

河川水難事故未然防止に向けた救難ロープに後付け可能な 投擲型水深測定デバイスと遠隔可視化システム

成尾 一征^{†1,a)} 岩井 将行^{†1,b)}

概要: 河川の水難事故による死者・行方不明者数は横ばいに推移しており、毎年同じような事故が繰り返されている。水難事故は一度発生すると重大な事故に繋がりがやすく、未然防止を目指すことが重要である。しかしながら、海の研究に比べ、河川に着目した水難事故を未然防止する研究や介入は少ない。そこで我々は、河川の水難事故未然防止に向けた救難ロープに後付け可能な投擲型水深測定デバイスとその遠隔可視化システムを提案する。河川は陸上からの目測では水中の様子が判別しにくいいため、実際の水深を見誤ってしまい事故を招く恐れがある。そこで、河川利用者自身が容易に使用することを想定した、陸上からの測定を可能とする投擲型水深測定デバイスと、その情報をスマホ上で確認できるアプリを開発した。評価実験として想定した使用用途での水深測定を行い、実測値に対して誤差 1 cm 前後での測定が可能であることを確認した。

Throwable Bathymetric Device and Remote Visualization System Retrofittable to Rescue Ropes for Prevention of River Water Accidents

1. はじめに

水難事故の死者・行方不明者数は概ね横ばいに推移している [1]。これは例年同じような事故が繰り返し発生していることを示しており、現状の水難事故対策では不十分である。

また、水難事故は発生すると重大な事故に繋がりがやすいことが指摘されている。警察庁の令和 3 年における水難の概況によると水難者 1625 人のうち 744 人と約 46%が死亡事故や行方不明者となっている [1]。この統計結果について、政府広報オンラインでは、一度事故が起きると、命にかかわる重大事故になる可能性が非常に高いのが水難の特徴であると述べている [2]。したがって、未然に防止することが重要である。

一方で、河川に着目した水難事故を予防する研究が少ないと指摘されている。Peden らは河川での溺死防止に関する証拠基盤の構築を行った [3]。本研究の中で、溺水予防の研究と介入は、海水浴場・子供や高齢者・家庭用プール・浴槽に焦点を合わせたものは行われてきたが、河川に関する

研究は注目されていないと指摘している。

この指摘を受けて筆者らも水難事故対策に関する研究の調査を行った。調査にあたっては Peden らの河川の水難事故対策に関する体系的な文献レビューを行った研究内での手法 [4] を参考にした。結果として、水難事故発生後に被害軽減を目指す研究 [5–15] は多く見受けられたのに対して、水難事故の未然防止策を検討する研究は特に河川環境において見受けられなかった。

水難事故が重大事故に繋がりがやすいことは、環境を河川に絞った場合でも同様に指摘されている。河川財団らの水難事故防止に関するデータによると、独自に収集された河川を中心とする水難者 4955 人のうち約 6 割が死亡・行方不明となっている [16]。この調査結果について、水難事故が発生すると死亡や重体などの重大な結果を招くケースがかなりあり、事故を未然に防止することの重要性が伺えると述べている。

そこで我々は、河川における水難事故の予防を目指した、危険水域を識別するデバイスと、その情報を可視化するシステムの開発を行う。本稿では、2 章で関連研究と、3 章で河川の水難における課題を述べ、4 章で提案システムの概要について説明する。5 章では取り組んだ検証実験の概

^{†1} 現在、東京電機大学大学院未来科学研究科情報メディア学専攻

a) narusei@cps.im.dendai.ac.jp

b) iwai@cps.im.dendai.ac.jp

要について説明し、6章ではその結果と考察を述べる。最後に7章でまとめと今後の展望を述べる。

2. 関連研究

溺水防止策は国際ライフセービング連盟によって、一次、二次、三次に分類されている [17]。一次予防対策は溺死のリスクや危険性の除去、もしくは軽減のための対策である。二次予防対策は溺死のプロセスが既に発生している場合に障害の程度を軽減する対策である。三次予防対策は溺死の障害やリスクを減らすことを目的とする事後対策である。本稿では未然防止を目指しているため、溺死の危険性を除去や軽減する一次予防対策を目指す研究について着目する。

2.1 海を対象とする研究

石川ら [18] はコニカミノルタジャパン株式会社と共に、海岸に設置したカメラ画像から AI により離岸流発生を自動検知し、海岸利用者やライフセーバーにリアルタイムで通知することで、事故防止と迅速な救助につなげるシステムを開発した。本研究は一次予防対策を実現しており、本稿の関連研究であると考えられる。本研究は海浜浴場を主眼に置いているのに対して、本稿では河川環境を対象とする。

