

# 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

## Measuring the Sizes of Drifting Ice Floes Caused by Tsunami Propagating up the Rivers in Pacific Coastal Areas of Hokkaido

阿部孝章<sup>1</sup>・吉川泰弘<sup>2</sup>・平井康幸<sup>3</sup>

Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA and Yasuyuki HIRAI

In Hokkaido, Northern Japan, the tsunami of 2011 Tohoku Pacific-Coast Earthquake broke river ice and transported thousands of meter-long ice floes in rivers whose mouths are on the Pacific Coast. The objectives of this study are to investigate sizes and areas of ice floes by using photographs obtained during the field survey conducted after the tsunami and, on that basis, to estimate the masses of floes transported by the tsunami. Sizes and areas of them were measured using an image analysis technique and ice thicknesses are measured on site. In an extreme case, the estimated masses were approximately 1.2 to 20 ton on average and 5.0 to 170 ton as maximums of floes retained near the bridge piers. This work highlights the potential risks of ice floes, which can be hazardous to river structures such as bridge piers.

### 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や落橋、氾濫等甚大な被害もたらされた。世界的にも、予てから河川津波の危険性は指摘されていたが(田中ら, 2006)、今次津波を受け、河川施設に関しては河川を逆流する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(河川津波対策検討会, 2011)。

一方で、この地震による津波は北海道の複数の1級河川にも侵入が確認された(阿部ら, 2012a)。12月から4月は北海道における河川結氷期間である。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(阿部ら, 2012b)。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するものである。しかし、河川津波により破碎された氷板の質量や輸送速度が分かっていないため、現状では河川構造物に対する衝突力を評価することが非常に困難である。

海洋域において、流水は沿岸構造物に損傷劣化等の様々な悪影響を及ぼすため、また、地球規模での海水の

形成について現象を解明するため、そのサイズを計測する試みは以前から国内外で行われている。例えば、衛星画像、航空撮影写真等を用いた、Rothrockら(1984)、Inoueら(2004)、そしてToyotaら(2006)によるものがある。しかし、この種の解析手法は、河川域において、3月という解氷期に、急速に融解する氷板津波痕跡について適用することは、時空間的に対象とするスケールが異なるため困難である。

河川内を漂流する結氷の特性を把握する取り組みとして、山地河川で解氷期に流下する巨大氷板の挙動に関する検討もなされているが(Jasek, 2003)、流量と気温上昇により流下する漂流氷板を扱ったものであり、河川津波で破壊された氷に同様の手法を適用するのは困難である。寒冷地域である北米において、移動する結氷が構造物に加える負荷を検討した例(Johnstonら, 1999)もあるが、これも津波により破壊・漂流する氷を対象とはしていない。河川津波による漂流氷板の規模や質量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ための前段階として、河川津波による漂流氷板の質量を評価することを目的とした。そのためにまず、津波来襲後河道内に滞留・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の長辺及び面積を明らかにした。続いて質量を推定するために現地で計測された氷板厚のデータから、痕跡氷板の厚さを推定した。これらの結果から氷板の質量を簡易的に推定した。

---

1 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  
2 正会員 博(工) (独法)土木研究所 寒地土木研究所  
寒地河川チーム  
3 正会員 北海道開発局 札幌開発建設部  
札幌河川事務所長

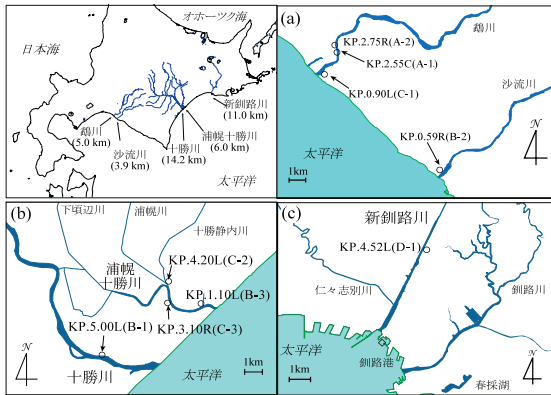


図-1 本研究の対象河川  
(左上図括弧内は河川津波の遡上距離)

## 2. 手法

### (1) 現地調査

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鷗川（むかわ）、沙流川（さるがわ）、十勝川、浦幌（うらほろ）十勝川、新釧路川である。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除された後、複数班に分かれ、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、低水路近傍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、堤防上や高水敷上からの写真撮影を行った。写真の撮影位置を図-1(a)～(c)に○で示した。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。

