

港湾における波浪変形計算の活用

APPLICABILITY OF WAVE TRANSFORMATION MODEL IN PORT

平石哲也・平山克也
Tetsuya HIRAISHI and Katsuya HIRAYAMA

正会員 工博 港湾空港技術研究所海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

Estimation of wave height and period is in great importance for design of port facility. The harbor tranquility is determined according to wave height distribution and occurrence probability in the target berth areas. The crown height of breakwater and sea wall is designed as those facilities protect the inner harbors and water-front areas from the acting waves. The wave transformation model with high accuracy is necessary to keep the harbor safe and effective. In the paper, the practical computation system for port wave is introduced. The energy balance equation model and Bussinesq equation model for wave is employed for estimation of wave transformation in shallow water and very shallow water area respectively. The data base including water depth contours and berth arrangements in the ports is attached with the computation system as the bathymetry data for simulation is completed in short duration.

Key Words : harbor tranquility, numerical simulation, water depth data base, wave transformation

1. はじめに

我が国は、生活必需品およびそれらの原材料の調達をほとんど輸入に頼っている。また、自動車や工作機械等の工業製品の輸出は、我が国の生活基盤を支える重要な要素である。最近では、シンガポールや釜山港などの効率的な大規模港湾が世界物流の拠点になりつつある。しかし、我が国の輸出入を支え、太平洋を横断する長距離輸送路の基点として、我が国港湾の整備も引き続き重要である。

これからの港湾には、高速物流ネットワークに対応した、短時間で荷役を効率よく実施できる高い経済性が期待される。たとえば、コンテナターミナルでの荷役効率は、商品の価格に直接影響を与える。港内波浪による船体動揺によって荷役が中断されると、運搬費用が増加し、商品価格が高くなる可能性がある。逆に、外洋に面した港湾で、安全に荷役ができると、輸送に要する手間と日数が少なくなり、商品価格は低下する。

これまでの港湾計画は、岸壁の波高が荷役許容値を越える確率が目標値以下になるように港形や防波堤の配置が決定されてきた。港内の荷役が可能である時間を確率的に表した数値が港内静穏度である。この場合、波の周期が港内静穏度の評価に大きく影響することはない。単純に波高レベルで港湾の荷役効率を評価している。最近では、長周期波による荷役障害等が各地で報告され、技術基準等の設計マニュアルの中でも長周期波や十数秒のうねりに対する荷役許容波高を新たに設定しようとする試みが成

されている。また、船型や岸壁に対する波向によって荷役許容波高を変えることも提案されている。このような評価をすることによって、海域の波の特性に応じて最も効率的に荷役ができる港湾施設を計画することができる。港内の波の計算では、風波成分の波高だけでなく、うねりや長周期波に対応した周波数帯の波浪エネルギーの推定も重要になる。

一方、港湾は物流施設としての機能だけでなく、都市の住居環境を快適にし、人が集う場所を提供する新たなウォーターフロントとしての役割を果たすことを、近年強く求められている。港に集う人が水辺に近づく場所は、波のしぶきや少量の越波量でも被害を与える可能性がある。したがって、前面の港内波浪は、波高、周期だけでなく波形や最高波の発生頻度等まで詳細な検討が必要である。

環境改善や多様な生物相を港内で育成するためには、人工海浜や人工干潟が港湾区域でも建設されつつある。この場合、静穏な場所に当該施設を計画するだけでなく、砂浜の安定を図り、生物の成長に最も適した波浪条件を積極的に造る必要がある。多様な構造物や人工のリーフ等による波浪変形を精度よく推定し、波形や海浜流の影響を検討しておくことが必要になる。

このように、港湾の機能を高めるためには、港内の波浪変形を精度よく推定しておくことが、ますます重要になってきた。これまでの港湾計画においては、沖波が決定された後、エネルギー平衡方程式等を用いて、浅海域の屈折変形を検討して、港口部の波浪条件を決めていた。次に、高山法等の回折計算

で、港内水深を一定として波高変化を推定し、港内施設毎の設計波高を求めたり、港内静穏度を算定してきた。しかし、前述のように港内の波形変化や人工の海浜や浅瀬による砕波や屈折の影響を評価するためには、非線形的な波浪変形を時間領域で推定できる計算法の導入が必要と考えられる。

