

無人自動流量観測システムの確立とその課題

Establishment of automatic water-discharge measurement system and subjects

萬矢敦啓¹・本永良樹²・深見和彦²

Atsuhiro YOROZUYA, Yoshiki MOTONAGA and Kazuhiko FUKAMI

¹正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Many devices with different principles, such as electro-magnetic, acoustic, and video-image, have been introduced as a fixed water discharge measurement system. Recently, development of each technique as well as parallel observation between the techniques and others make recognize them as fully developed one, which is good enough to apply them as industrial usage. On the other hand, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) initially developed as a marine measurement have been also applied by many river engineers to river discharge measurement. After peripheral devices, such as the high speed river boat, data transferring system, GPS, and etc, developed as well as incorporated to ADCP, conductivity of the measurement system significantly improved. Thereafter, the system experienced the water discharge measurement with many difficult conditions, characterized by high unsteadiness, loose boundary, and, above all, rough water surface. Since importance of automatic discharge measurement system have elevated recently, it has been expected to establish the system. The authors in this paper will explain about establishment of the one with major components, such as the fixed type velocimeter, determination of velocity index, as well as riverbed elevation changing during flooding. Additionally, some preliminary studies associated with the components will be introduced with suggesting further study for completion of the system. Finally, based on the knowledge as well as the technique, which has already developed, the authors introduced the complete procedures starting with preoperational observation, actual observation, determination of the values, and finally storage of the values.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, automatic discharge measurement, index velocity, river bed monitoring*

1. はじめに

河川水流量を計測するための手法として電波¹⁾²⁾³⁾⁴⁾, 超音波⁵⁾⁶⁾, 画像⁷⁾⁸⁾等の, 異なる原理を用いた計測技術が提案されてきた. それぞれ単独の技術的な進歩のみならず他の計測機器と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た⁴⁾⁸⁾. 一方, 海洋計測技術として開発されたTeledyne RDI社 (以下, TRDI社) のADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)が河川計測技術として適用され始めた⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾. 近年では日本国内においても使用実績が増え, また周辺機器が充実してきたこともあり¹²⁾¹³⁾, 急流河川においても観測実績が積み重ねられてきている¹⁴⁾. これに加え, 誤差評価手法の確立, 計測機器の誤差に関する検討などを経て, ADCPに対する理解が深まりつつある¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾.

我が国における高水流観では主に浮子測法が用いられている. 浮子測法は既に50年以上の実績があり, 技術の向上と水文データの蓄積が実施されてきた. その一方で

出水時の観測態勢の構築に時間を要するため, 出水時における水位の上昇期あるいはピーク流量を取り逃す可能性があること等の課題も残っている.

また, 浮子測法を含めた従来の流量観測手法では, 高水・低水時の流量観測データを基にHQ曲線を作成し, 水位計により自動計測された水位をHQ式に代入して流量に換算している. この方法で求める流量は算出値であり, 実際に観測されたデータではない.

このような課題に対し, 先述したような観測技術の発展状況を踏まえれば, 今後期待されることは無人自動流量観測手法の確立である. ここでは設置型流速計を用いて河川水の一部を自動計測し, 流速補正係数, 及び河床高・水位から算出する河積をかけ合わせ, 流量値を算出するものである. 本論文では著者らが提案する自動流量観測手法に関する技術的な提案と今後の課題に関して議論を進めたい. なお将来的には流量値を得るための一つの手法として二瓶らの提案するDIEX法⁹⁾を用いて算出することも考えられるが, ここでは流量値の算出に必須となる計測方法に関して重点を置き, もっとも単純な区分

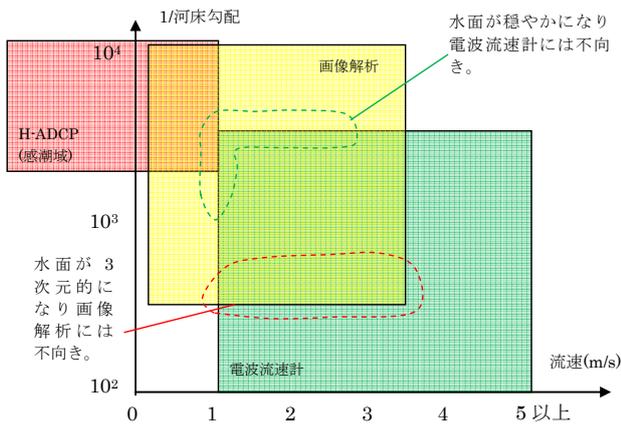


図-1 設置型流速計の適用範囲

求積法を用いることにする。

2. 無人自動流量観測手法の構成要素

無人自動流量観測手法を確立するにあたり、以下の4つの項目に関して独立して議論をすすめる必要がある。それらは (1)設置型流速計を用いた流速計測、(2)流速補正係数の算定、(3)洪水時の河床高の計測、(4)橋上操作艇に搭載したADCPを用いた基準流量値の算出である。以下それらの項目に関して詳細に説明する。

