

## 結氷河川における津波災害の防止・軽減技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 24～平 28

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、矢部浩規、柿沼孝治、  
前田俊一、黒田保孝、岡部博一、  
阿部孝章、佐藤好茂、渡邊尚宏、  
鳥谷部寿人

### 【要旨】

結氷が生じる状態の河川に津波遡上が発生した場合、津波が結氷を破壊し大量の氷板を発生させる。氷板漂流や散乱により河川構造物等の損傷や機能不全等の被災が懸念されており、結氷条件下での津波作用時の外力や、河川津波の遡上及び、災害軽減技術について評価、検討を実施した。実験結果から横断構造物周辺でアイスジャム現象が発生して水位を堰上げること、津波波力そのものを増大させる効果があることを明らかにし、数値解析モデル構築によって氷板漂流物を伴う津波現象の再現を可能とした。また、津波発生時の最適な樋門操作方法を、結氷の量や樋門の開度、津波波形を変化させた波力変動の実験結果から明らかにした。

キーワード：結氷河川、河川津波、氷板、樋門操作

### 1. はじめに

積雪寒冷地においては、直轄河川においても冬期間は結氷で覆われることとなる。そのような状態の河川に津波が来襲した場合、津波は結氷を破壊するため大量の氷板漂流物が発生する。過去、実際に 2011 年東北地方太平洋沖地震津波発生時には、写真-1.1、1.2 のような大量の氷板漂流物が河道内や樋門周辺で確認された<sup>1)</sup>。氷板群を伴う河川津波の挙動については未だ未解明な点が多く、構造物に対する衝撃力をどのように評価すべきか考え方が十分に確立されていないのが現状である<sup>2)</sup>。そこで本研究では、積雪寒冷地における河川構造物の津波に対する防護手法を確立することを目的として、河川構造物への影響評価に着眼した実験及び数値解析手法の検討を行った。

次章の 2. において、大規模河川津波水理実験による氷板漂流物の橋桁構造物への影響評価、数値解析による氷板漂流物群挙動、水位変動等の検討を行う。3. では、氷板漂流物を大量に含む大規模河川津波現象を再現可能な数値モデルを構築し、実験の計測結果と数値計算結果を比較してモデルの妥当性を検証する。4. では、冬期河川津波発生時に最適な樋門操作法を明らかにすることを目的に、実際の樋門形状を模擬した水理実験によって氷板等の漂流物による樋門周辺の時系列的な水位や波力の変動を把握する。



写真-1.1 (左) 新釧路川で撮影された滞留氷板の様子 (河口から 4.5km 付近、2011/3/13 16:45 頃)、(右) 北海道鶴川 (むかわ) における氷板痕跡 (2011 年 3 月 13 日撮影)



写真-1.2 冬期河川津波発生後の樋門周辺状況の例

### 2. 氷板混合津波の波力特性、津波漂流物群の数値解析

#### 2. 1. 氷板混合津波が河川構造物に及ぼす波力特性に関する実験的検討

2011 年東北地方太平洋沖地震津波により、結氷期に最大クラスの津波が発生した際には、氷板漂流物と共に河川遡上することで橋梁等の損傷が予想され、漂流物が混合した流れを考慮する必要性が再認識されたところである。津波漂流物対策として、宇野ら<sup>3)</sup>の水理

実験では津波バリアを用いたコンテナ漂流物の捕捉効果や、木岡ら<sup>4)</sup>の水理実験により建物間のアイスジャム形成に関する知見が得られている。また、橋梁と津波の相互作用に関する研究も進められており、江面ら<sup>5)</sup>の数値解析による津波衝突時に落橋した橋桁へ作用した水平及び鉛直波圧の推定や、中村ら<sup>6)</sup>は津波力が桁の移動に与える影響を3次元数値計算モデルで解析している。氷が影響する流れとしては、河合ら<sup>5)</sup>による定着氷盤の氷縁部を変化させた際に氷盤の運動形態が変化することや、水理実験による浮氷に対する安定性の解析<sup>6)</sup>、押し波と引き波を再現可能な水理実験によりアイスジャム発生時の平面的挙動について検討した知見が存在する<sup>7)</sup>。

しかし、既往研究では流体力のみを考慮した津波対策や、結氷河川に関する個々の現象を対象にしたものが多いのが現状である。河川構造物周辺における津波遡上の検討としては、阿部ら<sup>8)</sup>の数値解析により樋門ゲート前面で氷板群を伴う津波の場合には波高や伝播速度の変化が確認されているものの、結氷期の河川津波襲来時における漂流物としての氷板を考慮した流れ、すなわち氷板と津波が混合した波力が橋桁に与える影響の検討はなされていない。また、橋梁は災害時の重要な避難経路に指定されているケースもあり<sup>9)</sup>、冬期間における大規模津波の発生時に、橋梁や道路等のインフラが健全な状態で保たれていることは、避難経路の確保は元より、その後の復旧活動や生活基盤を確保する上でも重要である。

このため本章では、津波遡上時における漂流氷板の縦断的並びに鉛直方向の挙動を再現可能な水理実験を行い、固体と液体が混合している流れを対象に、氷板混合津波が橋桁に及ぼす波力変化の特性を明らかにすることとした。

## 2. 1. 1. 研究手法

図-2.1に示した水路模型について、寒地土木研究所が所有する単管製簡易可傾斜水路を用いた。模型の諸元は、北海道の1級河川新釧路川等の河口から0.8km～1.5kmとなる河口域を想定し、模型縮尺は1/100～1/50程度とした。水路延長15.0m、水路幅0.3mの中央にアクリル部を設け、その中心には3分力計(日章電気(株),LMC-3502A-100N)に接続した橋桁模型を設置した。この機器の設置については、ゲート開放時のノイズを検出しないよう実験水路から独立させた構造とした。なお、橋桁模型の両端は固定されておらず、3分力計で吊された状態となっている。

アクリル部では、図-2.1に示したゲートを $x=0$ と表すと、 $x=3.75$ の位置となる橋桁部を中心に動画撮影を行い、津波遡上時の氷板混合状況や橋桁に与えるインパクト、氷板衝突時の局所的な流況変化を視覚的に捉えることとした。撮影に用いたカメラは、デジタル一眼レフカメラ(Canon EOS 5D Mark2, 24mm単焦点レンズ)である。河川流量は、給水部に設置したポンプにより与えており、給水時の水面振動を抑制するため、ヘチマロン(新光ナイロン(株))を用いた整水区間を設けている。

氷板模型の材質は、河氷の比重(0.91～0.92)に近いポリプロピレンを用いており、寸法については阿部ら<sup>1)</sup>の測定結果を参考に、辺長 $L=0.03\text{m}$ 、氷板厚 $t=5\text{mm}$ とした。図-2.2に示した結氷カバー率は、氷板模型設置

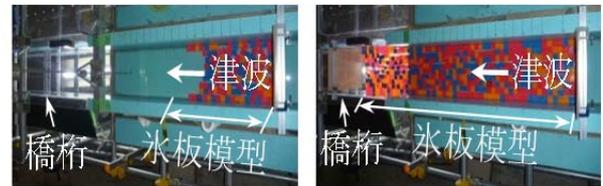


図-2.2 結氷カバー率(左:20%, 右:80%)

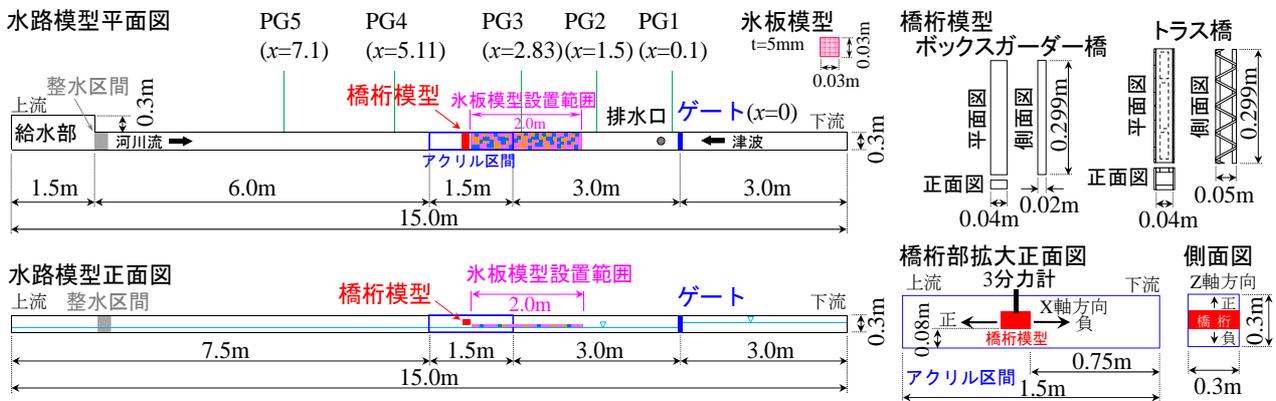


図-2.1 模型水路の諸元及び計測機器の設置状況

範囲  $A=2.0\text{m} \times 0.3\text{m}$  内における氷板模型  $A_i = 0.03\text{m} \times 0.03\text{m}$  が占める面積の割合を示し、20%は氷板模型を134枚、80%は氷板模型を534枚使用して、氷板模型が重ならないよう水面に浮かべて設置している。氷板模型の色は、津波フロント到達時や氷板と津波が混合した際、個々の氷板挙動を判別しやすいよう、ピンク、オレンジ、ブルーの3色をランダムに配置している。

津波の発生方法は、ダムブレイクによる造波とした。ゲートの設置については、開放時の震動が水路へ伝わらないようにするため、実験水路とは別に設けたゲート専用の独立した支柱へ設置することとした。水位計測は、図-1に示したPG1~PG5の地点で水路底面のピエゾに接続されている導水管に設置した圧力センサ(STS Sensors, ATM.1ST)を用いて、縦断的な計測を行った。

実験ケースについて、図-2.2に示した結氷カバー率20%、80%に加え、これらの評価基準となる氷無しの計3ケースを、ボックスガーダー橋並びにトラス橋毎に、河川流量や初期水深、貯水池高を変化させた表-2.1の実験条件で実施した。つまり、結氷3ケース×橋桁2ケース×河川流量2ケース×初期水深2ケース×津波3ケース=合計72ケースの実験を実施することで、

津波遡上時の水深変化や異なる流況により発生する詳細な変化を網羅できるようにした。氷板混合流が橋桁に及ぼす影響を把握するため、ピエゾ設置箇所には現れない橋桁模型位置での水位変化を確認できるように、アクリル部には橋桁の下流面( $x=3.75$ )を中心とした1cm格子の目盛りを設置し、目視による水位の読み取りを可能とした。次に、図-2.1に示した橋桁へ接続した3分力計の値を用いて、津波遡上時の波力をボックスガーダー橋とトラス橋で比較し、橋桁構造の違いによる波力分布特性を確認することとした。これらの結果を基に、実験映像から確認した局所的な水位変化とピエゾ設置箇所の水深、3分力計の値とを合わせて考察することを試みた。

表-2.1 実験条件 (ボックスガーダー橋, トラス橋共に、氷無し, 結氷カバー率20%, 結氷カバー率80%で実施)

河川流量 $Q$ [L/s]	初期水深 貯水池高			河川流量 $Q$ [L/s]	初期水深 貯水池高		
	$h$ [cm]	$H$ [cm]			$h$ [cm]	$H$ [cm]	
0.1	3	17	25	0.2	3	17	
		21				21	
		25				25	
	6	17	25		6	17	
		21				21	
		25				25	

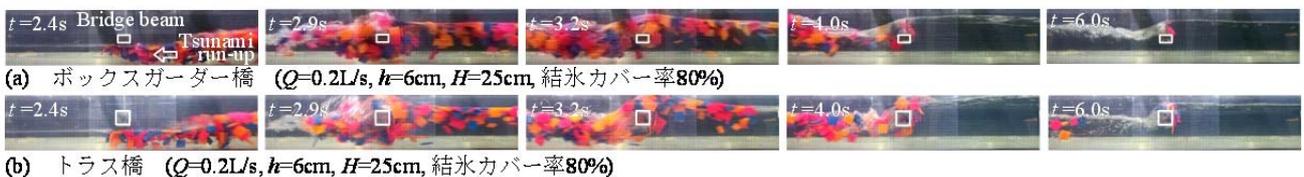


図-2.3 実験状況. 左から順に津波フロント ( $t=2.4\text{s}$ ), 橋桁衝突から0.3s後 ( $t=2.9\text{s}$ ), 橋桁衝突から0.6s後 ( $t=3.2\text{s}$ ), 橋桁衝突後 ( $t=4.0\text{s}$ ,  $t=6.0\text{s}$ ) の変化. (写真左上の数値はゲート開放時を0sとした時の経過を示す)

