

# 海底谷周辺沿岸域における長周期波浪の集中と対策

深瀬 祐太郎  
指導教員 佐藤真司

## 1. はじめに

2008年2月24日に富山湾や佐渡沖で発生した高潮災害は「寄り回り波」とも呼ばれ、被災状況に時間差と局地性をもつ予測対策の難しい災害であった。本研究では被災地近くの田中観測所において得られた波浪データ分析によって、寄り回り波は長距離をうねりとして伝播することで非線形干渉により長周期成分が卓越した波であることを明らかにした。そして寄り回り波のようなうねり性波浪が傾斜地形変動部の多数存在する富山湾の海底谷に侵入した際、地形に起因する離岸流と相互干渉して局部的に波浪増大ピークを形成すること、緩斜面領域において卓越する長周期変動成分が傾斜変動部を経て急斜面へ侵入することで水位をさらに押し上げるという効果によって、急斜面地形の傾斜変動部周辺で波浪打ち上げの局地的ピークが形成されるという機構があることを実験によって解明した。したがって波浪低減対策考案の際は海浜流、長周期変動成分の制御が重要であり、施工・維持の面での実行可能性もあわせて考慮したところ、

- 緩勾配斜面と急勾配斜面の境界付近に流れを制御する透過突堤を設置する
- 緩勾配斜面の沿岸近く（100～200m程度）の地点に離岸堤を設置する

という二つの対策が有効であると考えられ、実験との整合性を十分に検討した数値計算モデル（Boussinesqモデル）を用いて被災地地形を導入した波浪変形計算を行い検証した結果、被災地区周辺沿岸域で離岸流が抑制されることで波浪が大幅に低減するという結果が得られた。この知見は富山湾以外の傾斜急変部を有する海底地形にも適用できるものと考えられる。

## 2. 地形急変部周辺の波と流れに関する平面水槽実験

### (1) 実験方法

実験は、長さ3m、幅0.5m、深さ0.5mの平面2次元水槽において行った。多方向造波装置によって、斜面の設けられた水槽に任意の波浪を伝播させることが可能である。斜面勾配は図のように基本的に1/10および1/20からなっているが、アタッチメントの設置により勾配1/40の緩斜面域を作り出

せる。これを利用して緩斜面域・急斜面域の並列した地形を作り、地形急変部を表現した。側面部分には導波板による完全反射境界を設置することで境界原理によって尾根、谷の連続した海底谷地形を再現した（図1）。

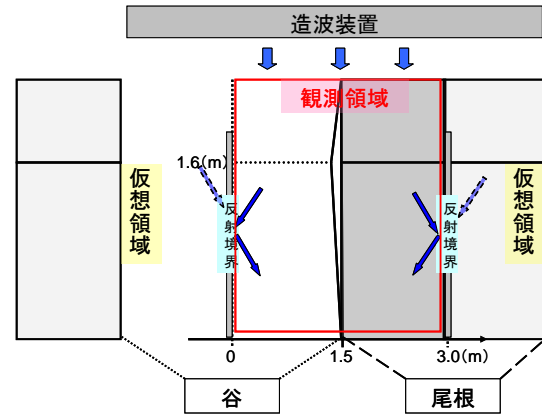


図1 実験レイアウト

なお、一様水深部の水深は全てのケースについて23.1cmで固定した。実験地形には図2のように座標を設定し、以後の実験結果及び数値計算結果の検証は全てこの座標上において論じるものとする。

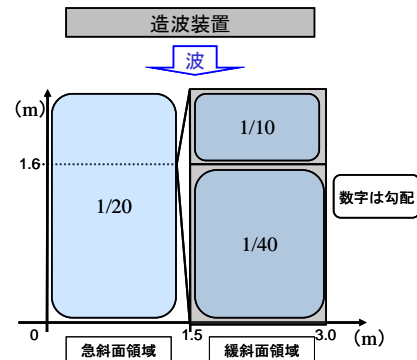


図2 実験座標系

波浪の集中機構を把握し易くするため、一様水深部の波高2.8cm、周期1sの規則波と、うねり性波浪に見られるような長周期変動成分の発達しやすい群波の2つを使用した。波向きはいずれも直入射である。群波は2つの相異なる周期（本実験では周期0.9sと1.1s）を有し、かつ波高が同一（本実験では2cm）の波を合成したものである。長周期変動成分の影響も検討するため、群波の造波では非線形二次干渉波も合わせて造波した。

