

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.51 No.1 June 2012

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 51 卷 第 1 号 (Vol. 51, No. 1), 2012 年6月 (June 2012)

目 次 (CONTENTS)

1. 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た
多方向不規則波の造波とその特性
..... 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章 3
(Generation and Characteristics of Random Waves for Distribution of Directional Spectra on Variable Bathymetry
..... Katsuya HIRAYAMA, Hiroyuki IWASE, Hiroaki KASHIMA)
2. 強震動を対象とした 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル
..... 野津厚, 若井淳 23
(A Source Model for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan,
Earthquake to Explain Strong Ground Motions
..... Atsushi NOZU, Atsushi WAKAI)
3. 係留施設の機能低下評価手法に関する研究
..... 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保 55
(Development of Evaluation Method for Functional Performance of Mooring Facilities
..... Ema KATO, Yuichiro KAWABATA, Mitsuyasu IWANAMI)

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た 多方向不規則波の造波とその特性

平山 克也*・岩瀬 浩之**・加島 寛章***

要 旨

ブシネスクモデルでは、沖側境界から入射させる多方向不規則波形は、一様水深上で与えたある1つの沖波方向スペクトルに対して造波される。このとき沖側境界は、海底地形による屈折・浅水変形や沖の島や岬による回折・反射変形などの影響が少なく、方向スペクトルの空間変化が小さい沖合に設定することが求められるので、計算領域は必然的に広がる場合が多い。しかし、実務においては、現地の地形特性や計算容量、演算時間等の制約により、必ずしもこれらを満足できないケースも多くみられる。

そこで本研究では、沖側境界を岸側へ寄せた場合などに顕著となる方向スペクトルの空間変化を複数の方向スペクトルで代表させ、これらに対する多方向不規則波を水深が一様でない沖側境界上で造波する方法を提案することにより、ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式法とのカップリング（片方向接続）を実現した。この造波精度の検証は球面浅瀬場を対象として実施し、屈折後の波高・波向分布を直接造波可能であることを示すとともに、このような造波境界（接続境界）は、極端な浅瀬を避けて設定すべきであることを明らかにした。

さらに、岩手県久慈港、富山県伏木富山港で発生した高波災害の再現計算を行い、造波境界における方向スペクトルの空間変化を考慮することにより港湾・海岸施設への被災波の作用状況をより明確に説明できることや、NOWPHASによる波浪観測データが得られた伏木富山港の例では、不規則波形の波高分布が高波高側に偏る傾向をも再現できることを確認した。

キーワード：方向スペクトル，任意水深，多方向不規則波，ブシネスクモデル

*海洋研究領域波浪研究チーム チームリーダー

**（株）エコー（前 波浪研究チーム依頼研修員）

***海洋研究領域波浪研究チーム 研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

Generation and Characteristics of Random Waves for Distribution of Directional Spectra on Variable Bathymetry

Katsuya HIRAYAMA *

Hiroyuki IWASE**

Hiroaki KASHIMA***

Synopsis

Generally, wave transformation in shallow water should be estimated for a representative offshore wave spectrum. However it may be difficult for the Boussinesq wave model which requires a relative narrow computational region for calculating wave fields that an incident wave boundary is expanded to offshore. In this paper, multi-directional random waves for spatial distribution of directional spectra and shallow water depths are generated on the linear incident boundary in Boussinesq wave model. The applicability of the newly developed procedure of generation, which is based on the generation method for arbitrary spectrum proposed by Hirayama and Miyazato (2009), is verified by the reproduction of spatial distribution of wave height behind a spherical shoal for the transformed directional spectra estimated by energy balance equation. Thus the coupling between Boussinesq model and energy balance equation is realized.

The characteristics of directional random waves generated with the coupling are investigated on some applications to actual harbors. The significant wave heights in front of the breakwater and revetment damaged with severe waves can be estimated larger than them calculated without the coupling. In addition, the statistic distribution of wave height observed at the wave station and reproduced with coupling becomes gentle around the peak for *Yorimawari-nami*, which causes many caissons of the offshore breakwater slide widely in Fushiki-Toyama port in 2008, instead of corresponding to the Rayleigh distribution at the foot.

Key Words: Directional Spectrum, Variable water depth, Random waves, Boussinesq model

* Head, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Research Division

** ECOH Corporation (Ex-Trainee, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Research Division)

*** Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Research Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式法とのカップリング手法の提案	7
2.1 任意形状スペクトルの造波法	7
2.2 複数方向スペクトルの造波法	8
2.3 任意水深上での造波法	8
3. 球面浅瀬場を対象とした造波精度の検証	9
3.1 球面浅瀬場における複数方向スペクトルの抽出	9
3.2 球面浅瀬周辺の波浪場の再現精度	10
3.3 適用範囲に関する考察	11
4. 現地港湾への適用（被災波の再現計算）	12
4.1 岩手県久慈港（2006年10月の高波）	12
4.2 富山県伏木富山港（2008年2月の寄り回り波及び台風0423号による高波）	13
4.3 波浪統計量の出現特性に関する考察	17
5. まとめ	19
6. おわりに	19
参考文献	19
記号表	20
付録 球面浅瀬場を対象としたブシネスクモデルどうしのカップリング	21

1. はじめに

ブシネスクモデルに代表される位相分解型波浪変形計算モデルでは、沖側境界から入射させる多方向不規則波形は、一様水深上で与えたある1つの沖波方向スペクトルに対して造波される。このとき沖側境界は、海底地形による屈折・浅水変形や沖の島や岬による回折・反射変形などの影響が少なく、方向スペクトルの空間変化が小さい沖合に設定することが求められるので、計算領域は必然的に広がる場合が多い。しかし、実務においては、現地の地形特性や計算容量、演算時間等の制約により、必ずしもこれらを満足できないケースも多くみられる。

そこで本研究では、沖側境界を岸側へ寄せた場合などに顕著となる方向スペクトルの空間変化を複数の方向スペクトルで代表させ、これらに対する多方向不規則波を水深が一様でない沖側境界上で造波する方法を提案するとともに、球面浅瀬場を対象としてこの造波精度を検証した。さらに、岩手県久慈港、富山県伏木富山港で発生した高波災害の再現計算を行い、造波境界における複数の方向スペクトルの空間変化を考慮することによる効果を検討した。

このうち、実海域における波浪観測データや、エネルギー平衡方程式法に代表される位相平均型の波浪変形計算モデルで算定された、ある1つの任意形状の方向スペクトルに対する多方向不規則波形の造波法は、平山・宮里(2009)によってすでに提案されている。本研究は、これを任意水深上の複数の方向スペクトルへと拡張し、エネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルとのカップリングを実現したものである。

まず、2章では、任意形状スペクトルに対する多方向不規則波の造波法及び任意水深上での造波法についてこれまでの研究事例を概説するとともに、複数方向スペクトルに対する多方向不規則波の任意水深上での造波法を新たに提案し、これを用いたブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式法とのカップリング手法について述べる。

3章では、球面浅瀬場を対象として、異なる複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波を、一様水深上あるいは任意水深上で造波した場合に、両者の片方向接続による造波精度の検証を行う。

4章では、エネルギー平衡方程式法とカップリングされたブシネスクモデルを現地港湾に適用し、波浪災害をもたらした高波あるいは長周期うねりの伝播・変形計算を行い、有義波高の空間分布及び不規則波形における個々波の波高分布の再現性を議論することにより、本手

法の有用性を検証する。

最後に、5章において研究のまとめを行う。

2. ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式法とのカップリング手法の提案

一般に、ブシネスクモデルの沖側境界で多方向不規則波を造波する際には、平面水槽に設置されたサーペント型造波装置と同様に、入射波の代表量である有義波高、有義波周期、主波向きならびに方向集中度から、関数スペクトル及び方向分布関数を用いて方向スペクトル形を決定し、周波数及び方向毎に分割された成分波の重ね合わせによって入射波形を作成する。このとき対象とする沖波方向スペクトルは代表的なただ1つであり、沖側境界上の造波水深は一定である。

しかし、実海域の比較的浅い海域での観測結果やエネルギー平衡方程式法による計算結果は、海底地形や構造物等の影響を受けて、沿岸域ではスペクトル形状がかなり変形していることも少なくない(任意形状の方向スペクトル)。さらに、このときには、ブシネスクモデルに対して設定した沖側境界に沿って、水深及び方向スペクトルは一様でないことが多い(任意水深、複数の方向スペクトル)。

そこで以下では、エネルギー平衡方程式法によって算定された複数の方向スペクトルをブシネスクモデルに入力し、直線で設定された沖側境界で多方向不規則波を造波するという、両者のカップリング手法(片方向接続)について述べる。

2.1 任意形状スペクトルの造波法

平山・宮里(2009)は、関数スペクトルによらない任意形状の方向スペクトルに対して、繰り返し法に基づく数値計算アルゴリズムを用いてエネルギー等分割を行い、式(1)に示すシングルサンメンション法によって多方向不規則波を造波する方法を提案した。

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

ここで、 x は直交平面座標のうち岸向きを正とする座標軸、 y は x 軸を右に見る向きを正とする沿岸方向の座標軸、 t は時刻である。また、 a_n は各成分波の振幅、 k_n は波数、 f_n は周波数、 θ_n は波向(反時計回りを正、単位は[rad])、 ε_n は初期位相であり、添字 n は n 番目の成分波であることを表す。 N_s は成分波数である。このうち、周波数スペ

クトル $S(f)$ に対する各成分波の振幅は、式(2)によって算出することができる。

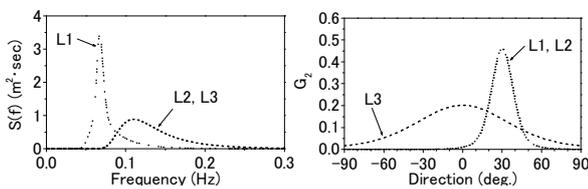
$$a_n = \sqrt{2S(f_n)\Delta f_n} \quad (2)$$

なお、周波数スペクトルをエネルギー等分割することによって生成された各成分波は、一般に、互いに独立であるため、長時間にわたり不規則な波形を造波することが可能である。これに対し、周波数等分割により造波される不規則波形では、成分波の最小周波数に依存して同じ波形が繰り返されるため、長時間の造波に際してはより多くの成分波数を必要とする。

