

ADCP搭載型ラジコンボートによる 低水流量観測技術の開発

DEVELOPMENT OF LOW-FLOW MEASUREMENT METHOD USING THE ADCP-EQUIPPED RC BOAT

橘田隆史¹・山内猛²・吉川世里子²・本田卓也²

Takashi KITSUDA, Takeshi YAMAUCHI, Yoriko YOSHIKAWA and Takuya HONDA

¹正会員 (株) ハイドロシステム開発 (〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天6丁目3-4)

²非会員 (株) ハイドロシステム開発 (〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天6丁目3-4)

The standard method in Japan for low-flow discharge measurement is the two-point method using a single-point current meter at 20% and 80% of the water depth. However, wading into the water for measurements in fast-flowing rivers poses significant safety risks. To address this issue, we have developed a compact, lightweight, and high-powered ADCP-equipped remote-controlled boat optimized for low-flow discharge measurement. Compared to conventional methods, this system enhances safety, reduces manpower requirements, and improves operational efficiency. In addition, we demonstrate its applicability to 3D riverbed topographic surveys in areas with fast flow and shallow water.

Key Words: ADCP, RC Boat, Discharge observation, Low flow measurement

1. はじめに

現在, 国内における低水流量観測手法は, 回転式流速計または電磁流速計などのシングルポイント流速計による鉛直2点計測を原則とした区分断面法が標準的に用いられている. この手法は, 竹内¹⁾による流量観測の歴史に詳述されているように, およそ1世紀以上前に確立された手法であり, 観測者が流水内に立ち入って流速計とストップウォッチで流速を計測し手書きで野帳に記録するというアナログ的な手順は現在に至るまで大きく変わらない. 近年の学術研究分野においても, 低水流量観測の方法論に関する議論は少ない. 例えば喜澤²⁾によってADCPと現行法を比較した研究や, 今村ら³⁾による2点法と精密法との比較研究が見られるものの, 総じて少なく, 技術開発が進んでいない分野と言える. 一方で, 現場実務では様々な課題が顕在化している. 例えば, 流速が速い場所での安全性, 観測に要する人数や時間, 厳冬の過酷な作業環境, などが挙げられる. 特に著者らは, 流速が1 m/sを超える様な早瀬において徒渉や有人船で計測作業を行っている現状に対し, 作業環境の改善が必要と認識している. そこで著者らは, 観測者の安全確保を初期の目的とし, 観測者が流水内に立ち入ることなく観測を行う手法として, 2021年にADCP搭載型ラジコン



図-1 ADCP搭載型ラジコンボート EZ-Boat 200

ボート EZ-Boat 200を開発した(図-1). 本機は2021年度から石狩川, 2022年度から小矢部川および神通川などにおいて試験的に導入され, 現行法との比較を通してその有効性が検証されてきた. 宮崎ら⁴⁾は, ラジコン式ADCPを用いることで圧倒的な時間短縮が可能と報告しており, 佐藤ら⁵⁾は, 現行法と比べて±10%以内の流量差に収まると報告している. さらに2025年初頭には高速型スラスターにより動力性能を向上させたEZ-Boat 500を開発した. 本報では, 新旧両機の開発経緯と性能について報告すると共に, その有効性や適用条件などについて検討を加えた. あわせて, 本手法による安全性の向上, 省人化, 省力化, といった現場負担の軽減に加え, 河床地形の簡易3次元測量などへの応用も提案する.

