

波状性津波による 河道内の氷板輸送に関する研究

Study on river ice floes transport due to Undular Bores

阿部 孝章¹・吉川 泰弘¹・安田 浩保²・平井 康幸¹
Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA, Hiroyasu YASUDA, Yasuyuki HIRAI

¹ 正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

² 正会員 工博 新潟大学准教授 災害復興科学センター (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

In this study, we examined some aspects of the drift motion of ice floes driven by bore-like tsunamis through a series of laboratory experiments. This work investigates the disintegration of a tsunami into a train of undular bores, with floating ice models on the surface. We recorded the experiments by digital cameras, and the position of an ice floe as a function of time was determined by digitalized pictures using image analysis techniques, namely, PTV. Several interesting details are revealed by these experiments. It was observed that run-up heights of wave front increase by over 70%, and time-series waveforms of undular bores agree well with those of velocities of model tracers. This means that bore front can accelerate the movement of ice floes violently. This work highlights the potential risks of ice floes, which can be hazardous to river structures, such as bridge piers, floodgates and intake screens.

Key Words : *Undular bore, Tsunami Run-up, Frozen Rivers, Ice floe transport*

1. はじめに

(1) 研究の背景

日本海溝・千島海溝沿いではマグニチュード 8 クラスの大地震やそれに伴う 10 m を超える大津波が発生し, ここ 20 年で北海道周辺においても釧路沖地震, 北海道南西沖地震, 十勝沖地震といった大規模な地震が頻発している。そして, 切迫性が専門家の間でも指摘¹⁾されていた三陸沖地震が平成 23 年 3 月 11 日に発生し, 地震による大津波により, 宮城県・岩手県を中心として貴い人命や財産に激甚な被害がもたらされた。かねてより, 地震災害から国民の生命や財産を保護するための基本計画の作成や施設整備の重点的な推進が行われていたものの, 本地震及び津波被害を受けて, 防災施設の安全基準や防災対策の抜本的な見直しが求められている。北海道のような積雪寒冷地域においては, 冬期間に大地震による津波が陸域へ来襲する「冬期複合災害」を想定する必要がある。

一方, 2004 年スマトラ島沖地震では, 津波が各国の河川を遡上して橋梁等に甚大な被害を及ぼしたことが報告され, これを契機として津波の河川遡上の危険性が強く認識されることとなった。河川のような水深の浅い領域を遡上する津波の先頭部分では, 局所的な水位上昇を伴う波状段波が形成される。近年の研究²⁾では,

入射時の波高に比較して静水中でも 1.4 倍程度, 流れのある場では 2.0 倍から最大で 2.5 倍程度³⁾という大幅な水位上昇が生じることが明らかにされている。更に, このインド洋津波では沿岸部の建物や船舶, 木材, 車輛等が漂流物として巻き込まれ, それらが構造物の破壊・粉碎を伴って新たな漂流物を巻き込み被害を一層拡大している⁴⁾。もし北海道周辺において大規模地震が冬期間に発生した場合には, 結氷状態の河川への津波侵入・遡上が考えられ, 津波による浮遊氷板の輸送が起こり河川構造物が被災する可能性がある。

写真-1 に示したのは 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波が輸送したと考えられる, 鵲川(北海道太



写真-1 鵲川河口部高水敷に残された巨大な氷板 (2011 年 3 月 14 日撮影)

平洋岸) KP.0.8 付近左岸における氷板痕跡である。この氷板は中央部に亀裂が入っていたものの、長辺は約 7 m, 短辺が 3 m, 厚さは 25 cm 程度であり, 比重を 0.9 とすれば重量は約 4.7 トンと見積られる。この津波による鶴川水位観測所 (KP.2.55 地点) の水位変化は最大で 80 cm 程度であったと報告⁵⁾されているが, 写真のような巨大氷板が河口部から津波遡上範囲において散見され, もし近海で大地震が生じた場合には更に大きなエネルギーを持って遡上することが想定される。過去, 実際に釧路市の春採川において, 1952 年十勝沖地震に伴う津波が結氷した春採川の河水を破壊しながら遡上したため, 多数の氷板が堤防を乗り越え家屋に被害を与えた事例⁶⁾も存在する。

