

## 資料-4

# 第2回 富山湾における『うねり性波浪』 対策検討技術委員会 資料

## 「うねり性波浪」の特性について

平成 20 年 3 月 27 日

国土交通省 北陸地方整備局  
新潟港湾空港技術調査事務所

# 第2回 富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会 資料

## 「うねり性波浪」の特性について

～ 目 次 ～

1. 波の解析について.....	1
2. 被災の概要.....	2
2.1 北防波堤の被災状況.....	2
2.2 万葉埠頭緑地の被災状況.....	4
3. 被災時の気象・海象状況.....	5
3.1 気圧配置.....	5
3.2 風、波浪の状況.....	6
3.3 潮位、長周期波の状況.....	8
4. 伏木地区における波浪特性.....	10
4.1 波浪計算手法.....	10
4.2 計算条件.....	12
4.3 波浪特性の検討.....	14

## 1. 波の解析について

今回の被災を受けて実施する「うねり性波浪」(寄り回り波)の解析では、浅海域(図 1-1 の“B”の範囲)を対象として、伏木地区の波浪観測地点(マフコタワー)の波浪観測情報を利用し、ブシネスクモデルにより「寄り回り波」の性状を詳細に解析した。

北海道から日本海を通過し発達しながら富山湾に侵入する発達メカニズム(図 1-1 の“A”の範囲)については未解明な部分の多い分野であり、今後の研究が待たれるところである。

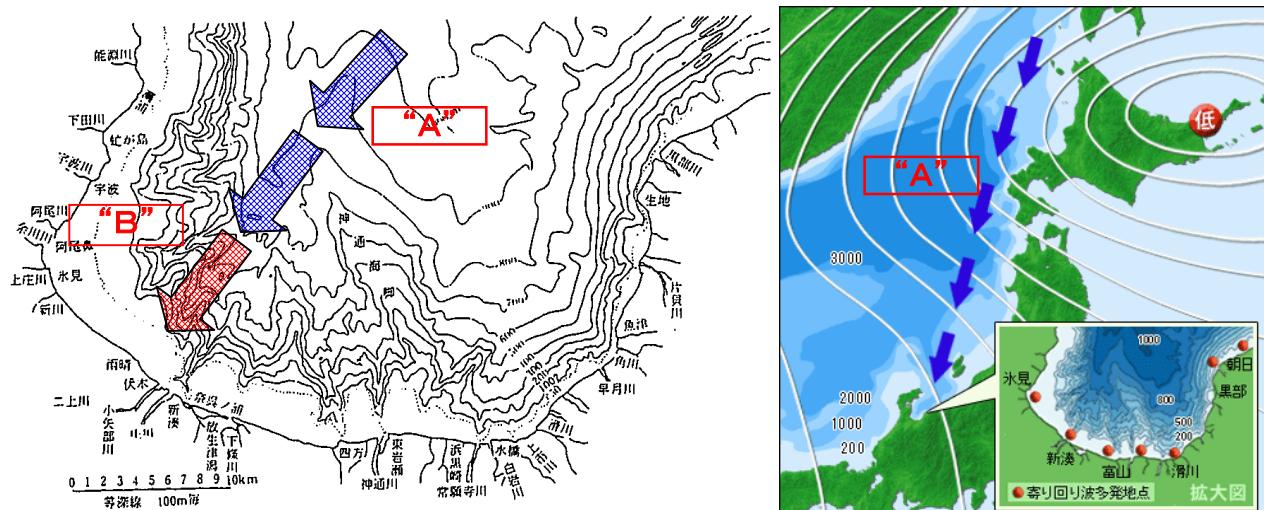


図 1-1 「うねり性波浪」(寄り回り波)の解析範囲

ブシネスクモデルは、従来の浅海域の計算手法では、得られなかつた海浜流や水位上昇等を含め全体で 10 項目あまりの波浪変形の同時計算が可能で、非線形性<sup>1</sup>を考慮してより実現象に忠実な表現が得られる、最新の高機能解析プログラムである。

### 【検討のまとめ】

- ① 被災時の北防波堤前面の波浪は非線形性が卓越する状況にあり、非線形効果により設計時に考えられていた波浪よりも高い波浪が出現していたと考えられる。
- ② 非線形性が卓越する波浪は従来の計算手法では予測が困難なのため、被災メカニズムの解析においても非線形性の波を考慮できるブシネスクモデルで検討を実施した。
- ③ ブシネスクモデルにより再現した北防波堤前面の被災時の波浪は、高波浪箇所と被災箇所がよく一致しており、計算手法の有効性が確認された。
- ④ 今後の課題は、「うねり性波浪」について、波の発生から日本海を通過して富山湾内に到達するまでの、精度の高い予測が望まれる。

<sup>1</sup> 波の非線形性：従来の解析法(海の波を正弦波の重ね合わせで表現する方法)では表現しきれない複雑な現象。詳細については、資料末の参考説明を参照。

## 2. 被災の概要

「うねり性波浪」の特性を解析するにあたり、伏木富山港（伏木地区）の被災の概要を整理する。主な被災箇所を図 2-1 に示す。



図 2-1 伏木富山港（伏木地区）における主な被災箇所

### 2.1 北防波堤の被災状況

北防波堤の被災状況を図 2-1～図 2-5 に示す。北防波堤では、ケーンの滑動および被覆消波ブロックの沈下が認められる。



図 2-2 北防波堤の被災状況（全体図）



図 2-3 北防波堤の設計区間の区割り（平面図）

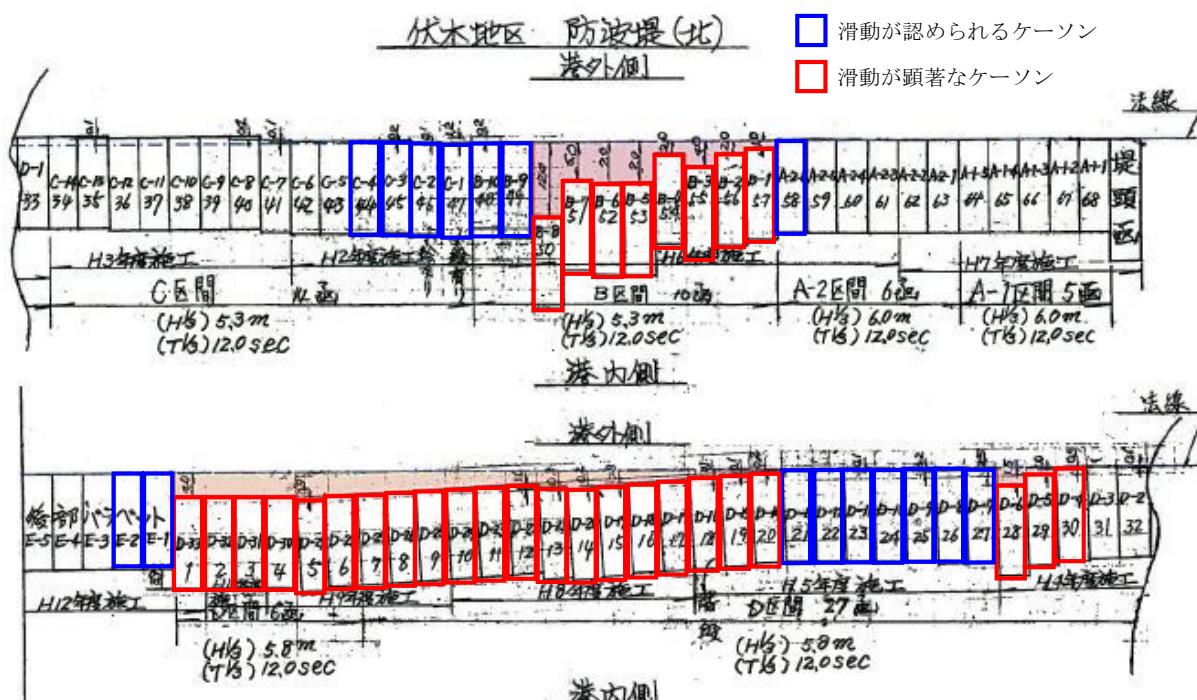


図 2-4 北防波堤ケーソンの滑動状況



図 2-5 北防波堤の被災状況 (D', D、B、区間)

## 2.2 万葉埠頭緑地の被災状況

万葉埠頭緑地の被災状況を図 2-6、図 2-7 に示す。万葉埠頭緑地では、浸水、陥没、ブロック片の散乱等の被害が認められる。

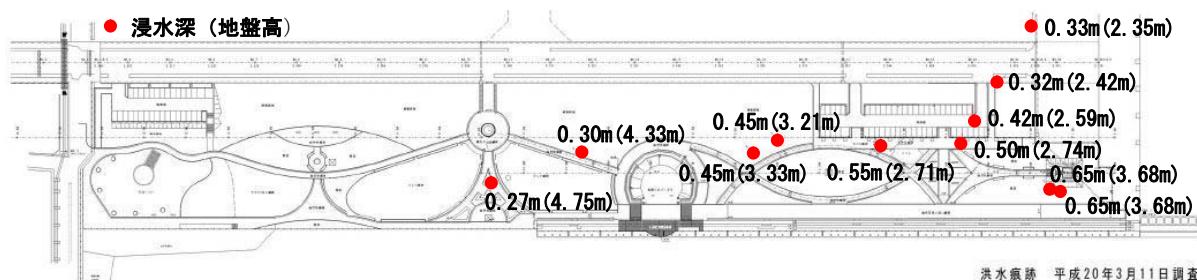


図 2-6 万葉埠頭緑地の浸水痕跡調査結果



緑地全景（展望台より）

護岸背後の陥没



1m以上の陥没

ブロック破片の散乱

図 2-7 万葉埠頭緑地の被災状況

### 3. 被災時の気象・海象状況

#### 3.1 気圧配置

被災前後の気圧配置を図 3-1 に、被災時の気圧配置と寄り回り波発生時の典型的な気圧配置の比較を図 3-2 に示す。2008 年 2 月 24 日 15 時の気圧配置は、寄り回り波が発生しやすい、典型的な気圧配置である。

