

## 津波による流氷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：木岡信治、森昌也、山本泰司

### 【要旨】

本研究は、流氷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。本年度では、まず、海氷のパイルアップやアーチアクションなど離散体特有の現象を考慮した、海氷の漂流・陸上への遡上シミュレーション手法の開発に取り組み、北海道東部の根室港内外に流氷が漂着している状態での津波来襲を想定し、その背後地への遡上シミュレーションを実施した。氷群の挙動（漂流）、氷群の陸上遡上、氷のパイルアップ形成等がシミュレートされ、ハザードマップ等への適用で、構造物配置計画や避難行動計画を考える上でも、本手法は非常に有用である事を確認した。次に、海氷の衝突破壊性状や衝突力、構造物の動的応答・降伏破壊等を推定できる、3次元数値シミュレーション手法により、複数の氷塊が衝突する場合の構造物の動的応答特性を調べ、その付加的风险について考察した。最後に水理模型実験により、市街地への氾濫を想定し、海氷群のパイルアップやアイスジャムに着目して、海氷群の挙動や水位の変化等を調べ、そのリスク増加について検討した。大量の氷群が伴う場合には、建築物には初期の動的およびその後持続する大きな静的な力が作用すること、津波避難ビル等への避難に際して、ジャムによる水位上昇と氷群のパイルアップも考えると、より高い所に避難する必要がある事などが分かった。

キーワード：津波、海氷、遡上、破壊、衝突、弾塑性、FEM、DEM、パイルアップ、アイスジャム

### 1. はじめに

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、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、津波により海氷が遡上し、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氷の遡上や、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<sup>1)</sup>等、何らかの津波による氷の挙動が確認された。したがって、海氷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海氷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水設計法構築など、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。

### 2. これまでの研究概要および本年度の研究目的

まず、氷海域で津波が発生した過去の事例をまとめ、海氷を伴った津波による被害事例を概観し、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を示した。

前節①に対応するため、海氷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を開発し、過去の事例と照らし合わせ、大局的ながら再現性が保障され、本手法が有望であることが確認された。さらに、連続体モデルでは不可能である、海氷の離散体特有の現象を考慮した、海氷の漂流・陸上への遡上シミュレーション手法の開発に取り組んだ。計算負荷軽減のため、個々の海氷を剛体円盤要素とした2次元の個別要素法を適用し、別途、鉛直方向の運動とパイルアップ形成を考慮した準3次元的モデルを開発とした。これをハザードマップに適用する事で、パイルアップやアイスジャムのリスクの可能性のある箇所が表示され、構造物の配置計画や避難行動計画を考える上でも、本手法は有用である。

次に前節②に対応するため、衝突実験や数値計算により、津波来襲時の氷塊が構造物へ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。衝突実験では、人工海氷側の条件（氷温、塩分、寸法、形状、衝突速度等）、および構造物側の条件（形状、規模）を様々変え、海氷を自由落下させることによって、構造物に衝突させている。比較のため、木材など他材料についても実施した。また、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、衝突実験結果も踏まえ、氷塊の破壊挙動や衝突力を良好に再現できる数値シミュレーション手法を開発した。さらに、氷塊衝突に対する構造物の耐氷設計に資するため、氷塊の衝突過程の他、構造物の動的応答解析（降伏含め）も可能な、実用的で総合的な計算手法を開発した。氷塊には 3D-DEM、構造物には 3 次元弾塑性 FEM を適用した。構造物の動的応答変位やその応力・歪み（破壊・降伏状態含め）等に加え、氷塊やその破壊氷塊群の軌道等がアニメーション表示されるため、その構造設計はもちろん、性能評価や安全性の視覚的な理解と確認ができ、当該目的のための強力な設計支援ツールを獲得した。また、海氷による広域的な建築物や工作物の損壊状況、ひいては経済損失等の概略推定を可能とするため、海氷が角柱構造物に及ぼす衝突力の簡易推定法を提案した。

本年度では、昨年度に引き続き、海氷のパイルアップやアーチアクションなど離散体特有の現象を考慮した、海氷の漂流・陸上への遡上シミュレーション手法の開発に取り組み、実海域においてそのパフォーマンスを確認した。さらに、昨年度開発した、海氷の衝突破壊性状や衝突力、構造物の動的応答・降伏破壊等を推定できる、数値シミュレーション手法により、複数の氷塊が衝突する場合の構造物の動的応答特性を調べ、その付加的リスクについて考察した。さらに、海氷群を伴った津波の市街地氾濫に関する基礎的な水理模型実験を行った。特に建築物間のアイスジャム形成やパイルアップに着目し、市街地において海氷群が引き起こすリスクの可能性について検討した。

### 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検討

#### 3.1 概説

昨年度に引き続き、連続体によるシミュレーション手法では対応できない、海氷のパイルアップ・アイスジャムやアーチアクションなど離散体特有の現象を考慮した、海氷の漂流・陸上への遡上シミュレーション手法の開発

