

河川流量観測の新時代

第2巻

水文・水資源学会 研究グループ
「河川流量観測高精度化研究会」編

2011年8月

「河川流量観測の新時代」第2巻の発刊にあたって

昨年に発行した「河川流量観測の新時代」が私たちの想像以上にご好評いただきました。その前から第2巻を発行することは決まっていたものの、さらに良いものにしなければならぬと気が引き締まる思いで編集いたしました。

本巻では特に水理・水文モデル側から現地観測への注文・期待をいただきました。また、最新の観測技術の動向について、さらには実際の現地観測の結果など熱い研究論文が揃いました。執筆者各位には厚く御礼申し上げます。

3月11日の東日本大震災では、多くの水位計や潮位計が地震・津波によって破壊され、データを取得できなかったと報告されています。自然現象を測るには大きなリスクと伴うという貴重な課題を残したといっても過言ではないでしょう。自然現象を測るという行為は、まさに自然を知りたいという知的好奇心への満足とともに、その知識を社会へ還元する極めて重要な使命の一つです。災害に強い水位計や潮位計の開発は急務であり、今後の河川・海岸・港湾管理上の大きな課題の一つでしょう。

簡単に思われている低水流量観測においても、河川の構造によって、ちょっとした流量・流速の増加に人間は対応できません。先日、筆者は富山県内の某河川でそのような体験をし、痛い目に遭いました。自然現象を測る難しさを改めて痛感しました。このような経験を広く周知することによって、さらに高い水準の観測技術・研究開発に繋がって欲しいという思いで本書を編集しました。

本書の刊行にあたって、執筆者には次のようなお願いをしています。完成された研究・技術はきっとどこか立派な論文集に提出されているので、本書には、研究・開発過程における失敗談やボツネタを書いて欲しいとお願いしました。技術の発展には“失敗”研究さえも広く公開することが必要だと考えました。さらに、観測や測定に使用した機材や備品の品名や製造会社、必要な人員等の詳細も記載して欲しいとお願いしました。なぜなら、立派な論文集の研究論文においても、「本当に何を使って、どうやって観測したの？」と観測自体がブラックボックスになっていることがあるからです。また、「本当は計測したいのだが、最初の入口もわからないので困っている」、というご意見へ反映させたいと願いながら本書を編集しました。

予算に制約があったため、出版物は白黒印刷とせざるを得ませんでした。しかし、下記ウェブサイト論文をダウンロードできるようにしましたので、カラー図についてはここを参照してください。

<http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/tebakari/newQobs/journal.htm>

本研究会では、来年度に第3号（2012年8月）を発刊することを決定しました。ご執筆いただける方は是非とも本研究会にコンタクトを取っていただければ幸いです。本会が工学系に偏っているというご批判もありますが、私たちはどのような分野の方々へも門戸を大きく開いています。

最後に、各執筆者におかれましては、大変お忙しい中を原稿料もなくご執筆いただきました。ここに記して重ね重ね深く感謝いたします。

水文・水資源学会 研究グループ
「河川流量観測高精度化研究会」
代表 手計太一

目 次

四分木構造格子による局所的な高解像度を導入した浅水流方程式の数値解析法・・・	1
安田浩保, 星野剛	
水文モデルの精度向上に向けた現地水文観測の重要性・・・・・・・・・・・・・・・・	1 2
呉修一, 大原憲明	
電波流速計による洪水流速観測の失敗を含めた事例集・・・・・・・・・・・・・・・・	2 0
山口高志	
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・・・・・・・・	2 8
岡田将治, 萬矢敦啓, 橘田隆史	
日本における ADCP を用いた高水流量観測手法・・・・・・・・・・・・・・・・	3 4
萬矢敦啓, 岡田将治, 橘田隆史, 深見和彦	
ADCP 取得データの“確からしさ”の検討・・・・・・・・・・・・・・・・	4 2
本永良樹	
ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について	4 9
橘田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励	
十勝川千代田実験水路における ADCP 及び電波式流速計による流量観測・・・・・・・・	5 7
稲垣達弘, 柿沼孝治, 三宅洋	
ADCP を利用した水理・水文観測事例—塩水楔と失水・得水量—・・・・・・・・	6 6
手計太一	

四分木構造格子による局所的な高解像度格子を導入した浅水流方程式の数値解析法

COMPUTATION OF SHALLOW WATER EQUATION
WITH HIERARCHICAL QUADTREE GRID SYSTEM

安田浩保¹・星野剛²

Hiroyasu YASUDA and Tsuyoshi HOSHINO

¹ 正会員 工博 新潟大学准教授 災害・復興科学研究所 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)
² 学生員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

Numerical computation of river flows have been employed the general coordinate system to adjust a river plane form. An adjustment flexibility of the coordinate system is better but it is difficult to generate a grid system in order to compute stably because grid system is not determined uniquely. This study develops a new boundary fitting method introducing the hierarchical quad-tree grid system in computation of shallow water equation. The numerical model with the quad-tree grid system apply to compute flow pattern in meandering channel, the result agree with experiments result well.

Key Words: quad-tree grid system, numerical model, meandering channel, shallow water equation

1. はじめに

河道の流況解析や河床変動解析においては、最低位の条件として河道の平面形状を忠実に表現することが要求される。この要求に対し、構造格子型と非構造格子型の二つに大別される様々な境界適合の手法がこれまでに提案されてきた。水工学の分野における構造格子型の先駆的な取り組みとしては、清水¹⁾による一般座標を導入した計算方法が挙げられよう。一般座標の格子構成では、横断形状の測線を平面的に配置して得られる幾何形状を基本的な格子構成とすることが多い。こうして得られる格子構成は広範な柔軟性を有し、数値解析の適用範囲を飛躍的に拡張することに大きく貢献してきた。その一方で、河道の湾曲部の曲率が大きい場合や、分岐・合流を繰り返すような場合では、単一座標系の構造格子型の宿命で境界適合のために生じる格子構成の歪曲が境界適合と無関係の計算領域の内部にまで及び、座標変換が要求するマトリクスの連続性を満足することができず、計算の精度や安定性の低下の大きな要因となる。このような歪曲を緩和するための最適化手法が提案されているものの、一般座標の格子構成パターンは無限のため、適切な解析を可能とする格子構成を得るまでに相当な試行錯誤が必要となる。最近では、内田・河原²⁾や安田・清水³⁾が直交座標系を基本としながら幾何学的な工夫を凝らして巧妙に境界適合する方法を提案している。彼らの方法は重合格子法⁴⁾の一種といえ、格子構成が一意に決定されるところに格子構成上の優位性を持つ。非構造格子型の計算方

法については、前野・小川⁴⁾や秋山ら⁵⁾などが有限体積法と流束差分法に基づく手法を提案して、解析精度と境界適合の汎用性が高いことを示している。これらの計算方法を解析対象に応じて使い分けたり組み合わせることで水工学分野において求められる境界適合はおおむね満足されつつある。近年、レーザーや超音波などのセンサ技術を応用した計測手法が急速に発達して、氾濫原、河道の平面形状および河床形状が高解像度の面的情報として取得されるようになってきた。すなわち、河道内地形の起伏を忠実に捕捉した情報に基づく水理解析を実現できる段階にまで計測技術が進展してきている。時空間の離散間隔が解析の精度とコストに密接に関係する数値計算の特性を踏まえると、このような面的情報の効率的な活用とは、格子構成において必要領域のみ局所的に地形情報を高解像で表現されることがひとつの理想形と言えよう。しかし、一般座標のような単一座標系に基づく境界適合法において高解像度情報を解析に組み込むためには、解析の対象領域の全体を一様に細密化した格子構成を用いざるを得ず、格子数の増大に伴う計算効率の著しい低下は不可避である。本研究では、近い将来に数値的な水理解析の基礎情報の主流となると考えられる高解像度の面的情報を四分木構造に基づく構造格子型計算法において効率的に活用するための格子構成法およびこれに基づく数値計算法について論じる。すでに、境界適合⁶⁾や物理量の急変点の解像度の向上のため⁷⁾に重合格子の一種である四分木構造格子を導入した解析手法が報告されている。これらに対し、本研究は、高解像度の

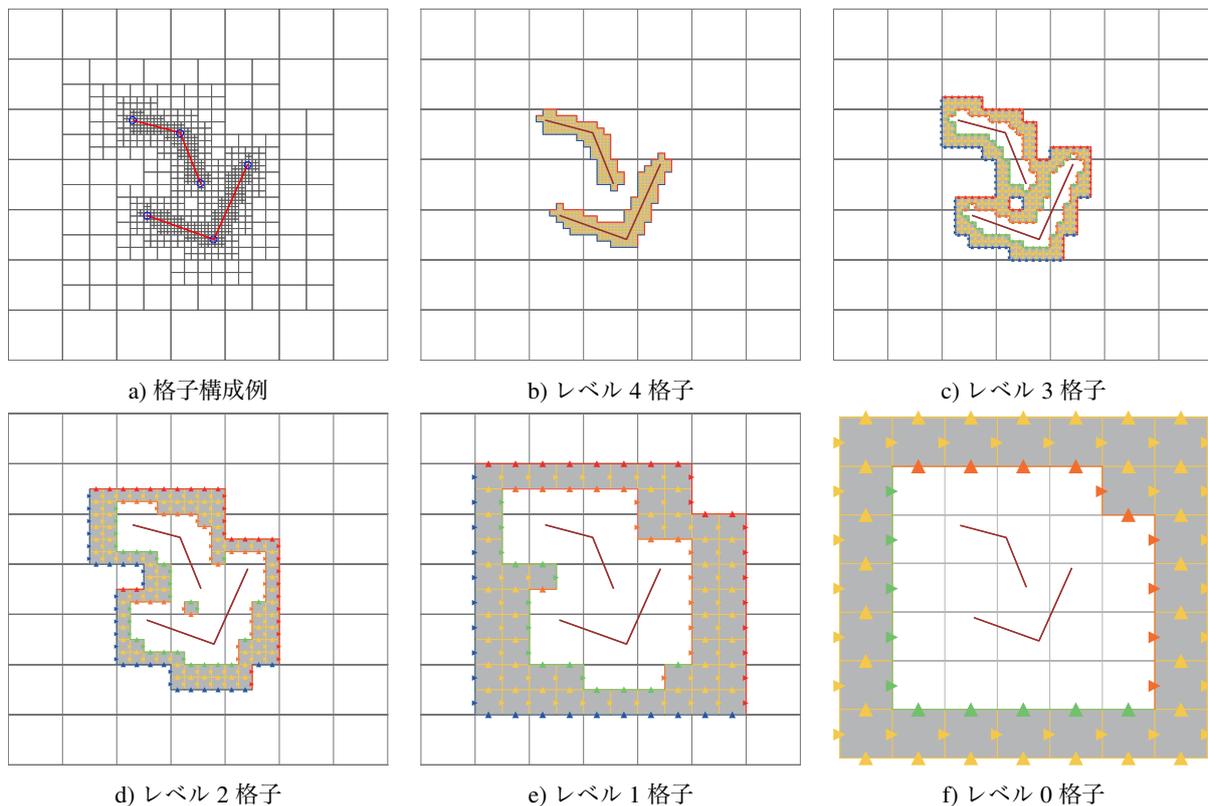


図-1 四分木格子による幾何表現と水理解析のための計算点配置とレベル間の接続関係

面的な地理情報の数値水理解析への適用を見据え、境界適合に対して四分木構造格子を適用するにとどまらず、地形急変部などの必要領域だけに限定した局所的な高解像度化を試み、これらがもたらす格子構成の柔軟性、解析の効率性、計算精度について示す。

2. 四分木構造に基づく格子構成法

(1) 四分木構造格子による幾何形状の表現

四分木構造とは2次元空間を再帰的に4つに分割した構造を指し、空間情報の観点では局所的に解像度を増減させることが可能な柔軟かつ効率的なデータ構造である。換言すると、構造的な分割規則に基づき格子面積が規定された多層の格子層の重ね合わせ構造と言える。

図-1 a) に四分木構造格子を用いて赤線で示された幾何形状を高解像度に表現した一例を示した。この図の例では、最も格子面積が大きいものを基準として、格子面積を $1/4^1$, $1/4^2$, $1/4^3$, $1/4^4$, と順に小さくした合計で5種類の大きさの格子を用いて幾何形状を表現している。この表記に従うと格子面積が最大のものは $1/4^0$ と書ける。以降、本論文ではべき乗の値を L とし、各格子面積レベルをレベル0などと表記する。

各レベルでの格子数はこの例の場合では、レベル0から4の順に34, 85, 140, 320, 662個の格子が用いられている。この領域例をすべてレベル4の格子で覆

うと格子数は12000程度となり、レベル0から4の格子を組合せた格子構成時の格子総数は10%以下にまで縮減されていることになる。この格子数の縮減の傾向は計算対象領域が広がるほどに一層顕著となる。

