

氷海域における波浪推算と沿岸域の波遡上特性について

Study on Wave Hindcasting and Wave Runup Characteristics in Ice-infested Sea Area

関口浩二¹, 松藤絵理子², 上久保勝美¹
Kouji.SEKIGUCHI¹, Eriko.MATSUFUJI², Katsumi.KAMIKUBO¹

¹ (独) 土木研究所寒地土木研究所

¹Civil Engineering Research Institute for Cold Region

² (一財) 日本気象協会

²Japan Weather Association

1. はじめに

気象庁の報告によると、地球温暖化の影響によりオホーツク海の流氷勢力が著しく変動する可能性が指摘されており、氷海域沿岸においては、海面上昇や流氷減少に起因する波浪増大への備えが求められている。近年の氷海域沿岸では、冬期間に波浪増大に伴う高波・越波や海岸侵食等の現象が発生しているため、重要な交通アクセスが通行止めまたは被災した場合、背後圏の物流や地域住民の生活等に多大なる影響を及ぼすことが懸念されている。

したがって、防災面や交通利用面などの観点から、このような地域の沿岸道路に対しては、越波対策を早期に講じる必要がある。写真-1は、オホーツク海に面した北海道沿岸域北部において、海浜に隣接する沿岸道路に波が遡上した場合の痕跡を示すものである。

一般に海岸における波の越波現象は、直立護岸や緩傾斜護岸の場合は数多く研究されている。しかしながら、緩勾配海浜の場合は水理特性が詳細に解明されていないため、独自の対応が必要とされる。このため、冬期間の氷海域で越波現象が発生した地域において、緩勾配海浜における波遡上特性を解明し、次に緩勾配海浜上に消波堤を築造した場合の波遡上抑制効果を解明することとした。

本研究では、今後の氷海域における波浪増大に備え、沿岸域の防災機能向上を図るため、対象地域に対策工を築造した場合の波遡上解析手法を提案することを目的とする。

2. 氷海域および沿岸域への数値解析の適用

冬期の氷海域における沿岸の波遡上現象を数値解析するためには、①氷海域における流氷分布を考慮できる波浪場計算が可能である、②沿岸域における波遡上計算が可能で

ある、計算モデルを必要とする。このため数値解析モデルは、①第三世代波浪推算モデルSWAN (Simulating WAves Nearshore)¹⁾ (Version 40.81) と②数値波動水路モデルCADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)²⁾の2つを適用した。

沿岸域における波遡上計算を行うにあたっては、大型低気圧接近時に沿岸道路への波遡上がみられた地域のうち、海浜地形の状況や道路の配置が一般的である代表断面を選定した。



写真-1 沿岸道路への波遡上状況 (平成16年1月15日)

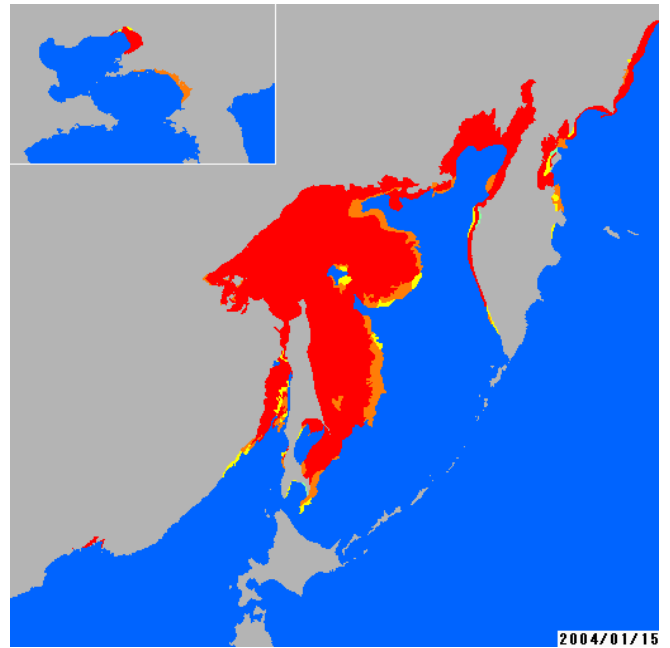
3. 波遡上時の再現計算

3.1 広領域波浪場計算 (SWAN)

