

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360197

研究課題名(和文) 河川結氷時における津波遡上の挙動解明

研究課題名(英文) Study on propagation mechanisms of Tsunami wave in ice-covered rivers

研究代表者

渡邊 康玄 (Watanabe, Yasuharu)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：00344424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：結氷河川へ津波が遡上する場合の防災・減災対策を検討するために、津波が結氷河川を遡上する場合の伝播機構の解明、津波により破壊された氷板によるジャミングの物理機構の解明を行い、津波の河道からの氾濫のみならず氷板をはじめとする漂流物の構造物等への衝撃力を把握する手法の開発を目的として研究を実施した。その結果、結氷時における津波の河川遡上は、通常の遡上機構とは大きく異なることが把握された。また、津波の挙動及び大規模な氷板漂流現象さらには、構造物への衝撃力や構造物の動的応答をも予測する手法の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to discuss the disaster prevention against tsunami which ascends in a ice covered rivers, the propagation mechanism of tsunami waves and the physical mechanism of ice jamming caused by tsunami were elucidated in this research. Moreover, this research inquired not only for the purpose of the flooding from the river channel of tsunami but for the purpose of development of the technique of grasping the impulse force to river structures of floating materials including ice floe, etc. As a result, it has been grasped that the tsunami propagation mechanism in ice covered rivers differs from the usual propagation mechanism greatly. The drifting materials model under tsunami condition was established. The impulse force to river structures of ice floe can be estimated by this model.

研究分野：水工学

キーワード：結氷河川 津波遡上 アイスジャム 不定流計算 個別要素法 氷板衝突 氷板破壊 氷板漂流

## 1. 研究開始当初の背景

河川津波の危険性は、1960年のチリ地震津波の北上川や1964年の新潟地震津波の信濃川での事例を契機に認識されていた。しかし、本格的な研究は、それからかなりの時間を経た2003年の十勝沖地震津波の北海道の複数河川への侵入に端を発した申請者らの研究を待たなければならない。この津波は河口での波高が2mに満たないにもかかわらず河道内を10km以上も遡上したことから、同現象が内在する重大な危険性が指摘され、簡便な河道内の津波の水位分布の予測法の開発が行われたものの、正確な水位変動の推定には非静水圧効果を導入した浅水理論が不可欠であることなどが申請者らによって指摘されてきた。

このような中、2011年3月に北海道から南東北までの広範囲を襲った巨大津波は、レベル2の水準の津波がもたらすいくつもの被害を新たに浮彫りにした。北海道のように冬期に河川が結氷する地域では水面を覆う氷板により水工学が対処すべき問題をさらに複雑化させ、しかも氷板が現象をより危険側に助長することが申請者らの津波来襲後の現地調査で明らかにされた。

## 2. 研究の目的

結氷河川へ津波が遡上する場合の防災・減災対策を検討する場合に必要な不可欠となる以下の諸現象を明らかにすることを目的とする。

(1) 結氷河川における波状性長波の圧力伝播の解明：一般的な開水路問題としての伝播だけでなく、氷板下を長距離にわたり津波が管水路に近い状態で遡上して、氷板の脆弱部で突如圧力解放が生じて氷板が飛散するという極めて危険な現象が発生していた。この問題に対処するため、結氷河川における波状性長波の遡上特性および圧力伝播の解明を行う。

(2) 往復揺動を伴う河川津波によるアイスジャムの解明：2011年3月の巨大津波では、北海道の鶴川で第1波の到達後に准流によりアイスジャムが形成され、1m以上の急激な水位上昇が観測された。このことを受け津波の遡上と遡下による往復揺動がもたらす氷板の集積や解消の物理機構の解明を行う。

(3) 氷板を有する河川津波に耐性を有する水門設計：冬期の寒冷地河川においては、水門等の計画を検討する場合、氷板の衝突と取付け部の周辺への集積の二つを加えて考える必要がある。このため、氷板の集積による機能不全を回避する水門構造を力学的に導く。

