

下新川海岸における長周期うねりの越波発生機構とその対策

加島 寛章*・平山 克也**

要 旨

近年、地球温暖化の影響と思われる台風の巨大化や経路変化に伴い、周期の比較的長いうねり性波浪（本研究では、長周期うねりと呼ぶ）が来襲し、我が国沿岸部において甚大な波浪被害が発生している。特に、地形急変部などの複雑な地形を有する地域では、地形や構造物の影響を受けて局所的な波浪集中や越波増大が懸念される。本研究では、2008年2月に複雑な海底地形を有する下新川海岸で発生した寄り回り波の来襲による越波・浸水被害を対象に、大型の平面水槽を用いて被災当時の波浪場や越波の発生機構の解明、それらを踏まえた効率的かつ効果的な対策工案の検討を行った。

これらの実験の結果、以下のような主要な結論が得られた。

- 1) 被災当時において、急勾配斜面側に面する海岸護岸では、護岸近傍に設置された潜堤・離岸堤群との間の水域で生じる平均水位上昇や来襲波群に伴う水位の長周期変動の挙動が、緩勾配斜面側に面する海岸護岸では、来襲波浪の局所集中による短周期波高の増大が、それぞれ越波流量の増大に大きく影響を与えていることを確認した。
- 2) 越波発生機構を考慮した越波低減の検討では、突堤を設置することにより沿岸方向の水位の長周期変動の抑制が可能となり、また、沖潜堤を設置することにより来襲波浪の抑制に加えて護岸前面水域の平均水位上昇の抑制が可能となることがわかった。この結果、最も越波被害の大きかった地域において、越波流量を5～30%程度低減できることを確認した。
- 3) 長周期うねりの越波低減を考える際には、従来までの短周期波浪の制御のみならず、地形特性等に応じて長周期変動の挙動や平均水位上昇の制御を含めた新たな対策を検討することも重要であることがわかった。

キーワード：長周期うねり，長周期変動，越波，突堤，沖潜堤，寄り回り波

* 海洋研究領域 波浪研究チーム 研究官

** 海洋研究領域 波浪研究チームリーダー

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 E-mail：kashima@pari.go.jp

Experimental Study on Mechanism and Countermeasures for Wave Overtopping of Long-Period Swell in Shimoniikawa Coast

Hiroaki KASHIMA*
Katsuya HIRAYAMA**

Synopsis

Recently, coastal disasters due to long-period swells induced by heavy storms and catastrophic typhoons increase in the Japanese coasts and harbors. The long-period swell is more susceptible to the bottom bathymetry of offshore deeper water and its wave height locally increases by the wave energy concentration under the effect of the complex bottom bathymetry in the relatively shallower water. In addition, the wave overtopping discharge may become larger by sea level increasing due to surf beat with wave groupings. In the study, the model experiments with a basin were conducted to make clear the spatial characteristics of wave transformation and the generation mechanism of wave overtopping for the heavy damages at the Shimoniikawa Coast in 2008. Then the countermeasures which have a great effect on the decreasing the wave overtopping discharge were discussed based on its generation mechanism.

The main conclusions of the paper are as follows.

- 1) The long wave induced by wave grouping and sea level increasing effect on the wave overtopping on the steep slope side. On the other hand, the short wave with wave grouping effects on it on the mild slope side.
- 2) It is possible to decrease the wave overtopping discharge of long-period swell by placing the jetty or some submerged breakwaters to control the along-shore long wave in front of the seawall or the short wave with wave grouping from offshore.
- 3) It is important to consider the effects on not only the short wave but also the long wave and sea level increasing in the discussion on the countermeasures for the wave overtopping of long-period swell.

Key Words: Long-period swell, Long wave, Wave overtopping, Jetty, Submerged breakwater, Yorimawarinami

* Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Field

** Head of Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Field

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 E-mail : kashima@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 平面越波実験	7
2.1 実験概要	7
2.2 実験条件	9
2.3 被災当時の来襲波浪の推定	9
2.4 自由長周期波が実験精度に及ぼす影響	11
3. 越波発生機構について	12
3.1 被災当時の波浪および越波特性	12
3.2 護岸背後への越波に及ぼす要因分析	14
3.3 護岸前面水位の長周期変動の特性	15
4. 越波発生機構を考慮した越波低減の検討	18
4.1 突堤による越波低減	18
4.2 沖潜堤による越波低減	19
5. 結論	19
6. あとがき	20
謝辞	20
参考文献	20
付録	22

1. まえがき

近年、地球温暖化の影響と思われる台風の巨大化や経路変化に伴い、設計波よりも周期の比較的長いうねり性波浪（本稿では、14s 程度の周期をもつうねり性波浪を長周期うねりと表記する。）が低気圧や台風の通過に伴って来襲し、我が国沿岸部において甚大な波浪被害が発生している。たとえば、2006年9月、10月には、台風12号および台風16、17号から変化した低気圧により岩手県久慈港の護岸の損壊や越波浸水被害が発生し、2007年9月には、台風9号により神奈川県西湘海岸の西湘バイパスの崩落、道路擁壁の倒壊が発生している。また、2008年2月には、日本海北部で発達した低気圧の影響で発生した長周期うねりの来襲により、富山県伏木富山港の防波堤ケーソンが滑動する被害が発生し、黒部川河口近くの入善漁港海岸（入善町芦崎地区）では、海岸保全施設が被災するとともに、護岸からの越波・越流により護岸背後の家屋の損壊や浸水等の甚大な被害が発生した。

この富山湾沿岸に被害をもたらした長周期うねりは、地元では「寄り回り波」と呼ばれ、低気圧の影響により北海道西方海上で発生した風波が長い距離を伝播して風域を離れ、周期の長いうねり性波浪となって富山湾内の各地にあたかも寄って回るように来襲する波浪のことである。富山湾は、水深が1000m以上と深く、「あいがめ」と呼ばれる急深な海底谷が沿岸付近までいくつも刻まれている。そのため、「寄り回り波」は、深海波の性質を保持したまま湾奥まで伝播し、湾奥の複雑な海底地形の影響によって局所的に波高が増大する特徴を持ち、湾内が静穏になった後に急激に海岸に打ち寄せるため、甚大な被害をもたらす場合がある。

一方、このような「寄り回り波」に代表される長周期うねりは、上記のように風波に比べてより水深の深い沖合から屈折や浅水変形を引き起こしやすく、ある周波数帯に波エネルギーが集中するようなピークの尖った形状のスペクトル特性をもち、波の連なり（波群構造）が形成されやすい。このため、長周期うねりについて議論する際には、海底地形の影響だけでなく、長周期うねり特有の波群特性や波群に伴って生じる長周期変動を考慮することが非常に重要となる。

田島ら¹⁾や深瀬ら^{2),3)}は、2008年2月に発生した下新川海岸の甚大な越波・浸水被害を対象に、現地地形特有の地形急変部を単純化した地形として2つの異なる勾配斜面が接する海底地形を用い、うねり性波浪の波高増幅機構について実験および数値計算による検討を行っている。その結果、強い海浜流や長周期変動の発達と来襲波

浪の干渉、沿岸域の複雑な地形の影響を受けて局所的に波高が集中し、遡上波の増大を招く危険性があることが指摘されている。

一方、著者ら⁴⁾は、同越波・浸水被害を検討対象として、平山⁵⁾が開発した修正ブシネスク方程式に基づく平面2次元数値モデルNOWT-PARI (NOnlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute)を用いて風波およびうねり性波浪が複雑な海底地形を有する海岸に来襲する場合の波高集中機構の違いについて検討している。また、周期14s程度の長周期うねりに着目し、その護岸越波特性を断面実験により検討し、うねり性波浪の直立護岸に対する越波流量は、通常の設計波よりも周期が長いことに十分配慮することにより、既存の越波流量算定図を用いて算定することが可能であることを確認している。さらに、うねり性波浪に顕著な波群に伴う水位の長周期変動の影響を受けて短時間に発生する越波流量が増大する危険性があることを示唆している⁶⁾。しかしながら、これらの研究では、護岸周辺の構造物等の詳細な地形を含む現地地形を対象としていないことや長周期うねりの護岸背後への越波に関する平面的な特性については十分な検討が行われておらず、長周期うねりによる越波対策について課題が残っている。

そこで、本研究では、2008年2月に発生した寄り回り波（富山湾特有の長周期うねり）の来襲による越波・浸水被害を対象に、大型の平面水槽内に下新川海岸の詳細な地形を再現し、被災当時の波浪場や越波の発生機構を解明するとともに、それらを踏まえた効率的かつ効果的な対策工案の検討を行った。なお、本研究で検討した対策工案は、地形急変部をもつ神奈川県西湘海岸や富山県滑川地区のように、下新川海岸と同様な海底地形特性を有し、長周期うねりによる越波災害が懸念される海域において、今後必要に応じて適用されることを想定して考案したものである。

2. 平面越波実験

2008年2月に下新川海岸で発生した越波浸水被害において、被災当時の長周期うねりによる波浪および越波状況の再現やその発生機構の解明、それらを踏まえた効率的かつ効果的な対策工案の検討を行うため、平面水槽を用いた越波実験を行った。

2.1 実験概要

実験は、L型に配置されたピストン型多方向不規則波造波装置を備えた長さ42m、幅18m、水深1.0mの平面水



写真-2.1 平面水槽の様子

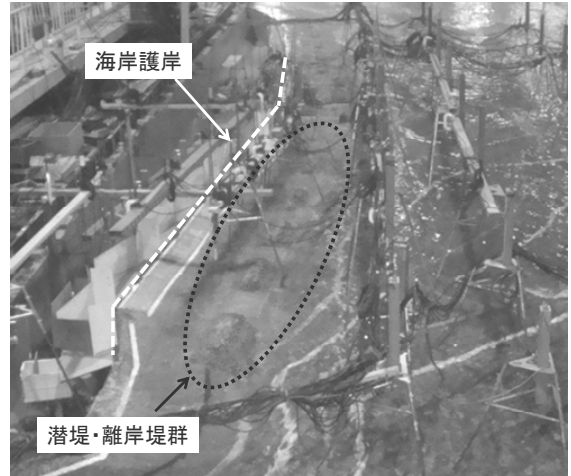


写真-2.3 被災時に設置されていた護岸前面の潜堤・離岸堤群



写真-2.2 海底地形 (左手前：沖側, 中央：海岸護岸側)

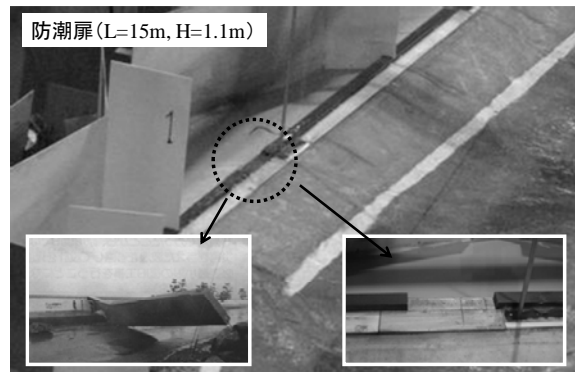


写真-2.4 破壊された防潮扉 (左) とその再現状況 (右)

槽内に、写真-2.1に示すような被災箇所周辺の詳細な海底地形および潜堤や離岸堤等の海岸構造物をモルタル模型で再現し、被災当時に来襲したと思われる波浪を造波して水槽内の水位や流速変化、護岸背後への越波量の計測を行った。なお、模型縮尺はフルード相似則を用いて1/100とし、特に断らない限り、以下では現地量で表記する。

実験模型は、造波可能な波向を考慮して東西を反転させた鏡像とした(写真-2.2)。なお、本稿で示す図面はすべて実地形に戻して表記している。現地の消波護岸および緩傾斜護岸の傾斜部はモルタル成形、パラペット部は木材で製作した。また、汀線付近の離岸堤は砕石をモルタルミルクで固めた透過構造とし、潜堤はモルタルで成形した(写真-2.3)。なお、海岸護岸の一部は防潮扉(長さ15m、高さ1.1m)となっており、被災当時に高波の来襲により破壊されたため、実験ではこの防潮扉がない状態を再現した(写真-2.4)。また、護岸背後への越波水塊の総量を計測するため、被災箇所周辺の護岸背後を7区間に分けて越波集水ますおよび導水板をそれぞれ設置し

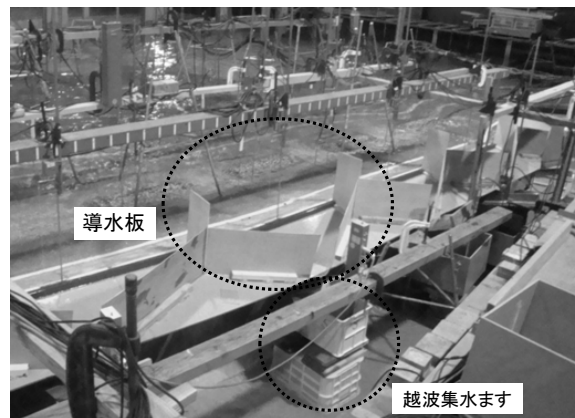


写真-2.5 越波集水ますの設置状況

た(写真-2.5)。さらに、沖から汀線までの波浪場や潜堤・離岸堤群周辺の流速場を計測するため、沖から汀線までの全49地点に容量式波高計を、汀線付近の潜堤・離岸堤群の沖側と岸側に設けた測線上(Line-05からLine-07)に水平2成分電磁流速計を合わせて設置した(図-2.1)。