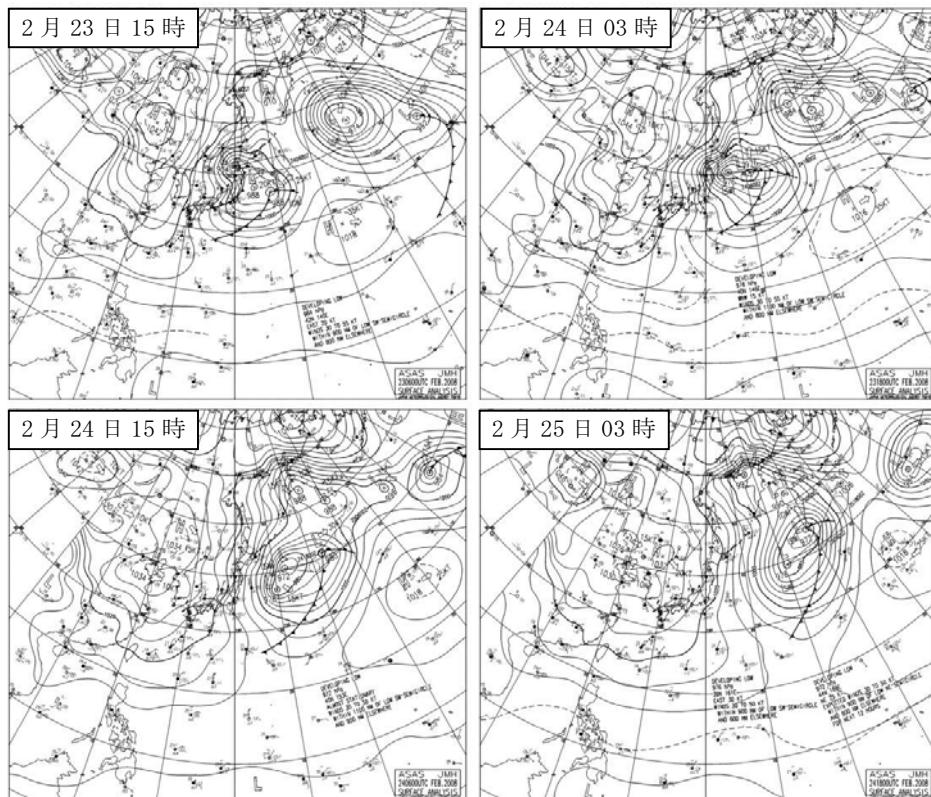


図 3-1 被災前後の気圧配置

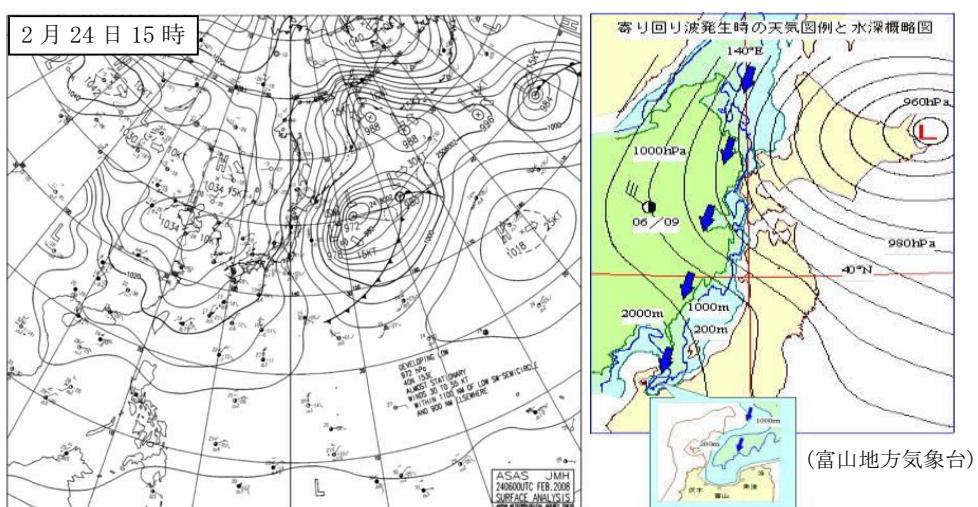


図 3-2 被災時の気圧配置と「寄り回り波」が発生時の典型的な気圧配置の比較

### 3.2 風、波浪の状況

2月23日0時～25日24時の風と波浪の状況を図3-3に、有義波と最高波の時系列図を図3-4に示す。

伏木富山および新湊において10m/sを超える風速が23日に観測されたが、24日以降は弱まった。風向は23日から24日にかけては北西が卓越した。

期間最大の有義波高は伏木富山では24日14時に、富山では24日16時に観測され、富山の有義波高9.92mは既往最大値を超える波高であった。周期は24日0時から25日12時にかけて10secを超え、24日午後には14sec～15secに達した。

周期が長く、近傍の風との対応がみられないことから、24日の高波がうねり性であったことがわかる。

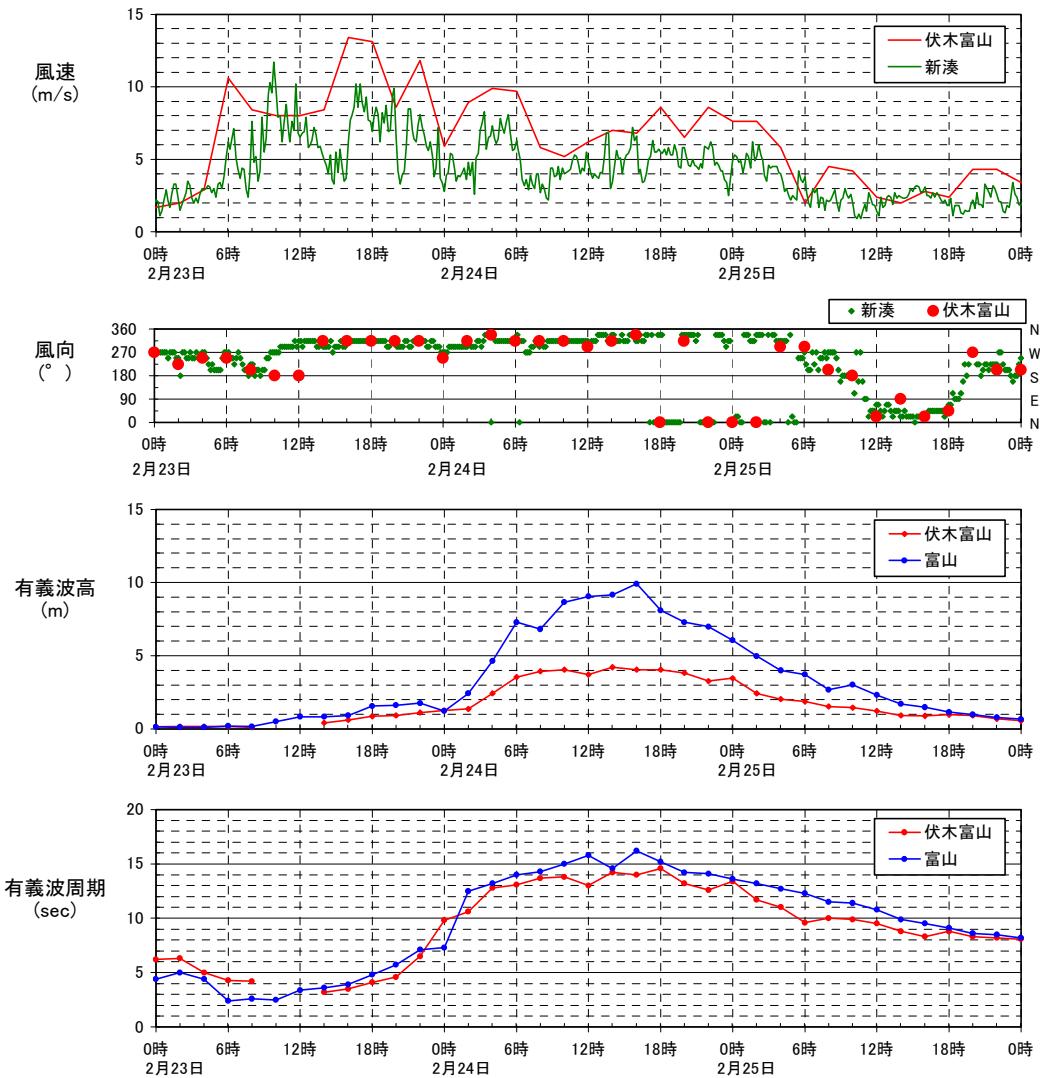
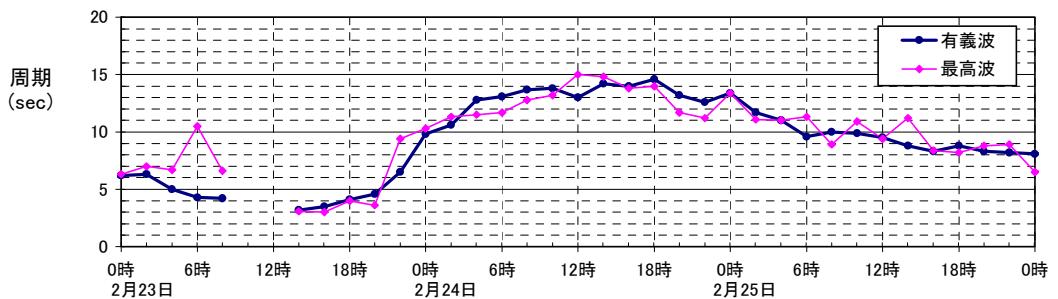
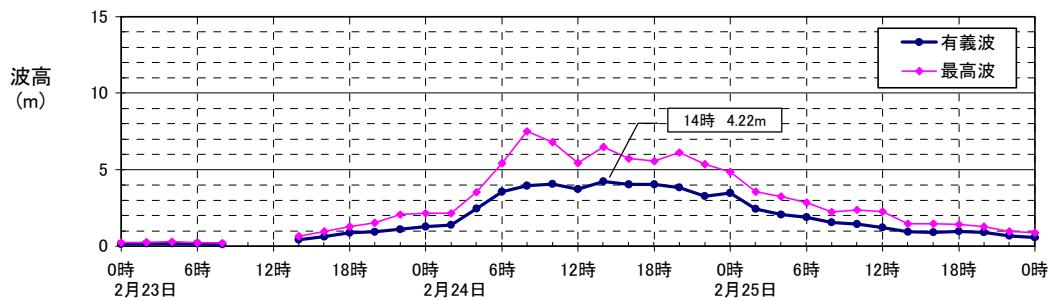


