

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

STUDY ON IMPACT FORCE OF RIVER ICE FLOES CAUSED BY PROPAGATING TSUNAMIS IN A FROZEN RIVER

阿部 孝章¹・吉川 泰弘²・平井 康幸¹

Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA and 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 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

²正会員 博 (工) 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

The tsunami of 2011 Tohoku Pacific-Coast Earthquake broke river ice and transported thousands of meter-long ice floes in the Mu River, Hokkaido, Japan. The objectives of this study are to investigate sizes and areas of ice floes from photographs obtained during the field survey after the tsunami and, on that basis, to estimate the impact forces of ice floes transported by tsunami on river structures. Ice floe sizes were measured using composite photographs of field survey that were superimposed both on 10-m grid data and river planforms. From the results of image analysis of survey photographs, the authors have also estimated the impulsive force due to tsunami-induced collision of ice floes and river structures, based on a formula for measuring impact forces. The impact forces were approximately 22 to 55 kN on average and 100 to 300 kN as a maximum when ice floes collide with a structure. This paper provides valuable information about the criterion for the design of river structures assuming winter-time tsunami disasters.

Key Words : *Tsunami Run-up, Frozen Rivers, Ice Floe Transport, Impact Force Estimation*

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日、三陸沖を震源とした東北地方太平洋沖地震が発生した。地震による被害に加え、東北地方で発生した大津波により沿岸域のみならず河川域において破堤、落橋、水門破壊、氾濫等、多様かつ甚大な被害がもたらされた。これまで世界的にも河川津波の危険性は指摘されていたが¹⁾、今次津波を受け、河川施設に関しては津波の流体力を考慮して設計を行うことと政府より提言された²⁾。

一方で、この地震による津波は北海道の複数河川にも侵入が確認された³⁾。12 月から 4 月は北海道における河川結氷期間であり、地震直後に実施した現地調査では、津波により破壊されたと考えられる氷板が漂流物化し、河道内に多数堆積しているのが確認された⁴⁾。この結果は、積雪寒冷地においては河川津波の流体力のみならず、漂流氷板の衝突力を考慮して施設設計を行うことが必要であることを示唆している。

これまで、津波による漂流物の衝突力に関する研究は様々な取り組みが行われている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。また、北海道と同様に寒冷地域である北米において、河川結氷が構造物に加える負荷を検討した例⁸⁾はあるが、津波による氷の急激な移動を対象とはしていない。河川結氷の

津波による漂流物化と急激な移動を対象とした研究は、著者ら⁹⁾による実験的研究を除きほとんど見られない。更に、実際に発生した河川津波による氷の衝突力を定量的に評価した例は既往研究では見られないのが現状である。

以上のような背景から、本研究では河川津波に伴う漂流氷板による構造物への衝突力評価を行うことを目的とした。そのためにまず、津波来襲後河道内に堆積していた氷板痕跡の写真から画像解析手法により氷板サイズを明らかにした。続いて次元河氷変動計算モデルと、現地で計測した氷板厚から氷板の質量を推定した。最後に既往研究による衝突力推定式から構造物への衝突力を簡易的に推定した。

2. 研究手法

(1) 現地調査及び調査写真の画像解析

本研究の調査対象流域は図-1 に示した北海道の太平洋岸に位置する鶴川下流部である。北海道開発局の調査によって、河川津波は河口から KP.5.0 地点まで遡上が確認された。なお、本稿において KP. の後に続く数値は河口からの距離 [km] を表している。著者らは 3 月 11 日の地震後、北海道太平洋岸地域で津波注意報が解