(1) 設置型流速計の確立

図-1は設置型流速計の適用範囲に関する概念図である。横軸が流速、縦軸が1/河床勾配である。電波式流速計及び画像解析は主に河川表面に現れる波紋を見ることになる。日本の多くの河川は洪水中に波紋や流木などのトレーサに適したものが存在することから、多くの場合これらの流速計測は適切な手法となる。しかしながら小中規模の出水や、河床勾配が低い下流の流量観測地点では

稀に波紋が発生しない場合もある。そのような場合にはこれらの手法は不向きとなる。また感潮域では塩水の侵入形態に応じて鉛直方向の流速分布が大きく異なるため、後述するように流速補正係数の決定が非常に困難になる。そのため、表面流速を計測する手法は不適切であるため、H-ADCPのような観測手法が必須となる。

図-1に示すような流況特性（あるいは河道特性）に応じた選択肢を用意しておく必要がある。土木研究所は、国土交通省とともに流量観測技術の高度化プロジェクトを立ち上げ、国内の流況の異なる幾つかの河川を対象として高度化して、高度化手法の候補となり得る機器・手法の観測特性を明らかにするための流量観測実験を実施している。

(2) 流速補正係数

ここで示す流速補正係数は、設置型流速計が計測した流速値から鉛直方向平均流速を算出するための係数である。国外の文献ではvelocity indexと標記されることが多い。Muste(2008)が指摘するように0.85を使用する場合は一般的である¹⁹⁾。これは流速分布が対数則に代表されるような流速分布を持つことを前提にしている。しかしながら河床波を伴う流れではその相対的な位置に応じて流速分布が大きく異なることが指摘されている²⁰⁾。例えば河床波のcrest(頂点付近)の流速分布は河床付近の流速が相対的に早くなり、流速が立つ。また河床波のtrough(谷)の流速分布は河床付近では非常に遅いもしくは逆向きの流れが存在することから、流速が広く分布することになる。この結果、流速補正係数にも大きく影響を及ぼし、例えば前者は1.0に近い値を示し、後者は例えば0.85よりも小さい値を示す。近年の研究では、Ceyda(2006)が数値計算と実験により流速補正係数に関する丁寧な検討を実施している²¹⁾。実河川における観測結果に関して、Yorozuya et al (2012)は河床波が通過した時の鉛直方向流速分布をADCPにより計測し、流速補正係数が

