

令和 4 年 3 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15259

研究課題名（和文）津波脆弱性評価の深化に向けた津波土砂移動氾濫モデルの標準化

研究課題名（英文）Development of tsunami sediment transport and urban area inundation model for improving tsunami vulnerability evaluation

研究代表者

山下 啓 (Yamashita, Kei)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：00772633

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、津波による土砂移動や市街地特有の局所性が強い津波ハザードの評価手法を高度化して被害メカニズムに関する理解を深めることを目的とする。まず、東日本大震災の巨大津波によって大きく海底が削られた宮城県気仙沼湾を対象に海底の基盤岩分布や底質の実態調査を行ない、調査で得られた基盤岩分布や地質データを踏まえて津波土砂移動解析モデルを検証した。また、建物倒壊が進む中での津波氾濫を効果的に解析する数値シミュレーション手法を提案する他、土砂移動により密度変化を伴う混合流体の影響を考慮して津波土砂移動モデルを高度化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気仙沼湾狭窄部の地形や底質環境の実態と海底基盤岩分布を現地調査で把握し、調査結果を踏まえた検証計算より、基盤岩分布の考慮が津波土砂移動モデリングの精度向上に重要な役割を果たすことを示した。また、建物群とそれらの倒壊過程を考慮した津波氾濫解析モデルを提案し、局所的な津波挙動や建物倒壊に伴う流況変化に対して合理的な解析結果を得た。さらに、土砂移動を伴う混合流体の影響を考慮した津波土砂移動モデルを開発し、気仙沼地域における津波被害に及ぼした土砂移動影響の知見を得た。本研究は、津波土砂移動氾濫のハザード評価手法を高度化し、被害メカニズムへの理解を深めて合理的な被害軽減策の立案に貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to improve a numerical simulation of tsunami hazard which has strong local characteristics due to tsunami-induced sediment transport and urban area inundation, and to deepen the understanding of tsunami damage mechanism. First, we conducted a field survey on the distribution of basement rocks and the geology of the seafloor in Kesenuma Bay, Miyagi Prefecture, where was largely eroded by the giant tsunami during the Great East Japan Earthquake. A tsunami sediment transport model using the field survey data was validated. An effective technique for numerical simulation of tsunami inundation that considers the destruction process of buildings was proposed, and the tsunami sediment transport model was improved by considering the effect of mixed fluid with density change due to sediment transport.

研究分野：海岸工学、津波工学

キーワード：津波 土砂移動 市街地氾濫 東日本大震災 気仙沼湾

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、巨大津波による土砂移動や地形変化、並びに市街地特有の局所性が強い津波により被害が拡大したと考えられる。こうした多様な影響を踏まえた津波リスク評価の重要性が高まる中、土砂移動計算で核をなす底質の現地データは乏しく、建物破壊をも伴う複雑な津波評価手法には課題が残っている。想定外の被害拡大を回避して今後に想定される巨大津波災害に備えるためには、津波による土砂移動や市街地特有の局所性が強い津波ハザードを精度よく予測するとともに被害メカニズムに関する知見を深めることが重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、東日本大震災で大規模な土砂移動や建物倒壊等の複合的で複雑な津波被害が生じた宮城県気仙沼市を対象として、地形変化・建物破壊を伴う津波氾濫のベンチマークに基づいて高度で実用的な津波土砂移動氾濫モデルを構築し、多様な物理プロセスを要因とする津波ハザードを高精度に評価することを主目的とする。

3. 研究の方法

2011年東北津波によって大規模な侵食を受けた気仙沼湾狭窄部海底を対象に、被災後8年が経過した地形や底質環境の実態と、海底基盤岩分布を把握するための現地調査を実施した。具体的には音響測深による水深調査、音波探査機による海底地質構造調査、および柱状採泥や表層堆積物採取による海底堆積物調査を行なった。これらの調査結果に基づき海底基盤分布を推定し、既存の気仙沼データに基盤岩とその上の堆積土砂の分布情報を付加した従来より詳細な現地ベンチマークセットを用いて津波土砂移動モデルを検証した。

また、高密度市街地における津波氾濫解析の高度化に向けて、まず、建物群の遮蔽効果及び流体抵抗を多孔質媒体の特性値によって表わし、次に、建物被害過程を津波被害関数によりモデル化する手法を開発して、気仙沼市の津波氾濫解析に適用した。

