

非接触型センサーを用いた面的な河川水流速・水位の計測手法の開発及び検証

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～平 29

担当チーム：水工研究グループ水文チーム

研究担当者：山本 晶、萬矢 敦啓、

小関 博司

【要旨】

本研究は河床変動・流路変動が活発な河道における流量観測システムを構築することを目的としている。この観測システムとは無人観測であること、洪水時の河床変化を考慮すること、データ欠測が少ない安定した計測が可能であることである。本報告で概説する電波式流速水位計はこのシステムの中心技術であり、既往の電波式流速計と比較すると計測範囲が広いこと、流速と水位の同時計測が可能になったことが特徴的である。また雨や雪を含んだ異なる気象条件においても計測できるアルゴリズムを改良した。ここでは計測原理の概要、短期的な比較観測、長期的な試験観測の結果の概要を述べる。

キーワード：非接触型センサー、電波式流速・水位計、流量観測手法、無人化・省人化

1. はじめに

河川計画・維持・管理を実施する上で最も基礎的な水文データは水位と流量であり、また流量は、水位、流速を計測することで算出することができる。これらを安定的かつ確実に計測するシステムを準備しておくことが、水文データを確実に蓄積するために欠かせない技術となる。

一方、日本国内で使用されている水位計の多くは、河道内に H 型鋼の支柱構造物を立てるなどし、そこに量水標や水位計を設置するものである¹⁾。また浮子流量観測手法に関しては作業員が浮子を投入することが前提となる。近年多発している大規模な出水時において、このような手法を採用している観測地点ではデータ欠測の事例が少なからず発生している。例えば、水位計近傍の河床洗掘による機器の破損、水位計周辺の土砂堆積及び濡筋の変化による計測の停止、外水氾濫により作業員が観測地点に到達できないことによる観測の実施不能などがこれにあたる。このような大規模出水時にデータ欠損がおきるということは、河道計画で最も参考にすべき既往最大クラスのデータを取得することができないことを意味する。

他方、新しい技術であるリモートセンシングを活用した手法は橋梁等に観測機器を設置することで計測機器が流れや河道の変化の影響を受けない。これらは超音波式、電波式水位計及び電波式流速計である²⁾が、これまでそれぞれが水位、流速データを蓄積してきた実績を持つ。それ故に無人自動流量観測システムの一つとして認知されてきた。またこれらの技術は 1 セン

サーあたり 1 地点の観測となるために、横断方向の流速及び水位が大きく変化する場合複数のセンサーを必要とする。またセンサーが照射する位置に土砂が堆積すると正しく水位を計測することができなくなる場合がある。

そこで本研究は河床変動・流路変動が活発な河道において安定的に、かつ十分な精度を持つ流量観測システムを構築することを目的としている。この観測システムは無人観測であること、洪水時の河床変化を考慮すること、データ欠測が少ない安定した計測が可能であることを目指している。さらに水没しない橋梁に設置した非接触型であること、照射位置が簡単に変更できることが望ましい。そのような観測システムを構築するために電波式流速・水位計（これ以後、センサーと呼ぶ）を中心とした技術体系を採用した。開発中のセンサーは既往の電波式流速計と比較すると高感度化に成功していること、水位と流速の同時観測を可能にしていること、またセンサーを任意の方向に振ることで流速や水位の面的な分布を迅速かつ効率的に計測できることが特徴的である。

本研究チームは横河電子機器と共同研究を締結し、研究開発を進めている。このような開発過程において二つの現地実験を実施した。一つ目は 3 章で説明する比較観測で、電波タイプの非接触型流速計が得意としない水面が穏やかな環境における流速及び水位の観測である。特に計測限界やそのような条件における計測精度を検証した。比較の対象として音響系流速観測手法の代表である Acoustic Doppler Current Profiler

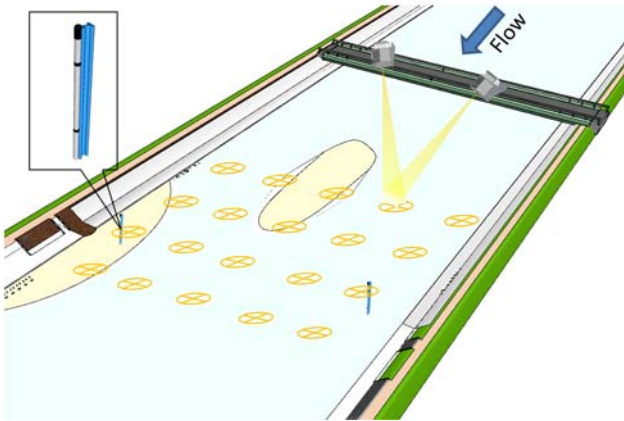


図-1 観測システムの概念図



図-2 雲台に搭載した電波式流速水位計：左がビデオカメラ、右が電波式流速・水位計のアンテナ、雲台

(ADCP)を使用した。二つ目は4章で説明する試験観測であり、洪水時の水面の凹凸が大きく対象距離が短い比較観測と比較すると計測条件としては簡単であるが、あらゆる気象条件での計測の安定性、雨や雪等の擾乱によるエラー除去のアルゴリズムの開発を実施してきた。本報告はセンサーの計測原理、比較観測、試験観測の計測結果の一例を紹介する。

