

## 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：山本泰司、木岡信治、森昌也

### 【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。本年度においては、まず、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 pile-up 形成を考慮した準3次元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が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、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。

キーワード：津波、海氷、遡上、破壊、衝突、弾塑性、FEM、DEM

### 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。

### 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。また、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の開発に取り組んだ。界面張力項などの導入などにより、海氷の固体としての振る舞いが可能となり、大局的ながら1952年十勝沖地震時の津波による海氷遡上域等を再現できたほか、さらに、3・11津波による道東の海氷の動きについて相応に説明できる（矛盾しない）妥当な結果を与えるなど、本手法が有望であることが確認された。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。

本年度では、上述した連続体によるシミュレーション手法では対応できず、過年度の課題としていた、海氷の pile-up 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。さらに、石油タンクや避難施設等の重要構造物の詳細な衝撃耐氷設計が可能となる、海氷と構造物との相互作用、つまり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、実用的で総合的な数値シミュレーション手法を開発する。さらに、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、海氷が構造物に及ぼす衝突力の簡易推定法を提案した。

### 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基礎的手法についての検討

#### 3.1 概説

既に述べたように、連続体によるシミュレーション手法では対応できず、過年度の課題としていた、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。今回は、後述するようにすでに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。

#### 3.2 モデルの概要

3 次元の DEM は、前述のようにすでに海氷単体の衝突破壊シミュレーションに採用しているが、これを遡上シミュレーションに組み込む事は、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。そこで、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する。DEM において、個々の要素を円盤とし、これを一つの氷塊とみなし、破壊を考慮しない。次式に示すように、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。

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

ここに、 $m_i$ : 要素  $i$  の質量、 $\mathbf{u}_i$ : 要素  $i$  の変位ベクトル、 $\mathbf{f}^{ij}$ : 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、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、 $\mathbf{f}^{ij}$  を計算した。氷に作用する外力  $\mathbf{F}_i$  は、流れによる圧力抗力と摩擦抗力からなると仮定し、次式で定義した<sup>5)</sup>。

$$\mathbf{F}_i = \frac{1}{2} \rho_w C_s A |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i) + \frac{1}{2} \rho_w C_d h' |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_i)$$

ここに、 $A$  は氷の面積、 $h'$  は喫水深、 $C_s$  と  $C_d$  はそれぞれ、摩擦係数と形状(圧力抗力)係数である。 $\mathbf{V}_w, \mathbf{V}_i$  はそれぞれ流速ベクトル、氷の漂流速度ベクトルである。なお、できるだけ計算負荷を軽減するよう、今回は回転を考慮しない事とする。

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。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として表示すると、

$$m_i \frac{d^2 u_{i,k}}{dt^2} = F_{i,SUM,k} \cos^2 \theta_{i,k} + W_i \sin \theta_{i,k} \cos \theta_{i,k} - \dot{u}_{i,k} / |\dot{u}_{i,k}| \mu (W_i \cos^2 \theta_{i,k} + F_{SUM,k} \sin \theta_{i,k} \cos \theta_{i,k}) = 0 \quad (k = 1, 2)$$

さらに、要素が斜面に接触する直前の速度を  $u_0$  とすると、斜面を遡上する初速度は、次式であることに注意する。

$$u_{i0,k} = u_{i0,k} \cos \theta_{i,k} \quad (k=1,2)$$

$k$  は各方向成分を示す添え字 (2次元座標で  $x, z$  成分),  $\mathbf{F}_{i,\text{SUM}}$  は要素に作用する合力であり、次式で表す。

$$\mathbf{F}_{i,\text{SUM}} = \sum_j (\mathbf{f}_n^j + \mathbf{f}_s^j) + \mathbf{F}_i$$

$W_i$  は地面に作用する力 (浮力と自重による),  $\mu$  は氷と地面との摩擦係数,  $\cdot$  は時間微分を表す。また,  $\theta_i$  は地面の勾配を表し、次式で表される (図-1 参照)。

$$\theta_z = \tan^{-1} \left( -\frac{H_{JZ\pm 1} - H_{JZ}}{\Delta z} \right)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( -\frac{H_{IX\pm 1} - H_{IX}}{\Delta x} \right)$$

$H$  は水深 (地盤から水面までの距離) を表す。これは、通常の津波シミュレーションで使用される地形データを活用する事を想定しており、要素 (氷) が存在するセルの位置を  $(IX, JZ)$  とすると、その隣接するセル  $(IX\pm 1, JZ\pm 1)$  との地面の勾配で表し、さらに  $IX$  と  $JZ$  に続く符号は、要素のそれぞれの速度成分の符号と同様とする。