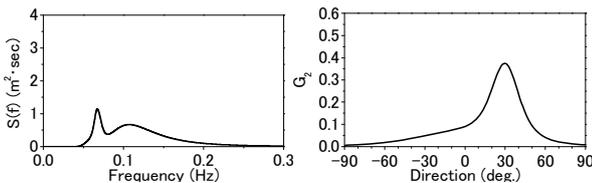
また、シングルサンメンション法では、各成分波の波向は、方向分布の累積曲線に対して乱数を当てはめ、各周波数に対してただ1つ割り当てられる。一方、ダブルサンメンション法では、各周波数に対し、方向分布に応じた複数の波向が割り当てられるため、前者に比べ、より多くの成分波数を必要とする場合が多いと考えられる。

2.2 複数方向スペクトルの造波法

沖・酒井 (2006) は、ブレットシュナイダー光易型スペクトルに対してエネルギー等分割する方法を援用し、エネルギー平衡方程式法によって算定された直線上に分布するそれぞれ形状が少しずつ異なるスペクトルに対して、少なくともピーク周波数付近で細かく分割された各成分波の代表周波数を得る方法を示すとともに、これを用いたダブルサンメンション法に基づく多方向不規則波の造波方法を示した。なお、より詳細なレビューが平山・宮里 (2009) に示されているので、合わせて参照されたい。



(a) 代表地点 (L1, L2, L3) で与えた方向スペクトル



(b) 平均した方向スペクトル (仮想方向スペクトル)

図-2.1 仮想方向スペクトルの定義

(左：周波数スペクトル，右：二次元方向分布)

一方、本研究では、前節で述べた任意形状スペクトルに対する造波方法を利用して、シングルサンメンション法に基づき、ブシネスクモデルの造波境界上で与えた複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波の造波方法を提案する。具体的な手順を以下に示す。

- ① 造波境界上の複数の代表地点 (例では L1, L2, L3 の3地点) で与えた図-2.1(a)に示す任意形状の方向スペクトルを平均し、造波境界全長に対し仮想的な方向スペクトルを1つ作成(図-2.1(b))。ここで、 G_2 は二次元方向分布であり、方向スペクトルを周波数方向に積分したものとして定義される。
- ② ①で作成した仮想方向スペクトルに対しエネルギー等分割法を適用し、各成分波の代表周波数を決定。さらに、各周波数に対する方向分布の累積曲線に乱数を当てはめ、各成分波の波向を決定。
- ③ ②で決定した各成分波の代表周波数を用いて、代表地点で与えた周波数スペクトルを分割し、式(2)に従い、代表地点における各成分波の振幅を決定。
- ④ 代表地点間の各計算格子上で与える各成分波の振幅を、線形補間により決定。ただし、②で決定した周波数、波向に加え、初期位相は各計算格子で共通。
- ⑤ ④で得た各計算格子上の各成分波諸元を用いて、従来の線境界入射法により、式(1)に従い、複数の方向スペクトルからなる1つの多方向不規則波を造波。

上記のうち、手順③は、各地点の方向スペクトルを厳密にエネルギー等分割するものではないが、それぞれのピーク周波数付近で細かく分割する各成分波が得られるなどの利点はそのまま維持している。また、手順④で得られる成分波諸元は、十分な成分波数に対して代表地点で与えた任意形状の方向スペクトルを比較的よく表すとともに、隣接する計算格子間で波峯線が揃った、より現実的な水面波形を造波できると考えられる。

2.3 任意水深上での造波法

水深が一様でない沖側境界上で斜め波を造波する場合には、沖側境界に沿う y 方向の隣り合う計算格子で波数 (波長の逆数) が異なるために生じる、波の位相差を考慮する必要がある。一方、従来のブシネスクモデル (平山, 2002) では、この問題を回避するため、水深一定とした造波境界と実地形との間に緩衝帯を設け、一様勾配

斜面により実地形へ適切にすりつけることを推奨している。しかし、造波境界上の複数の代表地点で与える任意形状の方向スペクトルは、エネルギー平衡方程式法などを用い造波境界上実際の水深に対して算定されたものであるため、造波水深に対して従来のような操作を行うことは適切ではない。そこで以下では、糸井ら（2003）を参考に、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法を整理する。

すなわち、水深が一樣でない造波境界上では波数 k_n が y 軸に沿って変化することを考慮すると、式(1)は式(3)のように書き換えられる。

$$\eta = \sum_{n=1}^{N_s} a_n(y) \cdot \sin\left(k_n(y)x \cos \theta_n + \int_0^y k_n(y) dy \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n\right) \quad (3)$$

ここで、振幅 a_n が y の関数であることは、造波境界 (y 軸) に沿って方向スペクトルが変化することに対応している。しかし、このときにも各成分波の周波数 f_n は変化しないので、波数 k_n は各計算格子の水深に応じて、各成分波に対し一義的に決定される。

3. 球面浅瀬場を対象とした造波精度の検証

ここでは、前章で提案した造波方法を用い、造波境界上の隣接する計算格子において振幅のみ、または振幅と波数が互いに異なる（漸変する）成分波諸元を有する多方向不規則波を造波して計算される領域内の波浪場と、これらが一樣とみなせる沖から造波したときの結果を比較することにより、このような造波方法の妥当性、及び波浪場の計算精度を検証した結果について述べる。

3.1 球面浅瀬場における複数方向スペクトルの抽出

図-3.1 に示す球面浅瀬（天端水深 5m，周囲は一樣水深 15m）を設定し、図-3.2 に示すように、b-b'断面及び c-c'断面上に設定した複数の代表地点に単一または複数の方向スペクトルを与え、ブシネスクモデルにより多方向不規則波を造波した。ここで、これらの方向スペクトルには、以下に述べるエネルギー平衡方程式法による算定結果を用いた。なお、計算格子間隔は、エネルギー平衡方程式法及びブシネスクモデルともに 2.0m とした。

まず、a-a'断面を造波境界とした計算領域を対象として、エネルギー平衡方程式法及びブシネスクモデルにより、表-3.1 に示す単一方向スペクトルに対する多方向不規則波を造波した。このうち、エネルギー平衡方程式法により計算された波高分布を図-3.3 に示す。球面浅瀬に

よる屈折・浅水効果により、浅瀬背後の中央で波高が高く、その両側で低くなる様子が確認できる。

エネルギー平衡方程式法で算定された方向スペクトルは、b-b'断面及び c-c'断面上で等間隔に設定した各 25 点で出力した。図-3.4 には、このうち代表 5 点（黒丸）で出力した方向スペクトル図を示す。なお方向軸は、便宜上、 y 軸の正の向きを方位 N と定義した。

これらより、特に、球面浅瀬の法肩付近の方向スペクトルは、屈折効果により方向分布に偏りが生じているこ

表-3.1 造波境界(a-a')で与える単一方向スペクトル諸元

有義波高(m)	有義周期(s)	波向き(deg)	S_{max}	エネルギー平衡方程式法		ブシネスクモデル
				周波数分割	波向分割	成分波数
1.0	5.1	0	75	20	40	512

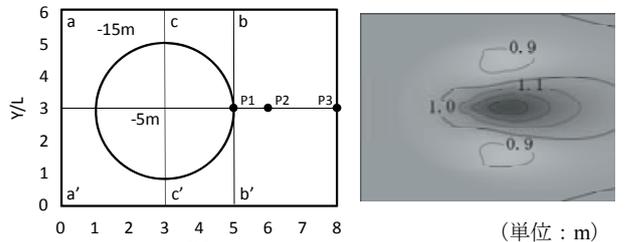
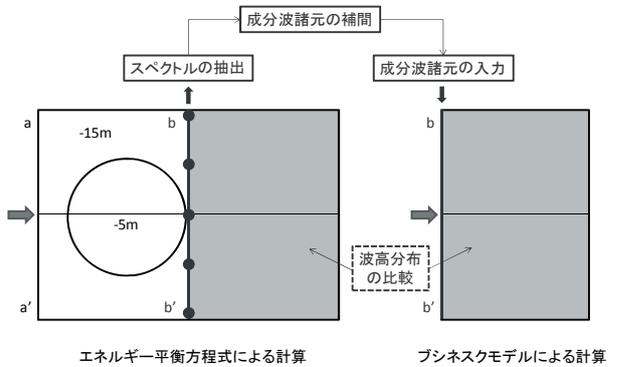
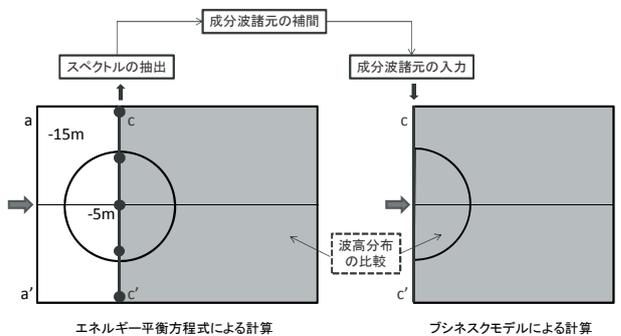


図-3.3 波高分布（エネルギー平衡方程式法）

図-3.1 球面浅瀬場と造波境界

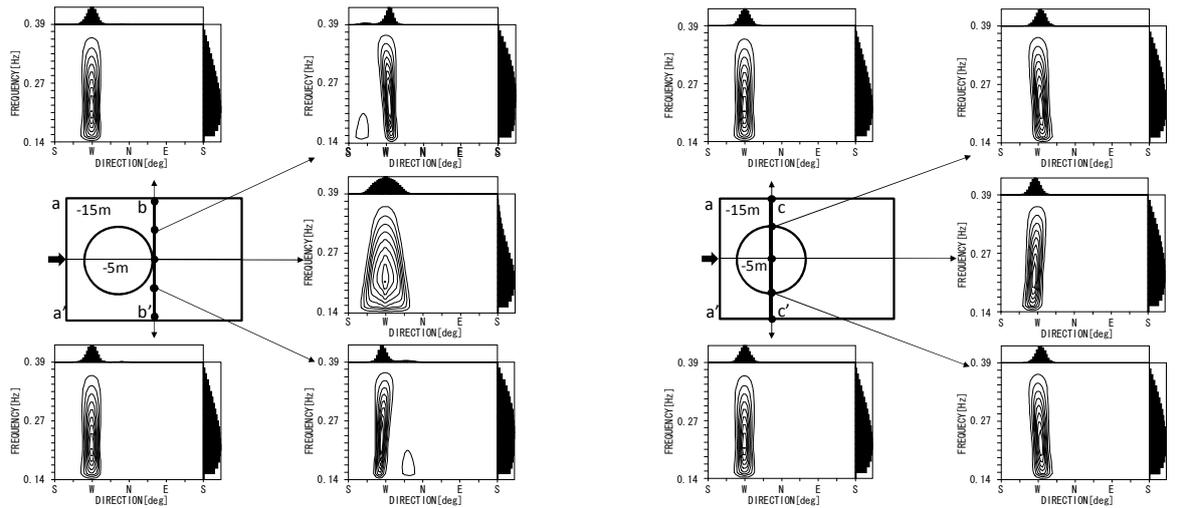


(a) b-b'断面（一樣な造波水深）でのカップリング



(b) c-c'断面（一樣でない造波水深）でのカップリング

図-3.2 球面浅瀬場を対象としたエネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルのカップリング



(a) b-b'断面 (造波水深が一樣な場合)