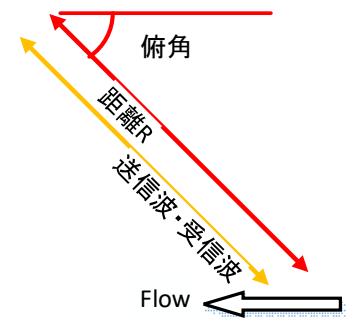


図-3 電波式流速水位計の実装例
(撮影時の図中の距離Rは18.14m)

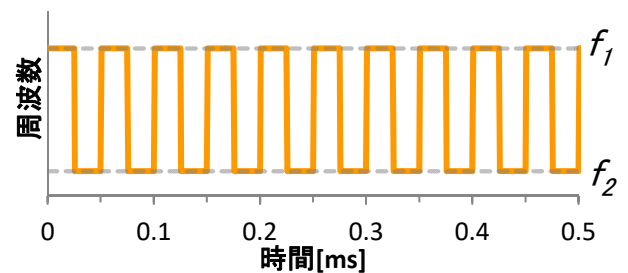


図-4 二周波 CW レーダの送信波のイメージ

2. 観測システム及び計測原理研究方法

2.1 観測システムの概要

図-1に観測システムの概念図を示す。図は堤防、橋梁を含めた代表的な河道、橋梁に設置した二つのセンサー、河道内に設定したセンサーによる照査域、左右岸に設置された既往の水位計を示す。またこれは低水時の水位を想定しているものである。

図が示すように、右岸に設置された既往の水位計は近傍の土砂堆積により水位観測ができない状況となっている。また設定された観測地点は複数あるが河道中心部のものは発生した砂州により河道の水位を代表しないものとなっている。このように河床変動が頻繁に発生するような河道においてこれらの砂州が水没するような水位での計測に関しては問題が顕在化しないが、低水時の水位計測となると課題が発生する。このような場合、センサーを砂州の存在しない箇所に照査すればこのような課題が解決される。

流量観測のための流速値という観点では堤防ラインに対して平行な流速成分を採用する機会が多い(ここでは偏角をゼロと定義する)。後述するドップラー効果を用いた観測は電波の送受信方向の流速を計測するため、図-1が示すようにセンサーの方向を変更できる機能を持たせ偏角が極端に大きくなる場合(例えば偏角

90度)の場合、一つのセンサーでは計測が難しい。そのために二つ以上のセンサーで同じ地点を計測することでこのような課題を克服することができる。

図-2 は一つの計測機器の構成を示したものである。ここでは雲台に左側にカメラ、右側にセンサーを搭載している。これらが雲台の操作により全方位に対して電波による流速及び水位の観測が可能となる。また画像から得られる情報は、流況、照査地点の砂州の有無、電波技術と組み合わせることで水面波の波形の観測が可能となる。特に波長の測定に関する議論は後述するが、水深推定に有効となるために流砂量の多い河川においては有効となる。

2. 2 計測原理

開発中のセンサーは電波技術の一つである二周波 CW(Continuous Wave)レーダ³⁾を活用した、多周波 CWレーダを用いた計測手法⁴⁾を採用している。同センサーは技術基準適合の特定小電力無線機器であり、アンテナ半値角を約2度と設定した。また使用周波数は24.05GHz から 24.25GHz まで目標とする距離に応じて設定することが可能である。図-3 は開発中のセンサーの試験観測の設置状況を示す。ただしこれは図-2 で示した雲台を採用していない。紙面の都合上図には示さないが、雨量、風向風速等の環境計測も同時に実施している。設置場所は北陸地方整備局姫川山本流量観測地点である。図が示すようにセンサーは水路橋に設置され、45度の俯角で上流側を照射している。このセンサーは照射域の流速とセンサーから照射域までの距離 R を計測する。またセンサーの標高、センサーの俯角、距離 R から水位を算出する。図が示す局舎の構造物が同観測地点の水位計であるが、センサーの照射位置はほぼ同じ測線で両者の横断距離は 10m 程度である。さらに流況を把握するためにセンサー直近に同じ方向を向けたビデオカメラが設置してある。自然河川の計測では降雨、周囲の植生等が揺れることから検出される速度成分等、受信電波を複雑にする要素が多数存在する。さらに照射域が面であること、面内を乱流成分となる水粒子があらゆる方向に移動している可能性があることなど、複雑な電波解析を要求されることになる。本章ではまず始めに議論を単純化するため、電波方向に流速 V_r で移動する点源に照射された送受信波に対して理論とその分析方法を示し、その後、自然河川の計測に必要な分析方法を概説する。

図-4 は二周波 CW レーダの送信波のイメージ図である。このような周波数 f_i ($i=1,2$)の電波を一定時間間隔で交互に送信する。これらの時間間隔は 1.0×10^{-3} s

