

河床変動に対応した河川流量観測システムの 開発と実河川実験

Development of river flow measurement system under the condition of riverbed evolution and its field experiments

角 哲也¹・中川 一²・鈴木崇正³・馬場和史⁴・小田将広⁵

Tetsuya SUMI, Hajime NAKAGAWA, Takamasa SUZUKI, Kazushi BABA and Masahiro ODA

¹正会員 博(工) 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

³学生員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4)

⁴JFEアドバンテック株式会社 (〒663-8202 兵庫県西宮市高畑町3-48)

⁵正会員 博(工) JFEアドバンテック株式会社 (〒663-8202 兵庫県西宮市高畑町3-48)

The river flow discharge measurement system under the condition of riverbed evolution has been developed. In the system, flow velocity, water level and local riverbed elevation are measured continuously, and cross section and calibration factor of the river channel are estimated both from the measured riverbed elevation and riverbed shapes previously determined by numerical calculations. Flow discharge is then obtained by multiplying the measured flow velocity, estimated cross section and calibration factor. Field experiments were carried out at Ozaki located upstream of Kambara Ozeki weir in the Shinano River. Investigations of the riverbed materials indicated that bed load could have moved after the special gate operation for migration of salmon at October 1st when reservoir water level was drawn down by opening gates of the weir and flow velocity was increased. The mean riverbed elevation was fallen down by 16cm from September to December. It was confirmed that the developed system can measure the river flow discharge within +/- 10% of that estimated by an Acoustic Doppler Current Profiler.

Key Words : River flow discharge measurement system, riverbed evolution, Obliquely incident ultrasound

1. はじめに

河川環境の整備と保全の必要性が強く認識されてきた近年、河床変動は防災・環境の両側面において重要な現象の一つとして取り上げられている。例えば、芦田らは、環境と調和する治水の実現に関し洪水時の河床変動による被害への対処とともに河川環境復元のための流砂環境の再生のために「河床変動を許容した河川整備が求められる」¹⁾と述べている。このような背景の下では、河川の基本的かつ重要な水理量の一つである流量についても河床変動に対応した観測技術が必要とされる。

著者らは、超音波を用いた流速測定技術と数値シミュレーションに基づく流量連続観測手法を開発し、河床変動が無い条件下では実用上十分な精度を持って連続観測可能であることを報告した²⁾。

この流量観測装置では、従来の低水流量観測や浮子観

測と同様に、流速測定値 v 、水位と河床形状から算出される流水断面積 A 、更正係数 k の積によって流量 Q を得る(式(1))。

$$Q = V \cdot A \cdot k \quad (1)$$

ここで、更正係数とは、測定した流速を断面平均流速に換算する係数である。

式(1)から明らかなように、例えば出水時に河床洗掘や埋め戻し等による河床形状の時間的変化が生じると、それは流量観測に直接影響する。しかし、出水中の河床形状を実時間観測することは非常に困難であることから、随時発生する河床変動の流量への影響は一般に考慮されていないのが現状である。

そこで、本研究では、河床変動が生じても高精度に流量を連続観測可能なシステムを開発することを目的として、事前実施する河床変動計算と現地での河床高連続測定を流速連続観測装置と組み合わせることによって、河床変動発生下での流量観測を高精度化する手法を開発

し、実河川での検証実験を実施した。

2. 河床変動に対応した流量観測技術

河床形状の測定には、音響測深機やマルチビーム測深器³⁾など、水中で超音波を送受信する装置を移動させる方法がある。しかし、川幅全体の測定のために装置を移動させる時間を要する。また出水時には装置を移動させて測定すること自体が困難と考えられる。すなわち、現状での河床変動に関する実時間情報は、ある定点の連続観測によって得られる局部的情報のみである^{4)~6)}。

