

災害を伴う大規模出水時の河床変動を考慮した流量観測手法の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 30～令 4

担当チーム：河道監視・水文チーム

研究担当者：山本晶、萬矢敦啓、
工藤俊、影山雄哉

【要旨】

近年頻発する大規模出水により、基本的な水文データである水位や流量が取得できない事例が散見される。この課題に対応することを目的として、あらゆる分野の新技术を組み合わせることで、水文観測に特化したロボットの開発を目指し、災害や荒天を伴う大規模出水時に河床変動が発生するような状況においても安全かつ確実に高精度で流量を観測する手法を考案した。そして、大規模洪水時に発生すると考えられる課題を整理した上で、それに対応するための試験観測を実施し、現場に適用可能であることを示した。

キーワード：水文自動観測、大規模出水、ロボット技術、非接触型計測、電波・画像・音響技術

1. はじめに

我が国における水文観測は、建設省による昭和 25 年水理調査の体系化以来 70 年以上にわたり計測を実施し、データを蓄積することで河川行政に貢献してきた。特に大規模出水のピーク水位、流量データは治水計画、防災情報発出の観点から欠測は許されない。これらの水文観測手法の特徴は、有人観測であること、河道内である水中や川底に機器を設置することであり、故障や危険による欠測の恐れが常にあるため、欠測を無くすための様々な努力がなされてきた。しかしながら、観測技術が大きく進歩したにもかかわらず、近年多発している大規模洪水時において水文データを取得できない事例が少なからず起きている。大規模出水時における河川水の状況は、急流部では激流を伴うこと、流木やごみ等が流下し、さらに滞筋の変化、外水氾濫、河川構造物の破損を伴う場合もある。また観測員の安全の観点から観測地点近傍への立ち入り制限が出ることもある。

例えば、平成 28 年 8 月に発生した台風 10 号では、石狩川水系空知川上流部である南富良野町は空知川の破堤による洪水氾濫水害を受けた。同時に同地点近傍の幾寅観測所において水位計が破損し、避難指示により従来方法である浮子流量観測を実施することができなくなった。その後、その場で撮影された動画を基に画像技術を採用することで流量値を推定した¹⁾。流量観測が中止となった例は令和 2 年台風 19 号においても複数の河川で発生した。

このような状況において、既往の観測機器の流出や

破損、作業員に対する退避命令によりデータ欠損が発生していることから、無人で観測できる新技术が必要となっている。

近年、音響、電波、画像等のデジタル技術の進化により流量観測の精度、確実性向上に資する新しい観測手法が提案されてきている。1990 年代から特に研究者を中心として同手法の正確性、適用性が検証され、実用に耐える技術であることが認知され、一部は「河川砂防技術基準(案)」でも紹介されている。これらの一部はセンサーを流水に接触させない手法であること、無人観測ができることが特徴である。また、IoT の技術革新による計測機の遠隔操作技術や他分野も含めたロボット技術等は観測機器の新たな発展をもたらすことが期待される。

このような背景から、土木研究所では水文データ欠測をゼロとするため「持ち得る全ての技術を投入し最大の困難に対応する」、「あらゆる技術の中から目的に応じて適切な技術を選択する」という考え方のもと、観測機器メーカー等との共同研究を行いながら、非接触型で流速や水位を計測する手法を開発し、手引き作成にも参画した。

本研究では、あらゆる分野の新技术を組み合わせることで、水文観測に特化したロボットの開発を目指し、災害や荒天を伴う大規模出水時に河床変動が発生するような状況においても安全かつ確実に流量を観測する手法を考案する。

