

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 -

札幌開発建設部 河川計画課 宮崎 亮直
高橋 賢司
渡辺 元之

低水流量は河川に関する計画立案や洪水等水災害への対応に必要な重要な基礎資料である。しかし、現行の観測手法は80年以上変化しておらず、計測に長時間を要する、河道内作業による安全性の確保、多くの人員を要する等の課題がある。本研究では、低水流量観測にラジコン式ADCPを導入し、計測時間の短縮や安全性の確保及び観測の省力化を図った。また、流量観測精度の検証を行い、現場での生産性向上の可能性を示した。

キーワード：低水流量観測、省力化、生産性向上

1. はじめに

流量観測には低水流量観測と高水流量観測があり、ともに河川管理の根幹となる基礎資料である。低水流量は、利水計画、低水管理、ダム管理など主に水資源の管理に必要なデータで、人の命と暮らしを守るための重要な基礎資料である。これらは長期間に渡る定期的かつ継続した観測データの蓄積が必要である。我が国における流量観測は、昭和12年に当時の逓信省、内務省、農林省が共同で河川水の多目的利用のための河川流量調査（河水統制事業調査）を実施したのが始まりと考えられる。¹⁾ これらの手法は昭和29年の総理府令としてまとめられ、河川砂防技術基準調査編等で観測の基準として用いられている。そのうち低水流量観測は、観測所の水深や河道状況に応じて観測方法が異なる。流速が遅く水深が浅い場所では、図-1のように観測員が川を歩いて渡りながら観測する徒歩観測を行い、流速が速く水深が深い場所は図-2に示す船による観測あるいは、図-3に示す橋上からの観測が必要になる。しかしながら、測量分野がGNSSやUAVを用いたDX化が進んでいる中で、低水流量観測は、約80年前の手法を踏襲しており、人手と時間がかかる手法は効率的とはいえず、高度化が望まれる。また当初、国土交通省が直営で実施していた流量観測は、その後、民間委託が進み現在に至っているが、急速に進む少子高齢化の影響もあり、人員不足が観測を継続していく上で大きな課題となっている。

そこで本研究では、従来の低水流量観測を見直し、観測時間の短縮と安全性の向上、人員の省力化、観測精度の検証を目的としてラジコン式ADCPを用いた低水流量観測について検討した。



図-1 徒歩観測



図-2 船観測



図-3 橋上観測

2. 現在の観測手法

低水流量観測は、表-1に示す水面幅に対応した水深・流速測定測線²⁾によって計測され、図-4のように横断面を区分して計測する区分求積法によって算出される。

低水流量観測に使用される可搬式流速計は、図-5に示す回転式流速計（三映式、広井式流速計等）と電磁流速計がある。徒歩観測では棒状のロッドを用いて流速計を固定するが、水深の深い船観測や橋上観測では錘を付けたワイヤーロープに流速計を取り付けて使用する。

3. 現行観測の課題

(1) 計測時間

現行法の大きな課題として、1回の観測に時間がかかることがあげられる。図-6には、札幌開発建設部管内51箇所の令和2年度低水流量観測の平均水面幅と平均観測時間を示す。観測時間は、徒歩観測では、水面幅2m~75mで、30分~120分程度かかっている。船観測では、水面幅30m~70mで70~120分以上、水面幅100mを超える橋上観測では、半数以上で120分を超える観測時間がかかっている。この場合、1箇所観測時間が2時間以上かかるため、移動時間を含めると1日2箇所程度が限界である。

(2) 安全性

低水流量観測は高水流量観測と異なり、流況が安定した状況で実施する機会が多いが、徒歩、船はいずれも水中または水上作業のため、転倒、転落などの危険が伴う。たとえ浅い水深でも高流速や河床の洗掘状況等によっては、転倒して流される可能性がある。また、船からの転落や転覆した場合、安全対策として河岸にスローロープを携えた人員を配置したとしても、河岸から10~20m程度が届く限界であり、川幅が広い場合は救助できなくなる可能性もある。よって、低水といえども水に接触する作業は常に危険が伴うことに留意する必要がある。