図 3-3 風と波浪の状況

## 伏木富山



## 富山

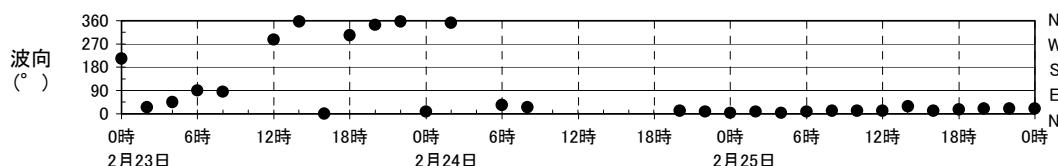
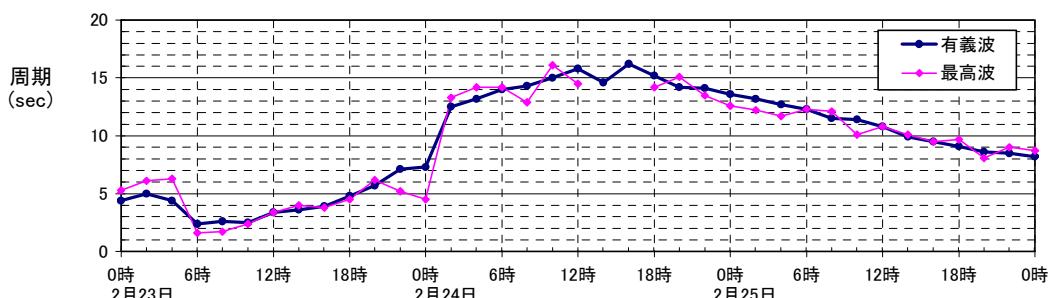
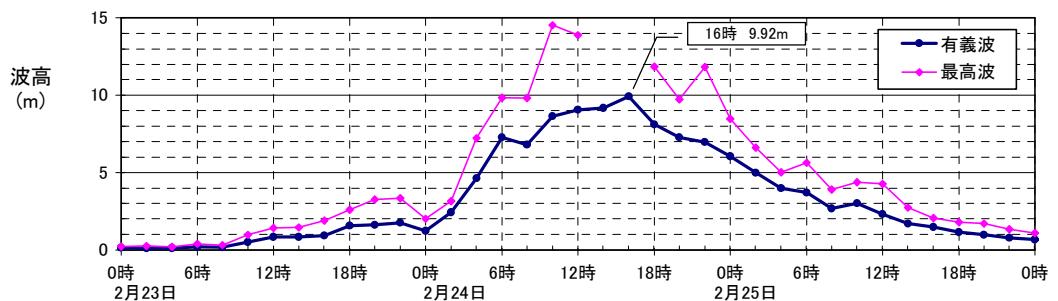


図 3-4 有義波と最高波の時系列図

備考) • 伏木富山の波向は全欠測であった  
• 富山の 24 日 14 時, 16 時は水圧波形データからの補足値のため有義波諸元のみを表示

### 3.3 潮位、長周期波の状況

#### (1) 潮位

伏木富山の潮位記録の推移を図 3-5 に示す。伏木富山の潮位観測施設は、応答性能から長周期波高成分を正確に捕らえておらず、詳細解析には様々な検討が必要で時間をするため、ここでは概略的に検討する。

最大波高を記録した 2 月 24 日 14 時の潮位は 21cm であった。その前後のアナログ潮位記録（図 3-6）を注意深く見ると、長周期波高の影響と考えられる周期 300sec 程度の潮位の変動が感じ取れる。

このピーク値を参考に、被災時の検討を実施する際の基準の潮位を 34cm とする。

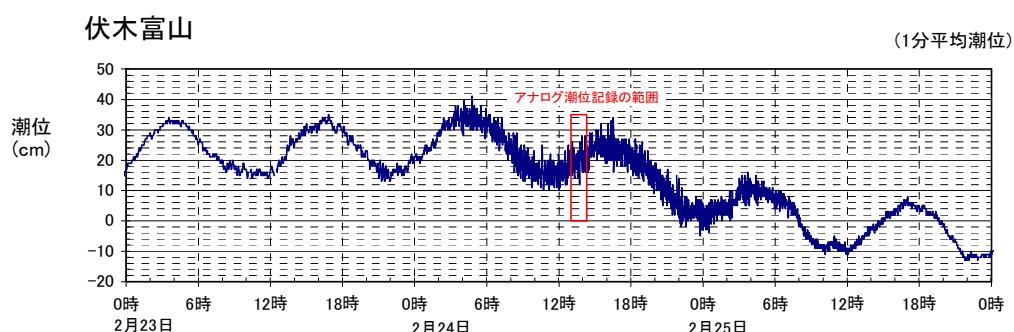


図 3-5 伏木富山の潮位の推移

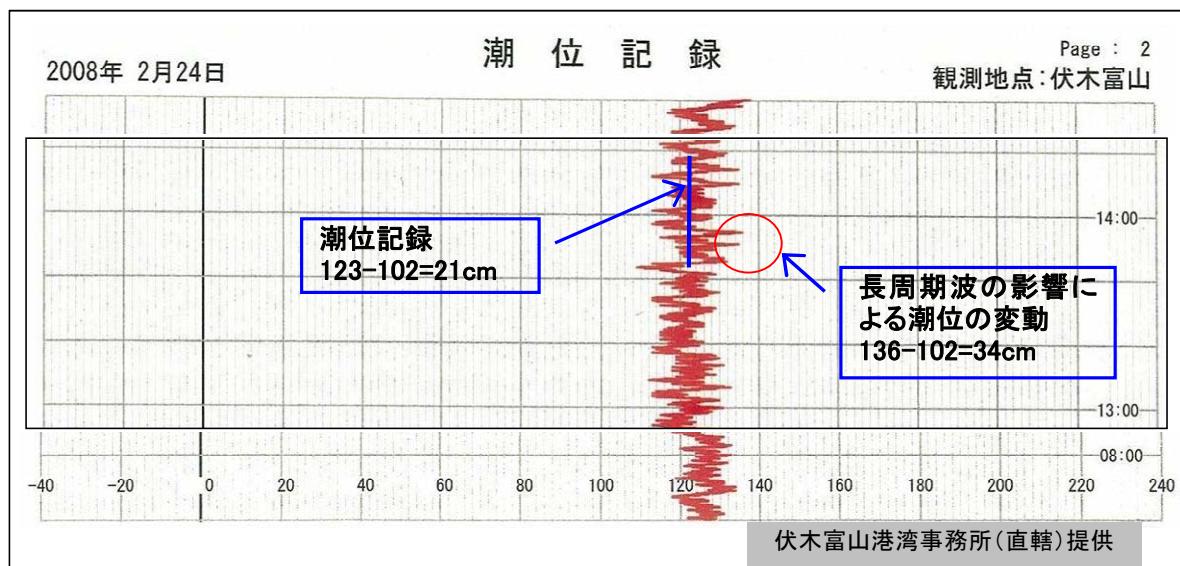


図 3-6 伏木富山のアナログデータ (2 月 24 日 13~14 時)

## (2) 長周期波に伴う水位上昇量

長周期波に伴う水位上昇量は、カムインズ波浪周期別情報により推定する。解析対象地点は、伏木地区、富山地区は連続観測が実施されないことから、周辺で実施されている金沢港・輪島港・直江津港のなかで、被災時の観測記録が保持されている金沢港とする。

カムインズの波浪周期別情報で金沢港の2月23~24日の波高データから、スペクトル解析による長周期波高(30~300sec)成分を取り出した結果を図3-7に示す。

伏木富山で最大波高を記録した24日14時前後の推定値は以下のとおりである。

- 長周期波高(30~60sec) = 30cm

- 長周期波高(60~300sec) = 30cm

(周期帶のエネルギーを有義波高 H1/3 に換算)

