

長周期うねりの来襲特性に関する現地調査と その考察

FIELD SURVEY ON ENCOUNTER CHARACTERISTICS OF LONG PERIOD SWELL

加島寛章¹・平山克也²・平石哲也²

Hiroaki KASHIMA, Katsuya HIRAYAMA, Tetsuya HIRAISHI,

¹正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (同上)

Recently, coastal disasters due to long period swell induced by storms increase in the Japanese coasts and harbors. For example, the caissons of breakwater in the Fushikitoyama harbor were moved by the 14.2s swell in 2008. In general, in shallow water the wave height of long period swell becomes larger than that of wind wave under the effects of wave shoaling and wave refraction in the deeper region. It is important to comprehend the bathymetry condition of broad area for understanding the transformations of long period swell in coastal area.

In this study, the field surveys are conducted to analysis the coastal disaster due to long period swell. Moreover, the mechanism of the disasters is typified from the relationship between bathymetry condition and disaster situation of the studied region.

Key Words : Long period swell, bathymetry, wave direction, Boussinesq model,

1. はじめに

近年, 地球温暖化の影響によると思われる台風の経路変化や大型化に伴い, 運輸施設が集中するような沿岸部において大規模な被害が多発している. たとえば, 2006年台風12号による久慈港の護岸崩壊や2007年台風9号による西湘バイパスの崩落, 2008年2月の発達した低気圧による伏木富山港防波堤の滑動被災などがある¹⁾. これらの災害の特徴は, 波高は設計波よりも小さいものの, 周期が設計波よりも長い周期14~15s程度のうねり性波浪(以下では, 長周期うねりと表記する.) が来襲したことである.

一般に, このような長周期うねりの発生・発達には十分に長いフェッチと強風場の継続が不可欠である. したがって, 季節風が吹き寄せる北東向きに長いフェッチが取れる日本海側の富山湾沿岸や, 遠方の台風からのうねりが来襲する太平洋沿岸の各地域では, このような長周期うねりによる高波の来襲に注意が必要である. また, 周期の長い波浪は風波に比べ, より水深の深い沖から浅水変形や屈折の影響を受け, 波形勾配が小さく砕波変形が生じにくくなるため, 浅瀬や海岸上ではより大きな波高となって防波堤や護岸に作用する. このような長周期うねりが来襲する可能性のある各地域では, 従来よりも広域な地形特性を整理しておくことが, 港湾および海

岸被害の予測・低減のために非常に重要である.

そこで本研究では, 長周期うねりによる被災や被害が発生した地域に対して現地調査を実施し, それらの被災要因を分析した. さらに, 各調査地域の地形条件と被災傾向の関係を明らかにすることにより, 被災メカニズムの類型化を試みた.

2. 現地調査

(1) 調査概要

長周期うねりによる港湾や海岸被害とその対策を把握するとともに, 各地の地形条件による被災傾向を分析するため, 長周期うねりが比較的来襲しやすいと考えられる富山湾沿岸(高岡市~入善町), 土佐湾沿岸(香南市~四万十市), および北海道南岸(苫小牧市~白老町)を対象に, 現地調査を行った(図-1). 以下では, 各地域における調査結果, および海底地形による波浪変形特性に着目した分析結果について述べる.

(2) 富山湾沿岸(高岡市~入善町)

