

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、寒地技術推進室

研究担当者：木岡信治、山之内順、窪田康一

【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、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する事を目標とするものである。このため、必要な要素研究として、まず、津波による流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。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層流モデルを適用するとともに、界面張力項などを導入した。その結果、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、本手法が有望であることを確認した。さらに、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。我々の既往研究を踏まえ、今回は、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、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。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、計算コストの安いFEMの適用に明るい見通しを得た。しかし、降伏（破壊）時以降の若干の衝突荷重の速度依存性の再現には難があり、課題が残った。

キーワード：津波、海氷、遡上、2層流、破壊、衝突、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、大量の海水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、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、図-1に示すように、家屋や橋梁等が損壊した例も報告されている¹⁾。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、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、流氷の陸上遡上はその被害を大きくしたといわれている。また、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望まれる。事実、これまでも流氷域・結氷域でも津波が少なからず発生しており、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。さらに、2011年3月11日に発生した地震津波で、道東方面の津波および流氷遡上調査を行った結果、

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、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-1）。

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。

このため必要な要素研究として、まず、津波による流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検討するため、今回は、流氷群を巨視的に高粘性流体（連続体）としてモデル化するとともに、非線形長波方程式の2層流モデルを採用し³⁾、その適用性について調べた。さらに、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。我々の既往研究を踏まえ、今回は、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、既往から検討を進めている 3D の個別要素法に加えて、降伏関数としてモール・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。

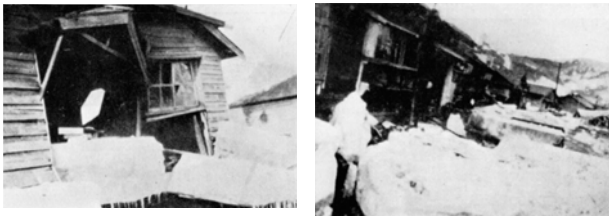


図-1 1952 年十勝沖地震で発生した津波とともに遡上した流氷による家屋の被害状況の例 (根室測候所蔵, 1952 年十勝沖地震調査報告書¹⁾ より)



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流氷跡 (根室半島太平洋沿岸部)

2 津波による流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

2.1 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、今回は特に、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うことを主な目的としている。

2.2 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^{3,4)}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: 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。

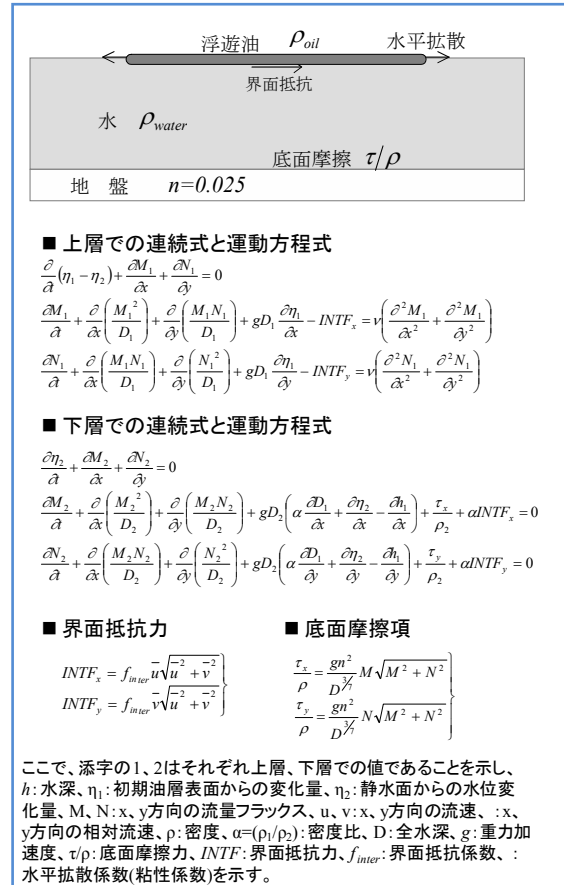


図-3 2 層流モデルの概要

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)、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⁵⁾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」⁶⁾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。

