

トレイルカメラを用いた晶氷流下の検知とアラート配信システム

Frazil slush detection using trail cameras and alert distribution system

(株) 福田水文センター ○正員 甲斐達也 (Tatsuya Kai)
 非会員 横尾啓介 (Keisuke Yokoo)
 大阪大学大学院工研究科 正員 中谷祐介 (Yusuke Nakatani)
 北見工業大学工学部 正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

1. はじめに

冬の寒冷地河川では、厳寒期に気温が急降下すると、河川水が過冷却状態¹⁾となり晶氷が発生し、混相流となって河道内を流下する。その晶氷が多くなるにつれ、例えば浄水や発電の施設では、導水路が閉塞するなどの取水障害²⁾の可能性が高まることになる。また、解氷期には氷板などが詰まり、流れをせき止めて水位が上昇する、いわゆるアイスジャム³⁾の発生によっても取水障害の危険性が高まり、実際、地域住民の生活に悪影響を及ぼすことが指摘されている。

このようなアイスジャムによる障害発生を未然に防ぐには、カメラで晶氷流下を監視するなどの対策を実施することや、事前に「アイスジャム発生予測プログラム⁴⁾」を用いて発生晶氷量を予測することが不可欠である。

一方、取水障害は気象や結氷の状況に依存するため、24時間体制で監視することが必要であり、その対策には人的な労力の負担が大きいことが懸念されている。

本研究は、取水障害の対策のうち、人的な労力の負担が大きい監視カメラによる晶氷流下の状態を、深層学習とアラートメールの配信により、作業の省力化と晶氷検知の正確性向上を試みた。

2. 現地観測の概要

観測は、1995年と2012年にアイスジャムの発生が確認されている渚滑川で行った。渚滑川は天塩岳に源を発し紋別市渚滑市街部でオホーツク海に注ぐ延長84km、流域面積1,240km²の一級河川である。

図-1には定点トレイルカメラ設置位置の概略を、図-2には観測機器の設置状況を、表-1には静止画像撮影の観測設定一覧をそれぞれ示す。

観測地点は渚滑川、KP14.1を対象として、河川結氷が開始する前の2021年12月16日から解氷が進行した3月14日までの約3ヶ月間とした。観測項目は、河川の晶氷流下の監視を目的として、表-1と図-2に示す観測機材と観測設定で、トレイルカメラによる静止画像の撮影を実施した。なお、同地点ではOYO(株)社製絶対圧水位計 S&DL mini による水位計測と、KP15.8地点ではノースワン(株)社製KADEC-UHTVで気温計測を実施した。

3. 現地観測の結果

観測期間中の結氷状況、水位、気温、氷板厚の時系列を図-3に示す。結氷の開始は、観測開始2日後の12月18日に確認された。その後、気温の低下とともに徐々

表-1 静止画像撮影の観測設定一覧

撮影期間	2021年12月16日～2022年3月14日
撮影間隔	30分インターバルで静止画1枚
画像解像度	300万画素(2,048×1,536)
撮影画像	日中: color (3チャンネル)
	夜間: gray (1チャンネル)



図-1 定点トレイルカメラ設置位置の概略



図-2 観測機器の設置状況

に結氷範囲が広がり、2月17日に全面結氷となった。全面結氷は3月7日まで続き、その後解氷が進み、3月14日の時点で川幅の約半分が結氷状態のまま観測終了を迎えた。なお、1月12日から1月15日にかけて暖気があり、水位が0.14m上昇した。静止画像や後述する「アイスジャム発生予測プログラム」で確認した結果、氷板厚に大きな変化がなかったこと、静止画像の結氷面に大きな変化がなかったことから、この水位上昇は融雪に起因するもので、解氷によるアイスジャムの発生によるものではないと判断した。

