

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04630

研究課題名(和文) 海水等の離散体を伴う津波シミュレーションの高度化と計算知能を用いたリスク分析

研究課題名(英文) Sophistication of numerical simulation of Tsunami wave with granular solids such as sea ice floes and risk analysis using computational intelligence

研究代表者

木岡 信治 (Kioka, Shinji)

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(寒地土木研究所)・総括主任研究員

研究者番号：20414154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：津波と海水からなる混相流に関する模型実験を実施し、特に、複雑な現象である水位上昇やパイルアップの人工知能による推定法、実海水データとのベイズ理論による統合法等を構築し、これに海水挙動の3次元計算結果を加えたシステムを「計算コスト削減を考慮した準3次元の海水を伴う津波計算モデル」の脆弱部に補完機能として組み込み、計算精度・効率の向上のためのシステムを構築した。また、道路への海水等漂流物の堆積等に関するメカニズムの把握のため、様々な漂流物模型を用いた津波実験を実施し、氷の規模、津波の強さ、護岸・道路の高さ、等による道路上への海水堆積状況の分類方法、積層する高さの推定法などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流水や沿岸結氷板を含む氷海域において、大量の海水をともなった津波は、被害を拡大し、国民の生命・財産に甚大な損害を与える。過去に、津波とともに海水が遡上し、建築物等が損壊した事例が幾つか報告されている。本研究結果は、海水を伴う津波に対する、危険物や避難施設などの重要構造物の配置計画や避難行動計画等に役立つハザードマップ作成のほか、重要構造物に作用する津波と海水による混相流の外力推定やその安定性・崩壊危険性等の照査といった安全性評価に役立つものである。さらに、救助や復旧・経済活動に重大な影響を及ぼす道路への海水や漂流物の堆積メカニズムの把握や対策、道路啓開上の留意点等に資するものである。

研究成果の概要(英文)：Tsunamis with sea ice floes have been reported to cause serious damage to private houses and bridges from the impact of the ice floes (e.g., in the 1952 Tokachi-oki earthquake). In this study, we performed model experiments involving onshore run-up of a tsunami containing sea ice floes with a focus on ice jams and pile-up formations between structures, and on a large accumulation of sea ice on the road that plays important roles for relief activities. We developed an estimation method of the pile-up height, which could be useful in the estimation of safety evacuation levels and the elimination of lots of sea ice on the road. These experimental results were also learned by using neural network to incorporate in one of computation modules of our numerical simulation system of tsunami with ice floes, which is a part of very complicated mathematical model. We proposed one of tools which would be useful in the formulation of disaster mitigation plans including hazard maps.

研究分野：氷工学

キーワード：海水 津波 パイルアップ アイスジャム 人工知能 数値シミュレーション 個別要素法 破壊

1. 研究開始当初の背景

流氷や沿岸結氷板を含む氷海域において、大量の海水をともなった津波は、被害を拡大し、国民の生命・財産に甚大な損害を与える。過去に、津波とともに海水が遡上し、建築物等が損壊した事例が幾つか報告されている。東北地方太平洋沖地震の教訓を踏まえ津波想定や対策等の見直しが進められている中、昨年末に北海道東部太平洋沖における超巨大地震の可能性が公表され、北海道において寒冷地特有の課題を考慮した津波対策がより一層強く求められる。本研究では、津波による海水等の離散体の挙動と陸上遡上の数値シミュレーションについて、構成する数理モデルの高度化とともに、実験や類似の実現象データを取り入れた計算知能等を組み合わせ、その高度化と信頼性向上を図る。加えて本シミュレーションや計算知能を活用したリスク分析法を構築し、海水を伴う津波防災に資するツールを提供する。

2. 研究の目的

本研究で取り組む目的は主に3つある。まず、(1)氷模型を用いた津波氾濫流の実験と解析であり、主に市街地を対象としたもの、そして、主に海岸道路を対象とした実験に分かれる。特に前者はアイスジャムやパイルアップ現象解明のほか、モデルに組み込む計算知能の情報としての活用を目指し、後者は、救助や復旧・経済活動に重大な影響を及ぼす道路への海水及び漂流物の堆積・閉塞に関するメカニズムの把握や対策、道路啓開上の留意点等に資するものである。次に、(2)津波による海水の漂流・陸上遡上の数値シミュレーションの高度化、である。本研究では、かねてより構築しつつあった数理モデルのうち脆弱性がある部分に、上記(1)の実験結果や、3D-DEMによる氷の挙動結果も加味することにより、精度よく効率的に計算するシステム・方法を考案する。最後に、本研究成果を踏まえ、(3)研究のとりまとめおよび今後の氷海域での津波防災研究のあり方、について提言した。

