

流氷来襲地域の沿岸防災に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平成 20 年～平成 22 年
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：木岡信治、菅原吉浩、上久保勝美、
菅原健司、大井啓司

【要旨】

気候変動に伴う流氷減少が沿岸域に与える影響を明らかとするため、オホーツク海沿岸を対象に観測データの解析および波浪推算による基礎的検討を行った。観測データの解析結果からは、近年の冬期波浪は増加傾向であり、流氷面積の減少が冬期波浪の増大に影響している可能性が大きいことが明らかとなった。また、波浪推算による流氷減少時の冬期の波浪変化を検討した結果、50 年確率波高は約 10cm 増大し、加えて海面水位の上昇を考慮すると、防波堤の滑動量は現在の波浪条件に対して約 1.7 倍に増大することが明らかとなった。さらに、津波による流氷の漂流・陸上遡上シミュレーションの基礎的な手法を構築し、大局的な流氷遡上域等を再現できることを示した。

キーワード：波浪推算、WAM、モンテカルロ、信頼性設計法、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流氷勢力が著しく変化する可能性が指摘されている¹⁾。流氷下を伝播する波浪減衰については水野ら²⁾が水理模型実験により検討を行っており、笹島ら³⁾は流氷存在時の周波数スペクトル形状について検討を行っている。しかし、実海域の流氷面積が減少した場合の波浪変化については具体的な検討が行われていない。今後、温暖化により流氷減少が顕著となれば、沿岸域に來襲する冬期波浪が増大し、沿岸構造物の安全性低下や高波被害の増加等が懸念される。

本研究では、オホーツク海沿岸の紋別地方を対象にし、波浪データおよび流氷面積の長期的変化から、流氷面積と冬期波浪の相互関係を検討する。また、オホーツク海沿岸を対象とした波浪推算を行い、流氷減少時の波浪変化が沿岸構造物である防波堤の滑動量に与える影響について検討する。さらに、流氷域・結氷域で津波が発生した過去の事例調査を行うとともに、津波による流氷の漂流・陸上遡上シミュレーションの基礎的な手法を検討する。

2. 近年の海象変化と流氷面積の関係

2.1 検討概要

検討対象期間は 1975 年～2009 年の 35 年間とした。波浪データについては、オホーツク海に面するナウファス紋別（波高計設置水深 -52.6m）の 2hr 毎データを使用した。風速データは、紋別港内の標高 18m 地点に設置されている、超音波式風向風速計により計測された 2hr 毎データを使用した。なお、波

浪データや風速データについては、各年の月別の欠測率が 50%以上の場合には、データを除外している。流氷面積については、気象庁のホームページ⁴⁾に公開されている、半旬毎（毎月 5 日、10 日、15 日、20 日、25 日および月末）データを使用した。

収集した波浪・風速・流氷面積データは、年別および月別で整理し、各データ別に近年の変化傾向や月別の特徴、流氷面積と冬期波浪の関係等について検討する。

2.2 波浪の経年変動

図-1 に月別の波浪エネルギーと高波浪（有義波高が 3m と 5m 以上の場合）の継続時間を示す。波浪エネルギーは棒グラフ、有義波高の継続時間は折れ線グラフとしている。有義波継続時間については、ナウファスデータが 2hr 毎データであることから、有義波高 3m 以上および 5m 以上の回数をカウントし、1 回当たり 2hr として累積している。なお、エネルギーフラックスは下記の式で算出している。

$$W_E = \frac{\rho g H_{1/3}^2 C_G}{8} \cdot T_N$$

ここに、 W_E ：波浪エネルギー（N）、 ρ ：海水の単位体積質量（=1,030tf/m³）、 g ：重力加速度（=9.81m/s²）、 $H_{1/3}$ ：有義波高（m）、 C_G ：群速度（m/sec）、 T_N ：ナウファス紋別のデータ測定間隔（=2hr）。

波浪エネルギーや高波浪の継続時間は 12 月～1 月の冬期に特に大きい傾向である。また、2005～2009 年の近年 5 カ年平均と 1975～2009 年の 35 年平均を比較すると、12 月の波浪エネルギーについ

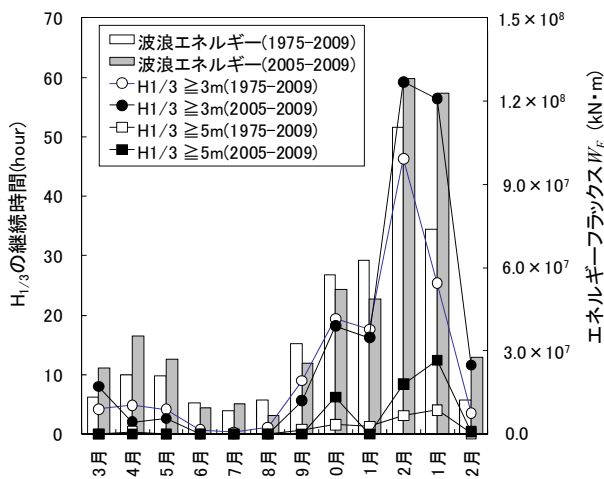


図-1 月別の波浪エネルギーと継続時間

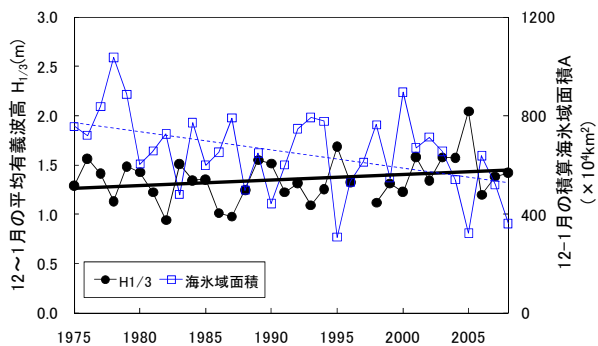


図-2 平均有義波高と積算流氷面積の経年変動

では 1.16 倍、1 月の波浪エネルギーについては 1.66 倍に増大しており、特に 1 月の増加が顕著である。年間に占める 12 月～1 月の波浪エネルギーの割合は、1975～2009 年では約 42%、近年 5 カ年では約 48% となり、年間の波浪エネルギーに対する冬期の割合が増大している。また、流氷来襲期の 2 月～4 月についても増加している。

このように、オホーツク海は冬期 12 月から 1 月の有義波高や波浪エネルギーが特に大きく、近年はその傾向が顕著である。また、2 月～4 月の従来は流氷により波浪エネルギーが抑制されていた期間についても、波浪エネルギーの増加が確認された。

2. 3 流氷面積と冬期波浪の長期的変化

図-2 に、1975～2008 年度の 12-1 月の平均有義波高とオホーツク海の積算流氷面積の経年変動を示す。なお、積算流氷面積とは、12 月から 1 月の 5 日毎の流氷面積を合計したものである。算出範囲は、図-3 の赤色の領域で、オホーツク海からカムチャッカ半島東岸までの範囲である。なお、2～3 月は海

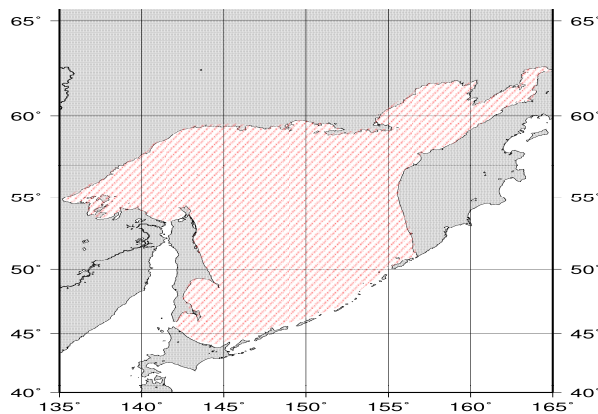


図-3 流氷面積の算出範囲

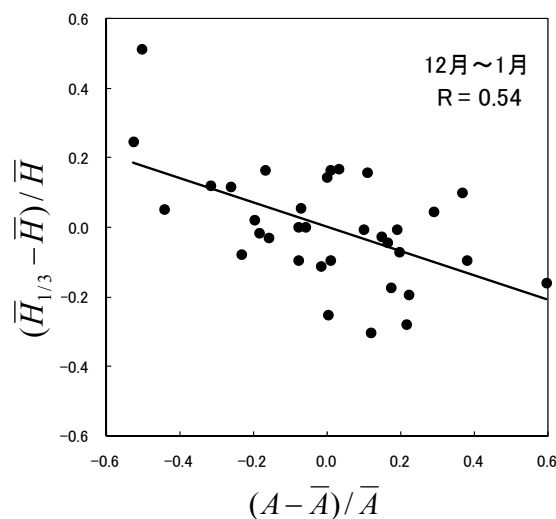


図-4 冬期平均有義波高と積算流氷面積

氷により波浪データの欠測期間が多いため除外している。

図より流氷面積の経年変動は大きいですが、長期的には減少傾向である。これに対して、冬期の有義波高は長期的には増加傾向である。過去最少の流氷面積を記録した 2005 年度を見ると、冬期 12～1 月の平均有義波高が大きくなっている。また、流氷面積が少ない 1983、1990、1995 年度においても、冬期の有義波高が大きい傾向である。反対に、流氷面積が多い 1982、1987、1993 年度では冬期の有義波高が小さい傾向である。