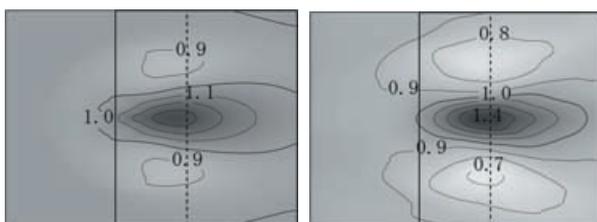
(b) c-c'断面 (造波水深が一樣でない場合)

図-3.4 エネルギー平衡方程式法で計算された代表地点におけるスペクトル

とがわかる. すなわち, b-b' 断面, c-c' 断面ともに, 低周波数 (長周期) 側で顕著な屈折変形が生じ, 球面浅瀬中心軸 ($Y/L=3$) の上側では NW より, 下側では SW より, 中心軸上では NW から SW の範囲に波向が変化している. これは, 造波境界 (a-a' 断面) から少なくとも c-c' 断面に至るまでの球面浅瀬上で, それぞれ中心軸をクロスするような屈折が生じていることを表している. また, この度合いは, 球面浅瀬中心を通る c-c' 断面よりも, 十分な屈折変形が生じた球面浅瀬直背後の b-b' 断面においてより大きい.

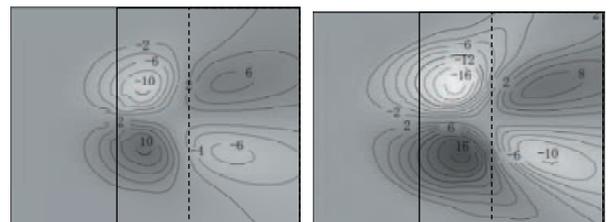
3.2 球面浅瀬周辺の波浪場の再現精度

図-3.5 (a) 及び (b) には, a-a' 断面を造波境界とした単一方向スペクトルによるエネルギー平衡方程式法及びブシネスクモデルによる波高分布を示す. なお, 図-3.5 (b) は図-3.3 の再掲である. 図より, エネルギー平衡方程式法に比べブシネスクモデルのほうが, より顕著な屈折・浅水変形が生じていることがわかる. また同様に, エネルギー平衡方程式法及びブシネスクモデルで算定された波向分布を図-3.6 (a) 及び (b) に示す. なお, 図には示していないが, 両計算モデルにおいて, 球面浅瀬による周期の変化はそれほど顕著ではないことを合わせて確認し



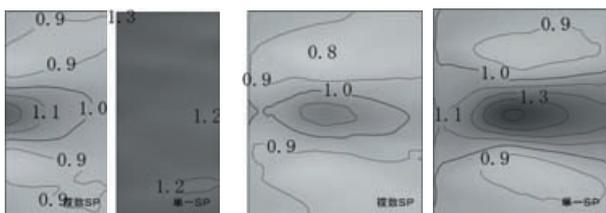
(a) エネルギー平衡方程式 (b) ブシネスクモデル(a-a')

図-3.5 計算モデルの違いによる波高分布の比較



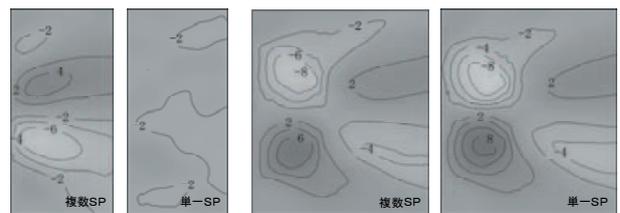
(a) エネルギー平衡方程式 (b) ブシネスクモデル(a-a')

図-3.6 計算モデルの違いによる波向分布の比較



(a) ブシネスクモデル(b-b') (b) ブシネスクモデル(c-c')

図-3.7 造波方法の違いによる波高分布の比較



(a) ブシネスクモデル(b-b') (b) ブシネスクモデル(c-c')

図-3.8 造波方法の違いによる波向分布の比較

ている。

ここで、これらの図中に示した黒枠は、それぞれ **b-b'** 断面 (破線) および **c-c'** 断面 (実線) を造波境界としたブシネスクモデルにおける計算領域である。ここで、複数方向スペクトルを造波する場合、各造波境界では、**図-3.4** で示した代表 5 点を含む各 25 点で補間された方向スペクトルに対して、水深が一樣な **b-b'** 断面では振幅のみ、水深が一樣でない **c-c'** 断面では振幅と波数が異なる (漸変する) 成分波諸元を有する多方向不規則波を造波する。一方、これらの計算領域で単一方向スペクトルを造波する場合には、それぞれの断面中央の代表地点で得られた方向スペクトルを、そのまま造波境界全長に与えて造波するものとした。ただし、この場合にも、水深が一樣でない **c-c'** 断面では、水深による波数の変化は考慮されることとした。

(1) 造波水深が一定の場合

球面浅瀬背後の水深が一樣な **b-b'** 断面を造波境界として算定されたブシネスクモデルによる波高分布を **図-3.7(a)** に示す。左図は複数方向スペクトル (複数 SP)、右図は単一方向スペクトル (単一 SP) による計算結果である。また同様に、複数 SP 及び単一 SP に対して算定された波向分布を **図-3.8(a)** に示す。

これらの図より、単一 SP を造波して算定された波高・波向分布はほぼ一樣で、球面浅瀬背後での波の集中は再現できていないのに対し、複数 SP では造波直後から沿岸方向の波高変化及び波向変化が見られ、球面浅瀬背後の造波境界における方向スペクトルの空間変化を適切に考慮できていることが確認できる。しかしながら、これらの複数 SP はエネルギー平衡方程式法で算定されたものであるため、これらをブシネスクモデルに与えて算定された波高・波向分布は、**a-a'** 断面から入射させたブシネスクモデルによる波高・波向分布ではなく、エネルギー平衡方程式法による波高・波向分布により近い結果となっている。

(2) 造波水深が一定でない場合

球面浅瀬上で水深が一樣でない **c-c'** 断面上を造波境界としたブシネスクモデルによる波高分布を **図-3.7(b)** に示す。同様に、左図は複数 SP、右図は単一 SP による計算結果である。また、複数 SP 及び単一 SP に対して算定された波向分布を **図-3.8(b)** に示す。

この場合には造波境界上で波数が変化するため、単一 SP の造波においても造波直後から屈折による球面浅瀬背後での波の集中が再現されている。しかし、造波境界

上での波高と波向の変化が考慮されていないため、入射する波エネルギーが過剰となるほか、波高ピーク地点もやや岸側にずれている。一方、複数 SP の場合では、球面浅瀬背後での波高増大は不十分ではあるが、波の集中を含む全体的な波高・波向分布の傾向は、エネルギー平衡方程式法ではなく、むしろ **a-a'** 断面で造波したブシネスクモデルによる結果に近い。これは、造波後に、球面浅瀬による波浪変形が計算されたためと考えられる。

3.3 適用範囲に関する考察

以上の検討において、複数方向スペクトルを造波した場合、設定した造波境界の位置によって球面浅瀬背後で算定される波高の集中度合いに違いがみられた。そこで、これらをより詳細に検証するために、**図-3.1** に示す岸沖方向の $Y/L=3$ 断面、沿岸方向の $X/L=7$ 断面で波高値を、**P1**, **P2**, **P3** 地点で周波数スペクトルを出力し、それぞれ比較した。結果を **図-3.9** 及び **図-3.10** に示す。

図-3.9 より、岸沖方向の波高分布は、**b-b'** 断面よりも沖側の **c-c'** 断面から造波したほうが、球面浅瀬による波高増大の再現性が低いことがわかる。これは、ともに **a-a'** 断面から計算されたエネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルによる球面浅瀬上の波の集中過程に違いがみられるため、その途上にある **c-c'** 断面 ($X/L=3$) で両者を接続したことにより、そのどちらの波高増大も再現できなかったためと考えられる。一方、この影響を受けにくい球面浅瀬から離れた岸側での沿岸方向の波高分布 ($X/L=7$) は、**b-b'** 断面ではエネルギー平衡方程式法、**c-c'** 断面ではブシネスクモデルによる結果に近い。

図-3.10 より、球面浅瀬背後の周波数スペクトルは、

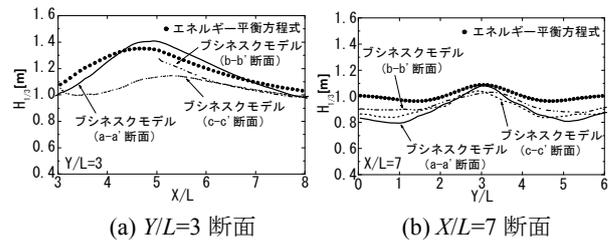


図-3.9 造波方向の違いによる波高値の比較

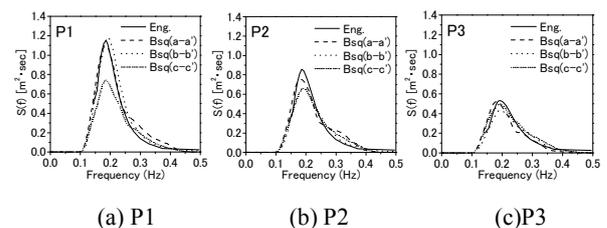


図-3.10 造波方向の違いによる周波数スペクトル比較

岸沖方向の波高分布と同様に、球面浅瀬の直背後ではb-b'断面から造波したほうが波エネルギーの増加をよく表現できているが、球面浅瀬から岸へ離れるほど、造波境界の位置による違いが見られなくなることがわかる。

これらの結果より、エネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルとのカップリング手法を実海域を対象とした計算に導入する際には、その造波境界は、顕著な屈折・浅水変形途上にあり、線形・非線形モデルで計算結果が異なる浅瀬上は避けて設定すべきであることがわかった。

