

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏名</b> (ふりがな)	<b>所属</b>	<b>役職</b>	
	田中 仁 (たなか ひとし)	東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻	教授	
<b>②研究テーマ</b>	名称	土砂移動を伴う河川遡上津波数値計算の高精度化に関する研究		
	政策領域	[分野] 河川技術分野	融合技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)
		[公募課題] 津波河川遡上及び浸水解析手法に関する技術研究開発		
<b>③研究経費</b> (単位: 万円)	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 年度	総 合 計
※端数切り捨て。	1,357	1,121		2,478
<b>④研究者氏名</b> (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名	所属・役職 (※平成 28 年 3 月 31 日現在)			
渡部靖憲	北海道大学大学院工学研究院・准教授			
渡辺一也	秋田大学理工学部・講師			
三戸部佑太	東北大学大学院工学研究科・助教			
<b>⑤研究の目的・目標</b> (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)				
<p>2011 年東日本大震災津波は沿岸域のみならず、河川下流部においても河川管理施設などに大きな被害をもたらした。その後、東北地方の各河川を対象に数値シミュレーションによる再現計算が実施されたが、精度が十分でない河川も見られる。このため、津波の河川遡上に関する数値計算の高精度化が強く求められている。波源域から沿岸域を対象とした津波数値計算技術に関しては、浅水方程式をベースにした標準的な計算法が確立されており、その信頼性が確認されている。これに対して、河川遡上津波に関しては「津波の河川遡上解析の手引き(案)」(財)国土技術研究センター)などの指針が示されてはいるものの、数値計算上の不明な点も多く残されている。そこで、本研究においては上記の既往計算法の問題点を踏まえ、</p> <p>(1) 河口地形変化過程の影響  (2) 非定常底面境界層特性の効果と底質移動への影響  (3) 河道特性に応じた最適格子間隔に関する検討</p> <p>の 3 点に関する検討を行う。これらの要因のうち、(1)、(2) は波源から沿岸域までの津波の伝搬過程においては重要性を持たず、また、(3) は津波の河道への浸入過程において問題点が顕在化する事象である。このため、これまでの海域を対象とした多くの研究においてはこれらの点に関して検討がなされていない。さらに、2011 年東日本大震災津波時に観察された「高水位維持型津波」の発生機構に関する検討を行った。</p> <p>本研究で対象とする検討内容は河川遡上津波に特有、かつ本質的な物理過程であると言える。</p>				

## ⑥研究成果

(様式 A-11と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### 1. 研究の背景・目的

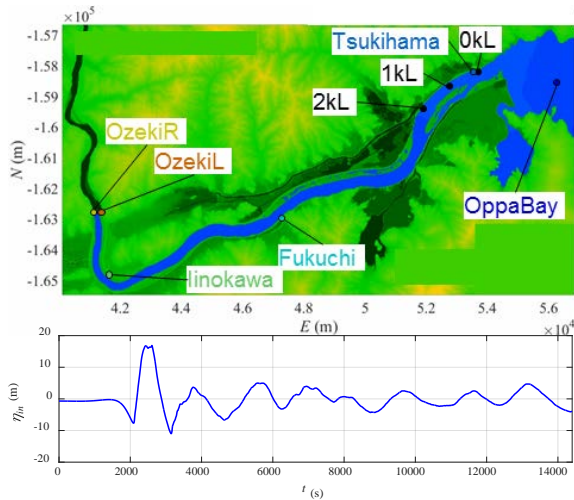


図-1 現地津波再現計算の計算領域（上）と入射波条

2011年東日本大震災津波は沿岸域のみならず、河川下流部においても河川管理施設などに大きな被害をもたらした。その後、東北地方の各河川を対象に数値シミュレーションによる再現計算が実施されたが、精度が十分でない河川も見られる<sup>1)</sup>。このため、津波の河川遡上に関する数値計算の高精度化が求められている。

本研究で計算対象とする北上川は2011年の津波により河口砂州がフラッシュされ、河口部が深く洗掘された。田中ら(2011)<sup>2)</sup>は津波の遡上特性が河口地形に大きく依存することを明らかにしており、津波下で生じている河口地形の変化はその河川遡上特性に大きな影響を与えたことが推測される。

