

平成 21 年度

ビジネスモデルによる波浪変形計算に関する勉強会

勉強会資料

平成 22 年 2 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
海洋・水工部 波浪研究チーム

# 目 次

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・                                                                                                               | 1  |
| 「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」発足の経緯と成果・・・・・・・・                                                                                                 | 2  |
| 「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」開催趣旨・・・・・・・・                                                                                                     | 3  |
| ブシネスクモデル（公開版 NOWT - PARI）のリリース履歴・・・・・・・・                                                                                                   | 4  |
| 1. セッション1 ー長周期波の計算事例ー                                                                                                                      |    |
| 1.1 高知県竜串湾の長周期波の検討・・・・・・・・                                                                                                                 | 6  |
| (株)東京久栄 環境事業部 環境創出部 ○西村規宏, 竹下 彰                                                                                                            |    |
| 1.2 傾斜堤タイプの長周期波対策施設の平面波浪場解析への適用・・・・・・・・                                                                                                    | 11 |
| 国土交通省 東北地方整備局 秋田港湾事務所 小澤敬二<br>前 (財)沿岸技術研究センター 森屋陽一<br>日本海洋コンサルタント(株) 技術本部 山本禎寿<br>(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 平山克也・平石哲也<br>(財)沿岸技術研究センター 調査部 ○山下 徹 |    |
| 1.3 長周期波を含む現地観測データを活用した港内静穏度の推定・・・・・・・・                                                                                                    | 17 |
| (株)三洋コンサルタント 調査部 西井康浩・○小野貴也                                                                                                                |    |
| 1.4 港内における長周期波対策・・・・・・・・                                                                                                                   | 24 |
| (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 平石哲也                                                                                                                   |    |
| 2. セッション2 ーブシネスクモデルとその周辺のモデル開発ー                                                                                                            |    |
| 2.1 うねりスペクトルにより造波される長周期波の計算例について・・・・・・・・                                                                                                   | 29 |
| (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 波浪研究チーム 平山克也                                                                                                           |    |
| 2.2 「うねり性波浪」の解析と予測・監視システムの構築・・・・・・・・                                                                                                       | 36 |
| 国土交通省 北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 大下善幸・室善一朗<br>(財)沿岸センター 高山知司・岡田弘三・宇都宮好博<br>(財)日本気象協会 ○松浦邦明・本橋昌志・松藤絵理子・内田洋平                                      |    |
| 2.3 スペクトル法とブシネスクモデルの接続方法に関する検討・・・・・・・・                                                                                                     | 42 |
| (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 波浪研究チーム ○岩瀬浩之・平山克也                                                                                                     |    |
| 2.4 平面・断面2次元連結モデルの有効活用に関する一検討・・・・・・・・                                                                                                      | 47 |
| 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 ○川崎浩司, 菊 雅美                                                                                                        |    |
| 質疑・応答・・・・・・・・                                                                                                                              | 53 |

## はじめに

独立行政法人港湾空港技術研究所波浪研究室が主催し、平成14年度より年1回のペースで開催してまいりました本勉強会は、皆様の熱心かつ温かいご支援のもと、今年度で第8回を迎えることができました。

おかげさまで、本勉強会を通じて、港湾・海岸設計の実務に対する適用事例の蓄積や問題点の抽出がなされ、継続的に改良が加えられてきたNOWT-PARIは、いまや、複雑な海底地形を有する港湾や海岸周辺の波浪場の推定や、風波および長周期波に対する港内静穏度の推定などの実務に、欠かせない存在となりつつあります。また最近では、おかげさまで当勉強会の活動そのものも社会において広く認知されるようになり、富山湾における『うねり性波浪』（いわゆる寄り回り波）による被災原因の解明に貢献したとして、被災原因検討委員会の活動とともに、平成21年度日本港湾協会技術賞（代表者：高橋重雄）を連携受賞させていただきました。

ところで、本日配布させていただきました勉強会資料の巻頭には、昨年度と同様、本勉強会発足の経緯とこれまでの成果、開催趣旨、および本勉強会を通じて公開してまいりましたNOWT-PARIプログラムのバージョンとその内容の履歴を掲載いたしました。特に、昨年度の勉強会で配布いたしましたVer4.6c6aにつきましては、当勉強会にご参加いただいているメンバーの方から「沖側境界から沖波を入射させる際、目標波が常に正しく造波できない」というご指摘を頂戴し、本年1月、このbugを修正したものをVer4.6c7aとして、勉強会メンバーリングリストを通じて緊急リリースさせていただいたところでございます。引き続き、皆様からのご支援を賜り、プログラムの不具合を排除するとともに、更なる成果を積み重ねることができれば、大変幸いに存じます。今後ともどうぞよろしくお願い申し上げます。

また、本年度の勉強会では、計8編のご発表を2つのセッションに分け、それぞれ、長周期波の計算事例、ブシネスクモデルとその周辺のモデル開発、に関する話題を中心にご議論いただけるよう編成いたしました。セッションの質疑時間やコーヒープレイクをご活用いただき、お互いに活発な意見交換がなされることを期待しております。

最後に、本勉強会の趣旨にご賛同いただき、本日まで出席されている皆様方は、日頃より、多くの難問に対してさまざまな解析手法を取り入れてご検討されているものと存じます。その際には本勉強会の成果が一助となり、ご活用いただければまことに幸いに存じます。

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
海洋・水工部 海洋研究領域  
波浪研究チーム リーダー 平山克也

## 「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」発足の経緯と成果

港湾近傍の波浪変形計算を精度よく検討するためには、波の回折、屈折、浅水変形、砕波などを同時に計算できるだけでなく、波の非線形性による波形の歪みもある程度推定できる計算モデルが必要である。一方、特に 1990 年代前半には、世界各国の研究者によって波の非線形性と分散性を考慮できる波動方程式が盛んに提案され、この頃には、分散特性が修正され、浅海域における波浪変形計算が可能なブシネスク方程式も登場した。

このような研究状況をふまえ、運輸省港湾空港技術研究所水工部波浪研究室(当時)では、次世代の波浪変形計算モデルの開発に着手し、平成 10 年度までに、分散特性の補正項を含む Madsen 型のブシネスク方程式を基礎とするブシネスクモデルを開発した。しかしながら、港湾・海岸における実務的な波浪変形計算に対してこれを広く適用するためには、入射境界や側方境界の与え方、砕波や遡上、部分反射の扱い方など、現地の波浪、地形条件に対応したさまざまな境界処理法に、開発・改良の余地が多く残されたままであった。

そこで、平成 11 年 1 月には、「浅海域非線形波浪モデルの実務への適用性に関する検討会」を開催し、大学や民間の研究者や技術者とともに、ブシネスクモデルに関する研究・開発の現状や、実際の港湾における調査プロジェクトに適用した際の効果や課題等について、活発な議論が交された。

また、これらの業務を引き継いだ独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室が、平成 13 年度に実施した「現地観測データ整理と計算結果の比較検討業務」では、学識経験者を擁した委員会ならびに幹事会を開催し、実際の計算事例を通じて、ブシネスクモデルの活用が期待される実務課題や今後克服すべき問題点等について、貴重な助言を頂戴した。さらに平成 13 年 12 月には、これらの成果の普及を目的とした講習会を開催した。このとき公開されたブシネスクモデルは、「NOWT-PARI Ver4.6 $\beta$ 」(Nonlinear Wave Transformation model by PARI)と呼ばれている。

さらに、平成 14 年度以降には、平成 13 年 12 月の講習会を継続・発展させた「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」を毎年 1 回のペースで開催している。

これまでに、港湾・海岸設計の実務において、複雑な海底地形を有する港湾や海岸周辺の波浪場の推定や、風波および長周期波に対する港内静穏度解析などの適用事例が着実に蓄積されている。また最近では、ブシネスクモデルと船体動揺解析モデル、あるいは 3 次元流体解析モデルと組み合わせて、長周期波に対する係留船舶の動揺や、護岸における越波飛沫の飛散状況の再現等が試みられるなど、学術的な応用例も多くみられる。

一方、これらの適用例や応用例を通じて得られた成果や問題点は、本勉強会や学会等での発表の場を通じて開発者およびその他の利用者へフィードバックされ、更なるモデルの改良や開発に寄与している。これらは、プログラムコードのデバッグから新たな境界処理法の開発・改良まで多岐にわたり、本勉強会にて、適宜、ヴァージョンアップ版が公開されている。

本勉強会は、平成 21 年度（平成 22 年 2 月 8 日開催）で第 8 回を数える。



## 「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」開催趣旨

(平成 13 年度講習会資料より抜粋)

近年、港湾設計ならびに港内静穏度評価に関する業務において、屈折系および回折系の波浪変形はもとより、波の非線形性を考慮した高精度な波浪変形解析プログラムである“ブシネスクモデル”に対する需要が急速に高まっている。

独立行政法人港湾空港技術研究所では、早くより当該モデルの開発業務に携わり、基本的なモデルの開発、およびいくつかの計算事例の蓄積はすでに終了している。今後は、より多くの現地適用事例の蓄積に努め、実務における計算モデルの信頼性の獲得を目指すとともに、さらなるモデル開発を行い、さまざまな計算条件および境界条件に対する適用性の向上を図る予定であり、港湾計画のツールとして広く活用されることを期待する。

このような経緯を踏まえた、本調査の目的は次の通りである。

- (1) 独立行政法人港湾空港技術研究所で開発された“ブシネスクモデル”の基本版 (Ver.4.6) を、公共の調査・設計業務への適用、および学術的な利用に関する限りにおいて、プログラムソースを関係者に公開する (営利目的への利用は認めない)。
- (2) “ブシネスクモデル”の基本概念の普及に努め、波浪変形計算に関する我が国の技術力の維持・向上に資する。
- (3) 学術的な知見や助言を広く収集し、“ブシネスクモデル”のさらなる計算精度および現地適用性の向上を目指す。

## ビジネスモデル（公開版 NOWT-PARI）のリリース履歴

平成 13 年 12 月 Ver4.6 $\beta$  平成13年度ビジネスモデル検討会で使用した評価版

平成 15 年 1 月 Ver4.6c デバッグ，計算結果出力方法の変更に伴うプログラム修正<sup>※1</sup>

※1 Ver4.6 $\beta$ に関する bug 情報の公開のみ（プログラムコードは非リリース）

- ・ 計算領域の外周スポンジ層の範囲設定に伴う bug の修正
- ・ 平均波高および有義波高の算定方法の変更（算定の可否を判断する最小波数を導入）

平成 16 年 4 月 Ver4.6c2 プログラムコードの整理に伴うプログラム修正（非リリース）

- ・ 変数の宣言における配列，型宣言，精度の統一
- ・ 変数の初期化の徹底
- ・ Y 方向運動方程式の係数算定に係る DO ループの効率化（2 重ループを跨ぐ IF 文排除）

平成 17 年 2 月 Ver4.6c3 開境界，部分反射境界の設定法の改良に伴うプログラム修正

- ・ 層流抵抗項の高次化による高次スポンジ層の導入

平成 18 年 6 月 Ver4.6c4 重大な bug が確認されたことによる緊急リリース

- ・ Ver4.6c3 において，水域と陸域の境界格子で砕波計算を行った場合に，演算の破綻を引き起こす恐れのある bug を修正

平成 19 年 2 月 Ver4.6c5a 演算の安定性や計算精度の向上に寄与するプログラム修正

- ・ 水位 E，水平流速 U，V，等の各変量の算定時刻の統一
- ・ 平均水位 EAVG の算定法の修正とそれによる波高 HRMS<sup>※2</sup>，HAKOU<sup>※3</sup>の補正

※2 HRMS：水位の 2 乗平均と波高頻度分布との関係から算定

※3 HAKOU：ゼロアップ法による平均波高と波高頻度分布との関係から算定

- ・ 砕波計算に用いる流量振幅の定義の修正
- ・ 砕波計算に用いる渦動粘性係数の算定時刻の修正
- ・ 砕波計算に用いる係数 $\alpha_D$ の定義の修正
- ・ 微小振幅波理論あるいは共分散法による平均波向の算定および出力

平成 21 年 2 月 Ver4.6c6a 任意形状スペクトル造波法の導入に伴うプログラム修正

- ・ 外部プログラム（実行ファイルを提供）により作成される任意形状スペクトルに対する成分波リストを読み込み，造波するための機能の追加
- ・ 沖波の波高頻度分布の変化に対する波高 HRMS，HAKOU の算定法の対応（係数の修正）
- ・ 計算条件を設定するコントロールファイルの導入

平成 22 年 1 月 Ver4.6c7a 重大な bug が確認されたことによる緊急リリース

- ・ Ver4.6c6a において，沖側境界から沖波を入射させる際，目標波が常に正しく造波できない原因となっている bug（水面波形の表示式について，Ver4.6c5a 以前のバージョンのものに比べ，初期位相が  $90^\circ$  異なるとともに，角周波数の符合が逆になっている）を以前の定義に修正（※Ver4.6c5a 以前のバージョンでは，目標波が正しく造波されることを確

認している)

(H22.02.08 現在)



## 1. 長周期波の計算事例

### 1.1 高知県竜串湾の長周期波の検討

#### 1.1.1 はじめに

竜串湾は、高知県南西部に位置し（図-1）、高緯度にも関わらずサンゴが生育している海域として知られているが、2001年9月に発生した高知県南西部豪雨災害で、河川から多量の泥土が流入し、サンゴに多大な影響を与えた。現在は、一部の海域で人為的に泥土が除去されたこともあり、高波浪後の濁りの回復が早くなって、徐々にではあるがサンゴの生育環境が改善しつつある状況である。しかしながら、泥土が除去されていない海域からの巻き上がりや河川からの泥土流入等の問題は依然として未解決のままである。また、近年は風浪だけでなく長周期波浪と濁りや泥土堆積の関係も指摘されるようになったため、長周期波の発生状況や伝播・増幅状況、流れや泥土の移動状況の解析が必要と考えられた。

本研究では、波浪の現地観測を行い、長周期波の発生状況や気象条件との比較を行った。また、現地観測スペクトルを入力条件として NOWT-PARI Ver.4.6c6a を用いて、計算した長周期波の伝播・増幅状況、泥土移動の傾向について検討を行った。

#### 1.1.2 波浪観測結果による長周期波の把握

竜串湾は太平洋に面し、南向きに開口した湾であるため外洋で発生した長周期波が直接来襲する可能性がある。そこで、図-2 に示した爪白（ツマジロ）沖に波高計を設置し、2008年10月9日～11月8日の1ヶ月間波浪の連続観測を行った。なお、サンプリング間隔は1sとした。

表-1 に観測期間中における長周期波の出現分布を示す。今回観測された長周期波の観測期間の平均波高は、30s～60sの周期帯で1.1cm、60s～300sで1.4cm、300s～600sで2.7cm、600s以上で5.0cm程度であった。波高階級は10cm以下が約93%を占め、周期帯別では600s以上の波高が最も大きい結果であった。今回の観測期間においては、有義波高の最大値が1.5mと擾乱の規模および発生回数が少ないため全体として、10cm以上の長周期波の出現率が少なかった。また、竜串湾の固有振動周期がおおよそ600sであるために共振により600s以上の周期帯で長周期波高が増幅したのではないかと考えられる。

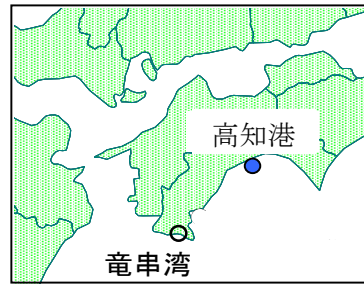


図-1 竜串湾位置図

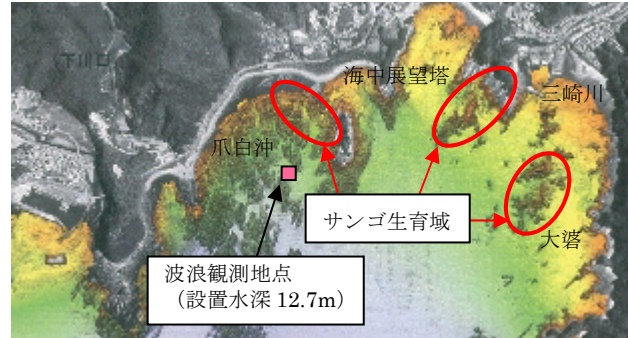


図-2 波浪観測地点

表-1 長周期波出現分布（2008.10.9～11.4）

| 周期帯       | 30～60s |       | 60～300s |       | 300～600s |       | 600s以上 |       | 30s以上 |       |
|-----------|--------|-------|---------|-------|----------|-------|--------|-------|-------|-------|
|           | 観測数    | 出現率   | 観測数     | 出現率   | 観測数      | 出現率   | 観測数    | 出現率   | 観測数   | 出現率   |
| 波高階級 (cm) |        |       |         |       |          |       |        |       |       |       |
| 0～1       | 173    | 47.0% | 53      | 14.4% | 1        | 0.3%  | 0      | 0.0%  | 0     | 0.0%  |
| 1～5       | 195    | 53.0% | 315     | 85.6% | 340      | 92.4% | 221    | 60.1% | 159   | 43.2% |
| 5～10      | 0      | 0.0%  | 0       | 0.0%  | 27       | 7.3%  | 133    | 36.1% | 182   | 49.5% |
| 10～20     | 0      | 0.0%  | 0       | 0.0%  | 0        | 0.0%  | 14     | 3.8%  | 25    | 6.8%  |
| 20～50     | 0      | 0.0%  | 0       | 0.0%  | 0        | 0.0%  | 0      | 0.0%  | 2     | 0.5%  |
| 50～       | 0      | 0.0%  | 0       | 0.0%  | 0        | 0.0%  | 0      | 0.0%  | 0     | 0.0%  |
| 全観測       |        |       |         |       |          |       |        |       | 368   |       |
| 平均値 (cm)  | 1.1    |       | 1.4     |       | 2.7      |       | 5.0    |       | 6.1   |       |

長周期波は沖合の低気圧により海面が吸い上げられ発生する場合があるため、観測期間中の気象条件との比較を行った。図-3 に観測期間中における長周期波及び有義波の経時変化を示す。図中点線部は低気圧が通過した期間である。これによると、低気圧の通過に伴い、長周期波高の増加がみられた。その際、300s～600s、600s以上の周期帯での増加が著しいが、300s以下の周期帯ではほとんど変化がみられなかった。また、通常の波浪が発達した期間10月18日～10月25日にかけては、30s～300s付近で僅かではあるが長周期波高が増加傾向にあった。このことから、竜串湾における長周期波はうねり性の波浪に起因するものと低気圧の通過に伴う気象要因に起因するものの2パターンであることが推察される。

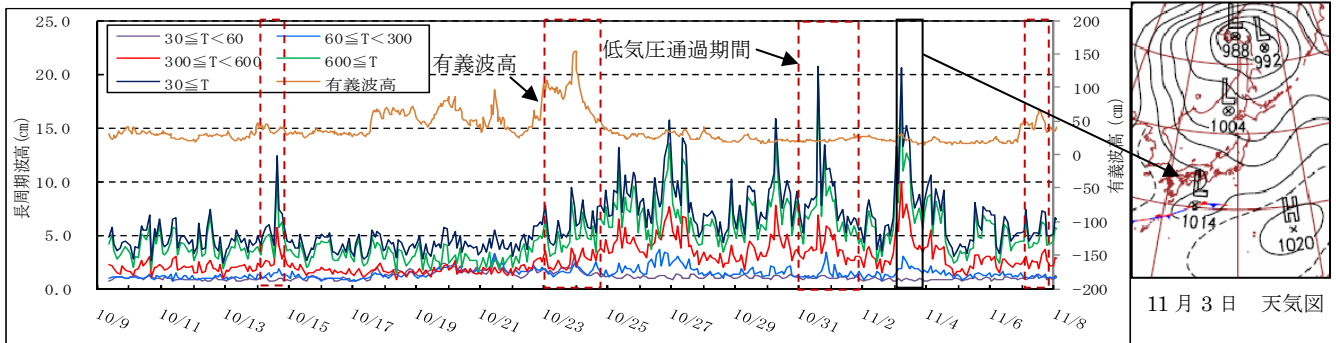


図-3 長周期波観測結果（10月9日～11月8日）

### 1.1.3 長周期波計算結果

#### (1) 計算条件

竜串湾に来襲する長周期波の伝播・増幅状況を検討するために NOWT-PARI Ver4.6c6a を用いて長周期波のシミュレーションを行った。

対象波浪は今回の観測期間中で最も長周期波が発達していた 11 月 3 日 4:50 の長周期波とした。今回の検討では、観測地点の長周期波高 10.1cm (30s～600s) となるよう入射波高を調整している。造波に関しては、図-4 に示した現地観測スペクトルを入力波形とした。スペクトルの幅は 600s 付近で長周期波が増幅していたことより 30s～600s の区間とした。その際、入射波高を調整するために、スペクトルのエネルギーを 2 割ほど落として造波させた。その他の計算条件は表-2 に示した通りである。

なお、今回の計算では、長周期波の方向性を現地卓越波向き S 方向からの一方向波として取り扱っている。

表-2 計算条件

| 項目     | 設定値               |
|--------|-------------------|
| 長周期波高  | 10.1cm (30s～600s) |
| 平均波周期  | 175.6s            |
| 造波周波数帯 | 30s～600s          |
| 沖側代表水深 | 40m               |
| 潮位     | 1.14m (M.W.L)     |
| 成分波数   | 256               |
| 主波向    | S, 一方向波           |
| 計算格子間隔 | 20m×20m           |
| 計算時間間隔 | 0.5s              |
| 計算時間   | 43200s            |

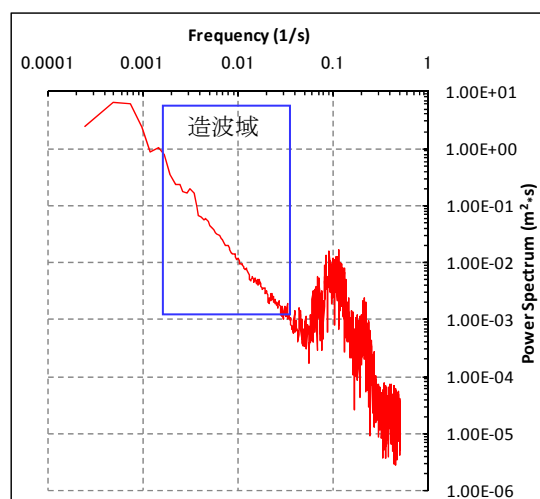


図-4 観測地点スペクトル形状

#### (2) 計算結果

計算結果より、図-5 に波高分布、図-6 に最大流速分布、図-7 に長周期波の伝播図を示す。

波高に関しては、沿岸域や湾奥部で長周期波高が増加していた。特に、千尋岬による遮蔽効果により周期の短い風波の場合は静穏な海域である大濠海域～三崎川河口において長周期波高の増加が著しかった。

た。この海域では、流速値も増加しており、かなりの範囲で泥土の移動が生じていた可能性がある。

また、長周期波が湾内に伝播するにつれ、湾奥部に位置する三崎川河口部においては水位変動が激しくなっており、現在泥土の堆積箇所である大濠海域と河口部で水位差が生じる形となり、大濠海域においては湾奥～湾外方向への往復流が卓越していると考えられる。特に、流れが湾外への流出する時に速くなっており、サンゴ上に降り積もった泥土が長周期波による流れでクリーニングされる可能性が期待される。

なお、これらの結果に関しては、長周期波を一方向波として取り扱っているため、エネルギーの集中しやすいところでは波高及び流速値が高い値を示している。長周期波の方向性については、解明されていないことが多いため、今後、長周期波の方向性を計算にどう取り入れていくかが課題と考えられる。

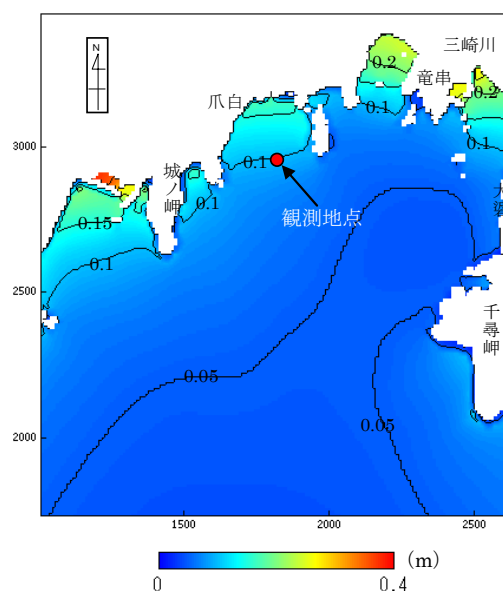


図-5 波高分布 (単位: m)

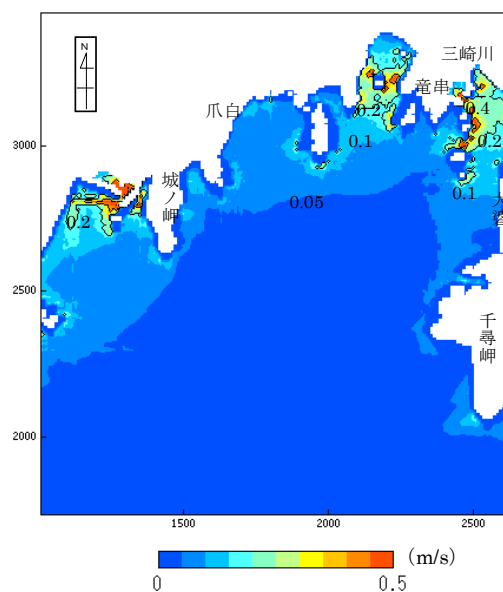


図-6 最大流速分布 (単位: m/s)



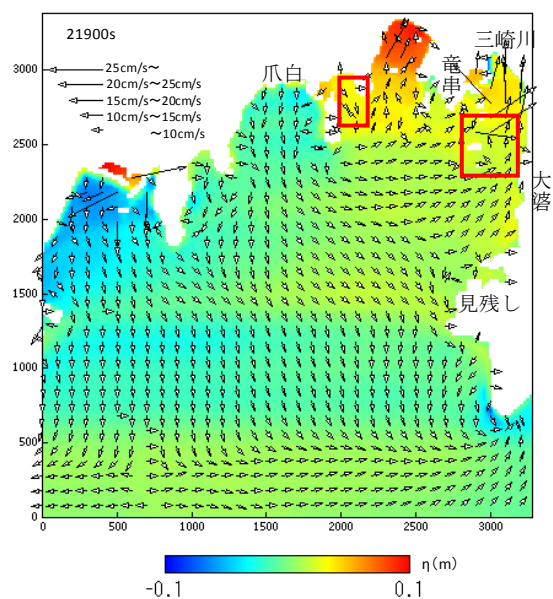
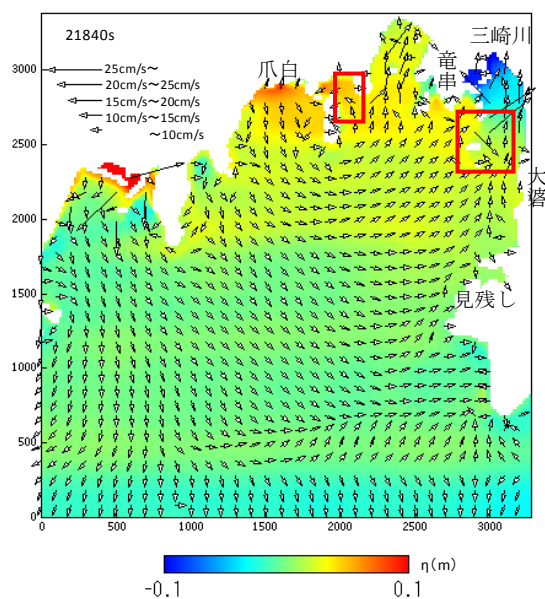
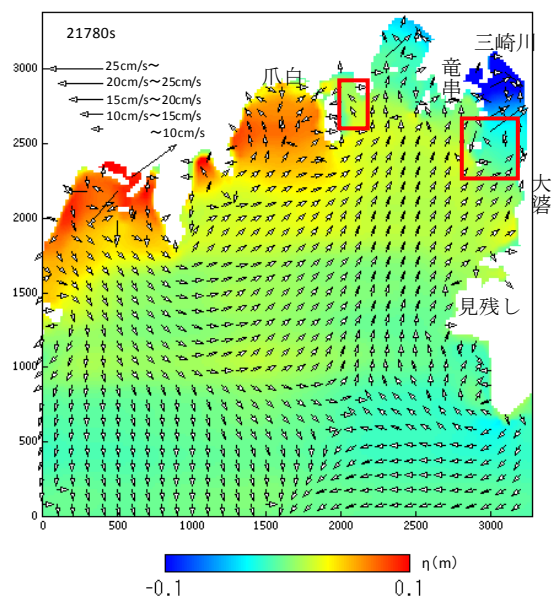
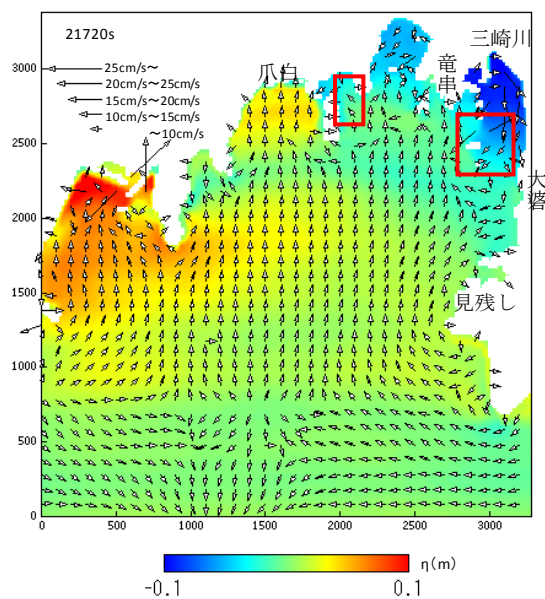
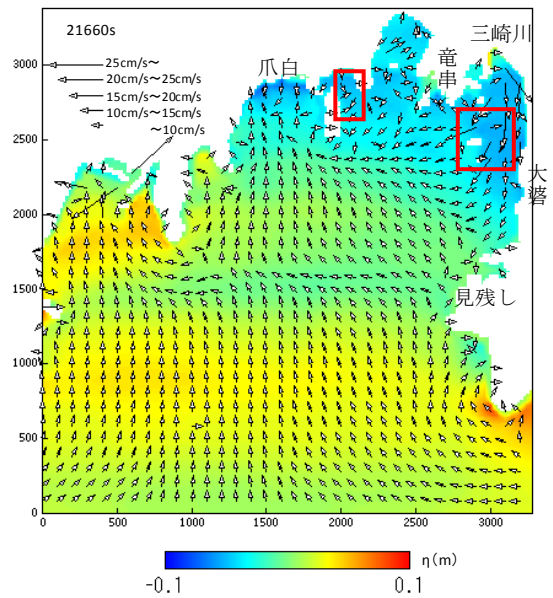
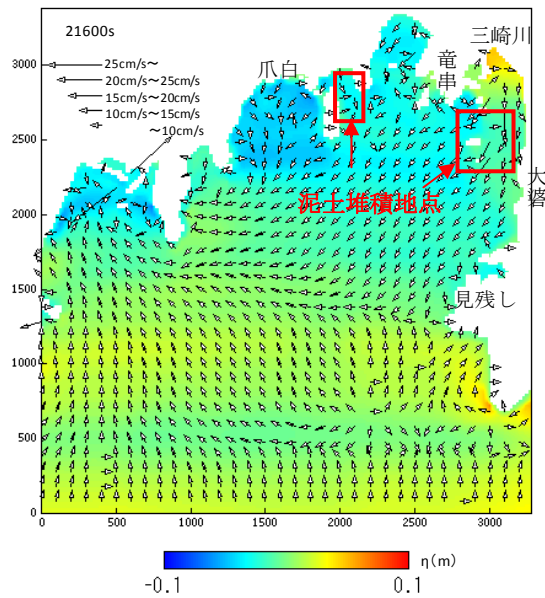


図-7 長周期波伝播図 (21600s~21900s)

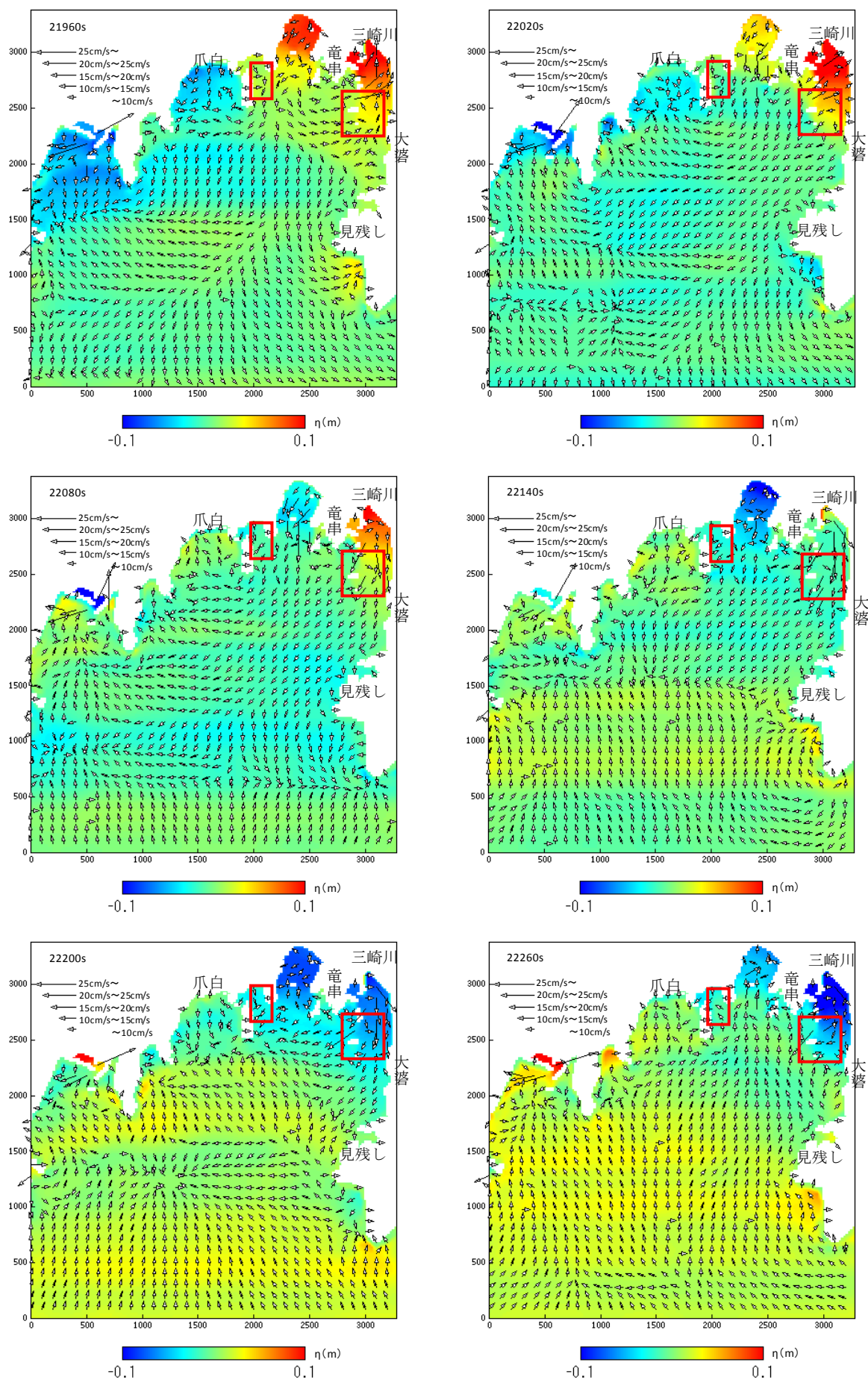


図-7 長周期波伝播図 (21960s~22260s)



#### 1.1.4 泥土移動に関する取り組み

波高は小さいが周期の長い長周期波は泥土の移動に大きな影響を与えと考えられる。そこで、ブシネスクモデルに粒子追跡モデルを組み込み泥土移動の検討を行った。

検討方法として、ブシネスクモデルにおいて1ステップの計算後に粒子追跡の処理を追加した。なお、粒子の乱れ速度は、1次のマルコフ過程に従うとして以下式で与えた。

$$u'_i = \rho u_{i-1} + N(0, \sigma_0)$$

$$\rho = \exp(-\Delta t / T_L)$$

$$\sigma_0^2 = (1 - \rho^2) K / T_L$$

ここで、Nは正規乱数、Kは拡散係数、 $T_L$ は積分時間スケール、 $\Delta T$ は計算時間ステップを表す。

試計算として、前述した観測スペクトルを基に造波を行い、表-3の条件で長周期波による粒子の移動状況を計算した。

表-3 計算条件

| 項目       | 設定値                                    |
|----------|----------------------------------------|
| 長周期波高    | 10.1cm (観測地点)                          |
| 造波周波数帯   | 30s～600s                               |
| 沖側代表水深   | 40m                                    |
| 潮位       | 1.14m (M.W.L)                          |
| 成分波数     | 256                                    |
| 主波向      | S, 一方向波                                |
| 計算格子間隔   | 20m×20m                                |
| 計算時間間隔   | 0.5s                                   |
| 緩造波時間    | 600s                                   |
| 計算時間     | 43200s                                 |
| 粒子拡散係数   | $1.0 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ |
| 積分時間スケール | 1800s                                  |

試計算の結果、水位差による流れが生じるため、大濠海域に投入した粒子が沖向きに移動していた。逆に、爪白海域に投入した粒子は、水位差による流れがそれほど確認されなかったため、ほぼ同心円上に拡散していた。

#### 1.1.5 まとめ

本調査は、竜串自然再生事業の一環として、竜串湾に及ぼす長周期波の影響について検討したものである。

現地観測波浪を用いて、長周期波の影響を調べた結果、岬の効果で通常は静穏な海域においても長周期波が影響を及ぼしている可能性があることが判明した。また、水位差によって生じた流れが、湾外方向へと流れる傾向が強く、通常は静穏な海域であるために泥土が溜まりやすかった海域において、長周期波による流れでクリーニングされる可能性があることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) (財) 沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，2004
- 2) 青木伸一：沿岸長周期波の発生と伝搬特性に関する研究，海洋開発論文集，第18巻，pp.155-160，2002.
- 3) 佐藤慎司：長周期波と漂砂・海浜変形との相互干渉について，海洋開発論文集，第18巻，pp.161-166，2002.
- 4) 角湯正剛：確率論的な手法を用いた冷却水取水に伴う浮遊体取り込みの研究，大阪大学博士論文，109p，1984.