(4) 氷板漂流を伴う河川津波の越流氾濫の挙動解明：1952年の十勝沖地震津波では釧路の春採川に沿った住宅地に氷板を伴う大量の氾濫水が来襲した実績がある。氷板の漂流を伴う河川津波の越流氾濫の挙動を解明するため、河道と堤内地を一体的に取扱いが可能な数理モデルの開発を行い、これに基づき挙動

解明を行う。

## 3. 研究の方法

過去に一切の研究例のない河川津波と氷板の連成問題を扱うことから、基礎的な現象把握(要素研究)を実施し、次いで河川結氷時の津波遡上に関する工学的課題(タスク)に取り組む。具体的手法は、以下のとおりである。

### (1) 結氷河川における波状長波の圧力伝播の解明(要素研究1)

開水路流れと長波の相互作用のための専用の大型実験水路(全長34m、長波用造波パドル付き)を用いて基本的な物理特性を調べる。圧力の測定は、ピエゾ管に圧力センサーを接続して測定した。また、流速の水深方向の分布はPIV法による面的流速計測を行った。

### (2) 河川津波による氷板破壊の統計モデル(要素研究2)

東日本大震災時に撮影された写真から画像解析によって、氷板のサイズと厚さを計測する。さらに、現地調査時に実測された氷板サイズと氷板厚の関係から、氷板の質量の推定を行った。

### (3) 氷板の衝突と集積の物理過程の解明(要素研究3)

橋脚や建築物を想定した工作物模型を設置し(氷はポリプロピレン製模型)、その近傍での遡上津波の流況(水深および流速)や氷の集積状況ならびに構造物への作用力等について水理模型実験を実施して測定を行った。また、個別要素法(DEM)による数値計算手法の妥当性を確認するため、中規模程度の人工海氷の衝突実験を実施した。

### (4) 河川津波によるアイスジャムの機構解明(タスク1)

河川津波によるアイスジャムの機構解明を目的として、2種類の水理模型実験を実施するとともに、その現象を再現する数値モデルの開発を実施した。

#### ① ジャミング時の氷板の挙動に関する水理実験およびシミュレーションモデルの開発

河川の水面を覆う氷板のジャミング時の挙動を把握する目的で水理模型実験を実施した。用いた水路は、水路長9.0m、水路幅0.2m、水路勾配1/500である。下流端には、実際にアイスジャムが発生している狭窄部を模して、水路幅が半分になるように設定した。狭窄部の上流側に配置した氷板は実際の氷を使用した。氷のサイズおよび個数は、2010年2月の渚滑川の現地調査の結果を参考にし、決定した。水位、気温、水温を計測するとともに、ジャミングの様子を水路側面から透明なアクリル側壁を通して撮影により行った。また、この結果を基に現象を再現するシミュレーションモデルの開発を行った。

#### ② アイスジャム発生条件に関する水理実験

一般に河川においてアイスジャムが発生

しやすいといわれている箇所は、水路幅が狭い箇所や水深が浅い箇所といわれている。このことから、アイスジャムの発生条件を明確化することを目的として、水路の狭窄の程度を変化させた水路を用い、投入する氷板サイズと量および流量を変化させて水理実験を行った。観測項目は、上流から投入された氷板の流下速度の変化ならびに集積状況と水位の変化である。

#### (5) 氷板を伴う河川津波に耐性を有する水門設計法の開発(タスク 2)

氷のモデル化に DEM や FEM を適用し、氷板の衝突シミュレーション手法を構築するとともに実務での構造物の耐氷設計に資するため、氷塊と衝突過程にある構造物の詳細な動的応答解析(変形挙動、応力状態、破壊・降伏)も可能な、総合的で実用的なシミュレーション手法を開発することを目的として、氷塊のシミュレーションには3次元個別要素法(3D-DEM)を適用し(自作コード)、構造物の応答解析には3次元動的弾塑性 FEM を適用することとした。

