

直立護岸を遡上越流する段波津波の特性と 浸水深および流速の制御について

CONTROL OF INUNDATED WATER DEPTH AND FLOW VELOCITY WITH
USING A VERTICAL TIDE BARRIER AGAINST TSUNAMI ATTACK

村上啓介¹・村上真章²・山口俊郎³

Keisuke MURAKAMI, Masaaki MURAKAMI and Toshiro YAMAGUCHI

¹正会員 博士(工学) 宮崎大学 工学部土木環境工学科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

²学生員 宮崎大学 大学院工学研究科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

³学生員 宮崎大学 大学院工学研究科(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

The reduction of an inundated water depth and flow velocity by a vertical tide barrier, which is installed in order to higher a crown height of an existing seawall against tsunami attack, was investigated through physical model tests. The inundated water depth and flow velocity behind the barrier were measured with changing a barrier height as well as a tsunami height. An elevated seawall with the vertical tide barrier effectively reduces the inundated water depth, and its efficiency depends on the tsunami height as well as the barrier height. On the other hand, reduction effect on the inundated flow velocity is extremely small compared to the inundated water depth. When the vertical barrier is installed retreated landward position, control functions of the tide barrier on inundated water depth and flow velocity are nearly same as the functions where the barrier is installed at the tip of the seawall, though the run-up height of tsunamis in front of the barrier is extremely reduced.

Key Words: *Tsunami, tide barrier, vertical seawall, inundated water depth, inundated flow velocity*

1. はじめに

津波被害は我国沿岸でくり返し発生しており, 沿岸部は津波災害に対して脆弱な状況にある¹⁾. また, 将来には東海, 東南海, および南海地震の発生が危惧され, これらの地震による津波被害が想定されるとともに, 被害軽減のあり方が検討されつつある²⁾. 我国の社会活動の中心的な部分は沿岸部に集中している. また, 過去の津波被害が我国沿岸各所で発生していることや¹⁾, 上記の津波被害想定区域²⁾は関東から九州に至る沿岸域が対象になっていることを考えると, 防護が必要な海岸線は非常に長く, 津波災害から沿岸域を効率的に防護してゆく方策の確立が課題となる.

過去に津波被害を被った沿岸地域では, 津波による浸水を防ぐ目的で津波防波堤, 水門, あるいは陸閘等の施設整備(ハード対策)が進められている. また, 被害の最小化を図る目的から, ハザードマップを作成して適切な情報提供と円滑な避難の実施をおこなうための対

策(ソフト対策)も併せて進められつつある³⁾. このように, ハード面の対策とソフト面の対策を効果的に組み合わせることで被害の軽減を図る取組みは重要である. ただし, 防護が必要な沿岸は広範囲に渡り, その沿岸域に対して施設整備を網羅的に適用することは事業の効率性や経済性の観点から困難と思われる.

津波防災を目的とした施設整備では, 既往最大の津波や想定津波を対象に, 津波防波堤, 水門, あるいは陸閘等を適切に配置して津波の進入を阻止することに重点が置かれてきた⁴⁾. 一方, 広域を対象に津波被害を軽減するためには, 津波の進入を阻止するための施設整備だけではなく, 津波の第一波を止める, あるいは浸水深や浸水流速を低減できる対策工を整備して, 適切な情報提供と避難の実施(ソフト対策)とを組み合わせることで対応する方策も有効と考えられる⁵⁾. すなわち, 既存の護岸や高潮堤を補強・嵩上げして, あるいは新設して上述の機能を確保することができれば, 既存ストックを有効に活用できることを含めて効率的な対応が可能となる.

