

津波による流水群の陸上来襲に備えた沿岸防災に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：山本泰司、木岡信治、森昌也

【要旨】

本研究は、流水が来襲する海域で発生する津波によって起こりえる被害の状況を予測し、国民の生命および財産の損害を最小限に抑えることに寄与する事を目標とするものである。本年度においては、近年氷海域で津波が発生した過去の事例をまとめるとともに、実際に海水を伴った津波による被害事例を概観し、海水によるリスクも考慮した防災対策が必要であることを改めて確認した。昨年度に引き続き、海水群を高粘性流体（連続体）と見なし、2層流モデルによる海水の漂流および陸上遡上シミュレーションの開発に取り組むとともに、3・11での道東での海水挙動の再現や、漁港周辺にある海水の配置を仮定した場合のケーススタディを行った。本モデルは、まだいくつかの問題を抱えるものの、3・11津波による海水の動きについて妥当な結果を与えた他、広域の海水移動は1km程度のオーダーであること、海水の陸域遡上を阻止するという観点から、防波堤の役割は大きい事、などが推察された。また、氷塊の衝突実験を、より速い衝突速度（ $\sim 7.7\text{m/s}$ ）で実施し、衝突破壊に関する既往の数値計算手法の妥当性をさらに高めた。さらに、津波漂流物でもある木材の衝突実験も実施し、同一の形状・衝突速度での木材と海水との衝突特性を比較するとともに、氷海域での津波発生時の漂流物による衝突を考慮した建築物や防護構造物（特に柱等）の構造設計に係わる留意事項について検討を加えた。

キーワード：津波、海水、木材、遡上、破壊、衝突、FEM、DEM

1. はじめに

冬の北海道北東部沿岸域などの流水域において、大量の海水をとめた津波は、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、次節にも示すように、過去に、津波により海水が遡上し、後述のように建物等が損壊した事例がいくつか報告されている。2011年の東北地方太平洋沖地震（以下 3・11）で発生した津波でも、当時残されていた僅かな海水の遡上や、河川氷のアイスジャム（閉塞）発生による水位上昇や水門への衝突¹⁾等、何らかの津波による氷のレスポンスが確認された。したがって、海水によるリスクも考慮した防災対策が重要かつ緊急の技術課題である事は明らかである。本研究では、主として、①海水遡上を考慮した津波ハザードマップ作成支援ツールを構築すること、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、等を目的とし、ひいては、被害の状況を予測し、これにより生じる国民の生命および財産の損害を最小限に抑えることに寄与できる研究を展開していきたいと考えている。

このうち、昨年度においては、津波による海水の漂流

および陸上遡上シミュレーションの基礎的手法の開発に取り組んだ。海水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層流モデルを適用するとともに、界面張力項などの導入などにより、海水の固体としての振る舞いが改善され、大局的ながら海水遡上域等を再現でき、本手法が有望であることを確認した。また、津波来襲時の氷塊の構造物への衝突する場合を想定した氷塊の破壊モードや構造物へ及ぼす衝突・動的荷重について検討した。過去の衝突実験データを補完するための実験を行うとともに、衝突荷重推定のためのモデルとして、既往から検討を進めている3Dの個別要素法に加えて、材料の構成モデルとしてモール・クーロンの破壊基準を考慮した3Dの動的弾塑性FEMの適用性も試みた。

本年度においては、20世紀以降に氷海域で津波が発生した過去の事例をまとめるとともに、実際に海水を伴った津波による被害事例を概観し、氷海域への津波の発生のリスクについて検討を加えた。また、昨年度に引き続き、海水群を巨視的に高粘性流体（連続体）と見なし、非線形長波方程式の2層流モデルによる海水の漂流および陸上遡上シミュレーションの基礎的手法の開発を試み

た。また、氷塊の衝突破壊に関する既往の数値シミュレーション手法の妥当性をさらに高めるため、氷塊の衝突実験を、既報よりもさらに速い衝突速度で実施し、検証した。さらに、津波漂流物でもある木材の衝突実験も実施し、同一の形状・衝突速度での木材と海氷との衝突特性を比較するとともに、氷海域での津波発生時の漂流物による衝突を考慮した建築物や防護構造物(特に柱等)の構造設計に係わる留意事項について検討を加えた。

2. 過去に発生した海氷を伴う津波の被害事例

まず、1952 年の十勝沖地震について簡単に説明する²⁾。まだ海氷が残る 3 月 4 日に十勝沖で M8.2 の地震が発生し、死者 28 名、家屋全壊・半壊多数という甚大な被害が生じた。遡上した海氷による家屋の被害状況の例を写真-1 に示す。津波規模は 1～2m であったが、道東では 3～4m (場所により遡上高 6m) の津波が来襲した。特に、霧多布での被害は大きく、琵琶瀬湾に取り残されていた流水や沿岸結氷板が、津波によって砕かれ、その氷片を伴って市街地に遡上し、家屋の破壊等の被害を拡大させたほか (図-1 参照)、氷が琵琶瀬橋(延長 98m)に直撃し橋脚が折れて墜落した。海氷は、2m 平方、厚さ 0.6m 程度の大きさが多く (大きいもので 5m 平方で厚さ 1.3m

