

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249067

研究課題名(和文)津波の浸水被害が想定される沿岸域の安心・安全な利用のための総合的研究

研究課題名(英文)Study on safety utilization of coastal zone of possible tsunami inundation

研究代表者

水谷 法美 (Mizutani, Norimi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10209760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,700,000円

研究成果の概要(和文)：津波の浸水被害が想定される沿岸域の安心・安全な利用をめざし、津波の早期情報提供のためのリアルタイムシミュレーション手法の構築と津波が来襲した際の津波による被害軽減のための被害発生機構や津波外力の評価手法の構築を主眼に研究を行った。そして、リアルタイムシミュレーションシステムについてはほぼ実用レベルのものは構築でき、さらにベイズ情報量基準を用いた確率論的予測手法の構築まで実施した。また津波による被害発生機構については、津波による局所洗掘発生機構の解明を行うとともにその時間発展の予測手法の構築を行なった。さらに建物の詳細構造を考慮した津波力の評価、建物群の津波軽減効果についても特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study is intended to establish the real time estimation method of tsunami inundation and to investigate generation mechanism of tsunami induced hazard like a local scour which causes severe damage on coastal dike or breakwaters. Moreover, tsunami force on structures is investigated and its estimation method is studied. Though the present study, the real time simulation method has been successfully established and its reliability has improved by considering stochastic approach. As far as tsunami induced hazard is concerned, numerical simulation method to evaluate local scour behind coastal dikes has been developed considering in/exfiltration flow and suspended sediment transport which play important role on actual event. The model was also improved to consider the effect of viscosity change due to suspended sediment. This effect was also examined in the estimation method of tsunami force on the structures. The tsunami force on the structure was also investigated in the study.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波 即時予測 浸水 局所洗掘 海岸堤防 津波波力 津波避難ビル

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災に伴う津波による被災地の復興計画や2012年8月に内閣府から発表された南海トラフの巨大地震にともなう津波の被害想定に対する対策が本格化することになるが、そこでは居住地の高所移転が中心的な対策の一つに挙げられることが想定された。一方、経済活動は沿岸域から離れることが困難であることも多く、これまでの文化的背景からも沿岸域の安全な利用が重要な課題となっている。このため、本研究では、耐津波性の高い施設を有効に利用し、例えばRC建造物に作用する津波の影響の定量的評価手法の構築、津波の早期検出及びリアルタイム予測などを実現し、両者を総合的に活用して津波に強いまちづくりの方策について考究ことが重要な課題として挙げられた。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では下記の項目の研究を実施することを目的とした。すなわち、(1)津波の早期検出技術の開発、(2)検出された津波の陸域への影響に関するリアルタイム津波予測、(3)陸域に遡上した津波の挙動の解明、(4)津波防護施設の破壊機構と耐津波性の向上方策、(5)建造物の耐津波性の評価とその平面配置による津波軽減効果、(6)生活空間と避難スペースの一体化、である。そして、それらの成果をまとめ、(7)防災力の総合評価も行うこととした。

### 3. 研究の方法

上記の課題について、(1)と(2)については研究分担者の富田と高川(H26年度から)が担当した。GPS波浪ブイが東日本大震災の津波被害の教訓から東海地方にも2基追加(伊勢湾口と尾鷲沖)され御前崎沖と併せて3基体制に整備されたことから、津波の早期検知とリアルタイムシミュレーションを、これらの複数のGPS波浪ブイを活用するシステムとして構築を行った。まず、複数の津波観測記録から波源を逆解析により推定し、求められた波源から津波の伝搬、遡上計算をリアルタイムに実施する手法の構築を行った。そしてこの一連の計算の過程に、階層ベイズモデルを導入することにより、推定結果の不確実性の定量的評価も同時に行う手法に発展させた。

(3)と(5)の平面配置の効果については、代表者の水谷が水理模型実験を実施し、分担者の中村が数値解析を行って考究した。水谷は複数の建物が設置された場合、後列の建物に作用する津波が前列の建物群によってどのように軽減されるのかに着目し、考究した。また、中村は、これらの検討を三次元非線形波・構造物相互作用の数値解析手法を自ら構築し、計算を実施して考究した。なお、計算の検証については、研究協力者であるオレゴン州立大学のCox教授らが実施した実験データも提供してもらい活用した。

