

11. 富山湾における寄り回り波の予測手法の構築と 温暖化の影響評価

津田 直樹¹・八木 隆聖²・呉 修一^{2*}

¹富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科（〒939-0398 富山県射水市黒川5180）

（現所属：富山県庁）

²富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科（〒939-0398 富山県射水市黒川5180）

* E-mail: kure@pu-toyama.ac.jp

本研究は、富山湾沿岸に襲来する寄り回り波の予測モデルを構築するとともに、温暖化が寄り回り波の発生に与える影響を評価することを目的としている。数値モデルSWANを北海道西岸から富山湾にかけて適用し、2008年および2013年に来襲したうねり性波浪について予測計算を行った。結果として、富山湾外の直江津と輪島で精度の高い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るため、今後更なる予測精度の向上が必要である。また将来の温暖化が日本海の風速場や寄り回り波に与える影響を評価するため、d4PDFデータを用いた将来評価を行った。これにより、将来、夏季の東日本海・富山湾周辺の平均風速は減少することが明らかとなった。また、100年確率の時間最大風速は、東日本海・富山湾で将来減少傾向にあることを示した。

Key Words : Yorimawarinami, swells, Toyama Bay, SWAN, d4PDF

1. はじめに

富山湾沿岸では古来より、うねり性波浪の被災があり、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り、本災害の対策として、寄り回り波のリアルタイム・事前予測の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を、事前に評価することも重要である。

寄り回り波の予測に関する研究として、例えば李ら²⁾は、領域気象モデル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³⁾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月の寄り回り波の計算結果より、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示している。斉藤ら⁴⁾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を構築している。

このように、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や、2013年の寄り回り波に関する解析事例は、著者らの知る限りでは存在しない。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は検討されていないのが実情である。

よって本研究では、SWANを用いた寄り回り波の予測システムの構築を行い2008年の寄り回り波のイベントのみならず、2013年に発生した寄り回り波も対象に、予測計算を行う。また、温暖化が寄り回り波に与える影響を

評価するため、d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change) データ⁵⁾の風速場を用い、温暖化の影響評価を行う。これにより、寄り回り波の予測システムを構築するとともに、温暖化の影響を評価することを本研究の目的とする。

2. 寄り回り波の予測計算

寄り回り波の特性を明らかにするため、観測結果に基づく研究が多くなされており（例えば、永井ら⁶⁾、麻柄ら⁷⁾、河合ら⁸⁾）、寄り回り波の発生時期、突如来襲性、地域性などの知見が多く報告されている。寄り回り波の大きな特徴として、北海道沿岸からのうねり性波浪を含むことが挙げられる。また、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。よって、予測を行うためには、北海道沿岸域からの波の伝播と、富山湾内での高解像度の計算が必要となる。以下にその予測計算の概要を記す。

(1) SWAN の概要

本研究では、寄り回り波の予測計算を他の先行研究と同様に SWAN を用いて実施する。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⁹⁾。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。

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

$$S = S_{in} + S_{dsw} + S_{dsb} + S_{dsbr} + S_{nl4} + S_{nl3} \quad (2)$$

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（浅海砕波）、 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。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。

本論文では、波の指数関数的発達については Janssen モデル用い、また、物理パラメータについては白波、3 波共鳴非線形相互作用の活性化の指定を選定した。

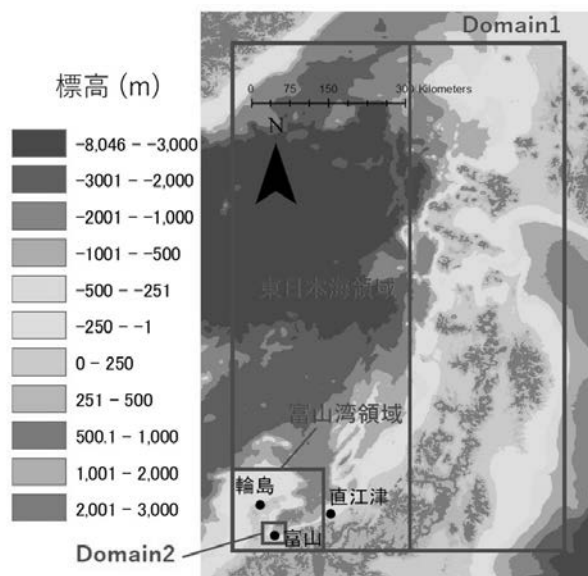


図-1 計算対象領域および計算地点の位置

(2) 使用したデータの概要と計算条件

本研究では計算領域全体に対して、空間解像度 1 km の GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) を地形データとして用いた。富山湾内では、高解像度の地形が必要なため、測深図などより作成した空間解像度 30 m の地形データを用いネスティングを行っている。図-1 に示す Domain 1 と 2 の領域を対象に計算を行っており、Domain 1 を 1 km の空間解像度で、Domain 2 を 30 m の空間解像度で計算を行っている。Domain 1 の境界条件は自由流出及び自由流入とし、Domain 2 の境界条件は Domain 1 からのネストダウンとした。

