

富山湾における寄り回り波の特性と その予測に向けた数値モデルの適用

津田 直樹, 呉 修一
(工学部 環境・社会基盤工学科)

要約: 本研究は、富山湾沿岸に襲来する寄り回り波の特性を把握し、その予測モデルを構築することを目的としている。寄り回り波の基本特性、伝搬特性、経年変化について整理するとともに、SWANモデルを北海道西岸から富山湾にかけて適用することで、2008年2月および2013年4月に来襲したうねり性波浪について予測計算を行った。計算結果として、富山湾外の直江津と輪島である程度の精度で計算を行うことができたが、富山では波高が過少評価であったため、今後更なる予測精度の向上が必要である。そのためには、更に高解像度の地形データの使用、領域気象モデルを用いた風速場のダウンスケーリング、SWANモデルの各種パラメタリゼーションの再検討、等の対応が必要と考えられる。

キーワード: 寄り回り波, うねり性波浪, 富山湾, SWAN

1. はじめに

富山湾沿岸では、古来より寄り回り波と呼ばれるうねり性波浪の被災がある。これを「寄り回り波」とよび恐れられている。ここ近年では、2008年に黒部市で72棟が高波により床下浸水するなど住民30人が緊急避難する事態となった。入善町芦崎地区では堤防を乗り越えた高波が波状的に住宅街を襲い、全壊4棟、半壊9棟、一部損壊16棟、床上浸水47棟、床下浸水建物75棟、車両26台、船舶8隻などの被害が生じた。倒壊した倉庫の下敷きになって同町の男性(87)が死亡し、重軽傷者15人など甚大な人的被害も生じた(国土交通省[1])。齊藤ら[2]によると、1926年から1987年までの間に高波による被災回数は141件に上り、年平均で2から3回の被災が確認されている。人的被害をもたらす様な大きな寄り回り波は約10年に1度発生すると言われている。

本災害の対策として、寄り回り波のリアルタイム予測システムを構築する必要がある。また、温暖化による気候変動を考慮した場合、寄り回り波の将来展望はどのようなものかを事前に把握することも重要である。

従来から高波や寄り回り波の研究は多く行われている。例えば間瀬ら[3]は、極端事象として規模の大きな波を対象とし、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の観測資料を用いて、日本海沿岸における波浪の長期増加・減少傾向について調査し、年々変動特性について解析した。その結果、冬型気圧配置によって生じた高波は、波高および周期ともに増加傾向を示し、波高の増加率は北部地域の方が大きくなる傾向を示した。河合ら[4]は、富山新港内の富

山高等専門学校臨海実習場における水位観測データ及びNOWPHAS富山波浪計のデータ解析を行い、富山新港内と岩瀬沖合におけるうねり性波浪侵入に伴う水位変動に関して調査している。その結果、うねり性波浪が富山湾に侵入する前に発生する水位変動は、富山湾内の副振動であり、これは数日前に富山湾沿岸の水位が低下し、その後上昇する過程で生じていることを明らかにした。その富山湾の主な副振動の周期は、約30分と約27分であることを示している。

寄り回り波の数値予測に関して、例えば李ら[5]は、メソ気象モデルMM5を用いることにより日本海での冬季低気圧による気象場を再現し、さらに第3世代波浪推算モデルSWANを用いて、日本海中部沿岸に来襲した寄り回り波の波浪推算を行い、波浪来襲時の時系列変化を精度よく再現している。しかしながら、波高・周期ともに回折領域では推算値がやや過小となる傾向があるため、今後改善が必要であるとしている。太田ら[6]は、SWANを用いて、波浪の変形としての回折と屈折を詳細に解析し、寄り回り波の波浪特性に与える海岸線地形と海底地形の影響を定量的に評価した。解析結果より、富山湾において波の回折・屈折の重要性を示唆するとともに、2008年2月の寄り回り波のハインドキャストランを実施した結果、富山湾の波浪推算では高解像度の地形データが必要であることを明らかにしている。齊藤ら[2]は、ニューラルネットワークを用いることで計算負荷が少なくより効率的にうねり性の高波を含む日本海沿岸での波浪予測を可能とするモデルの構築を行っている。うねり性波浪が発生したイベントを教師データとして学習させることにより、大規模なうねり性波浪を