同図に示したように、一見すると四分木構造格子を用いた幾何形状の表現方法は複雑に思えるが、隣接する格子面積レベルは同一か±1の大きさの3パターンしか存在せず、格子構成は非常に規則的である。この規則性の高さから四分木構造を導入した格子生成は容易であり、本研究では格子生成の自動化手法を確立した。また、規則性が高いにも関わらず、格子構成は柔軟かつ効率的に行え、複雑な形状をした計算領域の境界適合、線状の内部境界などの表現、局所的な解像度の向上などが可能である。本論文では、特に、境界形状および局所的な高解像度化に焦点を絞った議論を展開する。

(2) 自動構成法の概要

水理解析において四分木構造に基づく格子構成を導入するためには、(1) 四分木構造格子の生成、(2) 格子面積レベル間の接続関係の定義、(3) 各格子面積レベル毎の標高情報、以上3つについてあらかじめ準備する必要がある。四分木構造型の格子構成により広範な問題を解析していくことを考えると、計算機を用いるなどして自動的に生成されることが望ましい。本研究では、できるだけ簡便かつ少量の入力情報のみから四分木構造格子群を自動生成する方法を以下に考案した。

考案した自動生成法の入力情報は、境界適合や局所的高解像度化を実施する位置指定の座標値あるいは境界などを表す線分を構成する座標値、計算領域を定義するための座標値、レベル0の格子長、レベル0格子の分割階層数のみである。これらのわずかな入力情報だけから以下のすべての処理を実行可能なように設計した。なお、以下で論じる格子構成の手順は、スタaggerド格子を用いた2次元計算のための計算格子の生成を前提としている。

a) 四分木構造で構成された格子層の自動生成

まず、格子面積が最小のレベル L の格子層と入力された一連の線分座標との交点座標を求める。次に、求められた交点座標を包含するレベル L の格子を計算格子とし、この計算格子を包含する $L-1$ の格子を検索する。この $L-1$ 層の格子に内包される L 層内の格子を計算格子とし、このような検索を格子面積が最小のレベル L からレベル0の格子層の順に行う。このような検索規則を適用して得られた格子構成と各格子面積レベルごとの格子群が図-1 b) から f) である。この検索処理は、各格子面積レベルの水理解析において明示的に用いられる格子の選別を行ったことを意味する。

b) 格子面積レベル間の接続関係と計算順序

前項で行った検索処理は、スタaggerド格子の観点から見れば、各格子層の水位計算点を定義したことと同義である。四分木格子構造による水理解析を行うためには、この水位計算点の定義に加え、流速計算点の定義とそれらの種別判定が必要となる。この種別判定は、格子層の接合面における水理量の授受や境界条件の設定を簡便にするために不可欠な処理である。

図-1 の b) から f) に示した三角点は流速計算点を示しており、ここではこの三角点の種別の判定および計算処理について説明する。図中の b) から f) を見ると格子面積が最小となる格子層を除いて各層はドーナツ状の中空形状をしている。各レベルの格子層は図中の青線と赤線で示した外周では自身よりも格子面積がひとつ大きな格子層と、緑線と橙線で示された内周では自身よりも格子面積が小さい格子層と接合される関係にある。また、外周と内周の間に位置する同一レベルの格子接続部を黄線で示した。この関係性に着目すると、スタaggerド配置される計算点はこれらの線分上に位置する黄色、青色、橙色、赤色、緑色に着色された5種類に分類されることが分かる。このうち支配方程式から算出される計算点は黄色、青色、橙色の3種類である。赤色と緑色の計算点は移流項の計算に要する情報であり、異なるレベルにおいて支配方程式から算出された値から求める。

まず、黄色の計算点は外周や内周に関わらず計算領域内部の計算点として取り扱え、境界条件を課すことなく支配方程式から算出される。

レベル L の外周上に配置された青色の計算点は、ひとつ外周側に位置するレベル $L-1$ の計算済の水位を境

界条件として支配方程式から算出される。同様にレベル L の内周上に配置された橙色の計算点は、ひとつ内周側に位置するレベル $L+1$ の計算済の水位を算術平均することによりレベル L の境界条件として支配方程式から算出される。

レベル L の赤色の計算点は支配方程式からでなく、レベル $L-1$ の計算済みの値をもたせる。この処理手順はレベル L の赤色の計算点がレベル $L-1$ の橙色の計算点と空間的に重複していることに着目した。 (i, j) を水平方向と鉛直方向の任意の格子番号とすると、この重複は水平方向の計算点においては、レベル L の赤線上の2つの計算点 $(i, j), (i, j-1)$ とレベル $L-1$ の橙色の計算点 $(i/2, j/2)$ でみられ、鉛直方向の計算点ではレベル L の赤線上の2つの計算点 $(i-1, j), (i, j)$ とレベル $L-1$ の橙色の計算点 $(i/2, j/2)$ でみられる。ここでの計算手続きは対応する格子番号にレベル $L-1$ からレベル L へと値を渡すことで行われる。この関係は水平方向では以下の式 (1), (2) で示される。

$$f_{x,L}(i, j) = f_{x,L-1}(i/2, j/2) \quad (1)$$

$$f_{x,L}(i, j-1) = f_{x,L-1}(i/2, j/2) \quad (2)$$

同様に鉛直方向では式 (3), (4) として示される。

$$f_{y,L}(i, j) = f_{y,L-1}(i/2, j/2) \quad (3)$$

$$f_{y,L}(i-1, j) = f_{y,L-1}(i/2, j/2) \quad (4)$$

ここに、 $f_{x,L}, f_{y,L}$ はレベル L でのそれぞれ水平方向、鉛直方向の任意の物理量である。

レベル L の緑色の計算点は、青色に着色されたレベル $L+1$ の2つの計算点と空間的に重複している。この対応関係は水平方向ではレベル L の (i, j) はレベル $L+1$ の $(2i, 2j)(2i, 2j-1)$ の2点、鉛直方向ではレベル L の (i, j) はレベル $L+1$ の $(2i, 2j)(2i-1, 2j)$ の2点にある。このことから緑色の計算点の値は支配方程式からではなく、次の式で示した算術平均により求めた。水平方向と鉛直方向の算術平均をそれぞれ以下の式 (5), (6) に示した。

$$f_{x,L}(i, j) = (f_{x,L+1}(2i, 2j) + f_{x,L+1}(2i, 2j-1))/2 \quad (5)$$

$$f_{y,L}(i, j) = (f_{y,L+1}(2i, 2j) + f_{y,L+1}(2i-1, 2j))/2 \quad (6)$$

前述までの格子面積レベルの接合関係を踏まえると、支配方程式による計算は各格子面積レベルごとに行えばよく、格子面積レベルの計算順序は0から L に向かって行う。支配方程式の計算後には次の時間ステップにおける移流項の計算のために赤色と緑色の計算点の値を求めることで適切な境界条件を課した計算となる。つまり、異なる格子面積間の接続手続きは、四分木構造格子においては同一の座標系であるため、直交座標系と極座標を組み合わせるような重合格子と比べると非常に容易である。

なお、これまでに示した四分木構造格子の数値計算の手順および後述の支配方程式において、等流計算、不等流計算を試験的に行い、理論値の十分な再現性と算出された物理量の連続性は確認できた。このことから四分木構造格子における計算手続きはこれまでに説明した手法で記述できるものと判断できる。

c) 各格子面積レベル毎の標高情報の生成

一般座標を初めとする多くの構造格子では格子層は一層だけで良いため、それぞれの計算点に標高値を与えることは容易である。一方で、四分木格子に基づく構造格子は多層的なため、格子面積レベルごとに解像度の異なる標高値を準備する必要がある。入力ソースとして面的な計測結果を利用できる場合ではそれほど煩雑な処理は要求されない。しかし、入力ソースが横断測量や等水深線などの不規則な離散情報の場合、これらに対して何らかの補間処理を施して面的情報を生成する必要がある。この詳細については、後述の室内実験水路の再現計算の章において詳述する。

3. 数値計算法

(1) 支配方程式

各面積レベルの格子層の座標系は直交直線座標系で記述される。それぞれの層内における x, y 方向の流量フラックス、水位は以下の式 (7) から (9) の浅水流方程式により計算される。また、式 (8), (9) で用いる τ_{xb}, τ_{yb} は、式 (10), (11) により算出した。

$$\frac{\partial h_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k}{\partial x_k} + \frac{\partial N_k}{\partial y_k} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{M_k^2}{h_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left(\frac{M_k N_k}{h_k} \right) + g h_k \frac{\partial H_k}{\partial x_k} = -\frac{\tau_{xb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu_i \frac{\partial M_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left(\nu_i \frac{\partial M_k}{\partial y_k} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{M_k N_k}{h_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left(\frac{N_k^2}{h_k} \right) + g h_k \frac{\partial H_k}{\partial y_k} = -\frac{\tau_{yb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu_i \frac{\partial N_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left(\nu_i \frac{\partial N_k}{\partial y_k} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{xb} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

$$\tau_{yb} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (11)$$

ここで、 M, N は x, y 方向の流量フラックス、 t は時間座標、 x, y は平面座標、 h は水深、 g は重力加速度、 H は水位、 τ_{xb}, τ_{yb} は x, y 方向の底面せん断応力、 u, v は x, y 方向の流速、 ρ は水の密度、 ν_i は渦動粘性係数、それぞれの変数に下添えされた k は格子面積レベルである。

一般座標の支配方程式は四分木構造格子の支配方程

表-1 水理実験の諸条件

\tilde{L}	\tilde{B}	θ_0	bed gradient	Q
220cm	30cm	30°	0.00333	1.87l/s

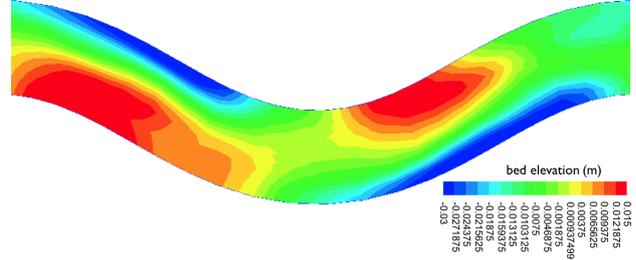


図-2 流路形状

式に座標変換に伴う付加項が加わる。両支配方程式は物理的には厳密に一致するものの、格子構成の歪曲が大きい場合などでは、一般座標ではこの座標変換が要求するマトリクスの連続性が満足されず、計算精度の低下の要因となることがある。

(2) 数値計算法

これらの式の数値計算は、連続の式、運動の式ともにスタッガード格子に基づく2次精度のLeap-Frog法を適用した。

4. 流路蛇行に関する水理実験の再現計算

本研究において新たに開発された流況解析法の妥当性を検証するために実現象との比較を行う。ここでは、河川の本来の特徴である蛇行部における流況の面的な特性を把握することを目的に、以下に示した蛇行流路に対する室内実験を比較対象とした。

(1) 水理実験の概要

長谷川ら^{8),9),10)}は、蛇行流路における流れの性質を調べることを目的に蛇行流路の移動床実験を行った。彼らは、式 (12) で表現される sine-generated curve の形状から成る水路を用いて種々の条件で実験を行った。

$$\theta = -\theta_0 \sin \frac{2\pi}{\tilde{L}} \tilde{s} \quad (12)$$

本研究では、このうち、表-1に示したME-2と呼ばれる実験の再現計算を行うことにした。ここに、 \tilde{L} は蛇行長、 \tilde{B} は流路幅、 θ_0 は蛇行角、また、同表中の Q は上流端から供給する定常流量である。彼らによると、表-1

の条件のもとで実験を実施した結果、実験開始から 240 分後に定常状態に達し、その時刻における河床形状が 図-2 である。

本研究では、四分木構造格子の計算特性を評価するために、この水理実験の再現計算を行った。四分木構造格子、一般座標系のいずれの再現計算に対してもこの定常状態における河床形状を固定床として与えた。

なお一般座標系による計算にはフリーソフトである RIC-Nays¹¹⁾ を用いた。

(2) 計算格子

図-2 に示した水路を四分木構造格子、一般座標系のそれぞれで数値計算するにあたり、計算格子を 図-3 (a), (b), (c) に示す通り設定した。

図-3 (a) に示した四分木構造の計算格子は、基本となるレベル 0 の格子を水平方向、鉛直方向ともに 5cm の正方格子に設定した。境界部における最小格子はレベル 3 に設定し、辺長 0.625cm の格子で境界部を表現している。この格子構成での各レベルの格子数を合計すると 9928 個であり、すべての格子を最小格子に設定した場合の格子数は 65280 個である。つまり四分木構造の導入により格子数をすべて最小格子とした場合から 84.8% 縮減されたことになる。本論文ではこの値を格子数縮減率と呼ぶこととし、この値が大きいほど空間の計算点数の効率化が施されたことになる。

