

## 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：寒冷沿岸域チーム

研究担当者：中嶋雄一、木岡信治、本間大輔、  
井元忠博

### 【要旨】

津波による海氷の漂流・陸上遡上シミュレーション手法として広域を対象とする連続体モデルと局所領域を対象とする離散体モデルを開発した。このうち離散体モデルについて、3次元計算より遥かに計算負荷が少なく、氷などの離散体特有のアーチアクション(arch action) やジャム(jam)、パイルアップ(pile-up)などが考慮できる準3次元個別要素法(DEM)を開発した。この手法を用いて、北海道東部の漁港を例に、仮想津波による海氷の遡上計算及び、被害想定等のデモンストレーションを行った結果、ハザードマップ作成のほか構造物の安全性や配置計画、避難行動計画等を検討する上でも、本手法が有用であることを確認した。また、海氷の衝突破壊および衝突荷重推定のため、3次元のDEMおよび動的弾塑性有限要素法(FEM)の数値モデルを開発し、中規模衝突実験によりそれらの妥当性を示した。破壊性状や衝突波形を対象とする場合には、DEMを用い、最大衝突力や継続時間の概算推定であれば、計算コストの安いFEMを用いる事により合理的な検討手法を提案した。さらに、海氷と衝突過程にある構造物の動的応答解析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、その構造設計、性能評価や安全性の視覚的な理解と確認ができる設計支援ツールを整備した。最後に市街地の津波氾濫を想定した水理模型実験により、海氷と海水の混相流体が及ぼすリスクなどを明らかにし、津波防災上の留意事項等を提案した。以上より、事例検討、理論、数値計算、物理実験など多角的な研究手法により、海氷を含む津波のリスク想定とその備えに必要な知識とツールを獲得した。

キーワード：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、ハザードマップ

## 1. はじめに

### 1. 1 研究の背景

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、過去に津波により海氷が遡上し、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）（図-1 参照）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、海氷特有の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



河川氷のアイスジャムの例。狭窄部等での氷の滞留・閉塞現象（阿部ら、2012）<sup>1)</sup>



沿岸での海氷のパイルアップ例（榊西村組高橋氏提供。氷塊が高く積み重なる現象をいう）

図-1 アイスジャムとパイルアップの例

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くものである。

### 1. 2 本研究の構成と目的

まず、2章では、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す。前節①に対応するため、3章では、海氷の漂流・陸上への遡上シミュレーションとそのハザードマップへの適用例について述べる。本計算方法では、そのコスト

と目的に応じて、広域的、局所的なエリア予測に分けており、前者には海氷群を巨視的に高粘性流体（連続体）と見なした連続体モデルを、後者には海氷のパイルアップ（図-1 参照）等の海氷群による離散体特有の現象を考慮した離散体モデルを採用した。北海道東部に位置する漁港を例に、仮想津波による海氷の遡上計算及び、4章の手法を使って衝突力の分布を推定し、被害想定等のデモンストレーションを行った。

次に前節②に対応するため、4章では、中規模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。数値計算は、3Dの個別要素法に加えて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。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、海氷の衝突力の簡易推定法を提案し、前述のハザードマップ作成に応用した。前節①および②に共通する知見として、5章では、海氷群を伴った津波の市街地氾濫に関する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するとともに、防災の実務上の観点より、いくつかの留意事項を示した。最後に本研究成果をとりまとめ、今後の課題について述べる。

## 2. 海氷を伴う津波の被害事例と海氷の作用形態の想定

### 2.1 過去の被害事例

まず、1952年の十勝沖地震について簡単に説明する<sup>3)</sup>。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図-2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氷や沿岸結氷板が、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、氷が琵琶瀬橋(延長98m)に直撃し橋脚が折れて落橋した。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）<sup>4)</sup>、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<sup>5)</sup>、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<sup>6)</sup>がある。著者等は、20世紀以降に氷海域で津波が発生した過去の事例をとりまとめたが<sup>7)</sup>、小さなものも含めると20以上を数える。道東の流氷域・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た。さらに、2015年2月に初めて、流氷接岸時期の津波を想定した救助訓練が実施された。また、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-3参照）。少し時期が早ければ、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<sup>8)</sup>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、霧多布での事例で見たように、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

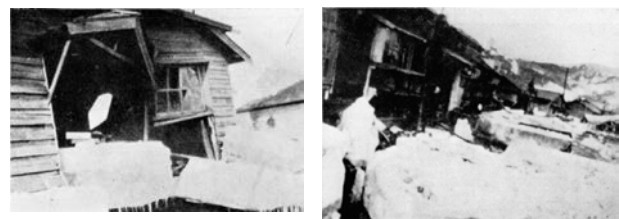


図-2 津波とともに遡上した海氷による家屋の被害状況の例  
(1952年十勝沖地震調査報告書<sup>3)</sup>より)



図-3 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想定される海氷（根室半島太平洋沿岸部）

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。

## 2. 2 海氷の作用（リスク）形態の想定

海氷によるリスク形態は様々想定されるが、漂流物としての構造物等への衝突のほか、アイスジャムやパイルアップがもたらす被害拡大等も考えられる。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、抗力の増加により崩壊した事例がある<sup>9)</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<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<sup>10)</sup>。主にこうした現象に着目しながら本研究を展開するものである。

## 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 連続体モデルによる計算方法（広域エリア対応）

#### 3. 1. 1 計算モデルの概要

前述のように、本計算方法では、そのコストと目的に応じて、広域的および局所的なエリア予測に分けている。本節では、このうち広域の計算法について述べる。海氷群を巨視的に高粘性流体と見なし、非線形長波方程式の2層流モデル<sup>11)12)</sup>の適用を試みた。そのモデルにおいて、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、海氷遡上時の海氷と陸部との摩擦（底面摩擦項として）を考慮したほか、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<sup>13)</sup>を採用した。さらに、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」の界面における界面張力項を考慮した。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、それらを合せた「正味の界面張力：net interfacial tension」<sup>14)15)</sup>を用い、これを定数とした。

#### 3. 1. 2 計算モデルの妥当性

まず、計算モデルの妥当性を概略的に調べるために、前述の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-4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。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。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。