13時間程度遡った気象データを用いて精度良く予測している。また、波高を取り入れた自己回帰型のニューラルネットワークによる予測は、気象データのみを入力値にした予測よりも、予測精度が良好となることも示している。

上記したように、寄り回り波についてはその特性を明らかにする研究から数値モデルを用いた予測まで、様々な研究が行われてきた。しかしながら、2008年の寄り回り波の最大波高を再現できた事例は少なく、2013年の寄り回り波に関しては解析事例が多くない。また、温暖化といった気候変動を考慮した、富山湾程度の領域スケールでの、寄り回り波の将来予測については著者らの知るかぎりでは検討されていない。そこで本研究では、寄り回り波の特性を整理するとともに、物理モデルSWANを用いた寄り回り波の予測システムの構築を行い、2008年の寄り回り波のみならず2013年に発生した寄り回り波も対象に予測計算を行うことを目的とする。また長期的には、温暖化が寄り回り波に与える影響を評価することも目的としている。

2. 寄り回り波の特性

2.1 寄り回り波の基本特性

過去に寄り回り波の特性解明に向けた研究は多くされてきた(永井ら[7], 麻柄ら[8], 河合ら[4])。その中でも最近の寄り回り波について調査した報告事例(麻柄ら[8])から、寄り回り波の基本特性を下記に列挙する。

(1) 富山湾への侵入時期

寄り回り波は、一般に10月から3月の冬季にかけて富山湾に侵入する。ただし、数は少ないが4月または9月に侵入することもある。

(2) 突如来襲(意外性)

例年10月から3月にかけて、低気圧が富山湾周辺を通過し、風や風浪がおさまり天候も回復した頃に突如来襲する。

(3) 時間差での発生

富山湾の東部と西部で、寄り回り波の来襲時間が数時間程度ずれる傾向がある。

(4) 地域性

複雑な海底地形の影響で寄り回り波が屈折し、大きな寄り回り波が押し寄せる沿岸とそうでない沿岸が存在する。

(5) 水位変動

寄り回り波来襲の1日前程度から、天文潮汐を除去した富山湾の水位が、気圧の影響により数10cm程度上昇する(天文潮汐の除去に加えて気圧の影響も除去すると1日程度前から水位が数10cm程度低下している)。

(6) 偏向して富山湾に侵入

対馬海流によりうねりが右へカーブして富山湾に侵入する。

(7) 白波を伴う顕著な寄り回り波が約20~30分の周期で沿岸に押し寄せる傾向がある。

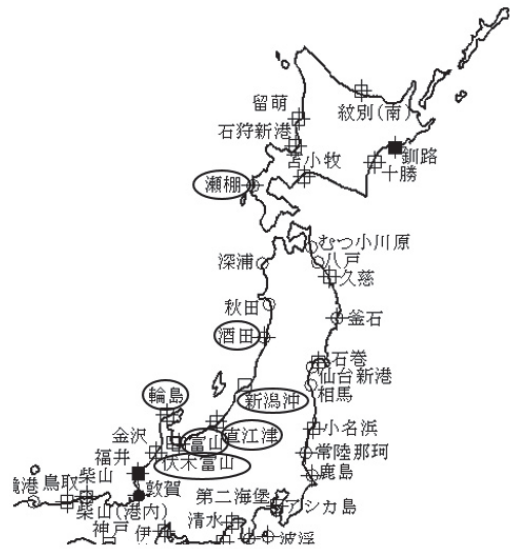


図-1 本研究で対象としたデータ観測地点

以上が、麻柄ら[8]の報告による寄り回り波の特性である。

2.2 寄り回り波の伝播特性

寄り回り波の特性として、北海道沿岸からのうねり性波浪であることが挙げられる。ここでは波浪の伝播の様子を実際の観測データから整理する。有義波高と周期のデータは国土交通省港湾局がウェブ上で公開しているNOWPHAS(Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarborS)のデータを使用した。NOWPHASは国土交通省港湾局・各地方整備局・北海道開発局・沖縄総合事務局・国土技術政策総合研究所および港湾空港技術研究所の相互協力のもとに構築・運営されている我が国沿岸の波浪情報網である(国土交通省[9])。本論文全体では、富山波浪計(富山県)、富山伏木波浪計(富山県)、輪島波浪計(石川県)、新潟沖波浪計(新潟県)、直江津波浪計(新潟県)、酒田波浪計(秋田県)、瀨棚波浪計(北海道)の7地点で観測されたデータを使用している。これらの観測地点を図-1に示す。

