

オホーツク海沿岸における海氷による高波時の波浪低減効果と波の遡上特性

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

○本間 大輔
木岡 信治

近年、地球温暖化の影響により、流氷勢力の減少に起因する波高増大が懸念されている。しかしながら、沖に海氷が少なく沿岸部に海氷が卓越した状況で高波が作用した場合に発生する沿岸部での海氷のパイルアップ現象や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。本研究では、実海域に多く見られる海氷の大きさや厚さを考慮した上で、海氷による波浪低減効果および波の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。

キーワード：防氷、海氷、パイルアップ、波浪低減、波の遡上、沿岸防災

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響により、北海道北西部における海氷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⁾。冬期におけるオホーツク海は、流氷に覆われることにより、海上風による波浪の発達を抑制する効果や海氷による波浪の減衰効果により波浪が低く抑えられているが、流氷勢力の減少に起因するオホーツク海沿岸の冬期間における波高増大が懸念されている²⁾。特に、沖合に海氷がほとんど存在せず、沿岸部に海氷があった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、海氷を伴った波の遡上により陸に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。

海氷による波の減衰効果については、Wadhamsら³⁾、Squireら⁴⁾が海氷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、海氷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氷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、海氷は小さく破壊され、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、海氷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氷が少なく、沿岸部に海氷が卓越した状況で高波浪が作用した場合の沿岸部における海氷のパイルアップ現象や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。

本研究では、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、海氷が沖側にほとんどなく、沿岸部に卓越した状態を設定し、実海域に卓越する流氷盤の大きさや厚さ⁹⁾を考慮した上で、高波浪が作用した場合の沿岸部における海氷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。

2. オホーツク沿岸の海氷状況

ここ十数年のオホーツク海沿岸での流氷の分布状況を見ると、海面全体に分布している状況は少なくなり、沖

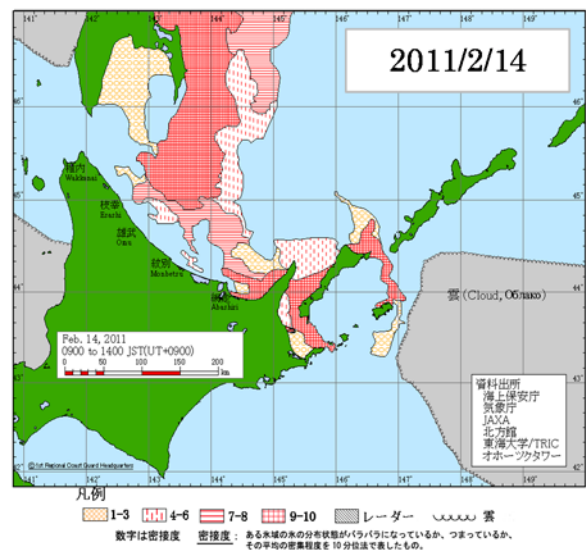


図-1 海氷分布

合に帯状に分布している場合や、沖合に海氷は少ないが、沿岸部付近に多く分布している状況が見られている。図-1は一例として2011年2月14日に観測された海氷分布であるが、海氷がまばらであり、当該年月日において年間の最大波高を記録していた。また、著者らは最近のオホーツク海沿岸の波浪状況を報告している³⁾が、近年において海氷が卓越する2月期では密接度が小さくなっている傾向があり、冬期波浪増大への備えが重要である。

3. 実験の設定

(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安全側を考慮した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-1および図-2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。