まず、実験室の平面2次元水槽中の水を染料によって青く

染色した。汀線部に黄色の亚克力板による斜面を設け、波が遡上を記録した。これは遡上波の画像解析を実行する際に遡上波先端が明瞭に識別できるようにするためである。遡上斜面を斜め上方から見下ろすような位置にデジタルビデオカメラを3台、各々が遡上斜面の幅100cmを画像内に収めるように設置し、遡上波を連続的に撮影した。ビデオカメラ設置場所と斜面の詳細な位置関係を図3に示す。撮影に際しては波浪場が定常状態に移行するまでの時間を40秒間とし、その後に規則波・群波について一定時間波の遡上波を撮影した。群波については詳細な分析のため規則波より撮影時間を長くすることとした。

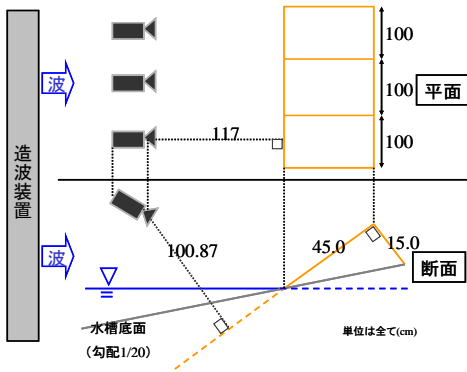


図3 画像を用いた斜面遡上解析概要図

容量式波高計を用い、図4において岸-沖方向で0.05m~1.7m, 沿岸方向で0.525m~2.475mの範囲内の格子測定点(全168点)において波高および平均水位上昇の分布を測定した。測定時間は、規則波は20秒間、群波は50秒間とした。

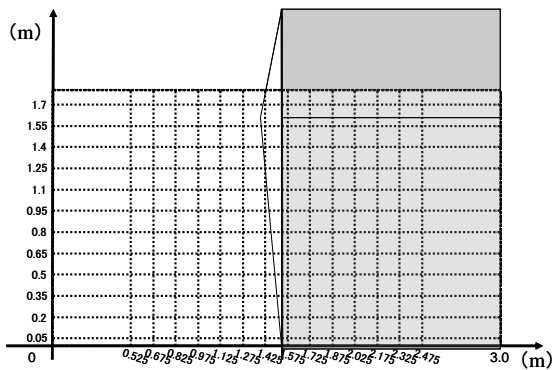


図4 実験における格子測定点

海浜流の流速はPTV手法により計測した。平面2次水槽底面を白色に着色し、天井にカメラを設置した。そして波の作用下で赤色のトレーサー粒子(粒径9mmBB弾)を領域内に均等に分布するように注意しながら投入して、その追跡から流れ場を推定した。なお、トレーサー粒子として用いたBB弾は水よりもやや比重が大きく、水中に沈んでいるものがほとんどであったため、今後数値計算値との相

互検証として用いる際にはこの分析結果を底面流速として取り扱うものとした。

(2) 地形急変部周辺の波と流れ

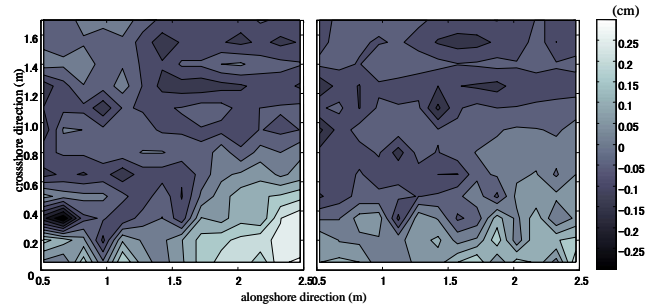


図4 平均水位上昇の平面分布(左:規則波,右:群波)