(4)については、防波堤の被災機構を水谷と中村が数値解析を行って考究した。研究協力者の小竹より防波堤ケーソンの津波による転倒に関する水理実験結果の提供を受け、その再現により転倒メカニズムを考究するとともに、転倒しづらいケーソンの形状や対策工法の有効性についても研究を行った。

また、海岸堤防の津波による被災機構については、現地調査から海岸堤防背後の局所洗掘が主要な原因と指摘されてきたことから、水谷と中村は、これまで開発してきた数値解析モデルを、波・構造物・海底地形変化・地盤の波浪応答の動的相互作用を解析する数値モデルへと発展させ、海岸堤防を越流した津波によって海岸堤防背後で生じる局所洗掘の規模とその時間発展を再現可能であることを確認した。

(5)については、RC構造の高層建築物を想定し、建物への津波作用の実態と建物の応答について、水谷が中心となって水理模型実験を行うとともに中村が数値解析から考究した。特に窓などの壁面の開口部の波力軽減効果、ピロティー構造の有効性、エレベーターホールのような高強度壁の効果などについて、実験と数値解析の両面から考究するとともに、津波によるコンクリート壁の破壊シミュレーションへ計算を連続させるスキームについても研究を行った。

(6)については、上記の研究成果が、津波浸水が想定される沿岸域の利用において、具体的に津波軽減効果が期待される建物群、防潮壁などの津波軽減効果や海岸堤防などの被災機構から検討を行った。また、(7)については、津波のリアルタイム浸水予測について、名古屋港地区を対象に実施し、その有効性を検証した。また、UAVにより三次元地形の計測の有効性、ならびにそのノウハウについても熊野の沿岸域を対象に考究した。

### 4. 研究成果

本研究の成果を以下に要約する。

(i)津波の早期検出技術の開発、および検出された津波の陸域への影響に関するリアルタイム津波予測(課題(1)(2)および(7))

これまで富田・高川が開発してきた沖合観測波形データの逆解析による津波波源の信用区間推定手法を改良・発展させ、浸水を伴う非線形現象に適用可能なアンサンブル予測手法を提案するとともに、階層ベイズモデルの事後確率密度分布の計算をモンテカルロ法による数値解法から、赤池ベイズ情報量基準の解析積分に基づく解法に改良し、数値計算の安定化と高速化を実現した。この提案したスキームの有効性をシミュレーションベースの双子実験により検証するとともに、検証例題として、南海トラフ巨大地震津波を想定し、南海トラフ沿いに設置されたGPS波浪計の観測波形データを用いて名古屋港に襲撃する津波波形や浸水状況の予測を行った。その結果、時系列波形予測、浸水面積予

測，最大浸水深の空間分布予測いずれにおいても，観測データの蓄積に応じて信用区間が縮小し，予測精度が向上し，真値に収束することが示された（図-1 参照）。

さらに，階層ベイズモデルにより観測誤差を含む津波の観測波形データから津波の波源の空間分布とその推定値の信用区間，さらに観測誤差を同時に推定する手法を構築し，観測データや観測点の数が十分に得られれば正しい推定値が得られること，データの多寡に応じて未知パラメータの信用区間を定量的に推定可能であることを明らかにした．提案手法は推定値の不確かさを定量的に示すことができるため，観測精度の向上・観測装置の追加整備・観測装置の配置の変更等により，波源推定における精度の変化を定量的に示すことができ，観測点の最適配置問題などにも応用できる．また，本手法で得られる波源は複数の標本群として得られるため，これらの標本を用いて津波伝播シミュレーションを多数実施することにより，浸水などの非常に強い非線形をもった現象も確率的な問題として定量的に推定を行うことができるようになる．

