

# 3次元MPS法による氷板破壊過程に関する 数値解析的検討

阿部 孝章<sup>1</sup>・吉川 泰弘<sup>2</sup>・木岡 信治<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ  
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

E-mail: abe-t@ceri.go.jp

<sup>2</sup> 正会員 北見工業大学 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

<sup>3</sup> 正会員 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

本論文は、3次元MPS(Moving Particle Simulation)法により、杭構造物との衝突による氷板の破壊過程に関して粒子法による3次元的なモデル化を行ったことを報告するものである。本モデルは氷板と杭構造物を共に連続体として取り扱っており、氷の動的な挙動は、まとまった計算粒子群の挙動として表現される。氷板破壊及び杭構造物周辺での破壊モードに関する実験と、数値解析結果との比較を通じ、本モデルの妥当性検証を行った。また、数値解析結果に関する定量的な検討も行っており、氷の破壊モードの変化は氷板内を伝播する圧力波に由来し、それに大きく影響を受けることが示された。それに加え、本モデルの氷板衝突により発生する衝撃力予測に関する適用性も示された。

**Key Words :** *ice sheet break-up, three-dimensional MPS method, break-up process, numerical simulation, medium-scale ice-sheet breakup test*

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波をはじめとして、津波発生時には漂流物が津波外力を増大することが指摘されている。北海道のような積雪寒冷地域において、特にオホーツク海沿岸部においては毎年流氷が来襲し、また全道的に河川内では結氷を生じる。このような状態の沿岸及び河口域において津波が来襲した場合には、氷が大量の漂流物となって、津波に輸送されることが懸念される。写真-1に示したのは、2011年東北地方太平洋沖地震津波の発生後、河道内で実際に確認された津波漂流物としての氷の痕跡である。河道内においてこのように氷が津波漂流物化し滞留する現象は2011年東北地方太平洋沖地震津波において初めて認識されたものであり、仮に高速で河川構造物へ衝突などが発生した場合には施設の損傷や機能不全をもたらす可能性すらある。こうした背景を踏まえ、著者らのグループではこれまで漂流氷板の存在が津波外力をどの程度変化させるかについて、河川横断構造物<sup>1)</sup>などを対象とした検討を進めてきた。しかし、これはどちらかと言えば、氷の存在が河道の流況を変化させることで外力が変化するというマクロな視点に立った検討であり、氷板群個々の挙動や構造物との衝突につ



写真-1 新釧路川左岸河口から4.5 km地点で確認された津波由来の漂流氷板 (2011年3月14日撮影)

いては深く検討できていなかった。

また、氷工学の観点からは、構造物に作用する氷力に関する既往研究が多く存在し、沿岸及び海洋構造物に作用する、準静的な氷荷重に関する検討がなされている。しかし、これらもやはり半無限氷板が構造物に及ぼすマクロな影響を扱うもので、これらの知見を、津波漂流物としての個々の氷板の衝突力の推定に直ちに援用することは難しいと考えられる。こうした状況から、著者らの一人である木岡ら<sup>2)</sup>は人工海氷の落下試験により衝突破壊を分析し、DEM(個別要素法)を用いその数値シミュレーションモデルの構築を行った。また続報<sup>3)</sup>においてそのモデルを3次元DEMによって拡張し、衝突破壊メカニ

ズムの考察を行っている。しかしDEMを用いた破壊のシミュレーションによると、氷板を計算粒子の集合体と見なし、その粒子間の相互作用に基づき各粒子を質点の挙動として追跡するわけであるが、粒子間の相互作用にバネ・ダッシュポットモデルというDEM特有の仮定を持ち込むこととなる。