本研究は、段波状の津波が沿岸部に来襲する場合を想定し、津波が護岸を越流する条件のもとで、護岸天端を嵩上げすることで津波の遡上による浸水深や浸水時の流速をどの程度低減できるのかを水理模型実験により明らかにすることを目的に実施した。

本研究では、模型縮尺が1/50程度を想定して実験をおこなった。まず、水路の下流端から約1.5mの地点に高さ8cmの護岸模型を設置し、天端の嵩上げがない条件のもとで護岸前面での段波の打上げ高さ、護岸上を越流する際の浸水深と浸水流速を計測した。実験では、護岸

つぎに、天端を嵩上げすることによる浸水深と浸水流速の制御効果を検討する目的で、護岸上に直立壁を設置して実験をおこなった。直立壁の高さは、 $d=3\text{cm}$ と 6cm の2通りとした。また、直立壁の位置は、護岸先端部に設置する場合 ($W=0\text{cm}$) と、比較のために陸側に引いて設置する場合 ($W=40\text{cm}$) の2通りとした。直立壁前面での打ち上げ高さは、直立壁を護岸先端部に設置した場合はW3の位置の波高計で、また陸側に引いた位置

表-1 実験ケース

護岸高さ	8cm
上流側水深 (h_1)	最大約30cm
下流側水深 (h_2)	2, 4, 6cm
直立壁高さ (d)	0, 3, 6cm
直立壁の位置 (W)	0, 40cm

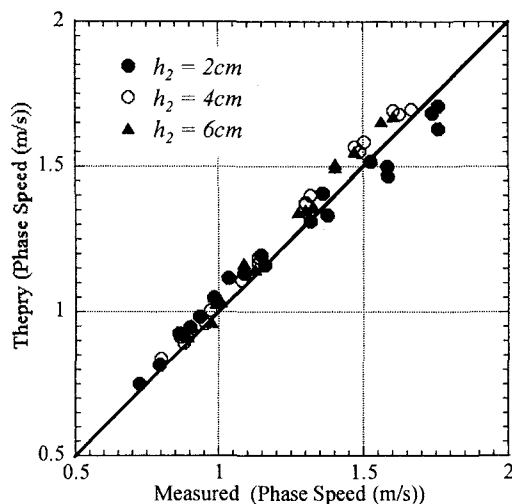


図-3 波速に関する実験値と理論値の比較

に設置した場合はW4の位置の波高計で計測した。直立壁背後の越流水深と流速は、直立壁の設置位置に応じてW4とV1、あるいはW5とV2の位置に設置した波高計と流速計で計測した。以上の実験ケースを表-1にまとめて示す。

(2) 波速に関する実験と理論の比較

実験手法の妥当性を確認する目的で、本実験で計測した波速を、福井ら^{6), 7)}が提案したモデル式から計算した波速と比較した。福井らは水路内を伝播する段波に対して連続条件と運動量法則を適用して式(1)の関係を導き、実験値と比較して良好な一致を確認している。

$$c = \sqrt{\frac{gH(H+h_2)}{2(H-\eta H_1)}} \quad (1)$$

ここで、 c は波速、 H_1 は段波の波高、 H は段波の全水深、 h_2 は段波前面の水深、 g は重力加速度である。また、 η は抵抗係数で、福井ら⁶⁾に従い h_2/H の関数として与えた。

図-3は、本実験で得られた波速と式(1)で算定した波速の相関を示したものである。前面水深 h_2 が異なる各実験ケースにおいて、式(1)で計算した波速は実験値を若干上回る傾向があるもののその差は極めて小さく、本実験で計測した波速と式(1)で算定した波速は良好に一致していることが確認できる。