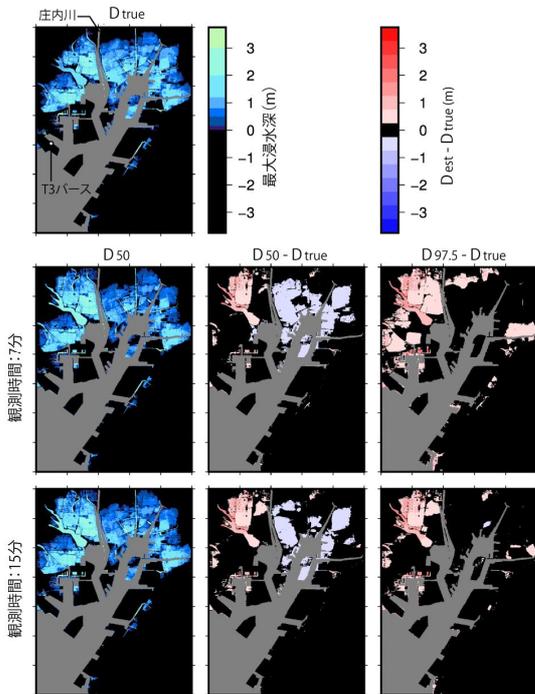


図-1 名古屋港における津波の最大浸水深の平面分布図の予測計算例

(ii) 遡上津波の挙動と建物の平面配置による津波軽減効果（課題(3)，(5)）

ビル群では，ビル間で流速が縮流で大きくなる．特に中央よりもビルの側壁に近い位置での流速が早くなる．この流れにより広報のビルへの波力は大きくなる可能性がある．後方のビルへの作用波力を小さくするには，前列のビル管を狭くし，後列のビルとの距離を大きくすることが有効である．また，数値

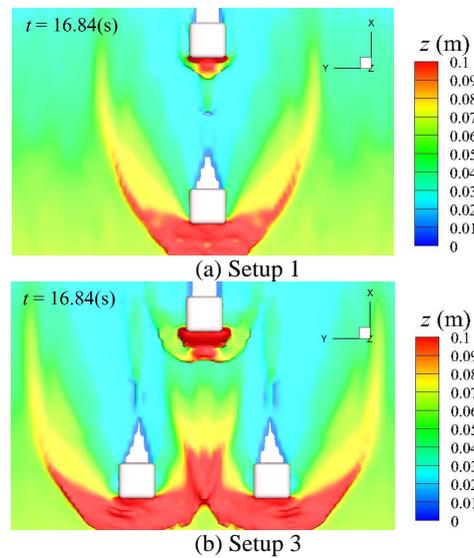


図-2 津波の遡上状況の立面図  
( $d/a = 4$ ，下側が沖)

解析を行って検討した結果（図-2 参照），ビル群の個々のビルに作用する波力については，運動量に基づいて抗力の形式で表示した算定式によりほぼ推定可能であることも明らかとなった．なお，護岸上に直立壁を設けて津波の軽減を図った場合，その高さや構造物との距離により作用力を低減できる場合もあるが，逆に波力を増大させる可能性もあることも明らかとなった（図-3 参照）。

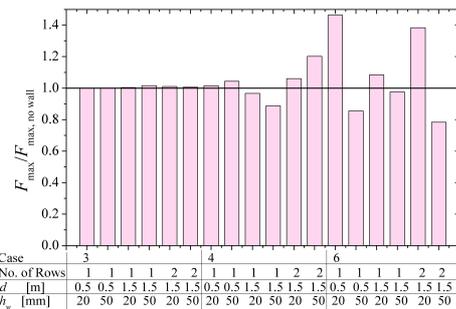


図-3 直立壁による最大波力  $F_{max}$  の低減率

(iii) 津波防護施設の破壊機構と耐津波性の向上方策

東日本大震災では，港湾における防波堤の多くが被災した．その代表的な被災形式は越流津波によるケーソンの転倒であった．このケーソンの転倒については，研究協力者の小竹が水理模型実験を行って検証を行っているが，本研究ではその実験データの提供を受け，既述の数値計算モデルにより再現計算を行った．これにより，越流した津波がケーソン背後で形成する大規模渦ともなう圧力低下が全面に作用する津波波力と相まってケーソンを不安定にさせ転倒に至ることが明らかとなった．このことからケーソン背後に生じる大規模渦を制御することで転倒が生じにくくすることが可能と考えられ，本研究では，ケーソンの港内側上端部を斜面にすることで渦を小規模化し，転倒を生じにくくすることも明らかにした．これは背後陸上