近年、連続体の解析手法として粒子ベースの解析手法、所謂粒子法が、海岸・海洋工学分野において注目を浴びてきている。海外で考案されたSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法<sup>4)</sup>や、国内で自由表面流れの解析を目的としてKoshizukaらにより提案されたMPS (Moving Particle Semi-implicitあるいはSimulation)法<sup>5)</sup>がある。これらの手法は連続体の運動方程式に則り完全Lagrange的に流体あるいは固体の運動を解析するものである。メッシュを用いた解析手法では衝突から破壊への一連の動的解析は困難であったが、もし固体どうしの衝突や破壊現象、そして衝撃力の評価に粒子法を適用することが可能となれば、未だ十分に確立されていない津波漂流物の影響を考慮した構造物の設計法に活用できる可能性がある。

そこで本稿では、粒子法による衝撃力検討ツールの確立を将来的な目標として、粒子法に基づく氷板破壊過程の3次元モデル化を行った。ここでは流水や河川氷板等が発生する積雪寒冷地域での津波発生時を想定し、構造物に衝突する氷板を対象としたシミュレーションを行った。計算結果と中規模実験との比較により構造物への衝突・破壊過程への基本的な適用性を検証することを目的とした。ここで、本稿で特に3次元モデルを採用して氷板破壊現象の検討を行った理由であるが、衝撃力評価の際に2次元モデルでは計算面に垂直方向の物体の挙動を完全に無視することとなり、衝撃力を正しく評価できない可能性が残るためである。

## 2. 手法

ここではまず数値計算の対象となる実験について述べる。氷板の衝突及び破壊実験<sup>2),3)</sup>は寒地土木研究所(札幌市)で行われた図-1の模式図に示すような自由落下方式による実験である。人工海水を杭構造物から氷下面までの落下高 $h = 1.5$  mから落下させ、円断面形の杭構造物(梁)に衝突させることで破壊させた。落下時、氷板の落下速度 $V_0$ は概ね $5.4$  m/sとなる。この落下速度は実験施設の制約上のものであるが、木岡ら<sup>2)</sup>が述べたように、現地で推定される越氷速度の推定値<sup>6)</sup>、あるいは津波による海水の漂流速度に比較して近いオーダーであり<sup>2)</sup>妥当な設定と考えられる。尚、自由落下の場合重力加速度の影響があるため水平衝突の場合とは異なることが考えられるが、ごく低速の領域を除いて重力加速度の影響は小さいという木岡ら<sup>3)</sup>の仮定をそのまま踏襲することとした。

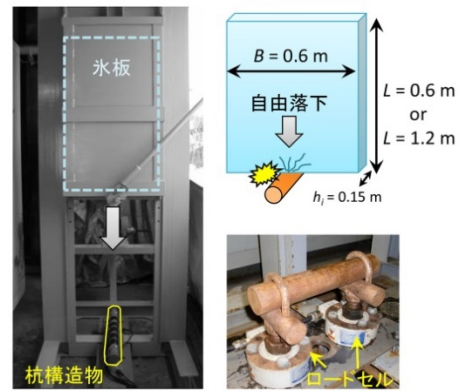


図-1 氷板破壊の実験装置<sup>3)</sup>

氷の衝突を受ける構造物として、杭は直径 $d = 6$  cm, 支間 $0.6$  mの両端単純支持のSS材である。尚、支点部にはロードセルを設置し、支点反力の計測も同時に行われている。氷板の破壊状況については、側方からカメラ撮影により把握できるようにした。氷板寸法を幅 $B = 0.6$  m, 長さ $L = 0.6$  mまたは $1.2$  mとした落下実験を対象に、3次元MPS法による数値シミュレーションを行うこととした。

本研究では、上記の中規模実験を対象として、3次元MPS法による再現計算を試みる。上述のように元来自由水面を持つ流体解析の一手法として提案されたMPS法であるが、その後宋ら<sup>7)</sup>によって弾性体の動的解析手法へと拡張された。その概要は以下の通りである。詳細については文献<sup>7),8)</sup>を参照されたい。弾性体の支配方程式は

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}) + \rho K_i \quad (1)$$

但し、 $\rho$ は密度、 $u_i$ は速度、 $x_i$ は変位、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタ、 $K_i$ は重力などの外力、 $\lambda$ 、及び $\mu$ はラメの定数で、次式のように表される。

$$\lambda = \frac{Ev}{1-\nu^2}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

