

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

岸本 真志¹・吉川 泰弘²・芳賀 聖一³・甲斐 達也³

¹学生会員 北見工業大学大学院 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
E-mail: k.masashi0304@gmail.com (Corresponding Author)

²正会員 博 (工) 北見工業大学准教授 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
E-mail: yoshi@mail.kitami-it.ac.jp

³非会員 福田水文センター (〒001-0024 北海道札幌市北区北 24 条西 15 丁目 2 番 5 号)

冬期に北海道十勝川河口の大津海岸に打ち上げられる「ジュエリーアイス」が新しい観光資源として注目されている。一方で、ジュエリーアイスが見られる時期は、十分には解明されていない。本研究の目的は、ジュエリーアイス出現時期推定手法の開発である。定点カメラで撮影された画像を用いて画像解析を行い、ジュエリーアイスの堆積面積を算出した。出現現象を形成・破壊・輸送・堆積・融解の5つに区分して検討を行った。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の比較を行い、計算結果の妥当性を確認した。

Key Words: jewelry ice, estimation of method, Otsu coast, appearance period

1. はじめに

近年、冬期に北海道十勝川河口の大津海岸に打ち上げられるジュエリーアイスが新しい観光資源として注目されている。ジュエリーアイスとは、大津海岸がある十勝管内の豊頃町出身の写真家が2012年²⁾に名付けた名前であり、大津海岸で見られる光の反射によって様々な色に輝くクリスタルのような無数の氷の塊である。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。2016年3月に策定された第8期北海道総合開発計画³⁾では、新たに「食」と「観光」が戦略的産業として位置づけられている。ジュエリーアイスが観光資源として注目されるようになると、地域ではその出現現象の解明や出現時期を推定する手法の開発が望まれるようになった。

ジュエリーアイスは透明度の高い氷である。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イスは河川の氷由来と推定できる。

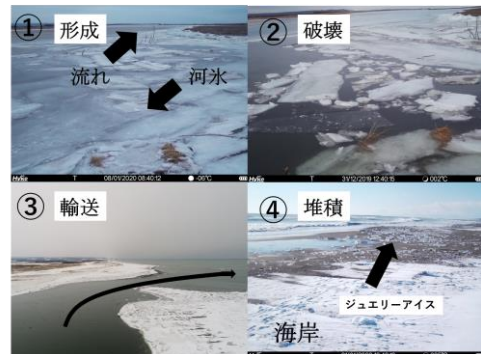


図-1 ジュエリーアイス出現現象⁴⁾

既往研究⁴⁾では、ジュエリーアイスに関する基礎的な知見を得て観光資源としての価値を高めるために、出現現象の解明を目的とした現地観測を実施している。現地観測に基づき、出現現象を図-1に示す形成・破壊・輸送・堆積の4つの現象に区分して定性的に説明している。既往研究⁴⁾より、以下の現象が推察された。潮汐変動の小さい小潮時において気温の低下により氷板が形成される。潮位が上昇することで水位も上昇して氷板が破壊される。この時に気温が高いと氷板は破壊されやすい。破壊された氷板は海域へと流れる。北風、東風が吹くことにより氷板は大津海岸に近づく。潮位が高いときに氷板は陸から離れずに大津海岸に堆積する。堆積した氷板はジュエリーアイスとなる。出現時期推定について

は、現象の解明に重点を置いているため達成できていない。

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。本研究では、過去の出現時期を気象データから推定できるか検討した。この手法の妥当性が確認できれば、将来予測も可能となる。

2020年1月、2月の大津海岸で撮影した写真の連続データに基づき画像解析を実施し、ジュエリーアイスの堆積面積を算出して出現時期を明らかにした。既往研究⁵⁾では、開水面と積雪面を分離する画像解析手法が用いられている。本研究では、この技術を応用してジュエリーアイスとその他の分離を試みた。さらに出現現象に融解を加えた5つに区分して出現時期推定手法を開発し、計算値と画像解析による堆積面積を比較した。

2. ジュエリーアイスに関する現地観測

ジュエリーアイスの出現現象を十分に解明するために、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-2**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、ジュエリーアイ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-3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、波打ち際に少量のジュエリーアイ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イスの堆積を確認した。なお、カメラ手前までジュエリーアイスの堆積を確認できたのはNo.2のみである。

図-4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。

図-5に水位計（S&DL mini MODEL4800, OYO応用地質株式会社製）の設置場所を示す。十勝川の上流（X軸：-141498.765, Y軸：-53812.794）と下流（X軸：-



