

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 22 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651197

研究課題名(和文) 波の干渉により津波を消散させる「双胴型」防波堤の設計開発と数理モデルの構築

研究課題名(英文) Development of novel breakwater "biplane" technology dissipating tsunami energy

研究代表者

奥村 弘 (Okumura, Hiroshi)

富山大学・総合情報基盤センター・講師

研究者番号：30355838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で開発した双胴型防波堤は、波を堰き止めることなく、特有の反射現象によって透過波を減衰させることができる。また、双胴型防波堤の消波効果は、構造体のサイズに依存せず有効である。このため、津波や高波に適切な配置と構造物としての耐久性を満たせば、あらゆる海岸や港湾、そして原発などの重要拠点を津波から守ることができる。従来の防波堤では想定する波を堰き止めるためにその高さや規模が肥大化し、海水の循環を妨げるなど自然環境の破壊が問題となっている。従来の防波堤に散見するこれら諸問題を大きく緩和させる未来型の防波堤として「双胴型」防波堤は大きな可能性があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We have successfully developed a new fuselage breakwater "biplane" to dissipate drastically both height and energy of Tsunami waves not by damming water but reflecting waves tactically. This paper presents the concept of fluid mechanical design with respect to the new fuselage breakwater "biplane" and its feature of wave reflection mechanism. In this research, we report a wave-absorbing property of the proposed breakwater and its efficiency by conducting verification of both tank and numerical experiments. Our knowledge and the theory obtained from this research are rich in novelty and very useful for the future coastal engineering and tsunami prevention.

研究分野：計算科学

キーワード：津波防災 津波減災 防波堤 計算流体力学 海岸工学 流体力学

1. 研究開始当初の背景

今日、日本を初め、世界的にも巨大津波に対する有効な防災技術が切望されている。本研究では、波の「干渉」を有効利用することにより、新しい観点から津波の高さや威力を大幅に低減することのできる未来型の防波堤とその設計手法の確立を目的とする。この研究の発端は、2011年3月11日の東日本大震災である。東北地方の太平洋側の広範囲な海岸では三陸沖に発生した巨大津波が、日本国土に対し甚大な被害を与えた。このとき、岩手県釜石港に設置された世界最大の津波防波堤は、この津波によって半壊され、その機能をほとんど発揮することができなかった。また、破壊を免れた防波堤箇所では、津波はやすやすと越波・越流し、その破壊力が弱まることなく陸上に遡上していった。つまり、従来型の「波をせき止める」防波堤では、大きな津波を弱め防ぐことができないのである。一方、複雑な湾形状を有する松島湾内の海岸周辺では、東北地方における他の海岸と比較するとほとんど被害を受けていないことが、震災後の調査で分かっている。(松島から東に数 km 離れた東松島市では 1000 人も犠牲者と津波による家屋等の倒壊が確認されたが、松島湾奥の松島では死者は 2 人で若干の浸水による被害があったことが確認されている。)

2. 研究の目的

(1) 2011年3月11日、東日本大震災では巨大津波の発生により三陸海岸を中心に広汎な太平洋側海岸線に甚大な被害を被った。これら被災地域の復興のためには安全の確保が第一に求められる。そこで生活する人々が安心して日常生活を行えるよう防災環境を整備する事が大変重要である。主要な防災環境の一つが津波対策である。本研究は新しい観点からの津波の高さや威力を大幅に低減することのできる防波堤の提案と設計手法の確立を目的とする。提案する防波堤は図1に示すような、波動の干渉を利用して津波のエネルギーを消散させる「双胴型」防波堤である。超音速流において波動抵抗の画期的低減が行えるとされるブーゼマン複葉翼と、波の「干渉」を有効利用し波のエネルギーを低減することで非常な高速化を実現した船舶「双胴船」に共通した「双胴」の流体力学的形状に着目した。一見、超音速流と津波は結びつかないと感じられるが、実は超音速流と陸地近くの海底が浅い場所の流れは、類似な流体方程式で表現できるのである。研究代表者はそれらの流れ場の類似性は既に簡単な計算により確認している)。本研究の成果は東日本大震災の復興に役立つとともに、津波に対する防災技術として日本および世界に向かって発信できる技術の基礎となると考えている。