ところで、このような考察を踏まえると、ブシネスクモデルに与える複数方向スペクトルを非線形モデルで算定できた場合には、その造波境界は、顕著な屈折・変形途上にある浅瀬上でも設定できる可能性がある。そこで、代表的な非線形モデルであるブシネスクモデルで複数方向スペクトルを算定した場合のカップリング精度について検討した例を付録に示す。ただし、この際には、ブシネスクモデルで算定される多方向不規則波形から方向スペクトルを推定する際に誤差が混入するため、必ずしも期待通りの造波精度は得られないことがわかった。なお、ブシネスクモデルどうしのカップリングは計算領域の接続と同じ意味合いをもつため、この実現のためにはむしろ、方向スペクトルを介さず波形レベルで直接接続するネスティング手法の導入を検討するべきと思われる。

4. 現地港湾への適用（被災波の再現計算）

以上のように、新たに開発した造波方法は、適切な位置に設定した沖側境界上で、任意水深上の方向スペクトルの空間変化を考慮できることが確認された。そこで、ここでは、この造波方法を造波水深が比較的深い現地港湾へ適用し、その効果を確認した結果について述べる。

すなわち、久慈港及び伏木富山港を対象としたブシネスクモデル(NOWT-PARI)による波浪変形計算において、このような造波方法の違いが計算結果に与える影響について検討した。

4.1 岩手県久慈港（2006年10月の高波）

複雑な海底地形を有する岩手県久慈港を対象として、①一様水深上で単一方向スペクトル、②任意水深上で単一方向スペクトル、③任意水深上で複数方向スペクトル、をそれぞれ与えた場合に計算される波高分布を比較し、違いを考察した。対象とした計算領域を図-4.1に示す。

(1) 計算条件

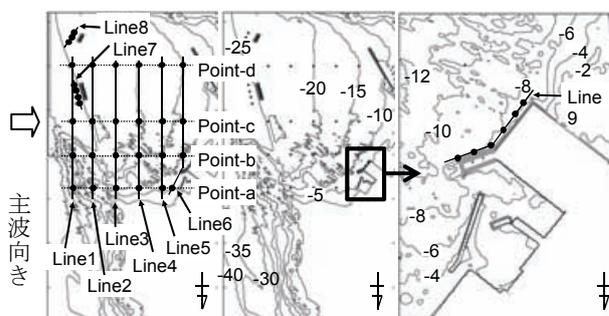
岩手県久慈港では、2006年9月5日に台風12号通過

に伴う高波が久慈港半崎地区に襲来し、護岸からの越波により背後地で浸水被害が発生した。また、護岸パラペットが2ヶ所で倒壊し、その残骸や砂礫等も打ち上げられた。なお当時、隣接する島の腰漁港で観測された波浪は、最大有義波高 $H_{1/3}=4.5\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=16\text{s}$ （6日0時）であった。

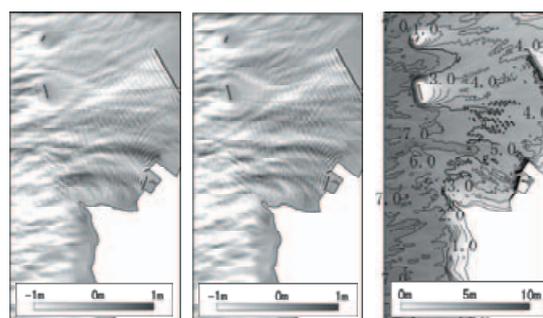
久慈港は、さらに2006年10月6日から7日にかけての台風16、17号崩れの低気圧によって再度被災し、半崎地区護岸だけでなく沖合の津波防波堤北堤のケーソン2函の上部工が破壊され、上部斜面堤1函が滑動した。こ

表-4.1 2006年10月の高波の波浪諸元と造波方法

造波方法	潮位 D.L.(m)	造波境界		波浪諸元			
		方向SP	水深	波高(m)	周期(秒)	γ	S_{max}
①	1.61	単一	一定	8.12	12.4	1	10
任意							
③		複数	エネルギー平衡方程式法による算定結果				



(a) 造波一定水深 (b) 造波任意水深 (c) 護岸部拡大図
図-4.1 対象とした計算領域の海底地形及び波高出力点



(a) 方法③-① (b) 方法③-② (c) 方法③の波高分布
図-4.2 造波方法の違いによる波高分布の比較

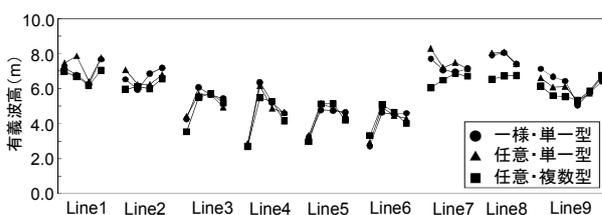


図-4.3 造波方法の違いによる波高値の比較

のとき、近隣の島の腰漁港及び八戸港の観測値から推定された当時の波浪は、有義波高 $H_{1/3}=8.12\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=12.4\text{s}$ 、潮位 D.L.+1.61m (7日 17時) であった。

そこで本研究では、後者の擾乱を対象として被災波の再現計算を実施した。すなわち、プシネスクモデルの造波境界で通常与える単一方向スペクトルはブレットシュナイダー・光易型とし、有義波高 8.12m、有義波周期 12.4s、波向 E、 $S_{max}=10$ とした。多方向不規則波の成分波数はいずれも 512 とした。また、一定とした場合の造波水深は 35m とした。一方、複数方向スペクトルは、単一方向スペクトルを与える造波境界上の代表地点 (水深 35m) で上述の波浪諸元が再現されるような沖波をエネルギー平衡方程式法を用いた逆推定により求め、そのとき同時に算定される造波境界上の複数地点における方向スペクトルを抽出して与えた。これらの計算条件をまとめて表-4.1 に示す。

なお、当時の被災に関するヒアリング結果によると、図-4.1(c) の Line9 で示す半崎地区護岸において、「護岸の南西側において破損程度が大きく、北西側に位置する波除堤の損傷等はなく、護岸から波除堤に向かうにつれて構造物の破損程度が小さくなっていった」ようである。

(2) 計算結果

任意水深上で複数方向スペクトルを造波した場合 (方法③) に、久慈港で計算された波高分布を図-4.2(c) に示す。また、図-4.2(a) 及び (b) は、この結果から方法①及び②で計算された波高分布を差し引いた差分図である。これらより、久慈港において、方向集中度の低い風波に対して複数方向スペクトルを造波した場合には、一様水深または任意水深上での単一スペクトルの造波結果に対して、全体的に出現波高が低下することがわかる。これは、エネルギー平衡方程式法による算定結果から代表的なただ 1 つの方向スペクトルを抽出する際、実務上安全側となるよう、対象海域の沖波とみなされるなかで比較的大きめの波高値を示すものを設定しているためと考えられる。

しかしながら、沖防波堤のうち北側の沖合、及び港内の護岸前面などでは、複数方向スペクトルを造波することで波の伝播・変形状況が変化し、逆に波高が増加している。さらに、図-4.3 では、このような造波条件の違いによる波高値の変化を代表出力地点に対して示した。波高分布と同様に、造波境界に近い海域 (Line1,2,7,8) や港内 (Line5) や港奥の半崎地区護岸前面 (Line9) などで造波方法による波高値の変化が確認できるが、出力地点が隣接する同じ測線上でもその変化は一様ではなく、

複数方向スペクトルの造波によっても波高がほとんど変化しないか、むしろ逆に増加している箇所も少なくない。

特に、護岸上部工 (延長 250m) のうち 188m が被災した半崎地区護岸 (Line9) では、北西側の波除堤前面 (Line9 の左側 3 点) と南西側の護岸前面 (Line9 の右側 3 点) とで、造波方法による波高分布の違いが明瞭に現れている。すなわち、被災の程度が激しかった護岸南西側の高い波高分布はいずれの造波方法でも同程度に算定されているのに対し、被災がみられなかった護岸北西側の波除堤前面で相対的に波高が小さくなる現象は方法②、③において次第に再現されるようになり、方法①と③では波高値に 1m 程度の違いがみられる。

これらの結果は、例えば、高波による被災原因の解明のために行う被災波の再現計算などにおいて、単一方向スペクトルによる場合には、造波境界の位置や造波スペクトルの形状などにも、細心の注意を払う必要があることを示唆している。一方、複数方向スペクトルによる場合には、これらをあまり意識せず任意に設定できる。しかし、球面浅瀬場を対象とした前章での考察を踏まえると、この場合にも、仮想方向スペクトルの成分波の波向分布が広範囲に及び易い島の直背後や、線形、非線形モデルで表現される波浪変形の違いが生じ易い浅瀬上等に造波境界を設定することは避けるべきである。

4.2 富山県伏木富山港 (2008 年 2 月の寄り回り波及び台風 0423 号による高波)

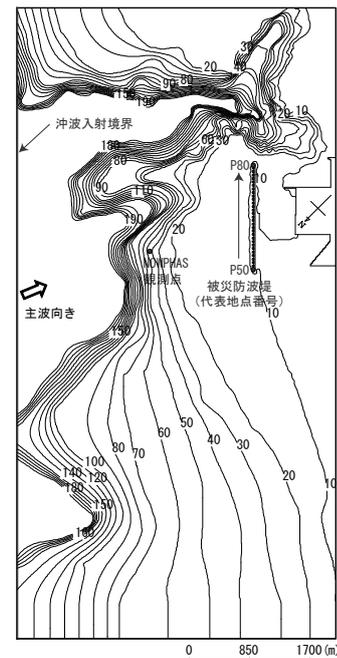


図-4.4 計算領域内の海底地形(水深 200m 以浅)

NOWPHAS地点で観測された有義波諸元及びスペクトル先鋭度に対する再現性に着目して試行計算を行い、入射境界から対象施設に至るまでの波浪場をより精緻に再現することを試みた。また、有義波高の空間分布や被災した防波堤法線位置における波高頻度分布の出現特性の違いを示し、被災原因や施設設計に用いられる H_{max} ($H_{1/20}$)等の波浪統計量への影響について考察した。

具体的には、寄り回り波に対してもほぼ深海域とみなせる水深 150m 以深の沖合に入射境界を設定し、ブシネスクモデルを用いて、対象とする防波堤に至るまでの波浪変形計算を実施した。造波方法は、①入射境界上の水深を 150m 一定とし、ただ1つの代表スペクトルを造波する方法、②入射境界上の地形をさらに水深 200m まで再現し、入射境界上に分布する複数の方向スペクトルを与える方法、の2種類とした。計算に用いた海底地形及び波高頻度分布を算定する代表地点 (NOWPHAS 地点を含む) の配置を図-4.4 に示す。

