

海水による高波時の波浪低減効果と波の遡上特性

本間 大輔*1

1. はじめに

近年、地球温暖化などの影響により、北極圏内の海水面積が将来的に著しく減少する可能性が高いことが報告されている¹⁾。海水は、波浪の発達を抑制する効果を有しているが、特に沖合に海水がほとんど存在せず、沿岸部に海水がある場合に発達した低気圧の影響を受けると、波そのものの遡上により海岸線の直近に位置している主要な交通路である道路盛土への被害のみならず、海水を伴った波の遡上により打ち上げられる氷塊によって、施設や家屋への甚大な被害が想定される。著者ら²⁾は海水のない状況下でのオホーツク海沿岸域における高波による海岸道路の盛土被害の発生条件について明らかとしているが、海水を伴った場合の沿岸域への影響を解明することは、今後の沿岸域の防災の観点から重要な課題である。

海水による波の減衰効果については、Wadhams ら³⁾Squire ら⁴⁾、が海水距離の増加に伴って指数関数的に減少することを検証し、堺ら⁵⁾片山ら⁶⁾は、海水が沖にシート状に卓越した状態を想定した場合の波浪低減特性や海水の挙動について明らかとしている。また、Frankenstein ら⁷⁾は、高波浪の条件下では、海水は小さく破壊され、surge、sway、pitch、roll、yaw などの複雑な動きとなることを指摘しており、Shen・Squire ら⁸⁾は、海水域における波の減衰に影響を及ぼす要因として、氷盤間の衝突や相互作用による吸収、砕波による散逸、波の伝搬による氷の変形などの様々な要因があることを指摘している。しかしながら、被害が甚大となる可能性の大きい沖に海水が少なく、沿岸部に海水が卓越した状況で高波浪が作用した場合の沿岸域における海水の遡上現象やパイルアップ現象、また、これに伴う波浪低減特性についての研究はほとんどされていないのが現状である。

本報告では、冬期において波の遡上により北海道オホーツク海沿岸域の道路盛土に被害のあった代表的な地形を基に、海水が沖側にほとんどなく、沿岸部に卓越した状態を設定（写真-1参照）し、実海域に卓越する流水盤の大きさや厚さ⁹⁾を考慮した上で、高波浪が作用した場合の沿岸域における海水の遡上現象を把握し、海水による波浪低減および遡上特性について、水理模型実験により明らかにするものである。

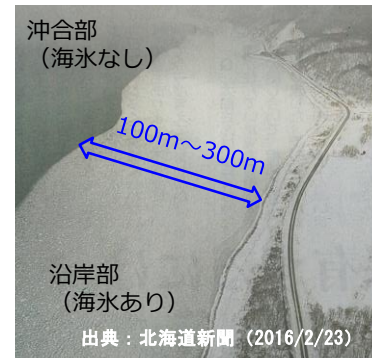


写真-1 本研究で対象とした海水状況

2. 実験の方法

2. 1 実験地形

実験の地形条件を設定するにあたり、オホーツク海沿岸の国道において、冬期間に波の遡上により道路盛土に軽微な欠損が生じた数件の事例のうち代表的な地形である1:30および1:10の複合勾配を対象とした。写真-2および図-1は、道路盛土に被害の発生した状況および海岸と道路盛土の断面地形である。



写真-2 波浪による盛土の被災状況

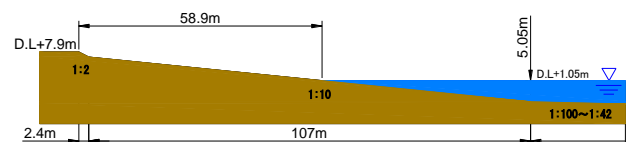


図-1 被災事例の断面地形

2. 2 実験条件

海水による波の波浪低減効果を明らかにするため、水理模型実験を実施した。図-2に示す反射吸収式造波装置を備えた2次元造波水路（長さ 24.0m，幅 0.8m，深さ 1.0m）に、現地の地形条件に合わせて1:30および1:10勾配のモルタル製固定床を設置した。模型縮尺は