(2) 我々は新しい発想「波を「堰き止める」のではなく、「tactical」に「反射」させると

いう発想 - から孤立波(津波の性質と似た性質の波。つまり、津波は一種の初期値問題であり、孤立波と仮定しても差し支えない)の波高とエネルギーを弱めることのできる新しい防波堤の基礎的な研究開発する。本研究では、この提案する防波堤の流体力学的デザインのコンセプトと特有の反射メカニズムを述べ、水槽実験とシミュレーションの両方により検証にした新型防波堤の消波特性と有効性を報告するものである。また、この研究により得られた知見と理論は新規性に富み、今後の海岸工学や津波防災に有用である。

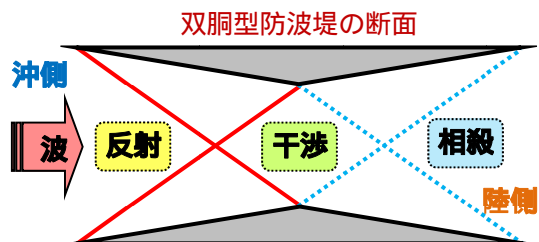


図1. 津波を消散させる双胴型防波堤の断面配置と波の相殺効果

沖合で発達した巨大津波は、海岸線に設置された何組かの「双胴型」防波堤の働きで防波堤内側の港湾・海岸では波が静穏化される。波を堰き止めるのではなく干渉で波を弱めるという発想は新しく、津波防災のイノベーションに成り得るといえる。津波は、基本的にスネルの法則により、どのように複雑な地形に対しても海岸線に垂直に波が到来するので、海岸線に垂直に設置した「双胴型」防波堤は津波をより効果的に消散することが出来る。この点は、迎角を考慮する航空工学や船舶工学とは異なっている。従来の防波堤では想定する波を堰き止めるためにその高さや規模が肥大化し、海水の循環を妨げるなど自然環境の破壊が問題となっている。また防波堤によって海洋景観が遮断されるといった「海の見えない海岸」の景観損失は近隣住民や観光産業にとって大きな問題であった。従来の防波堤に散見するこれら諸問題を大きく緩和させる未来型の防波堤として「双胴型」防波堤は大きな可能性があり、学術的にも産業利用上の観点からも卓越した成果が期待できる。なお、2体以上からなる複数組のブーゼマン型堤防を設置する場合には「複胴型」防波堤として、広範囲な海岸域においても有効な津波防災および減災技術となりうる。

3. 研究の方法

これまでの研究において、複雑な海岸線においても高精度に津波・高波を予測することができる CFD (Computational Fluids Dynamics: 計算流体力学) シミュレータを開発している。また、津波が防波堤に衝突し、遡上しながら越波する 3 次元的な自由表面流

