一般報文

大規模洪水に適応する水文観測ロボットの開発

萬矢敦啓・墳原　学・橘田隆史

1. はじめに

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、適用性がテストされ、実用に資する技術であることが認知され、一部は河川砂防技術基準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。また一方でIoTの技術革新による計測機の遠隔操作、その他にも他分野の例えばロボット技術等による技術革新は観測機器の新たな発展性を伺わせる。

このような背景から、土木研究所は水文データ欠損をゼロとするため「持ち得る全ての技術を投入し最大の困難に対応する」、「異な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に、観測機器メーカ等と共同研究を実施してきた。共同研究は、課題名：「電波技術を用いた河川水表面流速と水位の計測手法の研究」、期間：2017年1月～2021年3月まで、課題名：「河川の流速、水位、河床高の自動計測に関する研究」、期間：2022年6月から2024年3月まで、実施してきた。ここでは新技術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実施している。本報告は本水文観測ロボットの概略と近年の大規模出水時に発生した課題を整理すると共に、それらの課題を解決するための技術、今後の技術展開を概説する。

2. 水位流量観測の課題

我が国における水文観測は、建設省による1950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我が国の河川行政に貢献してきた。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る。また出水規模が大きい水位・流量データは治水計画、防災情報発出の観点から必要不可欠である。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、河床変動による澪筋の変化、内・外水氾濫、河川構造物の破損を伴う場合があること、流木やごみ等の流下物があることである。これらのことは、実河川における流量観測が自然河川を対象とし、流砂系であることを改めて強く認識させられる。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。このような状況において、既往の観測機器の流出・破損、作業員に対する退避命令がデータ欠損の理由であることから、無人で観測できる新技術が必要となっている。

例えば2016年8月北海道豪雨災害では、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、画像技術を採用することで流量値はかろうじて推定することができた[1)]。流量観測が中止となった例は2020年台風19号においても複数の河川で発生した。

3. 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データ転送の機能を有していることが特徴である。

本水文観測ロボットは設置型と移動型の二種類

Development of Hydrological Robot for Adapting to Large-scale Flooding

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いる。一方で移動型ロボットは設置型の一部の機能を用いて、使用者の意図に応じて簡易に設置・計測ができる仕組みで、特に災害時等に計測支援を実施することを想定している。以下に両ロボット、同水文観測ロボットを使用した流量値の算出アルゴリズムを概説する。

3.1 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フローである。図-1は橋脚に設置したものを例であるが、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)、また付帯設備の一つとして図-2(4)-3風向風速計である。

電波式流速水位計の計測原理は萬矢ら(2016)に詳しいが、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、河川水の流れの一部を計測する[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。観測ロボットを流量観測手法として採用し、さらに現在の技術基準に準拠する限りにおいては(1)河川水表面流速だけを選択することで、例えば現在の水文観測に記述されている要件は満たすことができる。しかしながら、現況の技術基準では考慮していない例えば河床変動や流路変動等の現象が起き、精度の高い流量値を得ることを課題としている観測所も散見される。そのような場合は図-2に示す(4)-1複数の水位計を用いた水面勾配の把握、 (4)-2河床材料の面的な把握を取得しておくことが望ましい。このような計測結果と後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ことが期待される。

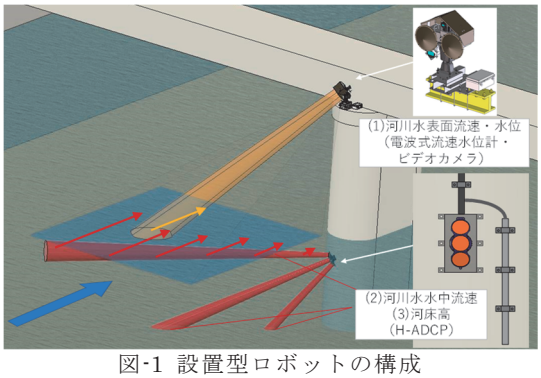

図-1 設置型ロボットの構成

3.2 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、ここでは設置型ロボットで概説した(1)河川水表面流速及び水位を計測し、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。電波式流速水位計が計測する範囲はセンサーと水面の比高で決まってくるが、例えば比高が10mであれば半径50m程度が計測範囲となる。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、このようにより高い比高を確保することができれば、計測範囲を拡大することも可能となる。

3.3 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

3.1設置型ロボットで示した全ての観測項目を採用することを前提に、流量値を算出するための計算アルゴリズムの一例を概説する。図-2の赤枠はそれぞれの計測に対応し3.1の(1)～(4)と同一である。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(1)河川水表面流速の計測で撮影した画像は、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ている。このためにカメラアングル値、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。

