# 「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

Accuracy and Adequacy of "Long Swell" Forecast and Watch Model

# 水口幸司<sup>1</sup>·大下善幸<sup>2</sup>·室善一朗<sup>3</sup>·高山知司<sup>4</sup>·岡田弘三<sup>5</sup>·宇都宮好博<sup>6</sup>

# Kouji MINAKUCHI, Yoshiyuki OOSHITA, Zenichirou MURO Tomotsuka TAKAYAMA, Kouzou OKADA and Yoshihiro UTSUNOMIYA

"Long swell" which attacked Toyama Bay from February 23 to 24, 2008, serious damaged breakwaters at Fushiki-Toyama Port. We used the wave prediction model which considered data assimilation to predict offshore wave. And we calculated wave transformation in a shallow water using Boussinesq-type wave transformation model (NOWT-PARI for short). We combined these both of them and built the prediction model of "Long Swell" at Fushiki-Toyama Port. To improve the precision of the made prediction model of "Long Swell", we built the wave watch system. We showed that a prediction of "Long-Swell" is possible to use wave prediction model and a wave watch system.

# 1. はじめに

平成20年2月23日から24日にかけて富山湾を襲った 「うねり性波浪(通称,寄り回り波)」は,伏木富山港伏 木地区の北防波堤や港湾緑地などに甚大な被害をもたら した.富山湾に発生する「うねり性波浪」は,周期が非 常に長く,波高の大きい波浪が日本海を北北東から南~ 南南西方向へ伝播してきて,富山湾の「藍瓶(あいがめ)」 と呼ばれる深い海谷を形成する海底地形により局所的に 変形され,波高がさらに増大し,沿岸に来襲したもので あると考えられている(国土交通省北陸地方整備局, 2008).

被災後,国土交通省北陸地方整備局(2008)は,『富 山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会』を 立ち上げ,委員会指導のもと被害の実態解明と復旧対応 について検討した結果,港湾・海岸施設を補強するとと もに,予測等により事前に情報を把握し,対処すること が有効であるという結論を得た.また,「うねり性波浪」 の予測の課題として,

①観測地点における波浪予測の精度向上

②富山湾特有の藍瓶等複雑な地形の効果の反映

③うねりの伝搬経路における「うねり性波浪」の監視 の3点を挙げている.

本稿は、港湾整備事業を安全かつ確実に進めるために、 上記の課題に取り組んだものである.すなわち、地形・ 水深等による影響を考慮し、沖波の入手と同時に港内の

1 2 3 4 5 6	フェロー 正会員	工博 博(理) 博(工)	前新潟港湾空港技術調査事務所 所長 新潟港湾空港技術調査事務所 調査課長 前新潟港湾空港技術調査事務所 水工係長 (財)沿岸技術研究センター 参与 (財)沿岸技術研究センター 調査役 (財)沿岸技術研究センター 業務課長
6	正会員	博(工)	(財)沿岸技術研究センター 業務課長

任意の地点での波高予測が可能となるように適切な波浪 変形モデルを活用した予測モデルを構築するとともに、 「うねり性波浪」の監視モデルを検討したものである. さらに、実事例による本モデルの予測実現の可能性と予 測精度の的確性について検討を行った.

## 2. 「うねり性波浪」予測モデルの概要

「うねり性波浪」予測モデルは、日本海全域から富山 湾までの波浪をネスティング計算する波浪予測モデルと 富山湾内の波浪変形モデルの組合せで構築した(図-1). 以下に、各々のモデルの概要を述べる.

#### (1) 波浪予測モデル

国土交通省北陸地方整備局(2008)は、『富山湾にお ける「うねり性波浪」対策検討技術委員会』の中で、課 題①としてNOWPHAS観測データを用いて波浪予測精度





を向上させる必要があるとしている.この課題に対応す るため、当時開発中であったNOWPHAS観測データを用 いた同化手法による波浪予測モデル(江口ら、2009)を 検討し、富山湾における精度を確認した.

図-2及び図-3は、データ同化手法を用いた波浪予測モ デルの領域図である.また、図-3には、データ同化で用 いるNOWPHAS観測地点を◎印で、気象庁観測地点を○ 印で図示している.これらの領域は、表-1に示すように、 空間間隔(格子間隔)が緯度格子座標で36分の領域1か ら2分間隔の領域4まで、ネスティングによって計算さ れる.また、波浪予測の入力となる風は、気象庁のGPV (Grid Point Value:格子点値)を用いた.先ず領域1及び 領域2では、地球全体の大気を対象とした気象庁の数値 予報モデルGSM (Global Spectral Model:全球モデル) を用いた.次いで領域3及び領域4では、日本及びその