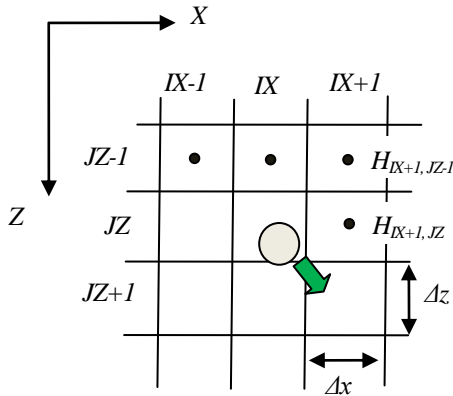


図-1 座標系と地形勾配を定義するための模式図

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  $H_s$  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より、次式のように導出した (図-2 参照)。

$$F_p = \frac{1}{2} \rho_i g H_s t \frac{Q(\theta, \phi, \beta)}{P(\theta, \phi, \beta)} \approx \frac{1}{2} \rho_i g H_s t$$

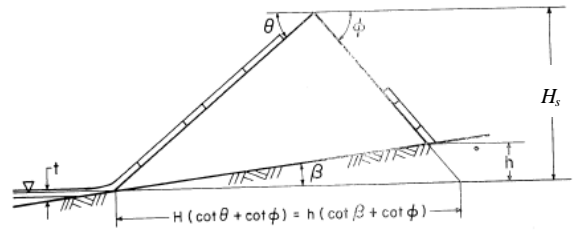


図-2 Shore ice pile-up のモデル(Kavacs and Sodhi,1980)

ここに、 $\rho_i$  と  $t$  はそれぞれ氷の密度と厚さ (単体),  $P, Q$  は  $\theta, \phi, \beta$  の関数であるが、この場合、 $P/Q=1$  ( $\beta=0$ ) としている。次に、これを本モデルに準用し (図-3 参照)、さらに摩擦抵抗を考慮すると、

$$F_p \approx \frac{1}{2} \rho_i g H_s t + \mu \rho_i g t A$$

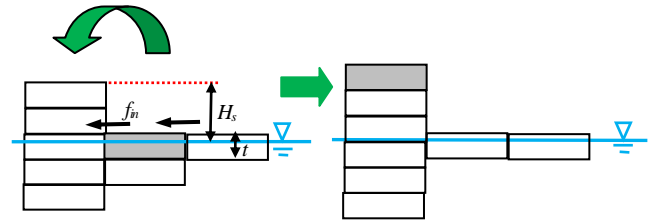


図-3 単純化された pile-up (ラフティング) のモデル

よって、氷に作用する力  $f_{in}$  が  $F_p$  を超えれば、pile-up (ラフティング) が生じる事になるが、複雑な要因を考慮し、係数  $\xi$  を介して、

$$f_{in} > \xi F_p$$

の場合に、pile-up (ラフティング) が生じると仮定する。むしろ、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 (pile-up の逆のプロセスが生じる)。

### 3.3 シミュレーションの例

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 (図-4 参照)、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て、ある単純な地形においてシミュレーションを試みる。ただし、この場合、要素間の接触において、過減衰状態を設定した。図-5 は、平坦部～一様勾配部 (1/57) ~ 平坦部の単純な地形上に大小複数の矩形の構造物を配

置した場合における、氷群の遡上シミュレーション例である。この場合、個々の要素(氷)の大きさは直径2m, 厚さ0.5mであり、簡単のため沖から岸方向への一様流(10m/s)のみを設定した。図中、赤色は、構造物、白黒濃淡はパイルアップ高を表す。図より、構造物近傍では、大きな力が作用するため、パイルアップ形成が目立つ事が分かる。

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が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、本手法は有用であるといえる。

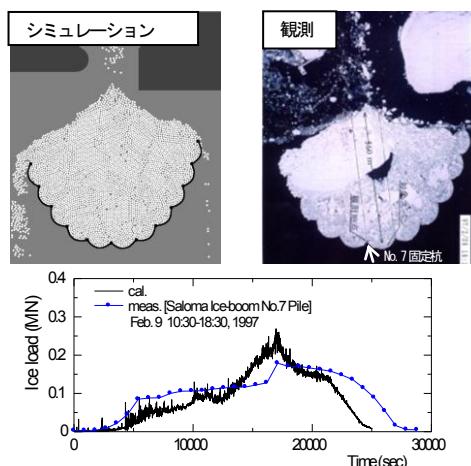


図4 アイスブームに作用する氷荷重の実測値と計算値との比較 [No.7固定杭に係留されているワイヤロープの張力で評価] [1997年2月9日 10:30-18:30] (木岡ら, 2010) <sup>5)</sup>