具体的には、正味の界面張力 σ_m 、氷層の密度 ρ_I として $-\sigma_m/\rho_I$ で表される項を、運動方程式に追加する。

界面張力項に注目して離散化すると、

$$\frac{M_1^{k+3/2} - M_1^{k+1/2}}{\Delta t} + other_terms - \frac{\sigma_n^{k+1/2}}{\rho_1} = other_terms$$

$$\frac{N_1^{k+3/2} - N_1^{k+1/2}}{\Delta t} + other_terms - \frac{\sigma_n^{k+1/2}}{\rho_1} = other_terms$$

次のステップの流量を求める形へ変形すると、

$$M_1^{k+3/2} = M_1^{k+1/2} + \Delta t \frac{\sigma_n^{k+1/2}}{\rho_1} + other_terms$$

$$N_1^{k+3/2} = N_1^{k+1/2} + \Delta t \frac{\sigma_n^{k+1/2}}{\rho_1} + other_terms$$

となるので、既存の流量算定式へ界面張力項

$$\Delta t \frac{\sigma_n^{k+1/2}}{\rho_1}$$

として追加した。

しかし、正味の界面張力項導入上の問題点がある。

Yapp(1989)⁶及び Izumiya(1998)⁷では氷盤下の油層が拡張が定常状態へ達した時点での正味の界面張力を求めたが、一般に時刻 $k+1/2$ の正味の界面張力 $\sigma_n^{k+1/2}$ を与えてシミュレーションを行うことは困難である。このため、ここでは正味の界面張力を定数として与えることとし、試行計算を実施して、その効果を評価することとした。

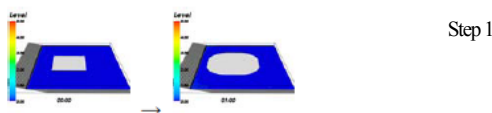
2.3 主な計算結果と考察

(1) 界面張力項の効果の検証

プログラム改良により導入した正味の界面張力項を導入した2層津波浸水予測モデルについて、その効果を検証するため、以下の数値実験を実施した。

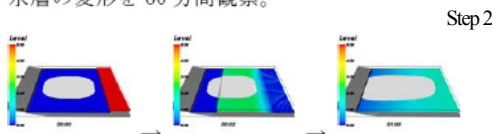
図4に示すように、縦横 3,000m×3,000m、一定水深 10m、海底勾配 1/50 のモデル地形を作成した。さらに、領域の中央に、氷層 1,000m×1,000m×初期層厚 1.0m を配置した。氷層に作用させる正味の界面張力を、 $sn=0.0$ 、 1.0×10^6 、 1.0×10^5 、 1.0×10^4 、 1.0×10^3 、の5通りとして感度を検証した。なお、共通パラメータとなる氷層の比重を 0.91、層間摩擦係数を 0.01、氷層の粘性係数を 0.01 と

正味の界面張力の効果による、氷層の変形を 60 分間観察。



Step 1

step-1に引き続き、波高 5.0m の入射波を与え遡上させる。氷層の変形を 60 分間観察。



Step 2

図4 界面張力項の効果を検証するための計算手順

設定した。また、離散化条件として、格子サイズ $\Delta x=10m$ 、計算時間間隔 $\Delta t=0.01s$ 、また水層及び氷層の波先における打ち切りパラメータは、 10^{-5} とした。計算は、図4に示すとおり、先ず step-1 として氷層を初期状態から静止状態となるまで、60 分間放置する。その上で、step-2 として、解析領域の右側より波高 5.0m の津波を入射させ、氷層の変形、及び堆積の変化を 60 分間追跡した。計算結果の一つとして氷層の体積変化を図5に示す。界面張力を入れない場合($sn=0.0$)、氷層の堆積は減少傾向となるが、界面張力を導入した場合、堆積の減少傾向は低減するのが分かる。一方、津波が入射して以降は、全ケースともに堆積が増加する傾向となる。これは、移動境界処理の際の誤差の累積と考えられ、改善のためには計算時間間隔を細かくする等の対応が必要と考えられる。このように、界面張力の導入は、氷層が無制限に拡散することを防ぐ効果があるものの、計算格子サイズ、計算時間間隔、氷層の範囲・厚さ等の条件に大きく依存するものと考えられ、試行計算による適切なパラメータを予め設定する必要がある。

