

河川管理施設周辺における津波漂流物群の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Tsunami Drifts around River Management Facilities

阿部 孝章* 吉川 泰弘** 佐藤 好茂*** 船木 淳悟****

ABE Takaaki, YOSHIKAWA Yasuhiro, SATO Yoshishige and FUNAKI Jungo

本報文は、津波及び氷板群と樋門をはじめとした河川管理施設との相互作用を再現するための実用的なモデルの構築について報告するものである。2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波は河川結氷を破壊し、北海道の河川域・沿岸域において多数の数メートル級の氷板を発生させた。しかしながら、現状では河川構造物は漂流物群を伴う津波に耐えうる設計とはなっておらず、そうした技術も十分に確立されていない。本研究では、複雑な自由水面変形及び氷板群の挙動追跡を行うことのできる、粒子法に基づく数値シミュレーションを実施した。2種類の検証計算、すなわち水槽内の浮遊剛体群の並進速度の時系列変化の検討及び狭窄部のアイスジャムを伴う一様流れ場における氷板挙動との検討に適用することでモデルの適用性を検証した。その上で、津波の挙動及び大規模な氷板漂流現象を分析するため、結氷した樋門吐口水路への津波侵入に関する実スケールシミュレーションに本モデルを適用した。

《キーワード：河川津波；津波漂流物；数値シミュレーション》

This report presents a practical model for simulating interactions of tsunami, ice floes and river management facilities such as sluice gates. The tsunami generated by the 2011 Tohoku Pacific-Coast Earthquake broke the river ice and left thousands of meter-long ice floes in the riverine and the coastal areas of Hokkaido, Japan. However, at present, river structures are not designed to withstand the external forces caused by tsunami with floating objects, while techniques for evaluating these forces have not been fully established. In this study, particle based numerical simulations were conducted, by which we can handle with violent free surface motion and ice floe movements. Applicability of the method is shown through simulations of two numerical tests, namely, time variation of translational velocities of floating rigid bodies in a water tank and ice floe movements in a uniform flow accompanying ice-jamming in a narrow section. Then the model is applied to the real-scale simulation of tsunami wave intrusion into a frozen sluice-way to analyze the wave characteristics accompanied by substantial ice floe movements.

《Keywords：Tsunami in Rivers；Tsunami Drifts；Numerical Simulation》

1. はじめに

積雪寒冷地域における雪や氷にまつわる問題は、土木工学の様々な分野で登場する。沿岸域における接岸した氷による害は、狭い場所でのアイスジャムや構造物前面でのパイルアップなど、構造物に損傷などの被害をもたらすため古くから寒冷な気候の国々において認知されてきた。それ故現象の解明や対策技術の検討については多くなされており、具体的なガイドライン等の策定に反映されている。

さて、日本列島は環太平洋造山帯の一部をなしており、地震津波の常襲地帯である。上記のような寒冷地における氷の害と、津波災害が重畳した場合の検討も従前よりなされており、これは過去1952年3月に発生した十勝沖地震津波が北海道太平洋岸の広い範囲で被害をもたらした¹⁾ためだと考えられる。例えば、佐伯ら²⁾や高橋ら³⁾による津波漂流氷板群の実験的な検討や木岡ら⁴⁾による氷板衝撃力に関する検討、氷板群が沿岸建築物周辺で津波により引き起こすアイスジャムに関する検討⁵⁾などがあり、その基本的な特性や挙動についてはかなりの程度まで明らかにされてきた。

そのような状況の中、2010年2月にチリ沖地震で発生した津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波は、震源から遠く離れた北海道沿岸域に到達し、結氷した河川への遡上が発生した。矢野ら⁶⁾の報告によれば十勝川において巨大氷板の漂流が発生しているし、2011年の東北地方太平洋沖地震津波では、河川管理施設周辺において写真-1のように多数の漂流氷板痕跡が発見され、実際に施設等に損傷をもたらしたことが報告されている⁷⁾。こうした問題は近年によりや河川管理上の課題として認識されることとなり、津波伝播の基礎メカニズムに関する検討⁸⁾や河川構造物に対する大規模津波の影響に関する検討⁹⁾などが開始され、徐々にその知見は蓄積されてきている。

冬期の津波来襲を想定した場合に、河川管理施設の操作等を決定するには、写真-1のような氷板漂流物

が引き起こす施設への衝突やジャミング、水位変動等の様々なシナリオを想定することが求められている¹⁰⁾。しかし、樋門水路のような局所的な領域に來襲する多数の漂流物群の挙動についてはほとんど明らかになっていない。そのため結氷時の河川津波來襲時の施設操作を考える上でどのような想定を備えるべきかについて考え方が十分に整理されていないのが現状である。

そこで本研究では、河川管理施設周辺において、氷板を代表とする漂流物群がどのような挙動を示すかと、それに伴う水位変動に関する検討を行うこととした。それにあたり、激しい自由水面変形を伴う津波衝突のような現象を柔軟に取り扱うことが可能な数値解析手法に着目し、これを基本的な解析手法として実スケールを想定した漂流物群を伴う津波衝突の数値解析を実施した。特に津波の衝突形態や非結氷期との違いに注目して議論を進めることとした。