3. 研究の方法

(1)氷模型を用いた津波氾濫流の実験と解析

(1-a)市街地における実験および解析

津波と海水からなる混相流に関する模型実験をゲート急開方式により実施し、特に、複雑な現象である水位上昇やパイルアップの人工知能による推定法、実海水データとのベイズ理論による統合法等を構築した。

(1-b)護岸や海岸道路を対象とした実験

救助や復旧・経済活動に大きな影響を及ぼす道路への海水及び漂流物の堆積・閉塞に関するメカニズムの把握のため、様々な漂流物模型を用いた津波実験を実施した。

(2)津波による海水の漂流・陸上遡上の数値シミュレーションの高度化

(1-a)による解析結果に海水挙動の3次元計算結果を加えたシステムを「計算コスト削減を考慮した準3次元の海水を伴う津波計算モデル」の脆弱部に補完機能として組み込み、計算精度・効率の向上のためのシステム構築を試みた。

最後に、研究成果をとりまとめ、今後の氷海域での津波防災研究のあり方等について提言した。

4. 研究成果

(1-a)市街地における実験および解析

本研究では、構造物近傍での水位上昇率 (h_c/h_0) (h_c : 氷がある場合の水深, h_0 : 氷がない状態での水深) について主に調べた。誤差を含む実測値を教師データとするモデル構築にAIC基準を導入して中間ニューロン数を制御した結果、実測値と推定値の比較から(図-1参照)、推定値は実測値の傾向を表現しており、単なる実測値の忠実な補完機能としてではなく、最小二乗法と遜色ない滑らかな推定となった。また、本データ学習を多層型(～5階層)に拡張したが、本実験データの場合には、シンプルな3階層型が最も合理的であることが分かった。

氷群が高く積み上がる現象であるパイルアップは、主働圧の増大をもたらし、津波水位よりも高く積み上がるため、避難施設等の重要構造物の設計には、この高さの推定は重要である。Shoreパイルアップ形成のアナロジーによる力学モデルの準用した方法もすでに考案している。このほか、実海域でのIce ridge形成の(sail/keel比)データの分析により、浸水深よりパイルアップ高を推定する理論式を高度化できる。このうち、着底しているGround ice ridge(あるいはstumkha)が参考になる。浸水深 h_D をkeel長、 $H_S=H_P-h_D$ (H_P はパイルアップ高)をsailの長さで見なせば(図-2)、 h_D つまり浸水深からパイルアップ高(H_P)が推定できる。図-2には、本実験結果の h_D と H_S との関係と、実海域のデータで

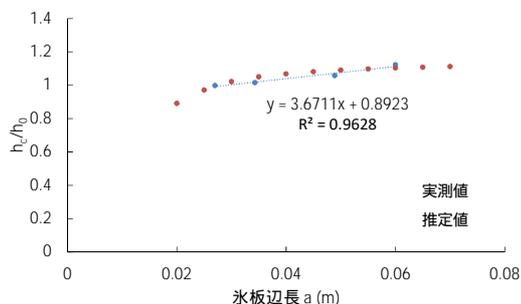


図-1 推定値と実測値との関係例 (3階層)

ある，着底して形成される Ground ice ridge (stumkha)の keel depth と Sail height との関係(Surkov & Truskov,1995)を比較した（両軸は氷厚で無次元化）．本実験データは特に着底して形成する Ground ice ridge の範囲（バラつき）の度合いも含めよく一致しており，津波ではない現場での貴重なフィールドデータも参照でき，本実験の妥当性も間接的に示すものである．ここで，ベイズ更新による実験データと現地観測データとの統合の方法を提案する．対象とする母数 θ は keel depth（あるいは h_D ）と Sail height（あるいは H_s ）との比，つまり図-2 で回帰直線とみなした時の傾きとする．ここで事前分布 $f_0(\theta)$ を模型実験結果から得られているものとして，新たな現地観測データ(h_{Di}, H_{si})の組が順次得られれば，その尤度 $f(h_{Di}, H_{si} | \theta)$ を考慮して，事後分布 $f_N(\theta | h_{Di}, H_{si})$ が得られる．