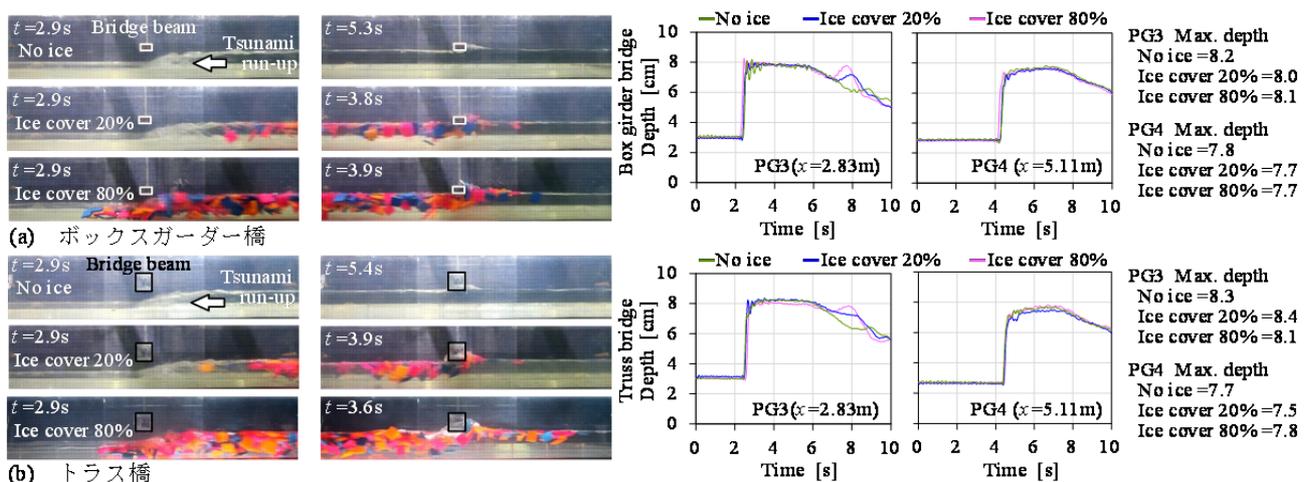


図-2.4 実験状況 ( $Q=0.1\text{L/s}$ ,  $h=3\text{cm}$ ,  $H=17\text{cm}$ ), (a), (b)共に写真左は橋桁位置への津波フロント到達時, 写真右は橋桁部の最大水位発生状況, 写真左上の数値はゲート開放時  $t=0\text{s}$  とした時の経過を示す. グラフの横軸はゲート開放時  $t=0\text{s}$  とした時の経過を示す)

## 2. 1. 2. 結果及び考察

### 1) 流況観察結果

実験結果については、特徴的なケースのみに焦点を絞って述べることにする。図-2.3 に示した実験時の状況について、ゲート開放後  $t=2.4s$  の状況は、津波により動き出した氷板が水中で回転する Under turning や、先端の氷板に潜り込む Half turning 及び Sliding<sup>5)</sup> が発生し、津波フロントに氷板が集中した楔形の侵入形態となっていた。その後、津波は橋桁へ衝突し ( $t=2.6s$ )、衝突から  $0.3s$  後となる  $t=2.9s$  では氷板は橋桁の上下を遡上していたが、衝突から  $0.6s$  後の  $t=3.2s$  では氷板は橋桁上部を遡上するものが大半を占めていた。 $t=4.0s$  には殆どの氷板が津波と共に遡上したが、 $t=6.0s$  経過後も橋桁に捕捉された氷板が確認された。この映像の内、 $t=3.2s, 4.0s, 6.0s$  の3時刻における(a),(b)の比較より、衝突直後からボックスガダー橋に比ベトラス橋では水位が上昇している様子が確認できる。他のケースでは津波遡上時の状況として、初期水深  $h=6cm$  は Under turning の発生が確認されていたが、初期水深  $h=3cm$  は Half turning や Sliding が大半を占めていた。これは、氷板模型寸法が  $L=3cm$  のため、初期水深  $h=3cm$  のケースでは水中での鉛直方向の挙動が制約されたことが影響し、差異が生じたと考えられた。

図-2.4 は橋桁毎に結氷カバー率が変化した際の流況を示している。図-2.4 右の水深には、ダムブレイクや排水口による水面変化の影響が少なく橋桁模型上下流部となる PG3 と PG4 の値を用いた。

津波の遡上形態について、図-4(a),(b)共に写真左は結氷カバー率20%に比べ80%は津波フロントに氷板が集中し、氷板と津波が混合した遡上形態となっていた。図-2.4(a),(b)共に写真右に示した橋桁への津波衝突時には、重畳した氷板の影響による局所的な水位上昇が発生し、結氷カバー率20%に比べ80%では、より顕著な影響が現れていた。特にトラス橋は、結氷カバー率20%の橋桁模型位置での水深約10cm に対し、結氷カバー率80%は約11cm となっており、約1cm の水位差が生じていた。これは、結氷カバー率が高くなること

により捕捉される氷板枚数が増加し、滞留後にも後続から遡上してくる氷板が詰まり易くなり、流れを阻害することが影響したと考えられた。また、トラス橋では流下方向に対する断面が三角形を基本とした骨組み状の構造となっており、漂流物を捕捉し易いことが起因したと推測された。図-2.4 右に示した橋桁上下流の水深は、橋桁構造の違いによる水深差が  $0.1\sim 0.4cm$  であり、先程の橋桁部での値と比べると差は小さい。本ケースは遡上した津波が橋桁へ接触した際、局所的な水位上昇が生じたが、その後の滞留時間や水位上昇量は小さく、上下流に及ぼす影響が少ないためと考えられた。

以上の結果より、ピエゾ設置箇所の数値と比べ橋桁部での水位差は大きく、実スケールに換算すると  $0.5\sim 1.0m$  程度であった。河口域での変化としては僅かなものかもしれないが、避難時等の橋梁通行中に橋桁を越流した津波により、生命の危険に晒される可能性は十分に存在する。

### 2) 氷板混合津波による負の段波

図-2.5 は津波が橋桁に衝突した反作用で河川流下方向へ逆流する波、すなわち負の段波が発生した状況を示している。水理条件は図-2.5(a),(b)共に同様ではあるが、ボックスガダー橋と比較しトラス橋では波高が上昇しており、 $t=3.3s\sim 3.6s$  では伝播速度が速い状況が窺える。この要因として、津波衝突後の状況を見ると、ボックスガダー橋は  $t=2.6s$  の津波衝突後には一時的に氷板が重畳しているが、その後は比較的スムーズに遡上している様子が確認できる ( $t=3.0s\sim 3.6s$ )。一方、トラス橋では、津波衝突後  $t=3.0s$  から氷板は滞留気味となっており、除々に氷板の遡上が確認されてはいるものの、 $t=3.6s$  でも氷板が複数捕捉されており、氷板による閉塞現象により流れの阻害が長期化したことが影響したと考えられた。

橋桁直下流部における負の段波は、橋桁へ衝突前の津波高と比較しボックスガダー橋で約1.5倍の5cm、トラス橋では約1.6倍の6cm波高が上昇している。さら

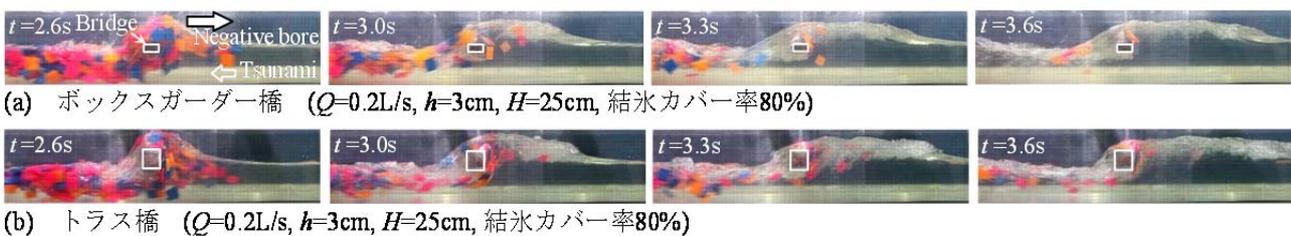


図-2.5 負の段波発生状況 (写真左上の数値は、ゲート開放時を  $0s$  とした時の経過を示す)

に負の段波は、前節の堰上げによる局所的な水位上昇とは異なり、下流部の水深計測地点のPG3に達している。PG3の水深について、図-2.7(a)は初期水深 $h=3\text{cm}$ 、図-2.8(a)は初期水深 $h=6\text{cm}$ の状況を示している。図-2.7(a)の水深は、津波到達後となる約5.0s以降に負の段波による水位上昇が発生し、津波遡上時の最大水深との差は、ボックスガードー橋は結氷カバー率20%が1.1cm、80%が1.4cm、図-2.6に示した上昇率では20%、80%共に約1.1倍となっていた。トラス橋では結氷カバー率20%が2.5cm、80%が2.9cm上昇しており、上昇率では20%が約1.2倍、80%が約1.3倍となっていた。図-2.8(a)では、ボックスガードー橋は20%が0.2cm、80%が1.5cm、図-2.6に示した上昇率では20%が約1.0倍、80%が1.1倍となっていた。トラス橋では結氷カバー率20%が2.0cm、80%が3.3cmとなり、上昇率では20%、80%共に約1.2倍であった。結氷カバー率が増す程、波高が上昇する傾向にあり、これは前節の局所的な現象と同様に、橋桁部の閉塞が影響したと考えられた。他ケースの状況は、図-2.6に示した $h=3\text{cm}$ 、 $H=17\text{cm}$ は氷板が橋桁の下部を通過し、 $h=6\text{cm}$ 、 $H=25\text{cm}$ のボックスガードー橋では氷板が橋桁上部を通過し捕捉される枚数が少なく、水位差が僅かにしか現れないケースも確認された。

これらのことから、初期水深は低く波高が上昇する程、負の段波の上昇割合は高くなる傾向を確認することができた。津波侵入時よりも負の段波は波高が上昇することで、この影響が下流広域に伝播し、堤防越流等の被害範囲が拡大する恐れがある。

### 3) 氷板混合波力の評価

3分力計の計測値について、図-2.7(b)に示したX軸の最大値は、ボックスガードー橋と比較しトラス橋の波力は、結氷カバー率20%は約0.8倍、結氷カバー率80%では約0.9倍となっていた。図-2.8(b)に示したG(80%)

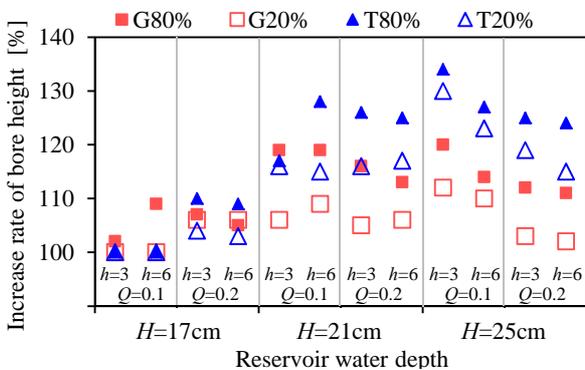


図-2.6 PG3における津波遡上時の最大波高に対する負の段波高上昇率（凡例のGはボックスガードー橋、Tはトラス橋、%は結氷カバー率を示す）

の8.5s付近に波力変化が生じているのは、橋桁上部に捕捉されていた氷板が、橋桁下流側面へ衝突しながら遡上したためである。X軸の最大値では、結氷カバー率20%、80%共にボックスガードー橋に比べトラス橋の波力は最大値で約1.2倍となっていた。前節までの津波遡上時における橋桁部での氷板捕捉状況や側面形状等を加味すると、ボックスガードー橋に比べトラス橋では河道断面の阻害となる受圧面積は広く氷板捕捉枚数が増加し、作用波力が大きくなると予想された。しかし、図-2.7(b)に示したトラス橋の最大値はボックスガードー橋を下回っていた。

この要因として、今回使用した模型重量はボックスガードー橋が162.2g、トラス橋は644.3gと異なることが

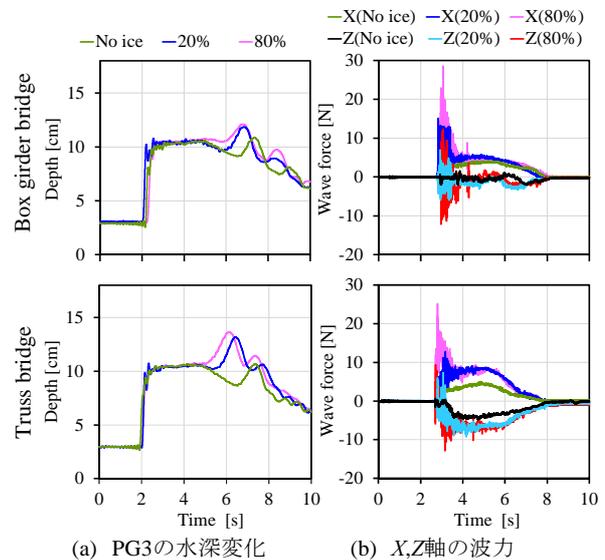


図-2.7  $Q=0.2\text{L/s}$ 、 $h=3\text{cm}$ 、 $H=25\text{cm}$ の計測結果（凡例の%は結氷カバー率を示す）

