

河川管理施設周辺における津波由来アイスジャムの発生過程に関する 数値解析的検討

Numerical Investigation on Ice-jamming Initiation Process around River Management Facilities
Caused by Tsunami

(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 Satou)
(独) 土木研究所寒地土木研究所 正 員 船木 淳悟 (Jungo Funaki)

1. はじめに

寒冷地域において、沿岸域の氷、例えば流氷と津波が重畳した場合の災害については、古くから議論されてきた。これは1952年十勝沖地震の発生時に、氷板群を伴った津波が、北海道の太平洋岸で家屋などに甚大な被害を及ぼした事例が確認されたためと考えられる。こうした災害の対策検討のため、高橋ら¹⁾による実験的検討、木岡ら²⁾による氷板衝突に関する数値的な検討や、氷板群が建築物周辺で引き起こすアイスジャムの検討³⁾をはじめ、津波と氷板の挙動に関しては数多くの検討がなされており、その基本的な挙動や特性についてはかなりの程度まで明らかにされてきた。

しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震に伴い北海道に到達した津波は、道内の多数の結氷河川にも遡上し、これによってそれまでほとんど認識されてこなかった河川結氷時特有の現象が引き起こされた。例えば、結氷が破壊され輸送された現象、アイスジャムによる水位上昇⁴⁾、樋門ゲート部への氷板侵入等がある。これらの現象を受け、近年の吉川ら⁵⁾や佐藤ら⁶⁾に

よる河道内における結氷を考慮した津波遡上検討がなされており、結氷河川・津波遡上の複合問題に対する知見も、徐々にではあるが蓄積されてきている。

さて、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。これらの写真ではいずれも河川管理施設周辺で氷板群が確認されており、仮にこれらの氷板がより規模の大きな津波に輸送された場合には施設の被災が懸念されるため、その具体的な対策に関する技術開発が求められている⁷⁾。

河川管理を考える上で、このような結氷期の津波来襲が重要な検討項目の一つであることは論を待たないが、施設周辺に群体として来襲する氷板の挙動はほとんど明らかになっていない。例えば、痕跡として確認された写真-1(a)のように、滞留氷板となる場合や、(b)のように複数枚の氷板が折り重なるような現象が発生する場合、そして(c)のように樋門水路そのものが埋め尽くされるような場合が考えられる。しかし依然として、結氷期の河川津波来襲時の施設操作を考える上でどのようなシナリオを想定すれば良いかについては、考え方が十分に確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、氷板群が来襲する場合に、施設周辺でどのような挙動が想定されるかの検討を行うこととした。前報⁸⁾では比較的水厚の大きい氷板群の存在を考慮した河川津波シミュレーションモデルを構築して検討を行ったが、本稿では、氷厚、氷板サイズを変更した数値実験により分析を行うこととした。それにより、氷板の諸元が変化した場合に、施設周辺での氷板挙動がどのように変化するかについて考察を行った。

2. 研究手法

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簡易に実行可能な粒子法に着目し、水工学分野で適用事例の多いMPS法⁹⁾を基本的な解析手法として採用することとした。以下に概要を述べるが、一般的なMPS法の解法に関しては越塚による文献¹⁰⁾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

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

で、 ρ は密度、 p は圧力、 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



(a) 新釧路川 (河口から 4.5 km 付近), 2011/3/14 撮影



(b) 浦幌十勝川 (河口から 3.0 km 付近), 2011/3/14 撮影



(c) 鷗川 (河口から 0.9 km 付近), 2011/3/14 撮影

写真-1 津波遡上後に北海道内の河川で撮影された滞留氷板の様子

圧力項・粘性項がそれぞれ次のように離散化される。

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

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

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, $w(r)$: 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 法独自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、圧力解を安定化させる手法¹¹⁾¹²⁾¹³⁾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、安定化された MPS 法の一つである、CMPS-HS-HL-ECS 法¹¹⁾を用いることとした。

