

## 氷海の家象予測と沿岸構造物の安全性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：山本泰司、山之内順、上久保勝美

### 【要旨】

オホーツク海の過去 30 年分の波浪を波浪推算モデル SWAN を用いて計算し、港湾構造物の設計で用いる 50 年確率波高の近年の変化について検討するとともに、将来的な気象変動を考慮した 50 年確率波高についても検討を行った。その結果、近年は海氷面積の減少が著しい海域が存在し、将来的にも著しく減少する可能性が高いことが確認できた。さらに、将来的には、北海道沿岸のほぼ全域において、最大風速および 50 年確率波高が大幅に増加することが明らかとなった。

キーワード：波浪推算、SWAN、オホーツク海、気候変動、MRI-AGCM3.2S

### 1. はじめに

地球温暖化の影響により、オホーツク海沿岸の海氷面積が近年減少傾向にある<sup>1)</sup>とともに、将来的にも著しく減少する可能性が高いことが気象庁<sup>2)</sup>により報告されているが、港湾構造物の設計で用いられている確率波高は、最新の波浪データを含めて算出していないことが多い。

これは、供用年数を 50 年などの長期に設定した確率波高を上回るような波浪事象は、頻繁に起こらないためである。しかし、菅原ら<sup>1)</sup>が長期的トレンドとして、オホーツク海の海氷の減少傾向および冬期波浪エネルギーの増加傾向を確認していることから、確率波高自体も変動している可能性がある。

また、将来的な気象変動を考慮した 50 年確率波高（以下  $H_{50}$ ）の変化を把握することは、今後の港湾施設の維持管理および防災体制を検討していく上で重要と考える。

このため、本研究では北海道周辺海域の過去 30 年分の波浪事象について、波浪推算モデル SWAN を用いて連続計算し、極値統計解析により近年の確率波高の変化について検討する。また、将来的な気象変動を考慮した  $H_{50}$  の変化については、革新プログラム（気象庁・気象研究所）による最新の超高解像度全球気候モデル（以下、MRI-AGCM3.2S）の温暖化予測実験結果（Mizuta ら<sup>3)</sup>）を波浪推算の外力条件として直接使い、将来気候における北海道沿岸における確率波高の変化を定量的に予測する。

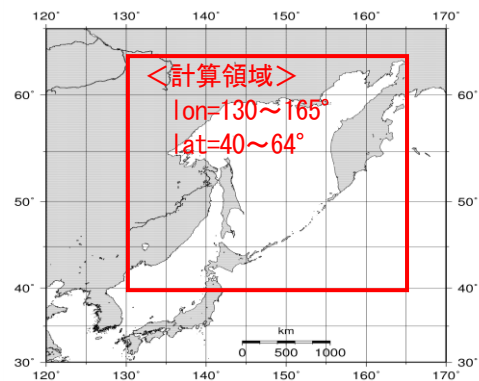


図-1 計算領域

### 2. オホーツク海における近年の確率波高の変化

#### 2. 1 検討方法

波浪推算の計算領域は図-1 に示すように、北緯 40°～64°、東経 130°～165° 範囲で実施した。波浪推算モデルはデルフト工科大学で開発された SWAN（Simulating Waves Nearshore、Cycle III Ver.40.81）を用いた。格子間隔は 0.15°、計算時間ステップは 10min とし、周波数分割数は 30 成分（0.04～1.0Hz）、方向スペクトル分割数は 36 成分とした。風による波の発達項については、Janssen<sup>4)</sup>を用いた。海上風データは NCEP（National Centers for Environmental Prediction）の Web 上で公開されている 10m 高度の風速再解析値 NCEP-Reanalysis2（空間解像度 1.875° × 1.905°）を用いた（以下、NCEP 風）。NCEP 風の時間解像度は 6hr 間隔となっている。