3. 直立壁前面での段波の打上げ高さ

図-2に示すように、発生した段波は水路内を伝播

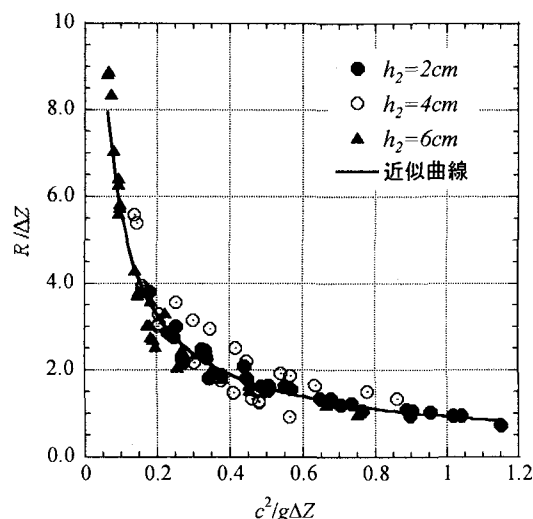


図-4 最大打上げ高さの特性

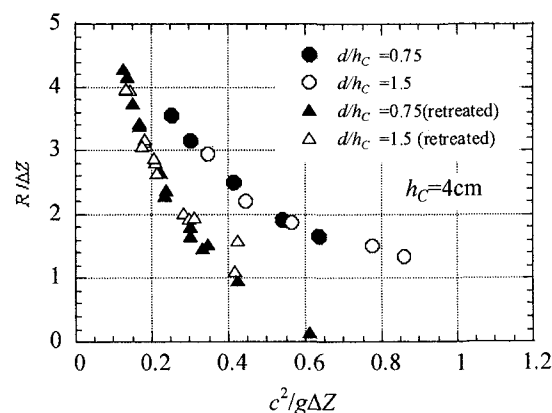


図-5 段波の最大打上げ高さの比較

して直立壁の前面で大きく打上げられて(図-2上段の太線: W3)護岸上を遡上する。この打上げ高さは段波の波速や護岸天端高さに応じて変化する。ここでは、直立壁前面での段波の最大打上げ高さについて検討した。

来襲する段波が持つ運動エネルギーの一部が位置エネルギーに変わると考え、段波の最大打上げ高さ R と波速 c の2乗との関係を整理し、嵩上げ後の天端高さ ΔZ (図-1において $\Delta Z = h_c + d$: 以下、直立壁の設置位置によらず ΔZ を嵩上げ天端高さと呼ぶ)に応じて打上げ高さは波速の2乗に比例する関係を確認した。この関係をもとに次元解析をおこない、相対打上げ高さ $R/\Delta Z$ を無次元パラメータ $c^2/(g\Delta Z)$ によって整理したものを図-4に示している。図-4は、護岸前面水深 h_2 が異なる各条件において、護岸先端に設置した直立壁の高さが $d=0, 3, 6$ cmの全ての結果をプロットしたものである。図中には全プロットに対する近似曲線も併せて示している。近似曲線と実験値の相関係数は0.97と高く、直立壁前面での打上げ高さ R は、来襲する段波津波の波速 c と嵩上げ天端高さ ΔZ から推定できる。

