

漂流物を伴う大規模河川津波の橋桁周辺の流れ特性に 関する数値解析的検討

阿部孝章¹・矢部浩規¹

¹正会員 工博 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）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波において、河川を遡上した津波により橋梁をはじめとした河川構造物に大きな被害が生じた¹⁾。これを受け河川構造物の設計にあたり津波等の影響を考慮することが基準内に明記されることとなったが、津波に対する設計法は未だ充分に確立されていないのが現状である。

さて、北海道のような積雪寒冷地域においては、12月から4月の期間にかけ多くの河川で結氷を生じる。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ることが、現地調査などから明らかにされてきた²⁾（写真-1）。津波の作用力のみならず、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のが現状である。そこで本研究では、合理的設計法の確立を最終的な目標とし、氷のような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。



写真-1 北海道鶴川（むかわ）における氷板痕跡（2011年3月13日撮影）

実験における水理量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こととした。

2. 手法

水理実験³⁾には図-1に示す簡易可傾斜水路（寒地土木研究所所有）を使用した。延長15 m、水路幅30 cmであり、下流部の $x = 0$ m地点にダムブレイク造波用ゲート、その直上流に排水口を設置しており、不等流場を遡上する河川津波を模擬することが可能である。河道諸元については北海道内の1級河川を想定し、模型縮尺は1/100～1/50程度、初期水深を3 cm、ダム部水深を25 cmとし、流入流量は北海道の直轄河川の冬期流量を参考に0.1 L/sとした。水路中央部にはボックスガーター橋、またはトラス橋の模型（図-2）を設置し、その下流部2 m区間に氷板模型を設置した。模型サイズは縦横3 cmの正方形、厚さ5 mmである。河道内で密に滞留する氷板群を模擬しつつ、実験時は流下しないようにゲート開放時までは櫛状の器具によって下流側で位置を固定した。

水路内の縦断的な水位変化を計測するため図-1の5地点（PG1～PG5）にピエゾを設置し、接続した導水管を圧力センサATM.1ST（STS Sensors, スイス）に接続し水深の計測を行った。氷の無いケースを比較の基準とし、ボックスガーター橋の場合、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³⁾にて述べている。

数値解析にあたり本稿では、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⁴⁾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