(2) 実験条件

海氷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-3に示す反射吸収式造波装置を備えた二次元造波水路（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1/45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波の低減率と反射特性、波の遡上特性および模擬氷のパイルアップ量を調べた。波浪条件は、被災事例A地区において道路盛土に軽微な被災が生じた $H_0 = 7.5\text{ m}$ 、 $T = 10.5\text{ s}$ （水位D.L.+1.05m）を含めて、周期2種類、波高6種類に変化させた。海氷のモデルには、波浪による氷板の変形に関する模型氷（物性などをスケールダウンさせて作成された実験用の氷）と模擬氷（ポリプロピレンを用いた模擬氷）を用いた実験を行い、模擬氷を使用することの妥当性を検証している金田ら¹⁰⁾にない、ポリプロピレン（比重0.90）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。設置範囲は5m区間とし、写真-2に示す防水柵をイメージした鉄網を設置した。また、波の遡上低減効果の比較検証のため、汀線から33.3cm（現地換算L=15m）の位置に消波堤を配置したケースも実施した。なお、消波堤は消波ブロック（現地換算10t型）を用い、天端2個並び2層厚とした。以上の実験条件をまとめて表-1に示す。

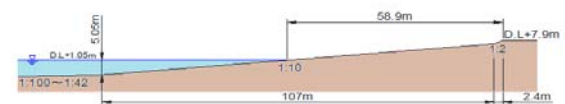


(a) 被災事例1 (A地区)

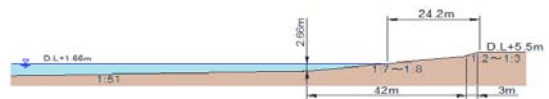


(b) 被災事例2 (B地区)

写真-1 オホーツク海沿岸の被災状況



(a) 被災事例1 (A地区) の断面地形



(b) 被災事例2 (B地区) の断面地形

図-2 被災事例の断面地形

(3) 波高と波の遡上高および海氷のパイルアップの計測方法

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、同一の計測を3回行ってその平均値とした。また、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。遡上高 R は静水面を基準とし、上方を正と定義した。サンプリングタイムは0.03s程度とし、3回計測を行いその平均値を採用した。また、被災相当波浪について、波の遡上水脈厚をデジタルビデオで計測した。海氷によるパイルアップは、鉄網柵前面の模擬氷について、水面からの高さ H と全体の厚さ T をデジタルビデオにより計測した。

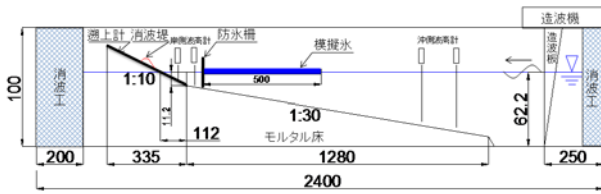


図-3 実験水路



写真-2 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.+3.44(+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)
模擬氷被覆率 ICR(%)	50%, 80%
模擬氷の大きさ (cm)	6(2.7m) × 6(2.7m), 10(4.5m) × 10(4.5m)
模擬氷厚さ t (cm)	0.5(22.5cm), 1.0(45.0cm), 2.0(90.0cm)
消波堤設置位置 (cm)	33.3(汀線から15m)

4. 不規則波による波の遡上高の再現

ヨーロッパ諸国では、不規則波の波の打上げ高として2%超過値 $R_{2\%}$ を代表値として用い、我が国の堤防などの設計には $R_{2\%}$ 打上げ高さを基準としている。そのため、実験による波の遡上高の再現には、この $R_{2\%}$ 遡上高を玉田ら¹⁴⁾により提案された算定式(1)による遡上高と、被害事例であるA地区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-4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、被害のあった波浪条件(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な要因と考えられる。また、式(1)が一樣勾配の条件で行った実験結果をベースとしているものであり、本実験で用いた複合勾配とは異なる条件であ

