

重.20 河床変動の影響を考慮した設置型流速計による洪水流量観測手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 28

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：深見和彦、萬矢敦啓、本永良樹

【要旨】

日本の河川での高水流量観測において、流速測定の新技術（ADCP や非接触型電波式流速計）を用いることで安定的に高精度を確保できる流量観測システムの開発に取り組んでいる。同システムに関して、河床変動と流速補正係数の関係を調べた。表面流速に対する係数として一般的な 0.85 で大きな問題はないが、河床変動状況によっては係数が急に大きくなることがわかった。また電波式流速計により測定された代表流速（河川表面流速）に及ぼす風の影響を把握し、その除去方法を例示した。一方、高水流量観測の精度を確保するためには、流速分布だけでなく断面形状を的確に測定することも重要であることから、音響測深機を用いた河床変動モニタリングシステムを開発した。また、従来法としての浮子測法と ADCP、電波式流速計の流速観測データを比較し、新技術は従来法から観測精度について継続性があることを示した。

キーワード：流量観測システム、浮子測法、ADCP、河床変動モニタリングシステム

1. はじめに

我が国の河川は洪水時には流速が早く、また上流から大量の浮遊物が流れてくることが多い。このため洪水時の流量観測においては、安全性、確実性の面から浮子測法が用いられてきた。浮子測法は昭和 30 年代から 50 年以上にわたって用いられており、技術の向上と水文データの蓄積がなされてきた。一方で近年 ADCP などの新技術が開発されるとともに、ADCP については周辺機器、リバーボートなどの開発も進み^{1) 2) 3)}、これらの新技術を用いた流量観測手法が実用に資するレベルに達してきている。また河川流量の計測方法として、電波式流速計⁴⁾、H-ADCP^{5) 6)}、画像解析^{7) 8) 9)}等を用いた計測技術が提案され、実用に向けた開発・研究が進められてきた。これらは無人で連続して代表流速（電波式流速計であれば河川表面流速等）を測定することができる技術であり、それぞれ他の計測機器との流速についての比較観測が実施される中で、これらが実用に資する技術であることが認知されてきている^{3) 8) 9)}。本研究グループは、これらの新技術を用いて、安定的に高精度を確保できる流量観測システムの開発・普及に取り組んできた。

これら成果を踏まえ、今後の流量観測技術を実際に高度化させるための手法を考えるにあたり、以下にあげる項目について議論を進める。それらは、a) 流量観測技術の高度化を図るための手法、b) 従来手法と新技術との比

較である。

2. 流量観測技術の高度化手法（案）

2.1 概説

これまでに開発・検証を行ってきた新しい技術を有効に活用することで、現地河川における流量観測技術を現実に高度化する一助とするために、土木研究所 ICHARM 旧水文チームは、高度化手法マニュアル（案）を作成した。このマニュアルでは、流量観測高度化の手順について以下のように想定した。

- 1) 従来の流量観測手法と比較して、より安定的に高精度を確保できる手法を活用すると言う意味で「高度化」とする。
- 2) 具体的には、洪水中の河床変動、河川の横断及び鉛直方向流速分布をよりの確に把握し、それを用いて流量値を算出することである。
- 3) 2)を得るため、橋上操作艇に搭載した ADCP 観測を採用する。
- 4) ADCP 観測を採用するに当たり、それぞれの観測地点に対して優先順位の検討が必要である。その順位は河川計画上の重要度による。例えば基準地点、ダム計画の存在、その他の理由が挙げられる。
- 5) また、ADCP 観測を採用しても、河道特性や気象条件によっては必ずしも全ての洪水を観測できない

場合もある。このような場合を想定して、固定設置型流速計による流量観測を補助的に実施し、ADCP データに欠測が生じる場合には、データを補完する。

6) ADCP 観測が実施できない場合として、

①中小規模の出水においても、山地急流河川に代表されるように流速が速く水面振動が激しい、もしくはその出水が早いことにより、ADCP 観測が実施できない場合

②大規模出水、あるいは出水のピーク付近において ADCP 観測にデータ欠損が多くなる場合（多くの河川がこの場合に該当すると想定される）

という二つの状況が考えられる。そのいずれの場合も、

- a) 流速が速く、かつ水面振動が激しくなる。
- b) 急激な水位の上昇、
- c) 流下物（流木、ゴミなど）が極端に多くなる。
- d) 観測態勢の遅れや観測機器の不具合を含んだヒューマンエラー等。

といった一つもしくは複数の要因が絡み合っ ADCP 観測を困難としている。このような場合は、固定設置型流速計によって、観測データ欠損を補うものとする。

7) 固定設置型流速計による流量観測は、固定設置型流速計、河床高計測、流速補正係数という3つの要素を持つ。

上記の前提条件を想定しながら、土木研究所を中心として、新技術を活用した高度化手法の開発が行われてきた。

ADCP を用いた流量観測手法に関しては、日本で多く見られる急流河川を含め、相当程度まで実用に資する技術となったと考えられる²⁾。

固定設置型流速計を用いた流量観測は、代表流速の計測、平均流速を算出するための流速補正係数の算定、河積を計算するための河床高の算定が必須となる。代表流速の計測に関して、電波式流速計、画像解析、H-ADCP 等の手法が実用に資する技術として紹介されている。本研究では、固定設置型流速計として最も実用化の進んでいる電波式流速計を主とし、代表流速として表面流速を測定する手法を検討してきた。一方、流速補正係数に関して、表面流速に対しては0.85が国内外で一般に使用されている¹⁰⁾。しかしながら、この数値は河床変動、河床波を伴う流れにおいて、詳細に検討されていない。さらに表面流速は風向・風速の影響をある程度受けることが知られている。これらを検証した事例について、2.2 で

その詳細を紹介する。また、河床高の算定をするための1つの手法として河床高自動計測を提案している。それを2.3で紹介する。

2.2 流速補正係数に関する考察

2.2.1 研究の内容

河床変動特性の異なる河川として、表-1に示す3つの河川を選んだ。それぞれの河川の出水時において、橋梁から ADCP を搭載した橋上操作艇による曳航観測を連続して実施し、河床高横断分布、河道断面内の流速分布について観測した。ADCP データについてはアンサンブルごとに計測データに対して対数測の近似式を当てはめ、

表-1 各河川諸元

	U川	K川	F川
観測期間	2012/4/20~22	2011/9/2~3	2010/10/30~11/1
出水状況	融雪出水	台風12号	低気圧性降雨
河床勾配	1/430	1/300	1/200
水面幅	約140m	約80m	約110m
河床変動特性	河床変動なし	大きな河床変動。変動幅約1.5m。	河床波の通過。変動幅約1.0m。

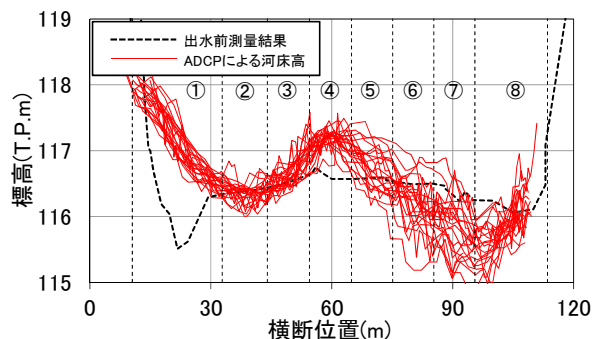


図-1 ADCP 観測により得られた河床高横断分布 (F川)
(最大で約1mの振動が見られた。)

