

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

Study on automatic detection of river ice condition using image analysis

(株) 福田水文センター 〇正 員 甲斐達也 (Tatsuya Kai)
(株) 福田水文センター 非会員 芳賀聖一 (Seiichi Haga)
北見工業大学 工学部 正 員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
寒地土木研究所 寒地河川チーム 正 員 横山洋 (Hiroshi Yokoyama)

1. はじめに

2019 年に WMO は、世界の平均気温が過去 5 年間で観測史上最も暑くなるなど地球温暖化の兆候やその影響が加速していると発表¹⁾した。北海道ではこれまで冬期に大雨となることは少なかったが、2018 年 3 月に季節外れの大雨と気温上昇によって、北海道全域でアイスジャム発生による被害が多発²⁾した。現在、寒冷地特有の結氷河川の適切な管理を目指す施策として、アイスジャム予測プログラム³⁾やアイスジャムスケール⁴⁾の開発や社会実装が進められており、被害の軽減に向けて研究が進められている。

一方で、アイスジャムの発生や決壊の予測について研究が進められているが、実際のアイスジャムの発生や決壊を検知するシステムや警報を配信するシステムは構築されていないのが現状である。

本論文は、アイスジャムの発生や決壊を検知するためのアラート配信システムの構築に向けた第一歩として、河川結氷状況を検知する画像解析技術となる結氷河川の開水面積の連続自動算出手法について検討した。

2. 現地観測の概要

観測場所は、2018 年 3 月のアイスジャムが要因と考えられる人的被害が発生した辺別川を観測対象として、事故発生現場から約 160m 下流の九線橋上流で実施した。辺別川はトムラウシ山の西に位置する三川台西方斜面を源流とする延長 47.5 km、流域面積 195.6 km² の石狩川水系美瑛川支流の一級河川である。

観測期間は、河川の結氷状態が安定した表-1 に示す 2019 年 2 月 1 日から 3 月 25 日までの期間とした。

観測項目は、河川の結氷状況把握を目的として、図-1 と表-2 に示す観測機材と観測設定で、動画撮影、水温観測、および水位観測を 1 時間毎に実施した。気温は、観測地点近傍の気象庁美瑛観測所のデータを用いた。

なお、カメラ撮影と水位観測は欠測期間が生じたため、表-1 にそれぞれの欠測期間を示している。

表-1 観測期間と欠測期間の一覧

項目\期間		観測期間	欠測期間
カメラ	現地撮影	2019/2/1 ~ 3/25	2/26~3/4
時刻水温	現地計測		-
時刻水位	現地計測		2/23, 24, 3/1, 3, 5~9
時刻気温	美瑛 (気象庁)		-



図-1 現地観測場所および観測機材

表-2 観測機材の仕様および観測設定

品名	テイドビット v2	品名	MODEL-4800S&DLmini
計測範囲	-20~30℃ (水中)	水位測定範囲	0~4m
精度	±0.2℃ (0~50℃)	圧力センサ精度	±0.1%FS (0~40℃)
分解能	0.02℃ [温度帯25℃]	水位分解能	1mm
時間精度	±1分/月 [温度帯0~50℃]	時間精度	気温20度で1秒/日以下
バッテリー	5年	バッテリー	6~8年
測定回数	約42,000点	測定回数	40,000回
質量	23g	質量	135g
寸法	30mm×40mm×17mm	外観寸法	直径22mm×長さ160mm
インターバル	1時間	インターバル	1時間
耐圧水深	305m		
品名	ハイクカム SP2		
静止画解像度	300万画素		
動画解像度	1280×720_30fps		
コーデック/拡張子	H264 MPEG4/MOV		
画角(対角線)	52°		
夜間撮影	940nm赤外線(ノーグロー)		
フラッシュ距離	20m		
インターバル	1時間: 静止画1枚・動画15秒		
寸法、重量	150×120×72mm, 400g		
記録媒体	SD/SDHCカード 最大32GB		
バッテリー	単3電池12本		