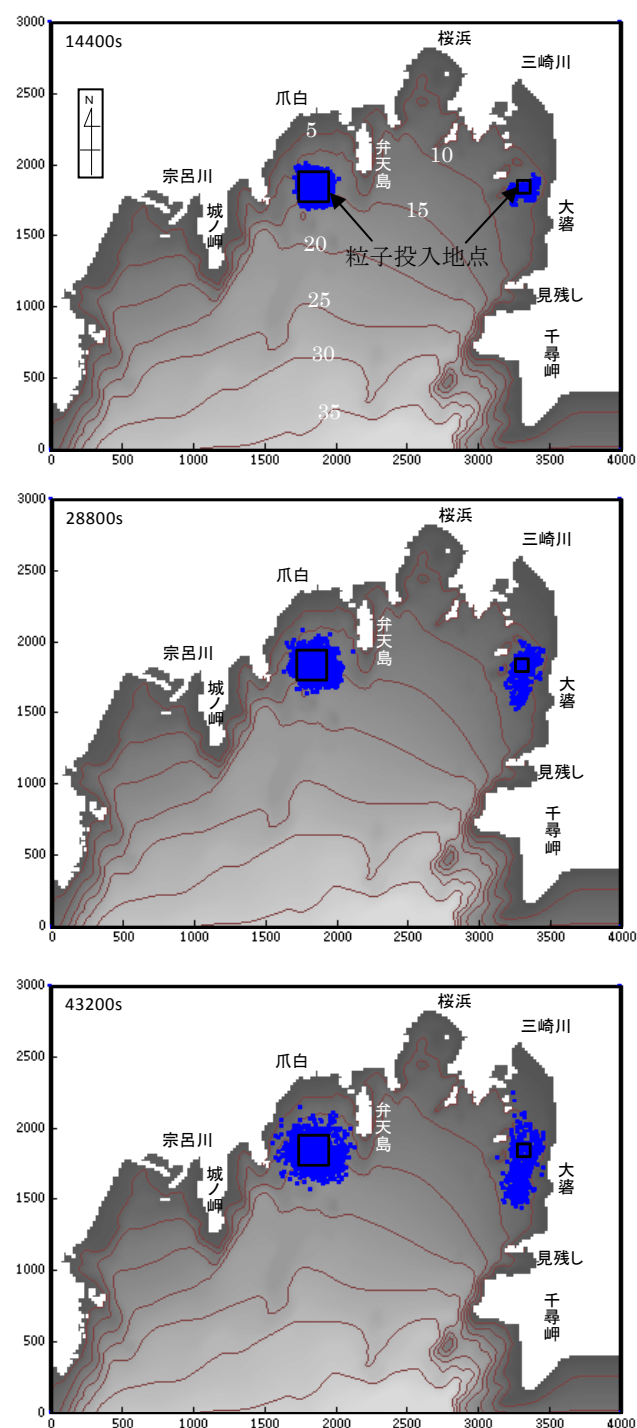


図-8 長周期波による泥土拡散計算結果

## 1.2 傾斜堤タイプの長周期波対策施設の平面波浪場解析への適用

以下は、2009年6月の海洋開発シンポジウムにて公表された「秋田港における港内長周期波対策施設による静穏度向上効果」の資料内容を紹介するものです。

### 1.2.1 はじめに

近年の船舶の大型化に伴い、多くの港湾において長周期波によると考えられる係留索の破断や荷役障害が問題となっている<sup>1)</sup>。この問題に対応するために、長周期波の波高を予測し荷役可否判断を行うソフト的な対策<sup>2)</sup>が提案され実用に供し始めていると共に、ハード的な対策として、係留系の復元特性を変更して船体の動揺を低減させる対策<sup>3)</sup>、また、防波堤の延伸や港内に長周期波のエネルギーを低減させるような対策施設を設置することにより泊地等の長周期波の波高を低減させる対策<sup>4), 5)</sup>が提案されている。

一般の公共岸壁を対象とした場合、利用する船舶が多種にわたるため、泊地の長周期波の波高を低減し静穏度を向上させることが可能な防波堤の延伸や港内への長周期波対策施設の設置が有効であると考えられる。ただし、防波堤の延伸は整備期間が長くなるため、即時的な静穏度の向上を目指すには、港内への長周期波対策施設の設置が有効であると考えられる。以上の背景を踏まえ、秋田港では、将来的な防波堤の延伸計画も考慮した上で、港内に傾斜堤タイプの長周期波対策施設を設置し、即時的な静穏度の向上を目指している。

本研究では、防波堤の内側に沿って設置された長周期波対策施設の前後で水位と流速等の現地観測を実施し、これまで明らかにされていなかった現地での傾斜堤タイプの長周期波対策施設の長周期波に対する反射率を推定した。さらに、現状および将来の施設整備の進捗に応じた、長周期波に対する静穏度の検討を行い、港内長周期波対策施設による静穏度向上効果について調べた。

### 1.2.2 現地観測の概要

#### (1) 長周期波対策施設の整備状況

現在、秋田港では第一南防波堤波除堤区間および外港地区の護岸前面において、傾斜堤タイプの長周期波対策施設の整備が進められている。図-1に平成19年度（2007年度）の波浪観測時点での長周期波対策施設の整備状況を示す。防波堤港内側の防波堤波除堤区間において、港口側130m、港奥側50mが整備済みの状況である。

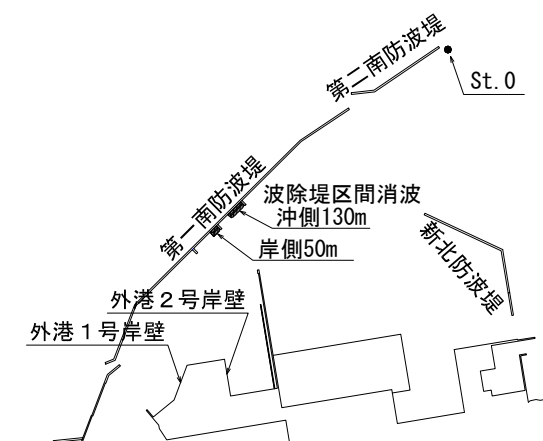


図-1 秋田港の長周期波対策施設位置図

#### (2) 観測期間および観測位置

2008年2月7日～3月11日（34日間）に港口（St. 0）および図-2および図-3に示す港口側の対策施設前背面（St. 1～St. 4）において水位、水圧、水平2成分流速の観測を実施した。

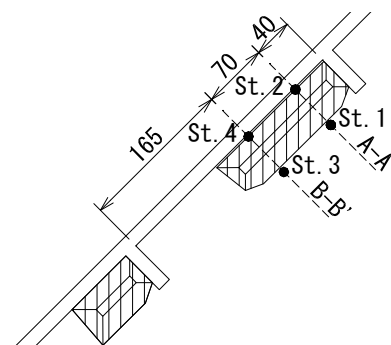


図-2 波浪観測位置（単位:m）

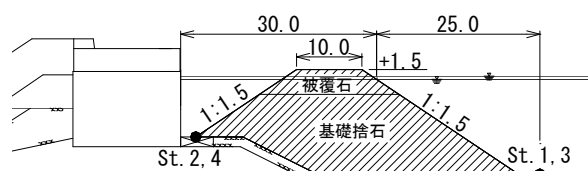
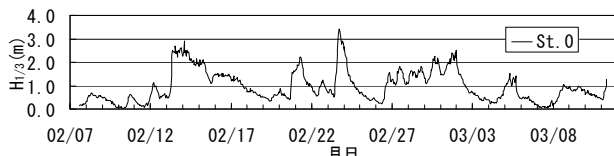


図-3 長周期波対策施設の断面および観測位置（単位:m）  
（被覆石1,000kg/個、基礎捨石200～500kg/個）

#### (3) 解析対象期間の設定

観測期間における観測データを1時間単位で、全成分および長周期波成分の統計処理を行った。St. 0における全成分、長周期波成分の有義波高の経時変化を図-4に示す。ここで、長周期波の周期帯は「港内長周期波影響評価マニュアル」<sup>6)</sup>（以下、マニュアル）に従い30s～300sとした。

観測期間中、St. 0における有義波高( $H_{1/3}$ )が2m以上となった表-1に示す4期間を高波イベントとして抽出した。



(a) 全成分



(b) 長周期波成分 (30s~300s)

図-4 有義波高の経時変化 (St. 0)

表-1 抽出した高波イベント発生時刻

| イベントNo. | 観測時刻              |
|---------|-------------------|
| No. 1   | 2008/02/14 02~03時 |
| No. 2   | 2008/02/21 07~08時 |
| No. 3   | 2008/02/23 17~18時 |
| No. 4   | 2008/03/02 00~01時 |

### 1.2.3 長周期波対策施設の反射率の推定

長周期波対策施設の反射率について、以下の方法により推定した。

- ① ブシネスク方程式を用いた水路モデルの波浪場解析<sup>7)</sup>により、長周期波対策施設の性能を表すパラメータであるエネルギー吸収係数と反射率の関係を求める。
- ② ブシネスク方程式を用いた平面モデルによる港内長周期波浪場の再現計算結果と現地観測結果との比較により、現地観測結果を最もよく再現する吸収係数を推定する。
- ③ 水路モデルで求めた吸収係数と反射率の関係から長周期波対策施設の反射率を求める。

#### (1) 水路モデルによる反射率とエネルギー吸収係数の関係

ブシネスク方程式を用いた水路モデルの波浪場解析により、長周期波対策施設の消波性能を表すパラメータであるエネルギー吸収係数を変化させたときの反射率の感度分析を行った。

##### a) 長周期波対策施設のモデル化

水路モデルは、図-5および図-6のようにモデル化した。計算格子間隔は長周期波対策施設の幅との関係から10mとし、水深は現地の状況から14mとした。長周期波対策施設は傾斜堤タイプであるため、その断面のモデル化は、防波堤（直立壁）から30m離れた位置が前面法肩となるように、3格子(30m)に吸収係数を設定した。

また、長周期波対策施設の中央と法面とでは波浪の減衰の度合いが異なると考えられるため、両サイ

ドの吸収係数は中央の吸収係数の半分の値とした。入射波は非線形性の影響を受けないように波高1cmの規則波とし、6周期(10, 30, 50, 60, 80, 100s)を検討した。

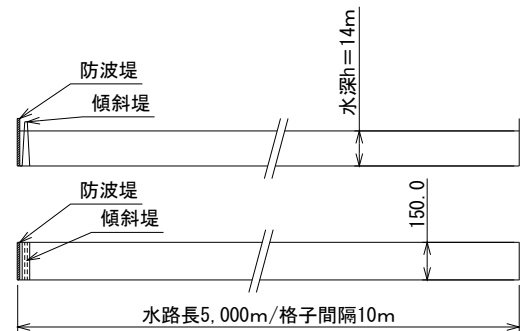


図-5 水路のモデル図（上：断面／下：平面）

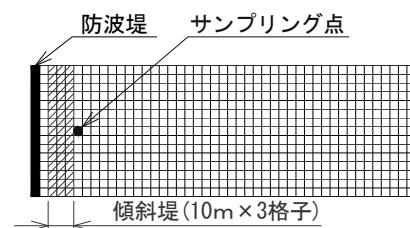


図-6 長周期波対策施設のモデル化

##### b) 反射率の感度分析

図-6に示したサンプリング点における水位および水路長方向の流速を用い、Guzaの方法<sup>8)</sup>により入・反射波の分離を行い、反射率を求めた。

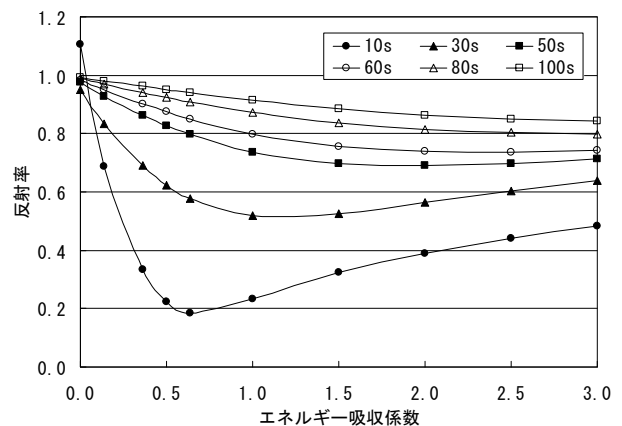


図-7 エネルギー吸収係数に対する反射率の算定結果

水路モデルによる反射率の算定結果を図-7に示す。本研究で着目している長周期波の周期は60~90s程度であり、ここで検討したエネルギー吸収係数0.0~3.0の範囲は、周期60sに対しては反射率0.74程度以上、80sに対しては反射率0.80程度以上に対応していることを示している。

## (2) 平面モデルでの検討

長周期波対策施設の設置位置にエネルギー吸収係数を設定して、ブシネスク方程式を用いた秋田港の平面波浪場解析を実施し、観測波高との整合性より反射率の推定を行った。検討条件は、観測期間中で最も高波浪であったイベントNo. 3（2008/02/23 17～18時）の条件とした。

### a) 計算条件および計算ケース

計算条件を表-2に、図-8に計算領域図を示す。

計算領域は、長周期波対策施設の法線が計算領域に対し水平となるように地形を回転させて作成した。また、格子間隔は水路モデルと同様の10mとした。入射波高はSt. 0における観測波高と計算波高の整合により設定することとし、沖側境界における入射波高の試行計算により調整を行った。

表-2 計算条件

| 項 目               | 係 数                                   |
|-------------------|---------------------------------------|
| 計算格子間隔            | 10m                                   |
| 入射波高              | 0.183m（試行計算の結果）                       |
| 入射波スペクトル          | 30s～300s（矩形スペクトル）                     |
| 入射波向              | N267° E/単一方向波<br>（イベントNo. 3のSt. 0の波向） |
| 成分波数              | 256波                                  |
| 計算時間間隔 $\Delta t$ | 0.25s                                 |
| 緩造波時間             | 300s                                  |
| サンプリング時間          | 3600s～7200s                           |

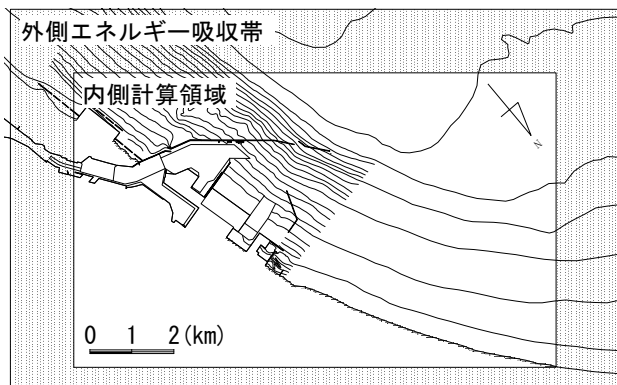


図-8 計算領域図

表-3 エネルギー吸収係数と反射率の対応[周期80s]

| Case. | Case. 1 | Case. 2 | Case. 3 | Case. 4 | Case. 5 | Case. 6 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 吸収係数  | 1.60    | 1.00    | 0.64    | 0.36    | 0.14    | 0.00    |
| 反射率   | 0.83    | 0.87    | 0.91    | 0.94    | 0.97    | 1.00    |

入射波の周波数スペクトルは、30s～300sで矩形のエネルギー分布となる不規則波とし、波向は観測期間におけるSt. 0の風波の波向と同一の単一方向として与えた<sup>6)</sup>。

計算ケースは表-3に示す6ケースとし、周期80sに対する長周期波対策施設の反射率は0.83～1.0である。表-3の吸収係数の値は、長周期波対策施設の中

央での設定値である。

### b) 多方向性の影響について

長周期波の波向や方向分布特性については、現在のところ十分に解明されていないため、マニュアルにおいては近似的に風波の波向で代表させた単一方向波とする手法を実用的な手法として提案されている。本検討においても、ブシネスク方程式を用いた波浪場計算の計算時間も考慮の上、マニュアルに従った解析を行っている。

ただし、実際の海域においては短周期成分よりも方向集中度が小さい多方向不規則波になっていることが指摘されている<sup>9)</sup>。そこで、多方向性の影響を調べるため、周期60sおよび80sの規則波について、波向を変化させた場合の港内波浪場の予備計算を行った。その結果、入射波の周期および波向により各St.の波高がばらつくことを確認した。

### c) 現地反射率の推定

上述したばらつきの存在等を考慮し、St. 1～4における観測波高と計算波高のそれぞれの平均値が等しくなるように計算値の補正を行った。観測値から計算値（補正後）を差し引き、観測値で無次元化し、誤差最小になる吸収係数から、表-3の係数を用いて長周期波対策施設の反射率を推定した。ここで、反射率としては、周期80sの波に対する値としている。図-9にイベントNo. 3の場合の設定反射率に対する波高の誤差を示す。St. 1とSt. 2では反射率0.94で、St. 3とSt. 4では0.87で極小値となる。またSt. 1～4の誤差の相加平均では0.94が極小値となった。

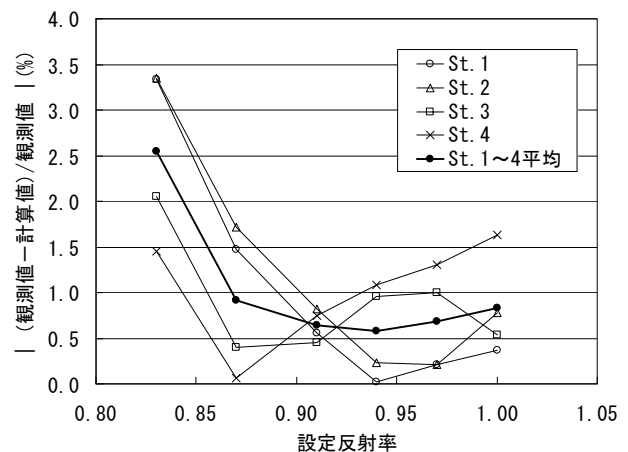


図-9 観測値と計算値の誤差（イベントNo. 3）

他のイベントにおいても同様に整理した結果を図-10に示す。ただし、平面波浪場の計算はイベントNo. 3を対象に行っているため、各St.と港口との波高比は、イベントNo. 3を対象にした計算結果を用いている。各設定反射率に対するイベントNo. 1～4の誤差およびその相加平均値、標準偏差について整理した。この結果より、対象としたイベントによりばらつきはあるものの誤差が最小となる範囲から、

長周期波対策施設の反射率は周期80sに対して0.91～0.97の間であるといえる。

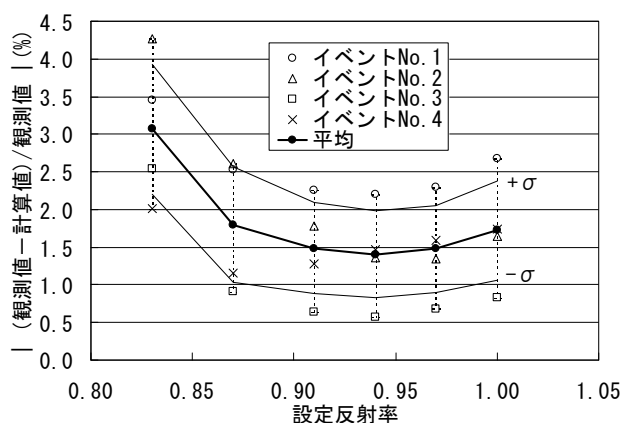


図-10 観測値と計算値の誤差平均

### (3) 断面実験結果との比較

現在、秋田港において整備されている長周期波対策施設の断面は、断面実験結果<sup>10)</sup>を参考に決定されている。ここでは、この実験結果と推定した反射率の結果との比較を行った。

図-11に実験模型断面を示す。上段が現在整備されている「切欠あり」の断面、下段が切欠部をケーソン背後まで埋めてしまう「切欠なし」の断面である。この2断面についての実験による反射率の算定結果が図-12である。堤体幅 $B$ と波長 $L$ の比 $B/L$ に対して反射率を整理している。秋田港において長周期波対策施設の堤体幅 $B$ は30mであり実験時の想定と同じ、また、対象周期 $T$ は80s程度であることから、水深 $h$ を14mとすると、波長 $L$ は $\approx 937$ mとなる。よって、 $B/L$ の値は0.032となり、図-12より反射率を読み取ると0.85～0.9程度となる。

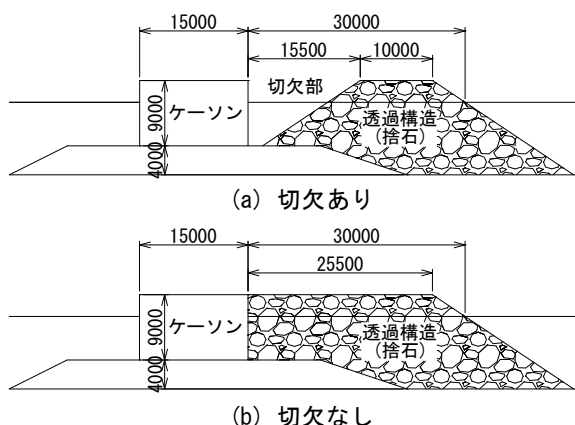


図-11 長周期波対策施設の実験模型断面<sup>10)</sup>（現地スケール換算、単位mm）

推定された秋田港の長周期波対策施設の周期80sに対する反射率0.91～0.97、その区間中間値0.94は、実験結果よりもやや大きいものの、本研究における

反射率の推定精度や実験結果のばらつき等を考慮すると、ほぼ対応する結果となっているといえる。また、実験結果を参照すると、この周期帯において「切欠あり」と「切欠なし」とでは反射率は大きく変わらない可能性が高く、今後、長周期波対策施設の性能を向上させるためには、切欠を埋めるのではなく、港内側への拡幅や対策施設の延長が有効であるといえる。

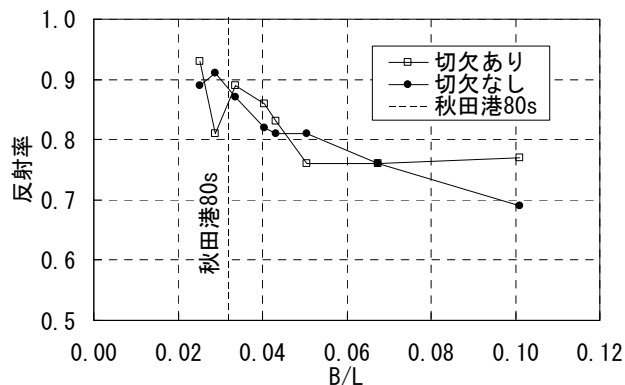


図-12 実験による長周期波対策施設の反射率特性

### 1.2.4 長周期波対策施設の整備による静穏度向上効果

現状および将来の施設整備の進捗に応じた、長周期波に対する静穏度の検討を行い、港内長周期波対策施設による静穏度向上効果について検討した。静穏度算定の対象としたのは、図-1に示した外港1号および2号岸壁である。静穏度は、マニュアルの標準解析法に従い、長周期波の波高の頻度とブシネスク方程式を用いた波浪場計算結果を用いて、対象位置の波高が基準波高を下回る確率として算定した。

#### (1) 検討港形

検討した港形は表-4に示す5ケースとした。このうち、②および④、⑤を図-13に示す。①の長周期波対策施設なし（平成16年度）は、図-8に示す防波堤延長で港内の長周期波対策施設が設置されていない状態、③の防波堤の整備も含めた港湾計画完成時は、図-13に示した②の状態に加えて主として第二南防波堤が872mから1500mに延伸されている状態である。④および⑤は、②平成23年度予定の長周期波対策施設完成港形に対して、港内の長周期波対策施設による静穏度向上対策として位置付けて設定したケースである。

#### (2) 静穏度算定条件

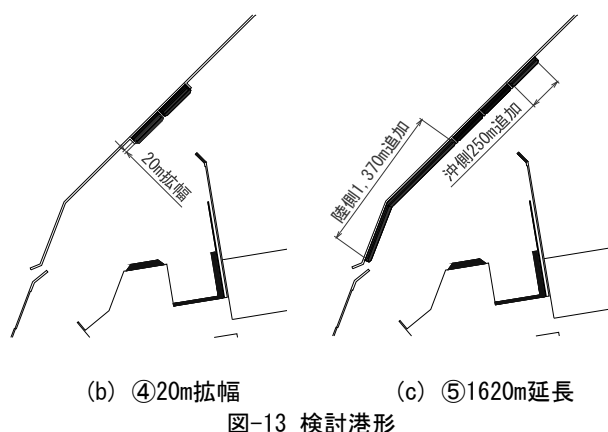
港口での長周期波高の出現頻度は1994年～2003年の10年間のデータを用い、静穏度算定時の荷役限界波高は対象船舶を考慮して10cmとした。計算におけるエネルギー吸収係数は、対策施設の設置水深の違



いにより反射率が変わることを考慮し、推定した長周期波対策施設の反射率を図-12に示した実験結果により補正して設定した。

表-4 検討ケース

|   |                                         |
|---|-----------------------------------------|
| ① | 長周期波対策施設なし（平成16年度）                      |
| ② | 長周期波対策施設完成（平成23年度予定）                    |
| ③ | 防波堤の整備も含めた港湾計画完成時                       |
| ④ | ②平成23年度予定港形の静穏度向上対策<br>長周期波対策施設の20m拡幅   |
| ⑤ | ②平成23年度予定港形の静穏度向上対策<br>長周期波対策施設の1620m延長 |



### (3) 静穏度算定結果

静穏度の算定結果を図-14に示す。なお、ここで静穏度の目標値としては、港湾の技術基準<sup>11)</sup>に従い97.5%とした。

②平成23年度予定港形の静穏度は外港1号で96.5%、外港2号で96.4%と、①平成16年度港形の静穏度に対して、それぞれ5.0%および9.3%向上する。また、③港湾計画完成予定港形の静穏度は外港1号で98.4%、

外港2号で98.4%と、何れも目標値である97.5%以上を満足する結果が得られた。

平成23年度予定港形に着目し、④長周期波対策施設を20m拡幅した場合の静穏度は、外港1号で96.7%（0.2%向上）、外港2号で96.9%（0.5%向上）と僅かではあるが静穏度が向上する結果となった。同様に⑤1620m延長では外港1号に対する効果が大きく98.3%（1.7%向上）と目標値としている97.5%以上となったが、外港2号に対しては97.2%（0.8%向上）と0.3%ほど目標値を満足できなかった。

この結果より、長周期波対策施設を港内に適切に配置することで、一般に整備に長期間を要する防波堤の延伸と同様の効果を得られるといえる。

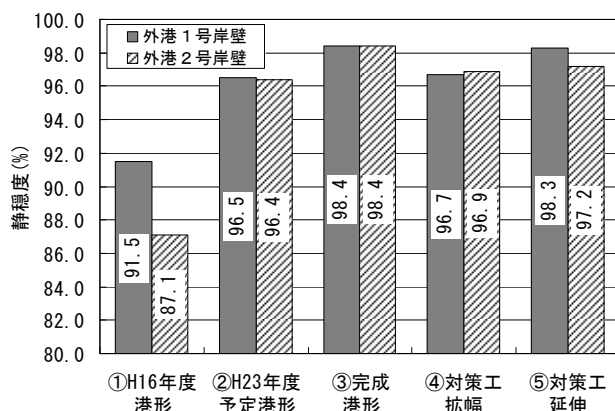


図-14 静穏度算定結果

### 1.2.5 おわりに

本検討における結果を以下に示す。

- ① 現地観測を実施し、秋田港の第一南防波堤の港内側の波除堤区間に設置された長周期波対策施設の反射率を推定した。その結果、長周期波対策施設の反射率は周期80sに対して0.91～0.97の間であるという結論を得た。過去に行われた実験結果と比較すると、推定された反射率は実験結果よりもやや大きいもののほぼ対応する結果となった。
- ② 計画している長周期波対策施設の設置が完了する平成23年度予定港形では、長周期波対策施設がない平成16年度港形に比べて荷役稼働率が5%以上向上する。さらに、長周期波対策施設を拡幅または延伸させることで、静穏度を向上させることも確認できた。以上より、長周期波対策施設を港内に適切に配置することによって、整備に長期間を要する防波堤の延伸と同様の効果を得られるといえる。

また、本検討で取り扱った波浪観測時点での対策施設の整備状況は図-2に示したとおり、波除堤間に完全に覆っておらず、波除堤の存在が各St.の観測

データに影響を与えていると考えられる。今後、波除堤間を覆う様に整備が進んだ段階での現地観測を行うことにより、長周期波対策施設としての水理特性（反射率、静穏度等）の推定精度の向上が期待できる。

## 参考文献

- 1) 平石哲也，田所篤博，藤咲秀可：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第 35 巻 3 号，pp. 1-36，1996.
- 2) 渥美洋一，若山義樹，國田淳，関口信一郎，川口勉，平石哲也，青木伸一，上田茂：長周期波の港内進入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討，海岸工学論文集，第 44 巻，pp. 221-225，1997.
- 3) 米山治男，佐藤平和，白石悟：係留索による長周期波低減システムの開発－模型実験および試設計－，（独）港湾空港技術研究所資料，No. 1056，29P. 2003.
- 4) 平石哲也，永瀬恭一：長周期波対策護岸の最適構造に関する実験，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 721-725，2004.
- 5) 大島香織，森屋陽一，水流正人，杉田繁樹，平石哲也：渦による消波効果を活用した長周期波対策施設の特性，海洋開発論文集，第 22 巻，pp. 145-150，2006.
- 6) 港内長周期波影響評価マニュアル：（財）沿岸技術研究センター，86p，平成 16 年 8 月.
- 7) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾技術研究所資料，No. 1360，162p，2002.
- 8) Guza R. T., E. B. Thornton and R. A. Hsiao : Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19<sup>th</sup> ICCE, Houston, pp. 708-723, 1984.
- 9) 関本恒浩：港湾内外の長周期波の特性とその評価に関する研究，中央大学理工学部博士論文，130P.，1990.
- 10) 山田晶子，国栖広志，爲廣哲也，小平田浩司，平石哲也：石巻港における長周期波の消波対策に関する検討，海洋開発論文集，第 21 巻，pp. 785-790，2005.
- 11) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，pp. 181，2007.