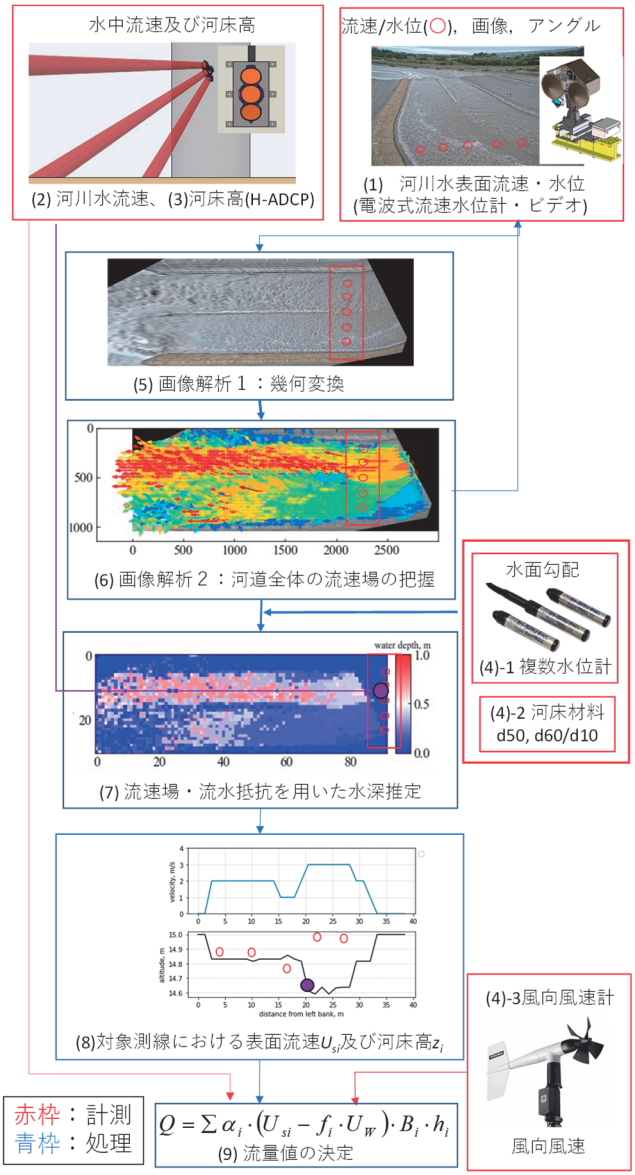

図-2　水文観測ロボットを用いた流量値算定のためのアルゴリズムの一例

(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。

図-3 移動型ロボットの設置事例

(7) 流速場・流水抵抗を用いた水深推定

(6)から得られた流速場から水深を推定する。推定には流水抵抗[6]を採用する。流水抵抗を求めるには、流速、勾配、河床材料（代表粒径と相当粗度に関連する係数）が必要となる。流速は(6)の結果を採用し、勾配の計測は図-2(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使用する。また河床材料は洪水前後の調査結果を採用する。ここで算定された結果は、「(3)の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、(3)の計測結果を真値として流水抵抗を再度検討し、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・河床高データを作成する。ここでは電波式流速水位計から得られた結果を真値として採用することが特徴的である。また河床高を作成するにあたり、(7)で得られた水深と電波式流速水位計の水位データを採用する。流量規模によっては河川表面の水位は一定と考えることもできるが特に大きな洪水ではその限りではない。このことから、水位に関しても空間分布を考慮することとしている。

(9) 河川水流量値の決定

(8) 対象測線における表面流速及び河床高から流量値を決定する。ここでは(8)から算定した流速及び水深に加え、図-2(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。

4. 課題解決方策の一例

厳しい自然環境下で河川水位・流量を把握するにあたりいくつかの課題が発生している。それらは、「2. 水位流量観測の課題」で概説したが、これらは有人観測、自然河川の観測であることから派生している課題として分類できる。また自然河川の計測であるため気象状況の影響も無視できない。この課題は非接触型手法を採用することに関連しているが、それらは豪雨、霧、風の影響である。このような場合は外乱除去を強化する必要がある。本章ではこれらの課題を解決するために、本ロボットが採用した手法及び技術を概説する。

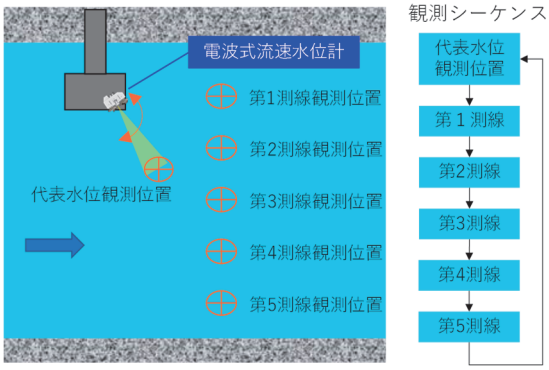

図-4 自動計測の一例

4.1 ロボットの無人観測機能

水文観測ロボットの運用は設置環境に応じて最適な設計を必要とする。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一例である。ここでは平水時において代表水位観測位置に電波を照射している。その後例えば水防団待機水位まで水位が上昇すると、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1測線から始まり、第5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。このように河道の状況に応じて、代表水位観測位置、測線数をプリセットする必要がある。