回帰直線を，

$$H_s = H_p - h_D = \theta h_D + \varepsilon$$

とし， ε は平均値 0 の正規分布に従うと仮定すると，新たな現地観測データ(h_{Di}, H_{si})の組が得られた場合の尤度関数（暗に σ は既知とする）は，

$$f(h_{Di}, H_{si} | \theta) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(H_{si} - \theta h_{Di})^2}{2\sigma^2}\right\}$$

母数 θ の事前分布も共役分布として正規分布に従うとし，母数（期待値 θ_0 ，標準偏差 σ_0 ）をもつとする．したがって，事後分布は，

$$f_N(\theta | h_{Di}, H_{si}) = \frac{f(h_{Di}, H_{si} | \theta) f_0(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} f(h_{Di}, H_{si} | \theta) f_0(\theta) d\theta} = N(\theta'', \sigma'')$$

で表され，同じ正規分布に従う．ここに，

$$\theta'' = \frac{\sigma_0^2 \sum h_{Di} H_{si} + \sigma^2 \theta_0}{\sigma_0^2 \sum h_{Di}^2 + \sigma^2}, \quad \sigma''^2 = \frac{\sigma_0^2 \sigma^2}{\sigma_0^2 \sum h_{Di}^2 + \sigma^2}$$

なお σ は回帰直線からのバラつきの標準偏差で長さの次元をもち， σ_0 および σ'' は無次元であることに注意する． σ は簡単のため，既知として扱っているが，通常は未知であるため，大量の現地データから推定するか，模型実験データからスケール換算して推定する方法が考えられる．後者の方法は，前述のように，実験データと現地観測データのバラつきの度合いは類似していると仮定できることを根拠としている．このように，実氷海域での Ice Ridge の幾何形状の現地観測データは実際の津波によって生成したわけではないが，これを津波模型実験データで補う，逆の見方をすれば，模型氷を使った小規模の模型実験を，現地観測データで補う，こうした両者の欠点を補う意味でもベイズ理論によるデータの統合には合理性があるといえる．また今後の課題になるが，それぞれのデータの特性を考慮した階層型ベイズ等さらに高度な統計モデルの適用なども考えられる．また，実用的には，構造物の設計や避難高等の設定において，パイルアップ高を危険側にとるのが妥当であるから，結局ベイズ更新された母数を用い，パイルアップ高は，

$$H_s = H_p - h_D = (\theta'' + t_\alpha \sigma'') h_D, \quad \therefore H_p = (\theta'' + t_\alpha \sigma'' + 1) h_D$$

と提案できる．ここに， t_α は標準正規分布の分位点（例えば 99%）， t は α に対する t 値である．以上から，本実験結果や理論的考察，そして貴重なフィールドデータとの統合も含め，多角的な推定法とその妥当性の検証が可能となった．

(1-b) 護岸や海岸道路を対象とした実験

実験結果より，貯水深（津波の強さ）や氷（漂流物）の形状・厚さ，護岸・道路の高さ，等をパラメータとし，漂流物が道路に与える影響をタイプ A～C のパターン（図-3）に分類した．漂流

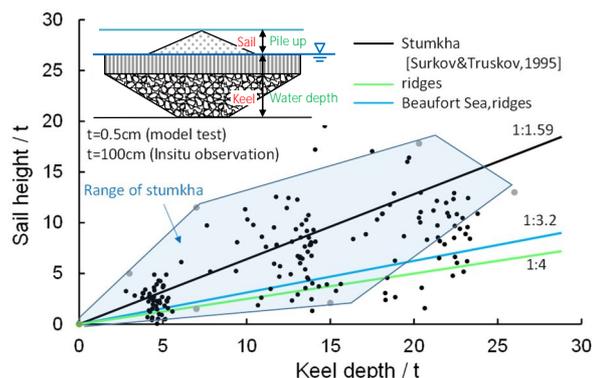


図-2 模型実験結果と実海域での Ice ridge (sail/ keel 比) [Surkov & Truskov,1995]との比較

物の形状や厚さにより積み重なり度合いや高さに傾向があること、 h_s と h_w (沖合津波水位から陸上までの高さ) との間にはほぼ直線的な関係があること (図-4), その傾きは抗力係数の関数で表されること, 相互作用タイプの変化については, Δh_s (沖合津波水位から護岸・道路天端までの距離) と Δh_w からその遷移域をおよそ推定できること (図-5), などを明らかにした。つまり, 本実験から, 氷の規模 (大きさ・氷厚), 津波の強さ, 護岸・道路の高さ, 等から海水の道路上への堆積状況を分類できること, またその推定法や積層する高さの推定法などを明らかにした。