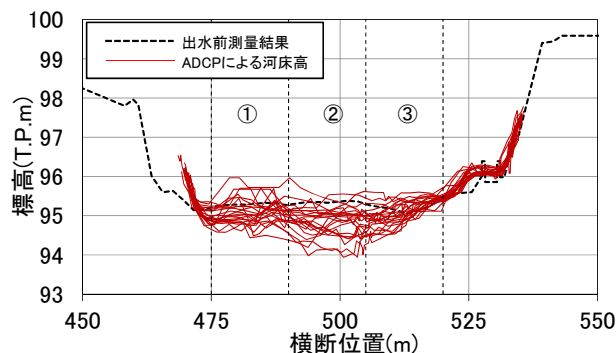


図-2 ADCP 観測により得られた河床高横断分布 (K川)
(最大で約1.5mの河床低下が見られた。)

その式を水深方向に積分平均することで表面流速に対する流速補正係数を求めた。表面流速は求めた対数近似式を水表面まで延長して算出している。各河川をそれぞれの河床変動状況に応じて複数の流積に区分けし、各流積毎にアンサンブルデータを平均した流速補正係数を求めた。また河床高についても各流積毎にアンサンブルデータの平均値を算出した。各河川において ADCP 観測地点付近に水位計を設置し、出水時の水位変動を測定した。これらのデータを基に異なる河床変動特性を有する河川における出水時の河床高変動、平均流速補正係数の変動について調べた。

2.2.2 結果と考察

図-1、図-2 はそれぞれ河床変動を伴う F 川、K 川において ADCP により得られた河床高横断分布を全て重ねた図である。F 川の河床変動については Yorozuya et al. (2011) が固定設置した音響測深機による出水時の定点河床高自動モニタリングを実施し、その結果から河床波が通過したことを示している。この時 F 川内の河床変動は横断方向に変動幅が異なっていることがわかる。F 川では最大で約 1m の河床高の振動が見られた。K 川では河床波の通過とは異なるが、短時間で河床高が大きく低下する変動が見られた。特に河川中央付近において 1.5m 程度の急激な変動が生じている。これらの結果から、F 川、K 川についてはそれぞれ図-1、図-2 に丸数字で示すような流積を設定した。U 川は融雪による出水期間中河床変動は生じてなかったため、川幅をほぼ当分割した 8 つの流積を設定した。図-3～図-6 はそれぞれ U 川、K 川、F 川における水位および選定した流積内の平均河床高、平均流速補正係数の時系列図である。U 川については流心に該当する流積を選んだ。K 川については最も河床変動の顕著な流積②を選んだ。また F 川については河床変動の小さい流積②と最も大きい流積⑦の二ヶ所を選んだ。

(1) 河床変動のない河川における流速補正係数

図-3 から U 川では融雪出水期に実施された観測期間中、顕著な河床変動はなかったことがわかる。また流速補正係数にも大きな変動は見られなかった。このことから河床変動の伴わない河川においては、流速補正係数は一定値を与えてよいと考えられる。ただし、U 川において ADCP 観測結果から導いた流速補正係数の平均値は約 0.74 であり、これは河川表面流速に対して一般的に言われている値である 0.85 より 0.1 程度小さい。このことから河床変動のない河川であっても、河川ごとに ADCP 観測を実施し、得られる鉛直方向流速分布を基に適切な流速補正係数を定めるべきであるといえる。

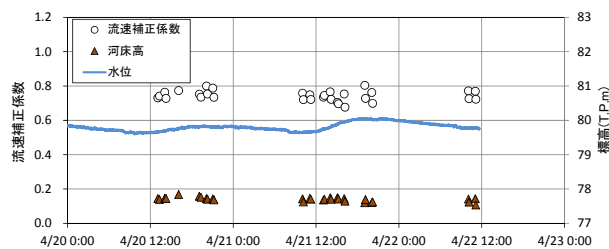


図-3 流速補正係数、河床高、水位の時系列 (U 川、区分②) (2012/4/20 ~ 4/22)

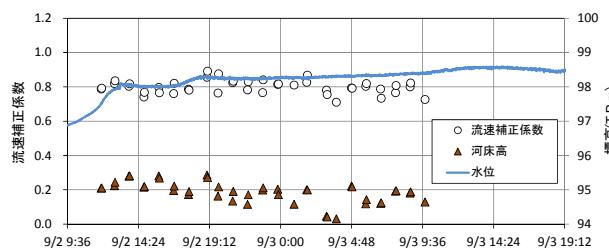


図-4 流速補正係数、河床高、水位の時系列 (K 川、区分②) (2011/9/2 ~ 9/3)

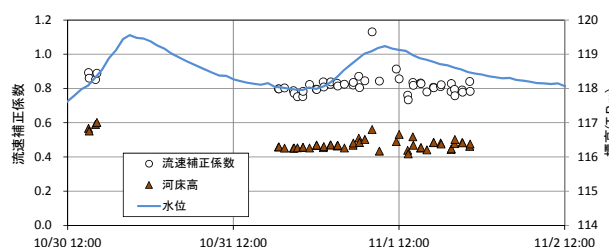


図-5 流速補正係数、河床高、水位の時系列 (F 川、区分②) (2010/10/30 ~ 11/2)

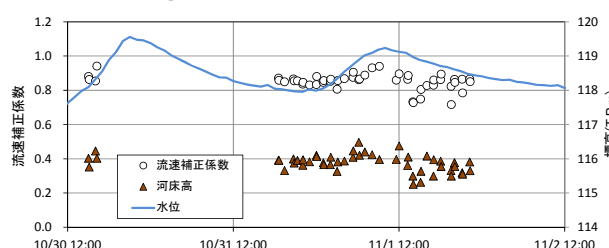


図-6 流速補正係数、河床高、水位の時系列 (F 川、区分⑦) (2010/10/30 ~ 11/2)

(2) 大きな河床変動を伴う河川における流速補正係数

図-4 から K 川では 9/3 2:00～5:00 にかけて河床が約 1.5m 低下し、その後すぐに埋め戻されるという急な変動が見られた。それ以外の時間帯においては不規則な河床変動が見られるものの、変動幅は大きくはない。流速補正係数については出水期間中変動し続けており、特に河床高が大きく低下する時間帯においては、それに合わせて係数も低下しているように見えるが、その変動幅は最大で 0.2 程度である。

(3) 河床波の通過する河川における流速補正係数

F 川では二つの出水ピークが連続して生じた。最初の

出水時には観測回数が少ないため、2番目の出水を対象とする。図-5、図-6よりF川では出水による水位の立ち上がり前には河床変動は見られない。水位が上昇を始めると最初に堆積傾向が見られ、その後、出水のピーク直前あたりから河床高が振動を開始する。これらの変動は河床波の通過を示していると考えられる。水位上昇前の河床高一定時には流速補正係数は約0.85でほぼ一定だが、河床高の堆積傾向が終了するあたりにおいて急に1.1を超える。流速補正係数の変動幅は最大で約0.4であり、これはU川での変動幅の倍程度である。このことは単発的に起きる河床変動よりも河床波の方が流れの構造に与える影響が大きいと考えられる。

(4)流速補正係数と鉛直方向流速分布形状の関係

F川では観測期間中に流速補正係数が1以上となるデータが多く見られた。そこでF川の観測結果において、アンサンブル毎に流速補正係数と鉛直方向流速分布形状の関係を調べた。その結果、流速補正係数が1以下の場合と1以上の場合で鉛直方向流速分布形状が異なることが分かった。図-7は流速補正係数が1以下のデータ例である。この場合、流速分布は河床に近いほど遅くなる一般的な流速の分布形状をしている。図-8は流速補正係数が1以上のデータ例である。流速補正係数が1以上の場合は、流速分布は河床に近い方が速い傾向を示した。流速補正係数が1以上となるアンサンブルが多くなる場合、あるいは河床付近の流速が上層に比べて極端に早くなるアンサンブルが存在する場合に、図-5に示したように流積の平均流速補正係数が1を超える。先述した通り、F川においては出水による水位上昇開始から水位ピーク直前までは河床は堆積傾向を示すが、流速補正係数が1を超えるデータはこの堆積傾向の時間帯に多く見られる。図-8の流速分布形状と併せて考えれば、これは河床波のcrestが形成されている過程を示していると考えられる。図-9にはF川の流積③内における全アンサンブル数に対する流速補正係数が1以上のアンサンブル数の比(以降、アンサンブル比と呼ぶ)の変動と平均河床高の変動の関係を示している。河床高が堆積傾向にある時間帯は、アンサンブル比も増加傾向にあるが、河床の堆積傾向が終わり、河床波が通過していると思われる時間帯になるとアンサンブル比はほとんど0を示すようになる。