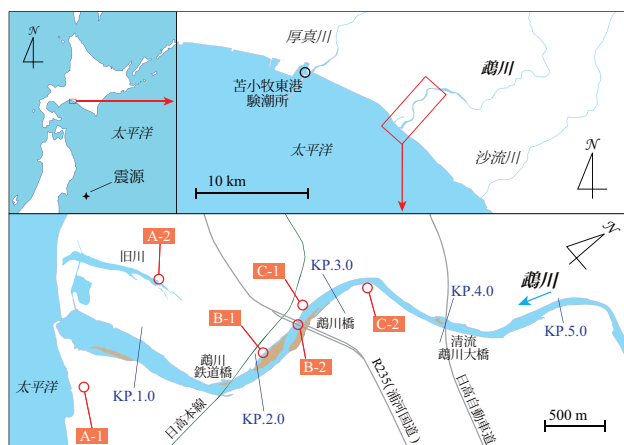


図-1 鵺川下流域の概況と橋梁の位置

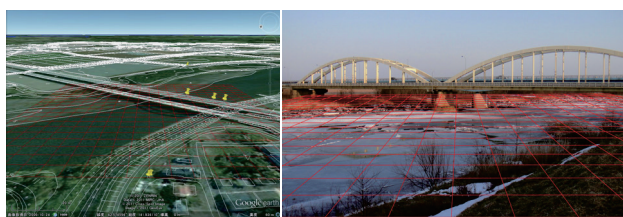


図-2 10 m グリッドデータを重ね合わせた河川平面図及び調査写真の図。撮影角度に応じてグリッドを傾斜させている。

除された直後、3月13日と14日の二日間にかけて現地調査を実施した。この当時、太平洋沖で余震が頻発していたため、低水路周辺での詳細な調査は危険が伴うと判断された。そこで、避難経路を確保しつつ安全かつ迅速に痕跡状況の概略を把握するため、堤防や高水敷上からの写真撮影を行った。

次に、津波痕跡に関する定量的な評価を実施するため、画像解析手法を次の二段階に分けて適用した。一つは、調査写真から氷板の最大長を計測し、堆積していた氷板サイズの縦断的な傾向を把握することである。もう一つは、漂流氷板の面積を推定するため、痕跡調査写真から氷板の輪郭を抽出したものである。

氷板のサイズについては、以下の方法で計測した。まず図-2左に示したように、河川改修平面図CADデータ上に、10 m 間隔のグリッドデータを生成する。その上で、撮影した位置や撮影角度を考慮した上で、河道形状や構造物の位置を参考にしつつ、グリッドを傾斜させて調査写真に重ね合わせた（図-2右）。写真上で見た氷板輪郭の最も離れた点同士を結ぶ線長 L_{imax} をサイズとし、グリッドとの相対的な大きさから1 m 単位で計測した。

次に氷板の面積については、上記と同様の手順でグリッドを写真に重ね合わせ、上面の輪郭が明瞭に抽出できる氷板について抽出を行った。そして上述とは逆の手順で変換を施して氷板輪郭とともにグリッドを平面図上に展開し、平面図上での面積を計測した。

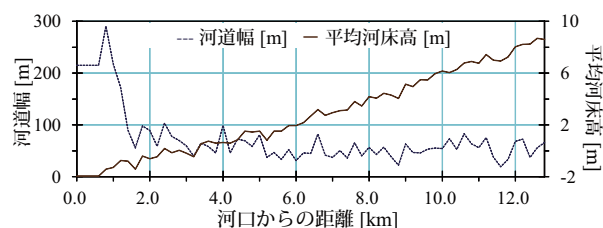


図-3 河水変動の1次元計算領域 (KP.0.0~12.6)

(2) 河水変動計算

本研究では構造物への氷板の衝突力の評価を最終的な目的としている。それには氷板質量の情報が必要となり、上記で求めた氷板面積の他に、氷板厚が必要となる。そこで、本研究では吉川ら¹⁰⁾によって提案された一次元河水変動計算モデルによる計算を実施し、津波侵入直前の河道内の縦断的な氷板厚を推定した。計算の概略は以下の通りである。