ここで $E$ はヤング率、 $\nu$ はポワソン比である。ここで圧力と応力を用いて式(1)を表すことにすると、

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho K_i \quad (3)$$

で圧力 $p = -\lambda \varepsilon_{kk}$ であり、

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

である。ある計算対象粒子 $i$ の近傍に存在する粒子 $j$ につ

いて、初期の相対位置ベクトル $\mathbf{r}_{ij}^0$ 、計算過程での相対位置ベクトル $\mathbf{r}_{ij}$ 、そして歪みによる変位ベクトル $\mathbf{u}_{ij}$ は

$$\mathbf{r}_{ij}^0 = \mathbf{r}_j^0 - \mathbf{r}_i^0, \quad \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{r}_{ij} - R\mathbf{r}_{ij}^0 \quad (6)$$

と表される。但し $R$ は3次元の回転行列である。これを鉛直成分と剪断成分に分割すると各応力は

$$\sigma_{ij}^n = 2\mu \frac{u_{ij}^n}{r_{ij}^0}, \quad \sigma_{ij}^s = 2\mu \frac{u_{ij}^s}{r_{ij}^0} \quad (7)$$

となる。MPS法は運動方程式中の微分演算子を粒子間相互作用モデルと呼ばれる独自の離散化モデルを用いて離散化することとなる。宋ら<sup>7)</sup>のように圧力を粒子位置で計算する際にMPS法における発散モデル<sup>8)</sup>を用いると、

$$p_i = -\lambda \varepsilon_{kk} = -\lambda \operatorname{div} \mathbf{u}_{ij} \\ = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{u}_{ij}^n}{r_{ij}^0} \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} w(r_{ij}^0) \quad (8)$$

のように求められる。ここで、 $D_s$ は空間の次元数(=3)、 $n_0$ は初期粒子数密度、 $w(r)$ はMPS法で標準の重み関数で、次式で表される。

$$w(r_{ij}) = \begin{cases} \frac{r_e}{r_{ij}} - 1 & (0 \leq r_{ij} \leq r_e) \\ 0 & (r_{ij} > r_e) \end{cases} \quad (9)$$

$r_e$ は相互作用を制限する影響半径であり、計算粒子径 $d_0$ を用いて $r_e = 2.1d_0$ とした。通常、MPS法の計算において影響範囲は $d_0$ の2~4倍とされることが多いが、 $d_0$ の2.1倍としたのは宋ら<sup>7)</sup>に従ったもので、3次元計算において計算コスト増大を防ぎつつ安定的に解析可能であることを確認したためである。

以上のモデルを用い、上述の海水を模擬した中規模実験のシミュレーションを行うため、解析にあたり図-2のような高さ $L = 0.6 \text{ m}, 1.2 \text{ m}$ 、計算粒子径 $d_0 = 2 \text{ cm}$ の3次元粒子モデルを作成した。初期粒子配置は正方格子状に等間隔な配置とした。実験に対応する初速度 $5.4 \text{ m/s}$ を青色で表される全氷粒子に与え、黒色で示される杭構造物モデルに接触した瞬間を $t = 0 \text{ s}$ とみなして計算を開始した。杭構造物モデルは直径 $6 \text{ cm}$ に相当するよう、幅 $6 \text{ cm}$ 、高さ $6 \text{ cm}$ となるように配置した(後述の図-3中の左段に示している)。 $L$ が短い氷板のシミュレーションでは総粒子数 $6,360$ 個、長い氷板では $12,660$ 個であった。計算時間間隔 $\Delta t$ は $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ とした。

