

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

PRESSURE PROPAGATION VELOCITY AND PRESSURE ATTENUATION CHARACTERISTIC OF TSUNAMI IN ICE-COVERED RIVER

吉川泰弘¹・渡邊康玄²・阿部孝章³・大久保敦⁴

Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuharu WATANABE, Takaaki ABE, Atsushi OKUBO

¹ 正会員 博(工) 北見工業大学助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

² 正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³ 正会員 修(農) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

⁴ 非会員 株式会社 構研エンジニアリング 橋梁部 (〒065-8510 北海道札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1 番 1 号)

This study aimed to clarify the pressure propagation velocity and pressure attenuation characteristic of tsunami in ice-covered river. We carried out a hydraulics experiment for tsunami in ice-covered river. This research clarified the following things. The pressure propagation velocity of a fix-ice case is rapid as compared with an open-water case and free-ice case. This velocity of free-ice case becomes later than open-water case. In free-ice case, the pressure propagation velocity becomes late when ice-size becomes smaller. The pressure attenuation of a fix-ice case is largest. If ice-size becomes small, pressure will not attenuate. When ice-size is small, the dispersion wave train of the same phenomenon as open-water case happens. On the other hand, When ice-size is big, It stops that dispersion wave train happens.

Key Words : *Tsunami, Ice-covered river, Pressure, Hokkaido*

1. はじめに

2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震による津波は、結氷した北海道の河川へと遡上した。現地調査結果^{1),2)}から、河川結氷時の河川津波現象は、河水を破壊および輸送し、河水を漂流物化させるため、危険側に助長することが明らかとなった。具体的には、十勝川等では樋門周辺への氷塊の集積、鶴川では河水堆積に伴うアイスジャムの発生、図-1 に示す尾幌川では圧力解放による河水の移動が起こっている。今後、巨大な津波が河川を遡上する場合には、河水の衝突による治水施設の被災や流水および河水の氾濫等の災害が想定される。このような現状を受けて、国土交通省北海道開発局が設置した雪氷期の津波沿岸防災対策検討会³⁾では、治水施設への河水の衝突、アイスジャムによる水位上昇、河水の市街地への侵入・堆積という現象について、早急に解明すべき現象としている。河川結氷時における河川津波の防災・減災対策を実施する上で、これらの現象の解明が急務となっている。

河川津波による氷板輸送に関する既往研究^{4),5)}では、氷板輸送速度は津波の伝搬速度と同程度まで加速され

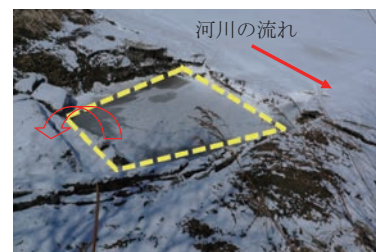


図-1 尾幌川支川合流部(河口から 1.3km)の河水の移動することや、氷板サイズが小さい場合は津波の波形に影響を与えないこと、粒子法による数値計算により氷板輸送現象を再現可能であることなど有益な知見が得られている。なお、氷板とは河水を硬い氷板と軟らかい晶氷に区分したものである。河川津波による氷板の衝突力については、東北地方太平洋沖地震の津波における鶴川の現地調査および解析から、衝突力は最大で 100kN から 300kN と推定されている⁶⁾。河川津波に伴うアイスジャム現象については、現地観測および数値計算から現象を解明している⁷⁾。一方で、圧力解放による河水の移動については、完全結氷した河水の下を津波が伝搬し、河水が脆弱な箇所では圧力解放が生じ、河水が移動したと考えられるが、河川結氷時の河川津波の圧力の挙動は、十分には解明されていない。

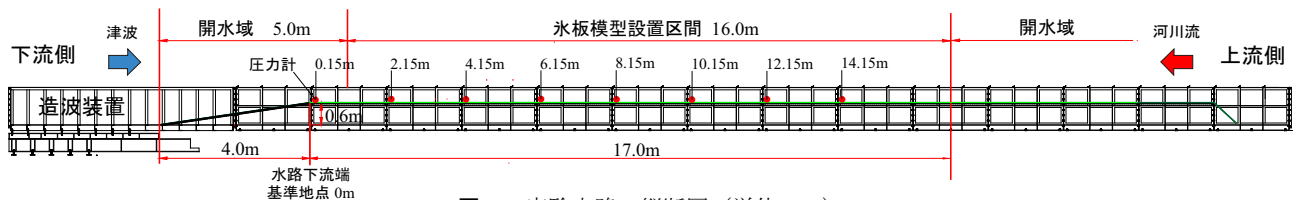


図-2 実験水路の縦断面図 (単位: m)