2. 水文観測ロボットの概要

水文観測ロボットは既往の水文計測技術、ロボット技術、IoT、人工知能を組み合わせたものである。人型ロボットと対比するとすれば、

頭脳;人工知能を用いた自己判断機能やデータ分析・データ保存

運動性能;機器の駆動

五感性能;画像、電波、音響技術を用いた水文観測と表現できる。またそれらに加えて遠隔操作やリアルタイムデータ転送の機能を有していることが特徴である。

水文観測ロボットは設置型と移動型の二種類があり、観測地点の状況や使用目的によって選択可能となっている。設置型ロボットは精度の高い流量値を測定することを想定しており、移動型ロボットは災害時等に計測支援を実施することを想定しているものである。以下にそれぞれのロボットの概要及び流量値の算出手順を示す。

2.1 設置型ロボット

図-1 は設置型ロボットの構成、図-2 は計測から流量値を算出するまでの手順である。図-1 は橋脚に設置した例であるが、設置位置は河岸等の選択肢もあり、設置条件を限定するものではない。図が示すように主たる計測器は、(1)河川水表面流速・水位を計測するための電波式流速水位計及びビデオカメラ、(2)水中流速及び(3)河床高を計測するための H-ADCP(Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler)である。また、精度向上のために別途、図-2 に示す(4)-1 複数の水位計を用いて観測地点前後の水面勾配を把握することが望ましい。さらに河床変動を定量化するためには対象領域の(4)-2 河床材料の面的な把握、風補正を考慮するために(4)-3 風向風速を取得しておくことが望ましい。

電波式流速水位計の計測原理は萬矢ら²⁾に詳述されているが、本ロボットの特徴はこれを機器の駆動を司る電動雲台に載せ、遠隔操作により使用者の意図に応じた方向を向けられることである。またビデオカメラを本雲台に搭載することで、電波の照射位置を中心とした流速場や水面波の状況を記録・解析することを意図している。H-ADCP は河床高の計測の役割を持つと共に、ビーム照射方向の流速を計測する³⁾。

これらの計測項目は目的に応じて選択することになる。複数の手法で流量を算出できるようにしておけば、精度を高め、欠測が生じる可能性を減らすことができる。例えば、(1)河川水表面流速のみを選択する場合は、現在の技術基準に準拠する要件を満たすことができる。