a) 調査結果

富山湾はあいがめと呼ばれる急峻な海底谷がいくつも存在している. 中でも黒部川河口に隣接する下新川海岸では, 図-2に示すように, 陸から数km離

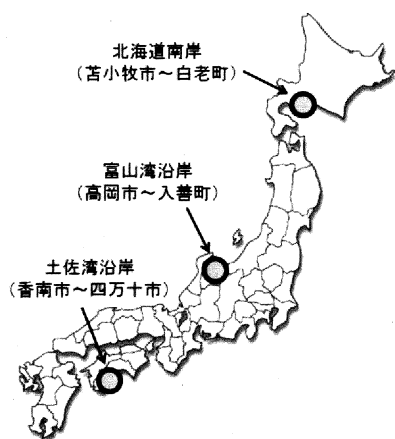


図-1 現地調査場所

れた海域の水深がすでに 150m 以深となることに加え、これらの海底谷と岬状地形が入り組んだ海底地形が形成されている。このような海域では、複雑な海底地形の影響を受けて屈折や浅水変形による局所的な波高の増大が生じ、大きな被害をもたらすことが予想される。たとえば、2008 年 2 月に発生した越波浸水被害は、津軽海峡から北海道南岸にかけて停滞しながら急激に発達した低気圧に伴い、日本海上で北東から南西にかけて吹き続いた強い風により、周期 14s 程度の長周期うねり（寄り回り波）が発生・発達したことが原因とされている。すなわち、富山湾沿岸に來襲した長周期うねりは、海底谷に挟まれた岬状地形により屈折、浅水変形し、波高増大を伴って岬状地形上の中央根元付近に位置する被災箇所へ來襲したものと推測された。

b) 海底地形による波浪変形特性（波高増大）

これらの考察の妥当性を確認するため、現地の海底地形を対象に検証計算を行った。

検証計算では、急峻な海底谷や岬状地形の入組んだ複雑な海底地形を対象に、回折や屈折、浅水変形、碎波に加え、遡上等の非線形な波浪変形現象を高精度に算定可能なブシネスクモデル²⁾を用いた。計算対象領域は、越波浸水による被災箇所および前面の複雑な海底地形を含む、図-2 に示す陸から数 km 離れた海域までとした。作用波としては、富山湾沿岸の伏木富山港に來襲した長周期うねりの再現計算を実施した平石ほか¹⁾にならい、周期 14.0s の JONSWAP 型スペクトルを入射させ、スペクトルの尖鋭度を表す γ 値は 10、方向集中度パラメータ S_{max} は

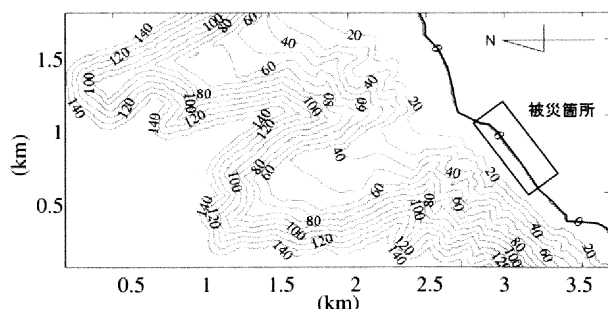


図-2 下新川海岸の海底地形（コンター線：水深値 (m)、右上の白色部分：陸地）

表-1 計算条件（富山湾沿岸）	
入射波周期	14.0s
スペクトル形状	JONSWAP 型 ($\gamma=10.0$)
入射波高	1.0m
入射波向	N
方向集中度パラメータ	75
時間差分	0.35s ($=T/400$)
計算格子	10.0m ($=L/30$)
緩造波時間	140s ($=10*T$)
計算開始時間	1400s ($=100*T$)
計算終了時間	4200s ($=300*T$)

75 とした。また、後の考察を容易にするため、波高は 1.0m とした。主波向は N とし、図-2 に示す計算領域からの左側からまっすぐに入射させることに対応している。なお、本計算では進行波の変形・集中による波高の増大について着目しているため、陸側にはエネルギー吸収帯を設け、反射や越波をさせない条件で計算を行った。表-1 に上記の計算条件等を示す。

図-3 に検証計算で得られた有義波高の平面分布を示す。図中のコンター線は有義波高値であり、同時に入射波高に対する増大率を表している。現地調査で考察したように、長周期うねりの波高は水深が浅い部分（岬状地形）で増大しており、海底地形の様子とよく対応していることがわかる。これらの地点における有義波高は入射波高に対して最大 1.4 倍であった。一方、図の中央付近に位置する沿岸部において波高の減衰が見られるが、これは、この海底前面が海底谷にあたり、この海域に入射した波は両側の岬状地形上へとそれぞれ屈折した結果、波エネルギーが沿岸部まで到達しなかったためと考えられる。このように、海底谷と岬状地形が存在する複雑な海底地形を有する海域では、波は浅い海域へ屈折して集中し、浅水変形により波高の増大が生じるため、波向に対して前面に岬状地形が広がる海岸では、風波に比べて長周期うねりによる大きな波高が來襲しやすいことが確認された。

