

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1159 June 2007

ビジネスモデル (NOWT-PARI) を用いた高精度港内静穏度解析法の提案

平山 克也

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目次

英文要旨	2
和文要旨	3
1. まえがき	4
2. 高精度港内静穏度解析法の提案	4
2.1 高精度港内静穏度解析法による荷役稼働率の算定手順	4
2.2 港内波浪変形計算モデルの仕様について	5
3. 那覇港内波浪観測結果（台風0514号）の再現計算	7
3.1 現地観測の概要	7
3.2 風波・うねりに対する再現計算	8
3.3 長周期波に対する再現計算	21
4. 高精度港内静穏度解析法の適用例 1-沖縄県那覇港-	32
4.1 沖縄県那覇港の概要	32
4.2 風波・うねりに対する港内静穏度および荷役稼働率の算定	36
4.3 長周期波に対する港内静穏度および荷役稼働率の算定	49
5. 高精度港内静穏度解析法の適用例 2-沖縄県S港-	53
5.1 沖縄県S港の概要	53
5.2 風波・うねりに対する港内静穏度および荷役稼働率の算定	56
6. まとめ	71
7. あとがき	72
謝辞	72
参考文献	72
記号表	73
付録A 那覇港内における現地観測結果（夏季）および台風0514号来襲時の気象概況	74
付録B 港内波高比の算定結果に及ぼす潮位の影響について 1-沖縄県那覇港-	79
付録C 港内波高比の算定結果に及ぼす潮位の影響について 2-沖縄県S港-	82
付録D ブシネスクモデルによる設計波および換算沖波の算定について	89

Harbor Tranquility Analysis Method for using Boussinesq-type Nonlinear Wave Transformation Model

Katsuya HIRAYAMA*

Synopsis

A conventional harbor tranquility analysis method has been developed to calculate wave transformation in a harbor. It can consider wave diffraction and reflection around breakwaters and seawalls as assuming the harbor bathymetry is flat. But, it has been frequently used because it can be immediately executed by a personal computer.

Recently, a Boussinesq-type transformation model has been developed in order for the planners to reproduce wave fields with more accuracy. This model can consider every wave transformation occurred in shallow water. Further NOWT-PARI based on the expanded Boussinesq equation has been produced with many kinds of boundary calculation techniques to apply wave calculations on the real bathymetry in and around ports and harbors. Hence the harbor tranquility can be estimated with higher accuracy in case that NOWT-PARI is applied to the calculations of the appearance frequency of wave height.

A new harbor tranquility analysis method is desired in order to make the best use of the high performance of NOWT-PARI in the calculations of wave refraction, nonlinear wave shoaling and breaking. In this report, it is proposed that the variation of harbor wave in height caused by the steepness of each offshore wave can be represented by a supplementary curve. The examples for the two model ports, where some storm waves penetrate shallow water on shoals and reefs, are shown to demonstrate the applicability of the new harbor tranquility analysis method using Boussinesq-type nonlinear wave transformation model.

Keyword: Boussinesq Model, NOWT-PARI, Harbor tranquility, Breaking, Shoaling, Supplementary curve

* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute
TEL : 0468-44-5042, FAX : 0468-41-3888, E-Mail : hirayama@pari.go.jp

ブシネスクモデル (NOWT-PARI) を用いた高精度港内静穏度解析法の提案

平山 克也*

要 旨

港内水深が一定であることを仮定し、波の回折・反射変形を考慮して港内波高分布を算定する高山法に対し、複雑な海底地形をそのまま入力できるブシネスクモデルでは、港内で生じる屈折・浅水・砕波変形を考慮した港内波高分布を算定することができる。また、実海域への適用を可能にするさまざまな境界処理法を備えたNOWT-PARIでは、港内外の防波堤や岬などの障害物に起因する回折・反射・透過変形に加え、水面波の非線形性・分散性および不規則性・多方向性などもすべて同時に計算されるので、港湾や海岸を対象とした実海域で起こりうる波浪変形をほぼ再現できると考えられる。

ところで、防波堤延伸や消波工設置の効果などを定量評価し、安全で使い易い港湾を計画するための指標として、港内静穏度および荷役稼働率が定義されている。これらの算定には、沖波波浪出現頻度分布をほぼ代表する各入射波を設定した複数の港内波浪変形計算を実施することが必要であるが、計算負荷の小さい高山法はこの要求に適し、かつ水深が一樣とみなせる港内の波高分布を比較的精度よく算定できる信頼性と汎用性を有しているため、港湾設計の実務においてこれまで広く用いられてきた。そして、現在の港内静穏度解析法は高山法をベースとして構築されている。すなわち、港内波浪出現頻度分布を算定するために行う波浪変形計算の各ケースでは、入射波高は1mで一定とし、周期および波向の違いによる港内波高比の変化のみが考慮される。これは、港内での屈折・浅水・砕波変形が算定されない高山法による計算結果では、入射波の波高や波形勾配による港内波高比の変化が生じないためである。

ところが近年では、船舶の大型化に伴う大水深バースや航路、泊地の整備、あるいは海域環境に配慮したさんご礁や岩礁等の浅瀬の保全などにより港内地形が複雑化・多様化し、これらを考慮しない従来の港内静穏度解析法では対応しきれない港湾もみられるようになってきている。そこで本研究では、このような港湾における波浪変形計算にブシネスクモデルを適用し、かつ入射波の波高や波形勾配による港内波高比の変化を考慮して、港内の対象岸壁における港内静穏度ならびに荷役稼働率を算定する「高精度港内静穏度解析法」を提案した。

すなわち、透水層を用いた任意反射境界処理法に加え、乱れ生成項に段波によるエネルギー損失を適用した乱流モデルに基づく砕波減衰計算法、ならびに引き波時に海底面が露出することも許容する遡上計算法を備えた最新ブシネスクモデル (NOWT-PARI, Ver.5.2) を対象として、2つの具体的な港湾を例に、入射波高を一定とした従来の方法、および波向、周期に加え入射波高をも変化させた本研究の方法によって港内静穏度を算定した。さらに、一定の荷役限界波高を用いる従来法と、船型、周期、波向によって異なる荷役限界波高を用いる標準解析法を適用して荷役稼働率を算定した。これらの算定結果を比較したところ、港口周辺に浅瀬や珊瑚礁が広がる港湾では、とくに港内での砕波変形の影響により、従来の方法に比べ高い静穏度 (=従来法による荷役稼働率) および荷役稼働率が算定される傾向にあることが明らかとなった。ただし、低潮位時には浅水変形によって対象岸壁の静穏度ならびに荷役稼働率が逆に低下することがあり、注意を要する。

キーワード： ブシネスクモデル, NOWT-PARI, 港内静穏度, 荷役稼働率, 砕波, 浅水変形, 曲面補間

* 海洋・水工部主任研究官 (波浪解析担当)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, 独立行政法人港湾空港技術研究所

TEL : 046-844-5042, FAX : 046-841-3888, E-Mail : hirayama@pari.go.jp

1. まえがき

近年における計算機の目覚ましい進歩により、エネルギー平衡方程式や高山法、あるいは対象海域毎にこれらを使い分けて用いる従来の方法に代えて、港湾設計の実務においても、ブシネスクモデルによる高精度波浪変形計算が広く実施されるようになってきている。なかでもNOWT-PARIは、実海域計算を行う上で必要となるさまざまな境界処理法を具備しているため、とくに、港湾施設等の設計波の算定や被災をもたらした異常波の推定等の実務において、近年着実にその適用事例を蓄積しているところである。すなわち、港内水深が一定であることを仮定して港内波高分布を算定する高山法とは異なり、複雑な海底地形をそのまま入力できるブシネスクモデルでは、高山法では算定されない港内での屈折・浅水・砕波変形を考慮した港内波高分布を算定することができる。また、ブシネスクモデルに対しさまざまな境界処理法を導入して構築されたNOWT-PARIでは、港内外の防波堤や岬などの障害物に起因する回折・反射・透過変形に加え、水面波の非線形性・分散性および不規則性・多方向性などもすべて同時に計算されるので、実海域で起こりうる波浪変形をほぼ再現できると考えられる。

ところで、港湾設計の実務において防波堤延伸や消波工設置の効果を定量評価し、安全で使い易い港湾を計画するための指標として、港内静穏度および荷役稼働率が定義されている。これらの算定法については「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（社団法人日本港湾協会、1999）にも示されており、さらに平成16年8月に刊行された「港内長周期波影響評価マニュアル」（財団法人沿岸技術研究センター、2004）でも詳しく述べられている。とくに後者では、“港内静穏度＝荷役稼働率”と考える「従来法」を改め、対象岸壁を利用する対象船型および岸壁入射波の周期や波向に応じて、荷役限界波高を変化させるという荷役稼働率の「標準解析法」を提案している。この修正によって、岸壁を利用する船種・船型によって岸壁が保証するサービスレベルが異なる状況を数値的に示すことが可能となるので、従来に比べ実際の荷役状況に即した荷役稼働率が評価されることが期待される。

さらに同マニュアルでは、港内の複雑な海底地形に対応するため、風波や長周期波による港内波高の算定には、高山法に代えてNOWT-PARIを用いてもよいとされている。しかしながら、対象岸壁における港内波浪出現頻度分布の算定には、依然として高山法をベースとした現行の港内静穏度解析法が用いられている。したがって、NOWT-PARIでは計算される入射波の波高や波形勾配による港内波高比の変化を、港内静穏度および荷役稼働率の算定結果に反映させるプロセスは導入されていない。すなわち、港内波浪出現頻度分布を算定するために行う高山法による波浪変形計算の各ケースでは、入射波高は通常1mで一定

とし、周期および波向の違いによる港内波高比の変化のみが考慮される。これは、港内での屈折・浅水・砕波変形が算定されない高山法による計算結果では、入射波の波高や波形勾配による港内波高比の変化が生じないためである。

ところが近年では、船舶の大型化に伴う大水深パースや航路、泊地の整備、あるいは海域環境に配慮したさんご礁や岩礁等の保全などにより港内地形が複雑化・多様化し、これらを考慮しない従来の港内静穏度解析法では対応しきれない港湾もみられるようになってきている。そこで本研究では、ブシネスクモデルをベースとし、入射波の波高や波形勾配による港内波高比の変化を考慮した港内静穏度ならびに荷役稼働率を算定する「高精度港内静穏度解析法」を提案した。そして、2つの具体的な港湾を例に、港内の対象岸壁における港内静穏度ならびに荷役稼働率を算定して、従来法による算定結果との違いを考察した。

2. 高精度港内静穏度解析法の提案

従来の港内静穏度解析法では、海底地形の変化に伴う港内での屈折・浅水・砕波変形を考慮しない高山法によって港内波高分布を算定することを前提にしていたので、入射波高を一定として波向、周期による港内波高比の変化のみを考慮した計算ケースを設定しておけば十分であった。一方、港内外で生じる複雑な波浪変形を同時に算定するために高山法に代えてブシネスクモデルを適用した場合には、例えば、一定の入射波高として1mあるいは3mを設定した場合に算定される港内静穏度は、とくに港内の水深変化が激しい場合、大きく異なることが予想される。これは、港内で生じる屈折・浅水・砕波変形によって入射波高による港内波高比に変化が生じるためである。そこで本研究では、このような問題点に言及するとともにこれに対応する以下のような手法を提案する。

2.1 高精度港内静穏度解析法による荷役稼働率の算定手順

港内静穏度解析では、対象港沖で観測または推算により得られた沖波波浪出現頻度分布に対し、これをよく代表する波高、周期、波向からなる代表波を複数抽出して、港内外波浪変形計算における入射波条件とする。このとき、従来の方法では入射波高の違いによる港内波高分布の変化は考慮しないので、入射波高は一定（とくに高山法では簡便のため1mとする）とし、各入射波向において周期のみが異なる入射波条件を設定する。すると、この場合に得られる港内波高比分布はある入射波向と入射周期に対してただ一通りである。そこで、これが入射波高値には依存しないことを仮定したうえで、ある対象地点において、波向および周期に対する波高比の変化特性を求め、沖波に対する港内波浪出現頻度分布を算定する。

一方、本研究で提案する新たな方法では、海底地形の変化に

表-2.1.1 本研究で提案する高精度港内静穏度解析法の手順（一般的な港内静穏度解析法との比較）

手順	一般的な港内静穏度解析法	高精度港内静穏度解析法
①	港外における波向き別波浪出現頻度表を作成する (波浪観測あるいは波浪推算データの統計処理)	
	港外波浪出現頻度を代表する入射波を複数設定する	
②	(波高1種類:通常1m)	(波高2~3種類)
	(周期3~6種類)	
	(波向5~9種類)	
③	各代表波について港外に対する港内波高比を算定する	
	(高山法(一部, プシネスク方程式法))	(プシネスク方程式法(Ver5.2))
④	対象岸壁前面の港内波高出現頻度表を作成する	
	(波向毎に入射波周期に対する港内波高比の変化近似曲線を設定)	(波向毎に入射波高・周期に対する港内波高比の変化近似曲面を設定) ⇒ (波高比の曲面補間法の提案)
	(沖波波浪出現頻度に対応する港内波高比を乗じ, 港内波高出現頻度を算定)	
⑤	港内静穏度(狭義)および荷役稼働率を算定する	
	(対象岸壁前面の波高が荷役限界波高を下回る比率を算定)	
	(従来法および標準解析法を用いて, 2通りの荷役稼働率を算定)	

より生じる屈折, 浅水, 碎波変形のために, 入射波の波向と周期が同じでも波高の違いにより港内波高比分布は一通りには決まらないことを考慮する. すなわち, 各入射波向において波高と周期が異なる入射波条件を設定して港内波高分布をそれぞれ算定することにより, ある対象地点において, 波向毎に波高および周期に対する波高比の変化特性を求め, 沖波に対する港内波浪出現頻度分布を算定する. そして, これを可能とするために, 入射波高-入射波周期平面における波高比分布を推定する曲面補間法を提案する.

荷役稼働率の算定では, 対象岸壁における船型や周期, 波向に対して, 動揺解析結果から提案されたそれぞれ異なる荷役限界波高を適用する標準解析法と, 比較のために, これによらず

一定の荷役限界波高 (0.5m等) を用いる従来法の2通りによって, 荷役限界波高に対する出現波高の未超過出現率を算定する. これらの算定手順を表-2.1.1に示す.

2.2 港内波浪変形計算モデルの仕様について

本研究で提案する高精度港内静穏度解析法においては, とくに港内外に浅瀬や珊瑚礁が広がり, 航路や泊地とともに複雑な海底地形を形成している港湾への適用を想定して, 透水層を用いた任意反射境界処理法に加え, 乱れ生成項に段波によるエネルギー損失を適用した乱流モデルに基づく碎波減衰計算法, ならびに引き波時に海底面が露出することも許容する遡上計算法を備えた最新プシネスクモデル (NOWT-PARI, Ver5.2) を用い

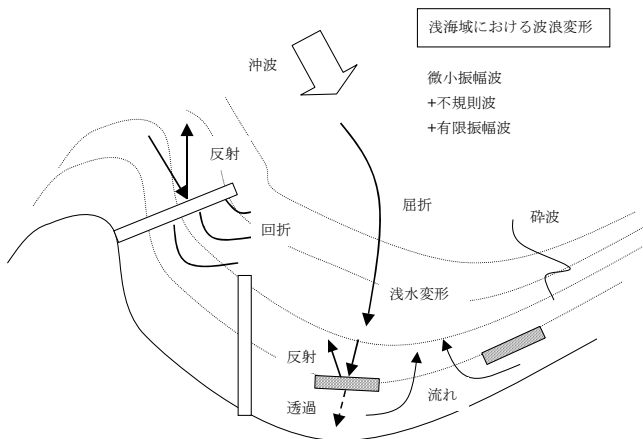


図-2.2.1 港湾や海岸周辺の波浪変形

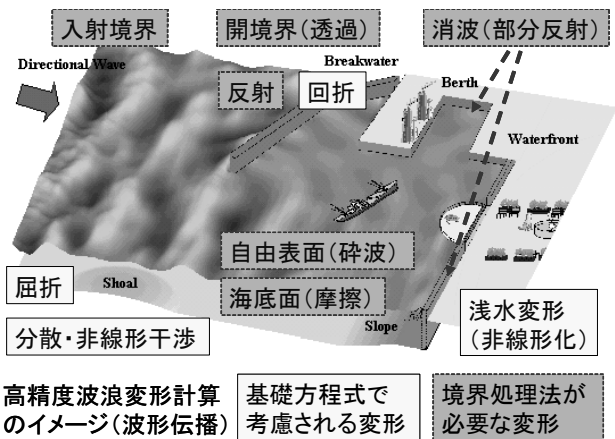


図-2.2.2 基礎式と境界処理法で算定される波浪変形

ることとした。これは、当所波浪研究室が主催して毎年開催している「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」を通じて関係諸氏に公開しているNOWT-PARI, Ver4.6を用いた場合、計算の発散を防ぐために設定する計算領域内の最小水深の制約のために、平常波でも顕著な浅水・砕波変形が生じる港内外の極浅海域を対象とした計算に十分対応できない恐れがあるためである。しかし、当然ながら計算可能な最小水深までに生じる砕波・浅水変形は算定されるため、本研究の成果はVer4.6を用いた港内静穏度解析にも活用できるものと思われる。

本研究で用いたNOWT-PARI, Ver5.2の概要を以下に示す。

港湾や海岸周辺の浅海域の波は、水深変化による屈折、浅水、砕波と、障害物による回折、反射、透過などの各種変形を受ける(図-2.2.1)。このような複合的な波浪変形問題を算定するために、ブシネスク方程式を用いた高精度波浪変形計算法(NOWT-PARI)では、基礎式で表現し得ない波の部分反射や砕波などの様々な境界問題を処理する適切な手法を開発して、港湾設計の実務に適用している(図-2.2.2)(平山, 2002)。

波消しブロックが施工された防波堤や護岸では、水深や入射波の諸元に応じて振幅が異なる反射波(反射率: K_r)が形成される。消波構造の物理量に基づいて客観的にモデル化した任意反射境界処理法を用いた計算では、模型実験で得た反射率を自動的かつ適切に再現することが検証されている(図-2.2.3)

(平山, 2001)。各種の消波構造が設置された実際の港湾を対象とした波浪変形計算では、屈折、回折変形とともに、港湾構造物による波の部分反射を正しく算定して、実験結果をよく再現することが確認されている(図-2.2.4)(平山・上原, 2002)。

さらに、段波理論を用いて砕波による渦の生成量を客観的に与え、その逸散過程を乱流モデルで算定する砕波モデルもすでに開発されている。これらを導入した最新版のブシネスクモデルで斜面上の潜堤による砕波変形を計算し実験結果と比較した結果、鉛直流速まで扱う3次元計算を行わなくとも、砕波前後の波高やスペクトル変化を適切に再現することが確認されている(図-2.2.5)(平山・平石, 2004, 2005)。

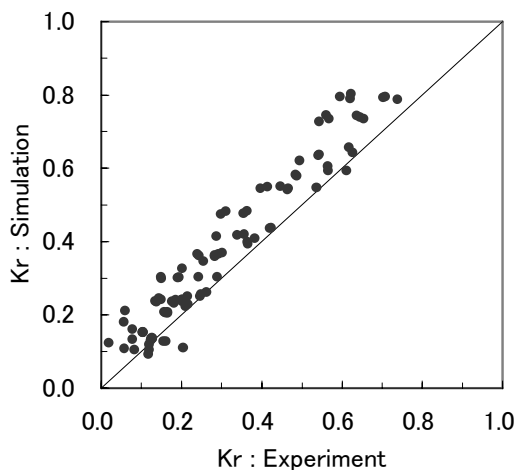


図-2.2.3 部分反射率の再現

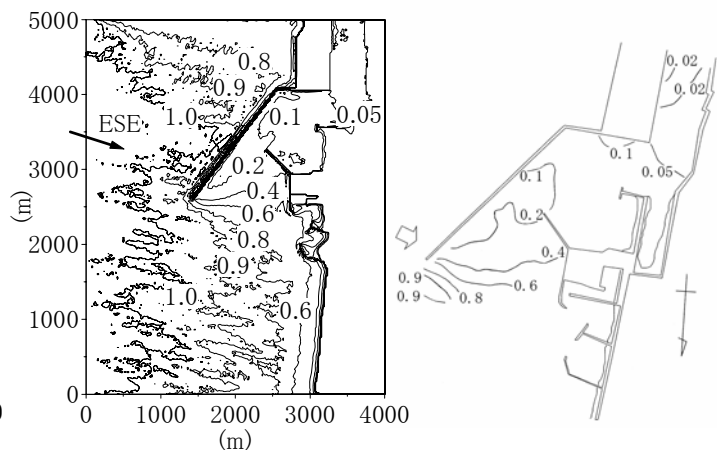


図-2.2.4 港内波高の再現 (左図: 計算, 右図: 実験)

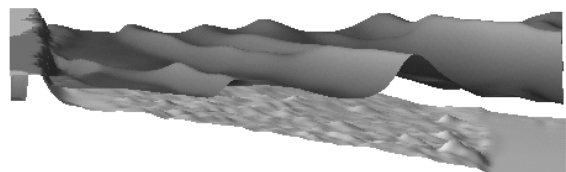
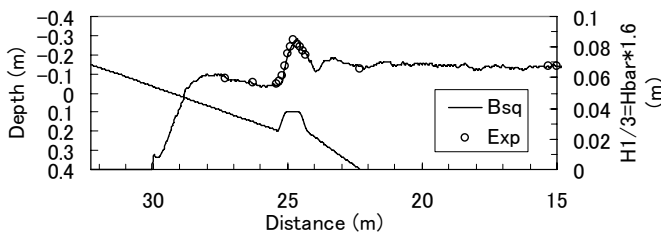


図-2.2.5 斜面上の砕波・遡上計算 (左図: 波高分布の再現, 右図: 海岸へ打ち上げる波の再現)

3. 那覇港内波浪観測結果（台風0514号）の再現計算

ここでは、港内外に浅瀬や珊瑚礁が広がり航路や泊地とともに複雑な海底地形を形成している、沖縄県那覇港の浦添地区および新港地区で得られた港内波浪観測データのうち、観測期間中に来襲した台風0514号による擾乱時の波高ならびに周波数スペクトルを対象とした再現計算を行い、最新ブシネスクモデル（Ver5.2）による港内波浪変形計算の計算精度を検証した。

3.1 現地観測の概要

平成17年度の夏季及び冬季に、那覇港の静穏度の基礎資料を作成することを目的として、那覇港の浦添地区と新港地区において波浪と風向・風速に関する現地観測が実施された。その概要を以下に示す。なお、調査期間は次のようであった。

（夏 季）

平成17年 9月 2日9:30 ～ 平成17年 9月18日11:30

（冬季1回目）

平成17年12月28日9:50 ～ 平成18年 1月12日11:30

（冬季2回目）

平成18年 1月21日8:30 ～ 平成18年 2月 6日11:30

(1) 波浪観測

波浪観測を行った5地点（St.1～St.5）を図-3.1.1に示す。St.1は浦添第一防波堤付近、St.2～St.4は浦添地区岸壁付近、St.5は新港地区岸壁前面である。

観測にはDL-2（協和商工製）を使用し、15昼夜の連続観測（サンプリング間隔0.5s）によって、波高（超音波式、水圧式）および流向・流速（電磁式）を計測した。

(2) 風向・風速観測

那覇港浦添地区および新港地区の2地点（図-3.1.1中のSt.AおよびSt.B）において、風向風速計（KADEC-21、コーナースシステム社製）により10分間平均風向・風速の観測を行った。なお、設置高さは、浦添地区で地上15m、新港地区で地上10mである。

(3) 潮位観測

那覇港の潮位観測は気象庁により実施されている。那覇検潮所の位置を図-3.1.2（丸印）に示す。

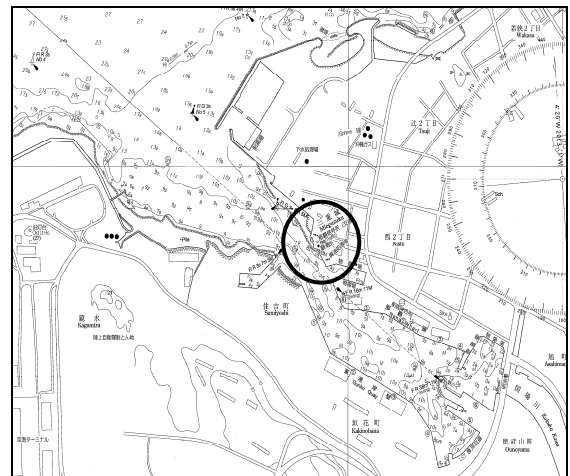


図-3.1.2 那覇検潮所の位置

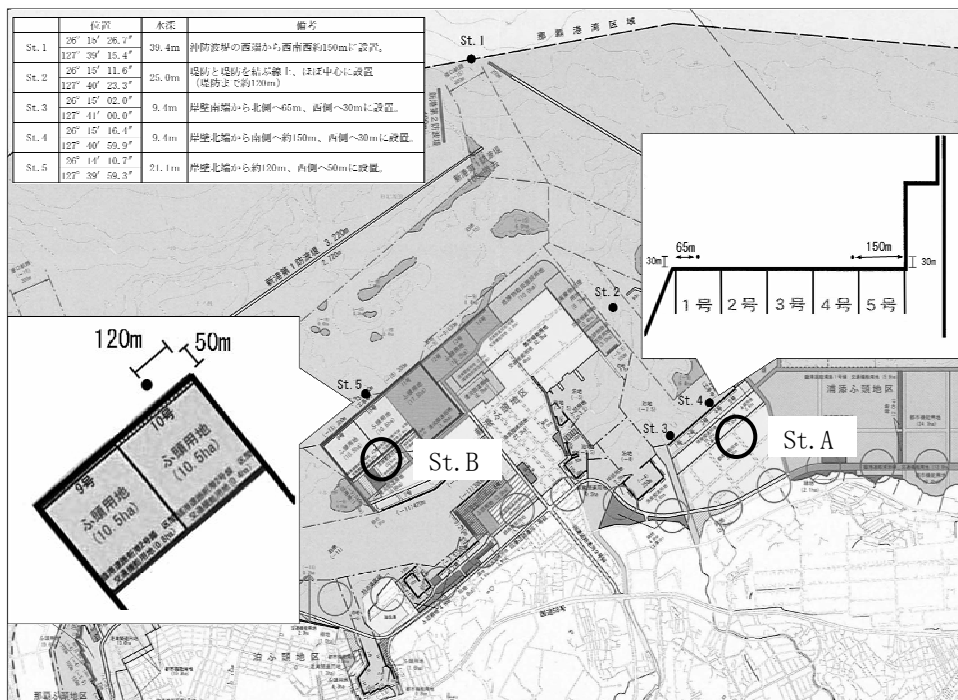


図-3.1.1 波高・流速計ならびに風向風速計の設置位置

3.2 風波・うねりに対する再現計算

ここでは現地波浪観測結果のうち代表的な5時刻を選定し、そのとき得られた港内外の波浪諸元に対して、後述する港内静穏度解析に用いるブシネスクモデル (NOWT-PARI, Ver5.2) による再現計算を実施して、那覇港における当該モデルの計算精度を検証する。

(1) 再現事象の抽出

夏季 (9月) の現地観測波浪のうち、台風0514号の接近により那覇港の港内外が擾乱した9月4日17時頃より9月6日22時頃までの期間で、波浪の発達期、ピーク期、減衰期に当たる計5時刻を選定し、再現の対象とする波浪諸元とした。選定した5時刻およびそのとき得られた各観測点における有義波高と有義波周期を表-3.2.1に示す。なお、これらの解析には各時刻より20分間の時系列波形を用いたが、次のような理由により、St.1~St.5の各地点で得られた観測波形に対してローパスフィルター処理を施し、周期5s以下 (周波数0.2Hz以上) を除去した波形に対してゼロアップクロス法による統計処理を行った。ただし、表中の () 内には高周波数成分を除去する前の波形に対して算定された波浪諸元を示している。

すなわち、水面波形の伝播を時間発展的に算定するブシネスクモデルにおいては、差分計算における数値誤差の発生 (波高減衰) を抑制するために、計算格子幅を波長の1/10程度以下に設定しなければならない。例えば、水深10mの海域を伝播する周期4sの波の波長は約25mであるので、この計算に必要な計算格子幅は2.5m程度となる。一方、本業務で計算対象とする海域は概ね5km四方であるから、2.5m格子を設定するためには2000×2000個もの計算格子が設定されることになり、少なくとも現在実務に利用できる計算機の計算速度および計算容量からすると、実施はかなり困難であることがわかる。

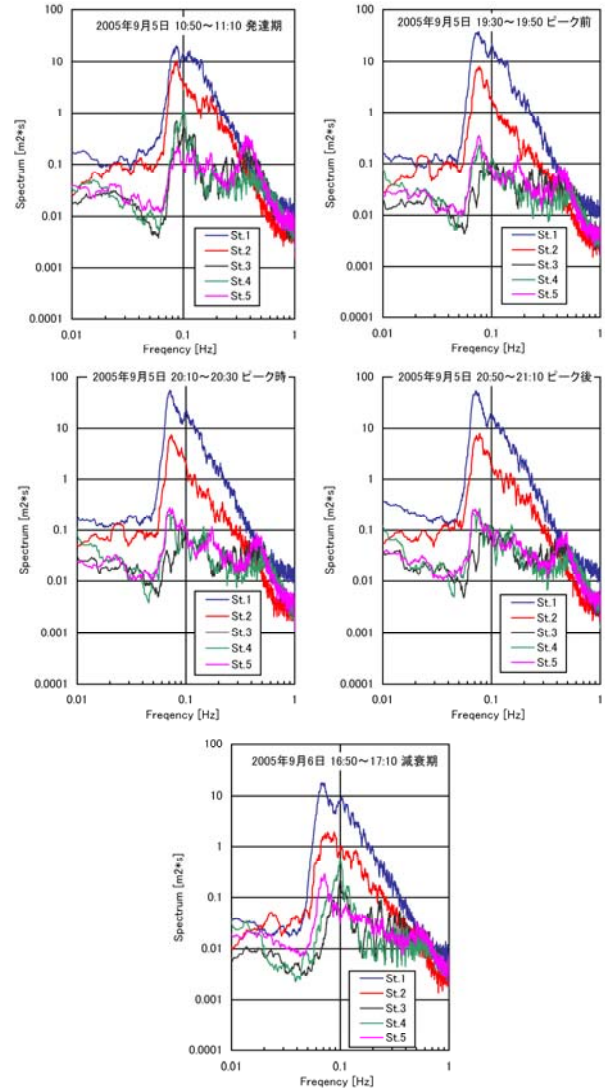
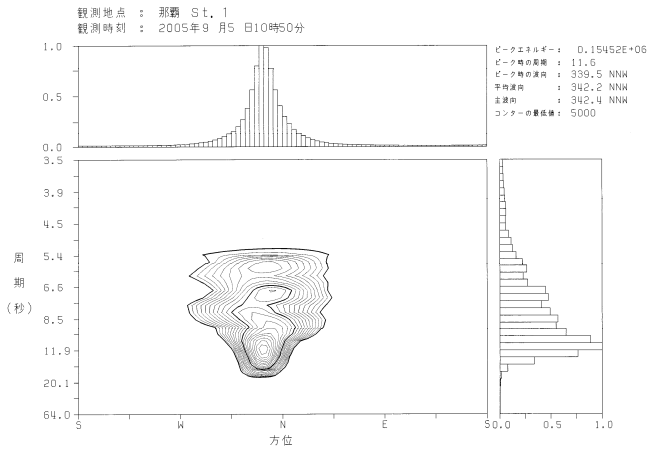


図-3.2.1 代表5時刻に観測された周波数スペクトル (夏季)

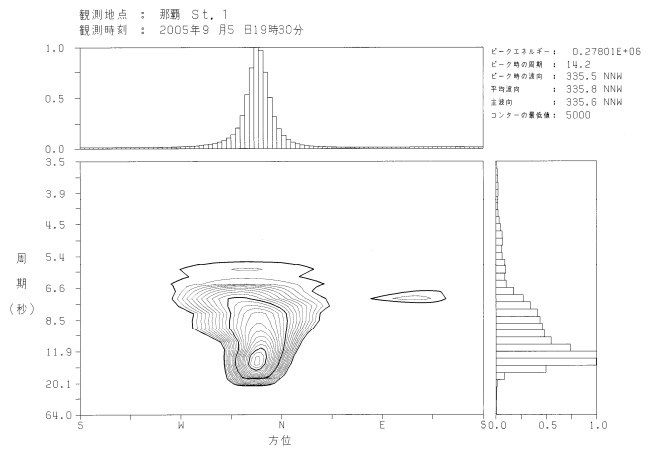
表-3.2.1 再現事象の抽出 (風波・うねり)

No.	年月日	時刻	NOWPHAS		St.1		St.2		St.3		St.4		St.5	
			H _{1/3} [m]	T _{1/3} [s]	H _{1/3} [m]	T _{1/3} [s]	H _{1/3} [m]	T _{1/3} [s]	H _{1/3} [m]	T _{1/3} [s]	H _{1/3} [m]	T _{1/3} [s]	H _{1/3} [m]	T _{1/3} [s]
1	2005.9.5	10:50	—	—	3.68 (3.98)	9.84 (9.20)	2.06 (2.35)	9.65 (9.10)	0.55 (0.75)	9.54 (4.50)	0.59 (0.66)	9.60 (5.40)	0.44 (0.79)	8.44 (3.40)
2	2005.9.5	19:30	—	—	4.52 (4.86)	11.29 (10.90)	1.58 (1.90)	12.27 (11.70)	0.29 (0.51)	9.53 (3.60)	0.34 (0.45)	10.25 (4.30)	0.36 (0.55)	9.54 (3.70)
3	2005.9.5	20:10	—	—	5.25 (5.54)	11.87 (11.80)	1.48 (1.65)	11.42 (9.90)	0.30 (0.48)	8.75 (3.50)	0.37 (0.49)	10.21 (4.20)	0.42 (0.58)	10.55 (4.30)
4	2005.9.5	20:50	—	—	4.68 (4.79)	11.00 (10.70)	1.82 (2.05)	11.55 (10.30)	0.35 (0.53)	9.40 (3.50)	0.38 (0.50)	10.33 (4.10)	0.38 (0.56)	10.96 (3.90)
5	2005.9.6	16:50	—	—	2.89 (3.06)	11.45 (11.00)	1.12 (1.20)	10.00 (8.80)	0.24 (0.38)	10.76 (3.80)	0.33 (0.37)	10.09 (4.90)	0.28 (0.38)	10.89 (4.20)

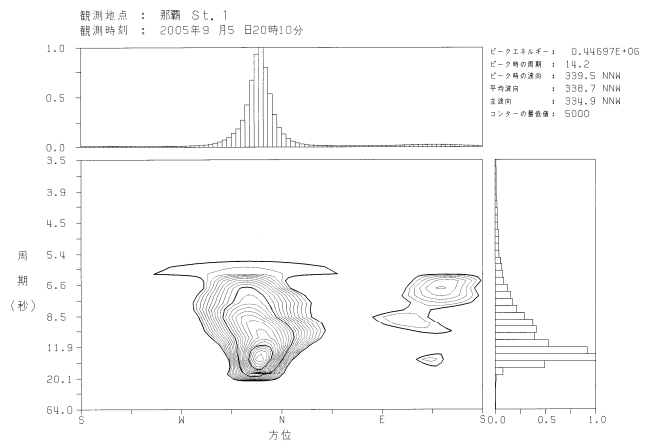
※ —は欠測を表す。また()は全周波数成分を用いて算定される波浪諸元を表す。



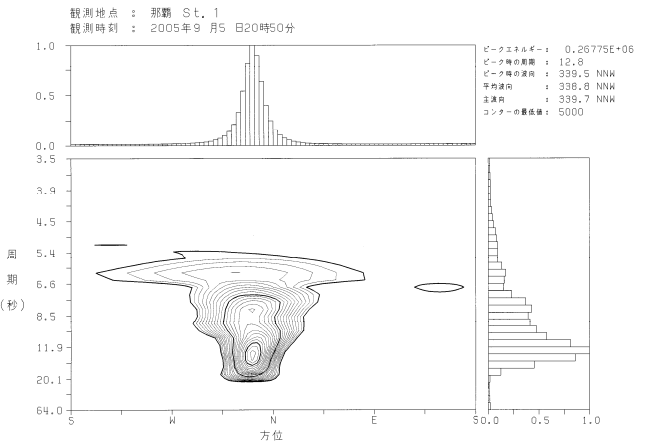
(a) No. 1 9月5日10:50



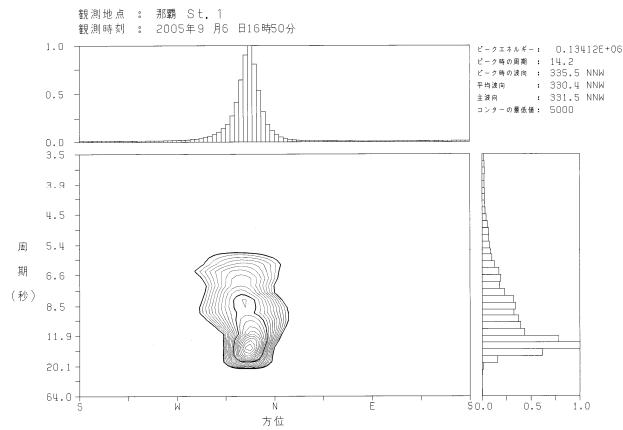
(b) No. 2 9月5日19:30



(c) No. 3 9月5日20:10

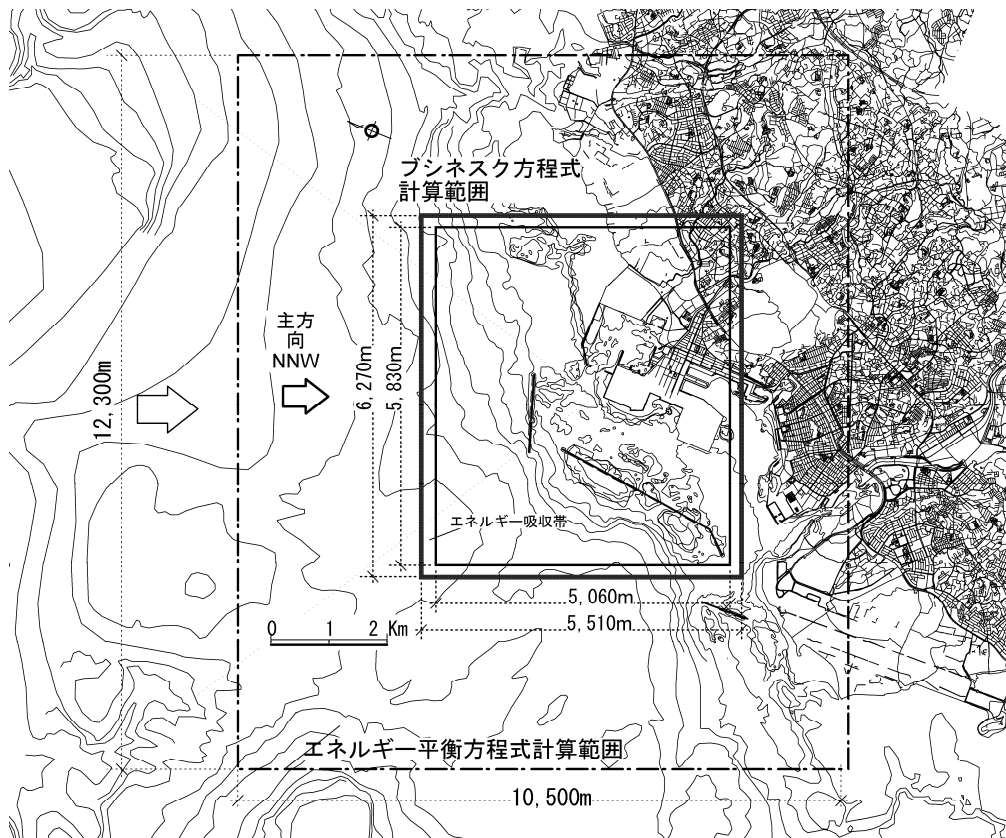


(d) No. 4 9月5日20:50

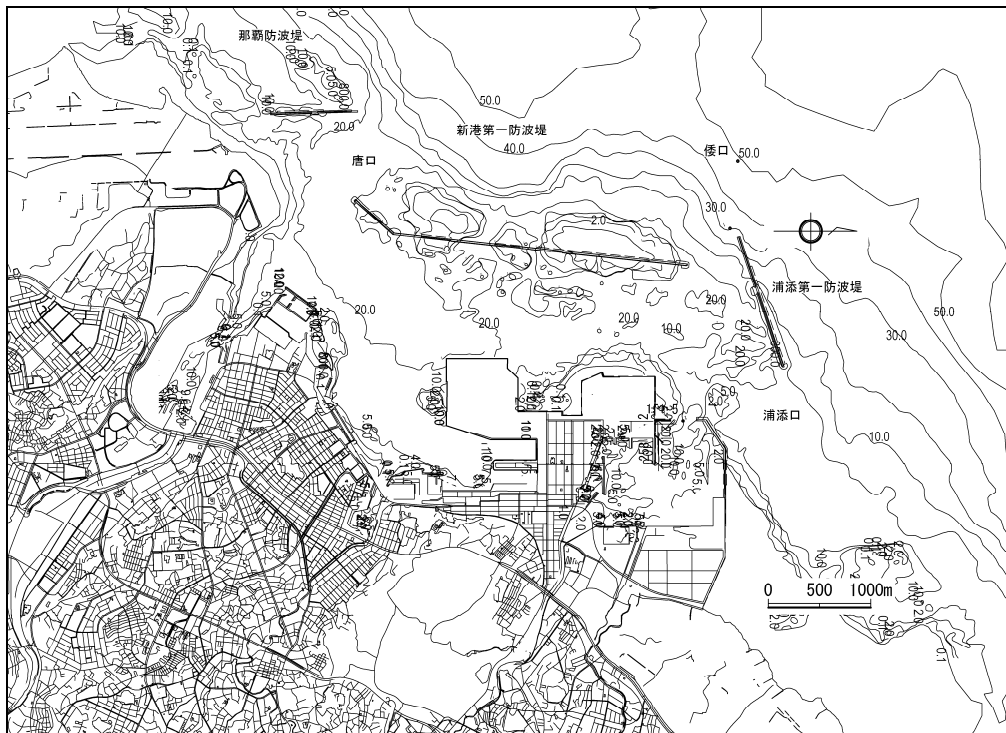


(e) No. 5 9月6日16:50

図-3.2.2 代表5時刻の方向スペクトル (St. 1, 夏季)



(a) 計算領域



(b) 海底地形

図-3.2.3 ブシネスクモデルによる再現計算の計算領域（風波・うねり）

ところが、現地観測結果からもわかるように、当該観測期間における概ね周期5s以下の風波は、沖から港内へ侵入するというよりも強風により港内で発生していると考えられる。したがって、海上風により発生する風波の造波ソースを持たないブシネスクモデルでは、これらの波はそもそも適用対象外として扱ったほうが良さそうであり、必要に応じて、SMB法等によって別途算定した港内発生波を、ブシネスクモデルによる計算結果にエネルギー的に合成するなどの方法を用いることが考えられる。もっとも、大型の貨物船やフェリーなどの船舶に対する港内静穏度や荷役稼働率の算定においては、一般的に、周期5s未満の短周期波によって荷役障害が発生することを考慮する必要はほとんどないであろうと思われる（港内発生波が生じる強風時には船体に変動風が作用し、むしろ、これによる船体動揺への悪影響が懸念される）。

したがって、ここで行う再現計算および後述する港内静穏度解析においては、計算容量や計算時間の制約、対象波の起源、あるいは対象となる係留船舶の動揺特性を考慮して、港内発生波と思われる短周期成分は無視し、周期5s以上を対象とした入射波スペクトルと計算格子幅を設定して実施することとした。

選定した5時刻において、各地点で観測された周波数スペクトルを図-3.2.1に示す。さらに、これらの観測時刻において、港外のSt.1で観測された方向スペクトルをそれぞれ図-3.2.2に示す。各図では、中央に横軸を方位、縦軸を周期とした方向スペクトル値のコンター図、その右側に周期（周波数）スペクトル図、上方に2次元方向スペクトル（方向スペクトルの周波数積分値）を示している。いずれの時刻も周期（周波数）スペクトルは一山型、2次元方向スペクトルは主波向に対して対称となっていることから、ブシネスクモデルによる再現計算では、標準的な方向スペクトルの関数形を用いて造波できることが確認された。なお、方向集中度はいずれも $S_{max}=25$ と推定した。

(2) 入射波条件および計算領域の設定

後述する港内静穏度解析では、那覇港NOWPHAS波浪観測地点において1998年～2002年に得られた沖波波浪出現頻度表を用いるため、その港内波浪変形計算に用いるブシネスクモデルの現地観測データに対する再現計算では、NOWPHAS観測地点の波浪

諸元を再現する入射波条件を設定することが望ましい。しかし残念ながら、今回の再現事象として設定した台風0514号による波浪擾乱時の代表5時刻においては、メンテナンス作業のためNOWPHAS波浪観測は実施されていなかった。そこで、前述の検討のとおり、NOWPHASによる波浪観測の復旧後の期間で有義波高、有義波周期、平均波向の相関が比較的高いことが確認された、St.1で得られた波浪諸元を再現計算の入射波条件として採用することとした。

一方、ブシネスクモデルによる再現計算で設定した計算領域を図-3.2.3に示す。再現事象とした代表5時刻における主波向はすべてNNWであったため、この向きの波が計算格子に対して直入射し差分計算による誤差の発生を極力抑制できるよう配慮した。海底地形の等深線図をみると、浦添地区港口部沖の北西側には最も浅い部分で水深約2mの浅瀬があり、とくに潮位が低く周期の長い波が来襲する場合などには大きな屈折変形を生じさせることが推測される。また、防波堤や岸壁は経済性等の観点から水深が浅い海域に設置される傾向にあり、港湾構造物周辺の水深は非常に浅くなっていることがわかる。これらのこと、および今回のブシネスクモデルによる再現計算では港外から来襲する周期5s以上の波の伝播変形に着目することから、計算領域の広さ等を勘案して、計算格子幅は $\Delta x=5m$ と設定した。

なお、入射境界上の水深は50mに一定とし、造波装置を用いた平面模型実験で行うのと同様に、計算領域内の海底地形と斜面によるすりつけを行っている。

入射境界は現地波浪観測点St.1よりも沖側に設定されているため、ここで造波されるべき入射波諸元はSt.1で得られたものと異なることが予想される。そこで、表-3.2.2に示すように入射波高を増大させ、St.1の地点で現地観測された波浪諸元が再現されるよう設定した。なお、表中の（）内は、エネルギー平衡方程式法を用いて同様にSt.1で観測波浪諸元となるよう入射波諸元を調整したときの、ブシネスク計算における入射境界上で得られた波高値との比を示している。すなわち、ブシネスクモデルにおいて方向集中度の比較的低い多方向不規則波（ $S_{max}=25$ ）を造波する場合には、沖波の到達波高に対し2割程度増幅させた波高を用いるのがよいと思われる。

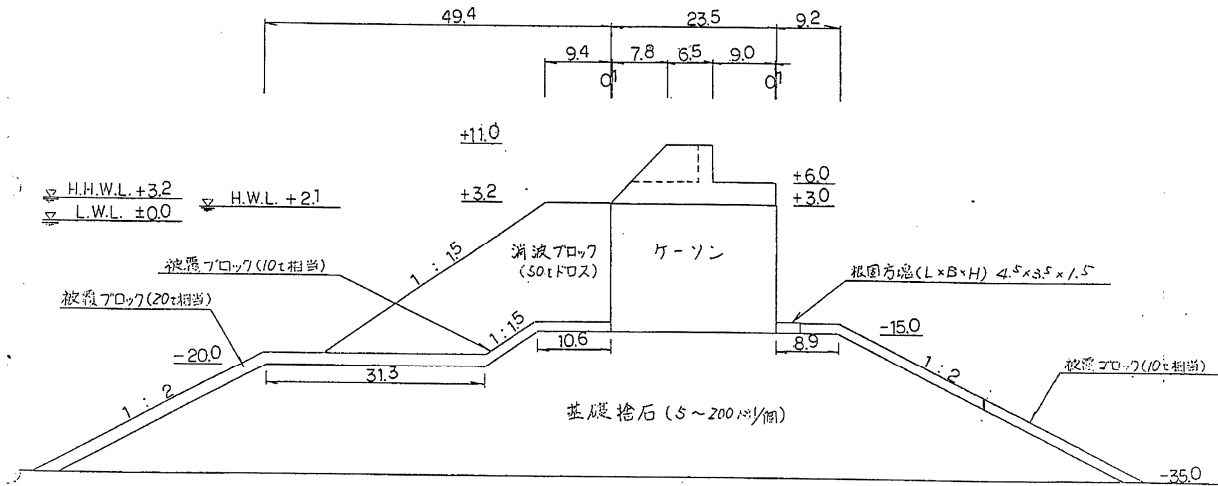
表-3.2.2 ブシネスクモデルによる再現計算の入射波条件（風波・うねり）

No.	月 日	時刻	ブシネスク入射波		波向き	潮位 (D.L.) [m]	S_{max}
			$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]			
1	9月5日	10時50分	5.56(1.31)	9.2	NNW	1.65	25
2	9月5日	19時30分	6.48(1.24)	10.9	NNW	2.21	25
3	9月5日	20時10分	7.40(1.25)	11.8	NNW	2.26	25
4	9月5日	20時50分	6.03(1.17)	10.7	NNW	2.23	25
5	9月6日	16時50分	4.03(1.23)	11.0	NNW	1.06	25

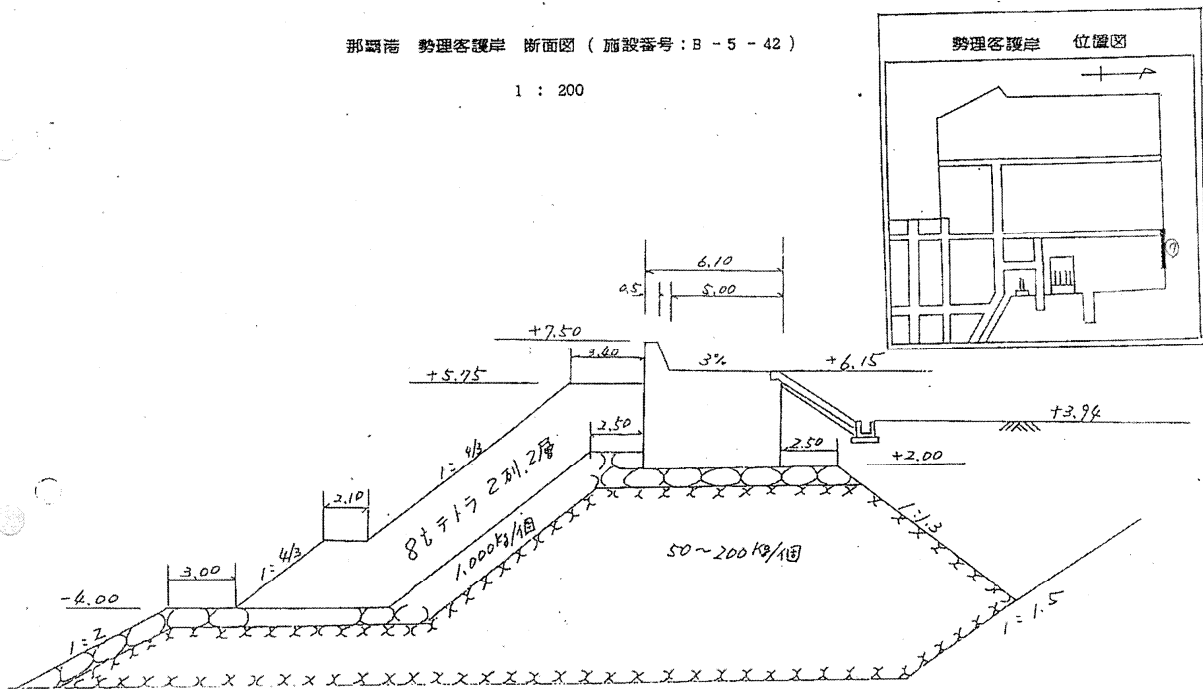
(3) 境界条件およびその他の計算条件の設定

開境界には、沖側水深50mでの代表波の1波長幅のエネルギー吸収帯（スポンジ層）を設定した。一方、消波ブロック被覆堤による任意反射率や透過堤による透過率は、消波工（消波ブロック）の法面勾配（あるいは設置幅）や空隙率等の諸元をもとに透水層データを作成することで、入射波周期に応じて適切な波浪減衰が生じるので、計算の中で自動的に再現される。

したがって、構造物境界では目標とする反射率等の設定は行わず、代わりに図-3.2.4に示す各防波堤、護岸の標準断面図等を参考に消波工の諸元を詳細に設定し、透水層モデルによる任意反射境界を表-3.2.3のように設定した。なお、その他の構造物境界で行った境界処理は表-3.2.4に示すとおりである。また、ブシネスモデルによる再現計算で設定したその他の計算条件を表-3.4.5に示す。とくに差分時間間隔は $\Delta t=0.05s$ とした。