(3) 労力

現行法では、1回の観測に観測員が4~5人必要で、特に船観測の場合は、船を観測所まで持ち込まなければならず、有人船を運搬するための牽引車両等の装備の充実が求められる。また、船などの積み下ろしや船着き場からの移動、観測測線のワイヤー施設の設営などを事前に準備しなければならない。河川を横断するワイヤーは、河川管理上張ったままにはできないため、毎回、観測前に設置、終了後に撤去しなければならないが、こうした事前準備だけでも相当数の人員が必要になる。また、船の往来が多い箇所では、図-7のような横断ワイヤーの設置そのものが危険を伴う場合がある。

表-1 水面幅に対応した低水流量観測の測線数

水面幅 (m)	水深測線間隔 (m)	流速測線間隔 (m)
10以下	水面幅の10~15%	左に同じ
10 ~ 20	1	2
20 ~ 40	2	4
40 ~ 60	3	6
60 ~ 80	4	8
80 ~ 100	5	10
100 ~ 150	6	12
150 ~ 200	10	20
200以上	15	30

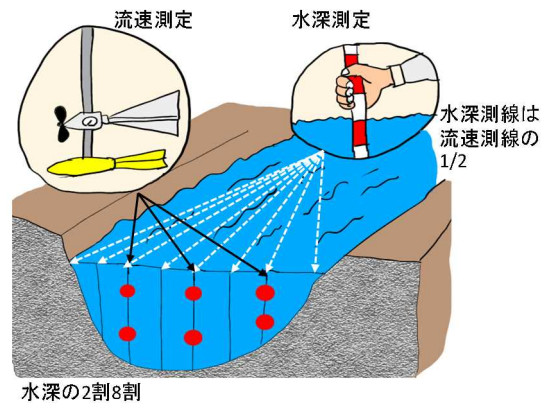


図-4 低水流量観測の測定方法



図-5 低水流量観測用の流速計

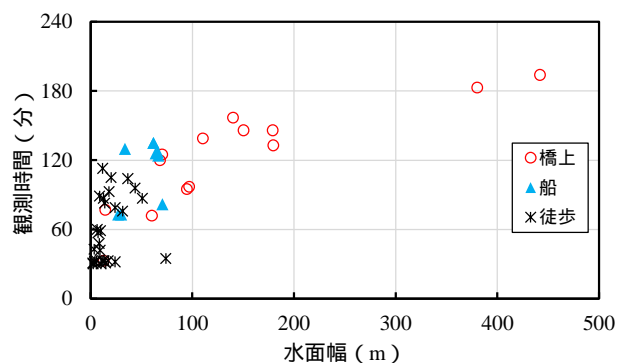


図-6 低水流量観測の水面幅と観測時間

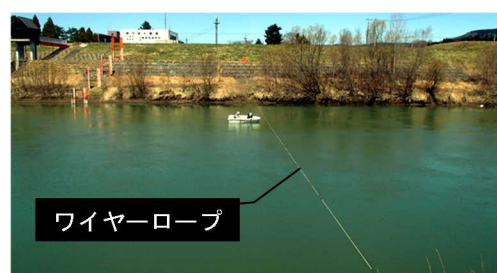


図-7 横断ワイヤーによる船観測

4. ADCPによる流量観測

(1) ADCP流量観測の開発

ADCPはセンサーから発信した超音波が水中の懸濁物に反射して戻ってくる波のドップラーシフト量で流速を算出している。喜澤ら³⁾はADCP搭載ボートを牽引ロープで橋上操作して、感潮域などでの低水観測への有効性を示した。大田見ら⁴⁾は、石狩川にADCPセンサーを河床設置して連続データを取得し感潮域のリアルタイム流量の算出を行っている。ADCPを用いる最大のメリットは断面流速をメッシュ状に測定できるだけでなく、水深や移動距離が測定できるので、断面積をリアルタイムで取得することができる点にある。こうしたADCPの超音波特性を踏まえた観測手法は、土木研究所の流量観測高度化マニュアル高水流量観測編⁵⁾にまとめられている。高水流量観測での仕様はそのまま低水流量観測にも適用可能であり、ADCPをボート移動させてデータ取得することで低水流量の観測が可能となる。ただし、ここまではADCPを牽引ロープで橋上操作する観測となっている。

