

氷海の海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：寒冷沿岸域チーム、寒地技術推進室

研究担当者：菅原吉浩、上久保勝美、山之内順、大井啓司

【要旨】

氷海域における波浪推算手法として、海氷密接度に応じて風速を減少させる新たな手法の再現性について、波浪推算モデル SWAN を用いて検討した。その結果、従来実施されていた氷水域を陸域として扱う手法に比べ、新手法では再現性が大幅に向上することが明らかとなった。また、将来気候における設計波を検討した結果、オホーツク海から日本海の広い範囲で最大風速は増加しており、北海道沿岸のほぼ全域において設計波が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

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氷水面積が近年減少傾向にある¹⁾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²⁾により報告されている。このため、北海道のオホーツク海沿岸に将来来襲する高波浪を推定し、被害軽減対策を早急に検討していく必要が生じている。この場合、氷海域における波浪推算手法が構築されている事が前提となるが、十分な検討がなされていない。

このため、本研究では氷海域における波浪推算手法について、波浪推算モデル SWAN を用いて検討する。

2. 氷海域における波浪推算

2.1 検討方法

波浪推算の計算領域は図-1 に示すように、第1領域と第2領域の2段階ネスティングで実施した。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、CycleIII Ver.40.81) を用いた。格子間隔は第1領域が 0.1° 、第2領域が、 0.0333° 、時間ステップは第1領域が 10min、第2領域が 5min とし、周波数分割数は 30 成分($0.04\sim 1.0\text{Hz}$)、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、Janssen³⁾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 $1.875^\circ \times 1.905^\circ$ 、時間解像度 6hr) を用いた (以下、NCEP 風と呼ぶ)。

再現計算は、12月～3月の海氷来襲時期 (以下、海

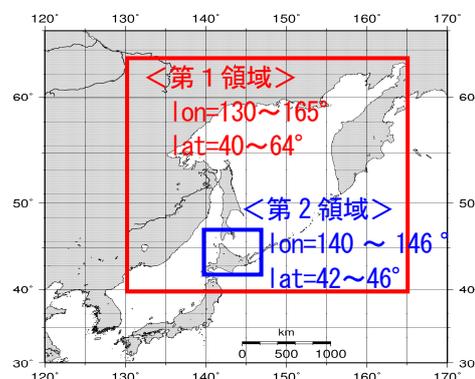


図-1 計算領域

氷期) と 4月～11月 (以下、通常期) に分けて検討した。対象とする波浪事象は、1979～2008年の30年間の内、氷期と通常期のそれぞれにおいて、各年の最大有義波高が観測された上位 10 ケースを対象とした。ただし、氷期については、氷水存在海域での波浪推算の再現性を検討する目的から、サハリンの南端 (北緯約 46°) より南側に氷水が存在しないケースは対象外とした。

推算値と比較する現地波浪データは、水深 50m 地点のナウファス紋別 ($N44^\circ 19' 04''$ 、 $E143^\circ 36' 25''$)⁴⁾を用いた。1 ケース当たりの波浪推算期間は、最大有義波観測日の前後 10日間 (計 20日) とした。また、氷水の分布範囲は、気象庁⁵⁾が公開している 5日毎の氷水分布図を用い、氷水画像データから 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。

氷期の波浪推算を行うためには、氷水存在時の周波数スペクトル形状が明らかとなっている必要がある。笹島ら⁶⁾は、氷水存在時の風波の周波数スペクト

ル形状を提案しているが、有義波諸元が既知である時の式形となっており風から波を推算することが出来ない。このため本検討では、表-1 に示す手法により検討した。

1つめは(手法 1-1~1-4)、海水域を陸域として扱う手法である。この内、手法 1-1 と 1-3 については、水口ら⁷⁾が推算精度を比較しており、海水密接度 4 以上を陸域として扱うと実測波高に近くなることを確認している。また、菅原ら¹⁾も、手法 1-1 の再現性を検討しているが、海水を陸域として扱うことにより通常期に比べて波浪が抑制されるなど課題が残っていた。

2つめ(手法 2)は、日々の海水の移動を考慮するため、海水密接度に応じて風速を低減する方法である。この手法の詳細は 2.2 で述べる。3つめ(手法 3)は、手法 1 と手法 2 を組合わせたものである。