規則波,群波について図3の位置で測定した平均水位上昇値の分布を示す。図より、平均水位上昇が緩斜面領域において大きくなっていることが分かる。これは、緩斜面領域の方で碎波が早く起こる分碎波後の波によるセットアップが長距離にわたって生じているためと推察される。地形の変化部分によって平均水位がこのように大きく変化しているため強い海浜流が生じることが予想される。

規則波,群波のそれぞれについてPTV法によるトレーサー粒子追跡によって沿岸流速ベクトルの分布図として表したものが図5である。

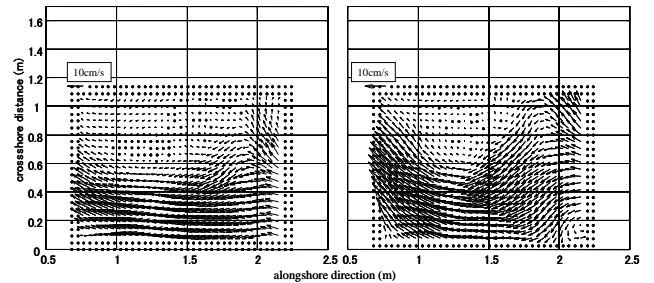


図5 流速ベクトルの平面分布(左:規則波,右:群波)

規則波については岸沖方向1mから傾斜変化の境界に向かって図において左下方向へ流れが生じていることが分かる。そして傾斜境界部分の沿岸付近では、左向きに岸と平行な強い流れとなっている。最終的に画像上で傾斜境界の左側、すなわち急斜面部分では沖に向かって左上に進む離岸流となる。

また、規則波,群波のそれぞれについて画像解析によって得られた最大遡上高さの沿岸方向分布を図6に示す。

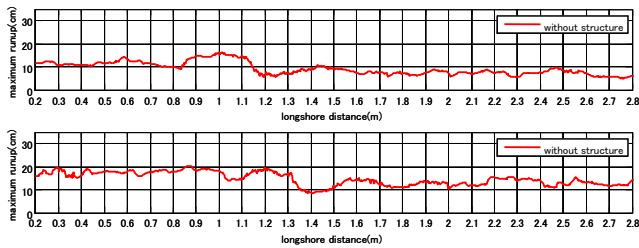


図6 最大遡上高さの沿岸方向分布（上：規則波，下：群波）

解析の際に撮影領域の両端（図6における0m付近と3m付近）において遡上線を連続的に捕らえられなかったため、図6の撮影領域のうち0.2～2.8mの区間のデータを考察に用いた。まず、平均水位上昇分布と最大遡上高さを合わせて考察すると、概して平均水位上昇が大きい領域から小さい領域、セットダウンにより水位が下がっている領域へと流れが生じていることが判明した。この傾向は群波についてもほぼ同様に見られるが、群波の場合では規則波に比べて沖側のベクトルの傾きが急であり、緩斜面・急斜面双方において岸沖方向の流れが大きいという状態が沿岸部まで広範囲にわたって続いていることが分かる。

遡上波形について、規則波では全体的に見て緩斜面領域では遡上が小さく、急斜面領域では大きくなっている。これは急斜面領域では波の碎波が緩斜面領域に比べて遅く、波のエネルギーの減衰が遅れるということをよく反映している。また、0.9～1.1mにかけて遡上のピークが明瞭に見られる。この領域は実験地形の緩斜面と急斜面の境界から急斜面側に30cm程度の距離に位置しており、地形急変部付近において波浪の増幅が生じていることが分かる。次に、群波については緩斜面、急斜面の双方において最大遡上が増加している。様々な周波数成分を持つ波が互いに干渉することで全体的に増幅しているものと考えられる。最大遡上の形状については多くの成分波の存在によって規則波ほど明瞭には見られなくなっているが、1.3mの地点において遡上高さにして2倍程度と急激に増大している。加えてこの位置は規則波の場合のピークの場所よりも斜面勾配の境界に近くっており、地形急変部付近での波の増幅がより顕著になっていると言える。このような地形に起因する波浪の増幅を抑制することが構造物検討において重要であるということが明らかとなった。さらにこのピークよりも左側に注目すると、規則波においては遡上低下しているのに対して群波では1.15m地点で再び急激な遡上高さの上昇が見られ、多少の上下を繰り返しながらも遡上の高い状態が継続している。含まれる周波数成分の多様性以外にも、規則波に対して流速場が変化している影響も考慮すべきものと考えられる。

