

構造物の並進・回転運動を導入したVOF法に基づく2次元数値波動水路の構築

DEVELOPMENT OF TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL WAVE FLUME WITH
TRANSLATIONAL AND ROTATIONAL MOTION OF STRUCTURE
BASED ON VOF METHOD

川崎浩司¹

Koji KAWASAKI

¹正会員 博(工) 名古屋大学助教授 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)

The main purpose of this study is to develop a two-dimensional numerical wave flume based on a VOF method in order to compute nonlinear interaction between wave and a moving structure. The numerical algorithm developed here is verified by comparing the numerical results with the theoretical ones on the movement distance of bottom-seated and bottom-detached structures in water. The numerical results, furthermore, reveal that the interaction of wave and a moving flap-type structure causes the difference of water levels between the offshore and onshore sides of the structure and has a strong effect on water surface elevation and water particle velocity field around the structure.

Key Words : Numerical wave flume, translational and rotational motion, wave-moving structure interaction, VOF method

1. はじめに

海岸保全施設が整備されてきた今日においても、未だ高潮は脅威を奮っている。特に、2004年は日本への台風上陸数が平年の約5倍と過去最高であり、各地で甚大な高潮災害が多発した。今後より一層、ハード・ソフト面の高潮災害対策が重要である。現在、ハード対策として、沿岸域の防護面のみならず、海域の景観・環境保全・利用面にも配慮した海域構造物の一つであるフラップゲート型高潮防潮堤の耐波機能が検討されている。同防潮堤の主な特徴として、締め切り時間が短いことから異常波浪時には十分な防護機能を発揮できること、通常時には海底に防潮堤を格納しているため海水交換性・船舶航行に支障がないことなどが挙げられる。

Tomita et al.¹⁾ は、任意角度に固定されたフラップゲート型高潮防潮堤に作用する波力・波圧および伝達波特性について、水理実験と数値解析の両面から検討した。その結果、フラップゲート型構造物が沖側に傾斜した場合に波の伝達率の軽減効果が高いことを示した。しかしながら、数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)²⁾

を用いた数値解析では、傾斜構造物の形状が鋸型となっており、高精度な作用波圧の算定までには至っていない。そのため、川崎ら³⁾ は、数値波動水路 CADMAS-SURF の構造物形状入力方法を改良することにより構造物形状を正確に設定し、静止状態におけるフラップゲート型高潮防潮堤の波動場および作用波力・波圧を解析した。しかし、フラップゲート型高潮防潮堤の大きな特徴である構造物の動的挙動を考慮していないなど検討の余地が残されていた。そこで、川崎・島^{4,5)} は、構造物の並進・回転運動を考慮したVOF (Volume Of Fluid) 法に基づく数値波動水路を構築し、モデルの妥当性を検証した。しかし、来襲する波と移動中の構造物の相互干涉については検討していない。このように、これまでフラップゲート型高潮防潮堤を対象に研究はいくつか行われているが、構造物が静止している場合や構造物の移動のみを取り上げており、フラップゲート型高潮防潮堤の特徴である構造物の移動中における波浪場に関する水理実験や数値解析はほとんど行われていないのが現状である。

そこで、本研究では、並進・回転運動する構造物と流体の非線形干渉を解析できる、VOF法に基づく断面2次元数値波動水路を構築することを主たる目的とする。そして、着底型鉛直・傾斜構造物、浮体構造物、任意形状

構造物，フラップゲート型構造物を対象に，可動中における構造物と流体の相互干渉について検討を行う．

2. 構造物の並進・回転運動を導入したVOF法に基づく数値波動水路

(1) 基礎方程式

本研究で活用する数値波動水路CADMAS-SURFは，海岸構造物の耐波設計に適用可能な断面2次元数値波動水路であり，自由表面が多価関数となる複雑な水理現象に対しても高精度に解析できるVOF法に基づいている．基礎方程式は，下式のとおり，透過性構造物の空隙率，流体抵抗を導入したPorous Body Modelに基づいて拡張された非圧縮性・粘性流体に対する連続式(1)， x ， z 方向のNavier-Stokes運動方程式(2)，(3)，流体の体積率を表すVOF関数 F の保存式(4)である．

