

# 異なる計測手法から得られた河川流量値の違いに関して

萬矢敦啓・後藤功次・山本 晶

## 1. はじめに

国土交通省による水文観測は昭和25年の水理調査として体制が確立され、それ以降観測が継続されている。刊行当初の流量年表を現在のものと比較すると、当時から継続されている観測所は28カ所であり、これらは70年に及ぶ歴史を持つ<sup>1)</sup>。このようなデータは地球温暖化の検討、河川計画の立案等を実施する中で大きく貢献してきている。例えば河川砂防技術基準の計画編第二章河川計画<sup>2)</sup>では基本高水の設定に関して概説している。ここでは複数の流量算定結果を示しているが、それらは直接的に計測された流量値や、計測結果を用いてパラメータチューニングされた降雨流出解析から得られたものがあるが、直接的にも間接的にも浮子測法で得られた結果が採用されている。

近年、接触型である音響<sup>3)</sup>、非接触型である電波<sup>4)</sup>・画像<sup>5)</sup>を用いた流量観測手法等（以降「新手法」という。）が実用に資する技術として紹介されてきている。また特に非接触型の新技術は、近年の無人航空機であるUAV技術の発達と共に計測手法に広がりを見せている<sup>6)</sup>・<sup>7)</sup>。これらは浮子測法（以降「従来法」という。）と比較すると、無人又は省人化であることが最大の優位点である。また災害を伴うような出水の場合、従来法が実施不可能となり新手法だけが計測された事例も紹介されてきている<sup>8)</sup>。一方で新手法と従来手法の両者を比較すると同時刻・同水理条件に計測した結果であったとしても異なる値が得られていることを示す報告が出てきた。例えば原田ら<sup>9)</sup>は従来法とADCP（超音波多層式流向流速計）を比較して、従来法が30%程度大きい流量を計測していることを報告している。また木下はADCP流量に対する現行流量（HQ換算流量）の差の頻度分布を示し、その差が最大で40%程度であることを示している<sup>10)</sup>。今後、新手法が主たる計測手法となるのであれば、このような原因は解明される必要がある。

我が国の河川は流砂系の自然河川であり、土砂輸送を伴う。土砂輸送を伴うことにより河床に波が発生する（波状地形のこと、これ以降、河床波と呼ぶ）。それらは川幅スケールで説明される中規模河床形態、水深規模のスケールの小規模河床形態として分類される<sup>11)</sup>。このような河床波は洪水規模に応じて動くことで河床変化を伴うこと、河川水の流れに大きく影響を及ぼすことが特徴的である。また我が国の洪水を引き起こす気象現象の一つは台風であり、多くの場合は強風を伴う。このような強風は時として流れに大きな影響を及ぼすことがある。このような河川における流量値を得るための計測は多くの乱れを考慮する必要があり計測結果の代表性を担保することはそれほど簡単ではなさそうである。

著者らは中部地方整備局管内の合計47箇所、5ヶ年において複数の手法で流量観測を実施すると共に、新手法と従来型により計測された流量値を比較した。本稿では流れに及ぼす河床波に関する概説から始め、各計測手法の特徴、合計641個の観測データから得られた計測結果の違い、その違いに対する考え方を概説する。

## 2. 流れに影響を及ぼす自然現象

### 2.1 中規模河床形態による流れ

図-1及び図-2は某河川の河床形状とパーティクル出力を用いた流線を示す。流線は同河床形状を用いて平面二次元定常計算により再現されたもので、それを用いてパーティクル出力を実施し図化したものである。これらの一連の作業はiRICのNays2DHを用いて作成した<sup>12)</sup>。図-1が示すように本計算で採用した河道は中規模河床形態が良く発達していて複雑な流路が存在する。この河床形状に対して砂州の波高、すなわち砂州の上端標高と同等の水位を持つように流量を上流端から与えると、図-1のパーティクルが示すような流線となる。すなわちパーティクルは砂州の形状に従い、

その縁を沿うように流れる。また流路が左岸から右岸へ移動した場合、パーティクルもそれに従い流れる。一方で図-2は本河道における計画規模の流量を用いたときの計算結果である。ここでは局所的な河床形状の影響を受けることなく、堤防ラインと並行に流れるようになる。図-1及び図-2から理解できることは、水位が低い場合は横断方向及び縦断方向の流れが発生するが、水位が高くなるに従い、縦断方向の流れが卓越することである。

