

# 寒冷地河口域の津波発生時における氷板サイズ分布の推定に関する研究

## Study on the Estimation of Ice Floe Size Distribution in Cold-region Estuaries Found in a Tsunami Event

阿部孝章<sup>1</sup>・吉川泰弘<sup>2</sup>・佐藤好茂<sup>3</sup>・伊藤 丹<sup>4</sup>

Takaaki ABE, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yoshishige SATOH and Akashi ITOH

In cold-region estuaries tsunamis can cause ice cover breakup, ice floe transport and consequent collisions between floes and riverine or coastal structures. The size distributions of ice floes can provide various kinds of information in defining design standards for structures against tsunami run-up. In this study sizes of ice floes after a tsunami event are measured using an image analysis technique and their size-distributions are investigated. A power-law dependence of the cumulative number of broken ice floes whose sizes larger than  $d$  was found;  $N(d) \sim d^{-\alpha}$ , which has been frequently observed in the geophysical and engineering contexts. Although there was an increasing deviation from the power law in some regions, the size distribution in four class-I rivers and a lake was found to obey a power law with similar scaling exponents around 2.8.

### 1. はじめに

2011年3月の東北地方太平洋沖地震津波により、沿岸域のみならず河川域でも広範な被害が生じた。一方、この津波は北海道沿岸域にも到達し、結氷で覆われていた河川を遡上して氷の破壊を生じ、これらは多量の氷板漂流物となった。過去には、1952年に発生した十勝沖地震では氷板を伴う氾濫流が堤防を越え被害を拡大させたことが報告されている。しかし、漂流物化する河口域の氷板の諸元は明らかにされておらず、氷の衝突を考慮した河川構造物の設計や氾濫時の建築物への作用外力を明確に推定することができないのが現状である。多数の漂流氷板の外力推定や、防御のための構造物を設計する際には、氷板漂流物の諸元に関する情報が必要となる。

海洋域において、気象や漂流の結果発生する氷板群の諸元については、いくらかの既往研究が存在する。著者らの知る限り、破壊された海水のサイズについて初期に体系的な考察を加えたのはRothrockら（1984）である。これを皮切りに、Lensu（1990）は南極海の一部であるウェッデル海の氷、Toyotaら（2006）はオホーツクの海水、国松ら（1993）はオホーツク海域でも特に沿岸域の海水に着目した検討を実施した。これらの検討では共通して、氷のサイズ分布が簡単な冪乗則に従うことを示している。

一般的に様々な長さのスケールにおいて、物質（巨大

なものでは天体の破壊による小惑星の生成、小さいものでは石膏塊・ジャガイモ・ガラス棒を落下させた時生じる小片等）に依存せず、「破壊」という作用により現れた小片のサイズは冪乗則に従うということが、統計物理・物性論的に知られている（早川, 1996）。こうした破壊後の小片（Fracture）に見られるサイズの法則性は、フラクタルと総称されている。上記の文献の中には、氷もフラクタルの性質に従う物質の一つであるという文脈として議論を進めたものがある。こうした知見を津波漂流物としての氷に当てはめることはできないだろうか。現状では、河口域の津波時における氷の破壊サイズは実測値が少なくほとんど明らかになっていない。また、河川における氷板サイズ分布はアイスジャム（氷による河道閉塞）等の現象を考慮する上で重要なパラメータであることが指摘されているが（吉川ら, 2014）、現地におけるサイズ分布に関する知見は十分に得られていない。このため、系統立ったデータの取得が不可欠であると考えられる。

そこで本研究では、寒冷地河口域の津波発生時における氷板サイズ分布を明らかにすることを目的とした。現地観測により得られた氷板サイズ分布について、フラクタルという幾何学的な概念を用いて、氷板サイズ分布の法則性を見出すことを試みた。現地観測データとしては津波遡上後の河口域で得られた調査写真及び衛星画像を基に、画像解析から氷板サイズの計測を実施した。

### 2. 手法

#### (1) 現地調査及び画像解析手法

本研究で対象とする画像は現地調査で得られたものと、衛星画像の2種類である。現地調査については、2011年3月13日から14日の2日間にかけて行われた。4つ

---

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) 北見工業大学 社会環境工学科  
3 正会員 (独法)土木研究所 寒地土木研究所  
道東支所  
4 正会員 修(工) 国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部