* 1 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム

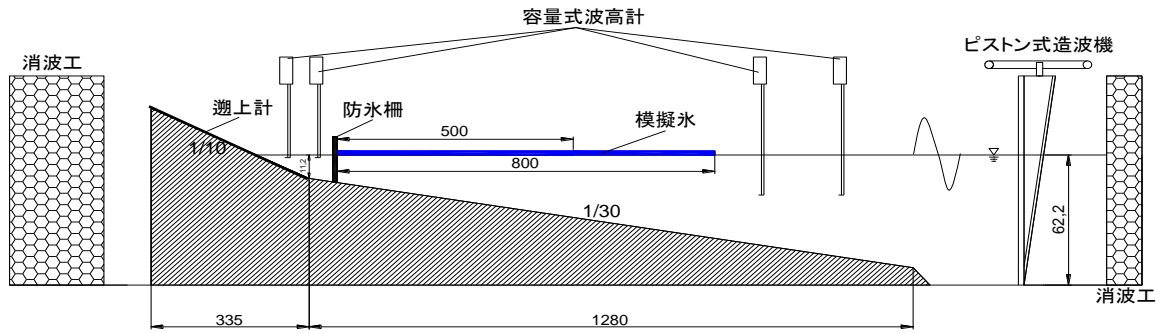


図-2 実験装置の概要図 (単位 : cm)



写真-3 防水柵による海水の制御状況

表-1 実験条件 (括弧内は現地量)

模型縮尺	1/45
入射波高 H_0 (cm)	6.7(3m)~20(9m):6波高
入射周期 T (s)	1.34(9s), 1.57(10.5s), 1.79(12s)
実験水位 h (cm)	D.L.+0.23(+1.05m), D.L.+0.34(+1.55m)
海底勾配 i	1/30と1/10の複合勾配
模擬氷設置範囲(cm)	500.0(225m)、800.0(360m)
模擬氷の大きさ(cm)	6(2.7m)×6(2.7m)、10(4.5m)×10(4.5m)
模擬氷被覆率 ICR(%)	50%、80%
模擬氷厚さ t_i (mm)	5(22.5cm), 10(45.0cm), 20(90.0cm)

1/45とし、実験にはすべて不規則波を用い、1波群200波を作用させたときの海氷の遡上特性、簡易的に設定した防水柵背後における波の低減率、波の遡上特性、防水柵前面における反射特性、模擬氷のパイルアップ厚さを調べた。波浪条件は、被災事例において道路盛土に軽微な被災が生じた $H_0=7.5m$ 、 $T=10.5s$ (水位 D.L.+1.05m) を含めて、周期3種類、波高6種類に変化させた。海氷の模型には、ポリプロピレンを用いた模擬氷 (比重0.91) を用いた。また、國松ら⁹⁾によりオホーツク沿岸域で観測された海氷盤の大きさおよび厚さの実測データを参考に、6.0cm×6.0cmと10.0cm×10.0cmの2種類の大きさを用い、厚さは0.5cm、1.0cm、2.0cmの3種類とした。海氷被覆率ICRは50%と80%とし、2種類の大きさの模擬氷を同じ面積になるように設定した。模擬氷の設定範囲は500cmおよび800cm区間とし、海氷の対策工としては、写真-3に示す防水柵をイメージした鉄網を設置した。以上の実験条件をまとめて表-1に示す。

2. 3 計測の方法

模擬氷の遡上高および防水柵前面のパイルアップ厚さの計測にはデジタルビデオカメラを用いた。また、波高の伝達率 K_t は、岸側2本で計測された波高の平均値を沖側2本の入反射分離した波高で除した値とし、波高の反射率 K_r は沖側2本の波高計により計測した。波の遡上高の計測は、水路床の1:10勾配部分に幅2cmの溝を設けて、容量線を斜面と同じ高さになるように設置して計測した。全ての計測は同一の条件で3回行ってその平均値とした。模擬氷同士および模擬氷と水路床の摩擦係数は、水路床1:10の勾配箇所において20回~30回の繰り返し試験を行い、平均値および中央値を採用した。