図-4 は 1975～2009 年の各年の 12 月～1 月の平均有義波高 $\bar{H}_{1/3}$ と積算流氷面積 A の相関を示す。縦軸は $\bar{H}_{1/3}$ を 1975～2009 年の有義波高の平均値 \bar{H} で無次元化しており、横軸も同様に 1975～2009 年の A の平均値 \bar{A} で無次元化している。

統計的な有意性は確認していないが、流氷面積が

少ない年に冬期有義波高は増大する傾向がみられる。例えば、横軸が-0.20 に対応する近似直線の縦軸は 0.07 となるが、これは、平年値に比べて流氷が 20%少ない時には、冬期 12 月～1 月の有義波高が 7%増大することを示している。

このように、流氷面積が多い年には冬期波浪が小さく、反対に、流氷面積が少ない年には冬期波浪が大きい傾向がみられ、流氷面積の増減が実際に冬期波浪の増減に影響している可能性が大きいことが確認された。

3. 波浪推算による流氷減少時の確率波高の検討

3.1 検討概要

波浪推算の計算領域は図-5 に示すように、北緯 43° から 63°、東経 142° から 167° を対象とし、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。NCEP-Reanalysis2 の時間解像度は 6hr 間隔である。波浪推算モデルは第 3 世代波浪推算モデル WAM を用い、水深の影響を無視した深海条件で計算を行った。格子間隔は 0.125°、計算時間ステップは 1/60hr (1min) とし、周波数分割数は 35 成分(0.042～1.067Hz)、方向スペクトルの方向分割数は 16 成分とした。

再現計算については、12 月～3 月の冬期流氷来襲時期 (以下、流氷期) と 4 月～11 月 (以下、通常期) に分けて再現性の検討を行った。再現計算ケースは、1999～2008 年の 10 年間の内、流氷期と通常期において各年の最大有義波高が観測された全 20 ケースの波浪を対象とした。再現性を確認するための現地波浪データは、紋別港沖の水深 50m 地点のノウファスデータを用いた。1 ケース当たりの推算期間については、最大有義波高が観測された日時的前後 5 日間 (計 10 日) とし、観測値と比較する推算値の出力地点は、波浪観測地点に最も近い計算メッシュ上の値を用いた。

流氷期の波浪推算手法については、流氷域を陸域として扱うこととした。流氷域の分布範囲は、気象庁のホームページ⁴⁾に公開されている 5 日毎の流氷分布図を用いた。流氷分布図には、流氷の密集割合 (海氷密接度) が 4 区分 (1～3、4～6、7～8、9～10) に色別に表現されている。水口ら⁵⁾は、密接度が 7 以上を陸域として扱った場合と 4 以上を陸域と

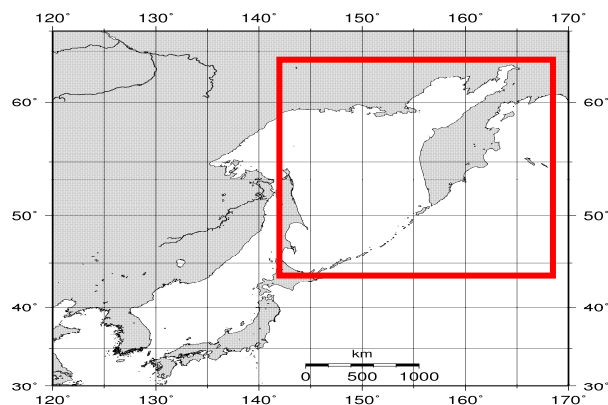


図-5 計算領域

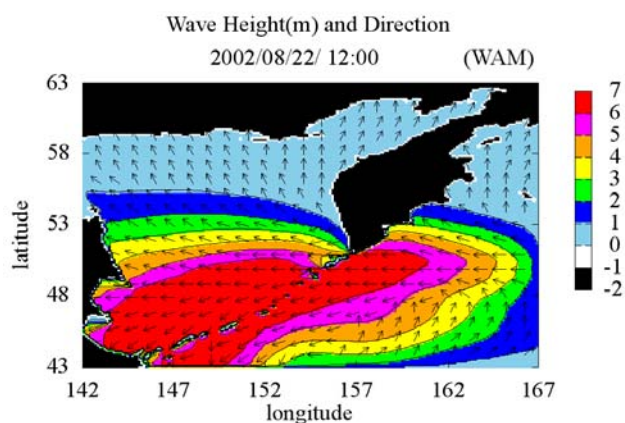


図-6 通常期の波浪推算結果の一例

して扱った場合における、オホーツク海に面する網走港を対象とした高波浪時の波浪推算を行っており、海氷密接度が 4 以上を陸域として扱う方が実測波高に近くなることを確認している。このため、本検討においても海氷密接度が 4 以上を陸域として扱うこととした。なお、推算期間中に流氷分布は日々変化するが、本研究では波浪推算 1 ケース 10 日間当たりの流氷分布については変化しないものとし、推算開始時の流氷分布図を用いた。

3.2 通常期の波浪推算の再現性

図-6 は、通常期の計算結果の一例で、北海道東方海上に発生した低気圧による有義波高分布である。北海道の東側には北方 4 島があるため 4 島を挟んで波高分布が不連続になっているが、北上した低気圧により波浪が増大し、北海道東側沿岸部に高波浪が来襲している様子が確認できる。

図-7 に、図-6 と同じケースについて、波向き、風速、有義波高および有義波周期の時系列を示す。波高については、8 月 21 日～8 月 22 日の北寄りの

風で大きく発達し、波向きについても NNE や NE 方向から来襲している。有義波高について推算値と観測値を比較すると、波高増減の経時的な傾向については概ね再現されている。しかし、ピーク付近の波高を再現することはできず、観測値に比べ 1.5m 程度大きい。このような傾向は、通常期の他のケースについても同様にみられた。有義波周期について推算値と観測値を比較すると、経時的な増減傾向は概ね再現されているが、ピーク前後の周期が観測値に比べ大きく、有義波高が減少した 8 月 25 日以降の周期については、観測値に比べ小さくなっている。

図-8 は、通常期の全 10 ケースについて推算波高と観測波高を比較したものである。推算波高は観測波高に比べて過大傾向となるが、相関係数は 0.899 と良好な相関が確認された。図-9 は同様に、通常期の全 10 ケースについて推算値と観測値の有義波周期を比較したものである。近似直線の傾きが 0.9246 と観測周期に近いが、相関係数については 0.639 と波高に比べて相関は良くない。

このように、通常期の推算波高は観測波高に対して過大傾向となるが、良好な相関であることから、推算された波高を図-8 の近似直線の傾き (≈ 1.23) で除することにより有義波高の推定が可能である。

なお、推算値と観測値の相違の原因としては、深海モデルであり計算では砕波変形などの影響が考慮されないこと、風速データおよび計算格子間隔の空間分解能が粗いこと、波高観測地点と計算結果の出力地点が厳密に一致していないことなどが考えられる。また、橋本ら⁶⁾や川口ら⁷⁾が指摘しているように、WAM モデルはうねり成分が精度良く評価できないことも要因と考えられる。

