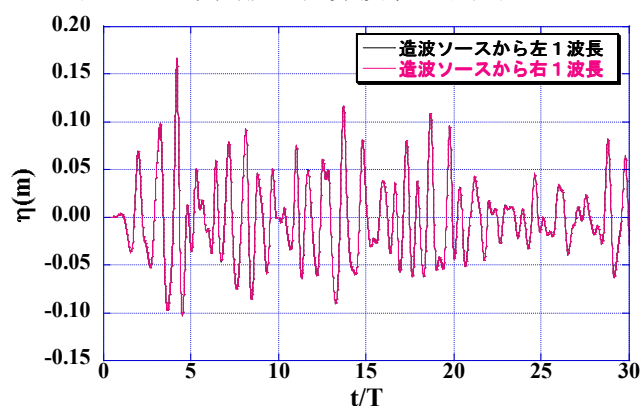


図-4 時間波形の比較図

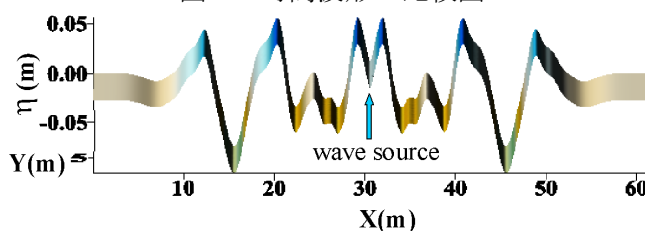


図-5 空間波形の鳥瞰図