

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310123

研究課題名(和文) 津波防災におけるグローバル・スタンダードとなりえる新たな大規模ハードウェアの開発

研究課題名(英文) Development of Large Hardware for Tsunami Disaster Mitigation Aiming Global Standard

研究代表者

高橋 智幸 (Takahashi, Tomoyuki)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：40261599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円、(間接経費) 3,720,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震津波による甚大な被害を踏まえた新たな防災ハードウェアとして、津波潜堤を提案した。津波潜堤は沿岸部に来襲する津波の水平方向および鉛直方向の流速を転向させ、津波自身の物理的性質を利用して減勢させる構造とした。従来の津波対策構造物の同津波による被災事例や減勢効果について調べた上で、水工学的な視点から津波潜堤の幾何学的形状を設計した。そして、水理実験および三次元数値解析により減勢効果を評価した。さらに実用化を踏まえてコンクリート構造物としての要件を検討した。

研究成果の概要(英文)：Tsunami submerged breakwater (TSB) is proposed as a new disaster mitigation hardware reflecting on serious damage by the 2011 Tohoku Tsunami. TSB can change directions of horizontal and vertical tsunami flows, and weaken tsunami power in coastal regions. At the beginning of the research, actual structures aiming for tsunami disaster were investigated about damage condition by the tsunami and weakening effect for the tsunami. Based on the investigation, a geometrical form of TSB was designed from the hydraulic engineering approach. The form was evaluated by the hydraulic experiment and the three-dimensional numerical modeling. And necessary conditions of TSB as a concrete structure to put into practice were examined.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 自然災害科学

キーワード：潜堤 水理実験 三次元数値解析 コンクリート構造物

1. 研究開始当初の背景

3月11日に発生した東日本大震災は、我が国においてこれまで行われてきた津波防災における様々な問題点を明らかにした。以下、それらの問題点を踏まえて、今後の津波防災のあり方を考察するとともに、本研究の着想に至った経緯を説明する。

マグニチュード9.0の地震によって引き起こされた津波は、堤防などの海岸保全施設の多くを破壊し、それらによって守られていた市町村において甚大な人的被害を生じさせた。海岸保全施設は設計津波高さに備えるよう経済的に作られている。したがって、それを大きく超えた外力が加われば被災することは工学的には必然である。しかし、そのハードウェアの限界が正しく住民へ周知されていなかった。ハードウェアに対する過度の安心感を住民に与えていたのである。また、高い堤防に囲まれた海が見えない海辺の街は、海の近くに住んでいるという感覚を弱めてしまっていた。そして、このようなハードウェアを中心とした津波防災は住民の避難行動を妨げ、また遅れを生じさせた。これらは津波防災に携わってきた技術者として真摯に反省すべき点であり、今後の防災ハードウェアにフィードバックすべき点である。

その一方で、ハードウェアの被災が強調された報道が多くなされており、ハードウェアの防災上の価値を過小に評価する傾向も見られる。実際には、ハードウェアが効果的に働いた地域は多数存在している。例えば、釜石の湾口防波堤は被災しているが、釜石市街へ来襲する津波の高さを約4割低下させ、到達する時間を5分遅延させている(港湾空港技術研究所資料, No.1231, 2011)。防災ハードウェアの効果はゼロか百かではない。想定を大きく超えた災害が発生した場合は被害をゼロにすることはできないが、外力を減勢させ、住民が避難することを支援してくれる。よって、今後もハードウェアが適切に整備されていくことは津波防災上重要である。

また、現在の高い防災意識を前提としたソフトウェア偏重の防災は危険である。もちろん防災意識を高いままで維持していく努力を続けることは必要であるが、それと同時に数年後、数十年後に防災意識が低下した場合でも効果的に働くハードウェアを築き維持していくこともまた必要である。ハードウェアが整備されず、しかもソフトウェアが働かない状態で津波に教わることだけは避けなくてはならない。

今回の津波が貞観津波の再来であれば千年に一度の津波となる。また貞観津波と明治三陸津波の連動型の可能性も指摘されている(佐竹ら, 東北地方太平洋沖地震の津波波源, 科学, Vol.81, No.5, 2011)が、その場合はさらに発生頻度の低い津波であった可能性もある。そのような低頻度の津波に対して、海岸保全施設のみで備えることは現実的には不可能であり、ハードウェアとソフトウ