同様の関係は、直立壁を陸側に引いて設置した場合についても言えるが、最大打上げ高さは直立壁を護岸先端に設置した場合よりも格段に低くなる。このことを

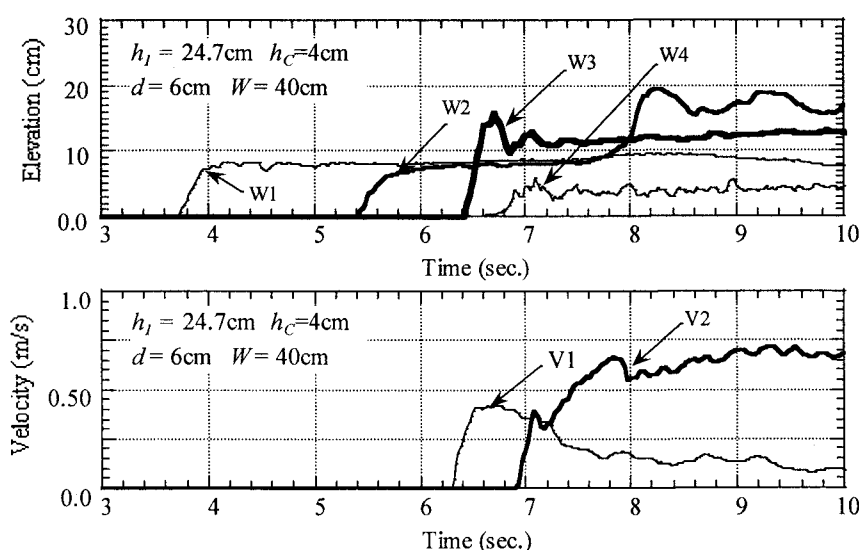


図-6 計測波形の一例（上段：水位変動，下段：流速変動， $h_c=4\text{cm}$ ， $d=6\text{cm}$ ， $W=40\text{cm}$ ）

示した一例が図-5である。護岸に到達した段波のエネルギーの一部は反射波として沖側に伝播するため、直立壁を陸側に引いた場合の段波の打上げ高さは、直立壁を護岸先端に設置した場合に比べて格段に低くなる。このことは、護岸前面水深 h_2 が異なる他の実験ケースについても同様であるが、嵩上げ前の護岸天端高さ h_c が低い場合には、反射波として沖側に伝播する波のエネルギーの割合が相対的に低下するので、打上げ高さの設置位置による違いは小さくなる傾向にある。

4. 護岸天端の嵩上げによる浸水深と流速の制御効果

松富ら⁸⁾は、津波が陸上遡上する際の浸水深と流速が家屋被害の程度におよぼす影響について実験的に検討している。また、水中歩行実験によって、洪水時の浸水深と流速が安全な避難行動にとって重要な指標となることが示されている⁹⁾。これらの結果より、浸水深や浸水流速を低減することは、津波被害の軽減や安全な避難にとって非常に重要であることが読み取れる。ここでは、護岸天端の嵩上げによって浸水深と流速がどの程度低減できるのかを検討した。

(1) 護岸天端の嵩上げによる浸水深の制御効果

図-6は、護岸天端高さが $h_c=4\text{cm}$ の場合について、上流側的水深 h_1 を約25cmとしたときの各波高計で計測した水位変動（上段）と各流速計で計測した流速変動（下段）の一例を示したものである。高さが $d=6\text{cm}$ の直立壁が $W=40\text{cm}$ の位置に設置されており、直立壁を越流した後の水位変動は図-6上段のW4に相当する。

まず、段波は直立壁前面で打上げられた後に全幅堰を越流する様な状況で背後に浸水する。その後は、徐々に直立壁背後の水位が上昇し、最終的には潜り堰を越流する様な流況に変化して定常状態となる。したがって、直立壁背後の水位上昇は、W3で計測した水位変動

の急激な立ち上がりには比べると緩やかであり、徐々に立ち上がった後に若干のピークを取ってほぼ一定の水位を維持している。他の実験ケースについても同様な変動を示していた。本実験では最大水位が生じた前後の10データを読み取って、その平均を浸水深とした。

図-7は、護岸天端高さが $h_c=4\text{cm}$ の場合について、天端の嵩上げによる浸水深の低減効果を示したものである。浸水深は段波波高で無次元化し（ h/H_1 ）、波速に関する無次元パラメータ $c^2/(gh_2)$ で整理して示している。天端の嵩上げがない場合（ $d/h_c=0$ ）は、浸水深は波速の増大（段波波高の増大）とともに増加し、波速に関するパラメータ $c^2/(gh_2)$ が2程度を超えると（段波波高が護岸天端よりも高くなる程度）、浸水深は段波波高とほぼ同程度の値（ $h/H_1=1$ ）を示している。これに対して、 $d/h_c=0.75$ 、 1.5 に示すように、浸水深は天端の嵩上げによって大きく低減される。図-7の場合では、天端の嵩上げによる浸水深の低減率は、段波波速が小さい範囲では5割程度であり、波速の増大（段波波高の増大）とともに3割程度に変化している。