に取り組む。アイスジャムとは氷の滞留・閉塞現象であり、河川においては河道を閉塞し、洪水を引き起こす事があるほか、橋脚やジャケット式の石油プラットホームの脚部にアイスジャムが発生し、抗力を増したため崩壊した事例がある(Wang,1983)<sup>2)</sup>。3・11 の津波でも、結氷河川を遡上する際に割れた大量の氷片が河道内に堆積・閉塞し、上流側の水位が長時間上昇した(吉川ら, 2012)<sup>1)</sup>。パイルアップとは氷塊が積み重なる現象で、大きな静的荷重が構造物に作用する場合がある(Timco et al., 2002)<sup>3)</sup>。さらに避難の観点からは、より、高いところまで氷塊が迫ってくることになり通常の津波時より高所へ避難する必要がある事といえる。この現象が加味されると、より精度の高い遡上域や危険箇所が推定されると期待されるほか、安全な避難施設等の設計や配置計画が可能となる。よって、広域（海域）では連続体手法による陸上遡上シミュレーションを用い、局所（特に陸域）で詳細な検討が必要な場合には、氷の離散的性質を考慮した遡上シミュレーション手法を適用するなど、領域や目的により合理的に組み合わせた計算が想定される。昨年度では、妥当性が示されている 2 次元の DEM (木岡ら, 2010)<sup>4)</sup>に、鉛直方向の運動を組み込み、ジャムやパイルアップも考慮できる準 3 次元的なモデルの構築を試みた。

本年度では、この計算モデルを用いて、実海域において、遡上シミュレーションを実施し、そのパフォーマンスを確認するとともに、ハザードマップ等、実務への適用性について検討した。

#### 3.2 モデルの概要

3 次元の DEM の適用は、それが局所的なエリア（数 100m～数 km のオーダーと推定される）であっても、計算コストが莫大となり、不可能であるため、昨年度と同様に、簡素化した 2 次元の個別要素法に、別途鉛直方向の運動を組み込んだ準 3 次元のモデルを構築した。DEM では、個々の剛体要素を円盤とし、これを一つの氷塊とみなし、破壊を考慮しない。個々の要素毎に独立した運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域でステップ・バイ・ステップで前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その動的挙動を解析するものである。

そのアルゴリズムは同様であるが、ごく簡単に説明する。要素間の接触には、スプリングとダッシュポットから成る Voigt model を適用して、接触力を計算し、氷に作用する外力は、流れによる圧力抗力と摩擦抗力からなると仮定した<sup>5)</sup>。なお、できるだけ計算負荷を軽減するように、回転を考慮しない事としている。次に、特に陸上遡上の際に地面に接触して運動する場合には、鉛直方向の

運動とともに地面の束縛力や抵抗を考慮する必要がある。このため、地面（斜面）に沿った運動方程式を構築し、これを水平成分の方程式系に変換して、必要な解を得る。

次に、氷が他の氷に積み重なるラフティング（パイルアップ）条件を考慮する。これは極めて複雑な外力要因と力学機構によるものであるが、現象を単純化し、Kavacs and Sodhi (1980)<sup>9)</sup>による shore ice pile-up の条件を準用する。彼らは、高さ  $H_i$  のパイルアップ高を形成するのに必要な単位幅当たり外力  $F_p$  を、仕事とポテンシャルエネルギーとの関係、および質量保存式より導出している。本モデルでは、このアイデアを準用し、さらにこれに摩擦抵抗、と複雑な要因を考慮した係数を導入することにより、パイルアップの条件を定めた。むろん、2次元平面で考えている円柱要素（氷）の厚さの増減がともなうことになる。一方、逆に、2つ以上の単体の氷が積層している状態の氷に作用する慣性力が摩擦力を超えた場合に、崩壊すると仮定する（パイルアップの逆のプロセスが発生）。

### 3.3 シミュレーションの例

北海道東部の根室港内外に氷が漂着している状態で、津波が来襲した場合を想定し、その背後地への遡上シミュレーションを実施した。まず、氷がない状態での津波伝搬と陸上遡上の計算を行った後、結果として得られた水深と流速から氷群の挙動や遡上を計算する。津波部の計算では、非線形長波理論（浅水理論）に基づき、海底摩擦項を含む基礎方程式を Leap-frog 法を用いて差分近似して解く。数値計算には、東北大学が提供する津波解析コード TSUNAMI をベースに改良を加え、自作したプログラムを用いた。主な計算条件を表-1に示す。

表-1 おもな計算条件

基礎方程式と解法	非線形長波方程式を基礎式とし、Leap-frog 法により差分近似して計算
計算格子間隔	波源から沿岸まで、メッシュサイズが 2700m~12.5m の 6 次領域で計算
計算領域の接続	大格子領域の流量を補間して小格子領域に与え、小領域の水位のうち大格子領域の中心に相当する位置の値をそのまま大格子領域に与える
計算時間	地震発生から 4000 秒
計算時間間隔	差分スキームの安定条件より、0.1~3sec.
地盤変位量計算	Mansinha and Smylie(1971)の方法
Manning の粗度係数	小谷等(1998)を参照し、土地利用により設定
陸上遡上境界条件	岩崎・真野(1979)の方法
越流境界条件	構造物の越流計算には本間公式を適用