#### (6) 氷板漂流を伴う河川津波の氾濫流の機構解明(タスク 3)

##### ① 四分木構造格子を導入した河道-氾濫原一体型の解析法の開発

矩形格子を基本としながら局所的な高解像度化が可能な四分木構造格子の導入により、河道と氾濫原を一体化した数値シミュレーションモデルの開発を行う。まず、数値解の安定性を把握するための四分木構造格子が有する打ち切り誤差の評価や、矩形格子による自然河川の流理解析の妥当性を示すことで、四分木構造格子を導入した河道と氾濫原の一体型解析における水理学的な妥当性を明らかにし、続いて、実流域に提案する解析法を適用し、十分な再現性を維持しつつも演算負荷が大幅に軽減されることを示す。図-1に、計算格子の一例を示す。ここでは、基本となる格子辺長を40mとし、格子辺長が1から3段階に変化する3種類の格子構成を用いた。四分木構造格子では、格子辺長の二分化が繰り返えされ、格子面積はLv-1, Lv-2, Lv-3の順に縮小していく。例えば、最大格子辺長を40m、二分化の回数値が2回であれば40m\_Lv2と表記する。

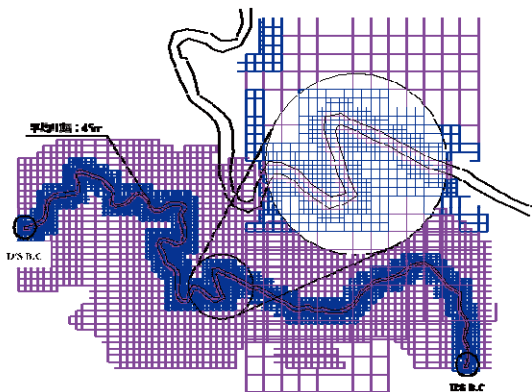


図-1 四分木構造格子を導入した一例

#### ② 津波漂流物群の数値シミュレーションの開発

複雑な自由水面変形及び氷板群の挙動追跡を行うことのできる、粒子法に基づく数値シミュレーションの開発を行った。2種類の検証計算、すなわち水槽内の浮遊剛体群の並進速度の時系列変化の検討及び狭窄部のアイスジャムを伴う一様流れ場における氷板挙動との検討に適用することでモデルの適用性を検証した。その上で、津波の挙動及び大規模な氷板漂流現象を分析するため、結氷した樋門吐口水路への津波侵入に関する実スケールシミュレーションに本モデルを適用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 結氷河川における波状長波の圧力伝播の解明(要素研究 1)

流れと波の共存場での水理実験結果の解析により、氷板が固定されている場合には、開水時に比べ圧力電波が早くなるものの、浮遊状態で存在する場合には開水時よりも遅くなることを明らかにした。また、鉛直方向流速成分は津波到達時の短時間のみ顕著であるが、1次元の不定流計算でもある程度再現可能であることが明らかになった。

##### (2) 河川津波による氷板破壊の統計モデル(要素研究 2)

調査写真から、氷板のサイズおよび質量を簡易に推定できることを示した。また統計解析の結果、傾向から逸れる氷板が存在はするものの、

$$N_{(d)} = cd^{-\alpha}$$

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。ここで、 $d$  ; 氷板の面積を同じ面積の円の直径で表したサイズ、 $N_{(d)}$  ; 氷板サイズの累積数分布で単位面積当たりサイズ  $d$  以上の大きさを持つ氷板の枚数、 $c$  および  $\alpha$  ; 係数である。

##### (3) 氷板の衝突と集積の物理過程の解明(要素研究 3)

氷群存在時には、氷群による衝突力に加えて、その後続く津波の準定常状態においても大きな荷重が持続することを明らかにした。これは、氷の工作物間における閉塞による水位上昇と、その間の堰き止め水塊による静水圧に起因するものであり、設計時にはこうした荷重を考慮する必要がある事を明らかにした。また氷板の構造物への衝突に関して、個別要素法(DEM)による数値計算手法の妥当性を確認するとともに、その数値実験を援用して、複数衝突など、様々な形態をとる、氷板の衝突・破壊と集積の物理過程について検討できる基礎的ツールを獲得した。