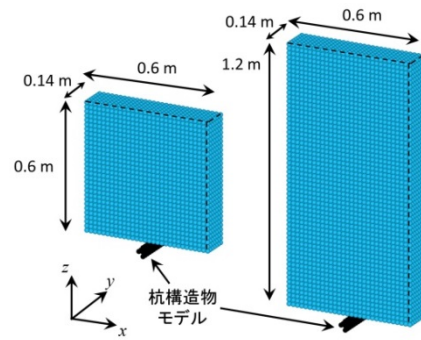


図-2 三次元の初期粒子配置

また、氷板の物性値について、密度は $900 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率は $1.3 \text{ GPa}$ 、ポアソン比は $0.3$ とし、杭モデルは変位しない固体として計算を行った。氷板の破壊条件としては、予備的な数値解析結果に基づき、氷板破壊実験を再現できるように設定した。その結果、初期の各粒子と近傍粒子間の距離から、 $0.2\%$ 以上変位した時引張りによる破壊、 $2\%$ あるいは $3\%$ 以上変位した時圧縮による破壊が発生するとみなし、いずれかの条件を満たした時に重み関数 $w(r)$ の値を $0$ にして近傍粒子との相互作用を強制的に $0$ とした。計算の初期状態において杭と氷板は接触しているものとし、その後の計算過程で得られる氷板構成粒子の破壊挙動を検討することとした。

また、杭に対する衝撃力は次のようにして求めた。すなわち、解析中、杭モデルを加速度は発生するが変位しない物体として取り扱い、杭モデル全体に発生する加速度の総和に、杭の質量を掛けてこれを杭に作用する力とみなすことにした。MPS法において、解析領域中の特定の物体に作用する力の評価は、後藤ら<sup>9)</sup>のように圧力値を物体表面で面積分することで求めることがある。しかしながら、弾性体解析手法で内部圧力値を同様の手法で力に換算することの妥当性が十分に確立されていないと考え、本稿では計算中発生する加速度値より直接的に力を算定することとした。

### 3. 結果及び考察

まず、落下衝突時の氷の破壊モードについて実験結果と計算結果との比較を通じて考察を行う。図-3に示したのは $L = 0.6 \text{ m}$ の場合における、(a)；ハイスピードカメラ(1000FPSで撮影したもの)による氷板破壊過程の実験写真と、(b1)及び(b2)；対応する時刻における数値解析結果(いずれも正面図)の比較である。図-3(b1)については、圧縮破壊条件を粒子間相互初期変位から $3\%$ 以上とした場合、図-3(b2)については $2\%$ 以上変位としてやや条件を緩和したケースを示している。以下では、この $2\%$ と $3\%$ の条件からの結果を対比しつつ議論を進めることとする。図中における $t = 0 \text{ s}$ は、ハイスピードカメラの実