また、波源モデルとして、北海道東方沖地震津波 DCRC-3b モデル<sup>7)</sup>をベースに、流水遡上の現象をより際立たせるため Dislocation を大きく設定した(表-2 参照)。

図-1にはシミュレーションフローを示す。

表-2 断層パラメータ

Origin of fault	43.210° N, 146.120° E
Length	140km
Width	70km
Strike	52deg.
Dip angle	77°
Slip angle	128°
Depth	30km
Dislocation	50m

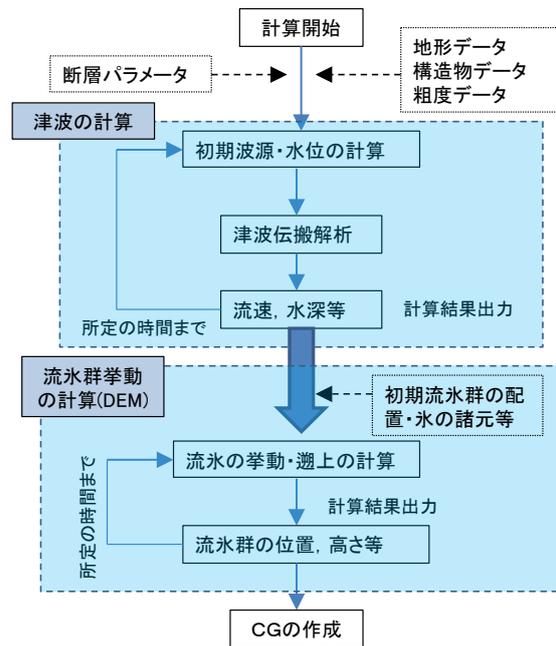


図-1 シミュレーションフロー

木岡ら(2010)<sup>4)</sup>は、サロマ湖のアイスブームに作用する氷荷重やトラップ状況との比較より、2次元 DEM（パイルアップや鉛直方向の運動を考慮しない）を用いた数値計算手法の妥当性を示すとともに、主なパラメータの決定手法について検討している。本研究における準3次元 DEM においても、そのパラメータを準用した。

図-2には、シミュレーションのスナップショットを例示した。上から順に、初期状態、押し波時、最大遡上時、そして引き波時である。氷のグレースケールは、氷厚（パイルアップ高）を示す。この計算により、津波の来襲による氷群の挙動（漂流）、氷群の陸上遡上、そして氷のパイルアップ形成が、シミュレートされているのが分かる。前述のように一応は DEM の妥当性が示されているとはいえ、鉛直運動やパイルアップを考慮した準3次元的な

本手法、特にそのパイルアップ高の妥当性は示されたわけではない。今後は、何らかの方法を用いてその妥当性の検証あるいはモデルの修正を行う余地はあるが、現状においても、これをハザードマップに適用する事を想定すると、パイルアップやアイスジャムリスクの可能性のある箇所が表示される事になり、ゆえに構造物の配置計画や避難行動計画を考える上でも、本手法は非常に有用であるといえる。