図-8は、護岸天端高さが $h_c=2\text{cm}$ の場合について示

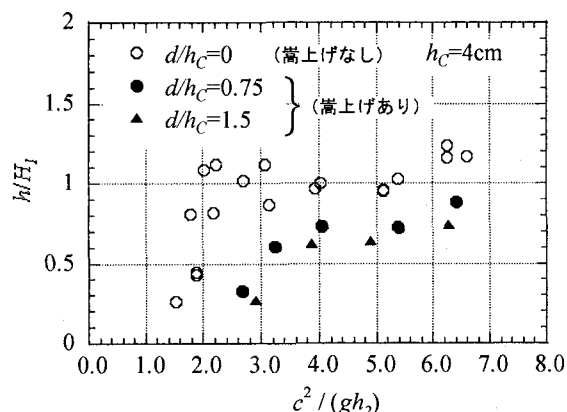


図-7 嵩上げによる浸水深の低減効果（ $h_c=4\text{cm}$ ）

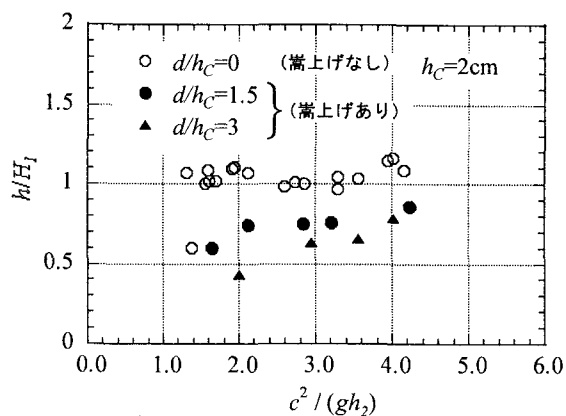


図-8 嵩上げによる浸水深の低減効果 ($h_c=2\text{cm}$)

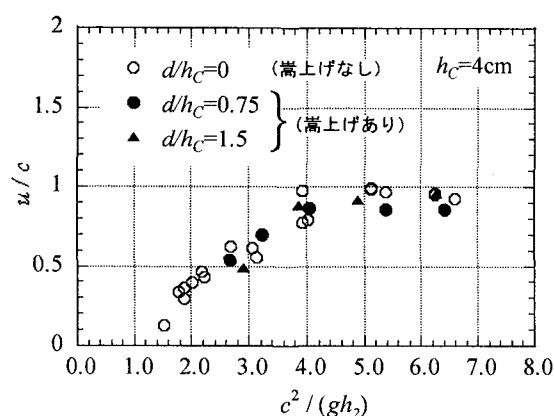


図-10 嵩上げによる流速の低減効果 ($h_c=4\text{cm}$)

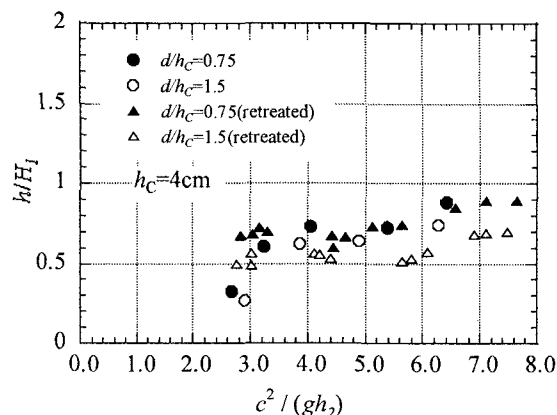


図-9 直立壁の設置位置の違いが浸水深におよぼす影響について ($h_c=4\text{cm}$)