Al-Dakheel ら [19] は溺水者を救出する救命用無人船舶と取り付けられたセンサから所得できるデータを記録し、それらを解析して溺水が生じた水域を地図上にマッピングするシステムを提案した。本研究は救難履歴の自動的な収集を行い、溺水事故が起こりうる可能性が高い水域のマッピングを行うことで、一次予防への取り組みが成されているため関連があると考えられる。

2.2 河川を対象とする研究

Lei ら [20] は GNSS による位置情報の判別とバイタルサインの検出を用いて、遊泳者の状態を段階的に外部へと送信することで、危険状態から溺水状態までを判別可能にし水難事故の防止を目指すアプリケーション開発を行った。本研究は溺水状態の迅速救助を目指す二次予防の観点のみではなく、着水の瞬間から監視を行い危険水域への進行を検出して通知するという一次予防の観点からもアプローチをしている点で関連のある研究であると考えられる。

Samarasinghe ら [21] は洪水発生を機械学習で予測する研究の中で、水深とバイタル情報を測定しユーザの状態を推定するシステムの検討を行った。本研究は進行方向の水深を測定し深みへの侵入を検出して警告するという一次予防への取り組みがなされている点で関連研究であると考えられる。

筆者ら [22] は深みへの侵入を検知するデバイスと、その通知を受け取る Web アプリケーションから構成されるシ

ステムを開発した。膝や腰の高さの入力を閾値として、現在地点の水深を元に監督者へ通知を行うことで溺水事故の予防を目指した。しかし、本研究は遊泳中の判定であるため、警告が間に合わない可能性があり、一次予防対策としては不十分であると考えられる。

また、筆者ら [23] は河川において早瀬と呼ばれる水流の激しい水域に生じる白波を、機械学習を用いて検出することで未然防止へ活躍できないかの検討を行った。本研究は入水前に危険水域を確認できる点で一次予防対策に繋がる研究であると考えられる。しかし、着目した白波と水難事故の関係性についての証拠基盤が整っていない点や、本研究時点では精度が足りない点などから検討の余地がある。

2.3 救難道具を發展させた研究

Wang ら [24] は水難事故の迅速救助を目指すスマートライフジャケットシステムを提案した。本研究は水難事故の防止に対して奨励されるライフジャケットを、様々なセンシング基盤を用いることで水難事故対策に対する更なるセーフティネットを増加させた試みとして関連のある研究であると考えられる。

3. 河川の水難における課題

有効な溺水防止策として事前に危険箇所を確認することが挙げられているが、河川の中は陸上からでは流れの速さや深みが分かりにくいという課題がある。

警察庁の令和3年における水難の概況においても、水難事故を未然に防ぐために危険箇所を把握することが挙げられている [1]。また、Peden らは河川での溺水防止において有効な戦略を独自の評価方法を加えたデルファイ法を用いて特定する研究を行った [25]。本研究では有効と考えられる66の戦略が挙げられ、最終的に統合された13の戦略が評価された。評価された13の戦略のうち、水遊びや水泳は指定された安全な場所でのみ行うことが挙げられている。本戦略の統合前にはレクリエーションや水に入る前に状況を確認するという戦略が含まれており、入水前に水中の状況を認知できることが有効な対策になる可能性がある。

一方で、河川財団らの水難事故防止に関するデータによると、川の中は陸上からでは見えにくく流れの速さや深みが分かりにくいと指摘している [16]。

したがって、河川は見た目には危険性を判別することが難しいため、入水せずに水中の状況を確認可能にすることで予防に繋がれる可能性があると考えられる。

4. 提案システム

前節の課題に対して、我々は入水前に河川の危険水域を認識可能とするシステムを目指す。危険箇所として、水(海)藻が繁茂している場所、水温の変化や水流の激しい場所、深みのある場所等が挙げられている。その中で本稿で

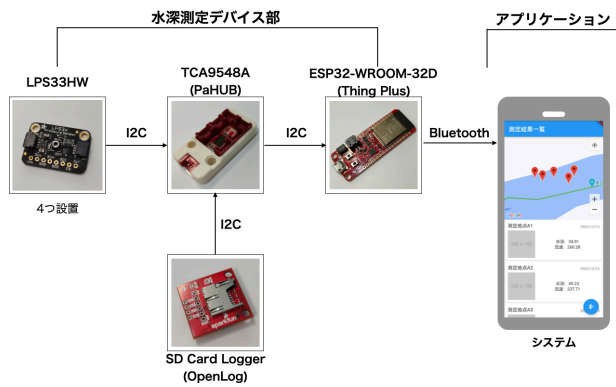


図 1: システム構成図



図 2: デバイスを投擲した様子



図 3: デバイスの外観

は、深みのある場所を危険箇所として考える。入水前に簡易的な水深測定を行い、この情報を遊泳者に提供することで危険箇所の認識を促す。

作成するシステムの構成を図 1 に示す。本システムは水深測定デバイスとその情報を確認できるスマートフォンアプリで構成される。デバイスは防水気圧センサである LPS33HW と複数のセンサを繋げるための TCA9548A と