(1) 資料収集とデータ作成

平成16年1月14日前後の事例を対象とし、波浪推算の期間を平成16年1月11日9時~1月18日3時として設定した。対象期間の代表的な天気図を図-1に示す。

波浪推算を実施するために必要とする入力データは表-1に示す期間のデータを収集し、波浪データは図-2に示す地点のデータを収集した。風データについては、RSMの精度が低い可能性があるため、傾度風モデル(地上天気図を利用する方法)についても風向風速データを作成した。海氷データの分布図と海氷密接度区分を図-3に示す。海水データは、「気象庁海氷観測資料」のデータを利用した。地形データは、第1領域については、ETOPO2 (NASA)を利用することとした。第2,3領域については、JTOPO30(日本水路協会)のデータから対象海域の地形データを切り出し、データを作成した。



密度度 1~3 4~6 7~8 9~10

図-3 気象庁HPの海水分布図

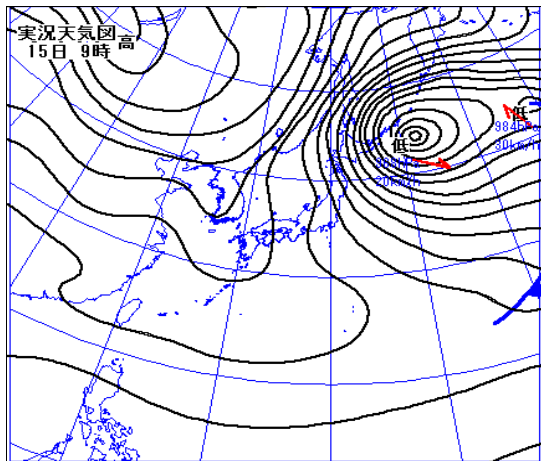


図-1 代表的な天気図(平成16年1月15日9時)

表-1 収集データ一覧

要素	対象ケース 2004年1月14日前後
①波浪データ	紋別
②風データ	第1領域用: GSM 第2,3領域用: RSM 及び 地上天気図
③海氷データ	・気象業務支援センター 「気象庁海氷観測資料」
④潮位データ	枝幸港の日平均潮位 (2004.1.15: T.P.38cm)
⑤地形データ	第2,3領域: JTOPO30 (財)日本水路協会

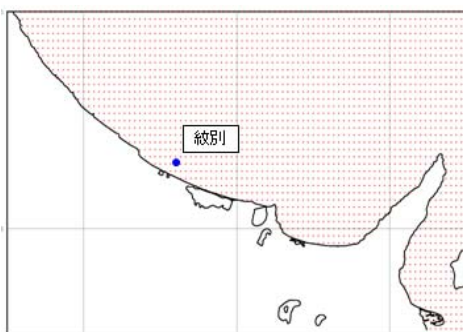


図-2 波浪観測地点(評価地点)