次に、3・11の地震の発生時における実際の海氷分布に基づいた再現計算を、根室半島全域を対象に行った。図-5には根室半島周辺の海氷挙動の再現計算の例を示す。この場合の海氷の移動は1km以内であり、この津波

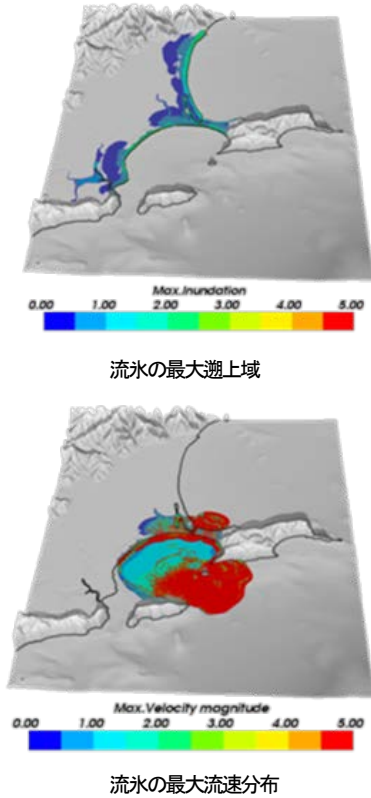


図-4 1952年十勝沖地震において発生した霧多布地区における津波+流氷の来襲再現の例

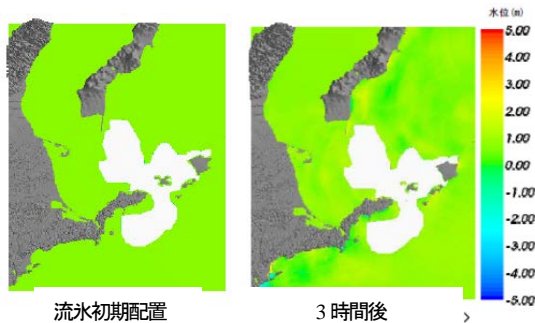


図-5 3・11での根室半島周辺の流氷挙動の再現例

による海氷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海氷の遡上が確認された程度で、当時、沖に去り、比較的密集していたと推測される海氷群の海岸への接近や遡上は確認されていない事から概ね妥当な結果と考える。

本計算モデルで、大局的ながら流氷遡上域等を再現でき、本モデルの有望性を示した。他方、界面張力の設定や、打ち切り水深等による数値不安定性など、いくつかの課題が明らかになった。今後より洗練されたモデルの開発が望まれるが、特に陸上遡上や局所での詳細な検討においては、次節の数値モデルが適し、外洋や広域での概

略検討では、本数値モデルが適していると評価できる。

### 3. 2 離散体モデルによる計算方法 (局所エリア対応)

#### 3. 2. 1 計算モデルの概要

特に陸上遡上時や構造物との干渉時においては、前述のように、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手法が必要となる。そこで個別要素法(DEM)の適用を試みた。3次元DEMの適用は、それが局所的なエリア(数100m~数km)であっても、計算コストが莫大となり、困難である。そこで、2次元のDEM<sup>16)</sup>に、鉛直方向の運動を考慮した準3次元的モデルを構築した。海氷群が流体に及ぼす影響は無視した。個々の要素を円盤とし、これを一つの氷塊とみなしたとき、その運動方程式は次式で表される。なお、計算負荷を軽減するため要素の回転は考慮しない。

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{u}_i}{dt^2} + \sum_j (\mathbf{f}_n^j + \mathbf{f}_s^j) + \mathbf{F}_i = 0$$

ここに、 $m_i$ : 要素*i*の質量、 $\mathbf{u}_i$ : 要素*i*の変位ベクトル、 $\mathbf{f}^j$ : 要素*j*が要素*i*に与える力のベクトルで添字*n,s*は要素間の法線および接線方向を示す。 $\mathbf{F}_i$ : 要素*i*に作用する外力ベクトル、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、 $\mathbf{f}^j$ を計算した。 $\mathbf{F}_i$ は、風や流れによる圧力抗力と摩擦抗力からなるとする<sup>16)</sup>。

陸上遡上の際など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。地面(斜面)に沿った運動方程式を構築し、これを水平(2次元平面)に置き換え、そのひとつの水平方向成分(x方向)を表示すると、

$$m_i \ddot{u}_{xj} = F_{SUM,xj} \cos^2 \theta_x + W_i \sin \theta_x \cos \theta_x - \text{sgn}(\dot{u}_{xj}) \mu (W_i \cos^2 \theta_x + F_{SUM,xj} \sin \theta_x \cos \theta_x)$$

$F_{SUM,xj}$ は要素*i*に作用する合力(x方向成分)であり、式(1)の左辺第2および3項の和で表される。 $W_i$ は地盤に作用する力で要素*i*の自重から浮力を差し引いたものとする。 $\mu$ は氷と地面との動摩擦係数、 $\dot{u}_{xj}$ は時間微分、 $\text{sgn}()$ は符号関数を表す。また、 $\theta$ は要素*i*の位置(IX,JZ)での地面の傾斜角を表すが、単純に隣接するセル(IX±1, JZ±1)との地盤高より推定する。そのx方向成分を表示すると、

$$\tan \theta_x = \text{sgn}(\dot{u}_{xj}) \frac{Z(IX + \text{sgn}(\dot{u}_{xj}), JZ) - Z(IX, JZ)}{\Delta x}$$