## 2.3 長周期波を含む現地観測データを活用した港内静穏度の推定

### 2.3.1 はじめに

南日本の東シナ海と太平洋に挟まれた海域では、九州の南方から台湾の東方にかけて島嶼群が点在する。対象とした当該港は、南西諸島西部の一つの島嶼群に位置している。この島は、生活物資の多くが直接日本本土や沖縄本島より海上輸送されており、定期航路の果たす役割は重要である。一方で、当該港は台風の来襲する頻度が高く、台風来襲時には、定期船が欠航となり、物資輸送が数日に渡って滞る。

今年度の調査は、近年の地球温暖化による台風の巨大化や水位上昇に伴う来襲波の増大、さらには航路開削による波浪の侵入等が見込まれる中、気象擾乱時の港内波浪場の実態を正確に把握することを目的とし、風波の影響はもちろんのこと、波群に拘束された長周期波の影響を、現地観測データとブシネスクモデルを用いた静穏度解析を通じ、検証を試みたものである。その中で、今回の発表は、現地観測データに基づく計算条件や境界条件の最適化検討の成果の一部を発表するもので、いずれも現況地形を使って行ったものである。

### 2.3.2 現地観測

#### (1) 波浪観測の概要

波浪観測は、台風の来襲が予想される8月下旬～10月上旬までの約40日間行った。観測は波浪計（Waves Observer DL-3型）4台を使用し、サンプリング間隔0.5秒で連続測定を行った。

波浪計の設置位置は、図-1に示す4地点である。また、同時刻におけるナウファス（No.1より約4km北西）の観測データもサンプリング間隔0.5秒で取得した。

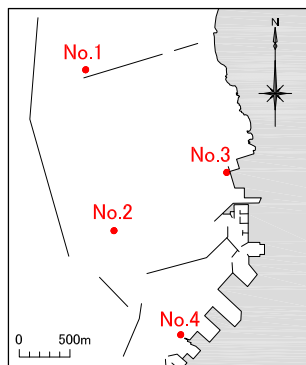
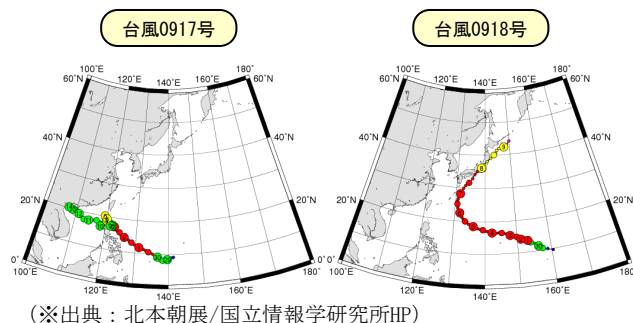


図-1 波浪計の設置位置

#### (2) 観測期間中の気象

8月下旬～9月下旬までは好天が続き、当該港に影響を及ぼす台風は発生しなかった。10月上旬に発生した台風0917号及び0918号は、図-2に示す経路を通過しており、当該港もその影響を受けたと考えられる。



(※出典：北本朝展/国立情報学研究所HP)

図-2 台風の経路図

### (3) 観測結果

#### (a) 波浪の経時変化

台風来襲時（10月上旬）のナウファス地点における波浪の経時変化図を図-3に示す。現地観測結果より、台風0917号及び0918号による波浪の発達期、ピーク期、減衰期をそれぞれ選定し、再現計算の対象とした。対象とした時刻を表-1に示す。

ナウファス地点の時系列データを見ると、台風0917号の波向は時々刻々と変化しているのに対し、台風0918号の波向はNNW～NWで安定していた。

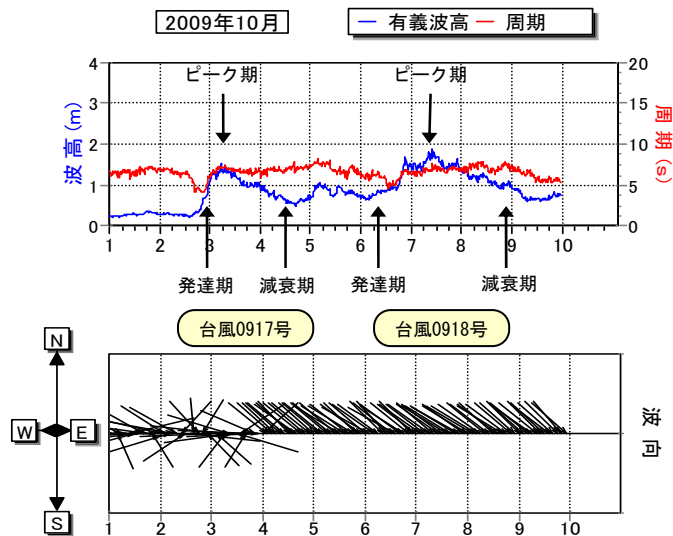


図-3 波浪の経時変化図

表-1 再現計算の対象時刻

| 台 風   | 台風0917号       | 台風0918号       |
|-------|---------------|---------------|
| 発 達 期 | 2009年10月2日23時 | 2009年10月6日8時  |
| ピーク期  | 2009年10月3日7時  | 2009年10月7日10時 |
| 減 衰 期 | 2009年10月4日11時 | 2009年10月8日22時 |

#### (b) 台風接近時のスペクトル形

選定した時刻において、各地点で観測された周波数スペクトルを図-4に示す。なお、解析には選定した時刻の前後1時間（計2時間）の観測データを0.5秒間隔で使用した。この結果より、境界周波数を20秒と設定し、以後の検討に用いることとした。

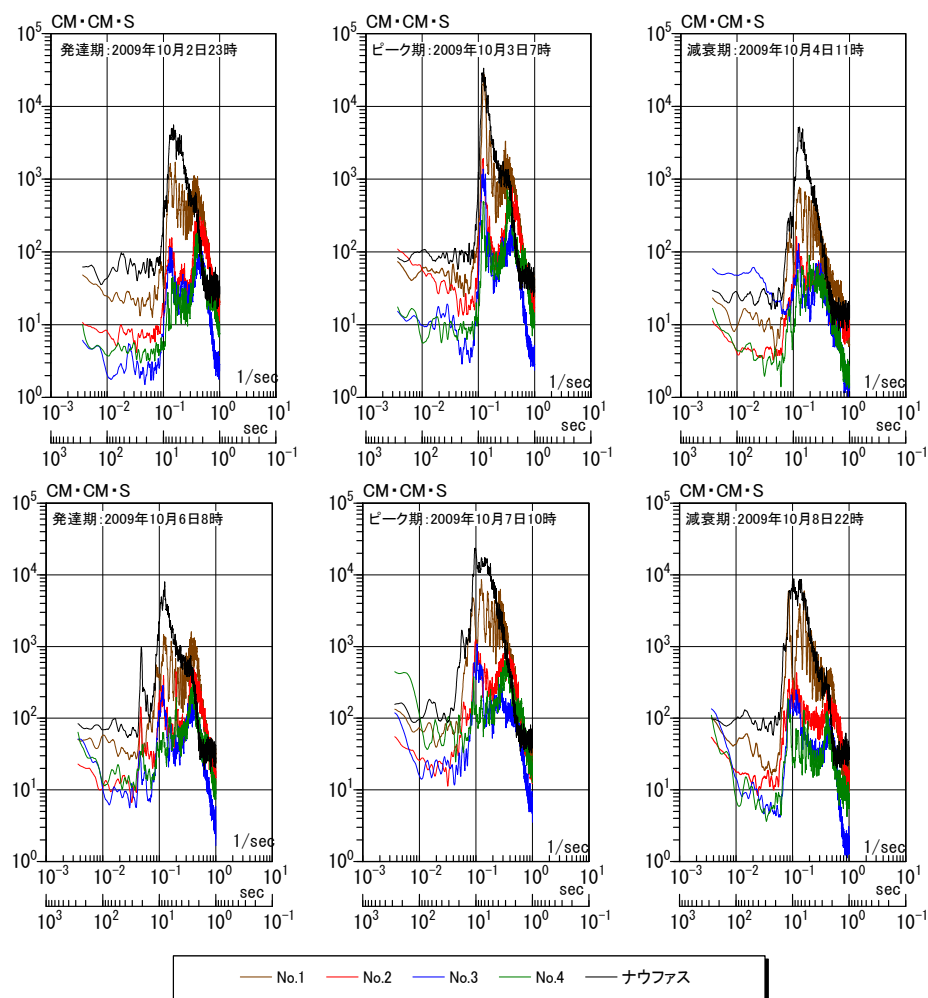


図-4 台風接近時の周波数スペクトル（上：台風0917号，下：台風0918号）

### 2.3.3 計算概要

#### (1) 地形条件

再現計算に用いる当該港周辺の地形図は図-5に示すとおりである。当該港の周辺海域にはサンゴ礁が分布し、海底地形が複雑な形状となっている。また港域には外郭施設が適切に配置されている。

図-6に、再現計算に用いる反射率設定図を示す。造波境界背後と側方境界には、反射が生じないよう

にスポンジ層を用いたエネルギー吸収層を配置した。また、港内の任意反射境界にも高次型スポンジ層を用いて、所定の反射率を呈するように設定した。なお、長周期波の反射率については、以降の検証で採用した値を示している。

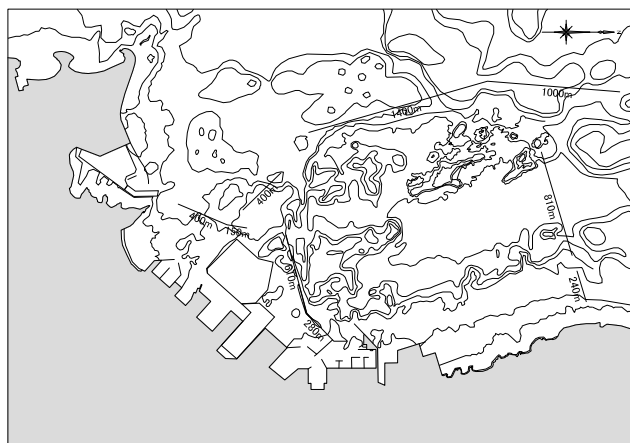


図-5 地形図

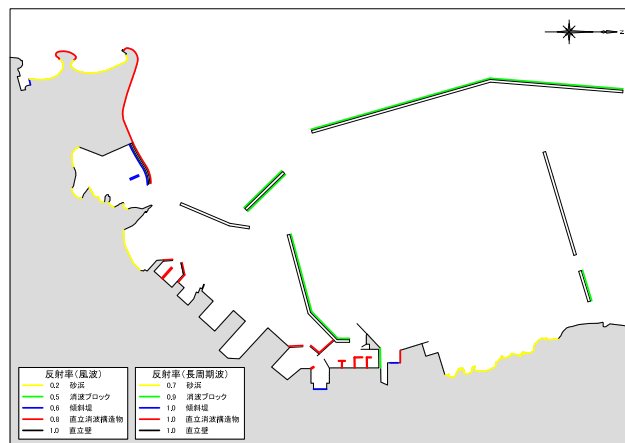


図-6 反射率設定図

## (2) 計算領域

計算領域は、風波・長周期波ともナウファス地点から波が入射するように設定した。検証にはN, NNW, NW, WNWの4波向の領域を用いているが、ここではNNWの計算領域を示す。

図-7に風波の計算領域を示す。計算時間の関係から、ナウファス地点から浅海域まではエネルギー平衡方程式で波浪の変形計算を行い、その結果から修正ブシネスク方程式の入射波を設定した。図-8に修正ブシネスク方程式の計算モデル図を示す。計算領域の周囲には300mのエネルギー吸収層を設定した。

図-9に長周期波の計算領域を、図-10に修正ブシネスク方程式の計算モデル図を示す。計算領域の周囲には1200mのエネルギー吸収層を設定した。

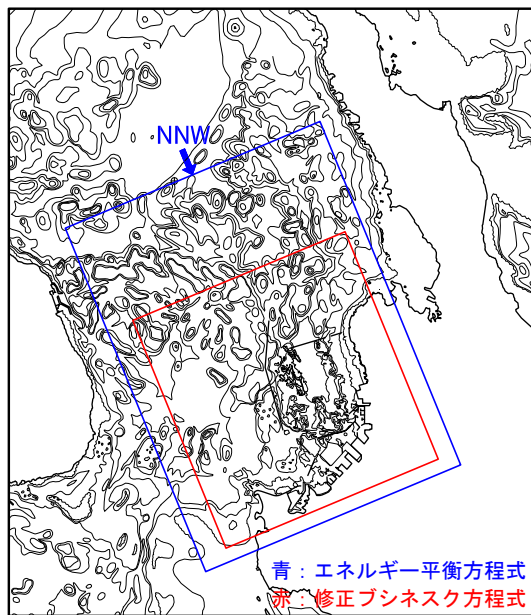


図-7 計算領域図（風波）

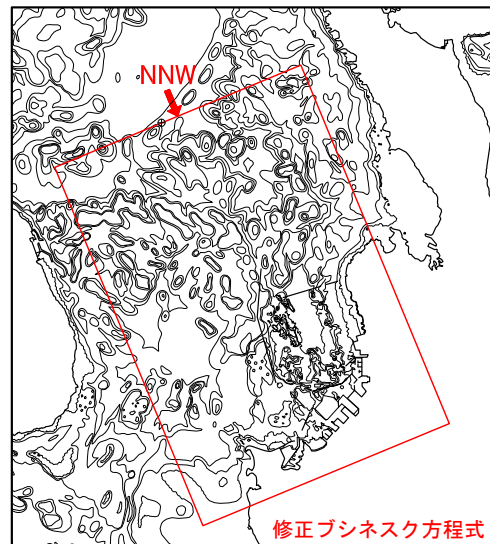


図-9 計算領域図（長周期波）

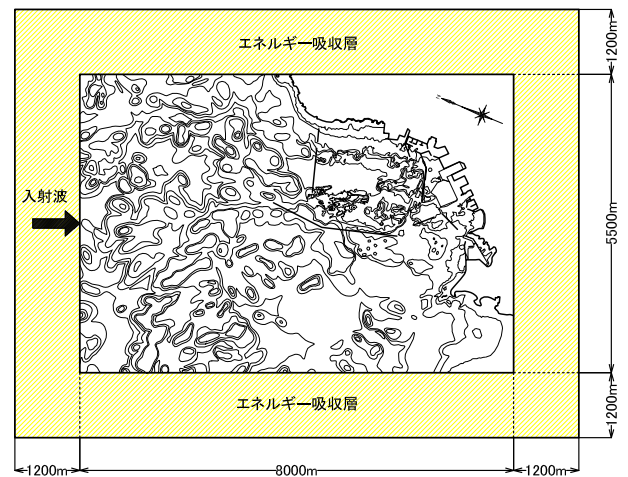


図-10 計算モデル図（長周期波）

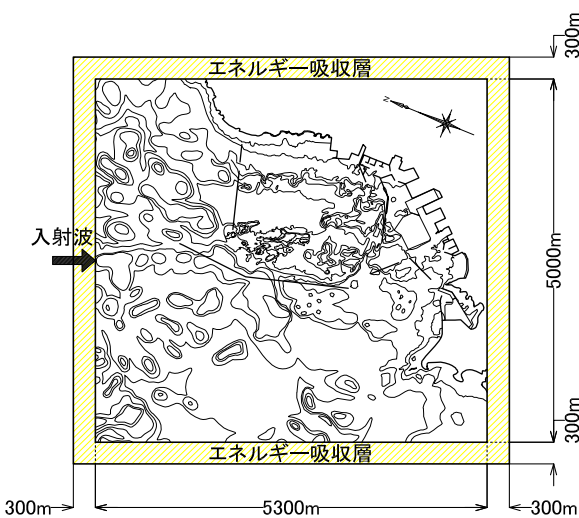


図-8 計算モデル図（風波）

## (3) 入射波条件

ナウファス地点の観測データを用いて、ゼロアップクロス法で統計処理を行い、選定した時刻の入射波を設定した。表-2に風波の入射波条件を、表-3に長周期波の入射波条件を示す。

表-2 入射波条件（風波）

|             |      | 年月日時          | 波高<br>(m) | 周期<br>(sec) | 波向  | 潮位<br>(m) | Smax |
|-------------|------|---------------|-----------|-------------|-----|-----------|------|
| 台風<br>0917号 | 発達期  | 2009年10月2日23時 | 0.85      | 5.5         | N   | 0.90      | 25   |
|             | ピーク期 | 2009年10月3日7時  | 1.47      | 7.4         | WNW | 1.90      | 25   |
|             | 減衰期  | 2009年10月4日11時 | 0.66      | 6.5         | NNW | 1.10      | 25   |
| 台風<br>0918号 | 発達期  | 2009年10月6日8時  | 0.81      | 6.3         | NNW | 2.00      | 25   |
|             | ピーク期 | 2009年10月7日10時 | 1.74      | 6.6         | NW  | 1.90      | 25   |
|             | 減衰期  | 2009年10月8日22時 | 0.99      | 7.5         | NNW | 1.90      | 25   |

表-3 入射波条件（長周期波）

|             |      | 年月日時          | 波高<br>(m) | 周期<br>(sec) | 波向  | 潮位<br>(m) | Smax          |
|-------------|------|---------------|-----------|-------------|-----|-----------|---------------|
| 台風<br>0917号 | 発達期  | 2009年10月2日23時 | 0.07      | 20~300      | N   | 0.90      | 一方向           |
|             | ピーク期 | 2009年10月3日7時  | 0.09      | 20~300      | WNW | 1.90      | 不規則波<br>(999) |
|             | 減衰期  | 2009年10月4日11時 | 0.04      | 20~300      | NNW | 1.10      |               |
| 台風<br>0918号 | 発達期  | 2009年10月6日8時  | 0.10      | 20~300      | NNW | 2.00      | 一方向           |
|             | ピーク期 | 2009年10月7日10時 | 0.11      | 20~300      | NW  | 1.90      | 不規則波<br>(999) |
|             | 減衰期  | 2009年10月8日22時 | 0.08      | 20~300      | NNW | 1.90      |               |

## 2.3.4 解析モデルと長周期波対策工等の反射率

### (1) 検証概要

解析モデルについては、①高次型スポンジ層モデル（NOWT-PARI, Ver. 4.6 $\beta$  改良版）、②Bore型砕波遡上越波透水層モデル（NOWT-PARI, Ver. 4.6c6a 改良版）の2つを対象として検証を行った。また、長周期波における海浜（長周期波対策工兼用）反射率については詳細な値が決められていないこと、当該港における過去の計算事例で反射率0.6を使用していたことを考慮し、高次型スポンジ層モデルでは0.6及び0.7の2つの反射率を用いて検証を行った。

検証ケースは表-4に示す3通りである。各ケースで計算を行い、観測地点における波高や周波数スペクトルの結果を観測値と比較し、解析モデルの精度を向上させることを目的とした。

表-4 検証ケース

| 解析モデル              | 海浜反射率<br>(長周期波対策工兼用) |     |
|--------------------|----------------------|-----|
|                    | 0.7                  | 0.6 |
| ①高次型スポンジ層モデル       |                      |     |
| ②Bore型砕波遡上越波透水層モデル | —                    |     |

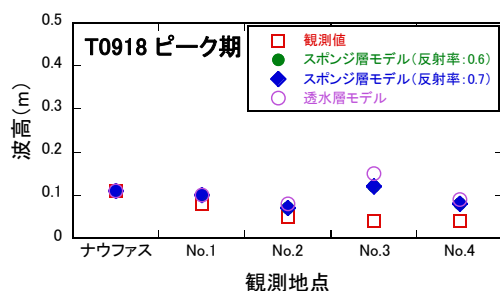


図-11 計算結果と現地観測結果による有義波高の比較

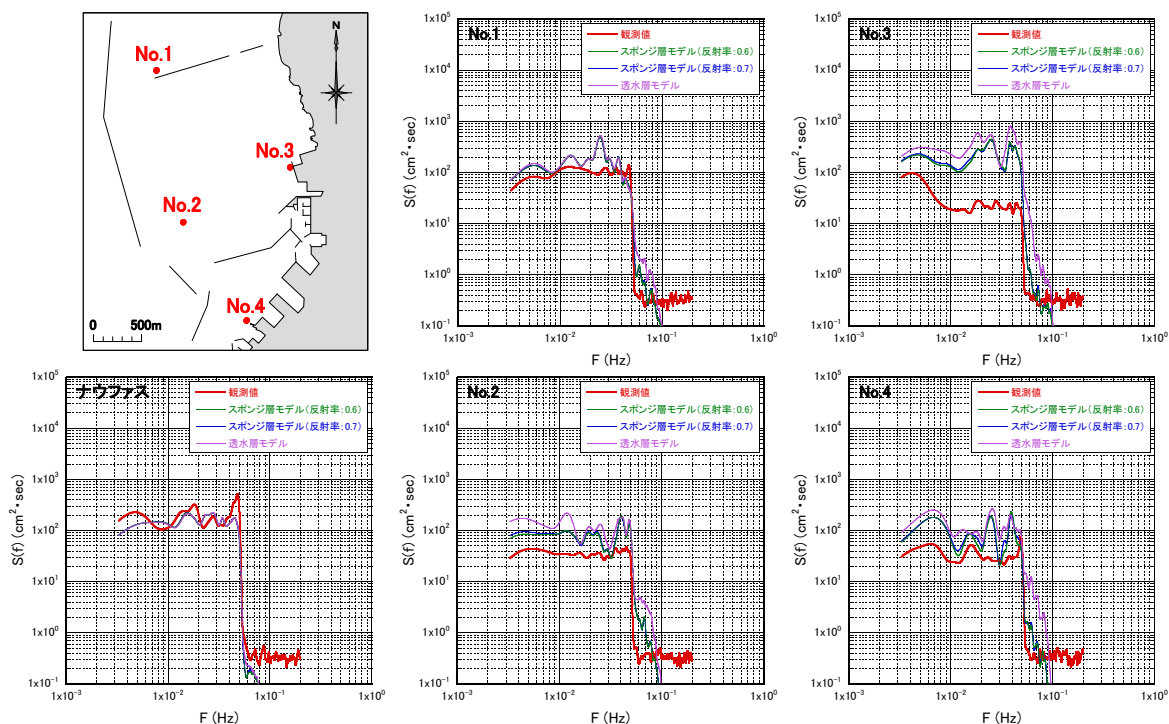


図-12 計算結果と現地観測結果による周波数スペクトルの比較

### (2) 検証条件

長周期波における入射波条件及び設定したその他の計算条件を表-5に示す。解析モデルと海浜反射率の検証については、表に示す入射波条件のうち、台風0918号ピーク期の条件を用いることとした。

表-5 計算条件（長周期波）

|       | 台風0917号           |       |       | 台風0918号 |       |       |
|-------|-------------------|-------|-------|---------|-------|-------|
|       | 発達期               | ピーク期  | 減衰期   | 発達期     | ピーク期  | 減衰期   |
| 波 向   | N                 | NNW   | NNW   | NNW     | NW    | NNW   |
| 波 高   | 0.07m             | 0.09m | 0.04m | 0.10m   | 0.11m | 0.08m |
| 周 期   | 20~300s           |       |       |         |       |       |
| Smax  | 一方向不規則波 (999)     |       |       |         |       |       |
| スペクトル | 標準スペクトル近似型        |       |       |         |       |       |
| 成分波数  | 512               |       |       |         |       |       |
| 潮 位   | 0.90m             | 1.90m | 1.10m | 2.00m   | 1.90m | 1.90m |
| 最小水深  | 1.0m              |       |       |         |       |       |
| 空間差分  | $\Delta x=20m$    |       |       |         |       |       |
| 時間差分  | $\Delta t=T/300s$ |       |       |         |       |       |
| 作用時間  | 波が行き渡ってから6000s    |       |       |         |       |       |
| 開境界   | 60s造波境界水深相当1波長    |       |       |         |       |       |

### (3) 検証結果

各地点における計算結果と現地観測結果による有義波高の比較を図-11に示す。反射率の違いによる影響はみられなかったが、港内では透水層モデルの波高が高くなる傾向がみられた。また、No.1~No.4地点については計算値が観測値を上回っており、特にNo.3地点については観測値を大きく上回っていた。

図-12は計算結果と現地観測結果による周波数スペクトルの比較を示したものである。反射率の違いによる影響はみられなかったが、港内では透水層モデルのエネルギーが大きくなる傾向がみられた。また、ナウファス地点においては計算結果と観測結果はよく一致していたが、港内に近づくにつれ、スペクトルの差が大きくなっていることが確認できた。

以上の結果より、解析モデルについては実績の高い高次型スポンジ層モデルを採用し、海浜反射率については一般的に用いられている0.7を採用した。



## 2.3.5 長周期波に対する消波ブロックの反射率

### (1) 検証概要

解析モデルの検証において長周期波の反射率は、「港内長周期波影響評価マニュアル」（以下、長周期波マニュアルと略す）にある表-6に示す値に準拠して設定しており、消波ブロック被覆護岸及び直立消波護岸の反射率は1.0として再現計算を行った。

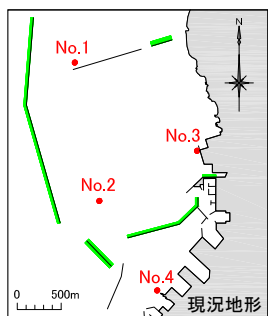


図-13 消波ブロック設置箇所

しかし、この検証では、港内における計算結果が観測結果よりも波高が高くエネルギーも大きくなる傾向がみられた。このことから、現地の状況や構造形式を考慮し、消波ブロック被覆護岸の反射率を0.9として、再検証を行った。当該港における消波ブロックの設置箇所は、図-13に示すとおりである。

表-6 長周期波の反射率

| 構 造                            | 反 射 率   |
|--------------------------------|---------|
| 自然海浜、干潟                        | 0.5～0.7 |
| 直立岸壁                           | 1.0     |
| 消波ブロック被覆護岸、スリットケーソン等による直立消波護岸  | 1.0～0.9 |
| 両面スリットケーソン護岸、人工海浜等で透水性を確保できるもの | 0.7     |

※港内長周期波影響評価マニュアルより

### (2) 検証条件

検証には前頁の表-5に示す条件を用いた。長周期波における消波ブロックの反射率の検証については、選定した6時刻全ての条件を用いた。

### (3) 検証結果

台風0918号ピーク期のものを検証結果の例として以下に示す。

各地点における計算結果と現地観測結果による有義波高の比較を図-14に示す。消波ブロックの反射率を0.9にすることにより、港内の岸壁に近いNo.3及びNo.4地点では、計算結果と観測結果がほぼ一致していた。その他の観測地点については、大きな変化はみられなかった。

図-15は、計算結果と現地観測結果による周波数スペクトルの比較を示したものである。港内のNo.2～No.4地点では反射率を0.9にすることで、エネルギー量が小さくなり、観測結果に近づく傾向がみられた。ナウファス及びNo.1地点については、大きな変化はみられなかった。

図-16は、消波工の反射率の違いによる有義波高比分布図の比較を示したものである。消波ブロックの効果により、港内波高が減少していることが確認できる。

選定した他の5時刻についても同様の傾向がみられた。以上の結果より、消波ブロックの反射率は0.9を採用することとした。

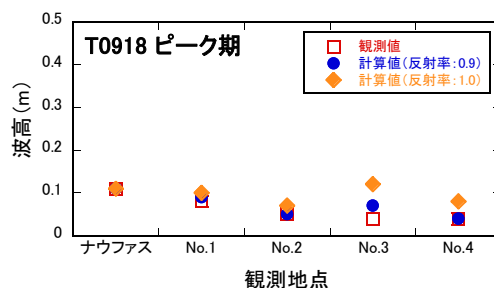


図-14 計算結果と現地観測結果による有義波高の比較

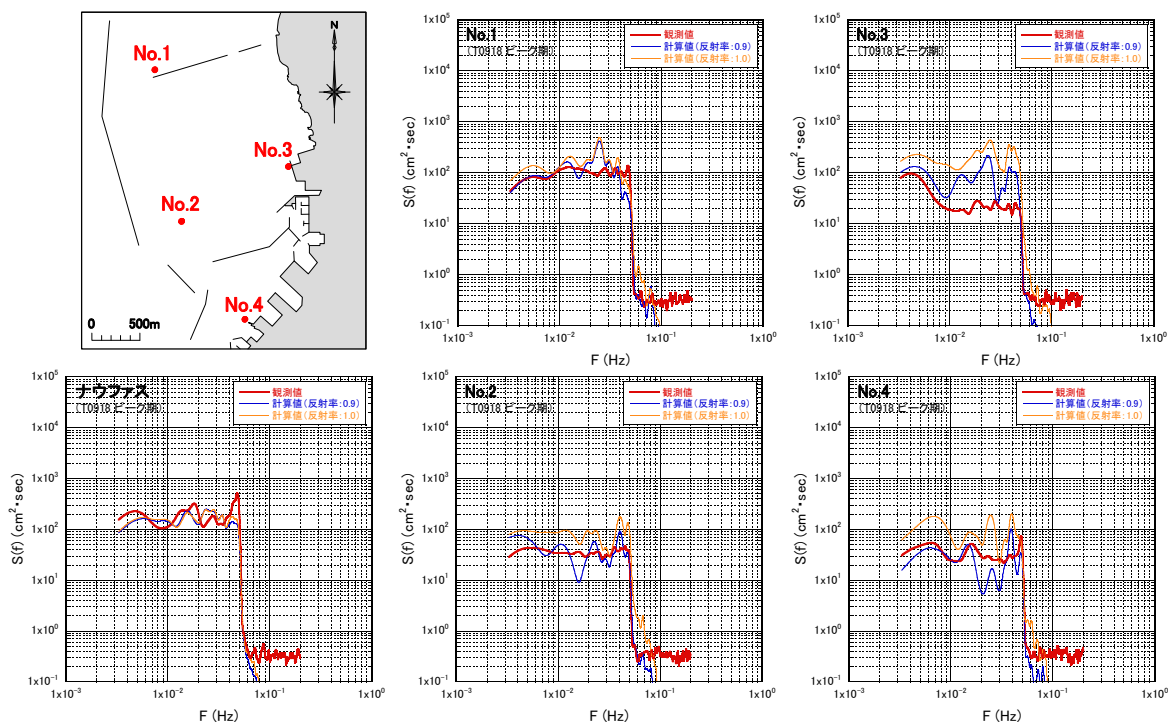


図-15 計算結果と現地観測結果による周波数スペクトルの比較

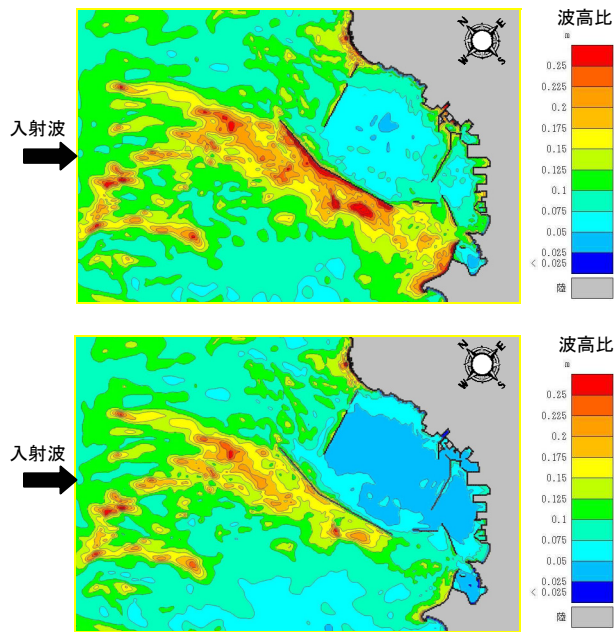


図-16 有義波高比分布図の比較（上：消波工反射率1.0、下：消波工反射率0.9）

### 2.3.6 風波の再現計算

#### (1) 検証概要

風波の条件で再現計算を行い、観測地点における波高や周波数スペクトルの結果を観測値と比較することで、解析モデルの精度を検証した。

#### (2) 検証条件

ナウファス地点から浅海域までは、表-7に示す条件を用いてエネルギー平衡方程式で波浪の変形計算を行った。この結果よりブシネスク方程式の入射波条件を設定し再現計算を行った。風波における検証については、選定した6時刻全ての条件を用いた。入射波条件及び設定したその他の計算条件を表-8に示す。

表-7 計算条件（風波）；[エネルギー平衡方程式]

|      | 台風0917号 |       |       | 台風0918号 |       |       |
|------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
|      | 発達期     | ピーク期  | 減衰期   | 発達期     | ピーク期  | 減衰期   |
| 波 向  | N       | WNW   | NNW   | NNW     | NW    | NNW   |
| 波 高  | 0.85m   | 1.47m | 0.66m | 0.81m   | 1.74m | 0.99m |
| 周 期  | 5.5s    | 7.4s  | 6.5s  | 6.3s    | 6.6s  | 7.5s  |
| Smax | 25      |       |       |         |       |       |
| 潮 位  | 0.90m   | 1.90m | 1.10m | 2.00m   | 1.90m | 1.90m |