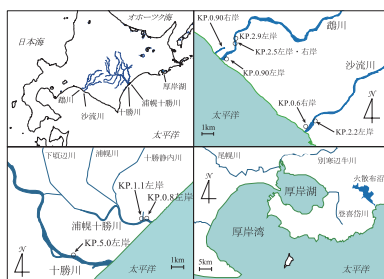


図-1 本研究で対象とした河口域の地図

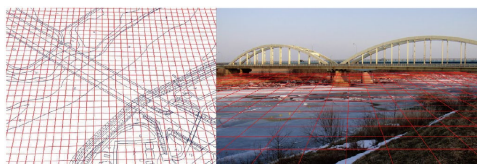


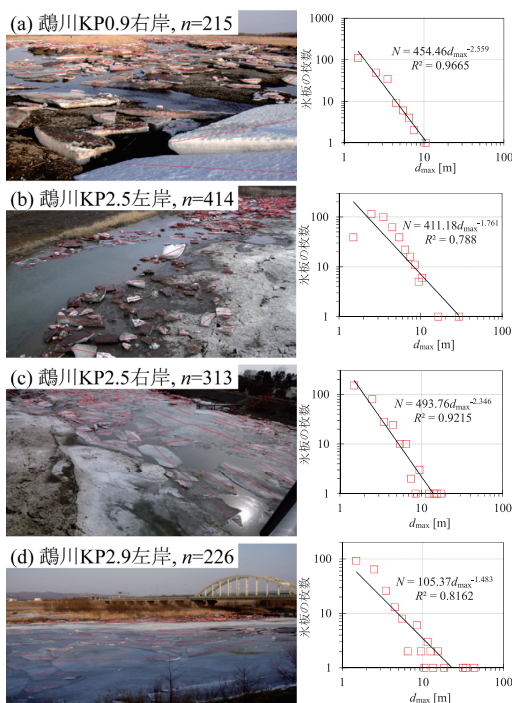
図-2 グリッドデータを重ね合わせた河川平面図及び調査写真(阿部ら, 2012)

の1級河川で河口位置の西から順に鵜(む)川, 沙流(さる)川, 十勝川, 浦幌十勝(うらほるとかち)川において, 特に氷板漂流物に着目して調査を実施した(対象は図-1). もう一つは衛星画像で捉えられた厚岸(あつけし)湖である. 以上の5箇所では, 3月11日の東北地方太平洋沖地震津波の発生後, 1.5 ~ 2 m程度の津波が来襲したと推定されている(Watanabeら, 2012). 調査時, 積雪の残る北海道沿岸域で, 余震による津波が警戒される中, 迅速かつ広範囲に調査を実施するために, GPSによる経路の記録と写真撮影のみ実施した. 但し, 氷板漂流物は移動と堆積後, 気温の条件や降雨・積雪により変形する可能性がある. この時の調査地域の日平均気温はいずれの地域でも-3 ~ -3℃程度であり, 急速な融解のためにサイズが著しくは変化しないものと考えた.

現地調査写真については, 図-2に示したように, 構造物位置や河道形状を参照しつつ, 試行錯誤の上グリッドを傾斜させて調査写真に重ね合わせた. このグリッドに基づき, 氷板サイズの最も長い辺長を1 m単位で読み取り, これを $d_{max}$ とした. 衛星画像については, 3月12日に得られたものである. 衛星画像については垂直処理が施されており, 水平方向のひずみは無視できるほど小さいと考えられる. こちらはGISソフトウェア上で輪郭を抽出し, 輪郭から得られる最大長を $d_{max}$ とみなした.

## (2) 統計的な性質の把握について

1章で述べたように, 何らかの破壊の作用により発生する氷のサイズ分布は, 単純な関数, 特に冪乗則に従って表されることが想定された. これは世界中の様々な地域の海水について確かめられてきたことである. 本稿の場合においては, 津波遡上による破壊後の氷を対象とす

図-3 鵜川における調査写真と $d_{max}$ の累積数分布

るが, 氷板サイズの分布が冪乗則に従って表されると仮定した. その場合, 対象範囲においてある長さ $d$ に対しサイズが $d$ 以上の氷板枚数 $N(d)$ は, スケーリング指数 $\alpha$ と係数 $c$ を用いて次のように $d$ の指数関数で表される.