(a) 浦添第一防波堤



(b) 浦添地区護岸

図-3.2.4 消波ブロック被覆工を有する防波堤、護岸の標準断面図

表-3.2.3 透水層パラメータの設定（浦添第一防波堤，浦添地区護岸）

ブロック名	積み方	トン数[t]	体積V[m ³]	代表径d[m]	層流抵抗係数 α_0	乱流抵抗係数 β_0	空隙率 λ_0
ドロス	乱積	40	17.4	2.59	2100	2.2	0.575
テトラ	整積	50	20.0	2.71	1200	1.7	0.500

表-3.2.4 最新ブシネスクモデルにおける構造物境界の設定

No.	区分	境界処理法
1	消波ブロック被覆工(防波堤、護岸)	透水層モデルにより再現
2	直立スリット工(防波堤、護岸)	スポンジ層による目標反射率の設定
3	直立壁、自然崖	消波設定無し(完全反射境界)
4	海浜(自然、人工)	碎波 遡上モデルにより再現
5	その他(不明)	消波設定無し(完全反射境界)

表-3.2.5 最新ブシネスクモデルで設定した計算条件（風波・うねり）

主方向	NNW
格子間隔	5.0 [m]
格子数	1103×1247
時間間隔	0.05 [s]
Smax	25
成分波数	512
碎波計算	有り
碎波指標	0.5
底面摩擦係数	0.02
最低水深	遡上計算が可能
沖側水深	50.0 [m]
有効造波時間	1025 [s]

(4) 計算結果および再現精度の検証

再現事象として選定した5時刻の港内外の有義波高分布について、ブシネスクモデルによる再現計算結果を図-3.2.5に示す。それぞれ、台風0514号による波浪擾乱の発達期、ピーク期および減衰期に当たっているため、波高、周期はそれぞれ異なっているが、浦添地区港口部では港内側へ急激に屈折しながら波が港内に侵入し、護岸による反射と港内での浅水変形によって、浦添4、5号岸壁前面で波高の増大が見られること、およびこれらに比べ、新港地区への波の伝播はほとんど見られないことなどは、いずれの時刻にも共通した傾向である。

つぎに、St.1～St.5で得られた現地観測結果（5s以下の成分波を除く）と計算結果のうち、有義波高の比較を図-3.2.6に示す。ここで、有義波高の計算値はブシネスク計算によって各地点で得られた水面波形に対してゼロアップクロス法により算出したものである。また、空間的なバラツキの影響を排除するた

めに、現地波浪観測点を中心とした25m四方の範囲（計算格子で5×5格子）で得られた有義波高の平均値として定義した。St.2およびSt.4において計算結果は観測結果よりもやや大きめの値を示したが、有義波高分布に関して、ブシネスクモデルによる再現計算の精度は概ね良好であることを確認した。

また、St.1～St.5における現地観測波浪およびブシネスクモデルによる再現計算で得られた周波数スペクトルの比較を図-3.2.7に示す。計算では5s未満の周期は計算対象外としたので0.2Hz未満の波エネルギーを比較すると、計算結果は現地観測結果よりもやや大きめに算定されているものの、とくに波浪擾乱の発達期には各観測地点とも、計算値の周波数スペクトルの形状は観測値を非常によく表していることがわかる。また、ピーク期、減衰期においても両者は比較的よく一致している。

なお、とくにSt.5を対象とした港内静穏度計算では、南よりの沖波が唐口から入射する影響を考慮する必要があると思われる。

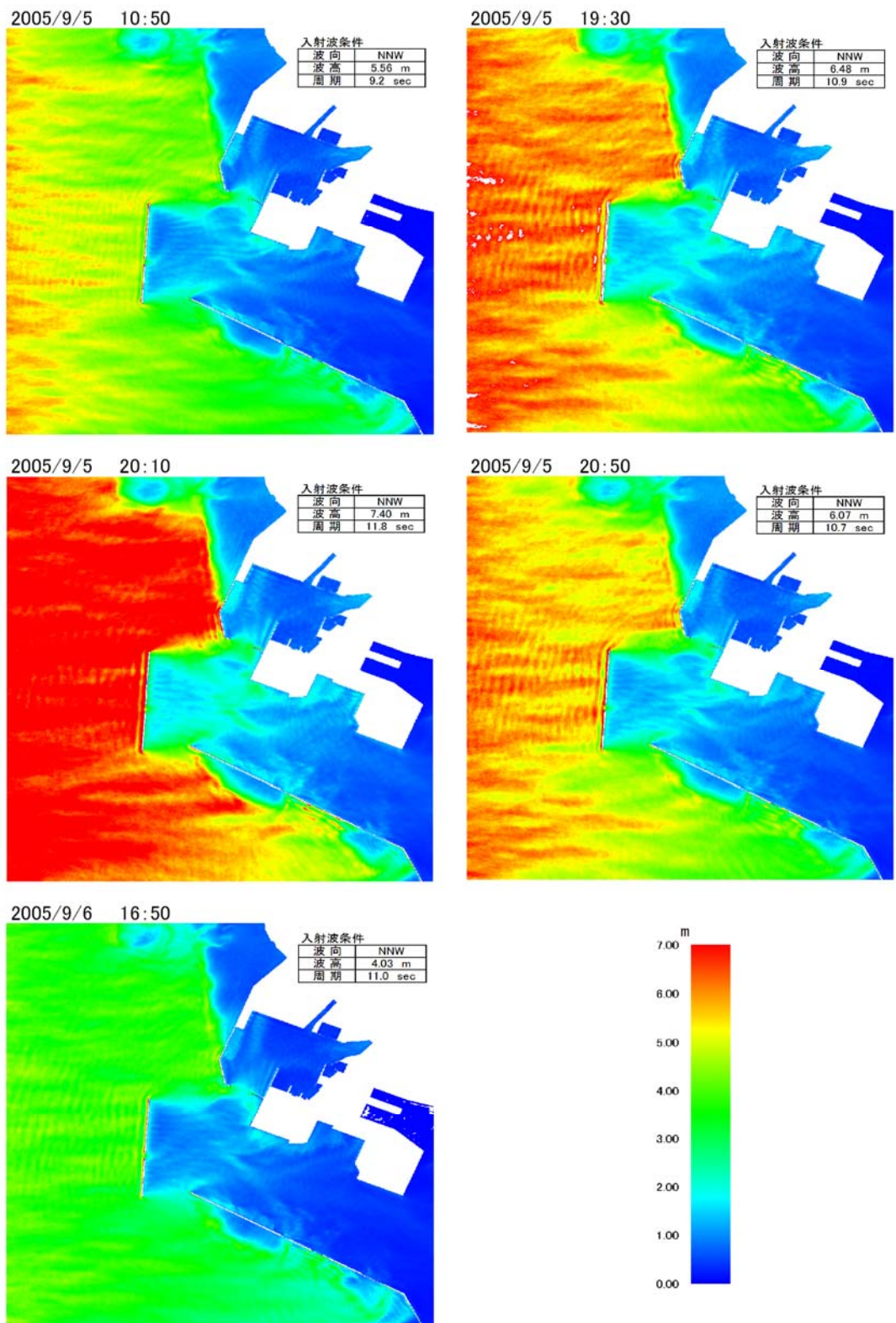
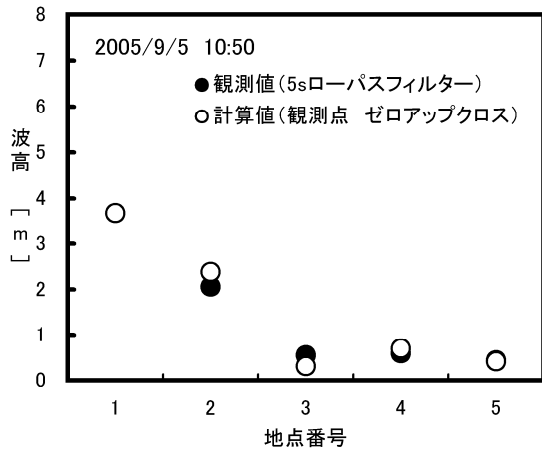
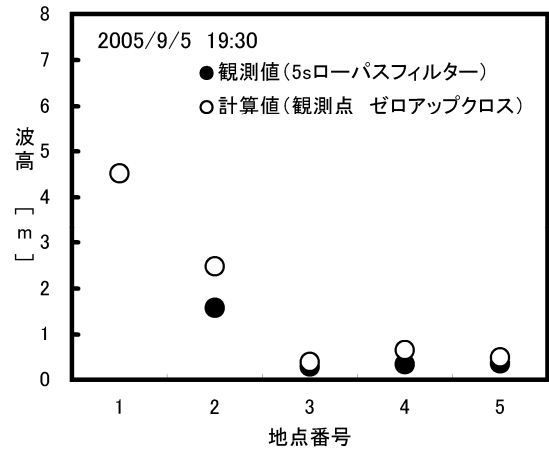


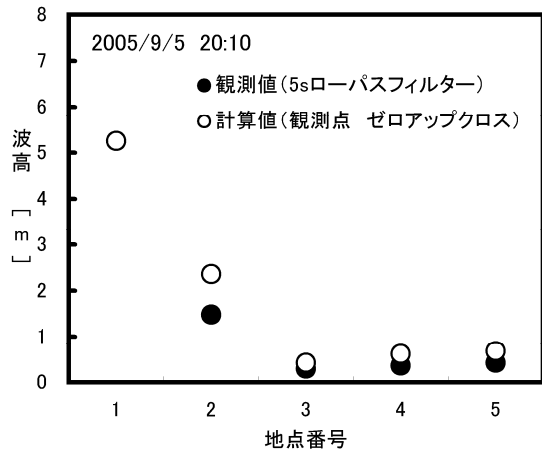
図-3.2.5 ブシネスクモデルによる波高分布算定結果（再現計算，風波・うねり）



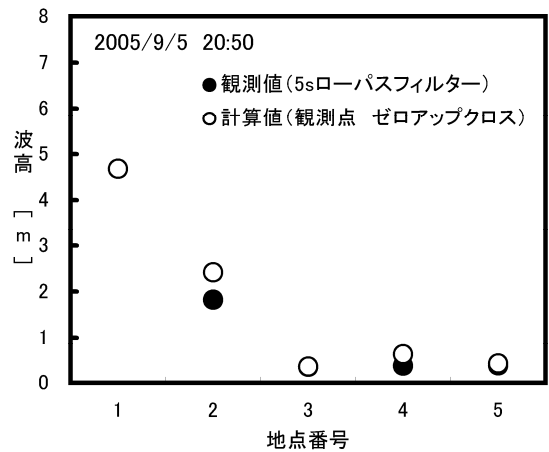
(a) No. 1, 9月5日10時50分



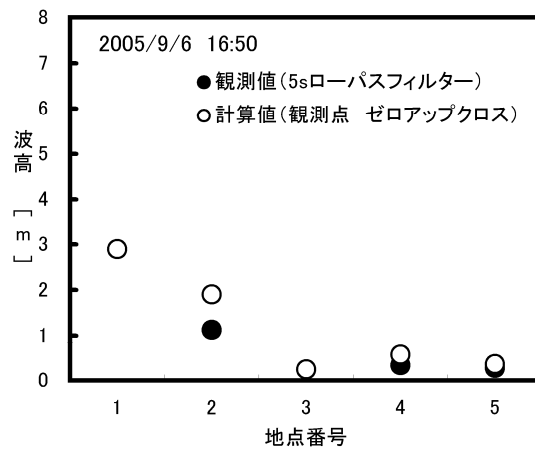
(b) No. 2, 9月5日19時30分



(c) No. 3, 9月5日20時10分

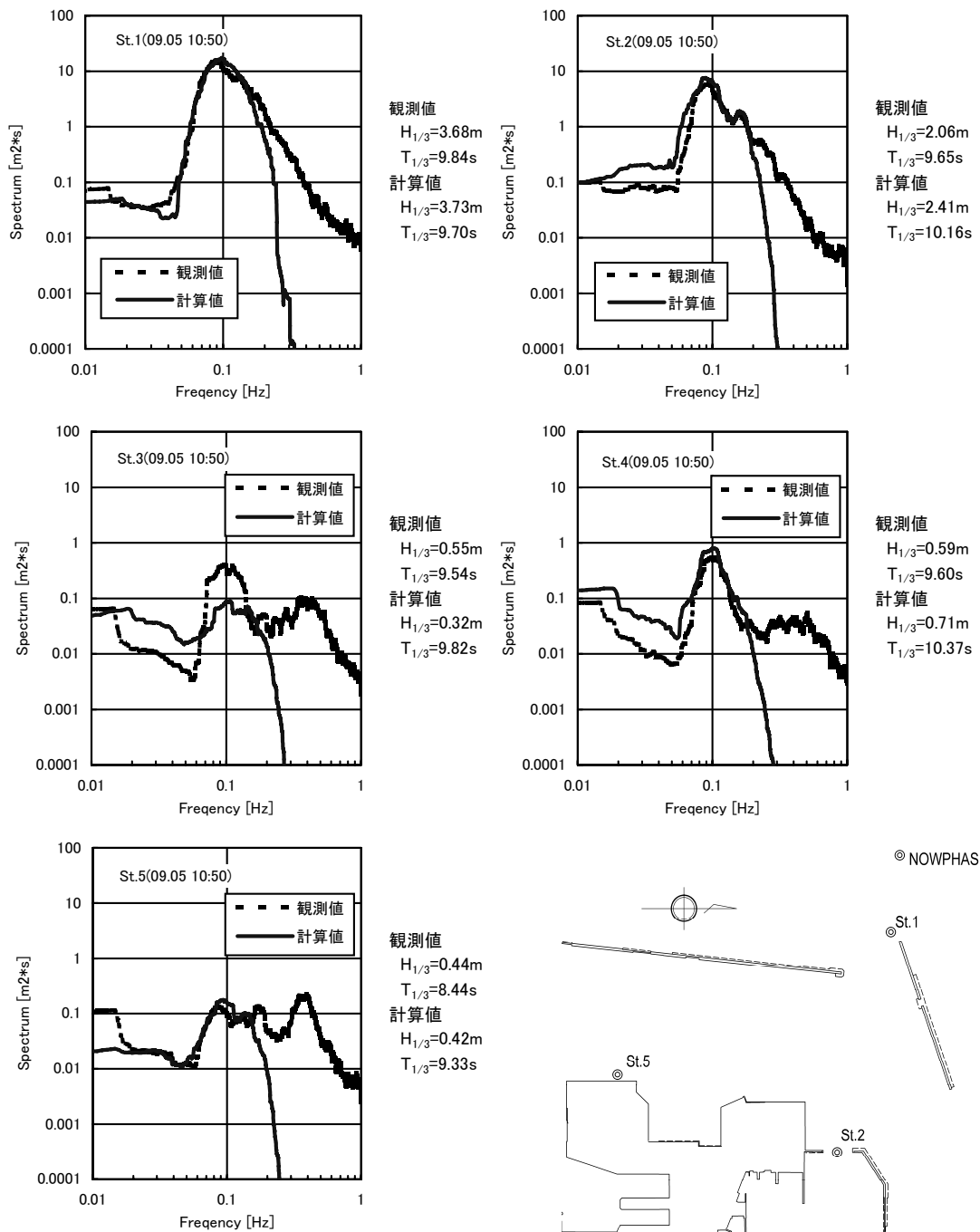


(d) No. 4, 9月5日20時50分



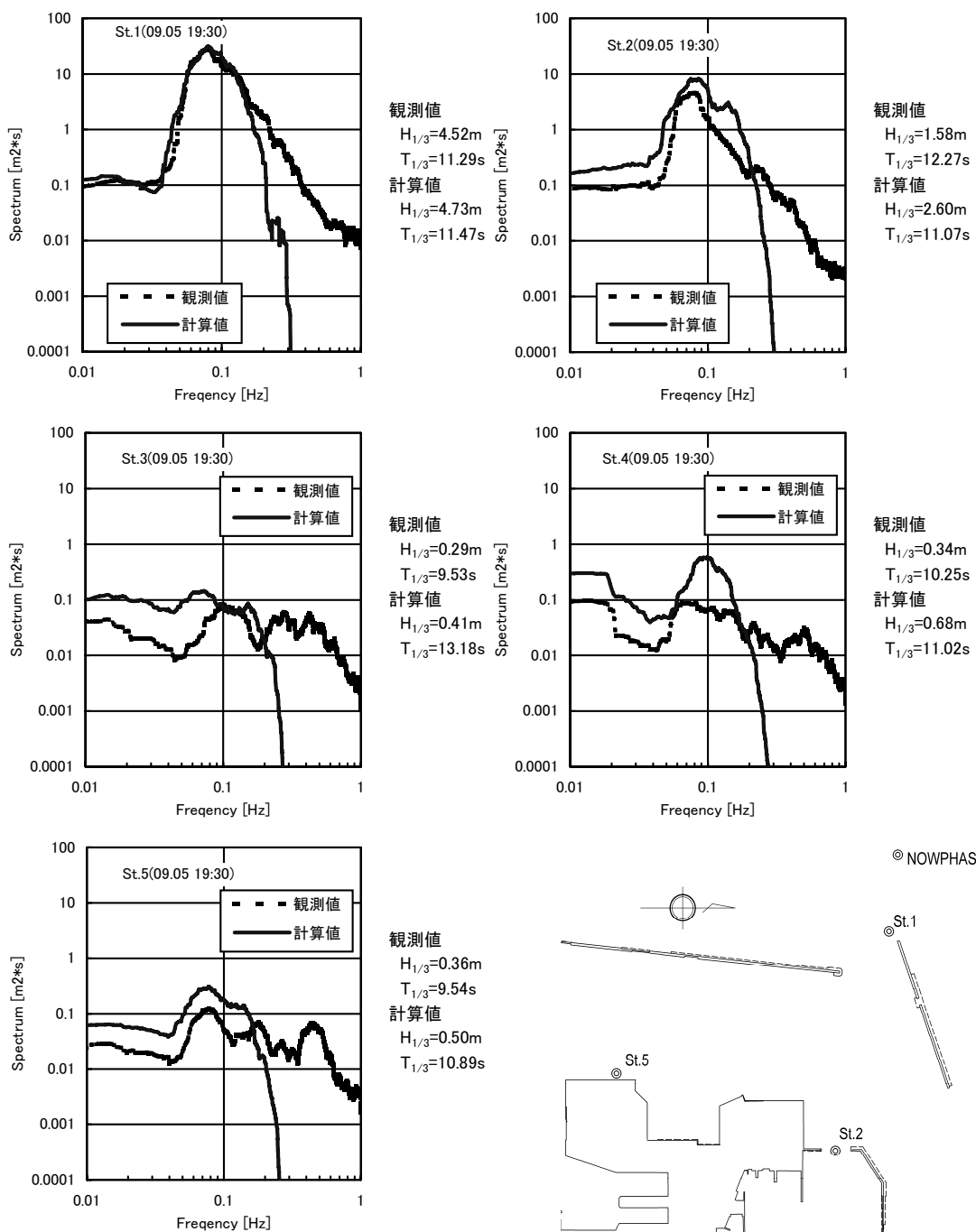
(e) No. 5, 9月6日16時50分

図-3.2.6 計算結果と現地波浪観測結果による有義波高の比較 (再現計算, 風波・うねり)



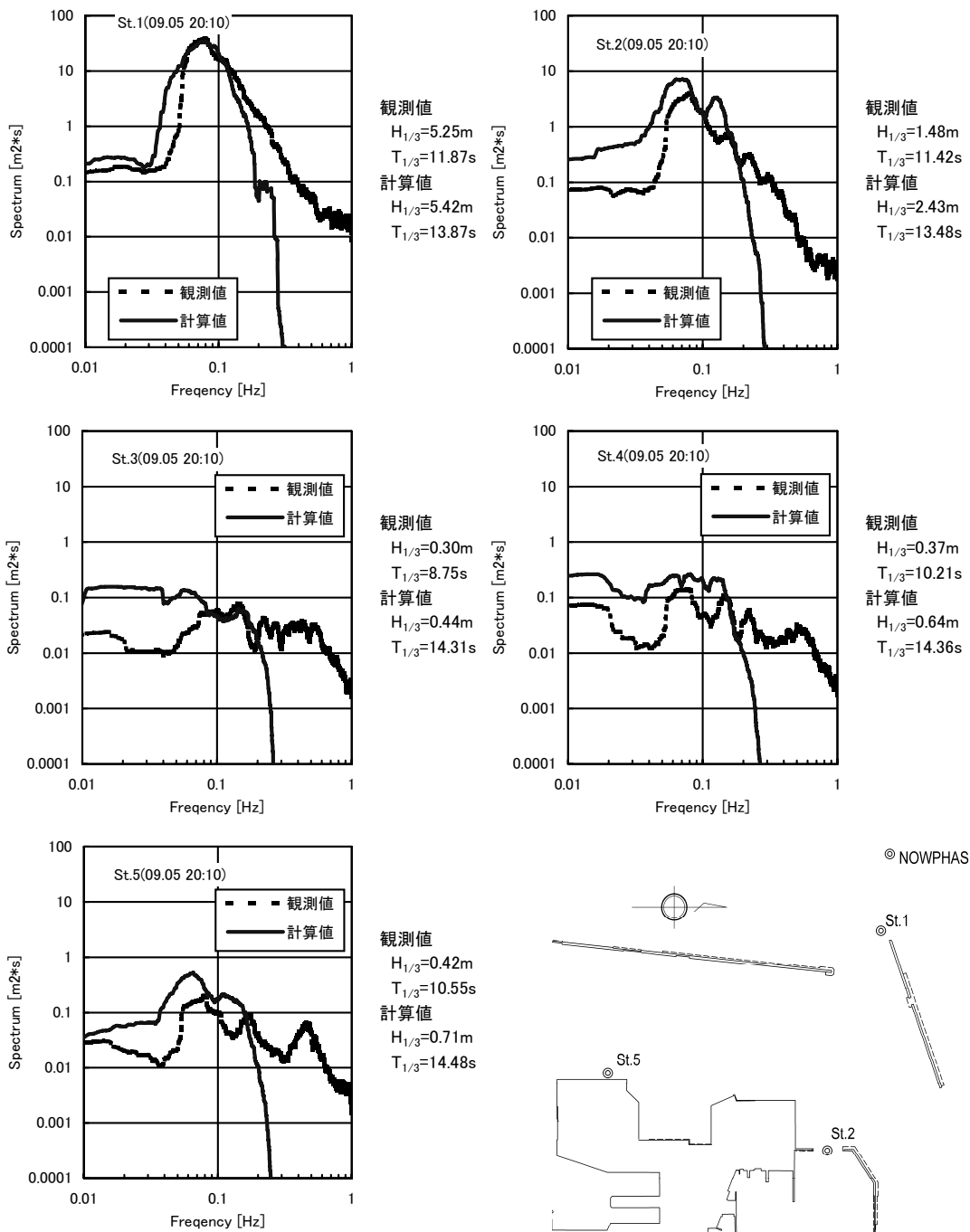
注) 観測値の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ は、観測結果から5s以上の成分を取り出し、ゼロアップクロス法により求めた。

図-3.2.7(a) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 1, 9月5日10時50分)



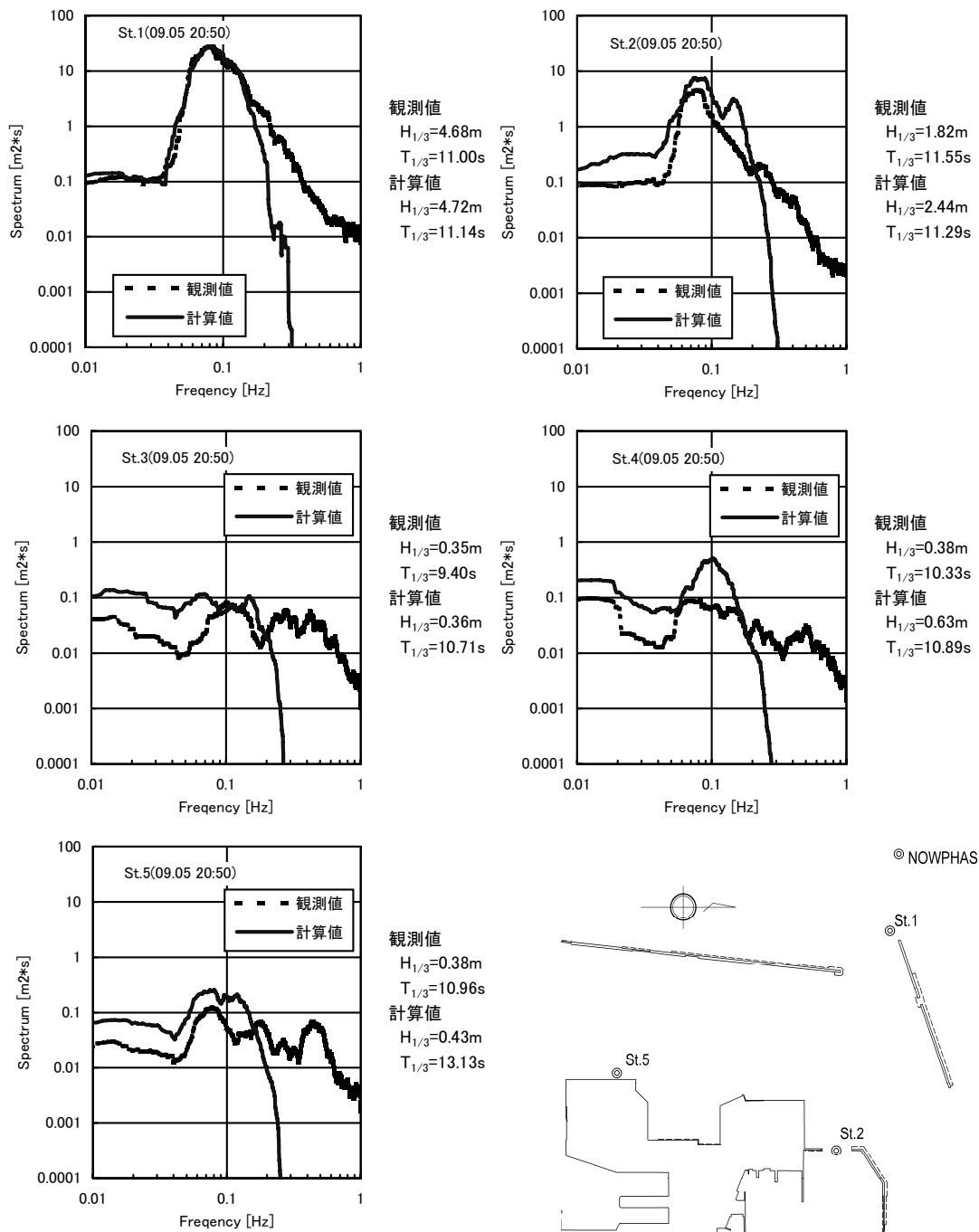
注) 観測値の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ は、観測結果から5s以上の成分を取り出し、ゼロアップクロス法により求めた。

図-3.2.7(b) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No.2, 9月5日19時30分)



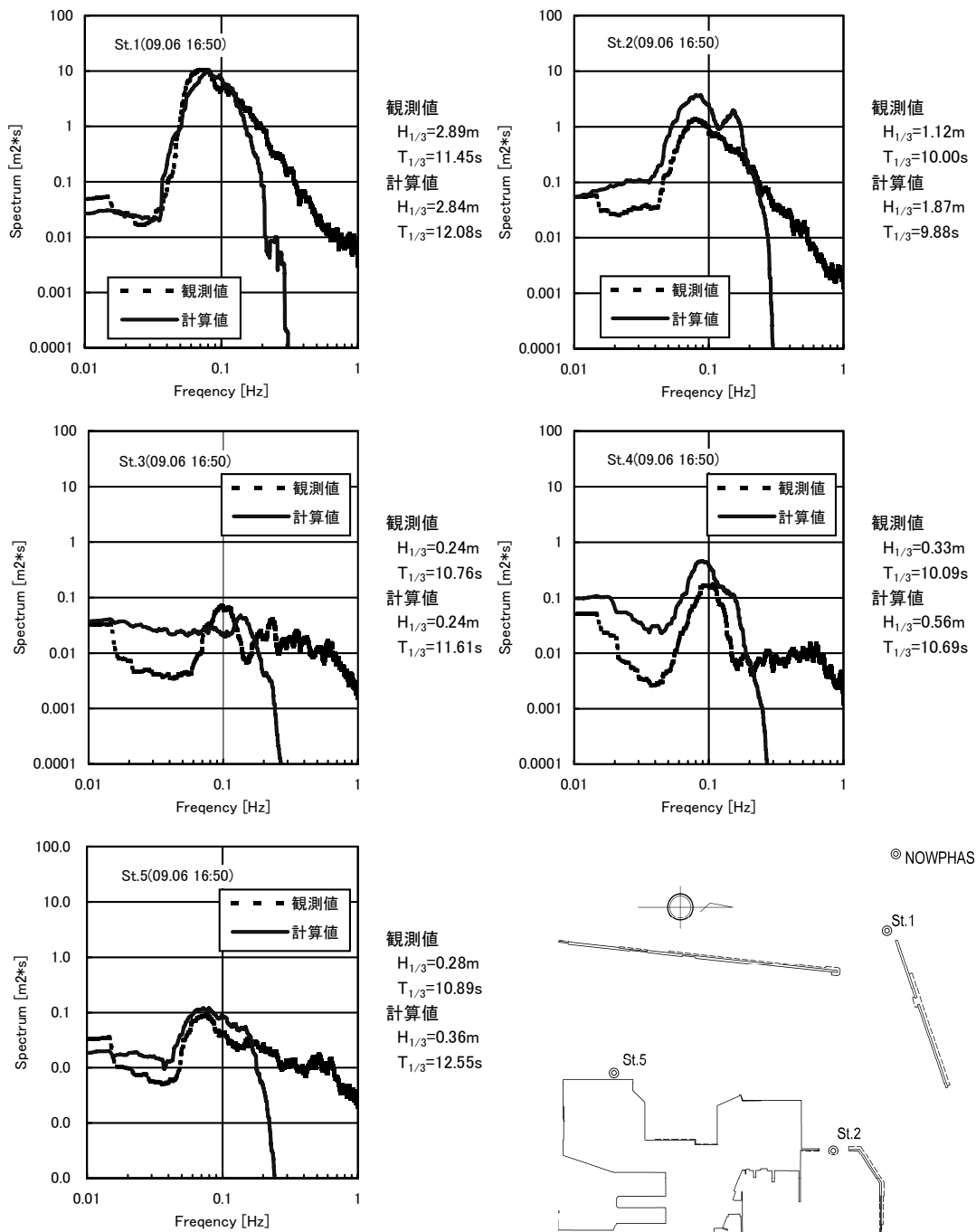
注) 観測値の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ は、観測結果から5s以上の成分を取り出し、ゼロアップクロス法により求めた。

図-3.2.7(c) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 3, 9月5日20時10分)



注) 観測値の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ は、観測結果から5s以上の成分を取り出し、ゼロアップクロス法により求めた。

図-3.2.7(d) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 4, 9月5日20時50分)



注) 観測値の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ は、観測結果から5s以上の成分を取り出し、ゼロアップクロス法により求めた。

図-3.2.7(e) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 5, 9月6日16時50分)

3.3 長周期波に対する再現計算

ここでは風波・うねりに対する再現計算と同様に、現地波浪観測結果のうち代表的な5時刻を選定し、そのとき得られた港内外の波浪諸元に対しブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.2）による再現計算を実施して、那覇港における当該モデルの計算精度を検証する。

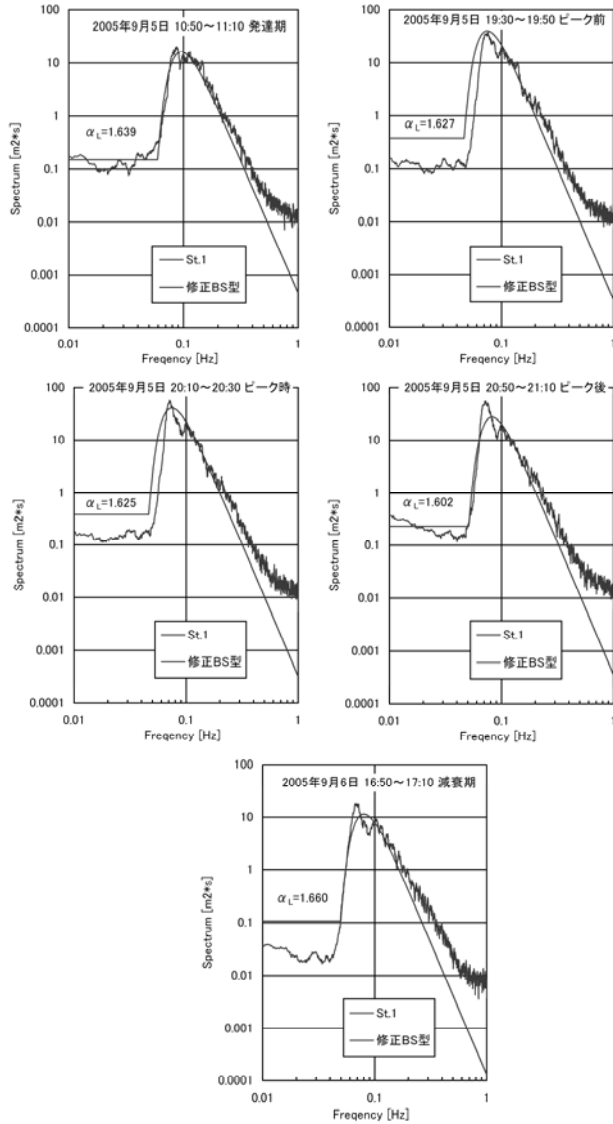


図-3.3.1 代表5時刻で推定された標準スペクトル（夏季）

(1) 再現事象の抽出

風波・うねりに対するものと同様に選定した代表5時刻において、各地点の観測波形に対して周波数スペクトル解析を行い抽出した長周期波の代表波高および代表周期を、標準スペクトルの推定に用いる係数 R_L 、 α_L と合わせて表-3.3.1に示す。なお、これらの解析には各時刻より40分間の時系列波形を用いた。

選定した5時刻において、現地観測地点St.1で推定された標準スペクトルを、観測波形から得られた周波数スペクトルとともに図-3.3.1に示す。台風0514号による波浪擾乱のピーク期および減衰期において、推定された標準スペクトルの長周期波成分の波エネルギーは観測結果よりも少し大きめであるが、いずれの時刻も標準スペクトルは観測スペクトルをほぼ近似できていることがわかる。一方、長周期波の波向観測手法については未だ十分な知見が得られていないため、本研究で取り扱う入射長周期波の波向は、同時刻の風波・うねりの波向と同一とした。また、方向集中度は、計算対象領域が沿岸域であることを考慮して一方向波とした。

なお、標準スペクトルにより長周期波のエネルギーレベルを近似することの妥当性を確認するために、夏季の現地波浪観測期間（平成17年9月2日9時30分～平成17年9月18日11時30分）に各地点で観測された風波・うねりの有義波高と長周期波の代表波高の相関を図-3.3.2に示す。いずれの地点も両者の相関は比較的高く、風波・うねりの波エネルギーが高いとき長周期波の波エネルギーも高くなることがわかる。ただし、浦添地区岸壁前面のSt.4では、風波・うねりの波高が0.5m程度のとき、長周期波の代表波高は10cmから20cmまで分布する傾向が顕著に現れていることから、浦添地区港内では風波・うねりよりも長周期波のほう伝播しやすい海域が存在することが示唆された（港外のSt.1に対する長周期波の波高相関を示した付図-A.2.5からは、那覇港内で長周期波が増幅される現象は確認されず、逆にある波高以上には増加しない傾向がみられた）。

(2) 入射波条件および計算領域の設定

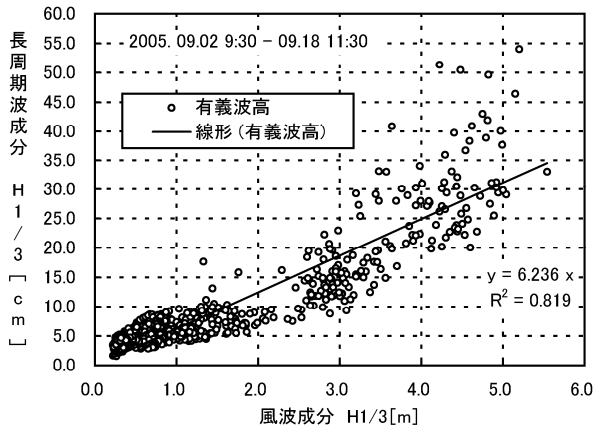
風波・うねりに対する再現計算と同様に、後述する港内静穏度解析における計算精度を検証するために実施する、ブシネスクモデルによる現地観測データに対する再現計算では、NOWPHAS波浪観測地点の波浪諸元を入射波条件として設定する

表-3.3.1 再現事象の抽出（長周期波）

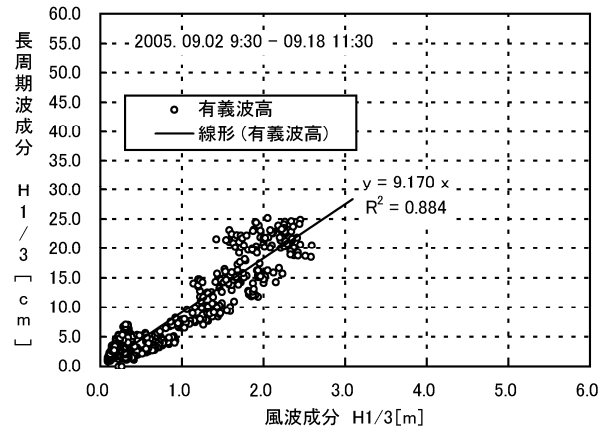
No.	年月日	時刻	St.1				St.2				St.3				St.4				St.5			
			$H_{L1/3}$ [m]	$T_{L1/3}$ [s]	RL	α_L	$H_{L1/3}$ [m]	$T_{L1/3}$ [s]	RL	α_L	$H_{L1/3}$ [m]	$T_{L1/3}$ [s]	RL	α_L	$H_{L1/3}$ [m]	$T_{L1/3}$ [s]	RL	α_L	$H_{L1/3}$ [m]	$T_{L1/3}$ [s]	RL	α_L
1	2005.9.5	10:50	0.22	39.0	0.06	1.64	0.21	36.9	0.10	1.59	0.09	52.7	0.11	1.57	0.12	63.6	0.18	1.52	0.12	48.1	0.15	1.54
2	2005.9.5	19:30	0.31	39.2	0.07	1.63	0.25	40.0	0.14	1.55	0.12	51.1	0.22	1.50	0.19	77.4	0.37	1.44	0.11	45.8	0.18	1.52
3	2005.9.5	20:10	0.33	39.5	0.07	1.62	0.22	41.4	0.12	1.56	0.11	50.1	0.21	1.51	0.16	71.2	0.29	1.47	0.12	52.3	0.19	1.51
4	2005.9.5	20:50	0.39	51.7	0.08	1.60	0.25	36.2	0.12	1.56	0.12	48.2	0.21	1.50	0.18	65.9	0.31	1.46	0.11	46.2	0.20	1.51
5	2005.9.6	16:50	0.15	45.1	0.05	1.66	0.14	40.9	0.09	1.59	0.06	56.9	0.17	1.53	0.12	77.7	0.27	1.48	0.07	48.5	0.18	1.52

ことが望ましい。しかし、代表5時刻においてNOWPHAS観測データが得られていないこと、および仮に得られていたとしても連続観測データではないことから、風波・うねりに関して比較的相関が高いことが示されたSt.1で得られた長周期波に関する波浪諸元を再現計算の入射波条件として採用することとした。

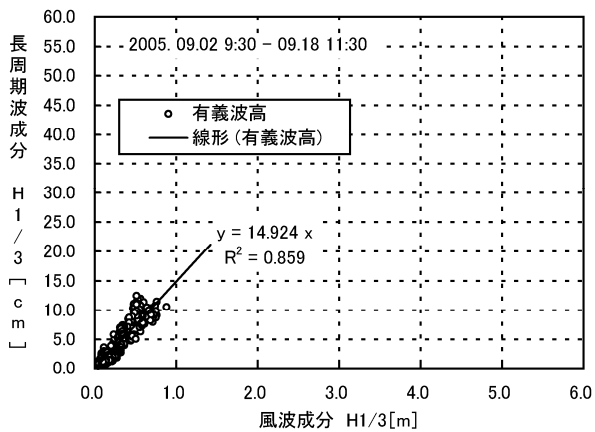
一方、ブシネスクモデルによる再現計算において設定した計算領域を図-3.3.3に示す。再現事象とした代表5時刻における風波・うねりの波向はすべてNNWであったため長周期波の波向もこれと同様とし、この向きが計算格子に対して直入射となるよう計算領域を設定した。長周期波を対象としたブシネスク計



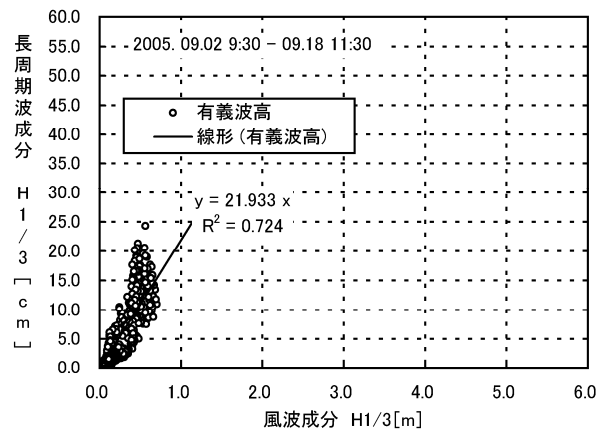
(a) St. 1



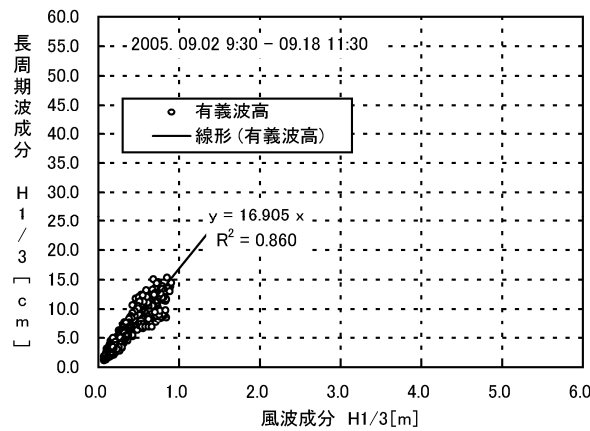
(b) St. 2



(c) St. 3



(d) St. 4

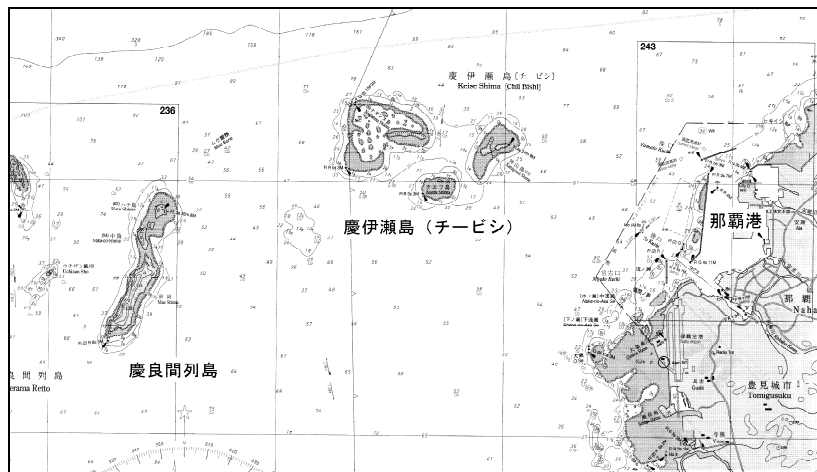


(e) St. 5

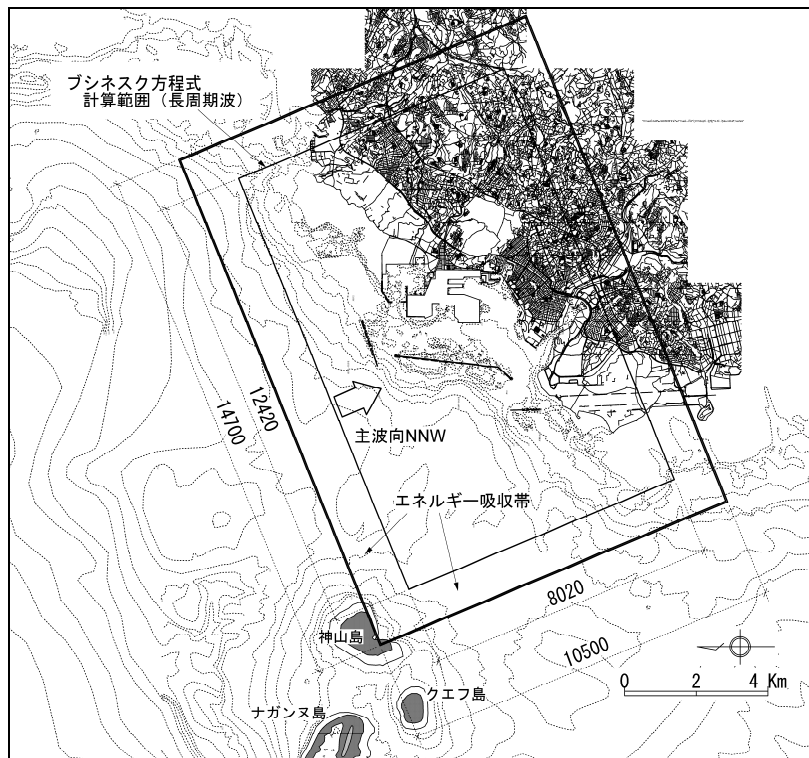
図-3.3.2 各現地観測地点で得られた風波・うねりと長周期波の波高相関 (夏季)

算では波長が長いために計算格子幅を大きく設定することができ、沖合を含む広い計算領域を設定することが可能である。ここで、那覇港西方の沖合約8kmには慶伊瀬島（チービシ）が位置し、さらに西南西には慶良間列島が位置しているため、これらの遮蔽効果により西方の海域から長周期波を含む波浪が伝播する影響を考慮する必要性は小さいと考えられる。また、St. 1地点の観測波形にはこれらの遮蔽効果が含まれていると思われる。

そこで、長周期波に対する再現計算に用いる計算領域の沖側端（入射境界）は風波・うねりに対するものと同様な海域に設定し、入射境界上の水深は50mに一定とした。また、計算格子幅は $\Delta x=20\text{m}$ とした。さらに、長周期波の波長スケールからするとこの海域はSt. 1からさほど離れておらず、港外側の広い海域においては長周期波のエネルギーレベル等は大きく変化しないものと考えられる。したがって、表-3.3.2に示すように、ブシネスクモデルの入射境界で造波する入射波諸元は、長周期波に関してSt. 1で得られたものをそのまま用いることとした。



(a) 那覇港沖の地形



(b) 計算領域

図-3.3.3 ブシネスクモデルによる再現計算の計算領域（長周期波）

表-3.3.2 ブシネスクモデルによる再現計算の入射波条件（長周期波）

No.	月 日	時刻	ブシネスク入射波		波向き	潮位(D.L.) [m]	S_{max}	St.1(標準スペクトルの各パラメータ)			
			$H_{L1/3}$ [m]	$T_{L1/3}$ [s]				$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	R_L	α_L
1	9月5日	10時50分	0.22	39.0	NNW	1.65	∞	3.98	9.2	0.059	1.64
2	9月5日	19時30分	0.31	39.2	NNW	2.21	∞	4.86	10.9	0.066	1.63
3	9月5日	20時10分	0.33	39.5	NNW	2.26	∞	5.54	11.8	0.068	1.62
4	9月5日	20時50分	0.39	51.7	NNW	2.23	∞	4.79	10.7	0.084	1.60
5	9月6日	16時50分	0.15	45.1	NNW	1.06	∞	3.06	11.0	0.049	1.66

表-3.3.3 最新ブシネスクモデルで設定した計算条件（長周期波）

主方向	NNW
格子間隔	20.0 [m]
格子数	525×735
時間間隔	0.15 [s]
Smax	999 (一方向波)
スペクトル	直線一定スペクトル, 1/300 ~ 1/20 [Hz]
ピーク周波数	1/1.13 $T_{1/3}$
成分波数	100
碎波計算	有り
碎波目標	0.5
底面摩擦係数	0.02
最低水深	遡上計算が可能
沖側水深	50.0 [m]
有効造波時間	2400 [s]

(3) 境界条件およびその他の計算条件の設定

計算領域外周において透過境界を実現するために設置するエネルギー吸収帯（スポンジ層）幅は、風波・うねりに対するものと同様に、代表波の1波長分とした。すなわち、長周期波の代表周期を50sとしたとき沖合の水深50mでの波長約1100mを、計算領域の外周に設置するエネルギー吸収帯幅とした。

一方、透水層モデルによる任意反射境界は長周期波に対してもそのまま適用できると考えられるので、消波ブロック被覆堤等に対する透水層パラメータの設定は前述の表-3.2.3と同様とした。また、その他の構造物境界における境界処理も、基本的には風波・うねりに対する再現計算で設定した表-3.2.4によるものと同等としたが、港内の直立構造物および不明な反射境界には、目標反射率を0.9程度としたスポンジ層を適宜設定した。

なお、長周期波に対する再現計算で設定したその他の計算条件を表-3.3.3に示す。とくに差分時間間隔は $\Delta t=0.15$ sとした。

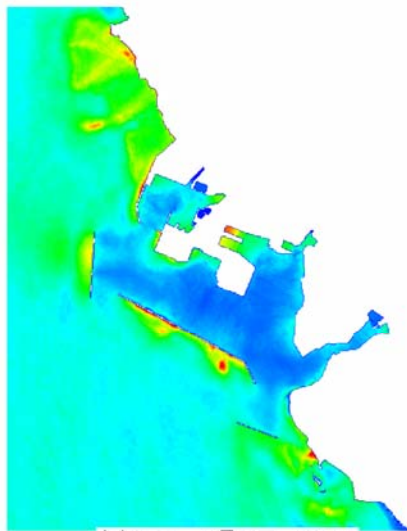
(4) 計算結果および再現精度の検証

再現事象として選定した5時刻の港内外の代表波高分布について、ブシネスクモデルによる再現計算結果を図-3.3.4に示す。風波・うねりと同様、それぞれ台風0514号による波浪擾乱の発達期、ピーク期および減衰期に当たっているため、波高、周期

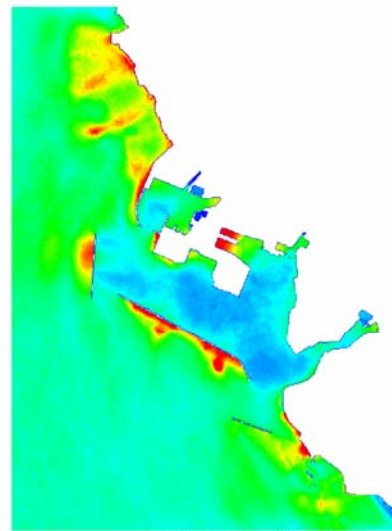
はそれぞれ異なっているが、浦添地区港内の各岸壁、特に浦添5号岸壁で波高の増大が見られること、およびこれらに比べ、新港地区の各岸壁では波高の増大がほとんど見られないなどは、いずれの時刻にも共通した傾向である。

つぎに、St.1~St.5で得られた現地観測結果と計算結果のうち、代表波高の比較を図-3.3.5に示す。なおこれらの計算値は、風波・うねりの場合と同様な方法により空間的なバラツキの影響が排除されている。いずれの時刻においても、浦添地区のSt.3およびSt.4で計算結果は観測結果よりもやや大きめの値を示していることから、浦添地区港内の各護岸において長周期波の反射率が実際よりも高めに設定されたことが懸念される点に注意を要する。しかし、浦添地区港口部のSt.2および新港地区のSt.5では両者はよく一致していることが確認できる。

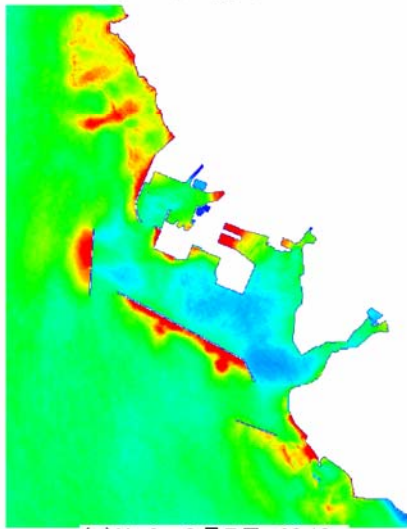
また、周期20s以上の長周期成分だけを対象として、St.1~St.5における現地観測波浪とブシネスクモデルによる再現計算で得られた周波数スペクトルを比較したものを図-3.3.6に示す。すべての地点において、計算結果は周期30s程度を境に長周期側で波エネルギーが増大する傾向がみられるが、観測スペクトル形状の特徴は比較的よく再現できており、再現性はほぼ良好であるといえる。