### (2) 調査写真の画像解析

氷板のサイズと面積を定量的に評価するため、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について、各地点での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

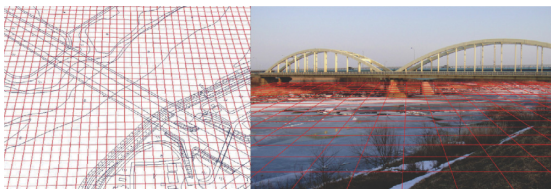


図-2 10mグリッドデータを重ね合わせた河川平面図及び調査写真（いずれも鷗川KP.2.60鷗川橋地点）

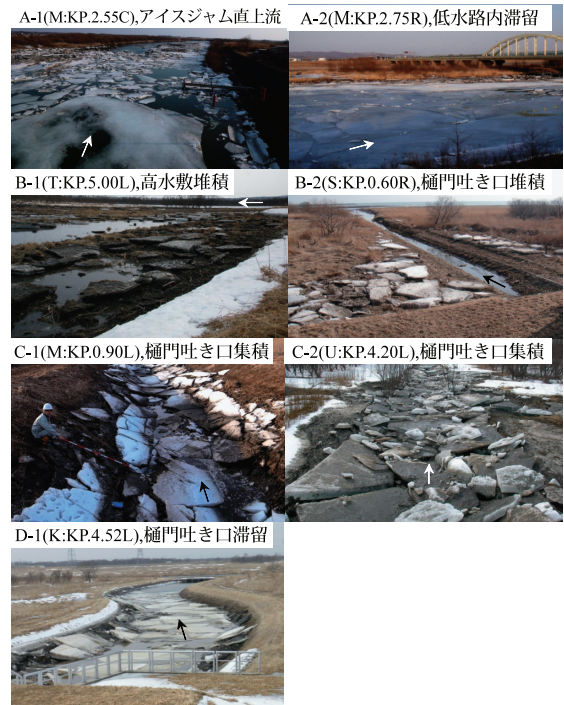


写真-1 氷板痕跡調査の分類  
(図中の黒または白の矢印は流向を表す)

に、格子状のグリッドデータを生成する。その上で、撮影位置や撮影角度を考慮した上で、平面図の川幅、橋梁位置等を基準にしてグリッドを傾斜させ、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 $L_{\max}$ を氷板のサイズとした。現在では痕跡が失われているため、本手法による誤差の定量的評価は困難である。この事実を考慮し、本研究では川幅や痕跡相互のサイズを比較するという目的に絞り、グリッドとの相対的な大きさから、1m単位で計測した。

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計測を行った。写真撮影により、痕跡を真上から見た状態（平面図）が写真内に投影された時、射影変換が行われたと考えて、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、平面図上で面積を計測した。

## 3. 結果及び考察

### (1) 現地調査結果

本研究で実施した各河川における津波氷板痕跡状況を写真-1に示した。KP.の数値の後のL, C, Rはそれぞれ撮影位置が左岸側、河道内（橋梁上）、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。また簡単のため、図表中

表-1 氷板痕跡の主要な分類

| タイプ | 特徴               |
|-----|------------------|
| A   | 低水路における氷板滞留      |
| B   | 高水敷上における氷板の散乱・堆積 |
| C   | 吐き口水路における多数氷板の集積 |
| D   | 吐き口水路における滞留      |

では河川を表す記号として鵠川はM, 沙流川はS, 十勝川はT, 浦幌十勝川はU, 新釧路川はKを用いることとする。

最上段の2枚の写真は鵠川のアイスジャム発生地点よりやや上流の調査写真である。A-1はKP.2.60地点の鵠川橋上から下流を撮影したものであり、KP.2.4付近で発生したアイスジャム(水による河道閉塞)の概況を示す写真である。鵠川では概ねKP.1.9~2.5の右岸側, KP.2.4~2.7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。A-2はアイスジャムより300mほど上流地点であり、低水路内に巨大な氷板の滞留が確認された。

B-1は十勝川における高水敷上の氷板散乱の様子、B-2は沙流川における樋門吐き口周辺の写真である。これらの地点では、高水敷上に多数の氷板散乱が確認された。これらは高水敷上で、互いにほとんど重なり合うことなく堆積していたため、河川津波の水位上昇によって漂流し、水位下降に従って堆積したと考えられた。