4つめ(手法 4)は、SWAN の HOTFILE コマンドにより、陸域とみなした海水の日々の移動を考慮する手法である。気象庁で公開されている海水分布が 5 日毎であるため、本検討では 5 日毎に海水を移動させて計算している。

2.2 風速低減による氷海域の波浪推算(手法 2)

2.2.1 氷海域の目標波高

海水域における波浪推算を行うためには、海水域での波浪の発達および減衰機構が明らかになっている必要がある。海水域での波浪減衰に関する既往の研究事例としては、Wadhams ら⁸⁾がニューファンドランド沖での観測結果を踏まえ、氷板下の波高減衰率 A が周期および氷板厚の影響を受けることを確認している。また、堺ら⁹⁾は水理模型実験により、氷板下の波高伝達率は波浪の伝播距離と共に指数関数的に減少すること、および密接度 10 相当の氷板厚さ別の減衰率 A を示している。なお、海水下の波高伝達率は、下記の式で表されている。

$$K_t = \exp(-Ax) \quad (1)$$

$$A = B \cdot f^n$$

ここに、 K_t : 氷板下の波高の伝達率、 A : 減衰パラメーター、 x : 氷板下の伝播距離(m)、 B 、 n : 氷厚別のパラメーター、 f : 波の周波数(Hz)

次に、海水域での波の発達については海水部分の風速は波の発達に寄与しないものとし、海水部分での風速をゼロと見なすことで、海水域全体の波の発達を考慮した。

表-1 流氷存在海域の波浪手法の一覧

	陸域とする密接度の境界	推算期間中の流氷分布	風速の調整
手法 1-1	4 以上	推算開始時で固定	無し
手法 1-2	4 以上	波高ピーク時で固定	無し
手法 1-3	7 以上	推算開始時で固定	無し
手法 1-4	7 以上	波高ピーク時で固定	無し
手法 2	流氷無し	無し	有り
手法 3	7 以上	推算開始時で固定	有り
手法 4-1	4 以上	5 日毎に変動	無し
手法 4-2	7 以上	5 日毎に変動	無し

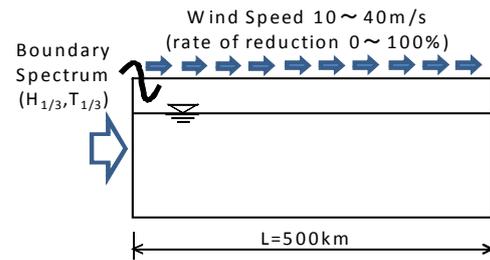


図-2 SWAN 1次元水路イメージ

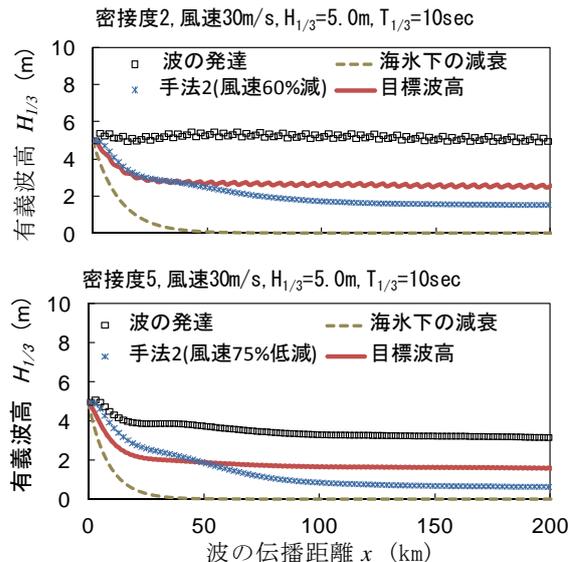


図-3 手法 2 による海水域波高の再現例

以上より、減衰および発達の両者を合成した波高を、計算で合わせ込む海水域波高(以下、目標波高)とした。

2.2.2 手法 2 の 1 次元数値水路での再現性

SWAN における波の発達項は線形増大項と指数関数項の 2 種類あるが、本検討では Janssen の指数関数項のみを考慮している。すなわち、風速を小さくすることで、指数関数的に減衰する海水域波高を擬似的に再現できるはずである。このことについて、SWAN による 1 次元水路で検討を行った(図-2)。水路長

