

電波流速計による高水流量観測の高度化 —次世代型流量観測の導入に向けて—

札幌開発建設部 河川計画課

○佐藤 裕介
川岸 智樹
北谷 沙紀子

電波流速計は、橋上等から河川に向けてマイクロ波を照射することで、非接触で河川表面の流速を得られる観測機器である。本研究では、持ち運び可能な可搬式電波流速計と予め橋に設置した固定式電波流速水位計を用いて実河川で試験観測を行い、現行観測手法（浮子測法）との比較による観測手法の高度化による有用性、観測流量の検証、観測の無人化について検討した。

キーワード：電波流速計、高水、無人化

1. はじめに

近年、気候変動等の影響によりこれまでにない局所的な豪雨などによる水害被害が全国的に多発する中で、河川における洪水時の確実な流量観測の必要性・重要性はさらに増している。我が国の洪水時の流量観測は昭和20年代後半から30年代にかけて確立した流量観測手法（浮子測法）が用いられているが、近年、浮子測法に代わる新しい観測機器が利用可能となってきており、洪水時における流量観測の効率化や精度向上を目的に、新たな観測手法の試行がされてきている。しかし、高度な流量観測機器が開発される一方で、新たな流量観測機器を使用した統一的な計測方法や、統一的な流量算出方法が定まっていないこと等から、現時点では現行の流量観測手法からの移行とまではなっていない状況である。

流量観測で得た流量は、河川計画の基本となるものであり、現行の流量観測手法から新たな流量観測手法へ移行するにあたり、最も重要な点として、現行の流量観測手法で得た流量データと、新たな流量観測手法により算出した流量データとで、データの連続性が確保されなくてはならない。

本研究では洪水時の流量観測において、浮子測法とともに電波流速計を用いた計測を実施し、新たな流量観測手法への移行に向けた観測データの検証及び観測の無人化について検討した。

2. 電波流速計の原理

電波流速計の測定原理は、図-1のように、球速を測るスピードガンと同じように、橋上等から河川水面に電波を放射し、水面上の波からの反射を受けて、ドップラー周波数により表面流速を測定するものであり、山口ら¹⁾

(1994) は、2カ年にわたる融雪期の信濃川水系魚野川での現地観測結果から、電波流速計による流量観測の有効性を示している。その後、萬矢ら²⁾ は電波流速計を用いた高水流量観測の自動観測システムを構築するために、欠測値や異常値の補正・補完の理論モデルを構築し、実河川での有効性を検証している。

一方で、電波流速計で測定した流速については、流量観測の高度化マニュアル³⁾にて課題として示されていたように、降雨時の観測では、極端に遅い流速を検出するといったことが懸念されていたが、近年開発された電波流速計ではこの問題が解消されている。しかしながら、流速が小さく水面に波が立たない場合では、電波の反射が帰ってこないため測定不能になり、一般的に0.5m/sec以下では観測が難しいといわれている³⁾。

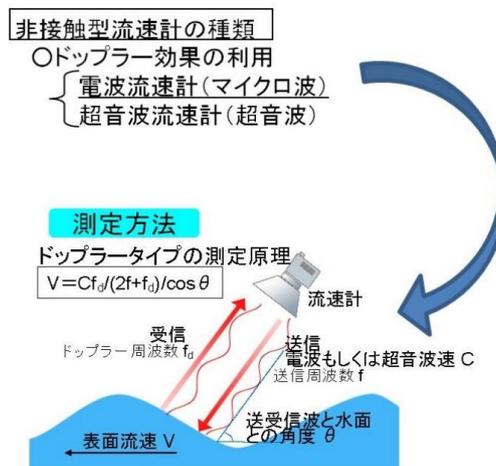


図-1 電波式流速計の測定原理⁴⁾

3. 可搬式電波流速計による現地観測

可搬式電波流速計は、図-2にあるように小型センサー内にロガーが一体となっており、水面に傾けてスイッチを押すことで流速の測定を開始できる。大きさは160mm（幅）×140mm（高さ）×302mm（奥行）、重さは2.4kg（電池込み）で持ち運びに適しており、本体を三脚等に取り付け、橋上から測定測線に向かって電波を照射するだけで流速を取得することができる。