このように、この界面張力の設定には労力を費やし、また誤差の蓄積やその結果として、実現象ではない不具合も生じる可能性があり、現段階においては今後さらなる検討が必要である。

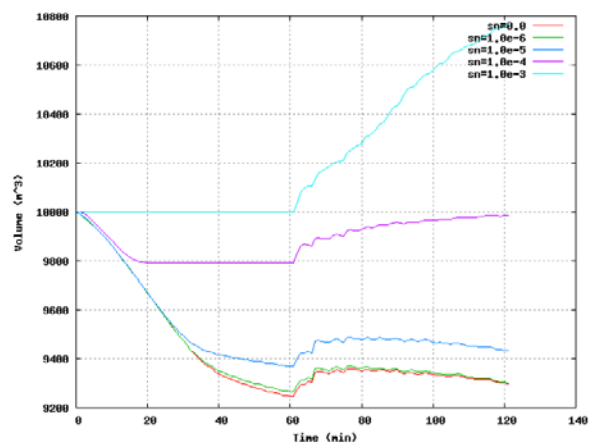


図5 氷層の体積変化

(2) 本モデルを用いた再現計算

前項では界面張力パラメータの設定に課題が残ったが、先の検討の範囲内で、氷層の体積が減少しない最小の値である $sn=1.0 \times 10^{-3}$ の条件を与えて、再現計算を試みた。その他の計算条件を表-1に示した。再現計算に用いたイベントとしては、前述のように、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の再現である。図6にはその計算結

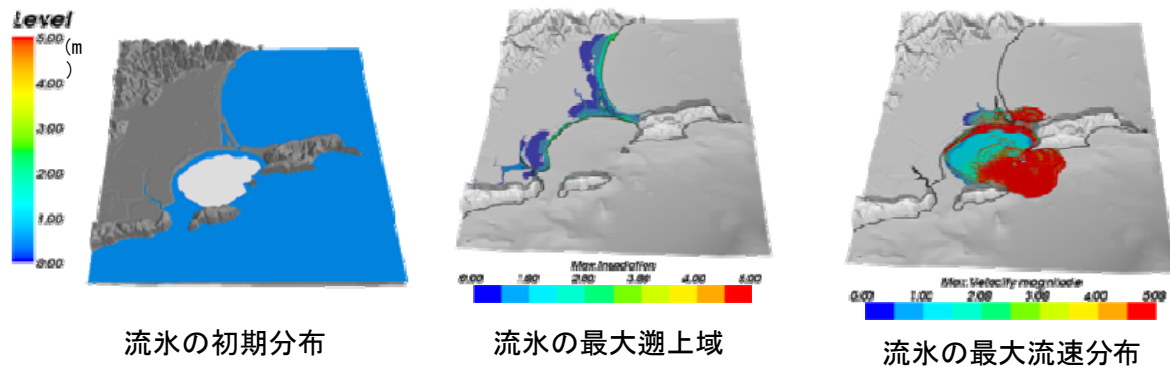


図-6 計算例：1952年十勝沖地震において発生した霧多布地区における津波+流氷の来襲再現

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ものと思われる。また、海水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と言える。以上の事から、本手法は有望であると思われる。しかし、流速など、打ち切り水深の設定な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。

表-1 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 | 1.0×10^3 |
| 氷層打ち切り水深 | 1.0×10^5 m |