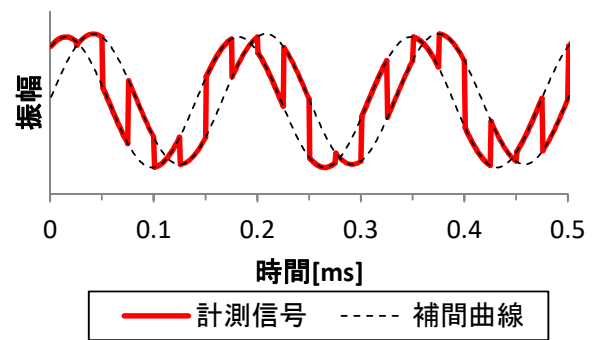


図-5 移動点から得られたドップラー信号のイメージ

に 20 回程度の周期の波を発信することになる。実際には周波数を切り換えるたびにデータを取得するので一つの周波数の信号に関して約 0.2 秒の間に 4096 個のデジタル値を取得する。このような波を f_i の周波数、 ϕ_i の位相を持った送信波 S_{fi} として次式に示す。

$$S_{fi} = a \cdot \cos[2\pi f_i t + \phi_i] \quad (1)$$

次にこの送信波が距離 R の位置の移動速度 V_R を持つ点に照射されたとき、受信波 R_{fi} はドップラー効果を受け次に示す式の信号となる。

$$R_{fi} = b \cdot \cos \left[2\pi f_i \left(t - \frac{2(R - V_R \cdot t)}{C} \right) + \phi_i \right] \quad (2)$$

ただし C は光速である。上式を書き換えると

$$R_{fi} = b \cdot \cos \left[2\pi (f_i + f_{di}) t - \frac{4\pi R f_i}{C} + \phi_i \right] \quad (3)$$

ただし、ここで

$$f_{di} = \frac{2f_i \cdot V_R}{C} \quad (4)$$

となる。ここで f_{di} はドップラー効果により変化した周波数である。このような信号から流速及び距離を換算するための情報を取り出すには、ドップラー信号を取り出す必要があるが、そのために両者を合成すると便利である。ここでは単純に式(1)と式(3)を掛け合わせることで式(5)を得る。

$$R_{fi} \cdot S_{fi} = a \cdot b \cdot \cos \left[2\pi (f_i + f_{di}) t - \frac{4\pi R f_i}{C} + \phi_i \right] \cdot \cos[2\pi f_i t + \phi_i] \quad (5)$$

式(5)は三角関数の加法定理により以下のように変形

することができる。

$$R_{f_i} \cdot S_{f_i} = \frac{ab}{2} \left\{ \cos \left[4\pi \left(f_i + \frac{1}{2} f_{di} \right) t + 2\phi_i - \frac{4\pi R f_i}{C} \right] \right. \\ \left. + \cos \left[2\pi f_{di} t - \frac{4\pi R f_i}{C} \right] \right\} \quad (6)$$

式(6)が示す合成波の特徴として右辺括弧内第一項と第二項は周波数が大きく異なる波であることから両者を分離することは容易である。このように分離された第二項は f_{di} の周波数を持った波であり、これをドップラー信号 d_{fi} と呼ぶことにする。この第二項は

$$d_{fi} = \frac{ab}{2} \left\{ \cos \left[2\pi f_{di} t - \frac{4\pi R f_i}{C} \right] \right\} \\ = A \cdot \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (7)$$

となる。この式からドップラー信号の ω_i から f_{di} を、位相 θ_i から距離 R に関する情報を得る。距離 R に関しては、二周波を活用し次式で得ることになる。

$$R = \frac{(\theta_1 - \theta_2) \cdot C}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (8)$$

式(8)が示すように位相 θ_i は $0 \sim 2\pi$ の範囲の数値を取ることになるが、送信する二つの周波数を変えることでターゲットとする計測範囲を自由に設定することが可能となる。また多周波技術とは送信周波数を3つ以上用いることで、式(8)が示すスケールを複数活用し、距離計測の精度を高めるものである。このようにして式(4)から流速を算定する。また式(8)から得られたセンサーから水面までの距離、センサーの設置条件である俯角およびセンサーの位置情報から水位を算出する。

図-5は移動点を対象としたドップラー信号のイメージである。図中に二本の正弦波が示されているが、太線が実際の計測信号、点線が正弦波に見えるように補間した曲線である。図-4で示したように二周波CWレーダは二周波の信号を時間差で発信している。式(7)は図の点線のような曲線を表現しているが、実際には太線のような信号を処理することになる。また図-4で説明したようにデジタル信号を扱っているため、実際には図-5の太線に離散的なデジタル値が存在することになる。さらに前述のように自然河川での計測であることから、必ずしも図-5が示すような綺麗な正弦波であるわけではない。そのようなドップラー信号を分析するためにスペクトル解析を実施し式(7)の周波数と

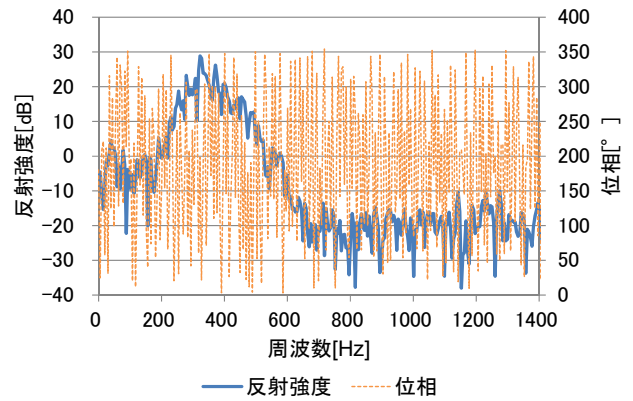


図-6 ドップラー信号のスペクトル (約0.2秒間に計測された4096個のデータより解析)