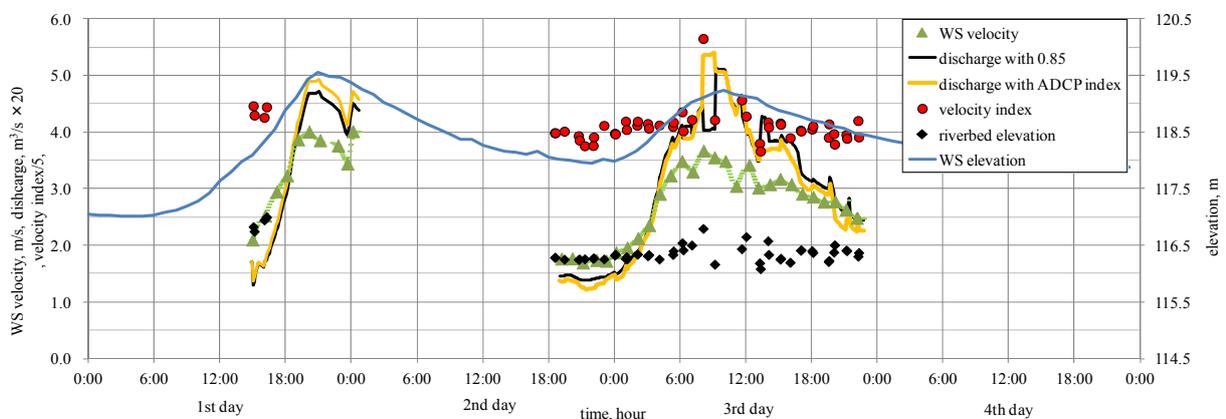


図-2 河床変動、水位、表面流速、ADCPによる流速補正係数、および流速補正係数0.85で求められた流量とADCPによる流量の時系列²²⁾

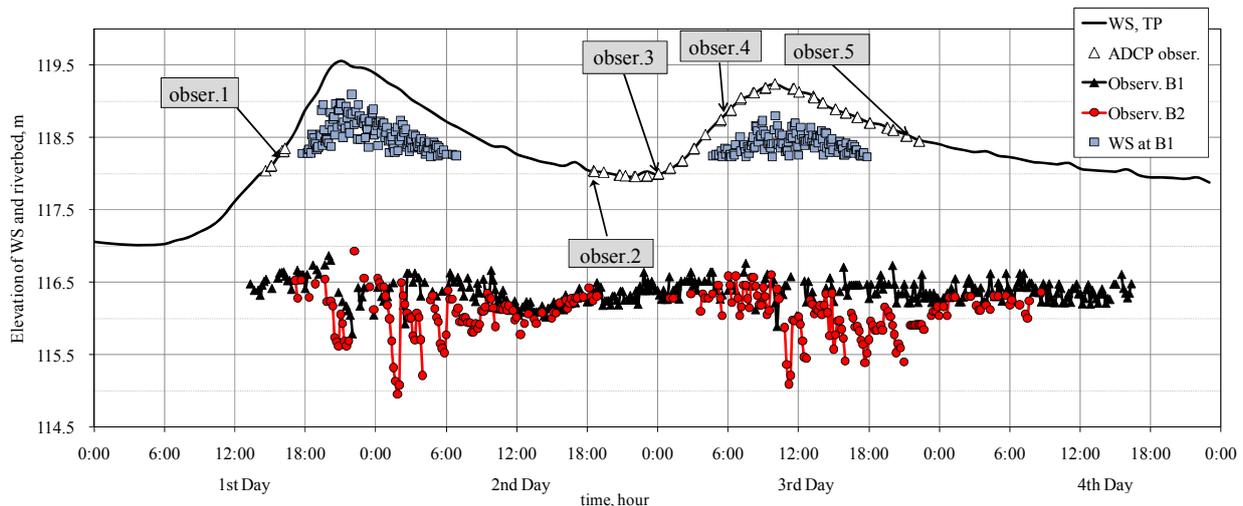


図-3 河床高、水位、ADCP観測時刻の時系列²²⁾

河床波の影響を強く受け、変動している事を示した²²⁾。ここではその一例を図-2を用いて紹介する。

図-2は電波式流速計を用いた表面流速、橋上操作艇に搭載したADCPを用いた河床高、鉛直方向流速分布から換算した流速補正係数、水位、流速補正係数を0.85として換算した流量値、ADCPから換算した流速補正係数を用いて換算した流量値の時系列を示したものである。この観測地点は100m程度の幅を持ち、これを8つの区分に分割している。ここで示す値はその中の一区分の平均値である。またADCPによる観測は●が示す時刻で、電波式流速計による観測は▲が示す時刻に実施された。

水位の時系列が示すように、ここでは通常的水位よりも2.5m程度の水位上昇を伴う小規模の洪水波が通過した時の現象を示したものである。河道全体としては1,000m³/s規模の流量値であった。1日目はあまり多くのデータが計測されていないことからあまり有意な議論は難しい。2日目の18:00以降について議論を進める。まず水位と河床高の変化(◆)を比較すると、2日目18:00から3日目5:00に至るまでほとんど河床高の変化は見られない。その後、水位がさらに上昇すると、河床の堆積傾向が始まる。さらに水位が上昇するに従い河床に堆積が見られるが、水位がピークを迎える頃、河床高は大きく振動を始める。水位は下降するが、河床高の振動はしばらく続くことになる。次に電波式流速計から得られた表面流速値(▲)に着目する。流速値は水位が上昇するに従い早くなる。前述のように河床高が振動すると同時に▲も同様な振動を始める。◆と▲は完全に独立した計測手法であるにも関わらず同じような傾向を持つ。

次に流速補正係数と流量値に関して議論を進める。河床変動が生じない時は流速補正係数は0.75~0.85で落ち着いているが、3日目の6時以降河床変動が生じ始めると0.73~1.1の間で変動する。流量補正係数が0.85前後で落ち着いている時は、流速補正係数0.85で求めた流量とADCPによる流量はほぼ一致するが、流速補正係数が変

動すると2つの流量が異なってくる。例えば、流速補正係数が1.13の時は24%、0.73の時は16%の流量差が生じている。このことから、河床変動が大きい場合は、流速補正係数の変化を適切に把握することが必要であることがわかる。より精度の高い流量の連続自動観測実現に向けて、この時々刻々の流速補正係数の変化を流量の算出に取り込むことが将来的には求められる。

既往の研究から同一の河床形態(砂漣、砂堆、反砂堆等々)における流速補正係数と無次元掃流力との関係には傾向が見られることが判明している²³⁾。河床形態に応じた流速補正係数の平均的な値が調べられているが、それらは現段階では実験から得られた知見であること、また実際には河床の変動に合わせて流速補正係数が変動していることが示されたため、固定設置型流速計による自動計測に合わせてしばらくは定期的にADCP観測を行い、流速補正係数と無次元掃流力の関係についてデータを蓄積する必要がある。