金沢港と伏木富山の同時間帯の有義波高とともに4.2m程度であったことから、伏木地区への割増率を1.0とし、長周期最高波高H<sub>max</sub>をH<sub>1/3</sub>×1.6とすると、長周期波による水位上昇量は以下のとおり求まる。

$$\text{長周期波による水位上昇量} = 1/2 \times 1.6 \times \sqrt{30^2 + 30^2} = 34\text{cm}$$

したがって、

$$\text{被災時概略水位高} = \text{ベースの潮位 } 34\text{cm} + \text{長周期波上昇量 } 34\text{cm} = 68\text{cm} \approx 70\text{cm}$$

となることから、被災時の設計条件等の検討を実施する際には、危険側に見積もった潮位条件としてD.L.+0.7mを考慮する。

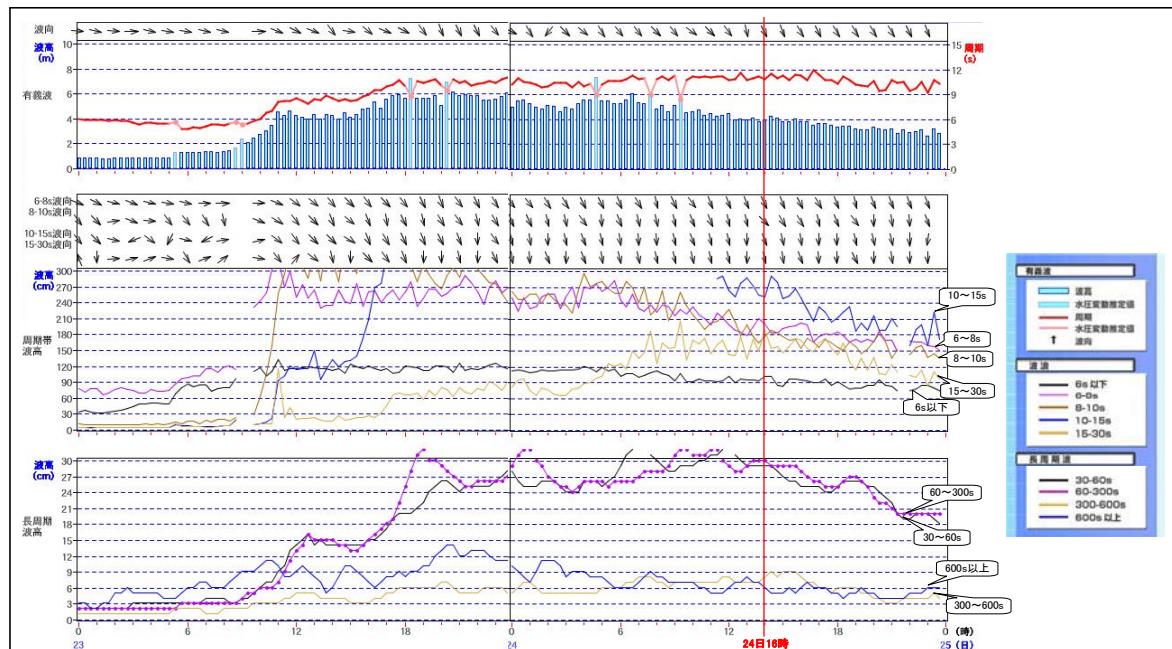


図3-7 カムインズの波浪周期別情報

#### 4. 伏木地区における波浪特性

伏木富山港（伏木地区）における被災波と設計波についてブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施し、波浪特性を把握する。

##### 4.1 波浪計算手法

伏木地区における波浪特性の検討には、(独)港湾空港技術研究所が開発しているブシネスクモデル(NOWT-PARI ver.4.6c5a(2008年最新版))を用いる。

###### (1) ブシネスクモデルの概要

ブシネスクモデルは、港内外の波浪変形を同時にかつ高精度に算定する最新の計算手法として、近年、その有用性が広く注目されている波浪計算手法である。(独)港湾空港技術研究所によるブシネスクモデルは、NOWT-PARI ver4.6 βが2001年度から配布されており、伏木富山港（伏木地区）の港湾計画関連の波浪計算においても2001年度から順次導入されている。ブシネスクモデルと他の波浪計算手法との適用範囲の比較を表4-1に示す。

表 4-1 波浪変形計算法（計算モデルの基礎方程式）の適用範囲<sup>2</sup>

分類	波浪変形計算手法	水深変化	屈折	浅水変形	碎波	回折	反射	海浜流	水位上昇	有限振幅性	分散性	多方向性
屈折系	①波向線法	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	②エネルギー平衡方程式	○	○	○	○	△	○	×	×	×	×	○
回折系	③ゾンマーフェルト解による解析解法	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	○
	④ヘルムホルツ方程式	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	○
	⑤高山法	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	○
屈折・回折系	⑥数値波動解析法	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×
	⑦ブシネスク方程式	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○

（碎波）②：碎波減衰項によって波高をエネルギー的に減衰させる

⑦：碎波減衰項によって運動流速を減衰させることにより波高を減衰させる

（回折）②：理論的な考慮はないが、数値分散により実用上問題のない結果が得られることが多い

（反射）⑦：部分反射（完全反射と無反射の中間的な反射率を有する反射）の取り扱い方に改善が必要である

<sup>2</sup> 平山克也(2002)：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究、港湾空港技術研究所資料 No. 1036.

## (2) ブシネスクモデルの特徴

ブシネスクモデルの最大の特徴は、屈折と回折を同時に考慮できること、および非線形性（有限振幅性）を考慮できることである。

### 1) 屈折・回折を同時に考慮できることの利点

従来の手法では、水深変化による屈折の影響が大きく遮蔽物による回折のない港外を屈折系のモデルで、水深変化による屈折の影響が少なく遮蔽物による回折の影響が大きい港内を回折系のモデルで別々に計算することが多かった。

ブシネスクモデルは、屈折・回折を同時に計算できることから、港内と港外で別々の計算をする必要がない。また、港内でも屈折と回折の両方を考慮できることから、港内の水深変化が大きい場合でも、従来の回折のみを考慮する手法と比較して計算精度向上する。

### 2) 非線形性が考慮できることの利点

ブシネスクモデルでは、非線形性が考慮できることにより高波浪時（波形勾配が大きい場合）や浅海域（水深波長比が小さい場合）の計算精度が向上する。

非線形性が計算精度に影響する例として、浅水係数の算定図を図 4-1 に示す。非線形性を考慮しない場合、実現象（非線形性を考慮する場合）と比較して浅水係数（波高）が低く見積もられる。したがって、ブシネスクモデルは従来法と比較して、実現象をより忠実に表現したモデルであるといえる。

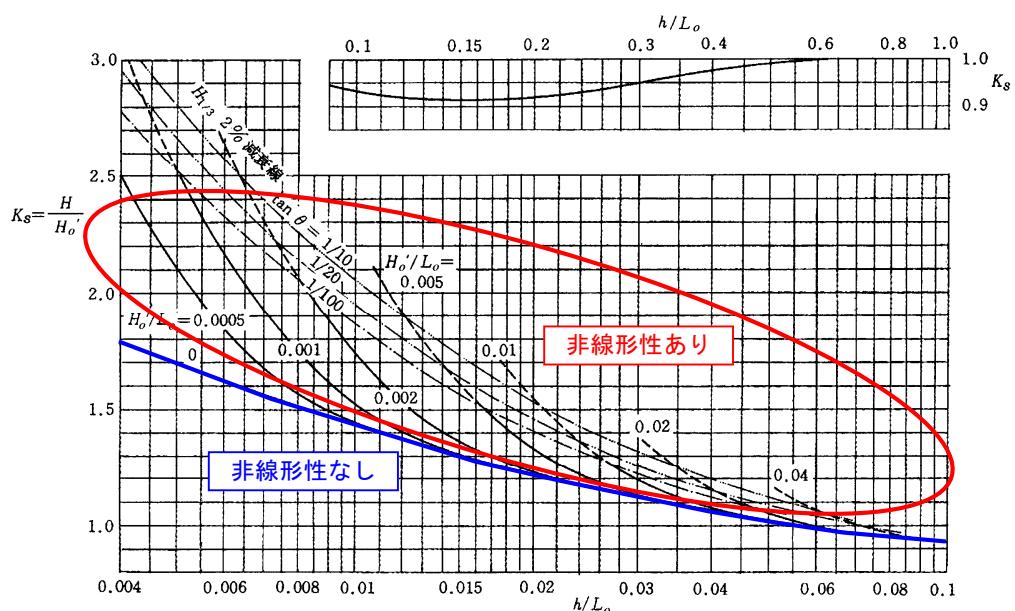


図 4-1 浅水係数の算定図（非線形性の例として）

## 4.2 計算条件

### (1) 波浪条件

検討波浪は、被災時の最大波浪（港外波浪観測地点における観測値）と、今回の被災で最も被害が大きかった北防波堤のB区間における設計沖波の2ケースとする。波向は、伏木地区における波浪特性から波向 NNE と NE の2ケースとする（被災時の波向は不明）。方向集中度パラメータ  $S_{max}$  は波形勾配から算定する。波浪条件のまとめを表 4-2 に示す。

表 4-2 波浪条件のまとめ（入射波）

波浪条件	波高(m)	周期(秒)	波向	$S_{max}$
被災波 (2008年2月24日14:00)	4.22	14.2	NNE NE	75
設計波 (B区間ににおける設計沖波)	4.80	12.0	NNE NE	25