本研究は、河川結氷時に津波の遡上が確認⁸⁾された尾幌川を対象とした水理実験を実施し、河川結氷時の河川津波の防災・減災対策を考案する際に重要な基礎的知見となる圧力伝搬速度と圧力減衰について検討を行った。

2. 河川結氷時の河川津波の水理実験

(1) 実験水路

実験水路は、図-2 に示す全長 34m、水路幅 0.5m、河床勾配 1/1000 の矩形断面水路を用いた。図-2 において、実験水路右側 (上流側) に給水装置、実験水路左側 (下流側) のプール部にコンピューター制御のパドル型造波装置が設置されている。このため、上流側から水を流し、下流側から津波を発生させることにより、上流側からの水の流れに対して津波を遡上させることが可能である。津波は、下流側のプール部に設置されている造波板を、1.476m の距離を 10 秒で上流側へと移動させることにより発生させた。圧力の測定地点は、図-2 において、水路下流端から 0.15m、2.15m、4.15m、6.15m、8.15m、10.15m、12.15m、14.15m の計 8 地点とした。圧力の測定方法は、実験水路の右側壁の水路底面から 1.5cm の位置に穴を開けてピエゾ管を設置し、ピエゾ管と圧力センサー (ATM.1ST 型圧力計発信器, STS Sensor Technik Sirnach AG) を導水管で接続し、圧力センサーからの電圧は、データーロガー (NR-600 スタンドアロン計測ユニット, 株式会社キーエンス) を介して値を得た。電圧と圧力の関係式を事前に導くことにより、0.01 秒毎の圧力を測定した。氷板模型の材料は、実際の河氷の比重 (0.92) と同等であるポリプロピレンとした。氷板模型の設置区間は、図-2 の水路下流端から 1m から 17m の計 16m の区間とした。

(2) 実験条件

波と氷の干渉に関する既往研究^{9),10)}では、氷板下での波速は、氷板の弾性率、氷板の厚さ、周期に依存し、氷板下での波高は、氷板が厚く周期が短いほど減衰することを明らかにしており有益な知見が得られている。一方、東北地方太平洋沖地震の津波によって破壊された河氷の写真の画像解析¹¹⁾から、氷板のサイズは、鶴川では、3m から 6m で大きいものでは 30m であり、均

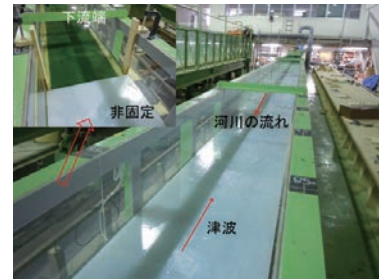


図-3 浮遊氷板実験の氷板模型設置状況

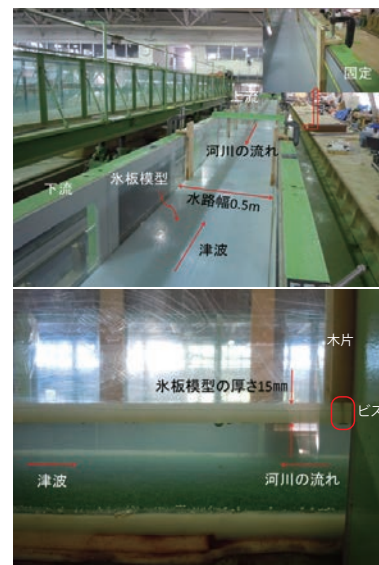


図-4 固定氷板実験の氷板模型設置状況

一ではないことが明らかとなっている。また、先行研究¹²⁾である河川結氷時の河川津波における水理実験では、完全結氷時の圧力伝搬速度は、開水時の 3.7 倍から 6.5 倍になるとの重要な知見が得られているが、氷板のサイズは 0.8m に固定した実験となっている。氷板のサイズが河川津波に与える影響を明らかにする必要がある。本実験では、氷板の厚さと周期は固定し、氷板のサイズおよび波高を変化させる実験条件とした。