複数の浮体（氷板群）の挙動追跡に関しては Gotoh¹⁴⁾が適用性を検証した剛体群モデルにより再現した。これは、ある氷板を構成する粒子群に、拘束条件を設定し剛体としての形状を保ちながら流れ場に輸送される様子を再現するものである。その際、解析中のあるタイムステップにおいて、まず剛体粒子も流体と同様の処理を行う。すると剛体粒子群の形状は一度崩れるが、剛体重心の並進速度、角速度を再計算し、タイムステップの最後に剛体全体としての形状を元に戻す処理を行うものである。尚、この処理は元々越塚¹⁰⁾により考案された手法であるが、最近では粒子法系解法における別の剛体解析手法¹⁵⁾も提案されていることも指摘しておく。

本稿では、用いたモデルの妥当性を確認するため、まずアイスジャム水理実験のシミュレーションに適用した。その後、実スケールのモデル解析領域を作成し、氷板の有無と諸元の変化により、解析上推定される河川津波の衝突形態の違いについて検討を実施した。

3. 結果及び考察

(1) アイスジャムに関する水理実験⁴⁾とその数値シミュレーション⁸⁾

吉川⁴⁾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。アクリル製で長さ 9 m、幅 0.2 m、勾配 1/500 の水路に、図-1 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。氷板模型は比重 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。

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。解析対象は狭窄部の上流端側端部から上流側 1.5 m、下流側 1.5 m の合

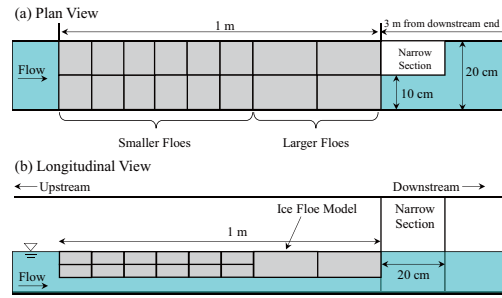


図-1 アイスジャム水理実験における狭窄部・氷板の位置関係の模式図

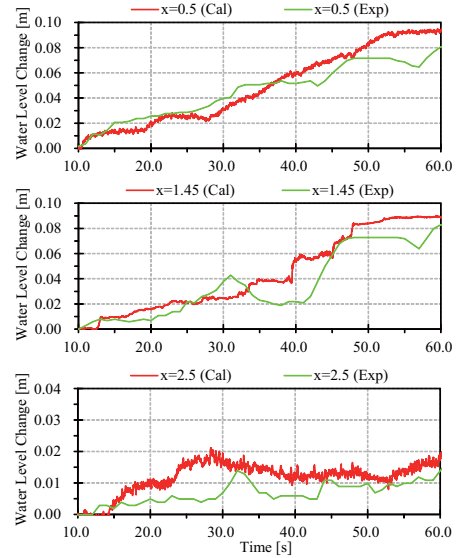


図-2 3箇所の水位計測点における時系列の水位変動量

計 3.0 m とした。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あるため、氷板下端が狭窄部に差し掛かった際に氷板群を構成する粒子の流下方向速度を強制的に 0 とし、狭窄部を通過しないようにした。狭窄部から上流側 1 m 地点 ($x = 0.5$ m)、上流側 0.05 m 地点 ($x = 1.45$ m)、下流側 1 m 地点 ($x = 2.5$ m) で水位計測を行った。但しここでの x は解析領域左端からの距離を表す。

図-2 に示したのは、水理実験における 3 箇所の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。グラフの上 2 段は狭窄部上流側 ($x = 0.5, 1.45$)、下段は下流側 ($x = 2.5$) 計測点である。上 2 段について、緑線で表される実験値からは上昇と下降を繰り返しながら水位上昇していく傾向が確認できるが、赤線の計算結果では上下変動こそ小さいものの、水位上昇速度は類似している。そのため、本モデル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。シミュレーションを通じて、各氷板の挙動について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で改善される可能性がある。

(2) 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、本稿のモデルを用いた場合に



写真-2 対象樋門の概況 (2011/3/14 撮影)