図-3 (b) は 図-3 (a) の計算格子に水路内の砂州や深掘れ部の鉛直起伏を忠実に計算へと反映するために、起伏変化の大きい箇所を線分として与え、前述の格子構成法に基づき格子分割を行った計算格子である。本研究ではこの線分を内部分割線と呼ぶこととする。この格子構成では 77.5% の格子数縮減率を示した。内部分割線を導入するほど最小格子は増加し、それに伴い格子数縮減率は低下していくが、 図-3 (b) に示す程度の内部分割では格子数縮減率は 10% 以下の低下を示した。このことから内部分割線を導入した際にも空間的な計算点の縮減には十分貢献することがわかる。

一方で、比較対象のために行った一般座標系の計算では 図-3 (c) に示した計算格子を用いた。これは実験水路を流下方向に 68 分割、横断方向に 30 分割したもので、この横断方向の分割数は 図-3 (a), (b) に示したレベル 2 と同程度とし、四分木構造格子と一般座標系で基本解像度を統一している。

(3) 初期条件・境界条件

本研究では、河床のせん断力の評価は安田・清水³⁾と同様に黒木ら¹²⁾により提案された式を用い、実験結果として示されている平均流速と平均水深を与えて河床の抵抗係数 C_d を 0.007 と求めた。このとき、摩擦速度を介して Manning の粗度係数は 0.010 と逆算される。

各計算の上流端の境界条件には流量フラックスを与えた。この流量フラックスは、横断方向に一律に与えた。下流端の境界条件には水位を与えるものとし、実

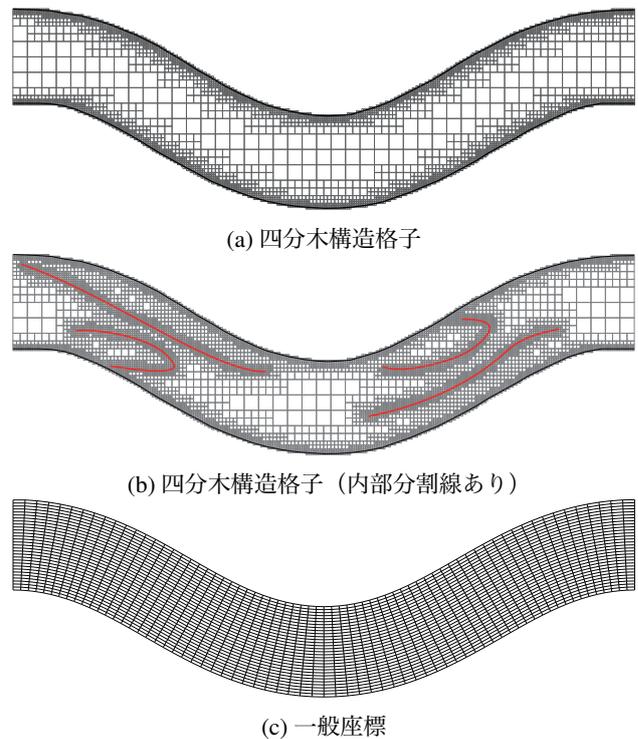


図-3 計算格子

験結果の平均水深と河床高さから規定される水位を与えた。また、水路側壁の境界条件は、ここでの流速を 0 とする non-slip 条件とした。渦動粘性係数 ν_t については、 $\kappa u_* h/6$ として求めた。ここで、 κ はカルマン定数で 0.4 を与え、 u_* は摩擦速度である。

(4) 標高情報の生成

四分木格子に基づく格子構成は水路内の局所的な起伏を格子面積レベルを上げることで忠実に反映することが可能である。格子面積の高レベル化に伴い、各格子面積レベルでの標高情報が必要となり、水路内の起伏の忠実な反映には境界条件である高密度の面的な標高情報を要する。入力ソースが不均一な離散情報である場合は構造格子型の情報に変換する必要があり、河床形状の計算への忠実な反映には標高情報の適切な補間が必須である。

今回対象とした水理実験の河床高は横断軸に沿った計測結果を基に作成された等高線情報しか残存しておらず、この不均一な離散情報から河床形状を忠実に反映した構造格子型の標高情報を復元した。以下にその手順を示す。

初めに (1) 等水深線上の座標をデジタイズにより求め、(2) そこで得られた離散情報を最近傍法 (Nearest Neighbor)、逆距離荷重法 (Inverse Distance Weighted) の両者を組み合わせることにより、構造格子型の情報へと変換する。ただし、この補間法の特徴として入力値の影響を強く受け、補間結果の標高情報が等高線近傍で平坦になることがある。このため、(3) 等高線近傍では 3

次スプライン補間の一種である CIP 法により、平坦化した標高の起伏を復元し、全体に滑らかに連続するように再度補間した。これらの標高情報を四分木格子の各格子面積レベルごとに与えた。

(5) 再現計算の結果

実験値および平面形状の高解像化を行った四分木構造格子、内部分割線を導入し、平面形状と鉛直起伏の高解像化を行った四分木構造格子、一般座標の定常状態に達した計算結果を流線、流速、水深を図-4,6,7 に示した。ただし、水深分布の実測値の情報が不明であるため水深に関しては計算結果のみを示した。

a) 流線

流線の実験値および計算結果を図-4 に示した。図-4 (a) に示した実験値から得られた流線には図中の (A) から (D) に示す以下の特徴がある。(A) 上流右岸の砂州を迂回する流れ、(B) 曲長部左岸側への流れの集中、(C) 曲頂部で通水幅が広がり、下流では右岸に沿う流れ、(D) 下流左岸の砂州を迂回する流れ、以上の4つである。特に (B) は、流路の最短距離を流れようとするこの実験条件における大きな特徴である。

図-4 に示した実験値と計算結果を比較する。流線を比較するとどれも傾向は一致しており、流況を概ね再現していることがわかる。細部に着目すると (A) および (D) の砂州を迂回する流れはどの計算においても確認できるものの、受けている砂州の影響の度合いには違いが見て取れる。特に (d) の結果は砂州の影響を過大に評価していることがわかる。また、(b) と (c) では同様の計算法にも関わらず、砂州の影響が (c) の方が大きくなる興味深い結果が得られた。この結果については次節で詳述する。(B) の流れはどの計算も左岸に寄る傾向を同程度に示している。(C) の流れはどれも右岸に寄る傾向を示すが、四分木構造格子では実験値よりも流れの外岸への集中が大きく表現されており、一般座標のほうが再現性が高いと判断できる。

b) 流速

図-5 に青色で示した右岸側縦断軸 $j = 3$ 、左岸側縦断軸 $j = 8$ に沿った流速分布を求めた。図-6 は $j = 3, 8$ 上における流速値、 x 方向および y 方向の流速値を示している。実測値の流速値は赤色の点で示した流速の実測地点の値を用いた。一般座標における流速値は計算点が空間的に $j = 3, 8$ に重なることから計算結果をそのまま用いた。四分木における流速値は観測点と計算点が異なることから計算結果を全て最小格子上に置き換え、最小格子ベースでの面積補間により算出した。

図-6 a) の $j = 3$ での流速はどの計算結果も概ね良好に実験値を再現している。特に上流から 50~200cm の区間では四分木構造格子での計算結果が一般座標と比べより実測値に近いことがわかる。

また、上流部での流速はどの計算においても多少の相違が見られるが、これは上流端で与えた流量フラッ

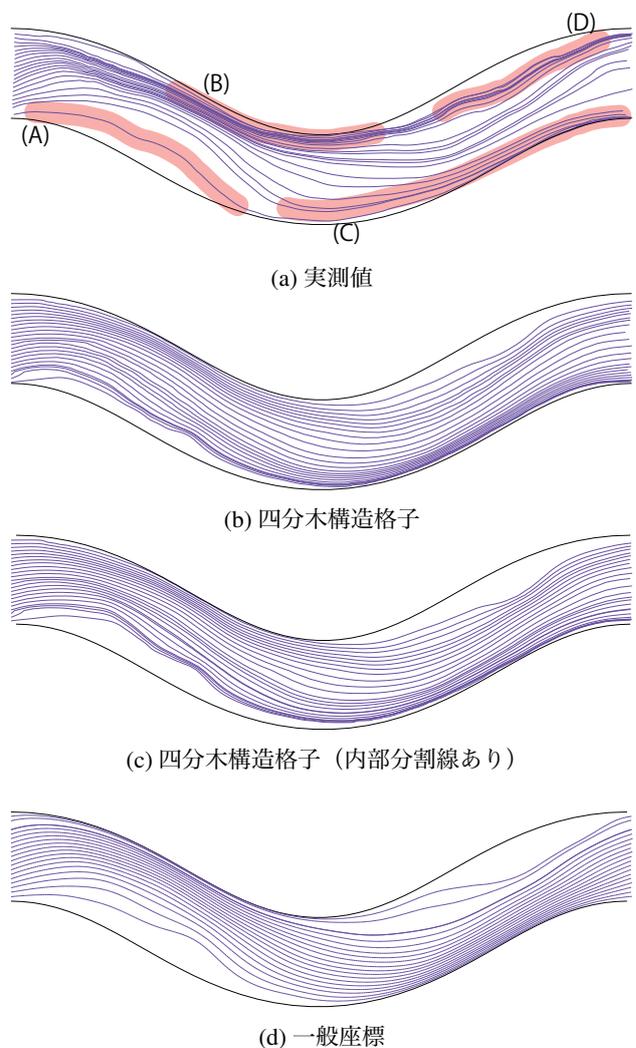


図-4 実測値と計算結果 (流線)

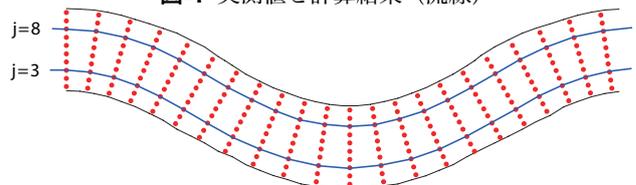


図-5 流速の評価点

クの境界条件の横断的な分布が実験と異なったことに原因があると考えられる。今回の計算においては上流端流量の横断分布は実測値が存在しないことから流量の横断分布は一様とした。

図-6 b) の $j = 8$ での流速は y 方向の流速の計算結果はいずれも再現性が高い。流速と x 方向流速はいずれの計算も縦断的に平均化した流速は概ね等しいが、実測値は上流から 100cm の地点でピークを迎えるものの四分木構造格子における計算結果はピークが上流から 150cm 付近にあり、空間的な流速分布のずれが生じていると判断できる。

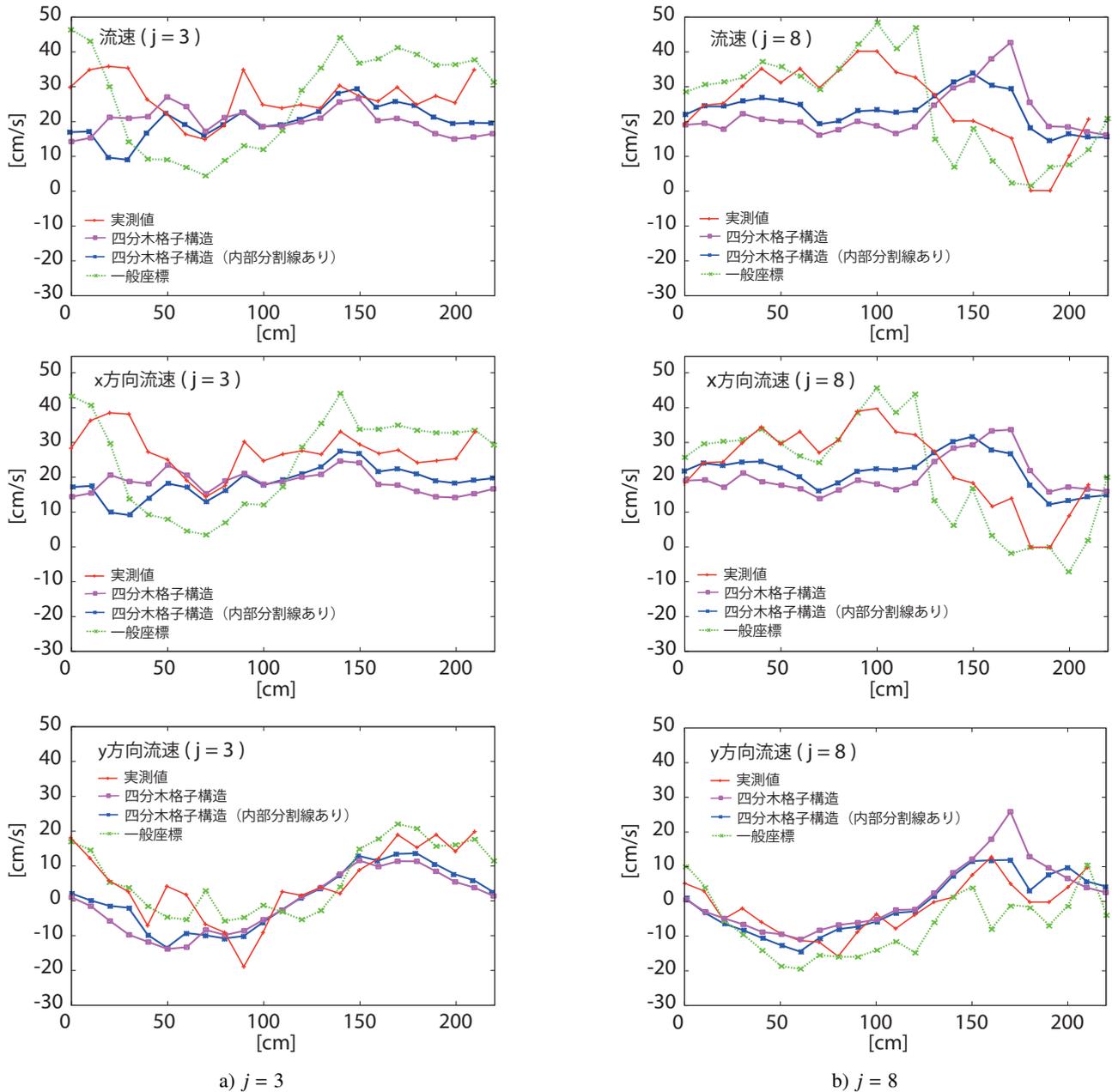


図-6 流速成分の比較

また、内部分割線を導入した四分木構造格子の計算の方が内部分割線のない計算と比べ、より実験値を良好に再現しており、特に砂州を迂回した後の流れである $j = 8$ の上流から 150~200cm の流速ではその違いが顕著である。