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

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

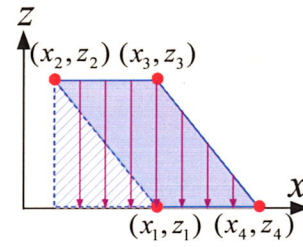
$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (4)$$

なお，式中の記号および計算アルゴリズム等の詳細は財団法人沿岸開発技術研究センター²⁾を参照されたい．

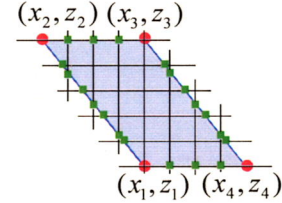
(2) 数値波動水路CADMAS-SURFの改良

a) 既存の構造物形状入力方法の問題点

既存の入力方法は，構造物頂点の x 座標の小さい順から， (x_1, z_1) ， (x_2, z_2) ， $\dots$ ， (x_m, z_m) ， (x_{m+1}, z_{m+1}) ， $\dots$ と座標を定義し，頂点を結ぶことにより構造物表面を決定する．そして， $x_{m+1} - x_m \geq 0$ の条件下で，構造物表面から z 軸の負方向に x 軸まで垂直に下ろした範囲を全て構造物とみなす．しかし，図-1(a)に示すように，本研究で対象とするフラップゲートは立ち上がる際あるいは倒れ込む際にゲート下部に水域が生じるため， $x_{m+1} - x_m \geq 0$ の条件を満足することができず，正確に構造物形状を設定することが不可能である．したがって，フラップゲートのような構造物を含めた任意形状を有する構造物を設定できるようにプログラムを改良する必要がある．なお，Porous Body Modelを使用しない場合には任意形状構造物の設定が可能であるが，斜面は階段状に近似されるため，精度良く作用波圧・波力を算定することは難しい．



