

フラップゲート型構造物の 流体連成解析モデルの構築とその検証

DEVELOPMENT OF FLUID-SOLID INTERACTION ANALYSIS MODEL
FOR FLAPGATE TYPE STRUCTURE AND ITS VALIDATION

木村雄一郎¹・柳 浩敏²・森西晃嗣³・森 信人⁴・安田誠宏⁴・間瀬 肇⁴

Yuichiro KIMURA, Hirotooshi YANAGI, Koji MORINISHI,
Nobuhito MORI, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

¹正会員 工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

²日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

³工博 京都工芸繊維大学 機械システム工学科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

⁴正会員 工博 京都大学防災研究所 沿岸災害研究分野 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A flapgate breakwater is a new type structure for coastal disaster reduction caused by tsunamis and storm surges that usually lies down on seabed and rises up as a seawall with its buoyancy when tsunami or storm surge occurs. In our previous experimental studies, blocking capabilities of the flapgate against tsunamis were confirmed, and the characteristics of the gate motion and wave pressure have been clarified. Present study develops a numerical model considering fluid-structure interactions for the flapgate and validation of the numerical model is conducted. The numerical model consists of combining the overset grid method and level set method for solving both flapgate motions and free surface water motions accurately. It is shown that the present developed model gives accurate predictions of flapgate motions against hydraulic model experiments.

Key Words : *flapgate structure, tsunami protection, fluid- structure interactions, over grid method, level set method, experimental validation*

1. はじめに

著者らは、図-1に示すような地震発生後に短時間で港口を閉鎖し港内への津波の進入を抑制するフラップゲート式可動防波堤（以下、フラップゲート）の開発を進めている。フラップゲートは、扉体、函体およびテンションロッドを主要な部材として構成される。扉体は、一端を回転支承として函体に連結され、他端に与えた浮力を利用して水面まで浮上し港口を閉鎖する。さらに、津波によって生じる港外水位の上昇により、扉体は所定の高さまで起立し連続した止水壁となる。テンションロッドは、上部ロッドおよび下部ロッドの2つの部材から成り、起立した扉体に作用する水圧荷重を支持するとともに、対をなす下部テンションロッド間に設置した流体抵抗板が、扉体の急激な起立動作を抑制する。

津波あるいは周期波に対するフラップゲートの

応答特性は、従来の水理模型実験^{1), 2)}により概ね明らかにされている。しかしながら模型実験では、実験設備の制約により、模型寸法や実験条件を自由に設定することは容易ではない。そこで本研究では、流体と剛体運動が連成する2次元数値解析モデルを構築し、その精度検証を行う。

フラップゲート型の構造物を対象として行われた固定座標系を用いた解析的な研究として、川崎³⁾や清宮⁴⁾らによるものがある。しかし、これらは構造物を流体の一部として扱うものであり、流体と剛体の練成を直接取り扱うものではない。一方、ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法等による移動座標系を用いた連成運動解析⁵⁾は、波と剛体の練成を高精度に扱うものであるが、構造体の時々刻々の変位に応じて計算格子をリメッシュするため、計算の負荷が大きい。

そこで、著者らは、連成解析モデルの構築にあたり、計算精度と計算負荷の問題を両立できる、リ

メッシュの不要な重合格子法を採用した。重合格子法⁶⁾とは、有限差分法による解析手法の一つであり、主格子中に補助格子（ここでは、扉体および扉体周囲の移動格子をあらわす）を重ねて配置することで数値解析を行うものである。気液境界面のモデル化には、界面より液相側が正、気相側が負となる垂直距離関数（レベルセット関数 f ）を用いて界面を捕捉するレベルセット法⁷⁾を導入した。