$$N(d) = c \times d^{-\alpha} \dots \dots \dots (1)$$

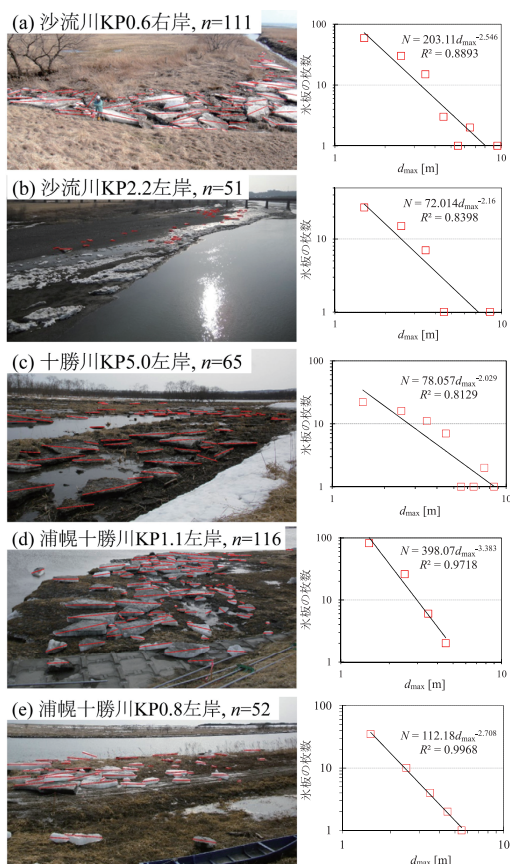
本稿ではこの考え方を援用し, 前節の画像解析で得られたサイズ $d_{max}$ と枚数 $N(d_{max})$ の関係について検討を行った.

なお, 既に著者ら(阿部ら, 2013)は厚岸湖で津波遡上後発見された氷に, 冪乗則に近い傾向が見られることを別途報告している. また前報(阿部ら, 2012)では, 図-1の4河川の画像解析結果より氷板枚数の分布がサイズの増大に伴って概ね単調減少となることを示した. 本研究では, これらの現地データに基づく氷板サイズ分布の統計的な性質を明らかにするために, 冪乗則という統一的な法則により, 氷板サイズ分布を推定することが可能かについて検討を行った. なお, データの分析に際しては最小二乗法を用い, 相関係数を主な指標とした.

## 3. 結果及び考察

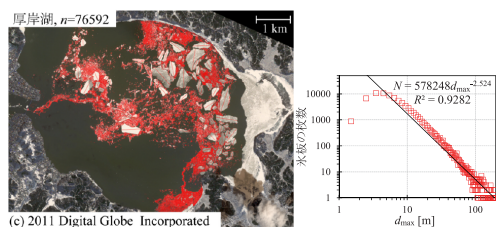
### (1) 画像解析の計測結果

図-3は, 鵜川における氷板痕跡について, 左側が長辺を抽出した調査写真, 氷板のサイズとその区分の枚数の関係を右段のグラフに示したものである. KP(キロポスト)は河口からの距離[km],  $n$ は抽出枚数を表す. (a)は河口右岸の旧川付近の堆積氷板群であり, 旧川の水際付

図-4 3河川における調査写真と $d_{max}$ の累積数分布

近に堆積しているものが多かった。(b)はKP2.6付近の鵜川大橋から下流方向左岸を撮影した写真である。水面の滞留氷板は少なく、薄く積雪がある砂州上に堆積しているものと、写真の右上部分で集中的に堆積している氷板群が確認できた。(c)は同じく鵜川大橋から下流方向右岸側に向いて撮影したもので、多数の滞留氷板が見られる。この下流KP2.4付近でアイスジャムが発生していることが吉川ら(2012)により指摘されているが、その効果で流れが緩やかになり滞留が発生したものと考えられている。(d)は鵜川大橋を上流右岸側から撮影したものであり、低水路内に巨大な氷板の滞留があり、奥の砂州上では多数の氷板堆積が生じている。

さて、この図-3で $d_{max}$ の分布を見ると共通してほぼ単調減少傾向が見られるばかりか、いずれのグラフについても、冪乗則で示される線分上に近い範囲で $N(d)$ のプロットが存在している。このことから、鵜川においては場所や氷板の滞留あるいは堆積によらず、4調査地点の氷板痕跡は概ね冪乗則に従っている。ところが(d)のように低水路内に存在し、漂流していない氷板についてはその分布から外れる傾向にあった。スケーリング指数

図-5 厚岸湖の衛星写真と $d_{max}$ の累積数分布

$\alpha$ についてみると、(a)、(c)は2.3-2.6で近い値であり、小氷板が多数見られる(b)では1.8、巨大な滞留氷板が存在する(d)では1.5とやや小さな指数となっている。