河川を遡上した津波により漂流氷板が輸送されると, 具体的には次のような被災シナリオが想定される。1 つは, 氷板が遡上過程において細かく破壊され, 樋門や水門のゲートを閉塞してその動作に支障を与えるようなケースであり, 二つ目には遡上した氷板が橋梁等の河川横断構造物へ衝突することで, 橋脚の損傷, 支承のずれを引き起こし, 橋梁利用者である鉄道や自動車への二次的被害をもたらすケースである。河道内の係留船舶や木材置き場の丸太については, 係留強化の徹底や規制を行うソフト的な防災対策の推進が可能である。ところが氷板は河道内に毎年形成され, しかも気象条件によって氷板厚や形成箇所・形成延長も常に変化する自然現象であり, また構造物への衝突時には脆性的破壊を伴うなど他の漂流物とは異なる特徴を持ち, それらを考慮した寒冷地域特有の防災対策が求められている。

以上のような背景に鑑み, 河道内の氷板輸送による津波防災対策を講じる上では, 津波による氷板遡上の距離や速度を見積もるための評価方法が必要となる。しかし津波の河川遡上に伴う漂流物輸送の研究例が非常に少なく, 被災記録の蓄積も充分ではないことから, 河川構造物の安全度を明確な根拠に基づき評価することができないのが現状である。

(2) 既往の研究

沿岸部においては, 津波による漂流物輸送の研究がこれまで数多く行われてきている。池野ら^{7)~8)}は陸域に遡上した津波が漂流物を輸送し, 構造物に与える津波波力, 様々な形状の漂流物の運動と衝突力との関係を整理した。水谷ら⁹⁾はエプロン上のコンテナを, 池谷ら¹⁰⁾は停泊中の船舶を津波漂流物として想定し, 漂流物の衝突力評価方法を提案した。また, 津波による海水氷板輸送に関する研究も多くはないものの, 数例^{11)~12)}見られる。ところが以上の研究は, 単一漂流物の挙動に焦点を絞ったものであるか⁸⁾, 波状性段波のような分

散波列の影響を考慮に入れていない¹²⁾といった理由で, その知見を氷板の河川遡上現象に直ちに適用するのは困難である。

前節で述べたように, 河道内の津波防災計画を講じる上で, 河川構造物の被災区間の指標となる氷板の遡上距離, 津波波力増大の原因となる氷板の遡上速度を考慮した, 実用に供しうる危険区間推定手法の確立が求められている。

これを念頭に置き本研究では, 河道内の氷板を対象として, 既往研究では十分に踏み込まれていない, 波状性津波による氷板輸送特性の解明を目的とした水理実験を行った。実験においては, 薄い氷板が河川水面上に存在する場合を想定し, 河道内を遡上する津波と氷板の相互作用, また氷板初期存在位置の水深と津波波高が氷板輸送過程に与える影響に関する知見の蓄積を目的とした。

2. 氷板を有する津波遡上実験の概要

(1) 実験水路の概要

水理実験では, 全長 34 m, 水路幅 0.5 m の矩形断面を有する図-1 に示す水路を用いた。図中で水路床の鋼製架台には人工芝が貼り付けられている。下流端から 6 m の区間は造波板の河道範囲であるため固定勾配区間であり, そこから 28 m の区間は水路勾配を変化させることが可能である。水路上流端には給水機構, 下流端水平床部分には排水機構を備え, 不等流場を形成することが可能である。但し, 上流端直下には給水による流水の攪乱を防止する目的の緩衝材を配置した。水位変化の計測を行うため, 縦断方向の $x = 5.0, 10.0, 15.0, 17.5, 20.0$ m 地点に容量式波高計 (ケネック製) を設置した。本稿ではそれぞれによる計測を Ch.1~5 と統一して表記することとする。

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, 津波による氷板輸送過程の動画撮影を行った。水路上部には下流端 ($x = 0.0$ m) を基準とした標定点を 0.5 m から 1 m 間隔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。

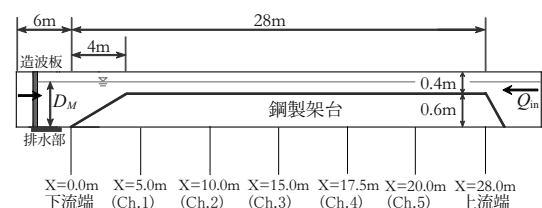


図-1 実験装置の寸法と波高計の設置位置 (側面図)