(2) ラジコン式ADCPの活用

ADCP橋上操作による流量観測を行うためには、河川を横断するワイヤーロープやトラスのない橋梁が必要になるが、ADCPが自走できればこの課題は解決する。

a) ラジコン式ADCPの仕様

ラジコン式スラストを装着したADCPの概要を図-8に示す。トリマラン型のボートで中央部のメインハルと両サイドのサイドハルで構成されている。ADCPはメインハルの最後尾の船底に取り付けられており、水泡による測定障害を防いでいる。フレームの左右にRTK-GNSSコンパスがあり、位置情報と船の向きを取得する。ラジコン式スラストはサイドハルの後方に取り付けられており、脱着が可能で、上部にリチウムポリマーバッテリーを格納している。

b) ラジコン操作

プロペラは前進と後進のみで、図-9の操作プロポでどちらかを前進、どちらかを後進させることで左右の旋回を行う。ラジコンの通信距離は平坦なところで300m以上可能である。流速は現在のところ2.0m/sec程度が限界で、安定的に観測する場合は、1.5m/sec以下が望ましい。

c) 運搬と収納

ラジコン式ADCPの重量は約30kgで図-10のように2人で運搬が可能で、ライトバンの後部に収まるサイズである。現行法の船観測の場合は船を積み込む大型車や牽引車が必要なのに比べると、相当軽量化されている。

d) クラウド操作

ADCPの操作は、以前はパソコンを現場に持ち込んで無線LAN接続で行っていた。また、ADCPは観測条件に応じた設定コマンドを操作する必要があるため、熟練者が同行する必要があった。しかしラジコン式ADCPでは



図-8 ラジコン式 ADCP の概要



図-9 ラジコン式 ADCP の操作プロポ



図-10 ラジコン式 ADCP の運搬と収納



図-11 ADCP 計測の遠隔サポート

船にSIM通信可能なマイクロPCを装備しており、遠隔で操作が可能のため、現場ではスイッチをオンにするだけで、図-11のように事務所で操作を行う。そのため、現場ではラジコン操作に集中して観測が可能である。

5. 実河川での適用性評価

(1) 試験観測の実施

実河川でのラジコン式ADCPの適用性を評価するため、現行観測（橋上）で180分以上の時間がかかる石狩川岩見沢大橋、石狩川石狩大橋と、船観測の千歳川裏の沢の3箇所を代表地点として、令和3年9月、10月にそれぞれ計4回、ラジコン式ADCPの観測を実施し、現行法との比較を行った。9月6日、9月8日の第1回目の流速分布を図-12～図-14に示す。図-12の石狩大橋は、右岸に流心が偏った河床形状になっており、湯水で塩水遡上が発生していた。ADCPにより水深2.5m付近に塩淡水界面が明瞭にみられ、上層は順流で、下層は逆流の二層構造が観測されている。現行の流量観測は鉛直方向の2割と8割の点流速測定であるため、塩水遡上などの水理現象を把握するのは難しいが、ADCPのように断面の大量のデータを取得することで把握が可能になる。この場合、上層部のみが河川流量で、下層部は海水と判断できるため、上層部だけの流量を算出するものとする。図-13の岩見沢大