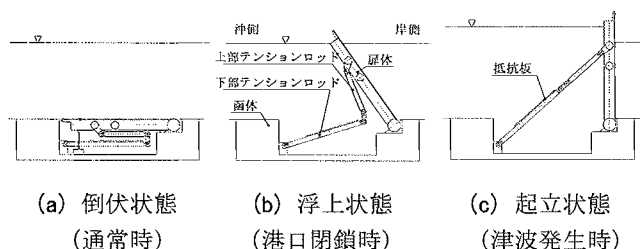


図-1 フラップゲート式可動防波堤の側面図

2. 数値解析モデル

(1) 重合格子法

前述のとおり、重合格子法とは、図-2のように主格子中に補助格子を重ねて配置することで数値解析を行う手法である。主格子では、構造物と重なる格子点およびその近傍の格子点は非計算格子「■」

（以後、HOLEと呼称）として扱われ、その他の格子上において物理量の計算が行われる。補助格子における最外周部の境界「○」には主格子から物理量が内挿され、補助格子領域における計算が行われた後、主格子におけるHOLE点周囲の格子「□」に物理量が戻される。HOLEは、物体から数周目の補助格子における周方向（物体に沿う方向）の曲線をHOLE境界としたときに、その内部に含まれる主格子点をさす。物体近傍の主格子点が、HOLE境界の内部か外部かのいずれに存在するかは、以下の方法により判定される。まず、判定されるべき主格子点Pに最も近いHOLE境界上の補助格子点Qを求める。つぎに、点QでのHOLE境界の外向き法線ベクトル $\mathbf{n}$ と、点Qから主格子点Pへの位置ベクトル $\mathbf{a}$ との内積を算定する。その計算値が正であった場合、格子点PはHOLE境界外部の点、負であった場合は境界内部の点とする。

$$(\mathbf{n}, \mathbf{a}) = \begin{cases} \leq 0 & \text{HOLE} \\ > 0 & \text{Not HOLE} \end{cases} \quad (1)$$

内挿には、以下に示す二次元の線形内挿（bi-linear interpolation）を用いる。

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ q_p \end{bmatrix} = (1-X)(1-Y) \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ q_A \end{bmatrix} + X(1-Y) \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ q_B \end{bmatrix} + XY \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ q_C \end{bmatrix} + (1-X)Y \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ q_D \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、添え字A, B, CおよびDは主格子点Pを内包する補助格子上のセルの各頂点を表し（図-2左下

の拡大図参照）， x, y は座標， q は物理量を表す。式(2)の上2つの式を用いて X, Y を求め、それらを3つ目の式に代入することで、主格子点Pに内挿される物理量 q_p が求められる。補助格子の最外周の境界についても同様の方法により算定され、主格子から補助格子へ物理量が内挿される。

扉体の変位量は、扉体に作用する流体力（回転軸周りのモーメント）と扉体の慣性モーメントを用いて、運動方程式を解くことで算定される。扉体に作用するモーメントは、扉体周りに作用する圧力および粘性力に回転軸からの距離を乗じ、扉体の全周にわたって積分することで得られるものである。ここで、実時間における計算時間間隔を Δt 、擬似時間における計算時間間隔を $\Delta \tau$ とし、両者は $\Delta t \geq \Delta \tau$ の関係を満たしているものとする。擬似時間とは、陰的な計算における内部反復の時間スケールを表すものである。実時間における計算では、扉体は変位を伴わない固定壁として扱われ、物理量の移流計算のみがなされる。一方、擬似時間における計算は、実時間ステップでの計算が1回なされる毎に複数回行われ、計算の安定性を向上させるとともに扉体変位量の計算も対象とする。扉体変位量の計算は、擬似時間において、所定の収束条件が満たされるまで繰返し実施され、その実時間ステップにおける適正な変位量として算出される。

