平成 15 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

勉 強 会 資 料

平成 16 年 1 月

独立行政法人　港湾空港技術研究所

海洋・水工部　波浪研究室

目　　次

1.はじめに ---------- 1

2.ブシネスクモデル(NOWT-PARI)を用いた実海域の波浪変形計算

2.1　ブシネスクモデル(NOWT-PARIVer.4.6β)の現地適用事例　ー紋別港ー　---------- 2

日本データサービス株式会社　　川口　勉

2.2　横須賀港走水地区における波浪場解析と実験との比較　---------- 7

株式会社　エコー　　原崎　恵太郎

2.3　ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)による港内静穏度の検討

ー伏木富山港（伏木地区）の港湾計画改訂ー　---------- 12

国土環境株式会社　　成毛　辰徳

2.4　長周期波が卓越する波浪場への

ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)の適用　---------- 17

株式会社三洋コンサルタント　　西井　康浩

2.5　Ｖ字型チャンネルの効用　---------- 22

三井共同建設コンサルタント株式会社　　國田　治

3.ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)の現状

3.1　ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)における

擬似段波モデルの適用（その２）---------- 24

独立行政法人　港湾空港技術研究所　　峯村　浩治

3.2　高知港における台風0209号来襲時の波浪変形計算への適用事例　---------- 29

独立行政法人　港湾空港技術研究所　　田中　和宏

4.ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)を用いたパソコンシステム

4.1　東京湾に面する港湾の風波とうねりを考慮した

高精度波浪変形計算のパソコンシステム　---------- 34

アルファコンサルタント株式会社　　上原　功

5.まとめ ---------- 39

付録：勉強会議事録 ---------- 40

1. はじめに

本勉強会は外部講習会として行われている非線形波浪変形計算モデル（NOWT-PARI）の業務適用事例の報告会であり，昨年度から数えて２回目になります．近年，港湾事業調査費に関しては，毎年削減されているのが現状であり，予算確保のためには，財務省への説明義務が発生します．ブシネスクモデルの開発においても若干の予算を貰っており，ブシネスクの重要性を簡単に説明するために本勉強会の報告資料を利用させて頂いております．

現在の国の考え方は，港湾整備は十分に整備されているという認識を持っており，現実にある様々な現場での問題解決に関するモデル開発に関しては，「なぜ，今調査をしなければならないのか」を説明する理由書が必要となり，そのための説明資料作成に有料な資料となっております．

現在の港湾は高機能化が要求されており，人工干潟や浅場の造成に伴い港内の水深変化が激しくなっているため，従来の計算モデルでは対応仕切れないケースが増えてきています．港湾のこれらの付加価値を高めるためには，より一層のモデル開発・改良が必要であり，透水層モデルをはじめとするブシネスクモデルのさらなる高機能化を進め，最終的には，エネルギー平衡方程式と一体化をすることで次世代に汎用的に利用される波浪変形計算システムの確立を目標としています．

今後とも，より精度の高い計算モデルの開発にご協力頂きたいと存じます．

2. ブジネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)を用いた実海域の波浪変形計算

2.1 ブジネスクモデル（NOWT-PARI Ver.4.6）の現地適用事例　―紋別港―

2.1 検討概要

北海道のオホーツク海に面する紋別港（図－１）では，低気圧の通過時およびその後数日間にわたり，図－２に示す範囲で擾乱が発生し，船舶の着岸や荷役不能，係留索の破断等の被害を引き起こしている．本資料では，図－３のフローに従い実施している港内擾乱要因の把握と対策工の検討に際し，ブジネスクモデルを適用した事例について，中間結果をとりまとめている．なお，波浪・流況および船体動揺観測地点は，図―４に示すとおりである．

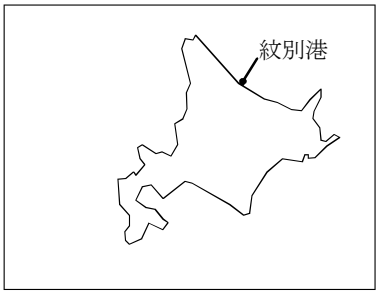


図-1 検討対象港の位置

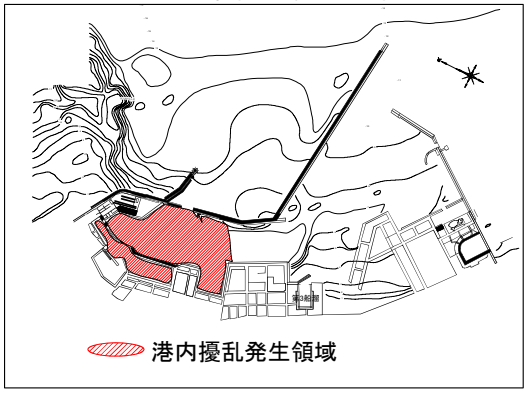


図-2 港内擾乱領域

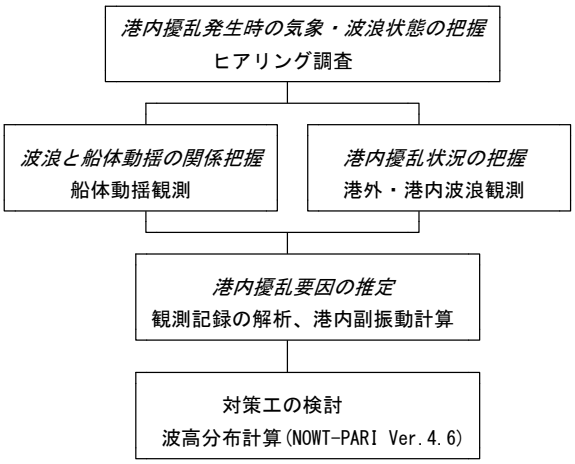


図-3　検討フロー

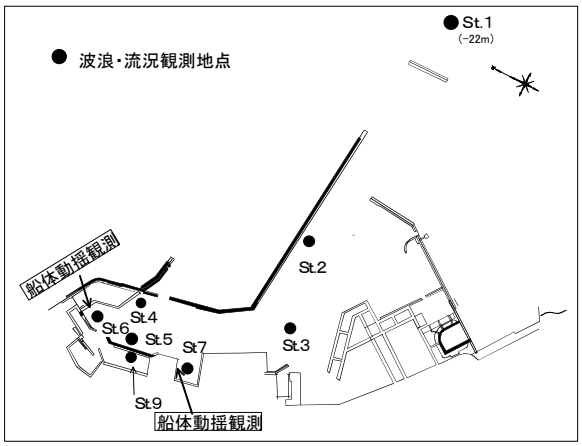


図-4 現地調査位置図（平成13年度～15年度）

2.2 港内擾乱要因の検討

(1) 船体動揺の発生要因

係留船舶の動揺と岸壁前面の水面変動および流速の波形の例を図－５に示す．ここで，長周期成分は，周波数1/300～1/20Hzとしている．図－５より，動揺運動は長周期の水面変動と流速変動に追随し，動揺と水粒子の軌跡も相似していることがわかる．さらに，動揺と水面変動のピーク周期もほぼ一致し（図－６），また，動揺量は長周期波高に概ね比例する（図－７）．

以上から，サージの固有周期が数10秒である小型船(30GT～330GT)についても，長周期成分波が船体動揺の主要な外力と推定される．

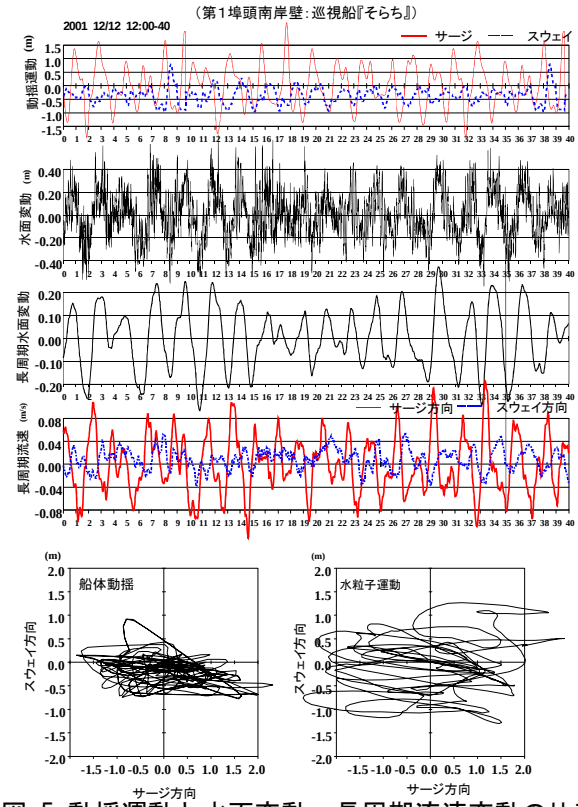


図-5 動揺運動と水面変動・長周期流速変動の比較
（波浪観測地点 St.7，係留船 330GT ）

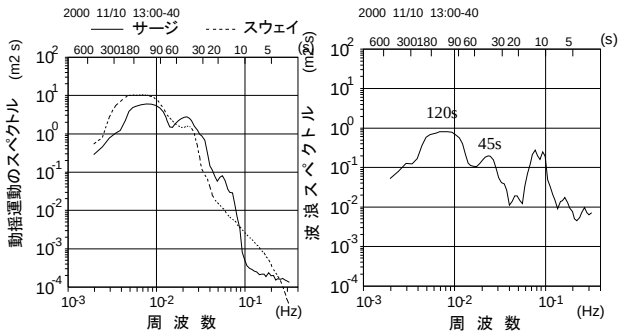


図-6 動揺と水面変動のスペクトル密度分布比較
（波浪観測地点 St.7，係留船 330GT ）

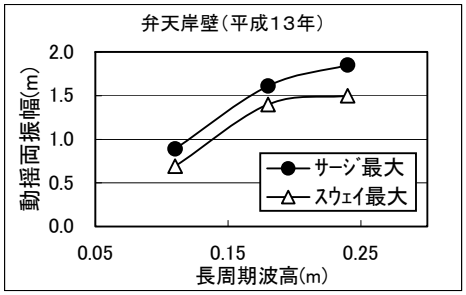
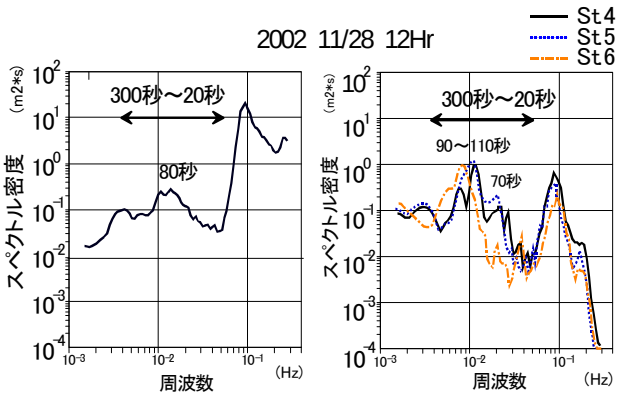


図-7 動揺量と長周期波高の関係
（波浪観測地点 St.6，係留船 30GT ）

(2) 港内長周期波の発生要因

図－８に示す港内擾乱時の港外・港内波浪のスペクトル密度分布の例では，長周期側のピーク周期が港外と港内で一致せず，港内では約70秒に第２ピークを有する．ここで，港内の長周期側ピーク周期90～110秒と約70秒は，図－９に示す副振動計算結果から得られる港内副振動周期に近い．さらに，図－１０に示されるように，港内の長周期波高が港外(St.1)より大きく，増幅されていること，時化後数日間にわたり擾乱が継続することから，港内の長周期波の主要な発生要因は，北側の切り通しから侵入する港外の長周期波のエネルギーで励起した港内副振動と推定される（図－１１）．



（ 港外：ST.1 ）　　（ 港内 ）

図－8 港外-港内 水面変動スペクトル密度分布比較

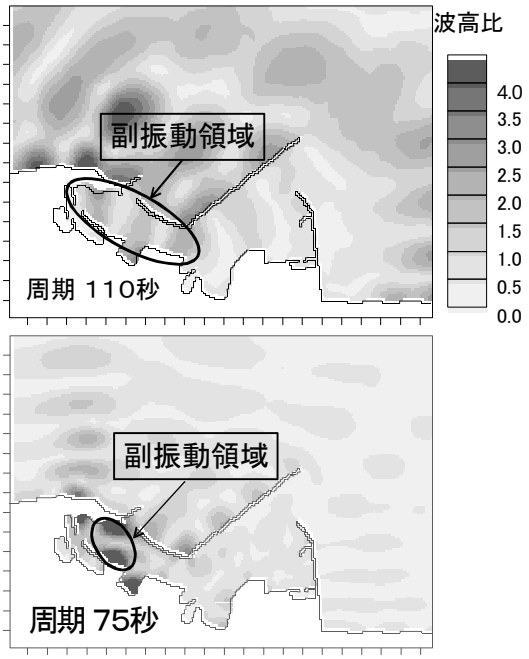


図-9 副振動計算による波高比分布

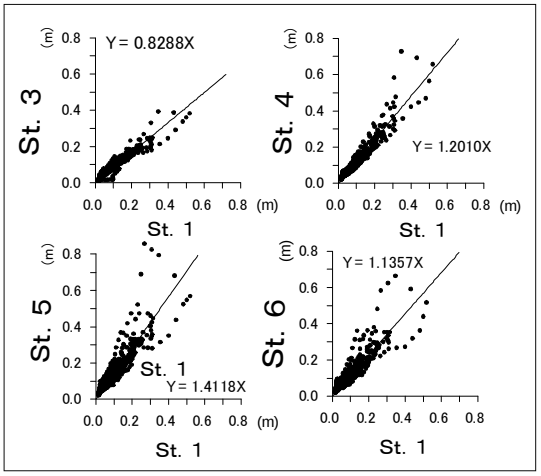


図-10 港外－港内　長周期波高の散布図

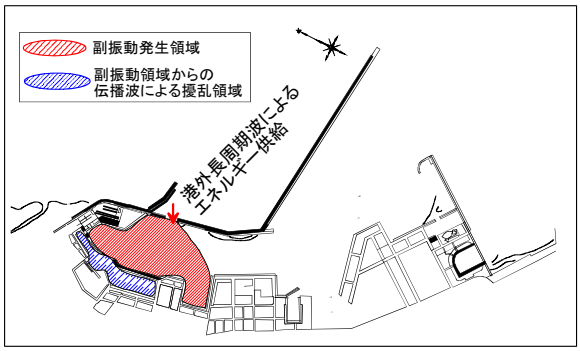


図-11 港内擾乱の推定模式図

2.3 対策工の検討

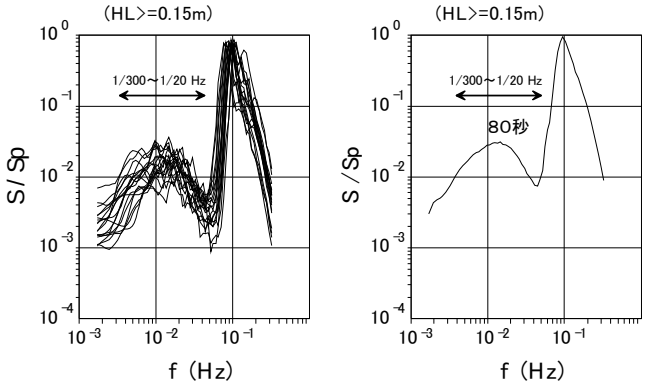
(1) 波浪変形計算の計算条件

1.2節の検討より港内擾乱の主要因が長周期波であると推定されたことから，その抑止策を数値計算（ブジネスクモデル：NOWT-PARI）用いて検討した．

主な計算条件を表－１に示す．ここで，長周期波に対する反射率は砂浜海岸 0.4，消波構造物 0.9とし，所定の反射率に対するスポンジ層は平山等[1)2)]の研究を参考に設定した．

表-1 波浪変形計算の計算条件

対象波	項目	設定値
長周期波	境界水深	25m
	解析領域	沿岸方向 7.4km，沖方向 4.8km
	モデル領域	沿岸方向14.9km，沖方向 8.6km
	格子間隔	25m
	有義波高	0.15m
	有義周期	80秒
	計算間隔	有義周期の1/150
	ｽﾍﾟｸﾄﾙ形状	周波数1/300～1/20Hzの実測スペクトル形の平均：図－11参照
	波向	N，NNE，NE
	方向集中度	Smax=10



（長周期波の発達時）　（平均的な分布形状）

図-12 長周期波発達時の波浪スペクトル密度分布

(2) 現況再現性の確認

図－１３に有義波の波高分比布の例を示し，図－１４に実測と計算の波高比の比較を示す．図－１４より，航路側のＳｔ．２，Ｓｔ．３，及び波向Ｎでは計算値が実測より小さいものの，再現性は概ね良好といえる．

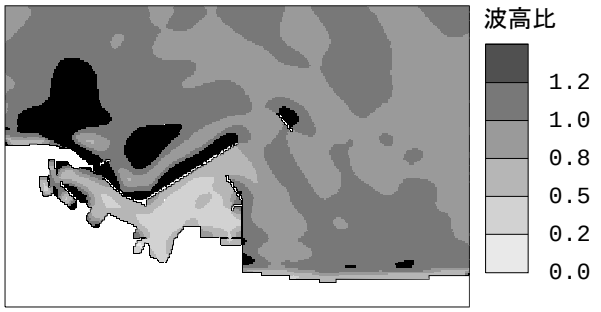


図-13 長周期波の波高比分布の例（波向NNE）

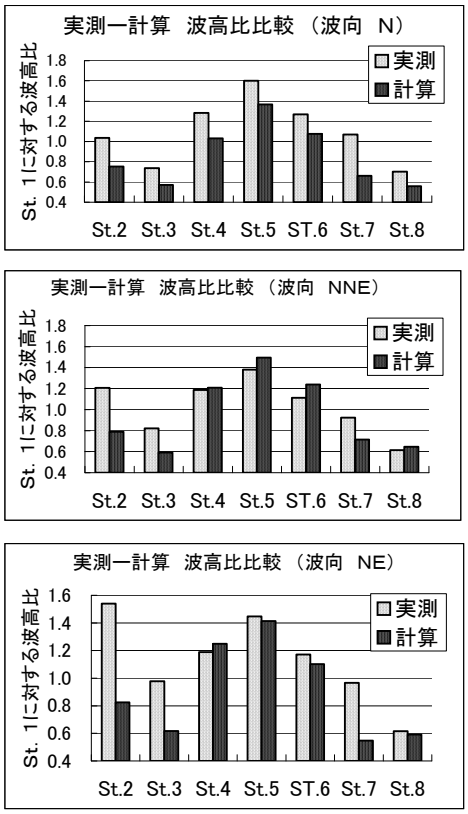


図-14 長周期波高比の実測値と計算値の比較
（波高比：港外 St.1の波高に対する比）

(3) 対策工の検討

(a)検討ケース

対策工は，港内で長周期波のエネルギーを吸収する方策を検討した．検討ケースを図－１５に示す．対策工１は，切り通しから侵入する長周期波の反射波の低減と副振動のエネルギー減衰するため，切り通しと対面する岸壁に消波施設を設置したケースである．対策工２は，副振動の一方の腹にあたる岸壁に消波施設を配したケース，対策工３は，両者を合わせたケースとした．ここで，消波施設の反射率は0.8を期待した．

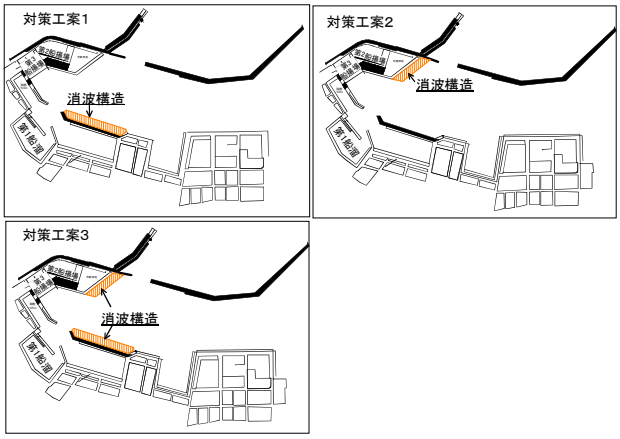


図-15 対策工の検討ケース

(b) 対策工の評価

図－１６には現況との波高比の差の分布を示しており，各ケースとも擾乱領域全域で波高比の低減がみられる．また，図－１７の港外(St.1)の波高に対する港内地点の波高比を比較すると，擾乱領域内のSt.4～St.8の波高比は，対策工１が対策工２よりやや小さいものの同程度であり，現況に対する波高比の低減は両ケースとも約25%である．対策工３では，現況に対して約40%減，対策工１，対策工２に対して約20%減が期待される．なお，対策工の効果を荷役稼働率で評価することを目的に，長周期波高と動揺量の関係式と着岸船舶毎の荷役限界動揺量から，長周期波に対する稼働率の算定方法を現在構築中である．

一方，図－１８に示す紋別港から約20Km南東に設置された海象計の観測記録から作成した月別の長周期波高の出現率をみると，高波高の出現率は秋口の9月以降に急増し，波高0.15m以上の出現率は，10月から漁期終了前12月間で約30%，波高 0.2m以上の出現率は平均約15%に達する．このような紋別港海域の波浪出現特性から，対策工は通年での稼働率向上とともに，季節別の稼働率も考慮し評価する必要があると考える．

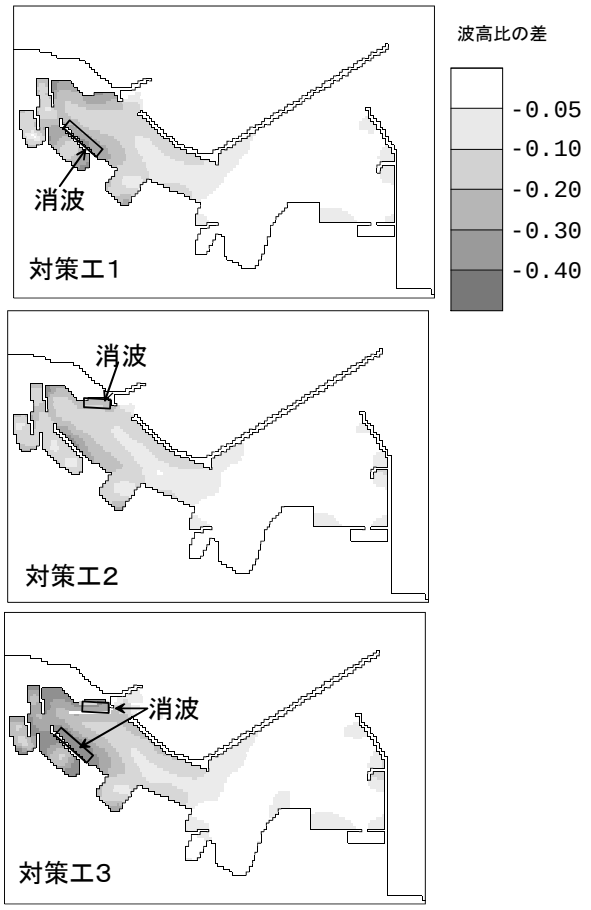


図-16 現況の波高比荷対する波高比の差の分布
（波向：ＮＮＥ）

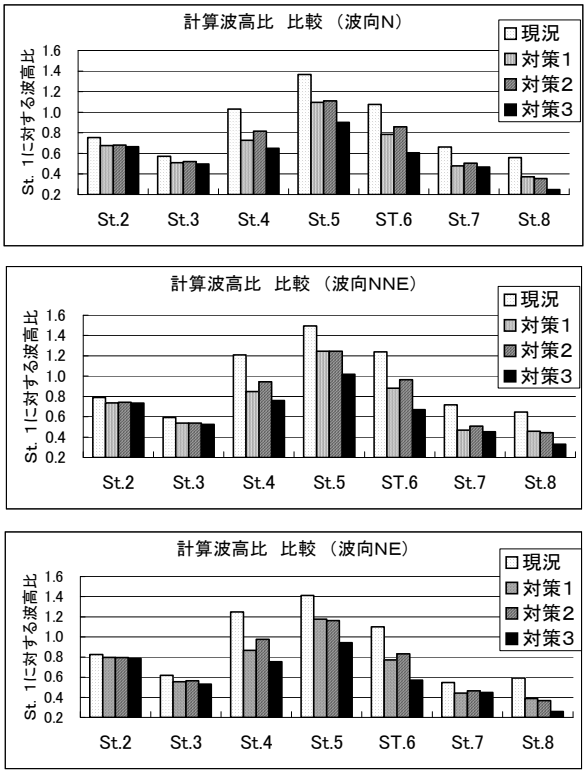


図-17 港外(St.1)に対する波高比の比較図

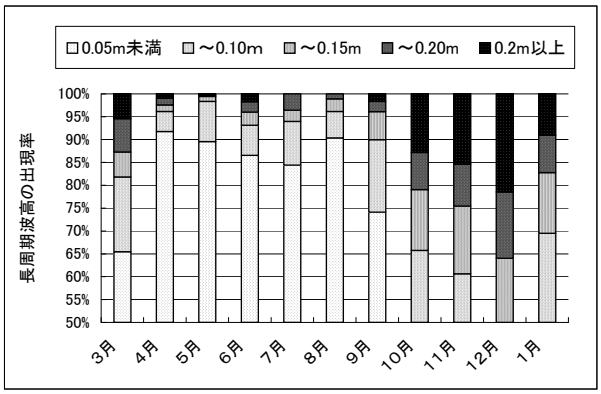


図-18 長周期波高の月別出現率(海象計:紋別南)
(2000 10/14～2003 7/24)

(4) 消波施設の期待反射率の設定

文献[3]によれば，背後に浸透層を有する両面スリットでは，周期30秒の波に対して反射率約0.6の数値実験値が得られているが，30秒以上での検討事例はみあたらない．

そこで，紋別港の場合，消波施設が対策工としての機能を確保するためには，どの程度の反射率を期待すれば良いか事前検討を行った．図―１９は，反射率0.7，0.8，0.9について，現況との波高比の差を示したものである．当然，反射率が小さいほど波高比の低減は大きい．しかし，反射率 0.7では効果が過大であり，一方，反射率 0.9では図－１８から推定される秋期・冬期に集中する港内擾乱の対策として不十分と判断し，結果として 0.8を期待値とした．

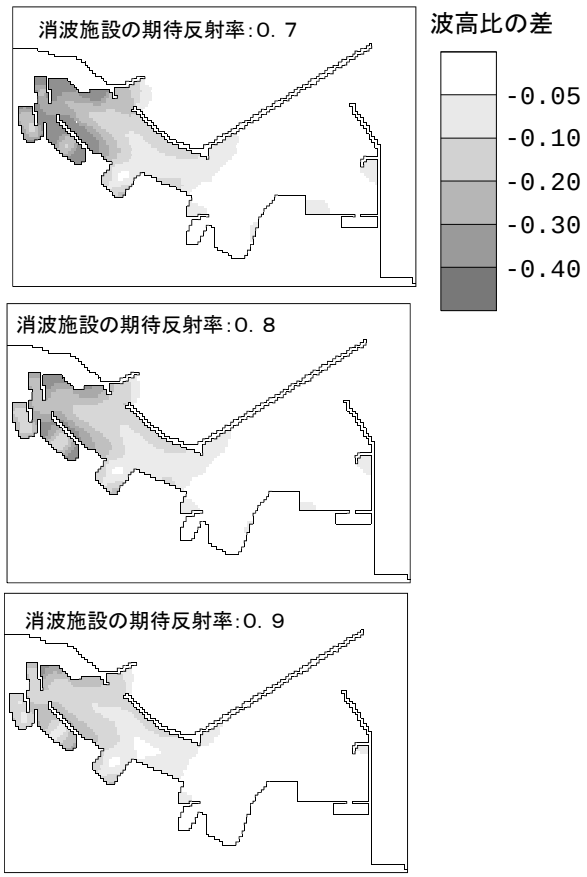


図-19 消波施設の期待反射率と波高比の低減効果
（対策工３　波向　ＮＮＥ）

2.4 おわりに

本資料の主な報告内容は次のようにまとめられる.