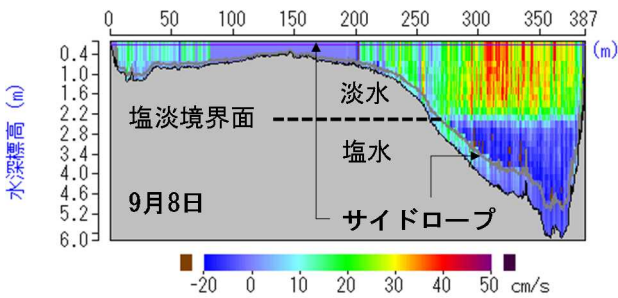


図-12 ADCP観測結果（石狩川石狩大橋）

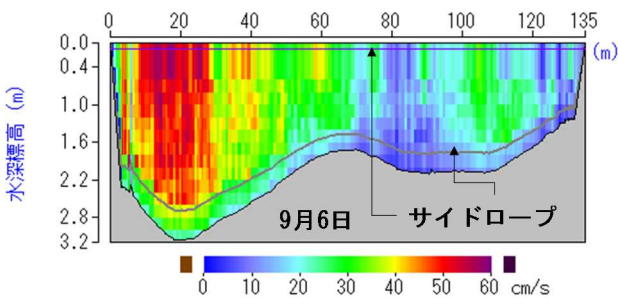


図-13 ADCP観測結果（石狩川岩見沢大橋）

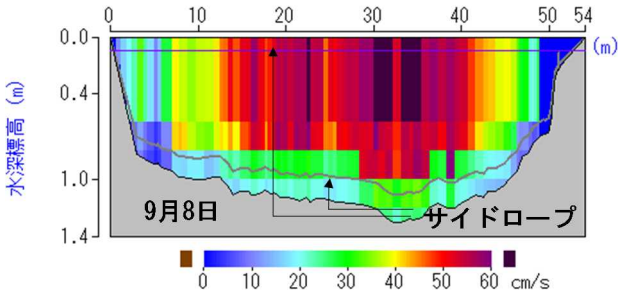


図-14 ADCP観測結果（千歳川裏の沢）

橋では左岸に流心が寄っており、図-14の裏の沢では河床形状はおわん型で中央部の流れが速くなっている。

(2) 超音波不感帯の流量補完

図-12～図-14の上層と下層に灰黒線が入っているところがサイドロープという超音波の干渉域で、ここは測定できない。また、左右岸についても水際までADCPがたどり着かない場合は、不感帯となるため、河岸形状を三角形や四角形等で表し直近の流速値で補完する。ADCPの流量は超音波による実測と、不感帯の数値補完を行って流量を算出している。補完方法は水文観測業務規程細則（平成29年3月）をもとに、表層は直下1層目0.2mの流速を使用するConstant法、下層は対数則法を用いた。図-15～図-17に実測流量と補完流量の積み上げ図を示す。3箇所の全体をみると、上層補完は全体の1～25%となり、下層補完は1～15%、左右岸は1%以下であった。