C-1は鵠川の河口付近の樋門吐き口水路、C-2は浦幌十勝川の支川浦幌川に接続する樋門吐き口水路における氷板痕跡である。B-1, 2の痕跡と異なるのは、氷板が何層にも重なって樋門吐き口水路の水面を覆うように堆積している点である。この種の痕跡は結氷時河川津波に独特のものと言え、最悪の場合は樋門ゲートの動作を阻害することも考えられる。今後、樋門等のオートゲート化が施される際にも、寒冷地では留意すべき現象と言えよう。

D-1は新釧路川KP.4.5地点の樋門吐き口水路の痕跡写真である。新釧路川ではこの地点のみ顕著な氷板痕跡が確認されたが、C-1, 2と異なり何層にも重なっている様子ではない。これは、この吐き口水路と本川の合流部手前に人道橋が掛けられており、そのピアが本川からの水の侵入・流出を抑制したものと推察された。

以上の調査結果を概括すると、北海道太平洋岸で確認された氷板痕跡の分類は、表-1のようにまとめられた。タイプAは、写真A-1, 2のような氷板の低水路内での滞留である。A-1は手前に巨大氷板が見られ、その周囲にやや小さい氷板が滞留している。A-2は大小様々な氷板が低水路を埋めるように滞留していた。タイプBは氷板が高水敷上に散乱している痕跡で、特に低水路の近くに

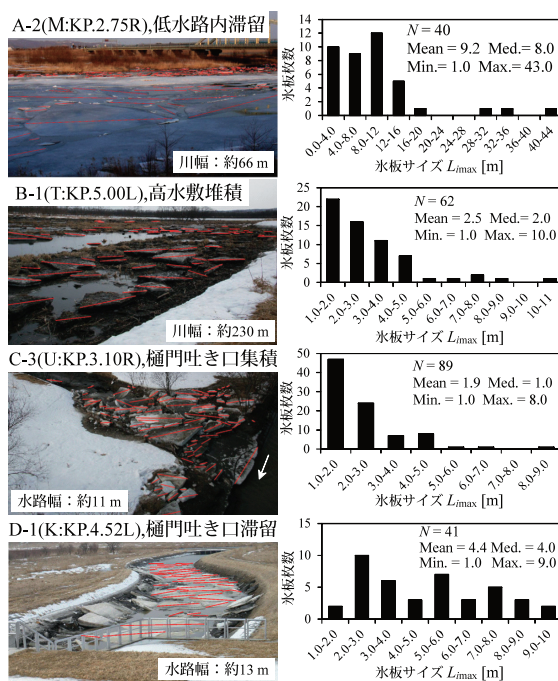


図-3 痕跡調査写真から抽出した痕跡氷板のサイズ(写真内の赤線が氷板の $L_{max}$ を表し、右段のヒストグラムは各区分の頻度を表す)

見られたものである。タイプCは、多数氷板が、折り重なるように樋門吐き口に集積した痕跡である。タイプDは、新釧路川でのみ見られた吐き口水路における滞留で、河川津波による水位上昇に伴い、亀裂が生じ、あまり相対位置を変化させずその場に滞留したと推定されるもので、発生メカニズムの観点ではタイプAの痕跡に近いと考えられる。

## (2) 氷板痕跡の最大長 $L_{max}$ 測定結果

タイプA~Dに分類された痕跡の調査写真に対し、画像解析手法を適用し抽出した $L_{max}$ を図-3に示した。但し、ヒストグラム中の $N$ は抽出した氷板数、Mean, Med., Min., Max.はそれぞれ $L_{max}$ の平均値、中央値、最小値、そして最大値を表す。

最上段は鵠川A-2の写真から抽出したヒストグラムである。但し、ここでは低水路内の氷板痕跡のみ抽出し、砂州上の多数の痕跡は除いている。最も頻度が大きいのは8.0~12mの区間であるが、計測の $L_{max}$ が30mを超える氷板も存在する。この写真に写っているKP.2.75付近を挟むKP.2.6, KP.2.8の横断面は、2009年の測量値で低水路幅がそれぞれ62, 67mである。30mを超える $L_{max}$ の氷板は、河岸との接続と河川津波の水位上昇により、最大応力の発生するほぼ中央部分で結氷が破壊され、各々のサイズとなったものと推定される。