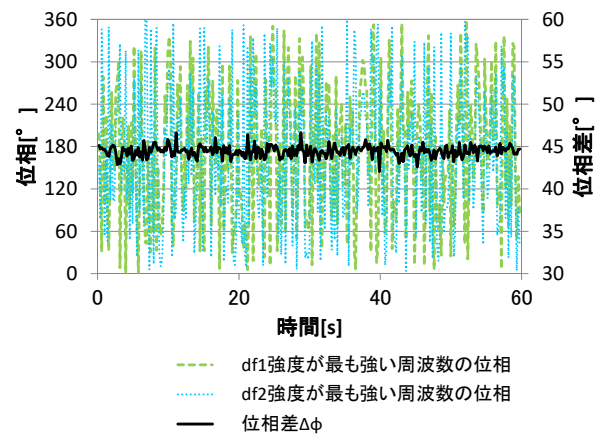


図-7 位相及び位相差の時間変化 (約5Hzの観測結果)

位相を抽出する。前述のようにこれまでは議論を単純化するために移動点に着目した。以下の結果は計測対象が面でありかつ乱流場である試験観測から得られた結果の一部を用いる。

図-6は二つのドップラー信号のうち、一つの周波数スペクトルを示す。これは約0.2秒間に計測された4096個のデータを用いたスペクトルであり、横軸を周波数、左縦軸を信号の振幅から得られる強度、右縦軸をスペクトル解析の実数部と虚数部から算出した位相を表示している。このときの最大強度を示す周波数 f_{di} が310Hzとなる。この値を式(4)に代入することで流速値を得る。また位相はそれぞれの周波数に対して変化があるために少しわかりづらいが周波数310Hzに対しては200度と読むことができる。これを例えば θ_1 とする。同様に他方の信号から θ_2 を得る。図-7は位相及び位相差の時間変化を示す。図-6が約0.2秒間に4096個のデジタル値を用いて作成されているのに対して、図-7はこのような観測を一分間計測した場合の時間変化であり、この観測の最小時間単位は約0.2秒

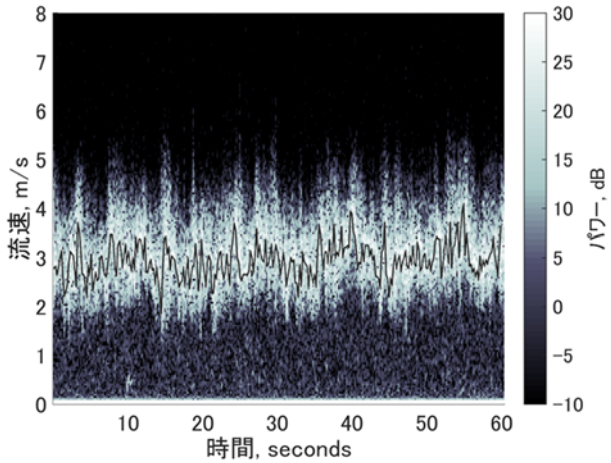


図-8 流速と反射強度の時間変化(約 5Hz の観測結果)

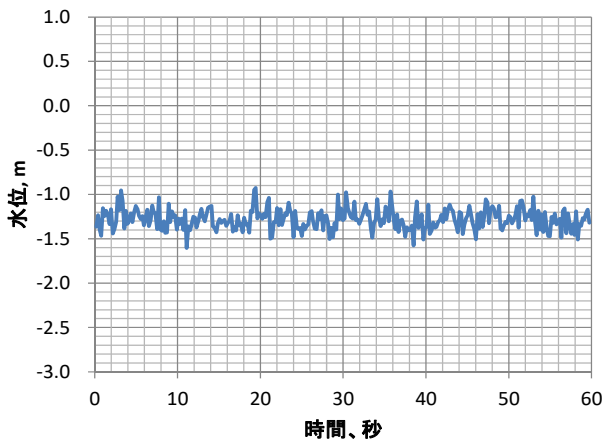


図-9 水位の時間変化 (約 5Hz の観測結果)

である。位相そのものは図-6 が示したように 0.2 秒間のスペクトル解析でも値が広く分布する。また同様に図-7 が示すように時間的にも大きく変動している。しかしながら位相差は図-7 が示すように時間的にも安定していることがわかる。この値を式(8)に代入して距離を算出することになる。

図-8 は縦軸に流速を、コンターで反射強度の時間変化を示す。ここで示す反射強度は図-6 の縦軸の反射強度に対応するものである。また図-6 で決定した流速を図-8 に黒線で示す。このときの流速は平均値が 3m/s 程度で、0.5m/s 程度の範囲で振動している様子がわかる。図-9 は図-7 で決定された位相差を式(8)に代入し、さらに他の周波数からの情報を基に得られた水位の時間変化を示したものである。なお水位は観測地点のテレメータ水位の基準に合わせた標高で表示している。さらに前述のようにこのセンサーは俯角 45 度で設定されていることから、それらを考慮した結果となる。これらが示すように水位は平均して-1.2m 程度、0.2m 程

度の範囲で振動している様子がわかる。またこのときの流速と水位の振動の周期は 10 秒程度である。紙面の都合上ここでは示さないが、このときの流況をビデオ映像で確認すると河川表面に凹凸が発生していること、小規模ながら碎波も発生していることがわかる。上記の流速と水位の振動は、センサーの設置条件によるものも考えられるが、このような流況による流速・水位の変動からも十分説明できるものである。