写真-2 実河川橋脚部で滞留する多数の氷板 (2009 年 2 月撮影)

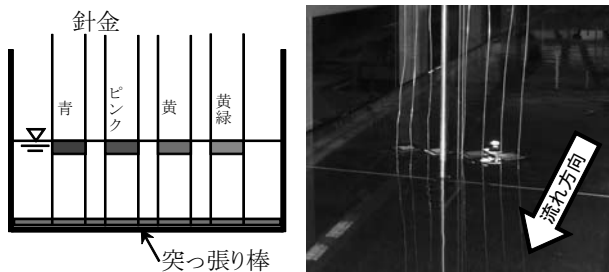


図-2 氷板模型の模式図 (横断図) と設置状況の写真

(2) 実験条件

実験施設の制約上、河道内の津波遡上を無歪み模型で再現することは困難が伴う。そこで歪み模型の考え方を適用し、Froude 数に関する相似則を満たすように全ての実験条件において、河床勾配 $i = 1/250$ 、造波板前の水深 $D_M = 0.80$ m とした。流入流量は、便宜的ではあるが $Q_{in} = 2.5, 5.0, 7.5$ [l/s] と設定した。これは水路内で現象を確認する区間を 25 m とすれば、河川縦断方向に約 5 km、河口付近水深を約 4 m としたことに相当する。また流量に関しては現地での約 80~110 m³/s に相当し、これは北海道内の 1 級河川十勝川の 2 月~3 月 (河川結氷期~解氷期) の流量観測記録に基づいて設定している。

(3) 氷板模型

河道内に存在する氷板は、完全結氷している状態が破壊されて生じたり、河川の両岸に細長く付着していたり、橋脚などによってある場所で滞留していたりといった様々なケースが考えられる。本実験では簡単のため、津波入射によって容易に輸送され、河岸との相互作用がほぼ無視できると考えられる滞留氷板の輸送を実験の対象とした。具体的には写真-2 のようにある地点で滞留し、互いに密集している氷板群が津波によって遡上開始するような現象である。これを再現するために氷板模型としてポリプロピレン製の板を使用した。サイズは縦横 30 mm × 30 mm、厚さ 5 mm ± 0.5 mm、比重は 0.9 程度である。

流入流量が存在する実験条件では、写真のような多

数の氷板の位置を固定して再現することは困難が伴うため、氷板の枚数を 4 枚とした。河床部に突っ張り棒を設置し、1 つの氷板につき 2 本ずつ、固定用の針金を突っ張り棒に巻き付け鉛直上方に張ることで縦断方向の氷板位置を固定した。こうすることで最も上流側にある滞留氷板を模擬することを目的としている。しかし、河床部の突っ張り棒や針金の存在が流れに及ぼす影響の評価までは難しく、津波の伝播への影響を最小限に抑えつつ、氷板を水路内に固定する設置方法については今後も検討を加えていく予定である。なお、後述する PTV 画像解析は色調の違いによりトレーサ粒子を抽出する。4 枚の模型の運動を別個に抽出することを意図し、本研究では左岸側から青、ピンク、黄、黄緑の順に着色した。

以上の条件設定の上で、水路の $x = 5.0$ m 付近から 20.0 m までの区間において、これらの氷板群の初期設置位置 (以後 D_{up} と表記する) を波高計位置に合わせて変化させる実験を行った。

3. 実験結果

(1) 波高計の測定結果

まず、氷板の存在が津波の挙動に与える影響についての検討を行う。前報¹³⁾において、著者らは、清水中に多数の氷板が存在する実験を行い、多数の氷板が存在しても、津波の変形過程や伝播速度に与える影響は小さいことを示した。氷板設置位置が波高計の直上流