(a) 既存モデル



(b) 改良モデル

図-1 任意形状構造物の入力設定方法

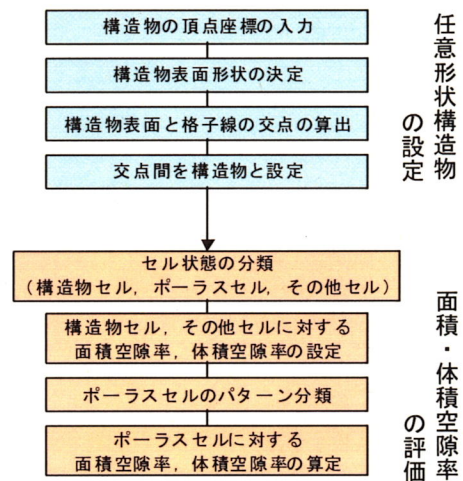


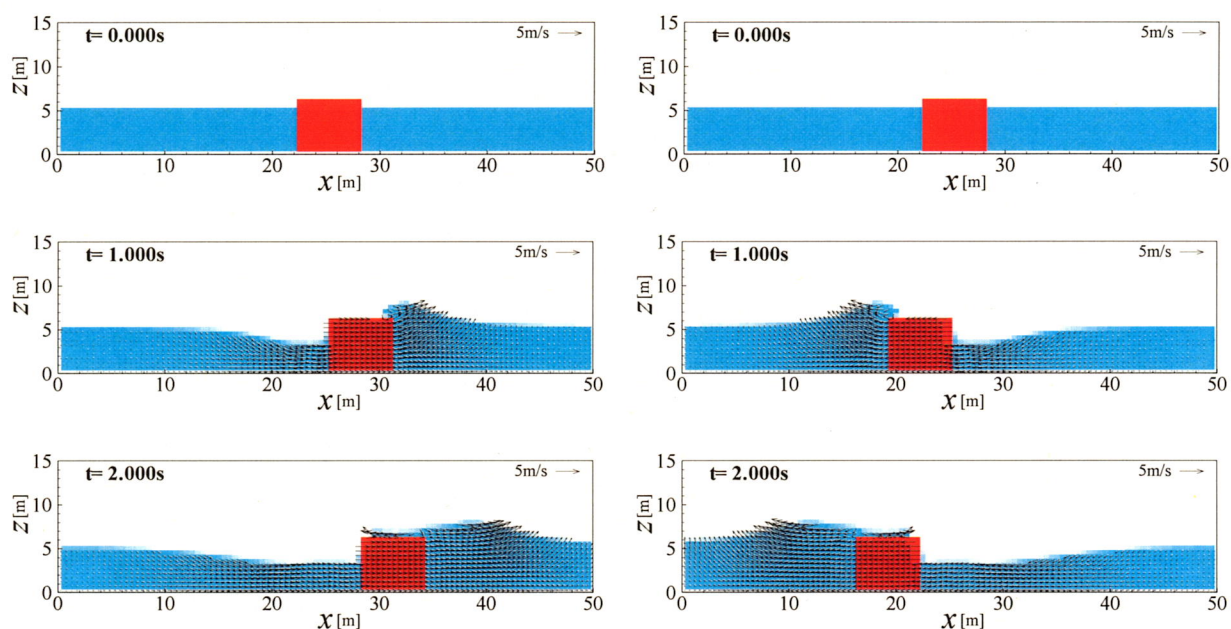
図-2 任意形状構造物の設定方法の計算フロー

b) 構造物形状入力方法の改良点

まず構造物の頂点の座標（図-1(b)の●印）を設定し，それらを結ぶことで構造物表面を決定する．ついで，構造物表面と x - z 格子線の交点（図-1(b)の■印）を求め，その交点間を構造物とみなすことにより，任意形状構造物の設定を行う．ここで，計算セルを，セル全体が構造物である「構造物セル」，セル内の一部が構造物である「ポーラスセル」，それら以外の「その他セル」に大別する．よって，各セルの面積透過率，空隙率は，構造物セル，その他セルに対しそれぞれ0，1となる．ポーラスセルの面積透過率・空隙率は既存モデルと同様に算定される．よって，上述したことをまとめると，図-2に示す計算フローとなる．なお，上述の一連の処理を行った後，VOF関数 F を用いて，その他セルを「流体セル($F=1$)」，「表面セル($0 < F < 1$)」，「気体セル($F=0$)」に分類する．

c) 任意形状構造物の動的挙動の取り扱い方

本計算アルゴリズムでは，構造物の境界条件設定を行わずに，構造物の体積・面積空隙率を活用することに



(a) 右方向に水平移動 (b) 左方向に水平移動
図-3 着底型鉛直構造物の並進運動に伴う水面変動と水粒子速度場の時系列変化

より、セルの状態・流速・圧力・VOF関数の値を算定することにした。すなわち、構造物セルとポーラスセルあるいは構造物セルと流体セルの間での流速と圧力の連続性を保つために、一時的に構造物セルを流体セルとして扱い解析を行った。このことは、構造物セルも、流体セルとポーラスセルと同様、連続式とNavier-Stokes運動方程式を用いて流速、圧力を計算することを意味する。しかしながら、構造物内も流体として取り扱っているため、圧力伝播が構造物内部で発生することになる。この問題を克服するために、構造物セルに四方囲まれた構造物セルに対してのみ圧力 p を $p=0$ と設定した。これにより、構造物が移動した場合においても、構造物内部を圧力が伝播しない上、構造物境界周辺で異常な圧力変動を防ぐことが可能となった。

ついで、構造物境界面と内部に構造物の移動速度を設定することにより、VOF関数 F の移流計算手法Donor-Acceptor法を従来の解法のままで構造物と流体の動的挙動を同時解析できるようになった。なお、構造物内部のVOF値は本来であれば $F=0$ であるが、流体セルとして取り扱っているため、 $F=1$ となる。しかしながら、構造物セルの体積空隙率を利用することにより、どこに構造物セルが存在するのか容易に評価できる。