更に、土砂移動による密度変化等の影響を津波計算に取り入れるための定式化を行ない、従来の津波土砂移動モデルに実装、気仙沼事例に適用してモデリング効果を検討した。

4. 研究成果

気仙沼湾狭窄部の海底調査により、震災以降に狭窄部中央付近とその北側が更に侵食を受けている他、狭窄部中央付近に堆積が認められた(図1)。また狭窄部周りの調査範囲の海底には、一般的な港内にあるヘドロ性状の浮泥堆積物は確認されず底質環境は比較的良好であった。更に調査範囲全体の海底には硬い層が表層部に存在する他、特に狭窄部では礫質堆積物または基盤が露出していることがわかった。これらの調査結果に基づき海底基盤分布を推定し、2011年東北津波を対象とした津波移動床モデリングに非侵食面データとして導入した。その結果、巨大津波により狭窄部では基盤が剥き出しになるほどの侵食が生じ、侵食分布は基盤地形にほぼ規定されていた他(図2及び図3)、露出した基盤岩は急縮効果による局所的な流速と侵食の増加に寄与していたと考えられる。これまで、現地の海底基盤分布を考慮した津波移動床モデリングの検証事例はないため、モデリング結果の誤差が何に起因するのか不明確な部分もあったが、海

底基盤データの調査・導入は、津波移動床モデリングの精度向上や、流速及び地形変化の過小評価を回避する上でも重要であることがわかった。

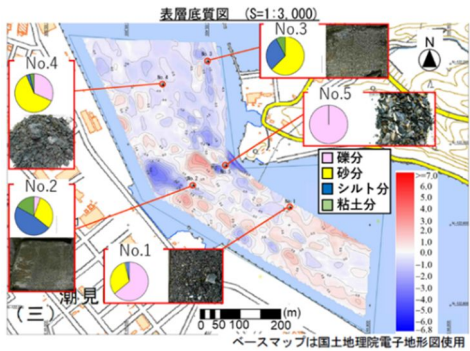


図1 震災以降の地形変化量と表層堆積物 (青: 侵食, 赤: 堆積, コンター線は 0.5 m 間隔)

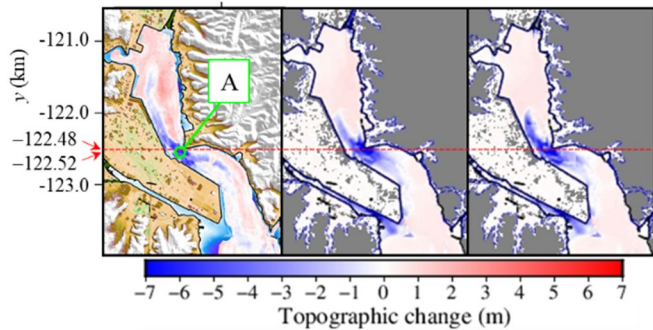


図2 津波による地形変化(左:原口ら(2012)の調査結果, 中:基盤岩を考慮しない計算結果, 右:基盤岩を考慮した計算結果)

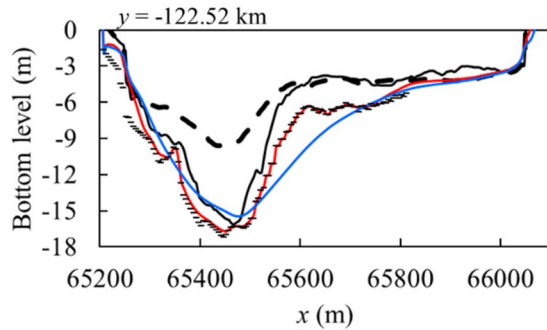
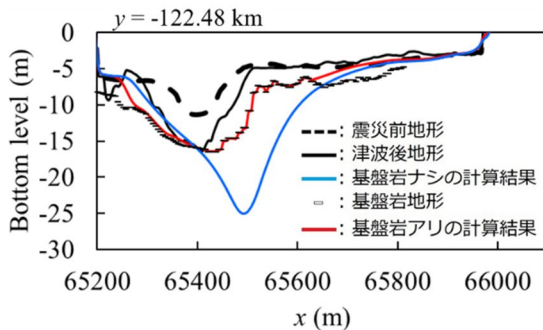


図3 津波前後の狭窄部断面地形(図2の2測線)