(3) 洪水中の河床高の計測

従来の浮子測法等では出水前後の基準断面における横断測量を実施し、河積の大きい方の断面形状を採用している。実際には出水の段階に応じて河床が変動していることが認知されているが、定量的な変化の議論がそれほど多くはないため一般化することは難しい。ここでは出水中の河床変動に関する先行的な研究事例²²⁾を以下に示す。

図-3は河床高、水位、ADCP観測時刻の時系列を示す。これらは図-2で議論した洪水波と同じイベントである。ここで示す河床高は二地点；B1及びB2において音響測深機を用いて計測したものである。この音響測深機は観測に用いている橋梁の上流側の河道内に架設したH綱に設置している。

まず最初の出水について、観測地点B1に注目する。ここでは水位の立ち上がり時付近からピーク時付近まで

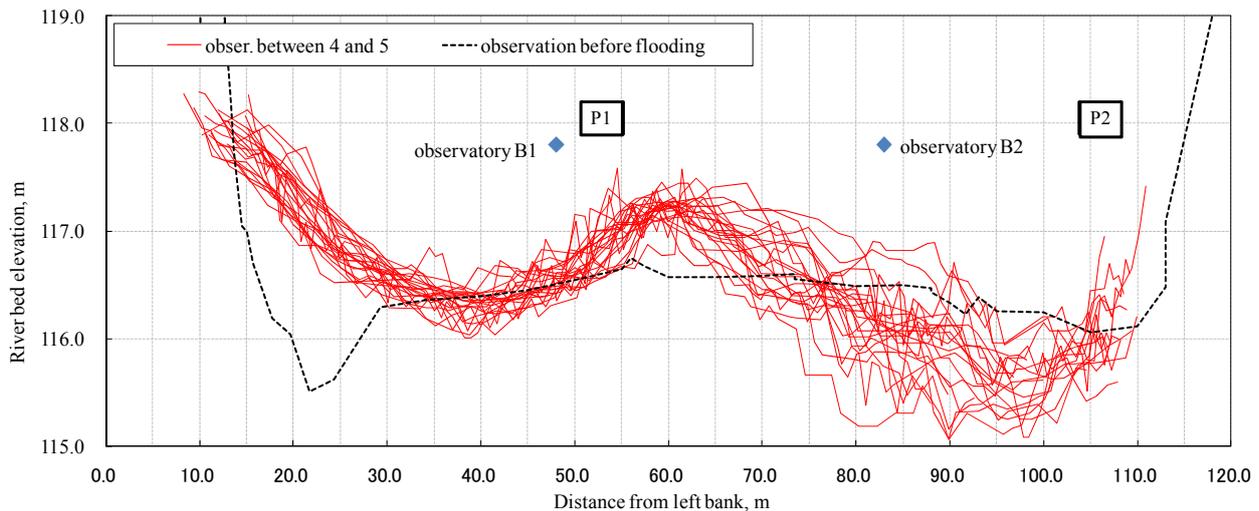


図-4 ADCP を用いた横断観測により得られた河床高の横断分布²⁾

河床高は堆積し続けている。ピーク後、水位の低下に伴い河床高も低下するが、1m程度の振動を伴っている。観測2日目の12:00以降、土砂堆積が続き12時間ぐらいで約50cm堆積する。2度目の出水時にも、河床高変動は最初の出水時の同じような傾向を示す。最終的に河床高は最初の値に戻っている。観測地点B2について見ると、水位と河床高の関係は観測地点B1と似たような傾向を示している。若干の違いとしては、B2における河床高変動の振幅がB1におけるそれよりも大きいということである。両方に共通の特徴は最低河床高が現れるのが流量ピーク時ではなく、ピークから数時間後であることである。

次に図-4は図-3に示すobser.4及びobser.5の期間中に実施したADCP横断観測による河床高分布データを重ねたものである。また洪水前に計測された定期横断の観測結果も同様にここに示す。また横断面における観測地点B1、B2を示してある。2度の出水期間中において、観測地点B1を含む左岸側では河床高が約0.5mの範囲で振動しており、逆に観測地点B2を含む右岸側では河床高が約1.5mの範囲で振動している。ここで図-4に示す橋上操作艇に搭載したADCPの観測結果は、橋梁の下流における観測結果であり、H網に設置した音響測深機は同橋梁の上流における観測結果を示すため、直接的な比較はあ