4.2 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⊗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土砂堆砂が起き、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観測を継続することができた。

図-5 流路変動が活発な河川における水位観測

4.3 河床変動を考慮した流量の算定事例

流量観測対象地点において澪筋変化等の流路変動が発生した場合、精度の高い流量値を算出するには河床変動を考慮する必要がある。ここでは十勝川の千代田実験水路で北海道開発局等が行った実験で得られた結果の一部を概説する。

図-6は対象河道の概要であり、これは実験終了直前の計測結果である。流れは右から左で長さの単位はcmである。実験の初期条件は右岸が低水路、左岸が高水敷である。千代田実験水路は流量のコントロールが可能であり、実験中の流量は42m^3/sであった。本対象領域は湾曲部の出口付近であり、時間の経過と共に右岸側の低水路に砂州が発生し、堆積すること、一方で左岸側の高水敷が侵食し澪筋が右岸から左岸へ変化することが特徴である。また(横軸、縦軸)= (1000, 4500)近傍にみられるように、左岸下流付近の堤防侵食が確認できる。さらに時間的に連続した図-6同様の画像からPIV手法を実施することで流速場が得られ、それを図-7に示す。

図-7は図-6と同一の画角における流速場であり、ここでは二次元流速の絶対値で示す。例えばピクセル値で（横軸、縦軸）= (60, 58)近傍の流速は3.2m/s程度となり、これが本実験の最大の流速であった。また左岸上流(100, 90)近傍では0.5m/s程度、右岸中央(60, 22)近傍では0.5m/s程度を示す。また流速が2.0m/s以上の領域は流速場に大きな凹凸を確認することができる。このような面的な流速分布と両岸で計測した水位分布を用いてエネルギー勾配を算定した。また通水後に河床材料の平面分布を調べ、それらの情報から流水抵抗を用いて水深分布を算定した。

図-8は図-6の横軸が1805cmの断面における流

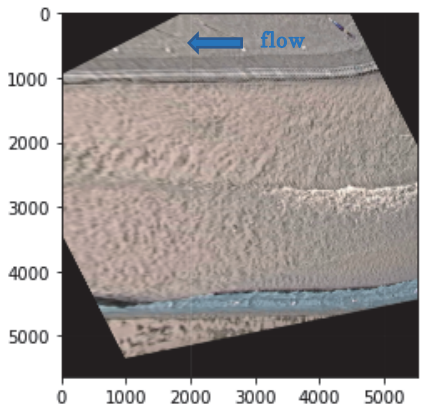

図-6 対象河道（長さの単位はcm）

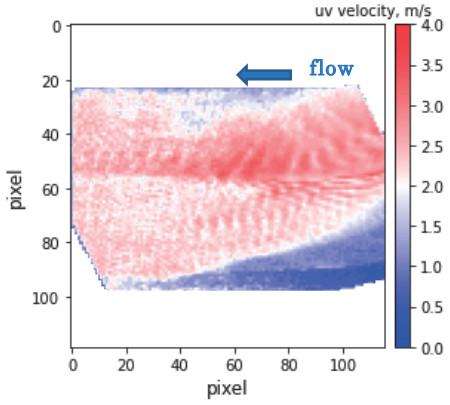

図-7　PIVで解析した流速場（横軸・縦軸は解析画像のpixelで標記）

速と水位、河床高の横断分布である。流速は図-7から縦断方向(u_vel)と横断方向(v_vel)、水位(WSE)は両岸で計測された値を直線的に結んで断面形としている。河床高は実験初期河床（init)、通水後の最終河床(final)、前段落で概説した流水抵抗から算定した算定河床(esti)を示す。初期河床形状が、右岸が低水路、左岸が高水敷であるのに対して、最終河床は低水路内の堆砂と高水敷の侵食が特徴的である。また河道中央部の流速が大きいにも関わらず、最終河床は初期河床と同一になっているのは、この近傍に低水路護岸があることに起因する。最終河床と比較すると算定河床は凹凸が多い。これは図-7で指摘された項目の一つであるが、これは**小規模河床形態**※であると推定され、通水が終了し、河床に対する流れによる外力がなくなると共に小規模河床形態が消え均された形状になったことから、このような違いが出たと思われる。