陽的な差分式によって連続式と運動方程式を解き、水位 H_z は次式より算出した。 $H_z = Z + h_w + (\rho_i/\rho_w)h_i$ 。但し、 Z [m] は河床高、 h_w [m] は有効水深、 h_i [m] は氷板厚、 ρ_w [kg/m³] は水の密度で 999.8、 ρ_i は氷の密度で 917.4 を与えた¹⁰⁾。氷板厚 h_i の算定には次式を用いた。

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5} \right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{45.8}{10^2} \right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 h'_i [m] は Δt 秒前の氷板厚、 T_a, T_w [°C] は気温及び水温で、鵺川水位観測所における1時間毎の観測データを与えた。 α, β は地点固有の係数を表す。前者は氷板形成の程度を表し、後者は氷板融解の程度を表す係数である。本研究では一定値の $\alpha = 0.35, \beta = 1.62$ と与えて計算を実施した。2009年の測量データに基づく計算領域を図-3に示した。上流端の境界条件は、冬期間（主として結氷時）に鵺川 KP.26.0 の栄水位観測所において観測された水位データと流量観測データに基づき水位流量曲線を作成し、1時間毎の流量を与えた。下流端の境界条件は鵺川河口から西に約10 km 離れた地点の苫小牧東港における潮位データを標高 [T.P.m] に換算し、1時間ごとに与えた。計算時間間隔 Δt は1秒、計算格子間隔 Δx は200 m として与えた。粗度係数 n は一定値の0.025を与えた。

本モデルによる推定結果は、北海道開発局により冬期間に実施された流量観測時の結氷厚さのデータ、さらに(1)節の現地調査において各調査地点で無作為に数枚抽出した氷板痕跡について厚さ h_i を計測した結果と比較し、精度の検証を行った。

(3) 衝突力の評価

池野ら⁶⁾は、次元解析や碎波段波津波・陸上遡上津波による漂流物衝突力に関する実験結果より、津波に伴う漂流物衝突力の支配的なパラメータとして

$V_H/g^{0.5}(DL)^{0.25}$ を見出した。但し、 D は漂流物の代表的な高さ、 L は代表長さである。本研究では D に氷板厚 h_i 、 L に氷板の最大長 L_{imax} を選択した。

この支配パラメータを基に衝突力 F_H の算定式は以下のように表される。

$$F_H = \frac{5gMC_{MA}V_H^{2.5}}{g^{1.25}(DL)^{0.625}} \simeq \frac{5g\rho_i A_i h_i C_{MA} C_H^{2.5}}{g^{1.25}(h_i L_{imax})^{0.625}} \quad (2)$$

但し、 M は漂流物の質量、 C_{MA} は質量係数、 V_H は漂流物の衝突直前の移動速度、 C_H は津波の波速、 A_i は画像解析で求めた氷板面積である。池野ら⁶⁾は $C_{MA} = 2.0$ とした場合、漂流物の形状によらず 3 次元衝突時の実験結果との相関が良いとしているため、本研究でもこれに従った。水面上に浮かんだ漂流物の場合、津波のような長周期波による輸送では、 V_H は C_H に近い値となることが既往研究⁶⁾⁷⁾で確認されているため、本研究でも簡単に $V_H \simeq C_H$ とみなした。

F_H の推定については、鵜川 KP.2.6 地点の低水路内に存在する鵜川橋の橋脚に、河川津波により下流側から上流側に向かって氷が衝突することを想定した。上記で求めた氷の質量、式 (2) により、 F_H を推定した。ここで、波速 C_H については、鵜川における河川津波が長波の波速と津波侵入前の断面平均流速 v との相対速度；

$$C_H = \sqrt{gh} - v \quad (3)$$

で遡上すると仮定して推定した。 v は H - Q 式から求めた流量を河積で除して求めた。水深 h を第一波による水位変化と鵜川橋地点の平均河床高から算定し、約 3.9 m/s と推定した。なお、本稿では紙面の都合上掲載を割愛するが、式 (3) で求めた河川津波の波速は、道内の一級河川である十勝川、新釧路川における第一波の波速³⁾を概ね ± 0.5 m/s の精度で評価可能であることを別途確かめている。