(1) 2008年2月の寄り回り波

2008年2月に周期14sを超えるうねり (寄り回り波) が来襲した伏木富山港では、海底谷 (あいがめ) が入り組んだ複雑な海底地形上の波浪変形により局所的に波高が集中し、防波堤ケーソンが大きく滑動するなどの被害が生じた。この原因究明や対策検討の報告は既に数多くみられ、有用な成果が得られている (例えば、永井ら, 2008; 水口ら, 2010)。

(a) 計算条件

伏木富山港の NOWPHAS 地点で観測された被災時 (2008年2月24日14時) の周波数スペクトルは、 $H_{1/3}=4.22\text{m}$, $T_{1/3}=14.2\text{s}$, $\gamma=1.5$ とした JONSWAP 型スペクトルで近似できる (図-4.5)。そこで、それぞれの造波方法で与える入射スペクトルは、上述した既往の検討結果にならない波向 NNE, 方向集中度 $S_{max}=75$ を基本とし、スペクトル先鋭度は観測結果と同じと仮定したうえで、観測波高、周期を再現できるように合わせ込みにより決定した (表-4.2)。特に、方法②の NW 側及び SE 側の造波境界では、被災波に対し僅かに浅海域となる海底岬上から造波することに注意されたい。

ここで、エネルギー平衡方程式法を用いて算定された伏木富山港周辺の波高分布とともに、ブシネスクモデルの造波境界にあたる線分の両端で算定された方向スペクトルを図-4.6 に示す。両者を比較すると、SE 側方向スペクトルの方向分散は主方向 (NNE) に対してほぼ対称であるのに対し、NW 側方向スペクトルでは、非対称 (歪

表-4.2 寄り回り波の波浪諸元と造波方法

造波方法	潮位 TP+m	造波境界			入射条件			算定結果(NOWPHAS地点)		
		方向SP	水深	波高(m)	周期(秒)	γ	Smax	波高(m)	周期(秒)	γ
①	0.21	単一	一定	4.12	13.5	1.5	75	4.20	14.1	2.1
②	0.21	複数	任意	エネ法による分布比率を乗じる		1.5	75	4.26	14.7	2.2

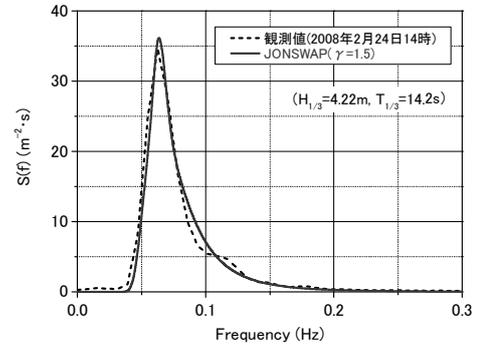


図-4.5 NOWPHAS 地点の周波数スペクトル(寄り回り波)

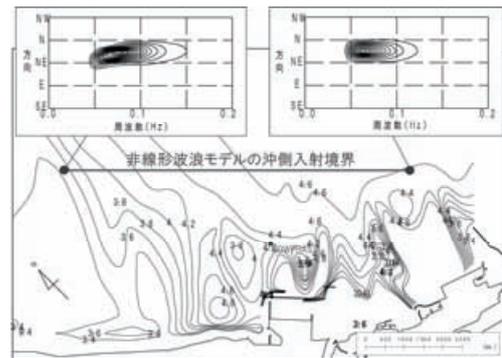


図-4.6 エネルギー平衡方程式法の計算結果(寄り回り波)

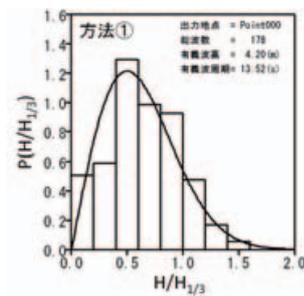
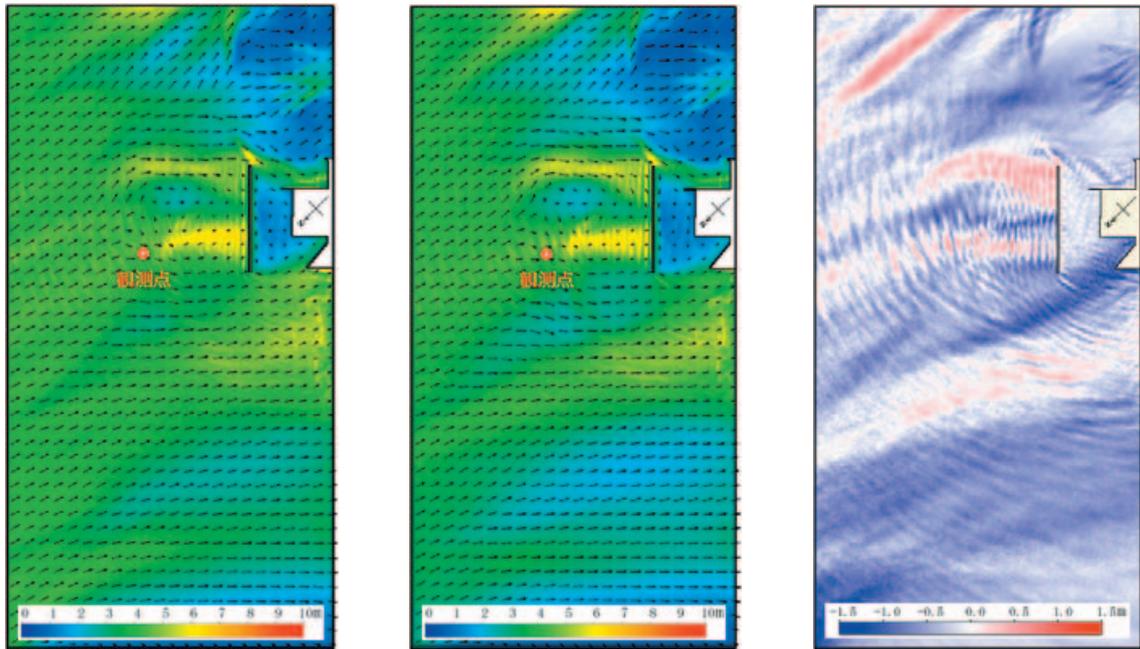


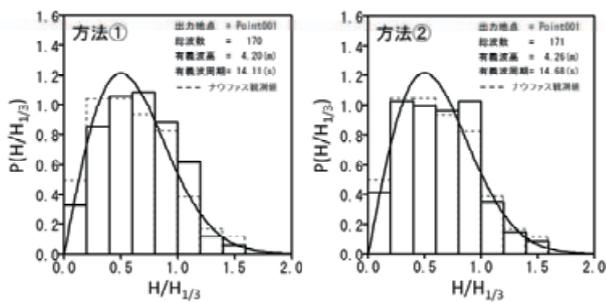
図-4.7 造波波形の波高頻度分布(寄り回り波：単一 Sp)

んだ分布) となっている。これは、この線分上の NW 側に張り出した海底岬地形により、水深 150m 以深であっても、周期の長い成分が地形の影響を受けて屈折するためと考えられる。このように、より深い海底地形の影響を受けやすい寄り回り波を対象とした場合には、ブシネスクモデルの造波境界に与える方向スペクトルを厳密に



(a) 方法①：一定水深・単一 Sp (b) 方法②：任意水深・複数 Sp (c) 差分図（方法②－方法①）

図-4.8 計算領域内造波方法による有義波高分布の違い（寄り回り波：2008年2月）



(a) 一定水深・単一 Sp (b) 任意水深・複数 Sp

図-4.9 NOWPHAS 地点の波高頻度分布(寄り回り波)

一様とみなすことは困難であることがわかる。

また、造波境界上の代表点で抽出した方向スペクトル（単一 Sp）に対する不規則波形の波高頻度分布を図-4.7に示す。なお、各地点の方向スペクトル（複数 Sp）に対する不規則波形の波高頻度分布もこれと同等とみなすことができる。

(b) 計算結果

異なる造波方法を用いて計算した寄り回り波による 1/3 有義波高分布、及び方法①に対する方法②の差分図を図-4.8に示す。なお図には合わせて、各地点の波向きベクトルを示している。入射境界上の水深変化及び方向スペクトルの空間分布を考慮した方法②では、特に被災防波堤前面の SE 側で、これらを考慮しない方法①より

も顕著な波高集中・増大がみられる。また、これらの差分図より、SE 側では波高が 10%増大し、NW 側では波高が 20%減少していることがわかる。

また、このとき得られた NOWPHAS 地点での波高頻度分布を図-4.9に示す。造波波形の波高頻度分布を示した図-4.7と比較すると、方法②では、方法①に比べ出現頻度が平滑化され、大きな波高ランクも含め観測結果とよく一致している。このように、方向スペクトルの空間分布を考慮した造波方法を採用することにより、同程度の有義波高であっても波高頻度分布の形状が変化し、高波高の出現頻度が増加することは大変興味深い。

(2) 台風0423号による高波

周期 9s 程度の高波浪により訓練船が防波堤に衝突・座礁し、万葉緑地護岸で顕著な越波被害が生じた 2004 年 10 月の台風 23 号来襲時の波浪場、及び波高頻度分布を同様に推定した。

(a) 計算条件

台風 23 号来襲時に NOWPHAS 地点で観測された周波数スペクトルは、湾内発生波と思われる短周期成分を含む 2 山型であった（図-4.10）。しかし、本研究では簡単のため、このときの代表諸元 ($H_{1/3}=6.53\text{m}$, $T_{1/3}=8.4\text{s}$, 波向 N29° E) に対する 1 山型スペクトルで近似することとし、先鋭度、方向集中度をそれぞれ $\gamma=1.0$, $S_{\max}=25$ と

表-4.3 台風 23 号による高波の波浪諸元と造波方法

造波方法	潮位 TP+m	造波境界		入射条件			算定結果(NOWPHAS地点)			
		方向SP	水深	波高(m)	周期(秒)	γ	Smax	波高(m)	周期(秒)	γ
①	0.29	単一	一定	5.90	8.5	1.0	25	6.54	8.6	0.6
②	0.29	複数	任意	エネ法による分布比率を乗じる		1.0	25	6.46	8.2	1.3