・ブジネスクモデル(NOWT-PARI Ver4.6)の実業務への適用性について

十分な造波領域と適切な格子間隔，計算時間間隔，入射波のスペクトル分布，部分反射等を設定することにより，港内外多地点の実測値に対して良好な再現性が得られ，モデルは実務上十分なものであった.

・長周期波に対する消波施設の期待反射率について

紋別港の場合，港内において長周期波（有義周期80秒）のエネルギーを減衰させ港内擾乱を抑止するためには，消施設設に 0.8程度の反射率が必要と推定される.

参考文献

1) 平山 克也：港湾設計における波浪変形計算手法の発展とその活用について，平成14年度 港湾空港技術講演会講演集，pp. 75-104 .
2) 平山，平石：ブジネスクモデルにおける目標反射率の設定法と港内波高分布計算に対する適用，海岸工学論文集，第49巻(2002)，pp676-680
3)港湾空港技術研究所 波浪研究室：平成13年度 特別研究 長周期波の発生メカニズムと港湾・海岸における長周期波対策に関する研究「数値直接解析法による長周期波対策消波層の反射率調査」，平成13年12月.

2.2 横須賀港走水地区における波浪場解析と実験との比較

2.2.1 はじめに

(1) 報告概要

横須賀港走水地区（以下，簡単に「走水」と記述する）では，港外に防波堤の建設が計画されている（以下，簡単に計画防波堤を「防波堤」と記述する）．

この防波堤は，港内静穏度の向上と異常時における越波対策を目的としている．これに対して，平成14年度に，実験および波浪変形計算（ブシネスク方程式法）による港内静穏度の検討が実施されている．

本報告では，ブシネスク方程式法の波浪変形計算（NOWT-PARI Ver4.6β）と水理模型実験の比較検討を行う．

(2) 対象地点

対象地点となる走水の位置を図－1に示す．また，図－2に，走水周辺海域の水深分布図を示す．図－2より，走水周辺海域の水深分布は，複雑に入り組んでいることがわかる．このように，周辺海域の水深分布は，複雑であるため，従来の静穏度解析手法で港内波高分布を精度良く評価するのは困難である．そこで，平成14年度調査では，波の浅水変形，屈折，回折，反射等を同時に取り扱うことのできるブシネスク方程式法により，港内静穏度の検討が実施されている．

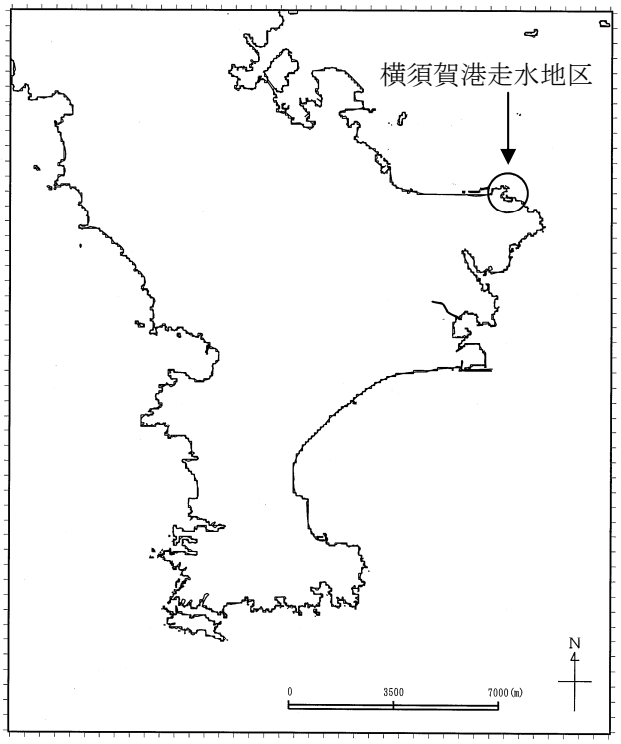


図-1　横須賀港走水地区の位置図

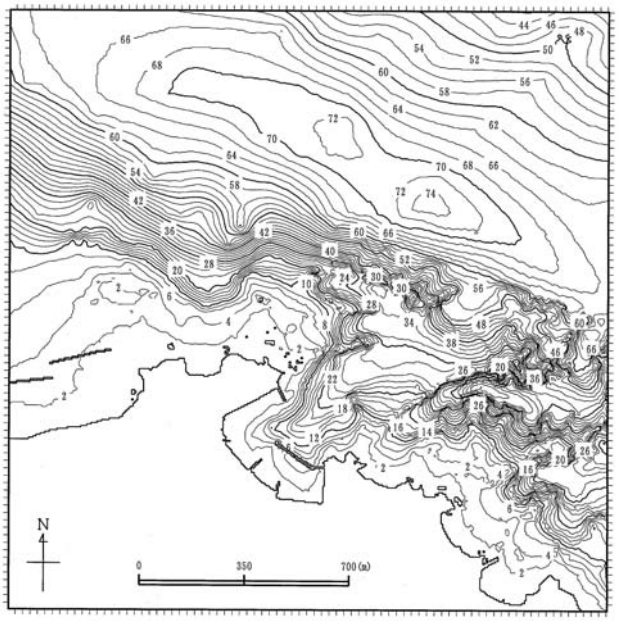


図-2　走水周辺海域の水深分布図（単位:m）

2.2.2 水理模型実験

以下に実験概要を示す．なお，実験結果については，1.2.3節において後述する．

(1) 実験施設

実験は平面水槽を用いて行っている．この水槽は，50m×40mの大きさの水槽である．水槽諸元および模型床の設置状況を表-1および写真-1に示す．

表-1　水槽諸元

水槽諸元	幅		長さ		深さ
	50.0m	×	40.0m	×	1.5m
造波装置	形式)	ピストン型連続タイプ，板長 117m×２台			
	発生波)	規則波	H=40cm		T=0.5～4.0s 程度
		不規則波	$H_{1/3}$=25cm		$T_{1/3}$=0.7～3.0s 程度
	規則波，一方向・多方向不規則波発生可能				

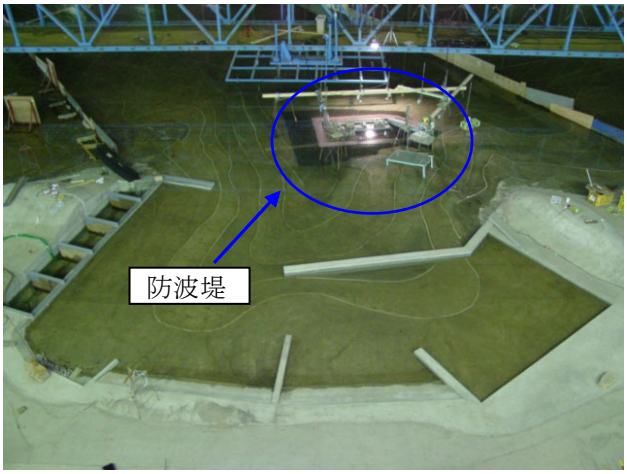


写真-1　模型床の設置状況

(2) 実験目的

平成14年度の実験は，防波堤の被覆材の安定性，現況および防波堤設置時の静穏性(護岸越波の検討を含む)の検討を目的としている．本報告では，静穏度実験について概説し，計算との比較を行う．

(3) 波浪条件

実験で使用する波浪条件は，護岸越波の検討を行っていることから，異常時波浪を対象としている．表-2に，入射波条件を示す．表中の台風時とは，2002年の21号台風時の波（越波被害発生時）であり，年最大波は，1994年～1998年の走水沖の推算波浪データより設定した値である．図-3，図-4に，波向ESE，NNEにおける造波機位置および入射波検定位置を示す．図中の●印は，入射波の検定位置（Point 0）を表している．なお，模型縮尺は，1/40である．

表-2　入射波条件（台風時および年最大波）

入射波条件	有義波高(cm)	有義波周期(s)	波向
台風時	199	12.1	ESE
年最大波	215	5.8	NNE

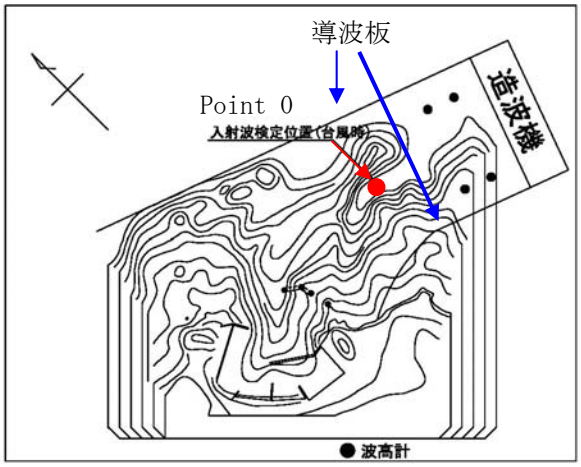


図-3　造波機位置および入射波検定位置（台風時）

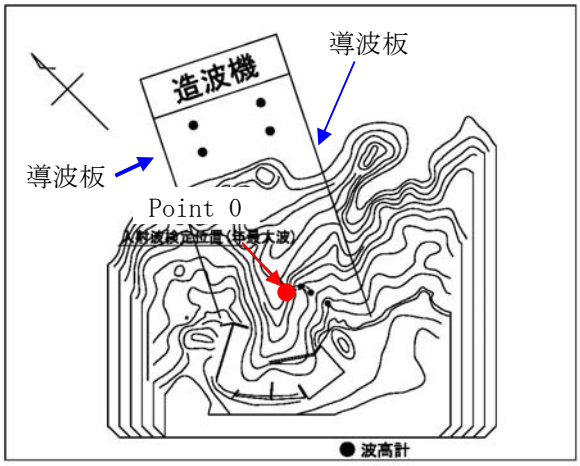


図-4　造波機位置および入射波検定位置（年最大波）

各波向における入射波の検定位置は，台風時の場合は，屈折による波浪変形の影響が大きいため，沖合のポイントで設定している．年最大波の場合は，比較的走水漁港に対して直角方向に近い波向であるため，防波堤の設置位置で波高を合わせるように入射波検定を行っている．

実験は，一方向不規則波で行い，周波数スペクトルは，計算と同様に，修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルを用いている．波浪作用時間は，約200波の波を作用させている．

(4) 計算ケースと波高計設置位置

計算ケースは，下記の２ケースとする．図-5に，防波堤の法線位置と波高計の設置ポイント図を示す．

・現況地形（防波堤なし）
・防波堤地形（防波堤延長100m）

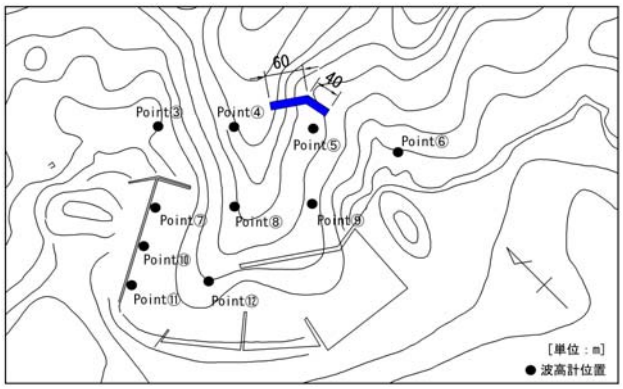


図-5　防波堤の法線位置と波高計の設置ポイント図

2.2.3 ブシネスク方程式法による波浪変形計算

(1) 計算条件

計算条件は，以下のように設定している．

・計算波向　　：ESE，NNE
・計算範囲　　：図-6,図-7に計算範囲図を示す．
・地形条件　　：現況地形，防波堤地形の２種類
・格子間隔　　：5m
・時間間隔　　：周期に対して400分割
・反射率　　：部分反射考慮（図－8 参照）
・入射波周期　：5.8s，12.1s（表-2 参照）
・入射波高　　：1.0m
・最低水深　　：2.0m
・最大水深　　：50m以深一様
・入射波の種類：一方向不規則波
・波浪作用時間：港内に波が入射してから約200波

なお，入射波高は，1.0mで計算している．この理由としては，ブシネスク方程式による波浪変形計算を行う場合，入射波高の２倍程度の最低水深を確保する必要があるが，走水港内の水深はDL-2.0m～-5.0mと浅いため，最低水深を深くとると港内での波浪変形現象がうまく評価できなくなる恐れがあるためである．本報告では，波高を1.0m(単位波高)として計算し，実験結果との比較は，増幅率（波高比）で検討する．

また，計算条件は，実験の条件に合わせて設定しているが，平成14年度の計算データをそのまま利用したため，下記の点が異なっている．

・入射波境界（造波機）の位置
（図-3,図-4および，図-6,図-7 参照）
・計算では，導波板を付加していない．
・最大水深は，実験が40m以深一様に対して，
計算では50m以深一様

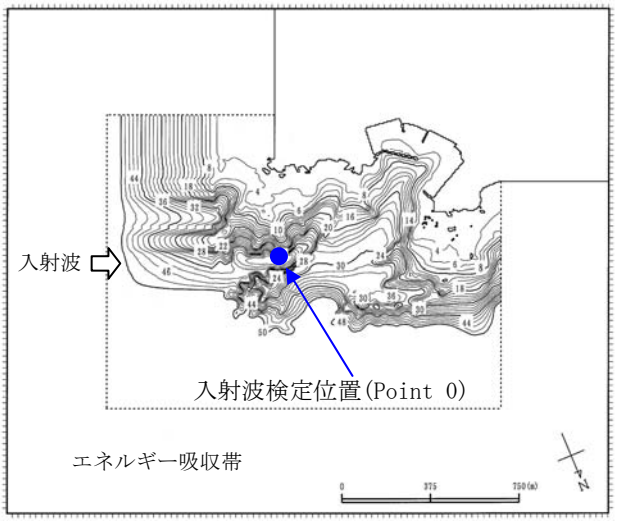


図-6　波向ESEにおける計算範囲図

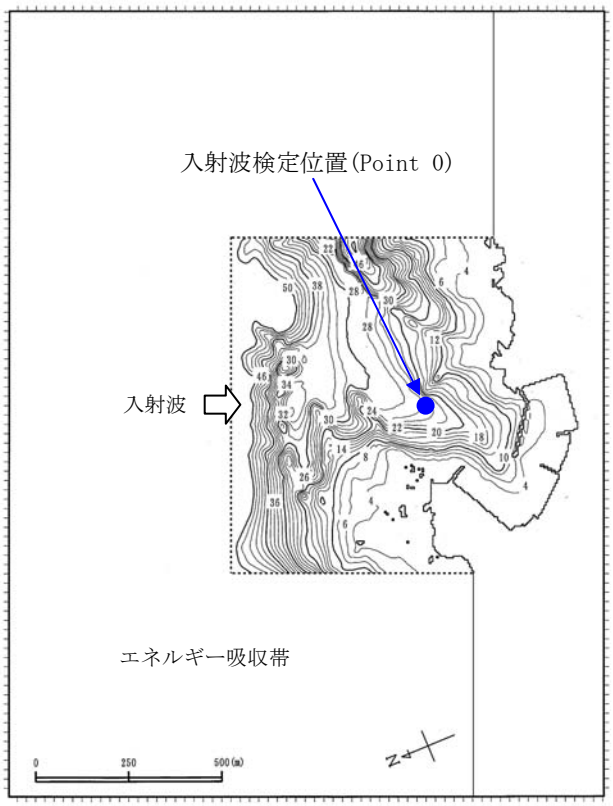


図-7　波向NNEにおける計算範囲図

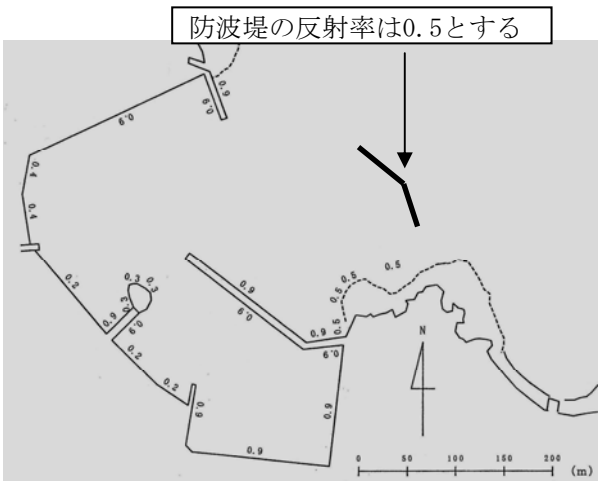


図-8 部分反射率の設定図

(2) 計算結果

図-9(1),(2)に，波向ESEにおける現況地形および，防波堤地形の波高比分布図を示す．同様に，図-9(3),(4)に，波向NNEにおける現況地形および，防波堤地形の波高比分布図を示す．

図-9より，計算結果の考察を以下にまとめる．

・波向ESEの場合，現況地形における港内波高比分布は，漁船係留岸壁前面において 0.2～0.4となっている．また，防波堤地形における港内波高比分布は，漁船係留岸壁前面において 0.2程度となっており，防波堤建設による遮蔽効果により，波高比で0.1程度減少している．

・波向NNEの場合，現況地形における港内波高比分布は，漁船係留岸壁前面において 0.2～0.3となっている．また，防波堤地形における港内波高比分布は，漁船係留岸壁前面において 0.1～0.2程度となっており，防波堤建設による遮蔽効果により，波高比で0.1程度減少している．

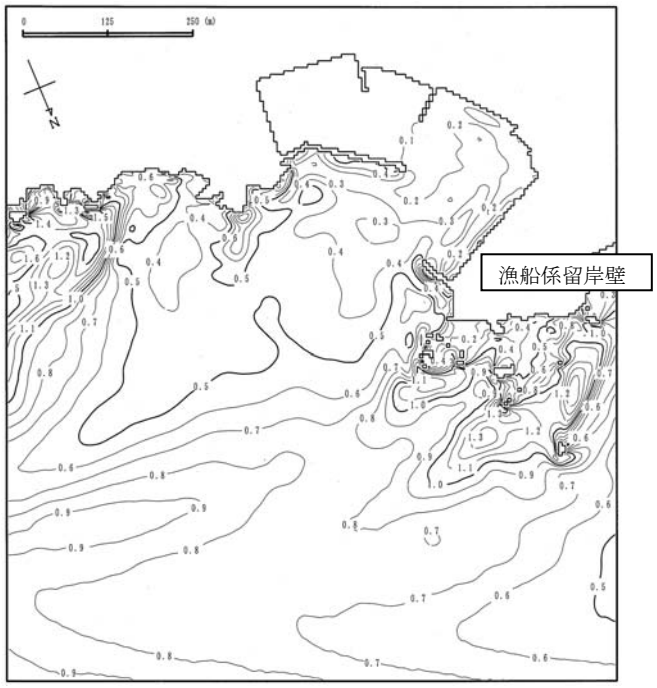


図-9(1) 波向ESE，現況地形における波高比分布図

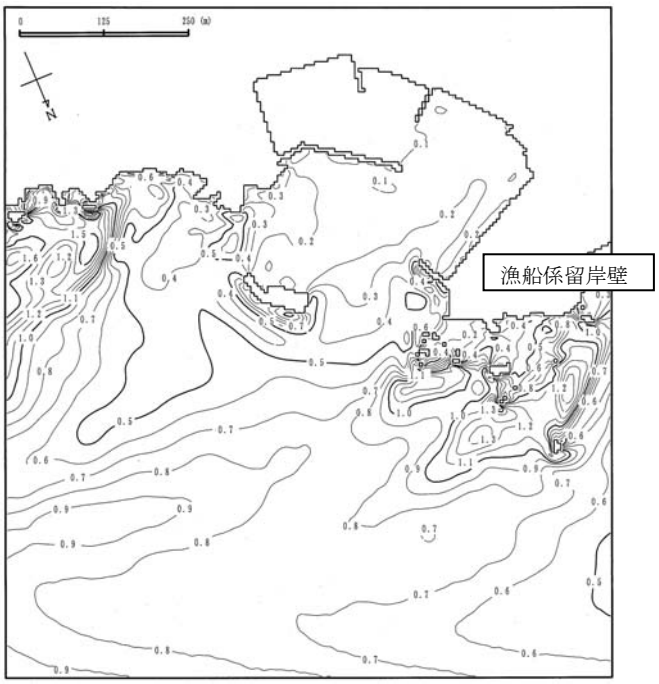


図-9(2) 波向ESE，防波堤地形における波高比分布図

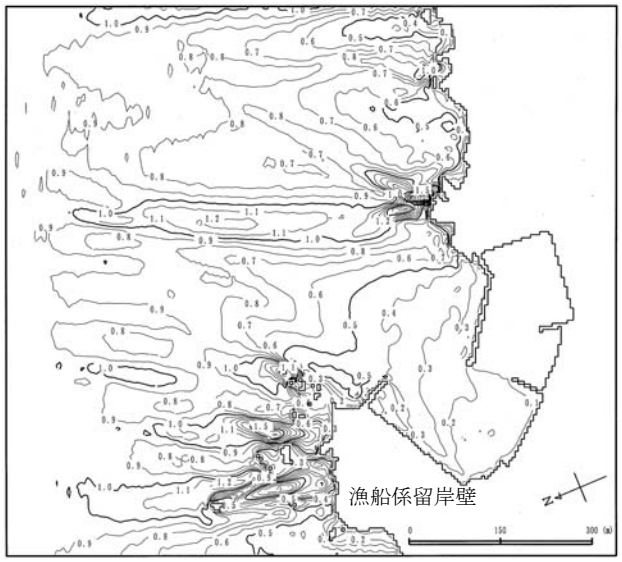


図-9(3) 波向NNE，現況地形における波高比分布図

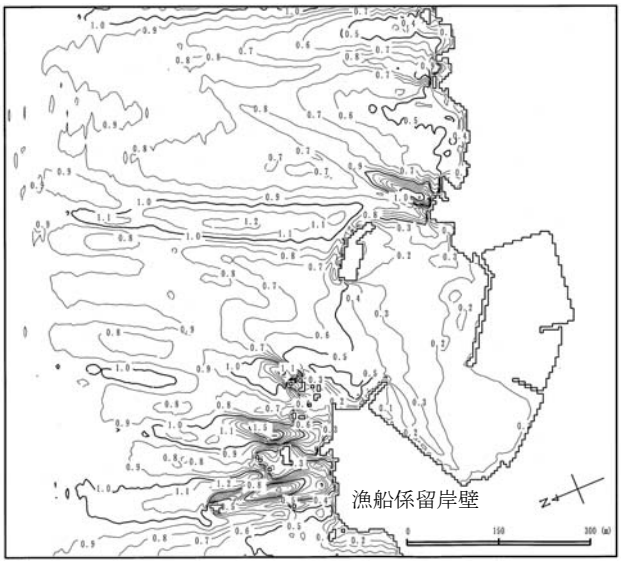


図-9(4) 波向NNE，防波堤地形における波高比分布図

(3) 水理模型実験と波浪変形計算との比較

実験と計算の比較は，各ポイントの有義波高を現況地形のPoint 0の有義波高で除算した増幅率で評価する．これは，前述した実験と計算との条件の違いから有義波高値で直接両者を比較できないため，港沖（Point 0）に対する各ポイントの増幅率を比較することにより，実験と計算における港内の波高分布特性を比較する．

図-10(1),(2)に，波向ESEにおける現況地形および，防波堤地形の増幅率グラフを示す．同様に，図-10(3),(4)に，波向NNEにおける現況地形および，防波堤地形の増幅率グラフを示す．また，図－11に，図-5に示した防波堤の法線位置と波高計の設置ポイント図を再掲する．

図-10より，比較結果の考察を以下にまとめる．

・波向ESEの場合，各ポイントの増幅率特性は，実験値と計算値でよく似ているものの，計算値の方が増幅率が小さいポイントが多い．両者は，港沖（Point 0）に対する各ポイントの増幅率を比較しているので，計算と実験の入射境界（造波機）の位置の違いは影響しないと思われる．しかしながら，特に波向ESEの場合，陸域とほぼ平行に入射するため，屈折の影響を強く受け，計算値と実験値を比較すると，港沖（Point 0）での波向が変化しているのではないかと考えられ，この波向の差異が港内増幅率特性の違いに起因していると思われる．

