

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

Estimate of Jewelry Ice appearance period on the Otsu coast in Hokkaido in 2020

北見工業大学	〇正 員	岸本真志 (Masashi Kishimoto)
北見工業大学	正 員	吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
福田水文センター	非会員	芳賀聖一 (Seiiti Haga)
福田水文センター	非会員	甲斐達也 (Tatsuya Kai)

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、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。大津海岸のある豊頃町では、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、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は、十分には明らかになっていないため、出現時期推定手法の開発が求められている。

既往研究³⁾では、現地調査により、出現現象を形成・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。本研究では、2020年の大津海岸で撮影した写真に基づき画像解析を実施し、ジュエリーアスの堆積面積を算出して出現時期を明らかにした。さらに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. 現地観測

ジュエリーアスの出現現象を明らかにするために、定点カメラ、水位計、風向風速計の設置を行った。

2.1 定点カメラ

十勝川河口と大津海岸周辺において、氷の挙動を捉えるために定点カメラ（HYKEカメラ SP2、株式会社ハイク社製）を設置した。観測期間は、2019年12月23日から2020年2月28日とした。設置場所は、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、十勝川の河氷の破壊状況、破壊された河氷が海域へ流下する輸送状況、ジュエリーアスの堆積状況である。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。

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



図-1 定点カメラ設置場所図

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、海岸で多量のジュエリーアスの堆積を確認した。

十勝川河口下流に向けたNo.3のカメラでは、河氷の形成、破壊、海域への輸送を確認した。2019年12月24日から河道の結氷が進行し、27日には全面結氷した。12月31日7時から正午にかけて、河氷の破壊を確認した。2020年1月1日には全面結氷を確認した。2月22日から河口付近から解氷が進み2月27日に解氷した。

十勝川河口上流に向けたNo.4のカメラでは、河氷の形成、破壊、海域への輸送を確認した。2019年12月31日7時に河氷の破壊を確認し、その後一気に海域へと流下した。以降、結氷が進み全面結氷となった。その後、水際に河氷の破壊を確認した。2020年2月23日に流心部で破壊が生じ、16時から21時にかけて河道全体の河氷が流下した。その後、上流から河氷の流下が不規則に見られた。

十勝川上流に向けたカメラで最も上流側に設置されたNo.5カメラでは、機械設置から2020年2月23日まで全面的に結氷していた。また、観測期間中、水位変動による河氷の上昇と下降が確認された。

2.2 潮位と水位

現地観測により、水位計を十勝川の上流（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。図-2に2020年1月の上流水位、下流水位、十勝潮位を示す。図-2から十勝川の水位は、潮位の影響を受けていることがわかる。ジュエリーア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日には水位が上昇している。

2.3 風向風速計

定点カメラ No.5 の位置に風向風速計を設置し、風向と風速のデータを取得した。図-3 にその結果を示す。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. 画像解析によるジュエリーアイス堆積面積の算出

既往研究では、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³⁾していた。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実施する。

画像解析を行う対象画像は、定点カメラ No.2 で撮影された画像を用いる。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、画像解析が出来ない画像として「氷と雪が堆積している画像」「夜間の画像」が挙げられる。

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。画像を射影変換し、適切な閾値を与え二値化処理を実施する。1pic=0.00007m²とし、ピクセル数を面積に変換する。画像解析の一例を図-4 に示す。青い枠が射影変換した範囲である。図-5 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、解析範囲外にジュエリーアイスが堆積しており、解析は出来ていない。

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。

4.1 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³⁾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。

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

h_i [m]: 氷板厚, h'_i [m]: Δt 前の氷板厚, T_a [°C]: 気温, T_w [°C]: 水温, 水温は気温より計算⁴⁾した。 h_w [m]: 水深, α , β は、地点固有の係数。

