

津波遡上に伴う氷板の輸送過程に関する水理実験

HYDRAULIC EXPERIMENT ON ICE SHEET TRANSPORT
DUE TO TSUNAMI RUN-UP

寒地土木研究所 ○正会員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
正会員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
正会員 平井 康幸 (Yasuyuki Hirai)

1. 緒言

大地震発生時に来襲する津波に関する研究はこれまで数多く行われてきているが、河川に遡上した津波の予測、及びその対策に関しては、その危険性が以前から指摘されてきたにも関わらず、未だ知見が非常に不足しているのが現状である。不等流場である河川内に浸入した津波は、波状性段波を形成しながら波頭部において急激な水位上昇が生じることが指摘されている¹⁾。現行の河川堤防規模は、一般的な豪雨-洪水シナリオを想定して設計されているため、河道を遡上する津波に対して十分な防御効果を発揮できるかどうかは十分に検討されていないのが現状である。更に、北海道内の一部の河川は冬期間の気温の低下に伴い、河道内に河氷が形成される。写真-1（道東支所 矢野雅昭撮影）は2010年チリ地震の影響を受け十勝川の氷板が揺動している様子である。このような結氷河川にさらに大きな津波が来襲した場合、津波はどのように遡上するのか、また津波により河氷がどのような挙動を示すのかはほとんど未解明であり、研究例も非常に少ない。実際に釧路市の春採川において、1952年3月十勝沖地震に伴う津波が結氷した春採川の河氷を壊しながら遡上したため、多数の氷板が家屋に被害を与えた事例がある。津波による氷板輸送の研究は高橋ら²⁾によるものがあるが、これは沿岸構造物へ遡上氷板が及ぼす影響に焦点を置いたものであり、その知見を氷板の河川遡上現象へ直ちに適用することは難しい。

そこで本研究では、河道内を遡上する津波と河道内に存在する氷板の相互作用、また氷板存在位置の水深と津波波高が氷板輸送過程及び氷板遡上距離に与える

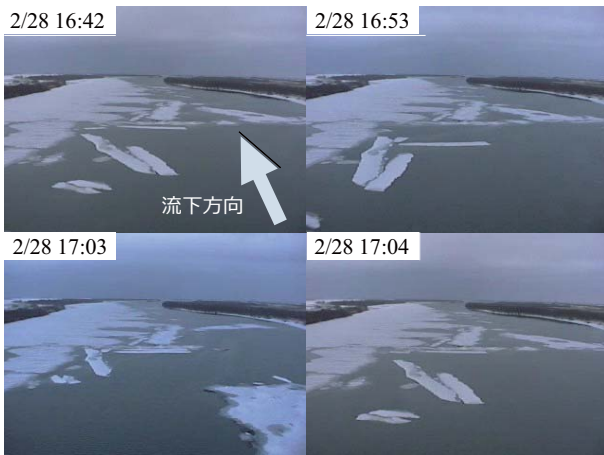


写真-1 十勝川における氷板揺動の様子 (2010年2月撮影)

影響に関する知見の蓄積を目的として、薄い氷板が河川水面上に存在する場合を想定した津波実験を実施した。そして入射波一定の条件で河道内縦断方向の氷板存在位置を変化させ、氷板輸送過程や氷板群の時系列的な拡散過程、そして最終的な遡上距離についての検討を行った。

2. 氷板を有する津波遡上実験の概要

実験水路は、全長34m、水路幅0.5m、水路勾配1/250の矩形断面を有する図-1の水路を用いた。実験条件は、上流からの流量無し、入射波の周期9秒、目標波高0.035m、造波板前の水深 $D_M = 0.80\text{m}$ とし、水路床の鋼製架台には人工芝が貼り付けられている。また水位変化を計測するため、 $x = 5.0, 10.0, 15.0, 17.5, 20.0\text{ m}$ 地点に容量式波高計を設置し、それぞれによる計測をCh.1~Ch.5とした。さらに実験水路の上方には2台のデジタルカメラを設置し動画撮影を行った。水路上部には下流端 ($x = 0.0\text{ m}$) を基準とした標定点を0.5mから1mピッチで撮影範囲内に設置しており、映像から津波や氷板の位置関係を読み取ることが可能となった。

実河川に存在する氷は、大別すると硬い氷板とその下に存在する軟らかい晶氷に分けることができる。本研究では、直接の被害につながる可能性が高いと想定される硬い氷板に着目した。そのため実験に用いた氷板は、ポリプロピレン製、1枚の厚さ $5\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ 、

