

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

Research on the effects of river tsunami with ice floes on river management facilities

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
 北見工業大学社会環境工学科 正 員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正 員 佐藤 好茂 (Yoshishige Satoh)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正 員 伊藤 丹 (Akashi Itoh)

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地域においては、冬期間に多くの河川で結氷が生じる。2011年東北地方太平洋沖地震津波は全国的に河川遡上を引き起こしたが、道内の多数の結氷河川にも遡上し、これまで認識されてこなかった結氷時特有の現象を引き起こした。例えば水面を覆っていた結氷の破壊と輸送¹⁾、アイスジャムによる水位上昇²⁾、樋門ゲート部への氷板侵入等がある。これら多くの場合において氷は津波漂流物となり、多数の氷板の散乱・堆積・パイルアップやアイスジャムの発生が確認された。これを受け、北海道開発局による「雪氷期の津波沿岸防災対策検討会」では氷の諸現象発生に伴う津波外力の増大に対する懸念が指摘された³⁾。

写真-1に示したのは東北地方太平洋沖地震津波の遡上後に実施された現地調査で得られたものであるが、調査者の身長よりも大きな氷板が樋門吐口水路に滞留しており、仮に津波が再度遡上し、この水路に侵入した場合は構造物への衝突が懸念される。筆者らによる画像解析結果⁴⁾によれば、この地点での滞留氷板のサイズは概ね1~9mであったことが分かっている。しかし、樋門や水門のような河川構造物の設計に河川津波の波力や氷の衝突外力による影響が考慮されておらず、その評価手法も確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、氷板群の存在を考慮した上で構造物に対する河川津波シミュレーションモデルの構築を目的とした。本稿では、津波衝突のような激しい流れ場の解析と漂流物の連成解析が容易に実行可能な粒子法に着目し、特に近年盛んに開発が進んでいる高精度MPS法の一つを用いることとした。氷の存在を考慮した上での鉛直2次元場における津波侵入の数値解析を実施し、氷板群を伴う津波の衝突形態に着目して議論を進めることとした。



写真-1 新釧路川で撮影された滞留氷板の様子（河口から4.5 km 付近、2011/3/13 16:45 頃）

2. 研究手法

本節ではMPS法の基礎式と使用した高精度MPS法について概略的な説明を行う。一般的なMPS法の解法に関してより詳しくは越塚による文献⁵⁾を参照されたい。MPS法の支配方程式は、非圧縮性粘性流体の流れを記述する連続の式及びNavier-Stokes方程式

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

で、 p は圧力、 ρ は密度、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{u}$ は速度、 $\mathbf{g}$ は重力加速度である。基礎式中の微分演算子を含む圧力・粘性項がそれぞれ次のように離散化される。

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

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

但し p_i : 粒子 i の圧力、 $\hat{p}_i = \min_{j \in J} (p_i, p_j)$, $J = \{j : w \neq 0\}$ 、 D_s : 空間次元数、 n_0 : 基準粒子数密度、 $\mathbf{r}_{ij}$: 粒子 j の粒子 i に対する相対位置ベクトル、 w : 重み関数、 λ はMPS法のモデル定数であり、式中の括弧 $\langle \cdot \rangle_i$ はMPS法の粒子間相互作用モデルで離散化することを表す。

これまで、標準型MPS法を用いると流れ場内部において圧力解の振動が深刻であるという問題が指摘されてきた。これに関しては、近年国内外で発展している高精度MPS法⁶⁾等の開発によりその懸念も徐々にではあるが払拭されてきている。本稿では、高精度MPS法の一つである、CMPS-HS-HL-ECS法⁶⁾を用いることとした。これは、既往の高精度MPS (CMPS-HS-HL) 法を更に発展させたもので、圧力Poisson方程式の生成項に次式で表されるECS (Error Compensating parts in the Source term) 項：

$$\text{ECS} = \frac{n_k - n_0}{n_0} \left(\frac{1}{n_0} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k \right) + \left| \frac{1}{n_0} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)_i^k \right| \left(\frac{n_k - n_i}{n_i} \right) \quad (4)$$