### (3) 沿岸遡上高さとの遡上スペクトル分布

斜面地形の急変部の存在によってうねり性波浪の長周期、

短周期帯成分波の挙動にどのような特性があるかを検証するため、多くの周期成分波を持つ群波について先程行った実験室での画像解析による水面遡上と波高計を用いた測定による水位変動の時系列データをそれぞれ用い、実験地形内で海岸線部分におけるスペクトルの沿岸方向分布を分析した。長周期・短周期変動成分の沿岸部における分布をより明確にするため、観測に基づいており、加えて沿岸方向においてより多くのデータが得られている画像解析の結果を用いてさらに分析を行った。現地スケールで周期25秒、すなわち実験室スケールで周期1.786秒を長周期変動成分、短周期変動成分の境界とし、それぞれの領域で周期に対する斜面遡上スペクトル強度のr.m.s値 $\sqrt{\eta_s}$ 、 $\sqrt{\eta_l}$ 成分、短周期変動成分について計算して沿岸方向分布を表示し、遡上高さの沿岸方向分布と比較した（図7）。

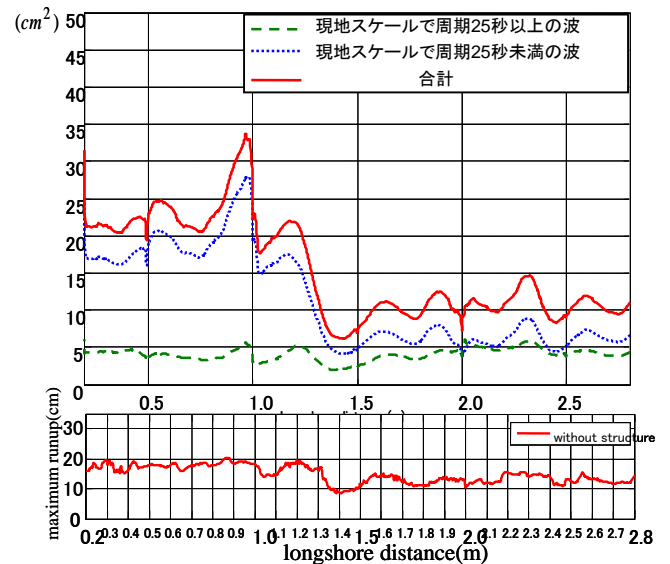


図7 長・短周期帯のスペクトル強度と最大遡上高さとの比較（群波）

図をみると長周期変動成分が緩斜面で卓越していることが分かる。これは、緩斜面領域で碎波が早く生じることにより短周期波が減衰し、長周期波が残ることによって相対的に長周期変動成分が卓越しているものと考えられる。しかしながら急斜面領域中の傾斜変動部付近（図中1.2～1.3m）でも長周期変動成分の割合が比較的大きくなっている。さらに1.3m付近には長周期変動成分のピークが存在しており、成分波全体についてもピークとなっている。この領域は波浪打ち上げ高のピークの位置と一致している。したがって、傾斜急変部付近に生じる波浪遡上がピークを形成する要因の一つとして緩斜面領域から急斜面領域へと長周期変動成分波が侵入し、局部的に長周期変動成分が大きくなることにより水位上昇が押し上げられる、ということが考えられ