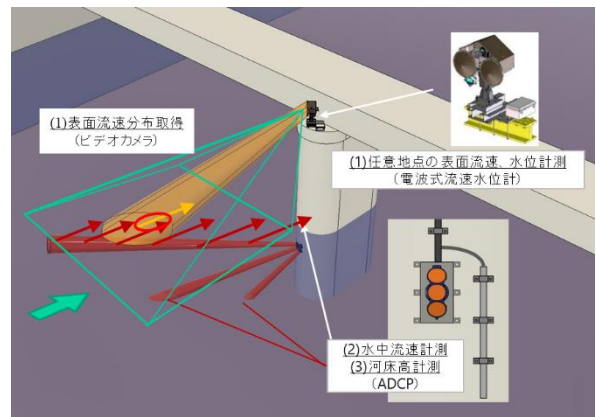


図-1 設置型ロボットの構成

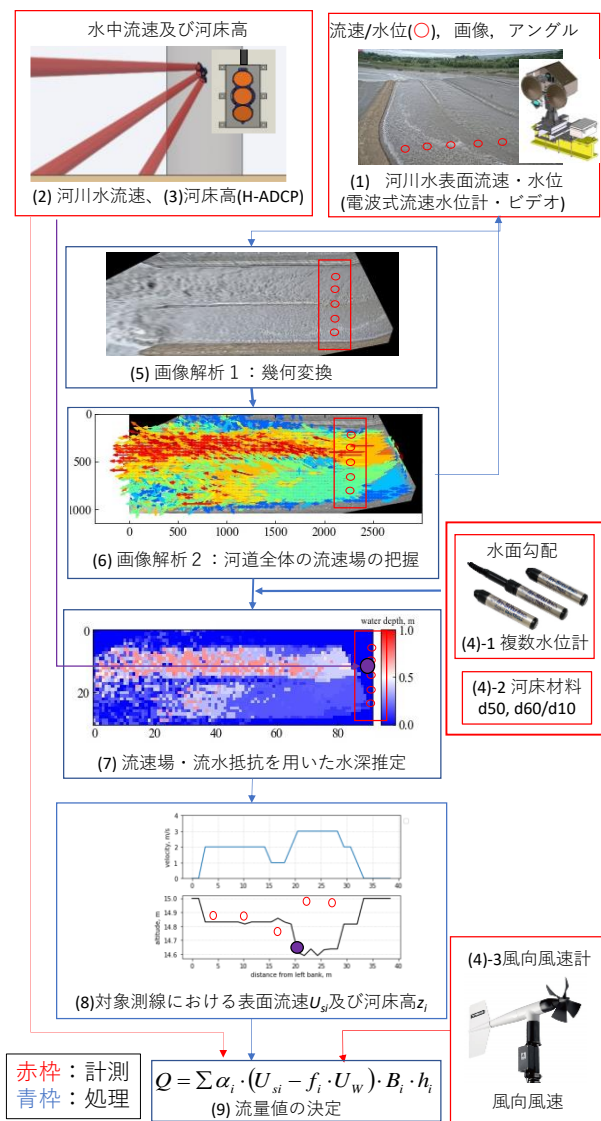


図-2 水文観測ロボットを用いた流量値算定のためのアルゴリズム

一方、河床変動が激しく、現況の技術基準では精度の高い流量値を得ることが難しい観測所も散見される。そのような場合は上記の一連の観測項目を採用し、後



図-3 移動型ロボットの設置イメージ

述する流量計算アルゴリズムを採用することでその課題が解決する可能性がある。

2.2 移動型ロボット

図-3 は移動型ロボットの設置事例を示す。左は歩道橋に仮設置したものであるが、これは 2.1 節で概説した(1)河川水表面流速及び水位を計測するもので、これらは電波式流速水位計及びビデオカメラ、自動雲台で構成されている。移動型ロボットを仮設置にするにあたっては、橋梁等の既存の施設を利用し、例えば結束帯等で固定する。なお計測対象地点に到着後、一時間程度で設置が完了し、その後水位・流速の面的な観測とデータ転送及びweb ブラウザによるデータ閲覧を開始することができる。図-3 右は高所作業車に搭載して計測した事例の一つであるが、このように高い比高を確保することができれば、広い計測範囲を対象とすることも可能となる。

2.3 水文観測ロボットを用いた流量計算アルゴリズムの一例（画像解析による流量算出）

2.1 節で示した全ての観測項目を採用することを考え、河床変動を考慮した流量値を算出するための計算アルゴリズムを概説する。図-2 の赤枠は 2.1 節で示した(1)～(4)に対応する。また、青枠は赤枠の計測結果を用いたデータ処理の過程を示す。以下、項目毎に概説する。

(5) 画像解析 1：幾何変換

図-2 の(1)河川水表面流速の計測において撮影した画像は、流速場を把握するためのものである。一般的に画像解析で実施する幾何変換は標定点を必要とする⁴⁾が、ここでは標定点を必要としない手法を採用し、カメラアングル値、電波式流速水位計で計測したセンサーから照射域までの距離を用いて幾何変換を実施する。

(6) 画像解析 2：河道全体の流速場の把握

時間的に連続した(5)で得られた幾何変換画像と PIV

手法(Particle Image Velocimetry)⁵⁾を用いて、画角内の流速場を把握する。電波式流速水位計の値が点計測であるのに対して、画像は近傍全体の流れ場を把握することを可能とする。