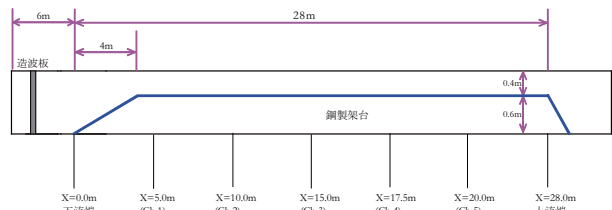


図-1 実験装置の寸法と波高計の設置位置

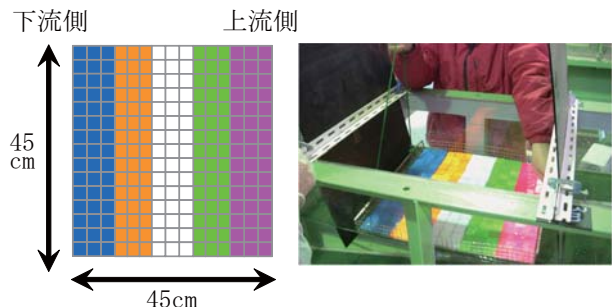


図-2 氷板模型の模式図と設置状況

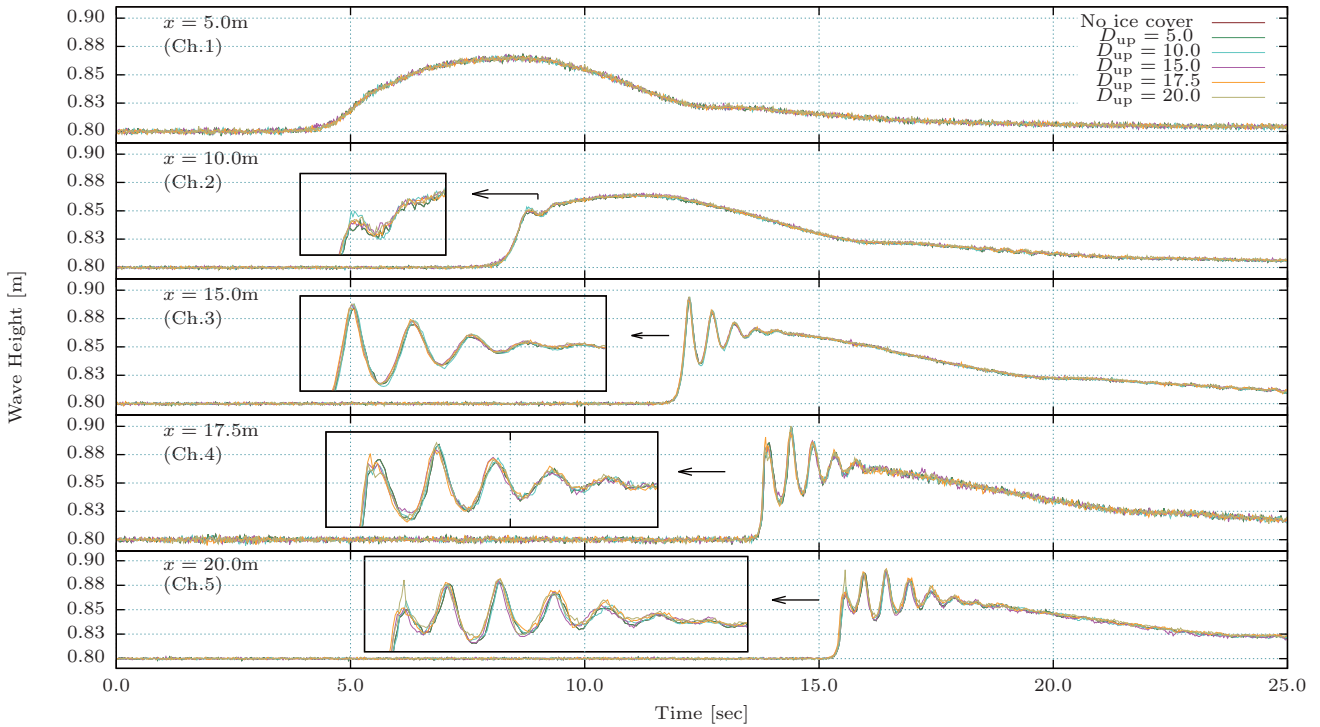


図-3 波高計各設置点で計測した時間波形 ($D_M = 0.80\text{m}$)