c) 水深

計算結果の水深分布を図-7 に示す。いずれの計算結果も同様の水深分布を示し、計算結果が滑らかに連続していることが見て取れる。

以上を踏まえた全体的な四分木構造格子における計算結果は一般座標系によるものと同程度の再現性を示し、計算が妥当であることが確認できる。水深と流速は支配方程式の未知数であるため、これらの計算結果の再現性が高いということは支配方程式が適切に計算

されたことを示す。

(6) 局所的な高解像度化の影響

図-4 (b) と図-4 (c) を比較すると、図-4 (c) は流路の内岸側に発達した砂州を迂回する流れがより明瞭に表現されている。これは図-3 (a) と比べ、図-3 (b) の格子構成がより河床の起伏を忠実に計算へと反映させていることを指し示している。また、縦断流速を比較しても内部分割線を導入したほうが全体的に再現性が高かった。つまり、河床起伏の大きい箇所においては図-3 (b) のような局所的な高解像度が計算精度の向上に必要な不可欠となる。

四分木構造では格子分割レベルと内部分割線の位置情報を任意に制御することが可能であり、図-3 (b) では

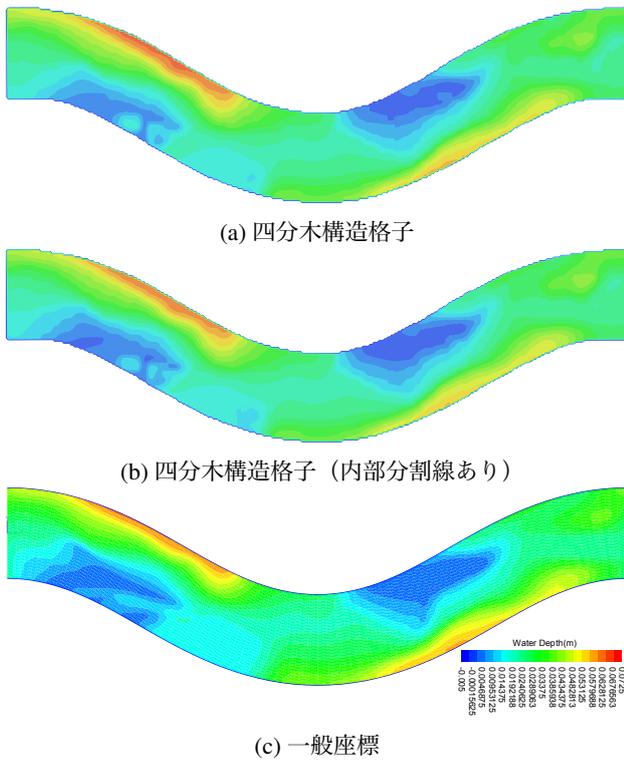


図-7 計算結果（水深）

河道内の砂州や深掘れ部の河床起伏が大きい箇所でも内部分割線を導入したが、線分に沿って分割可能なだけでなく、面的に内部分割領域を設定することも可能である。以上のことは曲線性を有する自然地形と直線性を有する人工構造物どちらの平面形状および鉛直起伏をも計算に忠実に反映できることを指し示し、これらを有する流路における有力な解析手法の一つであると考えられる。

5. 実河川での再現計算

前章での再現計算により実験水路スケールでの四分木構造を用いた計算の妥当性は確認された。しかしながら、実河川の平面形状は図-2のように数学関数で規定されるものではなく、前者と比べてさらに複雑な平面形状および鉛直起伏を有することが一般的である。このような複雑な地形形状および異なる計算領域スケールでの適用に関しては検討の余地が残る。そこで、本章では実河川を対象とした水理計算を行い、四分木構造格子と既存の水理計算で最も妥当性の高い手法の一つである一般座標系による計算結果を比較し、実河川スケールへの適用性を検討する。

(1) 対象河川

計算対象は石狩川下流 27~35kp とし、洪水時の水理計算を行う。対象領域の平面形状および鉛直起伏を図-8に示す。この領域の中央部は石狩川と夕張川の合流点であり、合流部には土砂の堆積が見られ標高が高くなっ

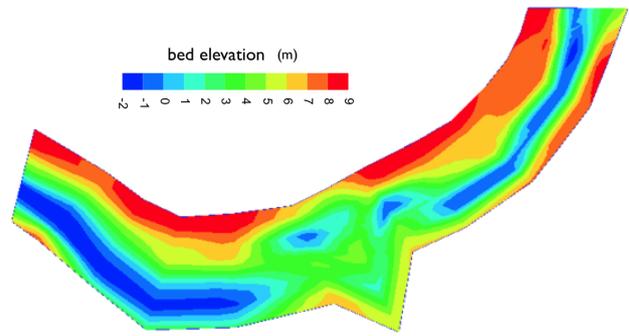
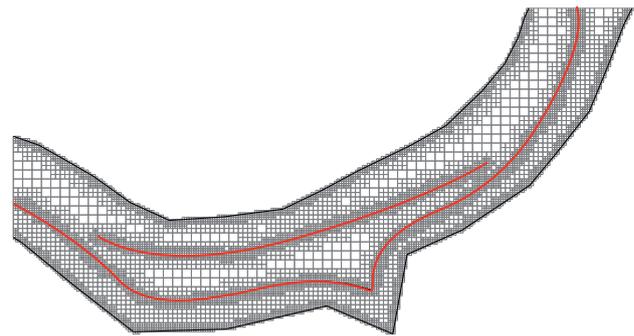
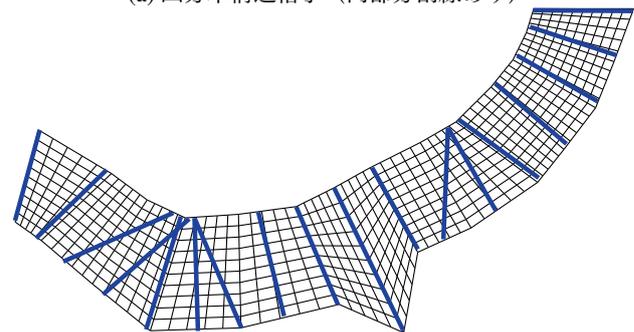


図-8 流路形状



(a) 四分木構造格子（内部分割線あり）



(b) 一般座標

図-9 計算格子

ている。このような河道内起伏の急変部を有する自然河川を対象とした。

(2) 計算条件と計算格子

計算条件は洪水流量 $13000\text{m}^3/\text{s}$ を上流端から定常として与え、夕張川からの流入が無いように設定した。Manning の粗度係数は 0.030 とし、その他の境界条件および初期条件は前章の再現計算に用いたものと同様に設定した。

四分木構造の計算格子は辺長 100m の正方格子をレベル 0 とし、最大レベルを 2 の辺長 25m の格子を最小格子とした。また、河道内形状を忠実に反映するために河床起伏の大きい箇所に図-9 (a) に赤線で示す内部分割線を導入した。格子縮減率は 76.7% であり、水路実験と同程度の空間的な計算点数の効率化がなされた。

一般座標の格子構成は図-9 (b) に示すように流下方

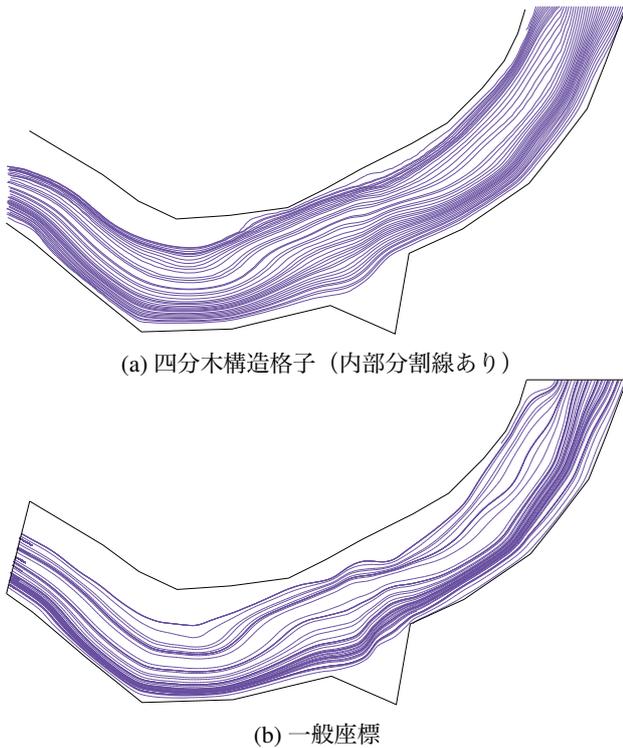


図-10 計算結果（流線）

向に 65 分割，横断方向に 10 分割し，格子辺長は概ね 100m とした．全体的には四分木構造格子のレベル 0 の格子が一般座標系の格子と同程度の大きさとなるようにした．この一般座標の格子生成に際しては図中に青線で示した横断測線の測線に基づき格子生成を行った．この横断測線を利用する格子生成法は最も直接的な手法である．しかしながら，比較的簡便に格子を生成できるものの，一般座標が要求するマトリクスの連続性を満足することの難しい格子生成法である．その結果，図-8 に示したような自然河川ではこの連続性を保つために格子生成の試行錯誤を要するのが常である．

(3) 計算結果

四分木構造，一般座標の計算結果の流線をそれぞれ図-10 (a), (b) に示す．両者を比較すると中央部右岸で多少の相違が見られるものの，全体的には概ね一致しており，四分木構造での計算が実河川スケールにおいても妥当であると判断できる．

以上のことから自然河川のように複雑な平面および鉛直形状を有する流路に際しても四分木構造格子を導入した計算が有用であることがわかる．

6. 閉鎖性水域における解析

四分木構造を用いた計算格子では格子の大きさを容易に自在に設定できるため，どのように複雑な平面形状であろうと計算に反映可能となる．また，湾や湖などの閉鎖性水域における水理解析にも応用できること

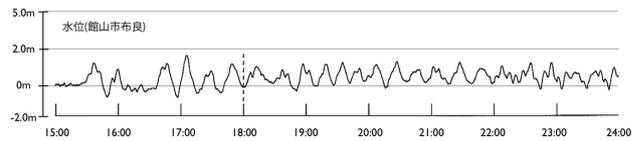


図-12 館山市布良での実測水位

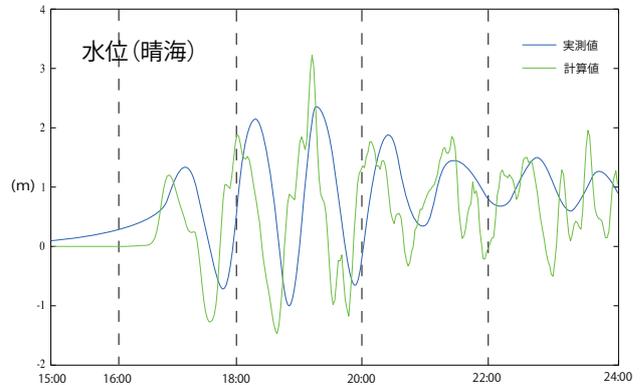


図-13 水位の時間変動

を本章で示す．ここでは東京湾を例に東日本大震災の際に観測された津波の再現計算を行った．波高の実測値は気象庁の公表データを利用した．¹³⁾

(1) 計算格子

図-11 に東京湾の平面形状を再現した計算格子を示した．この計算格子は最大レベルを 3 に設定し，レベル 0 を辺長 1000m の正方格子とし，最小格子は辺長 125m の正方格子である．東京湾の地形は自然に形成された地形と埋立地のように人工的に造られた地形の両者を包含しており，平面形状は非常に複雑な形状を有しているが，図-11 に示すように四分木構造格子で表現可能である．