浅海域の非線形波浪の計算モデルとしては、非線形緩勾配方程式を用いた砕波計算や非線形分散波の波動理論を活用した手法¹⁾等が提案されている。また、Navier-Stokes方程式を直接解いて、3次元的な水粒子運動を求めようとする計算法が活用され、近年、目覚ましい発展が続けられている。これらの計算モデルを実設計に活用するためには、今後、計算アルゴリズムの高速化、周辺の境界条件の簡略化、構造物の反射波の取り扱い法の改良などを図る必要があるが、短時間で達成できると期待できる。

本報告では、高精度港内波浪推定の要求に応えることができ、港内における波の屈折、回折、砕波、反射、非線形性等を実用的な精度で取り扱えるモデルとして改良ブシネスク型波動方程式を活用した港内波浪変形計算法の活用例²⁾を紹介する。港口部における波浪条件は、エネルギー平衡方程式を用いて決定するが、計算に用いる水深データや港形データの作成に要する時間と手間を省略するために、あらかじめデータベースを作成しておき、各種の計算で共通に使用できるように整理している。

本報告で紹介する水深・港形データベース、エネルギー平衡方程式および改良型ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算モデルを活用すると、港内の施設改良や人工干潟の設計において必要な波浪条件を、実用的な精度で、ほぼ正確に推定できるものと期待している。

2. 港内波浪変形の計算法

(1) 水深・港形データベース

港湾計画の策定時には、現在の港形における波浪変形、将来の港形における波浪変形が検討されることが多く、共通の水深データで計算が実施される。また、通常波浪だけでなく港内副振動や、津波・高潮の影響も推定される。計算ケース毎に異なった格子水深データを作成したり、港形データを作成することは計算に要する時間と手間が大きくなり、効率的な計画策定作業に支障がでる。そこで、主要な港湾について、水深データと港形データを、あらかじめ作成しておき、計算実行時に迅速に計算データを作成できるデータベースを作成した。

データベースでは、まず、全国の重要港湾を中心に主要な港湾での設計に使用できるよう、各エリア毎に深海域から水深コンターのデータを作成した。すなわち、水深毎にコンター線の座標を保存し、地図上に水深コンターが出力できる。図—1は、東京湾南部の水深を例として示したものである。変形計算では、通常、格子状の地形を入力データとして、



図—1 データベースに収録された水深データの例

格子毎に水深値を格子地形上に入力し、プログラム中で読み込む。データベースでは、格子間隔に応じて、指定した領域中の水深コンターを変換し、格子状の水深データを作成する機能を設けた。

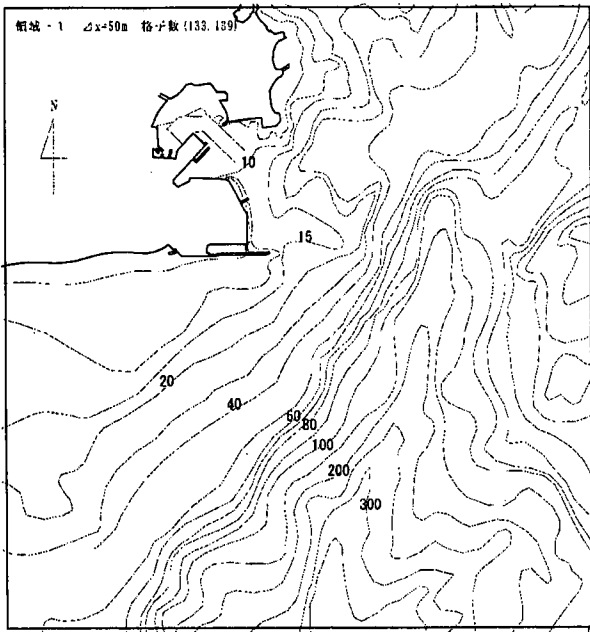
エネルギー平衡方程式で波浪変形を計算するためには、境界で波高・周期だけでなく波向を設定する必要がある。入射波の波向は、境界線に対してできるだけ直角になる方が、計算上の数値分散による誤差が小さくなる。そこで、計算に用いる格子地形の格子方向は任意に変更できる方がよい。本データベースでは、波向に対してできるだけ直角な入射境界線が設定できるように、格子地形の向きを任意に回転可能とした。