### (2) 地形条件

今回の検討は、被災の再現が目的であることから、地形条件は現況地形とする。地形条件および構造物の反射率の設定を図 4-2 に示す。

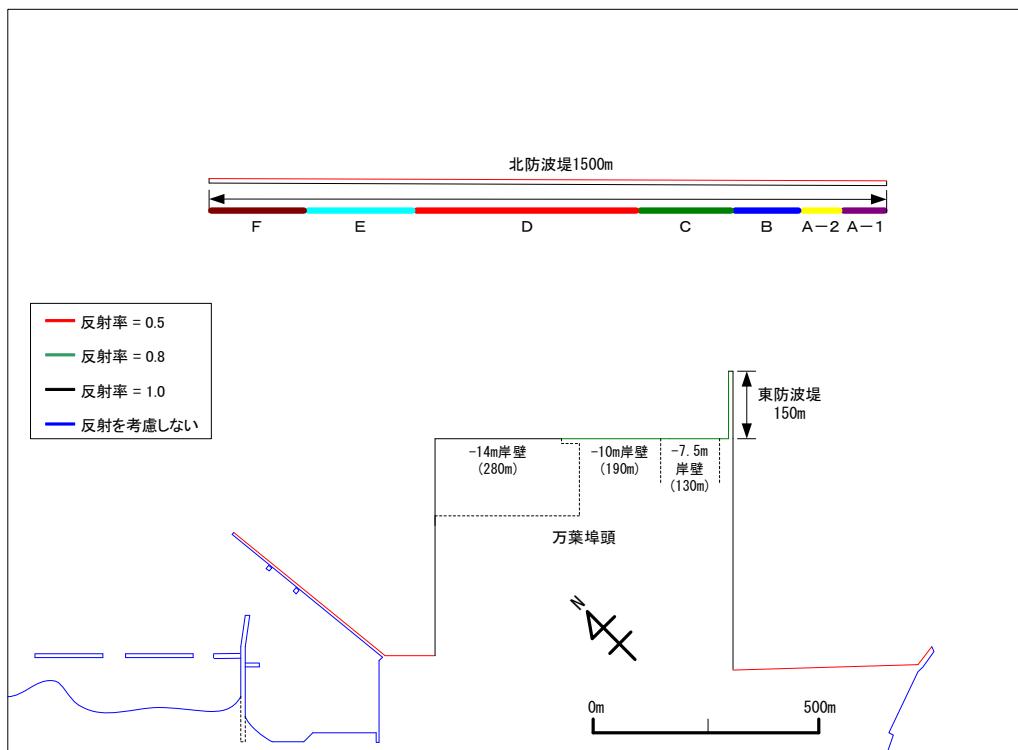


図 4-2 港湾構造物条件設定図（現況：構造物による反射あり）

### (3) 主な計算条件

主な計算条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 主な計算条件

項目	計算条件	備考
計算対象域	伏木外港の港外および港内	図 4-3 参照
沖側境界条件	修正 JONSWAP 型スペクトル ( $\gamma = 3.3$ )	
港内反射率	直立壁 : 1.0 スリットケーション : 0.8 消波ブロック : 0.5	図 4-2 参照
計算格子間隔	10m	
計算時間間隔	0.02 秒	
積分時間	$100T_{1/3}$	
沖側最大水深	50m	港外波浪観測地点(46m)付近
最低水深	5.0m (万葉埠頭緑地の進行波計算は 2.0m)	
計算潮位	M.S.L.=D.L+0.2m	

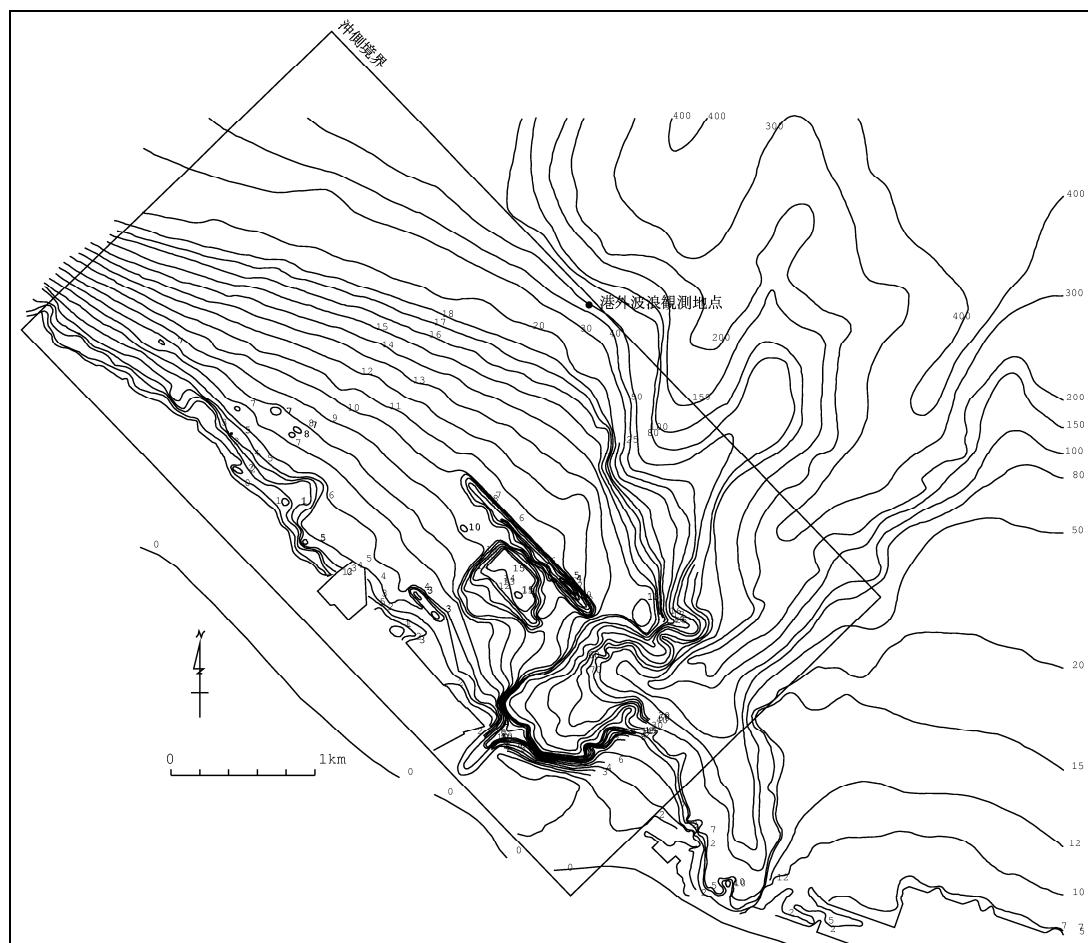


図 4-3 計算領域の設定図 (数値は水深(m))

### 4.3 波浪特性の検討

被災時の状況を把握するために、ブシネスクモデルにより伏木富山港（伏木地区）に波浪変形計算を実施し、波浪分布を把握する。また、同一の条件で設計波についても検討を行う。

ここでは、“北防波堤の反射あり”の条件での計算結果をもとに、北防波堤前面で実際に起こっている現象を正確に把握することとする。

#### (1) 被災波の波浪変形計算

伏木富山港（伏木地区）港外波浪観測地点（マフコタワー）における被災時の最大波高（波高 4.22m、周期 14.2 秒）を入射波条件として、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施する。波向は NNE および NE の 2 ケースとする。波浪計算結果を図 4-4 および図 4-5 に示す。

被災波の波浪計算結果（平面分布）から次のことがいえる（表 4-4）。

- ・ 北防波堤の B 区間は、波向 NNE ではあまり波高が高くならない。波向 NE では波浪の収束域となるため、高波浪となる。
- ・ 北防波堤の C 区間は、波向 NNE では波浪の拡散域となり、波高が高くならない。波向 NE では、東端で波高が高くなる。
- ・ 北防波堤の D 区間は、波向 NNE では全域で波高が高くなる。波向 NE では、西側のみ高波浪となる。
- ・ 万葉埠頭緑地では、波向 NNE で波高が高くなる。波向 NE では、波浪の収束域が北防波堤に遮蔽されるため、波高は高くならない。
- ・ 波向 NEにおいては、B 区間と C 区間の境界付近や、D 区間の西端の被災箇所と高波浪の分布がよく一致している。

表 4-4 被災波の波浪特性

波向	北防波堤			万葉埠頭緑地
	D 区間	C 区間	B 区間	
波向 NNE	高い（全域）	低い	低い	高い
波向 NE	高い（西側）	高い（東端）	高い	低い

■ は危険な波向

伏木(北)防波堤 1,500m

F'区間 60m F区間 155m E区間 240m D区間 95m D区間 400m C区間 210m B区間 150m A-2区間 90m A-1区間 100m

