

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25246043

研究課題名(和文) 遡上津波と構造物の相互作用評価のためのマルチスケール数値実験

研究課題名(英文) Multi-scale numerical experiments for mechanical interaction between tsunami run-up and structures

研究代表者

寺田 賢二郎(Terada, Kenjiro)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：40282678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,000,000円

研究成果の概要(和文)：自然災害のなかで、土石流や洪水、津波などは、流体と構造物の混在する複雑な多重物理現象であるために、予測しがたい被害の甚大化・複合化を伴うことがあるが、この予測の困難さは、それらの相互作用のメカニズムが未解明であることに起因する。本研究では、津波被害に焦点をあてて、遡上津波と構造物との相互作用の機構解明を可能とする「マルチスケール数値実験法」を構築する。具体的には、現象を空間的に階層化したうえで、相対的に小さい空間スケールでの現象に対して無用な近似を極力排除した流体・構造連成解析を行い、広域(より大きな空間スケール)での災害時物理現象の特徴づけと構造物被害予測のための方法論を提示する。

研究成果の概要(英文)：Unexplained mechanisms of interaction between fluids and solids often causes unpredictable and extensive damages into human lives as well as structures. In this study, focusing our attention to tide-protection forests against tsunami energies, we propose a method of multiscale numerical experiments for evaluating their disaster-reduction characteristics. For that purpose, we introduced a hierarchical way, a tide-protection forest is stratified into three spatial scales; branch-scale, tree-scale and forest-scale. A tide-protection forest is assumed to be porous media and we identify its porous term as reduction characteristics. Several cases of lower-scale analyses are carried out with different initial and boundary conditions to construct a response surface of the overall resistances at the upper-scale. Thus, with this information about the porous medium's characteristics, a whole coastal region can be a analysis target to make a risk assessment for structures behind the forest.

研究分野：計算力学

キーワード：津波 破壊 マルチスケール 流体・構造連成 防災・減災

### 1. 研究開始当初の背景

地震大国である我が国においては、想定地震に対する種々の工学的アプローチにより信頼性の高い被害予測が可能となっており、その結果に基づく防災・減災のための様々な施策が講じられている。しかし、たとえ地震動や津波の場所や規模・性質を適切に予見できたとしても、理学・工学・医学・経済学・社会科学などを抱合する災害科学の学術的観点からすると、物質的および人的被害推定に際しての解像度や次元は不十分である。従来の広域および中域（都市域）の平面的で粗い尺度の従来型の被害推定は自治体・行政レベルでの判断材料としては有効であるが、個々人の防災対策や避難行動の意思決定に用いられるデータは立体的（あるいは3次元的）な視点に時間の評価軸を加えた4次元的で細かい尺度（例えば街区レベル）で評価したものでなければ利用価値が低いのが現状である。そのため、現象を空間的に階層化した上で、それぞれの必要とする情報を得ることができる数値解析シミュレーションが必要であり、また、それらの空間スケールをつなぎ連成する解析手法の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

自然災害のなかで、土石流や洪水、津波などは、流体と固体材料・構造物の混在する複雑な多重物理現象であるために、予測しがたい被害の甚大化・複合化を伴うことがあるが、この予測の困難さは、明らかにそれらの相互作用のメカニズムが未解明であることに起因する。そこで本研究では、津波被害に焦点をあてて、遡上津波と構造物との相互作用の機構解明を可能とするマルチスケール数値実験法を構築する。具体的には、現象を空間的に階層化した上で、相対的に小さい空間スケールでの現象に対して、無用な近似を極力排除した高精度の流体・構造連成解析を行い、広域（より大きな空間スケール）での災害時物理現象の特徴づけと構造物被害予測のための方法論を提示する。

### 3. 研究の方法

地域・都市域の物理的被害予測に際して階層的な評価を想定し、空間スケールを以下のように階層化した上で現象を分類する。

- レベル1：材料のスケール（0.001m～1cm）
- レベル2：部材のスケール（1cm～100cm）
- レベル3：建物のスケール（0.1m～10m）
- レベル4：街区のスケール（10m～1000m）
- レベル5：地域・都市スケール（1km～100km）

本研究では、解像度の高いレベル、すなわち相対的に小さい空間スケールでの現象を精度良く予測し、それよりも1つ大きいスケールでの現象・特性は、平均化あるいは均質化の理論を適用し把握する。これらの平均化・均質化を行うため、マルチスケール数値実験法を用いる。各レベルの具体的な3次元