3. 不規則波による波の遡上高の再現

実験による波の遡上高の再現には、 $R_{2\%}$ (2%超過値) 遡上高を玉田ら¹⁰⁾により提案された算定式(1)による遡上高と、被害事例を再現させた水理模型実験による波の遡上高を比較し、被災時の波高と波の遡上高の関係を整理した。図-3は沖波波高 H_0 と代表遡上高 $R_{2\%}$ の関係であり、図中の○印は、被災のあった波浪条件 (被害相当波浪) での結果である。計算値(cal)から求まる遡上高 $R_{2\%}$ は、実際の被害の高さまで到達しない結果となったが、実験値(exp)では被害範囲もしくはそれ以上の遡上高さとなった。実験値と計算値の値が異なる原因としては、沖波波高が比較的小さい場合には、1:30の地形勾配では碎波せず、勾配変化点もしくは1:10の地形勾配で碎波する現象が見られたことが主要要因と考えられる。現地の被災は、海水面(W.L)から5.65m~6.85m (道路面高) の間で発生しており、道路面の高さ W.L+6.85m (D.L+7.9m) まで波の遡上痕が残っていたことから、実験値は実際の現地での被害レベルまで波が遡上しており、概ね再現できていると想定される。

$$R_{2\%}/H_0 = 2.99 - 2.73 \exp \left[-0.57 * \left\{ \tan \beta / \left(H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\} \right] \dots (1)$$

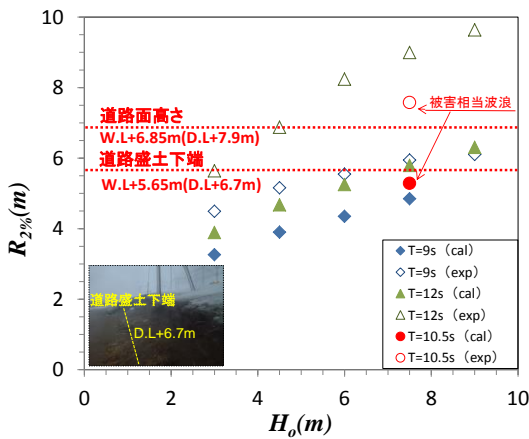


図-3 沖波波高 H_0 と遡上高 $R_{2\%}$ の関係

4. 海水の遡上

海水の遡上状況を把握するため、水理模型実験を実施した。ここでは、被災時における波浪条件 ($H_0=7.5\text{m}$, $T=10.5\text{s}$) をベースに海水が写真-1に示す状況で高波が作用した場合の模擬氷の遡上状況について整理した。

4. 1 摩擦係数

本実験における模擬氷同士の静止摩擦係数 μ_{s1} および模擬氷と水路床の静止摩擦係数 μ_{s2} は、現地の状態を想定し、湿潤状態とした。それぞれの値は図-4 に示すとおりであり、摩擦係数の結果はバラツキのある傾向が見られた。安留ら¹¹⁾、Takeuchi ら¹²⁾は氷と氷、海水と地盤との摩擦係数に与える因子の効果について、相対速度、砂の粒径、鉛直応力、氷の温度などに依存することを明らかとしている。本検討で対象とした海岸における海浜の砂の中央粒径 d_{50} は 1.2mm 、2016 年における 2 月期の最低外気温は概ね $-3^\circ\text{C} \sim -14^\circ\text{C}$ となっており、文献におけるこれらの条件下でのそれぞれの摩擦係数の値は今回の繰り返し試験により得られた摩擦係数の平均的な値および中央値と近い結果となった。