3. 3 流氷期の波浪推算の再現性

図-10 は、流氷期の計算結果の一例で、冬型の気圧配置が気象要因の有義波高分布である。流氷域は白色の分布で示しているが、流氷域の南東側で波浪が増大し、北海道東側沿岸部に高波浪が来襲している様子が確認できる。

図-11 に、図-10 と同じケースについて、波向き、風速、有義波高および有義波周期の時系列を示す。有義波高について推算値と観測値を比較すると、波高の増大や減少の経時的な変化傾向については概ね再現されている。しかし、12 月 25 日および 12 月 27 日付近の波高を再現することはできず、観測値に比べ 1.0m 程度小さい。図-7 および図-8 において、通常期の推算波高が観測値に比べ大きい傾向であっ

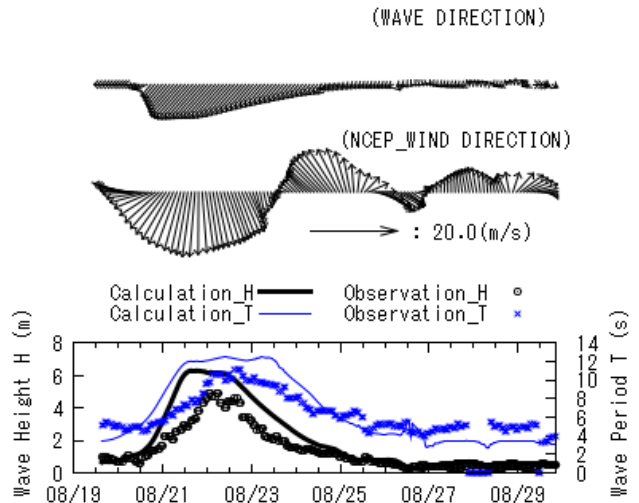


図-7 有義波諸元と風の時系列
(2002. 8. 19-2002. 8. 29)

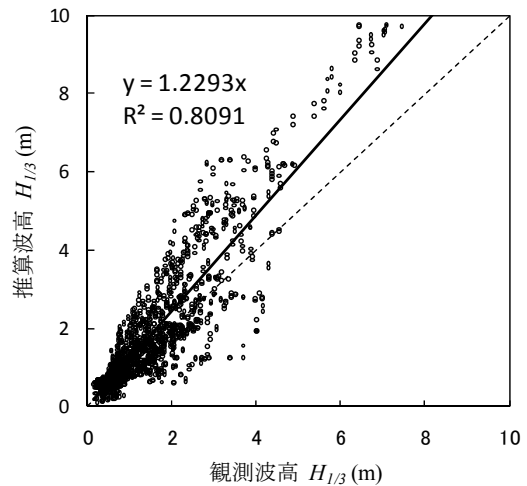


図-8 通常期有義波高の観測値との相関

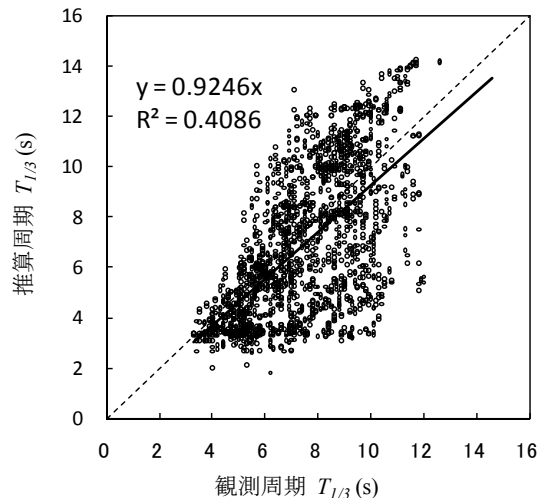


図-9 通常期有義波周期の観測値との相関

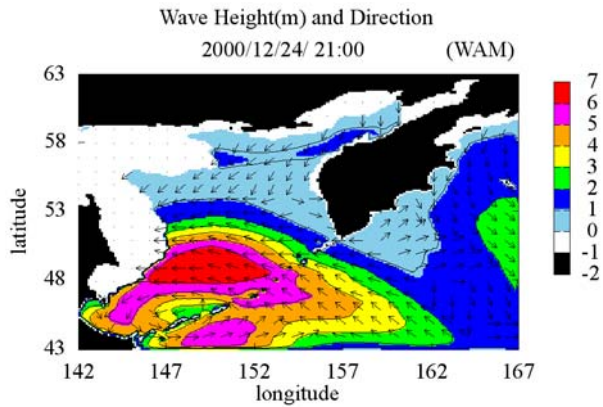


図-10 流氷期の波浪推算結果の一例

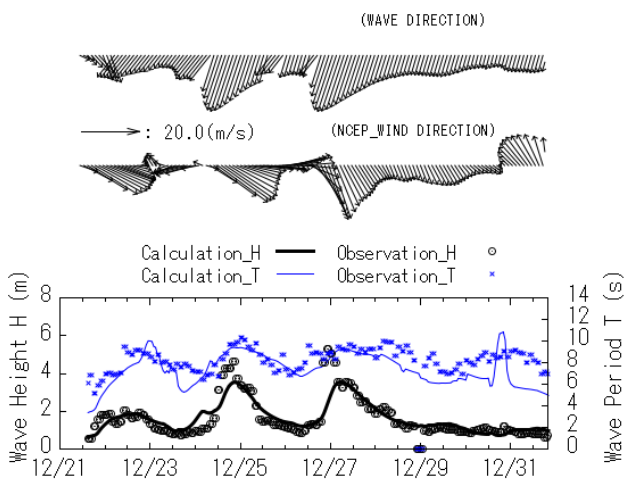


図-11 有義波諸元と風の時系列
(2000. 12. 21-2000. 12. 31)

たことを考えると、流氷を陸地とみなすことにより、波浪の伝播が過剰に抑えられたと推測される。また、有義波周期についても経時的な変化傾向が概ね再現されているが、推算値は観測値に比べ全体的に小さい。

図-12 は、流氷期の全 10 ケースについて推算波高と観測波高を比較したものである。近似直線の傾きが 0.965 と観測波高に近いが、図-8 の通常期の近似直線の傾きと比べると通常期の 78% となっており、先に述べたように、流氷を陸地とみなした事により波浪が過小に評価されていると考えられる。ただし、流氷分布範囲が小さいケースの場合には、通常期と同様に NCEP の推算波高は観測波高を大きく上回っている。また、相関係数は 0.878 と良好な相関となった。図-13 は同様に、流氷期の全 10 ケースについて推算値と観測値の有義波周期を比較したものである。流氷が少ない計算ケースも含んで

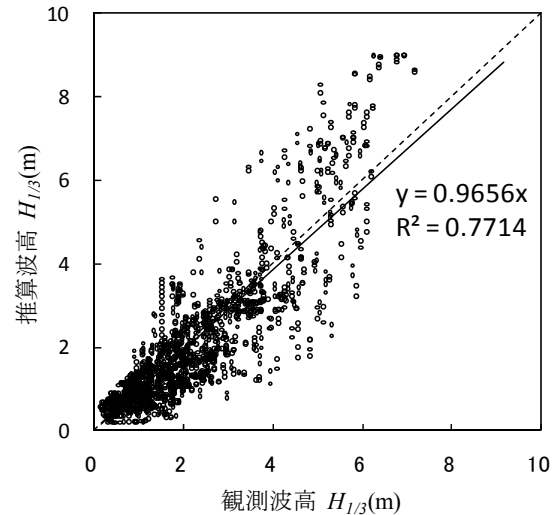


図-12 流氷期有義波高の観測値との相関

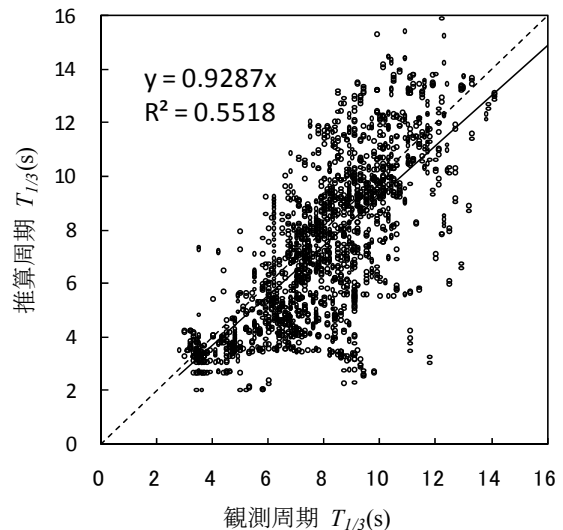


図-13 流氷期の有義波周期の観測値と推算値の相関

いるため、全体的な相関としては図-9 の通常期と同程度となっている。

以上のように、流氷期の有義波高は通常期に比べ小さめに算出されるが、流氷を陸域として扱っても妥当な再現結果が得られることが確認された。

なお、流氷面積が小さいケースでは、通常期と同様に観測波高に比べて推算波高が大きめに算出される傾向がみられたことから、流氷減少時の波高を算出する際には、計算結果を図-8 の近似直線の傾き (≈ 1.23) で除することにより有義波高を推定する。