2.2.3 まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 河床変動のない河川において流速補正係数に大きな変動はない。ただし、一般的に用いられる0.85とは異なる値を示す場合もあるので、河川毎にADCP観測

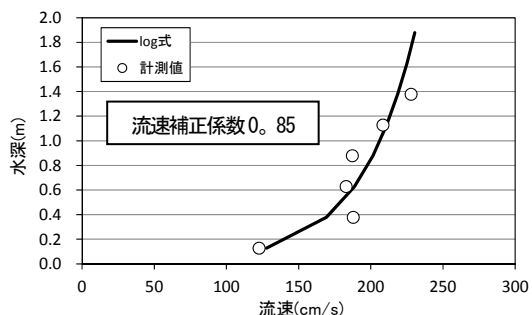


図-7 流速補正係数1以下の場合の流速分布例 (F川)

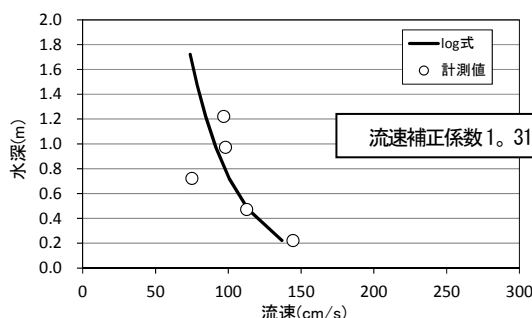


図-8 流速補正係数1以上の場合の流速分布例 (F川)

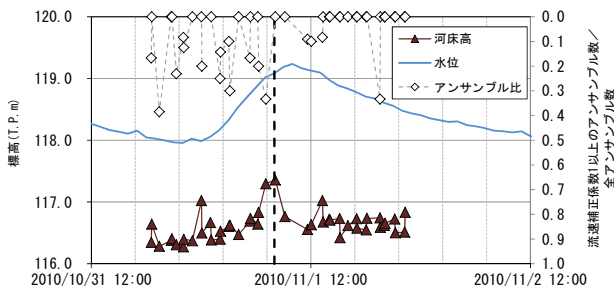


図-9 河床高変動と流速補正係数1以上のアンサンブル数の全アンサンブルに対する比の変動 (F川、流積③)

により適切な値を確認する必要がある。

- 2) 河床変動が通過する河川では流速補正係数が顕著に変動する。単発的な河床変動よりも河床波の通過する方が流速補正係数の変動幅は大きい。河床波の発生する河川では、出水による水位上昇時の河床高が堆積傾向を示す時間帯において流速補正係数は特に大きく変動し、1を超えることもある。この時の鉛直方向流速分布は河床付近の流速が上層よりも早くなるプロファイル形状を示すことから、crestの発生に伴う堆積傾向の時間帯であると考えられる。

2.3 河川表面流速の特性と風による影響の補正手法の再検証

2.3.1 研究の内容

ここでは、強風が吹く条件下において、非接触型の電波流速計を用いて代表流速として河川表面流速を計測する

場合を対象とする。先述した通り強風の影響を受けると、電波流速計で計測したデータに実際の河川表面流速とは異なる誤差が含まれることになる。また河床高変動の影響は実際の表面流速を変動させる要因である。そこで観測地点として、強風および河床変動の有無に基づいて、表-2に示す2つのフィールドを選定した。

両観測地点において、以下に示す観測を実施した。

流量測定断面上に河床形状等に応じて複数の測線を設定し、各測線上において橋上から可搬式電波流速計（横河電子機器株式会社 ポータブル電波流速計RYUKAN™）を用いて河川表面流速を測定した。俯角は40°とし、河川横断面に対して電波照射方向が垂直になるように設置した。データの出力はI地点については2秒毎、H地点については1秒毎に行った。橋上操作艇に搭載したADCPを用いて断面内流速分布と河床高分布について横断観測を実施した。

風向・風速については各観測地点に関して気象庁の最寄りの観測所における10分平均データ（観測時刻前10分間における平均値）を利用した。I地点についてはU観測所（I地点から約10km離れた位置）、H地点についてはK観測所（H地点から約3km離れた位置）のデータを利用した。

本研究においては電波流速計を用いて計測した表面流速の精度について検討するために、電波流速計データとの比較用データとして、ADCP観測結果から推定した河川表面流速を用いる。ADCPで観測した場合、水面直下にデータの欠測領域（以降、上層不感帯と呼ぶ。）が生じる。この部分では流速データを何らかの方法で外挿する。データを水表面まで外挿した値がADCPにより推定される河川表面流速（以降、推定表面流速と呼ぶ。）である。この値を河川表面流速の“真値”と仮定して、電波流速計で測定した表面流速と比較することで、電波流速計データに影響を与える要因について考察する。ADCP観測における上層不感帯のデータ外挿方法として、次の4手法が提案されている。手法1)：流速実測値について対数則の近似式を当てはめ、それより外挿する¹²⁾、手法2)：流速実測値についてベキ乗則の近似式を当てはめ、それより外挿する¹⁰⁾、手法3)：計測している表層3層のデータから直線近似式を求め、それより外挿する¹⁰⁾、手法4)：計測している表層第一層のデータを一様に外挿する¹⁰⁾、¹³⁾などである。各外挿方法の適性等について現時点で明確な基準はない。そこで本稿においては、電波流速計データとの比較・検証の段階では、上記の手法1)~4)それぞれにより推定される河川表面流速の平均値を推定表面流速とする。この方法（以降、4手法平均と呼ぶ。）は、Fujita et al. ⁹⁾により、弱風かつ河床変動が顕著でない場合には、LSPIVなどの画像処理法

表-2 観測地点緒言

観測地点名	I	H
水系/河川	T川水系/K川	S川水系/U川
観測期間	2011年9月2日~9月3日	2012年4月20日~22日
出水状況	台風12号による出水	融雪出水
河床勾配	1/300	1/430
水面幅	約80m	約140m
河床変動	有	なし
風の状況	台風12号により強風	無風または弱風

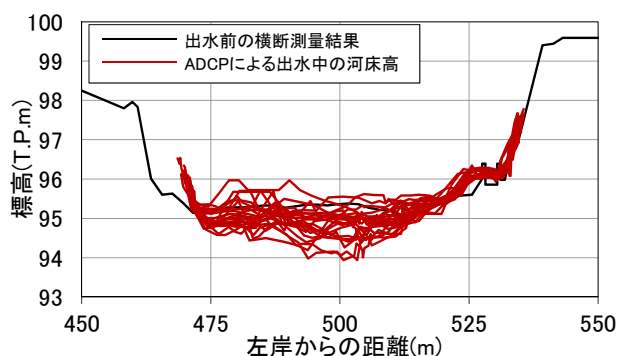


図-10 ADCP観測により得られた河床高横断分布(I地点)
(河道中央部では約1.5mの河床低下が見られた。)

により算定された表面流速と良く一致していることが示されている。上記のようにして得られた電波流速計およびADCPによる表面流速、河床高、風向・風速を基に、強風、河床変動の影響がどのように表れるかを把握するとともに、電波流速計の計測値から風による誤差要因を除去する方法について検証する。