図-2 定点カメラ設置位置



図-3 左：No.1 右：No.2（2020年1月21日 14:30）



図-4 No.3における河水の破壊状況
（左：2019年12月30日 12時50分、
右：2019年12月31日 12時50分）



図-5 水位計設置場所

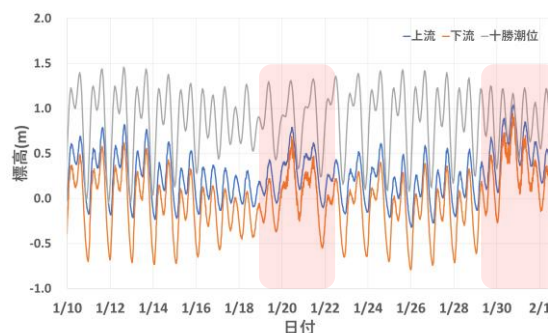


図-6 水位変化図（2020年1月）

145290.416, Y軸：-48552.002) の2か所に設置した。図-6に水位変化を示す。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ている。

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12.8m/sであった。

3. 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。既往研究⁴⁾では, 大津海岸に占めるジュエリーアイスの割合は目視観測によって算出している。本研究では, 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。

画像解析のフローを図-7に示す。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。図-8に画像解析を行うことのできない画像の一例を示す。

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する。画像解析の対象画像一例を図-9に示す。青い枠が射影変換した範囲(226.3261m²)である。図-10に射影変換及び二値化した画像を示す。なお, カメラNo.2で堆積が確認された2019年12月下旬は, 図-9に示す青い解析範囲外にジュエリーアイスが堆積しており解析はできていない。

4. 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

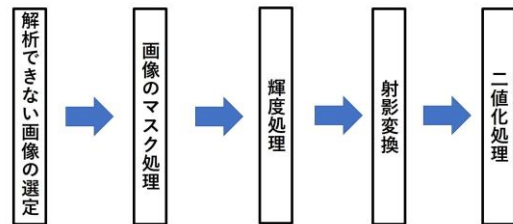


図-7 画像解析のフロー

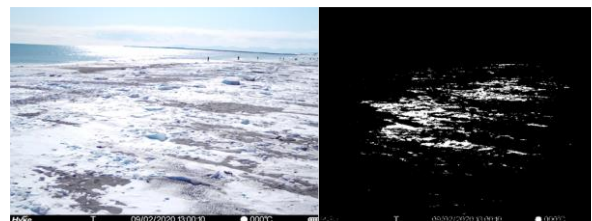


図-8 画像解析を行うことのできない画像の一例
「氷と雪が堆積している画像」
(2020年2月9日13時00分)

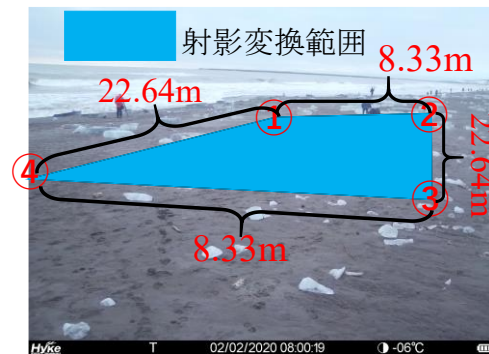


図-9 画像解析の対象画像一例 (2020年2月2日)

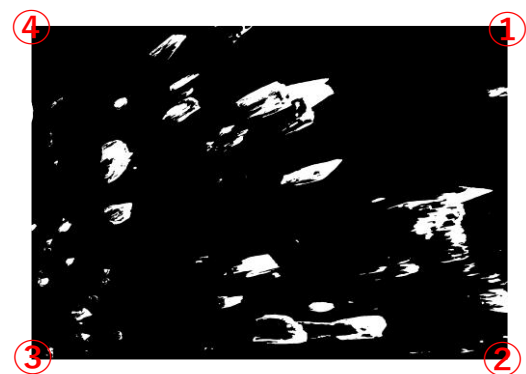


図-10 射影変換及び二値化した画像 (2020年2月2日)

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-11に, 本研究で考慮したジュエリーアイス出現現象を示す。

(1) 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⁹⁾を用いた。気温, 地点固有の係数を入力値

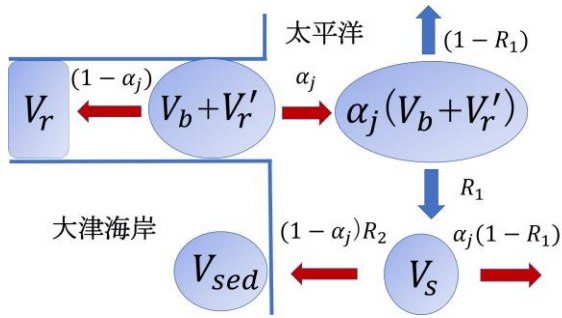


図-11 本研究で考慮したジュエリーアイス出現現象

として、形成から融解までの氷板厚を計算できる。

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

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

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

h_i [m] : 氷板厚, h'_i [m] : Δt 前の氷板厚, T_a [°C] : 気温, 気温は気象庁 7) のデータを使用. T_w [°C] : 水温, 水温は気温より計算 6) 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. 図-12に, 茂岩水位観測所の氷板厚の実測値と計算値を示す. 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.