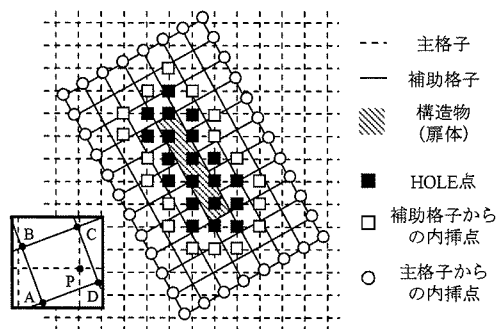


図-2 重合格子法概念図

(2) レベルセット法

レベルセット法は、異なる相の界面を追跡することを目的とする界面捕捉法の一つである。界面捕捉法の中でも、各計算セルに占める気液の体積率を用いるVOF（Volume of Fluid）法は広く用いられている。しかし、体積率で界面を評価するVOF法は、計算の安定性は高いもののシャープな界面を表すことができないという欠点を持つ。

レベルセット法は、界面での安定性と鋭敏性を併せ持つ計算手法であるといえる。それは、相の界面より液相側が正、気相側が負となるような垂直距離関数（レベルセット関数）を用いて界面の位置を捕捉する。このため、界面の曲率や法線方向等の微分量についても比較的精度良く求めることができる。また、レベルセット関数 f は界面に有限な厚さ α を持たせることができ、密度や粘性係数のように界面

で急激に変化するものでも、その界面の厚さに応じて値を分布させ、比較的安定した計算を行うことができる。密度および粘性係数は、以下の式を用いて各計算セルに付与される。

$$\rho = \begin{cases} \rho_w & f \geq \alpha \\ \rho_a & f \leq -\alpha \\ \bar{\rho} + \Delta \rho \sin(\pi f / 2\alpha) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_w & f \geq \alpha \\ \mu_a & f \leq -\alpha \\ \bar{\mu} + \Delta \mu \sin(\pi f / 2\alpha) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 ρ_w 、 ρ_a は液相と気相の密度、 μ_w 、 μ_a は液相と気相の粘性係数、 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\mu}$ は両者の平均値、 Δ は両者の差の1/2である。

界面からの垂直距離関数であるレベルセット関数 f を移流方程式により移流させると、垂直距離関数としての性質が失われる。そこで、レベルセット関数 f を常に界面からの距離関数として保持するため、再初期化と呼ばれる処理が必要となる。

(3) 数値計算法

本研究では、非圧縮性流体を対象としている。また、非圧縮性流体の計算手法として擬似圧縮性法を使用するため、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式に擬似時間微分項を加えた、擬似圧縮性ナビエ・ストークス方程式を支配方程式として使用する(式(5)~(7)参照)。擬似時間に対する定常解が得られたとき擬似時間微分項は0となり、この方程式の解は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と等しくなる。

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + f_x \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + f_y \quad (7)$$

ここで、 p は圧力、 u は x 方向の流速、 v は y 方向の流速、 t は実時間、 τ は擬似時間、 Re はレイノルズ数、 f_x は x 方向に生じる外力、 f_y は y 方向に生じる外力を表す。

空間微分項の離散化は、二次精度風上差分を用いて行った。また、実時間に対する積分は二次精度の後退差分法を使用した。重合格子法、レベルセット法および数値計算法の詳細については、フラップゲートの周期波に対する応答解析を取り扱った、著者らの論文⁸⁾を参考にされたい。

3. 模型実験と解析の条件

水理模型実験は、長さ50m、幅1m、高さ1.5mの2次元造波水槽を用いて、模型縮尺1/30で実施した。実験装置全体の概略を図-3に示す。実験模型は、水深13mの実海域を対象とした実機を模型化したものであり、実機の扉体一門の高さは22m、対応する模型の扉体高さは71.7cmに相当する。水槽内には、砂と半透過性のマットを用いて傾斜面を構築した。傾

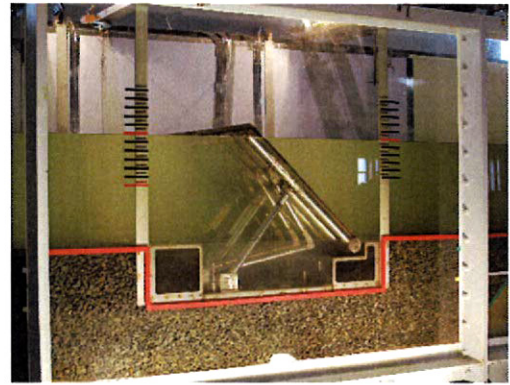


写真-1 実験で用いたフラップゲート模型 (左：沖側)

