

# 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

## Experimental Study of Characteristics of Wave Force in Tsunamis that Contain Ice Sheets Against Bridge Beam

佐藤好茂<sup>1</sup>・阿部孝章<sup>2</sup>・吉川泰弘<sup>3</sup>・伊藤 丹<sup>4</sup>

Yoshishige SATOU, Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA and Akashi ITOU

In the event of a winter tsunami, there is the concern that floating ice sheets originating from sea ice might impact structures if the ice is carried by tsunami run-up. Accordingly, we conducted hydraulic model tests that reproduced the vertical and longitudinal behaviors of floating ice sheets carried by tsunami run-up. We clarified the characteristics of wave force for tsunamis that contain sea ice sheets and the impact of such tsunamis against bridge girders. In this test we reproduced a flow that contained solid substances and liquid substances. We confirmed that the wave force of a tsunami whose ice cover rate is 80% is about 2.5 times the wave force of a tsunami that contains no ice. We succeeded in showing the wave force characteristics of tsunami waves containing water and ice running up rivers in winter for bridge girder structures.

### 1. はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震時には大規模な津波が襲来し、未曾有の被害をもたらした。この時、太平洋沿岸地域では、津波の影響を受け橋桁の流出や漂流物による橋梁の損傷が発生した(国土技術政策総合研究所・(独法)土木研究所, 2011)。北海道では、複数河川で津波遡上による河水の破壊が確認され(阿部ら, 2012)、写真-1のように樋門ゲート前面や河岸、高水敷に堆積した痕跡が多数残されていた。津波発生後、北海道において実施された現地調査(寒地土木研究所, 2011)では、コンテナや車両の漂流に加えて、流氷が岸壁に遡上するという寒冷地域特有の現象が確認され、漂流物化した氷板が構造物等に衝突する被害が懸念された。

このように今次津波により、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(2013)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(2013)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(2012)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



写真-1 北海道の河川における津波遡上痕跡(2011.3.14撮影)

波圧の推定や、中村ら(2013)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(1997)による定着氷盤の水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、水理実験による浮水に対する安定性の解析(Ambtmanら, 2011)、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(佐藤ら, 2014)。

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(2014)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はいるものの、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(釧路市, 2013)、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。

1 正会員	(独法)土木研究所 寒地土木研究所 道東支所 研究員
2 正会員 修(農)	(独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 研究員
3 正会員 博(工)	北見工業大学助教 社会環境工学科
4 正会員 修(工)	国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部 部長

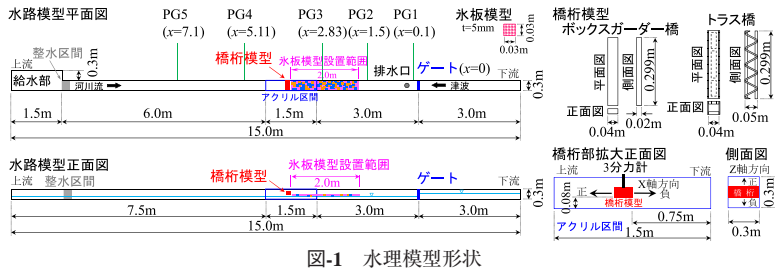


図-1 水理模型形状

このため本研究では、津波遡上時における漂流水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、水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. 研究手法

(1) 水理実験概要

図-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LMC-3502A-100N（日章電気（株））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-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、津波遡上時の水板混合状況や橋桁に与えるインパクト、水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 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。

水板模型の材質は、河水の比重（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（2012）の測定結果を参考に、辺長 $L=0.03m$ 、水板厚 $t=5mm$ とした。図-2に示した結氷カバー率は、水板模型設置範囲 $A=2.0m \times 0.3m$ 内における水板模型 $A_1=0.03m \times 0.03m$ が占める面積の割合を示し、20%は水板模型を134枚、80%は水板模型を534枚使用して、水板模型が重ならないよう水面に浮かべて設置している。水板模型の色は、津波フロント到達時や水板と津波が混合した際、個々の水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。



図-2 結氷カバー率(左:20%, 右:80%)

表-1 実験条件(ボックスガーター橋, 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 $h$ [cm]	貯水池高 $H$ [cm]	河川流量 $Q$ [L/s]	初期水深 $h$ [cm]	貯水池高 $H$ [cm]
0.1	3	17	0.2	3	17
		21			21
		25			25
	6	17		6	17
		21			21
		25			25