対象河川は、北海道東部に位置する厚岸湾に注ぐ尾幌川とした。水路模型の縮尺は、実験水路の設備を踏まえて 1/20 とした。現地の河川流量は、現地の値として川幅 30m、水深 2m、流速 0.5m/s の値を用いて、 $30\text{m}^3/\text{s}$ とした。実験の河川流量は、15.8L/s となる。一方、水路幅は 1.5m の幅が必要となるが、本実験水路の幅は 0.5m である。現地における河川河口部は直線であり横断方向の流況変化は小さいと仮定して、横断方向に関しては抽出模型として考えた。このため、実験の河川流量は 5.6L/s となり、全ケースで固定して与えた。津

波の条件は、河川結氷時の河川津波に含まれる水理現象を少なくするために、砕波が発生しない条件となる波高と周期を試行錯誤により検討した。その結果、半波長の周期を 10 秒に固定し、波高は 1cm, 2cm, 3cm の 3 ケースとした。なお、開水時において、波高 1cm と 2cm は砕波はしなかったが、波高 3cm では水路下流端から 11m 付近で砕波している。津波発生前の水深は、水路下流端から 0.15m 地点で水深 10.0cm, 水路下流端から 14.15m 地点で水深 8.6cm である。

氷板条件は、以下の 6 ケースである。河水が水面に存在しない「開水」の 1 ケース。河水が水面に浮遊して水位変動に追従する「浮遊氷板」のケース、「浮遊氷板」のケースは、氷板の厚さ 1.5cm, 幅 49.4cm は固定し、長さを 0.25m, 0.50m, 1.0cm, 2.0cm として、図-2 の設置区間 16m に複数設置した 4 ケース。設置枚数は、氷板の長さ 0.25m で 64 枚, 2.0m で 8 枚である。図-3 は「浮遊氷板」の実験状況を示している。下流側では、氷板が流下するのを木片により防いだ。河水が河岸に接地して水位変動に追従しない「固定氷板」の 1 ケース、「固定氷板」の氷板サイズは厚さ 1.5cm, 幅 49.4cm, 長さ 2.0m とし、図-2 の設置区間 16m に 8 枚の氷板を設置した。図-4 は「固定氷板」の実験状況を示している。氷板の固定方法は、長さ 2m の氷板 1 枚毎に氷板と木片をビスで固定し、木片と実験水路を万力で固定した。なお、氷板サイズの幅は、水路側壁の影響を除くため、水路幅 50.0cm に対して 0.6cm 小さくした。

実験条件は、3 ケース (水理条件) × 6 ケース (氷板条件) の計 18 ケースである。

3. 水理実験結果

水路縦断方向の圧力変化、圧力伝搬速度、圧力減衰について検討した。なお、圧力伝搬速度、圧力減衰の検討では、信頼性を高めるため、1 ケースにつき 2 回の実験を実施しており、検討ではその平均値を用いている。

(1) 圧力変化

造波開始からの水路縦断方向の圧力変化について、波高 1cm を図-5、波高 2cm を図-6、波高 3cm を図-7 に示す。各地点で津波発生前の水深が異なるため初期の圧力が異なる。津波だけの影響を抽出するため、図-5,6,7 の縦軸の圧力変化の値は、各地点の圧力から津波発生前の圧力を引いた値とした。また、圧力の値は 0.01 秒毎に取得しているが、値のばらつきが大きいため、±0.02 秒の計 0.04 秒の範囲で平均した値を図に示している。

図-5,6,7 より、波高が大きいくほど圧力変化が大きく、各波高の「開水」ケースの 8.15m 地点で、分散波列が生じているのが分かる。「浮遊氷板」ケースの分散波列