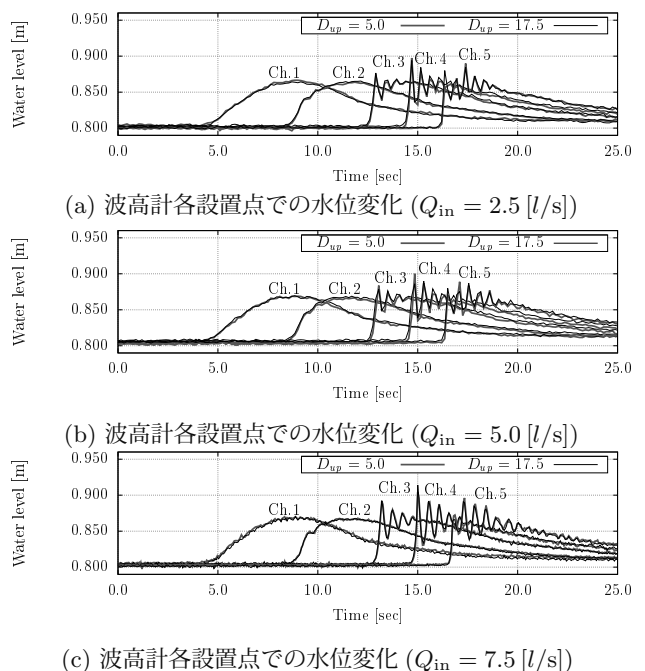


図-3 水理実験により得られた時間波形 ($i = 1/250$, $D_M = 0.80$, $D_{up} = 5.0, 17.5$)

であるうちの2ケース ($D_{up} = 5.0$; 分散波列形成前, $D_{up} = 17.5$; 流量の存在するケースで先頭波峰が砕波する直前) について, 波高計で計測された時間波形を給水量の異なる3ケースについて図-3 (a)~(c) に示した. 二つの図において $t = 0.0$ sec は造波板が稼働を開始した時刻であり, $t = 25.0$ 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.

まず, 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, どの流量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. 加えて, 氷板が下流 $D_{up} = 5.0$ の位置にある場合と, $D_{up} = 17.5$ の場合とで遡上に伴う変形過程にあまり変化は見られなかった.

波の変形過程について見てみると, 始め波峰の前後ではほぼ対称だった波形は, 伝播していく過程で先頭部分が段波のような形状となる. Ch.3 ($x = 15.0$) では, いずれのケースでも先頭部分で分散波列が生じ, 3ないし4個の波峰が生じている. Ch.4 地点までは第1波峰が成長し続け, $Q_{in} = 7.5$ のケースでは, はじめ6.4 cm だった最大波高が11 cm 程度まで上昇した. これは, 静水中の実験における最大波高9 cm¹³⁾ (約40%の水位上昇) を超えて, 70%も最大水位が上昇していることとなる. 流れ場における遡上津波の波高上昇率に関する検討はまだ端緒に付いたばかり¹⁴⁾であり, 今後もその流体力学的な特性の把握に関する研究が望まれる.

Ch.5 においては, いずれの場合もピーク水位は第2から第3波峰へと移行していることが確認された. これは急峻に成長した分散波の先頭波峰が自重を支えきれずに崩れる砕波現象のためであり, ビデオ映像から, 砕波後の波頭部分は小さな凹凸を持つ様子が確認された. 総じて, 本実験で用いたサイズの薄い氷板が存在しても, また氷板が水路縦断方向のどの位置に存在していても, 津波の時間波形が受け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 m/sec は, 前述のように氷板の移動を2台のカメラにて撮影・収録した後連続画像をPTV解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, 及び時空間補正を行った. 本実験では, 津波により4枚の模型が同時に輸送されるが, トレーサー粒子として抽出可能であったものの速度を時系列でプロットした. ほとんどのケースでは氷板は遡上津波の水面上を滑るように輸送され