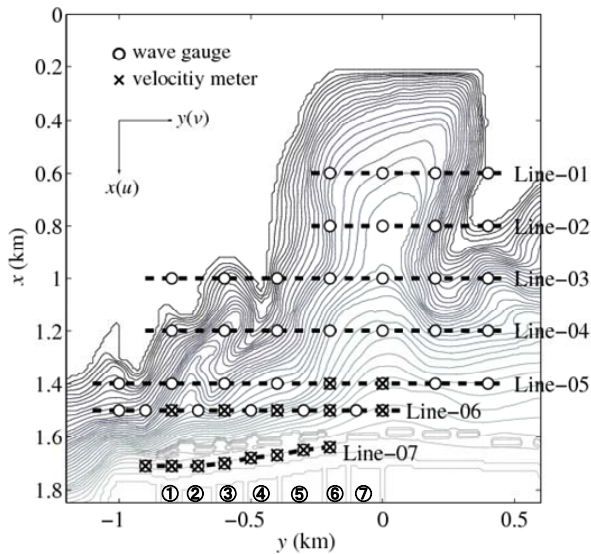


図-2.1 計測機器および越波集水ますの設置位置（コンターライン：水深，○：容量式波高計，×：水平2成分電磁流速計，○数字：越波集水ます，点線：計測測線）

2.2 実験条件

実験に用いた入射波浪は、2008年2月に下新川海岸で発生した越波浸水被害を可能な限り再現するため、被災箇所近くの田中観測所（設置水深：12.8m）で観測された波浪諸元（有義波高および有義波周期）をもとに、造波板位置で逆推定された有義波高 $H_{1/3}=5.97\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=13.9\text{s}$ の不規則波浪とした。また、スペクトル形状は、長周期うねりを捉えた観測データを解析した平山ら⁷⁾の研究を参考に、 $\gamma=4.0$ の JONSWAP 型スペクトルを採用した。実験水深 h は、被災当時の潮位（伏木富山港での観測潮位：D.L.+0.21m）を考慮して 90.21m とした。入射波向については、田中観測所では波向観測が実施されておらず、特定することができない。そこで、被災当時の来襲波浪の主波向については、加島⁸⁾により実施された下新川海岸を対象とした波浪変形計算の結果および後述する来襲波浪の推定結果より、長周期うねりが沖合から実験水深（ $h=90.21\text{m}$ ）に伝播するまでの屈折変形を考慮した主波向 $\theta=N18.5\text{E}$ と設定した。また、方向集中度については多方向波と一方向波（ $S_{\max}=25, 999$ ）の2ケースを設定した。

一方、ピストン型造波装置が備わった水槽実験において、波群を造波する場合には、造波板で再現できない水粒子運動の鉛直分布の誤差を補うように、周期の長い自由波（自由長周期波）が発生し、波群に拘束された長周期波を正確に推定・再現することが困難となる^{9),10)}とともに、護岸背後への越波流量に影響を及ぼす護岸前面の

表-2.1 入射波浪条件

Case	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	θ	S_{\max}	γ	自由長周期波
1	5.97 m	13.9 s	N18.5E	999	4.0	制御なし
2				25		
3			N3.5E	999		制御あり
4						

長周期変動^{11),12)}の推定精度が低下する危険性がある。そこで本研究では、このような自由長周期波が実験精度に及ぼす影響を検討できるようなケースも設定した。表-2.1にこれらの入射波浪条件をまとめたものを示す。

計測時間は、十分多くの波数の長周期変動が計測可能となるように、短周期波の計測波数が各ケースの平均周期に対して1000波以上となるように設定し、サンプリング時間間隔は25Hzとした。本稿で取り扱った統計解析では、まず計測された水位変動の時系列データにFFT法による帯域フィルターを用い、周波数スペクトルを30s以下の短周期変動成分（長周期うねりのピーク周波数を含む）と30~300sの長周期変動成分に分離した。次に、逆FFT法により各変動成分に対する波形を抽出し、ゼロアップクロス法により、有義波に相当する波高をそれぞれ短周期波高 H_s 、長周期波高 H_L と定義した。また、計測された水位変動の時系列データの時間平均操作により得られる水位の上昇量を平均水位上昇量 η_{bar} とし、護岸背後に設置された越波集水ますに溜まった水塊の総量に、計測時間による時間平均操作を施して作用波に対する護岸背後の越波流量 q を算出した。

2.3 被災当時の来襲波浪の推定

被災当時の来襲波浪を知るものとして、被災箇所付近の田中観測所で観測されたデータが有効である。しかしながら、この観測所では波向観測は行われておらず、来襲波浪の方向特性を特定することができない。そこで、主波向および方向集中度を変化させた case1~case3 を対象に、被災当時に来襲したと思われる波浪を推定した。図-2.2~図-2.4に示すのは、沖から順に設けた測線上の水位変動から得られた波浪統計量（短周期波高、長周期波高、平均水位上昇量）の空間変化である。また、図-2.5は、方向集中度と護岸越波流量の関係を表したものである。それぞれの図に対して○が case1（ $\theta=N18.5\text{E}$ かつ $S_{\max}=999$ ）、*が case2（ $\theta=N18.5\text{E}$ かつ $S_{\max}=25$ ）、△が case3（ $\theta=N3.5\text{E}$ かつ $S_{\max}=999$ ）の結果である。

まず、図-2.2より短周期波高についてみると、主波向が等しい case1 および case2 の短周期波高は、沖から岸にかけてほとんど同様な変化を示し、Line-03~Line-06

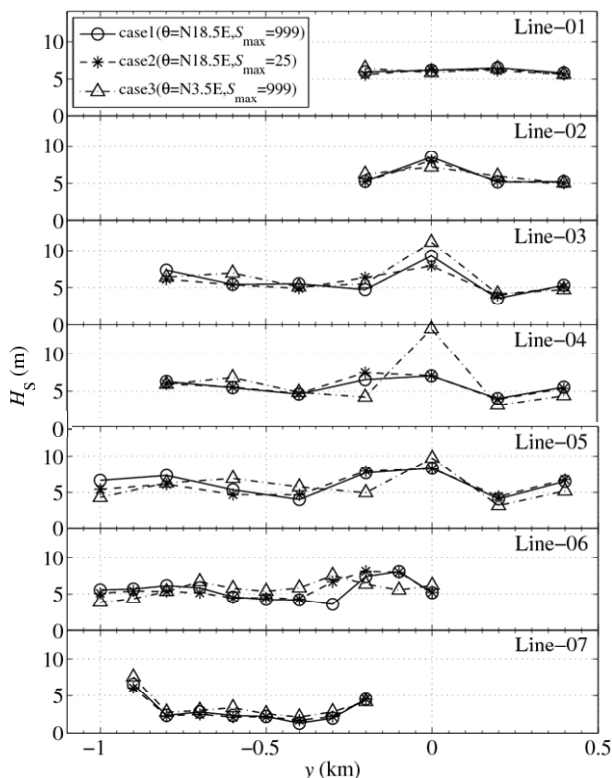


図-2.2 来襲波向特性と短周期波高の関係 (○ : case1 ($\theta=N18.5E, S_{max}=999$), * : case2 ($\theta=N18.5E, S_{max}=25$), Δ : case3 ($\theta=N3.5E, S_{max}=999$))

の海底岬上を伝播するにしたがって極大値をとる位置が $y=0.0\text{km}$ から -0.2km に移動している。一方、主波向 $N3.5E$ の case3 では、波高の極大値をとる位置はほぼ $y=0.0\text{km}$ であり、またその値は case1 および case2 よりも最大で 1.5 倍程度大きくなっている。これは入射波向による海底岬での屈折変形による波高集中の状況が異なるためである。一方、潜堤・離岸堤群背後の Line-07 では、護岸近傍へ入射するまでに十分な屈折変形が生じて波の一方方向化が進み、その後潜堤・離岸堤群で砕波したため、波向や方向集中度による違いがほとんど見られないと考えられる。

次に、図-2.3 より長周期波高についてみると、長周期波高は沖から潜堤・離岸堤群の前面 (Line-01~Line-06) において、短周期波高と同様な入射波波浪による違いがみられる。すなわち、短周期波高が増大すると同時に、長周期波高が増大し、波群に拘束された長周期変動が発生しているものと考えられる。一方、潜堤・離岸堤群背後の Line-07 では、入射波浪による長周期波高の空間変化に違いがみられる。case1 では、被災箇所 ($y=-0.8\sim-0.7\text{km}$ 付近) において 2.0m 程度の長周期波高が発生し、 $y=-0.3\text{km}$ において極小値をとり、case2 では、被災箇所

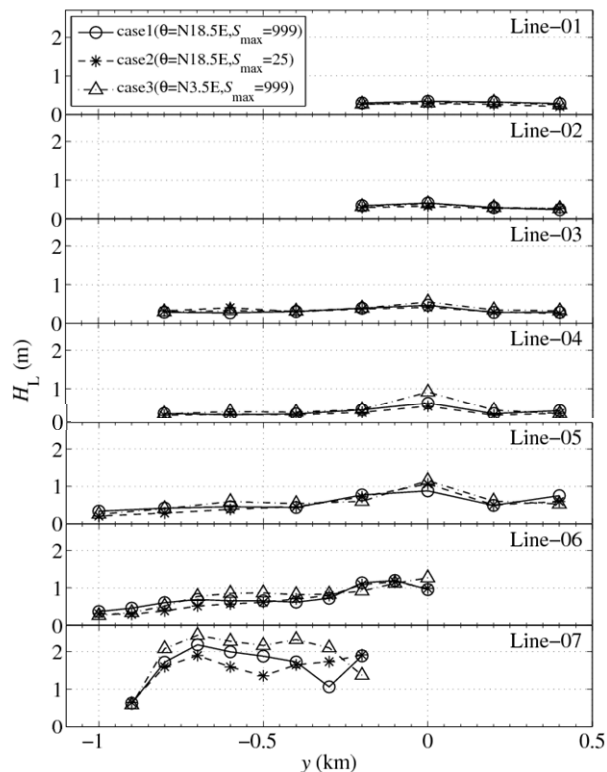


図-2.3 来襲波向特性と長周期波高の関係 (○ : case1 ($\theta=N18.5E, S_{max}=999$), * : case2 ($\theta=N18.5E, S_{max}=25$), Δ : case3 ($\theta=N3.5E, S_{max}=999$))

に加えて地形急変部 ($y=-0.3\sim-0.2\text{km}$ 付近) において 2.0m 程度の長周期波高が発生し、 $y=-0.5\text{km}$ において極小値をとっている。一方、case3 では、被災箇所の他に、護岸前面のほとんどの地点において 2.0m を超える長周期波高が発生している。このように、護岸前面で発達する長周期変動は、来襲波浪の波向や方向集中度の影響を受けることが示唆される。

さらに、図-2.4 より平均水位上昇量についてみると、平均水位上昇量は砕波後のポア状態時に発達するため、入射波浪によらず、潜堤・離岸堤群の背後 (Line-07) において顕著な平均水位の上昇が確認できる。しかしながら、入射波向によりその空間変化が異なっている。case1 と case2 の結果から方向集中度による平均水位上昇量の違いはほとんどみられないものの (ただし、 $y=-0.3\text{km}$ は除く)、case3 のように入射波向が変化することにより、1.3 倍程度の違いが生じている。

最後に、図-2.5 より護岸越波流量についてみると、case1 では、被災箇所において護岸越波流量が最大となり、 y 軸の正方向 (図の右側) に向かうにしたがっておおむね減少する傾向となっている。case2 の護岸越波流量は、主波向の等しい case1 と同様な空間変化を示して