図—2に横須賀港南部(久里浜湾)をモデル港とした計算地形の設定例を示す。この場合には、格子間隔を50mとして、 x 方向および y 方向に約130個の格子を設定し、沖合の水深300m程度の海域までを計算領域とした。入射波は図の下方から伝搬するものとして、図—2(1)および(2)は、それぞれ、入射波向がSおよびNの場合の格子水深のコンター表示図を示す。図の側方境界は鏡像境界となっている。

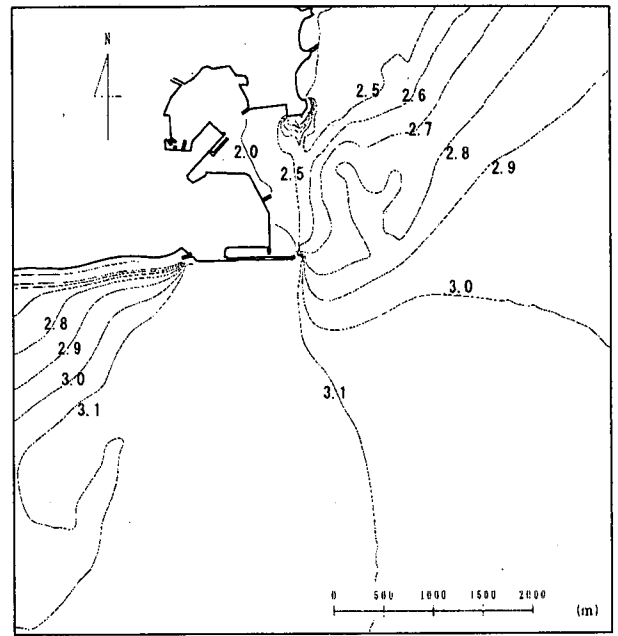
港湾地形は、現況、将来計画の2種類が収録されており、将来における港内静穏度の変化などを検討できる。非線形波浪の変形を時間領域で解く場合には、対象波長の1/10程度の小格子地形が必要である。この水深データベースでは、水深コンターを保存しているため、任意に格子間隔を設定できる。

(2) エネルギー平衡方程式

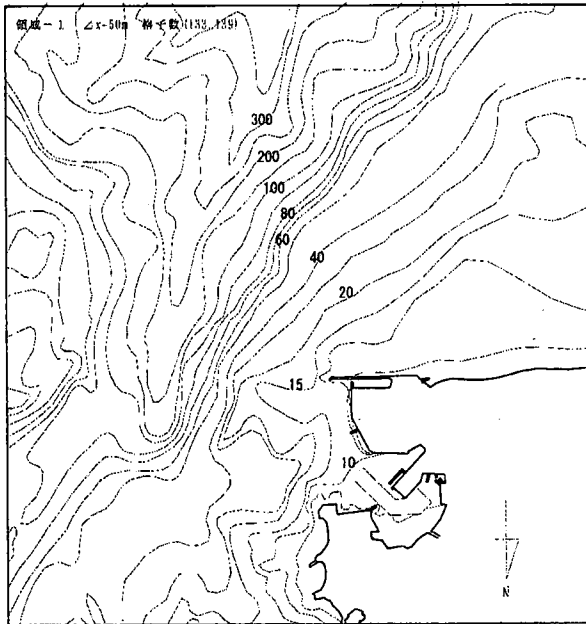
計算法の概要は文献³⁾等を参照できる。図—3に上記の横須賀港南部におけるシステム中のエネルギー平衡方程式の計算例を示す。入射波の条件は次の通りである； $H/3=3.0\text{m}$, $T/3=7.0\text{s}$, $S_{\text{max}}=10$, 波向S。