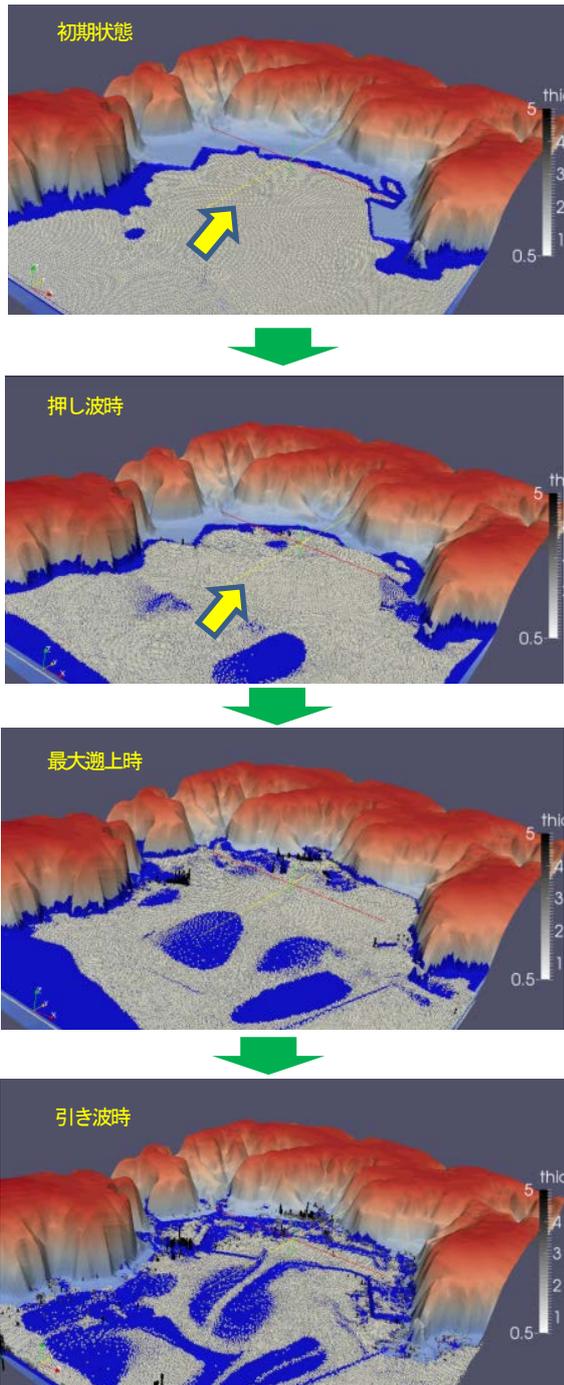


図-2 津波による氷群の陸上遡上のシミュレーション例

#### 4. 津波来襲時の海水による種々の衝突プロセスにおける構造物の動的応答の検討

##### 4.1 本節の目的

現実的には、津波によってもたらされる海水は多数あり、それが同時に構造物に衝突するケースが多いと考えられる。既往では単体の氷のみの衝突しか検討していなかった。本年度では、開発した計算ツールを用い、複数の氷塊が構造物に同時に衝突した場合のシミュレーションを実施し、構造物の動的応答特性について検討を加えた。なお、我々の開発した計算ツールは、こうした複雑な衝突破壊過程にも容易に対応できるところに特徴がある事、実務への適用の具体例を示す事が本節の目的でもある。

##### 4.2 構造物の耐氷設計支援ツール

昨年度では、実務での構造物の耐氷設計に資するため、氷塊と衝突過程にある構造物の詳細な動的応答解析（変形挙動、応力状態、破壊・降伏）も可能とした、実用的で総合的なシミュレーション手法を開発した。氷塊のシミュレーションには3次元個別要素法(3D-DEM)を適用し、構造物の応答解析には3次元動的弾塑性性(FEM)を適用した。構造物の動的応答変位やその応力・歪み（あるいは破壊・降伏状態）等に加え、氷塊やその破壊氷塊群の軌道等がアニメーションとして表示されるため、その構造設計はもちろん、性能評価や安全性（隣接する構造物相互含め）の視覚的な理解と確認ができ、当該目的のための強力な設計支援ツールを獲得している。この計算フローを図-3に示す。

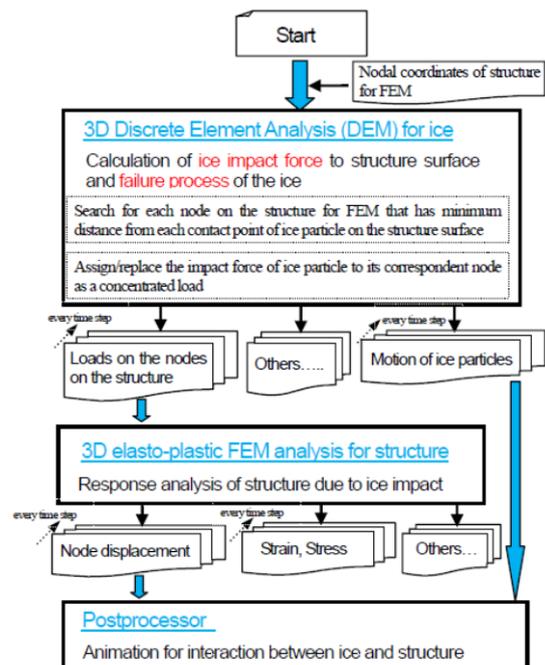


図-3 DEM-FEMによる氷塊と構造物との相互作用シミュレーションのフロー

### 4.3 複数の氷塊による建造物の動的応答の検討

図4に示すように、寸法が等しい2つの直方体の氷板が、積層状態から、 $z$ 方向（衝突方向）のみにある距離( $De$ )だけずれた状態で角柱建造物に衝突する、シンプルなシミュレーションを実施した。既報と同様に氷と建造物にはそれぞれDEM<sup>8)</sup>とFEMを適用した。主な実験条件を表-3(a)に示す。建造物は弾性体および弾塑性体の2種で計算し、同じ総質量をもつ単体( $De=0$ )と複数の氷塊の衝突による動的応答特性について検討するものである。つまり、 $De=0$ の場合は、単体の氷の衝突を示し、それ以外は、いわゆるその半分の厚さの2つの氷が、衝突方向に $De$ ずれて衝突していることを想定している。