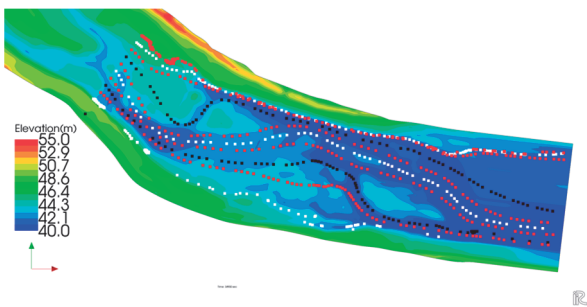


図-1 河床高と流線（低水位の場合）

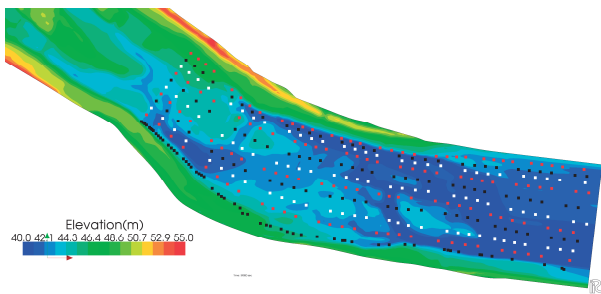


図-2 河床高と流線（高水位の場合）

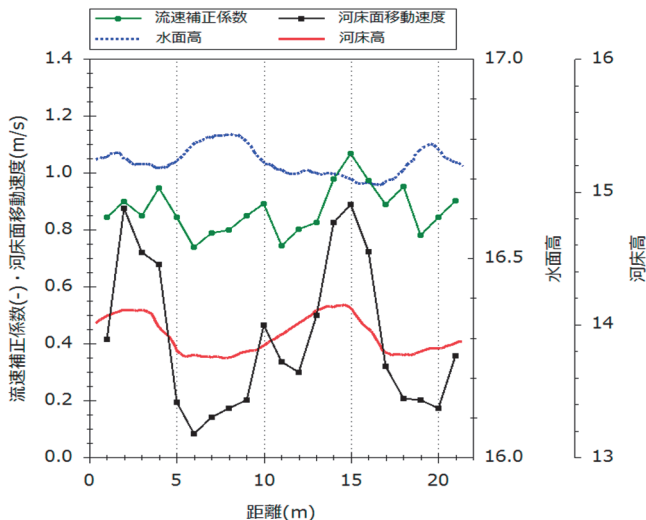


図-3 ADCP及びGPSにより計測された河床高、水面高、流速補正係数<sup>13)</sup>

## 2.2 小規模河床形態による水深方向の流速分布

水深方向の流速分布は小規模河床形態の影響を強く受ける。出現する小規模河床形態は砂蓮、砂堆、遷移河床、平坦河床、反砂堆に分類されるが、これらは掃流力によりある程度分類されること、またそれぞれの河床の凹凸の程度もその種類により異なることが特徴的である<sup>11)</sup>。その中でも砂堆の凹凸が大きく、水深方向の流速分布に最も影響を及ぼす。例えば図-3はADCP及びGPSにより計測された小規模河床波上の河床高、水面高、流速補正係数<sup>13)</sup>を示す。この流速補正係数はADCPにより計測された水面近傍の流速と鉛直方向の平均流速の比である。

図-3が示すものは1.5波長分の河床波により形成された水理量である。河床高に着目すると横軸が3m、14m近傍で河床波の凸部となる。この位置においては水面が凹部となる。一方でこの位置における流速補正係数は1程度となる。また横軸が6m近傍では河床波の凹部となり、流速補正係数は0.8以下となる。また9m近傍では0.85程度となる。流速補正係数が1となる場合は表面付近と河床近傍の流速値がほぼ一緒になることを意味している。一方で0.8以下に関して、発生個所は凹部の河床近傍で、この内部では逆向きの流れも発生する。その結果、表面付近の早い流速と河床近傍の遅い又は逆向きの流速があることで、流速値が広く分布する。他方、0.85となる場合、一般的な対数分布で近似できるような流れであり、このような流れは河床が平坦なときに河道全体の流れとして発生する場合がある。

また小規模河床波の波長は水深の6倍程度であることが報告されている<sup>14)</sup>。また砂堆の伝播速度は1cm/s程度であることも報告されている<sup>15)</sup>。