域への遡上津波を軽減する上で非常に効果の大きい成果であると判断される(図-4, 図-5 参照)。

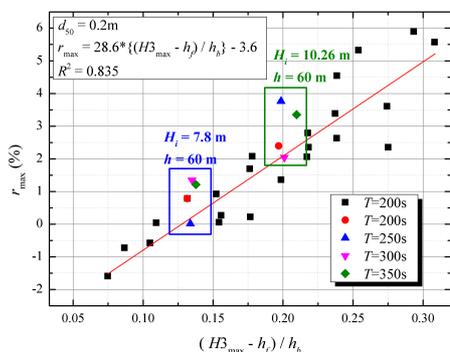


図-4 ケーソン港内側の作用波力の低減効果

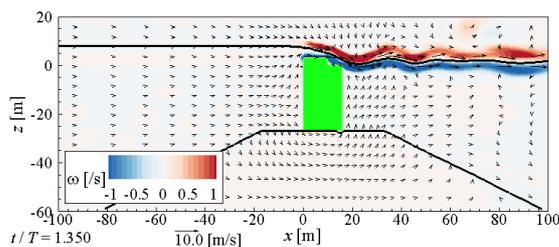


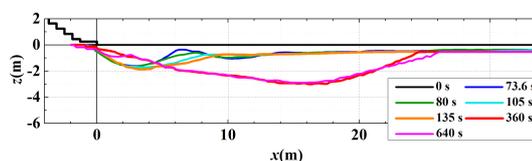
図-5 ケーソン港内側上部を斜面にした場合の流況の例

一方、陸上に遡上した津波を軽減するには海岸堤防が機能することが求められる。しかし、東日本大震災では多くの海岸堤防が津波により被災した。被災した海岸堤防の多くに共通して確認されたのは、海岸堤防を越流した津波による海岸堤防背後の局所洗掘である。粘り強い構造を実現するためには、まずはこの局所洗掘の発生機構を明らかにした上でその対策を講じることが必要不可欠である。本研究では、波・構造物・地形変化・地盤の波浪応答の相互作用の時間発展を解く数値解析モデルを構築し、この問題に取り組んだ。特に底質の移動に関しては、地盤内への浸透流、地盤からの滲出流による底質の移動しやすさも考慮したモデルとなっている。まず、小竹らが行った海岸堤防背後の局所洗掘の再現から本モデルの妥当性の検証を行うとともに、加藤らの実験結果の再現性なども行い、本手法の有効性を明らかにした。そして、越流により洗掘した地形上で生じる渦の形状により洗掘の進展が異なることを明らかにした。さらに本手法により、洗掘対策として複数の手法の有効性を検討し、袋詰玉石工や二線堤などが有効な対策であることを明らかにした(図-6, 図-7 参照)。

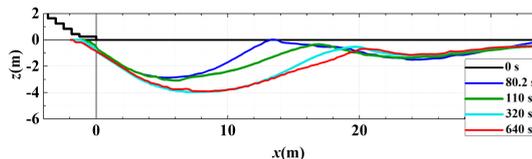
なお、本手法は建物隅角部における津波による局所洗掘などへの拡張も可能であり、その検証も水理模型実験結果との比較により実施している。

(iv) 建造物の耐津波性の評価(課題(5),(6))

RC 構造のビルは耐津波性に優れていることは東日本大震災の津波被害調査からも確認されている。したがって、津波避難ビルと

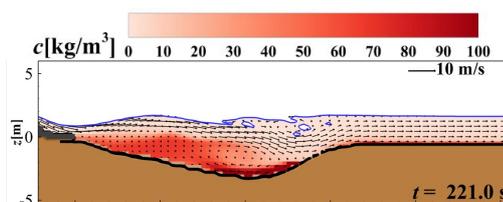


(a)  $D_{50} = 2.0 \text{ mm}$ ,  $\tau_c = 0.05$ ,  $H_{\text{max}} = 2 \text{ m}$