図-8で示した情報から流量を算定すると42.2m³/sとなった。実験時の流量が42m³/sであるため、算定された流量は十分な精度を得られたと考えている。

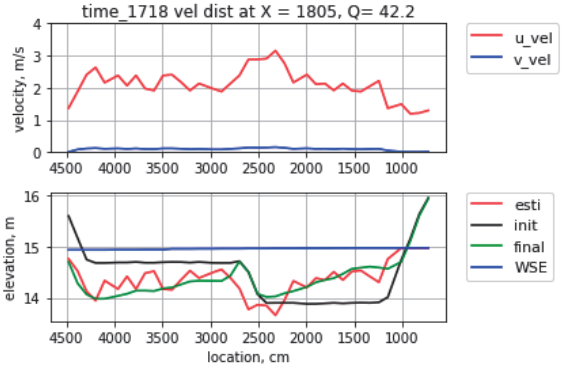

図-8　対象河道中央付近の流速分布と、水位(WSE)、河床高

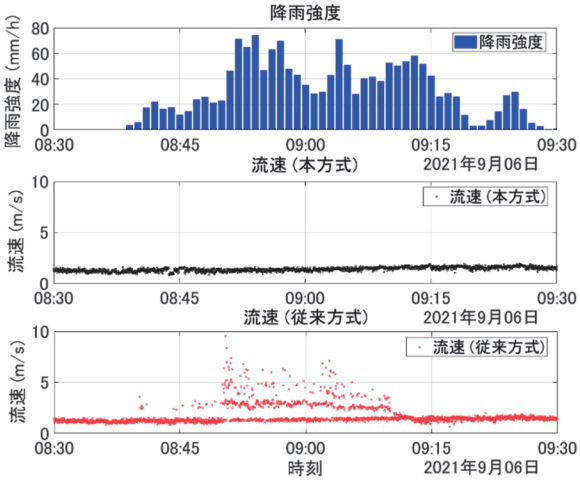

図-9 降水による外乱除去の一例

4.4 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。両者の計測項目の違いは、本手法が対象地点の流速と対象地点までの距離であり、従来方式は流速である点である。本手法の特徴は距離情報を用いて河川表面における流速を判定していることである。図-9に対応事例の一例を示す。図-9は降雨強度(上)とその時得られた電波値から算定し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（図-9中）と、従来方式(電波式流速計)の手法で採用したもの（図-9下）である。図が示すようにデータ取得期間において80mm/h程度の雨量が観測された。そのとき従来方式は0～2m/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-9中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。これらのことから新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。

4.5 その他

共同研究体が本移動型ロボットを開発した目的に災害支援があげられる。例えば大規模出水時に既存の水位計が破損した場合、防災情報の発出が不可能となる。また橋梁が破損した場合、既往の流量観測手法は中断せざるを得ない。その近傍に本移動型ロボットを設置することで観測の連続性が保証されることになる。また移動型ロボット近

※土木用語解説：小規模河床形態と反砂堆

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、危険個所等を速やかに発見することにも役立つことを期待している。

5. 今後の技術開発予定

本章は水文観測ロボットの今後、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水深方向の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が注意すべきポイントとなるが、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予定である。

(2) 河床高予測精度の検証

3.3で紹介したように、河床高の予測に関してはある程度の精度が担保されていることを検証できた。しかしながら本手法には次に示す課題がある。それらは洪水時に河床材料の大幅な変更があった場合、**反砂堆**※に代表されるような水面変動が大きい場合、小規模河床形態の遷移が発生した場合、急激な流路変化が発生した場合である。これらは本ロボットの運用の観点、土砂水理学の観点から技術開発を進める必要がある。

(3) プラットフォーム機能の実装

プラットフォームはIoT用語では共通基盤の標準環境を意味するが、著者らが意図する流量観測におけるプラットフォームは図-2の赤枠で示した観測値である。これらの観測値を用いて流量値を算定するためには複数の計算手法が考えられる。例えば本稿では河床高変化を考慮した流量を算定するためのアルゴリズムを図-2の青枠で示した。しかしながら河川管理者の意図によっては現行の河川砂防技術基準に準拠した手法である必要もある。さらに、土砂水理学の発達により、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、観測値を共通基盤として、流量値の算定に関しては手法を特定することなく、複数の手法を採用できることを前提としたプラットフォーム機能を有するシステムとしている。

謝　辞

本解析結果の一部は、北海道開発局帯広開発建設部が令和3年6月に実施した千代田実験の結果を使用し、計測の許可、実験データの提供を受けた。また阿賀川河川事務所、高田河川国道事務所から観測機器の設置許可を受けた。ここに謝意を示す。

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）、2017.5
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.I305～I311、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

萬矢敦啓

土木研究所 河道保全研究グループ河道監視・水文チーム 主任研究員
YOROZUYA Atsuhiro

墳原　学

(株)ＹＤＫテクノロジーズ 技術開発本部 技術開発1室 室長
TSUKAHARA Manabu

橘田隆史

(株)ハイドロシステム開発 代表取締役
KITSUTA Takashi