

平成 23 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 24 年 1 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
海洋研究領域 波浪研究チーム

---

# 目 次

---

1. はじめに .....	1
はじめに .....	1
「ビジネス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
「ビジネスモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」開催趣旨 .....	3
ビジネスモデル（公開版 NOWT-PARI）のリリース履歴 .....	4
2. NOWT-PARI の波浪研究・実務への適用事例 .....	7
2.1 消波工への斜め入射による波の反射率に関する考察 .....	7
（独）港湾空港技術研究所 海洋研究領域 波浪研究チーム チームリーダー 平山 克也	
2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大 .....	12
（独）港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究チーム 大久保 陽介	
2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例 .....	18
（株）三洋コンサルタント 西井 康浩	
2.4 NOWT-PARI ver. 4.6 における砕波減衰計算の改良 .....	24
（独）港湾空港技術研究所 海洋研究領域 波浪研究チーム 宇野 喜之	
2.5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題 .....	33
（独）港湾空港技術研究所 海洋研究領域 波浪研究チーム 加島 寛章	
3. ビジネス勉強会 10 回記念講演 .....	38
3.1 ビジネス勉強会の開催実績と今後の展望 .....	38
（独）港湾空港技術研究所 海洋研究領域 波浪研究チーム チームリーダー 平山 克也	
3.2 波浪変形計算の発展の歴史と今後の課題 .....	48
（財）沿岸技術研究センター 沿岸防災研究所長 京都大学名誉教授 高山 知司	
4. 勉強会の開催 .....	62

## 1. 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10回の節目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、各地方整備局等の技術職員を対象として昨年度から開始した港内静穏度解析研修に合わせて、NOWT-PARIのパッケージソフトウェアを開発し、活用がますます広がることが期待されています。

ところで、本勉強会資料の巻頭には、これまでと同様、本勉強会発足の経緯と成果、開催趣旨を掲載させていただきました。加えて本編では、今回を含む過去10回の開催実績を振り返るとともに、今後の在り方をご議論いただけるような話題提供を用意いたしました。この中でも述べますように、本勉強会は、NOWT-PARIプログラムの普及を図る段階から、これを改良・応用して、計算精度ならびに実務への適用性の向上を図る段階へと移行し、発足当時に掲げた当初の目標を達成しつつあります。その一方で、使用機会の増加につれて、計算負荷の削減や計算時間の短縮という視点も非常に重要となってきています。

本年度の勉強会でも、NOWT-PARIの研究・実務への適用例に関する5編の話題提供をいただけることになりました。さらに今回は、第10回を記念して、浅海域の波浪変形計算をはじめ、海岸工学の多岐にわたる分野に多大な功績を残され、現在もさまざまな場でご指導を頂戴している高山知司京都大学名誉教授にお越しいただき、波浪変形計算の発展の歴史と今後の課題についてご講演いただきます。折角の機会ですので、各セッションでの質疑やコーヒープレイクなどを通じ、活発な意見交換がなされることを期待しています。

なお今回は、造波境界上の水深と方向スペクトルの空間変化を考慮して多方向不規則波を造波できるように改良したバージョン：Ver46d8aをリリースさせていただきます。

最後に、本勉強会の趣旨にご賛同いただき、本日までご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 Ver4.6β」(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、バージョンアップ版が公開されている。

本勉強会は、平成 23 年度（平成 24 年 1 月 30 日開催）で第 10 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 Ver4.6β 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 Ver4.6β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碎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

- ・ 碎波計算に用いる流量振幅の定義の修正
- ・ 碎波計算に用いる渦動粘性係数の算定時刻の修正
- ・ 碎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)

平成 23 年 2 月 Ver4.6d7a 任意水深の造波境界に対応

- 沖側境界の水深変化に伴う波速変化を考慮した任意水深の造波境界へ対応
- calcmd (コントロールファイル名) を calcmd\_d へ変更し、パラメータ設定項目を再整理
- 計算格子のサイズ、数に応じソースコードを変更する手間を解消するため、depth (水深データファイル)、addfd (スポンジ層データファイル) のヘッダー部にこれらの情報を追加し、それぞれのファイル名を depth\_d, addfd\_d へ変更
- 流量 Flux (P, Q) から、同じ位置 (計算格子中央) 及び同時刻 (各計算ステップの x-sweep 及び y-sweep) の水平 2 成分流速を算出するサブルーチン: CALCUV において、y 方向流速 v を算定する IF ブロック文に bug が確認されたことへの対応 (デバッグ)

※uvavg に出力される計算結果が若干修正されるとともに、x 方向の砕波計算 (サブルーチン: CALBRK) の状況にも若干影響するものの、その程度は非常に小さいと思われる。

(誤)

```
if( mod(NSTEP,1) .eq. 1 )then
  V(I,J) = Q(I,J)/DDD          ! (x-dir) V(n)
else
  V(I,J) = ( Q(I,J)+QOLD(I,J) ) / 2.0D0 / DDD  ! (y-dir) V(n+1/2)
endif
```

(正)

```
if( mod(NSTEP,2) .eq. 1 )then  ! debug 2010/12/22
  V(I,J) = Q(I,J)/DDD          ! (x-dir) V(n)
else
  V(I,J) = ( Q(I,J)+QOLD(I,J) ) / 2.0D0 / DDD  ! (y-dir) V(n+1/2)
endif
```

平成 24 年 1 月 Ver4.6d8a 複数方向スペクトル造波の導入に伴うプログラム修正

- 外部入力する成分波リストファイル (spectdat.in) のフォーマット修正
    - 1 行目 : 各方向スペクトル (に対応する成分波リストセット) の数 : NRP
    - 2 行目以降 : 各方向スペクトルの成分波リストセット
- ヘッダーに記載の各方向スペクトルの諸元 (NS, IWTP, GAMMA) に続いて、各方

向スペクトルの位置（造波境界：I0 上の沿岸方向格子番号：J）を JRP として記載する。ただし、NRP=1 のとき（単一の方向スペクトルの場合）は記載する必要なし。

- 成分波リスト作成実行ファイル（mkspe.exe）の更新

外部出力する成分波リストファイル（spectdat.in）のフォーマット修正

複数方向スペクトル造波に対応するため、条件設定ファイル（cont.txt）に NRP を指定する項目を追加（詳細はマニュアル参照）。また、NRP>1 のとき、条件設定ファイルと合わせて、方向スペクトル番号と JRP との対応を規定するファイル（\*\*.pnt）が必要。

- 複数方向スペクトルを造波する場合（NRP>1 のとき）には、任意水深に対応した造波を自動（強制）選択する。

(H23.01.30 現在)

## 2.1 消波工に斜めに入射する波の反射とその再現

### 2.1 消波工に斜めに入射する波の反射率とその再現

#### 2.1.1 はじめに

港内静穏度を高める有効な対策の一つとして、防波堤の港内側や護岸前面に消波ブロックや捨石を積み、岸壁等への反射波の発生を抑制することが挙げられる。これによる荷役稼働率の向上効果は、高山法やブシネスクモデルを用いた港内波浪変形計算によって確認できるが、この際には、消波工による反射波の低減効果、すなわち反射率を正しく見積もることが肝要である。この反射率は一般に、断面実験等で得た過去の知見をもとに、風波・うねりに対しては0.3~0.5程度に設定されることが多い（例えば、合田，2008）。しかし、港内に設置されたこれらの消波工に対する波向きは、断面実験の状況とは異なり、消波工断面に対し斜めに入射することも少なくない。これは特に、長周期波対策として近年施工例が増えつつある透過型の幅広傾斜堤などのように、消波工幅が広く、入射角に応じて波が消波工内を通過する見かけ上の距離が大きく異なる場合には、反射波の低減効果に大きな違いが生じることも想定される。

そこで本研究では、消波工に対して斜め入射する一方向不規則波の反射率を平面模型実験により計測し、ブシネスク型の反射境界処理に反映させることを念頭に、それらの特性について考察した。なお、本稿は第58回海岸工学講演会にて発表された平山ら（2011）の研究からの抜粋、及び質疑を踏まえ追加検討した内容から構成されていることを予めご了解いただきたい。

#### 2.1.2 幅広消波工に直入射する波の反射率

山田ら（2005）は、縮尺1/50の断面模型実験を行い、直立壁前面のさまざまな透過層による港内長周期波（周期30~120s）の反射率の、相対消波工幅  $B/L$  ( $B$ は静水面での消波工幅、 $L$ は波長) に対する変化特性を示した。しかし、この風波・うねりに対する反射特性は未だ明らかではないため、次のような模型実験を実施した。

##### (1) 実験条件

対象断面は、16t型テトラポッド（代表径：約1.8m）で被覆された消波堤（以下、被覆直立堤）、

及び前面に16t型テトラポッドまたは捨石（代表径：0.2~0.7m程度）からなる傾斜式透過層を有する直立堤（以下、傾斜堤）とし、模型縮尺1/37で断面水路内または平面水槽内に設置した。これらの断面図を図-1に示す。

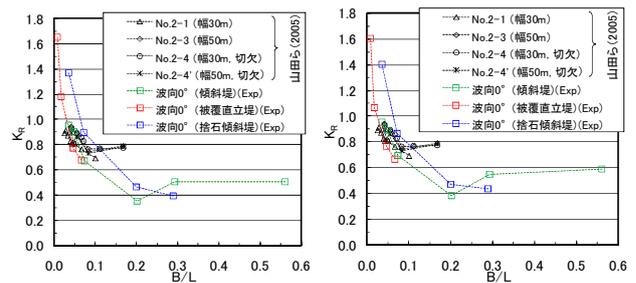
造波水深及び護岸前面水深は20.85m（模型量：0.564m）で一定とした。また、周期6，9，12sの風波に対しては一方向不規則波を造波し、波高は沖波波形勾配  $H_0'/L_0=0.008$  で一定となるように設定した。一方、周期30，45，60sの長周期波に対しては規則波を造波し、波高は0.5mで一定とした。ただし、平面水槽内に設置した被覆直立堤及び捨石傾斜堤に対しては、周期6sの風波及び45sの長周期波を省略する代わりに、後述するように波向き30，60°とした斜め入射波を追加した。これらの実験ケースをまとめて表-1に示す。

##### (2) 反射率の算定方法

消波工に直入射する一方向不規則波及び規則波の反射率は、2地点で同時に計測された水位変動を用いる合田ら（1976）の方法、及び1地点で同時に計測された水位・流速変動を用いるGuza et.al（1984）の方法を用い、2通りで算定した。ただし、不規則波に対しては入・反射波エネルギー比の平方根を、規則波に対しては入・反射波高の比をそれぞれ反射

表-1 幅広消波工による波の反射実験

対象断面	波向 [deg]	波形勾配	現地量			模型量			
			水深 [m]	波高 [m]	周期 [s]	水深 [cm]	波高 [cm]	周期 [s]	
消波ブロック傾斜堤 (16t型テトラポッド)	0	0.008	20.85	0.44	6	56.4	1.19	0.99	
				0.92	9		2.49	1.48	
				1.69	12		4.57	1.97	
				0.5	30		1.35	4.93	
				0.5	45		1.35	7.40	
				0.5	60		1.35	9.86	
消波ブロック被覆堤 (16t型テトラポッド)	0	0.008	20.85	0.44	6	56.4	1.19	0.99	
				-	-		-	-	
				1.69	12		4.57	1.97	
	捨石傾斜堤	60	0.008	20.85	0.5	30	56.4	1.35	4.93
					0.5	45		1.35	7.40
					0.5	60		1.35	9.86



(a) 合田ら(1976)の方法 (b) Guza et.al (1984)の方法  
図-2 幅広消波工に直入射する波の反射率の変化

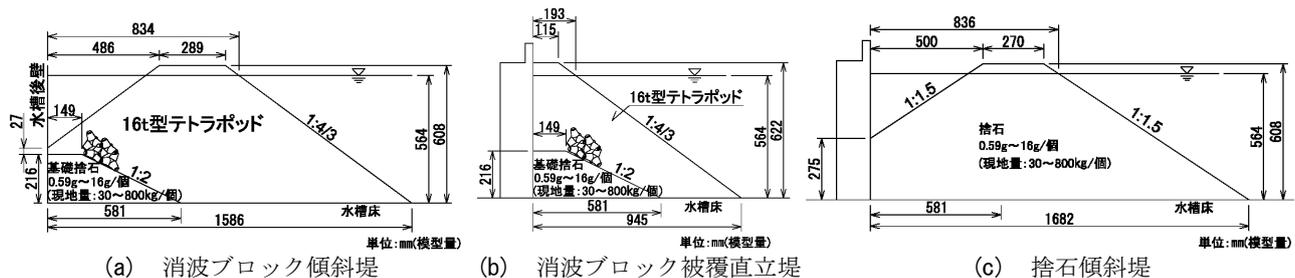


図-1 幅広消波工断面（縮尺：1/37）

## 2.1 消波工に斜めに入射する波の反射とその再現

率として整理した。

### (3) 実験結果

山田ら (2005) による捨石式透過構造に対する実験結果と合わせ、各断面による風波・うねり、長周期波の反射率を図-2に示す。まず、図-2(a)(b)の比較より、線形理論に基づくGuza et.al (1984)の方法は、少なくとも本実験では、合田ら (1976)の方法と同様な結果を与えることを確認した。次に、16t型テトラポッドを用いた被覆堤及び傾斜堤による反射率は $B/L=0.04\sim 0.07$ 付近でよく一致しており、これらは風波・うねり、長周期波の区別なく $B/L$ と良い相関を示すほか、捨石傾斜堤による反射率に比べ、同じ $B/L$ に対して少し小さくなるのがわかる。なお、平面水槽内の十分小さな $B/L$ に対して、両方法で算定された反射率がともに1を超えている原因は定かではないが、これらのケースでは造波板から消波工までの距離が1波長に満たないことによる影響も少なくないと考えられる。また、 $B/L$ の増加とともに反射率が単調減少する傾向がみられるのは $B/L=0.2\sim 0.3$ 付近までであった。

一方、山田ら (2005) による結果との比較より、 $B/L=0.03\sim 0.08$ 付近ではいずれの消波工断面による反射率は互いによく一致している。しかし、 $B/L=0.1\sim 0.2$ 付近では、山田ら (2005) による結果は本実験と同様、 $B/L$ の増加による反射率の低下がみられない。この原因として著者らは、後述するように、入射波の波高と消波材(捨石、消波ブロック)の代表径との関係により、消波工内の空隙で波が乱される効果よりも、消波材自体で波が反射する現象が卓越するようになるためではないかと考えている。

### 2.1.3 幅広消波工による斜め波の反射率

ここでは、図-1に示す幅広消波工のうち、被覆直立堤及び捨石傾斜堤に対して斜めに入射する風波・うねり、長周期波の反射特性について、平面実験を行い検討した。

#### (1) 実験条件

延長370mの被覆直立堤及び捨石傾斜堤を模型縮尺1/37で平面水槽内に設置した。入反射波分離解析を行うために設置した波高計及び流速計と合わせ、これらの配置を図-3に示す。なお、対象とした実験ケースは、表-1のうち波向き30、60度としたものである。

#### (2) 反射率の算定方法

各波向きに対する反射率は、一方向不規則波、規則波ともに、反射面近傍の入・反射波がそれぞれ卓越する水域あるいは入・反射波共存域で計測した水位・流速変動をもとに、以下に示す2通りの方法で算定した。さらに、それらの結果の違いについて検討した。なお、風波の平面波浪場における反射率の

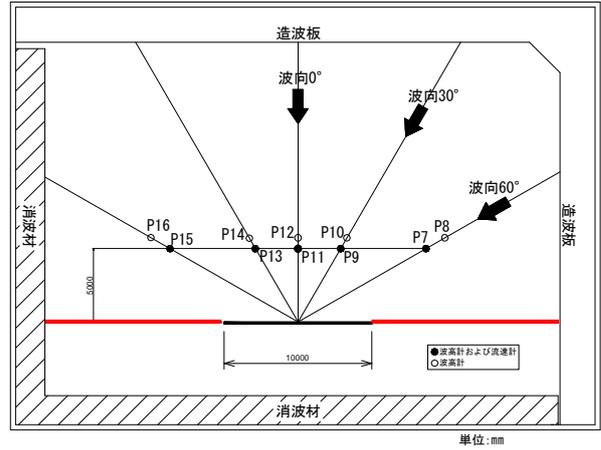


図-3 平面実験に用いた模型及び計測機器の配置 (縮尺: 1/37) ※赤線は無限防波堤設定時(数値計算)

推定には、方向スペクトル解析に基づく方法を利用できる。しかし本研究では、合わせて長周期波の斜め反射率を計測するとともに、入・反射波の方向分散性は小さいと考えられるため、断面2次元水路における方法を平面波浪場に拡張して用いた。

#### a) 合田ら(1976)の方法

図-3のうち、入射波あるいは反射波の波向きに沿って配置した合計2対の波高計(波向き30度ではP9, 10及びP13, 14, 波向き60度ではP7, 8及びP15, 16)による同時波形記録を用いて、合田ら(1976)の方法による入反射波分離解析を実施し、それぞれ入射波あるいは反射波のみのエネルギーまたは波高を抽出して、風波、長周期波の反射率を算定した。

#### b) 平面へ拡張したGuza et.al. (1984)の方法

図-3のうち、入反射波共存域の同一地点に設置した波高計及び水平2成分流速計(波向き30度ではP13)による同時波形記録を用いて、平面波浪場へ拡張したGuza et.al (1984)の方法による入反射波分離解析を実施した。ただし、このような水域が反射面のごく近傍に限られる波向き60度の場合は、入射波あるいは反射波が卓越する水域で得られた水位・流速の同時波形記録(P7あるいはP15)よりそれぞれ入射波あるいは反射波のみを分離した。

拡張したGuza et.al (1984)の方法では、図-4のような変数に対し微小振幅波理論に従う関係式を整理して、新たに式(1)、(2)を導いた。ここで、 $\eta_i$ 、 $\eta_r$ は入射波及び反射波の水位変動、 $\alpha$ は反射面法線に対する斜め波の入射角、 $\theta$ は水平2成分流速計におけるx座標の正の向きと入射波向きがなす角である。なお、これらが森屋ら(1994)の式と異なる点は、入射角と反射角が等しいと仮定するとともに、実際の実験状況に合わせるため、水平2成分流速計の座標軸を反射面に対して任意に回転することに対応したことである。ただし、平面実験では常に $\theta=0$ となるよう、波向きに応じて流速計の座標を回転させた。

$$\eta_i = \frac{\eta \sin(2\alpha - \theta) + \sqrt{h/g} v}{\sin(2\alpha - \theta) - \sin \theta} = \frac{\eta \cos(2\alpha - \theta) + \sqrt{h/g} u}{\cos(2\alpha - \theta) + \cos \theta} \quad (1)$$

## 2.1 消波工に斜めに入射する波の反射とその再現

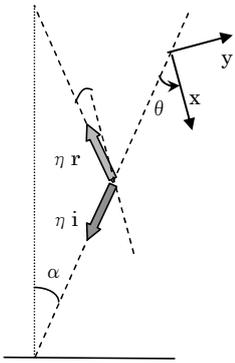
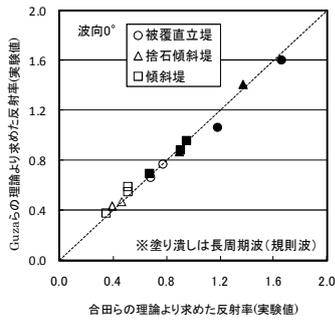
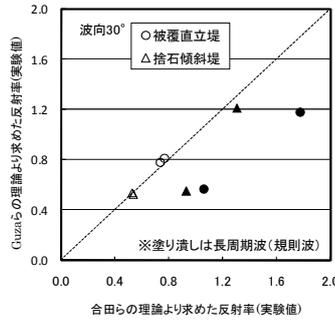


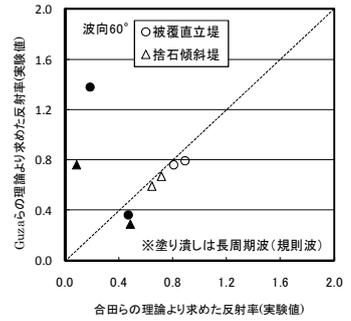
図-4 座標の定義



(a) 波向き0度



(b) 波向き30度



(c) 波向き60度

図-5 反射率の比較 (合田ら(1976), 平面へ拡張したGuza et al (1984)の方法)

$$\eta_r = -\frac{\eta_i \sin \theta + \sqrt{h/gv}}{\sin(2\alpha - \theta) - \sin \theta} = \frac{\eta_i \cos \theta - \sqrt{h/gu}}{\cos(2\alpha - \theta) + \cos \theta} \quad (2)$$

### c) 合田ら(1976)とGuza et. al. (1984)の方法の比較

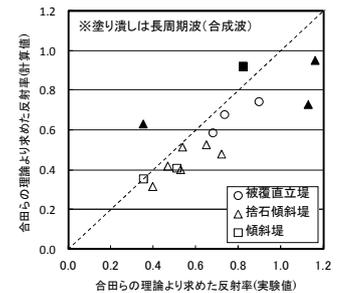
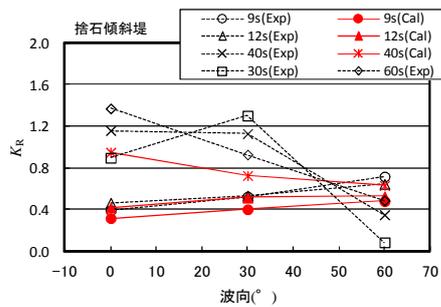
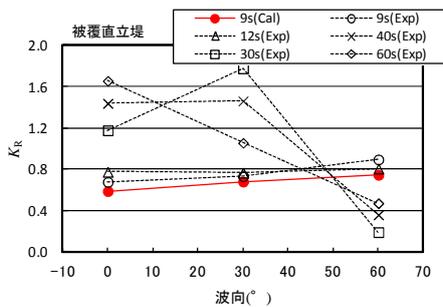
合田ら(1976)の方法及び拡張したGuza et al (1984)の方法で算定された、消波ブロック被覆直立堤及び捨石傾斜堤に対する斜め波の反射率について、予備検討で行った波向き0度の実験ケース(消波ブロック傾斜堤を含む)と合わせ、入射波向き毎に比較した結果を図-5に示す。このうち、規則波として造波した長周期波では反射率が1を超えるケースもみられるが、波向き0度の場合には、両方法による推定結果は非常によく一致している。一方、斜め波に対しては当初、適用が困難と思われた合田らの方法は、入・反射波がそれぞれ卓越する水域で個別に入・反射エネルギーを計測・分離することで、少なくとも風波・うねりに対して斜め波の反射率を推定できることを確認した。しかし、斜め入射する

長周期波に対して両方法による算定結果は必ずしも一致しない。これは、平面水槽内の多重反射のために、入・反射波がそれぞれ卓越する水域を特定できなかったためと思われる。

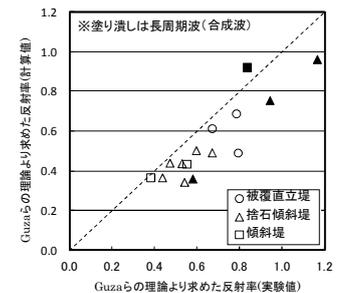
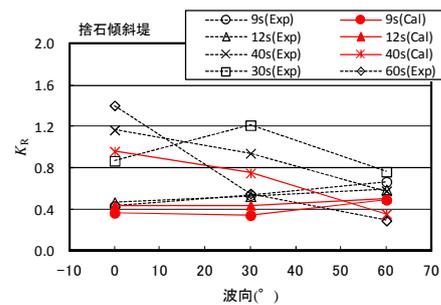
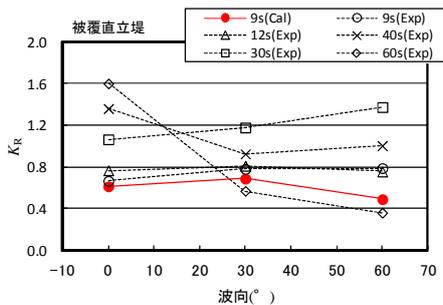
### (3) 実験結果

被覆直立堤及び捨石傾斜堤に対する風波・うねり及び長周期波の入射波向きによる反射率変化のうち、合田ら(1976)の方法で算定した結果を図-6に、拡張したGuza et al (1984)の方法で算定した結果を図-7に示す。なお、長周期波の反射率については、周期30~60sの範囲で直線スペクトルを仮定したとき、周期30, 60sの規則波に対する反射率を $K_{R-30s}$ ,  $K_{R-60s}$ とすると、平均的な反射率は次式で与えられるものと考え、合わせてプロットした。

$$T_{ave} = 1 / \left( \frac{1/30 + 1/60}{2} \right) \quad K_{R-ave} = \sqrt{\frac{K_{R-30s}^2 + K_{R-60s}^2}{2}} \quad (3)$$



(a) 消波ブロックで被覆された直立堤 (b) 前面に捨石傾斜堤を有する直立堤 (c) ブシネスクモデルの再現精度  
図-6 入射波向きによる反射率変化 (合田ら(1976)による方法) (有限長の防波堤)



(a) 消波ブロックで被覆された直立堤 (b) 前面に捨石傾斜堤を有する直立堤 (c) ブシネスクモデルの再現精度  
図-7 入射波向きによる反射率変化 (Guza et al (1984)による方法) (有限長の防波堤)

## 2.1 消波工に斜めに入射する波の反射とその再現

さらに、図には合わせて、後述するブシネスクモデルによる斜め波の反射率に関する再現計算結果を示した。

両方法で算定した、風波・うねりに対する被覆直立堤あるいは捨石傾斜堤の反射率は、予備検討の結果と同様、入射角度が大きくなるにつれて反射率が微増した。そこで、この原因として著者らは、波形勾配が小さい港内波 ( $H_0/L_0=0.008\sim 0.010$ ) は消波工法面で碎波しにくいことに加え、消波材の代表径 (16t型テトラポッド: 1.85m, 捨石: 0.56m) が入射波高 (周期9s: 0.92m, 周期12s: 1.69m) に比べ相対的に大きく、斜め入射による消波工法面の見かけの空隙面積の減少とも相まって、消波工内の空隙による波の散乱効果よりも、消波材自体による波の反射が卓越したためではないかと推測している。

一方、周期60sの規則波、及び直線スペクトルを仮定した代表長周期波 (式(3)より周期40sと表記) では、入射角度が大きくなるほど反射率が低下した。これは、当初の予想通り、長周期波で卓越する振動流が消波工内で乱され、見かけ上の消波工幅に応じた抵抗が作用したと考えられる。また、周期30sの規則波では、風波・うねり及び長周期波に対する反射率の変化傾向が混在しているようである。なおこの傾向は、特にGuza et.al (1984) の方法による算定結果においてより顕著にみられた。

### 2.1.4 ブシネスクモデルによる斜め反射波の再現

消波工内の波浪減衰過程をモデル化した透水層を有するブシネスクモデル (平山, 2006) を用いて、特に消波工による斜め波の反射特性に関する再現精

表-2 幅広消波工に対する透水層パラメータ

消波材の種類	16t型テトラポッド	捨石
積み方	乱積み	乱積み
$\alpha_0$	2100	1500
$\beta_0$	2.2	1.8
$\lambda_0$	0.5	0.4
$d$ [mm] ※	50	15

※平面実験の再現計算は模型量で実施

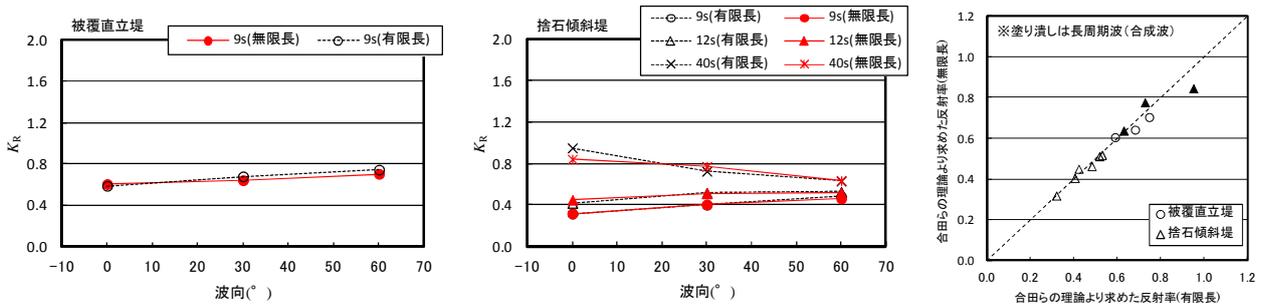
度を検証した。

#### (1) 計算条件

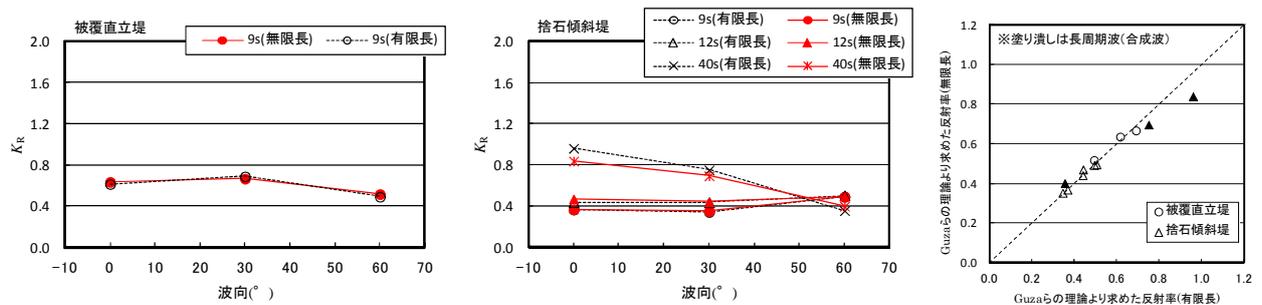
図-1 (b) (c) に示す消波工断面を対象として、消波材に応じて設定する透水層パラメータ ( $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ : 層流・乱流抵抗係数,  $\lambda_0$ : 代表空隙率,  $d$ : 消波材の代表径) を表-2のように与えた。ただし、2種類の消波材で構成される場合の透水層内パラメータは、今回は簡便のため、それぞれの層厚に応じ比例配分して与えるものとした。

計算ケースは、被覆直立堤に対しては周期9sの風波、捨石傾斜堤に対しては周期9, 12sの風波及び周期30~60sの範囲で直接スペクトルを有する長周期波群とし、それぞれ図-3に示す平面水槽と同様な計算領域を設定して、波向き0, 30, 60度の一方向不規則波に対する波浪変形計算を行った。なお、これらの再現計算は模型量で実施し、差分格子間隔は  $\Delta x=0.10m$  とした。

さらに、第58回海岸工学講演会にてご指摘いただいた防波堤端部からの回折散乱波が斜め波の反射率に与える影響を検討するために、図-3中の赤線部へ防波堤を延伸した無限長の防波堤を設定し、同様な波浪条件における反射率の計算結果を比較した。



(a) 消波ブロックで被覆された直立堤 (b) 前面に捨石傾斜堤を有する直立堤 (c) 防波堤長さの違いによる差異  
 図-8 入射波向きによる反射率変化 (合田ら (1976) による方法) (防波堤長が異なる計算結果の比較)



(a) 消波ブロックで被覆された直立堤 (b) 前面に捨石傾斜堤を有する直立堤 (c) 防波堤長さの違いによる差異  
 図-9 入射波向きによる反射率変化 (Guza et.al (1984) による方法) (防波堤長が異なる計算結果の比較)

## 2.1 消波工に斜めに入射する波の反射とその再現

### (2) 反射率の算定方法

平面実験と全く同様に、合田ら(1976)の方法及びGuza et.al(1984)の方法を用いて2通りの反射率を算定した。なお、再現計算に用いた計算領域では、式(1)、(2)に対し、波向き0、30度では $\theta=\alpha$ 、60度では $\theta=\alpha+\pi/2$ が成り立つ。

### (3) 計算結果

#### a) 有限長の防波堤による斜め波の反射率

前述の図-6(c)及び図-7(c)では、入射波向きに関係なく、平面実験で得られた消波工による斜め波の反射率に対し、再現計算で得られた結果をプロットした。長周期波の反射率は、特に合田ら(1976)の方法で算定した場合に多少のばらつきがみられ、風波の反射率は両方法とも若干小さめではあるが、全体的に、計算結果は実験結果を比較的良好に再現していることがわかる。

また、図-6(a)(b)及び図-7(a)(b)のうち、風波の波向きによる反射率の変化について、計算結果は、入射角とともに反射率が微増する傾向を、その値とともに比較的良好に再現している。一方、長周期波に対しては、逆に、入射角とともに反射率が減少する傾向をよく再現している。これらは、幅広消波工をモデル化した同じ幅の透水層によって、入射波の波高、周期、波向きに応じ、消波材自体で波が反射する状況や、入射角に応じた見かけ上の消波工幅の変化が適切に表現されたためと考えられる。

なお、平山ら(2011)に掲載した反射率の再現計算結果では、造波装置による吸収造波制御に対応するスポンジ層の設定に一部誤りがあり、有限防波堤の側方側を直立壁とみなして計算していた。本稿ではこれを修正して得られた反射率を掲載したが、幸いにも、この影響は反射率が若干小さめに算定される程度に留まっていることを確認した。すなわち、上述した実験結果に対する反射率の再現精度や変化傾向は、修正前の算定結果に対してもほぼそのまま考察し得るものであったことを付記しておく。

#### b) 無限長の防波堤による斜め波の反射率

第58回海岸工学講演会でのご指摘を踏まえ、図-3中の赤線で示すように防波堤を延長して、無限長の防波堤による斜め波の反射率変化を、透水層モデルを用いて別途算定することにより、防波堤端部からの回折散乱波が斜め波の反射率の推定精度に与える影響を検討した。

前述の図-6及び図-7と同様に、合田ら(1976)及びGuza et.al.(1984)の方法で算定された反射率及びその波向きによる変化について、平面実験と同じ有限長の防波堤(図-6,7の赤線を再掲)あるいは無限長の防波堤に対する数値計算結果を図-8及び図-9に示す。

入射波向きに関係なく、有限長の防波堤(消波工)を対象として透水層モデルで算定された斜め波の反射率に対し、無限長の防波堤に対する反射率をプロットした図-8(c)及び図-9(c)をみると、反射率の算定方法に係わらず両者はほぼ一致していること

がわかる。すなわち、少なくとも本研究で対象とした消波防波堤に対し透水層モデルで算定される斜め反射波を扱う限りにおいて、防波堤端部からの回折散乱波が斜め波の反射率の推定精度に与える影響は、無視し得る程度であることが確認された。

しかしながら、入射波向きによる反射率の変化を示した図-8(a)(b)及び図-9(a)(b)を詳しくみると、風波に比べ長周期波では、有限な防波堤端部からの回折散乱波の影響と思われる反射率の違いを確認することができる。したがって、入射波向きに応じた斜め波の反射率が比較的大きい場合(本研究の場合には概ね0.7以上)には、回折散乱波が反射波の推定精度に与える影響にも留意する必要があると思われる。

### 2.1.5 おわりに

本研究では、複数の消波工断面による斜め反射波を平面模型実験により計測し、2通りの入射波分離解析法を用いて、風波・うねり、長周期波の入射角による反射率の変化特性を明らかにするとともに、透水層による任意反射境界を備えたブシネスクモデルにより、これらの実験結果を比較的良好に再現できることを示した。

今後は、消波工に直入射する波の反射率のみを再現目標として設定されるスポンジ層を用いたブシネスクモデルにおいて、斜め反射波の再現精度を検証するとともに、これを用いた港内静穏度解析で算定される荷役稼働率への影響等についても検討を進める必要があると思われる。

### 参考文献

- 1) 合田良實：耐波工学，鹿島出版会，2008，430p.
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：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.248，1976，24p.
- 3) 平山克也：透水層を用いた任意反射境界処理法の高精度化と遡上計算への適用，海洋開発論文集，第22巻，2006，pp.241-246.
- 4) 平山克也・川内清光・宮里一郎：消波工に斜めに入射する波の反射率に関する一考察，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.67，No.2，2001，pp.L686-L690.
- 5) 森屋陽一・大福浩之・水口 優：斜め反射の場合の入・反射波の分離手法について，第49回年次学術講演会講演集，1994，pp.656-657.
- 6) 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，2005，pp.785-790.
- 7) Guza R.T., E.B.Thornton and R.A.Holman: Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19th ICCE, Houston, 1984, pp.708-723.