ここで、流量観測に限定すれば必要な情報は流水断面積や更正係数の値であり、河床形状そのものではない。

そこで、本研究では、実河川における河床変動情報は局所的な河床高の連続測定値として入手し、不足する全体形状に関する情報を河床変動計算により補完して、測定河床高に対応する流水断面積や更正係数を推定することとし、これらの推定値と流速連続測定値から式(1)により、流量を実時間連続観測する手法について検討した。

流量観測処理フローとしては、以下のようになる。

- (ア) あらかじめ当該地点を含む流域の出水イベントに対する河床変動計算を実施し、流量観測点における幾つかの代表的な時点 $t_i, i=1 \dots n$ での河床形状 $zs(t_i, x)$ を推定する (x は横断方向距離)。
- (イ) それぞれの河床形状 $zs(t_i, x)$ について、実際に河床高を測定する場所 $x = x_0$ の河床高 $zs_i = zs(t_i, x_0)$ を求める。
- (ウ) それぞれの河床形状 $zs(t_i, x)$ について、水位 $ws_j, j=1 \dots m$ と流水断面積 $As(zs_i, ws_j)$ の関係を求める。
- (エ) それぞれの河床形状 $zs(t_i, x)$ について、河床固定による流れの数値シミュレーションを実施して水位 ws_j と更正係数 $ks(zs_i, ws_j)$ の関係を求める²⁾。

以上は河床変動計算及び流れの数値シミュレーションによる解析結果であり、流量観測場所で流量観測時に得られる流速・水位・河床高等の変化情報は不要である。

次に、実河川において流速 V 、水位 w とともに、局所的な河床高 z を連続測定する。得られた測定値に対し、

- (オ) 水位・河床高と流水断面積の関係 $As(zs_i, ws_j)$ 、及び水位・河床高と更正係数の関係 $ks(zs_i, ws_j)$ から、測定時点での流水断面積 $A' = As(z, w)$ 及び更正係数 $k' = ks(z, w)$ を求める。

- (カ) 流速 V に(オ)で得た流水断面積 A' 及び更正係数 k' を乗じて、河床変動を考慮した流量 Q を得る。

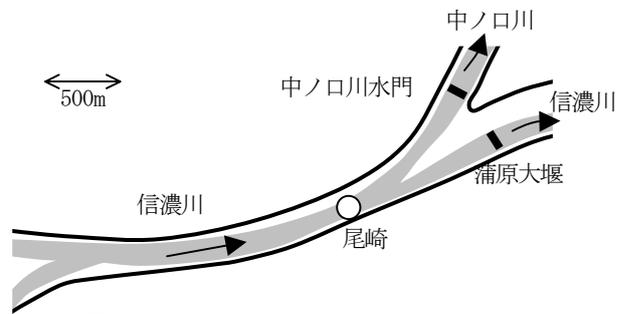


図-1 信濃川下流・尾崎地点と蒲原大堰位置概略

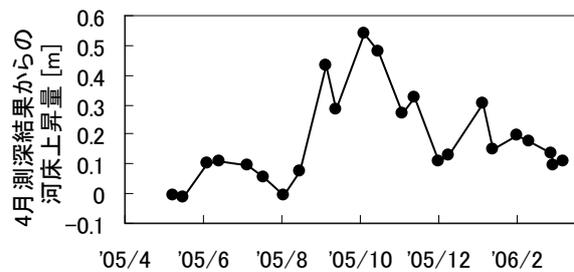


図-2 尾崎地点での平均河床高の経時変化(2005年)

3. 実河川実験

実河川実験は信濃川下流域の尾崎地点で実施した。本地点は蒲原大堰の湛水区間(図-1)にあり、通常期間の水位調節と10月以降の特例放流(鮭の遡上にあわせて堰ゲートを部分全開する操作)により、図-2に示すような河床高変化が生じている。また、本地点では国土交通省によりATENAS流量観測システム²⁾(以下、ATENASと称す)を用いた流速・流量の連続観測が実施されている。