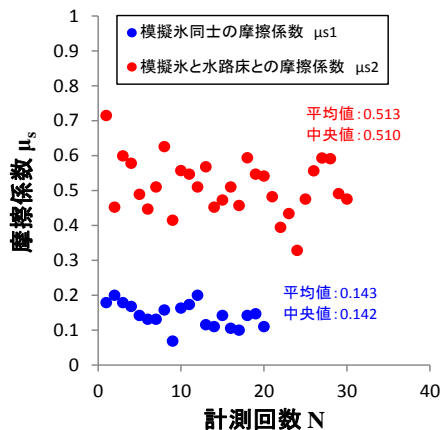


図-4 摩擦係数

4. 2 海水の遡上特性

図-5 は、模擬氷設定範囲が 500cm および 800cm (現地換算 225m 、 360m)、模擬氷の厚さが 1.0cm (現地換算 45cm) のときの被災波浪を含む 6 波高、3 周期の条件での模擬氷の遡上範囲の一例である。模擬氷の堆積傾向は、波高および周期の増加により、到達距離および堆積高が増加する。また、模擬氷の設定範囲および図示はしていないが、模擬氷の厚さ t_i が大きいほどその傾向は小さくなるが、この要因として考えられるのは、模擬氷の設定範囲が大きい場合、汀線付近から沖側にかけて多量の模擬氷が集積し、波浪のエネルギーが吸収・減衰され、模擬氷が遡上しづらくなる傾向があるためである。被災相当波 (10 年確率波程度) では、模擬氷の厚さ t_i による差はあるが、 $110\text{cm} \sim 140\text{cm}$ まで遡上し、概ね盛土法先位置である 125cm (現地換算 56m) 程度まで遡上する結果となった。

著者ら²⁾は、オホーツク沿岸域における自然海岸における盛土の被災事例を整理しており、概ね 10 年確率波程度以上の波浪が作用した場合、汀線から 60m 程度離れた盛土に被災が発生する可能性があることを報告している。このことから、1:10 および 1:30 の海底勾配を持つ未整備の当該自然海岸においては、汀線より

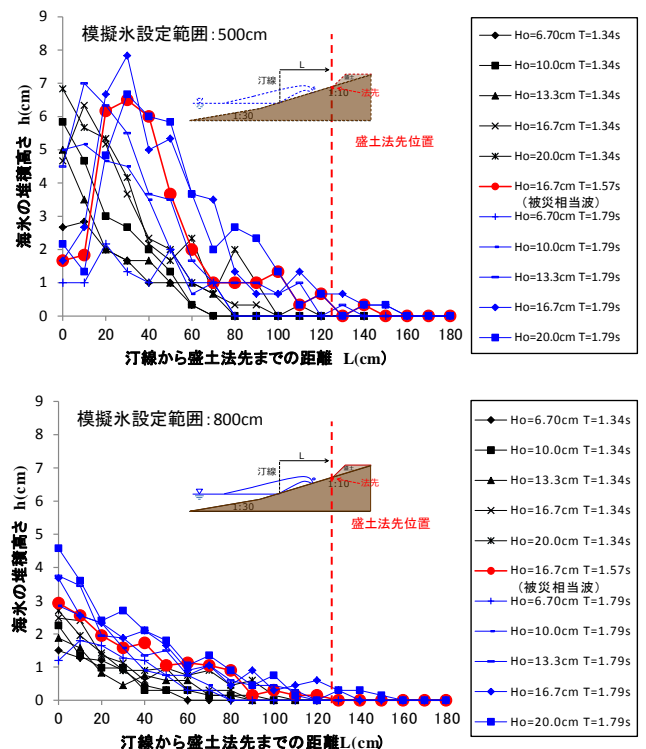
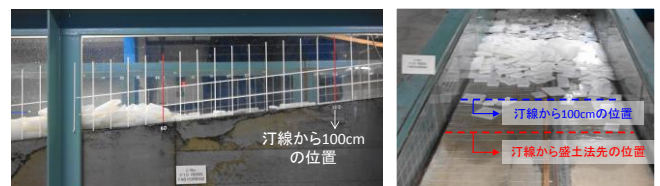