2.3. アルゴリズムの最適化

図-6 が示す信号は雨や雪等の擾乱のなり理想的な計測結果の一例である。すなわち得られた 310Hz の周波数は河川水の表面が流速を持つことから得られた値である。電波の照査範囲の中に雨粒や雪が混在した場合、それらの落下速度も得られた流速の一つとして計測される。また風等によるセンサーの振動は照査域の流速を相対的に変えることになる。このような課題に対して長期的な観測結果から電波特性等を鑑み、アルゴリズムを最適化することで、低水時、出水時、異なる気象条件に対応が可能なアルゴリズムを最適化した。

3. 比較観測

2 章で概説したセンサー及び手法を評価するため実河川における比較観測を実施した。ここでは特に電波タイプの非接触型流速計が得意としない水面が穏やかな環境における流速及び水位の観測であり、特に計測限界やそのような条件における計測精度を検証することを目的にしている。観測に際しては ADCP 及びトータルステーションのターゲットを搭載した橋上操作艇を有人船で曳航することで複数の観測地点に移動する。一方でそれぞれの観測地点にセンサーを照射することで両者を比較した。流速に関しては ADCP の第一層の観測値、水位に関してはトータルステーションによる測量結果を用いている。なお ADCP は Teledyne RD 社の Work Horse ADCP を、トータルステーションは一級測量で頻繁に使用されているトプコン社の IS3 を採用した。観測地点は前橋市を流れる利根川を選定した。観測は平水時に実施していて、観測期間中の水位変動は無視できるほど小さかった。

観測地点の概要を図-10 に示すが、この写真は観測当時より若干流速が早いときの流況である。この近傍は瀬淵が存在する河道区間である。この観測地点の直上流は瀬の一部であるが、ここの流速は早く、また水面に凹凸が発生している。図の下に示す橋梁の直下流には、同様に高流速地点である瀬がある。本観測では、上記の両瀬の間の淵を観測地点としている。観測に要

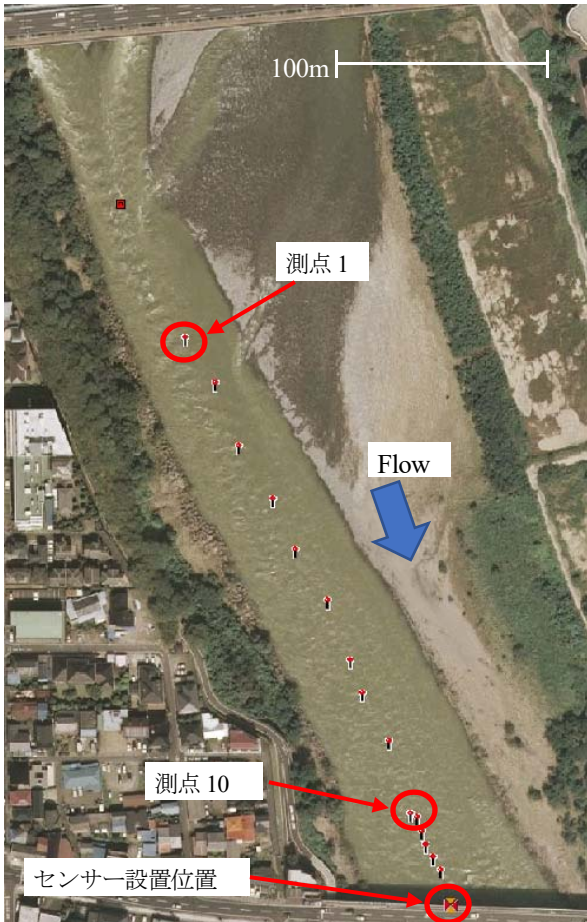


図-10 観測地点概要 (出典：国土地理院)

した時間は一日程度であり、アメダスの前橋は天気が晴れ、風速が 2 m/s 程度であった。電波式水位流速計は図下の橋梁から上流側を向け、俯角を徐々に変えることで複数の地点を計測している。俯角はデジタル傾斜計(Pro3600)を採用している。測点はセンサーからの水平距離が292mの測点1を最上流点として俯角を徐々に大きくしながら下流側を計測した。測点10の水平

距離は41m、最下流の測点15の水平距離は11mである。またセンサーの設置位置と測点1までの垂直距離は16.042m、測点15までの垂直距離は16.221mであった。

図-11は観測された流速の縦断変化を示す。これは三分間計測を実施したときの平均値である。横軸はセンサーから水面までの直線距離、左縦軸をセンサー、ADCPで計測した流速、右縦軸に両者の差を示す。図が示すように流速は上流部で2m/s程度の値から下流に向けてほぼ一様に減少し1m/s程度になり、また最下流部で少し早くなる。計測範囲全域にかけてADCPと電波式水位流速計の計測結果はほぼ等しく、正確差も最大で0.15m/s程度である。

図-12は観測された水位の縦断変化を示す。これも同様に三分間計測の平均値である。横軸はセンサーから水面までの直線距離、左縦軸はセンサー、トータルステーションで計測した水位、右縦軸は両者の差である。図が示すように、水平距離が180mまでは観測結果が得られているが、それ以上の距離においてはデータ欠測が生じている。これは流速値を得るよりも水位計測には多くの信号を必要としていること、そのために水位データを解析するのに十分な信号が得られていないことが原因である。また50mから180mにかけては正確差が1mを超えること、また50m以下では0.1m程度の正確差となる。