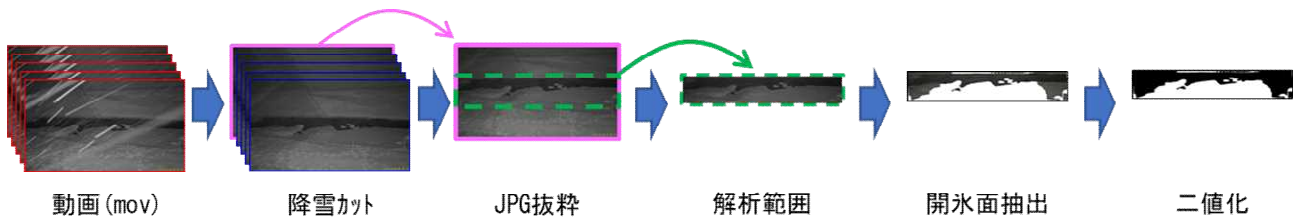
3. 開水面積の連続自動算出

3.1 開水面の連続抽出

開水面の画像上のピクセル数 (以下、pix 数) の算出は、将来システムに実装されることを想定して、無料で利用できるオープンソースの Python(Ver.3.7.3) と OpenCV(Ver.4.1.1)を用いた。

(1) 降雪カット方法

気象庁美瑛観測所データをみると、2019 年 2 月 1 日から 3 月 25 日の 53 日間のうち 21 日間降雪の記録があった。降雪が、映像に映ると背景が開水面か否かを判定することができない。加えて、降雪が事前に映像に含まれているか否かを判断することは難しい。よって、開水面の pix 数の算出に先立って映像から降雪をカットする作業を全ての映像で行った。



図－2 開水面の連続抽出フロー

アルゴリズムは、ゼロ埋めした背景フレームを用意して撮影フレームに重みづけをしながら背景フレームに重ね更新することで、動かない背景のみを抽出する手法を用いた。具体的には OpenCV の `cv2.absdiff()` と `cv2.accumulateWeighted()` 関数を用いて背景と降雪を分離した。更に、重みづけの計算誤差を減らすため、浮動小数点 (`np.float32`) を用いて計算を行った。図－3 には結果の一例を示しており、降雪カット作業の前後で降雪が除去されていることが確認できた。



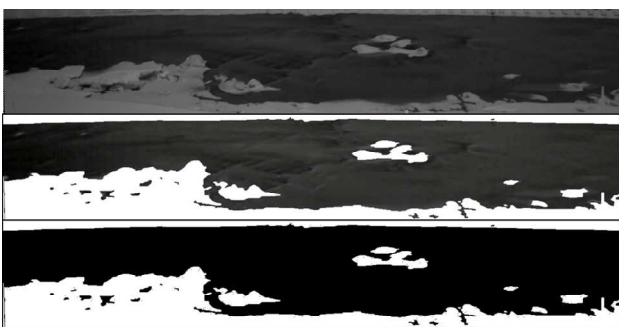
図－3 降雪カット (左：カット前、右：カット後)

(2) 開水面の連続抽出

降雪カットした映像から静止画 (JPG) を抜き取り、解析範囲をカットした画像を用いて開水面と積雪面の分離を行った。

アルゴリズムは、指定した範囲内の色分布を基に Graph Cut で開水面と積雪面の境界を求め、この境界から求めた開水面と積雪面の色分布計算と Graph Cut による境界算出を繰り返し行い、開水面と積雪面の分離を行った。用いた関数は `cv2.addWeighted()` と `cv2.GrabCut()` である。結果を示したものが図－4 である。

一方、Graph Cut 処理がうまくいかず開水面の pix 数の算出を行う二値化画像の開水面抽出がうまく表現できていないケースが二つ存在した。一つは Graph Cut 初期境界内の開水面が小さいため、開水面と積雪面の分離が

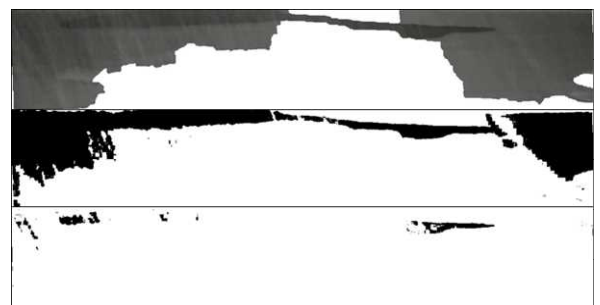
図－4 開水面抽出から二値化の一例
(上：抽出前、中：抽出後、下：二値化)

うまくいかなかったケースである。もう一つは、今回の一連の作業は自動化して行っているため、二値化する際に固定した閾値を用いると、昼夜で color と gray に変化する画像の開水面と積雪面の分離がうまくいかなかったケースである。