・波向NNEの場合，各ポイントの増幅率特性は，実験値と計算値で比較的よく一致している．

以上のことから，実験値と計算値は，前述した実験と計算との条件の違いを考慮すると，比較的よく一致している．

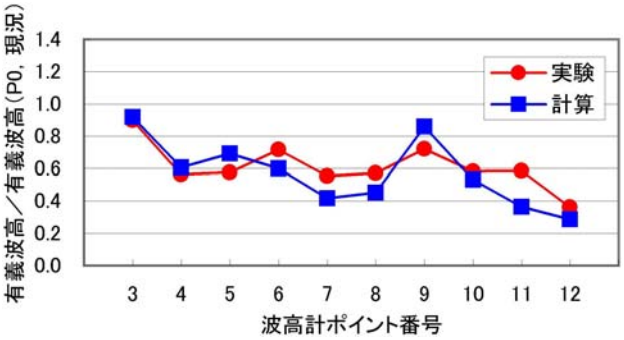


図-10(1) 波向ESEにおける現況地形の増幅率グラフ

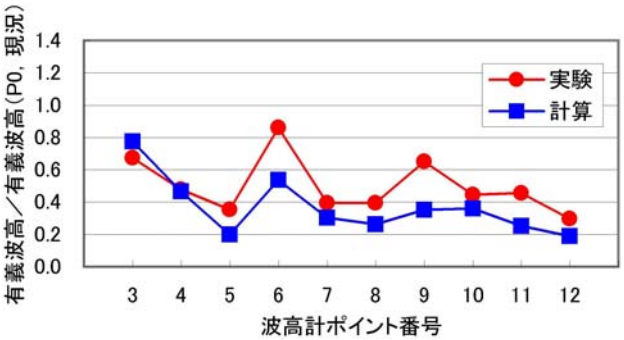


図-10(2) 波向ESEにおける防波堤地形の増幅率グラフ

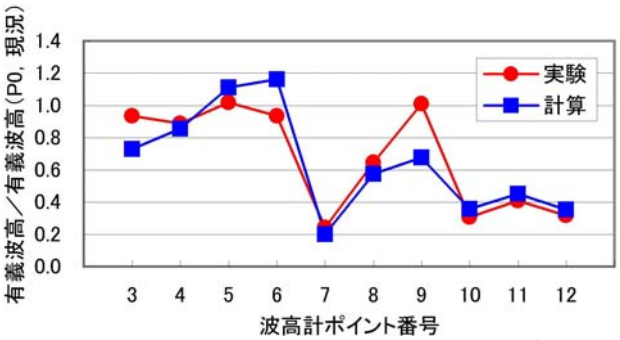


図-10(3) 波向NNEにおける現況地形の増幅率グラフ

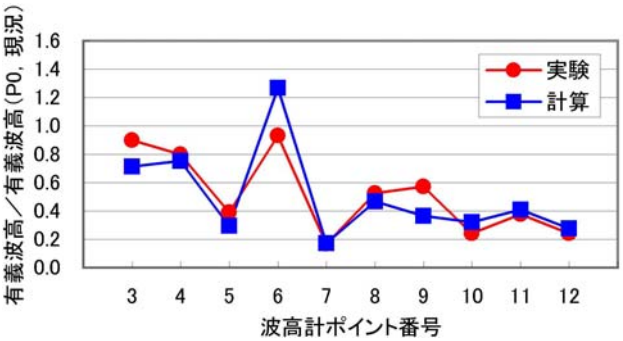


図-10(4) 波向NNEにおける防波堤地形の増幅率グラフ

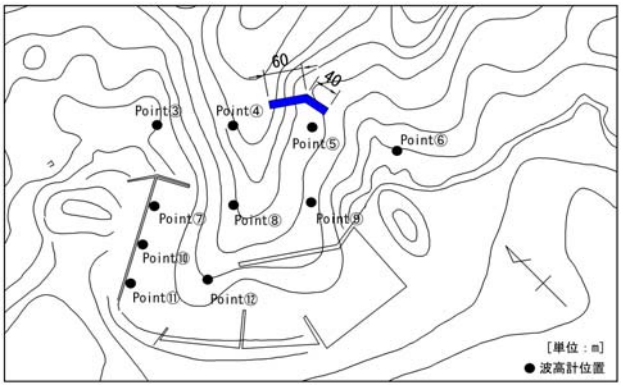


図-11　防波堤の法線位置と波高計の設置ポイント図

2.2.4 まとめ

・ブシネスク方程式法の波浪変形計算（NOWT-PARI Ver4.6β）と水理模型実験の比較検討を行った．その結果以下のことが言える．

・波向ESEの場合，各ポイントの増幅率特性は，実験値と計算値でよく似ているものの，計算値の方が増幅率が小さいポイントが多い．特に波向ESEの場合，陸域とほぼ平行に入射するため，屈折の影響を強く受け，計算値と実験値を比較すると，港沖（Point 0）での波向が変化しているのではないかと考えられ，この波向の差異が港内増幅率特性の違いに起因していると思われる．

・波向NNEの場合，各ポイントの増幅率特性は，実験値と計算値で比較的よく一致している．

・実験値と計算値を比較した結果，前述した実験と計算との条件の違いを考慮すると，比較的よく一致している．

参考文献

1)平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性，海岸工学論文集，第49巻，pp.676-680，2002.
2)国土交通省関東地方整備局東京湾口航路工事事務所：平成14年度 東京湾口航路水理模型実験 報告書，平成15年3月
3)国土交通省関東地方整備局東京湾口航路工事事務所：平成14年度 東京湾口航路撤去材活用検討調査 報告書，平成15年2月

2.3 ブジネスクモデル（NOWT-PARI）による港内静穏度の検討　－伏木富山港（伏木地区）の港湾計画改定－

2.3.1 検討概要

本検討は伏木富山港（伏木地区）において、ブシネスクモデルによる波浪シミュレーションを行い、岸壁前面波高比を算定するとともに岸壁の荷役稼働率を算定し、港湾計画改定に資することを目的としている。

2.3.2 波浪計算

(1) 計算条件

ブシネスクモデルによる波浪シミュレーションの計算条件を表-1に示す。

入射波の周波数スペクトルについて設定根拠等を以下に述べる。

短い吹送距離で強風により急速に発達した風波や、分散効果等によりある周波数帯だけがうねりとして伝播した波浪は、風波の標準的な周波数スペクトルである修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルよりも鋭く尖ったピークをもつことが多い。

既往の観測により得られた伏木富山港（伏木地区）の観測スペクトルが鋭く尖ったピークを持つことが確認できたことから、波浪計算では沖側境界条件の入射波周波数スペクトルとして修正JONSWAP型スペクトルを採用する（γ＝3.3）。

ピークの鋭さを現すパラメータ‘γ’を有する修正JONSWAP型スペクトル[(1),(2)] は、式-1～式-4により与えられる。

$$S(f) = B_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]}$$

--------(式-1)

$$B_J = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9+\gamma)^{-1}}[1.094 - 0.01915 \ln \gamma]$$

--------(式-2)

$$T_p = T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}]$$ --------(式-3)

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & : \quad f \le f_p \\ 0.09 & : \quad f \ge f_p \end{cases}$$ --------(式-4)

$\gamma =$　　1～7（平均3.3）

ここに、$S(f)$ は周波数スペクトル、$f = 1/T$ は周波数、$f_p = 1/T_p$ はピーク周波数、T_p はピーク周期、$H_{1/3}$ は有義波高（計算入力波高）、$T_{1/3}$ は有義波周期（計算入力周期）である。

修正ブレットシュナイダー・光易型と修正JONSWAP型（γ=1.0、γ=3.3、γ=7.0）の入射波スペクトルを比較し、図-2に示す。修正ブレットシュナイダー・光易型と修正JONSWAP型（γ=1.0）のスペクトルはほぼ一致する。また、修正JONSWAP型スペクトルは、γが大きいほど周波数スペクトルのピークが鋭くなる。

表-1 波浪計算の計算条件

項 目	計 算 条 件			備 考
計算対象領域	伏木外港の港外および港内 計算領域は、波浪条件別（波向・周期）に設定する			図-1 参照
周期	6秒	10秒	13秒	３ケース
波高	100cm			１ケース
波向	N、NNE、NE			３ケース
Smax	25	75		
入射波スペクトル	修正JONSWAP型スペクトル（γ=3.3） 光易型方向関数			
港内反射率	直立壁　　：1.0 スリットケーソン：0.8 消波ブロック　　：0.4、0.5			周期10秒の規則波に対する反射率
計算格子間隔	5m	10m		
計算時間間隔	1/100秒	1/8秒		
積分時間	40分	40分		

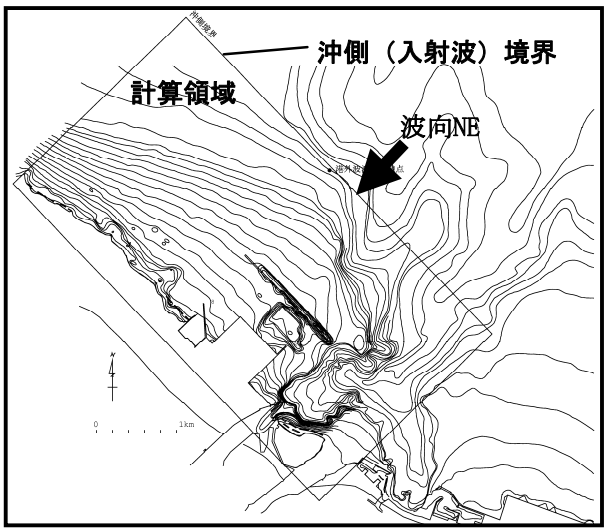


図-1　計算領域設定例（現況、波向NE、周期10秒、13秒）

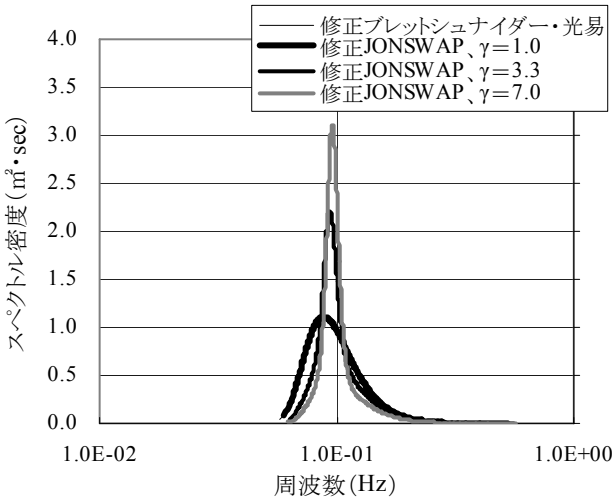


図-2　標準スペクトルの比較（$H_{1/3}$=1.0m、$T_{1/3}$=10.0s）

(2) 計算ケース

計算ケースは以下に示す６ケースとする。計算ケースを表-2に、検討ケースの港湾構造物条件を図-4に示す。

(ｱ)現況

(ｲ)うねり対策

（現況＋北防東端50°150m延伸＋東防50m撤去）

(ｳ)既定計画（直立）

（整備計画、北沖防波堤300m、西防波堤460m直立壁）

(ｴ)既定計画（消波）

（整備計画、北沖防波堤300m、西防波堤460m消波構造）

(ｵ)新規計画（直立）

（整備計画、北防東端50°150m延伸＋東防50m撤去、西防波堤460m直立壁）

(ｶ)新規計画（消波）

（整備計画、北防東端50°150m延伸＋東防50m撤去、西防波堤460m消波構造）

岸壁前面波高比の算定対象岸壁は次に示すとおりである（図-4の図中(1)～(5)）。

- -7.5m岸壁　(1)
- -10m岸壁　(2)
- -14m岸壁　(3)
- (新)-12m岸壁 (4)
- (新)-10m岸壁 (5)

表-2　計算ケース

計算ケース	整備計画（２岸壁新設）	北沖防波堤300m	北防波堤150m延伸東防波堤50m撤去	西防波堤460m（反射率）
現況	×	×	×	×
うねり対策	×	×	○	×
既定計画(直立)	○	○	×	○(1.0)
既定計画(消波)	○	○	×	○(0.8)
新規計画(直立)	○	×	○	○(1.0)
既定計画(消波)	○	×	○	○(0.8)

(3) 岸壁前面波高比の算定方法

波浪条件別の港内波高比は各岸壁前面、幅50ｍの平均値とする(図-3)。

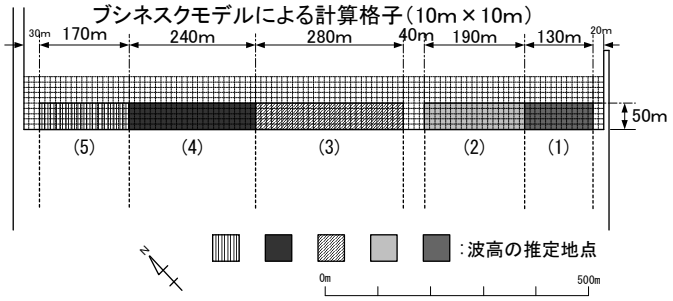
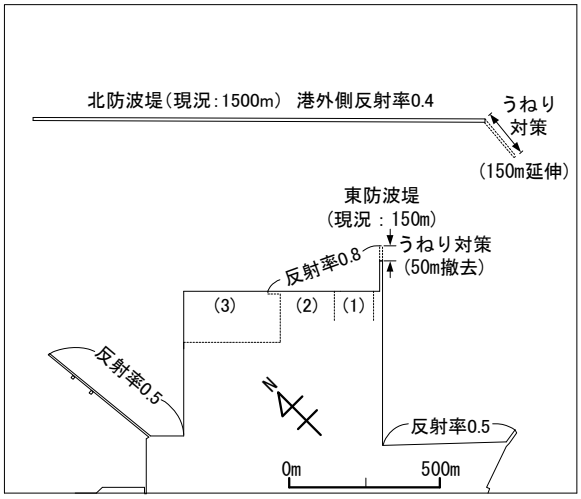
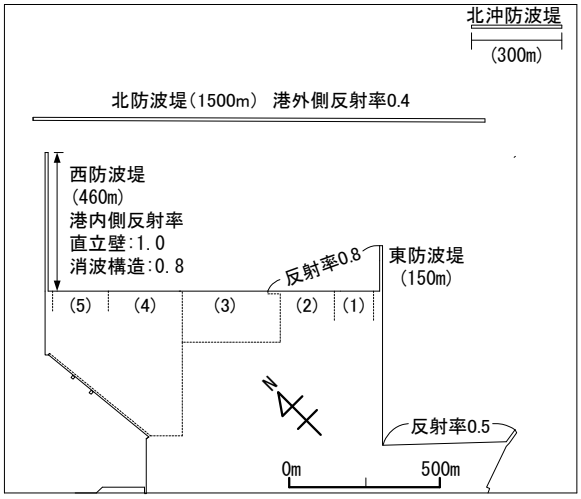


図-3　岸壁前面波高比の算定地点例



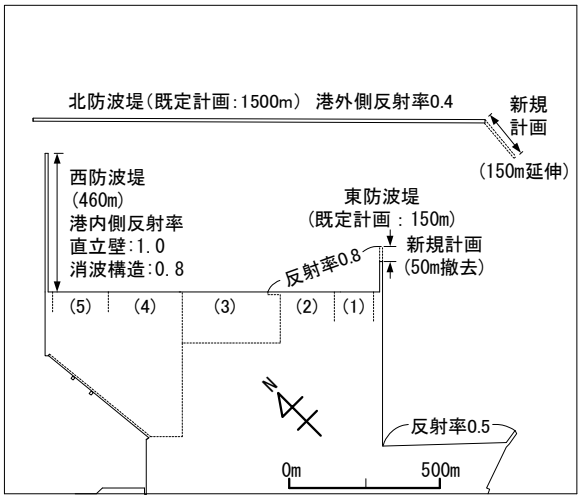
(ｱ),(ｲ)現況およびうねり対策

(1)～(3)は岸壁前面波高比算定対象岸壁



(ｳ),(ｴ)既定計画（西防波堤:直立壁および消波構造）

(1)～(5)は岸壁前面波高比算定対象岸壁



(ｵ),(ｶ)新規計画（西防波堤:直立壁および消波構造）

(1)～(5)は岸壁前面波高比算定対象岸壁

図-4　港湾構造物条件

(3) 波浪計算結果

伏木外港の港内波浪変形計算をブシネスクモデル（Ver.4.6β）により行い、現況、うねり対策、既定計画および新規計画における波浪条件別の港内波高比を整理する。

ここに、波高比は沖波波高に対する岸壁前面波高の比率である。

計算結果の一例（波高分布図）を図-5(1),(2)に示す。また、岸壁前面波高比の算定結果例を表-3および図-6に示す。

(a) 現況およびうねり対策について

現況と比較して、うねり対策の岸壁前面波高比は非常に小さくなっており、うねり対策工は適切であると考えられる。

(b) 整備計画について

既定計画と比較して、新規計画の岸壁前面波高比は小さく、新規計画のうねり対策工は効果的である。また当然のことながら、西防波堤の構造は直立壁よりも消波構造の方が岸壁前面波高比は小さく、その効果は西防波堤に近い岸壁ほど大きい。

表-3　岸壁前面波高比（波向NE、周期10sec）

岸壁前面波高比（沖波波高を1とする）	現況	うねり対策	既定計画（直立）	既定計画（消波）	新規計画（直立）	新規計画（消波）
-7.5m岸壁	0.28	0.13	0.23	0.21	0.16	0.15
-10m岸壁	0.38	0.12	0.27	0.25	0.15	0.13
-14m岸壁	0.38	0.15	0.29	0.25	0.19	0.15
(新)-12m岸壁	—	—	0.40	0.36	0.24	0.19
(新)-10m岸壁	—	—	0.46	0.38	0.28	0.19

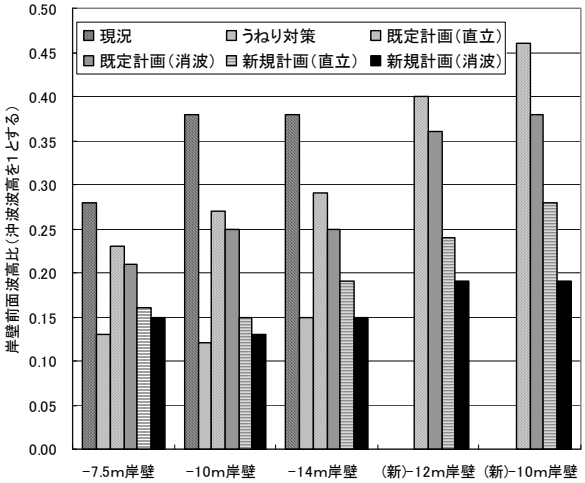
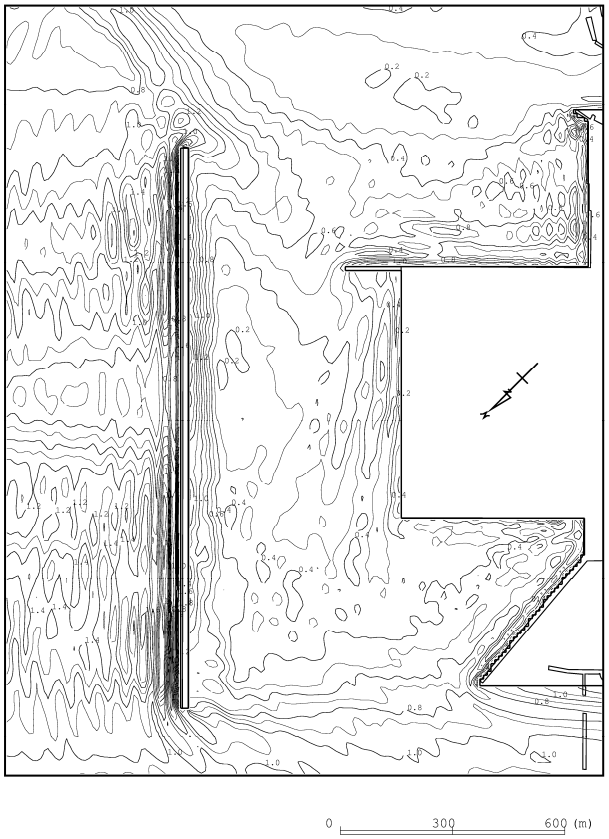


図-6　岸壁前面波高比（波向NE、周期10sec）

(ｱ)現況(北防波堤 1500m、-14m 岸壁完成)
沖波波高100cm　周期10sec　波向NE(N45°)　Smax75



(ｲ)うねり対策(現況＋北防東端 50° 150m 延伸＋東防 50m 撤去)
沖波波高100cm　周期10sec　波向NE(N45°)　Smax75

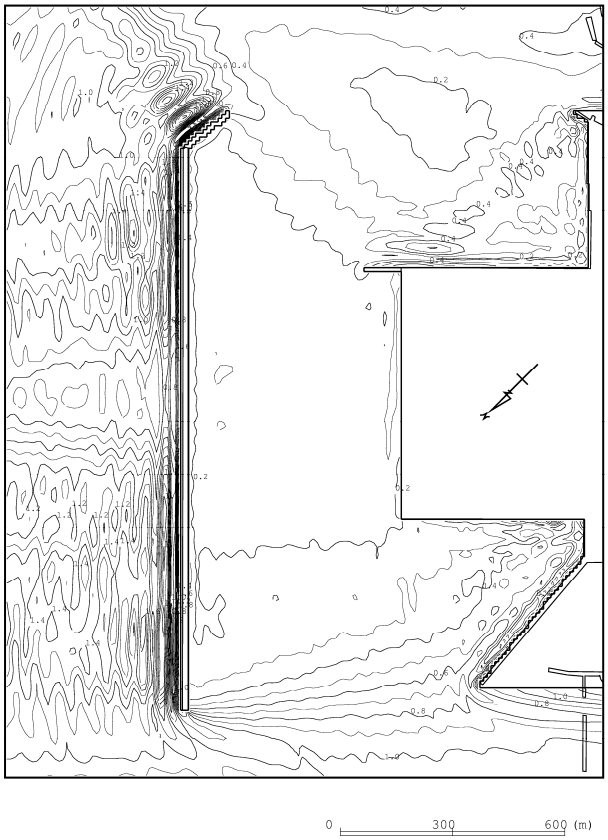
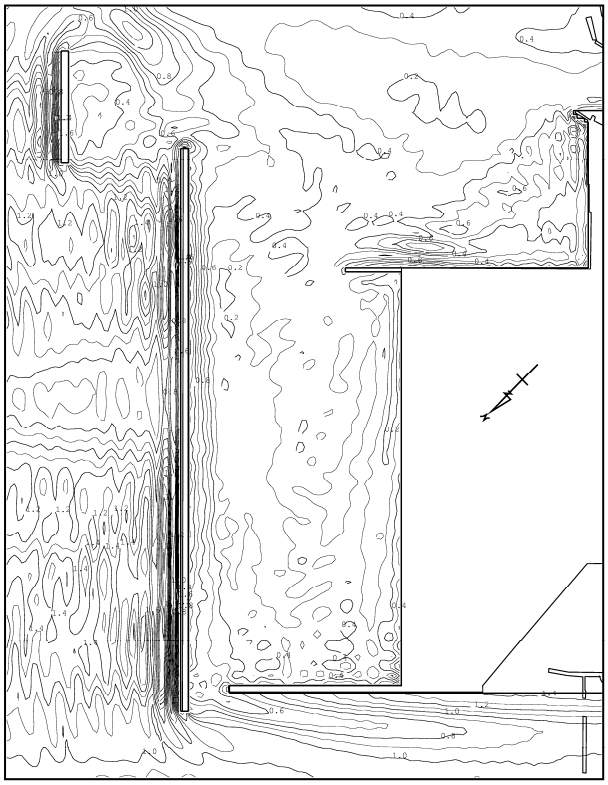
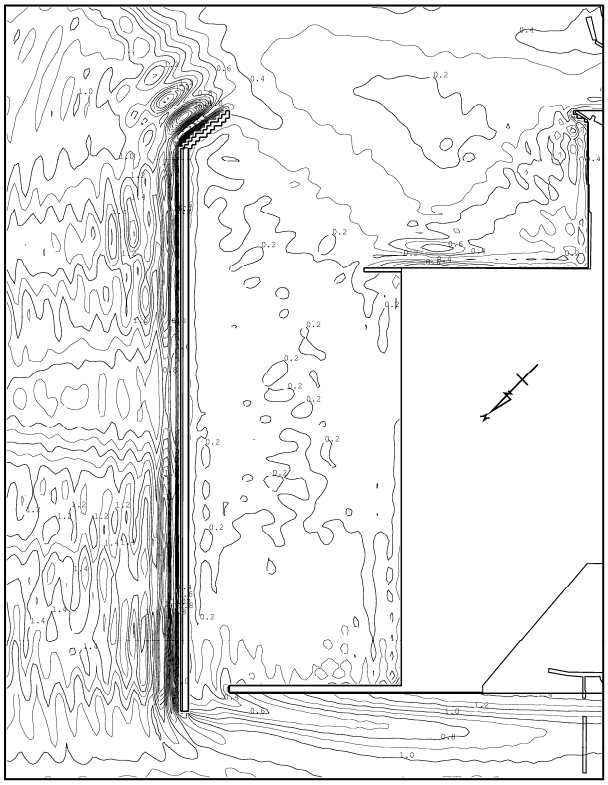


図-5(1)　波高分布図（現況およびうねり対策、単位：m）

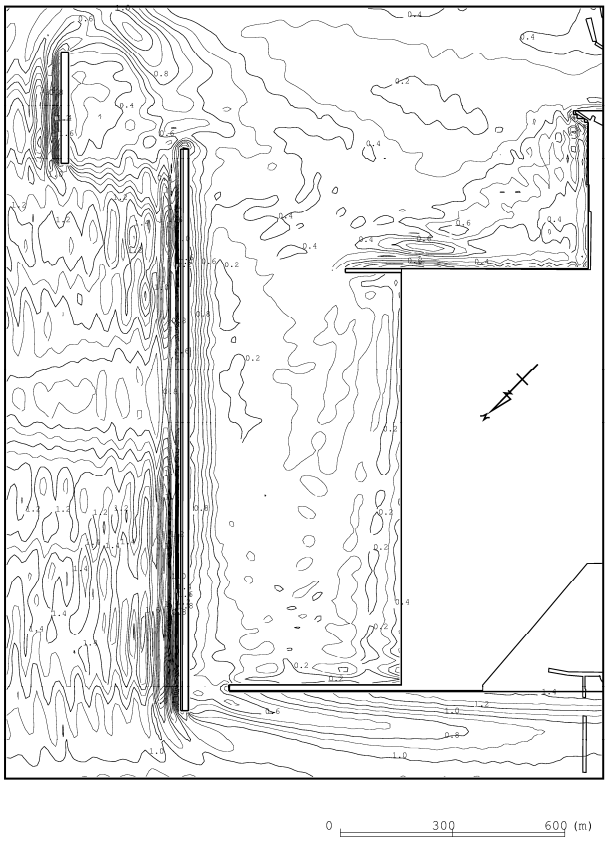
(ｳ)既定計画（直立）（現況＋新岸壁完成＋北沖防波堤 300m
＋西防波堤 460m（直立壁））
沖波波高100cm　周期10sec　波向NE(N45°)　Smax75



(ｵ)新規計画（直立）（うねり対策＋新岸壁完成＋北防東端 50°
150m 延伸＋東防 50m 撤去＋西防波堤 460m（直立壁））
沖波波高100cm　周期10sec　波向NE(N45°)　Smax75



(ｴ)既定計画（消波）（現況＋新岸壁完成＋北沖防波堤 300m
＋西防波堤 460m（消波構造））
沖波波高100cm　周期10sec　波向NE(N45°)　Smax75



(ｶ)新規計画（消波）（うねり対策＋新岸壁完成＋北防東端 50°
150m 延伸＋東防 50m 撤去＋西防波堤 460m（消波構造））
沖波波高100cm　周期10sec　波向NE(N45°)　Smax75

