

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 3 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14035

研究課題名(和文)津波遡上波先端の力学と境界条件モデル

研究課題名(英文)Dynamics of moving contacts of run-up tsunami waves

研究代表者

渡部 靖憲 (Watanabe, Yasunori)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20292055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、任意勾配地形上の津波遡上波先端の挙動と局所流れの力学的特徴を適切に反映し、動的な浸水域変化の厳密な評価を可能とする自由水面先端境界条件モデルを開発するものである。3次元水面形状を再構成する動的画像計測技術の高度化、拡散界面モデルの気液流体計算への導入、開発した遡上波先端モデルの特性の検証、高解像度計算環境における新たな津波遡上計算枠組みの構築を行った。2011年東北津波に対して、防潮堤から越流し街路に沿って遡上する都市型浸水シナリオ及び北上川流域の浸水過程に適用し、地形に依存した浸水過程の差異が判明した。

研究成果の概要(英文)：This study provided a novel mechanical model imposed at a toe of tsunami running up over arbitrary ground conditions. This model has been confirmed to provide appropriate dynamic responses of the run-up waves and to estimate accurate flood areas. The specific research achievements are; (1) improvements of the imaging technique to measure dynamic three-dimensional water surfaces, (2) introduction of a phase-field model to three-dimensional fluid flow computations, (3) validations of the proposed model, and (4) establishing new computational framework for run-up tsunami computations. The proposed model has been applied to the two practical cases of tsunami floods, in urban area and river basin, observed in the 2011 Tohoku earthquake tsunami, which provided distinctive flooding processes depending on the ground conditions.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波 遡上波

1. 研究開始当初の背景

2011年東北沖地震津波の襲来が我々に残した大きな教訓は、近い将来予期されている大津波に向けた高度かつ多様な浸水及び被害予測技術、ハードの強靱化技術、避難誘導システム開発において我が国に大きな技術革新をもたらした。これは、海岸における浸水評価だけでなく河川への津波遡上と堤防からの越流を含む海岸と河川を一体とした総合的被害評価とそれに対応する複合防御を目指すものであり、早急な確立が急務となっている。一方、津波計算に関しては、ハザードマップ作成等に必要となる静的最大浸水を推定するための基本的計算法は大よそ確立され、研究の主眼は動的遡上過程における粗度評価や建築物被害、物質移動(瓦礫)モデル、土砂移動モデル開発等に向けられている。しかしながら、現行の津波計算法には遡上に関わる重大な問題が未解決のまま残されている。

遡上波先端の境界条件に関しては、古くに議論され、長波双曲線関数の特性曲線によるもの(岩崎・富樫 1969)、2次元長波計算に対する岩崎・真野モデル(1979)とこれを修正した小谷らのモデル(1998)など多く存在する。しかしながら、現在遡上計算で使用される後者2つのモデルは、隣接する計算格子間の全水頭を陸地高さと同側水深との関係から大胆に近似し矛盾した結果が生じないように(不安定を引き起こすゼロ水深を排除するため)場合分けをして計算を続行するための計算上の処理に過ぎず、遡上先端流れの力学を反映したものではない。この処理は、先端部近傍流れの計算精度を著しく下げ、計算格子幅依存性を高めるだけでなく、陸上地形が急変する場合や堤防を越流し流下する流れに対して深刻な問題を引き起こし、さらに先端位置を陽的に決定できない重大な欠点をもつ。

2. 研究の目的

長波計算等における遡上波先端における現行モデルは、自由水面・底面の接触点背後の水深を計算に不都合が生じないように周辺底面レベルとの関係から粗く近似するものであり、接触点の動力学が支配する先端部近傍の流れを再現できないだけでなく、接触点の正しい位置(浸水限界位置)も陽的に定義できない。本研究は、近年流体力学分野で著しく発展した拡散界面モデルを応用し、任意粗度をもつ任意勾配地形上の津波遡上波先端の挙動と局所流れの力学的特徴を適切に反映し、動的な浸水域変化の厳密な評価を可能とする自由水面先端境界条件モデルを開発するものであり、未熟な現行モデルの使用によって遡上流れの正しい再現が阻害されることなく将来期待される浸水域の土砂や瓦礫の輸送、底面浸食等の高度な予測を保証するために不可欠な研究である。

3. 研究の方法

任意勾配、任意粗度の斜面上を遡上、流下する自由水面流れの高解水面形画像計測(タスク1)、拡散界面モデルの3次元 Navier-Stokes 方程式系への導入(タスク2)、長波方程式系に対する遡上波先端境界条件モデルの開発(タスク3)を通して遡上波先端位置の移動と背後に形成されるせん断流を支配する力学を反映した境界条件モデルを開発する。以下の個別研究内容を並行して行い、目的を達成する。