対処方法としては、前者は、開水面抽出処理方法を「対話的前景領域抽出」方法に変更することを検討した。しかし、「対話的前景領域抽出」の処理方法は、ユーザ入力が必要なため自動処理を目指したアルゴリズムには導入できず、今回は対処することができなかった。

後者は、color と gray 画像に対応した閾値の設定を各画像のうち Graph Cut でカットした部分 (グレースケールで白色の 255 の部分) を除いた NumPy 配列の平均値で求め、平均値を増減することで最適な二値化画像を目指した。しかし、平均値の増減は処理全体に適用できる最適値 (今回は平均値 $\times 0.85$) としたため、個別でみると二値化が現況開水面をうまく表現できていないケースも存在した。この部分についても、今後更なる改良が必要である。

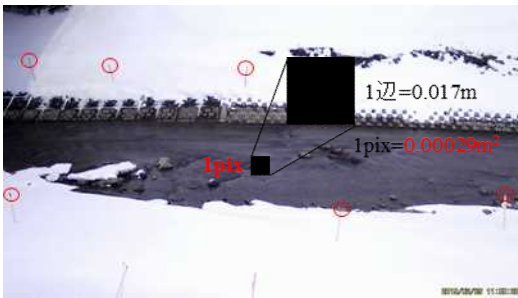
図－5 は Graph Cut から二値化処理の失敗例である。図中の中段は閾値が大きすぎて積雪部分が開水部分に含まれており、下段部分は閾値が小さすぎて開水面が積雪部分に含まれてしまった例である。

図－5 Graph Cut から二値化処理の失敗例
(上：Graph Cut、中：閾値大、下：閾値小)

3.2 開水面積の連続自動算出

開水面積の連続自動算出は、まず撮影した映像から開水面の pix 数を算出する。次に画像上で開水面を囲うように XY 座標が既知である 6 点を設定する。これらの点と点の実距離と画像上の pix 数の関係から、1pix の長さ と面積を求める。そして開水面の pix 数に 1pix の面積を乗じることにより開水面積を算出した。

以上より、1pix の長は 0.017m、1pix の面積は 0.0029m² として開水面の連続自動算出を行った。



図－6 既知点の配置状況

4. 結果と検討

4.1 開水面積の連続自動算出手法の妥当性

開水面積の連続自動算出の結果を図－7に示す。算出した値の妥当性を判断するため、無作為で選んだ画像の開水面積を ImageJ ソフトで読み取り、値を図－7と表－3に示し比較を行った。

表－3をみると、ImageJ 読み取り面積を 100%とした連続自動算出面積の比率は、観測前半の①～⑤は 17.5～567.3%に対して観測後半の⑥～⑧は 44.8～110.6%と、観測後半の方が 100%に近い値であった。

図－7をみると、観測前半の連続自動算出面積には日周期のような振幅があり、ImageJ の読み取り面積がこの振幅の下限側に位置していることから、観測前半の連続

自動算出面積は過大に算出されている可能性がある。

一方、観測後半の連続自動算出面積は、⑦のような一時的な値の乖離はあるが、概ね連続自動算出面積と ImageJ の読み取り面積の値は一致している。

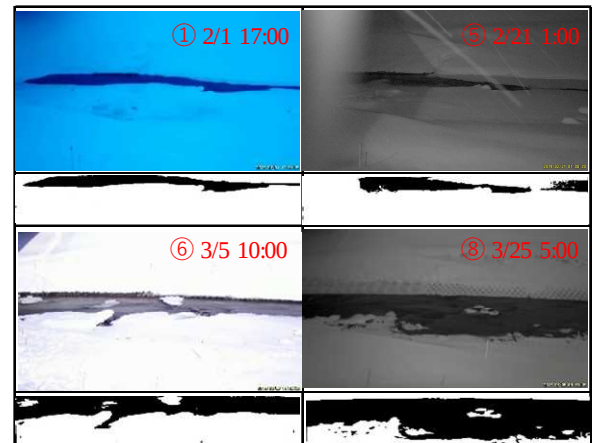
連続自動算出した開水面積の精度が低い原因を検討するために、表－3中の①～⑧についてオリジナル映像から抜粋した静止画と二値化の開水面の比較を行った。図－8には開水面積の精度が高いものを示し、図－9には開水面積の精度が低いものを示した。なお、図中の静止画の下に示したものが二値化の画像である。