(3) 土佐湾沿岸（香南市～四万十市）

a) 調査結果

太平洋に面した土佐湾沿岸は、大局的には南に開けた弓状の海岸線を有しているが、その沿岸域では海岸や岬、岩礁帯等が交互に現れる海岸地形が形成されている（図-4）。そのため、長周期うねりの来

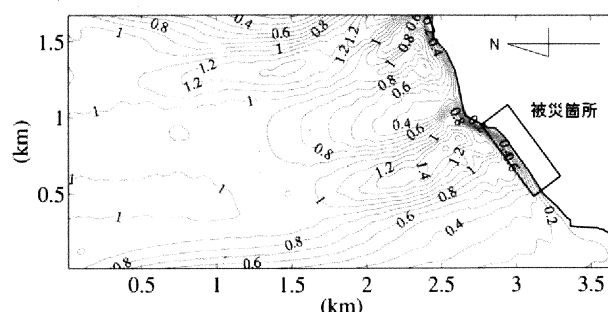


図-3 有義波高平面分布（コンター線：有義波高値 (m)、右上の白色部分：陸地）

襲特性に違いが生じることが考えられる。

たとえば、土佐湾西岸に位置するK海岸では、海岸前面に岩礁帯があり、これらで砕波することにより来襲波のエネルギーが減衰され、海岸浸食や越波災害等の危険性が比較的低くなっている。ところが、岩礁帯が途切れている一部の区間では、海岸に波が直接作用するため、海浜勾配が急峻化してそこを遡上する波による砂利の飛散や越波が生じているようである。このように岩礁帯の有無により来襲波による海岸浸食や越波被害に差異がみられている。

一方、同じ土佐湾西岸に位置しているS海岸では、海岸突堤の根固めブロックが長周期うねりにより飛散する被災が度々発生している。たとえば、2002年の台風9号（来襲波の周期15.3s）や2005年の台風14号（来襲波の周期16.2s）は、いずれも土佐湾の南海上を北東に進行し、これらの進行に伴って発生したと思われる長周期うねりが土佐湾に対して南東寄りから来襲している³⁾。しかしながら、これらの災害をもたらした来襲波の波向は、土佐湾の対岸がある北東（海岸線に対して左側）であることが現地調査より判明し、来襲波の波向が沖からの伝播過程の中で土佐湾の海底地形の影響を受けて曲げられ、北東寄りからS海岸に来襲したものと推察された。

このように、沖合から海岸線に至るまでに海底地形の影響を受けて来襲波の特性が大きく異なることが考えられる。すなわち、来襲波の波向が沖合で等しい場合でも、各海岸線に到達する来襲波の波向は大きく異なることが予想される。そこで、比較的接近している上記の2つの海岸を対象に、沖から海岸線までの海底地形による来襲波の波向特性について、エネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算により検証した。

b) 海底地形による波浪変形特性（波向変化）

上述した長周期うねりの来襲波向と海底地形の関係を確認するため、エネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算により検証を行った。検証計算では、計算領域を沖合から沿岸域まで階層的に分割（最小計算領域：約2km×2km）し、K海岸およびS海岸近傍の波浪変形を計算した。作用波としては、周期16.0sのブレットシュナイダー・光易型スペクトルを入射させ、方向集中度パラメータ $S_{\max}$ は75とした。入射波高は1.0mに設定した。本検証では沖合から沿岸域、沿岸域から各海岸に至るまでの海底地形による屈折の影響を調べるため、入射波の波向はK海岸およびS海岸に来襲しやすいESE、SE、SSEの3種類に設定した。なお、本計算における沿岸域は、最小計算領域である陸地から約2km四方の範囲とした。表-2に上記の計算条件を示す。