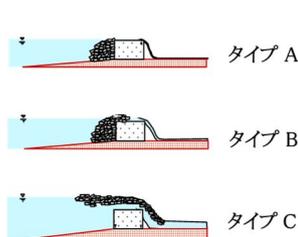


図-3 漂流物と構造物の相互作用タイプ

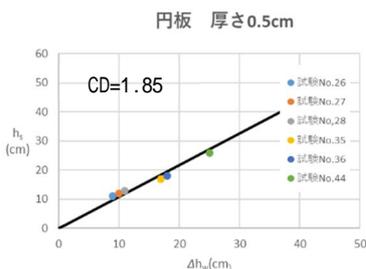


図-4 h_s と Δh_w との関係例 (円板 氷厚 0.5cm)

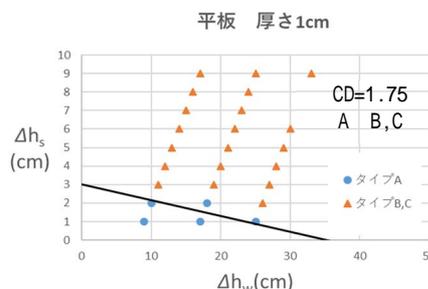


図-5 Δh_s と Δh_w との関係例 (平板 氷厚 1cm)

(2) 津波による海水の漂流・陸上遡上の数値シミュレーションの高度化

ベースとなる準3次元DEMによる数値シミュレーションの脆弱部分の補完機能として, 前述の実験データの機械学習結果および3D-DEMによる氷の挙動シミュレーションを活用した方法を想定している。3D-DEMは計算コストが高く広域には不向きであるが, 詳細な複雑な3次元挙動の計算には向いており, 局所的な補完機能としては有用であり, そのためにも精度をさらに高める必要がある。個々の氷の要素に作用する外力は, 水流による抗力 (せん断, 圧力), 付加質量力, 圧力勾配等であるが, このうち, 特に抗力の考え方について課題があり, 氷を構成する個々の (結晶) 粒子が相互に結合している場合の氷全体に作用する抗力を適切に表現するために個々の粒子に作用する抗力の考え方を更新した。粒子の下流側すぐ近接する粒子の抗力も同じ抗力を与えた場合には全体として過大な外力を与えてしまうことになる。この方法として, 注目する粒子の影響範囲を考え, 粒子の大きさの数個分下流の範囲に死水域が及ぶとし, 流れの方向からみて, 重複するつまりオーバーラップする面積を抗力が作用する合計面積から減じていく方法を採用した。図-6には, 一様な流れによる外力を受け, 護岸前に氷群が堆積する状況を例として, 個々の粒子が受ける圧力抗力のレベルを示した。視覚的にも, 氷の下流側 (死水域) にある氷に作用する抗力が緩和され, 抗力を受ける範囲は妥当であることがわかる。これにより過大な抗力作用を回避でき, 氷の内部応力機構だけでなく挙動に重要な外力設定が整った。図-7には3次元計算による海岸上を遡上する氷群挙動の例も示したが, 漂流シミュレーションのコアなる準3次元DEMによる計算モジュールの脆弱部分の補完機能としての運用のほか, 重要構造物の耐氷設計の数値シミュレータとして活用されることも想定している。