(7) 流速場・流水抵抗を用いた水深推定

(6)で得られた流速場から水深を推定する。推定には小規模河床波に関連する流水抵抗の知見⁶⁾を用いる。当該手法により水深を求めるには、流速、勾配、河床材料を得る必要がある。流速は(6)で求めた PIV 手法の結果を採用し、勾配の計測は図-2 の(4)-1 や電波による縦断水位観測を想定しているが、このような観測が困難な場合は河床勾配を代用することが考えられる。また、河床材料は洪水前後の調査結果を採用することが考えられる。ここで算定された結果は、図-2 の(3)で示す「H-ADCP を用いた河床高の計測」で得られた結果を用いて検証を行う。もし大きく異なるようであれば、H-ADCP の計測結果を再現できるように水深推定を再度検討し、勾配、河床材料の分布を見直す必要がある。

(8) 対象とする測線における表面流速及び河床高

(6)及び(7)で得られた結果から対象測線の流速・河床高を作成する。ここでは、電波式流速水位計から得られる流速及び水位の横断分布を用いるとともに、(7)で推定した水深の横断分布から、河床高の横断分布を推定する。なお、流量規模が比較的小さい場合は、水位は横断的に一定と捉えることも可能である場合が多いが、大洪水ではその限りではない。このことから、水位に関しても横断分布を考慮することが本手法の特徴である。

(9) 河川水流量値の決定

(8)までの手順で得た表面流速、水位、河床高の横断分布から流量値を算定する。なお、図-2 では(4)-3 風向風速計から取得した風向風速データ、(2)で取得した流速補正係数、風補正係数を採用するフローを示している。

3. 課題解決策の一例

有人観測の大きな課題は、観測地点が立入制限になった場合に計測不可となることである。例えば、水位流量観測地点の橋梁の立ち入り制限や、山間部の観測地点において降雨量が閾値を超えたことによる交通制限、氾濫が発生することによる立入制限等が挙げられる。無人観測 (3.1 節で後述) を導入することで、上述の条件においても観測を実施できることが期待される。

計測対象が自然河川であることから、河床変動や気

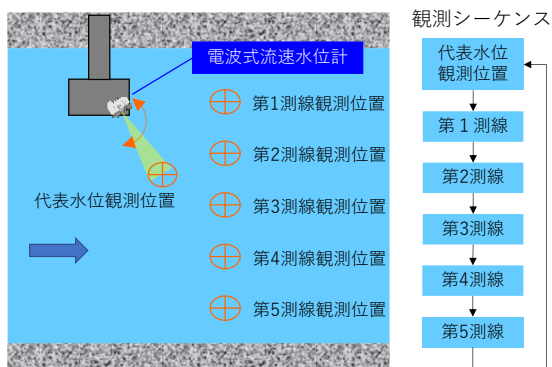


図-4 自動計測の一例

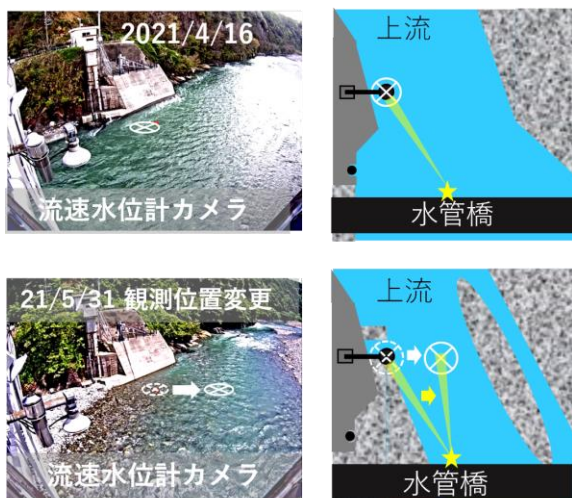


図-5 流路変動が活発な河川における水位観測

象条件の影響を強く受けることを考慮する必要がある。従来の浮子観測による流量の算定には洪水前後で河道断面積を比較し大きい方を採用するが、大規模洪水時は地点によっては洪水中に河床高が時々刻々と変化し、滞筋も変わることが考えられ、この洪水中の河床変動を考慮しないことが誤差の要因として挙げられる。また、特に大規模出水時には既往のH鋼等、河道に設置した水位計が破損することがあり、防災情報の発出に影響することが考えられる。このような事象が起きた場合に対して、災害支援に活用できる機能を持たせることを考える。