3. 数値波動水路の精度検証

(1) 着底型鉛直・傾斜構造物の並進運動

図-3に着底型鉛直構造物の並進運動に伴う水位変動と水粒子速度場の時系列変化を図示する。(a)、(b)はそれ

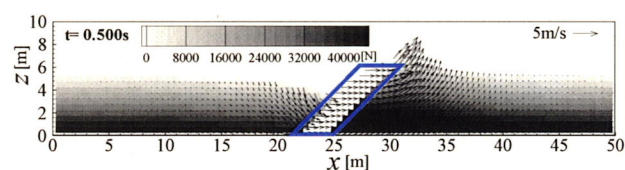
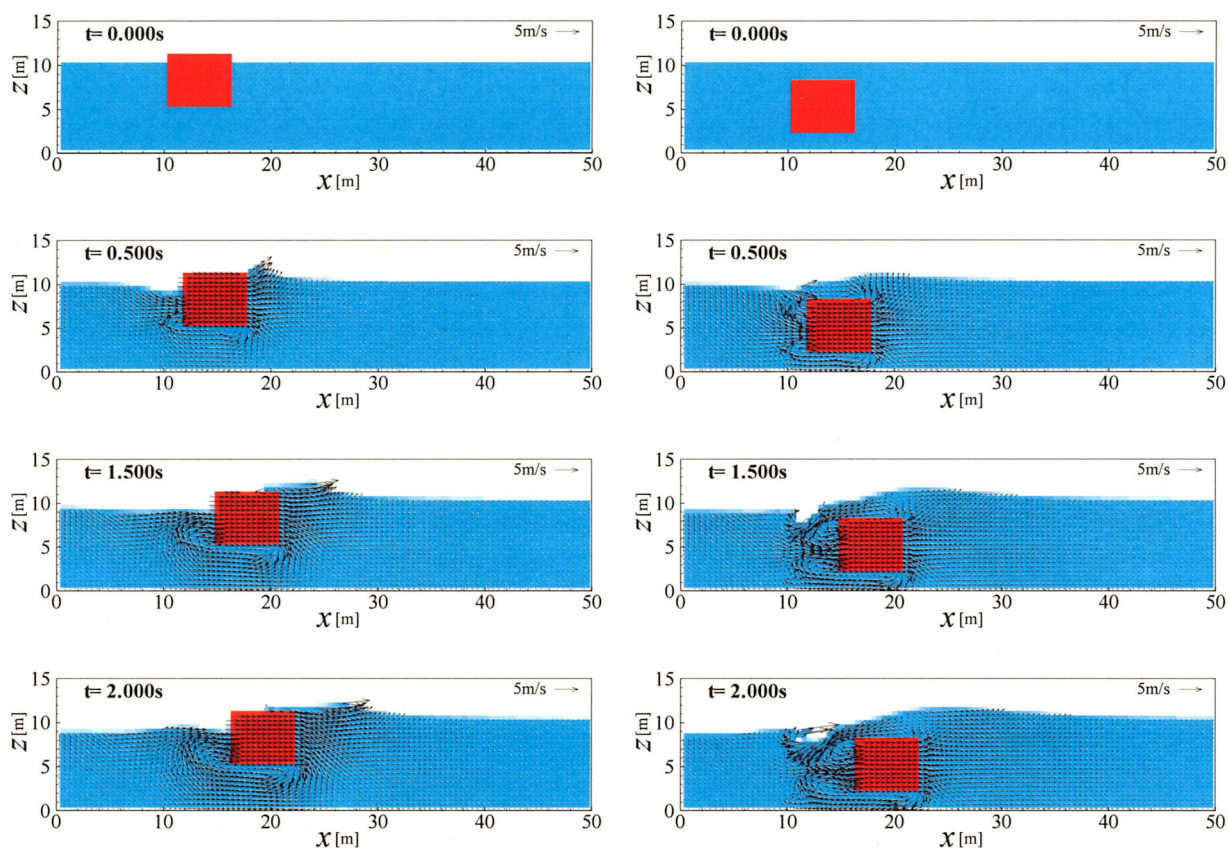


図-4 着底型傾斜構造物の水平移動に伴う圧力場

ぞれ構造物が右方向、左方向に移動する場合である。同図に示すように、計算領域は $50.0\text{m} \times 15.0\text{m}$ であり、静水深を 5.0m とした。また、構造物幅を 6.0m 、構造物高さを 6.0m とし、構造物の移動速度は 3.0m/s と一定に保った。また、 x 方向と z 方向の格子間隔をともに 0.5m とした。