精度の高い図－8をみると、昼の color 映像(3月5日)、夜の gray 映像(3月25日)、朝夕で特殊なコントラストとなる映像(2月1日)、降雪時の映像(2月21日)と、様々な条件下でも精度よく自動で開水面積を算出することができている。

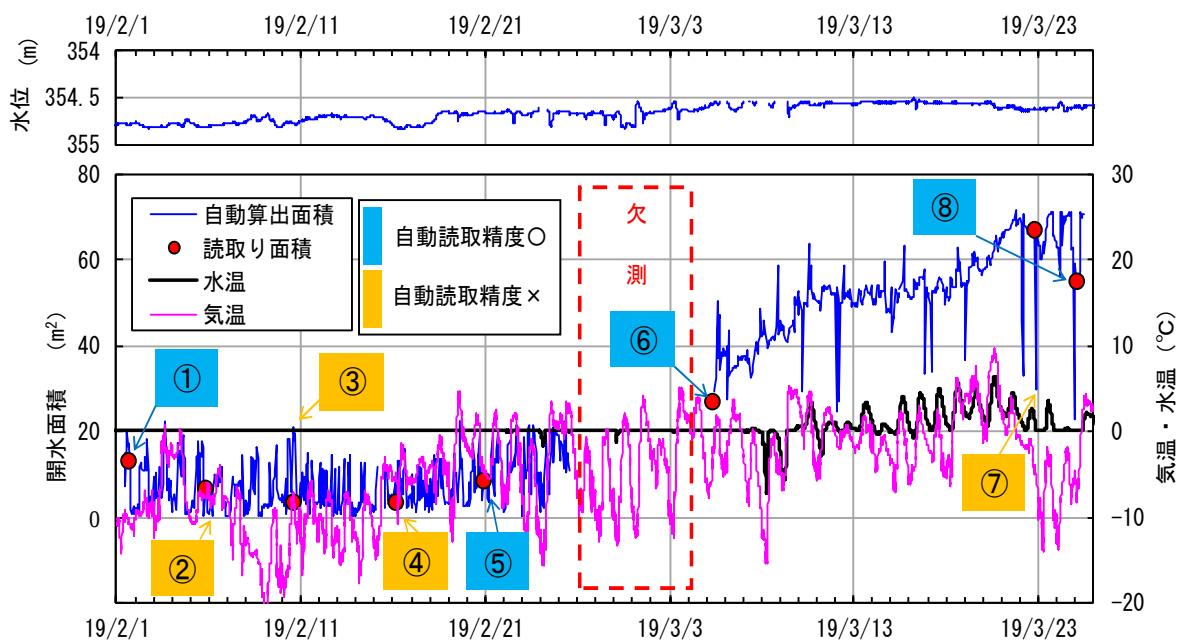
精度の低い図－9をみると、同じ条件下の夜の gray 映像(2月16日)、朝夕で特殊なコントラストとなる映像(2月10日)、降雪時の映像(2月5日)でも静止画と二値化で開水面積の差が大きくなっている。

表－3 開水面積比較一覧

番号	日付\項目	連続自動算出面積(a)	imageJ 読み取り面積(b)	a/b
		m ²	m ²	%
①	2019/2/01 17:00	12.30	12.90	95.3
②	2019/2/05 22:00	1.13	6.44	17.5
③	2019/2/10 16:00	17.70	3.12	567.3
④	2019/2/16 06:00	0.67	2.91	23.0
⑤	2019/2/21 01:00	7.77	8.02	96.9
⑥	2019/3/05 10:00	29.34	26.53	110.6
⑦	2019/3/22 21:00	29.77	66.41	44.8
⑧	2019/3/25 05:00	55.22	54.80	100.8



図－8 面積算出結果（精度が高い）



図－7 開水面積と気温・水温・水位の関係

このうち、3月22日映像は降雪が激しく、15秒間の動画撮影では背景の開水面と積雪面の補間ができない状況であった。

2月5日と2月16日は夜間の映像であるが、表-4と図-10に示すように、2月1日～3月5日の期間は消費電力0.3Wの赤外線ライト2台であったため、夜間撮影の光量が足りなかった可能性が高い。3月5日以降は、消費電力4Wの高出力ライトに交換したことで、安定した夜間の開水面積の結果が得られている。