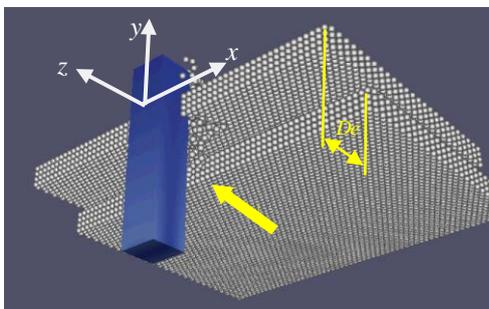


図-4 角柱建造物と複数氷塊の衝突例

表-3(a) 主な計算条件

氷の幅	1.2m	氷の衝突速度	5.12m/s(2ケース)
氷厚	0.08m	氷のずれ量( $De$ )	0.01, 0.2, 0.3cm(4ケース)
氷の長さ(衝突方向)	0.85m	建造物の物性	弾塑性体, 弾性(2ケース)
建造物幅	0.12m		
建造物高	0.6m		

DEM<sup>8)</sup>では、要素（すべて同じ半径をもつ剛球）間の接触はVoigt modelを採用し、要素間の破壊の条件のうち、接線方向についてはMohr-Coulumbの破壊基準を適用した。また、粒子配列は強度の直交異方性を考慮し、 $x$ - $z$ 平面（最密格子）および $x$ - $y$ 平面（四角形配置）で異なる配置とした。粒子間結合は、直に接していない第2近接の粒子間へも適用した。さらに法線方向の破壊基準は、

表-3(b) DEM(海水側)の主な計算条件

$\Delta t$	$10^{-6}$ sec	$h_n$	0.1
$r$	0.01 m	$k_{t_{xz}}$	480 kN/m
$\rho$	$1.49 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	$k_{t_{xy}}$	$2.0 \times k_{t_{xz}}$
$\phi_c$	15 deg	$k_{s_{xz}}$	$0.3 \times k_{t_{xz}}$
$c_{xz}$	100 kPa	$k_{s_{xy}}$	$0.3 \times k_{t_{xy}}$
$c_{xy}$	$2.0 \times c_{xz}$	$\beta$	1.007

4t: 時間ステップ, r: 粒子半径,  $\rho$ : 粒子密度,  $\phi_c$ : 内部摩擦角, c: 粘着力,  $h_n$ : 粒子間接触による減衰定数,  $k_{t_{xz}}$  はそれぞれ法線、接線方向のスプリング定数,  $\beta$ : 要素間の引張限界歪率,  $x, z, xy$  は、図4に示した $x$ - $z$ および $x$ - $y$ 平面内で配置した粒子間のパラメータを示しており、例えば、 $k_{t_{xz}}$ は $x$ - $z$ 平面内で配置した要素間の法線方向のスプリング定数を表す

表-3(c) FEM(建造物側)の主な計算条件

時間ステップ	$10^{-4}$ sec	x方向分割数	4
摩擦角	25deg	y方向分割数	4
ダイレイタンシー角	25deg	z方向分割数	20
ヤング率	7GPa	全要素数	320
粘着力	10MPa	全節点数	1865
単位体積重量	20kN/m <sup>3</sup>		

要素間に引張力が作用した場合で、要素間ひずみがある閾値を超えた場合に破断するものとする。次に、FEMでは、その構成則として、ひずみ硬化しない弾完全塑モデルを用い、材料の構成モデルは、降伏関数 $f$ にモール・クーロンの破壊基準を採用した。また、塑性ポテンシャル $g$ は、モール・クーロン式の $\phi, c$ に関連づけたDrucker-Prager式を用いた。ただし、ダイレイタンシー角は $\phi$ に置き換えた。動的非線形計算は、材料非線形による収束計算(変位増分の算出)には修正Newton-Raphson法を、時間積分にはNewmarkの $\beta$ 法を用いた。なお、今回

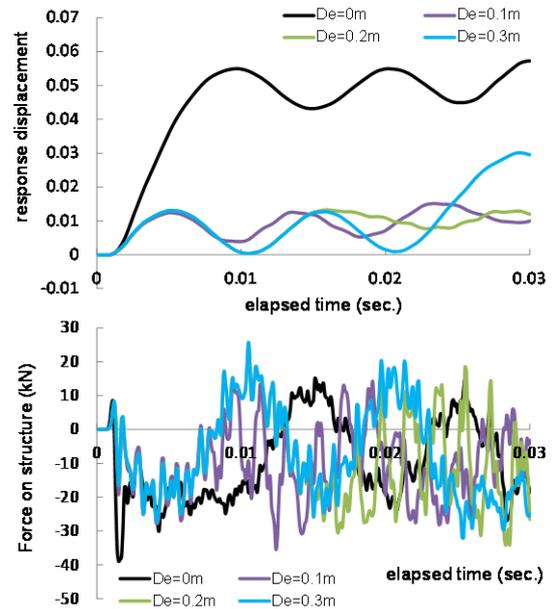


図-5(a) 建造物の変位(上)と荷重(下)の経時変化(弾塑性体)