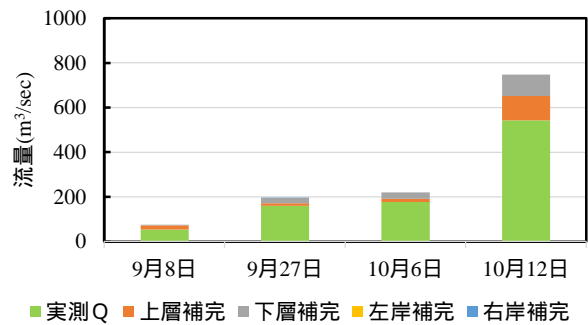


図-15 ADCP流量（石狩川石狩大橋）

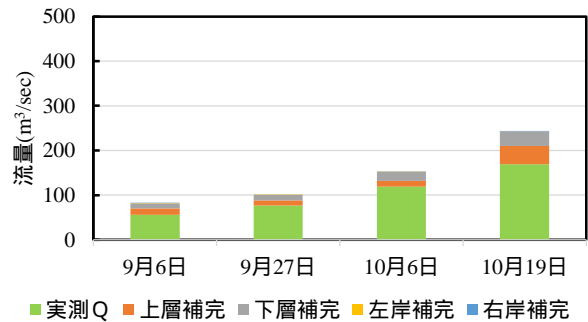


図-16 ADCP流量（石狩川岩見沢大橋基準）

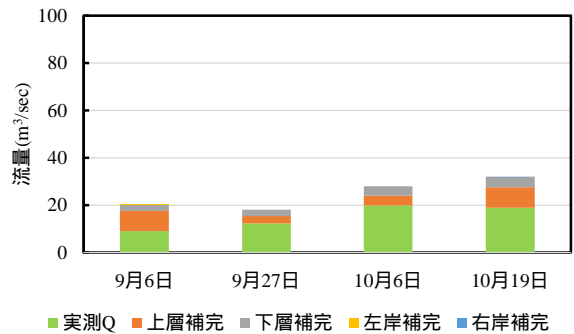


図-17 ADCP流量（千歳川裏の沢）

(3) ラジコン式ADCPの測線直線化

ラジコン式ADCPは人による曳航作業なので、横断軌跡がジグザグになる傾向がある。しかしながらRTK-GNSSで曳航軌跡が取得できるため、図-18のように測線に合わせて横断測線の直線化が可能である。既往の横断測線に測線直交流速を投影することが可能なため、ラジコン操作での横断ラインのばらつきは許容できる。

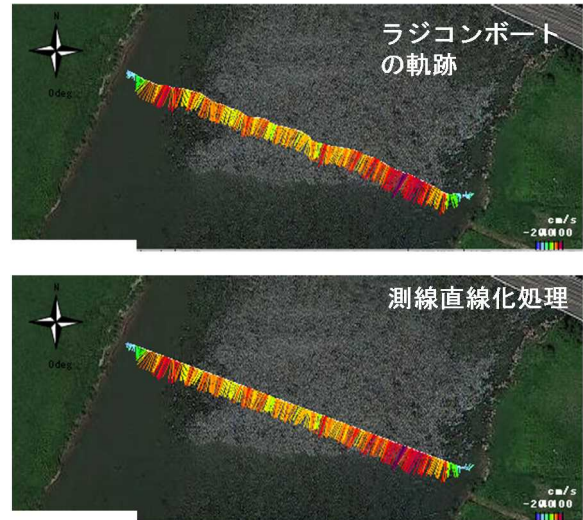


図-18 ラジコン式ADCPの測線直線化

(4) 作業性の評価

ラジコン式ADCPは重量が約30kgであるため、2名でライトバンからの積み下ろしや河岸までの運搬が可能であった。河岸に高低差がある場合は、スライダー等を準備する必要があるが、現行法の船観測に比べると人手は半分以下となった。また、計測はすべて陸上で完了するため、水上作業の危険性は無い。ラジコン操作はおおよそ1m/secで横断方向に移動させたが、流速が1.5m/sec程度では、船先を上流側に向けながら移動するように操作した。現在のスラストの出力性能では2m/secを超えると対応できないため、低水でも流心部の流速に留意して観測計画を立てる必要がある。ラジコンの通信距離は300m以上でも十分通信が確認できた。しかし、河岸からの目視では、100m以上になると対岸とラジコン式ADCPの距離が把握しにくいいため、見通しが良ければ橋上等で操作を行う方が良いと考えられる。

(5) 観測時間の評価

ラジコン式ADCPと現行法で比較した観測時間を表-2に示す。石狩大橋では現行法で180分(3時間)かかる観測が10分以内になり、岩見沢大橋、裏の沢でも120分(2時間)以上かかる観測が3分以内で完遂できている。準備時間を含めても前後10分程度であり、圧倒的な時間短縮となった。

表-2 観測時間の比較

石狩大橋	水位 (m)	現行法流量 (分)	ADCP流量 (分)
9月8日	0.14	180	10
9月27日	0.04	190	10
10月6日	0.45	180	9
10月12日	0.59	190	9