図-5 ADCP 及び周辺機器を搭載した橋上操作艇

まり意味をなさないが、両者が河床の振動幅に関して同様の結果を示している事から、図-3で示す河床高自動観測から得られた観測結果の値の信頼性を確認することができる。

これらの図が示すように音響測深機を斜めに設置した河床高自動計測は有意な結果を出すことがよくわかる。今後の課題はこれらの値の示す意味や、河床高が大きく変化したときの代表性である。またこれはH網を使用しているが、橋脚の背後に設置することも可能である。

(4) 橋上操作艇に搭載したADCPを用いた基準流量値、流速補正係数および河床高の算出

ADCP横断観測により基準流量値を求めるとともに、その観測結果を利用して、流速補正係数および出水中の河床変動を算定する。

ADCP横断観測による基準流量値は、無人自動流量観測システムによる観測流量の精度検証のためのデータとして用いる。

ADCPはボートに搭載して横断観測を実施することで、河床高、鉛直及び横断方向流速を計測することから水理学的な仮定を必要とせずに河川水流量を算出することのできる唯一の計測手法であることが一般的に認知されている。しかしながらADCP単体で流量観測を完成させることは難しく、複数の周辺機器を組み合わせることでこれが可能になる。図-5はADCP及び周辺機器を搭載した橋上操作艇である。この橋上操作艇は6m/s程度の流速においても計測実績がある。さらにVRS-RTK-GPS、音響測深機、データ転送装置、さらには橋で操作する台車等を組み合わせることで流量観測が安全にかつ精度の高い計測結果を得ることが可能となる。詳細は他の参考文献に譲る¹⁴⁾。