したものである。護岸天端の嵩上げによる浸水深の低減特性は図-7と同様であり、おおよそ5割～3割程度の低減率を示している。一連の実験結果より、護岸天端高さに対する嵩上げ量の比 d/h_c が大きいほど、浸水深の低減効果は高くなる。ただし、低減率は嵩上げ比に対して必ずしも比例関係にはなく、また、低減率は段波波高に対する嵩上げ天端高さの比によっても若干異なる。

図-9は、護岸天端高さが $h_c=4\text{cm}$ の場合について、直立壁の設置位置による浸水深の違いを示したものである。図-5で示したように、直立壁を陸側に引いた場合の直立壁前面での打上げ高さは、護岸先端に設置した場合に比べて格段に低くなる。これに対して図-9に示す浸水深の場合、直立壁を陸側に引くことによって水深は若干浅くなる傾向が見られるものの、その違いは打上げ高さの場合ほど明確ではない。護岸天端高さが異なる他の実験ケースについても同様の結果となり、直立壁の設置位置が浸水深の低減効果におよぼす影響は僅かであることを確認した。

(2) 護岸天端の嵩上げによる浸水流速の制御効果

直立壁の背後における流速変動は図-6下段のV2に相当する。越流後の流速は、W4における水面変動と同様に緩やかに立ち上がり、最大流速値を取った後に若干

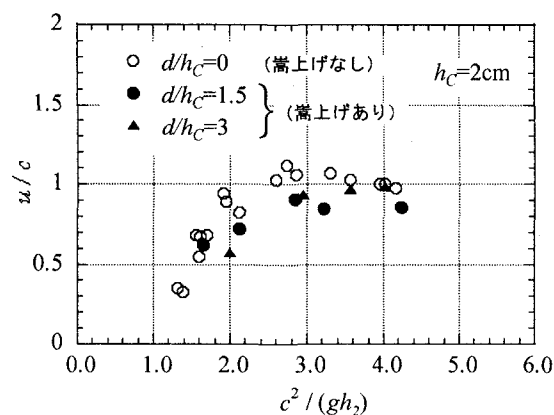


図-11 嵩上げによる流速の低減効果 ($h_c=2\text{cm}$)

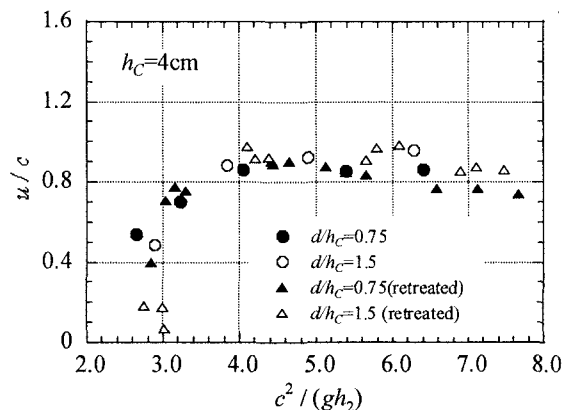


図-12 直立壁の設置位置の違いが浸水流速におよぼす影響について ($h_c=4\text{cm}$)

変動しながらほぼ一定の値を維持している。本実験では、最大流速が生じた前後の10データを読み取り、その平均を浸水流速とした。図-6下段には、直立壁の前方(V1)における流速変動を併せて示している。流速は段波が到達した時点から加速して最大値を取った後に、潜り堰の流況に至るまでの過渡的な状況で徐々に減速し、その後は一定値に収束している。

図-10は、護岸天端が $h_c=4\text{cm}$ の場合について、天端の嵩上げによる浸水流速の低減効果を示したものであ

る。浸水流速は段波の波速で無次元化し (u/c : 流速波速比), 波速に関する無次元パラメータ $c^2/(gh_2)$ で整理して示している。天端の嵩上げがない場合 ($d/h_c=0$) は, 流速波速比は段波波速の増大 (段波波高の増大) とともに単調に増加し, おおよそ $u/c=1$ に収束する傾向を示している。これに対して, 天端を嵩上げた場合の流速について見ると, 段波波速に対する流速比の変動特性は天端の嵩上げがない場合と同様であり, その値も嵩上げがない場合に比べて僅かに低減するかほぼ同等の値を示している。