表-8 計算条件（風波）；[修正ブシネスク方程式]

|       | 台風0917号            |            |            | 台風0918号    |            |            |
|-------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|       | 発達期                | ピーク期       | 減衰期        | 発達期        | ピーク期       | 減衰期        |
| 波 向   | N 4.96° W          | N 62.76° W | N 20.19° W | N 21.39° W | N 40.82° W | N 18.84° W |
| 波 高   | 0.77m              | 1.29m      | 0.65m      | 0.81m      | 1.50m      | 0.96m      |
| 周 期   | 5.5s               | 7.4s       | 6.5s       | 6.3s       | 6.6s       | 7.5s       |
| Smax  | 25                 |            |            |            |            |            |
| スペクトル | 修正Bretschneider光易型 |            |            |            |            |            |
| 成分波数  | 512                |            |            |            |            |            |
| 潮 位   | 0.90m              | 1.90m      | 1.10m      | 2.00m      | 1.90m      | 1.90m      |
| 最小水深  | 1.0m               |            |            |            |            |            |
| 空間差分  | $\Delta x=5m$      |            |            |            |            |            |
| 時間差分  | $\Delta t=T/200s$  |            |            |            |            |            |
| 作用時間  | 波が行き渡ってから600~800s  |            |            |            |            |            |
| 開境界   | 10s造波境界水深相当1波長     |            |            |            |            |            |

### (3) 検証結果

各地点における計算結果と現地観測結果による有義波高の比較を図-18に示す。台風0918号の発達期、ピーク期、減衰期における各地点の有義波高は、観測結果と比較的一致していた。台風0917号についても同様の傾向がみられた。

図-19は計算結果と現地観測結果による周波数スペクトルの比較を示したものである。ここでは台風0918号ピーク期の結果をしめしている。No.4地点ではピーク周期がずれているものの、その他の地点では比較的スペクトル形状が一致しているといえる。選定した他の時刻についても、計算結果と観測結果は概ね一致していた。

図-20は、台風0918号の発達期及びピーク期における波高分布図を示したものである。

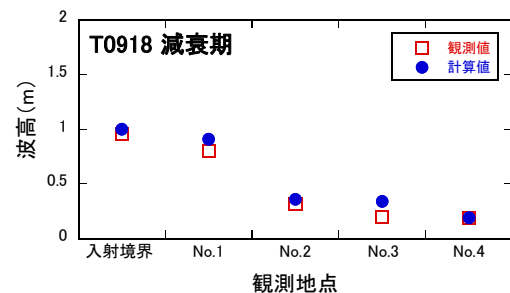
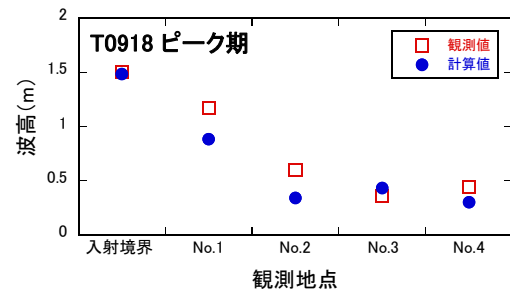
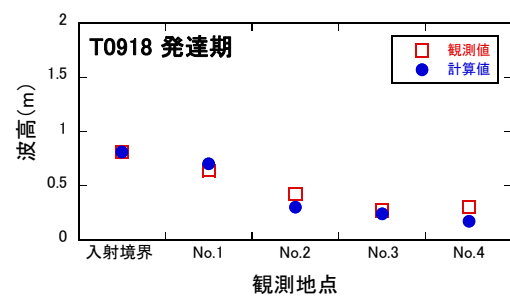


図-18 計算結果と現地観測結果による有義波高の比較

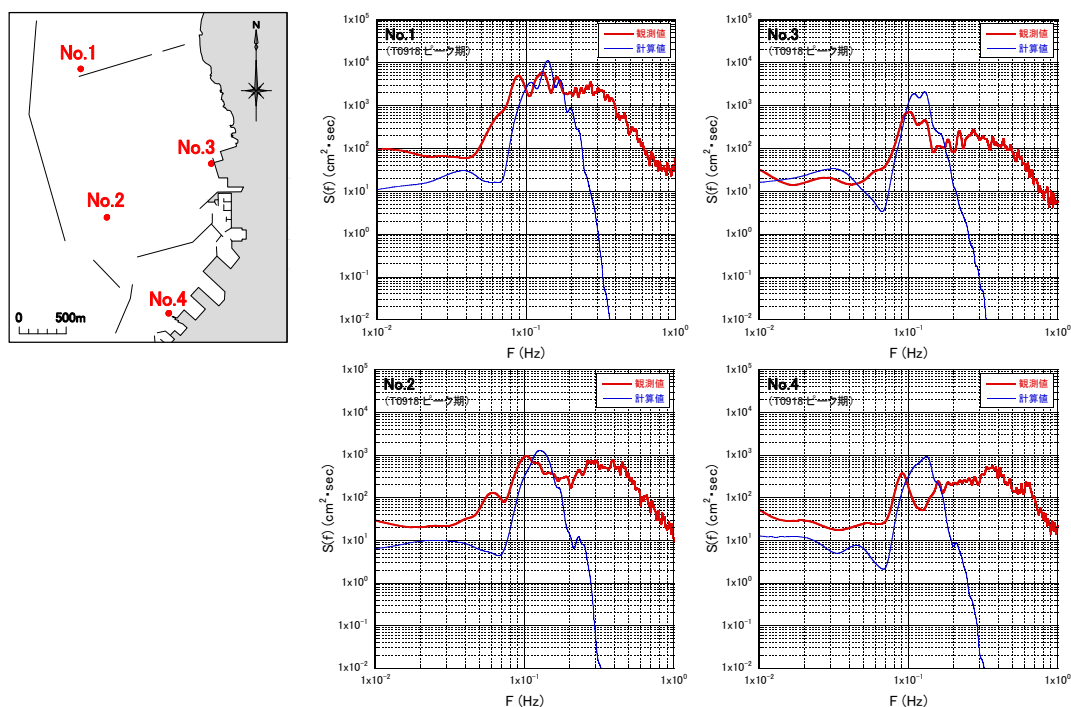


図-19 計算結果と現地観測結果による周波数スペクトルの比較

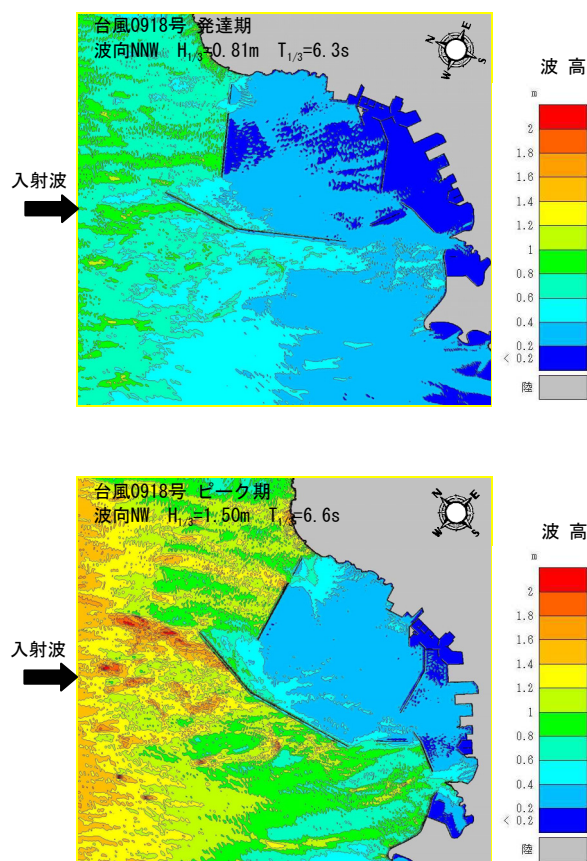


図-20 波高分布図（上：発達期，下：ピーク期）

### 2.3.7 まとめ

今年度の調査では、現地観測結果を用いてブシネスクモデルの計算条件及び境界条件を見直し、現地に即した状況を設定することにより解析モデルの精度を向上させることができた。具体的な知見として、次の3つが主要な成果として挙げられる。①長周期波に対する透水性の新形式護岸の反射率は、同等の値を呈する自然海浜を通じて検討を行ったところ、今回モニターした地点での差異はほとんど認められなかったことから、長周期波マニュアルにある0.7でも妥当であることが分かった。②沿波になりやすい斜め入射が当たる従来の前面消波工の長周期波に対する反射率は、0.9に取ると現地観測の傾向に一致することが分かった。③風波においてもピーク周波数付近では、エネルギーレベルが一致する傾向を確認できた。

今回の検討は、観測期間中に当該港付近を通過し、影響を及ぼした台風を解析対象に選定し、計算を行ったもので、当該港を直撃した台風を示すものではない。そのため、今回の観測成果が当該港を代表する波浪特性になっているかどうかの検証は、今後必要であると考えられる。

### 参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，2004
- 2) 平山克也：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，港研資料，No. 1159，pp. 1-90，2007



## 1.4 港内における長周期波対策

### 1.4.1 はじめに

我が国の太平洋や日本海に面する大型の港湾では、沖合から入射する周期30s～300sの長周期波によって、係留船舶と係留索からなる係留系の固有振動が励起され、大きな水平運動が発生することが多い。水平運動は、船首-船尾方向のサージ動揺量が顕著で、荷役障害や係船索の切断につながる危険性が多い。著者らは、苫小牧港における現地観測をもとに、長周期波の発生メカニズムを検討してきた（平石ら、1996）。次に、数値解析を中心として、長周期波による荷役障害への対策法を提案した。対策法としては、1)防波堤を延伸して、沖合から侵入する長周期波を抑止する、2)係留系を改良したり、陸上から硬いロープで係留して、動揺を防ぐ（米山ら、2003）、3)長周期波の発生時と大きさを予測して、接岸時刻や荷役時間を調整する、4)港内で長周期波のエネルギーを吸収できる消波層を設けて、港内での増幅を防ぐ等が考えられている（沿岸技術センター、2004）。

この中で、1)は宮崎県細島港の防波堤建設として実現されつつあるが、整備に時間を要するため、効果が発現するまでに相当の時間が必要になる。2)は、宮城県石巻港における陸上ウインチとして試験的に運用されており、船舶の動揺低減に効果があることが確認されている（米山ら、2008）。しかし、毎年の維持管理や、運用時の作業員の確保など恒久施設として使用するためには課題が残されている。3)は沿岸技術センターの港内波浪予測システム(COMINS)のオプションとして供給されている（渥美ら、1997）が、長周期波による荷役障害を解決したわけではなく、あくまでも安全性の確認ツールとして機能させるべきものである。4)の消波層を設ける手法は、比較的建设コストが小さく短期間で整備できるので、長周期波による荷役障害がすでに生じている港湾で応急対策として注目されている。2007年から秋田港の主防波堤の港内側に試験的に設置されたのをはじめとして、2009年8月現在、苫小牧港でも施工がはじまっている。海中に投入した粒径数十cmの礫材層による消波効果（反射率）については、平石ら(2002)が模型実験等で明らかにしているが、このほかにも、導水板を利用してケーソン内で渦を発生させてエネルギー損失を図って消波する方法（大島・森屋、2005）や共振効果を利用した方法（高橋・鈴木、2005）などが提案されている。ただし、砂礫層を設置する際には、防波堤に密着させたり、個別のコンクリート板で支持をするなど、設置場所や施工法によって数種類の構成が考えられ、構成毎の適用性を比較した検討例はない。

平石(2004)が、研究の当初に検討していた対策工法は2重スリットケーソンの背後に、直径30～80cm程度の巨礫を投入するもので、既に高潮対策用に建設された同じ構成の施設について、現地観測により

長周期波浪に対する消波効果の確認などを行っている（平石ら、2006）。しかし、長周期波浪に対応するには波長に比例して大きな空間の確保が必要であり実際の港湾で長周期波浪の低減のために建設するには、前述のように、港湾の形状や設置可能な場所に適した構造・規模にする必要があり、省スペース化かつ低コスト化が求められる。そこで、永瀬ら(2008)は、スリットを有するL型ブロック係船岸（沿岸技術センター、2006）の消波施設への活用を提案している。ここでは、実用化を強く念頭において、永瀬ら(2008)の実験結果を中心に、既存データを整理して、スリットケーソン以外にも、L型ブロック係船岸を応用した構造物や、礫材のみを海中に投入して透水層のみを建設する長周期波対策工法の性能を検討した。反射率は、これまでに浸水解析等で実績があるMARS法を応用した数値解析（永瀬ら、2000）と造波実験や透水試験などの水理模型実験によって計算した。

### 1.4.2 長周期波対策工の種類

透水層を用いた長周期対策護岸施設は、礫材を投入することで消波機能を発揮することができ、ケーソンなどの構造物を用いる方法に比べて、港湾の様々な部分に設置可能な利点がある。図-1.4.1は、港湾にこの方法を活用するための方法や設置が考えられる部分を示したものである。しかし、提案している構造物は比較的大きな空間を必要として、これまでの研究（平石ら、2003）で明らかにした長周期波の低減に効果がある奥行き30m程度の施設を港湾内で建設するには、様々な制約がある。したがって、実港湾で計画する場合には静穏度確保のために理想的な部分だけではなく、様々な海域への適用が考えられる。そこで、図-1.4.2に示すような実海域で利用するために現実的な4つ形態を考えた。a)は波除堤など透過堤として活用するもので、b)は防波堤の前面に礫材のみを投入した場合、c)およびd)は両面スリットケーソンやL型スリット付きブロックの背後に礫を投入したものである。

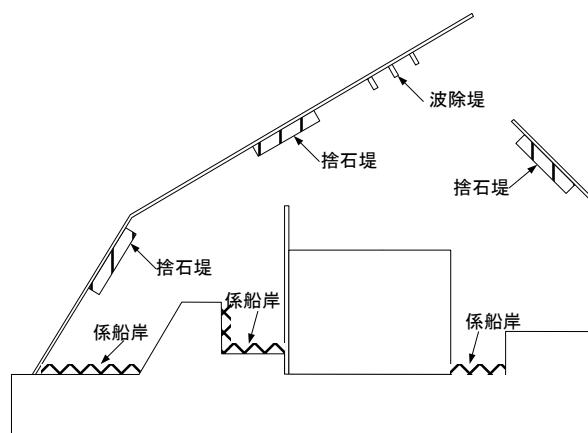


図-1.4.1 長周期波対策工の活用イメージ

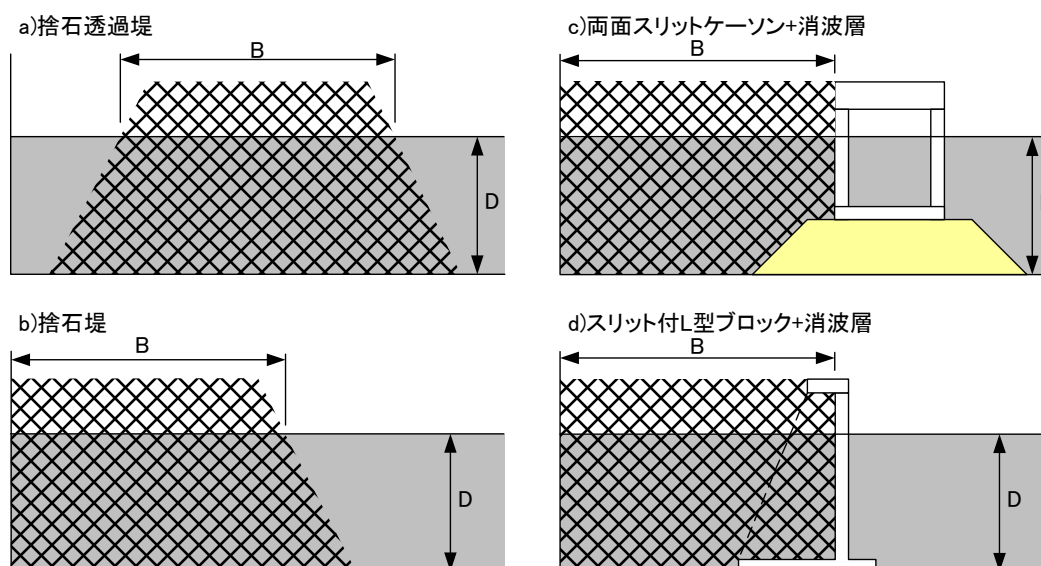


図-1.4.2 長周期波対策工の標準的な断面

### 1.4.3 捨て石型長周期波対策工の性能

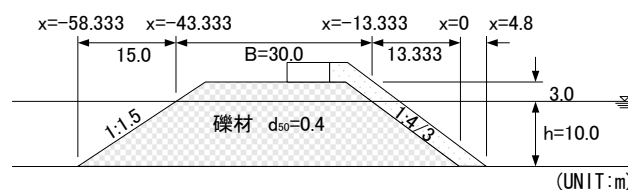
ここでは、1.4.2で示した構造物について、水理模型実験ならびに数値解析を実施してその特性を明らかにする。ここでは、単純な傾斜型の捨て石堤を例として、反射率等の解析法を示す。なお、平石ら(2006)は捨て石堤における風波の透過率や反射率を同様な手法で求めており、実験法や計算法の詳細は既資料を参考にされたい。

ここでは、提案した長周期波対策工のうち、a)の捨て石堤の水理特性を明らかにするため模型実験と数値解析を行った。模型実験は、縮尺1/20として行い、消波層には $d_{50}=30\text{mm}$ の砕石をもちいた。解析は、永瀬ら(2000)の3次元で水-空気混相を対象として、波面解析が可能なMARS (Multi-Advection Reconstruction Solver)法である。波浪は造波ソースを用いて入射させ、反射波はエネルギー吸収層を設置して吸収させた。消波層での圧力損失は、近藤ら(1983)によるDupuit-Fochheimer則を用いて計算を行い、計算に必要な係数は別途透水試験によって検証した結果を用いた(平石, 2004)。入射波は現地スケールで、 $T=8, 15, 30, 45, 60, 100\text{s}$ の規則波を標準とし、必要に応じて $f=0.001\sim 0.050\text{Hz}$ の50波を重ね合わせたホワイトノイズ、孤立波を用いた。入射波高は現地での長周期波浪は10cm程度ではあるが、解析での分解能を確保するため $H=1\text{m}$ とした。

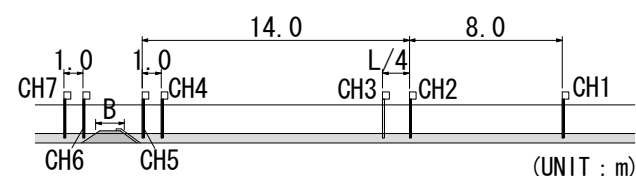
図-1.4.3 (a)および(b)に捨て石透過堤の断面図と実験時の波高計配置を示す。沖側は1:4/3の勾配で被覆材として消波ブロックを設置した。このブロックは消波層全体の風波に対する安定性を確保することが目的である。加えて、内部の捨て石消波層と粒径が異なる層を構成することで、長周期波に対する反射率を捨て石層だけの場合よりも低下させることができる(平石, 2004)。この形態は、防波堤の内側に波除堤として利用したり、港口などで波浪の侵入を防ぐために用いることができる。

図-1.4.4は、解析結果を示したものである。解析条件は、透過堤の奥行きは図-1.4.3に示したとおり静水面の高さで $B=30\text{m}$ とした。捨て石の粒径は $d_{50}=40\text{cm}$ である。ここでは、紙面の都合により解析による断面図のみを示したが、別途縮尺1/20による模型実験も実施し、 $d_{50}=30\text{mm}$ の砕石を礫材として利用している。

図-1.4.5は、現地スケールで周期 $T=45\text{s}$ の解析ならびに実験による波形である。(a)はMARS法による解析波形である。(b)は水理模型実験による波形で、CH4～7設置位置は図-1.4.3に示してある。解析では $t=100\text{s}$ ころ入射波が到達して透水層を通過した $X=-58.333$ では波高0.2m程度の透過波が認められる。また、 $X=200$ の波形などには正弦波の入射波に反射波が重なっている状況が見られる。同様に実験波形にも透過波・反射波が認められるなど、両者は良く対応した波形を示している。



(a) 透過型の捨て石堤の断面



(b) 実験水路での波形観測点

図-1.4.3 透過型の捨て石堤(タイプ(a))の実験模型

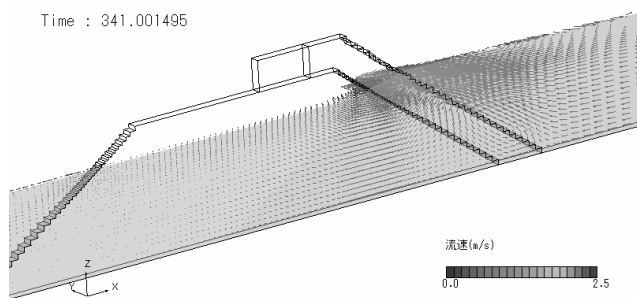
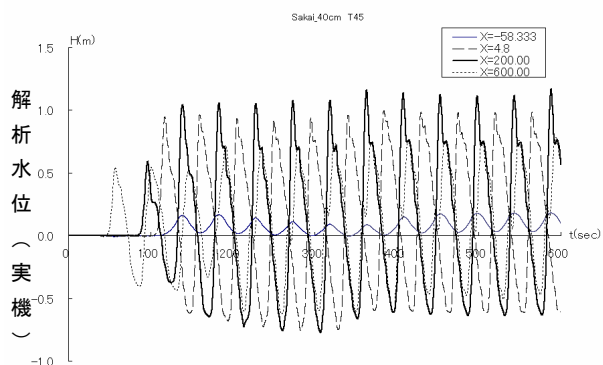
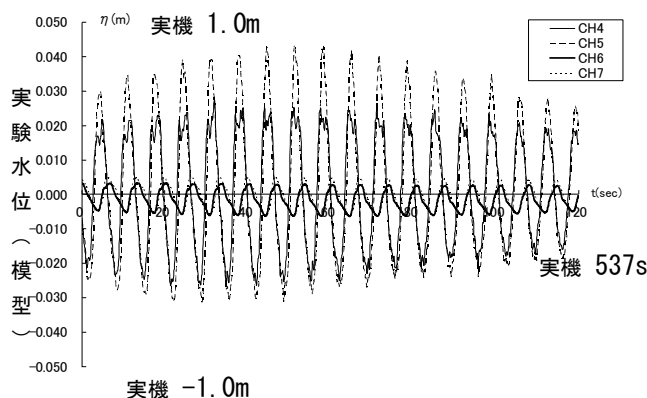


図-1.4.4 数値計算で求めた捨石層内の流れ



(a) 解析波形



(b) 実験波形

図-1.4.5 捨て石透過堤における波形変化 ( $B=30\text{m}$ ,  $T=45\text{s}$ )

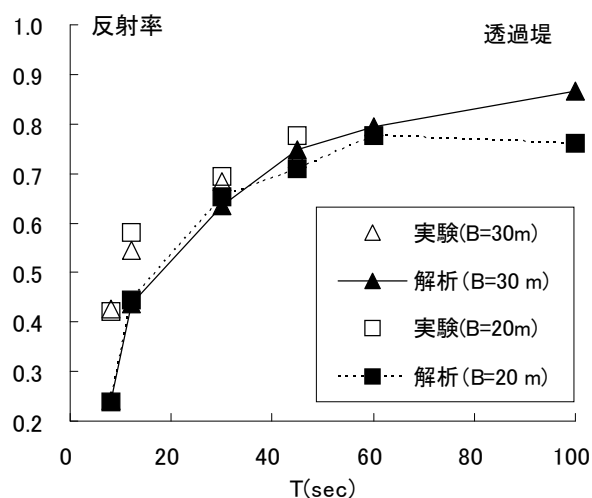


図-1.4.6 波周期と反射率 (透過型捨石堤)

図-1.4.6に入射波の周期と反射率の関係を示す。反射率は、解析を行った周期 $T=8, 15, 30, 45, 60, 100\text{s}$ の波形から合田ら(1976)の方法により求めた。水理模型実験の結果も示したが、 $T=60, 100\text{s}$ に関しては、造波できなかった。消波層の奥行きについては $B=20, 30\text{m}$ について実施している。 $T=8, 15\text{s}$ では、解析による結果が実験より小さくなっているが、 $T=30\text{s}, 45\text{s}, 60\text{s}$ では、解析により実験が精度よく再現することができている。また、 $B=20\text{m}$ の場合に、 $B=30\text{m}$ に比べて反射率が大きくなる傾向も、実験値と解析値でよく一致しており、実験値が得られないケースでは、解析値で反射率が推定できることが判った。以上のように、MARS法を用いた数値波動水槽技術で、礫による消波層を用いた長周期対策施設の水利特性をよく再現できる。また、周期(波長)が長くなることにより消波性能が低減することがわかる。消波層の奥行き $B=20\text{m}$ において、 $T=100\text{s}$ における反射率があまり上昇しないのは、この構造物が透過堤であるためで、 $B=30\text{m}$ の透過率は $K_t=0.42$ であるのに対して、 $B=20\text{m}$ の場合には $K_t=0.49$ となっている。

また、解析では、 $f=0.001\sim 0.050\text{Hz}$ の50波を重ね合わせたホワイトノイズならびに孤立波でも解析を行った。その結果は、 $B=30\text{m}$ でホワイトノイズ $K_r=0.79$ 、孤立波 $K_r=0.69$ であり、前者では $T=60\text{s}$ 、後者で $T=45\text{s}$ の結果と同程度であり、 $B=20\text{m}$ でも同様の結果を得た。入射計算の方法にもよるが、入力したホワイトノイズのうち、比較的短周期側の波浪によって反射率が説明できることは、今後の長周期対策施設の検討に有効である。図-1.4.6に示すように模型実験結果と本研究で用いる数値解析法の結果は、ほぼ一致する。そこで、他のタイプの捨て石型対策工については、できるだけ実験結果を用いて反射率を決定するものの、実験できないケースや模型を製作できない場合には、数値解析による予測値を採用する。

#### 1.4.4 捨て石型長周期波対策工の消波効果の比較

図-1.4.2に示した4つの形態に関して実施した模型実験やMARS法を用いた解析結果のうち、反射率を施設の奥行き長さと波長の比 $B/L$ で整理して図-1.4.7に示す。本研究で説明しなかった両面スリットケーソンと消波層を組み合わせた場合の結果については、平石ら(2003)の結果を用いている。すべての構造物で、 $B/L$ が小さくなると反射率が大きくなり、長周期波浪の消波特性が理解できる。

特に、透過型捨て石堤、不透過型捨て石堤、スリット付L型ブロック+消波層を用いた3つの形態において、反射率にはほとんど違いが見られない。一方、c)はスリット部分のエネルギー低減効果が期待できるので、周期が小さくなると反射率が大きく低減する。a)、b)では構造物の安定を図るため沖側の礫材の粒径を大きくしたり、異型ブロックの併用が現実的である。平石ら(2003)によると、沖側に比較的粒径の大きな消波層を配して徐々に粒径を小さくして波

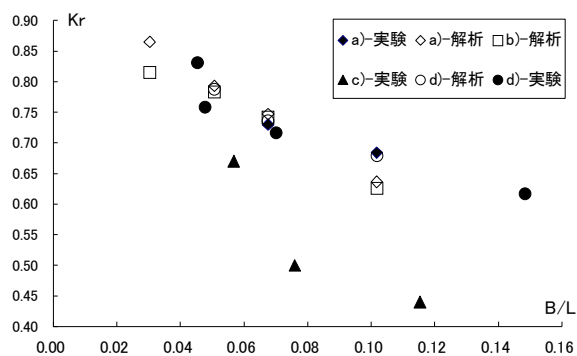


図-1.4.7 捨石型対策工の反射率算定結果

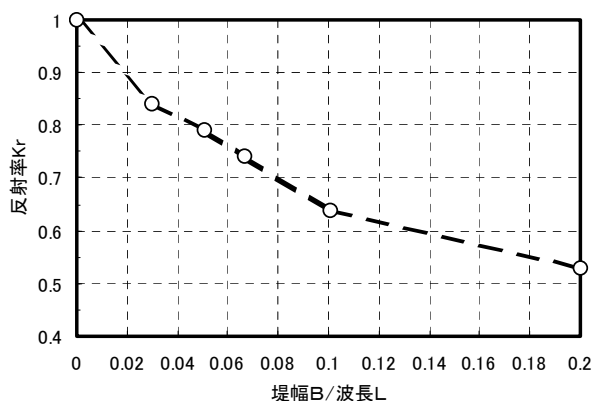


図-1.4.8 捨石型対策工の反射率推定図

浪のエネルギーロスを図ることで消波層の奥行きを小さくすることが可能なが分かっている。導水板を利用してケーソン内で渦を発生させてエネルギー損失を図る方法（渦消波タイプ）（大島ら，2006）でも同じような評価を行っているが、ほぼ同じような結果が得られている。

図-1.4.8は、解析解のみで対策工の反射率を推定することで設計で活用できるダイアグラムの形に図-1.4.7を修正したものである。この図では、(a)、(b)および(d)タイプの反射率が、 $B/L$ に対してほぼ同じ値を示すので、同一の $B/L$ での値を平均して示し

た。(c)の両面スリットタイプは短周期波に対しては、スリットケーソンの効果が大きくなるので、周期15以下の風波に対しては、図-1.4.8に示された値より小さく反射率は0.4～0.5程度になる。図を用いて、捨石型長周期波対策工の各タイプについて対象とする長周期波周期 $T$ と港内水深 $h$ から波長を計算して( $L=T(gh)^{1/2}$ )、堤幅 $B$ に対する反射率 $K_r$ の概略値が推定できる。ここで、 $g$ は重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ )である。

表-1.4.1は、捨石型の各種構造形式について、計算結果をもとに、適用性を評価したものである。◎が最も優れ、○が優れていることを示す。△は課題があり、今後も適用性について検討すべき構造であることを示す。工費については、礫材を積むだけのタイプ(a)および(b)が有利である。水域占有幅については、タイプ(c)の両面スリット型が、スリットケーソンが示す幅だけ、他の形式より大きくなる。逆に、両面スリットケーソンの上部を岸壁等に活用できるので付加的な利用には優れている。

消波効果については、長周期波に対しては、捨石層の幅が主に関係するので、どの構造でも大きな差は生じない。ただし、長周期波と同時に風波やうねりも作用しているので、スリットケーソンとしても機能するタイプ(c)がやや優れていると判断した。既存防波堤強度補強については、防波堤背後に対策工を配置する場合に、タイプ(a)は、離岸堤のような配置となり、礫材が直接既設防波堤の壁面に当たらないので、やや有利と考えた。

捨石堤型の長周期波対策工を製作する場合には、材料とする礫材の粒径や空隙率についても考慮する必要がある。平石(2004)は、礫材の径が40～60cmで、できるだけ粒径がばらつかず、空隙率を40～50%に保てる必要があることを示している。

なお、消波ブロック層の空隙率は約50%であり、捨石材の確保が難しい場合には、消波ブロックによる代用も考えられる。

表-1.4.1 捨石型長周期波対策工の性能

| タイプ | 略 称              | 工費 | 水域占有幅 | 付加的な利用 | 消波効果 | 既存防波堤強度検討 |
|-----|------------------|----|-------|--------|------|-----------|
| (a) | 捨石透過型            | ◎  | ○     | △      | ○    | ◎         |
| (b) | 捨石不透過型           | ◎  | ○     | △      | ○    | ○         |
| (c) | 両面スリットケーソン+消波層   | △  | △     | ◎      | ◎    | ○         |
| (d) | スリット付きL型ブロック+消波層 | ○  | ◎     | ○      | ○    | ○         |

#### 1.4.5 まとめ

本研究では、港内における長周期波の反射を抑制することによって、荷役障害を軽減する長周期波対策工の効果を各種の形式に対して検討した。得られた主な結論を示す。

①礫材を消波材として利用することで、様々な海域へ適用できる形態を示した。港湾計画の中では、

利用可能な水域が限られるので、その状況に応じた施設を建設できる。

②スリット付きL型ブロック構造物の背後に礫材を投入する構造で、2重スリットケーソンや幅広捨て石堤を利用した場合と同程度の反射波低減効果が得られる。

③捨て石型対策工について、長周期波の周期と堤幅から反射率を簡単に推定できるダイアグラムを提

案した。

本研究において提案した長周期波の反射率を計算モデルに導入することによって、ブシネスクモデル(平山, 2002)による長周期波対策工が港内静穏度に及ぼす影響を考察できる。すなわち、目標とする反射率が再現できるようにスポンジ層の厚さと吸収係数を調整することによって、港内の長周期波対策工を再現できる。

## 参考文献

- 渥美洋一・若山義樹・國田淳・関口信一郎・川口勉・平石哲也・青木伸一・上田茂(1997)：長周期波の港内進入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討，海岸工学論文集，第44巻，pp.221-225。
- 沿岸開発技術研究センター(2004)：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸開発技術ライブラリーNo.21，86p。
- 沿岸開発技術研究センター(2006)：L型ブロック式係船岸技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリーNo.22，35p。
- 大島香織・森屋陽一(2005)：導水板によるスリット構造物の長周期波浪特性，海洋開発論文集，第21巻，pp.791-796。
- 大島香織・森屋陽一・水流正人・杉田繁樹・平石哲也(2006)：渦による消波効果を活用した長周期波対策施設の特性，海洋開発論文集，第22巻，pp.145-150。
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976)：不規則波実験における入反射波の分離推定法，港研資料，No.248，24p。
- 近藤淑朗・竹田英章(1983)：消波構造物，森北出版，275p。
- 高橋重雄・鈴木高二朗(2005)：共振効果による長周期波の消波システムの原理と基本特性，海岸工学論文集，第52巻，pp.696-700。
- 永瀬恭一・島田昌也(2000)：Mars法を用いた数値波動水槽に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp.391-395。
- 永瀬恭一・平石哲也・押村嘉人(2008)：港湾内での利用形態に合わせた長周期波浪対策技術，海岸工学論文集，第55巻，pp.811-815。
- 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可(1996)：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第35巻3号，pp.1-36，1996。
- 平石哲也・永瀬恭一(2002)：流体直接解析法による長周期波対策護岸の性能検討，海岸工学論文集，第49巻，pp.686-690。
- 平石哲也・永瀬恭一(2003)：長周期波対策護岸の性能検討実験，海岸工学論文集，第50巻，pp.801-805。
- 平石哲也(2004)：長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算，港空研資料，No.1093，21p。
- 平石哲也・奥野光洋・安藤興太(2006)：砂礫層内における長周期の水流動に関する現地観測，港空研資料，No.1130，28p。
- 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.1360，162p。
- 米山治男・佐藤平和・白石悟(2003)：係留索による長周期波低減 システムの開発ー模型実験および試設計ー，港空研資料，No.1056，29p。
- 米山治男・川守田正路・朝倉邦友・増門孝一・根木貴史・大竹祐一郎(2008)：長周期動揺低減システムの開発および大型船を使用した現地実証実験，土木学会第63回年次学術講演会講演集，pp.389-390。