図-5 模擬氷の遡上状況

60m 程度の値を目安に、ハード面では、波浪および海水を直接的に抑制する対策あるいは路線の変更、ソフト面では、日々のパトロールの強化および通行止めの措置等を行うことが重要と考えられる。

5. 海水による高波の低減特性

海水による波高低減の要因としては、Shen・Squireら⁸⁾、著者ら¹³⁾も指摘している、①海水の相互作用（衝突や摩擦）、②海水面上での波の砕波、③海水の変形に伴う波の反射（海水厚さに依存）などが考えられる。しかしながら、高波浪時にはこれらの要因が同時に発生し、非常に複雑な現象となる。ここでは、波浪低減に影響を及ぼす①～③について全体を考慮した検討とした。図-6は模擬氷の遡上を防水柵で対策を施した表-1の条件での模擬氷による波浪低減効果の結果である。図中の K_t は模擬氷存在時の伝達率であり、模擬氷が無い場合の伝達率 K_t^* で除することにより波浪の低減割合を示している。模擬氷設定範囲 X が大きく波長 L_o が小さいほど、また、 ICR が高く氷厚 t_i が厚いほど波浪低減効果が大きい。 $ICR80\%$ 、 $t_i=20\text{mm}$ の場合では、おおよそ30%~50%程度の低減効果があり、波浪低減の要因である①②③が複合的に発生していることが実験映像より確認できた。特に H_o が大きくなるほど模擬氷が激しく衝突しながら、岸方向に移動し、大きな氷群となって堆積（パイルアップ）することにより②と③の現象が強くなっていく。 $ICR50\%$ 、 $t_i=5\text{mm}$ では、 X/L_o （模擬氷設置範囲と波長との比）が小さい場合ではほとんど低減効果が見られなかった。この要因としては、 X/L_o が1程度の条件では模擬氷がその場に留まった上下運動が主となり、前述した波浪低減の要因の②と③の影響はほとんどなく、①が主な要因となるため低減効果が小さかったと考えられる。

図-7は、一例として模擬氷の設定範囲が500cm、沖波波高 $H_o=16.7\text{cm}$ 、周期 $T=1.57\text{s}$ のときの模擬氷通過後の波高であり、0.032s間隔、8192データにおけるスペクトル密度を示したものである。スペクトル密度は ICR が高く氷厚が大きいほど低減効果が高い。また、 ICR や氷厚の違いに関わらず全周波帯でスペクトル密度が減衰する傾向が見られた。

つぎに海水による反射率特性（③）を確認するため、模擬氷の有無による反射率 K_r を調べた（図-8）。模擬氷設定範囲が500cmの場合（上図）では、海水存在時の反射率 K_r は、模擬氷の無い場合の反射率 K_r と比較してほとんど差のない結果となったが、模擬氷設定範囲が800cmの場合（下図）ではその差が明確にでている。