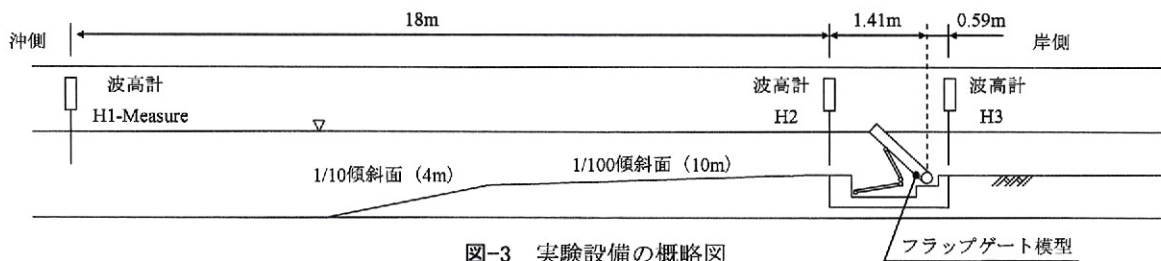


図-3 実験設備の概略図

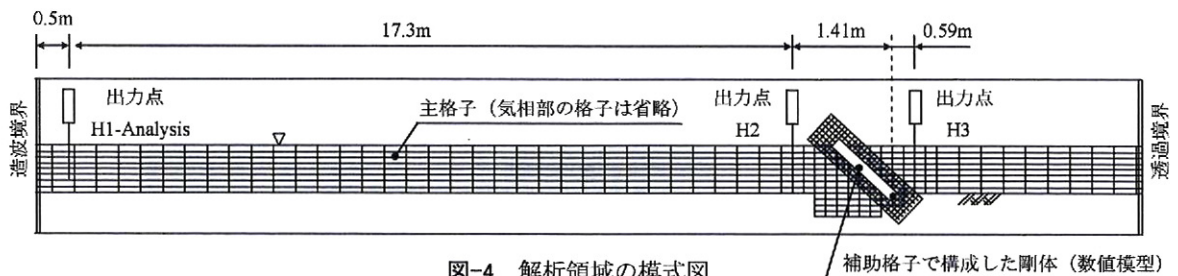


図-4 解析領域の模式図

斜面は、1/10勾配の斜面を4m作成し、その後、1/100勾配の斜面を10mにわたって作成した。傾斜面の背後にフラップゲート模型を設置し、模型の周囲は碎石によって構築した。フラップゲート設置位置における水深は、42.4cmである。実験に用いたフラップゲートの写真を写真-1に示す。

数値解析では、水路長を27.6mとし、フラップゲートの扉体を表す補助格子を図-4のように配置した。水深は、実験の条件と合うように設定した。主格子における格子数は、水平方向440グリッド、鉛直方向65グリッドとし、フラップゲート設置位置の周囲については計算格子を密に配置した。また、補助格子は、扉体の長手方向74グリッド、扉体の厚さ方向29グリッドとして作成し、扉体部分を60グリッド×5グリッドの格子により形成した。

実験模型では、テンションロッドが設置されていることにより、扉体角度が90度を越えることはない。数値解析では、扉体が90度に達した際、扉体の角速度を数値的に0に置き換える処理を施すことで、扉体角度が90度を越えないようにした。本解析では、抵抗板をモデル化していない。実験結果との比較は、抵抗板を設置していない実験ケースを用いて行った。また、計算領域の沖側は造波境界、岸側は透過境界とし、水深以下の海底床については非計算領域として与えた。