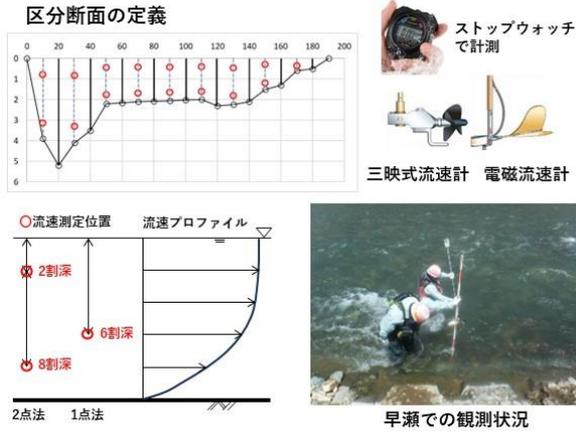


図-2 現在の低水流量観測の手法

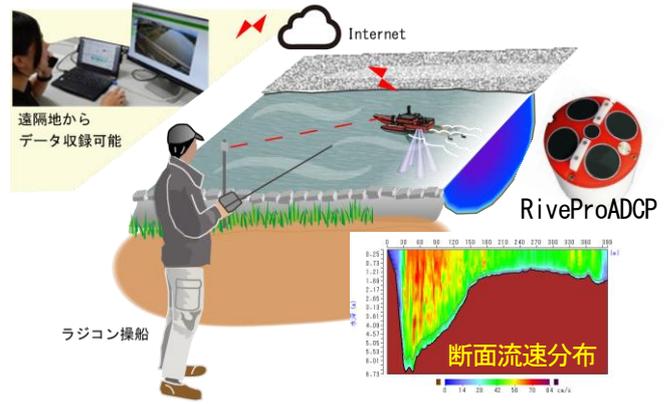


図-3 ラジコンボートによる観測イメージ

2. 現在の低水流観の手法と課題

(1) 現行法の手順

低水流量観測の手法は河川砂防技術基準や水文観測に詳述されているとおり2点法が標準となっており、現在の国交省による水文観測業務はこの方法に準拠している。現行法の観測イメージを図-2に示した。

観測手順としては、河道断面を水面幅に応じて8～12区分に分割し、各区分の中央において流速を計測する。水深が十分にある場合は水深の2割深および8割深の2点、浅い場合には6割深の1点で、いずれも20秒間の平均流速を計測する。流速計は、回転式もしくは電磁式などのシングルポイント流速計を使用する。回転式流速計の場合は電子音をカウントしながらストップウォッチで20秒を超えた最初の電子音の時間を記録し、経過時間と電子音数から流速に換算する。電磁流速計の場合は20秒平均値が表示されるため、それを野帳に記入する。横断形状は各区分の境目と中央でスタッフやけん縄を用いて水深を計測する。横断測線に沿って計測する方法は、兩岸にワイヤーやメジャーを架線する方法が一般的であるが、架線が困難な場所や流れが速い地点では、橋上から徒歩で計測する方法もある。流量算出に際しては、鉛直2点の平均流速値を区分断面積に乗じて区分流量を算出し、断面内で積分し、断面流量値としている。

(2) 現在の低水流観の実務上の課題

低水流量観測とは言え流速が1.0 m/s以上になるケースは少なくない。こうした流況において観測者が直接流水内に立ち入って観測を行うことには安全上のリスクが伴う。また、水深が深い場合は有人船を利用することが多いが、特に早瀬での有人船利用は危険性が高まるだけでなく、流速計のロッドを静止させる作業が困難となるため観測精度にも影響を及ぼす。これが現行法の第一義的な課題と考えた。

次に、現行法においては作業効率の面でも幾つか課題

が指摘できる。現行法では通常4～5名の作業員が必要となり、月に2～3回の観測を年間通して実施する。人手不足が慢性化するなか、年間でこれだけの人員を確保することが困難となっており、省人化の必要性が高まっている。また、1地点あたりの準備から撤収までに要する時間は、川幅50m程度の小河川でも1時間程度、川幅200mほどの河川では3時間程度かかるとの報告もあり²⁾、作業負担軽減の余地は大きい。

加えて厳冬期になると、作業環境はさらに過酷となる。極寒時の水中や水際での作業は身体的な負担が大きく、働き方改革が求められる現代においては、早急に改善が求められる課題である。

さらに技術的な観点では、流量値の正確な把握のためには短時間での計測が望ましいとされるが、例えば石狩川では、1地点当たり2時間から3時間を要すケースなどもあり、その間に水位が変動することで流量値が正確に観測できていない可能性も考えられる³⁾。

さらに、感潮域や背水域、偏流が生じる場所などにおいて、現行法が必ずしも技術的に適しているとは限らず、水理条件に応じた適切な観測手法の選択が求められる。

3. ADCPラジコンボートによる低水流量観測手法

(1) EZ-Boat 200 / 500の開発

前節で述べたような実務上の課題解決を目的として、著者らは2021年にADCPを搭載したラジコンボート「EZ-Boat 200」を開発した。観測のイメージを図-3に示す。本手法は観測者が流水内に立ち入ることなく、ラジコンボートを操作することで横断流速分布と断面形状の同時計測が可能となり、流速が速い場合でも安全な観測が可能となる。