2. 検討の手法

まず、本研究で用いている数値解析手法について述べる。本研究で採用しているのは、はじめ Koshizuka ら¹¹⁾により提唱され、水工学や海岸工学分野で比較的適用実績の多い MPS (Moving Particle Semi-implicitあるいはSimulation)法である。なお、MPS法と類似の手法として Gingold ら¹²⁾が提唱した SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法がある。近年では離散化手法や計算の進め方に大きな違いは無くなってきており、どちらの手法も、徐々にではあるが実務においても様々な分野で普及が拡大している。

一般的な MPS 法の解法については越塚による参考書¹³⁾が詳しいのでここでは割愛するが、支配方程式は非圧縮性粘性流体の流れを記述する次の連続の式及び Navier-Stokes の運動方程式である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1)$$

ただし、 ρ は流体密度、 \mathbf{u} は速度、 p は圧力、 ν は動粘

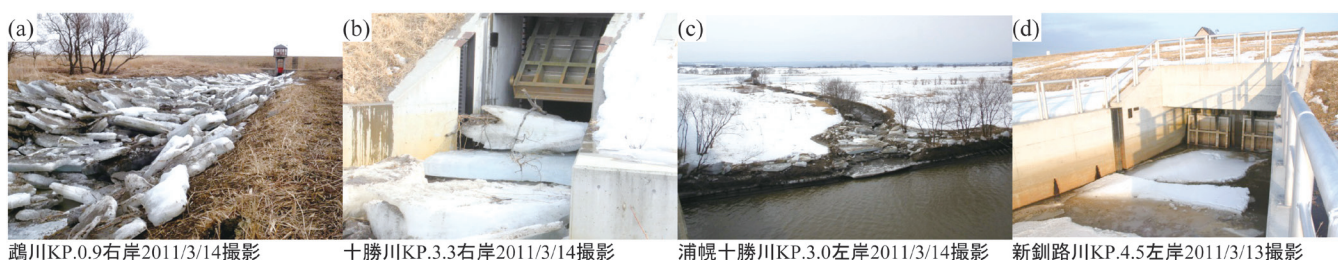


写真-1 2011年東北地方太平洋沖地震津波後、河川管理施設周辺で確認された氷板漂流物群の痕跡

性係数、 g は重力加速度である。粒子法は計算メッシュを用いずに流れの解析を行う方法である。河川工学的な諸問題の解析にあたっては(1)式を水深積分したいわゆる浅水方程式を用い、格子法(粒子法との対概念と考えた場合の、メッシュに基づく流れの解析法)により1次元あるいは2次元の解析を行うことがほとんど一般的である。しかし、格子法によって例えば河川を遡上する段波が水面上の構造物と相互干渉する場合や、漂流物を伴う津波現象などに適用するためには、特段の工夫や処理を要することから解析には困難が伴う。本研究の主な対象である氷板群の解析も自由水面変動と漂流物の複雑挙動が伴うことが想定されるため、そうした解析対象への適用性及び柔軟性から、粒子法を採用することとした。標準のMPS法においては、基礎式において微分演算子を含む圧力項・粘性項がそれぞれ次のように離散化される。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - \hat{p}_i}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij} w(r_{ij}) \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2D_s}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(r_{ij}) \quad (3)$$

ただし、 p_i は粒子 i の圧力、 \hat{p}_i は相互作用を計算する粒子が持つ圧力の最小値、 D_s は空間の次元数(=2)、 n_0 は基準粒子数密度、 r_{ij} は粒子 j の粒子 i に対する相対位置ベクトル(大きさは $r_{ij} = r$)、 $w(r)$ は重み関数、 λ はMPS法のモデルパラメータであり、括弧 $\langle \cdot \rangle_i$ はMPS法の粒子間相互作用モデルで離散化することを示している。

さて、Koshizuka ら¹¹⁾による標準型のMPS法は水工学の諸問題において複雑界面を伴う現象について多数適用されてきているが、内部圧力場の数値解に非物理的な振動を伴うという問題が指摘されてきた。こうした問題に対して、近年MPS法の解を安定化させるスキームに関する研究が盛んに行われるようになり^{14)~17)}、そうした圧力攪乱はかなりの程度まで抑制可能であることが示されてきた。本研究では、そうした安定化されたMPS法の一つであるCMPS-HS-HL-ECS(Corrected MPS with a Higher order Source term, Higher order Laplacian and Error Compensating parts in the Source term)法¹⁴⁾を基本的な解析手法として採用した。

次に氷板群挙動追跡のための剛体モデルの考え方についてその概略を述べる。MPS法において、剛体は相対配置が固定された粒子群によって表現される。 N 個の粒子からなる剛体を構成する粒子 k の位置ベクトルを \mathbf{r}_k 、剛体の重心座標を \mathbf{r}_g 、慣性モーメントを I と

するとこれらの関係は次のように表される。

$$\mathbf{r}_g = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{r}_k, \quad I = \sum_{k=1}^N |\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_g|^2 \quad (4)$$

解析上は、慣性モーメントは時刻0で計算し、以降は同じ値を使い続ける。まず各時間ステップにおいて、流体粒子と剛体構成粒子の区別をせず非圧縮性流れの計算を行う。従って、この段階では剛体粒子も流体粒子のように運動しているので、剛体としての相対的な位置関係は崩れてしまう。ただし、計算時間間隔 Δt は十分小さいので、その変化はあまり大きくないと見なす。そこで崩れた剛体粒子間の相対位置関係を元に戻す処理を行う。剛体の並進速度ベクトルと回転速度ベクトルは次で表される。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{u}_k, \quad \mathbf{R} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{u}_k \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g) \quad (5)$$