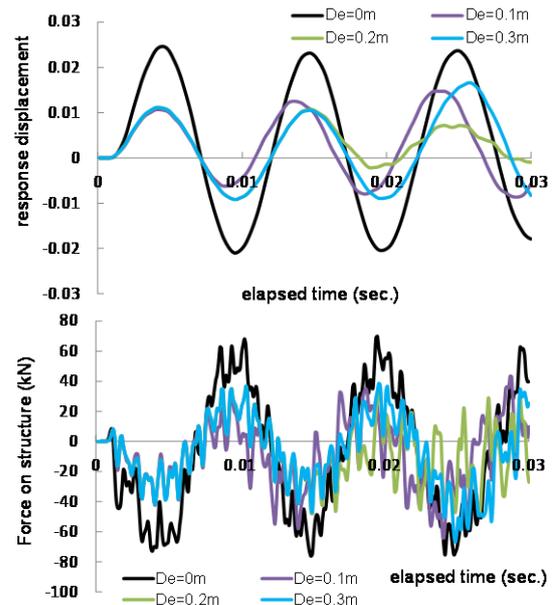


図-5(b) 建造物の変位(上)と荷重(下)の経時変化(弾性体)

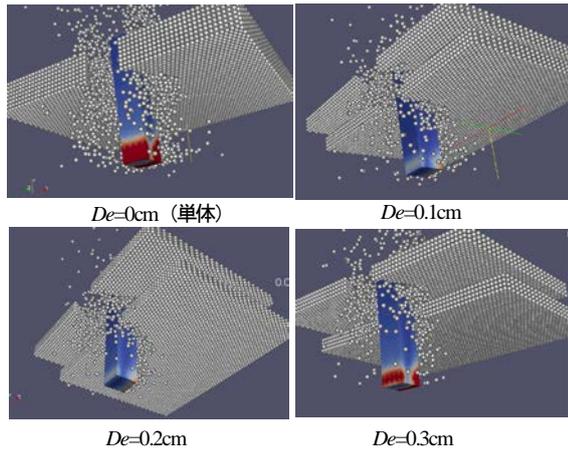


図-6 同時刻でのスナップショット例 ( $V_0=12\text{m/s}$ , 弾塑性体, 構造物のグラデーションは八面体せん断歪)

は材料内の内部減衰を考慮しなかった。DEM および FEM の主な計算条件をそれぞれ表-3(b)(c)に示す。

図-5 には、構造物を弾塑性体および弾性体とした場合のそれぞれの構造物変位（自由端部）と荷重（底面での衝突方向の作用荷重、つまりせん断力）の例を示す。さらに、図-6 には弾塑性体を例として、 $De$  に応じた同時刻でのスナップショットの例を示した。まず変位をみると、 $De=0$  以外、いうまでもなく、先行する氷塊(単体である  $De=0$  の半分厚の氷)が衝突し、初期に  $De$  だけずれていた後続の氷塊が衝突するまでの変位は一致するが、その後分岐し、それぞれずれ量に応じたモードで変位しているのが分かる。これは荷重でも同様となっている。本計算条件の場合、弾塑性体であっても、先行する氷塊のみでは弾性挙動を示し、後続が衝突すれば塑性変形が生じるのが分かる。また変位（弾性体の場合にはその振幅）は、この範囲では、単体( $De=0$ )に比べて大きく減じるものの、後続が衝突する場合には、ずれ量に応じて最大変位が異なる事が興味深い。特に塑性変形が生じる場合にはそれが顕著となる。さらに、荷重に着目すると、その極値や最大値の絶対値は、 $De$  に応じて、変位ほどには大きく減じるわけではなく、特に塑性変形を含む場合には、 $De=0$  と比べ、その最大値は大きく変わらず、むしろ逆向きの力が増大する。結局、荷重値の極値あるいは最大値に違いがないのは（特に後続が衝突する場合）、氷板規模（平面的）によらず構造物近傍の氷の破壊領域（クラッシング）のみに依存し、つまり構造物に衝突する微小粒子の弾性衝突（これ以上破壊を伴わない結晶粒単位）の数に依存すると考えられる。このため、厚さには依存し、特に弾性体の荷重を見ると、後続が衝突するまでは  $De=0$  の半分の荷重値となっている。また、構造物の固有振動数やずれ量の違いにより、位相がずれ、また、特に

$De=0.2\text{m}$  の場合等、増幅傾向になる場合などその挙動は複雑となる。

以上より、運動量の総量として変わらない氷塊が大小分割して同時に作用する場合、その動的挙動は複雑である事、そして、同じ運動量をもつ単体の氷塊が衝突する場合に比べ、変位は大きく抑えられる可能性があるが、荷重は大きく変わらずむしろ逆向きの荷重が大きくなる場合がある事、等が分かった。しかし、様々な固有振動、氷塊の衝突モードによっては、さらに複雑で危険モードが発現する可能性もあるため、今後、さらに様々な条件でシミュレーションを実施し、一考する価値があるであろう。本シミュレーション手法は、こうした複雑な衝突破壊過程にも容易に対応できるところに特徴がある事を再度強調しておきたい。