次に、図-4には鵜川を除く3河川における氷板痕跡のサイズについて整理した結果を示す。(a)、(b)は沙流川の痕跡であり(a)は河川樋門の前面に集積した氷板、(b)は左岸砂州上にまばらに堆積した氷板である。右段のグラフからも、若干のばらつきは持ちながらも冪乗則の分布から著しく外れてはいない。十勝川の現地で堆積氷板が確認できたのは(c)地点のみであり、グラフ縦軸から1枚ずつしか存在しない $d_{max}$ も見られるがプロット群は冪乗則の分布から大きく外れてはいない。浦幌十勝川の痕跡(d)、(e)は左岸側高水敷上で見られたもので、冪乗則に非常に近い分布を呈していた。指数については、(d)で3.0を超える大きな値となっている以外は2.0-2.7となった。

図-5は厚岸湖の滞留氷板について衛星写真から氷の長辺 $d_{max}$ を抽出したものであり、写真の上下方向が南北方向に対応する。東側に1辺数百mの比較的巨大な氷板がまばらに滞留しその空隙部分に多数の小氷板が滞留し開水面も見えている。別報(阿部ら、2013)の津波再現計算では東側の平均水深は50cmで西(厚岸湾)側的水深より小さく、津波が遡上しづらいために結果として巨大氷板が残されたと推定を行った。右段グラフから枚数の分布は独特な形状を呈している。概ね数十mまでのオーダーの氷板は両対数軸上で放物線に類似した形状、50mを超えるとまばらな分布であった。概ね8m程度から30m程度までは一直線上にプロットが並び、それより $d_{max}$ の小さい区間では冪乗則で示される直線より枚数は少なく、それより大きい区間では冪乗則から左右にばらつきを持つ分布となった。ただ全体の傾向としては $\alpha = 2.5$ 程度で分布を説明することができそうである。

以上に示した5地点において $\alpha$ は概ね1.5-3.4の範囲に含まれており、高い相関係数が確認できることから、津波により破壊される河口域の氷板も、極地圏の海水等と同様に、冪乗則によってそのサイズの分布を推定可能であることが示唆される。但し海水よりも指数は大きくなる可能性があることに留意すべきであろう。



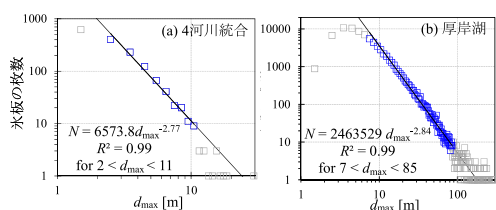


図-6 対象地点で冪乗則に従う区間を抽出した結果

## (2) 各分布に関する考察

図-6は、 $d_{max}$ の累積数分布を(a)本稿の検討で用いた全ての河川氷板について、(b)厚岸湖の滞留氷板について示したものである。2つのグラフに分けたのは、計測手法と写真解像度が大きく違うためで、特に(a)は斜め写真から1m単位で読み取った氷板サイズであるため、(b)より大きな計測誤差が含まれる可能性がある。黒実線は、グレーのプロットで示した $N(d)$ がばらつく範囲を除外し、冪乗則に従っている部分を抽出して描いたものである。この図を見ると対象の4河川においてスケーリング指数は2.8程度、厚岸湖においても、その区間では指数2.8程度であることが読み取れる。共通点としては、この津波発生時の北海道太平洋岸の河口域の結氷であること、来襲日時(3月11日夕方以降)等であるが、指数が近い値となるのは興味深い結果である。

前節より、河口域の津波により破壊された氷板サイズ分布は概ね単調減少となり、地点や気象条件に影響を受けずに、概ね冪乗則に従い分布していることが分かった。また、河道・湖床の形状により津波遡上時の流況は異なっていたと考えられるが、氷板サイズ分布が冪乗則に従う理由については、現時点では明らかになっていない。オホーツクの海水域で計測範囲や位置を変化させてもほぼ同じ指数の冪乗則の分布に従うことは、Toyotaら(2006)、Toyotaら(2002)によっても確かめられている。しかし、衛星画像自体が入手困難であることから複数地点を対象とした検討例が少ない。そのため、今後は異なる海域、河川域での異なる事例の蓄積が望まれる。

ここで、写真-1は鵡川で見られた氷板痕跡の破断面の例で、(a)は断面に複数の層状構造が見られ、鉛直方向に不均質な構造を呈していた。また(b)のように脆い柱状の結晶構造からなる氷板も多数確認された。このように同じ河川の近い調査地点であっても結氷は空間的に不均質な性質を持つことが多く、これは生成過程の違いに起因している。氷の不均質構造に起因して、1軸圧縮強度等の物性値は変化するという報告(原ら, 1993; 竹内ら, 2013)も存在する。しかし、氷のサイズ分布というマクロな指標で見た場合には、図-3より単純な関数で、鵡川の氷の傾向がある程度説明されている。