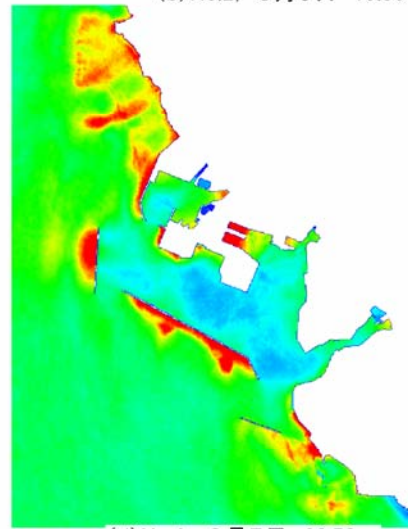
(a)No.1, 9月5日 10:50



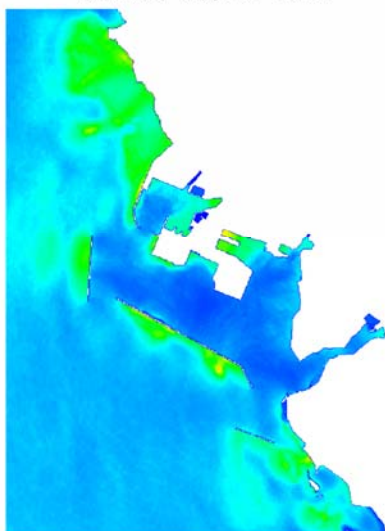
(b)No.2, 9月5日 19:30



(c)No.3, 9月5日 20:10

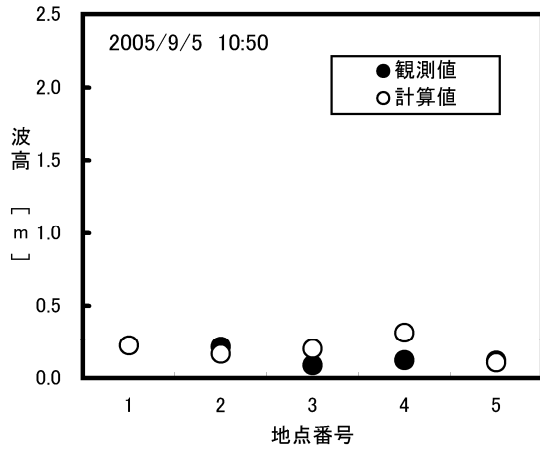


(d)No.4, 9月5日 20:50

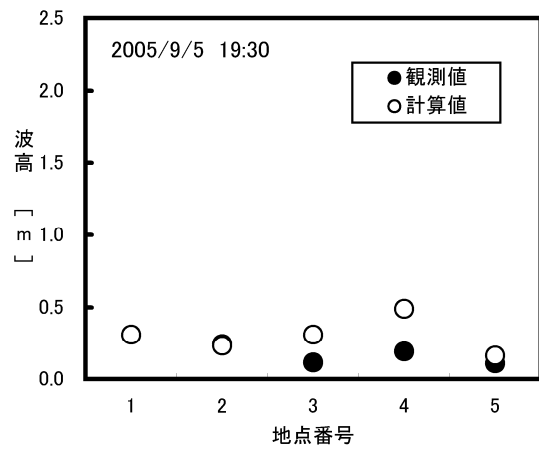


(e)No.1, 9月6日 16:50

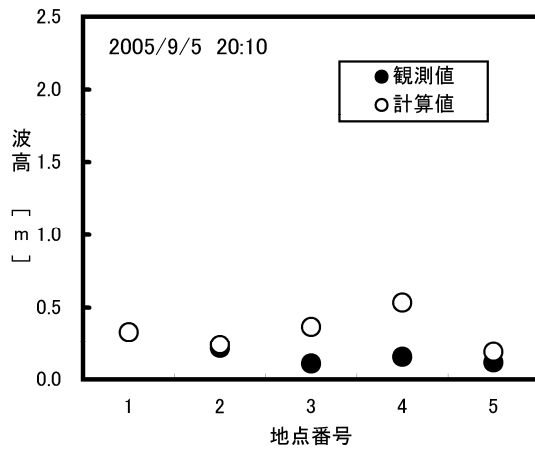
図-3.3.4 ブシネスクモデルによる波高分布算定結果（再現計算，長周期波）



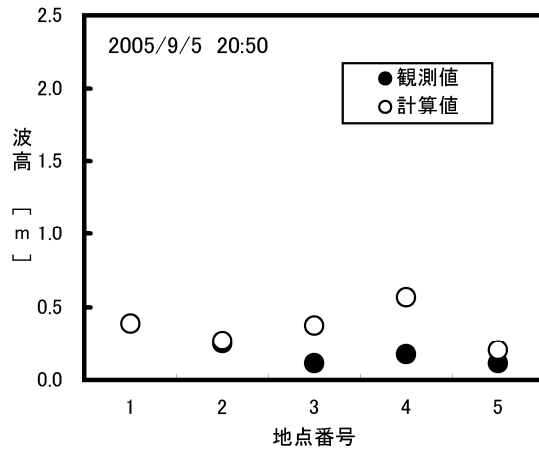
(a) No. 1, 9月5日10時50分



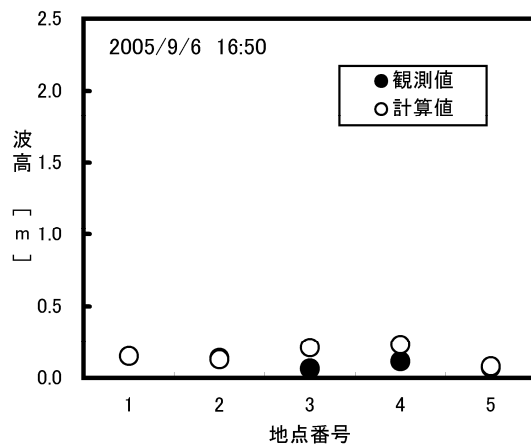
(b) No. 2, 9月5日19時30分



(c) No. 3, 9月5日20時10分



(d) No. 4, 9月5日20時50分



(e) No. 5, 9月6日16時50分

図-3.3.5 計算結果と現地波浪観測結果による有義波高の比較（再現計算，長周期波）

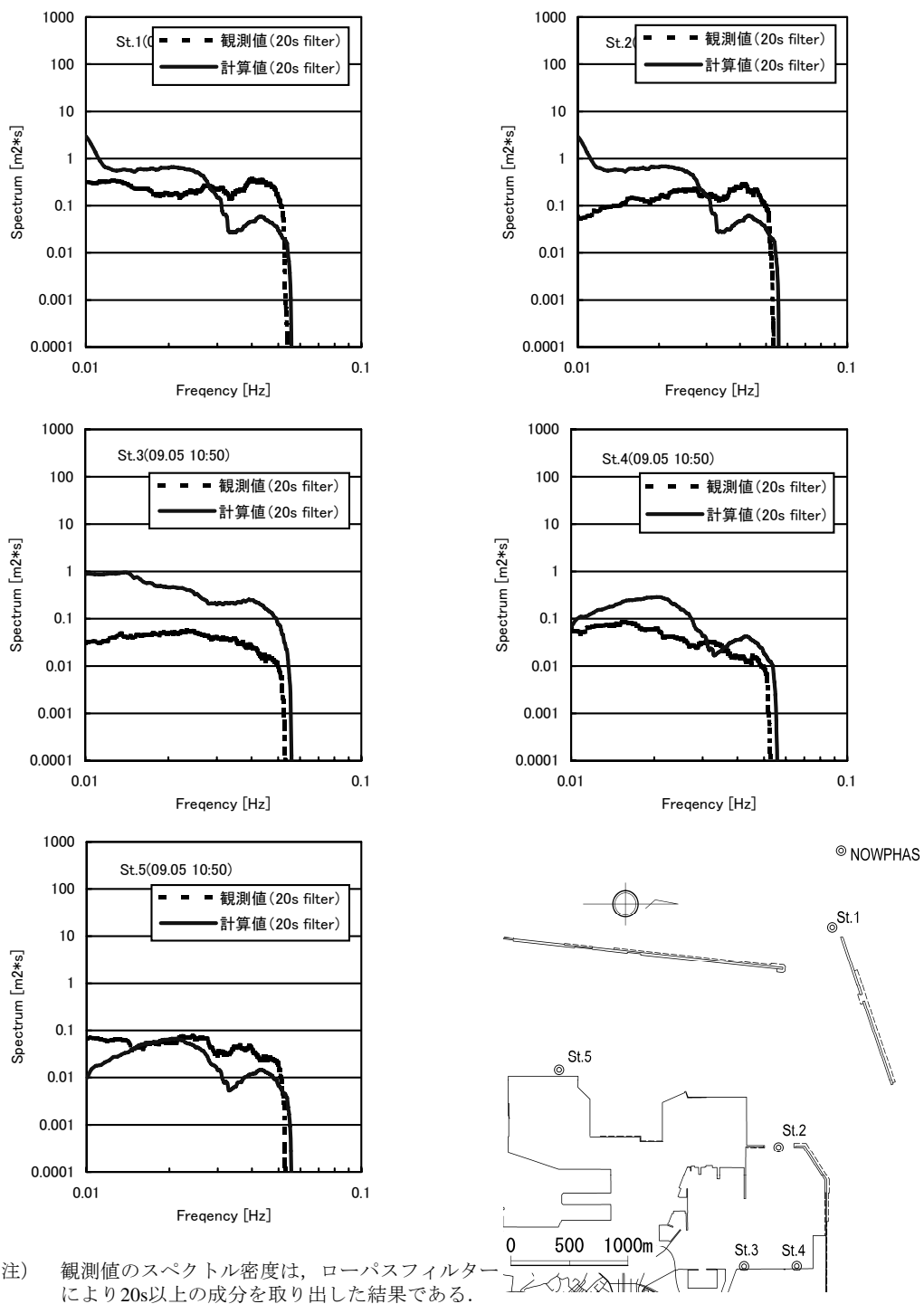
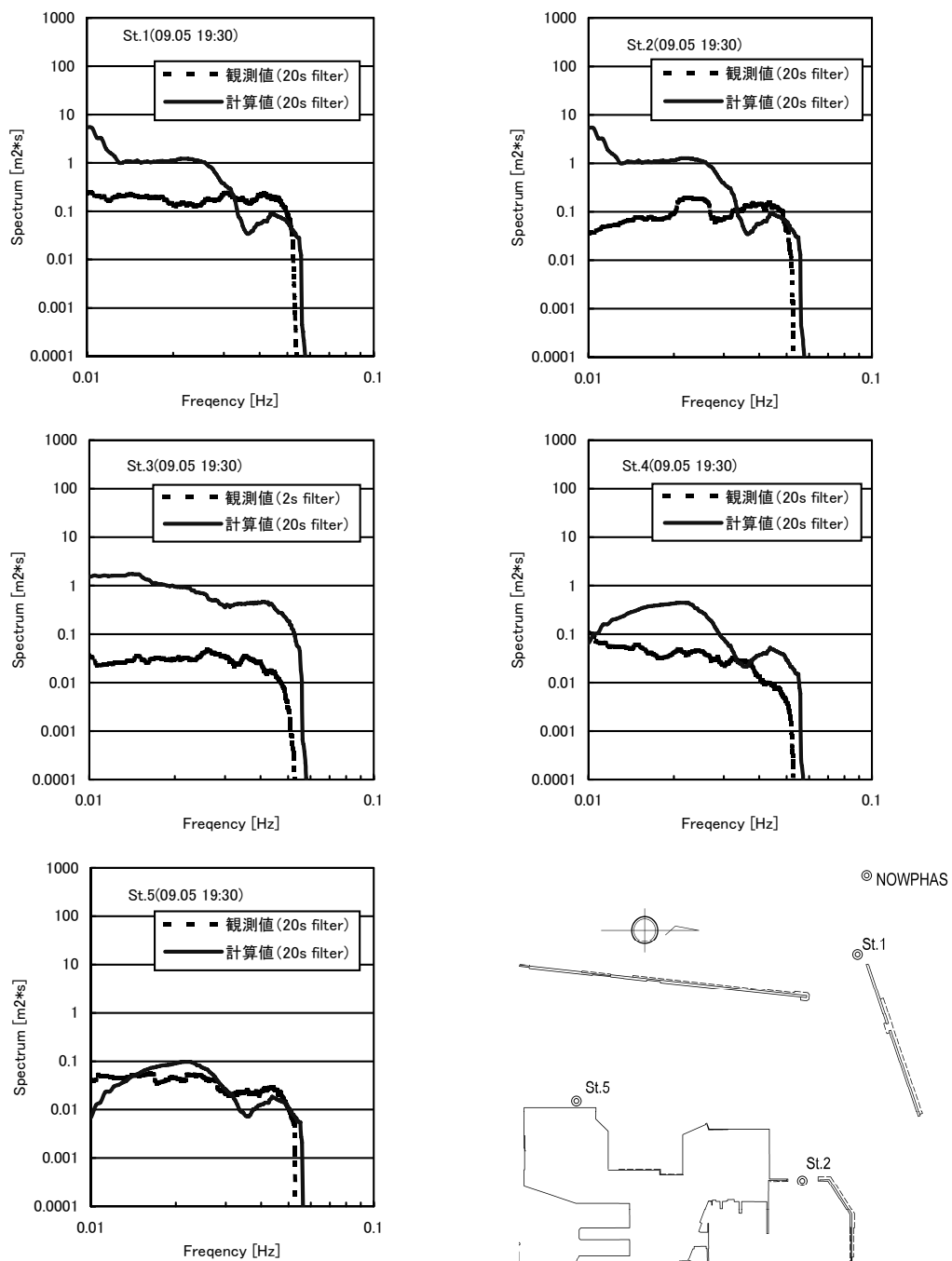
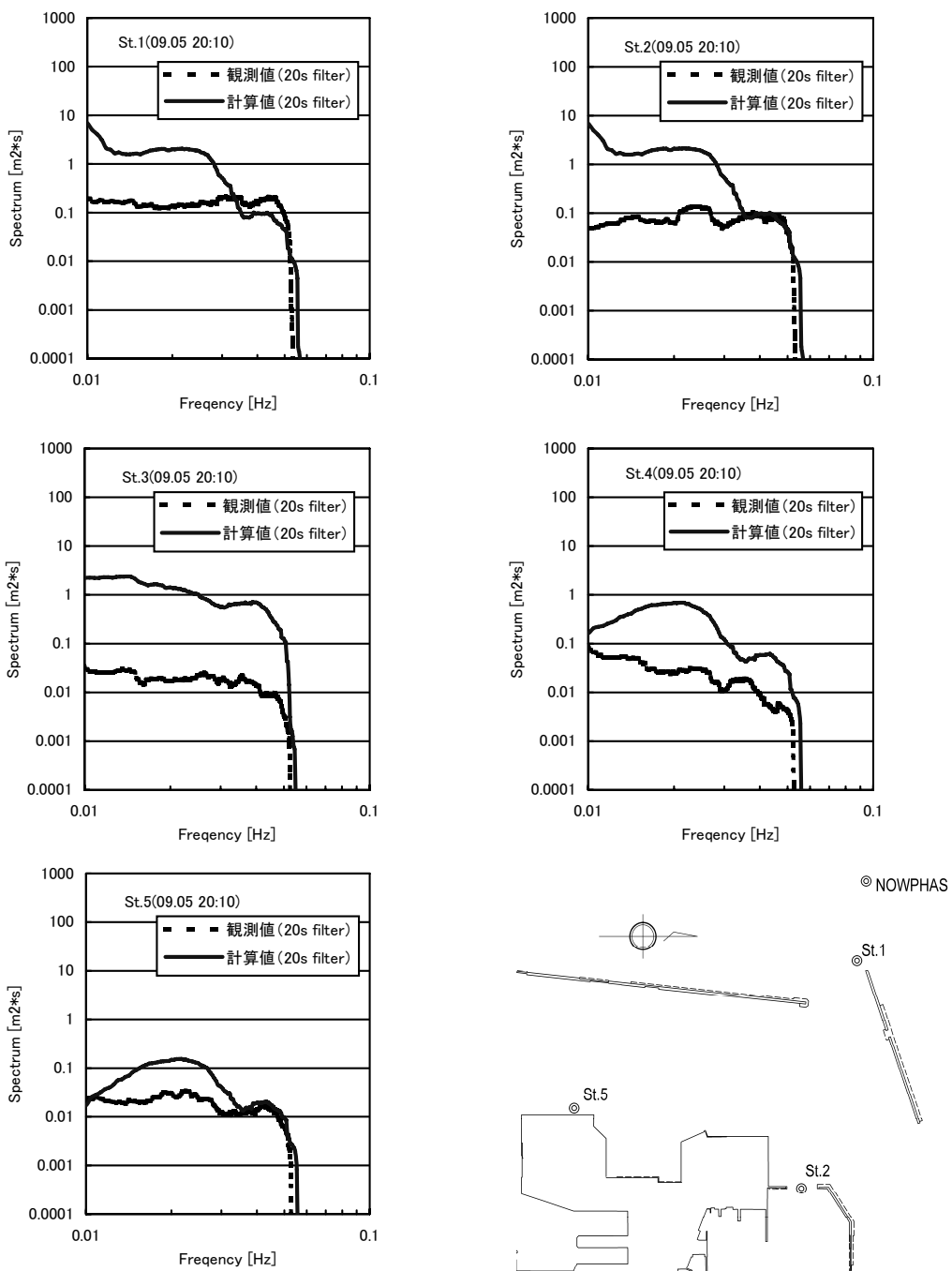


図-3.3.6(a) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 1, 9月5日10時50分)



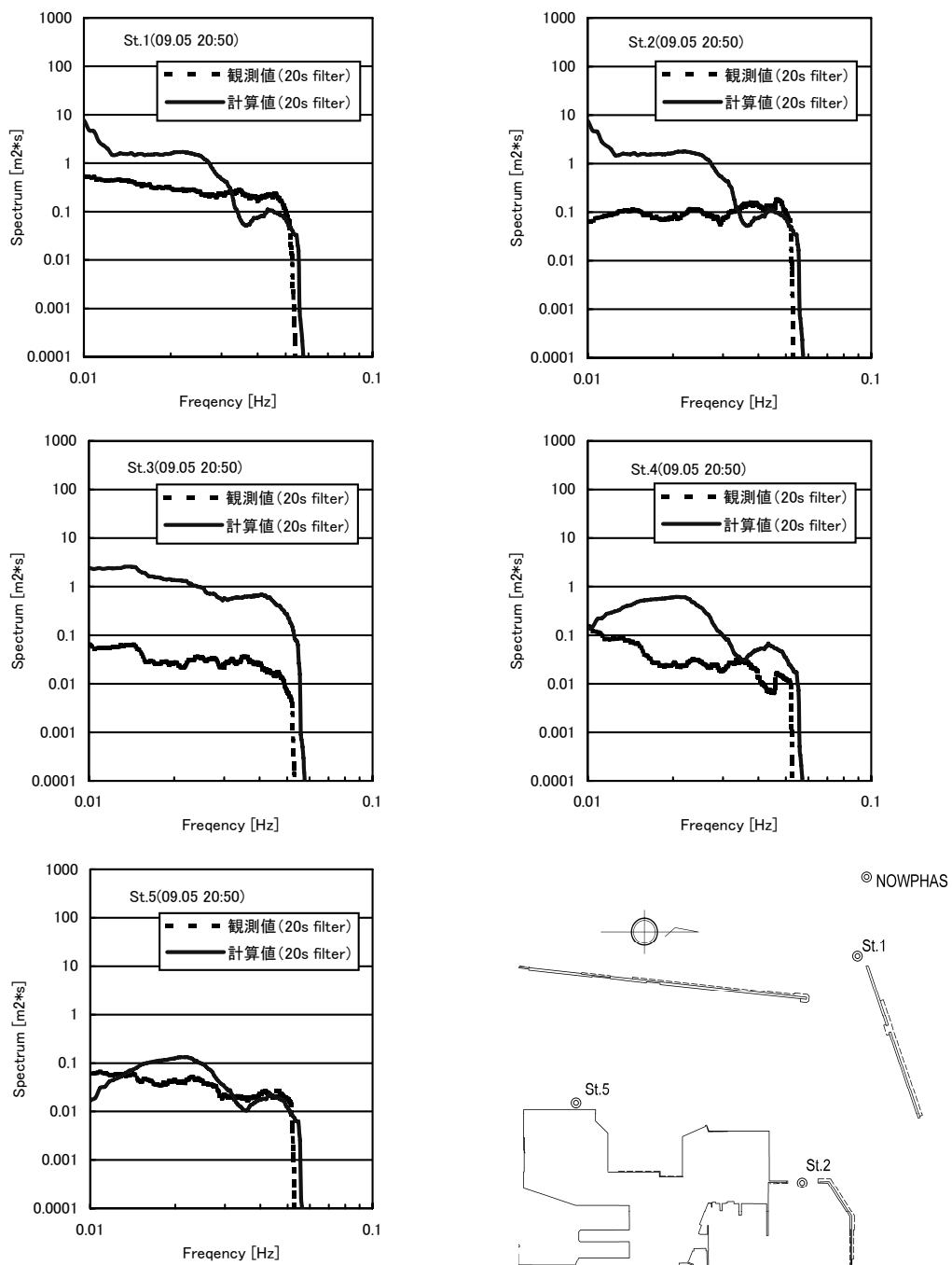
注) 観測値のスペクトル密度は、ローパスフィルターにより20s以上の成分を取り出した結果である。

図-3.3.6(b) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 2, 9月5日19時30分)



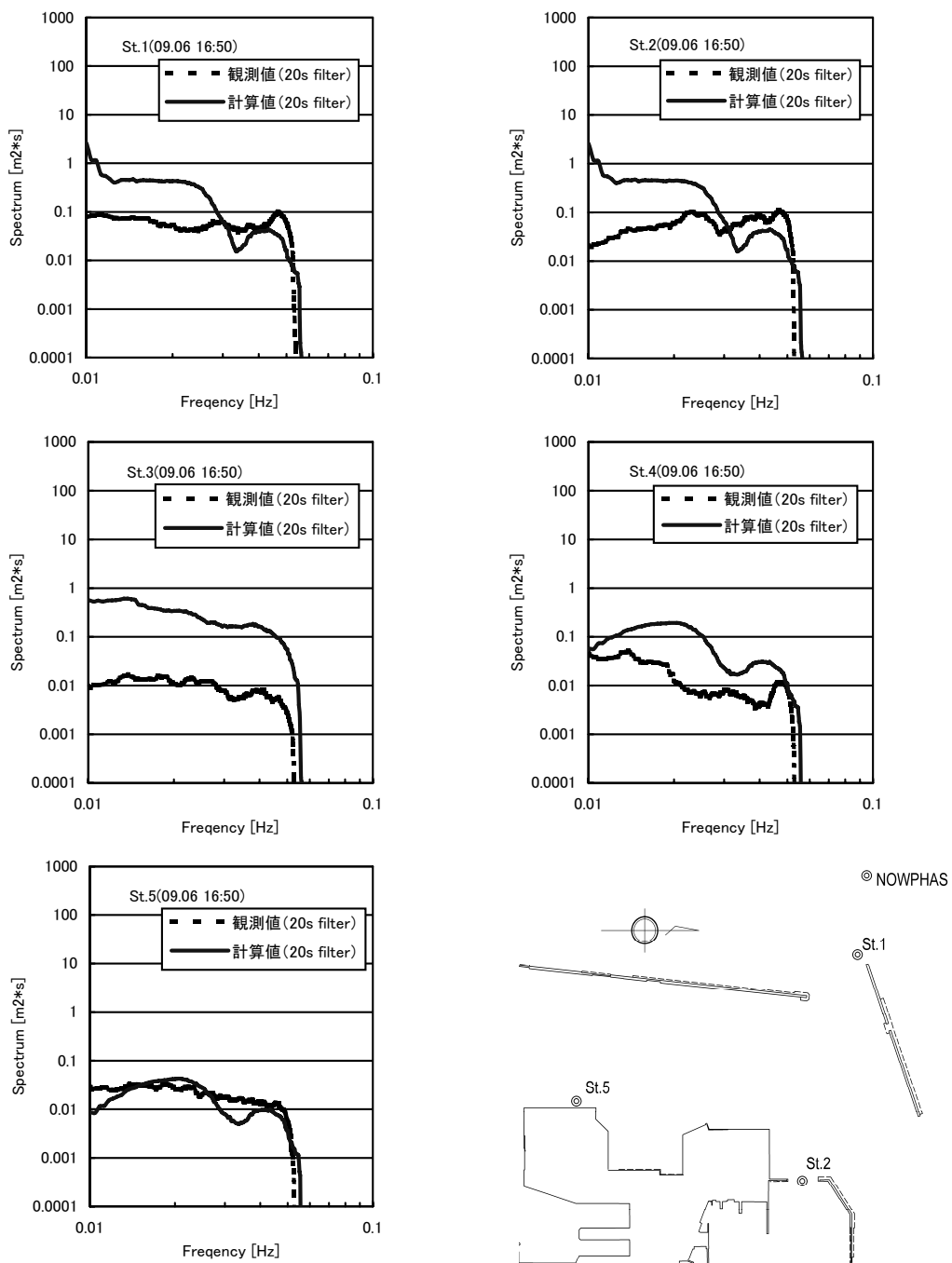
注) 観測値のスペクトル密度は、ローパスフィルターにより20s以上の成分を取り出した結果である。

図-3.3.6(c) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 3, 9月5日20時10分)



注) 観測値のスペクトル密度は、ローパスフィルターにより20s以上の成分を取り出した結果である。

図-3.3.6(d) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 4, 9月5日20時50分)



注) 観測値のスペクトル密度は、ローパスフィルターにより20s以上の成分を取り出した結果である。

図-3.3.6(e) 計算結果と現地波浪観測結果による周波数スペクトルの比較 (No. 5, 9月6日16時50分)

4. 高精度港内静穏度解析法の適用例 1-沖縄県那覇港-

ここでは、港内外に浅瀬や珊瑚礁が広がり航路や泊地とともに複雑な海底地形を形成している沖縄県那覇港を対象として、高精度港内静穏度解析を実施した。そして、港内波浪変形計算にはともに最新ブシネスクモデル (Ver5.2) を用いながらも、荷役稼働率の算定に従来法を用いた場合と標準解析法を用いた場合、および入射波高による港内波高比の変化を考慮した場合と考慮しない場合のそれぞれについて、対象岸壁における荷役稼働率を算定し、その違いを考察した。

4.1 沖縄県那覇港の概要

(1) 位置および地形条件

那覇港は沖縄本島の北西岸に位置し、西方沖の慶良間列島、あるいは北東沖の残波岬などの遮蔽域にあたる。したがって、長いフェッチを伝播して発達する高波浪やうねりは、那覇港沖では南西 (SW) や北西 (NW) 方向から来襲することが多いと考えられる。

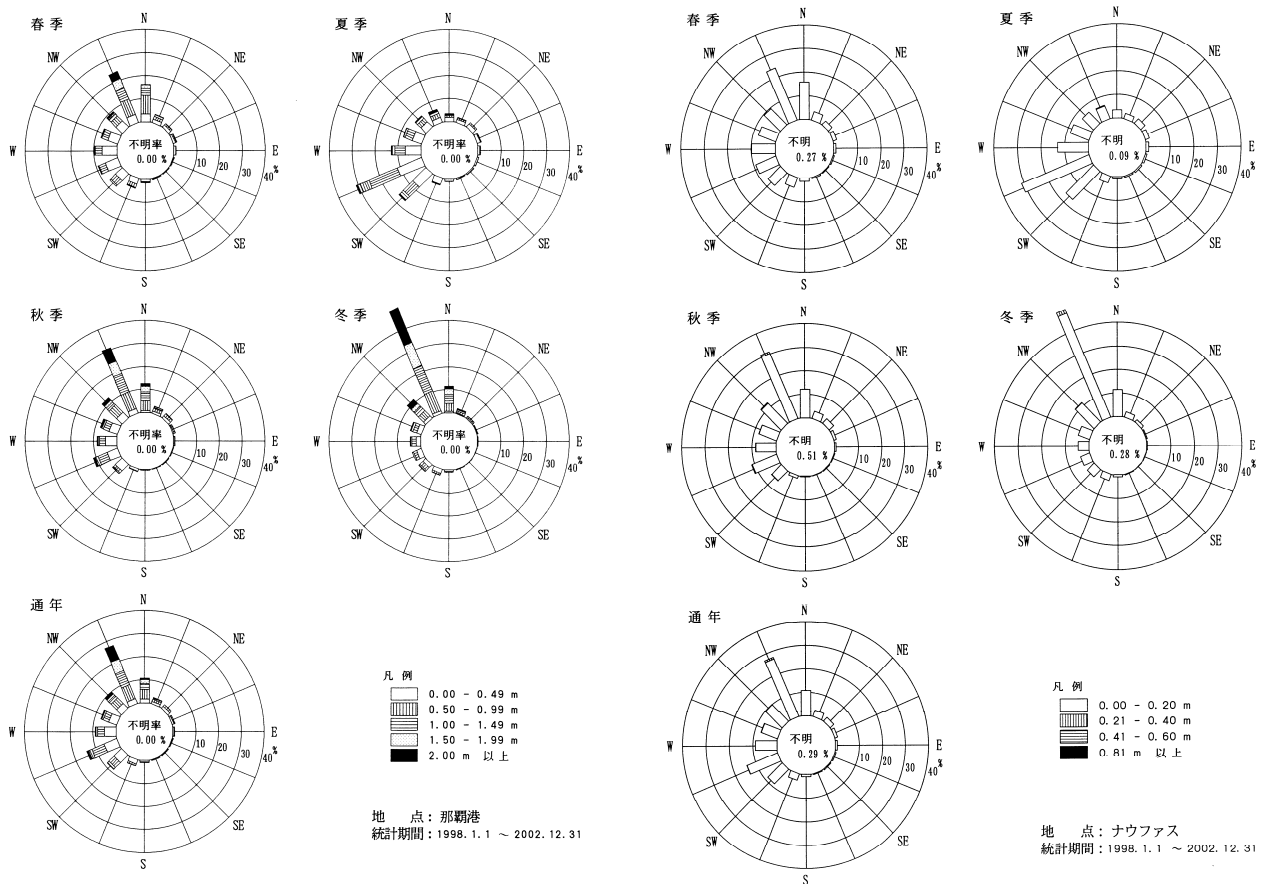
那覇港周辺および港内には沖縄本島周辺に生息した珊瑚礁

(裾礁) が分布し、図-3.2.3からもわかるように、沖合展開した岸壁や沖防波堤はこれらの浅瀬を利用して建設されてきた経緯がある。また、港口部や港内に点在する珊瑚礁上では砕波が生じ、これらは天然の消波構造物として機能していることが伺われる。

(2) 波浪および潮位条件

那覇港沖に設置されたNOWPHAS波浪観測計により取得された波浪データのうち、1998年から2002年までの5カ年に観測された風波・うねりの沖波波浪出現頻度分布を図-4.1.1(a)および表-4.1.1に示す。出現頻度が高い波向NNW, NW, WSWの高波浪のうち、NNWとNWは秋季から春季にかけて吹く北からの季節風、WSWと一部のNNW, NWは夏季から秋季にかけて来襲する台風とその吹き返しによるものと考えられる。

一方、長周期波の沖波波浪出現頻度分布の推定には、平石ら (1997) が提案した標準スペクトルによる方法を用いた。すなわち、那覇港において過去に実施された調査結果に基づき係数 $\alpha_t=1.65$ と設定し、これと風波・うねりの周波数スペクトルから、直線で近似される長周期波スペクトルのエネルギーレベルを推定することにより、長周期波高を式 (3.2.1) を用いて算



(a) 風波・うねり

(b) 長周期波

図-4.1.1 那覇港沖の波浪出現頻度分布図

表-4.1.1 那覇港沖の波浪出現頻度分布図 (風波・うねり)

(a) 波高一周期

地点: 那覇港

期間: 1998年1月~2002年12月

波高(m)	0.0 ~ 2.0	2.1 ~ 3.0	3.1 ~ 4.0	4.1 ~ 5.0	5.1 ~ 6.0	6.1 ~ 7.0	7.1 ~ 8.0	8.1 ~ 9.0	9.1 ~ 10.0	10.1 ~ 11.0	11.1 ~ 12.0	12.1 ~ 13.0	13.1 ~ 14.0	14.1 ~ 15.0	15.1 ~ 16.0	16.1 ~ 17.0	17.1 ~ 18.0	計	超過
0.00~0.25	1 (0.00)	20 (0.00)	16 (0.00)	276 (0.00)	750 (0.00)	339 (0.00)	40 (0.00)	6 (0.00)	1 (0.00)				3 (0.00)	3 (0.00)			1 (0.00)	1456 (0.00)	21834 (0.00)
0.26~0.50	2 (0.00)	23 (0.00)	172 (0.00)	1107 (0.00)	2365 (0.00)	1429 (0.00)	397 (0.00)	162 (0.00)	36 (0.00)	33 (0.00)	46 (0.00)	90 (0.00)	48 (0.00)	7 (0.00)	1 (0.00)			5918 (0.00)	20378 (0.00)
0.51~0.75	5 (0.00)		53 (0.00)	593 (0.00)	1368 (0.00)	1203 (0.00)	529 (0.00)	137 (0.00)	121 (0.00)	59 (0.00)	33 (0.00)	69 (0.00)	9 (0.00)			1 (0.00)	2 (0.00)	4182 (0.00)	14460 (0.00)
0.76~1.00			5 (0.00)	235 (0.00)	803 (0.00)	924 (0.00)	602 (0.00)	177 (0.00)	65 (0.00)	29 (0.00)	20 (0.00)	15 (0.00)	5 (0.00)	1 (0.00)				2881 (0.00)	10278 (0.00)
1.01~1.25			1 (0.00)	69 (0.00)	447 (0.00)	692 (0.00)	520 (0.00)	157 (0.00)	48 (0.00)	18 (0.00)	7 (0.00)	3 (0.00)	7 (0.00)		1 (0.00)			1970 (0.00)	7397 (0.00)
1.26~1.50				20 (0.00)	221 (0.00)	516 (0.00)	462 (0.00)	141 (0.00)	39 (0.00)	15 (0.00)	4 (0.00)	2 (0.00)	1 (0.00)					1421 (0.00)	5427 (0.00)
1.51~1.75					92 (0.00)	395 (0.00)	436 (0.00)	171 (0.00)	29 (0.00)	7 (0.00)	2 (0.00)	2 (0.00)						1134 (0.00)	4006 (0.00)
1.76~2.00					32 (0.00)	204 (0.00)	324 (0.00)	200 (0.00)	32 (0.00)	9 (0.00)	2 (0.00)	1 (0.00)						804 (0.00)	2872 (0.00)
2.01~2.25					9 (0.00)	98 (0.00)	263 (0.00)	198 (0.00)	37 (0.00)	11 (0.00)	2 (0.00)							618 (0.00)	2068 (0.00)
2.26~2.50						41 (0.00)	170 (0.00)	189 (0.00)	32 (0.00)	8 (0.00)	1 (0.00)							441 (0.00)	1450 (0.00)
2.51~2.75						15 (0.00)	119 (0.00)	167 (0.00)	35 (0.00)	6 (0.00)	1 (0.00)	1 (0.00)						345 (0.00)	1009 (0.00)
2.76~3.00						7 (0.00)	66 (0.00)	129 (0.00)	39 (0.00)	13 (0.00)	4 (0.00)							258 (0.00)	664 (0.00)
3.01~3.50						4 (0.00)	33 (0.00)	116 (0.00)	82 (0.00)	12 (0.00)	3 (0.00)							256 (0.00)	406 (0.00)
3.51~4.00						2 (0.00)	15 (0.00)	20 (0.00)	40 (0.00)	3 (0.00)	2 (0.00)							78 (0.00)	150 (0.00)
4.01~4.50							3 (0.00)	11 (0.00)	17 (0.00)									43 (0.00)	72 (0.00)
4.51~5.00							2 (0.00)	3 (0.00)	4 (0.00)									12 (0.00)	29 (0.00)
5.01~5.50								3 (0.00)	6 (0.00)									10 (0.00)	17 (0.00)
5.51~									7 (0.00)									7 (0.00)	7 (0.00)
計	8 (0.00)	43 (0.00)	247 (0.00)	2300 (0.00)	6087 (0.00)	5669 (0.00)	3969 (0.00)	1983 (0.00)	661 (0.00)	257 (0.00)	137 (0.00)	183 (0.00)	73 (0.00)	11 (0.00)	2 (0.00)	1 (0.00)	3 (0.00)	21834 (0.00)	
超過	21834 (0.00)	21826 (0.00)	21783 (0.00)	21536 (0.00)	19236 (0.00)	13149 (0.00)	7280 (0.00)	3311 (0.00)	1328 (0.00)	667 (0.00)	410 (0.00)	273 (0.00)	90 (0.00)	17 (0.00)	6 (0.00)	4 (0.00)	3 (0.00)		

上段: 出現回数、下段: 出現率 (%)

測得率: 99.64 %

(b) 波向一波高

地点: 那覇港

期間: 1998年1月~2002年12月

波高(m)	不明	NNE	N E	ENE	E	ESE	S E	SSE	S	SSW	S W	WSW	W	WNW	N W	NNW	N	計	超過
0.00~0.25		42 (0.19)	53 (0.24)	32 (0.15)	20 (0.09)	11 (0.05)	11 (0.05)	12 (0.05)	34 (0.16)	172 (0.79)	203 (0.93)	274 (1.25)	230 (1.05)	168 (0.77)	85 (0.39)	45 (0.21)	64 (0.29)	1456 (6.67)	21834 (100.00)
0.26~0.50		195 (0.89)	225 (1.03)	152 (0.70)	101 (0.46)	63 (0.29)	56 (0.26)	50 (0.23)	110 (0.50)	252 (1.15)	774 (3.54)	1058 (4.85)	875 (4.01)	645 (2.95)	550 (2.52)	480 (2.20)	332 (1.52)	5918 (27.10)	20378 (93.33)
0.51~0.75		132 (0.60)	114 (0.52)	73 (0.33)	36 (0.16)	11 (0.05)	15 (0.07)	32 (0.15)	42 (0.19)	135 (0.62)	425 (1.95)	748 (3.43)	424 (1.94)	370 (1.69)	458 (2.10)	687 (3.15)	480 (2.20)	4182 (19.15)	14460 (66.23)
0.76~1.00		96 (0.44)	54 (0.25)	17 (0.08)	9 (0.04)	6 (0.03)	9 (0.04)	5 (0.02)	18 (0.08)	45 (0.21)	236 (1.08)	483 (2.21)	235 (1.08)	197 (0.90)	280 (1.28)	752 (3.44)	438 (2.01)	2881 (13.20)	10278 (47.07)
1.01~1.25		63 (0.29)	16 (0.07)	10 (0.05)	1 (0.00)	4 (0.02)			6 (0.03)	22 (0.10)	128 (0.59)	212 (0.97)	95 (0.44)	99 (0.45)	197 (0.90)	338 (3.57)	338 (1.55)	1970 (9.02)	7397 (33.88)
1.26~1.50		30 (0.14)	9 (0.04)	4 (0.02)				1 (0.00)	5 (0.02)	70 (0.32)	102 (0.47)	63 (0.29)	41 (0.19)	159 (0.73)	702 (3.22)	235 (1.08)	1421 (6.51)	5427 (24.86)	
1.51~1.75		29 (0.13)	6 (0.03)	1 (0.00)					1 (0.00)	16 (0.07)	55 (0.25)	15 (0.07)	30 (0.14)	117 (0.54)	639 (2.93)	225 (1.03)	1134 (5.19)	4006 (18.35)	
1.76~2.00		13 (0.06)		1 (0.00)					2 (0.01)	15 (0.07)	33 (0.15)	17 (0.08)	15 (0.07)	93 (0.43)	490 (2.24)	125 (0.57)	804 (3.68)	2872 (13.15)	
2.01~2.25		9 (0.04)	2 (0.01)						4 (0.02)	37 (0.17)	12 (0.05)	16 (0.07)	60 (0.27)	400 (1.83)	78 (0.36)	618 (2.83)	2068 (9.47)		
2.26~2.50		6 (0.03)	1 (0.00)						1 (0.00)	15 (0.07)	1 (0.00)	5 (0.02)	47 (0.22)	325 (1.49)	40 (0.18)	441 (2.02)	1450 (6.64)		
2.51~2.75		3 (0.01)								11 (0.05)	2 (0.01)	7 (0.03)	36 (0.16)	263 (1.20)	23 (0.11)	345 (1.58)	1009 (4.62)		
2.76~3.00		3 (0.01)								1 (0.00)	11 (0.05)	4 (0.02)	35 (0.16)	181 (0.83)	12 (0.05)	258 (1.18)	664 (3.04)		
3.01~3.50		1 (0.00)								2 (0.01)	15 (0.07)	4 (0.02)	2 (0.01)	42 (0.19)	184 (0.84)	6 (0.03)	256 (1.17)	406 (1.86)	
3.51~4.00										3 (0.01)	6 (0.03)	2 (0.01)	5 (0.02)	19 (0.09)	43 (0.20)		78 (0.36)	150 (0.69)	
4.01~4.50										6 (0.03)	5 (0.02)	4 (0.02)	1 (0.00)	6 (0.03)	21 (0.10)		43 (0.20)	72 (0.33)	
4.51~5.00										1 (0.00)	1 (0.00)	1 (0.00)	4 (0.02)	5 (0.02)			12 (0.05)	29 (0.13)	
5.01~5.50										1 (0.00)	3 (0.01)	1 (0.00)	5 (0.02)				10 (0.05)	17 (0.08)	
5.51~										1 (0.00)	1 (0.00)	1 (0.00)	4 (0.02)				7 (0.03)	7 (0.03)	
計	0 (0.00)	622 (2.85)	480 (2.20)	290 (1.33)	167 (0.76)	95 (0.44)	91 (0.42)	100 (0.46)	210 (0.96)	634 (2.90)	1885 (8.63)	3067 (14.05)	1985 (9.09)	1617 (7.41)	2190 (10.03)	6005 (27.50)	2396 (10.97)	21834 (100.00)	

上段: 出現回数、下段: 出現率 (%)

測得率: 99.64 %

表-4.1.1 那覇港沖の波浪出現頻度分布図 (風波・うねり)

(c) 波向一周期

地点:那覇港
 期間:1998年1月~2002年12月

波向 周期(s)	不明	NNE	N E	ENE	E	ESE	S E	SSE	S	SSW	S W	WSW	W	WNW	N W	NNW	N	計	超過
0.0~2.0														1	1	3	3	8	21834
2.1~3.0			2						5	9	9	1	1		2	5	9	43	21826
3.1~4.0		7	13	2	1	3			17	44	37	38	31	20	13	12	9	247	21783
4.1~5.0		102	87	63	38	22	29	21	47	143	211	431	374	271	200	147	114	2300	21536
5.1~6.0		263	255	130	87	49	46	51	77	228	477	950	844	701	659	790	480	6087	19236
6.1~7.0		182	105	74	35	17	11	19	43	142	365	735	489	373	667	1805	807	5869	13149
7.1~8.0		62	16	14	5	4	5	9	14	62	283	407	150	155	361	1862	560	3969	7280
8.1~9.0		6	2	3					6	201	236	52	52	184	1056	181	1983	3311	
9.1~10.0					1				1	2	116	141	21	19	51	244	65	661	1328
10.1~11.0				1							65	79	6	6	25	46	29	257	667
11.1~12.0				2							67	24	2	5	16	14	17	137	410
12.1~13.0				1							22	16	5	5	13	17	104	183	273
13.1~14.0											26	5	10	9	2	14	73	90	411
14.1~15.0											3					7	11	17	108
15.1~16.0																		6	63
16.1~17.0																			2
17.1~											2							3	2
計	0	622	480	290	167	95	91	100	210	634	1885	3067	1985	1617	2190	6005	2396	21834	100.00

上段:出現回数、下段:出現率(%)

測得率: 99.64%

表-4.1.2 那覇港沖の波浪出現頻度分布図 (長周期波)

波向一波高

地点:ナウファス
 期間:1998年1月1日~2002年12月31日

波向 波高(m)	不明	NNE	N E	ENE	E	ESE	S E	SSE	S	SSW	S W	WSW	W	WNW	N W	NNW	N	計	超過
0.00~0.05	23	418	426	268	163	87	89	96	197	585	1548	2359	1668	1302	1250	1583	1084	13146	21834
0.06~0.10	32	162	60	20	4	8	2	4	13	46	298	552	266	243	554	2276	905	5445	8688
0.11~0.15	8	34	4	2					3	26	93	34	40	238	1399	238	2179	3243	
0.16~0.20	8								3	33	8	20	100	583	45	310	1064		
0.21~0.25											3	14	5	36	119	1	184	254	
0.26~0.30											6	5	4	2	9	25	51	70	
0.31~0.35											1			3	2	10	16	19	
0.36~0.40											1				1			3	
0.41~0.45														1				1	
0.46~0.50																		0	
0.51~0.55																		0	
0.56~0.60																		0	
0.61~0.65																		0	
0.66~0.70																		0	
0.71~0.75																		0	
0.76~0.80																		0	
0.81~																		0	
計	63	622	480	290	167	95	91	100	210	634	1885	3067	1985	1617	2190	6005	2333	21834	100.00

上段:出現回数、下段:出現率(%)

測得率: 99.64%

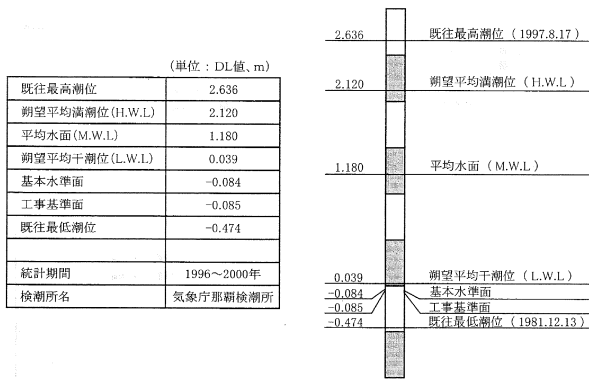


図-4.1.2 那覇港の潮位

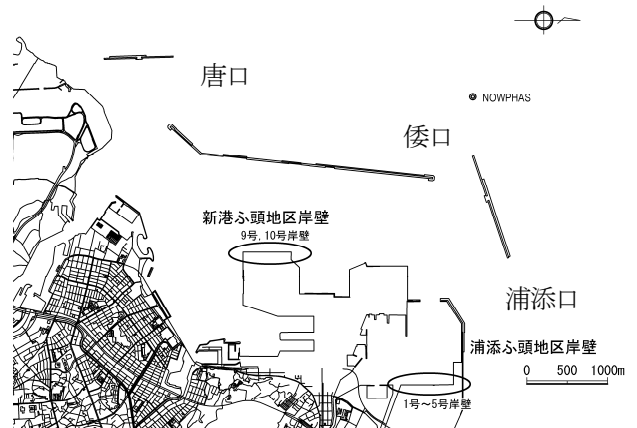
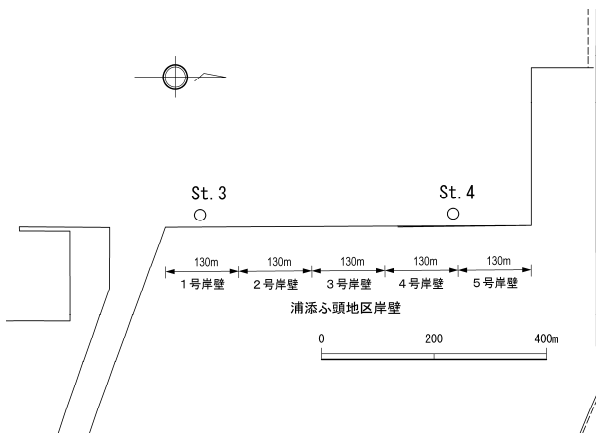
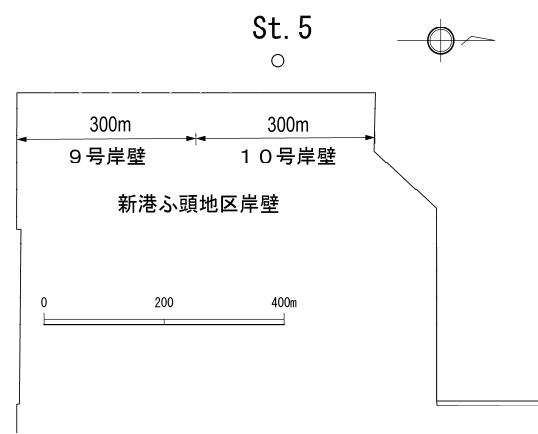


図-4.1.3 対象岸壁の位置 (概要)



(a) 浦添ふ頭地区



(b) 新港ふ頭地区

図-4.1.4 対象岸壁の位置 (詳細)

表-4.1.3 対象岸壁の諸元

	岸壁名	水深[m]	延長[m]
浦添ふ頭地区	Wharf No.1 ~ Wharf No.5 (1号~5号)	- 7.5	650 (130m×5バース)
新港ふ頭地区	Wharf No.9, Wharf No.10 (9号, 10号)	- 13.0	600 (300m×2バース)

表-4.1.4 対象船舶の諸元

	岸壁名	船種	船型	水深
1	浦添ふ頭地区岸壁	一般貨物船	5,000DWT	- 7.5m
2	"	"	3,000DWT	"
3	新港ふ頭地区岸壁	コンテナ船	40,000DWT	- 13.0m

出した(さらに、観測結果と同様にこれを0.9倍した値を採用した)。このようにして得た長周期波の沖波波浪出現頻度分布を図-4.1.1(b)および表-4.1.2に示す。

那覇港の潮位は図-3.1.2に示した気象庁の那覇検潮所で観測されている。潮位および基準面を図-4.1.2に示す。平均水面はD.L.+1.18mであり、潮位偏差は高々約2.1mである。

(3) 対象岸壁および対象船舶

港内静穏度および利用船舶の荷役稼働率を算定する対象岸壁の位置およびその詳細を図-4.1.3、図-4.1.4および表-4.1.3に示す。浦添地区には-7.5m岸壁が、新港地区には-13m岸壁が整備されており、それぞれ3,000DWT、5,000DWTクラスの一般貨物船、あるいは40,000DWTクラスのコンテナ船が利用している。表-4.1.4はこれらをまとめたものである。

4.2 風波・うねりに対する港内静穏度および荷役稼働率の算定

(1) 波浪変形計算の条件設定

2.1節で述べたように、港内静穏度は沖波波浪出現頻度分布に対する各対象岸壁での波浪出現頻度分布を算定して評価される。このとき両者を関係づけるのが港内波高比であり、これらは沖波波浪出現頻度分布をよく表す代表波について波浪変形計算を行うことにより算定される。

代表波諸元のうち、周期と波向については、**図-4.1.1(a)**および**表-4.1.1**に示した沖波波浪出現頻度分布より、それぞれ、周期4種類(6, 8, 10, 12s)、波向7種類(N, NNW, NW, WNW, W, WSW, SW)を設定した(ただし後述するように一部でSSWも実施した)。また、多方向波の方向集中度は、入射境界での水深や計算精度等を考慮してすべて $S_{max}=25$ と仮定した。一方、波高は、高山法などを用いた通常の港内静穏度解析では1つの値で代表させ、通常1mとすることが多い。これは、高山法では港内の海底地形による波浪変形は考慮できないため、入射波高の大小によって港内波高比やその分布が変化することがないためである。しかし、港内外で生じる複雑な波浪変形を一度に考慮できるブシネスクモデルでは、港内での屈折・浅水・砕波変形によって入射波高に応じて港内波高比が変化するため、沖波波浪出現頻度分布を1つの波高で代表させることは、ブシネスクモデルが有するこのような計算特性を十分活かしているとは言いがたい。とくに対象とした那覇港では、港内外に珊瑚礁が点在し非常に複雑な波浪変形が生じることが予想されるため、ここでは1mに加えて4mの波高を有する代表波も設定して、砕波等による港内波高比の変化も考慮することとした。なおこれらの波高値はNOWPHAS地点のものである。これらを**表-4.2.1**に示す。

波浪変形計算に用いる計算領域は、計算領域の入射境界に対して入射波の主波向が常に直角となるよう、座標軸を回転させて設定した(**図-4.2.1**および**図-4.2.2**)。これは、計算格子に対して波が斜めに伝播する際に生じる計算誤差を極力抑制するためである。ここで、浦添地区へ到達する波は**図-4.1.3**に示した倭口および浦添口から入射すると考えられるが、新港地区へ到達する波は浦添口、倭口に加え唐口から入射すると考えられる。計算容量の制約等からこれらの港口をすべて含むような計算領域を設定することは困難であったため、ここでは唐口からの入射波による新港地区対象岸壁における波浪出現頻度を別途算定し、最後にエネルギー的に合成する手法を用いることとした。