寄り回り波の伝播特性は、直江津、酒田、瀨棚の3地点と富山で比較した。本研究でこの3地点を選択したのは、寄り回り波の特性である北海道付近で発生した風浪が南下し富山に伝播されるためである。図-2に2013年4月に発生した寄り回り波の際の各地点の有義波高を、図-3に2008年2月に発生した寄り回り波の際の各地点の有義波高を示す。図-2、図-3より、富山で観測された波の挙動と他の3地点で観測された波の挙動が似ていることがわかり、うねり性波浪の伝播の様子が確認される。また最高波は、富山港が他の3地点より12時間ほど遅れて来襲することも分かる。このことから、他の地点でうねり性波浪が観測されれば、

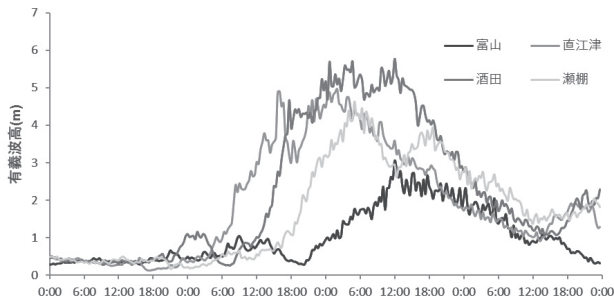


図-2 2013年4月6～9日の4地点（富山，直江津，酒田，瀬棚）の有義波高の時系列

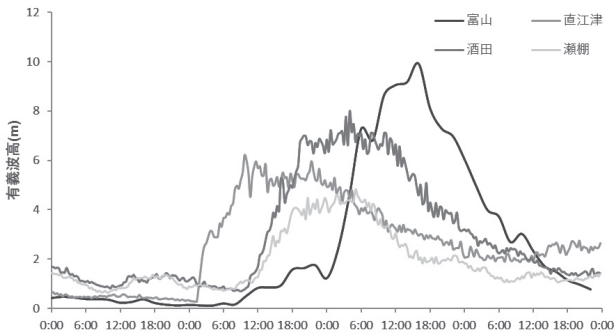


図-3 2008年2月22日～25日の4地点（富山，直江津，酒田，瀬棚）の有義波高の時系列

約半日前に富山への来襲が予測できる可能性も大きいと考える。実際に齊藤ら[2]はこの特性を利用して予測を行っていると考えられる。また、2008年では富山は他の地点に比べ最高波が大きく、2013年では小さい。

2.3 寄り回り波の経年変化

寄り回り波の経年変化について調べるために、富山、新潟沖、酒田で観測された最大有義波高2m以上かつ周期が10秒以上のうねり性波浪が観測された回数及び最高有義波高について年別にまとめた。データの欠損が多いため、2ヶ月以上データの欠損がない年を調査対象とした。そのため、酒田では1998～2016年、新潟沖では1993、1994、1997～2000、2002、2004～2008、2013～2016年、富山では、2002～2008、2010、2011、2015、2016年を調査範囲としている。図-4に、富山、新潟沖、酒田における最大有義波高の経年変化を、図-5に富山、新潟沖、酒田における最高有義波高2m以上かつ周期が10秒以上のうねり性波浪の観測回数の経年変化を示す。図より明らかなように、過去のデータ期間が十分に長くないため、増加・減少傾向などのトレンドは得ることはできていない。しかし、今後の温暖化での台風経路・強度の変化や冬型低気圧の配置が変化する可能性などを考慮した場合、長期的にはトレンドが変化する可能性が存在する。よって、寄り回り波の将来展望を明らかにするために、温暖化を考慮した長期予測計算を今後は実施