エアが連携した災害に強い街づくりが必要となる。そこでの主役は住民であり、その中心となる対策は避難である。住民の避難行動を支援する防災情報と防災教育などのソフトウェアが不可欠であるが、それと並行して津波の高さを減じ、津波の到達時間を遅らせるハードウェアの整備もまた避難行動の支援としては重要である。ただし、そのハードウェアは住民に過度の安心感を与えず、海の近くで生活していることを意識してもらえるものでなくてはならない。さらに津波の発生間隔に比べてハードウェアの耐用年数は短いため、できるだけ劣化を遅らせ、長寿命化を図ることも重要である。土木学会や国土交通省などでは道路を盛土構造にした二線堤などを提案しているが、そのような多重防衛は海域にも考えられる。しかも、より波源に近く、生活圏ではないためハードウェア整備の自由度は陸域より相対的に高くなる。

国外に目を向けると、米国の西海岸やハワイなどのように、人口稠密な市街地を沿岸部に有している津波危険地帯は多く存在する。しかし、米国やオランダなどの欧米諸国においては、海岸域管理の主流は自然地形を尊重した養浜工法であり、第二次世界大戦以降は構造物による海岸整備はほとんど行われていない。また、2004年スマトラ島沖地震津波により甚大な被害を受けたインド洋諸国においても、観光資源の維持や経済的な理由から海岸保全施設の整備は困難な状況にある。

このような地域に対して、我が国は優れたハードウェア技術で津波防災の支援をすることが可能である。既に多くの研究者や行政の防災担当者が我が国を視察しており、高い評価を得ている。しかし、我が国が建設してきた防災施設は、防災効果は高いが、建設費が膨大で、自然地形を大きく変え、観光資源を損ない、常時におけるデメリットが強い。そのため、国際的には受け入れられておらず、ODAでスリランカなどの途上国に導入されるに留まっている。

すなわち、我が国は優れたハードウェア技術を有しているにも関わらず、その技術を国際社会に提供できないのである。総合的な津波防災ハードウェア技術を開発し、次の世代に受け継いでいくことは、東日本大震災を経験した我々の世代の責任である。

2. 研究の目的

1. を踏まえて、優れた津波防災技術により国際社会へ貢献することを目指し、グローバルスタンダードとなり得る新たな津波防災ハードウェアの提案を本研究では目的とした。提案するハードウェアが備える特徴は以下の通りである。

(1) 住民に過度の安心感を与えない

住民に、海の近くで生活していることを意識してもらい、ハードウェアのみでは完全に防ぎ切れないこと知ってもらい、避難の重要性を認識してもらえるハードウェアとする。

(2) 海域を有効に活用する

ハードウェア整備の自由度が相対的に高い海域を有効に活用して、より湾口近くで津波を減勢させ、湾内に侵入するエネルギー自体を減少させる多重防御とする。

(3) ハードウェアは防災の一部

従来の構造物はそれだけで津波の被害を完全に防ぐことを目標としてきたため、大規模かつ建設費が高額にならざるを得なかった。そのため、津波の危険地帯であるにも関わらず、未整備の地域が多く存在している。また、既に整備された地域でも、想定以上の津波が発生する危険性が絶えず指摘され、改修の要請が多く出されている。しかし、ハードウェアは防災の主役ではなく、一部分にすぎない。そこで、避難などのソフトウェアによる防災との連携を始めから前提として、構造物は津波エネルギーの多くを減衰させる機能に留めた設計とする。これにより、建設費を安価に抑えて、整備率の向上を目指す。

(4) 柔よく剛を制す

従来の構造物は正面から津波とぶつかる（エネルギーを完全反射させる）ように設計されてきた。そのため堅固で大規模な構造物が必要となっていた。そこで流速の方向を変えるなど津波自身の物理的性質を利用して、エネルギーを減衰させる構造物を設計する。

(5) 常時は邪魔にならない

自然地形の改変を少なくすると共に、津波の周期帯のみを選択的に減衰させ、海水交換などの自然環境システムを阻害しない構造物を設計する。すなわち常時は隠れているが、非常時だけ存在を示すハードウェアとする。

(6) 長寿命化

仮に構造物の寿命を 50 年とすると、千年に一度の津波に備えるためには最多で 20 回作り直すことになる。よって、低頻度の災害に備えるためには構造物の寿命をできるだけ長くすることが望ましい。コンクリート構造物の劣化を減らすために、海水中に没しさせ、大気に接しない設計とする。

