

Numerical Simulation of Tsunami Run up around Porous Vertical Barriers based on a Finite volume Godunov type High resolution Scheme

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-01-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056501

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博士論文要旨

有限体積法に基づく津波数値モデルの構築と
透過性防波柵周辺の浸水流解析への適用

*Numerical Simulation of Tsunami Run up around Porous Vertical Barriers
based on a Finite volume Godunov type High resolution Scheme*

金沢大学大学院自然科学研究科 環境デザイン学専攻

氏名 上野 卓也

主任指導教員 由比 政年

Abstract

A numerical model was developed based on a finite volume Godunov type scheme and the quadtree grids in this study. The numerical results were compared with existing experiment results to examine the applicability of the numerical model. The results indicated that the proposed model shows the following advantages. The model can reduce computation time while keeping computational accuracy by using quadtree grids. And the model achieves stable and accurate computation by using local high-resolution scheme. The balance between computation time and accuracy is shown to be improved in tsunami run-up analysis that requires a combination of high and low resolution. The model can reproduce fluid properties (water surface level, flow velocity and wave pressure) for complex flows such as run-up, overflow and diffracted waves. The model is effective for the design of coastal structures because it can predict the vertical distribution of wave pressures acting on structures. The model can qualitatively and quantitatively reproduce the spatial and time history of flow around the porous barrier, and reduction effects of inundation flows related to the shielding rate of the porous barrier. Also, it can provide a cost-efficient method to study horizontally two-dimensional flows compared with experimental approach. In this study, the experimental cases compared with the numerical results were limited. It is necessary to further verify the models against cases such as tsunamis entering obliquely to combinations of structures.

論文要旨

1. 目的

現在、津波対策としては、防潮堤・避難ビルなどの構造物によるハード対策およびハザードマップによるソフト対策の組み合わせによる最適対応が検討されている。ハード・ソフト両面で適切な津波対策を行うためには、構造物に作用する流体力や浸水領域・浸水流速を的確に評価する必要がある。しかし、遡上津波解析では、数値的な不安定性や膨大な計算時間などの問題点を抱えており、高精度かつ高速な数値モデルの構築と陸上構造物周辺の流況解析への適用が急務である。不連続波面を含む遡上津波解析の安定性・解析精度向上には、高解像度スキームの適用が有効である。また、小スケールの構造物や水路等の影響を的確に考慮するためには、洋上伝播と比較して格段に細かな格子解像度を必要とする。そこで、必要な解像度に応じて空間格子を分割する四分木格子の活用が効果的と考えられる。

本研究では、有限体積法に基づく高解像度スキームをベースとして、四分木格子を活用した津波・洪水の氾濫解析数値モデルの構築を試みることにし、以下について検討する。

- (1) 有限体積法に基づく数値計算モデルの構築を行い、計算結果がどの程度の精度で遡上現象を再現可能であるかの検証を行う。
- (2) 検証されたモデルを複雑地形上の氾濫や構造物周辺の流況・流体力特性の解析に適用し、遡上津波の運動特性を検討する。

- (3) 数値モデルによる流体力特性の評価法について、精度および適用性について検討する。
- (4) 透過性の防波柵による津波浸水深の低減効果を検討する。また、防波柵の幅と遮蔽域の関係についても検討する。
- (5) 四分木格子を適用した数値計算モデルにおいて、解析精度の向上、計算コストの削減について検討する。

2. 数値モデル

(1) 基礎方程式

数値計算モデルの基礎方程式として、非線形長波方程式 (NLSW) を用いる。NLSW の表記法は各種存在するが、不連続面が形成されるような解析においては、質量と運動量の保存が計算上重要である。また、底面が急勾配となる場合には、ソース項の離散的取り扱いを適切に行う必要がある。本研究では、この 2 点を考慮し、水面変位を用いた表記法を採用する。静水時の水位は地形勾配による影響を受けないため、水面変位による表記を用いることでウェルバランス性（フラックスとソース項のバランス）が保たれる。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} = \mathbf{s} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{q} は保存量、 \mathbf{f}, \mathbf{g} はそれぞれ x, y 方向の流束、 \mathbf{s} はソース項であり、各ベクトル量は次のように表される。