Bluetooth を用いることができる ESP32 を搭載したマイコンで構成されている。デバイスで測定した水深は Bluetooth を用いてアプリケーションに送信される。

使用方法として水深測定デバイスを投げ込むという手段を検討する。実際に投擲した様子を図 2 に示す。投擲型とすることで入水することなく水深測定を可能とする。また、利用者が容易な使用を可能とするためにデバイスに取り付けるロープなどには特別なものを指定しない。特に、遊泳者が携帯を推奨される救難用ロープなどに後付けする形での運用を可能とすることで、導入に対する敷居を下げたいと考えている。デバイスが取得した水深情報は、水中では無線通信を行うことができないため、大気中に露出した瞬間にアプリケーションに向けて送信する。利用者はアプリケーションで水深情報を受信することや、測定情報を一覧表示で確認することができる。

4.1 水深測定デバイスの実装

水深測定デバイスの外観を図 3 に示す。デバイスは 3D プリンターを用いて出力された土台にエポキシレジンとエポキシパテなどの耐水性を持つ材料でコーティングを行い作成された。底面から 7.55 cm の高さに存在する穴には、防水気圧センサのセンサ部が露出している。

水深測定デバイスの内観を図 4 に示す。デバイスはスタック構造となっており、下層におもりを、中層に水圧測定部を、上層にマイコンやバッテリーといったその他の部品が搭載されている。各階層は O リングを用いた防水構造となっている。中層と上層は任意の数だけ増やすことができるようになっている。

水深測定手法は圧力式を用いる。その他の手法として超音波やレーザーを用いる方法などがあるが、本稿の目的に合わせて圧力センサを用いることとした。まず、超音波センサはクラッタと呼ばれる現象が起きてしまい、通常の超音波水深計は水面下の約 1 m ほどを測定することが困難である [26]。本稿では膝や腰といった 1 m 以内での範囲を測定できることが求められているため、超音波センサを用いた実装は見送った。次に、レーザーは UAV などを用いた測定が主流であり、入水前に遊泳者が簡易的に水深測定を行うには適さないと考え実装を見送った。

一方で、圧力式の水深測定を用いるにあたって 2 点検討事項が存在する。1 つ目は、大気圧を計測する必要がある点である。水中で得られた圧力は大気圧が含まれているため、水圧のみを算出するために大気圧を減算する必要がある。一般的な投げ込み型の圧力式水深測定装置には、大気圧を導入するためのパイプなどがケーブルに内蔵されている。しかし、前述したデバイスに取り付けるロープには特別なものを指定しないことを実現したい。そこで、入水前までに測定された気圧情報を大気圧と見なしして計算を行う。本実装をすることで、デバイスのみで完結した水深測定が

可能となる。本手法は筆者らが過去に取り組んだ先行研究内にて検証を行っている [22]。検証の結果、1 分間あたりの計測で生じる誤差が 0.02 cm 程度であった。本デバイスの使用法においてはデバイスを投擲してから引き上げるまでの時間が十分に短いため許容できると判断した。また、入水の判定は 1 秒あたりに 1 hpa 以上の変化が生じた場合と定義した。1 hpa の変化は陸上で換算すると約 10 m の上下動を示すことになる。これは陸上で起こるには不自然な現象であり、水圧が加わったと判断するのが妥当であると考えて、入水の判定に用いることとした。2 つ目は、流速の影響を受ける点である。流速が早い箇所ではセンサ部に対しての圧力が高まるため値が高くなる。そこでセンサを 4 方向に向けてデバイスに搭載し、最も計測される水圧が小さい値を用いて算出を行った。一般的に河川は上流から下流に流れている。そのため、最も高い水圧が計測されるセンサの対面方向に位置するセンサは、比較的水流の影響を受けにくいと考えた。

以上の 2 点に対応した上で、圧力の公式から水深を算出する。水圧から水深への変換は次式の物理式を使用する

$$p = \rho gh$$

ここで p は気圧 [Pa]、 ρ は密度 [kg/m^3]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 h は高さ [m] を示す。一般的な水において ρ と g は既知であり、これを代入すると、

$$p = 9781h$$

となる。これは 1m あたり 9781Pa 変化が生まれることを示している。1 cm あたりで換算すると、97.81 Pa となり 0.9781 hPa と示すことができる。これを利用して、算出した水圧を 0.9781 hPa で除算することで cm 単位での水深を算出する。また、取得した水深情報は Bluetooth の Advertising を用いて送信される。