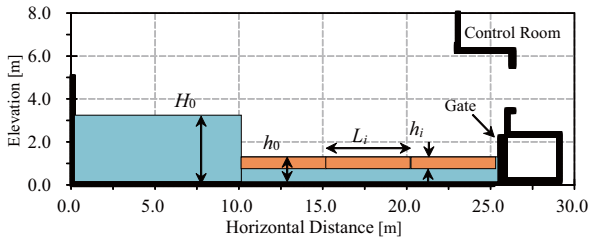


図-3 樋門付近鉛直 2次元計算の解析領域の概念図 (橙色部分が滞留氷板を表す)

は、氷板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 に本稿の検討で津波想定に用いる樋門の概況を示した。尚、写真中の赤線は津波痕跡水位を表しており、津波は樋門ゲート部まで到達したものと推定された。この樋門形状を参考として、本研究では実物と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。樋門形状に基づく解析領域を図-3 に示した。右側が治水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。ダムブレイクにより造波し、波と漂流物群を施設に衝突させた。ダム側の初期水深 $H_0 = 2, 3\text{m}$ 、吐口水路初期水深 $h_0 = 0.3, 1\text{m}$ 、氷板厚 $h_i = 0.1, 0.3\text{m}$ 、水平方向の氷板延長 $L_i = 1, 3, 5\text{m}$ と変化させた数値実験を行い、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-4 に一例として示したのは、 $H_0 = 3\text{m}$ 、 $h_0 = 1\text{m}$ 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、尚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

力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、 $H_0 = 2\text{m}$ 、 $h_0 = 0.3\text{m}$ の場合の結果を図-5 に示した。(b) の氷板長 $L_i = 1\text{m}$ 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。(c) $L_i = 3$ 、(d) $L_i = 5$ の場合に着目すると、薄い氷板群は折り重なった状態で施設に接近している。前報⁸⁾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 (a) 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、薄い氷板が多数折り重なるような図-5 (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 (c) 鶴川のような痕跡に繋がるものと推測された。尚、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。

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。解析には実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¹⁶⁾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) 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, Vol.41, pp.1236-1240, 1994.
- 2) 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.1.333-1.340, 2013.
- 3) 木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 氷板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