令和4年度の流量観測の試行では、石狩川下流本川の5地点（納内、橋本町、奈井江、月形、岩見沢大橋）で、令和4年6月29日の出水時に、浮子による観測と同時に、可搬式電波流速計で観測を実施した。なお、可搬式電波流速計による観測は、橋上の浮子投下測線と同じ位置とし、1測線毎に30秒以上の測定を行い平均とした。以下に、浮子による観測と電波流速計の観測時の比較を行い、その有用性及び現行観測との整合性について示す。

a) 観測人員の省力化

浮子による観測では、図-3のように橋上に2名（浮子投下員、交通誘導員）、第1・第2見通しに3名（見通員、記録員）の合計5名が必要である。これに対し、可搬式電波流速計は、図-4のように、橋上から機器を操作して観測を行うため、機器の操作1名、橋上の安全管理としての補助員1名の合計2名体制で観測が可能である。

b) 観測時の安全の確保

浮子による観測では、図-3のように第1見通しと第2見通しに観測員が張り付く必要があることから、水位によっては水際付近で見通す場合があり、高水出水時や夜間観測時には十分な注意が必要である。これに対し、可搬式電波流速計では、観測員は橋上のみであり、歩道上からの観測であれば夜間でも安全が確保できる。

c) 観測時間の短縮

表-1にて、石狩川本川で浮子による観測と可搬式電波流速計の観測にて、実際にかかった観測時間を示す。

石狩川本川では、浮子による観測では1回の観測に40～60分かかっているのに対し、可搬式電波流速計は、1測線につき30秒以上の連続観測を行ったにもかかわらず、総計4～7分と、浮子による観測に比べて大幅な時間短縮が可能であった。

d) 観測資材の運搬

浮子による観測では、水深に応じて表面から4mまでを使い分ける必要があるため、図-5のように浮子を積み込んで運搬する大型の車両が必要である。これに対し、図-5にあるように可搬式電波流速計は30cm程度の小型筐体のため、乗用のコンパクトカーでも運搬可能で、現行法に比べて手軽に観測準備ができるメリットがある。



図-2 可搬式電波流速計



図-3 浮子観測による測定



図-4 可搬式電波流速計による測定

表-1 観測時間の比較

単位：分

観測所	浮子	電波
納内	40	6
橋本町	50	4
奈井江	60	5
月形	60	7
岩見沢大橋	60	6



図-5 浮子と可搬式電波流速計の資材の比較

e) 浮子測法による算出流量との整合性

浮子は表-2のように水深によって表面、0.5m、1m、2m、4mの浮子を使い分け、断面平均流速にするための流速補正係数（更生係数）が定められている。よって、6月29日の出水による観測データは、浮子観測では表-2の更生係数を乗じて流速を算出し、可搬式電波流速計は表面流速のため、表面浮子の更生係数を乗じて流速を算出した。

留意事項として、図-6のように可搬式電波流速計は橋上の浮子投下位置で測定しているが、橋から俯角40°程度での測定のため、橋下15~20m程度の測線を照射している。一方で、浮子による観測は第一見通しと第二見通しの通過時間で測定するため、図-6のように、電波流速計の測定断面と浮子の第一・第二見通し断面は縦断的に離れている。

ここでは、測定している流速は縦断的に一定と仮定して比較するが、全く同じ地点での流速比較ではないということに注意する必要がある。

流速比較を行った結果、図-7にあるとおり河岸付近を除くと概ね±10%差に入る結果が得られた。河岸付近は、植生や河岸地形によって流れが乱れやすいため、浮子測法と電波流速計に差が見られていると推察できる。また、電波流速計は前述したとおり、水面凹凸が少ない場合に流速が取得できない場合がある。石狩川本川でのデータ取得率は、図-8のとおり、中流の納内、橋本町、奈井江では概ね95%以上であったが、下流の月形、岩見沢大橋では60~80%となり取得率が低下した。これは下流ほど水面凹凸が少なくなるため、観測地点の特性によってデータの取得率にばらつきがみられることが示されている。

流量比較について、現行法の流量算出方法と同様にし、流速のみを可搬式電波流速計にて得られた表面流速に置き換えて流量を算出した結果、図-9にあるとおり、図-7の流速比較結果と同様の傾向を示した。これにより、現行法の浮子観測から、可搬式電波流速計による高水流量観測の高度化への移行にあたり、流量の算出方法を現行法の算出手法と同じくし、河岸付近に見られる流速について現行法との差異を除外する方法を確立することができれば、新たな流量観測手法への移行に向けて、流量データの連続性を保つことができると評価できる。