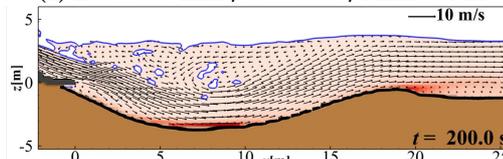


(b)  $D_{50} = 2.0 \text{ mm}$ ,  $\tau_c = 0.10$ ,  $H_{\text{max}} = 4 \text{ m}$

図-6 現地海岸における洗掘孔の発達状況



(a)  $D_{50} = 2.0 \text{ mm}$ ,  $\tau_c = 0.05$ ,  $H_{\text{max}} = 2 \text{ m}$



(b)  $D_{50} = 2.0 \text{ mm}$ ,  $\tau_c = 0.10$ ,  $H_{\text{max}} = 4 \text{ m}$

図-7 赤前海岸における裏法尻周辺の流動場

しての活用や、場合によっては RC 構造の高層集合住宅の高層階は津波浸水が想定される沿岸域の居住スペースとしての可能性も示唆される。一方、建物の窓や内部壁などの詳細構造が津波波力に及ぼす効果は明瞭では無い。そこで本研究では水理模型実験と数値解析により建物の詳細構造を考慮した津波波力の実態の解明を行った。その結果、窓などの開口部があることにより津波波力は軽減でき、その軽減効果は開口率によりほぼ整理できることを明らかにした。また、ピロティ構造は津波に対して有効であることも明らかにした。この際、エレベータのようなユーティリティスペースの設置は避けられないが、そのようなスペースは海側から遠い位置に配置することで津波波力の軽減が可能であることも併せて明らかにした。

さらに、建物が津波に対して角度を持つような場合の津波波力の変化特性なども斜め波の効果についても考究し、定量的な評価も行った(図-8 参照)

RC 構造のビルは耐津波性が高いことが確認されているが、一方でいくつかの事例として津波による被災例も確認されている。RC 構造物の耐津波性の定量的な評価は今後の沿岸域の安全な利用の上では極めて重要である。そこで RC 構造壁の津波による破壊に関する数値シミュレーションについても実施した。LS-DYNA によるシミュレーションを行うこととしたが、波の入射から計算するの

は負荷が大きすぎるので、剛体と津波の相互作用の結果から、限定された領域の結果のみ LS-DYNA に引き継ぎ、構造物の応答を計算するスキームの構築を行った。これにより効率的に RC 構造物の耐津波性構造壁の破壊に至るまでのシミュレーションが可能となった(図-9 参照)。

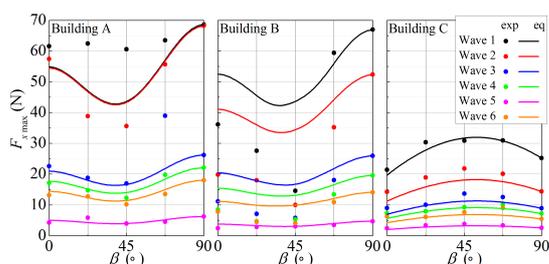


図-8 津波の入射角ともなう波力の特性

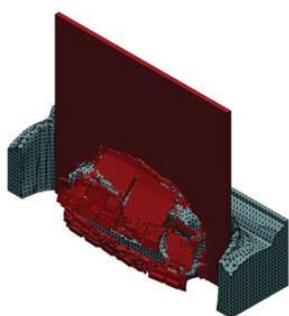


図-9 RC 壁の津波による破壊シミュレーション例

#### (v)防災力の総合評価(課題(7))

本研究で実施した研究は主に津波防災面からは個々の課題に対する各論的な研究であるが、東北などの復興計画のイメージに示される沿岸域の利用は個々の対策を総合化したいわゆる面的防御として位置づけられる。そして、その中の個々の対策の評価のほとんどを本研究の成果でカバーできると判断される。論文としては公表に至っていないが本研究では UAV を使った三次元地形の計測手法についても研究を行っており、SfM/MVS 手法により精度よく三次元地形データの作成が可能となることも確認している。これらを有機的に使用することで、津波の浸水が想定される沿岸域の安全・安心な利用の実現に大きく資する成果が得られたものと考え