本式の計算値の妥当性について、氷板厚の実測値が存

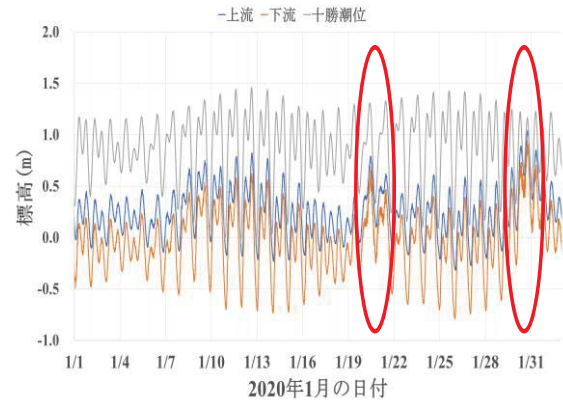


図-2 潮位と水位計の時系列データ (2020年1月)

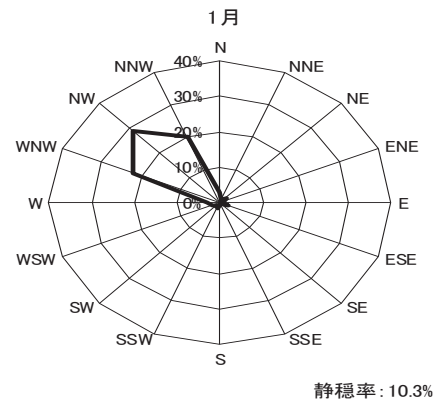


図-3 風配置図(2020年1月)



図-4 画像解析一例 (2020年2月2日8時)

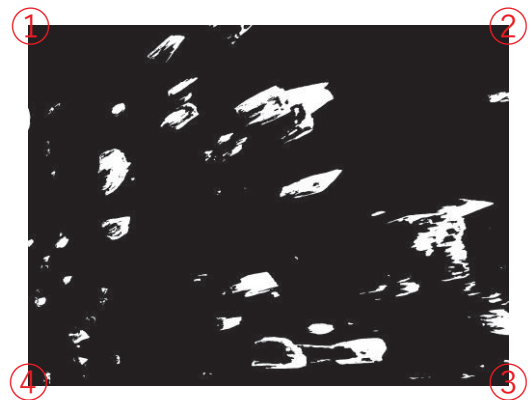


図-5 射影変換および二値化した画像

在する十勝川河口から約 20km 地点の茂岩水位観測所において、実測値と計算値の比較を行った。図-6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。本検討から、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出来ていない。

4.2 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、河氷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。氷板の曲げ応力は、次式⁵⁾を用いた。

$$\sigma_{\alpha} = -0.0294T_{ice} + 0.7023 \quad (2)$$

$$T_{ice} = \frac{T_a + T_w}{2} \quad (3)$$

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⁵⁾を用いた。

$$\sigma_{max} = 3\rho_w \left(\frac{L_i u_w \sin\theta}{h_i} \right)^2 \quad (4)$$

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、既往研究より 10 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。

$$u_w = \frac{2\pi}{T} (h - h_t) \frac{e^{\frac{2\pi}{L} h_t} + e^{-\frac{2\pi}{L} h_t}}{e^{\frac{2\pi}{L} h} - e^{-\frac{2\pi}{L} h}} \quad (5)$$

$$L = T \times \sqrt{9.8 \times h} \quad (6)$$

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。

河氷が破壊される条件は次式⁵⁾となる。

$$\sigma_{\alpha} < \sigma_{max} \quad (7)$$

4.3 輸送



図-6 茂岩観測所の氷板厚の実測値と計算値

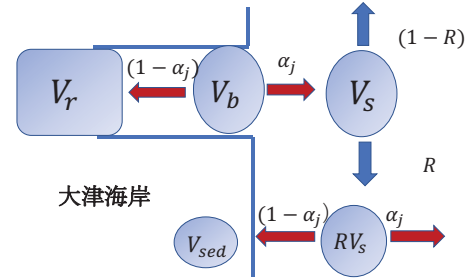


図-7 輸送から堆積までの模式図

氷板の輸送は、破壊された氷板が海域へと輸送され、氷板が海岸付近に接近する現象を考慮する必要がある。既往研究³⁾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。氷板が海岸に接近する条件は、風速が強く、風向は海岸へ吹く風である北風東風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 により、海域へ輸送されると仮定した。その後、風によって大津海岸に接近すると考えた。また、氷板厚 h_i [m]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。図-7に輸送と接近および堆積についての模式図を示す。破壊された氷板、海域へ向かう割合、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。