## 2. セッション2

### －ブシネスクモデルとその周辺のモデル開発－

#### 2.1 うねりスペクトルにより造波される長周期波の計算例について

沖で発生した周期14s程度の周期の長いうねり（長周期うねり）が浅海域に到達すると、通常の高波に比べ、より深い水深の海底地形による影響を受けて屈折や浅水変形が生じ、沿岸域では高波浪となって、突然の越波災害や小型船舶の転覆事故等を引き起こす恐れがある。例えば、東京湾口に面した久里浜湾では、台風0402号が関東地方のはるか沖を通過した後、静天時にもかかわらず急に高波が来襲し、漁船が転覆する事故が発生した（図-1）。また、太平洋に面した北日本の港湾や海岸では、台風0612号および2006年10月の発達した低気圧に伴う周期の長い波が観測され、防波堤や護岸、海岸突堤の被災が生じた。したがって、海岸近くの急峻な海底地形はもちろんのこと、比較的緩やかな海底勾配を有する海域では、より沖合の海底地形の状況にも留意する必要があると考えられる（加島ら、2009）。

一方、このような被害をもたらした長周期うねりのスペクトル形状は、周期14-17s程度の狭帯域スペクトルとして、 $\gamma$ 値を適切に設定したJONSWAP型スペクトルで近似できることが報告されている（平山ら、2009）。また、このような狭帯域スペクトルから生成される水面波形は、顕著な包絡波形を伴う高波の連なり現象が明瞭に現れる。これは、互いに僅かに異なる周期の波が同じ方向に進行することにより、“うなり”が発生するためであるが、このような波浪は、係留船舶の長周期動揺、海岸の汀線近傍のサーフビート、消波ブロックの安定性、及び護岸越波量などに影響を及ぼすことが指摘されている（合田、2008）。

さらに、2008年2月に富山県入善漁港海岸で発生した越波浸水災害では、“あいがめ”と呼ばれる、岸沖断面勾配が沿岸方向に急変する地形特性を有する海岸において、波群を有する周期の長いうねりとこれに付随する長周期変動成分が重畳したことが、ある特定の海岸への波の集中を助長し、被害をより甚大化させた可能性があることが指摘されている（田島ら、2009）。すなわち、海岸護岸の前面では、短周期波成分包絡波と水位の長周期変動成分との位

相がほぼ一致するため、長周期変動による水位の上昇時に高波の連なりが来襲する危険性が高いことが明らかとなっている。

このように、長周期うねりは、風波に比べ単に周期が長い波というだけではなく、非常に長い距離を伝播する過程で成分波が選別され、波向きの一方向化と周波数の狭帯域化が進んだ結果、浅海域において、風波とは若干異なる伝播・変形特性を有するものと考えられる。そこで、本稿では、冒頭で述べた台風0402号来襲時に久里浜湾で観測された長周期うねりの観測例をケーススタディとして、沖で観測された水面波形やスペクトルの特性、及び、これらをブシネスクモデルに入力して計算された長周期うねりの伝播特性とその再現性について、考察を行った。

##### 2.1.1 NOWT-PARIにおける任意形状スペクトル造波

NOWT-PARIを用いて沿岸域での波浪変形計算を実施する場合、その入射境界に与える方向スペクトルは、外洋から計算されたエネルギー平衡方程式法による算定結果を用いて与えられることが多い。このとき、現行のNOWT-PARIでは、入力条件として算定された有義波高、有義波周期および波向きから、ある決められた関数スペクトルに基づいて入力方向スペクトルを設定し、多方向不規則波を造波することにより以降の計算を実施する。

しかし、この方法では、ピーク周波数や主波向きが互いに異なる双峰型の方向スペクトルや、エネルギーの集中度が高い狭帯域スペクトル、あるいは、エネルギー平衡方程式法で算定されるような、海底地形や構造物等の影響を受けて、元のスペクトル形状からはかなり変形した方向スペクトルに対して、適切な多方向不規則波を造波することができない。

そこで、平山・宮里（2009）は、このような任意形状スペクトルを用いて多方向不規則波を造波する方法を提案している。なお後述するように、本稿では、この造波法を活用することにより、JONSWAP型スペクトルで近似される長周期うねりの水面波形を造波し、久里浜湾内で観察されたうねり性高波浪の再現計算を試みた。この概要を以下に示す。

多方向不規則波の水面波形は、さまざまな振幅、周期、波向き、および位相を有する成分波（規則波）を多数重ね合わせることで表現できる。また、成分波を作成する際には、エネルギー等分割<sup>※1)</sup>することにより、少ない成分波数で長時間の多方向

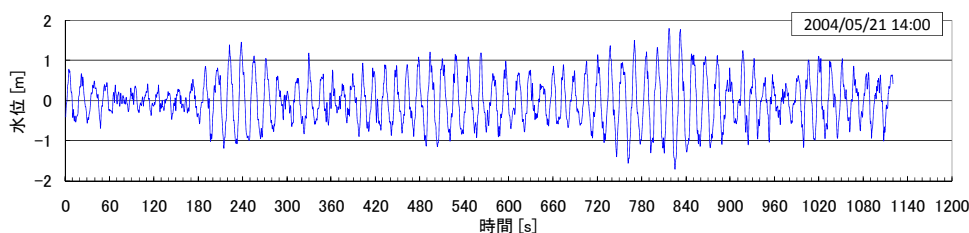


図-1 久里浜湾（アシカ島）で観測された長周期うねりの水面波形（左）と海岸近傍の波浪来襲状況（右）

不規則波を造波することが可能になる．さらに，シングルサンメーション法<sup>※2)</sup>はダブルサンメーション法<sup>※3)</sup>に比べ，用いる成分波数を大幅に削減することが可能である．

ここで，ブレットシュナイダー・光易型スペクトルに対するエネルギー等分割 ( $f_n$ ；代表周波数) は式(1)により実施できるが，JONSWAPスペクトルや，海底地形や構造物等による波浪変形を受けた任意形状スペクトルに対しては適用できない．そこで，これを数値的に実現するアルゴリズムを開発し，与えられた任意形状スペクトルに対するエネルギー等分割を実現した (図-2(a))．なお，分割された各スペクトル幅に対応する成分波の振幅  $a_n$  は式(2)で与えられる．一方，各成分波の波向きは，任意形状の方向スペクトルから各成分波の周波数に対応する方向分布を抽出し，その累積曲線に対して乱数を当てはめて決定した．このようにして得られた多方向不規則波の造波波形をスペクトル解析し，得られた周波数・方向スペクトルを元の造波目標スペクトルと比較した結果を図-2(b)，(c)に示す．

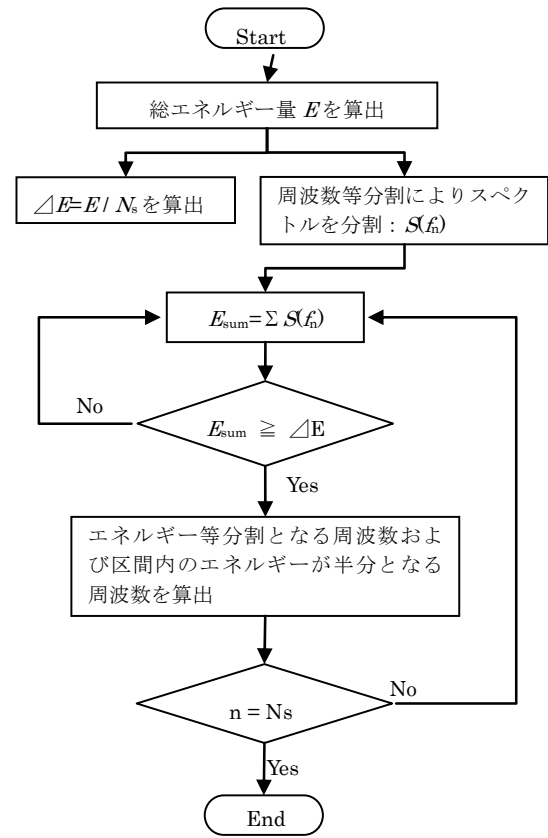
$$f_n = \frac{1.007}{T_{1/3}} \left[ \ln \left( \frac{2N_s}{2n-1} \right) \right]^{-1/4} \quad (1)$$

$$a_n = \sqrt{2S_n(f)\Delta f_n} \quad (2)$$

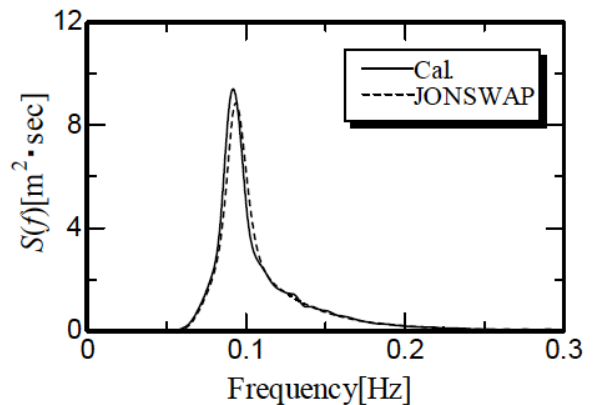
- ※1) エネルギー等分割は，各成分波のエネルギー（振幅）が互いに等しくなるように周波数スペクトルを分割する方法である．これに対し，周波数等分割では，各成分波に対応するスペクトル幅が一定となるように周波数スペクトルを分割する．特に，周波数等分割して得られる各成分波の周波数は互いに整数倍となるため，この場合には，成分波の最小周波数に依存して同じ波形が繰り返されることになる．
- ※2) シングルサンメーション法は，周波数成分のみに対する級数和として表わされ，波向きは各周波数に対して1つが割り当てられる．そのため，より少ない成分波で多方向不規則波を表現することが可能であり，造波波形の演算時間を短縮することが期待される．
- ※3) ダブルサンメーション法は，周波数成分ごとにすべての方向成分を有する形となっており，多方向不規則波は，周波数成分と方向成分の二重級数和から算出される．この方法では，多方向不規則波を表現する上で，成分波の数が膨大になり，また，成分波間で位相干渉を起こす危険もある．

### 2.1.2 台風0402号来襲時に観測された長周期うねり

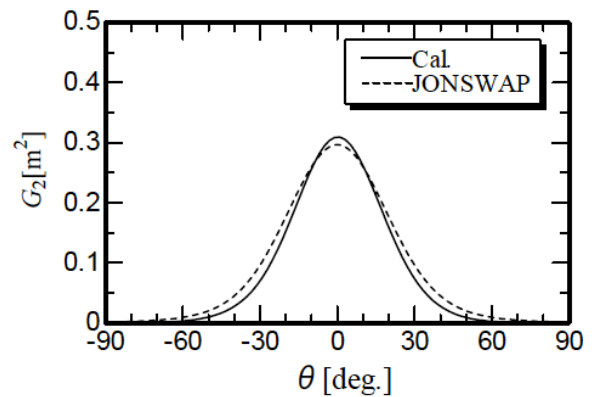
台風 0402 号は 5 月 14 日にミンダナオ島の東海上で発生した．19 日朝には中心気圧 950hPa で，石垣島の南海上で北東に進路を変え，本州の南海上へ向かった．20 日朝には中心気圧 955hPa と若干勢力が弱まり，南大東島の南東海上を通り，夜には更に勢力を弱めながら八丈島の南海上で北東に抜け，21 日午後には東北地方の東海上で温帯低気圧となった．日本列島に最も接近したのは関東沖を通過した 21 日午前 9 時頃であった．



(a) エネルギー等分割アルゴリズム



(b) 周波数スペクトルの再現性



(c) 2次元方向スペクトルの再現性

図-2 任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波

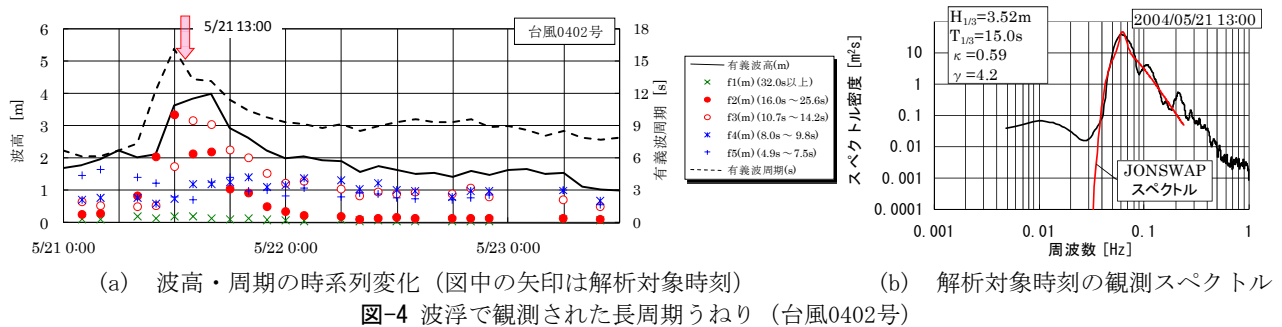
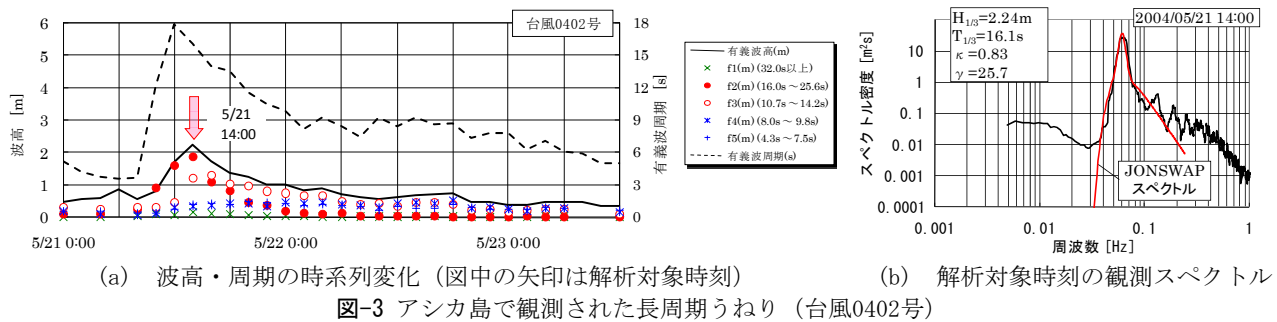


表-1 観測及び推定された長周期うねりのスペクトル諸元の一覧 (台風0402号)

|                | $H_{1/3}$ [m] | $T_{1/3}$ [s] | $\theta$ [deg] | $\kappa$ | $\gamma$ | $S_{\max}$ | $h$ [m] |
|----------------|---------------|---------------|----------------|----------|----------|------------|---------|
| 観測スペクトル (波浮)   | 3.52          | 15.0          | 177            | 0.59     | 4.2      | 31         | 48.7    |
| 観測スペクトル (アシカ島) | 2.24          | 16.1          | —              | 0.83     | 25.7     | —          | 21.7    |
| 推定された沖波スペクトル   | 7.07          | 16.5          | 170            | 0.67     | 7.2      | 25         | $L_0/2$ |
| 算出された境界スペクトル   | 2.23          | 16.14         | 165            | 0.73     | 11.6     | 111        | 32.2    |

台風 0402 号の通過後、突然高波が来襲した久里浜湾では、その湾口に位置するアシカ島で観測された周期帯別波高の時系列変化において、21 日 12 時を境に、周期 10.7s 以上および周期 16.0s 以上の波高が急激に増加している (図-3(a))。この原因としては、沖合の波浮で観測された方向スペクトルの時間変化から、一方向性の高いうねりの波向きが台風の進行とともに徐々に変化し、ちょうど真南となったときに久里浜湾に入射したことが推測された。また、図-1 に示すアシカ島 (水深 21.7m) での波形記録からも、この突然の高波が周期 17s 程度の長周期うねりの来襲によるものであることがわかる。なお、これと同様な波形記録は、ある時間差を伴って、波浮及び太平洋沿岸の御前崎、潮岬等でも観測されていたことが報告されている (加島ら, 2008)。

このピーク時 (21 日 14 時) に観測された波形を解析したところ、有義波高 2.24m、有義波周期 16.1s であった。また、スペクトル形状パラメータは  $\kappa=0.83$  と推定され、これを JONSWAP 型スペクトルの  $\gamma$  値に換算すると実に 25.7 であった (図-3(b))。このように非常に特異な狭帯域スペクトルが現れた原因については、後述する久里浜湾を対象に実施した長周期うねりの伝播・変形計算によって考察できる。したがって、ここでは、東京湾沖に位置する伊豆大島の波浮港 (水深 48.3m) で観測された波高・周期の時系列変化とピーク時の観測スぺ

クトルを図-4 に示す。

波浮におけるピーク波高発生時刻は 21 日 16 時であったが、周期 17s のうねりの伝播速度を考慮すると、アシカ島のピーク波高に影響を及ぼしたと考えられる波浪は、波浮では 21 日 13 時頃に観測されたであろうと推測された (図-4(a))。このときの波浪諸元は、有義波高 3.52m、有義波周期 15.0s、平均波向 177° であった。また、スペクトル形状パラメータは  $\kappa=0.59$  と推定され、これを JONSWAP 型スペクトルの  $\gamma$  値に換算すると 4.2 であった (図-4(b))。さらに、JONSWAP 型スペクトルに対する光易型方向関数の方向集中度は  $S_{\max}=31$  (ブレットシュナイダー・光易型スペクトルに対しては  $S_{\max}=35$ ) と推定された。

ところで、遠方から長時間にわたって方向集中度の高いうねりが来襲した台風 0612 号のケースでも、太平洋に面した常陸那珂港 (水深 30.3m) で観測された長周期うねりスペクトルは、 $\gamma=4.0$  の JONSWAP 型スペクトルで近似された (平山ら, 2009)。つまり、この 2 つの事例からは、少なくとも外洋で観測される長周期うねりのスペクトル形状は、その伝播距離が長いほど一方向性が増すことは十分想定されるが、それだけで極端に狭帯域化することは考えづらいであろうことが示唆された。

後述する推定値と合わせて、アシカ島及び波浮で得られたスペクトル諸元を表-1 に示す。



### 2.1.3 うねり性高波浪の再現計算

アシカ島で観測された長周期うねりのスペクトルは、観測波浪の波長に対して観測水深が浅く、局所的な海底地形の影響を受けやすいため、それぞれの海域で出現した長周期うねりの特性を必ずしも代表していないことも想定される。そこで、まず、これらを再現対象として、エネルギー平衡方程式法を用いた逆解析により沖波スペクトルを推定し、次に、求めた沖波に対して順解析（波浪変形計算）を行い、沿岸域に別途設定した計算領域沖側の境界上代表地点で算出される方向スペクトルを出力した。さらに、ブシネスクモデルを用いた再現計算では、このような任意形状スペクトルから多方向不規則波を造波する平山・宮里（2009）の手法を用いて、長周期うねりの波群伝播過程をシミュレートすることを試みた。これらの計算手順を図-5に示す。

#### (1) 観測スペクトルに対する沖波の推定

アシカ島では波向観測が実施されていない。そこで、手順のうち再現性の検討は、次に示す2段階で行った。すなわち、アシカ島では21日14時に観測された周波数スペクトルのみを対象とし、波向き及び

方向集中度の再現性は、周期17sのうねりの伝播速度を考慮し、その1時間前の21日13時に波浮で観測された方向スペクトルに対して行うものとした。

この結果、これらの観測スペクトルに対して推定された沖波スペクトルの諸元は、 $\gamma=7.2$ 、 $S_{\max}=25$ であった。さらに、ブシネスクモデルによる再現計算時の入射条件として、計算領域沖側の境界上代表地点（水深32.2m）で抽出した接続方向スペクトルの諸元は、 $\gamma=11.6$ 、 $S_{\max}=111$ と推定された。これらの詳細は、すでに表-1に示したとおりである。また、アシカ島波浪観測地点及びブシネスク計算における接続境界上の代表地点の位置を図-6(a)に示す。

なお、ここまでの波浪変形計算においても、東京湾口の複雑な海底地形（水深150mの断崖等）の影響によるスペクトルの尖鋭化、及び方向集中過程が再現されているが、アシカ島で観測された $\gamma=25.7$ を説明するまでには至っていない。そこで、方向スペクトルの更なる変形は、次に行うブシネスクモデルによる再現計算において確認することとした。

#### (2) 長周期うねりの伝播・変形計算

ここでは、図-5に示す手順に従い算出された、ピーク時に観測されたであろう入射境界上の接続方向スペクトルをそのまま用いて、長周期うねり波形を造波し、ブシネスクモデルによるうねり性高波浪の伝播・変形状況の再現、及びそれらの結果の考察を行った。久里浜湾内で算定される水面波形等を出力する代表点の位置を図-6(b)に示す。

久里浜湾内に設定した代表出力点のうち、Point1（アシカ島）、Point8（港外を見通せる岩礁帯）及びPoint14（遮蔽域にあるフェリー岸壁）で算定された周波数スペクトルを図-7に、水面波形を図-8に示す。ここで、図-7のうち細線は、沖側境界に入力した境界スペクトルである。

まず、図-7(a)に示すPoint1で算定されたスペクトル形状から、 $\gamma=25.2$ と推定され、波高、周期と合わせて、アシカ島で観測されたピーク時のスペクトル形状を非常によく再現できていることがわかる。このとき、急峻な地形を有する久里浜湾口のアシカ島付近では、屈折による波の収れんと浅水変形により、顕著な波高増大が生じている（図-6(a)、図-6(c)）。すなわち、特異な狭帯域スペクトルを観測したアシカ島では、屈折変形により来襲波が選別されて入射したことが推測された。また、図-8(a)に示す水面波形は、当時の観測波形（図-1 左）と同様な波群特性（顕著な包絡波形を伴う高波の連なり）を有することが確認できる。

次に、Point3より岸側の港内に伝播したうねりのスペクトル形状をみると、基本波の2倍、3倍周波数付近の短周期成分、及び長周期成分のエネルギー増大が次第に顕著となり、特に図-7(b)に示す岩礁帯上に位置するPoint8では、これらがかなり顕著に表れている。また、図-8(b)に示す水面波形は、高波の連なりとともに波形が上下非対称となる

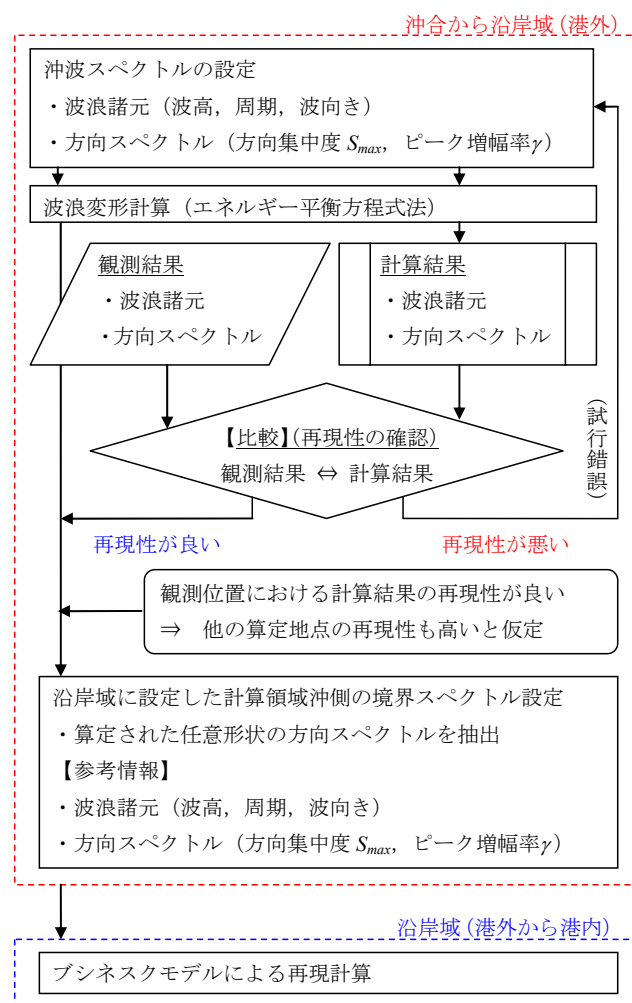


図-5 うねり性高波浪の再現計算の手順

非線形化が進み、碎波も生じている。これはちょうど、図-1 右に示した波浪状況をよく説明している。なお、ゼロアップクロス解析によって得られるこれらの代表周期は、短周期成分の影響により次第に短く算定され、Point8 では 4s 弱程度短くなっている。さらに、図-7(c)に示す Point14 をはじめとする港奥の遮蔽域では、短周期成分のエネルギーが減衰

し、周期 50s 及び 200s 程度の長周期成分のエネルギーが相対的に増大している。これらの原因としては、港形に依存する固有周期や波群に拘束された長周期波との関係が疑われる。また、図-8(c)に示す水面波形でも包絡波形は確認されるが、これらの振幅はかなり小さくなっている。

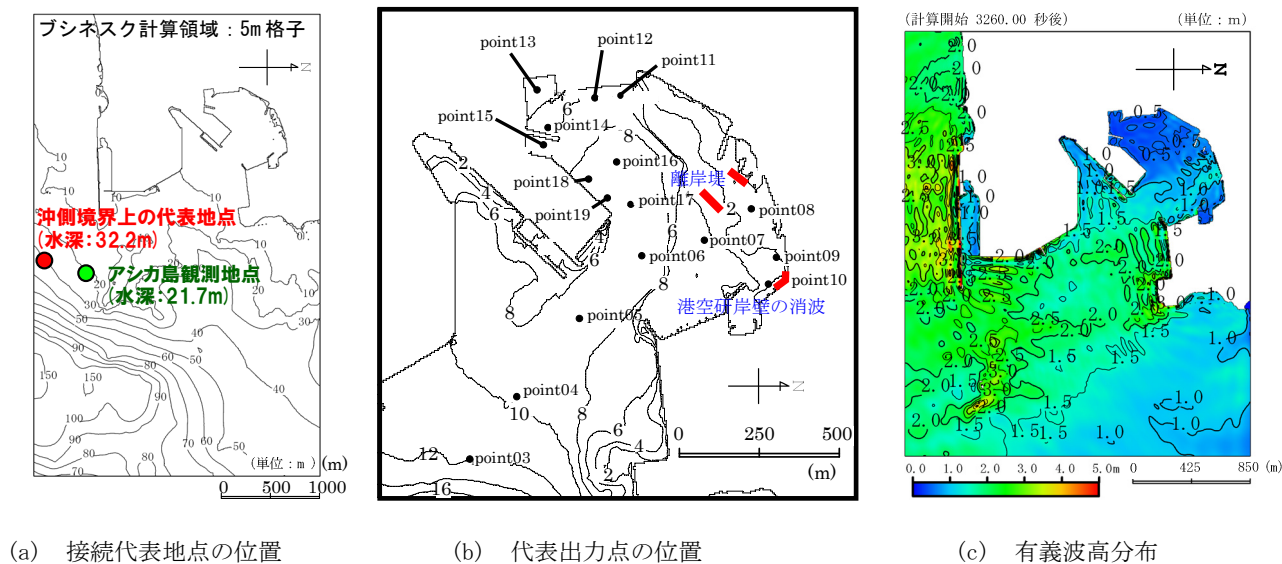


図-6 久里浜湾を対象としたビジネスモデル計算における計算領域

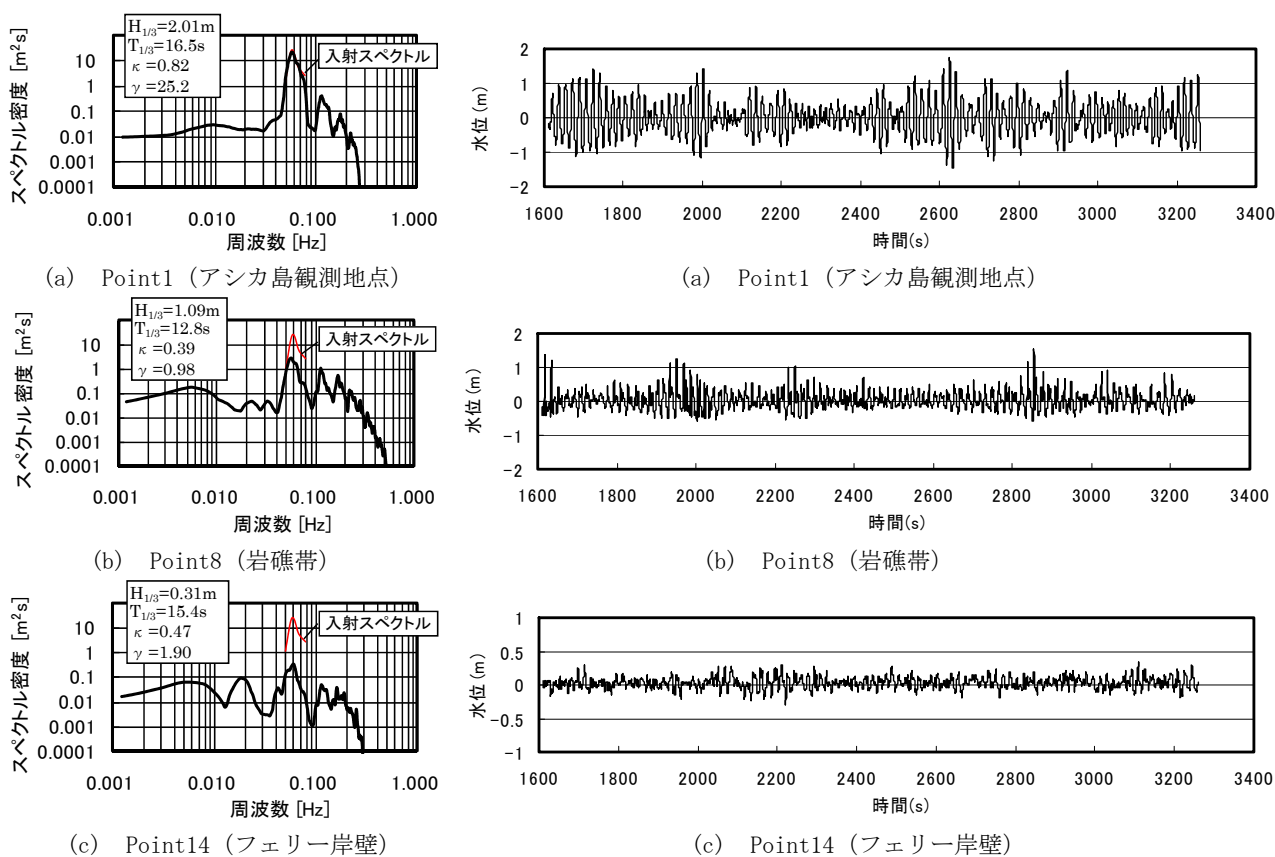


図-7 うねり性波浪の周波数スペクトル

図-8 うねり性波浪の水面波形



## 2.1.4 NOWT-PARIによる拘束長周期波の造波精度

以上のように、ブシネスクモデルによる再現計算を行った結果、台風0402号来襲時に久里浜湾で観測された長周期うねりは、顕著な高波の連なりを伴って湾内に侵入し、成分波間の非線形干渉や砕波・回折等による波高減衰を経て、湾内に、波群に拘束された長周期波（包絡波）とそれが解放された自由長周期波（水位の長周期変動成分）の両方をもたらすことがほぼ明らかとなった。

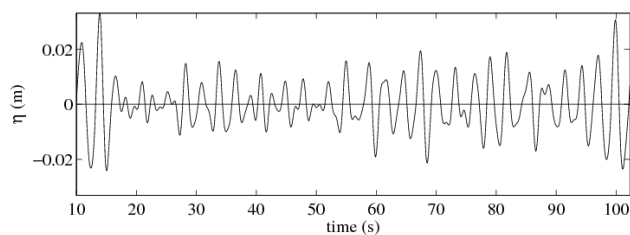
このとき、NOWT-PARIの基礎方程式とした弱非線形・弱分散性のブシネスク方程式において表現可能な、2次オーダーの非線形干渉のみに着目し、かつ砕波・遡上変形を含む短周期波の波浪変形に対するブシネスクモデルの高い計算精度を勘案すると、波群に拘束された長周期波が自由長周期波として解放される過程についても、NOWT-PARIによってほぼ再現可能であろうことが期待される。

しかしながら、NOWT-PARIで採用している造波境界では、一般的な実験水槽と同様に、微小振幅波理論に基づき成分波を線形に重ね合わせ、代表水深における水平流速成分を与えることにより、波群を含む不規則波形を造波しているため、波群に拘束された長周期波を造波する際には、同時に、これによる水面の不連続を補償するような自由長波も合わせて造波されている可能性がある。このような波は実海域には存在しないため、NOWT-PARIの計算領域内で算定される長周期波の伝播・変形に関する計算精度を議論する場合には、この影響を排除しておく必要があると考えられる。