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17 件)

- 1) 中村友昭・鈴木愛美・趙容桓・水谷法美 (2016): 浮遊砂による流体の粘土の変化と一様流および津波による流動場を与える影響に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 72(2) (印刷中, 査読有)
- 2) 高川智博・富田孝史 (2015): ベイズ情報量基準を用いた確率論的津波浸水予測手法

の開発と検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), pp. I\_379-I\_384.

doi.org/10.2208/kaigan.71.I\_379 (査読有)

- 3) 高川智博・富田孝史 (2014): 階層ベイズモデルによる津波波源逆解析解の信用区間と観測誤差の同時定量推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 70(2), I\_196-I\_200. doi.org/10.2208/kaigan.70.I\_196 (査読有)
- 4) 中村友昭・中島彩・水谷法美 (2014): 沿岸構造物存在下における陸上構造物への津波力に関する 3 次元数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), pp. I\_816-I\_820. doi.org/10.2208/kaigan.70.I\_816 (査読有)
- 5) Manawasekara, C., Mizutani, N., Nakamura, T., Aoki, S. (2014): Failure of concrete structure under tsunami loading, J. of JSCE, Div. B: Hydraulic, Coastal and Env. Eng., JSCE, 2(1), pp. 214-223. (査読有) doi.org/10.2208/journalofjsce.2.1\_214
- 6) Nakamura, T., Mizutani, N. and Aoyama, K. (2014): Numerical analysis of the tsunami-induced drift behavior of a shipping container and the effectiveness of its countermeasure, Int. J. of Offshore and Polar Eng., ISOPE, 24(4), pp.253-261. (査読有) www.isopec.org/publications/journals/ijope-24-4/abst-24-4-p253-jc612-Nakamura.pdf
- 7) Nakamura, T. and Mizutani, N. (2014): Sediment transport calculation considering unresolved scales of turbulence and its application to local scouring due to tsunami run-up, Int. J. of Offshore and Polar Eng., ISOPE, Vo.24, 24(4), pp.269-277. (査読有) www.isopec.org/publications/journals/ijope-24-4/abst-24-4-p269-jc611-Nakamura.pdf
- 8) 中村友昭・中島彩・水谷法美 (2014): 護岸を越流した津波による陸上構造物への作用波力とその評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 70(2), pp. I\_408-I\_413. doi.org/10.2208/jscejoe.70.I\_408 (査読有)
- 9) 中村友昭・峯浦亮・澤祐太郎・水谷法美・小竹康夫 (2014): 混成堤ケーソン港内側に作用する越流津波による波力と転倒防止策に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 70(2), pp. I\_492-I\_497. doi.org/10.2208/jscejoe.70.I\_492 (査読有)
- 10) 青木悟・チャトラマナワセカラ・水谷法美, 平川信也, 芦沢哲(2013): 津波避難ビル内部の空間形状に着目した作用津波力に関する実験的考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), I\_846-I\_850. doi.org/10.2208/kaigan.69.I\_846 (査読有)
- 11) 中村友昭・安藤康平・水谷法美・小竹康夫 (2013): 津波の越流による混成堤ケーソンの転倒防止策に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 69(2), pp. I\_906-I\_910. doi.org/10.2208/kaigan.69.I\_906 (査読有)
- 12) 中村友昭・水谷法美 (2013): 地形変化の影響を考慮した地盤解析手法の開発とその