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \eta \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} q_x \\ uq_x + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\eta z_b) \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} q_y \\ vq_x \\ vq_y + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\eta z_b) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_{bx}}{\rho} - g\eta \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ -\frac{\tau_{by}}{\rho} - g\eta \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 η は水位、 $q_x (=uh)$ 、 $q_y (=vh)$ は x および y 方向の線流量、 u 、 v は x および y 方向の水深平均流速、 $h (= \eta - z_b)$ は水深、 z_b は底面地盤高、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 τ_b は底面せん断力である。

(2) ゴドゥノフ型有限体積法

不連続波面を含む津波数値解析では、安定性・解析精度の点から、高解像度スキームの適用が有効である。高解像度スキームとは、流れのスムーズなところでは 2 次精度で計算を行い、不連続部分では数値振動を生じさせないために 1 次精度に切り替えて計算することで衝撃波のような不連続的变化を高解像度で捕獲表現できる計算スキームである。高解像度スキームを構築するために、本モデルでは勾配制限関数 ψ を導入することとし、安定性に優れる minmod 関数を制限関数として用いた。

$$\psi(r)_P = \max[0, \min(r_P, 1)] \quad (6)$$

ここで、 r は検討対象となる変数の勾配の比であり、以下のように表される。

$$r(\eta)_P = \frac{\eta_e - \eta_P}{\eta_P - \eta_w} \quad (7)$$

h , q_x , q_y についても同様の計算を行う。 P は解が求められているデータ点、 e は P の東側セルの中心値、 w は P の西側のセル中心値である。東側、西側とは、 P と同じ解像度での x 軸方向に 1 つ右側、左側のセルを示す。続いて、ゴドゥノフ型有限体積法では、セル境界値を、セル中心値から再構成する。東側セル境界面 (E) の左側 (L) での値は、勾配制限関数を用いて以下のように表される。

$$\eta_E^L = \eta_P + \frac{\psi_P}{2} (\eta_P - \eta_w) \quad (8)$$

h , q_x , q_y についても同様の計算を行い、水深が負となる場合には水深は 0 と再定義する。

数値流束を計算するための近似リーマン解法として、HLLC (Harten Lax-van Leer Contact wave) 法を用いる。また、ソース項の離散化については、Liangらが提案する地形勾配項と摩擦項を別々に処理する手法を採用する。

時間発展には、2 次の予測子・修正子法を用いる。まず、予測子段階では、次式で \mathbf{q}^* を求める。

$$\mathbf{q}_P^* = \mathbf{q}_P^n + \Delta t \mathbf{K}_P(\mathbf{q}^n) \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_P = -\frac{\mathbf{f}_E - \mathbf{f}_W}{\Delta x} - \frac{\mathbf{g}_N - \mathbf{g}_S}{\Delta y} + \mathbf{s}_P \quad (10)$$

ここで、 Δt は時間ステップ、 Δx , Δy は格子間隔、添え字 E , W , N , S は P の東、西、北、南側におけるセル境界面である。続いて修正子段階の計算を以下のように行う。

$$\mathbf{q}_P^{n+1} = \mathbf{q}_P^n + \frac{1}{2} \Delta t [\mathbf{K}_P(\mathbf{q}^n) + \mathbf{K}_P(\mathbf{q}^*)] \quad (11)$$

また、 Δt は、CFL 条件によって制御される。

(3) 四分木格子

四分木格子とは、空間格子を4分割した構造格子であり、局所的な解像度の増減にも柔軟に対応できる。隣接する格子サイズが異なる場合においても、補間式を導入することで、格子サイズが等しい場合と同様のモデルを用いることができる。

3. 四分木格子を活用した数値モデルの性能評価

(1) 三角形形状の堤防周辺の流況解析

構築した数値モデルの検証として、Soaresによって行われた、三角形形状の堤防を遡上・越流するダム崩壊流れの水理実験と数値解析との比較を行った。実験では、水路(5.6m×0.5m)に堤防を設置し、貯水池水位0.111m、堤防下流側水位0.02mとして、3地点(G1, G2, G3)で水位の計測が行われた(図-1)。なお、水槽端部は完全反射の鉛直壁である。計算格子サイズは、 $\Delta x = 0.04\text{m}$ をベースに堤防付近に四分木格子(2段階)を適用した。