##### (4) 河川津波によるアイスジャムの機構解明(タスク 1)

###### ① ジャミング時の氷板の挙動に関する水理実験

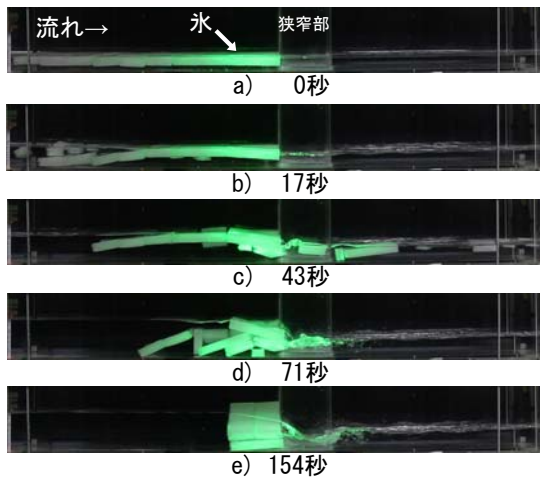


図-2 狭窄部におけるジャミングの様子

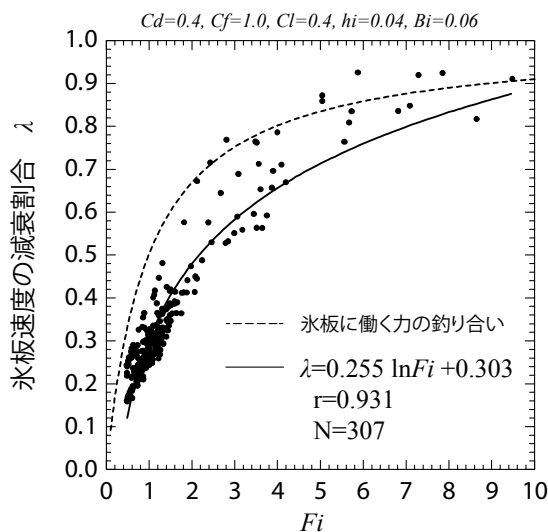


図-3 氷板速度の減衰割合と  $F_i$  との関係

ジャミングが形成される際には、先ず流水が氷板の上を流れ氷が不安定となって上流側から狭窄部に向かって氷板が移動する。次いで氷板が狭窄部の直上流で集積し始め河床面に接地すると同時に一気にアイスジャムが発生する現象を確認した。ジャミングの一例を図-2に示す。これらの現象を再現する1次元混合氷径河氷変動計算モデルを構築し、氷板個々の動きまではモデル化できていないものの水理実験の現象を精度よく再現することに成功した。なお、このモデルは、河川水の流れ、流動する氷板の流れ、固定した氷板の形成融解、河川水温、アイスジャム発生条件に関する計算で構成されている。

## ② アイスジャム発生条件に関する水理実験

従来アイスジャムが発生しやすいといわれている水路幅が狭い箇所、水深が浅い箇所では、アイスジャムは発生せず、水路幅が狭い箇所の上流となる水深が深く流速の遅い箇所において発生した。このような場でのア