波浪推算期間については、1979 年 1 月 1 日～2008 年 12 月 31 日の長期間における連続計算を行った。海

氷存在時の波浪推算手法については菅原ら<sup>5)</sup>に従い、風速を海水密接度に応じて減少させる手法とした。

現地波浪データは、水深 50m 地点のナウファス紋別 (N44° 19' 04"、E143° 36' 25")<sup>6)</sup>を用いた。計算値の出力地点はナウファス紋別に最も近い計算格子点上の値を用いた。また、海水域の分布範囲は、気象庁<sup>7)</sup>が公開している 5 日毎の海水分布図を用い、海水画像データから RGB カラー情報を抽出し密接度を数値化したデータを用いた。なお、海水分布図には、海水の密集割合 (以下、海水密接度) が 4 区分 (1~3、4~6、7~8、9~10) に色別に表現されており、密接度 10 とは海面が完全に海水に覆われており、密接度 1 とは海面の 10%が海水に覆われていることを示している。

$H_{50}$ は SWAN による 30 年分の推算結果から合田<sup>8)</sup>の手法に従い統計処理を行った。極値資料としては極大値を対象とし、閾値は全データ数の 3~5%となるように格子毎に設定した。また、1979~1993 年の 15 年間 (以下、term15) と 1979~2008 年の 30 年間 (以下、term30) の期間毎に  $H_{50}$ を算出し、term15 と term30 の  $H_{50}$ を比較することで、近年の変化を検討することとした。

## 2. 2 近年の最大風速および海水面積の変化

図-2 に、term15 から term30 における最大風速の変化率を示す。図より、近年は千島列島南東部やカムチャッカ半島東部において風速が大幅に増加しており、北海道周辺では日本海沿岸北部およびオホーツク海沿岸での増加が特に顕著である。また、年間全体 (左図、Jan-Dec) より冬期間 (右図、Jan-Mar) の方が最大風速の増加が顕著である。 $H_{50}$ には極値統計解析上、最大風速の影響が多分に表れるため、オホーツク海沿岸および日本海沿岸北部では特に  $H_{50}$ が増大すると推測される。図-3a)に、term15 から term30 における近年の海水出現確率の変化を示す。オホーツク海では全体的に海水出現確率が低下しており、10%以上減少している領域もみられる。また、北海道のオホーツク海沿岸でも約 4%程度出現確率が減少している。

## 2. 3 近年の 50 年確率波高 $H_0$ の変化

図-3b)は、近年の  $H_{50}$ の変化として term30 と term15 の  $H_{50}$ の差を示している。 $H_{50}$ の増加区域は、図-2 の風速増加区域と概ね対応していることから、近年の確