津波氾濫解析の高度化に関して、浸水状況に応じた建物被害程度を考慮可能な津波氾濫解析モデルを開発した。本モデルの特徴は、建物群の流体抵抗や遮蔽効果を考慮するポーラスモデルの空隙率や透過率を、時々刻々の津波ハザードと建物被害関数に基づいて算出する実用的な新たな手法によって、建物影響の時間変化を考慮した津波氾濫解析を可能とする点にある。本モデルを宮城県気仙沼における2011年東北津波の氾濫解析に適用したところ、建物前面での水位のせり上がりや(図4)、その効果が建物被害によって低下する合理的な津波挙動が再現され(図5)、本提案手法の有用性を確認できた。本手法は一般的な津波浸水解析モデルに従来スキームを変更することなく実装可能で、高密度市街地の津波ハザードを評価する高度で実用的なモデルへの発展に繋がられると期待される。

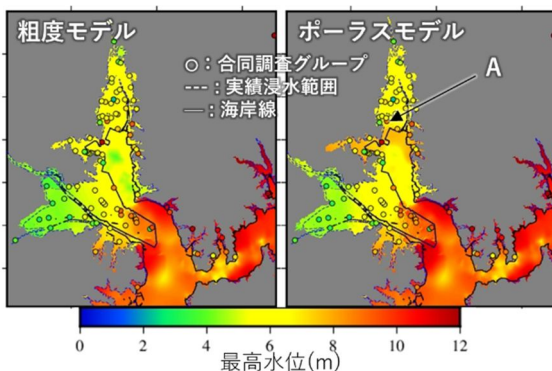


図4 宮城県気仙沼市における2011年東北津波による浸水高分布(計算値と痕跡値)

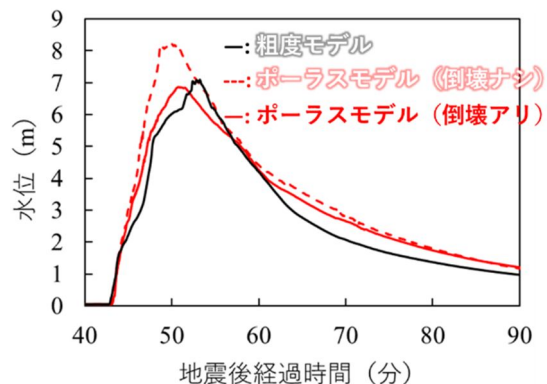


図5 図4における地点Aにおける水位の時系列

更に、土砂移動による混合流体の密度変化や運動量輸送を考慮した津波土砂移動モデルの開発を進めた。ここでは、既存の混合流体の浅水理論式 (Cao et al., 2004) と、津波土砂移動モデル (高橋ら, 1999) に基づいて、津波流に適した混合流体の浅水理論式を新たに定式化し、分散処理計算が可能な津波土砂移動モデルに実装した。そして、図 6 に示す、砂浜斜面への孤立波遡上に関する既往の水理実験結果を用いて検証を行ない、水位や地形変化に関して比較的良好な再現性を確認できた。また、土砂輸送を伴う津波遡上プロセスにおいて混合流体効果がどのように作用するのかを検討するために、物理量や混合流体の浅水理論式における各項の影響を調べた (図 7)。混合流体効果は、遡上時の津波フロントでは比較的大きく、後続流れでは比較的小さいことが確認された。そして、遡上初期には、底質の巻上げによって遡上流速が抑えられるが、その後濃度が上昇して平衡状態の浮遊砂流に遷移すると、津波フロントにおける高濃度流れと後続流れとの間の濃度勾配が比較的大きくなり、その濃度勾配によって遡上が抑制される運動メカニズムへと変化していることが確認された。その結果、汀線付近での津波高が僅かに上昇して、遡上域での浸水高は低下する傾向にあることがわかった。ただし、本モデルでは考慮していない高次効果である見かけの粘性増加等によるエネルギー減衰に関しては既往研究 (例えば、松富, 2019) 等を参考にしながら今後の更なる研究が必要であると考えられる。