表-4.2.1 港内静穏度解析に用いる代表波(風波・うねり)

項目		設定値	
主波向	浦添・倭口	N, NNW, NW, WNW, W, WSW, SW	
	唐口	WNW, W, WSW, SW, SSW	
波高 [m]		1.00	4.00
周期 [s]		6.0, 8.0, 10.0, 12.0	8.0, 12.0

た。なお、計算格子幅はすべての計算領域で $\Delta x=5m$ とした。

潮位は計算領域内の水深を決定付けるため、リーフ等の浅い水域が点在する港湾等を対象とした波浪変形計算ではとくに重要である。しかし、出現波浪とそのときの潮位との関係は確率的要素が大きいため、これが那覇港の波浪変形計算結果に与える影響については付録Bで触れることとし、ここではすべて平均潮位(M.S.L.=D.L.+1.18m)を用いて計算することとした。また、境界条件等その他の計算条件は、3.2節に示した風波・うねりに対する再現計算と同様に設定した。

(2) 港内波高比の算定結果

表-4.2.1に示した各代表波について算定された、各対象岸壁前面の波高比の入射波周期による変化のうち、浦添地区のものを**図-4.2.3**に、新港地区のものを**図-4.2.4**にそれぞれ示す。まず浦添地区について、概観するといずれの波向でも周期が長いほど、どの岸壁でも波高比が増加する傾向にあるが、それは10s程度を境に上限となり、12sに対する波高比は10sのものと同様となっていることがわかる。また、波が浦添口から入射するN系の波ほど、入射波高の違い(1mと4m)による波高比の変化が大きく、この傾向はとくに隅角部側の4号、5号岸壁で顕著である。これらの現象は、長い周期の波ほど反射を繰り返すなどして港内に侵入しやすいという特性のほか、浦添地区の水域を形成している内防波堤前面の浅瀬(天端高2m)による影響を大きく受けているものと考えられる。すなわち、浦添口から入射するN系の波のうち長い周期の波は浅瀬で大きく屈折し、西に向けた開口部から浦添地区に侵入しやすくなると考えられる。ここで、波向Nに比べ波向NNWの入射波による港内波高比が減少しているのは、浦添口を形成する浦添第一防波堤による遮蔽効果によるものと考えられる。さらに、波高4mの波は天端高2mの浅瀬上でほとんど砕波しない波高1mの場合と比べ大きく減少することになる。一方、W系やS系の入射波に対しては入射波高による波高比の変化はほとんど確認されないことから、これらの波は港内の海底地形による影響をほとんど受けずに対象岸壁へ到達したことが推測される。

つぎに、浦添口、倭口に加え唐口からも沖波が入射すると考えられる新港地区の港内波高比の算定結果をみると、いずれの波向でも周期が長いほど、どちらの岸壁でも波高比が増加する傾向は浦添地区と同様であるが、その上限は少なくとも12sより長い周期で迎えることが異なる点である。また、N系の波ほど入射波高の違いによる波高比の変化が大きいは浦添地区と同様である。ただし、W系やS系の波向を有する波高4mの波が唐口から入射する場合には、浦添口から入射するN系の波と同様、波高1mの場合に比べ波高比が減少している。これは、唐口を形成する新港第一防波堤の南側端付近の浅場で、波高4mの波が砕波することによるものと考えられる。

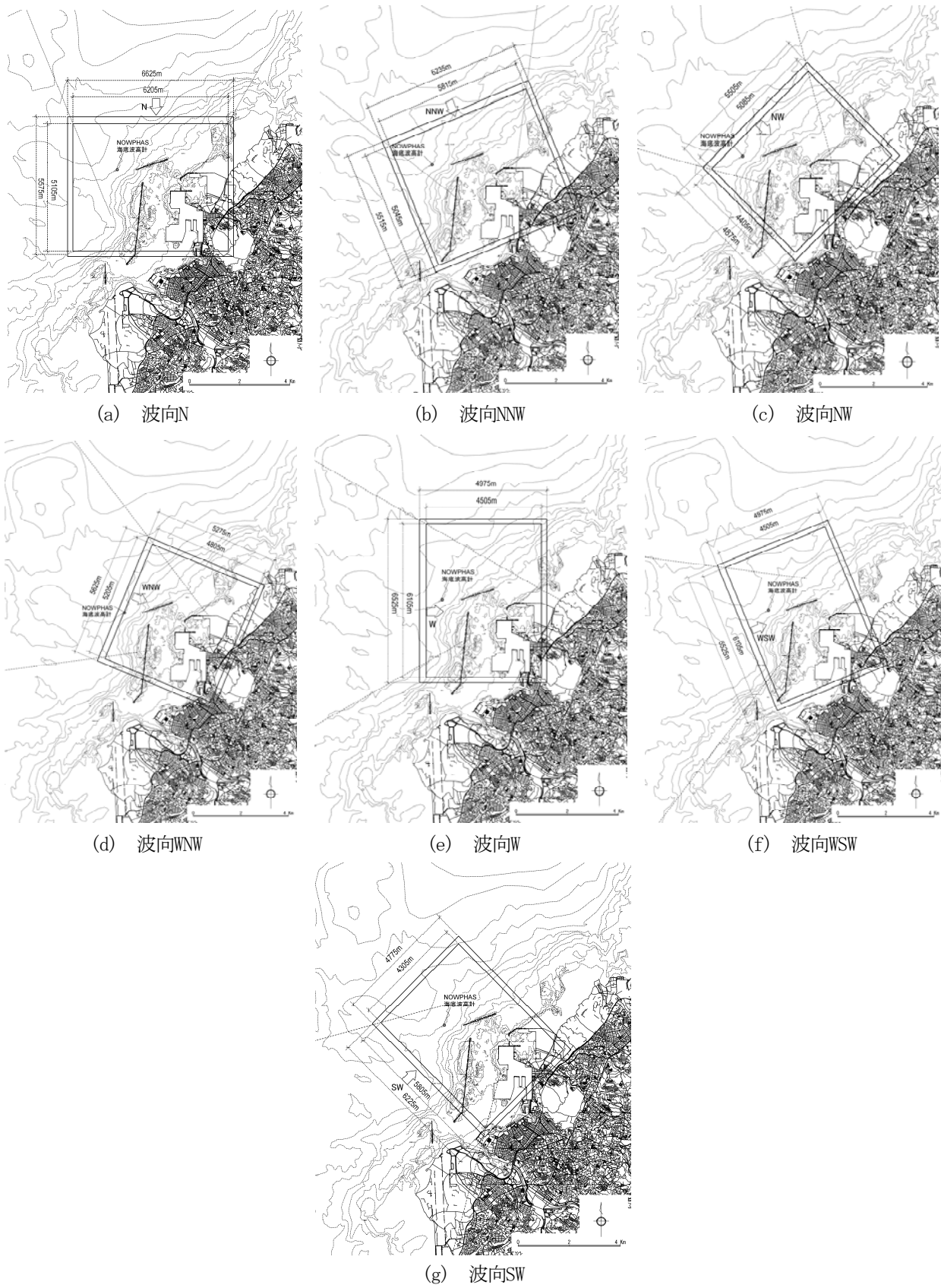
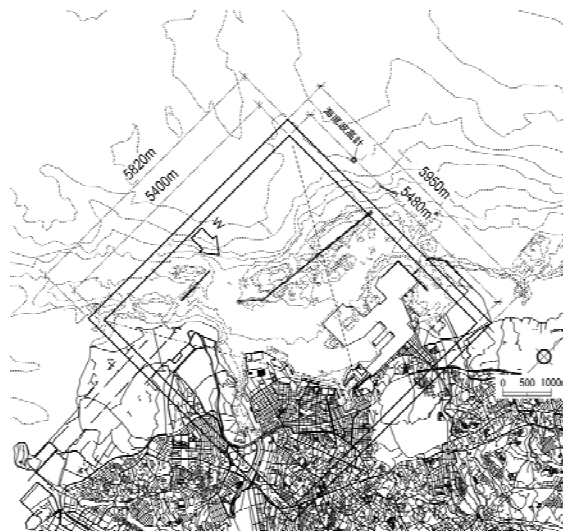


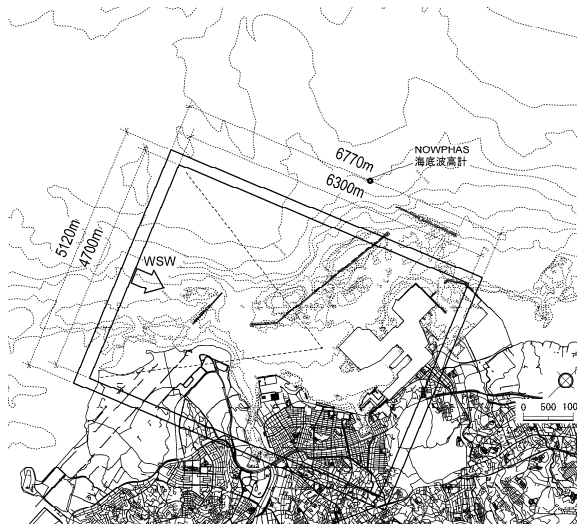
図-4.2.1 波浪変形計算に用いた計算領域（浦添口・倭口から入射）（風波・うねり）



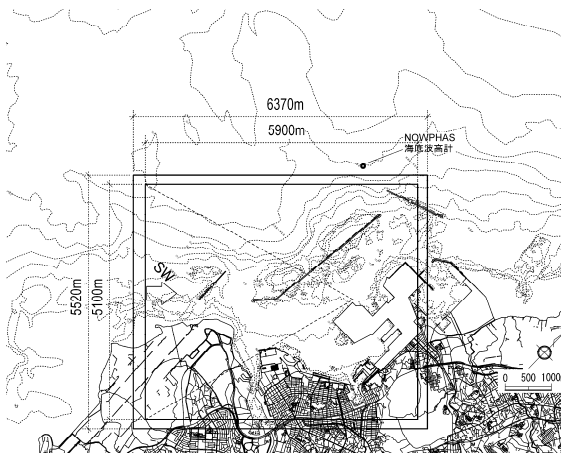
(a) 波向WNW



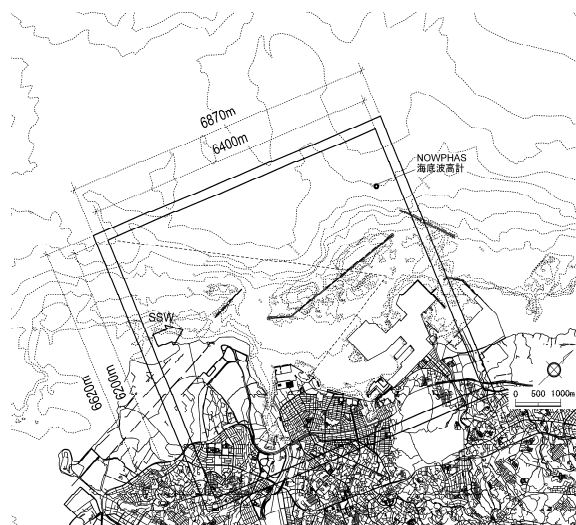
(b) 波向W



(c) 波向WSW

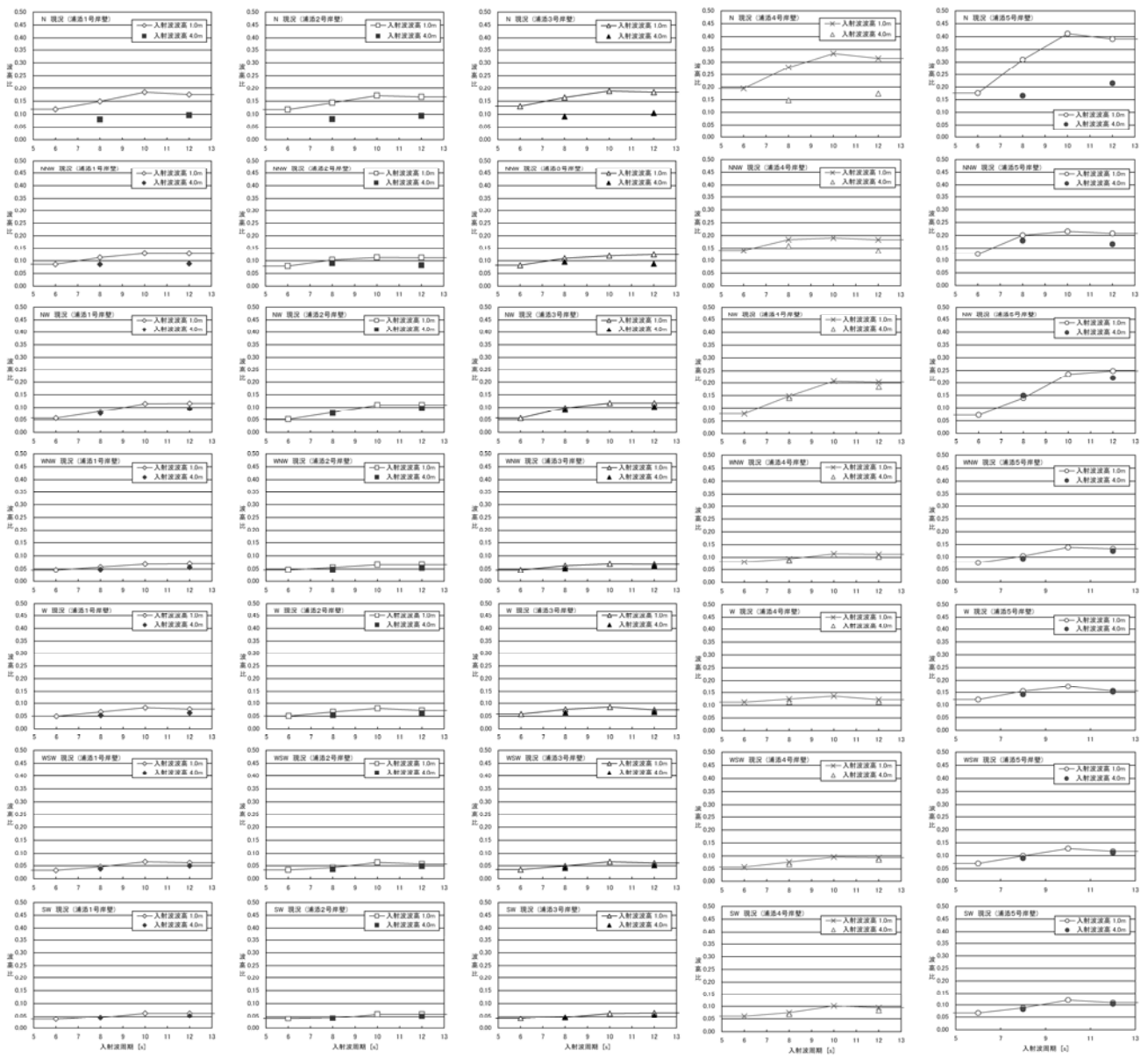


(d) 波向SW



(e) 波向SSW

図-4.2.2 波浪変形計算に用いた計算領域（唐口から入射）（風波・うねり）



(a) 浦添1号岸壁 (b) 浦添2号岸壁 (c) 浦添3号岸壁 (d) 浦添4号岸壁 (e) 浦添5号岸壁

図-4.2.3 浦添地区における港内波高比の算定結果（浦添口・倭口から入射）（風波・うねり）



(a) 新港9号岸壁

(b) 新港10号岸壁

(c) 新港9号岸壁 (唐口入射)

(d) 新港10号岸壁 (唐口入射)

図-4.2.4 新港地区における港内波高比の算定結果 (a, b: 浦添口・倭口から入射, c, d: 唐口から入射) (風波・うねり)

(3) 港内波高比の補間法

表-4.1.1に示した沖波波高出現頻度分布では、波高に関して3mまでは0.25m毎、3m以上では0.50m毎にランク分けされている。また、周期に関しては1.0s毎に、波向に関しては16方位にランク分けされている。しかし、那覇港沖のNOWPHAS波浪観測データをより詳細に解析することにより、本研究においては、周期に関しては0.1s間隔で、波向に関しては1°間隔でランク分けされた出現頻度分布が得られている。したがって、図-4.2.3および図-4.2.4に示した港内波高比をこれらに乘じ、各対象岸壁前面での波浪出現頻度分布を得るためには、各代表波諸元間の波浪諸元によって得られる港内波高比について、適切な補間法によって推定する必要がある。そこで以下では、従来から行われている入射波高を一定とした場合と、本研究で新たに提案する入射波高を変化させた場合のそれぞれについて、その補間法を具体的に述べる。

a) 入射波高を一定とした場合

まず、周期による港内波高比の変化を補間する場合には、図-4.2.3および図-4.2.4のうち、入射波高1mに対して得られた波高比を直線で結ぶ補間式を設定する。ただし、周期6s未満の波に対しては周期6sの、周期12sを超える波に対しては周期12sの波高比をそのまま適用できるものとする。

つぎに、波向による港内波高比の変化を補間する場合には、図-4.2.3および図-4.2.4のうち、入射波高1mに対して得られた各波向での同一周期による波高比を直線で結ぶ補間式を設定する。ただし、浦添口・倭口からの入射波を対象とした場合に代表波が設定されていない波向SSWに対する波高比は、WSWからSWへの波高比の変化傾向を勘案して波向SWに対する波高比の1/2を与えるものとする。また、唐口からの入射波を対象とした場合に代表波が設定されていない波向Nに対する波高比は、波向WNWに対する波高比の1/3を与えるものとし、WNW～NW～Nの間を直線で結ぶ補間式を設定する。なお那覇港においてN～NE～EとSSW～S～Eの向きはほぼ陸地にあたり、これらの方向から波が入射することは考慮外としたため、波高比は設定していない。

ここで、より厳密には、ブシネスクモデルによる波浪変形計算で設定した入射境界での波向と、那覇港沖のNOWPHAS地点で観測される波向は、海底地形による屈折変形の影響によって若干異なることが予想される。そこで本研究では、各代表波を対象に別途、エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算を行い、この影響を補正した。図-4.2.1に示した浦添口・倭口からの入射波を対象とした計算領域では、その補正角、すなわち入射境界とNOWPHAS地点での波向の偏差は、最も屈折することが予想された周期12sの波でも高々±5°程度であった。しかし、図-4.2.2に示した唐口からの入射波を対象とした計算領域では、波向SSWの場合、両者の波向の偏差が16方位の1方位分に当たる22.5°を越えるケースも見られた。そこで、この場合には

波向SSWの代表波に対して得られた港内波高比に代えて、波向SWに対して得られた港内波高比を波向SSWに対してもそのまま適用することとした。なお、唐口からの入射波を対象とした計算領域にはNOWPHAS観測地点が含まれていないため、ブシネスク計算による目標波高の合わせ込みを実施できていない。そこでこれらのケースでは、エネルギー平衡方程式法による計算結果を用いて、ブシネスクモデルで算定された港内波高比を補正している。

以上のようにして設定された港内波高比の補間直線のうち、浦添地区に対するものを図-4.2.5に、新港地区に対するものを図-4.2.6に示す。ただし、新港地区に対する波高比は、さらに浦添口・倭口から入射するものと唐口から入射するものを合成して得られることに注意されたい。

b) 入射波高を変化させた場合

この場合には、1つの波向に対する波高比に限定した場合でも、入射波の周期だけでなく波高によっても港内波高比が変化する。したがって、入射波高を一定とした場合のように、各代表波に対して得られた港内波高比を直線で結ぶだけでは、平面的な変化傾向を推定することは困難である。また、これが可能なほど多くの代表波を設定できたとしても、その補間式の作成には多大な労力を要することになる。

<入射波高を考慮した港内波浪の算定方法>

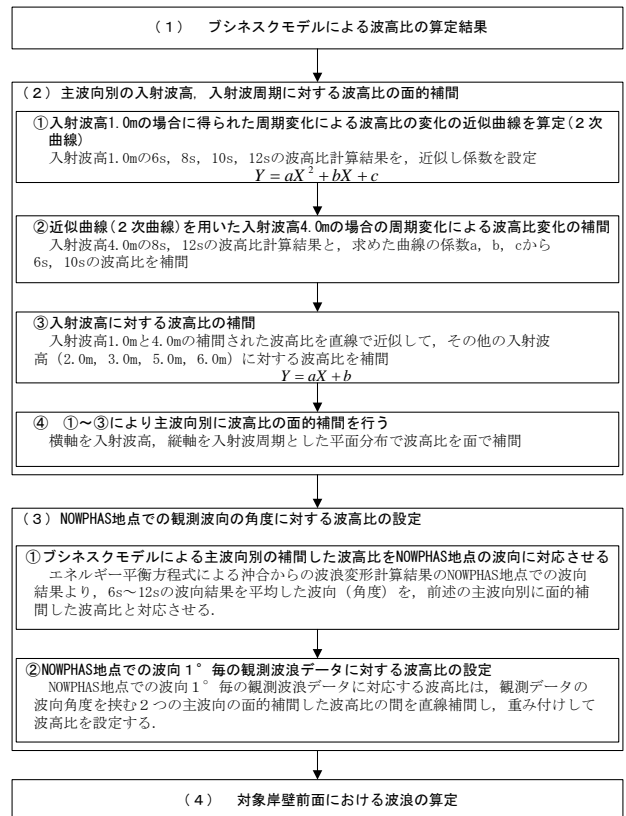
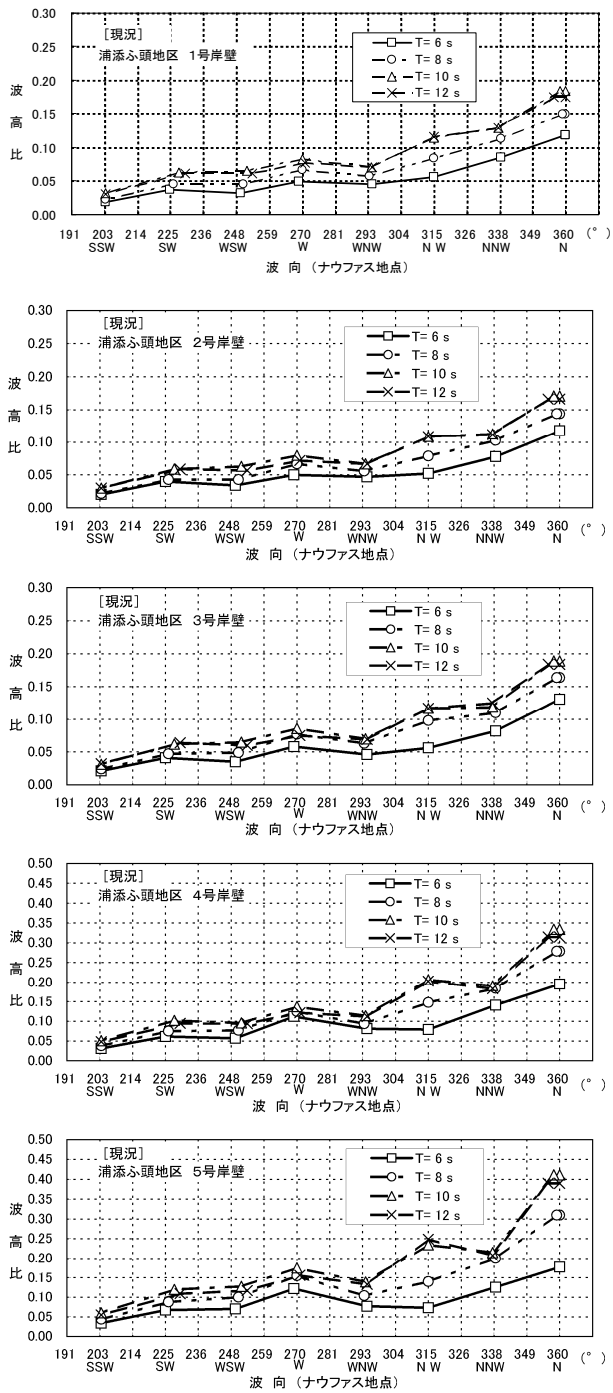
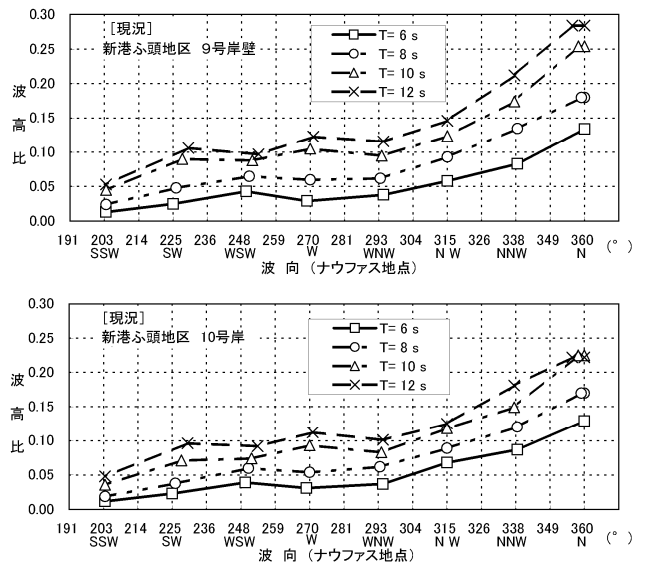


図-4.2.7 曲面補間法による港内波高比の設定手順

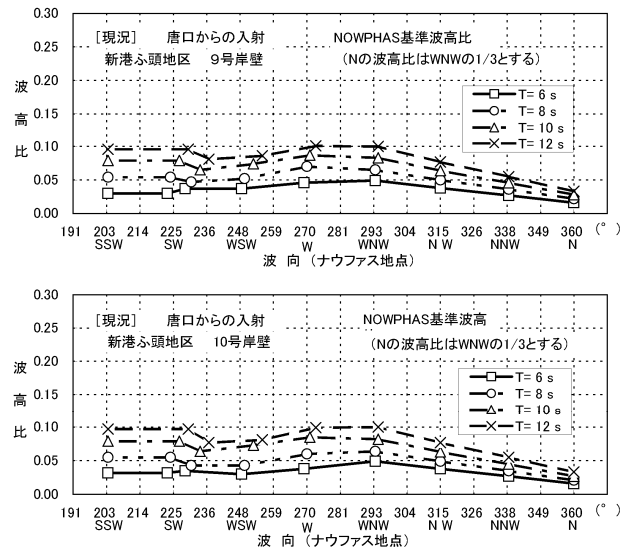


浦添口・倭口から入射

図-4.2.5 浦添地区における港内波高比の補間直線
(風波・うねり)



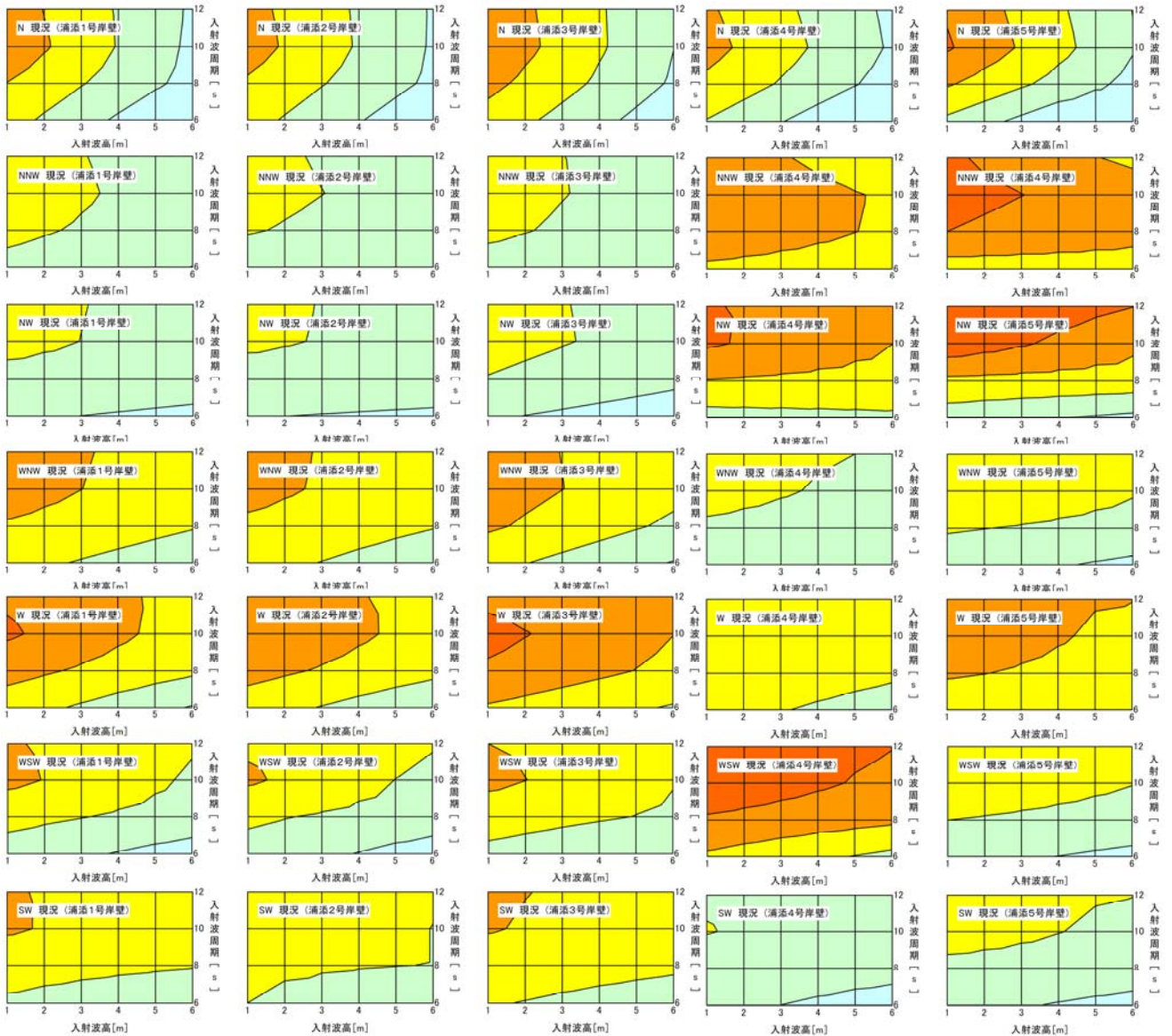
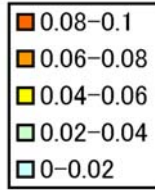
(a) 浦添口・倭口から入射



(b) 唐口から入射

図-4.2.6 新港地区における港内波高比の補間直線
(風波・うねり)

(凡例)



(a) 浦添1号岸壁 (b) 浦添2号岸壁 (c) 浦添3号岸壁 (d) 浦添4号岸壁 (e) 浦添5号岸壁

図-4.2.8 浦添地区における港内波高比の補間曲面 (浦添口・倭口から入射) (風波・うねり)

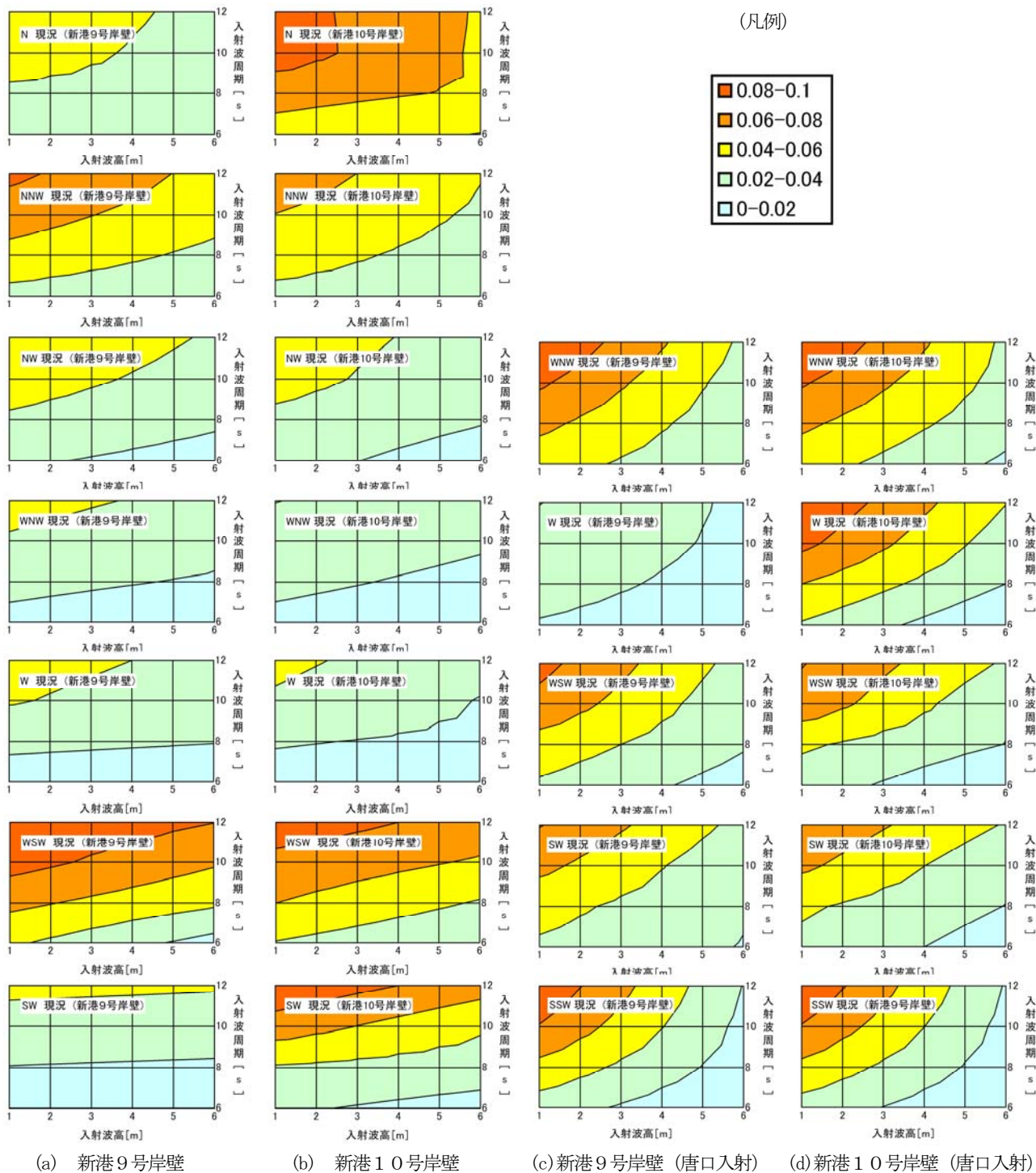


図-4.2.9 新港地区における港内波高比の補間曲面 (a, b : 浦添口・倭口から入射, c, d : 唐口から入射) (風波・うねり)

これらの課題を一度に克服するために、本研究では、代表波に対する港内波高比の変化を近似する曲線あるいは曲面を設定することを提案する。すなわち、表-4.2.1のように代表波諸元に2種類の波高値を設定した場合には、それぞれの波高値において周期による港内波高比の変化を近似する曲線を求め、それら2本の曲線間を内挿または外挿する直線を引くことにより、波高一周期平面において平面的に分布する港内波高比を得ることができる。なお、代表波諸元に3種類の波高値を設定した場合には3本の曲線間を曲線で結ぶことも可能であるが、この場合には2次曲面あるいは3次曲面で近似するほうが適切と考えられる。この方法の詳細については5章で改めて述べる。

さて、那覇港における港内波高比の曲面補間の具体的な手順はおおよそ次のようである。まず、4種類の周期に対する波高比が得られている入射波高1mのものを対象として、最小2乗法によりこれらを近似する2次曲線を求める。つぎに、2種類の周期に対する波高比しか得られていない入射波高4mのものに対して、同様な近似2次曲線を引くことはできないため、ここでは先に求めた2次曲線のうち、放物線の尖鋭度を表す係数aは入射波高4mの場合にも適用できるとして、2点より残りの係数bおよび係数cを決定する。そして、このようにして得た2つの曲線を最短で結ぶ1次直線を引くと、波高一周期平面上に港内波高比のコンター図を描くことができる。

以後、波向による港内波高比の変化を補間する方法からは、各波向で同一の波高と周期を対応させると、入射波高を一定とした場合と全く同様である。このような港内波高比の算定手順を図-4.2.7に示す。そして、このようにして得た浦添地区、新港地区に対する補間曲面をそれぞれ図-4.2.8、図-4.2.9に示す。

表-4.2.2 対象岸壁の港内静穏度（風波・うねり）
（入射波高を一定とした場合）（従来法）

(現況)	浦添ふ頭地区 (%)					新港ふ頭地区 (%)	
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁	9号岸壁	10号岸壁
$H_{1/3} \leq 0.5m$	99.83	99.89	99.86	96.69	95.35	99.18	99.58
$H_{1/3} \leq 0.3m$	96.67	97.68	96.70	87.12	86.34	92.66	94.17
$H_{1/3} \leq 0.2m$	89.64	91.10	89.22	77.74	77.37	82.96	84.53

※入射波高1.0mの波高比を用いた場合

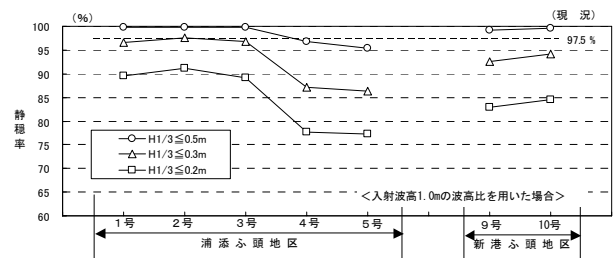


図-4.2.10 対象岸壁の港内静穏度（風波・うねり）
（入射波高を一定とした場合）（従来法）

(4) 港内静穏度（＝従来法による荷役稼働率）の算定

これまでの検討により、那覇港沖のNOWPHAS地点で観測されたさまざまな波浪諸元を有する波が港内の各対象岸壁前面へ入射したときに出現する、NOWPHAS観測波高に対するそれぞれの波高比が明らかになった。そこで、表-4.1.1に示したNOWPHAS地点における沖波波浪出現頻度分布をこれらに乗じることにより、各対象岸壁前面における波浪出現頻度分布を得ることができる。ただし本研究ではより詳細に、周期0.1s毎、波向1°毎に得られた沖波波浪出現頻度分布を用いた。

以下では、入射波高の取り扱い方の異なるそれぞれの方法について、従来の技術基準で示されている荷役限界波高0.5m、0.3mあるいは0.2mに対する波高の未超過出現率を算定し、その結果評価される港内静穏度の違いを考察する。なお、港湾整備に関する現行の技術基準では97.5%以上の港内静穏度を確保することを目標としている。そこで以下の考察では、得られた未超過出現率がこの数値を満足するかを1つの指標として、沖波に対する港内波高比の算定方法や荷役限界波高により、この目標達成率がどのように変化するかに着目して考察を行った。

a) 入射波高を一定とした場合

この方法では、沖波の波高に関係なく、図-4.2.5および図-4.2.6に示した港内波高比の補間直線に沖波波浪出現頻度分布を掛け合わせて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を求め、3種類の荷役限界波高（0.5m、0.3m、0.2m）に対する波高の未超過出現率を算定した。結果を表-4.2.2および図-4.2.10に示す。

中・大型船舶に対する荷役限界波高0.5mを採用した場合には、浦添地区の1～3号岸壁前面および新港地区の9号、10号岸壁の静穏度は97.5%を満足するが、浦添4号、5号岸壁の静穏

表-4.2.3 対象岸壁の港内静穏度（風波・うねり）
（入射波高を変化させた場合）（従来法）

(現況)	浦添ふ頭地区 (%)					新港ふ頭地区 (%)	
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁	9号岸壁	10号岸壁
$H_{1/3} \leq 0.5m$	100.00	100.00	100.00	98.25	96.75	99.76	99.94
$H_{1/3} \leq 0.3m$	98.85	99.10	98.79	88.29	87.21	94.81	96.62
$H_{1/3} \leq 0.2m$	91.60	92.83	91.18	78.00	77.78	86.78	88.38

※入射波高1.0m、4.0mの波高比を用いた場合

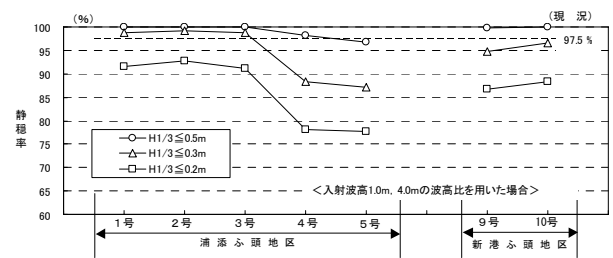


図-4.2.11 対象岸壁の港内静穏度（風波・うねり）
（入射波高を変化させた場合）（従来法）

度は目標値に僅かに届かないことがわかる。また、小型船舶に対する荷役限界波高0.3mを採用した場合には、浦添2号岸壁でようやく97.5%を満足するが、その他の岸壁では目標値に達していない。さらに、より厳しい荷役限界波高0.2mを採用した場合には、いずれの岸壁でも目標値を満足できなくなる。

これらのことから、沖波波高の違いによる港内波高比の変化、例えば、高波浪時に碎波して港内波高が低減することなどを考慮せず、かつ係留船舶の動揺特性のうち周期による違いを無視できるとした場合には、風波・うねりに対して、浦添1号～3号岸壁および新港9号、10号岸壁は中・大型船舶に対する港内静穏度が確保され、さらに浦添2号岸壁は小型船舶に対する港内静穏度も確保されているが、その他の岸壁はいずれの船舶に対しても十分な静穏度が未だ確保されていないと判断される。

これらの結果のうち、例えば、小型船舶に対して静穏度が不十分と判断された浦添4号、5号岸壁のうち後者では、実際に綱切れ等の荷役障害が発生していることから、これは妥当な結果だと思われる。一方、いずれの船舶に対しても静穏またはほぼ静穏とみなされる波高の未超過出現率が算定された浦添1号～3号岸壁では、実際には荷役ができない状況が続く時期があることが報告されている。ただし、これらの岸壁における波高の未超過出現率は、浦添4号、5号岸壁における値とは明らかに異なっている。

b) 入射波高を変化させた場合

この方法では、沖波の波高と周期に応じて、図-4.2.8および図-4.2.9に示した港内波高比の補間曲面に沖波波浪出現頻度分布を掛け合わせて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を求め、3種類の荷役限界波高(0.5m, 0.3m, 0.2m)に対する波高の未超過出現率を算定した。結果を表-4.2.3および図-4.2.11に示す。

中・大型船舶に対する荷役限界波高0.5mを採用した場合には、浦添地区の1～4号岸壁前面および新港地区の9号、10号岸壁の静穏度は97.5%を満足するが、浦添5号岸壁の静穏度は目標値に僅かに届かないことがわかる。また、小型船舶に対する荷役限界波高0.3mを採用した場合には、浦添1号～3号岸壁で97.5%を満足するが、その他の岸壁では目標値に達していない。さらに、より厳しい荷役限界波高0.2mを採用した場合には、いずれの岸壁でも目標値を満足できなくなる。

これらのことから、係留船舶の動揺特性のうち周期による違いを無視できるとしながらも、沖波波高による港内波高比の変化を考慮した場合には、風波・うねりに対して、浦添1号～4号岸壁および新港9号、10号岸壁は中・大型船舶に対する港内静穏度が確保され、さらに浦添1号～3号岸壁は小型船舶に対する港内静穏度も確保されているが、その他の岸壁はいずれの船舶に対しても十分な静穏度が未だ確保されていないと判断される。すなわち、これらを先述の入射波高を一定として算定された港内波高比による結果(表-4.2.2および図-4.2.10)と

比べると、とくに高波浪時に碎波して港内波高が低減することなどを考慮したことにより、さらに中・大型船舶に対する浦添4号岸壁、および小型船舶に対する浦添1号、3号岸壁の静穏度が確保されていると判断されたことがわかる。

(5) 標準解析法による荷役稼働率の算定

周期による船体動揺特性の変化を考慮せず、対象船舶の規模に応じて荷役限界波高を一律に設定する従来法とは異なり、標準解析法では、対象岸壁に対する入射波向と周期による係留船舶の動揺量の変化を考慮した荷役限界波高を、船種・船型毎に設定して荷役稼働率を算定する。これを那覇港に適用した場合の概要を以下に示す。

「港内長周期波影響評価マニュアル」に示されている各船種に対する荷役限界波高(有義波)によると、浦添1号～5号岸壁を利用する3,000DWT, 5,000DWTクラスの一般貨物船の荷役限界波高はそれぞれ表-4.2.4(a)で与えられる。また、新港9号、10号岸壁を利用する40,000DWTクラスのコンテナ船は表-4.2.4(b)で与えられる。これらの表から、標準解析法において設定される荷役限界波高は、さらに岸壁前面の波向および周期によっても異なることがわかる。ブシネスクモデルによる港内波浪変形計算では、岸壁前面の波高とともに同時にこれらを算定することもできるが、本研究ではマニュアルに示されている手法にならって設定した。すなわち、岸壁前面の周期は沖波と同じとし、波向は図-4.2.12に示すように、防波堤の開口部と係留船舶の中心位置を直接結んだ角度として、それぞれ浦添ふ頭1号～5号では60°、新港ふ頭9号、10号では15°または30°に設定した。このようにして設定された各岸壁における荷役限界波高が、表-4.2.4のうち網掛けで示した部分である。なお本研究では、周期に関してこれらの数値を線形補間し、各岸壁において0.1s毎の周期に対する荷役限界波高を設定した。

表-4.2.4 風波・うねりに対する荷役限界波高(単位:m)

(a) 一般貨物船

船型 (DWT)	波向 (°)	有義波周期 (s)					
		4	6	8	10	12	15
3,000	15	0.50	0.50	0.45	0.30	0.30	0.20
	30	0.50	0.50	0.40	0.20	0.20	0.20
	45	0.50	0.50	0.25	0.20	0.20	0.20
	60	0.50	0.35	0.20	0.20	0.20	0.20
5,000	15	0.50	0.50	0.50	0.45	0.35	0.30
	30	0.50	0.50	0.50	0.40	0.25	0.25
	45	0.50	0.50	0.50	0.25	0.20	0.20
	60	0.50	0.50	0.30	0.20	0.20	0.20

(b) コンテナ船

船型 (DWT)	波向 (°)	有義波周期 (s)					
		4	6	8	10	12	15
40,000	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.20
	60	0.50	0.50	0.50	0.50	0.25	0.20

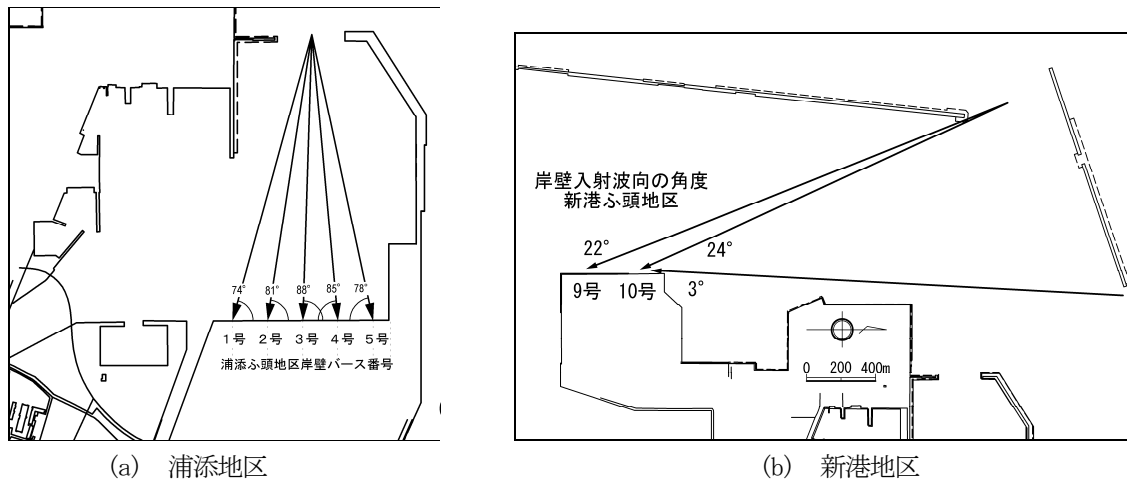


図-4.2.12 各岸壁における波向の設定法

これは、2s刻みで示された周期に応じて荷役限界波高を段階的に変化させるマニュアルの例題で示された方法とは異なっているが、本研究のように0.1s刻みで沖波波浪出現頻度分布が得られている場合には、むしろ妥当な方法だと思われる。

標準解析法では、このようにして設定された荷役限界波高に対する波高の未超過出現率を算定して、各対象岸壁を利用する対象船舶の荷役稼働率を算定する。なお本研究では、対象船舶の船種・船型あるいは波の周期・波向によって異なる係留船舶の動揺特性を考慮して荷役限界波高を設定する、標準解析法で算定される波高の未超過出現率をとくに荷役稼働率といい、船種・船型に係わらず荷役限界波高を一定（ただし規模に応じて異なる）とした従来法で算定される港内静穏度（＝従来法による荷役稼働率）とは区別して用いることとする。

a) 入射波高を一定とした場合

この場合には従来法を用いた際に行ったのと同様に、沖波の波高に関係なく、図-4.2.5および図-4.2.6に示した港内波高比の補間直線に、沖波波浪出現頻度分布を掛け合わせて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を算定する。そして、従来法のように係留船舶の規模に応じて3種類の荷役限界波高を設定するのではなく、表-4.2.4の網掛け部分に示した荷役限界波高およびその線形補間値に対する波高の未超過出現率を算定して、各対象岸壁の荷役稼働率を算定した。結果を表-4.2.5および図-4.2.13に示す。

浦添地区の岸壁を利用する3,000DWTクラスあるいは5,000DWTクラスの一般貨物船の荷役稼働率は、いずれの岸壁においても目標値97.5%に達しておらず、風波・うねりに対して十分な荷役稼働率が確保されていないと判断される。とくに浦添4号、5号岸壁の荷役稼働率は、いずれの船舶においても85%にも満たない。ただし5,000DWTクラスの一般貨物船に対しては、浦添1～3号岸壁の荷役稼働率は95.5%を超えている。これらの状況は従来法による港内静穏度の評価結果とほぼ同様であり、

5,000DWTクラスの荷役稼働率は従来法で荷役限界波高を0.3m（小型船）としたときの、3,000DWTクラスの荷役稼働率は従来法で荷役限界波高を0.2m（極小型船）としたときの港内静穏度に、それぞれほぼ対応しているが、後者では浦添4号、5号岸壁の荷役稼働率が、従来法に比べ5%程度大きく評価されている。

一方、新港地区の岸壁を利用する40,000DWTクラスのコンテナ船の荷役稼働率は、いずれの岸壁においても目標値97.5%を大きく上回っており、風波・うねりに対して十分な荷役稼働率が確保されていると判断される。この状況は従来法による港内静穏度の評価結果と同様であり、これらの荷役稼働率は、従来法で荷役限界波高を0.5m（中・大型船）としたときに得られた港内静穏度に等しい。これは、40,000DWTクラスのコンテナ船に対して標準解析法で設定された荷役限界波高が、この場合には周期によらずすべて0.5mであったためである。

b) 入射波高を変化させた場合

この場合には従来法と同様に、沖波の波高と周期に応じて、図-4.2.8および図-4.2.9に示した港内波高比の補間曲面に、沖波波浪出現頻度分布を掛け合わせて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を算定する。そして、従来法のように係留船舶の規模に応じて3種類の荷役限界波高を設定するのではなく、表-4.2.4の網掛け部分に示した荷役限界波高およびその線形補間値に対する波高の未超過出現率を算定して、各対象岸壁の荷役稼働率を算定した。結果を表-4.2.6および図-4.2.14に示す。

浦添地区の岸壁を利用する5,000DWTクラスの一般貨物船の荷役稼働率は、浦添2号岸壁で目標値97.5%に達し、隣接する浦添1号、3号岸壁でも目標値を僅かに下回る程度であった。すなわち、沖波波高の違いによる港内波高比の変化、とくに高波浪時の碎波による波高減衰などを考慮したことにより、これを考慮しない場合（表-4.2.3および図-4.2.11）は95.5%程度と見積もられていたのに対し、これらの岸壁では風波・うねりに対して、ほぼ十分な荷役稼働率が確保されていると判断された。

表-4.2.5 対象岸壁の荷役稼働率（風波・うねり）
（入射波高を一定とした場合）（標準解析法）

(5,000DWT) (%)						(40,000DWT) (%)	
浦添ふ頭地区						新港ふ頭地区	
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁	9号岸壁	10号岸壁
現況	95.57	96.45	95.55	88.79	87.64	99.18	99.59

(3,000DWT) (%)					
浦添ふ頭地区					
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁
現況	91.22	92.32	90.97	82.74	81.93

※・網掛けはバース稼働率の目標値(97.5%)を満足しない・入射波高1.0mの波高比を用いた場合

表-4.2.6 対象岸壁の荷役稼働率（風波・うねり）
（入射波高を変化させた場合）（標準解析法）

(5,000DWT) (%)						(40,000DWT) (%)	
浦添ふ頭地区						新港ふ頭地区	
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁	9号岸壁	10号岸壁
現況	97.17	97.64	97.17	89.57	88.28	99.76	99.94