図-3(a)より、着底型鉛直構造物が右方向に水平移動し始めると、構造物前面の水位が上昇し、そして構造物上に水塊が遡上していく様子が認められる。一方、構造物背後では、質量保存のため、水位が低下している。また、構造物セルとポーラスセルあるいは構造物セルと流体セルの間における流速の連続性が保たれていることが確認できる。さらに、構造物左端が $x=22.0\text{m}$ から $x=28.0\text{m}$ に移動していることがわかる。このことは時刻 $t=2.0\text{s}$ における構造物の理論的移動距離 6.0m (=移動速度 $3.0\text{m/s} \times$ 計算時間 2.0s)と完全に合致しており、構造物の移動方法の妥当性が検証される。また、構造物を左方向に同じ速度で移動させた場合を示す図-3(b)から、同計算結果は図-3(a)の結果と全く左右対称であり、計算手法に方向依存性がないことが確認される。

図-4に着底型傾斜構造物の並進運動に伴う圧力場の計算結果の一例を示す。同図より、構造物内外近傍における流速・圧力の連続性が保持されていることが確認され、本手法の妥当性が検証される。



(a) 喫水深5.0mの場合

(b) 静水面下2.0mの場合

図-5 浮体構造物の並進運動に伴う水面変動と水粒子速度場の時系列変化

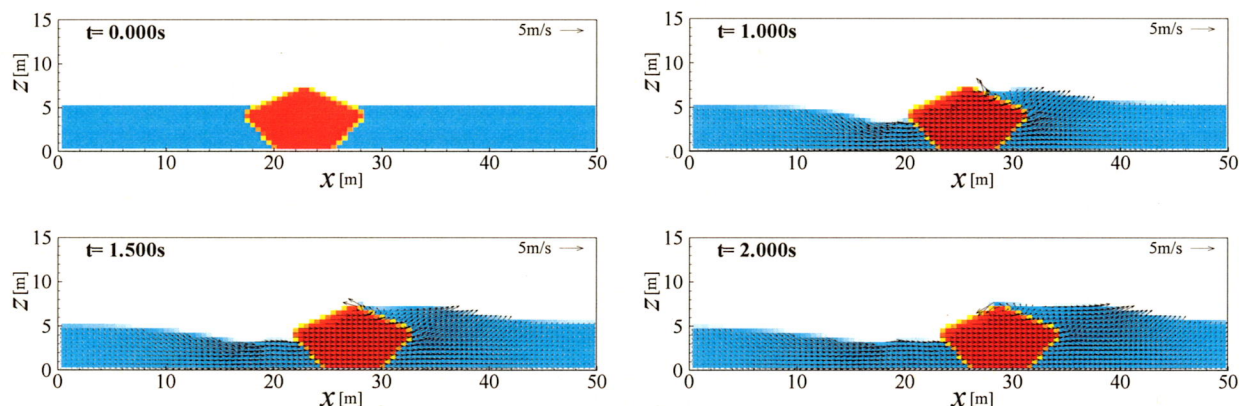


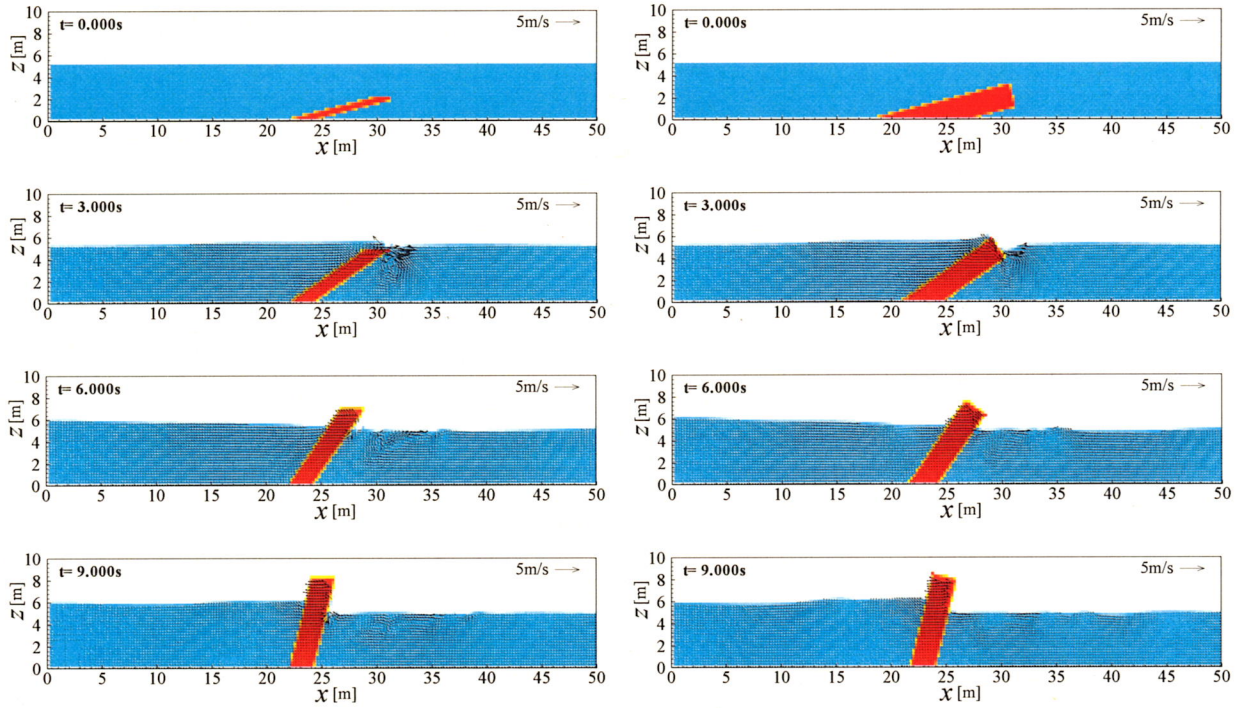
図-6 任意形状構造物（五角形構造物）の並進運動に伴う水面変動と水粒子速度場の時系列変化

(2) 浮体構造物と任意形状構造物の並進運動

図-5(a)に浮体構造物の水平移動に伴う波動場を示す。なお、浮体構造物の形状および移動速度は前節と同様で、底面から5.0mの位置に設置した。つまり、この場合の喫水深は5.0mである。なお、静水深を10.0mとした。