3. 結果及び考察

本章では、調査写真から抽出した氷板サイズの計測結果、その河川縦断的な傾向、そして河水変動計算モデルから推定した氷板の質量、衝突力推定式から評価した構造物への衝突力を示す。

(1) 現地調査及び画像解析結果

本研究で実施した鵜川における津波痕跡状況を写真-1 に示した。KP. の数値の後の L,C,R はそれぞれ左岸側、河道内、右岸側を表している。なお、写真に付した A-1 等の番号は撮影位置で、図-1 のそれと対応している。最上段の 2 枚の写真は河口からおおよそ 1 km までの調査写真である。A-1 は KP.0.4 地点の左岸側堤防から河口を撮影したものであり、氷板が点々と散乱して



写真-1 氷板痕跡の調査写真の分類; 区間 A (左), 区間 B (中央) 及び区間 C (右)

いる様子が確認された。A-2 は鵜川河口の右岸側に存在する旧川付近の氷板散乱状況であり、水面近傍に集中的に氷板が散乱していた。

中央段 (B-1,2) の 2 枚は、KP.2.4 付近で発生したアイスジャムの概況を示す写真である。B-1 はアイスジャムフロント部の写真であり、この地点のみ低水路内に氷板が折り重なるように堆積して河川横断方向に堰を形成していた。B-2 は KP.2.6 地点の鵜川橋より下流を撮影したものである。鵜川では概ね KP.1.9~KP.2.5 の右岸側、KP.2.4~KP.2.7 の左岸側に砂州が形成されているが、撮影当時はいずれにおいても無数の氷板が堆積していた。

最下段の 2 枚は、KP.2.6 のアイスジャムよりやや上流で、氷板の河道内での滞留が確認された地点の写真である。これらの地点では河川結氷に亀裂が入った状態で氷板が滞留していた。

次に、これらの写真に上記の画像解析手法を適用し抽出した L_{imax} を図-4 に示した。同図左の写真は、写真-1 と同位置で撮影したもので、右は各写真における氷板の L_{imax} に関するヒストグラムである。但し、ヒストグラム中の N は抽出した氷板数、Mean, Min., Max. はそれぞれ L_{imax} の平均値、最小値、最大値を表す。図-4(a) の河口付近の写真については、 L_{imax} が 1 m から 4 m までのものがほとんどであり、4 m を超えるものの数は少なかった。一方で、下段の旧川付近の堆積氷板については、サイズに関して単調減少の分布と