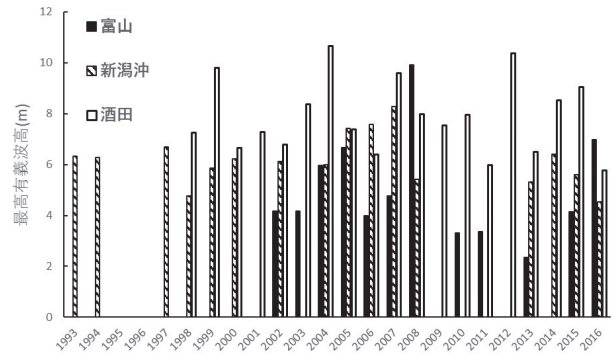


図-4 富山，新潟沖，酒田の最大有義波高の経年変化

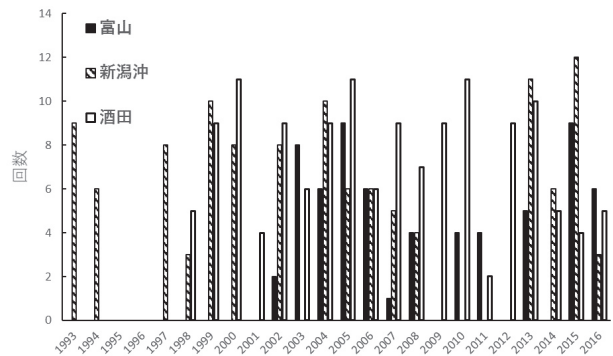


図-5 富山，新潟沖，酒田のうねり性波浪の観測回数の経年変化

する予定である。

3. 寄り回り波の予測計算

3.1 SWANの概要

本研究では、寄り回り波の予測計算を物理モデルであるSWANを用いて実施する。間瀬ら[3]によると、SWANは、波浪推算モデルとしてデルフト工科大学で開発され、周波数、方向、空間座標の4独立変数の関数である波作用量平衡式を解くことによって、流れの影響も考慮した波浪変化を計算する事が可能である。

SWANは空間においては2次オーダー風上差分、スペクトル領域においては1次オーダー風上差分と2次オーダー中央差分のハイブリッド型スキームを用い、伝播項とソース項を同時に離散化する事が可能となっている。SWANで用いられている波作用量平衡方程式の基礎式および、その右辺のソース項の式は以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$$S = S_{in} + S_{dsw} + S_{dsb} + S_{dsbr} + S_{nl4} + S_{nb} \quad (2)$$

ここに、 N : 波作用量, σ : 相対周波数, C_x, C_y, C_σ , C_θ : 格空間における伝播速度, S_{in} : 風から波へのエネルギー輸送, S_{dsw} : 波のエネルギー消散 (白波破波), S_{dsb} : 波のエネルギー消散 (海底摩擦), S_{dsbr} : 波のエネルギー消散 (浅海碎波), S_{nl4} : 4波共鳴非線形相互作用, S_{nl3} : 3波共鳴非線形相互作用である。