(2) 計算条件

計算条件は図-11 の左端に図-12 に示した湾口から 10km 程度離れた千葉県館山市布良の 3 月 11 日の実測波高を境界条件として与え，計算格子の外側は不透過とした．

(3) 計算結果

図-11 に赤色で示した東京都中央区晴海での 3 月 11 日の水位の実測値と計算値を図-13 に示す．この図からわかるように水位のピーク位置には多少のずれが生じているものの，概ねの傾向は計算により再現されている．湾の入り組んだ箇所での水位の妥当性から，四分木構造は複雑な形状を有する閉鎖性水域の計算にも適用可能であると判断できる．



図-11 計算格子

7. 四分木構造格子に適する解析対象

これまでのことを踏まえると四分木構造格子と一般座標系はそれぞれ一長一短の特徴を有しており、扱う計算対象に得手不得手があることがわかる。本章ではそれらの特徴と効果的な使い分けについて示す。

一般座標における利点は平面形状を少ない格子で表現できる点である。四分木構造格子では解像度と格子数の関係の効率化は施されているものの、適切な平面形状の表現のための境界部での格子の集中は不可避であり、格子数の観点では一般座標が優位である。一方で、河道内の鉛直起伏の表現は局所的な高解像化が可能な点から四分木構造格子が優位である。また、四分木構造はマトリクスの連続性を考慮する必要がないため、いかなる平面形状であっても格子生成が容易に行えるという利点がある。

以上のことから流れの急変部を有さない流路においては計算負荷の観点から一般座標が適していると言え

る。しかしながら、一般座標では格子構成が困難な、複数河川の合流や砂州や人工構造物などの不透過領域を含む複雑な平面形状を有する流路では四分木構造格子を用いることが有効である。また、流路内に人工構造物や中洲などの流れの急変部を有する場合には局所的な高解像化が可能な四分木構造格子による計算が適していると思われる。

8. おわりに

本研究では四分木構造を導入した浅水流方程式の数値解析法を確立した。四分木構造は直交座標系を用いても非常に柔軟な境界適合を可能とする格子構成法であり、直交座標系を用いていることでの利点として以下の3つがある。(1) 数値計算の精度において重要となる格子の直交性が保持されること、(2) 格子の歪曲を

行わないため、方程式に付加項が不要となること、格子生成時に際しても交差角に対する配慮が不要であることから(3)格子構成を一意に決定できる。

この四分木構造格子では局所的な高解像化を容易かつ任意に実現することが可能である。この特徴は、境界形状の適合の他に流水中に存在する構造物や中州などの不透過領域の解析への反映を飛躍的に簡便な手続きで実現した。それだけにとどまらず、河床形状の急変領域などの適切かつ効率的な解析の反映も同時に約束している。このような解析密度の向上は、今後主流となると考えられる面的な標高情報の計測技術と組み合わせることで精度向上に寄与するばかりか、局所的な地形や水理状況の把握が可能となるため構造物周りの流れの把握や生物の生息場の確保などの計算結果の2次的利用においても非常に有益となると考えられる。

謝辞:本研究は、科研費基盤研究(A)(代表者 清水康行)、科研費基盤研究(B)(代表者 渡邊康玄)、科研費若手研究(B)(代表者 安田浩保)からの支援を受けて実施されている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水康行：一般座標系を用いた2次元流れと河床変動の計算，土木学会年次学術講演会講演概要集第II部，No.46，pp.634-635，1991。
- 2) 内田龍彦，河原能久：二次元浅水流の保存型CIP陽解法の開発とその検証，応用力学論文集，Vol.9，pp.917-924，

- 2006。
- 3) 安田 浩保・清水康行：座標軸非依存の部分境界適合法による蛇行流路の数値計算，土木学会水工学論文集，第52巻，pp.1003-1008，2008。
- 4) 前野詩朗，小川信：非構造格子有限体積法による水理構造物周辺流れの数値解析，応用力学論文集，Vol.6，pp.857-864，2003。
- 5) 秋山壽一郎，重枝未玲，浦 勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく1次および2次精度平面2次元洪水流数値モデル，土木学会論文集，No.705/II-59，pp.31-43，2002。
- 6) Cruz, S.： Numerical solution of the shallow water equations on quadtree grids. DPhil thesis, Oxford University, UK, 1997.
- 7) 渡部靖憲，小玉努：Adaptive Mesh Refinementによる高解像津波シミュレーション，海洋開発論文集，第25号，2009。
- 8) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学博士論文，184p.，1984。
- 9) 長谷川和義，山岡勲，田中直人：蛇行蛇行の影響を受けた河床波の形状特性，土木学会北海道支部論文報告集第II部，第38号，1982。
- 10) 長谷川和義，山岡勲，鈴木康正：蛇行流路における河床波上の流れ，土木学会北海道支部論文報告集第II部，第38号，1982。
- 11) 河川シミュレーション支援ソフト【RIC-Nays】<http://i-ric.org/nays/ja/index.html>
- 12) 黒木幹男，岸力，板倉忠興：交互砂州の水理特性，沖積河川における河床形態と流体抵抗の研究，1975。
- 13) 気象庁「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について

(2011.7.31 受付)

水文モデルの精度向上に向けた 現地水文観測の重要性

IMPORTANCE OF HYDROLOGIC FIELD STUDIES FOR THE IMPROVEMENTS OF THE HYDROLOGIC MODELS

呉 修一¹・大原憲明²
Shuichi KURE and Noriaki OHARA

¹正会員 博士 (工学) カリフォルニア大学デービス校 (One Shields Ave, Davis, CA95616, USA)

²正会員 Ph.D. カリフォルニア大学デービス校 (One Shields Ave, Davis, CA95616, USA)

Field study is an essential component of hydrologic science because all hydrological studies must be conducted by such observation-based knowledge of real watersheds. In this paper several studies related to hillslope runoff processes were reviewed, and the importance of connections between field studies and modeling activities to improve hydrologic models was discussed. As an example, the results of the field study (Ohara et al., 2011) focused on the role of snow in runoff processes were presented in the paper. In this field study, a field site at Ward Creek watershed, Lake Tahoe Basin, California was built for observations of overland flow, subsurface stormflow, and channel flow, simultaneously with atmospheric measurements in order to examine the hydrology at a snow-covered hillslope.

Key Words : *Field observation, hillslope hydrology, snowmelt, overland flow, subsurface flow*

1. はじめに

河川流量データは、河川治水・利水・環境計画の策定に向けた基礎情報であるとともに、リアルタイムの河川流量データはリアルタイム洪水予測や洪水予報システムにおけるシステム変数のアップデートなどにおいて重要な役割を果たす。また、河川流量データは、流域における大気、境界層、地表面、地中などにおける複雑な気象・水文素過程のアウトプットであり、流域水文特性を端的に示す指標である。よって、河川流量データは流域の流出・保水特性や環境特性の解明に必要不可欠となる。例えば、流域における土地利用・被覆状態や人為活動の変化や気候変動などがどのように河川流況に影響を与えたかを議論する際には、長期流量データが必要となる。また、非常に多くの降雨流出解析モデルが開発されており、河川流量データに基づくキャリブレーション・バリデーションされたモデルを用いることで、基本高水流量の算定や流域特性の解明など非常に多岐にわたる解析が

行われている。このような状況を考えた場合に、河川流量観測の精度向上は非常に重要なトピックである。

河川流量以外にも、降水、蒸発散などの気象因子や斜面流出成分、各種水質成分などの水文・水質データも非常に重要である。例えば、呉ら¹⁾、山角ら²⁾は、荒川、隅田川、神田川および日本橋川の都市河川感潮域において水質の時空間分布特性に関して現地採水を行うとともに ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler : 超音波ドップラー多層流向流速計) を用いることで、感潮域における水理・水質機構の複雑性を示すと同時に、日本橋川の出水時に下水のオーバーフローに伴い溶存酸素濃度が減少する事を明らかにしている。このような現地観測は、河川流況および水質環境を解明するのみならず、地元住民とデータを共有し議論することで、都市河川再生に伴う街づくりに向けた大きな機運を生じ、地元住民の注目を河川に集める事に大いに役立っている。

また、近年大いに注目されている気候変動の予測計算で用いられる GCM (General Circulation Model) や RCM (Regional Climate Model) の精度向上に向けて、地表面フ

ラックスなどを集中的に観測する試みが世界各地で行われている（例えば、FIFE³、CASES⁴、EFEDA⁵、琵琶湖プロジェクト^{6,7}、荒川プロジェクト^{8,9}など）。このような観測プロジェクトは、空間的に密に測定されたデータの乏しい気象因子などを集中的に観測することで、その時空間分布特性を明らかにするとともに、気象計算領域グリッド内のフラックスなどのパラメタリゼーションを改良することに大きく貢献するだろう。

ここで、現地水理・水文観測の主要な目的は、複雑な自然現象を解明するという点であることを再度確認したい。例えば、単一斜面や小流域における現地水文観測や散水実験などは、降雨流出過程の解明および降雨流出モデルの発展に大きく寄与してきた。現地観測結果より明らかにされた重要な流出プロセスを組み込むことで、物理過程に基づく降雨流出モデルの開発が行われてきている。流出モデルの発展に関する詳細なレビューは、例えば、Kavvasら¹⁰、Kampf et al.ら¹¹、呉ら¹²などを参照されたい。このような物理モデルを用いることで、流域の市街化や森林の伐採などの土地利用・被覆状態の変化が水循環過程に与える影響や、地中水と地表水の相互作用の影響、人為活動が水循環に与える影響などに対する解析が可能となる。例えば、赤羽ら¹³は、土壌・地形特性に基づく降雨流出モデルを用いることで、里山の市街化が表面流、中間流に与える影響を定量的に評価している。また、木内ら¹⁴は、分布物理型水循環モデルであるWEPモデルを用い、農地と都市が混在する流域に適用することで、農地が水循環に及ぼすインパクトを定量的に評価している。その他にも物理流出モデルを用いた水文・水質解析が非常に多岐にわたり行われている（例えば、佐山・寶¹⁵、呉ら¹⁶、手計ら¹⁷、宮本ら¹⁸など）。

このような、降雨流出モデルの発展・開発には、単一斜面や小流域における現地水文観測結果が非常に大きく貢献してきた。よって、本論文では、斜面流出過程に関する現地観測に着目することで、水文モデルの更なる発展に向けた現地水文観測の重要性を議論する。最初に、斜面流出プロセスに関連した現地観測のレビューを行うとともに、その一例としてOharaら¹⁹の現地観測結果を紹介する。これにより、河川流量精度向上とともに、今後の水文学の発展に向けて現地水文観測が担う役割を再認識したいと考える。本論文集のタイトルは「河川流量観測の新時代」であり河川流量観測の精度向上に向けたポイントに言及することが重要と考えるが、この点に関しては他の執筆者に一任し、著者らはモデリングの観点から斜面流出プロセスに関する現地観測に着目するとともに今後どのような水文データ整備が必要かなどの点に言及することにしたい。

なお、参考文献 Oharaら¹⁹は本論文中に度々登場するため、これ以降は Oharaら(2011)と表記することで、他の文献との区別をはかる。

2. 斜面流出プロセスに着目した現地観測

従来までの降雨と流量の応答関数を求めるだけのシステム工学として降雨流出を扱うのではなく、純然たる物理過程に基づき降雨流出機構を解明するという「物理水文学」の取り組みは現地水文観測結果に基づき発展してきた。このような物理水文学の取り組みは、流域に降った雨水がどのような経路をたどり流域末端に達するかという疑問に答えるだけでなく、概念モデルから物理モデルへの降雨流出モデルの変遷に大いに寄与してきた。

斜面現地観測で得られた最も大きな成果の一つは、出水時のハイドログラフを形成する主成分はHorton型の表面流ではなく中間流である事の発見であろう。Tsukamoto²⁰、Hursh and Brater²¹らの試験地における観測結果により、直接流出では中間流が卓越するという理論的根拠が確立した。また、降雨流出の成分分離の問題に関して、トレーサーとして種々の物質を用いた研究が、例えば、海老瀬ら²²、竹内ら²³、Sklash and Farvolden²⁴によって行われている。これらの研究からも表面流ではなく中間流の寄与が大きいことが示されている。