$\Delta x$ は格子サイズ、 $Z(IX, JZ)$ は位置(IX, JZ)での地面高である。

なお、式(2)において、地面に接触する直前の要素の速度に $\cos\theta$ を乗じたものが、地面を遡上する初速度となることに注意する。

次に、氷が他の氷に積み重なるパイルアップ（またはrafting）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、Kovacs and Sodhi (1980)<sup>17)</sup>によるshore ice pile-upの条件を準用する。彼らは、高さ $H_s$ のパイルアップを形成するのに必要な単位幅当たりの外力 $f_p$ を、仕事とポテンシャルエネルギーとの関係、質量保存則より導出している。本モデルに準用し、さらに摩擦抵抗を考慮すると次式を得る。なお、 $P/Q=1$  ( $\beta=0$ ) とし、氷の長さ $L$ （円柱の場合は直径と仮定）および面積 $A$ を考慮して、力の単位として表している。

$$f_p = \frac{1}{2} \rho_i g H_s t L + \mu_i \rho_i g t A$$

ここに、 $\mu_i$ は氷/氷の動摩擦係数である。氷の接触力 $f_n$ が $f_p$ を超えれば、パイルアップが生じ、円柱要素（氷）の厚さの増加が生じると仮定する。逆に、2つ以上の単体の氷が積層している状態で最も上部にある氷に作用する慣性力が、氷の静止摩擦力を超えた場合に、その氷が崩壊し、その相互作用している氷（低い方）に積層すると仮定する。なお、要素である海氷自身は破壊しないものと仮定した。

### 3. 2. 2 計算例とハザードマップへの適用可能性

まず、波源モデルとして、北海道東方沖地震津波をベース<sup>18)</sup>に、海氷遡上の現象をより際立たせるために、Dislocationを50mに設定したものとした。津波の計算では、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いた。格子サイズは波源から沿岸まで、2700m~12.5mの6次領域で計算し、対応する時間間隔は3sec~0.1sec、計算時間は4000秒とした。陸上遡上境界条件には岩崎・真野(1979)<sup>19)</sup>の方法を、越流境界条件には本間公式を、Manningの粗度係数には、小谷等(1998)<sup>20)</sup>を参照した。図-7に示すように、海氷の配置および遡上計算の対象は6次領域（3km×4km）のみとし、港内外に流氷が漂着している状態を想定し、直径5m、厚さ0.5mの円柱の海氷を、前項と同様に千鳥配置した。図-6には、本計算法のシミュレーションフローを示す。

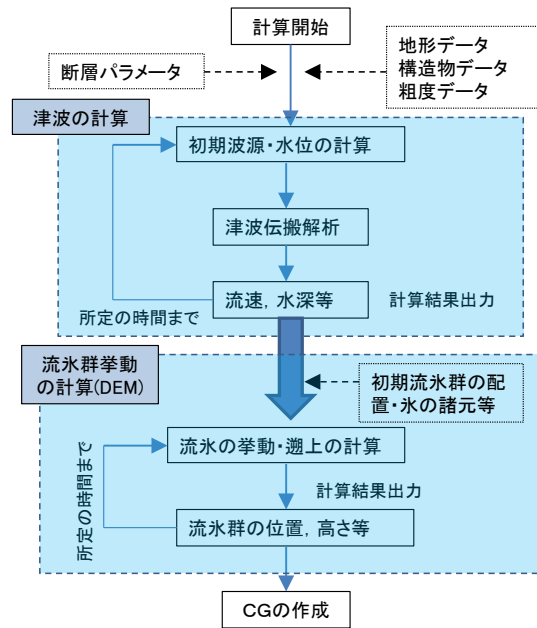


図-6 津波による海氷遡上のシミュレーションフロー

以上の条件で計算した結果のうち、初期状態、遡上時、海氷の最大遡上時、引き波時の幾つかのスナップショットを図-7に示す。これらの図は鉛直方向に10倍拡大して表示している。海水の動きにやや遅れて海氷が応答（遡上）していること、パイルアップが生じていること、海水が引いた後も海氷が陸上に残存すること、等が見て取れる。さらに、氷塊の慣性力や背後からの作用力により、海水の遡上よりもやや海氷の遡上範囲が拡大する箇所があることも注目される。ハザードマップへの適用を考えると、海氷の遡上範囲のほか、パイルアップやアイスジャムの発生リスクがある箇所が表示可能なので、その有用性が期待される。

次に、この計算例をもとに、津波力あるいは海水の衝突力の平面分布を推定し、構造物の被害予測（ハザードマップ作成）を試みる。次章で解説するように、3次元のDEMを応用した海水の衝突力や脆性破壊機構ならびに破壊氷片の飛散の推定のための数値計算手法を開発しているが、ハザードマップなど広域における構造物の安全性を評価するには計算コストがかかる。そこで、4.5節で考案した、氷塊の遡上速度等から簡易的に衝突力の分布を推定する方法をここで用いる。被害予測の一つの方法として、衝突力に応じた構造物の被害状態を表す被害危険度ランク<sup>21)</sup>を推定した結果を図-8に示す。

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 3D 個別要素法(DEM)による衝突破壊解析法

氷塊には、それを構成する要素(粒子)間に引張抵抗を与えた3次元のDEMを適用した。本研究で用いる計算コードは自作であるが、基本的には、文献<sup>22)23)</sup>等による概念に基づいている。DEMでは、要素(粒子)の集合体において、次式に示すように、個々の要素毎に独立した運動方程式(並進・回転)をたて、これを差分近似して時間領域で前進的に解いて要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析するものである。

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{u}_i}{dt^2} + \sum_j (\mathbf{f}_n^{ij} + \mathbf{f}_s^{ij}) + \mathbf{F}_i = 0$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} + \sum_j (\mathbf{r} \hat{\mathbf{i}}^{ij} \times \mathbf{f}_s^{ij}) + \mathbf{G}_i = 0$$