今回の比較観測は低水のような河川表面が穏やかな流況での観測となった。既往の電波式流速計はこのような流況において観測を得意としていない⁵⁾。例えば極端な例を挙げると鏡のような水面では照射電波の多くがセンサーの反対方向へ反射し、センサーで電波を受信できないことになる。反対に水面に大きな凹凸

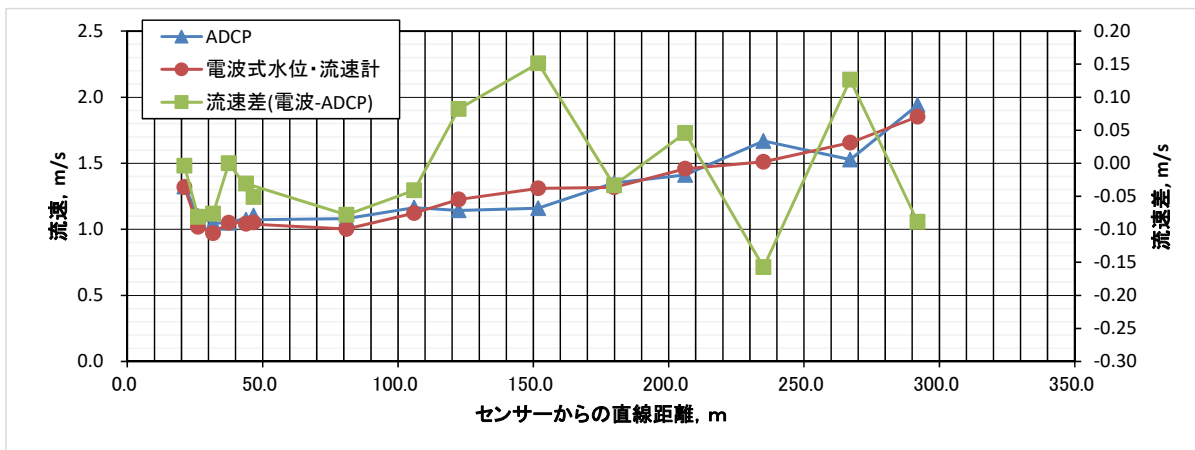


図-11 流速の縦断変化 (3分間平均)

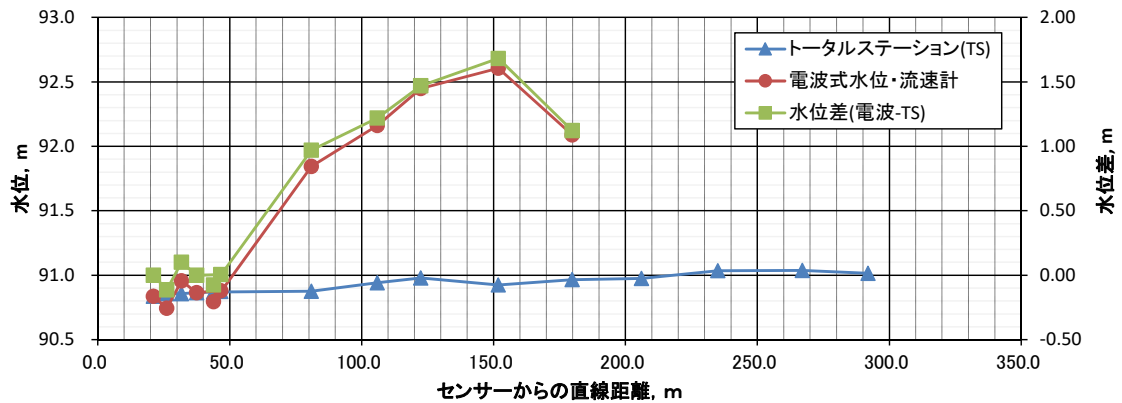


図-12 水位の縦断変化（3分間平均）

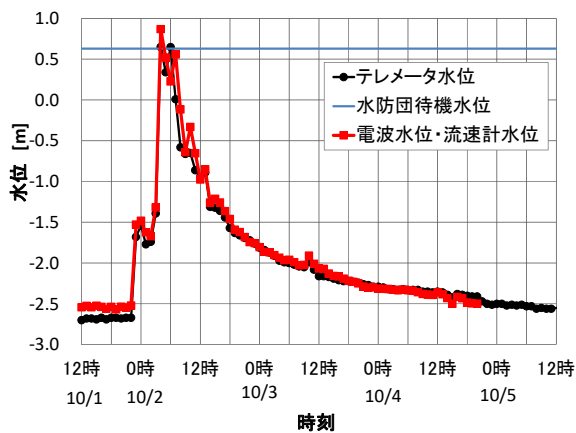


図-13 水位の時間変化



図-14 ピーク水位における流況（10月2日6時）



図-15 砂州の上を計測した例（10月5日6時）

が存在するような場合においては強い受信電力を得ることができる。そのためにセンサーの限界は穏やかな水面でテストすることが望ましい。そのような前提の基に本比較観測では以下のような知見を得ることができた。