風速データは、気象庁の MSM (Meso-Scale Model) の地表面解析値の予測結果を入力として用いた。MSM は、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 時間先まで予測している。MSM の空間解像度は 5 km である。

計算期間は、寄り回り波が発生した 2008 年 2 月 21 日 0 時～25 日 8 時と 2013 年 4 月 5 日 0 時～9 日 8 時の 2 イベントを対象とした。計算タイムステップについては 3 分とした。

(3) 計算結果

図-2、図-3、図-4 に富山、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観測・計算結果の時系列を示す。3 地点の位置は図-1 に示すよう、富山以外は富山湾の外に位置している。この比較で、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、輪島のいずれの地点においても有義波高の増加傾向、周期の傾向やタイミングについて、良好に予測できている。

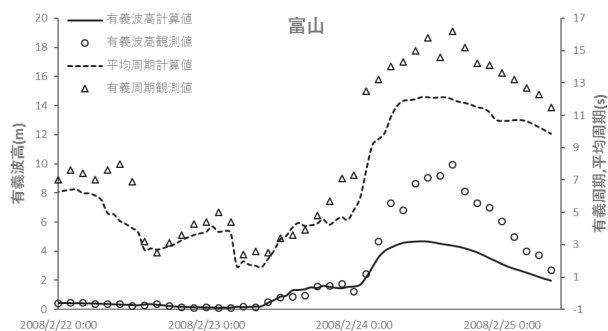


図-2 富山における 2008 年 2 月 22～25 日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

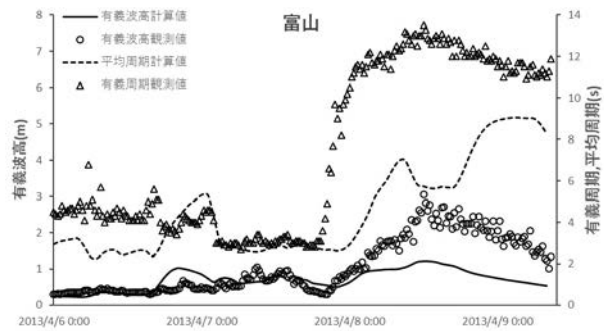


図-5 富山における 2013 年 4 月 6～9 日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

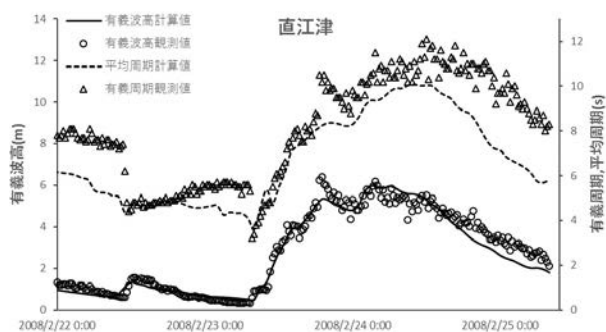


図-3 直江津における 2008 年 2 月 22～25 日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

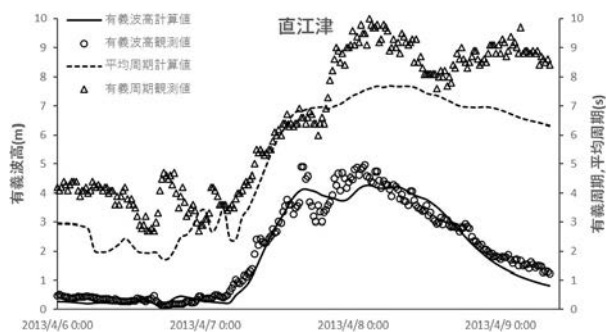


図-6 直江津における 2013 年 4 月 6～9 日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