ここに、 $m_i$ : 要素*i*の質量、 $\mathbf{u}_i$ : 要素*i*の変位ベクトル、 $\mathbf{f}^{ij}$ : 要素*j*が要素*i*に与える力のベクトルで添字 $n, s$ は要素間の法線および接線方向を示す、 $\mathbf{F}_i$ : 要素*i*に作用する外力ベクトル、 $\mathbf{G}_i$ : 要素*i*に作用する外力モーメント、 $I_i$ : 要素の慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}_i$ : 要素*i*の各速度ベクトル、 $\hat{\mathbf{i}}$ : 要素*i*から*j*の中心間の直方向の単位ベクトル、である。要素間の接触ひきは、Voigt modelを適用して、 $\mathbf{f}^{ij}$ を計算した。なお、本研究では氷を構成する個々の要素をすべて同じ半径をもつ剛球とした。要素間の破壊の条件のうち、接線方向についてはMohr-Coulumbの基準を適用し、接線方向の力が次式のせん断抵抗力( $FS_{CRT}$ )を上回った場合にその粒子間結合を破断させた。

$$FS_{CRT} = C + f_n \tan \phi_c = b_{xy} b_{xy} c + f_n \tan \phi_c$$

ここに、 $\phi_c$ は氷の内部摩擦角、 $c$ は粘着応力、 $f_n$ は要素間の法線方向接触力、 $b_{xy} b_{xy}$ は要素間の接触幅である(図-9参照)。また、図-9に示すよう、粒子配列は強度の直交異方性を考慮し、 $x-z$ 平面において最密格子、 $y-z$ 平面において4角形配置とし、異なる配置とした。海氷は多結晶柱状構造(結晶主軸は*y*軸に直交)、モデルでの氷要素をひとつの結晶粒と見立てると、巨視的にみて、規則配列のうち本配列が最も近いと考えられる。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、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した。

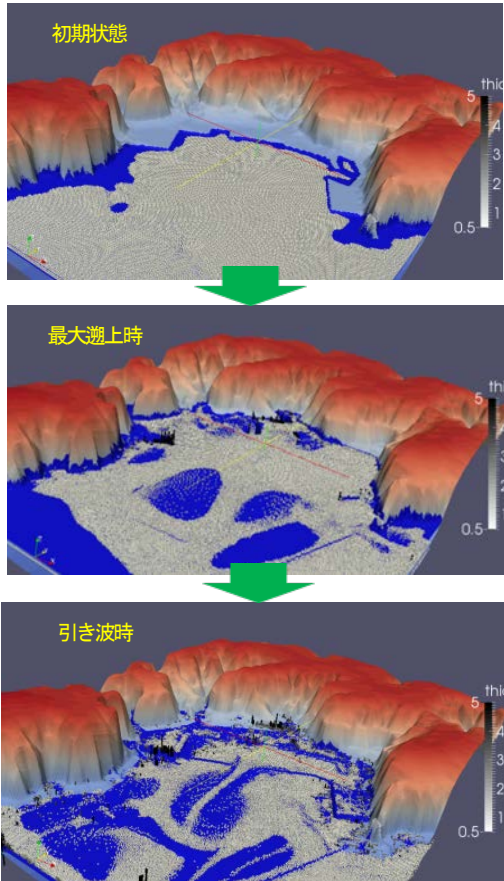


図-7 津波による海氷遡上のシミュレーション例

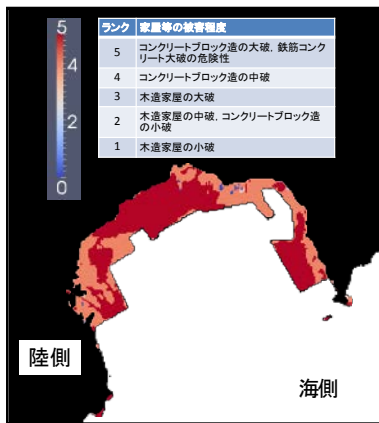


図-8 図-7の計算結果に対応する被害予測の例

図より、危険ランクが明確に表示されること、また図は省略したが、海氷が存在する場合の方がはるかにその危険ランクが増すこと、被害範囲についても、海氷の方が、やや海水よりも拡大する部分があること、等が明示される。図-7と合わせれば、パイルアップやアイスジャム等の発生リスクがある箇所や海氷遡上範囲が理解でき、ハザードマップ作成や、構造物の安全性や配置計画、避難行動計画等を検討する上でも、本手法が有用であると考

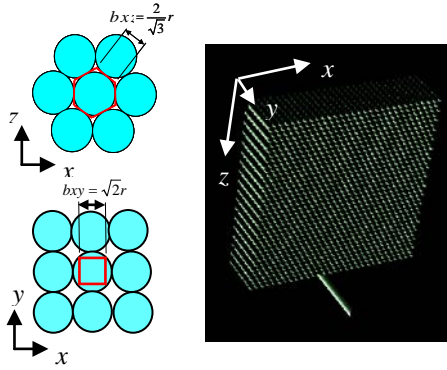


図9 粒子配列と接触幅の定義

4. 2 3次元動的弾塑性性 FEM による衝突破壊解析法

構成則としては、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、次式に示すように、降伏関数  $f$  にモール・クーロンの破壊基準を採用した (例えば24)。

$$f(I_1, J_2, J_3) = -I_1 \sin \phi + \frac{1}{2} \left\{ 3(1 - \sin \phi) \sin \Theta + \sqrt{3}(3 + \sin \phi) \sin \Theta \right\} \sqrt{J_2} - 3c \cos \Theta = 0$$

ここに、 $I_1, J_2$ などは、応力不変量  $\Theta$  は Lode 角、 $\phi, c$  は内部摩擦角および粘着力である。また、塑性ポテンシャル  $g$  としては、モール・クーロンの  $\phi, c$  に関連づけた Drucker-Prager 式を用いた (例えば24)。

$$g(I_1, J_2) = -\frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} I_1 + \sqrt{J_2}$$

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)である修正 Newton-Raphson 法を、時間積分には Newmark の  $\beta$  法を用いた。なお、本研究では材料内の内部減衰を考慮しない。次節に示す直方体の人工海氷と円形断面杭との衝突計算では、20 節点六面体アイソパラメトリック要素を用い、解析領域は対称性を考慮して、

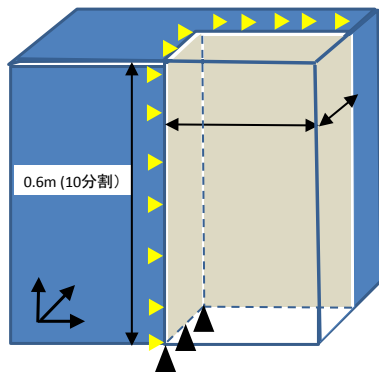


図10 FEM による解析領域と要素分割の概要

1/4 領域で実施した (図-10)。また杭の表現として、氷の中心部における単純支持とした。なお、解析コードは、Quake3d (例えば24) をもとに再構成 (自作) したものである。