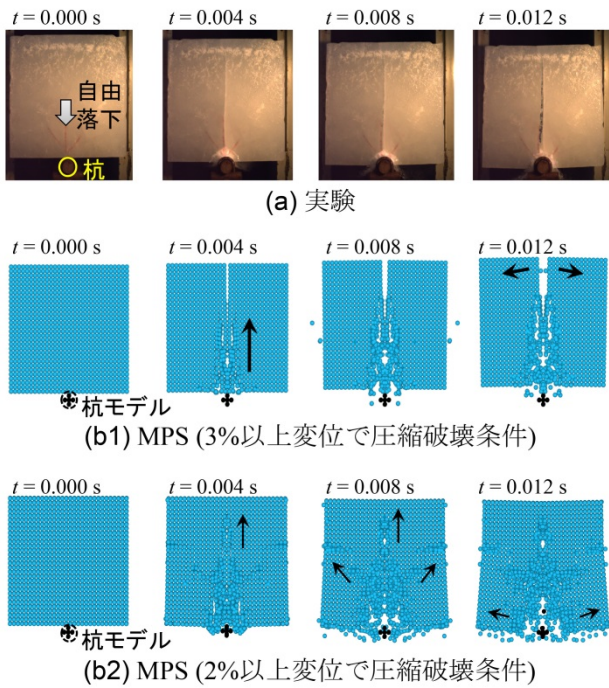


図-3  $B=L=0.6\text{ m}$ ,  $V_0=5.4\text{ m/s}$ の実験ケースにおける破壊性状の時系列変化とシミュレーション結果

験映像においては下端部でクラック（白く見える部分）が発生する直前のフレームに設定し、数値計算結果では計算開始時刻とした。

図-3 (a)より、実験では自由落下による接触後、 $t=0.004\text{ s}$ 以後中央で縦方向に亀裂を生じるスプリット型破壊が生じている。同時に、 $t=0.004\text{ s}\sim 0.008\text{ s}$ にかけて下端部で氷のめり込みが生じており、杭近傍では多数の細かな亀裂が生じて写真内で白く見えている。 $t=0.012\text{ s}$ においてはめり込みが進行し、中央で二つに割れた氷板の亀裂は更に広がっている様子が確認できる。

一方、数値解析結果を見ると、図-3 (b1)の3%変位で圧縮破壊条件について見ると、 $t=0.004\text{ s}$ の段階で中央にクラックが入り、氷板は上端部まで2つに分離している様子が確認できる。その後時間が経過するにつれ、分離した氷板は左右方向に離れていく様子が見られた。中央の亀裂部では粒子配置の乱れも確認され、周辺に飛散する計算粒子も見られた。これは杭近傍で計算粒子間の異常接近が起こり、強い反発力が生じたためと考えられた。また、本ケースにおいては氷板の鉛直位置がほとんど変化せず、氷板の下端は杭上部に接触した高さを保ったままシミュレーションは継続した。

図-3 (b2)の2%変位で圧縮破壊とした条件の結果を見ると、 $t=0.004\text{ s}$ で中央部にクラックが生じている点では実験結果や図-3 (b1)と共通しているが、異なるのは氷板の中央部分から左右方向上向きに別のクラックが生じている点である。クラックは上端部方向、左右端方向の3方向に分岐しており、その形状のまま氷板全体としては

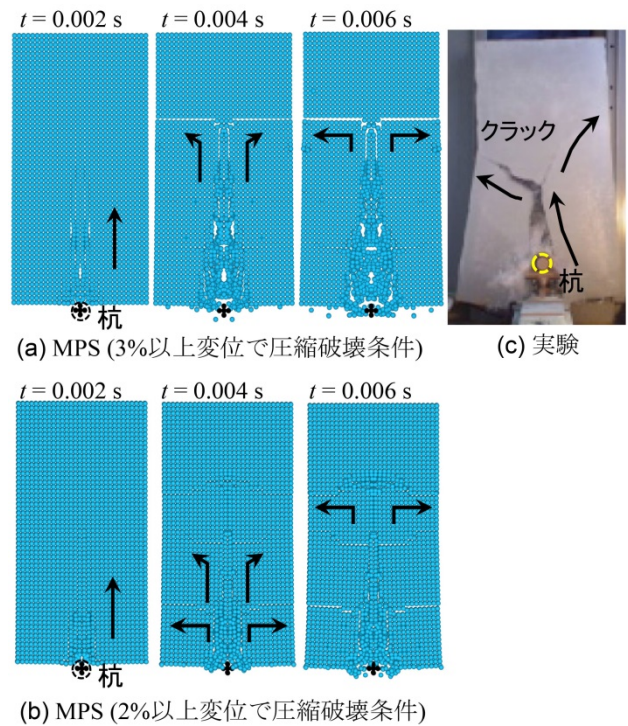


図-4  $L=1.2\text{ m}$ のケースに対応する数値解析結果(a), (b)と実験における破壊形状(c)の比較

杭方向に落下を継続している様子が確認された。

次に図-4に示したのは $L=1.2\text{ m}$ の場合の破壊シミュレーション結果と実験で得られた破壊形状の比較である。数値解析結果の図-4 (a)では縦方向に発生した亀裂が途中で水平方向に分岐し、最終的にT字型の破壊形状となっている。一方図-4 (c)の実験ではY字型の破壊形状が得られた。形状こそ異なるものの3つの破片に分裂する過程は再現された。図-4 (b)の2%以上の変位とした条件では、はじめ杭近傍から上方へ入った亀裂が、途中3箇所を左右方向に分岐し、複数の破片となる結果が得られた。図-4 (c)の実験結果に示したY字状の破壊性状とは異なっている。しかし、同じ条件であったとしても人工海水実験では破壊形状が異なることがあり、図-4 (b)の場合のように複数破片となったケースも存在する(木岡らの文献<sup>2)</sup>の図-2)。従って僅かな条件の違いで破壊形状は異なることがあるため、数値解析上の一つのパラメータの組み合わせが氷板破壊をいつも良く記述できるわけではないことに留意する必要がある。