3. 無人自動流量観測システム

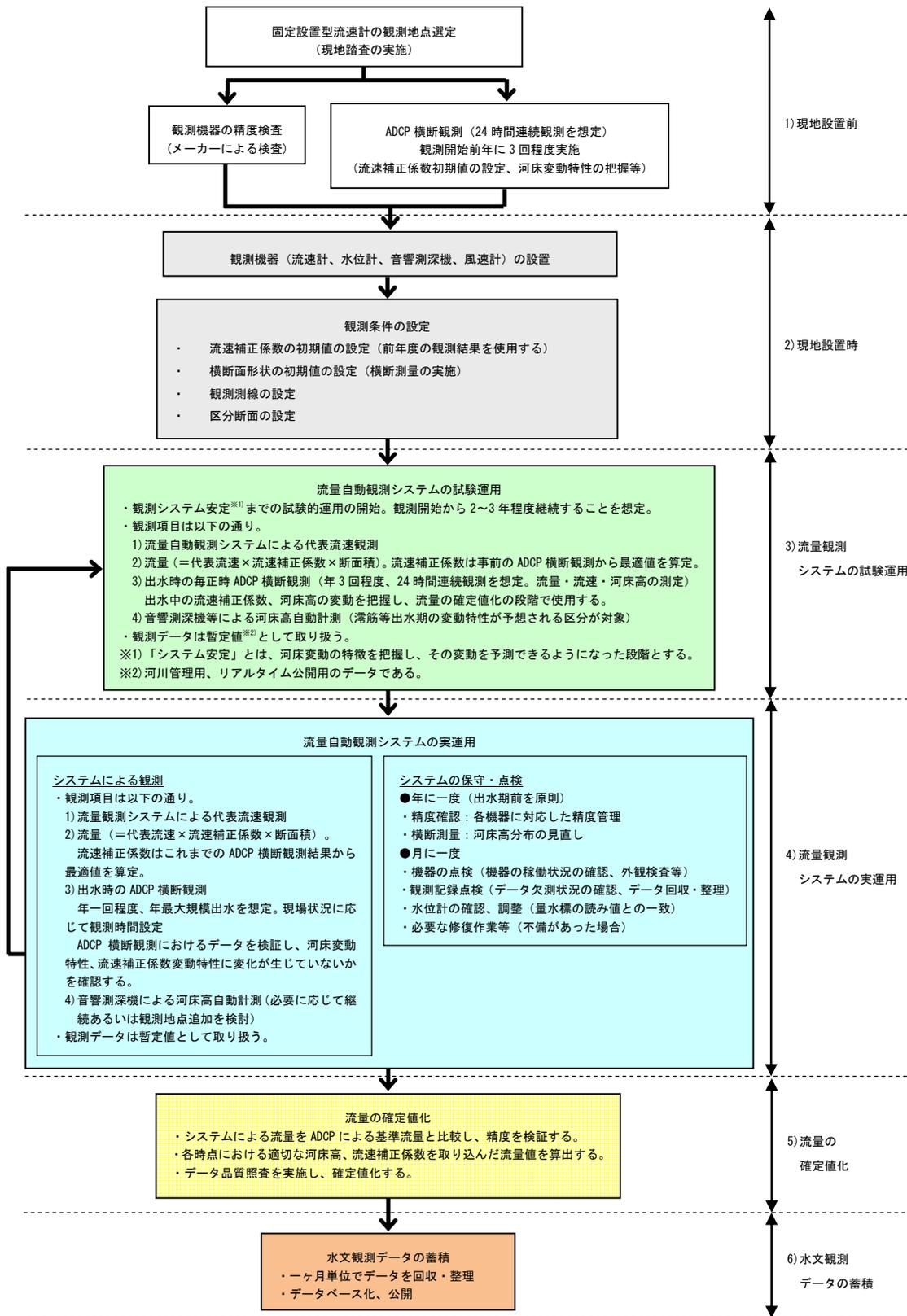


図-6 固定設置型流速計の設置前からデータ蓄積までのフロー

二章では無人自動流量観測システムにおいて必要となる項目のそれぞれの計測方法に関して議論をした。この章ではそれらを組み合わせて完成させる無人自動流量観測システムの概要に関して説明する。この無人自動流量観測システムは、無人及び自動で流量観測を実施できる

技術であること、高い精度で流量を計測できる技術であることが前提条件となる。以下それらの将来を説明する。固定設置型流速計で計測できるのは河川の代表流速 (例: 電波流速計であれば河川表面流速) である。流量を求める際には測定した代表流速に流速補正係数を乗じ

て流量測定断面における断面平均流速を求め、それに流量測定断面の河積を乗じる。そのため、流量観測システムの中で予め流速補正係数、河積を定めることが必要である。

流速補正係数については、原則としてADCPにより得られた流速の鉛直方向分布から算出する。一方、河積については年に一度、出水期前（5月下旬～6月上旬頃）に、流量測定断面において河床横断測量を実施することを原則とする。水位と河積の関係を用いて、水位から河積を求めため、水位計は流量測定断面内に設置することを原則とする。また水位計の観測データ出力の時間間隔は固定設置型流速計と同期させる。

さらに、「河川では出水中は河床が変動している」という前提に立ち、固定設置型流速計を用いた流量自動観測システムとは別に、ADCP横断観測あるいは音響測深機による自動観測により河床変動を常時把握する。

使用する固定設置型流速計が非接触型である場合、表面流速は台風時等の強風時には、風向・風速の影響を大きく受ける場合がある。このため、風向・風速計を設置し、風向風速の影響を考慮して表面流速を補正する。

これらのことを加味した上で流量観測システムの設置から運用に至るまでのフローを図-6に示し、同図の右の1～6の項目に従い、詳細を説明する。

1) 現地設置前

固定設置型流速計による流量自動観測所を設置するに当たっては、設置予定地点について現地踏査を実施し、流量観測が精度良く実施できる地点・断面であるか確認する。その際には国土交通省河川砂防技術基準等を参考にしながら、加えて固定設置型流速計の特徴等も考慮して判断する。例えば電波流速計であれば電波を遮蔽する障害物（植生等）がないか等を確認する。

設置する固定設置型流速計について、流速計センサーそのものの精度をあらかじめ検証しておく。これについては、メーカーにおいて出荷時に精度検査を実施し、その結果を成績表として添付させるものとする。

流量自動観測システムの運用開始に当たり、流速補正係数の初期値を設定するとともに、河床変動特性を予めある程度把握しておく必要がある。

そのため、固定設置型流速計による流量観測を開始する前年にADCPによる横断観測を3回程度の出水について実施する。これは24時間連続観測を想定している。この結果を基に、流量自動観測開始時の流速補正係数の初期値を設定する。また、このADCP横断観測結果から、当該河川における出水中の河床および流速補正係数の変動特性について把握する。

2) 現地設置時

観測地点に精度検査が済んだ流速計とともに、自記水位計、（非接触型であれば）風向・風速計を現地に設置

する。さらに、流量測定断面内において滞筋等出水中の河床変動が顕著であること推定される区分においては音響測深機などを利用した河床変動自動測定装置を設置する。

自記水位計は流速計で測定している断面の水位が分かる地点に設置する。自記水位計と併せて量水標も設置する。自記水位計と量水標の零点高は揃える。また、流量測定断面の河床高横断測量を行い、水位と河積の関係を求める。

風向・風速計は橋梁中央付近に設置すること（橋梁中央付近に設置することが困難である場合には、風向・風速が障害物等による影響を受けない観測地点近傍に設置しても良い。）等に留意する。設置する風向・風速計は気象業務法に定められた検定を受けたものとする。