最後に、剛体粒子の速度ベクトルを次式のように剛体運動の速度ベクトルに置き換える。

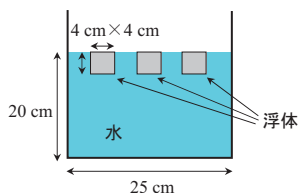
$$\mathbf{u}_i = \mathbf{T} + (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g) \times \mathbf{R} \quad (6)$$

以上の処理を、解析領域内の全ての剛体に対して行い、時系列的な剛体群挙動の追跡を行う。この処理は元々越塚ら¹³⁾により考案された手法であり、Gotoh ら¹⁸⁾によって浮体群挙動への適用性も確認されている。また、これは剛体解析手法としてMPS法に限定された処理方法という訳ではなく、流木群の追跡¹⁹⁾やブロック群の追跡²⁰⁾にも用いられてきたものである。更に最近では粒子法系解法における別の剛体解析手法²¹⁾も提案されていることも指摘しておきたい。

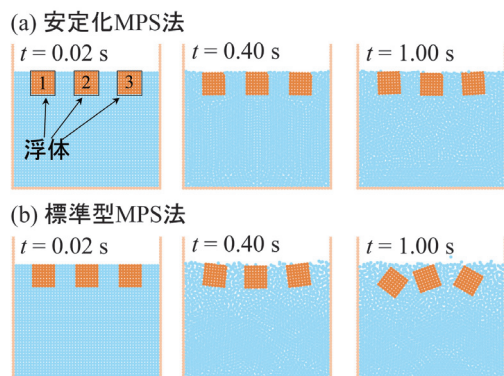
3. 結果及び考察

3. 1 浮体群が存在する2次元静水槽問題

ここでは、単純な問題の一例として、静水槽内の浮体群に関する解析を行い、用いた剛体モデルの適用性について考察を行うこととした。本節では初期状態において水面近傍に設置した浮体の挙動に関して、時系列的な変化を通じてこの点を述べることとする。図-1は本解析領域の概念図を示したものである。幅25cm、水深20cmの矩形水槽で解析を行い、水槽の水面部に等間隔に4cm四方の浮体を配置した。浮体は左から順に1, 2, 3と番号を付した。本解析では流体も剛体も比重は水に等しいとし、粒子径 $d_0 = 0.005\text{m}$ とした。1秒間の現象について解析を行った。比重に差が無いので理論上は力の釣り合いから解析を通してこの浮体の変



図－１ 浮体群が存在する２次元静水槽問題の概念図

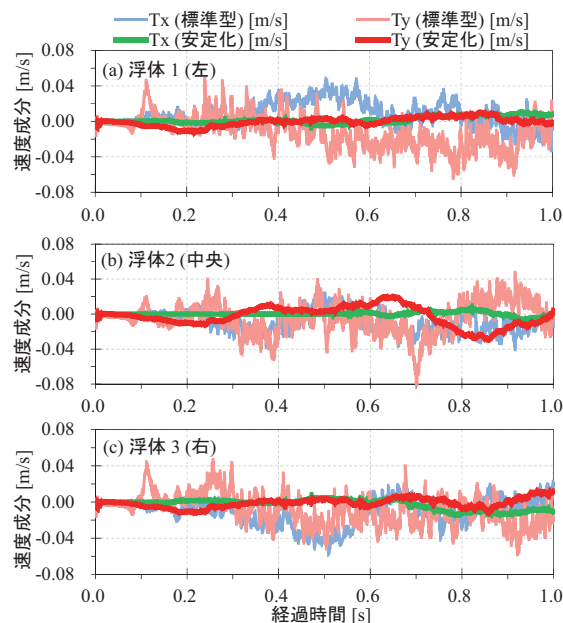


図－２ 浮体群の挙動に関する数値解析結果

位や速度は 0 となる。

計算開始後 $t = 0.02, 0.40, 1.00$ s における安定化 MPS 法における解析結果を図－２ (a) に、標準型 MPS 法における解析結果を (b) に示した。図より、安定化 MPS 法の解析結果では 3 枚のスナップショットで浮体位置はほとんど変化していないが、標準型 MPS 法の場合は浮体位置が徐々に下方に遷移した。安定化 MPS 法により安定した内部圧力場が得られることは多くの既往研究で確かめられているが、それにより (a) のケースで浮体位置が安定したものと推察される。標準型 MPS 法では圧力場が振動を起こし、また水面付近で粒子の飛散が生じていることも、水面付近に設置した浮体が大きく変位した一要因であると考えられる。