次に上記のような破壊形状の相違が生じた要因について、数値解析上の内部圧力波という観点で検討を行った。図-5に示したのは $L=0.6\text{ m}$ の場合の氷板表面部の圧力波の伝播過程である。本図は図-2中におけるy軸の負から正方向を表示しており、氷板表面に現れている圧力分布を示しているが、その分布は氷板奥行き方向ではほぼ同様であったことを付記しておく。図-5 (a)は3%変位の場合、図-5 (b)は2%以上変位の場合の比較で、 $t=0.00025\text{ s}$ にお

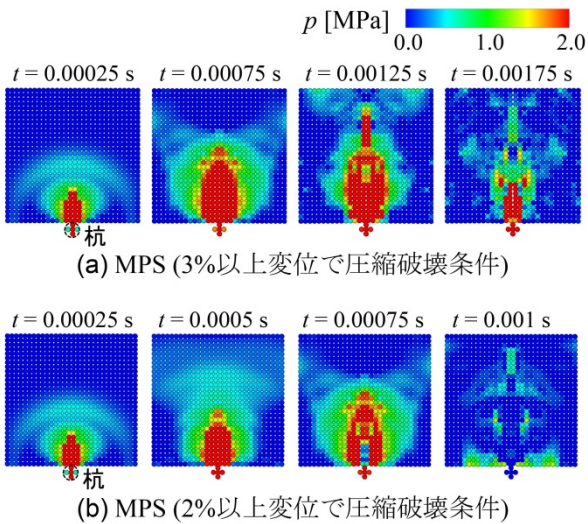


図-5  $L=0.6$  mにおける氷板内部の圧力波の伝播過程の違い

いて圧力分布は類似しているが、 $t = 0.0005$  s以降においては図-5 (a)のケースの方が圧力波は早く上流端へ到達した。その結果として図-5 (a)では $t = 0.00175$  sにおいて上端で僅かな亀裂が生じ始めている。同時に杭近傍では圧力大の領域が広がっており、その後亀裂は上端から下端方向へと進行した。その結果が図-3 (b1)のように上端側から分離していく破壊形状の要因になったと考えられた。

図-5 (b)のケースについては、 $t = 0.00075$  sの段階で、杭近傍で圧力小の領域が発生しており、ここから亀裂が発生した。その後上方へ向かう亀裂が発生し「ハ」の字型に分離していく発端となっているのが $t = 0.001$  sの段階である。氷板中央線の下部に圧力0の領域が発生しており、ここから亀裂が発生した。そして図-3 (b2)の結果へと遷移していった。

一方で図-6に示す $L = 1.2$  mの場合に関して、図-6 (a) 3%変位の条件では、発生した圧力波ははじめ上方に伝播するが上部1/3程度に到達した所で、下部の杭との接触部で破壊が発生している。その様子は圧力ゼロの領域が杭近傍に発生していることから分かる。その後亀裂は上方へ進行し ( $t = 0.00190$  s),  $t = 0.00400$  s以降T字状のクラックとなった過程が確認された。図-6 (b) 2%変位の条件では、初期の $t = 0.00075$  sの段階で、圧力波が上昇すると共に杭接触部では圧力ゼロ領域が発生しており、 $t = 0.00175$  s以後はまばらな圧力分布となり、水平方向に、複数クラックが発生する様子が確認された。