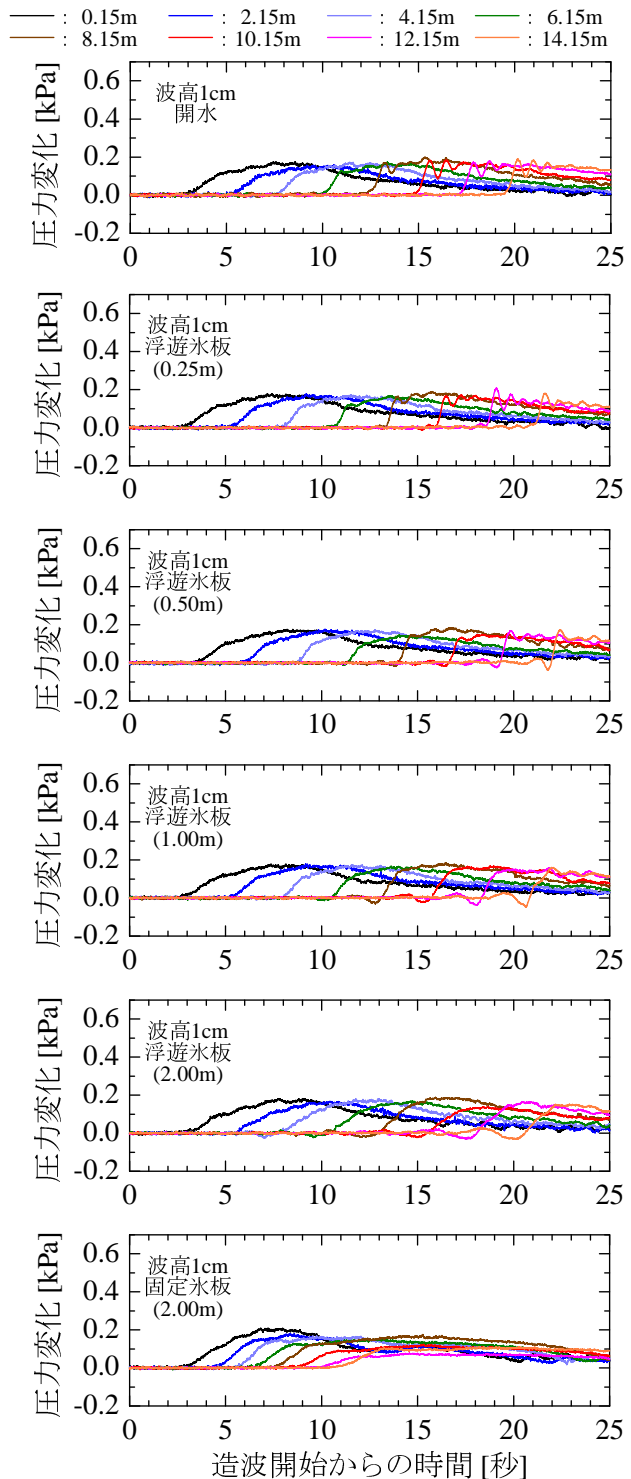


図-5 水路縦断方向の圧力変化 (波高 1cm)

は、氷板が 0.25m から 2.0m と大きくなるにつれて、分散波列の発生規模が小さくなっている。「開水」ケースで発生する分散波列は、浮遊氷板が存在することにより、浮遊氷板のサイズが大きいくほど、分散波列が抑えられることが確認された。「固定氷板」ケースでは、分散波列は生じていない。一方で「固定氷板」のケースでは、他のケースに比べて圧力伝搬が速いことが分かり、この知見は既往研究¹²⁾と一致する結果である。なお、分散波列とは、津波が水深の浅い場所で周期の短