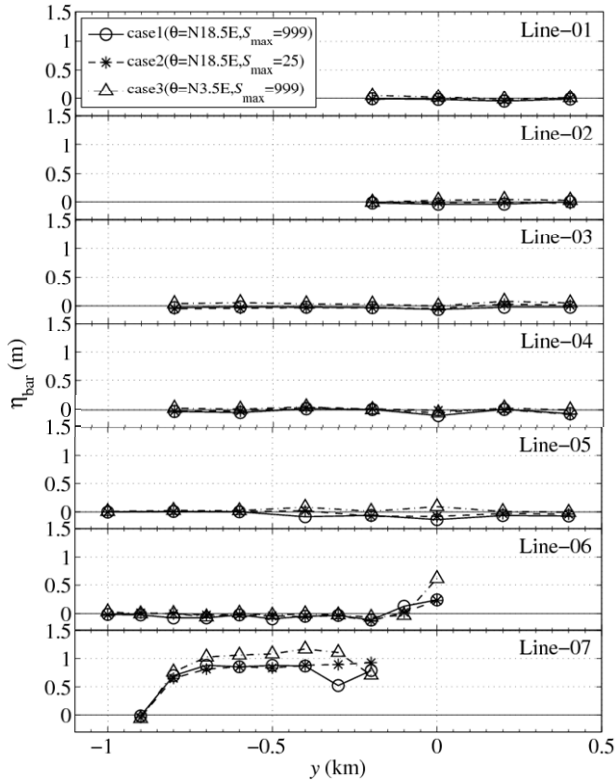


図-2.4 来襲波向特性と平均水位上昇量の関係 (○ : case1 ($\theta=N18.5E, S_{max}=999$), * : case2 ($\theta=N18.5E, S_{max}=25$), Δ : case3 ($\theta=N3.5E, S_{max}=999$))

いるが、護岸越波流量は case1 に比べて緩勾配斜面側 ($y=-0.3\sim-0.1\text{km}$) で 10^1 オーダー程度大きく、急勾配斜面側 ($y=-0.8\sim-0.4\text{km}$) で 10^1 オーダー程度小さくなっている。一方、主波向の異なる case3 では、図-2.3 および図-2.4 で示した護岸前面での顕著な長周期変動や平均水位上昇量の影響により、護岸越波流量が被災箇所だけでなく、 $y=-0.6\sim-0.3\text{km}$ の護岸前面の広範囲にかけて増大している。しかしながら、被災箇所における護岸越波流量は case1 において最大となっている。

図-2.6 は、富山県入善町役場による被災調査の結果から得られた被災当時の浸水状況を表したものである。この図より、 $y=-0.8\sim-0.7\text{km}$ 付近の護岸背後の浸水面積が最も広く、北東 (図の右側) に向かうにしたがって徐々に狭くなっている。このような調査結果と上記の来襲波向特性を変化させた実験結果から、被災箇所の護岸越波流量が最も大きく、かつ被災箇所から離れるにしたがって減少傾向を示す case1 の入射波浪 ($\theta=N18.5E, S_{max}=999$) に対する結果が、被災当時の護岸越波流量の空間変化に最も適合しているものと考えられる。また、護岸背後の浸水面積と越波継続時間より推定した越波流量は $6.1 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{m/s})$ であり、これに対して case1 から case3 にお

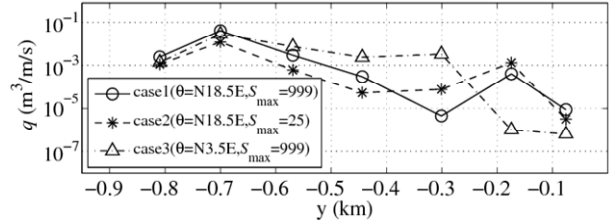


図-2.5 来襲波向特性と護岸越波流量の関係 (○ : case1 ($\theta=N18.5E, S_{max}=999$), * : case2 ($\theta=N18.5E, S_{max}=25$), Δ : case3 ($\theta=N3.5E, S_{max}=999$))

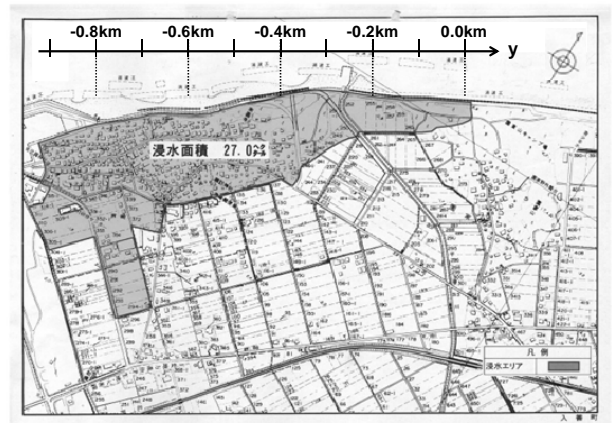


図-2.6 被災調査で得られた護岸越波・浸水領域 (灰色ハッチ : 浸水面積)

いて計測された越波流量を護岸延長に沿って空間平均した越波流量は、それぞれ $7.8 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{m/s})$, $2.4 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{m/s})$, $8.1 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{m/s})$ であり、case1 における越波流量が被災当時の越波流量に最も近い。ただし、この推定では、浸水面積は 27ha (図-2.6)、浸水深は 1.0m (緩傾斜護岸を遡上した波が背後の住宅地へ氾濫した痕跡から推定¹³⁾)、護岸延長は富山県入善町役場管轄の下新川海岸総延長の 1166m、越波継続時間は高波が来襲していたと考えられる 10.5 時間 (=37800s) とした。

以上より、2008 年 2 月に下新川海岸で発生した越波浸水被害では、造波位置相当で有義波高 $H_{1/3}=5.97\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=13.9\text{s}$ の一方向性の強い長周期うねり ($S_{max}=999$) が $N18.5E$ の方向から来襲したものとして捉えることができる。

2.4 自由長周期波が実験精度に及ぼす影響

ここでは、case3 および case4 の波浪を対象に、ピストン型造波装置で波群を造波した際に発生する自由長周期波が実験精度に及ぼす影響について検討を行った。ただし、この自由長周期波の制御にあたっては、造波板の変位方向に伝播する波の造波に対してのみ有効な造波シ

システムを使用しているため、L型配置の片方のみの造波板を使用した一方向波浪 ($\theta=N3.5E$, $S_{max}=999$) を対象とした。また、造波装置で造波可能な成分波数は有限であり、自由長周期波の制御は、造波すべき波群と分け合っ
て行う必要があるため、これによる波群の造波精度の低下に留意する必要がある。なお、自由長周期波の制御方法については、加島・平山¹⁴⁾やSand¹⁵⁾を参照されたい。

図-2.7に示すのは、波群を造波する際に発生する自由長周期波の影響を把握するため、特に長周期変動が顕著になる潜堤・離岸堤群の前面 (Line-06) および背後 (Line-07) で計測された短周期波高、長周期波高、平均水位上昇量、護岸越波流量を比較したものである。○は自由長周期波を制御しない造波方法、*は自由長周期波を制御した造波方法の結果である。この自由長周期波は、波群に拘束された長周期波を打ち消す働きがあるため、自由長周期波の発生を抑制しない造波方法の場合には、拘束波に由来する長周期変動を過小に計測する恐れがある。しかしながら、短周期波高や長周期波高、平均水位上昇量についてみると、Line-06 および Line-07 のいずれにおいても自由長周期波の制御の有無によるこれらの違いはほとんど見られない。また、護岸越波流量についても同様に顕著な違いは確認できない。

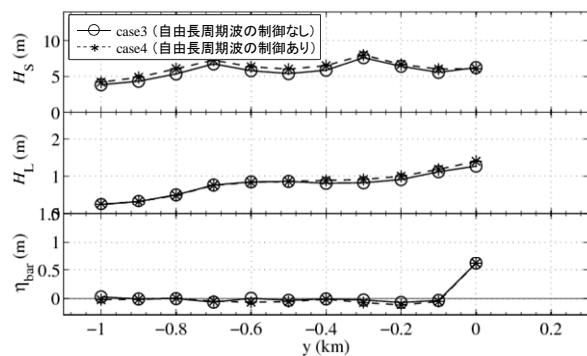
このように、今回の実験においては、波群を造波する際に造波板運動により発生する自由長周期波の影響は、波群の伝播過程において発生する長周期変動に対して十分小さいことがわかった。そこで、本研究において被災当時の波浪場および越波状況を把握する際には、この影響は無視できるものとした。

3. 越波発生機構について

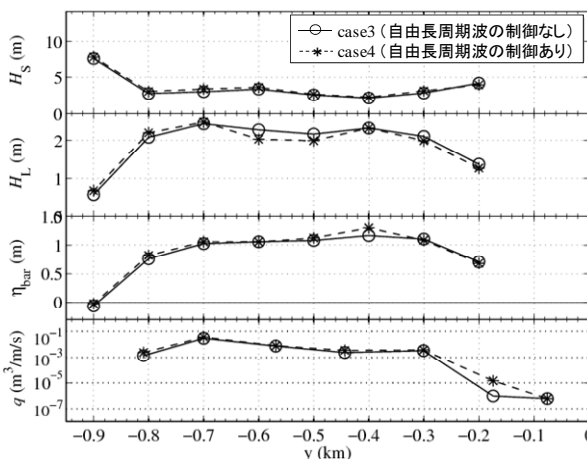
被災当時の海岸地形に対して得られた波浪場や越波状況をもとに、潜堤・離岸堤群と海岸護岸に挟まれた水域 (Line-07) における水位・流速変動や短・長周期波高、平均水位上昇量に着目し、長周期うねりの来襲時における波浪および越波状況を整理するとともに、越波発生機構について検討した。

3.1 被災当時の波浪および越波特性

前章で述べたように、2008年2月に下新川海岸で発生した越波浸水被害では、造波位置相当で有義波高 $H_{1/3}=5.97\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=13.9\text{s}$ の一方向性の強い長周期うねり ($S_{max}=999$) が $N18.5E$ の方向から来襲したものとして捉えることができた。そこで、この推定された来襲波浪を対象に、被災当時の波浪および越波特性を整理



(a) Line-06



(b) Line-07 および護岸

図-2.7 護岸周辺の短周期波高や長周期波高、平均水位上昇量と護岸越波流量 (○: 自由長周期波の制御なし, * : 自由長周期波の制御あり)

した。

まず、被災当時の来襲波浪の波浪変形特性を俯瞰的に把握するため、全計測点で得られた波浪統計量をスプライン補間して空間分布を作成した。図-3.1~図-3.3に示すのはこれらの結果であり、順に短周期波高、長周期波高、平均水位上昇量の空間分布である。図中の実線は2.5m間隔で描画された等深線であり、コンターは各統計量の値である。

図-3.1より、短周期波高についてみると、沖合から伝播してきた波浪は海底岬上 ($y=-0.3\sim 0.0\text{km}$) で屈折および浅水変形の影響を受けて局所的に集中し、入射波高よりも大きい7.0mを超える波高が発生している。また、 $y=-0.7\text{km}$ 付近の護岸から沖合0.4km程度はなれた位置 ($x=1.4\text{km}$) に形成されている小規模な海底岬においても波浪の局所集中がみられる。一方、急勾配斜面側 ($y=-0.7\sim -0.4\text{km}$) の潜堤・離岸堤群の背後では、砕波により波高の減衰が確認できる。図-3.2より、長周期波高についてみると、水深が浅くなるにつれて長周期波高は増大し、