図-5および図-6に示すのは、K海岸およびS海岸に対してエネルギー平衡方程式による波浪変形計算により得られた平均波向分布である。図中のベクトルは波向を表し、各図の上から下の方向に入射波を沖

表-2 計算条件（土佐湾沿岸）

対象海岸	K海岸		S海岸
入射波周期	16.0s		
スペクトル形状	ブレットシュナイダー・ 光易型		
入射波高	1.0m		
入射波向	ESE	SE	SSE
方向集中度パラメータ	75		
計算格子	10.0m（最小計算領域）		

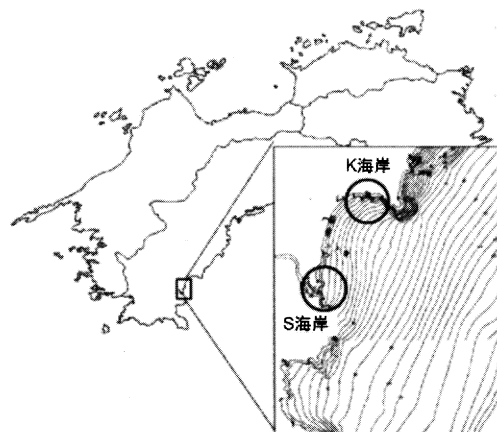


図-4 K海岸とS海岸の位置関係

合から作用させている。また、図中の○印は調査対象海域を表している。

図-5よりわかるように、沖合波向（入射波向）がESEの場合では、沿岸域の波向（最小計算領域における入射波向）がSSEに変化し、その後沿岸域内で屈折して調査対象海域ではSに変化している（図-5(a)）。また、沖合波向がSEおよびSSEの場合では、沖から沿岸域にかけては屈折の影響はほとんど見られないが、沿岸域内の微地形の影響を受けて調査対象海域の波向はやはりSに変化している（図-5(b)および(c)）。したがって、南に開いたK海岸では、沖の長周期うねりの波向にかかわらず、沖および周辺の海底地形により生じる屈折変形の影響を受け、長周期うねりはほぼSから来襲することがわかる。

一方、S海岸についてみると、K海岸と同様に沖合の海底地形や沿岸域内の微地形の影響を受けて屈折が生じ、長周期うねりの来襲波向が変化していることが確認された。沖合波向がESEの場合では、沖合から沿岸域、沿岸域から調査対象海域にかけて屈折の影響を受けずに波が伝播し、波向はESEのままである（図-6(a)）。一方、沖合波向がSEおよびSSEの場合では、沖から沿岸域にかけて波向がSEに変化し、沿岸域から調査対象海域にかけてやはりESEに変化している（図-6(b)および(c)）。したがって、東に開いたS海岸では、沖の長周期うねりの波向にかかわらず、沖および周辺の海底地形により生じる屈折変形の影響を受け、長周期うねりはほぼESEから来襲することがわかる。