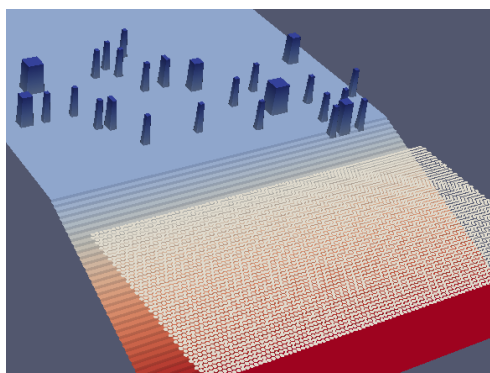


図-5(a) アイスジャムおよびパイルアップを考慮した氷群遡上のシミュレーション例(地形と初期状態)

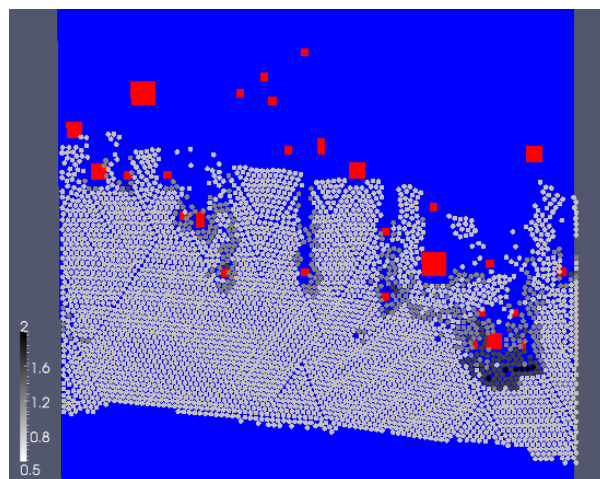


図-5(b) アイスジャムおよびパイルアップを考慮した氷群遡上のシミュレーション例(構造物は赤色:パイルアップ高は白黒の濃淡で表示)

#### 4. 津波来襲時の氷塊の構造物への衝突力と構造物の耐氷設計支援ツールの構築

##### 4.1 構造物の耐氷設計支援ツールの構築

これまで、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、衝突実験等との比較により、その妥当性を検証してきた。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。さらに本年度は、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する。まず、従来通り、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(自作コード)、構造物の応答解析には3次元動的弾塑性FEMを適用する。

ここでは、主として、構造物に適用するFEMによる計算手法の概要を述べる。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、降伏関数にモール・クーロンの破壊基準を採用した<sup>例え<sup>6)</sup></sup>。また、塑性ポテンシャルとしては、モール・クーロン式の $\phi, c$ に関連づけたDrucker-Prager式を用いた<sup>例え<sup>6)</sup></sup>。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、今回は材料内の内部減衰を考慮しなかった。また要素には、20節点六面体要素を使用した。なお、解析コードは、Quake3d<sup>7)</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）の方法については以下のプロセスとした。

- 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-6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ーション結果のスナップショットを図-7に示した。さまざまアウトプットが可能であるが、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と確信する。