(2) 波浪推算

a) 計算条件

設定した計算領域を図-4, 計算条件を表-2に示す。

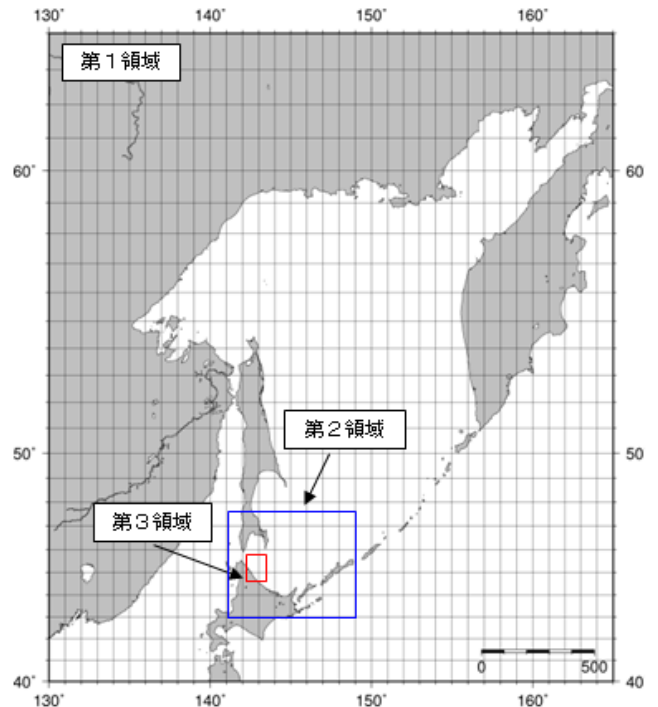


図-4 計算領域

b) 海水域の風速補正

菅原ら(2012)³⁾の方法に従い、海氷が存在する格子については、表-3の海氷密接度と風速の低減率の関係を用いて風速データを補正した。

c) 波浪推算の実施

第3世代波浪モデルSWANのプログラムを用いて波浪推算を実施した。対象海域において波高がピークとなる時刻の風速および波高の平面分布(第1領域~第3領域)を図-5に示す。また、ピーク波高時の沿岸域における最大有義波高の分布を図-6に示す。

d) 波浪推算結果の評価

波浪推算値の評価地点は、図-2に示す波浪観測地点付近である。波浪推算値は第2領域の推算結果から抽出し、時系列図と散布図を用いて実測値と推算値とを比較した。時系列図を図-7、散布図を図-8に示す。散布図は、観測波高1m以上の値を対象として作成した。図-7によると、風データをRSMと傾度風とで比較したところ、波浪推算値のピーク付近では、傾度風の方が精度高く(実測値に近く)再現されているといえる。図-8によると、傾度風から算出した波データの有義波高および周期についての実測値と推算値との相関は高いと考えられる。このことから、対象ケースでは妥当な波浪推算結果が得られたと推察する。