表-1	波浪予測	•	データ	同化の諸元
-----	------	---	-----	-------

	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5 内湾		
入力海上風	GS	SM	MSM(予測計算時に毎時大気 解析値をMSMに同化) 予報時間に応じてGSMに変更				
波浪予測 モデル	加藤ら 松	(2007)の 浦ら(200	- つ浅海域に適応したWAMを 08)が改良したモデル				
空間間隔	36'	12'	6'	2'	1'		
計算条件	深海	深海	深海	深海	浅海		
時間間隔	1時間(同化前,同化後とも)						
方向分割	32方位						
周波数分割	25成分 35成分						
予測要素	全地点:有義波高・周期・波向,風向・風速						
データ同化	\$	L	有義波高・周期・スペクトル(周 期帯別)を予測計算終了後, 毎時,OIにより30時間先まで修正				

近海の大気を対象とした気象庁の数値予報モデルMSM (Meso Scale Model:メソモデル)を用いた.このMSM は、予測計算開始時に毎時大気解析値とデータ同化を行 っており、GSMに比べて沿岸部の精度向上が期待される. なお、MSMの予測期間はGSMに比べて短いため、MSM の予測期間より先の予測に対してはGSMを用いた.

また,用いた波浪モデルは,加藤ら(2007)の浅海域 に適応させたWAMモデルを松浦ら(2008)が改良した モデルである.さらに,領域3及び領域4に対しては, リアルタイムで得られるNOWPHAS観測値を用いてデー タ同化を行った.使用したデータ同化手法は,リアルタ イムでの波浪予測を提供するために,計算負荷の小さい 最適内挿法を用いた.

#### (2) 波浪変形モデル

本論文の課題②は、富山湾特有の藍瓶地形による影響 の効果を取り入れることである.この課題に対応するた め、波浪変形モデルの特性を検討し、「うねり性波浪」 予測に適したモデルの選定を行った.

対象とする「うねり性波浪」は、周期が14秒前後に達 する(平成20年2月の被災時には9.92m, 16.2秒が観測さ れている:国土交通省北陸地方整備局, 2008). この波 浪が港湾に来襲した際,代表水深を10mとすると,相対 水深 $\sigma$ (水深・波長比(h/L))は、0.075と長波に近い. また,4mの波浪が来襲すると仮定すると、波形勾配 (H/L)は0.03,波高・水深比(非線形性の強さ) $\varepsilon$ は0.4, アーセル数(Ur) $\varepsilon/\sigma$ <sup>2</sup>は71>>1となる.20<Ur<80の場合 は、孤立波を形成する.この様な富山湾における「うね り性波浪」の伝搬を精度良く計算し、波高分布を求める 場合,浅水変形,屈折,碎波に加えて,有限振幅性(非 線形性,分散性)を考慮する必要がある.そのため、富 山湾における「うねり性波浪」の波浪変形計算を実施す



る場合には,修正ブシネスク方程式が最適と考える.本 研究では,砕波及び任意水深も考慮できるNOWT-PARI Ver.4.6c5aを用いた(平山, 2002).

波浪変形モデルの検討フローを図-4に示す. 伏木富山 港の伏木地区では詳細な深浅測量による海底地形データ を有することから、詳細なメッシュ(10m間隔)で非線 形分散波モデル(ブシネスクモデル)を用いた波浪変形 解析を実施した(全ケース:172ケース).また、線形モ デル(エネルギー平衡方程式)を用いた波浪変形解析も 実施し(全ケース)、これらの計算結果の比較検討から、 モデルの差による影響度等を検討した.一方,詳細な海 底地形データがない富山地区においては、線型モデルを 用いた波浪変形解析を全ケースで実施し、1ケースのみ 非線形分散波モデル(ブシネスクモデル)を用いた波浪 変形解析を実施した.富山地区では、海底地形データが 粗いために屈折効果が過小評価され、また、線形モデル であるために非線形効果が無視され、沿岸係数(波高の 増幅率) は適切に評価されない可能性がある. そこで、 伏木地区及び富山地区で実施した2つのモデルに基づく 沿岸係数の比較結果から、予測に適用可能な非線形の影 響を取り入れて、富山地区での沿岸係数の比を割増率と して乗じることとした.

実際の予測モデルに適用させシステム化するために は、様々な入射波向や周期・波高に対応させる必要があ り、沿岸係数(波高の増幅率)をテーブルの形で事前に

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

表-2 入力条件

作成しておくことにした.この際,北から西の波に対し ては,能登半島の遮蔽域になるため16方位の間隔 (22.5°)で沿岸係数表を作成すれば十分であるが,「うね り性波浪」が来襲する北から北東の波に対しては,波向 に対する周囲の地形や海底地形の影響が大きいことか ら,方位5度間隔で「沿岸係数表」を作成した.また, 周期及び波高については,表-2に示すように,4周期に ついて,波高については6波高について沿岸係数表を作 成し,その他の波高,周期の沿岸係数は上記条件の沿岸 係数を内挿して使用することとした.