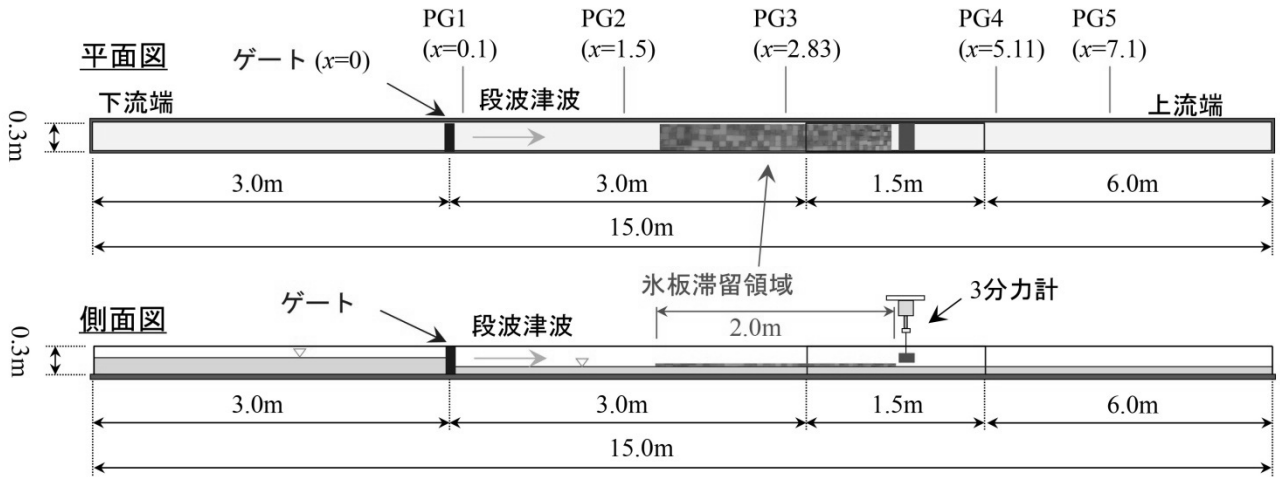


図-1 模型水路の諸元及び水位計測点との位置関係

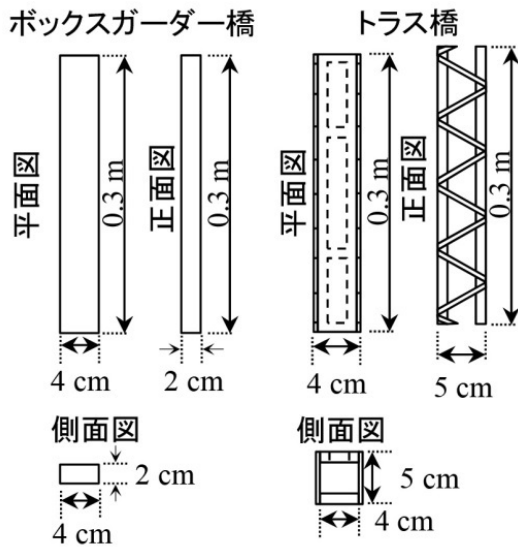


図-2 二種類の橋桁模型の諸元

方程式：

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

であり、次式のような独自の粒子間相互作用モデルを用いて圧力勾配項、粘性項の離散化が行われる。

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

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

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。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⁵⁾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⁴⁾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 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。