本研究では固定床および移動床の津波数値計算モデルにより国土技術政策総合研究所（以下、国総研）における北上川河川遡上津波実験および2011年東日本大震災津波の北上川河川遡上の数値計算を実施し、実験結果および現地観測値との比較から再現計算精度の検証を行う。本研究では新たに浅水流方程式（Shallow Water Equation, SWE）モデルと $k$ - $\omega$ モデルに基づく境界層流れ数値計算を組み合わせたSCM（Simultaneous Coupling Method）を適用し、底面境界層の非定常性の津波遡上および地形変化過程への影響について検討する。また、適合格子細分化法（Adaptive Mesh Refinement, AMR）を適用した津波数値計算モデルにより同様な津波河川遡上数値計算を実施し、その津波遡上計算への適用性を検討するとともに高度な津波遡上先端部の取り扱いによる計算結果への影響について検討する。また、これらの手法を用いて津波による河川の高水位維持現象に関する水理実験を実施した。2010年チリ地震津波時には潮汐に重畳する形で津波による水位変動が生じた一方で、2011年東日本大震災津波では第一波到達後数時間にわたって潮汐よりも高い水位が維持されたことが確認されている。より河川構造物へ大きな負荷の生じる高水位維持現象の発生機構・条件について検討した。

### 2. 平成27年度の研究内容

まず、SWEモデルとマニング式に基づく底面せん断力による既存手法を用いて国総研実験の再現計算および2011年東日本大震災津波の北上川河川遡上の再現計算を実施し、実験結果および現地観測値との比較からその精度について検討を行った。なお計算は固定床および移動床の双方の条件によって実施し、地形変化による河川遡上計算結果への影響について議論した。ここで、波源域から追波湾までの津波伝播計算を予め実施し、その湾口部への入射波形を境界条件として与えることで、北上川河口周辺の詳細計算を実施した（図-1）。

次に流れの非定常性が強い津波先端部付近における底面せん断力の時間変化を考慮した計算を実施するため、SCM<sup>3)</sup>を適用し国総研実験および2011年津波の再現計算を実施した。この結果をマニング式による底面せん断力を用いた従来手法と比較し、非定常底面境界層による津波河川遡上および河口地形変化への影響を検討した。

また、これと同時にAMR法を適用した津波計算モデル<sup>4)</sup>により、河川部の詳細地形を用いた津波河川遡上計算を行う。カラーファンクション（水域で1、陸域で0）を用いて定義した水陸境界付近に対しAMRにより動的に高解像計算を実施することで、より正確な記述が要求される河岸や津波遡上先端部での動的な高解像計算を可能とした。国総研実験および2011年津波の再現計算を通してその適用性、および津波遡上計算結果への影響について議論する。

また、上述の3つの手法を比較することでSCMおよびAMRをそれぞれ適用した場合の従来手法との差異について議論し、SCMとAMRを組み合わせることによる北上川の津波河川遡上計算への効果について検討した。

## ⑥研究成果 (つづき)

最後に2011年津波の入射波形 (図-1下) の初期水位からの変動分を5, 10, 30, 50, 70%とすることで, 2010年チリ地震津波規模~2011年東日本大震災津波規模の波形を仮想的に作成し, 異なる入射津波規模に対する河川内の水位変動過程の変化について数値実験を実施した. これにより, 潮汐重畳型の水位変動から高水位維持型の水位変動への遷移条件について検討した.

### 3. 研究成果

#### (1) 既存の手法による北上川における数値計算の精度検証

固定床実験の再現計算では, 地形や堤防条件の異なる様々な条件で計算を実施し, そのほぼすべてのケース・地点で実験結果と概ね一致する計算結果が得られた (図-2). 地形変化や引き波のない条件ではあるものの, 従来手法により河口地形や堤防の初期条件に対する津波河川遡上特性の変化を概ねとらえられることが分かった. また移動床条件での2011年津波の再現計算 (図-3) では河口砂州で数mの侵食が生じたが, 実際に2011年津波時に確認されたような河口砂州のフラッシュには至らなかった. 福地観測所における観測値と比較すると, 固定床計算の結果ではやや水位が過大であるが, 波形については概ね再現されている. 一方で移動床計算結果では最大水位がやや小さく, また一波毎の水位変動が小さくなった. 移動床とした堤防部分が越流開始後急速に侵食され, 堤内地を含めたより広範囲に津波が伝播することがこのような水位変動の要因であると考えられる.