- 適用,土木学会論文集 B3(海岸工学),69(2), pp. I\_1026-I\_1030 .  
doi.org/10.2208/kaigan.69.I\_1026 ( 査読有 )
- 13) 中村友昭・中島彩・水谷法美 (2013): 津波作用時に沿岸構造物の配置が岸側の構造物に与える影響に関する研究,土木学会論文集 B3(海洋開発),69(2) pp. I\_287-I\_292 .  
doi.org/10.2208/jscejoe.69.I\_287 ( 査読有 )
- 14) 中村友昭・安藤康平・水谷法美・小竹康夫 (2013): 津波の越流による混成堤ケーソン岸側での水圧の低下機構に関する研究,土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69(2), pp. I\_389-I\_394 .  
doi.org/10.2208/jscejoe.69.I\_389 ( 査読有 )
- 15) 菊雅美・中村友昭・水谷法美・平川信也・芦澤哲 (2013): 建築物に作用する津波力の低減対策に関する研究,土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69(2), pp. I\_413-I\_418 .  
doi.org/10.2208/jscejoe.69.I\_413 ( 査読有 )
- 16) 中村友昭・根笹裕太・水谷法美 (2013): 遡上津波による非固定陸上構造物周辺の洗掘現象への流体・構造・地形変化連成数値計算モデルの適用,土木学会論文集 B3(海洋開発), 69(2), pp. I\_503-I\_508 .  
doi.org/10.2208/jscejoe.69.I\_503 ( 査読有 )
- 17) Nakamura, T. and Mizutani, N. (2013): Sediment transport calculation considering laminar and turbulent resistance forces caused by infiltration/exfiltration and its application to tsunami-induced local scouring, J. Offshore Mechanics and Arctic Eng., ASME, 136(1), pp. 011105-1-011105-9.  
DOI: 10.1115/OMAE2013-10199 ( 査読有 )

〔学会発表〕(計 17 件)

- 1) Mizutani, N., Kiku, M. and Nakamura, T.: Study on countermeasures for reducing tsunami force acting on buildings, Regional Conf. on Natural Disasters, Manila, Philippines, Sept. 25-26, 2015.
- 2) Nakamura, T., Nezasa, Y., Mizutani, N., and Kotake, Y. : Study on tsunami scour at landward toe of coastal dike and tsunami force on its armor blocks, Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conf., Boston, USA, Sept.9-11, 2015.
- 3) Mizutani, N., Aoki, S., Manawasekara, C., and Nakamura, T.: Effect of space configuration of building on tsunami force on it, 34th Int. Conf. on Coastal Eng., Seoul. Korea, Jun.15-20, 2014.
- 4) 中村友昭・安藤康平・水谷法美・小竹康夫:津波の越流による混成堤ケーソンの転倒に対する係留索の効果について,混相流シンポジウム 2013, 長野市, 2013 年 8 月 9-11 日.
- 5) 中村友昭・水谷法美: 地形変化の影響を考慮した地盤解析手法の開発について,土木学会第 68 回年次学術講演会, 習志野市, 2013 年 9 月 4-6 日 .

- 6) Nakamura, T. and Mizutani, N. (2013): Sediment transport calculation considering laminar and turbulent resistance forces due to infiltration/exfiltration and its application to tsunami-induced local scouring, 32nd Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. , Nantes, France, Jun.9-14, 2013.
- 7) Nakamura, T. and Mizutani, N. : Sediment transport calculation considering unresolved scales of turbulence and its application to local scouring due to tsunami run-up, 23rd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Anchorage, USA, Jun.30-Jul.5. 2013.
- 8) Nakamura, T., Mizutani, N., Hirakawa, N., and Ashizawa, S. : Numerical analysis of tsunami-induced inundation behind buildings along coasts, 7th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, Bali, Indonesia, Sep 24-26. 2013.

他 9 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.coast.civil.nagoya-u.ac.jp/wiki.cgi?page=%B8%A6%B5%E6%C6%E2%CD%C6>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

水谷法美 (MIZUTANI NORIMI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 10209760

### (2)研究分担者

中村友昭 (NAKAMUTA TOMOAKI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 90569328

富田孝史 (TOMITA TAKASHI)  
港湾空港技術研究所・アジア太平洋沿岸防災センター・副センター長  
研究者番号 : 20242836

高川智博 (TAKAGAWA TOMOHIRO)  
港湾空港技術研究所・海洋情報・津波研究領域・主任研究官  
研究者番号 : 30451785 (H26,27 年度)

### (3)連携研究者

川崎浩司 (KAWASAKI KOJI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 20304024 (H25 年度)