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ATM.1ST（スイス、STS社）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、ボックスガータ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-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。

(2) 水板混合波力の計測

水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-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ター橋とトラス橋で比較し、橋桁構造の違いに

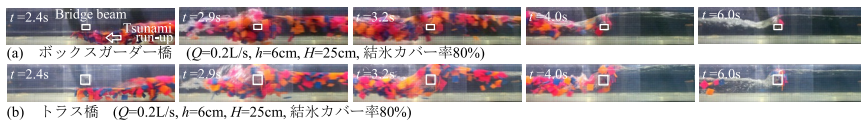


図-3 実験状況。左から順に津波フロント( $t=2.4$ s)、橋桁衝突から0.3s後( $t=2.9$ s)、橋桁衝突から0.6s後( $t=3.2$ s)、橋桁衝突後( $t=4.0$ s、 $t=6.0$ s)の変化。(写真左上の数值はゲート開放時を0sとした時の経過を示す)

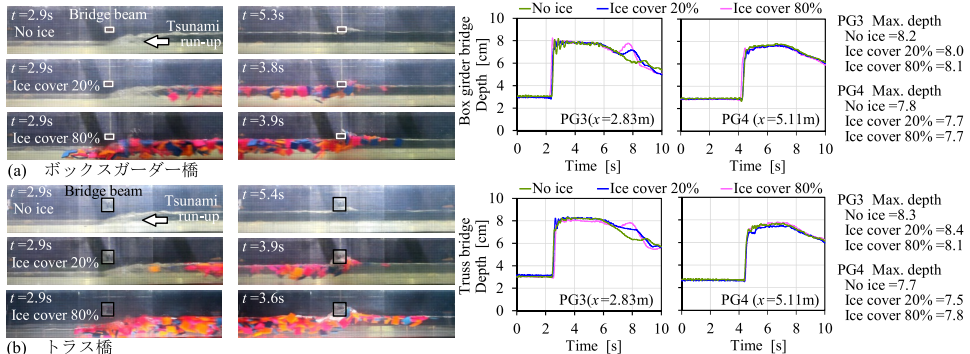


図-4 実験状況( $Q=0.1L/s$ ,  $h=3$ cm,  $H=17$ cm)。(a)、(b)共に写真左は橋桁位置への津波フロント到達時、写真右は橋桁部の最大水位発生状況、写真左上の数值はゲート開放時を0sとした時の経過を示す。グラフの横軸はゲート開放時を0sとした時の経過を示す)

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。

### 3. 結果と考察

#### (1) 実験状況

実験結果については、特徴的なケースのみに焦点を絞り述べることにする。図-3に示した実験時の状況について、ゲート開放後 $t=2.4$ s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(河合ら, 1997)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( $t=2.6$ s)、衝突から0.3s後となる $t=2.9$ s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 $t=3.2$ s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。 $t=4.0$ sには殆どの氷板が津波と共に遡上したが、 $t=6.0$ s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、 $t=3.2$ s、 $4.0$ s、 $6.0$ s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べ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 $h=6$ cmはUnder turningの発生が確認されていたが、初期水深 $h=3$ cmはHalf turningやSlidingが大半を占めていた。これは、氷板模型寸法が $L=3$ cmのため、初期水深 $h=3$ cm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-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-4右の水深には、ダンプレー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-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-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0.1~0.4cm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0.5~1.0m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。

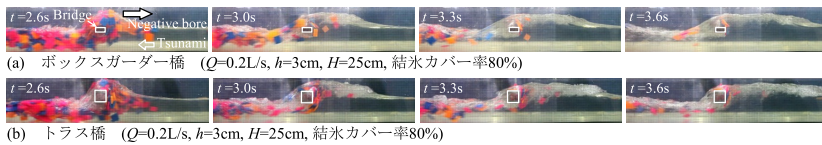


図-5 負の段波発生状況(写真左上の数値は、ゲート開放時を0sとした時の経過を示す)

(2) 氷板混合津波による負の段波

図-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-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-7 (a) は初期水深 $h = 3cm$ 、図-8 (a) は初期水深 $h = 6cm$ の状況を示している。図-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、ボックスガダー橋は結氷カバー率20%が1.1cm、80%が1.4cm、図-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-8 (a) では、ボックスガダー橋は20%が0.2cm、80%が1.5cm、図-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-6に示した $h = 3cm$ 、 $H = 17cm$ は氷板が橋桁の下部を通過し、 $h = 6cm$ 、 $H = 25cm$ のボックスガダー橋では氷板が橋桁上部を通過し捕捉される枚数は少なく、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