3. 4 流氷減少時の波浪推算

流氷減少時の冬期波浪が年最大波を上回る風擾乱を選定するため、事前に予備検討として、1975～2008 年の紋別港内の冬期流氷期の風速データを用

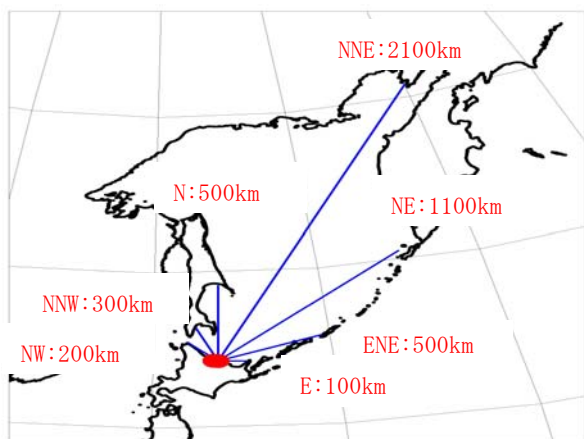


図-14 ウィルソン方式での吹送距離

いてウィルソン方式による簡易波浪推算を行い、ウィルソン波高上位 10 ケースの風擾乱を対象に WAM により波浪推算を実施した。将来の流氷減少量（以下、将来シナリオ）については、気象庁¹⁾が大気・海洋結合地域気候モデル CRCM を用いて検討を行っており、IPCC 第 4 次評価報告書の温室効果ガス排出シナリオの B1 シナリオ（環境の保全と経済の発展が地球規模で両立）に対して、100 年後の流氷面積が約 20%減少する予測結果が示されている。このため、本研究では、将来シナリオについては、流氷面積を海水温が高い南側から一律に 20%減少すると仮定し、流氷を減少させない場合（以下、現在シナリオ）と有義波高の比較検討を実施した。

なお、ウィルソン方式で使用する吹送距離については、図-14 に示すように設定した。

図-15 に現在シナリオと将来シナリオにおける波高分布の一例を示す。現在シナリオでは、北海道沿岸部が流氷で覆われているために高波浪は来襲していないが、将来シナリオでは流氷が 20%減少することにより、北海道沿岸部に高波浪が来襲している。

図-16 は、図-15 と同じ推算ケースについて、現在シナリオと将来シナリオによる有義波高を比較したものであるが、現在シナリオでは有義波高のピークが 2m 程度であるのに対し、将来シナリオでは約 7m となり、流氷が 20%減少することにより波浪が激増している。なお、観測値と推算値（0%OFF）を比較すると、波高の経時変化について概ね再現されている。

表-1 に、全 10 ケースの波浪推算結果を示す。なお、推算値および将来シナリオの有義波高について

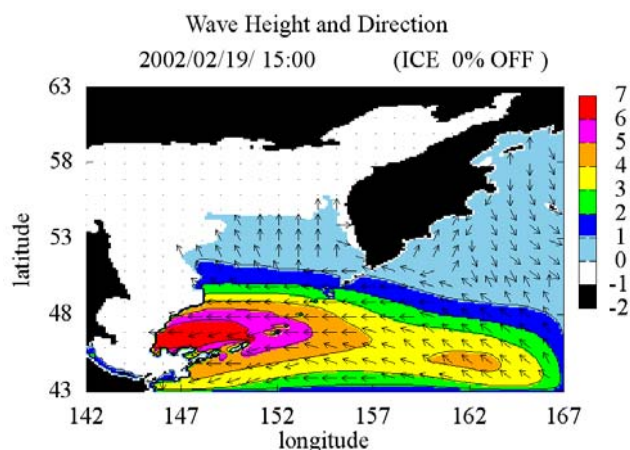


図-15 (a) 現在シナリオ波高分布の一例

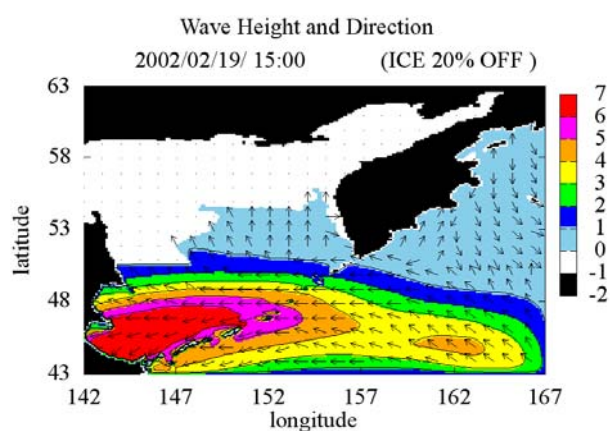


図-15 (b) 将来シナリオでの波高分布の一例

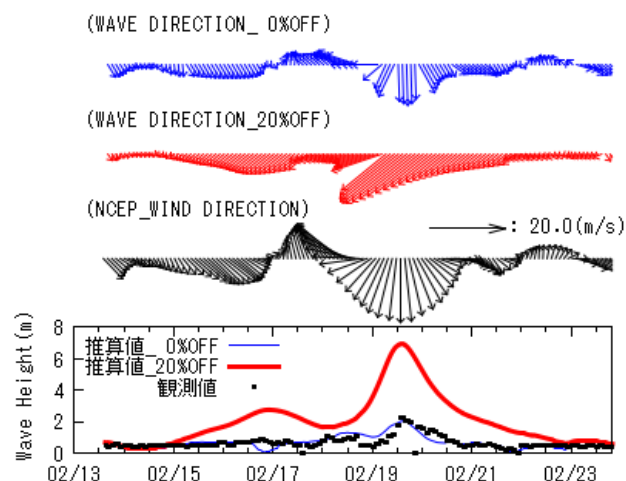


図-16 将来シナリオでの有義波高の時系列
(2002. 2. 13-2002. 2. 23)

は、図-8 の観測値と推算値の相関関係より 1.23 で除した値としている。観測波高については、10 ケース中 5 ケースで流氷の影響により欠測となって

いるが、残りの5ケースについては観測値に近い値となっている。将来シナリオと推算値（現在シナリオ）を比べると、全ケースで将来シナリオの有義波高は大きくなっている。さらに、将来シナリオと年最大値を比べると、10 ケース中 5 ケース（太枠野線）において実測の年最大値を上回る結果となった。

3. 5 流水減少時の確率波高の変化

1975年～2009年の35年間の年最大有義波高を表-1の将来シナリオの有義波高で置き換え、極値統計解析により流水減少時の確率波高を検討する。極値統計解析は合田⁸⁾の手法に従い、極値資料に当てはめる極値分布は、極値I型分布（Gumbel分布）、極値II型分布（形状母数 $k=2.5, 3.33, 5.0, 10.0$ ）、Weibull分布（形状母数 $k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$ ）の9種類とし、最適な確率分布を相関係数およびMIR基準に従って選択した。