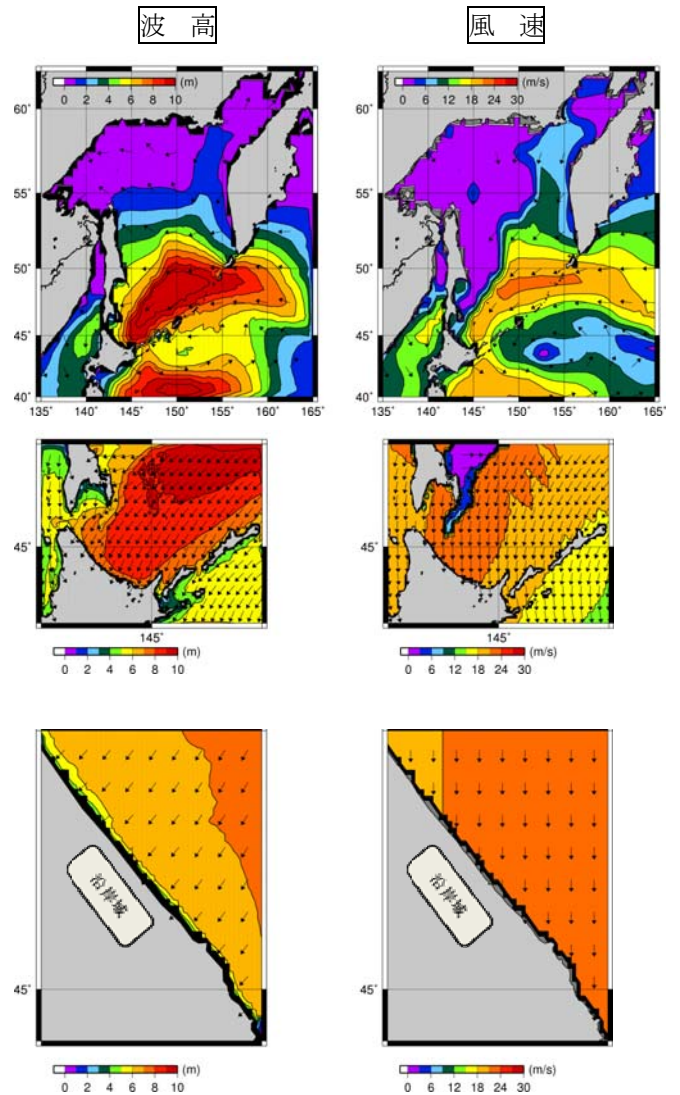


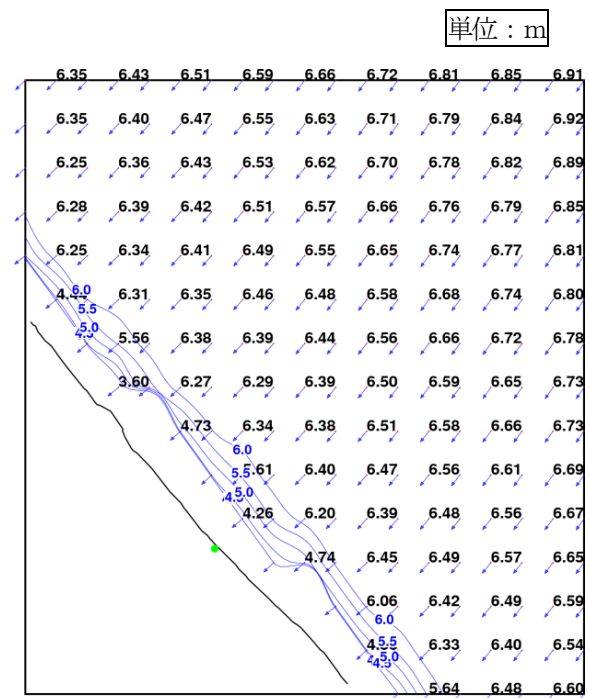
図-5 平面分布(風速・波高)(2004年1月15日9時)

表-2 計算条件

	第1領域	第2領域	第3領域
計算範囲	N40度~64度 E130度~165度	N43度~47.6度 E141度~149度	N44度56分~45度20分 E142度12分~142度36分
格子数	351 × 241	241 × 139	49 × 49
格子間隔	6分(約10km)	2分(約3.5km)	30秒(約0.9km)
計算時間間隔	10分	5分	1分
周波数分割数	30成分(0.04Hz ~ 1.0Hz)		
周期成分	30成分(25.0秒 ~ 1.0秒)		
方向分割数	36成分		

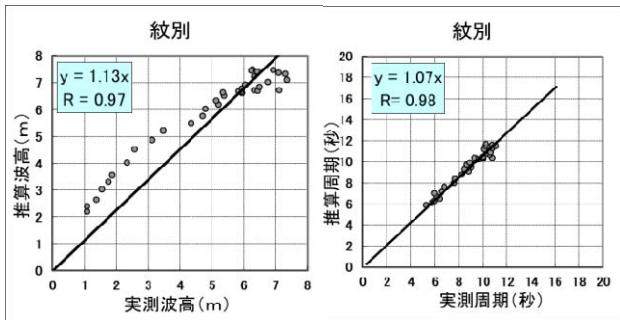
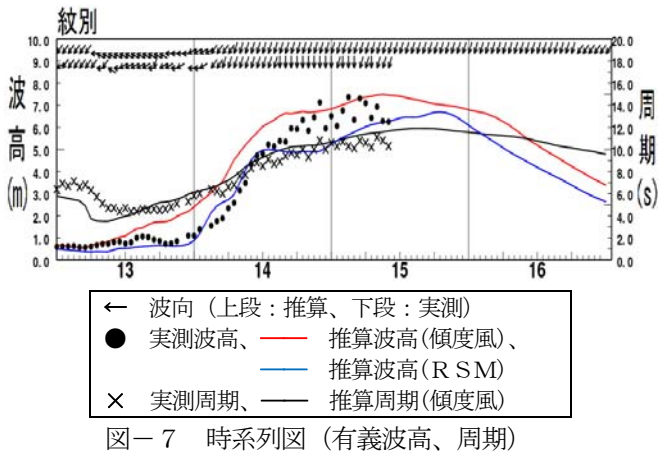
表-3 海氷密接度と風速の低減率

密接度	低減率
1~3	25%
4~6	60%
7~8	80%
9~10	100%



(黒数字は最大有義波高、青矢印は波向)

図-6 沿岸域における最大有義波高の分布



の解析では、ハイブリッド差分法 (1次精度風上差分と2次精度中央差分) を使用している。2つの差分の比率を示すVP-DONORの値を変化させて試行計算を行った結果、VP-DONOR=0.3を用いることとした。また、消波工に係る係数値は、川崎ら(2007)⁴⁾を参考に設定した。