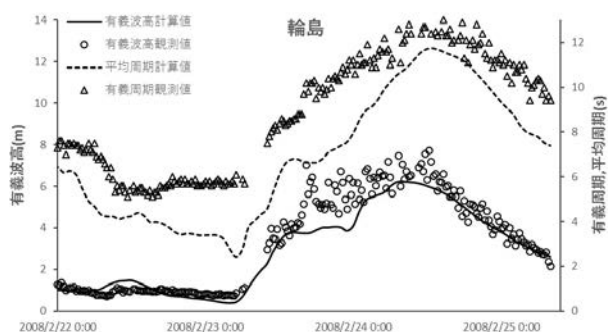


図-4 輪島における 2008 年 2 月 22～25 日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

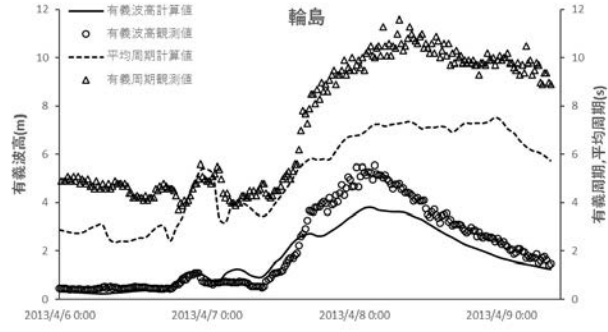


図-7 輪島における 2013 年 4 月 6～9 日の有義波高と有義周期の観測値及び計算値の時系列

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、輪島と富山では観測結果より予測計算結果が波高、周期ともに小さい値となっている。既往研究（例えば、李ら²⁾、太田ら³⁾）と同様に、過小評価の結果となっている。

図-5、図-6、図-7 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観測・計算結果の時系列を示す。2008 年のイベントと同様に、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小に評価されている。表-1 にそれぞれの地点・イベントの、観測値と予測値に

おける相関係数 R および Nash-Sutcliffe 係数(NS 係数)の結果を示す。富山では、2013 年イベントのほうが 2008 年に比べて精度が低い結果となっている。

このように、富山湾内の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、太田ら³⁾が既に指摘しているよう、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。また風データも予測値ではなく、再解析値を用いるとともに、更に高解像度のものを使用するため、領域気象モデ

表-1 各地点・イベントにおける R および NS 係数

地点名	富山	輪島	直江津
対象イベント	2008年イベント		
R	0.97	0.95	0.96
NS係数	0.66	0.85	0.89
対象イベント	2013年イベント		
R	0.79	0.97	0.98
NS係数	0.33	0.87	0.96

ル（例えば、WRFなど）を用いた動的なダウンスケーリングが今後必要である。しかしながら、本研究では、2013年イベントも2008年イベントと同様に解析することで、2008年イベントが特異（約10 mの有義波高）な極端イベントのため計算結果が過小評価となるのではなく、その他のイベントにも普遍的に本論文の予測方法では、富山で過小評価になることを示すことが出来た。

3. 温暖化の影響評価

(1) データの概要

本研究では、d4PDF データを用い温暖化の影響評価を行う。d4PDF は、地球温暖化対策に資するために作成した高解像度大規模データベース⁵⁾であり、多数のアンサンブル実験を行うことによって、確率密度分布の裾野にあたる極端気象の再現と変化について十分な議論ができるデータベースとなっている。本論文では、d4PDF の過去実験および気候モデル MIROC5 による 4℃上昇実験による地上大気データにおける風速データ u 成分と v 成分それぞれを使用した。過去実験の 1961 年 1 月から 2010 年 12 月の過去 50 年分と、4℃上昇実験の 2051 年 1 月から 2100 年 12 月の将来 50 年分のデータを使用した。4 アンサンブルメンバーを使用することで、過去 200 年、将来 200 年分の比較を行っている。データの解析では、図-1 に示した Domain 1 および東日本海領域、富山湾周辺領域を対象としている。

(2) 現在気候と将来気候での風速の比較

気候変動が寄り回り波に与える影響を評価するために、4℃上昇実験の将来 200 年と過去実験の過去 200 年の風速を、東日本海領域、富山湾周辺領域で空間的に平均するとともに月平均の風速で比較する。図-8 に東日本海領域、図-9 に富山湾周辺領域の月ごとの平均風速を現在気候と将来気候で示す。図-8 より、東日本海領域における将来気候では、現在気候より平均風速が低くなっていることがわかる。図-9 より、富山湾周辺領域における将来気候は、7 月から 11 月にかけて現在気候より