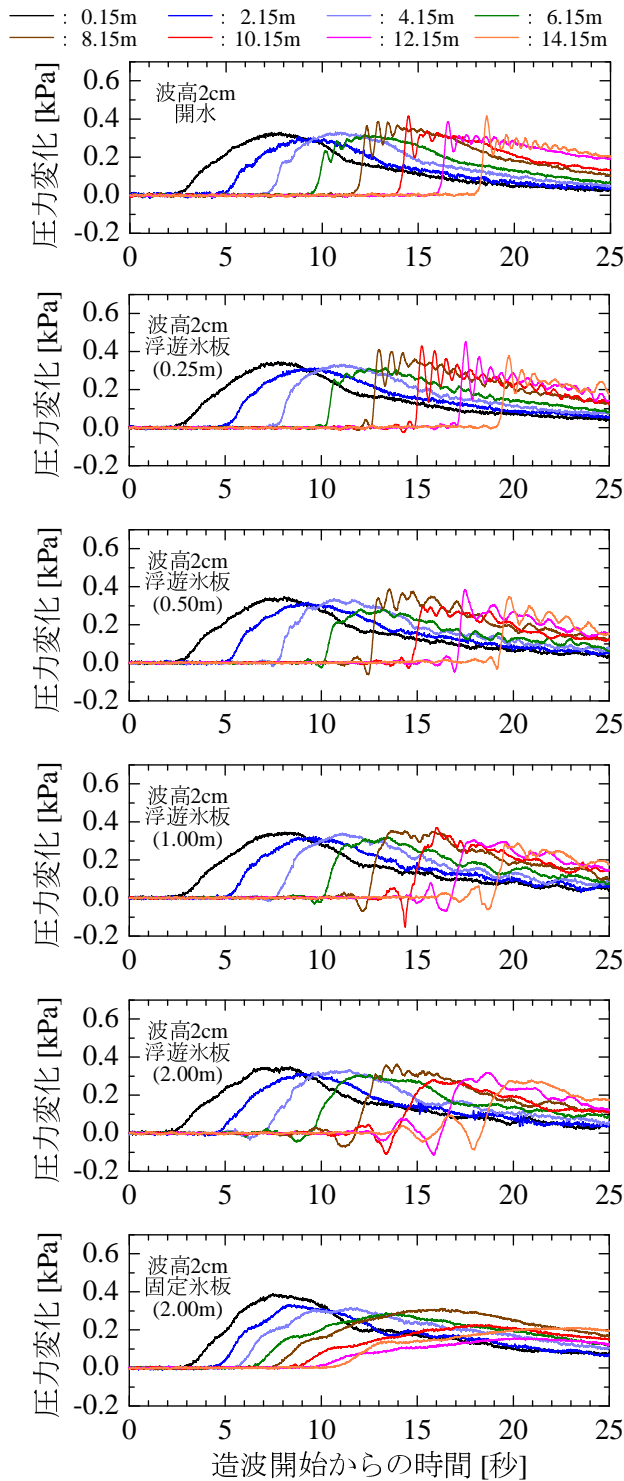


図-6 水路縦断方向の圧力変化（波高 2cm）

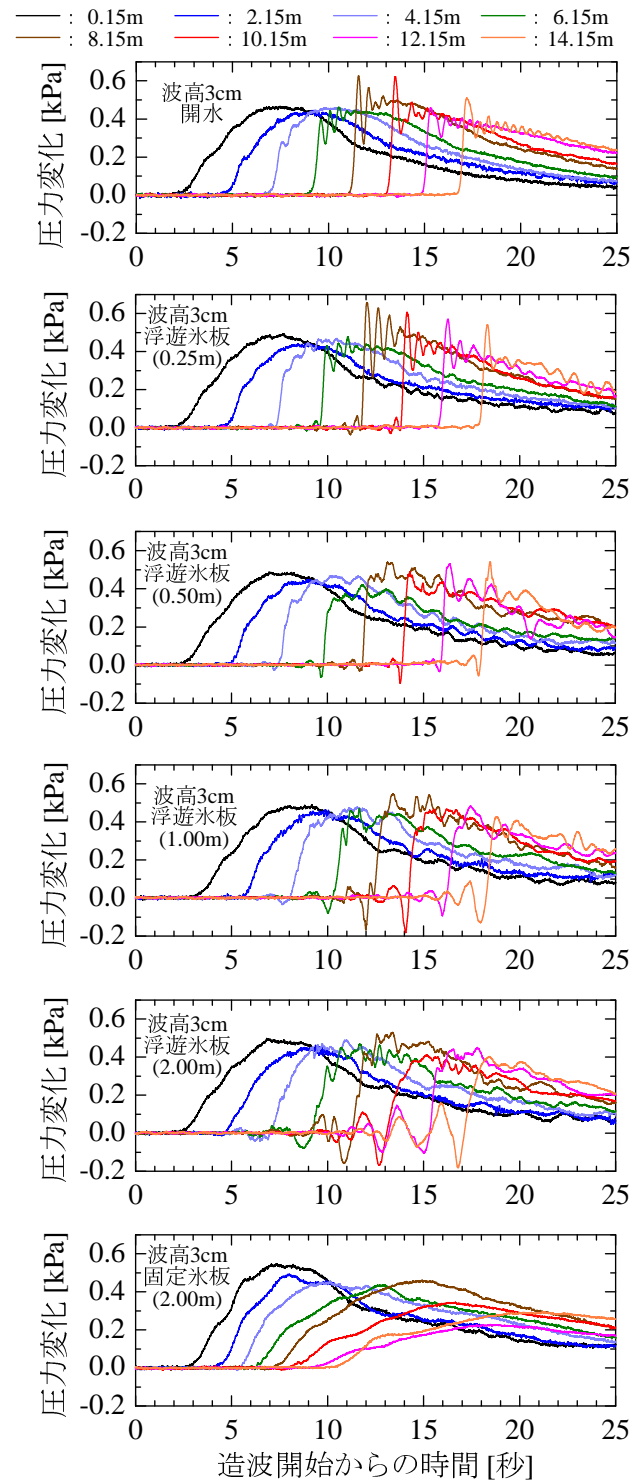


図-7 水路縦断方向の圧力変化（波高 3cm）

い波に分裂する現象である。

次に、本実験において津波到達前に圧力波形が振動する現象が発生した。特徴的なのは、図-7の「浮遊氷板」2.0mのケースにおける14.15m地点の圧力変化であり、津波の到達が17秒付近に対して、13秒付近から圧力波形が振動している。この現象は、振幅の大小はあるが「浮遊氷板」ケースのみで発生しており、「開水」および「固定氷板」では起こっていないこと、氷板サイズが大きいほど振動している圧力波形の波長および周

期が長いことから、以下のように推察した。図-8に示すように、津波により下流の氷板が傾くと同時に上流側の氷板に影響及ぼし、圧力変化を生じさせ、この氷板を伝わる速度が津波の伝播速度より速いため、本来の津波の伝播とは異なるメカニズムによりこのような圧力波形が観測されたものと考えられる。つまり、津波により下流側の浮遊氷板が持ち上げられ、津波が遡上するよりも速く、一つ上流の氷板に影響を与えたためと推察した。

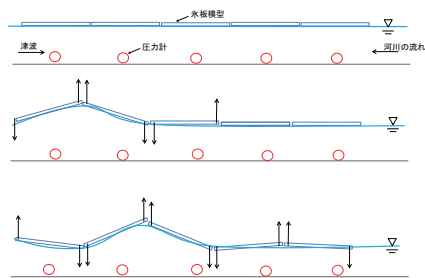


図-8 河川津波到達前の氷板の挙動

表-1 圧力伝搬速度 (m/s) の平均値, 実スケールに換算

波高 cm	開水	浮遊 5m	浮遊 10m	浮遊 20m	浮遊 40m	固定 40m
20	3.90	3.53	3.53	3.62	3.71	8.45
40	4.13	3.85	3.87	3.91	4.04	8.31
60	4.51	4.13	4.16	4.27	4.43	8.28