実河川実験では、

- ・河床高測定システムによる局所的河床高の連続測定
 - ・音響測深機による深淺測量
 - ・河床材料調査
 - ・流速プロファイラー曳航による断面内流速分布測定
- を実施した。河床高測定値とATENAS測定流速から、前述のフローにより流量を求め、流速プロファイラーの曳航観測結果と比較・検証した。実施期間は、特定放流による河床変動発生を想定して2008年9月~12月とした。

(1) 河床高の連続測定

局所的な河床高の連続測定法には、固定した音響測深機・サイドスキャンソナー⁴⁾、砂面計⁵⁾、洗掘センサ⁶⁾などがある。ここで、砂面計はその構造上高さ方向の測定分解能を余り高くできない。洗掘センサはその原理上、埋め戻しが測定できない。

そこで、本研究では、超音波による音響測深の原理を用いて河床高の連続測定を行った。ここでは、超音波センサを設置しやすい水際部からより流心に近い河床高を測定するために、超音波が河床に対して斜めに入射する配置とした(図-3)。この場合、局所的な河床高 z は、

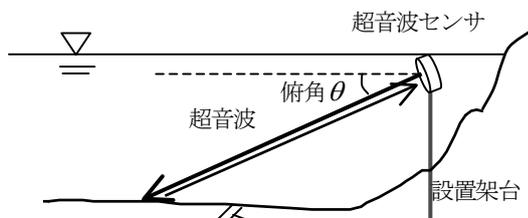


図-3 斜め入射超音波による河床高測定模式図

超音波の伝播時間 tT ，河床高センサ設置標高 hs ，超音波の俯角 θ ，水中音速 c より，次式で算出される。

$$z = hs - c \cdot \frac{tT}{2} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

日照や季節要因等で水温が変化すると音速も連動して変化する。そこで本研究では，水中音速にATENASの音速実測値を使用した。本研究の観測期間では音速は1,495m/sから1,435m/sまで変化していた。

超音波センサは河川中の既設杭に設置した（設置標高T.P.+5.5m, 5.8m）。超音波の水平方向からの俯角は 39° ， 31° ， 16° とし，俯角による河床高測定性の差異を検討した。俯角 39° と 31° は同一のセンサを実験前期に 39° ，実験後期に 31° として測定を行った。俯角 16° で既設杭から約13m先，水際より約25m先の河床高を測定できる。なお，俯角 16° はマルチビーム測深器等での最小俯角と同程度である。

超音波送受には小水路用超音波流量計（JFEアドバンテック製K-TT-200）の超音波送受信部を利用した。超音波センサの周波数は200kHz，ビーム半減角は定格 5° であり，超音波が河床高に照射される領域は，俯角 $39^\circ \sim 16^\circ$ ，センサから河床までの鉛直距離3.5mの場合，長径1~5m程度，短径0.5~1m程度の楕円のような形状になる。超音波受信波形は全て記録し，後述の処理により伝播時間を評価した。これにより，河床高は前述の領域内の平均値ではなく，超音波ビーム中心の強度が最も強い超音波を反射する限定的な領域での値となる。超音波発信は1分間隔とし，10分間のデータを平均して測定値とした。

(2) 音響測深

斜め入射超音波による河床高測定の精度検証のために，音響測深機（千本電機製PDR-2200W）を用いて，主として1mピッチで河床高を測定した。本研究では音速変化をより正確に補正するためバーチェックによる音速校正ではなく音速実測値を用いて河床高を求めた。

(3) 河床材料調査

特例放流の実施前後に，河床材料をエクマンバージ型採泥器により採取し，試料の粒径分布を測定した。

(4) 流速プロファイラー曳航による流速分布測定

超音波流速プロファイラー（Teledyne RDI製Workhorse Rio Grande，周波数1.2MHz）を有人船で川幅方向に曳航して断面内流速分布を測定した。測定される