4. 3 海氷の衝突実験および衝突破壊解析法の検証

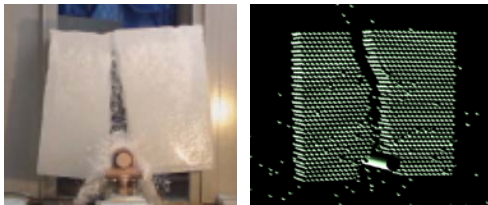
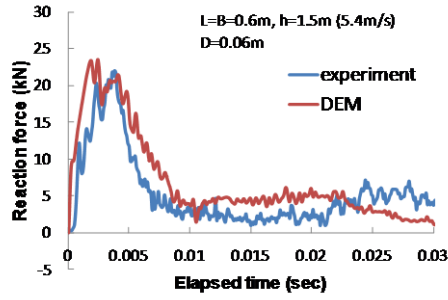
4. 3. 1 衝突実験の方法

衝突実験は、既報<sup>25)</sup>および前中期研究 (~H22) 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、人工海氷を、杭構造物へ衝突させることにより行っている。人工海氷は、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°C)、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  $5 \times 10^{-4}$  sec. (減衰定数: 7%) であった。本中期研究では、特に、衝突速度をさらに高めて実施し、衝突速度依存性を明らかにしたこと、それから比較のため、木材を使用したこと、等が既報と異なる。木材はカラマツ (産地は北海道旭川) で、無垢材として、海氷と同じ寸法・形状に成形した。木材は海氷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、繊維の方向に平行および垂直としてそれぞれ実施した。

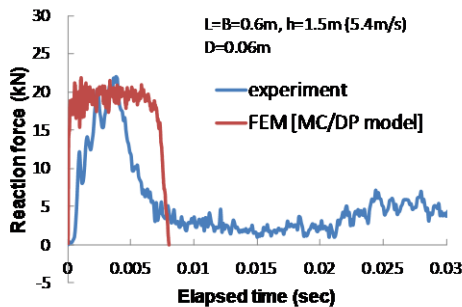
4. 3. 2 実験結果および計算結果との比較

計算パラメータは、DEM については既往<sup>25)</sup>のものを、FEM については、その主なものとして、動弾性係数 1.5GPa,  $c=1$ Mpa,  $\phi=25$ deg. を与えて計算した。図-11 には、衝突力 (支点反力) 波形の実測値と計算値の比較例を示した。DEM については、既往研究<sup>25)</sup>から示されているように、その衝突力波形や脆性的破壊性状など非常に良い一致を示しているのが分かる。しかし、FEM については、衝突力波形や破壊性状は異なる。モデルでは塑性変形しているのみで材料分離は生じないので当然ではあるが、最大衝突力や主な荷重継続時間は、良い近似を与えている。その八面体剪断歪みをみると (同図(b))、杭近傍を中心に塑性歪みは広がっていくが、衝突荷重はほぼ一定に推移後、除荷する。これは塑性歪み領域外の弾性回復過程によるものである。

図-12 には衝突速度に伴う最大衝突力の推移を示す。同図には、DEM および FEM による計算値も示した。最大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



(a) DEM による計算結果の例



(b) 動的弾塑性 FEM による計算結果の例  
(下図は八面体剪断ひずみ分布を示す)

図-11 衝突力（支点反力）波形の実測値と計算値の比較例

加した高速度の条件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。

DEM と FEM による計算結果は、検討した範囲では、両者とも実験結果を良好に再現している。この結果より、極めてシンプルな構成則を持つ DEM の適用の妥当性をさらに高めたといえる。また、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

用いるのが良いが、最大衝突力や継続時間の概算値であれば、計算コストの安い FEM を用いる事が合理的と考えられる。ただし、FEM では降伏後、最大衝突力は衝突速度に対しておよそ一定に推移するが、実測値や DEM の場合には、破壊後も、衝突速度に対して微増する。これは、破壊して氷片が系外へ飛散したとしても、一部の破壊氷片は構造物近傍にとどまり（拘束され）、前述のように速度に依存する小型の弾性体の集合体として杭に作用するためと考えられる。FEM ではそれを再現できないため条件によってはその使用には注意が必要である。

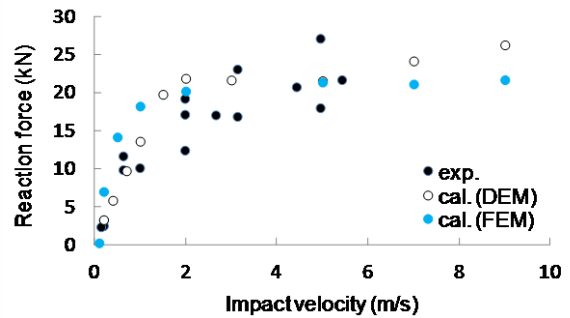


図-12 衝突速度による最大衝突力の推移の実測値と計算値との比較例

#### 4. 3. 3 木材の衝突特性と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-13 には、衝突速度に伴う木材と海水の衝突特性の比較例を示す。木材と海水は同一寸法であっても密度が異なるため、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。力積は、衝突直前の運動量で除した値を示す。衝突速度に伴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ること、海水より木材の衝突力の方が遙かに大きいこと等がわかる。また、木材の衝突力は繊維方向によって異なり、繊維方向による降伏応力やヤング率の違い例えば<sup>20)</sup>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、木材の方が大きく、破壊後はその違いははかばかしくなる。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氷の場合には、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、海氷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。

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、海氷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、海氷のほかにも、もし木材や車両、コンテナ等の一般の津波漂流物等があれば、それらで決まることになる。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、パイルアップ（海氷群の積み重なり）や粒状体としてのアイスジャム（閉塞）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を考慮する必要がある。これについては次章で述べる。さらに、海氷よりも構造物が大きい場合や、複数氷塊の同時あるいは非同時の衝突、また衝突後飛散した物体の二次的な衝突プロセスも考慮しなければならない。