このように、氷を連続体のモデルとみなしてMPS法を採用することにより、破壊過程の内部構造まで踏み込んだ検討をすることが可能となった。

次に、本モデルの実際的な応用例として、杭に対する衝撃力推定に適用した。再現の対象としたのは木岡ら(文献<sup>3)</sup>の図-7)による剛性の低い杭を用いた実験で、本稿では $L = 0.6$  mで、2%以上変位での圧縮破壊条件を設定した場合が対応する。ロードセル計測における時系列的な支

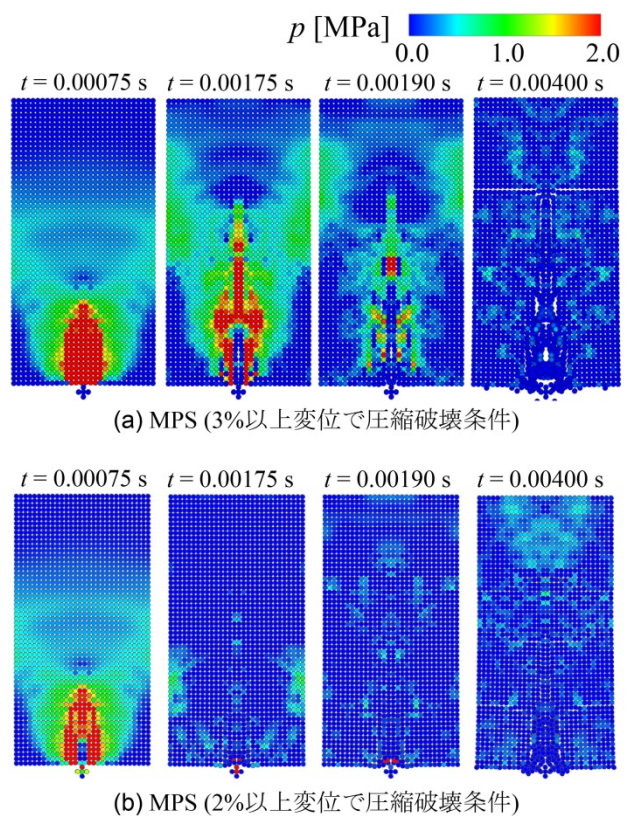


図-6  $L = 1.2$  mにおける氷板内部の圧力波の伝播過程の違い

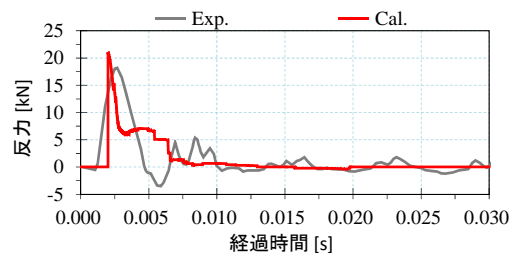


図-7 実験における支点反力波形と数値計算結果の比較例 ( $L = 0.6$  m)

点反力の波形と、数値計算結果の比較を図-7に示した。灰色線が実験結果であるが、はじめピーク値を持った後、振動しながら減衰していく波形となっている。赤線で示される計算結果は、ピーク時刻の立ち上がり時刻から、反力のピーク値、ピーク値の発生時刻までは、概ね実験結果と類似しており、概略的な傾向は再現できている。ところが、振動を伴って反力が負となる点や、その後減衰していく様子までは再現できておらず、モデル化の中でこのことを考慮するか、あるいは実験の条件設定において支点部の取り扱いをより厳密にするなどが必須であると思われる。

木岡ら<sup>3)</sup>が指摘しているように、DEMを用いて杭の反力を時系列的に良好に評価できているとしても、モデル上の弾性係数を実測値に比べ小さく設定することになるなど、モデルチューニングに関する課題を有している。

本稿で適用した MPS 法のモデルについても圧縮破壊条件がチューニングパラメータとして残され、その設定には任意性が残る。そのため本稿ではひとまず、予備的な数値解析により、氷板のスプリット破壊等が見られる値を設定したが、その設定法に関しては DEM を適用した時と同様今後の課題である。