構造・流体連成解析対象は以下のように限定して平均特性評価を行い、本手法の理論を構築する。

- (a) 津波と遡上過程と浸水過程の非定常現象（従来の非線形浅水長波解析）（レベル5）
- (b) 防波堤・防長林（剛体とみなす）が障害物あるいは転倒対象として機能する現象（レベル4）
- (c) 構造物の破壊・転倒とそれらを巻き込みながら流体特性が変化する非定常現象（レベル3）
- (d) 浮遊がれきを含む流体（レベル2）および海底砂や礫を含む流体（レベル1）の非定常流体特性

### 4. 研究成果

- (1) 防潮林の減災特性評価（レベル3からレベル5）

ここでは、本研究における防潮林の減災特性評価のためのマルチスケール数値実験法について説明する。数値解析に際して、防潮林を多孔質体で構成されるマクロ構造物であると近似し、ミクロ（枝木スケール）・メゾ（樹木スケール）の2つのスケールでのマルチスケール数値実験を行うことにより、防潮林の減災特性を得るものである。

マルチスケール数値実験では、図-1に示すように、防潮林が規則的な形状で周期的なミクロ構造物を持つものと仮定し、多孔質体としてのマクロな特性、すなわち防潮林効果を評価する。防潮林というマクロ構造物に対するミクロ構造（樹木、枝木）などの形状は小さく、これらは同一とみなし、防潮林という巨視的構造が規則的な形状・周期的な配置をもつ枝木や樹木（ミクロ構造）によって構成される多孔質体として近似する。防潮林という全体構造物に流体が流れ込んだ際の挙動を解析するために、樹木、枝などのミクロ構造の解析を始めに行い、それらの解析結果をメゾ、マクロへと用いるスケールアップ型の解析を行う（図-2）。今回、ミクロスケール、メゾスケール、マクロスケールの3つのモデルを設定し、それぞれをPhase-1（枝木スケール）、Phase-2（樹木スケール）、Phase-3（防潮林スケール）としてマルチスケール数値実験を行った。

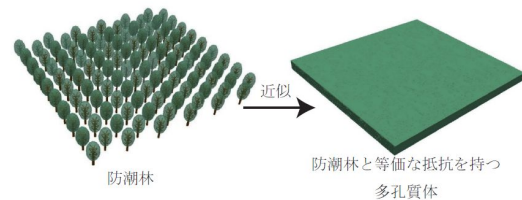


図-1：多孔質近似概念図

本研究で用いる支配方程式は、非圧縮粘性流体における Navier-Stokes の運動方程式と連続式で以下のように表される。

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{f} - \mathbf{S} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}, p) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $\mathbf{u}$  は速度ベクトル、 $p$  は圧力、 $\mathbf{f}$  は物体力ベクトル、 $\boldsymbol{\sigma}$  は応力テンソル、 $\mathbf{S}$  は多孔質体の抵抗ベクトルである。また、多孔質体の抵抗ベクトル $\mathbf{S}$ は次式のように定められる。

$$\mathbf{S} = -C \frac{1}{2} \rho \|\mathbf{u}\| \mathbf{u} \quad (3)$$

ここで、多孔質特性値 $C$ は、多孔質体に対して持つ抵抗の大きさを表す係数であり、流れのパターン（流速・水深）によって異なる値を持ち以下のように決定する。

$$C = \frac{2\Delta p}{\rho \Delta l} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta p$  は多孔質体を挟んだ任意の検査面での圧力損失を示し、 $\Delta l$  は検査面の距離を表す。圧力損失は、各時刻における時間平均した値を用いている。各 Phase の解析でそれぞれのスケールのモデルで挟んだ検査面間の圧力損失を測定し、求められた特性値 $C$ を、次のスケールのモデルに与えることによってスケールアップ型のマルチスケール解析が実施される。