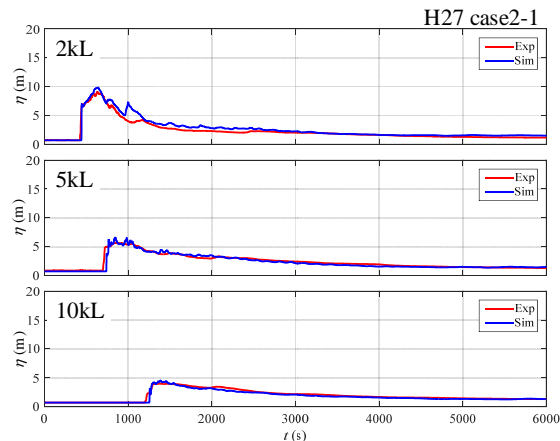


図-2 国総研固定床実験の再現計算結果の例

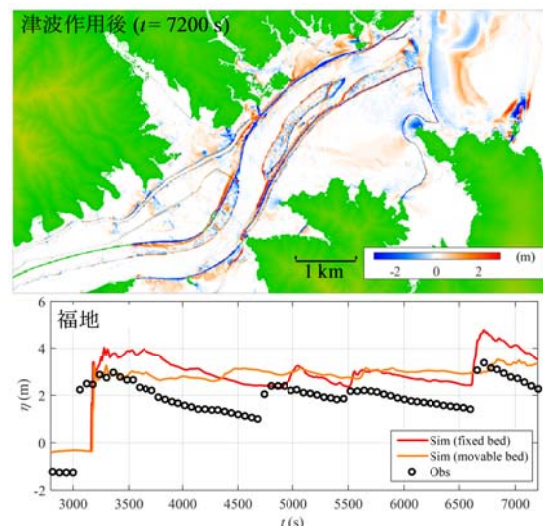


図-3 2011年津波の再現計算結果. 上: 移動床計算による地盤高の変化量, 下: 水位観測値との比較

#### (2) 北上川における非定常底面境界層の効果と底質移動への影響の検討

国総研実験の再現計算にSCMを適用し取得した水平流速および乱流エネルギーの鉛直分布 (図-4) から, 本手法により津波先端付近での急速な境界層の発達過程が妥当に計算されていることを確認した. 固定床での現地津波再現計算結果で従来手法との底面せん断力の分布を比較し, 津波先端部付近で局所的に従来手法の倍程度の大きな底面せん断力を生じていることが分かった (図-5). しかしながら, 先端部の通過後の底面せん断力の変動は従来手法のものと概ね傾向が一致しており, 上流側での水位変動過程にも有意な差が見られなかった. 底面せん断力に差を生じる時間帯が津波先端部の通過時に限られる結果となったため, 移動床計算結果についても従来手法との間に有意な差は見られず地形変化量はほぼ一致し, 底面境界層の非定常性を考慮した場合でも津波による河口砂州のフラッシュが再現されなかった.

#### (3) 北上川の河道特性に応じた最適格子間隔に関する検討

AMRを適用した津波数値計算モデルにより実施した国総研実験および2011年津波の再現計算結果から, カラーファンクションの移流計算により適切に水陸境界位置の変化を捉え高解像計算

## ⑥研究成果 (つづき)

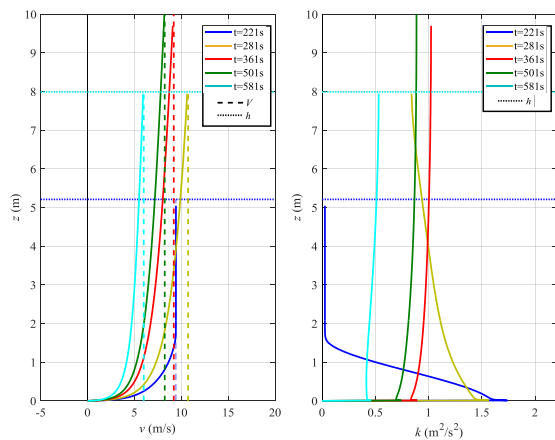


図-4 水平流速と乱流エネルギーの鉛直分布 (河口部)