B-1及びC-3の写真は、それぞれ高水敷上に散乱、吐き



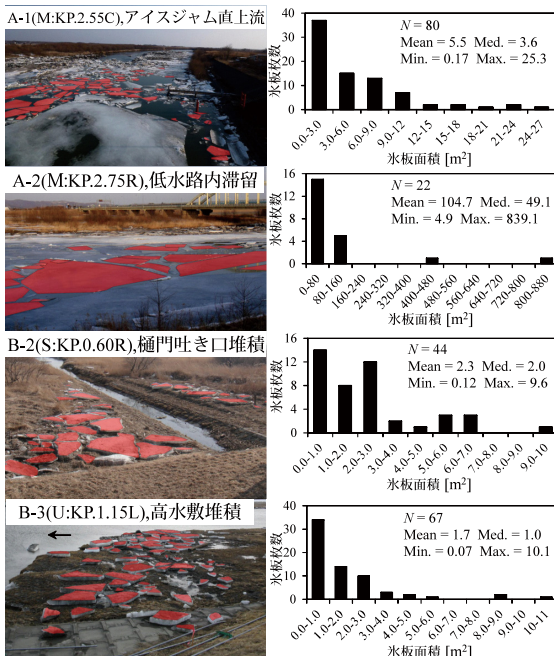


図-4 氷板輪郭を抽出した調査写真，及び，輪郭から計測した面積のヒストグラム

口水路に集積した氷板痕跡で， $L_{max}$ のヒストグラムは指数関数的に減少となった．これは，堆積するまでに，津波の水位上昇により結氷が破壊されてから，漂流しながら河岸や植生と，あるいは相互に衝突することで更に小さく破碎されたためと考えられた．漂流した時間，距離が長い程，破碎の機会が増え，サイズは小さくなる傾向にあると考えられる．

D-1の写真は，3. (1) 節でも言及したように吐き口水路内で破壊され，ほとんど位置を変えずに滞留した痕跡と考えられた．2.0～3.0，5.0～6.0，7.0～8.0の3つのピークを持つ分布となった．調査時の水面幅は約13 mであり，中央の5.0～6.0 m区間のピークは前段落の議論と同様に最大応力の発生点；中央部分での破壊から説明されよう．それを挟む2つのピークは，吐き口に侵入する津波フロントの波形勾配等，他の要素が原因となった可能性がある．

### (3) 氷板痕跡の面積 $A_i$ 測定結果及び質量の推定

本節では，顕著に氷板の滞留ないし漂流が確認された鵠川・浦幌十勝川・沙流川の3河川について，代表的な地点における氷板面積の計測結果を示す．更に，現地調査時に実際に計測された氷板厚のデータから，津波漂流物としての氷板の質量を概算する．

図-4に示したのは，3河川において調査写真から抽出した氷板上面の輪郭（塗り潰し部分）と，右段は輪郭に基づき計測された面積のヒストグラムである．表-2に示

表-2 3河川における氷板厚 $h_i$  [m]の計測結果

| 河川   | 鵠川       | 沙流川  | 浦幌十勝川 |
|------|----------|------|-------|
| 調査日  | 3/13, 14 | 3/13 | 3/14  |
| N    | 18       | 3    | 6     |
| Mean | 0.24     | 0.22 | 0.33  |
| Med. | 0.22     | 0.20 | 0.35  |
| Max. | 0.40     | 0.35 | 0.48  |
| Min. | 0.15     | 0.10 | 0.19  |

したのは，3河川の調査地点で，無作為に抽出した氷板の厚さを表にまとめたものである．

図-4より，A-1地点の滞留氷板の面積は平均して5.5m<sup>2</sup>であった．尚，写真最手前に滞留する巨大氷板は輪郭が写真外にも存在するため抽出していない．A-2地点の滞留氷板の面積は中央値でも約50m<sup>2</sup>，最大で800m<sup>2</sup>を超えた．B-2，B-3地点の写真については，面積平均値は1.7m<sup>2</sup>，4.4m<sup>2</sup>程度であり，鵠川の滞留氷板に比較すると非常に面積は小さい．しかしこれらの堆積氷板は，漂流と衝突を繰り返した後にこれらの大きさとなったと考えられ，津波による漂流開始時には更に大きい氷板であった可能性もある．

以下では，氷板質量を推定するための $h_i$ の代表値として中央値を用いることとした．これは以下のような理由による．最小値では，河道内で融解が進行していたと考えられる高流速部分等の氷板厚を用いることとなる．また，最大値では河岸部等の元来流速の小さい領域での氷板厚を用いることとなるためである．すなわち，最小値や最大値を用いると，漂流物群である氷板の質量を過小評価，あるいは過大評価する可能性があったためである．いずれの河川でも中央値と平均値の差は2cm程度であったが，上述のように局所的に大きい，あるいは小さい氷板厚の影響を除くため，3河川で統一して中央値を用いた．