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

最後に、剛体粒子の速度ベクトルを次式のように

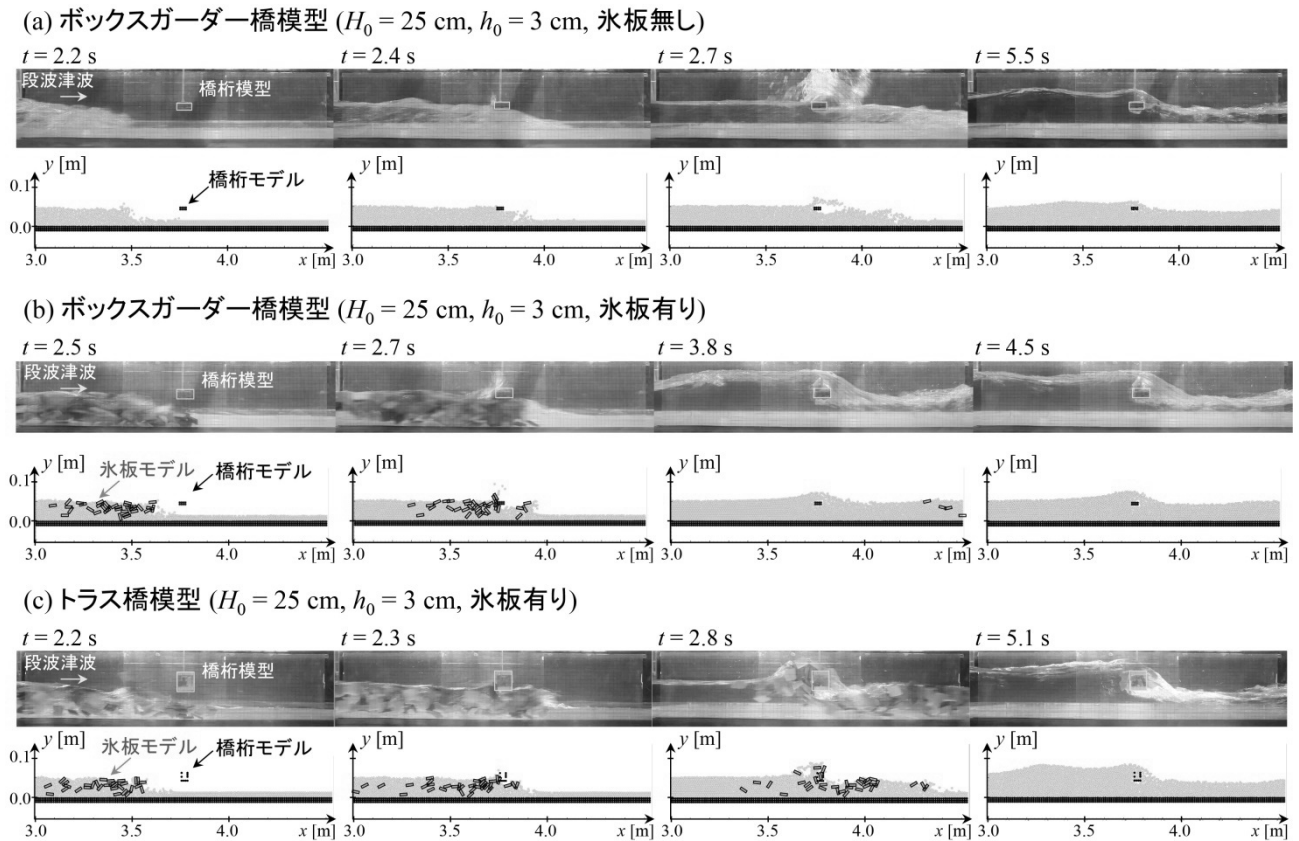


図-4 実験における流況と数値解析結果との比較

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⁴⁾により考案された手法であり，Gotohら⁶⁾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⁷⁾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³⁾や，波力の継続時間に着目した議論を行ってきた．本稿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．尚，実験模型や現象は3次元であるが，鉛直2次元的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

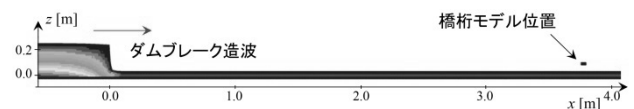


図-3 数値解析モデルにおける初期粒子配置

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．

3. 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-4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)ボックスガーダー橋模型，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-4 (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 ($t=2.7\text{ s}$)、その後橋桁の上面・下面に分岐し遡上が発生している ($t=5.5\text{ s}$)。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 $d_0 = 1\text{ cm}$ 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-4 (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 $t=2.5\text{ s}$ 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 $t=4.5\text{ s}$ 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-4 (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 ($t=2.2\text{ s}$)。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 ($t=2.8\text{ s}$)。段波フロント通過後は一部の氷板模型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 $t=2.8\text{ s}$ 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 $t=5.1\text{ s}$ 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-5である。図-5上段(a1), (a2), 中段(b1), (b2)がボックスゲーター橋模型の条件, (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-4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、 $t=7\text{ s}$ 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-5 (b1)及び(b2)はボックスゲータ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, $t=6\text{ s}$ 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、 $t=8\text{ s}$ 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-5 (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-6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-6 (a)のボックスゲータ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を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、