非接触型手法を適用する際の課題は、豪雨、霧、風の影響が挙げられる。このような場合は外乱除去を強化する必要がある。

上記のことを鑑み、本章では、無人観測機能、流路変動への対応、降水による外乱除去について概説する。

3.1 ロボットの無人観測機能

図-4 は川幅が 50m 程度の水位流量観測地点における無人観測のイメージ図である。ここでは平水時には代表水位観測位置に電波を照射し、例えば水防

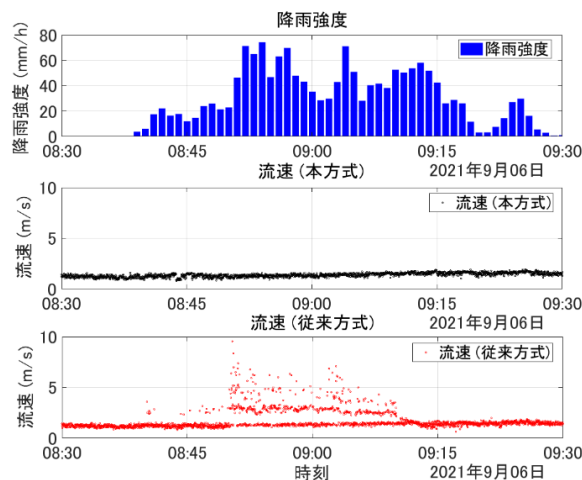


図-6 降水による外乱除去の一例

団待機水位まで水位が上昇した場合は、それを検出し、高水流量観測モードに移行する。高水流量観測モードでは、図の観測シーケンスが示すように、第一測線から始まり、第五測線まで電波の照射先が移動することで河道全体の測線毎の流速を算出する。これにより、水位が上昇したことを自動で検知して流量観測を実施することが可能となる。

3.2 流路変動に対応した観測事例

河床変動や流路変動が活発な河川における計測事例を示す。図-5 左上及び右上における×印が 2021/4/16 における水位の計測地点である。この期間の水位観測は良好であったが、その後 2021/5/31 には、図-5 左下及び右下が示すように電波照射位置に土砂堆積が起き、水位の観測値が欠損した。それを受けて図-5 左下及び右下の白及び黄の矢印が示すように遠隔で電動雲台を操作することで電波の照射位置を修正して観測を継続することができた。

3.3 降水による外乱除去

降水による外乱除去の性能を評価するために、降雨時に得られた流速値の計測結果を用いて、従来方式と本方式の二つの出力結果を算出した。両者の計測の違いは、本方式は電波照射地点の流速のみならず対象地点までの距離も計測していることであり、従来方式は流速のみを計測している点である。すなわち、本手法は距離情報を用いて、河川表面との距離よりも明らかに距離が異なる対象の流速を除去した上で、河川表面に相当すると判定される流速を出力する。図-6 は降雨強度とその時得られた流速値の時間変化を示す。雨量計は電波式流速計近傍に設置したもので、流速値は本ロボットで採用しているアルゴリズムと、従来方式(電波式流速計)の手法で採用したものである。図-6 上段が示すようにデータ取得期間において 80 mm/h 程度の

雨量が観測された。そのとき図-6 下段の従来方式は0～2 m/s 程度のものと離散的な 10m/s 程度の値を出力した。それぞれは河川水流速と雨粒の落下速度であったと推定している。一方で図-6 中段は本手法の出力結果であり、0～2m/s 程度の値が安定的に出力されている。これらのことから本手法は照射距離の違いに応じて適切に計測された河川水流速値を算出していることを確認した。