縦横 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、比重 0.9 程度である。なお、実河川においては上流からの流量が氷板輸送過程に無視できない影響を及ぼすことが考えられるが、水路実験によってその現象を再現することは困難が伴う。そのため本研究ではまず第一段階として、ごく基本的な津波と氷板輸送の相互作用を把握することを目的として上流からの流量が無い静水中の条件とし、ほぼ同一形状の氷板模型を並べてこれを氷板群とみなした。

この氷板模型は上流側から順にピンク、緑、白、オレンジ、青に着色し、図-2に示すように縦15列・横15列の計225個を配置してこれらを氷板群(約 $45\text{cm} \times 45\text{cm}$)とみなした。水路の下流端2m付近から21.5mまでの区間において、この氷板群の初期設置位置を50cm毎に変えて計40ケースの実験を行った。

3. 実験結果

(1) 波高計の測定結果

まず氷板が無い場合、及び氷板群の上流側先端位置 D_{up} が 5.0, 10.0, 15.0, 17.5, 20.0 m の各ケースについて、波高計の Ch.1~5 で計測された時間波形をそれぞれ図-3に示した。図において $t = 0.0 \text{ sec}$ は造波板が稼働を開始した時刻であり、 $t = 25.0 \text{ sec}$ 以降は最上流側の Ch.5 が水路の上流端からの反射波の影響を受け始めるため図中には示していない。氷板を設置しない場合の波形は「No ice cover」として同図にプロットした。造波板によって上に凸の半周期の孤立波(津波)を発生させると、どのケースにおいても津波は水路を遡上する過程で同様の変形を起こした。すなわち、始め波峰の前後でほぼ対象だった波形は伝播しながら前傾化し、Ch.2のやや手前で一波峰だった入射波の波峰先端

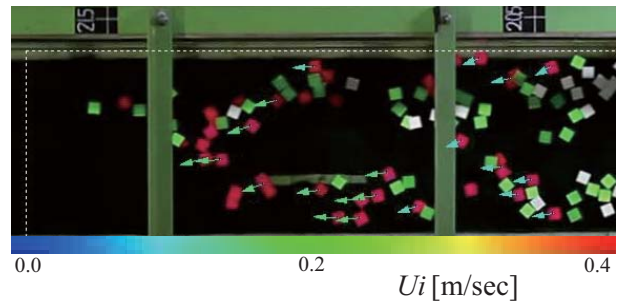


図-4 PTV 解析で求めた氷板輸送速度 ($t = 28.33 \text{ sec}$)

から新しい波峰が現れる(Ch.2)。その後も波数分散現象が継続したが、最先頭の波峰が自重を支えきれなくなることで、平均して約16.7m地点で碎波を起こした。その後通過したCh.4でピークが鈍化していることから、Ch.3とCh.4の間で碎波を起こしていることが推察される。なお、この碎波現象は分散波の先頭波峰がわずかに崩れ波頭部に小さな凹凸を生じる程度のものであり、一般に沿岸部で生じる気泡を激しく混入するような碎波とは性質の異なるものである³⁾。Ch.4からCh.5まで移動する間には波峰のピークが減衰する様子が確認された。総じて、薄い氷板の氷板群が存在しても、また氷板が水路縦断方向のどの位置に存在していても、津波の時間波形に与える影響は非常に小さいと考えられる。言い換えると、氷板群の存在が津波の波高や波峰の移動速度に与える影響もまた小さいことがわかる。

