

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04267

研究課題名（和文）寒冷地河川河口周辺の海岸に堆積するジュエリーアイスの出現時期推定手法の開発

研究課題名（英文）Development of a method for estimating the appearance period of jewelry ice deposited on beaches around the mouths of cold-region rivers

研究代表者

吉川 泰弘 (yoshikawa, yasuhiro)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50414149

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、現地観測結果に基づきジュエリーアイスの出現現象を定式化し、これらの式を統合してジュエリーアイスの出現時期推定手法を開発することである。得られた研究成果は、定点カメラを含む現地観測から、ジュエリーアイス出現現象を形成・破壊・輸送・堆積・融解の5つに区分した。これらの現象を定式化して、ジュエリーアイス出現時期推定手法を開発した。定点カメラで撮影した画像からジュエリーアイスの堆積面積を算出し、この値と計算値を比較して、計算結果の妥当性を確認した。ホームページ上で、本手法を用いた出現予測を公表した。さらに現地観測を実施し、その結果から本手法の課題を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、入力値に予測値を入力することでジュエリーアイスの出現時期の予測が可能となる。将来の予測を行うことで、観光客の旅程計画や観光地の受け入れ体制の判断材料となる。全国や世界から観光客が北海道に足を運びきっかけとなり、地域振興や地域産業の発展に貢献できる。また、ジュエリーアイスを通して、河川が持つ新たな観光資源としての価値を見出し、河川の魅力を伝えることが可能となる。本手法は、他の河川にも適応可能であり、河川工学のみならず、海岸工学、観光学などの学術分野への展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to formulate the phenomena of jewelry ice appearance based on field observations and to develop a method for estimating the appearance period of jewelry ice by integrating these equations. Based on the field observations including fixed-point cameras, we classified jewelry ice appearance phenomena into five categories: formation, destruction, transport, deposition, and melting. These phenomena were formulated and a method for estimating the period of appearance of jewelry ice was developed. The area of jewelry ice accumulation was calculated from images taken by a fixed-point camera. The validity of the calculated results was confirmed by comparing the calculated values with the this area of jewelry ice accumulation values. We published the prediction of the appearance of jewelry ice using this method on our website. We also conducted field observations and clarified the issues of the method based on the results of the observations.

研究分野：河氷工学，河川工学

キーワード：ジュエリーアイス 寒冷地河川 河氷 観光 河口 海岸 結氷河川 出現時期推定

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冬期に北海道十勝川河口の大津海岸に打ち上げられる光の反射によって様々な色に輝く無数の氷の塊「ジュエリーアイス」が2012年に十勝毎日新聞で紹介されると、インターネット等のメディアを通じて全国的に注目されるようになり、道内はもとより道外から観光客が大津海岸へ足を運ぶようになった。なお、「ジュエリーアイス」とは、大津海岸がある十勝管内豊頃町出身の写真家が2012年に名付けた言葉である。大津海岸がある豊頃町では、ジュエリーアスを貴重な観光資源として捉え、2015年からインターネット上でジュエリーアスの出現情報を発信しており、年々、日本国内だけでなく海外からも注目されるようになってきている。一方で、ジュエリーアイスが見られる時期について、豊頃町役場への問い合わせが増えているが、現在、出現現象が十分には解明されていないため、大津海岸に直接足を運び目視によりジュエリーアスの有無を確認しているのが現状であった。

ジュエリーアスは透明度が高い氷である。海水が凍る場合は、凍る過程で不純物が氷内部に取り込まれるため、白濁の氷となり透明な氷にはならない。河川で淡水が凍る場合は、流れの遅い場所からゆっくりと冷やされて不純物を排出しながら凍るため、透明な氷となる。このことからジュエリーアスは河川の氷由来と推定できる。河川の氷が破壊される時期は、一般には春先の気温が上昇する時期であるが、ジュエリーアイスが海岸に堆積する時期は1月～2月の厳冬期である。申請者は冬期に十勝川河口部の現地観測を実施し、大潮時に河氷が破壊されることを確認している。また現地観測により、破壊された河氷は海域へと漂流し、海岸に向かって風が吹く場合に海岸へと近づき、大潮時に海岸に堆積することが確認されている。このように現象解明のための定性的な糸口は見つけられているが定量的に定式化して現象を表現するまでには至っていない。

2. 研究の目的

本研究は、ジュエリーアスの出現現象を定式化して実際に運用することにより「ジュエリーアイスを見るには、いつ現地に行けばよいのか」の問いに答えることを念頭に置いた。本研究は、ジュエリーアイスが大津海岸に堆積してから融解するまでの出現時期推定手法の開発が目的である。