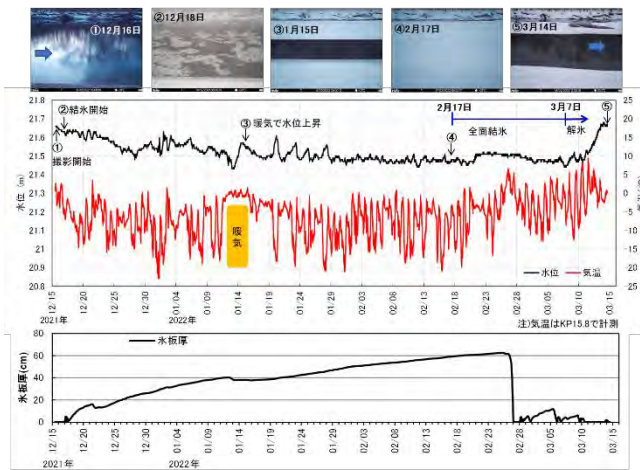


図-3 結氷面の変遷と氷板厚の変化図

3-1. 結氷状況の整理

静止画像から、結氷状況の経時的な変化と晶氷の流下状況について整理を行った。整理方法は静止画像を目視するとともに、「アイスジャム発生予測プログラム」の出力結果である発生晶氷量と氷板厚を用いて整理した。表-2に同プログラムに必要な入力情報を示す。

表-2 「アイスジャム発生予測プログラム」入力一覧

項目	取得方法	項目	取得方法
気温	気象庁 網走地方気象台	河床勾配	過去文献 ⁵⁾
風速		川幅	地形図より
日照時間		水位	現地計測データ
降雪深		水位計設置点の河床高	

3-2. 晶氷流下状況の整理

「アイスジャム発生予測プログラム」で算出した発生晶氷量と、目視による晶氷の有無を整理し、現地状況が確認できる代表的な静止画像を加えて図-4に整理した。

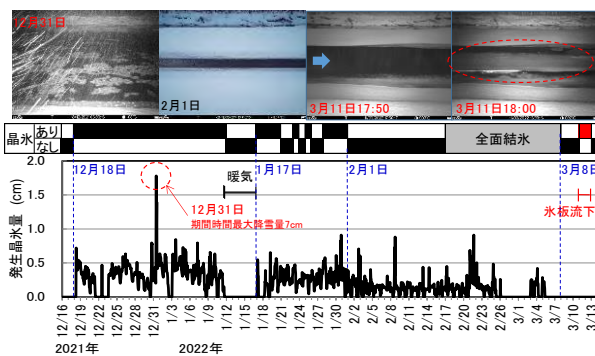


図-4 算出発生晶氷量と現地状況の比較

静止画像より、晶氷は結氷が開始した12月18日から暖気が訪れる直前の1月12日まで毎日確認された。暖気が抜けると、晶氷の有無が交互に発生している。2月1日以降は結氷面の範囲が広がることで、アンカーアイスの発生条件である過冷却状態^りが起りにくいことや、降雪があっても結氷面上に積雪となることから、晶氷の発生は確認できなかった。

「アイスジャム発生予測プログラム」で算出した発生晶氷量をみても、2月1日以降は発生量が抑えられていることが確認できる。

解氷が確認された3月8日以降は徐々に解氷面が広くなり、3月11日17:50から18:00の間に大きな氷板が流下する状況が確認された。氷板は翌日まで留まっていたが、その後流下した。なお、この現象による急激な水位の上昇は確認できず、アイスジャム発生までは至らなかった。

4. 深層学習モデルを用いたアラート配信システム

深層学習モデルは、Pythonの機械学習ライブラリであるTensorFlowを用いて、日中のcolor画像のみを対象としてモデルを構築した。使用したPCの主なスペックは、OS: Windows 10, CPU: AMD Ryzen75800, メモリ: 32GB, GPU: GeForce RTX3070である。

4-1. 教師データ作成

(1) ダミー画像作成

深層学習には教師データとして晶氷をラベリングした画像が大量に必要なことになる。一方、晶氷を手動でラベリングする場合、多大な労力が必要であることや、塗り残しやみだしなどの人為的ミスが生じる。そこで教師データ作成の省力化と精度向上を図るため、ダミー画像を用いた教師用画像の作成⁶⁾を試みた。

ダミー画像の作成方法の一例を図-5に示す。作成方法は、静止画像に映り込んでいる晶氷を切り取り、晶氷が流れていない同系統の背景画像に、切り抜いた晶氷を0°または180°に回転させ無作為に複数枚の晶氷を張り付けることで作成した。なお、晶氷を貼り付ける際は、0°と180°を混在させずに貼り付けた。