## 2.3 風による表面付近の流速の影響

鉛直方向の流速分布に大きな影響を与えるものとして風の存在は無視することができない。特に台風等の影響で一定方向の強風が長時間卓越した場合には表面流速が強く影響を受ける。それは風速の割合として評価され、複数報告されている。例えば土木研究所ら(2006)<sup>16)</sup>は1.6%、恩田ら(2016)<sup>17)</sup>は8.2%、本永ら(2013)<sup>18)</sup>は7.4%、柏田ら(2012)<sup>19)</sup>は4.4%と報告している。

### 3. 流量観測手法の特徴

流量観測の手法は大きくわけて二つに分類できる。これらは区分求積法とベクトル解析の一つである線積分から算定する方法（以下「線積分法」という。）である。

区分求積法は流量観測地点の川幅から断面数を決定し、河道に垂直な流速成分である流速値を計測し、別途得られた水深、各断面幅の情報から流量値を算出するものである。水深に関して測定した水位と河床高から断面毎の水深を求める。河床高に関しては洪水前後で計測し、河床変化が認められた場合は河積が最大となるように河床高を採用する。またここで必要な断面数は川幅に応じた数が基準化されていてそれらは水文観測<sup>1)</sup>等に詳しい。流速値を計測するにはいくつかの手法があるが、それらは例えば本稿でいう従来法や新手法がある。一方で線積分法はADCP法のみにて特化した手法で、これはADCPが河川の三次元的な流速場とADCPを搭載した舟艇そのものの移動ベクトルを計測することで数学的に厳密な流量値を得る手法である。

流量観測で最も重要なのは河道内の流れの理解と、その理解に応じた各手法による計測値の代表性である。以下、それぞれの手法を概説する。

#### 3.1 浮子測法：従来法

浮子測法を概説するが、詳細は参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。同手法の特徴は、二つの見通し線の設定と更正係数である。見通し線に関しては、浮子の投入地点から50m程度の助走区間をへて100m程度離れた第一見通しと第二見通しの間の流下時間を計測し、その結果から流速値を算定する。この間、浮子は直線的に流れることを前提としていることが特徴的である。また各水深に応じて浮子の長さが規定され、大雑把に考えると水深の4から8割程度の吃水を持ち、その水深を代表した流れの計測となる。浮子の長さに応じた更正係数を用いることで更正流速(鉛直方向平均流速)を算定している。特に2.3で概説した風の影響を受けにくい手法の一つである。

#### 3.2 非接触型流速計(電波・画像)：新手法

電波式流速計はマイクロ波を利用したCWレーダ技術の活用例で、送・受信波の周波数差から流速値を算定するものである<sup>20)</sup>。同手法は表面流速

を計測する手法であること、観測対象は10m程度の楕円領域であり、その内部の最大値を観測することが特徴的である。

ここで概説する画像解析手法の中でも、流量観測に最適な手法はSpace Time Image Velocimetry (STIV)<sup>21)</sup>である。本手法は流量観測の対象水位における流れと並行に検査線を引き、検査線上の検出した移動体の動きを時間展開することで流速値を得る。検査線の長さは計測時間によるが、大雑把に考えると10m程度である<sup>23)</sup>。

これらの非接触型手法は、表面流速を計測しており、流速成分は河道に対して平行な成分を抽出していることが特徴である。

#### 3.3 Acoustic Doppler Current Profiler：新手法

ADCPを活用した一つの計測方法は本機器を専用ボートに搭載し、水面から川底に向けるように設置し、橋からロープを用いて横断方向に操作する方法である<sup>22)</sup>。この手法の特徴の一つは川底の形(河床形状)、計測位置に応じて変化する三次元的な流速分布を計測することである。これらの情報を用いて得られた流量値は水理学的な仮定(計測断面内の流速分布や河床高)を用いることなく流量値を得ているために、得られた結果に対して不確定要素が少ない。一方で流れによっては計測が困難になる場合がある。特に水面に波が発達し、ボートが大きく振動するような場合には計測を実施することは簡単ではない。