3. 研究の方法

(1) 現地観測

ジュエリーアスの出現現象を解明するために、2019年12月から2020年2月までの期間において、十勝川河口と大津海岸周辺に定点カメラ、水位計、風向風速計の観測を行った。定点カメラ(HYKEカメラSP2、株式会社ハイク社製)は、2019年12月23日から2020年2月28日の期間で図-1に示す4か所の場所に5台(No.1, 2, 3, 4, 5)を設置した。捉える現象は、十勝川の氷板の破壊現象、破壊された氷板が海域へ流下する輸送現象、ジュエリーアスの堆積現象である。No.1, 2は大津海岸に向けて設置し、No.3, 4は十勝川河口周辺に向けて設置し、No.5は十勝川上流に向けて設置した。記録周期は10分間で、動画と静止画で記録した。

図-2に1月21日のNo.1とNo.2のカメラ画像を示す。大津海岸に向けたNo.2では、2019年12月27日から28日にかけて、波打ち際で少量のジュエリーアスの堆積を確認した。2020年1月20日、21日、30日、31日、2月17日では、カメラ手前まで多量のジュエリーアスの堆積を確認した。なお、カメラ手前までジュエリーアスの堆積を確認できたのはNo.2のみである。

図-3に12月30日と31日のNo.3の氷板の破壊状況を示す。十勝川河口下流へ向けたNo.3では、氷板の形成、破壊、海域への輸送を確認した。2019年12月31日7時から正午にかけて氷板の

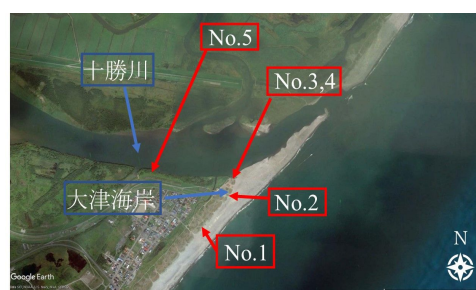


図-1 定点カメラ設置位置



図-2 左: No.1 右: No.2
(2020年1月21日14:30)

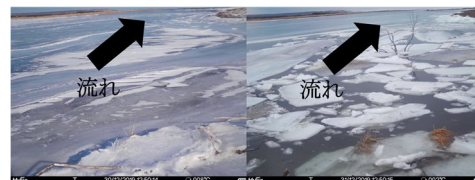


図-3 No.3における河氷の破壊状況
(左: 2019年12月30日12時50分、
右: 2019年12月31日12時50分)

破壊を確認し、その後一気に海域へと流下した。2020年1月3日頃には全面結氷を確認した。2月22日に河口付近から解氷が進み2月27日に解氷した。

水位計 (S&DL mini MODEL4800, OYO 応用地質株式会社製) については、十勝川の上流 (X 軸: -141498.765, Y 軸: -53812.794) と下流 (X 軸: 145290.416, Y 軸: -48552.002) の2か所に設置した。ジュエリーアイスの堆積が確認された2020年の1月20日から21日, 30日, 31日, 2月17日には上流と下流ともに水位が上昇した。

風向風速計 (KADEC-KAZE, YOUNG 社, ノースワン株式会社製) を定点カメラ No.5 の場所に設置し風向と風速のデータを取得した。調査期間中の卓越風は北西であった。最大瞬間風速は, 1月6日で 12.8 m/s であった。

(2) 画像解析による堆積面積の算出

ジュエリーアイスの実際の堆積状況を観測するために、定点カメラで撮影された画像を用いて画像解析を行った。なお、No.1 の定点カメラは遠景でジュエリーアイスの堆積状況を解析することが困難であったことから、No.2 の定点カメラで撮影された画像を用いた。Python を用いた画像解析により大津海岸に堆積したジュエリーアイスの面積を求めて、一様かつ定性的なデータの取得を試みた。なお、画像解析により得られた堆積面積を用いて、ジュエリーアイスの出現時期推定手法の妥当性の確認を行う。

解析期間は、2019年12月24日から2020年2月28日である。目視によって堆積が確認されていない画像は解析対象外とした。なお、画像解析ができない画像として「氷と雪が堆積している画像」「夜間の画像」が挙げられる。総データ数が681枚、夜間の画像が345枚、「ジュエリーアイスが堆積していない」または「氷と雪が堆積している」画像が87枚である。射影変換したデータ数が249枚である。