岩見沢大橋	水位 (m)	現行法流量 (分)	ADCP流量 (分)
9月6日	0.78	130	3
9月27日	1.00	130	3
10月6日	1.25	130	3
10月19日	1.52	130	3

裏の沢	水位 (m)	現行法流量 (分)	ADCP流量 (分)
9月8日	0.75	130	1
9月27日	0.64	100	2
10月6日	0.91	130	2
10月12日	1.30	130	2

(6) 流量の不確実性

観測日と水位、ADCP流量、現行法流量の結果を表-3に示す。今まで国内では、流量を始めとする計測値には、真値が存在することを前提とした測定誤差を用いることが多かった。しかし、すべての計測にはある程度の不確実性(Uncertainty)が存在することから、国際基準ISO/TC113では、測定結果に対する偏差量を定量化した不確実性を併記することが推奨されている。そこで、Heningら⁹⁾の手法を用いて、ADCPの流量に対する不確実性を算出した。不確実性は±の範囲で幅をもち、流量値にその幅を加減した値までが、計測値として認知される。表-3に示すとおり、計測した流量に対して1.6~5.5%程度の幅が含まれていることがわかった。

表-3 流量比較

石狩大橋	水位 (m)	ADCP流量 (m ³ /sec)	不確実性 (%)	現行法流量 (m ³ /sec)	流量差
9月8日	0.14	90.46 ± 4.0	± 4.4	129.37	-30%
9月27日	0.04	196.00 ± 7.5	± 3.8	197.62	-1%
10月6日	0.45	219.20 ± 6.8	± 3.1	204.57	7%
10月12日	0.59	747.61 ± 12.0	± 1.6	832.07	-10%

岩見沢大橋	水位 (m)	ADCP流量 (m ³ /sec)	不確実性 (%)	現行法流量 (m ³ /sec)	流量差
9月6日	0.78	82.63 ± 3.2	± 3.8	96.31	-14%
9月27日	1.00	102.09 ± 5.0	± 4.8	119.31	-14%
10月6日	1.25	152.05 ± 4.2	± 2.7	183.33	-17%
10月19日	1.52	243.09 ± 4.2	± 1.7	286.23	-15%

裏の沢	水位 (m)	ADCP流量 (m ³ /sec)	不確実性 (%)	現行法流量 (m ³ /sec)	流量差
9月8日	0.75	20.49 ± 1.2	± 5.5	26.16	-22%
9月27日	0.64	18.12 ± 0.8	± 4.4	21.60	-16%
10月6日	0.91	27.94 ± 1.1	± 3.9	30.97	-10%
10月12日	1.30	31.99 ± 1.1	± 3.3	32.80	-2%

(7) 観測精度の評価

ADCP流量と現行法流量との整合性を評価するために、まず流量値のみで比較すると、表-3に示すように石狩大

橋では-30～7%、岩見沢大橋では-17～-14%、裏の沢では-22～-2%の差がみられ、ADCPはほぼすべてで、現行法よりも小さい流量が算出された。本来であれば、ADCP、現行法ともに不確実性の幅を明記して評価しなければならないが、回転式流速計を用いた現行法については、流量の不確実性が定量化できないため、現行法は流量値のみで評価した。理由として、ADCPはビームの較差やボートの揺動などがすべて記録されるため、不確実性を算出できるが、回転式流速計は、流速値のみが出力され、流向や流速計の揺動までは把握できないためである。次に、不確実性を考慮して比較した結果を表-4に示す。これはADCP流量に不確実性のプラス成分のみを加算した流量で、現行法と比較したものである。ここでは、石狩大橋で-27%～10%、岩見沢大橋で-15～-10%、裏の沢で-17%～1%の差となり、表-3より流量差は小さくなったが、ADCP流量が小さくなる傾向はみられた。9月8日の石狩大橋は、-27%と大きな差になったが、この時の水理現象は塩水遡上による2層構造になっており、現行法の2点法では流量の代表性を把握するのが難しいと推察される。よって、ここでは詳細なデータを取得できるADCP流量が優位と考えられる。