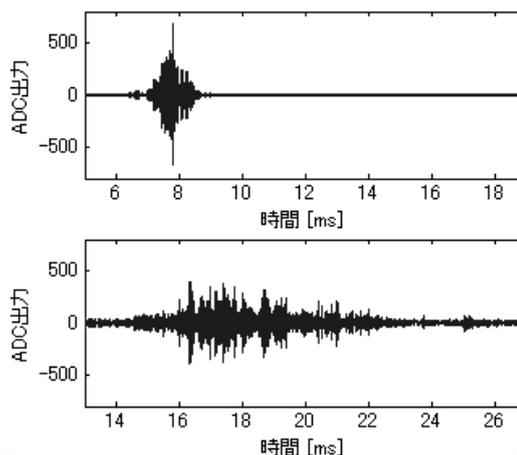


図-4 斜め入射による反射超音波の波形例. (上) 俯角 39° ，(下) 俯角 16°

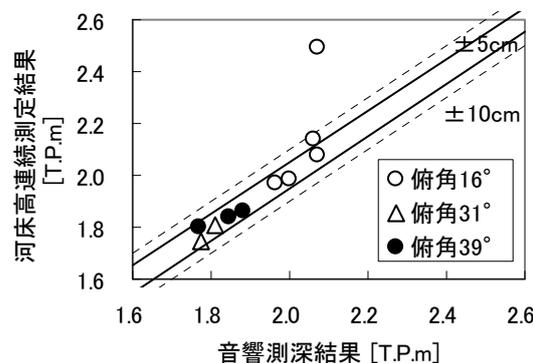


図-5 河床高測定結果と音響測深結果の比較

流速は船に対する相対値であるので，RTK-GPS（日本GPSソリューションズ製NetSurv3000-VS）により常に船の位置を把握して船速を求め，補正を行った。

測定原理上流速が測定できない不感帯（水面付近，河床付近，及び船が航行できない左右岸の水際付近）の流速には近傍の流速測定値を外挿し，流量を推定した。

4. 観測結果

(1) 斜め入射超音波による河床高連続測定

河床からの超音波反射波の例を図-4に示す。俯角が浅いほど時間軸方向に伸張した波形となっているが，これは超音波ビームの持つ幾何学的な広がりにより反射点からの伝播時間の差が大きくなるからである。このような超音波波形から伝播時間を求めるために，包絡線検波した波形の重心を伝播時間と定義する信号処理法を開発し，河床高測定に適用した。

音響測深を実施した時点での河床高測定値を音響測深と比較した結果を図-5に示す。縦軸に斜め入射超音波による河床高連続測定値，横軸に音響測深による同位置の河床高を取っている。俯角 $39^\circ \cdot 31^\circ$ については測深に対し $\pm 5\text{cm}$ ，俯角 16° については一点を除き $\pm 10\text{cm}$ の領域内にプロットされている。俯角が深い方が測定精度は高いが，俯角 16° でも垂直入射の音響測深と同程度の測

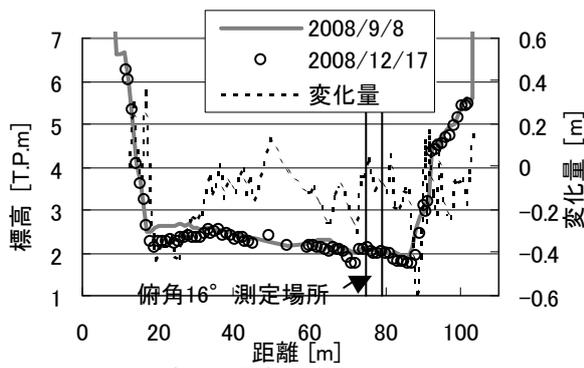


図-6 音響測深結果 (9月と12月の比較)