流速補正係数の初期値は、先述の通り、観測開始前年度に実施したADCP横断観測結果を基に設定することを原則とするが、観測開始前年にADCP横断観測が十分に実施できなかった場合、観測開始後に自動流量観測システム内にて実施される出水期のADCP横断観測データを基に早期に設定する。その間、流速補正係数が決定するまでは、電波流速計や画像処理方式について一般的に使用される更正係数である0.85を暫定的に利用してもよい。この数字は水文学の分野において一般的に受け入れられている数字である¹⁹⁾。

流量測定断面における河床高横断測量結果から観測測線（電波流速計であれば横断方向のどの地点にセンサーを設置するかなど）を決定する。この時、観測開始前年に実施したADCP横断観測結果があれば、そのデータも参考とする。各観測測線が受け持つ区分断面を決定する。流速補正係数、河道形状の初期値はシステムに入力しておく。

3) 流量観測システムの試験運用

固定設置型流速計により、設定した各区分断面ごとに代表流速を連続的に観測する。この時、非接触型流速計の場合には、風の影響の補正を実施する。

観測された代表流速は予め入力された流速補正係数を用いて各区分断面における断面平均流速に換算される。さらにこの断面平均流速は、水位-河積の関係を用いて水位から求まる各区分断面積に乗じて区分流量が求まる。これを積分して断面流量が求まる。代表流速から断面流量が求まる過程は全て自動化され、リアルタイムで行われるものとする。ただし、この時点での流量値は暫定値である。リアルタイム流量として公開する場合には、このデータを公開する。（後述する流量の確定値化の段階で河床高変動や流速補正係数変動の状況に応じて流量値の確定化を実施する。）

「河川では出水中は河床が変動している」という前提に立ち、固定設置型流速計を用いた流量観測システムとは別に、並行して、毎出水時におけるADCP横断観測

(毎正時の24時間連続観測を年3回程度実施することを想定)を実施する。必ずピーク流量を観測するものとする。このADCP横断観測結果を基に出水中の河床変動、流速補正係数変動を把握する。これらの観測データは「4)流量観測システムの実運用」および「5)流量の確定値化」の段階で使用する。

このように毎出水時に毎正時のADCP横断観測を実施している限り、流量観測の自動化とはならない。そのためADCP横断観測結果から当該観測地点における河床および流速補正係数の変動特性を把握し、無人自動流量観測に随時反映させることに努めなければならない。例えば河床変動に関して、無人自動流量観測システムの試験運用段階において、毎正時ADCP横断観測による河床高横断分布変動データと音響測深機による河床変動データとの比較・解析から当該流量観測所における河床変動特性が把握できれば、音響測深機による自動計測で河床変動をリアルタイムで把握でき、ADCP横断観測回数を減らせる可能性がある。(あるいはADCP横断観測の必要性がなくなる可能性もある。その場合でも音響測深機による河床変動モニタリングは実施する。)

音響測深機は、始めは、「1)現地設置前」の段階で実施したADCP横断観測の結果を基に滯筋等出水期の河床変動が予想される区分断面を対象として設置する。音響測深機についてはADCP横断観測結果との比較・検討を基にして必要に応じて設置地点の追加等を行う。

無人自動流量観測の試験運用の段階においては、このように観測開始後もADCP横断観測データを積み重ねることで、流量観測システムの省力化、自動化を進める。

ADCP横断観測結果と音響測深機による河床高変動データの比較・検討結果から、音響測深機により観測断面内の河床高変動が概ね推定できるようになった場合を「システム安定」状況とし、この状況に達した段階で次の「4)流量観測システムの実運用」の段階へ進むものとする。「システム安定」状況に至るまで、観測開始から2~3年程度かかることを予想している。

4) 流量観測システムの実運用

システム安定状況に達した後のシステムの運用について述べる。

引き続き固定設置型流速計により代表流速を求め、システムに入力された流速補正係数および河床高から断面流量を算出する。この段階での流量データは暫定値である。

この段階では、河床変動は概ね音響測深機により自動計測できるようになっている。

ADCP横断観測は、河床変動特性や流速補正係数の変動に変化が生じていないか等を確認する目的で、年一回程度、年最大規模出水を対象として実施する。観測時間等は本段階に至るまでのADCP横断観測結果に基づいて判断する。これらの観測データは「5)流量の確定値化」

の段階で使用する。ADCP横断観測結果におけるデータ検証を行い、河床変動特性等が変化していると判断されれば、必要に応じて「3)流量観測システムの試験運用」の段階へ戻る必要が生じる場合もある。

観測とは別に、システムの保守・点検を定期的実施する。年に一度、各機器の精度確認と観測断面の横断観測を実施する。これは出水期前に行うことを原則とする。その他、機器の点検(機器の稼働状況の確認、外観検査等)、観測記録点検(データ欠測状況の確認、データ回収・整理)、水位計の確認、調整(量水標の読み値との一致)などを月に一度の頻度で実施する。点検の結果、観測機器等に不備が見つければ、早急に修復等の処置を取ることとする。