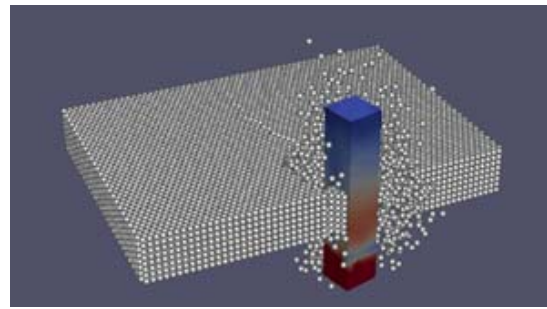


図-4 氷塊の構造物への衝突シミュレーション例（氷にはDEM 構造物に動的弾塑性FEM適用、構造物の色の濃淡は8面体せん断歪みで表示）

イスジャムの形成メカニズムは、次のように説明される。すなわち、先ず氷板模型が流速の遅い場所で集積し堆積することにより上流側の水位が上昇する。上流の水位の上昇に伴う水面勾配の増大により、上流の氷板模型は下流へと流下し、下流側の氷板模型の密集度が高くなり、よりアイスジャムの状況が顕著になる。また、フルード数と同様の形式をした無次元量である  $F_i$  により、アイスジャム発生の可能性を評価でき、氷板サイズが大きく、氷板量が多く、流量が少ないほど、アイスジャムは発生しやすいことを明らかにした。図-3に、アイスジャムの発生を表す指標となる評判の移動速度と  $F_i$  との関係を示す。

## (5) 氷板を伴う河川津波に耐性を有する水門設計法の開発(タスク2)

DEM と FEM との連成計算（相互干渉プロセス）の方法は以下のプロセスとして、

①DEMにより氷の衝突計算を行う、②氷を構成する個々の粒子の構造物表面での衝突（接触）点座標を特定する、③その粒子の接触点から最短の構造物の節点（FEMでの）を検索する、④その粒子が構造物表面へ及ぼす衝突力（3方向成分の力）を、その節点に集中荷重として作用させる、⑤その荷重をもとにFEMで構造物応答の計算を実施する。

氷塊が柱状構造物に衝突するシミュレーション結果のスナップショットを図-4に示した。さまざまアウトプットが可能であるが、一例として同図に示すように、構造物の動的応答変位やその応力・歪み（あるいは破壊・降伏状態）等に加え、氷塊やその破壊氷塊群の軌道等がアニメーションとして表示されるため、その構造設計はもちろん、性能評価や安全性（隣接する構造物相互含め）の視覚的な理解と確認ができ、当該目的のための強力な設計支援ツールとなる。

## (6) 氷板漂流を伴う河川津波の氾濫流の機構解明(タスク3)

### ① 四分木構造格子を導入した河道-氾濫原一体型の解析法の開発

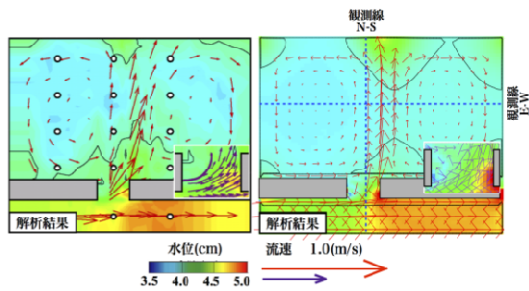


図-5 破堤氾濫の再現結果

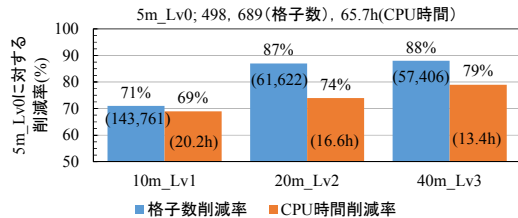


図-6 計算負荷の削減率

破堤氾濫を想定した水理模型実験の結果を、四分木構造格子を導入した今回のモデルで再現した結果を図-5に示す。破堤部において、実験値に比べ流速の計算値は過大に、また水位の計算値は過小に評価されているものの、領域全体として計算値は実験値を良好に再現している。また、図-6は、図-1で示した領域での計算格子の違いによる格子数とCPU時間の削減率を示したものである。図に示されるように、四分木構造格子を導入することにより、計算精度を落とさずに、河道-氾濫原一体型の計算が可能となる。

## ② 津波漂流物群の数値シミュレーションの開発

治水施設に対してどのように接近するかについて数値解析的な検討を行った。モデル精度については事前に単純な数値実験及び水理実験のシミュレーションを通じて確認をした。図-7は、図-2に示した水理実験結果を再現したものであるが、きわめて良好な再現結果を得た。また、より実際的な検討として、現地スケールを想定した樋門形状を再現し、氷板の諸元を変更した分析を行った。その結果、検討を行った条件化では、津波条件と漂流氷板が厚い場合には、サイズ ( $L_i$ ) の小さい氷板の時は津波に追従して施設に接近し、サイズが大きい時は追従性が低い予測結果が得られた。しかし、漂流氷板の厚さ ( $h_i$ ) が小さい時はサイズによらず群体として施設に接近するという予測結果が得られた。