表-2 浮子による水深、吃水と更生係数

浮子番号	1	2	3	4	5
水深(m)	0.7以下	0.7~1.3	1.3~2.6	2.6~5.2	5.2以上
吃水(m)	表面浮子	0.5	1.0	2.0	4.0
更生係数	0.85	0.88	0.91	0.94	0.96



図-6 測定断面（石狩川奈井江）

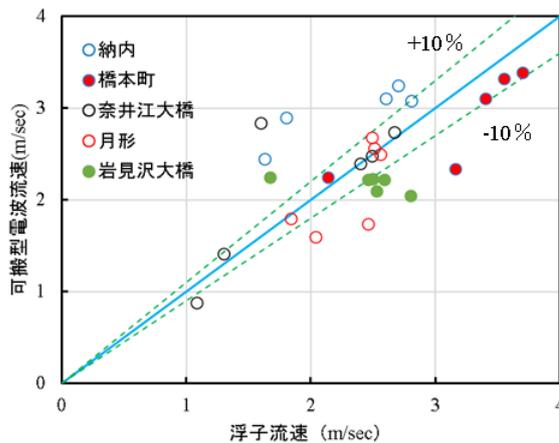


図-7 流速分布比較

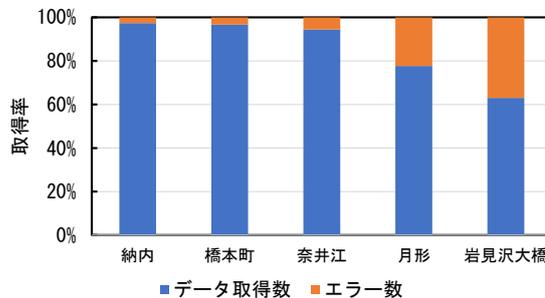


図-8 電波流速計データ取得率

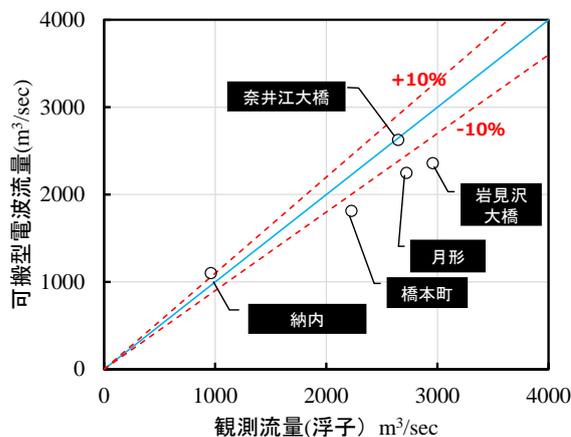


図-9 流量比較

4. 固定式電波流速水位計の現地観測

豊平川藻岩水位流量観測所において、令和4年3月から図-10に示す固定式電波流速水位計を設置し、連続的な水位と流速の測定を行っている。

1) 構造

当観測所では、図-11のように、橋上歩道の高欄に固定式電波流速水位計を単管組で設置し、FEP管で高欄に沿わせて観測局舎まで引込み、局舎から電源の供給を行っている。電波流速水位計はマイクロ波を斜めに照射して、水面からの反射波のドップラー効果で流速と水位を同時計測できる。マイクロ波の照射距離は30mで、高架橋にも対応可能である。設置俯角は20度程度まで、偏角は45度程度まで計測可能であるが、俯角40度、偏角0度に近い方が計測精度が高いとされている。また、電波を扱う上での、無線局免許や無線従事者の取得は不要で、データは観測局舎内に専用モジュールを置き、オンラインで観測値のリアルタイムの確認が可能である。

2) 水位観測について

豊平川藻岩水位流量観測所では、図-12のように、基準水位観測所の水位計、水位標が橋上流にあり、そのポイントに電波を照射して観測を行った。

3) 計測結果のリアルタイム表示

固定式電波流速水位計は、1分インターバルで水位と流速及び反射強度や振動などが記録される。計測結果は図-13のように、リアルタイムでWebサイト閲覧が可能なシステムとなっている。