また, 浅海域での波浪変形計算において, *S<sub>max</sub>*(方向 集中度)は以下のとおりとした.

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

減衰距離の短いうねり(波形勾配が比較的大)

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

減衰距離の長いうねり(波形勾配が小)

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

さらに、平成20年2月の被災時のスペクトルは、能登 半島外側の輪島ではブレットシュナイダー・光易型スペ クトルに近い形状であったが、伏木富山及び富山では JONSWAPスペクトルに近い形状であった.これは、藍 瓶地形における波の屈折の影響でスペクトル形状が変化 しているためである(国土交通省北陸地方整備局,2008). 本モデルは、異常波浪時だけではなく、静穏な波浪時も 含めた毎日、自動的に予測を行うことから、沖波の周波 数スペクトルは標準的なブレットシュナイダー・光易型 スペクトルを使用することとした.

入射波高3m,周期12秒,方向集中度S<sub>max</sub>=75で計算し た結果を図-5に示す.図の左列は水深分布図,右列はエ ネルギー平衡方程式による波高に対するブシネスクモデ ルによる波高の分布図(非線形性の影響による増幅率) である.藍瓶地形による影響だけを検討するため,構造



図-5 水深図及びエネルギー平衡方程式による波高に対する ブシネスクモデルによる波高(波高比)

物は無反射(透過)に設定している.図中,周期12秒の 場合,海底の尾根付近では波高の倍率が0.9~1.6であり, 平均は1.2倍程度である(図中の楕円部分).一方,周期 8秒以下の波浪の場合は,波高の倍率は平均で1.0倍程度 であった.したがって,周期10秒以下の波浪に対しては, エネルギー平衡方程式の沿岸係数をそのまま利用しても 問題はないが,周期10秒以上の波浪に対しては,屈折に より波高が増大し非線形性(有限振幅性)が顕著になる 海底の尾根付近(図中の楕円域内)に予測地点が存在す る場合は,波高を1.2倍程度割り増す必要がある.

# (3)「うねり性波浪」予測モデルの検証

前出の図-1に示した「うねり性波浪」予測モデルを作成し,過去の実事例で検証を行った.本モデルは平成20 年2月の被災事例の検討によって作成したものであるため,被災以前の実事例で検証を行った.

平成15年から平成19年の5年間の伏木富山及び富山の 観測結果から、「うねり性波浪」として有義波高2.0m以 上,有義波周期10秒以上の22事例を抽出し、その中で 有義波高が大きい4事例(顕著事例)の検証を行った.

図-6は平成16年2月の事例である.データ同化により, 伏木地区では概ね予測値は実測値と一致し,富山地区で も実測値に近づいた(但し,ピークは十分に捕らえてい ない).他の事例も概ね同様の傾向があった.本手法は, 同時刻の観測地点における観測値と予測値の誤差の情報 を基本として,データ同化を未来の予測に適用する方法 であるが,さらに精度を向上させるためには,上流側の NOWPHAS地点との誤差共分散行列の更新を利用したデ ータ同化を検討することが考えられる.また,データ同



化による波浪予測でも予測しきれない場合には,過去の 「うねり性波浪」来襲時の特徴を踏まえて,「うねり性波 浪」来襲時の気象・海象条件を事前に把握し,観測値を 監視する等の補助手段との併用が有効と思われる.

### 3.「うねり性波浪」監視モデルの概要

本論文の課題③は,波浪予測の見逃し等を補完するために監視を行うことである.この課題に対応するため, 「うねり性波浪」監視モデルの検討を行った.

富山湾の「うねり性波浪(寄り回り波)」は、日本海北 部で発達した波浪が富山湾に来襲するものである。した がって、発生域の日本海北部の監視、あるいは発生域か ら富山湾へ伝播する波浪群の経路上の状況を監視するこ とで、いつ富山湾において「うねり性波浪」が出現する かを予想することが可能になると考えられる。この考え に基づいて、「うねり性波浪」を発生させる気象・波浪条 件及び伝播途中の波浪実況を監視する方法を検討した。

#### (1) 日本海北部の気象海象予測値の監視

「うねり性波浪」の発生源と想定される日本海北部海 域を監視域として設定した.過去5年間,22事例の「う ねり性波浪」来襲時(ピーク時)の6~48時間前の日本 海の気象・海象の格子点値を用いて,北系(北東~北西) の海上風・波浪の統計値を算出し,監視格子点,監視開 始,閾値を設定した.検証の結果,(6~24時間前迄の) 18時間(4時刻)のうち12時間(3時刻)連続して, 50%以上の格子点で,風速14m/s,波高4.0m以上が予測 された場合に監視を開始すれば,22事例中13事例で「う ねり性波浪」の発生を予測することができた(適中). したがって,予測時刻が48時間よりも先の時点で,監視 海域の海上風,波浪が先の条件を満たす場合に監視を開 始すれば,富山湾に来襲する「うねり性波浪」の発生を 見逃さないと考えられる.