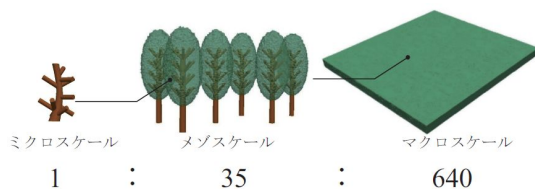


図-2: スケールアップ型マルチスケール解析概念図およびスケール比

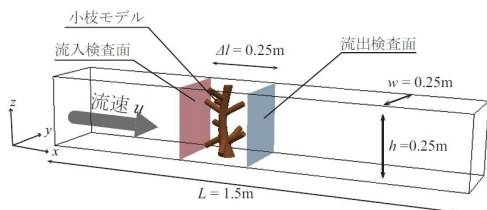


図-3: Phase-1 で用いた解析領域

## (2) 数値解析例

数値実験：枝木の多孔質特性値同定

Phase-1 ではマイクロスケールの解析を行う。解析領域を図-3に示すように設定し、様々な流れのパターンを与えることによって数値実験を行う（図-4）。数値実験により各ケースにおける多孔質特性値 $C$ を式(4)より求め、速度 $u$ と水深 $h$ を軸とした空間にプロットし、図-5に示す特性値 $C$ の応答曲面を作成する。

この応答曲面を用いて次のスケールの解析にスケールアップする。

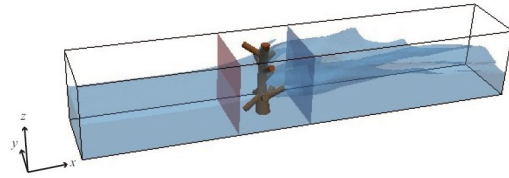


図-4: Phase-1 での解析の様子

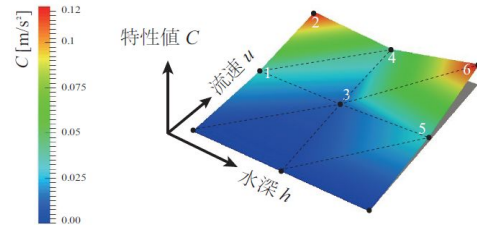


図-5: Phase-1 での多孔質特性値応答曲面

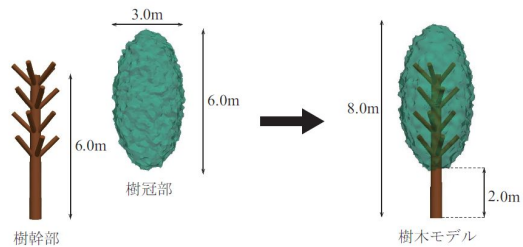


図-6: Phase-2 で用いた樹木モデル



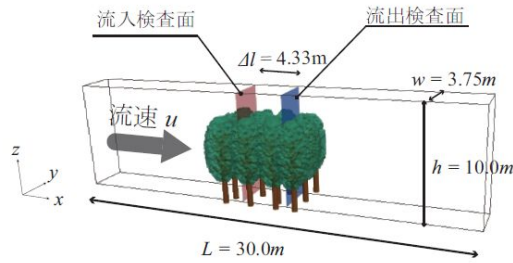
図-7: Phase-2 で用いた2つのモデルとその植栽配置

数値実験：防潮林の多孔質特性値同定

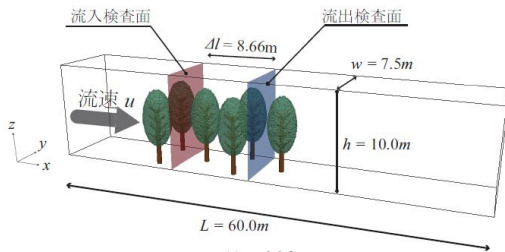
Phase-2 では、メソスケールの解析を行う。メソスケールには樹木群モデルを採用し、図-6に示すように樹木部モデルと樹冠部モデルを重ね合わせたものを用いる。樹冠部を多孔質領域とし、Phase-1で求めた枝木スケールの応答曲面より多孔質特性値を算出する。これによりマイクロ-メゾ間のスケールアップを行っている。樹木群モデルを設定では、樹木の植栽密度による防潮林効果の違いを検討するため、配置形状は同一で配置間隔のみが異なる（高さ以外の辺が2倍）2つのモデル model-a, model-b を設定した（図-7）。

解析領域を図-8に示すようにそれぞれ設定し、様々な流れのパターンを与えることによって数値実験を行う（図-9）。数値実験により各ケースの多孔質特性値 $C$ を求める。この結果より得られた応答曲面を図-10に示す。この図より、樹木を密に配置した model-aの方が、疎に配置した model-b に比べて高い抵