2.3.2 結果と考察

I地点、H地点について、最寄りの気象庁観測所における風向・風速の10分平均データを用いて現場における観測期間中の風の状況を調べた。その結果、I地点においては観測期間中河川流下方向の逆流向きに6~10m/sの風が常時卓越していることが分かった。I地点~気象庁U観測所間は約10km離れているが、両観測所は同じ平野内にあり、観測期間中は台風12号により同平野内では広い範囲で強風となっていたため、U観測所における風の状況がI地点でもほぼ同じだったと推定される。実際同平野内のU観測所以外の気象庁の観測所においても観測期間中は河川流下方向の逆流向きに強風が卓越していることを気象庁アメダスデータにより確認している。H地点においては観測期間中はほぼ無風状態、あるいは1m/s程度の弱風状態であった。H地点のあるU川は山間部の幅1km未満の狭い平地を流れており、K観測所は同平地内の約3km上流側に

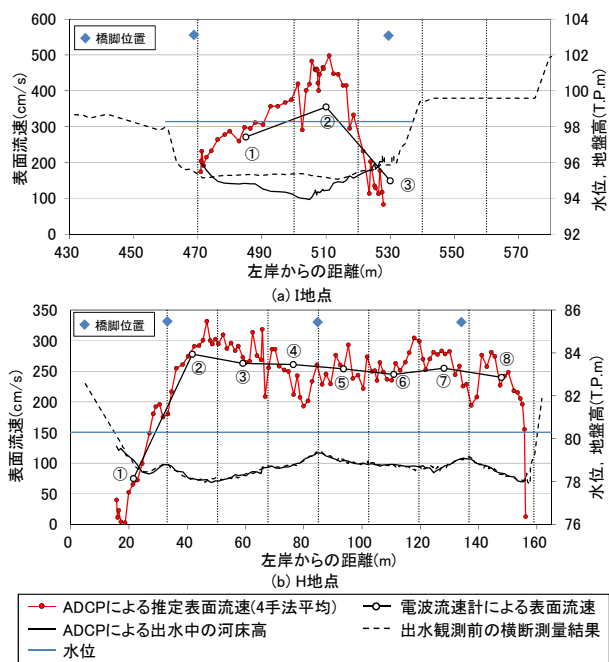


図-11 電波流速計と ADCP による表面流速横断分布

位置する。

そのためK観測所で無風または弱風状態であればH地点においても同様の風況であったと推定される。実際現地観測時の体感でもH地点ではほとんど風はなかった。

図-10はI地点においてADCP横断観測により得られた河床高の横断分布を全て重ねた図である。この図から分かる通り、I地点においては台風による出水中であった観測期間中、顕著な河床変動が生じている。特に横断面中心付近においては1m程度の急激な変動が生じていることが分かった。なおH地点では融雪出水期であった観測期間中、河床変動はほとんど生じていなかった。

以降において本研究により得られた結果を示し、それに対して考察を行う。

(1) 表面流速に現れる強風の影響

図-11(a)、(b)はそれぞれI地点、H地点における電波流速計および ADCP による河川表面流速の横断分布図の一例である。図中、○数字は電波流速計による測線の番号である。これらの図より、電波流速計と ADCP により計測された表面流速横断分布形状はほぼ同様の傾向を示していると考えられる。しかしながらI地点に関しては、流心において電波流速計による表面流速が ADCP による推定表面流速より若干低く測定されている。図-12(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれI地点の測線①、測線②、測線③およびH地点の測線③における電波流速計による生データ (I地点では2秒毎、H地点では1秒毎に

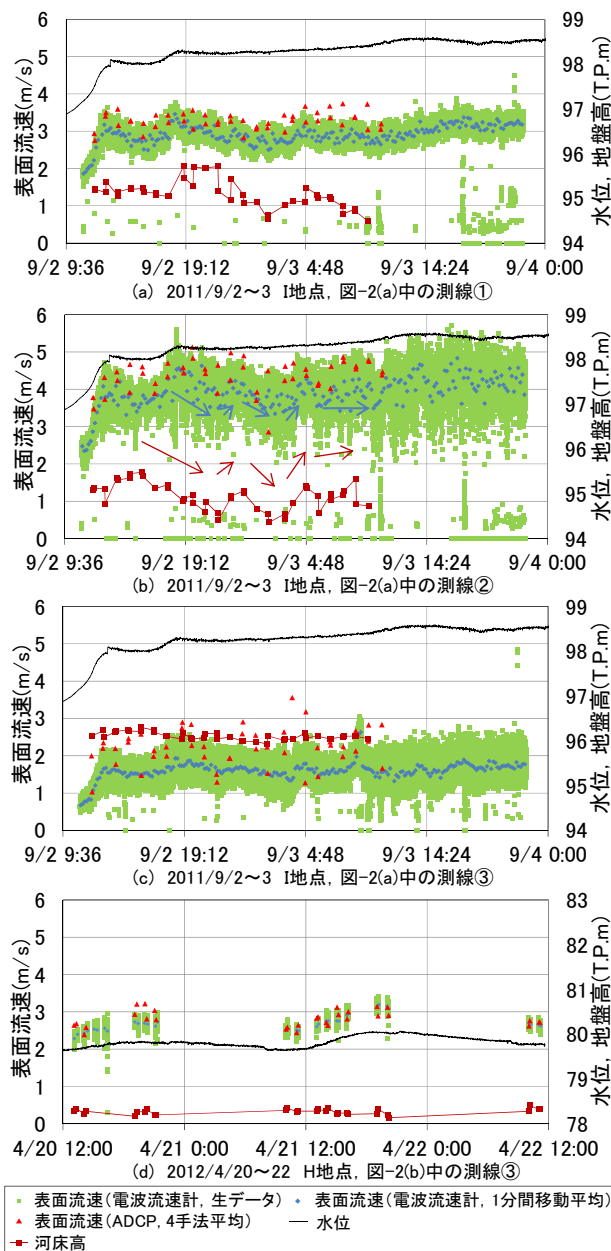


図-12 各表面流速、水位、河床高の時系列

出力)、その平均データ (前方1分間移動平均値)、ADCPによる推定表面流速および水位と河床高の時系列図である。I地点では測線②、H地点では測線③がそれぞれ流心に当たる。(各測線位置については図-11(a)、(b)を参照。)電波流速計の生データについては明らかな異常値と思われるデータについても観測全期間で見れば少数なのでそのまま図化している。電波流速計の平均値を求める際には、このような異常値と推定されるデータは除去した上で前方1分間移動平均を施した。

これらの図から電波流速計の生データは両観測地点において顕著な振動を示していることがわかる。電波流速

計は河川表面における凹凸の移動する速度を計測しており、そこには河道流れに存在する様々なスケールの擾乱が影響要因としてあると考えられるため、このデータの振動要因を一意的に論ずることはできない。しかしながら I 地点、H 地点の結果を比較すると、強風時の観測であった I 地点の方が弱風時の観測であった H 地点よりも電波流速計生データの振動幅が大きいことから、この生データの振動には風の影響が強く含まれていることがわかる。

電波流速計の生データにはこのように 0.5~2.0m/s 程度の幅を持つ顕著な振動が含まれるため、実際に表面流速データとして利用する場合には何らかの平均値を取る必要がある。これについて明確な基準は定められていないが、本研究では前方 1 分間移動平均データを用いた。この電波流速計の平均値を ADCP による推定表面流速と比較した場合、変動の傾向は良く一致しているように見えるものの、ADCP データの方が電波流速計データよりも大きく示される傾向が見られる。このことから風の影響は電波流速計の計測値に誤差として現れ、実際の表面流速と異なる値が計測されるため、その除去が必要であると言える。具体的な風の影響の除去については後述する。