程度)、遡上速度は人の駆け足程度であった、等の情報が得られている。そのほか、1982 年 3 月根室沖地震で発生した津波により遡上した海氷による家屋や船舶の損害 (国後島)³⁾、1923 年 2 月カムチャツカ地震津波による遡上氷塊がカムチャツカ半島の魚缶詰工場を破壊した事例⁴⁾、そして、3・11 でも、色丹島の港湾で、遡上した海氷により燃料パイプが切断された等の被害例⁵⁾がある。表-1 には、文献⁶⁾等も参照し、20 世紀以降に氷海域で津波が発生した過去の事例をまとめた。小さなものも含めると 20 以上を数えるのが分かる。道東の流水域・結氷域で津波が来襲していることに加え、オホーツク海でも観測されている。さらに、オホーツク海を震源とする地震と津波が 1956 年に発生し、網走で 40cm の津波を記録した。2006 年、2007 年には千島列島沖での地震により一時オホーツク海にも津波警報が発令された。それを契機にオホーツク海に面したいくつかの自治体でも、ハザードマップの導入が試みられ、その後北海道庁によるオホーツク海沿岸部での想定津波シミュレーション結果を受け、多くの自治体でもハザードマップの導入が始まりつつある。3・11 では、道東にも 3m 近い津波が来襲した。当時、幸い海氷が後退していたが、残っていたわずかな海氷の陸上遡上が確認された (図-2 参照)。少し時期が早

表-1 近年、流水・結氷域で津波が発生した事例⁶⁾など参照

発生年月日	震源、地震名等	M	概要
1918.9.7	千島列島ウルップ島沖	8.0	根室1m, 花咲0.5m など
1952.3.4	十勝沖	8.2	霧多布3～4m など
1956.3.6	北海道北東沖(網走沖)	6.3	網走で40cm など オホーツク海で唯一発生した津波、最大震度4
1958.11.7	択捉島付近	8.1	紋別18cm, 網走33cm, 稚内15cm, 花咲143cm など*
1960. 5.22	チリ地震	9.5	網走92cm, 花咲339cm など*
1963.10.13	択捉島沖	8.1	網走72cm, 根室(花咲) 130cm など*
1964.3.28	アラスカ地震	9.2	稚内34cm, 紋別10cm, 網走12cm, 花咲36cm など*
1968.5.16	十勝沖	7.9	根室(花咲) 111cm など*
1969.8.12	北海道東方沖地震	7.8	紋別25cm, 網走34cm, 稚内23cm, 花咲253cm など*
1971.9.6	樺太西沖	6.9	紋別12cm, 網走31cm, 稚内64cm など*
1973.6.17	根室半島沖地震	7.4	紋別16cm, 網走18cm, 稚内11cm, 花咲250cm など*
1975.6.10	北海道東方沖	7.0	温根婦50cm, 落石80cm
1978.3.25	択捉島沖	7.4	網走5cm, 根室(花咲) 40cm など*
1983.5.26	日本海中部地震	7.7	紋別29cm, 網走18cm, 稚内45cm など*
1991.12.22	ウルップ島沖	6.8	紋別22cm, 網走7cm, 羅臼漁港7cm, 花咲20cm など*
1993.7.12	北海道南西沖地震	7.8	紋別19cm, 網走15cm, ウトロ漁港39cm, 稚内72cm など*
1994.10.4	北海道東方沖地震	8.1	ウトロ漁港54cm, 紋別54cm, 網走32cm, 稚内39cm, 花咲346cm など*
1994.4.8	三陸はるか沖	6.6	根室港8cm, 花咲46cm など*
2003.9.26	十勝沖地震	8.0	花咲0.9m, 釧路1.2m など
2006.11.15	千島列島沖地震	7.9	紋別30cm, 網走22cm, 稚内16cm, 花咲31cm など
2007.1.13	千島列島沖地震	8.2	網走8cm, 花咲15cm, 釧路13cm など
2010.2.27	チリ地震	8.8	枝幸0.3m, 網走0.2m, 花咲1.0m, 釧路0.7m など
2011.3.11	東北地方太平洋沖地震	9.0	枝幸43cm, 網走34cm, 稚内38cm, 花咲286cm など