(7) 国際貢献

津波防災による国際貢献を念頭において、インド洋沿岸の観光地や欧米諸国などの津波危険地域でも導入しやすく、グローバルスタンダードとなり得る設計とする。

3. 研究の方法

2. の特徴を備えた津波防災ハードウェアとして、津波潜堤の開発を行った。研究方法の構成を図 1 に示すが、津波潜堤の津波減勢効果とコンクリート構造物としての力学的性能・耐久性能に関するテーマに大きく分けることができる。前者では、まず従来の潜堤や湾口防波堤など既に設置されている津波対策構造物に関する資料収集および現地調査を実施し、津波潜堤の設計において重要な減勢効果については詳細に調べた。これらのデータを踏まえて、工学的な視点から、津波エネルギーを効率良く減衰させること

のできる幾何学的形状を検討して、津波潜堤の設計を行った。そして、設計した津波潜堤の減勢効果を検討するために、平面水槽を用いた水理実験および三次元数値解析を実施した。なお、水理実験は、模型の製作や予備実験、測定結果のばらつきを踏まえた繰り返し実験など、比較的費用や時間がかかる。そこで、水理実験では津波潜堤の形状と条件を単純なものに絞りこみ、基本的な減勢効果を調べることと、数値解析の検証データを得ることを主な目的とした。一方、数値解析では、水理実験結果を用いて再現性を確認した後、複雑な形状や条件での減勢効果を調べた。また、後者では、コンクリート工学的な視点から、実際に津波潜堤を大水深の海域に建設する場合の各種性能について検討した。

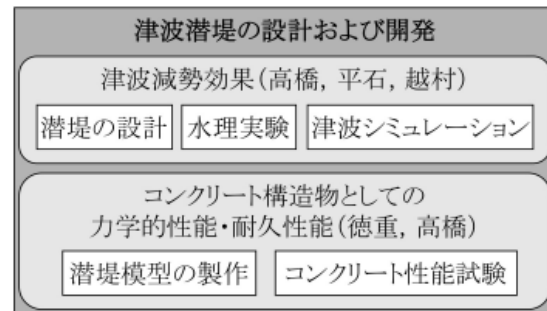


図 1 研究方法の構成

4. 研究成果

(1) 津波潜堤の設計

潜堤(図 2 右)は従来からある技術であり、背後の海面を静穏化して堆砂機能を促進させる効果があるため、海岸侵食の対策として浅海域に建設されている。一般的に形状は単純な台形で、常時は海面下に隠れているよう天端高が低く設計されている。一方、津波潜堤(図 2 左)は津波エネルギーの減衰を目的として、湾口などの比較的水深が大きい場所に建設する。形状としては長い勾配区間を持たせ、水平方向の流速を鉛直方向へ変化させるように設計する。通常の波浪の場合は海面付近のみ水塊は動いているが、津波は長波であるため、海底から海面付近まで全体的に大きな水平方向の流速を持っている。

津波潜堤はこの津波の特徴を利用して、海底付近での流れを鉛直方向に変えてやることによって、水平方向の運動量すなわち岸に向かう運動量を減少させることを目指している。また、津波潜堤は図 3 に示すように、平面的にも岸へ向かう運動量の減少を図っている。具体的には、岸沖方向に進入してきた津波を津波潜堤の先端で分断し、続いて津波潜堤に沿った流れを誘起して沿岸方向へ流速を変化させる。そして、沿岸方向に転じた流れ同士を衝突させることにより、運動量を減少させる。湾口防波堤の場合は完全反射させるため、常時は海水交換を妨げることになるが、津波潜堤の場合は選択的に津波の周期帯にのみ作用するため、常時の自然環境メカニズムへの干渉を抑えることができる。こ