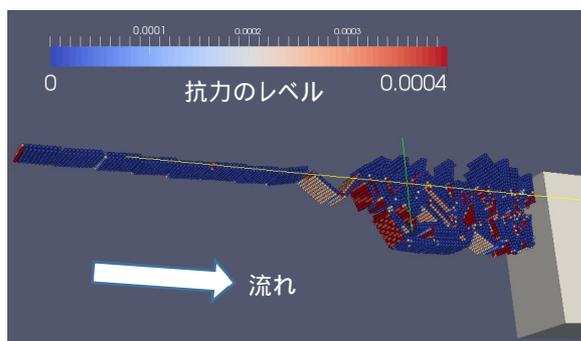


図-6 3次元計算による護岸前に堆積する氷群に作用する圧力抗力分布の例

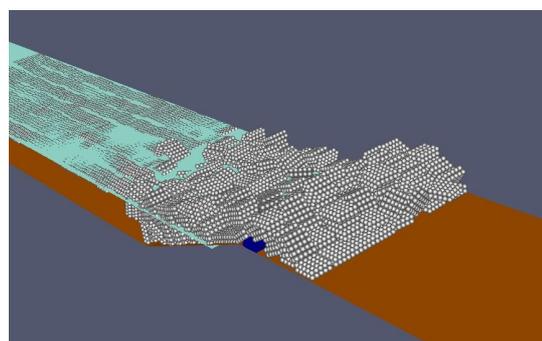


図-7 3次元計算による陸上を遡上する氷群挙動の例

次に, 津波による海水の漂流・陸上遡上のシミュレーションの精度および効率性向上のための方策を考察する。その中心的な役割を担うのが津波計算および氷の挙動を扱う準3次元DEMによる数値計算であるが, 基本的に両者とも平面2次元計算である。氷については, 計算コストを抑えるために, 前述した3次元計算法でなく, 2次元DEMを採用しているが, 陸上遡上やパイルアップを考慮するため, 鉛直方向の運動を別途考慮して準3次元的方法を開発した。しかし, ジャム発生による水位上昇やパイルアップ高推定の数値モデルが困難であった。そこで数値モデルが困難な部分, つまり脆弱な部分には, 前述の実験データによる機械学習を用いて, ジャ

ム発生時の水位上昇や、パイルアップ高を活用しようという試みである。また精度が高く要求される個所に応じ、部分的に前述の3次元計算を適用するハイブリットな方法を考案した。この計算システムを図-8に示す。また実験データのほか3次元計算結果や類似する別の実現象データを加えた学習やベイズ更新により、さらなる精度向上のための実装も容易に行えるシステムを想定している。現段階では、水位上昇やパイルアップ高の最終(最高)状態での更新のみ行えるシステムを構築したに過ぎないが、今後はより汎用性と実用性が高い実装を行っていく予定である。またこのシミュレーションができると、危険物や避難施設などの重要構造物の配置計画や避難行動計画等に役立つハザードマップ作成や、重要構造物に作用する外力やその安定性・崩壊