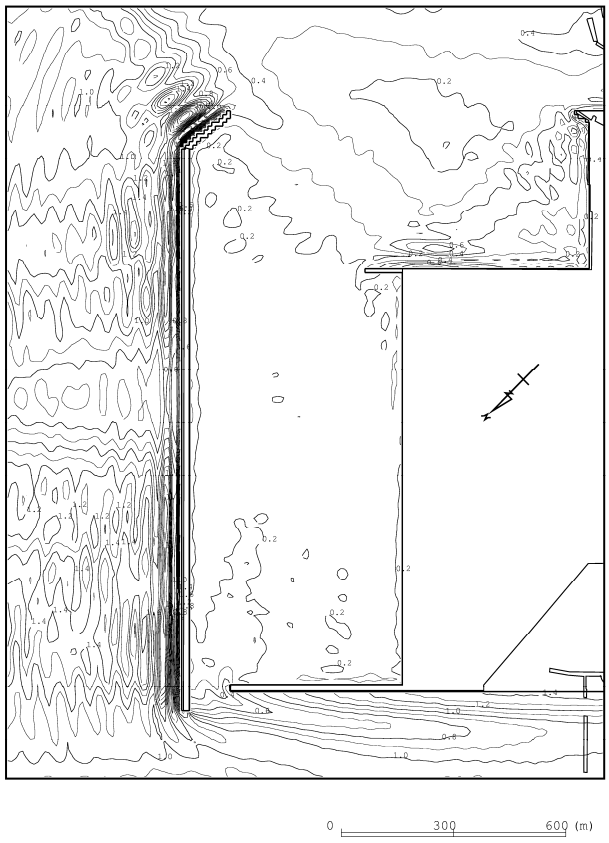


図-5(2)　波高分布図（既定計画および新規計画）

2.3.3 荷役稼働率の算定

(1) 荷役限界波高の設定

長周期波対策技術マニュアル（案）[3]を参考に荷役限界波高を設定する。ただし、最低荷役限界波高は0.20mとする。荷役限界波高の設定を表-4に示す。

表-4　荷役限界波高の設定

岸　壁	船　種	荷役限界波高（m）					
		4秒	6秒	8秒	10秒	12秒	15秒
-7.5m 岸壁	5,000DWT級 貨物船	0.50	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20
-10m 岸壁	15,000DWT級 貨物船	0.50	0.45	0.35	0.25	0.20	0.20
-14m 岸壁	50,000DWT級 貨物船	0.50	0.50	0.45	0.35	0.25	0.20
(新)-12m 岸壁	30,000DWT級 貨物船	0.50	0.45	0.35	0.25	0.20	0.20
(新)-10m 岸壁	12,000DWT級 貨物船	0.50	0.45	0.35	0.25	0.20	0.20

■ は、最低荷役限界波高(0.2m)により荷役限界波高を補正した部分
(注) 岸壁に対する波向は60°とした

(2) 荷役稼働率算定結果

港外波浪観測データ、岸壁前面波高比および荷役限界波高を用いて、通年（1-12月、目標荷役稼働率97.5%）と冬季（12-2月、目標荷役稼働率95.0%）の荷役稼働率を算定する。荷役稼働率算定結果を表-5、表-6に示す。

(a) 現況およびうねり対策について

現況およびうねり対策の荷役稼働率算定結果は次のとおりである。

- 現況は、通年・冬季ともに目標を達成しない岸壁・船種がある。
- うねり対策は、通年・冬季ともに全ての岸壁・船種で目標を達成する。

したがって、うねり対策は十分な荷役稼働率を確保するために十分な効果があると考えられる。

表-5　荷役稼働率の算定結果（通年：1-12月）

荷役稼働率 (%)	現況	うねり対策	既定計画 (直立)	既定計画 (消波)	新規計画 (直立)	新規計画 (消波)
-7.5m岸壁 5,000DWT級 貨物船	96.37	98.41	97.99	98.35	98.20	98.58
-10m岸壁 15,000DWT級 貨物船	97.34	99.31	98.45	98.78	99.15	99.39
-14m岸壁 50,000DWT級 貨物船	97.68	98.70	98.89	99.23	99.24	99.55
(新)-12m岸壁 30,000DWT級 貨物船	—	—	97.12	97.96	97.87	98.79
(新)-10m岸壁 12,000DWT級 貨物船	—	—	96.69	98.10	97.49	98.98

■ は、通年目標荷役稼働率（97.5%）を達成しないケース

(c) 整備計画について

整備計画の荷役稼働率算定結果は次のとおりである。

- 既定計画（直立）および新規計画（直立）は、通年・冬季ともに目標を達成しない岸壁・船種がある。
- 既定計画（消波）は、通年では目標を達成するものの、冬季においては目標を達成しない岸壁・船種がある。
- 新規計画（消波）は、通年・冬季ともに全ての岸壁・船種で目標を達成する。

したがって、整備計画において十分な荷役稼働率を確保するためには、①西防波堤の構造は「消波構造」、②うねり対策工は「北防東端50°150m延伸＋東防50m撤去」である必要があると考えられる。

表-6　荷役稼働率の算定結果（冬季：12-2月）

荷役稼働率 (%)	現況	うねり対策	既定計画 (直立)	既定計画 (消波)	新規計画 (直立)	新規計画 (消波)
-7.5m岸壁 5,000DWT級 貨物船	91.59	96.40	95.19	95.92	95.65	96.61
-10m岸壁 15,000DWT級 貨物船	93.47	98.25	96.00	96.80	97.81	98.39
-14m岸壁 50,000DWT級 貨物船	94.92	97.51	97.14	97.97	98.05	98.84
(新)-12m岸壁 30,000DWT級 貨物船	—	—	92.95	94.85	94.77	96.83
(新)-10m岸壁 12,000DWT級 貨物船	—	—	91.74	95.24	93.82	97.34

■ は、冬季目標荷役稼働率（95.0%）を達成しないケース

2.3.4 まとめ

本検討は「ブシネスクモデルによる波浪シミュレーション」を用い「長周期波対策技術マニュアル（案）」に準拠した新しい方法で港湾計画の改定に係る港内静穏度の検討を実施した初めてのケースである。本検討をモデルケースとして、今後、他の港湾においても新しい方法を用いた港湾計画の検討が行われることを期待する。

参考文献

1) 合田良実：数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質、第34回海岸工学論文集、土木学会、pp.131-135,1987.
2) 合田良実：増補改訂 港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp.20,1990.
3) 国土交通省港湾局：長周期波対策技術マニュアル（案）, 2002.11.

2.4 長周期波が卓越する波浪場へのブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)の適用

2.4.1 はじめに

規模大きく，形状が複雑な港では，港内が比較的静穏状態にあるにも関わらず，係留中の船舶が岸壁に沿って前進・後退を繰り返す水平運動(サージング)が生じることがある．その結果，荷役障害や係留索の切断事故が起き，稼働率を低下させる原因となっていることが，全国各港で報告されている．これらは長周期波に起因する船舶動揺と言われ，現象が顕在化している港湾では，原因の究明と対策工の検討が求められている．今回調査を行った鹿児島県・志布志港においても係留船舶の長周期動揺による荷役障害が問題となっており，その原因の特定と有効な対策の考案が重要視されている．

本報告では，画像解析，現地観測をもとに，修正ブシネスクモデルNOWT-PARI Ver.4.6βを改良して長周期波が侵入する波浪場の再現を試みる数値シミュレーションを行い，係留船舶の長周期動揺の原因とそのプロセスを明らかにした．

2.4.2 現地の状況

(1) 志布志港の概要

志布志港は九州南東部にある志布志湾の湾奥に位置し，港は南西方向に発達している．その規模は沖防波堤港口から港奥まで約4.5kmとなっている．

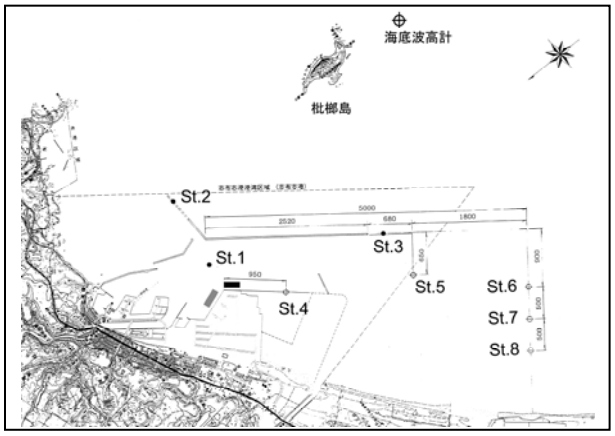


図-1 志布志港平面図

(2) 長周期動揺の実態

志布志港の長周期波による主な被害に関しては，平石ら(1997)が調査を行っている．それによれば，数分周期のサージングにより荷役障害が生じていること，係留索の切断事故も頻発していることが報告されている．

また，荷役関係者の間では，東シナ海を低気圧が通過すると，港内において係留船舶の長周期動揺が発生する傾向にあることが指摘されている．

(3) 画像解析による船舶の動揺特性

2002年9月4日，台風16号が北緯26度付近を西進しているとき，志布志港若浜地区に係留していた船舶がサージングを起こしている様子をデジタル・ビデオ・カメラで撮影し，画像解析によってその動揺特性を調べた．撮影対象とした船舶は，丁度荷役作業を行っていた貨物船(約200t)で，その船首部分にターゲットを定め撮影した．撮影は10分間にわたって行い，6秒間隔でマーカーの位置を追跡してサージングとヒービングを調べた．

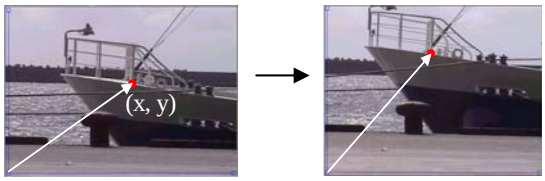


図-2 画像解析に用いた静止画

解析の一例として，係留船舶のサージングの経時変化の一部を図-3に示す．これより，周期60秒程度のサージングが生じていることがわかる．

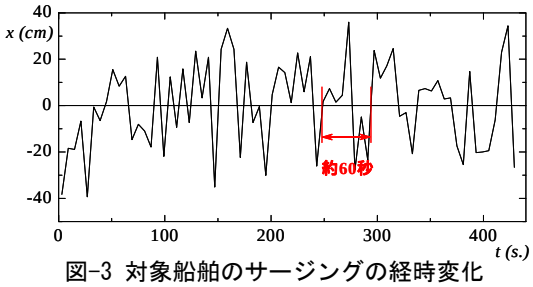


図-3 対象船舶のサージングの経時変化

(4) 波浪観測による海象特性

2000年(平成12年)度と2001年(平成13年)度の2回にわたり，志布志港周辺で波浪観測を実施した．観測を行った場所を図-1に，またそのときの観測概要を表-1に示す．

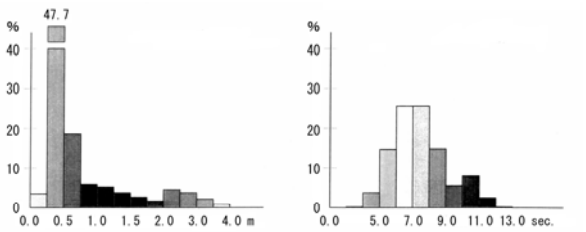
表-1 波浪観測の概要

期間	平成12年度			平成13年度		
	8月17日～10月5日			8月28日～10月24日		
観測点	St.1	港内		St.4	港内	
				St.5	南西側港口	
	St.2	北東側港口		St.6	港外（沿岸部沖側）	
	St.3	南西側港口		St.7	港外（沿岸部）	
				St.8	港外（沿岸部岸側）	
	枇榔島（ナウファス）			枇榔島（ナウファス）		
観測機器	DL-2 Wave Observer		2台	DL-2 Wave Observer		5台
	Wave Hunter Σ		1台			
観測方法	通常波	毎偶数時前後10分間（計20分間） サンプリング間隔0.5秒				
	長周期波	連続計測 サンプリング間隔1.0秒				

このとき，St.1とSt.4は港内，St.3とSt.5は港口の観測点である．

まず2000年(平成12年)度の観測結果より，枇榔島沖合のナウファス・ステーションでの波高と周期，さらに波向の出現頻度を図-4と図-5にまとめた．これによると観測中の有義波高は0.25m～0.50mの階層のものが約半分近くを占め，有義波周期は7秒前後

となっている．少し大きい目の有義波周期10秒の波も約10%出現している．波向はSEとSSEでほぼ全体を占めている．特にSEは，志布志湾の等水深線に直交する方向で，屈折を受けにくい状態で入射してくる波向である．また，SSEは志布志港沖防波堤の斜め方向から入射し，静穏度を低下させる方向である．



(a) 有義波高の出現頻度　　(b) 有義波周期の出現頻度

図-4 観測期間中の有義波の出現頻度

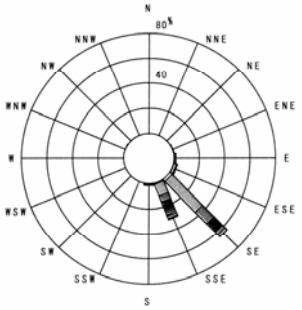
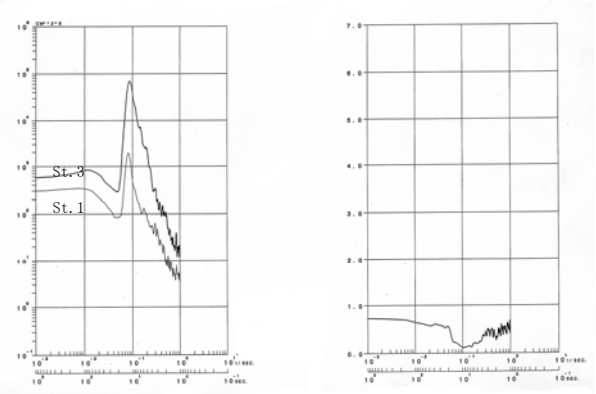


図-5 観測期間中の波向の出現頻度

図-6は，同じく2000年(平成12年)度の波浪発達期にある港口St.3と港内St.1のパワースペクトルを調べたものである．



(a) パワースペクトル　　(b) 振幅比

図-6 発達期における港内外のパワースペクトル

これによると，20秒を境に通常波成分では周期10秒～11秒に明瞭なピークが認められる．また長周期波成分はピークがやや不明瞭であるが，およそ60秒～100秒の値が読み取れる．次に振幅比でみると，周期4秒～11秒付近で振幅比が極端に減少しているのは，この範囲の風波に対して沖防波堤の遮蔽効果が現れていることを示す．

次に，2001年(平成13年)度の観測結果より，主に長周期波の特性を調べてみた．9月10日頃に生じた高波浪時のデータをもとに，周期20秒をしきい値としてFFTによってフィルタリングを行い，ゼロアップクロス法によって通常波成分と長周期波成分について波浪諸元を求めた．表-2にその結果を示す．

表-2 観測値から求めた波浪諸元

波浪種別	St.	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
通常波	枇榔島	1.37m	9.7s
	St.4	0.15m	6.4s
	St.5	1.08m	9.0s
長周期波	St.5	14.2cm	62.6s

これによると，通常波の周期は10秒，長周期波の周期は60秒となり，長周期波に関しては船舶の長周期動揺の周期にほぼ一致する．

次に発達期の長周期波成分の方向スペクトルを図-7に示す．

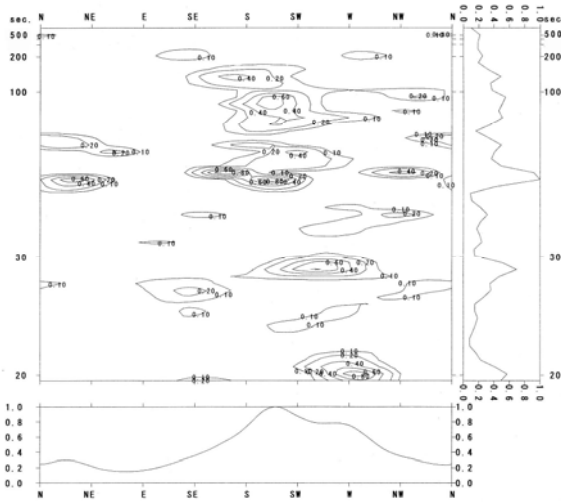


図-7 長周期成分の方向スペクトル

港内に侵入する長周期波の伝播方向を調べるため，今回は港口のSt.5において発達期の長周期波の方向スペクトルを調べてみた．その結果，周期のピークは60秒であり，それ以上の長周期波成分で見ると，伝播方向は主にSSW方向であることがわかる．このSSWは，沖防波堤港口部から港奥部を結ぶ長軸の方向に一致する．また，2000年(平成12年)度と2001年(平成13年)度の観測データについて，平石ら(1997)が用いた通常波の有義波高と有義波周期の積を使って長周期波波高を整理してみた．結果を図-8に示す．これによると，2000年(平成12年)度のデータはほぼ線型関係にあり，長周期波と通常波には相関があり，通常波の諸元から長周期波高を推測することも可能であることがわかる．しかし，2001年(平成13年)度のものは低い領域で固まり，明瞭な線型関係を示さ

ない．これは，この年の観測期間中に明瞭な暴浪が出現しなかったことに起因するものと考えられる．

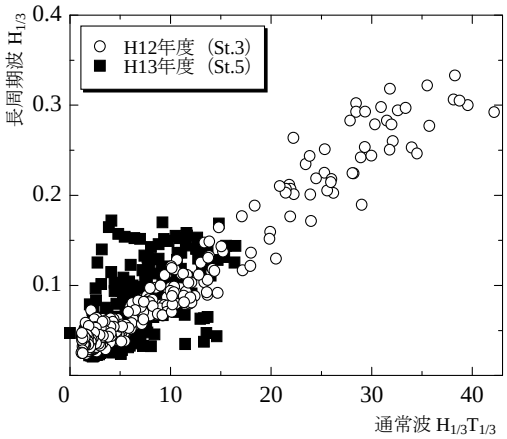


図-8 枇榔島沖での通常波と長周期波の相関関係

以上の波浪観測の解析から，周期10秒の通常波，周期60秒の長周期波の存在が確認された．

2.4.3 数値モデルの改良

(1) 高次型スポンジ層を用いた任意反射境界処理

今回使用した数値モデルは，平山(2002)が提案した高次型スポンジ層を用いた透水層モデルに改良し，任意反射境界の設定を可能にしたものである．このとき，運動方程式の中のエネルギー吸収項は，Crusら(1993)の双曲線型関数によるエネルギー減衰係数を用いて高次エネルギー減衰項に置き直した．

● 運動方程式（$x-dir$）

$$\frac{\partial P}{\partial t}+gD\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{D}\right)+\sigma P+\frac{f}{2D^2}P\sqrt{P^2+Q^2}-\nu\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}\right)$$
$$=\left(B+\frac{1}{3}\right)h^2\left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2\partial t}+\frac{\partial^3 Q}{\partial x\partial y\partial t}\right)+Bgh^3\left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 \eta}{\partial x\partial y^2}\right)$$
$$+h\frac{\partial h}{\partial y}\left(\frac{1}{6}\frac{\partial^2 Q}{\partial x\partial t}+Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial x\partial y}\right)+h\frac{\partial h}{\partial x}\left(\frac{1}{3}\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial t}+\frac{1}{6}\frac{\partial^2 Q}{\partial y\partial t}+2Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}+Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2}\right)$$

式-1

● 高次エネルギー減　　衰項（ $x-dir$ ）　（平山　,2002 ）

$$=\sigma\left[P-\mu^2\left\{\left(B+\frac{1}{2}\right)h^2\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 Q}{\partial x\partial y}\right)-\frac{h^3}{6}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial^2}{\partial x\partial y}\left(\frac{Q}{h}\right)\right)\right\}\right]$$

式-2

● エネルギー減衰項　　（ Cruz　ら，1993　）

$$\sigma(x)=\frac{r\sigma_m}{2(\sinh r-r)}\left[\cosh\left(\frac{rx}{F}\right)-1\right]$$

$F=2\sim3$ 波長，　$\sigma_m=\sqrt{g/h}$，　$r=3$

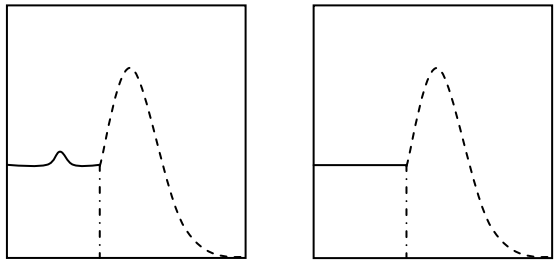
式-3

(2) 側方入射境界からの入射処理

オリジナルモデルでは側方からの入射波が扱えないため，造波境界だけでは多方向分散を精度よく表すことができない．そのため，その影響が対象地点に出ないよう，計算領域は広く取る必要があった．そこで今回は，側方からの入射を可能にするようモデルを改良した．具体的には，側方境界の水深変化に対して，屈折と浅水効果，さらには砕波がある場合には砕波による効果を考慮できるよう境界条件の改良を試みた．

(3) 長周期波スペクトルの設定

長周期波の標準的なスペクトル形状について，平石(1999)の研究を参考にエネルギーレベルの近似を行った．以下，そのときの長周期波側のスペクトル形状のパターンについて，図-9に概念図を示す．



(a) ピークエネルギー密度　　(b) エネルギー密度一定

図-9 長周期波側(実線)スペクトルの形状

2.4.4 数値計算による波浪場の再現

(1) 計算領域の設定

解析の諸条件と計算ケースを以下の表に示す．

表-3 波浪条件

	波高	周期	波向	Smax	波数
風波	1.5m	10s	SSE/SE	25	512
長周期波	0.1m 0.2m	60s 30～300	SSE	単一波 一方向	1 512

表-4 潮位および地形条件

	潮位	計算領域	地形
風波	+1.00m (観測値)	7,300m×8,000m	沖防延長 400m+2500m
長周期波		11,000m×19,500m	

表-5 計算条件

	差分格子	時間差分	計算時間
風波	10m	$T_{1/3}/200$	$240T_{1/3}$
長周期波	25m	$T_{1/3}/80$	$40T_{1/3}$

表-6 計算ケース

	ケース	入射方向	備考
風波	Case1w	SSE(正面)	側方入射無し 修正BM
	Case2w	SE(斜め)	
	Case3w	SSE(正面)	側方入射有り 修正BM
	Case4w	SE(斜め)	
長周期波	Case5*l*	SSE(正面)	60秒単一波
	Case6*l*		30秒～300秒 一様スペクトル

(2) 風波の解析結果と考察

風波については，SSE方向波(正面)とSE方向波(斜め)を対象に，それぞれ造波境界と造波境界および側方境界から波を入射させた4ケースで計算を行った．まず，Case1wでは，図-1にある枇榔島沖，港口のSt.5，港内のSt.4を対象に，2001年(平成13年)度

の観測値と比較してみた．結果は図-10にあるように，枇榔島沖では観測値1.37mに対して計算値1.38m，港外側St.5では観測値1.08mに対して計算値1.16m，港内側St.4では観測値0.15mに対して計算値0.15mと，いずれも両者はよく一致していることがわかる．また，この結果では，岸沖方向で波高減衰が顕著でない．これは潮位をHWLにとったため，入射波高に対して計算水深が深くなり，砕波が起こりにくい条件になったためと考えられる．この傾向は，観測値に一致するものである．

次に図-10と図-11，図-12と図-13で側方入射の影響をみた．これによると，側方入射を考慮したケースでは，側方境界付近で入射波のエネルギーが十分考慮された傾向を呈していることが確認される．ただし，今回のケースでは，造波境界を大きくとっているため，モニターしている各St.での差異は小さい．

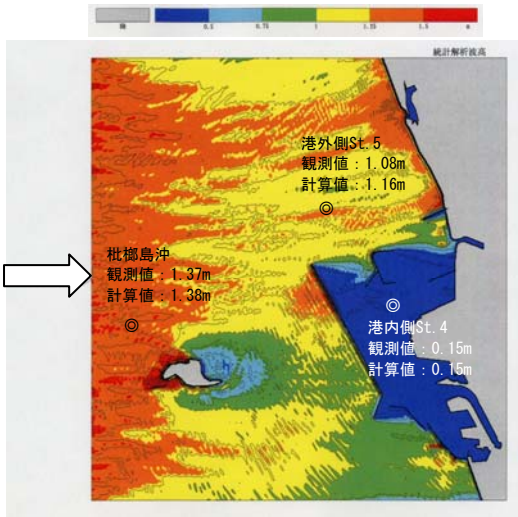


図-10 SSE方向の風波(正面)を造波境界から入射させたときの有義波高分布～Case1w

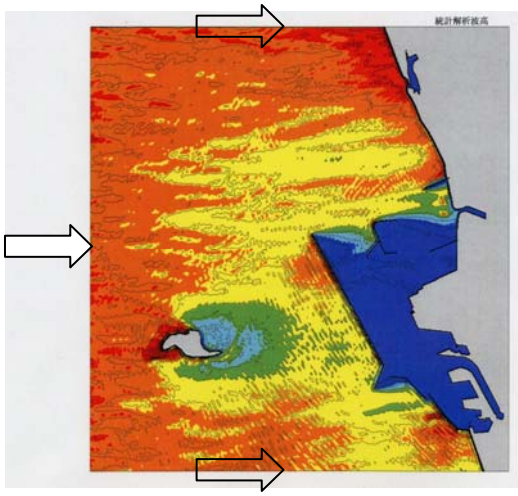


図-11 SSE方向の風波(正面)を造波境界および側方境界沿いから入射させたときの有義波高分布～Case2w

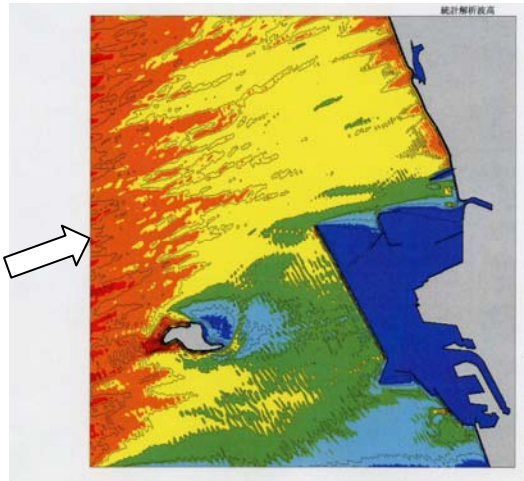


図-12 SE方向の風波(斜め)を造波境界から入射させたときの有義波高分布～Case3w

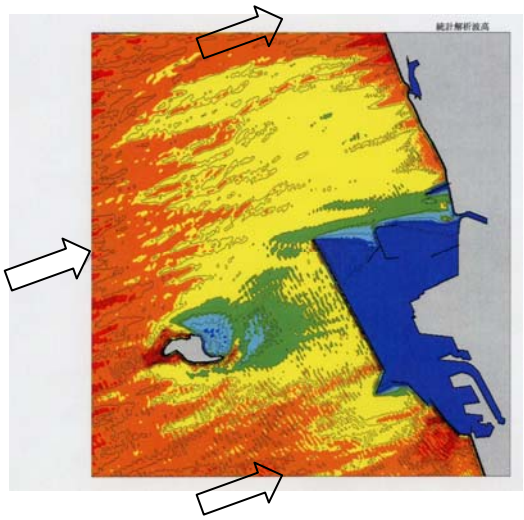


図-13 SE方向の風波(斜め)を造波境界および側方境界から入射させたときの有義波高分布～Case4w

(3) 長周期波の解析結果と考察

長周期波については，一方向単一波を対象としたものと，方向集中度パラメーターとエネルギーレベルが一様となるスペクトルを用いて入射波諸元を与えた一方向不規則波を対象とした2ケースで計算を行った．まず，Case5*1*は，観測値にある周期60秒を採用し，一方向単一波を与え，定在化した長周期波浪場を再現したもので，この結果を図-14に示す．このときの採用周期60秒は，係留船舶の長周期動揺にみられる固有周期にも一致したものである．結果は，St.5の観測値14.2cmに対して計算値は18cmとなり，ほぼ一致する．また，港内においては，沖防波堤港口部と港奥部を結ぶ港の長軸に沿って周期的な波高分布がみられる．また若浜埠頭周辺では，岸壁沿いに重複波が形成されている．今回画像解析の対象とした貨物船が係留していた岸壁付近や長距離フェリーが接岸する岸壁付近では，重複波の節が出現している．この部分は定在的に水平流速の振幅が大きくなる位置で，ここに係留されている船舶は長周期動揺のサージングを起こしやすくなっている．