水位の時間変化について、実験結果と計算結果を比較したものを図-2に示す。計算結果は、津波の到達がわずか(約0.3秒)に遅れる傾向にあり、波の分裂による細かな変動は再現できていないものの、大局的には、遡上や反射を含めて、定性的・定量的に実験結果と一致している。なお、津波到達時刻や水位が粗度係数の値により変化することを確認しており、今回は全体的な水位を合わせることを優先し、粗度係数 $n = 0.011$ とした。

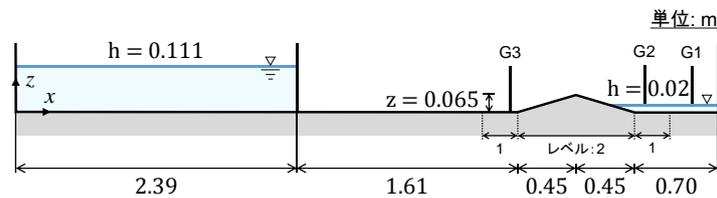


図-1 実験水路の概要 (Soares, 2007)

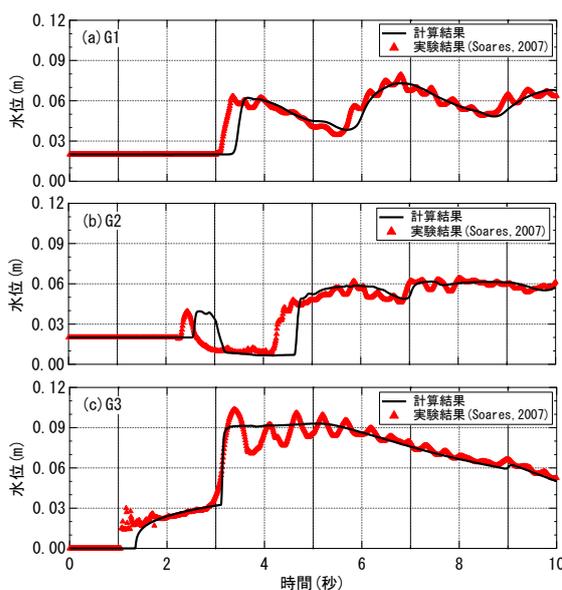


図-2 水位の時間変化

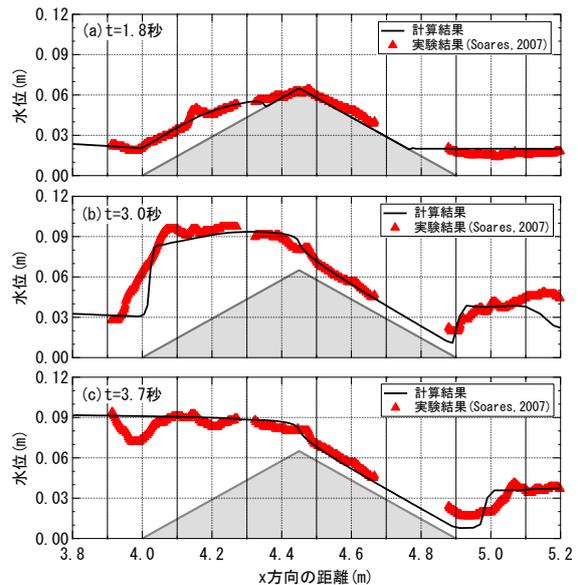


図-3 三角形形状堤防付近の空間波形の比較

堤防付近の空間波形について、実験結果と計算結果を比較したものを図-3に示す。計算結果は、上述したように、津波の到達がわずかに遅れる傾向にあるものの、堤防遡上時 (a)、越流後 (c) を含めて、定性的・定量的に実験結果の水面形状を良く再現している。(b) $t=3.0$ 秒における堤防下流側では、計算結果は津波先端部の到着がやや遅れる結果となった。