(2) 圧力伝搬速度

波高毎に整理した水路縦断方向の圧力伝搬速度を図-9に示す。表-1に各ケースの水路縦断方向の圧力伝搬速度の平均値を実スケールに換算して示す。フルード相似にて換算した。圧力伝搬速度は、氷板の影響と推察された津波到達前の圧力波形の振動は無視して、圧力変化が0.05kPaとなった時点を津波到達とし、津波到達時間と圧力測定地点間の距離を用いて算出した。図-9より、どの波高においても「固定氷板」の圧力伝搬速度はどのケースよりも速く、表-1より「開水」の約2倍の速さである。図-9および表-1より、「開水」と「浮遊氷板」の比較では、「浮遊氷板」は「開水」よりも圧力伝搬速度が遅い。「浮遊氷板」の圧力伝搬速度は、氷板サイズが小さいほど遅く、氷板サイズが大きいほど速い。また、圧力伝搬速度は、波高が大きいほど値が大きくなっている。氷板サイズによる圧力伝搬速度の違いについて、1元配置分散分析を用いて有意差を求めた。波高20cmと40cmは有意水準0.05で有意であったが、波高60cmはP値0.08で有意差はみられなかった。このことは、津波規模が大きい場合の圧力伝搬速度は、氷板サイズに影響を受けないことを示唆している。なお、波高による圧力伝搬速度の違いについては、全てのケースにおいて有意水準0.05で有意であった。

(3) 圧力減衰

水路縦断方向の圧力減衰を評価するために、氷板の影響を受けていない開水域の水路下流端から0.15m地点を基準として、各地点の圧力比(=各地点の圧力変化のピーク値÷0.15m地点のピーク値)を指標とした。圧力比が1以上であれば、その地点の圧力は増幅していることを示し、1以下であれば、その地点の圧力は減衰していることを示す。津波が河川を遡上するに伴い減衰する場合は、圧力比は1から0へと近づく。波高毎