## 4. 比較観測の結果

### 4.1 観測概要

本章では異なる手法により得られた流量値の違いを考察する。本稿で採用した中部地方整備局管内の水位流量観測所は47地点であり、流量観測を実施した期間中、一時間毎に二つの手法による比較流量値を取得した。このような観測をこれまで5年間実施し、641個の比較観測値が収集された。また一つの比較観測値は、3章で示した従来型と三つの新手法から選択された一手法の組み合わせとなる。新手法に関しては電波が370個、画像が174個、ADCPが26個である。なお、本観測値の中には明らかに間違った計測を実施しているものも混在していた。その理由は画角の設定が適していなかったこと(画像解析の場合)、局所的な渦の発生により流れが計測に適していなかつ

たこと（新手法全般の場合）等であった。後者の場合、各観測地点における流れを理解し、それに応じた測線の設定が必要となる。それらを精査した上で合計570個の比較流量値を採用した。また非接触手法に対しては流速補正係数を0.85、風による影響に関しては1.6%を採用している。

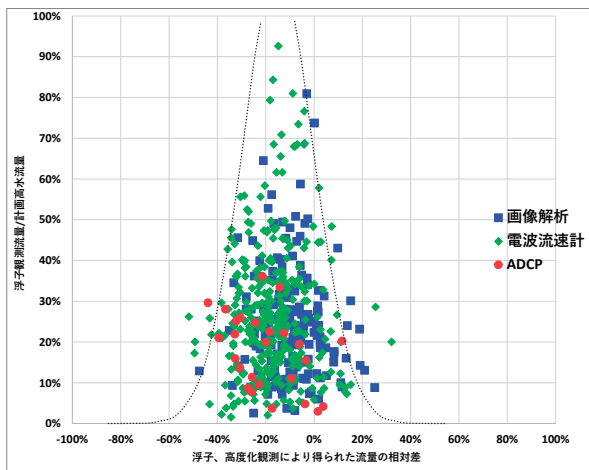


図-4 従来法と新手法で計測した流量値の相対差と流量規模の関係

## 4.2 観測結果

図-4は異なる手法で得られた流量の相対差と流量規模を示すものである。横軸の相対差は{(新手法 - 従来法)/従来法}で算定される。縦軸は従来法で計測された流量値を計画高水流量で無次元化したものである。■は画像解析、◆は電波式流速計、●はADCPにより得られた結果、点線はガウス関数を用いて同様の分布を作成した曲線である。図-4が示すように、流量規模が小さい時、相対差は大きく幅を持った数値となり、数十%の差を持つこともある。一方で流量規模が大きくなるとその差は小さくなり、これらの結果の多くは-10%程度を中心としたガウス曲線内に分布していることがわかる。

## 4.3 結果の考察

### 4.3.1 水位が低いときの相対差

図-4が示したように流量規模が小さいとき(例えば10%)の相対差は、流量規模高いとき(例えば60%)とくらべると大きく、多くは-40%から+10%に分布している。これは図-1で示したように浮子測法の特徴とそのときの河床形状、それによる流れが強く影響している。すなわち、水位が低いとき浮子は河床形状に沿って流れるため、浮子測法の前提である直線的に流れることを期待す

ることが難しい。また新手法は取得したい流向を計測者が選択することができるために河床波による横断方向の流速の影響を受けづらい。横断方向流速の影響を受ける従来型とそうでない新手法の差を検討しているために、このような水位条件の下では相対差は大きくなることが推測される。さらにマイナス側にずれる理由は、浮子が横断方向の流れにより想定される断面よりも早い流速を持つ断面を通過することに起因していると考えられる。

### 4.3.2 水位が高いときの相対差

図-4が示すように流量規模が大きいとき(例えば60%)の相対差は-30~0%程度の範囲の値を持つ。これは図-2が示すように流れが河道に対して平行であることから、河道には縦断方向の流れが卓越する。このような条件においては横断方向の流れを考慮する必要はなく、鉛直方向の流速に対する各計測方法の違いだけを議論する必要がある。なお、水位がさらに上昇し流量規模が100%近くに到達するとさらにその傾向が顕著となり、相対差は-15~5%程度の範囲を持つ値になることが想定される。

### 4.3.3 比較観測のまとめ

浮子測法は吃水率が0.4~0.8程度の値を持つことから水面から4~8割水深の流れを代表した流速値を得る。また、例えば水深が3m程度あれば小規模河床形態の波長は18m程度となる<sup>19)</sup>ことを考慮すると両見通し間である100mという意味は、浮子が5波長程度の河床波の上を流下することになる。橘田らが示したようにその間に鉛直方向流速が大きく変動する<sup>13)</sup>ことから、浮子測法が算定する流速値はそのような流れで得られた結果である。