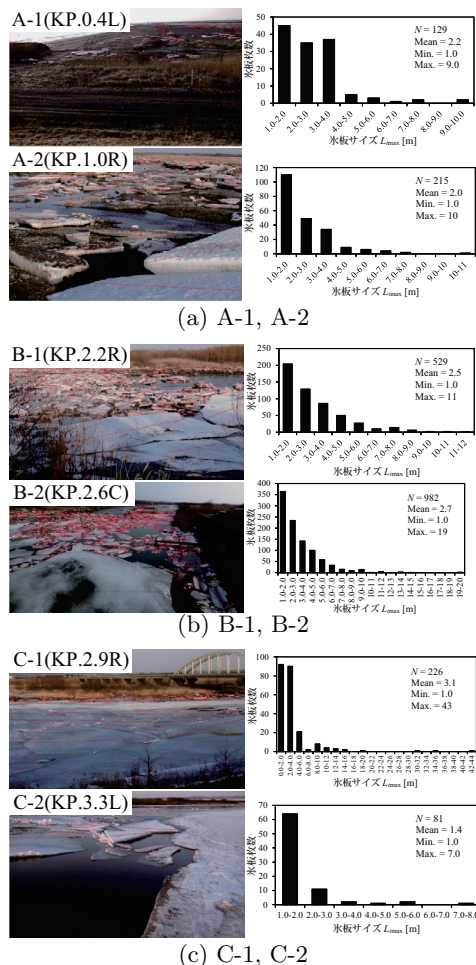


図-4 A-1～C-2の写真から抽出した痕跡氷板のサイズ；写真内の赤線が氷板の L_{max} を表し、右段のヒストグラムは各 L_{max} の頻度を示す。

なった。

図-4(b)のアイスジャム付近の写真については、フロントでは529枚、全景写真では1000枚近い氷板を抽出した。 L_{max} の分布から、区間Aの地点と比較すると L_{max} の大きい氷板の数が増えており、砂州に堆積していたもので最大11m、滞留していたもので最大19mであった。図-4(c)について、上段では砂州上の堆積氷板に比較すると、河道内の滞留氷板は L_{max} が相対的に大きい。なお、この地点の水面幅は約50mである。

以上の現地調査結果を踏まえ、鵲川における河川津波痕跡の区間として表-1のように分類を行った。3区間のうち、中央のアイスジャム発生点を基点として考えるのがわかりやすい。区間Bについてまず考察を行うと、鵲川では津波侵入前、遡上区間に結氷が生じていたと考えられる。そこに河川津波が侵入し、結氷を破壊しながら遡上し発生した多量の漂流氷板により狭窄部でアイスジャムが発生したものと推察される。

これに関連し、同じ北海道の1級河川浦幌十勝川において、松川ら¹¹⁾は津波による結氷移動の観測に成功

表-1 鵲川において確認された痕跡の主要な分類

区間	KP.	特徴
A	KP.0.0 (河口) - KP.2.4	砂州・高水敷上での氷板散乱
B	KP.2.4 - KP.2.6 (鵲川橋)	アイスジャム発生点と直上流
C	KP.2.6 - KP.5.0 (遡上限界)	鵲川橋より上流； 滞留氷板や結氷への亀裂

している。彼らによれば、まず河口の結氷が巨大な氷板の形で遡上し、それが橋梁に衝突して小さく破碎されつつ遡上し、小氷板が引き波時に流下したとされている。鵲川でも同様の形態で氷板輸送が生じた可能性があり、鵲川ではKP.2.4付近の狭窄部の存在がアイスジャムの誘因となり得たと考えられる。

輸送された漂流氷板のうち、アイスジャムに捕捉されなかったものについては、引き波によって下流へと流れ、一部が高水敷や河口付近の砂州に堆積したものと考えられる。これが区間Aに見られるような氷板痕跡の由来であると推測できる。漂流物化した氷板は、高水敷等へと散乱していく過程で河岸や植生と、あるいは相互に衝突することで氷板が更に細かく破碎されたと推定される。これは L_{max} の平均値が(区間A)<(区間B)であることから類推される。

下流へと流出しなかった氷板は上流側で滞留していたと考えられる。これが区間Cに分類された氷板痕跡である。区間Cの上段については、非常に大きな氷板の滞留が確認されたが、これはアイスジャムの直上流付近までとは異なり、津波による水位変動が生じる機会が少なく、大きくは移動せずに、亀裂が入ったのみの状態で滞留したものと考えられた。アイスジャムによる河道閉塞は水位上昇をもたらしたばかりでなく、河道内に多量の氷板を滞留させる効果があったことも今次津波を特徴付ける重要な現象と言えよう。

図-4(c)下段は上段よりやや上流地点であるが、平均的に小さい漂流氷板が生じている。この付近では河床勾配 i_b が大きくなっており(図-3)、流速がやや大きくなると考えられる。そのため他地点に比べて結氷が薄く、その分氷板が割れやすくなったものと推察された。縦断的な結氷厚を含めた考察に関しては次節で更に詳しく検討を行う。

(2) 痕跡氷板の質量及び衝突力の推定

まず、本研究で実施した河水変動計算に関して、モデルの妥当性を観測データにより検証する。図-5に示したのは、KP.2.55の鵲川水位観測所地点において、北海道開発局により実施された現地観測データと計算による氷板厚のデータを比較したものである。