4.2 アプリケーションの実装

スマートフォンアプリのスクリーンショットを図 5 に示す。アプリは Flutter を用いて作成されており、測定結果の一覧画面とデバイスからの水深データを受信する画面で構成されている。一覧画面では測定結果の一覧と地図上に測定地点の位置情報が表示される。地図サービスには Google Map^{*1}を利用した。測定結果をタップすると地図上に立てられている対応するピンにカメラが移動するようになっている。データ受信画面はデバイスから取得できたデータ以外に、ユーザが測定地点を判別しやすいように任意の測定地点名と位置情報を登録できる。位置情報は現時点では手動で登録する形式となっている。

*1 Map data ©2022 Google

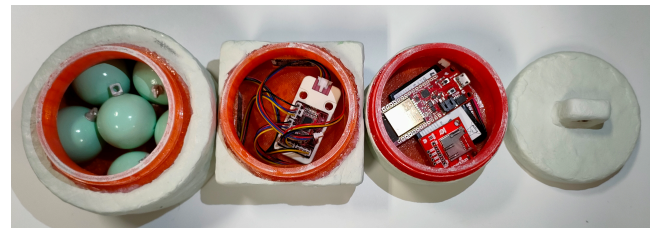


図 4: デバイスの内観



(a) 一覧画面

(b) データ受信画面

図 5: アプリのスクリーンショット

5. 検証実験

本システムを検証するためにシステムの動作検証実験とシステムの有効性評価に向けた予備実験を実施した。

5.1 実験目的

システムの動作検証実験の実験目的について定義する。システムの動作検証実験は開発したデバイスとアプリケーションが、期待した動作をするか確認するために実施する。本システムには水深測定機能とその情報の送受信機能が存在するため両者に対して検証実験を行う。水深測定機能に対しては、筆者らは先行研究内 [22] にて同一のセンサを用いた精度を確認する検証実験を行っている。検証の結果、約 1 cm 程度の誤差での測定が可能であることを確認している。そこで本稿では、本システムが想定する使用方法を実施した場合にも水深測定が可能かを確認する。データ送受信機能はデバイスからアプリケーションにデータが適切に送信されるかを確認する。