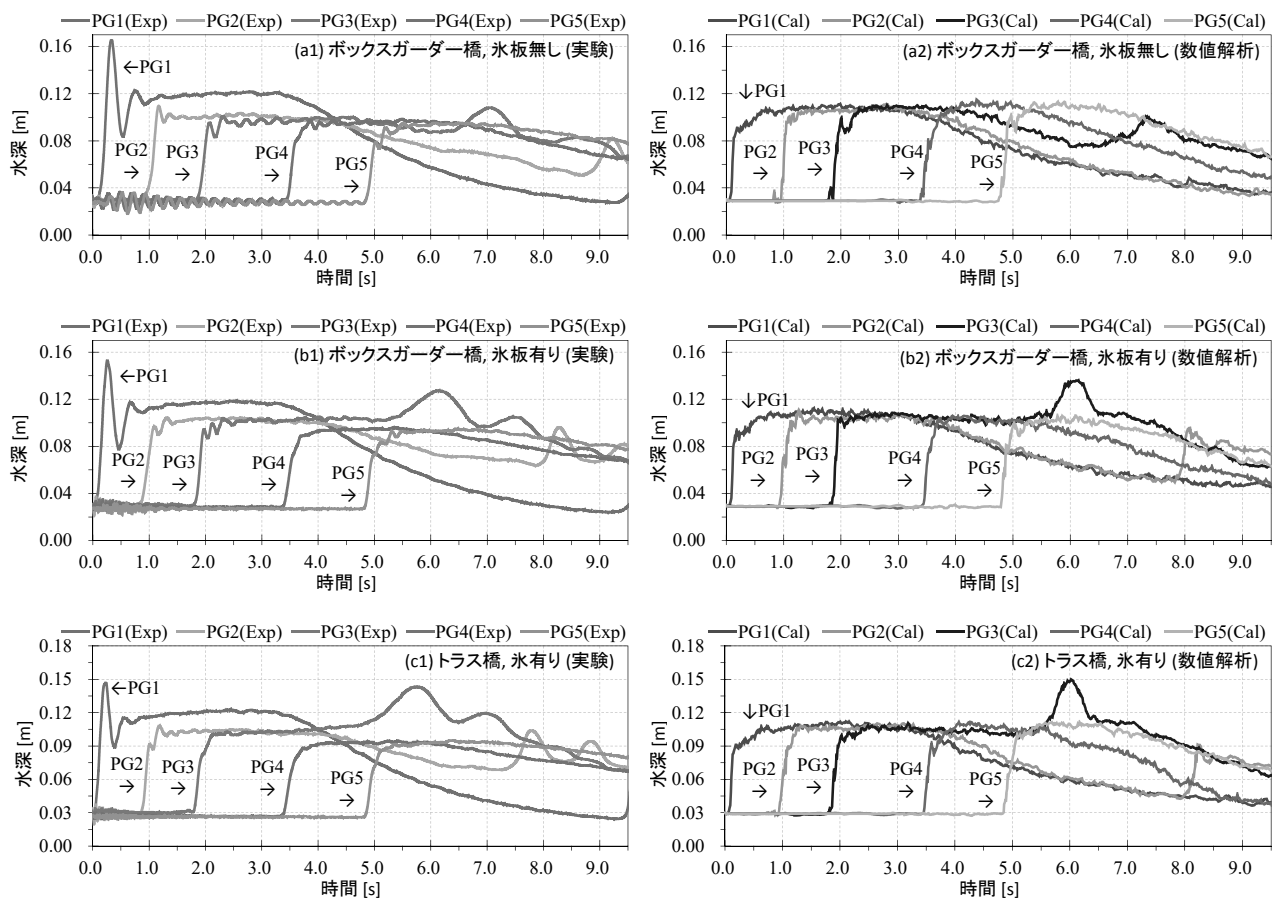


図-5 実験における流況と数値解析結果との比較

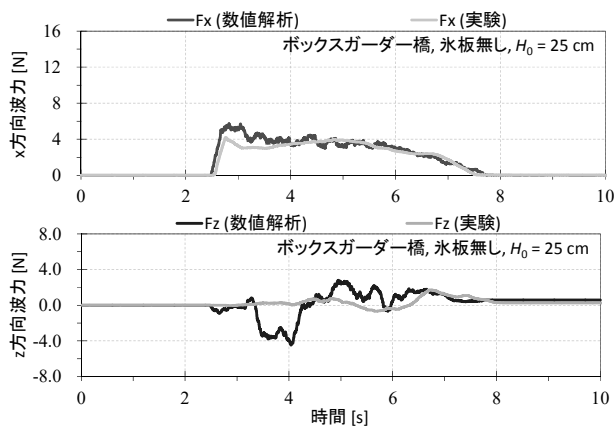
数値解析結果では充分再現されていない。これは z 方向の波力変動については橋桁上面と橋桁下面で発生している分岐流の変動により発生する力が、解析上うまく現れなかったためと考えられた。