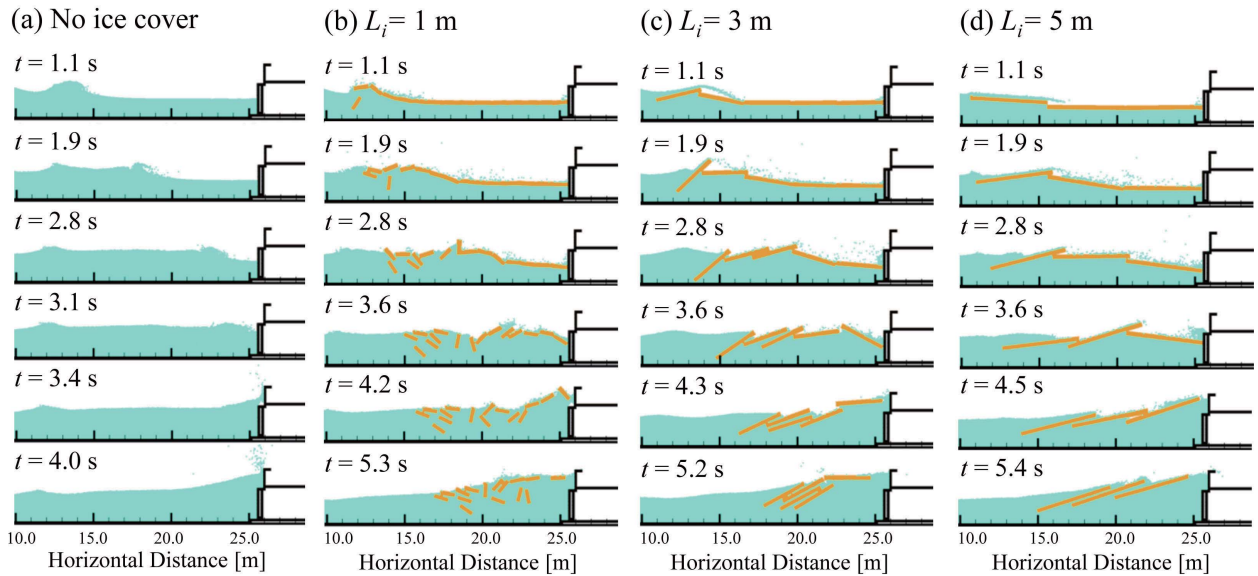


図-4 各ケースにおける津波衝突のスナップショット（水色の粒子が水、黄色粒子が氷板部分を表す）

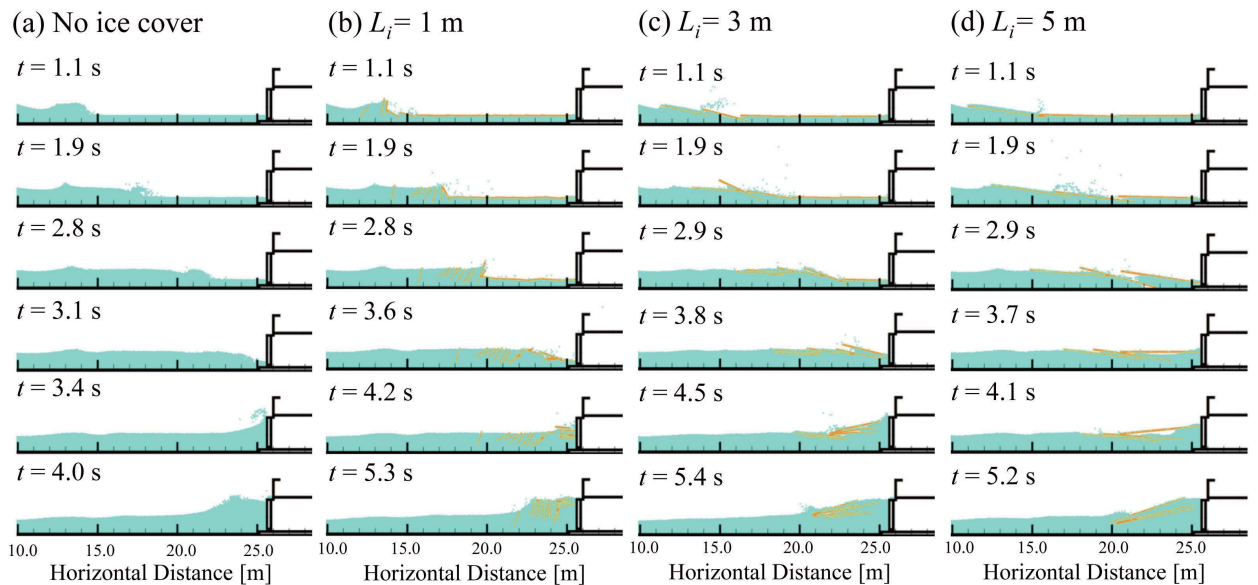


図-5 各ケースにおける津波衝突のスナップショット（水色の粒子が水、黄色粒子が氷板部分を表す）

会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I.821-I.825, 2014.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 佐藤好茂, 阿部孝章, 稲垣尚人, 吉川泰弘, 船木淳悟, 寒冷地河川における樋門ゲート前面の結氷制御方法に関する提案, 寒地技術論文・報告集, Vol.30, pp.12-17, 2014.
- 8) 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.
- 9) Koshizuka, S. and Oka, Y., Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp. 421-434, 1996.
- 10) 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.

- 11) 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.
- 12) 玉井佑, 柴田和也, 越塚誠一, Taylor 展開を用いた高次精度 MPS 法の開発, Transactions of JSCES, Paper No.20130003, 2013.
- 13) 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.
- 14) Gotoh, H. and Sakai, T., Key issues in the particle method for computation of wave breaking, Coastal Engineering, Vol.53, pp.171-179, 2006.
- 15) 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.
- 16) 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.