(1) プロジェクターから物体に照射したカラーブロックの反射パターンから3次元水面形状を再構成する画像計測技術の精度を高め、遡上波の動的な局所水面形状を抽出する。投影光の懸濁水の水中での散乱光の2台のカメラによる撮影から水面位置を特定するアルゴリズムを開発する。

(2) 非平衡界面に対して気体液体の自由エネルギー、表面エネルギーを拡散界面中の状態量によって近似し従来の静的平衡接触角を使うことなくプリミティブに動的接触角を計算可能な拡散界面モデルを既に開発済みである3次元気体乱流シミュレータへ導入する。このモデルが仮定する拡散界面により遡上波先端におけるせん断力の特異点問題を回避可能となり、厳密な挙動と背後流れを再現可能となる。

(3) 平野部や山地等の異なる地形における津波浸水のマクロな特徴は良く知られており、従来の非線形長波方程式モデルによって良く再現される。家屋等建築物が密集する都市部における津波浸水では、建物、街路、街区の局所スケールに規定された局所的水位変動を伴った遡上流れが浸水初期に卓越し、静水圧近似による水深積分型モデルではその評価が困難となる。3次元流体計算では任意の局所流況が再現できる一方、気固液が一点で交わる遡上波先端の問題を克服しなければならない。本研究では、遡上波先端における動的接触角の経験モデルを3次元流体計算に導入するための底面、壁面における境界条件モデルを提案する。開発したモデルは、都市型浸水の典型となる防潮堤からの越流、街路への水塊の貯留、遡上波の構造物の衝突、街路を流れる遡上波の合流など局所流況を模擬する、防潮堤と不透街区からなるモデル都市の浸水過程に適用し、その特徴を調査する。

(4) 従来津波の遡上計算において、相対的に粗い地形グリッドに対するサブグリッド情報(グリッド内部の構造物や植生、堤防の貯留越流モデル等)に対して間接的なモデル化が行われてきた。一方、近年利用されている Laser Profiler 高解像地形データでは、相対的に大きな構造物、施設は解像され、それらに

よる形状抵抗や堤防形状が陽的に計算に反映可能なため、この適用を前提に最適な計算法を検討すべきである。また従来の遡上計算は、水深が小さくなる遡上先端部の計算を避けその背後までの水位勾配から長波方程式を解くものであり、陽的に遡上先端の水域境界の力学が反映されないだけでなく、解像された施設等の浸水位置周辺の計算が回避されるため、高解像地形データの有利性を最大限に利用できない。本タスクは、動的適合解像度計算を支援する Adaptive Mesh Refinement(AMR)環境下で semi-Lagrange 計算法をベースとした、遡上先端を追跡し先端部の力学を反映させる新たな計算アプローチを提案し、高解像 LP データを効果的に計算に反映させるためのフレームワークを構築する。また、2011 年東北津波の北上川流域への浸水過程への適用を通して、その特徴を議論すると共に、本モデルの移動床計算への展開について提案を行う。

4. 研究成果

(1) 遡上波先端を含むダムブレイク流れの三次元水面形状遷移を数値化するため、プロジェクターから物体に照射したカラーブロックの反射パターンから 3 次元水面形状を再構成する画像計測技術の高度化を進めた。2 台のカメラを使った新たな計測アルゴリズムを構築し、従来の計測法による精度を著しく向上させ、波浪の水面形計測を容量式波高計と同等の精度(誤差 0.5mm 以下)で動的 3 次元計測を可能とすることを検証した。

(2) 非平衡界面に対して気体液体の自由エネルギー、表面エネルギーを拡散界面中の状態量によって近似し従来の静的平衡接触角を使うことなくプリミティブに動的接触角をもつコンタクトラインを計算可能な拡散界面モデルを開発し、気液流体計算に導入した。実験結果との比較から、動的な気液間運動量交換による気液界面の更新を矛盾なく再現可能であることが明らかになった。

(3) 提案するコンタクトモデルは遡上波先端の現実的な形状を与えるだけでなく、遡上速度だけでなく流速分布を修正するため、先端から背後にかけて特に局所渦構造も変化させることが明らかになった。防潮堤から越流し街路に沿って遡上する都市型浸水シナリオをモデル化し、遡上波伝播の接触角依存性を明らかにすると共に、遡上波の合流、街路への貯留を通して段波が街路を駆け巡る非定常な浸水過程が生じることを発見した。段波による急速な水位上昇並びに大規模渦の発生は、浸水域の力学的影響だけでなく避難を困難にするため、都市型被災シナリオとして考慮すべき問題であることが明らかになった。