システムの有効性評価に向けた予備実験の実験目的について定義する。まず、本稿では参加者を伴った実地調査の

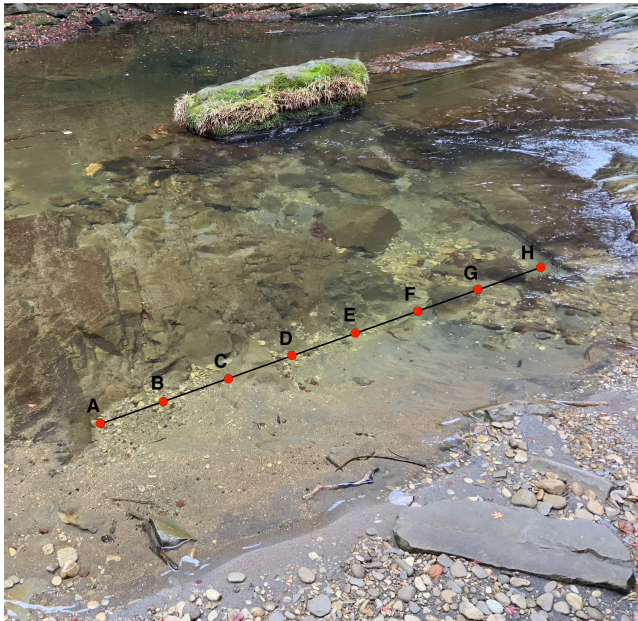


図 6: A から H 地点の水深を予想する

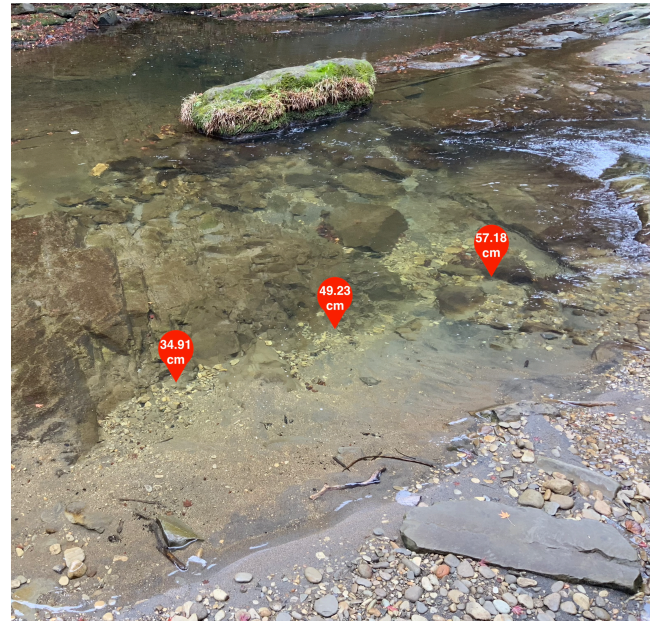


図 7: タスク内で提示したシステムの測定結果

機会が得られなかったため、将来的な有効性評価に向けた予備実験を行うこととした。本稿では河川は陸上からでは流れの速さや深みが分かりにくいという指摘を取り上げて、この問題を取り除くことで水難事故の防止に寄与できるのではないかと検討している。そこで、実際に陸上からでは深みが分かりにくいのかと、システムを導入することで深みに対する認識が変化するかを仮想的に確認する。

5.2 実験内容

実験は養老渓谷にて行った。水深測定機能の検証実験では事前の測定で水深 40 cm と判明した水域に対してデバイスの投擲を行い、その測定結果を実測値と比較した。データ送受信機能の検証実験では想定の使用手順で 5 回の測定を行い、その測定結果をアプリケーションで受信した。

システムの有効性評価に向けた予備実験では目視による水深予想と、システムの測定結果を確認した上での水深予想の結果を比較した。まず画像内の任意の区間に A から H 地点を指定し、その直下の水深を目視で予想するというタスクを実施した。タスク時に使用した出題画像を図 6 に示す。次にシステムの測定結果を提示した上で同様のタスクを再度実施した。提示したシステムの測定結果画像を図 7 に示す。

また、システムの概要と本実験を踏まえたアンケートを実施した。アンケートの設問内容を表 1 に示す。回答は 5 件法を用いて収集した。

6. 実験結果と考察

前節で定義した検証実験の結果と考察について述べる。

6.1 水深測定実験とデータ送受信実験

水深測定実験の結果を図 8 に示す。実験の結果、投擲を伴う水深測定の場合にも約 1 cm の誤差で水深が測定できることが確認できた。誤差の範囲は 0.39 cm から 0.91 cm となった。比較的穏やかな流れの水域で実施したため、搭載された 4 つのセンサは概ね同じ値を示している。投入時は測定地点に向けて瞬間的に沈んでいくため、値が急激に上昇している。デバイスを回収する際は段階的に水面へ近づいていくため、値の変化はなだらかに下降していると考えられる。本システムは利用者にとって想定外の深みなどを回避することを目的としているため、膝や腰といった深さなどが判別できれば良いと考えている。したがって、本手法の精度でも問題なく利用可能であると考えられる。

データ送受信機能の実験結果として測定結果のマッピングのスクリーンショットを図 9 に示す。今回測定した 5 つの測定は全てアプリ側で受信し適切にマッピングされたことを確認できた。

以上の 2 点からデバイスの動作とアプリへの反映が正常に行われていることを確認できた。このことから本システムは期待した動作を実現できると考えられる。

6.2 水深予想実験

目視による水深予想結果を図 10 に示す。目視による水深予測では 3 名を除き概ね同様の回答となった。0 cm から 30 cm 以内での回答が最も多く、実際より浅く判断してしまう人が多いことがわかった。全体の傾向とは異なった回答をした 3 名には回答理由についてインタビューを行った。始点付近を深く終点付近を浅く回答した 2 名は終点付近に岩があるため直下の水深は浅いと考えたと回答した。残り 1 名は特に理由はなくそのように見えたためと回答し

表 1: 実施したアンケートの質問内容

質問番号	質問内容
Q1	目測による判断では水中の状態を理解することは難しい
Q2	水深を把握することは水中の状態を理解する助けとなる
Q3	水流の激しさを把握することは水中の状態を理解する助けとなる
Q4	同行者（ご家族や友人）が深い水場に入っていき様子を見て危ないと思う
Q5	同行者（ご家族や友人）が流れの速い水場に入っていき様子を見て危ないと思う

た。終点付近の岩の存在については G, H 地点の指定が誤解を与えてしまう位置だったことが問題の一つであると考えられる。

システム導入後の水深予想結果を図 11 に示す。システム導入後の水深予想では全員が同様の回答となった。目視での予想と比べて全体的に深めに回答している。特にシステムからの情報提供とほぼ同一地点の指定であった E 地点は全員が 1 cm 前後で同様の値を回答している。したがって、目視での予想と比べて実態に即したものになったと考えられる。