2.4 今後の課題

本計算モデルで、大局的ながら流氷遡上域等を再現でき、本手法の有望性を確認した。しかし他方、界面張力の設定や、打ち切り水深等による数値的不安定性、また、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あり得る事など、様々な課題が明らかになった。さらに、海水は、外力や挙動の不安定性により積み重なる（パイルアップ）性質を有している事や、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、氷堆積によって高さが増すため、この現象は、避難施設等の検討の際に必要な情報の一つと考えられる。本モデルではこれら離散体特有の現象を再現できないため、今後は、領域に応じて、流体モデル、離散体モデル（例えば個別要素法、SPH、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も同時に検討していく必要があると認識している。

3. 津波来襲時の氷塊の構造物への衝突に関する検討

3.1 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、今回は、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、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3次元の動的弾塑性有限要素法の適用性も試みた。

3.2 衝突実験

衝突実験は、既往の研究^{（例えば8）}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¹⁾を、様々な形状や寸法の構造物へ衝突させることにより行っている。人工海水は、様々な寸法(0.15~1.2m、厚さtは約0.16mと一定)の直方体に整形し、様々な氷温(-15℃~-5℃)、様々な衝突速度(0.14~5.4m/s)に設定して衝突させた。また、構造物にはロードセルや歪ゲージ、変位計等を配置し、衝突時の反力（これにより衝突荷重

を推定) や構造物変位等を計測するものである。今回は特に、標準的な海水寸法 (0.6m×0.6m) において、高速条件や低速条件(脆性破壊しない)を追加して実施した。

3.3 衝突破壊の数値モデル

(1) 個別要素法モデル

基本的には、既往研究と同様であるが、再度簡単に説明しておく。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 次元の個別要素モデル(DEM)を適用し、杭の解析には弾性 FEM を適用した。DEM は、岩石や RC 構造物などの衝撃破壊解析への適用例も多い(例えば⁹⁾。本研究で用いた計算コードは自作であるが、基本的には、文献⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾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くことにより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しようとするものである。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。

図-7 に示すよう、粒子間の接触は 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 平面および x-y 平面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、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。

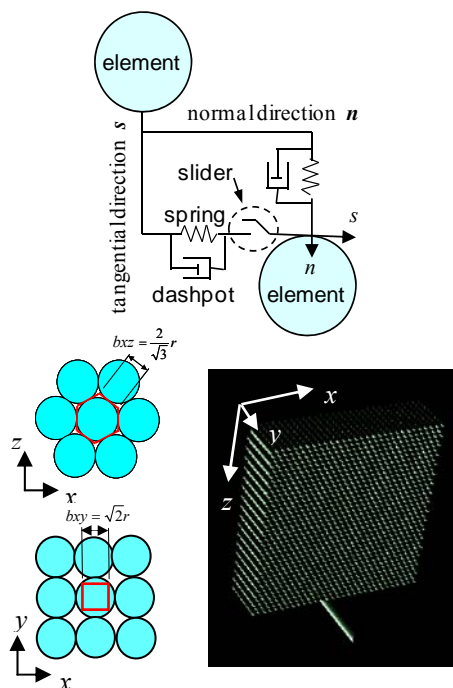


図-7 個々の剛体粒子の接触と粒子配列

(2) 動的弾塑性有限要素モデル

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¹²⁾。

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

ここに、 I_1, J_2 などは、応力不変量、 Θ はLode角、 ϕ, 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・クーロン式の ϕ, c に関連づけた Drucker-Prager 式を用いた(例えば¹²⁾。

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

ただし、ダイレイタンシー角は ϕ 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 β 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。

図-8 に、解析領域と要素分割 (20 節点六面体要素) の概要を示す。解析領域は対称性を考慮して、1/4 領域で実施し、境界条件は図のようにグレーの面に垂直な方向に固定した。また杭の表現として、単に単純支持とした。なお、解析コードは、Quake3d(例えば¹²⁾)をもとに再構成 (自作) したものである。