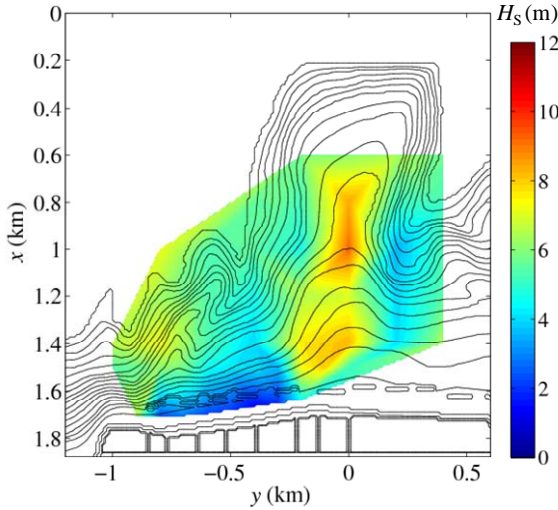


図-3.1 被災当時の短周期波高の空間分布

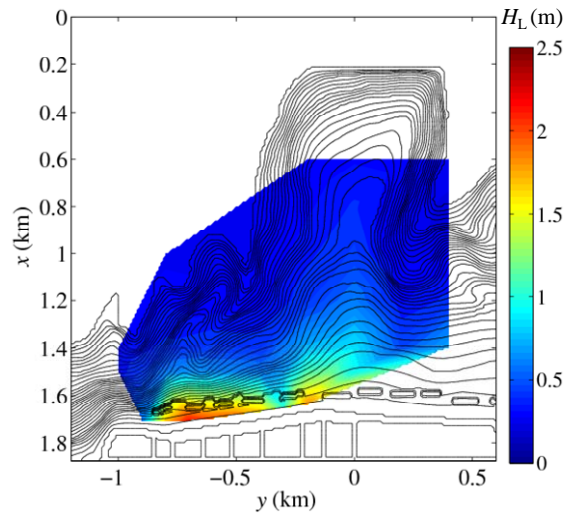


図-3.2 被災当時の長周期波高の空間分布

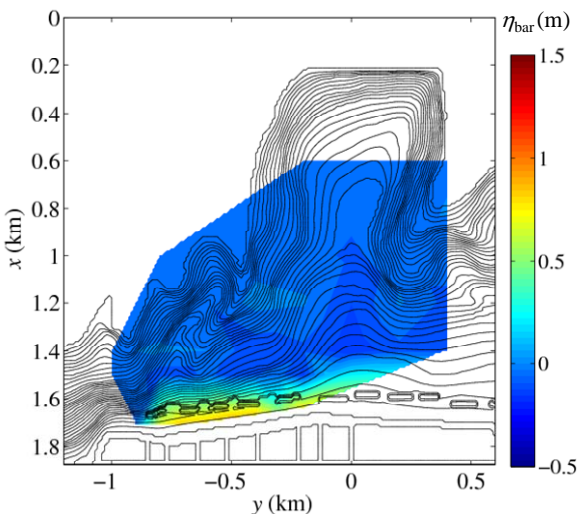


図-3.3 被災当時の平均水位上昇量の空間分布

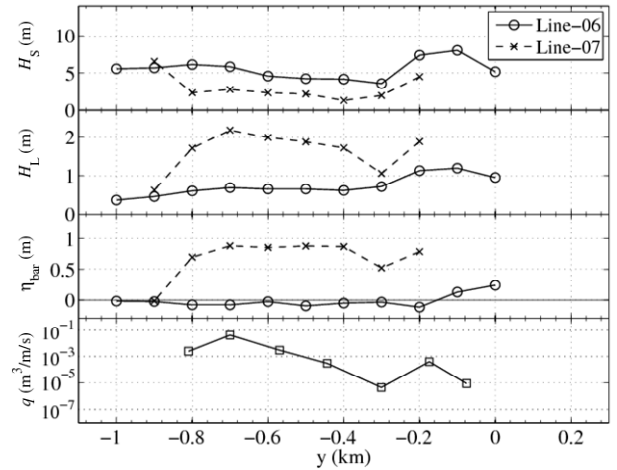


図-3.4 被災当時の波浪統計量と護岸越波流量の関係

特に、急勾配斜面側の潜堤・離岸堤群の背後では、砕波により長周期変動が卓越し、2.0m程度の長周期波高が確認できる。また、平均水位上昇量についてみると、長周期波高と同様に、潜堤・離岸堤群背後において卓越していることがわかる(図-3.3)。このように、被災当時、7.0mを超えるほどの高波が来襲していたと同時に、特に越波・浸水被害の大きかった護岸($y=-0.8\text{km}$ 付近)を含む護岸前面において顕著な長周期変動や水位の上昇が発生していたものと推定できる。

次に、被災当時の越波状況を把握するため、図-3.4に被災当時の比較的海岸護岸に近い岸側のLine-06およびLine-07の波浪統計量と護岸越波流量を示す。図の上から順に、短周期波高と長周期波高、平均水位上昇量、護岸背後への越波流量を表している。この図より、潜堤・離岸堤群の沖側のLine-06では、海底岬による屈折や浅水変形の影響を受けて緩勾配斜面側で短周期波高が増大していると同時に、短周期波浪に付随した長周期変動の発達により長周期波高も増大している。一方、潜堤・離岸堤群背後のLine-07では、砕波の影響を受けてLine-06に比べて短周期波高は半減し、長周期波高および平均水位上昇量は急増している。さらに、平均水位上昇量については、急勾配斜面側の潜堤・離岸堤群背後や緩勾配斜面側の浅瀬上の砕波帯内で上昇し、地形急変部($y=-0.3\text{km}$)で低下している。これらの水位差により生じる顕著な沿岸流の状況については、田島ら¹⁾が2つの異なる勾配斜面が接する単純化した海底地形において指摘した傾向と良く一致している。

護岸越波流量についてみると、護岸越波流量は被災規模の大きかった $y=-0.8\sim-0.7\text{km}$ 付近において最も大きく、それより北東側(y 軸の正方向側)に向かうにしたがっておおむね減少傾向となっている。また、このような護岸

越波流量の空間変化は、長周期波高のものと非常に類似している。これらより、被災時は短周期変動に加えて顕著な長周期変動や平均水位の上昇により護岸背後への越波が促進された可能性があると考えられる。

3.2 護岸背後への越波に及ぼす要因分析

前節より、被災時には護岸前面の長周期変動や平均水位の上昇により、護岸背後への越波が促進された可能性が示唆された。そこで、これらの越波発生・促進させる要因について分析を行った。通常、護岸背後への越波を考える際には、護岸前面の波浪場や護岸構造が重要なファクターとなる。一般に、港湾設計等で護岸越波流量を算出する際には、合田による護岸越波流量算定式¹⁶⁾やこれをより使いやすい形に修正した護岸越波流量算定式¹⁷⁾が主に用いられる。しかしながら、これらの算定方法では、対象護岸前面の構造物等による顕著な平均水位の上昇やサーフビートによる影響は的確に考慮されていない。そのため、護岸前面に潜堤・離岸堤群が配置された複雑な現地地形を再現し、かつ護岸前面の水位の長周期変動や平均水位上昇が卓越している本研究では、その適用は非常に困難である。

そこで、本研究では、平山ら¹⁸⁾により提案されたこれらの影響を考慮した護岸越波流量の算定方法を採用した。この方法は、砕波による平均水位上昇やサーフビートが卓越する砕波帯内のリーフ上護岸に対し、合田による越波流量算定式を適用する場合の堤前水深 (h_{toe}) および換算沖波波高 (H_0') を以下の式 (1) および式 (2) で定義し、護岸越波流量を算定するものである。

$$h_{toe} = h_0 + \eta_{bar} + \alpha * H_L \quad (1)$$

$$H_0' = H_s / K_{sb} \quad (2)$$

ここで、 h_0 は静水深、 η_{bar} は平均水位上昇量、 H_L はサーフビート（長周期変動）の有義波高、 H_s は風波（短周期変動）の有義波高である。また、 α は水位に対するサーフビート波高の寄与率（経験的に、 $\alpha=0.5$ ）、 K_{sb} は合田の砕波帯内波高の略算式から得られる砕波帯内波高と換算沖波波高の比である。なお、護岸天端高 h_c は静水面から護岸天端までの鉛直高を表す。

図-3.5 に示すのは、護岸前面の Line-07 で計測された波浪統計量から式 (1) および式 (2) を適用して得られた換算沖波波高、堤前水深、護岸天端高、換算沖波波高で無次元化した護岸越波流量である。図中の実線は堤前水深を静水深のみで表した場合、破線は堤前水深を静水深と平均水位上昇量で表した場合、一点鎖線は堤前水深

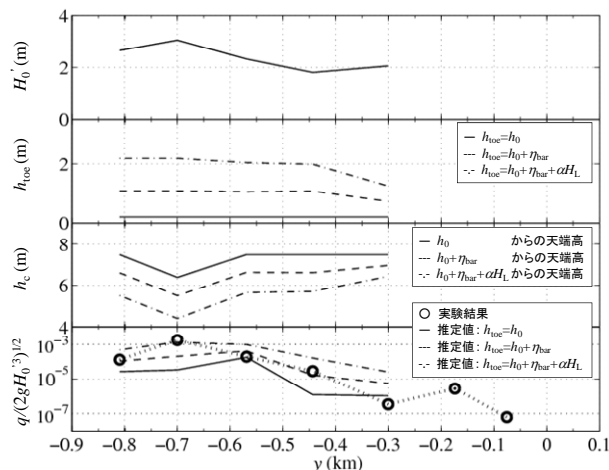


図-3.5 堤前水深および換算沖波波高と無次元護岸越波流量の関係

を静水深に平均水位上昇量および長周期波高を加えて表した場合の結果であり、護岸越波流量のプロットデータが実験結果である。なお、図の $y=-0.3$ km より右側では、上記の式 (2) の適用範囲外であると考えられたため、推定結果については掲載していない。図より、自明ではあるが、護岸前面の平均水位上昇量や長周期波高を考慮することにより、堤前水深は増大し、護岸天端高は減少している。また、護岸天端高が減少することにより、護岸越波流量が相対的に増大していることがわかる。これらを踏まえ、詳細に護岸越波流量の発生要因について分析した結果を示す。

緩勾配斜面側の $y=-0.3$ km 付近では、換算沖波波高は最も小さく、平均水位上昇量および長周期波高を考慮した堤前水深が最小（護岸天端高が最大）であり、実験で得られた護岸越波流量が極小となっている。一方、 $y=-0.4$ km 付近では、換算沖波波高は $y=-0.3$ km とほぼ等しいが、堤前水深が増加（護岸天端高が減少）しているために護岸越波流量が急増している。一方、急勾配斜面側の $y=-0.7$ km 付近では、高波来襲時にこの付近に設置されていた防潮扉が破壊され、周囲に比べて護岸天端高が防潮扉の高さ 1.1 m 低下したため、護岸越波流量が最大となっている。また、急勾配斜面側 ($y=-0.8 \sim -0.4$ km) に面した護岸越波流量の空間変化は、平均水位上昇量あるいは長周期波高を考慮して算定図より推定した護岸越波流量（図中の一点鎖線）にほぼ従い、このような変化は平均水位上昇量や長周期波高に従う堤前水深の増加（護岸天端高の減少）によるものであることを示している。

このように、護岸背後への越波は、来襲波浪だけでなく、護岸前面の長周期変動や平均水位上昇量の影響を受けて生じたものであることがわかった。

3.3 護岸前面水位の長周期変動の特性

前節で述べたように、護岸越波流量を促進させる要因として、来襲波浪の大きさ（短周期変動）だけでなく、護岸前面の水位の長周期変動が大きく影響をしていることがわかった。そこで、本節では、護岸前面を含む潜堤・離岸堤群周辺における水位の長周期変動の特性について、水位変動の時系列変化やスペクトル分布をもとに検討を行った。

(1) 水位変動の時系列変化

図-3.6および図-3.7に、潜堤・離岸堤群前面および背後のLine-06およびLine-07において計測された水位の長周期波形を示す。各図の実線は水位の長周期変動を、破線は波群の包絡波形を表している。なお、図-3.6ではLine-06における長周期変動が極小であったため、便宜上、振幅を2倍に増幅させた波形を示している。

図-3.6より、潜堤・離岸堤群前面のLine-06についてみると、 $y=-0.5\sim-0.2\text{km}$ において、水位の長周期変動と包

絡波形は逆位相な関係になっている。また、 $y=-0.9\sim-0.6\text{km}$ においても、 $y=-0.5\sim-0.2\text{km}$ に比べて水深が比較的深いために水位の長周期変動の振幅が小さくなっているが、両者の位相関係はおおむね逆位相な関係となっている。一方、図-3.7より、潜堤・離岸堤群背後のLine-07についてみると、 $y=-0.3\sim-0.2\text{km}$ 付近では、両者の波形は非常によく一致している。しかしながら、 $y=-0.8\sim-0.4\text{km}$ において、両者の波形のピークをとる時間帯にずれが生じている。また、Line-06およびLine-07の $y=-0.8\sim-0.4\text{km}$ において、波群の包絡波形の位相が各地点間で互いによく一致している。

図-3.8は、沖から汀線まで x 軸に沿った各測線上の水位の長周期変動と包絡波形の相関係数の空間変化を表したものである。図の横軸は両者の位相差 τ を、コンターは相関係数 R を表し、図-3.8(a)～(d)の横線(点線)は潜堤・離岸堤群が設置されている位置を表している。なお、相関係数は以下の式(3)より算出した。