I 地点での観測については、観測開始初期に出水の影響により短時間で急激に水位が上昇するが電波流速計、ADCP による表面流速もそれに合わせて急激に増加しているのが分かる。また融雪出水期に観測を実施した H 地点では、微小ではあるが水位に関して 12:00 頃から上昇し 18:00 頃から逡減し始めるという日周期での変動があるように見える。これは一日の日照量の変動に従っていると思われる。この時、データ数が少ないものの、この日周期の水位変動に合わせて表面流速も変動しているように見える。すなわち、水位が上昇すれば表面流速も加速し、水位が逡減すれば表面流速も減速する一般的な H-V 関係がここに表れている。

(2) 表面流速に現れる河床変動の影響

図-12(a)、(b)より、I 地点においては台風 12 号による出水で水位が急に上昇すると、測線①、測線②で河床高の変動が顕著になることがわかる。しかしながら図-12(c)より、測線③においては河床高に目立った変動は見られない。図-10 からわかる通り、出水による河床高変動は河道内で平均的に生じるのではなく、顕著に変動する区分断面と、そうでない区分断面とがあることが実際の観測データから示された。図-12(d)より、H 地点においては観測期間中を通して河床変動は見られなかつ

た。(図-12(d)には流心である測線③のデータのみを示したが他測線でも同様の傾向であった。) これは H 地点での観測は融雪出水期に実施されたため、台風による出水に比べ、出水の規模が小さかったためと考えられる。

I 地点の測線①、測線②では河床高変動に合わせて、電波流速計による表面流速のデータ (平均値) が変動しているように見える。図-12(a)、(b)からは河床高上昇時には表面流速が加速し、河床高下降時には表面流速が減速しているように見える。逆に河床変動が見られなかった I 地点の測線③ (図-12(c)) および H 地点 (図-12(d)) では表面流速の変動は見られなかった。これらのことから出水中に河床高が変動している場合には、河床の増加、低減に合わせて表面流速が加速、減速していると考えられる。

(3) 表面流速計測値に現れる風の影響の除去

先述した通り、強風の影響は電波流速計による河川表面流速の計測値に誤差として現れるため、その影響の除去が必要である。

電波流速計で計測した表面流速の平均値と ADCP による推定表面流速を比較すると、I 地点では全測線において ADCP 推定表面流速の方が電波流速計平均値よりも大きくなる傾向が見られる。H 地点においては ADCP 推定表面流速と電波流速計平均値が概ね一致している。これは先述の通り、I 地点での観測期間中は、現場では台風の影響により逆流向きの強風が卓越していたため、逆流向きの風波等が発生し電波流速計では表面流速が実際よりも遅く計測されたと考えられる。また、H 地点については弱風状態であったため表面流速には風による大きな影響がなかったと考えられる。

図-13 に非接触型流速計 (電波流速計および画像解析 (LSPIV)) による表面流速と ADCP による推定表面流速の相関図を示す。ADCP のデータは 4 手法平均である。強風時のデータとして I 地点における観測データを使用している。また弱風時のデータとして H 地点における観測データ、ならびに M 地点 (T 川) にて実施した画像解析 (LSPIV) と ADCP 横断観測により河川表面流速を測定したデータ⁹⁾を使用している。H 地点は代表として流心に当たる測線③のみのデータを示すが、他の 7 測線でも同様の傾向が見られた。図-12(d)より弱風時には非接触型流速計により測定した表面流速と 4 手法平均による ADCP の推定表面流速がよく一致していることがわかる。この結果より、弱風時においては ADCP の上層不感帯の外挿法には 4 手法平均を適用できることが分かった。

また強風時には、ADCP データが非接触型流速計（電波流速計）より大きめに測定されることが分かった。先述した通り、これは現地における風の影響であると考えられる。そこで ADCP データを“真値”と仮定し、電波流速計データから風の影響を除去して真値に変換する手法について検討する。

図-14 は I 地点、H 地点での観測において得られた ADCP による推定表面流速と電波流速計による表面流速の差と風の相関図である。風のデータはそれぞれ現場より数 km 離れた気象庁の観測所における風向・風速データから各地点における河川流向方向成分を抽出している。表面流速および風ともに河川の順流方向を正としている。ここに、 U_{WIND} ：風速の河川流向成分、 U_{ADCP} ：ADCP による推定表面流速（4 手法平均）、 U_{RCM} ：電波流速計による表面流速である。

先述の通り、I 地点では観測期間中は河川流れに対して常に逆流向きの風が卓越しており、その影響で電波流速計の値が ADCP の値より小さくなる傾向が全体的に見られた。しかしながら図-14 から分かる通り、一部に電波流速計データが ADCP データよりも大きくなるケースも見られる。ADCP データを詳細に調べた結果、このようなデータのいくつかについては以下のように説明できる。I 地点の測線②に関して図-14 中に赤矢印で示したデータは、ADCP について全アンサンブルデータを見ると、測線②に該当するアンサンブルのみ両隣のアンサンブルより急激に流速が減少していた。これは何らかの異常値と考えここでは無視する。また I 地点の測線③に関して図-14 中で Y が負値となったデータは ADCP による鉛直方向流速分布データが上層部で逆勾配を示していることが分かった。これは流速の遅い流れに対して逆流向きの強風が吹いたためと推定される。特に図-14 中赤矢印で示した I 地点測線③のデータはこの傾向が顕著であり、この場合には 4 手法平均で表面流速を推定するには適さないと考えられる。よって赤矢印で示したデータは除去した上で、ADCP による推定表面流速を“真値”と仮定し、風と二つの表面流速データの差の関係を算定すると、次式のような電波流速計データから風の影響を除去する式が導かれる。

$$U_{WS} = U_{RCM} - 0.074 U_{WIND} \quad (1)$$

ここで U_{WS} は電波流速計による表面流速から風の影響を除去したデータである。この式は風速の約 7.4% が表面流速に加算されることを意味している。既存の研究¹³⁾では地上風速計測値を対数則により 10m 高度相当に基準化した場合の風速値の 1.6% が表面流速に重畳される

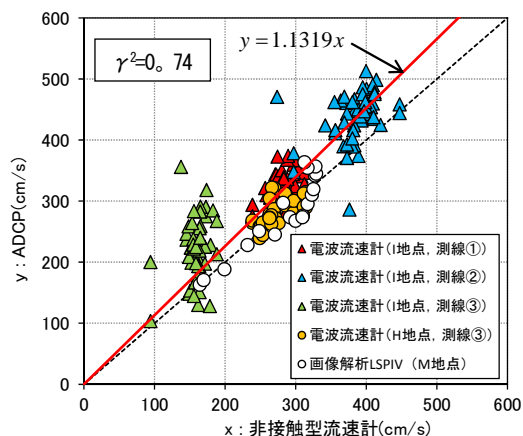


図-13 非接触型流速計と ADCP の相関図

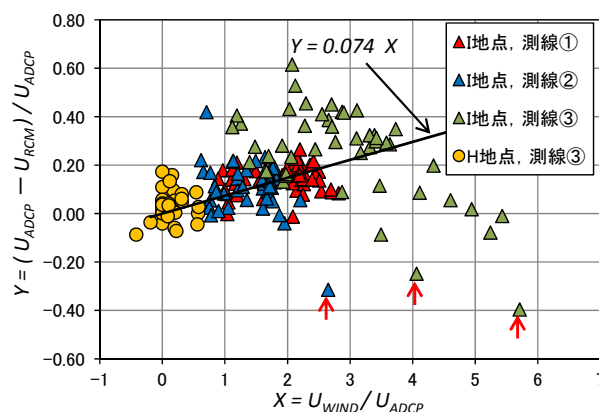


図-14 風速と二つの表面流速差の相関図

(赤矢印データは除去した上で Y と X の相関式を求める。)