る。

### (3) 波・流れ制御構造物の検討

これまでの検討結果を踏まえると、制御構造物の検討では、特に急斜面領域において波高の抑制を効果的に行うことが求められ、海浜流の抑制や地形急変部付近の最大遡上ピークを低減することが肝要であるといえる。そこで、構造物の種類（潜堤、離岸堤、突堤）と設置位置（急勾配斜面側、緩勾配斜面側、地形急変部）を変化させ、合計9ケースに対して、遡上波の変化を分析した。その結果、急勾配斜面側に離岸堤を設置するケースA、地形急変部に突堤を設置するケースB、緩勾配斜面側に離岸堤を設置するケースCの順に遡上波の低減が図れることが分かった。各設置ケースのレイアウトおよび入力波が規則波の場合の斜面最大遡上分布を下図8に示す。

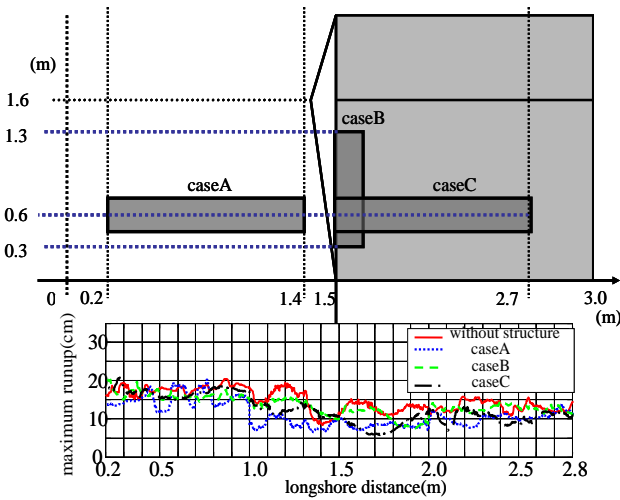


図8 各ケース設置レイアウトおよび最大遡上高さ（群波）

急勾配斜面側に構造物を設置する条件が効果的であるのは自明であるが、構造物の断面が大きくなり、コストが高くなる。本研究では、コスト面においても有利であると考えられるケースB、Cを対策案として検討し、波浪制御を目的とするものとしては過去に設置例の少ないケースBについては流速の平面分布も踏まえて詳細に検討することとした。

透過性の突堤を設置した場合は打ち上げ高のピークが全体的に解消されており、緩斜面領域だけでなく急斜面においても打ち上げが減少している。特に岸から離して設置した CaseB においては傾斜変動部のピークを効果的に解消している。

緩斜面領域に離岸堤を設置した場合、砕波後すぐの地点である沖側に設置した際には構造物未設置の状態からピークが傾斜変動部に移動したような状態となりピークの消失

は見られなかった。一方で沿岸部に設置したCaseCの場合は急勾配での若干の減少に加え、傾斜変動部周辺の1.1~1.3m, 1.5~1.8mにおいて特に減少している。緩斜面に離岸堤を設置する場合は砕波点直後よりもある程度（本研究での実験の場合現地スケールで約120m）沿岸部に設置することで大きな効果が得られるということが判明した。

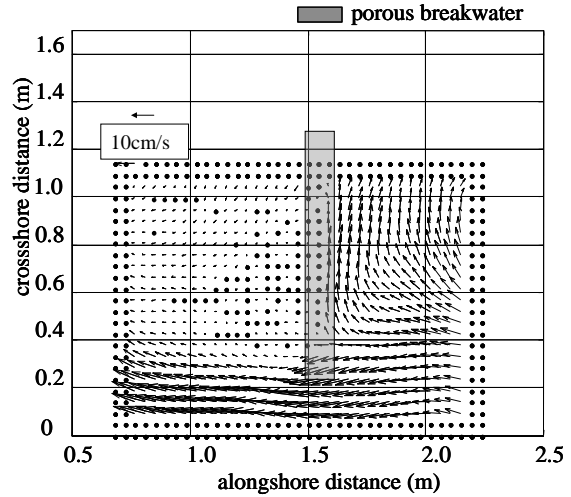


図9 ケースCにおける流速平面分布（規則波）

図はPTV手法による、ケースBについての流速平面分布である。突堤設置領域についてはデータ欠損部分を設けている。沿岸部付近において海浜流が生じているが、向きは沿岸方向に平行であり、離岸流となる流速成分はほぼ解消している。このことから離岸流干渉による波峰線の屈折が解消され、沿岸遡上部での波の集中が抑制されたものと考えられる。