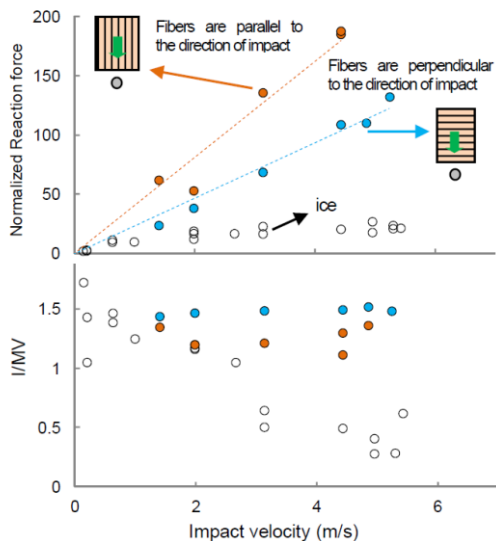


図-13 衝突速度にともなう木材(カラマツ)と海氷の衝突特性の比較 (上図：最大衝突力, 下図：力積)

#### 4. 4 構造物の耐氷設計支援ツールの開発

前節では、氷のモデル化にDEMやFEMを適用し、海氷の衝突シミュレーション手法を構築し、その妥当性を

検証した。学術的には未だ様々な課題が残され、さらに汎用的手法開発に向けて取り組む余地があるが、その基本的な衝突シミュレーション手法が整備されたと言える。本節では、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）も可能な、総合的で実用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前節の3D-DEMを適用し、構造物の応答解析には3次元動的弾塑性FEMを適用した。これには、4.2節で述べた方法を用いる。解析コードは、Quake3d<sup>23)</sup>をもとに再構成し、さらにC言語化して自作したものである。DEMとFEMとの連成計算（相互干渉プロセス）は以下のプロセスからなる。

- ① DEMにより氷の衝突計算を行う
  - ② 氷を構成する個々の粒子の構造物表面での衝突（接触）点座標を特定する
  - ③ その粒子の接触点から最短の構造物の節点(FEMでの)を検索する
  - ④ その粒子が構造物表面へ及ぼす衝突力(3方向成分の力)を、その節点に集中荷重として作用させる。
  - ⑤ その荷重をもとにFEMで構造物応答の計算を実施
- こうして構築したシミュレーションプロセスを図-14に、そして、例として氷塊が柱状構造物に衝突するシミュレ

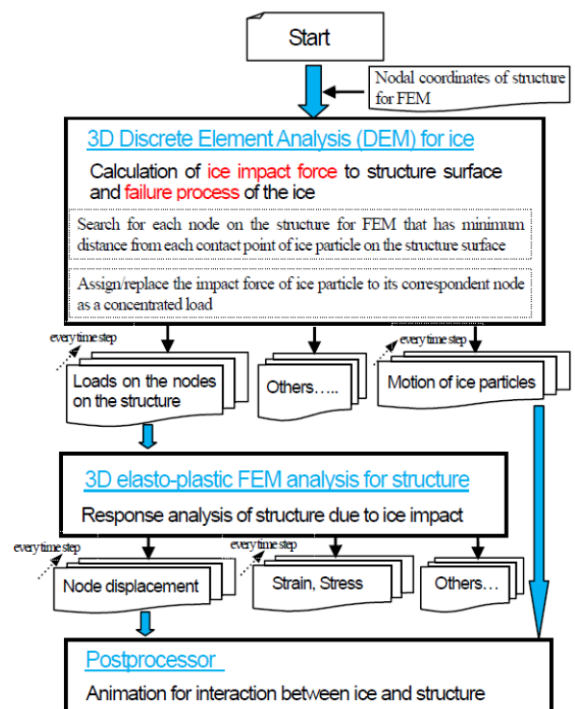


図-14 DEM-FEMによる氷塊と構造物との相互作用シミュレーションのフロー

ーション結果のスナップショットを図-15 に示した。一例として同図に示すように、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となる。

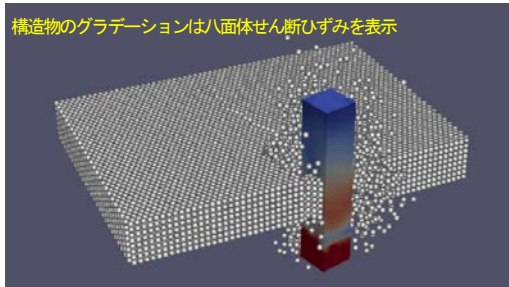


図-15 氷塊の構造物への衝突シミュレーション例  
(氷にはDEM 構造物に動的弾塑性FEM適用)

#### 4. 5 構造物(角柱)に及ぼす衝突力の簡易推定法

本節では、海氷による広域的な建築物や工作物の損壊状況、ひいては経済的損失の概略推定を可能とするため、これまでの実験結果や数値計算結果、理論的考察より、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。我々は過年度において無限平板（もしくは氷の大きさ(B)より構造物幅(W)が大きい場合）に作用する衝突力の簡易式を導出している。今回は、角柱構造物に及ぼす衝突力の簡易推定法を提案した。無限平板と異なり、解析的な簡易式の導出は極めて困難であるが、「実用的」で「安全側の設計荷重」を与えるという観点のもと、精度は劣るが、無限平板の場合のアイデアを踏襲し、角柱構造物にも拡張する。つまり、衝突時の構造物近傍の氷粒子（それ以上分離破壊しない最小単位）は弾性衝突するというものである。構造物幅変化による、前節のDEMやFEMで計算した衝突力と平板および杭構造物への衝突実験結果による衝突力の推移から、総合的に判断して、を、次式のようなバイリニア型の式形を提案した。

$$F / \eta \sqrt{\rho E h V_0 B} = W / B + 0.5 \quad W / B < 0.5$$

$$F / \eta \sqrt{\rho E h V_0 B} = 1 \quad W / B > 0.5$$

構造物幅が氷の幅の半分より大きい場合( $W/B > 0.5$ )には、従来の無限平板衝突の簡易推定式で計算し（構造物幅を氷の幅とする）、構造物幅が0の場合( $W/B=0$ )には、その計算値の半分とする。構造物幅がその間にある場合