図－３ には番号 1～3 の浮体を持つ並進速度ベクトル $T = (T_x, T_y)$ 各成分の時系列変化を示した。いずれのグラフについても標準型の場合は x, y 成分とも高周波の振動が卓越し大きな速度が生じており、浮体位置の変化が起こったものと考えられる。一方、安定化 MPS 法の場合は、振動は飛躍的に抑制され、理論値の 0 付近の値を取り続けている。これが図－２ のような差異に結びついたものと考えられる。但し、図－３ (a) では安定化 MPS 法の浮体の速度ベクトルが 0 付近で推移しているのに対し、(b) では 0.7 s 以後下向きの速度が発生し、また 1.0 s にかけて 0 に近づくような挙動が得られた。図－２ に見られる安定化 MPS 法の結果の僅かな変位に現れていると考えられる。こうした不自然な挙動を抑制する対策としては、Khayyer らが別途提

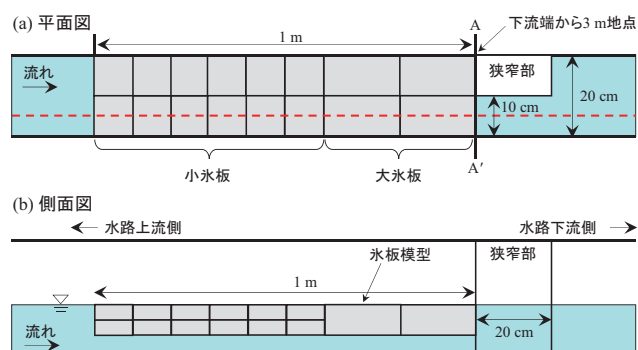


図－３ 浮体群を持つ並進速度ベクトル成分の時系列変化

案している MPS-GC 法 (Gradient Correction) 法¹⁴⁾ や更なる高精度スキーム¹⁶⁾ などの高精度化処理を付加することが考えられ、今後も継続的に検討する予定である。しかし、本解析を通じて浮体は水面位置に安定する結果が得られていることから、このような浮体群の解析には安定化 MPS 法の適用が望ましいと考えられ、以下の検討では安定化 MPS 法を基本的な解析手法として採用した。

3. 2 アイスジャムに関する水理実験²²⁾とその数値シミュレーション

吉川ら²²⁾ は春先の解氷期などに河道狭窄部で発生しうるアイスジャムに関する水理実験を実施した。アクリル製で延長 9 m、幅 0.2 m、勾配 1/500 の水路に、図－４ のように下流端から 3 m の位置から 0.2 m 区間に幅 0.1 m の狭窄部を設置し、始め狭窄部上流に大小 2 種類の氷板群を設置した。氷は比重 0.9、寸法は大きいものが長さ 20 cm、幅 10 cm、厚さ 3 cm、小さいものが長さ 10 cm、幅 10 cm、厚さ 1.5 cm である。狭窄部上流端 (図－４ (a) の A-A' 断面) から上流 1 m 地点、下流 1 m 地点の 2 箇所 で水位計測を行った。実験開始後、上流流量を徐々に増加させると氷が流下しアイスジャムが発生することとなる。本稿では、粒子法モデルによるこの実験の数値シミュレーションを実施した。解析にあたり可能な限り水理量は実験と同一とし、計算粒子径 $d_0 = 0.005$ m とした。図－４ (a) A-A' 断面の上流側 1.5 m 地点から下流側 1.5 m 地点までの計 3.0 m を解析対象

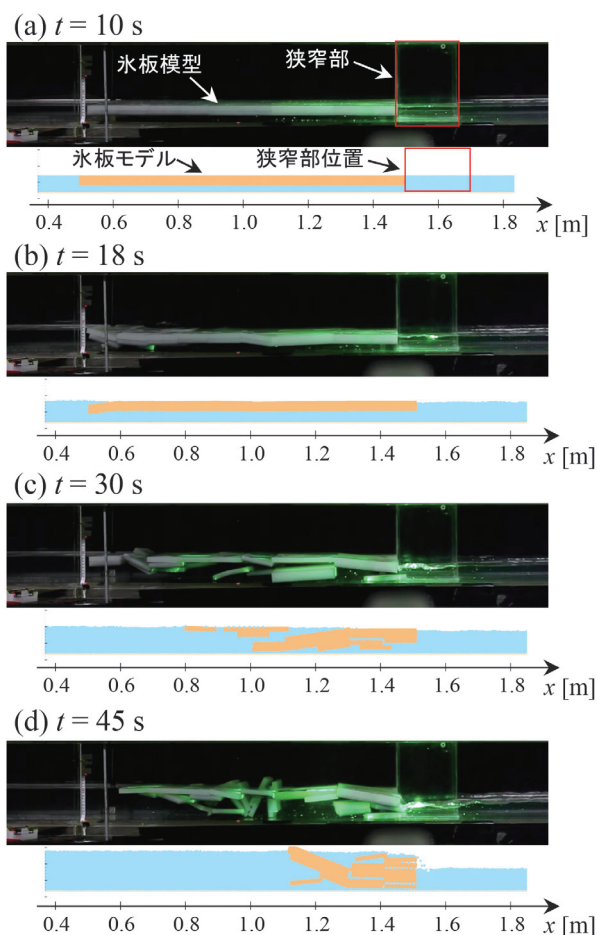


図－４ アイスジャム水理実験における狭窄部・氷板モデルの位置関係の模式図

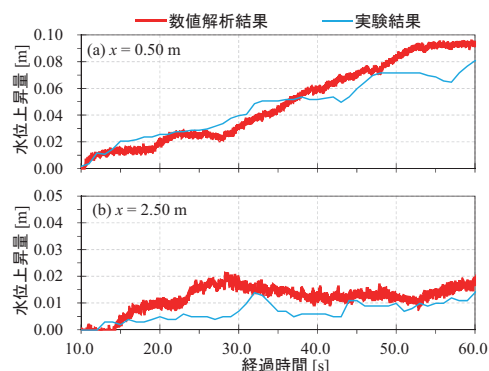
とし、領域左端を $x = 0$ m 地点とした。鉛直 2 次元モデルで狭窄部の再現は困難であるため、図－4 (a) の赤破線の断面について解析を行うこととし、氷板下端が狭窄部に差し掛かった際に流下方向速度を 0 とし、狭窄部より下流に流下しないようにした。