図-17は、最適な分布関数であるWeibull分布（形状母数 $k=2.00$ ）を適用した場合の、観測値（尺度母数 $A=2.365$ 、位置母数 $B=3.369m$ ）と将来シナリオ（尺度母数 $A=2.351$ 、位置母数 $B=3.520m$ ）における年最大有義波高の確率分布である。観測値と将来シナリオにおける確率分布形状は類似しているが、将来シナリオにおいては高波浪が来襲しやすい確率分布となっている。また、50年確率波高は観測値では8.04m、将来シナリオでは8.16mとなり、約10cm確率波高が増大する結果となった。

このように、流水が減少することにより高波浪が高頻度で来襲するようになり、臨海施設の設計で用いられている50年確率波高も増大する可能性が高いことが確認された。

4. 流水減少時の防波堤の性能評価

4. 1 検討概要

気候変動が北方海域の沿岸構造物に与える影響を検討する上で、流水減少による波浪増大に加え、海面上昇を考慮することが必要であり、これらの影響に対する構造物の性能を評価する手法としては、信頼設計法が最適である。このため、波浪増大の影響を最も受けやすい防波堤を対象に、流水減少による波浪増大および海面上昇に対する影響を信頼設計法により検討を行う。

防波堤の信頼性設計法に関する既往の研究事例としては様々行われているが、本研究では、高山ら⁹⁾の手法に従い、消波ブロック被覆堤の変状による波

表-1 将来シナリオによる有義波高の変化

case	期間	有義波高 $H_{1/3}(m)$			年最大値
		観測値	推算値	将来シナリオ	
1	2007.1.3-1.13	6.36	6.37	6.97	6.24
2	2004.1.9-1.19	7.13	7.34	7.79	7.16
3	1993.1.24-2.3	2.88	3.68	4.74	3.71
4	1991.2.13-2.23			5.77	6.57
5	2008.2.20-3.1	2.26	3.24	5.24	5.27
6	1990.3.8-3.18			6.02	4.30
7	1983.2.11-2.21	1.10	0.81	2.21	5.90
8	1991.3.2-3.12			3.41	6.57
9	1999.3.17-3.27			2.82	4.45
10	2002.2.13-2.23	2.28	1.66	5.64	4.90

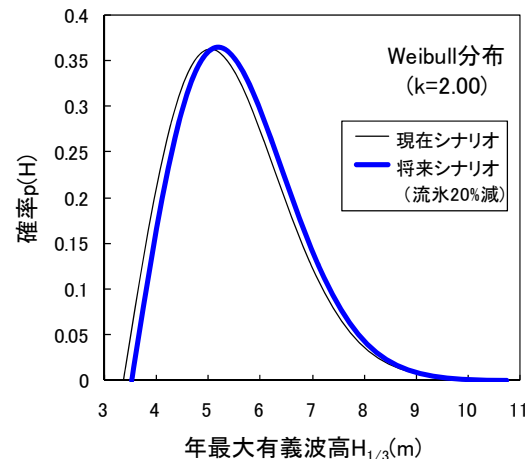


図-17 年最大有義波高の確率分布

力増大を考慮した堤体滑動量の算出を行う。沖波は図-17で設定したワイブル分布に従い、1年間（1波群）の有義波高 $H_{1/3}$ の継続時間は2hrとした。

検討対象施設は、紋別港の沖合の第1線防波堤を対象とし、この防波堤の設計沖波（波向 NNE）に、図-17の確率分布を適用させる。ただし、図-17は波向き別では無く年最大波を対象にした確率分布であるが、高波浪時の波向きは NNE となることが多いため、設計沖波も同様の確率分布形状になると仮定した。

表-2に、信頼性設計上の各要因の正規分布の変動条件を示す。平均値の偏り α や変動係数 γ の意味は、真値と誤差のばらつきを正規分布として考慮したもので、限られた波浪データから確率分布を推定するための統計的不確実性、波浪変形および波力の算定精度、材料のばらつき等である。値については下迫ら¹⁰⁾と同様としているが、高潮についてはオホーツク海での影響は少ないため考慮していない。また、沖波から堤体位置までの屈折係数は1試行回数毎に計算を行わず、現行設計法における屈折係数を一定値とて与えた。ただし、波浪変形の γ は 0.1

とすることで、屈折と浅水変形の変動を考慮している。堤体への入射角については、屈折後の入射角 $\beta = 58^\circ$ に対して $\pm 11.25^\circ$ の範囲で一様分布させ、入射角の変動係数は考慮しないこととした。

表-3 に検討ケースを示す。シナリオ I は現在シナリオ、シナリオ II では流氷減少による波浪増大を考慮し、シナリオ III および IV で海面上昇による影響の検討を行う。なお、海面上昇量については、IPCC が 100 年後の平均水位上昇量を 18~59cm と予測しており、本研究においては、耐用年数 50 年間における滑動量を対象とするため、海面上昇量は 50 年間で 30cm 上昇すると仮定し、0~50 年の間では経過年数に対して線形的に増加すると仮定した。

4. 2 将来シナリオにおける防波堤性能の変化

図-18 は、シナリオ別の各年の累積滑動量を 5000 回の試行全てについて平均したものである。シナリオ I ~ II を比較すると、流氷が減少することにより 50 年目の滑動量は約 1.4cm 大きくなるが、被害は小さい。これは、沖波が大きくなっても砕波変形により堤体位置の有義波高が頭打ちとなることと、安全率が 1.2 以上であり十分な堤体重量が確保されているためと考えられる。しかし、シナリオ III ではシナリオ II よりも滑動量が大きくなり、シナリオ IV では、シナリオ I に比べて約 1.7 倍の滑動量 (9.9cm) となった。なお、防波堤の滑動量の許容値については明確に定められていないが、静穏度を確保する面から考えると、約 10cm の滑動量は機能上から全く問題が無いと考えられる。

4. 3 将来シナリオに対する対策の方向性

現行の安全率を用いた設計法では、施設の安定性は滑動、転倒、支持力の各被災モードに対する安全率で評価されるため、将来シナリオに対する具体的な被害の程度が把握できない。また、消波ブロックの安定質量はハドソン式で評価されているため、沖波波高が 10cm 程度増加しただけで安定質量不足となり、1 ランク上の消波ブロックでの改良が必要と判断される場合もある。しかし、今回、信頼性設計法で検討した結果、堤体に滑動は生じるものの基礎マウンドから堤体が滑落するような被害とはならず、将来シナリオに対しても防波堤としての機能を十分に有する事を確認した。

このため、将来シナリオに対する施設の安定性および機能性を評価する場合には、信頼性設計法を取

表-2 各要因の正規分布の変動条件

不確定要因	平均値の偏り α	変動係数 γ	備考
沖波	0	0.1	
潮位	—	—	+1.3~0.0m 迄一様確率分布
高潮	—	—	考慮せず ^a
波浪変形	0	0.1	
有義波周期	0	0.1	
摩擦係数	0	0.1	$\mu = 0.6$
入射角	—	—	$\beta \pm 11.5^\circ$ で一様分布
波別周期	0	0.1	
波力	0	0.1	衝撃砕波係数 α^* を考慮
自重	—	—	変動は考慮せず ^a

表-3 期待滑動量の検討ケース

シナリオ	流氷減少	海面上昇	備考
I	無	無	現在シナリオ
II	有	無	将来シナリオ
III	無	有	シナリオ I + 海面上昇量=30cm
IV	有	有	シナリオ II + 海面上昇量=30cm

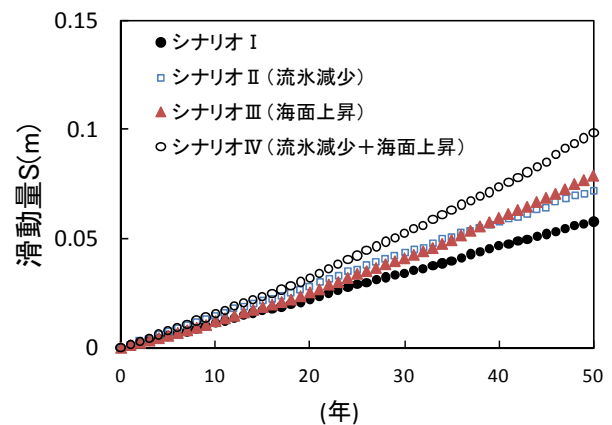


図-18 シナリオ別の堤体滑動量の経年変化

り入れる事が経済性の面からも必要である。一方、沿岸構造物の耐力不足が確認された場合には、従来どおり、防波堤の嵩上げ等による堤体重量の増加および消波工改良が基本になってくるが、ブロック沈下により衝撃的な波力が作用することも想定されるため、維持管理によるブロック沈下箇所の早期発見と早期改修が基本的な対策として重要であると考えられる。