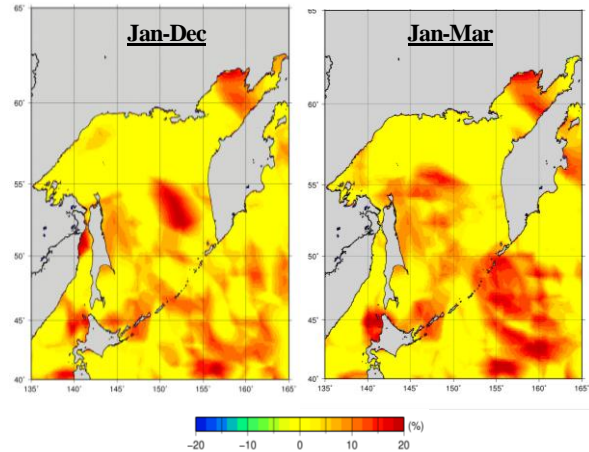


図-2 近年の最大風速の変化率

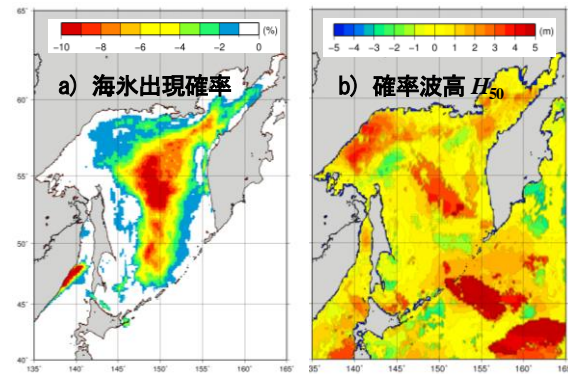


図-3 近年の海水出現確率および  $H_0$  の変化

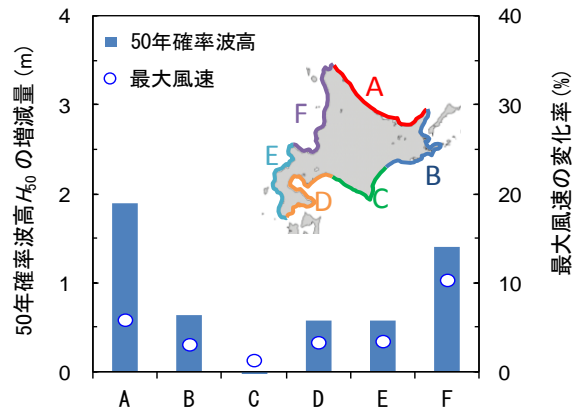


図-4 北海道沿岸の  $H_{50}$ および最大風速の将来変化

率波高の増加要因としては、最大風速の増加の影響が大きいことが確認できる。

図-4 に、北海道沿岸の地域別の  $H_{50}$ および最大風速の変化を示す。 $H_{50}$ の増減量は最大風速の変化に概ね対応しており、風速の増大が顕著なオホーツク海沿岸の A 区域および日本海側北部の F 区域において確率波高が 1~2m 程度増大している。なお、水口ら<sup>9)</sup>は、

オホーツク海に面する網走港を対象に、過去に算出した確率波高を WAM による波浪推算結果により検討している。その結果、最新の波浪データを含めると 2m 程度確率波高が増大することを確認している。このことから、設計上の確率波高が過去の波高データにより統計解析されている場合には、実体と異なることも想定される。今後、必要に応じて確率波高の妥当性について検討を行うことが望ましい。

## 2. 4 海氷の有無が 50 年確率波高 $H_{50}$ に与える影響

一般的に全球モデルを対象にした波浪推算を行う場合、海氷を考慮せずに波浪推算を実施しているように思われる。この場合、氷海域では  $H_{50}$  が過大に算出されるおそれがある。

図-5 に、海氷の有無が  $H_{50}$  に与える影響として、前述 2.3 の図-3b) で示した海氷密接度に応じて風速を低減させた場合と、海氷を考慮しない場合の差を示す。カムチャッカ半島北部およびアムール川からサハリンの海氷密接度が高い地域において、波高差が 4m 以上となっている。このことは、海氷を考慮せずに波浪推算を実施すると、確率波高を 4m 以上も過大評価する領域が存在することを示している。また、北海道東部沿岸および根室半島南部でも 1~2m の波高差がみられることから、北海道沿岸部の設計波を算出する際には、従来どおり海氷を考慮すべきである。