を加え動的に補正するECSスキームを付加したものである。本稿では、本モデルによる解析結果を高精度MPS法 (Improved MPS) と表記することとする。複数の浮体 (氷板群) の挙動追跡に関してはGotohら⁷⁾が適用性を検証した剛体群モデルにより再現した。

本稿では、用いたモデルの妥当性を検証するため、静

水槽に浮かぶ浮体の解析、アイスジャム水理実験の再現に適用した。静水槽の問題においては、越塚⁵⁾により公開されている標準型 MPS 法コードの計算結果と比較を行いつつ議論を進めた。その後、実スケールのモデル解析領域を作成し、氷板の有無により解析上推定される河川津波の衝突形態の違い、そして樋門吐口水路での水位変動特性について検討を実施した。

3. 結果及び考察

(1) 浮体が存在する 2 次元静水槽問題

ここでは静水槽内の浮体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する。本節においては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。水深 20 cm の矩形水槽で解析を行い、水槽の中央上部に 4 cm 四方の浮体を配置した。なお、本解析では流体も剛体も比重は水に等しいとし粒子径 $d_0 = 0.005$ m とした。1 秒間の現象について解析を行ったが、理論上は解析を通してこの浮体の変位や速度は 0 となる。

計算開始後 $t = 0.30, 0.45, 0.87$ s における高精度 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、高精度 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右側、下側に遷移した。高精度 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 には各ケースで浮体を持つ並進速度ベクトル $\mathbf{T} = (T_x, T_y)$ の時系列変化を示した。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、高精度 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着いたものと考えられる。

(2) アイスジャム実験²⁾とその数値シミュレーション

吉川ら²⁾は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、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。狭窄部から 1 m 地点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が、本稿では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。鉛直 2 次元モデルで狭窄部の再現は困難で

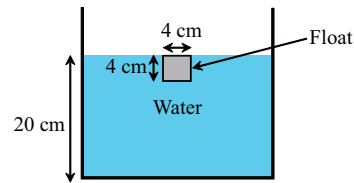


図-1 浮体が存在する 2 次元静水槽問題の概念図

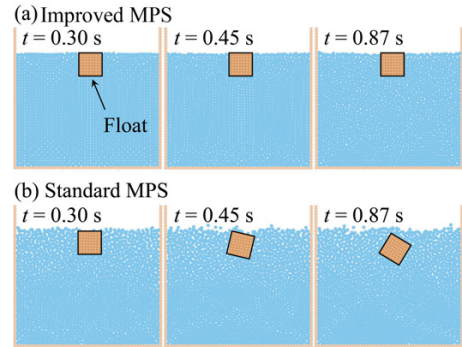


図-2 静水槽内の浮体シミュレーションのスナップショット

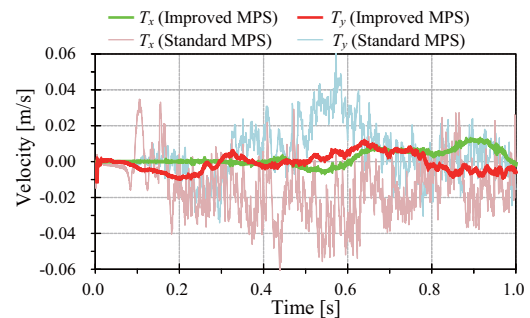


図-3 浮体を持つ並進速度ベクトル成分の時系列変化

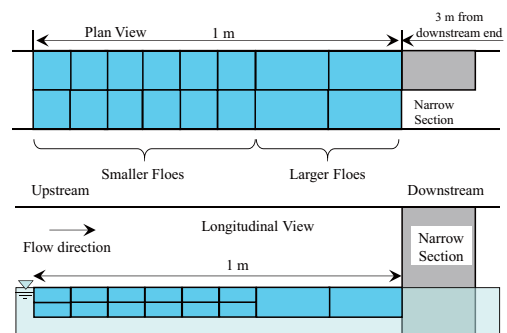


図-4 アイスジャム実験における狭窄部・氷板の位置関係の模式図

あるため、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、狭窄部を通過しないようにした。

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) は通水開始直後の様子で、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、上流側氷板の潜り込みが再現された。(c) の $t = 27.0$ s においては、水理実験では上流部で斜めに転倒し、その箇所滞留している氷板が確認されたが、下段の解析結果では氷板群はほとんどが水平に近い角度を持ち、狭窄部付近で氷板同士が折り