過去に、ADCPを搭載したラジコンボートはいくつか実用化されている。例えば木下⁷⁾のラジコンボートがその先駆けであるが洪水観測向けで大がかりである。また、Q-Boat 1800⁸⁾は高速性能(船速4.5 m/s)を備えるも

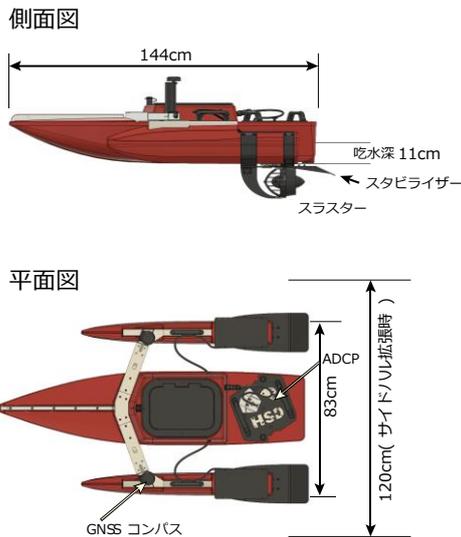


図-4 EZ-Boat 200/500の外観



図-5 従来型HSRBとEZ-Boat船体の比較

の全長213 cm・重量60 kgと大型で、水面際までのアプローチ性に難があった。また、Q-Boat 1250は全長125 cm・重量25 kgと小型軽量で可搬性に優れるが、最大船速は1.2 m/sとやや動力不足で、高速流時に橋上操作観測へ転用できる構造ではない。また、搭載出来るADCPもRiverProとRiverRayに限られるなど汎用性に欠けていた。このためEZ-Boat 200の開発に当たり、可搬性と動力性能の両立、ラジコン観測と橋上操作観測との併用性、搭載できるADCP機種汎用性確保などに留意した。

船体には既に橋上操作艇として開発していたEZ-Boat船体を流用した。橋上操作観測との併用を想定して、スラスタユニットは脱着式としたが、これにより既にボート本体を所有しているユーザーはスラスタユニットの追加のみでラジコン観測が可能となる。当機は全長144 cm・重量35 kgと可搬性に優れながらも、船速1.8 m/sを実現している。また、橋上操作観測に切り替えることで流速5 m/s程度までは観測可能となる。搭載出来るADCPはTeledyne RDI社製のRiverPro, RiverRayに加え、Workhorseシリーズにも対応することで汎用性を高めた。

システムの構成は、ADCP、ボート船体、脱着式スラスタユニット、慣性航法装置 (INS) とGNSSコンパス、遠隔操作用のEZユニット、およびバッテリーからなる。使用するソフトウェアは、ADCP操作用のWinRiverII、ボートの航跡をリアルタイムに地図上に表示させるEZTracker、それに流量算出ソフトのVAI4である。EZ-Boat 200/500の外観を図-4に示す。

(2) ADCPを利用する利点

近年、河川流量観測の新技术として画像解析法や電波流速法など非接触手法が積極的に活用されてきているが、これらが直接計測するのは表面流速に限られる。これらの手法で鉛直平均流速値を得るには表面流速係数を用い

る必要があり、現状では0.85が固定値として用いられている。この係数0.85は多くのケースで概ね水理現象を代表していると言えるが、実際には流況や水深、横断方向によっても変化するため、表面流速法を低水流量観測に適用させるには慎重な議論が必要となる。一方、ADCPは移動しながら断面内の流速分布を詳細に計測することが出来るため、得られたメッシュ状のデータから2割深と8割深の流速値を直接利用することが可能である。また、ADCPは流速分布だけでなく横断形状の同時計測も可能であり、非接触式手法では困難な地形情報の取得が可能な点も利点である。

(3) ボート船体の特長

図-5に従来型のHSRBと著者らが開発したEZ-Boat船体の比較を示す。ADCPが搭載出来る橋上操作型のボートは、国内ではTeledyne RDI社製のHigh Speed River Boat (図-5左、HSRB) が洪水観測などにおいて利用されてきたが、さらに高速安定性を向上させ、通信装置などの収納やADCPの脱着性を改善したのがEZ-Boat (図-5右) である。ADCPの装着位置を船尾方向に配置することで船首アップによるデータ欠落を大幅に改善している。ボディー素材は軽量で高強度なカーボンファイバーを採用した。サイドハルはフィールド実験を重ね、高速流でもボートの揺動が抑えられる条件を経験的に見だし、幅120 cm、吃水深3 cmを採用した。サイドハルは運搬時の可搬性を考慮して83 cmに収縮させることが可能である (図-4下)。