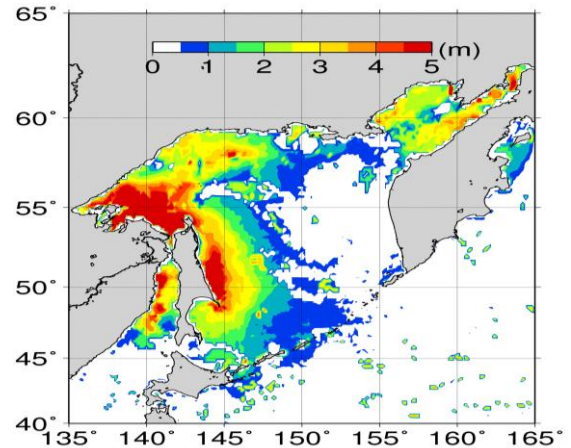


図-5 海氷の有無が  $H_{50}$  に与える影響

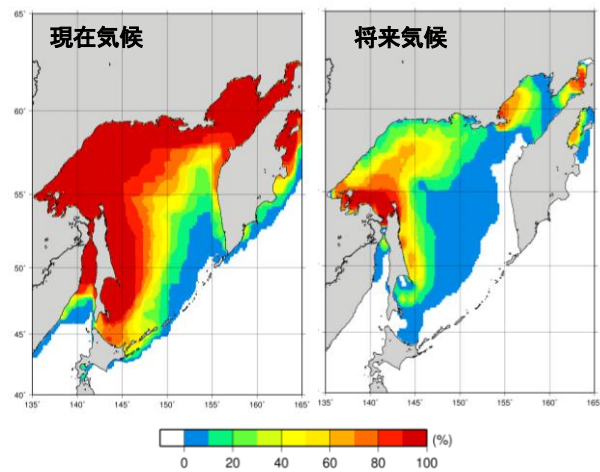


図-6 将来気候の海氷出現確率

## 3. 将来気候におけるオホーツク海の波高変化

### 3. 1 検討方法

次に、MRI-AGCM3.2S を用いて、将来気候における  $H_{50}$  を算出する。対象期間は温暖化予測実験結果の内、1979~2003 年（現在気候）、2015~2039 年（近未来気候）および 2075~2099 年（将来気候）の 3 期間とした。また、波浪推算で用いる外力は、MRI-AGCM3.2S の出力値である地上 10m の海上風速  $U_{10}$ （空間解像度は約 20km、時間解像度 3 時間間隔）とし、海氷期については MRI-AGCM3.2S の境界条件として用いられている月別の海氷分布<sup>10)</sup>から菅原ら<sup>11)</sup>に従い海氷密接度に応じて風速を低減させた。

波浪推算の計算領域は図-1 の第 1 領域を対象とした。推算期間は、現在・近未来・将来気候の各期間毎 25 年分の計算を行い、延べ 75 年分の計算を実施した。その他の波浪推算方法は、前述 2.1 と同様である。

### 3. 2 海氷面積および風速の将来変化

図-6 に、水田ら<sup>10)</sup>の月別海氷分布をもとに算出した現在気候および将来気候における海氷出現確率を示す。将来気候の海氷出現確率は、現在気候において出現確率が比較的小さく、海氷周縁部に相当する領域での減少率大きい。北海道東部から約 200km の範囲では、海氷の出現確率が近未来気候で約 30%、将来気候で約 70%減少している。今後、北海道沿岸での海氷による波浪抑制効果が低減し、冬期波浪は一層増大するものと考えられる。一方、将来気候においても依然として広範囲で海氷は存在するため、波浪推算上、前述 2.4 で示したとおり確率波高を算出する際には海氷の影響を考慮する必要がある。

図-7 に、MRI-AGCM3.2S の  $U_{10}$  をもとに算出した近未来気候および将来気候における現在気候に対する最大風速の変化率を示す。近未来および将来気候ともに、サハリン北部や日本海側での風速の増加傾向がみられ