画像解析方法を記す。まず対象画像において、氷が存在しない海域と氷の堆積していない浜辺を切り取り、マスク画像を作成する。その後、輝度処理、BGR 調整、モノクロ化を実施する。現地で計測した射影変換用の座標を入力して変換を行う。適切な閾値を手動で設定し、どの画像に対しても一定の値で二値化処理を実施した。1pic は 0.00007m² とし、ピクセル数を面積に変換した。

4. 研究成果

(1) ジュエリーアイスの出現時期推定手法の開発

大津海岸に堆積したジュエリーアイスの出現現象について形成、破壊、輸送、堆積の4つの現象に加えて「融解」を考慮して定式化を試みた。図-4に、本研究で考慮したジュエリーアイス出現現象を示す。

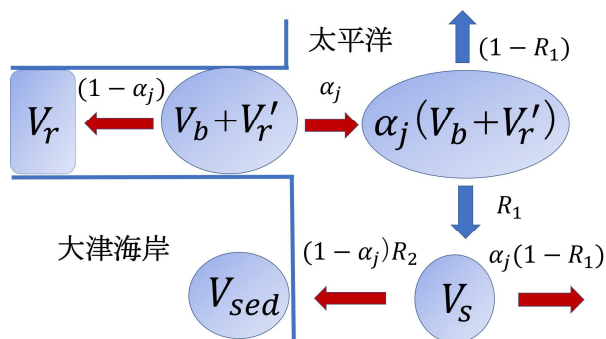


図-4 本研究で考慮したジュエリーアイス出現現象

形成

氷板の形成は、気温による形成、融解を考慮できる氷板厚計算式の次式を用いた。気温、地点固有の係数を入力値として、形成から融解までの氷板厚を計算できる。

$$h_i = h'_i - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h'_i} - \left(\frac{48.8}{10^2}\right) \beta^{4/5} T_w h_w^{1/3} \quad (1)$$

$$\alpha = 0.906 - 2.770 \frac{I_b B}{h_w} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\left|\frac{Q}{B h_w}\right|}{h_w^{2/3}} \quad (3)$$

h_i [m]: 氷板厚, h'_i [m]: Δt 前の氷板厚, T_a []: 気温, 気温は気象庁のデータを使用. T_w []: 水温, 水温は気温より計算した. h_w [m]: 等流水深, I_b [無次元]: 河床勾配, B [m]: 川幅で 192 を与えた. α は気温に対する氷板形成の程度を表し, 大きくなると氷板を増加させ, β は水温と有効水深に対する氷板融解の程度を表し, 大きくなると氷板を融解させる係数である. また, h'_i [m] の初期値として 1cm を与えた。

本式の計算値の妥当性を確認するために、氷板厚の実測値が存在する十勝川河口から 21km 地点の茂岩水位観測所の実測値と計算値の比較を行った。その結果、平均絶対誤差は 5cm であった。本研究から、十勝川の氷板厚を気象データから推定可能であることが分かった。一方で、破壊されやすく危険を伴うこともあり、十勝川河口周辺の氷板厚の実測値が得られておらず、河口周辺での本式の計算値の妥当性の確認は実施できていない。

破壊

氷板の破壊は、現地観測結果から、水位または潮位が上昇する期間かつ気温が上昇する期間において、氷板が破壊されて海域へと流下される現象が多く捉えられた。水位または潮位の変動により、氷板は曲げ応力を受けて破壊されたと推察できる。また、氷板の許容曲げ応力は温度に依存する。気温の上昇により氷板の許容曲げ応力が小さくなり破壊されやすくなったと推察できる。氷板の許容曲げ応力は、次式を用いた。

$$\sigma_{\alpha} = -0.0294T_{ice} + 0.7023 \quad (4)$$

$$T_{ice} = \frac{T_a + T_w}{2} \quad (5)$$

ここで、 σ_{α} [MPa]：氷板の許容曲げ応力、 T_{ice} []：氷板平均温度である。応力が最大になる縁応力は、次式を用いた。

$$\sigma_{max} = 3\rho_w \left(\frac{L_i u_w \sin\theta}{h_i} \right)^2 \quad (6)$$