(4) 脱着式スラスタユニットの開発

脱着式のスラスタユニットは、2021年開発当時は200W型のスラスタを左右に2基用いる設計とした。容量115Whのバッテリーを左右個別に搭載し、スラスタ

ユニットとバッテリーと制御基板を一体型とすることで、脱着を容易にさせた。

静穏水面での走行試験では最大船速1.8 m/sが得られた。駆動時間は最大出力で15分間の連続使用が可能で、出力を60%に抑えると船速1.0 m/sでおよそ40分の連続使用が可能である。2021年から2024年までの石狩川や小矢部川、神通川での試験観測は当機で実施している。後述するが、上記性能ではパワー不足との指摘が出たため、2025年初頭には高速型のEZ-Boat 500を開発した。

(5) 遠隔操作装置 EZユニット

ADCPの操作を陸上や遠隔の事務所から実施するための通信装置である「EZユニット」を船体内に配置した。当初EZ-Boat 200では、EZユニット内の基板型PCにリモートアクセスし、WinRiverIIを遠隔操作してデータを収録していた。しかしこの方式では基板型PCの負荷が高くなるため、発熱によって観測を中断せざるを得ないケースが度々発生した。これを改善するため、基板型PCにデータブリッジ機能を新たに実装し、ADCPとGNSSデータを陸上まで無線伝送する方式に変更した。これにより、陸上側のPCでWinRiverIIを直接操作しながらデータ収録することが可能になり、基板型PCの負荷が大幅に低減したため、長時間安定運用が可能となった。なお、観測データはボート内にも保存されるため、陸上との通信が途切れた際にもデータが失われることは無い。通信方法は、インターネット方式と、携帯電波が届かない山間地向けにWi-Fi無線が選択できる設計とした。

4. 現行の低水流量観測との比較

(1) 小矢部川における低水流量観測の実施

富山県小矢部川において、当該地点で流量観測を実施している北建コンサル(株)の協力の下、EZ-Boat 200を用いて試験観測を行った。選定した地点は平水時でも流れが速く、かつ水深が1.4 m程度と深いため、通常はワイヤーを架線し有人船で11測深の各区分を三映像流速計で2点計測している。

(2) 流量の比較結果

EZ-Boat 200で計測した結果を図-6に示した。流心付近の表面流速は1.5 m/sを超えており、EZ-Boat 200の出力不足により若干下流に流されながら横断する航跡となった。ADCPによる観測流量は23.2 m³/sで、この時のH-Q流量は23.9 m³/s(出典：国土交通省 水文水質データベース 2025年4月閲覧)と、3%の誤差に収まり、流量値に関しては現行法と遜色ない結果が得られた。なおADCPによる流量算出は、現行法と同じく各区分内の2割8割深の流速を抽出し、鉛直2点の平均流速を、区分断面積に乗じて区分流量を求め、断面内で積分した。