注記) *検潮所における最大全振幅

ければ、被害が拡大していた可能性もある。また根室海峡に面した漁港においても 1m 以上の津波が来襲した事を考えると、エッジ波⁷⁾によりオホーツク海まで伝搬してくる可能性もあり、氷海域での津波のリスクは、その発生源が千島沖やオホーツク海のみではない事を示唆している。また、海氷量や気象条件により、流氷が太平洋にも流出してくるため、霧多布での事例でみたように、津波の常襲地域であり、大きな津波の来襲が危惧される根釧地域にも海氷を伴う津波のリスクがあるといえる。

以上概観したように、沿岸結氷域や流氷域にも津波が来襲しており、海氷によるリスクも考慮した防災対策が必要であることが分かる。事実、既に見たように、海氷による直接的な被害事例がある事は強調しておきたい。

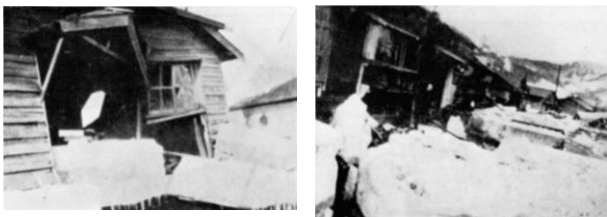


図-1 津波とともに遡上した海氷による家屋の被害状況の例 (1952 年十勝沖地震調査報告書²⁾ より)



図-2 東北地方太平洋沖地震で発生した津波により遡上したと思われる海氷 (根室半島太平洋沿岸部)

3 津波による海氷の漂流および陸上遡上シミュレーションの基礎的手法についての検討

3.1 概説

本モデルの検討については、かねてから実施しているが、特に、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-水-空気」の界面に導入した界面張力項の振る舞いについての理解を深め、精度向上に向けた検討を行っている。昨年度の試行より、界面張力の設定や、打ち切り水深等による数値不安定性等の課題は抱えるものの、1952 年十勝沖地震での霧多布付近の津波来襲状況の再現を行った結果、海氷の固体としての振る舞いが改善され、大局的ながら海氷遡上域等を再現できた。本年度では、引き続きモデルの検証を行うとともに、3・11 での道東での海氷挙動の再現や、漁港周辺

にある海氷の配置を仮定した場合の防波堤の効果を含む氷の移動や挙動特性についてケーススタディを行った。

3.2 モデルの概要

海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⁸⁾⁹⁾を適用した。モデルの概要を図-3 に示す。2 層流モデルにおいて、各層 (上層: 海氷群, 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。現実の海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、海氷遡上時の海氷と陸部との摩擦を考慮したこと (底面摩擦項として)、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海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¹⁰⁾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-水-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」、「水-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」¹¹⁾¹²⁾を用い、これを定数としている。

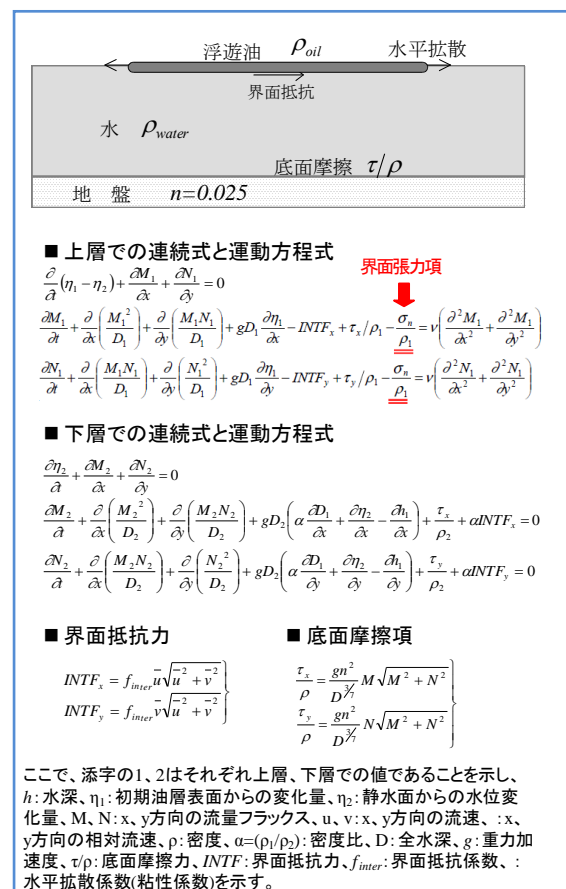


図-3 2 層流モデルの概要

3.3 主な計算結果と考察

(1) 2011 年東北地方太平洋沖地震の再現計算

3・11 の地震の発生時における実際の海水分布¹³⁾に基づいた再現計算を、根室半島全域を対象に行った。断層パラメータは、東北大学院工学研究科付属災害制御研究センター¹⁴⁾公開の値を採用し、Mansinha and Smylie (1971)の方法により垂直地盤変動量を求めた。その垂直地盤変動により上下した水塊が津波の初期水位となる。計算時間を3時間とした。主な計算条件を表-2に示す。