図-5(a)より、図-3(a)に示す着底型鉛直構造物の水平移動による波浪特性と同様、構造物前面で上昇した水塊は構造物上に遡上し、構造物背後では水位の低下が確認される。しかし、構造物下部に有水域が存在するため、時計回りの循環流が形成されていることが認められる。

一方、構造物上面が静水面下2.0mの位置に設置された浮体構造物の場合を示す図-5(b)をみると、構造物が水平に動き出すと同時に、浮体構造物の上下部の有水域でそれぞれ反時計回り、時計回りの循環流が発生している。そして、それぞれの循環流は構造物背後で干渉し合い、砕波の発生が認められる。また、図-6に示すように、任意形状構造物の一例として五角形構造物を対象に計算した結果、本数値波動水路は、単純な四角形だけでなく、五角形など複雑な形状を有する構造物に対しても解析可能であることが示される。



(a) 構造物底面の隅角部2点を支点とする方法① (b) 構造物中心線と底面の交点1点を支点とする方法②
図-7 フラップゲート型構造物の回転運動に伴う水面変動と水粒子速度場の時系列変化

4. フラップゲート型構造物と波の相互干渉に関する数値解析

(1) 矩形構造物の回転運動

フラップゲート型高潮防潮堤のように底面に固定された構造物の回転移動を取り扱うために、構造物の移動速度に角速度を導入する。ここでは、構造物の回転運動の取り扱い方として、(1)構造物底面の隅角部2点を支点とする方法①、(2)構造物中心線と底面の交点1点を支点とする方法②の2つを考える。

並進・回転移動の両方を考慮した構造物の移動速度は式(5)で表される。

$$\begin{cases} u_{\text{obst}} = U - \omega(z - z_0) \\ w_{\text{obst}} = W - \omega(x - x_0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 u_{obst} 、 w_{obst} は水平・鉛直方向の構造物の移動速度、 U 、 W はそれぞれ水平・鉛直方向の構造物の並進速度、 ω は構造物の角速度、 (x, z) は構造物内部の任意の地点、 (x_0, z_0) は支点のx-z座標である。