図-5に関して、観測データでは43、50日目で結氷が急激に発達しているが、計算ではそれが再現できず、ゆるやかに上昇している。また観測では79日目で氷板厚が下がり始めているが、計算ではそれが再現できてい

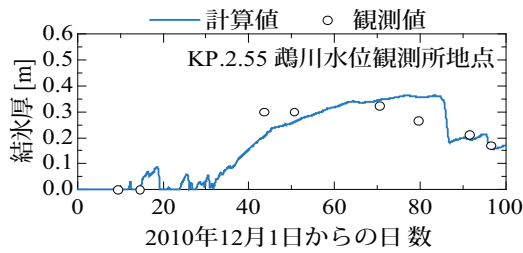


図-5 氷板厚 h_i の河氷変動計算モデルによる推定値及び実測値 (2010 年 12 月 1 日～2011 年 3 月 11 日)

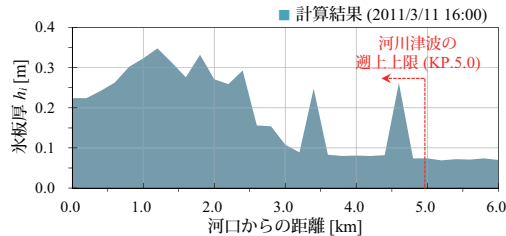


図-6 1次元河氷変動計算モデルにより推定した氷板厚の縦断分布

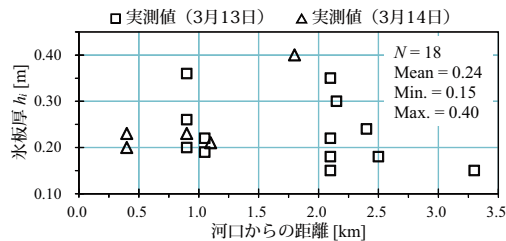
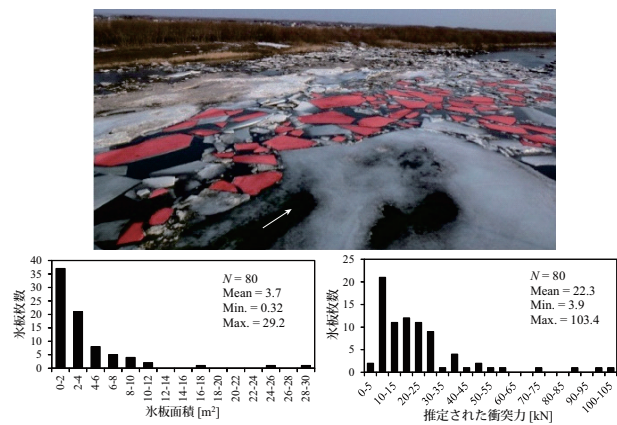


図-7 現地調査時の氷板厚 h_i の計測結果

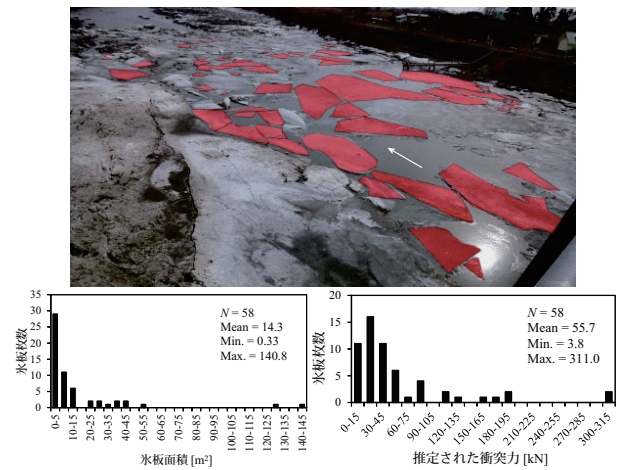
ない。これは氷の形成・融解に関するパラメータ (α と β) を全期間で固定しているためと考えられ、再現性向上のためには両パラメータの時間変化をも考慮する必要があると考えられる。そのほかの点については、計算による予測値は概ね良好に氷板厚を再現できていると言える。特に 91, 96 日目 (3 月 2, 7 日) の 2 回の計測について再現性は良好である。