ここで、 σ_{max} [MPa]：応力が最大になる縁応力、 ρ_w [kg/m³]：水の密度で 999.8 を与えた。 L_i [m]：破壊される氷板の縦断的な長さで、20 を与えた。 $\sin\theta \doteq \tan\theta = (h_t - h) \div \Delta x$ とした。 h_t [m]：潮位、 h [m]：平均潮位で、0.863 を与えた。 Δx [m]は縦断距離で Google Earth より十勝川河口から平均潮位になるまでの距離として 1005 を与えた。 u_w [m/s]：流速は、上流方向と下流方向へ向かう流れがあり、微小振幅波理論を適用し次式を用いた。正の流速は海から川へ向かう流れとなる。

$$u_w = \frac{2\pi}{T} (h - h_t) \frac{e^{\frac{2\pi}{L} h_t} + e^{-\frac{2\pi}{L} h_t}}{e^{\frac{2\pi}{L} h} - e^{-\frac{2\pi}{L} h}} \quad (7)$$

$$L = T \times \sqrt{9.8 \times h} \quad (8)$$

L [m]：波長であり 129690.5 を与えた。 T [s]：周期であり 44595.36 を与えた。式 (7) は水面の流速である。氷板が破壊される条件は次式となる。

$$\sigma_{\alpha} < \sigma_{max} \quad (9)$$

輸送

氷板の輸送は、破壊された氷板が海域へと輸送され、氷板が十勝川右岸付近に接近する現象を考慮する必要がある。現地観測より、破壊された氷板が海域へと流下する期間は、満潮から干潮にかけて見られた。氷板が十勝川右岸に接近する条件は、風速が強く、風向は十勝川右岸へ吹く風である北北西の条件であると推察できる。本研究では、破壊された氷板 V_b [m³] が、海域へと向かう割合 α_j と風による十勝川右岸に接近する割合 R_1 により、海域へ輸送されると仮定した。その後、風によって十勝川右岸に接近すると考えた。また、氷板厚 h_i が 0.3m 以下の場合、海水で溶けると仮定した。しかし、破壊された氷板が海域へと流下し、どのような軌跡を辿り、どの程度の時間で、海岸に堆積するかについては未解明である。破壊された氷板、海域へ向かう割合、風により十勝川右岸に接近する割合、河川内を滞留する氷板、海域へ流下する氷板は次式で表した。

$$V_b = h_i B L_i \quad (10)$$

$$V_r = (1 - \alpha_j) V_b \quad (11)$$

$$\alpha_j = \frac{u_w}{u_{w,min}} \quad (12)$$

$$V_s = R_1 \alpha_j (V_b + V_r) \quad (13)$$

$$V_r' = \Sigma V_r \quad (14)$$

$$R_1 = \frac{w_s}{w_{s,max}} |\cos(\gamma_1 - \theta_w) + 1| \times 0.5 \quad (15)$$

V_b [m³]：破壊氷板量、 R_1 ：風により十勝川右岸に接近する割合、 $w_{s,max}$ [m/s]：最大風速であり、44 年間における最大値で 24 を与えた。 w_s [m/s]：風速、 γ_1 [°]：北を 0°、南を 180° として、大津海岸に向かう最適な風向として試行錯誤の上 17.5 (北北西) を与えた。 θ_w [°]：風向、 α_j ：海域へ向かう割合で、範囲は 0~1 であり、流速 u_w [m/s] が 0 以上の時は $\alpha_j = 0$ とした。 $u_{w,min}$ [m/s]：最小流速として -3.08 を与えた。なお、川から海へ向かう流れはマイナスとなる。 V_r [m³]：計算時間毎の河川内滞留氷板量、 V_s [m³]：流下氷板量、 V_r' [m³]：既に河川内に滞留している氷板量である。

堆積

氷板の堆積は、海に流出した氷板が、風により大津海岸に接近する割合 R_2 と、陸域へと向かう割合 $1 - \alpha_j$ によって海岸に堆積すると考えた。氷板堆積量 V_{sed} は大津海岸全体に堆積する総量である。

$$R_2 = \frac{W_s}{W_{s_max}} |\cos(\gamma_2 - \theta_w) + 1| \times 0.5 \quad (16)$$

$$V_{sed} = (1 - \alpha_j) R_2 V_s \quad (17)$$

R_2 : 風による大津海岸への接近割合, γ_2 [°] : 90 (東風) を与えた, V_{sed} [m³] : 氷板堆積量である.

融解

氷板の融解は, 現地観測の画像データより時間とともに氷の融解が確認された. 融解について, 本来ならば気温による融解を考慮するべきだが, 本研究では簡易的に求めるため日数によってジュエリーアイスが融解すると仮定した.

$$V_{ji} = \Sigma V_{sed} \quad (18)$$

$$\frac{dV_{ji}}{dt} = \omega V'_{ji} \quad (19)$$

V_{ji} [m³] : 融解を考慮した氷板堆積量 (ジュエリーアイス), ω [1/day] : ジュエリーアイスが堆積して溶けるまでの日数を 20 日として $-1/20$ を与えた. V'_{ji} [m³] : 既に堆積しているジュエリーアイスである.