実験結果と解析結果の比較は、周期性の押波から始まる津波を使用したケースを対象とした。実験では、ピストン式の造波装置を周期30秒で1周期分作動させることで、津波を模擬する孤立波を作成した。数値解析では、流速の水平方向成分が鉛直方向に一樣であると仮定した微小振幅波としての長波を使用し、数値水路にて、実験と同じ条件の孤立波を発生させた。数値解析で用いた長波の表面波形および境界における流速の鉛直分布は、以下の式で表される。

$$\eta = a \cos(-\sigma t) \quad (8)$$

$$u = \frac{a\sigma}{kh} \cos(-\sigma t) \quad (9)$$

$$v = a\sigma \left(1 + \frac{y}{h}\right) \sin(-\sigma t) \quad (10)$$

ここで、 η は水面変化を、 a は入射波の片振幅を、 h は水深を、 σ は角周波数をそれぞれ表す。

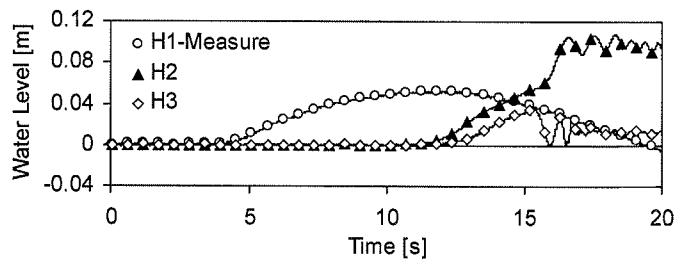
実験および解析で使用した入射波は、実海域のスケールで水深を13mとすると、周期166s、波高3.6mの孤立波に相当する。

4. 実験結果と解析結果の比較

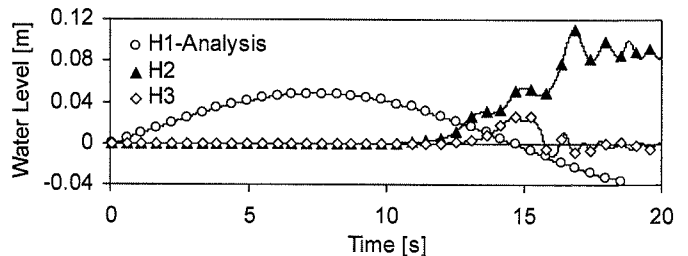
模型実験および数値解析における、フラップゲートの沖側と岸側の水位および扉体角度の時間変化を

図-5および図-6に示す。水位変化は、図-3あるいは図-4のH1、H2およびH3における出力値を示すものである。各図の横軸は、入射波がフラップゲート設置位置に到達する時刻が一致するように記載した。

図-5より、H1における水位の変動には、実験値と解析値の間に時間的な差異がみられる。これは、模型実験と数値解析とでは、フラップゲート沖側における水深の条件が異なるため、孤立波の伝播速度に違いが生じたためと考えられる。数値解析における孤立波の伝播速度と、極浅海域 ($1/25 \geq h/L$, h : 水深, L : 波長) における長波の理論的な伝播速度とを比較した場合、両者が概ね一致することを確認した。H2における水位の解析結果では、水位の上昇の様子に実験結果との違いがみられるものの、フラップゲートに孤立波が作用し、扉体前面の水位が盛り上がる様子、さらに、その後水面が変動する様