(2) PTV 解析による氷板輸送速度の検討

氷板の輸送速度 $U_i \text{ m/sec}$ は、氷板の移動を前述の2台のカメラにて撮影・収録した後に連続画像をPTV解

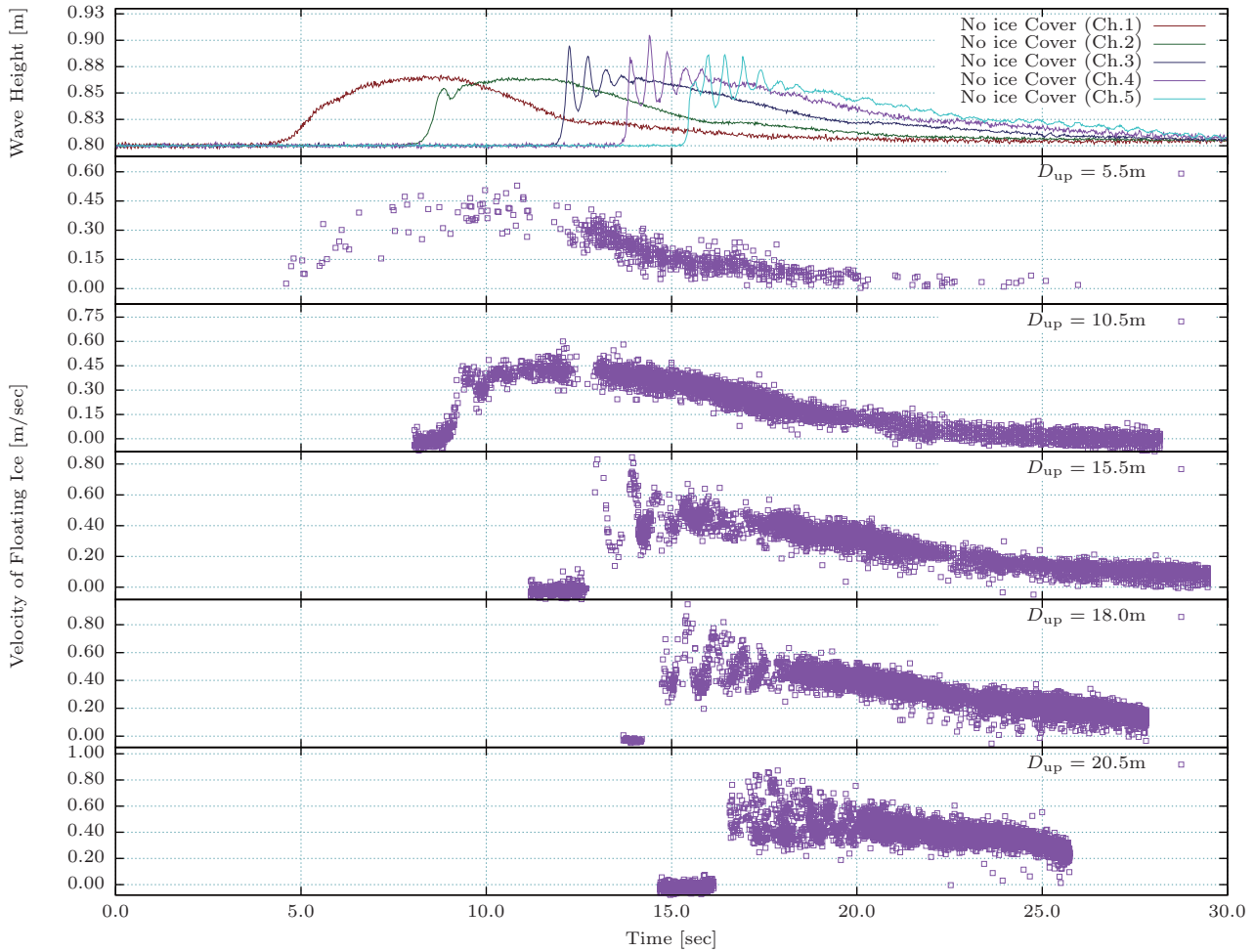


図-5 氷板無しのケースの時間波形（最上段）及び、 D_{up} の違いによる時系列的な氷板輸送速度の変化

析することで求めた。画像解析には Dipp-Flow version 2.00（株式会社ディテクト）を用いており、同ソフトウェア上でレンズ歪み補正、時空間補正を行った。本研究では初期状態から上流側にあり、平均して遡上距離の大きいピンクに着色した氷板模型を PTV 解析のトレーサー粒子とし、その速度の時系列変化を追跡した（図-4）。図-5 に $D_{up} = 5.5, 10.5, 15.5, 18.0, 20.5$ m の場合の、氷板群内で各氷板が持つ速度の縦断方向成分の時系列変化を示した。また比較のため、氷板無しの場合の時間波形を示した。 $D_{up} = 5.5$ のケースで速度を抽出できた氷板が少ないのは、この場合の氷板同士が相対位置を変えないまま一つの大きな板の形で遡上したためである。トレーサーとなる氷板が互いに密着して周囲との色差が小さいと PTV での解析は困難となる。途中 13 sec 付近でトレーサーが増えるのは、この付近にある壁面の凹凸に氷板が接触し、拡散範囲が広がったためである。 D_{up} が 10.5 m 以上のケースでは、初期から比較的多くのトレーサーを抽出することができた。加えて氷板輸送速度の時系列変化は、津波遡上に伴う分散波形状と酷似していることがプロットから読み取ることができる。前項において、Ch.2 から Ch.3 にかけて波数分散現象と先頭波峰の発達過程、及び Ch.4~Ch.5 にかけてのピーク波峰の減衰を指摘したところであるが、 $D_{up} = 5.5\sim 10.5$ 、 $D_{up} = 18.0\sim$