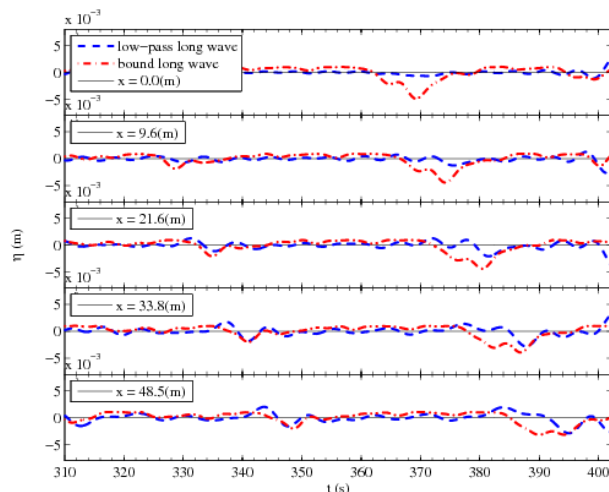
そこで、本稿では、造波板の運動により発生する自由長波の制御法を提案したSand (1982) にない、これをNOWT-PARIに導入することの妥当性について、非常に長い一様水深場（水深0.6m）を伝播する波群に拘束された長周期波を数値的に造波することにより検討した。なお、実験室におけるピストン型の造波板の運動は、NOWT-PARIでは、代表水深の水平流速による造波に対応していると考えられる。

検証計算において対象とした基本波（波群を構成する波）は、長周期うねりを想定したJONSWAPスペクトル（ $\gamma=10$ ）に従う周期2.86s（0.35Hz）の一方方向不規則波である。また、波群の伝播計算過程において、波群に拘束された長周期波が解放されないよう、計算領域は波群の伝播方向に十分長く設定するとともに（約450m $\approx$ 68L、Lは短周期波の有義波周期に対応する波長で、約6.5m）、その沖側及び岸側にはスポンジ層を設定して無反射境界とし、かつ波高を十分小さく設定し非砕波条件とした（有義波高2cm）。さらに、拘束長周期波の造波精度を確認するための波形データは、造波板位置を原点とし、波群の伝播方向に沿って設定した少なくとも4地点（ $x=1.46L$ ,  $3.28L$ ,  $5.14L$ ,  $7.37L$ ）で計測した。

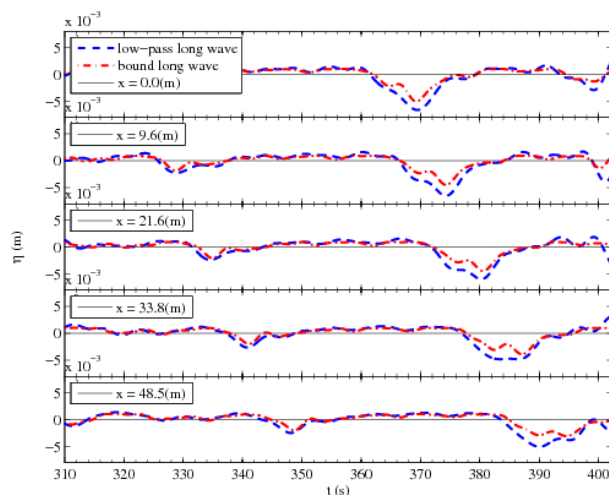
図-9は、長周期うねりスペクトルを想定した一方方向不規則波の造波波形、及びこれを造波した場合に水路内の各地点で計測される、水面波形の長周期変



(a) 造波波形



(b) 計測・推定された拘束長周期波（制御なし）



(c) 計測・推定された拘束長周期波（制御あり）

図-9 一方方向不規則波の波群に拘束された長周期波

動成分（青線）及び水面波形の短周期成分から推定される拘束長周期波（赤線）である。造波時に自由長波の発生を制御しない場合（図-9(b)）には、その地点で計測される水面変動の長周期変動成分は、同じくその地点で計測された波群から推定される拘束長周期波の波形と大きく異なる時刻があることが確認できる。しかし、自由長波の発生を制御した場合（図-9(c)）には、そのような時刻においても、両者の波形は比較的良好に一致していることがわかる。

したがって、今回の検証計算により、Sand (1982) によって提案された実験室内で発生する自由長波の制御法は、NOWT-PARIにおける造波境界に対しても適用できることが確認された。

### 2.1.5 まとめ

本稿では、台風0402号来襲時に、東京湾に面する久里浜湾及びその沖合に位置する伊豆大島の波浮港で観測された長周期うねりのスペクトルが、それぞれJONSWAPスペクトルで近似できることを示すとともに、主に久里浜湾を対象として沖波スペクトルの推定及び観測スペクトルの再現計算を行い、任意形状スペクトルを造波可能なNOWT-PARIを用いたうねり波形の伝播・変形計算により、アシカ島で観測された $\gamma=25$ を超える狭帯域スペクトルや波形の波群特性なども再現できることを示した。

一方で、現行のNOWT-PARIで採用されている造波境界を用いて波群に伴う拘束長周期波を造波した場合には、対応する実験室のピストン型造波装置と同様に、実海域には存在しない自由長波を発生させてしまうことを示すとともに、Sand (1982) が提案した制御法はNOWT-PARIにおける造波境界に対しても有効に機能することを確認した。

今後は、これらの成果を踏まえ、甚大な越波浸水災害が発生した入善漁港海岸を対象として、当時来襲した長周期うねりの波群特性を再現し、田島ら (2009) によって指摘された高波浪の集中機構の検証等を行う予定である。なお、本研究の一部は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸

分野における基礎的研究推進精度」による補助を受けて実施したことを記し、謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Sand, Stig, E.: Long wave problem in laboratory models, JWPCOD, Vol.108, No. WW4, 1982, pp.492-503.
- 2) 加島寛章・平山克也・峯村浩治・平石哲也: 全国波浪観測データを活用したうねり性波浪の伝播特性について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.171-175, 2008.
- 3) 加島寛章・平山克也・平石哲也: 長周期うねりの来襲特性に関する現地調査とその考察, 海洋開発論文集, Vol. 25, 2009, pp.629-634.
- 4) 合田良実: 耐波工学, 鹿島出版会, p224, 2008.
- 5) 田島芳満・石指裕章・佐藤慎司: 地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, 2009, pp. 211-215.
- 6) 平山克也・加島寛章・仲井圭二: 長周期うねりのスペクトルと波群特性に関する考察, 海洋開発論文集, Vol. 25, 2009, pp.635-640.
- 7) 平山克也・宮里一郎: 任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案, 港空研報告, 第48巻, 第2号, 2009, pp.199-214.

## 2.6 「うねり性波浪」の解析と予測システムの構築

### 2.6.1 はじめに

平成20年2月23日から24日にかけて富山湾（図-1）を襲った『うねり性波浪（寄り回り波）』は、伏木富山港伏木地区の北防波堤や港湾緑地などに甚大な被害をもたらした。被災後、国土交通省北陸地方整備局は、『富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会』を立ち上げ、委員会指導のもと調査を行った結果、港湾・海岸施設の補強に加え、事前に情報を把握し対処することが有効であるという結論を得た。

また、「寄り回り波」の予測の課題として、

- ①観測地点における波浪予測の精度向上
- ②藍瓶等複雑な地形（図-2）の効果を反映させる
- ③うねりの伝搬経路におけるうねり性波浪の監視の3点を挙げている。

そこで、地形・水深等による影響を考慮し、沖波の入手と同時に港内の任意の地点での波高予測が可能となるよう適切な波浪変形モデルを活用した予測システムを構築するとともに、うねり性波浪の監視システムを検討した。

### 2.6.2 波浪変形モデルの特性を活かした予測システムの検討

#### (1) 入力条件の検討

平成20年2月23日から24日にかけて、伏木富山港富山地区で最大有義波高9.92m、有義波周期16.2秒のうねり性波浪が観測された。

実際の予測システムを構築する上で、様々な入射波向や周期・波高に対応する必要があるため、上記の事例を包含しつつ、過去の波高周期結合頻度（永井ほか<sup>1)</sup>）から、詳細な海底地形を反映した「沿岸係数」をテーブルの形で事前に作成しておく必要がある。この際、北から西の波に対しては、能登半島の遮蔽域になるため16方位の間隔(22.5°)で沿岸係数表を作成すれば十分であるが、「うねり性波浪」が来襲する北から北東の波に対しては、波向に対する周囲の地形や海底地形の影響が大きいことから、方位5度間隔で「沿岸係数表」を作成した。また、周期については、4秒、8秒、12秒及び16秒の4周期について沿岸係数表を作成した。さらに、波高については、1m、3m、5m、7m、9m及び11mの6波高について沿岸係数表を作成した。その他の波高、周期の沿岸係数は上記条件の沿岸係数を内挿して求めた。

表-1 入力条件

| 要素         | 入力条件                                    |
|------------|-----------------------------------------|
| 波高（6波高，m）  | 1,3,5,7,9,11 m                          |
| 周期（4周期，秒）  | 5,8,12,16 秒                             |
| 波向（13方位，°） | 0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,68,338,315° |

また、浅海域での波浪変形計算において、 $S_{max}$ （方向集中度）は以下のとおりとした。

風波： $S_{max} = 10$  ( $0.03 < H_0/L_0$ )

減衰距離の短いうねり（波形勾配が比較的大）

： $S_{max} = 25$  ( $0.015 < H_0/L_0 < 0.03$ )

減衰距離の長いうねり（波形勾配が小）

： $S_{max} = 75$  ( $H_0/L_0 < 0.015$ )

国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所<sup>2)</sup>によると、2008年2月24日の観測スペクトルでは、発達段階（有限フェッチ）の風波のスペクトルであるJONSWAP型スペクトル（ $\gamma=3.3$ ，最大10.0）であった。

- ① 沖側の輪島はブレットシュナイダー・光易型スペクトルに近い形状である。
- ② 伏木富山、富山はJONSWAPスペクトルに近い形状であった。
- ③ 伏木富山、富山の波浪計は、藍瓶地形の浅いところにあるため、屈折の影響でスペクトル形状が変化している。

としている。

一方、JONSWAPスペクトルの集中度係数 $\gamma$ は、観測値に対して毎回フィッティングするものであるが、本業務は予測を対象としているため、そのような調整を行えない。そこで、本解析では、沖波の周波数スペクトルは、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルとした。

#### (2) 波浪変形モデルの検討

対象とするうねり性波浪は、周期が14秒前後に達する。この波浪が港湾に来襲した際、代表水深を10mとすると、相対水深 $\sigma$ （水深・波長比；鉛直加速度の考慮の必要性（ $h/L$ ））は、0.075と長波に近い。また、4mの波浪が来襲すると仮定すると、波形勾

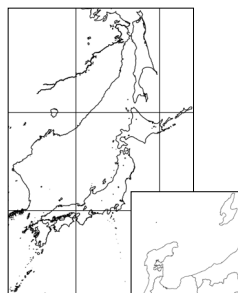
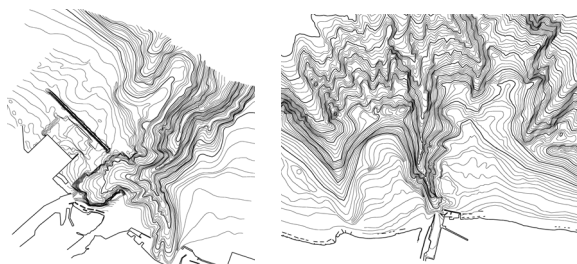


図-1 富山湾位置図



(a) 伏木地区 (b) 富山地区

図-2 港湾前面の海底地形（藍瓶）

配 ( $H/L$ ) は0.03, 波高・水深比 (非線形性の強さ)  $\varepsilon$  は0.4, アーセル数 ( $Ur$ )  $\varepsilon/\sigma^2$  は  $71 \gg 1$  である.  $20 < Ur < 80$  の場合は, 孤立波を形成する.

この様な波浪の伝搬を精度良く計算し, 波高分布を求める場合には, 浅水変形, 屈折, 砕波に加えて, 有限振幅性 (非線形性, 分散性) を考慮する必要がある, さらに砕波, 任意水深も考慮できるブシネスク方程式が望ましいと考えられる.

ただし, 有限振幅性は水深の精度に大きく影響を受けるため, 特に港湾周辺では精度の高い詳細な海底地形を必要とする.

伏木地区では港湾区域の深浅測量データがあり港湾周辺の藍瓶地形が測量されている. 一方, 富山地区では深浅測量データがない. したがって, 詳細な海底地形データを有する伏木地区においては非線形分散波モデル (ブシネスク方程式) を用いた波浪変形解析を実施し, 詳細な海底地形データがない富山地区においては線形モデル (エネルギー平衡方程式) を用いた波浪変形解析を実施した.

### (3) 波浪変形モデルの特性を活かした予測システムの検討

詳細な海底地形データを有する伏木地区においては, 詳細なメッシュで非線形分散波モデル (ブシネスクモデル) を用いた波浪変形解析を実施した. また, 線形モデル (エネルギー平衡方程式) を用いた波浪変形解析も実施し, これらの計算結果の比較検討から, モデルの差による影響度等を検討した. 詳

細な海底地形データがない富山地区においては, 線形モデル (エネルギー平衡方程式) を用いた波浪変形解析を実施した. 富山地区では, 海底地形データが粗いために屈折効果が過小評価され, 線形モデルであるために非線形効果が無視され, 沿岸係数は適切に評価されない可能性がある. そこで, 伏木地区で実施した2つのモデルに基づく沿岸係数の比較結果から, 予測に適用可能な非線形の影響を取り入れると共に, 富山地区での沿岸係数の比を割増率として乗じることとした. 予測システムの検討フローを図-3に示す.

ブシネスクモデルの場合, 周期4秒とすると格子間隔を2m程度に取る必要があり現実的ではない. そこで, 周期4秒の代わりに周期5秒として格子間隔を5mとした. 周期8秒以上の場合は格子間隔を10mとした.

### (4) 各モデルの比較結果

#### (a) 伏木地区における波高計地点, 波高の平面分布について

ここでは, 表-2, 図-4に示す検証計算Case1と, Case2~6に示す5ケースについて, 各モデルの波高 (比) 平面分布の特徴を述べる.

ブシネスクモデルの検証計算結果を以下に示す. 北防波堤の前面中央と前方東側 (図中○印) の波高が高く, 国土交通省北陸地方整備局編<sup>3)</sup>と同様の結果となっている. また, ブシネスクモデルの場合は, 北防波堤前面は, 入反射波により重複波を形成して

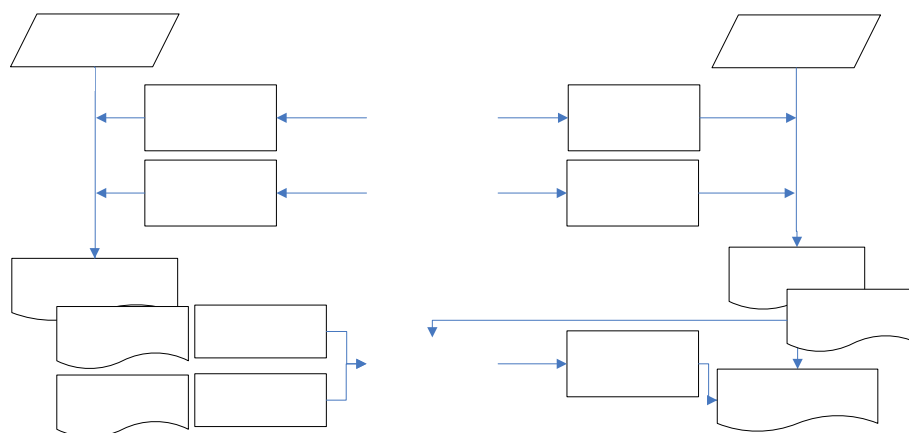


図-3 予測システムの検討フロー

表-2 各ケースの計算条件と結果 (波高計地点)

| Case | 入射波諸元     |           |           |      | 再現目標      |           |           | ブシネスク     | エネ法       |
|------|-----------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      | 波高<br>(m) | 周期<br>(秒) | 波向<br>(°) | Smax | 波高<br>(m) | 周期<br>(秒) | 波向<br>(°) | 波高<br>(m) | 波高<br>(m) |
| 1    | 4.42      | 14.42     | 17.5      | 75   | 4.22m     | 14.2      | 25        | 4.21      | 3.66      |
| 2    | 3         | 8         | 20        | 25   | —         | —         | —         | 3.20      | 3.05      |
| 3    | 3         | 12        | 20        | 75   | —         | —         | —         | 2.88      | 2.80      |
| 4    | 3         | 16        | 20        | 75   | —         | —         | —         | 3.05      | 2.27      |
| 5    | 5         | 12        | 20        | 75   | —         | —         | —         | 4.60      | 4.65      |
| 6    | 7         | 12        | 20        | 75   | —         | —         | —         | 6.46      | 6.45      |



いることがわかる。また、表-2より、本検証計算結果は、再現目標をほぼ満足している。エネルギー平衡方程式の場合は、ブシネスクモデルに比べて、波高分布の差は小さい。また、北防波堤の東側と中央よりも西側の波高が高く、ブシネスクモデルの結果と同様の結果となっている。また、本モデルは位相平均化モデルであるため、ブシネスクモデルに見られた重複波は見られない。

図-2に、Case 2以降の事例の、ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式の入射波に対する波高比、両者の波高比の倍率（ブシネスクモデルの波高比／エネルギー平衡方程式の波高比）を示す。また、参考として水深分布を示す。

Case 2（波高3m、周期8s、Smax25）の場合、ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式の入射波に対する波高比は、1.0～1.2倍であった。両者の波高比の倍率も1.0～1.2倍で、ほぼ同程度であった。本ケースは周期の比較的短く分散性のある波浪のケースであり、このような場合はブシネスクモデルの結

果とエネルギー平衡方程式の結果はほぼ同じであるといえる。

Case3(a)（波高3m、周期12s、Smax75）の場合、ブシネスクモデルの入射波に対する波高比は、エネルギー平衡方程式よりも、場所によって変化が大きい（0.4～0.6の階調から1.6～1.8の階調が存在する）。これは、ブシネスクモデルのほうが、海底地形（海底の谷、尾根による屈折等）の影響をより再現しているためであると考えられる。ただし、両者の波高比の倍率が1.4倍を越えるところもある。これは、屈折による波高増大、非線形性による波高増大の効果だけとは考えにくい。そこで、ブシネスクモデルの計算について、Case3の条件で、北防波堤と港湾を波浪が透過する条件（Case3(b)；構造物なしの条件）で実施し、エネルギー平衡方程式の結果（入射波のみ）と比較した。その結果、反射の影響が取り除かれ、屈折による正味の波高増大は尾根付近でも1.2～1.4倍であった（図中○領域）。港内において、波高比の倍率（ブシネスクモデルの波高比／エネルギー

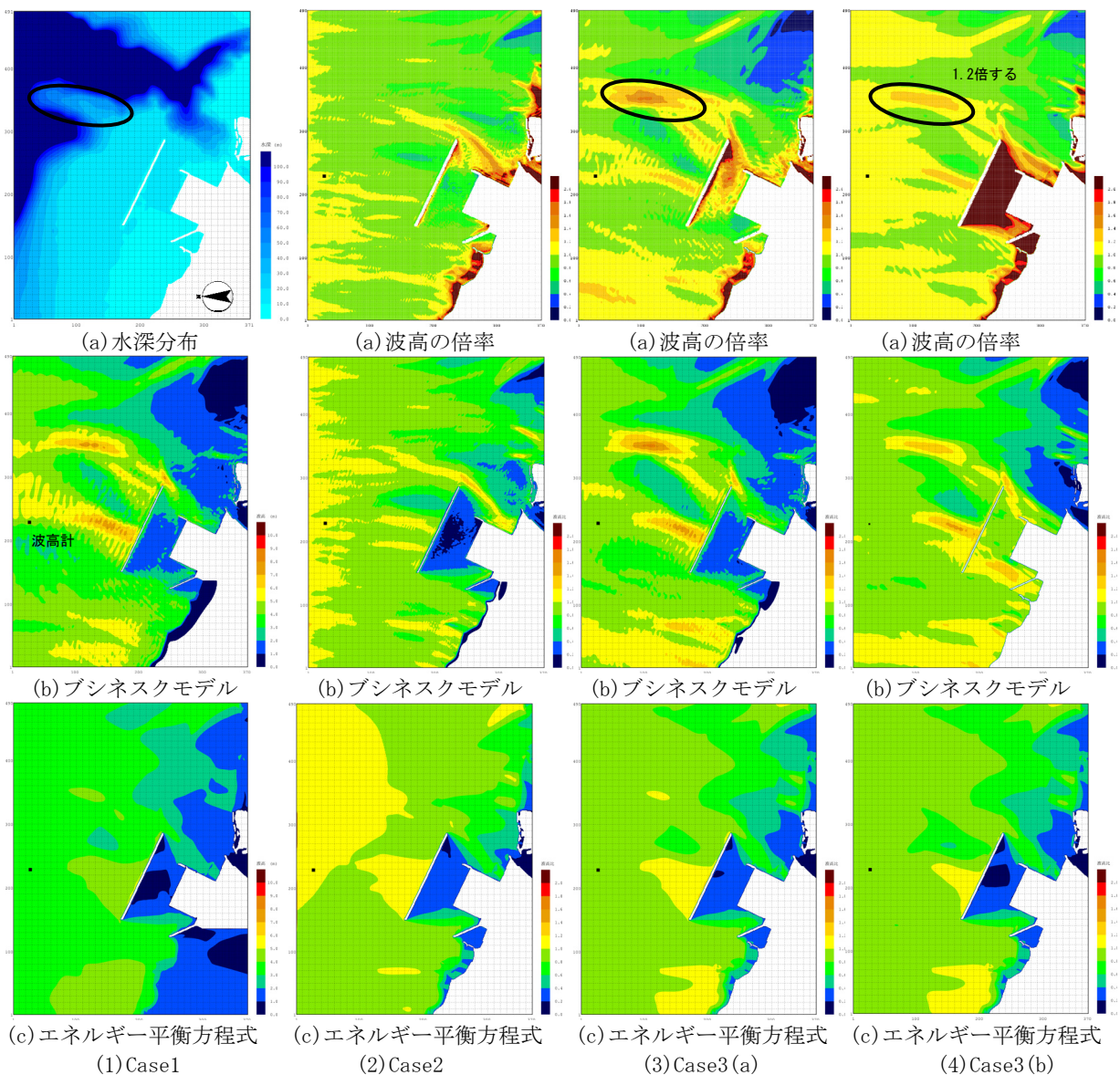


図-4 伏木地区の水深および各モデルの比較



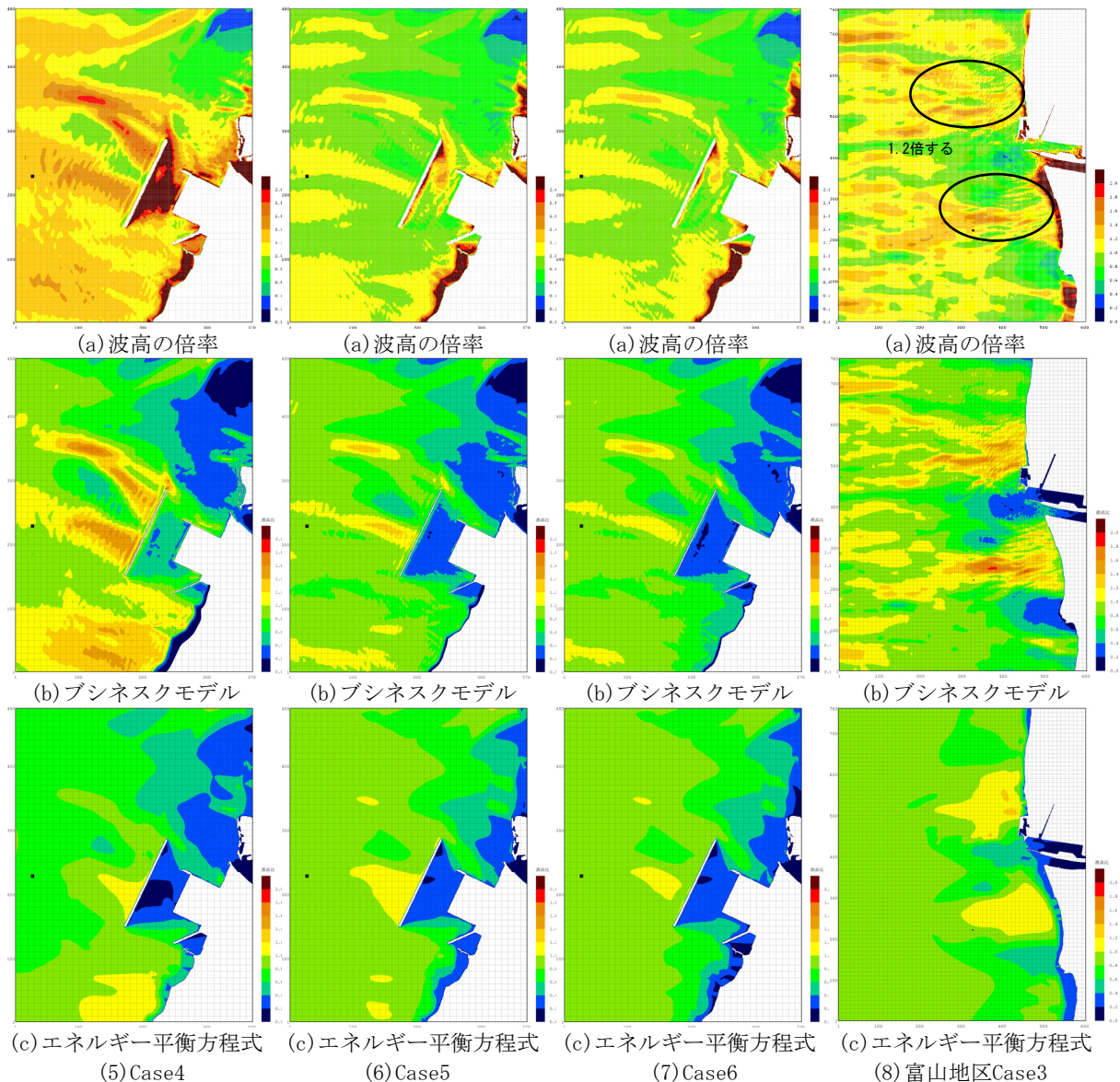


図-4つづき 伏木地区の各モデルの比較と、富山地区の各モデルの比較

ギー平衡方程式の波高比) が大きい理由は、ブシネスクモデルの条件のみ「波浪が防波堤を透過する」としているためである。

Case3の場合、ブシネスクモデルの入射波に対する波高比は、エネルギー平衡方程式よりも場所によって変化が大きい。Case4 (波高3m, 周期16s, Smax75) の場合、この傾向はさらに強くなる。両者の波高比の倍率も2倍弱となる (但し、反射波を含む)。

Case5, Case6ではブシネスクモデルの入射波に対する波高比はCase3よりも低い。両者の波高比の倍率は1.2~1.4である。これは、波形勾配がCase3よりも大きいために、分散性が強くなるためであると考えられる。

以上により、

- 8 秒以下の波浪に対しては、エネルギー平衡方程式の沿岸係数をそのまま利用しても問題はな

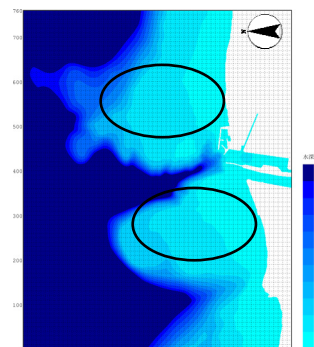


図-4つづき (9) 富山地区の水深

いと考えられる。

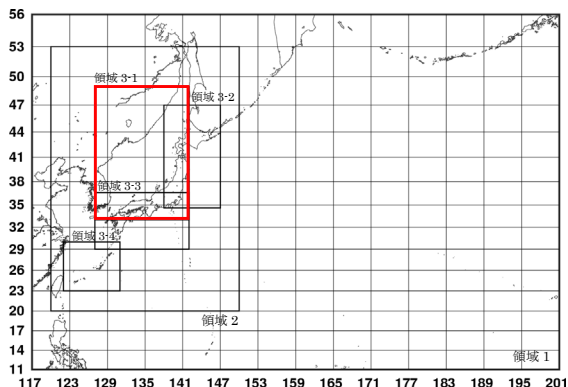
- 周期 12 秒以上の波浪に対しては、海底の尾根付近では、屈折により波高が増大し非線形性が顕著になるため、エネルギー平衡方程式の沿岸係数を 1.2 倍程度割り増す必要があると考えられる。

- ・ 周期 8 秒と 12 秒の間の沿岸係数の割り増し率は、1.0 と 1.2 を補間することとした。

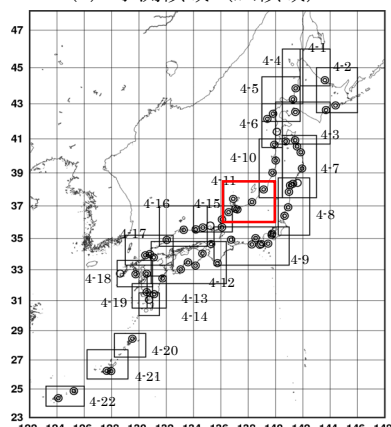
#### (b) 富山地区における波高の平面分布について

図-4(8), (9)に、波高3m, 周期12秒, Smax75の事例の、ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式の入射波に対する波高比、波高の倍率（ブシネスクモデルの波高／エネルギー平衡方程式の波高）を示す。また、参考として水深分布を示す。

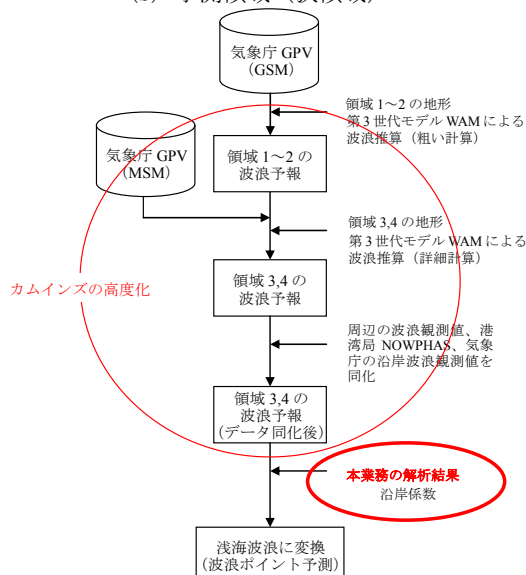
富山地区においても、海底の尾根が存在し、ここ



(a) 予測領域（広領域）



(b) 予測領域（狭領域）



(c) 予測フロー

図-5 予測システム

で、ブシネスクモデル、エネルギー平衡方程式の両者の波高比は高くなっている（図中○印）。両者の波高の倍率は、概ね1.2程度であり、前項(a)の結論と同様である。

したがって、エネルギー平衡方程式により富山地区の沿岸係数を整備する際、以下の方針とした。

- ・ 8 秒以下の波浪に対しては、エネルギー平衡方程式の沿岸係数をそのまま利用する。
- ・ 図中○印の範囲にある波高計地点では、周期 12 秒以上の波浪に対しては、屈折により波高が増大し非線形性が顕著になるため、エネルギー平衡方程式の沿岸係数を 1.2 倍割り増すこととした。

図-3 のフローにしたがって、表-1 のケースについて、富山地区では必要に応じて沿岸係数を割り増した。

#### 2.6.3 予測システムのフロー構築と検証

予測システムは、COMEINSの新しい波浪予報をベースとして、図-5に示す予測フローによるものとした。

本システムの特徴は以下のとおりである。

- ① 近海、沿岸の領域では、入力とする海上風に、メソ気象モデルMSM（解像度5km）のメソ気象モデルによる海上風を用いることにより、高波予測の改善を図っている。
- ② NOWPHAS沿岸波浪観測値を同化することによって、予測情報に誤差があった場合にも、波浪観測が行われていない任意の場所で誤差を補正し精度を上げることができる。

過去の顕著なうねり性波浪の来襲事例について、構築した予測システムの検証を実施した。その典型的な一例を図-6に示す。データ同化により、伏木地

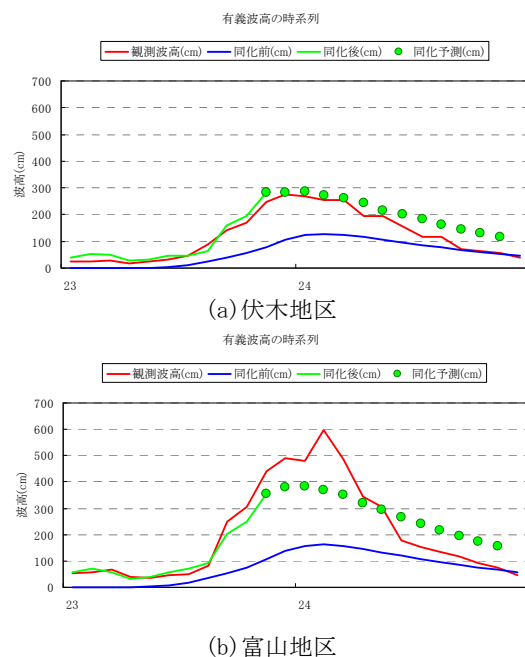


図-6 予測システムの検証結果の例  
(2004年2月23～24日の事例)

区では概ね予測値は実測値と一致し、富山地区でも実測値に近づいた（但し、ピークは十分に捉えていない）。他の事例も概ね同様の傾向があった。

これは、データ同化が、同時刻の観測地点における観測値と予測値の誤差の情報を基本として、将来に適用するためであると考えられた。そこで、精度向上のためには、上流側NOWPHAS地点との誤差共分散行列の更新を利用したデータ同化の実施等、が考えられた。また、データ同化による予測値の修正以外にも、過去の「うねり性波浪」来襲時の特徴を踏まえて、来襲可能性を気象、海象条件から事前に把握し、観測値を監視することが必要になると考えられた。

#### 2.6.4 おわりに

富山湾に発生する「うねり性波浪」（通称、寄り回り波）は、周期が非常に長く、波高の大きい波浪が日本海を北北東から南～南南西方向へ伝播してきて、富山湾の「藍瓶」と呼ばれる深い海谷を形成する海底地形により局所的に変形され、波高がさらに増大して、沿岸に来襲したものであると考えられている。したがって、発生域から富山湾へ伝播する波浪群の位置等の状況を監視することで、いつ富山湾において「寄り回り波」が出現するかを予想するこ

とが可能になると考えられる。以上の考えに基づいて、数値計算により得られた「うねり性波浪」の予測情報を補完するため、「うねり性波浪」を発生させる気象、波浪条件及び伝播途中の波浪実況を監視する方法についても検討を行い、警戒監視の基準を作成したが、これは本勉強会の範疇ではないため割愛する。

今後、本検討の結果を用いて、うねり性波浪の予測システム、監視システムを構築する予定である。

#### 謝辞

本解析では、ビジネスモデルには、（独）港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室が作成したNOWT-PARI ver.4.6c5aを用いました。ここに記して、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 永井紀彦：全国港湾海洋波浪観測30年統計（NOWPHAS 1970-1999），港湾空港技術研究所資料NO.1035，2002.
- 2) 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所編：平成20年度うねり性波浪の水位等検討調査報告書，pp. 資料-5，2008.
- 3) 国土交通省北陸地方整備局：富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会報告書，pp. 20, 27，2008.