5. 津波被害に及ぼす流氷の影響評価法

5.1 概要

冬期の北海道北東部沿岸域などの流氷域において、大量の海氷をともなった津波は(図-5.1)、通常の津波よりもさらに被害を拡大し、国民の生命・財産に甚大な損害を与える可能性がある。事実、1952年3月、十勝沖地震で発生した津波により流氷が遡上し、後述の図-5.3に示すように、家屋が損壊した例も報告されている。中央防災会議において切迫性が高いと指摘されている地震・津波には、結氷・流氷域で発生するものも含まれ、流氷遡上による損害を軽減するためのハード的・ソフト的な方策の確立が強く望まれている。そこで、将来的には、①海氷遡上を考慮した津波ハザードマップ作成技術を構築すること、②石油タンクや避難施設等の重要構造物の衝撃耐氷設計法構築など被害軽減のための方策を提案すること、を目標とするため、本研究ではこのうち、前者①に資する基礎的な研究を実施する。まず、流氷域・結氷域で津波が発生した過去の事例を調査するとともに、津波による流氷の漂流・陸上遡上シミュレーションの基礎的な手法を構築し、その適用可能性を検討する。

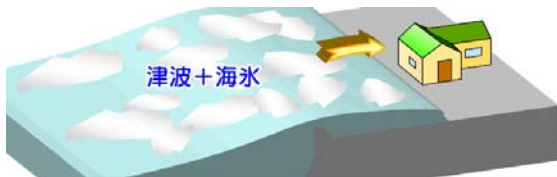


図-5.1 流氷をともなった津波来襲のイメージ

5.2 流氷域・結氷域で津波が発生した過去の事例調査

図-5.2に、1952年十勝沖地震とその被害の概要を示す。1952年3月4日にM8.2の地震が十勝沖で発生し、死者28名、家屋全壊・半壊多数という甚大な被害が生じた。津波規模は1~2mであったが、道東では3~4m(場所

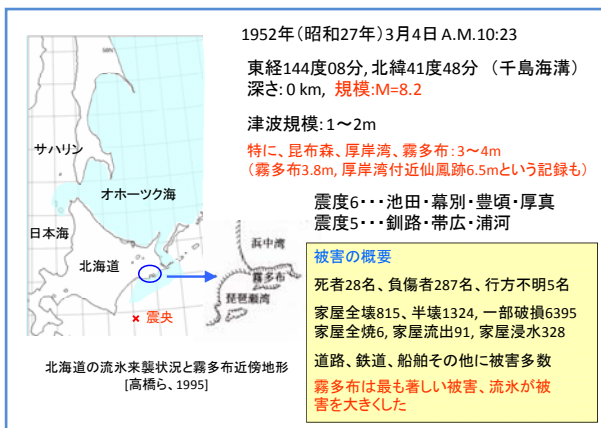


図-5.2 1952年十勝沖地震とその被害の概要

により遡上高 6m)の津波が来襲し、特に霧多布は最も大きな被害を被った。この津波は流氷を伴っており、流氷の陸上遡上がその被害を大きくしたといわれている。図-5.3に、津波とともに遡上した流氷による家屋の被害状況の例を、図-5.4に、霧多布における浸水と家屋被害の分布を示す。特に、霧多布での被害においては、琵琶瀬湾に取り残された海氷が、津波によって砕かれ、氷片を伴って市街地・陸地に遡上したことで、家屋の破壊等、被害を拡大させた例の無い複合災害である。津波来襲直前の海氷分布や海氷特性については、詳細な資料は残っていないものの、約1週間前に流氷が到達し、琵琶瀬湾に残置された状況であった、海氷の大きさは、2m平方程度で、厚さ0.6m程度が多く、5m平方で厚さ1.3m程度のものがあつた、厚さ1m以上の流氷が市街地に遡上した、遡上速度は人の駆け足程度であつた、などの情報



図-5.3 1952年十勝沖地震で発生した津波とともに遡上した流氷による家屋の被害状況の例(北海道浜中町)(根室測候所蔵、1952年十勝沖地震調査報告書¹²より)

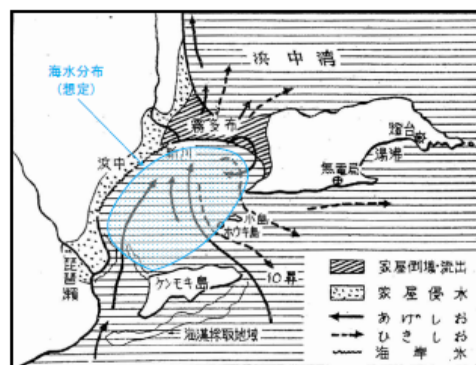


図-5.4 霧多布における浸水と家屋被害の分布

が得られた。これらは、後述する遡上シミュレーションの検証などで利用する。

次に、流氷域・結氷域で津波が発生した過去の事例を表-5.1 にまとめた。なお、赤のラインはオホーツク海においても観測された津波を示す。このように流氷域・結氷域でも津波が少なからず発生していることが分かる。オホーツク海に面したいくつかの自治体でも、2006年、2007年千島沖で発生した地震津波を契機としてハザードマップを整備するに至った。また、後述するが、2011年の東北地方太平洋沖で発生した地震で、道東にも大きな津波が来襲した。その時、幸いにして流氷は、後退傾向にあり、ほとんどなかったが、それでもそのわずかな氷塊が遡上していたことは注目に値する。

表-5.1 20世紀以降、流氷・結氷域で津波が発生した

1918	千島列島ウルフ島沖	M8.0	死者24人。根室(花咲) 1.1m
1952	十勝沖	M8.2	死者・行方不明者33人。北海道から東北に津波。霧多布: 3~4m
1956	北海道北東沖	M5.8	最大震度4。網走付近に軽微な被害。網走で波高0.4m
1958	択捉島付近	M8.1	太平洋岸各地に津波。霧多布で波高2m
1960	チリ地震に伴う津波		日本国内での死者142人。根室地方3.5m
1963	択捉島沖	M8.1	三陸沿岸で津波。根室などで数10cm
1969	北海道東方沖	M7.8	根室・釧路・広尾でそれぞれ震度4。根室で1.3m
1973	根室半島沖	M7.4	北海道で最大震度 5、津波あり。花咲2.8m
1994	北海道東方沖	M8.2	道東で最大震度 6、死者・行方不明者は北方領土で11人。花咲1.7m。網走1.5cm
2003	十勝沖	M8.0	霧多布1.2m。花咲0.9m
2006	千島沖	M7.9	花咲0.4m。釧路0.3m。網走0.2m。紋別0.4m
2007	千島東方沖	M8.2	花咲0.2m。稚内0.1m。網走0.1m
2010	チリ中部沿岸	M8.8	花咲1.0m。網走0.2m。枝幸0.3m など
2011	東北地方太平洋沖	M9.0	花咲2.8m。霧多布2.6m。網走0.3m。枝幸0.4m など

赤のラインはオホーツク海においても観測された津波を表す

5.3 津波による流氷の漂流・陸上遡上シミュレーションの基礎的手法の検討

5.3.1 モデルの概要

流氷群は非連続体であるが、巨視的に高粘性流体(連続体)としてモデル化し、非線形長波方程式の2層流モデルを適用[例えば松本(1998)¹³]、岩淵・今村([2005)¹⁴]した。モデルの概要を図-5.5 に示す。2層流モデルにおいて、各層(上層:流氷群、下層:海水)に流体の支配方程式を積分した層モデルを適用する。支配方程式は各層で非線形長波理論を適用し、各層の運動方程式中には界面抵抗の項を付加して運動量を受け渡す。下層の影響は界面の変化として上層の連続式に取り入れられ、上層の影響は圧力として下層の運動の式にあらわれる。