れ（海や河川の流れ）のシミュレーションを高精度に行うCFD技術を開発している。その結果、津波について次の知見を得ている。津波は通常の海の波では無く高速流体の塊である。例えば、水深が約4000mで発生した津波の時速は約720kmである。このような津波は通常の防波堤では堰き止めることが出来ず防波堤を越波する。越波した津波は防波堤衝突時よりもさらに勢いを増し、陸地内にその破壊力を増幅させながら氾濫することが分かった。本研究では、この3次元自由表面流れシミュレータを用いることで、任意の形状を持たせた「双胴型」防波堤が受ける津波の流体現象を精緻に算出する。そして、双胴による波の干渉現象を解析し、津波減衰のメカニズムの数理モデルを構築・検証する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、松島湾の湾形状とその湾口に配置された島々の形状に、津波の破壊力を弱める何らかのヒントが隠されていると確信し、新型防波堤の断面形状デザインの着想を得た。なお、ここでは議論をシンプルにするために、波の表面張力、乱流粘性、摩擦は無視できるものと仮定する（この仮定はブジネスク方程式の第一次近似解においても成立する）。まず、一般的な孤立波の性質として、一定水深の水路において、正の波高を持つ入射波が垂直壁にぶつかると、その孤立波は壁面上を垂直に駆け上がり「反射」波が生じる（線形理論では孤立波の波高は壁面上で2倍になる）。このとき、その反射波は、入射波と同じ性質と正の波高を持った孤立波として逆方向に進行する。これは、流体の連続式により、波のエネルギーフラックスが保存されるためである。また、水路幅を入射波（孤立波）の進行方向に緩やかに狭めた場合、水路の狭窄部分でのエネルギーフラックスは、波の「集中」という性質により、水路幅に対する狭窄比の2倍に反比例して増大することが海岸工学の分野では一般的に知られている。ここで我々は一つの問題を提案する：では、水路端における反射壁の形状を壁付近で急激に狭窄する水路端の形状を選んだとき、反射波の性質はどのように変化するのであろうか？ この問いに対する詳細な検討は、一見あまりにも単純で自明のように思えるが、どの研究者も試みようとしなかったようである。我々が与えるこの問いに対する一つの回答は、水路端の反射壁を三角形断面に狭窄した水路における孤立波の反射シミュレーションにより得られる。つまり、この三角形断面の水路壁にぶつかった孤立波は、エネルギーフラックスの集中により加速度を増し、垂直壁の場合よりも波高が「過度（excessive）に上昇」する。このとき、砕波が発生しなければ、波のエネルギーフラックスは完全に「保存されなくてはならない」ため、結果的に生じる反射波の「一部」は、平均水面位置よりも低い「負（negative）」の

波高をもった逆位相の孤立波へと転じる。後述する双胴型防波堤のデザイン・コンセプトには、この特有の反射現象に基づいた理論的背景を起源としていることを明記しておく必要があるだろう。なお、この負の波高を含む反射波は、孤立波の非線形性および分散性とは関係なく生じるものであることを付記しておく。

(2) 次に、水路端部における三角形断面の壁中央に「穴を空け」、流体の流れが「通過しやすい」水路に話題を拡張してみよう。（実はこの試みにこそ、防波堤技術のブレークスルーが隠されていたことに読者は気付かれるだろう。）つまり、水路の一部に対称な三角形からなる狭窄部を設け、この水路方向に孤立波を流し、通過させることを考える。

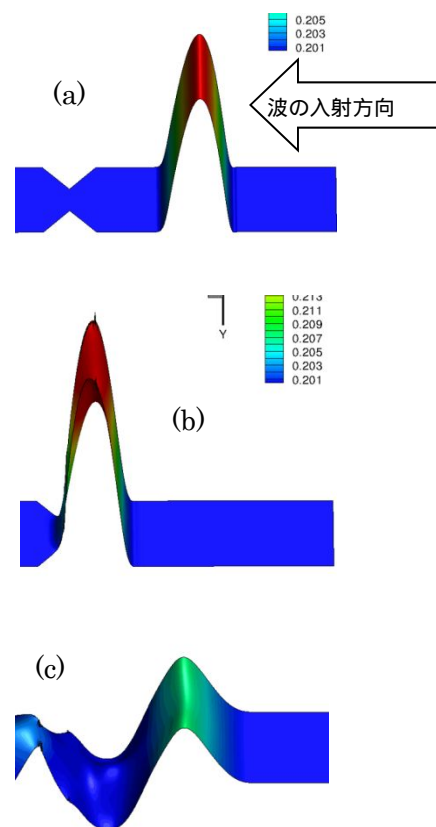


図2. 双胴型防波堤を通過する孤立波のシミュレーション結果

一般的に流体力学では、水路を流れる流量は保存されるため、水路断面が滑らかに狭窄される部分だけ流速が増加し、通過した流量は何ら変化しない、つまり水路を反射し逆流する流量はないと考える。ところが、我々が試みた孤立波の流れシミュレーション（図2）と水槽実験（図3）の結果では、三角形狭窄部を通過した透過波は波高が減衰（つまり、波のエネルギーも減衰）し、流入する孤立波の一部は反射され上流に遡っていくことが分かった。この反射波にはnegativeな（負の）波高を含み、入射波に対して逆位相の反