(1) 波向Sに対応した計算地形

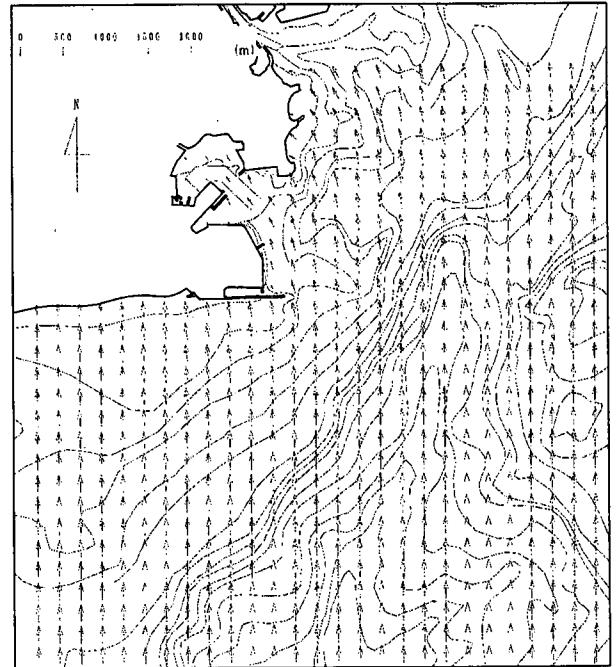


(1) 有義波高



(2) 波向Nに対応した計算地形

図-2 横須賀港周辺の計算用地形



(2) 波向ベクトル

図-3 エネルギー平衡方程式による計算結果例

図-3 (1)および(2)は、それぞれ、有義波高および主波向ベクトルの分布を示す。有義波高は久里浜湾内で湾口の遮蔽効果によって減衰している。波向は屈折によって浅い海域へ向かうようになり、図の左側の久里浜湾へ湾口から直角に湾内へ侵入するようになる。

(3) ブシネスク方程式を用いた波浪計算

図-3に示した久里浜湾の内部は、新しく航路が掘削され、水深変化が著しくなっており、河口部には岩礁帯が広がり、局所的な波高変化が生じている。このように、港内での屈折・回折・砕波等による変形の影響が大きいと考えられる場合には、非線形性

まで検討できる波浪変形モデルが必要である。ここでは、修正ブシネスク方程式を基礎として、境界処理法を追加してモデルの適用範囲を実設計に活用できるまで広げた平山による計算法³⁾を紹介する。

図-4に本計算法の計算結果の出カイメージ図を示す。入射境界で、エネルギー平衡方程式で推定された波浪条件(波高、周期、波向、方向集中度等)を与えると、シングル・サンメーション法で多方向不規則波の時系列データを作製し、境界での水位データが計算される。港内では、計算時間内の水位と線流量の変化が時系列データとして与えられ、統計処理を行うことによって、有義波高、周期等が計算で

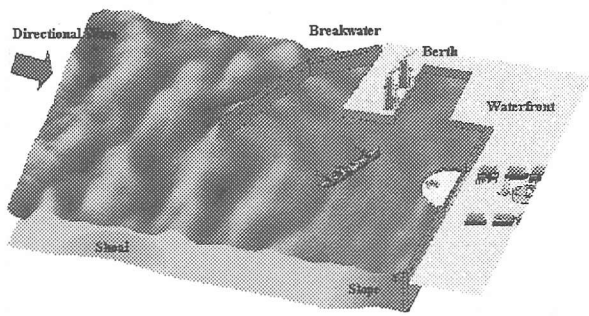


図-4 NOWT-PARIの計算出力イメージ

きる。波形データは、岸壁での係留船舶の動揺計算、護岸での短時間の浸水深計算、人工海浜での3次元海浜安定計算等にも活用でき、多様な目的を有する港湾域の施設設計で有用である。

計算モデルは、例題としての水深・地形データを付属させたプログラムをパッケージ化して、登録制で任意に使用できるように、限定的に配布している。ただし、海浜への遡上境界や砕波モデルの改良など、今後も改良する箇所が含まれており、すべてのケースに適用できるような完成品ではない。そこで、定期的にプログラム使用者が計算結果を発表し、問題点を議論する場を設けて、定常的なモデル改良を続けている²⁾。プログラムパッケージは、NOWT-PARI (Nonlinear Wave Transformation model in Port and Airport Research Institute) と名付けており、適時、バージョン番号を付加している。2003年4月現在で、NOWT-PARIの計算結果を港湾施設の設計に活用している港湾等は以下の通りである；