表-2 主な計算条件

格子サイズ	90m(4 次領域)~2,430m(1 次領域)
計算時間間隔	0.1s(4 次領域)~2.7s(1 次領域)
計算潮位	T.P.+0.8 m
水層打ち切り水深	1.0×10^4 m
初期氷厚	1m
比重	0.91
界面抵抗係数	0.01
水平方向拡散係数	$100 \text{ m}^2/\text{s}$
界面張力	1.0×10^3
氷層打ち切り水深	1.0×10^4 m

図-4 には根室半島周辺の海水挙動の再現計算の例を、図-5 には歯舞港沖の拡大図を示した。この場合の海水の移動は1km 以内であり、この津波による海水分布に対する影響は小さなものであったと推察される。事実、前述のように、根室半島太平洋側の海岸には、僅かに沿岸に漂着していた（本計算では考慮できない）海水の遡上が確認された程度で、当時、沖に去っていた比較的密集していたと推測される海水群の海岸への接近や遡上は確認されていないことから概ね妥当な結果と考える。また、本計算では、移動境界を打ち切りパラメータにより処理すること、正味の界面張力を全計算期間に一定値で適用す

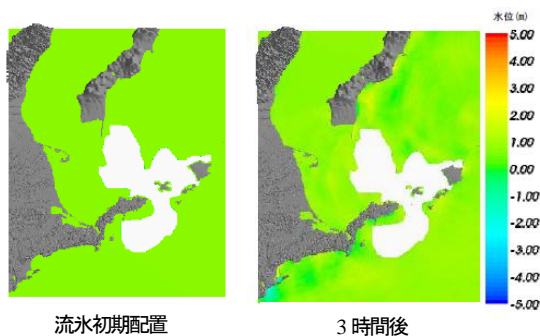


図-4 3・11 での根室半島周辺の流水挙動の再現計算の例

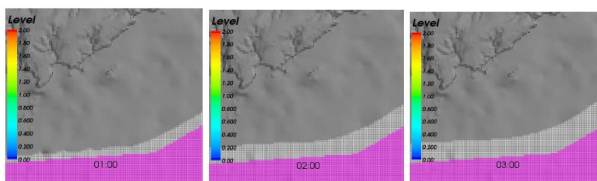


図-5 歯舞港沖拡大図（氷層(白)のみ表示、紫は初期配置）

ることから、氷層の体積が変動するが、2%ほどの減少に抑えられて、津波による氷層への影響が少ないことと相まって、正味の界面張力が機能している事が確認された。

(2) 漁港周辺の海水挙動のケーススタディ

本検討では、ある漁港（根室半島太平洋側）の防波堤より沖側一面に海水に覆われた状態で、3・11 の津波が来襲した場合を想定した。津波は、格子サイズをさらに細かくした（10m, 6 次領域）以外は前述と同様である。海水は氷厚 1m とし、図-6 に示すような初期分布として配置した。同図には3 時間後の状況を示した。港口周辺に海水が接近した場合、津波により港内へ流入する傾向が認められるが、港外の海水が大量に港内に流入する訳ではなく、外郭施設による流入抑制効果も認められるのが伺える。また、本検討では陸上への水層の遡上はみられたが、氷層の遡上はなかった。先と同様に、正味の界面張力の効果で体積が減少しないが、津波が到達した後は体積が増大傾向にある。よって界面張力は静的な条件においては海水を拡散させない効果を発揮するものの、動的な条件においては移動境界処理上の累積誤差等による影響があり、予め試行計算による適切なパラメータ設定が必要であることを確認した。また海水の移動速度について、層厚が微細な場合、流速が適切に算定されない。これは移動境界処理等のロジック、計算時間間隔の問題でもあるが、「ある一定値以下の層厚の流速は無視する」等の何らかの割り切りが必要と考えられる。

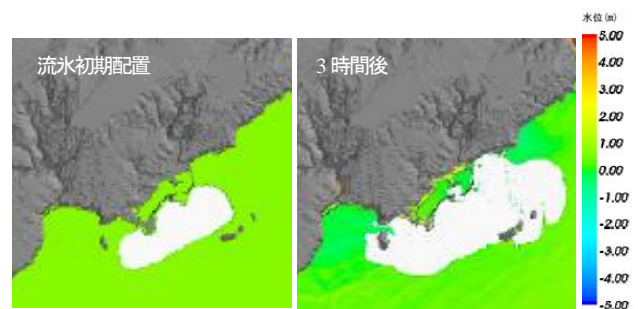


図-6 漁港周辺（根室半島太平洋側）の海水挙動の例

(3) 考察

以上検討したように、本モデルは、まだいくつかの問題を抱えるものの、今回の津波規模では広域の海水移動は1km 程度のオーダーであること、海水の陸域への遡上を阻止するという観点から、防波堤の役割は大きい事、などが推察された。さらに、津波による広域の海水移動が認められないことを踏まえると、本モデルは、主に漁港周辺等沿岸域に絞り、海水が局所的に存在するような条件を対象とした解析に用いることが適切と考えられる。