それぞれの実験結果から、目視による水深予測は実際より浅く判断してしまう人が多いが、システムが提供する水深測定結果を考慮することで判断が変容することが確認できた。したがって、システムが導入されることで水深に対する認識の変化が生まれたと考えられる。一方で、今回の実験では動画像を用いて実施したため、現地に足を運んだ場合は目測でも精度の高い予測ができる可能性は存在する。

6.3 アンケート結果

アンケート結果を表 2 に示す。Q1 においては今回の実験結果を受けた上で目測での判断が難しいと感じた回答者が多く、全ての人が「とてもそう思う」か「そう思う」を選択した。また Q2 では 1 名を除いて「とてもそう思う」か「そう思う」を選択した。理由としては、入水の際の判断材料になるからという回答が多く見られた。「そう思わない」を回答した 1 名にインタビューをしたところ、水難事故の文脈においての水中の状態ではなく純粋な自然界においての水中の状態を連想したため水流以外は水中の状態ではないと考えたとの回答を得られた。筆者の出題意図としては水難事故の文脈を意識していたため、誤解を生む質問設定をしてしまったことが問題であったと考えた。Q3 では 1 名を除いて「とてもそう思う」か「そう思う」を選択した。理由としては流れが早いと危険であると思うからという回答が多く見られた。「どちらとも言えない」を選択した 1 名にインタビューしたところ、流れの速さと危険度合いの相関がわからないからという回答を得られた。Q4 では 2 名を除いて「とてもそう思う」か「そう思う」を選択した。理由としてはニュースなどで流される事故を聞くため深みに入っていきことが危ないというイメージを持っているという回答が多く見られた。「どちらとも言えない」を

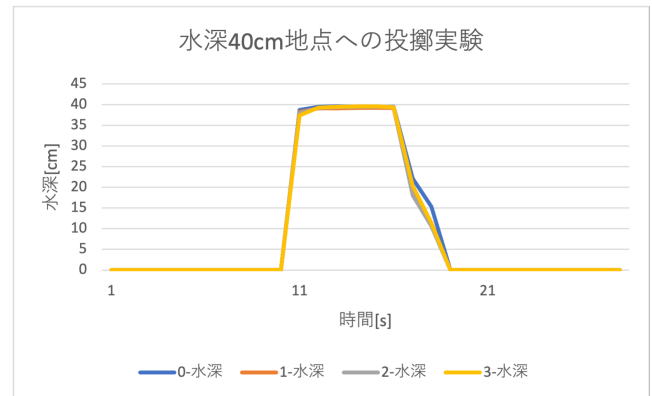


図 8: 水深測定実験の結果

選択した 2 名にインタビューしたところ、自身の身長が高いため何かあったら救助に行けると考えているという回答や同行者を信用しているという回答が得られた。Q5 では全ての回答者が「とてもそう思う」か「そう思う」を選択した。理由としては Q4 と同様にニュースなどでよく聞くことから危険だと考えているという回答が多く見られた。

アンケート結果から実験参加者は目視による水中状態の予測に難しさを感じていることがわかった。また、水深や水流は水中の状態を理解する要素の一つとなり得ることがわかった。したがって、陸上からでは水中の状況が分かりにくいという指摘が適切である可能性と、水深や水流の情報を提供することは理解を進める助けとなる可能性がある。さらに、同行者が危険水域へ入水することは危ないと感じる人が多かったため、システムを通して危険水域を事前に把握できることで入水前の声掛けなどが増加する可能性も考えられる。一方で、本アンケートは意識調査であるため参考に留まるものであり、今後は実地調査にて行動の変化が実際に起こるのかを検証する必要があると考える。

7. おわりに

本稿では、水難事故を未然に防止することの重要性と、溺水予防の研究と介入において河川はあまり注目されていないことを背景に、河川における水難事故予防を目的とするシステムの検討を行った。有効な溺水防止策として事前に危険箇所を確認することが挙げられているが、河川の中は陸上からでは流れの速さや深みが分かりにくいと述べられている。そこで、本システムは投擲型の水深測定デバイスを用いて、入水前に陸上から深みのある場所の検出を行

表 2: アンケート結果

質問番号	とてもそう思う	そう思う	どちらとも思わない	思わない	全く思わない
Q1	10	4	0	0	0
Q2	7	6	1	0	0
Q3	8	5	1	0	0
Q4	8	4	2	0	0
Q5	11	3	0	0	0