次に，Case6*1*は，観測値から得られたパワースペクトルをもとに，平石(1999)が提案している方法で長周期波高を推定し，長周期成分のエネルギー密度が一様となる周波数スペクトルを用いて長周期波浪場を再現したもので，この結果を図-15に示す．このとき設定した長周期帯は，30秒から300秒である．先の一方向単一波の結果と比べると，港内の分布は顕著な重複波がみられなくなり，一部の狭小領域を除き全体に滑らかになる傾向にある．ただし若浜埠頭周辺では，波高としては大きくないものの，岸壁に沿って周期的な重複波が形成されていること確認できる．これは，一方向単一波で波高分布を定在化させたCase5*1*でも同様であり，この付近では重複波の腹節が形成されやすいことがわかる．

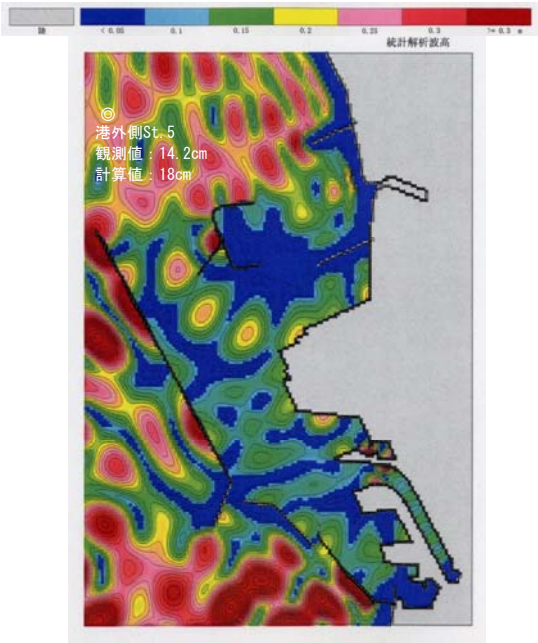


図-14 SSE方向の長周期波を一方向単一波で入射させたときの長周期有義波高分布～Case5/

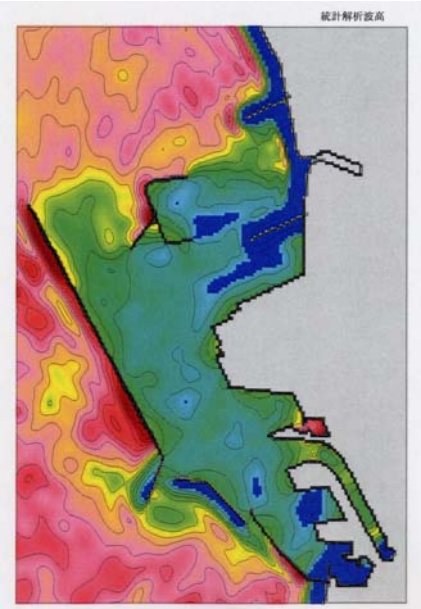


図-14 SSE方向の長周期波を一様スペクトル密度で入射させたときの長周期有義波高分布～Case6/

2.4.5 まとめ

長周期波が卓越する志布志港において，画像解析と現地観測，さらに修正ブシネスクモデルNOWT-PARI Ver.4.6βを改良した数値モデルを用いて係留船舶の長周期動揺の原因とそのプロセスについて検討を試みた．これによると，低気圧の中心が北緯26度付近にあるとき，周期60秒前後の長周期波が港内に侵入し，係留船舶の長周期動揺を発生させていることがわかった．これを数値シミュレーションで再現させたところ，若浜埠頭の岸壁付近で重複波が形成され，このときの腹節の位置が画像解析で対象とした貨物船や長周期動揺が報告されている長距離フェリーの接岸位置とほぼ一致していることが明らかになった．

今後，対策工の検討に入る予定であるが，この際の課題として，可能であれば乱流抵抗項まで考慮した透水層モデルを用い，任意反射境界付近の計算付加を軽減して検討を試みたい．また，将来的には動揺シミュレーションと組み合わせた数値モデルを開発し，直接動揺量を計算することで対策工や係留索の改善効果を評価したい．

謝辞

本検討に際し，国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所ならびに下関港湾空港技術調査事務所の方々よりご協力を頂きました．ここに深く感謝致します．

参考文献

1) 西井康浩，高瀬和博，大岡弘樹，鵜崎賢一，松永信博：長周期波の侵入による港内動揺の現地観測と数値計算，海岸工学論文集，第50巻，pp.236-240，2003.
2) 平石哲也，白石　悟，永井紀彦，横田　弘，松渕知，藤咲秀可，清水勝義：長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査，港湾技研資料，No.873，pp.7-8，1997.
3) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾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，pp.26-90，2002.
4) Eric Cruz，横木裕宗，磯部雅彦，渡辺　晃：非線形波動方程式に対する無反射境界条件について，海岸工学論文集，第40巻，pp.46-50，1993.
5) 平石哲也：長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定，港湾技研資料，No.934，pp.4-13，1999.

2.5 V字型チャンネルの効用

2.5.1 計算の目的

「航路をV字型に掘ると、進入波が屈折し、脇へそれるので、航路奥が静穏になる」ことが期待される。

この、V字型のチャンネルが、どの程度効果があるか、平石博士の「修正ブーシネスクモデルによる差分計算のプログラム(NOWT-PARI Ver.4.6β)」を使用し、想定される水深で、シミュレーション（1ケース）を行った。

2.5.2 使用したコンピューター

（通常のパソコンです。）

HDD：　60 Gバイト
MEMORY：SD-RAM 256 MB
CPU:　ペンティアムIV　2.0 GHz
OS:　ウインドウズ2000

2.5.3 使用したプログラム

(1)波の伝播

bsn_k1.for
（平石博士の差分プログラム）

(2)FORTRAN

Developer Studio
（ウインドウズ上でフォートランを動かすソフト）

(3)海底地形作成

chikei3d.xls
（エクセル2000で私が作ったプログラム）
単純な地形を作るときに、便利なプログラム、データーは10桁にそろえ、横8列に並べる。

(4)図化

SCILAB(フランスの大学のフリーソフト)
サイラブは、マトリクス計算ができるほか、2次元、3次元の図を書くことができる。

2.5.4 計算結果を整理

intake_text.xls
（エクセル2000で私が作ったプログラム）

1) bsn で作成された計算結果のファイルは、横8列の形式なので、それを、サイラブが読みこめるように、縦1列に並べる。
2) 計算領域全部を図化する必要のない場合、部分を切り出す。（図化すると、メッシュが細かすぎて黒くなるので、メッシュを飛ばし飛ばし拾う。）

2.5.5 計算メッシュ、地形（ 図-1参照 ）

- 幅１ｋｍ（200メッシュ）、長さ1.5 ｋｍ（300メッシュ）のエリアの周りにスポンジ区間（98メッシュ）、その外周に、2メッシュの厚さの壁を設けて計算した。（Total 400x500 mesh、& 1 mesh = 50 m）
- 水深は、沖側の壁のあたりで-20 m、港内側の壁のあたりで-15 mとした。
- V字の谷は、沖側の壁から、港内側の壁まで、一直線とし、谷の形状は、幅、200 m、谷の深さは周りに比べて、20 m深くした。
- 造波の場所は、沖側スポンジ層境界(沖の壁から約500 m 内側)。
- 防波堤は、造波位置から500 m進んだところに設置。開口幅は200 m

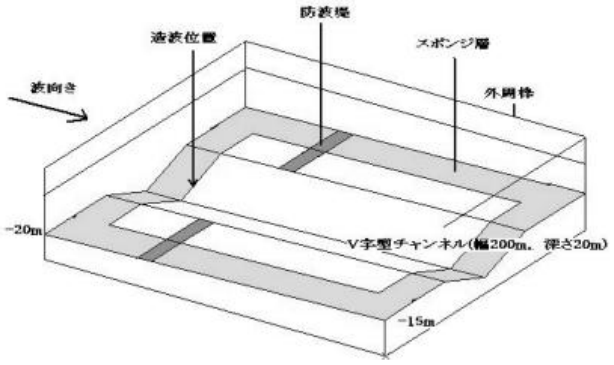


図-1 海底地形

2.5.6 造波の諸元

H1/3=1.0m、T1/3=12 sec、Smax=99、方向分割=10

2.5.7 計算のための時間の分割

はじめ、周期を20分割して計算を始めたが、すぐエラーになってしまった。

おそらく、時間間隔が長いと、力を受けた水の速度が大きくなりすぎるのではないかと、勝手に推測して、周期を100分割した。また、計算波数は20波程度に少なくし、エラーがでないうちに、結果をゲットする作戦とした。

2.5.8 OUTPUT

図-2のH1/3の分布は、２波目から２０波までの平均である。

図-3の水位（波の形）は、１０波目の状況である。

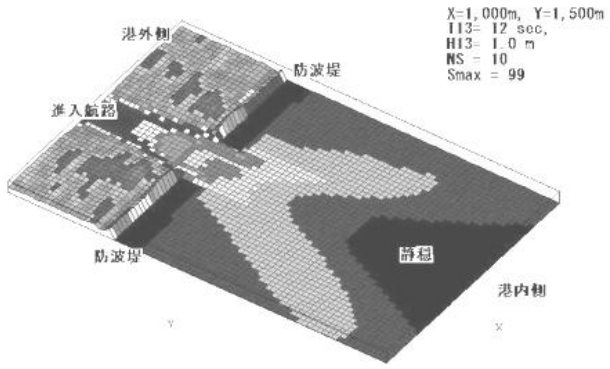


図-2 有義波高分布

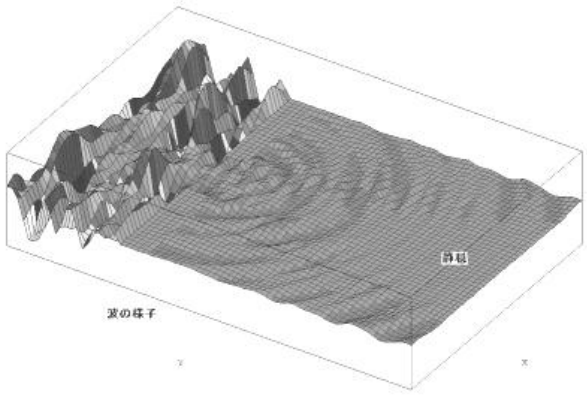


図-3 水位分布（波の進行の様子）

2.5.9 所見

(1)港外

V字の谷のチャンネル内では、周りに比べ、波が静かである。これは、防波堤で反射された波も、V字型のチャンネルが凹レンズ効果をもたらして、波をそらし、静穏になっているためと理解される。

(2)港内

進入した波が同心円を描いて伝播している。

本来最も波あたりの多いはずの、波の直進方向において、わずか５００m進むうちに、波が消えている。

2.5.10 適用の可能性の考察

実際の港湾のスケールに照らすと、３００mの船の長さがあるとすると、ストッピングディスタンスは5Lとして、１５００mである。これに対して、５００m進むと静穏になっている。このように、V字型のチャンネルの凹レンズ効果は、意外に顕著であることが確かめられた。おそらく、２重の防波堤にすれば、完璧に静穏な港を作ることができるであろう。従来、防波堤や航路を斜めに作ってきたが、もし、V型のチャンネルを作るなら、沖向きに防波堤の開口部を設けることも可能となる。

V字型のチャンネルのレンズ効果について、今後、長周期の波についての効果、津波に対する効果も、平石博士のプログラムで、調べたいと考えている。

参考文献

「平山克也・平石哲也：修正ブシネスク方程式による高精度波浪変形計算の基本特性，港湾空港技術研究所資料，平成１４年３月」

3. ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver.4.6β）の現状

3.1 ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)における擬似段波モデルの適用（その２）

3.1.1 概要

昨年度，平山・原は，「時間発展型擬似段波モデル」とした1次元砕波モデルを開発した（以下，段波モデルと称す）．この砕波モデルは「非定常な砕波現象における単位時間あたりのエネルギー減衰量が，ある微小時間および微小空間における跳水によるエネルギー損失に等しい」と仮定したものであり，砕波の形態によらず，統一的に扱うことの出来る砕波モデルである．

本論文では平山・原によって開発された段波モデルを様々な断面1次元地形に対して適用し，砕波モデルとしての妥当性と適用性についての確認を行ったものである．また，段波モデルを平面2次元計算へ適用した場合についての検討結果も示す．

3.1.2 断面2次元計算における段波モデルの適用

(1) 砕波判定及び砕波減衰量

段波モデルにおける，砕波判定及び砕波減衰量は，(3.1.1)式及び(3.1.2)式により求める．(3.1.1)式は水表面における鉛直圧力勾配を示したものであり，理論上は，圧力勾配0の時に砕波することになるが，平山・原によれば，一様斜面の進行波による砕波や部分重複波を統一して判定するため，砕波判定のしきい値は圧力勾配0.7にすると良いとしている．

また，砕波によるエネルギー逸散量は(2.1.2)式により算出し，(3.1.3)式に示す運動方程式において減衰項として左辺第4項により考慮する．

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}\bigg|_{z=\eta} = g - \frac{\partial h}{\partial x}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{D}\right) - D\frac{\partial^2}{\partial t\partial x}\left(\frac{P}{D}\right) \qquad (3.1.1)$$

$$\Delta E = \frac{1}{\rho g}\frac{D_0}{D_1 D_2}\left(\hat{P}_1 - \hat{P}_2 + \hat{P}_0\right) - \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h_2 - h_1 \qquad (3.1.2)$$

ここで，$D_0 = \frac{1}{2}(D_1 + D_2),\ \hat{P}_1 = \int_{-h_1}^{\eta_1} p_1 dz,\ \hat{P}_2 = \int_{-h_2}^{\eta_2} p_2 dz,$

$$\hat{P}_0 = -\int_{-h_1}^{\eta_0} p_0 dz + \int_{-h_2}^{\eta_0} p_0 dz$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{D}\right) + gD\frac{\partial \eta}{\partial x} + gD\frac{\Delta E}{L} = \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2\frac{\partial^3 P}{\partial t\partial x^2} + Bgh^3\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \qquad (3.1.3)$$

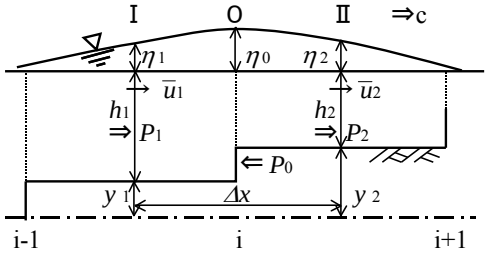


図-1　時間発展型擬似段波モデルの模式図

(2) 様々な汎用地形における適応性

段波モデルの適応性を確認するため，本年度行われた断面砕波実験の結果を基に検討する．その結果を図-2に示す．なお，図中には実験値，段波モデルによる計算値，及び合田(2003)の段階的砕波モデルにおける計算結果を参考値として併せて示す．

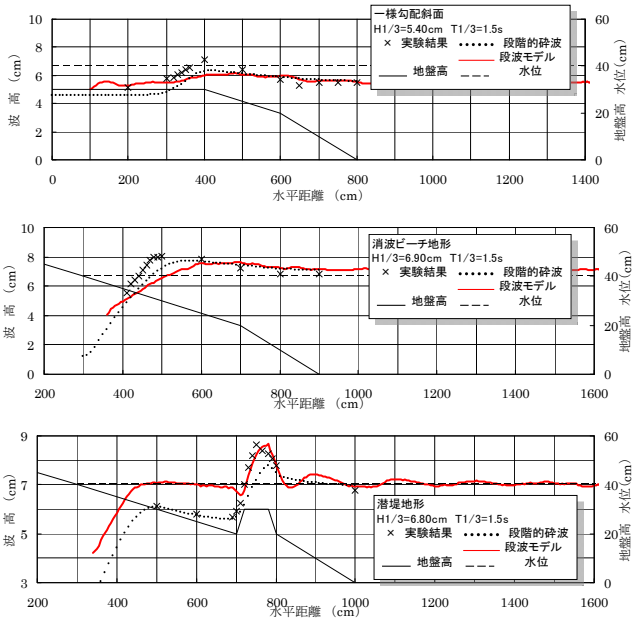


図-2　断面地形における波高分布図
（上：一様勾配　中：消波ビーチ　下：潜堤）

図-2(上)に示す一様勾配(1/20)地形は，沖側水深0.4mから，1/10勾配で水深0.2mまで上がり，1/20勾配で水深0.1mまで上がる地形である．そして，水深0.1mで水平床となり，終端部には消波材を設置している．これは端部の境界条件に透水層モデルを用いることで数値計算上において再現できる条件である．図より，段波モデルと段階的砕波モデルは，ほぼ同様な波高変化を示すが，砕波点は段階的砕波モデルの方がはっきりと現れる．また，砕波後の波高の推定には段波モデルが適しているようである．

次に，図-2(中)に示す消波ビーチ地形は，一定勾配1/20の斜面が水面上まで続く地形である．現在の段波モデルにおいては，水の遡上を表現できないため，計算においては最小水深を限界まで浅くし，終端部は一様勾配地形と同様に透水層モデルを用いた．段波モデル及び段階的砕波，共に実験に比べ砕波の減衰が比較的深い水深で始まっているため，砕波後の波高は実験波高よりも低く評価されている．この実験との砕波点の差違は，水の遡上により発生する戻り流れ等の影響であると考えられる．

また，図-2(下)に示す潜堤地形は前に示した消波ビーチ地形に天端高0.1mの潜堤地形を設けた地形である．この地形における段波モデルの計算結果は，潜堤を通過するまではとても良く一致している，しかし，潜堤の逆勾配部分に入り，急激に水深が増大すると，波高も増加している．これは水深の急激が増に伴い，判定が非砕波となり，分散関係式に従った水深に相当する波高に戻っているものと考えられる．よって，実験では逆勾配斜面上も継続的に砕波

減衰していることが確認されることから，逆勾配斜面上における砕波減衰の必要性が再確認された．一方，合田の段階的砕波は，逆勾配斜面上での減衰を考慮されているため，砕波後の波高は良く一致しているが，潜堤上の様に波形の非線形性が強くなる領域では，放物型方程式を用いているため，砕波高は低めに評価されている．したがって，極めて急峻な地形に対しては段波モデル用いたブシネスク方程式により砕波波高を良く表現出来る.しかし，バートラフ地形や，潜堤背後のような地形を対象とする際には，逆勾配斜面上での砕波減衰を考慮する必要があるという，平山らの指摘を水理実験から再確認することが出来た.

よって，段波モデルの特徴として，地形の勾配が緩やかな場合には，砕波の開始が早く，波の減衰も早いが，どんな条件下においても，概ね波高の推定が可能であり，急激な波の変形にも安定して算定可能な砕波モデルであることが明らかとなり，段波モデルの汎用性が確認された.

3.1.3 平面2次元における擬似段波モデルの開発

(1) 砕波判定

平面2次元における砕波判定では各計算格子における鉛直圧力勾配を，(3.2.1)式により求め，砕波判定は鉛直圧力勾配が0.7以下となると砕波が発生するものとした.

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}\bigg|_{z=\eta} = g - \frac{\partial h}{\partial x}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{P}{D}\right) - \frac{\partial h}{\partial y}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q}{D}\right) - D\frac{\partial^2}{\partial t\partial x}\left(\frac{P}{D}\right) - D\frac{\partial^2}{\partial t\partial y}\left(\frac{Q}{D}\right) \quad (3.2.1)$$

(2) 砕波減衰量

エネルギー逸散量は2次元断面モデルで用いた(3.1.2)式によりΔEを定義し，(3.2.2)式(3.2.3)式に示すブシネスクモデルの運動方程式右辺第7項に砕波減衰項として付加し，砕波減衰を考慮する方法を用いた.

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial P}{\partial t} + gD\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{D}\right) + \sigma P + \frac{f}{2D^2}P\sqrt{P^2+Q^2} - gD\frac{\Delta E_x}{L} \\
&= \left(B+\frac{1}{3}\right)h^2\left\{\frac{\partial^3 P}{\partial x^2\partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x\partial y\partial t}\right\} + Bgh^3\left(\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3\eta}{\partial x\partial y^2}\right) \\
&\quad + h\frac{\partial h}{\partial y}\left\{\frac{1}{6}\frac{\partial^2 Q}{\partial x\partial t} + Bgh\frac{\partial^2\eta}{\partial x\partial y}\right\} \\
&\quad + h\frac{\partial h}{\partial x}\left\{\frac{1}{3}\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial t} + \frac{1}{6}\frac{\partial^2 Q}{\partial y\partial t} + 2Bgh\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2} + Bgh\frac{\partial^2\eta}{\partial y^2}\right\}
\end{aligned} \quad (3.2.2)$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial Q}{\partial t} + gD\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{PQ}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q^2}{D}\right) + \sigma Q + \frac{f}{2D^2}Q\sqrt{P^2+Q^2} - gD\frac{\Delta E_y}{L} \\
&= \left(B+\frac{1}{3}\right)h^2\left\{\frac{\partial^3 P}{\partial x\partial y\partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial y^2\partial t}\right\} + Bgh^3\left(\frac{\partial^3\eta}{\partial x^2 y} + \frac{\partial^3\eta}{\partial y^3}\right) \\
&\quad + h\frac{\partial h}{\partial x}\left\{\frac{1}{6}\frac{\partial^2 P}{\partial y\partial t} + Bgh\frac{\partial^2\eta}{\partial x\partial y}\right\} \\
&\quad + h\frac{\partial h}{\partial y}\left\{\frac{1}{6}\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial t} + \frac{1}{3}\frac{\partial^2 Q}{\partial y\partial t} + Bgh\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2} + 2Bgh\frac{\partial^2\eta}{\partial y^2}\right\}
\end{aligned} \quad (3.2.3)$$

(3) 減衰方法

平面2次元における段波モデルの砕波減衰方法は，まず(2.2.1)式により各時間ステップにおける全ての計算格子点について鉛直圧力勾配を算定し，0.7以下となる場合に，エネルギー逸散量を計算し(3.2.2)式及び(3.2.3)式の運動方程式を解く.

しかし，NOWT-PARIにおける差分計算はADI法を採用おり，x，yそれぞれの方向に交互に差分計算を行っているため，計算上の砕波のエネルギー逸散量は，常にx,y方向の各成分量として算定されることになる．よって，斜め方向に伝搬する波の砕波の逸散量を求める際にも，エネルギー逸散量の成分量として減衰させることになるので，例えば(3.2.2)式のx方向の運動方程式のみでも，水位変動を減衰させることは可能となる.

したがって，この成分量として扱われるエネルギー逸散量が運動方程式上で作用させる方向を限定した場合の試計算を行い，減衰量がどのように変化するのかを確認を行う.

3.1.4 斜め斜面地形による確認

(1)計算条件

斜め方向に進行する場合の減衰過程を確認するため，斜め斜面地形において段波の方程式上の減衰方向を（x，y，x-y）の３通りで比較する．用いた地形は，図-3に示す一様勾配1/10の地形に対して45度の角度で波が入射するように設定した地形を用いる.また，波浪条件は有義波高1.6m，有義波周期5.1s（波形勾配0.04）の1方向不規則波を用いる.

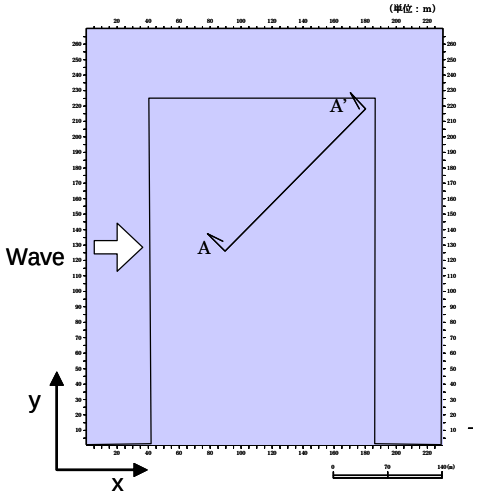


図-3　斜め斜面地形における計算領域図(slope：1/10)

(2)計算結果

図-4は，波が屈折し徐々に斜面に垂直に波向が変化しながら伝搬する過程で，砕波が起こった場合に，砕波減衰を考慮する方向をｘ方向，ｙ方向，x-y方向のそれぞれのケースに対して図-3に示すA-A’断面の有義波高を抽出し比較したものである.