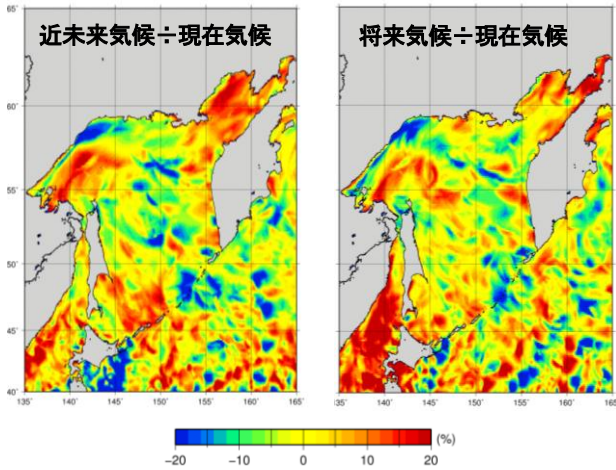


図-7 将来の最大風速の変化率

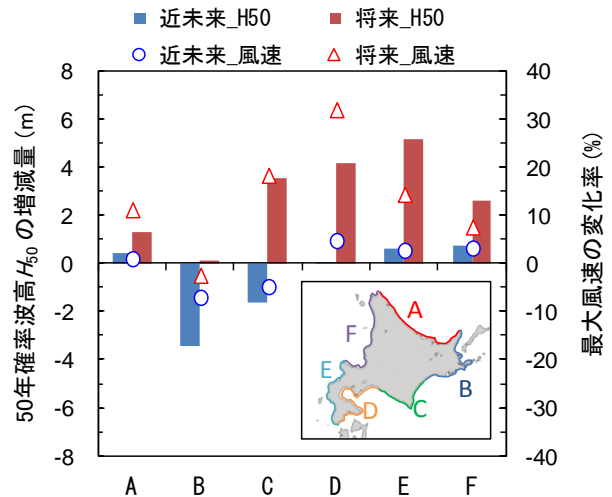


図-9 北海道沿岸の  $H_{50}$  および最大風速の将来変化

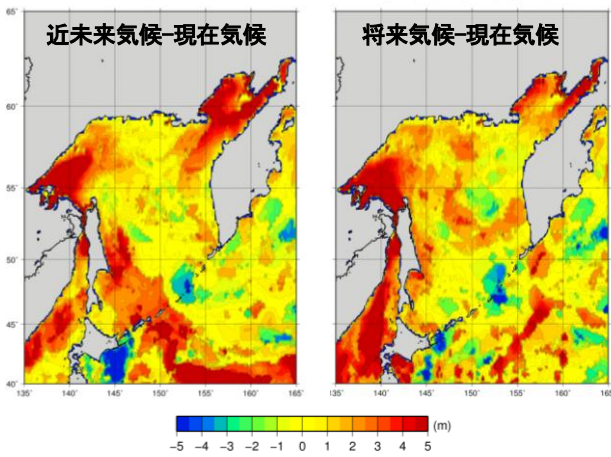


図-8 将来の50年確率波高  $H_{50}$  の変化

る。また、近未来気候では北海道沿岸の風速増加は顕著でないが、将来気候においては北海道全域で風速が増加しており、太平洋沿岸西部で約 30%、日本海沿岸南部で約 15%、オホーツク海沿岸で約 10% 風速が増加している。

### 3.3 50年確率波高 $H_{50}$ の将来変化

図-8 に、近未来および将来気候における  $H_{50}$  の現在気候との差を示す。近未来気候では千島列島付近や日本海北西部における  $H_{50}$  の増加が顕著である。これに対して、将来気候では北海道の日本海側から太平洋沿岸にかけて  $H_{50}$  が増加しているが、これは図-7 の最大風速の変化率の分布に概ね対応している。

図-9 に、北海道沿岸の地域別の  $H_{50}$  のおよび最大風速の変化を示す。 $H_{50}$  の増減量は最大風速の変化率に概ね対応している。近未来気候では、最大風速の変化が少なく、確率波高の増加量も全地域で 1m 未満とな

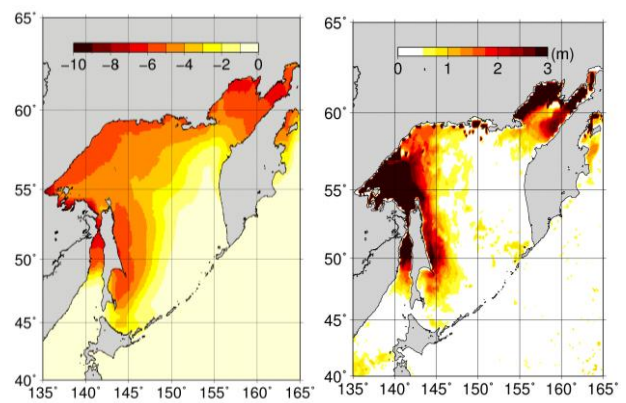


図-10 将来気候における海氷減少が  $H_{50}$  に与える影響

っている。一方、将来気候においては B 区域以外の地域で  $H_{50}$  が大幅に増加しており、特に日本海側の E 区域および F 区域では  $H_{50}$  が約 4~5m 増加している。このことから、将来気候については日本海側から太平洋にかけて  $H_{50}$  の増加が顕著となるが、近未来気候では図-4 の近年の変化を含めると、オホーツク海沿岸や日本海沿岸北部で波浪による沿岸施設への影響が増大すると考えられる。

### 3.4 冬期波浪が確率波高に与える影響

図-10(a) に、現在気候に対する将来気候での海氷密度の変化を、図-10(b) に、将来の海氷減少が  $H_{50}$  に与える影響として、海氷分布が現在気候の場合と将来気候の場合の  $H_{50}$  の差を示す。なお、海氷分布が現在気候のパターンでは、例えば 2075 年 1 月では 1979 年 1 月、2099 年 3 月では 2003 年 3 月の海氷分布というように、現在気候 25 年間と同じ海氷分布および出現