## 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

### 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

#### 2.2.1 はじめに

ケーソン式混成堤の耐波設計のうち、滑動破壊モードに関しては、力の釣合に基づく安定性照査以外に、設計供用期間中の波浪作用による滑動量をモンテカルロシミュレーション（以下、MCSと記述する）によって確率的に評価し、設計供用期間中の期待滑動量<sup>1)</sup>や累積滑動量が許容値を超える確率<sup>2)</sup>を評価する方法が提案されている。この方法は変形量を照査する方法であり、力の釣合による方法と比較して性能設計という観点からはより望ましい方法であるといえる。MCSの実行においては通常、防波堤前面の波高分布特性は設計供用期間中一定であると仮定される。しかしながら、ケーソンに一旦滑動が生じると、滑動していない隣接するケーソンから波浪が回り込むため、滑動したケーソンに対する波高が増大する傾向があることが指摘されている<sup>3)</sup>。

防波堤は通常、一定の復旧水準に照らし、滑動量が許容値以下であれば多少の変状が生じても港内を静穏に保つという性能を発揮していれば、そのままの状態に放置されると考えられるため、防波堤前面の波高分布特性を一定と仮定する方法は、破壊確率の評価において危険側の可能性がある。

したがって、本研究では、滑動したケーソンに波浪が回り込む現象を適切に考慮可能であるブシネスク方程式モデルを用いて滑動したケーソン前面における波高増大率の評価を行った。さらに、MCSにおいて、ケーソン式混成堤の変位に伴う波高増大を考慮した累積滑動量に関する破壊確率を評価し、波高増大を評価しない条件における破壊確率との比較を行った。

#### 2.2.2 波高増大率の評価

##### (1) 評価手法

長尾ら<sup>3)</sup>は、防波堤が滑動した後の堤体に作用する波高増大を検討するために、過去の被災事例から滑動量の空間自己相関解析を行い、被災特性を反映して被災後のケーソンをモデル化し、ブシネスク方程式モデルを用いて、堤体前面での波高を算定している。しかし、長尾ら<sup>3)</sup>の結果は、10函分の平均滑動量に対する波高増大率であり、滑動後のケーソンに作用する波高増大率を把握するには、特定の1函の滑動量とその前面波高の関係を調べる必要がある。また、上記の結果は1つの波浪条件にのみ検討した結果であり、滑動後のケーソン前面への波の回り込みは波の波長による影響が大きいと考えられるため、波浪条件を変えた条件についても検討する必要がある。そこで、本研究では、長尾ら<sup>3)</sup>と同様に、ブシネスク方程式モデル（NOWT-PARI Ver.4.6c7a）を用いて波浪変形計算を実施し、ケーソン1函分のみを滑動させて、入射波高に対する波高増大率を求めた。なお、本計算では、ケーソン1函分のみを滑動

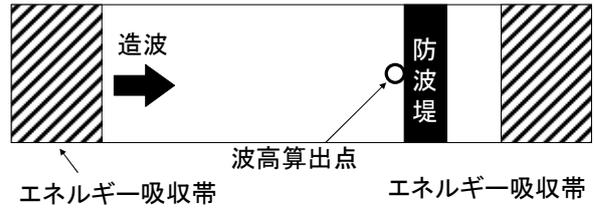


図-1 波高増大率算定の計算領域

表-1 計算条件

項目	値
波高	0.1m
周期	6s, 8s, 10s, 12s, 16s
波向	直入射 一方向波
水深	10m
計算時間間隔	0.02s
計算格子	0.25m
ケーソン諸元	L15m×B10m
ケーソン函数	9函（中央部1函のみ滑動）
滑動量	0.0m, 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1.0m

させているが、隣接函との滑動量の相対量を取り扱っている。

##### (2) 計算条件

本研究では、図-1に示すような長水路を計算対象とし、計算格子を0.25mとして、延長15mのケーソン9函の中央1函分を0.25m, 0.5m, 0.75m, 1.0m滑動させた場合をモデル化した。比較対象として、滑動しない条件（滑動量0.0m）での計算も実施した。計算条件は表-1に示すとおりであるが、現象を簡潔に取り扱うため、波高を0.1mとして、砕波等の影響が生じない条件とした。また、波高増大傾向には、滑動量に対する波長が関係するため、水深は一定とするが、周期を6s～16sまで変化させて、滑動させた中央1函のケーソンの前面波高を算出した。

##### (3) 計算結果

表-1の条件のもと、ブシネスク方程式モデルNOWT-PARIを用いて、滑動後のケーソン前面波高を算出した。計算結果の例として、周期10sとした場合のケーソン滑動量が0.00m～1.0mのケースにおける滑動ケーソン近傍の有義波高分布を図-2に示す。同図より、滑動しているケーソン前面では波高が高くなっていることがわかる。また、滑動量が大きいほど、波高の増大がより顕著にみられる。滑動しない条件での堤体前面波高に対する、滑動後の堤体前面波高を波高増大率として、それぞれのケースで波高増大率を算出した。各ケースの波高増大率と滑動量との関係を図-3に示す。

## 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

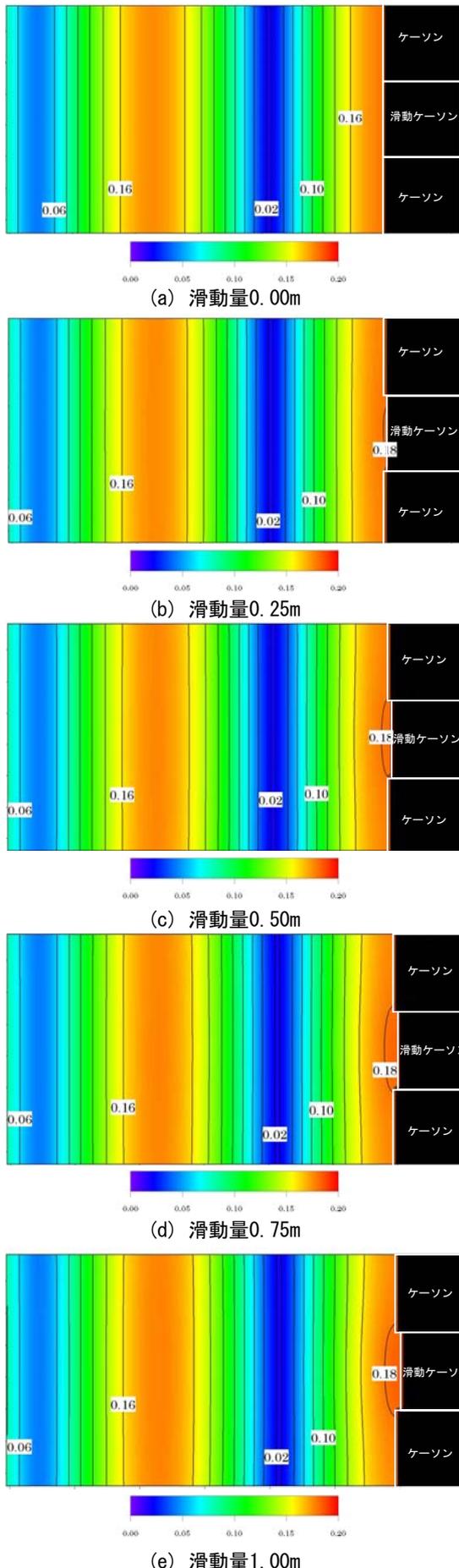


図-2 滑動ケーソン近傍の有義波高分布

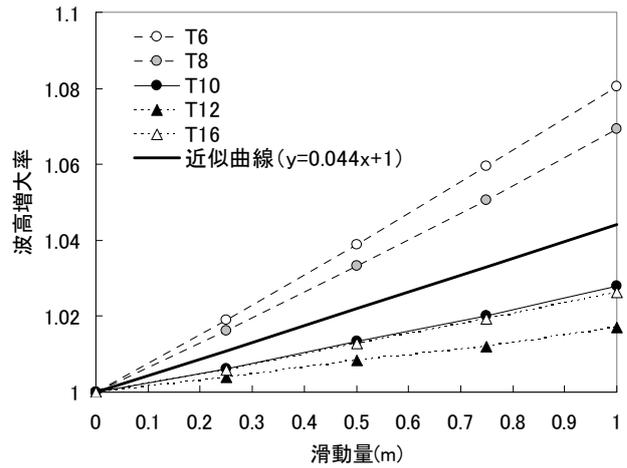


図-3 滑動量に対する波高増大率

図から、滑動量が大きくなれば波高増大率が大きくなることが確認できる。また、同じ滑動量であっても周期によって波高増大率は変わることがわかった。

これは、波浪が滑動していない堤体に到達した際、反射から水位が上昇し、滑動した堤体に波浪が回り込むと考えられ、その回り込みの傾向が波長によって異なることに起因していると考えられる。

本研究では、波高増大率の増加傾向を簡潔に取り扱うため、全ケースの平均値の近似曲線を設定し、その近似曲線を用いて、以降の滑動量解析を実施した。また、0.1mの代表波高による検討を実施しているが、砕波が生じない他の波高で、ほぼ同等の結果を確認している。なお、本検討では、周期に伴う波高増大率のばらつきや砕波、越波による影響、法線方向の波高分布等の影響は考慮しておらず、今後、さらなる研究を実施する必要がある。

### 2.2.3 滑動に関する破壊確率の評価

#### (1) MCS実行方法

MCSを用いた防波堤の累積滑動量に関する破壊確率<sup>2)</sup>の算定方法は以下の通りである。

まず、極値分布に従って沖波波高をサンプリングし、浅水変形、砕波変形を考慮して堤前位置での有義波高を求める。有義波高は波群の代表波高であるので、レーリー分布を適用することで個別波高を求める。この際に砕波の影響を考慮する。

次に、式(1)に示す滑動に関する運動方程式を右边が正の条件下において2回積分することにより1波毎の滑動量を算定する。これを1年間繰り返し、さらに設計供用期間繰り返すことにより累積滑動量を求める。これを滑動量許容値と比較し、破壊か安定かの判定を行う。以上の試行を繰り返すことにより破壊確率を評価する。

$$\left( \frac{W}{g} + M_a \right) \frac{d^2 x}{dt^2} = P_H - \mu(W' - P_V) \quad (1)$$

## 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

ここで、 $W$ ：堤体の空中重量(kN/m)、 $g$ ：重力加速度( $m/s^2$ )、 $M_a$ ：付加質量( $=1.0855\rho_0h'^2$ )(kg)、 $\rho_0$ ：海水の密度( $1.03t/m^3$ )、 $h'$ ：ケーソン底面から静水面までの高さ(m)、 $x$ ：ケーソンの滑動量(m)、 $P_H$ ：堤体に作用する水平波力(kN/m)、 $W'$ ：堤体の水中重量(kN/m)、 $P_U$ ：堤体に作用する揚圧力(kN/m)、 $\mu$ ：堤体底面と基礎との摩擦係数である。

水平波力および揚圧力の従う波力の時系列モデルとしては、谷本ほか<sup>4)</sup>が提案している三角形パルスに正弦波形を組み合わせた波形モデルを用いている。

また、高波は毎年1回来襲することとし、その継続時間は2時間としている<sup>2)</sup>。さらに、設計因子の従う確率分布は港湾基準<sup>5)</sup>に準じる。

MCSの実行において必要な乱数は長尾ほか<sup>6)</sup>の指摘を参考にメルセンヌ・ツイスタ<sup>7)</sup>とした。さらに、MCSにおいて十分な精度で50年間の累積滑動量に対する破壊確率を評価するためには $4 \times 10^5$ 回程度の試行回数が必要である<sup>8)</sup>ことから、計算負荷低減の観点から長尾<sup>8)</sup>の方法に従って破壊確率を評価した。

この方法の概要は次の通りである。

- ① 50年の累積滑動量に対する破壊確率は、通常50年間の累積値のシミュレーションを数多く試行して評価するが、この方法ではまず1年の滑動量の確率分布関数をMCSによって評価する(MCS1)。考慮する滑動量許容値に対する1年の滑動量の確率分布関数の値を読み取って1より減じれば1年の滑動量許容値に対する破壊確率が得られる。50年の累積滑動量に対する破壊確率は1年の滑動量の50回の累積値の確率分布関数を求めて同様の手順を踏むことで算出できるため、次に1年の確率分布関数から50回サンプリングして累積する試行を繰り返す(MCS2)ことにより50年の累積滑動量の確率分布関数を求める。
- ② MCS1では、収束効率を高める観点から重点サンプリング法<sup>9)</sup>を適用する。MCS1の試行回数は $2 \times 10^6$ 回とする。これは、通常の50年間の累積を求めるMCSとしては $4 \times 10^4$ 回に相当する試行回数であり、計算効率が良い。
- ③ MCS2では、1年の滑動量に対する確率分布関数から50回サンプリングするが、確率分布関数において滑動量がゼロの確率が非常に高いことに着目して50年間の滑動回数ごとにシミュレーションを行う。MCS2は3000回程度の試行回数で収束し、かつMCS2はMCS1と比較して計算負荷が非常に少ない。

### (2) 1年間の滑動量の確率分布関数

本研究では、滑動に伴う波高増大を考慮するため、波高増大率0, 3, 6, 9%の条件について、まず1年間の滑動量の確率分布関数を評価した(MCS1)。防波堤の耐波安定性の違いによる影響を把握するため、耐力作用比を0.6, 0.8, 1.0, 1.2の4種類の異なる耐波安定性を有する防波堤断面を対象として滑動量解析を実施した。その他の計算条件は、表-2に示

表-2 MCSの計算条件

項目	値			
沖波確率分布 (50年確率値)	Weibull分布 k=1.4, A=0.826, B=2.611 (4.80m, 12.0s)			
潮位	0.0m~0.5m			
設置水深	-11.5m			
天端高	4.0m			
耐力作用比	0.6	0.8	1.0	1.2
堤体幅 (m)	14.5	19.5	24.5	29.5
継続時間	2時間			
供用期間	50年間			
繰返し回数	MCS1 : 2,000,000回 MCS2 : 3,000回			

す通りである。

波高増大率別の1年間の滑動量の確率分布関数を図-4に示す。R/Sは耐力作用比、 $r$ は波高比であり、1.0~1.09の順に増大率0~9%である。滑動量は防波堤の破壊確率の議論で必要な範囲として0.01m以上の範囲で示している。波高増大率が高くなるほど滑動量に対する確率分布関数の値は上昇しており、その変化量は耐力作用比が小さいほど大きい。

本研究では50年間の累積滑動量に対する破壊確率の評価を対象としているが、いま波高増大率が1年間の滑動量に対する破壊確率に及ぼす影響をみると図-5のようになる。ここで、滑動量の許容値( $d_a$ )は0.1, 0.3, 0.5, 1mとしている。破壊確率は波高増大率に対して比例的に増加していることが分かる。いま現場で生じる可能性のある条件として、滑動量許容値0.5mの条件に着目すると、波高増大率としては3%程度に相当する。この破壊確率を波高増大率0%の初期状態と比較すると、8~11%程度の破壊確率の増加があることになる。破壊確率の増加は耐力作用比が小さいほど大きい。

波高増大率が高くなるほど滑動量に対する確率分布関数の値が上昇することと併せて、滑動が生じる可能性も増大する。図-6に、波高増大率別の1年間の滑動発生確率を示す。滑動発生確率も、波高増大率に対して比例的に増加していることが分かる。滑動量に対する破壊確率と同様に、波高増大率3%の条件に対する滑動確率を波高増大率0%の初期状態に対する滑動確率と比較すると、8~16%程度の滑動確率の増加となる。

以上のように、波高増大の影響として、同じ滑動量に対する滑動量の確率分布関数の値が増加する、すなわち大きな滑動が生じやすくなるとともに、滑動そのものが生じやすくなるといえる。その程度は波高増大率が3%の条件においても各々10%程度の増加であり、このことが50年間の累積滑動量に対する影響について次に検討する。

## 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

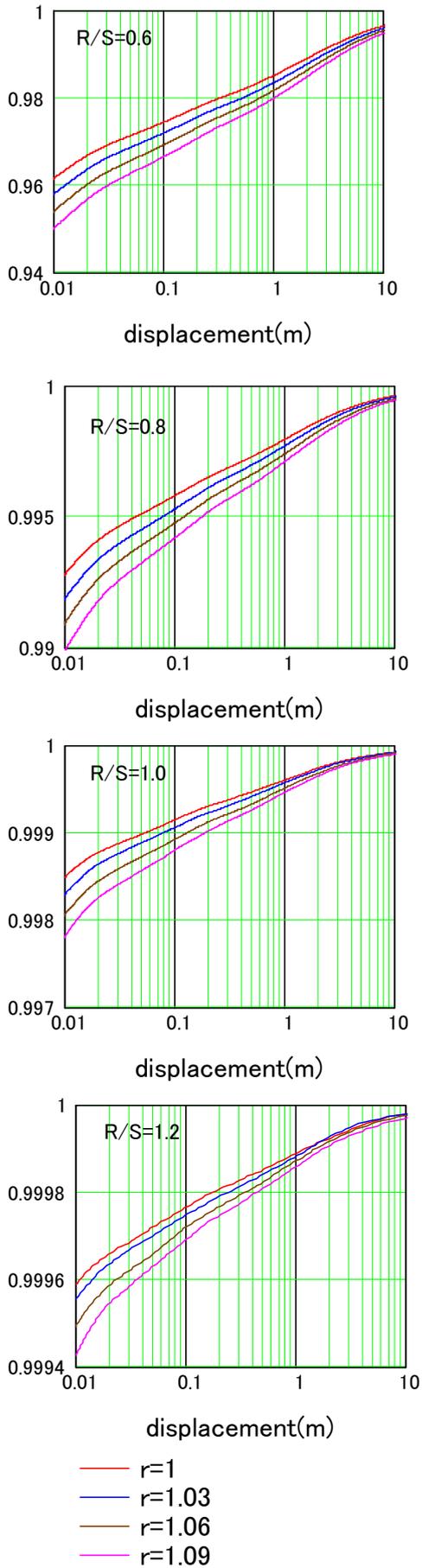


図-4 波高増大率別の1年間の滑動量の確率分布関数

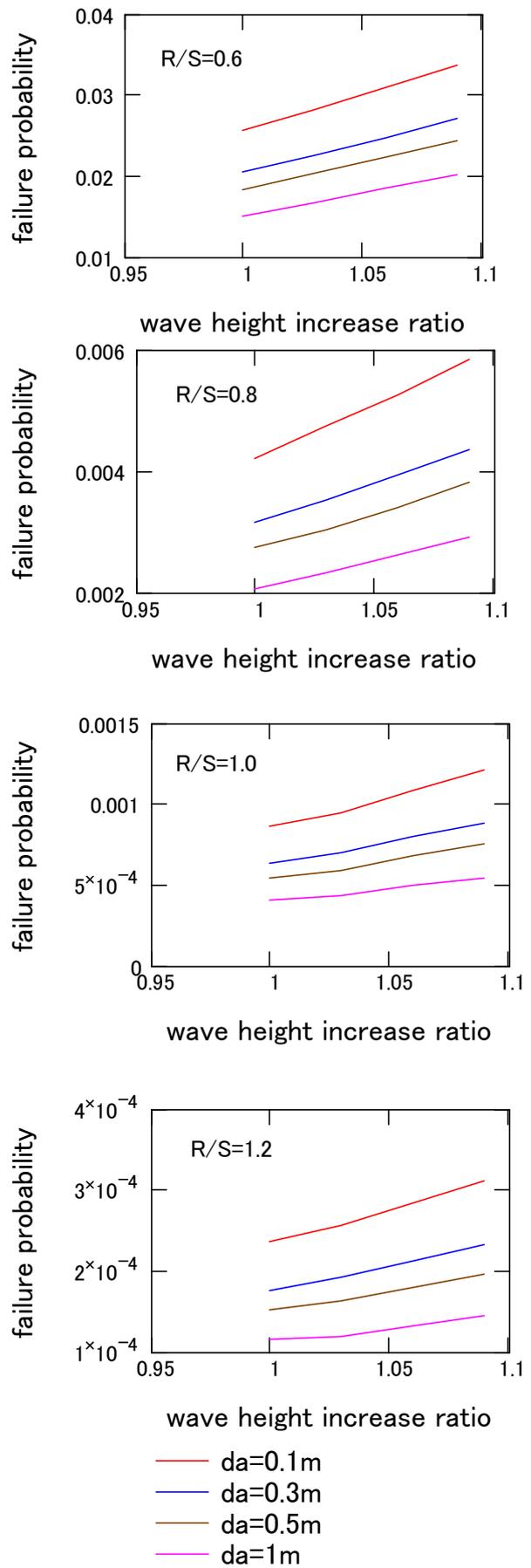


図-5 波高増大率別の1年間の滑動量に対する破壊確率

## 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

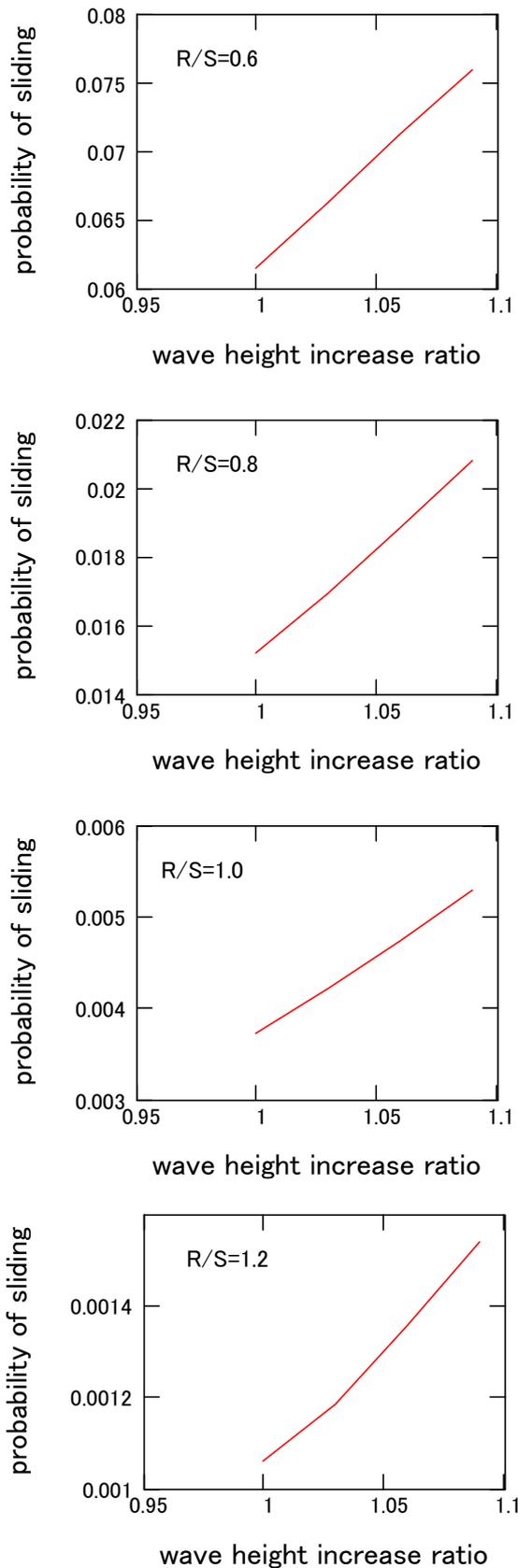


図-6 波高増大率別の1年間の滑動発生確率

### (3) 50年間の累積滑動量に対する破壊確率

次に1年間の滑動量の確率分布関数を用いて、50年間の累積滑動量を算出する。基本的な方法は滑動による波高増大を考慮しない場合<sup>8)</sup>と同様であるが、本研究では波高増大を考慮するため、サンプリングされた滑動量から波高増大率を評価し、次年にサンプリングされる滑動量を0~9%までの波高増大率に対応した滑動量の確率分布関数をもとに内挿によって評価する。なお、波高増大率として9%までの評価しか行っていないために波高増大率9%に相当する2m以上の累積滑動量が生じた場合は内挿を行わず波高増大率9%の値をそのまま適用するが、滑動量許容値として1m以内の範囲で検討を行うため結果には影響がない。さらに、比較のために波高増大を考慮しない条件についても破壊確率を評価した。

50年間の累積滑動量の確率分布関数を耐力作用比0.8および1.0の条件を例として図-7に示す。波高増大を考慮しない条件と比較して波高増大を考慮した条件では同じ滑動量に対する確率分布関数の値が小さくなっており、大きな滑動量の生じる確率が増加していることが分かる。

波高増大を考慮することにより累積滑動量に対する破壊確率がどの程度増加するのか、波高増大を考慮しない条件に対する比として示したものが図-8である。水平軸は波高増大を考慮しない場合の破壊確率、鉛直軸は波高増大を考慮した場合の値と考慮しない場合の値の比である。破壊確率は、滑動量許容値を0.1, 0.3, 0.5, 1mとした場合の値である。同図には、期待滑動量についても同様の条件で比の値を示している。

耐力作用比が0.6の条件では滑動量許容値によって結果にばらつきが大きいですが、それ以外の条件では波高増大を考慮すると、波高増大を考慮しない場合と比較して概ね5%程度の破壊確率の増加が認められる。耐力作用比が0.6の条件で傾向が異なるのは、安定性の低さのために破壊確率が非常に大きいためである。

期待滑動量についても、耐力作用比が0.6以外の条件では概ね5%程度の期待滑動量の増加が認められた。耐力作用比が0.6の条件では期待滑動量の増加は18%程度に達している。

以上の結果により、防波堤の維持管理手法として比較的にまめに修復を行わない場合などは、防波堤の重要度などに応じて波高増大による破壊確率の増加に関する考慮の必要性があることが示唆される。

### 2.2.4 まとめ

本研究では、防波堤の滑動に伴う波高増大が防波堤の累積滑動量に対する破壊確率に及ぼす影響について検討した。本研究により得られた主要な知見は以下の通りである。

## 2.2 防波堤の滑動に伴う波高増大

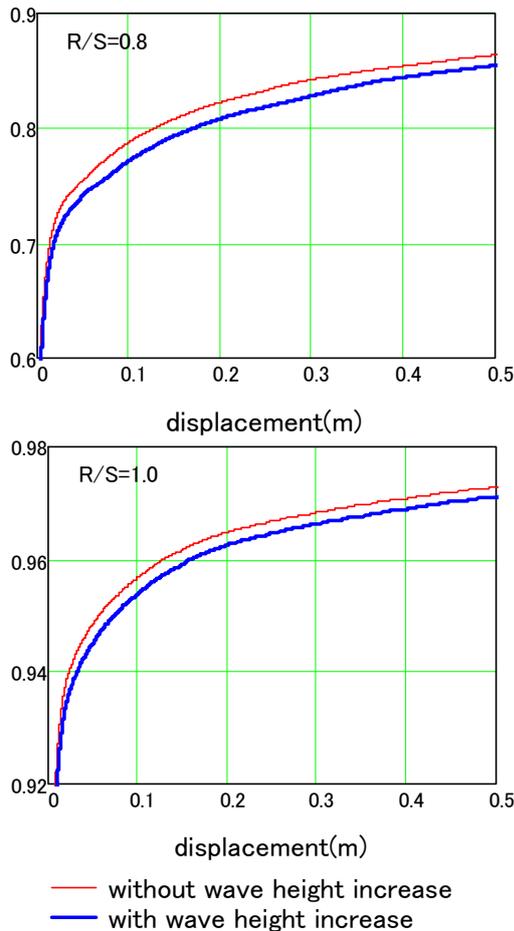


図-7 50年間の累積滑動確率分布関数の例

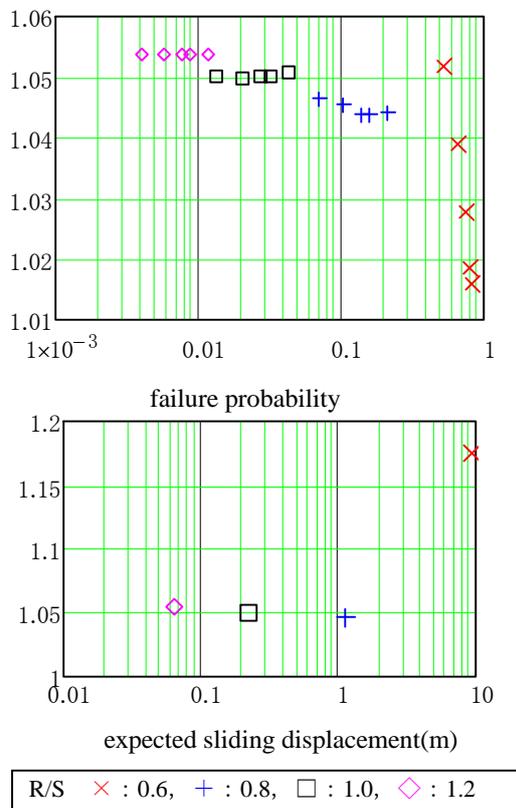


図-8 破壊確率比

- ① 滑動量の増加に比例して波高増大率が高くなる傾向が得られた。得られた結果をもとにして滑動量に対する波高増大率の近似式を得た。
- ② 滑動に伴い波高が増大すると、大きな滑動が生じやすくなるとともに、滑動が生じる可能性自体も高くなる。この両者の影響により、本研究の範囲では、波高増大を考慮することにより、波高増大を考慮しない場合と比較して、概ね5%程度の破壊確率および期待滑動量の増加が認められた。この傾向は、堤体の安定性の大小にかかわらず概ね一定であった。