MPS 法をはじめとした連続体解析モデルによる、物体の衝撃破壊現象及び、衝撃力時系列変化の同時再現は試みとして端緒に付いたばかりであり、課題は多いものの、耐津波及び耐漂流物を想定した構造物設計にあたっての数値的な検討ツールとなれば、構造物等の管理者が防災対策を行う上での判断に資することが期待される。

#### 4. まとめ及び今後の課題

本研究では、弾性体の解析手法として拡張された 3 次元 MPS 法を中規模氷板破壊実験のシミュレーション計算に適用した。数値解析結果より、実験での動画撮影結果等と比較し、実験にて確認された氷板の破壊モードを概ね再現可能であることが確認された。また、数値解析手法の応用として、実験での計測が困難である内部圧力波を時系列的に比較することによって、圧力波の伝播過程が異なることで破壊形状の違いがもたらされるものと推察された。

また、構造物に対する衝撃力評価への将来的な応用を想定し、一例としてロードセルによる氷板衝撃力の反力の時系列変化と計算結果の比較を行い、時系列的な衝撃力の変化を数値解析上ある程度再現できることを確認した。こうした連続体モデルを用いることにより、漂流物破壊時の内部応力をも加味した衝撃力の検討が将来的に可能になると期待される。今後は MPS 法が元来流体解析手法として提案されたことを踏まえ、流体との連成解析に本手法を結合し、津波災害等をはじめ、より広範な自然現象に対して適用可能な 3 次元モデルの構築を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究では数値計算の際に戦略的基盤ソフトウェアの開発プロジェクト成果である NEXST\_MPS\_Solid (Ver 0.1b, (c) MooSeop Song & Seiichi Koshizuka) プログラムを利用した。また、本研究は一部に一般財団法人防災研究協会の「若手研究者助成」の支援を受け行われた。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 佐藤好茂, 阿部孝章, 吉川泰弘, 伊藤丹, 氷板混合津波が橋桁に及ぼす波力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70(2), pp.1\_851-I\_855, 2014.
- 2) 木岡信治, 森昌也, 山本泰司, 竹内貴弘, 流水期の津波来襲を意図した流氷の構造物への衝突に関する中規模実験およびその数値計算手法の基礎的検討, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.851-855, 2008.
- 3) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁, 海氷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(応用力学), Vol.68(2), I\_423-I\_432, 2012.
- 4) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J., Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, 375-389, 1977.
- 5) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving Particle Semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, 421-434, 1996.
- 6) 川合邦広, 佐藤正樹, 早川哲也, 花田真州, 佐伯浩, 越氷防止施設に作用する氷荷重の評価と試設計, 海洋開発論文集, Vol.13, pp.807-812, 1997.
- 7) 宋武燮, 越塚誠一, 岡芳明: MPS 法による弾性構造体の動的解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71(701), 16-22, 2005.
- 8) 越塚誠一, 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 丸善, 144 p., 2005.
- 9) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 谷岡弘邦, 浸水時地下街階段登段者の脚部に作用する流体力評価に関する計算力学的アプローチ, 水工学論文集, Vol.50, pp.865-870, 2006.

(2016.2.4 受付)

## NUMERICAL INVESTIGATION ON THE ICE-SHEET BREAKUP PROCESS USING THREE DIMENSIONAL MPS METHOD

Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA and Shinji KIOKA

This paper presents a particle-based 3D-modeling of ice-sheet break-up processes during a collision with a structure by the three-dimensional Moving Particle Simulation (MPS) method. The model considers both the ice-sheet and the pile structure as a continuum and the dynamic motion of ice is represented as a set of calculation particles. The model is verified through the comparisons between numerical results and the experiments of ice sheet break-up and failure mode around a pile structure. Quantitative investigation from the numerical results is also made, showing that the difference in the ice failure mode originates from and affected dominantly by pressure wave propagation across the ice. In addition, the model shows applicability for the prediction of impact force exerted by ice sheet collision.