500km、水深を底面摩擦等の影響を受けないよう500mとし、風速を10、20、30、40m/sの4ケース、境界での有義波高を2、5、8mの3ケース、周期を8、10、12secの3ケースとし、風速を0から100%の間で5%刻みで変化させ、海水域波高に最も近づく風速の低減率を検討した。減衰パラメーターAは、堺らの実験縮尺を1/100とした場合に、現地スケールで100cmの氷厚に相当するものを用いた。また、水野ら¹⁰⁾の実験結果から、密接度5のAは密接度10のAの1/4とした。密接度2のAについては、密接度5と10のAから線形外挿により求めた。波の発達については、10km長(第1領域の格子間隔0.1°に対応)の海水が密接度に応じて水路内に等間隔に配置されているものとし、海水部分の風速をゼロとみなして別途計算した。

図-3に密接度2および密接度5での検討例を示す。密接度2の場合、風速を60%減少させることで、伝搬距離x=0~50km迄は目標波高を再現している。なお、x=50km以降では、目標値以上に波が減衰している。これは、海水下の減衰波高がx=50km付近でゼロとなっており、50km以降の目標波高が減衰していないためである。実際には、x=50km以降についても、手法2のように減衰していくものと思われる。この点については、波の発達と減衰の両者が共存した状態での波高伝達率を明らかにする必要があり、今後の課題である。

また、密接度5の場合、x=0~50kmの範囲内において目標波高を若干上回っているが、風速を75%減少させることで概ね目標波高を再現できている。

なお、波の発達が波打っているのは、海水と海水面が交互に現れるためであり、発達と減衰を合成した目標波高もその影響を受けている。

表-2は、最確値を目標波高とした場合の誤差の二乗平均平方根(RMSE)の一覧である。全ケースの検討結果より、密接度2では風速の低減率を60%、密接度5では風速の低減率を75%とした場合の誤差が最も小さくなり、表中の値もその場合のRMSEを示している。

全般的に、RMSEは1m以内に収まっており再現性が高い。海水域へ進入する波高が8.0mの場合には誤差が1mを超えるケースもみられるが、伝搬距離が長く(=200km)なると誤差が減少し、概ね1m以下の誤差に収まっている。このことから、冬期の北海道のオホーツク海沿岸部は、通常200km以上の広い範囲で海水が接岸しているため、実務上は問題ないと思われる。

なお、気象庁の海水分布図は海水密接度1~3、4~

表-2 目標値からの二乗平均平方根誤差 (RMSE)

風速 (m/s)	H(m)	密接度 2		密接度 2		密接度 5		密接度 5					
		伝播距離=50km		伝播距離=200km		伝播距離=50km		伝播距離=200km					
		T(sec)		T(sec)		T(sec)		T(sec)					
		8	10	12	8	10	12	8	10	12			
40	2.0	0.19	0.22	0.21	0.41	0.56	0.53	0.32	0.22	0.2	0.76	0.7	0.65
		0.15	0.09	0.12	0.55	0.52	0.46	0.19	0.11	0.1	0.62	0.53	0.51
		0.12	0.07	0.10	0.40	0.37	0.35	0.22	0.17	0.1	0.34	0.33	0.32
30	5.0	0.30	0.21	0.10	0.13	0.14	0.14	0.39	0.35	0.27	0.11	0.12	0.11
		0.39	0.20	0.12	0.41	0.58	0.58	0.37	0.32	0.2	0.78	0.76	0.68
		0.38	0.26	0.09	0.53	0.56	0.47	0.58	0.52	0.41	0.62	0.55	0.52
20	8.0	0.56	0.47	0.21	0.41	0.36	0.33	0.83	0.79	0.67	0.3	0.33	0.33
		0.90	0.79	0.53	0.21	0.22	0.2	1.02	0.96	0.82	0.23	0.25	0.25
		0.69	0.47	0.17	0.42	0.59	0.59	0.86	0.73	0.64	0.74	0.75	0.66
40	2.0	0.79	0.55	0.31	0.5	0.53	0.49	1.08	1.03	0.92	0.53	0.54	0.52
		1.02	0.90	0.62	0.4	0.38	0.35	1.26	1.31	1.18	0.3	0.39	0.4
		1.24	1.22	0.89	0.3	0.36	0.34	1.44	1.46	1.31	0.33	0.4	0.41