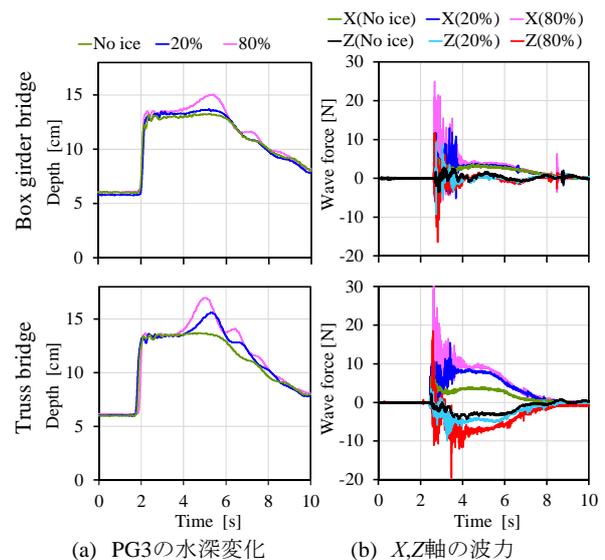


図-2.8  $Q=0.2\text{L/s}$ 、 $h=6\text{cm}$ 、 $H=25\text{cm}$ の計測結果（凡例の%は結氷カバー率を示す）

挙げられた。庄司ら<sup>10)</sup>は、津波作用が同程度であれば桁重量が大きい程、桁移動の被害は少ないことを示しており、氷板衝突時の作用波力に対してトラス橋では重量が大きいことにより、変位が少なくなったと推測された。また、初期水深 $h=6\text{cm}$ に比べ $h=3\text{cm}$ の氷板輸送過程は、橋桁下部を遡上する氷板枚数が多くなっており、これらの影響は、水深により変化する可能性があることと示唆された。

図-2.7(b)及び図-2.8(b)のX軸は、ゲート開放後 $t=3.0\text{s}$ から波力の収束となる $t=8.0\text{s}$ まで、ボックスガダー橋に比べトラス橋は高い波力が継続しており、 $t=5.0\text{s}$ 付近の値で比較すると、図-2.7(b)は結氷カバー率20%、80%共に約1.6倍、図-2.8(b)は20%が約2.5倍、80%が約2.4倍となっていた。氷無しとの比較では、ボックスガダー橋は1.0~1.4倍、トラス橋は1.8~2.5倍であった。Z軸の変化は、津波衝突直後に振幅が正負両方向に発生したが、その後はボックスガダー橋の値に大きな変化は無く、氷無しの場合と比較すると、トラス橋で図-2.7(b)は1.9~2.0倍、図-2.8(b)は約1.5~2.3倍の高い波力が継続していた。

流体力のみの場合と比べ氷板混合波力の影響は、特にトラス橋で顕著に現れており、高い波力の継続が長期化することで、累積波力が増加し滑動や落橋、損傷等が生じる危険性が示唆された。

### 2.1.3. まとめ

結氷期における津波遡上を再現するため、氷板が混合した流れを考慮した水理模型実験を行い、橋桁に及ぼす影響について得られた知見を以下に示す。

- ・結氷カバー率が増すことで津波フロントに氷板が集中し、混合した遡上形態となることで、橋桁部では氷板の重畳による局所的な水位上昇が確認され、結氷カバー率が増すほど顕著に影響する。
- ・氷板混合津波の衝突後、負の段波が確認され、本章の条件においては津波遡上時の波高と比較し、橋桁直下流部で最大1.6倍の上昇が確認された。
- ・トラス橋は氷板混合流の影響として、氷板捕捉時の受圧面積は広く閉塞現象により流れの阻害が長期化し、最大波力及び累積波力の増加が懸念される。

## 2.2. 河川管理施設周辺における津波漂流物群の数値解析手法の検討

冬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、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<sup>11)</sup>。しかし、樋門水路のような局所的な領域に来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来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検討を進めることとした。

### 2.2.1. 数値解析手法

はじめに、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<sup>12)</sup>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。一般的な MPS 法の解法については越塚による参考書<sup>13)</sup>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、 $\rho$ は流体密度、 $\mathbf{u}$ は速度、 $p$ は圧力、 $\nu$ は動粘性係数、 $\mathbf{g}$ 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流方程式を用い、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、 $\mathbf{r}_{ij}$ 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、 $\lambda$ 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<sup>12)</sup>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、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法<sup>14)</sup>を基本的な解析手法として採用した。

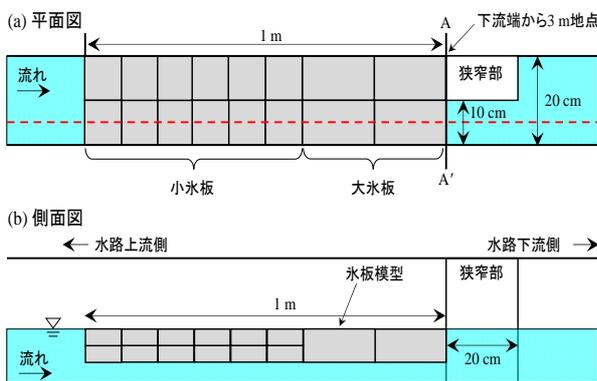


図-2.9 アイスジャム水理実験における狭窄部・氷板模型の位置関係の模式図

## 2.2.2. 結果と考察

### 1) アイスジャムに関する水理実験とその数値シミュレーション

吉川ら<sup>15)</sup>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-2.9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-2.9(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板が流下しアイスジャムが発生することとなる。

本章では、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量は実験と同一とし、計算粒子径 $d_0 = 0.005$  mとした。図-2.9(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-2.9(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-2.10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-2.10(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ことが確認された。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。

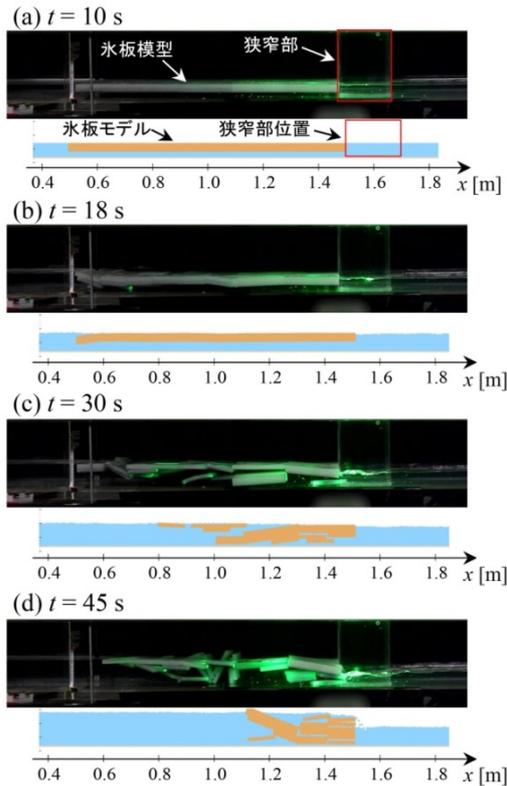


図-2.10 アイスジャム水理実験の様子（各時刻上段）及び解析結果との比較（同下段）

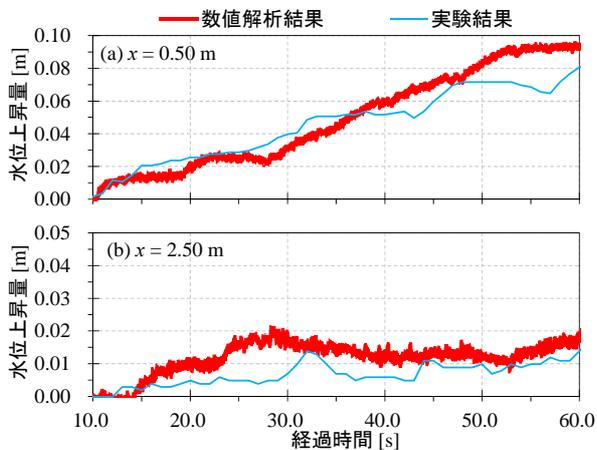


図-2.11 水位計測点における時系列の水位変動量  
(a)上流側、(b)下流側)

図-2.11 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、シミュレーションは完全に再現できていないわけではないが、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。

## 2) 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-2.2 に本章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にとどめ、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-12 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



写真-2.2 対象樋門の概況

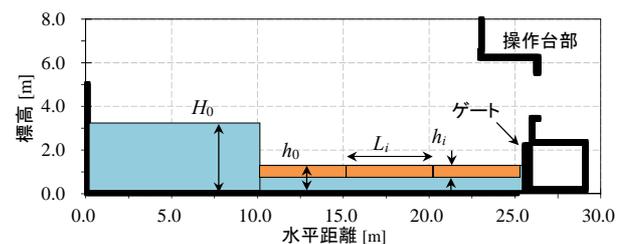


図-2.12 河川管理施設付近の2次元数値解析領域の概念図

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-2.13に一例として示したのは、 $H_0 = 3 \text{ m}$ ,  $h_0 = 1 \text{ m}$ ,  $h_i = 0.3 \text{ m}$ 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、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、 $H_0 = 2 \text{ m}$ ,  $h_0 = 0.3 \text{ m}$ ,  $h_i = 0.1 \text{ m}$ の場合の結果を図-2.14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。

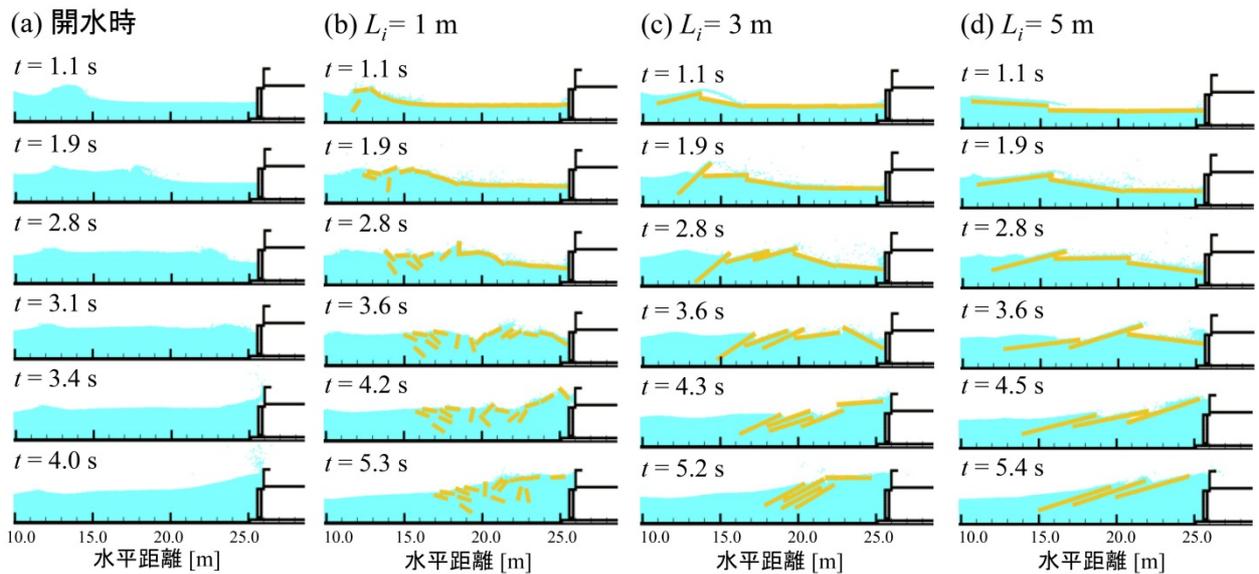


図-2.13 河川管理施設周辺における氷板漂流物群の解析結果のスナップショット ( $H_0 = 3 \text{ m}$ ,  $h_0 = 1 \text{ m}$ ,  $h_i = 0.3 \text{ m}$ )