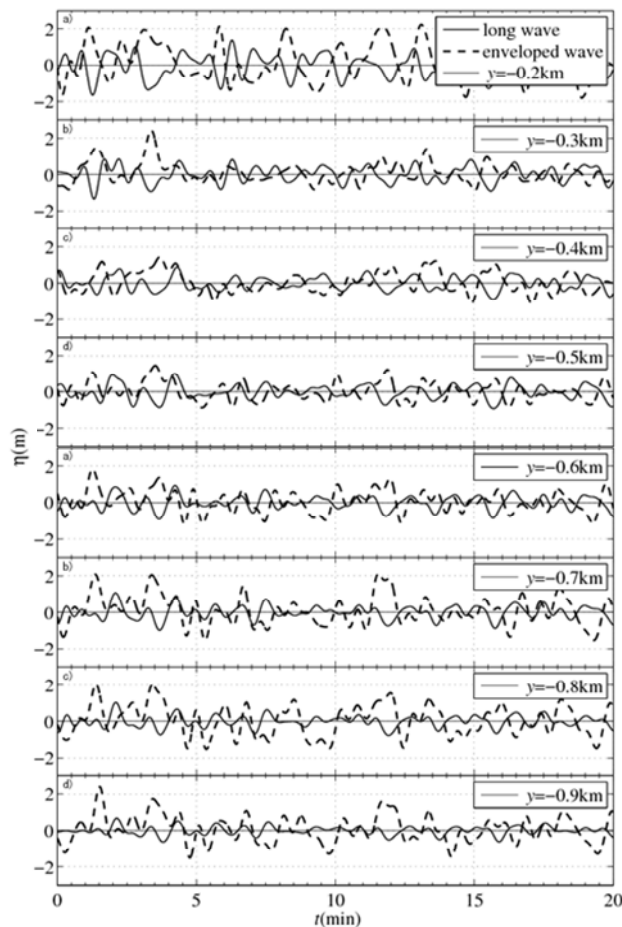


図-3.6 潜堤・離岸堤群前面のLine-06における水位の長周期変動の時系列変化（実線：長周期変動，破線：波群の包絡波形）

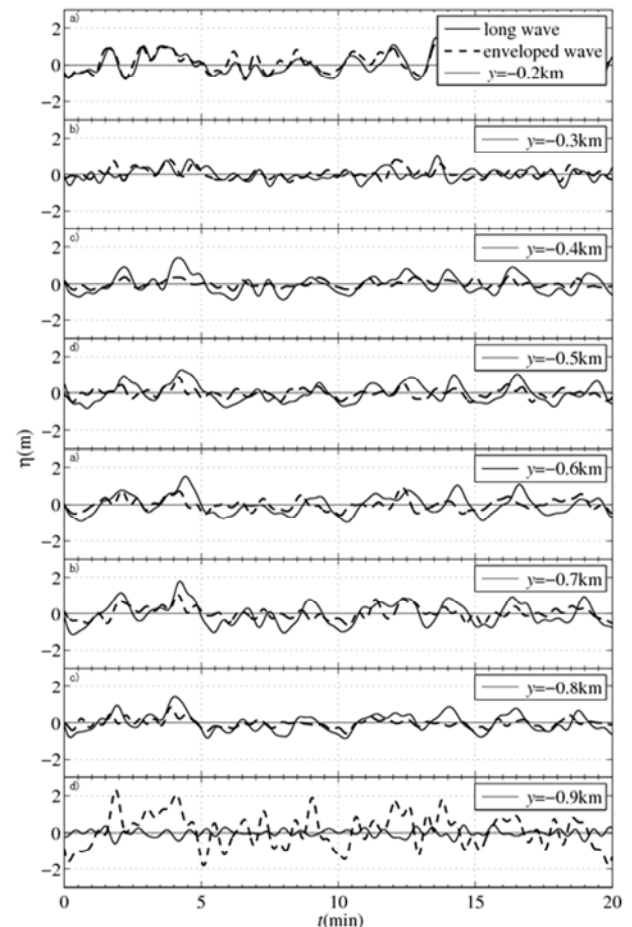


図-3.7 護岸前面のLine-07における水位の長周期変動の時系列変化（実線：長周期変動，破線：波群の包絡波形）

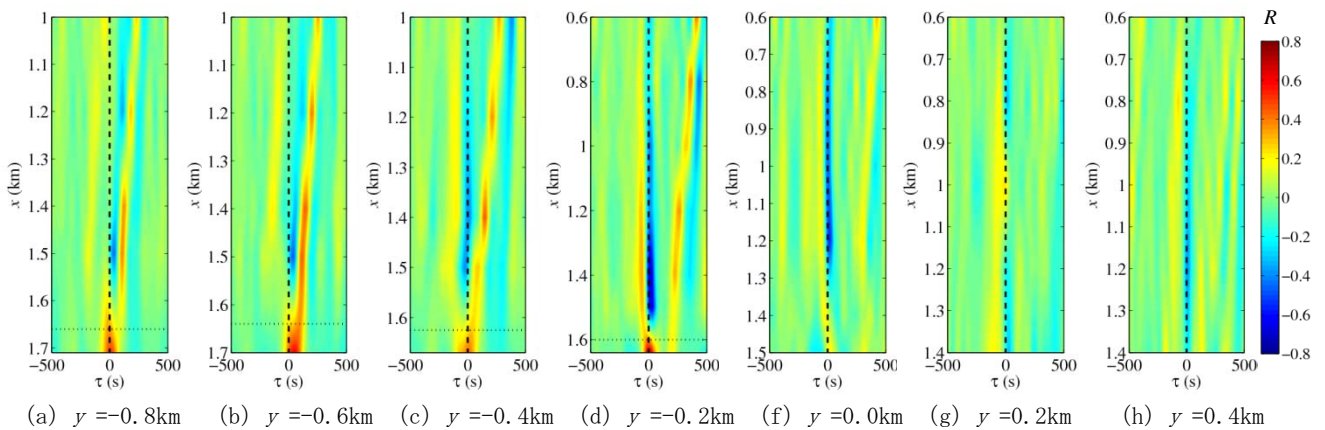


図-3.8 水位の長周期変動と包絡波形の相関係数の空間分布 (点線：潜堤・離岸堤群の設置位置，コンター：相関係数)

$$R(\tau) = \langle A^2(t) \eta_L(t+\tau) \rangle / \sigma_{A^2} \sigma_{\eta_L} \quad (3)$$

ここで、 $A(t)$ は包絡波形、 $\eta_L(t)$ は水位の長周期変動の波形、 $\langle \rangle$ は時間 t に対する平均値、 σ_{A^2} および σ_{η_L} はそれぞれ $A^2(t)$ および $\eta_L(t)$ の標準偏差である。この図より、海底岬上の $y=0.2, 0.4\text{km}$ の測線上では、 $\tau=0\text{s}$ において岸沖方向に負の相関が得られている。すなわち、両者は逆位相な関係を形成していることがわかる。一方、 $y=0.0\text{km}$ では $x=1.45\text{km}$ 付近において、 $y=-0.2\sim-0.8\text{km}$ では潜堤・離岸堤群の設置位置において、負から正に相関係数が逆転している。

このような包絡波形と水位の長周期変動の位相関係については、一方向波を対象として、加島・平山⁶⁾、List¹⁹⁾ や Janssen and Battjes²⁰⁾ により、砕波帯よりも沖側では両者は負の相関係数（水位の長周期変動と包絡波形は逆位相な関係）を示し、波群に拘束された長周期変動が存在することが指摘されている。一方、砕波帯内やそれよりも岸側の水域では両者は正の相関係数（水位の長周期変動は包絡波形と一致する）を示す。これは、砕波過程において波群に拘束された長周期変動が解放されて自由波として伝播していることを意味する。

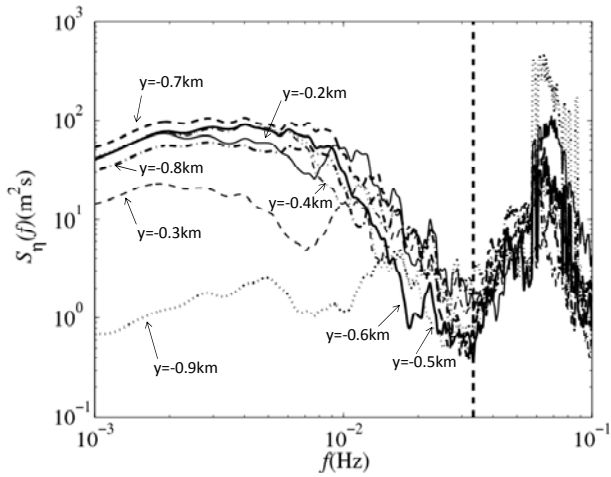
これらを踏まえると、本実験で確認された水位の長周期変動の特性は以下のように整理することができる。まず、緩勾配斜面側の $y=-0.3\sim-0.2\text{km}$ について、潜堤・離岸堤群よりも沖側では、水位の長周期変動は包絡波形に対して逆位相な関係を持ち、波群に拘束された長周期変動が卓越している。しかしながら、潜堤・離岸堤群の背後では、波群の包絡波形と長周期波形の位相が非常によく一致していることから、その拘束が砕波により解放され、自由波として存在している。また、このような長周期変動の挙動は、一方向波においてみられるものと同様であり、詳細については後述するが、緩勾配斜面側の護

岸前面では、一方向性の強い長周期変動が発生していたことが考えられる。

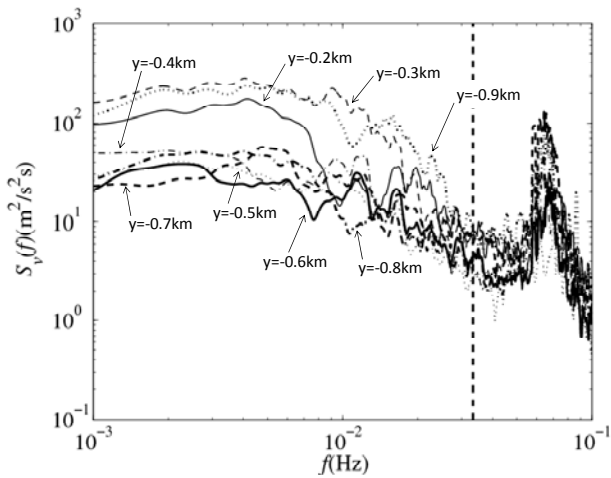
次に、急勾配斜面側の $y=-0.8\sim-0.4\text{km}$ について、潜堤・離岸堤群よりも沖側では、緩勾配斜面側と同様に、水位の長周期変動と包絡波形が逆位相な関係をしていることから、波群に拘束された長周期変動が卓越しているといえる。一方、潜堤・離岸堤群の背後では、砕波により拘束が解放されて自由波として存在していると思われるが、両者の波形にずれが生じている。このことより、急勾配斜面側における水位の長周期変動は、緩勾配斜面側とは異なる挙動をしていることが考えられる。そこで、次項ではこの水位の長周期変動の挙動の差異について詳細に検討するため、スペクトル特性に着目した。

(2) スペクトル分布

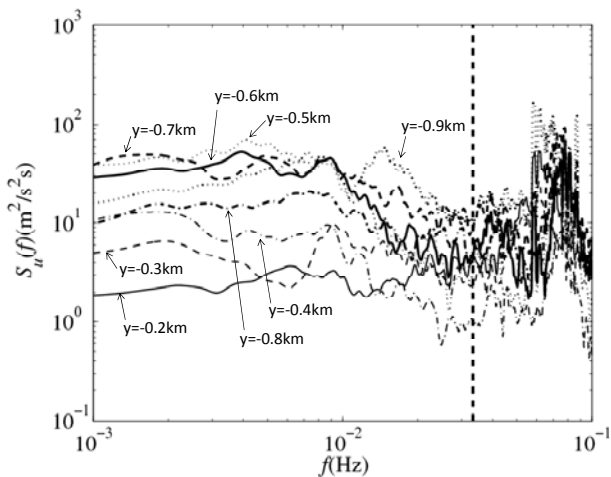
図-3.9に示すのは、潜堤・離岸堤群背後のLine-07の水位および流速変動のスペクトル分布である。図中の縦の点線は周期30sを表すラインである。まず、 $y=-0.3\text{km}$ 付近では、水位の長周期変動スペクトルが小さく、沿岸方向流速の長周期変動スペクトルが卓越している。したがって、この水域では、この地点を節とした沿岸方向の長周期変動が生じていることが推測される。なお、この波群の2次の非線形干渉によって発生する長周期波の周期は30~1000s程度であるが、潜堤・離岸堤群と海岸護岸に挟まれたこの水域では、図-3.9(b)でも確認できるように、特に100~130sの成分が沿岸方向の重複波として定在すると考えられる。しかしながら、岸沖方向の長周期変動がほとんど見られない。これは、拘束長周期波を含む波群が地形急変部 ($y=-0.3\sim-0.2\text{km}$ 付近) において大きく屈折し、波群に拘束された長周期波の解放が沿岸方向に



(a) 水位変動スペクトル



(b) 流速変動スペクトル (沿岸方向)



(c) 流速変動スペクトル (岸沖方向)

図-3.9 潜堤・離岸堤群背後における水位および流速変動のスペクトル分布

行われたものと考えられる。なお、このことは、前節で述べた長周期変動と波群の包絡波形の位相が非常によく一致していることから確認できる。

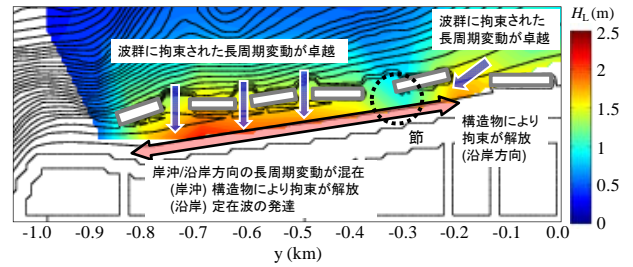


図-3.10 潜堤・離岸堤群周辺における水位の長周期変動の挙動 (コンター：長周期波高)

次に、 $y=-0.8\sim-0.4$ km付近の急勾配斜面側では、岸沖方向流速の長周期変動が卓越し、沿岸方向流速の長周期変動とはほぼ同程度のエネルギーを有している。したがって、この水域では、沿岸方向の長周期変動だけでなく、沖からの来襲波群に由来する岸沖方向の長周期変動も同時に生じていることが推測される。これは、図-3.7で示したように、 $y=-0.8\sim-0.4$ kmにおいて、波群の包絡波形の位相が各地点間で互によく一致しているのに対し、各地点における長周期変動と包絡波形が一致しておらず、時間的なずれが生じていることから確認できる。すなわち、これらの長周期波形は、岸沖方向の長周期変動に対し、沿岸方向の長周期変動がほぼ同じ空間位相で重畳したものであると考えられる。