ここで、現実の流氷挙動と合うように、オリジナルモデルに対して検討を加えた主な項目は、流氷遡上時の流氷と陸部との摩擦を考慮したこと(底面摩擦項として)、

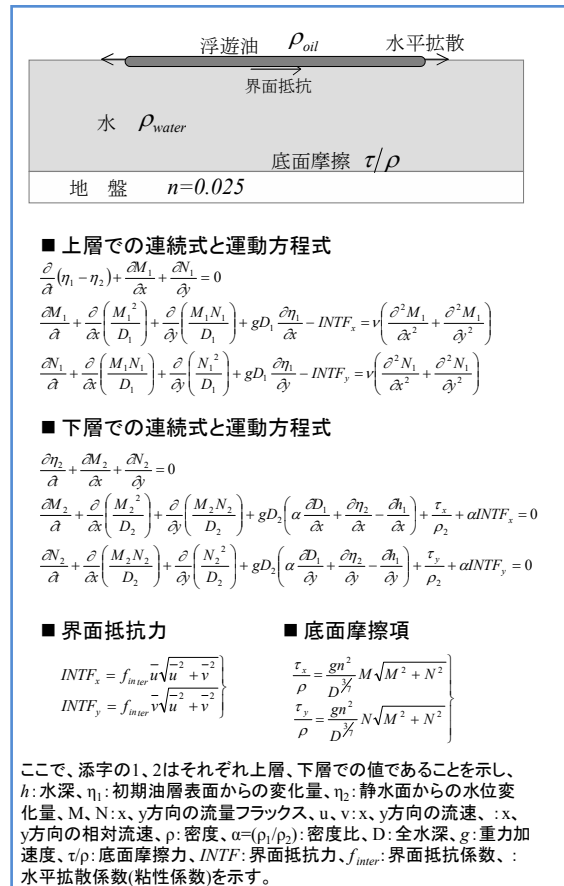


図-5.5 2層流モデルの概要

界面抵抗係数は「摩擦抗力係数」として扱い、水平拡散係数(粘性係数)は、オホーツク海における流氷の海岸近傍の速度分布(境界層内)から推定される渦動粘性係数[滝沢ら, 1976]を採用したこと、それから、上層流体(氷)が無限に広がっていくという矛盾に対処するため、「氷-氷-空気」の界面における界面張力項を考慮したこと、等である。しかし、「氷-空気」、「氷-水」、それぞれの界面張力を得ることが困難なため、それらを合した「正味の界面張力: net interfacial tension」(Yappa, 1989)¹⁵を用いる。これにより、津波到達までに氷層が拡散する現象を抑制する効果が期待され、つまり、予め与えた一定の氷厚を保持した状態での流氷群挙動がシミュレーションできる。

また、波源から伝播する津波については従来の非線形長波方程式による単層モデルを、流氷遡上を含む領域について2層流モデルで解く方法を採用した。本研究で採用した単層・2層ネスティングモデルの概念図を図-5.6 に示す。なお、本シミュレーションは、1952年十勝沖地震における霧多布周辺での津波・流氷挙動の再現計算としたため、その地形モデルを例示している。

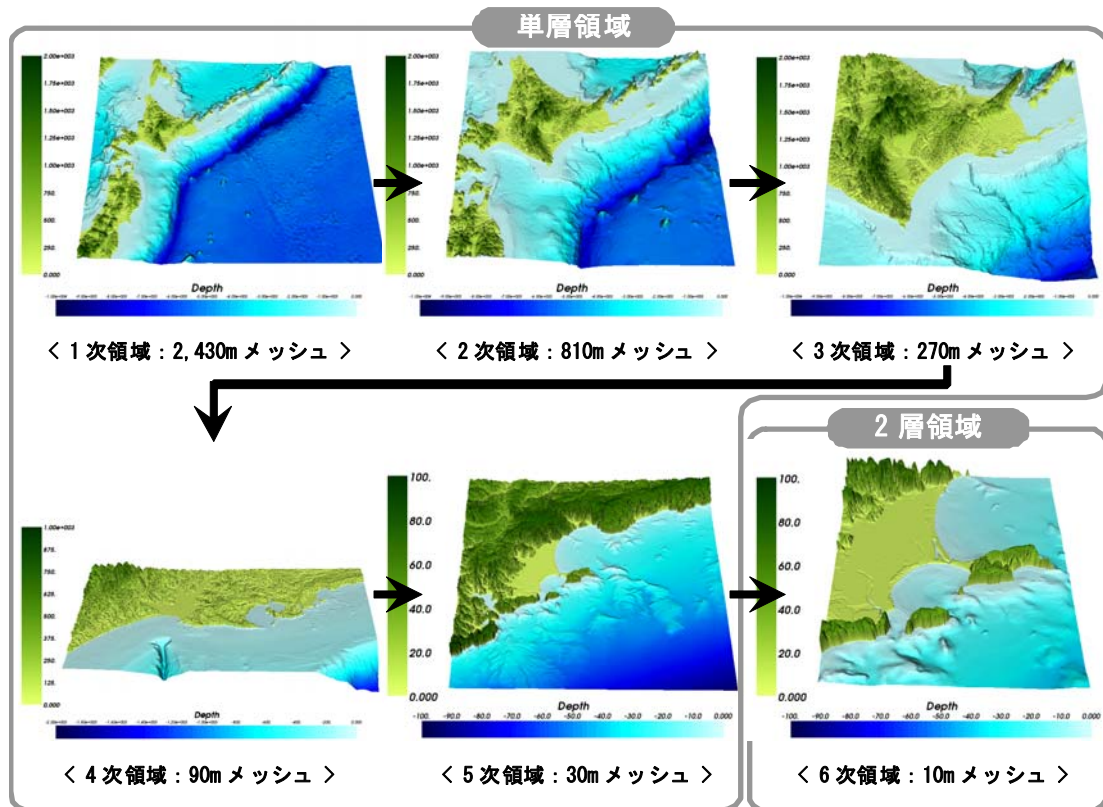


図-5.6 単層・2層ネスティングモデルの概念

5.3.2 主な計算結果

本シミュレーション法を用いて、実際に津波で流氷が遡上し、被害をもたらした、1952年十勝沖地震での霧多布付近の津波来襲状況を再現した。図-5.7にはその計算結果の例を示す。なお、流氷の初期分布には、前述の調査結果を基に本図のように、1m厚の氷が琵琶瀬湾に分布している状況を仮定した。また、主な計算条件を表-5.2に示した。計算結果を見ると、拡散係数を適切に設定し、界面張力項を導入した事など、改良された二層流モデルにより、流氷の固体としての振る舞いが改善され、大局的ながら流氷遡上域等を再現できたものと思われる。また、海氷衝突力推定に必要な最大衝突速度（流氷の最大流速）が数 m/s であり、前述の調査結果から、流氷の

表-5.2 主な計算条件

格子サイズ	10m(6次領域)~2,730m(1次領域)
計算時間間隔	0.01s(6次領域)~2.43s(1次領域)
計算潮位	T.P.+0.5m
水層打ち切り水深	1.0×10^5 m
初期海水厚	1m
比重	0.91
界面抵抗係数	0.01
水平方向拡散係数	100 m^2
界面張力	$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^3$
氷層打ち切り水深	1.0×10^5 m

遡上速度は駆け足程度だったという証言とも合致していると言える。しかし、流速など、打ち切り水深の設定な

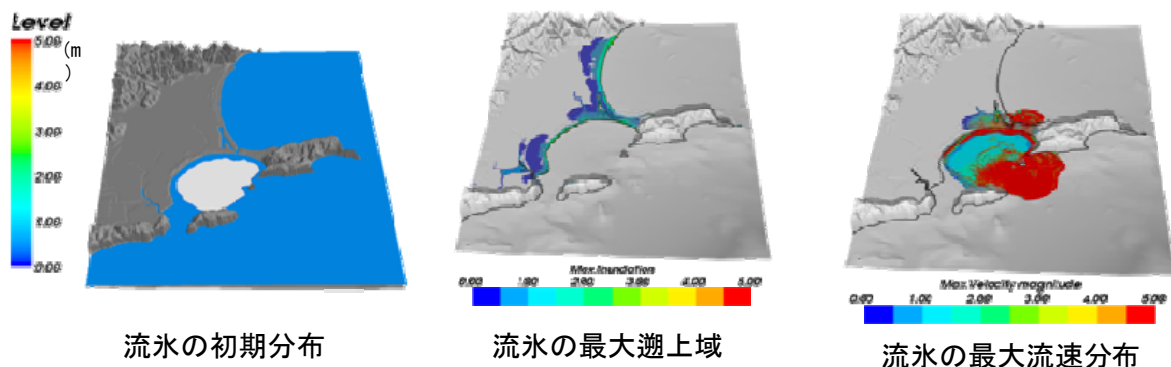


図-5.7 計算例：1952年十勝沖地震において発生した霧多布地区における津波+流氷の来襲再現

どに伴うスパイク状の数値的不安定性が残ることや、地形の凹凸や構造物を超えて流氷が移動するなど、実際推定される挙動とは異なる流体的な性質が残っている事など、計算精度向上や計算手法の改良等、まだ多くの課題が残されている。