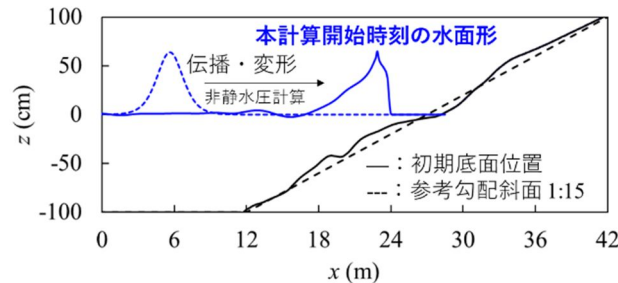


図 6 砂浜斜面に入射する孤立波

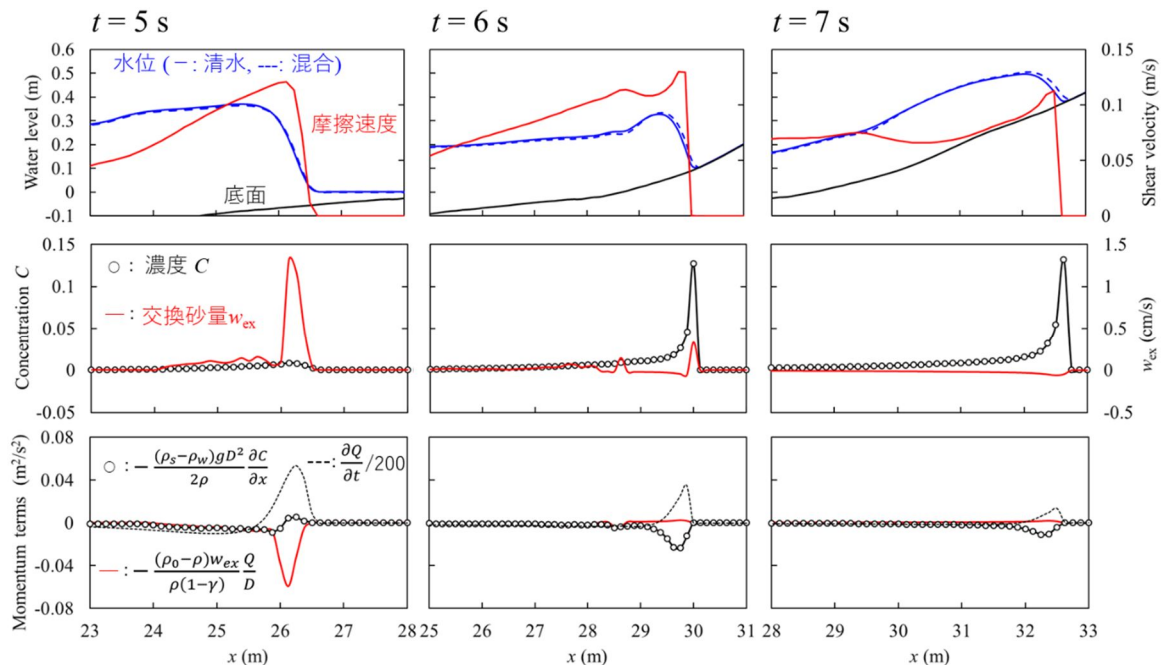


図 7 津波遡上過程における混合流体モデルの各項の影響

最後に、混合流体モデルを気仙沼湾における 2011 年東北津波の事例に適用して、当該地域の土砂移動が津波ハザードにどのような影響をもたらしたのかを検討した。その結果、気仙沼湾狭

窄部の大規模侵食によって津波が狭窄部を通過しやすくなり，その奥に位置する市街地の水位及び流速の増加に寄与していたことが確認された（図8左図）．ここで確認されたハザード増加は，清水流を対象にした従来モデルでも同様に確認されていたが（山下ら，2017），土砂混入を伴う津波流の流体密度増加は浸水量増加を抑制する働きとして作用する可能性を否定できなかった．しかし，混合流体を対象とした本計算では，津波流の流体密度増加による浸水範囲及び浸水高への影響は比較的小さいことがわかった．一方，氾濫水密度の増加に伴う流体力の増分は，木造家屋の倒壊の閾値と考えられる 20kN/m （飯塚・松富，2000）と同等のオーダーである 10kN/m 程度であったことがわかり（図8右図），当該地域における建物被害を拡大させたと考えられる．