図－5 に示したのは、アイスジャム水理実験の様子と解析結果との比較である。図－5 (a) は通水開始 10 秒後の様子で、氷板は整然と並んでいるが、(b) の時刻になると水理実験では氷板群の上流側で攪乱が生じ、上流側の氷板の一部が滞留氷板の下部に潜り込んでいる様子が確認された。解析結果においても、氷板群全体の配置は異なるものの、上流側氷板の流れによる攪乱が再現された。(c) の $t = 30$ s においては、水理実験では氷板群の配置は大きく乱れており流下が始まっているが、下段の解析結果でも氷板群は流下しながら狭窄部箇所で滞留が始まっている。(d) $t = 45$ s では狭窄部付近で氷板同士が折り重なりジャミングが生じる結果となった。解析結果においても狭窄部直上流で閉塞が発生した。すなわち、実験においてもシミュレーション結果においても狭窄部上流で水位上昇が生じており、これは狭窄部によるアイスジャムに起因するものと考えられた。

図－6 に示したのは、水理実験による 2 箇所の水位変動の計測結果と解析上得られた水位変動量との比較を示したものである。図中の x は解析領域左端からの距離 [m] に合わせて示している。上流側 (a) について、実験値は上昇と下降を繰り返して全体として上昇する傾向であるが解析結果では上下変動はさほど明瞭でなかった。下流側 (b) について、傾向は合致せずとも緩やかな変動傾向は概ね類似している。両地点とも解析を行った時間帯での上昇傾向及び上昇量は概ね類似しており、解析結果はある程度の妥当性を有していると考えられた。各氷板の挙動について、シミュレーショ



図－5 アイスジャム水理実験の様子(各時刻上段)及び解析結果との比較(同下段)

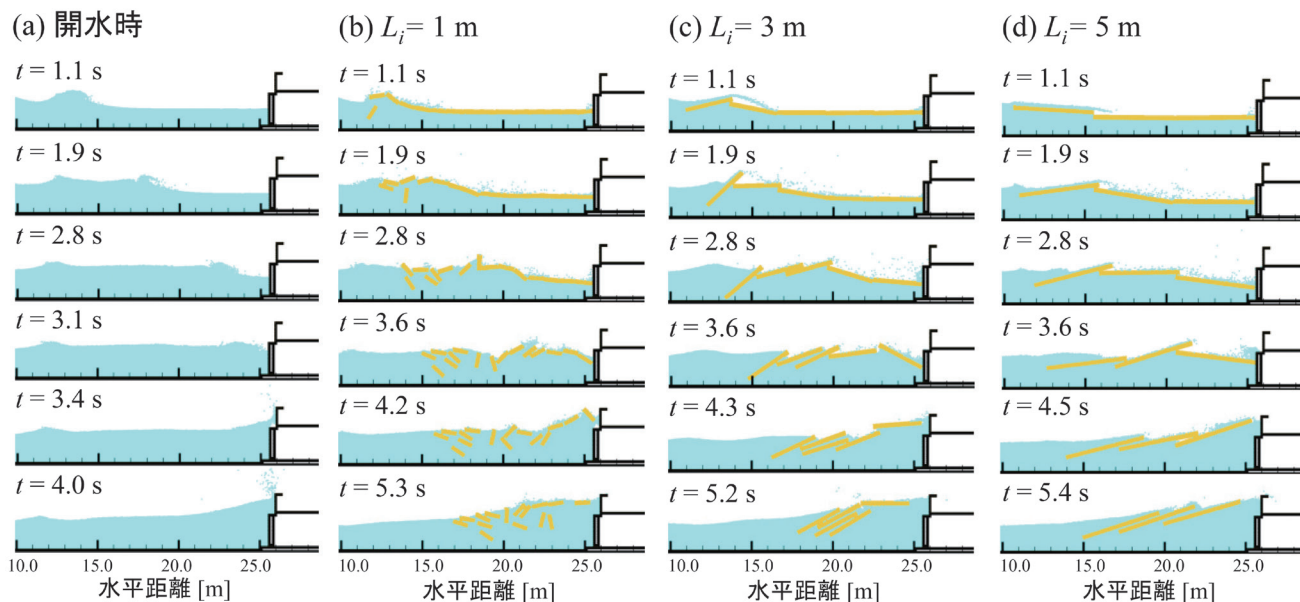


図－6 水位計測点における時系列の水位変動量

ンは完全に再現できているわけではないが、再現性の向上のためには河床部との摩擦の考慮、氷板同士の摩擦を適切にモデル化することが必須であるものと考えられる。

3. 3 樋門ゲート前面部での氷板群挙動の解析

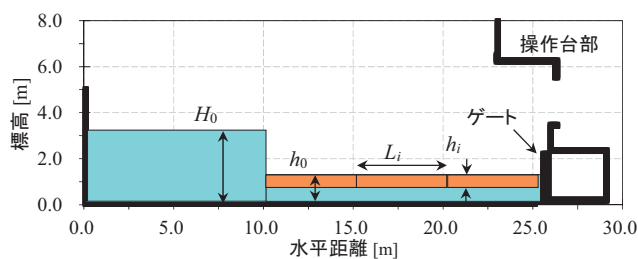
前項までの検討において、安定化 MPS 法を用いた場合には、浮体群の挙動や水位変動傾向についてある程度妥当な結果が確認された。本項では、実際の治水施