図 9: データ受信実験の結果

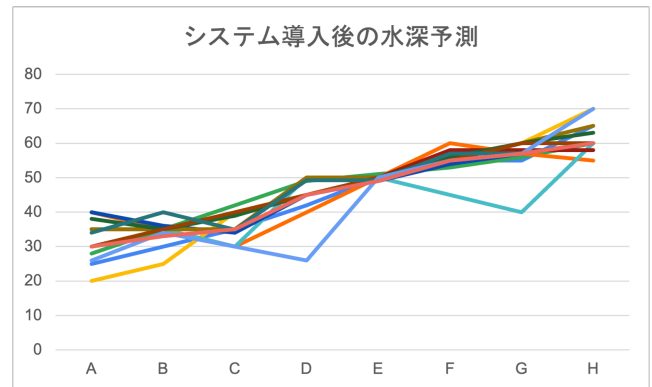


図 11: システム導入後の水深予想タスクの結果

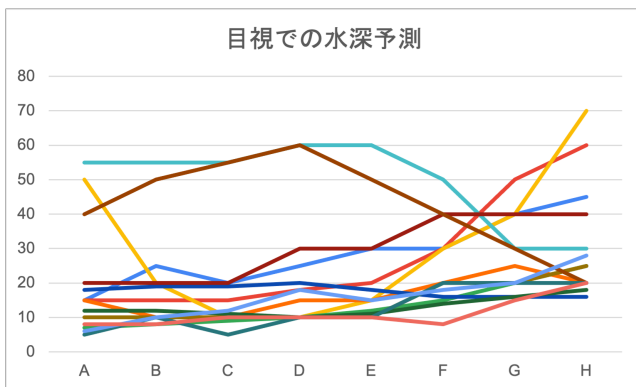


図 10: 目視による水深予想タスクの結果

う。得られた水深情報を遊泳者へと可視化することで、河川における水難事故予防を目指す。

本システムの評価に向けて、作成した水深測定デバイスとアプリケーションの動作検証のために水深測定機能とデータ送受信機能に対する実験を行った。水深測定機能に対する実験では、1 cm 程度の誤差での水深測定が可能であることを確認した。データ送受信機能に対する実験では5回の測定全てがアプリ側に正しく送信されることを確認した。また、システムの有効性評価に向けた予備実験を行った。本稿では目視による水深予想結果とシステム導入後の

水深予想結果の比較を行った。結果として、目視による水深予測は実際より浅く判断してしまう人が多いが、システム導入後にその判断が改められることを確認できた。これは本システムが導入されることで、実際の水遊びの場でも一定の警戒度をもたらす可能性が確認できたと考えられる。