のような津波減勢効果を有する津波潜堤を設計するため、図4に示す基本型を提案した。

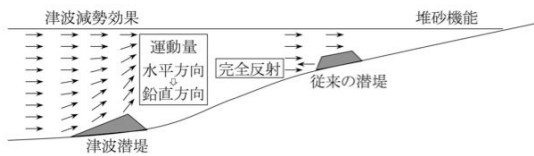


図2 従来の潜堤と津波潜堤

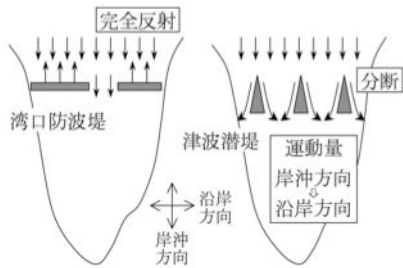


図3 湾口防波堤と津波潜堤

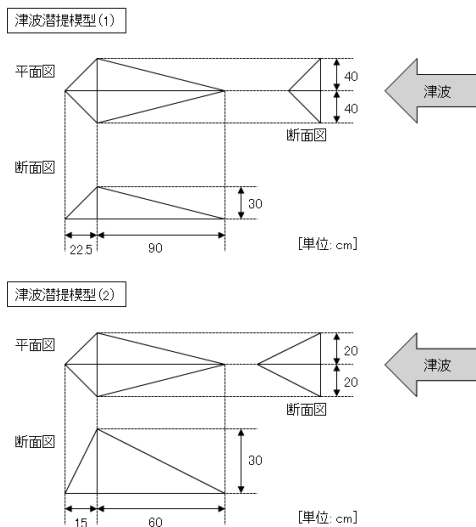


図4 津波潜堤の基本形

(2)津波潜堤の水利実験

水利実験で使用する津波潜堤模型は、以下の点に重点的に配慮して、セメントコンクリートにより製作した。型枠は特注となり、寸法の再現性を実現するために、特に滑らかな脱枠作業を実施するために、型枠の寸法と設置方法について配慮した。作製した型枠を図5に示す。津波実験時の波の影響の観察の容易さを実現するために、使用セメントをホワイトセメントとした。コンクリートの配合は予め透水試験機による透水性の確認を行った結果、一般のコンクリート2次製品用配合(蒸気養生、材例14日で圧縮強度30MPa)で十分適用可能であると判断し、配合を決定した。なお、水セメント比は45%としている。製作した模型を図6に示す。

水利実験には平面水槽(水路長30m×水路幅45m×深さ1.0m)内に仕切りを設置して、5m幅の直線水路を設けた。水路の詳細図を図6に示すが、造波装置の基準位置から3.7m

のところ、潜堤の先端が至るように模型を設置した。模型の形状は、津波潜堤模型(1)を基本として、幅を2倍と3倍にしたものも設置した。また、配置は、単体を基本として、波の進行方向およびそれに直角方向に2基並べたケースを考え、合計9種類の条件で実験を行った。模型縮尺は1/50を想定している。水深は水路底面から30cmであり、ちょうど模型の頂点と水面が一致する高さである。計測器は容量式波高計と電磁流速計を使用し、模型の前方、側方、後方で測定した。

その結果、津波潜堤の尾根線に向かって津波が集まり、側方での津波高が低減(最大で約15%)されることを確認した。しかし、後方では津波高は徐々に高くなり、前面津波高と変わらなくなるため、奥行方向への配置も検討する必要があると考えられる。

(3)津波潜堤の数値解析

津波は長波理論を用いて解析できるが、本研究では津波潜堤周辺の三次元の流れを解析する必要がある。そこで、三次元非圧縮の



(a)津波潜堤模型(1)



(b)津波潜堤模型(2)

図5 津波潜堤模型用型枠

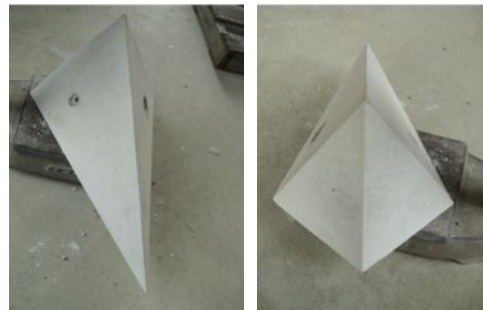
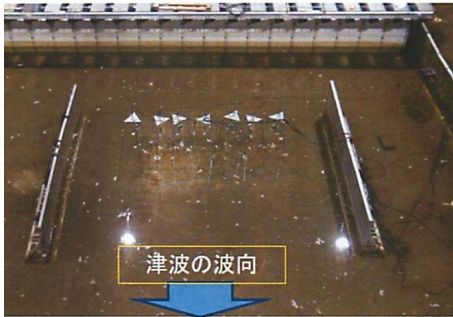