ところで、これらの算定結果は、S海岸で実施し

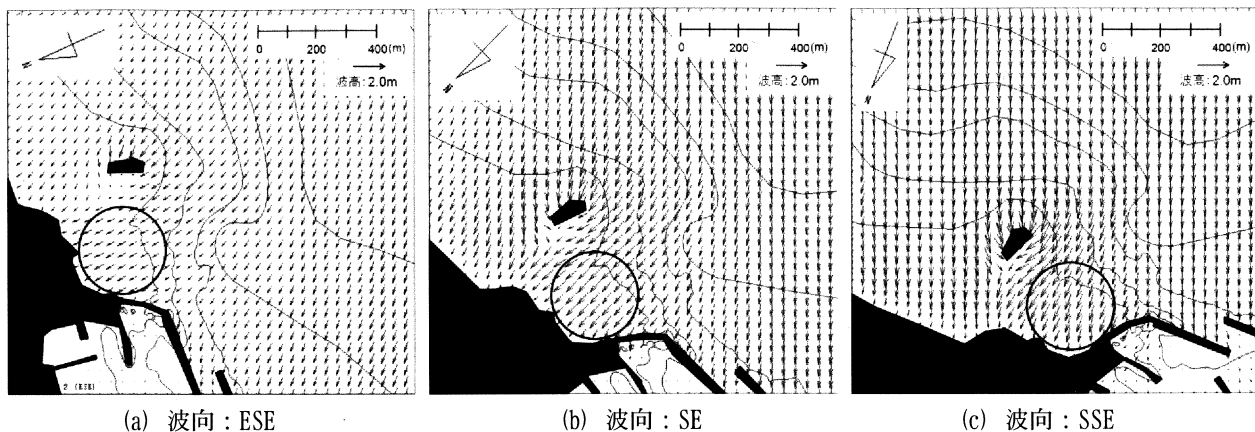


図-5 K海岸における長周期うねりの来襲波向と海底地形の関係
(コンター線：水深値 (5m間隔), ○印：調査対象海域)

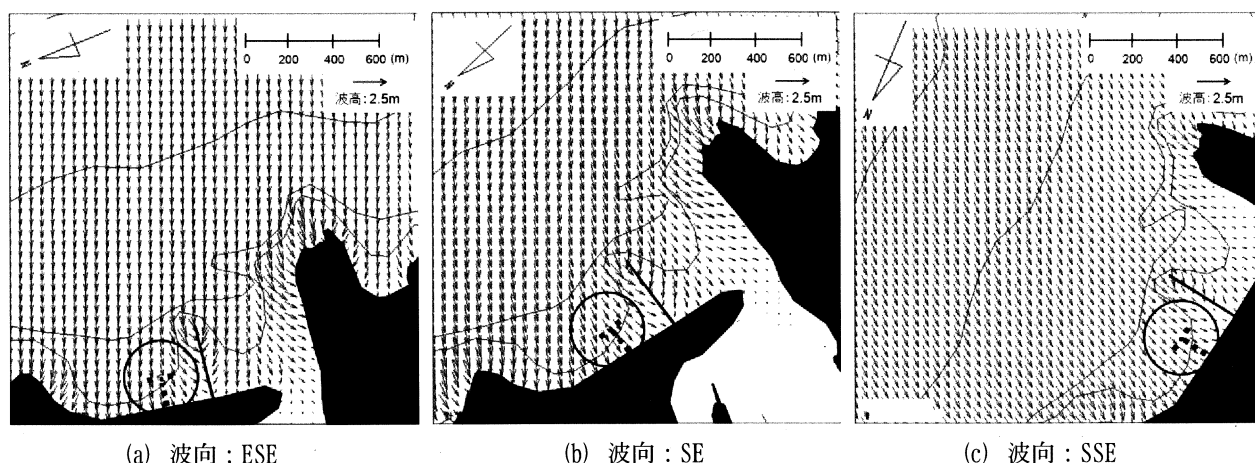


図-6 S岸における長周期うねりの来襲波向と海底地形の関係
(コンター線：水深値 (5m間隔), ○印：調査対象海域, 点線：海岸突堤)

た現地調査において、被災波は海岸突堤（図-6中の点線で表示）に対して左側（北より）から来襲したであろうとの推定結果を十分説明できていない。これは、本検証計算では、海岸突堤法線やその周辺に形成された微地形を考慮していないため、突堤先端で生じる屈折・回折変形により突堤の付け根周辺で波向がNEに変化する様子が再現されていないためと考えられる。

さらに、K海岸およびS海岸の調査対象海域への来襲波向についてみると、沖合で等しい波向の長周期うねりを作用させた場合でも、K海岸についてはS方向、S海岸についてはESE方向と、各海域への来襲波向は異なっている。

このように、長周期うねりが沖合から来襲する場合には、沖合の大局的な地形や沿岸域の微地形により屈折が生じるため、たとえ海岸が近接していたとしても、外洋から海岸線に來襲する長周期うねりの波向は、海岸が開けた向きに依存しやすいことが改めて確認された。