4) 水位の検証

図-14にて、基準水位（既設水位計水位）と固定式電波流速水位計で得られた水位の比較検証を行った。これは令和4年4月から9月の流量観測時の水位を抽出したもので、基準水位との水位差は0~0.07m、平均は0.01mであった。高水出水時（8月16日3回）についても水位差は0.02~0.05mで、適用可能と評価できる。



図-10 固定式電波流速水位計の設置位置



図-11 固定式電波流速水位計



図-12 固定式電波流速水位計の計測点

Contents		■ 日表						
オーバービュー	局番指定:	03: 南22条大橋						
最新情報	日付指定:	2022年	08月	16日	表示			
トレンドグラフ	前日	翌日	ダウンロード					
ローグ情報	日表	流速	水位	流速瞬間値	水位瞬間値	反射強度	振動レベル	
カメラ画像	日グラフ	m/s	m	m/s	m	dB	m/s ²	
システム履歴	Fisログ情報	00:01	1.88	37.19	1.929	37.230	41.148	0.613
トップページ	Fisログ情報	00:02	1.91	37.17	1.891	37.151	41.827	0.958
	トップページ	00:03	1.95	37.16	1.918	37.108	43.008	0.881
		00:04	1.95	37.16	1.914	37.158	44.397	1.034
		00:05	1.93	37.16	1.856	37.174	43.123	1.073
		00:06	1.94	37.16	1.957	37.146	43.384	0.881
		00:07	1.95	37.18	2.145	37.133	42.235	0.766
		00:08	1.92	37.18	1.996	37.144	43.004	0.996
		00:09	1.91	37.18	1.593	37.278	43.549	0.958
		00:10	1.92	37.20	1.826	37.095	43.616	0.996
		00:11	1.91	37.18	2.081	37.077	43.174	0.996

図-13 計測結果のリアルタイム表示 (WEB)

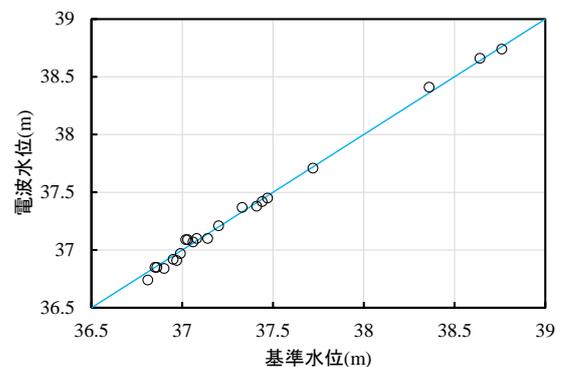


図-14 固定式電波流速水位計と基準水位の整合性

5) 流量算出結果

令和4年4月から9月までの低水流量観測及び高水流量観測について、固定式電波流速水位計1点の表面流速をDIEX法で横断面メッシュ状に内外挿した流速分布を図-15に示す。

DIEX法 (Dynamic Interpolation and Extrapolation method) とは、二瓶ら⁵⁾によって開発された、測定値を運動方程式によって内外挿を行い、点のデータから面のデータに展開する手法である。

河川砂防技術基準調査編に「各点の流速計測値に代表させる区分断面ごとの区分流量を単純にそのまま足し合わせるのではなく、それらの計測値群が満足すべき水理学的条件を同時に考慮して流量を算出する方法」として記述されており、DIEX法はこれに相当する。

DIEX法は実測値から式(1)に示す簡略化した3次元運動方程式を用いる。ここで、省略された項を補うために付加項 F_a を導入している。

$$Fa + gl + A_H \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \left(\frac{C_f}{h} + \frac{aC_D}{2} \right) u^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 y は横断方向、 u は主流方向水深平均流速、 A_H は水深平均された水平渦動粘性係数、 h は水深、 C_f は底面摩擦係数 ($=gn^2/h^3$ 、 n :マンニングの粗度係数)、 l は水面勾配、 g は重力加速度、 a は植生密度パラメータ、 C_D は植生の抵抗係数である。また、付加項 F_a の内外挿については、観測値が1点のみであるため、横断方向に一樣とした⁶⁾。