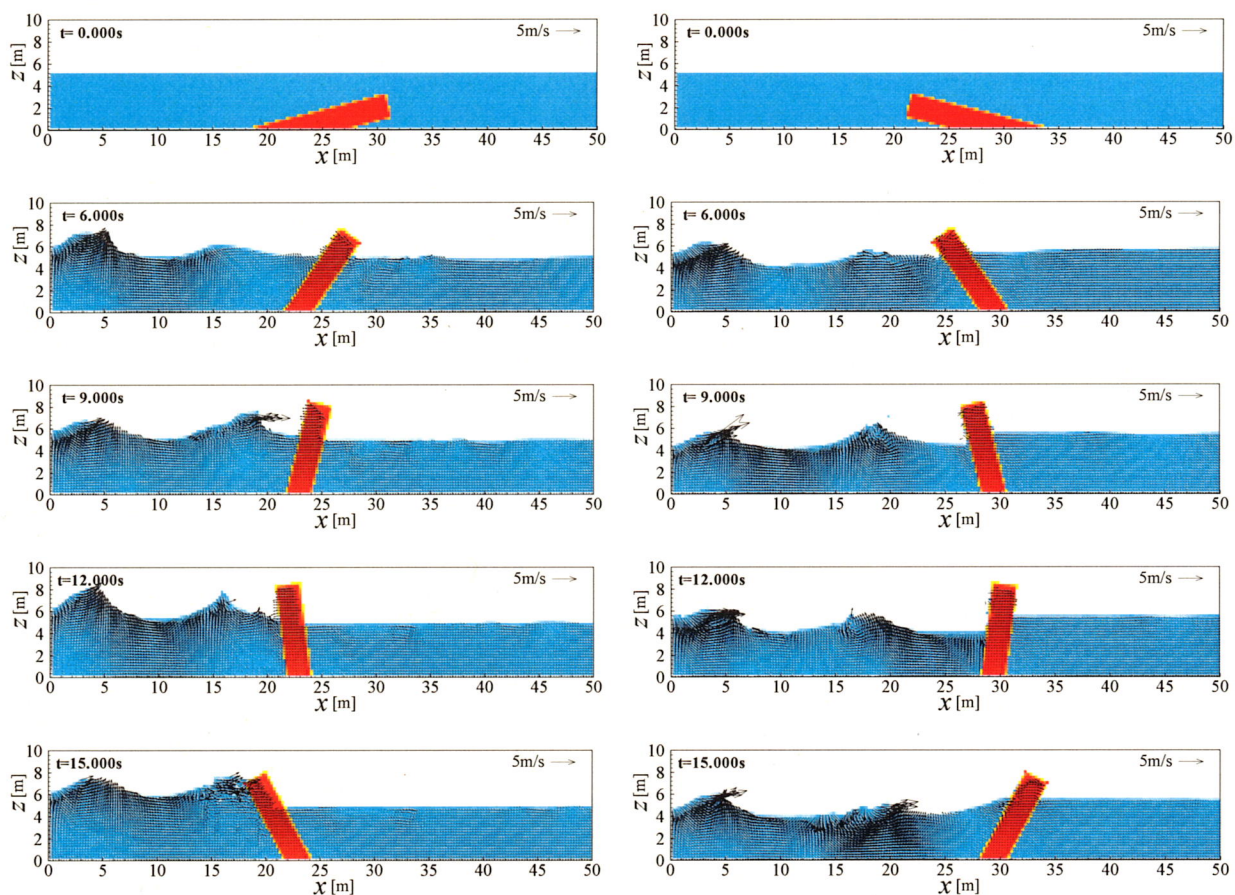
図-7(a), (b)は、それぞれ構造物の回転運動の取り扱い方法①と②の場合で、初期傾斜角度を30度と設定した着底型矩形構造物の回転運動に伴う水位と流速場の時間変化を同時に図示したものである。ここで、構造物が垂直になったときの構造物形状（構造物幅 $B=2.0\text{m}$ 、高さ $H=8.0\text{m}$ ）が一致するように、構造物の初期形状を決定した。また、構造物の角速度は反時計回りに $\pi/26\text{rad/s}$ （ π ：円周率）とし、x方向とz方向の格子間隔をともに 0.25m とした。