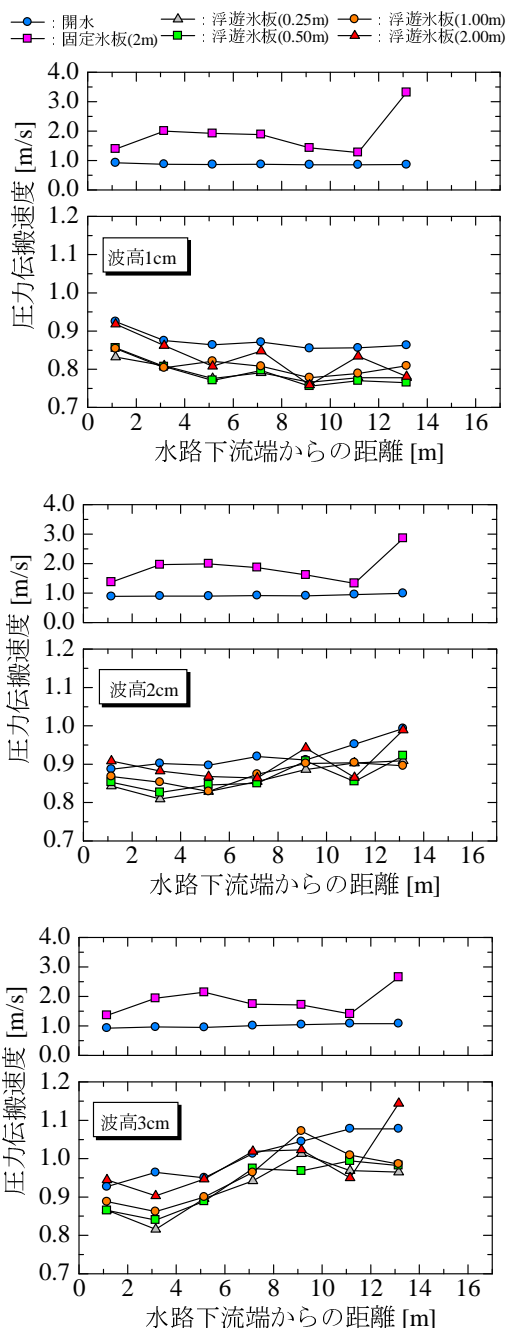


図-9 圧力伝搬速度

に整理した水路縦断方向の圧力比を図-10に示す。

「開水」のケースにおいて、波高が大きくなるにつれて分散波列が生じるため、上流側で圧力比が大きくなり圧力が増幅している。「浮遊氷板」では、氷板サイズが小さい場合は、上流側で圧力の増幅がみられるが、氷板サイズが大きくなるに従い、圧力の増幅は抑えられているのが分かる。「固定氷板」のケースでは、他のケースに比べて圧力が減衰している。氷板サイズによる圧力減衰の違いについて、分散波列が生じている8.15m地点から上流の地点の計4地点における圧力比の実験データを基に、1元配置分散分析を用いて有意差を求めた。波高1cmは有意差はみられなかったが、波高2cmと3cmは有意水準0.05で有意であった。このことは、津波規模が小さい場合の圧力減衰は、氷板サイズに影響

響を受けないことを示唆している。要因として津波規模が小さい場合は分散波列が発生しないためと考えられる。波高による圧力減衰の違いについても同様に有意差を求めた。氷板サイズが0.25mと0.50mは有意水準0.05で有意であったが、氷板サイズが1.0mと2.0mは有意差はみられなかった。このことは、氷板サイズが大きい場合の圧力減衰は、津波規模に影響を受けないことを示唆している。要因として氷板サイズが大きい場合は、氷板が分散波列を抑制するためと考えられる。

4. まとめ

本研究により以下のことが明らかとなった。氷板を固定した場合の圧力伝搬速度は、開水の場合および氷板を浮かべた場合に比べて速い。氷板を浮かべた場合の圧力伝搬速度は、開水の場合に比べて遅く、氷板サイズが小さいほど遅くなる。圧力減衰は、氷板を固定した場合が一番大きく、氷板サイズが小さくなるにつれ圧力は減衰しない。氷板サイズが小さい場合では、開水の場合と同様に分散波列が発生する。一方で、氷板サイズが大きい場合では、分散波列を抑える効果がある。

本研究の知見を用いて、完全結氷時の河川を想定すると、津波の第一波では圧力の上昇が抑えられるが非常に速い速度で圧力が伝搬し、ある地点で圧力解放が発生し、河水が破壊され河水は水面を浮遊する状態となる。第二波以降で、河水のサイズが小さくなるに伴い、圧力の伝搬速度は遅くなるが、圧力の上昇および分散波列は開水時と同等の現象となり、さらに漂流物としての河水が圧力の上昇とともに流動することを意味しており、河川結氷時の河川津波対策においては、第二波以降に特に着目して検討する必要があることを示している。