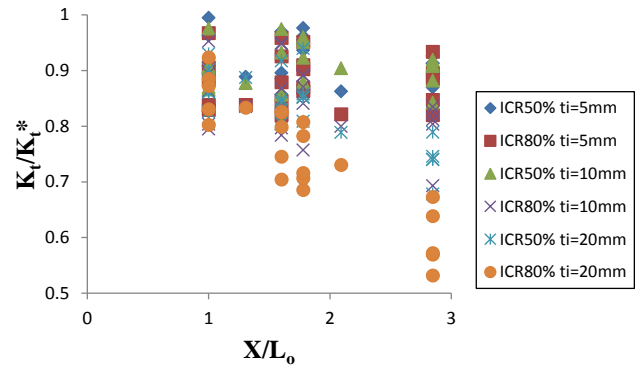


図-6 X/L_o と K_t/K_t^* の関係

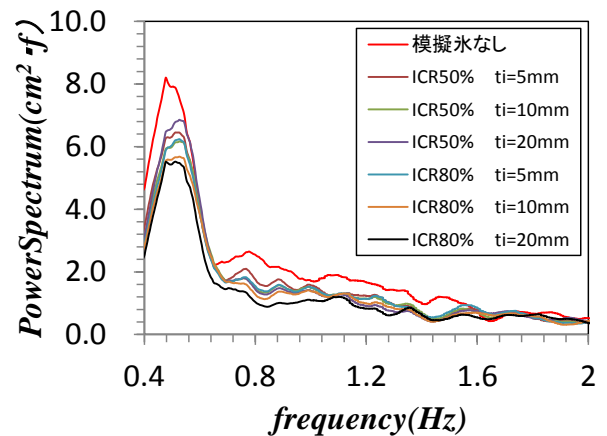


図-7 周波数とスペクトル密度の関係

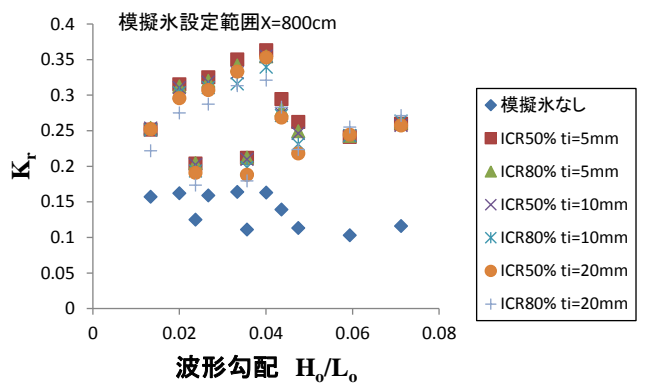
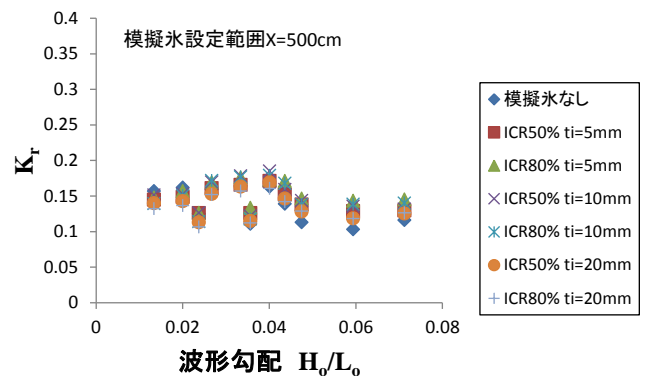


図-8 波形勾配 H_o/L_o と反射率 K_r の関係

反射率 K_r は最大で 0.35 程度となり、模擬氷がない場合の 2 倍～3 倍程度となった。この要因としては、 ICR が高く、氷厚 t_i が大きいほど、模擬氷が防氷柵前面付近に堆積し、反射波が大きくなったことが考えられる。

6. 海水による波の遡上特性

海水による波の遡上高の低減効果を明らかにするため、模擬氷のない状態での波の代表遡上高 $R_{2\%}^*$ (2% 超過値) をベースとし、模擬氷を設定したときの遡上高の関係を調べた。図-9 は、表-1 の条件での海水による波の遡上低減効果の結果である。図中の $R_{2\%}$ は、模擬氷設定時の遡上高であり、模擬氷がない場合の遡上高 $R_{2\%}^*$ で除することにより、波の遡上低減割合を示している。 ICR と氷厚 t_i が大きくなる程、低減効果が増し、 $ICR80\%$ 、 $t_i=20\text{mm}$ の場合では最大で 8 割程度の低減効果が見られた。 ICR と氷厚 t_i が小さく、 H_o/L_o も小さい場合は、ほとんど波の遡上低減効果はなく、この傾向は波浪低減特性と同様である。