なお、滑動量に対する波高増大率の関係はばらつきが大きい。本研究では両者の平均的な関係を用いて破壊確率を議論した。このため、今後はこのばらつきの程度が破壊確率に及ぼす影響について検討することが必要である。

### 参考文献

- 1) 下迫健一郎, 高橋重雄: 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第37巻第3号, pp.3-30, 1998.
- 2) 下迫健一郎・多田清富: 混成堤の性能照査型設計法における滑動量の許容値設定に関する検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.766-770, 2003.
- 3) 長尾 毅, 辻尾大樹, 熊谷健蔵: 防波堤の平均滑動量と波高増大に関する研究, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.975-980, 2010
- 4) 谷本勝利, 古川浩司, 中村廣昭: 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, Vol.43, pp.846-850, 1996.
- 5) 国土交通省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 6) 長尾 毅, 吉岡 健, 尾崎竜三: 防波堤の滑動量に関する破壊確率の算定精度向上に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.941-945, 2008
- 7) Matsumoto, M. and T. Nishimura: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations, 8, pp.3-30,1998.
- 8) 長尾 毅: 重点サンプリング法を用いたモンテカルロシミュレーションによる防波堤の累積滑動量に対する破壊確率評価の効率化に関する研究, 構造工学論文集 Vol.55A, pp.236-248, 2009
- 9) Harbitz, A.: An Efficient Sampling Method for Probability of Failure Calculation, Structural Safety, Vol.3, No.2, pp.109~115, 1986

## 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

### 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

#### 2.3.1 はじめに

本検討で対象とした航路と護岸は、熊本県天草市にある本渡瀬戸航路と知ヶ崎地区南側護岸である。当該航路（図-1）は、天草諸島の上島と下島に挟まれた狭隘な海峡に位置し、有明海の島原湾と八代海の不知火海間を延長約5kmで結んでいる。昔から西九州の交通の要所として栄え、長崎県や天草北岸から、八代海沿岸や鹿児島県への海上の近道として重要な役割を果たしてきた。しかし、当該航路では、浅水深への対応、海難事故の防止、大型船の航行可能などの諸問題に対応する課題を抱えていた。国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所のホームページによれば、昭和29年度より国の事業として航路整備事業が始まり、昭和55年度の工事をもって航路は水深-4.5m、幅員50mとして完成し、昭和56年度から直轄の保安全管理業務が実施されたとある。またその間、昭和49年7月に航路部分が国の開発保全航路の指定を受け、昭和54年5月に航路の保全のために護岸の補強が必要となり、陸域部分まで追加指定を受け、越波対策の護岸整備も実施されたとある。

しかし、知ヶ崎地区南側護岸では、現在でも潮位が高い時に航跡波による越波が局所的に発生し、これが当該地の地域住民の生活環境を悪化させる要因となっているという背景がある。

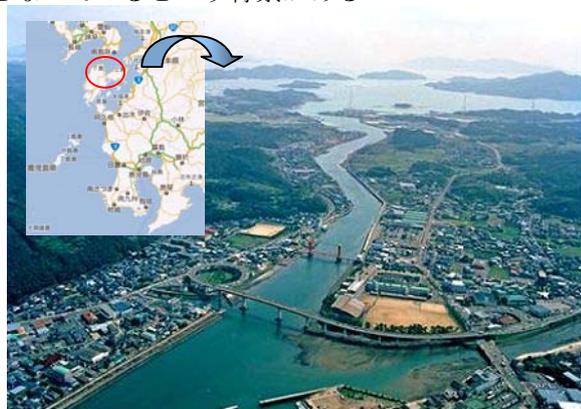


図-1 本渡瀬戸航路（出典：九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所HPおよびGoogle地図）

そこで本検討では、航跡波による越波特性を把握するため、現地で航跡波を観測すると同時に、波浪と同期をとった越波流量を直接測定し、さらに数値シミュレーションを用いて観測で得られた越波特性を再現し、精度を担保させた上で対策工の効果を予測することを目的とした。

#### 2.3.2 現地観測

本観測は、当該地において実際に船舶を走行させ、航跡波とそれに起因する越波流量を、同期をとって直接測ったものである。調査位置は、図-2に示す通りである。



図-2 調査対象域（出典：Google地図）

#### (1) 観測概要

波浪観測は、多機能型海象観測装置（以下、波浪計と称す）を航路付近に設置（図-3）し、年間で高潮位となる秋期の大潮期である平成23年9月28日～29日の満潮時（図-4）に実施した。なお、潮位に関しては、調査対象域内にある大門検潮所（図-2）のデータを活用した。

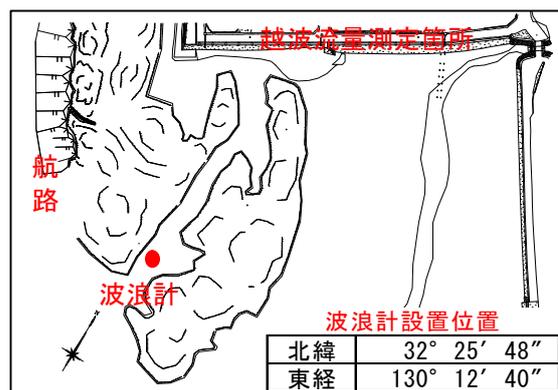


図-3 波浪計設置位置と越波流量測定箇所

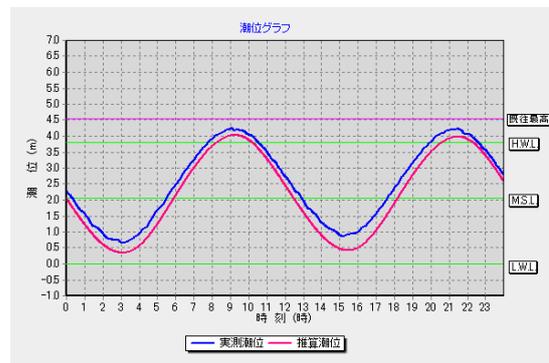


図-4 大門検潮所での潮位グラフ（平成23年9月28日）  
（出典：九州地方整備局気象・海象データHP）

#### (2) 観測方法

波浪観測は、航路内を国土交通省所有の港湾業務艇（かがしま）に条件を合わせて実際に航行してもらい、航路より伝播する航跡波を測定した。進行方

## 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

向は、対象護岸での越波量が多くなると想定される北向きとし、船速を変えた合計11ケースの測定を行った。表-1は、測定ケースを示す。また、図-5は、対象船舶と波浪観測の概略図を示す。

表-1 船舶走行の条件と測定ケース

ケース No.	船速 (kt)	潮位 (m)	観測日	備考
1	19	4.18	9月28日	行合船なし、静穏
2	22	4.21	9月28日	同上
3	12	4.17	9月28日	同上
4	13	4.13	9月28日	同上
5	12	4.05	9月28日	同上
6	12	4.01	9月28日	同上
7	20	3.80	9月28日	同上
8	12	4.16	9月29日	同上
9	19	4.22	9月29日	同上
10	9	4.24	9月29日	対象船舶と同時に南向きに漁船通過
11	15	4.28	9月29日	対象船舶通過後に北向きに漁船通過



図-5 対象船舶と航行方向 (右出典: Google地図)

越波流量測定は、図-6に示す越波採取器3基を用いて行った。越波採取器の設置状況は図-7に、設置位置は図-8に示す。なお、護岸上を越流する水塊を漏水させずに越波採取器に集水させるため、護岸と越波採取器の間に導水板を取り付けた。また、打上げ高さを測定するため、越波採取器の単管足場に基準標尺を取り付けた。

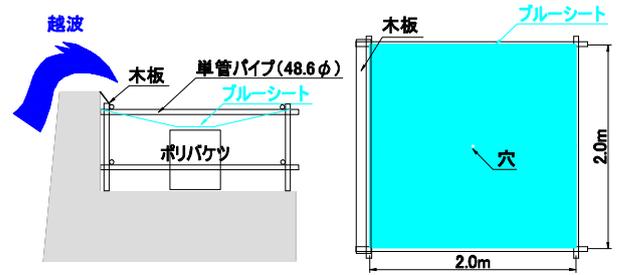


図-6 越波採取器概略図 (左: 断面図, 右平面図)



図-7 越波採取器の設置状況

2日目の越波採取器の設置位置は1日目の越波発生状況を考慮し、No.1については図-8にあるように東側へ移動させた。越波流量は、ケース毎またNo.毎にメスシリンダーを使い計測した。

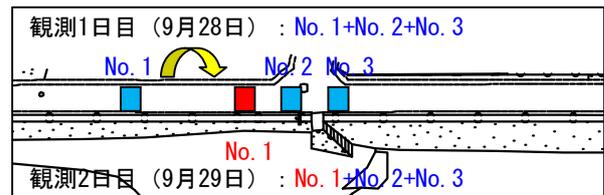


図-8 越波採取器の設置位置 (2日目変更)

### (3) 観測データの整理

図-9にあるような波高の時系列データに対して、観測ケース毎に波浪条件の整理を行った。観測データでは全てのケースで、図中の破線枠内にあるような航跡波の発生・伝播・到達の影響が明確に現れており、この時間帯のデータを対象に以下の要領で波高・周期・波向の整理を行った。

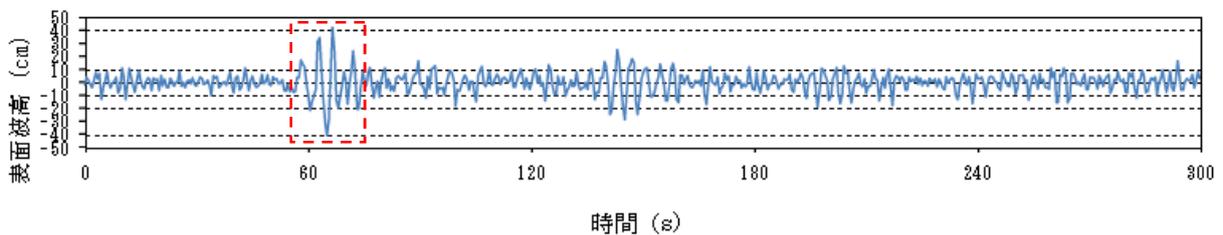


図-9 波浪の時系列データ (ケース8で例示)

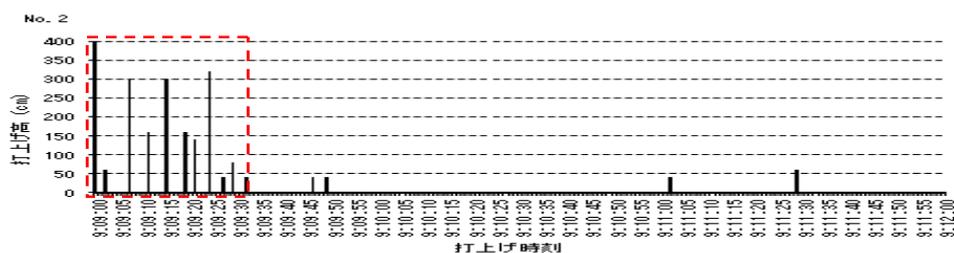


図-10 打上げ高の時系列データ (ケース8のNo. 2越波採取器で例示)

## 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

- ・ 波高は、航跡波の影響範囲内における最大波高をそのケースの代表波高とした。
- ・ 周期は、最大波高時の周期をそのケースの代表周期とした。
- ・ 波向は、航跡波の影響範囲内における平均波向きをそのケースの代表波向とした。

越波量については観測地点毎に整理し、図-6に示す越波採取器の幅および越波時間との関係から越波流量 ( $m^3/m/s$ ) の算定を行った。越波時間は、ビデオ画像を基に図-10に示す打上げ高状況の整理結果より、図中の破線枠内にあるように「航跡波による打上げが発生した時間から一定間隔で発生する打上げがなくなるまでの時間」と定義した。波高および越波量以外に、打上げ高でも同様に整理した。

### (4) 観測結果の考察

ここでは、最も越波量が多く、打上げも頻発していた越波採取器No.2の結果を対象に、船速、最大波高、潮位についてそれぞれ最大打上げ高、打上げ回数、越波量について、図-11~13のようにまとめた。

これによると、船速が高速 (19~22kt) に比べ中速 (12~13kt程度) のときの方が、波高、頻度および越波量とも大きくなるのが分かった。これは、対象船舶の造波特性、例えば中速で航行することにより喫水部分、つまり造波容量が大きくなり、結果として波高が大きくなったと考えられる。

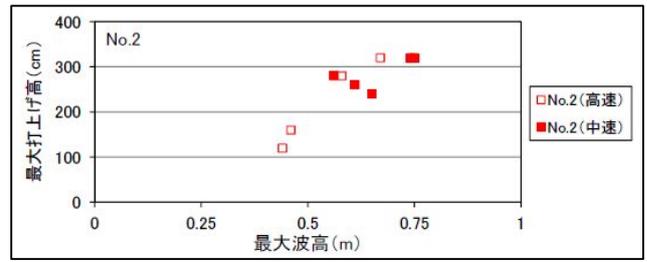


図-12(a) 最大波高と最大打上げ高

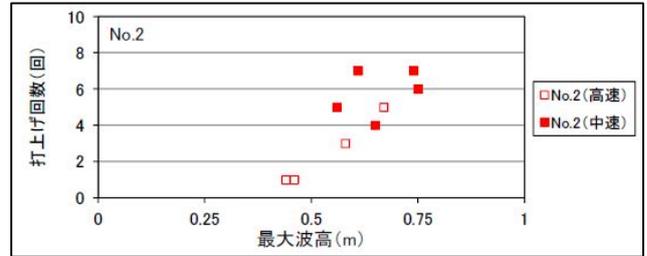


図-12(b) 最大波高と打上げ回数

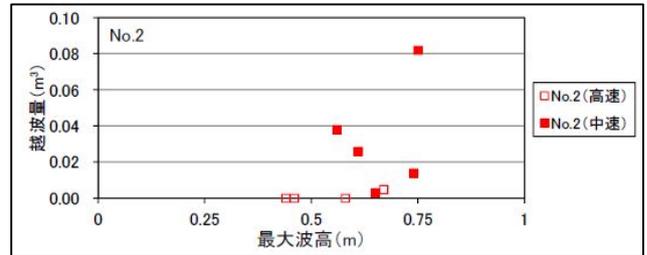


図-12(c) 最大波高と越波量

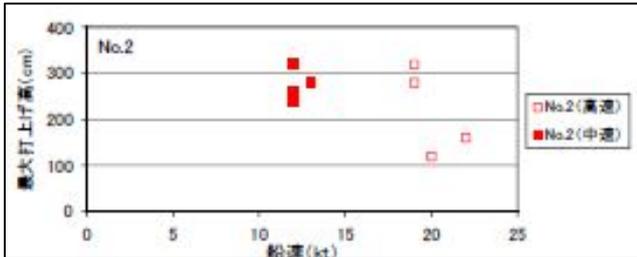


図-11(a) 船速と最大打上げ高

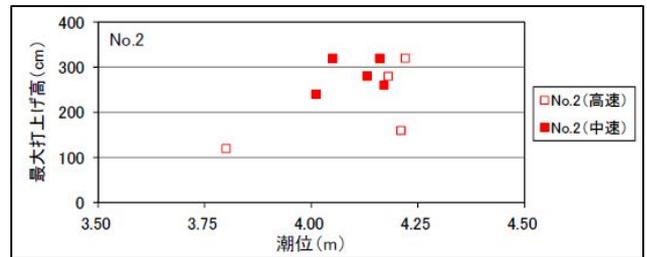


図-13(a) 潮位と最大打上げ高

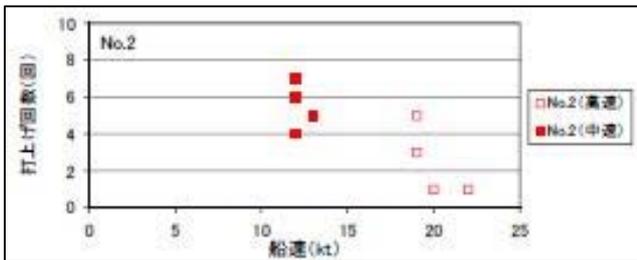


図-11(b) 船速と打上げ回数

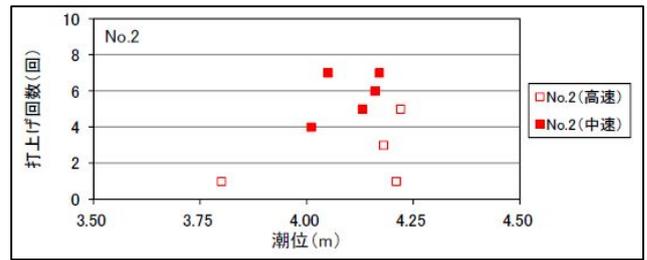


図-13(b) 潮位と打上げ回数

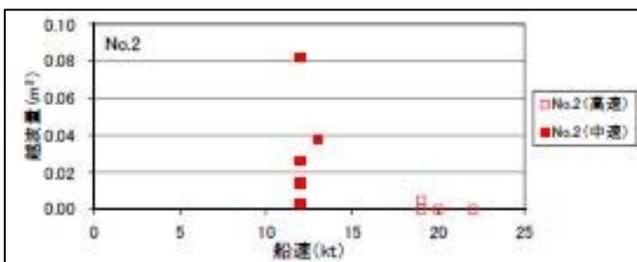


図-11(c) 船速と越波量

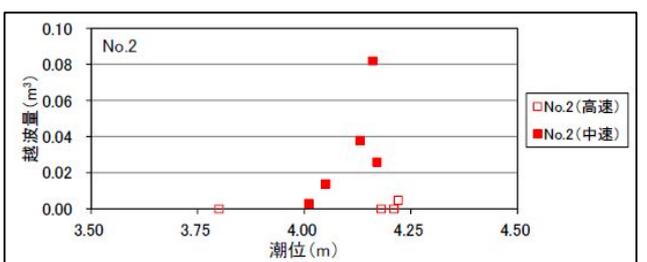


図-13(c) 潮位と越波量

## 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

### 2.3.3 数値解析

前節で検討した現地観測に対して、航跡波を造波諸元とする平面波浪場の検討を、NOWT-PARI (Ver.4.6c5a) の改良版を用いて再現し、対象護岸の越波量の算定を試みた。ここで用いたモデルは、平山ら (2006) が提案した越流公式による遡上モデルをベースに、護岸上の越波水塊の運動やそれに伴う護岸周辺の水位変化等も計算可能にした改良版である。さらにパラペットの断面2次元の詳細な形状効果による越波特性を把握するため、沿岸技術ライブラリーNo.30のCADMAS-SURF (Ver.5.1) を使い、パラペットの前出し効果を評価した。

#### (1) 平面波浪場での越波検討

##### 1) 計算地形と境界条件

対象海域の海底地形については、このたびの地形測量の成果および既往の測量成果を基に再現した。計算領域の周囲には、図-14に示すエネルギー吸収層と任意反射境界を設けた。この対象護岸付近の直立壁の反射率は現地の状況を勘案し、反射率1.0と0.9の予備計算を通じ、今回は0.9を採用した。また、本渡瀬戸航路内の直立消波ブロックは同じ予備計算を通じ、反射率0.8とした。

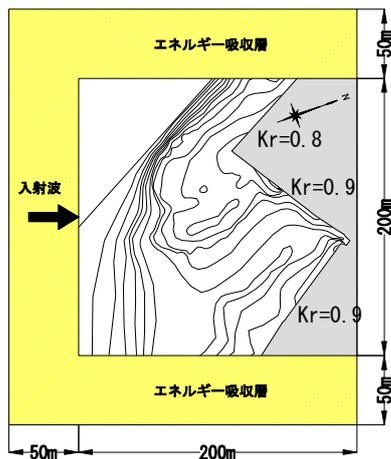


図-14 ブシネスクモデルによる平面図

##### 2) 計算諸元

現地観測において越波量が多かった表-1の測定ケースにあるNo.8の諸元を解析対象とし、下記の入射波条件を設定した。

- ・ 航跡波は船の航行と共に造波位置が移動するが、数値モデルの特性上、造波位置は航路境界付近に固定した。
- ・ 波形は波浪観測結果の表面波高の時系列データを参考に、規則波として扱った。
- ・ 波高は現地の波浪観測結果より得られた航跡波の最大波高を計算で再現するように、入射波の波高を調整した。
- ・ 周期は現地の波浪観測結果より得られた航跡波の最大波高時の周期を用いた。
- ・ 波向は現地の波浪観測結果より航跡波の影響が表れている時間帯の波向を用いた。

表-2に計算諸元を、図-15に入射波の設定概要を、図-16に越波量算定箇所を示す。

対象ケース	ケース8
波高 (m)	0.90
周期 (s)	3.8
波向 (°)	N169° W
潮位 (m)	4.16
成分波数	1 (規則波)
空間差分 (m)	$\Delta x=1$
時間差分 (s)	$\Delta t=T / 200$
越波算定時間	波が護岸に到達してから10波程度

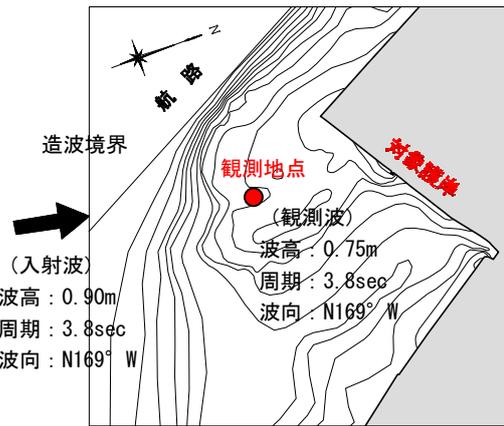


図-15 入射波の設定概要図

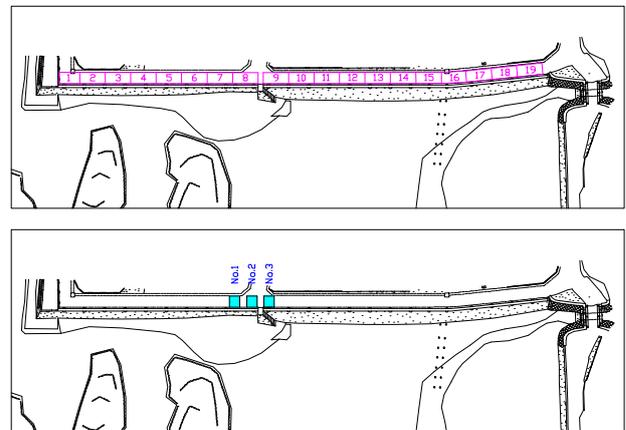


図-16 越波量算定箇所  
(上: 数値解析, 下: 現地観測)

##### 3) 計算結果と考察

図-17は直立壁の反射率を変えた2ケース (反射率: 0.9および1.0) の結果に、現地の観測結果を合わせて記載したものである。また、越波量の算出根拠となる平面波浪場の波高分布は、図-18にある通りである。

これによると、反射率1.0の場合、護岸4~護岸13においてほぼ同程度の越波量が算出されており、現地の越波状況と傾向が一致していない。また、護岸8, 9の越波量についても現地観測結果を上回る結果

## 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

となった。これに対し、反射率0.9の場合、護岸8～10間で越波量の出現が多くなっており、現地の越波の出現傾向とほぼ一致した。また、護岸8の越波量については現地観測結果とほぼ一致したが、護岸9については現地観測値を上回る結果となった。この原因として、数値計算の地形に反映されなかった現地の階段突起部の影響が、現地の越波量抑制に働いた可能性がある。このような定量性の不一致はあるものの、現地観測で最も越波が頻発し、越波量も多かったNo.8での整合性を勘案し、護岸の任意反射境界の反射率は0.9で評価することとした。

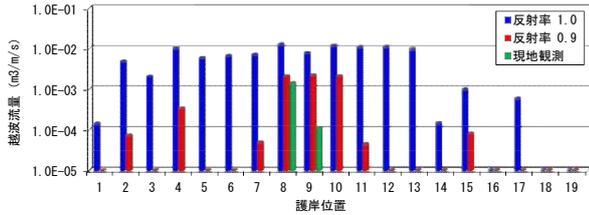


図-17 越波量算定の結果

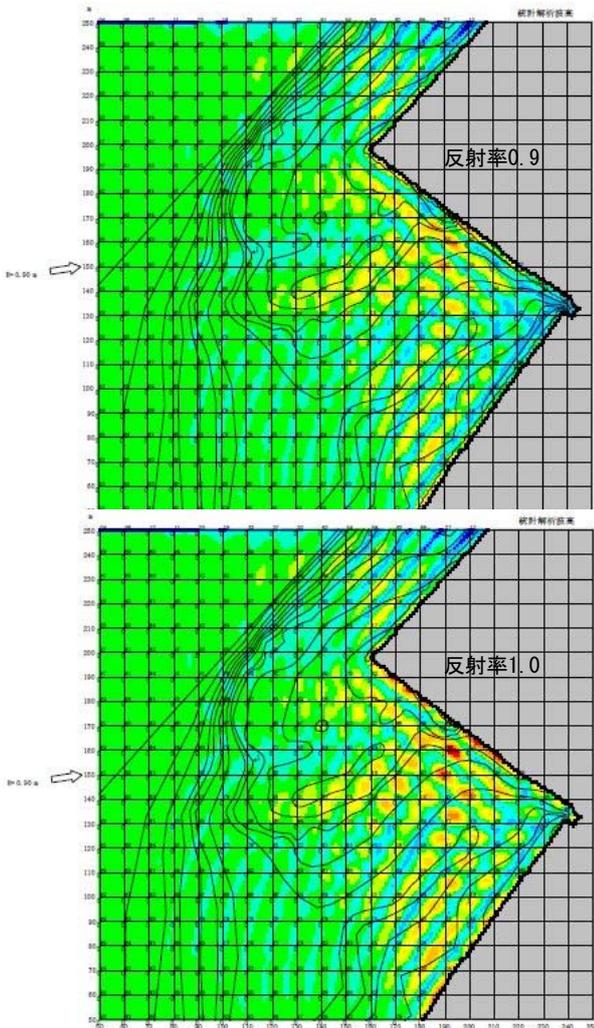


図-18 ブシネスモデルによる波浪場の再現  
(上：護岸反射率0.9, 下：護岸反射率1.0)

### (2) 断面2次元での越波検討

#### 1) 計算断面

対象とする断面形状は、No.8付近の波向に対して2次元長水路を設定し、水路に対して標準断面を直交させた上で背後に集水枡を組み込んだ。図-19に模擬した形状図を示す。現況の標準形に対し、対策工はパラペット嵩上案と前出し案を考えた。

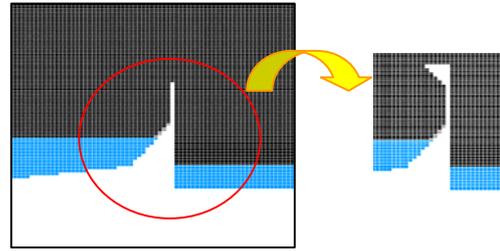


図-19 CADMAS-SURFによる断面図  
(左：現況再現, 右：対策工)

#### 2) 計算条件

計算に用いた諸元は、表-3の通りである。

表-3 計算諸元

波高 (m)	0.80	波高計位置で観測値0.75mを確認
周期 (s)	3.8	-
時間制御 (s)	時間刻み	自動 (最小刻み幅: 1.0E-5)
	解析時間	120
造波モデル	STK-CND (規則波)	
開境界	微小振幅波による放射境界を使用	
減衰領域	造波ソース背後に2波長分を設定	
格子座標 (m)	水平方向 (沖→岸)	1.00, 0.75, 0.50, 0.30, 0.20, 0.15, 0.10
	鉛直方向 (下→上)	0.150, 0.120, 0.100, 0.075, 0.050, 0.075, 0.100

#### 3) 計算結果の事例

対策工としてのパラペット嵩上案と前出し案の計算事例を、図-20に示す。

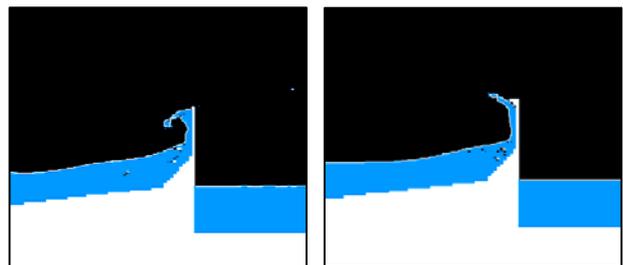


図-20 CADMAS-SURFによる断面2次元水路の再現  
(左：嵩上高50cm, 右：嵩上高50cm+前出し幅20cm)

### 2.3.4 対策工の検討

#### (1) 対策工の基本方針と許容越波流量

当該地は、護岸背後に民家が迫り、水叩き部は道路を兼ねており、生活環境に密接に結びつく空間にある。高潮時の越波打上げ時には、道路歩行や家屋への影響が報告される。

そこで、対策工の検討の基本方針として、今回はパラペット部の改良に主眼を置いた整備を行うこと

## 2.3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

とした。具体的には、パラペットの鉛直方向の嵩上については、NOWT-PARI (Ver.4.6c5a) の改良版を使い、パラペットの水平方向の前出しについては、CADMAS-SURF (Ver.5.1) を使い検討を行った。

表-4 背後地利用状況から見た許容越波流量

利用者	堤防からの距離	越波流量 (m <sup>3</sup> /m/s)
歩行者	直背後 (50%安全度)	$2 \times 10^{-4}$
	直背後 (90%安全度)	$3 \times 10^{-5}$
自動車	直背後 (50%安全度)	$2 \times 10^{-5}$
	直背後 (90%安全度)	$1 \times 10^{-6}$
家屋	直背後 (50%安全度)	$7 \times 10^{-5}$
	直背後 (90%安全度)	$1 \times 10^{-6}$

(出典：港湾の施設の技術上の基準・同解説, H11.4)

評価指標には、表-4にある背後地利用状況から見た許容越波流量を用いることとした。また、生活環境の一つとなる眺望性や通風性も評価指標の参考に加えた。

### (2) 嵩上高さの検討結果

護岸の嵩上高さの効果を確認するため、嵩上高さを10cmずつ変化させた越波流量の解析を行った。図-21に嵩上高さと越波流量の関係を示す。

これによると、現況再現では、現地観測で最も越波が頻発し越波量も多かったNo.8において、観測値と計算値が一致していることが分かる。その後、嵩上高さを変化させた計算でも、No.9に比べNo.8での越波流量の多さが確認できる。

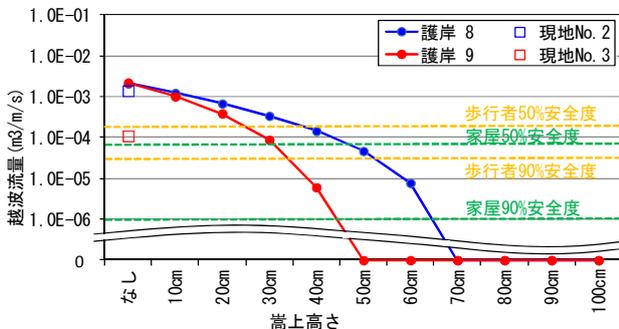


図-21 嵩上高さと越波流量の関係

嵩上高さと越波流量の関係から、歩行者90%安全度と家屋90%安全度の両指標を満たすのは、嵩上高さ70cmのときとなる。しかし、現在のパラペットの高さは約80cmであるため、これにさらに70cmの嵩上を行うと道路からの天端高は150cmとなり、著しく眺望の劣化や通風性に支障をきたすことになる。

そこで、鉛直方向の整備としての嵩上は、歩行者90%安全度をほぼ満たす嵩上高さ50cmで止め、この後は家屋90%安全度を満たすために、水平方向の整備として前出しを試みた。

### (3) 前出し幅の検討結果

護岸の前出し幅の効果を確認するため、前出し幅を10cmずつ変化させた越波量の解析を行った。

No.8付近を標準断面とした今回の解析結果では、まず現況再現で観測値ならびにNOWT-PARI (Ver.4.6c5a) の改良版で算定した越波流量と、CADMAS-SURF (Ver.5.1) の結果が、整合性が図られるようCADMAS-SURF (Ver.5.1) の計算条件を調整した。この作業を行った上で、嵩上高さ50cmの解析と、さらにこれから前出しを10cmずつ伸ばした解析を行った。図-22に前出し幅と越波流量の関係を示す。