(4) 2011 年東北津波を対象に、動的な計算格子解像度の変化を可能とする AMR、物理量

の特性曲線に沿った移流計算を近似する CIP 法を組み合わせた新たな長波遡上計算の枠組みを開発し、その優位性を模型実験並びに今次津波の再現計算を通して検証した(図 1 参照)。北上川流域を対象とした模型実験に対する本計算モデルによる再現計算を行い、追波湾から伝達する津波の河口堤防からの越流、河口砂州上の局所水位変動、河川堤防からの越流、そして用水路や道路など局所地形を遡上する津波を最高解像度で追跡し、その浸水過程を再現した。河道内における水位変動の実験結果、標準的非線形長波方程式モデルによる数値結果と本モデルの結果を比較し、提案するモデルは、両者の結果と矛盾なく津波の伝播を再現することを確認した。断層モデルによって発生させた海域の津波伝播計算を 4 段階ネスティングの下で行い、追波湾湾口部における津波の来襲を入力値として、本モデルによる高解像遡上計算を行った。追波湾の湾内セイシュに伴って変動する津波水位に応答した越流と浸水過程を再現し(図 1)、その浸水域は日本地理学会によって提供される津波浸水観測結果と矛盾しない。津波伝播と連成する移動床計算により、追波湾の河口堤防付近、並びに河口砂州近傍で有意な局所浸食、堆積を確認することができた。

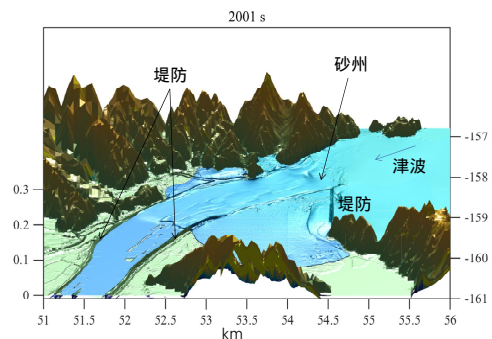


図 1：津波先端モデルによる AMR 津波遡上計算結果の一例。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

以下、全て査読有。

Watanabe Yasunori, Mitobe Yuta, Tanaka Hitoshi, Watanabe Kazuya, 2018, High-resolution Tsunami-bedload coupled computation in AMR Environment, Proceedings of International Conference on Coastal Engineering 2018 (in press).

Kadowaki S., Watanabe Y. Yamashita K., Saruwatari A., Phase-Field computation of drop impacts, 2018, International conference on Fluid Mechanics (in press).

Otsuka Junichi, Saruwatari Ayumi, Watanabe Yasunori, 2017, Vortex-induced suspension of sediment in the surf zone, Advances in Water

Resources, 110, 59 ~ 76, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.021>.

渡部靖憲, 田中仁, 三戸部佑太, 渡辺一也
高解像地形データ上の AMR-CIP 系津波遡上計算
アプローチ, 2016, 土木学会論文集 B2 (海岸
工学), 72, 238-288.

三戸部佑太, 渡辺一也, 田中仁, 渡部靖憲,
津波規模に応じた河道内水位変動過程に関
する数値実験, 2016, 土木学会論文集 B2 (海
岸工学), 72, 271-276.

三戸部佑太, Neetu Tiwari, 渡辺一也, 田
中仁, 渡部靖憲, 2016, 浅水流方程式と乱流
モデルを組み合わせた津波河川遡上数値計
算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72,
259-264.

渡部靖憲, 佐々木理沙, 小柳津遥陽, 牧田
拓也, 森岡晃一, 猿渡亜由未, 2016, 遡上波
先端モデルの 3 次元 LES への導入と都市型浸
水過程への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工
学), 72, 67-72.

〔学会発表〕(計 3 件)

Watanabe Yasunori, HIGH-RESOLUTION
TSUNAMI-BEDLOAD COUPLED
COMPUTATION IN AMR ENVIRONMENT,
International Conference on Coastal Engineering,
2018.

渡部靖憲, 高解像地形データ上の AMR-CIP
系津波遡上計算アプローチ, 海岸工学講演
会, 2016.

渡部靖憲, 遡上波先端モデルの 3 次元 LES
への導入と都市型浸水過程への適用, 海岸
工学講演会, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 靖憲 (Watanabe Yasunori)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号 : 20292055

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()