以上で計算モデルがある程度の再現性を有していることが確認されたことから、このモデルを用いて縦断的な分布に関する検討を進める。図-6 に示したのは、計算により推定した、鵠川水位観測所で津波が観測される直前 (3/11 16 時) の段階での縦断的な氷板厚の分布である。河口から KP.2.4 までは 0.2 m 以上の厚さであり、KP.1.2 において極大値を持つ。KP.2.6 より上流では氷板厚は小さくなっているが、これはこの地点の上流部が河口部に比して急勾配なため、氷の融解が進行したためと考えられた。KP.3.3 と KP.4.6 で局所的に厚い分布となっているのは、この付近で河床勾配が小さくなっているためである。

次に、現地調査時に高水敷上で観測された氷板痕跡の実際の厚さを図-7 に示した。厚さの計測は 13 日と 14 日に行ったが、両日で顕著な相異は見られない。河口から KP.1.05 付近までは、0.36 m (KP.0.90) の 1 枚を除き、概ね 0.20 m から 0.25 m までの厚さがあった。ア



(a) 3/13, 16:00 頃撮影



(b) 3/14, 14:15 頃撮影

図-8 氷板輪郭を抽出した調査写真及び、輪郭から計測した面積及び推定衝突力のヒストグラム

イスジャム発生点を含む KP.2.0 から上流の区間では、 h_i は 0.15 m から 0.35 m までとばらつきが大きくなった。痕跡氷板の枚数に比して h_i を計測した枚数が少なく断言は難しいが、3 月 11 日の津波発生前、津波侵入区間において h_i は河川縦断的に分布を持っており、津波による破壊と輸送が生じたために、遡上あるいは流下して図-7 のような h_i 分布の攪乱が起こったと推定される。

更に、(1) 節の既に行った考察より、氷板が大きく漂流したと考えられるのは KP.3.0 より下流であったと考えられる。そこで、河口から KP.3.0 までの h_i を単純に平均し、 $h_i = 0.26$ として以下の検討を実施した。図-6 の計算結果より、この区間の h_i は 0.11 m から 0.35 m である。図-7 から h_i の実測値も類似した範囲にあり、おおその氷板質量を評価するという目的に照らし合わせれば、まずまずの精度であると考えられる。

図-8 は、鵠川橋とアイスジャム発生点の間の領域で、面積を抽出した氷板とその輪郭、各写真についての面積と漂流衝突力のヒストグラムである。図-8(a) は左岸の砂州を含めて撮影した写真である。手前に写っている巨大な浮遊氷板は輪郭の一部が写真外にあるた

め抽出していない。平均値は 3.7 m^2 であり、最も面積の大きい氷板は約 30 m^2 であった。右列のヒストグラムより、各氷板が構造物に衝突した場合、平均して約 20 kN、最大で 100 kN ほどの衝突力が発生し得るという結果となった。

図-8(b) は 3 月 14 日に鵠川橋から水位観測所近傍を撮影したものである。いずれの写真からも、水位観測所付近に滞留している氷板の面積は 3 月 13 日に撮影した写真のものより大きい。衝突力については、平均して約 50~60 kN、最大で 300 kN と推定された。

ほぼ同地点における滞留氷板に関して、1 日後に上記のように面積が大きくなったのは、津波侵入によって氷板配置の変化が生じたか、または河川流により上流の滞留氷板が一部、流されてきたためと推定できる。また、3 月 13 日の写真で抽出できなかった手前側の巨大氷板が、水位変化の作用で分解し小さいサイズとなった可能性もある。このように橋脚への衝突力に関して危険側に推定されたのは、アイスジャム上流で大量の氷板滞留が続いたことに由来していると言える。今後の寒冷地域における河川津波対策に関しては、水位上昇以外にもアイスジャムによるこうした副次的な効果を十分に考慮する必要がある。