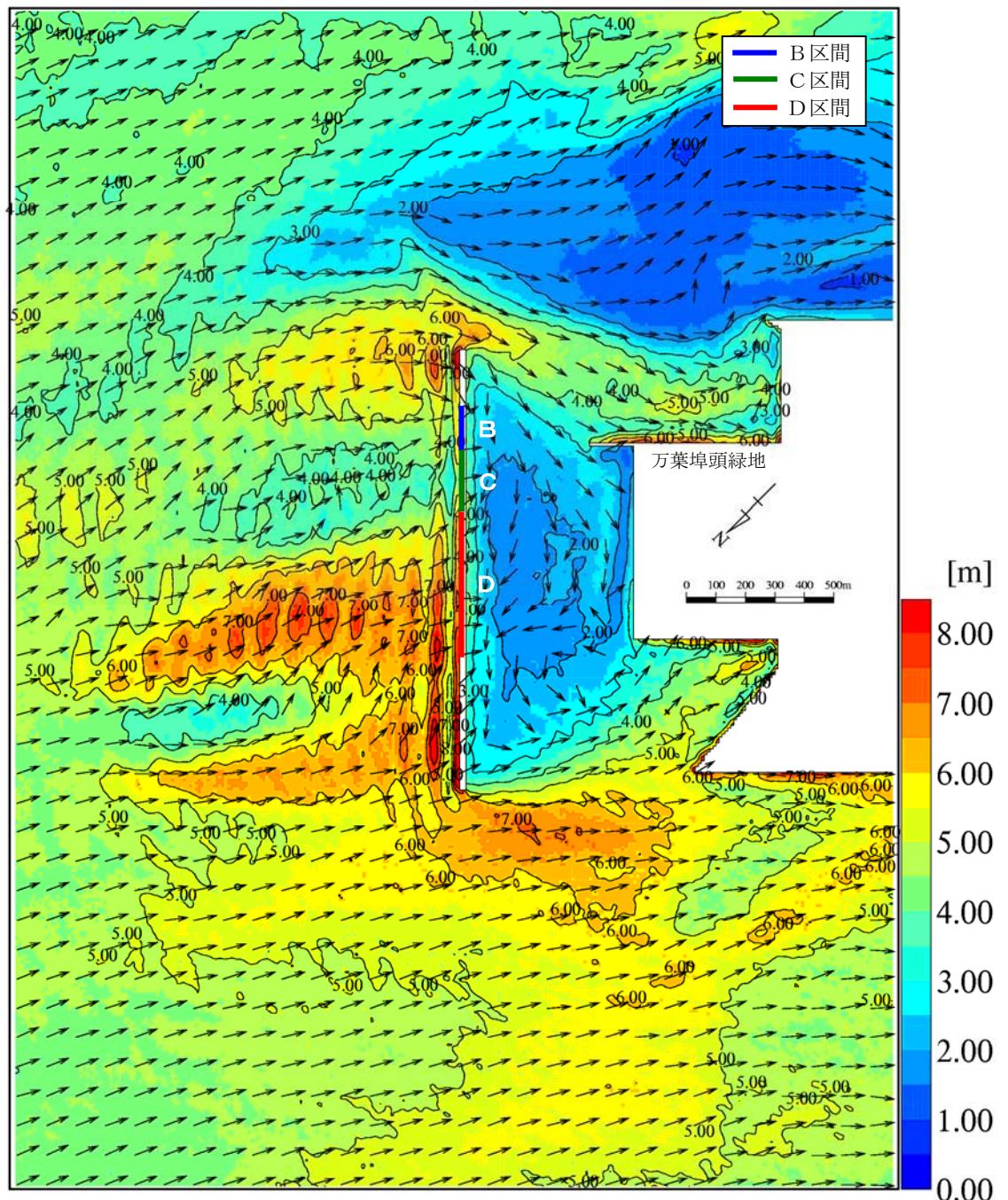


図 4-4 被災波の波浪計算結果（波向 NNE）

(構造物による遮蔽・反射あり)

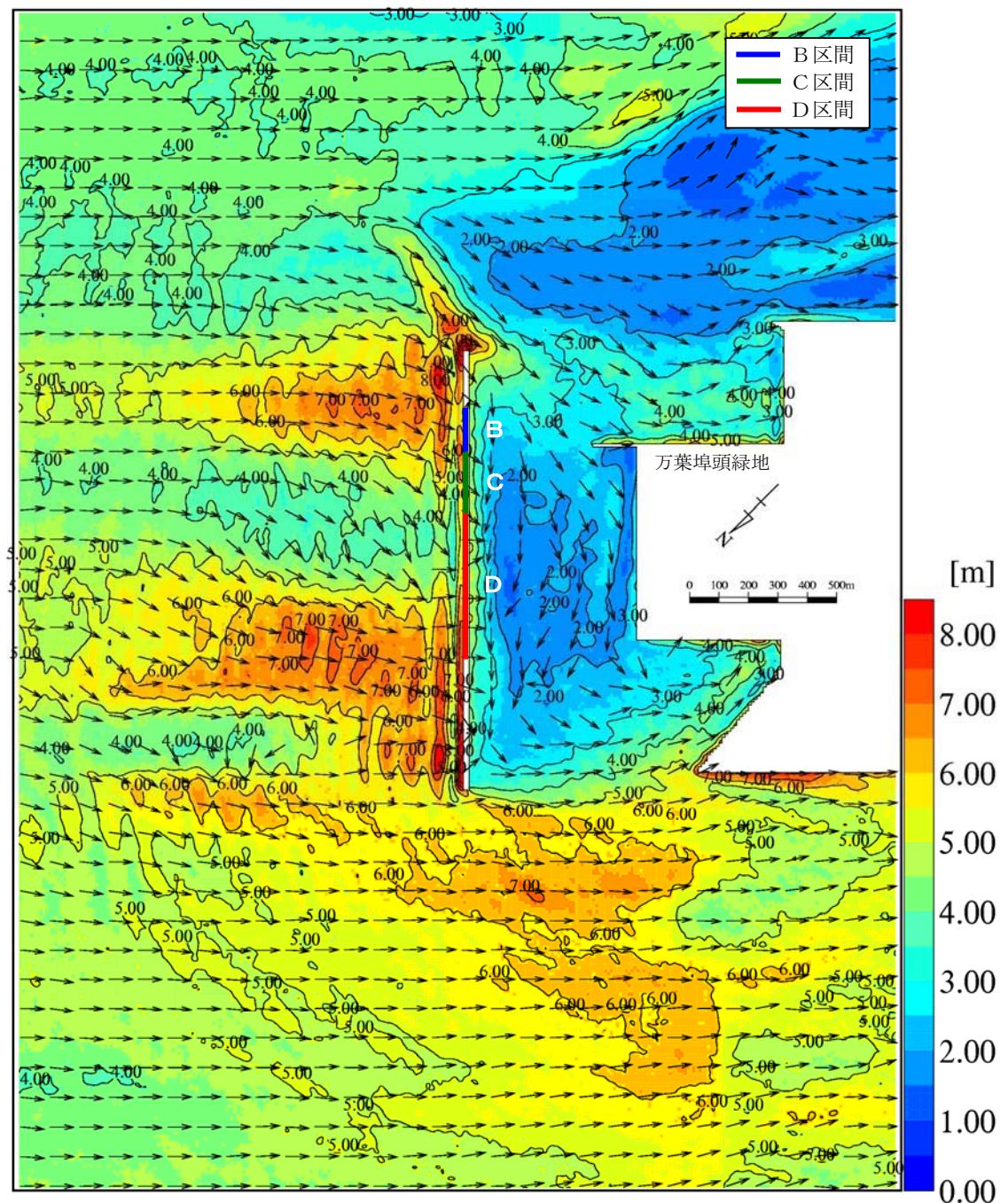


図 4-5 被災波の波浪計算結果（波向 NE）

(構造物による遮蔽・反射あり)

## (2) 設計波（B区間）の波浪変形計算

被災波と設計波の波浪特性の違いを確認するために、最も被害が大きかったB区間の設計沖波（波高 4.8m、周期 12 秒、SMB 法）を入射波条件として、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施する。波向は NNE および NE の 2 ケースとする。波浪計算結果を図 4-6 および図 4-7 に示す。

被災波の波浪計算結果（平面分布）から次のことがいえる（表 4-5）。

- ・ 北防波堤の前面では、全般に波向 NNE よりも波向 NE のほうが波高は高い。
- ・ 北防波堤のB区間は、波向 NNE ではあまり波高が高くならない。波向 NE では東側が波浪の収束域となり、高波浪となる。
- ・ 北防波堤のC区間は、波向 NNE、NE ともに波浪の拡散域となるため、波高は高くならない。
- ・ 北防波堤のD区間は、波向 NNE、NE ともに波浪の収束域となり、波高が高くなる。万葉埠頭緑地では、波向 NNE で波高が高くなる。波向 NE では、波浪の収束域が北防波堤に遮蔽されるため、比較的低くなる。

表 4-5 B区間の設計波の波浪特性

波向	北防波堤			万葉埠頭緑地
	D区間	C区間	B区間	
波向 NNE	高い（西側）	低い	低い	高い
波向 NE	高い（西側）	やや低い	高い（東側）	低い