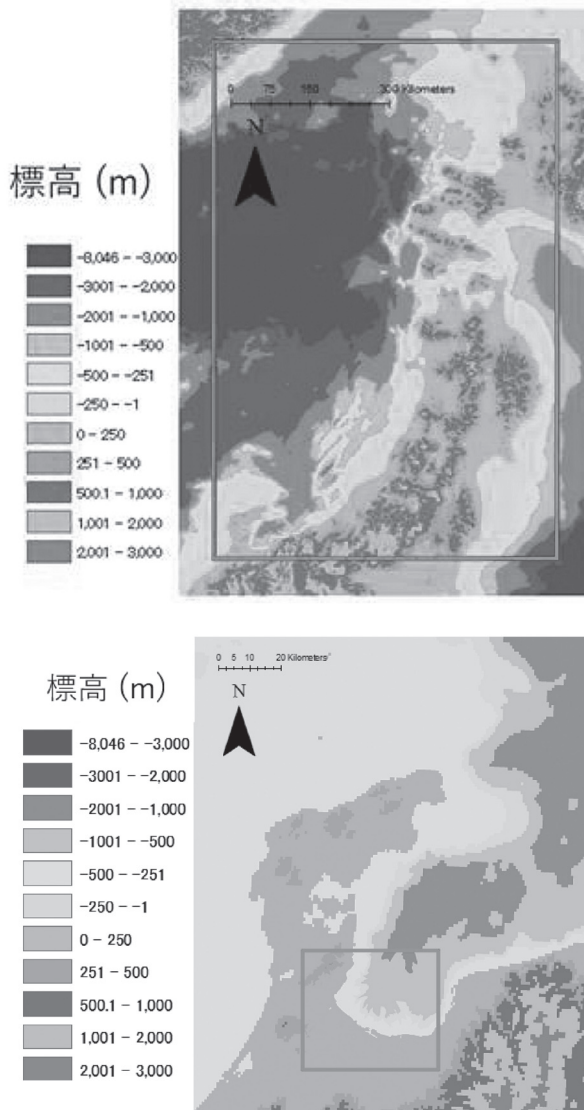


図-6 計算対象領域 (上: 全体, 下: 高解像度地形データの使用領域)

3.2 地形データの概要

本研究では空間解像度 1 km の GEBCO を地形データとして用いた。GEBCO は General Bathymetric Chart of the Oceans (大洋水深総図) の略称で、国際水路機関 (IHO) とユネスコ政府間海洋学委員会 (IOC) が共同で作成されたものである (BODC[10])。また、海図や人工衛星データや各国の機関から提供されたデータから作成されており、

地球全球スケールにおける海底地形データの DEM データを代表するものの 1 つである。富山湾内では、高解像度の地形が必要なため、測深図より作成した空間解像度 30m の地形データを用いネスティングを行っている。

また、経度 $136.35^\circ \sim 142.35^\circ$ 、緯度 $36.5^\circ \sim 42.5^\circ$ の範囲で計算を行った。ネスティングの状況と計算対象領域を図-6 に示す。

3.3 入力に用いる風データの概要

本研究では MSM の風速予測値を入力値として用いた。MSM とは、メソ数値予報モデル (Meso-Scale Model) の略称である。MSM は日本とその近海を計算領域とし、1 日 8 回 3 時間ごとに予測計算を行っており、1 時間隔でデータを出力し 15 時間から最大 39 時間先まで予測できる。これにより、数時間から 1 日先の大雨や暴風などの災害をもたらす現象を予測することを目的としている。本研究では MSM の地表面解析値の風速データをモデル入力値として使用した。

地表面解析値には地表から 10m の高さで予測計算が行われた、風の u 成分と v 成分があり、それを使用している。計算範囲は経度 $136.35^\circ \sim 142.35^\circ$ 、緯度 $36.5^\circ \sim 45.5^\circ$ の範囲を指定し、格子数は x 方向に 98、 y 方向に 181 として計算を行っている。また計算時間は 2008 年 2 月 21 日 0 時 ~ 25 日 8 時と 2013 年 4 月 5 日 0 時 ~ 9 日 8 時とした。

3.4 寄り回り波の予測計算結果

図-7、図-8、図-9、図-10 に富山、伏木富山、直江津、輪島の 2008 年 2 月 22 日から 25 日までの有義波高と有義周期の時系列ごとの観測値及び計算値を示す。ただし、周期に関しては、SWAN の出力値は平均周期、観測値は有義周期であるため、前者は後者より小さくなっている点に注意されたい。

図に示されるよう、富山、直江津、輪島いずれの地点においても有義波高の増加傾向、周期の傾向については予測することができている。特に直江津においては有義波高、周期を精度よく予測できている。しかし、伏木富山においては予測計算結果と観測結果の最大波高に差が生じており、計算結果は過少評価となっている。直江津に関しては精度よく予測することはできたが、輪島、富山では観測結果より予測計算結果は波高、周期ともに少し小さい値となった。図-11、図-12、図-13 に富山、直江津、輪島の 2013 年 4 月 5 日から 9 日までの有義波高と有義周期の時系列ごとの観測値及び計算値を示す。このイベントでは伏木富山の観測データが欠損であり、比較を行っていない。2008 年の寄り回り波と同様に、直江津ではある程度の計算精度を得ることが出来たが、富山および輪島では計算結果が過少に評価