入射波境界における計算領域と側面スポンジ層の

境界では数値分散が起こるため，回折の様な現象が起こり，計算領域の端では波高の減少が見られる．よって，図上で波高が徐々に減衰しているのは，浅水変形による波高の増大よりも，この数値分散による波高の減少量の方が支配的であるためである．したがって，このままでは砕波量の評価をするのは難しいため，図中の緑実線で示した従来型（NOWT-PARI4-6β）で計算した結果を元に，A-A’断面上における波高分布の差違について考察する．

本計算条件は波の屈折角がさほど大きくはならない．よって，水深1m程度においても，x方向に進む波成分が支配的であるため，x砕波及びx-y砕波の場合にはほぼ同様な傾向となる．

一方，y方向のみに減衰させた場合には，波の進行方向と減衰方向が一致しないため波が減衰せず進行してしまう．

したがって，x-y双方向に砕波を考慮すると，波の進行方向をある程度考慮して，砕波減衰を作用させることができ，結果的に従来型ブシネスクの解と一致してくるものと考えられ，エネルギーの逸散方向は，x-y双方向に作用させるものとする．

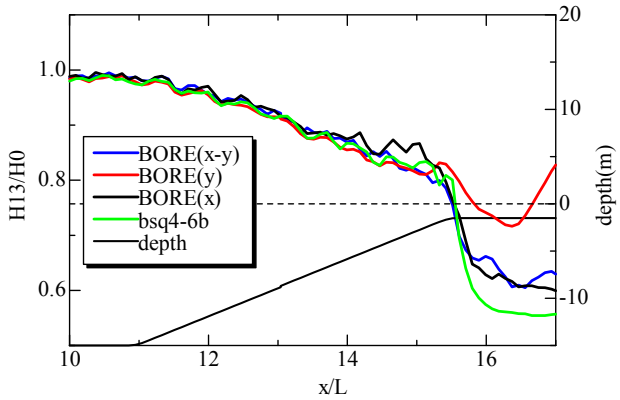


図-4　斜め斜面上における有義波高分布

3.1.5 球面浅瀬地形における比較

(1) 計算条件

次に，x-y方向砕波の段波モデルを用いて，多方向不規則波中における適用性を検討する．使用する地形は図-5に示す球面浅瀬地形であり，多方向不規則波中における砕波特性を把握するために行われた水理模型実験で用いた地形である．

浅瀬地形は水深0.6m，天端水深0.2mとして，半径1L（L：波長）の範囲で球面浅瀬を形成しているものである．図-5に示す●印は波高計測地点であり，浅瀬を中心として３測線（a-a’，b-b’，c-c’）上に配置した．

また，用いた入射波条件は有義波高0.1m，有義波周期1.5sとして，方向集中度を変えて２ケース(Smax=5及び75)を実施した．

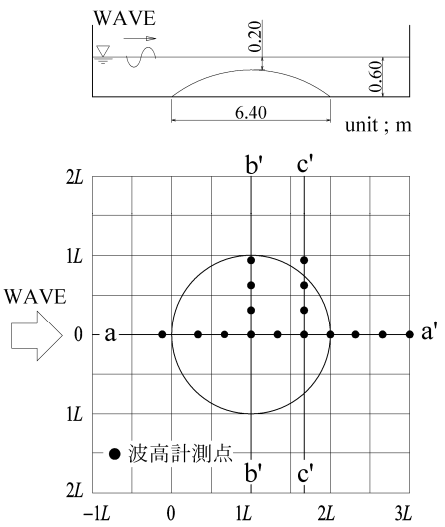


図-5　球面浅瀬地形図

(2) 解析結果

この地形において，方向集中度の異なる波浪条件下における砕波減衰量の差異について確認する．

図-6は，方向集中度の低いSmax=5と方向集中度の高いSmax=75の2ケースの実験と計算の結果であり，実験で計測された３測線上における波高分を示した図である．

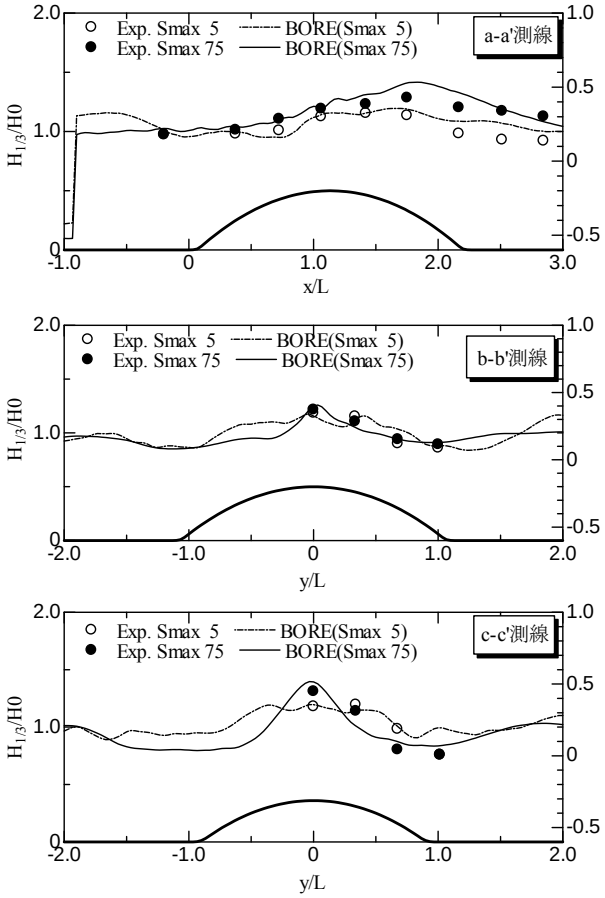


図-6　球面浅瀬地形における有義波高分布

入射した波は，球面地形を通過することにより屈折し，中央部背後に集中して砕波する．図-6のa-a’測線の結果を見ると，同じ波浪条件下においても，方向集中度の違いにより，波高分布は大きく異なることが確認されており，浅瀬中央部背後においては，方向集中度が小さい方が，波高が低くなる．段波モデルの計算結果は，浅瀬中心までの非砕波領域では実験結果と一致するが，砕波後の波高は方向集中度によらず，実験結果に比べ，やや高めになっている．

またb-b’測線では，方向集中度の違いによる差はなく，計算値と実験値との差もほとんどない．しかし，Smax=5の場合には浅瀬中央から見て，左右の対称性が崩れており，波の方向分布幅が広いため若干解析波数が不足しているようである．

さらにc-c’測線において，方向集中度が高い場合には，実験値よりも計算値は若干上回る傾向にあるが，おおむね実験値と一致している．

よって，多方向不規則波中において，方向集中度が異なる条件においても，段波モデルにおいて統一的に評価することが可能であることが確認された．

3.1.5 現地地形における適用性

(1) 計算条件

次に沖合防波堤（延長900m）周辺をモデルとした図-7に示す地形において，防波堤前面での波高分布を測定した水理実験結果と比較する．波高の計測地点は図-8に示すように，防波堤幹部中央周辺とその背後である．

水理実験におけるスケールは1/100であり，使用した波浪諸元を表-1に示す．また，対象とする防波堤の前面は消波工被覆されており，実験時に求められた反射率0.3程度であった．よって，防波堤前面には任意反射境界として７格子分のスポンジ層を設けている．

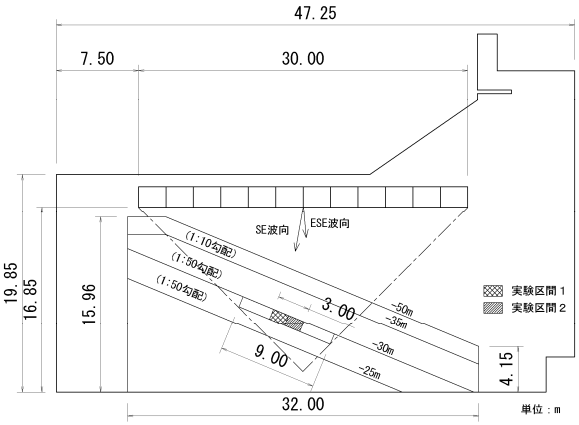


図-7　実験平面図

表-1　波浪条件（実機スケール）

波　　向	SE
有 義 波 高	12.3m
有 義 波 周 期	14.5s
方 向 集 中 度	10

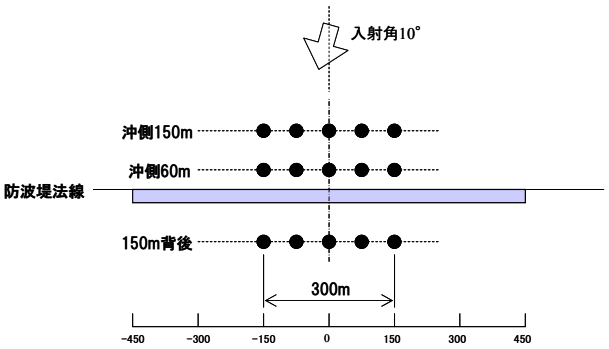


図-8　波高計配置図（実機スケール）

(2) 計算結果

計算結果を以下に示す．図-9は段波モデルによる有義波高の平面分布である．解析の結果，防波堤前面で砕波判定されており，砕波による影響が現れている．この結果から，実験の波高計測ライン毎に波高を比較したものが図-10,11である．

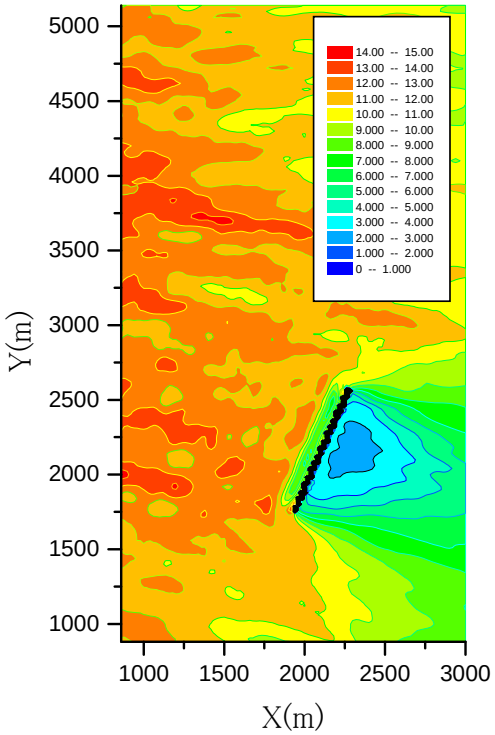


図-9　段波モデルによる平面波高分布

図-10は，防波堤法線方向（等水深）に，３測線で実験値と比較したものである．沖側150m測線においては水平距離による波高の分布に差が出ているが，水槽内での反射波の影響が出ているものであり，これを除けば，計算値と良く一致するものと考えられる．また，背後150m測線上では，計算値は実験値よりも低くなっているのは，実験時に，防波堤上に大きな越流が生じていたためであり，波の回折成分しか考慮されていない計算値は，越流成分を含んだ実験値よりも小さな波高となる．なお，沖側5H13の測線は計算上スポンジ層内に当たるため参考値となる．

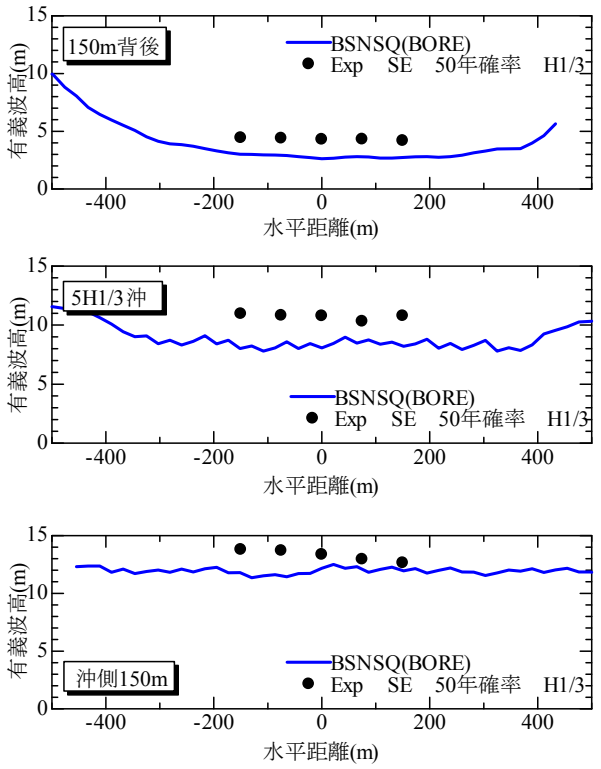


図-10　防波堤法線平行方向測線における波高分布

そして，図-11は防波堤法線に対して直角方向に抽出した波高分布であり，防波堤岸沖方向に対する波高分布としては，防波堤の影響による波高変化は概ね表現できているが，防波堤周辺では大きな波の遡上は起こっていないことが確認された．

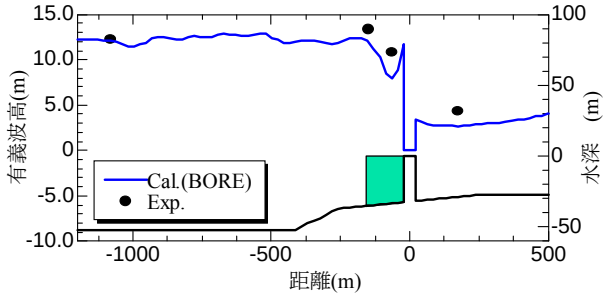


図-11　防波堤法線直角方向における波高分布

3.1.5まとめ

以下，本論文で示した主な結論についてまとめる．

・断面実験結果により，段波モデルの汎用性を確認した．特に，急激な水深変化に対しても適応可能であったが，逆勾配斜面上における砕波減衰のモデル化の必要性が再確認された．

・平面2次元計算において，鉛直圧力勾配を用いた判定法，及び段波モデルを用いることで，平面実験と一致することが確認された．

・平面2次元計算における段波モデルの評価には，砕波変形が支配的となる条件における水理実験との比較が必要である．

参考文献

1）平山克也・原信彦（2003）：時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波モデルの開発，港湾空港技術研究所報告第42巻，第2号，pp. 27-45

2）平山克也（2002）：非線形不規則波を用いた数値計算の港湾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

3）合田良実（2003）：段階的砕波モデルによる人工リーフ波高伝達率の特性解析，海岸工学論文集，第50巻，pp. 676-680

4）高山知司・池田直太・平石哲也（1991）：砕波及び反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告第30巻，第1号，pp. 21-67

5）合田良実（1975）：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp. 59-106.

6）灘岡和夫・大野修史・栗原礼（1996）：波動場の力学状態に基づく砕波過程の解析と砕波実験，海岸工学論文集，第43巻，pp. 81-85.

7）平山克也（2001）：ブシネスクにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発，海岸工学論文集，第48巻，pp. 26-30.

記号表

C ： 位相速度
c ： 波速
D ： 全水深
g ： 重力加速度
h ： 静水深
k ： 波数
P ： x方向の線流量フラックス
Q ： y方向の線流量フラックス
p ： 圧力
$\bar{u}$ ： 断面平均流速
u_s ： 水表面流速
ΔE ： 跳水によるエネルギー損失水頭
η ： 水位
ρ ： 水の密度

3.2 高知港における台風0209号来襲時の波浪変形計算への適用事例

高知港における波浪変形計算にブジネスクモデル(NOWT-PARI)を適用した事例の中で、回折領域におけるエネルギー平衡方程式法とブジネスクモデルによる算定結果を比較した結果を紹介する.

3.2.1 はじめに

(1) 概要

太平洋に面する高知港の防波堤では大波浪の影響による消波ブロックの沈下が発生し、大きいところでは２m程度の沈下が報告されている．またケーソンの沈下も発生している．この実態調査を目的として台風0209号来襲時から東第１防波堤で海底地盤間隙水圧の観測が行われている．このような沈下原因の調査の一環として、本報告では2002年７月の台風0209号来襲時に高知港の海象計が波高のピークを観測した７月25日18時を対象として周辺波浪場の解析を行ったものである.

(2) 対象地点及び台風0209号について

対象地点である高知港の位置および高知港港口部周辺の水深分布図をそれぞれ図-3.2.1、図-3.2.2に示す.

対象とした平成14年(2002年)の台風0209号の概要を表-1.2.1に、経路図を図-3.2.3に示す．また台風来襲時に図-3.2.2に示す高知港の海象計が観測した波向、有義波高、有義波周期の時系列図を図-3.2.4に示す.

図-3.2.1　高知港位置図

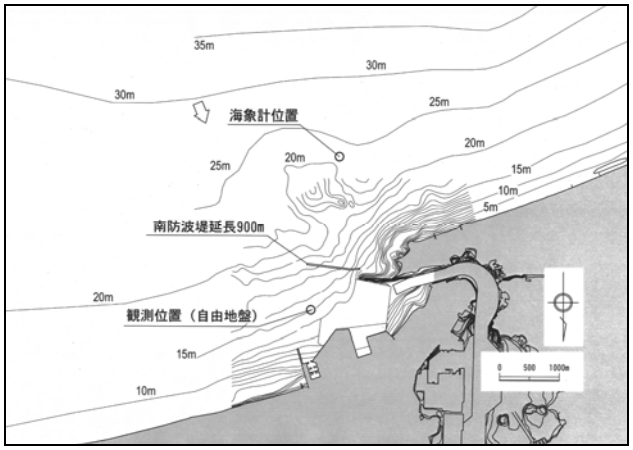


図-3.2.2　高知港新港地区周辺の水深分布図

表-3.2.1　台風0209号の概要

台風番号	0209
国際名	Fengshen
台風の発生日時と位置	2002/07/14　09:00 北緯11°00′東経170°55′
台風としての寿命	13日12時間
最低中心気圧 （気象庁解析）	2002/07/22　09:00 920 hPa
最大風速 （気象庁解析）	2002/07/22　09:00 50 m/s（100knot）
最大強風域半径 （気象庁解析）	2002/07/22　09:00 北東側600km、南西側440km

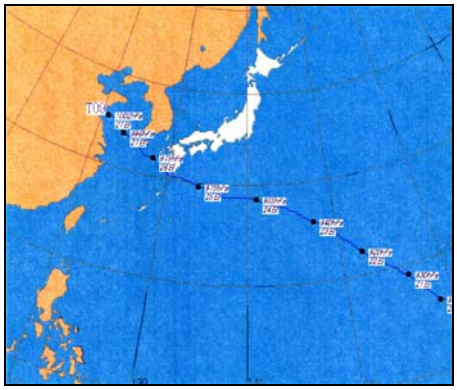


図-3.2.3　台風0209号の経路図

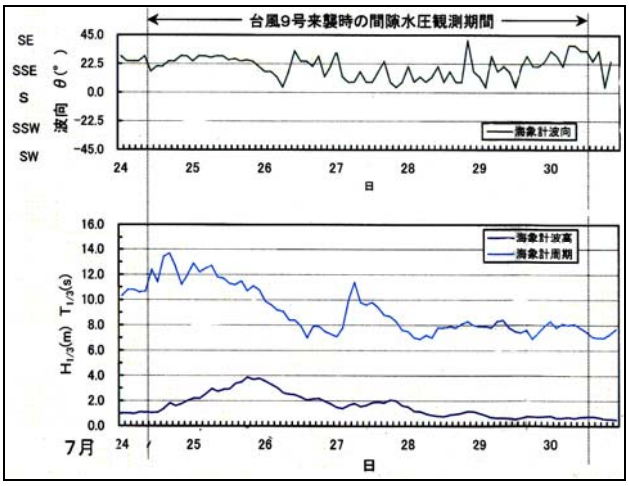


図-3.2.4　高知港海象計の波向・有義波高・有義波周期の時系列図(台風0209号来襲時)

3.2.2 高知港港口部における波浪場解析

台風0209号来襲時に高知港の海象計が波高のピークを観測した７月25日18時を対象として周辺波浪場の解析を行う．解析は全ケースとも海象計地点からエネルギー平衡方程式法により波浪場を求め、ブジネスクモデルの入射境界で先に求めた波浪を平均し入射波として計算を行った．なお今回のブジネスクモデルの計算では、ブジネスクモデルの入射境界と海象計位置が比較的近いことと水深の差が３m程度であることから周期およびSmaxはエネルギー平衡方程式法と同様とした．また本計算においては港内で水圧の観測が行われた東第１防波堤は、エネル

ギー平衡方程式法、ブジネスクモデル両計算とも防波堤は無いものとして計算を行った.

(1) 計算モデルによる有義波高の比較

(a) エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算

計算モデルは高山らによる方法[1)]とした．なお今回使用したモデルは回折項については考慮していない．砕波モデルは磯部と同様に砕波による波高減衰項を導入している.

入射波条件については表-2.1.1のように海象計の観測結果を代表させて主波向SSE、Sの入射波とした．表中の$H_{1/3}$、$T_{1/3}$はそれぞれ有義波高、有義波周期である．また他の計算条件を以下に示す.

・潮位　　：H.W.L=T.P.+1.0 [m]
・格子間隔　　：沖側20m、岸側10m
・周波数分割数　：12
・方向分割数　　：18

例として主波向SSEの計算領域を図-2.1.1に示す.

算定した主波向SSEの有義波高分布を図-2.1.2に示す.

表-3.1.1　エネルギー平衡方程式法の入射波諸元

No.	主波向 [deg.]	$H_{1/3}$[m]	$T_{1/3}$[s]	Smax	波向範囲 [deg.]
1	SSE(157.5)	4.0	11.0	25	±60
2	S(180.0)	4.0	11.0	25	±60

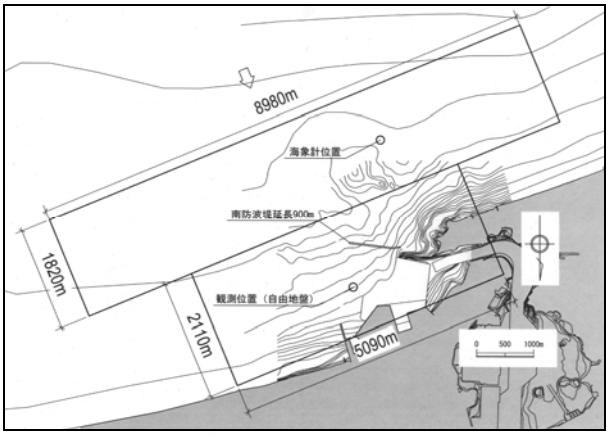


図-3.1.1　エネルギー方程式法計算領域図（主波向SSE）

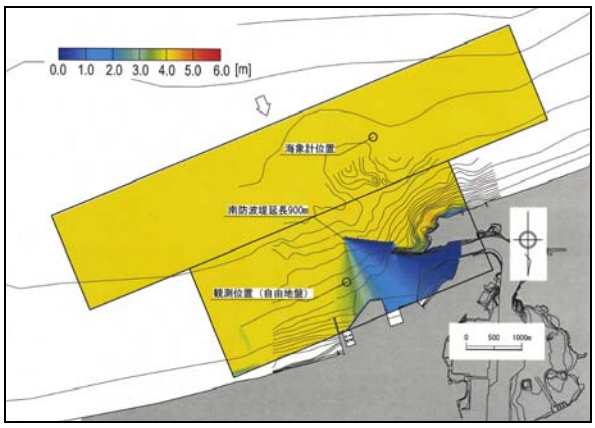


図-3.1.2　有義波高分布図（主波向SSE）

(b) ブジネスクモデルによる波浪変形計算

計算に使用したモデルは「非線形波浪変形モデルNOWT-PARI ver.4.6」である．砕波判定は流速波速比により行う計算モデルで、本計算では限界流速波速比を$\gamma_b = 0.64$とした.

入射波条件を表-2.1.2に示す．これはエネルギー平衡方程式法により求めた波浪場を、ブジネスクモデルの入射境界で平均し入射波としたものである．表中の$H_{1/3}$、$T_{1/3}$はそれぞれ有義波高、有義波周期である．また他の計算条件を以下に示す.

・潮位　　：H.W.L=T.P.+1.0 [m]
・格子間隔　　：10 [m]
・計算格子間隔　　：dt=$T_{1/3}$ / 1200 [s]
・沖側水深　　：22.0 [m]
・最小水深　　：　5.5 [m]
・入射波種類　　：多方向不規則波
・有義波高算定時間　：$T_{1/3}$×100 [s]

例として主波向SSEの計算領域を図-2.1.3に示す.

算定した主波向SSEの有義波高分布を図-2.1.4に示す.

表-3.1.2　ブジネスクモデルの入射波諸元

No.	主波向 [deg.]	$H_{1/3}$[m]	$T_{1/3}$[s]	Smax	波向範囲 [deg.]
1	SSE(157.5)	4.00	11.0	25	±60
2	S(180.0)	3.95	11.0	25	±60

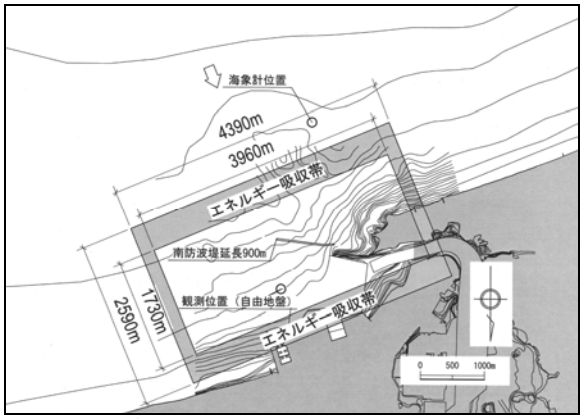


図-3.1.3　ブジネスクモデル計算領域図（主波向SSE）

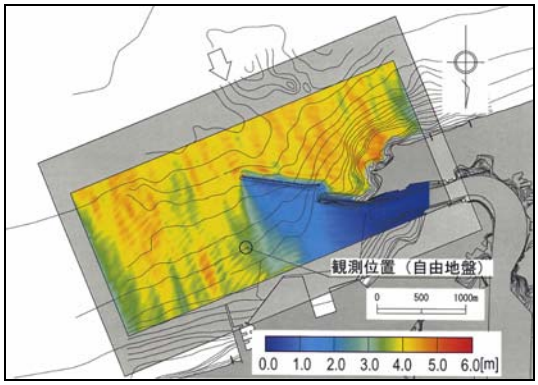


図-3.1.4　有義波高分布図（主波向SSE）

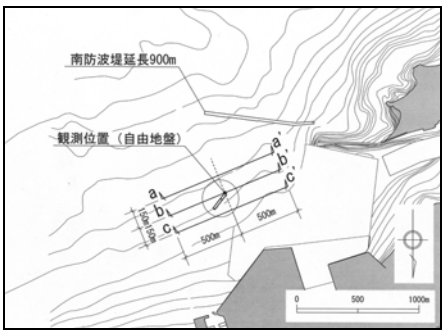


図-3.1.5　測線a-a'およびb-b'、c-c'（主波向SSE）

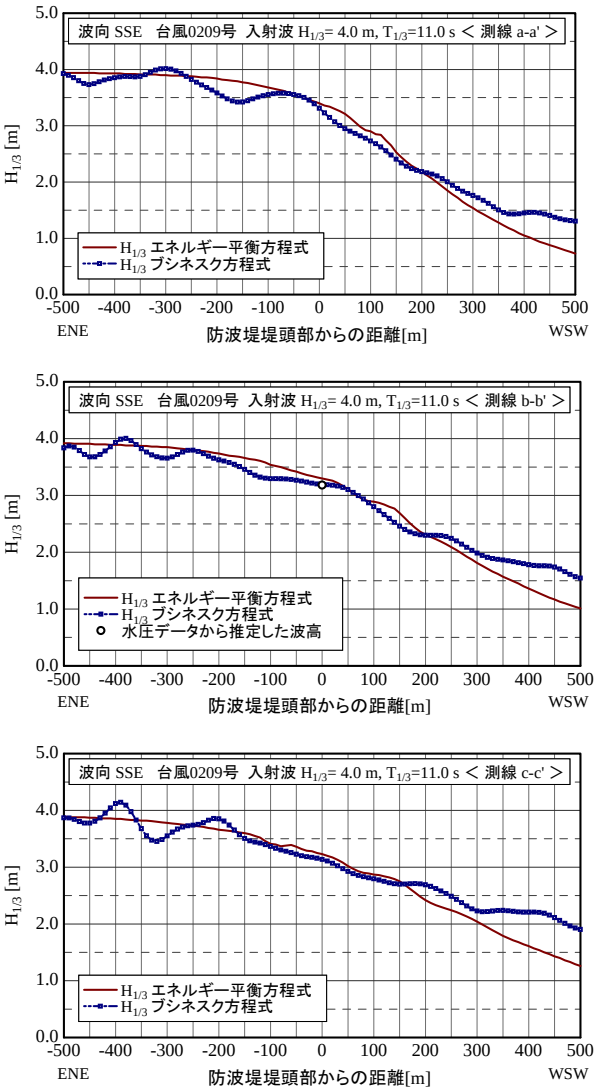


図-3.1.6　測線上の有義波高比較図（主波向SSE）

次に計算モデルによる有義波高の算定結果を比較する．有義波高を比較した測線を図-2.1.5に示す．測線は東第１防波堤堤頭部を通るNNW-SSE線を中心の法線とした３側線（a-a'、b-b'、c-c'）を主波向SSEの結果に設定した．有義波高比較図を図-2.1.6に示す．上から測線a-a'、b-b'、c-c'上の結果である．また先述のように、エネルギー平衡方程式法およびブシネスクモデルともに東第１防波堤（観測位置の防波堤）は無いものとして計算を行っている．