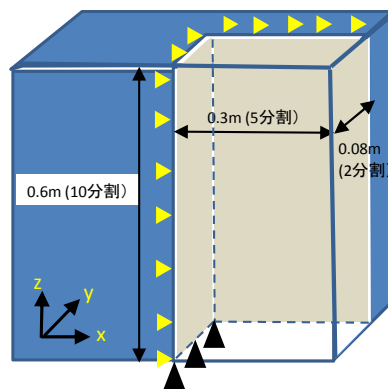
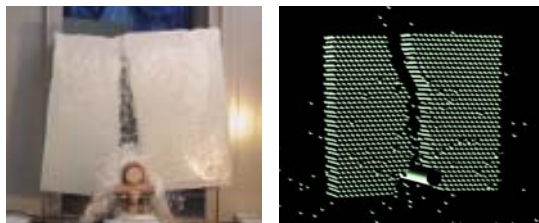
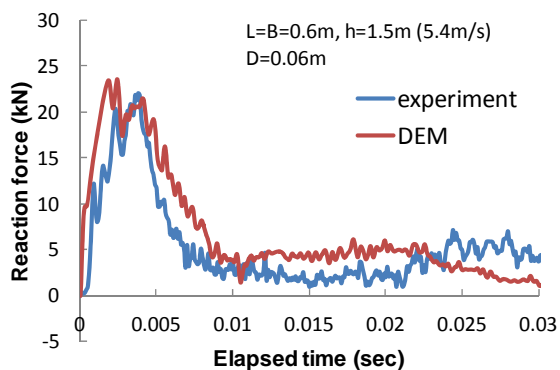


図-8 FEMによる解析領域と要素分割の概要

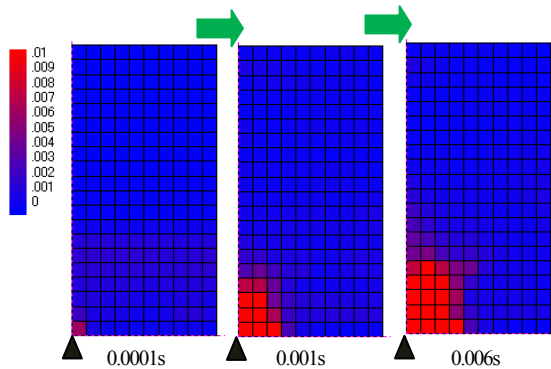
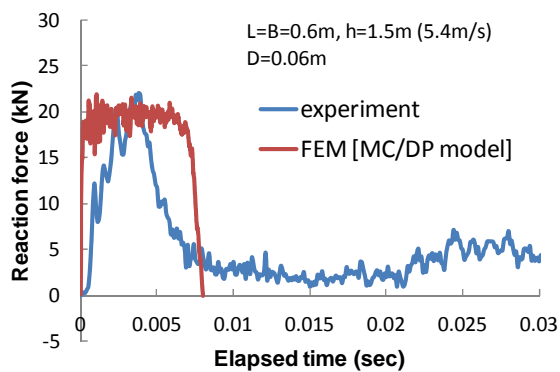
3.4 実験結果および計算結果

計算パラメータは、DEMについては既往⁹⁾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、 $c=1\text{Mpa}$ 、 $\phi=25\text{deg}$ を与えて計算した。図-9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⁸⁾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。FEM については、その衝突力のピークはおおよそ同程度の値が得られたが、衝突力波形や破壊性状は異なる。これは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、脆性破壊（材料分離）が生じない場合の挙動として



(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-9 衝突力（支点反力）波形の実測値と計算値の比較例

参考程度に考察してみる。図(b)下図は、計算による八面体剪断歪みを示した。これらは降伏後の荷重継続時間内におけるものであるが、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。

このように、脆性破壊を考慮しない場合は、破壊性状や衝突力波形は大きく異なるが、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とも考えられる。