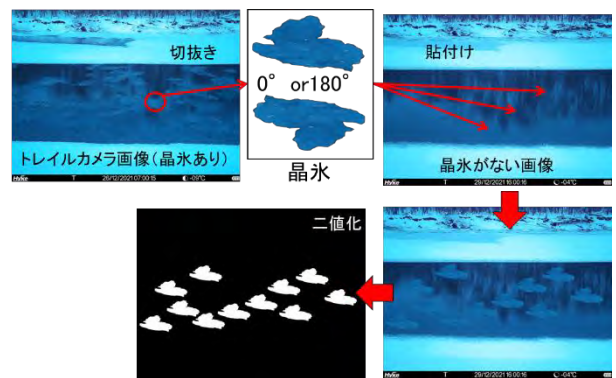


図-5 ダミー画像の作成方法 (晶氷回転0°の一例)

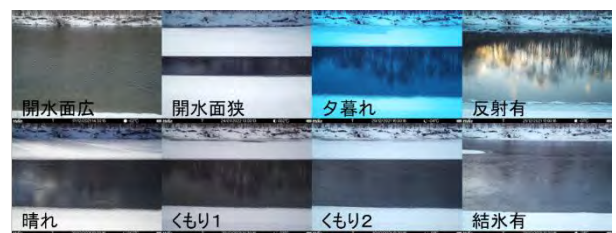


図-6 教師用画像の背景画像の種類 (8種類)

背景画像は現地状況を踏まえて図-6 に示す 8 種類、
 晶氷画像は背景画像と同系色で大きさが異なるもの計
 22 種類用意した。これら素材を用いて、晶氷あり画像
 を 205 枚作成するとともに、晶氷なし画像を 51 枚用意
 し、合計 256 枚の教師用画像を作成した。

(2) データオーギュメンテーションと輝度処理

(1)で作成した 256 枚の教師用画像を用いて、X 軸、Y
 軸、XY 軸に対して反転した合計 1,024 枚の水増し画像
 を作成した。これら画像は、OpenCV を用いて標準偏差
 192、分散 16 の輝度処理を行い、新たな水増し画像
 1,024 枚を作成した。

以上より、教師用画像の合計は 2,048 枚とした。

4-2. 深層学習モデル

採用したモデルは、トレイルカメラで撮影した静止画
 像から晶氷を自動検知するため、画素単位でクラス分類
 が可能なセマンティックセグメンテーション⁷⁾の一種で
 ある U-Net⁸⁾とした。U-Net の特徴は、画像の局所的特徴
 と巨視的特徴の両情報をもとに画像を再構築する点にあ
 る。本研究で用いた U-Net の構造を図-7 に示す。

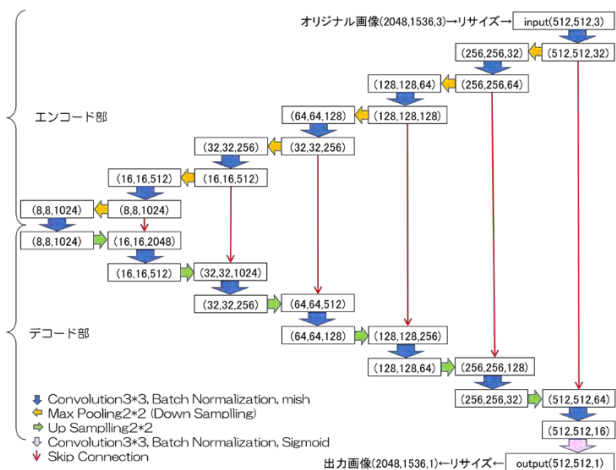


図-7 本研究で用いた U-Net の構造

トレイルカメラの静止画像は 2,048×1,536pixel である
 が、計算の都合上、バイキュービック補間法により(512
 ×512×3)の配列にサイズダウンした画像をモデルの入
 力画像とした。

教師用画像のうち 15% を検証用データとして使用した。
 損失関数 $J(\theta)$ は、画像内の予測領域と正解領域の類似
 度を表す Dice 係数をもとにした次式を用いた。

$$J(\theta) = \frac{1}{M} \left(1 - \frac{2 \sum_N \hat{y} * y + 1}{\sum_N \hat{y}^2 + \sum_N y^2 + 1} \right) \quad (1)$$

ここで、M：バッチサイズ(1)、N：入力画像の層画素数
 (512×512)、y：入力に対して与えられた正解値、 \hat{y} ：
 入力に対するネットワークの出力値である。

4-3. モデルの性能評価

モデルの性能評価は、教師用画像に使用していないオ
 リジナル画像を用いて、「PixelAnnotationTool」を使用
 して手動でアノテーションした画像と、モデルの出力画
 像を目視で比較を行った。性能評価に用いる画像は、図
 -6 に示す様々な背景や晶氷の厚さや大きさを考慮した
 画像を選定した。