20.5 の氷板輸送速度の時系列変化にも同様の傾向を見出すことができる。氷板の輸送速度は津波波形に追従する形で変動しながら、氷板が輸送されていくものと考えられる。

(3) 波峰移動速度と氷板拡散過程の関係

津波の伝播速度と氷板拡散過程との関係を検討するには、時系列的な波峰移動速度が必要となる。波高計のデータのみからこれを算定することは困難が伴うため、本研究では 1 次元不等流計算による津波遡上のシミュレーションを行い、波高計における時間波形と計算結果を比較しつつ、波峰の移動速度を簡易に求めた。1 次元計算においては、縦断的な河床標高、川幅 0.5 m、粗度係数を一定値の 0.014、Ch.1 の波高計データを下流端境界条件として与えた。また、実現象とは異なるが、計算の安定化を図るため上流から流入量 $0.001\text{ m}^3/\text{sec}$ を与えた。また計算時間間隔は 0.001 sec、計算点間隔は 0.1 m とした。図-6 に 1 次元計算波形と Ch.1~5 の測定波形を示しているが、波数分散こそ表現できていないものの、概ね良好に波峰の移動速度を追跡できていると言える。この 1 次元計算によって求めた波峰の移動速度と、 $D_{up} = 5.5, 10.5, 15.5, 18.0, 20.5$ m の場合における氷板拡散範囲の関係を図-7 に示した。図より津波はほぼ等速度で遡上していることがわかるが、氷板の拡散過程は波数分散の前後で大きく異なってい