$$V_b = h_i B L_i \quad (8)$$

$$\alpha_j = \frac{u_w}{u_{w,min}} \quad (9)$$

$$V_r = (1 - \alpha_j) V_b \quad (10)$$

$$V_s = \alpha_j (V_b + V_r') \quad (11)$$

V_b [m³]：破壊氷板量、 B [m]：川幅で 192 を与えた、 α_j ：海域へ向かう割合であり、範囲は 0～1 である。流速 u_w [m/s]が 0 以上の時は 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]：河川内滞留氷板量、 V_s [m³]：流下氷板量、 V_r' [m³]：すでに河川内に滞留して

いる氷板量。

4.4 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 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。

$$R = \frac{w_s}{w_{s,max}} |\cos(\gamma - \theta_w)| \quad (12)$$

$$V_{sed} = (1 - \alpha_j) R V_s \quad (13)$$

R ：接近割合， $w_{s,max}$ [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 [°]：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 90（東風）を与えた． θ_w [°]：風向， V_{sed} [m³]：氷板堆積量。

4.5 融解

氷板の融解は、現地観測の画像データをより、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。

$$V_{ji} = \Sigma V_{sed} \quad (14)$$

$$\frac{dV_{ji}}{dt} = \omega V'_{ji} \quad (15)$$

V_{ji} [m³]：融解を考慮した氷板堆積量， 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]：すでに堆積しているジュエリーアイス。

5. 計算値の妥当性

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-8 に示す。

図-8 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。1 月 30 日から 2 月 4 日までの間に、解析値が上昇しているにも関わらず、計算値では上昇していない。原因として、この時期の風向は北北西が多いことや、時間遅れで堆積したことなどが考えられる。また、本研究では No.2 の限られた範囲でしか画像解析を行っていないため、海岸全体の堆積量を解析できていない。そのため計算結果との違いが生じていると推察できる。

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、画像解析により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気象データ（気温、

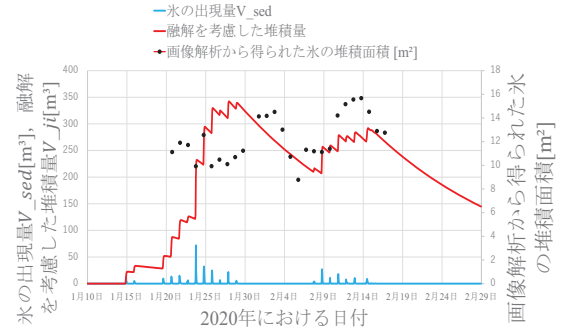


図-8 画像解析による堆積面積と計算による堆積量の比較

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、このモデルの破壊される氷板の縦断的な大きさ L_i [m]、風向 γ [°]の検討が必要である。さらに、破壊された氷板が、風により大津海岸に接近するときの風向と、大津海岸に堆積するときの風向を分けて考える必要がある。

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

参考文献

- 1) 豊頃町の新絶景ジュエリーアイス，<http://www.toyokoro.jp/jewelryice/>（閲覧日：2021 年 11 月 29 日）
- 2) The New York Times, Ice That Sparkles Like Diamonds Washes Onto Japanese Shores, <https://www.nytimes.com/2017/01/30/science/jewel-ice-tokachi-river-hokkaido-japan.html>（閲覧日：2021 年 11 月 29 日）
- 3) 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，2020。
- 4) 吉川泰弘，渡邊康玄，早川博，平井康幸：結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.68，No.1，pp.21-34，2012。
- 5) 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。