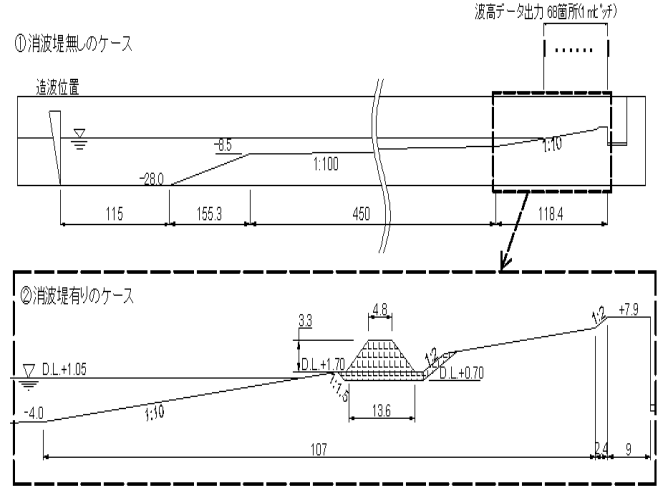


表-4 計算条件

	数値計算
波の種類	規則波: 消波堤無しの場合 不規則波: 消波堤有無の場合
波高	5.5m, 6.5m, 7.5m (対象ケースの有義波高は6.5m)
周期	11.4s
潮位	+1.05m
水深	造波水深 -28.0m, 堤脚水深(h1) -4.0m

表-5 解析条件

計算時間	規則波	350 s
	不規則波	1,830 s
移流項の差分	VP-DONOR	0.3
消波工	空隙率	0.5
	慣性力係数 C_M	1.2
	抗力係数 C_P	1.0

3.2 波の遡上計算(CADMAS-SURF)

(1) 計算条件

図-9は代表断面における海底・海浜地形および道路形状をモデル化したものであり、消波堤有無の2種類の地形を対象にした。海底地形の勾配は1/100、海浜地形の勾配は1/10であり、陸側には沿岸道路(路面高DL+7.9m)が隣接する。消波堤の消波ブロック規格は10t相当であり、天端幅は2ヶ並び、高さは2層厚とした。

数値波動水路(CADMAS-SURF)を用いて波の遡上解析を行うにあたっては、図-9に示す水深-28.0m×延長838.7mの計算断面を設定し、格子間隔を2m×0.4m(堤脚水深以浅は1m×0.4m)とした。対象ケースの造波数値は、図-6に示したSWANの計算結果から抽出した。表-4は計算条件を示しており、静水深および周期を一定とし、造波波高を3種類変化させて、規則波および不規則波(修正Bretschneider・光易型のスペクトル, 150波)を作用させた。

波遡上の水理特性を解明するためには、消波堤無しの場合で規則波と不規則波とを比較した。また、消波堤有無の場合で不規則波による波遡上高さを比較した。

(2) 波の遡上高さの算定

波遡上データは、図-9に示す海浜部位置(68箇所)において時系列に出力し、波の最大遡上高を算出した。

解析で使用したパラメータを表-5に示す。基礎方程式

4. 波の遡上実験

(1) 模型実験条件

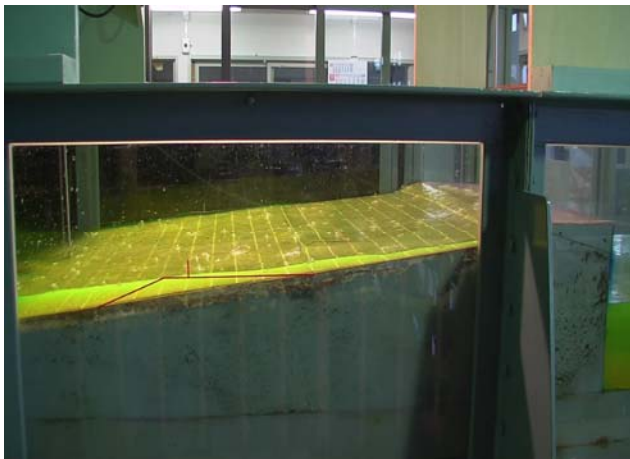
CADMAS-SURFの計算精度を高めるため、模型実験を行った。実験装置は、反射吸収式造波装置を備えた長さ28m、幅0.8m、深さ1.0mの二次元造波水路を用い、模型縮尺は水槽諸元などを考慮して1/45、海底勾配、前浜勾配は波遡上計算の条件と同一とした。実験波は規則波および不規則波とし、波遡上計算と同様の考えで表-6に示す波を使用した。