図-8 は、モデルの性能評価に選定した 24 枚の画像に
 ついて、オリジナル画像・手動アノテーション画像・モ
 デル出力画像を併記したものである。図中の赤枠で囲ま
 れた画像は、目視で晶氷検知が 50% を下回るものとした。

目視による晶氷検知が 50% を下回った画像は、選定し
 た 24 枚の画像中 8 枚で、うち 2 枚は、ほぼ晶氷を検知
 することができなかった。

(1) 晶氷検知が低い画像

晶氷は厚さが薄いと川の色が透過してしまい、晶氷と
 河川水の分離が困難であった。モデルでは、晶氷の大小
 や川幅の広狭に関わらず、晶氷が薄い場合は晶氷の検知
 が低い結果であった。また、一日のうち朝夕の極短時間、
 画像全体が青みがかった画像が撮影される。これら画像
 についても、モデルでは晶氷の検知が低い結果であった。

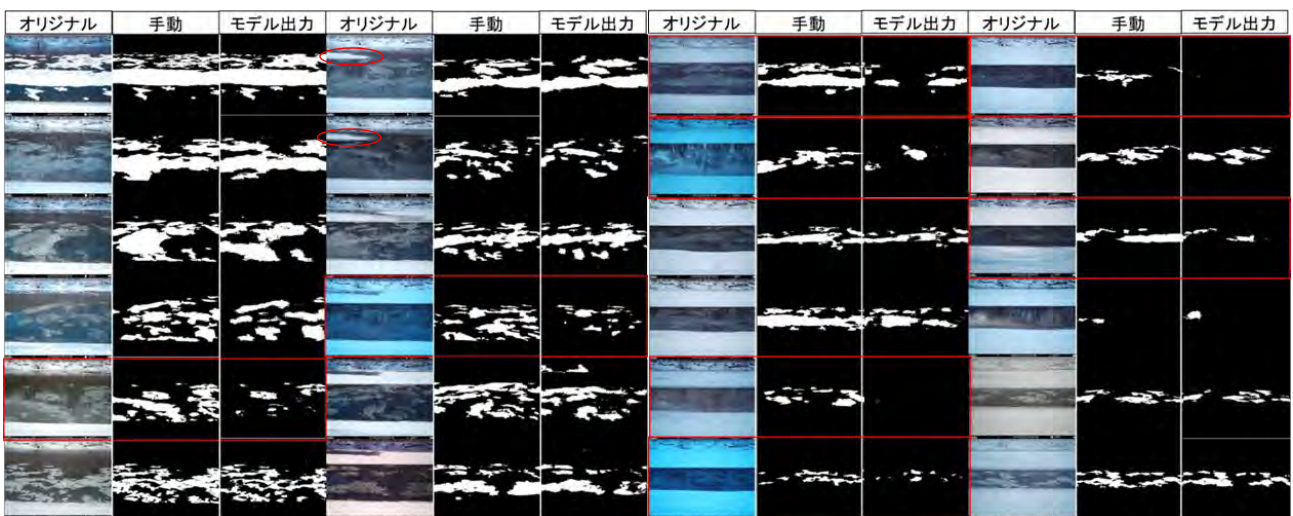


図-8 モデルの定性的評価

(2) 晶氷検知が高い画像

厚い晶氷は、吹雪で視通が確保できないような状況ではない限り、比較的安定して検知することができた。また、モデルでは図-8中の赤丸で示す結氷の範囲は、“結氷”と“晶氷”を正確に判定することができた。理由は、結氷範囲が急激に変化することはないため、学習させることが容易であった。

4-4. 晶氷流下の監視体制

(1) アラートメール配信のタイミング

図-9に示す晶氷の発生とメール配信のタイミングは、(a)トレイルカメラで撮影した静止画像の晶氷量が連続して閾値を超えた場合に、事前に登録したメールアドレスにアラートメールを配信する。(b)その後も晶氷量が継続して閾値を超えている場合は、一定間隔で晶氷発生継続アラートメールを配信する。(c)晶氷量が閾値を連続で下回った段階で晶氷消失のメールを配信する流れとなっている。