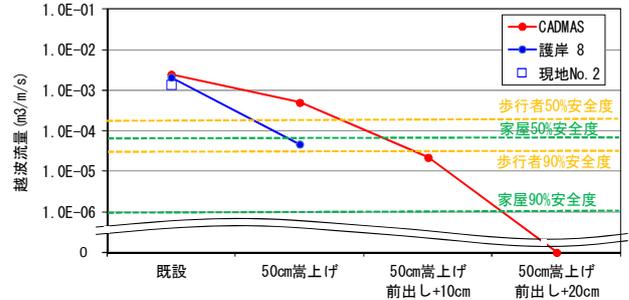


図-22 前出し幅と越波流量の関係

これによると、家屋90%安全度を満たすため、水平方向の整備として前出し幅を20cmにとると、ほぼ越波流量は許容値を下廻ることが確認できた。

### 2.3.5 おわりに

通常、護岸の越波検討では、平面波浪場における波の変形解析を行い、その結果から設計者が換算沖波を設定し、合田ら(1975)の越波流量算定図表から越波量を読み取っていた。この方法では、平面波浪場の再現にせきかく精度の高いブシネスクモデルなどを用いても、解の連続性が担保されない。そこで今回は、対象波が航跡波ではあるが、ブシネスクモデルをベースに越流公式による遡上と護岸上の越波水塊の運動やそれに伴う護岸周辺の水位変化等にも対応した改良版を用いて、現地観測値と検証しながら、越波量を直接算定することを試みた。

今回の解析は、造波位置を固定し、航跡波に規則波を用いたが、最も越波が発生した位置で、観測値と計算値がほぼ一致した。今回の嵩上高さの検討では、このブシネスクの改良版により平面波浪場の計算から直接護岸越波量を算定することが可能となることを示した。ただし、パラペットの前出し効果については、断面2次元の検討として別途CADMAS-SURFを用いて評価する必要がある。

### 参考文献

- 1) 平山克也・長谷川準三・長谷川巖(2006)：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
- 2) 合田良美・岸良安治・神山豊(1975)：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol.14, No.4, pp.3-44

## 2.4 NOWT-PARI ver. 4.6xにおける砕波計算の改良 ～渦動粘性係数分布の改良～

### 2.4.1 はじめに

ビジネスモデル NOWT-PARI は、実務での経験とのフィードバックを行いながら、主に静穏度解析を目的とした開発・整備が進められており、側方および沖側・岸側境界での反射条件の設定方法や入射境界で現地波浪に近い波浪スペクトルの与え方等が確立されてきた。また、砕波モデルの導入により、高波浪時の浅海域での波浪変形を再現できるよう整備されており、近年ではコンピュータの高機能化もあり、以前より精緻な地形条件を用いて砕波が生じる条件下での港湾・海岸での被災等の状況把握にも活用されるようになってきた。

現在配布している NOWT-PARI の最新版 ver.4.6d7a で採用されている渦動粘性型砕波モデルは、佐藤ら(1993)の研究に基づくモデルである。この砕波モデルは、一様勾配斜面上や球面浅瀬上などの構造物の存在しない単純地形における砕波変形を対象としていた。

本報告の内容は、砕波計算時の防波堤等の境界処理に関するプログラム改良とその効果の検討である。効果の検討は、一様勾配斜面上の砕波帯内に防波堤や港湾を設置し、改良前と改良後のプログラムによって計算される波高分布等の比較により行う。また、実務において演算時間が重要であり、プログラム改良に伴う演算時間の増大についても比較する。

### 2.4.2 プログラムの改良方針

#### (1) 砕波モデル

ビジネス方程式における砕波変形は、砕波時に生じる乱れによって拡散する運動量（拡散項）を運動方程式に追加することによって計算することができる。運動量の拡散は渦動粘性係数で表示され、佐藤・Kabiling(1993)は、運動量方程式に追加される拡散項および渦動粘性係数  $\nu_t$  について、以下の式で用いて評価した。

$$\text{拡散項 (x 方向)}: -\nu_t \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right)$$

$$\nu_t = \frac{\alpha_D s g d}{\sigma^2} \sqrt{\frac{g \hat{Q} - Q_r}{d Q_s - Q_r}}$$

$$Q_s = 0.4(0.57 + 5.3s) \sqrt{g d^3}, Q_r = 0.135 \sqrt{g d^3}$$

ここに、 $d$ : 平均水深、 $s$ : 海底勾配、 $\hat{Q}$ : 線流量の振幅、 $\alpha_D$ : 砕波点からの距離に応じた係数（砕波点で5、距離に反比例する値）である。

NOWT-PARI ver4.6d7a に組み込まれている砕波計算のサブルーチン CALBRK では、上記の砕波モデ

ル中の渦動粘性係数  $\nu_t$  を算定する。また、プログラム開発・改良および検証は、一様斜面や球面浅瀬上での砕波変形を対象として進められ、平成18年度の勉強会において報告され議論がなされた。しかし、対象地形を一様勾配斜面や球面浅瀬上などの構造物を存在しない場合と限定されたモデルであるために、現在次のような課題を解決する必要があることが分かっている。

#### (2) 現況モデルの砕波計算における課題

現在の砕波計算アルゴリズムでは、各格子において波速流速比を用いた砕波判定を行う。次に、砕波点と判定された格子を中心に半径1波長の範囲に渦動粘性係数を分布させて、砕波に伴う渦粘性の効果を影響する。ただし、防波堤の存在を考慮せずにその分布の計算を行うため、水域を分断する防波堤がある場合には、図-1のように防波堤の裏側まで砕波の影響が及んでしまう。このため、本来、砕波による減衰がない防波堤の裏側でその影響を受けてしまい、砕波帯内にある港湾の静穏度計算や被災時再現計算では影響が出てしまう可能性がある。例えば、防波堤や非計算点の情報を用いて、防波堤によって分断され、砕波点から見て防波堤を乗り越えた側に渦動粘性係数を分布させないような処理を組み込む必要がある。

防波堤周辺で砕波が発生する場合には、砕波点周辺で分布する渦動粘性効果を完全に遮断する場合（図-1）と、防波堤先端付近を波が回り込み砕波の影響が防波堤の遮蔽域にある程度影響する場合がある。前者の場合には、砕波点を含む領域と含まない領域に分け、含まない砕波点の裏側の領域の渦動粘性係数をゼロにすれば良い。後者の場合は、防波堤外側での砕波によって防波堤先端を回り込む波と同様に渦や乱れも広がり、回折域にもある程度影響が及ぶと考えられる。しかしながら、防波堤先端周辺で砕ける波および流れ挙動についてはよく分かっておらず、乱れや波の回折域への回り込み高かについて室内実験などによる把握および数値モデルへの取り込むことは現時点では難しい。

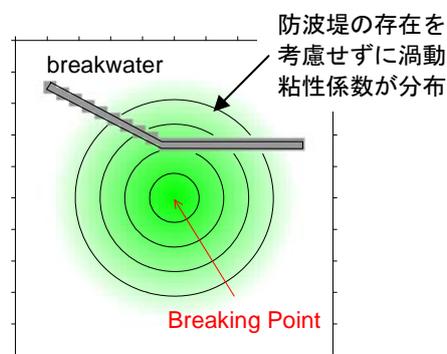
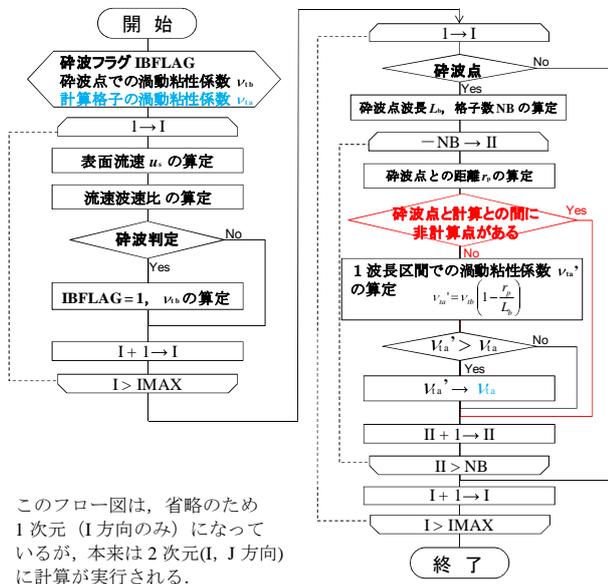


図-1 現プログラムにおける渦動粘性係数の与え方に関する問題

(3) 防波堤による波の遮蔽効果（防波堤処理）

現況の計算では流速波速比によって砕波点と判定された地点の周辺に渦動粘性の効果を取り込んでいる。渦動粘性係数は砕波点から線形で減少する分布で与え、砕波点から半径1波長とする範囲に分布させる。その作業手順は、現況のプログラムでは、側方および海側・岸側のエネルギー吸収帯を除いた領域で、砕波判定を行い、砕波点での渦動粘性係数  $\nu_{t,b}$  を算定する。その後、砕波点を中心に一波長の範囲で、砕波点を円錐の頂点とした分布を与える計算を行う。図-2は、砕波計算アルゴリズムのフロー図であり、本プログラム改良は図中に赤で示す部分であり、一波長の範囲での渦動粘性係数  $\nu_{t,a}$  を算出する際に、渦動粘性係数算定地点と砕波地点の間に非計算点があるかを判別し、ある場合にその計算点での渦動粘性係数をゼロとするよう修正したことである。



このフロー図は、省略のため1次元（I方向のみ）になっているが、本来は2次元（I, J方向）に計算が実行される。

図-2 砕波計算のフロー図

図-3は、砕波点から1波長の範囲にある渦動粘性係数算定地点が砕波点からみて防波堤裏側に位置するか否かを判定する計算ルーチンの説明図である。まず、砕波点から1波長の範囲に位置する  $\nu_{t,a}$  算定格子を選択し、砕波点に向かう単位ベクトルを作成する。  $\nu_{t,a}$  算定格子を起点とし、1格子ずつ長くしたベクトルの終点が非計算格子（水深データが-999）になるとき、防波堤裏側に位置すると判定し  $\nu_{t,a} = 0$  とした。非計算格子が出現せずに、砕波点まで到達する場合には、  $\nu_{t,b}$  と砕波点からの距離を用いて  $\nu_{t,a}$  を算定した。

防波堤処理を行うと、防波堤の回折領域で渦動粘性係数が不連続な分布になり、運動方程式を解く際に水位や流速に影響を及ぼす。場合によって計算が不安定になることも考えられる。そこで、防波堤などの構造物の遮蔽効果を考慮し渦動粘性係数の分布を計算した後に、渦動粘性係数についてスムージング処理を行うことを考えた。スムージングは、

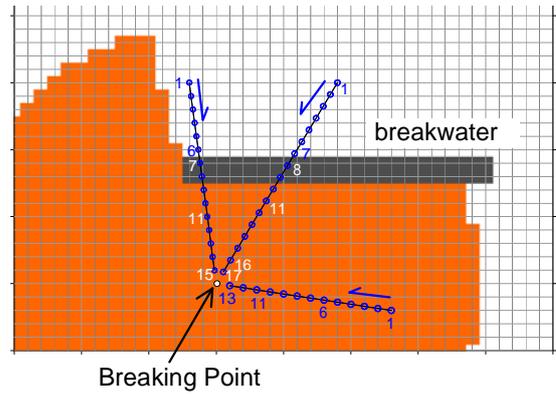


図-3 遮蔽域の判定方法

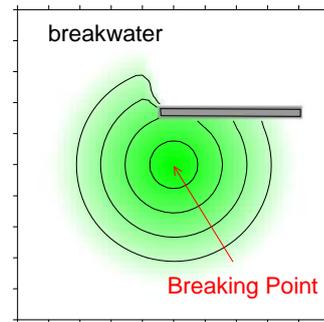


図-4 防波堤処理後の渦動粘性係数の分布

砕波点を除く地点に対して行い、岸側・沖側、沿岸方向2点の計4点のデータを用いて空間平均を用いた。

2.4.3 モデル地形計算による検証

一様勾配斜面の地形の砕波発生領域に、防波堤および港湾を設置した場合の改良前後のプログラムによる波浪変形計算を行い、プログラム改良の効果を検証した。効果検証には、水位変動、渦動粘性係数および波高分布の整理結果を用いた。また、構造物の有無の判定やスムージング処理の付加したことによって、計算時間が増加すると予想されたため、モデル港湾地形における演算時間を整理した。表-1に、計算条件を示す。

表-1 計算条件の一覧

項目	設定
計算格子	格子サイズ: $DX=5m$ 格子数: 沿岸 $J_{MAX}=600 \times$ 岸沖 $I_{MAX}=350$
モデル地形	①防波堤（設置水深 $d_{BW}=5, 7.5, 10m$ ） ②モデル港湾
波高, 周期	$H_0'=6.55m, T_0=10s$
入射波	A.規則波 / B.不規則波（100波）
時間間隔	$DT=0.01s$
底面摩擦	0.02（海域全域）
砕波指標	流速波速比 0.56

計算過程の理解のしやすさのため、入射波は規則波と一方向不規則波とした。不規則波の入射波スペクトルは、ブレットシュナイダー・光易型を用いた。

(1) 地形条件

構造物周辺の渦動粘性係数 $\nu_{t,a}$ の分布を確認するため、一様勾配(勾配 1/40)斜面上の砕波帯内に防波堤や港湾を建設したケースを計算した。砕波帯となる水深帯を検討するため、構造物がない一様勾配斜面の波浪変形計算を行い、砕波の発生および波高減衰を把握した。防波堤および港湾の有無に関わらず、これより示す計算においては、入射境界付近の水深は 30m、岸側は一様水深(水深 1.5m)とした。沖側および岸側、側方境界部にはエネルギー吸収帯を設けた。

図-5に示す計算結果は、計算範囲の中央断面における岸沖断面波高変化図であり、波高減衰は水深 8m 付近から発達し、岸側の一定水深部(水深 1.5m)では、波高 2m 程度まで減衰することが確認できる。岸側および沖側に設定したエネルギー吸収帯によって、波の反射は生じていないことも確認できる。ただし、エネルギー吸収帯における波高変化は図示していない。

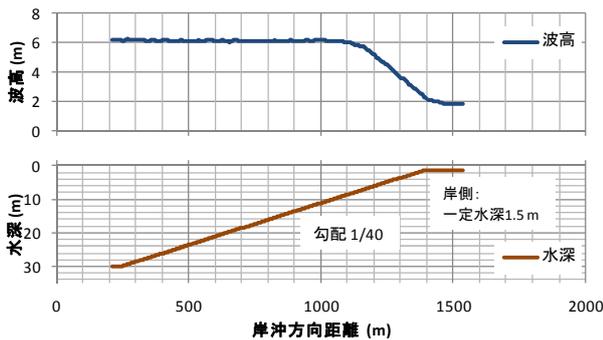


図-5 一様勾配斜面上の波高変化 (B. 不規則波)

① 防波堤

計算範囲の沿岸方向の中央部に長さ 400m の防波堤を設置した。図-5 より砕波は 10m 以浅で発生すると考えられたため、図-6(a)のように、防波堤設定水深  $d_{BW}$  を 10m, 7.5m および 5m と設定した。また、図中の緑線は、エネルギー吸収帯の境界線である。

② モデル港

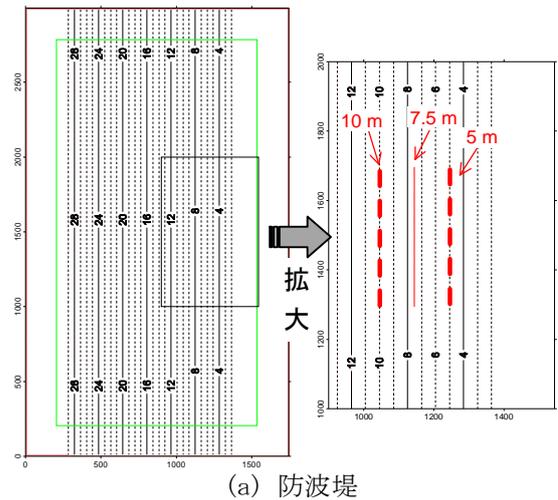
図-6(b)に示すように、防波堤の先端水深を 6m、港内水深 5m とする比較的小規模な港湾地形である

(2) 計算結果

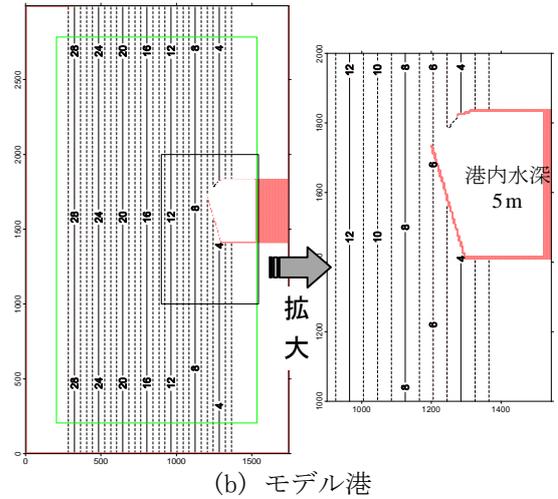
①防波堤・規則波ケース、②防波堤・不規則波ケースおよび③モデル港・不規則波ケースの3ケースの計算結果を以下に整理する。

① 防波堤・規則波ケース

図-7 および図-8 に示す波高分布図から、防波堤延長方向に縞状の波高分布がみられる。これは、防波堤背後で防波堤両端部からの回折波が、腹と節を形



(a) 防波堤



(b) モデル港

図-6 モデル地形

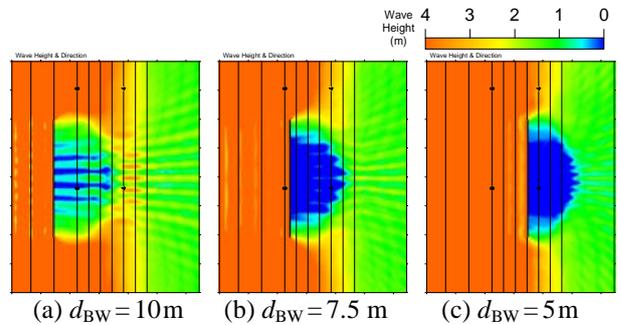


図-7 波高分布 (旧バージョン, 防波堤・規則波ケース)

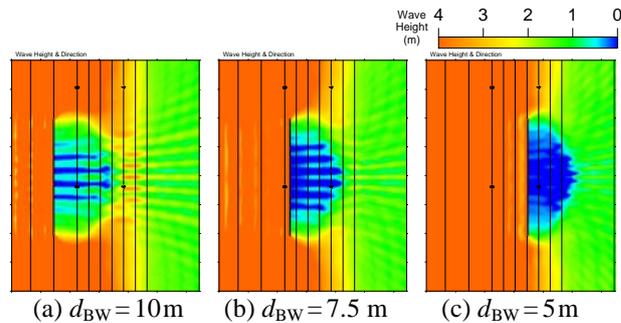


図-8 波高分布 (改良バージョン, 防波堤・規則波ケース)

## 2.4 NOWT-PARI ver. 4.6xにおける砕波計算の改良～渦動粘性係数分布の改良～

成する定在波となっているためである。

$d_{BW} = 7.5\text{m}$  および  $5\text{m}$  のケースで、旧バージョンの防波堤背後の波高が、改良バージョンに比べ、小さいことが確認できる。

図-9 および図-10 に、旧バージョンを基準とした波高差分図および波高比分布図を示す。プラス（赤）は改良によって波高が増大、マイナス（青）は波高が減衰していたことを示す。波高比は、旧バージョンの波高を基準(1.0)とした波高比を格子毎に算定したものである。

波高差分図（図-9）では、 $d_{BW} = 10\text{m}$  のケースで、防波堤沖側で波高の変化が顕著である。 $d_{BW} = 7.5\text{m}$  および  $5\text{m}$  とするケースでは、防波堤背後において改良前後の差分が大きく、2つのケースでは  $d_{BW} = 7.5\text{m}$  のケースで変化が大きい。 $d_{BW} = 5\text{m}$  では防波堤を設置する水深帯で砕波による波高減衰が進んでおり、波高としての差が小さくなっていると考えられる。また、どのケースにおいても、縞状に波高変化がみられる。これは、防波堤端部からの反射波の変化が影響していると考えられる。また、この波高変化は入射波高の1%程度である。

波高比分布図（図-10）では、 $d_{BW} = 7.5\text{m}$  と  $5\text{m}$  のケースで、防波堤岸側で顕著な波高変化（改良に寄る波高増大）がみられる。防波堤沖側で砕波した際に防波堤裏側まで分布させていた渦動粘性係数が改

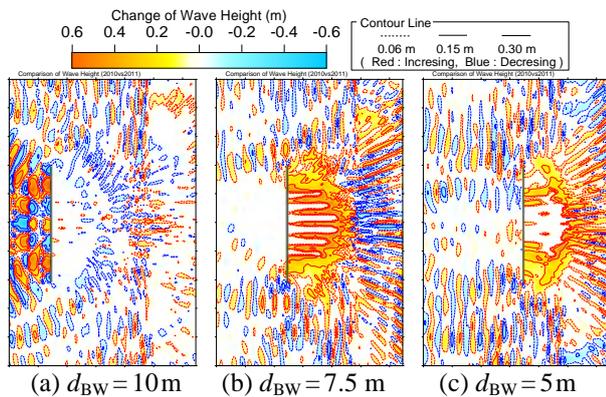


図-9 波高差分図（旧・改良バージョン比較、防波堤・規則波ケース）

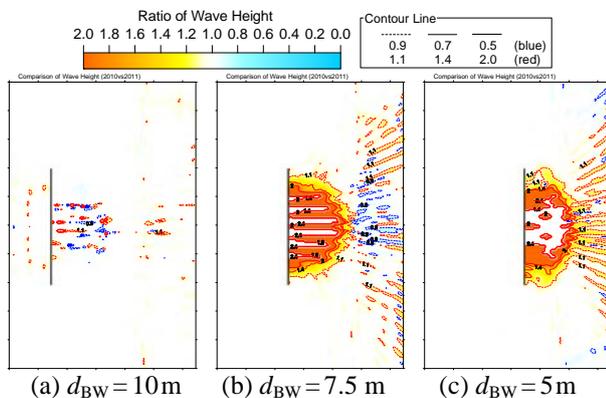


図-10 波高比分布（旧・改良バージョン比較、防波堤・規則波ケース）

善された効果であると考えられる。 $d_{BW} = 10\text{m}$  の場合の波高比をみると、波高差分に比べ改良による変化が少ないと見て取れる結果になっている。波高比による比較が波高差分による比較よりもプログラム改良の効果を明瞭にしているのは、回折域のように波高が小さい領域である。これは、水面を平滑化する渦粘性型の砕波モデルの特徴ともいえる。

$d_{BW} = 10\text{m}$  のケースの防波堤背後での波高変化は、防波堤端部付近で生じる砕波、すなわち渦動粘性係数の分布による影響が背後に及んだためであると推定する。

図-11～図-14 に、砕波点の渦動粘性係数分布  $\nu_{t,b}$  および砕波点の1波長分を含めた範囲で与えた渦動粘性係数  $\nu_{t,a}$  の分布を示す。

旧バージョンおよび改良バージョンにおける砕波点の渦動粘性係数  $\nu_{t,b}$  の分布図から、判定された砕波点の多くは  $8\text{m}$  以浅に分布しており、防波堤設置水深を  $5\text{m}$  としたケースでは主に防波堤沖側で砕波が発生することが分かる。

全6ケース（砕波計算プログラム2バージョン×防波堤設置位置3ケース）で、防波堤背後では防波堤の遮蔽効果によって砕波が発生しない。防波堤から離れた岸側では、防波堤両端部から入射した波が回折し砕波することが確認できる。ただし、 $d_{BW} = 5\text{m}$  のケースでは、防波堤の岸側で砕波が発生しない。これは、防波堤の後方で屈折効果によって、波が等深線に直角方向に進もうとする影響もあり、波が十分に回り込めないためである。

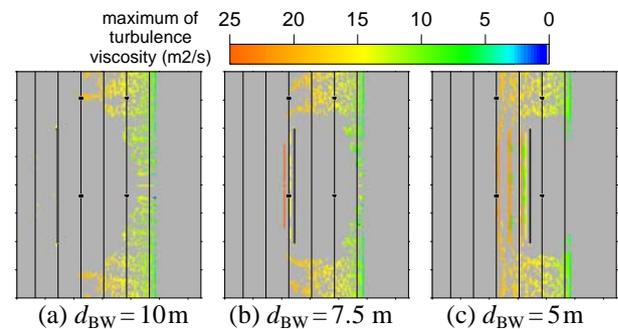


図-11 砕波点渦動粘性係数  $\nu_{t,b}$  の最大値分布（旧バージョン、防波堤・規則波ケース）

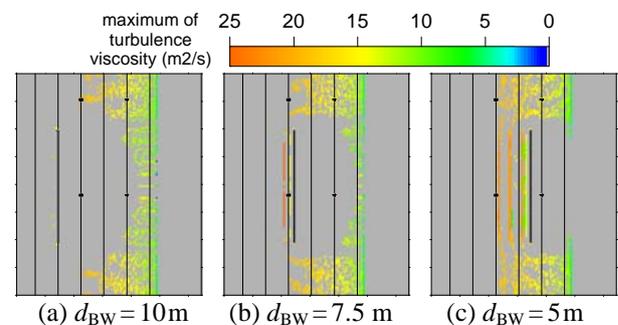


図-12 砕波点渦動粘性係数  $\nu_{t,b}$  の最大値分布（改良バージョン、防波堤・規則波ケース）

## 2.4 NOWT-PARI ver. 4.6xにおける砕波計算の改良～渦動粘性係数分布の改良～

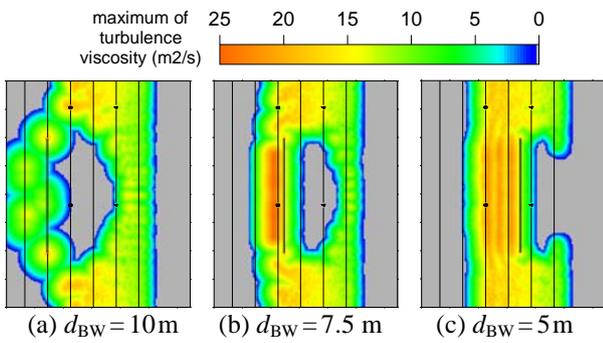


図-13 渦動粘性係数  $v_{t,a}$  の最大値分布 (旧バージョン, 防波堤・規則波ケース)

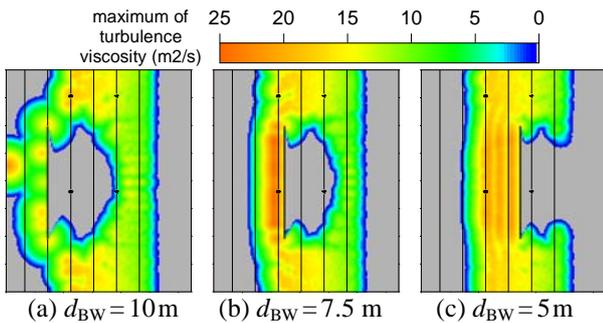


図-14 渦動粘性係数  $v_{t,a}$  の最大値分布 (改良バージョン, 防波堤・規則波ケース)

図-13 および図-14 に示す海域における渦動粘性係数  $v_{t,a}$  は、旧バージョンで防波堤を取り囲んでいた分布が、改良によって防波堤背後で分布しないように修正されている。

### ② 防波堤・不規則波ケース

図-15 および図-16 に、防波堤を設置し不規則を作用させたケースの波高分布平面図を示す。規則波に比べ、防波堤背後域での腹および節構造は明瞭でない。この平面分布をみる限るでは、改良による顕著な変化はみられない。

図-17 および図-18 は、新旧バージョンの波高差分図および波高比を示す。イメージマップのプラス (赤) は改良による増大を示しており、マイナス (青) は減少を示す。防波堤の設置水深別にみると、 $d_{BW}=5\text{m}$  のケースで改良による波高増大がみられる場所が他のケースと異なる。波高増大部分に着目し主な傾向をみると、 $d_{BW}=5\text{m}$  の場合には、岸側で V 字状に波高増大がみられるのに対し、その他の 2 ケースでは、防波堤沖側の先端に比較的近いところ (図中○で囲む) での波高の増大と防波堤の遮蔽域での波高増大がみられる。ただし、一方向波で実施した本計算では、回折による防波堤背後域への水位変動が小さくなり、改良による波高変化が不明瞭となっていると考えられる。反射波が存在する場合や、入射波の方向集中度が小さく防波堤背後へ回折する波が大きくなる場合には、改良による効果が明瞭になると推測される。

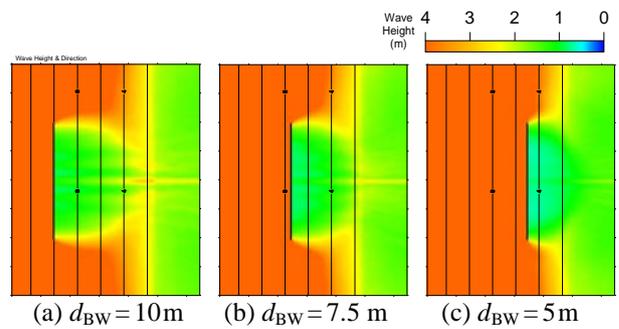


図-15 波高分布 (旧バージョン, 防波堤・不規則波ケース)

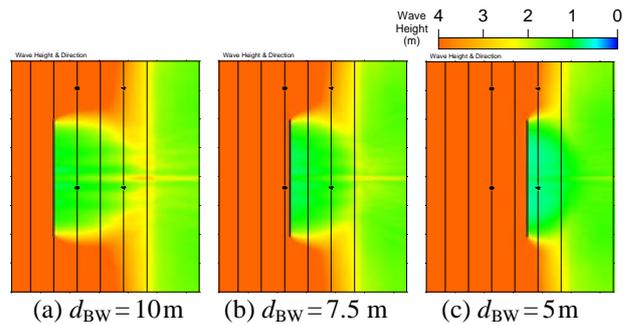


図-16 波高分布 (改良バージョン, 防波堤・不規則波ケース)

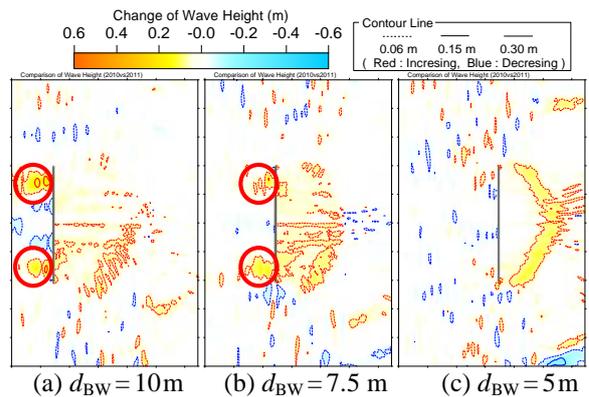


図-17 波高差分図 (改良による波高増大, 防波堤・不規則波ケース)

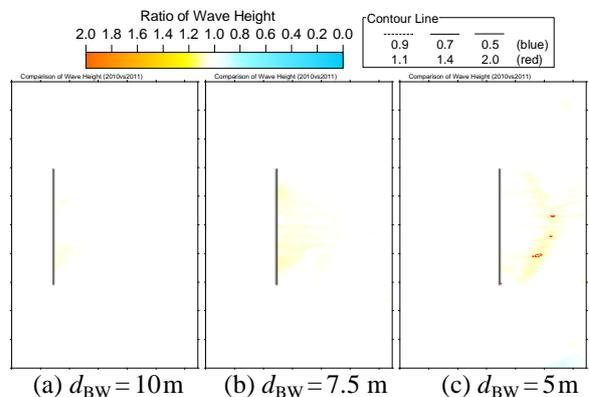


図-18 波高比分布図 (改良による波高増大, 防波堤・不規則波ケース)

$d_{BW} = 5\text{ m}$ とした場合のV字形の波高増大領域は、防波堤両端から回折しながら波が伝播する領域であると考えられる。改良の効果が顕著になるのは、砕波点との間に防波堤が位置する箇所であり、旧バージョンでは防波堤沖側で砕波が発生すると、防波堤背後において渦動粘性の効果を見込んでしまい防波堤裏側で波高減衰が生じる。プログラム改良によって渦動粘性係数の分布が直接変化するのは1波長の範囲であるが、減衰した波が伝播するためその岸側の波高も小さくなると考えられる。このような防波堤背後の波高分布は、防波堤背後で発生する循環流や水位上昇量の推定において大きく影響するため、改良による推定精度の向上が期待できる。