以上の考察を模式的にまとめると、この水域における水位の長周期変動の挙動は、図-3.10のように整理できる。なお、本実験に用いた平面水槽の固有周期は、長辺方向に約850s、短辺方向に約360sであり、この水域でみられる長周期変動の周期は、少なくともこれらとは異なるものといえる。

(3) 方向スペクトル分布

ここでは、上記までの護岸前面の水位の長周期変動の方向特性について補足検討を行った。風波の方向スペクトルの推定方法としては、たとえばMEP (最大エントロピー原理法)²¹⁾ やBDM (ベイズ法)²²⁾ などがあり、近年では、海洋短波レーダーを用いて方向スペクトルを推定するなど、より実用的かつ高精度な推定法が提案・開発されている²³⁾。本研究では、長周期波に対してもこれらがそのまま適用可能なものと仮定し、そのうち汎用的でそれほど計算時間を有せずに簡易に方向スペクトルを推定することが可能な拡張最大エントロピー原理法を用いた推定方法 (EMEP)²⁴⁾ を用いた。本検討では、以下に示す手順で水位の長周期変動の方向分布を推定した。

まず、護岸前面の水位および水平2成分流速の長周期変動に対して方向スペクトル解析を適用した。次に、上記

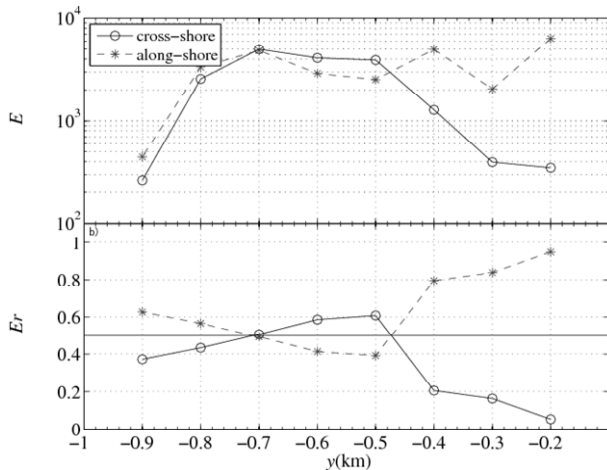


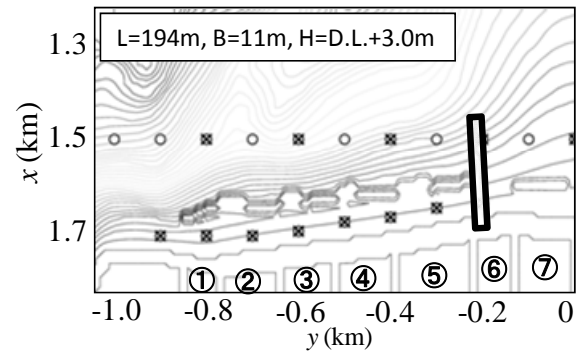
図-3.11 水位の長周期変動の沿岸および岸沖方向のエネルギーの関係

で得られた方向スペクトルを沿岸方向と岸沖方向の2方向に分割した。ここでは、 x 軸の正方向を基準方向（0度）とし、それに対して時計回りを負方向、反時計回りを正方向と定義し、これより、 -135 度 \sim -45 度および 45 度 \sim 135 度を沿岸方向、残りの -45 度 \sim 45 度、 -180 度 \sim -135 度、 135 度 \sim 180 度を岸沖方向と定義した。最後に、これらの定義に従って水位の長周期変動の沿岸および岸沖方向のスペクトル密度（エネルギー）を算出した。

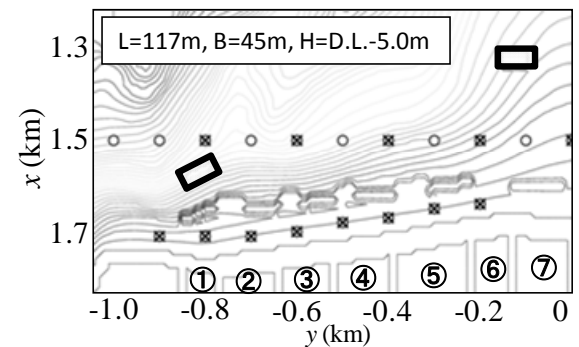
図-3.11に示すのは、上記の方法により得られた水位の長周期変動の沿岸および岸沖方向のエネルギーの関係である。図の上段は各方向のエネルギー E を、下段はそれらの全エネルギーに対する割合 E_r を示している。○は岸沖方向、*は沿岸方向のエネルギーである。図より、緩勾配斜面側の $y=-0.4\sim-0.2$ kmにおいては、沿岸方向のエネルギーが岸沖方向のエネルギーに対して 10^1 オーダー大きく、沿岸方向の長周期変動が卓越していることが確認できる。一方、急勾配斜面側の $y=-0.8\sim-0.5$ kmでは、両方向のエネルギーが同程度であることから、沿岸方向と岸沖方向の長周期変動が混在していることがわかる。このように、方向スペクトル解析からも前節で述べた護岸前面の水位の長周期変動の挙動が確認された。

4. 越波発生機構を考慮した越波低減の検討

前章で述べたように、被災当時の海岸地形における越波発生には護岸前面の水位の長周期変動が強く影響していることが明らかになった。中でも、急勾配斜面側では、水位の長周期変動と平均水位上昇、緩勾配斜面側では波浪集中による短周期波高の増大が、それぞれの越波量に大きく寄与していると考えられる。そこで、これらを考



(a) 突堤の設置位置



(b) 沖潜堤の設置位置

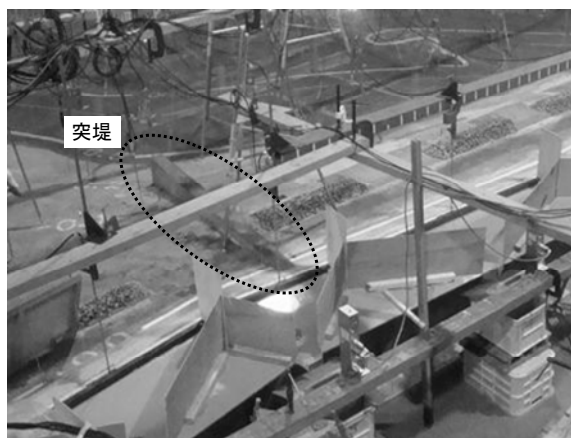
図-4.1 対策工設置時の平面図

慮した効率的かつ効果的な対策工として、地形急変部（ $y=-0.3$ km）付近に長さ194m、幅11m、高さD.L.+3.0mの突堤を設置した地形（突堤タイプ：図-4.1(a)、写真-4.1(a)）と緩勾配斜面および急勾配斜面上の水深20m地点にそれぞれ長さ117m、幅45m、高さD.L.-5.0mの潜堤を設置した地形（沖潜堤タイプ：図-4.1(b)、写真-4.1(b)）を想定し、これらの越波低減効果について検討を行った。なお、これらの対策工はいずれも不透過構造とした。

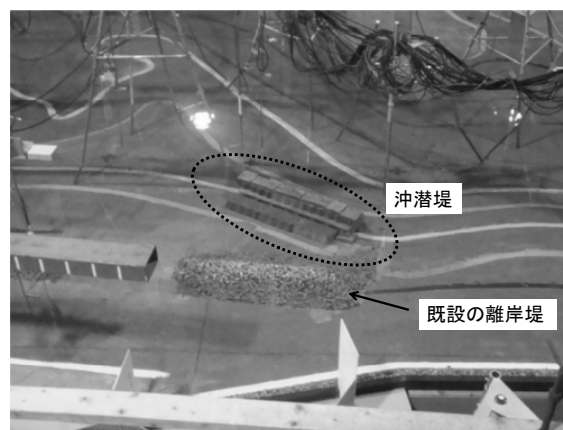
4.1 突堤による越波低減

被災当時の護岸前面における波浪場を整理した結果、拘束長周期波を含む波群が地形急変部（ $y=-0.3$ km）において大きく屈折し、その際に波群に拘束された長周期変動の解放が沿岸方向に行われ、潜堤・離岸堤群と護岸に挟まれた水域で沿岸方向に卓越する定在波が発達することがわかった。そこで、この付近の汀線から水深20m（図-4.1(a)に示すLine-06付近）まで延びる突堤を設置し、沿岸方向の長周期変動を抑制した場合の波高分布および護岸越波量を計測した（図-4.2）。

図-4.2(a)より、Line-06において、 $y=-0.2$ km付近の短周期波高および長周期波高が増大している。これは、この増大した地点の背後に突堤の端部が位置しており、突堤での反射の影響を受けたものと考えられる。それ以



(a) 突堤の設置状況



(b) 沖潜堤（急勾配斜面側）の設置状況

写真-4.1 対策工の設置状況

外の地点では、突堤を設置したことによる違いはほとんど見られない。一方、図-4.2 (b) より、Line-07において、まず、突堤の遮蔽域となる $y=-0.3\text{km}$ 付近では、短周期波高や長周期波高、平均水位上昇量が減少するとともに、護岸越波流量が低減した。一方、突堤からの反射域となる $y=-0.2\text{km}$ 付近では、護岸越波流量の増大がみられた。次に、これより西側 (y 軸の負の方向) の急勾配斜面側では $y=-0.7\text{km}$ 付近まで、長周期波高では $0.3\sim 1.0\text{m}$ 程度、平均水位上昇量では $0.1\sim 0.5\text{m}$ 程度の突堤設置による低減がみられた。これらは、沿岸方向の長周期変動や緩勾配斜面側から流入する水塊を突堤が遮蔽したためと考えられる。しかしながら、突堤から離れるほどその低減効果は小さくなり、護岸越波量が最大であった $y=-0.7\text{km}$ 付近での越波低減効果は5%程度に留まった。

4.2 沖潜堤による越波低減

被災当時の護岸前面における波浪場を整理した結果、急勾配斜面側の護岸前面で生じる平均水位の上昇は、高波高のまま来襲する波群が護岸近傍の潜堤・離岸堤群で砕波することによるものと考えられる。したがって、より沖合で砕波させることにより平均水位が上昇する位置を変化させることが有効であると考えられる。一方、緩勾配斜面側では、平均水位上昇および長周期波高の増大は避けられないため、越波流量の低減には短周期波高を低減させる必要がある。そこで、設置水深20m程度(図-4.1 (b))を限度としてこれらの沖合に潜堤を設置し、護岸前面の潜堤・離岸堤群に入射する短周期波高を低減させた場合の波高分布および護岸越波量を計測した(図-4.3)。

図-4.3 より、まず、緩勾配斜面側に設置した沖潜堤により、潜堤・離岸堤群より沖側の Line-06 のうち、 $y=-0.2$

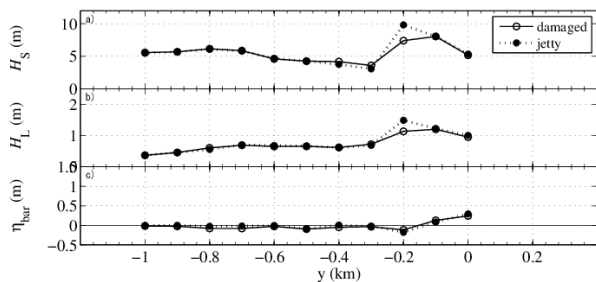
$\sim 0.0\text{km}$ 付近で短周期波高および長周期波高が低減し、その岸側の護岸における越波流量の大幅な低減に寄与していることが確認された。次に、急勾配斜面側に設置した沖潜堤により、潜堤・離岸堤群より岸側の Line-07 のうち、 $y=-0.7\sim -0.5\text{km}$ 付近では、短周期波高および長周期波高にほとんど変化は見られないが、平均水位上昇量が 0.1m 程度低減した。これにより、護岸越波量が最大であった $y=-0.7\text{km}$ 付近での越波流量は30%低減することが確認された。ただし、沖潜堤より沖側の Line-06 のうち、 $y=-1.0\sim -0.7\text{km}$ 付近で短周期波高および長周期波高のわずかな低減の理由については、今のところ不明である。

5. 結論

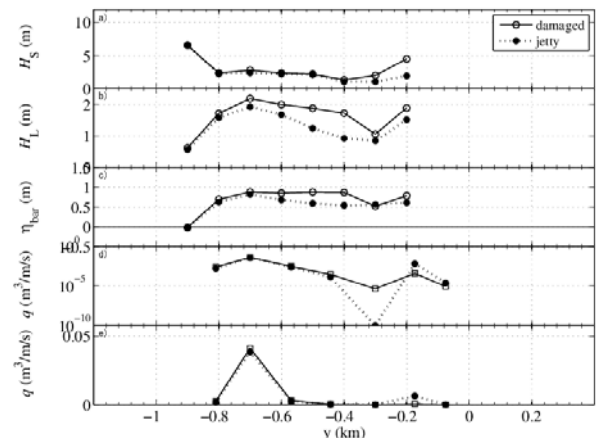
本研究では、2008年2月に複雑な海底地形を有する下新川海岸で発生した寄り回り波の来襲による越波・浸水被害を対象に、大型の平面水槽を用いて被災当時の波浪場や越波の発生機構の解明、それらを踏まえた効率的かつ効果的な対策工案の検討を行った。