5) 流量の確定値化

「4)流量観測システムの実運用」および「5)流量観測システムの実運用」の各段階での流量データは暫定値という取扱いであった。

本段階において、ここまで流量自動観測システムによる流速・流量観測と並行して実施してきたADCP横断観測あるいは音響測深機による河床高自動計測の結果を基にして、流量データの確定値化を実施する。

具体的には、ADCP横断観測結果あるいは音響測深機による河床高自動計測結果から求まる各時点における適切な流速補正係数、河床高を取り込んだ流量値を算出する。

流量観測システムによる流量値をADCP横断観測によって測定された基準流量値と比較し、システムの観測精度を検証する。

その後、流量値に対してデータの品質照査を実施し、確定値化する。品質照査方法については本稿とは別にまとめる予定である。

6) 水文観測データの蓄積

確定値化した流量データは、水文データとしてデータベース化し、公開する。

4. まとめ

著者らは本報告の中で無人自動流量観測手法の確立とその課題を議論した。以下ここから得られた知見をまとめる。

1) 無人自動流量観測システムにおいて代表流速を測定するために使用する設置型流速計については、各機器の特徴と対象とする河川の状況を比較・検討し、適切なものを選定する必要があることを示した。

2) 流速補正係数は河床変動に応じて平均値から $-0.1 \sim +0.3$ 程度の変動があることを示し、それが観測流量値に影響を与えることを示した。それにより河床変動が大き

い場合には流速補正係数の変化を適切に把握する必要があることを示した。

3) 出水中には河床高が大きく変動している場合があることを示した。それにより出水中の河床変動を測定し、観測流量値に反映させることの重要性を示した。

4) ADCP横断観測あるいは音響測深機による河床高自動計測により、出水中の流速補正係数、河床高の変動を把握する方法を示した。

5) 無人自動流量観測システムについて、機器設置場所の選定から最終的なデータ蓄積・公開までの流れをフロー図にまとめて提示した。

謝辞：本報告で説明したいいくつかの項目は、土木研究所が過去数年間にわたり国土交通省及び同国士技術政策総合研究所とともに連携して推進してきた流量観測高度化プロジェクトから得られたデータを使用している。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 独立行政法人土木研究所，財団法人土木研究センター，アジア航測株式会社，小糸工業株式会社，株式会社拓和，株式会社東京建設コンサルタント，横河電子機器株式会社：共同研究「非接触型流速計測法の開発」共同研究報告書，土木研究所共同研究報告書，No.291，2003
- 3) 深見和彦ら：ドップラー式非接触型流速計（電波・超音波）を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～，河川技術論文集，Vol.14，pp.307-312，2008.
- 4) 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，土木学会河川技術論文集，第16巻，pp.53-58，2010
- 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，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，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) 金木誠・寺川陽・吉谷純一・松浦達郎：超音波ドップラー流

速プロファイラーの河川流量観測への応用に関する研究報告書，土木研究所資料，3719号，2000.3.

- 10) 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.
- 11) 岡田将治，橋田隆史，森本精郎，増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測，水工学論文集，第52巻，2008.
- 12) 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.
- 13) 菅野裕也・萬矢敦啓・深見和彦：外部コンパスを併用したADCP観測に関する提案，土木学会河川技術論文集，第17巻，pp.35-40，2011.
- 14) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・深見和彦：日本におけるADCPを用いた高水流量観測手法，河川流量観測の新時代，pp.34-41，2011.
- 15) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦：ADCPを用いた洪水流観測の計測精度評価に関する総合的検討，水工学論文集，第55巻，pp.1183-1188，2011.
- 16) 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，pp.295-300，2008.6.
- 17) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史：日本におけるADCPを用いた流量観測データの品質管理手法の考察，河川流量観測の新時代，pp.28-33，2011.
- 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，水工学論文集，第54巻，pp.1087-1092，2010.
- 19) Marian Muste et al., 2008; Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resour. Res., 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950
- 20) 例えば吉川 秀夫：流砂の水理学，丸善，ISBN-10: 4621030086, ISBN-13: 978-4621030080, 1985.
- 21) Ceyda Polatel: Large-scale roughness effect of free-surface and bulk flow characteristics in open channel flows. Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa. 2006.
- 22) Atsuhiko Yorozuya, Kazuhiko Fukami: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, Proceeding of Third International Symposium on Shallow Flows, Iowa City, Iowa USA, 2012.
- 23) 山本晃一：構造沖積河川学，山海堂，ISBN-10:4381017366, ISBN-13:978-4381017369，2004.

(2012. 8. 31受付)