以上、本モデルは、高解像度スキームの導入により、不連続波面を含む段波津波が、三角形の堤防を遡上・越流する流れにおいて、水位の時間変化および堤防付近の空間波形を良好に再現することが可能である

(2) 直立護岸上の構造物周辺における流況解析

続いて、有光らによって行われた、直立護岸上の構造物に作用する段波津波の水理実験と数値解析との比較を行った。実験では、水路（長さ18 m×幅0.5 m×高さ0.5 m）に直立護岸を設置し、貯水位0.15 mとして、構造物前面から1 mmの位置で浸水深、15 mmの位置でx方向流速、構造物前面にて作用波圧が計測された（図-4）。計算条件は、以下の4ケースである。

① 防潮壁なし、構造物なし。② 防潮壁なし、構造物は直立壁（高さ0.4 m×幅0.5 m）。③ 防潮壁（高さ0.05 m×幅0.5 m）あり、構造物なし。④ 防潮壁あり、構造物は矩形構造物（高さ0.4 m×幅0.5 m×厚さ0.07 m）。計算格子サイズは、①、②では全域を $\Delta x=0.01$ m、③、④では均一格子：全域を $\Delta x=0.01$ m、四分木格子： $\Delta x=0.04$ mをベースに構造物付近に四分木格子（2段階）を適用、とした。

まず、防潮壁を設置しない場合の (a) ケース①：進行波、(b) ケース②：直立壁前面での浸水深およびx方向流速について実験結果と計算結果を比較した（図-5）。計算結果の出力位置は、実験での計測位置と同様とした。図-5 (a) では、進行波が護岸から2 m沖に到達した時刻を $t=0$ とした。計算結果は、津波到達時刻を含めて、浸水深、x方向流速ともに実験結果と定性的・定量的に一致している。図-5 (b) では、津波先端部が直立護岸に到達した時刻を $t=0$ とした。浸水深の計算結果は、津波到達時の直立壁前面での瞬間的かつダイナミックな水位上昇を表現しており、その後の重複波状態についても良好に実験結果を再現している。x方向流速の計算結果は、浸水深が小さいため実験では計測が難しい、津波先端部の速い流速を表現しており、直後の重複波状態（ほとんど流速が発生しない）も適切に表現している。

次に、防潮壁を設置した場合の矩形構造物に作用する作用波圧について検討した。ケース④では、作用波圧の算出には有光らが提案する手法、すなわち、構造物前面での浸水深 h_f による静水圧と運動量保存則に基づく圧力の和として最大波圧を求める手法を用いた。

$$p(z, t) = \rho g \{ h_f(t) - z \} + \rho u_f(t)^2 \quad (12)$$

ここで、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 z は作用高さ、 t は時間である。ただし、 $h_f < z$ の場合には、作用波圧は発生しないものとし、 $u_f < 0$ の場合には動水圧は発生しないものとする。なお、構造物前面の浸水深および流速の出力位置は、有光らと同様に、構造物から 2

(3) 透過性防波柵の背後における津波浸水流解析

榎田らによって行われた、透過性防波柵による津波浸水流の低減効果に関する水理実験と数値解析との比較を行った。実験は、水路（長さ12 m×幅0.4 m×高さ0.4 m）に直立護岸を設置し、貯水位 $h_1 = 25\text{cm}$ 、静水位 $h_2 = 5\text{cm}$ として、段波を発生させ、海域・陸域にて水位と流速を計測し（図-8）、防波柵（高さ10.5 cm×幅39.5 cm）の有無による浸水流低減効果について検討が行われた。防波柵は、実験では円形孔（直径4.00 mm：遮蔽率 $\sigma = 70\%$ 、直径4.25 mm： $\sigma = 60\%$ 、直径4.50 mm： $\sigma = 50\%$ ）が数多く開いた形状であり、数値解析では遮蔽率に応じて細かな不透過壁を断続的に設置するスリット形状で模擬した。スリット幅の値は、試行計算結果（幅10~40 mmの範囲で2~3%の変化）に基づき、経験的に20 mmと設定した。計算格子サイズは、 $\Delta x = 0.02\text{ m}$ をベースに防波柵付近に四分木格子（2段階）を適用した。