抗値を示していることがわかる。



(a) model-a



(b) model-b

図-8：Phase-2での解析領域

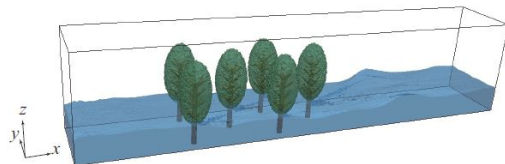


図-9：model-bにおける解析結果

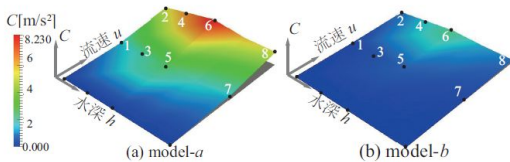


図-10：Phase-2での多孔質特性値応答曲面

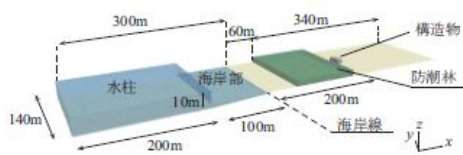


図-11：Phase-3で用いた解析領域

### 防潮林効果の解析

Phase-3ではマクロスケール解析、すなわち防潮林効果の評価実験を行う。樹木群(Phase-2)に対する解析により算定した多孔質特性値を防潮林と等価な抵抗を持つ多孔質領域として設定し、津波の浸水距離や速度の減衰を見る。解析領域は、図-11のように設定した。防潮林の有無や、防潮林の植栽密度差の影響を考察するため、防潮林のない解析領域、密な植栽(model-a)の防潮林を持つ領域、疎な植栽(model-b)の防潮林を持つ

領域の3つのケースについて解析をした。各ケースにおける解析結果を図-12,13に示す。この図より防潮林を配置した2ケースは防潮林を配置していないケースと比較して、180mほど到達距離が短くなっている。また、植栽密度の差は、60秒後の津波到達位置と比較すると100mほどの距離差が確認できる。このことから植栽密度の違いによる防潮林効果の違いを適切に再現できていることがわかる。また、防潮林による減衰効果を検討するため、後背地に設置した構造物の応力解析を行った。各ケースの解析結果より求められた構造物に作用する流体力の時刻歴を外力として与え、動的構造解析を行った。解析結果を図-14に示す。密な防潮林を設置した結果は、構造物全体で作用している応力が5000kN以下の低い値となっていることが確認でき、疎な防潮林では、流体力の減衰効果が低いため、高い応力を示していることがわかる。

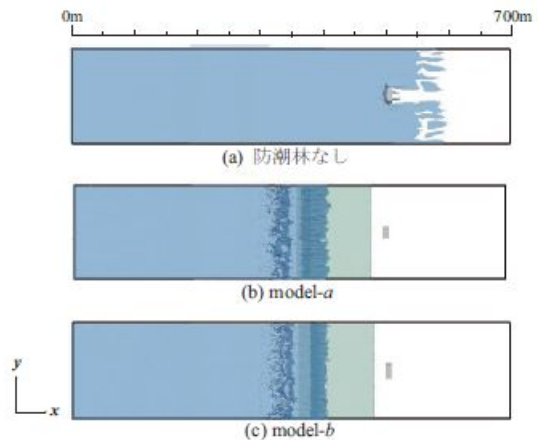


図-12：同時刻における浸水到達距離の違い (t=20.0s)

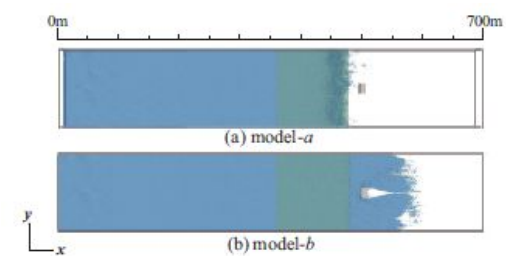


図-13：防潮林解析結果(t=60.0s)

これらの結果よりマルチスケール数値実験を用いた防潮林の減災特性評価が行えることを示した。

### (3) 構造物の破壊を考慮した構造流体連成解析(レベル2からレベル4)

本研究では、流体力による構造物の接触挙動および破壊挙動まで含めた構造物と流体の相互連成作業が考慮可能な安定化有限被覆法に基づく連成解析手法を提案する。まず、構造物は複数の剛体要素を結合することでモデル化する。剛体要素は、Cohesive model