(3,000DWT) (%)					
浦添ふ頭地区					
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁
現況	92.60	93.50	92.44	83.33	82.44

※・網掛けはバース稼働率の目標値(97.5%)を満足しない・入射波高1.0m, 4.0mの波高比を用いた場合

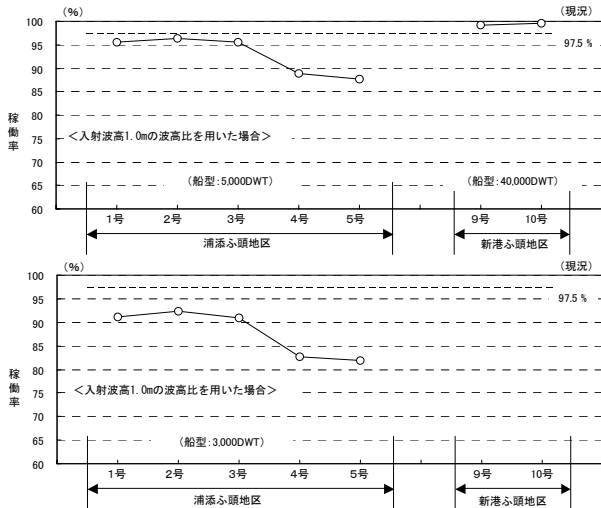


図-4.2.13 対象岸壁の荷役稼働率（風波・うねり）
（入射波高を一定とした場合）（標準解析法）

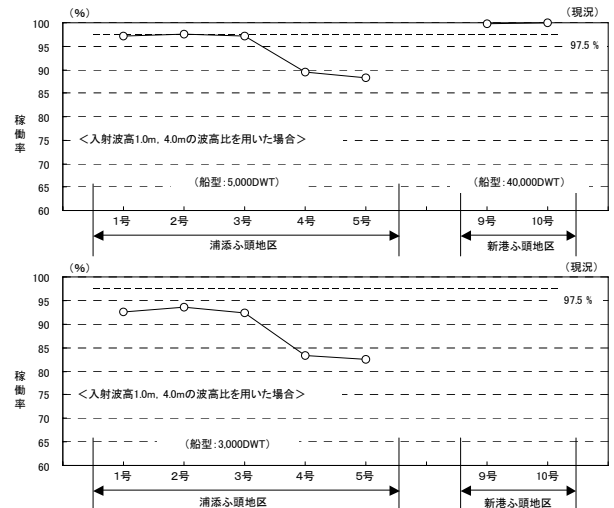


図-4.2.14 対象岸壁の荷役稼働率（風波・うねり）
（入射波高を変化させた場合）（標準解析法）

しかし3,000DWTクラスの一般貨物船の荷役稼働率は、これらの岸壁でも95%にも及ばず、荷役稼働率は未だ不十分である。また浦添4号、5号岸壁の荷役稼働率は、5,000DWTクラスでは90%、3,000DWTクラスでは85%にも満たない。これらの状況は従来法による港内静穏度の評価結果とほぼ同様であり、5,000DWTクラスの荷役稼働率は従来法で荷役限界波高を0.3m（小型船）としたときの、3,000DWTクラスの荷役稼働率は従来法で荷役限界波高を0.2m（極小型船）としたときの港内静穏度に、それぞれほぼ対応しているが、後者では浦添4号、5号岸壁の荷役稼働率が、従来法に比べ5%程度大きく評価されている。

一方、新港地区の岸壁を利用する40,000DWTクラスのコンテナ船の荷役稼働率は、いずれの岸壁でも目標値97.5%を大きく上回っており、風波・うねりに対して十分な荷役稼働率が確保されていると判断される。この状況は従来法による港内静穏度の評価結果と同様であり、これらの荷役稼働率は、従来法で荷役限界波高を0.5m（中・大型船）とした港内静穏度に等しい。

以上、各対象岸壁に対して4種類の波高の未超過出現率（従来法による2つの港内静穏度、および標準解析法による2つの荷役稼働率）を示した。それぞれの特徴をまとめるとおよそつ

ぎのようである。まず、従来法と標準解析法による港内静穏度あるいは荷役稼働率の算定結果を比較すると、標準解析法による荷役稼働率は、小型船を対象とした港内静穏度に比べ、小さな数値、すなわちより厳しい結果を算定し、より小さな船に対しては逆に大きな数値を算定する傾向にあるが、これらは標準解析法による荷役限界波高の設定値に依存するものと思われる。また、港内波高比の算定時に沖波波高による違いを考慮した場合には、とくに荷役限界波高を超える港内波浪が出現しやすい高波浪時に生じる港内での砕波による波高減衰が、各対象岸壁前面で算定される波浪出現頻度分布に反映される。したがって、那覇港のように港内に浅瀬が点在する港湾では、従来法、標準解析法による港内静穏度あるいは荷役稼働率ともに、総じて大きな数値が算定されることになる。港内の海底地形による複雑な波浪変形を考慮すると、この結果は妥当なものであり、より実態に即した港内静穏度あるいは荷役稼働率が算定できるものと考えられる。ただし、港口から港内にかけて浅場のようなものがなく、対象岸壁に向かうにつれて水深が浅くなるような港湾や潮位条件では、浅水変形による波高増大によって波高の未超過出現率が減少することも考えられるので、注意を要する。

4.3 長周期波に対する港内静穏度および荷役稼働率の算定

(1) 波浪変形計算の条件設定

長周期波に対する港内静穏度および荷役稼働率は、風波・うねりに対する算定法と同様、波浪変形計算で得られた沖波波高出現頻度分布の算定地点に対する港内波高比を用いて、対象岸壁前面での長周期波の波高出現頻度分布を作成して算定される。ただし、すべての長周期波の周期は20~300sであると仮定するので、長周期波の沖波波高出現頻度分布を表す代表波の諸元は波高および波向である。さらに、風波・うねりに対する港内波高比の算定で考慮したような、高波浪時における港内での砕波変形等については、波長が長く波形勾配が非常に小さな長周期波で問題となることは少ない。したがって、港内波高比が大きく変化する可能性のある長周期波の沖波諸元は、波向のみで考えると考えられる。

そこで、図-4.1.1(b)および表-4.1.2に示した沖波波高出現頻度分布に対し、長周期波の代表波諸元として、風波・うねりと同様な7種類の波向(N, NNW, NW, WNW, W, WSW, SW)を設定した。また方向集中度は、那覇港周辺の沿岸部では屈折変形により長周期波の方向集中度が高まると考えられること、および長周期成分波の方向分布関数が未だ明らかにされていないことなどから、 $S_{max}=999$ (一方向波)と仮定した。一方、波高は、風波・うねりの代表波として波高1m、周期9sを設定し、長周期波の標準スペクトル形を決定する α_L に、那覇港における5カ年の観測記録から推定された平均的な値 $\alpha_L = 1.65$ を設定した。これらをまとめて、表-4.3.1に示す。

長周期波の港内波高比を算定するために行う波浪変形計算には、風波・うねりと同様、ブシネスクモデルを適用した。そもそもブシネスク方程式は長波近似の波動方程式であるから、長周期波のような周期の長い波を対象とした波浪変形計算は、むしろ風波・うねりを対象とするよりも容易である。例えば、長周期波に対する計算格子幅は風波・うねりに対するものよりも大きく設定できるので、同じ計算格子数でより広い海域をカ

表-4.3.1 港内静穏度解析に用いる代表波 (長周期波)

項目	設定値
主波向	N, NNW, NW, WNW, W, WSW, SW
スペクトル	標準スペクトル近似形(直線型)
基本とした短周期側スペクトル	合田修正型BSスペクトル
長周期波周期	20.0s ~ 300.0s
係数 α_L	1.65
長周期波の代表周期	$1/((1/20 + 1/300)/2) = 37.5s$
短周期側代表値	$H_{1/3}=1.0m, T_{1/3}=9.0s$
成分波数(NS)	100
方向集中度の最大値 S_{max}	999
長周期波の代表周期に対するdt	0.05s
有効統計時刻	1200s ~ 3600s

バーする計算領域を設定できる。したがって、風波・うねりを対象とした場合には計算領域を2つに分けて計算していた、浦添口・倭口および唐口からの波入射は、長周期波を対象とした波浪変形計算では1つの計算領域で対応できる。本研究では、長周期波に対する計算格子幅は $\Delta x=20m$ とした。なおこの場合にも、計算領域の入射境界に対して入射波の波向が常に直角となるよう、それぞれの波向に対する計算領域はそれぞれ座標軸を回転させて設定した(図-4.3.1)。

波浪変形計算時に設定する潮位は、風波・うねりに対するものと同様に、すべて平均潮位(M.S.L=D.L.+1.18m)を設定した。また、境界条件等その他の計算条件は、3.5節に示した長周期波に対する再現計算と同様に設定した。

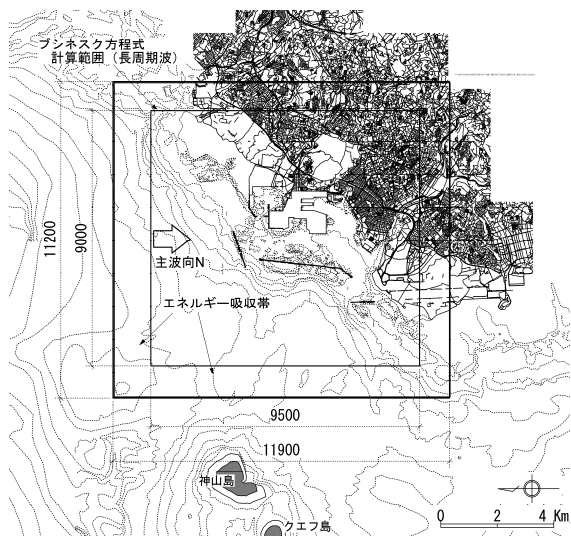
(2) 港内波高比の算定結果

表-4.3.1に示した各代表波について算定された、各対象岸壁前面の波高比を表-4.3.2に示す。また、対象岸壁毎の波向による港内波高比の変化を図-4.3.2(a)に示す。なお図-4.3.2(b)は、長周期波との比較のために示した、周期8sの風波に対して得られた波向による波高比の変化である。まず、長周期波に対する港内波高比をみると、とくに浦添4号、5号岸壁ではすべての波向に対して波高比が1を上回っており、浦添地区隅角部による長周期波高の増幅が顕著に生じていることがわかる。また浦添地区のその他の岸壁でも共通して、波向NNWと波向WNW, Wに対する波高比が相対的に大きくなっている。これらの方向は、それぞれ浦添第一防波堤および新港第一防波堤の法線にほぼ直角であることから、これらによる港内長周期波の多重反射が浦添地区における長周期波による波高比を増大させていることが懸念される。一方、新港地区では、新港第一防波堤の法線にほぼ直角となる波向WNW周辺で相対的に波高比が大きくなっているが、その他の波向に対する波高比は0.5程度でほぼ一定である。長周期波の港内波高比に関するこれらの変化傾向は、N系の入射波ほど波高比が大きくなる周期8sの風波のものとは、明らかに異なる。ただし、浦添4号、5号岸壁の波高比が浦添地区のその他の岸壁よりもすべての波向で大きくなる傾向などは両者に共通した特徴である。

(3) 港内波高比の補間法

波浪変形計算の条件設定で述べたように、長周期波に対する港内波高比の設定においては、波高および周期に関する補間は必要ない。したがって、ここでは波向による港内波高比の変化についてのみ補間する。

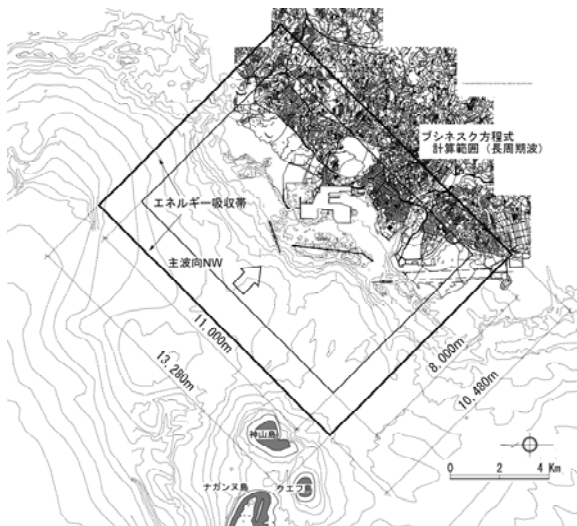
すなわち、図-4.3.2(a)に示した長周期波による波向毎の港内波高比において、それぞれを直線で結ぶ補間式を設定する。ただし、代表波を設定していない波向SSWに対する波高比はSWと同じとした。また、那覇港においてN~NE~EとSSW~S~Eの向きはほぼ陸地にあたり、これらの方向から波が入射することは考慮外としたため、波高比は設定していない。



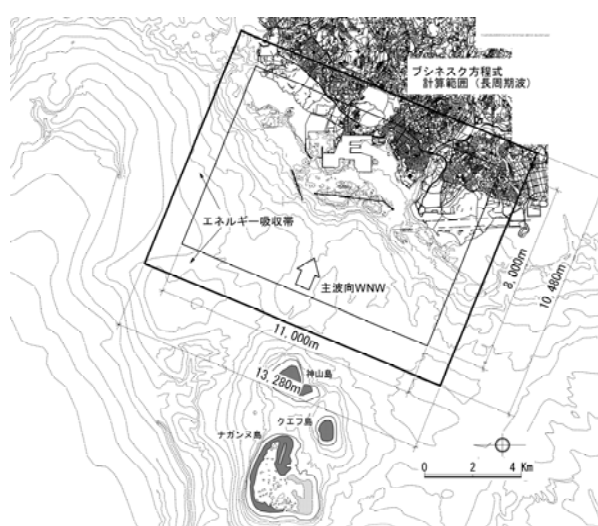
(a) 波向N



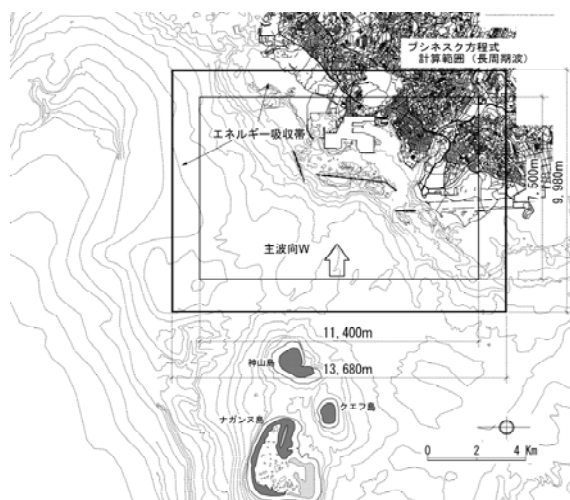
(b) 波向NNW



(c) 波向NW



(d) 波向WNW

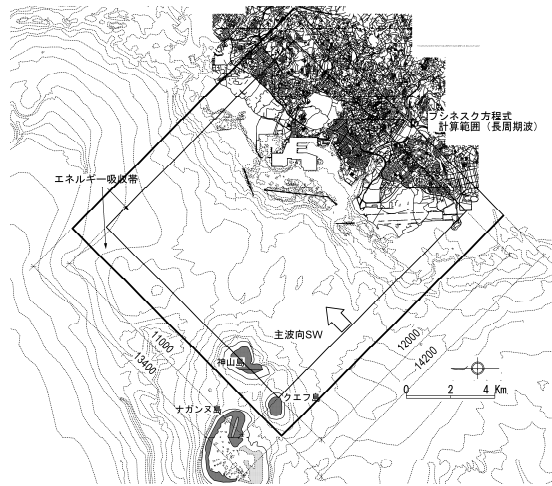


(e) 波向W



(f) 波向WSW

図-4.3.1 波浪変形計算に用いた計算領域 (長周期波)

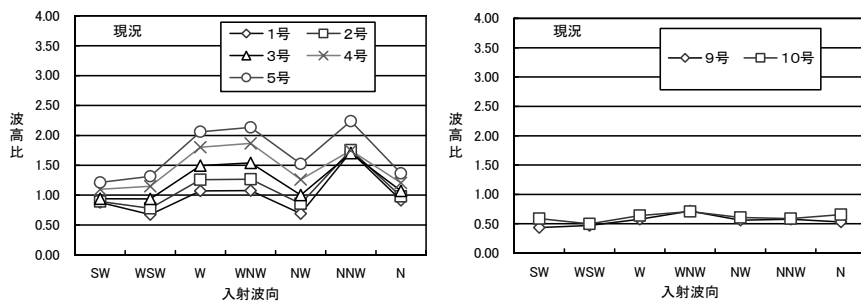


(g) 波向SW

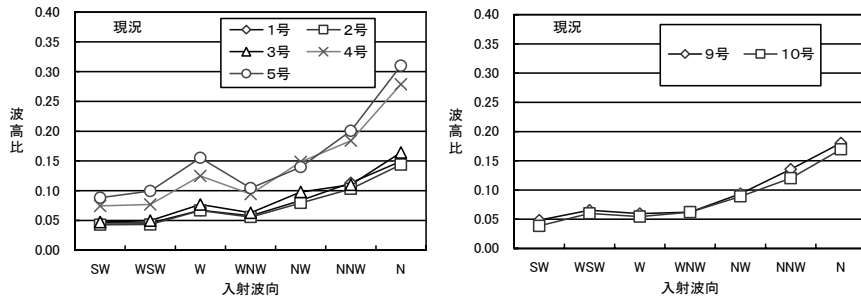
図-4.3.1 波浪変形計算に用いた計算領域(長周期波)

表-4.3.2 港内波高比の算定結果(長周期波)

主波向	浦添ふ頭地区					新港ふ頭地区	
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁	9号岸壁	10号岸壁
N	0.914	0.979	1.067	1.206	1.363	0.530	0.655
NNW	1.723	1.751	1.705	1.749	2.238	0.577	0.587
NW	0.689	0.856	1.000	1.261	1.523	0.560	0.606
WNW	1.075	1.267	1.538	1.865	2.135	0.715	0.708
W	1.069	1.257	1.495	1.801	2.061	0.577	0.640
WSW	0.675	0.777	0.936	1.146	1.315	0.473	0.499
SW	0.879	0.895	0.939	1.098	1.211	0.436	0.586



(a) 長周期波



(b) 風波(周期8s)(参考)

図-4.3.2 港内波高比の算定結果

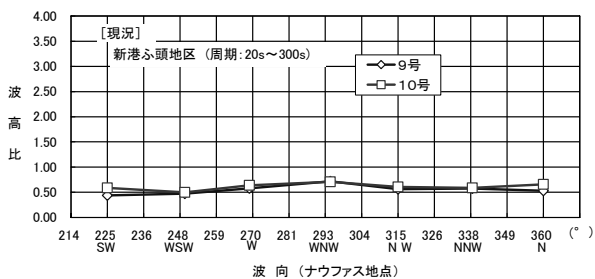
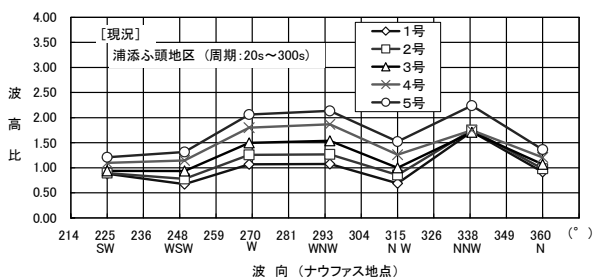


図-4.3.3 港内波高比の補間直線 (長周期波)

表-4.3.3 対象岸壁の港内静穏度 (長周期波)

(現況)	浦添ふ頭地区 (%)					新港ふ頭地区 (%)	
	1号岸壁	2号岸壁	3号岸壁	4号岸壁	5号岸壁	9号岸壁	10号岸壁
$H_{L1/3} \leq 0.20m$	94.43	95.71	93.47	90.27	87.11	99.96	99.95
$H_{L1/3} \leq 0.15m$	88.56	89.95	87.03	83.36	79.78	99.72	99.66
$H_{L1/3} \leq 0.10m$	79.08	79.85	76.29	71.75	67.93	97.05	96.96

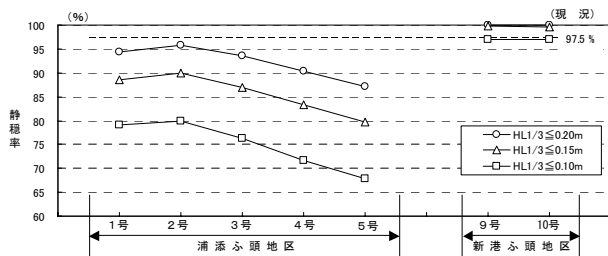


図-4.3.4 対象岸壁の港内静穏度 (長周期波)

表-4.3.4 長周期波に対する荷役限界波高

レベル	想定される条件	荷役限界波高 (m)
1	サージングについて荷役許容動揺量が比較的大きな船種またはサージングの固有周期が 1.5min 以下の船舶 (中型船: 1,000~5,000DWT)	0.20
2	サージングについて荷役許容動揺量が中程度の船種およびサージングの固有周期が 1.51min 以下の船舶 (一般貨物船: 5,000~10,000DWT)	0.15
3	サージングについて荷役許容動揺量が小さな船種およびサージングの固有周期が 2~3min の船舶 (コンテナ船、鉱石船等: 10,000~70,000DWT)	0.10

(4) 港内静穏度 (=従来法による荷役稼働率) の算定

長周期波に対する各対象岸壁前面での波浪出現頻度分布は、これまでの検討によって得られた港内波高比の補間直線 (図-4.3.3) に、沖波の波高に関係なく、表-4.1.2で示した長周期波の沖波波浪出現頻度分布を乗じて得ることができる。ただし本研究ではより詳細に、風波・うねりのときと同様、波向1°毎に得られた沖波波浪出現頻度分布を用いた。そして、長周期波に対して設定した3種類の荷役限界波高 (0.20m, 0.15m, 0.10m) に対する波高の未超過出現率を求め、長周期波による港内静穏度を算定した。結果を表-4.3.3および図-4.3.4に示す。

長周期波の荷役限界波高として設定したいずれの数値でも、浦添地区のすべての岸壁において、目標値97.5%を満足する港内静穏度は得られていないことがわかる。ただし、長周期波の荷役限界波高として0.20mを採用した場合には、浦添2号岸壁で95.5%を上回る港内静穏度が算定された。そして、そこから浦添地区の隅角部に近づくにつれて (浦添4号、5号岸壁)、静穏度が低下することがわかる。一方、新港地区では、荷役限界波高を0.20mあるいは0.15mと設定した場合に、いずれの岸壁でも目標値97.5%を大きく上回り、0.10mとしたときのみ目標値に僅かに届かない結果となっている。

これらのことから、長周期波に対して、浦添地区のすべての岸壁は、荷役限界波高を0.20mとした場合でも十分な港内静穏度が確保されていないが、新港地区のすべての岸壁は、荷役限界波高を少なくとも0.15mとした場合には十分な港内静穏度が確保されていると判断される。

(5) 標準解析法による荷役稼働率の算定

「港内長周期波影響評価マニュアル」でも指摘されているように、現在のところ、長周期波に対する荷役限界波高は、風波・うねりに対するものほど明確ではなく、表-4.3.4が示されている程度である。すると、これらの荷役限界波高は、上述した港内静穏度の算定に用いたものと全く同じである。したがって現状では、長周期波の荷役稼働率を算定する標準解析法なるものはとくに存在しないと考えられるため、長周期波については「荷役稼働率=港内静穏度」とみなすこととした。なお表-4.3.4によると、浦添地区の岸壁を利用することが想定される3,000DWTまたは5,000DWTの一般貨物船、および新港地区の岸壁を利用することが想定される40,000DWTのコンテナ船に対する荷役限界波高は、それぞれ0.20mおよび0.10mとなる。

5. 高精度港内静穏度解析法の適用例2-沖縄県S港-

ここでは、那覇港と同様に、港内外に浅瀬や珊瑚礁が広がり航路や泊地とともに複雑な海底地形を形成している沖縄県S港を対象として、高精度港内静穏度解析を実施した。そして、港内波浪変形計算にはともに最新ブシネスクモデル (Ver5.2) を用いながらも、荷役稼働率の算定に従来法を用いた場合と標準解析法を用いた場合、および入射波高による港内波高比の変化を考慮した場合と考慮しない場合のそれぞれについて、対象岸壁における荷役稼働率を算定し、その違いを考察した。なお、那覇港に比べS港では、港形が小さい代わりに港内外の水深変化が非常に大きいため、入射波高による港内波高比の変化を寄り詳細に把握できるよう、港内波浪変形計算を実施する計算ケースを増やし3種類の入射波高を設定することとした。

5.1 沖縄県S港の概要

(1) 位置および地形条件

沖縄県S港は東シナ海に面した離島の北岸に位置し、N系の沖波が来襲する際に遮蔽域を形成する周辺の島や岬は見当たらない。一方、S系の沖波はS港が位置する離島によって遮られるが、周辺の深い海底から急勾配で切り立った孤島独特の海底地形のために、島による回折波の一部は屈折変形によってトラップされ、島の外縁に沿って回り込む波がW系あるいはE系の沖波として来襲することが懸念される。

このような独特の地形条件をできるだけ詳細に把握するために、本業務では、S港およびその周辺の海底・陸上地形に関する資料として、海上保安庁海洋情報部による海図、沿岸の海の基本図およびそのデジタルデータ、および国土地理院地理情報部や役場による1/25,000や1/10,000地形図およびその数値地図や空中写真等を広く収集した。また港湾や海岸の施設に関する

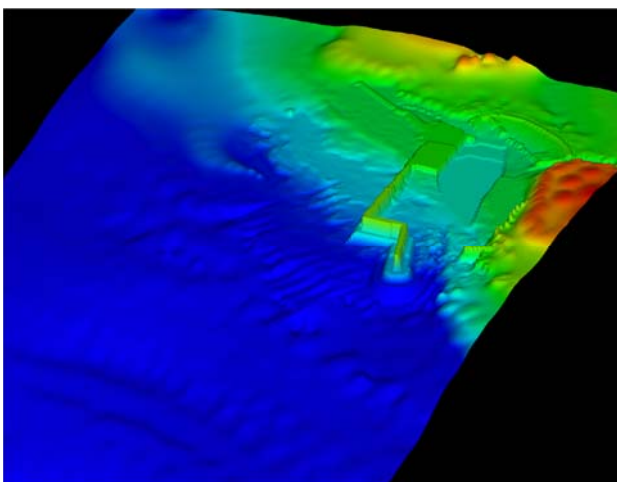


図-5.1.1 S港およびその周辺の水深データ (鳥瞰図)

資料として、沖縄県によるS港計画平面図、防波堤平面図・標準断面図等を収集した。

これらの資料をもとに作成した、S港およびその周辺の水深データを図-5.1.1に示す。また、この作成手順を図-5.1.2に示す。港内外の水深変化や微地形による波浪変形を考慮できるブシネスクモデルによる高精度波浪変形計算への適用に耐えうるよう、防波堤周辺のマウンドや潜堤、人工海浜の地形等も詳細に表現している。なおこれらの基準面は、海図および沿岸の海の基本図等で採用されている基本水準面に統一した。この際、S港整備当時の工事基準面で描かれた資料は、その後の調査で判明した補正值+8cmを加えて、基本水準面による数値へと変換した。

(2) 波浪および潮位条件

港内静穏度および荷役稼働率を算定する際に必要となるS港沖の波浪出現頻度分布は、「平成13年度沖縄管内における波浪特性把握調査業務」(財団法人沿岸開発技術研究センター、平成13年11月)にて作成された1996年から2000年までの沖合の波浪推算データベースに対し、エネルギー平衡方程式法による浅海変形計算を行って算定されたものを用いた。抽出された沖合の波浪出現頻度分布を図-5.1.3に、浅海変形計算によって算定されたS港沖の波浪出現頻度分布を図-5.1.4および表-5.1.1に示す。なお、計算対象波向はE~N~Wの9方位であった。

ここで、波浪推算データベースから抽出された沖合波浪出現頻度分布をみると、波向NNW, NW, WNWの波浪出現頻度が極端に少ないことに多少の違和感をおぼえる。しかし、この波浪推算手法の妥当性については沖縄管内のNOWPHASによる6観測地点において観測値と推算値の比較検証により確認されていること、およびS港周辺海域においてこの代替となる波浪観測データが存在しないことから、これに対する補正は必要ないものと判断した。一方、波向Wおよび波向Eの波浪出現頻度が高いのは、S

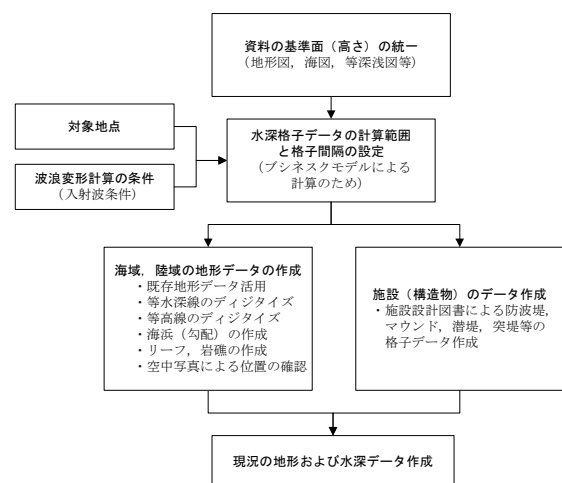


図-5.1.2 水深データの作成手順

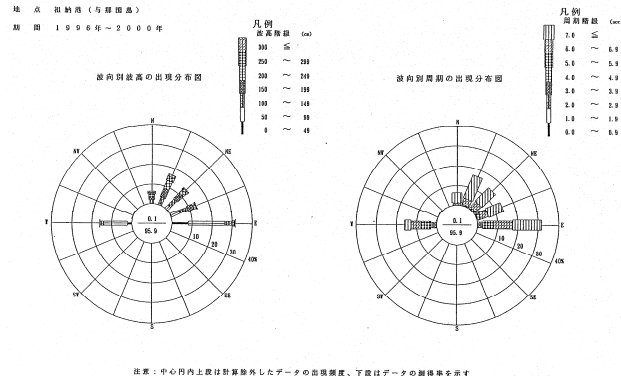
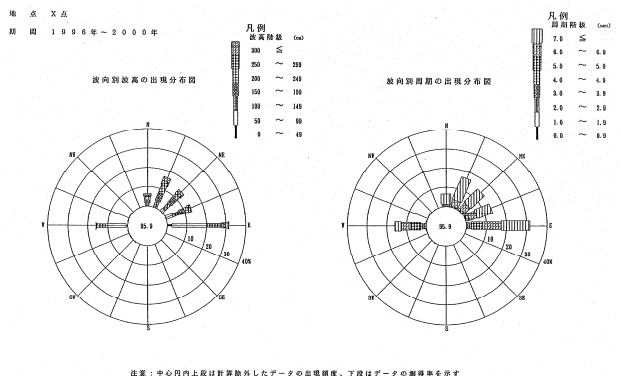


図-5.1.3 波浪推算データベースによる沖合波浪出現頻度分布

図-5.1.4 浅海変形計算で得られたS港沖波浪出現頻度分布

表-5.1.1 浅海変形計算で得られたS港沖波浪出現頻度分布

(a) 波高一波向

	C	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	計
C	10																	10
~ 49			3	28	579							153	2					765
50 ~ 99		63	169	320	1278							820	4		1	24		2679
100 ~ 149		229	308	295	257							129	2	1	1	124		1346
150 ~ 199		338	276	207	77						9					131		1038
200 ~ 249		297	144	91	20						2				2	85		641
250 ~ 299		162	82	34	10						2				4	39		333
300 ~ 349		56	23	9	5						2				1	30		126
350 ~ 399		18	9								1					14		42
400 ~ 449		4		2												9		15
450 ~ 499											1				1	3		5
500 ~ 549																1		1
550 ~ 599																1		1
600 ~ 649																		0
650 ~ 699															1	1		2
700 ~		1															3	4
計	10	1168	1014	986	2226	0	0	0	0	0	0	0	1119	8	2	12	463	7008

(b) 周期一波向

	C	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	計
C	10																	10
~ 0.9																		0
1.0 ~ 1.9																		0
2.0 ~ 2.9													1					1
3.0 ~ 3.9		6	18	19	154							120	3				2	322
4.0 ~ 4.9		14	6	19	24							77	1		1		2	144
5.0 ~ 5.9		44	80	112	387							354	2	1			15	995
6.0 ~ 6.9		225	250	272	657							333	2				75	1814
7.0 ~ 7.9		389	422	376	514							150					146	1997
8.0 ~ 8.9		379	189	155	217							57			2		139	1138
9.0 ~ 9.9		101	46	25	189							19			6	62		448
10.0 ~ 10.9		9	3	2	53							5			2	17		91
11.0 ~ 11.9				4	17							2					2	25
12.0 ~ 12.9		1			8							1			1	1	1	13
13.0 ~ 13.9					5												2	8
14.0 ~ 14.9					1	1												2
15.0 ~																		0
計	10	1168	1014	986	2226	0	0	0	0	0	0	0	1119	8	2	12	463	7008

(c) 波高一周期

	C	~ 0.9	1.0 ~ 1.9	2.0 ~ 2.9	3.0 ~ 3.9	4.0 ~ 4.9	5.0 ~ 5.9	6.0 ~ 6.9	7.0 ~ 7.9	8.0 ~ 8.9	9.0 ~ 9.9	10.0 ~ 10.9	11.0 ~ 11.9	12.0 ~ 12.9	13.0 ~ 13.9	14.0 ~ 14.9	15.0 ~	計
C	10																	10
~ 49				1	256	11	29	136	162	80	84	6						765
50 ~ 99				66	118	780	849	573	191	68	26	8						2679
100 ~ 149					15	144	544	409	154	63	15	2						1346
150 ~ 199						33	260	533	163	37	9	1				2		1038
200 ~ 249						9	15	311	257	36	6	2	1	3	1			641
250 ~ 299							9	9	264	34	8	7	2					333
300 ~ 349								1	29	83	6	2	5					126
350 ~ 399										36	5	1						42
400 ~ 449										7	6							15
450 ~ 499											2	2	1					5
500 ~ 549											1							1
550 ~ 599											1							1
600 ~ 649																		0
650 ~ 699														2	2			2
700 ~															2	2		4
計	10	0	0	1	322	144	995	1814	1997	1138	448	91	25	13	8	2	0	7008

表-5.1.2 S 港沖の波向別波浪出現頻度分布 (波高一周期)

(a) 波向W (b) 波向WNW (c) 波向NW

(a) 波向NNW (b) 波向N (c) 波向NNE

(a) 波向NE (b) 波向ENE (c) 波向NE

系の波をすべてこのいずれかに集約させたためである。さらに、浅海変形計算を行って得られた S 港沖の波浪出現頻度分布は波浪推算データベースから抽出したものとほぼ同様な結果となっているが、これは、沖合の推算地点から S 港沖地点までの海底地形が十分深く、顕著な波浪変形が生じなかったためと推測される。さらに表-5.1.1 (a) (b) を元に、表-5.1.1 (c) を各波向に振り分けて作成した波浪出現頻度表を表-5.1.2 に示す。

一方、潮位は、南西諸島を代表するものとして石垣港における潮位実況を参考にした。那覇港および石垣港における潮位実況を図-5.1.5 に示す。

(3) 対象岸壁および対象船舶

本研究で対象とした S 港岸壁の諸元および位置をそれぞれ表-5.1.3 および図-5.1.6 に示す。さらに、各岸壁の使用が想定される船舶の諸元を表-5.1.4 に示す。

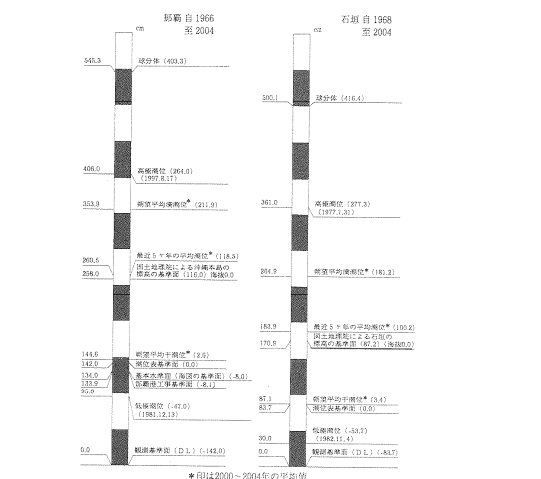


図-5.1.5 那覇港および石垣港における潮位実況

表-5.1.3 S 港岸壁の諸元

No.	岸壁名	水深[m]	延長[m]
1	Wharf No.1 (-4.5m岸壁)	-4.5	100(100m×1バース)
2	Wharf No.2 (-5.5m岸壁)	-5.5	100(100m×1バース)
3	Wharf No.3(計画中)(-7.5m岸壁)	-7.5	130(130m×1バース)

表-5.1.4 対象船舶の船種と船型

No.	岸壁名	船種	船型	水深
1	Wharf No.1 (-4.5m岸壁)	フェリー	498 GT	-4.5m
2	Wharf No.2 (-5.5m岸壁)	"	"	-5.5m
3	Wharf No.3(計画中)(-7.5m岸壁)	貨物船	5,000 DWT	-7.5m

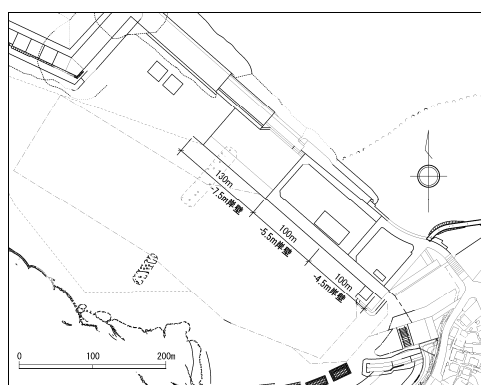


図-5.1.6 S 港岸壁の位置

5.2 風波・うねりに対する港内静穏度および荷役稼働率の算定

本節におけるS港港内静穏度解析はつぎの手順で行った。すなわち、まずS港港内波浪変形計算に用いる入射波浪を、**図-5.1.4**および**表-5.1.1**に示したS港沖波浪出現頻度をよく代表する波高、周期、波向を抽出して設定した。つぎに、**図-5.1.1**に示したS港およびその周辺の水深データを適宜回転させ、計算波向毎に直入射となるような計算領域を設定して、港形・地形データを作成した。また、港内外の港湾施設や自然地形による波の反射変形等をよく再現するよう各境界条件を設定した。このようにして得られた各波向における沖波条件および地形条件を用いてブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施し、各代表波浪諸元による対象岸壁前面での波高比を算出した。最後に、これらを内挿および外挿して得られた波高比の各近似値にS港における波向別沖波浪出現頻度表(**表-5.1.2**)の各セル値を乗じて、対象岸壁前面での波浪出現頻度を算出し、別途設定される荷役限界波高に対する未超過出現率を算定して、対象岸壁における静穏度を得た。さらに、標準解析法を用いて各岸壁を利用する対象船舶毎に荷役稼働率を算定した。

(1) 波浪変形計算の条件設定

S港港口部では港内水深が急激に浅くなるほか、港内にはリーフが存在し航路・泊地との水深差が極端に大きいため、港内において顕著な屈折・浅水・砕波変形が生じることが懸念され、この場合には入射波の波形勾配(波高波長比)に応じて対象岸壁前面の波浪出現頻度が変化する恐れがある。そこで本研究では、那覇港を対象としたときと同様に、従来のように入射波高を一定とする方法に加え、異なる入射波高を用いる方法を新たに提案し、対象岸壁における波浪出現頻度分布を算定することとした。

すなわち、S港沖の波浪出現頻度(**図-5.1.4**および**表-5.1.1**)を参考に、まず出現頻度の高い周期6s, 8s, および出現頻度は低いが係留船舶の動揺に大きな影響を及ぼすと考えられる周期10s, 12sについて、従来どおり、S港沖代表地点での目標波高を1.0mとする入射波を設定した。さらに、波高や波形勾配の違いによる港内波高比の変化を考慮するために、周期6s, 8sについて目標波高2.0m, 周期8s, 10sについて目標波高3.0mとする入射波も合わせて設定した。なお、入射境界から港口部に位置するS港沖代表地点までに生じる波浪減衰を見込み、入射境界での波高は、波高、周期、波向等の波浪諸元に関係なく、一律1.2倍したものを与えることとした。また、入射波の波向は、S港において陸側となるWSW~S~ESE方向、および収集した資料により出現頻度が極めて低いと予想されたNNW, NW, WNWを除いた6方位(E, ENE, NE, NNE, NおよびW)とした。ただしS港の形状から、NNW, NW, WNWの3方位は波がS港内へ最も

入射しやすい波向と考えられるため、波浪推算データベースによる波浪特性が必ずしも現地の実態を表現できていないことも想定し、念のため、波高1m, 周期8sの入射波を設定して波浪変形特性を把握しておくこととした。

入射波諸元および計算ケース一覧を**表-5.2.1**に示す。なお、S港の地勢および係留船舶の長周期動揺による荷役障害の実績等を勘案すると、長周期波が港内静穏度に与える影響は軽微であると判断されるため、本研究においては長周期波を対象とした港内波浪変形計算は行っていない。

表-5.2.1 港内静穏度解析に用いる代表波(S港)

項目	設定値		
主波向	W, N, NNE, NE, ENE, E		
波高[m]	1.00	2.00	3.00
周期[s]	6.0, 8.0, 10.0, 12.0	6.0, 8.0	8.0, 10.0
入射波スペクトル	合田修正型BSスペクトル		
成分波数(NS)	512		
方向集中度の最大値Smax	25		

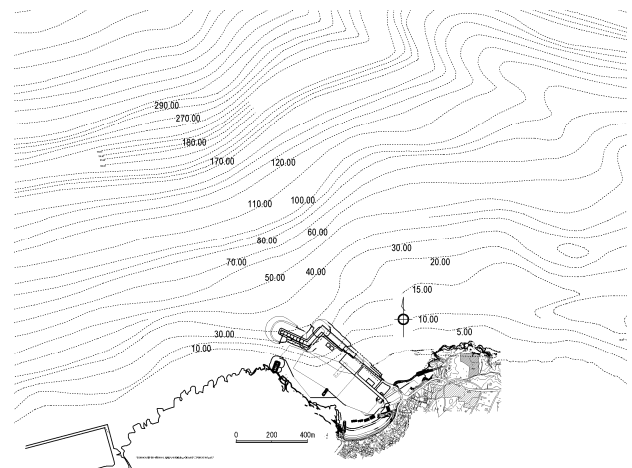


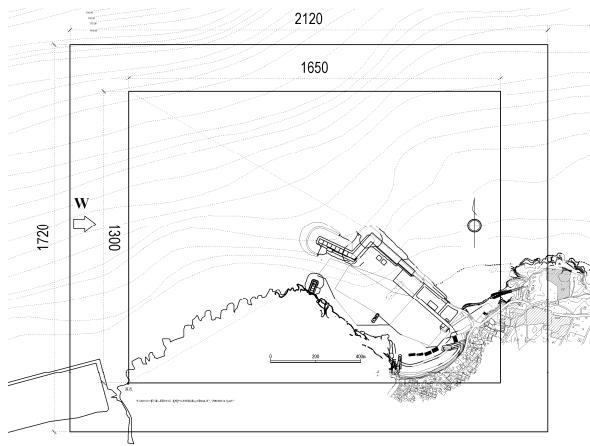
図-5.2.1 S港およびその周辺の海底地形

表-5.2.2 ブシネスク計算に用いた造波水深(S港)

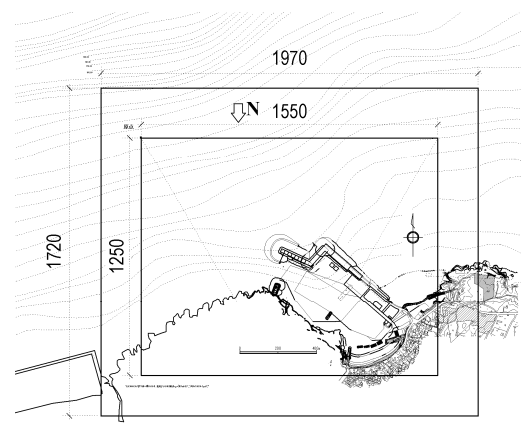
入射波周期[s]	造波水深[m]	$L_0/2$ [m]
6.0	30.0	28.8
8.0	50.0	49.9
10.0	75.0	78.0
12.0	80.0	112.0

表-5.2.3 ブシネスク計算に用いた計算領域(S港)

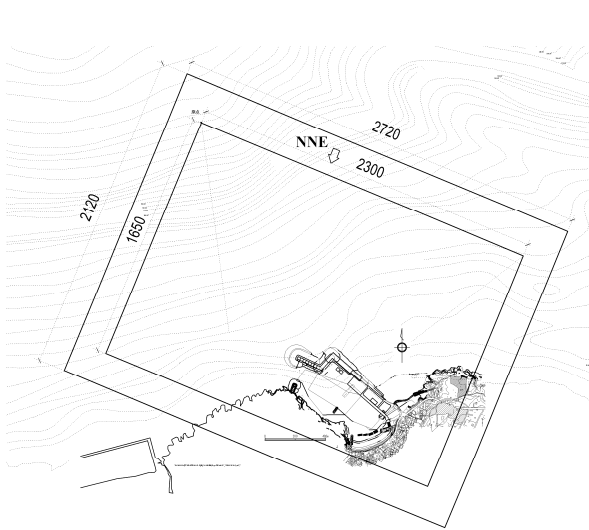
主波向	格子間隔[m]	I方向[m]	J方向[m]	I方向格子数	J方向格子数	造波水深からのスローブ勾配	
W	5.0	1650	1300	330	260	1/6	0.166
WNW	5.0	1900	2000	380	400	1/6	0.166
NW	5.0	1700	1900	340	380	1/4	0.250
NNW	5.0	1500	1550	300	310	1/3	0.333
N	5.0	1250	1550	250	310	1/4	0.250
NNE	5.0	1650	2300	330	460	1/4	0.25
NE	5.0	1650	2450	330	490	1/4	0.25
ENE	5.0	1550	1900	310	380	1/5	0.200
E	5.0	1700	2100	340	420	1/7	0.143



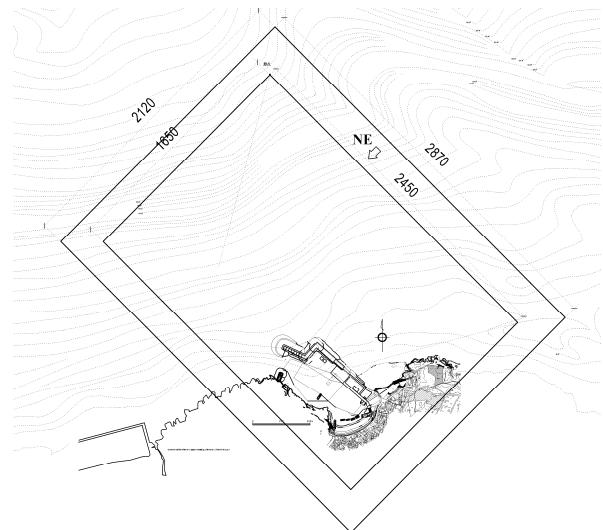
(a) 波向W



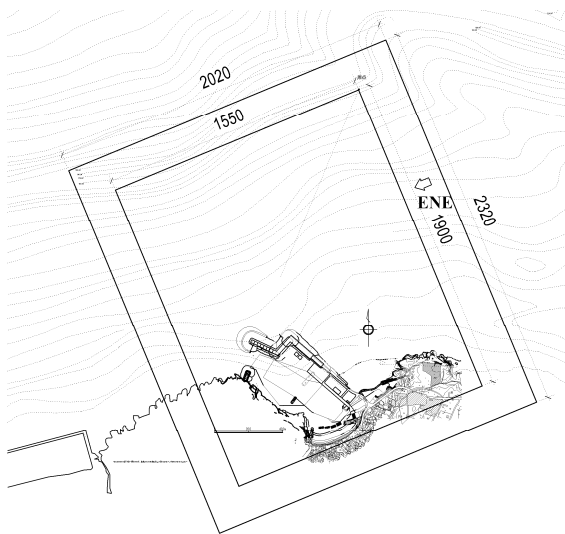
(b) 波向N



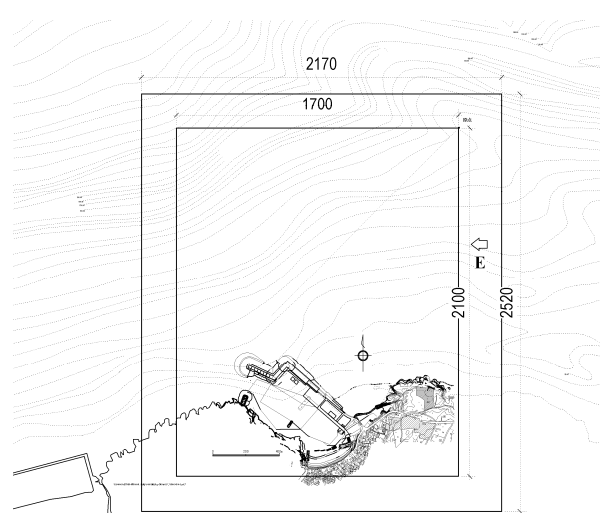
(c) 波向NNE



(d) 波向NE



(e) 波向ENE



(f) 波向E

図-5.2.2 波浪変形計算に用いた計算領域 (S港)

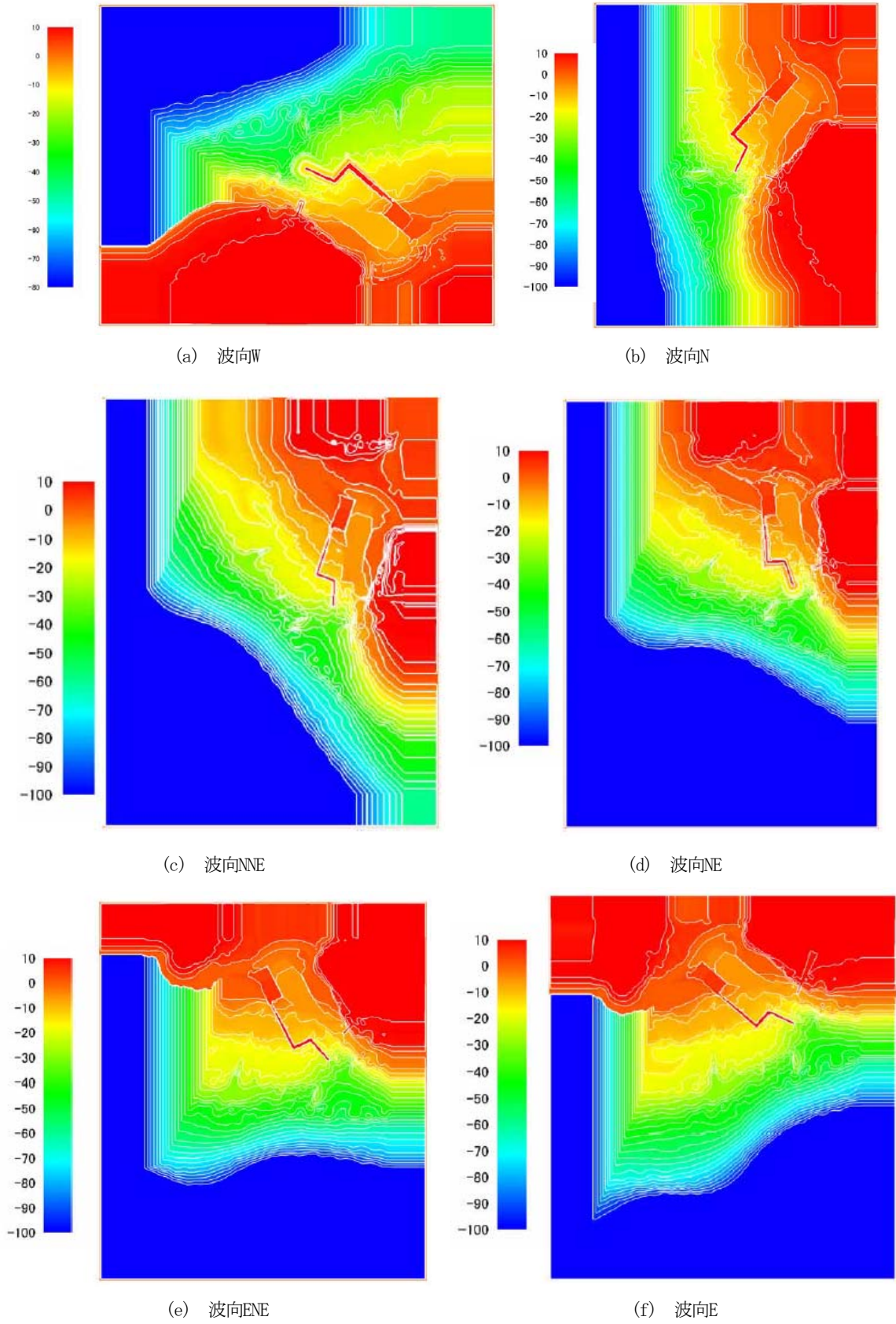


図-5.2.3 波浪変形計算に用いた海底地形 (S港)