## 2.3 スペクトル法とブシネスクモデルの接続方法に関する検討

### 2.3.1 はじめに

現行のブシネスクモデル（平山，2002）では，入射境界上の方向スペクトルは一樣と仮定して多方向不規則波を造波するため，入射境界は，海底地形の影響が小さく，方向スペクトルの空間変化が小さい沖合に設定する必要がある，必然的に計算領域を広く確保する必要があった．したがって，例えば，沿岸部でより詳細な計算格子を設定し波浪変形計算を行う場合には，膨大なメモリ容量と演算時間を要することが実務上の大きな課題となっている．

そこで本資料では，ブシネスクモデルで設定する入射境界をできるだけ岸に寄せ，計算領域を小さく設定する代わりに，その結果，海底地形の影響を受け，入射境界上の方向スペクトルの空間変化が無視できなくなることに対応するため，スペクトル法によって算定された方向スペクトルの空間的な偏り（分布），及びそれらの水深が異なることによる波数変化を考慮した多方向不規則波の造波方法について検討を行ったものである．

### 2.3.2 ブシネスクモデルの造波方法

#### (1) 任意形状のスペクトルの造波方法

NOWT-PARI（Ver4.6c7a）では，任意の周波数・方向スペクトルから多方向不規則波の造波方法として，平山・宮里（2009）によるエネルギー等分割によるシングルサンメンション法を採用している．

$$\eta = \sum_{n=1}^{N_s} a_n \sin(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (1)$$

ここで， $(x, y)$  は平面座標， $t$  は時刻， $a_n$  は各成分波の振幅， $k_n$  は波数， $f_n$  は周波数， $\theta_n$  は波向， $\varepsilon_n$  は初期位相を示す．また，周波数スペクトルのエネルギー等分割は，各成分波間のエネルギーが等しくなるように周波数スペクトルを分割する方法である．なお，周波数分割により造波される不規則波形の最大造波時間は，成分波の最小周波数に依存するためこれを超えて造波すると，同じ波形がくりかえされるという問題が生じる．この様子を図-1に示す．

まず，周波数に対応する振幅は以下の式(2)で算出する．

$$a_n = \sqrt{2S_n(f_n)\Delta f_n} \quad (2)$$

次に，各成分波の波向は，図-2に示すように各成分波の方向分布を積分した累積曲線  $P(f_n; \theta)$  を算出し， $[0, 1]$  の乱数を当てはまることで決定する．この結果，シングルサンメンション法では，ダブルサ

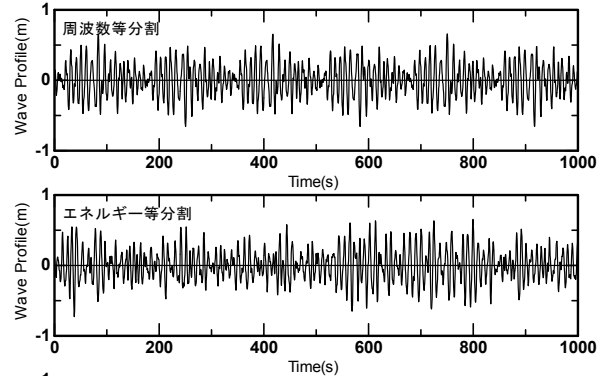


図-1 周波数分割の違いによる波形の比較

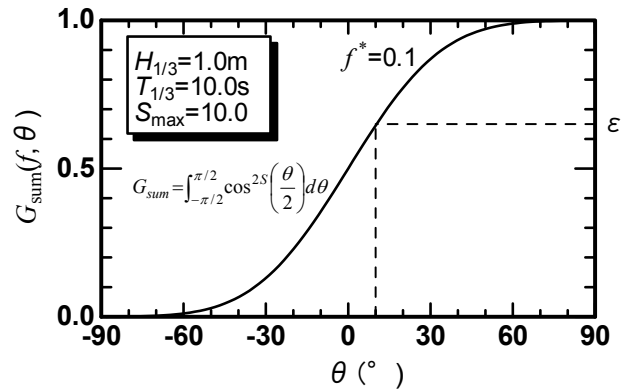


図-2 方向分布の累積曲線の例

ンメンション法に比べ，少ない成分波数で多方向不規則波を作成できる．

#### (2) 任意水深上の造波方法

NOWT-PARI（Ver4.6c7a以前）では，入射境界の水深は一定とし，一樣勾配斜面を設けて現地地形へすり付けることを推奨している．しかしながら，この適切な設定には多少の経験と手間を要するため，このような作業を省略して現地地形上で直接，波を造波できることが望ましい．このためには，任意水深分布上での多方向不規則波の造波手法が必要となる．

以下では，水深が急変する沖側入射境界における斜め波の造波法を提案した糸井ら（2002）の報告を参考に，水深が一定でない沖側入射境界に沿って，波数（波長の逆数）が異なるために生じる成分波の位相差を考慮した，多方向不規則波の造波方法を提案する．

図-3に示すように，入射境界に対し，計算領域へ直角に入射する成分波の波向きを0度，反時計回りを正とした成分波の波向きを  $\theta$  とすると，ある成分波の水位変動  $\eta_{comp}(x, y, t)$  は，式(3)で表わされる．

$$\eta_{comp}(x, y, t) = a \sin(k_x x + k_y y - \sigma t + \varepsilon) \quad (3)$$



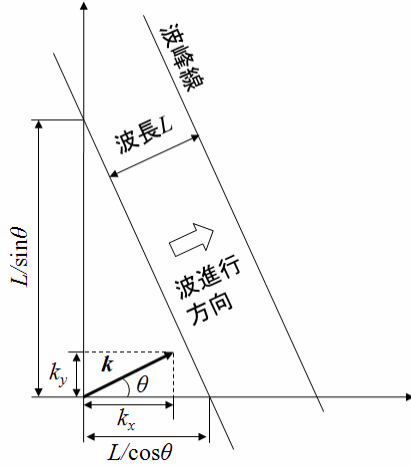


図-3 波向と波数ベクトル

ただし、 $k_x = k \cos \theta$ 、 $k_y = k \sin \theta$ であり、 $a$ は振幅、 $\sigma (=2\pi/T)$ は角周波数、 $k (=2\pi/L)$ は波数である。

いま、水深が一定でない沖側入射境界上では、波数 $k$ は $y$ 軸に沿って変化することを考慮すると、式(3)は式(4)のように書き換えられる。ここで、複数の方向スペクトルを入力する場合には、沖側入射境界（ $y$ 軸）に沿って振幅 $a$ も変化する。

$$\eta_{comp}(x, y, t) = a(y) \sin \left( k_x(y)x + \int_0^y k_y(y)dy - \sigma t + \varepsilon \right) \quad (4)$$

また、このような入射境界上で多方向不規則波を造波する場合には、式(4)で表わされる成分波を複数重ね合わせて造波する。さらに、複数の方向スペクトルを入力した場合にも角周波数 $\sigma (=2\pi/T)$ は沖側入射境界（ $y$ 軸）に沿って変化しないので、波数 $k (=2\pi/L)$ は各計算格子の水深に応じて各成分波に対し一義的に決定される。なお、複数スペクトルに対する多方向不規則波の造波方法の詳細については、別の機会に報告することを予定している。

### 2.3.3 球面浅瀬による造波方法の検証

#### (1) 計算条件

このような造波方法に対する妥当性の検証は、図-4に示す球面浅瀬（天端水深5m、球面浅瀬の周囲は水深15mで一定）を設定し、図中のb-b'断面、及びc-c'断面で得られる複数方向スペクトルをそれぞれの断面から造波し、ブシネスクモデルで計算される多方向不規則波の伝播状況を、a-a'断面から単一方向スペクトルを造波したときに得られる各領域の波高比と比較することにより行った。ただし、b-b'断面及びc-c'断面で入力する各代表地点の方向スペクトル（複数方向スペクトル）は、以下に示す様に、エネルギー平衡方程式法による波浪変形計

表-1 沖側で与える単一方向スペクトルの諸元

| 波高 (m) | 周期 (秒) | 波向 (度) | Smax |
|--------|--------|--------|------|
| 1.0    | 5.1    | 0      | 75   |

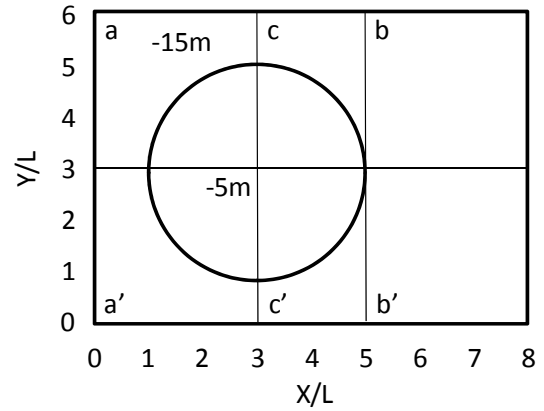


図-4 検証で設定した球面浅瀬の水深分布

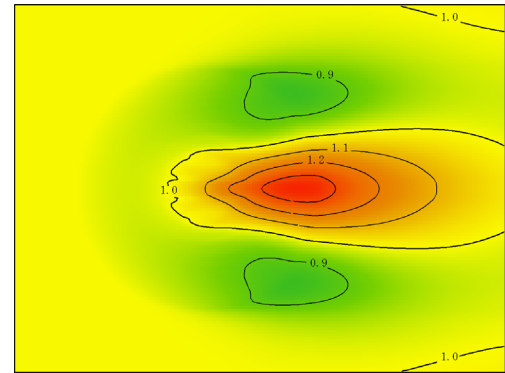


図-5 エネルギー平衡方程式による波高比分布

算によって得られる方向スペクトルの出力結果として与えた。

なお、計算格子間隔は、エネルギー平衡方程式およびブシネスクモデルともに5.0mである。

#### (2) 方向スペクトルの抽出

エネルギー平衡方程式、及び球面浅瀬場全体を対象としたブシネスクモデルにおける沖側境界（a-a'断面）の入射波条件は、表-1に示すようなブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルとCOSn型方向関数によって生成される多方向不規則波とした。このうち、エネルギー平衡方程式により計算された波高比分布を図-5に示す。球面浅瀬による屈折効果により、浅瀬背後で波高が高くなる様子が確認できる。

また、方向スペクトルは、図-4に示すb-b'断面およびc-c'断面上の25点で出力した。ここで、図-6および図-7に示す代表点5点（赤丸）での方向スペクトル分布をそれぞれ図-8(a)および図-8(b)に示す（なお、分布図の方向軸は、便宜上、 $y$ 軸の正の向きを方位Nと定義した）。特に、球面浅瀬の側面付近で算出された方向スペクトルでは、屈折効果によ



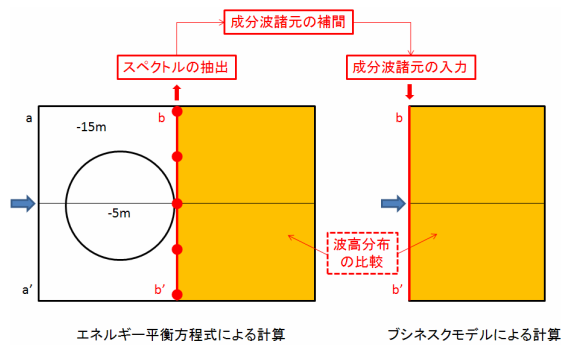


図-6 水深が一定の場合

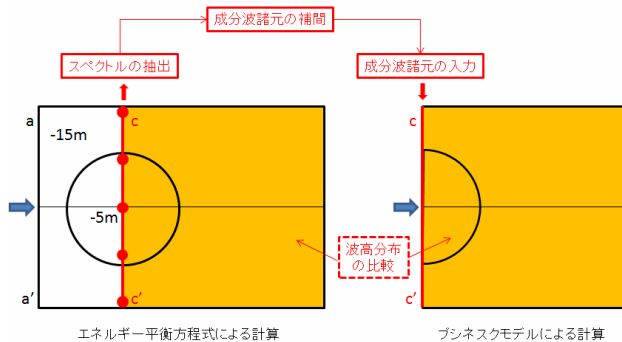


図-7 水深が一定でない場合

る方向スペクトルに偏りが見られる。

次に、沖側境界（a-a'断面）を入射境界とした単一方向スペクトルによるエネルギー平衡方程式およびブシネスクモデルによる波高比分布を図-9(a)および図-9(b)に示す。a-a'断面から入射させた波高分布は、エネルギー平衡方程式法に比べブシネスクモデルのほうが、より顕著な屈折・浅水変形が生じる計算結果となっている。なお、同図中に示した赤枠は、それぞれb-b'断面（破線）およびc-c'断面（実線）を入射境界としたブシネスクモデルにおける計算領域である。

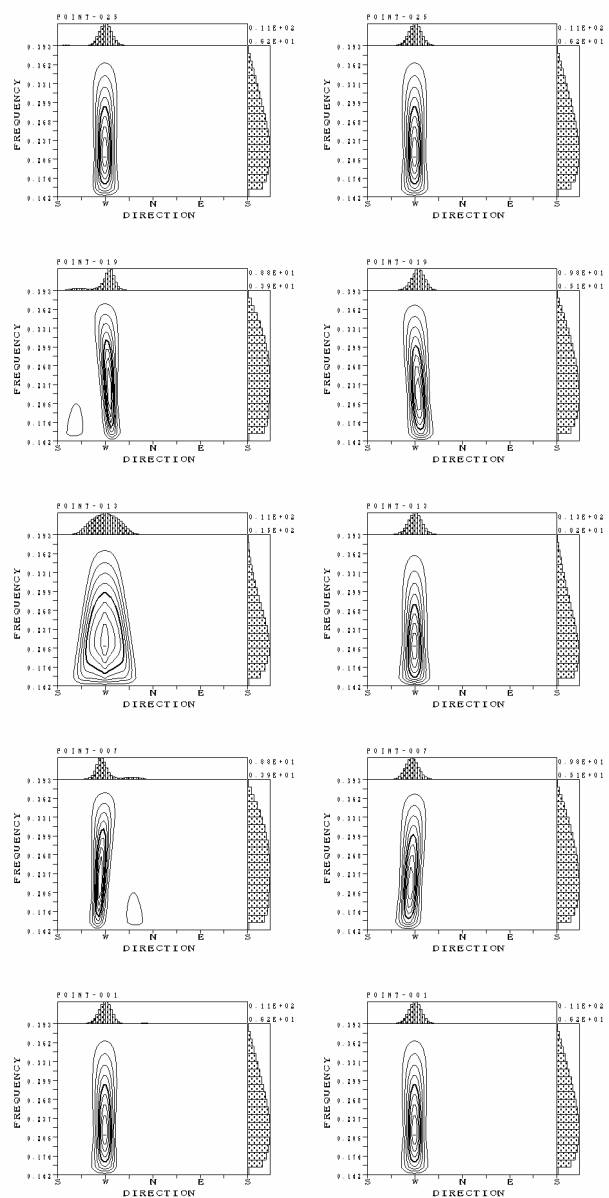
### (3) 造波精度の検証

b-b'断面およびc-c'断面に等間隔で配置した計25点の方向スペクトルは、b-b'断面およびc-c'断面で補間され、それぞれの断面を沖側入射境界とするブシネスクモデルにおいて、入射波として用いられる。

これにより、沖側入射境界上の隣り合う計算格子において、振幅のみ、または、振幅と波数が互いに異なる（漸変する）成分波諸元を有する多方向不規則波を造波し、その結果を、球面浅瀬場全体を計算領域としたエネルギー平衡方程式、及びブシネスクモデルによる計算結果と比較することにより、計算領域内を伝播する水面波形の特性、及び造波方法の妥当性を確認する。

#### (a) 造波水深が一定の場合

球面浅瀬背後で一定水深となるb-b'断面上を入射境界とした、ブシネスクモデルによる波高比分布を図-9(c)に示す。左図は単一方向スペクトル（単

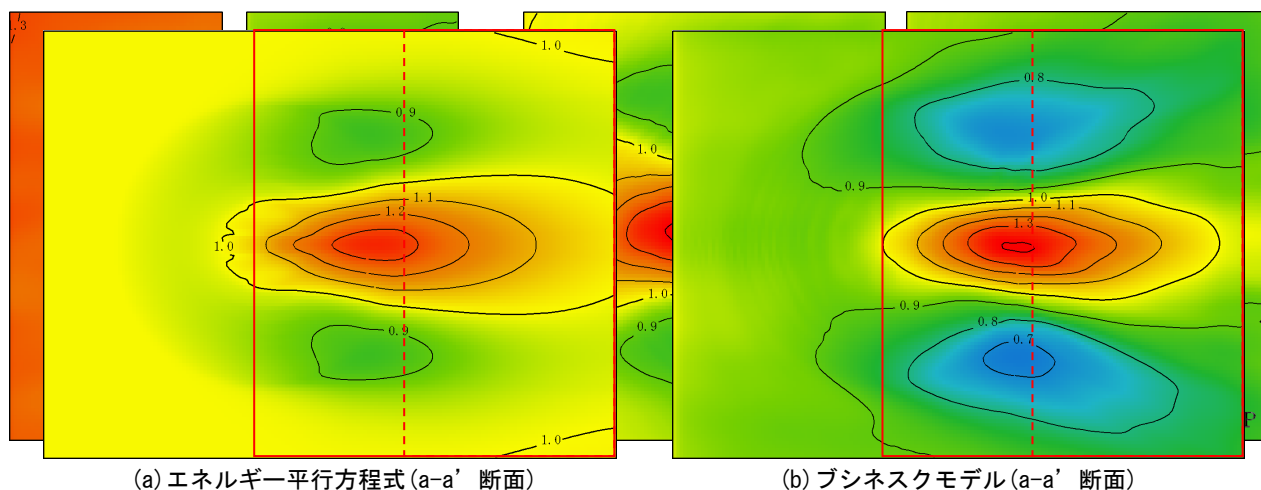


(a) b-b'断面 (b) c-c'断面  
(上からのb→b' およびc→c' の順番)

図-8 検証で使した球面浅瀬の水深分布

一SP)、右図は複数方向スペクトル（複数SP）による計算結果である。ここで、単一方向スペクトルには、エネルギー平衡方程式によりb-b'断面の中央で算定された方向スペクトルを使用した。また、複数方向スペクトルとは、上述した25点で得られた方向スペクトルを指す。

単一方向スペクトルの場合は、従来のブシネスクモデルと同じ造波方法によって計算されている。この場合、造波境界上の水深が一定であり、かつ方向スペクトルも一定であるため、伝播後の波浪は変形せず、波高比分布はほぼ一様分布となる。このため、a-a'断面を入射境界としたエネルギー平衡方程式やブシネスクモデルのように球面浅瀬背後での波の集中を再現することはできない。



(c) ブシネスクモデル(b-b' 断面)

(d) ブシネスクモデル(c-c' 断面)

図-9 造波方法の違いによる波高比分布の比較

一方、複数方向スペクトルの場合では、球面浅瀬背後における方向スペクトルの空間分布の変化が考慮されているため、単一方向スペクトルの場合とは異なり、波高比の増大が再現されている。しかしながら、これらの複数方向スペクトルは、エネルギー平衡方程式により得られたものであるため、これにより計算されたブシネスクモデルによる波高分布は、a-a' 断面から入射させたブシネスクモデルによる波高分布ではなく、エネルギー平衡方程式による波高分布により近い計算結果となっている。

#### (b) 造波水深が一定でない場合

球面浅瀬上で水深が一定ではないc-c' 断面上を入射境界としたブシネスクモデルによる波高比分布を図-9(d)に示す。同様に、左図は単一方向スペクトル、右図は複数方向スペクトルによる計算結果である。ここで、単一方向スペクトルには、c-c' 断面の中央で算出された方向スペクトルを使用した。

単一方向スペクトルの場合、任意水深上の造波であることに伴って入射直後から水深変化の影響を受け、屈折による球面浅瀬背後での波の集中が再現されているが、c-c' 断面上で一様のスペクトルを与えているために、波高比分布が全体的に大きくなったものと推測される。

一方、複数方向スペクトルの場合では、球面浅瀬背後での波の集中が再現され波高比は相対的に高くなるが、やはり、a-a' 断面から入射させたブシネスクモデルによる波高分布ではなく、エネルギー平衡方程式法による波高分布により近い計算結果となっている。

#### (c) 考察

b-b' 断面上を入射境界とし、複数方向スペクトルを用いて造波を行ったブシネスクモデルの波高分布は、エネルギー平衡方程式による波高分布と比較的良好一致している。したがって、方向スペクトルを複数点設定する造波方法を導入することにより、b-b' 断面上の方向スペクトルの空間変化の影響が考慮できたものと考えられる。

一方、c-c' 断面上を入射境界とし、単一方向スペクトルを用いて造波を行ったブシネスクモデルによる計算結果が、エネルギー平衡方程式の波高比分布に比べ過大となった原因は、側方に近づくほど波エネルギーが小さくなるという、境界上の方向スペクトルの空間変化が考慮できていないためと考えられる。

以上のように、任意水深の造波境界で多方向不規則波を造波した場合、海底地形による屈折や方向ス

ペクトルの空間変化を考慮しない従来の造波方法では、入射境界上あるいはそれより沖側の海底地形に依存して、計算領域に入射させる波浪場を過小または過大に算定する恐れがある。

#### 2.3.4 おわりに

スペクトル法によって算定された任意水深上の複数の方向スペクトル（方向スペクトルの空間変化）を用いて、多方向不規則波を造波する方法について検討をおこなった。今回提案した造波方法は、単一方向スペクトルを用い一定水深を仮定して造波する従来の造波方法では対応できないような、入射境界上の波浪場に対しても適用できることが、エネルギー平衡方程式による球面浅瀬場の計算結果との比較を通じて明らかとなった。

今後は、方向スペクトルの偏りが顕著な現地地形への適用計算を実施する予定である。

#### 参考文献

- 1) 平山克也：非線形不規則波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. 1036，2002，p. 162.
- 2) 平山克也・宮里一郎：任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案，港空研報告，第48巻，第2号，2009，pp. 199-214.
- 3) 糸井生夫，伍井 稔，成毛辰徳：ブシネスクモデルの伏木富山港（伏木地区）への適用とその課題，平成14年度ブシネスクによる波浪変形計算に関する勉強会資料，2003，pp. 7-11.

## 2.4 平面・断面2次元連結モデルの有効活用に関する検討

### 2.4.1 はじめに

近年、実務において断面2次元数値モデルが積極的に利用されている。特に、VOF法に基づく数値波動水路CADMAS-SURF（Super Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure）<sup>1),2)</sup>は、海岸構造物の耐波設計に適用可能なモデルとして開発され、磯部ら<sup>3)</sup>をはじめとする数多くの研究事例によって、進行波の浅水変形や碎波・越波現象に対する妥当性が確認されている。しかし、実際の海域は複雑な波動場となっており、より詳細な解析を行うためには、護岸付近における波の浅水・碎波変形だけでなく、沖合での波の屈折・回折も含めた平面的な波浪変形を考慮する必要がある。そこで、3次元波動場を直接的に計算する3次元モデルの開発が行われている（例えば、有川ら<sup>4)</sup>、川崎・袴田<sup>5)</sup>）。ただし、3次元数値モデルを実海域に適用するにあたっての当面の問題として、計算コストが挙げられる。特に、越波現象を解明するためには多大な計算時間を要するため、現時点において実務への3次元数値モデルの適用は難しい。一方、修正ブシネスク方程式に基づく平面2次元数値モデルNOWT-PARI（Nonlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute）<sup>6)</sup>は、波の浅水変形・屈

折・回折を同時に解析可能であり、計算領域内の波高分布や沿岸域の波・流れ場の算定に対して高い実績を有している。さらに、平山ら<sup>7)</sup>は、ブシネスクモデルに越流公式を導入することで、護岸背後への越流量が算出可能になることを示している。ただし、飛沫を含む越波現象を直接的に解くことはできないため、越波解析に関しては未だに課題が残されている。

上述の背景から、沖合での平面的な波浪変形を解析可能なNOWT-PARIと複雑な水面挙動を高精度に解析できる断面2次元数値波動水路CADMAS-SURFを採用し、それぞれの長所を活かしながら両計算結果を適切に接続することにより、両モデルを有効活用した護岸の実務耐波設計が可能になると考えられる。川崎ら<sup>8)</sup>は、NOWT-PARI Ver.4.6c4とCADMAS-SURFによる沖合の波浪変化を考慮した護岸周辺の越波解析を試み、護岸への入射波向きを考慮することで、波の浅水変形・屈折・回折の影響のみならず、碎波・越波現象も良好に考慮することができることを示した。しかし、作用波が規則波であったこと、護岸への入射波向きを波高分布から推定するなど、検討課題が残されていた。

本研究では、不規則波波動場を対象に、公開されている最新版のNOWT-PARI Ver.4.6c7aとCADMAS-SURF Ver.5.1の連結による越波解析を行い、解析結果の有用性について検討する。

### 2.4.2 NOWT-PARIによる平面2次元計算

#### (1) 計算条件および解析方法

本研究では、天然リーフが発達し、複雑な波動場となっている沖縄本島北部海域の実海底地形を計算対象とした。図-1に、NOWT-PARIにおける計算領域の水深分布を示す。当該海域では、岸側に浅水域が分布し、沖側に向かって急激な水深変化を伴う地形となっている。

表-1にNOWT-PARIにおける計算条件を示す。本

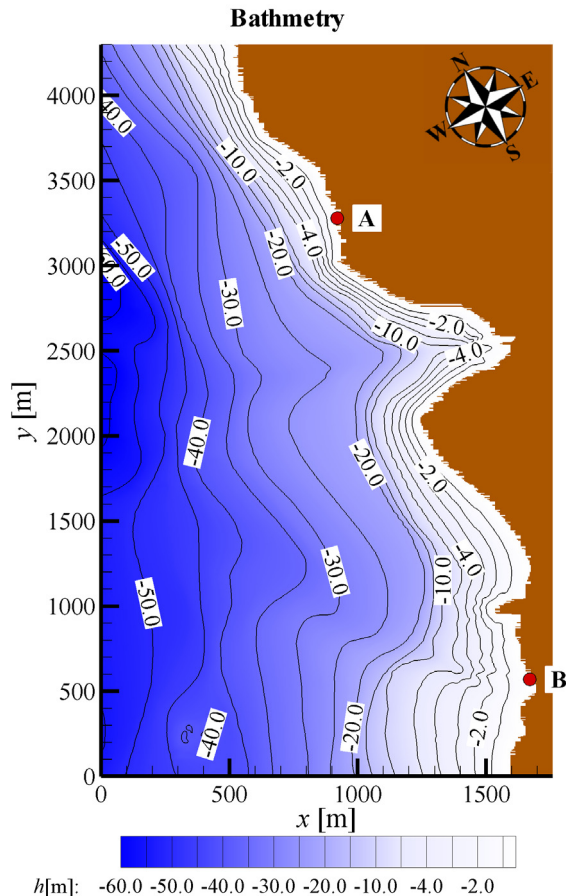


図-1 計算領域の水深分布

表-1 NOWT-PARIの計算条件

|                      |                           |                  |
|----------------------|---------------------------|------------------|
| 時間                   | 時間間隔 $\Delta t$           | 0.010s           |
|                      | 終了時間                      | 1800.0s          |
| 格子                   | x方向格子数                    | 406              |
|                      | y方向格子数                    | 1006             |
|                      | 格子間隔 $\Delta x, \Delta y$ | 5m               |
| 波浪                   | 有義波高 $H_{1/3}$            | 6.58m            |
|                      | 有義波周期 $T_{1/3}$           | 9.2s             |
|                      | 波向                        | 0°               |
|                      | 成分波数 NS                   | 100              |
| 水深                   | 方向集中度 $S_{\max}$          | $\infty$ (999.0) |
|                      | 入射境界水深 $h$                | 52.24m           |
|                      | 潮位 WL                     | 1.20m            |
|                      | 潮位加算後の最小水深 HLIMIT2        | 1.0m             |
|                      | 潮位加算後の平均全水深の最小値 HLIMIT3   | 0.01m            |
| 碎波限界流速波速比 $\gamma_b$ |                           | 0.64             |



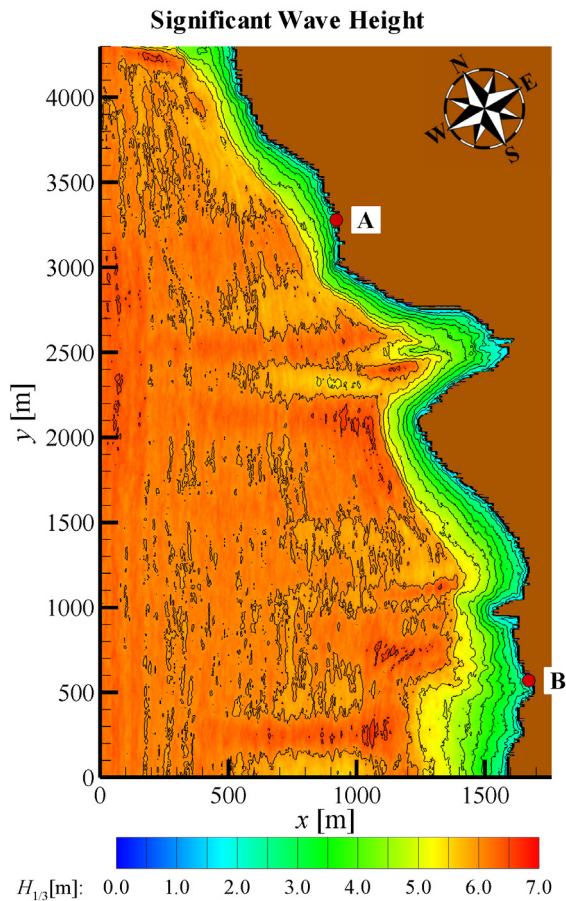


図-2 有義波高分布

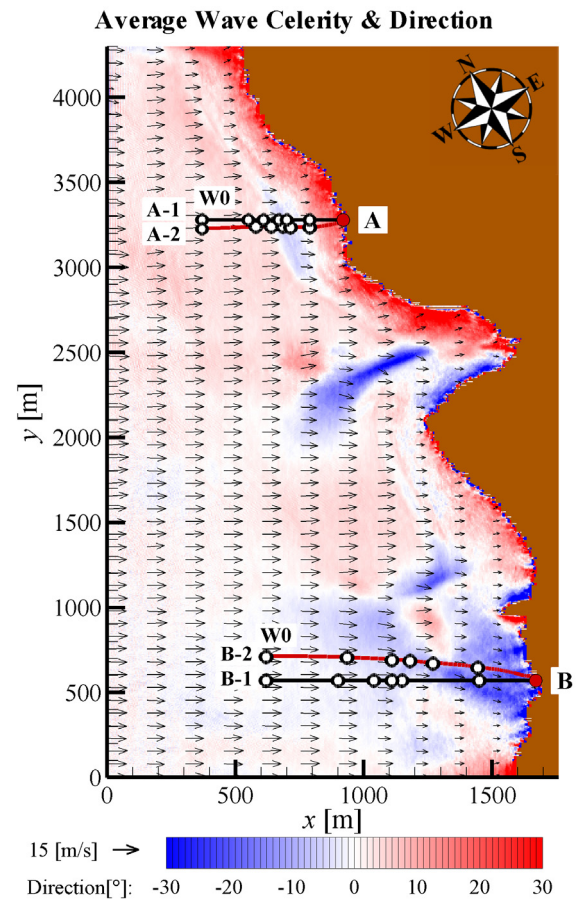


図-4 波速ベクトルおよび波向角

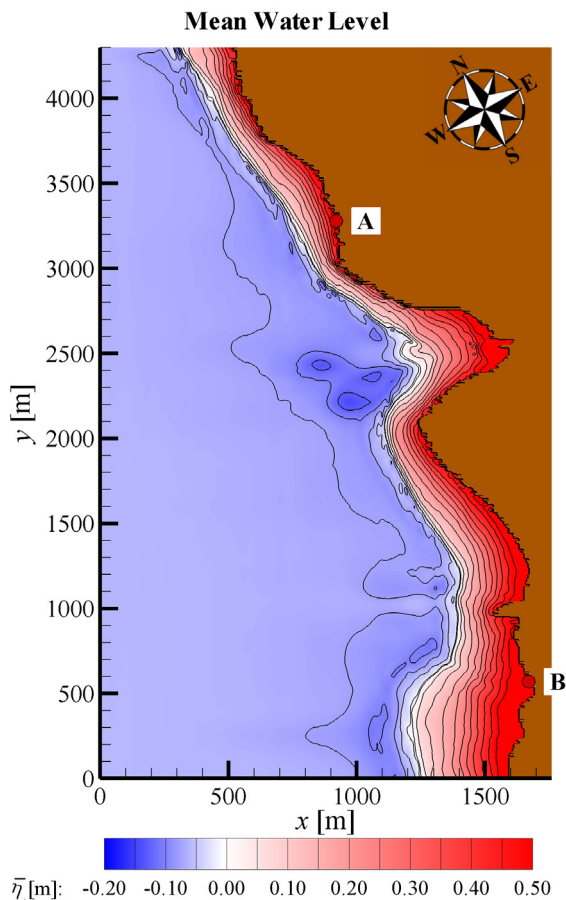


図-3 平均水位分布

計算では、対象域において過去に越波災害が発生したときの波浪条件を参考に入射波を設定した。不規則波のスペクトルタイプは修正Bretschneider・光易型とし、有義波高 $H_{1/3}=6.52\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=9.2\text{s}$ の不規則波を、図-1に示す造波境界 ( $x=0.0\text{m}$ ) から波向 $0^\circ$ の一方向波として入射させた。砕波判定指標 $\gamma_b$ は推奨値の0.64を用いた。また、試行計算結果に基づき、潮位換算後の最小水深HLIMIT2および平均全水深の最小値HLIMIT3を、それぞれ1.0mおよび0.01mとした。計算領域の外周には、境界での反射波を抑えるためのエネルギー吸収帯を設定した。ただし、海域と陸域の境界は完全反射とした。