一方で非接触型流速計は表面流速の計測である。そのために風も含めて鉛直方向の流速分布の影響を直接的に受ける。本検討では流速補正係数を0.85としている。しかしながら計測時の小規模河床形態の位置が観察されていないことから流速補正係数に関して厳密な値を設定することは困難である。また本検討では風の影響を1.6%としているが、前述のように風の影響評価は文献によって多少のバラツキがある。

本節では浮子観測と非接触型測法に関して両者の計測結果に与える鉛直方向の流速分布に関して



考察した。これらの結果を受け、両者の差は水位が高い条件において10%程度であること、観測精度に対する計測手法の優越を評価することは簡単ではないことを理解することができる。

## 5. 流量値の不確実性

### 5.1 国際基準の定義

国際基準機構 (International Standard Organization; ISO)は工業分野の国際規格を策定するための組織であり、その中の技術委員会 (Technical Committee; TC)の一つであるTC113が水文計測を担当している。ISOの技術基準の一つである ISO/TS25377: Hydrometric Uncertainty Guidance (HUG)が流量の不確実性を規定している<sup>23)</sup>。ここでは「計測結果の品質に関する記述は、技術基準で決められたすべての測定で記述され、このような記述がないような状況で二つの計測を比較することができない」とある。ここでいう全ての計測とは3章で示したように区分求積法であれば、流速、水位、河床高、川幅である。計測結果の品質は一般的には計測精度のことであるが、これらを考慮すると計測結果の真値は幅を持ち、次式で示される。

$$Q = \bar{Q} \pm u(Q) \quad (1)$$

ここでQ: 真値、 $\bar{Q}$ : 計測結果、 $u(Q)$ : 流量の不確実性で統計学的には $2\sigma$ 程度となる。

### 5.2 不確実性を考慮した流量値の算定

これまでの知見を基に不確実性を考慮した流量値を算定してみる。ISO/TR8363によると浮子測法の不確実性は10%としている<sup>24)</sup>。今、式(1)の $\bar{Q}$ を $3,000\text{m}^3/\text{s}$ とすると $u(Q)$ は $300\text{m}^3/\text{s}$ であることから $Q_{\text{浮子}}=2,700\sim 3,300\text{m}^3/\text{s}$ となる。一方4章で記述したように新手法から得られた値は水位が高い場合、浮子測法と比較して10%程度低いことが統計的に得られている。また新手法の不確実性を10%と仮定する。それらを勘案すると式(1)のそれぞれの値は $\bar{Q}=2,727\text{m}^3/\text{s}$ 、 $u(Q)=272\text{m}^3/\text{s}$ となり $Q_{\text{新手法}}=2,455\sim 2,999\text{m}^3/\text{s}$ となる。

ここで $Q_{\text{浮子}}$ と $Q_{\text{新手法}}$ により得られた流量値は、厳密には異なるものの、両者は同じ範囲の値である。このことから、統計学から判断すると両者の差は無視できるほど小さいと結論づけることができる。

## 6. まとめ

本稿を以下のようにまとめる。

- 1) 砂州や複列砂州の河道における流れを平面二次元計算により再現した結果、a) 水位が低い場合、横断・縦断方向の流れが発生するが、一方で b) 水位が高い場合は、縦断方向の流れが卓越する。
- 2) 小規模河床形態が発生する場合は鉛直方向流速又は流速補正係数が河床の凹凸に応じて変化する。
- 3) 合計 47 個所で 5 ヶ年にわたり従来型と新手法の比較観測を実施した。両者の相対差は 1)a)の条件では数十%となる一方、1)b)の条件においては 10%程度となる。
- 4) 今後 3)の 10%の違いを評価するためには小規模河床形態に関する検討がヒントとなる可能性がある。そのような情報がない場合、1)b)の条件においては観測精度に対する計測手法の優越を評価することは簡単ではない。
- 5) 4)の差に関する解釈を流量観測の不確実性から議論した結果、統計学から判断すると両者の差は無視できるほど小さいと結論づけることができた。