- 1) 苫小牧西港, 2) 伏木富山港, 3) 横須賀港,
 - 4) 羽田周辺海域, 5) 敦賀港, 6) 宮崎港, 7) 玄界灘東海域, 8) 兵庫県柴山港, 9) 名瀬港
- つぎの港湾では、周期30s以上の長周期波の変形が推定されているが、風波との同時解析も可能になっている；

- 10) 小名浜港, 11) 常陸那珂港, 12) 鹿島港,
- 13) 宮古港, 14) 八戸港

NOWT-PARIの現地適用性は、境界条件や入射条件の取り扱い法の改良で、常に更新されているので、今後も活用できる港湾数は増加するものと期待している。

NOWT-PARIの適用に関して、留意すべき点のひとつとして、有効造波領域の問題が挙げられる。NOWT-PARIでは、入射境界から実験水槽における造波装置と同様に時系列として波を発生させるため、多方向不規則波を造波した場合には、成分波の斜めな波が到達しない部分は、波高が目標値より低下する。ここでは、長方形の海域において一測線から多方向不規則波が入射した場合を想定して、計算領域内における有義波高の分布を検討する。

図-5に示すように、沖側一辺に入射境界を設けた岸沖方向400m、沿岸方向800mの計算領域（水深

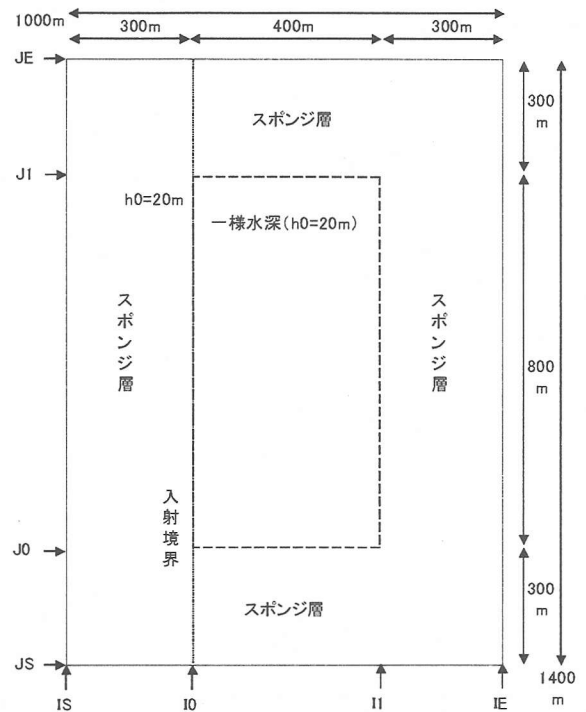


図-5 NOWT-PARIによる多方向波の計算領域

は20mで一定)を設定し、この有限な海域でNOWT-PARIにより造波される多方向波の有効造波領域の計算精度と、多方向波の方向集中度 S_{max} による違いを検討する。計算領域の周囲には、300m幅(有義波長; $L_{1/3}=89m$ の2倍以上)のスポンジ層による開境界を設置した。