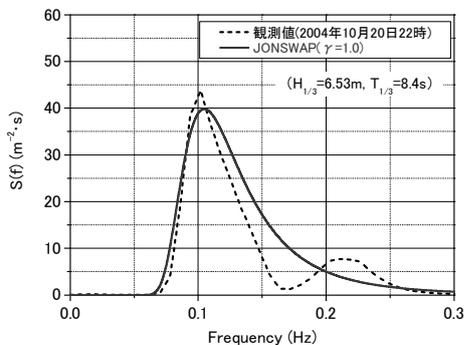


図-4.10 NOWPHAS 地点の周波数スペクトル(台風 23 号)

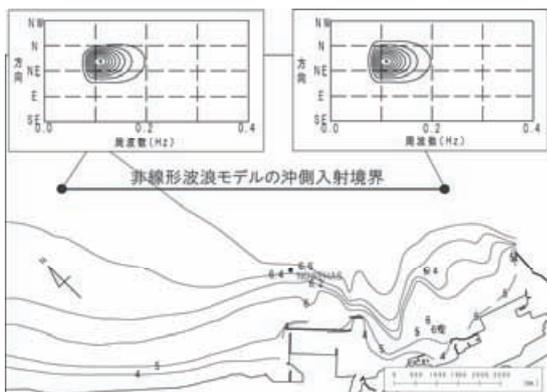


図-4.11 エネルギー平衡方程式法の計算結果(T0423 号)

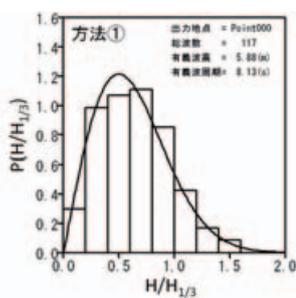
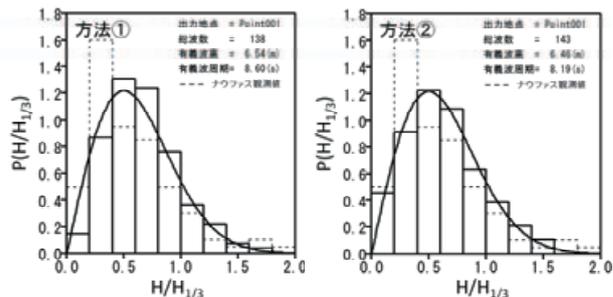


図-4.12 造波波形の波高頻度分布(台風 23 号：単一 Sp)

設定した(表-4.3)。

一方、寄り回り波に比べ周期が短い風波では、十分深い海底地形による変形は受けないため、造波方法の違いが計算結果に与える影響は小さくなることも考えられる。そこで、エネルギー平衡方程式法を用いて算定された伏木富山港周辺の波高分布とともに、ブシネスクモデルの



(a) 一定水深・単一 Sp (b) 任意水深・複数 Sp
図-4.14 NOWPHAS 地点の波高頻度分布(台風 23 号)

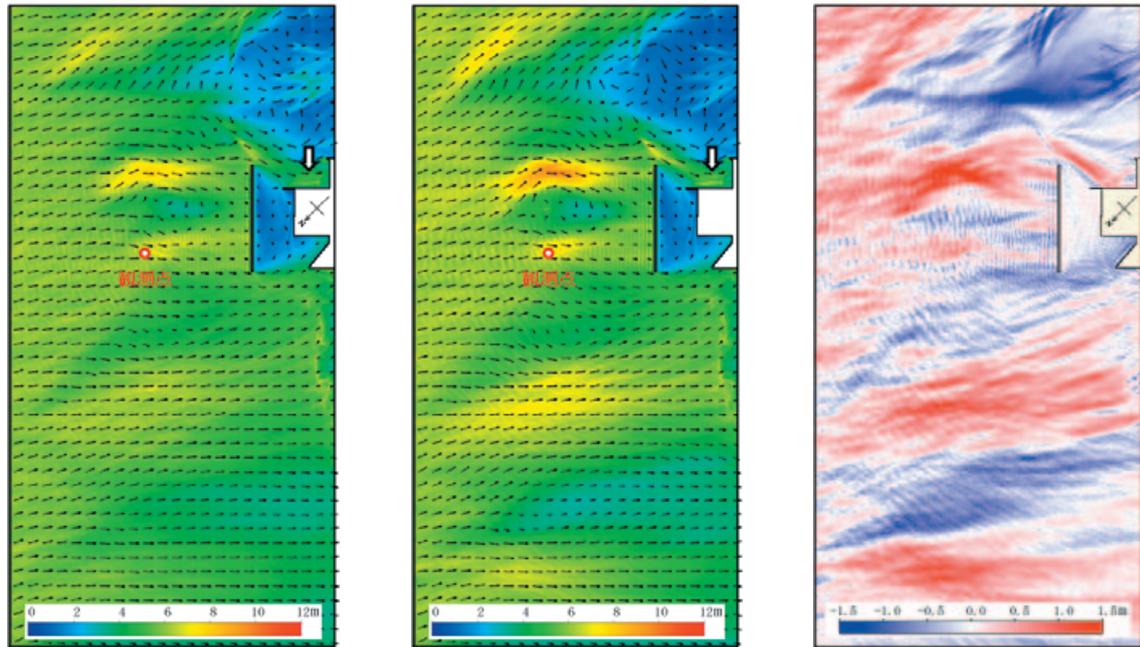
造波境界にあたる線分の両端で算定された方向スペクトルを図-4.11に示す。両者を比較すると、SE側方向スペクトルの方向分散は、主方向に対してほぼ対称であるのに対し、NW側方向スペクトルでは、寄り回り波ほどではないが、やや非対称(歪んだ分布)となっている。これは、この線分より沖側及び西側にある能登半島の遮蔽効果により、W系の成分波が到達しにくいと推測される。ただし、波高分布については、沖側入射境界上でほぼ同様となっている。このように、造波水深に対して十分に波長が短い風波を対象とした場合にも、沖の周辺地形による遮蔽等の影響を受け、ブシネスクモデルの造波境界に与える方法スペクトルを厳密に一樣とみなすことができないこともあり得る。

また、造波境界上の代表点で抽出した方向スペクトル(単一 Sp)に対する不規則波形の波高頻度分布を図-4.12に示す。なお、各地点の方向スペクトル(複数 Sp)に対する不規則波形の波高頻度分布もこれと同等とみなすことができる。

(b) 計算結果

異なる造波方法を用いて計算した台風 23 号高波による 1/3 有義波高分布、及び方法①に対する方法②の差分図を図-4.13に示す。なお図には合わせて、各地点の波向きベクトルを示している。入射境界上の水深変化及び方向スペクトルの空間分布を考慮した方法②では、防波堤の少し沖の海域で、これらを考慮しない方法①に比べ顕著な波高集中・増大がみられる。また、これらの差分図でも確認できる、SE側の防波堤端部からその背後の護岸前面(万葉地区:矢印で表示)にかけての波高増大は、当時の護岸越波被災の状況ともよく対応している。

また、このとき得られた NOWPHAS 地点での波高頻度分布を図-4.14に示す。造波波形の波高頻度分布を示した図-4.12に比べ、両方法ともあまり大きな変化はみられない。しかし方法①ではレイリー分布に比べ、1/3 有



(a) 方法①：一定水深・単一 Sp (b) 方法②：任意水深・複数 Sp (c) 差分図（方法②－方法①）

図-4.13 計算領域内造波方法による有義波高分布の違い（台風 23 号による高波：2004 年 10 月）

義波高より少し小さな波高階級で出現頻度が高くなっているのに対し、②ではいずれの階級でもほぼレイリー分布に従う結果となっている。

(3) 風波と長周期うねりによる波浪場の違い

周期 14s 程度の寄り回り波では造波境界上の水深変化による屈折効果、周期 9s 程度の台風 23 号高波では造波境界沖の周辺地形による遮蔽効果により、造波境界上の方向スペクトルは、それぞれ厳密には一様とみなすことができなかった。しかし、これらを考慮した造波方法を適用することにより、少なくとも NOWPHAS 地点では、伏木富山港における当時の波浪場をより精緻に再現できることが明らかとなった。そこで、このようにして得られた両者の波浪場を比較し、来襲波の周期による波浪場（有義波高分布）の出現特性の違いについて考察する。

台風 23 号による高波（周期 8.4s）の来襲時には、防波堤沖の海底岬上で生じる屈折・浅水変形により、NOWPHAS 波浪観測地点、及びその隣りの海底岬上で波高が急激に高くなる海域がみられる。しかし、その範囲は防波堤前面にまでは至っていない。したがって、有義波高 6.5m を超える高波が観測されたにもかかわらず、防波堤ケーソンが滑動するなどの大きな被害がみられなかったものと推測される。

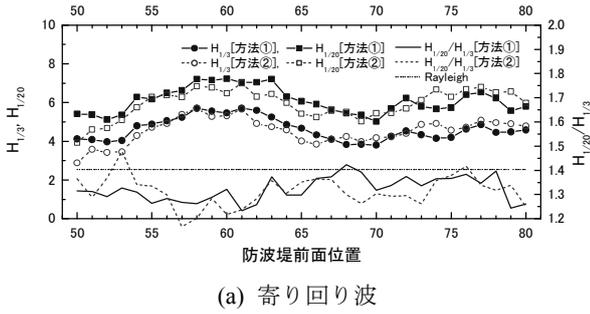
一方、寄り回り波（周期 14.2s）の来襲時には、NOWPHAS 波浪観測地点、及びその隣りの海底岬上での波高増大はそれほど顕著ではなく、むしろそれらの岸側

の防波堤前面にかけて波高が急激に高くなる海域が広範囲に広がっている。したがって、観測された有義波高は設計波高よりも僅かに小さい 4.2m 程度であったにもかかわらず、延長 1500m のうち 855m にわたりケーソンが滑動するという甚大な被害が生じたものと推測される。

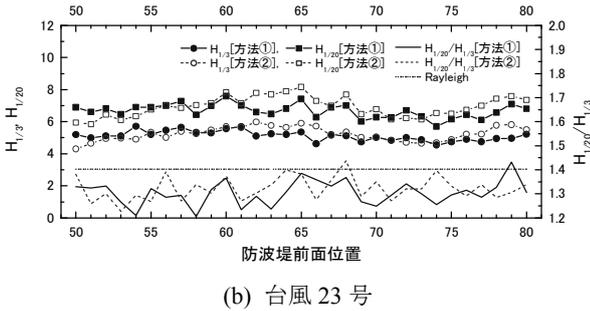
さらに、前述のように、NOWPHAS 波浪観測地点では両者において波高頻度分布にも顕著な違いがみられた。そこで、被災した防波堤法線位置でのこれらの違いとその影響について、次節で考察する。