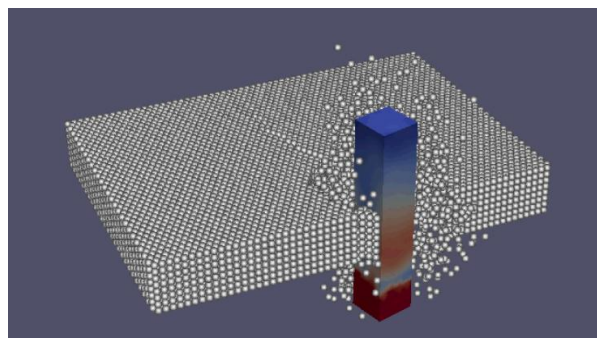


図-7 氷塊の構造物への衝突シミュレーション例（氷にはDEM構造物に動的弾塑性FEM適用、構造物の色の濃淡は8面体せん断歪みで表示）

#### 4.2 構造物(角柱)に及ぼす衝突力の簡易推定法

冒頭に述べたように、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する。まず、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<sup>8)</sup>。図-8にその概要を示すが、運動量保存則による簡易理論をもとに、DEMによる数値実験、そして中規模衝突実験結果等による検証結果から、総合的に導出されたものであり、氷塊を構成する個々の氷粒子の弾性衝突（氷粒子は個々の結晶に相当しそれ以上に分離・破壊しない最小単位と想定）による衝突力の集積の結果であると考えていることになる。今回は、角柱構造物（先とは逆に $B > W$ ）に及ぼす衝突力の簡易推定法を提案する。そのような場合には、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。まず、図-9には、構造物幅変化による、既存の様々な方法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を図示した。なお、縦軸の衝突力は、 $W=B$ における衝突力、つまり無限平板への作用力で除して無次元化し、横軸は $W/B$ とした。図示した計算値は、従来から用いているDEM、そして先の概念より氷を完全弾性体（破壊分離しない）としたFEMによる結果、それから、既に提案した簡易推定式をBの代わりにWで置き換えて計算したもので、である。実験値は、角柱