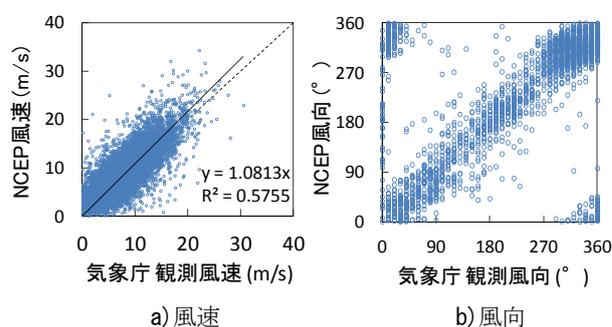


図-4 再解析値と観測値の相関

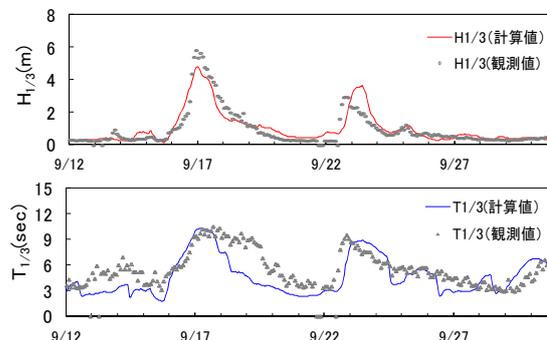


図-5 通常期の波浪推算結果の一例 (1998年)

6、7~8、9~10の4段階で分類されている。このため以下の検討では、密接度1~3においてはその中央値である密接度2で代表させ、密接度4~6においては密接度5で代表させ、風速の低減率をそれぞれ60%および75%とした。なお、密接度7~10については風速をゼロとし、この部分を陸域として扱った手法3と比較を行った。

2.3 氷海域の波浪推算の再現性

2.3.1 風速再解析値の精度

波浪推算には、その外力である風速の影響が多分に影響するため、波浪推算で使用するNCEP風の精度を

検証した。観測風速は、オホーツク海に最も近い気象庁の海上ブイ（No.21001、N36.7° から 39.5°、E145.5° から 145.7°）を用いた。対象期間は気象庁の観測データが存在する 1980 年~1991 年とした。なお、気象庁の海上ブイは 7.5m 高度の観測風速であるため 10m 高度に変換した。また、NCEP 風は、気象庁の海上ブイの周囲 4 点の値で線形内挿した。

図-4a)に風速の相関を示す。NCEP 風は観測値に比べ若干大きくバイアスはあるが、観測値とほぼ同程度である。図-4b)に、観測風速 10m 以上を対象とした風向きの相関を示す。NCEP の風向きは観測値と同程度であることが確認できる。

2.3.2 通常期の再現性

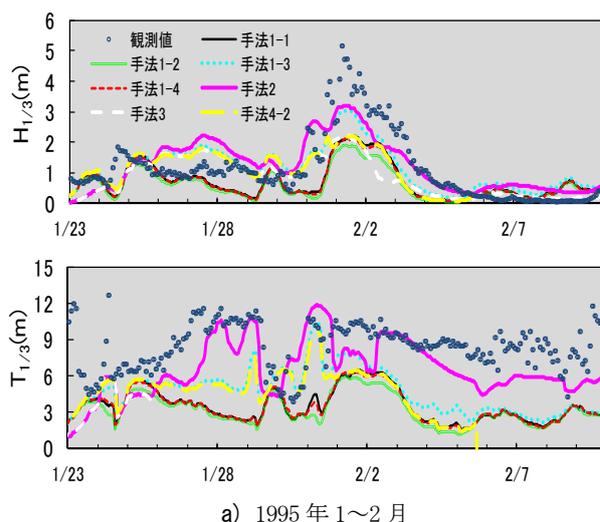
図-5 は、通常期の計算結果の一例で、有義波高および有義波周期の時系列を示す。9 月 17 日と 9 月 23 日に観測波高のピークがあり、計算波高は観測波高に比べ若干小さいが、経時的な変化が概ね再現されている。また、有義波周期についても、経時的な変化が概ね再現されている。後述する図-7 に、通常期の全 10 ケースについての推算波高と観測波高の相関を示す。