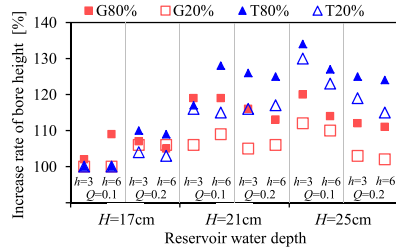


図-6 PG3における津波遡上時の最大波高に対する負の段波高上昇率(凡例のGはボックスガダー橋、Tはトラス橋、%は結氷カバー率を示す)

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-7 (b) に示したX軸の最大値は、ボックスガダ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-8 (b) に示したG (80%) 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%共にボックスガダ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、ボックスガダ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-7 (b) に示したトラス橋の最大値はボックスガダ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ダー橋が162.2g、トラス橋は644.3gと異なることが挙げられた。庄司ら (2006) 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 $h = 6cm$ に比べ $h = 3cm$ 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とし唆された。

図-7 (b) 及び図-8 (b) のX軸は、ゲート開放後 $t = 3.0s$ から波力の収束となる $t = 8.0s$ 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、 $t = 5.0s$ 付近

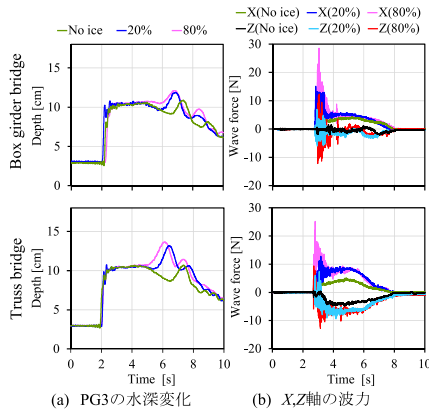


図-7  $Q=0.2L/s$ ,  $h=3\text{cm}$ ,  $H=25\text{cm}$ の計測結果  
(凡例の%は結水カバー率を示す)

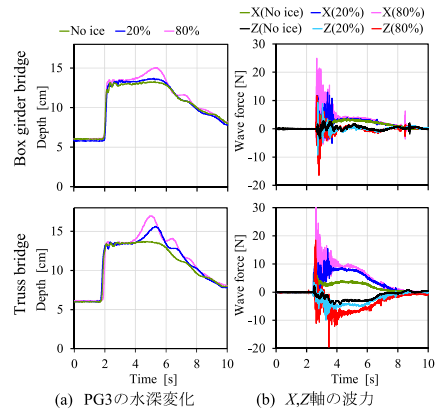


図-8  $Q=0.2L/s$ ,  $h=6\text{cm}$ ,  $H=25\text{cm}$ の計測結果  
(凡例の%は結水カバー率を示す)

の値で比較すると、図-7 (b) は結水カバー率20%、80%共に約1.6倍、図-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、氷無しのケースと比較すると、トラス橋で図-7 (b) は1.9~2.0倍、図-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。

#### 4. まとめ

結水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。

結水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、結水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、本稿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。

本研究は、十分に解明されていなかった氷と水の混合流を再現したものであり、今後、津波遡上区間の橋梁設計に活用されることが期待できる。また、今回のような水位計測地点に現れない局所的な現象を解明することで、例えば水位観測所とは別の場所に存在する橋梁で起

こりうる現象が把握可能となり、より現実に即した避難経路選定等の防災対策に繋がることを期待される。

謝辞：本研究は、JSPS科研費 24360197, 26870023の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 阿部孝章・吉川泰弘・平井康幸 (2012)：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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- (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.
- 木岡信治・森 昌也・遠藤 強・竹内貴弘・渡部靖憲 (2013)：海水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.
- 釧路市 (2013)：釧路市津波避難計画，平成25年8月7日，pp. 15-17.
- 国土技術政策総合研究所・(独法) 土木研究所 (2011)：東北地方太平洋沖地震による橋梁の被害調査概要報告，35p.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ambtman, D.K., P. Steffler and F. Hicks (2011)：Analysis of the Stability of Floating Ice Blocks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.137, No.4, pp. 412-422.