しかしながら、大規模出水時には河川近傍の飽和面近くにおいて表面流の発生が考えられる。これは流域全体から表面流が生じるのではなく、流域の一部から表面流もしくは直接流出全体が生じるということである。Betson²⁵は降雨量が流域の浸透能を超過したとき一部の飽和域から流出は生じるという部分流出寄与域(Partial source area)の考えを提案した。Hewlett²⁶は流出寄与域が降雨とともに変動し、流域流出量の変動に対応するという変動流出寄与域(Variable source area)の考えを提案した。それに先立ち高棹²⁷は表土層内をダルシー型の中間流領域とみなし、水深が表土層を超える時表面流が生じこれをkinematic waveとして取り扱い、流出過程を総合的に表現する解析の方法を確立している。これは、Betson²⁵、Hewlett²⁶が提案する部分流出寄与域の考え方を理論的に説明したものと認められる。

このような現地観測と同時に散水実験を通じ単一斜面を実スケールで再現しようとする試みも多くなされてきた。吉野²⁸は多摩ニュータウンにおいて散水実験としてはかなりの空間スケールを有する20m×20mの粗造成地および林地斜面において散水実験を行い、山地、都市域の流出特性の違いと土壌の初期水分状態が流出特性に占める要因の大きさを示した。また、山田ら²⁹は室内散水実験および多層土壌で構成される斜面における屋外散水実験を行うことにより流出経路の解明を試み、降雨流出経路は雨水の鉛直浸透に始まり透水係数の異なる土層境界面としての不浸透面で飽和帯が発生し、押し流すように飽和側方流が形成されることを明らかにした。ここで、土壌の初期水分状態が降雨流出に与える影響は非線形であり、その影響が大きいことは昔からよく知られている。

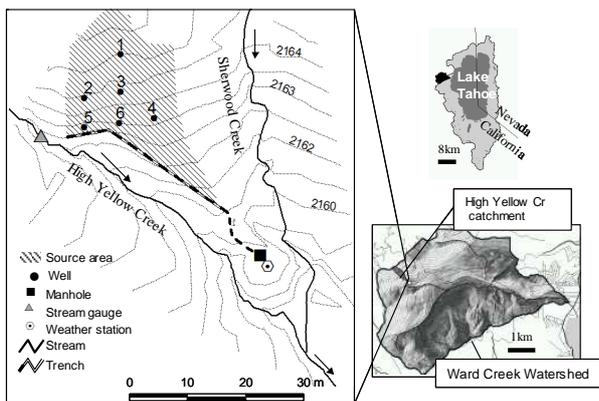


図-1 現地観測サイトの概要 (Oharaら, 2011)

このような土壌の初期水分状態を「古い水」の存在と称し、古い水の流出寄与割合や滞留時間に関する観測や理論的解析が行われている (例えば, Kirchner³⁰⁾, 佐山ら³¹⁾)。Sayama and McDonnell³²⁾ は、流出成分の時空間起源に応じたハイドログラフの分離手法を、土壌水分などが非常に密に観測された複数の流域に適用することで、部分流出寄与域や変動流出寄与域の概念を実測値およびモデル解析結果より理論的に証明するとともに、流水の滞留時間に影響を与える要因に関して検討を行っている。

この他にも、パイプ流の存在 (例えば, McDonnell³³⁾) が出水に大きな影響を与えることや、岩盤浸透水が基底流量などに大きく寄与していることなど (例えば, Uchidaら^{34,35)}) の非常に重要な知見が現地観測より発見されている。

このような現地水文観測と降雨流出モデルの関係は、浅野ら³⁶⁾に詳しく記述されており、斜面観測の知見とモデリングの問題点が詳細に議論されている。また、Oharaら(2011)では、雪層を伴う斜面流出プロセスに関する現地観測が詳しく記述されているので、これらも参照されたい。

3. 雪層が斜面降雨流出プロセスに与える影響

本章では、Oharaら(2011)にて得られた斜面流出プロセスに関する現地観測結果を紹介することで、今後の現地水文観測とモデリングの同時進行および有機的な結合の重要性を議論する。この現地観測の目的は、冬季から春季に積雪が存在する小流域に着目し、雪層の存在する斜面における降雨・融雪流出プロセスを解明するとともに、雪層の有無が表面流の発生に与える影響を明らかにすることである。

(1) 現地観測サイト

対象とした小流域は、米国カリフォルニア州に位置するTahoe湖流域内のWard Creek流域(26.4km²)である (図-1)。Ward Creek流域は、シエラネバダ山脈に見られる

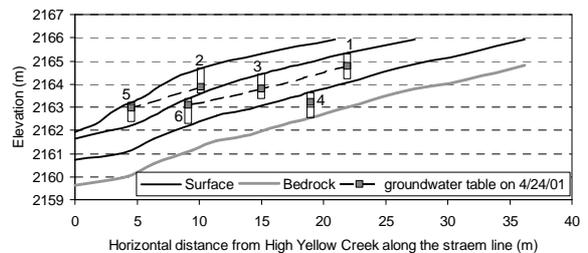


図-2 対象斜面の縦断面図および仮設井戸の位置 (Oharaら, 2011)

典型的な小流域であり、比較的に高標高に位置する。例えば、流域内の標高2160m地点における冬季の降水の90%が降雪である。流域内の積雪深は冬季から春季にかけて3mを超える部分が大半である。シエラネバダ山脈からの融雪水はカリフォルニア州における主要な水資源であると同時に、冬季から春季にかけての融雪流出を伴う洪水は大きな問題となっている。カリフォルニア州の水政策に関しては、例えば、浅野³⁷⁾などに詳しく記述されているので、そちらを参照されたい。

従来から、Tahoe湖流域における土砂浸食に伴い発生した浮遊砂の湖内流入に伴い、Tahoe湖の水質汚染が問題となっている。土砂浸食は、河床浸食、ガリー浸食および斜面における表面流の発生に伴う浸食であることが多くの研究から既に指摘されている (例えば, Kroll³⁸⁾, Simonら³⁹⁾, Kavvasら⁴⁰⁾, Rothら⁴¹⁾)。よって、Oharaら(2011)では、雪層を伴う単一斜面において、表面流の発生機構に着目し現地観測を行うことで、斜面における降雨・融雪流出プロセスを解明するとともにTahoe湖流域における土砂浸食メカニズムを明らかにすることを目的としている。

(2) 観測の概要

対象としたWard Creek流域内の観測サイトは、集水面積12,400m²、勾配約16%の流域の代表的な斜面である。地表面から難透水面(Bedrock)までは、現地調査結果より2層(Root zone and Consolidated layer)に区分できることが明らかにされている (図-2, 3)。また、米国農務省(USDA)で公表されている土質調査結果より、対象斜面の飽和透水係数の値は36-360mm/hであり、非常に透水性の高い斜面であると言える。この斜面特性に基づき本観測では、表面流(Overland flow)、浅い中間流(Rootzone discharge)、深い中間流(Consolidated layer discharge)を対象とし、継続的な測定が行われている。

図-1に示されるように中間流を測定するためのトレンチがHigh Yellow Creekに沿って設置され、下流側に位置するマンホールへと接続されている。このマンホール内に設置された測定器を基に、2成分の中間流が測定される。また、トレンチの地中部には、ポリエチレンシートと排水パイプが2層の中間流を分離するために設置されている (図-3)。表面流の計測は、樋をトレンチの上斜

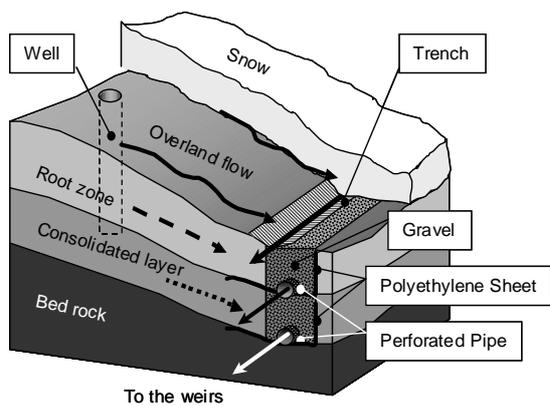


図-3 表面流および中間流の観測システムの概略図 (Oharaら, 2011)

面側に設置することで行っている。この樋は雪の重みに十分耐えられる強度を有するとともに、他の物質の流入を防ぐためにネットで覆われている。斜面流出成分の他にも、High Yellow Creekの流量も同時に測定されている。図-4に表面流測定のためのトレンチ、表面流および中間流測定のためのマンホール内部および河川流量測定のための堰の写真を示す。斜面流量の計測は、ボックスへの流入水量を圧力変換器を通じて水位へと換算し、この水位から流量を算定している。水位から流量への変換はキャリブレーションされた水位・流量曲線を用いて行われる。

更に、土壌水分量の空間分布を評価するために、6箇所に仮井戸を掘削し、そこでの水位を圧力水頭から算定している。これは、対象とする表面流が、Hortonタイプの表面流のみではなく高棹タイプの表面流 (Dunneタイプ、もしくは復帰流など)も想定しており、土壌水分量情報が非常に重要なためである。また現地の地表面熱交換量を測定するため、微気象観測タワーが設置されている。これにより、降水、日射量、気温(2m, 5m)、湿度(2m, 5m)、地表面温度などが同時に測定されている。これらの気象情報は、融雪量などを算定する際に用いられる。

(3) 積雪を伴う地域における小規模流量観測の留意点

当観測地は積雪量が多く、厳冬期には管理のために近づくことも容易ではないため、すべての観測を自動化している。図-4でも示されているように積雪からYellow High Creekの堰を守るために頑丈な覆いを設置している。また流量観測用の堰近傍の水が凍らないように配慮するとともに、温度観測を同時に行いデータが有効であることを確認した。幸い北部カリフォルニアでは雪が断熱材の働きをすることにより、融雪の季節(3月～5月)には地表近くが氷点下に達することはなかった。また、マンホール内に流量観測機器を設置することは勾配を確保するとともに、凍結を防ぐ意味においても有効であることが確認された。



図-4 表面流集水用のトレンチ (左上)、表面流測定用のマンホール内部 (右上)、中間流測定用のマンホール内部 (左下) および河川流量観測用の堰 (右下) の写真 (Oharaら, 2011)

(4) 融雪量の算定

積雪層から地表面へ供給される水量を算定するため、Watershed Environmental Hydrology (WEHY) Model (Ohara and Kavvas⁴²⁾, Kavvasら¹⁰⁾の融雪モジュールが使用されている。本モジュールは、積雪の3層を考慮した熱収支モデルである。入力データは、観測された降水量、正味放射量、全天日射量、気温、地表面温度、風速、相対湿度などが用いられている。モデルのキャリブレーションにはカリフォルニア州水資源局 (California Department of Water Resources) が提供する実測の積雪情報が用いられた。

(5) 観測結果の概要

Oharaら(2011)で示された観測結果の一例として、3つの代表的な出水イベントを紹介する。イベントの特徴は、Case1(2001/05/13-17): Snow-Free Runoff (降雨のみ、積雪および融雪無し)、Case2(2000/04/30-05/05): Snowmelt Runoff (融雪のみ、降雨無し)そしてCase3(2000/05/06-10): Rain-on-Snow Runoff (降雨、融雪ともにあり)である。

図-5に、Case1のイベントで測定された斜面流出量および地下水位の時系列を示す。この出水は、総降雨量27mmであり、シエラネバダ山脈においては中規模の流出イベントである。この出水は5月に流域内の積雪が融雪に伴い消失して間もない間に生じたものであり、流域内土壌水分はある程度湿潤状態であると考えられる。図-5に示されるよう、この規模の降雨では地下水位の上昇は顕著ではなく、表面流の発生は確認できず全ての斜面流出成分は中間流で構成されていた。

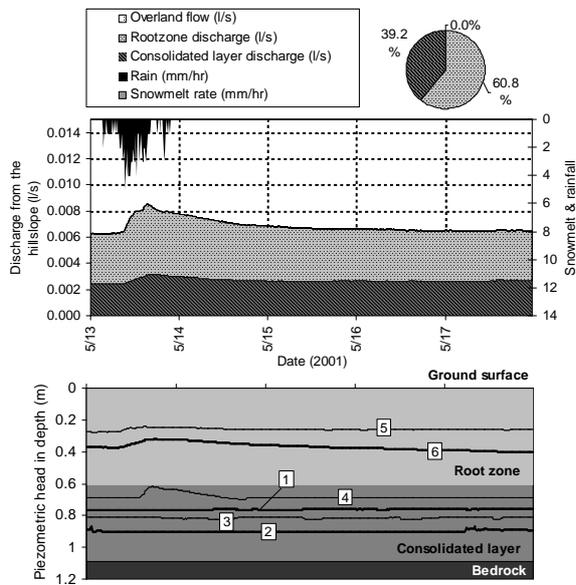


図-5 観測された降雨量、斜面流出量および地下水位の時系列 (Case1: Snow-Free Runoff) (Oharaら, 2011)