を導入した個別要素法を用いることで構造物の接触挙動および破壊挙動を表現する。流体解析では、支配方程式として非圧縮粘性流体における Navier-Stokes の運動方程式と連続式を用い、Phase-field 法により界面位置の計算を行う。また、安定化有限被覆法を用い、構造物と流体の接触界面位置を正確に表現し、構造物と流体の相互連成の計算を行う。

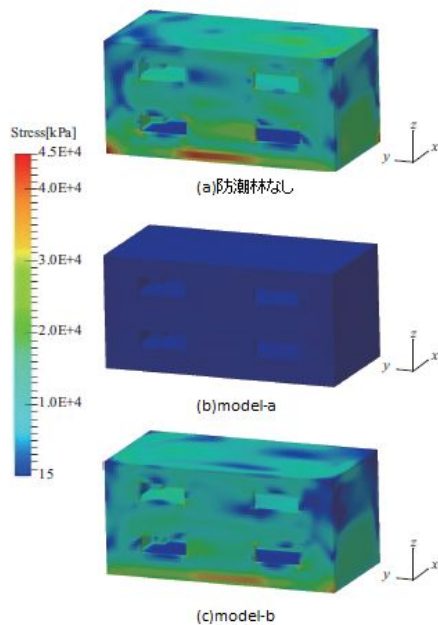


図-14：各ケースにおける応力分布図

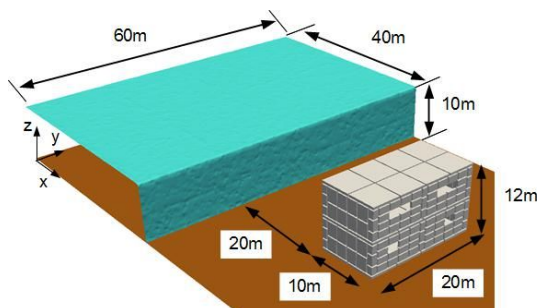


図-15：解析モデル図

数値解析例として、津波荷重による構造物の破壊解析を行う。図-15 に解析モデルを示す。本解析では、構造物の部材が複数の剛体要素でモデル化されるように剛体要素を配置している。構造物は、208 個の交代要素(球要素の半径 0.1m)に分割してモデル化を行い、各剛体要素に Cohesive model によって結合している。また、DEM の解析で用いるバネ定数は  $1.0 \times 10^7 \text{ N/m}$ 、反発係数は 0.2、摩擦角は 30 度を用いた。Cohesive model のパラメータは FEM を用いて構造物の柱の 3 点曲げ試験の解析結果を行い、破壊時の最大反力がほぼ等しくなるようにパラメータを同定した。構造物付近の最小メッシュ幅は、0.01m になるように作成している。

図 16 に解析結果を示す。構造物前方からの津波が 1 階前面の壁面を壊し、その後、瓦

礫となった壁面を巻き込みながら、後方の壁面を壊す様子が確認でき、この図より、流体力により、建物の壁面が破壊・接触し、流されていく様子が安定に解析が行われていることがわかる。このことより、本手法の実問題への適用性および安定性が確認できた。