図-6 (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-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障害が発生し、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。

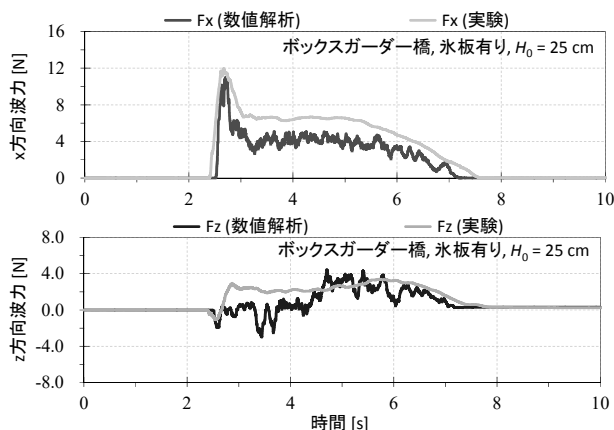
次に、図-6 (c)のトラス橋の場合であるが、全体的な傾向としては波力の時間変化は x 方向、 z 方向ともに類似している。数値解析結果では高周波の振動成分が伴っている。前述の通り、図-4における流況

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。

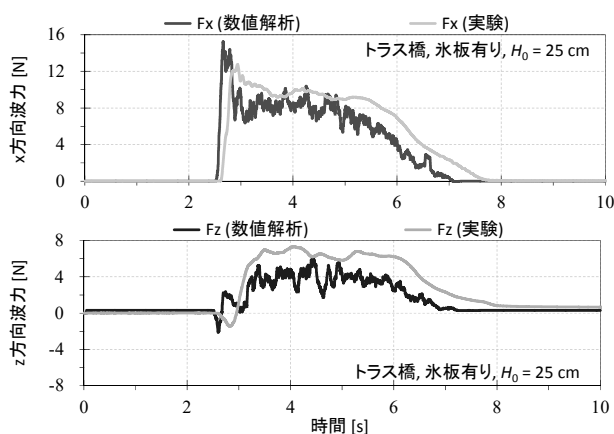
本研究で構築した数値モデルは、波力の時間的な変化や、波力作用時間の予測に一定の信頼が持てると言える。特に x 方向波力については、いずれのケースとも概ね良好な再現結果を得ることができた。その一方で、氷の細かな挙動や、ピーク波力、氷板付着後の継続波力の正確な予測はできていない。これは数値解析モデルの解像度を上げ、例えば $d_0 = 5 \text{ mm}$ とするなどの対処で一部改善する性質のものと考えられる。その上で、より再現性を向上するには、氷と、橋桁の固体間相互作用までも、モデル上考慮する必要があると思われる。



(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-6 各ケースにおける時系列の波力変化

4. まとめ及び今後の課題

本稿では、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。本稿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。

今後は、流れ場内での各氷板個別の挙動や、氷板模型と橋桁模型の固体間相互作用をも加味した波力評価に関する種々の検討を行っていき、漂流物の存在がもたらす河川津波波力の変動特性についてより詳細な検討を加えていく予定である。

謝辞：本稿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。本稿におけるデータ整理には北海道開発局佐藤好茂氏、寒地土木研究所鳥谷寿人氏にご協力頂いた。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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：東北地方太平洋沖地震による橋梁の被災調査概要報告，35 p., URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/10312kyouryou.pdf>, 2011 (参照日2016年6月20日)。
- 2) 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, No.2, pp.I_1436-I_1440, 2012。
- 3) 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。
- 4) 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, 751-769, 1998。
- 5) 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。
- 6) Gotoh, H. and Sakai, T.: Key issues in the particle method for computation of wave breaking, Coastal Engineering, Vol.53, pp.171-179, 2006。
- 7) 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。