鵠川の場合は表-2の中央値を用いると，A-2地点の滞留氷板について，平均及び最大面積を持つ氷板の質量はそれぞれ，約21t，170tと推定される．これは，東北地方において今次津波の漂流物として確認された車（約1～2t），漂流木（約0.1～1t）に比較しても数十倍から数百倍の質量で，漁船等の船舶にも匹敵する質量である．

沙流川及び浦幌十勝川で確認された痕跡氷板の質量についても， $h_i$ の中央値を用いて推定した．その結果，A-1，2地点の滞留氷板よりも面積が小さいとは言え，沙流川（B-2地点）では平均で約0.4 t，最大で約1.8t，浦幌十勝川（B-3地点）では平均で約0.5 t，最大で約3.2tと推定された．

河川結氷は，寒冷地の気象条件により毎年形成されるもので，ハード対策が困難であるという特性を持つ．寒

冷地の河口域において国道橋等の重要構造物の設計に際し、津波漂流物の衝突を考慮する場合には特に留意すべき結果と言える。

#### 4. まとめ

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太平洋岸に河口を持つ河川の結氷に関し、調査写真の画像解析に基づく氷板サイズ、面積の計測を行った。更に画像解析と調査データを基に津波侵入に伴い発生した氷板の質量を実現象に基づき推定することに成功した。

得られた結果として、河川津波による滞留氷板の質量は鵠川橋周辺で平均値としては約1t~20t, 最大では5t~170tと推定された。これらが河川津波の表面流速により輸送され、仮に構造物等へ衝突が発生した場合、それ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よう。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・鉄道橋等重要な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、衝撃を弱める緩衝材等の対策を早急に施すことが望ましいと言える。

現在では氷板痕跡は消失しているため、上記画像解析手法による計測誤差を検証するための情報を再度収集することは、非常に困難である。また、本研究の検討では簡易に推定することしかできなかった氷板厚も考慮に入れ、検討を行うことが本来望ましい。更に、氷板のサイズを決定する要因となる波高等の津波外力、構造物等との衝突による氷の破碎過程、氷の材料物性等を踏まえた議論には至っていない。以上の点について、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。本研究で適用した一連の簡易推定手法を用いれば、調査写真から生じた氷板痕跡の面積を計測し、簡易に質量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主に低水路周辺で滞留または堆積していた氷板である。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(阿部ら, 2012b)。樋門等の堤防内構造物は、津波遡上の方角とは異なる角度で氷板衝突が発生する懸

念があり、今後水理実験や数値解析手法を併用し、発生外力の検討を進めていく予定である。以上のような知見が蓄積されてゆけば、積雪寒冷地域における河川津波特性を考慮した、安全な河川構造物の施設設計に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、帯広、釧路各開発建設部には河道諸元データ等をご提供いただきました。また、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者: 渡邊康玄, 課題番号24360197)の補助を受けました。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も謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸 (2012a): 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 (4), pp. I\_1525 - I\_1530.
- 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 (2012b): 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, No.705, pp. 20 - 30.
- 河川津波対策検討会 (2011): 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, 2011年8月, p. 1.
- 田中 仁, 中川 一, 石野和男, 矢野真一郎, Bandara Nawarathna, 安田浩保, 渡邊康玄, 長谷川和義 (2006): スマトラ沖地震津波によるスリランカでの被害に関する現地調査-河川被害を中心として-, 水工学論文集, 第50巻, pp.577 - 582.
- Inoue, J., M. Wakatsuchi and Y. Fujiyoshi (2004): Ice floe distribution in the Sea of Okhotsk in the period when sea-ice extent is advancing, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L20303, 4 p.
- Jasek, M. (2003): Ice jam release surges, ice runs, and breaking fronts: field measurements, physical descriptions and research needs, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 30, pp. 113 - 127.
- Johnston, E., W. Timco and R. Frederking (1999): An overview of ice load measurements on bridge piers. *Proceedings of the 10th Committee on River Ice Processes*, pp. 290 - 302.
- Rothrock, D. A. and A. S. Thorndike (1984): Measuring the sea ice floe size distribution, *Journal of Geophysical Research*, Vol.89, No.C4, pp. 6477 - 6486.
- Toyota, T., S. Takatsuji and M. Nakayama (2006): Characteristics of sea ice floe size distribution in the seasonal ice zone, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L02616, 4 p.