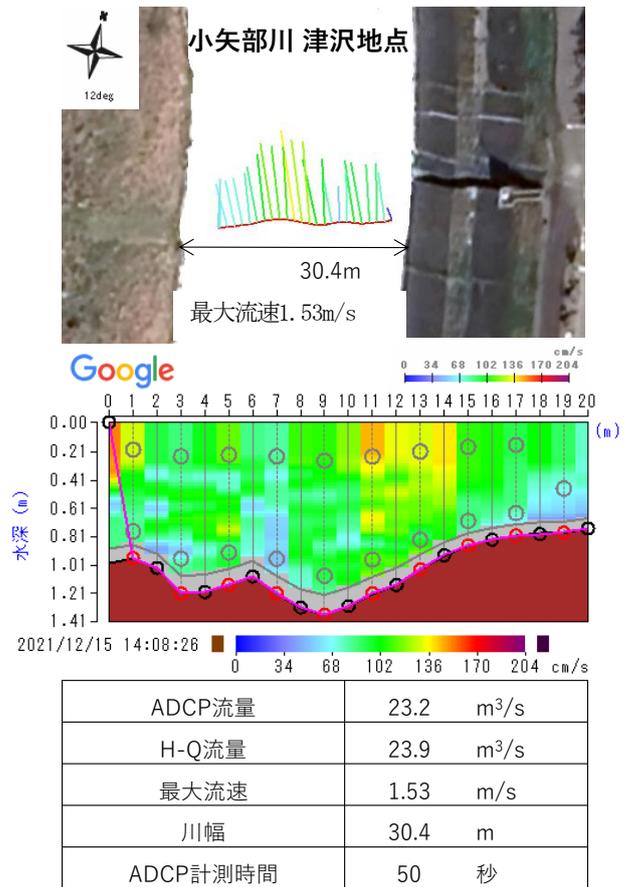


図-6 EZ-Boat 200による観測結果

(3) 本手法による実務上の利点

当該地点は低水時でも常時流速が速く、観測時の最大流速は1.5 m/sであったが、このような流況でも流水内に立ち入ることなく安全に観測を行えることが確認できた。しかし当該地点では流速が2 m/sを超える状況もしばしば見られる。その際は少し上流の橋梁から橋上操作観測に切り替えることが可能であるが、ラジコン操作により同一測線上で計測するためにはさらなる船速向上が必要と判断された。

作業の効率化に関しては顕著なメリットが見いだせた。現行法では、作業員5名で準備に30分、観測に30分、片付けに15分と、トータルで1時間15分を要している。EZ-Boat 200による観測では、操縦者1名、対岸付近での監視員1名、ADCPの操作に1名の合計3名で実施可能となる。作業時間は、現地到着後の準備に15分、2往復4データの取得に合計10分程度、片付けに5分、トータルで30分程度と現行法の半分程度の時間で実施出来た。但し、同日にすべての観測地点をADCP方式で対応できない場合には、現行法に準じた人員体制を維持して出勤する必要があるため、その際は人員削減効果が限定的となることに留意する必要がある。

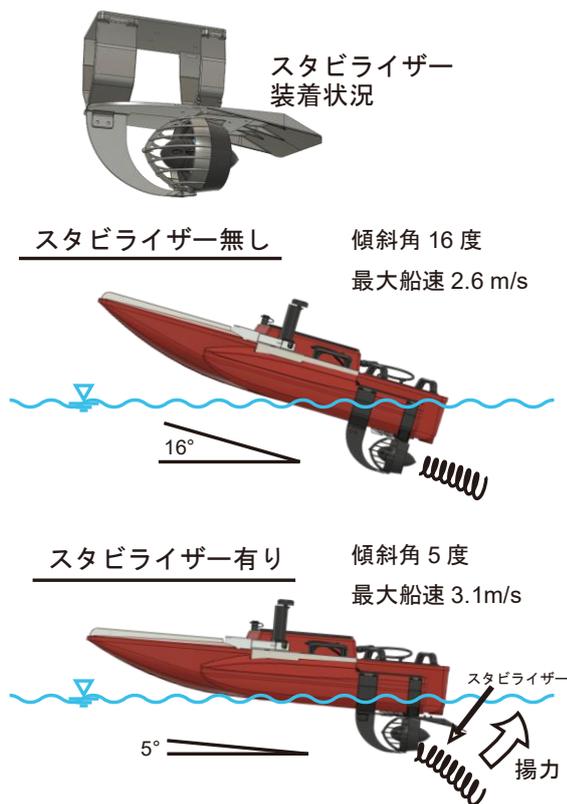


図-7 スタビライザー装着効果

(4) 本手法のデメリットと適用条件

RiverProADCPのオートモードで計測した場合は、センサーからの不感距離が12 cmとなり、吃水深（11 cm程度）を加味しても水面から23 cmが未測となる。また、河床付近の水深比6%以内は原理上、サイドローブとの干渉が生じるため同じく不感帯となる。このため、2割深の流速値にADCPの実測値を当てはめるためには、水深1.2 m以上が必要となり、それより浅い場合は6割深のデータを採用する必要がある。また、水深0.4 m以上が浅い場合は6割深においてもADCPの実測値を当てはめることができないため、水深0.4 m以上が断面の大部分を占める場合は、本手法の適用は難しくなる。