4.3 波浪統計量の出現特性に関する考察

前節では、2008 年 2 月の寄り回り波、及び 2004 年 10 月の台風 23 号高波の来襲時に伏木富山港で実際に出現したと思われる波浪場を再現するために、防波堤や護岸からの反射波を含む波浪変形計算を実施した。一方、設計時に防波堤法線位置で算定される最高波高 H_{\max} や 1/20 有義波高 $H_{1/20}$ 、あるいは換算沖波波高 H_0' などは、いずれも進行波高として定義されている。そこで、伏木富山港において別途、進行波を対象とした波浪変形計算を実施し、特に、防波堤法線位置での波高頻度分布に着目して、造波方法や来襲波の周期の違いがこれらに与える影響について考察した。ただし、防波堤ケーソンの安定計算等に用いられる H_{\max} は、計算した不規則波形の長さや波群特性（初期乱数）の影響を強く受けるため、ここでは、消波ブロックの安定計算に用いられることがある



(a) 寄り回り波



(b) 台風23号

図-4.15 防波堤法線位置での波浪統計量（進行波）

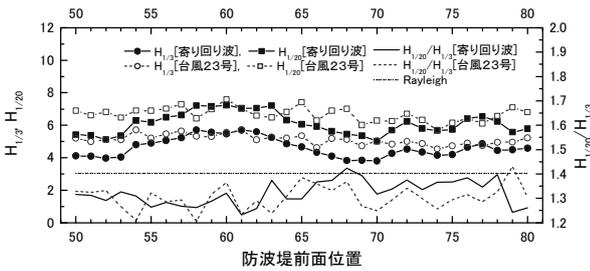


図-4.16 方法①で造波した波浪場の波浪統計量の比較

$H_{1/20}$ 、及び換算沖波波高 H_0' の算定に必要な $H_{1/3}$ の出現特性に着目することとした。

(1) 入射境界の水深変化による影響（寄り回り波）

寄り回り波を対象とした波浪変形計算において、防波堤法線位置（Point50～80）で得られた水位変動データに対してそれぞれゼロアップクロス解析を実施し、算定された進行波の $H_{1/20}$ 、 $H_{1/3}$ 及び両者の比 $H_{1/20}/H_{1/3}$ を図-4.15(a)に示す。

波高比に関して、方法②では、レイリー分布の値 $H_{1/20}/H_{1/3}=1.4$ よりも全体的に小さく、さらに方法①に対しても小さくなる区間が多い。したがって、方法②ではNOWPHAS 地点と同様、防波堤法線位置で波高頻度分布の形状は平滑化される傾向にあると考えられる。

例えば、NW 側の Point56～61 では、 $H_{1/3}$ は方法①と同程度であるのに対し、 $H_{1/20}$ は方法①に比べ数十 cm 程度小さくなっている。一方、SE 側の Point68～80 では、 $H_{1/3}$

は方法①に比べ大きく、 $H_{1/20}$ も方法①と同程度または大きくなっている。

すなわち、滑动被災がほとんどみられなかった NW 側では $H_{1/3}$ のわりに $H_{1/20}$ が小さいのに対し、甚大な滑动被災が生じた SE 側では $H_{1/3}$ 、 $H_{1/20}$ ともに大きい。SE 側のみが特に大きい。ケーソンの滑动は波群中の高波浪により発生することから、これらは実際の被災状況をより明確に示している。

(2) 沖の周辺地形による影響（台風23号）

同様に、台風 23 号による高波の場合を図-4.15(b)に示す。

波高比に関し、前項で述べた寄り回り波の場合に比べると、方法②の場合でも 1.4 を大きく下回ったり方法①に比べ全体的に小さくなる傾向は認められない。したがって、少なくとも方法②ではNOWPHAS 地点と同様、防波堤位置で波高頻度分布はほぼレイリー分布に従うものと推測される。

ただし、中央部の Point62～70 及び SE 側の Point74～80 の区間では、方法②による $H_{1/3}$ 及び $H_{1/20}$ は方法①に比べ大きくなっている。このうち特に後者は、当時の被災状況とも符合する背後の万葉護岸に至る波高増大にも影響を与えていると推定されることから、やはりこの場合にも、造波境界上の方向スペクトルの空間変化を考慮して造波することの妥当性が確認された。

(3) 浅海域の波浪変形過程の違いによる影響

防波堤法線位置で算定される波高比 $H_{1/20}/H_{1/3}$ の出現特性からもわかるように、周期 14s 程度の寄り回り波ではレイリー分布に比べ波高頻度分布が平滑化される傾向、周期 9s 程度の台風 23 号高波ではレイリー分布に従う傾向にあることが判明した。これらはそれぞれ、造波境界上の屈折・浅水変形、あるいは造波境界沖の回折・反射変形を考慮した造波方法を適用した結果、明らかになったことである。

しかしながら、この傾向には、周期が異なることによって生じる、造波境界から防波堤法線位置までの海底地形による波浪変形の影響も含まれていると思われる。そこで、造波境界上における方向スペクトルの空間分布を考慮することによる効果をより明確にするために、一定水深・単一スペクトルを用いて造波した方法①による計算結果に改めて着目し、周期による波浪変形過程の違いについて考察する。そこで、図-4.15 に示した方法①の結果を抽出し、両者を比較した結果を図-4.16 に示す。

寄り回り波に対する造波波高は台風 23 号による高波

に比べ 1.8m 程度小さいが、防波堤法線位置における両者の $H_{1/3}$ 及び $H_{1/20}$ はほぼ等しくなっている区間が多くみられる。これは平石ら (2008) が指摘するように、周期が長い長周期うねりでは、海底地形による屈折・浅水変形により局所的な波高増大が生じたためと考えられる。

一方、これらの波高比については、両者とも Point63 付近を境に NW 側では波高比が小さく、SE 側では波高比が大きい。すなわち、方法①で造波した寄り回り波の波高比は、レイリー分布に従うと推測された台風 23 号による高波に対する空間分布に比較的よく似ている。特に、SE 側の波高比は、レイリー分布に従う値である 1.4 に近い。これらは、寄り回り波がレイリー分布の特徴である狭帯域スペクトルとして表わされることによるものと推測される。さらに、同様な波高頻度分布に対し、防波堤法線位置でみられる同様な波高比の空間変化は、海底地形による波浪変形に起因する現象と考えられる。したがって、これは逆に、寄り回り波を方法②で造波した際にみられた波高頻度分布の平滑化は、造波境界における方向スペクトルの空間分布に起因していたことを示すものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、スペクトル法によって算定された任意水深上の複数の方向スペクトルをブシネスクモデルに与え、これらの空間分布を考慮した多方向不規則波を造波する方法を提案し、球面浅瀬場を対象としてその妥当性を検証した。

この結果、極端な浅瀬を避けて設定した造波境界上の入射スペクトルを単一とみなすのではなく、異なるすべての方向スペクトルの特性を反映した仮想方向スペクトルに対して、任意形状スペクトルの造波方法を適用することにより、各方向スペクトルを近似的にエネルギー等分割するシングルサンメンション法に基づく造波方法 (=ブシネスクモデルとエネルギー平衡方程式法とのカップリング手法) の開発に成功した。

次に、その成果を用いて現地港湾を対象とした波浪変形計算を行い、入射境界から対象施設に至るまでの波浪場をより精緻に再現することを試みた。

具体的には、2006 年 10 月の高波により護岸パラペットが被災した岩手県久慈港、及び 2008 年 2 月の寄り回り波により防波堤ケーソンが滑動し、2004 年 10 月の台風 23 号による高波で護岸の越波被害が生じた富山県伏木富山港を対象とした被災波の再現計算を通じて、造波境界上の任意水深や方向スペクトルの空間分布を適切に考

慮することが重要であることなどが明らかとなった。

特に、伏木富山港を対象とした被災波の再現計算では、NOWPHAS 波浪観測地点で得られた波高頻度分布特性を良く再現するとともに、沖防波堤法線位置での $H_{1/3}$ 、 $H_{1/20}$ の出現特性から、寄り回り波来襲時の防波堤ケーソンの滑動状況をより明確に説明できることを示した。さらに、このときみられた波高頻度分布の平滑化は、一様でない複数の方向スペクトルに対する不規則波を造波することにより再現されることを明らかにした。

また、波の非線形性がそれほど顕著にならない範囲でブシネスクモデルの沖側境界を岸側へ寄せ、計算領域を縮小することによる演算の効率化が可能となった。

これらの成果により、港湾設計・管理の実務において、被災波の再現及び設計波の算定がより高精度かつ迅速に行えるようになると期待される。

6. おわりに

本研究では、任意形状スペクトルに対する多方向不規則波の造波方法を提案した平山・宮里 (2009) の成果を発展させ、造波境界上の任意水深や方向スペクトルの空間変化を考慮した造波方法を新たに開発することにより、エネルギー平衡方程式法とブシネスクモデルのカップリング (片方向接続) を実現した。

今後は、球面浅瀬場を対象とした精度検証において示された適用限界も踏まえつつ、より多くの現地港湾への適用事例を蓄積することにより、このような造波方法の適用範囲をより明確に示すとともに、線形モデルの計算精度に依存する適用限界を解消するために、ブシネスクモデルどうしをカップリングすることに相当するネスティング手法を用いた領域接続法の導入を図る予定である。

(2012 年 1 月 27 日受付)

参考文献

- 糸井生夫・伍井 稔・成毛辰徳 (2003): ブシネスクモデルの伏木富山港 (伏木地区) への適用とその課題, 平成 14 年度ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会資料, pp.7-11.
- 沖 和哉・酒井哲郎(2006): 直線上に分布するスペクトルを入射波条件とした多方向不規則波変形時系列解析, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.259-264.
- 永井紀彦・平石哲也・河合弘泰・川口浩二・吉永宙司・

大釜達夫(2008): 波浪観測網が捉えた 2008 年 2 月 24 日の日本海沿岸高波の特性, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.146-150.

平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎 (2008): 偶発波浪荷重による被害例とその対策, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.981-985.

平山克也・宮里一郎 (2009): 任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案, 港空研報告, 第 48 巻, 第 2 号, pp.199-214.

平山克也(2007): ブシネスクモデルによる波浪変形計算の精度と現地適用性, 2007 年度 (第 43 回) 水工学に関する夏期研修会テキスト, B-7, 土木学会, 20p.