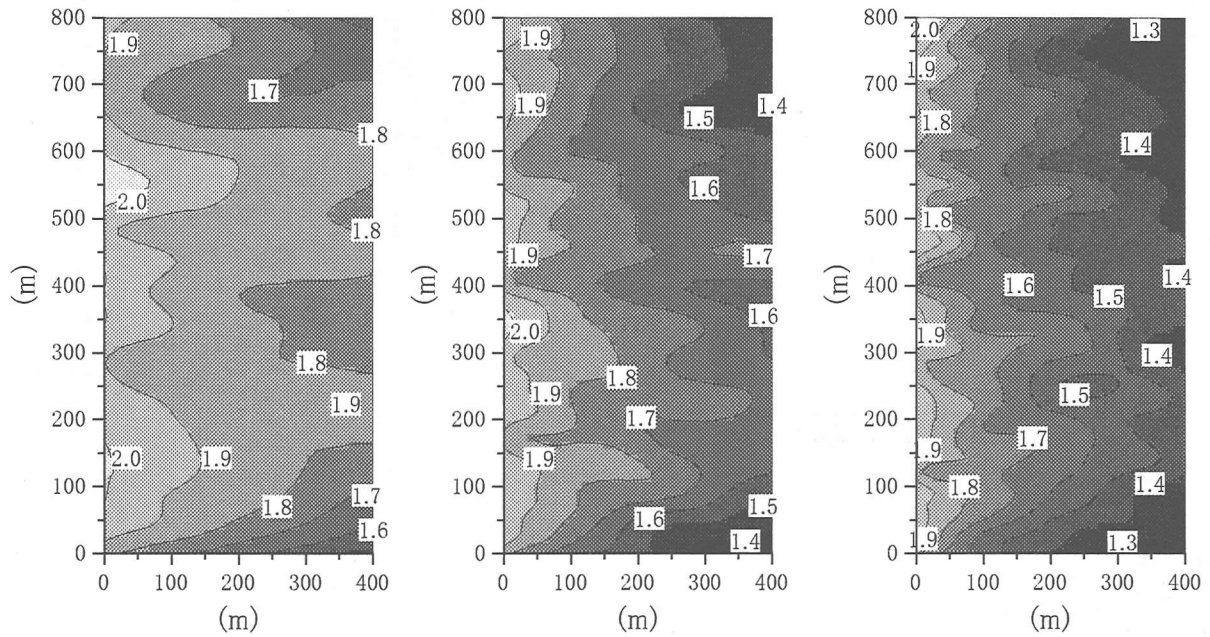
表-1は、NOWT-PARI使用時に設定する基本的な計算条件の一覧である。また、表-2には、入射境界で造波する多方向波の諸元と数値計算に用いる差分条件を、以降で述べる差分条件の違いや打ち切り誤差の修正による計算精度の検証のために設けた計算ケースと併せて示している。

表-1 NOWT-PARIにおける基本計算条件

海底地形	一様水深 $h_0=20m$
計算範囲	沿岸方向800m, 岸沖方向400m
格子間隔	$Dx=10m$
計算終了	$TEND=220 * T_{1/3}$
取得時間	$TSVE=20*T \sim Tend=220*T$
砕波判定	$Rb = 0.80$
摩擦係数	$F = 0.00$
最小水深	$HLIMIT=5m$

表-2 波浪条件と差分条件

No.	Dx	Dt	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	波向	計算波数	S_{max}
CaseH	10m	0.2s	2.0m	8.0s	0deg	512	75
CaseM	10m	0.2s	2.0m	8.0s	0deg	512	25
CaseS	10m	0.2s	2.0m	8.0s	0deg	512	10



(1) CaseH : $S_{max} = 75$ (2) CaseM : $S_{max} = 25$ (3) CaseS : $S_{max} = 10$

図-6 異なる S_{max} の多方向波の有義波高分布

表-2に示した計算ケース；CaseH, CaseM, CaseS に対し, NOWT-PARIを用いて計算された多方向波の有義波高分布を図-6に示す。ここで, これらの有義波高は, レーリー分布を仮定し, 各格子における水位変動の2乗平均に3.8を乗じて算定されたものである。多方向波が有する波群特性の影響により沿岸方向に対照な波高分布は得られていないものの, $S_{max}=75$ の多方向波では, 波エネルギーの80%に当たる波高1.8m以上の等値線が有効造波領域の境界線にほぼ一致していることから, この計算ケースでは, 多方向波の伝播がほぼ妥当に計算されていると評価できる。