これらの類推から、結氷厚が小さい時、すなわち冬期の中でも結氷開始時期や解氷期においては、津波に追従して漂流氷板の接近が発生しやすくなると考えられる。しかし、現地調査結果(24)から氷は実際にはサイズに分布を持つことが想定され、今後、サイズ分布をも考慮した水理実験や解析を実施し、治水施設等の設計や操作上で考慮すべき事項の整理を行うことが望ましいと考えられる。

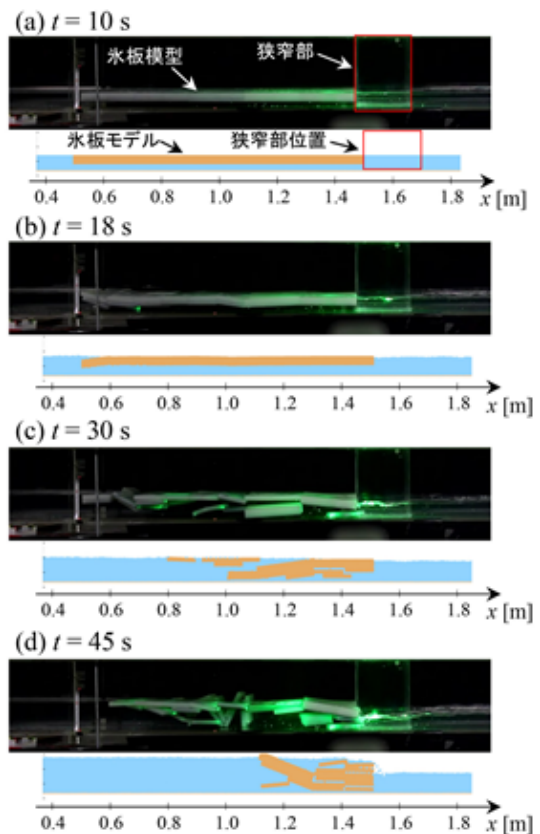


図-7 水理模型実験結果(各時刻上段)と解析結果(各時刻下段)との比較

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 22 件)

1. 吉川泰弘, 黒田保孝, 橋場雅弘, 入交泰文: 寒冷地河川における晶氷発生計算モデルの開発と取水障害の発生条件, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 71, No. 4, pp. 1327-1332, 2015.
2. 佐藤好茂, 阿部孝章, 吉川泰弘, 伊藤丹; 氷板混合津波が橋桁に及ぼす波力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 851-855, 2014.
3. Yoshikawa, Y., Watanabe, Y., Ito, A.; A SIMPLE EQUATION FOR ICE SHEET THICKNESS AND ICE FORMATION/BREAKUP PREDICTION, Journal of JSCE, Vol. 2, pp. 203-213, 2014.
4. 阿部孝章, 佐藤好茂, 吉川泰弘, 伊藤丹, 大槻敏行, 加納浩生, 高精度粒子法に基づく河川構造物に対する津波波圧推定, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 70(4), [特]地震工学論文集, Vol. 33, 土木学会, 2014.
5. 吉川泰弘, 黒田保孝, 伊藤丹, 渡邊康玄: 結氷河川における河道形状を考慮したアイスジャム発生条件に関する研究, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp. 241-246, 2014.
6. 木岡信治・森昌也・遠藤強・竹内貴弘・渡部靖憲; 海水群を伴った市街地への