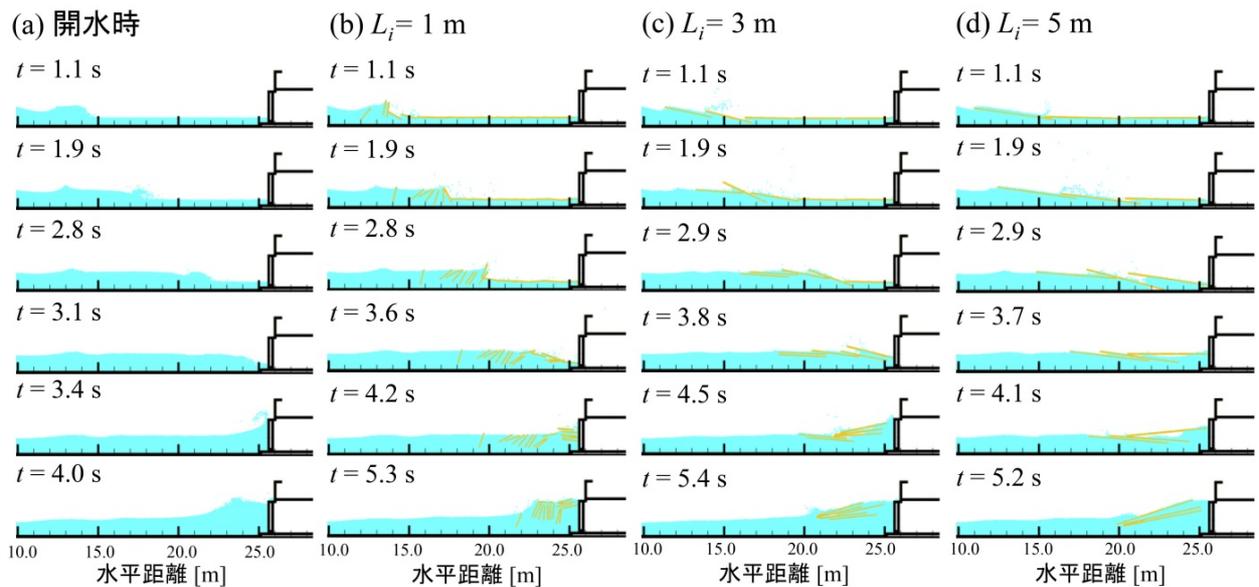


図-2.14 河川管理施設周辺における氷板漂流物群の解析結果のスナップショット ( $H_0 = 2 \text{ m}$ ,  $h_0 = 0.3 \text{ m}$ ,  $h_i = 0.1 \text{ m}$ )

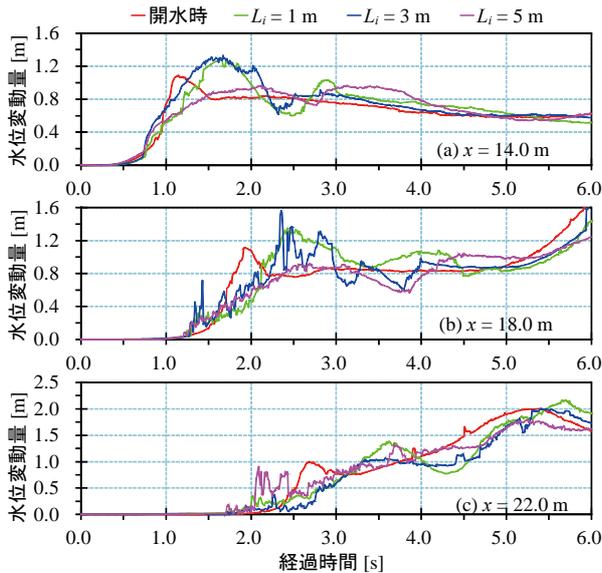


図-2.15 3地点における水位変動量の時系列変化

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。(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、別途実施した解析により図-2.13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<sup>8)</sup>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-2.14 (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、鶴川で確認されたような痕跡<sup>15)</sup>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章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-2.13 ( $H_0 = 3$  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-2.15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-2.15 (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-2.13 (b)のような津波フロント内部での氷板の回

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-2.15 (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-2.13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-2.15 (c)は22 m 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、 $L_i = 1, 3$  m で二山型の波形となっているのは、図-2.13 (b)  $t = 4.2$  s、図-2.13 (c)  $t = 4.3$  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。

### 2.2.3. まとめ

本節では、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、より実際的な検討として、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、本章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<sup>16)</sup>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。

以上、本章では、結氷期の河川域で発生する可能性のある氷板群を伴う津波現象について、河川横断構造物との相互干渉に関する水理実験や数値解析手法の検討を行った。実験の結果、横断構造物周辺でアイスジャ

ム現象が発生して水位の堰上げ効果が発生するだけでなく、津波波力そのものをも増大させる効果があることが推定された。また、氷板漂流物を伴う津波現象を再現可能な数値解析モデルを構築し、実際の直轄河川をフィールドとしてモデルの適用を行いその有効性を確認することができた。

### 3. 漂流物を伴う大規模河川津波の数値モデルと橋桁周辺流れ特性

結氷を生じた河川において津波が遡上すると氷が破壊され大量の漂流物群となった場合、漂流物群を伴う場合の外力の変化、(多くの場合)増加についてはメカニズム上も不明な点が多く、合理的な設計法の確立が困難である。そこで本章では、合理的設計法の確立を目標とし、氷板漂流物を大量に含む大規模河川津波の水理実験を実施した上で、これを再現可能な数値モデルの構築を行った。

#### 3. 1. 研究の手法

水理実験方法<sup>17)</sup>は、簡易可傾斜水路(寒地土木研究所所有)を使用した。2.1.1.に詳細を示している。氷の無いケースを比較の基準とし、ボックスガーダー橋の場合、トラス橋の場合それぞれについて流況観察及び時系列的な水深の計測を行った。詳細は別報<sup>3)</sup>にて述べている。

本研究では、河川構造物のような複雑形状構造物を有する条件の下、激しい自由水面変化と漂流物輸送の連成解析を容易に実施可能なMPS法を基本的な数値解析手法として採用した。用いられる基礎式は連続式及びNavier-Stokesの運動方程式(式(1))であり、独自の粒子間相互作用モデル(式(2)、(3))を用いて圧力勾配項、粘性項の離散化が行われる。

標準のMPS法による計算は流れ場内部で顕著な圧力解の振動が発生することが報告されているが、圧力解の安定化を図るため高精度MPS法のスキームの一つCMPS-HS-HL法を適用した。漂流物群の追跡にはKoshizukaらによる剛体挙動追跡のための簡易弱連成モデル<sup>18)</sup>を用いた。そ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を時刻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。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 $\Delta t$ 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。その後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。

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

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。この簡易追跡処理は元々Koshizukaら<sup>18)</sup>により考案された手法であり、Gotohら<sup>19)</sup>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<sup>20)</sup>等にも用いられてきたものである。著者らのグループによるこれまでの検討では、水理実験における流況、水深、及び波力計測結果<sup>17)</sup>や、波力の継続時間に着目した議論を行ってきた。本章では上記の実験による結果の数値解析モデルによる再現を試み、流況のみならず流速や波力など流れ場の内部構造を詳細に把握するための基礎的検討を報告するものである。なお、実験模型や現象は3次元であるが、鉛直2次元な流況及び漂流物群の漂流挙動を把握するためにまずは2次元モデルによる検討を行うこととした。

数値解析モデルにおける初期粒子配置を図-3.1に示した。計算粒子径 $d_0 = 1$  cmであり、総粒子数は全てのケースで15,000個程度である。実験で10秒間の再現計算に要した時間は1ケース当たり、20分~30分程度であった。また、橋桁に作用する波力をモデル内で測定するため、橋桁部分を構成する固定粒子を、加速度は

発生するが変位はしない粒子と定め、時系列的な加速度変化に橋桁模型の質量を仮想的に掛けることで、ゲートに作用する波力を間接的に推定するという処理を行った。

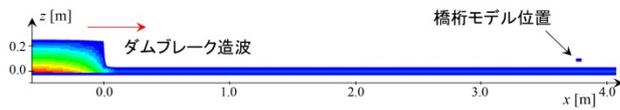


図-3.1 数値解析モデルにおける初期粒子配置

### 3.2. 結果及び考察

#### 1) 橋桁周辺の流況

まず、実験時に把握された流況と数値シミュレーション結果との比較を行う。図-3.2に示したのは、ダム部水深25 cm、初期河道水深3 cmの場合における、(a)ボックスゲーター橋模型、氷無しのケース、(b)トラス橋模型、氷板模型有りのケースの実験・数値解析結果との比較である。各図面の左が下流側である。また、数値解析結果においては黒色が固定された河床・壁面構成粒子、水色が水粒子、橙色が氷板を構成する剛体粒子を表している。

図-3.2 (a)のケースより、ダムブレイクによりくさび形状の段波が下流から接近し、橋桁に接触後は飛沫を上げながら衝突し ( $t=2.7$  s)、その後橋桁の上面・下面に分岐し遡上が発生している ( $t=5.5$  s)。数値解析結果からも類似した流況が見られ、段波の遡上、橋桁との接触やナップを形成しながらの遡上流の分岐については計算上も確認することができる。計算粒子径は  $d_0 = 1$  cm としており解像度として現象を十分に再現できるとは言い難いが、遡上流と橋桁の相互作用、すなわち橋桁の存在により遡上が阻害されるような現象は本モデルによってある程度再現できる可能性がある。同図(a)最右段の実験のスナップショットにおいて、橋桁下流側の山なりの水面形は橋桁で発生した反射波であるが、数値解析上も明瞭ではないものの同様の反射波が発生している。

図-3.2 (b)は氷板群有りのケースを示している。実験では初期段階である  $t=2.5$  s において、津波フロントは内部に氷板群を含んだ状態で遡上している。その後段波は氷板と共にボックスゲーター橋に衝突し、水しぶきが上がっている。数値解析結果でも、同様の様子が再現されている。氷板群が通過した後、実験では一部

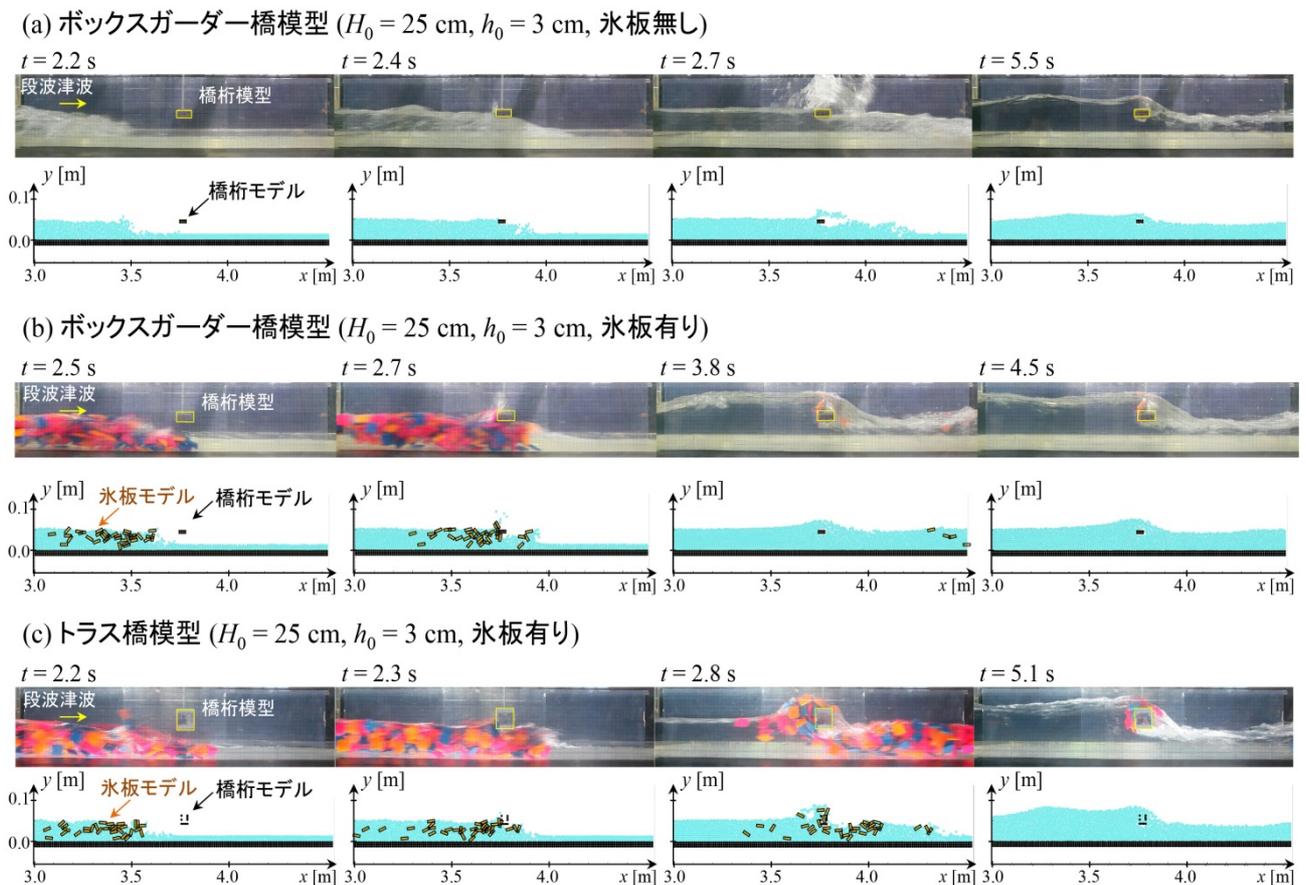


図-3.2 実験における流況と数値解析結果との比較

の氷板が付着しているが、数値解析結果ではその様子は再現されていない。実験では $t = 4.5$  sにおいても氷板の付着が発生しているが、数値解析ではそのような傾向は確認されなかった。