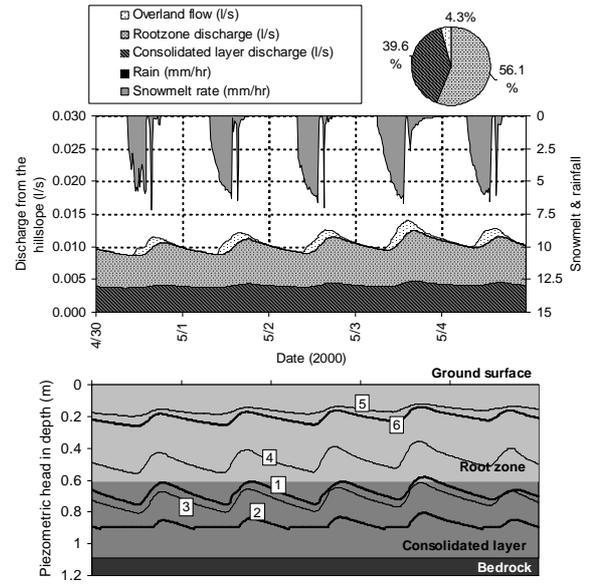


図-6 観測された斜面流出量、地下水位の時系列および算定された融雪量 (Case2: Snowmelt Runoff) (Oharaら, 2011)

図-6に、Case2のイベントで測定された斜面流出量および地下水位の時系列を示す。図に示されたハイドログラフは本流域における融雪期の典型例であり、融雪量、斜面流出量、地下水位が気温の日変動に応じて変動していることがわかる。ここで、図-6で示される融雪量は、WEHYモデルの融雪モジュールから算定されたものであることに注意されたい。図-6に示されるよう、このイベントでは表面流が発生しており、積雪が存在し融雪が生じる状況では、全流出量のうち表面流のしめる割合は5%程度であることがわかる。ここで非常に興味深い点は、地下水位の上昇はさほど顕著ではなく、この表面流は高棹タイプの表面流では無いと考えられることである。融雪量のイベント平均は33mmであり、Case1のイベントと比較して大きな違いは無く、地下水位データから土壌の初期水分量に関しても大きな違いは無いと思われる。このような状況から、積雪の存在が表面流の発生に寄与していることが考えられる。この現象に関して、Oharaら(2011)では、雪層と地表層の透水係数の相違と、雪層下部における毛管作用に伴い、飽和側方流が雪層下部にて発生しているものと説明している。この観測結果に基づき、積雪を有する斜面における降雨・融雪流出プロセスは、図-7に示すように考えることができることが示されている。つまり、雪層が透水性の高い表層土と同様の働きをし、ここで生じる飽和側方流が、表面流を形成しているのである。この雪層内の表面流の存在が、春季の洪水ピーク流量や斜面の土砂浸食に与える影響は少なくないであろう。

図-8に、Case3の出水例を示す。この出水は、総降雨量98mmの雨を伴う大きな出水であり、この地域で大きな洪水を生じさせた。図-8に示されるよう、降雨に伴い地下水位が上昇し、トレンチ付近の土壌が飽和に達して

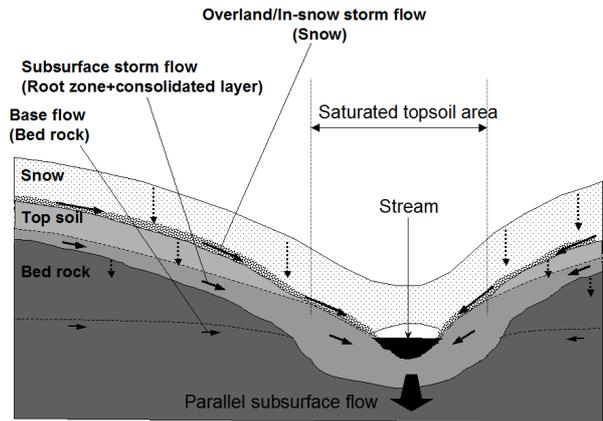


図-7 雪層を有する斜面における降雨・融雪流出プロセスの概念図 (Oharaら, 2011)

いることがわかる。この時の融雪量は、総降雨量98mmに対して、33.7mmであった。ここで、現地微気象観測データから算定された地表面の熱収支データからも、出水に寄与した融雪は少ないことが示されている。これは、降雨時には雲の存在により短波放射量が制限される点、高標高および降雨時の低い気温と高湿度が地表面の熱交換フラックスを抑制する点などが影響していると考えられる。この結果は、Marksら⁴³⁾が示した、融雪の出水への寄与は標高の増加に伴い減少するという観測結果とも合致するものである。これによりシエラネバダ山脈における標高の高い地域では、降雨時の融雪が洪水への寄与する割合は比較的少ないことが示された。

(6) 現地観測の重要性

Oharaら(2011)では、上記で紹介した観測結果以外にも、High Yellow Creekにおいてピーク時に流出に寄与する斜

面長は13.2-15.1m 程度であることを算定することで、従来から提案されている部分流出寄与域理論の妥当性を示している。更に、高標高流域においては雨滴が融雪に与える熱量は少ないことを示している。また、雪層内の飽和側方流が表面流を構成している事を示したことで、雪層の存在しない出水イベントよりも雪層の存在する出水イベントのほうが斜面における土砂浸食が大きい事を明らかにしたHarr⁴⁴⁾の観測結果の理論的根拠を示したと考えられる。これは、雪層内をふくむ表面流の流下速度は、浅い中間流などよりも早い為、多くの斜面浸食を生じやすいためと考えられる。また、このような雪層が存在する場合の表面流の発生を考慮した流出モデルは著者らの知る限り存在しない。応答の早い表面流の存在はシエラネバダ山脈水系で生じる洪水に少なからず影響を与えると考えられるため、これらをモデリングに組み込むことが北部カリフォルニア州の洪水を計算する際に重要なポイントとなるであろう。

このように、現地水文観測結果と水文モデルの構造を比較検討し有機的に結合することで、新しい知見の解明のみならず、更に物理性の高い水文モデルの構築が可能となる。水文データベースの充実、計算機能力の飛躍的な向上、リモートセンシング技術の向上に伴うGISデータの充実により、対象流域を一度も訪れることなく、小規模から大規模流域を対象とした降雨流出計算が可能な時代になっている。しかしながら、降雨流出計算におけるスケーリングの問題などは未解決の大きな課題であるし、地表面水文プロセス、地中水、地下水などの動的相互作用が長期流出計算へ与える影響などは未知な点が多い。昨今の降雨流出計算モデルに期待されるものは、過去の出水イベントを再現するのみではなく、気候変動下における将来の水循環予測であったり、物理的に起こり得る最大規模の洪水である可能最大流量(PMF: Probable Maximum Flood)などを算定することである。このような地表面・気候条件が変化する場合の長期流出計算や物理的に可能な最大洪水量を算定する際には、既存のモデルには組み込まれていない流出プロセス(例えば、本章で紹介した雪層中を流れる飽和側方流)が非常に大きな役割を果たす可能性が存在し、このようなプロセスをモデルに組み込むことがモデルの不確実性を軽減するうえで重要になるであろう。

以上により、今後も現象の解明および更なる物理水文モデルの発展・改良に向けて現地観測や散水実験などは必要不可欠であり、そのために今一度「単一斜面」に戻り流出プロセスを再確認することが重要であると著者らは考える。

4. 水文学の今後の更なる発展に向けた水文観測の重要性

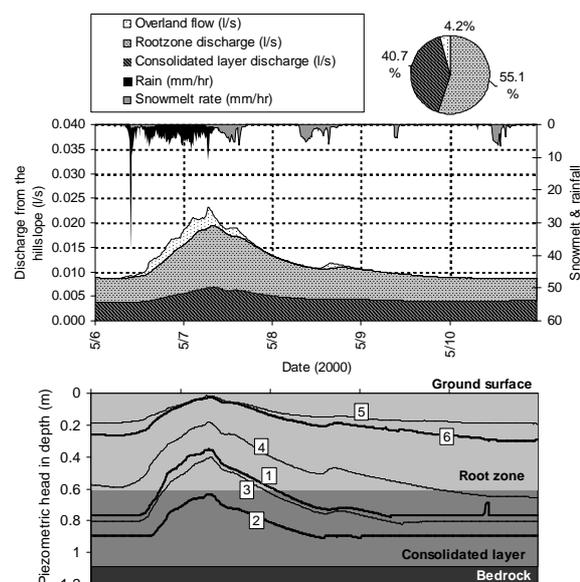


図-8 観測された降雨量、斜面流出量、地下水位の時系列および算定された融雪量 (Case3: Rain-on-Snow Runoff) (Oharaら, 2011)

今後の水文モデルの更なる発展に向けて水文観測が重要である事は上記した。水文観測においても今後特に重要な点は、

- 測定精度の向上
- 観測データの共有、データベース化
- 短期集中観測ネットワークの充実

であると考えている。

測定精度向上の重要性は、本論文集のメインピックであり、著者らがここで言及する必要もないであろう。しかしながら一つ指摘したい点は、過去の長期データを校正する事を考慮した上で、測定精度の向上に取り組む事が重要だという点である。地球温暖化や人為活動の影響が流域水循環に与える影響を議論するためには、長期流量データが必要不可欠である。このようなデータを議論する際には、観測データに多少の精度不足が含まれているように、あまり気にすることなく長期のトレンドを見ることが多い。これは長期間のデータに対してある種の基準化を行うことで測定誤差などは無視できるものと考えられるためである。こういった状況を考えた場合、観測手法の変更や測定精度の向上に伴い、長期観測データのトレンドが変化することが生じては本末転倒である。過去の測定手法・データに対して校正を行う事を踏まえ、各種条件の基で測定精度の向上を行うことが重要であろう。また、測定精度向上と同時並行で、未だに豪雨災害が頻発している2級河川や水文データの不足した流域などにおけるデータの充実に向けて、安価かつ簡易に水文データの長期計測が可能となる手法の開発も非常に重要である。

観測データの共有、データベース化に関しては、国土交通省の水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)

や気象庁のアメダス(<http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>)などの広域かつ長期的なデータベースとは別に、各研究者や民間企業、自治体などが個別に行っている現地観測のデータを共有しデータベース化する事が非常に重要ではないかと考える。国際水文科学連合(IAHS)が精力的に推進しているPUB (Predictions in Ungauged Basins)プロジェクト(例えば、Sivapalan⁴⁵⁾, Sivapalanら⁴⁶⁾)では、水文データの不足した流域における洪水予測に向けて、現地観測データや解析結果の共有が試みられている。このような取り組みが、河川流量観測の新時代に向けても必要なのではないかと考える。その第一歩の情報共有として、本論文集が果たす役割は非常に大きいと考える。今後の更なる情報・データ共有のために国や水文・水資源学会、土木学会や若手研究者の精力的なリーダーシップと献身的な協力体制が必要不可欠となるであろう。

最後に短期集中観測ネットワークの充実の必要性に関して述べる。現地観測は人的労働力、機材、時間、予算が必要となり、これらを一つの研究室でカバーすることは非常に困難な場合が多い。よって、予算がある機関は予算を、機材がある機関は機材を、人員がある機関は人員を、アイデアがある機関はアイデアを提供することで、各研究機関が協力のもと短期集中観測ネットワークを構築することが非常に重要であると考えられる。例えば、日本では琵琶湖プロジェクトや、雲物理過程の解明に向け旧炭坑の長大立坑を使用した実スケール実験が行われたマジックモンキープロジェクト(例えば、山田ら⁴⁷⁾, 笹尾ら⁴⁸⁾)などがこの考えの基で行われてきた。学術論文執筆のために、データや機材を抱え込む時代は既に終末を迎えており、これからはデータ・アイデアを共有することで協力していく時代である。この効率化により、多種多様な条件を考慮した現地観測・実験の実施が数多く可能となり、学術論文数、学術的知見の新発見や社会への貢献なども従来より増えるものと考えられる。

このようにして整備される水文データを使用し様々な解析を行うことも重要である。現在、国土交通省を中心に水・物質循環解析ソフトウェアの共通プラットフォーム「CommonMP (Common Modeling Platform for Water-material circulation analysis)」の開発が精力的になされており(例えば、山田⁴⁹⁾)、既に実際に使用できる段階となっている。このCommonMPで使用できる要素モデルを用い、整備された水文データの解析を行う。解析結果から、水文データおよび要素モデルの何が不十分であるのかを議論する事で、更なる要素モデルの開発およびCommonMPへの実装を進める。また新しい要素モデルを駆使するためにはどのような水文データの充実が必要なのかを議論することも可能となる。このように、CommonMPと新しい時代の水文観測データベースが共に成長していくことが、新たな知見の発見に大きく寄与するとともに、水文学の更なる向上に向けて非常に重要である。