4. 津波来襲時の氷塊の構造物への衝突に関する検討

4.1 概説

津波来襲時の氷塊の構造物への衝突する場合を想定した氷塊の破壊モードや構造物へ及ぼす衝突・動的荷重について検討するものである。我々の既往研究を踏まえ、昨年度は、過去の衝突実験データを補完するための実験を行うとともに、衝突荷重推定のためのモデルとして、3Dの個別要素法に加えて、材料の構成モデルとしてモール・クーロンの破壊基準を考慮した3次元の動的弾塑性有限要素法の適用性も試みた。その結果、DEMとともに衝突速度にともなう衝突荷重の推移の実験的傾向を概ね良好に再現できた。実務上の観点から、破壊性状や衝突力波形までを問題とする場合には、DEMを用いるのが良いと思われるが、最大衝突力や継続時間の概算値程度であれば、計算コストの安いFEMを用いる事が合理的と考えた。

本年度においては、氷塊の衝突破壊に関する既往の数値シミュレーション手法の妥当性をさらに高めるため、氷塊の衝突実験を、既報よりもさらに速い衝突速度（落下高3m、速度約7.7m/s）で実施し、検証した。他方、一般的には、津波の市街地氾濫等で船舶やコンテナ、流木等の漂流物が建築物等へ与えるインパクトが懸念されている。一般の漂流物と海水の衝突力特性を比較しておくことは実務上必要である。そこで、津波漂流物の一種である木材の衝突実験も実施し、特にその衝突速度依存性について調べ、既存の海水の実験結果と比較した。なお、前重点プロジェクト研究においても一部の実験は実施していたが、新たな条件や計測項目等の追加や改良により、改めて実施したものである。また、氷海域での津波発生時の漂流物による衝突を考慮した建築物や防護構造物の構造設計に係わる留意事項について検討を加えた。

4.2 衝突実験

衝突実験は、既往の研究^{例えば15)}とほぼ同様であるが、簡単に説明する。衝突実験は自由落下方式により、人工海水¹⁵⁾を、杭構造物へ衝突させることにより行っている。人工海水は、直方体（幅0.6m、厚さ0.15m、衝突方向の長さ0.6mの直方体）の直方体に整形し、氷温（-6～-10℃）、様々な衝突速度（0.14～7.7m/s）に設定して衝突させた。杭は、支間を0.25mとした両端単純支持のSSの丸棒で、両支点部にロードセルを配備して、衝突時の支点反力を計測した。杭、支点部、基盤を含めた固有周期は 5×10^{-4} sec.（減衰定数：7%）であった。

今回使用した木材はカラマツ（産地は北海道旭川）で、

無垢材として、今回の海氷実験と同じ寸法・形状（幅0.6m、厚さ0.15m、衝突方向の長さ0.6mの直方体）に成形した。また用いた木材は、本実験条件では、海水と異なり分離破壊が生じないため、脆性破壊・材料分離の衝突力特性への関与についても、若干検討ができる。衝突方向は、木材の繊維方向による材料特性の違いを考慮し、木材の繊維の方向に平行および垂直としてそれぞれ実施した。なお、木材の実験時の含水率22-25%、密度（湿潤状態）0.44-0.46g/cm³であった。

4.3 実験結果および考察

(1) 衝突速度が衝突力特性に及ぼす影響

図-7には衝突速度にともなう最大衝突力（合支点反力の最大値）の推移を示す。また同図には、昨年度検討した3次元個別要素法および3次元動的弾塑性有限要素法による計算値も示した。最大衝突力は、衝突速度がある値以上となると、その増加率は軽減する。その増加率が変化するのは、ちょうど氷塊が破壊（または降伏）し始める時に対応している¹⁶⁾。なお増加率が変化する速度は、計算結果の場合でおよそ2m/s、実験結果ではそれより小さく1-2m/sにあるようである。実験では、1-2m/sで破壊は生じてないが、僅かな塑性変形が生じた可能性がある。このように、衝突力の速度依存は、破壊が生じる速度を境に異なり、バラツキはあるが概してバイリニア型にモデル化でき、破壊後はその直線勾配は小さくなる。今回追加した高速度の条件（7.7m/s）での結果も大体その直線上にある。これは脆性破壊により、大小の氷塊に分離して飛散し、衝突方向の運動量減少の緩和あるいは運動エネルギーの消費をもたらしている事、また破壊後もほぼ速度に比例して衝突力が増加するのは、なおも杭近傍の氷粒子が弾性に近い衝突を継続しているためと思われる。一般に氷は粘弾性体であり、歪み速度が速い場合には弾性的挙動を示すが¹⁷⁾、海水には液体のブライン組織（高濃度の塩水）が内在するため、その材料諸特性の本実験のような早い歪み速度での依存性が知られていない。破