謝辞：(株) 水工リサーチの河田拓視氏には水理実験のサポートを頂いた。本研究は科研費基盤研究(B)24360197および河川整備基金 24-1114-001 の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 阿部孝章, 宮本修司, 吉川泰弘, 佐藤博知, 稲垣達弘, 平吉昭: 北海道太平洋岸地域の河川結氷状況調査～2011年3月及び2012年3月の比較を通じた検討～, 寒地土木研究所月報, No.710, pp.40-45, 7月, 2012.
- 2) 渡邊康玄, 西田正実, 木村祐輔, 小松佑輔: 3. 釧路方面 (北見工業大学 渡邊康玄), 土木学会水工学委員会 東北関東大震災調査団, 調査報告書の公開ページ, <http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/> (参照日 2013/4/4)
- 3) 国土交通省北海道開発局: 雪氷期の津波対策の検討, 雪氷期の津波沿岸防災対策検討会, <http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z-jigyoku/bosai/seppyou/tsunamitaisaku.html> (参照日 2013/4/4)
- 4) 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸: 波状性津波による河道内の氷板輸送に関する研究, 土木学会, 河川技術論文集, 第17巻, pp.359-364, 2011.

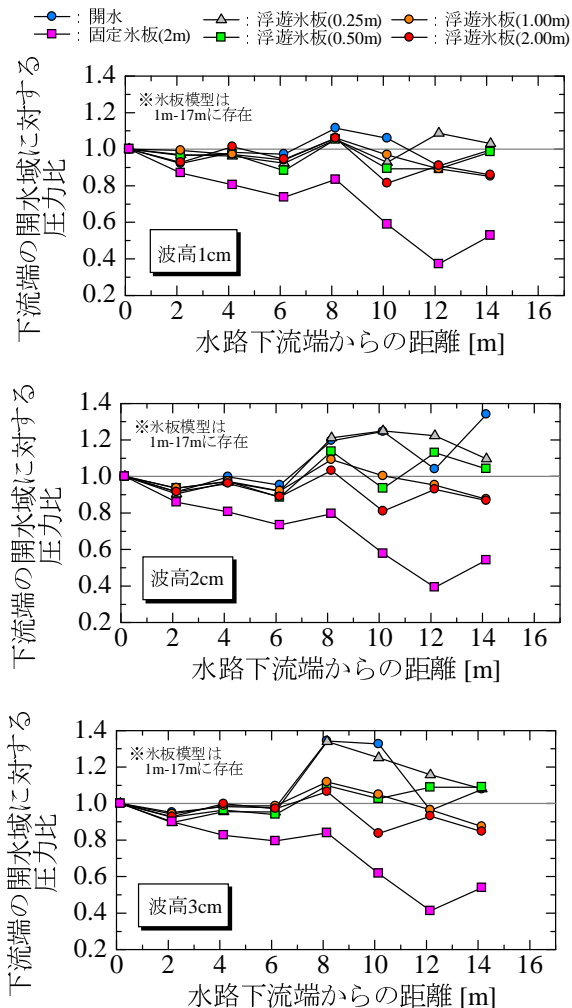


図-10 圧力比 (各地点の圧力変化のピーク値÷0.15m 地点のピーク値)

- 5) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸, 伊藤丹: 波状段波により輸送される河道内氷板の挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.L919-L924, 2013.
- 6) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 結氷時河川津波による漂流氷板の衝突力評価に関する研究, 土木学会, 河川技術論文集, 第18巻, pp.411-416, 2012.
- 7) 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.L416-L420, 2012.
- 8) 高橋麻子, 渡邊康玄, 吉川泰弘: 結氷時の尾幌川における河川津波の数値計算, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第68号, S-6, 2012.
- 9) 堺茂樹, 笹本誠, 平山健一, 劉曉東, 松村洋, 金田成雄, 泉山耕: 波浪による氷板の破壊に関する氷海水槽実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.926-930, 1995.
- 10) 堺茂樹, 笹本誠, 片山潤之介, 劉曉東, 平山健一, 泉山耕, 金田成雄: 氷板による不規則波の変形に関する実験, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.426-430, 1996.
- 11) 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.L1436-L1440, 2012.
- 12) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 結氷時河川津波の伝播機構に関する実験的研究, 土木学会, 年次学術講演会講演概要集, 第67回, 2-080, pp.159-160, 2012.

(2013. 4. 4 受付)