前述のように、 $d_{BW} = 7.5\text{ m}$  および  $10\text{ m}$ としたケース(図-17(a), (b))では、防波堤沖側かつ先端部近くで顕著な波高増大が確認できる。また、 $d_{BW} = 7.5\text{ m}$ のケースよりも、 $d_{BW} = 10\text{ m}$ の方が改良による波高増大がより明瞭であり、この領域の波高増大は旧バージョンにおいて防波堤岸側で発生する砕波による渦粘性の影響を沖側まで効果を見込んでしまっているためであると考えられる。防波堤先端部付近でその波高増大が顕著であるのは、防波堤の中心部付近では、波が防波堤による遮蔽効果によって中心部岸側で砕波が発生しないが、先端部付近で、砕波が比較的発生しやすいためであると考えられる。

図-20および図-21は新旧バージョンにおける砕波点の渦動粘性係数 $\nu_{t,b}$ の最大値の分布図であり、図-22および図-23は砕波点回りの渦動粘性分布 $\nu_{t,a}$ の最大値の分布図である。規則波に比べ、砕波帯が広

く分布していることが分かる。渦動粘性係数 $\nu_{t,a}$ について旧バージョンと改良バージョンを見比べると、防波堤岸側で渦動粘性係数 $\nu_{t,a}$ がゼロになっており、改良による効果を確認できる。

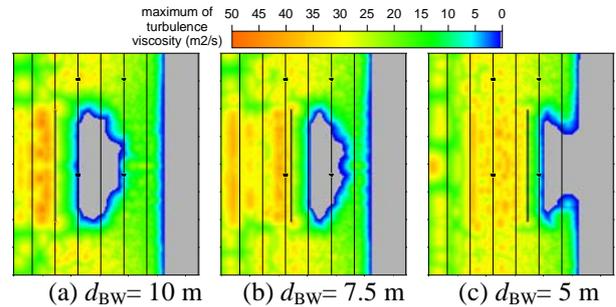


図-21 渦動粘性係数 $\nu_{t,a}$ の最大値分布 (旧バージョン, 防波堤・不規則波ケース)

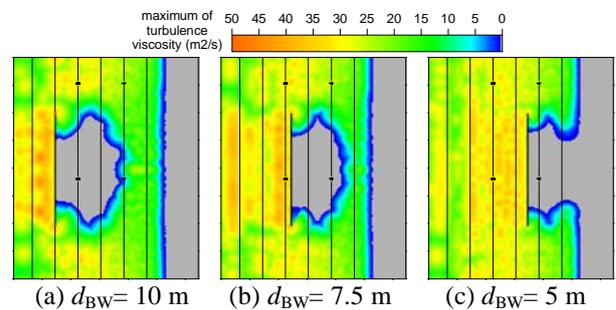


図-22 渦動粘性係数 $\nu_{t,a}$ の最大値分布 (改良バージョン, 防波堤・不規則波ケース)

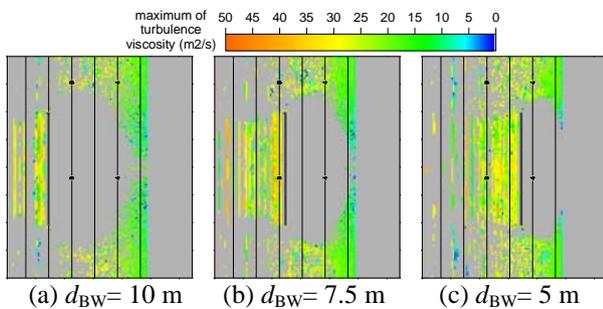


図-19 砕波点渦動粘性係数 $\nu_{t,b}$ の最大値分布 (旧バージョン, 防波堤・規則波ケース)

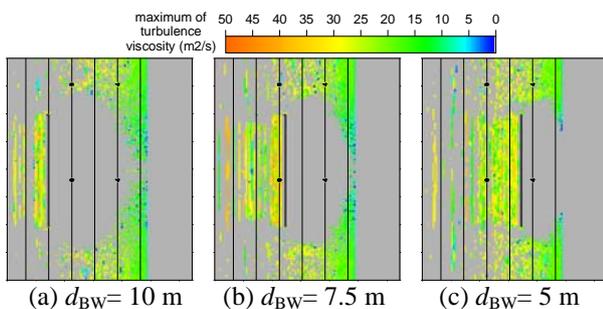


図-20 砕波点渦動粘性係数 $\nu_{t,b}$ の最大値分布 (改良バージョン, 防波堤・不規則波ケース)

### ③ モデル港・不規則波ケース

図-23に、造波開始から407秒後における水面変動および渦動粘性係数の平面分布図を示す。イメージマップは、水位分布を示し、コンターおよびハッチングは渦動粘性係数の分布を示す。砕波は同じ水深帯で発生しているものの、水面変動や砕波の発生状況に違いがみられるのは、その時刻以前の砕波変形や波の反射等の履歴がその時刻の波の分布や砕波判定に影響しているためである。

旧バージョンの渦動粘性係数の平面分布では、防波堤沖側での砕波発生に伴って、港内側にも渦動粘性係数が分布(図中Aの矢印)し、砕波の影響が防波堤を透過するような計算になっていることが確認できる。一方、改良バージョン(図-22(b))においては、この防波堤を乗り越え砕波による渦動粘性の効果が現れることが改善されている。

旧バージョンおよび改良バージョンの波高分布図を図-24に示す。港外の波高分布には変化がほとんどみられないが、港内で改良バージョンで波高が増大している。

図-25に、旧バージョンおよび改良バージョンを比較した波高差分図および波高比分布図を示す。波高差分図で比較すると、港内の奥側まで波高分布に違いが見られる。差分図から港内のほぼ全域で0.2m程度波高が増大している。港の入り口を除く港内港

口部付近や防波堤に沿って波高の増大傾向が大きくなり、最大 0.6m 程度（入射波高の 1 割程度）の波高増大がみられる。また、構造物周辺では完全反射（反射率 1.0）であり港内で多重反射が発生するため、プログラム改良による波高差が大きく改良の効果が明瞭となっていると考えられる。

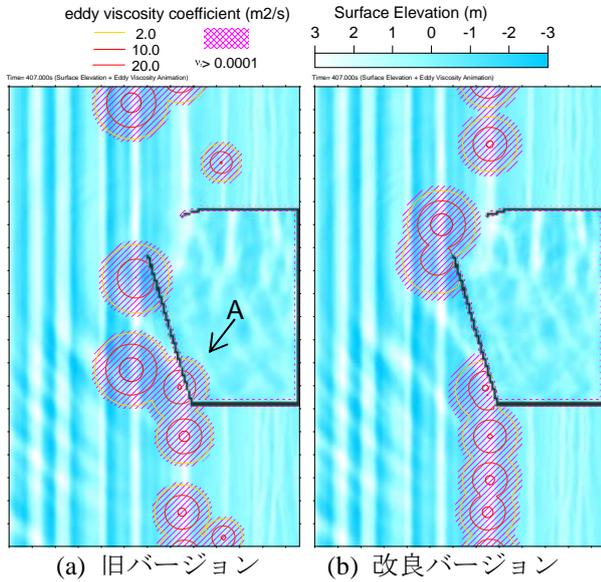


図-23 水位分布と渦動粘性係数  $\nu_{t,a}$  の分布図  
(モデル港湾・不規則波ケース)

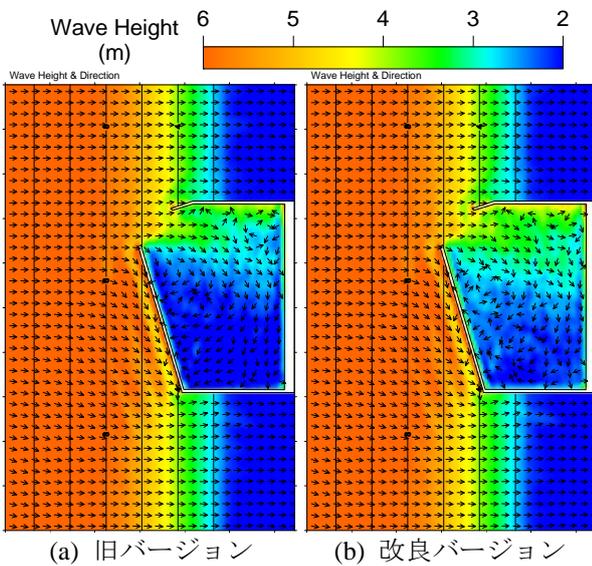
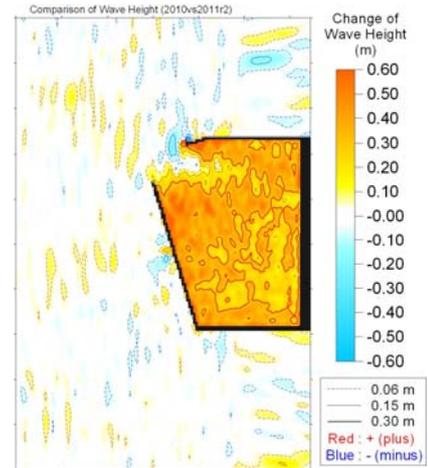


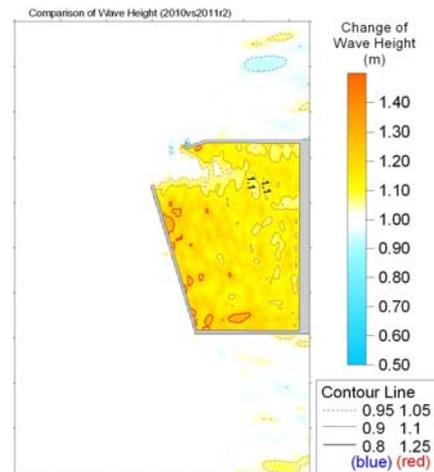
図-24 波高分布図  
(モデル港湾・不規則波ケース)

図-26 および図-27 は、砕波点における渦動粘性係数  $\nu_{t,b}$  の最大値および拡散項を算定する際に用いる渦動粘性係数  $\nu_{t,a}$  の最大値を求めた結果である。図-26 のイメージマップで色が付いている格子は、砕波点と判定された格子を示す。砕波判定は、水深 11m より浅い地点で発生し、水深 4~8m で比較的大きな渦粘性を伴う砕波が発生している。また、防波

堤先



(a) 波高差分図



(b) 波高比分布図

図-25 波高分布の比較図  
(モデル港湾・不規則波ケース)

端部を除く港内をみると、旧バージョンでは長い防波堤背後で砕波が発生していないのに対して、改良バージョンでは図中○で囲まれた付近で発生してい

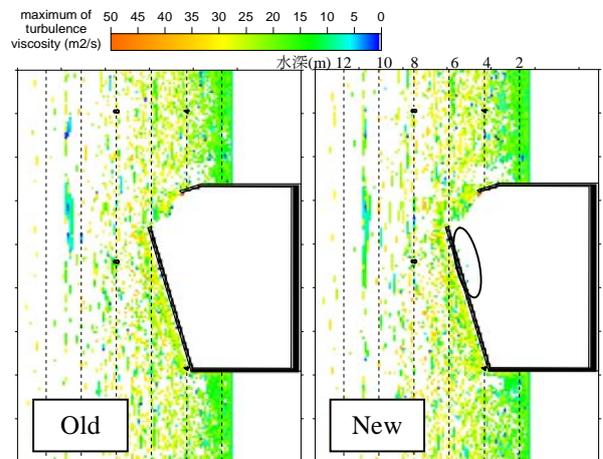


図-26 砕波点渦動粘性係数  $\nu_{t,b}$  の最大値分布図  
(モデル港湾・不規則波ケース)

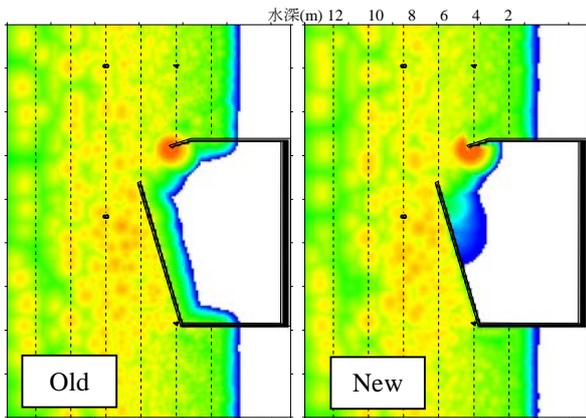


図-27 砕波点回り渦動粘性係数 $\nu_{ta}$ の最大値分布図 (モデル港湾・不規則波ケース)

る。図-27 にの右図, 改良バージョンでは港奥側で渦動粘性係数 $\nu_{ta}$ が分布しておらず, 今回の改良の効果が確認できる。

図-28 には代表地点での水位変動について, 新旧バージョンの比較図である。代表地点は上図に示す5地点であり, 水深20mの砕波帯から十分に離れたP1, 防波堤の延長方向2箇所についてそれぞれ港外側P2, P4と港内側P3, P5としている。

港湾沖の地点 P1 の水位変動では, バージョンの新旧による差がみられないのに対し, 防波堤付近では, 水位変動に差がみられる。特に, 旧バージョンの港内側 P3 および P5 の波形では, 港外側での砕波による渦粘性の効果が及んでいることが原因と考えられる波形の平滑化が明瞭である。それに比べると, 港外側 P2 および P4 の波形でも違いはみられるものの, 港内に比べて顕著ではない。防波堤処理による改良の効果が水位変動の波形にも顕著に表れており, スペクトルや長周期変動を追跡する際にも効果があることが分かる。

#### 2.4.4 計算時間への影響

プログラム改良による演算時間への影響を検討するため, 防波堤設置 ( $d_{BW}=7.5m$ ) に規則波を入射させたケースを対象とした。比較するプログラムは, 旧バージョンと, 改良プログラムについては3種類 (スムージング処理をしないプログラム, 渦動粘性係数の不連続な分布を緩和するためのスムージング処理を, 砕波判定がなされ1波長の範囲での算定時に行うプログラム (Smoothing 1) と全ての渦動粘性係数算定が完了した後に海域全体でスムージング処理を行うプログラム (Smoothing 2)) で比較した。渦動粘性係数の分布が変化するため, 波高分布については多少の違いはみられるが, プログラム改良による変化に比べれば, 十分に小さいものであることが確認できた。

図-29 に演算時間の時系列変化図を示す。計算ステップ20000以下では, どのケースも同じような演算速度になっていることが分かる。波が砕波する水

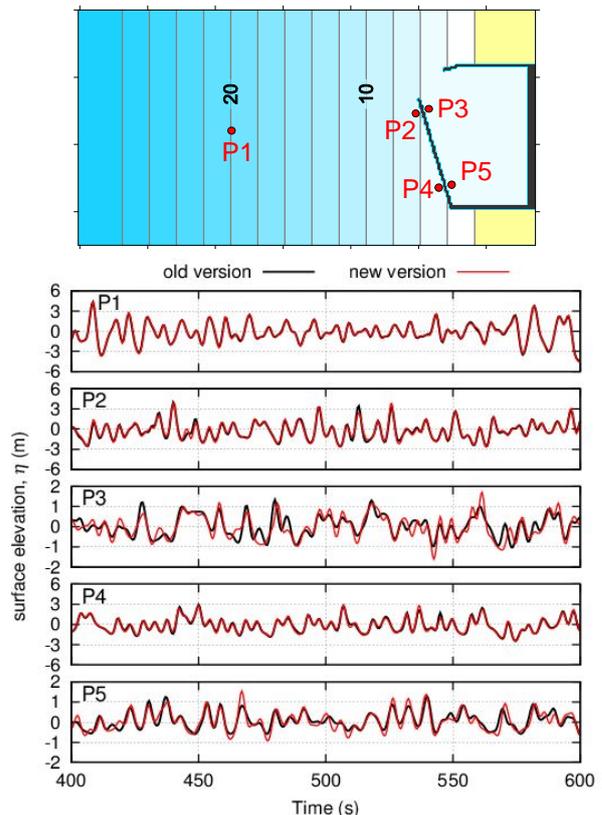


図-28 代表地点における水位変動

深帯まで到達しておらず, 砕波計算の修正による違いが現れていない時間帯である。改良バージョンと比較すると, 当然ながらスムージングをしない場合の演算時間が一番早く終了し, 次は smoothing 2 であった。

図-30 および表-2 に1ステップあたりの演算時間を整理した。演算時間の時系列変化から, 砕波が発生しない初期の時間帯(period 1)および波の場が安定している時間帯(period 2)について整理した。

波が砕波し安定した後の区間 (period 2) で比較すると, スムージングなし, smoothing 1 および smoothing 2 で旧バージョンと比べ, 3%, 11%および8%の増加となっており, プログラム改良による演算時間の増加は1割程度であると推測される。

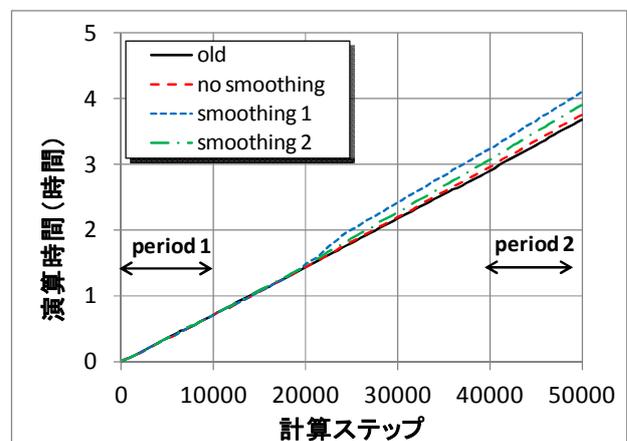


図-29 演算時間の時系列変化

## 2.4 NOWT-PARI ver. 4.6xにおける砕波計算の改良～渦動粘性係数分布の改良～

今回比較した規則波のケースでは、波の場が安定してから10波で計算を終了しており、演算時間の差は小さい。100波以上を作用させる不規則波ではperiod 2の演算速度の比に応じて総演算時間が長くなると考えられる。smoothing 1では、砕波点間の距離（渦動粘性係数を複数回算定する格子数）や砕波帯の広さなどによる影響があり、スムージングによる演算時間の増加には、地形や入射波の計算条件によって変わると考えられる。

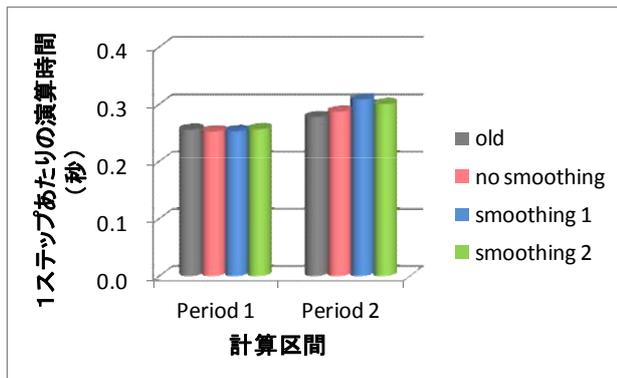


図-30 1ステップあたりの演算時間の比較

表-2 1ステップに掛かる演算時間（区間別）

	旧バージョン	改良バージョン		
		Smoothing なし	Smoothing 1	Smoothing 2
Period 1	0.257 (1.00)	0.254 (0.99)	0.254 (0.99)	0.258 (1.00)
Period 2	0.279 (1.00)	0.288 (1.03)	0.310 (1.11)	0.302 (1.08)

表中の()内は、旧バージョンを1とした比

### 2.4.5 まとめ

NOWT-PARI ver4.6x に整備されている砕波計算サブルーチン CALBRK について、防波堤の存在を考慮して渦動粘性係数の分布を与えて計算できるように改良した。

プログラム改良の効果検証は、砕波帯内に防波堤を設置したケースと港湾を建設したケースを改良前後のプログラムで計算して行った。波高分布と改良前との波高分布の比較、砕波判定結果、渦動粘性係数の分布を考察した結果を以下に示す。

- ・モデル地形による検証を行い、渦動粘性係数  $\nu_{ta}$  は改良によって砕波点からみて防波堤の裏側に分布しないことを確認した。その変化に伴った波高分布の変化も確認でき、プログラム改良は良好であると考えられる。
- ・防波堤を設置したケースでは、防波堤の設置水深によって、改良の効果がみられる領域や波高変化量が異なる。
- ・港湾を建設したケースでは、港内で多重反射が発生しており、改良前の結果と比べて入射波高の最大1割程度の違いがみられた。改良前後の波高変化は、港内の静穏性や、砕波帯と港湾の位置関係によって異なると考えられる。すなわち、砕波帯内に位置し静穏性の低い港湾などでは改良による効果が顕著になる。
- ・防波堤処理による演算時間の増加は、今回検討したケースにおいては、1割程度であった。

### 参考文献

- 1) Watanabe, A., T. Hara, and K. Horikawa(1984) : Study on breaking condition for compound wave trains, *Coastal Eng. in Japan*, Vol.27, pp.71-82.
- 2) 佐藤慎司・M. Kabiling(1993) : Bossinesq 方程式を用いた三次元海浜変形の数値計算, *海岸工学論文集*, 第40巻, pp.386-390
- 3) 成毛辰徳(2007) : 平均水位上昇量を考慮した波高および波向算定方法の提案, 平成18年度ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会講演集, pp.20-25
- 4) 平山克也(2007) : ブシネスクモデル (NOWT-PARI Ver4.6c4) に関する主な修正事項とその回折, 平成18年度ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会講演集, pp.26-38

2.5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題

2.5.1 はじめに

外洋における漁船等の海難事故（たとえば、2008年に発生した第59寿和丸沈没事故など）の原因の1つに挙げられる突発波浪はフリークウェーブと呼ばれ、北海油田の開発に係わるヨーロッパの国々を中心に研究が進められている。これらの研究成果として、深海域では、3次の非線形干渉の影響が顕著になると、kurtosisが増大し、この変化に依存してフリークウェーブの出現確率が增大することが報告されている<sup>1)</sup>。Mori and Janssen<sup>2)</sup>は、フリークウェーブを有義波高の2倍を超える最大波と定義し、4波相互作用を考慮した非線形理論をもとに、深海域におけるフリークウェーブの出現予測手法を構築している。また、森ら<sup>3)</sup>は、波の方向分散が大きくなるとフリークウェーブの発生頻度が低下するという結果を踏まえ、方向分散の影響を上記の出現予測手法に取り入れている。しかしながら、水深の影響を含む浅海域におけるフリークウェーブの挙動については未だ検討されていない。

沿岸域に目を向けると、地球温暖化の影響と思われる台風・低気圧の大型化やその経路変化により高波災害が多発している（たとえば、2008年に発生した寄り回り波による越波浸水被害など）。これらの被災の原因究明や対策工の検討などの議論では、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 by Port and Airport Research Institute）が活用されている<sup>4)</sup>。この数値モデルは、波の浅水変形・屈折・回折を同時に解析することが可能で、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おり、上記以外にも港湾設計等の実務においても活用されている。また、近年では、その計算精度を向上させるため、各種改良が進められている<sup>5), 6), 7), 8)</sup>。

このような背景から、今後、フリークウェーブのような突発波浪を発生させる波浪が沖合から沿岸域に襲来する場合にはNOWT-PARIによる検討が必要になってくる。しかしながら、沖合で発生するフリークウェーブなどの突発波浪に対しては、これまでにNOWT-PARIで取り扱った事例はほとんどなく、NOWT-PARIがどの程度の計算精度を有しているのかについてはほとんどわかっていない。そこで、本論文では深海域で発生が確認されやすいフリークウェーブの発生・伝播過程に着目し、NOWT-PARIの適用性や計算精度について考察を行った。具体的に、

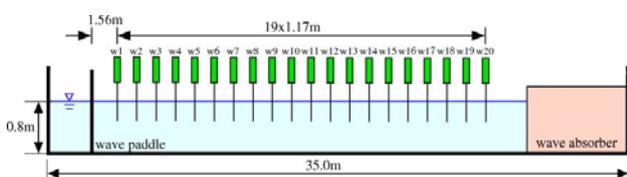


図-1 実験水路の断面図および波高計配置図

表-1 入射波浪諸元

case	$T_{in}$ (s)	$H$ (cm)	$h$ (m)	$H/L_0$	$\gamma$
1	1.0	6.24	0.80	0.04	1.0
2	1.0	6.24	0.80	0.04	3.3
3	1.0	6.24	0.80	0.04	10.0
4	1.0	3.12	0.80	0.02	10.0
5	1.0	4.68	0.80	0.03	10.0

フリークウェーブの発生・伝播に関する断面水路実験とNOWT-PARIによる数値計算を実施し、両者の結果に対して比較検討を行った。この際、フリークウェーブの発生に関わりの非常に深い波の非線形干渉を中心に論じた。

2.5.2 断面水路実験の概要

実験は、長さ35m、幅0.6m、高さ1.3mの断面水路内に、図-1に示すようなフリークウェーブの発生が確認されている深海域を想定し、一方向不規則波列を造波して水路内の波形変化を計測した。

実験に用いた一方向不規則波列は、入射波周期 $T_{in}$ を1.0sに固定し、JONSWAP型スペクトルのスペクトル尖鋭度 $\gamma$ や入射波高 $H$ に対する波形勾配 $H/L_0$  ( $L_0$ : 周期1.0sを有する深海波の波長)を変化させて5ケース設定した。これらの入射波浪をまとめたものを表-1に示す。実験水深は、周期1.0sの波浪が深海波となるように $h=0.8$ mに設定した。また、統計的な変動性を抑制するために10000波の波を造波し、サンプリング周波数20Hzで造波板前面から等間隔に20地点の水面波形を計測した。なお、10000波の計測方法は、1計測あたり1000波の波を造波させ、その波群構造のみを変化させて10計測行い、1つの入射波浪条件につき合計10000波の解析を行った。解析では、各統計量を算出するための1波列の波の数 $N$ を200に固定し、50波列を対象に各地点で計測された水面変位から波の非線形性を表すskewness(歪度:  $\mu_3$ )やkurtosis(尖鋭度:  $\mu_4$ )、最大波高の期待値 $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$ を算出した。

2.5.3 数値計算の概要

断面水路実験の結果と比較検討を行うため、断面水路実験の状況を適切に再現したNOWT-PARIによる波浪変形計算を実施した。数値計算で用いた入射波浪諸元や計測条件は断面水路実験で用いたものと同じとした。計算領域は図-2に示すように、格子数は $x$ 方向に684、 $y$ 方向に14メッシュ作成し、沖側境界

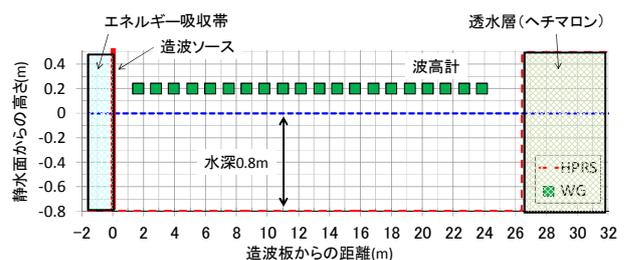


図-2 計算領域（断面図）

## 2.5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題

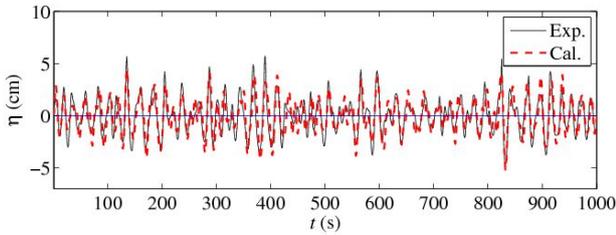
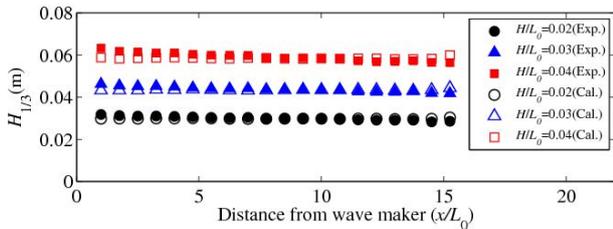
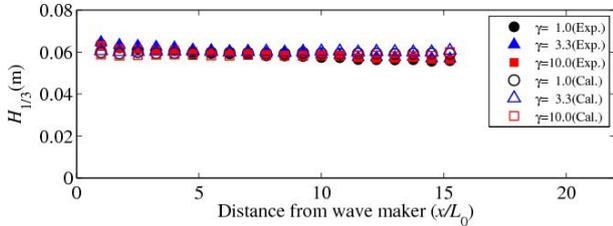


図-3 断面水路実験と数値計算で得られた水面波形の一例（抽出地点：造波板に最も近い位置，黒実線：実験結果，赤点線：計算結果）



(a) 波形勾配



(b) スペクトル尖鋭度

図-4 有義波高の空間変化

にはエネルギー吸収帯（周期1.0sの深海波長 $L_0$ に相当する幅=32メッシュ）を，岸側境界には消波工（ヘチマロン：長さ5.5m）を想定した透水層を設定した．格子間隔は $dx=dy=0.05\text{m}$ （ $\approx L_0/30\text{m}$ ）に，計算時間間隔は $dt=0.001\text{s}$ （ $=T/1000\text{s}$ ）に設定した．また，計算出力時間間隔は，実験のサンプリング周波数と同一の $0.05\text{s}$ （ $=20\text{Hz}$ ）とし，計算結果出力位置は波高計の設置箇所とほぼ等しくなる位置に設定した．

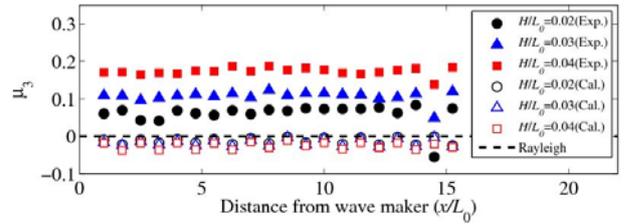
### 2.5.4 結果と考察

#### (1) 非線形統計量の空間変化

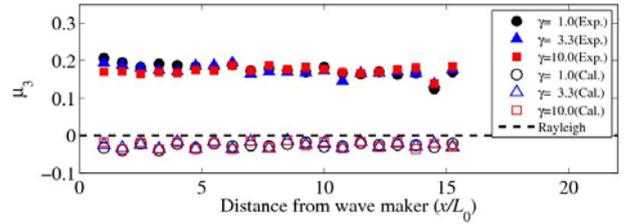
まず，数値計算による波の非線形性の再現性を確認するため，非線形統計量の空間変化を検証した．

図-3に断面水路実験と数値計算で得られた水面波計を比較したものを示す．水面波形は造波板に最も近い位置で得られた波形を示しており，黒実線が実験結果，赤点線が計算結果である．この図より，両波形に若干の差異は見られるものの，その位相はおおむね一致し，計算結果は実験結果を比較的良く表現することが可能であるように見える．

図-4～図-6に示すのは，有義波高やskewness，kurtosisの空間変化を波形勾配およびスペクトル尖鋭度ごとに比較した結果である．各図の横軸は周期1.0sの深海波長 $L_0$ で無次元化した造波板からの距離

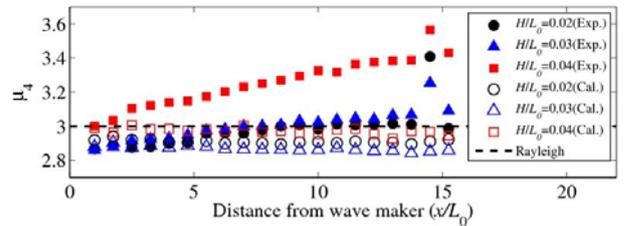


(a) 波形勾配

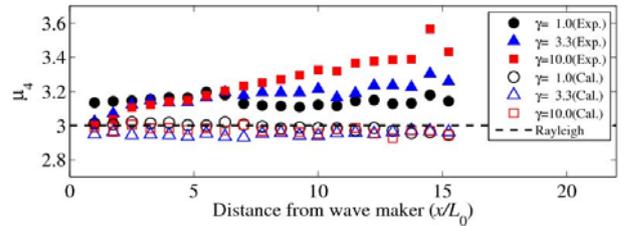


(b) スペクトル尖鋭度

図-5 skewnessの空間変化



(a) 波形勾配



(b) スペクトル尖鋭度

図-6 kurtosisの空間変化

$x$ であり，各色で塗りつぶされたプロットは実験結果を，白塗りのプロットは計算結果を表し，プロットの形状は波形勾配およびスペクトル尖鋭度の違いを表している．また，図-5および図-6の破線は波高分布がRayleigh分布に従う場合に得られるskewnessおよびkurtosisを表している．これらの図より，有義波高についてみると，実験および計算結果の有義波高は各波形勾配（入射波高）に応じた値でおおむね一様に分布し，両者の差異はほとんどみられない．しかしながら，水面波形の非線形性を表すskewnessやkurtosisに対しては顕著な違いが見られる．