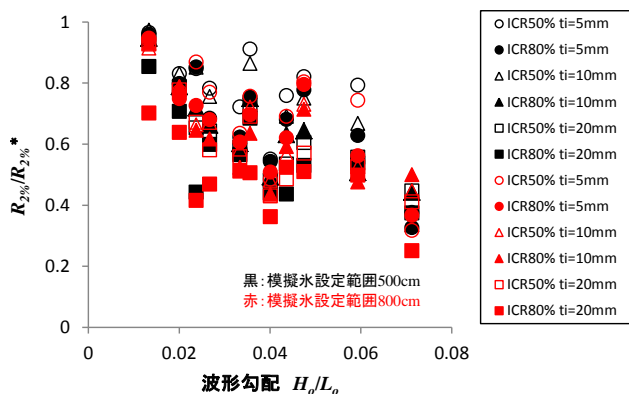


図-9 波形勾配 H_o/L_o と波の遡上低減効果の関係

7. 波浪による海水のパイルアップ

沖に海水がなく、沿岸部に海水が卓越した状況において、図-2 に示す仮設防氷柵を設定し、波浪による海水のパイルアップ厚さ T を計測した (写真-4 参照)。図-10 は、沖波波高 H_o と防氷柵前面の模擬氷のパイルアップ厚 $T_{2\%}$ の関係の結果である。図中の $T_{2\%}$ は、模擬氷のない状態で、波の代表遡上高 $R_{2\%}^*$ が発生する波浪が作用したときの防氷柵前面のパイルアップ厚さを示している。 $T_{2\%}$ は ICR および氷厚 t_i に依存しない結果となったが、沖波波高 H_o との強い関連性があり、 H_o の増加にともない \log 関数的に増加する傾向がみられた。