図-9は、実験における水面の写真と断面平均した計算結果を比較したものである。なお、実験では、円孔から透過した水塊も撮影されるため柵直後の水面比較は困難である。津波先端部が直立護岸に到達した時刻を $t = t_a$ とした。まず、(a)においては、津波先端部の位置や形状が実験結果と良好に一致している。次に、直立護岸前面で激しく跳ね上がる (b) では、細かな波しぶきは再現されていないものの、全体に実験結果を再現している。続いて、(c)では、進行方向の斜め前方への強い打ちこみや跳ね上がりは表現できず、防波柵前面での反射が強まる形として現れる。ただし、防波柵背後の浸水流先端部位置は、実験結果と良く一致している。(d)では、計算結果は、防波柵と直立護岸による反射が実験結果よりも早く上流側へと伝わる傾向があるものの、重複波の水位や防波柵背後から離れた位置での浸水流は、実験結果と比較的良好に一致している。

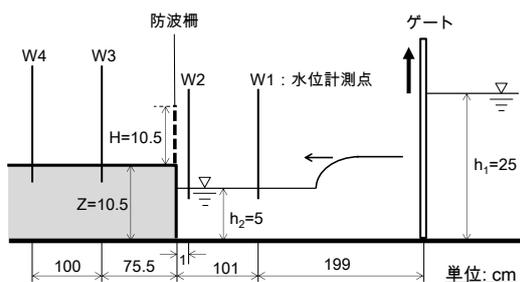


図-8 実験水路の概要（榎田ら，2013）

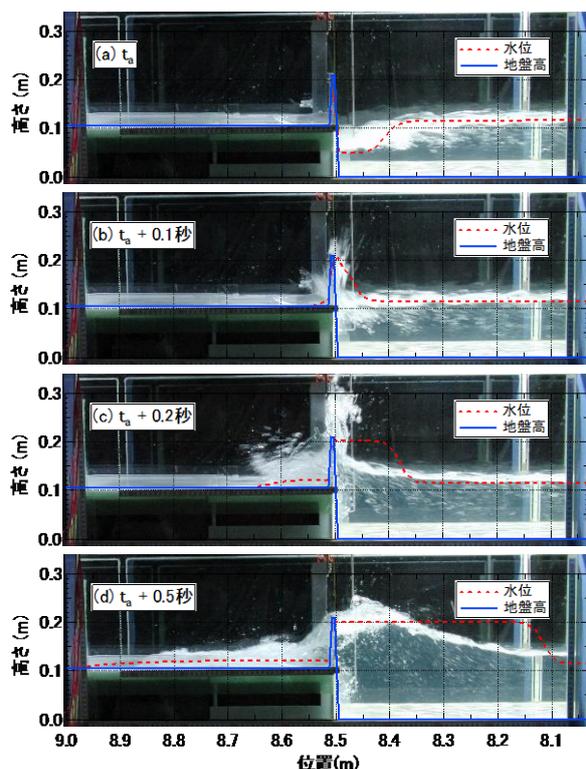


図-9 空間波形の比較（防波柵 $\sigma = 60\%$ ）

浸水深の時間変化について、直立護岸のみの場合（図-10a）および $\sigma = 60\%$ の防波柵を設置した場合（図-10b）ともに、計算結果は、実験結果を平滑化しているものの、津波到達時の水位の立ち上がりや反射、越流を含め定性的・定量的に実験結果を再現している。防波柵背後の浸水深は、W3においては、わずかにピーク値が低く、W4においては、到達が遅れる傾向にあるものの定性的な再現は良好である。

図-11はW4における浸水深低減比と遮蔽率の関係を示す。浸水深低減比は、各遮蔽率の防波柵を設置した場合の浸水深を、防波柵を設置しない場合の浸水深で無次元化して算出した。遮蔽率の増加に伴う浸水深低減比について、計算結果は実験結果を良好に再現している。