図6 津波潜堤模型外観



4-6 実海域再現水槽内に設置した水路

図7 実験水路(上が平面図, 下が断面図)

Navier-Stokes 方程式と連続の式を支配方程式として、VOF 法で解く CADMAS SURF 3D を使用した。まず、水理実験と同条件で計算を行い、実験結果を再現できていることを確認した(図8)。また、水理実験では測定していない地点での波高と三次元流速を出力した結果、津波潜堤によりY方向の流れが増幅されていることと、当初の予想より鉛直方向の流れが発生していないことを明らかにした。津波潜堤の減勢効果をより高めていくためには、鉛直方向の流れを増大させることが重要になると考えられる。次に、水理実験では検討していない形状や従来の潜堤についても数値解析を実施して、津波潜堤による流況の変化と減勢効果を検討した。

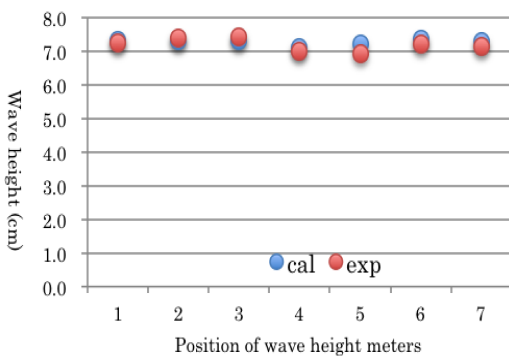


図8 水理実験の再現計算の一例

(4)津波潜堤の実用化

港湾防潮堤や本研究における潜堤の場合、無筋コンクリートとすることが一般的であるが、本研究での模型製造においては脱枠や運搬時の形状維持などのために、鋭角部に多少の配筋が必要であることが明らかとなった。さらに、模型においては認められなかったが、マッシュな躯体となるため、水和に伴う自己収縮、ならびに温度ひび割れの発生が懸念されるために、単位セメント量や使用セ

メントの選定が必要であることも明らかとなった。

今後、実寸法で潜堤を製造する際には、上述した配筋方法、外力に伴う断面力の算定、潜堤表面部の平滑度、ひび割れ発生を抑制するための配合の選定など、課題を解決する必要があることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計19件)

徳重英信, 木村渉, 川上洵, 凍結融解を受ける天然ゼオライトを用いたポーラスコンクリートのスケーリングと変形挙動, セメント・コンクリート論文集, 査読有, 2014, No. 67, pp. 434-440

Koshimura, S., S. Hayashi and H. Gokon, Lessons from the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Disaster, Journal of Disaster Research, 査読有, 2013, Vol.8, No.4, pp. 549-560

Hayashi, S., S. Koshimura, The 2011 Tohoku Tsunami Flow Velocity Estimation by the Aerial Video Analysis and Numerical Modeling, Journal of Disaster Research, 査読有, 2013, Vol.8 No.4, pp. 561-572

鈴木進吾, 河田恵昭, 高橋智幸, 縄文時代早期の大阪湾とその周辺陸域における津波解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 2013, Vol.69, No.2, pp. I_1346-I_1350

高橋智幸, 森下祐, 原口強, 津波に伴う土砂移動による海底地形変化, ながれ, 査読有, 2013, pp. 15-20

平石哲也, 黒田美里, 土橋和敬, 網式消波材の開発と高波・津波対策としての効果, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 2013, Vol.69, No.4, I_1465-I_1470

松田充, 徳重英信, 川上洵, 鈴木弘実, 吸光度と RGB 値を用いた天然ゼオライト混和ポーラスコンクリートのメチレンブルー吸着特性の評価, セメント・コンクリート論文集, 査読有, 2013, No.66, pp. 259-265

Fritz, H.M., D. Phillips, A. Okayasu, T. Shimozono, H. Liu, F. Mohammed, V. Skanavis, C. E. Synolakis and T. Takahashi, 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesenuma Bay using LiDAR, Geophysical Research Letters, 査読有, 2012, Vol.39, L00G23, DOI:10.1029/2011GL050686

Mori, N. and T. Takahashi, Nationwide Post Event Survey and Analysis of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, Coastal Engineering Journal, 査読有, 2012, Vol.54, No.1, DOI: 10.1142/S0578563412500015

Mas, E., S. Koshimura, A. Suppasri, M.