(4) 北海道南岸（苫小牧市～白老町）

a) 調査結果

北海道南岸は、緩やかな曲線を描く比較的単調な平行等深浅海岸が形成されている（図-7(a)）。そのため、台風の北上に伴い南から來襲する長周期うねりは、それぞれ同様な波浪変形を受けて各地の海岸に到達すると考えられる。ところで、この地域では、平成6年までにもともと100～300m幅を有していた海浜の汀線が全体的に後退し、海岸侵食による汀線後退が進んだ弱い部分から護岸崩壊や越波被害が多発している。これらの対策として、直立護岸から緩傾斜護岸への移行整備が行われているものの、整備の進捗に合わせて被災箇所が次々と移動し、現在では断続的に総延長約7kmの緩傾斜護岸が整備されている。一方、合わせて沖合に人工リーフを整備した地域では、沖での砕波を促進させる面的防護効果により汀線の前進がみられる。

b) 海底地形による波浪変形特性（施設効果）

上述した緩傾斜護岸や人工リーフを活用した面的防護施設による、長周期うねりの波浪変形特性を確認するため、エネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算により検証を行った。作用波としては、周期

表-3 計算条件（北海道南岸）

入射波周期		14.0s
スペクトル形状		ブレットシュナイダー・ 光易型
入射波高		1.0m
入射波向		SE
方向集中度パラメータ		75
反射率	緩傾斜護岸	0.3
	直立護岸	0.9
計算格子		20.0m

16.0sのプレットシュナイダー・光易型スペクトルを入射させ、方向集中度パラメータ S_{max} は75とした。入射波高は1.0mに設定した。入射波向は、長周期うねりが北海道南岸に來襲する可能性の高い南東（SE）に設定した。表-3に計算条件を示す。また、緩傾斜護岸および人工リーフによる波高減衰の検討の他に、緩傾斜護岸の整備に合わせて被災箇所が次々と移動したことを踏まえ、護岸形式の不連続部が周辺波浪場に与える影響についても検討できるように、現地の整備とは異なるが、緩傾斜護岸と直立護岸（未整備区間）を交互に設置したケースを設定した。図-7に緩傾斜護岸および人工リーフの整備前と整備後の海底地形を示す。

ところで、エネルギー平衡方程式では、緩傾斜護岸の構造をふまえた波浪変形は算定できないため、護岸境界において異なる反射率を設定することにより緩傾斜護岸と直立護岸を区別している。そこで、構造様式別の反射率の概略値に関する合田⁴⁾による推定値を参考に、緩傾斜護岸に対しては「異形消波ブロック斜面」の0.3、直立護岸に対しては0.9と設定した。また、人工リーフは、陸地から360m離れた地点に3基設置し、リーフ長は300m、幅は40m、リーフ間隔は150mに設定し、可能な限り現地で設置されているリーフを再現した。

図-8に、エネルギー平衡方程式により算定された有義波高の平面分布を示す。図中のコンター線は有義波高値を表している。図-8(a)より、護岸整備が行われていない場合では、長周期うねりの來襲に対して、全海岸線にわたって一様な波高の増大を確認することができる。すなわち、比較的単調な平行等深浅海岸が形成されている海岸に長周期うねりが來襲する場合には、海岸の各地において同様な波浪が來襲し、波高も単調に分布することが確認された。

一方、図-8(b)より、緩傾斜護岸および人工リーフを整備した場合では、人工リーフによる波高減衰（人工リーフ前面の波高と比べると、通過後の波高は2割減である）が再現された。これは、沖合に設置された人工リーフ上で砕波が促進されて來襲波のエネルギーが低減されたため、ヘッドランドによる波の遮蔽効果と同様のメカニズムにより、リーフ背後でトンボロ現象が発達したことに対応していると考えられる。これに対し、人工リーフ間では、波高

減衰を確認することができないが、本計算では人工リーフによる回折効果は過小評価されている可能性があることに注意を要する。

また、緩傾斜護岸の整備による波高減衰および護岸端部における波高の変化についてみると、直立護岸に対する計算結果とほとんど違いが見られなかった。したがって、海岸施設整備の進展に伴い、隣接する未整備区間で越波被害が発生した主な原因は、作用波の特性が変化したのではなく、海岸の防護能力による違いと考えられる。ただし、海岸施設が長周期うねりの変形特性に与える影響をより詳細に確認するためには、護岸構造などの違いによる遡上や越波を考慮した波浪変形計算を行う必要があると思われる。