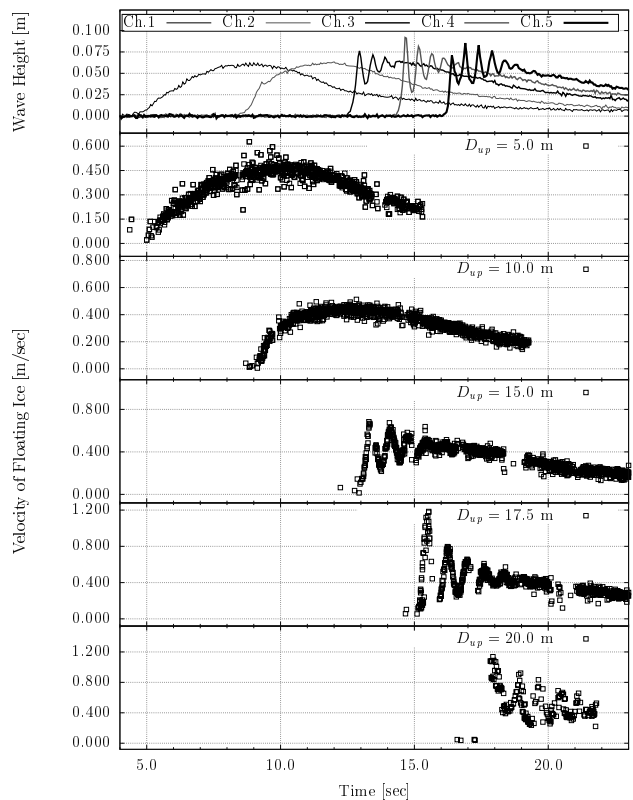


図-4 波高計測定結果から得られた津波波高と氷板輸送速度の時間変化 ($Q_{in} = 2.5$)

たが, 先頭波峰の砕波を伴うような形態の氷板輸送では, 氷板が水面下に潜るケースがあり, トレーサーとして抽出できないことがあった.

図-4, 5 に, 給水量が $Q_{in} = 2.5, 5.0$ に対する, 氷板が持つ速度の縦断方向成分の時系列変化を示した. 速度は, 水路の下流から上流に向かう方向を正とした. 比較のために各ケースの波高変化を最上段に示しているが, 2~6 段目に示した D_{up} の氷板速度の波形は, 最上段のような形状の波の入射により生じたとみなすことができる.

図-4 において, $D_{up} = 5.0$ のケースでは, 入射波の波形が一山であるため, 氷板輸送速度の波形も一山となっている. $D_{up} = 10.0$ のケースでは, 入射波の先頭部で水面勾配がやや急になっており, 輸送速度の波形もそれに追従するように反応している. 先頭部が分散波列を生じ始めた $D_{up} = 15.0$ では, 輸送速度の波形においても波列が形成されており, $D_{up} = 10.0$ の場合に最大でも0.5 m/s 程度だった輸送速度は, 0.7 m/s 程度まで急激に増加している. その後 $D_{up} = 17.5$ までは分散波列の成長が続いており, 輸送速度も追従して波形が急峻化しており, 最大で1.2 m/s と, 分散波列形成前の $D_{up} = 5.0$ の場合の氷板輸送速度に比較しても2倍以上の速度となっている. 砕波後の入射では, 水面の

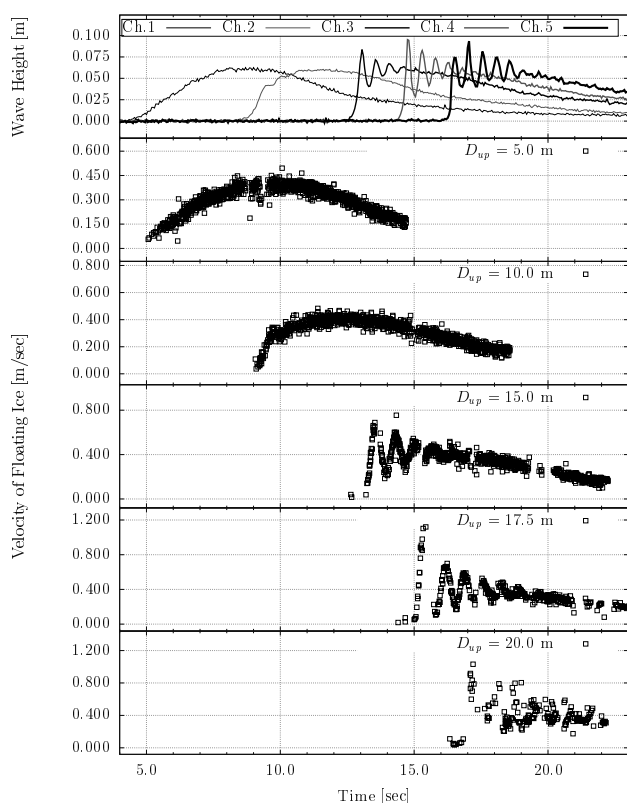


図-5 波高計測定結果から得られた津波波高と氷板輸送速度の時間変化 ($Q_{in} = 5.0$)

攪乱と氷板模型の潜り込みが生じ、PTV 解析のトレーサー粒子の抽出が困難になったため、プロット数は減少している。

図-5 には、 $Q_{in} = 5.0$ の場合の時間波形（最上段）と氷板輸送速度の波形を示した。このケースにおいても氷板設置位置の違いによる氷板輸送速度の波形変化と津波の変形過程は非常に近い形状となることが確認された。また本稿では、紙面の制約上記載を省略するが、 $Q_{in} = 7.5$ の際にも同様の傾向が確認されている。