図-3.2(c)のケースを見ると、ダム部水深や初期水深は(a)と同一であるが遡上と共に氷板群の漂流が発生し、段波内部での氷板の回転が観察された( $t = 2.2$  s)。多くの氷板群ははじめ段波フロントと共に桁下を通過するが水深が大きくなると橋桁の上部を通過するものも確認された( $t = 2.8$  s)。段波フロント通過後は一部の氷板モデルはトラス橋模型の下流側面に付着し流れを阻害する様子が確認された。

一方で同一条件の数値解析結果を見ると、実験と同様に橙色で表される氷板モデルは段波フロント内部で回転を伴いつつ輸送され橋桁に接近し、段波フロントが橋桁に接触するとほぼ同時に氷板モデルも橋桁に接触する様子が確認された。また、実験結果の $t = 2.8$  sのように橋桁の上部と下部に分岐する流れも再現された。しかし、表示した最終時刻である $t = 5.1$  sにおいて、氷板モデルが橋桁モデルに付着する様子は再現されな

かった。これは氷板の付着がトラス構造や氷板群をすり抜ける水流により維持されるもので、このような現象は鉛直2次元モデルでは再現が難しいことが理由として考えられた。

## 2) 水位変動状況

次に、定量的な検討の一つとして、PG1~PG5の5地点における水深の計測結果と、同一の計測点における水深の数値解析結果を比較して示したのが図-3.3である。図-3.3上段(a1), (a2)、中段(b1), (b2)がボックスゲーター橋模型の条件、下段(c1), (c2)がトラス橋模型の条件を示したもので、水理条件は図-3.2と共通である。まず上段の比較を行うと、PG1地点において実験の水深計測値が他地点の水深計測結果、数値解析結果よりフロント水深が大きく、後続流通過時もやや大きい数値で推移している様子が確認された。この地点はゲートから0.1 m地点であり、ゲート開放時や段波がゲート部を通過する際の攪乱が伝播した結果このようにフロント水深が大きくなったためと考えられる。しかしながら、段波状となりながら上流へ伝播していく波形は

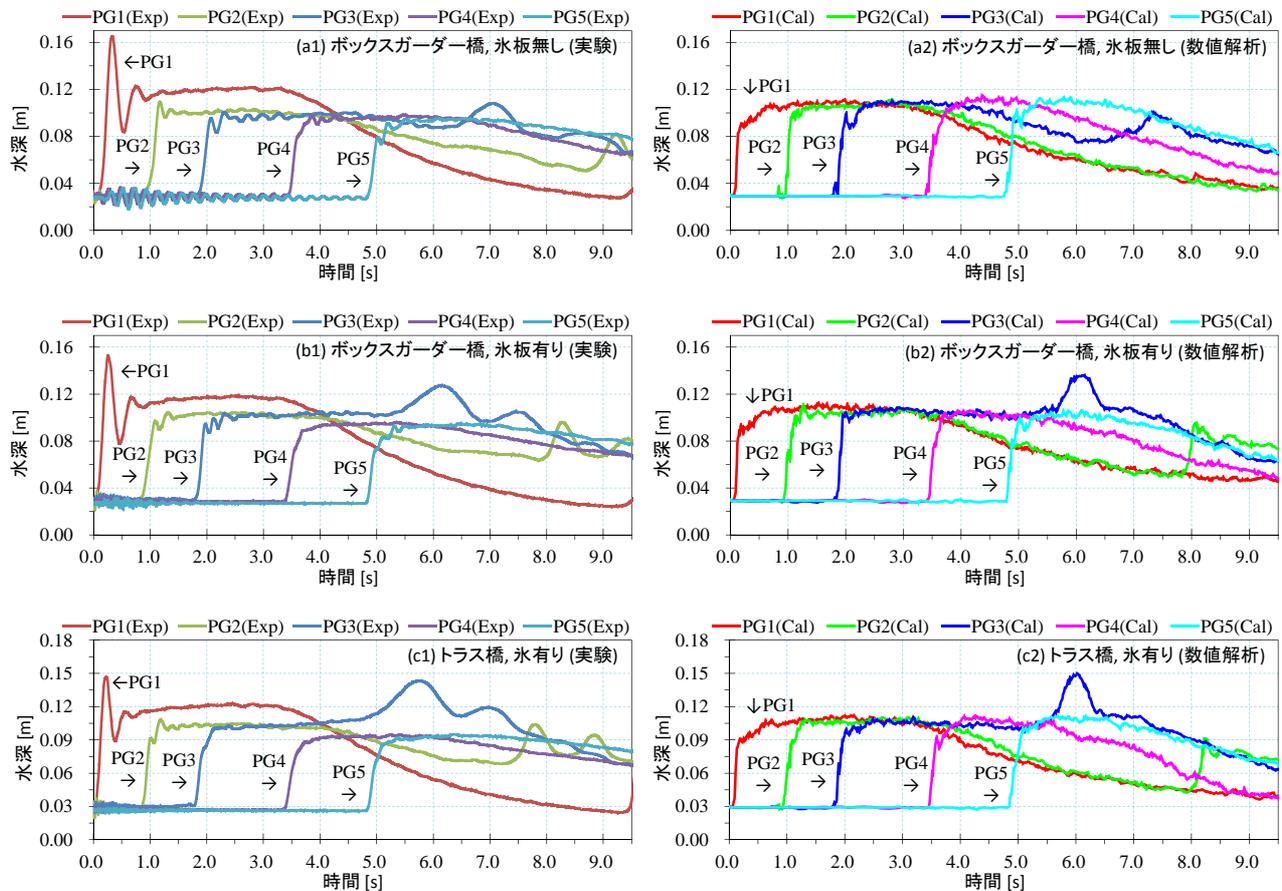


図-3.3 実験における流況と数値解析結果との比較

実験と類似した結果が得られており、各計測点への到達時刻も概ね一致している。また、 $t=7$ s前後で上述のようにPG3において反射波が計測されているが、数値解析結果でも同様の反射波が確認できる。

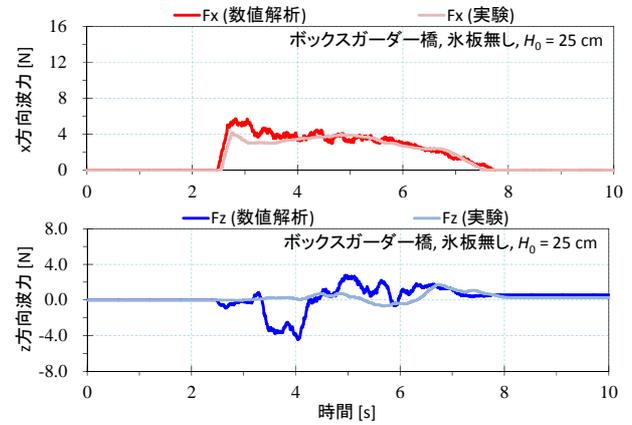
図-3.3 (b1)及び(b2)はボックスガーダー橋で氷板群を伴う場合である。全体の傾向としては、氷の無いケースである(a1), (a2)の時系列変化と類似している。しかし、氷板の存在により、橋への衝突時に発生する反射波の波高が開水時よりやや大きくなっている (PG3,  $t=6$  s付近)。この傾向は数値解析上も再現されている。PG2地点 (緑線) でも、 $t=8$  sで反射波が観測されており、全体として波形は良好に再現されている。

図-3.3 (c1), (c2)の比較より、PG1で水深が実験より小さく推移するのは共通であるが、他の計測点での計測波高や到達時刻は概ね再現されている。PG3、続いてPG2において反射波が計測される現象についても、数値解析で得られている。以上の考察から、流況、漂流物の輸送、縦断的な波形の変化などの傾向は実験と大きく乖離することなく数値解析結果でも得られており、流れ場の内部構造などに踏み込んだ検討も今後ある程度は可能と考えられる。

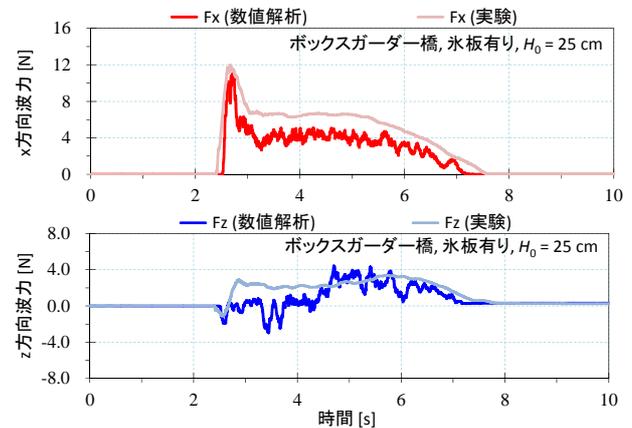
図-3.4に示したのは、 $x$ 方向及び $z$ 方向の波力の時系列変化であり、(a)~(c)は図-4の(a)~(c)に条件がそれぞれ対応している。ダム部水深は25 cm、河道部初期水深は3 cmである。図-3.4 (a)のボックスガーダー橋で氷板無しの場合では、時系列的な $x$ 方向の波力は概ね良好に再現できている。波力の発生時刻から消失時刻までも再現することに成功している。但し、フロント衝突時のピーク波力はやや過小評価となっている。一方で、 $z$ 方向の波力変動については、数値解析結果では充分再現されていない。これは $z$ 方向の波力変動については橋桁上面と橋桁下面で発生している分岐流の変動により発生する力が、解析上うまく現れなかったためと考えられた。

図-3.4 (b)のボックスガーダー橋で氷板有りの場合、ピーク波力は概ね再現できているが、継続波力は計算においてやや過小評価となっている。この理由は、図-3.4 (b)の実験に見られたように、氷板の付着によって遡上流の阻害が発生し、受圧面積が増加することで波圧が増加したのであるが、これがモデル上再現できなかったためと思われる。 $z$ 方向波力については、波力作用時間帯の後半部分では傾向が一致しているものの、前半部分では異なる傾向を示している。この波力作用時間帯前半部分について、実験では鉛直上向き方向となっているが数値解析では0前後の値を取り続けた。流

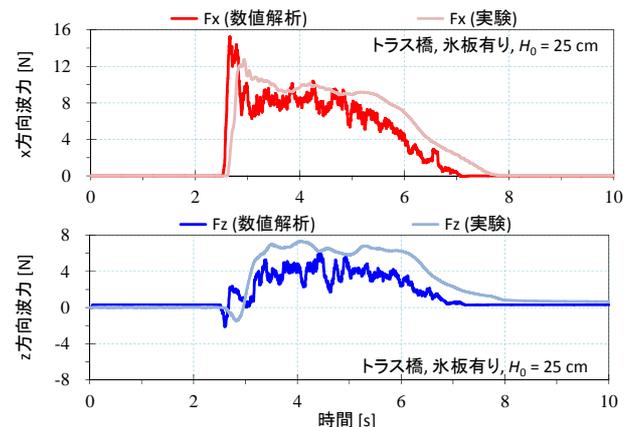
況観察結果からこの時模型に対して氷板衝突が発生しており、数値解析モデルにおいて固体衝突を考慮していないことから、このような変動傾向となった可能性がある。



(a) ボックスガーダー橋、氷板無しの場合



(b) ボックスガーダー橋、氷板有りの場合



(c) トラス橋、氷板有りの場合

図-3.4 各ケースにおける時系列の波力変化

次に、図-3.4 (c)のトラス橋の場合であるが、全体的な傾向としては波力の時間変化は $x$ 方向、 $z$ 方向ともに

類似している。数値解析結果では高周波の振動成分が伴っている。前述の通り、図-3.2における流況観察から波力作用時、氷板付着が発生するために遡上流の障害が発生するのであるが、数値解析では氷板の付着が再現されていない。これは採用している剛体モデルでは固体間衝突の効果を考慮していないためと考えられる。言い換えれば、トラス橋模型の場合に発生している波力は氷板の効果よりも、水流の作用の方が支配的である可能性もある。