表-5.2.4 ブシネスク計算における座標設定 (S港)

主波向	格子間隔 [m]	IMAX	JMAX	IS	IO	I1	IE	JS	JO	J1	JE
W	5.0	424	344	2+1	2+46	2+381	2+420	2+1	2+41	2+301	2+340
WNW	5.0	474	484	//	//	2+431	2+470	//	//	2+441	2+480
NW	5.0	434	464	//	//	2+391	2+430	//	//	2+421	2+460
NNW	5.0	394	394	//	//	2+351	2+390	//	//	2+351	2+390
N	5.0	344	394	//	//	2+301	2+340	//	//	2+351	2+390
NNE	5.0	424	544	//	//	2+381	2+420	//	//	2+501	2+540
NE	5.0	424	574	//	//	2+381	2+420	//	//	2+531	2+570
ENE	5.0	404	464	//	//	2+361	2+400	//	//	2+421	2+460
E	5.0	434	504	//	//	2+391	2+430	//	//	2+461	2+500

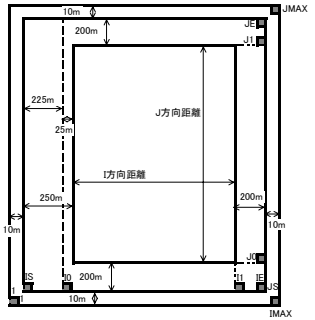
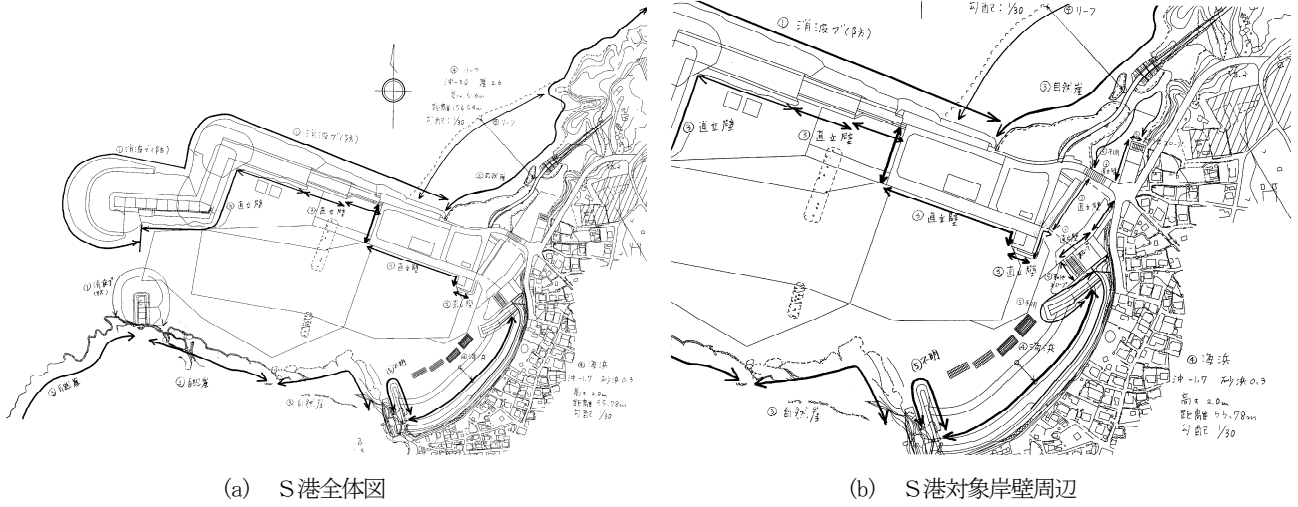


図-5.2.4 座標設定の定義



(a) S港全体図

(b) S港対象岸壁周辺

図-5.2.5 S港における境界条件区分

ブシネスク計算に用いる計算領域は、主波向毎に波が計算領域へ直角に入射するよう、それぞれ領域を回転させて設定した。この基本となる海底地形の等深線図を図-5.2.1に示す。さらに、主波向毎に設定した計算領域を図-5.2.2に示す。ここで、S港およびその周辺の海底地形は、水深による波浪変形等の影響を勘案して、水深-80m~30m以浅の地形を再現するものとした(表-5.2.2)。また、水深を一定とするブシネスクモデルの造波境界と実地形とのすり合わせは、周辺の海底勾配等を勘案して設定した(勾配1/3~1/7)。このようにして得た主波向毎の計算領域の海底地形等深線図を図-5.2.3に示す。また、それらの詳細な諸元、座標値およびその定義を、表-5.2.3、表-5.2.4、図-5.2.4に示す。なお、計算格子間隔は $\Delta x=5m$ とした。さらに、ブシネスク計算の実施に当たっては、安定な演算を実現するために、水深データに対し部分地形の平滑処理(平滑処理回数3回)を施している。

潮位は計算領域内の水深を決定付けるため、リーフ等の浅い水域が点在する港湾等を対象とした波浪変形計算ではとくに重要である。しかし、出現波浪とそのときの潮位との関係は確率的要素が大きいため、これがS港の波浪変形計算結果に与える

影響については付録Bで触れることとし、ここではすべて平均潮位(M.S.L.=D.L.+1.0m)を用いて計算することとした。

計算領域内の境界条件は、表-3.4.2に示したように、①消波ブロック被覆工、②直立スリット工、③直立壁・自然崖、④海浜(自然海浜・人工海浜)・岩礁、⑤その他(不明含む)、の区分に基づいて設定した。S港におけるこれらの配置を図-5.2.5に示す。このうち、消波ブロック被覆工では、消波工(消波ブロック)の法面勾配(設置幅)や空隙率等の諸元をもとに、表-5.2.5に示すような透水層パラメータを設定した。また、その設定状況を図-5.2.6に示す。このような透水層モデルに基づく任意反射境界を用いることにより、入射波諸元に応じて自動的に適切な波の反射率を再現することができる(図-

表-5.2.5 透水層パラメータの設定 (S港)

ブロック名	積み方	トン数	体積V[m ³]	代表径d[m]	層流抵抗係数 α_0	乱流抵抗係数 β_0	空隙率 λ_0
ドロスタ	乱積	50 [t]	21.7	2.79	2100	2.2	0.575
テトラ	乱積	2 [t]	0.8	0.90	2100	2.2	0.500
テトラ	乱積	5 [t]	2.0	1.26	2100	2.2	0.500
テトラ	乱積	20 [t]	8.0	2.00	2100	2.2	0.500
テトラ	乱積	50 [t]	20.0	2.71	2100	2.2	0.500

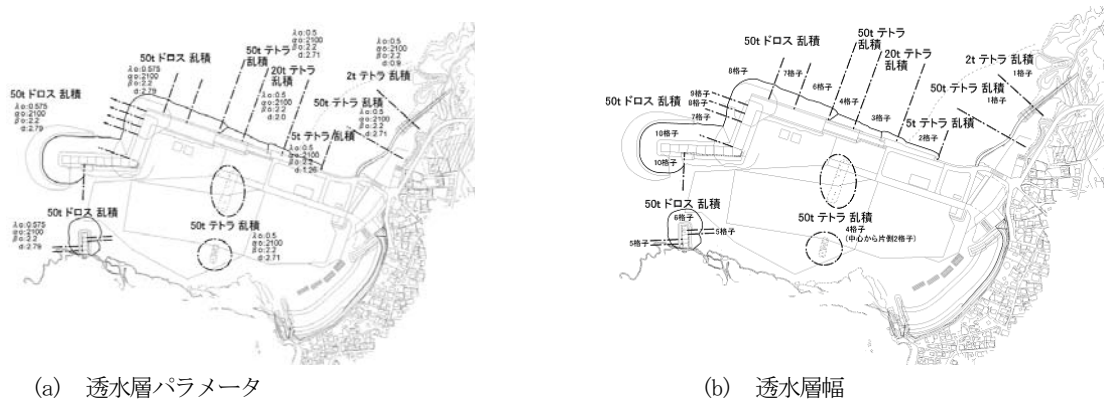


図-5.2.6 透水層パラメータの設定状況 (S港)

2.3.3) . そのため、これらの境界処理では目標とする反射率の設定は行われぬ。また、海浜やリーフで波が砕波・遡上することによる波浪減衰や反射率の低減などは、最新ブシネスクモデルに組み込まれた砕波・遡上モデルによって自動的に算定される。ただし、港内のリーフ高さは、目視状況などから朔望平均干潮位 (L. W. L. =D.L. +0.03m) に等しいと仮定した。

さらに、S港港奥の人工海浜前面に設置されている潜堤に関して、実際には捨石による透過潜堤として施工されているが、本研究では人工海浜周辺の詳細な波・流れ場の再現までは必要としないこと、および本研究に用いた最新ブシネスクモデルにおいても、このような境界条件の設定には別途試行計算を要することなどから、ここでは不透過堤として取り扱うこととした。なお、斜面上に設置された不透過堤周辺で生じる波浪変形は、最新ブシネスクモデルによって非常に良好に再現できることが確認されている (図-2.2.5)。

一方、直立壁・自然崖では、計算上、反射率1.0の完全反射境界として扱われている。また、反射条件等が不明なその他の境界でも、計算の発散防止等の目的でスポンジ層を設置しない場合には完全反射境界として扱われる。なお、S港においては直立スリット工等の施工は行われていないため、無反射境界とする周辺の開境界を除き、スポンジ層は設定されていない。

したがってS港において岸壁前面は完全反射境界である。一般に、反射境界の近傍では重複波の波高分布に空間的な変動が生じることが知られている。そこで、対象岸壁前面の波浪場を代表する波高比は、以下に示すように、岸壁法線から少し離れた平行直線上位置での波高を空間的に平滑化して算定することとした。すなわち、図-5.2.7中の黒丸位置 (計算格子) で算定された波高から港外波高に対する波高比を算出し、隣接する4点で定義されるarea (エリア) 毎にこれら4点の値を平均した波高比を算定した。そして、このようなエリアをarea1～area8の計8つ設定し、-4.5m岸壁ではarea1, area2, area3, -5.5m岸壁ではarea3, area4, area5, -7.5m岸壁 (計画中) ではarea6, area7, area8の波高比の平均値を各岸壁前面波高比の

代表値として定義して、各岸壁における静穏度ならびに対象船舶に対する荷役稼働率の算定に用いることとした。なお、計算では-7.5m岸壁 (計画中) の港形は再現されていないため、岸壁からの反射波は考慮されず、逆に-7.5m建設時には撤去されるべき仮設透過堤による波浪減衰が生じているため、-7.5m岸壁 (計画中) に対する波高比の算定結果はあくまで参考値であることに留意されたい。

ブシネスク計算におけるその他の計算条件を表-5.2.6に示す。

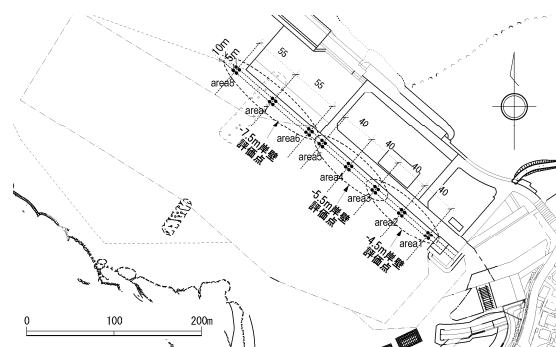


図-5.2.7 対象岸壁前面を代表する波高算定地点の定義

表-5.2.6 ブシネスク計算時のその他の計算条件

(a) 境界条件

項目	設定値
砕波モデル	修正擬似段波モデル (1方程式乱流モデルに基づく)
砕波判定方法	水表面での鉛直圧力勾配および砕波限界波高の下限値
砕波指標	鉛直圧力勾配 0.5
底面摩擦係数	0.02
最低水深	遡上計算が可能 (陸上部分もデータ化)
最大水深	周期別の造波水深と同じ (表-2.2.3)
遡上モデル	越流公式による遡上・流下フラックスを算定

(b) 計算時間

入射波周期 T13 [s]	波高 DT [e]	波長 TDEL [s]	経過波時間 TTIN [s]	シミュレーション 開始時刻 T SVE [s]	計算終了時刻 TEND [s]
6.0	0.015	0.375	60.0	750.0	1520.0
8.0	0.020	0.500	80.0	750.0	1775.0
10.0	0.025	0.625	100.0	750.0	2032.0
12.0	0.030	0.750	120.0	750.0	2288.0

(2) 港内波高比の算定結果

表-5.2.1に示した各代表波について算定された、各対象岸壁前面における入射波向による波高比の変化を、対象岸壁、目標波高毎に図-5.2.8に示す。さらに各図では、入射波周期毎の波高比の変化を示している。

まず、目標波高1.0mとした港内波高比の算定結果に着目すると、波向Wを除くいずれの波向、いずれの岸壁でも、入射波周期が長いほど波高比が増大する傾向にあるが、それらは10s程度を境に上限となり、12sに対する波高比は10sのものとはほぼ同様となっていることがわかる。これらの波はS港主防波堤の先端から回折して港内の対象岸壁前面へ入射すると考えられるため、10sを超える波は十分回折されずに港内への侵入が抑制されたと推測される。さらに波向がN方向からE方向へ変化するとつれて長い周期の波ほど波高比が減少する傾向にあるのも、こ

れと同様な理由と考えられる。ただし、本計算に用いた水深データでは、主防波堤先端部の高マウンド地形もできるだけ忠実に再現されているため、周期の長い波ほど屈折により港内に侵入するようすは再現できているものと考えられる。一方、波向Wでは、島の外縁に沿って入射する波がS港開口部周辺の斜面に沿うように屈折して港内に入射すると考えられるため、周期の長い波ほど港内によく侵入したと推測される。またこのときの波高はS港沖で1.0mであることから、浅水変形によって波高が増大したとしても、港内の浅瀬ではほとんど砕波することなく対象岸壁前面まで侵入したと考えられる。なお、-7.5m岸壁において波向Wのとき周期による波高比の変化があまりみられないのは、-7.5m岸壁は港内の沖側に位置するため、開口部から続く斜面に沿って屈折して入射する波の伝播経路からは少し外れているためと考えられる。

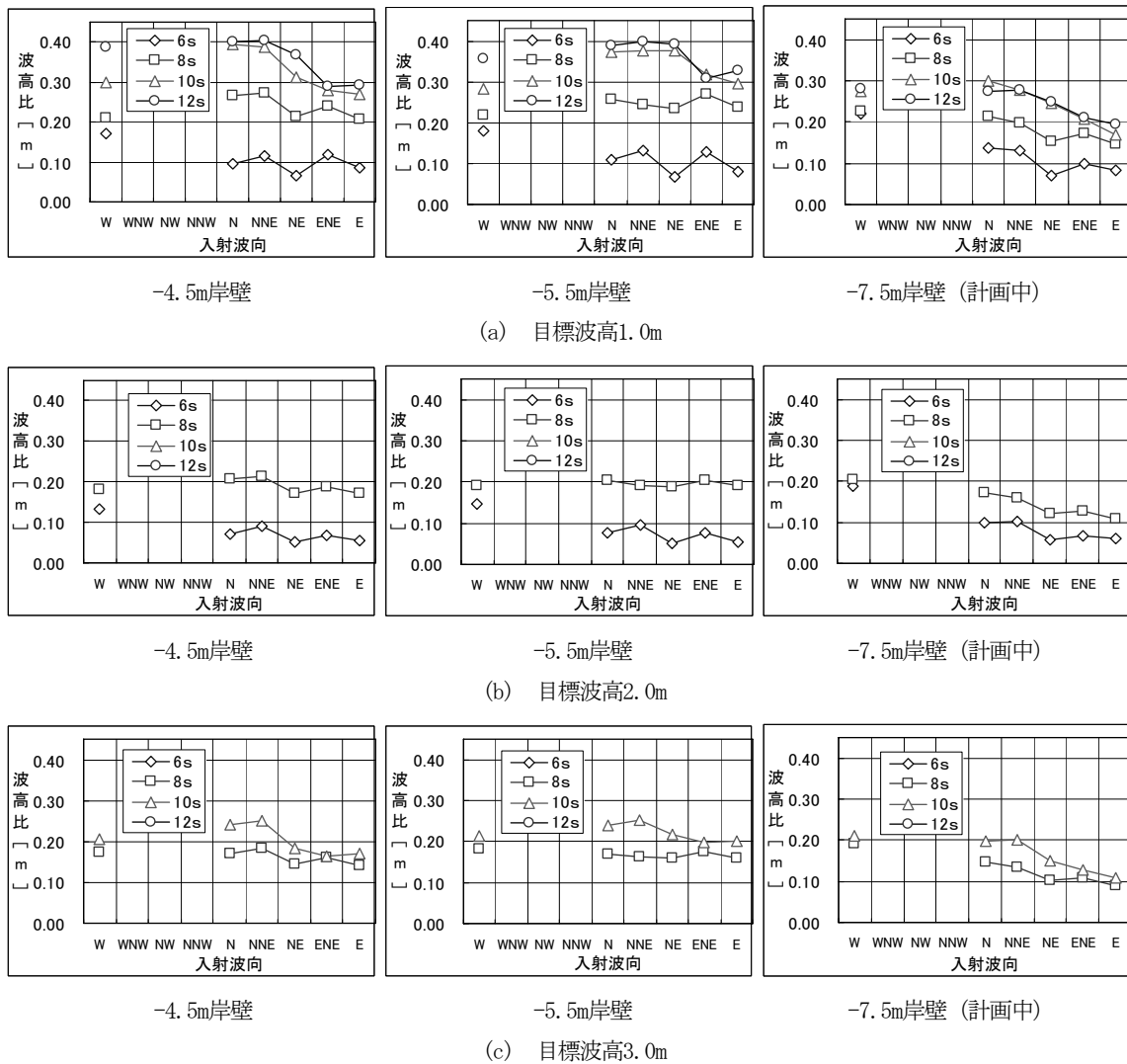


図-5.2.8 港内波高比の算定結果 (S港)

つぎに、周期8sの波について目標波高に対する波高比の変化に着目すると、波向Wを除くいずれの波向、いずれの岸壁でも、目標波高1.0mの波に比べ、2.0m、3.0mとした波の波高比が減少していることがわかる。これらは、主防波堤先端部の高マウンド部や港内の浅瀬によって、不規則波を形成する成分波の一部が砕波したためと考えられる。なお同様な傾向は、目標波高1.0mあるいは2.0mとした周期6sの波、および目標波高1.0mあるいは3.0mとした周期10sの波にも認められる。一方、波向Wでは、とくに周期8sの波について、いずれの岸壁でも目標波高に対する波高比の変化がほとんどみられない。このことから波向Wの波は、S港沖や港内での海底地形のうち比較的深い水路のような部分を通して、ほとんど砕波せずに港内へ侵入していると考えられる。

(3) 港内波高比の補間法

表-5.1.1に示した沖波波浪出現頻度分布、あるいは表-5.1.2に示した波向別の沖波波浪出現頻度分布では、波高に関しては0.5m毎、周期に関しては1.0s毎、波向に関しては16方位にそれぞれランク分けされている。したがって、図-5.2.8に示した港内波高比にこれらを乗じ、各対象岸壁前面での波浪出現頻度分布を得るためには、各代表諸元間の波浪諸元によって得られる港内波高比について、適切な補間法によって推定する必要がある。そこで以下では、従来から行われる入射波高を一定とし

た場合と、本研究で新たに提案する入射波高を変化させた場合のそれぞれについて、その補間法を具体的に述べる。ただし、これらは先に述べた、那覇港を対象とした港内静穏度解析で行った方法とはいずれも少し異なるので、注意されたい。

a) 入射波高を一定とした場合

まず、周期による港内波高比の変化を補間する場合には、図-5.2.8のうち、各波向の目標波高1.0mに対して得られた波高比を抽出して横軸を入射波周期としたグラフにプロットし、周期による波高比の変化を近似する2次曲線を最小2乗法により決定する。ただし、周期6s未満の波に対しては周期6sの、周期12sを超える波に対しては周期12sの波高比をそのまま適用できるものとする。このようにして得た補間式を対象岸壁毎に図-5.2.9～図-5.2.11に示す。ここで、周期による港内波高比の変化を2次曲線で補間することは、本研究で行った新たな試みである。ところが、変動説明率(=相関係数の2乗)は-4.5m岸壁前面、-5.5m岸壁前面でほぼすべて99%を超え、また参考として示した-7.5m岸壁前面でもほぼすべて90%を超えていることから、近似精度は非常に高く有用な方法であると考えられる。すなわち、ある岸壁に入射するある波向の波の周期による波高比の変化がある1つの関数で表されると、那覇港で行ったように各周期間の線分で補間式を定義したときに比べ、代表波以外の周期による港内波高比推定を格段に省力化できると考えられる。

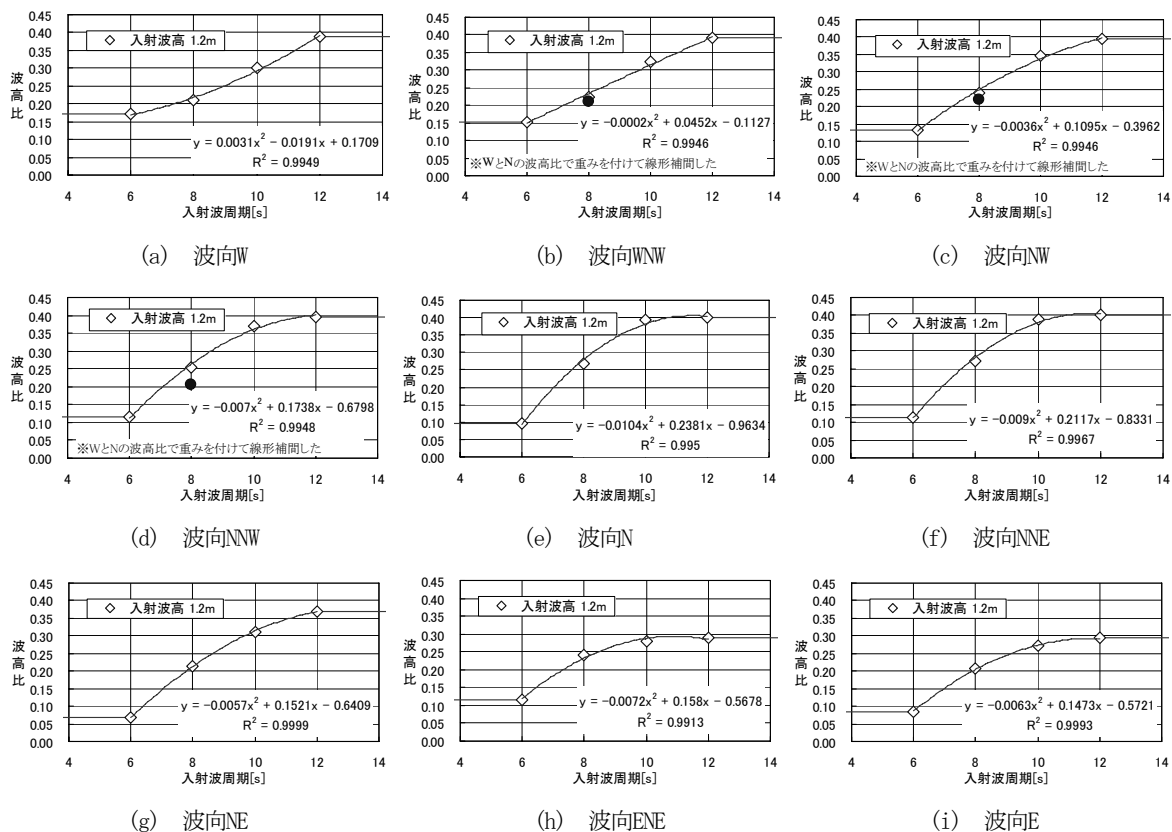


図-5.2.9 港内波高比の補間曲線 (S港, -4.5m岸壁) (波向WNW, NW, NNWに対する波高比の変化は、波向Wと波向Nの間で線形補間)

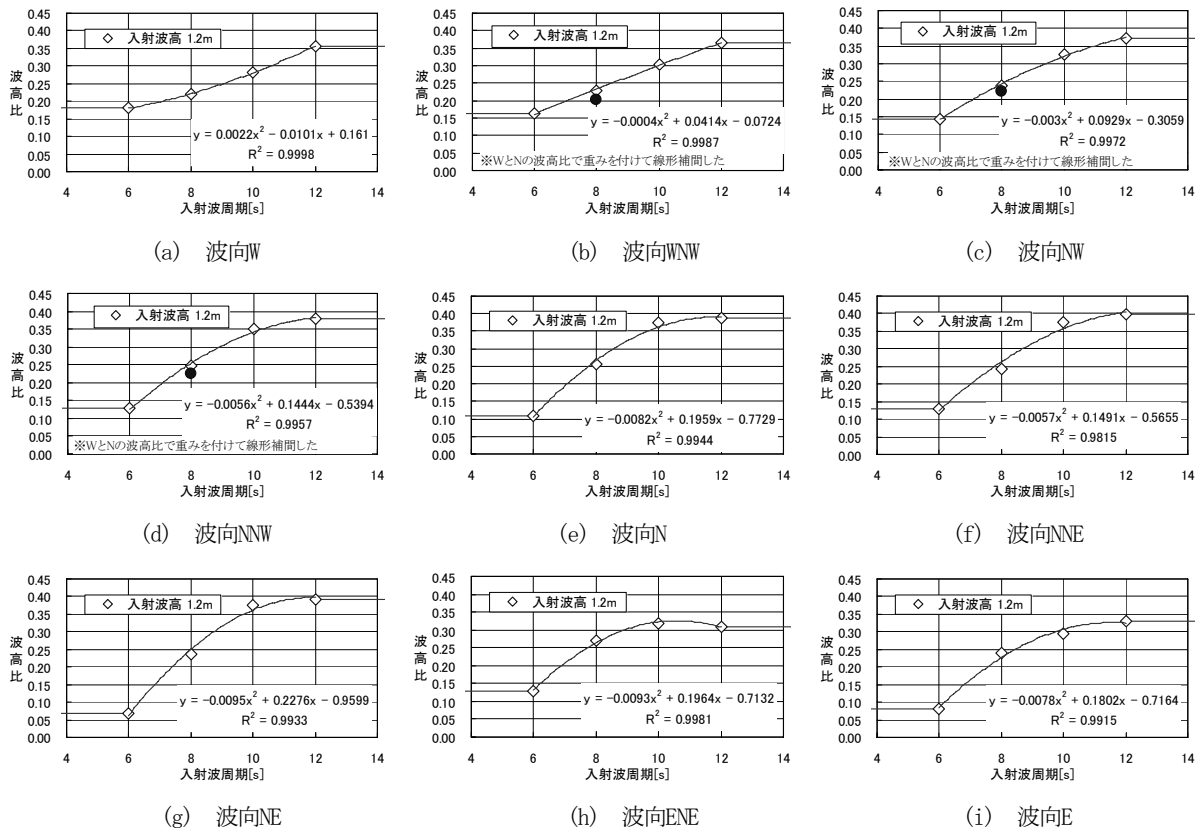


図-5.2.10 港内波高比の補間曲線 (S港, -5.5m岸壁) (波向WNW, NW, NNWに対する波高比の変化は波向Wと波向Nの間で線形補間)

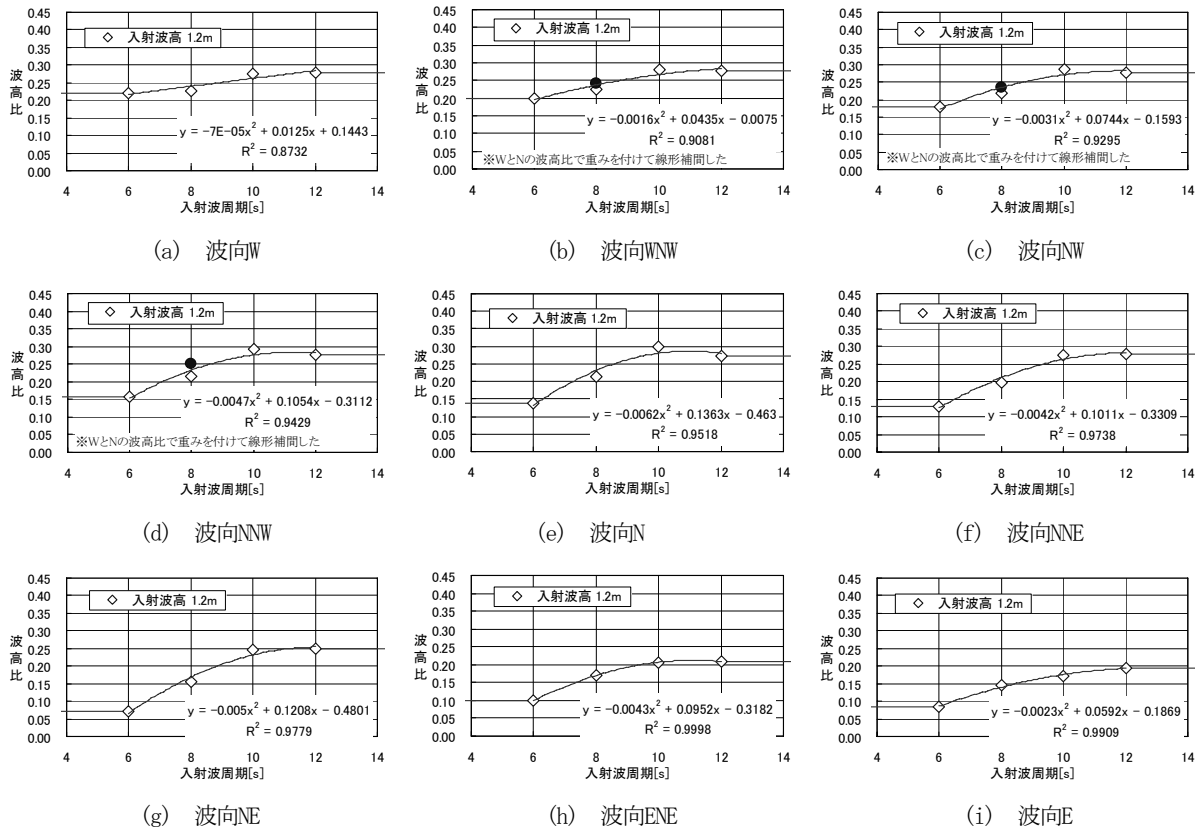


図-5.2.11 港内波高比の補間曲線 (S港, -7.5m岸壁) (波向WNW, NW, NNWに対する波高比の変化は波向Wと波向Nの間で線形補間)

なお、これらの図において、代表波を設定していない波向W, NW, NNWに対する補間2次曲線は、波向Wと波向Nで算定された各周期に対する港内波高比を方向に関して線形に補間し、こうして得られた各波向の波高比に対して得たものである。そしてこれらの図には、目標波高1.0m, 周期8.0sとして別途算定した各対象岸壁前面での波高比をプロットしているが、これらはいずれも補間2次曲線に近い値を示していることが確認できる。

つぎに、波向による港内波高比の変化を補間する場合には、図-5.2.8で得た目標波高1.0mに対する各波向の補間2次曲線において、同一周期での波高比を方向に関して線形に補間する式を設定する。これらは那覇港を対象として行った方法と同様である。なお、波向ESE～S～WSWは、表-5.1.1あるいは表-5.1.2においてS港沖の沖波波浪出現頻度が設定されていないため、ここでも港内波高比の補間式を設定する必要はない。

b) 入射波高を変化させた場合

この場合には、1つの波向に対する波高比に限定した場合でも、入射波の周期だけでなく波高によっても港内波高比が変化する。そこで、那覇港を対象とした港内静穏度解析でも行ったように、本研究では、代表波に対する港内波高比の変化を近似する曲面を設定することを提案する。ただし先述の那覇港では、2種類の波高について周期に対する港内波高比の変化を近似する曲線を求め、それら2本の曲線に直交する直線を引くことで、波高一周期平面に分布する港内波高比を得た。しかしS港では、代表波諸元に3種類の波高値を設定したので、周期に対する3本の波高比変化曲線が得られることになる。そこで、これらに直交する2次曲線を引くことで、同様に、波高一周期平面に分布する港内波高比を得ることもできるはずである。ところが、実際の作業においてこの方法は、2本の曲線に直交する直線を引く、すなわち2点間を線形に内挿あるいは外挿することに比べ、格段に労力を要するようになる。そこで、このような2次曲線を格子状に配置して補間曲面を形成する作業に代えて、格子点上の既知の値を通る補間2次曲面を決定する方法を用いることにする。さらにこの考え方を推し進めて、周期軸方向に関しては6sから12sまで、2s間隔で4つの代表波諸元に対する波高比がすでに得られていることを考慮すれば、波高軸方向に関しても等間隔で4つの代表波諸元に対する波高比を補間的に求めることにより、格子点上の4×4=16点を通る補間3次曲面を決定することができる。そこで以下では、このような考え方に基づいたS港における港内波高比の曲面補間の具体的な手順を述べる。

まず、入射波高を一定とした場合と同様に、4種類の周期に対する波高比が得られている目標波高1.0mのものを対象として、最小2乗法によりこれらを近似する2次曲線：t1を求める（すなわち、図-5.2.9～図-5.2.11）。つぎに、それぞれ2種類の周期に対する波高比が得られている目標波高2.0mおよび3.0mに

対して同様な近似2次曲線：t2, t3を引くために、先に求めた2次曲線：t1のうち、放物線の尖鋭度を表す係数 a_1 がこれらの近似曲線でも共通であると仮定して、それぞれの曲線上にある2点より残りの係数 b_{12} , b_{13} および係数 c_{12} , c_{13} を決定する、

一方、3種類の目標波高に対する波高比が得られている周期8sについて、目標波高に対する港内波高比の変化を近似する2次曲線：h1を求め、それぞれ2種類の目標波高に対する波高比が得られている周期6sおよび10sに対して同様な近似曲線：h2, h3を引くために、先に求めた2次曲線：h1のうち、放物線の尖鋭度を表す係数 a_h がこれらの近似曲線でも共通であると仮定して、それぞれの曲線上にある2点より残りの係数 b_{h2} , b_{h3} および係数 c_{h2} , c_{h3} を決定する。

最後に、周期12sのときの目標波高に対する港内波高比の変化はほぼ周期10sのときと似ていること、および目標波高4.0mのときの港内波高比は目標波高3.0mのときよりも低下するであろうことを考慮して、それぞれ周期10sまでに得られた周期に対する港内波高比の補間2次曲線：t1, t2, t3, および目標波高3.0mまでに得られた目標波高に対する港内波高比の補間2次曲線：h1, h2, h3で外挿して、目標波高4.0mの2次曲線：t4および周期12sの2次曲線：h4を得る。

ここで、周期軸上の3本の2次曲線：t1, t2, t3と目標波高軸上の3本の2次曲線：h1, h2, h3から格子点上の3×3=9点の港内波高比を得ると、これらを通る補間2次曲面が次式により与えられる（島田、2000）。ここで、 r_{ij} は格子点上の位置ベクトルである。

$$\bar{r} = \sum_{ij} k_{ij} \bar{r}_{ij} \quad (5.2.1)$$

$$\begin{aligned} k_{ij} &= f_i(u) f_j(v) \\ f_1 &= (1-t)(1-2t) \\ f_2 &= 4t(1-t) \\ f_3 &= -t(1-2t) \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

また、周期軸上の4本の2次曲線：t1, t2, t3, t4と目標波高軸上の4本の2次曲線：h1, h2, h3, h4から格子点上の4×4=16点の港内波高比を得ると、これらを通る補間3次曲面が、式(5.2.1)に対して次式により与えられる。

$$\begin{aligned} k_{ij} &= f_i(u) f_j(v) \\ f_1 &= (1/2)(1-t)(1-3t)(2-3t) \\ f_2 &= (9/2)t(1-t)(2-3t) \\ f_3 &= -(9/2)t(1-t)(1-3t) \\ f_4 &= (1/2)t(1-3t)(2-3t) \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

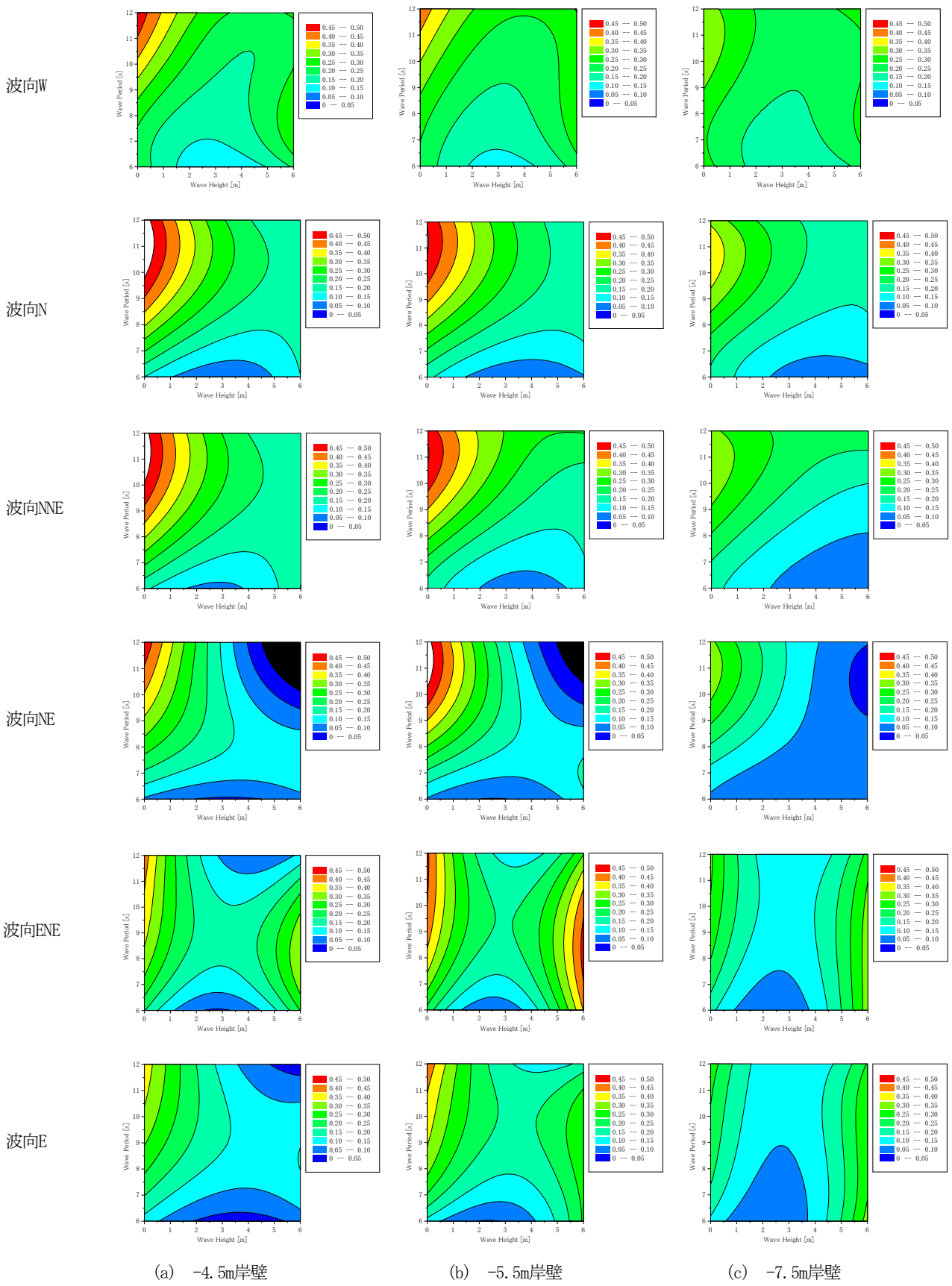


图-5.2.12 港内波高比の補間曲面 (S港)

以下では、入射波高の取り扱い方の異なるそれぞれの方法について、従来の技術基準で示されている荷役限界波高0.5m, 0.3mあるいは0.2mに対する波高の未超過出現率を算定し、その結果評価される港内静穏度の違いを考察する。なお、港湾整備に関する現行の技術基準では97.5%以上の港内静穏度を確保することを目標としている。そこで以下の考察では、得られた未超過出現率がこの数値を満足するかを1つの指標として、沖波に対する港内波高比の算定方法や荷役限界波高によって、この目標達成率がどのように変化するかに着目して考察を行った。

a) 入射波高を一定とした場合

この方法では、沖波の波高に関係なく、図-5.2.9～図-5.2.11に示した港内波高比の補間直線に沖波波浪出現頻度分布を乗じて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を求め、3種類の荷役限界波高(0.5m, 0.3m, 0.2m)に対する波高の未超過出現率を算定した。結果を表-5.2.7, 表-5.2.8および図-5.2.13に示す。

中・大型船舶に対する荷役限界波高0.5m, 小型船舶に対する荷役限界波高0.3m, およびさらに厳しい荷役限界波高0.2mのいずれを採用した場合にも、S港のすべての対象岸壁で港内静穏度の目標値97.5%を満足できていないことがわかる。なお、既設の-4.5m岸壁および-5.5m岸壁に比べ、現在計画中の-7.5m岸壁で波高の未超過出現率が比較的大きく算定されるのは、建設時には撤去される仮設透過堤で波浪減衰が生じていることと、未設置の岸壁による反射波が考慮されていないことが影響しているものと考えられる。

表-5.2.8 対象岸壁の港内静穏度 (S港)
(入射波高を一定とした場合) (従来法)

(現況)	岸壁名 (%)		
波高	-4.5m岸壁	-5.5m岸壁	-7.5m岸壁
$H_{1/3} \leq 0.5m$	85.12	84.70	91.60
$H_{1/3} \leq 0.3m$	70.86	68.29	78.20
$H_{1/3} \leq 0.2m$	58.55	55.84	62.10

※入射波高1.0mの波高比を用いた場合
※-7.5m岸壁のみ無し(反射波無し)の条件による参考値

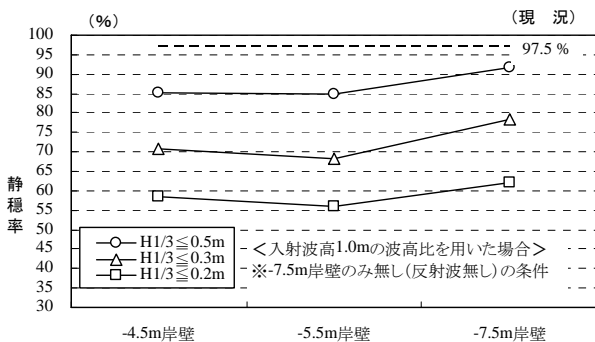


図-5.2.13 対象岸壁の港内静穏度 (S港)
(入射波高を一定とした場合) (従来法)

これらのことから、沖波波高の違いによる港内波高比の変化、例えば、高波浪時に砕波して港内波高が低減することなどを考慮せず、かつ係留船舶の動揺特性のうち周期による違いを無視できるとした場合には、S港の既設岸壁(-4.5m岸壁および-5.5m岸壁)を利用できる中・小型船舶に対して、70%~85%程度の静穏度しか確保されていないと判断される。この結果は、春季から夏季にかけての比較的静穏な時期を選んで荷役が行われている現状を考えると、まず妥当な結果だと思われる。しかし、港内にリーフが発達したS港の場合には、荷役限界波高を超えるような高波浪に対して生じる、砕波による波高低減効果が作用すると考えられる。したがって、これを考慮せずに算定したこれらの静穏度は少々過小評価になっていると推測される。

b) 入射波高を変化させた場合

この方法では、沖波の波高と周期に応じて、図-5.2.12に示した港内波高比の補間曲面に、波向別の沖波波浪出現頻度分布を乗じて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を求め、3種類の荷役限界波高(0.5m, 0.3m, 0.2m)に対する波高の未超過出現率を算定した。結果を表-5.2.9, 表-5.2.10および図-5.2.14に示す。

現在計画中の-7.5m岸壁で波高の未超過出現率が比較的大きく算定される理由は入射波高を一定とした場合と同様であるが、入射波高を変化させた場合には、高波浪時の砕波による波高減衰が考慮されるために、いずれの荷役限界波高に対しても既設の-4.5m岸壁および-5.5m岸壁における静穏度が3~8%向上していることがわかる。

表-5.2.10 対象岸壁の港内静穏度 (S港)
(入射波高を変化させた場合) (従来法)

(現況)	岸壁名 (%)		
波高	-4.5m岸壁	-5.5m岸壁	-7.5m岸壁
$H_{1/3} \leq 0.5m$	91.77	92.24	97.46
$H_{1/3} \leq 0.3m$	76.68	73.99	85.36
$H_{1/3} \leq 0.2m$	61.10	58.36	67.97

※入射波高による浅水変形と砕波の変化を考慮した場合
※-7.5m岸壁のみ無し(反射波無し)の条件による参考値

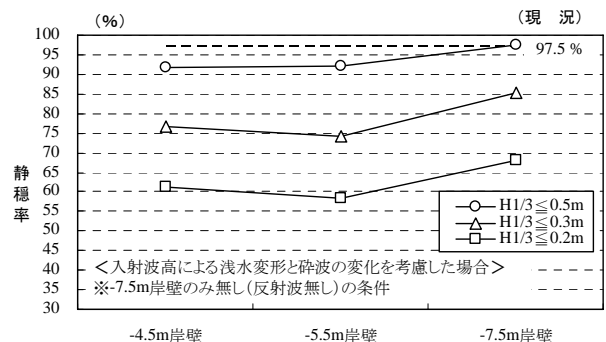


図-5.2.14 対象岸壁の港内静穏度 (S港)
(入射波高を変化させた場合) (従来法)

このように、係留船舶の動揺特性のうち周期による違いを無視できるとしながらも、沖波波高による港内波高比の変化を考慮した場合には、既設の-4.5m岸壁および-5.5m岸壁において、中・大型船舶に対しては90%以上の港内静穏度が確保され、小型船舶に対しては75%程度の港内静穏度が確保されていると判断された。すなわち、これらを先述の入射波高を一定として算定された港内波高比による結果（表-5.2.7、表-5.2.8および図-5.2.13）と比べると、とくに高波浪時に砕波して港内波高が低減することなどを考慮することにより、中・大型船舶では7%程度、小型船舶では5%程度、静穏度が高く見積もられることがわかる。

ただし残念ながら、S港対象岸壁では年間を通じた荷役稼働実績が得られていないため、この数値の妥当性を検証することは困難である。そこで、このような港湾に対しては、荷役実績のある例えば春季から夏季にかけての沖波波浪出現頻度分布に対する各岸壁での波浪出現頻度分布を整理して、季節別の港内静穏度を算定するなどの検証法が考えられる。またこのような季節別港内静穏度の考え方は、通年の港内静穏度が低い複数の岸壁で季節毎の稼働率が異なる場合、対策工が施工されるまでの暫定的な措置として、比較的静穏度が高い時期を狙って荷役岸壁を使い分ける等の対策運用を講じる際などに、非常に有益な情報を与えるものと考えられる。

(5) 標準解析法による荷役稼働率の算定

周期による船体動揺特性の変化を考慮せず、対象船舶の規模に応じて荷役限界波高を一律に設定する従来法とは異なり、標準解析法では、対象岸壁に対する入射波向と周期による係留船舶の動揺量の変化を考慮した荷役限界波高を、船種・船型毎に設定して荷役稼働率を算定する。これを沖縄県S港に適用した場合の概要を以下に示す。

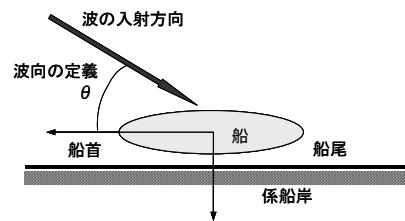
「港内長周期波影響評価マニュアル」には、-4.5m岸壁および-5.5m岸壁を利用する500GRTクラスのフェリーに対する荷役限界波高（有義波）は示されていない。したがってより詳細には、別途、当該船舶に関する船体動揺解析を行って荷役限界波

高を設定する必要があると思われる（詳細解析法）。しかし本研究では、マニュアルに掲載されている船種・船型のうち、当該船舶の動揺特性をもっともよく近似すると思われる、表-5.2.11(a)に示す1,000GRTクラスの自動車運搬船に対する荷役限界波高を適用できるものと仮定した。一方、現在計画中の-7.5m岸壁を利用することが想定される、5,000DWTクラスの一般貨物船に対する荷役限界波高は表-5.2.11(b)で与えられる。

これらの表から、標準解析法において設定される荷役限界波高は、さらに岸壁前面の波向および周期によっても異なることがわかる。ブシネスクモデルによる港内波浪変形計算では、岸壁前面の波高とともに同時にこれらを算定することもできるが、本研究ではマニュアルに示されている手法にならって設定した。

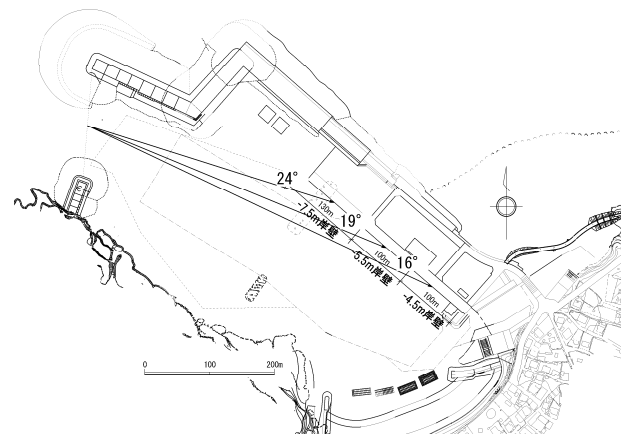
すなわち、岸壁前面の周期は沖波と同じとし、波向は図-5.2.15に示すように、防波堤の開開口部と係留船舶の中心位置を直接結んだ角度として、それぞれ-4.5m岸壁および-5.5m岸壁では15°、-7.5m岸壁では30°に設定した。このようにして設定された各岸壁における荷役限界波高が、表-5.2.11のうち網掛けで示した部分である。なお本研究では、周期に関してこれらの数値を線形補間し、各岸壁において1.0s毎の周期に対する荷役限界波高を設定した。

船尾側から波が入射する場合には、90°を中心に対称となる角度の波向の値を採用する。波向150°の場合は波向30°の結果を用いる。



出典：「港内長周期波影響評価マニュアル」

(a) 係留船舶の作用波向の定義



(b) S港対象岸壁における波向設定

表-5.2.11 風波・うねりに対する荷役限界波高（単位：m）

(a) 自動車運搬船

船型 (GRT)	波向 (°)	有義波周期 (s)					
		4	6	8	10	12	15
1,000	15	0.50	0.50	0.30	0.20	0.20	0.20
	30	0.50	0.50	0.25	0.20	0.20	0.20
	45	0.50	0.40	0.20	0.20	0.20	0.20
	60	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

(b) 一般貨物船

船型 (DWT)	波向 (°)	有義波周期 (s)					
		4	6	8	10	12	15
5,000	15	0.50	0.50	0.50	0.45	0.35	0.30
	30	0.50	0.50	0.50	0.40	0.25	0.25
	45	0.50	0.50	0.50	0.25	0.20	0.20
	60	0.50	0.50	0.30	0.20	0.20	0.20

図-5.2.15 各岸壁における波向の設定法

の岸壁においても目標値97.5%に達しておらず、風波・うねりに対して十分な荷役稼働率が確保されていないと判断される。これらの状況は、従来法による港内静穏度の評価結果（表-5.2.8および図-5.2.13）において荷役限界波高を0.3m（小型船）あるいは0.2m（極小型船）とした場合の中間に位置している。具体的にはこれらは、代表波の入射波高を一定として得られた各対象岸壁前面の波浪出現頻度分布に対し、従来法による港内静穏度の算定では表-5.2.7、標準解析法による荷役稼働率の算定では表-5.2.12において、それぞれ太線で囲まれた範囲の波浪出現頻度を算出したものである。すなわち、荷役限界波高の設定に周期や波向、および船種・船型による船体動揺特性の違いを考慮した標準解析法では、対象岸壁を利用する船舶の荷役稼働率の実態をよりの確に把握できていると考えられる。

一方、-7.5m岸壁を利用することが想定される5,000DWTクラスの一般貨物船の荷役稼働率は、従来法による港内静穏度の評価結果において荷役限界波高を0.5m（中・大型船）とした場合とほぼ対応している。これは、標準解析法で設定される5,000DWTクラスの一般貨物船の荷役限界波高が、当該岸壁で出現頻度の高い周期8s未満のとき0.5mとなるためである。

表-5.2.13 対象岸壁の港内静穏度（S港）
（入射波高を一定とした場合）（標準解析法）

(現況)			
(フェリー, 498GT) (%)			
	岸壁名		
形状	-4.5m岸壁	-5.5m岸壁	-7.5m岸壁
現況	68.72	66.24	—
(旅客船, 5,000DWT) (%)			
	岸壁名		
形状	-4.5m岸壁	-5.5m岸壁	-7.5m岸壁
現況	—	—	87.99