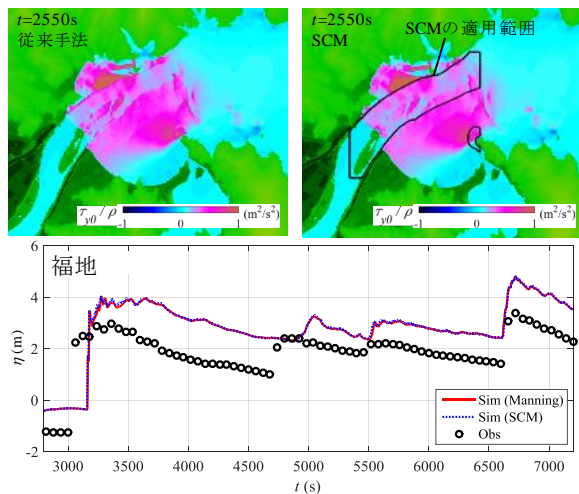


図-5 底面せん断力の東西方向成分(西向き正)の水平分布 (上) と水位観測値との比較 (下)

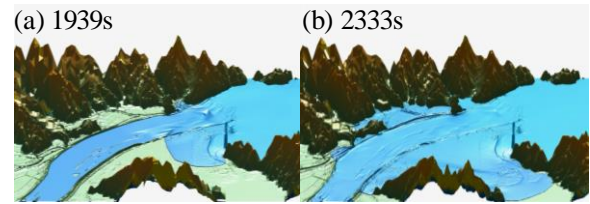


図-6 AMRを用いた2011年津波再現計算結果

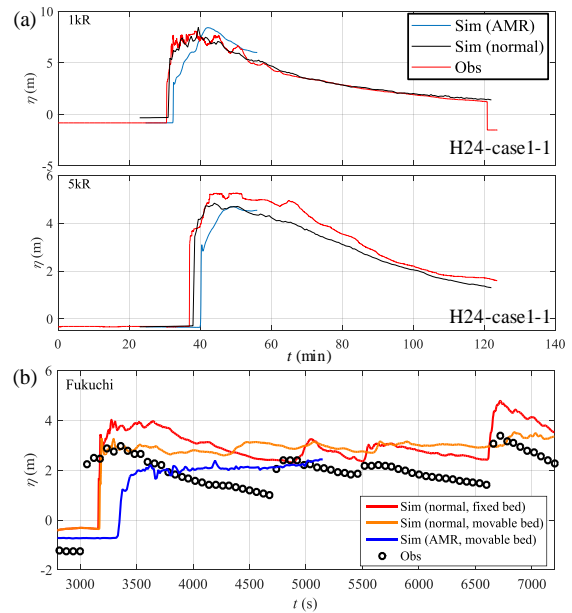


図-7 国総研実験(a)および2011年津波(b)の再現計算結果

一致する良好な結果が得られた (図-7). また2011年津波の再現計算結果について、従来手法と比較して1波目の立ち上がりやや小さいものの、概ね観測値と矛盾のない水位上昇が確認された. また移動床計算による地形変化量や分布の傾向について従来手法とほぼ同等な結果が得られることが確認できた.

### (4) 北上川における底面境界層モデル・AMR法を組み合わせた手法の検討

今回実施した北上川の河川遡上津波の数値計算では従来手法および10mメッシュ地形データにより良好な計算結果が得られることが(1)での検討により確認されている. そのため、AMRにより水陸境界線付近を動的に高解像計算した場合でも計算結果に大きな影響が見られなかった. また前述のとおりSCMと従来手法での底面せん断力の差異は津波先端部通過時のみで大きくその後の変動は概ね一致したため、SCMの適用時にも河川遡上過程や地形変化量に有意な差は認められなかった. したがって今回対象とした北上川における津波遡上計算においてはSCMおよびAMRを組み合わせた場合でも従来手法と概ね一致する計算結果となることが推測される.