全般的には推算波高は観測波高に比べて過小傾向であるが、相関係数は 0.81 と良好な相関が確認された。

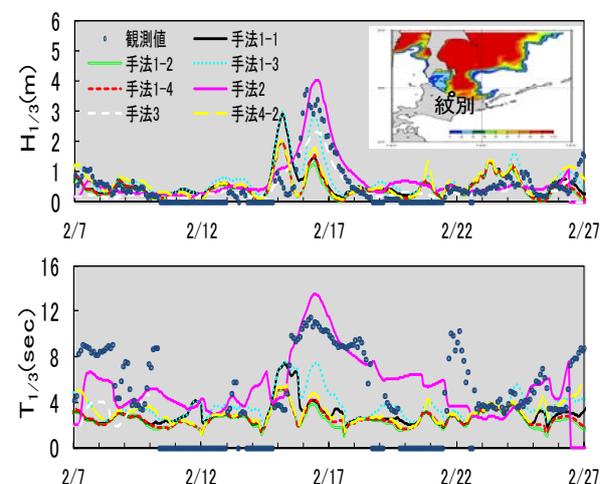
2.3.3 海氷期の再現性

図-6 は、海氷期の観測波高と手法 1 から手法 4 の推算波高を比較した一例である。図-6a)の期間については、最初沖合にあった海氷が波高ピーク時に北海道東部沿岸に近づく状況であった。このため、手法 1-2 や手法 1-4 では波高ピーク時の海水分布で固定しているため、波高と周期が小さくなっている。また、手法 1-1 に比べ手法 1-3 の方が観測値に近く、水口ら⁷⁾の結果とは異なり密接度 7 以上を陸域とした方が密接度 4 以上を陸域とした場合よりも再現性が良い。この理由は、水口らの検討は海氷が少ない高波浪事象を主に対象としており、本検討で抽出した海氷が北海道沿岸部に接近する事象とは異なるためと考えられる。

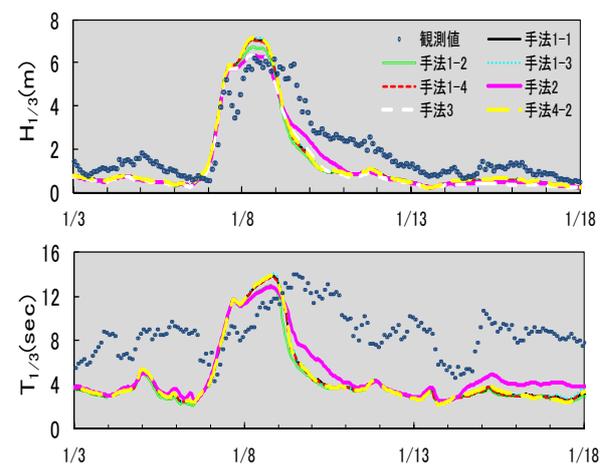
次に、手法 2 については、波高だけで無く周期の再現性も良く、全手法の中で最も再現性が良い。手法 3 については、密接度 7 以上を陸地とみなした影響により波高が過小傾向である。海氷（陸域）の移動を考慮した手法 4-2 は、波高ピーク時の海氷接岸による波浪減衰を過大に評価するため、観測値に比べて波高が小さい。



a) 1995 年 1~2 月



b) 2007 年 2 月



c) 2007 年 1 月

図-6 海氷期の推算結果の一例

図-6b)に、別な期間の推算結果を示す。手法 1-2 や手法 1-4 については、図-6a)と同様に他の手法に比べて波高および周期が小さくなっている。また、手法 2 と手法 3 の風速を調整した以外の手法については、観

測値とは異なり波高のピークが2つ存在し、経時的な傾向を再現出来ていない。この理由としては、図の右上に2月10日～14日の海氷分布を示しているように、密接度3以下の海氷が道北に多く接岸しているが、手法2および手法3以外ではこの部分を海面とみなしており、波浪が過剰に発達したためと考えられる。一方、手法2については図-6a)と同様に再現性が最も高い。