また、最大船速の3分の2を超える流速が生じる場合は、操船の安定性が損なわれ、機材流出のリスクも高まる。この場合は橋上操作観測へ切り替えることが望ましい。

5. ラジコンボートの改良

(1) 最大船速の向上

当初開発したEZ-Boat 200は200W型のスラスターを用いていたが、流速が1.2 m/sを超える状況ではパワー不足に陥る。これを受け、より高出力の500W型スラスターを採用し、船速の向上を図った。バッテリーには20V型480Whの高出力型を採用し、重量が増えるため搭載箇所をサイドハルからボート本体内部に変更した。最大出力

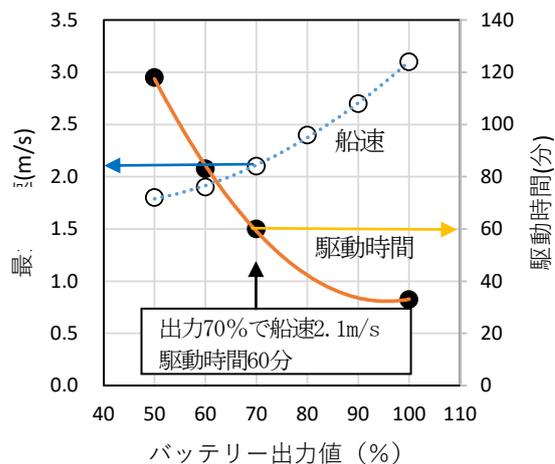


図-8 バッテリー出力値と船速、駆動時間の関係

時には大電流が流れるため保護回路も強化して安全性を確保した。試走では大幅な出力アップを実現したものの、走行時に船首アップ角度が16度以上となり、それにより推進効率が低減して最大船速2.6 m/sと期待していた数値に届かなかった（図-7上）。この問題に対応するため、ボートの姿勢を安定させる目的でスタビライザーを独自設計し船尾に取り付けた。その結果、船首アップ角度は5度以内に抑えられ、最大船速も3.1 m/sを記録するなど期待通りの性能を発揮させることができた（図-7下）。

(2) バッテリー出力値と最大船速、使用時間の関係

図-8に500W型でのバッテリー出力値と最大船速および駆動時間の関係図を示した。最大出力時（100%）には船速3.1 m/sが発揮できるものの連続稼働時間は30分程度であった。バッテリー出力値を70%に落とすことで船速は2.1 m/s程度と減速するが、連続稼働時間は60分程度確保できた。電池交換の頻度を抑える必要があるため、通常は最大出力値を70%に制限し、早瀬などで大出力が必要な際は、プロポ操作でブースター機能をONにすることで、一時的に最大出力を発揮できる設計とした。

6. 早瀬での簡易3次元測量

(1) ADCPIによる簡易3次元測量手法

ラジコンボート搭載のADCPは流量観測以外に、深淺測量機器としても活用できる。ADCPでは5つのビーム個々に測深データが得られるため、測位データを紐付けることで5点のXYZデータが取得できる。また、ADCPのビームを進行方向に対して22.5度回転させることで、両サイド方向に計測点を5点配置させる設計としている。左右のビーム幅は水深の0.7倍と限られるが、密にジグザグ走行することで簡易的な3次元測量が可能となる。特にRiverProADCPではボートの吃水を加味しても水深23 cm程度と浅い場所での測深が可能である。