被災当時において、急勾配斜面側に面する海岸護岸では、護岸近傍に設置された潜堤・離岸堤群との間の水域で生じる平均水位上昇や来襲波群に伴う水位の長周期変動の挙動が、緩勾配斜面側に面する海岸護岸では、来襲波浪の局所集中による短周期波高の増大が越波流量の増大に大きく影響を与えていることを確認した。

越波発生機構を考慮した越波低減の検討では、突堤を設置することにより沿岸方向の水位の長周期変動の抑制が可能となり、また、沖潜堤を設置することにより来襲波浪の抑制に加えて護岸前面水域の平均水位上昇の抑制が可能となり、最も越波被害の大きかった地域において、越波流量を5~30%程度低減できることを確認した。



(a) 潜堤・離岸堤群の前面 (Line-06)



(b) 護岸前面 (Line-07)

図-4.2 突堤設置後の波浪場および護岸越波流量 (白丸つき実線: 被災当時の結果, 黒丸つき破線: 突堤設置時の結果)

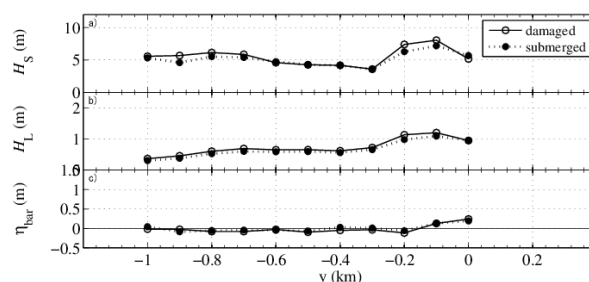
これらの結果, 長周期うねりの越波低減を考える際には, 従来までの短周期波浪の制御のみならず, 長周期変動の挙動や平均水位上昇の制御を含めた新たな対策を検討することも重要であることがわかった。

6. あとがき

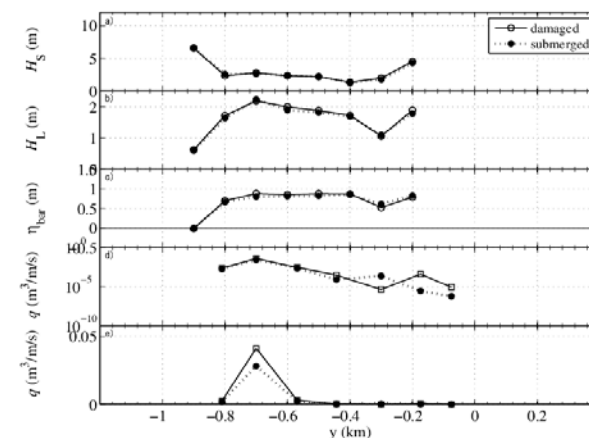
現在の下新川海岸では, 護岸背後の集落や施設の被害の規模に鑑み, 施設の安全性の確保を図るとともに, 漁業・海岸事業との連携により, 離岸堤の大型化や潜堤の離岸堤化, 護岸嵩上げなど漁港や海岸の機能を高める復旧が行われてきた。

一方, 本研究は, 下新川海岸で発生した越波・浸水被害を対象に, 長周期うねりと護岸越波流量の関係や護岸前面における顕著な長周期変動を考慮した対策工について検討を行ったものである。たとえば, 地形急変部をもつ神奈川県西湘海岸や富山県滑川地区においては, 下新川海岸と同様な災害が生じるおそれがあるため, これらの対策工を活用することにより越波低減が期待されると思われる。

このように, 今後, これらの成果が, 近年多発化して



(a) 潜堤・離岸堤群の前面 (Line-06)



(b) 護岸前面 (Line-07)

図-4.3 沖潜堤設置後の波浪場および護岸越波流量 (白丸つき実線: 被災当時の結果, 黒丸つき破線: 突堤設置時の結果)

いる長周期うねりの越波に対する護岸設計や対策工の検討などにおいて, その一助となれば幸いである。

(2011年9月16日受付)

謝辞

本研究の一部は, (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構・運輸分野における基礎的研究推進制度による研究課題「長周期巨大波浪の発達・変形機構と減災対策 (港湾・海岸被害の分析と類型化および減災対策の考案と検証)」(研究代表者: 東京大学・佐藤慎司) として実施したものである。本稿のとりまとめにあたっては, 本共同研究における議論の結果を大いに参考にした。共同研究終了時点 (平成23年3月末) のメンバーである東京大学教授 佐藤慎司氏, 同准教授 田島芳満氏, 同助教 高川智博氏をはじめ, 関係各位に対して心からの謝意を表す。

参考文献

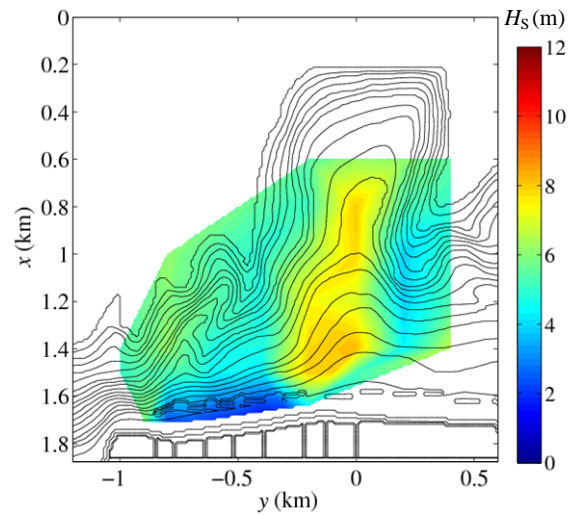
- 1) 田島芳満, 石指裕章, 佐藤慎司: 地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 65, No. 1, 2009年, pp. 211-215.
- 2) 深瀬祐太郎, Suminda Ranasinghe, 田島芳満, 佐藤

- 慎司：下新川海岸におけるうねり性巨大波浪の変形機構，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 65, No. 1, 2009 年，pp. 1411-1415.
- 3) 深瀬祐太郎，佐藤慎司，田島芳満，Ranashinghe Suminda：沿岸域地形急変部における長周期うねり性波浪の集中と対策，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 66, No. 1, 2010 年，pp. 21-25.
 - 4) Kashima, H and K. Hirayama: Effects of bottom topography characteristics on transformations of long period swell, Proceedings of the 4th International Short Conference on Applied Coastal Research, 2009, pp. 197-205.
 - 5) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No. 1036, 2002 年，162p.
 - 6) 加島寛章，平山克也：長周期うねりの護岸越波量および作用波圧特性に関する実験的検討，港湾空港技術研究所資料，No. 1218, 2010 年，26p.
 - 7) 平山克也，加島寛章，仲井圭二：長周期うねりのスペクトルと波群特性に関する考察，海洋開発論文集，Vol. 25, 2009 年，pp. 635-640.
 - 8) 加島寛章：うねり性波群に伴う水位の長周期変動の空間分布の算定，平成 22 年度ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会，2010 年，pp. 11-16.
 - 9) 池野正明，田中寛好：自由長波制御により造波された波群拘束長周期波の浅水・砕波変形と構造物による重複波の特性，海岸工学論文集，第 42 巻，1995 年，pp. 156-160.
 - 10) 関本恒浩，森屋陽一，水口 優：多方向波浪場における長周期拘束波の推定法に関する研究，海岸工学論文集，第 46 巻，1999 年，pp. 291-295.
 - 11) 川崎浩司，菊 雅美，舟橋 徹：直立護岸越波に及ぼすリーフ形状と波浪諸量の影響について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 65, No. 1, 2009 年，pp. 751-755.
 - 12) 太田隆夫，木村 晃，松見吉晴：人工リーフ背後の緩傾斜護岸における打ち上げ高・越波量について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 65, No. 1, 2009 年，pp. 776-780.
 - 13) 川崎浩司，水谷法美，岩田好一朗，小林智尚，由比政年，斎藤武久，北野利一，鷺見浩一，間瀬 肇，安田誠宏：富山県東部海岸における 2008 年 2 月高波による被害調査，海岸工学論文集，第 55 巻，2008 年，pp. 151-155.
 - 14) 加島寛章，平山克也：大型平面水槽における波群に拘束された長周期波の造波制御システムの導入，海洋開発論文集，Vol. 26, 2010 年，pp. 1263-1268.
 - 15) Sand, S. E.: Long waves in directional seas, Coastal Engineering, Vol. 6, 1982, pp. 195-208.
 - 16) 合田良美，岸良安治，神山 豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 4 号，1975 年，pp. 3-44.
 - 17) 高山知司，永井紀彦，西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第 21 巻，第 2 号，1982 年，pp. 151-206.
 - 18) 平山克也，春尾和人，宮里一郎：ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元に関する考察，港湾空港技術研究所報告，Vol. 48, No. 3, 2009 年，pp. 23-74.
 - 19) List, J. H.: Wave groupiness variation in the nearshore, Coastal Engineering, 1992, Vol. 15, pp. 475-496.
 - 20) Janssen, T. T. and J. A. Battjes: Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom, Journal of Geophysical Research, Vol. 108, C8, 2003, 14p.
 - 21) 橋本典明，小舟浩治：最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定，港湾技術研究所報告，第 24 巻，第 3 号，1985 年，pp. 123-145.
 - 22) 橋本典明：バイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定，港湾技術研究所報告，第 26 巻，第 2 号，1987 年，pp. 97-125.
 - 23) 橋本典明，L. Lukijanto，山城 賢，児島正一郎：海洋短波レーダーにおける実用的な方向スペクトル推定法の開発，海岸工学論文集，第 55 巻，2008，pp. 1451-1455.
 - 24) 橋本典明，永井紀彦，浅井 正：海洋波の方向スペクトルの推定における拡張最大エントロピー原理法の修正—入・反射波共存場を対象として—，港湾技術研究所報告，第 32 巻，第 4 号，1993 年，pp. 25-47.

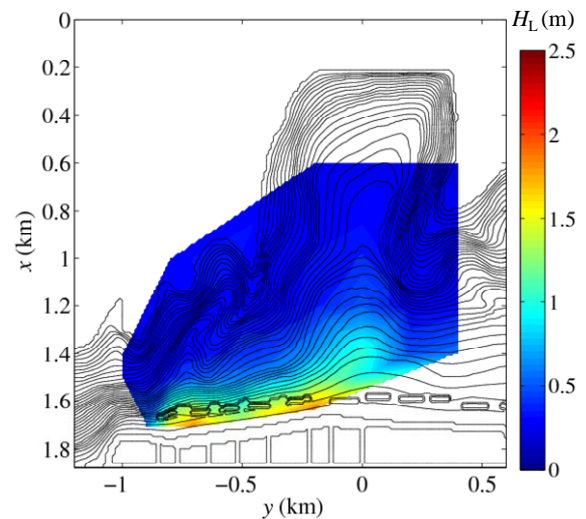
付録

付図-1～付図-3にcase2～4における各波浪統計量（短周期波高，長周期波高，平均水位上昇量）の空間分布を示す。

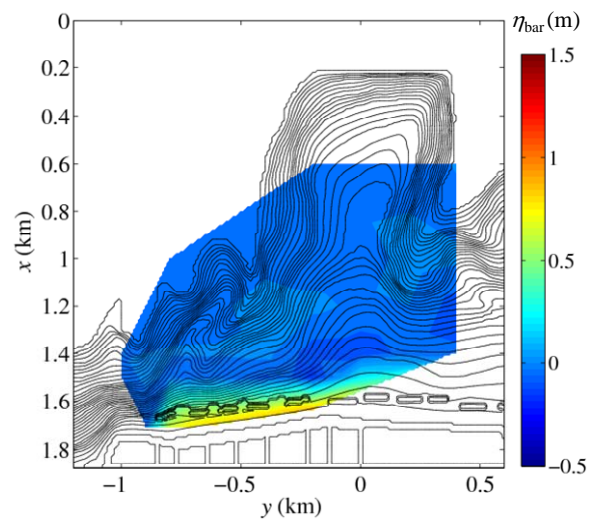
付図-4および付図-5に対策工の検討で用いた突堤および沖潜堤を設置した場合に被災当時に来襲したと思われる波浪を造波して得られた各波浪統計量の空間分布を示す。