図-10 は、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を示す。DEM については、既往研究から示されているように、その推移を非常に良く再現している。FEM による計算結果も、検討した範囲では、実験結果を良好に再現しているように見える。およそ衝突速度 1m までは、弾性挙動を示し、それ以降に破壊（降伏）が生じるようになる。このように、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、破壊後は、衝突速度による力の増加率は大きく減ずるものの、衝突速度に対して微増する傾向が伺える。これは、氷塊に対する構造物の相対的な規模や構造物形状にも依存すると思われるが、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）、それは衝突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と考えられる（つまり、構造物ごく近傍の氷片は、側方への飛散はなく、衝突後の運動量減少の緩和がない）。本研究での FEM ではそれら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。

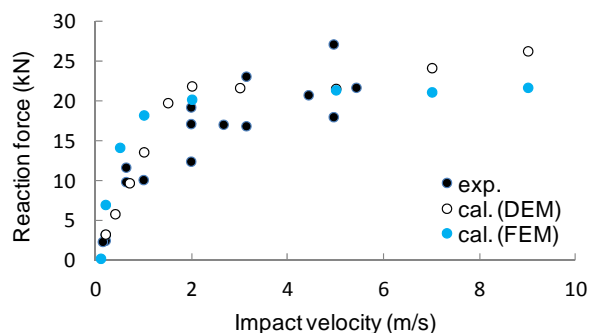


図-10 衝突速度による最大衝突力の推移の実測値と計算値との比較例

4. まとめ

本年度では、津波による流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。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層流モデルを適用するとともに、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改善され、大局的ながら流氷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。しかし他方、実際推定される挙動とは異なる流体的な性質があり得る事など、様々な課題が明らかになった。さらに、海氷は、パイルアップや、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、氷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、流体モデル、離散体モデル（例えば個別要素法、SPH、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も同時に検討していく必要がある事を確認した。

次に、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。我々の既往研究を踏まえ、今回は、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、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。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られる。しかし、降伏（破壊）時以降の若干の衝突荷重の速度依存性の再現には難があり、課題が残った。さらに今後は、単体の氷塊ではなく、複数氷板が同時あるいは非同時に衝突してくる可能性もあ

り、さらなる実験や数値実験を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 十勝沖地震調査委員会(1954)：十勝沖地震調査報告、1018p.
- 2) 北海道(1953)：十勝沖震災誌、927p.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Yapa, P. and T. Chowdhury (1989)：Oil spreading under ice covers, Proc. International Oil Spill Conference, pp.161-166.
- 7) 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.
- 8) 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].
- 9) 土木学会 (2004)：衝突実験・解析の基礎と応用，丸善.
- 10) 伯野元彦 (1997)：破壊のシミュレーション，森北出版.
- 11) 粉体工学会編 (1998)：粉体シミュレーション入門，産業図書.
- 12) 地盤工学会編 (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.

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

Budgeted: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2011-2015

Research Team: Port and Coast Research Team,
Cold Region Technology Promotion Division

Author: KIOKA Shinji, YAMANOUCHI Jun, KUBOTA Koichi

Abstract: 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 also examined the impact / dynamic load acting on a structure and the fracture modes due to the collision with a sea ice floes caused by tsunami wave. As a numerical model for estimation of the impact load, we attempted to apply the 3D dynamic elastic-plastic FEM analysis considering the Mohr-Coulomb's fracture criterion in addition to the 3D DEM which we had developed so far. The results by FEM analysis as well as the DEM agreed well with the trends of the experimental results regarding the relationship between the impact load and the impact velocity. Therefore, it seemed that the application of the FEM would be more reasonable because its calculation cost was relatively small. However, some problems remained because it appeared to be difficult to reproduce the dependence of the impact load on the impact velocity after yield/fracture of the ice floe.

Key words : *Tsunami, Sea ice, Run-up, two layer model, fracture, impact, FEM, DEM*