図－8 河川管理施設周辺における氷板漂流物群の解析結果のスナップショット ($H_0 = 3$ m, $h_0 = 1$ m, $h_i = 0.3$ m)



写真－2 対象樋門の概況



図－7 河川管理施設付近の2次元数値解析領域の概念図

設の形状に基づく解析領域を作成し、氷板群を伴う河川津波の構造物周辺の挙動に関する解析を実施した。

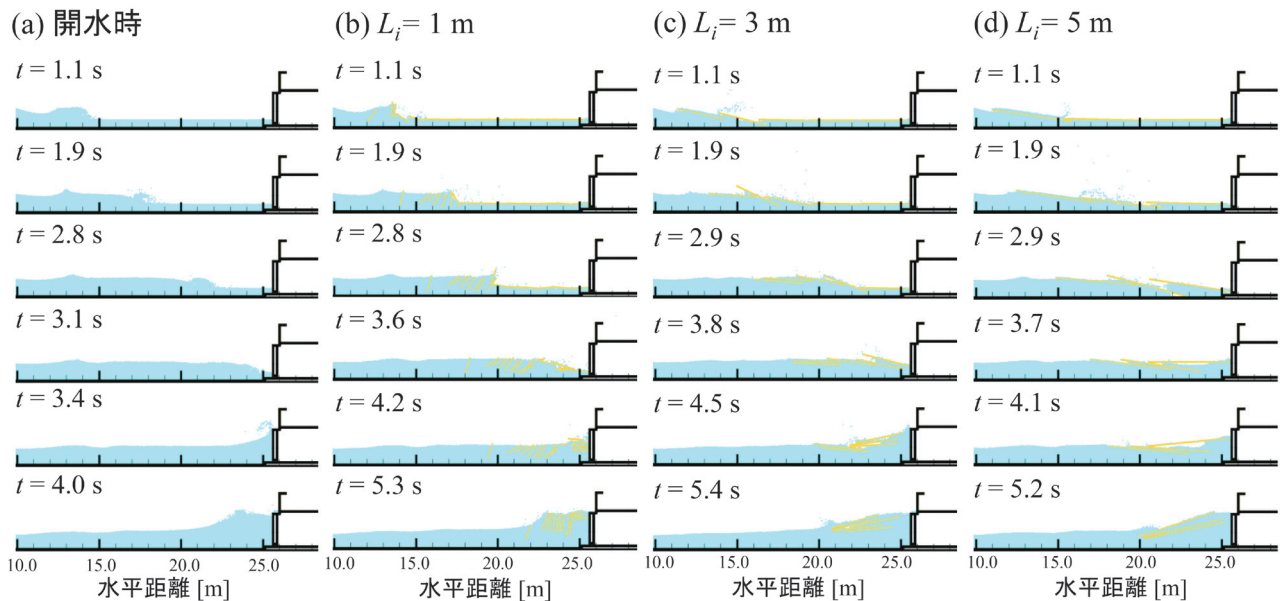
写真－2に本稿の検討で想定に用いた河川管理施設である樋門の概況を示した。この樋門に関し、河床部、ゲート部、樋門操作台部の形状について再現を行った。

なお、この樋門は形状の参考とするとどめ、ここでは異なる寸法で数値解析用のモデル形状を作成し、検討を実施した。樋門形状に基づく解析領域を図－7に示した。右側が河川管理施設を模した境界形状であり、施設操作台とゲート形状を再現した。左側に水深

H_0 の領域を設定してダムブレイクにより造波し、波と漂流物群をゲート全閉状態の施設に衝突させた。ダム側の初期水深 $H_0 = 2, 3$ m、吐口水路初期水深 $h_0 = 0.3, 1$ m、氷板厚 $h_i = 0.1, 0.3$ m、水平方向の氷板延長 $L_i = 1, 3, 5$ mと変化した数値実験を行い、氷板のサイズにより施設に接近する津波の伝播形態と氷板群の漂流過程の変化について検討を行った。氷板比重は前項同様0.9とした。

図－8に一例として示したのは、 $H_0 = 3$ m, $h_0 = 1$ m, $h_i = 0.3$ mの場合に(a)氷板群の無い開水時の波の伝播の様子と、(b), (c), (d)は氷板の長さを変更した場合の氷板の漂流過程と戻り流れとなるまでの様子である。図中の黒い部分が構造物の一部、水色の部分が水粒子、茶色が氷板を構成する粒子群を表し、 t はダムブレイク後の経過時間を表す。(a)より氷板が存在しない場合は巻き波型の碎波がゲートに接近したが、(b)～(d)はいずれも波の形状は不明瞭となり、なおかつ氷板は群体としてゲート部に接近する結果となった。また(b)～(d)の比較から相対的に長い氷板ほど水平位置の移動が少なかった。これは氷板の自重による慣性の影響と考えられたが、言い換えれば小さい氷板ほど漂流物として波への追従性が良く、施設へ衝突する場合に大きな衝突速度が発生すると考えられた。