DIEX法によって得られた固定式電波流速水位計による流量と、浮子による観測流量との整合性を図-16に示す。固定式電波流速水位計による流量について、DIEX法で算出した流量のほか、従来の区分求積法で算出した流量を併せて示す。流量規模が小さい低水流量については、区分求積法は概ね合致するが、DIEX法では過小となった。一方で、高水流量については、区分求積法では過大となったが、DIEX法は合致する傾向がみられた。流量を算出する上で、1測線の点流速を断面全体の平均流速とするのは難しく、河川砂防技術基準調査編などでは、表-3、表-4のように、観測時の測線数は水面幅によって決められているが、本研究結果より、DIEX法を活用することで高水に対しては1測線でも浮子測法と整合する流量が算出可能であり、固定式電波流速水位計による洪水時の流量観測 (無人化) について、適用が可能であると評価できる。ただし、当観測所は水面凹凸も明瞭で、電波流速水位計によるデータ取得が比較的容易な地点であるため、すべての観測所で適用できるとは限らない。測線配置については、臼田ら⁷⁾の研究で、現行の浮子測法による高水流量観測の測線数簡略化を検討し、河床形状がお椀型、複断面型では3測線で観測流量と整合する可能性を示している。今後、こうした研究と連携して、適用を検討していく必要がある。

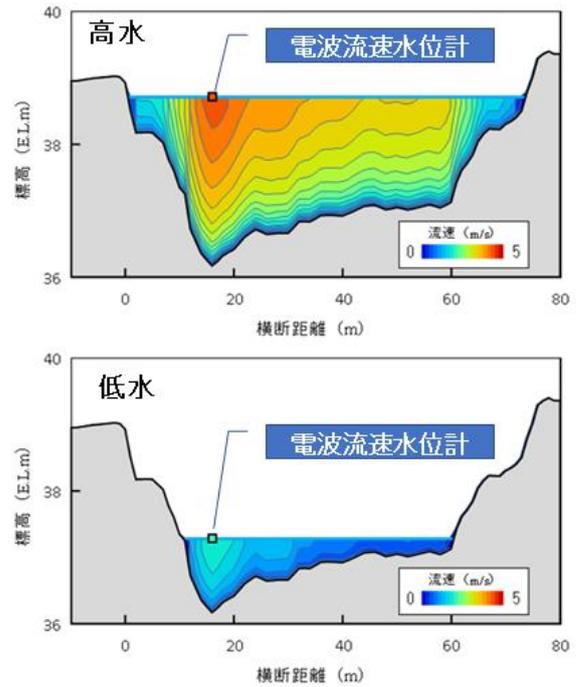


図-15 DIEX法による流速値内外挿

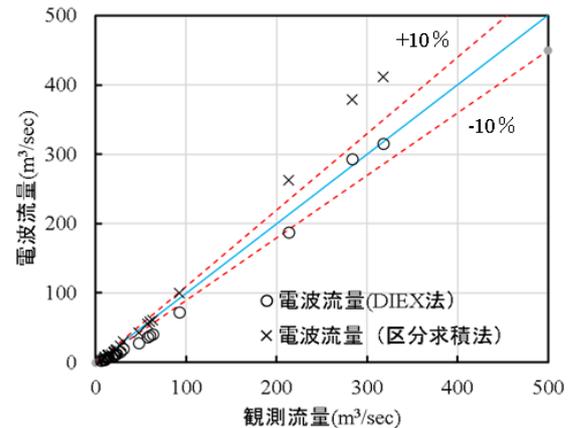


図-16 電波流量と観測流量 (現行法) の整合性

表-3 水面幅に対応した浮子流速測線数の目標数 (標準法)

水面幅	20m未満	20~100m未満	100~200m未満	200m以上
浮子流速測線数	5	10	15	20

表-4 水面幅に対応した浮子流速測線数の関係 (緊急法)

水面幅	50m未満	50~100m未満	100~200m未満	200~400m未満	400~700m未満	700m以上
浮子流速測線数	3	4	5	6	7	8

6) 高水時連続観測の有効性について

令和4年4月から11月の中で、図-17に示す最も大きい出水である令和4年8月16日1時～24時を対象に、電波流速水位計を用いて連続水位及び連続流量を算出した。

図-18に水位と流量ハイドロを示す。固定式電波流速水位計の流量はDIEX法を用いて算出した。

この時、浮子による観測は14時と16時の2回実施しているが、固定式電波流速水位計の流量との流量差が14時で3.9%、16時で0.6%と高い整合性を示した。

固定式電波流速水位計では、時系列の水位、流速が連続的に取得できるため、図-19のような水位 H と流量 \sqrt{Q} から、高水出水の傾向をみる事ができる。 H - \sqrt{Q} が、逆ループを描く場合は水位上昇期と水位下降期の水面勾配の変化とされ、順ループを描く場合は、河床変動などで河積が変化していることが予測される。ここでは水位上昇期と水位下降期が概ね同じライン上で推移することから、水面勾配の変化や大規模な河床変動はなかったと推察できる。このように、固定式電波流速水位計で連続したデータを取得することで出水特性を同時に把握することが可能である。また、橋上から固定式電波流速水位計で計測することにより、非接触で水位と流速を同時に測定できることから、大規模出水などによるデジタル式や水晶式の水圧計が流出するといったリスクもなくなる。