図-6c)には、海氷が比較的少ない場合の推算結果を示す。各手法に明確な差が無いが、従来の海氷面積を陸域とする手法では推算波高は観測波高に比べて1m程度大きくなっている。この理由は、従来手法では密接度3以下の氷海域を海面とみなしているためと考えられる。一方、密接度3以下の風速を低減させている手法2および手法3では観測波高のピーク値を概ね再現している。

図-7に、各手法の推算波高と観測波高の相関を示す。なお、手法0とは海氷が全く無いものとして計算した結果である。各手法とも再現性が良く、良好な相関を示している。ただし、手法0では近似直線の傾きが0.96と一見すると最も再現性がよくなっているが、通常期の近似直線の傾きが0.85であることを勘案すると、推算結果がやや過大傾向と考えられる。

表-3に、各手法の有義波高の相関係数および誤差を示す。なお、極値波高を求める観点から、5m以上と5m未満の波高で分けて整理した。表中のrmseとは、森ら¹¹⁾と同様にQuantile値(任意データの順位を全体のデータ数に対する割合で示す)における観測値からの誤差を基準化したもので、Quantile値が6～95%値のrmseをrmse₉₅、96～100%値のrmseをrmse₁₀₀としている。全波高を対象とした相関係数では手法2と手法0が再現性が高くなる。また、5m以上の相関では手法0が手法2よりも高いが、極値付近の波高を対象とするのであれば、順序統計量としてのrmse₁₀₀で判断すべきであり、この観点より手法2が確率波高を算出する上で最適な手法であるといえる。

2.3.4 氷海域のスペクトル形状の再現性

笹島ら⁶⁾は、高周波成分側のエネルギーが減衰し、ピーク周波数付近が鋭く尖る氷海域の風波の周波数スペクトル形状を提案している。図-8は、氷海域での観測スペクトル形状とSWANによる計算結果を比較したものである。同図中には笹島らの提案スペク

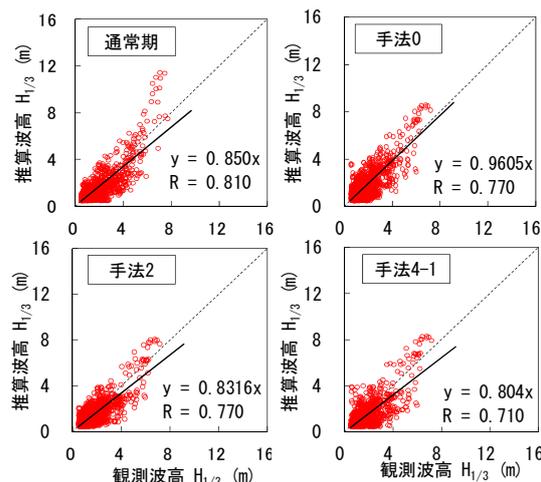
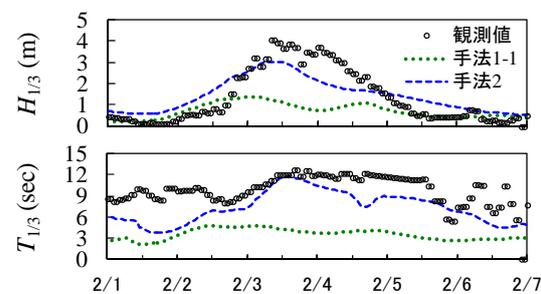