次に、水路内を遡上する分散波列の形状と氷板輸送過程との関係をより詳細に検討するため、1次元不定流計算¹⁵⁾による水理実験のシミュレーションを行った。一例として、 $Q_{in} = 5.0$, $D_{up} = 17.5$ のケースにおいて、氷板のもつ輸送速度 U_{ice} の時間変化を図-6 (a) に、計算により求めた氷板存在地点の表面流速 U_s 、同地点の水位をそれぞれ図-6 (b), (c) に示した。画像解析により求められる氷板存在地点は離散値であるが、その中で分散波列の波峰部分に相当する4点、波谷の3点、分散波列による短周期の水位変化が消失して以降の2点を抽出してプロットした。図-6 (a)~(c) の比較から、波峰が氷板の下を通過するのとほぼ同時刻に U_{ice} は最大となり、氷板が波谷に落ち込んだ時に U_{ice} , U_s とも極小値を取っている。更に、第2の波峰が氷板存在地点

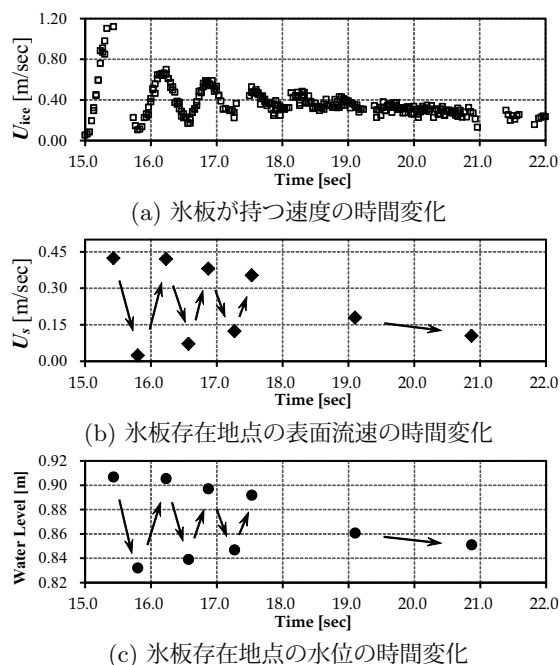


図-6 氷板が持つ速度と氷板存在地点における表面流速・水位の時間変化 ($Q_{in} = 5.0$, $D_{up} = 17.5$)

を通過した際に再び U_{ice} は極大値を取っていることがわかる。そして分散波列の振幅の影響が消失する概ね $t = 19.0$ sec 以降は、 U_{ice} は単調に減少している。

以上から、氷板は津波の先頭波峰、もしくは分散波列の第2波峰以降の急峻な水面勾配によって加速し、分散波列の波谷に入り急激に減速する。輸送過程の初期においてはこのような間欠的な加速と減速を繰り返し、氷板を輸送している津波本体から分散波列による水位変化が消失して以後は、表面流速のみによって輸送されると推測される。

(3) 波高水深比と最大氷板輸送速度に関する検討

本項では、波高の上昇により氷板がどの程度の速度で遡上するかを見積もるために、入射波の波高水深比と氷板の最大輸送速度と津波伝播速度の比との関係を今回の実験、及び前報¹³⁾において行われた流量 $Q_{in} = 0.0$ に対する実験結果も併せて検討を行った。津波の規模を表す指標としては、津波の波高 η を氷板初期地点の水深 H_{ice} で除したものを選択した。前報で実施した $Q_{in} = 0$ の実験に関して、波高計設置位置は本研究と同様であるため、波高計間に設置した氷板については入射波高の評価ができない。そこで、波高計がない地点の津波波高は前節と同様の数値シミュレーションにより算出した。但し、流量の無い条件については氷板を多数用いているため、輸送特性は本来であれば異なることが予想されるが、同じ滞留氷板と見なせば、最上流側に配置されていた氷板の挙動は本研究の氷板挙動に近いと考えられる。