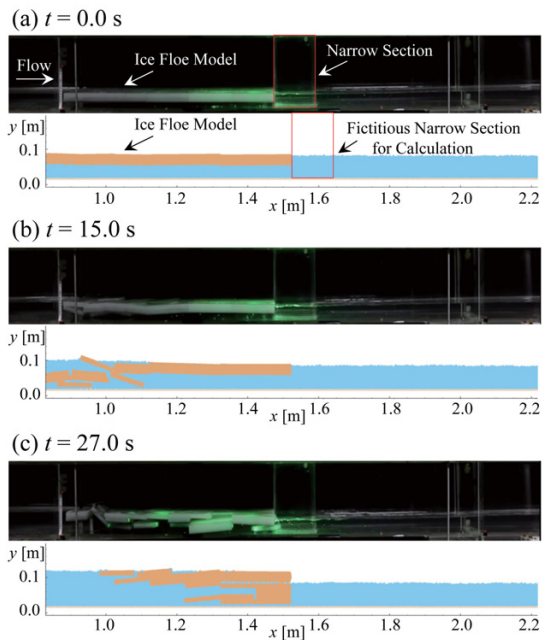


図-5 アイスジャム水理実験の様子と解析結果との比較

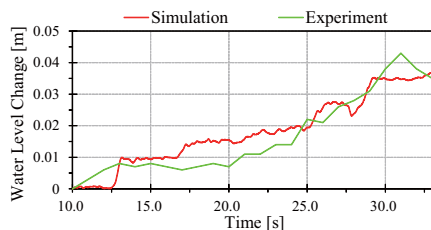


図-6 水位計測点における時系列の水位変動量

重なりジャミングが生じる結果となった。但し、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閉塞に起因するものと考えられた。

図-6 に示したのは、水理実験による水位変動量の計測結果と解析上得られた水位変動量の比較を示したものである。実験結果は開始 10 s 後、徐々に水位上昇が継続したが、解析結果では 12 s 過ぎまで変化は小さく、その後急激に上昇し、概ね実験結果に近い速度で水位上昇が継続した。解析を行った時間帯での上昇傾向や上昇量は類似しており、粒子法による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。氷板の挙動について、シミュレーショ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) 樋門ゲート前面部での氷板群挙動の解析

前項の検討において、高精度 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。本項においては、実際の治水施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挙動に関する解析を実施した。