されている。また全体的に2013年イベントのほうが精度が低い結果となった。

このように、富山湾内の伏木富山と富山観測所では観測結果と予測計算結果に大きな差がでていることから、富山湾の複雑な地形に起因して波高が増加しているのではないかと考えられる。そのため、精度よく富山において予測計算を行うには沿岸部などで更に高解像度の地形データが必要と考えられる。また風データも更に高解像度のものを使用するため、領域気象モデル（例えば、WRFなど）を用いた動的なダウンスケーリング等が今後必要と思われる。更にSWANモデルで使用しているパラメタリゼーション等のチェック・変更も検討が必要である。

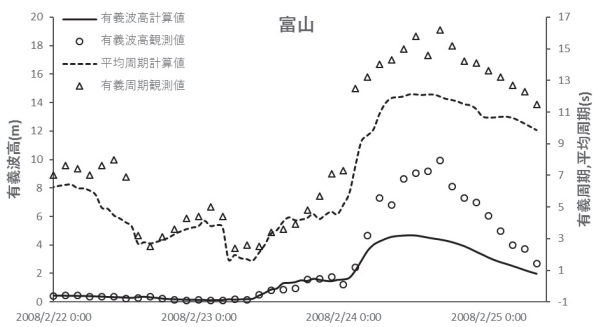


図-7 富山における2008年2月22～25日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

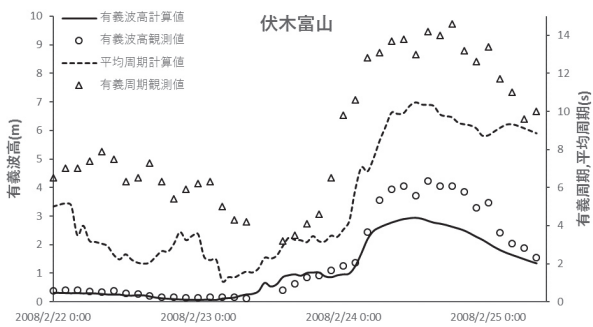


図-8 伏木と富山における2008年2月22～25日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

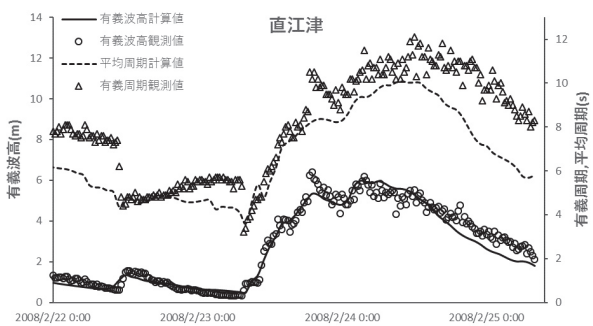


図-9 直江津における2008年2月22～25日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

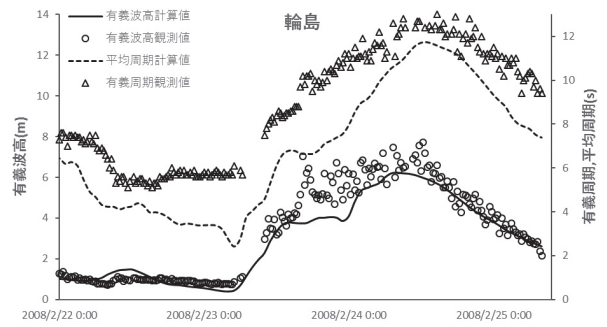


図-10 輪島における2008年2月22～25日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

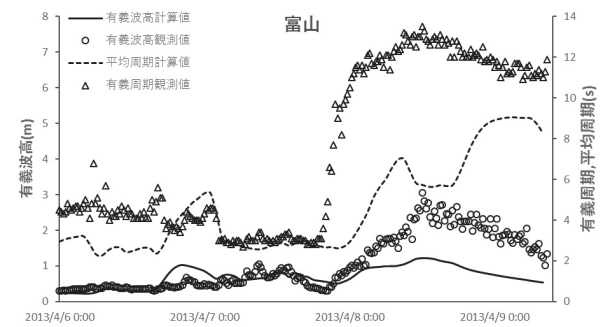


図-11 富山における2013年4月6～9日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

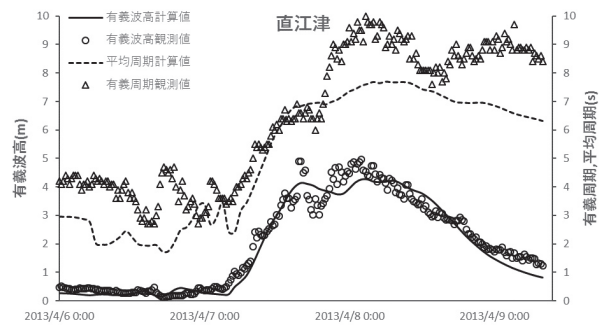


図-12 直江津における2013年4月6～9日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

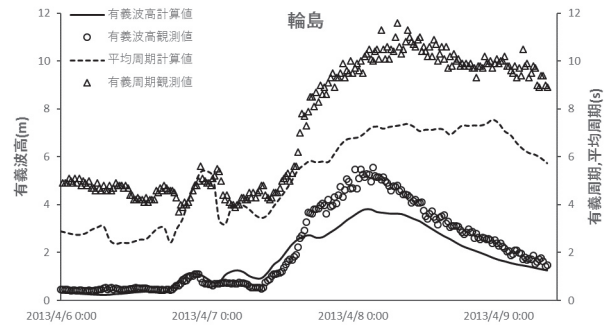


図-13 輪島における2013年4月6～9日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

4. まとめ

本研究は、富山湾沿岸に襲来する寄り回り波の特性を把握し、その予測モデルを構築することを目的とし、寄り回り波の基本特性、伝搬特性、経年変化について、まずは整理した。更にSWANモデルを適用することで、2008年2月および2013年4月に来襲したうねり性波浪について予測計算を行った。

予測計算では、富山湾外の直江津と輪島である程度の精度で計算を行うことができたが、富山および伏木富山では波高および周期の傾向のみの予測であり最大波高等の過小評価が見られた。今後更なる予測精度の向上が必要と考える。そのためには、更に高解像度の地形データの使用、領域気象モデルを用いた風速場のダウンスケーリング、SWANモデルの各種パラメタリゼーションの検討、等の対応が必要と考えられる。また、今後の温暖化が寄り回り波に与える影響を定量的に評価するために、温暖化を考慮した長期計算の実施が必要となる。