3.4 その他

ロボットを開発した目的に災害支援が挙げられる。例えば大規模出水時に既存の水位計が破損した場合、その近傍に移動型ロボットを設置することで水位データの連続性が担保されることが期待されるとともに、移動型ロボット近傍の面的な流速場を計測することが可能となる。例えば、河川構造物近傍の流れの集中箇所を把握し、危険箇所等を速やかに発見ことにも役立つことが期待される。

4. まとめ、今後の研究開発の方向性

本研究では、電波技術、画像解析、H-ADCP といった複数の計測技術を組み合わせることにより、安全かつ確実に流量を観測する手法を考案した。そして、いくつかの試験観測を実施し、現場に適用可能であることを示した。

令和5年3月時点では、電波式流速水位計とビデオカメラを搭載した流量観測システムが神通川と常願寺川に導入されている。今後も、必要に応じて他の機能も追加されたロボットの現場導入が期待される。

以下に水文観測ロボットに関して今後、開発すべき技術を示す。

(1) 自己判断機能の実装

河川水の表面情報から鉛直平均流速を算定することは、条件によっては簡単ではない。特に局所的な渦が発生している場合は注意すべきであるが、このような流れ場を電波式流速水位計単独では判定することができない。今後は、画像解析技術から近傍の流れ場を把握し、センサーの照射位置をロボット自らの判断で変更することができる機能を持たせることが考えられる。

(2) プラットフォーム機能の実装

本稿では河床高変化を考慮した流量を算定するための手順を示した。一方、河川管理者の立場としては現行の技術基準に準拠した手法が基本であるが、それが欠測した場合や精度が低い場合に備えて、本稿で示した河床変動を考慮した流量算出機能や、土砂堆積や荒天への対応機能を持っていることが望ましい。さらに、

土砂水理学の発達等により、より精度の高い流量算定手法が開発される場合もある。

このような背景から、流量値の算定に関しては手法を特定することなく、複数の手法を搭載できることを前提としたシステムが望ましい。すなわち計測に関しては図-2 の赤枠のデータを採用することは共通とした上で、図-2 の青枠で示す流量算定アルゴリズムや今後開発される新技術に関しては、使用者の意図に応じて搭載でき、切り替えて利用できるような基盤としての「プラットフォーム」が開発され、より高精度で欠測のないシステムが構築されることが望ましい。

参考文献

- 1) 佐藤匡ら：平成28年台風10号空知川上流における画像処理型流量観測の適用性—大規模出水に対応した流量観測高度化(その2)第60回(平成28年度)北海道開発技術研究発表会論文(自由課題・安全), H29年5月.
- 2) 萬矢敦啓ら：電波式流速水位計の開発, 土木学会論文集G(環境), Vol.72, No.5, pp.1305-1311, 2016.
- 3) 例えば二瓶泰雄・木水啓：H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリング, 土木学会論文集B, Vol.64, No.4, p.295-310, 2007
- 4) 例えば藤田ら：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集第38巻, pp.773-738, 1994
- 5) 例えば森北出版株式会社：PIV ハンドブック第二版, ISBN978-4-627-67182-9, 2002
- 6) 岸力・黒木幹男：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1972

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DISCHARGE OBSERVATION IN LARGE-SCALE FLOODING CONSIDERING RIVER BED EVOLUTION

Research Period: FY2018-2022

Research Team: Flood and River Response Monitoring Team,
River Dynamics Management Group

Author: YAMAMOTO Akira
YOROZUYA Atsuhiko
KUDO Shun
KAGEYAMA Yuya

Abstract: Number of cases essential hydrological data, such as water level and discharge, was unable to be observed due to large-scale flooding, is increasing in recent years. To cope with the problem, a secure and safety observation method in large-scale flooding with river-bed evolution has developed using combined system composed of new technologies. Some examinations were conducted, which shows the method can be used in actual observation stations.

Keywords: automatic hydrological observation, large-scale flood, robot technique, non-contact current meter, combination of RADAR/image/acoustic technique