6. 考察

(1) ADCP と現行法との差について

ADCP 流量値が現行法と比較して小さくなる傾向がみられたが、その要因のひとつとして現行法観測の計測特性に着目する必要がある。今回、石狩川石狩大橋と岩見沢大橋は橋上、千歳川裏の沢は船である。これらはいずれも回転式流速計をワイヤーロープで水中に沈めて測定しているため、流速計の向きは固定ではなく、フリーである。よって、主流方向に回転が向きやすく、必ずしも測定断面に直交した流速成分を計測していない場合がある。これに対し、ADCPは流向流速を測定するため、横断測線に直交した流速成分で流量を算出する。実河川では図-18のベクトル図のように流向にばらつきがみられていることから、観測方向の違いによる流量差が発生している可能性がある。ADCPは絶対流速（スカラー値）も取得できるため、今後はさらにデータ解析を進めて行くことで要因を分析する必要がある。

7. まとめ

- 観測時間では、現行法で120～180分かかかる観測がラジコン式ADCPでは10分以内に短縮できた。準備時間を含めても前後10分程度と大幅な時間短縮となった。
- 安全性では、ラジコン式ADCPは、河岸に運ぶだけで、操作はすべて陸上で完結するため、水上作業が無くなり、作業の安全性は向上した。

表-4 不確実性を考慮した流量比較

石狩大橋	水位 (m)	ADCP流量 (m ³ /sec)	現行法流量 (m ³ /sec)	流量差
9月8日	0.14	94.46	129.37	-27%
9月27日	0.04	203.50	197.62	3%
10月6日	0.45	226.00	204.57	10%
10月12日	0.59	759.61	832.07	-9%

岩見沢大橋	水位 (m)	ADCP流量 (m ³ /sec)	現行法流量 (m ³ /sec)	流量差
9月6日	0.78	85.83	96.31	-11%
9月27日	1.00	107.09	119.31	-10%
10月6日	1.25	156.25	183.33	-15%
10月19日	1.52	247.29	286.23	-14%

裏の沢	水位 (m)	ADCP流量 (m ³ /sec)	現行法流量 (m ³ /sec)	流量差
9月8日	0.75	21.69	26.16	-17%
9月27日	0.64	18.92	21.60	-12%
10月6日	0.91	29.04	30.97	-6%
10月12日	1.30	33.09	32.80	1%

- 省力性では、ラジコン式ADCPは重量30kgと軽量でライトバンに入るサイズであること、ADCP操作がクラウドで可能なことから、現場は最低2名の作業で観測が可能であった。現行法は最低でも4～5名以上必要なことを考慮すると省力化に寄与することがわかった。
- ADCP流量は現行法流量に比べて小さくなる傾向がみられた。今後、ADCPの不確実性の範囲や現行法の計測特性を踏まえて精度検証を進める必要がある。
- ラジコン式ADCPによる低水流量観測は、現場の時間短縮、安全性向上、省力化に貢献できるため、現場の生産性向上に寄与することが期待できる。また、連続観測によりH-Q式の精度向上にも寄与すると考えられる。今後、様々な観測所で検証を行い、研究成果を今後の低水流量観測に活かすことが望ましい。

参考文献

- 手計太一：河川水文観測の発展，水文・水資源学会，Vol.31，No.6，pp.568-570，2018．
- 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準（調査編），平成26年4月改訂，2018．
- 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，485-490，2001．
- 大田見定・天野直哉・館ヶ沢恵：感潮区域における流量観測手法について 石狩大橋地点でのリアルタイム流量観測 - ，国土技術研究会，自由課題（イノベーション部門），2010．
- 国立研究開発法人土木研究所水工研究グループ水文チーム：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編）Ver1.2,2016．
- Hening, H.: Estimating uncertainty of streamflow measurements with moving-boat acoustic doppler current profilers, Hydrological Sciences Journal, vol.63, pp.353-368, 2018.