(2) 波の遡上高さの計測

ビデオカメラを用いて海浜部に遡上した斜距離を目視にて測定し、この斜距離位置における静水面からの高さを遡上高さとした(写真-2参照)。また、道路法肩部の遡上高さは容量式波高計を設置して計測した。

表-6 模型実験条件

実験縮尺	1 / 45
波の種類	規則波：消波堤無しの場合 不規則波：消波堤有無の場合
波高	14.4cm (対象ケースの有義波高)
周期	1.70s
潮位	2.3cm
水深	造波水深 -62.2cm、堤脚水深(h1) -8.9cm



(上側：消波堤無し、下側：消波堤有り)

写真-2 実験写真：不規則波の最大遡上時点

5. 波遡上特性と消波堤の効果

(1) 沖波波高 H_o' と波遡上高さとの関係

数値解析の結果から、沖波波高 H_o' と波遡上高さとの関係を図-11に示す。2ケース(規則波・消波堤無しと不規則波・消波堤無し)を比較した結果、後者が道路面上の越波

現象を再現することが明らかになった。

規則波・消波堤無しおよび不規則波・消波堤有りの場合は、沖波波高が5.5mから7.5mへと増加するに従い波遡上高さは増加するのに対し、不規則波・消波堤無しの場合は、横這い傾向にある。

模型実験は、沖波波高 $H_o' = 6.5m$ の場合について行ったところ、図-11に示すとおり、3ケース共に良好な相似関係にある。

以上のことから、波の周期が一定の場合、波高が増加すれば波遡上高さは増加すると推察する。しかしながら、路面に越流するケースでは、波遡上高さは一定値を保つことがあると推察する。

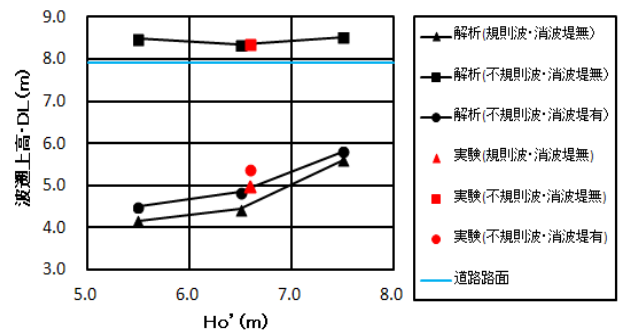


図-11 沖波波高と波遡上高さとの関係図

(2) 波形勾配 (H_o' / L_o) と R_{max} / H_o' との関係

波形勾配 (H_o' / L_o) と R_{max} / H_o' との関係を図-12に示す。ここで、 R_{max} は静水面上の波遡上高さの最大値である。

消波堤無しの場合の R_{max} / H_o' は、不規則波では規則波の約1.6~2.4倍となる。規則波・消波堤無しの場合、 H_o' / L_o が0.027から0.037へと増加しても R_{max} / H_o' は横這い傾向にあるのに対し、不規則波・消波堤無しの場合、直線的に低減する。

不規則波の条件では、海浜部に消波堤を設置した場合は、消波堤無しの場合に比べて R_{max} / H_o' が36~54%低減する。不規則波・消波堤有りの場合は、 H_o' / L_o が0.027から0.037へと増加しても R_{max} / H_o' は横這い傾向にあるのに対し、不規則波・消波堤無しの場合、直線的に低減する。

模型実験は、沖波波高 $H_o' = 6.5m$ ($H_o' / L_o = 0.032$) の場合について行った。模型実験値/数値解析値は、規則波・消波堤無しの場合1.15、不規則波・消波堤無しの場合1.00、不規則波・消波堤有りの場合1.14であり、良好な相似関係にある。