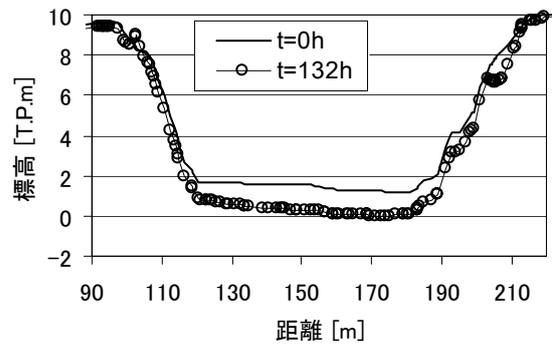


図-7 河床変動計算で得られた河床形状例

定精度が得られることが確認できた。誤差が大きく生じた測定時については、俯角 16° と俯角 31° で時系列変化の差異が大きく、濁度あるいは水温条件により河床付近の音響反射状態に差異が生じた可能性がある。従って、斜め入射超音波による河床高測定では、俯角や周波数の最適化を今後検討する必要がある。

(2) 音響測深

観測開始時 (9月) と終了時 (12月) の河床形状を図-6に示す。同図には両者の河床高変化量も破線で示している。これより、河床高連続測定を行った右岸近傍で約10cm、左岸水際部では約40cmの河床低下が発生していた。

(3) 河床材料粒径分布測定

尾崎で採取した河床材料はシルト混じりの細粒成分であり、細粒成分の代表粒径 (d_{50}) は0.7mm、シルト成分の代表粒径は $16\mu\text{m}$ であった。

5. 河床変動に対応した流量観測技術の検討

(1) 河床変動計算

実測する河床高から流水断面積や更正係数を求める補完情報を得るため、尾崎地点を含む数km範囲の流域の河床変動計算を実施した。計算では、河床形状には2004年、2006年の測量データを用いた。流れ場は乱流モデルに $k-\epsilon$ モデルを用いた平面2次元モデルを用いた。流砂モデルとしては、掃流砂の計算にはMeyer-Peter-Müllerの式、浮遊砂の計算にはLeeの式を用いた。

水位ハイドログラフは、2004年新潟豪雨時の尾崎地点水位変化を参考に、ピーク水位が計画高水位となるように与えた。平水時流量は本研究での流速プロファイラー観測値に基づき決定し、ピーク流量は計画高水ピーク流量とした。河床材料・SSの粒径は実測値を用いた。

初期 ($t=0\text{h}$) と出水後 ($t=132\text{h}$) の河床形状計算結果例を図-7に示す。この各河床形状に対し、様々な水位における流水断面積を算出し、実河川での河床高測定場所における計算河床高に対して流水断面積 $A_s(zs_i, ws_j)$ を

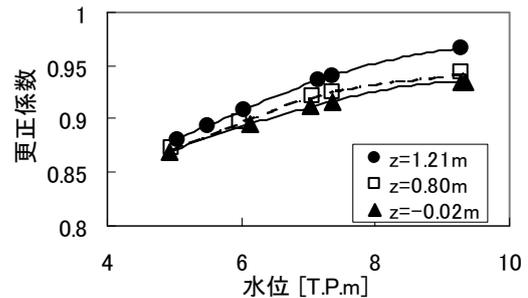


図-8 各河床高での更正係数の水位依存性

整理した。また、代表的な河床形状について、流れの数値シミュレーション²⁾により様々な水位での断面内流速分布を算出し、更正係数 $ks(zs_i, ws_j)$ を求めた。河床高ごとに更正係数を水位の関数として整理した結果を図-8に示す。

(2) 河床高実測値に基づく評価流量の検証

河床高測定値及び尾崎地点での水位、流速から、河床変動計算の結果に基づいて流水断面積と更正係数を算出して流量を求めた。それらを流速プロファイラーによる流量推定値と比較した。

a) 流速測定精度の検証

ここでまず、流量評価に使用する流速の測定精度について検証した。ATENASは測定水深での低水路内川幅方向の平均流速を測定しているため、流速プロファイラーによる断面流速分布からATENASとほぼ一致する測定範囲を平均して幅方向平均流速を求めた。