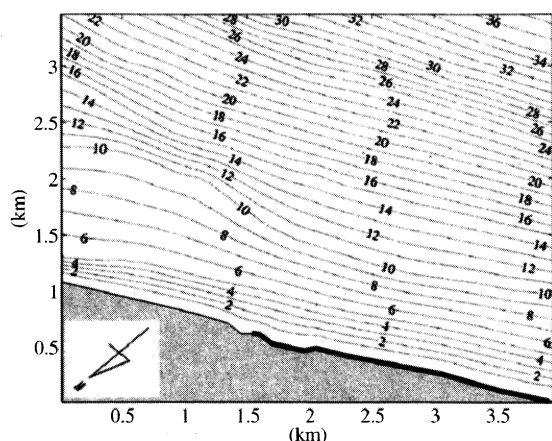
3. 被災メカニズムの類型化

ここでは、これまでの現地調査の結果および各調査地域の地形条件と被災傾向の関係から、長周期うねりによる被災メカニズムの類型化を試みる。たとえば、3つの海底地形特性（局所的な複雑地形、沖合の大域地形、広域的な単調地形）に大別して、被災メカニズムとその対策についてまとめると、表-4のように整理できる。

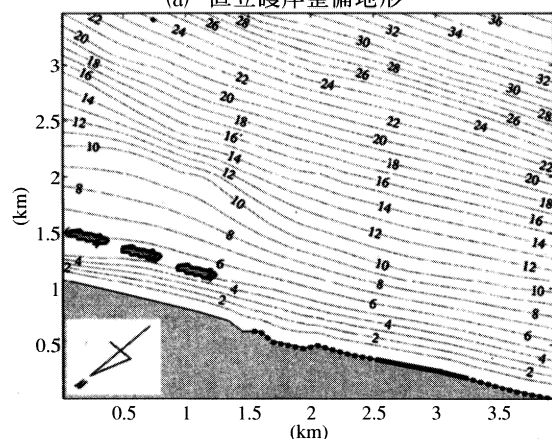
まず、局所的な複雑地形では、波の集中機構を把握することが重要となる。富山湾沿岸における波浪変形計算結果のように、海底谷と岬状地形が入り組んだ複雑な地形を有する海域では、急激な水深変化に伴って屈折および浅水変形が促進され、波の集中による波高の増大が懸念される。このような現象が発生する海域は比較的特定しやすいため、集中的に対策を講じることにより被害を低減できる可能性がある。たとえば、水深20m海域に離岸堤タイプの対策工を設置し、沖で強制的に砕波を促進させる対策などが考えられる。

次に、沖合の大域地形では、長周期うねりと風波の周期の違いによる屈折状況の変化が重要となる。土佐湾沿岸における波浪変形計算結果で確認したように、沖合から沿岸域への伝播過程で屈折が生じ、その後、沿岸域内の微地形によりさらに屈折して波向が変化する。これにより、來襲波の周期が長いほど、近接した地域において、沖で波向が等しい場合でも各地域への來襲波向が異なることが考えられる。このように、沿岸域における長周期うねりの來襲方向を考える場合には、より水深の深い沖合の海底地形による影響を考慮することが重要である。

最後に、広域的な単調地形では、局所的な複雑地形と異なり、波高の集中は生じにくい代わりに、長周期うねりはどの海岸にもほぼ同様に來襲する。そのため、防護すべき背後地の状況を把握することが重要となる。北海道南岸における波浪変形計算結果のように、単調地形が続く海岸では、海岸により來