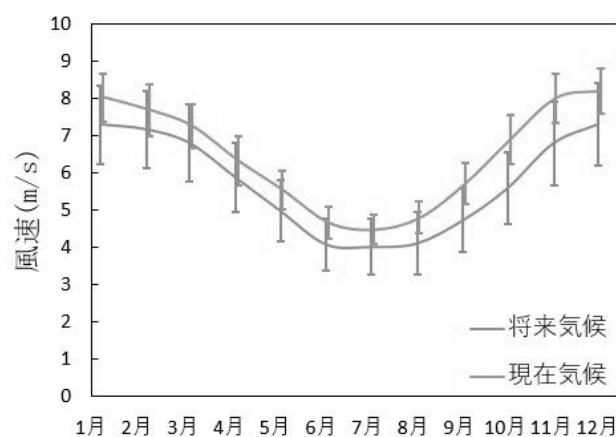


図-8 東日本海領域における月平均風速
(エラーバーは標準偏差を示す)

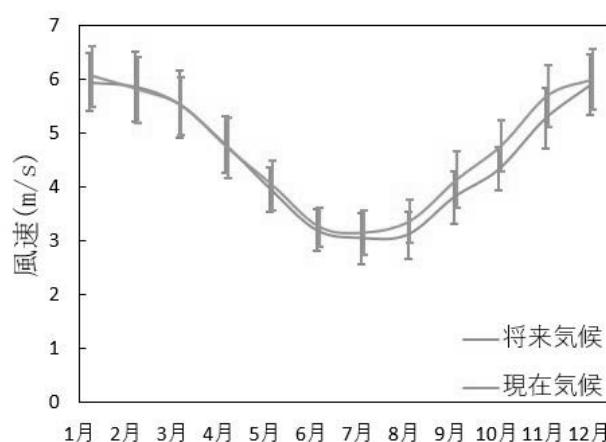


図-9 富山湾周辺領域における月平均風速
(エラーバーは標準偏差を示す)

も平均風速が低くなっていることがわかる。上記の違いは、 t 検定より 5%水準での有意差を示している。これらのことから、東日本海領域では 1 年を通じて、富山湾領域では 7 月から 11 月にかけて、風浪による波高の低下が生じる可能性が考えられる。

極値についても検討を行うため、Domain 1 において各格子の年間最大風速を基に、各格子における年最大風速の 50 年確率、100 年確率、300 年確率をカンプロットにより求めた。図-10 に現在・将来気候での、50 年確率、100 年確率および 300 年確率最大 1 時間風速の空間分布を示す。図-10 より、将来気候における 50 年確率の年最大風速は、富山湾周辺から日本海沿岸で現在気候に比べて小さくなっている。将来気候における 100 年確率の年最大風速は、東日本海領域全体で現在気候に比べ小さくなっており、300 年確率の最大風速は日本海沿岸および北海道の西側で現在気候よりも減少していることがわかる。