$Q_{in} = 0$ については D_{up} を 1 m 間隔とし、流量有り

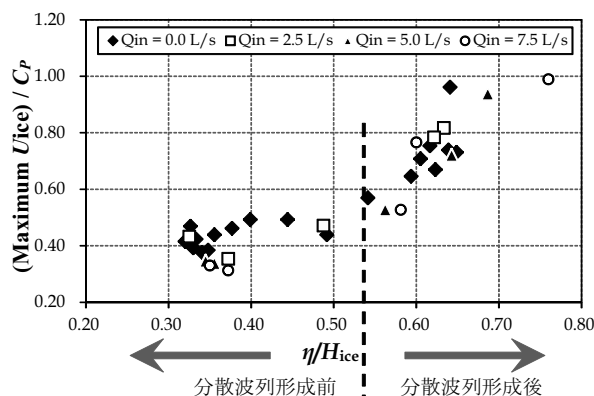


図-7 入射波の波高水深比と氷板の最大輸送速度との関係

のケースについては D_{up} は波高計設置点である。PTV解析によって得られた最大氷板輸送速度を第一波峰の伝播速度 C_p で除したものをこれらの実験に対してプロットすると、図-7のようになった。 U_{ice} の各ケースにおける最大値は、 η/H_{ice} に対して単調に増加することがわかった。更に、概ね $\eta/H_{ice} < 0.55$ の領域では増加が緩やかであるが、それ以上の領域では U_{ice} の最大値は急激に増加した。ここに示した傾向は流量によらず該当するため、氷板輸送速度は波高水深比に強く影響を受けると言える。

また、分散波列形成後の入射のうち、(U_{ice} の最大値/ C_p) が1に近づくと頭打ちになるのは、津波本体の伝播速度が氷板輸送速度の上限となっているからと推察される。

4. まとめ

本研究では、津波が波状段波を形成しながら河川を遡上し、その過程で氷板を輸送する際の特性についての検討を行うことを目的に、滞留氷板に見立てた氷板模型を水面に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。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- 薄く面積の小さい氷板が水面上に存在している場合は、氷板が津波の進行速度に与える影響が小さいこと、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。
- 冬期の結氷河川への波状性津波の遡上について、上流からの流量によって最大波高は1.7倍程度まで上昇することがあり、それに氷板輸送が重畳する場合は氷板遡上速度も急激に増加することが明らかとなった。そのため津波による漂流氷板の構造物等への影響を評価する際には、津波の波数分散効果を考慮する必要があることが示された。

- 波高水深比の大きい条件では、氷板輸送速度は津波本体の伝播速度と同程度まで加速されることが示された。

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、壁面摩擦や波高計の存在が流れ場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、今後も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、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) 内閣府中央防災会議 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会: 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告, pp. 6-16, 2006.
- 2) 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.
- 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. 890-894, 2007.
- 4) 藤井直樹, 今村文彦: 津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案, 自然災害科学, Vol 28, pp. 371-386, 2010.
- 5) 北海道開発局河川管理課: 平成 23 年東北地方太平洋沖地震により、津波が河川を遡上した痕跡について、報道提供資料, 2011.
- 6) 北海道大学 十勝沖地震調査委員会: 十勝沖地震調査報告 1952 年 3 月 4 日, 1954.
- 7) 池野正明, 田中寛好: 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 721-725, 2003.
- 8) 池野正明, 田中寛好: 段波津波による漂流物の衝突力に関する実験的研究, 電力中央研究所報告, U03052, 2004.
- 9) 水谷法美, 高木祐介, 白石和陸, 宮島正悟, 富田孝史: エブロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 741-745, 2005.
- 10) 池谷毅, 稲垣聡, 朝倉良介, 福山貴子, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢賢: 津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 276-280, 2006.
- 11) 佐伯浩, 高橋良正, 三谷朋行: 津波による海氷盤の陸上への遡上機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 796-800, 1994.
- 12) 森昌也, 木岡信治, 阿部島直哉: 津波来襲時の海水の漂流挙動に関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 65 号, 2009.
- 13) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 津波遡上に伴う氷板の輸送過程に関する水理実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 65 号, 2011.
- 14) 安田浩保, 大塚淳一: 流れを遡上する波状性長波のカオスの挙動とその流動の内部構造の特性, 水工学論文集, 第 54 巻, 2010.
- 15) 安田浩保: 不等流を遡上する波状性段波に関する水理実験とその数値計算, 寒地土木研究所月報 第 658 号, pp. 29-36, 2008.

(2011.5.19 受付)