## 7. 今後の検討

- 1) 近年、大規模出水の頻発により作業員が計測現場に立ち入ることが当たり前でない事象が散見される。またその他の社会情勢の変化により流量観測業務が成立しない場合もあるようである。このような状況においては新手法を用いた流量観測の無人化・省人化は避けて通ることはできないように思われる。
- 2) これまで流量観測による観測値は一つだけであった。しかしながら異なる手法を選択することが可能になり、両者を比較することができるようになってきた。
- 3) そのためには流量観測の不確実性を取り入れる必要がある。同時に不確実性のそれぞれの要素を算定する必要がある。
- 4) 著者らの実施した新手法による観測では、残念ながら 70 個の観測値を欠測扱いとしている。
- 5) 今後は 1)の理由により新手法の採用が進むと

考えられるが、4)にあるようなデータ欠損をなくすためにも、また、過去のデータを含め、異なる手法による計測値を適切に扱うためにも、計測に関わる受注者・発注者らが、得られたデータに関して正しい解釈をすることが重要である。

謝 辞

本稿の4章で用いた観測データは中部地方整備局が開催した流量観測高度化検討会の成果です。この場をお借りして歴代の主たる担当者である河川部総合土砂管理官、小野秀樹殿、庄内川河川事務所副所長、村田智孝殿、河川部河川計画課課長補佐、原幹彦殿に対して、この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水文観測：国土交通省、平成14年
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準計画編、2020
- 3) 例えば木下良作：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
- 4) 例えば山口高志・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) 例えば藤田一郎、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
- 6) 藤田一郎ら：マルチコプターから撮影されたブレ動画の高精度補正に基づくAerial STIVの開発、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.71、No.4、I\_829～I\_634、2015
- 7) 小関博司ら： UAV搭載型電波式流速・水位計を用いた流量推定手法の提案、河川技術論文集、pp.219～224、2019
- 8) 佐藤匡ら：平成28年台風10号空知川上流における画像処理型流量観測の適用性—大規模出水に対応した流量観測高度化(その2)—、第60回(平成28年度)北海道開発技術研究発表会、2017.2
- 9) 原田靖生ら：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討、水工学論文集、第51巻、pp.1081～1086、2007
- 10) 木下良作：ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について、第4回河川環境管理財団研究発表会講演録、2006
- 11) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度、土木学会論文報告集、第210号、1973年2月、pp.65～91
- 12) iRIC: Nays2DH、<https://i-ric.org/solvers/nays2dh/>
- 13) 橘田隆史ら：流況河床高同時観測システムの構築と観測から得られた河床波の挙動、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.73、No.4、I\_535～I\_540、2017.2
- 14) Yalin, M.S. and Bishop, C.T. : On the physical modeling of dunes, Proc. 17th Cong. IAHR, 1. 1977
- 15) 小関博司ら：砂堆の伝播速度に着目した掃流砂層表面の速度の推定法、土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74、No.5、I\_805～I\_810、2018
- 16) 土木研究所ら：非接触型流速計を用いた開水路流量観測方法及びその流量、特許第3762945号、2006.4
- 17) 恩田実之留、平川隆一、非接触型流速計測法の流速計測精度が受ける風の影響、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.71、No. 4、pp. I\_901～I\_906、2016
- 18) 本永良樹ら：河床変動及び強風に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、pp. I\_745～I\_750、2013
- 19) 柏田仁ら：電波流速計による表層流速計測とDIEX法に基づく流量推定手法の提案、河川技術論文集、Vol.18、pp.393～398、2012
- 20) 萬矢敦啓ら：電波式流速水位計の開発、土木学会論文集G(環境)、Vol.72、No.5、pp.I305～I311、2016
- 21) Fujita et al.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The Space-Time Image Veloc-imetry (STIV). International Journal of River Basin Man-agement. 5. 105-114 2007. 10.1080/15715124.2007.9635310.
- 22) 例えば土木研究所水文チーム：流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編) Ver1.2 : [https://www.pwri.go.jp/team/hydro\\_eng/manual.htm](https://www.pwri.go.jp/team/hydro_eng/manual.htm)
- 23) <https://www.iso.org/standard/69367.html>
- 24) <https://www.iso.org/standard/28929.html>

萬矢敦啓



土木研究所水工研究グループ  
水文チーム 主任研究員  
YOROZUYA Atsuhiko

後藤功次



国土交通省中部地方整備局河川部  
河川環境課建設専門官  
GOTOU Kouji

山本 晶



土木研究所水工研究グループ  
水文チーム 上席研究員  
YAMAMOTO Akira