両図より、フラップゲートが回転運動し始めると、構造物の移動の影響により流体が持ち上げられ構造物前面の水位が上昇し、構造物背後では水位が低下している。ついで、図-7(a)と図-7(b)を比較すると、方法①では、回転軸を2点設けているため、構造物長を一定に保つことはできるが、長さが固定されるためワイパーを動かしたときのような構造物形状となり、構造物幅が回転運動とともに大きく変化している。一方、方法②では、構造物隅角部2点の midpoint に回転の支点を置き、構造物幅を一定に回転させている。そのため、構造物長が固定されておらず、構造物の傾斜角度によって構造物底面の形状が変化する。以上のことから、両手法には一長一短はあるものの、構造物の幅が一定となる方法②の方が視覚的に実現象に近いことから、本研究では、構造物の回転運動の取り扱い方として、方法②を採用することにした。

(2) フラップゲート型構造物と波の相互干渉

図-8は回転運動するフラップゲート型構造物と波の相互干渉に伴う水位と水粒子速度場の時系列変化を示す。ここで、(a), (b)は、初期傾斜角度を30度と設定した構造物が角速度 $\pi/26\text{rad/s}$ でそれぞれ反時計回り、時計回りに回転する場合である。

計算領域は水平方向に 50.0m 、鉛直方向に 10.0m で、x, z方向の格子間隔はともに 0.25m である。構造物形状は幅 2.0m 、高さ 8.0m とし、波浪条件は波高 2.0m 、周期 3.0s 、静水深 5.0m とした。また、計算領域左側に造波境界を配置し、右側境界には開境界処理としてSommerfeldの放射境界を採用した。図-8(a)に示すように、フラップ



(a) 反時計回りの場合

(b) 時計回りの場合

図-8 回転運動するフラップゲート型構造物と来襲波の相互干渉に伴う水位変動と流速場の時系列変化

ゲートが反時計回りに回転し始めると、水位が構造物前面で上昇し、構造物背後で低下する。また、構造物の回転運動の影響により進行波が碎ける様子もみられ、構造物には大きな波力・波圧が作用していると推察される。一方、構造物が時計回りに回転運動する場合を図示する図-8(b)をみると、構造物前面の水位低下と構造物が岸側に倒れ込む影響から、図-8(a)とは大きく異なる水位変動が認められる。このことから、構造物の動的挙動が波動場に及ぼす影響は極めて大きいことがわかり、また本研究で構築した数値波動水路の有用性が確認できる。

5. おわりに

本研究では、構造物の動的挙動を考慮したVOF法に基づく2次元数値波動水路を構築した。そして、同数値波動水路を用いて、回転運動するフラップゲート型構造物と来襲波の相互干渉について検討するとともに、本研究で構築した数値波動水路の有用性を確認した。今後は、数値計算の面から、可動中におけるフラップゲート型防潮堤の越波と作用波力・波圧などの諸特性を詳細に解明していく予定である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金・若手研究(B)（代表：川崎浩司，課題番号：17760404）による成果であることを付記し、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- Tomita, T, Shimosako, K, and Takano, T: *Wave forces acting on flap-type storm surge barrier and waves transmitted on it*, Proc. of 13th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., pp 639-646, 2003.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター：沿岸開発技術ライブラリーNo.12 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発～数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書～，457p, 2001.
- 川崎浩司，富田孝史，下迫健一郎，高野忠史，熱田浩史：フラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波力，海岸工学論文集，第50巻，pp.791-795, 2003.
- 川崎浩司，島 知宏：構造物の移動を考慮したVOF法に基づく数値波動水路の構築，土木学会中部支部平成16年度研究発表会講演概要集，pp.185-186, 2005.
- 川崎浩司，島 知宏：構造物の回転運動を考慮した2次元数値波動水路の構築，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集2-144，pp.287-288, 2005.