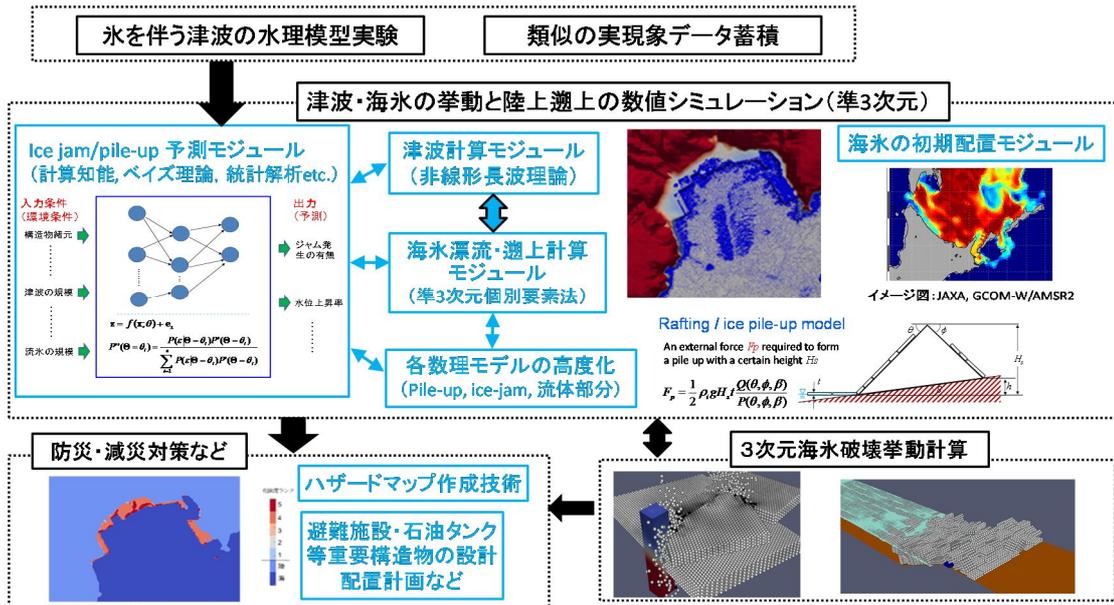


図-8 海水を伴う津波の挙動・陸上遡上の数値計算システム

危険性等の照査といった安全性の評価が可能となる。

(3) 研究のとりまとめおよび今後の氷海域での津波防災研究のあり方

本研究では、津波と海水からなる混相流に関する模型実験を実施し、海水が伴う挙動やリスクを明らかにした。特に、複雑な現象であるアイスジャム発生条件、それによる水位上昇やパイルアップを人工知能によって推定する方法を構築した。これにはノイズを考慮したニューラルネットを用い、適切な中間ニューロン数の決定法を提案するとともに低層のニューラルネットで十分な精度が得られること等を明らかにした。また3次元個別要素法による海水の挙動計算のうち、水流による氷の挙動を精度よく再現するために、特に抗力の考え方について改良し妥当な結果を得た。3次元計算は広域には不向きだが、局所においては有効である。以上の実験データの学習結果(計算知能)と3次元計算結果を、計算コスト削減のために開発された準3次元の津波/海水の漂流・陸上遡上シミュレーションの脆弱部分に補完機能として組み込み、さらなる計算の精度・効率の向上のためのシステム構築を試みた。

さらに、道路への海水及び漂流物の堆積・閉塞に関するメカニズムの把握のため、ポリプロピレン製の氷模型のほか、木材やがれきを模擬した様々な漂流物模型を用いた津波実験を実施した。本実験から、氷の規模(大きさ・氷厚)、津波の強さ、護岸・道路の高さ、等から海水の道路上への堆積状況を分類できること、またその推定法や積層する高さの推定法などを明らかにした。こうした成果は、救助や復旧・経済活動に重大な影響を及ぼす道路への海水及び漂流物の堆積・閉塞に関するメカニズムの把握や対策、道路啓開上の留意点等に資するものである。

今後は数値計算技術のさらなる高度化、とくに本研究ですべて達成できなかったAI技術やベイズ理論を使った計算の効率化、防災教育や啓発資料としてのCG作成も可能なシステムの構築を行っていく必要がある。特にこうしたシステムは、危険物や避難施設などの重要構造物の配置計画や避難行動計画等に役立つハザードマップ作成のほか、重要構造物に作用する外力やその安定性・崩壊危険性等の照査といった安全性の評価が可能となる。

また積雪寒冷地での津波避難場所や避難のあり方に関しても多くの課題があり、その解決のための研究も重要と考える。我々は予備的に調査を実施した結果、北海道には緊急避難場所として神社や墓地など屋外が指定されているところがあり、中には、誘導・案内看板がない、全く除雪されていない、ソーラパネルなどの街灯がなく夜間は真っ暗、など管理が行き届いていないところもあった。さらに一本道に面したところもあり、その道路が大量の氷や雪がれきで塞がれると、敏速な救助や救援物資の輸送に大きな支障をきたす可能性のあるところも確認された。ゆえに、敏速な道路啓開の方法・そのシステム構築、代替の救助・救援物資ルート設定あるいは輸送方法の構築、避難場所の配置、避難ルートの設定、などに資する研究が今後必要と考えており、精力的に取り組んでいきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 木岡 信治, 石田 麻衣子, 長谷川 朋毅, 竹内 貴弘, 佐伯 浩	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 北海道オホーツク海沿岸部における海水のサイズ分布に関する一考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 905-910
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 木岡 信治, 石田 麻衣子	4. 巻 815
2. 論文標題 津波によるアイスジャム発生予測に関する一考察 - 模型実験データの多変量解析とその予測可能性について -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 寒地土木研究所月報	6. 最初と最後の頁 39-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木岡信治
2. 発表標題 湖で発生する結氷板の陸への遡上現象 (Ice Tsunami) の力学的メカニズムに関する一考察
3. 学会等名 寒地技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内貴弘
2. 発表標題 結氷海域における津波と構造物の相互作用について ~異なる形状の流水供試体を用いた実験~
3. 学会等名 寒地技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	竹内 貴弘 (Takeuchi Takahiro) (40305983)	八戸工業大学・大学院工学研究科・教授 (31103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------