※網掛けは荷役稼働率の目標値(97.5%)を満足しない
※入射波高1.0mの波高比を用いた場合
※-7.5m岸壁のみ無し(反射波無し)の条件による参考値

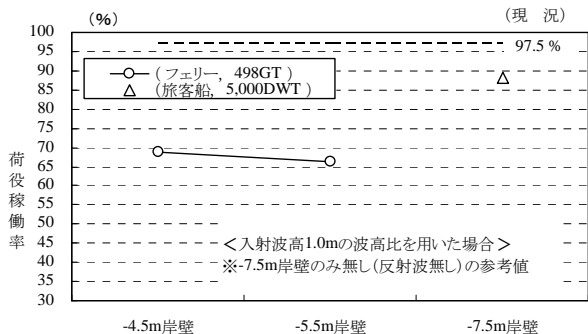


図-5.2.16 対象岸壁の港内静穏度（S港）
（入射波高を一定とした場合）（標準解析法）

b) 入射波高を変化させた場合

この場合には従来法と同様に、沖波の波高と周期に応じて、図-5.1.12に示した港内波高比の補間曲面に、沖波波浪出現頻度分布を乗じて各岸壁前面の波浪出現頻度分布を算定する。そして、従来法のように係留船舶の規模に応じて3種類の荷役限界波高を設定するのではなく、表-5.2.11の網掛け部分に示した荷役限界波高およびその線形補間値に対する波高の未超過出現率を算定して、各対象岸壁の荷役稼働率を算定した。結果を表-5.1.14、表-5.2.15および図-5.2.17に示す。なお、表-5.2.14の各セル値は先述の表-5.2.9のものと全く同じである。

-4.5m岸壁および-5.5m岸壁を利用する500GRTクラスのフェリー（1,000DWTクラスの自動車運搬船）の荷役稼働率は、いずれの岸壁においても目標値97.5%に達しておらず、港内リーフによる高波浪時の碎波減衰を考慮しても、やはり十分な荷役稼働率が確保されていないと判断される。また、これらの状況は、入射波高を一定とした場合と同様に、従来法による港内静穏度の評価結果（表-5.2.10および図-5.2.14）において荷役限界波高を0.3mあるいは0.2mとした場合の中間に位置している。一方、-7.5m岸壁の利用が想定される5,000DWTクラスの一般貨物船の

表-5.2.15 対象岸壁の港内静穏度（S港）
（入射波高を変化させた場合）（標準解析法）

(現況)			
(フェリー, 498GT) (%)			
	岸壁名		
形状	-4.5m岸壁	-5.5m岸壁	-7.5m岸壁
現況	73.74	71.45	—
(旅客船, 5,000DWT) (%)			
	岸壁名		
形状	-4.5m岸壁	-5.5m岸壁	-7.5m岸壁
現況	—	—	92.68

※網掛けは荷役稼働率の目標値(97.5%)を満足しない
※入射波高による浅水変形と碎波の変化を考慮した場合
※-7.5m岸壁のみ無し(反射波無し)の条件による参考値



図-5.2.17 対象岸壁の港内静穏度（S港）
（入射波高を変化させた場合）（標準解析法）

荷役稼働率については、当該岸壁で出現頻度の高い周期8s未満の波に対する荷役限界波高が0.5mと設定されるために、従来法による港内静穏度の評価結果において荷役限界波高を0.5mとした場合にほぼ対応している。

以上、S港内の各対象岸壁に対して4種類の波高の未超過出現率（従来法による2つの港内静穏度、および標準解析法による2つの荷役稼働率）を示した。それぞれの特徴をまとめると概ねつぎのようである。まず、従来法と標準解析法による港内静穏度あるいは荷役稼働率の算定結果を比較すると、標準解析法による荷役稼働率は、小型船を対象とした港内静穏度に比べ、小さな数値、すなわちより厳しい結果を算定し、中・大型船に対しては逆に大きな数値を算定する傾向にあるが、これらは標準解析法による荷役限界波高の設定値に依存するものと思われる。また、港内波高比の算定時に沖波波高による違いを考慮した場合には、とくに荷役限界波高を超える港内波浪が出現し易い高波浪時に生じる港内での砕波による波高減衰が、各対象岸壁前面で算定される波浪出現頻度分布に反映される。したがって、S港のように港内に浅瀬が点在する港湾では、従来法、標準解析法による港内静穏度あるいは荷役稼働率ともに、総じて大きな数値が算定されることになる。港内の海底地形による複雑な波浪変形を考慮すると、この結果は妥当なものであり、より実態に即した港内静穏度あるいは荷役稼働率が算定できるものと考えられる。ただし、港口から港内にかけて浅場のようなものがなく、対象岸壁に向かうにつれて水深が浅くなるような港湾や潮位条件では、浅水変形による波高増大によって波高の未超過出現率が減少することも考えられるので、注意を要する。

6. まとめ

本研究では、透水層を用いた任意反射境界処理法に加え、乱れ生成項に段波によるエネルギー損失を適用した乱流モデルに基づく砕波減衰計算法、ならびに引き波時に海底面が露出することも許容する遡上計算法を備えた最新ブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.2）を対象として、その優れた計算精度を現地観測データによって検証するとともに、その計算特性を十分に活用できるよう既往の港内静穏度解析法を改良して、港内の対象岸壁における港内静穏度ならびに荷役稼働率を高精度に算定する手法を提案した。また、このような改良効果をより明確に示すために、本研究では、港内外に浅瀬や珊瑚礁が広がり、航路や泊地とともに複雑な海底地形を形成している沖縄本島的那覇港および沖縄県S港を対象として、港内静穏度の算定ならびに荷役稼働率の算定を実施した。得られた結論を以下に示す。

1) 那覇港浦添地区および新港地区を対象とした港内波浪観測データの再現計算では、計算容量ならびに計算時間の

制約から計算格子間隔を5mと設定したところ、現地観測データに含まれる周期5s未満の波エネルギーを再現できないことが判明した。なお、那覇港内で観測されるこれらの周期帯の波は風による港内発生波が支配的であると思われる。

- 2) したがって、風による造波ソースを持たず、沖波の港内伝播・変形計算を得意とするブシネスクモデルにおいてはこれを除外し、港内で観測された周期5s以上の風波・うねりに対する再現計算を実施したところ、この範囲においてスペクトル形までも非常によく再現できることを確認した。また、とくに浦添地区前面には水深2m程度の浅瀬が存在し、ここで大きく屈折・浅水・砕波変形した波が浦添地区に入射し、港内波高分布に大きく影響していることが確認された。これは、干上がりによる計算の発散を防ぐために最小水深を設定し、計算上、浅瀬の天端高を低く抑えざるを得なかった従来のブシネスクモデル（Ver4.6）では十分再現できなかった現象である。
- 3) さらに、周期20s～300sの長周期波に対し、計算格子間隔を20mとして実施した再現計算でも、港内長周期波の観測結果をよく再現できることを確認した。
- 4) つぎに、那覇港浦添地区、新港地区、および沖縄県S港を対象として、入射波高を一定とした従来の方法、および入射波高をも変化させた本研究の方法によって港内静穏度を算定した。ここで、対象岸壁前面で得られる港内波高比の、入射波周期および入射波高に対する変化を近似する補間式には、2次曲線あるいは2次曲面が適用できることを確認した。
- 5) さらに、それぞれの方法で得られた対象岸壁における港内波浪出現頻度分布に対し、一定の荷役限界波高を用いる従来法と、船種・船型、周期、波向によって異なる荷役限界波高を用いる標準解析法を適用して荷役稼働率を算定した。この結果、港口周辺に浅瀬や珊瑚礁が広がる那覇港およびS港では、入射波高によって異なるとくに港内での砕波変形を考慮することにより、港内静穏度（=従来法による荷役稼働率）および標準解析法による荷役稼働率ともに、従来の方法に比べ高い数値が算定される傾向にあることが明らかとなった。
- 6) ただし、従来法と標準解析法による港内静穏度あるいは荷役稼働率の算定結果を比較すると、数値の大小関係は標準解析法による対象船舶毎の荷役限界波高の設定値のほか、対象岸壁前面での波浪出現頻度に大きく依存することが確認された。例えば、5,000DWTの一般貨物船に関して、S港で計画中の7.5m岸壁で算定された荷役稼働率は、小型船を対象とした港内静穏度（荷役限界波高0.3m）よりも大きく、中・大型船を対象とした港内静穏

度（荷役限界波高0.5m）に近い値が算定されたのに対し、那覇港浦添1～3号岸壁で算定された荷役稼働率は、小型船を対象とした港内静穏度（荷役限界波高0.3m）よりも小さな数値が算定された。これはとくに、出現頻度の高い周期8sの波に対する荷役限界波高が、波が浅い角度で入射するS港-7.5m岸壁では0.5mであるのに対し、深い角度で入射する那覇港浦添1～3号岸壁では0.3mであることが影響している。

- 7) 一方、港口から港内にかけて浅場のようなものがなく、対象岸壁に向かうにつれて水深が浅くなるような港湾や潮位条件では、浅水変形による波高増大によって波高の未超過出現率が減少することも考えられる。すなわち、潮位による港内波高比の変化を確認した波浪変形計算結果では、S港-4.5m岸壁前面において、リーフによる砕波変形が生じにくい満潮時に波高比が減少し、干潮時には逆に増加する現象が確認された。これは、潮位が低下し水深が浅くなったことにより岸壁前面で浅水変形が生じたものと考えられる。したがって、このような場合には港内静穏度ならびに荷役稼働率が悪化することになるため、注意を要する。

7. あとがき

従来の港内静穏度解析法は、海底地形の変化に伴う港内での屈折・浅水・砕波変形を算定しない高山法によって港内波高分布を算定することを前提にしていた。したがって、入射波高を一定として波向、周期による港内波高比の変化のみを考慮した計算ケースを設定しておけば十分であった。一方、港内外で生じる複雑な波浪変形を同時に算定するために、高山法に代えてブシネスクモデルを適用した場合でも、本研究で行ったような入射波高による港内波高比の変化を考慮しなければ、とくに港内で生じる屈折・浅水・砕波変形を考慮した港内静穏度を真に算定しているとはいえない。例えば、一定の入射波高として1mあるいは3mを設定した場合に算定される港内静穏度は、とくに港内の水深変化が激しい場合、大きく異なることが十分にあり得る。本研究では、このような問題点に言及するとともにこれを解消する手法を提案した。

ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver4.6）およびその改良版の最新ブシネスクモデル（NOWT-PARI Ver5.2）は、港湾・海岸構造物の設計波の算定や被災時の作用波の算定等においてすでに数多くの適用実績を有している。本研究ではさらに、港口や港内に浅瀬やリーフが広がる複雑な港湾で得られた現地観測データに対して再現計算を行い、その計算精度を確認するとともに、その精度が保証される計算モデルの適用範囲にも言及した。

実務における港内静穏度解析ならびに荷役稼働率算定にブシ

ネスクモデルを用いる際には、本研究で述べたようなブシネスクモデルの計算特性や適用限界を熟知しておく必要があると思われる。

(2007年3月9日受付)

謝辞

本研究をとりまとめるにあたり、内閣府沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所ならびに沖縄県八重山支庁土木建築課からは、現地港湾における気象・海象条件に関する資料や港湾計画図・港湾施設図等をご提供いただくとともに、当該港湾が抱える問題点や港湾荷役の現状等についてご教示いただいた。また、(株)日本港湾コンサルタントの山賀博氏、田中和広氏には、代表波の波浪変形計算にかかる演算作業と入射波向に対する港内波高比の補間作業をご担当いただいた。この場をお借りして、心から謝意を表します。

参考文献

- 平石哲也，河野信二，玉城重則，長谷川準三(1997)：港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて，海岸工学論文集，第44巻，pp. 246-250。
- 平山克也（2001）：ブシネスクモデル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。
- 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。
- 平山克也・上原 功（2002）：消波構造物に作用する波浪の消波機構を考慮した港内波浪変形計算，海岸工学論文集，第49巻，pp. 671-675。
- 平山克也・平石哲也（2004）：ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第51巻，pp. 11-15。
- 平山克也・平石哲也（2005）：平面2次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 11-15。
- 財団法人沿岸技術研究センター（2004）：港内長周期波影響評価マニュアル，港内長周期波影響評価マニュアル検討委員会。
- 財団法人沿岸技術研究センター（2001）：平成13年度沖縄管内における波浪特性把握調査業務報告書。
- 島田静雄（2000）：CAD・CGのための基礎数学，インターネット時代の数学シリーズ⑦，共立出版，232p。
- 社団法人日本港湾協会（1999）：港湾の施設の技術上の基準・同解説，運輸省港湾局監修。

記号表

f_1	:	直線スペクトルの下限周波数
f_2	:	直線スペクトルの上限周波数
H	:	波高
H_0	:	沖波波高
H_0'	:	換算沖波波高
$H_{1/3}$:	1/3有義波高
$H_{LL/3}$:	長周期波の有義波相当波高
L	:	波長
L_0	:	沖波波長
$L_{1/3}$:	有義波の波長
\mathbf{r}	:	任意点での空間位置ベクトル
\mathbf{r}_{ij}	:	格子点上の空間位置ベクトル
R_L	:	風波と長周期波のエネルギー比の平方根
$S(f)$:	周波数スペクトル
S_{max}	:	方向集中度パラメータ
T	:	周期
$T_{1/3}$:	1/3有義波周期
Δt	:	差分時間間隔
Δx	:	x方向の計算格子間隔
Δy	:	y方向の計算格子間隔
α_L	:	標準スペクトルのパラメータ
θ	:	波向
θ_p	:	主波向

付録A 那覇港内における現地観測結果（夏季）および台風0514号来襲時の気象概況について

A.1 波浪観測データの解析方法

(1) 風波・うねり

超音波式波高計により計測された20分間の水面変動の時系列データは、①異常値の除去、②トレンドの除去、③ゼロアップクロス法による代表波の算出、の処理を経て、風波・うねりの波高、周期の統計量に整理されている。また、波向は、異常値およびトレンドが除去された水平2成分の流速変動 u 、 v および水圧変動 p を対象として、共分散法により計算されている。異常値は、波形の明らかな異常あるいは水位の絶対値が標準偏差の4倍を超えた部分として定義され、データから除去される。

風波・うねり解析においては、長周期波成分を示すトレンドを除去する。具体的には、異常値を除去した波形に20sの移動平均を行った波形を求め、さらにこの波形に30sの移動平均を

行って得た波形を元の波形から差し引く方法が採用されている。

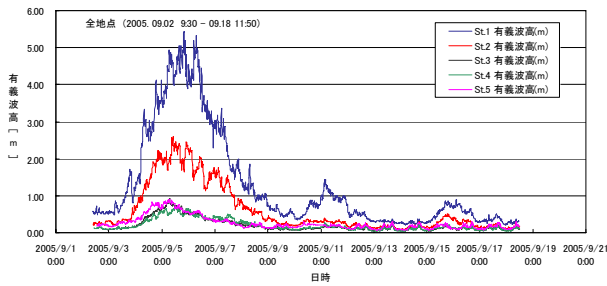
異常値およびトレンドが除去された波形に対しゼロアップクロス解析を行い、個々波の波高および周期を求める。このとき、欠測部分（異常値の除去部分を含む）の波形は線形補間されるが、解析データ数に占める欠測データ個数の割合が半数以上あった場合には、波高、周期の統計量を欠測扱いとする。

(2) 長周期波

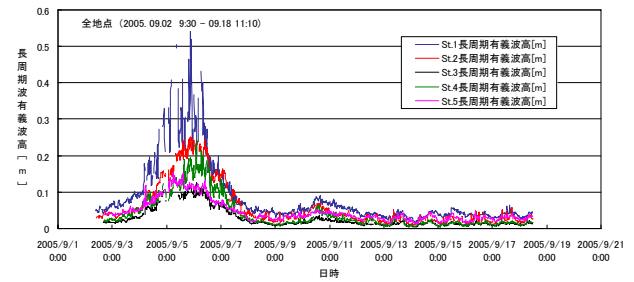
風波・うねり解析と同様に異常値が除去された水面変動の時系列データに対し、FFT解析を行い周波数スペクトルを算定する。ただし、解析データ数は、連続した20分間時系列データを2つ繋いだ40分間時系列データのうち、前半4096個を用いている。また、300s以上のトレンドは最小2乗法による放物線近似によって波形データから除去されている。

長周期波の有義波相当波高は次式によって求める。

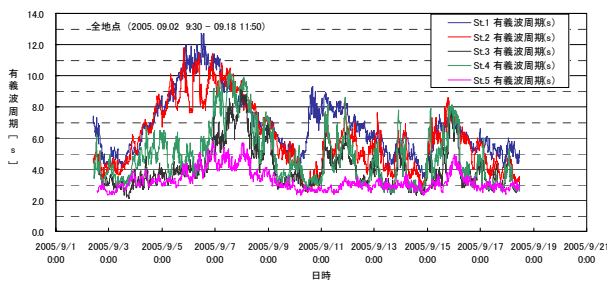
$$H_{L1/3} = 4.0 \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S(f) df} \quad (\text{A. 1.1})$$



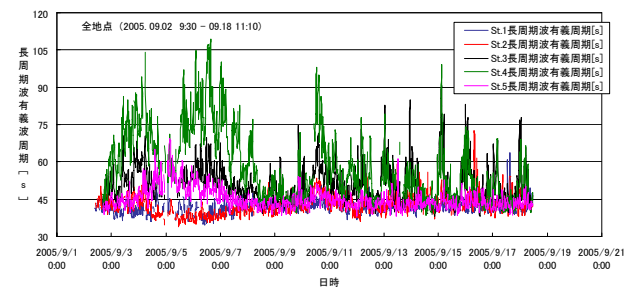
(a) 有義波高



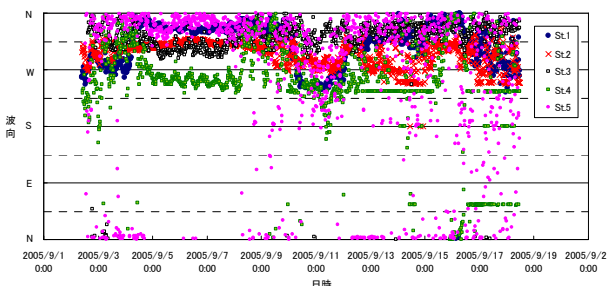
(a) 代表波高



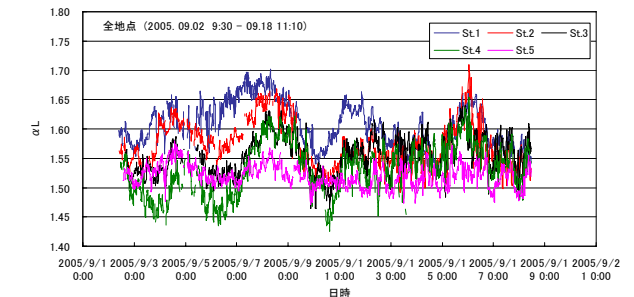
(b) 有義波周期



(b) 代表周期



(c) 平均波向



(c) 係数 α_L

図-A.2.1 風波・うねりの経時変化（夏季）

図-A.2.4 長周期波成分の経時変化（夏季）

ここで、 $S(f)$ は周波数スペクトル、 f_1 、 f_2 は積分する周波数範囲を示し、全周波数帯とすれば通常の有義波相当波高が得られる。本解析では長周期波の周期帯を20~300s ($f_1 : 1/300$, $f_2 : 1/20$)と定義し、長周期波高は式(A.1.1)で得られるものの0.9倍とした値を採用した(財団法人沿岸技術研究センター, 2004)。また、代表周期は、この周期帯の0次および2次のモーメントから平均周期を求め、これを1.2倍して有義波相当とし

た。なお、平石ら(1997)による標準スペクトル形を定義する際に用いる係数 α_L は、波の総エネルギーに対する長周期波成分の波エネルギーの比の平方根 R_L との相関が強いことを利用して得ることができる。本解析では、平石ら(1997)の図-7より推定した次の近似式を用いて、各時刻における係数 α_L を算出した。

$$\alpha_L = -0.1069 \ln(R_L) + 1.3368 \quad (\text{A.1.2})$$

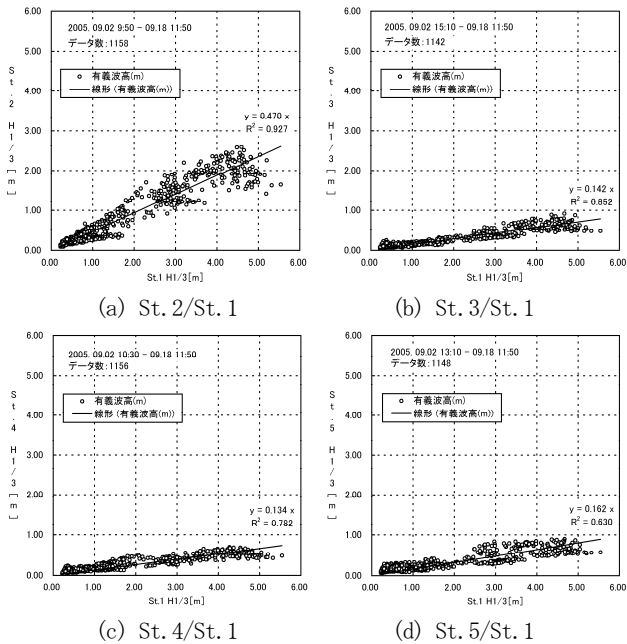


図-A.2.2 風波・うねりの波高相関(対St.1, 夏季)

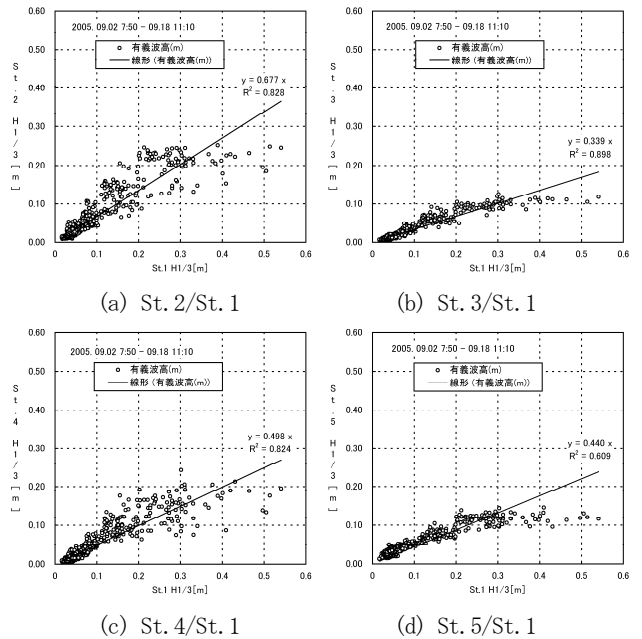


図-A.2.5 長周期波の波高相関(対St.1, 夏季)

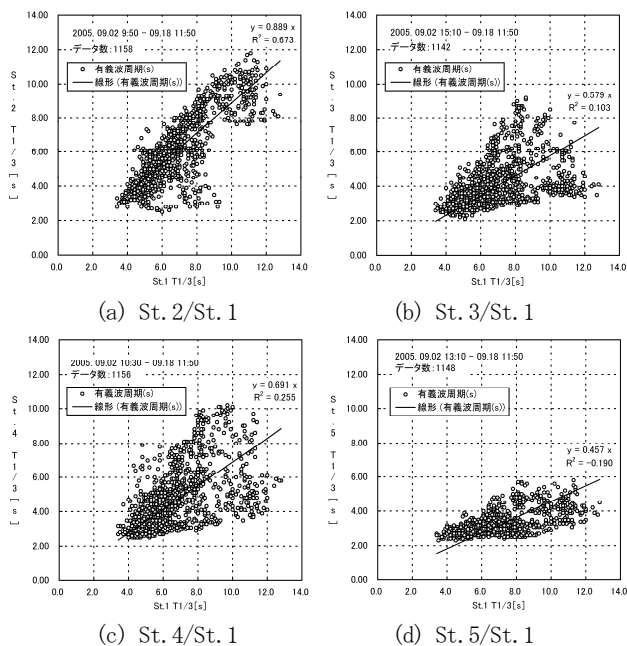


図-A.2.3 風波・うねりの周期相関(対St.1, 夏季)

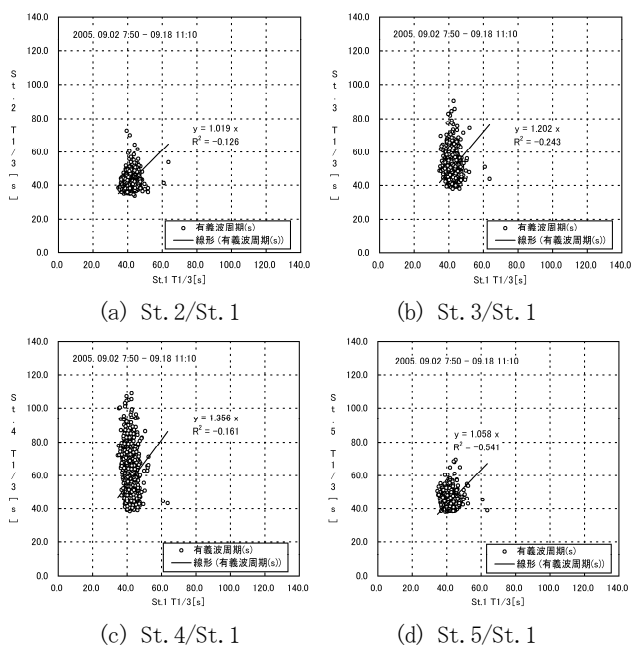


図-A.2.6 長周期波の周期相関(対St.1, 夏季)

A.2 現地観測結果（夏季）

ここでは、夏季の現地観測結果について、その概要を記す。

(1) 風波・うねり

観測期間中に得られた風波・うねり成分の有義波高、有義波周期、平均波向の経時変化を図-A.2.1に、港外の波浪観測地点St.1に対する波高、周期の相関をそれぞれ図-A.2.2および図-A.2.3に示す。

台風0514号が来襲した9月5日から6日にかけて、St.1～St.5の各地点で有義波高の増大が観測されている。これに対応して、St.1およびSt.2では有義波周期の増大が観測されているが、港内に位置するSt.3～St.5ではこの傾向がほとんどみられない。しかし、この期間に得られた周波数スペクトルをみると、これらの地点でも約10sの成分波のエネルギーが約2.5sの成分波のものと同程度存在していることが確認できる（図-3.2.1）。したがって、この期間には、港内で発生した短周期成分のために、ゼロアップクロス解析で得られる有義波周期が短周期側へ偏ってしまっていたことが推測される。それ故、風速が5m/s以下までおさまった9月7日早朝あたりからは（図-A.2.7）、港内のSt.3～St.5でも有義波周期が増大していることが確認できる。なお、波向について港外（St.1）では、9月11日頃の擾乱によってWSWの波向が観測されたことを除けば、台風0514号来襲時も含め概ねNNWであった。またこのとき、St.2およびSt.3ではNW、St.4ではWSW、St.5ではNNWが観測された。

港外の観測点St.1に対する各観測点St.2～St.5の相関をみると、波高についてはいずれも比較的高い相関関係が認められる。すなわち、浦添地区および新港地区の波高は、St.1が位置する倭口から港内に入射する波がまず支配的であることがわかる。しかしより詳細には、その他の開口部（浦添口および唐口）からの入射波も港内の波高分布に影響を与えていること、および浦添地区のSt.4、St.5の変動説明率 R^2 （＝相関係数の2乗）が若干小さめであることから、港内発生波の影響もあることなどが推測される。一方、周期についてはSt.2を除きいずれも低い相関となっている。これは、倭口以外の開口部からの入射波のほか、とくに港内発生波による影響が大きいことを示唆している。

(2) 長周期波

観測期間中に得られた長周期波成分の代表波高、代表周期、係数 α_L 平均波向の経時変化を図-A.2.4に、港外の波浪観測地点St.1に対する波高、周期の相関をそれぞれ図-A.2.5および図-A.2.6に示す。

風波・うねり成分と同様に、台風0514号が来襲した9月5日から6日にかけて、St.1～St.5の各地点で代表波高の増大が観測されているが、代表周期は港内でのみ増大し、60s～90s程度となっている。このとき、係数 α_L は港内ほど小さな値となっており、風波・うねり成分の波エネルギーに対する長周期波成分のエネルギーレベルが高まっている様子が伺える。

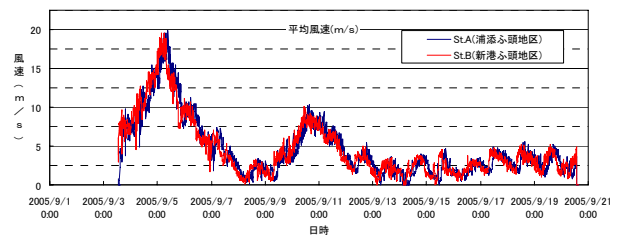
港外の観測点St.1に対する各観測点St.2～St.5の相関をみると、波高については風波・うねり成分と同様にいずれも比較的高い相関関係が認められる。しかし、St.1で長周期波の代表波高が0.3m程度以上になると、いずれの観測地点でもそれ以上の波高の増加はほとんどみられなくなり、ほぼ一定値となっている。このことから那覇港では、港内外に広がるリーフや浅瀬によって港内への長周期波成分の侵入や港内での増幅現象が抑制されている可能性が示唆される。一方、周期については、St.1では概ね40s程度の長周期波しか観測されていないのに対し、その他の観測点では60s～100s程度の長周期波が観測されている。したがって、先程の波高に関する考察と合わせて考えると、那覇港内では、波高0.3m以上、周期40s程度の長周期波はリーフや浅瀬等による何らかの作用によって、低周波数側へシフトすることが推測される。

(3) 風向・風速

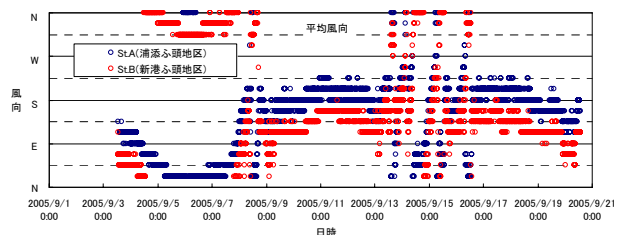
観測期間中に得られた風向・風速の経時変化を図-A.2.7に示す。風向・風速ともに、浦添地区と新港地区の間で観測地点による違いは確認できない。台風0514号来襲時には、9月3日未明から9月7日早朝にかけて風速5m/sを超え、9月5日のピーク時には北からの風で平均風速18m/sが観測されていた。これは、波向NNWの風波・うねり（港内発生波を含む）が観測されたこととよく一致する。

(4) 潮位

観測期間中に那覇検潮所で得られた実測潮位の経時変化を図-A.2.8に示す。St.1において有義波高の増大が顕著であった9月5日夕刻はほぼ満潮時刻であったことがわかる。

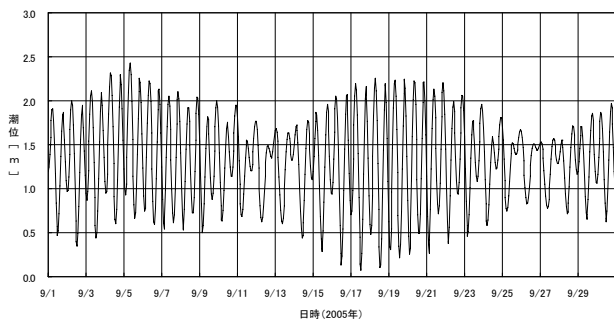


(a) 風速

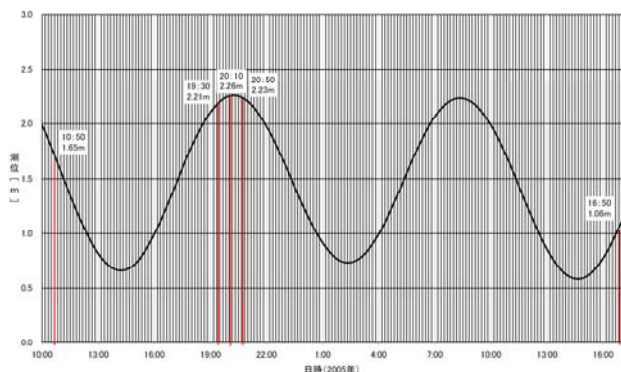


(b) 風向

図-A.2.7 風向・風速の経時変化（夏季）



(a) 9月1日～9月30日 (潮位基準面 : T.P. +115.9cm)



(b) 9月5日～9月6日 (台風0514号による擾乱時)

図-A.2.8 実測潮位の経時変化 (夏季)

(5) 那覇港NOWPHAS波浪観測データとの比較

那覇港ではNOWPHASによる波浪観測が実施されており、図-A.2.9に示すように、今回設置した港外の波浪観測地点St.1とは658mしか離れていない。しかし、那覇港NOWPHAS波浪観測は毎偶数正時の20分間観測しか実施されておらず、かつ9月8日までは観測装置の不具合により欠測であったため、とくに夏季の現地観測における港外波浪観測データはSt.1で取得することとした。しかしながら、那覇港における沖波波浪出現頻度分布等は長年に渡りNOWPHAS地点において得られた観測データに基づいているため、ここでは、今回設置したSt.1とNOWPHAS地点で得られた波浪観測データの関係を明らかにしておくこととした。

那覇港NOWPHAS波浪観測では切れ目のない連続データを取得していない。そこで、毎偶数正時の20分間観測データを用いて解析した風波・うねり成分について、NOWPHASによる有効観測期間と今回の現地観測期間 (夏季) が重なる、9月9日～9月18日の期間に得られた有義波高、有義波周期、平均波向の経時変化を図-A.2.10に示す。また、波高、周期の相関をそれぞれ図-A.2.11および図-A.2.12に示す。これらより有義波高、有義波周期、平均波向の各諸元において両者の相関は比較的高いと考えられるが、完全には一致しないことに注意を要する。

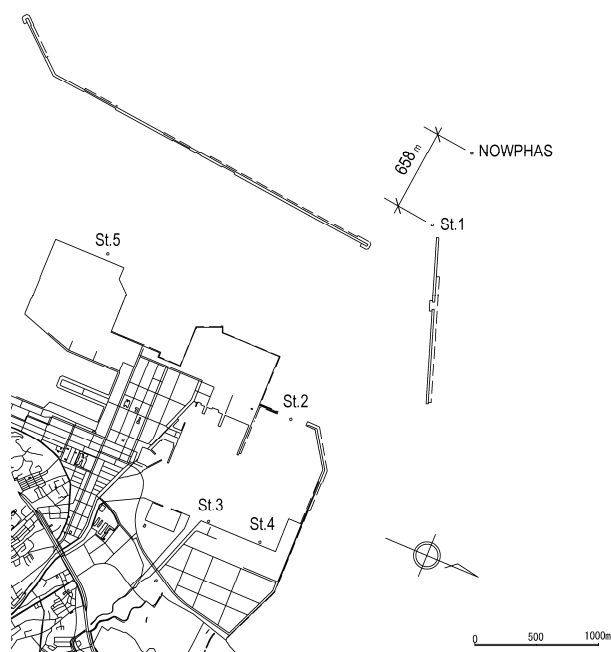
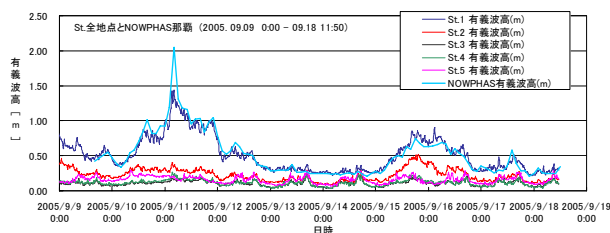
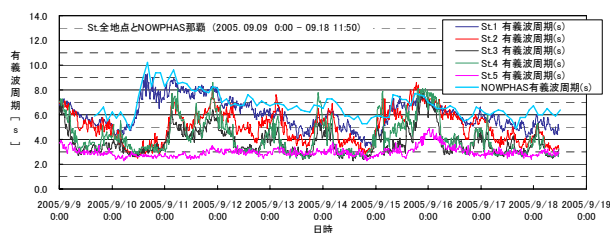


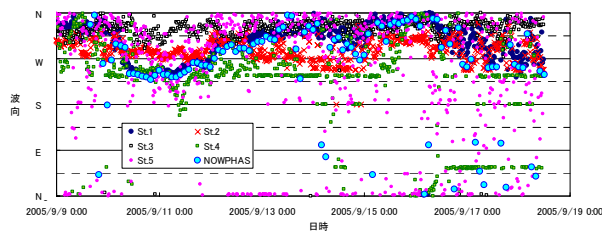
図-A.2.9 NOWPHAS波浪観測地点とSt. 1との位置関係



(a) 有義波高



(b) 有義波周期



(c) 平均波向

図-A.2.10 風波・うねりの経時変化 (9月9日～18日)

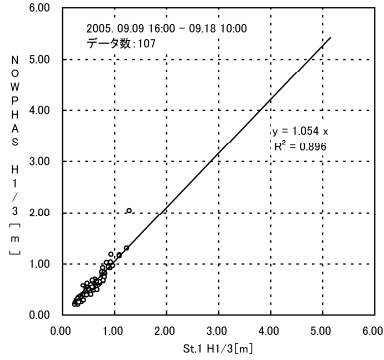


図-A. 2.11 NOWPHAS波浪観測地点とSt. 1の波高相関

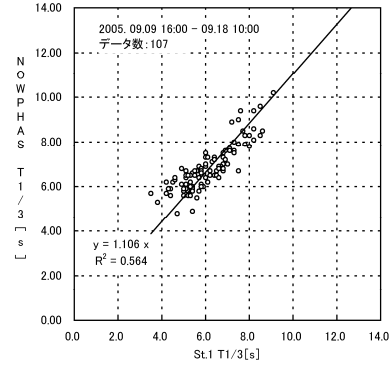


図-A. 2.12 NOWPHAS波浪観測地点とSt. 1の周期相関

A.3 台風0514来襲時の気象概況

夏季(平成17年9月2日9:30~平成17年9月18日11:30)に行われた現地観測期間中、沖縄本島に接近した台風0514号について概要を以下に示す。

夏季の現地観測を行った期間中の9月5日に、台風14号が沖縄

本島東側を通過した。台風の経路図を天気図、波浪実況図、沖縄気象台による気象概況と合わせて以下に示す。これらより、沖縄本島の東側海域では4日頃から猛烈なしけとなっていたが、本島西側沿岸に位置する那覇港では、台風通過後の吹き返しにより、5日午後にしけのピーク時刻を迎えたことが推測された。

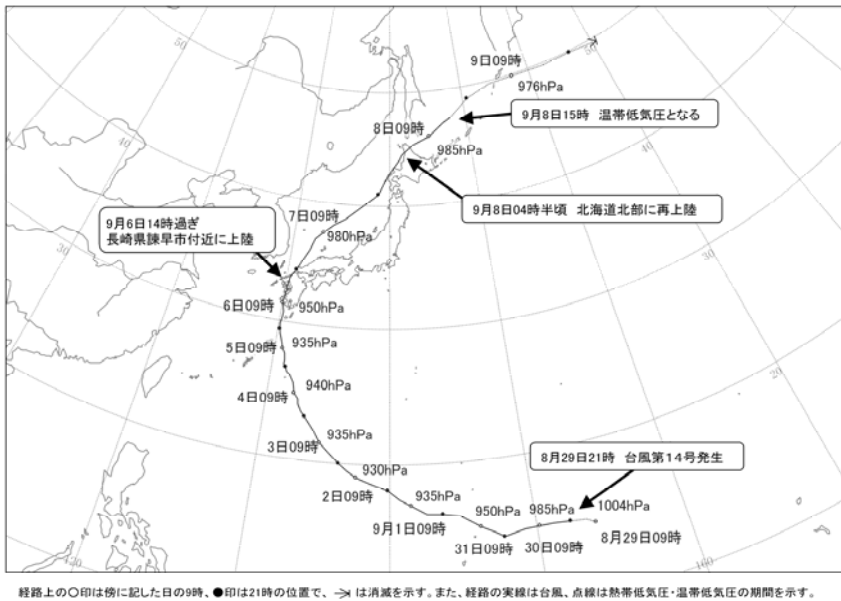


図-3.1.3 台風0514号経路図

<気象概況>

○波

大東島地方の沿岸では9月3日昼前から6mを超える大しけとなった。また、3日夜からは台風の接近で12mを超える猛烈なしけとなり、5日夕方にも猛烈なしけの状態が続いている。本島地方でも、3日夜から6mの大しけとなり、4日から9mを超える猛烈なしけとなっている。宮古島地方でも4日から6mを超える大しけ、八重山地方では4~5mのしけとなっている。(図-3.1.3~5参照)

○観測値

南大東村在所では、9月4日19時20分に最大風速32.8m/s(西南西の風)、4日20時32分に最大瞬間風速55.6m/s(西南西の風)、4日15時05分に最低気圧936.8hPaを観測した。最大瞬間風速は南大東島における9月の極値の1位(観測史上4位)を、最低気圧は観測史上1位をそれぞれ更新している。

名護市宮里では、5日13時40分に最大風速16.3m/s(北西の風)、4日18時12分に最大瞬間風速32.8m/sを観測したほか、那覇市樋川では5日02時30分に最大風速17.4m/s(北北西の風)、5日00時08分に最大瞬間風速29.2m/s(北北西の風)を観測した。

雨量は、南大東村在所で4日20時40分までの1時間に50mmの非常に激しい雨を観測し、降り始めの3日00時から5日15時までの雨量は257mmとなった。

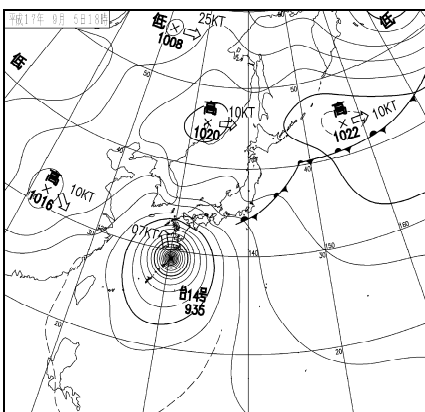


図-3.1.4 地上天気図

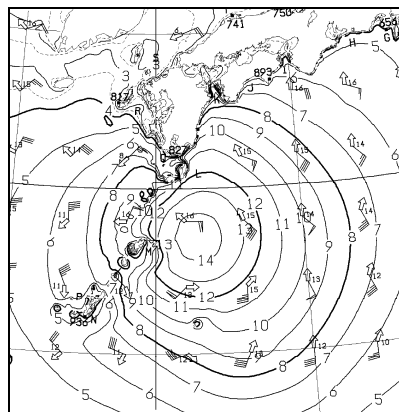


図-3.1.5 波浪実況図

付録B 港内波高比の算定結果に及ぼす潮位の影響について
1—沖縄県那覇港—

那覇港のように、リーフ等の浅い水域が点在する港湾等を対象としたブシネスクモデルによる波浪変形計算では、屈折・浅水・砕波変形の程度に場の水深が深く関係するため、初期潮位はとくに慎重かつ確実に設定される必要がある。ところが、港内静穏度解析に波浪と潮位の同時出現確率を考慮することは、計算負荷等の問題からいまのところ実施するまでには至っていない（例えば、出現確率を割り当てる代表ケースとして、満潮位時、平均潮位時、干潮位時を設定した場合、それぞれの条件において代表波の港内波高比を算定するためには、波浪と潮位の同時出現確率を考慮しない場合の3倍の計算ケース数が必要になる）。

そこで、沖波波浪出現頻度分布に対する代表波のうち、入射波周期と波向はそれぞれ1種類ずつ（8s, NNW）とし、入射波高のみ3種類（1.0m, 2.0m, 3.0m）とした対象波を設定して、3種類の潮位条件（満潮位：H.W.L.=D.L.+2.12m, 平均潮位：M.S.L.=D.L.+1.18m, 干潮位：L.W.L.=D.L.+0.04m）に対するこれらの港内波高比を比較した。

ブシネスクモデルで計算されたNOWPHAS地点に対する港内波高比のうち、各地点に対応する1つの計算格子で得られた水位の時系列データをゼロアップクロス解析して得た有義波高から算定したものを付表-B.1および図-B.1に示す。なお、St.1～St.5およびNOWPHAS波浪観測地点の位置は付図-A.2.9を参照されたい。

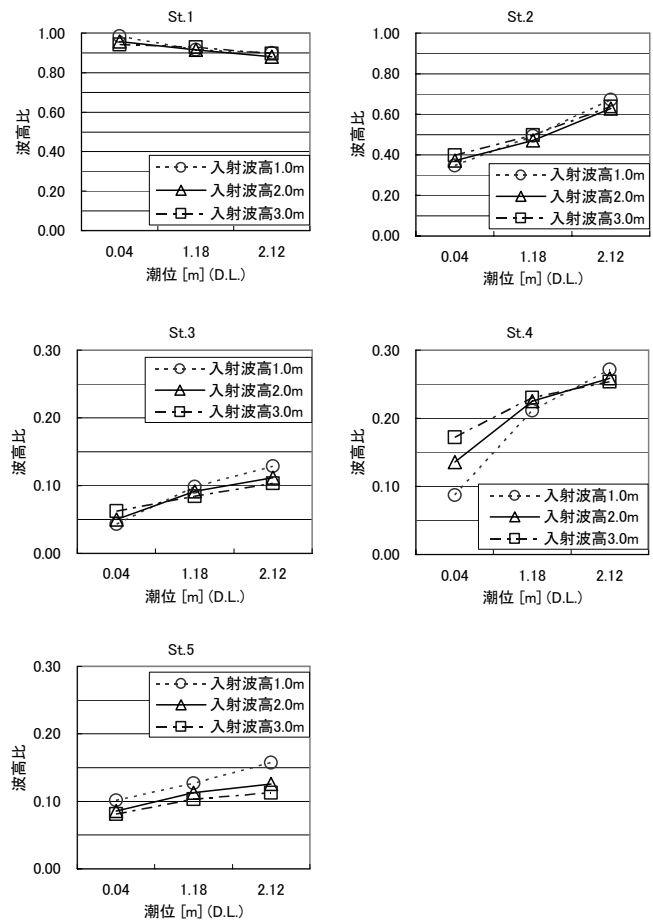
まず、那覇港沖のSt.1地点における波高比は、潮位や入射波高によらず、およそ一定値0.9となる。しかし、那覇港内の浦添地区港口部に位置するSt.2地点で得られた波高比は、いずれの入射波高でも、潮位とともに増大している。これは、この沖側に存在する天端高約D.L.-2mの浅瀬による波の屈折・砕波状況が、潮位の上昇による浅瀬上の水深の増大に伴って変化することが原因と考えられる。さらに、浦添地区内の浦添1号岸壁前面のSt.3地点でも、St.2地点と同様な傾向が見受けられる。これは、浦添地区内へ伝播する波は港口部のSt.2地点を通過して侵入することに対応している。ただし両地点では、潮位が高く入射波高が小さいほど港内波高比が大きくなる傾向が確認できる。これらは、浦添地区港口沖の浅瀬による砕波の発生頻度が減少するためと考えられる。ところが、同じ浦添地区内に位置する浦添4号岸壁前面のSt.4地点では、潮位とともに波高比が増大する傾向は同様に確認されるけれども、とくに干潮位時には、入射波高が大きいほど港内波高比が増大している。これは、この付近に広がる浅瀬の影響により、潮位が低く（水深が浅く）波形勾配が大きいほど、浅水変形によって波高が増大するためと考えられる。

付表-B.1 入射波高と潮位の違いによる港内波高比の算定結果（那覇港, 各波浪観測地点）

L.W.L. (D.L.+0.04m)	入射波高1.0m			入射波高2.0m			入射波高3.0m		
	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比
NOWPHAS	0.69	8.24	1.00	1.40	8.33	1.00	2.09	8.29	1.00
St.1	0.68	8.16	0.99	1.34	8.30	0.96	1.97	8.31	0.94
St.2	0.24	8.19	0.35	0.52	8.57	0.37	0.83	9.23	0.40
St.3	0.03	9.34	0.04	0.07	10.74	0.05	0.13	9.19	0.06
St.4	0.06	8.74	0.09	0.19	8.81	0.14	0.36	9.05	0.17
St.5	0.07	8.47	0.10	0.12	8.90	0.09	0.17	8.48	0.08

M.W.L. (D.L.+1.18m)	入射波高1.0m			入射波高2.0m			入射波高3.0m		
	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比
NOWPHAS	0.71	8.43	1.00	1.42	8.12	1.00	2.13	8.35	1.00
St.1	0.65	8.35	0.92	1.30	8.42	0.92	1.98	8.48	0.93
St.2	0.35	8.25	0.49	0.67	8.41	0.47	1.06	8.02	0.50
St.3	0.07	8.94	0.10	0.13	8.32	0.09	0.18	9.00	0.08
St.4	0.15	8.91	0.21	0.32	9.15	0.23	0.49	9.05	0.23
St.5	0.09	9.57	0.13	0.16	9.79	0.11	0.22	9.56	0.10

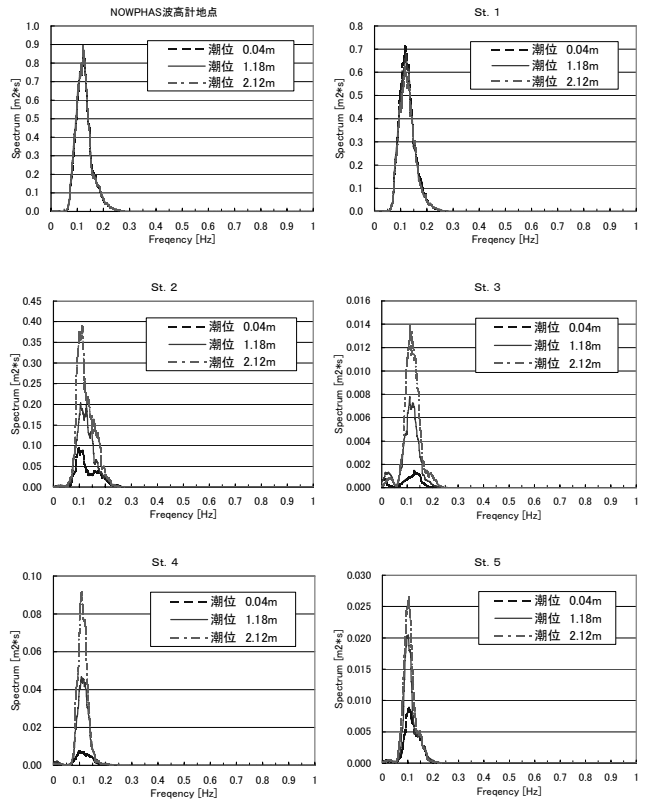
H.W.L. (D.L.+2.12m)	入射波高1.0m			入射波高2.0m			入射波高3.0m		
	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比	H1/3[m]	T1/3[s]	波高比
NOWPHAS	0.70	8.36	1.00	1.43	8.61	1.00	2.13	8.49	1.00
St.1	0.63	8.16	0.90	1.26	8.18	0.88	1.91	8.10	0.90
St.2	0.47	8.26	0.67	0.90	8.41	0.63	1.36	8.46	0.64
St.3	0.09	8.32	0.13	0.16	8.50	0.11	0.22	8.46	0.10
St.4	0.19	9.03	0.27	0.37	9.03	0.26	0.54	9.14	0.25
St.5	0.11	9.46	0.16	0.18	9.63	0.13	0.24	9.99	0.11



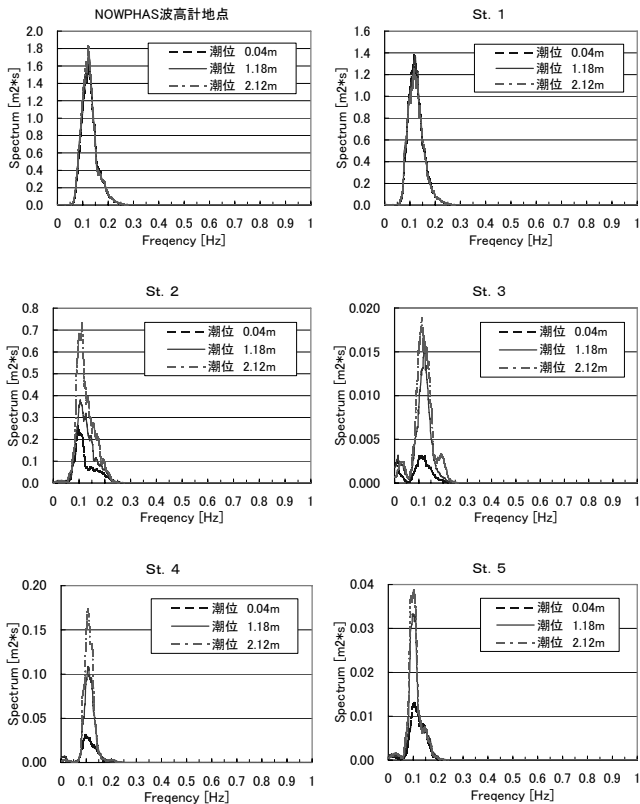
付図-B.1 入射波高と潮位の違いによる港内波高比の算定結果（那覇港, 各波浪観測地点）