まず，skewnessについてみると，実験結果では初期の波形勾配に依存してskewnessが一様に分布している． $H/L_0=0.02$ の場合には空間平均したskewnessは $\mu_{3(\text{mean})}=0.06$ であり， $H/L_0=0.03$ ， $0.04$ の場合には，それぞれ $\mu_{3(\text{mean})}=0.11$ ， $0.18$ である．一般に，skewnessは水面波形の尖度を表す非線形量であり，非線形性が強くなると増加し，波峯が尖鋭化（ $\approx$ 波谷が扁平化）していることを意味する．この波峯の尖鋭化は，2次オーダーの非線形干渉の影響を受け

## 2.5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題

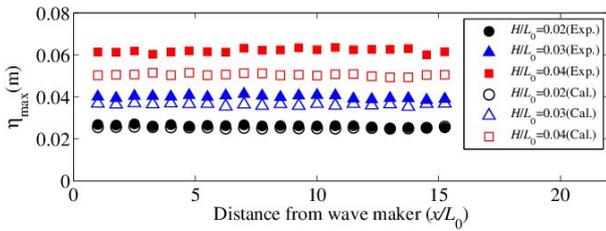


図-7 最大水位の空間変化 (波形勾配)

て生じることがTayfun<sup>9)</sup>により報告されており、波高に対してはその影響は直接的には及ばないことも明らかにしている。また、Longuet-Higgins<sup>10)</sup>による狭帯域スペクトルを仮定した2次の非線形干渉理論では、skewness:  $\mu_3^{\text{bound}}$ は以下の式 (1) で表され、波形勾配に依存する。

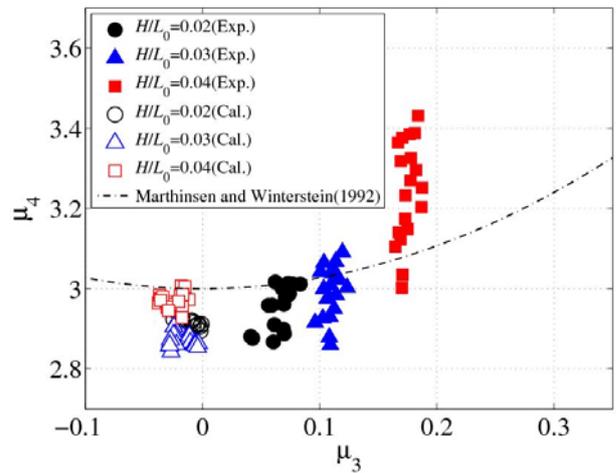
$$\mu_3^{\text{bound}} = 3k\sqrt{m_0} \quad (1)$$

ここで、 $k$ は波数、 $m_0$ は水面変位の分散 (0次モーメント) である。実験結果では、 $H/L_0=0.02$ の場合には $\mu_{3(\text{mean})}=0.06$ 、 $H/L_0=0.03$ 、 $0.04$ の場合には、それぞれ $\mu_{3(\text{mean})}=0.11$ 、 $0.18$ であり、それぞれに対応する理論値は $\mu_3^{\text{bound}}=0.09$ 、 $0.12$ 、 $0.16$ である。これより実験では、2次の非線形干渉の影響によるskewnessの発達が確認できる。一方、計算結果のskewnessは、初期の波形勾配やスペクトル尖鋭度にかかわらず、 $\mu_{3(\text{mean})} \approx -0.02 \sim -0.03$ でおおむねRayleigh分布に従う。すなわち、数値計算では、断面実験で確認されたほどの顕著な2次の非線形干渉は生じておらず、その結果として、skewnessの発達 (波峰の尖鋭化) が見られなかったものと考えられる。図-7に示すように、最大水位の空間変化からもわかるように、数値計算における波峰の尖鋭化は断面実験ほど顕著ではないことが確認できる。

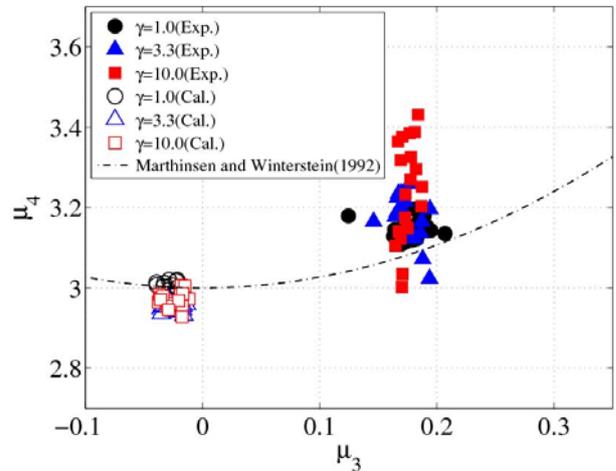
次に、kurtosisについてみると、実験結果では、波形勾配やスペクトル尖鋭度によるkurtosisの増加割合に違いはあるものの、波の伝播とともにkurtosisは単調増加し、Rayleigh分布からの乖離を確認することができる。特に、 $H/L_0=0.04$ 、 $\gamma=10$ の場合にはkurtosisは $\mu_4=3.0 \sim 3.4$ まで増加している。これらは、Mori and Yasuda<sup>11)</sup>が報告しているように、深海域では特に4波相互作用の効果により、3次の非線形干渉の影響を受けてkurtosisが変化 (増加) することを裏付ける結果となっている。また、skewnessと同様に、2次の非線形干渉理論<sup>10)</sup>により表されるkurtosis:  $\mu_4^{\text{bound}}$  (式 (2)) を用いると、

$$\mu_4^{\text{bound}} = 3 + 24k^2 m_0 \quad (2)$$

いずれの波浪条件に対しても $\mu_4^{\text{bound}}=3.02 \sim 3.07$ となり、kurtosis変化は2次の非線形干渉によるものではないことがわかる。一方、計算結果をみると、実験結果で確認されたkurtosisの増加はみられず、Rayleigh分布におおむね従う。これは、NOWT-PARI



(a) 波形勾配



(b) スペクトル尖鋭度

図-8 skewnessとkurtosisの関係

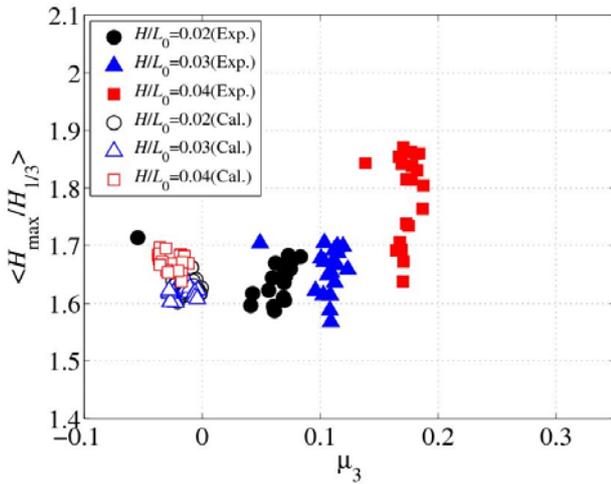
の支配方程式である修正ブシネスク方程式は、2次オーダーまでの計算精度しか有しておらず、kurtosis変化に影響を及ぼす3次の非線形干渉を考慮していないためである。

以上より、上記についてまとめると、次のように考察できる。断面水路実験では、2次の非線形干渉の影響を受けて初期の波形勾配に応じてskewnessが発達し、3次の非線形干渉により波の伝播とともにkurtosisが増加するということがいえる。一方、数値計算では、2次の非線形干渉までしか考慮できないことにより、3次の非線形干渉により発達するkurtosis変化は再現できず、また、今回の計算範囲において顕著な2次オーダーの非線形干渉が見られなかったことによりskewnessの発達が見られなかった。

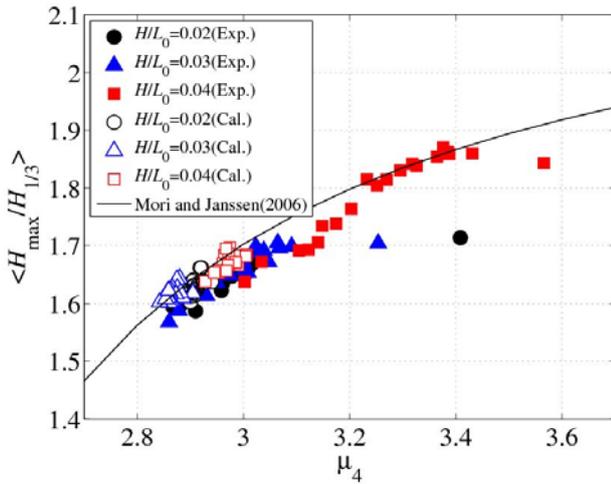
### (2) 2次と3次の非線形干渉

次に、非線形干渉に対する計算精度を詳細に確認するため、図-8にskewnessとkurtosisの関係を示す。図の横軸および縦軸は、それぞれ全地点で計測されたskewnessおよびkurtosisを表している。図中の破線はLonguet-Higgins<sup>10)</sup>による2次の非線形干渉理論で表されるskewness (式 (1)) とkurtosis (式

## 2.5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題



(a) skewness :  $\mu_3$



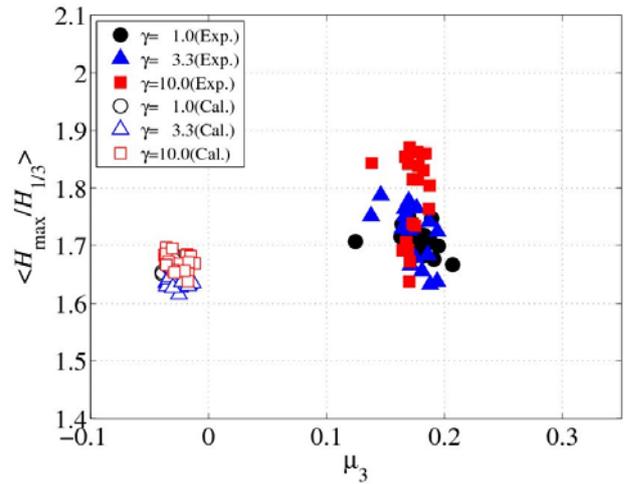
(b) kurtosis :  $\mu_4$

図-9 非線形干渉の最大波高への影響（波形勾配）

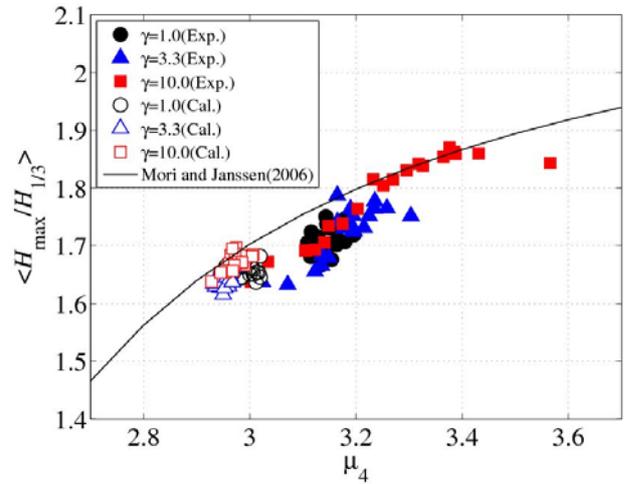
(2) から導出した関係式 (3) を表したものである（たとえば, Marthinsen and Winterstein<sup>12)</sup>）.

$$\mu_4^{bound} = 3 + \frac{8}{3} (\mu_3^{bound})^2 \quad (3)$$

これより、実験結果ではkurtosisはskewnessに依存しないことがわかる。特にフリークウェーブの出現確率の高い波浪条件 ( $H/L_0=0.04$ ,  $\gamma=10$ ) において、これらの分布は2次の非線形干渉下における skewness と kurtosis の関係式（図中の破線）から大きくはずれ、過大側に幅広く分布している。すなわち、2次の非線形干渉ではなく、3次の非線形干渉が kurtosis の増大に影響を与えていることが確認できる。また、波形勾配が小さい波浪条件では、3次の非線形干渉の効果が小さく、おおむね2次の非線形干渉により skewness や kurtosis が変化することがわかる。一方、計算結果では、すべての条件に対して kurtosis の分布幅が狭く、2次の非線形干渉理論におおむね一致しているように見える。しかしながら、前節で述べたように、2次の非線形干渉による skewness の発達を確認されていないことから、このような結果には疑問が残り、現段階ではその原因に



(a) skewness :  $\mu_3$



(b) kurtosis :  $\mu_4$

図-10 非線形干渉の最大波高への影響（スペクトル尖鋭度）

については不明である。

### (3) 非線形干渉と最大波高の関係

最後に、これまでの結果を踏まえ、フリークウェーブの発生を間接的に表す最大波高に対する再現性を確認するため、非線形干渉と最大波高の関係について検証した。

図-9および図-10に skewness および kurtosis と最大波高の関係を波形勾配とスペクトル尖鋭度に分けて示す。図中の  $\langle \rangle$  はアンサンブル平均を表し、縦軸は有義波高に対する最大波高の期待値である。各図 (b) 中の実線は Mori and Janssen<sup>2)</sup> により構築された4波相互作用を考慮した非線形理論に基づく最大波高の推定式である。これらの図より、実験および計算結果の最大波高は、skewness に独立して分布していることがわかる。これは、前節において述べたように、2次の非線形干渉に依存する skewness は、波峰を尖鋭化させる効果を有するが、波高には直接影響を与えないためである<sup>9)</sup>。一方、最大波高の kurtosis 依存が実験および計算結果から確認できる。これは、kurtosis は3次の非線形補正として最大波高分布に直接影響を与えるため、 $\langle H_{max}/H_{1/3} \rangle$  と

## 2.5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題

kurtosisには良い相関が見られる。しかしながら、数値計算では、3次の非線形干渉を考慮できていないにもかかわらず、良い相関が見られている。この原因については不明であるが、一義的にkurtosisが決まれば、Mori and Janssen<sup>2)</sup>の推定式により最大波高を推定することが可能であることがわかる。ただし、同一条件に対する断面実験と数値計算の最大波高の期待値に違いがみられている。たとえば、フリークウェーブの発生しやすい波浪条件 ( $H/L_0=0.04$ ,  $\gamma=10$ ) において、断面実験における最大波高の期待値の最大値は  $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle_{\max} \doteq 1.9$  であり、数値計算では  $\langle H_{\max}/H_{1/3} \rangle_{\max} \doteq 1.7$  である。これは、3次の非線形干渉の最大波高の出現確率に及ぼす影響によるものと考えられる。

### 2.5.5 まとめ

本論文では、深海域で発生が確認されやすいフリークウェーブの発生伝播過程に着目し、断面水路実験およびNOWT-PARIを活用した数値計算を実施し、両者の結果の比較検討を行うとともに、NOWT-PARIの適用性について検証を行った。これらの検証の結果、2次オーダーの計算精度を有するブシネスク方程式を用いた数値計算では、波の非線形性を表すskewnessやkurtosisの変化を適切に表現することができないことがわかった。また、3次の非線形干渉によるkurtosis変化は依存して増大する最大波高についても適切に再現することが難しいことが改めて確認された。しかしながら、これらの影響を直接受けけない平均量のような波浪統計量（たとえば、有義波高）に対してはおおむね再現可能であることがわかった。

本研究の成果の一部は、科学研究費補助金（代表者：森信人）によるものであることを付記する。

### 参考文献

- 1) Janssen, P.A.E.M. (2003): Nonlinear four-wave interactions and フリークウェーブs, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 4, pp.863-844.
- 2) Mori, N. and P.A.E.M. Janssen (2006): On kurtosis and occurrence probability of フリークウェーブs, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 7, pp.1471-1483.
- 3) 森 信人・P.A.E.M. Janssen・川口浩二：多方向性を考慮した異常波浪予測モデルの提案とその検証，*海岸工学論文集*，第55巻，pp.111-115，2008.
- 4) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港設計への活用に関する研究，*港湾空港技術研究所資料*，No.1036，162p，2002.
- 5) 平山克也・平石哲也：ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性，*海岸工学論文集*，第51巻，pp.11-15，2004.
- 6) 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.706-710，2006.
- 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，*港湾空港技術研究所報告*，第48巻，第2号，pp.199-214，2009.
- 8) 平山克也・岩瀬浩之・加島寛章：任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波，*土木学会論文集B2（海岸工学）*，Vol.65，No.1，pp.11-15，2009.
- 9) Tayfun, M. A. (1983): Nonlinear effects on the distribution of crest-to-trough wave heights, *Ocean Engineering*, Vol.10, No.2, pp.97-106.
- 10) Longuet-Higgins, M. S. (1963): On the distribution of the heights of sea waves: some effects of nonlinearity and finite band width, *J. Geophys. Res.*, Vol.85, No.C3, pp.1519-1523.
- 11) Mori, N. and T. Yasuda (2001): Effects of high order nonlinear wave-wave interactions on random waves, *Rogue Waves 2000, IFREMER, Brest*, pp.229-244.
- 12) Marthinsen, T. and S. Winterstein (1992): On the skewness of random surface waves, In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.3, pp.472-478.

# 3.

---

ブシネスク勉強会  
10 回記念講演

## 平成23年度 ブシネスクモデルを用いた波浪変形計算に関する勉強会 ブシネスク勉強会の開催実績と今後の展望

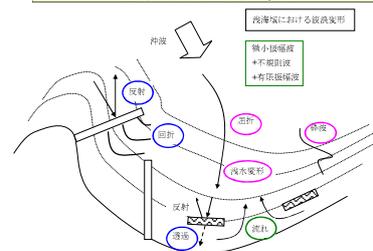
独立行政法人 港湾空港技術研究所  
海洋研究領域 波浪研究チーム  
チームリーダー 平山克也

### ブシネスク勉強会の開催経緯

#### ● ブシネスク勉強会の開催

- 平成11年度・・・ブシネスクモデル研究会
  - 大学，企業，港空研から8編の研究発表
    - 様々な課題へNOWT-PARI Ver4.6を適用
    - 各種ブシネスクモデルの計算精度の比較
- 平成13年度・・・実務への適用性検討会
  - 大学，企業，港空研から9編の調査報告
    - NOWT-PARI Ver4.6の現地適用性を検証
    - 学識経験者による委員会・幹事会の開催
- 平成14年度・・・第1回ブシネスク勉強会
  - **港湾・海岸設計の実務への適用**と普及，問題点の把握・改善を図る
  - 年1回(2月頃)開催し，平成23年度(2012/01/30開催)で第10回を数える
  - 大学・民間企業を中心に，延べ550名以上の参加者(参加費無料)
  - 参加者・事務局による発表，**プログラムコード(Ver4.6)の配布・更新**
- 平成21年度日本港湾協会技術賞(代表者：高橋主監)

港湾・海岸周辺の波浪変形



# ブシネスク勉強会の開催経緯

- Webサイトによる開催案内・プログラムダウンロード(認証あり)

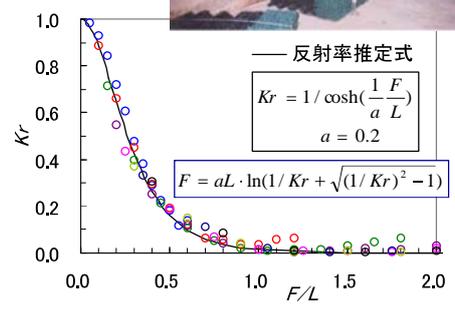
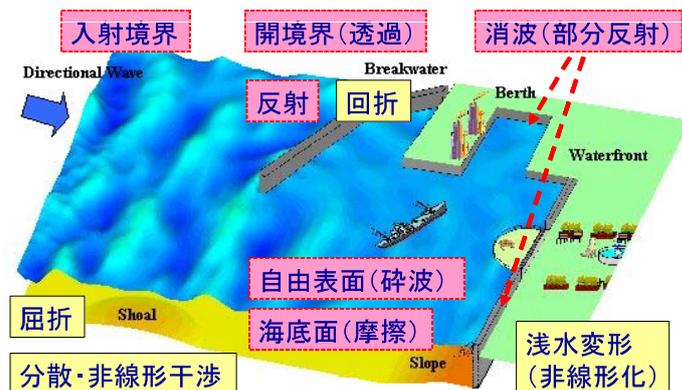


# ブシネスクモデル“NOWT-PARI”の概要

NOlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute

- NOWT-PARI Ver4.6 (基本プログラム)

- 現地港湾を対象としたとき、**最低限必要な境界処理法**を導入
  - 造波境界・・・吸収造波(線境界入射法)
  - 反射境界・・・完全反射, 無反射・目標反射率(高次スポンジ層)
  - 底面摩擦境界・・・流速の2乗に比例する摩擦抵抗 ( $f=0.02$ )
  - 砕波計算・・・流速波速比, 渦動粘性係数(一様勾配斜面を仮定)



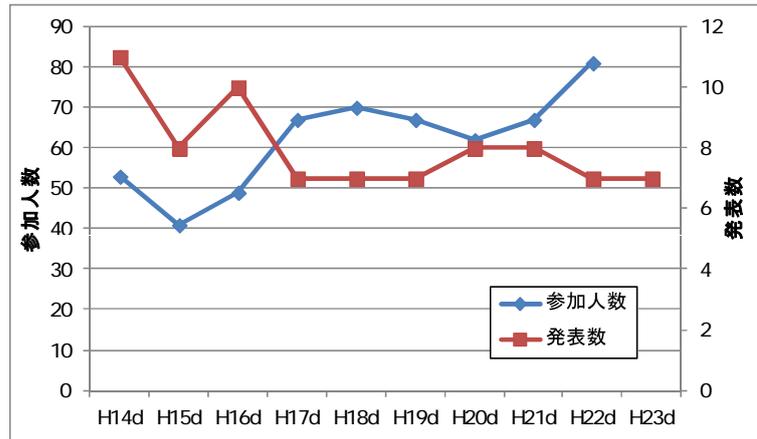
高精度波浪変形計算のイメージ(波形伝播)      基礎方程式で考慮される変形      境界処理法が必要な変形



## ブシネスク勉強会の開催実績

- 開催場所の推移(第1回～第10回)
  - 平成14～15年度 (独)港空研 本館1F大会議室
  - 平成16～17年度 国総研第2庁舎(旧研修センター)
  - 平成18～22年度 横須賀市産業交流プラザ 第1研修室
  - 平成23年度～ 横須賀市ヴェルクよこすか 第1会議室
- 参加人数と発表数の推移

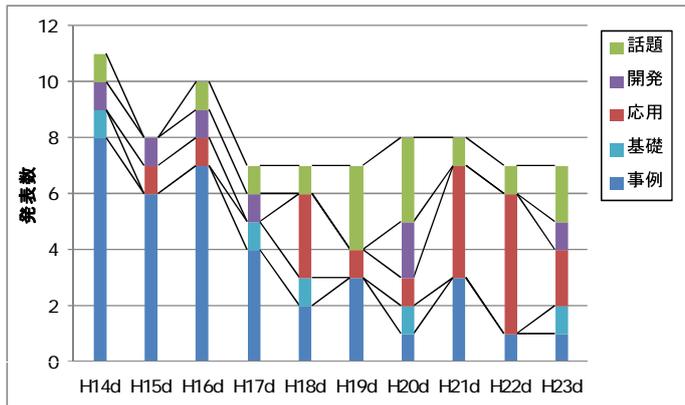
- 参加人数(のべ)
  - 557名(第9回まで)
- 発表数(合計)
  - 80編(第10回まで)



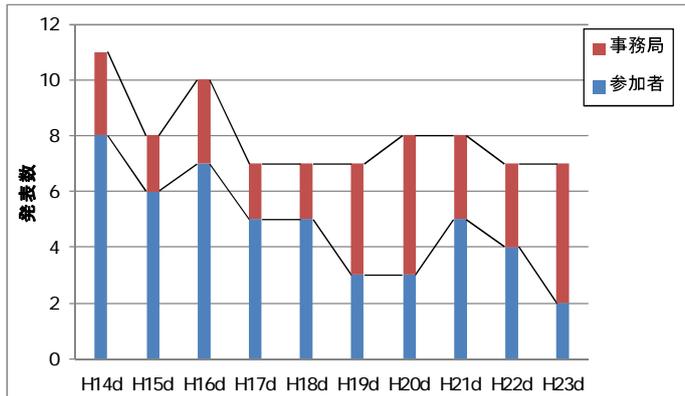
## ブシネスク勉強会の開催実績

- 発表内容と発表者の推移

- 発表内容
  - 事例 実港湾等への適用
  - 基礎 Ver4.6の計算特性
  - 応用 Ver4.6の改良・拡張
  - 開発 Ver5.xの適用事例
  - 話題 周辺研究の紹介等



- 発表者
  - 参加者 大学・行政・企業
  - 事務局 (独)港空研



# ブシネスク勉強会の開催実績

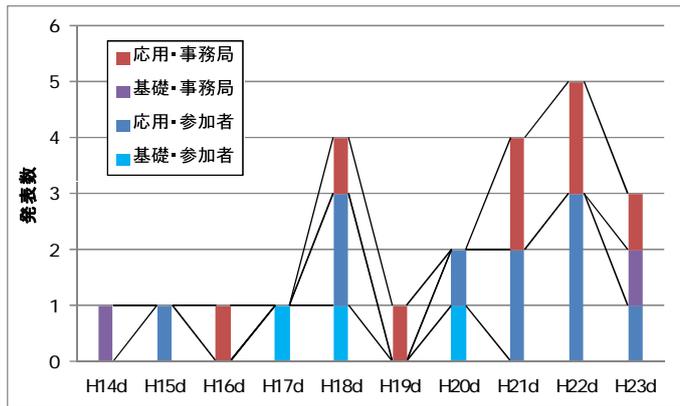
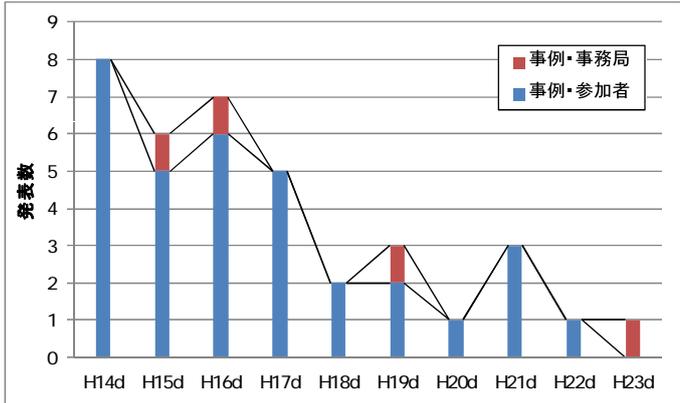
## ● 発表内容と発表者の関係

### ● 発表内容

- 事例 実港湾等への適用
- 基礎 Ver4.6の計算特性
- 応用 Ver4.6の改良・拡張
- 開発 Ver5.xの適用事例
- 話題 周辺研究の紹介等

### ● 発表者

- 参加者 大学・行政・企業
- 事務局 (独) 港空研



## (参考) ブシネスク勉強会の発表題目一覧(1)

### ● 発表内容(事例)

#### ● 事例(36)・・・設計波(被災波), 静穏度, 長周期波, 消波工, 等

発表日	発表題目	発表者	発表者
H14d	ブシネスクモデル(NOWT-PARIVer.4.6β)の現地適用事例 - 大型港湾(苫小牧西港区)と漁港(青森)	日本データサービス株式会社	三船修司 他
	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	国土環境株式会社	糸井正夫 他
	ケーソン式混成堤の堤頭部付近の波浪変形解析	東電設計株式会社	樋口豊久 他
	「ブシネスク方程式による波浪変形計算システム(P046)」の現地適合性について(小名浜港)	日本海洋コンサルタント株式会社	法橋一賢
H15d	横須賀港走水地区における波浪場解析	国土交通省関東地方整備局東京海口航路工事事務所 財団法人港湾空港建設技術サービスセンター 株式会社エコー	小野寺幸夫 他
	玄界灘東海域におけるブシネスクモデルによる適用事例及びその課題	株式会社日本港湾コンサルタント	田川昌宏 他
	ブシネスクモデルの東通発電所建設地点への適用事例	株式会社開発計算センター	小林英次 他
	敦賀港におけるブシネスクモデル(NOWT-PARI)の適用と課題	財団法人日本気象協会	市川雅史 他
H16d	ブシネスクモデル(NOWT-PARIVer.4.6β)の現地適用事例 - 紋別港-	日本データサービス株式会社	川口 勉
	横須賀港走水地区における波浪場解析と実験との比較	株式会社エコー	原崎憲太郎
	ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)による港内静穏度の検討 - 伏木富山港(伏木地区)の港	国土環境株式会社	成毛辰徳
	長周期波が卓越する波浪場へのブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β)の適用	株式会社三洋コンサルタント	西井康浩
H17d	V字型チャンネルの効用	三井共同建設コンサルタント株式会社	國田 治
	高知港における台風0209号来襲時の波浪変形計算への適用事例	独立行政法人港湾空港技術研究所	田中和宏
	反射波が卓越する防波堤前面海域での数値計算と水理模型実験との比較	(株)三洋コンサルタント	西井康浩
	秋田港における港内静穏度の評価法の検討	(株)エコー	鈴木智浩
H18d	鷺泊港における高波高時の浅海変形計算への適用	(財)日本気象協会	齋藤勝也
	台風による高波浪の河川域における潮上・越波計算への適用	(株)アルファ水エコンサルタンツ	秋田雄大
	NOWT-PARI(Ver.4.6β)の透過堤への適用事例	日本データサービス(株)	室岡浩司
	水面波形成力情報の活用 - 函館港島防波堤の転倒被災メカニズムに関する考察 -	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
H19d	港口部における時系列波浪情報の予測	神戸大学大学院	齋 要順
	寒測波スペクトルを用いた港内静穏度評価法の検討	株式会社エコー	鈴木智浩
	東浦漁港におけるブシネスクモデルの浅瀬解析への適用事例	株式会社クマシロシステム設計	佐々木淳一
	那覇港における非線形波浪変形モデルを用いた波浪予測	ニシキコンサルタント株式会社	村本哲三
H20d	副振動が卓越する漁港(熊石漁港)へのブシネスクモデルの適用とその課題	株式会社クマシロシステム設計	阿部島直哉
	複雑なリーフ地形における波浪変形	鹿島建設株式会社	福山貴子
	透過型防波堤を考慮した長周期波計算	株式会社エコー	原崎憲太郎
	沖合人工島に設けた緩傾斜護岸前面の波浪変形と越波打上げの検討	株式会社三洋コンサルタント	小野貴也
H21d	久慈港半崎地区護岸被災波の検討	独立行政法人港湾空港技術研究所	春尾和人
	漁港における長周期波計算の適用事例	日本データサービス株式会社	鶴西弘行
	隅角部における波高増大の検討	パシフィックコンサルタンツ	辻尾大樹
	高知県電串湾の長周期波の検討	(株)東京久栄	西村規宏
H22d	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	国土交通省東北地方整備局秋田港湾事務所 (財)沿岸技術研究センター 日本海洋コンサルタント(株)	山下 徹
	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	(独)港湾空港技術研究所	
H23d	青森港における港内反射波対策工の検討(仮)	(株)エコー	峯村浩治
H23d	(仮)防波堤の滑动に伴う波高増大	独立行政法人港湾空港技術研究所	大久保陽介

## (参考)ブシネスク勉強会の発表題目一覧(2)

### ● 発表内容(基礎・応用)

#### ● 基礎(5)・・・差分誤差, 前駆時間, 分散性, 非線形性, 等

H14d	多方向波の有効造波領域と差分条件が計算精度に及ぼす影響に関する検討	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
H17d	津波再現計算への適用性 ~前面地形の違いによる津波の砕波・遡上および波力特性に関する研究	八千代エンジニアリング株式会社	中平順一
H18d	長周期波再現計算の適用における基礎的な検討	株式会社三洋コンサルタント	西井康浩
H20d	浅海域を伝播する津波特性に関する検討	日本港湾コンサルタント	国栖広志
H23d	(仮)フリークウェーブの発生・伝播計算における課題	独立行政法人港湾空港技術研究所	加島寛章