今回設定した観測条件では流速計測能力の限界を確かめることができなかつたが、300m程度の範囲であれば十分な計測能力を持つことが理解できた。水位計測に関しては180m以上の計測を目標とする場合センサーの送受信能力を向上させる必要がある。一方で50～180mの範囲に関しては式(8)に示したように目標とする距離に応じた周波数を組み合わせることで正確差を小さくすることができる。さらに50m以下に関しては、十分実用に耐えうる正確度を持ち合わせていることがわかる。また俯角を計測するための傾斜計の精度も影響してくることから、周辺機器の改善も考えながら精度を向上することが必要となる。またこの試験観測は3分間の平均結果を使用している。前に述べたとおり、センサーの最小計測間隔は0.2秒であるため非定常性が強い流況における観測結果の妥当性を評価する必要がある。

4. 試験観測

この章では洪水時の水面の凹凸が大きく対象距離が短い計測条件、無人・遠隔観測における計測の安定性、雨や雪等を含めたあらゆる気象条件におけるエラー除去のアルゴリズム開発のための観測である。試験観測の実施場所は図-3に示した姫川山本水位・流量観測地点である。本観測所は河床勾配が1/110程度であり洪水時には流速が7m/sを超えるような値も存在し⁶⁾、また定在波が発生するような流況となる⁷⁾。図中の距離

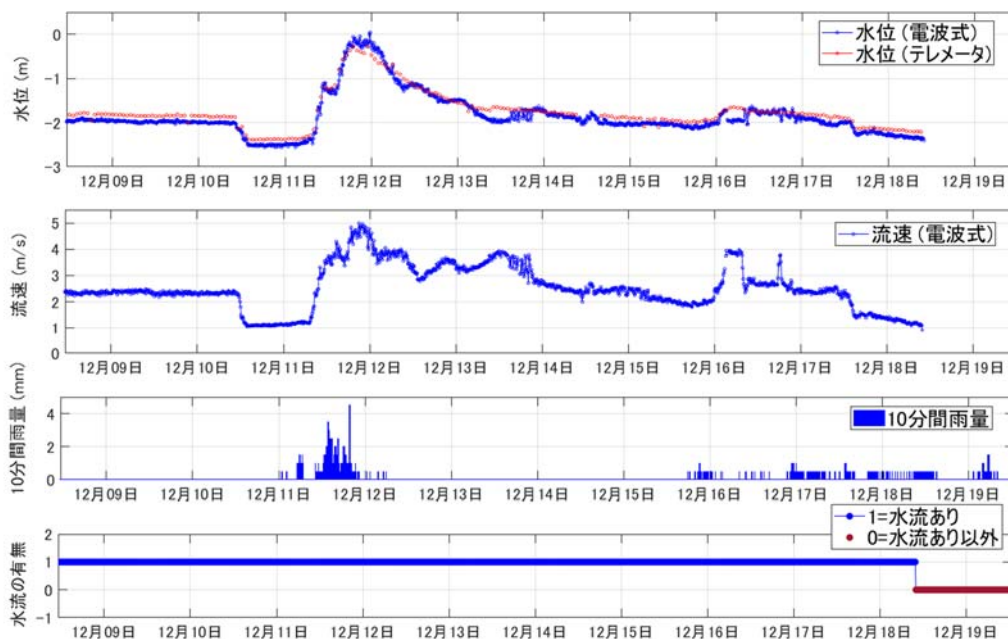


図-16 水位、流速、10分雨量、照査位置における水流の有無の長期観測の一例

Rは18.14mであるため、先の比較観測と比較すると十分高い正確度を持つ範囲の計測であることがわかる。本観測は2015年9月から2017年11月に間に実施されている。本章では同試験観測から得られた結果の一部を示す。ここでは比較観測の対象として国土交通省所管の同地点の水晶式のテレメータ水位を用いた。なお流速に関しては、良好な比較材料がないためにここでは水位観測の結果のみを議論の対象とする。

図-13はテレメータ水位とセンサーが計測した水位の時間変化である。図が示すように-2.7mであった水位が6時間程度で0.63mの水防待機水位を超えて0.65mまで上昇した。その後三日程度かけて元の水位まで下降した。また10月4日20時からそれ以降はデータ欠測が生じていることが特徴的である。これらの二つの水位は特に増水期とピーク水位付近にかけては数十cm程度の差が認められる。

次に図-14は図-13のピーク付近に対応する流況の画像である。写真中央部の○はセンサーの照射点に対応している。図-14が示すように波の凹凸や砕波も発生していることがわかる。またYorozuya et al (2014)は同観測地点の別の出水において1m程度の横断的な水位差が発生することを報告している⁶⁾。またセンサーの照射位置とテレメータ水位計の位置が10m程度離れている。これらのことから、図-13が示す水位差は流況によるもので十分説明することが可能である。次に図-15は図-11の10月5日6時における状況である。図が示すように照射域に砂州が発生したため照射

域の流速値が存在しなくなった。前述のように水位は式(8)で得られるRを用いて算定することになるが、この式の θ_i は図-6のドップラー信号のスペクトルから決定される。そのために流れが存在しない地点が照射域になった場合、流速を決定するための周波数が算出できなくなり、同時に水位を決定するための位相も算出することができなくなる。