一方, $S_{max}=25$ および $S_{max}=10$ の多方向波の場合には, 等値線が示す形状は有効造波領域の形状にやや似ているものの, 有効造波領域内で観測されるべき値よりも概ね1割程度小さな波高が算定されていることがわかる。この理由としては, 成分波である大きな角度を有する斜め波の波高が波向の上手側の領域で低下するためと考えられる。さらに, 格子の分割方向に対して斜めに伝播する成分波に対して, 差分計算の打ち切り誤差による波高減衰が有意であったためと考えられる。したがって, 方向集中度の低い多方向波の伝播を計算する場合には, 計算範囲を大きく取って有効造波領域を拡大したり, 差分間隔をさらに密に設定する必要があると考えられる。

3. 波浪変形計算の適用例

(1) 福井県敦賀港の場合

敦賀港鞍山北地区-9m岸壁では, フェリーが毎日着岸し荷役を行っているが, 特に冬季には高波浪の

ため荷役障害が頻発している。そこで, 波浪の短期多点観測・船舶動揺観測を行い, 敦賀港における波浪特性・船舶の動揺特性を明らかにするとともに, 波浪変形計算により現況地形, 計画平面及び対策工における波浪の港内への伝搬過程, 静穏度が検討されている。図-7に計算領域の地形を示す。鞍山防波堤で遮蔽された岸壁がフェリー係留点で, 旧港地区は金ヶ崎防波堤で遮蔽されている。金ヶ崎防波堤の沖側には将来港形の例として, 沖合埋立地を配置

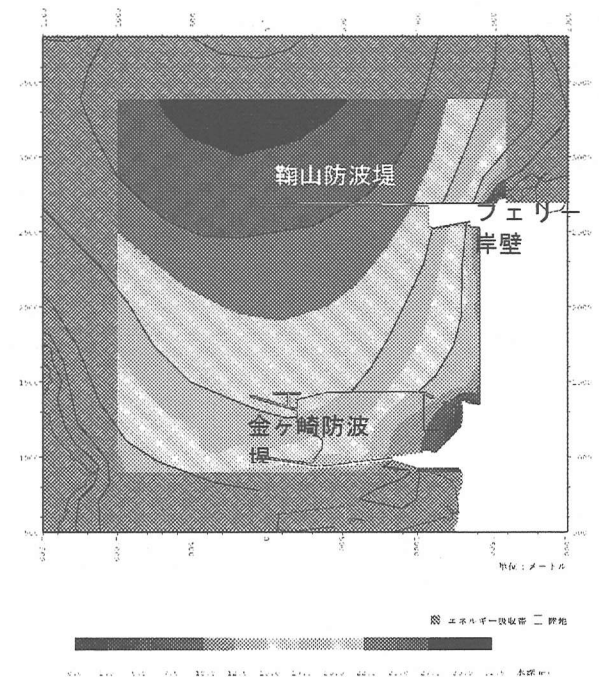


図-7 敦賀港をモデルとした計算地形

表-3 敦賀港モデル地形での計算条件

項目	条件
入射波の波高	1.0m
入射波の周期	6秒、9秒、12秒 の計3周期
入射波の波向	NNW
入射波のスペクトル形状	周波数：フレットシュナイター・光易型 方向関数：光易型 Smax : 75
格子間隔	周期6秒の場合：5m 周期9,12秒の場合：10m
積分時間間隔	周期の1/100秒
積分時間	40分

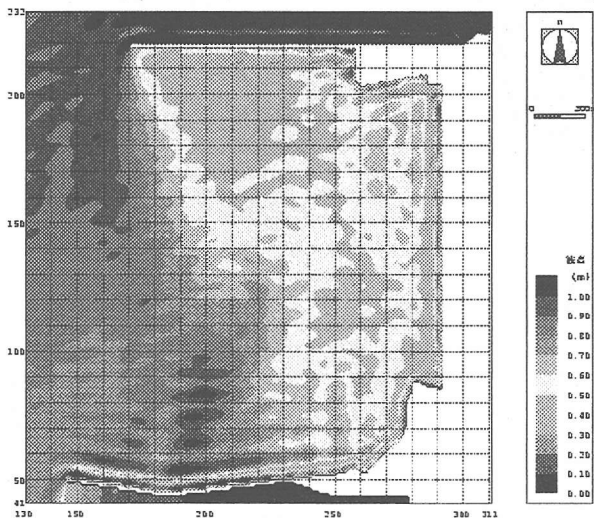


図-8 現況モデル地形での波高分布 (T0=12s)