4. まとめと今後の課題

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波によって破壊が生じた鵠川の河川結氷に関して、調査写真の画像解析に基づく氷板サイズの計測を行った。更に画像解析と数値計算、調査データを基に津波侵入に伴う氷板の衝突力を推定した。衝突力の推定は橋脚周辺で巨大氷板の滞留が確認された鵠川橋を対象とした。

得られた結果として、河川津波による氷板の衝突力は 3 月 13 日~14 日の調査時で平均して 20 kN~55 kN、最大で 100 kN~300 kN と推定された。これらは構造物の設計に際して決して無視できない作用力であると言える。少なくとも今後は、寒冷地域においては河口付近の国道橋等重要な河川構造物の設計に際しては河川津波による氷板衝突を考慮し、何らかの対策を施すことが望ましいと言える。

現時点で著者は、上記で用いた画像解析手法により計測した氷板サイズの誤差を検証するための情報を持ち合わせていない。また、本研究の検討では便宜的に与えた式 (2) 中の質量係数や漂流物 (氷) の材料物性も考慮に入れて検討を行うことが本来望ましい。これらの点について、引き続き検討していくこととしたい。

河川津波と河川結氷の相互作用を考慮した構造物の設計基準を定めるためには、今後も同様の結氷時河川津波が発生した際の現地観測が非常に重要と言える。本研究で提案した一連の簡易推定手法を用いれば、調査

写真から氷板の質量を評価し、衝突力の評価を行うことが可能である。

また、本研究で対象としたのは河川津波の遡上方向と氷板の輸送・衝突方向が非常に近い場合である。本稿では触れなかったものの、樋門ゲートへの河川津波の衝突が映像で確認されている⁴⁾。堤防内構造物のように、津波遡上方向とは異なる角度で発生する氷板衝突に関する検討も重要であり、今後水理実験や数値解析手法を併用して検討を進めていく予定である。それらの知見が明らかとなれば、積雪寒冷地域における河川津波特性を考慮した、河川構造物の設計基準の立案へ貢献することが期待される。

謝辞：本研究の遂行にあたり、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部には水文・水質・河道諸元データ等を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。また、現地調査にご協力頂いた関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Yasuda, H., Watanabe, Y., Mitamura, H., Hasegawa, K. and Nawarathna, B.: Report on Asian tsunami ascending the river, and its associated bank erosion and bridge failure in Sri Lanka, Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, IAHR, pp. 1231-1236, 2005.
- 2) 河川津波対策検討会: 河川への遡上津波対策に関する緊急提言, 国土交通省報道発表資料, p. 1, 2011 年 8 月.
- 3) 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸: 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp. I.1525-I.1530, 2012.
- 4) 阿部孝章, 吉川泰弘, 矢野雅昭, 永多朋紀, 稲垣達弘, 桃枝英幸, 村上泰啓, 平井康幸: 2011 年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の結氷河川における遡上状況及び氷板痕跡調査, 寒地土木研究所月報, 第 705 号, pp. 20-30, 2012.
- 5) 松富英夫: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp. 111-127, 1999.
- 6) 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.
- 7) 水谷法美, 高木裕介, 白石和陸, 宮島正悟, 富田孝史: エプ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.
- 8) Johnston, E., Timco, W. and Frederking, R.: An overview of ice load measurements on bridge piers, Proceedings of the 10th Committee on River Ice Processes, pp. 290-302, 1999.
- 9) 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, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp. 359-364, 2011.
- 10) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 寒地河川における河氷変動と水位変化に関する研究, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp. 247-252, 2010.
- 11) 松川優一, 荒繁彦, 加藤三明, 油川曜佑, 渡邊幸一, 長岡宏樹, 山口甲: 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した北海道十勝川河川津波の観測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp. I.1513-I.1518, 2012.

(2012.4.5 受付)