次に、氷板厚が薄い場合の挙動について検討を行うため、 $H_0 = 2$ m, $h_0 = 0.3$ m, $h_i = 0.1$ mの場合の結果を図－9に示した。(b)の氷板長 $L_i = 1$ mのケースにおいて、段波形状に従って氷板群は巻き込まれながら施設に衝突する結果となった。また、氷板群は先頭部に

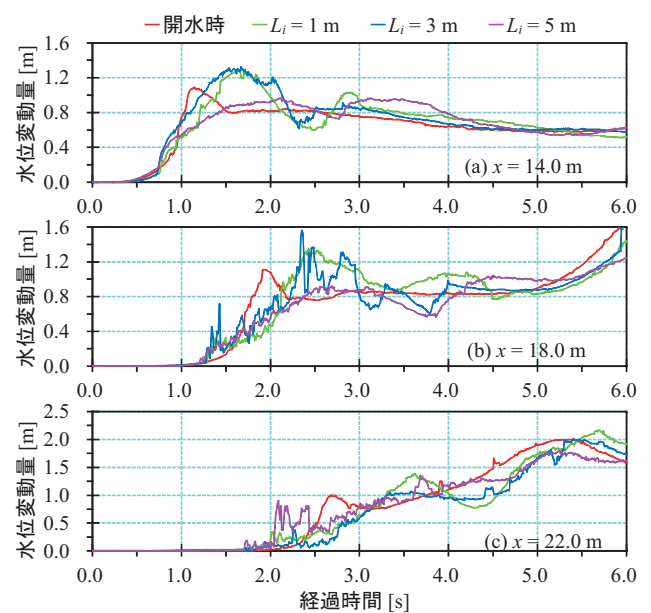


図－9 河川管理施設周辺における氷板漂流物群の解析結果のスナップショット($H_0 = 2$ m, $h_0 = 0.3$ m, $h_i = 0.1$ m)

集中しており、このような面的に衝突が発生する場合には施設への外力が増大する懸念がある。(b) $L_i = 1$ 、(c) $L_i = 3$ 、(d) $L_i = 5$ の場合に着目すると、いずれも薄い氷板群は折り重なった状態で施設に接近している。なお、本稿では紙面の都合上割愛するが、別途実施した解析により図－8と同様に $H_0 = 3$ m, $h_0 = 1$ m とした条件でも、類似の現象が確認された。別報²³⁾では、津波規模が小さい場合には氷板の横方向の変位が小さく、その場で上下運動を生じ津波が氷板の下部を伝播した数値解析結果を示した。そのような現象は写真－1 (d) の痕跡のように、折り重ならず、その場に滞留するような氷板輸送を説明するものと考えられる。

一方で、薄く小さい氷板が多数折り重なるような図－9 (b) $L_i = 1$ の場合は、波の衝突後引き波で水位が低下した結果、写真－1 (a) 鵜川のような痕跡に繋がるものと推測された。なお、2011年の東北地方太平洋沖地震津波では河川に何度も津波遡上が発生したと推測されている。そのため、氷板の初期条件は本稿の解析のように整然と並んだものではなく、分散していた可能性があることを付記しておく。

図－8 ($H_0 = 3$ m, $h_0 = 1$ m, $h_i = 0.3$ m) の条件において、氷板の有無による伝播状況の違いを検討するために図－10に示したのは水平距離 $x = 14$, 18, 22 m 地点で算出された時系列の水位変動である。図－10 (a) より氷板の無い場合は段波状の波形が確認できるが、 $L_i = 1$, 3 m の場合には約0.2 m 高い波高となって接近している。これは前述の指摘の通り氷板の波への追従性が良いために図－8 (b) のような津波フロント内部



図－10 3 地点における水位変動量の時系列変化

での氷板の回転や重畳が発生し水位をやや上昇させたものと考えられた。 $L_i = 5$ m の場合は氷板の存在によりフロント波面勾配が他ケースに比較して緩やかになる効果が生じている。更に波高を低下させる効果も見られた。図－10 (b) は18 m 地点のものである。氷板サイズ 3 m のケースにおいて振動が見られるのは図－8 のように水面から飛び出した氷板で水位を検出したためと考えられた。それを除けば概略的な傾向として開水時に比較するとフロントの波面勾配は小さくなっているが、本体部分($t = 2 \sim 3$ s)はやや波高が上がっ

ている。図-10 (c)は22m 地点の水位変動であるが、若干の波形変化を生じているものの概略的な傾向について見れば大きな変化は見られない。しかし、 $L_i = 1, 3\text{ m}$ で二山型の波形となっているのは、図-8 (b) $t = 4.2\text{ s}$, 図-8 (c) $t = 4.3\text{ s}$ のように水面近傍の氷板の影響によるものと考えられた。このように浮遊する氷板群は遡上する津波波形・波高を変化させるだけでなく、津波侵入を受けると同時にフロント付近に集積し、特に強い相互作用を生じることがわかった。

4. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波発生時の北海道太平洋岸地域で痕跡として残された河道内氷板を元に、それらが治水施設に対してどのように接近するかについて数値解析的な検討を行った。モデル精度については事前に単純な数値実験及び水理実験のシミュレーションを通じて確認をした上で、より実際の検討として、現地スケールを想定した樋門形状を再現し、氷板の諸元を変更した分析を行った。その結果、本稿で与えた津波条件と漂流氷板が厚い場合には、サイズ(L_i)の小さい氷板の時は津波に追従して施設に接近し、サイズが大きい時は追従性が低い予測結果が得られた。しかし、漂流氷板の厚さ(h_i)が小さい時はサイズによらず群体として施設に接近するという予測結果が得られた。

これらの類推から、結氷厚が小さい時、すなわち冬期の中でも結氷開始時期や解氷期においては、津波に追従して漂流氷板の接近が発生しやすくなると考えられる。しかし、現地調査結果²⁴⁾から氷は実際にはサイズに分布を持つことが想定され、今後、サイズ分布をも考慮した水理実験や解析を実施し、治水施設等の設計や操作上で考慮すべき事項の整理を行うことが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 北海道大学十勝沖地震調査委員会, 十勝沖地震調査報告 1952年3月4日, 1954.
- 2) 佐伯浩, 高橋良正, 三谷朋行, 津波による海水盤の陸上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.796-800, 1994.
- 3) 高橋良平, 片山晃, 花田真州, 佐伯浩, 山下俊彦, 氷盤群の津波による陸上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.1236-1240, 1994.
- 4) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁, 海水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 (応用力学), Vol.69 (2), pp.I_333-I_340, 2013.
- 5) 木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 海水群を伴った市街地への津波遡上特性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_821-I_825, 2014.
- 6) 矢野雅昭, 吉川泰弘, 石谷隆始, 高橋一浩, 2010年2月28日に発生したチリ沖地震津波の結氷河川における河川遡上に関する現地観測, 寒地土木研究所月報, Vol.693, pp.14-16, 2011.
- 7) 阿部孝章, 吉川泰弘, 矢野雅昭, 永多朋紀, 稲垣達弘, 桃枝英幸, 村上泰啓, 平井康幸, 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, Vol.705, pp.20-30, 2012.
- 8) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 阿部孝章, 大久保敦, 河川結氷時における河川津波の圧力伝搬速度と圧力減衰特性, 河川技術論文集, Vol.19, pp.375-380, 2013.
- 9) 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, No.2, pp.I_851-I_855, 2014.
- 10) 国土交通省 北海道開発局, 雪氷期の津波沿岸防災対策の検討報告書, 37p., 2013.
- 11) Koshizuka, S. and Oka, Y., Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, No.3, pp.421-434, 1996.
- 12) 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, pp.375-389, 1977.
- 13) 越塚誠一, 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 丸善, 144p., 2005.
- 14) Khayyer, A. and Gotoh, H., Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method, *Journal of Computational Physics*, Vol.230, No.8, pp.3093-3118, 2011.
- 15) Kondo, M. and Koshizuka, S., Improvement of stability in moving particle semi-implicit method, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*,

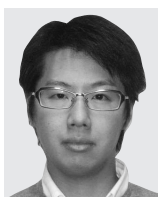
Vol.81 No.12, pp.1514-1528, 2011.

- 16) 玉井佑, 柴田和也, 越塚誠一, Taylor 展開を用いた高精度 MPS 法の開発, *Transactions of JSCEs*, Paper No.20130003, 2013.
- 17) 入部綱清, 仲座栄三, MPS 法における勾配計算の高精度化とその応用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.46-50, 2010.
- 18) Gotoh, H. and Sakai, T., Key issues in the particle method for computation of wave breaking, *Coastal Engineering*, Vol.53, pp.171-179, 2006.
- 19) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行, 蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68 (2), pp.I_415-I_422, 2012.
- 20) 原田英治, 後藤仁志, 酒井哲郎, 被覆ブロックの幾何配列特性の破壊抵抗に及ぼす影響, 海岸工学論文集, Vol.48, pp.936-940, 2001.
- 21) 田邊将一, 浅井光輝, 宮川欣也, 一色正晴, 粒子法による津波時の橋梁上部構造の流失被害予測シミュレーション, 第17回応用力学シンポジウム講演概要集, No.100097, 2014.
- 22) 吉川泰弘, 阿部孝章, 平井康幸, 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, No.2, pp.I_416-I_420, 2012.
- 23) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹, 氷板群を伴う河川津波が治水施設に及ぼす影響に関する研究, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集, B-32, 2014.
- 24) 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹, 寒冷地河口域の津波発生時における氷板サイズ分布の推定に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_1471-I_1475, 2014.



阿部 孝章*
ABE Takaaki

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
研究員
博士(工学)



吉川 泰弘**
YOSHIKAWA Yasuhiro

北見工業大学
社会環境工学科
助教
博士(工学)



佐藤 好茂***
SATO Yoshishige

寒地土木研究所
技術開発調整監
道東支所
研究員



船木 淳悟****
FUNAKI Jungo

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
上席研究員