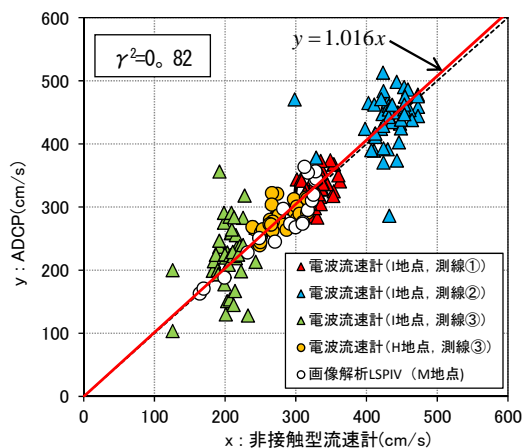


図-15 風の影響を除去した非接触型流速計と ADCP の相関図

と報告されており、今回の解析とは風速値の取り方が違うものの、表面流速に与える風の影響は従来考えられているよりも大きい可能性がある。既往の研究は延長 50m の水路での実験結果であるが、今回観測対象とした I 地

点を含むK川の区間は南北方向に10km以上ほぼ直線的な河道となっており、吹送流がより卓越したため既往の研究よりも風の影響が大きく表れたとも考えられる。いずれにせよ、今回の結果は風向が河川流れの逆流方向に卓越する状況での観測データのみで得られたため、今後、順流方向に風が卓越する場合も含め継続して観測を行い、より多くの知見を蓄積することが必要である。また本研究では観測現場から数km離れた地点での風のデータを用いて電波流速計データの補正を試みたが、今後は実際に現地に風向・風速計を取り付け、電波流速計に与える風の場の影響とその除去方法についてより詳細に議論していくことが必要である。

図-15は図-13に示したI地点での観測データについて、電波流速計から(1)式を用いて風の影響を除去した補正值とADCPの相関図である。図-13において、もともと風の影響がなかったと推定されるデータについては、補正せずに再掲している。図-13、図-15にはそれぞれ風の影響を除去する前後について非接触型流速計による表面流速とADCPによる推定表面流速の相関係数を載せているが、風の除去により相関係数が0.74から0.82へ改善されているのがわかる。このように風の影響を除去することで、電波流速計データとADCPデータの相関がよくなることが分かった。ADCPの方が電波流速計より無視できない程度に大きくなるデータも数点見られるが、これらの取り扱いについては今後の課題とする。

2.3.3 まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- 1)ADCPの上層不感帯におけるデータ外挿は4手法平均が適切である。
- 2)強風時には電波流速計により計測された表面流速に風の影響が強く作用する。実河川において計測したデータを解析した結果、既往の研究による知見よりも風の影響が大きい場合もあり得ることが示された。この結果を踏まえて、現地条件下において電波流速計による計測値から風の影響を除去する実験式を示した。
- 3)出水時に河床高変動が生じている際には、その変動に応じて表面流速も変動している。具体的には河床高上昇時には表面流速は加速し、河床高下降時には表面流速は低減する。

2.4 河床高自動計測手法の開発

2.4.1 研究の目的

実河川における洪水時の河床変動、局所洗掘等、河道内の河床の挙動を把握する手法としては、複数の技術がある。汎用的な手法の一つとしてリング法があるが、こ

れは最大洗掘深と埋め戻しを把握する手法である¹⁴⁾。また砂面計を用いた観測は、例えば富士川や安部川等の複数の河川において観測事例がある¹⁵⁾。近年では、洪水時実河川の高濁度条件における音響技術を用いた河床高計測の成功事例が徐々に増えている。特にラジコンボート又は橋上操作艇に搭載したADCP(1200kHzや600kHz)による観測はその代表例と言える^{16)、17)、18)、1)}。一方、国土交通省河川局の河川定期縦横断面測量業務の深淺測量では音響測深機を用いるが、これらは200kHzの周波数を持つ機器である。またこのような業務の多くは低水時に行うため比較的濁度の条件における計測ではあるが、ADCPと比較すると音波が低周波であり減衰に対してより強いことから、より信頼性の高い計測結果が得られることが期待される。また近年ではマルチナロービームやサイドスキャンソナーなどが紹介されているが、これらは本質的には音響測深機を斜めに照射した場合の観測手法の一つである。

このような事例を踏まえ、本研究グループは音響測深機を斜めに照射することで自動計測をすることを検討する。これを用いることの利点は適用範囲の広さである。例えば橋脚や堤防の法尻等の河川構造物にセンサーを設置することで照射域近傍の流況を乱すことなく局所洗掘を把握することが期待できる。また橋脚やH型鋼に同センサーを設置することで洪水時の河積の変化を把握することも可能となる。

本研究グループは2.1で概説した流量観測高度化手法を実現することを目的として、音響測深機を用いた自動河床計測を実施することで、ADCPによる流量観測を実施できない状況においても設置型流速計データと組み合わせ高精度の流量値を得る手法の開発を行う。既にYorozuya et al. 2012はH型鋼に設置したセンサーを用い、洪水時の河床高の変動の観測事例を説明した¹¹⁾。ここでは、音響測深機を橋脚に設置することで河床高を自動計測する可能性を議論する。H24年度は音響測深機の設置及び維持管理を実施した。残念ながら大きな出水がなかったため、その可能性を検証できる有意な計測結果を得ることはできなかった。本報告では設置状況を説明することとする。

2.4.2 計測方法

1) 観測地点

観測地点として、新潟県糸魚川市に位置する姫川山本観測所を選択した。ここは日本における急流河川の1つであり、河床勾配が1/100程度となる。洪水時は流速が早く、河川の表面も大きく振動する。そのことから洪水時