#### ● 応用(18)・・・流れの影響, 砕波, 統計処理, 沖波, 高速化, 等

H15d	東京湾に面する港湾の風波とうねりを考慮した高精度波浪変形計算のパソコンシステム	アルファコンサルタント株式会社	上原 功
H16d	河口部における波高増幅率の簡易算定手法	独立行政法人港湾空港技術研究所	峯村浩治
H18d	港外波浪のスペクトル形状を考慮した港内波浪の推定	株式会社エコー	仲井圭二
	平均水位上昇量を考慮した波高および波向算定方法の提案	いであ株式会社	成毛辰徳
H19d	ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver4.6c4)に対する主な修正事項とその解説および効果の検証	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
	JONSWAPおよび任意の方向スペクトルを用いたブシネスクモデルの入射波の高精度化	独立行政法人港湾空港技術研究所	宮里 一郎
H20d	ブシネスクモデルを用いた係留船舶の動揺計算	三洋コンサルタント	西井康浩
H21d	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	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
	「うねり性波浪」の解析と予測・監視システムの構築	(財)日本気象協会	松浦邦明
	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	独立行政法人港湾空港技術研究所	岩瀬浩之
	平面・断面2次元連続モデルの有効活用に関する一検討	名古屋大学大学院	川崎浩司
H22d	複数方向スペクトルに対する不規則波形の波浪統計量	独立行政法人港湾空港技術研究所	岩瀬浩之
	うねり性波群に伴う水位の長周期変動の空間分布の算定	独立行政法人港湾空港技術研究所	加島寛章
	2次元配列変数の1次元化による演算の高速化について	(株)エムエーシー	松島三郎
	GPUによるNOWT-PARIの高速化について ①NOWT-PARIのGPU化	プロメテック・ソフトウェア(株)	川上 浩
H23d	GPUによるNOWT-PARIの高速化について ②オリジナルとの比較計算	日本データサービス(株)	蒔田俊輔
	(仮)船跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例	(株)三洋コンサルタント	西井康浩
	(仮)NOWT-PARI ver.4.6iにおける砕波減衰計算の改良	独立行政法人港湾空港技術研究所	宇野喜之

## (参考)ブシネスク勉強会の発表題目一覧(3)

### ● 発表内容(開発・話題)

#### ● 開発(7)・・・砕波・遡上モデル(リーフ), 透水層モデル(反射率)

H14d	ブシネスクモデル(NOWT-PARI)を使用した1次元砕波計算	独立行政法人港湾空港技術研究所	原 信彦
H15d	ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6b)における擬似段波モデルの適用(その2)	独立行政法人港湾空港技術研究所	峯村浩治
H16d	リーフ上の波浪変形計算への適用	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
H17d	透水層を用いた任意反射境界処理法に関する2.3の改良について	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
H20d	リーフ上護岸の設計波算定への適用	独立行政法人港湾空港技術研究所	春尾和人
	リーフ上を遡上する津波の変形計算への適用	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
H23d	(仮)消波工への斜め入射による波の反射率に関する考察	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也

#### ● 話題(14)・・・波浪モデル, 波浪観測・推算, 長周期波対策, 等

H14d	非線形緩勾配方程式を用いた計算手法の解説と計算事例	独立行政法人港湾空港技術研究所	有川太郎
H16d	エネルギー平衡方程式法によるリーフ域を含む複雑地形に対する波浪変形の計算精度	五洋建設(株) 技術研究所	杉田繁樹
H17d	大型浮体構造物や大型没水構造物と相互干渉する表面波および内部波の数値計算	独立行政法人港湾空港技術研究所	柿沼 太郎
H18d	GPS波浪計の全国展開によるナウファスの再構築	独立行政法人港湾空港技術研究所	永井紀彦
	うねり性高波浪の近年の傾向について	株式会社エコー	峯村浩治
H19d	波浪推算とその活用	独立行政法人港湾空港技術研究所	川口浩二
	GPS波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性	独立行政法人港湾空港技術研究所	永井紀彦
H20d	人工サーフィンリーフに関する近年の動向	独立行政法人港湾空港技術研究所	鈴木高二朗
	ナウファスが捉えた2008年2月24日の寄り回り波	独立行政法人港湾空港技術研究所	永井紀彦
	NOWT-PARI Ver4.6c6aの機能およびマニュアル説明	独立行政法人港湾空港技術研究所	宮里 一郎
H21d	港内における長周期波対策	独立行政法人港湾空港技術研究所	平石哲也
H22d	NOWT-PARIの基礎と実用性	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
H23d	(仮)ブシネスク勉強会の開催実績と今後の展望	独立行政法人港湾空港技術研究所	平山克也
	(仮)波浪変形計算の発展の歴史と今後の課題	(財)沿岸技術研究センター	高山知司

## (参考)NOWT-PARI Ver4.6のリリース履歴(1)

- 平成13年12月 NOWT-PARI Ver4.6 $\beta$ の配布
  - 平成13年度ブシネスクモデル検討会で使用した評価版
  
- 平成17年2月 NOWT-PARI Ver4.6c3 の配布
  - Ver4.6 $\beta$ のデバッグ(平成15年1月に情報提供済み:Ver4.6c)
    - 計算領域の外周スポンジ層の範囲設定
    - 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)
  - ソースコードの整理(平成16年4月に情報提供済み:Ver4.6c2)
    - 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
    - 係数算定(Y-sweep)に係るDOループの効率化(2重ループを跨ぐIF文排除)
  - 開境界, 部分反射境界の設定法の改良
    - 層流抵抗項の高次化による**高次スポンジ層の導入**

## (参考)NOWT-PARI Ver4.6のリリース履歴(2)

- 平成18年6月 NOWT-PARI Ver4.6c4 の配布
  - Ver4.6c3のデバッグ(重大なバグが確認されたため緊急リリース)
    - 水域と陸域の境界格子で碎波計算を行った場合に, 演算の破綻を引き起こす恐れがあった。
  
- 平成19年2月 NOWT-PARI Ver4.6c5a の配布
  - 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乗平均値 $\times 4.004$
      - ※3 HAKOU:ゼロアップ法による平均波高 $\times 1.597$
    - **碎波計算**に用いる流量振幅の定義, 渦動粘性係数の算定時刻の修正
    - **碎波計算**に用いる係数 $a_D$ 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

## (参考)NOWT-PARI Ver4.6のリリース履歴(3)

- 平成21年2月 NOWT-PARI Ver4.6c6a の配布
  - 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(calcmd)の導入
  
- 平成22年1月 NOWT-PARI Ver4.6c7a の配布
  - Ver4.6c6aのデバッグ(重大なバグが確認された緊急リリース)
    - 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
      - 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° 異なるとともに、角周波数の符合が逆になっていたため
    - 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)

## (参考)NOWT-PARI Ver4.6のリリース履歴(4)

- 平成23年2月 NOWT-PARI Ver4.6d7a の配布
  - calcmd(コントロールファイル名)をcalcmd\_dへ変更
    - 計算格子のサイズ、数に応じソースコードを変更する手間を解消するため、depth(水深データファイル)、addfd(スポンジ層データファイル)のヘッダー部にこれらの情報を追加し、それぞれのファイル名をdepth\_d, addfd\_dへ変更
  - 任意水深の造波境界へ対応
    - 沖側境界の水深変化に伴う波速変化を考慮
  - Ver4.6c7aのデバッグ
    - 流量Flux(P, Q)から、同じ位置(計算格子中央)及び同時刻(各計算ステップのx-sweep及びy-sweep)の水平2成分流速を算出するサブルーチン:CALCUVにおいて、y方向流速vを算定するIFブロック文にbugが確認されたことへの対応
      - uvavgに出力される計算結果が若干修正されるとともに、x方向の碎波計算(サブルーチン:CALBRK)の状況にも若干影響するものの、その程度は非常に小さいと思われる。

## (参考)NOWT-PARI Ver4.6のリリース履歴(5)

- 平成24年1月 NOWT-PARI Ver4.6d8a の配布
  - 複数方向スペクトル造波の導入に伴うプログラム修正
    - 外部入力する成分波リストファイル (spectdat.in) のフォーマット修正
      - 1行目:各方向スペクトル(に対応する成分波リストセット)の数:NRP
      - 2行目以降:各方向スペクトルの成分波リストセット
        - ヘッダーに記載の各方向スペクトルの諸元(NS, IWTP, GAMMA)に続いて,各方向スペクトルの位置(造波境界:I0上の沿岸方向格子番号:J)をJRPとして記載する
        - ただし, NRP=1のときは記載する必要なし
    - 成分波リスト作成実行ファイル (mkspe.exe) の更新
      - 外部出力する成分波リストファイル (spectdat.in) のフォーマット修正
      - 複数方向スペクトル造波に対応するため,条件設定ファイル (cont.txt) に NRPを指定する項目を追加(詳細はマニュアル参照)
        - NRP>1のとき,条件設定ファイルと合わせて,方向スペクトル番号とJRPとの対応を規定するファイル (\*.pnt)が必要
    - NRP>1のとき,任意水深に対応した造波を自動(強制)選択する

## ブシネスク勉強会の周辺状況

- パッケージソフトウェアの開発
  - NOWT-PARI Ver4.6d7aをベースとした直轄職員向けソフト
  - 直轄職員向け研修を実施(平成22年度より年1回程度)
- GPS波浪計の普及,沿岸波浪計の高精度化
- (浅海域)波浪推算モデル(SWAN, WAM, 等)の普及
- エネルギー平衡方程式法の拡張
  - 回折変形を考慮
    - 間瀬肇・高山知司・北野利一・森安里夫(1999):位相平均波浪変形解析モデルへの回折効果のモデリングと適用性に関する研究
  - 波と流れの干渉を考慮
    - 間瀬肇・由比政年・雨森洋司・高山知司(2004):波・流れ共存場における碎波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築
- 流体直接解析法(CADMAS-SURF, 等)の実用化

## ブシネスク勉強会の実績(まとめ)

### ● 参加人数・発表件数の推移

- 参加人数の増加 … NOWT-PARIの普及, 認知度の向上
- 発表件数の減少 … 課題の解消, 精度検証機会の減少
- ⇒ 基本Versionによる事例の蓄積はほぼ完了?
- ⇒ エンドユーザーの増加?

### ● 発表内容の推移

- 事例研究の減少 … 参加者による発表数の減少が主要因
- 基礎・応用の増加 … 事務局に加え参加者からも多く発表
- 開発・話題の提供 … 実務への適用に係る課題が未だ存在
- ⇒ 今後も計算精度及び現地適用性の向上 (Version up) を図る

今後は、NOWT-PARIの普及・事例の蓄積から、モデル改良(計算精度・現地適用性・計算効率の向上)とその活用促進に重点をおく

## ブシネスク勉強会に関する今後の展望(案)

### ● 開催方法

- 開催案内 … メールングリスト, Webサイト
- 開催時期 … 年度初め? (前年度の成果公表に期待)
- 開催頻度 … 隔年開催? (Version up版の状況にもよる)

### ● 発表内容

- NOWT-PARIの適用・特性・改良(事例・基礎・応用)
- NOWT-PARIの周辺研究・分野(開発・話題)

### ● NOWT-PARIプログラム

- ソース公開 … 最新版をWebからダウンロード(認証あり)
- バグ情報 …… Twitterなども活用?(サーバ等, 要検討)
- Version up 予定(公開版: Ver4.6)
  - 複数方向スペクトルによる多方向波の造波 (Ver46d8a:2012/01/30)
  - 碎波モデルのうち渦動粘性分布の遮蔽効果への対応(近日中)
  - 部分反射・透過境界への透水層モデルの導入(準備中)

# 波浪変形計算法の発展と 今後の方向

高山知司

京都大学名誉教授

(財)沿岸技術研究センター

---

## 講演内容

### 波浪変形計算法の発展と今後の方向

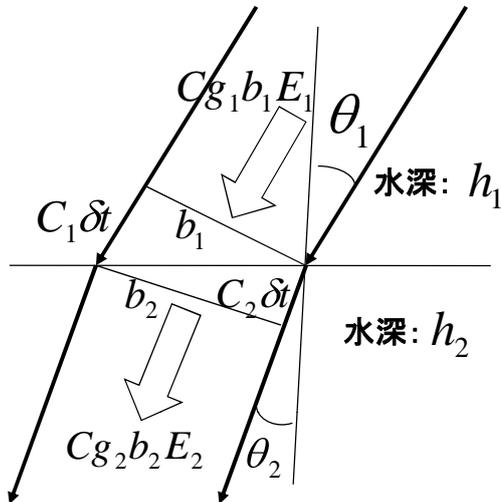
1. 1975年以前  
規則波に対する波浪変形計算
2. 1975年～1995年  
不規則波に対する波浪変形計算
3. 1995年～現在  
非線形波浪の変形シミュレーション
4. 今後の方向  
境界変形との連成シミュレーション

# 1. 1975年以前：規則波の変形

規則波：有義波 (  $H_{1/3}, T_{1/3}$  )

波峰線法と波向線法

波向線法



波向きの変化：

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{C_2}{C_1}$$

ここに  $C = \frac{g}{2\pi} T \tanh kh$

波高の変化：

仮定：波向き線を横切って波のエネルギーが流出しない

$$\left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 = \frac{C_{g1} b_1}{C_{g2} b_2}$$

## 浅水変形と屈折変形

波高変化  $\frac{H}{H_0} = k_s k_r$

浅水係数：水深のみの関数

$$k_s = \sqrt{C_{g0} / C_g}$$

ここに  $C_g = \frac{C}{2} \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\}$

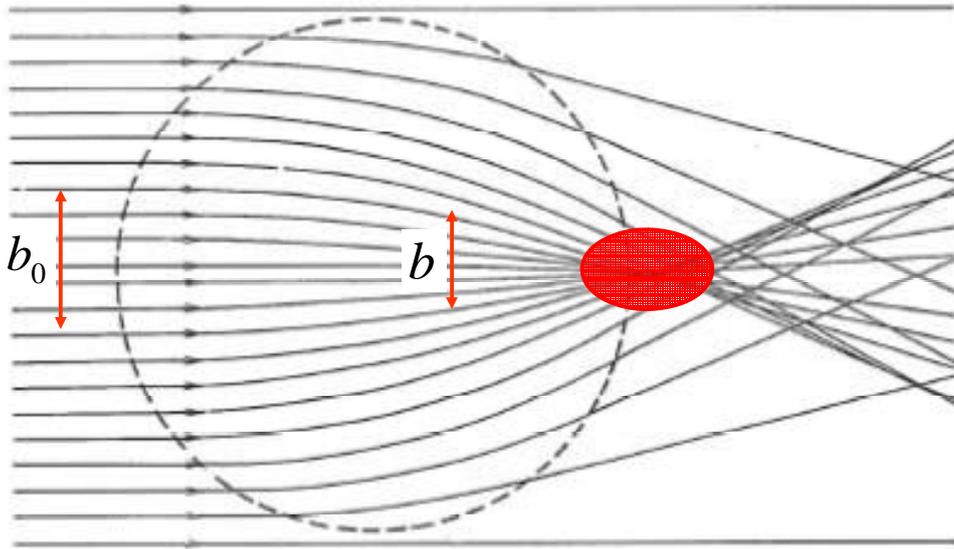
屈折係数：波向きの変化による波高変化

$$k_r = \sqrt{b_0 / b}$$

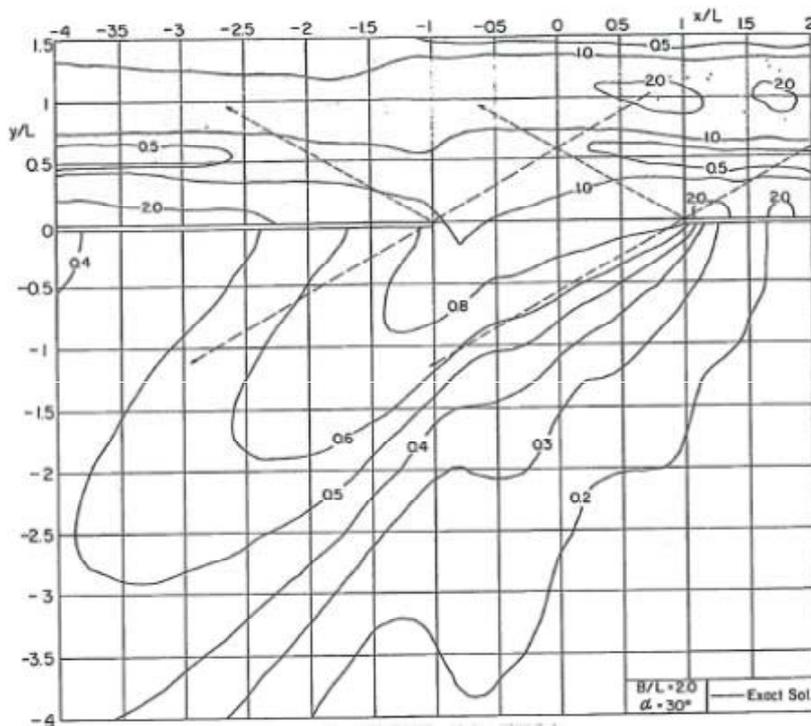
屈折係数は波向線幅  $b$  から算定：波向線法

## 波向線法の問題点

波向き線交差点で波高が無限大

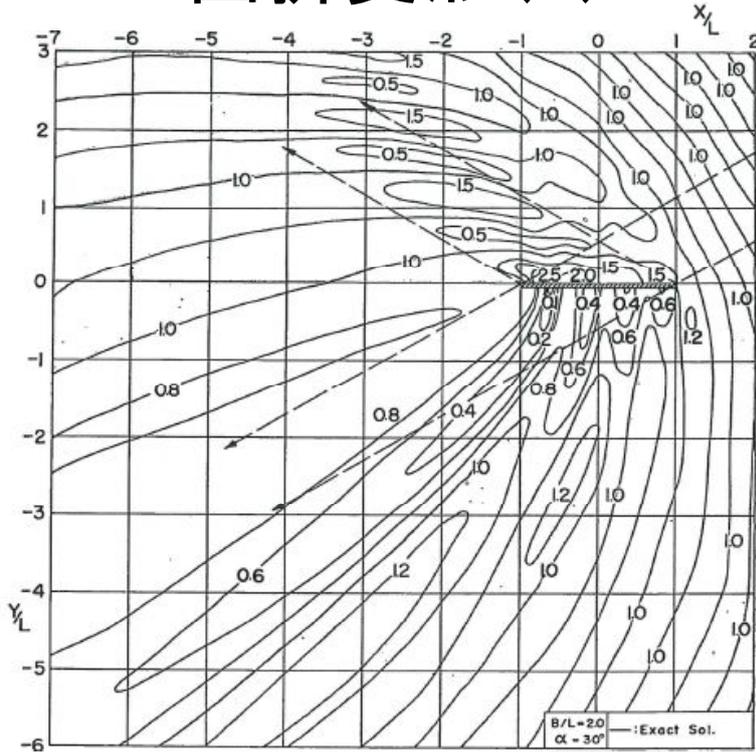


## 回折変形(1)



両翼防波堤による波の回折

# 回折変形(2)



島堤による波の回折

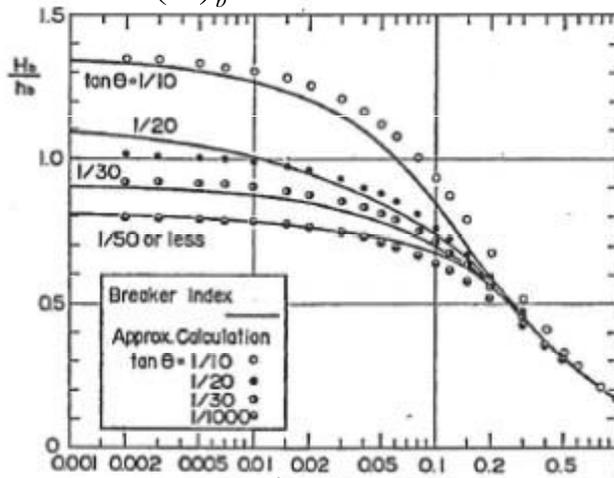
# 砕波変形

砕波の条件: 波峰頂における水粒子速度=波速

孤立波:  $(H/h)_b = 0.78$  McCowan (1894)

深海波:  $(H_0/L_0)_b = 0.142$  Michell (1893)

浅海波:  $\left(\frac{H}{L}\right)_b = 0.142 \tanh 2\pi \left(\frac{h}{L}\right)_b$  Miche (1944)



合田の砕波指標(1973)

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5\pi \frac{h_b}{L_0} \left( 1 + 15 \tan^{4/3} \theta \right) \right] \right\}$$

# 波別解析による砕波変形計算

(合田モデル 1975)

沖波の波高分布:  $p_0(x) = 2a^2 x \exp(-a^2 x)$

ここに  $x = H/H_*$   $a = H_*/H_{rms}$

$$H_* = \bar{H} : a = \sqrt{\pi}/2$$

砕波条件

$$x_b = \frac{H_b}{H_*} = \frac{A}{H_*/L_0} \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5\pi \frac{h_b}{H_*} \frac{H_*}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right] \right\}$$

$$x_1 : A = 0.18 \quad x_2 : A = 0.12$$

平均水位の上昇

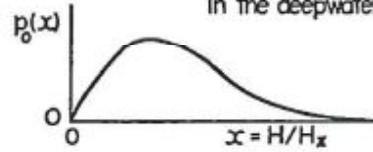
$$\rho g (\bar{\eta} + h) \frac{d\bar{\eta}}{dx} + \frac{dS_{xx}}{dx} = 0$$

$$S_{xx} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

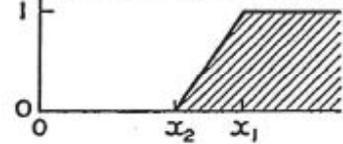
サーフビート: 水位の正規分布を仮定

$$\frac{\zeta_{rms}}{H_0} = \frac{0.01}{\sqrt{\frac{H_0'}{L_0} \left( 1 + \frac{h}{H_0'} \right)}}$$

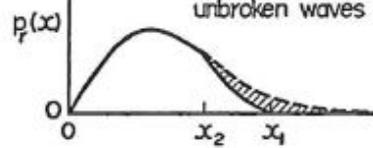
(1) Wave height distribution in the deepwater



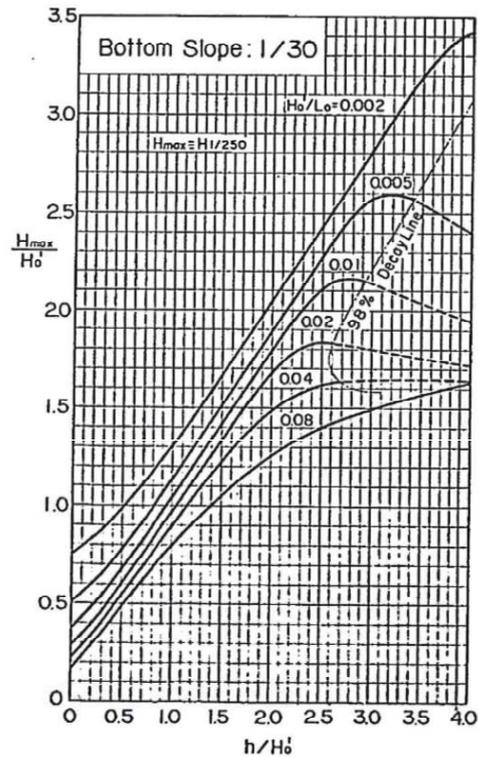
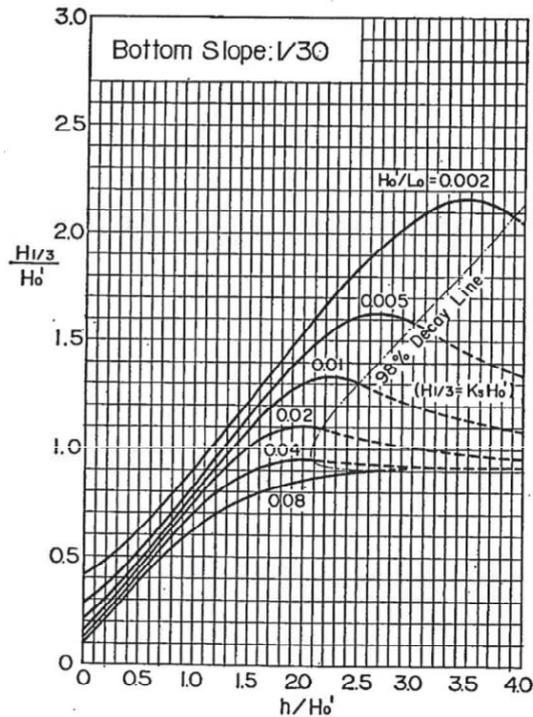
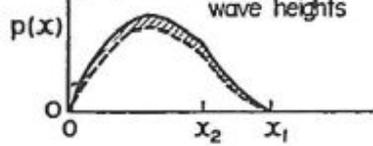
(2) Wave cut by breaking



(3) Distribution of unbroken waves



(4) Redistribution of wave heights



## 不規則波浪の砕波変形計算例

## 2. 1975～1995年：不規則波の変形計算

海の波の不規則特性の明確化，特に方向スペクトル

$$\text{波の方向スペクトル: } S(f, \theta) = S(f)G(f; \theta)$$

$$\text{波の周波数スペクトル: } S(f) = \int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) d\theta$$

$$\text{波の方向関数: } \int_{-\pi}^{\pi} G(f; \theta) d\theta = 1$$

$f = 1/T$  : 周波数       $\theta$  : 波向角

波の周波数スペクトルの形状:

ブレットシュナイダー・光易型

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}]$$

波の方向関数の形状:

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2S} \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

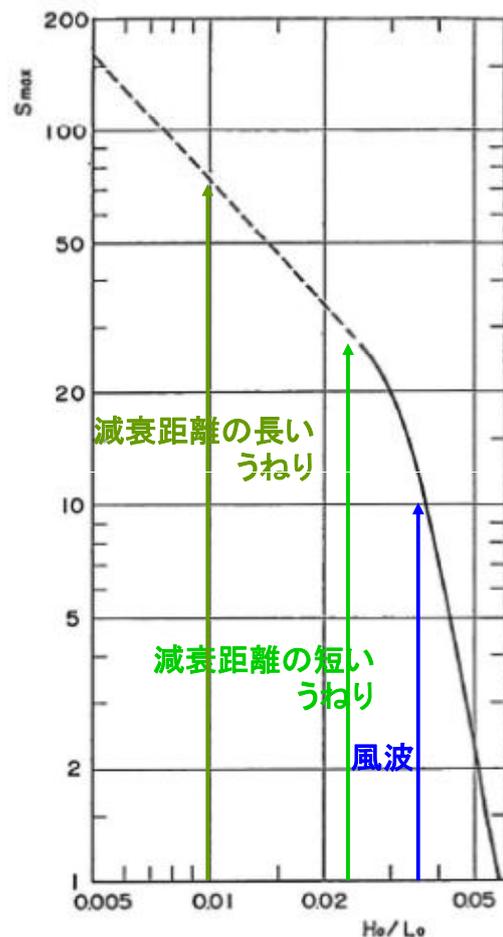
$$S = \begin{cases} S_{\max} (f / f_p)^5 & f \leq f_p \\ S_{\max} (f / f_p)^{-2.5} & f > f_p \end{cases}$$