本研究で得られた成果は，津波土砂移動氾濫のハザード評価手法を高度化し，被害メカニズムへの理解を深めて合理的な被害軽減策の立案に貢献すると期待される．

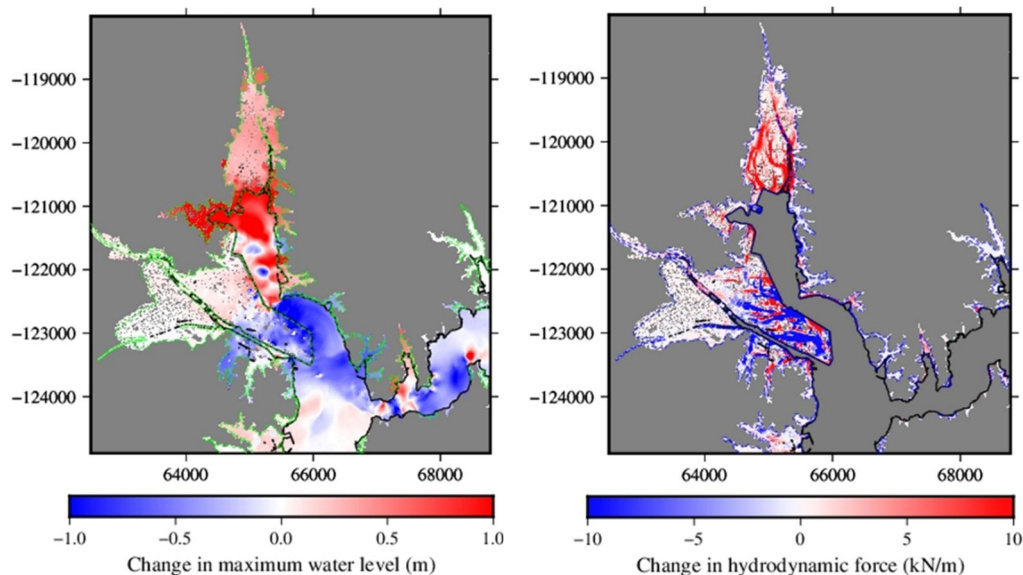


図8 宮城県気仙沼市における2011年東北津波に伴う土砂移動及び混合流体効果による最高水位（左）及び流体力（右）の変化（混合流体モデルによる計算結果と土砂移動を考慮しない津波計算モデルによる計算結果の差分）

参考文献

- 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第47巻，pp.381-385，2000.
- 高橋智幸，首藤伸夫，今村文彦，浅井大輔：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海岸工学論文集，第46巻，pp.606-610，1999.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，現地調査結果（オンライン），
<http://www.coastal.jp/ttjt/>，参照2019-09-10．
- 原口強，高橋智幸，久松力人，森下祐，佐々木いたる：2010年チリ中部地震津波および2011年東北地方太平洋沖地震津波による気仙沼湾での地形変化に関する現地調査，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68, No. 2, pp.I_231-I_235, 2012.
- 松富英夫：津波氾濫水密度の簡易評価法，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.75, No.2, pp.I_385-I_390, 2019.
- 山下啓，嶋原良典，菅原大助，有川太郎，高橋智幸，今村文彦：土砂移動が及ぼす津波ハザード及び建物被害への影響 - 東日本大震災の宮城県気仙沼市における津波氾濫・土砂移動・船舶漂流の統合計算 - ，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73, No.2, pp.I_355-I_360, 2017.
- Cao, Z., Pender, G., Wallis, S., and Carling, P.: Computational dam-break hydraulics over erodible sediment bed, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(7), pp.689-703, 2004.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山下 啓・菅原大助・有川太郎・高橋智幸・今村文彦	4. 巻 Vol. 76, No. 2
2. 論文標題 海底基盤データを利用した津波移動床解析の改善の試み-気仙沼湾での事例-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_427-I_432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山下 啓・菅原大助・門廻充侍・有川太郎・高橋智幸・今村文彦	4. 巻 Vol. 75, No. 2
2. 論文標題 高知県における最大クラスの津波による地形変化と潜在的影響の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_685-I_690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.I_685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山下 啓
2. 発表標題 土砂輸送を伴う混合流体の密度変化と運動量輸送を考慮した津波移動床解析
3. 学会等名 第10回巨大津波災害に関する合同研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下 啓
2. 発表標題 海底基盤データを利用した津波移動床解析の改善の試み-気仙沼湾での事例-
3. 学会等名 第67回海岸工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下 啓
2. 発表標題 高知県における最大クラスの津波による地形変化と潜在的影響の評価
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下 啓
2. 発表標題 臨海都市部における津波による底質移動に起因した災害リスク評価に向けて
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門廻充侍
2. 発表標題 宮城県気仙沼市における震災データ活用による犠牲率と黒い津波外力との関係
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎谷亮太
2. 発表標題 タイ・プラトーン島を対象とした 2004 年インド洋大津波による海浜侵食とその回復要因の検討
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下 啓
2. 発表標題 Coupled non-hydrostatic flow and sediment transport model for investigation of coastal morphological changes caused by tsunamis
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下 啓
2. 発表標題 高知県広域における南海トラフ巨大地震の津波による土砂移動影響の潜在性評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤琢也
2. 発表標題 南海トラフ巨大地震津波による土砂移動解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	ハワイ大学			
中国	Ocean College, Zhejiang University			