(a) 短周期波高

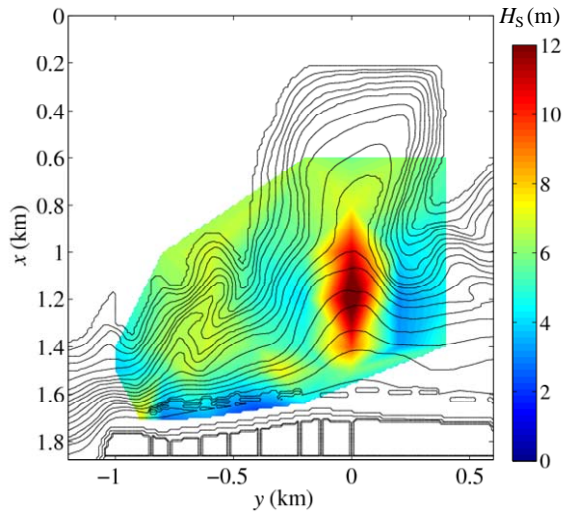


(b) 長周期波高

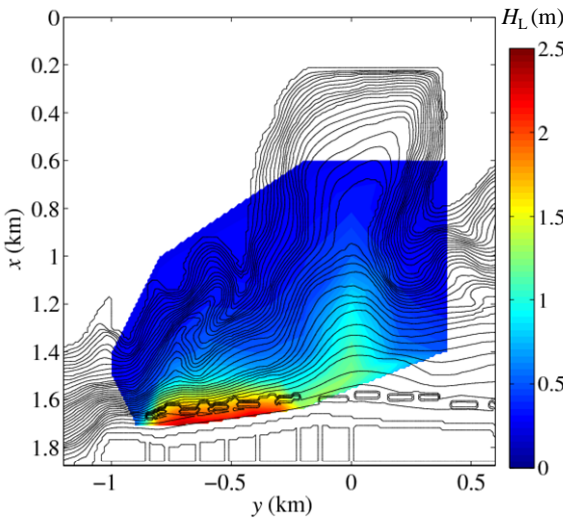


(c) 平均水位上昇量

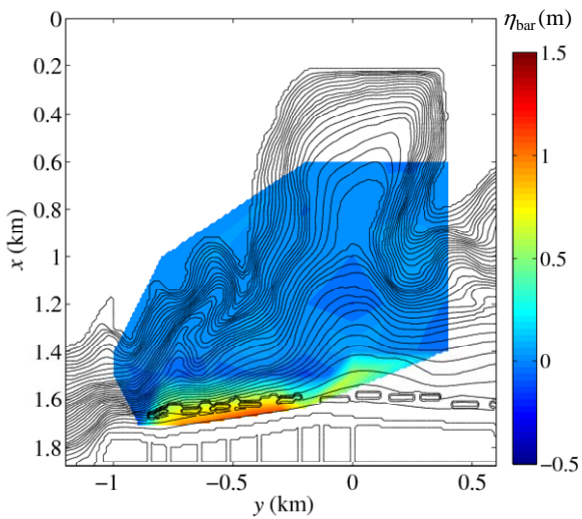
付図-1 case2における波浪統計量の空間分布（： $\theta = N18.5E$, $S_{max} = 25$, 自由長周期波の制御なし）



(a) 短周期波高

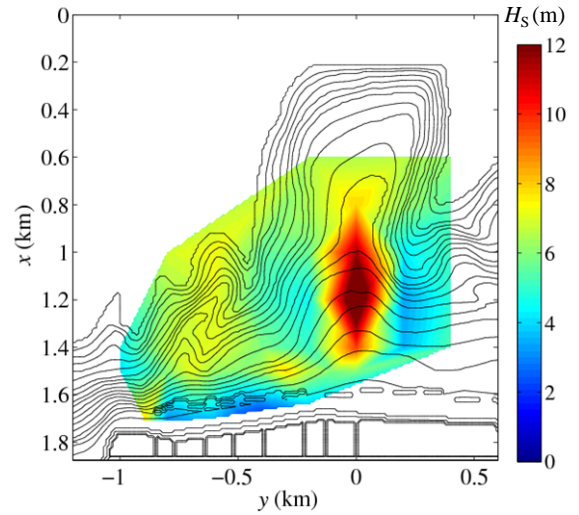


(b) 長周期波高

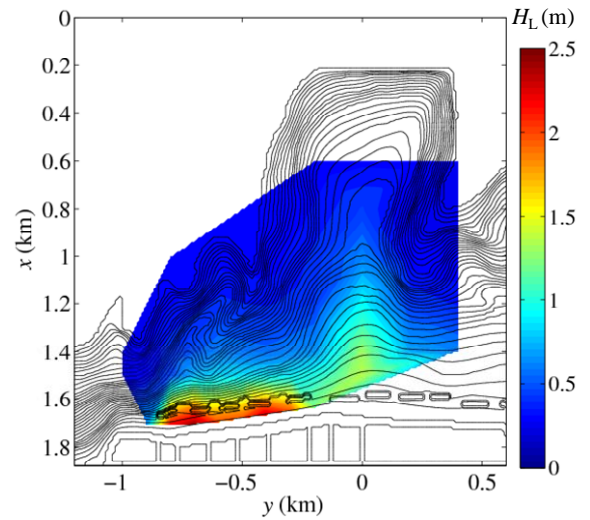


(c) 平均水位上昇量

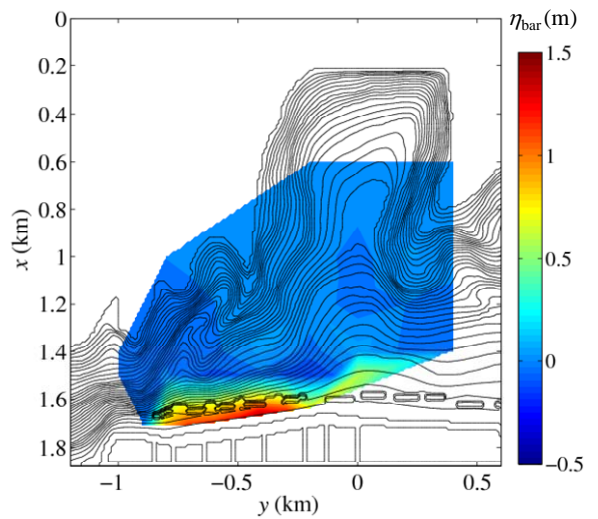
付図-2 case3における波浪統計量の空間分布 ($\theta=N3.5E$, $S_{max}=999$, 自由長周期波の制御なし)



(a) 短周期波高

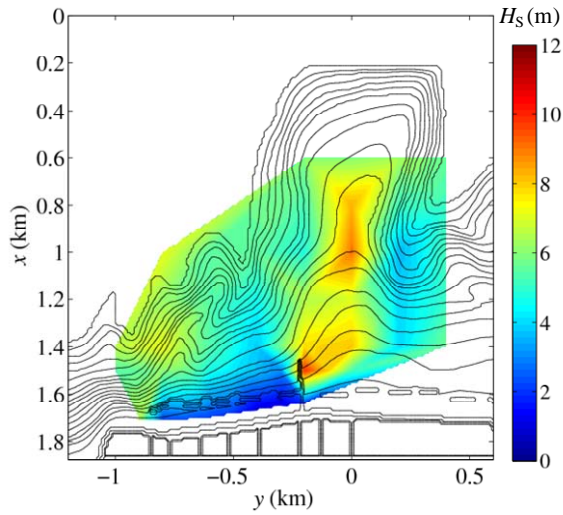


(b) 長周期波高

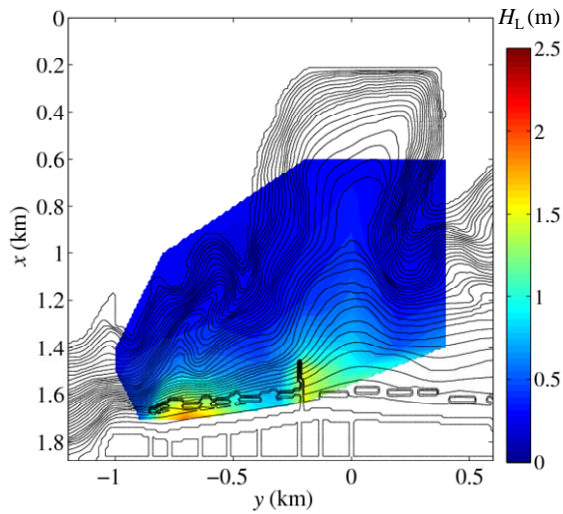


(c) 平均水位上昇量

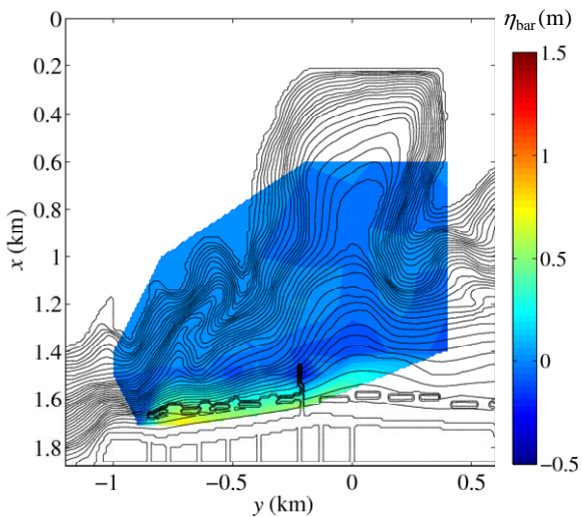
付図-3 case4における波浪統計量の空間分布 ($\theta=N3.5E$, $S_{max}=999$, 自由長周期波の制御あり)



(a) 短周期波高

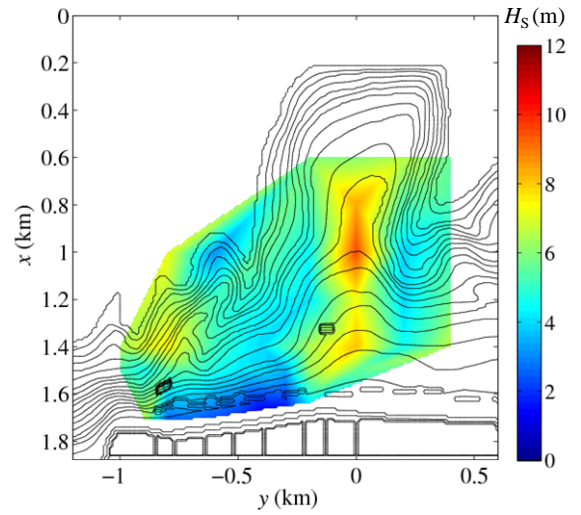


(b) 長周期波高

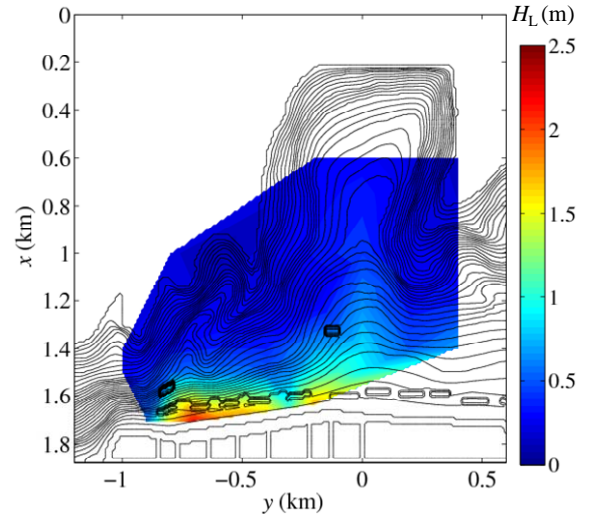


(c) 平均水位上昇量

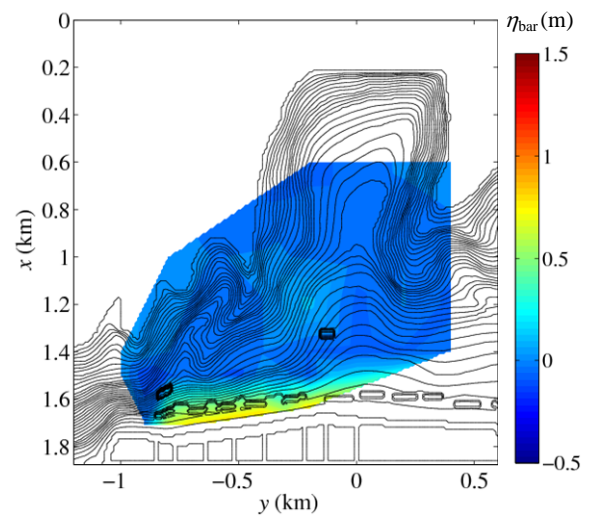
付図-4 突堤設置時における波浪統計量の空間分布
(case1 : $\theta=N18.5E$, $S_{max}=999$, 自由長周期波の制御なし)



(a) 短周期波高



(b) 長周期波高



(c) 平均水位上昇量

付図-5 沖潜堤設置時における波浪統計量の空間分布
(case1 : $\theta=N18.5E$, $S_{max}=999$, 自由長周期波の制御なし)