透過性の突堤を設置した場合は打ち上げ高のピークが全体的に解消されており、緩斜面領域だけでなく急斜面においても打ち上げが減少している。特に岸から離して設置した CaseB においては傾斜変動部のピークを効果的に解消している。

緩斜面領域に離岸堤を設置した場合、砕波後すぐの地点である沖側に設置した際には構造物未設置の状態からピークが傾斜変動部に移動したような状態となりピークの消失は見られなかった。一方で沿岸部に設置したCaseCの場合は急勾配での若干の減少に加え、傾斜変動部周辺の1.1~1.3m, 1.5~1.8mにおいて特に減少している。緩斜面に離岸堤を設置する場合は砕波点直後よりもある程度（本研究での実験の場合現地スケールで約120m）沿岸部に設置することで大きな効果が得られるということが判明した。

### 3. Boussinesq モデルによる数値計算

数値計算には波浪の非線形性と海浜流場を考慮することが出来る Boussinesq モデルを用いることとした。

まず、構造物未設置の状態での傾斜急変部を持つ地形での波浪・流れ場が再現されるか検証した。構造物を設置していない条件に関して、規則波と群波の入力波で計算結果と前章での実験結果を波高の2乗平均値  $H_{r.m.s}$ 、平均水位上昇値、流速の平面分布について比較・検証した。

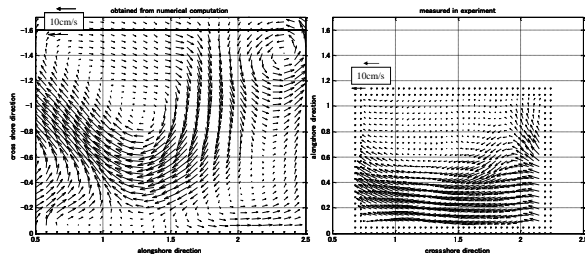


図 10 構造物未設置状態についての流速平面分布比較 (左：計算値，右：実験測定値)

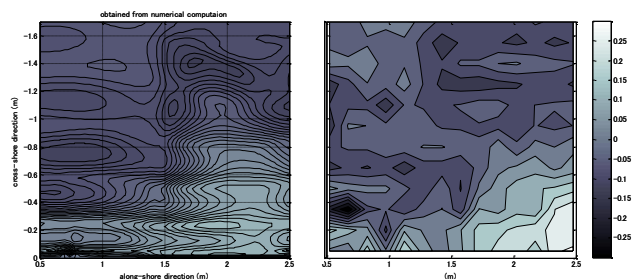


図 11 構造物未設置状態についての平均水位上昇分布比較 (左：計算値，右：実験測定値)

平均水位上昇については、緩斜面領域において水位上昇が大きくなっている点において両者が良く一致している。また流速分布の比較を概観すると、緩斜面領域の沖から観測領域の中心部へと斜めに向かい、傾斜変動部ではほぼ岸に平行となって急斜面領域で沖へと向かう離岸流となる、という流速場の状況が良く再現されている。しかしながら岸から距離 0.4~0.8m の領域では流れが概ね一致しているものの、沖からの距離が 0.4m 以内の沿岸域では数値計算による流速場が非常に小さくなっていることが分かる。これは、本研究で用いた計算モデルが砕波による波面崩壊で生じる質量輸送 (surface roller) を考慮しておらず、これを補償するような流れが再現されていないためと考えられる。流速場の計算ではこのように沿岸にごく近い領域で過小評価している傾向はあるものの、砕波帯内の領域全体については主にセットアップによる水位上昇の相違によって沿岸方向、急斜面領域では沖に向かう流れが生じるという現象が再現されているといえる。