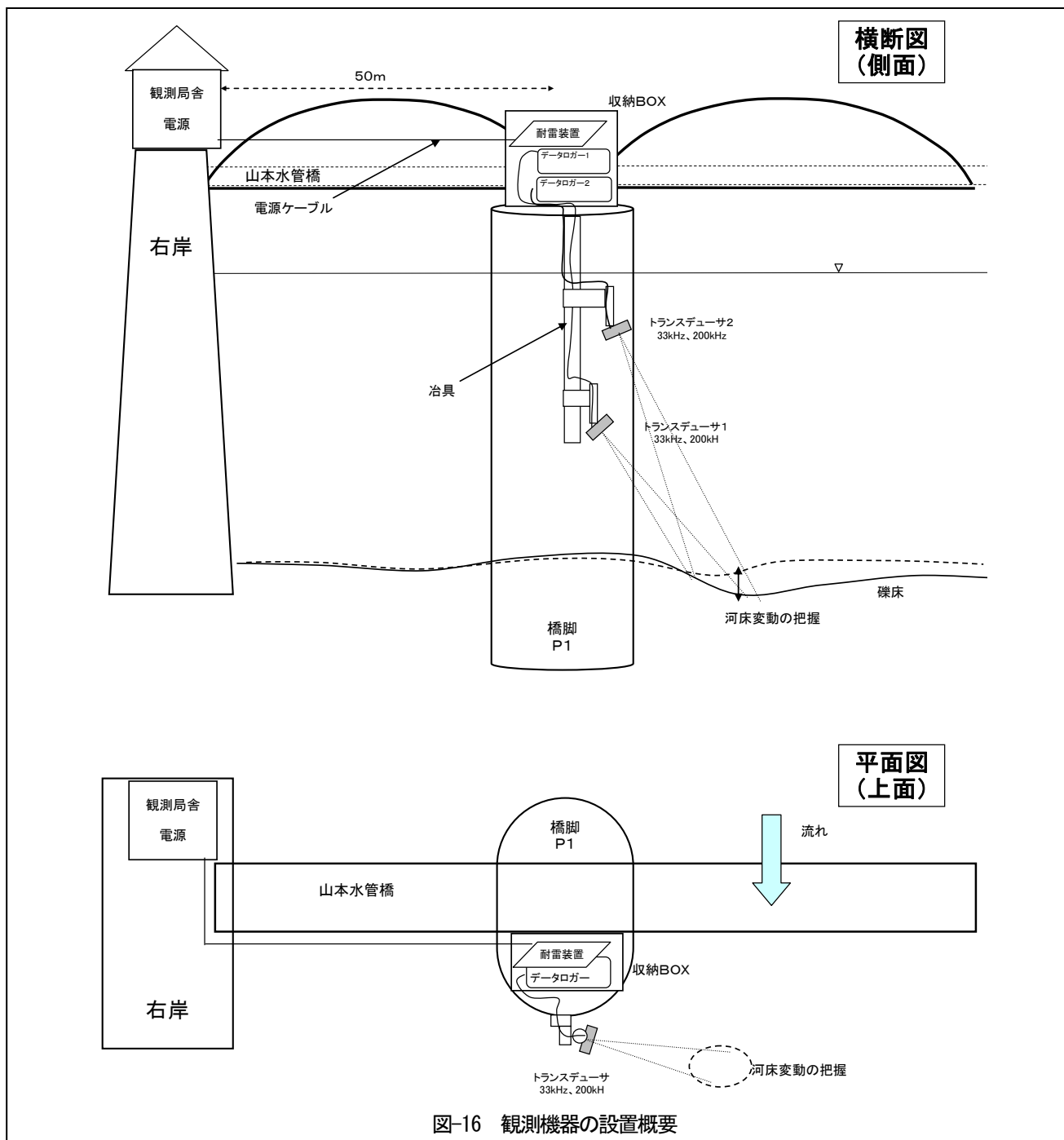


図-16 観測機器の設置概要

の河床変動も把握できていないことが実態である。姫川を管理する国土交通省高田河川国道はこのような流況中の ADCP を用いた観測を、土木研究所と共同で実施している。本検討では、これらのデータと比較することが可能であることから、同観測所を自動音響測深機の対象地点とした。

2) 設置概要

本検討で用いた観測機器を以下に示す。ここでは 200kHz 及び 33kHz の二つの周波数を持つトランスデューサ

CVM を採用した。二つの異なるセンサーを用いることで、河床波が発達した時の掃流層の上と下の両方を同時に計測することを期待している。またこれらのセンサ

表-3 トランスデューサ設置高さ

トランスデューサ設置高	標高 (TPm)	水位 (m) ※
センサ2 (上段)	+6.50	+1.454
センサ1 (下段)	+63.50	+0.454

一は計測間隔が 100kHz~340kHz、センサー下 0.2m から計測可能であること、測定水深の範囲が 200 kHz のセンサーは 0.2 ~ 200m、33 kHz のセンサーは 0.5 ~ 1、500m、計測精度は 200 kHz で 1cm または水深の $\pm 0.1\%$ 、33 kHz で 0.1m 又は水深の $\pm 0.1\%$ である。またデータロガーがチャート紙を必要とせず、電子ファイルとしてのチャート出力ができることが特徴的である。一般的に音響測深機はデジタル値だけの出力も可能である。Yorozuya et al は観測値が時間的に大きく変動することが想定される場合、離散的に出力されるデジタル値をチャート紙による連続データと比較することで値の妥当性を検証することが重要であることを報告している¹¹⁾。チャート紙を用意するという事は大きな記録装置と記録紙を準備することになるが、本観測機器は電子ファイルとしてチャートのかつ電子的な記録が可能になることが大きな特徴である。

図-16 は音響測深機の設置状況である。ここでは橋脚の背後に二つの音響測深機を異なる高さに設置した。観測機器の設置位置は、事前踏査および過去の水位履歴を参照し、山本水管橋 P1 橋脚の下流側とした。トランスデューサの位置は、山本観測所における水位の経年変化より、最高水位近傍と中出水規模を捉えるために、2 か所に設定した。トランスデューサの設置高さを表-3 に示す。またこのような観測では電源確保が困難であることが一般的であるが、ここでは観測局舎の電源を利用した。

図-17~図-19 に音響測深機の設置状況の写真を示す。

3. 従来手法と新手法の比較

3.1 概要

従来手法である浮子流量観測手法は 1950 年代に確立され、その後、60 年以上のデータが蓄積されている。悪天候、昼夜問わず観測を実施できるため、非常に安定して安全・確実に観測データを取得できる手法である。浮子流量観測から流量値を算出する際には、これまで述べてきた高度化手法とは異なる複数の仮定や特徴を有していることに配慮が必要である。それらは 1) 浮子を含めたトレーサを用いた流量観測手法は河川水の流況を代表していること、2) 河床高は当該洪水前後の最大値を採用し、河積を計算していること、3) 浮子の流下速度を計測する流下区間を通じて、想定している区分断面を通過すること、4) 更正係数は安芸式から算出されたものであること等である。

従来手法と新手法を比較するにあたり、計測機器が計測機器本体に依存するもの、環境に依存するものをわけ



図-17 音響測深機の設置状況①



図-18 音響測深機の設置状況②



図-19 音響測深機の設置状況③

て検討する必要がある。例えばプライス式流速計が算出する流速値は計測器依存であるため、他の同様な観測機器との比較は極めて単純である。一方浮子観測は元々の河道形状、洪水の規模、それに応じた河床変動、河床波に応じた鉛直方向流速分布・乱流等にも大きく影響を受ける。そのため、浮子流量観測手法とその他の計測手法における流速計測値そのものは物理的意味が異なり、両者を単純に比較することは難しい。上記の4つの項目の中で、他の流速計から算出される流速値と比較して議論することができるのであれば、3)を大前提とした1)、4)となる。これらを議論するために実スケール規模であり、

かつ河道形状が限りなくコントロールされている実験施設を用いて従来手法と新手法の比較を実施した。その結果を3.2で紹介する。

3.2 浮子測法との比較

本研究では、(独) 土木研究所寒地土木研究所¹⁹⁾が十勝川千代田実験水路において同時並行的に行った浮子、ADCP、電波流速計それぞれによる観測データを基に、従来法である浮子法と新技术であるADCP、電波流速計それぞれによる流速値に関する比較・検証を実施した。ADCPに関しては横断観測が実施された。千代田実験水路における観測は2007年～2010年にかけて計8ケース実施されている。基本的には、浮子の流下速度と、当該浮子流下測線上におけるADCP、電波流速計の観測データについての比較・検証をそれぞれ実施した。なおADCP横断観測、電波流速計による観測は、全て浮子計測区間内の断面で実施された。また浮子は全て概ね真っ直ぐ流下したことが確認されている。

3.2.1 浮子とADCPの比較

浮子の流下速度と、当該浮子流下測線に対応するADCPアンサンブルデータを比較する。浮子観測の前後5分以内にADCP横断観測が実施されていない場合についてはデータの比較は行わなかった。ADCPは河道断面内の流速分布を3次元的に測定できる機器であるが、上層・下層においてデータの不感帯が生じる。この不感帯については、ADCPによる実測データを用いてデータの外挿を行う。上層不感帯については、①流速実測値について対数則あるいはべき乗則の近似式を当てはめ、それらにより外挿する手法、②計測している表層3層のデータから近似直線式を求め、それにより外挿する手法、③計測している表層第一層のデータを一樣に外挿する手法などが一般的なようである。本研究グループ²⁰⁾はこれらの手法による外挿データを平均する手法を提案し、この手法による外挿を水面表まで伸ばして得られた値が、実際の表面流速を精度良く表していることを示した。本研究ではこの外挿法を用い、浮子流下速度と、浮子測線上に当該するアンサンブルにおけるADCP観測データの浮子吃水範囲の平均流速を比較する。ただし、当該アンサンブルにおいてADCP実測データ数が上層不感帯の外挿データ数より少ない場合にはデータを棄却し、浮子との比較を実施しなかった。