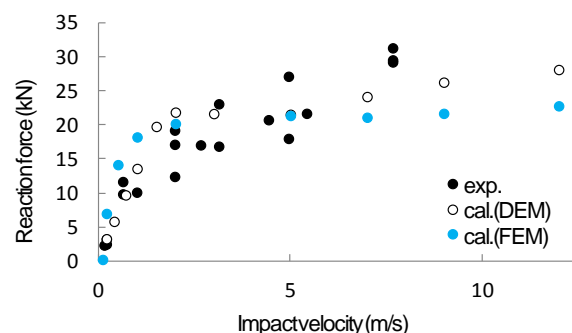


図-7 衝突速度にともなう最大衝突力と力積
（昨年度の結果に高速域を追加）

壊後の値や勾配の計算値は、実測値に比べやや小さな感があり、弾性や降伏、靱性など種々の材料諸特性の歪み速度の依存性やその非線形性を否定できないが、本実験の範囲においては、極めてシンプルな構成則を持つ個別要素モデルによる計算値も大体その傾向を再現しており、その妥当性をさらに高めたといえる。

(2) 木材との衝突力特性の比較および構造設計に係わる実務における留意事項

図-8には、衝突速度にともなう木材と海水の衝突特性の比較例で、上図は最大衝突力、下図は杭が受ける力積を示す。なお、木材と海水は同一寸法であっても密度が異なる。この影響をできるだけ取り除くため、棒や直方体等の単純な物体の弾性衝突のアナロジーから、その衝突力が材料密度と弾性率の平方根、衝突速度の1乗に比例する事を根拠として、木材の衝突力に「海水密度と木材の密度との比の平方根」を乗じ、海水と同じ入力運動量に応じた衝突力となるように換算した。さらに、力積は、衝突直前の運動量で除した値を示す。図をみると、衝突速度にともなう最大衝突力の推移は、前述のように海水の場合にはバイリニア型の直線（脆性破壊後の直線勾配は減少）になるのに対し、分離破壊しない木材の場合には、ほぼ直線であり、衝突速度の概ね1乗に比例している事、しかも、海水より木材の衝突力の方が遙かに大きい事がわかる。なお、前述のように木材の杭への衝突跡を確認すると、杭近傍においてのごく局部的なへこみが確認された場合もあるものの、衝突力が衝突速度に

比例して増大していることから、全体としては大体弾性的に挙動しているものと思われる。また、木材の衝突力は繊維方向によって異なり、衝突方向に平行な繊維の方が大きく、繊維方向による降伏応力やヤング率の違い例えば¹⁸⁾に起因している。その衝突方向に平行な繊維をもつ木材と海水との最大衝突力を比較すると、海水の脆性破壊が生じるまでは、約3.5倍、破壊後は22倍、木材の方が大きい、なお材料密度の補正をしない場合でも、それぞれ2.6倍、16倍となり、破壊後はその違いはかなり大きくなる。海水と木材の弾性率はおよそ1オーダー異なるが、大雑把に弾性体の衝突力は弾性率の平方根に比例すると仮定すると、大体において、前述の脆性破壊までの衝突力の比に近い。次に同図下の構造物が受ける力積を見ると、脆性破壊を生じる海水の場合には、力積は小さく、つまり複数の大小の破壊片が（同じ衝突方向に）飛散し、同じ衝突方向の運動量減少の緩和が生じている事が推察できる。したがって、海水による衝突力が遙かに木材より小さいのは、物体を構成する個々の組織の弾性やレオロジー等の材料特性のほか、杭近傍の材料分離の発生（靱性）とその破壊粒子の系外への脱出機構にも大きく依存していると思われる。平板に作用する海水衝突力の計算より、非破壊の弾性領域でも脆性破壊領域においても、つまり破壊の有無にかかわらず、衝突力は衝突速度に比例して増大し、ほぼ1本の直線に乗ることが示された。さらに、同じく平板の場合には、予め粒子間の結合を切断した状態（つまり粒状体）の衝突力は、個体の場合と比べてやや小さい程度であった。つまり粒子への分離（靱性）は衝突力へあまり影響を及ぼさず、もっぱら粒子を解放し、自由な運動をもたらす前提条件であるともいえる。極端な検討事例ではあるが、この事からも前述の運動量減少の緩和が衝突力へ及ぼす影響の機構が示される。なお、完全弾性衝突ならば、図-8の下図の縦軸（力積と初期の運動量との比）は2になるはずであるが、実際には完全弾性ではないことその他、基盤を含めた反力計測系の剛性・減衰、計測誤差（正確な衝突速度の推定誤差、特に落下高が小さな場合には大きな誤差がでる）、特に木材においては若干の塑性変形、等に起因している場合があることを附記しておく。