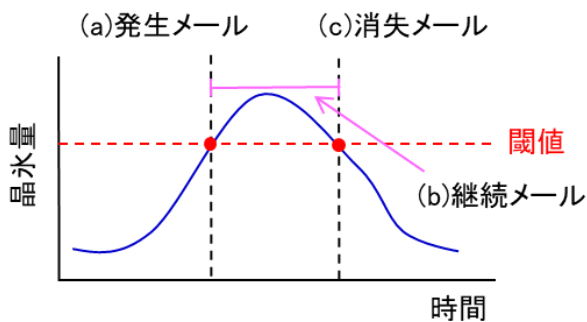


図-9 晶氷の発生量とメール配信のタイミング

(2) アラートメールと Web 監視の複合管理体制

アラートメール配信システムと併用して、担当者が任意の時間に晶氷の流下状況を確認できるように、トレイルカメラから配信された静止画像を Web で閲覧できるシステムを構築した。これにより、晶氷の流下を検知システムと Web 閲覧で複合的に監視することを可能とした。図-10には、アラートメールと Web 監視の複合管理体制のイメージを示す。

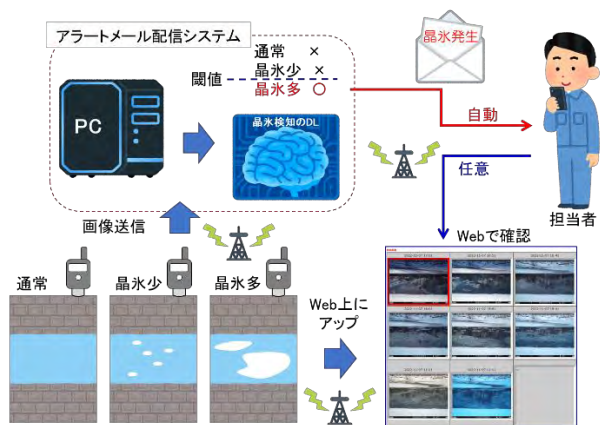


図-10 アラートメールと Web での複合監視のイメージ

5. まとめと今後の課題

本研究では、渚滑川 Kp14.1 に設置したトレイルカメラの color 画像を用いて、U-Net モデルによる深層学習を行い晶氷の検知とアラートメールを配信するシステムを構築した。これにより、これまで監視カメラを用いて目視監視で行っていた晶氷の流下監視の省力化と、晶氷検知の正確性向上を図ることが可能となった。

また、アラートメール配信システムと Web 閲覧システムを併用することで、それぞれのシステムを補完するハイブリッドな監視体制を構築した。

一方、晶氷流下検知モデルは color 画像のみを用いてモデルを構築しているため、今後は夜間の gray 画像についても晶氷流下を検知できるシステムに更新していく必要がある。また、color 画像についても、薄い晶氷や朝夕の特殊なコントラストは、検知精度が低く改善の余地がある。

謝辞：本研究を遂行する上で、国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所寒地河川チームより渚滑川の観測データ提供のご高配を賜った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 鳥谷部寿人, 吉川泰弘, 阿部孝章, 黒田保孝, 船木淳悟, 佐藤好茂, 津村喜武: オソベツ川における吹雪による晶氷増加とアイスジャム発生危険箇所の抽出に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.72, No.4, I_601-I_606, 2016.
- 宇佐美宣拓, 吉田剛, 山下俊彦: 寒冷地河川で発生する晶氷に関する現地観測, 土木学会水工学論文集, 第 52 巻, pp.499-504, 2008.
- 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸: 2010 年 2 月に渚滑川で発生したアイスジャムに関する研究, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.353-358, 2011.
- 横山洋, 伊波友生, 吉川泰弘: アイスジャム発生予測プログラムの現地河川への適用性評価と課題について, 北海道開発技術研究発表会論文, 第 64 回, pp.335-340, 2021.
- 吉川泰弘, 渡邊康玄: 渚滑川と湧別川における氷板と晶氷の現地観測, 土木学会北海道支部, 第 64 号, B-15, 2008.
- 中谷祐介, 懸樋洗大: U-Net を用いた河川スカム連続検出手法の改良, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, I_895-I_900, 2021.
- Garcia-Garcia, A., Orts-Escolano, S., Opera, S. O., Vil-lena-Martinez, V., and Garcia-Rodriguez, J.: A Review on Deep Learning Techniques Applied to Semantic Segmentation, *arXiv preprint*, arXiv:1704.06857, 2017.
- Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T.: U-net: Convolution networks for biomedical image segmentation, *Proceedings of the 18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pp. 234-241, 2015.