有義波高の比較図より、両モデルに大きな差はなく回折による波高の減衰が計算されていることがわかる．また東第１防波堤で観測された水圧データから推定された波高を図-3.1.6の中段図に丸印で示す．推定された波高は約3.2ｍである．計算結果は両モデルとも波高3.2～3.3mであるが、入射主波向をSSEと仮定した結果であり海象計による波向との差により算定した波高にも差が出てくると考えられる．

また両モデルの差としては防波堤の直背後で、エネルギー平衡方程式法では波高の減衰が続いているのに対し、ブジネスクモデルでは測線にもよるが波高比（入射波に対する比）0.4～0.6からは減衰傾向が緩やかとなる．これは今回使用したエネルギー平衡方程式法では回折項を考慮していないため、波の方向分散性による擬似回折により波高が減衰するの

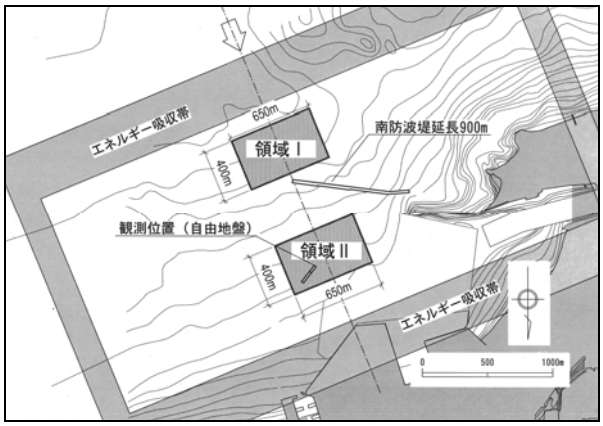


図-3.1.7　相関比較格子点範囲図（主波向SSE）

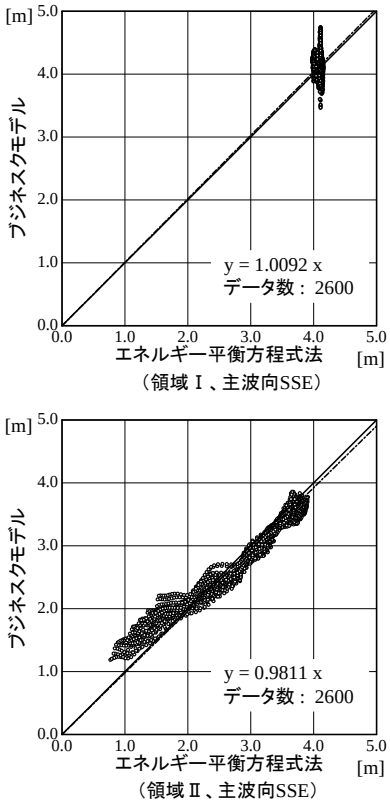


図-3.1.8　有義波高の相関図（主波向SSE）

みであるのに対して、ブジネスクモデルでは分散項により防波堤背後の波の進入も計算されるためであると考えられる．

次に両モデルによる有義波高分布の相関を検討した．領域を南防波堤前面と背後の２つに分け、回折による波高への影響を検討する．図-3.1.7に相関を取った格子点の範囲を２つ示す．防波堤手前沖側の領域を領域Ⅰ、防波堤背後の領域を領域Ⅱとする．両領域とも650×400[m^2]の範囲とし、データ数は2600点である．

相関をとるのは、主波向SSEの計算結果とする．相関図を図-3.1.8に示す．上段と下段はそれぞれ領域Ⅰ、領域Ⅱの図である．横軸がエネルギー平衡方程式により求めた有義波高[m]、縦軸がブシネスクモデルにより求めた有義波高[m]である．図より回折後の領域でも両モデルには高い相関が認められる．

(2) 台風による有義波高の時間的変化

台風の移動に伴う入射波の変化が、回折によりどう影響を受けるかについて検討した．海象計の方向スペクトルの解析結果を５ケース抽出し、エネルギー平衡方程式法およびブジネスクモデルにより有義波高を算定した．その入射波条件を表-2.2.1に示す．またエネルギー平衡方程式により算定したブジネスクモデルの入射波条件を表-3.2.2に示す．なお計算領域は前出の主波向SSEの領域と同様である．

図-3.2.1に港内水圧計位置での有義波高の時間変化を示す．横軸は日時であり縦軸は波高[m]である．図中の○と●、□、大きい○がそれぞれ海象計の観測波高、港内水圧を換算した波高、ブジネスクモデルで入射主波向を考慮した算定波高、主波向をSSEで計算したブジネスク算定波高である．図より入射主波向を考慮したブジネスクの計算結果は、港内水圧換算波高に比べ約75%の波高となった．しかし主波向をSSEとしたブジネスクの計算結果（7/25 18:00のみ）では、水圧換算波高とほぼ同じ波高となった．このことから同時刻において海象計位置で波向Sでも、南防波堤より東寄りから入る波は波向がSE寄りであった可能性が考えられる．そこで波向を考慮した計算結果が波向SSEの結果に対して約0.74の波高比であるので、波向を考慮した計算結果に対し1.3倍割増した波高比を図-3.2.2に◇印で示す．割増しない計算結果は、波高比0.61～0.76となった．

次に測線b-b'上で有義波高を時間毎に算定した結果を図-3.2.3に示す．横軸は測線上の水圧計設置位置からの距離[m]、縦軸は有義波高[m]である．図中の灰色、黒色で示しているのがそれぞれエネルギー平衡方程式法、ブジネスクモデルによる結果である．図よりブジネスクモデルによる結果の方が若干小さいが、両モデルに大きな差異は認められない．

また両モデルの算定結果を波高比にして示す．エネルギー平衡方程式法、ブジネスクモデルによる結

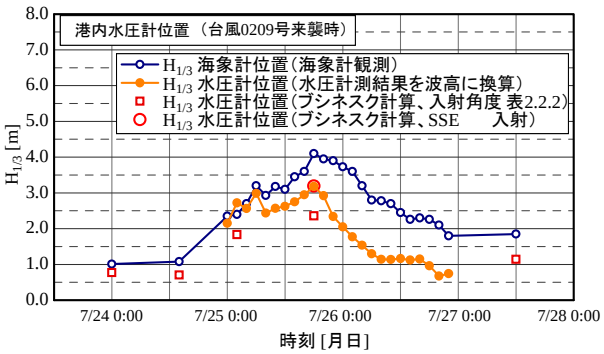


図-3.2.1　有義波高時系列図（港内水圧計位置）

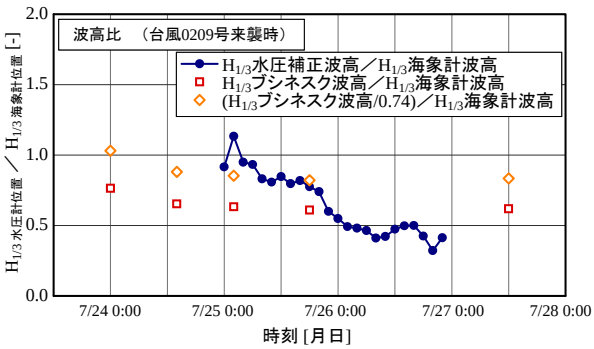


図-3.2.2　波高比時系列図（港内水圧計位置）

表-3.2.1　海象計での方向スペクトルから算定した入射波諸元

ケース	月日 時間	$H_{1/3}$[m]	$T_{1/3}$[s]	θ [deg.]	Smax	潮位[m]	波長L[m]	$H_{1/3}$ / L
①	07.24 0:00	1.01	10.3	N155° E	10	+0.5	161.2	0.0063
②	07.24 14:00	1.08	12.4	N172° E	10	0.0	194.1	0.0056
③	07.25 2:00	2.90	11.7	N168° E	25	+0.5	183.1	0.0158
④	07.25 18:00	3.87	10.7	N172° E	25	+1.0	167.5	0.0231
⑤	07.27 12:00	1.85	9.8	N176° E	10	+0.2	153.4	0.0121

表-3.2.2　エネルギー平衡方程式により算定したブジネスクモデル入射波諸元

ケース	月日 時間	$H_{1/3}$[m]	$T_{1/3}$[s]	θ [deg.]	Smax	潮位[m]	波長L[m]	$H_{1/3}$ / L
①	07.24 0:00	0.99	10.3	N155° E	10	+0.5	151.2	0.0065
②	07.24 14:00	1.07	12.4	N167° E	10	0.0	182.1	0.0059
③	07.25 2:00	2.90	11.7	N167° E	25	+0.5	171.8	0.0169
④	07.25 18:00	3.84	10.7	N170° E	25	+1.0	157.1	0.0244
⑤	07.27 12:00	1.80	9.8	N171° E	10	+0.2	143.9	0.0125

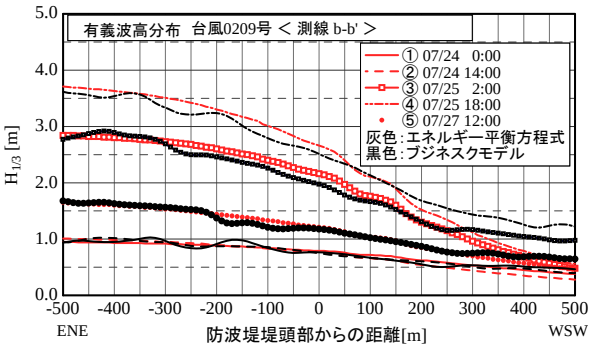


図-3.2.3　有義波高比較図（測線b-b'）

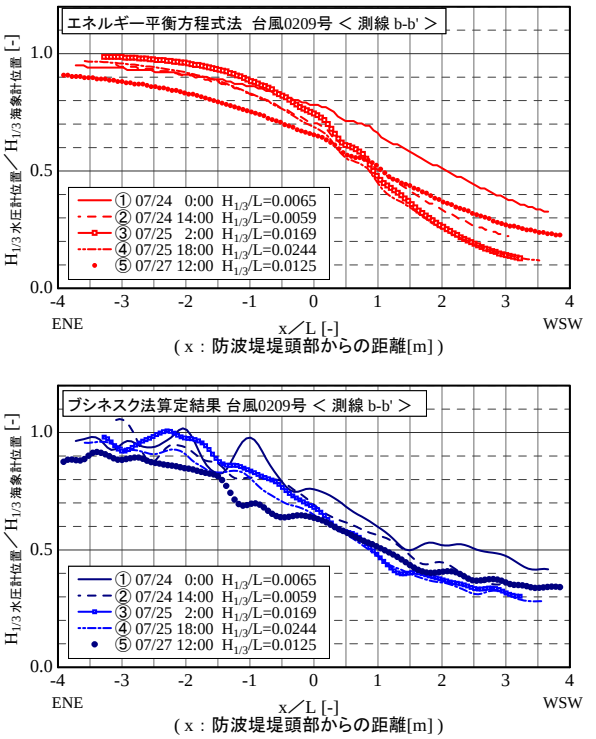


図-3.2.4　有義波高比図（測線b-b'）

果をそれぞれ図-2.2.4の上段と下段に示す．横軸は波長に対する水圧計設置点からの距離の比、縦軸は海象計の有義波高に対する計算モデルによる水圧計位置での有義波高の比である．両モデルとも水圧計位置での波高比は、約0.65～0.75となった．また波形勾配が大きい（入射波高が大きい）ほど、回折による減衰傾向が大きい．防波堤背後で回折点から離れたWSW側を見てみると、エネルギー平衡方程式法は波高比約0.3～0.1程度まで減衰するのに対して、ブジネスクモデルでは減衰しても波高比0.3程度にとどまる結果となった．

3.2.3 まとめと今後の検討課題

- 高知港における台風0209号来襲時の海象計の観測結果より代表波を仮定し、エネルギー平衡方程式法およびブジネスクモデルによる有義波高の算定結果を比較した．
- 両計算モデルによる測線上の有義波高比較図より、両モデルに大きな差はなく回折による波高の減衰が計算された．
- 防波堤背後においてエネルギー平衡方程式法に比べ、ブジネスクモデルでは入射波に対する波高比0.4～0.6からは緩やかな減衰傾向を示した．これは波浪の回折による減衰だけでなく、防波堤背後への波浪の進入も計算しているためだと考えられる．
- 台風の移動による入射波の変化に伴う港内波高をブジネスクモデルにより計算した結果、海象計の方向スペクトルから算定した波向より約12°東寄りに主波向を設定した場合に、港内の水圧換算波高と算定波高はほぼ一致した．
- ブジネスクモデルによる計算においても入射波の主波向によって回折後の波高分布に大きな差が生じるため、入射境界付近での波浪観測、特に波向の観測が港内波高の推定にとって非常に重要であると考えられる．
- 2003年８月より港内水圧計設置点近傍に超音波式波高計が設置され、台風0310号の観測が行われた．今後この観測値についてもブジネスクモデルにより検討していく．
- 港内におけるケーソン設置毎の防波堤延長に伴う回折や反射といった防波堤周辺の局所的な波高変化をブジネスクモデルにより計算し、観測値と比較および検討を行う予定である．

参考文献

1) 高山知司、池田直太、平石哲也：２．砕波および反射を考慮した波浪変形計算、港湾技術研究所報告、第30巻　第１号、1991
2) 港湾空港技術研究所波浪研究室：平成13年度 現地観測データ整理と結果の比較検討業務報告書、2001
3) 港湾空港技術研究所波浪研究室：平成14年度 ブジネスクモデルによる波浪変形に関する勉強会 資料、2003
4) 平山克也・平石哲也：ブシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性、第49回海岸工学講演会論文集、pp.676～680、2002
5) 平山克也：非線型不規則波浪を用いた数値計算の港湾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
6) 合田良実：増補改訂 港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp.40～51、1990
7) 国立天文台編：理科年表 机上版、丸善株式会社、2000

4. ブジネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)を用いたパソコンシステム

4.1 東京湾に面する港湾の風波とうねりを考慮した高精度波浪変形計算のパソコンシステム

4.1.1 はじめに

本システムは，港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室が開発した汎用性非線形型波浪変形モデルNOWT-PARIをベースとして，東京湾内の複雑な港湾形状における非線形型波浪の変形計算をできるだけ簡便に実行できることを目標として構築したシステムである．

4.1.2 機能の構成と計算手順

図-1に，開発したパソコン版波浪変形計算ソフトの機能の構成を示す．本システムは，「計算条件の設定」，「計算実行」，「合成波の計算」，「計算結果の表示・出力」，「時間波形の解析」，「参考データの表示」の6つの機能を備えている．また，「計算条件の設定」，「計算結果の表示・出力」，「時間波形の解析」の各機能については，さらに機能が細分化されている．これらの各機能は，システム上にメニューボタンとして配置されており，そのメニューボタンをクリックすると，データの入力や各種操作によってそれぞれの作業が行えるようになっている．

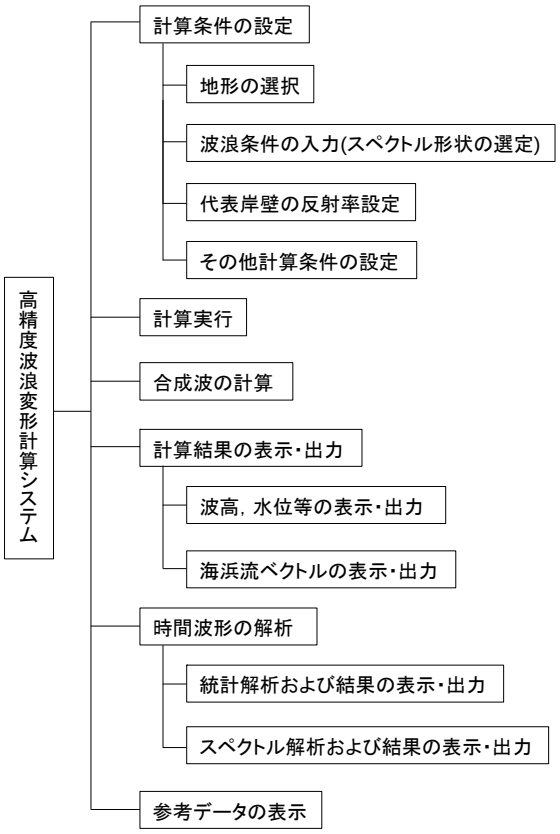


図-1 システムの機能構成

本システムでは，対象とする港湾に対し，風波が作用する場合の計算とうねりが作用する場合の計算を行うことができる．また，その結果を合成して風波とうねりが同時に作用した場合の波高を計算することができる．計算手順は図-2のようになる．

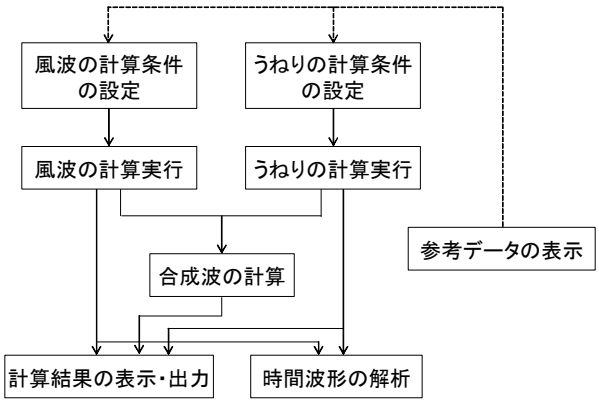


図-2 計算手順

4.1.3 計算条件の設定

波浪変形計算を行うために必要な条件は，①地形(水深)条件，②波浪条件，③構造物の反射条件，④その他の計算条件の 4 つに分けることができる．計算条件の設定プログラムでは，これらの条件に対応する 4 つのファイルを計算実行時の入力データファイルとして作成する．

図-3に，計算条件の設定プログラムのメニュー画面を示す．この画面で，計算条件を保存するファイル名と入射波が風波かうねりかの種別を指定して，各条件の設定画面に移行する．

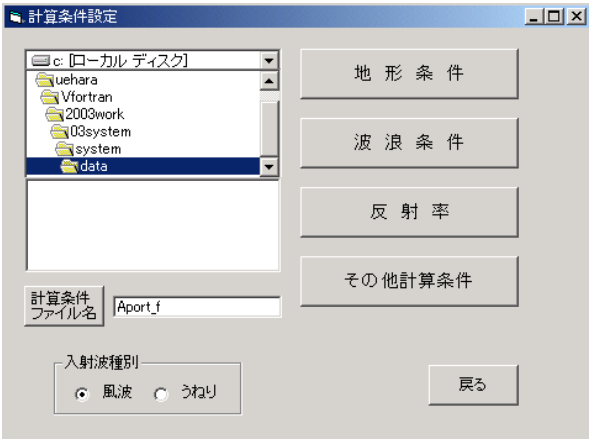


図-3 計算条件設定メニュー画面

(1) 地形条件の設定

地形条件の設定では，ユーザーがシステムに登録されているファイルから対象とする地形を選択すると，そのファイルを指定したファイル名でコピーすることで地形ファイルが作成される．本システムでは，入射境界はy軸に平行に設定し，入射波の進行方向はx軸の正の方向としている．

(2) 波浪条件の設定

波浪条件の設定では，ユーザーが指定した周波数スペクトルと光易型方向スペクトル(資料-1 参照)から，シングルサンメンション法による成分波を計算し，成分波ファイルを作成する．

本システムでは，風波の周波数スペクトルにはジョンスワップ型スペクトルを採用している．このスペクトルには，ピークの鋭さを表すパラメータγが導入されているのが特徴であり，本システムではこのγの異なる10種類のスペクトルからスペクトル形状を選択することにより風波入射波の設定が行われる．また，うねりのスペクトルは，低周波数側が周波数f=1/30Hzで，高周波数側が風波のスペクトル分布線と交わる一様分布スペクトルとしている．スペクトル密度は風波の波エネルギーの20%, 50%, 80%になるスペクトル密度から選択できるようにしている．図-4に波浪条件の設定画面を示す．

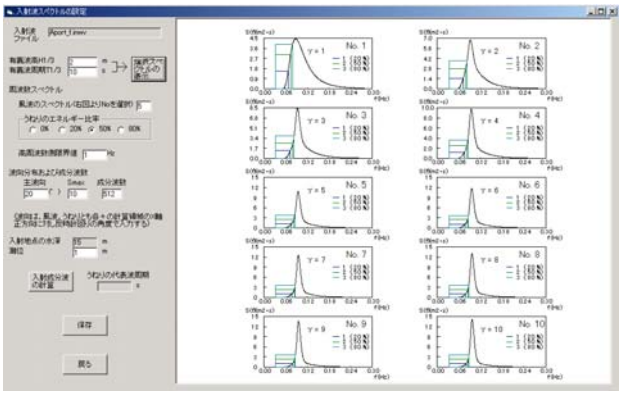


図-4 波浪条件の設定画面

(3) 代表岸壁の反射率設定

代表岸壁の反射率設定では，代表岸壁に対してユーザーが入力した反射率に対応するエネルギー吸収帯の吸収係数を計算(平山，2002)し，エネルギー吸収係数ファイルを作成する．

エネルギー吸収係数εの計算は，平山の提案式(1)を変形した式(2)からエネルギー吸収帯幅Fを求め，式(3)の双曲線型のエネルギー吸収係数式より算出する．

$$K_r = 1/\cosh\left(\frac{1}{a}\frac{F}{L}\right) \tag{1}$$

$$F = aL \cdot \ln(1/Kr + \sqrt{(1/Kr)^2 - 1}) \tag{2}$$

$$\varepsilon(l) = \frac{\gamma\varepsilon_m}{2(\sinh\ \gamma - \gamma)}\left[\cosh(\gamma\ l/F) - 1\right] \tag{3}$$

$$\varepsilon_m = \theta\sqrt{g/h} \tag{4}$$

ここで，K_rは代表岸壁の反射率，Lは構造物境界での水深hに対する代表波周期の波の波長，a=0.2，θ=2.0，gは重力加速度，lはエネルギー吸収帯の水域側境界からの距離，$\gamma = 3$である．図-5に代表岸壁の反射率設定画面を示す．

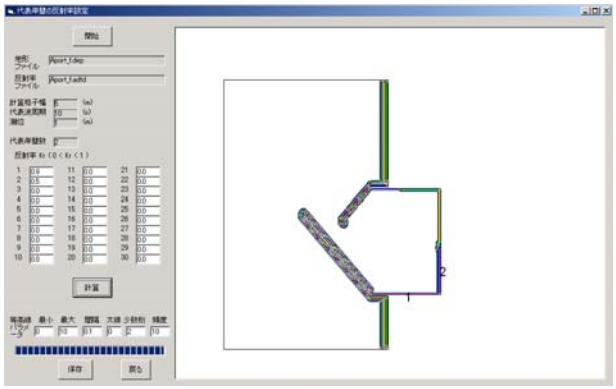


図-5 代表岸壁の反射率設定画面

(4) その他の計算条件設定

その他の計算条件設定では，(1)～(3)で設定した条件以外の計算に必要なデータを入力し計算条件ファイルを作成する．入力項目には，計算格子幅，計算時間間隔，計算時間，砕波判定流速波速比，時間波形出力点，計算領域の設定値等があり，図-6のような計算条件設定画面においてデータの入力を行う．

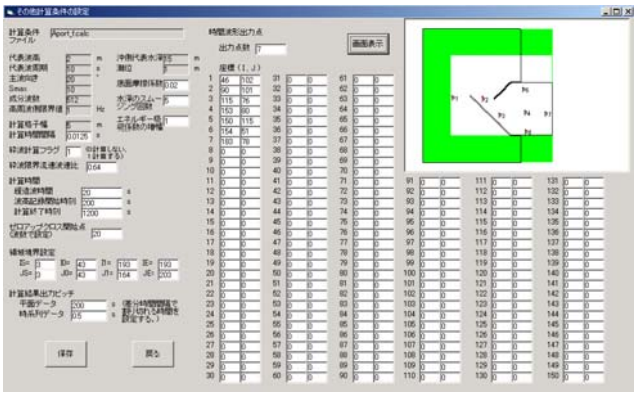


図-6 計算条件設定画面

4.1.4 計算の実行

計算の実行では，計算条件設定プログラムによって作成された入力データを用いて波浪変形計算を行う．計算モデルは，港湾空港技術研究所が開発した非線形型波浪変形モデル NOWT-PARI4.6βのスポンジ層を高次型スポンジ層に改良した波浪変形モデル(平山・平石，2001)である．図-7 に計算実行画面を示す．

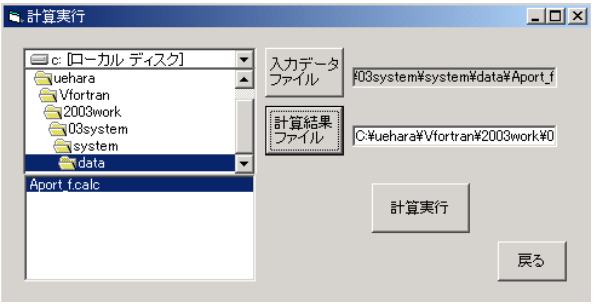


図-7 計算実行画面

4.1.5 合成波の計算

合成波の計算はプログラムでは，対象港湾に風波とうねりが同時に作用した場合の港内波高分布を評価するため，風波が作用した場合の波高とうねりが作用した場合の波高のエネルギー合成波高を計算し，ファイル出力する．

合成波の計算は式(5)によって行われる．

$$\text{合成波の波高} = \sqrt{\text{風波の波高}^2 + \text{うねりの波高}^2} \qquad (5)$$

図-8 のような画面上で，風波およびうねりの波高データファイルを指定し，合成波波高の計算および結果のファイル出力を行う．

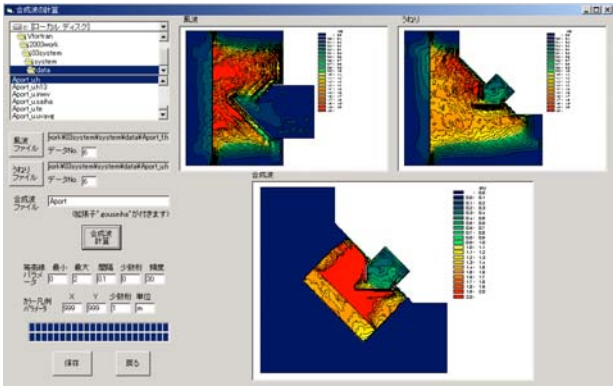


図-8 合成波計算画面

4.1.6 計算結果の表示・出力

計算結果の表示・出力プログラムでは，有義波高，水位や海浜流などの計算結果を，コンター図やベクトル図として画面上へ表示あるいはプリンターへ出力する．有義波高のカラーコンター表示例を図-9に示す．