たことが考えられる。

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。

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

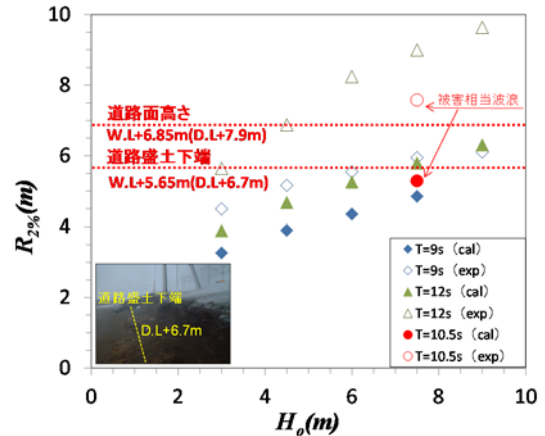


図-4 沖波波高 H_0 と遡上高 $R_{2\%}$ の関係

5. 海水による波高の低減特性

海水による波高低減の要因としては、Shen・Squireら⁹⁾も指摘している、①海水の相互作用(衝突や摩擦)、②海水面上での波の碎波、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-5は表-1の条件での海水による波浪低減効果の結果である。図中の K_f 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_f^* で除することにより波浪の低減割合を示している。波形勾配 H_0/L_0 の違いによる模擬氷の低減効果はバラツキの大きい結果となっていたが、ICRが高く氷厚が厚いほど波浪低減効果が大きい。ICR80%、 $t=20$ mmの場合では、おおそ3割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_0 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の現象が強く出ていた。ICR50%、 $t=5$ mmでは、波形勾配 H_0/L_0 が小さい場合ほとんど低減効果が見られなかった。この要因としては、 H_0 が0.02以下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-6は、一例として沖波波高 $H_0=16.7\text{cm}$ 、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し、特に高周波ほど減衰効果が高い結果となった。この傾向は水野ら¹³⁾の結果と同じである。

つぎに海氷による反射率特性 (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-7)。海氷存在時の反射率 K_r は、模擬氷の無い場合の反射率 K_r (0.1-0.16) と比較して全体平均では5%程度高い値とな

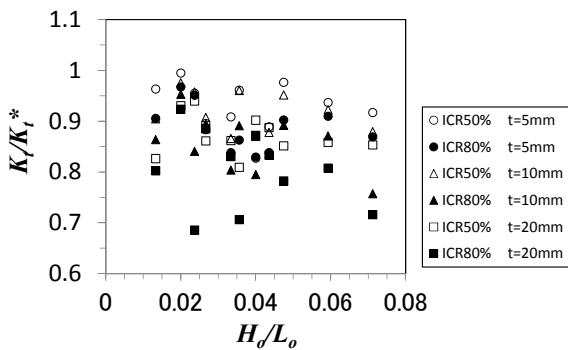


図-5 波形勾配 H_0/L_0 と低減割合 K_r/K_r^* の関係

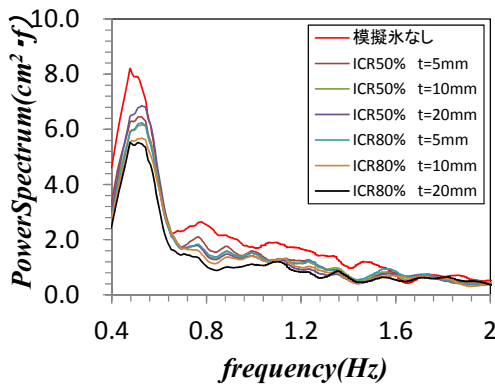


図-6 周波数とスペクトル密度の関係

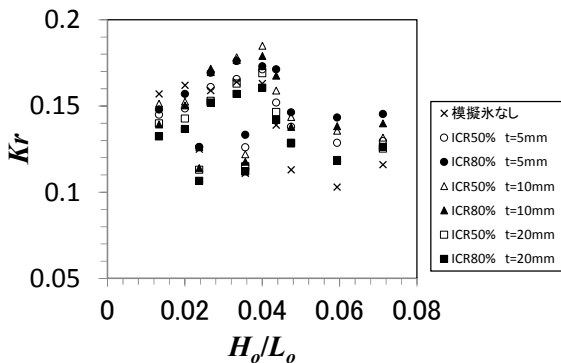


図-7 波形勾配 H_0/L_0 と反射率 K_r の関係

っており、 ICR が高く t が小さいほど K_r が大きく、 ICR が低く t が大きいほど K_r が小さくなる傾向となった。また、波形勾配 H_0/L_0 が 0.02 以下の条件では、模擬氷のある場合と比較して、最大で2割程度大きく、 H_0/L_0 が 0.04 以上の条件では、最大で2割程度小さい結果となった。