図-9に流速プロファイラー測定流速とATENAS測定流速を比較した。これより、両者は $\pm 3\%$ 以下の範囲で一致しており、ATENASが流速プロファイラーと同程度の測定精度であることが確認できた。

b) 河床高実測値に基づく評価流量の検証

前述の方法で実測河床高から河床変動計算結果に基づいて流水断面積と更正係数を評価した。それらと流速測定値から流量を算出し、河床高測定箇所2箇所についての平均値を求め、それと流速プロファイラーによる流量推定値を比較した。結果を図-10に示す。評価流量は流速プロファイラーによる推定流量に対し $\pm 8\%$ の範囲内で一致した。現状の標準的な出水時の観測法である浮子観

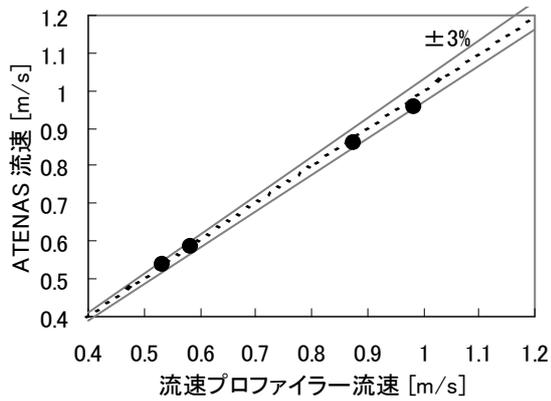


図-9 ATENASと流速プロファイラーとの流速測定値の比較

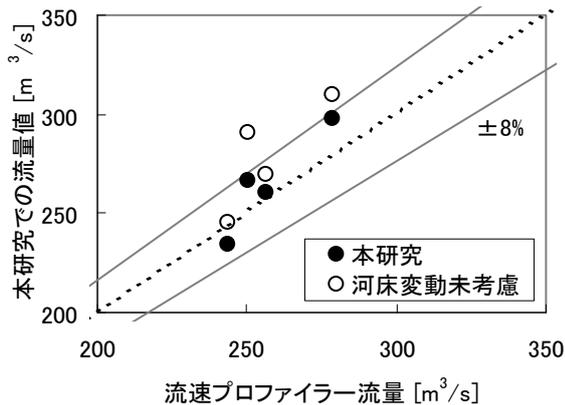


図-10 本研究による流量と流速プロファイラー流量の比較

測の精度は10%程度と想定されているので、それと同程度の観測が可能であることがわかった。また同図には、2006年4月測量の河床形状を用いて、その後の河床変動を考慮しない場合の流量算出値も示しているが、最大16%の誤差が生じている。これより、河床変動を考慮することによる観測精度の向上が確認される。

以上により、流速連続測定に加え、河床高連続測定と河床変動計算に基づく流水断面積及び更正係数を決定する本手法により、河床変動が生じる環境条件下でも実用上十分な精度で流量観測が実施できることが示された。

6. 河床高の時系列変化に関する考察

本手法の流量観測に関しては時空間的に平均化された河床変動情報で十分と考えているが、今回の観測で得られた特徴的な河床変動特性についてここで考察を行う。

(1) 摩擦速度と河床材料移動限界

河床高の時系列変化を考察するに当たって、基本的な水理量である摩擦速度を評価した。流速プロファイラーでの流速分布測定結果から、河床高測定場所での鉛直流速分布を抽出し、対数則で近似して得られた相当粗度、有効摩擦速度を平均流速とともに表-1に示す。特例放流開始(2008年10月1日)の前後で摩擦速度が約2倍増加した。さらに、同表には評価した有効摩擦速度を用いて岩垣の式から求めた移動限界粒径も示した。特例放流以前は既

表-1 測定流速分布から推定した有効摩擦速度と移動限界粒径

測定日	平均流速 [m/s]	相当粗度 [m]	有効摩擦速度 [cm/s]	移動限界粒径 [mm]
2008/8/6	0.52	0.01	1.8	0.6
2008/9/17	0.57	0.03	2.0	0.7
2008/11/5	0.81	0.30	3.1	1.5
2008/12/17	0.91	0.16	3.4	1.7