( $0 < W/B < 0.5$ )には、その幅に応じて、両2者の間を線形的に変化させる。3.2.2項での被害状況の推算では、一般的な概念を示すことが主旨であったので、構造物群は平板と考え、その単位幅あたりの力で評価し、上式第2式を用いている。

#### 4. 6 複数の氷塊による構造物の動的応答の検討

図-16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構造物に衝突する、シンプルなシミュレーションを実施した。氷と構造物にはそれぞれDEMとFEMを適用した。構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-17には、構造物を弾塑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

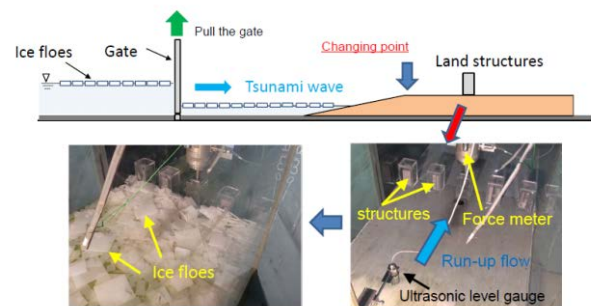


図-18 実験装置の概要図

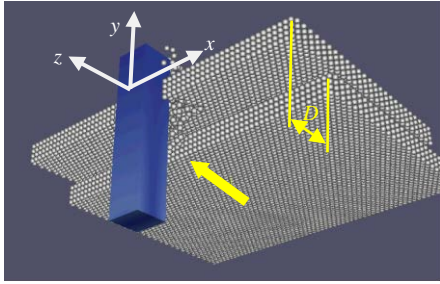
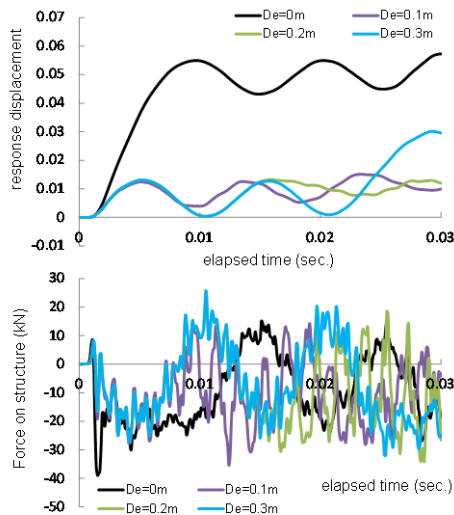


図-16 角柱構造物と複数氷塊の衝突例

図-17 構造物の変位(上)と荷重(下)の経時変化  
(弾塑性体)

作用荷重、つまりせん断力)の例を示す。得られた結果を要約すると、以下となる。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. 海氷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ます、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9) 10)</sup>した事例が幾つかある。

図-18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。

### 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-19)。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(閉塞)による水位上昇分のみでは説明がつかない。そこで、図-20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大体実測値の傾向を説明できる(図-19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-19、20)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。

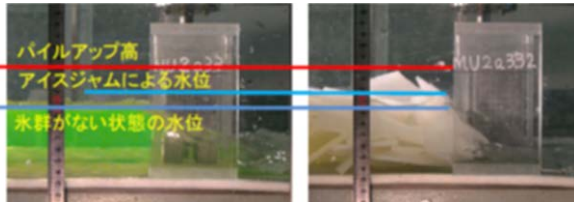
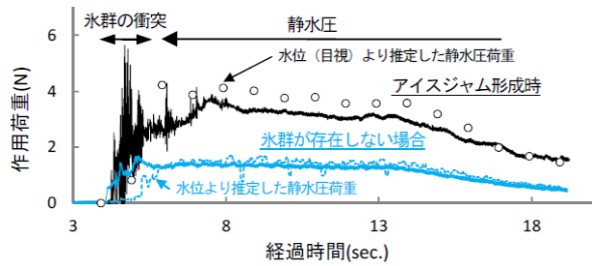


図-19 建築物に作用する経時変化の例 (氷群有無の比較)

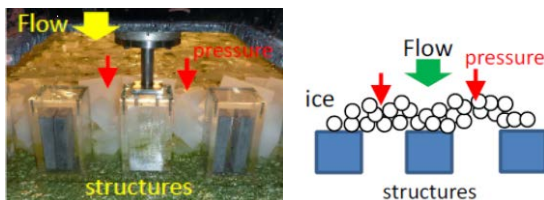


図-20 建築物間でのアイスジャムによる水流堰き止め状況 (左) および建築物間で生じる水圧荷重の建築物への作用のイメージ図 (右)

## 6. 結論

### 6. 1 各章の主要な結論

2章では、氷海域で津波が発生した過去の事例をまとめ、海水を伴った津波による被害事例を概観した。沿岸結氷域や流氷域にも津波が来襲しており、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示した。

3章では、海水の漂流・陸上への遡上シミュレーションとそのハザードマップへの適用例について述べた。広域的なエリアを対象とする、巨視的に高粘性流体としてモデル化し、非線形長波方程式の2層流モデルを適用した連続モデルを開発した。界面張力項などの導入などにより、流氷の固体としての振る舞いが確認された。また、幾つかの過去の流氷を伴う津波状況より、間接的に本手法の妥当性が示され、その有望性を確認した。さらに、比較的局所エリアを対象とした、3次元計算より遥かに計算負荷が少なく、氷などの離散体特有のアーチアクションやジャム、パイルアップなどが考慮できる準3次元的なDEMを開発した。この手法を用いて、北海道東部に位置する漁港を例に、仮想津波による海氷の遡上計算及び、被害想定等のデモンストレーションを行った。パイルアップやアイスジャム等の発生リスクがある箇所や海水遡上範囲が推定できるほか、構造物の損害程度に応

じた危険ランクが明確に表示されることから、ハザードマップ作成や、構造物の安全性や配置計画、避難行動計画等を検討する上でも、本手法が有用であることが確認された。

4章では、中規模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。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。DEMとFEMによる計算結果は、両者とも中規模実験結果(衝突速度に伴う衝突力特性)を良好に再現した。この結果より、極めてシンプルな構成則を持つDEMの適用の妥当性をさらに高めた。また、実務上の観点から、破壊性状や衝突力波形までを対象とする場合には、DEMを用い、最大衝突力や継続時間の概算値であれば、計算コストの安いFEMを用いる事が合理的と考えられる。さらに、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。構造物の動的応答変位やその応力・歪み(破壊・降伏状態含む)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、その構造設計、性能評価や安全性の視覚的な理解と確認ができる強力な設計支援ツールを獲得した。またその解析ツールを用いて、複数氷塊の構造物への非同時衝突について検討した。運動量の総量が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などを示した。