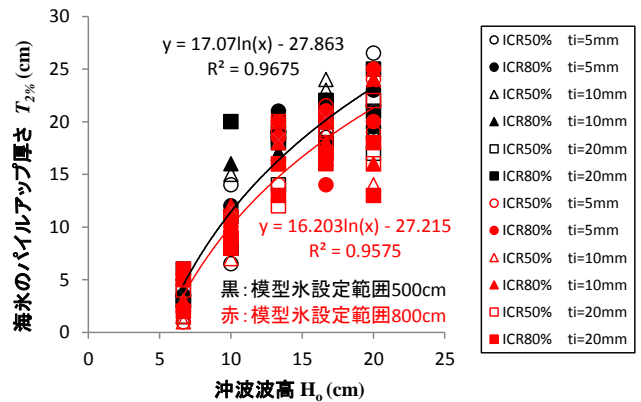


図-10 沖波波高 H_o とパイルアップ厚さ T の関係

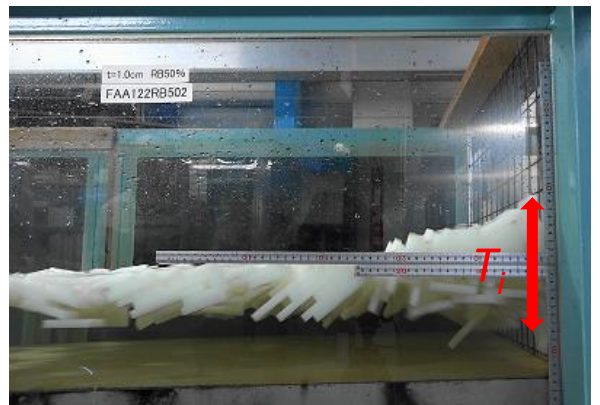


写真-4 実験状況

8. まとめ

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 10年確率波相当の波浪に対する 1:30 および 1:10 の勾配を持つ対象海岸における海水の遡上影響範囲は、汀線から概ね 60m 程度と想定される。
- 2) 模擬氷による波の低減効果は、模擬氷設定範囲が大きいほど効果が大きく、 $ICR80\%$ かつ氷厚 $t_i=20\text{mm}$ の場合では 30%～50% 程度となり、どの条件においてもスペクトル密度は全周波帯で低減している。
- 3) 模擬氷による波の反射率特性は、模擬氷設定範囲が増加する程大きくなり、最大で模擬氷がない場合の 2 倍～3 倍程度となる。
- 4) 模擬氷による波の遡上低減効果は、模擬氷設定範囲および ICR 、氷厚 t_i が大きいほど高く、 $ICR80\%$ 、 $t_i=20\text{mm}$ の場合、最大 8 割程度の効果がある。
- 5) 模擬的に設置した防氷柵前面での波浪による海水のパイルアップ厚さ T の値は、模擬氷設定範囲が増加するほど小さくなり、 ICR と t_i の違いにあまり依存せず、波高による影響が大きい。
- 6) オホーツク海沿岸域における高波浪作用時の沿岸部における海水による波浪低減の要因は、海水の ICR と t_i および波高に依存し、①海水の相互作用 (衝突や摩

擦)、②海氷面上での波の砕波、③海氷に作用する波の反射(海氷厚さに依存)による影響があることを確認した。

参考文献

- 1) IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約. 気象庁暫定訳 (2014 年 3 月 6 日版) .
- 2) 本間大輔, 山本泰司, 宮武誠, 木村克俊 (2015) : 高波による海岸道路の盛土被害の発生条件と対策の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.71, No.2, pp.269-274.
- 3) Wadhams,P.,V.A.Squire,D.J.Goodman,A.M.Cowan,and S.C.Moore : The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone (1998),J.Geo-phys.Res., pp.6799-6818.
- 4) Squire,V.A.,J.P.Dugan,P.Wadhams,P.J.Rottier,andA.K.Liu : Of ocean waves and sea ice (1995), Annu.Rev.Fluid Mech.,27, pp.115-168.
- 5) 堺茂樹, 笹本誠, 片山潤之助, 劉曉東, 平山健一, 泉山耕, 金田成雄(1996) : 氷板による不規則波の変形に関する実験, 海岸工学講演会論文集, 第 43 巻, pp.426-430.
- 6) 片山潤之助, 劉曉東, 笹本誠, 金田成雄, 泉山耕, 堺茂樹 (1997) : 氷盤群下の波浪変形特性に関する実験, 海岸工学講演会論文集, 第 44 巻, pp.146-150.
- 7) Frankenstein,S.,S.Loset,and H.H.Shen (2001) : Wave-ice interactions in Barents Sea marginal ice zone, Journal of Cold Region Engineering,15, pp.91-102.
- 8) Shen,H.H.and V.A.Squire (1998) : Wave damping in compact pancake ice fields due to interactions between pancakes,In jeffris, M.O.,ed.Antarctic sea ice , physical processes,interactions and variability.Washington, DC,American., Geophysical Union, pp.325-341.
- 9) 国松靖, 秋原真哉, 榎国夫, 高木雄一郎, 原文宏, 佐伯浩(1992) : 氷盤の大きさに関する研究, 寒地技術シンポジウム論文・報告集, 第 8 回, pp.417-422.
- 10) 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏 (2009) : 複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. B2-65, No. 1, pp. 936-940.
- 11) 安留哲, 荒川政彦, 前野紀一(1999) : 氷・氷摩擦係数の測定 : 日本雪氷学会誌, 第 61 巻, 6 号, pp.437-443.
- 12) Takahiro,T.,Mikio,S.,Kazuo,M.,Hirokazu,S. and Atushi T.atakeuch : Coefficients of Friction of Sea Ice on Sand : Proceeding of The Thiteenth International Offshore and Polar Conference, pp.461-464.
- 13) Honma.D.,Kioka,S. and Takeuchi,T : Effect of Sea Ice on the Wave Damping and the Wave Run-up Characteristics under High Waves in the Sea of Okhotsk off Hokkaido (2016): Proceeding of the 23rd IAHR International Symposium on Ice.(Paper.No.4871913).