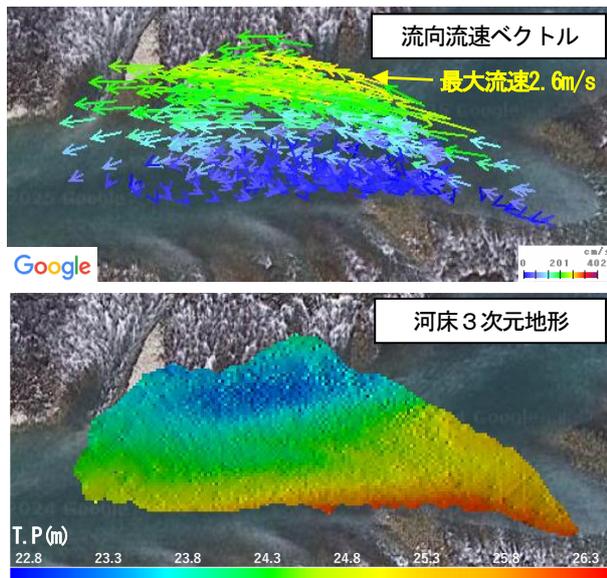


図-9 EZ-Boat 500による河床3次元測量

(2) 木曾川早瀬での3次元測量結果

低水時でも常に早い流れが生じている木曾川55 km地点周辺の早瀬において、EZ-Boat 500の走行テストを兼ねて3次元測量を実施した。図-9上はジグザグに航走して得られた流向流速である。右岸側の流速は2.6 m/sを超える状況で、遡上するには動力性能が不足していたため、右岸側の早瀬では上流から下流に流されながら計測し、流れの比較的ゆるやかな左岸側から遡上することで面的に計測させた。

図-9下は得られた簡易点群測量結果をもとに0.5 mメッシュで作成した図である。測位はVRS-RTKを利用し、ボートの揺動はADCP内部の傾斜センサーで補正した。その結果、このような水深の浅い早瀬において河床洗屈の様子などが3次的に把握することができた。水深が浅く流れの速い早瀬において、マルチビームソナーなどの大型機材で計測することが困難な場合は、本手法も選択肢となり得る。

7. まとめ

(1) 本手法の低水流量観測における有効性

本手法のメリットとして、早瀬での安全な観測、観測人員の省人化と作業時間の短縮、作業量の省力化、厳冬期での過酷な作業の緩和など、現場作業の改善効果は大きい。特に有人船で観測している地点は、改善効果は顕著である。また付加価値として、前節で紹介したように深淺測量や補備測量などに活用することで利用範囲を拡げることができる。

DX化による利点もあり、ADCPの観測データはバイナリ形式で多くの情報がデジタル形式で記録されるため、目的に応じて様々な解析が可能となる。例えば、表面流速係数の算出、流砂速度の解析、超音波濁度解析やそれ

を利用した浮遊砂フラックス算出などに展開可能である。

(2) EZ-Boat 200 と500のメリット・デメリット

EZ-Boat 500は動力性能に優れる一方、EZ-Boat 200はスラスターとバッテリーが一体型であるため脱着性に優れており、EZ-Boat船体のみ所有しているユーザーでも脱着式スラスターの導入のみで容易にラジコン化が可能というメリットがある。EZ-Boat 500にアップデートするには船体加工が必要となり、コスト的にも高くなる点がデメリットである。

(3) 低水流量観測における適用条件

適用水深は0.4 m以上必要となり、それより浅い場合はシングルポイント流速計で補うなどの対策が必要となる。また、流速はEZ-Boat 500の場合で最大流速2 m/s程度が安全な使用範囲となる。それ以上の流速が生じている場合は橋上操作観測が望ましい。

謝辞： ADCPラジコンボートによる低水流量観測の適用性については、札幌開発建設局、北海道開発局、黒部河川事務所、および土木研究所による合同勉強会にて2022年から2024年にかけて検討を頂いた。小矢部川での試験観測は北建コンサル(株)、神通川では北陸コンサルタント(株)、石狩川では(株)福田水文センターに協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 竹内俊雄：流量観測の歴史 (1), (2), 水利科学, 18巻3号, p16-48, 1974
- 2) 喜澤一史：低水流量観測の精度と新しい観測手法の実用性, 平成11年開発土木研究所 月報, 1999.
- 3) 喜澤一史, 井出康郎：河川流量観測における新計測法の提案について, 河川技術論文集, 第7巻, 2001年6月.
- 4) 今村仁紀, 深見和彦, 天羽淳：河川における低水流量観測技術基準の再評価, 平成18年土木技術資料48-1, 2006.
- 5) 宮崎亮直, 高橋賢司, 渡辺元之：ラジコン式ADCPを用いた低水流量観測の高度化・現地作業の生産性向上-, 第65回(2021年度)北海道開発技術研究発表論文, 2021.
- 6) 佐藤祐介, 竹瀬真由美, 吉武竜馬：ラジコン式ADCPを用いた低水流量観測の高度化・流量算出手法の比較検証-, 第67回(2023年度)北海道開発技術研究発表論文, 2023.
- 7) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案, 水文・水資源学会誌, Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998.
- 8) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察, 河川技術論文集, 第14巻, 2008.

(2025. 4. 3受付)