写真-2 に本稿の検討で用いる新釧路川 A 樋門の現況を示した。この樋門に関し、河床、ゲート、樋門操作台部の形状について再現を行った。尚、A 樋門は形

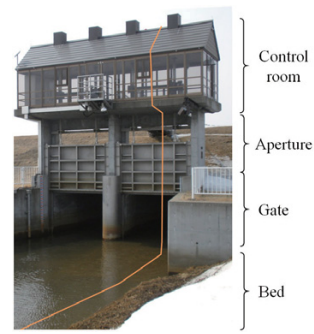


写真-2 A 樋門の現況と抽出した断面（橙線）

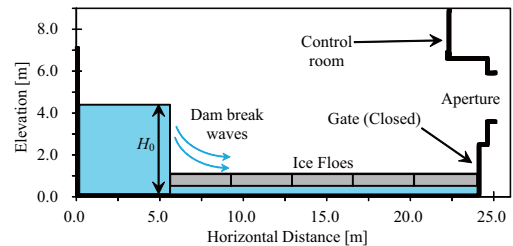


図-7 樋門付近鉛直 2 次元計算の解析領域の概念図（グレーの部分に滞留氷板を表す）

状の参考とするにとどめ、本研究では異なる寸法で仮想的な樋門ゲート部形状を作成し検討を実施した。

図-7 に解析領域を示した。ダム高さ $H_0 = 1, 2, 3$ m、現地調査結果⁴⁾に基づき氷板群の厚さは 0.3 m、各氷板の長さ 3 m、初期水深 $h_0 = 0.2$ m とした。 $x = 10.0, 15.0, 17.5, 20.0, 21.0$ m の位置において氷も含めた水位を測定し津波の縦断的な伝播状況の把握を行った。尚、ゲートは全閉状態を想定し、上流側（堤内地側）からの流入は考慮しないこととした。津波は重力作用による水の落下により段波として発生させた。また、比較のため氷板群粒子を水に置き換えた場合の解析も行った。これは開水時と結氷時で吐口水路での津波浸入の違いを明らかにするためである。2013 年現在で標準的なデスクトップ PC (4 コアプロセッサ、32GB RAM) を用い、実スケールで 7 秒間の現象を再現するのに要した計算時間は約 4 時間程度である。

解析結果の一例として図-8 に示したのは $H_0 = 1, 2, 3$ m の場合の氷板群と津波伝播の特長的なスナップショットである。(a) $H_0 = 1$ m のケースでは、津波は緩やかに伝播し、氷板の上面を遡上する薄い層と、氷板下を伝播する津波に分かれ、氷板の縦断的な位置はほとんど変化せず上下に揺動する様子が確認された。(b) $H_0 = 2$ m のケースでは、津波が伝播すると共に、前節のアイスジャム実験のように縦断的な位置が変化しながら、ゲートに接近する様子が確認された。(c) $H_0 = 3$ m のケースでは段波が氷板上部に乗り上げつつ ($t = 0.5 \sim 1.0$ s) ゲートに接近し、段波に輸送された氷板が折り重なるようにゲート部に接近した。冒頭で指摘したような氷のパイルアップが数値解析上も再現された。

図-9 に示したのは $H_0 = 1, 2$ m の場合の水位測定結果である。 $H_0 = 3$ m のケースでは $t = 1.0, 2.6, 4.3$ s のように水面下に空気塊の巻き込みを発生し水位計測