今後はデバイスの小型化やデバイス側に GPS を載せることによる位置情報登録の簡略化といったシステム面の改善を行うと共に、水深以外の指標として水流の激しさについても計測できるような機能の追加を目指していきたい。一方で、水流の激しさを評価する機能については本稿の動作検証実験中に簡単な調査を行っている。水深測定実験と併せて、流れの速い水域での測定を行ったところ、4方向に設置された防水気圧センサの値の乖離が生じることが判明した。この値の乖離を用いて水流の激しさを評価できるのではないかと考えている。また、システムの有効性評価は更なる検証が必要であり、特に実際の水遊び中にシステム導入による変化が起こるのかを確認する必要がある。将来的には測定した結果を蓄積し、水難事故の発生地点やヒヤリハット事例の発生地点情報と連携させることで、危険水域となる恐れのある地点を推測することができないかと考えている。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19K11949, 21H04381 の助成、および立石科学技術振興財団の支援を受けたものです。立教大学文学部 史学科 超域文化学専修 野中健一教授、岐阜県中津川市議会議員 三浦八郎氏と付知町の皆様とのご協力に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 警察庁生活安全局生活安全企画課：令和3年度における水難事故の概況（オンライン），入手先（https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/chiiiki/r03suinan_gaikyou.pdf）（参照2022/12/12）。
- [2] 政府広報オンライン：水の事故、山の事故を防いで、海、川、山を安全に楽しむために（オンライン），入手先（<https://www.gov-online.go.jp/useful/article/201407/3.html>）（参照2022/12/12）。
- [3] Peden, A.: Building the evidence base for river drowning prevention, PhD Thesis, James Cook University (2019).
- [4] Peden, A. E., Franklin, R. C. and Leggat, P. A.: Fatal river drowning: the identification of research gaps through a systematic literature review, *Injury Prevention*, Vol. 22, No. 3, pp. 202–209 (2016).
- [5] Shehata, A. M., Mohamed, E. M., Salem, K. L., Mohamed, A. M., Salam, M. A. and Gamil, M. M.: A Survey of Drowning Detection Techniques, *2021 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC)*, IEEE, pp. 286–290 (2021).
- [6] Hayat, M. A., Yang, G., Iqbal, A., Saleem, A. and Mateen, M.: Comprehensive and comparative study of drowning person detection and rescue systems, *2019 8th International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)*, IEEE, pp. 66–71 (2019).
- [7] Jalalifar, S., Kashizadeh, A., Mahmood, I., Belford, A., Drake, N., Razmjou, A. and Asadnia, M.: A smart multi-sensor device to detect distress in swimmers, *Sensors*, Vol. 22, No. 3, p. 1059 (2022).
- [8] Kalamajska, E., Misiurewicz, J. and Weremczuk, J.: Wearable Pulse Oximeter for Swimming Pool Safety, *Sensors*, Vol. 22, No. 10, p. 3823 (2022).
- [9] Eng, H.-L., Toh, K.-A., Yau, W.-Y. and Wang, J.: DEWS: A live visual surveillance system for early drowning detection at pool, *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 196–210 (2008).
- [10] Kharrat, M., Wakuda, Y., Koshizuka, N. and Sakamura, K.: Near drowning pattern detection using neural network and pressure information measured at swimmer's head level, *Proceedings of the Seventh ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*, pp. 1–2 (2012).
- [11] Xiao, D., Yu, Z., Yi, F., Wang, L., Tan, C. C. and Guo, B.: Smartswim: An infrastructure-free swimmer localization system based on smartphone sensors, *International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, Springer, pp. 222–234 (2016).
- [12] Wen, J., Zhou, D., Feng, H., Wang, Y., Geng, X., Ma, H. and Yang, Z.: LifeTag: Vital Sign Detection for Drowning People in Sea Accidents by Wearable Device, *Proceedings of the 2019 8th International Conference on Networks, Communication and Computing*, pp. 57–64 (2019).
- [13] Dehbashi, F., Ahmed, N., Mehra, M., Wang, J. and Abari, O.: SwimTrack: Drowning Detection using RFID, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2019 Conference Posters and Demos*, pp. 161–162 (2019).
- [14] Ramani, J. G., Gayathri, J., Aswanth, R. and Gunasekaran, M.: Automatic prevention of drowning by inflatable wrist band system, *2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*, IEEE, pp. 346–349 (2019).
- [15] Kharrat, M., Wakuda, Y., Koshizuka, N. and Sakamura, K.: Automatic waist airbag drowning prevention system based on underwater time-lapse and motion information measured by smartphone's pressure sensor and accelerometer, *2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, IEEE, pp. 270–273 (2013).
- [16] 河川財団：水難事故防止に関するデータ（調査・分析）（オンライン），入手先（<https://www.kasen.or.jp/mizube/tabid324.html>）（参照2022/12/12）。
- [17] International-Life-Saving-Federation: Drowning prevention strategies (online), available from (<https://www.ilsf.org/sites/ilsf.org/files/filefield/drowning-prevention-strategies-ils-board-approved-200807101.doc>) (accessed 2022/12/12).
- [18] 石川仁憲, 佐藤嘉亮, 島田良, 小峯力: AIによる離岸流検知機能の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I.175–I.180 (2019).
- [19] Al-Dakheel, S., Ozyer, S. T., Ozdemir, F. C., Karadag, A. and Al-Tekreeti, M.: Unmanned Surface Vehicle with Drown Map System, *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, IEEE, pp. 1–6 (2019).
- [20] Lei, Y., Chen, M., Sun, T., Li, W., Gou, W. and Qin, Y.: Application of BeiDou Navigation Satellite System in Anti-Drowning System, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 428, No. 1, IOP Publishing, p. 012009 (2018).
- [21] Samarasinghe, D., De Silva, P., Mudalige, T., Gamage, M. and Abeygunawardhana, P.: Drown Prevention and Flood prediction using smart embedded devices, *2019 International Conference on Advancements in Computing (ICAC)*, IEEE, pp. 304–309 (2019).
- [22] 成尾一征, 岩井将行ほか: WAPS: 水難事故被害抑止を目的とした水位による河川の危険エリア侵入の検知と通知システムの検討, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2020, No. 1, pp. 1–8 (2020).
- [23] 成尾一征, 岩井将行: 機械学習を用いた白波検出による早瀬流域識別手法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報 (2022).
- [24] Wang, K., Zhao, K., Su, M., Qi, J., Hou, Y. and Tang, S.: An intelligent life jacket system based on OneNET, *2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, IEEE, pp. 1071–1074 (2021).
- [25] Peden, A. E., Franklin, R. C. and Leggat, P. A.: Developing drowning prevention strategies for rivers through the use of a modified Delphi process, *Injury prevention*, Vol. 26, No. 3, pp. 240–247 (2020).
- [26] Deeper-Soner: ソナーの仕組み（オンライン），入手先（https://deeperonar.jp/usage/how_it_works/）（参照2022/12/12）。