Matsuoka, M. Matsuyama, T. Yoshii, C. Jimenez, F. Yamazaki and F. Imamura, Developing Tsunami Fragility Curves Using Remote Sensing and Survey Data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato, Natural Hazards and Earth System Sciences, 査読有, 2012, Vol. 12, pp.2689-2697

齋藤正文, 高橋智幸, 岩間賢一, 岩寄隼人, 東北地方太平洋沖地震津波による牡鹿半島地方港湾の被害, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 2012, Vol.68, No.2, pp.1_266-1_270

越村俊二, 郷右近英臣, 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 2012, Vol.68, No.2, pp.1_336-1_340

林里美, 越村俊二, 映像解析による2011年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 2012, Vol.68, No.2, pp.1_366-1_370

菅裕介, 越村俊二, 小林英一, 2011年東北地方太平洋沖地震津波による気仙沼湾における大型船舶の漂流・座礁の解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 2012, Vol.68, No.2, pp.1_251-1_255

岸本治, 馬場康之, 久保輝弘, 東良慶, 平石哲也, 2011年東北地方太平洋沖地震津波の観測による田辺湾の共振現象, 自然災害, 査読有, 2012, J. JSNDS 31-2, pp.127-144

徳重英信, 川上洵, 細谷多慶, 松岡智, 秋田県八幡平における高炉スラグ混和セメント系固化体の高温酸性水浸漬試験, セメント・コンクリート論文集, 査読有, 2012, No.65, pp.442-448

松田充, 西山翼, 徳重英信, 川上洵, 鈴木弘実, 天然ゼオライトを用いたポーラスコンクリートのメチレンブルー吸着特性, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 査読無, 2012, V-6

千明祐也, 大谷朋也, 木村渉, 徳重英信, 川上洵, 凍結融解を受ける天然ゼオライトを用いたポーラスコンクリートの劣化挙動, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 査読無, 2012, V-17

中村勇貴, 徳重英信, 川上洵, 岩城アイランドブリッジで暴露したコンクリート供試体の表面塩化物イオン量と飛来塩分, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 査読無, 2012, V-11

[学会発表](計10件)

高橋智幸, 津波防災の今後の技術の方向性-観測, 警報, 防災情報-, 第60回海岸工学講演会前日シンポジウム, 九州大学医学部百年講堂, 2013年11月12日

Koshimura, S., The Impact of the 2011 Tohoku Tsunami Disaster and Implications to Tsunami-resilient

Community -A Case Study in Sendai City (Invited), International Tsunami Symposium, 2013年9月27日

Kumagai, K., T. Takahashi, T. Hiraishi, The basic study on tsunami reduction effect for the structures of submerged breakwater which is of the pyramid type, International Tsunami Symposium 2013, Gocek, Turkey, 2013年9月25-28日

高橋智幸, 観測とシミュレーションを連携させた新たな津波防災, 日本地震工学会防災講習会, 建築会館ホール, 2013年1月24日

高橋智幸, 津波評価および解析手法の現状と課題, 日本原子力学会2012年秋の大会, 広島大学東広島キャンパス, 2012年9月20日

Seto, S., K. Mizuta, R. Hisamatsu, T. Takahashi, Relationship Between Tsunami Sources and the GPS-mounted Buoys In the Nankai Trough, AOGS-AGU(WPGM) Joint Assembly 2012, Singapore, 2012年8月16日

高橋智幸, 津波のメカニズムを探る~来たる巨大地震に備えて, サイエンス映像学会第5回大会, 青山学院大学, 2012年3月27日

Koshimura, S., The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster (Invited), 2011 AGU Fall meeting, San Francisco, 2011年12月8日

Takahashi, T. and the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, Field Investigation and Analysis of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami (Invited), 2011 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2011年12月5日

高橋智幸, 今回の津波の特性, 第58回海岸工学講演会前日シンポジウム, マリオス盛岡, 2011年11月12日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 智幸 (TAKAHASHI, Tomoyuki)
関西大学・社会安全学部・教授
研究者番号: 4 0 2 6 1 5 9 9

(2) 研究分担者

平石 哲也 (HIRAISHI, Tetsuya)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 2 0 3 7 1 7 5 0

越村 俊一 (KOSHIMURA, Syunichi)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号: 5 0 3 6 0 8 4 7

徳重 英信 (TOKUSHIGE, Hidenobu)
秋田大学・工学資源学研究科・教授
研究者番号: 8 0 2 9 1 2 6 9