## 5. 海水の市街地への遡上に関する水理模型実験

### 5.1 本節の目的と実験概要

この実験では特に比較的建築物が密集した市街地への氾濫を想定し、特に、そこに形成される海水群のパイルアップやアイスジャムという現象に着目した、海水群の挙動や水位の変化等を調べ、そのリスク増加について検討する。前者は、氷が高く積み上がる現象、後者は、狭い箇所での氷の滞留・閉塞現象で、これらの形成により、大きな荷重が作用する場合があり、津波時ではないが、橋梁や沿岸・海洋構造物等が崩壊<sup>(例えば2) 3)</sup>した事例がいくつかある。

図-7 のように、海水模型群（ポリプロピレン製）を水面に浮かべた状態（沿岸に漂着した状態を想定）で、ゲート急開方式により段波を発生させ、一樣斜面部を伝搬した後、水平な陸上部に遡上させた（縮尺 1/100）。陸上には、アクリル製の角柱からなる複数の建築模型を横断方向に一直列配置した。計測項目は、分力計による水路中央部の建築模型に作用する荷重、デジタルビデオカメラ及び超音波式水位計による陸上遡上水深、そして底面設置型の電磁流速計による陸上遡上流速である。なお、密度と摩擦係数は実際の氷と同程度であるが、破壊強度や

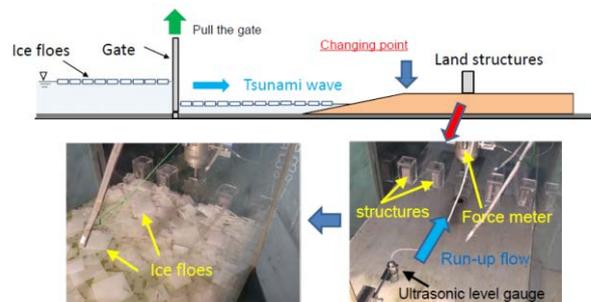


図-7 実験装置の概要図

弾性率等は相似でないため、氷群衝突力の評価は対象外とした。よって衝突力については別途検討しているわけである。

## 5.2 主な実験結果の概要

本実験によって以下の事が推察された。氷の大きさや建築物間隔等の条件によっては、建築物付近でアイスジャムが発生し、その閉塞によって流れをせき止め水位が上昇する。建築物には、まず氷群による衝突荷重が作用し、その後しばらく大きな静的な力が持続する(図-8)。しかし、この力は、氷群がない場合の力に比べかなり大きく、アイスジャム(堰き止め)による水位上昇分のみでは説明がつかない。そこで、図-9に示すように、壁のように建築物間でせき止められた水の圧力も建築物が負担するために生じる静水圧荷重が付加すると仮定した場合の推定値はだいたい実測値の傾向を説明できる(図-8の白丸で表示)。

以上の結果から、大量の氷群が伴う場合には、建築物には初期の動的およびその後持続する大きな静的な力が作用すること、津波避難ビル等への避難に際しては、その建築物が崩壊せずとも、水位上昇と氷群のパイルアップ(図-8,9)も考えると、より高い所に避難する必要がある事が分かった。今後さらに様々なシナリオを考慮した実験を実施していく予定である。

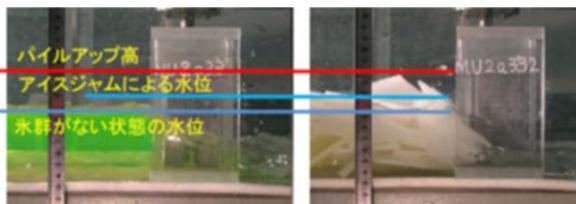
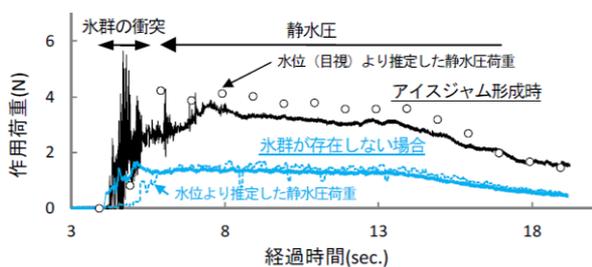


図-8 建築物に作用する経時変化の例(氷群有無の比較)

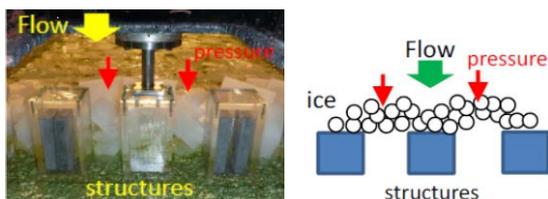


図-9 建築物間でのアイスジャムによる水流堰き止め状況  
(左) および建築物間で生じる水圧荷重の建築物への作用のイメージ図(右)