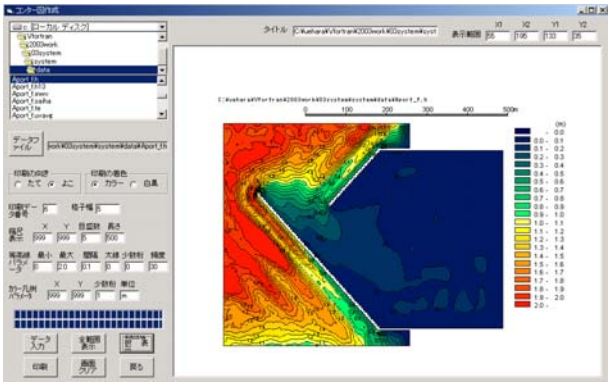


図-9 コンター図表示画面

4.1.7 時間波形の解析

時間波形の解析では，計算により得られた代表点の時間波形について，統計解析およびスペクトル解析を行う．

統計解析では，水位の時間波形について平均水位の補正後，ゼロアップクロス法により一波一波の波高および周期を求め，その結果から有義波高，有義波周期，平均波高，平均周期を算出する．

スペクトル解析では，水位の時間波形について平滑ピリオドグラム法によりスペクトルの解析を行う．

図-10に統計解析を行う画面、図-11にスペクトル解析を行う画面を示す．

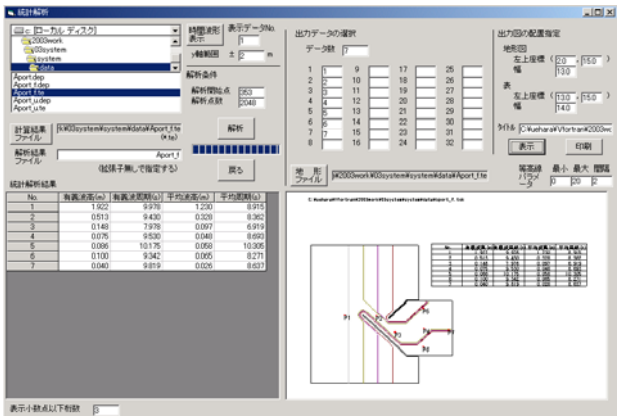


図-10 統計解析実行画面

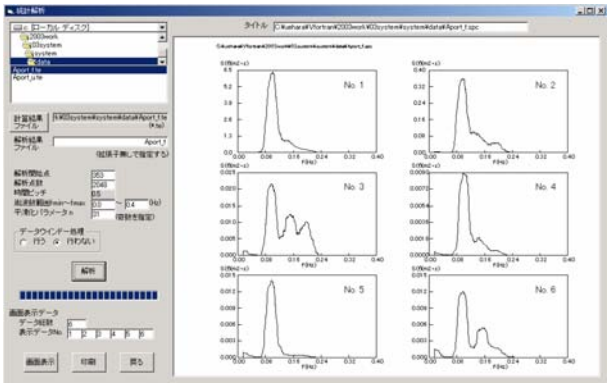


図-11 スペクトル解析実行画面

4.1.8 参考データの表示

参考データの表示では，波浪条件設定時の参考として，東京湾内の代表港湾に来襲する風波およびうねりの推算値を表示・出力できるようにしている．図-12に参考データ表示画面を示す．

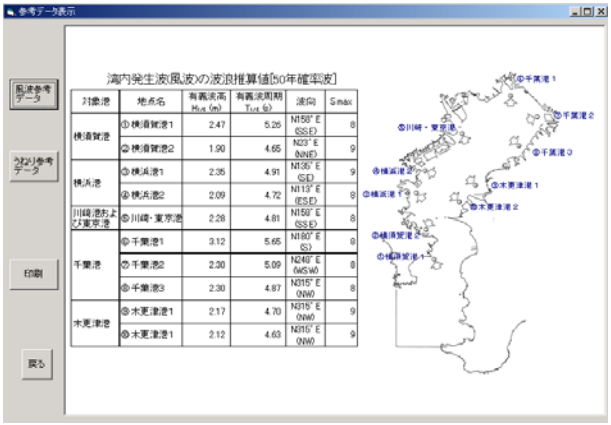


図-12 参考データ表示画面

4.1.9 横浜港への適用

本システムを横浜港に対して適用した結果について以下に示す.

(1) 計算条件

本システムでは，対象とする港湾に対し，風波が作用する場合とうねりが作用する場合の計算を行うため，それぞれの作用波浪に対する計算条件を設定する必要がある．表-1に計算条件を示す.

表-1 計算条件

入射波	計算条件	設定値等
風波	計算領域	図-13に示す.
	入射波	スペクトル形状：JONSWAP γ= 1(CASE-1), γ=10(CASE-2) $H_{1/3}$=2.09m, $T_{1/3}$=4.72s 波向：N112.5°E（図-13のx軸方向） Smax=10 成分波数Ns=512
	潮位	2.0m
	堤体の反射率	全ての堤体反射率を0.4に設定
	格子間隔	5m
	差分時間間隔	0.0118s ($T_{1/3}$/400)
	積分時間	2360s (500$T_{1/3}$)
	底面摩擦係数	0.02
うねり	計算領域	図-14に示す.
	入射波	スペクトル形状：一様分布(CASE-1の風波の50%のエネルギー) H_{ber}=1.09m, T_{ber}=10.8s 波向：N157.5°E（図-14のx軸に対して22.5°反時計回り方向） Smax=125 成分波数Ns=512
	潮位	2.0m
	堤体の反射率	全ての堤体反射率を0.4に設定
	格子間隔	10m
	差分時間間隔	0.054s (T_{ber}/200)
	積分時間	3240s (300T_{ber})
	底面摩擦係数	0.02

表中のH_{ber}およびT_{ber}は，式(6)，式(7)で示される代表波高および代表波周期である.

$$H_{ber} = \sqrt{8(f_{u\max} - f_{u\min})S_u} \tag{6}$$

$$T_{ber} = 2/(f_{u\min} + f_{u\max}) \tag{7}$$

ここで， f_{umin}およびf_{umax}はうねりの最小周波数および最大周波数，S_uはうねりのスペクトル密度である.

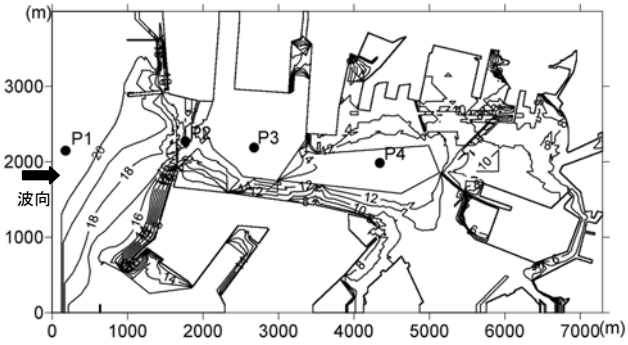


図-13 計算領域（風波の場合）

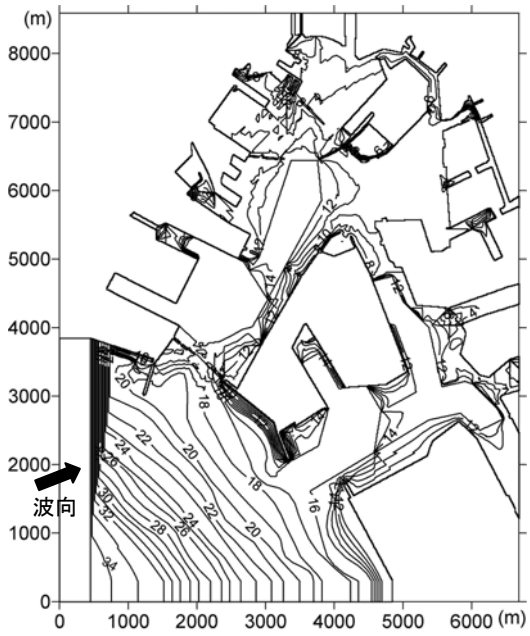


図-14 計算領域（うねりの場合）

風波の計算は，スペクトルのパラメータγ=1(CASE-1)の場合とγ=10(CASE-2)の場合について行った．また，うねりの計算は，風波のCASE-1のスペクトル形状に対する入射波条件で行った.

(2) 波高分布

(a) 風波の波高分布

CASE-1の波高分布を図-15，CASE-2の波高分布を図-16に示す.

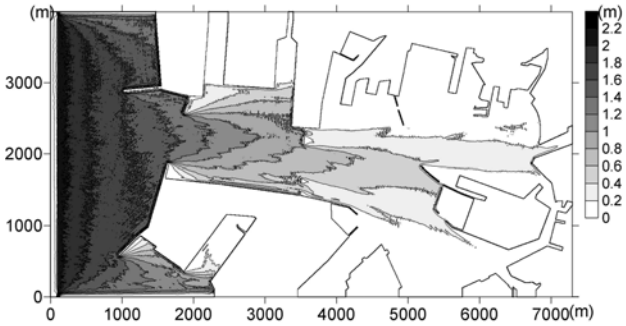


図-15 風波の波高分布(CASE-1)

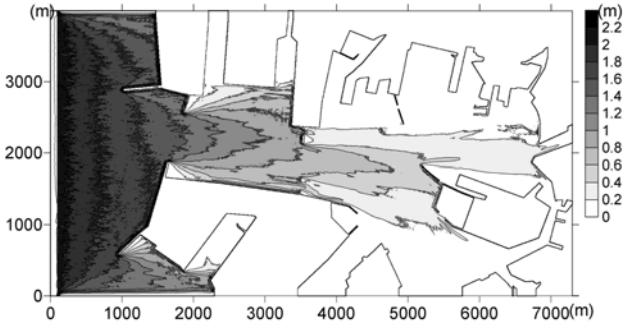


図-16 風波の波高分布(CASE-2)

両者を比較すると，CASE-2の方が全体に若干波高が大きくなっていることがわかる．これは，CASE-2の方が高周波数成分のエネルギーが少ないため，平山(2003)や糸井ら(2003)が指摘した波長に対する差分格子の分割数が小さいことによる減衰が小さくなることによると考えられる．

(b) うねりの波高分布

図-17に，うねりの波高分布を示す．風波の計算対象領域をみると，開口部防波堤の効果によって港奥部の波高が小さくなっていることがわかる．

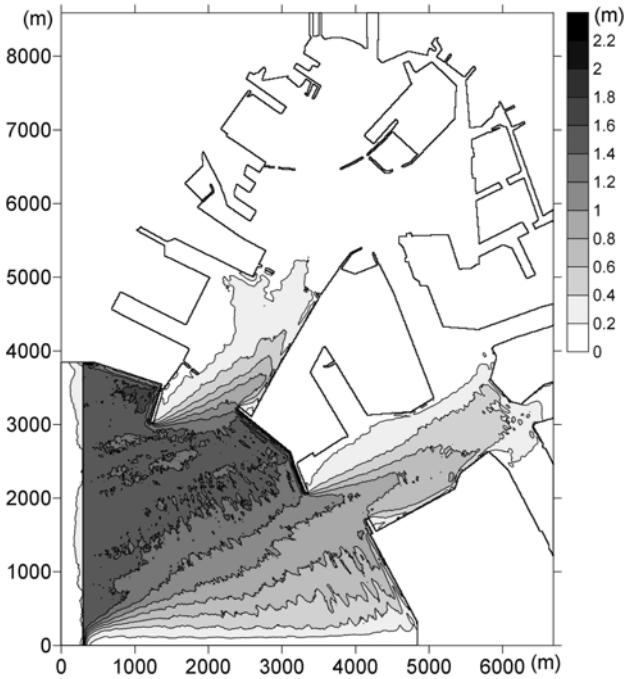


図-17 うねりの波高分布

(c) 合成波の波高分布

図-18に，風波CASE-1とうねりの波高をエネルギー合成した波高分布を示す．この図と風波のCASE-1の波高分布を比較すると，開口部付近では波高が大きくなっているが，港奥部ではほぼ同じ波高分布となっており，風波の50%のエネルギーのうねりを考慮した場合，港口部付近では波高は増大するが，港奥部にはほとんど影響がないことがわかる．

(3) 代表点における周波数スペクトル

入射波が風波の計算について，図-13に示した4点の代表点(P1～P4)における水位変動をスペクトル解析した結果を図-19に示す．この図をみると，CASE-1とCASE-2で波高の大きさについてはほとんど変化がなかったが，スペクトル形状は異なっていることがわかる．またP1とP4をみると，CASE-2は波の伝播によるスペクトルの分布形に変化が少ないのに対し，CASE-1では高周波数成分のスペクトル密度の低下割合が大きくなっているのがわかる．

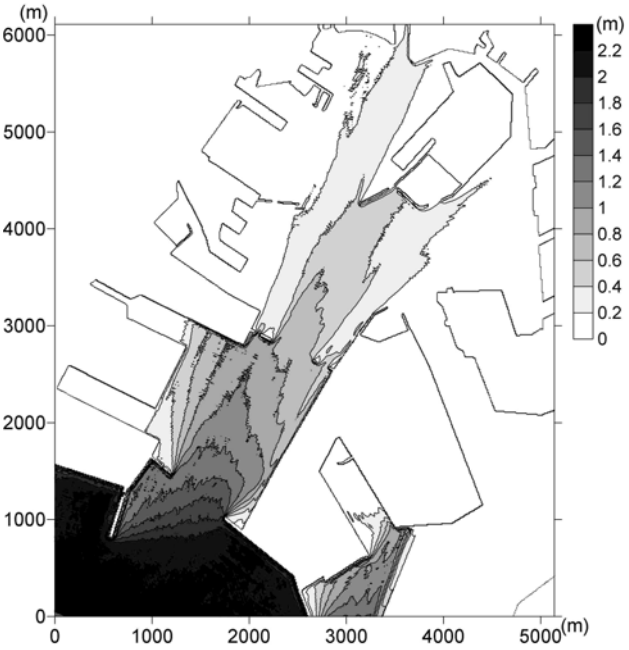


図-18 合成波の波高分布

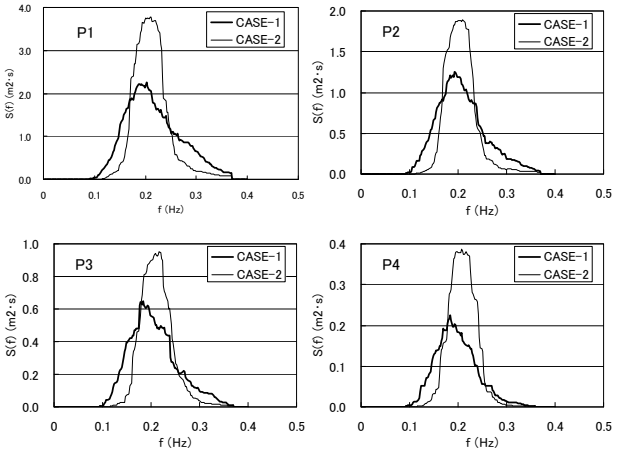


図-19 周波数スペクトル

参考文献

1) 平山克也・平石哲也：ブシネスクモデルにおける透水層を用いた任意反射境界処理法の開発，港湾研究所報告，第40巻第1号，2001.3.

2) 平山克也：ブシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性，海岸工学論文集，第49巻，pp.676-680，2002.

3) 平山克也:多方向波の有効造波領域と差分条件が計算精度に及ぼす影響に関する検討，平成14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資料，港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室，2003.1.

4) 糸井正夫，伍井稔，成毛辰徳：ブシネスクモデルの伏木富山港(伏木地区)への適用，平成14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資料，港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室，2003.1.

5. まとめ

本年度,「NOWT-PARI Ver.4.6β」が適用された解析結果についての報告が行われた．それにより得られた成果と，明らかとなった問題点及び解決策について，以下にまとめる

①長周期波の計算を行う際は，風波成分とは別に，長周期成分のみのスペクトルを用いて，計算を行う必要がある．

②ブシネスクモデルを用いて荷役稼働率の評価を行う場合，高山式のような従来の計算結果との整合を図るためには，対象バースから 50m 程度沖側に照査点を設定することで，既往の計算結果と同様な結果を得ることが出来る．ただし，直立スリットケーソンのように，所要の反射率を有する構造形式の岸壁の場合, 設定した部分反射境界（スポンジ層）の影響で, 前面水域が乱れる場合があるため, 荷役稼働率の評価においては結果に対する慎重な照査が必要である．

③計算領域の側方の計算領域で波高が低くなり，有効造波領域を確保することが困難な場合には外部スポンジ層の側方境界上に入射境界を与えることで, 計算上の有効造波領域を広く確保することが可能である．

④回折変形が顕著に起こらない領域についてはブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式の計算結果は同等であるため，既往の結果と整合を図ることが可能である．

今年度における，プログラムの更新項目はない．よって「NOWT-PARI Ver.4.6β」のバージョンが現時点での最新バージョンとなる．今後は，透水層モデルや，新砕波モデル等の開発段階にある新機能を適宜盛り込むことにより，NOWT-PARI の高精度化を行っていく予定である．

付録：勉強会議事録

①ブシネスクモデル(NOWT-PARIVer.4-6β)の現地適用事例　―紋別港―

〈質問〉対象船舶がかなり小さいと思われるが，長周期波動揺としている根拠は図-5 の時系列の他にあるのか？

〈回答〉対象岸壁における対象岸壁は 100 秒程度の揺れを起こしている

〈質問〉図-8 のスペクトルにおける観測時期は，オホーツクの流氷が来ない時期に実施したものか？

〈回答〉現地での調査は９月下旬から１２月中旬まで行われている．

〈質問〉また，図-8 は 10 秒よりも短い周期の波が無いが，フィルタリングをしているのか？

〈回答〉自由度が 15 程度のフィルタを掛けて風波成分を除去している．

〈質問〉図-10 において長周期波として，40cm 程度の高い波高が出ているが，長周期波の定義はどうしているのか？単純にスペクトルを合成しているだけで，これだけの波高になるのか？

〈回答〉港外で観測されているスペクトルから 20 から 100 秒の周期の波形が現れており，サージングの運動周期と一致していることから，これ長周期波としている．

〈質問〉スペクトルを合成しただけでも，これくらい大きな波高になっているのか？

〈回答〉スペクトルパワーのみでこれだけの波高が解析される，有義値の値では無い．

②横須賀港走水地区における波浪場解析と実験との比較

〈質問〉図-6，7 で計算領域の方向が変わっているのはどうしてか

〈回答〉NOWT-PARI の仕様でそうなっている．直に入れる方が計算精度が良いため，波向に合わせた領域を作成して用いている．

〈質問〉多方向不規則波で行ってはいないのか.

〈回答〉実験では１方向波のみで行っているため，多方向波での検討はしていない．しかし，試計算で行った結果から，多方向を用いると波高分布に差違が現れる結果となることは確認している．

〈質問〉導波版を用いた実験と計算を比較すると，１方向波でなかなか合わないことがあ

り，Smax を変えて計算した結果実験値とぴったり一致したということがあった．今回はそういう検討はしていないのか？

〈回答〉今回は，行っていない

〈質問〉造波機の設置幅がタイトになっている理由は

〈回答〉実験場の場所的な制約があり，このような配置となっている．また波向を変える時には造波機を移設させている．

③ブシネスクモデル(NOWT-PARI)4-6b)による港内静穏度の検討—伏木富山港（伏木地区）の港湾計画改訂—

〈質問〉岸壁前面から 50m の地点を抽出しているが，そのときの岸壁の任意反射境界のスポンジと抽出点の位置関係はどのようになっているのか？

〈回答〉任意反射境界は１番と２番の岸壁に設定しており，スポンジは岸壁法線より陸側に１格子程度配置している．反射率としては設計上の 0.5 よりも大きい 0.8 と設定している．

〈質問〉表-1 の計算時間間隔は 1/8 秒となっているが，

〈回答〉1/80 秒の誤りである．

〈質問〉稼働率算定の際に，前面 50m を取っているが，スペクトルに JONSWAP 型を用いたことで，ブレッドシュナイダーに比べて規則波的な波浪特性とので．岸壁前面が重複波領域になっている事に起因しているのではないか？

〈回答〉スペクトルの違いにより，波高分布は異なるが，稼働率における差違は現れなかった．抽出点をどこにするかは，検討当初から議論があった．計算上は，岸壁前面では重複波となっており，距離により波高にばらつきが大きかった．工事事務所や港空研との協議の結果，今回の 50m 沖側までの平均値を用いることで既往の検討結果との整合を図ることが出来た．

〈コメント〉現在の所，稼働率の評価にどの地点の波高を用いるのかは，明確になっていない．ケースによっては局所的に反射波の影響で重複波領域の範囲も変化することもあるので今回の数値が汎用的に用いることの出来る値ではない．ブシネスクを用いる場合，ある程度多くの波数を計算しないと，定量的評価を行うのは難しいことがある．

④長周期波が卓越する波浪場へのブシネスクモデル(NOWT-PARIVer.4-6b)の適用

〈質問〉30～300 秒のスペクトルで入力した場合と，単一波を入力した場合の比較を行っているが，スペクトルから単一波に相当する成分だけを取り出した場合と単一波の場合での，波高の増幅率の比較は行っているのか

〈回答〉今回は単一波に相当するスペクトル成分のみを取り出した計算を行っていない．単一波の場合は，現地の観測地を目標値として，入射波境界における造波振幅の調整で合わせ込みを行い 15cm 程度の波高を行っている．また，Case6l に関しては単位波高を使用し，平石(1999)による長周期波高を推定しており，港内の重複波の分布特性の傾向のみを比較している．

〈質問〉すでに整備の進んだ港湾に対しての長周期対策の方策としてはどのようなものが考えられるのか.

〈回答〉長周期波が重複波となって顕著に現れている場合には，港内に消波工を適切に配置することが有効となる．特に防波堤を延ばすことが困難な港では，重複波を低減させるような消波工配置を考えることや，堅い材質の係留策に変更する等のソフト面での対策も有効である．

〈質問〉長周期波と風波を計算しているが，計算格子の分割幅はどう設定しているのか．また長周期波と風波を同時に解析することは可能なのか

〈回答〉計算格子間隔は長周期波 25m　風波 10m で行っている．長周期波と風波を合成したスペクトルで計算してしまうと，風波成分が強く現れてしまい，長周期波成分が消えてしまう．やはり，長周期波成分を含んだ波浪場を再現する場合には，今回行ったような単一波成分で定在化した波浪場を確認して，平石の方法により不規則波を用いて再現するという方法が有効であると考える．

⑤Ｖ字型チャンネルの効用

〈コメント〉NOWT-PARI の他に通称を名付けてはどうか

〈質問〉計算条件の設定として，航路の幅員を変化させた場合，レンズ効果にどのような違いが現れるのか

〈回答〉１ケースのみの検討なのでコメントできないが，今後検討の必要となるところである．

〈コメント〉鹿島港において，浅瀬を作って同様なレンズ効果を期待するアイデアがあっ

たが，浅瀬造成に対する漁業補償が問題となり事業化には至っていない．

⑥ブシネスクモデル(NOWT-PARIVer.4-6b)における擬似段波モデルの適用（その２）

〈質問〉波高が大きくて水深が小さい場合に，計算が発散する問題があるため，最小水深を大きく設定しなければならなかったが，この砕波モデルを入れると，そういった制約はなくなるのか？

〈回答〉本モデルを使っても完全には無くならない．適用できる地形もまだ限られている．浅くなると波高が減衰するというのは，従来モデルと変わらないが，段波モデルでは水位が急激に落ちるので，より浅いところまで計算は可能になる．

〈質問〉実験結果との比較を有義波高でやっているが，平均水位や流速等での比較はしているか？

〈回答〉まだ行ってはいないが，数値は求められているので．今後比較を行いたい．

⑦高知港における台風 0209 号来襲時の波浪変形計算への適用事例

〈質問〉図-2.2.1 において，入射波向きを考慮した算定波高というのは，計算結果の波向を観測波向に合うようにしたという意味か

〈回答〉現地に設置されている海象計の波向を入射波条件にすると，照査地点での波高が若干低くなるという事があり，“照査地点の波高が合うように波向を補正している”という意味である．高知港の場合，海象計の取付誤差が計測波向に影響を与えている可能性があるため，現地で調査を行っているところである．

〈質問〉エネ方の場合には Smax の違いにより方向分散の度合が大きく変わってくる．Smax25 を用いているようであるが，方向集中度を変えて行った計算結果はあるのか

〈回答〉今回の検討では Smax を変化させて計算は行っていない．今回の場合，回折が効く波向ではなかったこともあり，そういう領域ではブシネスクとエネ方で同様な結果が得られなければならないため，その確認を行ったものである．逆に，これまでエネ方を用いて行っていた港湾計画を，ブシネスクモデルに切り替えても問題ないというのが結論を示しているが，今後，現地での観測データが上がってくるので，波向を含んで様々な海象条件で計算することにより，ブシネスクモデルの優位性が明らかになってくるものと考える．

〈質問〉間瀬先生の回折項を用いているモデルで計算した場合，エネ方においても回折を十分に評価出来ると考えられる．しかし，ブシネスクモデルの場合，回折と同時に

反射も入ってきてしまうので，計算領域が定常になった時点では，反射波を含んだものになる．エネ方で反射を入れていないという計算条件をしている場合，波高の差が大きくなってくると考えられるが，

〈回答〉今回のエネ方，ブシネスク共に反射を考慮しているが，一般的には御指摘のようにブシネスクの計算では長い解析波数を取った場合，反射波が入ってくるため，エネ方との差は大きくなると思われる．今後観測される台風データを用いて詳細に検討していく予定である．

〈質問〉自由地盤とはどういうものか

〈回答〉地盤中に計５個の間隙水圧計を配置しており，その内，海底面に設置してある間隙水圧計の場所を報告書中の分類で自由地盤と称している．一般的に認識されている単語ではない．

⑧東京湾に面する港湾の風波とうねりを考慮した高精度波浪変形計算のパソコンシステム

〈質問〉システムで用いる地形データや反射率は，あらかじめ作っておくということか

〈回答〉本システムでは，対象港湾の港構造物や反射率についてはデータベースとして，あらかじめ作成しておく必要がある．既設の構造物に関して反射率は固定となっており，後付で増築出来そうな構造物の前面に対しては任意に反射率を設定できるようになっている．

〈質問〉販売はしているのか？

〈回答〉販売はしていない．本システムは港湾局や管理事務所に配布する予定のものである．よって管理者が簡便に検討できるように計算条件の変更機能を最小限に限定したものである．

〈質問〉P1 から P4 の地点でスペクトルを表示する機能があるが，静穏度をスペクトルから評価する手法があるのか

〈回答〉東京湾において問題となっているのがうねりの評価である．昨年度からうねり成分を見込んで構造物の設計が行われるようになってきているが，港湾計画上は問題となっていない．本業務は，うねり成分が入ってきた時に，構造物の安定性や，船舶の動揺に影響があるかを検討したものである．あくまで，異常時波浪を対象として，うねり対策の消波工配置を簡易に検討するための計算システムである．よって，静穏度解析を行うシステムとは考えていない．また，観測の結果から東京湾では JONSWAP 型のスペクトルが適合すると確認されているので，本システムでも採用している．