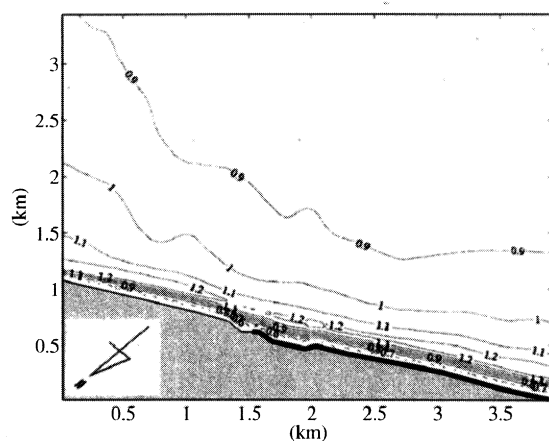


(a) 直立護岸整備地形

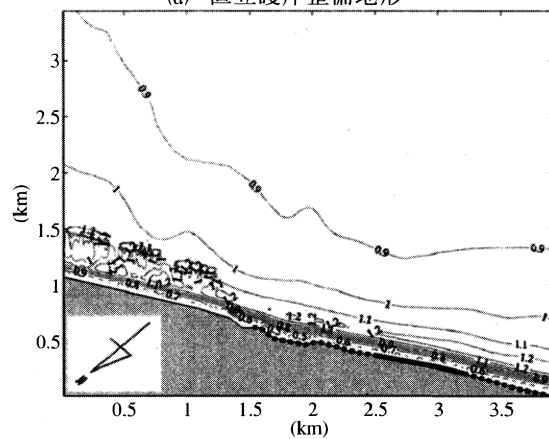


(b) 緩傾斜護岸および人工リーフ整備地形 (想定)

図-7 北海道南岸の海底地形 (コンター線：水深値 (m)，左下の灰色部分：陸地，点線：緩傾斜護岸，実線：直立護岸，囲み線：人工リーフ 3 基)



(a) 直立護岸整備地形



(b) 緩傾斜護岸および人工リーフ整備地形 (想定)

図-8 有義波高平面分布 (コンター線：有義波高値 (m)，左下の灰色部分：陸地，点線：緩傾斜護岸，実線：直立護岸)

襲波の特性に違いは見られず，同様な被災状況になる可能性が高い。そのため，特に防護が望まれる地域に選択的に対策を講じる必要がある。対策工としては，緩傾斜護岸の整備や人工リーフの設置等の面的防護が挙げられるが，緩傾斜護岸の整備においては，背後地への遡上・越波の増大や周辺の波浪場を与える影響についても，詳細な検討が望まれる。

4. おわりに

本研究では，長周期うねりの来襲しやすい地域（富山湾沿岸，土佐湾沿岸，北海道南岸）を現地調査するとともに海岸や港湾での既往被害を分析し，各調査地域の地形条件と被災傾向の関係から被災メカニズムの類型化を試みた。その結果，長周期うねりは風波と異なり，沖合の海底地形特性の影響を受け，その被害形態が海底地形により異なることがわかった。また，特に複雑な海底地形に起因した波高の集中が生じる場合には，当該地域に重点的な対策を講じることにより，被害を低減できる可能性があることが示唆された。

謝辞：下新川海岸の海底地形測量データは，国土交

表-4 被災メカニズムの類型化 (海底地形特性)

海底地形	考慮すべき項目	対策案
局所複雑地形	波高の増大	集中的な碎波促進
沖合大域地形	波向の変化	沖での屈折を考慮
広域単調地形	後背地の状況	選択的な面的防護

通省北陸地方整備局黒部河川事務所よりご提供いただいたことを付記する。また，本研究の成果の一部は，(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構による運輸分野における基礎的研究推進制度（代表者：佐藤慎司）により実施されたものであることを記し，謝意を表する。

参考文献

- 1) 平石哲也，平山克也，加島寛章，春尾和人，宮里一郎：偶発波浪荷重による被害例とその対策，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 981-985，2008。
- 2) 平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 11-15，2004。
- 3) 加島寛章，平山克也，峯村浩治，平石哲也：全国波浪観測データを活用したうねり性波浪の伝播特性について，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 171-175，2008。
- 4) 合田良美：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，p. 83，2008。