5. まとめ

(1) まとめ

- 可搬式電波流速計は、流心付近は流速差 $\pm 10\%$ 程度に収まり、流量も同様に $\pm 10\%$ 程度となった。河岸付近に見られる流速について、現行法との差異を除外する方法を確立することができれば、浮子測法にかわる高水の流量観測手法として適用可能であると評価した。
- 固定式電波流速水位計では、流心1箇所の表面流速から、DIEX法を用いて流量を算出した。低水は観測流量に比べて小さくなるが、高水は合致する傾向がみられた。これにより、固定式電波流速水位計による洪水時の流量観測（無人化）について、適用可能である評価した。

(2) 今後の課題

- 電波流速計は、水面凹凸の少ないところでは、電波流速計によるデータの取得率が下がるため、適用できる観測所及び水位範囲をあらかじめ把握しておく必要がある。
- 電波流速計が取得するのは表面流速であるため、強風が吹いた場合の影響を調査する必要がある。
- 固定式電波流速水位計は適切な測線に設置することで機能するため、観測所毎に適用可能な測線をあらかじめ検討しておく必要がある。

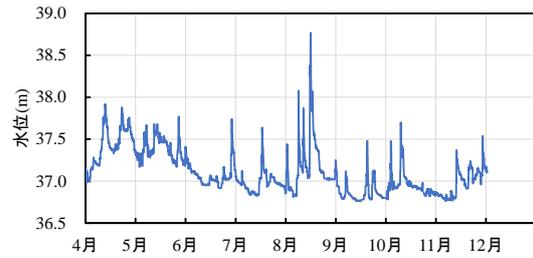


図-17 豊平川藻岩の水位（令和4年4月～11月）

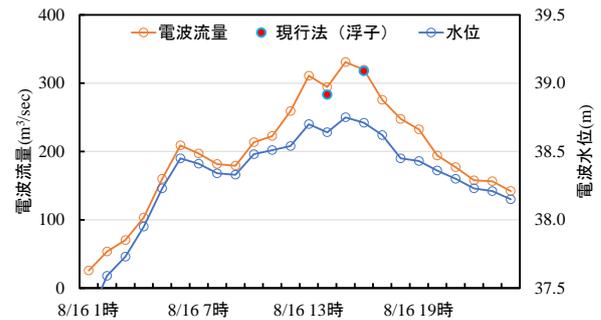


図-18 高水出水時の水位・流量ハイドロ

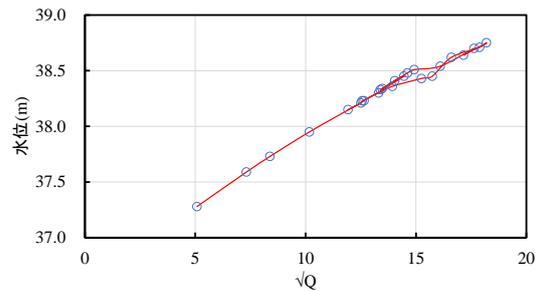


図-19 H - \sqrt{Q} 図

参考文献

- 山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28，pp.41-50，1994.
- 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦：非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，河川技術論文集，第16巻，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.
- 国立研究開発法人土木研究所：非接触型流速計，技術情報，重点普及技術（河川），
<https://www.pwni.go.jp/jpn/results/tec-info/index.html>
- 二瓶泰雄・木水啓：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案，土木学会論文集，No.803/II 73，pp.155-160，2005.
- 岩本演崇，二瓶泰雄：H-ADCP 計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング，水工学論文集，Vol.53，pp.1009-1014，2009.
- 白田峻曹・高橋賢司：高水流量観測の省力化に向けた測線設定について～次世代型流量観測の導入に向けた検討～，北海道開発技術研究発表会論文，2021.