次に、構造物を設置した場合について、波浪場の変動が計算によってどのように再現されるのかを検証した結果を示

す。

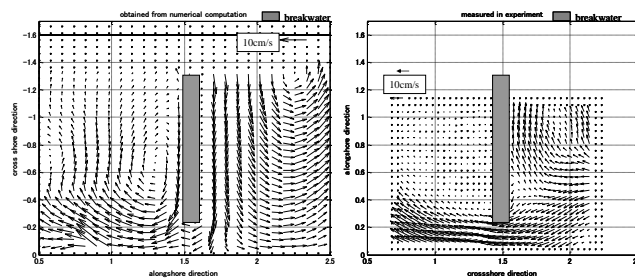


図 12 構造物設置状態についての流速平面分布比較 (左：計算値，右：実験測定値)

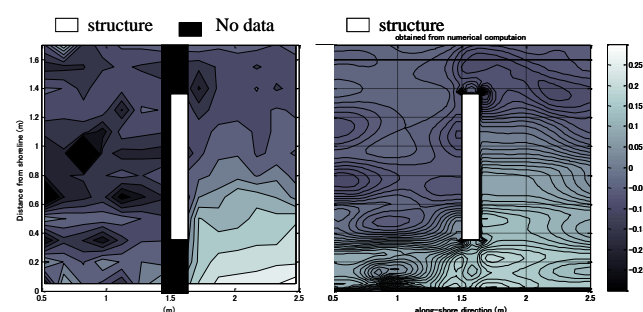


図 13 構造物設置状態についての平均水位上昇分布比較 (左：計算値，右：実験測定値)

平均水位上昇について、計算で急斜面領域での若干の過大評価が見られるものの両者は良く一致している。流速分布については、緩斜面領域の特に沖では流れがうまく再現されていないが、沿岸付近、特に急斜面領域では離岸流も含めてかなり精度よく再現されていることが分かる。したがって急斜面領域で生じる離岸流を評価するうえでは十分信頼に足るものと考えられる。

構造物 (不透過突堤) を設置した場合、画像解析結果において 1.5m 付近、数値計算結果において 1.4m 付近の傾斜変動部で両者とも打ち上げが減少し、急斜面側に向かうにつれて増加している。しかし数値計算結果においては 0.8~1.3m にかけて他の領域に対して高く広範囲にわたるピークを形成している。構造物を設置した位置および構造物が不透過構造物であることを考慮すると、傾斜変動部付近のピークは入射波と構造物からの反射波との干渉によるものと考えられ、これが数値計算によって、他の領域に比べて相対的に過大評価されたものと推察される。

#### 4. おわりに

本研究では、長周期うねり性波浪の沿岸での挙動に関して、実験と数値計算により検討した。その結果、長周期うねり性波浪は、沖合の複雑な地形の影響を受けて局所的に

集中し、その結果、強い海浜流や長周期変動を発達させることを確認した。また、これらがさらに波浪と干渉することにより、地形急変部などに局所的な波浪集中を引き起こすことを明らかにした。対策としては、波の遡上が大きくなる急勾配区間での構造物設置に加えて、海浜流や長周期変動が卓越する緩勾配区間での構造物導入も有効であることが示された。海浜流や長周期変動の平面的な分布を考慮した構造物配置の検討が有効である点が、長周期うねり性波浪の特徴であると考えられる。

現地地形において制御構造物の効果を詳細に検討することが今後の課題であり、その際には本研究で用いた数値モデルによるシミュレーション結果が十分に信頼できるということが判明した。

### 参 考 文 献

- 浜田徳一 (1964) : 表面波の2次干渉, 第12回海岸工学講演会講演集, pp.12-18.
- 間瀬 肇 (2009) : 富山湾沿岸に災害をもたらした2008年2月冬季風浪の予測と追算シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.156-160.
- Kennedy, A. B., Q. Chen, J. T. Kirby and R. A. Dalrymple(2000) : Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and run-up, I: 1D, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.126, WW1, pp.39-47.
- Nwogu, O.J.(1993) : Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.119, WW6, pp.618-638.
- Ranasingle,R,S,(2009) : Doctoral thesis submitted to Department of Civil Eng, the University of Tokyo