は危険な波向



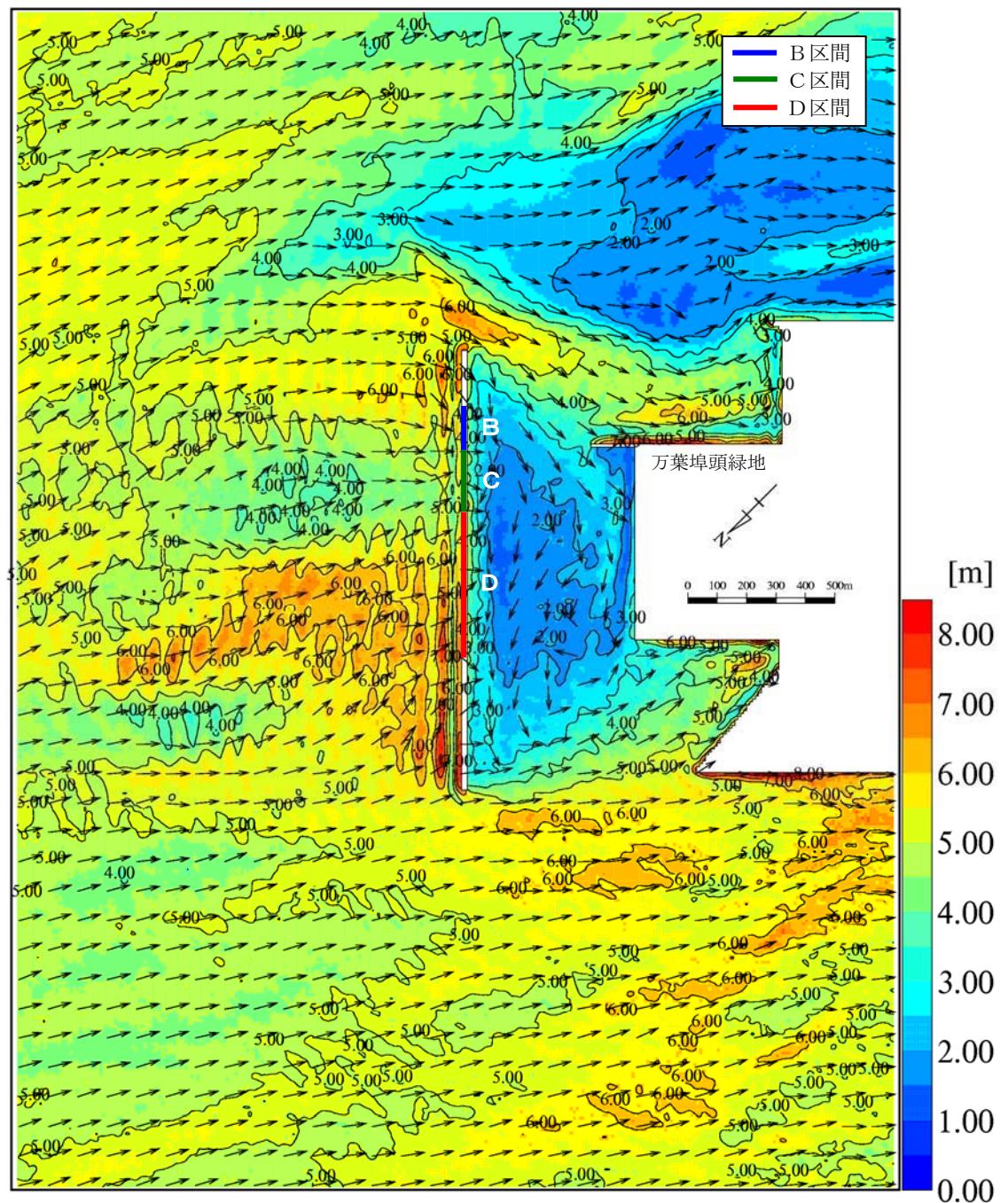


図 4-6 設計波(B 区間)の波浪計算結果 (波向 NNE)  
(構造物による遮蔽・反射あり)

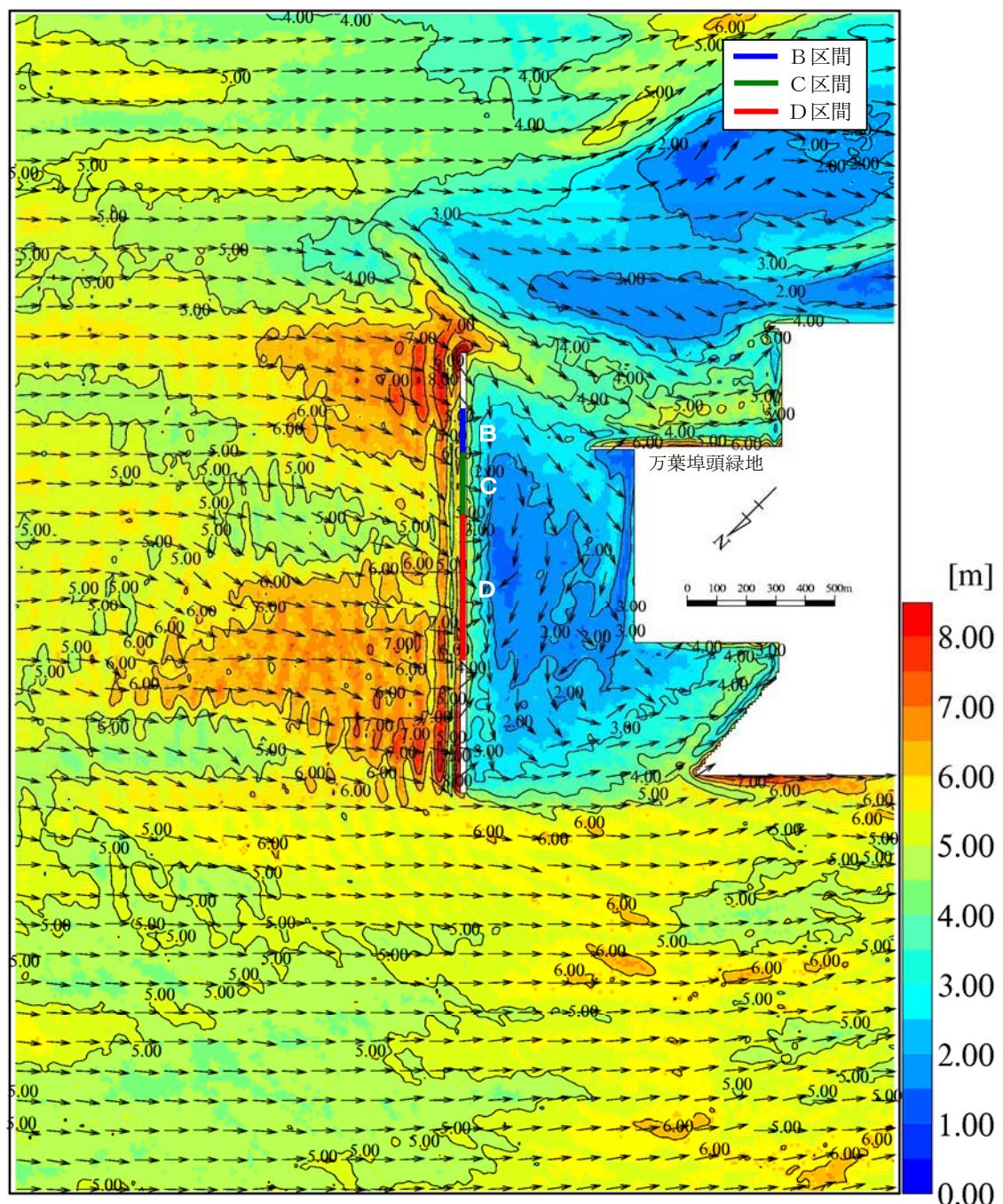


図 4-7 設計波(B 区間)の波浪計算結果 (波向 NE)

(構造物による遮蔽・反射あり)

### (3) 北防波堤前面の波高分布特性

北防波堤前面(30mの最大値)の波高分布特性を図 4-8 に示す。

#### 1) 被災波

北防波堤前面の波高分布特性から、被災波について次のことがいえる。

- ・ B・C区間の波高は、全般に波向 NNE よりも波向 NE のほうが高い。特に、波向 NE では被災箇所の波高が高くなっている。
- ・ D区間の波高は、全般に波向 NE よりも波向 NNE のほうが高い。区間内では、被害の大きかった西側の波高が高い傾向にある。

#### 2) 設計波

北防波堤前面の波高分布特性から、設計波について次のことがいえる。

- ・ B・C区間の波高は、全般に波向 NNE よりも波向 NE のほうが高い。
- ・ D区間の波高は、波向 NE と NNE では同程度である。

#### 3) 被災波と設計波の比較

北防波堤前面の波高分布特性から、被災波と設計波の違いについて、次のことがいえる。

- ・ 被災波の入射波高(4.22m)は設計波の入射波高(4.8m)よりもよりも波高が低いが、北防波堤前面では被災波の波高のほうが高い場所が多くみられる。
- ・ 被災波は、設計波よりも場所的な波高の変化が大きい。
- ・ これらの現象は、設計波の周期(12秒)よりも被災波の周期(14.2秒)のほうが長いため、屈折による波浪の収束・発散や浅水変形の効果が大きいために生じると考えられる。

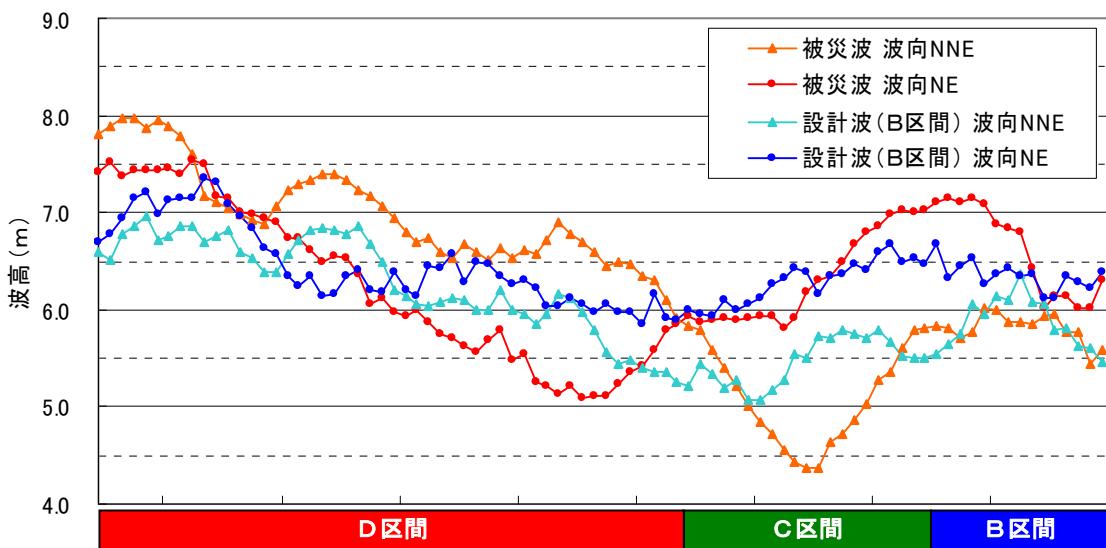


図 4-8 北防波堤前面の波高分布特性 (反射あり)