但し注意すべきことの1点目として、鵡川の図-3(d)

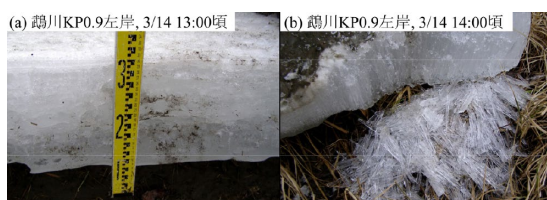


写真-1 鵡川における氷板の破断面の例

のように、図-3(a) - (c)に比較して著しい破壊が生じていない氷板や、厚岸湖東部のように巨大な氷板が存在するために $d_{max}$ 大の区間で冪乗則からの乖離が発生する点である。前報で新釧路川においても、分布に従わない事例を示しており、これは河川樋門の吐口(水路)に滞留する氷板痕跡であった(阿部ら, 2012内の図-3)。そして2点目には、写真の解像度と同程度かそれより小さい氷板については抽出できる枚数が減少し、冪乗則の直線より下回るようである(端的なのが図-3(b)、図-5、及び、他の氷板サイズ分布の検討事例: Lensu, 1990, Herman, 2010等)。

検討対象の一つである浦幌十勝川において、津波遡上と流下に伴い巨大氷板がKP3.0付近浦幌大橋の橋脚に衝突し、破壊され時間的に小さくなっていったという観測報告が松川ら(2012)によってなされている。この橋脚は低水路幅約90mのほぼ中央に位置している。他の3河川でも遡上区間に橋脚が存在するが厚岸湖ではそのような人工構造物は存在しない点が対照的であり、それにも関わらず $\alpha$ が近い値となった。以上から、遡上後に残された痕跡から得られる一つの類推ではあるものの、一定時間の漂流中に破壊が生じた結果が冪乗則の分布であり、冪乗則に従っているサイズの範囲において、氷板の破壊は共通のシナリオが進行していた可能性がある。

## (3) 氷板サイズ分布の推定について

以上の結果では、サンプル数50-60程度でも概ね冪乗則に近い分布が限られた区間において得られている。この知見を実現現象に適用する場合には、複数箇所氷板長を計測してスケーリング指数 $\alpha$ を求めれば、他の地点に存在する氷板サイズ分布もその冪乗則から推定できる可能性がある。例えば、漂流物衝突力の推定に際しては、重要なパラメータとして物体の代表長を取ることが多い(例えば池野ら, 2013)。代表長として $d_{max}$ を取るとした場合、群体としての漂流氷板群のサイズ分布を冪乗則として推定し、衝突力推定式に代入することが一つの方法として考えられる。但し痕跡氷板の漂流過程によっては、図-3(d)のように100以上のサンプルを取ってもばらつく場合があることに留意することが必須であると思われる。

#### (4) 氷板枚数の絶対値と推定式の係数 $c$ について

これまでの議論ではサイズ分布の傾向は推定できるが、氷板漂流物の量は推定できない。フラクタルの概念は自己相似形状のみを規定するものであり、絶対値は規定しないからである。 $c$ は枚数の絶対値を決定する無次元量で、サイズ分布を把握しようとする対象域の面積によって変化するパラメータである。厚岸湖の面積は約30 km<sup>2</sup>、他の河川調査写真の計測範囲は高々0.03 km<sup>2</sup>程度（最も広域を抽出した図-4 (b) 沙流川左岸砂州）であり、厚岸湖全体の図-5に比較すると $c$ は小さい値となる（図-3, 4）。

Rothrockら（1984）を初めとして過去の海水にまつわる検討では衛星・航空写真から任意に抽出した矩形等で領域を絞り、単位面積あたりの枚数として標準化することが可能であった。本稿では低水路に滞留あるいは高水敷等に堆積した氷板であるため $c$ は様々な値となり、破壊進行中は時間的に変化する。しかし、領域の取り方で決まる $c$ はフラクタルの性質を表す指数 $\alpha$ には関係しないことを鑑みた上で設定することが望ましい。例えば、対象とした鵠川と浦幌十勝川では毎冬河口まで結氷で覆われることから、氷板発生量の初期値としては、津波遡上が予測される区間の結氷表面積を取るのが適当と思われる。津波発生後に全面結氷状態から氷板が生じると考えれば、初期の水の最大長は低水路幅や湖面幅、橋脚間隔等を取る。本稿の事例に追従するとすれば破壊が進行するにつれ、サイズ分布は冪乗則に近づくであろう。