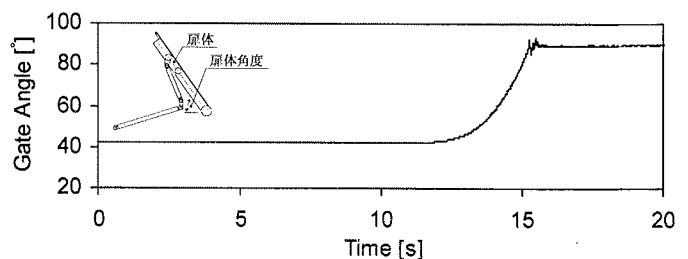


(a) 実験結果

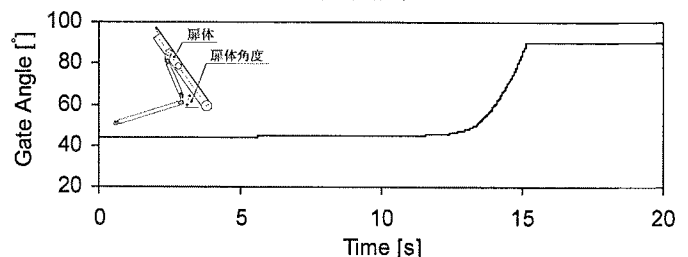


(b) 解析結果

図-5 各出力値点における水位変化の時間変化

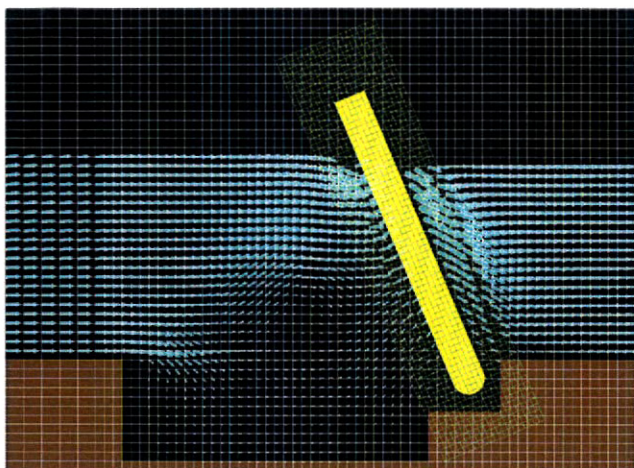


(a) 実験結果

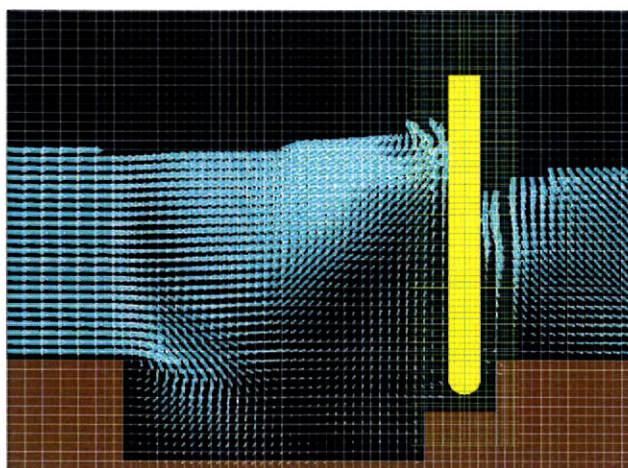


(b) 解析結果

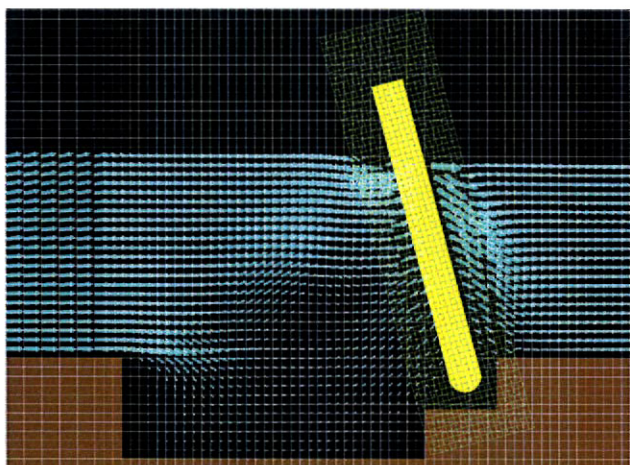
図-6 扉体角度の時間変化



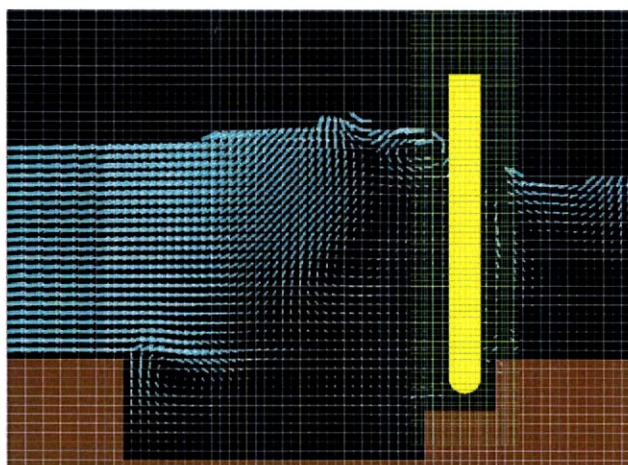
(a) 扉体角度：68度



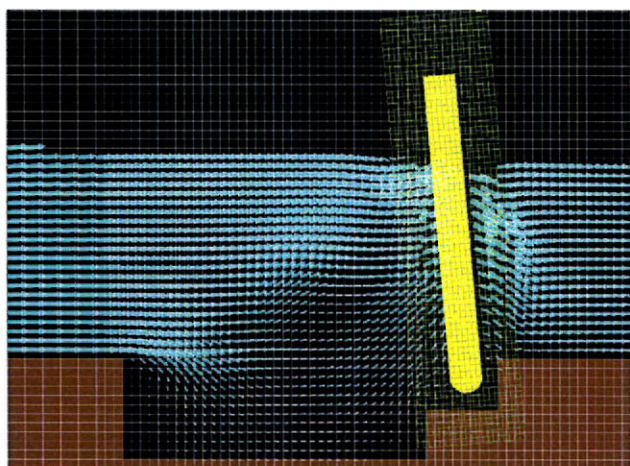
(d) 扉体起立完了時



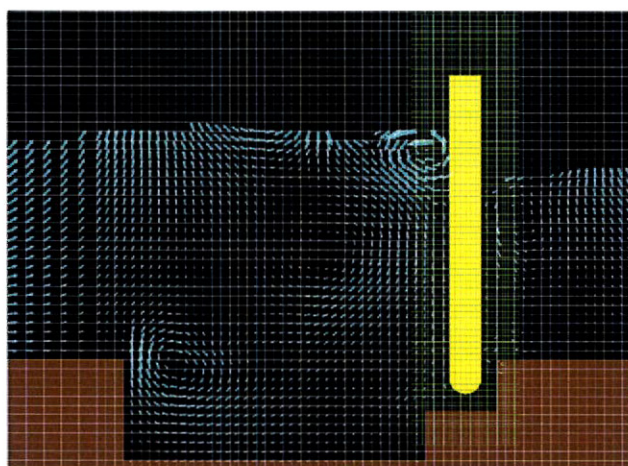
(b) 扉体角度：76度



(e) 扉体起立完了後 0.32s



(c) 扉体角度：85度



(f) 扉体起立完了後 0.64s

図-7 数値解析による流速ベクトルのスナップショット

子について、実験結果と良く一致した。H3における解析結果では、フラップゲートによって港内への孤立波の伝播が遮断されている様子、また、その後の水位変動について、解析結果は実験結果と良く一致した。ただし、扉体起立後における両者の港内の平均水位（H3）を比較すると、解析値は実験値よりも低いことがわかる。これは、実験では、港外から生じる漏水により港内の水位が若干上昇するが、数値解析においては、港内外が完全に遮蔽されており、そのような水位上昇は生じないためである。

図-6より、孤立波来襲時における扉体角度の時間変化について、扉体の起立に要する時間、あるいは、扉体角度が示す曲線の勾配など、解析結果は実験結果と良く一致した。

図-7に、扉体起立完了前後の時刻における、数値解析による流速ベクトルのスナップショットを示す。これら(a)～(f)の図は、0.32秒毎の出力結果である。図-7において、白線は計算格子、ベクトルを表示した領域は液相、下方の濃灰色の領域は海底床（函体；扉体格納部）を示すものである。また、扉体の周りに配置された格子が補助格子であり、扉体周りにおける物理量の計算を細密に行うとともに、扉体に働く流体力を算定することで扉体を回転運動させる。