射波が生じる。我々が発見したこの現象は、上述した波のエネルギーフラックスの集中による“excessive”(過度)な波高の上昇とこれに伴う特有の反射メカニズムによって理論的に説明することができる。なお、孤立波の数値シミュレーションと断面水槽実験の結果は極めて良い一致を示していることから、本論が実証的に成立しているといえる。

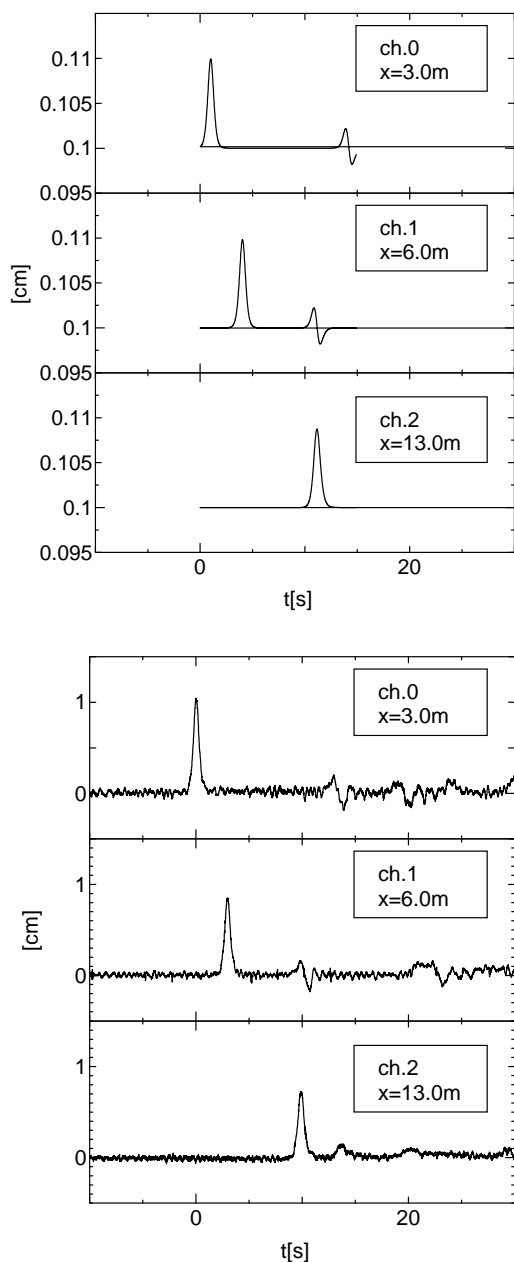


図 3. 数値シミュレーション(上図)と断面水槽実験(下図)の比較結果

(3) さらに、透過波の波高は水路幅に対する開口比の平方根に比例するため、この一對の三角形ユニットの間隔を無限小に狭めれば、理論上は波を透過させながら波を完全に反射させることができる。図 4 は、開口比に対する透過波(減衰波)のエネルギーフラックスの線形減衰を示している(透過波の波高の

2 乗がエネルギーフラックスに相当するため、この線形関係は極めて妥当である)。つまり、この一對の三角形ユニットこそ、我々が提案する双胴型防波堤のコンセプトである。特記すべきことは、この双胴型防波堤は、波を堰き止めることなく、この特有の反射現象によって透過波を減衰させることができるということである。また、双胴型防波堤の消波効果は、構造体のサイズに依存せず有効である。このため、津波や高波に適切な配置と構造物としての耐久性(コストも考慮した)を満たせば、あらゆる海岸や港湾、そして原発などの重要拠点を津波から守ることができるのである。我々の研究は、新しい原理を発見したのではなく、専門家が得てして陥る「思考の盲点」を探し出し、新しい観点から波を弱める構造体を見つけ出したに過ぎない。これまでに、我々は視覚的にも確認できる一般的な波の諸性質を「知っていた」ため、この発見に遠回りしてしまった。人間の思考は、視覚的な先入観に大きく左右される傾向があるからである。