3.2.2 浮子と電波流速計の比較

電波流速計はドップラー効果を利用して流水の表面流速に重畳した表面張力波の移動速度を測る機器である。表面張力波はランダムに四方に伝播するため、電波流速

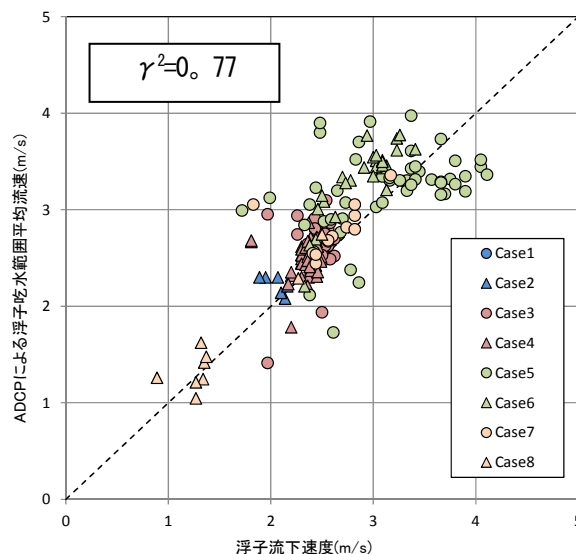


図-20 浮子とADCPの比較

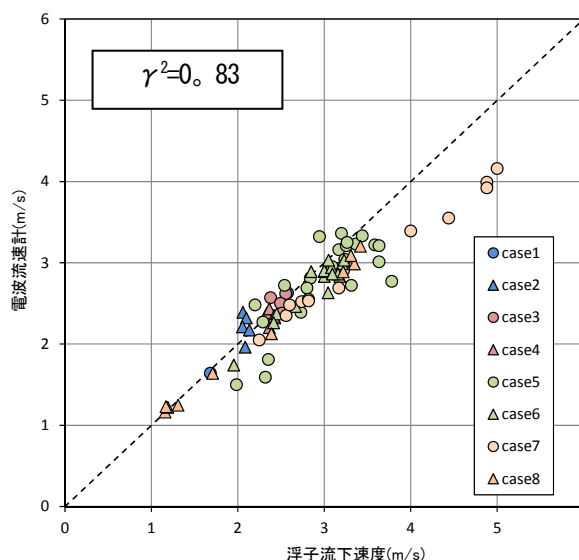


図-21 浮子と電波流速計の比較

計で得られる流速は結果的に表面流速となる。電波流速計により得られる表面流速と、電波流速計で測定している横断位置を通過する浮子の流下速度を比較する。各観測において電波流速計は水路の横断中心における流速を測定するように設置されている。電波流速計測定横断位置を通過する浮子がない観測については、電波流速計測定位置の両隣に設定された浮子測線上の浮子流下速度を平均し、電波流速計データとの比較を実施した。

3.3 結果と考察

3.3.1 浮子とADCPの比較結果

浮子流下速度とADCPによる浮子吃水範囲の平均流速の比較結果を図-20に示す。両データの相関係数は0.77を示し、概ねよく一致していると言える。一部に多少の

ばらつきが見られるが、浮子観測と ADCP 横断観測の流速の計測時間スケールや計測位置（区間）が厳密に一致していない等の理由が考えられる。

3.3.2 浮子と電波流速計の比較結果

浮子流下速度と電波流速計による流速データの比較結果を図-21 に示す。両データの相関係数は 0.83 を示し、さらに良い一致を確認できた。図-20 に比べるとデータのばらつきが小さくなっているが、これは電波流速計データが一分間の時間平均値であることで、ADCP よりも浮子の流速計測時間スケールに近い等の要因が考えられる。

3.4 まとめ

従来法（浮子測法）と、新技術（ADCP、電波流速計）それぞれにより得られた流速データは単純には比較できないことを認識した上で、集中的に相互比較データが得られた観測事例を用いて比較を試みた結果、概ね良好な相関関係・一致が見られることを確認した。このことは従来の浮子法においても計測の前提条件が満たされる限り高い精度で流速データが得られることを示唆している。また新技術を用いた流量観測への移行に当たり、流速データ精度の連続性に大きな問題は無いことのひとつの証左となるものと考えられる。

参考文献

- 1) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦：高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関する提案, 土木学会河川技術論文集, 第 16 巻, pp.59-64, 2010.
- 2) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 菅野裕也, 深見和彦：高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関する提案, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.59-64, 2010.
- 3) 萬矢敦啓・本永良樹・深見和彦：無人自動流量観測システムの確立とその課題, 河川流量観測の新時代, 第 3 巻, pp.15-22, 2012.9
- 4) 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
- 5) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正：鶴見川感潮域における H-ADCP を用いた流量観測, 河川技術論文集, Vol.11, pp.243-248, 2005.
- 6) 二瓶泰雄, 水木啓：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システムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.643, No.4, pp.295-310, 2007.
- 7) 藤田一郎, 河村三郎：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.733-738, 1994.
- 8) 藤田一郎, 原浩気, 萬矢敦啓：河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.1177-1182, 2011.
- 9) Fujita, I., Hara, H., Yorozuya, A.: Evaluation of imaging technique accuracy for discharge measurement and development of real time system for surface flow measurement, Journal of Hydroscience and Hydraulic Eng., No.30-1, pp.15-28, 2012.
- 10) M. Muste, I. Fujita, A. Hauet: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resources Research, Vol.44, W00D19, 2008.
- 11) Yorozuya, A., Fukami, K.: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, *Proceeding of Third International Symposium on Shallow Flows*, Iowa City, Iowa USA, 2012.
- 12) 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, pp.53-58, 2010.
- 13) 二瓶泰雄, 酒井雄弘：実河川洪水流における浮子の更正係数, 土木学会論文集 B, Vol.66/No.2, pp.104-118, 2010.
- 14) 植木真生, 福島雅紀, 末次忠司：河道内への砂礫の敷設供給が下流河川の河床状態に与える影響, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.415-420, 2006.
- 15) 末次忠司, 日下部隆昭, 坊野聡子：土砂管理施策のためのキーノート ～土砂動態の時空間的不連続性を考慮した流域管理に向けて～, 国土技術政策総合研究所資料 第 231 号, 2005.
- 16) 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.
- 17) 木下良作：洪水時の流れと河床, 河川文化, 河川文化を語る会講演集<その七>, pp.5-84, 1999.
- 18) 岡田将治, 萬矢敦啓, 橋田隆史：ADCP 搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響, 土木学会水工学論文集, 第 54 巻, 2010.
- 19) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地河川チーム：河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書, 2012.10
<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/chiyoda.html>
- 20) 本永良樹・萬矢敦啓・深見和彦：河床変動及び強風を伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.69, No.4, I_745-I_750, 2013.

重.20 A STUDY ABOUT WATER DISCHARGE MEASUREMENT SYSTEM WITH FIXED TYPE DEVICES INCLUDING RIVER BED EVOLUTION

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : Water-related Hazard Research Group

Author : Kazuhiko FUKAMI, Atsuhiro YOROZUYA

Yoshiki MOTONAGA

Abstract : Regarding to flood flow observations in Japanese rivers, our research group have focused on developing a water discharge measurement system applying new technologies. Among the major components of the system, a river bed evolution and a velocity index have been focused on this projects. This technical report summarized our focused topics. In addition, comparisons between a traditional method and a newly invented method was conducted to appreciate the past data.

Key words : water discharge measurement system, Float measurement, ADCP, river bed monitoring system