初期時刻:1/12 21時 12時間後:1/13 9時 18時間後:1/13 15時 24時間後:1/13 21時 図-7 実事例による監視例(平成22年1月13日の事例)

#### (2) NOWPHAS 波浪観測値の監視

過去5年間,22事例の「うねり性波浪」来襲時(ピー ク時)の0~24時間前のNOWPHAS観測地点(留萌~輪 島)の有義波高,有義波周期の観測値を用いて,警戒監 視開始の条件設定を行った.試行錯誤した結果,有義波 高2.0m以上かつ有義波周期9秒以上という条件に該当す る地点が1地点でもあれば監視を開始すれば,22事例中 21事例で「うねり性波浪」の発生を予測することができ (適中),富山湾に「うねり性波浪」が来襲する数時間~ 20時間前に前兆を捉えることが可能である.

#### 4. 実事例によるモデルの的確性の確認

「うねり性波浪」予測・監視モデルを用いた疑似シミ ュレーションを実施し、実事例における的確性について 確認を行った.この擬似シミュレーションは、予測モデ ル及び監視モデルによって富山湾に「うねり性波浪」が 発生すると予測された場合、自動的に携帯電話へメール 通知するとともに、通知を受けた港湾関係者等がPCの 監視画面により状況を確認するものである.ここでは、 NOWPHAS富山観測地点で有義波高2.0m以上、有義波周 期9秒以上を観測した平成22年1月13日の事例について 確認結果を示す.

#### (1) NOWPHAS 波浪観測値の監視結果

NOWPHAS波浪監視地点(留萌~輪島)の波浪観測値 が1地点でも波高2.0m以上かつ周期9秒以上が観測され た場合にメール通報するという設定で監視を行った.そ の結果,1月13日の04:20輪島,09:00酒田,12:00新潟及 び直江津,14:00富山,15:40秋田,で閾値を超えた.

### (2)「うねり性波浪」予測結果

富山湾の3日先までの波浪予測値が波高2.0m以上かつ 周期9秒以上を予測した場合にメール通報するという設 定で監視を行った.その結果,富山観測地点の予測値が 1月13日14時~20時の間閾値を超える予測であった.

#### (3) 日本海北部海域の監視結果

日本海北部監視域において、12~48時間先の海上風・

波浪予測の6時間間隔の予測値のうち,3時刻連続して格 子点の50%以上で,北系の風向で風速14m/s以上,かつ 北系の波向で波高4m以上が予測された場合にメール通 報するという設定で監視を行った.図-7は波高の監視結 果であり,図中の楕円は監視海域を示している.図-7を 見ると,本事例は警戒の対象となるパターン(日本海北 部で発達した波が富山湾に伝播するパターン)ではなく, 日本海中央部の高波高域が北西風によって富山湾に来襲 する冬型のパターンであったことが分かる.

(1)から(3)の全ての結果が「うねり性波浪」発生を予測 した場合に,警戒体制に入る等の処置をとることが可能 であり,本モデルは実用的に有用であると推察される.

### 5.おわりに

今後,富山地区及び新湊地区の詳細な海底地形データ を使用し,再検討を行い,「うねり性波浪」予測・監視モ デルをシステム化して試運用を行うとともに,様々な事 例で的確性を確認することによって,予測精度の向上や 閾値の検討を行っていく予定である.

#### 参考文献

- 江口一平・松浦邦明・松藤絵理子・本橋昌志・三嶋宣明・岡田弘三(2009):NOWPHAS沿岸波浪観測値の沿岸波浪予報へのリアルタイム同化による予報精度の向上 沿岸気象海象情報配信システム(COMEINS)の高度化-,海洋開発論文集,第25巻,pp.885-890.
- 加藤史訓・福濱方哉・橋本典明・三嶋宣明・松藤絵理子・字 都宮好博(2007):内湾を対象としたリアルタイム波浪予 測システムの開発,海洋開発論文集,第23巻,pp.225-230.
- 国土交通省北陸地方整備局(2008):富山湾における「うねり 性波浪」対策検討技術委員会報告書,50 p.
- 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, 162 p.
- 松浦邦明・橋本典明・河合泰弘・川口浩二・本橋昌志・松藤 絵理子(2008):高解像度波浪推算データベースと NOWPHAS沿岸波浪観測値を利用した方向スペクトル客 観解析値の推定,海洋開発論文集,第24巻,pp.915-920.