本手法の妥当性の確認

出現時期推定手法の妥当性を確認するために, 画像解析によるジュエリーアイスの堆積面積と計算値による堆積量を比較した結果を図-5 に示す. 1月20日以前にもジュエリーアイスが大津海岸に堆積していたが, No.2 の解析範囲外に堆積していたため解析できていない. また, 2月18日以降も堆積していたが, 雪と氷が堆積していたため解析不可能であった. 図-5 の黒点が画像解析の結果である. 青線が計算による堆積量 V_{sed} で, 赤線が融解を考慮した計算による積算堆積量 V_{ji} である. 図-5 より, 計算値は堆積面積の出現時期の変動を表現している. しかし一部で計算値と堆積面積の変動に違いが生じている. 画像解析による堆積面積は No.2 の限られた範囲の値であり, 海岸全体の堆積量を代表していない. 一方で計算値は, 海岸全体の堆積量を計算しているため, 計算値と堆積面積の変動に違いが生じていると推定できる. 1月20日頃に計算値と画像解析の堆積面積で乖離が生じている. この原因として, 1月20日頃の風向を見ると北北西の風向が多く, 計算上, 十勝川右岸に接近するが, 東風が吹いていないため R_2 の値が小さくなり, 計算値の堆積量が小さくなったと推定できる. また本手法では, 堆積現象における上げ潮や下げ潮の潮位変動の影響を考慮していない. 精度向上のためには, 本手法で考慮した風向き R_2 と流向 α_j に加えて, 潮位変動などの現象を考慮する必要性が示唆された.

まとめ

本研究では, ジュエリーアイスの観光資源としての価値を高めるために, 出現時期推定手法の開発を目的として, 画像解析結果に基づき本手法の妥当性を確認した. 自然現象であるジュエリーアイスの出現現象を, 主に気温, 風向, 風速, 潮位から再現可能であることを示した.

2022 年度と 2023 年度において, 本手法を用いて出現予測を行い, ホームページ上で公表した. 閲覧数は, 2022 年度は 40,486 回, 2023 年度は 38,025 回であった. 2023 年度では 10 日間予測から 2 日間予測に変更したが, web 訪問者数の減少は, 2022 年度に比べて 1%程度であった. web 訪問者の言語は, 日本語 97.0%, 英語 1.6%, 中国語 1.2%, 韓国語 0.2%であった. 2023 年度の web アンケート調査により, 以下のことが明らかとなった.

- ・ 同じ予測でも人によって評価が異なる
- ・ 閾値の与え方を再検討する必要がある
- ・ 解氷に伴う出現を考慮する必要がある
- ・ 多少でも見られれば満足できる方と, 多量の氷を見たい方がいる

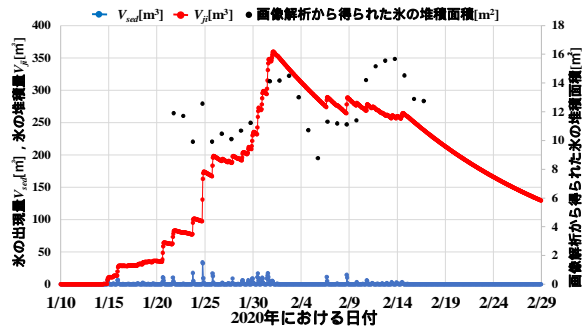


図-5 画像解析による堆積面積と計算による堆積量の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 岸本真志, 吉川泰弘, 芳賀聖一, 甲斐達也	4. 巻 78
2. 論文標題 北海道大津海岸におけるジュエリーアイス出現時期推定手法の一検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1063 ~ I_1068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_1063	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井上和哉, 松川優一, 菊地正彦, 吉川泰弘
2. 発表標題 GPS追跡機器によるジュエリーアイスの輸送経路調査
3. 学会等名 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第79号, B-12
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋田智広, 吉川泰弘, 井上和哉, 松川優一, 菊地正彦, 芳賀聖一, 甲斐達也
2. 発表標題 北海道大津海岸におけるジュエリーアイスの輸送・堆積現象に関する現地調査
3. 学会等名 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第79号, B-13
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本真志, 吉川泰弘, 芳賀聖一, 甲斐達也
2. 発表標題 2020年の北海道大津海岸におけるジュエリーアイス出現時期の推定
3. 学会等名 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第78号, B-06
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ジュエリーアイスプロジェクト Jewelry Ice Project
<http://sub0000548986.hmk-temp.com/jewelryice/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------