## 6. まとめ

本年度では、まず、昨年度に引き続き、海水のパイルアップやアーチアクションなど離散体特有の現象を考慮した、海氷の漂流・陸上への遡上シミュレーション手法の開発に取り組み、実海域においてそのパフォーマンスを確認した。氷群の挙動計算には、妥当性が示されている2次元のDEMに、鉛直方向の運動を組み込み、ジャムやパイルアップも考慮できる準3次元的なモデルを採用した。今回は、北海道東部の根室港内外に流氷が漂着している状態で、津波が来襲した場合を想定し、その背後地への遡上シミュレーションを実施した。まず、氷がない状態での津波伝搬と陸上遡上の計算を行った後、結果として得られた水深と流速から、準3次元DEMによる氷群の挙動や遡上を計算する。この計算により、津波の来襲による氷群の挙動(漂流)、氷群の陸上遡上、そして氷のパイルアップ形成が、シミュレートされた。現状においても、これをハザードマップに適用する事を想定すると、パイルアップやアイスジャムリスクの可能性のある箇所が表示される事になり、ゆえに構造物の配置計画や避難行動計画を考える上でも、本手法は非常に有用である事を確認した。

昨年度開発した、DEMを用いた海氷の衝突破壊性状や衝突力、FEMを用いた構造物の動的応答・降伏破壊等を推定できる、3次元数値シミュレーション手法により、複数の氷塊が衝突する場合の構造物の動的応答特性を調べ、その付加リスクについて考察した。運動量の総量として変わらない氷塊が大小分割して同時に作用する場合、その動的挙動は複雑である事、そして、同じ運動量をもつ単体の氷塊が衝突する場合に比べ、変位は大きく抑えられる可能性があるが、荷重は大きく変わらずむしろ逆向きの荷重が大きくなる場合がある事、等が分かった。本シミュレーション手法は、こうした複雑な衝突破壊過程にも容易に対応できることを確認した。

最後に水理模型実験により、比較的建築物が密集した市街地への氾濫を想定し、特に、そこに形成される海氷群のパイルアップやアイスジャムに着目して、海氷群の挙動や水位の変化等を調べ、そのリスク増加について検討した。大量の氷群が伴う場合には、建築物には初期の動的およびその後持続する大きな静的な力が作用すること、津波避難ビル等への避難に際しては、その建築物が崩壊せずとも、水位上昇と氷群のパイルアップも考えると、より高い所に避難する必要がある事などが分かった。

参考文献

- 1) 吉川康弘, 阿部孝章, 平井康幸(2012): 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.
- 2) Wang, Q.J.(1983): A Tentative View on Ice Load Applied on Jacket Platforms in Bo-hai Gulf, Proc. of Int' l Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Vol.2, pp.930-939.
- 3) Timco G.W. and A. Barker (2012): WHAT IS THE MAXIMUM PILE-UP HEIGHT FOR ICE ?, Proc. of the 16th IAHR Int' l Symp. on Ice, Vol.2, pp.69-77.
- 4) 木岡信治, 河合孝治, 竹内貴弘, 牧田佳巳(2010) サロマ第二湖口における流氷挙動と水路護岸に作用する流氷接触荷重の数値計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No1, pp. 786-790.
- 5) 木岡信治・森昌也・山本泰司・遠藤強・竹内貴弘(2009): 流氷群とアイスブームの相互作用に関する水理模型実験とその数値計算に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol.25, pp. 1053-1058.
- 6) Kobacs, A. and Sodhi, D.S. (1980): Shore ice pile-up and ride-up; field observations, models, theoretical analysis. Cold Regions Science and Technology ,2, pp.209-288.
- 7) 越村俊一, 高橋智幸, 首藤伸夫 (1994): 北海道東方沖地震津波の解析, 土木学会東北支部技術研究発表会, pp.184-185.
- 8) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁(2013): 海氷の杭構造物への衝突破壊特性に関する実験的及び数値的検討, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, Vol.16.

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

Budget: 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: KIOKA Shinji

MORI Masaya

YAMAMOTO Yasuji

### Abstract

We developed a fundamental numerical simulation method for run-up sea ice due to Tsunami based on a quasi-3D model that applied 2D-DEM to ice elements and that considered their motions in the vertical direction and conditions for ice pile-up. We applied this simulation method to a sample calculation for the run-up tsunami on the hinterland of Nemuro port, which is located at the eastside of Hokkaido, under the condition where sea ice floes drifted ashore around port, and the ice drift, ice pile-ups and ice jams could be simulated well. By applying this simulation to a hazard map, places/spots with possible danger where ice pile-up and ice jam could form can be indicated on the map and therefore this simulation method would be useful in light of a consideration for arrangement planning of structures and evacuation planning.

We applied the 3-D numerical simulation method for the interaction between a structure and an ice floe based on 3-D FEM-DEM, which was already developed last year, to dynamic response analysis of a structure when several ice floes simultaneously collided the structure to examine the additional risks.

Also, we performed model experiments on the inundation flow of tsunamis with ice floes. After the collision force imparted by the ice floes acts on structures, the tsunami flow is dammed by the formation of ice jams between the structures, and a large static force also acts on the structures because of the water level rise in front of the structures and because of hydrostatic pressure between the structures due to the ice jam, and this steady state remains for some time. We also proposed that we should evacuate to higher places than usual, because of the water level rise and the ice pile-up.

**Key words** : *Tsunami, Sea ice, Run-up, fracture, impact, elasto-plastic, FEM, DEM, Pile-up, Ice-jam*