6. 海氷による波の遡上特性

海氷による波の遡上高の低減効果を明らかにするため、4. で再現させた模擬氷のない状態での $R_{2\%}$ 遡上高をベースとし、模擬氷を設置した場合と代表的な対策工としての実績の多い消波堤を設置した場合の遡上高の関係を調べた。図-8は、表-1の条件での海氷による波の遡上低減効果の結果である。図中の $R_{2\%}$ は模擬氷設置時および消波堤設置時 ($L=15\text{m}$) の遡上高であり、模擬氷が無い場合の遡上高 $R_{2\%}^*$ で除することにより波の遡上高の低減割合を示している。 ICR と氷厚 t が大きくなる程、低減効果が増し、 $ICR80\%$ 、 $t=20\text{mm}$ の場合では最大で6割程度の低減効果が見られた。 ICR と氷厚 t が小さく、 H_0/L_0 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。消波堤を設置した場合は H_0/L_0 の影響は小さく概ね4割程度の低減効果となっていた。

海氷の有無によって波の遡上により生じる道路盛土の

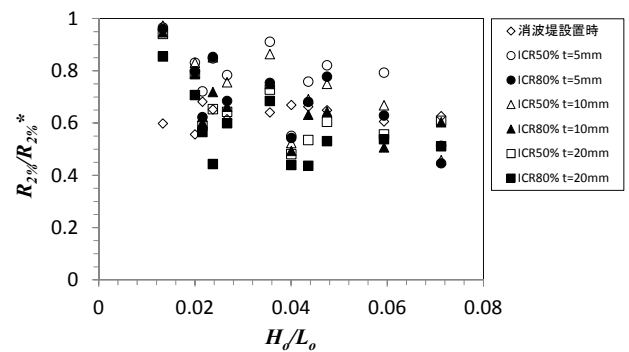


図-8 波形勾配 H_0/L_0 と波の遡上低減効果の関係

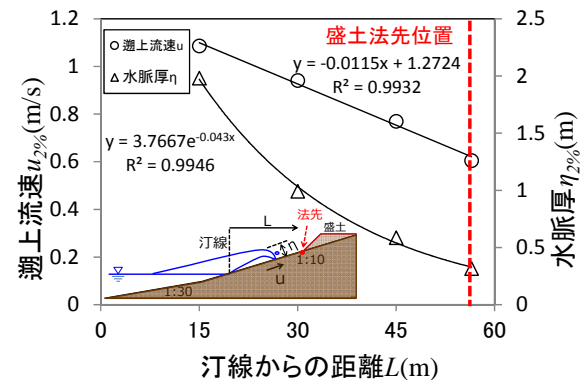


図-9 汀線からの距離と遡上流速と水脈厚の関係

被災の初期条件を把握することは、海水による波の遡上特性を検討する上で重要である。ここでは、波の遡上高さとともに遡上流速および水脈厚の影響についても検討を行った。遡上流速 u は、遡上波先端水位の流速を単位面積当たりの流束として取り扱い、遡上波1周期あたりのエネルギー方程式によって求めた宮武ら¹³⁾を準用して算出した。この方法によって遡上計で観測されたすべての波の遡上高を算出した後、 $R_{2\%}$ に該当する遡上波先端水位の流速を遡上流速 $u_{2\%}$ とした。また、水脈厚 η （水底からの波頂高）は、 $R_{2\%}$ に該当する遡上波の各地点ごとの水位をデジタルビデオで解析した値を $\eta_{2\%}$ とした。

図-9は模擬氷が無い状態で被災相当波 ($H_0=7.5$ m, $T=10.5$ s) を作用させたときの汀線からの距離と遡上流速 $u_{2\%}$ および水脈厚 $\eta_{2\%}$ の関係である。汀線から離れるにしたがって $u_{2\%}$ は直線的に、 $\eta_{2\%}$ は指数曲線的に減少している。盛土先端位置では、 $u_{2\%}=0.6$ m/s 程度、 $\eta_{2\%}=0.3$ m 程度となった。これらの値は対象海岸での波浪による盛土の初期被害を発生させる1つの目安と考えられる。