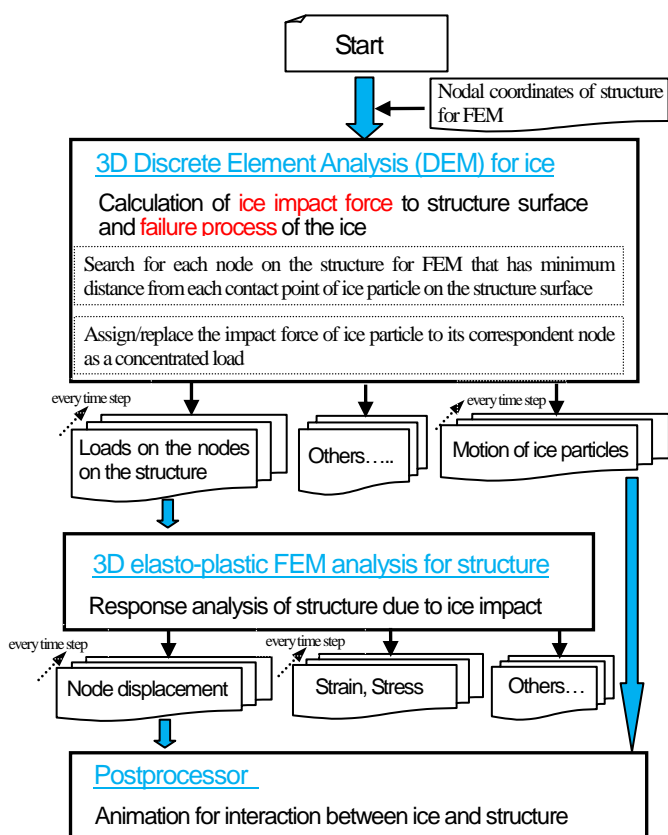


図-6 DEM-FEMによる氷塊と構造物との相互作用シミュレーションのフロー

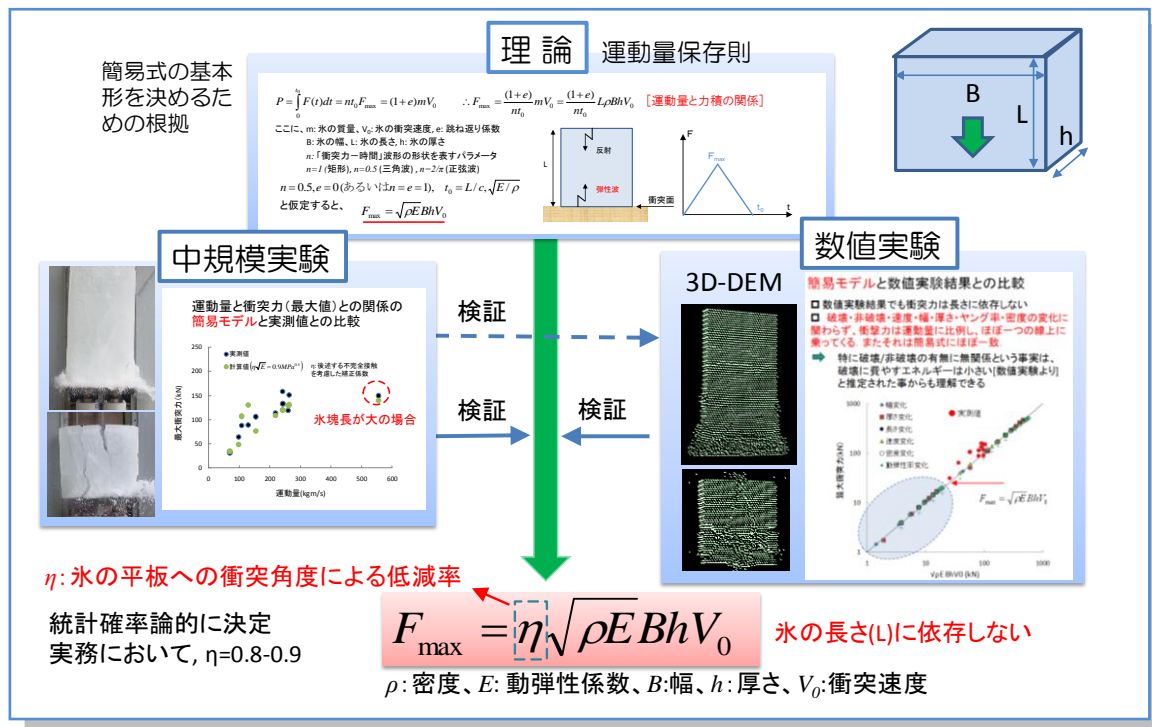


図8 平板に作用する衝突力簡易式導出までのプロセス (過年度報告書<sup>9)</sup>より抜粋)

への衝突実験結果であるが、 $W/B=1$ のそれは平板実験結果であることを意味する。また DEM そして衝突実験による値はばらつくが、先の無次元化に際しては  $W/B=1$  における平均値を使用している。まず、実験値と DEM による計算値とは調和的である。既存の簡易式では実験値を過小評価し、逆に完全弾性体とした計算結果は過大評価しているのが分かる。後者については、特に  $W/B$  が小さい場合が顕著であり、これは、実際には、脆性破壊により、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に起因する。したがって、海氷による衝突力が弾性体(破壊しない)より小さいのは、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する(木岡ら, 2013)<sup>9)</sup>。したがって、当初の概念、杭近傍付近の微小粒子の弾性衝突は、多少なりとも妥当ではあるものの、その要因の方が相対的に大きく寄与し、当然の結果であったとも言える。しかし、これらの結果は、実験値の上限を与え、前述のように、「実用的」で「安全側の設計荷重」を与えるという観点のもと、この弾性 FEM 計算結果に基づく簡易式を構築するのが妥当である。そこで、その計算結果を近似する最も単純なものは、次式のようなバイリニア型の式形が想定される。

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

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

この式の意味するところは、以下である。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。

以上より、角柱構造物に作用する氷塊の衝突力の簡易推定式として上式を提案したい。

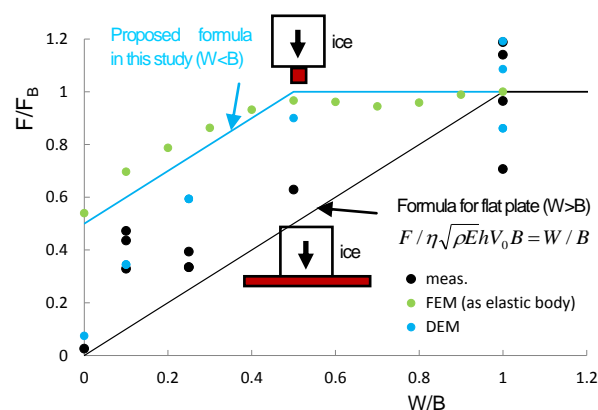


図9 構造物幅変化による、既存の様々な方法で計算した衝突力(DEM, FEM, 無限平板の簡易式, 今回提案の簡易式)および平板および杭構造物への衝突実験による衝突力の推移

## 5. まとめ

本年度においては、まず、連続体によるシミュレーション手法では対応できず、過年度の課題としていた、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んだ。大幅な計算負荷軽減のため、個々の海氷を円盤要素とした2次元の個別要素法を適用し、これに別途、鉛直方向の運動を組み込みこんだ準3次元モデルとした。さらに、仕事とポテンシャルエネルギーの関係より導出されたshore-pile upの条件を準用し、パイルアップ(氷の積層)を考慮した計算モデルを開発した。実際その手法を用いて、簡単な条件での遡上シミュレーションを実施し、可視化した。何らかの方法を用いて、今後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のリスクの可能性のある箇所が表示される事になり、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といえる。

次に、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(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(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。これには、「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、既存の無限平板の場合のアイデアつまり、「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」という概念を踏襲しつつ、これまでの実験結果や数値計算結果、理論的考察より、総合的にその簡易式を導出した。

## 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 GW. 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) 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.
- 8) 独立行政法人土木研究所(2011): 平成 22 年度重点プロジェクト研究報告書, 海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究, pp.32-34.
- 9) 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

**Budgeted** : 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 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. 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 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. We also proposed a simple formula to estimate ice impact force acting on a prism type structure to roughly estimate economic damages due to the ice impact for buildings/structures over a wide area.

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