方向集中度パラメーター  $S_{\max}$  の値

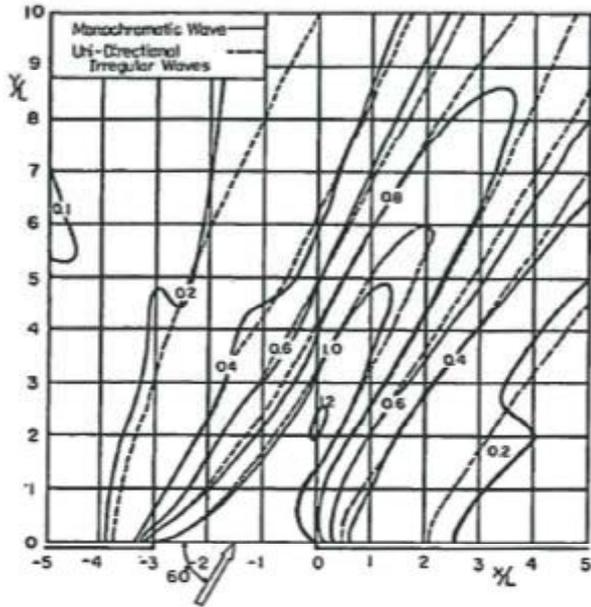
風波:  $S_{\max} = 10$

減衰距離の短いうねり:  $S_{\max} = 25$

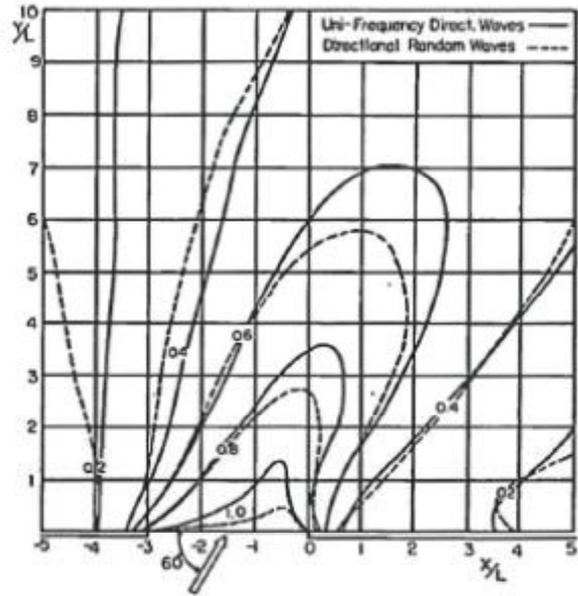
減衰距離の長いうねり:  $S_{\max} = 75$



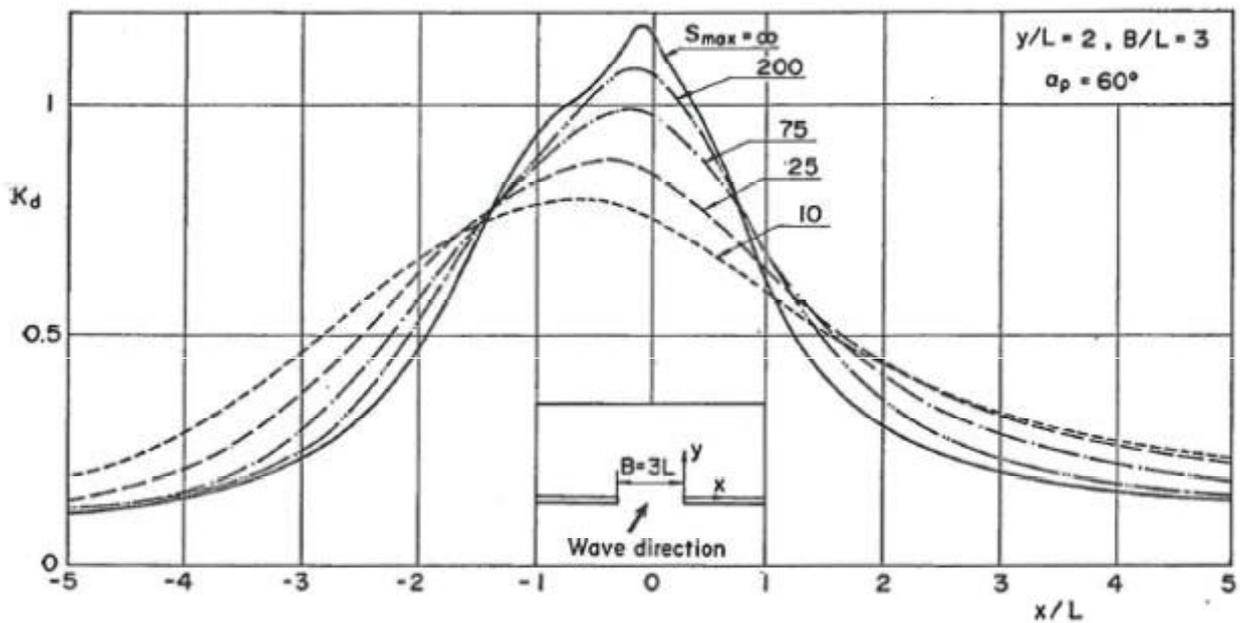
## 多方向不規則波の回折計算



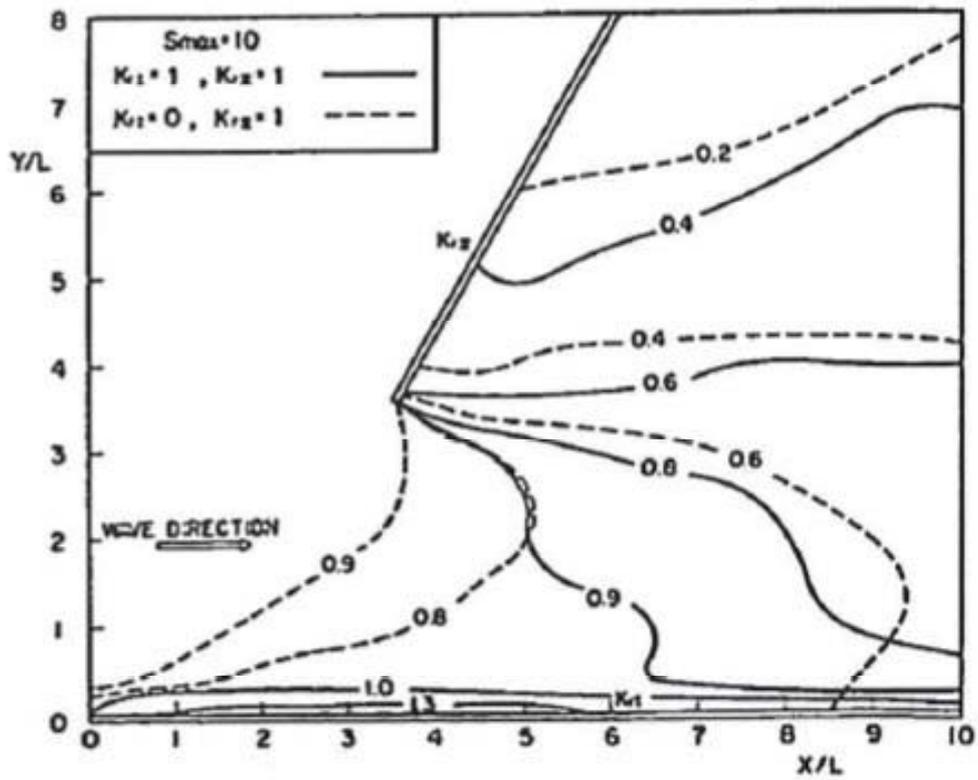
規則波と単一方向不規則波の回折図



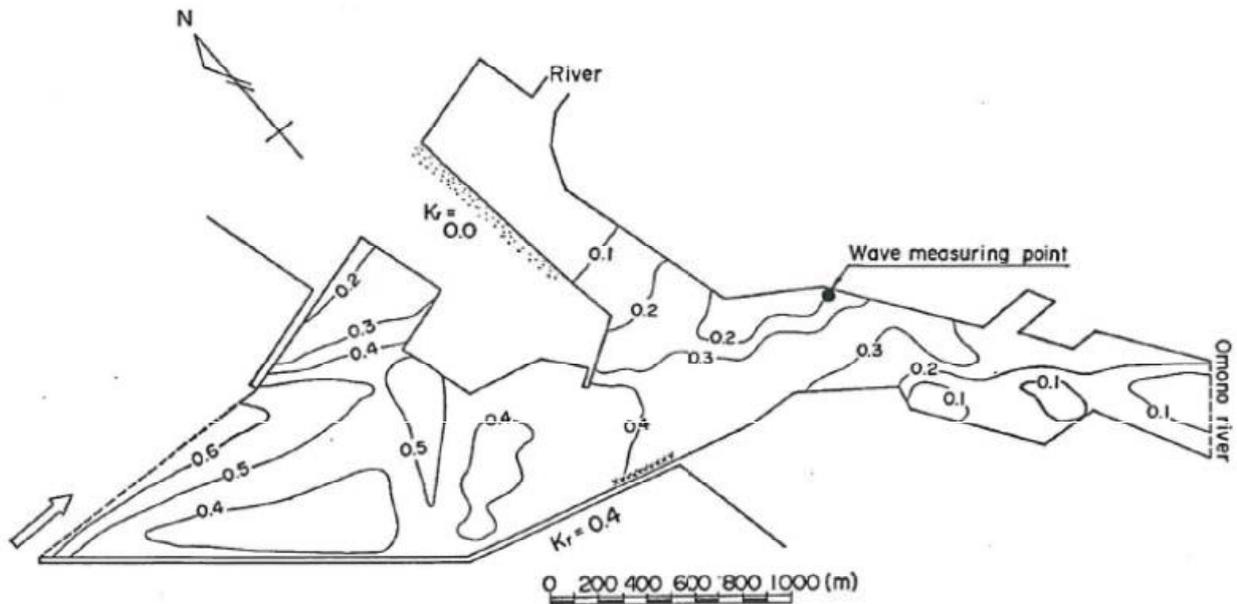
多方向単一不規則波と多方向不規則波の回折図



$S_{max}$  の値による回折係数の変化図



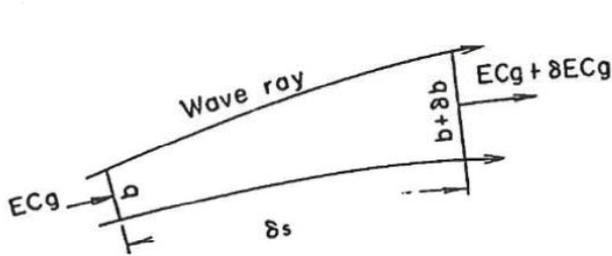
多方向不規則波の回折図



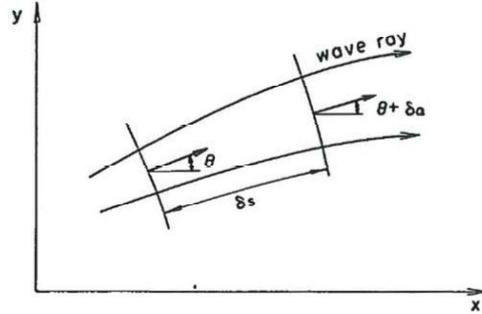
秋田港内における波高分布

## エネルギー平衡方程式による波浪変形

### エネルギー平衡方程式:



$$\partial(EC_g b) / \partial s = 0$$



$$\frac{\partial \alpha}{\partial s} = \frac{1}{C} \{ \sin \theta \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \cos \theta \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right) \}$$

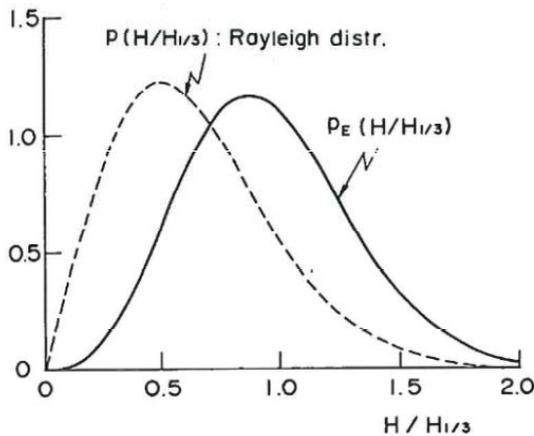
$$\underbrace{(SC_g \cos \theta)_x + (SC_g \sin \theta)_y}_{\text{浅水変形}} + \underbrace{(\partial / \partial \theta) [S(C_g / C)] \{ (\partial C / \partial x) \sin \theta - (\partial C / \partial y) \cos \theta \}}_{\text{屈折変形}} = -\varepsilon_b S$$

浅水変形

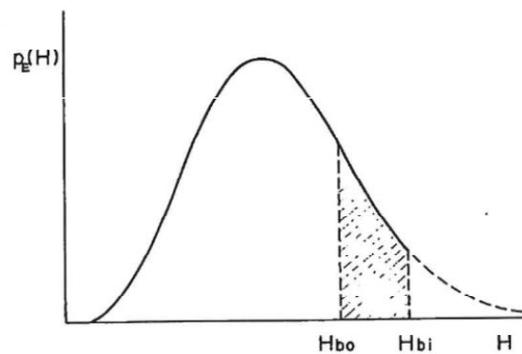
屈折変形

砕波変形

### 砕波で消失するエネルギーの算定

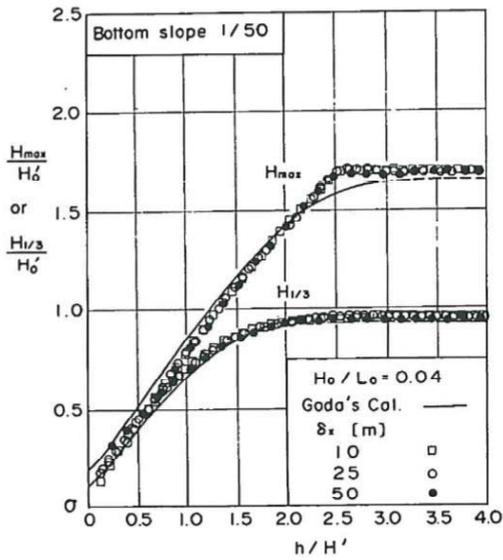


波浪のエネルギー分布

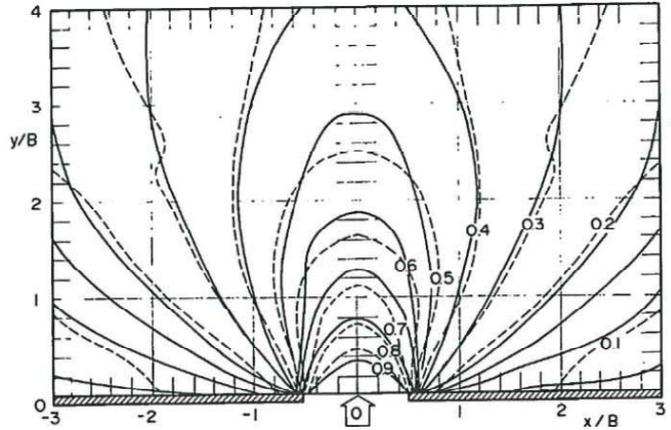


砕波による消失エネルギー

## エネルギー平衡方程式法による計算例

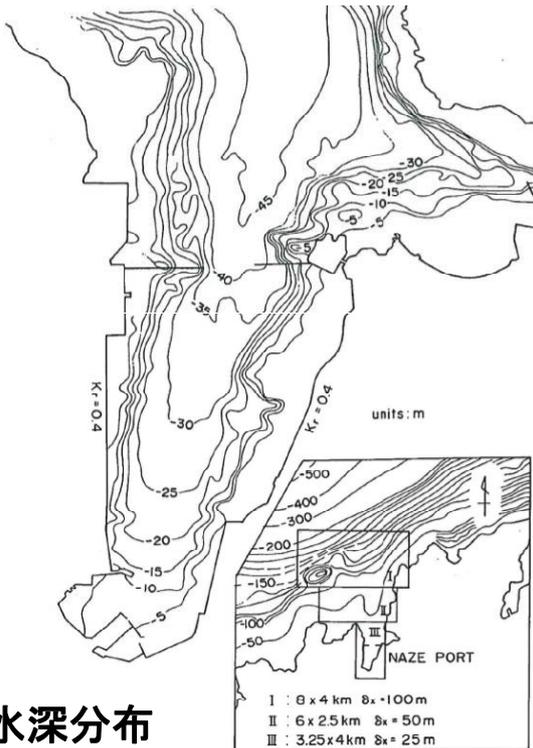


砕波変形計算の比較

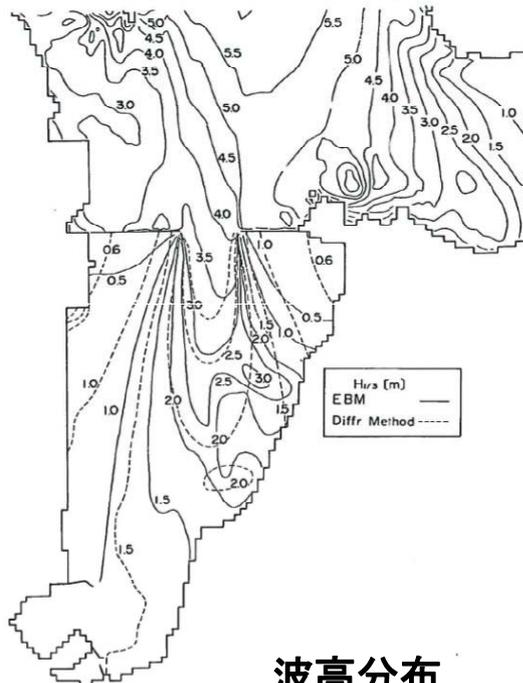


不規則波 ( $S_{max}=10$ ) の  
回折図との比較

## 名瀬港における波浪変形計算



水深分布



波高分布

### 3. 1995年～現在： 非線形波浪の変形シミュレーション

非線形波浪の変形シミュレーションの可能になった理由

#### 1) パソコンの急速な発達

- ・計算高速化： CPUの増大
- ・記憶容量の増大： Mb→Gb→Tb

#### 2) パソコンの安価化

- ・自由な使用： 計算時間
- ・並列計算： 多くのパソコン使用可

#### 3) シミュレーション手法の高度化

- ・解の安定化

### 非線形波浪のシミュレーション法

水の連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

水の運動方程式(ナビエーストークス方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\rho \partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\rho \partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -g - \frac{\partial p}{\rho \partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

移流項(非線形項)
粘性項

2種類の解法

1. ブシネスモデル
2. VOF法(CADMAS-SURF)

# 1) ブシネスク方程式法

## 特徴

- ・長波近似が基本： 静水圧近似を補正
- ・海底から水面まで積分した平面2次元モデル

## 水の連続式

$$\frac{\partial D\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

## 水圧

$$p = \rho g(\eta - z) + \int_x^{\eta} \frac{\partial w}{\partial t} dz$$

## 水の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial D\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{u}\bar{v}}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ &= \frac{2}{5} h^2 \left( \frac{\partial^3 D\bar{u}}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 D\bar{v}}{\partial t \partial x \partial y} \right) + \frac{1}{15} g h^2 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) + \nu_{\beta} \left( \frac{\partial^2 D\bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D\bar{u}}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial D\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial D\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial D\bar{v}^2}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ &= \frac{2}{5} h^2 \left( \frac{\partial^3 D\bar{u}}{\partial t \partial x \partial y} + \frac{\partial^3 D\bar{v}}{\partial t \partial y^2} \right) + \frac{1}{15} g h^2 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} \right) + \nu_{\beta} \left( \frac{\partial^2 D\bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D\bar{v}}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

## ブシネスク方程式法の特徴

- 1) 平均流速を用いているので、比較的広い空間での計算が可能
- 2) 長波近似による静水圧分布が基本となっているため、実際の波圧分布に近くなるような修正が必要
- 3) 長波近似のために沖波状態からの計算ができない問題がある。
- 4) 波形が前傾するような巻き波状態に対する計算はできない。そのために、砕波状態の波形の精度が十分でない。
- 5) 移動境界での計算ができない

## 2) VOF法

$F(t, x, y, z) = A$  となる面の動きは次式で表すことができる

$$0 = F(t + \delta t, x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z) - F(t, x, y, z) = \left[ \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} \right] \delta t$$

水の連続式を満足する条件の下で、さらに書き直すと、

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} &= \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} + F \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fv)}{\partial y} + \frac{\partial(Fw)}{\partial z} = 0 \end{aligned}$$

ここに

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

流体の運動方程式から得られた流速が連続式を満足するように修正し、修正した流速を用いて、VOF関数を設定する。

## VOF法の特徴

- 1) 計算時間が掛かる。特に、三次元空間の計算では計算時間が掛かり過ぎる。そのために、不規則波に対する計算が困難
- 2) VOF関数の計算に数値拡散が生じ、精度のよい波形が得られなくなる可能性。
- 3) 移動境界での計算ができない
- 4) 模型実験による精度の検証が不十分
- 5) 碎波時における空気の影響

## 4. 今後の方向

- 1) VOF法の三次元空間計算では計算時間が掛かり過ぎるので、他の方法と組み合わせて計算時間の短縮
  - 2) 変形境界に対する練成計算
    - ・構造物の破壊
    - ・地盤の洗掘
    - ・浮体(船体)運動
  - 3) 消波ブロックに作用する波力とその変形
- 

ご清聴ありがとうございました

4.

---

勉強会の開催

## 4. 勉強会の開催

### 4. 勉強会の開催

平成 23 年度ビジネス勉強会は、平成 24 年 1 月 30 日 14～17 時、横須賀市内会場（ヴェルクよこすか）で行われた。勉強会出席者は、発表者と事務局を含め 83 名であった。



#### ●NOWT-PARI の波浪研究・実務への適用例（第 1 セッション）

##### 1-1 消波工への斜め入射による波の反射率に関する考察

西井>通常の港湾に長周期波がくるときに、ある周期を想定して、20 秒とか 30 秒とかの規則波を起し、振動軸がくると予測される場所を予想し、振動軸上にバッファゾーン、つまり高スポンジ層や透水層を付ければかなり効きます。多方向の波でやるとすごく効きます。そうすると、波高を過小評価になると思うのですが、どうでしょうか。

平山>その点は気を付けなくてはいけない点です。港口から波が入射する場合で、防波堤裏側に消波が巻いてあった場合に、そこを波が通過すると、スポンジ層によってかなり波が減衰



平山リーダー（発表者）

していく結果になります。それが本当なのかという確認、この研究の発端になっています。つまり、入射角が薄く入ってきた場合に、かなり波を消してしまうという効果の確認です。長周期波については、入射角が大きいと反射率が下がるという傾向は出たので、あとは程度の問題かなと思います。ご指摘のとおり、付けすぎないというのはかなり重要だと思います。

あと、強振モードの場所で、スポンジ層を付けるという話、まさにそのとおりで、計算の精度が云々というよりは、対策としての効果を発揮するために、そういう場所を抽出して適切な消波を行うということになるだろうと思います。この研究自体は、波が斜めに入ってきた場合に、正しく評価しているのかということを中心に行ってきました。

平山>昨年の海岸工学で高山先生に頂いた宿題の回答について説明します。この実験は有限長の防波堤で行っております。この場合に回折散乱波などが生じて、防波堤前面に蛇行するような波が出来て、その影響が結果に出ているのではないかとご指摘を頂いたので、その検証を行いました。そのときにヒントも頂きまして、計算では防波堤延長を有限ではなくて無限に設定できるので、計算では全部を防波堤にして計算を行いました。有限長の結果と無限

## 4. 勉強会の開催

長の結果を比較すると、長周期波の場合に少し結果に違いが出ておりました、ご指摘のような回折散乱波の影響があるのかなということですが、風波についてはほとんどその影響がなかったという結果になりました。

### 1-2 防波堤の滑動に伴う波高増大

成毛>ブシネスクの計算について、マウンドはなく一定水深での計算ということで良いでしょうか。

大久保>はい。

成毛>規則波で、周期によって特性が違うというのですが、波長との関係で、変形を取ると周期 10 秒の結果がかなり下の方、6 秒と 8 秒が上の方にあったということですが、例えば 2 函ずつれていた場合には、8 秒の方に 10 秒が乗ってきってしまうとかそういうこともあるのかなと思ったので、安全側に考えると平均を取るよりも何か良い考えがあるのかなと思いました。



大久保さん（発表者）

西井>計算格子を 0.25m で、1 函の幅が 10m あるから 40 メッシュになっていて、細かくて良いのですが、空間差分をもう少し粗くとした計算を確認されたこととかはありますか。始めから 25cm でやっていますか。

大久保>最初は 50cm でやりましたが、結果が良くなかったので、メッシュを細かくしたのを覚えてます。

西井>私も以前同じ事をやりました。変な値が局所的に出るというのがありました。移流項とか圧力項とかを調べていったのですが、意外と圧力項が粗いメッシュだと効いていました。全然違う値になるので、モデル海域だと良いのですが、実務海域でやると 25cm は非常に厳しいメッシュです。こういった危険エリアをやる場合には、圧力勾配項を修正するといったチューニング、テクニックが必要だろうと思います。そのためには、高スポンジ層を薄く入れると、うまく効いて他に影響が出なくてそこだけを抑えるということができるので、もしそういうことがあれば参考にして頂ければというコメントです。

平山>今の西井さんのコメントは、数年前にブシネスク勉強会（平成 18 年勉強会資料）でご発表頂いた内容です。数年前の資料にもっと詳しい内容がありますので、機会があれば資料などをご覧頂いて勉強して頂ければと思います。

宮里>図-3 の波高増大率のグラフをみると、やはり周期の短い波は、少し途中から性質的に大きくなっていくということなんで、最後耐力作用比 0.6 の計算結果とか、ばらつきが大きかったのは、そういうことも考慮していけば、どこかで大きく動いたところで、波高増大率がピュッと大きくなっていくと思います。それが計算上で出てくれば変わってくると思います。動いたときにまた計算してということはしてないですね。ある程度動いた状態を固定して、平均していますよね。

大久保>はい、そうです。

宮里>ある程度繰り返し計算して、ある程度のタイミングで計算して、曲線がぐっと上がる瞬間のところを捉えられるようになると、低いところでも合うのではないかなと僕は思いました。

## 4. 勉強会の開催

### 1-3 航跡波の影響を受ける護岸の越波対策に関する活用事例

成毛>一つだけ気になった点がありまして、CADMAS とビジネスで合わない、平面と鉛直 2 次元だから合わないのは当たり前前といえば当たり前だと思うのですが、CADMAS の結果では、斜め入射の補正とかはしているのでしょうか。

西井>斜めの補正はしていません。オーダーが同じオーダーにあるのか、隣のオーダーに下がるのかというぐらいで考えています。実務としてやっています。



西井さん（発表者）

中村>越波量が大きいときには、水が越波するような形になるのでビジネスでもかなり精度良く計算できるのかなと思うのですが、今回のように少ない越波量のとときというのは、非常にしぶきが多くなって、粒々のような動きになっていると思います。ビジネスでやったときに精度良く合うのか、やっぱり少ないときには合わないような傾向が出てくるのか教えて下さい。

西井>現地の越波というのは、バーンと打ちあがったものが、冬季風で運ばれて粒子となって飛散します。今回の場合はすぐ目の前で、ドーンとあがったものが無風状態なので、落ちてきます。それをダイレクトに採っています。マス側に落ちていないものは、調査員がねぶります。それで、越波量としては、マイナス 4 乗のオーダーだったのですが、合ったので驚きました。

宮里>計算結果の図-18 ですが、これと実際の現場の越波している位置について、波高が大きい場所とかはだいたい合っているのですか。合うものなのでしょうか。

西井>実は合っています。場所は No.8 ですが、波高が高くなっていますね。ここに階段があり、この影響があつて、上がっているんじゃないのかというのがありました。ただ、階段はメッシュにできないので無視していますが、ない状態でも、位相干渉がちょうどここに来て、越波がどんどん上がります。2 日間やった 2 日目は 1 日目に設置した位置をずらして、急遽ここで取り出しました。ここだけ上がるという、地形によってここだけ集中して上がるという状況だと思います。

宮里>動画をみていたとき、だんだん波が横から滑って行って、あるときにここで大きくなっていく状況がみられました。ビジネスだと水位変動が時間的に出ますけど、波の条件っていうのはある意味簡易的に入れていて、例えば航跡波では水位変動がだんだん大きくなって行って、その瞬間でぱんと大きく跳ね上がるような現象が出るのかっていうのが本当に出るのであればすごいと思いますが、どうでしょうか。

西井>波は規則波でやりました。不規則波でやると、かなりのつぺりとなるので、特に航跡波はご存じのように後ろ側が規則波です。問題はこの縦波っていうのがかなり支配的ですけども、こいつが規則波かどうか分からないので、エイヤーっと規則波で行いました。それで、あの位置で出るっていうのが再現されたので、素晴らしいと思いました。

### 1-4 NOWT-PARI ver. 4.6 における砕波減衰計算の改良

平山>この問題の最初のご指摘は、平成 18 年度の勉強会の時に、いであの成毛さんから、こういった問題があるのではないかと、おっしゃっていただいて、そのとき確認はできていましたが、なかなか具体的な作業に入れませんでした。もう一つの背景としては、バージョンの 5 シリーズで、別の砕波モデルを開発していて、そちらは乱流モデルで渦動粘性係数の分布を解くよう

#### 4. 勉強会の開催

なモデルをやっている、遮蔽がある場合にも問題ありません。同時に2つのバージョンを開発しており、結果的にはこちらの改良の方が先になってしまって、高いバージョンの公開の方はあと一歩まだ及んでいないところです。

**成毛**> ver4.6c5a くらいに入れたくて一生懸命やっていたんですけども、色々忙しいうちに、うやむやになってしまっていました。やっていただいてありがとうございます。これは新しいモデルに入れて頂ける予定とかはあるのでしょうか。

**宇野**> できれば早く公開できるようにしたいと考えています。それなりの計算結果が出ていると思うので、あとは少しプログラムを見直して、配布していきたいと思います。

**成毛**> 経験上、小さな漁港の30年確率波みたいな大きな波長の波を計算すると、すごく効くので、スイッチでON/OFFできるとな嬉しいと思います。

**平山**> 検討したいと思います。内容の背景は、平成18年度の資料に詳しくありますので、そちらをご参照ください。



宇野（発表者）

#### 1-5 フリークウェーブの発生・伝播計算における課題

**国栖**> クルトシスで3というのが正規分布の値だと思いますが、例えばブシネスクでやると、砕波で上の部分とか尖っている部分とかは出にくいというのがあるのではないかと思います。さきほどのブシネスクの計算結果で2.8~3.2くらいまでだったと思います。たぶん、正規分布に近いためだと思います。かなり大きな波で、非線形な波になると、越波流量とか越流量みたいなのが合わなくなるのではないかという感じがしますが、そのあたりいかがでしょうか。限界なのかというところ、改良できるかどうかというところを教えてください。



加島（発表者）

**加島**> 越波に関しては、今回検討していません。

**平山**> 今回は、深海波を対象とした計算です。一定水深の中で、2次の干渉だとか3次の干渉なりが発達する状況がブシネスクでどこまで計算できるのかについて検討してみました。その中の結論で、3次、2次のオーダーすらなっていないというのが結論ですが、これは深海波での話ということだと思います。元来、ブシネスクは深海波の計算は不得意です。分散特性を補正して、なんとか計算できるようにしていますが、特に2次の非線形の干渉という部分では、浅海域で勝負したいところではあります。クルトシスは3次なので難しいですが、スキューネスあたりは浅海域であれば合ってくるかなと期待はしています。これから斜面の計算とかをする中で、実験データとの比較を行いつつ、いずれご質問にお答えできるような結果が出せるだろうと思います。今のところ、まだ手持ちではそういったデータを持ってないと思います。

**高山**> 私もフリークウェーブというのは話には聞くのですが、特性が良く分からないので、教えて頂きののですが、確かに非線形干渉で、かなり高くなるということが起きる波だと思います。これは空間的にはどれくらい続いているのでしょうか。ぼっと出て、すっと消えてしまうものなのか、かなり続いているものか、その辺りを少し教えてください。

**加島**> タイトルの方で、フリークウェーブの伝播と書いてあるのですが、フリークウェーブ自体

#### 4. 勉強会の開催

は、ある場所で突発的な大きな波が出るっていうものです。その波がその形を維持して、ずっと伝わっていくものではありません。

高山>そうすると、そういうのある場所に出て、そういうのが出やすいっていうのは、空間的に出る箇所がいくつもあるっていうことなのですか。

加島>そうですね。ただ、それがどの空間で、どういう形で出やすいのかというところまでは検討が進んでいませんが、現段階では、時間的な軸でみた場合、例えば台風が通過したときに通過する前、通過している最中、通過後などいつ出やすいのかとか、台風に対して危険範囲の中で出るのか、という検討をしています。場所の特定までは、まだ検討が進んでいないのが現状です。

平山>補足しますと、今やっている研究というのは、深海域でフリークウェーブが発生するメカニズムというのは、かなり検討が進んでいて、そういった知見を基に、浅海域にそれを活用して行けないのかなと考えたのが発端です。深海域でフリークウェーブが発生する条件は、周期が長くて一方向性が強くスペクトルが尖っている場合です。こういったときに、クルトシスがキュッと上がる傾向があり、イメージとしてはうねりのような波になりますから、そのような波が浅海域にやってきた場合に、深海域で持っていた性質を保持したままやってくるのか、それとも浅海域で性質が変わってしまうのか、そのような点に着目した研究を行っているところです。今回は計算結果を中心に話をしていますが、実験結果だけで考察した中には、深海域から一気に浅海域に駆け上がってくるようなリーフ地形では、深海域での性質を引きずったまま浅海域でそういったものが発生する可能性があるというのがみられるようなデータもあります。そういったことに対してブシネスクモデルがどこまで対応できるのかというところを確認したいというのが研究の目的です。まだ途中経過です。

西井>そうすると、右辺の分散項が意外と支配的というか、マドセンらが言っていますように、ここの工夫によっては、うまく出たり滑らかになったりとかいうところで、右辺を少し変えなくてはいけないかもしれないと思うんですけども、その辺はいかがでしょうか。

平山>ご指摘のとおりです。より高次の現象を扱うためには、今の分散項では不十分です。ブシネスクモデル自体はより高次のモデルも、たくさん提案はされていてありますけども、そういったより高次のモデルにするためには、非線形項だけではなくて、分散項も同時に変更しないと高次の問題に対応できないので、今のご指摘はまさにその通りだと思います。

## 4. 勉強会の開催

### ●ビジネス勉強会 10 回記念講演 (第 2 セッション)

#### 2-1 ビジネス勉強会の開催実績と今後の展望

---

ビジネス勉強会の立ち上げから中心となって携わってきた平山リーダーから、勉強会の目的の変化が変化し、それに応じる形で発表内容も変化してきたと、これまでの実績データに基づいた分かりやすい説明がされました。

今回 10 回目という節目を迎えたこと、ビジネスモデル NOWT-PARI の使用する側も知識や経験を積みつつある今、勉強会のあり方を見直す時期にきていると提言がありました。今後も、参加者と一緒になって勉強会のあり方や、具体的には時期や情報公開についての手法などに考えたいという願いもありました。



平山リーダー (発表者)

#### 2-2 波浪変形計算の発展の歴史と今後の課題

---

高山先生は、波浪変形計算において「高山法」を開発されたことはあまりにも有名です。これまで港湾空港技術研究所水工部長や京都大学教授を歴任され、現在(財)沿岸技術研究センター長に就任されるとともに、京都大学名誉教授でいらっしゃいます。港湾や海岸の設計において、まだ波浪変形計算手法が確立されていなかった頃から現在に至るまでの本当に数多くのご経験も踏まえ、波浪変形計算の発展、そして今後の課題や取り組み方についてお話しを頂きました。海岸工学が取り扱える現象が、規則波から始まって、不規則波、そして非線形波浪へと発展し、新たな課題に取り組んでいく海岸工学そして研究者や技術者の歩みを生き生きと拝聴することができました。常に最先端のご研究ならび開発をなされていた高山先生ではないと講演して頂けない貴重な内容のものでした。



高山先生

今後の課題については、計算手法の発展とともにそれらの特徴や限界について言及して頂き、どのような解決策があるのか、先生のお考えを賜りました。また、波と構造物を一緒に考えることや、ビジネスと CADMAS を接続させることの必要性などについてご指摘して頂き、勉強会参加者はその必要性を再認識することができました。参加者にとって、今後の自己研鑽、勉強会発展の糧となるお話しを拝聴できました。

### 3 全体質疑

---

平山>本日の前半のセッション，特に西井さんからご講演頂いた航跡波のことです．今回使われているモデルだと，造波境界を固定してということとされております．ビジネスモデルで航跡波というと埼玉大学の谷本先生のグループの研究があります．あのことを NOWT-PARI に導入しようとする，難しいのでしょうか．以前航跡波の計算ができたなら良いなあと思って少し考えてみましたが，そのときには難しいのかなと思いました．何かその辺りでトライされたようなことがもしあれば教えて頂きたいです．

西井>谷本先生の論文はちゃんと読んだことがないのですが，造波境界をいくつか分割して，それに位相差をかませれば，なんとか実務レベルでは使えるのではないかなと思います．

西井>高山先生がご指摘されたように，これから港の計画をするとき，静穏度のことを考えたときに，長周期波の問題にビジネスモデルの結果をのせると，船舶動揺ってというのがなんと簡単にうまくできないかと思っています．単純に波高が 10cm とか 15cm とかで長周期波を評価していますけども，実際の船というのはローリングしているところっていうのは，節の位置にいますと，サージが起こりますので，そういったものをビジネスモデルで精度良く解かれたものをダイレクトに扱えないかと思っています．

平山>そういうことができたなら良いなあと思っています．高山先生のご講演にもありましたように CADMAS とビジネスモデルを接続するというものがありましたが，連続性というのが重要なかなと思っています．CADMAS で計算する際には，沖での条件を与える必要があるという部分で，エネルギー平衡方程式とかビジネスの方で計算した結果を入れているんだと思いますが，そこに主観性が入りますし，断面モデルであれば，混相をどうするんだとかいう問題もあります．幸いにこの勉強会にご参加して頂いている方々の中には，CADMAS のモデルも実務で使われている方もいらっしゃるので，いろんな方のお力をお借りして，これからの課題にも取り組んでいければなあと思っています．今後ともご指導，ご協力のほどをお願い致します．