図-10は、模擬氷を設置した場合と消波堤を設置した場合の汀線からの距離 L と水脈厚 $\eta_{2\%}$ の関係である。模擬氷設置時の η は消波堤設置時と比較して、 $ICR80\%$ で $t=10$ mm以上の条件では消波堤よりも遡上低減効果が高いことが確認された。また、 $ICR80\%$ 、 $t=20$ mmの条件では、汀線より30m地点において η がほぼ0となり、波の遡上がなくなることを確認した。

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-3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高さ H および厚さ T を計測した。図-11は模擬氷のない状態で $R_{2\%}$ 遡上高を発生させる波浪に対応した波形勾配 H_0/L_0 と水面より上面の模擬氷のパイルアップ高さ $H_{2\%}$ の関係を示したものである。図中の黒のデータが被災条件の水位 ($DL+1.05$ m)、赤のデータがより潮位の高い $DL+1.55$ mの結果である。防氷柵前面における H は、潮位の影響は小さく、 H_0/L_0 が0.04を境にパイルアップ高さ $H_{2\%}$ が減少する傾向があった。 $H_{2\%}$ は最高で7m程度まで達しており、 ICR や氷厚 t にはあまり依存しない結果となった。また、潮位の違いによる $H_{2\%}$ の値の差はあまり見られなかった。 H_0/L_0 を関数として $H_{2\%}$ との関係を式(2)のように算定した。

図-12は、沖波波高 H_0 と防氷柵前面の模擬氷のパイルアップ厚 T (写真-3) の関係の結果である。パイルアップ高さ $H_{2\%}$ と同様に、 ICR や氷厚 t 、勾配変化点の潮位の違いについて規則性をもたない結果となった。ただし、 H_0 の増加にともないlog関数的に T が増加する傾向がみられた。以上の結果から、平均的なパイルアップ厚 T を式

(3) のように算定した。

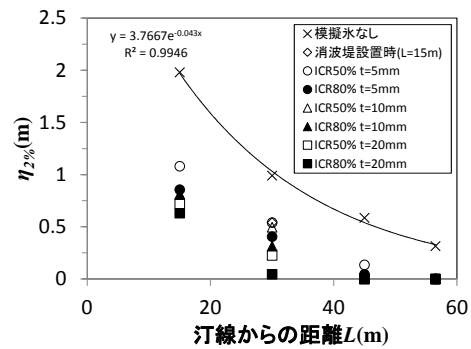


図-10 汀線距離 L_0 と水脈厚 η の関係

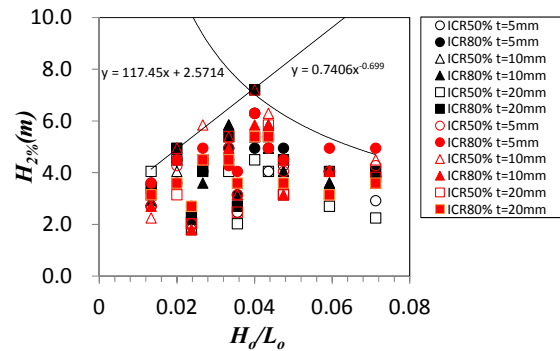


図-11 波形勾配とパイルアップ高さの関係

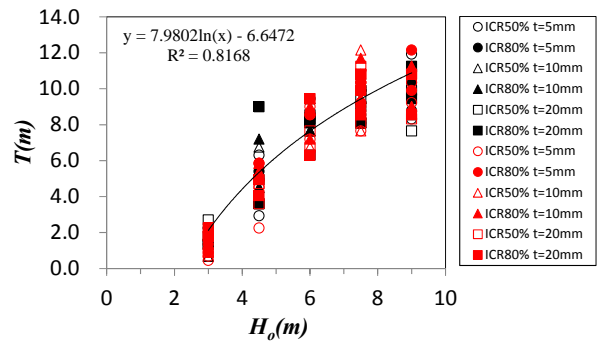


図-12 沖波波高とパイルアップ厚さの関係



写真-3 模型実験によるパイルアップ状況

$$H_{2\%} = 117.5 \left(\frac{H_o}{L_o} \right) + 2.57 \dots \frac{H_o}{L_o} < 0.04$$