謝辞

本研究は、平成28年度富山県立大学奨励研究の助成を受け実施したものです。ここに末尾ながら記して、謝意を表します。

参考文献

- [1] 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：富山湾の寄り回り波について、
<http://www.gicho.pa.hrr.mlit.go.jp/gijutsu/report/pdf/yorimawari.pdf>
- [2] 齊藤武久・小久保元貴・間瀬肇：ニューラルネットワークを用いた日本海沿岸域でのうねり性高波浪の予測に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学）：72(2), I_175-I_180, 2016。
- [3] 間瀬肇・平尾博樹・國富將嗣・高山知司：SWANを用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証，海岸工学論文集，第48巻，pp236-240, 2001.
- [4] 河合 雅司・平山 克也・北村 康司・川口 清司：うねり性波浪に伴う富山湾沿岸の水位変動について，日本航海学会論文集，第132巻，pp28-35, 2014.
- [5] 李漢洙・山下隆男・駒口友章・三島豊秋：メソ気象・波浪推算モデルによる2008年2月の寄り廻り波の再現計算，海岸工学論文集第55巻，pp161-165, 2008。
- [6] 太田俊紀・松浦知徳・村上智一・下川信也：地形効果による寄り回り波の波浪特性，土木学会論文集B3, Vol.72, No.2, 2016。
- [7] 永井紀彦・平石哲也・河合弘泰・川口浩二・吉永宙司・大釜達夫：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，pp146-150, 2008.
- [8] 麻柄葵・河合雅司・三井正雄・眞岩一幸：2013年4月の寄り回り波について，日本航海学会論文集，第130巻，pp93-98, 2014.
- [9] 国土交通省港湾局：リアルタイムナウファス
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- [10] BODC (British Oceanographic Data Centre): GEBCO
<https://www.gebco.net/>

Characteristics of Swells in Toyama Bay and Application of Numerical Simulation Model for Real Time Forecasting

Naoki Tsuda and Shuichi Kure

Department of Environmental and Civil Engineering

Faculty of Engineering

Key Words: Yorimawarinami, Swells, Toyama Bay, Swan