第5章では、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、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に着目して、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。

### 6. 2 総括的結論および今後の課題

本研究では、まず過去の事例検討より、海水特有の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を明らかにしたうえで、理論的検討、数値シミュレーション、物理実験など多角的な研究手法により、海水を含む津波の挙動、海水の陸上構造物への衝突破壊特性等を学術的に明らかにするとともに、氷海域特有のリスク

想定ならびに、津波ハザードマップ作成手法、避難施設や危険物などの重要構造物の耐氷設計手法、避難のあり方の提言、など実用上の多くの知識とツールを獲得した。以上より冒頭で述べた、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できたものと考えている。

しかし、特にアイスジャム形成時など海氷群が及ぼす荷重には水平のみならず鉛直方向へ作用する場合（アップリフト）や、複数氷塊が非同時に衝突する場合の動的挙動特性など、またいくつかの複雑な海氷群の作用形態を解明する必要がある。加えて、そのアイスジャムやパイルアップの詳細な形成条件の解明のほか、さらに洗練された数値シミュレーションの開発など、より確かな知見やツールを獲得すべく、引き続き必要な研究を展開して行く予定である。

### 参考文献

- 1) 阿部孝章、吉川泰弘、矢野雅昭、永多朋紀、稲垣達弘、村上泰啓、平井康幸(2012)：2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の結氷河川における遡上状況及び氷板痕跡調査、寒地土木研究所月報、No.705、pp.20-30.
- 2) 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.
- 3) 十勝沖地震調査委員会：十勝沖地震調査報告、1954.
- 4) 鏡味洋史(2009)：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.
- 5) Savarenski, F.E. (1952): ソ連科学アカデミー地震協議会報告、No4、津波(地震調査研究推進本部による翻訳版参照).
- 6) Kaistrenko, V., Razjigaeva, N., Kharlamov, A. and Shishkin, A. (2012): Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice, Pure Appl. Geophys.
- 7) 木岡信治、森昌也(2013)：氷海域における津波防災の研究の取り組みについて、寒地土木研究所月報、No.726、pp.41-46.
- 8) Watanabe, Y., Mitobe, Y., Saruwatari, A., Yamada, T. and Niida, Y.: Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250002, 2012.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 岩淵洋子、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.
- 13) 滝沢隆俊(1977): 流氷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.
- 14) Yapa, P. and T. Chowdhury (1989)：Oil spreading under ice covers, Proc. International Oil Spill Conference, pp.161-166.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 越村俊一、高橋智幸、首藤伸夫 (1995)：北海道東方沖地震津波の解析、土木学会東北支部技術発表会講演概要集、pp. 184-185.
- 19) 岩崎敏夫、真野明(1979)：オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算、海岸工学論文集、Vol.26、pp.70-74.
- 20) 小谷美佐、今村文彦、首藤伸夫(1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法、海岸工学論文集、Vol.45、pp.356-360.
- 21) 松富英夫、首藤伸夫(1994)：津波の浸水深・流速と家屋被害、海岸工学論文集、Vol.41、pp.246-250.
- 22) 伯野元彦 (1997)：破壊のシミュレーション、森北出版
- 23) 粉体工学会編 (1998)：粉体シミュレーション入門、産業図書
- 24) 地盤工学編 (2003)：地盤技術者のためのFEMシリーズ、弾塑性有限要素法がわかる、(社)地盤工学会
- 25) 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].
- 26) 伏谷他：木材の物理、文永堂、1985.

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

<b>Budgeted :</b>	Grants for operating expenses General account
<b>Research Period:</b>	FY2011-2015
<b>Research Team:</b>	Cold-Region Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research Group (Port and Coast)
<b>Author :</b>	NAKAJIMA Yuichi KIOKA Shinji HOMMA Daisuke IMOTO Tadahiro

We developed numerical models of drifting and run-up ice floes driven by Tsunami. The numerical models have two kinds of types: two-layer continuum model and discrete model. The discrete model is based on a quasi-3D DEM in which phenomena unique to granular solids such as the arch action, jam and pile-up of such solids can be simulated with a small computation load. We confirmed that the simulation results could estimate risk areas where ice pile-up and jam form as well as hazardous areas showing damage states for structures and that the simulation method was expected to be useful for the compilation of hazard maps and the development of disaster mitigation plans in the future. We clarified the more complicated fracture processes of sea ice on structure through both medium-scale experiments and numerical calculation. 3D dynamic and elastic plasticity FEM was also developed along with DEM. Both DEM and FEM agreed well with the experimental trends of collision force by ice on structure. If we estimate only maximum collision force and duration time, the use of FEM of which computational cost is more reasonable was expected to be more advantageous than the use of DEM. We also developed a practical and an overall numerical simulation method for dynamic response analysis of a structure considering sea ice collision processes. Sea ice and structure were applied to 3D-DEM and 3D dynamic plasto-plastic FEM, respectively. The sea ice fracture processes and trajectories of the ice fragments after fracture, along with dynamic displacements, stresses and strains of the structure including its failure/yield conditions, could be indicated. Therefore, we can not only design the structure considering the interaction with ice but also visually understand and confirm the safety performance evaluation for structure. Finally, we performed model experiments on the inundation flow of tsunamis with ice floes to clarify additional risks caused by mixed flow consisting of sea water and sea ice floes, and added some suggestions necessary to tsunami disaster mitigation plan including safety evacuation performances.

Thus, we developed support tools to offer information or materials lead to suppose various scenario including the worst-case required to examine plans for disaster mitigation in light of priority on human life.

**Key words :** Sea ice, Run-up, fracture, collision, elasto-plastic, FEM, DEM, Pile-up, Ice-jam, Hazard map