#### 4. まとめ及び今後の課題

本稿で対象とした調査地点の氷板痕跡については、サイズが小さいほど枚数が多いという明瞭な傾向が存在した。統計解析により、傾向から逸れる氷板が存在はするものの、 $N(d) = c \cdot d^{-\alpha}$ という関係式によって河川や場所によらず多くの津波由来氷板サイズの分布を推定できる可能性が示された。今回の検討範囲では、 $\alpha = 1.5 \sim 3.3$ という範囲であった。特に、冪乗則に従う区間においては一定に近い $\alpha = 2.8$ の分布に従い、これは海水の既往研究よりやや大きい値であった。また、その区間を挟むように、それより小さい $d$ では冪乗則で予測される枚数より小さく、大きい $d$ では冪乗則からばらつき、そのような傾向は既往の海水の計測結果と共通した傾向であった。

河口域の氷板漂流物の制御や津波を考慮した場合の河川構造物設計においては、氷板の大きさが重要な要素となるが、氷板漂流物の調査を行う場合、少ない枚数だけを調査すればおおよそ全体の傾向を把握することも可能と考えられる。但し、明確な傾向が一部に見出されたとは言え、あくまで解氷期の北海道沿岸域における事例の一つであるから、今後同様の事象が発生した場合には事

例の蓄積が重要と考えられる。また、津波による漂流時に進行する氷板の破壊機構に関する検討が行われれば、氷板諸元に関する理解は更に進むことを指摘しておく。本研究の成果は、ほとんど未知であった河口域の氷板という津波漂流物の諸元に関する明確な傾向を見出したものであり、漂流物諸元を踏まえた津波防災の立案に資することが期待される。

**謝辞：**本研究の遂行にあたり河道諸元データ等を提供頂いた北海道開発局 室蘭、帯広、釧路の各開発建設部と、現地調査に協力頂いた関係各位に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 阿部孝章・吉川泰弘・平井康幸（2012）：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（2），pp.I\_1436-I\_1440.
- 阿部孝章・吉川泰弘・佐藤好茂・伊藤 丹（2013）：寒冷地の半閉鎖性水域における津波振動と結氷破壊特性に関する研究，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.69（2），pp.I\_455-I\_460.
- 池野正明・木原直人・高畠大輔（2013）：津波漂流物の簡易移動判定と実用的な衝突力推定法，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69（2），pp.I\_861-I\_865.
- 国松 靖・秋原真哉・榎 国夫・高木雄一郎・原文宏・佐伯 浩（1992）：氷盤の大きさに関する研究，第8回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.417-422.
- 竹内貴弘・木岡信治・成田恭一（2013）：圧縮破壊下における海水のフラクタル特性に関する室内試験，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.69（2），pp.I\_1192-I\_1197.
- 早川美徳（1996）：衝撃破壊の統計則，科学，岩波書店，Vol.66（12），pp.845-852.
- 原文宏・国松 靖・大久保周一郎・佐伯 浩・岡本 智（1993）：天塩川の氷の強度に関する実験的研究，第9回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp.660-664.
- 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（2012）：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（4），pp.I\_1513-I\_1518.
- 吉川泰弘・阿部孝章・平井康幸（2012）：河川津波に伴い発生した北海道鵠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（2），pp.I\_416-I\_420.
- 吉川泰弘・阿部孝章・渡邊康玄・伊藤丹（2014）：1次元混合水径河水変動計算モデルの開発とアイスジャムの再現計算，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70（4），pp.I\_679-I\_684.
- Herman, A. (2010) : Sea-ice floe-size distribution in the context of spontaneous scaling emergence in stochastic systems, PHYSICAL REVIEW E 81, 066123.
- Lensu, M. (1990) : The fractality of sea ice cover, Proceedings of the 10th International Symposium on Ice, Vol.1, pp.300-313.
- Rothrock, D. A. and Thorndike, A. S. (1984) : Measuring the sea ice floe size distribution, Journal of Geophysical Research, 89 (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.
- Watanabe, Y., Y. Mitobe, A. Saruwatari, T. Yamada and Y. Niida (2012) : Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake tsunami on the Pacific coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol.54, 1250002, 17 p.