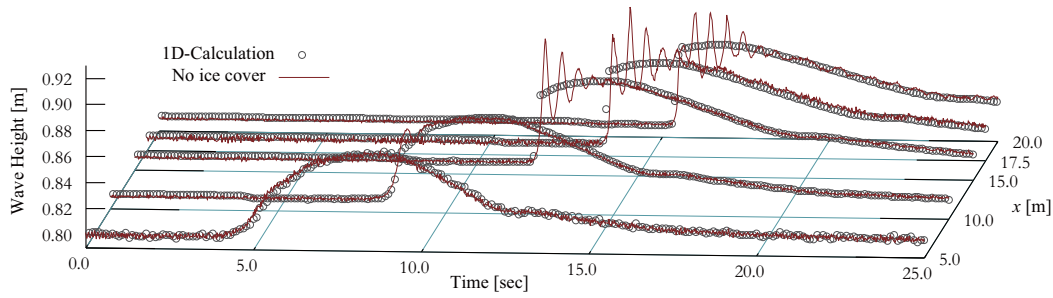


図-6 1次元津波計算と氷板無しの水路実験による時間波形の比較

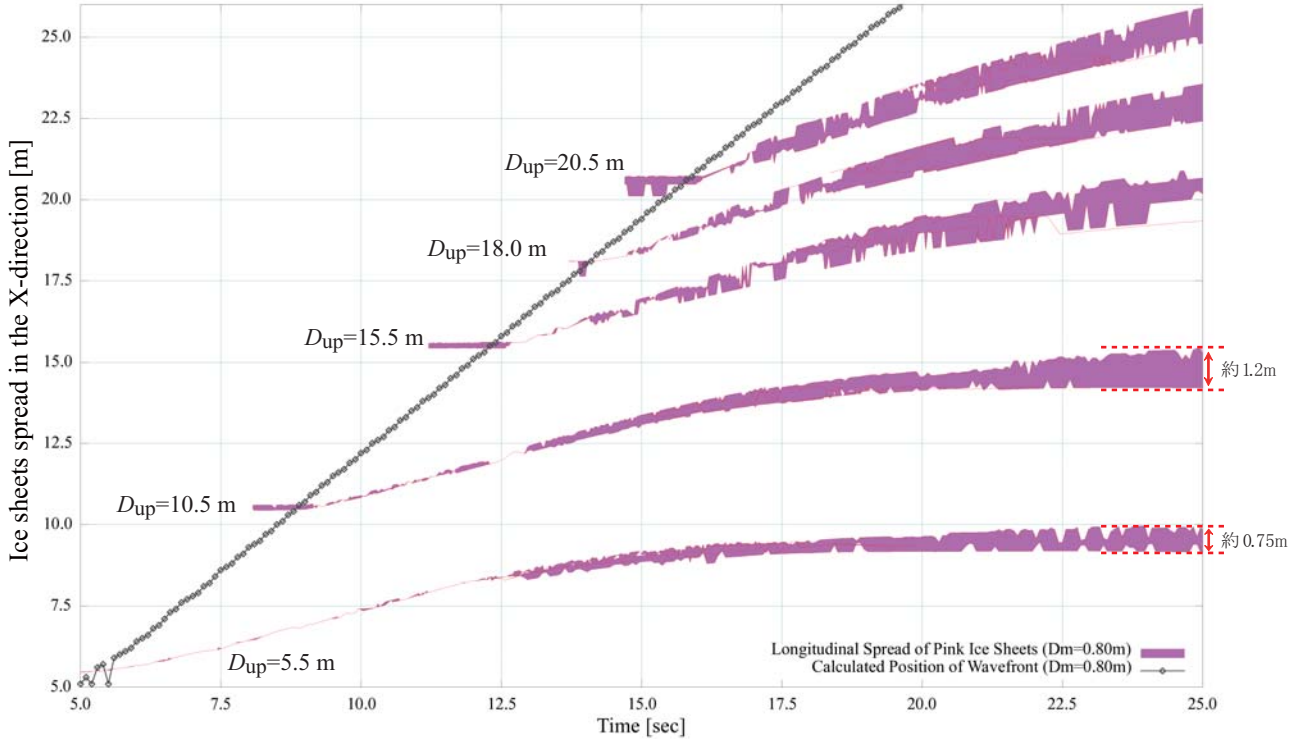


図-7 PTV 解析により求めたピンク色氷板模型の時系列的な拡散範囲と先頭波峰位置との比較

ることがわかる。 $D_{up} = 5.5, 10.5$ m のケースでは、始め氷板群は互いに接触しながら当初の形を維持しつつ遡上するため拡散幅は狭いが、側壁面の摩擦等が原因で次第に拡散を起こした。本実験の水路内ではほぼ氷板遡上過程が完結したこれらのケースについて、最終的な拡散範囲はそれぞれ約 0.75 m と約 1.2 m であり、上流側 $D_{up} = 10.5$ のケースの方が最終的な遡上距離も大きいことがわかる。一方で波数分散以後の氷板輸送では津波の通過直後から氷板は大きく拡散しており、かつ 25.0 sec の段階でも $D_{up} = 20.5$ のケースは図-5 より 0.20~0.35 m/sec 程度の流速を持つ氷板が多い。より延長の長い実験水路を用いた場合はさらに遡上距離が延びることが予想される。

4. 結言

本研究では、津波が河川を遡上し、その過程で氷板を輸送する際の波峰の移動速度と時系列的な氷板移動速度の特性についての検討を行うことを目的に、氷板模型を設置した津波遡上実験を行い、波高計による波高分析及び撮影動画を用いた画像解析を行った。その結果、薄い氷板が水面上に存在している場合は、氷板

が津波そのものの挙動に与える影響が少ないこと、そしてそのような条件の下では氷板の輸送速度は時系列的に、津波波形と近い形で変動することが明らかになった。なお本実験は、津波と氷板輸送に関する基礎的な知見を得るためのものであり、上流からの流量が無い静水中の条件で行っている。また、壁面摩擦や波高計の存在が流れ及び氷板拡散過程に及ぼす影響まで踏み込んだ検討はできておらず、今後実験条件の設定方法に関して継続的な検討が必要である。更に氷板が今回の実験よりも厚い場合、あるいは面積が大きい場合に対して、津波の伝播速度と氷板輸送過程の関係の変化について今後検討を加えていきたいと考える。

参考文献

- 1) Hiroyasu Yasuda: One-Dimensional Study on Propagation of Tsunami Wave in River Channels, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.136, No.2, pp.93-105, 2010.
- 2) 高橋良正, 片山晃, 岡本智, 佐伯浩: 氷板の津波による陸上への遡上機構に関する実験的研究, 第 10 回寒地技術シンポジウム, pp.419-423, 1994
- 3) 中村祐介, 安田浩保, 清水康行: 流れの遡上に伴う波高減衰に着目した波状性段波の実験的研究, 地震工学論文集, pp.370-375, 1999.