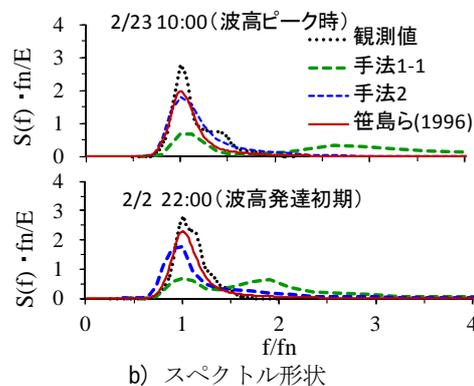
図-7 各手法における観測および推算波高の相関

表-3 各手法の有義波高の相関および誤差

		通常期	手法1-1	手法1-2	手法1-3	手法1-4
近似直線傾き	5m未満	0.74	0.74	0.66	0.80	0.71
近似直線傾き	5m以上	1.28	1.21	1.19	1.23	1.21
近似直線傾き	全波高	0.85	0.83	0.77	0.88	0.80
相関係数R	5m未満	0.71	0.51	0.47	0.54	0.44
相関係数R	5m以上	0.80	0.66	0.61	0.68	0.65
相関係数R	全波高	0.81	0.74	0.74	0.76	0.73
基準化RMS誤差	rmse ₉₅	18.85	19.32	27.43	12.91	21.89
基準化RMS誤差	rmse ₁₀₀	24.70	14.72	13.80	14.65	14.94
		手法2	手法3	手法4-1	手法4-2	手法0
近似直線傾き	5m未満	0.77	0.68	0.71	0.76	0.90
近似直線傾き	5m以上	1.13	1.15	1.20	1.22	1.24
近似直線傾き	全波高	0.83	0.77	0.80	0.84	0.96
相関係数R	5m未満	0.57	0.54	0.43	0.33	0.59
相関係数R	5m以上	0.66	0.51	0.63	0.67	0.72
相関係数R	全波高	0.77	0.75	0.71	0.69	0.77
基準化RMS誤差	rmse ₉₅ (%)	16.01	26.10	24.34	15.89	6.27
基準化RMS誤差	rmse ₁₀₀ (%)	12.94	15.10	13.16	14.50	14.02



a) 波高および周期の時系



b) スペクトル形状

図-8 氷海域でのスペクトル形状 (1994年2月)

トルも示している。まず、従来手法（手法 1-1）では、観測値とは異なりスペクトルピークが 2 山現れており、高周波成分側にも多くのエネルギーが存在している。また、周期についても観測値に比べて相当小さい。一方、手法 2 では従来手法のように高周波成分は存在せず、ピーク周波数付近にエネルギーが集中し観測値に近づいている。前述の図-6 で示したように、手法 2 では波高だけでなく周期の再現性も高くなっていたが、この理由として、風速低減領域での波速の分散性により、沿岸部には高周波成分が除去された周期の長い波が来襲したためと考えられる。このように、手法 2 を用いることにより、従来手法に比べて氷海域におけるスペクトル形状の再現性が向上することが確認された。

3. まとめ

氷海域における波浪推算手法として、海氷密接度に応じて風速を減少させる手法は、従来実施されていた氷海域を陸域として扱う手法に比べて、再現性が大幅に向上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: 「オホーツク海の流水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) 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.
- 4) 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/>
- 5) 気象庁ホームページ <http://www.data.kishou.go.jp/>
- 6) 笹島隆彦, 早川哲也, 吉野真史, 後藤智明: 「海氷存在時における風波の周波数スペクトル特性」, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 431-435, 1996.
- 7) 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.
- 8) Wadhams,P: "Airbone laser profiling of swell in an open ice field", *J.G.R.*, Vol.80, No.33, pp.4520-4528, 1975.
- 9) 塚茂樹, 笹本誠, 片山潤之介, 劉曉東, 平山健一, 泉山耕, 金田成雄: 「氷板による不規則波の変形に関する実験」, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 426-430, 1996.
- 10) 水野雄三, 谷野賢二, 平沢充成, 高橋哲美, 長内戦治: 「海氷による波浪の減衰に関する一考察」, 海洋開発論文集, 第 7 巻, pp. 7-11, 1991.
- 11) 森信人, 志村智也, 安田誠宏, 間瀬肇: 「地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測」, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp. 1231-1235, 2010.

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: Port and Coast Research Team,
Cold Region Technology Promotion Division

Author: SUGAWARA Yoshihiro, KAMIKUBO Katsumi,
YAMANOUCHI Jun, OOI Keiji

Abstract: This study examined the wave forecasting method in the ice-infested sea area and change of the waves by the climate change in the future. Compared with the previous forecasting method which assumes that ice-infested waters were land, it turned out by the newly-proposed method that the wind speed assumed to be decreased according to the ice concentration rate. Consequently, the reproducibility of the significant wave height and the significant wave period has been improved.

Key words: Wave forecasting method, SWAN, Sea of Okhotsk, Climate change