一方、新港地区の新港10号岸壁前面のSt.5地点では、港内の他の地点と同様、潮位とともに港内波高比が増大する傾向は確認されるけれども、入射波高が小さいほど港内波高比が増大する傾向が確認できる。これは、港内に広がる浅瀬で砕波が発生する頻度が減少するためと考えられる。

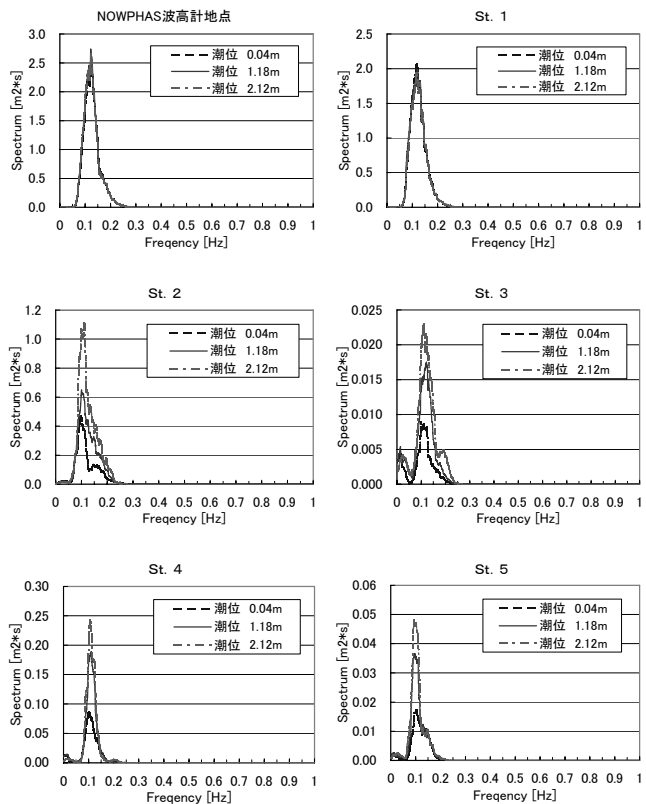
これらの状況をより詳細に確認するために、各地点における周波数スペクトルの変化を付図-B.2に示す。St.1地点では、いずれの入射波高でも潮位によるスペクトルの変化は見られない。しかし、St.2地点およびSt.3地点では、潮位が低く入射波高が大きいほど、砕波によるスペクトル変化が生じ、St.2では高周波数側に、St.3では低周波数側にもスペクトルのピークがみられるようになる。ところが、隅角部に近いSt.4では、低潮位時に砕波によるスペクトル変化がみられるのは同様であるが、同じく浦添港内に位置するSt.3に比べ、入射波の基本周波数の波エネルギーが1オーダー程度大きくなっている。また、波高が高く潮位が低いほど、この付近の浅い地形上での浅水変形による波高増大が生じていることがわかる。一方、St.5では、St.2、St.3地点のものほど顕著ではないが、低潮位時には砕波によるスペクトル変化が生じ、入射波高が大きいほどピーク周波数の両側に小さなスペクトルピークが確認できる。



(a) 入射波高1.0m



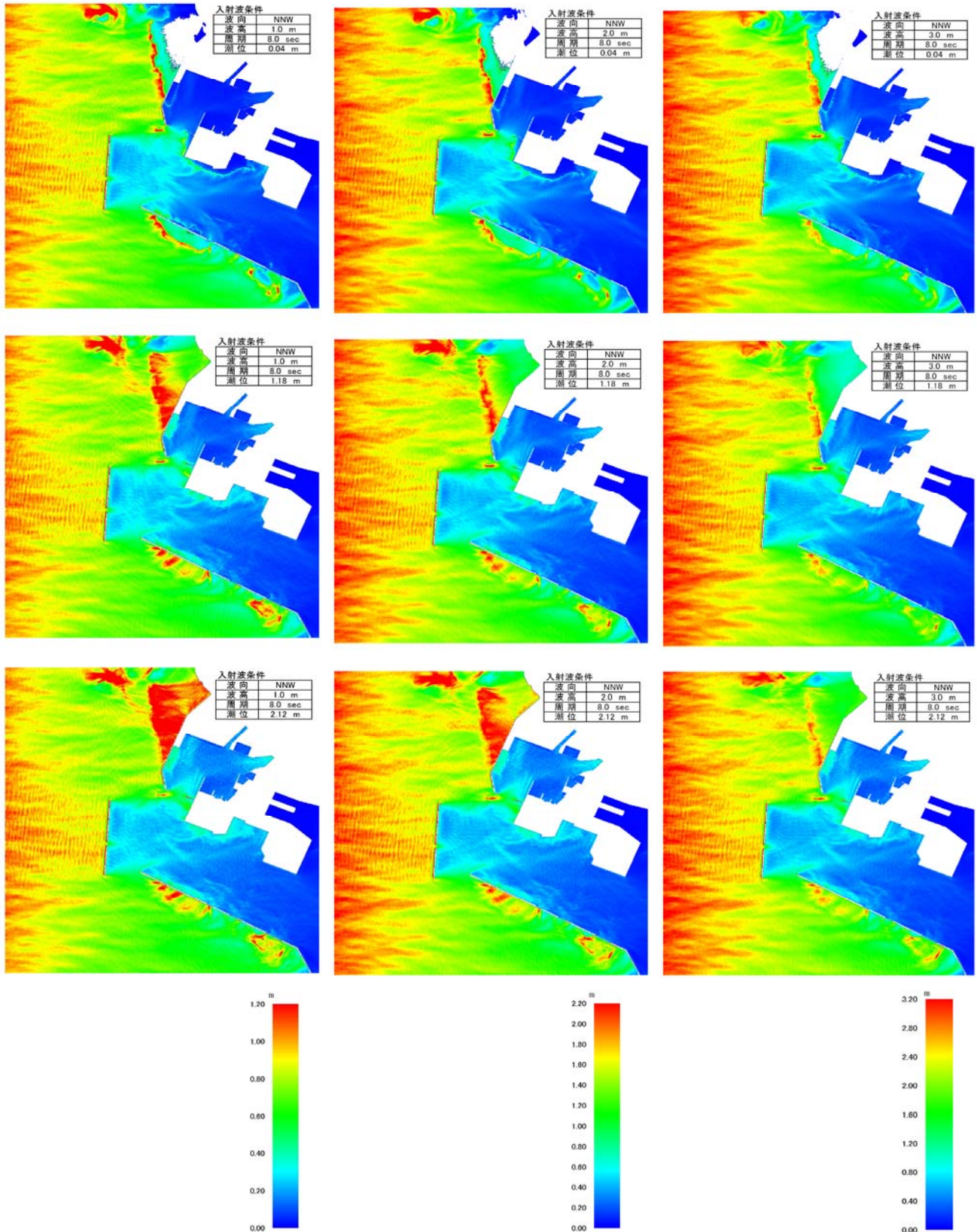
(b) 入射波高2.0m



(c) 入射波高3.0m

付図-B.2 入射波高と潮位の違いによる港内スペクトルの算定結果 (那覇港, 代表点)

最後に、潮位および入射波高の違いによる有義波高分布を付図-B.3に示す。



付図-B.3 潮位および入射波高の違いによる有義波高分布 (入射波周期8s, 波向NNW)

付録C 港内波高比の算定結果に及ぼす潮位の影響について2 —沖縄県S港—

S港のように、リーフ等の浅い水域が点在する港湾等を対象としたブシネスクモデルによる波浪変形計算では、屈折・浅水・砕波変形の程度に場の水深が深く関係するため、初期潮位はとくに慎重かつ確実に設定される必要がある。ところが、港内静穏度解析に波浪と潮位の同時出現確率を考慮することは、計算負荷等の問題からいまのところ実施するまでには至っていない(例えば、出現確率を割り当てる代表ケースとして、満潮位時、平均潮位時、干潮位時を設定した場合、それぞれの条件において代表波の港内波高比を算定するためには、波浪と潮位の同時出現確率を考慮しない場合の3倍の計算ケース数が必要になる)。

そこで、沖波波浪出現頻度分布に対する代表波のうち、波向を1種類(NNE)として周期を4種類(6s, 8s, 10s, 12s)および目標波高を3種類(1.0m, 2.0m, 3.0m)とした対象波を設定した場合(ケース1)と、周期と目標波高はそれぞれ1種類ずつ(8s, 1.0m)とし波向を6種類(W, N, NNE, NE, ENE, E)とした対象波を設定した場合(ケース2)のそれぞれについて、3種類の潮位条件(満潮位: H.W.L.=D.L.+1.90m, 平均潮位: M.S.L.=D.L.+1.00m, 干潮位: L.W.L.=D.L.+0.10m)に対するこれらの港内波高比を比較した。

C.1 ケース1: 周期, 目標波高および潮位を変化させた場合

ブシネスクモデルで計算されたS港沖の代表地点に対する各対象岸壁前面の港内波高比を付表-C.1.1および図-C.1.1に示す。なお、各対象岸壁前面を代表する波高算定点の定義は本編中の図-5.2.7を参照されたい。

まず、いずれの対象岸壁においても、目標波高および潮位にかかわらず、周期とともに波高比が増大する様子が確認できる。これは、周期が長い波ほどあまり減衰せずに港内まで伝播しやすいという従来からの知見に一致するものであり、本編中の港内静穏度解析で行ったさまざまな波向に対する計算結果でも同様な傾向にあることが確認されている。つぎに、潮位による違いをみると、いずれの対象岸壁および目標波高においても、潮位が低いほど港内波高比が大きくなる傾向が確認される。これは、潮位低下による港内水深の減少に伴い、浅水変形による波高増大が生じたためと考えられる。したがって、波形勾配が急な周期の短い波ほどすぐに砕波してしまい、潮位による波高比の違いがみられなくなるとともに、目標波高が大きいほど波高比が小さくなっていることがわかる。またこれは、水深の浅い岸壁ほど顕著である。一方、波形勾配が緩やかな周期の長い波ほど浅水変形により波高比が増大していることが確認できるが、とくに潮位が低く目標波高が大きいものほど、周期12sの波高

比は周期10sのものとはほぼ同じかそれより小さくなっている。これは、港口部での屈折・回折変形の違いに加え、砕波によってそれ以上の波高増大が抑制されたためと考えられる。なお、水深が深い岸壁ほど潮位による港内波高比の変化が小さくなっているのは、潮位による水深変化の割合が小さいためであると考えられる。

最後に、周期, 目標波高の違いによる有義波高分布を潮位毎に付図-C.1.2に示す。

C.2 ケース2: 周期, 目標波高および潮位を変化させた場合

ブシネスクモデルで計算されたS港沖の代表地点に対する各対象岸壁前面の港内波高比を付表-C.2.1および付図-C.2.1に示す。なお、各対象岸壁前面を代表する波高算定点の定義は本編中の図-5.2.7を参照されたい。

これらのうち、平均潮位時の波向による港内波高比の変化について、本編中では目標波高に対する港内波高比の変化を考察した。すなわち、波向Wを除くいずれの波向、いずれの岸壁でも、目標波高1.0mの波に比べ、2.0m, 3.0mとした波の波高比が減少したが、これは主防波堤先端部の高マウンド部や港内の浅瀬によって、不規則波を形成する成分波の一部が砕波したためと思われた。したがって目標波高1.0mとした今回のケースでは、少なくとも平均潮位時には港内でそれほど顕著な砕波は生じていないと考えられる。すると、干潮位時に波向NNE, NE, ENEで港内波高比が増大しているのは、水深が浅くなったことによる浅水変形によるものと考えられる。また、波向N, Eで港内波高比が減少するのは沖防波堤端部の高マウンド周辺での砕波によるものと考えられる。さらに、満潮位時にN~Eのすべての波向で港内波高比が減少しているのは、水深が深く顕著な浅水変形が生じないためと考えられる。

一方、波向Wでは、本編中でいずれの岸壁でも目標波高に対する波高比の変化がほとんどみられないことが確認され、このことから波向Wの波は、S港沖や港内での海底地形のうち比較的深い水路のような部分を通して、ほとんど砕波せずに港内へ侵入していると考えられた。深い水深では潮位による水深変化の割合が小さくなるため、潮位による港内波高比の変化もほとんどみられなかったものと考えられる。なお-4.5m岸壁に比べ、-5.5m岸壁や-7.5m岸壁で次第に潮位による波高比の差が小さくなっているのもこれと同様な理由によるものと考えられる。

最後に、周期, 目標波高の違いによる有義波高分布を潮位毎に付図-C.2.2に示す。

付表-C.1.1 周期と目標波高, 潮位の違いによる港内波高比の算定結果 (S港, 各対象岸壁前面)

(a) 目標波高 1.0m

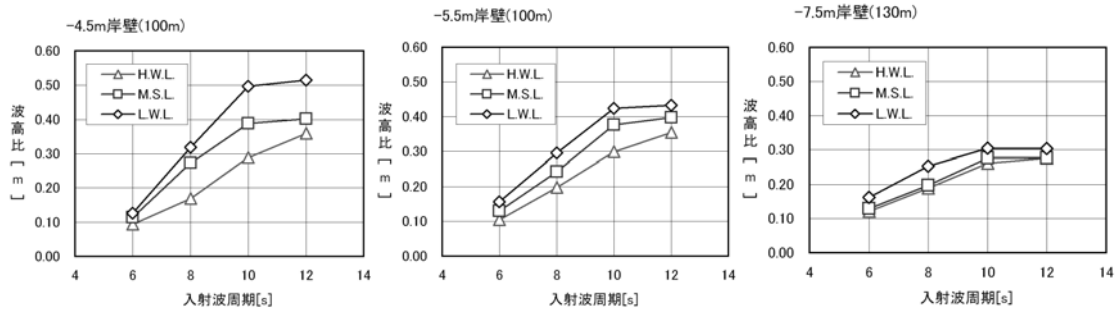
	港外点 平均波高[m]	-4.5m岸壁 100m				-5.5m岸壁 100m				-7.5m岸壁 130m			
		6s	8s	10s	12s	6s	8s	10s	12s	6s	8s	10s	12s
L. W. L.	1.044	0.126	0.319	0.498	0.515	0.156	0.296	0.425	0.433	0.162	0.254	0.305	0.304
M. S. L.	1.056	0.115	0.273	0.389	0.402	0.131	0.244	0.377	0.398	0.130	0.198	0.277	0.278
H. W. L.	1.057	0.095	0.169	0.288	0.360	0.105	0.198	0.299	0.355	0.122	0.189	0.262	0.277

(b) 目標波高 2.0m

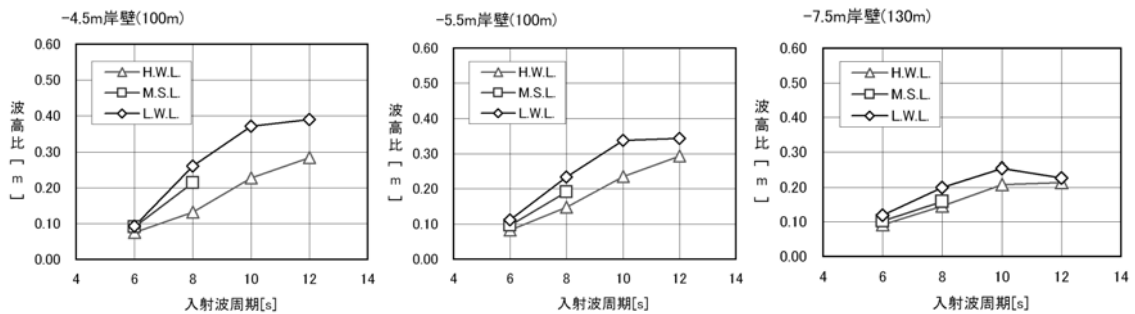
	港外点 平均波高[m]	-4.5m岸壁 100m				-5.5m岸壁 100m				-7.5m岸壁 130m			
		6s	8s	10s	12s	6s	8s	10s	12s	6s	8s	10s	12s
L. W. L.	2.127	0.093	0.261	0.372	0.390	0.112	0.234	0.338	0.344	0.119	0.200	0.254	0.227
M. S. L.	2.137	0.090	0.214			0.096	0.192			0.102	0.159		
H. W. L.	2.158	0.075	0.132	0.228	0.284	0.083	0.147	0.236	0.293	0.092	0.145	0.208	0.214

(c) 目標波高 3.0m

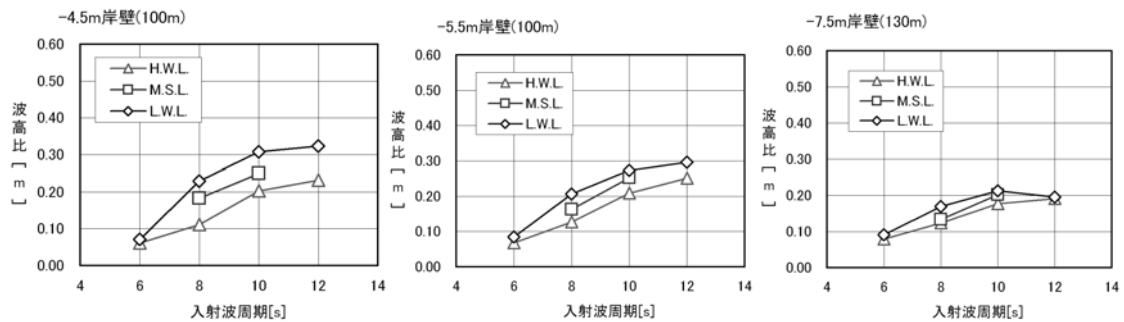
	港外点 平均波高[m]	-4.5m岸壁 100m				-5.5m岸壁 100m				-7.5m岸壁 130m			
		6s	8s	10s	12s	6s	8s	10s	12s	6s	8s	10s	12s
L. W. L.	2.996	0.071	0.230	0.307	0.324	0.084	0.206	0.273	0.296	0.092	0.169	0.213	0.196
M. S. L.	3.044		0.183	0.250			0.163	0.252			0.134	0.203	
H. W. L.	3.033	0.062	0.111	0.203	0.232	0.068	0.128	0.209	0.251	0.079	0.124	0.178	0.191



(a) 入射 (目標) 波高 : 1.0m

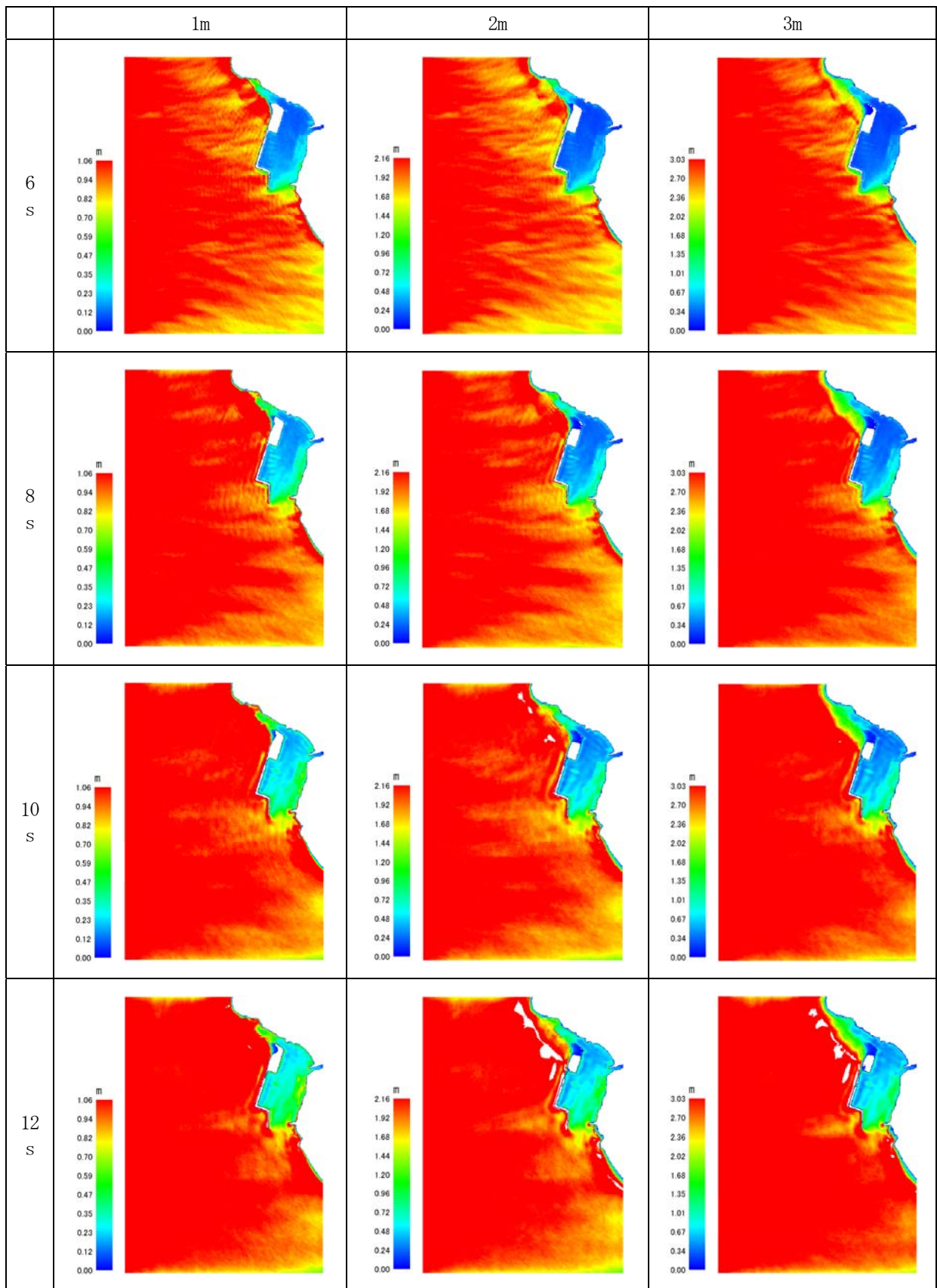


(b) 入射 (目標) 波高 : 2.0m

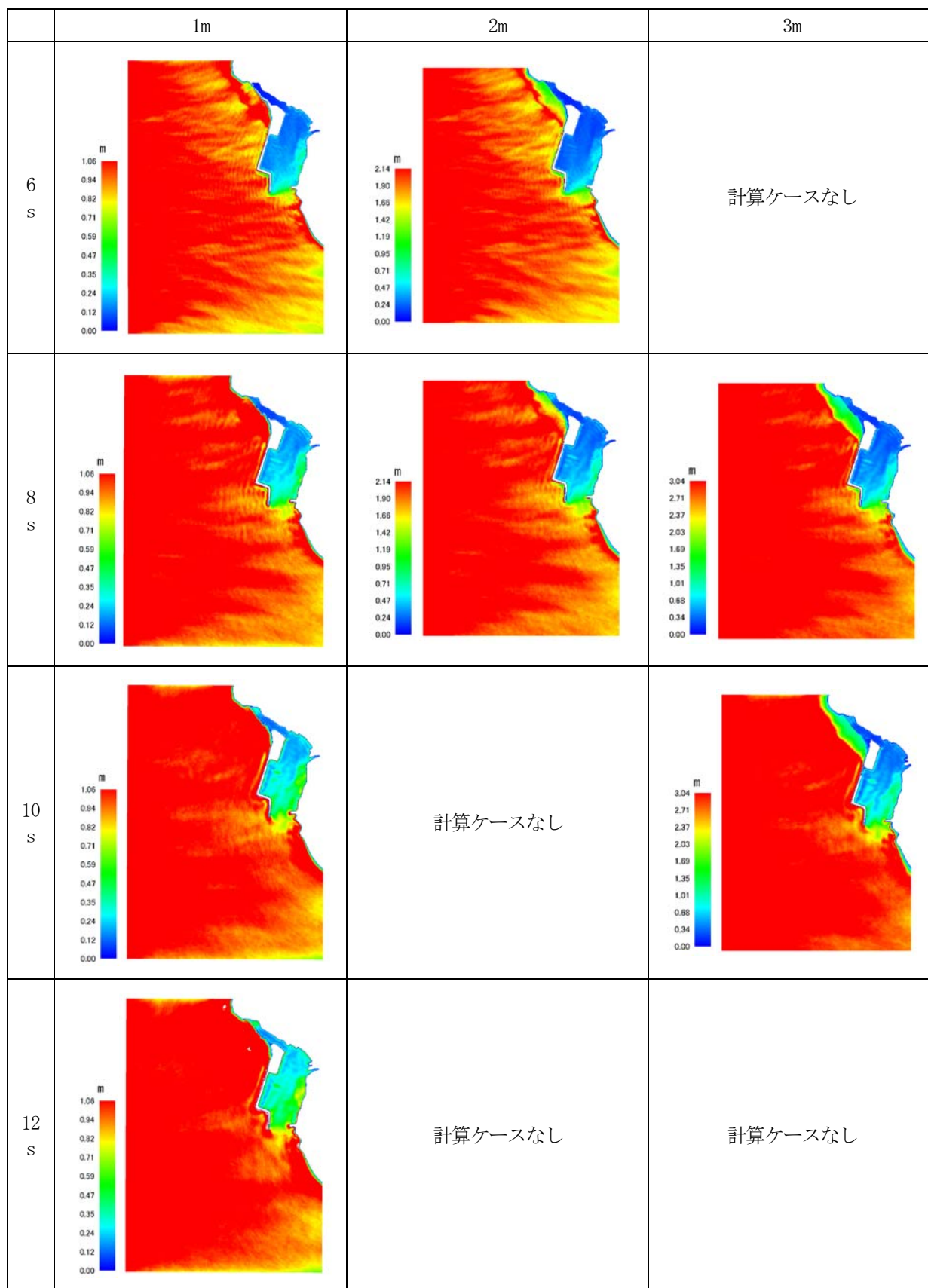


(b) 入射 (目標) 波高 : 3.0m

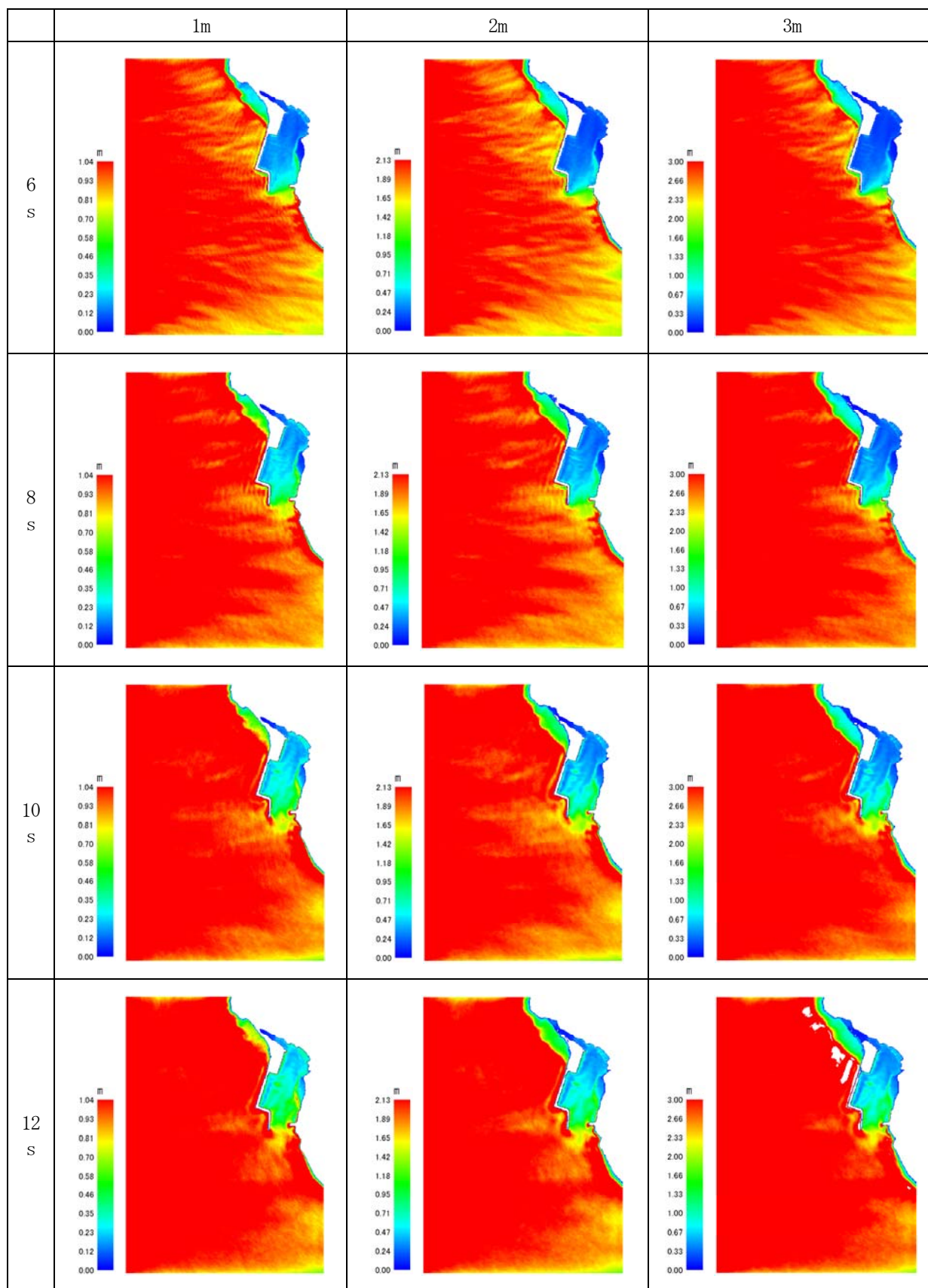
付図-C.1.1 周期と目標波高, 潮位の違いによる港内波高比の算定結果 (S港, 各対象岸壁前面)



付図-C. 1.2(a) 周期と目標波高の違いによる潮位毎の有義波高分布（S港，各対象岸壁前面）（H. W. L. =D. L. +1.90m）



付図-C. 1.2(b) 周期と目標波高の違いによる潮位毎の有義波高分布 (S港, 各対象岸壁前面) (M. S. L. =D. L. +1.00m)

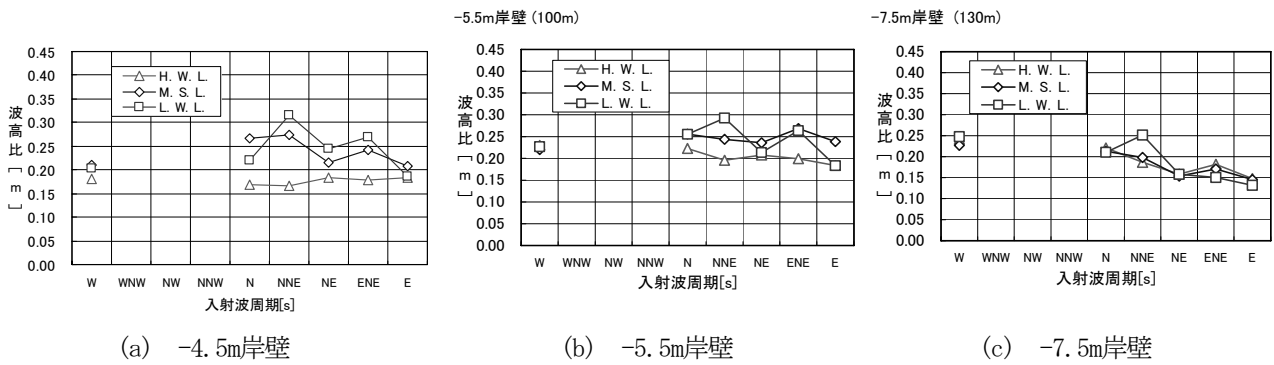


付図-C. 1.2(c) 周期と目標波高の違いによる潮位毎の有義波高分布 (S港, 各対象岸壁前面) (L. W. L. =D. L. +0.10m)

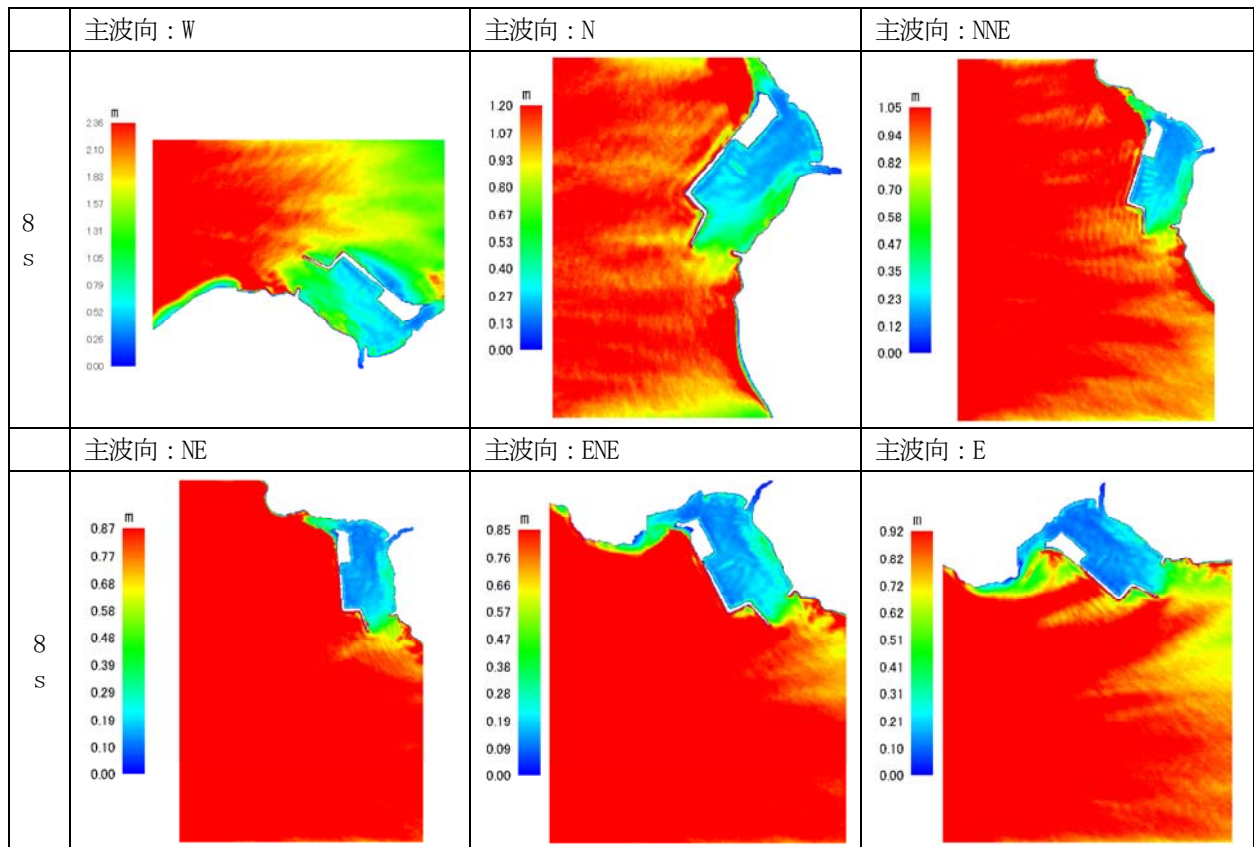
付表-C.2.1 波向と潮位の違いによる港内波高比の算定結果 (S港, 各対象岸壁前面)

目標波高 1.0m T=8.0s

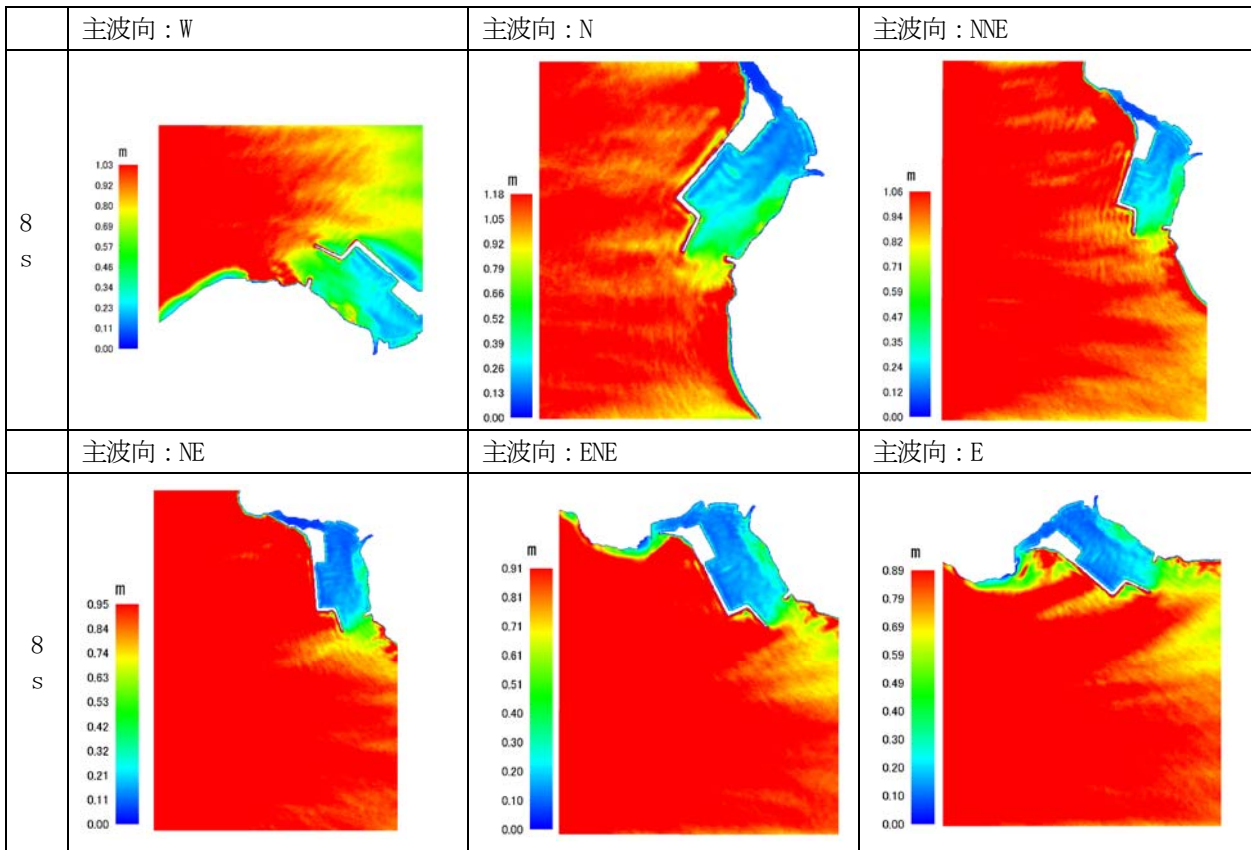
主波向	港外点 平均波高[m]	-4.5m岸壁 100m			-5.5m岸壁 100m			-7.5m岸壁 130m		
		L. W. L.	M. S. L.	H. W. L.	L. W. L.	M. S. L.	H. W. L.	L. W. L.	M. S. L.	H. W. L.
W	1.070	0.202	0.210	0.181	0.227	0.220	0.230	0.248	0.227	0.242
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N	1.202	0.220	0.267	0.168	0.255	0.256	0.223	0.210	0.213	0.221
NNE	1.053	0.315	0.273	0.166	0.293	0.244	0.196	0.251	0.198	0.187
NE	0.868	0.245	0.215	0.183	0.213	0.236	0.207	0.158	0.154	0.158
ENE	0.852	0.268	0.241	0.178	0.264	0.269	0.199	0.150	0.171	0.182
E	0.924	0.186	0.208	0.182	0.183	0.239	0.184	0.132	0.145	0.148



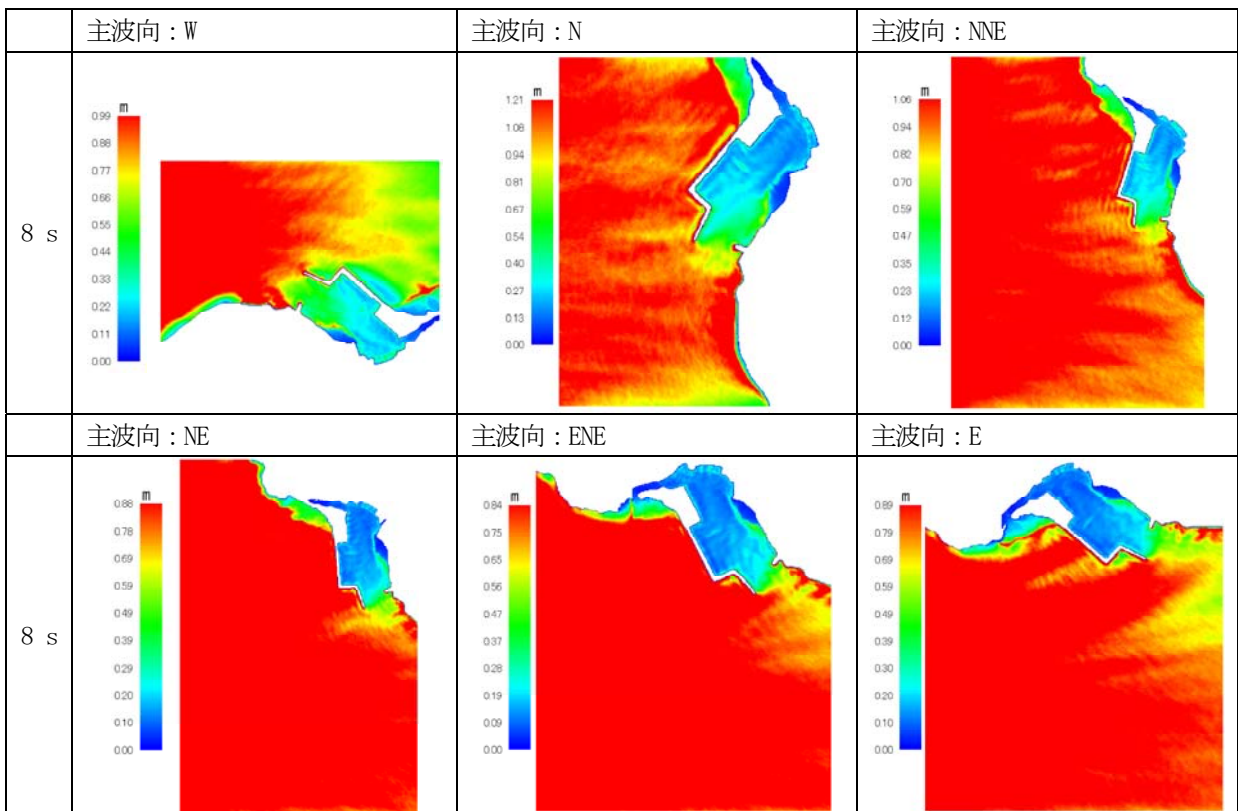
付図-C.2.1 波向と潮位の違いによる港内波高比の算定結果 (S港, 各対象岸壁前面)



付図-C.2.2(a) 波向の違いによる潮位毎の有義波高分布 (S港, H.W.L.=D.L.+1.90m)



付図-C. 2. 2 (b) 波向の違いによる潮位毎の有義波高分布 (S港, M. S. L. =D. L. +1. 00m)



付図-C. 2. 2 (c) 波向の違いによる潮位毎の有義波高分布 (S港, L. W. L. =D. L. +0. 10m)

付録D ブシネスクモデルによる設計波および換算沖波の算定について

本研究の題目にもあるように、本編では、ブシネスクモデルを用いて従来よりも高精度な港内静穏度解析を行う手法について、2つの具体的な港湾を例に述べた。ところで、このようにして港内静穏度の現状が明らかになり、現在の港湾形状では十分な港内静穏度が確保されないことが判明すると、その次の作業として、港内静穏度を向上させるための対策工の検討が実施される。この対策工には、港内外の適切な場所に消波工を設置したり、あるいは港内のより適切な場所に岸壁を移設するなどの対応も考えられるが、多くの場合、新たに防波堤や波除堤を建設して港内への波の侵入を抑制することが検討される。

通常、この対策工は複数提案され、静穏度の向上効果はもちろん、経済性や施工性の観点から最適と思われる対策工を選定することになる。このうち、対策工による静穏度の向上効果は、現況港形に対して行ったのと全く同様に、対策港形を対象とした港内静穏度解析によって把握することができる。一方、対策工の経済性や施工性に関する検討は、技術者の経験的な判断のほか、より詳細には対策工の概略設計などを通じて検討される。そして、この際もっとも基本となるものは対策工に作用する波浪外力である。

周知のとおり、構造物に作用する波力の基本的な算定方法はすでに設計基準等で明らかにされているので、ここで述べるまでもないが、それらでもっとも基本となる入力条件は構造物の設置位置またはその5波高沖での有義波高や最高波高、および換算沖波波高である。そして、これらは実験式や図式解法、あるいはエネルギー平衡方程式法などの従来の数値計算手法によって算定することができる。このうち、ブシネスクモデルは、港内外の複雑な海底地形、あるいは岬や港湾・海岸構造物により生じるさまざまな波浪変形を一度にかつ高精度に算定できる数値計算手法として注目されている。そこで、本研究の最後に、ブシネスクモデルを用いて対策工等の設計波高および換算沖波波高を算定する方法を提案する。

D.1 設計波の算定手順

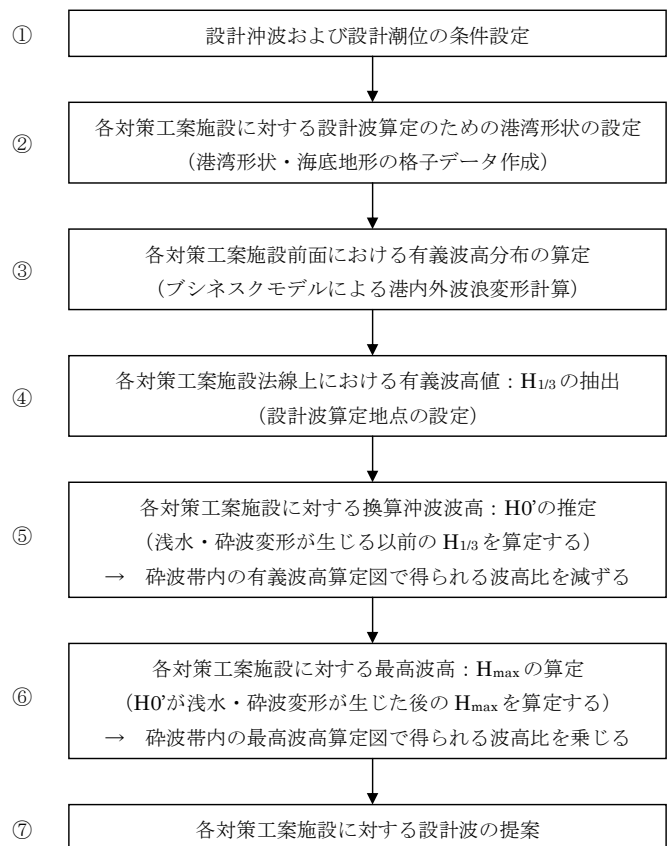
ブシネスクモデルを用いて、対策工等の港湾構造物に作用する設計波を算定する手順はおよそ次のようになると考えられる(付図-D.1.1)。すなわち、まず、多年にわたるNOWPHAS波浪観測記録や波浪推算データを用いた極値統計解析の結果から、各港湾で設定されている設計沖波および設計潮位などの条件を設定する(①)。つぎに、その沖波が対策工等の港湾構造物に作用するまでの波浪変形状況をブシネスクモデルで算定するために、港湾形状や海底地形などが反映された水深データや、陸地や構造物等による波の反射条件を設定した

境界データなどからなる格子データを作成する(②)。

この際には、設計波を算定したい対象構造物は格子データに含まないようにする。これは、設計波は入射波を対象に定義されているためである。つまり、設計波の算定位置での波浪場に、対象構造物による反射波が含まれないようにしなければならない。そして、①を②に入射させて、ブシネスクモデルによる港内外波浪変形計算を実施したのち(③)、対策工等の構造物法線上における有義波高： $H_{1/3}$ を抽出する(④)。なお、これ以降の手順は次節以降で順に述べることにする。

D.2 換算沖波波高 H_0' の推定手順

付図-D.1.1に示したフローのうち、⑤換算沖波波高 H_0' を算定する手順を付図-D.2.1に示す。すなわち、対策工施設前面の水深 h と海底勾配 $\tan\theta$ において、はじめは適当に設定した H_0' に対する相対水深 h/H_0' を求め、これが4より大きいときは沖で碎波しないものとみなし、首藤(1974)による非線形浅水係数の算定図から浅水係数 K_s を得る。一方、相対水深 h/H_0' が4以下の場合には合田(1975)による碎波帯内の波高の算定図から波高比 $H_{1/3}/H_0'$ を得る。なお、この代わりに碎波帯内の有義波高の略算式を利用することもできる。つぎに、④で得られた対策



付図-D.1.1 ブシネスクモデルによる設計波の算定手順

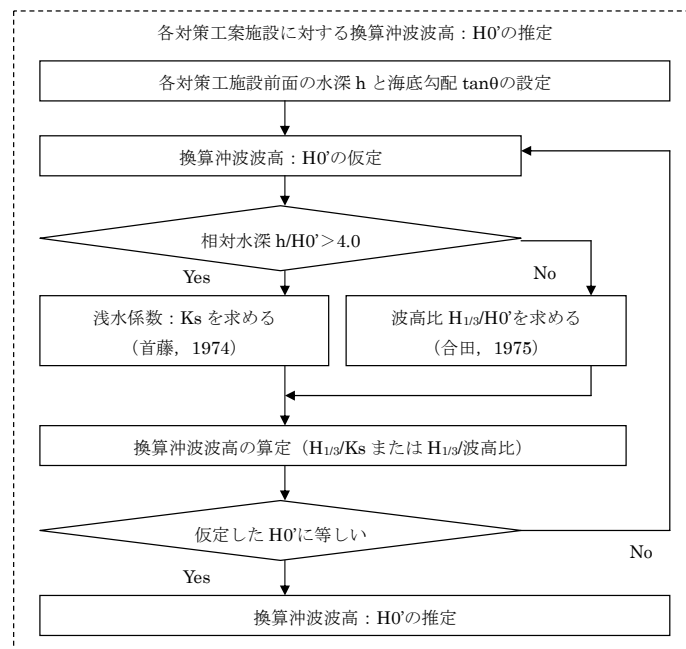
工案施設前面の有義波高 $H_{1/3}$ をこれらの浅水係数または波高比で減ずることにより、換算沖波波高 H_0' を得る。この作業を繰り返し、得られた H_0' と相対水深等を得る際に仮定した H_0' とが等しくなるときの H_0' を、対象施設における換算沖波波高として採用することができる。

D.3 最高波高 H_{max} の算定手順

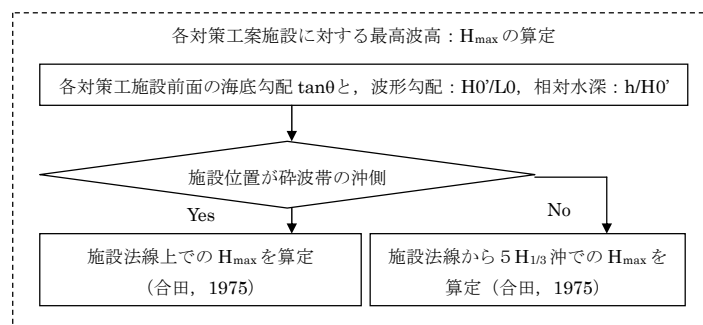
ブシネスクモデルでは、現地や造波水槽を用いた水理模型実験と同様な水面波形の伝播を時間を追って計算するため、計算領域内の任意の場所（格子）で、現地観測や実験計測と同様な水位や水平流速の時間波形を得ることができる。これをゼロアップクロス法で統計解析すれば、④で抽出した有義波高とともに、ここで求めたい最高波高も算定できるはずである。しかし、最高波高は十分長い不規則波形から抽出された個々波の波

高のうちのただ1つの最高値で定義されるため、統計的な変動が非常に激しいことが知られている。したがって、ブシネスクモデルによる波浪変形計算で得られる、ある限られた計算時間内の最高波高をもって構造物の設計波とすることは、非常に危険であるといわざるを得ない。そこで、最高波高は以下に述べる方法で算定することが望ましいと考えられる。

付図-D.1.1に示したフローのうち、⑥最高波高 H_{max} を算定する手順を付図-D.3.1に示す。すなわち、対策工施設位置が砕波帯の沖側の場合には施設法線上で H_{max} を算定する。一方、砕波帯内の場合には法線位置から $5 \times H_{max}$ 沖の地点における H_{max} を算定する。いずれも、合田（1975）による砕波帯内の波高の算定図から波高比を求め、これを換算沖波波高 H_0' に乗じて得ることができる。ここで、代わりに砕波帯内の最高波高の略算式を利用することもできる。



付図-D.2.1 換算沖波波高 H_0' の推定手順



付図-D.3.1 換算沖波波高 H_0' の推定手順

港湾空港技術研究所資料 No. 1159

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。