#### (4) 北防波堤前面の波形特性

被災波の波向 NE の波浪計算結果を例にとり、北防波堤前面における被災時の波浪の波形特性について検討する。北防波堤前面における被災波の空間波形特性を図 4-9 に、時系列波形特性を図 4-10 に示す。

空間波形では、波の山が前傾した波形となっている。また、空間波形・時系列波形ともに波の山と谷の形が非対称で、波の山は尖り、谷は平坦な波形である。これらの特徴は、非線形性の強い波浪に特有のものであり、今回の被災波浪が強い非線形性をもっていたことがわかる。

非線形性の強い波は、従来の波浪予測手法では予測が困難であり、複雑な海底地形条件など「うねり性波浪」の影響を受ける場所等では、これから港湾の設計では、非線形性等も考慮した設計手法を採用することが求められる。

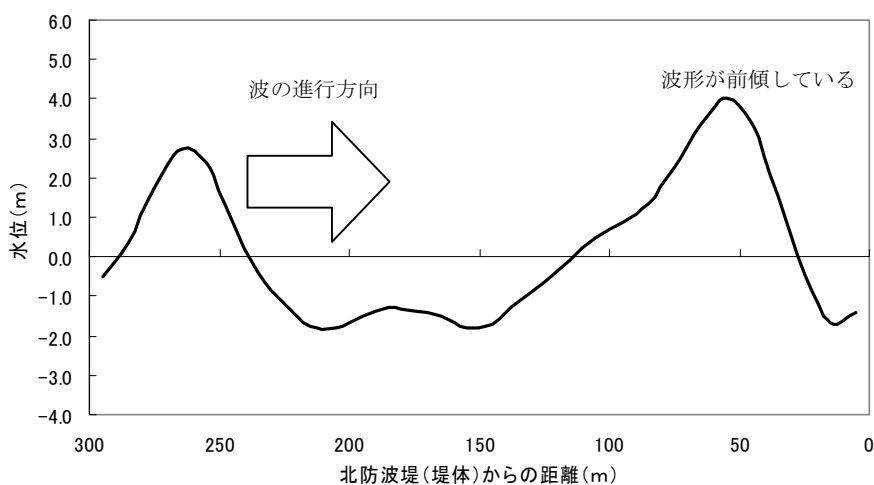


図 4-9 北防波堤前面の空間波形特性（B 区間、計算時刻：2150 秒）

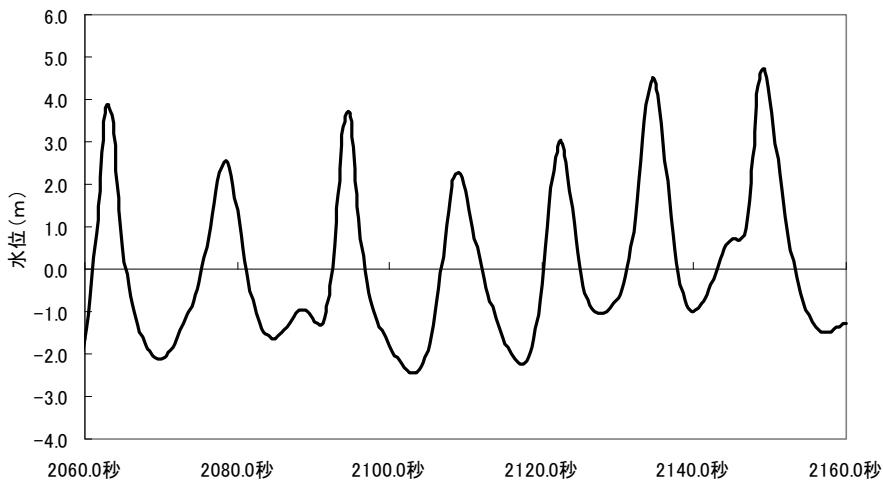


図 4-10 北防波堤前面(50m)における時系列波形特性（B 区間）

## 【参考説明】“波の非線形効果”について

### ●波の伝播過程における非線形効果

波浪は、伝播する過程において次のような3つの現象とそれに伴う効果を呈することが知られている。

1. 深海で発生した波浪は、線形の分散波として浅海域へと進行する。
2. 波浪が波高水深比が大きくなる海域（浅海域）に進行すると非線形効果（波の上部では波速が大きくなり、波の下部では波速が小さくなり波が前に傾く）があらわれ、波の峰が高くなるとともに波前面勾配が急峻となる。
3. さらに水深波高比が大きい遠浅の海域へ波浪が進行すると、波形や水深等の条件によっては非線形効果に分散現象が加わってソリトン分裂（一つの波峰が多数の波に分裂する現象）のような波状段波を形成することもある。

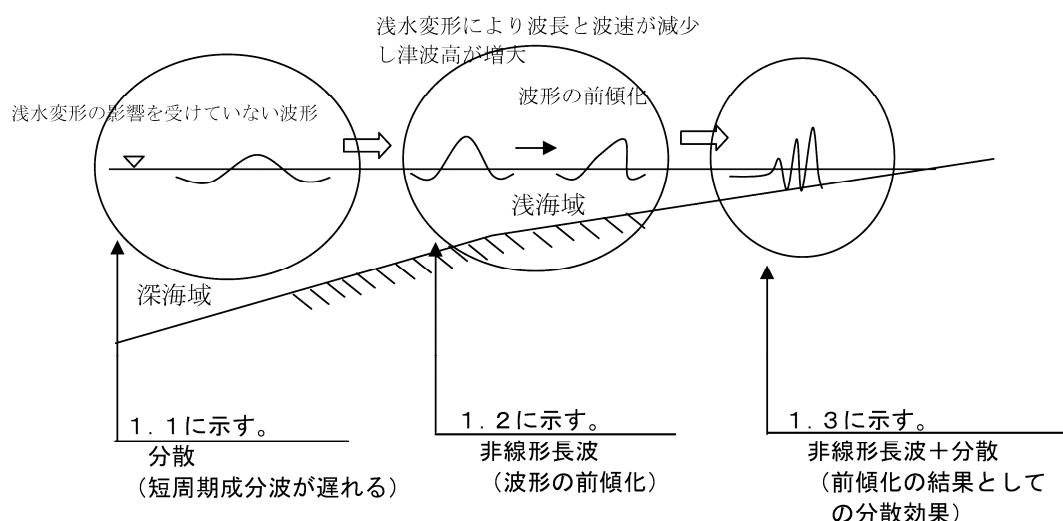


図 4.3-11 波浪の伝播過程における諸効果の模式図<sup>3</sup>

### 線形長波理論式で表現出来る現象

: 波は浅海域では、水深が浅い場所では波速は小さく、水深が深い場所では波速が大きい。

その結果、伝播過程で波長は次第に短くなり水位は高くなる（波速=  $\sqrt{gh}$ ）。

### 非線形長波理論式で表現できる現象

: 線形長波理論式で表現できる現象に加え、波の前傾化を表現可能（波速=  $\sqrt{g(h + \eta)}$ ）。

（ここに、gは重力加速度、hは平均水深、 $\eta$ は平均水深からの水位変動量である。）

<sup>3</sup> (財)国土技術研究センター(2007) : 津波河川遡上解析の手引き(案)を改変。

### ● “波の非線形効果” の具体例

波浪は浅海域において、波高水深比が深海域に比べて大きくなるため、水深の変化に伴う浅水変形によって波長、波速が減少するとともに波高が高くなる。浅水変形によって波高が高くなり、水位の高い部分と水位の低い部分との移動速度差が大きくなることで波の峰が前に傾くことを非線形効果という。このような現象は、非線形長波理論によって表現することができる。

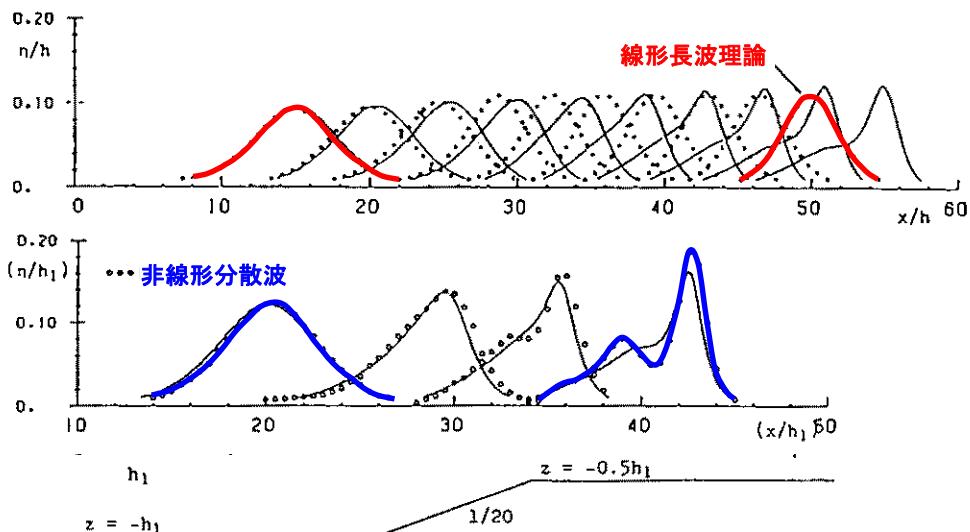


図 4.3-12 線形長波と非線形分散波（ブシネスク）との比較<sup>4</sup>

<sup>4</sup> 土木学会 海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会(1994)：海岸波動, pp. 230 を改変.