$$H_{2\%} = 0.741 \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{-0.699} \dots \frac{H_o}{L_o} > 0.04$$

$$T = 7.98 \times \log_e H_o - 6.65 \quad (3)$$

ただし、

$$5.05 \leq h \leq 5.55 \quad (h \text{は勾配変化点の水深 m})$$

$$0.013 \leq \frac{H_o}{L_o} \leq 0.071$$

の場合とする。

8. 結論

本研究で得られた結論を要約すると以下のとおりである。

1) 近年の流水分布状況は、沖合に帯状に分布している場合や、沖合に海氷は少ないが、沿岸部付近に部分的に多く分布している状況が見られ、冬期の波浪増大の要因となっている。

2) 海氷がない条件で、A地区海岸被災時における波の遡上を再現し、10年確率波相当の波浪に対する盛土被害の発生条件の目安としては、遡上流速 $u_{2\%}$ は0.6m/s程度、水脈厚 $\eta_{2\%}$ は0.3m程度と推定した。

3) ICR80%かつ氷厚 $t=20\text{mm}$ の場合では波浪低減は3割程度となり、スペクトル密度は全周波帯で低減しているが、高周波成分の方が低減割合が大きい。

また、海氷による反射特性は、ICRが高く t が小さいほど K_r が大きく、波形勾配 H_o/L_o が0.02以下の条件では、模擬氷のある場合と比較して、最大で2割程度大きく、 H_o/L_o が0.04以上の条件では、最大で2割程度小さい。

4) 海氷による波の遡上低減効果は、ICRおよび氷厚 t が大きいほど高く、ICR80%、 $t=20\text{mm}$ の場合、最大6割程度の効果があり、消波堤と同等以上の機能がある。

5) 模擬的に設置した防氷柵全面での波浪による海氷のパイルアップ高さ $H_{2\%}$ と平均厚さ T について算出した。 $H_{2\%}$ と T の値は、ICRと t 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氷による波浪低減の要因は、海氷のICRと t および波高に依存し、①海氷の相互作用（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。

9. 今後の課題

今後、海底勾配や水深条件などの実験条件を追加し、海氷による波浪低減の各要因を詳細に分析する必要がある。また、波浪による海氷のパイルアップについての算定式の妥当性を検証した上で、適用範囲を拡張する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道開発局稚内開発建設部道路整備保全課の協力を頂いたことをここに記し、謝意を表します。

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), pp.23-24
- 2) 本間大輔, 井元忠博, 山本泰司 (2015): オホーツク海に面した海岸道路の遡上高に伴う盛土被害の発生条件とその対策, 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所, 月報7月号, pp.25-31.
- 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 zom (1998),J.Geophys.Res.,pp.6799-6818.
- 4) Squire,V.A.,J.P.Dugan,P.Wadhams,P.J.Rottier,and A.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46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47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 Jeffries, M.O.,ed.Anrtctic sea ice, physical processes, interations and variability.Washington,DC,American Geophysical Union, pp.325-341.
- 9) 国松靖, 秋原真哉, 榎国夫, ffries 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) 金田成雄, 今井正, 平山健一, 堺茂樹 (1994): 波浪による氷板の変形に関する模型氷及び模擬氷を用いた実験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.901-905.
- 11) 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.
- 12) 水野雄三, 谷野賢二, 平沢充成, 高橋哲美, 長内戦治 (1991): 海氷による波浪の減衰に関する一考察, 海洋開発論文集, Vol.7, pp.7-11.
- 13) 宮武誠, 藤間聡 (2004): 波打ち帯の浸食・堆積過程に及ぼす前浜地下水の流動特性, 土木学会論文集, No.754, pp.51-61.