- 津波遡上特性に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), I\_821-I\_825, 2014.
7. 吉川泰弘, 阿部孝章, 渡邊康玄, 伊藤丹; 1次元混合氷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), No. 70, I\_679-684, 2014.
  8. 阿部孝章, 吉川泰弘, 佐藤好茂, 伊藤丹; 樋門ゲートに対する河川津波波力減勢工の提案とその効果について, 河川技術論文集, No. 19, 381-386, 2013.
  9. 吉川泰弘, 渡邊康玄, 阿部孝章, 大久保敦; 河川結氷時における河川津波の圧力伝搬速度と圧力減衰特, 河川技術論文集, No. 19, 375-380, 2013.
  10. 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁; 海氷の杭構造物への衝突破壊特性に関する実験的及び数値的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学)特集号, No. 16, I\_333-340, 2013.
  11. 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸, 伊藤丹; 波状段波により輸送される河道内氷板の挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), No. 69, I\_919-I\_924, 2013.
  12. 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸; 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, 河川技術論文集, No. 18, 411-416, 2012.
  13. 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸; 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), No. 68, I\_1436-I\_1440, 2012.
  14. 吉川泰弘, 阿部孝章, 平井康幸; 河川津波に伴い発生した北海道鶴川のアイスジャム再現計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), No. 68, I\_416-I\_420, 2012.
  15. 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁; 海氷塊の杭構造物への衝突に関する中規模実験とその数値計算法の基礎的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学)特集号, No. 15, I\_432-432, 2012.
- [学会発表] (計 23 件)
1. 北島 笙子; 河道狭窄部がアイスジャム発生現象に与える影響, 第 71 回土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2015 年 1 月
  2. 吉川泰弘; 鉛直 2 次元計算モデルを用いた河川津波による塩水遡上現象に関する数値実験, 第 71 回土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2015 年 1 月
  3. Yoshikawa, Y.; Study of Frazil Particle Distribution and Frazil Transport Capacity, The 22th IAHR International Symposium on Ice, 2014 年 8 月
  4. 河上将尊; 河川結氷時における河川津波の流速分布特性, 第 70 回土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2014 年 2 月
  5. 吉川泰弘; 1次元混合氷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, 第 58 回水工学講演会, 2014 年 3 月
  6. Watanabe, Y.; Tsunami Run-up to the Ice Covered Rivers in Hokkaido at the 2011 Great East Japan, 21st IAHR International Symposium on Ice, Ice Research for a Sustainable, 2012 年 6 月
  7. Takahashi, A., Watanabe, Y. and Yoshikawa, Y.; Tsunami Run-up to the Ice Covered Ohoro River in the 2011 Great East Japan Earthquake, 21st IAHR International Symposium on Ice, Ice Research for a Sustainable, 2012 年 6 月
  8. Yoshikawa, Y., Watanabe, Y., Hayakawa, H. and Hirai, Y.; Field Observation of a River Ice Jam In the Shokotsu River in February 2010, 21st IAHR International Symposium on Ice, Ice Research for a Sustainable, 2012 年 6 月
  9. 小関博司; 同次元一体解析法の流下型洪水氾濫への適用性の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月
  10. 安田浩保; 四分木構造格子を導入した河道と氾濫原の一体的解析法の適用性に関する検討, 土木学会関東支部技術研究発表会, 2013 年 3 月
  11. 大久保敦; 結氷河川における津波伝搬機構に関する水理実験, 第 69 回土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2013 年 2 月
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
渡邊 康玄 (WATANABE Yasuharu)  
 北見工業大学・工学部・教授  
 研究者番号: 00344424
  - (2) 研究分担者  
安田 浩保 (YASUDA Hiroyasu)  
 新潟大学・自然科学研究科・准教授  
 研究者番号: 00399354  
木岡 信治 (KIOKA Shinji)  
 土木研究所・寒地土木研究所・研究員  
 研究者番号: 20414154  
吉川 泰弘 (YOSHIKAWA Yasuhiro)  
 北見工業大学・工学部・助教  
 研究者番号: 50414149
  - (3) 連携研究者  
阿部 孝章 (Abe Takaaki)  
 土木研究所・寒地土木研究所・研究員