このように、東日本海領域では将来の風速の減少が予

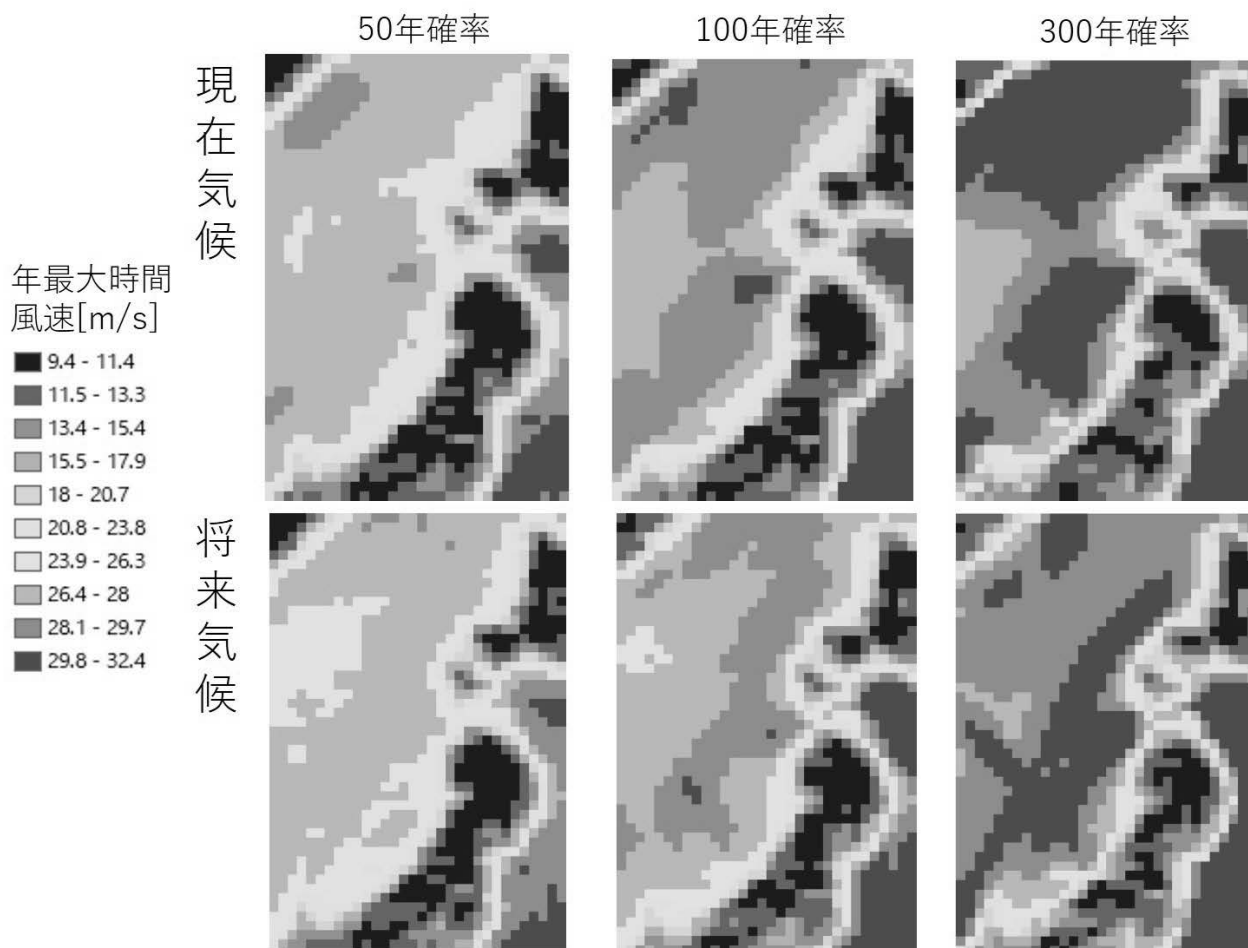


図-10 50年・100年・300年確率の年最大時間風速分布
(上段が現在気候、下段が将来気候、左から50年確率、100年確率、300年確率)

想される。この要因として、現在気候では台風が本州を通過するような軌道に対して、将来気候では台風が本州をかすめるような太平洋側を通過するような軌道に変化することなど、台風経路の変化が要因として考えられる。また、この台風の軌道の遷移により、日本海側において台風由来の高波や波浪の発生頻度・規模は低下すると考えられる。しかしながら寄り回り波は、うねり性波浪であり、風速のみではなく風向や強風の継続時間などが重要となってくる。よって、本論文の前半部で構築したモデルへの入力風速を、上記の風速場を用いることで、現在・将来気候での計算を行い、波高などで比較をすることが今後必要となる。

4. まとめ

本研究では、寄り回り波の事前予測を目的として、2008年2月および2013年4月に来襲したうねり性波浪を対象として波浪推算モデルであるSWANおよびMSMの風速予測値を用いて予測計算を行った。直江津、輪島

では精度よく予測できたが、富山では波高及び周期の傾向のみの予測となった。この原因として、富山湾における複雑な地形を地形データ30m格子で表現できていないことや、風データの空間解像度や予測精度の問題などが挙げられる。今後は、領域気象モデルを用いた風データのダウンスケーリングや更に高解像度の沿岸地形の導入などを通じ、寄り回り波の予測精度の向上を目指す。

また、気候変動が寄り回り波に与える影響を評価するため、d4PDFデータを使用して、現在気候と将来気候での風速の比較を行った。その結果、将来気候での東日本海領域での風速の平均および極値の減少が示唆された。よって、今後は、日本海沿岸で台風起源などの高波被害が減少する可能性がある。

しかしながら、本論文では、風向や強風継続時間などの、継続的な風速の評価を行っていない。うねり性波浪である寄り回り波においては、継続的な風速の時空間分布の評価が重要である。よって、現在気候、将来気候から継続的な強風の抽出を行い、SWANを用いた波浪計算を通じて評価を今後行う予定である。

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>
(2019年4月6日閲覧)
- 2) 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，pp.161-165, 2008.
- 3) 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.
- 4) 斉藤武久，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.
- 5) Mizuta, R., Murata, A., and Ishii, M. :Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, pp.1383-1398, 2017.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.