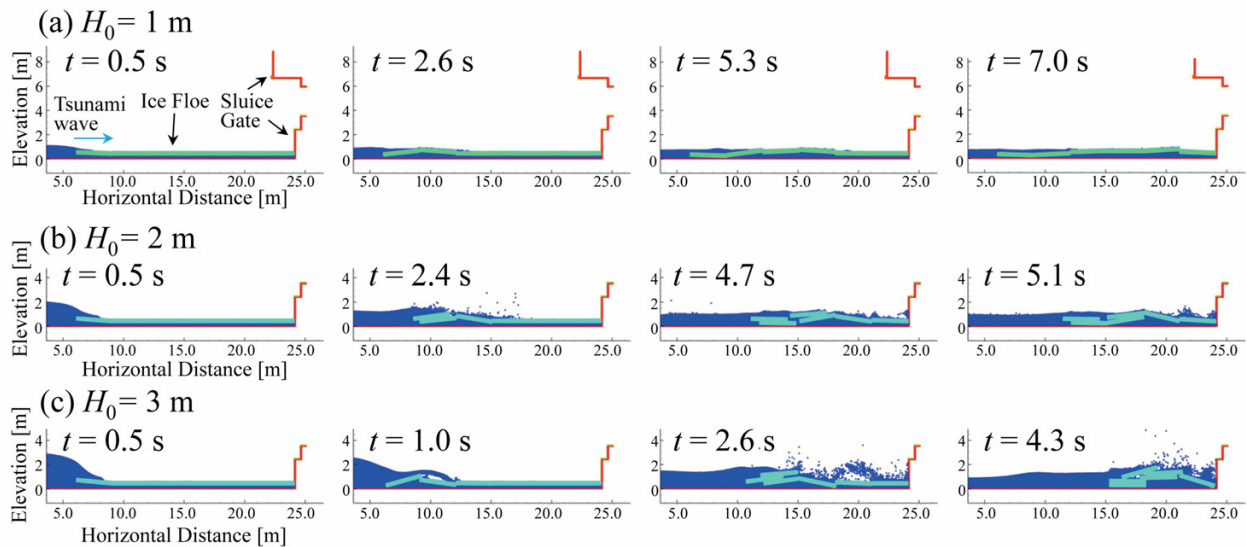


図-8 各ケースにおける段波衝突のスナップショット（青い粒子が水、水色粒子が氷板部分を表す）

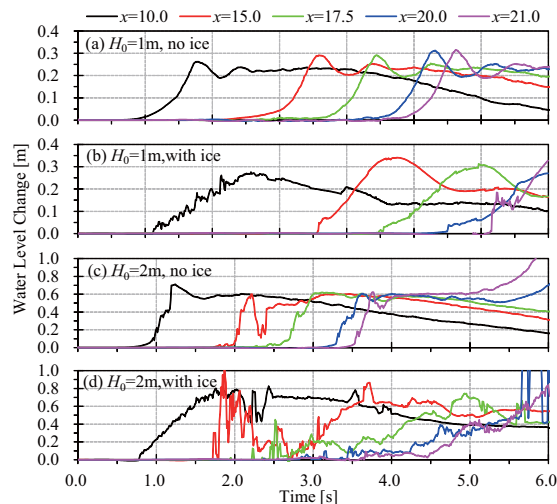


図-9 吐口水路内の水位変動の比較

が困難であったためここでは除外している。(a), (b) は $H_0 = 1$ m、(c), (d) は $H_0 = 2$ m で、氷の有無による違いを示している。同図の (a) より氷の無いケースでは津波は波状段波状となりながらゲートに接近しているが、(b) の氷板を伴う場合は一山型の波として伝播しており伝播速度は小さく、波高はわずかに大きくなっている。これは図-8(a) のように氷の存在が津波の伝播を阻害したためと考えられた。 $H_0 = 2$ m (c) の波高が大きい場合は切り立った段波として伝播しており、 $x = 15.0$ では $t = 2.0$ 、 $x = 17.5$ では $t = 2.7$ 付近で水位の立ち上がりが見られた。(d) の氷が存在する場合は、 $x = 15.0$ 地点で $t = 1.7$ 、 $x = 17.5$ 地点で $t = 2.5$ と開水時よりやや速く伝播する成分と、 $x = 15.0$ 地点で $t = 3.0$ 、 $x = 17.5$ 地点で $t = 4.0$ 以降と遅く伝播する成分とに分かれた。遅れて伝播する成分については、(b) に近い伝播速度であるものの、(c) で見られる波高が 0.6 m 程度であるのに対し、(d) では 0.7~0.8 m の波高であり、(b) と同様に結氷のあるケースでは波高がやや大きくなる結果が得られた。

4. まとめ

本研究では、寒冷地域においていわゆる L1 クラス津波の河川遡上で発生し得る、治水施設周辺における氷板群の輸送に焦点をあてた基礎研究を行った。高精度 MPS 法を用いた簡単な数値実験及び実験のシミュレーションを行いモデルの妥当性を確認し、実スケールの氷板群を伴う河川津波のシミュレーションを行った。結果、津波規模が比較的小さい場合は、氷板は上下方向のみに揺動し津波は氷板下を伝播するが、規模が大きくなると氷板は折り重なるように段波と共に施設に接近するという数値予測結果が得られた。更に、本稿の検討範囲では、氷板群が存在する場合には津波波高は大きく、伝播速度はやや小さくなる傾向が確認された。今後、本研究で構築した氷板群を含めた河川津波の実スケールモデルを用いた様々な解析を実施し、治水施設等の設計で考慮すべき結氷時河川津波の影響評価手法として取りまとめを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 松川優一, 荒繁彦, 加藤三明, 油川曜佑, 渡邊幸一, 長岡宏樹, 山口甲: 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した北海道十勝川河川津波の観測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68(4), pp. 1.1513-1.1518, 2012.
- 2) 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 (2), pp.1.416-1.420, 2012.
- 3) 北海道開発局: 雪氷期の津波沿岸防災対策の検討報告書, 37 p., 2013.
- 4) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 北海道太平洋岸地域で発生した河川津波に伴う漂流氷板の寸法計測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68(2), pp.1.1436-1.1440, 2012.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Gotoh, H. and Sakai, T.: Key issues in the particle method for computation of wave breaking, *Coastal Engineering*, Vol.53, pp.171-179, 2006.