本研究で構築した数値モデルは、波力の時間的な変化や、波力作用時間の予測に一定の信頼が持てると言える。特に $x$ 方向波力については、いずれのケースとも概ね良好な再現結果を得ることができた。その一方で、氷の細かな挙動や、ピーク波力、氷板付着後の継続波力の正確な予測はできていない。これは数値解析モデルの解像度を上げ、例えば $d_0 = 5 \text{ mm}$ とするなどの対処で一部改善する性質のものと考えられる。その上で、より再現性を向上するには、氷と、橋桁の固体間相互作用までも、モデル上考慮する必要があると思われる。

### 3.3. まとめ

本章では、漂流物群を含む大規模河川津波に関する水理実験の数値シミュレーションモデルを構築し、その流況の比較や水位変動の比較、更には波力計測結果との比較とを通じその再現性について検討を行った。本章の議論に用いたのは鉛直2次元のモデルであるが、概ね良好な再現性が確認された。すなわち、このような室内実験の再現であれば、3次元性を考慮せずとも、一定程度、漂流物群を伴う大規模津波の特性をできる可能性がある。

## 4. 河川津波発生時の樋門操作法

### 4.1. 実験手法

#### 4.1.1 実験水路

実験水路及び使用した模型について述べる。水理実験は寒地土木研究所の可傾斜水路を用いて実施した。水路の詳細な寸法などを図-4.1に示した。全長15 m、幅0.6 mの水路であり、ほぼ中央部に樋門模型を設置している。写真-4.1の現地写真(左)と模型(右)に示すように、新釧路川昭和樋門に近い構造を模してアクリル材で製作した。吐口水路から翼壁形状、函体内部及びゲート部を模擬したものである。実験の縮尺は1/30程度としており、模型函体部分は高さ8 cm、幅12 cmの2連である。なお、本研究では津波と構造物、氷板群模型の相互作用を明らかにすることが第一の目的であるため、現地形状を厳密には再現していない。

下流端から3 mの箇所にはダムブレイクによる造波が可能な可動式ゲートを設置しており、以下この造波ゲート部を $x = 0 \text{ m}$ と標記し上流向きを $x$ の正方向とする。造波ゲートを用いない造波法も用いたがこれは次節にて述べる。造波ゲート地点から模型樋門ゲートまでの吐口水路を模した区間に、滞留氷板を模擬するため図-4.1の灰色部分に氷板群模型をばらつくように滞留させた。氷板群有りのケースでは写真-3のように水面面積に対して氷板面積が占める割合を35%、70%に設定しそれぞれ氷板量小、氷板量大と表記することとする。氷板模型サイズは現地調査からの知見<sup>37)</sup>に基づき、大きいものは8 cm四方、小さいものは4 cm四方で、厚さ6 mm正方形のポリプロピレン板を一定比率で混合し重なり合わないよう滞留させた。

水路内の縦断的な水深を計測するため吐口側で3箇所(PG1~3)、呑口側で2箇所(PG4, 5)において圧力センサ(STS Sensors, ATM.1ST)を接続し水位計

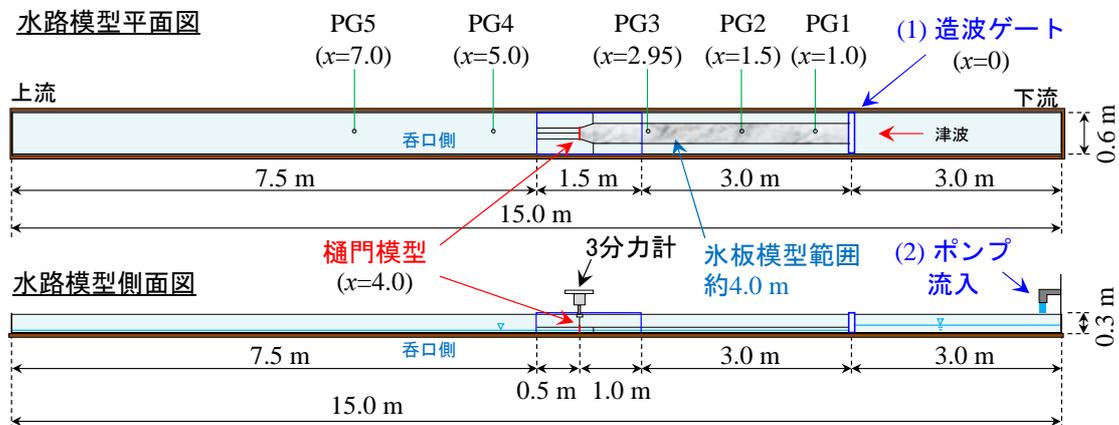


図-4.1 使用した実験水路の諸元、模型配置、及び水深測定位置

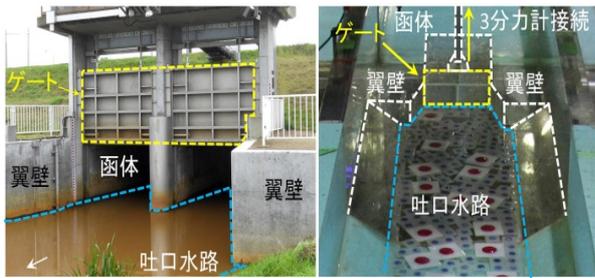


写真-4.1 昭和樋門概況(2013年8月撮影)と模型樋門

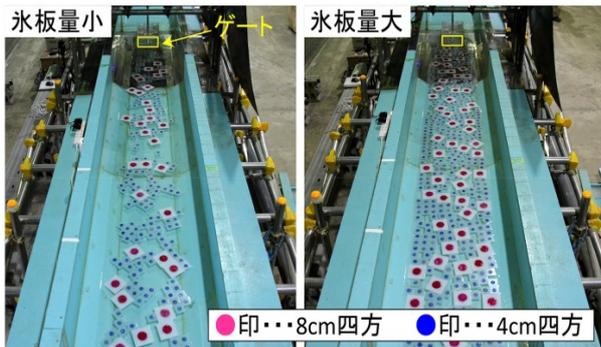
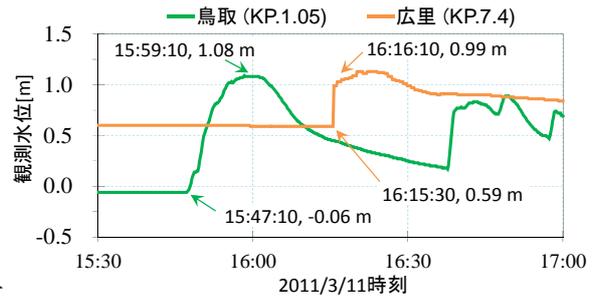


写真-4.2 氷板量小、氷板量大のケースの配置例

測を行った。樋門操作によるゲート開度の変化を模擬するため、ゲートの河床からの高さを変化できる構造とし、全閉、函体高さ 8 cm に対し開度 10 % (0.8 cm) 開放、50 % (4 cm) 開放の 3 通りを想定した。そしてゲートに 3 分力計 (日章電気株式会社, LMC-3502A-100N) を接続して津波衝突時の時系列的な波力計測を行った (写真-4.2 右)。水位及び波力はサンプリング間隔 0.001 s で計測を行い、0.1 s 間の移動平均を取りその変動傾向について検討を行った。流況確認のため模型の側方及び上方にハイスピードカメラ (CASIO, EX-FC500S) を 1 台ずつ設置し、これにより 120 FPS (120 フレーム毎秒) で撮影を行った。

#### 4.1.2. 吐口水路での造波方法

次に実験で外力として与えた津波条件の設定方法について述べる。沿岸域、または河川域のような、海域に比較して水深の浅い領域では、遡上に伴い津波波形は短時間で大きく変化することが知られている。図-4.2 に示したのは、2011 年東北地方太平洋沖地震発生後、新釧路川の鳥取水位観測所 (KP1.05)、広里水位観測所 (KP.7.4) で観測された津波第 1 波の波形である。これを見ると釧路港に近い鳥取水位観測所では山なりの水位変化となっているが、広里ではある時刻で急激に水位上昇が発生している。鳥取では 12 分間で 1.14 m の上昇、広里では僅か 40 秒間で 0.4 m の上



昇  
と

図-4.2 新釧路川における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波第 1 波の観測水位

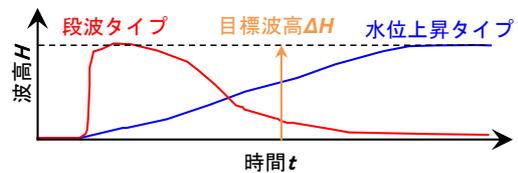


図-4.3 津波衝突形態別の時系列波形概念図

なっている。

安田ら<sup>21)</sup>や Watanabe ら<sup>22)</sup>が指摘するように、北海道周辺で観測される津波は、海底地形により生じられるエッジ波と呼ばれる波が沿岸線に沿って進行し、河口域の水面が上下するような津波であることが多い。彼らが 2003 年十勝沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の例から指摘するように、エッジ波の周期は北海道沿岸でおよそ 30 分から 1 時間程度で変動を繰り返すもので、港湾等において肉眼でその水面勾配を把握することは困難である。しかし、河川を遡上するにつれ水面勾配は徐々に前傾化し、図-4.2 のように明瞭な段波を形成し、構造物への衝突を起こすことが想定される。

本研究では特にこの津波波形による外力の違いに着目する。ほぼ河口に近い位置に設置された樋門であれば、緩やかな水位変動による津波来襲を受けると考えられるが、ある程度河口から離れた位置に設置された樋門であれば、段波状となる可能性がある。そこで図-4.3 の概念図に示したように、急激に水位上昇を起こす段波状の津波 (段波タイプと表記・図-4.1(1)造波ゲート使用) と、緩やかな水位上昇による津波 (水位上昇タイプと表記・図-4.1(2)ポンプ給水を使用) の 2 種類を想定することとした。時間的な比較を図-4.3 に示しているが、段波タイプでは水位上昇タイプに比較し非常に短い時間内に目標波高に到達する。図-4.2 広里での波高が鳥取地点よりも減衰しているように、上

流へ遡上するほど波高は減衰を起こすことが多いが、実験において目標とする波高 $\Delta H$ は共通とした。以上の条件で、津波の流れにより輸送される氷板群の挙動について検討を行うこととする。

## 4.2. 結果及び考察

### 4.2.1. 氷板群が存在する場合の樋門周辺流況

図-4.4に示したのは、側方及び上方からの撮影流況のスナップショットで上段から順に氷板群無し、氷板量小、氷板量大としている。ここでは基本的な条件として、樋門は津波来襲前に全閉した想定とし、目標波高 $\Delta H$ はL1クラス未満として模型樋門ゲート前面において4cm、現地換算で約1.2mとした場合の結果を示している。(a)~(c)それぞれで津波フロントが翼壁に到達する直前、翼壁衝突直後、樋門ゲート衝突直後、ゲート衝突後の反射波の発生時までを順に示した。津波フロントは青色破線で示している。

図-4.4(a)では、凹型形状となった津波フロントが翼壁に衝突してその後樋門ゲートに衝突し、反射波が発生する過程が確認された。一方で氷板群の滞留がある条件で氷板量小とした図-4.4(b)においては、フロント形状の推移としては(a)の場合に類似している。しかし多量の氷板輸送が発生しており、 $t = 3.300$  sではフロント周辺で回転を伴いながら氷板が輸送されている。 $t = 3.617$  sでは翼壁部への衝突と氷板群の上方への巻き上がりが発生しているが、フロント部に含まれる氷板群はまだ多くはない。その後 $t = 3.842$  sで氷板群を混合しつつ樋門ゲートへの衝突が起こっている。氷板量小の場合、先に津波の水流による衝突が発生し、氷板群は後から追従する形で衝突するという形態の発生が推察された

氷板量大の場合はその様相が少し異なり、図-4.4(c)に見られるように、フロント衝突前に氷板群が下流から上流へ押し出され、はじめの $t = 3.758$  sの段階でゲート前面に氷板群が密集している。津波フロント内部にも多量の氷板が混合している。その状態で津波と氷板群がほぼ同時に衝突している様子が確認できた( $t = 4.283 \sim 4.892$  s)。氷板群が多い場合の押し出される氷板については、河川横断構造物を対象とした佐藤ら<sup>40)</sup>の既報でも確認されており、氷板の量で輸送形態が大きく変化することも留意すべき事柄であろう。同様に氷板により流況が大きく変化する場合には、樋門の設計荷重で想定されていない外力が発生することも考えられる。主な受圧部分である扉体に対し、こうした漂流物の影響を考慮するかどうか、あるいはどの程度