図-7(a)～(d)より、扉体に作用する流体力によって、扉体が徐々に起立している様子がわかる。このとき、扉体は港内側に水塊を押し出しながら運動しており、港内領域にも流れが生じているのが確認できる。(d)は扉体起立完了直後の流速の分布を表すものである。扉体角度が90度に至り扉体が急停止したことにより、扉体のすぐ左側の水面付近のベクトルが、沖方向に反り返っている様子が再現されている。その後、水面付近に生じた乱れが波状となって沖方向に伝播することで、図-5(b)に示される水面の変動となって現れたと推測できる。

数値解析における扉体の運動特性が実験結果と一致しているということは、扉体の運動取り扱いとその主たる駆動力である流体の圧力、および流速場に関して、その評価の精度が高いことを意味する。これより、本解析モデルが、フラップゲート型構造物を対象とした、流体と構造体とを連成する手法として適切なものであることが確認できた。

5. おわりに

本研究を通して得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 重合格子法およびレベルセット法を用いて、気液境界面を有する、剛体と流体の連成解析モデルを構築した。
- (2) 重合格子により作成した剛体でフラップゲート扉体を模擬し、その数値模型に対して、水理模型実験と同じ条件の孤立波を作用させた。

(3) 数値解析によって、孤立波の伝播および扉体の起立運動により港内外に生じる水面の変動を再現でき、解析結果は、水理模型実験による計測結果と比較して、その特徴をよく捉えることができた。

(4) 扉体角度に関する解析結果は、実験結果と良く一致しており、扉体先端が水面を切りながら起立する様子など、扉体の運動を精度良く再現できた。

(5) 本解析モデルは、流体と構造体を連成する手法として適切であり、作用波に追従して運動するフラップゲート型の構造物を解析的に評価する上で有用なものであった。

本研究で対象とした孤立波は、水位の変化が比較的穏やかな周期性の津波を模擬したものであった。水位および扉体角度が短時間で大きく変化する段波性の津波についても扱えるよう、解析モデルを改良することを今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 木村雄一郎，新里英幸，仲保京一，安田誠宏，間瀬肇：フラップゲート式可動防波堤の波浪応答特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，pp.806-810，2009。
- 2) 白井秀治，藤田 孝，木村雄一郎，山口映二，仲保京一：フラップ式可動ゲートの津波低減性能に関する模型実験，海洋開発論文集，第22巻，pp.577-582，2006
- 3) 川崎浩司：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，海洋開発論文集，第22巻，pp.685-690，2006。
- 4) 清宮 理，下迫健一郎，由井孝昌，山下誠也，椎名正樹，土屋昌義：フラップ式水門の浮上・沈降挙動の解析，海洋開発論文集，第22巻，pp.691-696，2006。
- 5) 中野 修，田中伸和，榊山 勉，興野俊也，大熊義夫：ALE法による2次元動揺数値解析を用いた浮体式カーテンウォールの動揺・波力特性評価，海岸工学論文集，第47巻，pp.851-855，2000。
- 6) 小幡正規，中尾年雄，里深信行，森西晃嗣：重合格子法による二次元パタフライ弁モデルの数値計算，日本機械学会論文集（B編），第59巻562号，pp.220-226，1993。
- 7) 和田好隆，森西晃嗣，松野謙一：レベルセット関数法を用いた気泡の結合及び分離シミュレーション，第19回数値流体力学シンポジウム，B5-5，2005。
- 8) 木村雄一郎，柳 浩敏，森西晃嗣，森 信人，安田誠宏，間瀬 肇：重合格子法を用いた流体-構造体連成モデルによるフラップゲートの波浪応答解析，海岸工学論文集，第57巻，投稿中，2010。
- 9) Kimura, Y., Niizato, H., Nakayasu, K., Yasuda, T., Mori, N., Mase, H.: Response Analysis of Flapgate Breakwater for Tsunami and Storm Surge Protection, Proc. of 32nd ICCE, Shanghai, 投稿中，2010