水口孝司・大下善幸・室善一郎・高山知司・岡田弘三・宇都宮好博(2010): 「うねり性波浪」予測・監視モデルの可能性と的確性について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.146-150.

記号表

(x, y)	: 平面座標
t	: 時刻
a_n	: 成分波の振幅
k_n	: 成分波の波数
f_n	: 成分波の周波数
θ_n	: 成分波の波向
ε_n	: 初期位相
$S(f)$: スペクトル値
Δf_n	: 成分波のスペクトル幅
N_s	: スペクトルの分割数
S_{\max}	: 方向集中度パラメータ
$H_{1/3}$: 有義波高
$T_{1/3}$: 有義波周期
γ	: JONSWAP 型スペクトルの尖鋭度
$G_2(\theta)$: 二次元方向スペクトル
$P(H/H_{1/3})$: 波高確率密度

付録 球面浅瀬場を対象としたブシネスクモデル どうしのカップリング

本編3章では、球面浅瀬場を対象とし、線形モデルであるエネルギー平衡方程式法と非線形モデルであるブシネスクモデルとのカップリングによる造波精度について検討した。その結果、その造波境界は顕著な屈折・浅水変形途上にある浅瀬上は避けて設定することが望ましいことが判明した。

そこで、ここでは、このような波の非線形変形を考慮した複数方向スペクトルを同じブシネスクモデルで算定した場合のカップリング精度について検討した結果を示す。なお、ブシネスクモデルどうしのカップリングは計算領域の接続と同じ意味合いをもつため、この実現のためにはむしろ、方向スペクトルを介さず波形レベルで直接接続するネスティング手法の導入を検討すべきであると思われることに留意されたい。

1. 球面浅瀬場における複数方向スペクトルの抽出

本編3.1節と同様に、図-3.1に示す球面浅瀬場を対象として、図中のb-b'断面及びc-c'断面上に設定した複数の代表地点にブシネスクモデルで算定された複数の方向スペクトルを与え、同じくブシネスクモデルにより多方向不規則波を造波した。

計算格子間隔はともに2.0mとし、a-a'断面を造波境界とした計算領域に対して与える波浪諸元は表-3.1と同様とした。したがって、この場合に算定される波高・波向分布は、図-3.5(b)及び図-3.6(b)そのものである。また、方向スペクトルはb-b'断面及びc-c'断面上で等間隔

に設定した各25点で出力したが、このうち代表5点(黒丸)で得られた多方向不規則波形からEMEP法で推定した方向スペクトル図を付図-1に示す。

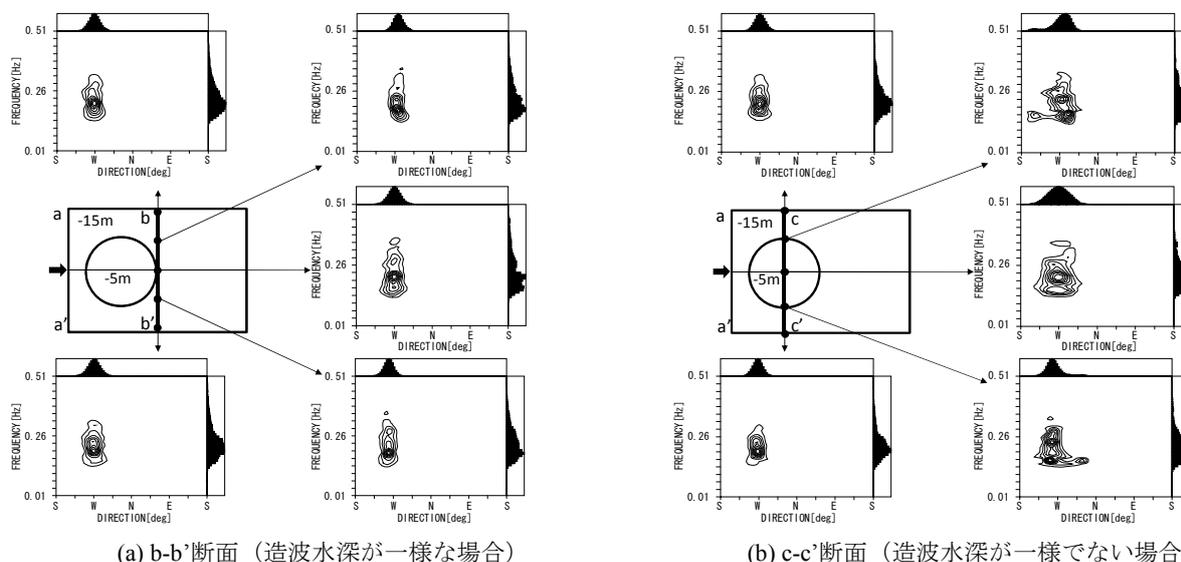
これらより、球面浅瀬の法肩付近の方向スペクトルはエネルギー平衡方程式法による算定結果(図-3.4)と同様、屈折効果により方向分布に偏りが生じていることがわかる。しかしながら、その度合いは図-3.4とは異なり、球面浅瀬直背後のb-b'断面よりも球面浅瀬中心を通るc-c'断面においてより大きい。これは、ブシネスクモデルを用いることにより、波の非線形性を考慮した球面浅瀬上の屈折・浅水変形が算定されたためと考えられる。

2. 球面浅瀬周辺の波浪場の再現精度

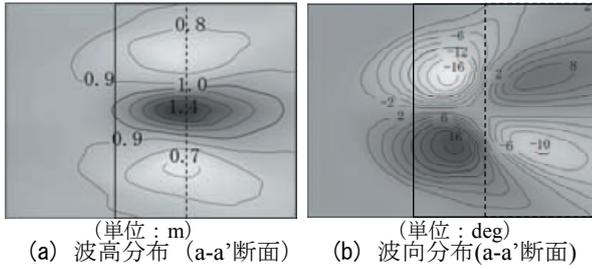
a-a'断面を造波境界としたとき、単一方向スペクトルに対してブシネスクモデルで算定される波高・波向分布を付図-2に示す(それぞれ、図-3.5(b)及び図-3.6(b)の再掲)。

2.1 造波水深が一定の場合

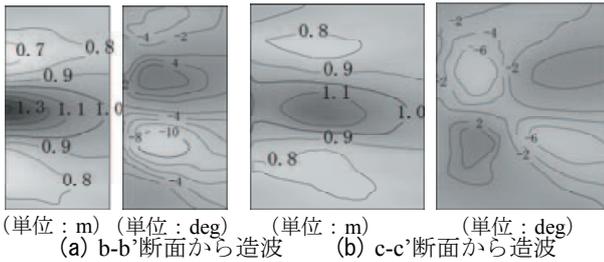
球面浅瀬背後の水深が一樣なb-b'断面を造波境界として算定されたブシネスクモデルによる波高・波向分布を付図-3(a)に示す。ここで、左図は波高分布、右図は波向分布である。図より、b-b'断面からの造波直後にも沿岸方向の波高変化が見られ、球面浅瀬背後の造波境界における方向スペクトルの空間変化を適切に考慮できていることが確認できる。さらに、これらの複数方向スペクトルは同じブシネスクモデルで算定されたものであるため、これらをブシネスクモデルに与えて算定された波高・波向分布は、a-a'断面から入射させたブシネスクモデルに



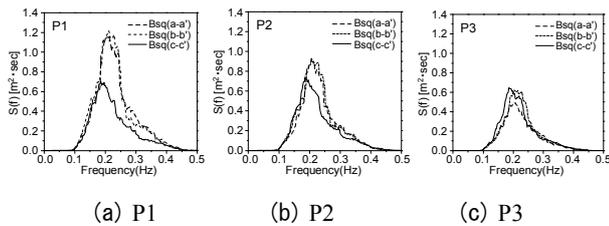
付図-1 ブシネスクモデルで計算された代表地点におけるスペクトル



付図-2 ブシネスクモデルで算定した波高・波向分布



付図-3 造波位置の違いによる波高・波向分布の比較



付図-4 造波位置の違いによる周波数スペクトルの比較

よる波高・波向分布に非常によく一致している。

2.2 造波水深が一定でない場合

球面浅瀬背後の水深が一定でない c-c'断面を造波境界

として算定されたブシネスクモデルによる波高・波向分布を付図-3(b)に示す。同様に、左図は波高分布、右図は波向分布である。この場合にも、複数方向スペクトルは同じブシネスクモデルで算定され、かつ造波境界上の任意水深に対応して波数が増えるため、これらをブシネスクモデルに与えて算定された波高・波向分布は、a-a'断面から入射させたブシネスクモデルによる波高・波向分布に比較的良好に一致している。ただし、ブシネスクモデルで算定された多方向不規則波形から方向スペクトルを推定する際に含まれる誤差の影響により、球面浅瀬背後での波高増大は不十分である。

3. 適用範囲に関する考察

以上の検討において、複数方向スペクトルの算定に代表的な非線形モデルであるブシネスクモデルを用いた場合でも、設定した造波境界の位置によって球面浅瀬背後で設定される波高の集中度合いに違いがみられた。そこで、これらをより詳細に検証するために、図-3.1に示すP1, P2, P3地点で周波数スペクトルを出力し、それぞれ比較した。結果を付図-4に示す。

図より、球面浅瀬背後の周波数スペクトルは、岸沖方向の波高分布と同様に、球面浅瀬の直背後付近のP1, P2ではb-b'断面から造波したほうが波エネルギーの増加をよく表現できているが、球面浅瀬から岸側へ離れたP3では造波境界の位置による違いが見られなくなることがわかる。この理由の1つとしては、ブシネスクモデルによる算定結果では波高・波向分布が大きく変化する球面浅瀬上で、その多方向不規則波形から方向スペクトルを推定する際、もともとの関数形から大きく変形した方向スペクトルの推定誤差による影響が挙げられる。

港湾空港技術研究所報告 第51巻第1号

2012.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

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

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

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

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

CONTENTS

1. Generation and Characteristics of Random Waves for Distribution of Directional Spectra on Variable Bathymetry	Katsuya HIRAYAMA, Hiroyuki IWASE, Hiroaki KASHIMA 3	
2. A Source Model for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan,	Earthquake to Explain Strong Ground Motions	Atsushi NOZU, Atsushi WAKAI 23
3. Development of Evaluation Method for Functional Performance of Mooring Facilities	Ema KATO, Yuichiro KAWABATA, Mitsuyasu IWANAMI 55	