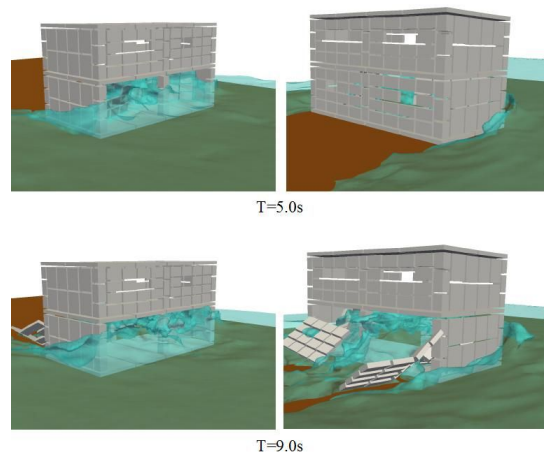


図-16：構造物の破壊解析結果

## 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 8 件)

- (1) 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎, コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの 3 次元破壊シミュレーションとその性能評価, 日本計算工学会論文集, 2015, P.20160004 (査読有)
- (2) 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 小山直輝, 金子賢治, 車谷麻緒, 加藤準治, 京谷孝史, 構造物の破壊を考慮した有限被覆法に基づく構造流体連成解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, 2015, pp.I\_203-I\_212 (査読有)
- (3) 野村怜佳, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 森口周二, 防潮林の減災特性評価を目的としたマルチスケール数値実験, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, 2015, pp.I\_193-I\_201 (査読有)
- (4) 高瀬慎介, 加藤準治, 森口周二, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 野島和也, 櫻庭雅明, 櫻山和男, 安定化有限要素法を用いた 2D-3D ハイブリッド手法による津波解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, 2014, pp.I\_307-I\_315 (査読有)
- (5) 神野真弥, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 櫻山和男, 微細ひび割れの形成と接触を考慮した準脆性材料の圧縮破壊シミュレーション, 日本計算工学会論文集, 2014, P.20140006 (査読有)
- (6) 車谷麻緒, 神野真弥, 寺田賢二郎, 粗骨材の幾何学的非線形に着目したコンクリートの圧縮破壊シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.16, 2013, pp.

I\_115-I\_123 (査読有)

- (7) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 加藤準治, 櫻山和男, 破壊シミュレーションのための構造要素を用いた離散体解析法, 日本計算工学会論文集, 2013, P.20130010 (査読有)
- (8) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 櫻山和男, コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, 2013, P.20130015 (査読有)

[学会発表](計9件)

- (1) R. Nomura, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, Multiscale analysis with a porosity model for evaluationg damping effects of coastal forest, 3rd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2015), 2015年12月14日, Tokyo, Japan
- (2) S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, M. Muramatsu, Finite Cover Based FSI Analysis with Tsunami Impact Loading, 13th U.S. National Congress on Computational Mechanics(USNCCM13), 2015年7月26日, San Diego, California, USA
- (3) K. Kashiya, G. Ling, J. Matsumoto, S. Takase, K. Terada, Modeling and simulation of tsunami using virtual reality technology, IV International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2015), 2015年5月18日, Venice, Italy
- (4) 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 小山直輝, 金子賢治, 車谷麻緒, 加藤準治, 京谷孝史, 構造物の破壊を考慮した有限被覆法に基づく構造流体連成解析, 第18回応用力学シンポジウム, 2015年5月16日, 金沢大学
- (5) K. Terada, S. Takase, J. Kato, S. Moriguchi, T. Kyoya, Multi-scale computations diversified : From material to disaster sciences, 11th. World Congress on Computational Mechanics(WCCM XI) (招待講演), 2014年7月24日, Barcelona, Spain
- (6) K. Kashiya, T. Fumuro, T. Kawabe, J. Matsumoto, S. Tanaka, S. Takase, K. Terada, Modeling and Simulation on Tsunami Waves Using Virtual Reality, 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014年7月24日, Barcelona, Spain
- (7) S. Takase, J. Kato, S. Moriguchi, K. Terada, T. Kyoya, M. kurumatani, M. Asai, K. Kashiya, Multiscale flow simulations of tsunami runup with locally-periodic structural obstacles, 11th. World Congress

on Computational Mechanics(WCCM XI), 2014年7月24日, Barcelona, Spain

- (8) 高瀬慎介, 加藤準治, 森口周二, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 野島和也, 櫻庭雅明, 車谷麻緒, 浅井光輝, 櫻山和男, 安定化有限要素法を用いた津波遡上の2D-3Dハイブリット計算, 第19回計算工学講演会, 2014年6月11日, 広島国際会議場, 広島
- (9) 高瀬慎介, 櫻山和男, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 有限被覆法を用いた物体周りの流体力計算, 第18回計算工学講演会, 2013年6月19日, 東京大学生産技術研究所, 東京

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺田 賢二郎 (TERADA KENJIRO)  
東北大学・災害科学国際研究所・教授  
研究者番号: 40282678

### (2) 研究分担者

櫻山 和男 (KASHIYAMA KAZUO)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 10194721  
浅井 光輝 (ASAI MITSUTERU)  
九州大学・工学研究科(研究院)・准教授  
研究者番号: 90411230  
車谷 麻緒 (KURUMATANI MAO)  
茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20552392  
森口 周二 (MORIGUCHI SHUJI)  
東北大学・災害科学国際研究所・准教授  
研究者番号: 20447527  
加藤 準治 (KATO JUNJI)  
東北大学・工学研究科(研究院)・准教授  
研究者番号: 00594087  
高瀬 慎介 (TAKASE SHINSUKE)  
東北大学・工学研究科(研究院)・助教  
研究者番号: 00748808