### (5) 高水位維持現象の発生機構の検討

各手法により入射津波規模の小さいケースについて計算を行った結果、小規模の津波についても計算手法毎に大きな差異が見られず同様な水位変動が得られることが確認された (図-8). 従来手法により補完的に多くのケースで計算を行った結果 (図-9)、湾内においては初期水位に対し正負に値が変動してい

## ⑥研究成果 (つづき)

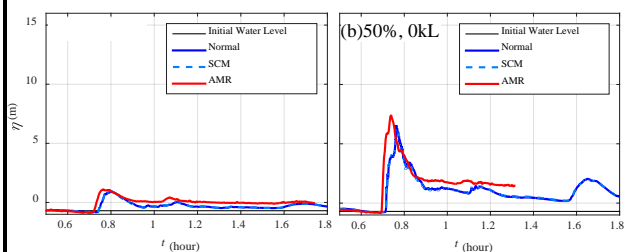


図-8 入射津波規模を2011年津波の10%および50%としたケースの各手法による計算水位時系列の比較

る一方で、河道内においては第一波入射後から高い水位で変動しており、また入射波の規模が大きいほど最大水位到達後の水位低下が遅いことが分かった。入射波の波高が大きくなると河道内への流入量が大きくなるが、河道内地形や底面抵抗の影響を受けやすい引き波時の流出量は波高に対する増加率が比較的小さく、入射波の規模が大きくなるにつれて水位が低下しにくい条件へ遷移することが分かった。

### 4. 今後の展望

SCMの適用により底面境界層の非定常性を考慮した津波数値計算を可能とし、また、AMRを適用することでより精緻な遡上先端部の取り扱いが可能となった。これらの成果は津波数値計算モデルの精緻化へ寄与するものである。しかしながら、これらのモデルを適用した場合でも現地の地形変化は再現されず、底面境界層モデルおよび地形変化モデルの改良は今後の課題である。

### 5. 河川等政策への質の向上への寄与

本研究で得られた成果は、北上川など東日本大震災津波の被災を受けた東北地方の河川の計画を精緻化させることに資するのみならず、今後、高い確率でその発生が予想されている東海・東南海・南海地震津波発生時の河川遡上津波による被害予測・防災計画立案において活用されることが期待される。

### 参考文献

- 1) 福島雅紀, 松浦達郎, 服部 敦: 河川津波の特性把握に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp. L\_261-L\_265, 2013.
- 2) 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, 盧 敏, Nguyen Xuan Dao: 2010年チリ地震津波の東北地方河川への遡上-河口地形と遡上特性との関連-, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 67, No. 4, pp. L\_1627-L\_1632, 2011.
- 3) Adityawan, M.B., Tanaka, H. and Lin, P.: Boundary layer approach in the modeling of breaking solitary wave run up, *Coastal Engineering*, Elsevier, Vol. 73, pp. 167-177, 2013.
- 4) Watanabe, Y. et al.: Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, *Coastal Engineering Journal*, World Scientific, Vol. 54, 1250002, 2012.

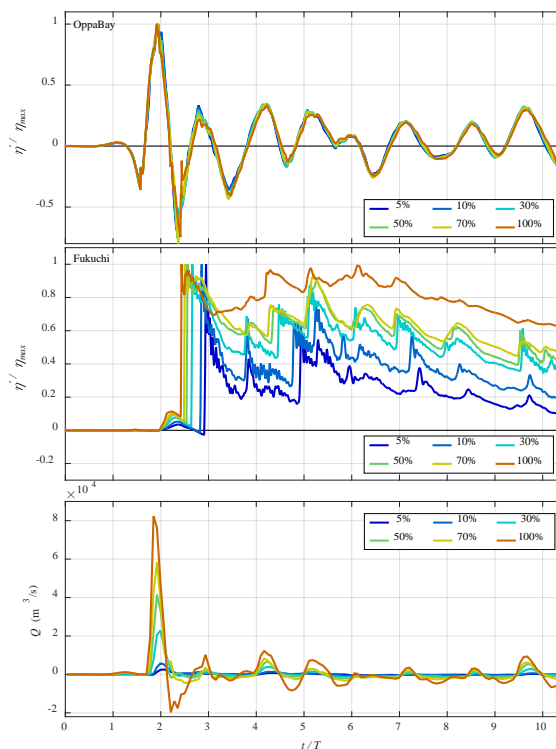


図-9 入射津波規模を2011年津波の5%~100%と変えた条件での湾内・福地観測所の水位時系列と河道内への流入量の時間変化。ただし水位は最大水位、時刻は津波周期により正規化している

## ⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

- 青山恭尚・三戸部佑太・小森大輔・田中 仁: 河川遡上津波の数値計算精度に堤防越流が与える影響, 東北地域災害科学研究, 第52巻, 2016.(印刷中)
- 青山恭尚・M. B. Adityawan・W. Widiyanto・三戸部佑太・小森大輔・田中 仁: 越流・破堤などの堤防条件が河川遡上津波の数値計算精度に与える影響, 平成27年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集, 2016.
- 山中智久・渡辺一也: 北上川周辺を対象とした津波に関する検討, 平成27年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集, 2016.
- 渡部靖憲・大島悠輝: ダムブレイク遡上波の水面形状と運動学的特徴, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.71, pp.43-48, 2015.
- 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, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, 2016 (第一段査読通過) .
- 三戸部佑太・Neetu Tiwari・渡辺一也・田中 仁・渡部靖憲: 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), Vol.72, 2016 (第一段査読通過) .
- 三戸部佑太・渡辺一也・田中 仁・Neetu Tiwari・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, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, 2016 (第一段査読通過) .
- Aoyama, Y., M. B. Adityawan, Y. Mitobe, W. Widiyanto, D. Komori and H. Tanaka: Numerical study on tsunami propagation into a river, J. of Coastal Research, SI, Vol.75, pp.1017-1021, 2016.
- Oshima, Y., H. Oyaizu and Y. Watanabe: Surface forms and local flows of run-up waves, Proc. Int. Symp. On Measurement techniques for Multiphase Flow, p191, 2015.
- Tanaka, H., M. B. Adityawan, Y. Mitobe and W. Widiyanto: A new computation method of bottom shear stress under tsunami waves, J. of Coastal Research, SI, No.75, pp.1247-1251, 2016.
- W. Widiyanto, M. B. Adityawan, H. Tanaka and Y. Mitobe: Numerical simulation of dam break flow, 平成27年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集, 2016.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

### 【基調講演・招待講演】

- 2015/9/15 神戸大学 重点研究「地震・豪雨等自然災害に関する防災・減災戦略」(代表: 飯塚 淳教授)に関するセミナーでの招待講演 “Impact of the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami on Coastal and Estuarine Environments”
- 2016/8/1日-2日(予定). 3rd ICEEDM (International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation)での基調講演, “Numerical simulation of shallow water waves with bottom boundary layer development” (インドネシア・バリ)
- 2016/11/20日-23日(予定) 3rd International Conference on Coastal Zone Engineering and Management in the Middle East (アラブ首長国連邦, ドバイ)での基調講演 “New approach for shallow water modeling considering development of bottom boundary layer”

### 【テレビ放映】

- 2016/02/28 テレビ朝日放映「災害列島 奇跡の救出 カメラが捉えた真実!!」(津波の河川遡上現象について, 本研究の成果も含めた最新の知見をもとに解説.)

### ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

無し。

### ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

河川内津波および氾濫流に対するAMRの適用について、その有効性が確認された。地形変化については使用されたモデルで計算された変動量が微小であるとの結果であったために、今回の計算においては水理計算と地形変化計算が完全にカップリングされたものにはなっていないが、AMRに土砂移動を組み合わせた解法のフレームワークは確立されたので、今後の方向性が示された。

### ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

現地の土砂移動に関しては現地の現象を十分には表現できなかったが、AMRによる計算について、実務的にも十分に使用出来ることを示すことが出来た。また、2011年東日本大震災津波時に観察された「高水位維持型津波」の発生機構に関する成果は、今後、河川管理施設の外力条件設定に当たって有意義な知見を提供する。

今後、国土技術政策総合研究所において「河川遡上津波の数値計算マニュアル」に本計算の手法を記載し、実務への反映を図っていくことになっている。