順序としている。

将来気候の家氷密接度は全体的に減少し、図-5 と同様に、現在気候の密接度が高い地域での波高差が特に大きく、北海道東部でも 1m 程度の波高差がみられる。このことから、将来気候における  $H_{50}$  の変化は全体的には風速の影響が大きい、家氷密接度の大きいサハリン周辺から北海道にかけては、家氷減少の影響が大きいことが確認された。

#### 4. まとめ

本年度得られた主要な研究成果を以下に示す。

- 1) 家氷を考慮せずに確率波高を算出すると、確率波高を過大評価することになり、その範囲はオホーツク海だけでなく北海道東部沿岸から根室半島南部にまでおよぶことが確認された。
- 2) 近年では、風速の増大区域に対応する、北海道のオホーツク海沿岸および日本海沿岸北部において確率波高が約 2m 増加していることから、設計波が過去の波高データにより統計解析されている場合には、実体と異なることも想定されるため、今後、必要に応じて確率波高の妥当性について検討を行うことが望ましい。
- 3) MRI-AGCM3.2S の温暖化予測実験結果を用いて、将来気候におけるオホーツク海の波高変化を検討した結果、将来気候においては家氷の出現確率が大幅に減少し、風速の増大区域に対応する北海道の日本海側では 4m 以上も確率波高が増大することが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 菅原吉浩、大塚淳一、山本泰司、山下俊彦：「オホーツク海の家氷減少が波浪に与える影響」、海洋開発論文集、第 27 巻、2011.
- 2) 地球温暖化予測情報：気象庁、第 7 巻、59p. 2008.
- 3) Mizuta, R. et al. (2012) : "Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid", J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 90A, pp. 233-258, 2012.
- 4) Janssen, P.A.E.M.: "Wave induced stress and the drag of air flow over sea waves", Jour. Phys.Oceanography, Vol.19, pp.745-754, 1989.
- 5) 菅原吉浩、上久保勝美、山本泰司：「家氷存在海域における波浪推算手法および予報精度の検討」、北海道開発技術研究発表会論文集、第 55 回、2012.
- 6) 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網ホームページ <http://nowphas.mlit.go.jp/>
- 7) 気象庁ホームページ <http://www.data.kishou.go.jp>
- 8) 合田良實：耐波工学、鹿島出版会、pp. 327-379.、2008.
- 9) 水口陽介、林誉命：「網走港における設計沖波の検討について」、北海道開発技術研究発表会論文集、第 52 回、2009.
- 10) 水田亮、足立恭将、行本誠史、楠昌司：「CMIP3 マルチモデルアンサンブル平均を利用した将来の海面水温・家氷分布の推定」、気象研究所技術報告、第 56 号、pp. 1-28、2008.
- 11) 菅原吉浩、山之内順、山本泰司：「家氷減少を考慮したオホーツク海における波浪の将来変化」、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、vol.68、No.2、pp. I\_1221-I\_1225、2012.

## WAVE FORECASTING AND SAFETY EVALUATION OF COASTAL STRUCTURES IN ICE-INFESTED SEA AREA

Budgeted: Grants for operating expenses  
General account

Research Period: FY2012-2014

Research Team: Cold-Region Hydraulic and Aquatic  
Environment Engineering Research  
Group (Port and Coast)

Author: YAMAMOTO Yasuji , YAMANOUCHI Jun,  
KAMIKUBO Katsumi

**Abstract:** This study calculated the surge for the past 30 years of the Sea of Okhotsk using surge estimation model “SWAN” and examined a recent change of the 50-year stochastic wave height to use by the design of the harbor structure and examined the 50-year stochastic wave height in consideration of a future weather change. Consequently, the ice-infested sea area decreased and confirmed that it was more likely to decrease in the future. Moreover, the maximum wind speed increased in the large range of the Sea of Japan from the Sea of Okhotsk, and the increase of 50-year stochastic wave height was proved in the whole area of the Hokkaido coast.

**Key words:** wave hindcasting method, SWAN, Sea of Okhotsk, climate change, MRI-AGCM3.2S