5.4 東北地方太平洋沖地震で発生した海氷の遡上状況および今後の課題

2011年3月11日に発生した地震で、道東方面でも3m近い津波が来襲した。道東方面の津波および流氷遡上調査を行った結果、その当時、幸い流氷が後退しており、沿岸部ではほとんどない状態であったが、それでも残っていたわずかな流氷が陸上へ遡上していることが確認された(図-5.8, 5.9 参照)。また民家に迫っている流氷塊も確認され、もう少し時期が早ければ、海氷によって被害が拡大していた可能性がある。



図-5.8 東北地方太平洋沖地震で発生した津波により遡上した流氷跡(根室半島太平洋沿岸部)

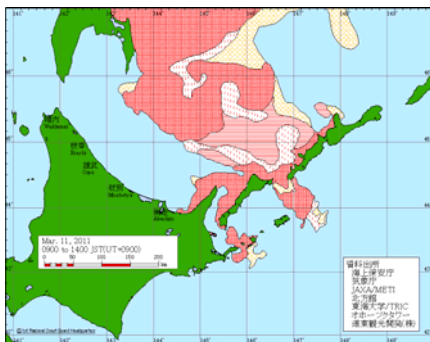
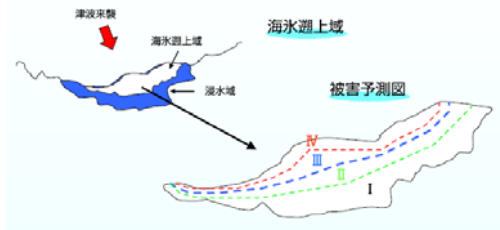


図-5.9 地震津波発生時の流氷分布

6. まとめ

本研究では、オホーツク海沿岸の紋別地方を対象とし、近年の気象海象変化を把握するとともに、流氷面積と冬



被害危険度ランク(飯塚ら(2000)準用)

ランク	衝突力 F	家屋等の被害の程度
I	$0 < F < 27.4$	木造家屋の小破
II	$27.4 < F < 49.0$	木造家屋の中破、コンクリートブロック造の小破
III	$49.0 < F < 111$	木造家屋の大破
IV	$111 < F < 603$	コンクリートブロック造の中破
V	$603 < F$	コンクリートブロック造の大破、鉄筋コンクリート大破の危険性

図-5.10 流氷遡上を考慮した被害予測やハザードマップのイメージ

期波浪の相互関係を検討した。また、オホーツク海を対象とした波浪推算を行い、流氷減少時の波浪増大および海面上昇が防波堤に与える影響について検討した。

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) オホーツク海の波浪エネルギーは12月～1月の冬期に大きく、年間に占める12月～1月の波浪エネルギーは約5割を占める。また、近年5カ年では冬期の波浪エネルギーおよび高波浪継続時間は増加しており、2月～4月の従来は流氷により波浪エネルギーが抑えられていた期間についても、波浪エネルギーが増加している。
- 2) 流氷面積の経年変動は大きいですが、長期的には減少傾向であり、これに対して冬期の有義波高は長期的には増加傾向である。また、流氷面積と冬期有義波高の相関から、流氷面積が少ない年に冬期有義波高が増大する傾向が確認され、観測データからも流氷面積が冬期波浪の増減に影響していることが明らかとなった。
- 3) 流氷存在海域における波浪推算手法として、海氷密接度4以下を陸域として扱うことで、妥当な再現性が得られることが確認された。
- 4) 流氷減少により北海道東側沿岸部には高波浪が来襲するようになり、流氷が20%減少すると仮定した将来シナリオにおいては、50年確率波高が約10cm増大することが確認された。
- 5) 流氷減少による波浪増大および海面上昇を考慮することにより、現行シナリオに比べて防波堤の滑動量は約1.7倍(9.9cm)となるが、基礎マウンドから堤体が滑落するような被害とはならず、将来シナリオ

に対しても防波堤としての機能を十分に有する事を確認した。

- 6) 流氷域・結氷域で津波が発生した過去の事例調査を行うとともに、今回発生した東北地方太平洋沖地震による津波と流氷遡上調査を行った結果、氷海域でも海氷を伴った津波が発生し、海氷が被害を拡大する可能性があることを示した。
- 7) 津波による流氷の漂流・陸上遡上シミュレーションの基礎的な手法を構築し、その適用可能性を検討した。二層流モデルを改良することにより、流氷の固体としての振る舞いが改善され、大局的ながら流氷遡上域等を再現でき、その有用性が示された。しかし一方、いくつかの課題が明らかとなった。

今後の本研究の方向性として、2~4章の流氷減少時の波浪推算については、モデルを浅海域に拡張するとともに、将来シナリオにおける流氷面積の減少範囲および流氷域を陸域として扱う際の海氷密接度の境界などについて検討を行っていく必要がある。また、将来シナリオを設定する上で、本検討では流氷減少と海面上昇を考慮しているが、これ以外に風速の増大など多方面からの検討が必要である。さらに、国の財政が極めて厳しい中、これらの将来シナリオに備えた事業を実施する際に、施設の投資優先度を判定する手法を確立していくことが重要である。

5章の津波被害に及ぼす流氷の影響評価法に関する今後の研究の方向性としては、まずは、前述のように本モデルの精度向上であるが、最終目標としては、図-5.10のイメージに示すように、主に数値計算および実験により、海氷遡上を考慮した津波ハザードマップ作成技術を構築し、石油タンクや避難施設等の重要構造物の衝撃耐氷設計法構築など被害軽減のための方策を提案していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 気象庁：「地球温暖化予測情報」，第7巻，59p. 2008.3.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 気象庁ホームページ <http://www.data.kishou.go.jp/>
- 5) 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.
- 6) 橋本典明、川口浩二、真期俊行、永井紀彦：「方向スペクトル観測値に基づく第三代波浪推算法（WAM）の推定精度に関する検討」、海岸工学論文集、第46巻、pp. 276-280、1999.
- 7) 川口浩二、橋本典明、永井紀彦、久高将信：「ECMWF 風データと WAM に基づく日本沿岸波浪の推定精度に関する検討」、海岸工学論文集、第48巻、pp. 231-235、2001.
- 8) 合田良實：「港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説—」、鹿島出版会、333p.、1990.
- 9) 高山知司、辻尾大樹、安田誠宏：「消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討」、海岸工学論文集、第54巻、pp. 906-910、2007.
- 10) 下迫健一郎、高橋重雄：「期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法」、港湾技術研究所報告、第37巻第3号、31p.、1998.9.
- 11) 下迫健一郎、大寄奈々子、中野史丈：「滑動量を要求性能に設定した信頼性設計法」、港湾技術研究所報告、第45巻第3号、24p.、2006.9.
- 12) 十勝沖地震調査報告 1952年3月4日、十勝沖地震調査委員会、1954年
- 13) 松本智裕・橋和正・今村文彦・首藤伸夫 (1998)：土石流による津波発生・伝播モデルの開発，海岸工学論文集，第45巻，pp.346-350.
- 14) 岩渕洋子・今村文彦(2005a).津波来襲による原油流出・拡散問題の整理と解析手法の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp.301-305.
- 15) Yapa, P. and T. Chowdhury (1989)： Oil spreading under ice covers, Proc. International Oil Spill Conference, pp.161-166.