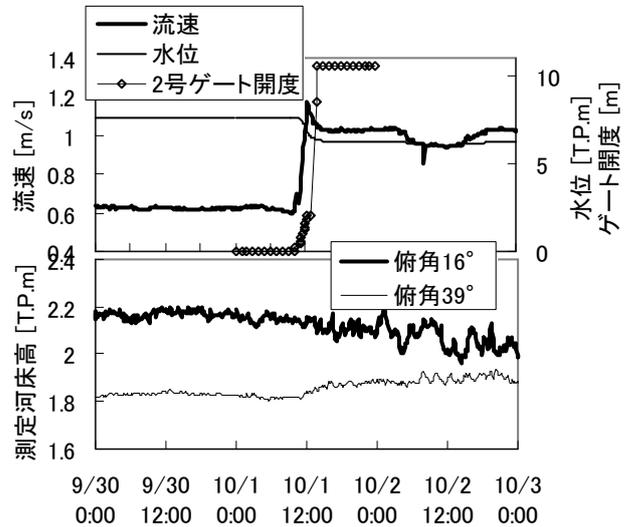


図-11 特例放流開始前後での流速、水位、河床高測定結果

に述べた尾崎河床材料(細粒成分)の代表粒径とほぼ同程度であるが、特例放流開始後は河床材料の代表粒径を上回っており、細粒堆積土砂を中心に河床材料の移動が生じたと考えられる。

(2) 特例放流開始前後

特例放流開始前後の流速、蒲原大堰2号ゲート開度(特例放流を開始日のみ表示)・水位変化と河床高変化を図-11に示す。ゲート開度が上昇するとともに、急激に水位が低下し、かつ流速が急増している様子が見られる。流速が水位変化の途中でピークを示しているが、これは貯水池における一時的な水位低下操作のような流入量一定条件下で急激に水位が低下した場合に生じる過渡的な現象であり、非常常流解析によれば堰に近いほど流速ピークが鋭くかつ大きくなる⁷⁾。

河床高は、水際に近い場所(俯角39°測定)では特例放流の開始とともに上昇しているが、より流心に近い場所(俯角16°測定)では徐々に低下しており、水位低下に伴う流速の増大と掃流力の増大により河床材料が移動したと考えられる。

(3) 河床高の周期的変動

流速が定常的に増大した11月後半には、特に俯角16°で測定した河床高に明瞭な周期的変動が見られた。代表的な測定結果を図-12(上)に示す。これより、その変動幅は0.2~0.4m程度であり、表-1に示した特例放流後

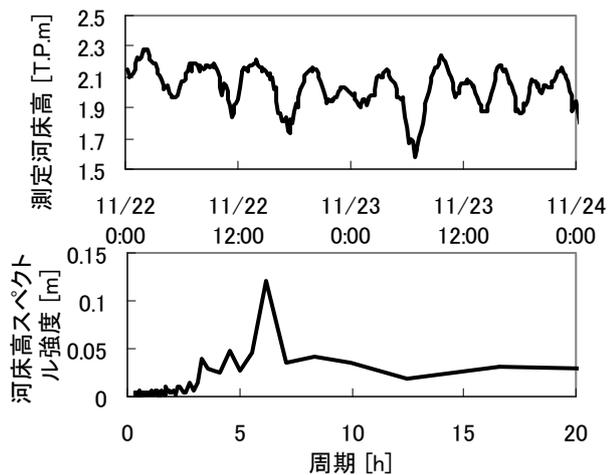


図-12 河床高の周期的変動例（上）と周期解析結果（下）

の相当粗度と同程度である。この期間の50時間分の測定データについてFFTにより周期解析を行った結果を同図（下）に示すが、卓越周期として約6hを得た。

この周期的変動は河床に形成された河床波が上流から下流に移動していく状況をとらえたものと推測される。変動幅を河床波高とみなすと、砂堆規模の河床波と考えられる。砂堆の波長 λ 、波高 H には以下の関係がある⁸⁾。

$$H = (0.03 \sim 0.06)\lambda \quad (3)$$

これより、波高 H を0.3mとすると、波長 λ は5~10m程度となる。変動周期を前述の波長が通過する時間と見なして求めた河床波の平均移動速度は1.4~2.8cm/minとなった。ここで、宇民らは斐伊川出水時の河床波の移動速度を3~4cm/minと見積もっている⁹⁾。また、山本らによる涸沼川による観測結果では、波長1~5m、波高0.2mの河床波の移動速度は1.7~17cm/min⁴⁾と得られている。今回観測された河床高の周期的変動は、これらの既往の知見とも概ね一致しており、本研究で実施した河床高連続測定により河床波の挙動を測定可能と考えられる。