まで明確化・定量化するかについて、今後の議論が望まれる。

次に、より河口に近い位置での津波来襲を想定した水位上昇タイプの流況について検討を行う。縮尺の条件から概ね実験開始100s後に目標波高の4cmとなるように水路へ給水を行っている。1点注意すべき事項として、本章の実験は縮尺模型実験であるため現地での時間スケールとの相似は厳密には取れていない。そのためあくまでも水位変動が早い段波タイプと緩やかな水位上昇タイプの相対的な比較に留めておくべきと考えられる。

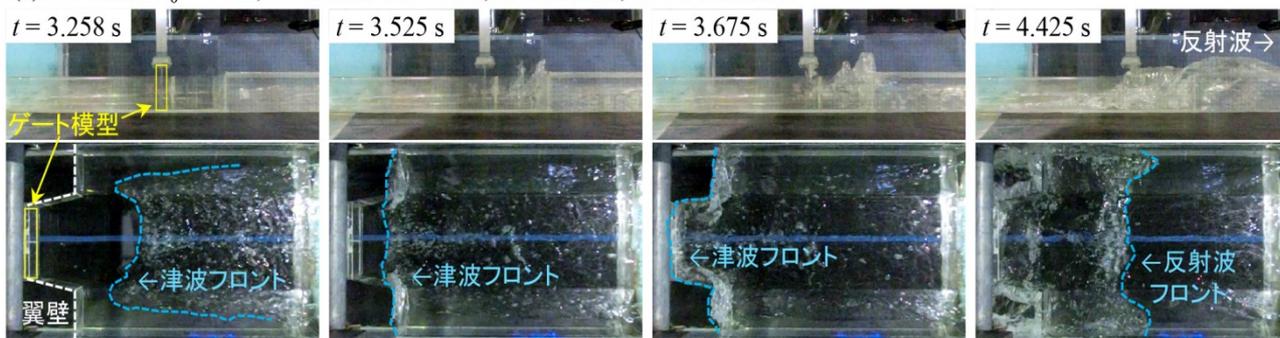
図-4.5は代表的な水位上昇タイプの流況のスナップショットであるが、初期の $t = 0$  sではまばらに滞留していた氷板が、30s後は徐々にゲート周辺に輸送されている。これは、下流端で給水されることでゲート付近と水面勾配が発生し、上流向きの流速が発生したためと考えられた。しかし、 $t = 60, 90$  sと比較しても氷板群の配置に大きな変化は見られず、水位のみが上昇する結果となった。津波の流速が比較的小さい場合は、氷板群は慣性の影響で大きくは輸送されないものと考えられた。そのため、ゲートに作用する波力としては、静水圧に近い、準静的な力となることが推定される。

### 4.2.2. 氷板群の有無による水位変化

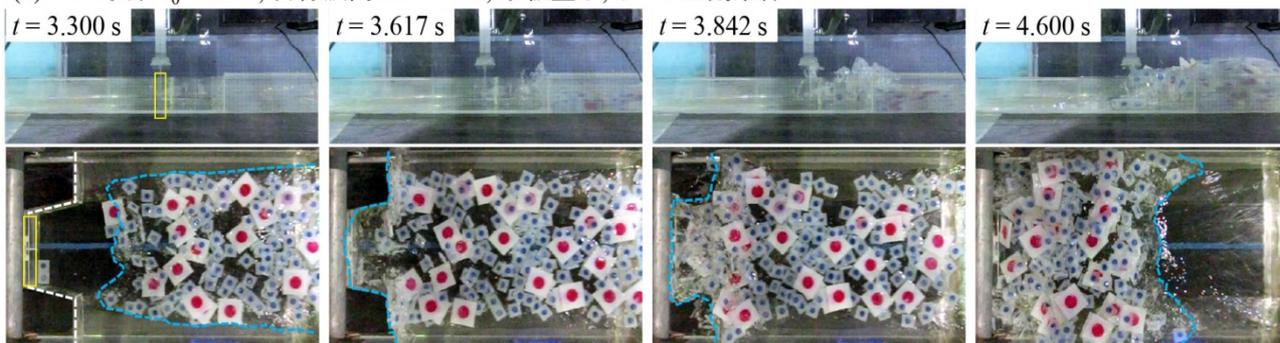
以下では圧力センサと3分力計の計測結果から、津波と氷板群、構造物の相互作用について定量的な検討を行う。本節ではゲート開度を変化させ、全閉の条件だけでなく10%開放、50%開放した場合の影響についても考察を行うこととした。

図-4.6に示したのはゲート全閉、10%開放、50%開放した場合で段波タイプの津波を衝突させた際の、PG3地点( $x = 2.95$  m)の時系列水位変化である。それぞれで氷板群無し、氷板量小・大のケースを示した。いずれのグラフにおいてもまず $t = 2$  s付近で段波状の津波が通過し、目標波高 $\Delta H = 4$  cm程度分だけ急激に上昇している。図-4.4に示したようにゲートに衝突した津波は反射波となってPG3地点に戻り流れとして到達する。いずれのグラフにおいても $t = 5.0$  s以後目標波高よりさらに大きな波高の波が通過している。これは反射波とダムブレイクによる後続流が重なり合って波高が大きくなったものと考えられた。しかし概して、時系列的な変動傾向は氷板の有無によらずどのケースも類似している。

(a) 吐口水深  $h_0 = 2$  cm, 目標波高  $\Delta H = 4$  cm, 氷板群無し, ゲート全閉条件



(b) 吐口水深  $h_0 = 2$  cm, 目標波高  $\Delta H = 4$  cm, 氷板量小, ゲート全閉条件



(c) 吐口水深  $h_0 = 2$  cm, 目標波高  $\Delta H = 4$  cm, 氷板量大, ゲート全閉条件

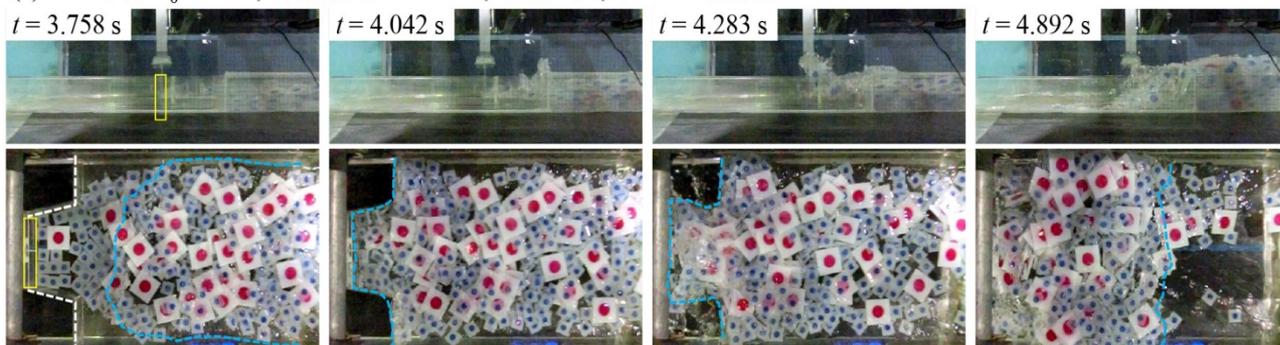


図-4.4 氷板群を伴う河川津波のゲートへの接近状況（段波タイプ；側方及び上方から撮影された流況）及び開水時との比較

吐口水深  $h_0 = 2$  cm, 目標波高  $\Delta H = 4$  cm, 氷板量大, ゲート全閉条件

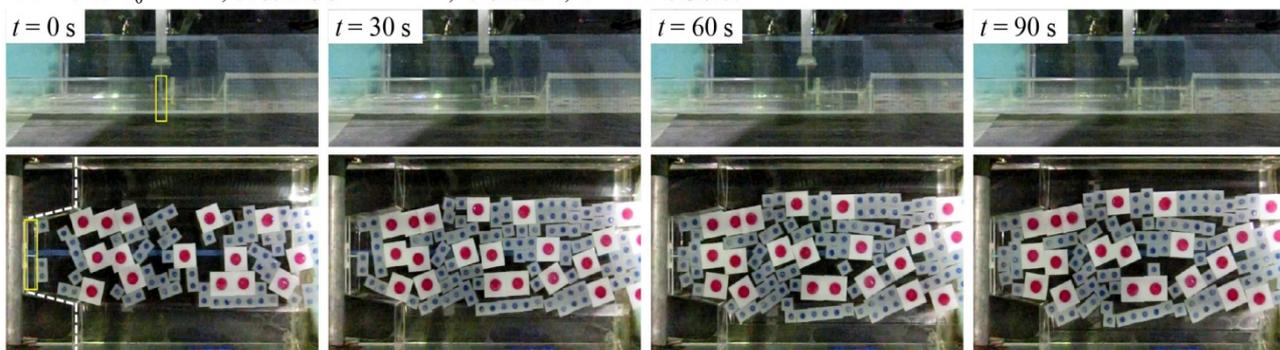


図-4.5 氷板群を伴う河川津波のゲートへの接近状況（水位上昇タイプ；側方及び上方から撮影された流況）

一方、図-4.7 に示した水位上昇タイプの津波では、いずれのケースもほぼ線形に水位が上昇している。(a)~(c)とも下流端部での給水開始後、概ね 15 秒後 PG3 地点に津波が到達し、水位上昇が開始している。図-4.6 のグラフでは段波や反射波の波形に振幅 1~2 cm 程度の細かな変動も見られたが、緩やかな水位上昇ではほとんど見られない。図-4.7 (c)のゲート開度 50%開放時ではわずかな変動が見られるが、これはポンプによる給水が一部安定しない時間帯が存在したためである。

以上示された結果から、本章の実験条件では、段波・水位上昇タイプいずれでも、氷板が存在しても波形を大きくは変えなかったものと考えられる。一定の条件下ではあるが、こうした現象は他の実験的研究でも指摘されている<sup>4)</sup>。これは例えば水の量に比較して氷の量が小さい場合や、波形のスケールに比較して氷が小さく、流れに追従しやすい条件の場合である。ところが、アイスジャムやパイルアップが顕著に発生する場合には波形・波力を大きく変化させる場合があること