図-11は, 護岸天端が $h_c=2\text{cm}$ の場合について同様に示したものである。図-10に示した実験条件よりも護岸天端高さに対する嵩上げ量が大きいため, 天端の嵩上げによって流速波速比は1割程度低減している。ただし, 図-8に示した浸水深の低減効果と比較すると, 護岸天端の嵩上げによる浸水流速の低減効果は小さい。

図-12は, 護岸天端高さが $h_c=4\text{cm}$ の場合に, 直立壁の設置位置による浸水流速の違いを示したものである。図-9で示した浸水深の場合と同様に, 直立壁の設置位置による浸水流速の違いはほとんど見られない。このことは護岸天端高さが異なる他の実験ケースについても同様であり, 浸水流速については直立壁の設置位置による有意の差はないことを確認した。

5. まとめ

本研究では, 津波が護岸を越流する条件のもとで, 護岸天端の嵩上げによる津波浸水深と浸水流速の制御効果を水理模型実験により検討した。本実験で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 段波の最大打上げ高さは, 嵩上げ天端高さに応じて波速の2乗に比例する関係にあり, 段波の波速と嵩上げ天端高さから打上げ高さが推定できる。段波の打上げ高さは直立壁の設置位置によって大きく異なり, 直立壁を陸側に引いて設置することにより打上げ高さは大きく低減される。
- 2) 護岸天端を嵩上げすることにより背後の最大浸水深は低減される。護岸天端高さに対する嵩上げ量の比が大きいかほど浸水深の低減効果は高くなる。ただし, 低減率は嵩上げ比に対して必ずしも比例関係にはなく, また, 低減率は段波波高に対する嵩上げ天端高さの比によっても若干異なる。

- 3) 護岸天端の嵩上げによる浸水流速の低減効果は, 浸水深の低減効果に比べて極めて小さく, 天端の嵩上げによる浸水流速の制御は難しい。
- 4) 直立壁を陸側に引いて設置することにより浸水深は僅かに浅くなる傾向にあるが, その程度は打上げ高さの場合に比べて極めて小さく, 直立壁の設置位置による浸水深の違いは僅かである。
- 5) このことは, 浸水流速に関しても同様であり, 浸水流速については直立壁の設置位置による有意の差はない。

謝辞: 本研究を実施するにあたり, 宮崎大学学内共同研究 (平成16年度宮崎大学学長裁量経費「特色ある大学づくり」 (代表: 原田隆典)) からの支援をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺偉夫: 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 1998.
- 2) 内閣府中央防災会議: 東南海, 南海地震等に関する専門調査会資料 (第14回) <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index.html>, 2003.
- 3) 内閣府 (防災担当), 他: 津波・高潮ハザードマップマニユアル, (財)沿岸開発技術研究センター, 2004.
- 4) 土木学会: 海岸施設設計便覧, 丸善(株), 2000.
- 5) T. Takayama: Countermeasures against TSUNAMIS in future, International Workshop on Tsunami Disaster Mitigation in Kobe 2005, pp. A1-A10, 2005.
- 6) 福井芳郎, 白石英彦, 中村充, 佐々木泰雄: 津波の研究 (I) 一段波津波の波速について一, 第9回海岸工学講演会講演集, pp.44-49, 1962.
- 7) 福井芳郎, 白石英彦, 中村充, 佐々木泰雄: 津波の研究 (II) 一段波津波の堤防におよぼす影響一, 第9回海岸工学講演会講演集, pp.50-54, 1962.
- 8) 松富英夫, 首藤伸夫: 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集 第41巻, pp.246-250, 1994.
- 9) 利根川研究会: 利根川の洪水一語り継ぐ流域の歴史一, (株)山海堂, 1995.