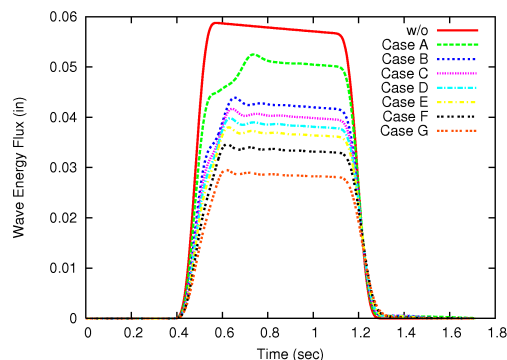


図 4. 双胴型防波堤の開口比に対する透過波エネルギーフラックスの線形減衰図

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6件)

奥村 弘, 有川 太郎: GPU と MPI による CADMAS-SURF/3D のハイブリッド並列化と検討, 土木学会論文集 B 3 (海洋開発) 70(2), I_361-I_365, 2013

Hiroshi Okumura, Yoichi Hikino and Mutsuto Kawahara: A shape optimisation method of a body located in adiabatic flows, 査読有, International Journal of Computational Fluid Dynamics (IJCFD), 2013, Vol. 27, Nos. 6-7, pp.297-306, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1080/10618562.2013.828049>

奥村 弘, 有川 太郎: GPU による CADMAS-SURF/3D の CUDA 並列化と検討, 査読有, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, p. I_754-I_759, 2013

奥村 弘：3次元移流方程式に対する Hermite 要素を用いた陽的有限要素法の開発，査読有，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69, No.2, I_011-I_015, 2013.

金山 進, 奥村 弘：A型 CIP 法との比較に基づくエルミート完全3次要素による移流計算精度の検証，査読有，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 69, No. 2, p. I_736-I_741, 2013.

桜木卓也, 奥村 弘：ダイカストにおける乱流を考慮した気液2流体問題の数値解析法，日本鑄造工学会，Journal of Japan Foundry Engineering Society，Vol.84, No.6, pp.325-333, 2012.

〔学会発表〕(計4件)

奥村 弘, 有川 太郎:GPU と MPI による CADMAS-SURF/3Dのハイブリッド並列化と検討,第39回 海洋開発シンポジウム,新潟県新潟市(朱鷺メッセ),2014年6月

奥村 弘, 有川 太郎:GPU による CADMAS-SURF/3D の CUDA 並列化と検討,第38回 海洋開発シンポジウム,米子コンベンションセンター,2013.6.28

奥村 弘, 有川 太郎: GPU による CADMAS-SURF/3D の CUDA 並列化と検討,第38回 海洋開発シンポジウム,米子コンベンションセンター,2013年6月26日

奥村 弘:3次元移流方程式に対する Hermite 要素を用いた陽的有限要素法の開発,第60回海岸工学講演会,福岡市・九州大学医学部百年講堂・小講堂・同窓会館,2013年11月13日

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称:消波構造体

発明者:奥村 弘

権利者:国立大学法人 富山大学

種類:特許

番号:特願 2013-041450

出願年月日:2013年3月4日出願

国内外の別:国内

名称:Wave-absorbing structure

発明者:奥村 弘,松島 紀佐

権利者:国立大学法人 富山大学

種類:特許(PCT)

番号:2.PCT/JP2012/072765

出願年月日:2012年9月6日

国内外の別:海外

6.研究組織

(1)研究代表者

奥村 弘(OKUMURA, Hiroshi)

富山大学 総合情報基盤センター・講師