前述のように土砂が水位計近傍に堆積することで水位観測が停止するような現象は現況の水位流量観測地点では頻繁に発生し、水文観測の課題の一つである。このような状況になった場合はセンサーに首振り機構を採用し、3章で議論した計測範囲内において照射位置をずらすことで新たに安定的に水位観測を継続することが可能となる。これは図-2で示したような雲台を採用することで解決する課題である。

図-16は水位、流速、10分雨量、照査位置における水流の有無であり、2015年12月9日から19日までの時系列変化を示している。図-13と同様に水位に関しては本センサーによる観測結果と共に、高田河川国道が計測しているテレメータ水位を示している。図が示すように12月11日に比較的大きな出水があり流速が最大でも5m/s、水位は0mにまで達している。図-13と同様にテレメータ水位が示す水位観測地点と本センサーの照査位置は必ずしも一致していないこと、水位の空間的な変動は数mにも及ぶことから水位の図が示す両者の乖離は自然現象によるものと考えられる。いずれにしても低水時の水位と考えることができる-2.5mか

ら+0.0m に至るまで連続した水位観測が成功している。また12月11日に関しては10分雨量にして3mmを超えるような降雨であるがこのような気象条件においても優位な計測結果が得られていることがわかる。

5. まとめと今後の技術的な展望

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 著者らは二周波 CW レーダを活用した多周波 CW レーダを用いて、流速・水位を同時に観測する電波式流速水位計を開発している。本稿ではその計測原理を概説した。
- 2) 開発中のセンサーを用いて比較観測を実施した結果、流速は水平距離で300m程度先の流速を数十cm程度の正確差で計測することが可能であることがわかった。また水位に関しては50m程度先の水位を10cm程度の正確差だった。
- 3) 無人・遠隔観測を試行した試験観測において、急激な水位上昇が発生したが、そのような現象に対しても適切な観測を実施していることがわかった。
- 4) 長期観測によるアルゴリズムの最適化により低水時、洪水時、複数の気象条件における観測を実施することができた。
- 5) 水文観測の運用上の課題の一つに水位計近傍の土砂堆積による計測の停止が上げられる。同手法に首振り機構を採用することでこのような課題を解決する可能性を示唆することができた。

また今後の技術的な展開を以下に述べる。流砂量が多い河道においては河床波の発達が見込まれる。河床波が発生すると条件によっては水面波が発生するが、このような水面波の波長と河床波の波長は同等である。また河床波の波長と水深の関係は Yalin & Bishop (1977)により整理されている⁸⁾。また水面波の波長、その時の流速に関しては山田ら(1984)の文献が参考になる⁹⁾。一方で本センサーは水位を計測しているがこれは実質、水面までの距離を計測していることになる。この水面までの距離、センサーの俯角である。図-2で示したように画像は照査域をとらえている。このような観測で水面波を画像から認識できる場合、これらの情報を組み合わせることで水面波の波長を計測することが可能となる。計測された波長、表面流速から水深を得ることができれば河床変動を考慮した流量観測システムが構築されることになる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所に観測と機材の設置の許可を頂いた。またテレメトリー水位データの提供を受けた。またここに得られた成果は横河電子機器との共同研究の成果である。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 例えば、国土交通省河川局監修、独立行政法人土木研究所編著：平成14年度版水文観測、全日本建設技術協会
- 2) 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.
- 3) 例えば、稲葉敬之、桐本哲郎：車載用ミリ波レーダ、自動車技術、Vol.64, No.2, pp.74-79, 2010.
- 4) 佐藤祐司・官野高雄：電波近接センサ、特許第3735721号 (P3735721)、2004.9.16
- 5) 例えば土木研究所水工研究グループ水文チーム：高水流量観測の高度化マニュアル(洪水流量観測編) Ver.1.2、http://www.pwri.go.jp/team/hydro_eng/manual.htm、2016.
- 6) Atsuhiko Yorozyua, Yoshiki Motonoga, Yoichi Iwami, T. Furuyama, K. Ogiwara: Water Discharge Measurements with ADCP in High Speed Flow with High Sediment Concentration, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp.21 - 24, Sept 2014.
- 7) 工藤俊、萬矢敦啓、小関博司、笛田俊治、中津川誠：洪水中の河床変動を考慮した流量の推定、土木学会論文集 G (環境)、Vol.72, No.5, pp.I313-I320, 2016.
- 8) Yalin, M.S. and Bishop, C.T. : On the physical modeling of dunes, Proc. 17th Cong. IAHR, 1. 1977.
- 9) 山田正、池内正幸、堀江良徳：不規則底面をもつ開水路流れに関する研究、第28回水理講演会論文集、pp.149-155, 1984.

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF WATER-LEVEL/VELOCITY MEASURING INSTRUMENT WITH RADAR TECHNIQUE

Research Period : FY2001-2005

Research Team : Hydrological Engineering

Authors : Akira Yamamoto,

Atsuhiko Yorozyua, and

Hiroshi Koseki

The research team have developed an automatic discharge measurement system at the river section, where river bed elevation and flow direction frequently change. The system requires remotely operative, capable enough to predict the river bed evolution by the observed values, and stable measurement with less missing data. The water-velocity/level measuring instrument is a core component for the system. This paper describes a measurement principle, results of a technical-examination on the actual river, and one of the results of a long-term observation.

Key words: non-contact current meter, velocity at water surface, gauge, RADAR