## (2) 沖合から護岸までの波浪変形特性

図-2に、計算領域における有義波高 $H_{1/3}$ の空間分布を示す。同図から、水深が10mより浅い岸側では、砕波の影響により波高が急激に減衰しており、有義波高が入射波の約40%となっている。また、平均水位 $\bar{\eta}$ の空間分布を示す図-3から、有義波高が減衰している岸側の領域で平均水位が顕著に上昇し、wave setupが認められる。さらに、砕波点近傍の水深10mより沖側では、wave setupdownの発生もみられる。図-4は、微小振幅波理論を基に算出された波速ベクトルおよび平均波向角の空間分布である。なお、平均波向角は、x軸から反時計回りを正と定義している。同図から、岸側の海底地形の影響によって、浅海域では波速ベクトルが変化している様子がみられる。



表-2 CADMAS-SURFでの計算条件

|      |                 | Case A-1                                                           | Case A-2 | Case B-1 | Case B-2 |
|------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| 計算時間 | 時間間隔 $\Delta t$ | 0.002s, 0.005s                                                     |          |          |          |
|      | 終了時間            | 1700.0s                                                            |          |          |          |
| 計算領域 | 格子間隔            | $\Delta x=1.25\sim 1.75\text{m}$ , $\Delta z=0.34\sim 1.5\text{m}$ |          |          |          |
|      | 護岸天端高*          | EL+4.93m                                                           |          |          |          |
| 波浪条件 | 水深 $h$          | 35.38m                                                             | 35.37m   | 35.26m   | 34.57m   |
|      | 潮位 WL           | 1.20m                                                              | 1.20m    | 1.20m    | 1.20m    |
|      | 有義波高 $H_{1/3}$  | 6.23m                                                              | 6.28m    | 6.28m    | 6.30m    |
|      | 有義波周期 $T_{1/3}$ | 9.09s                                                              | 9.21s    | 9.23s    | 9.15s    |

\* ELは対象地域の標高基準海面

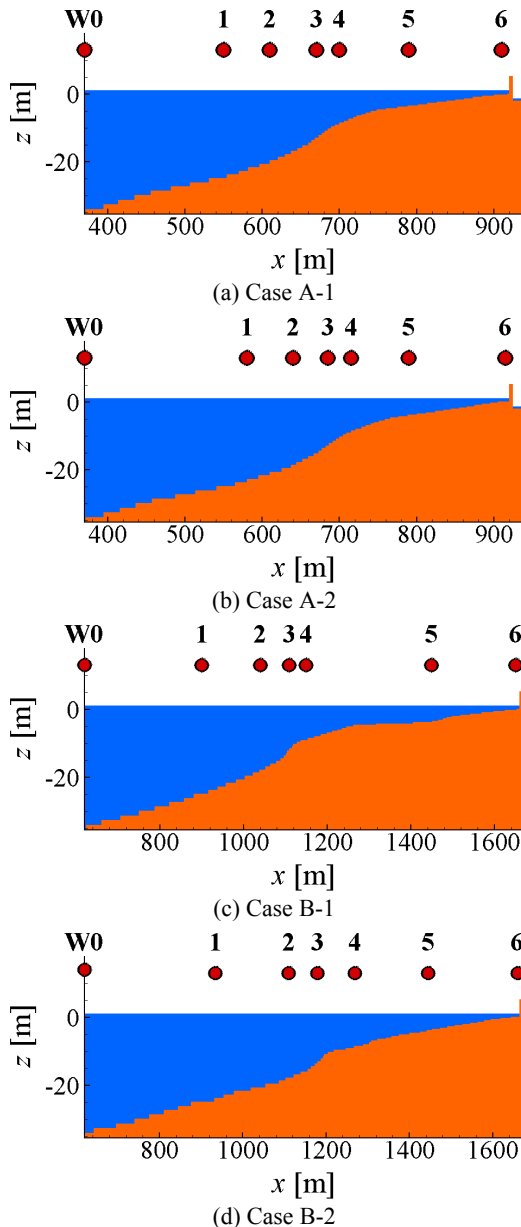


図-5 CADMAS-SURFによる計算領域

特に、 $x=1500\text{m}$ ,  $y=2500\text{m}$ 付近の入江において、入射波が大きく屈折していることがわかる。以上から、NOWT-PARIは沖合から岸側までの波の屈折や回折を含む波浪変形を適切に計算可能であると判断される。

## 2. 4. 3 CADMAS-SURFによる断面2次元計算

### (1) 計算条件の設定

CADMAS-SURFでは、台風の接近・通過時に越波被害を受けている2箇所に対し、NOWT-PARIの計算結果に基づく護岸周辺の越波計算を行った。対象地点を図-1に示す。同図から、Site A周辺は等深線が密となっており、水深が急変する地形である。一方、Site B周辺はSite Aよりも比較的緩やかな地形となっている。

図-4の平均波速分布に基づき、Site AおよびSite Bへの入射波向線を求めた結果を、同図中に赤線で図示する。両箇所とも、海底地形による屈折などの影響により、NOWT-PARIの造波境界に対して直角ではない波向線を有した波が入射していることがわかる。したがって、NOWT-PARIによる計算結果を断面2次元数値モデルCADMAS-SURFに接続する際には、護岸に入射する波向線を考慮して断面を設定する必要があると考えられる。

そこで、本計算では、護岸への入射波向線の影響について検討するため、造波境界に対して直角に断面を取ったCase A-1、Case B-1と、図-4で算出した入射波向線に応じて断面を取ったCase A-2、Case B-2について、それぞれ越波計算を行った。図-5は、各ケースにおける計算領域である。計算断面の海底地形は、NOWT-PARIで用いた海底地形データから該地点の水深を出力することによって作成した。計算開始地点は、全ケースにおいて地形変化が安定する水深 $h \approx 35\text{m}$ の地点とした。図-4および図-5に、CADMAS-SURFでの各断面の計算開始地点W0を示す。また、W1～W6は水面変動量の算出位置であり、各断面において水深が $h \approx 25, 20, 15, 10, 5\text{m}$ となる地点および護岸前面とした。また、現地護岸に基づき、天端高EL+4.93mの直立護岸を岸に設置した。

表-2に計算条件を示す。本計算では、NOWT-PARIで得られたW0での水面変動量 $\eta$ をフーリエ変換し、各周波数の振幅と位相角を算出した。そして、微小振幅波理論を用いて波の重ね合わせから、CADMAS-SURFの造波境界における水位 $\eta$ および流速 $u, w$ を算出した。NOWT-PARIで算出された水面変動量に対し、ゼロダウンクロス法を用いて造波地点W0における有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ を算出した結果を表-2に示す。

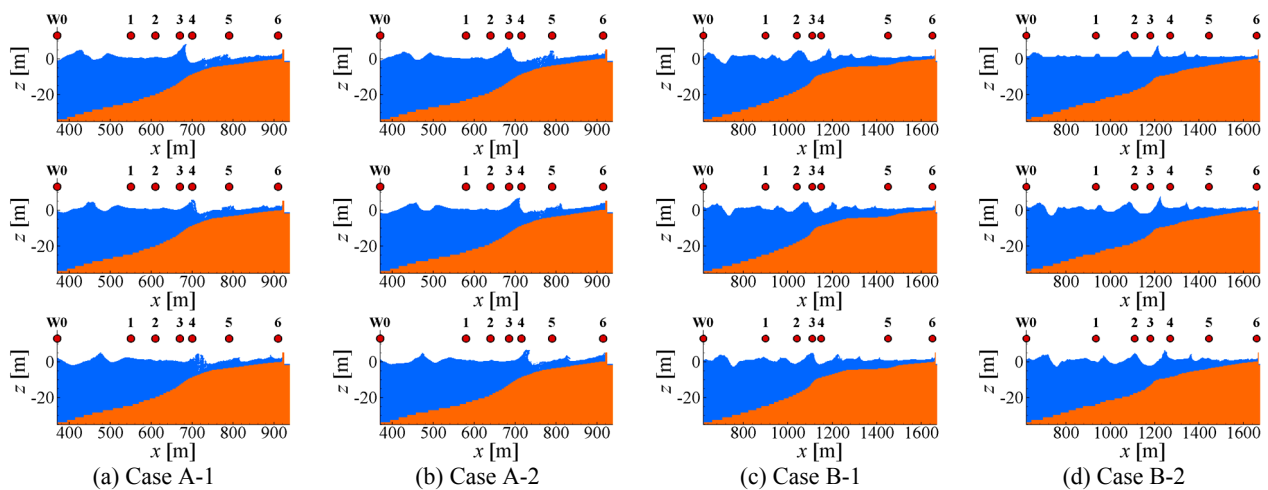


図-6 水面波形の空間変化

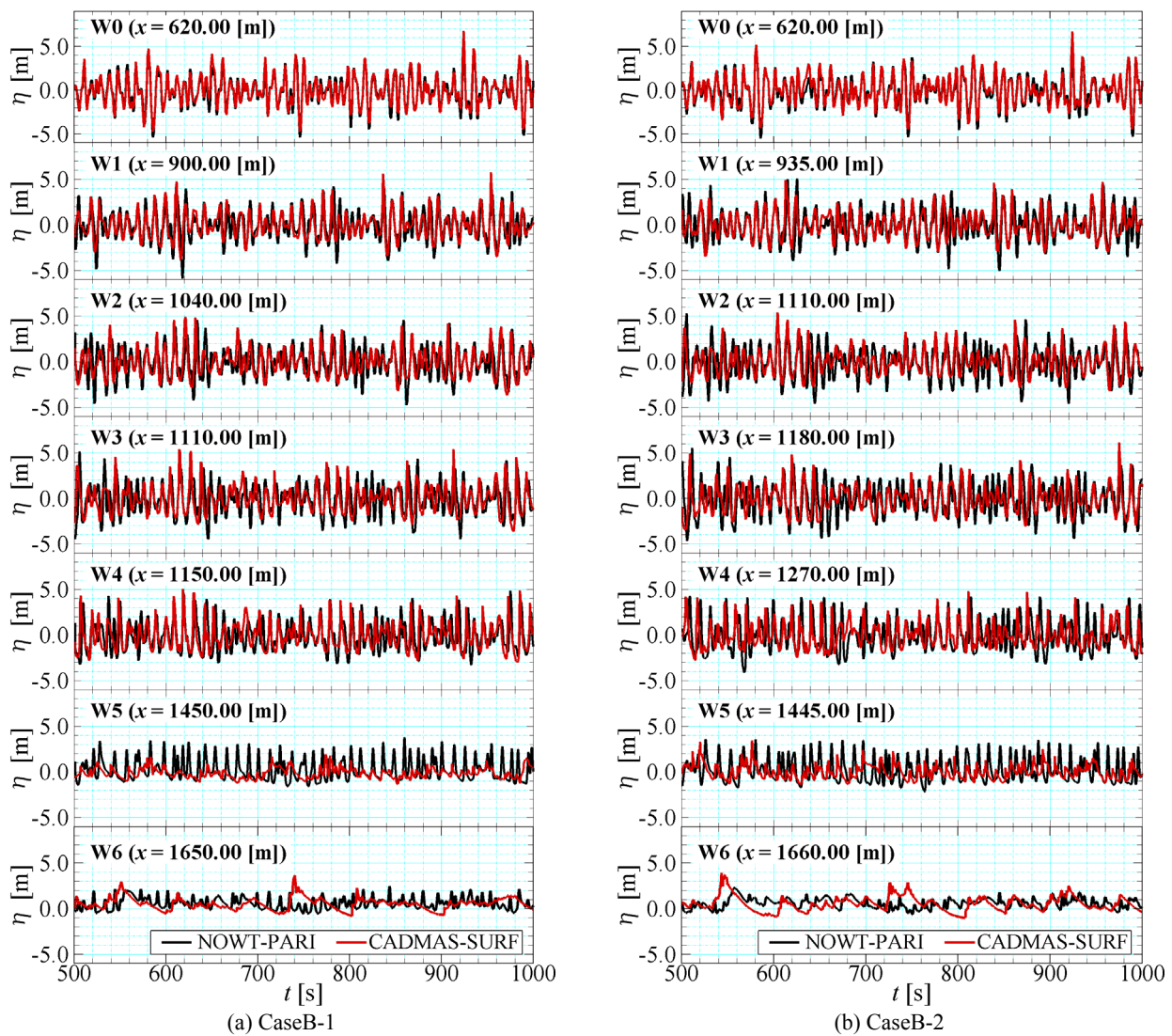


図-7 水位の時系列変化の比較

CADMAS-SURFでは、護岸背後に越波升を配置し、VOF関数 $F$  値の面積積分値から越波量 $Q$ の時系列変化を算出した。さらに、護岸到達第1波目から計算終了までを越波量の計測時間とし、累積越波量を計測時間で除することによって越波流量 $q$ を算出した。

## (2) 直立護岸の越波解析

水面波形の空間変化を図-6に例示する。全断面において、水深が10mから5mへ変化するW4とW5の間にて大規模な碎波が生じ、その後も碎波を繰り返しながら入射波が岸側へ進行している様子が確認できる。

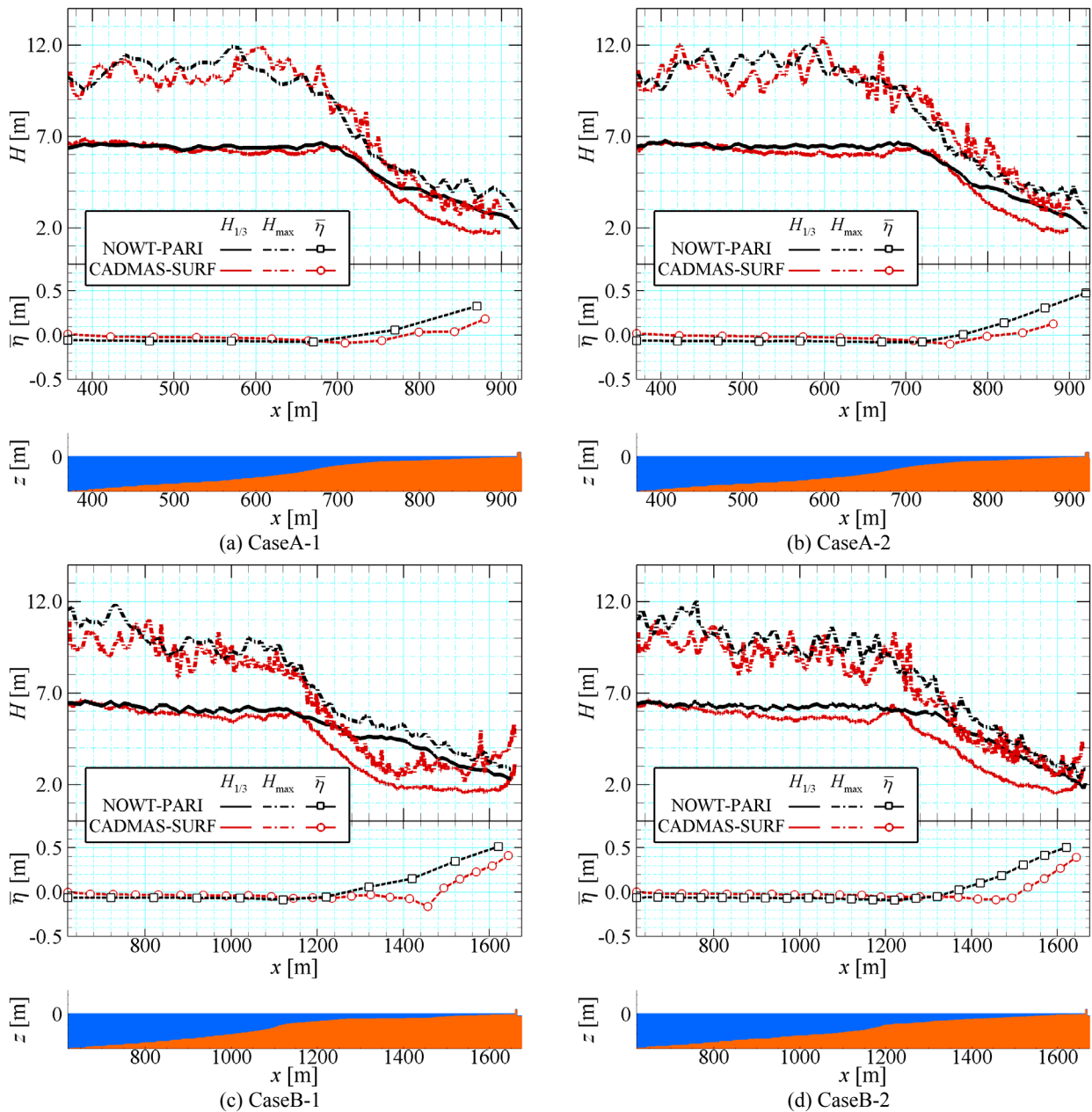


図-8 波高および平均水位分布の比較

図-7に、NOWT-PARIおよびCADMAS-SURFによって計算された水位 $\eta$ の時系列変化の比較を示す。なお、ここでは、Case B-1およびCase B-2の結果を例示する。図-7(a)および(b)から、計算開始地点W0において、CADMAS-SURFはNOWT-PARIの水面変動量をよく再現している。W0におけるNOWT-PARIとCADMAS-SURFの水位変動について相互相関係数を求めたところ、表-3に示すように、全ケースで0.95以上となった。したがって、CADMAS-SURFはNOWT-PARIの不規則な水面変動を高い精度で再現していることが定量的にも確認された。また、図-7から、Case B-1、Case B-2ともに、W4 ( $h \approx 10\text{m}$ )までは振幅および位相がほぼ一致している。しかし、NOWT-PARIにおいて波向角が $0^\circ$ ではなくなる水深10m以浅(W5およびW6)では、両者の水面変動量に大きな差異がみられる。これは、砕波と越波の影

表-3 造波開始地点の水位変動に対するNOWT-PARIとCADMAS-SURFの相互相関係数

| Case | 相互相関係数 |
|------|--------|
| A-1  | 0.967  |
| A-2  | 0.957  |
| B-1  | 0.970  |
| B-2  | 0.964  |

響によるものと考えられる。また、CADMAS-SURFでは、護岸前面において長周期波成分の卓越がみられる。

図-8に、NOWT-PARIとCADMAS-SURFでそれぞれ計算された波高および平均水位の空間分布の比較を示す。同図から、波向きを考慮したCase B-2は、断面地形の影響でCase B-1よりも砕波点が岸側になっていることが確認できる。また、全ケースとも、砕波後の有義波高 $H_{1/3}$ および平均水位 $\eta$ の空間分布に



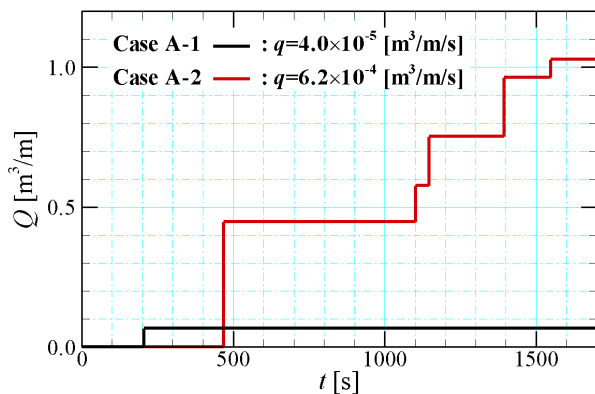


図-9 Site Aにおける越波量の時系列変化

| 表-4 各断面における越波流量 |                      |
|-----------------|----------------------|
| Case            | 越波流量 $q$ [m³/m/s]    |
| A-1             | $4.0 \times 10^{-5}$ |
| A-2             | $6.2 \times 10^{-4}$ |
| B-1             | $2.5 \times 10^{-4}$ |
| B-2             | $1.8 \times 10^{-3}$ |

差異が生じている。一方、Case A-2およびCase B-2において、NOWT-PARIとCADMAS-SURFで算出された最大波高 $H_{\max}$ はほぼ一致している。したがって、砕波後の有義波高および平均水位における差異は、図-7に例示したように、CADMAS-SURFにおいて、低周波成分が卓越したためと考えられる。長周期波の再現性に関する検討が数多く行われているNOWT-PARIに対し、CADMAS-SURFでは十分な検証が行われていないのが現状である。そのため、砕波後に生じる両者の差異については、今後、詳細に検討する必要がある。また、Case A-2およびCase B-2において、最大波高がよく一致しているのは、入射波向線を考慮したことにより、考慮しない場合よりも屈折の効果が反映できたためと推察される。以上から、NOWT-PARIの計算結果に基づいてCADMAS-SURFで護岸周辺の越波解析をする際には、砕波帯より沖に両モデルの連結地点を設定することが推奨される。

また、CADMAS-SURFでは断面2次元場における越波計算が可能である一方、公開されているNOWT-PARI Ver.4.6c7aでは越波・越流計算が行えない。そのため、砕波や屈折による波浪変形だけでなく、護岸背後への越流によって両者の計算結果に差異が生じると考えられる。したがって、沖合の波浪変形計算にはNOWT-PARIを、護岸周辺の越波計算にCADMAS-SURFを用いることにより、両モデルの特性を活かした越波解析が可能になると考えられる。

図-9は、CADMAS-SURFによって計算されたSite Aにおける越波量 $Q$ の時系列変化である。同図から、Case A-1に対し、Case A-2では繰り返し越波が生じている。また、入射波向線を考慮したCase A-2の方が越波流量が多くなったSite Aに対し、Site Bでは、表-4に示すように、Case B-1の方が越波流量が大きくなった。このことは、越波流量に及ぼす護岸への

入射波向線の影響が大きいことを示唆するものである。したがって、平面計算による波浪変形を反映させる方法のひとつとして、沖合から護岸への波向線に基づいた断面計算を行うことにより、より正確な越波計算が可能になると考えられる。

#### 2.4.4 おわりに

本研究では、断面2次元数値波動水路CADMAS-SURFと平面2次元ブシネスクモデルNOWT-PARIを用い、3次元数値モデルの代替として、沖合の波浪変化を考慮した護岸周辺の越波解析を試みた。その結果、平面および断面2次元モデルを有効活用することは、波の浅水変形・屈折・回折の影響のみならず、砕波・越波現象も良好に考慮することができる上、計算負荷が少ないため、越波対策護岸の耐波設計を行う際に役立つことを示した。

なお、本研究では、越波災害を受けたときの波浪条件に基づいて計算を行ったものの、CADMAS-SURFによる越波計算では、全ての計算結果において、当該地域での許容越波流量 ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ ) 以下となった。この要因として、波浪条件の設定など様々な要因が挙げられるが、台風時に生じる風の吹き寄せや吸い上げ効果が、NOWT-PARIおよびCADMAS-SURFでは直接考慮されていないことも大きいと考えられる。したがって、今後、台風時の越波解析を行う際には、風が越波量へ及ぼす影響を越波計算において評価することが重要であると考えている。

#### 参考文献

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリーNo.12，457 p，2001.
- 2) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF実務計算事例集，沿岸技術ライブラリーNo.30，306p.
- 3) 磯部雅彦，高橋重雄，余 錫平，榊山 勉，藤間功司，川崎浩司，蔣 勤，秋山 実，大山洋志：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—，海洋開発論文集，第15巻，pp. 321-326，1999.
- 4) 有川太郎，山田文則，秋山 実：3次元数値波動水槽における津波波力に対する適用性の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp. 46-50，2005.
- 5) 川崎浩司，袴田充哉：3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析，第54巻，海岸工学論文集，pp. 31-35，2007.
- 6) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，162 p，2002.
- 7) 平山克也，長谷川準三，長谷川巖：越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算，海岸工学論文集，第53巻，pp. 706-710.
- 8) 川崎浩司，菊 雅美，大久保陽介：越波対策護岸の実務耐波設計を目指した平面・断面2次元モデルの有効活用の試み，海洋開発論文集，第24 巻，pp. 1005-1010，2008.



## セッション1 ー長周期波の計算事例ー

### 1.1 高知県竜串湾の長周期波の検討（西村）

川崎：河川の効果は今回の計算にどのように入れていますか？

回答：今回の計算では河川の効果は入れていません。

川崎：実際では豪雨による河川の流れと長周期波によりクリーニング効果があるとの推測でしょうか？

回答：今回の計算は、豪雨を対象としていません。長周期波の影響域を知るために行いました。

宮里：計算における岸側境界の処理はどうなっていますか？

回答：岸側境界は反射境界とし、今回の計算では反射率 0.7 で設定しました。

宮里：長周期波の流れだけでなく平均水位からの流れもある可能性もあるということでもいいですか？

回答：そうです。

平山：平均水位上昇はどれくらい起こっていますか？

回答：だいたい 1cm くらいだと思います。なお、長周期波の波高は 10cm です。

### 1.2 傾斜堤タイプの長周期波対策施設の平面波浪場解析への適用（山下）

平山：長周期波の問題は、実際どのくらい反射するのか非常に興味がある。今回の秋田港による検討が上手くいけば他の港湾にも適用ができる。

西井：長い防波堤に対して何処に長周期波対策工を置くかを苦労していますが、図-2 に示した対策工この位置、長さはどのように決めたのですか？ 例えば、固有周期の規則波を計算してこの辺りで一番腹が起こっているからこの部分で消す効果があるなど、その部分を聞かせてください。

また、80 秒の矩形スペクトルで計算とのことですが、観測スペクトルでは計算していないのですか？ 矩形スペクトルでは一番はじめに応答するのが港形に応じた周波数帯ですが、意外ともっと下の 60 秒とか 50 秒のセカンドモードが出ると 1 万トン級の船では一番効くのでその点についてはどうされていますか？

回答：港口から入ってくる波が防波堤に当たって入射してくる過程で図-2 の位置に設置するのが最も効果的であると判断したものと思われます。長さに関しては、波除堤がいくつかあり、その間に設置する考えから位置関係が決まったものと思われます。

矩形スペクトル以外は検討していませんが、そのような現象があれば検討する価値はあると思います。

小林：エネルギー吸収帯の設定について、同じ値を 3 格子に与えているのですか？

回答：真ん中の格子を 1.5 としたならば、両サイドの格子は 0.7 と設定するなど、強弱をつけて設定しました。

小林：exp 型の吸収帯は試されていないのですか？波長と吸収帯の幅で反射率が決められますが、その関係が分かれば今後の長周期波の消波に役に立つと思います。

回答：ご参考にさせていただきます。

平山：格子間隔も大きく、あまり沢山の格子でスポンジ層を表現できない制約と厚みが再現出来ていないと斜め入射だと効き過ぎると言う問題の中で、工夫をすることによって3格子でそれを表現できないだろうかという取り組みの検討であると認識しています。

### 1.3 長周期波を含む現地観測データを活用した港内静穏度の推定（小野）

平山：海岸の反射率をスポンジ層と透水層で検討され、最終的には高次スポンジ層を採用したのですが、透水層では海岸をどの様にモデル化したのですか？消波工ブロックであれば、ブロックの空隙率や係数、代表径などを設定しますが、海岸の場合は何がそれらに対応するのでしょうか？

回答：ボアで遡上の計算を行い、その過程で海底摩擦とボアとで上がって、それが戻って反射になると言うイメージです。

平山：ボアの所の乱流抵抗が計算されているということですか？

回答：その通りです。

宮里：風波と長周期でスポンジ層の設定は同じですか？

現地観測との比較で長周期波のスペクトルは合っていますが、短周期波のスペクトルは落ちてきているように見えますがなぜですか？

回答：風波と長周期でスポンジ層の設定は別々に計算しています。

風波のスペクトルですが、ピーク値は合っていると認識しています。高周波数が落ちているのは、港内で発生する風波等の影響があると考えられる。

宮里：風波の計算でエネルギー平衡方程式から修正ブシネスクモデルへの接続は、どの様に接続しているのですか？

回答：長周期波の接続は矩形型のスペクトルを入力しています。風波については、波高と波向を出力し、それを境界条件として入力しました。

春尾：実際に船が揺れる条件は、台風が直撃するような時ですか？うねりだけが港内に入ってくる時ですか？

回答：今回対象とした港では、長周期波で船が揺れることはないということです。今回の検討で実際に長周期波では影響は見られなかったもので、もう少し検討が必要と考えます。

平山：S1-2 は水路により検証によりスポンジ層を設定、今回の検討では反射率 0.9 になる様に高次スポンジ層を設定しており、いずれも観測結果との比較を行い良い結果を得ており非常に興味深い結果と認識しています。

是非この様な検討を今後もさらにすすめる必要があると認識しています。

### 1.4 港内における長周期波対策（平石）

西井：長周期波対策で防波堤背後に航路が近い場合は先端部分にスリットケーソンを置く場合が多いと思いますが、沖防波堤では斜め方向から波が当たる場合もあると思いますが、その場合スリットは直方向と同じように効果があるのですか？

回答：基本的にスリットは斜め方向からのものはダメで、スリット面を丸にするようお願いしており、今すでにスリットの柱自体が円になりつつあります。スリットケーソンは全方向位にするべきと思っています。

国栖：長周期波に対して、すて石とブロックではどれくらい効果が違いますか？

回答：過去に論文を書いており、基本的には2トンや4トンの消波ブロックでは結果は同じなりました。あまり大きなブロックでは反射面を作ってしまうので、小さな4トン以下のブロックではほぼ同じ効果が得られます。

## セッション2 ーブシネスクモデルとその周辺のモデル開発ー

### 2.1 うねりスペクトルにより造波される長周期波の計算例について（平山）

西井：この研究は、ナウファスの情報を入射境界とした場合に、ナウファスの情報から長周期波の影響を分離して利用するといった内容になるのですか？

風波と長周期波の波向を同時にどの様に持たせるかについて、何かアイデアはありますか？

回答：今回の計算では一方向波を対象としている。拘束波として出来る長周期波は、成分波の組み合わせだけあるので、全てを考慮して造波することは困難です。長周期うねりは、非常に一方向性に強くある周波数帯に偏ったスペクトルであり、波群性の長周期を考える際には取っ付き易いと考えています。

また、通常の静穏度解析にこの方法を適用するには、まだ検証が必要であると考えています。

### 2.2 「うねり性波浪」の解析と予測・監視システムの構築（松浦）

平石：図-6の結果には、波高割り増し率が入っているとのことですが、富山の波高割り増し率はこれでもまだまだ足りないということになりますが、今後もう少し割り増し率を上げる予定はありますか？

回答：富山については、割り増し率の検討よりも詳細なデータを利用して再計算する方向になると思います。また、時系列の誤差には、沿岸係数の誤差だけでなく沖波推算の誤差もあり、両者を勘案して決める必要があると考えます。

平山：沖側で与えるスペクトルについて、予測したものを与えることは難しいでしょうか？

回答：沖波の波浪推算から周波数スペクトルから $\gamma$ を決めることにはなりますが、かなりのケースを用意する必要があるのでここでは $\gamma=1$ としました。

### 2.3 スペクトル法とブシネスクモデルの接続方法に関する検討（岩瀬）

小林：水深変化の効果を考慮した式(4)で、カッコ内の第2項目は波数をなめらかにするためにこの様な操作をしているのでしょうか？

回答：J方向の波数変化の効果を考慮するために積分しています。

小林：X 方向にも水深差がある場合はこの影響を考慮した方がいいのでしょうか？

回答：造波境界は X 方向に関して変化しませんので、今回の場合は考慮しておりません。

## 2.4 平面・断面 2 次元連結モデルの有効活用に関する一検討（川崎）

宮里：ブシネスクから CADMAS-SURF へ接続する時に CADMAS-SURF の入射条件はどのようにきめているのですか？

CADMAS-SURF は複雑な断面形状での越波を調べることができますが、断面に対して斜め方向の場合の考え方はどうなりますか？

回答：斜め入射に関してはかなり難しいと考えています。斜め入射は 3D の平面計算で上手く出来るかもしれませんが、現時点ではまだまだなので、その様な検討は必要であると考えます。

その地点での水位を F F T にかけて周波数毎に振幅と位相角を算出し、流速は微小振幅波理論で算出して重ね合わせ、マトリクスデータをして入射させています。

西井：要素法と VOF を接続部分でなかなか合わない様ですが、何か接続の工夫はありますか？

回答：今回の計算はブシネスクと CADMAS-SURF は別途計算していますので、同時に計算して接続をしているものではありません。2 段階の計算をやっています。

平石：越波量の計算結果で、A-1 と A-2 で越波量に差がでるのはなぜですか？

回答：A-1 では 1 回の越波であるのに対して波向線を考慮した A-2 では何回か越波が生じており、その差が結果の差として出ています。これは、碎波帯の影響、沖側地形の差や風を考慮していないことが考えられます。

平山：使用されたブシネスクモデルは遡上計算ができないモデルなので計算を安定にするにはご苦労されたと思いますが、不安定な中では高周波成分がかなり出ているのではないかと思います。

回答：リーフ上のサーフビートのメカニズムの解明に NOWT-PARI が利用でき、また CADMAS-SURF の観点から違いについて今後検討したいと考えています。