以上のことから、不規則波・消波堤無しの場合、波高が一定で波長が増加すれば波遡上高さは増加すると推察する。しかしながら、規則波・消波堤無しおよび不規則波・消波堤有りの場合、波高が一定で波長が増加しても波遡上高さはほぼ一定値を保つと推察する。

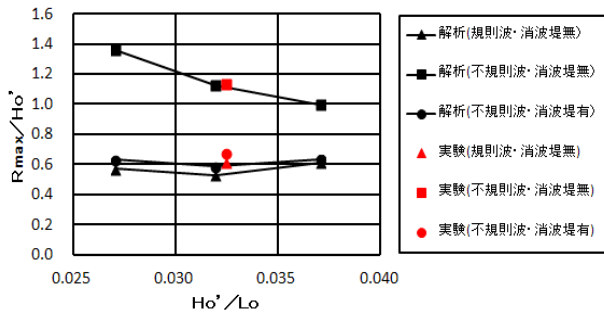


図-12 波形勾配 (H_o'/L_o) と R_{max}/H_o' との関係図

(3) 堤脚水深と沖波波高との比 (h_1/H_o') と R_{max}/H_o' との関係

堤脚水深と沖波波高との比 (h_1/H_o') と R_{max}/H_o' との関係を図-13 に示す。

規則波・消波堤無しおよび不規則波・消波堤有りの場合は、 h_1/H_o' が 0.67 から 0.92 へと増加しても R_{max}/H_o' は横這い傾向にあるのに対し、不規則波・消波堤無しの場合は、直線的に増加する。

以上のことから、不規則波・消波堤無しの場合、波高が一定で堤脚水深が増加すれば波遡上高さは増加すると推察する。しかしながら、規則波・消波堤無しおよび不規則波・消波堤有りの場合、波高が一定で堤脚水深が増加しても波遡上高さはほぼ一定値を保つと推察する。

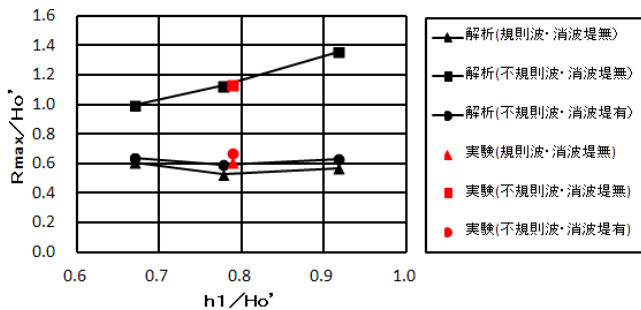


図-13 h_1/H_o' と R_{max}/H_o' との関係図

6. まとめ

氷海域に流氷が分布する時期における荒天時の風データ、海水データ等を収集し、波浪推算モデルSWANを用いて波浪推算を行った結果、実測値（紋別）との相関が高いことが確認された。次に、沿岸域の代表断面において、数値波動水路モデルCADMAS-SURFを用いて波遡上解析を行った結果、再現精度が高いことが明らかになった。

以上のことから、氷海域における緩勾配の沿岸地形において、消波堤を築造したときの波遡上抑制効果を検討する場合、2つの計算モデル（SWANとCADMAS-SURF）を組合せた解析手法は、有効に活用できることが確認された。

今後は、波遡上現象に係る計算精度を更に上げることが

課題であるため、水理模型実験の比較ケースを増やし、より詳細な確認を行っていく考えである。

謝辞

今回の波遡上解析を行うにあたっては、(株)アルファ水工コンサルタンツの八木澤一城氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 間瀬 肇・平尾専樹・國富將嗣ほか：SWANを用いた日本沿岸波遡上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，2001，pp.236-240
- 2) (財)沿岸技術研究センター(2008)：CADMAS-SURF 実務計算事例集，沿岸技術ライブラリーNo. 30
- 3) 菅原吉浩・山之内順・山本泰司：海水減少を考慮したオホーツク海における波良の将来変化，海岸工学論文集 第59巻，2012，pp. I 1221 - I 1225
- 4) 川崎浩司・菊雅美・眞栄里和也ほか：数値波動水路を用いた海岸護岸周辺の越波対策工法の検討，海岸工学論文集 第54巻，2007，pp. 951 - 955