以上、本モデルは、透過性防波柵の浸水深低減効果を的確に再現可能であり、実験を行うことが難しい平面的な流れが生じるケースを検討する上で非常に有効である。

5. 動的分割格子への拡張

四分木格子とは、バックグラウンド格子内を均一に分割する四分木型（ブロックベース方式）の構造格子である。本モデルでは、不要なデータを減らすために1次元配列としてデータを取り扱う。また、隣接する格子サイズが異なる場合においても、周囲から補間することで、格子サイズが等しい場合と同様のモデルを用いることができる。

本章では、計算ステップごとに解像度を最適化することができる四分木適合格子へと拡張した。格子の分割・統合を行う条件は、これまでも検討されており、本研究では、以下に示す水面勾配による条件を用いた。

$$M = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right)^2} \quad (13)$$

格子の分割・統合は、水面勾配 M が閾値 α_f を上回ると格子を分割、閾値 α_c を下回ると格

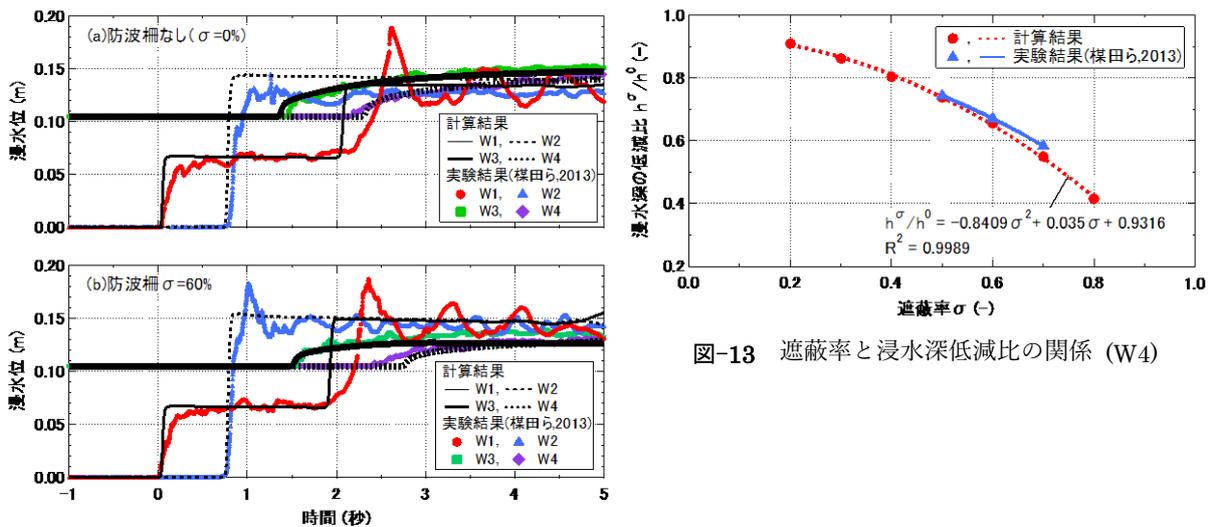


図-12 防波柵周辺水位の時間変化

図-13 遮蔽率と浸水深低減比の関係 (W4)

子を統合， α_f と α_c の中間では分割・統合を行わず解像度は変わらないと設定した。

四分木適合格子を導入した計算モデルを評価するため，斜め 45° に屈折した水路を持つ段波津波に関する水理実験 (Morris, 2000) と数値解析と比較した。実験では，貯水部 (2.39 m×2.44 m) を初期水位 0.25 m，水路 (0.495 m×8.00 m) を初期水位 0.01 m として 9 地点 (G1～G9) で水位の計測が行われた (図-12)。なお，水路の壁面は完全反射の不透過壁，水路下流側の境界条件は流出とした。ベースとなるバックグラウンドの格子サイズは， $\Delta x, \Delta y = 0.1$ m として，最大で 16 分割となる 2 段階の四分木適合格子を適用した。また， α_c, α_f は，経験的に $\alpha_c = 0.1, \alpha_f = 0.05$ と決定した。

図-13 は $t=4.0$ 秒における水位のスナップショットである。ただし，水路壁面は非表示とした。空間格子に対して，波が斜めに進行する屈曲水路部においても，津波先端部の形状を的確に表現しており，衝撃波の多重反射現象についても高解像度に捉えていることが確認できる。