なお、今回の観測期間では大きな出水がなく、河川流量に影響する規模での出水時の河床低下や埋め戻しに関する検討は実施できていない。今後は、出水時の河床変動特性の把握を踏まえて、本研究手法の流量観測精度の検証を行っていく必要がある。また、今回観測されたような比較的小スケールの河床波の流量観測上の取り扱い等についても、引き続き検討を進める予定である。

7. 結論

本研究では、超音波を用いた流速測定技術と流れの数値シミュレーションに基づく流量連続観測手法に加えて、事前に実施する河床変動計算と現地での河床高連続測定を組み合わせ、河床変動発生下での流量観測を高精度化する手法を開発し、信濃川下流の尾崎地点で実河川実験を実施し有効性を検証した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 超音波を斜めに送受信する手法で河道流心部の河床高の連続測定を実施し、音響測深に対して俯角 39° 、 31° で $\pm 5\text{cm}$ 、俯角 16° で $\pm 10\text{cm}$ の精度が得られた。
- (2) 本手法の流量連続観測手法は、流速プロファイラーによる流量推定値と8%の誤差範囲内で一致し、また、河床変動を考慮することにより観測精度が向上することが確認された。
- (3) 信濃川下流蒲原大堰において2008年10月に実施された特例放流（鮭の遡上にあわせて堰ゲートを部分全開する操作）時に現地調査を行い、水位低下に伴って堰の湛水区間の流速と掃流力が増大し、また河床材料の移動と河床高の低下現象が観測された。
- (4) 特例放流開始後の高流速の継続期間において、変動周期6h程度、変動幅0.2~0.4m程度の河床高の周期的変動が観測され、河床波の移動を捉えたものと考えられる。

謝辞：国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所には、蒲原大堰における実河川実験への協力および現地データ等の提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 中川 一: 21世紀の河川学—安全で自然豊かな河川を目指して, 京都大学学術出版会, 2008.
- 2) 中川 一, 小野正人, 小田将広, 西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証, 水工学論文集, 第50巻, pp.709-714, 2006.
- 3) 永松和彦, 矢野善康: マルチビームを用いた3次元河床測量について, 平成16年度九州国土交通研究会, 2004.
- 4) 山本浩一, 二村貴幸, 小川和彦, 坂野 章, 日下部隆昭, 末次忠司: 河床変動観測のヘッド回転型サイドスキャンソナーの適用に関する研究, 河川技術論文集, 第10巻, pp.297-302, 2004.
- 5) 国土交通省河川局, 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室: 河床変動の特性把握と予測に関する研究, 平成16年度国土交通省国土技術研究会, 2004.
- 6) 坂本 洋, 林健太郎, 竹島士朗, 石本俊亮, 倉吉一盛, 白石芳樹: 川内川における河床変動特性と予測に関する研究, 河川技術論文集, 第12巻, pp.37-42, 2006.
- 7) 鈴木崇正, 角 哲也: 貯水位低下操作時における非定常流解析, 土木学会関西支部, 投稿中, 2009.
- 8) 土木学会水理委員会編: 水理公式集平成11年版, 土木学会, 2000.
- 9) 宇民 正, 上野鉄男, 木下良作, 松本直也, 盛谷明弘, 室元孝之: 斐伊川における洪水観測について—水面流況と河床形状の同時計測—, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-2, pp.511-528, 1994.

(2009. 4. 9受付)