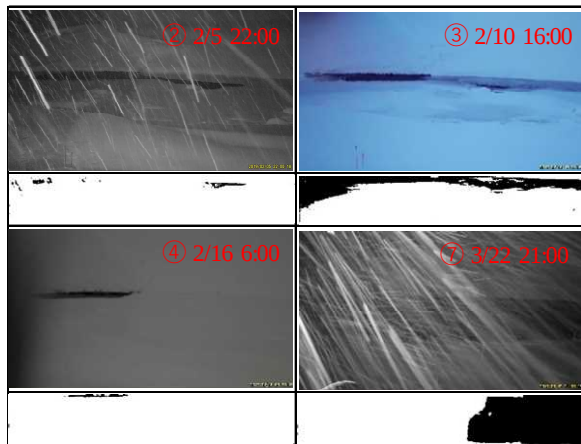


図-9 面積算出結果（精度が低い）

表-4 設置ライトの仕様

ライト	SA2-60-C-IR	S-SE24-IR 1R
設置台数	2台	1台
設置期間	2月1日～3月5日	3月5日～3月25日
LEDタイプ	1個	24個
照射角度	60°	30°
照射距離	12m	85m
波長	850nm	850nm
消費電力	0.3A	4A



図-10 ライト設置状況（左：低出力、右：高出力）

4.2 開水面積と気温、水温、水位との関係

気温、水温、水位の観測データは図-7の開水面積変化図に併記した。

水位変動幅を見ると、0.34mと小さいことから観測地点で大規模なアイスジャムは発生しなかったといえる。更に、開水面積と水位の関係をみても、水位変動と開水面積の増減との関連性が低いことから、水位変動が開水面積の増減に影響を与えている可能性は低い。また、上流でのアイスジャム発生に起因する水位低下現象は確認されていない。

一方、気温は開水面積が小さい2月中旬まではマイナス気温が続いているが、プラス気温が記録されると徐々に開水面積が増えており、気温変化と開水面積の増減は関連性が高いといえる。

水温は気温とは異なり開水面積上昇初期には全く変動していない。しかし、開水面積が急激に増加する3月上旬になると水温は変動し始め、3月中旬以降は最高水温＝最高気温となり、気温変化と同様の变化となった。

以上より、開水面積の増減と最も関連性が高い項目は気温であることが確認できた。

5. まとめと今後の課題

今回の観測・検討結果から得られた知見を箇条書きで以下に示す。

- ・1時間毎に撮影した映像を用いて、開水面積を連続的に自動で算出する手法を示した。
- ・本研究では、開水面積の算出手法は昼夜を問わず、また吹雪等の悪条件下でも算出することが可能であった。
- ・開水面積が小さい場合は、算出される開水面積の精度が低くなるケースがある。
- ・連続自動算出面積とImageJ読取り面積を比較すると、観測前半の連続自動算出面積は過大に算出されている可能性がある。
- ・一方、観測後半は概ね連続自動算出面積とImageJの読取り面積の値は一致している。
- ・夜間光量が少ないと画角隅が露出不足で開水面と積雪面の境界をうまく分離できない場合がある。対策として、高出力ライトに交換することで安定した夜間の開水面積の結果が得られている。
- ・降雪が激しいと、15秒間の動画撮影では背景の開水面と積雪面の補間ができない場合がある。
- ・本研究では、水位変動の幅が0.34mと小さいため、水位変動と開水面積の増減に係性はみられなかった。
- ・本研究では、最も開水面積の増減との関係性が高かった項目は、気温データであった。

今後の課題としては、Graph Cut 処理精度が低かったケースの改善や、二値化に使用する閾値の最適化が挙げられる。将来はこの技術を用いてアイスジャム発生の自動監視を行い、冬期河川の被害軽減へ繋げていきたい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP18K04361 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) World Meteorological Organization (WMO) : The Global Climate in 2015–2019, pp.5, 2019.
- 2) 横山洋、吉川泰弘、伊波友生：2018年3月北海道アイスジャム被害報告と今後の被害軽減策第62回（平成30年度）北海道開発技術研究発表会、2019.
- 3) 横山洋、吉川泰弘、伊波友生、矢部浩規：結氷河川における解氷期の河水挙動と解氷の簡易予測手法の検討、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.75、No.2、pp.I_931-I_936、2019.
- 4) 吉川泰弘、朴晃澤、大島和裕、横山洋：寒冷地河川における簡易的なアイスジャム計算モデルに関する検討、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、pp.I_351-I_356、2018.