(2) 破壊

氷板の破壊は, 現地観測結果 9) 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 9) を用いた.

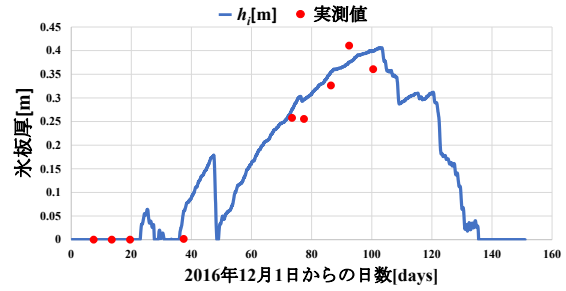


図-12 茂岩水位観測所の氷板厚の実測値と計算値

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

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

ここで, σ_α [MPa] : 氷板の許容曲げ応力, T_{ice} [°C] : 氷板平均温度である. 応力が最大になる縁応力は, 次式 9) 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. $\sin\theta \equiv \tan\theta = (h_t - h) \div \Delta x$ 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 9) となる.

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

(3) 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. 既往研究 9) 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377.5 (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。

(4) 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。

$$R_2 = \frac{w_s}{w_{s_{max}}} |\cos(\gamma_2 - \theta_w) + 1| \times 0.5 \quad (16)$$

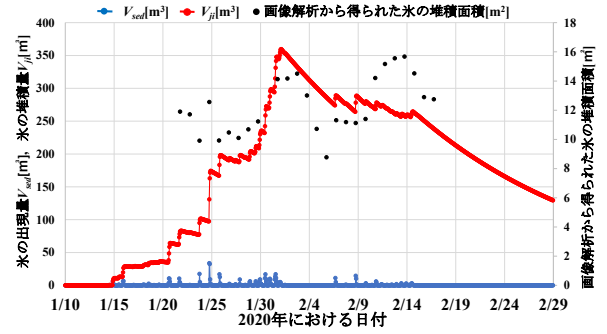


図-13 画像解析による堆積面積と計算による堆積量の比較

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

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。

(5) 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。

5. 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-13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-13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-13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。

6. 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。一方で、計算結果の精度を向上させるためには、堆積現象の解明とその定式化、本手法における破壊される氷板の縦断的な大きさ L_i 、時間差による堆積を検討する必要がある。

将来的には、入力値に予測値を入力することで、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ぶきっかけとなり、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。

謝辞：本研究は JSPS 科研究費 JP21K04267 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 独立行政法人工業所有権情報・研修館. "商標検索". 特許情報プラットフォーム. 出願番号 6097937. <https://www.j-platpat.inpit.go.jp/t0100>. (参照 2022 年 7 月 29 日)
- 2) 北海道新聞, 2017 年 2 月 19 日道東版
- 3) 国土交通省北海道開発局, 北海道総合開発計画について, <https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/keikaku/u23dsn0000000fqs.html> (参照: 2022 年 7 月 29 日)
- 4) 松浦悠, 吉川泰弘, 芳賀聖一: 北海道大津海岸に打ち上げられたジュエリーアイスの出現現象に関する現地観測, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第 76 号, B19, 2020.
- 5) 甲斐達也, 芳賀聖一, 吉川泰弘, 横山洋: 画像解析を用いた河川結氷状況の自動検知に関する検討, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第 76 号, 2019.
- 6) Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuharu WATANABE, Akashi ITOH : A SIMPLE EQUATION FOR ICE SHEET THICKNESS AND ICE FORMATION/BREAKUP PREDICTION, *Journal of JSCE*, Vol.12, pp.203-213, 2014.
- 7) 国土交通省 気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/> (参照2022年7月29日)
- 8) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 河川解氷時の河水の破壊と流下に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.67, No.4, pp.I_1075-I_1080, 2011.

(Received May 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

INVESTIGATION ON ESTIMATION METHOD OF JEWELRY ICE APPEARANCE PERIOD ON THE OTSU COAST IN HOKKAIDO

Masashi KISHIMOTO, Yasuhiro YOSHIKAWA, Seiiti HAGA and Tatuya KAI

"jewelry ice", which is appeared in winter on Otsu Coast near the Tokachi River mouth in Hokkaido, has been attracting attention as a new tourist resource. On the other hand, the period of the appearance of "jewelry ice" is not fully clear. The objective of this study is to develop a method for estimating the period of appearance of jewelry ice. Image analysis was performed using images taken by a fixed-point camera to calculate the area of deposition. The appearance phenomena are classified into five categories: formation, destruction, transport, deposition, and melting. The validity of the calculation results was confirmed by comparing the area of jewelry ice deposited by image analysis and the amount deposited by calculated values.