6. 結論

本研究では，有限体積法に基づく高解像度スキームおよび四分木格子の適用による高速・高精度な数値モデルを構築し，既往の実験と比較・検証を行った。その結果，本モデルの特徴として，以下のことを示すことができた。

- (1) 四分木格子の活用により，精度を保ちながらも計算時間を大幅に短縮でき，高解像度スキームにより，安定かつ的確に計算可能である。特に，細かな解像度 (市街地) と粗い解像度 (洋上) が混在する津波遡上計算においては，計算時間と精度のバランス面に優れている。
- (2) 堰を遡上・越流する流れ，構造物を回折する平面的な流れが生じるケースにおいて，流体特性 (水位，流速，流体力) を良好に再現する安定的な計算が可能である。また，構造物に作用する波圧の鉛直分布を的確に表現可能であり，構造物設計においても有効である。
- (3) 透過性防波柵周辺の空間的・時間的な流況を定性的・定量的に再現可能であり，防波柵の遮蔽率に応じた浸水流低減効果についても再現できる。また，実験を行うことが難しい平面的な流れが生じるケースを検討する上で，効率的な手法である。

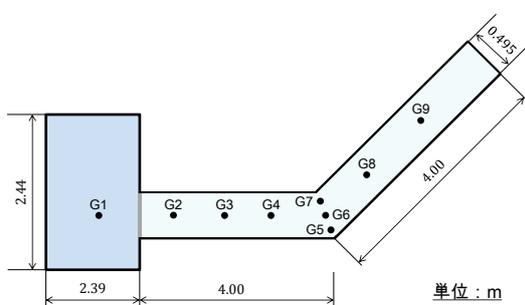


図-12 実験水路の概要 (Morris, 2000)

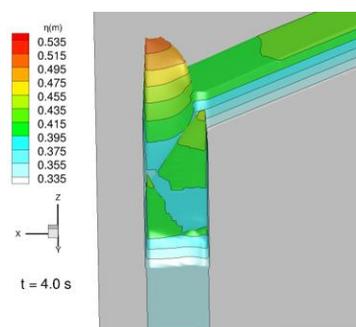


図-13 衝撃波の様子

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

有限体積法に基づく津波数値モデルの構築と透過性防波柵周辺の浸水流解析への適用

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学 専攻

(2) 氏 名 上野 卓也

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に対して審査員全員で面接および試問を行うとともに、論文の内容を検討し、第1回審査委員会にて審査方針を決定した。さらに、令和元年8月1日に行われた口頭発表後に第2回審査委員会を開催し、協議の結果、以下のように判定した。本研究は、構造格子の利点を活かしつつ、流れ場の急変部で局所的に空間解像度を高めて数値解析を実施することで、計算精度と計算効率の両立を図る四分木格子法を活用して、非線形長波方程式に対する高度な数値モデルを構築し、各種構造物周辺の流体場解析に適用したものである。本研究で構築された数値モデルは、遡上端部の移動境界や跳水等の不連続波面を含む複雑な流体場を安定かつ高解像度に解析可能であり、各種の既往実験結果に対する再現性も定性的・定量的にきわめて良好である。合わせて、四分木格子を効果的に活用することで、計算精度と計算効率のバランスを高いレベルで実現しており、津波・洪水氾濫解析への適用性は高い。さらに、本モデルを透過性防波柵周辺の流れ場解析に適用し、体系的数値解析を実施することで、その特徴を明らかにするとともに、背後に設置された構造物の前面水位低減に防波柵諸元が及ぼす影響や構造物配置上の留意点に関わる工学的知見を提示することに成功している。以上の研究成果は、今後、沿岸域への津波や高潮の遡上・氾濫予測およびその対策を検討する上で有用であり、その工学的価値も高い。以上のことから、本審査委員会は本論文が博士（工学）に値すると判断した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工 学)

5. 学位論文及び参考論文に不適切な引用や剽窃が無いことの確認

■ 確認済み（確認方法： iThenticate システムによる確認を行った。）

□ 未 確 認 (理 由：)