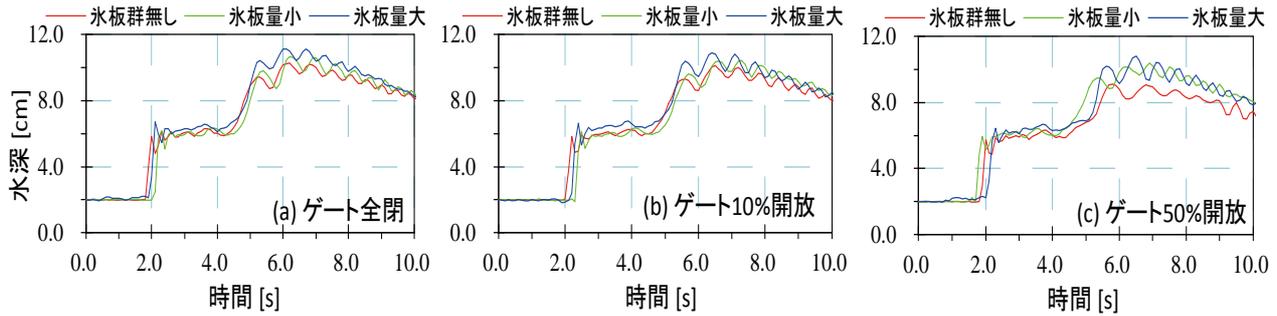


図-4.6 氷板群の有無と量による時系列水位の変化（段波タイプ；PG3 地点）

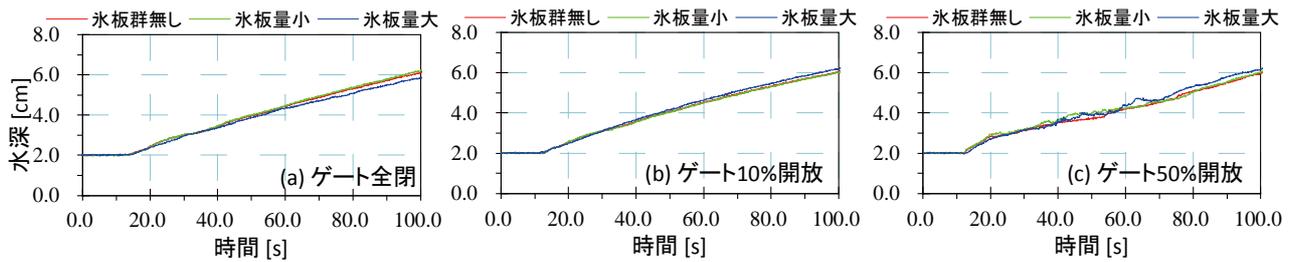


図-4.7 氷板群の有無と量による時系列水位の変化（水位上昇タイプ；PG3 地点）

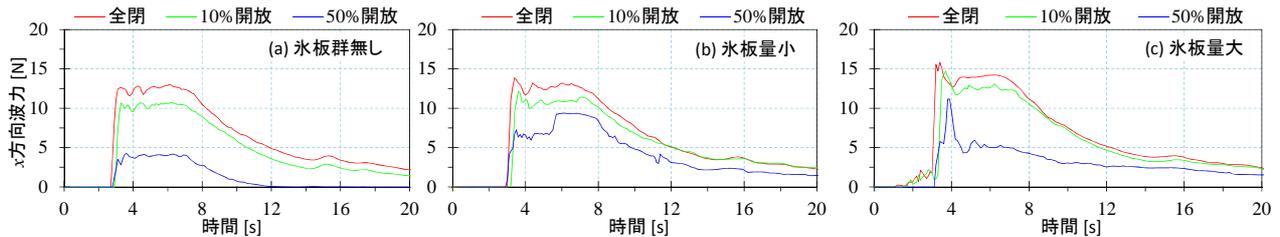


図-4.8 氷板群の有無とゲート開度を変化させた場合の波力の時系列変化（段波タイプ）

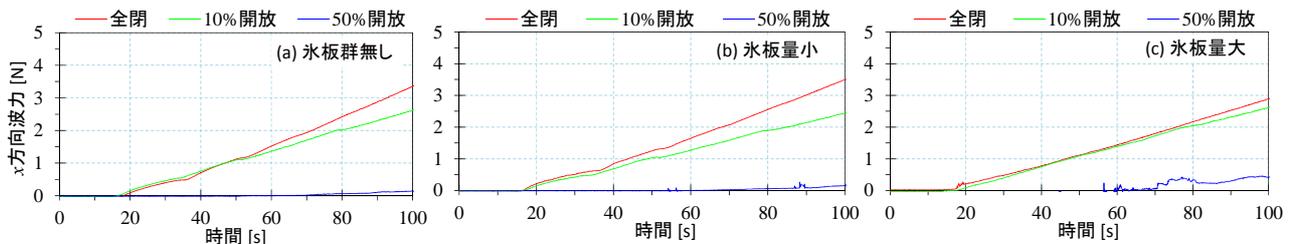


図-4.9 氷板群の有無とゲート開度を変化させた場合の波力の時系列変化（水位上昇タイプ）

17)も指摘しておく。川崎ら<sup>23)</sup>が指摘するように、氷の影響が支配的となる水理条件等について、発生確率の観点からの検討も含め、今後議論を深めていくことが望ましい。

図-4.8に示したのは、図-4.4に相当する条件(吐口初期水深 $h_0 = 2\text{ cm}$ 、 $\Delta H = 4\text{ cm}$ )で、なおかつゲート開度を変化させた場合の、津波衝突方向に対する波力の時系列変化を示したものである。左段(a)は氷板群無し、(b)は氷板量小、(c)は氷板量大の場合を示している。(a)~(c)を概括すると、全閉時が最も大きい波力で推移しており、ゲートを10%開放とすると1割程度、波力が小さくなる結果となった。一方で、50%開放(半開)までとすると大きく波力は低減していることが確認できる。(a)氷板群無しのケースでは全閉時最大13N程度であった波力は50%の開放時4N程度まで低減している。その一方で(b)と(c)のケースでは、波力低減効果は得られるものの、(b)氷板量小では全閉時14Nが半開時9Nへ、(c)全閉時15Nが半開時11Nである。

このようになる原因が2点考えられる。1つには、特にフロント部において、氷板群が混合した場合には流体力と固体衝突力が重畳し、トータルの波力を増大させた影響が存在し得ることである。もう1点としては、特に(b)と(c)のケースの50%開放時において不規則な波力変動となっている様子から類推できるように、ゲート下部に氷板群が潜り込み、津波の流れの阻害が発生し、結果として波力が増大するということである。このような作用力は他の津波漂流物に関する実験的検討でも数多く示されている<sup>4), 17), 23)</sup>。所謂アイスジャミングによる効果である。興味深いことに、本節の前半では氷板群量の大小に関わらず津波波形としては大きな変化はもたらされないことを指摘しておいたが、波力という観点からすると無視できない程波力の変化が現れている。冬期の河川津波対策を講ずるにあたって、仮に漂流物の影響を設計に考慮するとすれば、この点を加味した上で議論を進めていくことが望ましいと考えられる。

次に、水位上昇タイプの時系列的な波力変動を図-4.9に示した。結果として波力は図-4.7と同様の傾向でほぼ単調に増加する場合がほとんどで、ゲートが10%開放された場合は堤内への流入が発生する分、図中緑線のように全閉時より作用波力が小さく推移する。50%開放時には波力はほとんど作用しないが、氷板量大で50%開放時のみ、氷板との干渉によりわずかな波力が作用した。但し全閉時の静水圧に比較しても小さ

い波力である。以上の時系列変化は、前述の通り準静的な、静水圧に近い波力作用がもたらされたことを意味すると考えられる。

以上の結果をまとめると、まず河川津波と河川結氷の滞留が重畳した場合、氷板群の大量の輸送が生じる。その結果、開水時の場合に比較して津波の流況に若干の変化が見られたが波形そのものを大きくは変化させない。但し、氷板の閉塞現象などにより、波力を変化させる要因にはなり得ることが分かった。

更に本章では段波タイプと水位上昇タイプの2通りの造波を行ったが、これらはそれぞれ河口より上流へ遡上した津波と、河口にごく近い箇所で来襲する津波に相当する。水位上昇タイプの津波では、氷板群の存在があつた場合でも静水圧に近い波力となり、既存の設計法で対応できる可能性がある。しかし段波タイプの津波では固体衝突の影響、閉塞発生と流れの阻害の影響により、波力を増大させる可能性のあることが確認された。

数値解析的検討により、開水時にゲート開度を変化させることでゲートに作用する津波波力を低減させる効果が得られる可能性を示した<sup>16)</sup>が、本章の実験的検討により、氷板群が存在する津波衝突の場合では低減効果が抑えられ、危険側に作用することが確認できた。これも積雪寒冷地特有の留意事項と考えられる。

#### 4.3.まとめ

本研究では、未だ議論の途上である、冬期河川津波発生時の樋門操作方法について実験的な検討を行った。結氷の量や樋門の開度、そして津波波形を変化させた上で波力の変動の程度を明らかにした。その結果と前章の考察結果より、やはり冬期の樋門操作としては、閉扉操作を基本として堤内側を保護することを優先することが望ましい。これはただ津波逆流を防止するだけでなく、氷板の侵入による思わぬ津波外力の作用を未然に防ぐことも視野に入れてのことである。

但し今後の課題としては、遠地津波発生時に全閉とすると内水氾濫の危険性が高まることとなるため、一部開放が可能かどうか、本章の結果も含めて検討を行うこと、仮に一部開放した状態のゲートが津波衝突を受けた場合に、構造上耐えうるかの検討が必要になってくると思われる。また、大規模地震の発生後は樋門ゲート構造、その周辺地盤に被災が生じる可能性があり、堤内構造物全体としての保有耐力をも考慮した検討が必要となるであろう。いずれにせよ河川域の津波防災対策は議論の途上段階であり、防災・減災のため

の基礎検討や要素技術開発を継続していくことが肝要であると考えられる。

## 5. おわりに

本研究の実施によって、2011年の東日本大震災の被災事例調査、検討結果から、津波漂流物として結氷河川における氷板を位置づけることができた。さらに、氷板による影響評価から施設設計や管理方法への反映を目的に、結氷の存在による外力の変動及び、河川管理施設の操作法の考え方を明確化したことが挙げられる。

また、本研究では積雪寒冷地域の冬期の津波発生による沿岸防災対策<sup>24)</sup>に関する技術的な検討を国土交通省北海道開発局と共同で実施しており、引き続き支援を行っていく。ダム・堰施設設計基準(案)<sup>25)</sup>では、河川構造物の設計にあたり津波の影響を考慮することが定められ、その具体的な設計に反映させるため、本研究による技術的検討手法の活用等が望まれる。

**謝辞：**「3. 漂流物を伴う大規模河川津波の数値モデルと橋桁周辺流れ特性」における実験条件設定にあたっては北海道大学渡部靖憲准教授、北見工業大学吉川泰弘助教らにご助言を頂いた。また、本研究の一部はJSPS 科研費(課題番号26289148)の補助を受けた。

「4. 河川津波発生時の樋門操作法」について、国土交通省北海道開発局釧路開発建設部には2011年東北地方太平洋沖地震津波発生時の水位データ、既存の樋門諸元に関するデータを提供頂いた。また、本稿の取りまとめにあたり、釧路開発建設部治水課、釧路河川事務所による助言を参考とした。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 阿部孝章・吉川泰弘・平井康幸(2012): 北海道太平洋沿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、No.2、pp. I\_1436-I\_1440.
- 2) 阿部孝章・吉川泰弘・佐藤好茂・伊藤丹(2014): 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論文報告集、第70号、B-32.
- 3) 宇野勝哉・有川太郎(2013): 津波バリアを用いたコンテナ漂流物捕捉効果に関する実験的研究、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.69、No.2、pp. I\_921-I\_925.
- 4) 木岡信治・森昌也・遠藤強・竹内貴弘・渡部靖憲(2013): 海氷群を伴った津波の市街地氾濫に関する一考察、土木学会論文集B3(海洋開発)、Vol.69、No.2、pp. I\_509-I\_514.
- 5) 江面嘉之・庄司学・平木雄(2012): 2011年東北地方太

- 平洋沖地震津波で落橋した橋桁に対する津波波圧の推定、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.68、No.2、pp. I\_411-I\_415.
- 6) 中村友昭・水谷法美・Xingyue REN(2013): 橋桁へ作用する津波力と桁の移動に与える津波力の影響に関する数値解析、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.69、No.4、pp. I\_20-I\_30.
- 7) 河合孝治・原文宏・蒔田俊輔・正木智・佐伯浩(1997): アイスジャムの発生条件に関する実験的研究、第13回寒地技術シンポジウム、pp. 386-391.
- 8) (独法)寒地土木研究所(2011): 平成23年東北地方太平洋沖地震による北海道沿岸の港湾・漁港等被害調査速報、pp. 16-23.
- 9) 釧路市(2013): 釧路市津波避難計画、平成25年8月7日、pp. 15-17.
- 10) 庄司学・森洋一郎(2006): 桁橋の津波被害再現実験、海岸工学論文集、第53巻、pp. 801-805.
- 11) 佐藤好茂・阿部孝章・吉川泰弘・伊藤丹(2014): 河川津波による漂流氷板の閉塞現象に関する水理実験、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.70、No.4、pp. I\_733-I\_738.
- 12) 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.
- 13) 越塚誠一、粒子法、計算力学レクチャーシリーズ5、丸善、p.144, 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) 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.
- 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.
- 17) 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. I\_851-I\_855、2014.
- 18) Koshizuka, S., Nobe, A., Oka, Y.: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 26, pp.751-769, 1998.
- 19) Gotoh, H. and Sakai, T., Key issues in the particle method for computation of wave breaking, Coastal Engineering, Vol.53, pp.171-179, 2006.
- 20) 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.

- 21) 安田浩保、渡邊康玄、藤間功司、2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川溯上、No.768/II-68、pp.209-218、2004.
- 22) Watanabe, Y., Mitobe, Y., Saruwatari, A., Yamada, T. and Niida, Y., Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250002, 2012.
- 23) 川崎佑磨、伊津野和行、生島直輝、山中拓也、四井早紀、津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究、土木学会論文A1(構造・地震工学)、Vol.70(1)、pp.129-136、2014.
- 24) 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、平成25年3月、2013.
- 25) 国土交通省、ダム・堰施設設計基準(案)、平成28年3月.

# PREVENTIVE AND MITIGATIVE MEASURES AGAINST TSUNAMI HAZARDS IN ICE-COVERED RIVERS

Research Period : FY2012-2016

Research Team : River Engineering Research team

Author : FUNAKI Jungo, YABE Hiroki, KAKINUMA Takaharu

MAEDA Shunichi, KURODA Yasutaka, OKABE Hirokazu, ABE Takaaki,

SATO Yoshishige, WATANABE Masahiro, TOYABE Toshihito

## Abstract :

This report presents the progress of the research project for preventive and mitigative measures against tsunami hazards in ice-covered rivers.

First, characteristics of tsunami wave force containing ice floes and the impact of it against structures are investigated through hydraulic model tests reproducing behaviors of ice carried by tsunami run-up. It is confirmed that the presence of ice floes can cause an accidental jamming and an increase in the wave force. Then a practical model for simulating interactions of tsunami with ice floes is developed and applied to the real-scale simulation of tsunami wave intrusion. And an experimental investigation for the establishment of river control facility operation against tsunami considering the existence of ice floes run-up in rivers is conducted.

Key words : Ice-covered river, River tsunami, Ice floes, River control facility operation