した。表-3に計算に用いた波高、周期等の諸条件を示す。格子間隔は、入射波の波長の1/10程度になるように波周期によって変更されている。

図-8は、例として有義周期12sでの波高分布の計算結果を示す。フェリー岸壁は、鞍山防波堤の遮蔽域に位置して、沖波に比べると波高は小さく、静穏度は確保されている。しかし、岸壁自体の反射波と鞍山防波堤からの影響によって、局所的に波高増大が現れており、防波堤からの反射波の低減、岸壁の構造改善による反射波の防止が、港内の荷役効率の上昇には不可欠であることがわかる。金ヶ崎防波堤外海側の埋め立て地の造成時においても護岸の反射波の低減に努める必要があり、本計算モデルを活用することにより、将来の港湾の計画方針を適切に設定できる。

(2) 福島県小名浜港の場合

外海に面した港湾に係留された大型貨物船のサージ動揺による荷役障害の原因としては、沖合からの周期数十秒以上の長周期波の侵入が考えられている。長周期波による荷役障害の防止には、現在、1)係留索の改良、2)沖合防波堤の延伸や波除堤の新設、3)長周期波警報システムの整備、4)港内の消波機能の

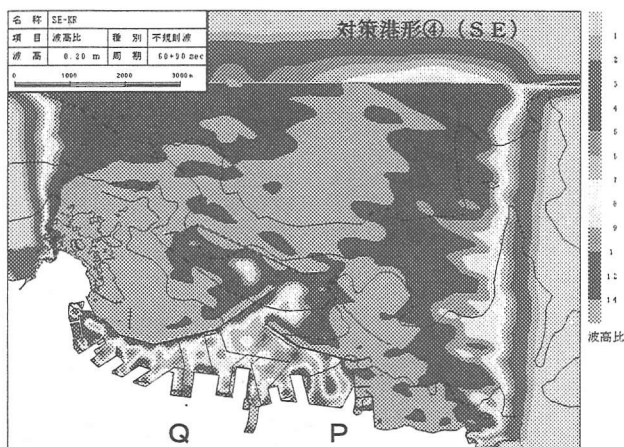


図-9 小名浜港をモデル地形とした長周期波消波ビーチによる波高低減効果に関する数値実験

拡充、等が提案されている。いずれの対策においても、対策工の効果によって長周期波による荷役障害が低減できることを定量的に示す必要がある。

港内の長周期波は、沖から伝搬する自由進行長波の変形だけでなく、浅海域での拘束長周期波の発達とその変形までも含めて計算することが望ましい。NOWT-PARIは非線形性による波浪変形を考慮できるので、風波に拘束された長周期波の影響を検討できる。計算に要する時間が膨大になるため、現在は風波と自由進行長波の変形計算は、それぞれ別個に実施されている。しかし、計算機の能力は飛躍的に向上しているので、将来は深海領域から風波の非線形的な変形を計算し、自由進行長波を境界で与えなくても、計算領域内で長周期波の発達と消散の過程が再現できると考えられる。

ここでは、長周期波に対する計算例として小名浜港における消波ビーチの効果を検討した計算例を示す。図-9は、小名浜港内のPおよびQに反射率0.7程度の人工ビーチを設置した場合の長周期波高を示す。PおよびQの消波岸壁前面では他の岸壁に比較して長周期波高が低下しており、対策が可能になる。

4. あとがき

本報告では、多様な機能を有する港湾の施設計画に活用できる高精度の波浪変形モデルを紹介し、その活用例を示した。計算の実施では、(財)日本気象協会松浦邦明、日本海洋コンサルタント(株)法橋一賢ならびに田中和広氏の協力を得ました。

参考文献

- 1) 有川太郎・岡安章夫(2002):非線形緩勾配方程式を用いた屈折・回折・砕波変形モデルの開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 26-30.
- 2) 港空港技術研究所(2003):ブシネスクモデルによる波浪変形に関する勉強会, 勉強会資料, 55p.
- 3) 平山克也(2002):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, 港空研資料, No. 1036, 162p.