以上より、特に、氷塊より構造物が小さい場合で、同じ衝突速度、寸法程度であれば、海水の方が遙かに衝突力が小さい事が推察された。氷海域での津波発生時の漂流物による衝突を考慮した建築物や防護構造物の構造設計等においては、通常の津波と同様に、木材や車両、コンテナ等の一般の津波漂流物等を考慮すれば良い事にな

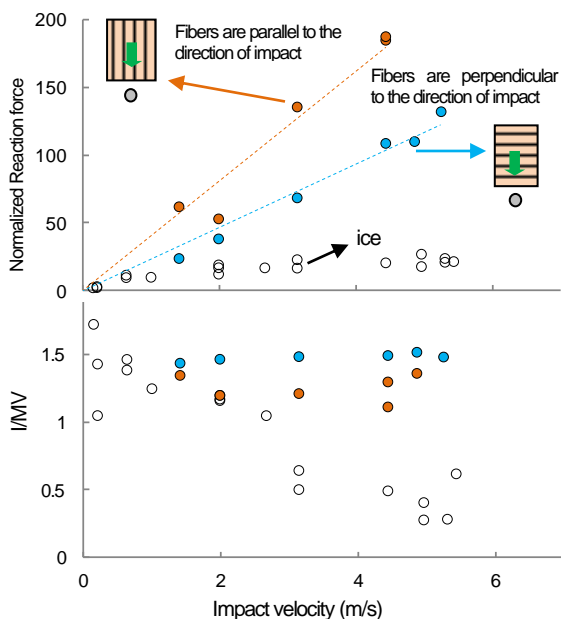


図-8 衝突速度にともなう木材（カラマツ）と海水の衝突特性の比較（上図：最大衝突力、下図：力積）

る。しかし、それは局部的な力の評価であり、特に柱や壁などの局部的損傷に対する検討に有効であるが、氷塊は膨大な量であるから、海水群の積み重なり（パイルアップ）や粒状体としての閉塞（アイスジャム）等の現象により、建築物全体に作用する力や転倒のリスクについては別途検討の余地はあること¹⁹⁾は強調しておきたい。

5. まとめ

本年度においては、まず、近年氷海域で津波が発生した過去の事例をまとめるとともに、実際に海水を伴った津波による被害事例を概観し、改めて海水によるリスクも考慮した防災対策が必要であることを確認した。

また、昨年度に引き続き、海水群を巨視的に高粘性流体（連続体）と見なし、非線形長波方程式の2層流モデルによる海水の漂流および陸上遡上シミュレーションの基礎的手法の開発に取り組むとともに、3・11での道東での海水挙動の再現や、漁港周辺にある海水の配置を仮定した場合の防波堤の効果を含む氷の移動特性についてケーススタディを行った。本モデルは、まだいくつかの問題を抱えるものの、3・11津波による道東の海水の動きについて相応に説明できる（矛盾しない）妥当な結果を与えた他、その津波規模では広域の海水移動は1km程度のオーダーであること、海水の陸域への遡上を阻止するという観点から防波堤の役割は大きい事、などが推察された。さらに、津波による広域の海水移動が認められないことを踏まえると、本モデルは、主に漁港周辺等沿岸域に絞り、海水が局所的に存在するような条件を対象とした解析に用いることが適切と考えられた。他方、pile-upや、粉体特有のアーチアクションにより、狭窄部などでのジャミング等が発生する。これにより、堆積によって高さが増し、避難施設等の検討等に影響を与えるため、領域に応じて、離散体モデル（個別要素法、セルオートマトン等）などを適用し、合理的に組み合わせることのできる計算法の開発にも着手しているので次回報告したい。

また、氷塊の衝突実験を、既報よりもさらに速い衝突速度（～7.7m/s）で実施し、氷塊の衝突破壊に関する既往の数値シミュレーション手法の妥当性をさらに高めた。さらに、津波漂流物でもある木材の衝突実験も実施した。氷塊より構造物が小さい場合で、同じ衝突速度、寸法程度であれば、海水の方が遙かに衝突力が小さい事が推察された。氷海域での建築物や防護構造物の構造設計等においては、通常の津波と同様に、一般の津波漂流物等を考慮すれば良い事になるが、それは局部的な力の評価に

限り、氷塊は膨大な量であるから、海水群の積み重なり（パイルアップ）や粒状体としての閉塞（アイスジャム）等の現象により、建築物全体に作用する力や転倒のリスクについては別途検討の余地はあることを指摘した。

参考文献

- 1) 吉川康弘, 阿部孝章, 平井康幸: 河川津波に伴い発生した北海道鶴川のアイスジャム再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, pp.416-420, 2012.
- 2) 十勝沖地震調査委員会(1954): 十勝沖地震調査報告, 1018p.
- 3) 鏡味洋史: 北海道の地方新聞に掲載の被害関連記事, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, 31, pp.951-954, 2009.
- 4) Savarenski, F.E.: ソ連科学アカデミー地震協議会報告, No4, 津波, 1952. (地震調査研究推進本部による翻訳版参照).
- 5) Kaistrenko, V., Razjigaeva, N., Kharlamov, A. and A. Shishkin: Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice, Pure Appl. Geophys., 2012.
- 6) 渡辺偉夫著: 日本被害津波総覧第2版, 東京大学出版会, 2011.
- 7) Watanabe, Y., Mitobe, Y., Saruwatari, A., Yamada, T. and Y. Niida: Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250002, 2012.
- 8) 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.
- 9) 岩瀬洋子・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.
- 10) 滝沢隆俊(1977): 流水野の粘性流体モデルにおける渦動粘性係数について, 低温科学, 物理編, 34, pp.181-186.
- 11) Yapa, P. and T. Chowdhury (1989): Oil spreading under ice covers, Proc. International Oil Spill Conference, pp.161-166.
- 12) Izumiyama, K., Uto, S., Narita, S. and Tasaki, R. (1998): Effects of Interfacial Tension on the Spreading of Oil under an Ice Cover. Ice in the Surface Waters, Shen (ed.), Vol. 1, pp. 419-426.
- 13) 第一管区海上保安本部海水情報センター, 海水速報 <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN1/1center.html>
- 14) <http://www.dcr.tohoku.ac.jp/>
- 15) S. Kioka, Y. Yamamoto and K. Sugawara, T. Endo and Takeuchi, T. (2010): Medium-scale Experiment and Numerical Simulation using 3-D DEM for the Impact Load by an Ice Floe against a Pile Structure, Proc. of 20th IAHR International Symposium on Ice [CD-ROM].

- 16) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁 : 海水塊の杭構造物への衝突に関する中規模実験とその数値計算法の基礎的検討, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, 2012.
- 17) Schulson, E. M. and Duval, P. : Creep and Fracture of Ice, Cambridge University Press, 2009.
- 18) 伏谷他 : 木材の物理, 文永堂, 1985.
- 19) 木岡信治, 竹内貴弘, 森昌也, 遠藤強, 渡部靖憲 : 海水群を伴った津波の市街地氾濫に関する一考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集号, Vol.69, No2, 投稿中, 2013.

STUDY ON DISASTER PREVENTION AGAINST TSUNAMI RUN-UP WITH SEA ICE

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold-Region Hydraulic and Aquatic

Environment Engineering Research

Group (Port and Coast)

Author : YAMAMOTO Yasuji

KIOKA Shinji

MORI Masaya

Abstract: We reviewed some damage cases in the past years by tsunami wave with sea ice floes. We reaffirmed to need our quick disaster-prevention measures against the additional potential risks by tsunami with sea ice floes. We developed a fundamental numerical simulation method for run-up sea ice due to Tsunami based on the continuum model by regarding sea ice floes as high viscous fluid such as oil. We found that the method would be useful for the preparation of hazard map considering the influences of the run-up sea ice due to Tsunami in the future. However, we also confirmed that we have to improve this model so that it could consider a pile up/ ride up phenomenon of sea ice floes.

We conducted medium-scale experiments regarding the impact applied by ice floes with a length of 0.6m and with an impact velocity of 0.14 to 7.7 m/s against a pile structure. Ice caused brittle failure/splitting in most cases. The increase rate of maximum impact load due to impact velocity decreased in comparison with that in non-fracture cases. Reliability of the numerical calculation method using the 3D DEM which we had developed so far was also raised. Also, the impact characteristics of timbers as a kind of Tsunami debris were compared to those of ice floes. The impact load of the timber increased linearly with impact velocity, and it was much greater than that of ice floe which causes brittle failure. Finally, we added consideration on points to note for a structural design of building or structure considering impact by Tsunami debris including sea ice floes in cold region.

Key words: Tsunami, Sea ice, Timber, Run-up , fracture, impact, FEM, DEM