参考文献

- 1) 呉 修一, 渡邊暁人, 多田直人, 山田 正: 都市河川感潮域における水質の空間分布特性に関する現地観測, 土木学会水工学論文集, Vol.52, pp.1105-1110, 2008.
- 2) 山角康樹, 浅見龍一, 山田 正, 井上智夫: 都市河川感潮域における水質の変動特性に関する現地観測, 土木学会水工学論文集, Vol.55, pp.1669-1674, 2011.
- 3) Sellers, P.J. and Hall, F. G.: *FIFE in 1992: Results, Scientific Gains, and Future Research Directions*, J. Geophys. Res., Vol.97, No.D17, pp.19091-19109, 1992.
- 4) LeMone, M.A., Grossmann, R. RL., Coulter, R. L., Wesley, M. L., Klazura, G. E., Poulos, G. S., Blumen, W., Lundquist, J. K., Cuenca, R. H., Kelly, S. F., Brandes, E. A., Oncley, S. P., McMillen, R. T. and Hicks, B. B.: *Land-Atmosphere interaction research, early results, and opportunities in the Walnut river watershed in Southeast Kansas : CASES and ABLs*, Amr. Meteorol. Soc., Vol.81, pp.757-779, 2000.
- 5) Jochum, M.A.O., de Bruin, H.A.R., Holtslag, A.A.M. and Belmonte, A.C.: *Area-Averaged Surface Fluxes in a Semiarid Region with Partly Irrigated Land: Lessons Learned from EFEDA*, J. Appl. Meteor., Vol.45, pp.856-874, 2006.
- 6) 田中賢治, 中北英一, 池淵周一: 琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング, 土木学会水工学論文集, Vol.42, pp.79-84, 1998.
- 7) 玉川一郎, 田中賢治, 石田祐宣, 樋口篤志, 松島 大, 浅沼 順, 小野圭介, 多田 毅, 林 泰一, 石川祐彦, 田中広樹, 檜山哲哉, 岩田 徹, 田中健路, 中北英一, CAPS 観測グループ: 琵琶湖プロジェクト2002年フラックス面的集中観測 (Catch A Plume by SATs : CAPS) : その概要: 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.4, pp.392-400, 2004.
- 8) 加藤拓磨, 小田村康幸, 山田 正: 河川からの風が都市の熱環境に与える緩和効果, 土木学会水工学論文集, Vol.53, pp.295-300, 2009.
- 9) 大野修平, 岩本進太郎, 加藤拓磨, 山田 正, 井上智夫: 都市部における河川周辺の気温特性と熱環境緩和効果, 土木学会水工学論文集, Vol.55, pp.343-348, 2011.
- 10) Kavvas, M.L., Z.Q. Chen, C. Dogrul, J.Y. Yoon, N. Ohara, L. Liang, H. Aksoy, M.L. Anderson, J. Yoshitani, K. Fukami and T. Matsuura: *Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model, based on upscaled conservation equations: hydrologic module*, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.9, No.6, 450-464, 2004.
- 11) Kampf, S. K., and S. J. Burges: *A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models*, Water Resour. Res., **43**, W05423, doi:10.1029/2006WR005370, 2007.
- 12) 呉 修一, 山田 正, 吉川秀夫: 有効降雨の推定に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. **65**, No.3, pp.231-245, 2009.
- 13) 赤羽祐也, 呉 修一, 山田 正: 都市流域における現地流量観測と都市化が洪水流出特性に与える影響, 土木学会水工学論文集, Vol.52, pp.481-486, 2008.
- 14) 木内 豪, 賈 仰文, 戸嶋光映, 吉谷純一, 倪 广恒: 農地と都市が混在する流域における WEP MODEL を用いた水循環解析, 土木学会水工学論文集, Vol.46, pp.283-288, 2008.
- 15) 佐山敬洋, 寶 馨: 斜面侵食を対象とする分布型土砂流出モデル, 土木学会論文集, 726/II-62, pp.1-9, 2003.
- 16) 呉 修一, 北村知里, 江花 亮, 山田 正: 小流域における水質ハイドログラフの形成過程に関する研究, 土木学会

- 水工学論文集, 49, pp.157-162, 2005.
- 17) 手計太一, 吉谷純一, スヴァンピモル チャンチャイ, 宮本守, 山田 正: 数値実験を利用した大ダムの持つ治水・利水効果の検証—タイ王国・Chao Phraya 川流域を対象として—, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 3, pp.145-155, 2007.
 - 18) 宮本 守, 木内 豪: 感潮域における都市河川の水・熱輸送特性と下水処理水が河川水温に与える影響, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 4, pp.291-302, 2007.
 - 19) Ohara, N., M.L. Kavvas, D. Easton, E.C. Dogrul, J.Y. Yoon and Z.Q. Chen: *Role of Snow in Runoff Processes in a Subalpine Hillslope: Field Study in the Ward Creek Watershed, Lake Tahoe, California, during 2000 and 2001 Water Years*, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.16, No.6, 521-533, 2011.
 - 20) Tsukamoto, Y. : *An experiment on subsurface flow*, J. Jpn. Soc. Forestry, Vol.43, pp.61-68, 1961.
 - 21) Hursh, C. R., Brater, E. F. : *Separating storm hydrographs from small drainage area into surface and subsurface flow*, Trans. Am. Geophys. Union, pp.863-870, 1941.
 - 22) 海老瀬潜一, 宗宮 功, 平野良雄: タンク流出モデルを用いた降雨時流出負荷量解析, 用水と廃水, Vol.12, pp.1422-1432, 1979.
 - 23) 竹内邦良, 坂本 康, 本郷善彦: NO₃ をトレーサーに用いた流出成分分離の可能性について, 土木学会水理講演会論文集, Vol.27, pp.405-413, 1983.
 - 24) Sklash, M.G. and Farvolden, R.N. : *The role of the groundwater in storm runoff*, J. Hydrol., Vol.43, pp.45-65, 1979.
 - 25) Betson, R. P. : *What is watershed runoff?*, J. Geophy. Res., Vol.69, No.8, pp.1541-1552, 1964.
 - 26) Hewlett, J. D.: *Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds*, US Dept. Agric., Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Ashville, North Carolina, Station Paper No.132, 1961.
 - 27) 高棹琢馬: 出水現象の生起場とその変化過程, 京大防災研究所年報, No.6, pp.166-180, 1963.
 - 28) 吉野文雄: 現地実験による表面流出の研究, 土木学会論文報告集, 第 330 号, pp.59-68, 1983.
 - 29) 山田 正, 日野幹雄, 藤田光一: 小試験地における雨水の流出機構に関する研究, 土木学会水理講演会論文集, Vol.26, pp.229-236, 1982.
 - 30) Kirchner J.W.: *A double paradox in catchment hydrology and geochemistry*, Hydrological Processes, Vol.17, pp.871-874, 2003.
 - 31) 佐山敬洋, 辰巳恵子, 立川康人, 寶 薫: 分布型流出モデルにおける流水の時空間分布起源に応じたハイドログラフ分離法, 水文・水資源学会誌, Vol.20, No.3, pp.214-225, 2007.
 - 32) Sayama, T. and J.J. McDonnell: *A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale*, Water Resour. Res., Vol.45, W07401, doi:10.1029/2008WR007549, 2009.
 - 33) McDonnell J.J.: *A rationale for old water discharge through macropores in a steep humid catchment*, Water Resour. Res., Vol.26, pp.2821-2832, 1990.
 - 34) Uchida, T., Y. Asano, N. Ohte, and T. Mizuyama: *Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope*, Water Resour. Res., Vol.39, 1018, doi:10.1029/2002WR001298, 2003a.
 - 35) Uchida, T., Y. Asano, N. Ohte, and T. Mizuyama: *Analysis of flowpath dynamics in a steep unchanneled hollow in the Tanakami Mountains of Japan*, Hydrol. Process., Vol.17, pp.417-430, 2003a.
 - 36) 浅野友子, 内田太郎, ジェフリー マクドネル: *Variable Source Area Concept* の次なる斜面水文過程の概念構築に向けた近年の試み: 斜面に降った雨はどこへ行くか?, 水文・水資源学会誌, Vol. 18, No. 4, pp.459-468, 2005.
 - 37) 浅野 孝: カレント・トピックス—海外の水管理政策動向— (第 1 回), 日本河川協会, 雑誌河川, 2008 年 5 月号, pp.71-74, 2008.
 - 38) Kroll, C. G.: *Sediment Discharge from Highway Cut-Slopes in the Lake Tahoe Basin, California, U.S.* Geological Survey Water Resources Investigations 76-19, Prepared in Cooperation with the California Department of Transportation Division of Highways, 1976.
 - 39) Simon, A., E. Langendoen, R. Bingner, R. Wells, A. Heins, N. Jokay and I. Jaramillo: *Draft Final Lake Tahoe Basin Framework Implementation Study: Sediment Loadings and Channel Erosion*, USDA-Agricultural Research Service, Channel and Watershed Processes Research Unit, National Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, 2003.
 - 40) Kavvas, M.L., J. Yoon, Z. Q. Chen, L. Liang, E. C. Dogrul, N. Ohara, H. Aksoy, M. L. Anderson, J. Reuter, and S. Hackley.: *Watershed Environmental Hydrology Model: Environmental Module and Its Application to a California Watershed*, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 261-272, 2006.
 - 41) Roth, J. T. Thayer, A. Breibart, J. O'Connell, W. Christensen, S. Norman: *Monitoring Program Annual Report*, USDA Forest Service, Lake Tahoe Basin Management Unit, 2006.
 - 42) Ohara, N. and M.L. Kavvas: *Field observations and numerical model experiments for the snowmelt process at a field site*, Advances in Water Resources, Vol.29, pp.194-211, 2006.
 - 43) Marks, D., J. Kimball, D. Tingey, and T. Link.: *The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: a case study of the 1996 Pacific Northwest flood*, Hydrol. Process. Vol.12, pp.1569-1587, 1998.
 - 44) Harr, R.D.: *Some Characteristics and Consequences of Snowmelt During Rainfall in Western Oregon*, Journal of Hydrology, Vol.53, pp.277-304, 1981.
 - 45) Sivapalan, M.: *Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology*, Hydrol. Process., Vol.17, pp.3163-3170, 2003.
 - 46) Sivapalan, M., K. Takeuchi, S.W. Franks, V.K.Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J.J. McDonnell, E.M. Mendiondo, P.E. O'Connell, T. Oki, J.W. Pomeroy, D. Schertzer, S. Uhlenbrook and E. Zehe: *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins(PUB 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences*, Hydrol. Sci. J., Vol.48, No.6, pp.857-880, 2003.
 - 47) 山田 正, 日比野忠史, 深和岳人, 松浦正典, 藤吉康志, 播磨屋敏生, 稲毛正昭, 中津川誠: 実スケールの雲物理実験と降雨モデルによる雲の微物理過程の考察, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.1-13, 1995.
 - 48) 笹尾将登, 土屋修一, 山田 正: 実スケール雲物理実験における時空間変化する粒子数濃度と雲水量の関係, 土木学会水工学論文集, Vol.51, pp.319-324, 2007.
 - 49) 山田 正: *CommonMP* プロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性, 河川流量観測の新時代, Vol.1, pp.1-6, 2010.

(2011. 7. 31 受付)

電波流速計による洪水流速観測の 失敗を含めた事例集

INTRODUCTION OF SEVERAL EXAMPLES OF CURIOUS H-Vs RELATIONSHIP INCLUDING CASES WITH WRONG INSTALLATION OF RADIO CURRENT METERS

山口高志
Takayuki YAMAGUCHI

名誉会員 工博 (株)環境モニタリング研究所 (〒170-0005 東京都豊島区南大塚3-10-10)

Since the first flood discharge observatory station using Radio current meters was installed in one of the rivers in Japan in 1990, 20years has passed, comparison between flood discharges by floats and Radio current meters have long been done. In parallel with the works, analyses between change of H (water level) ~Vs (point surface velocity) relationship and change of flow condition (e.g. bed level change and /or bed roughness change) during flood, have been studied.

Several examples analysed are introduced for the cases of discontinuous H-Vs curves wrong installation of the current meters and loop shape changes by backwater etc.in this paper.

Key Words : H-Vs relationship, Radio current meter.

1. はじめに

電波流速計とのつきあいも、はや20年を越えようとしている。非接触であるため故障が少なく、表面流速しかとれない弱点があるが、ほぼ確実にデータを取得できること、在来法の浮子の弱点の1つである橋梁下流（ピア後流域の影響）を避け、上流側でより少ない台数で観測すること、などのメリットにより洪水流量観測自動化の有望な方法の1つとして、生き残っている（他法の紹介は割愛する）。

この数年来の国土総合技術研究所の流速更生係数（ f =真の流量/表面流速より算出した流量）取得の努力も、設置地点での出水に恵れず成果が少なく、また1つの代替手段として考えられた水理実験による f の推定も、東日本大震災による装置の破壊という事故で実らずとの結果になり、現状では足踏みしている状態といえよう。

著者らの場合も設置箇所での出水にあまり恵まれず、取得したデータは少ない状況にあるが、委員長 手計先生の失敗談歓迎のお話も勘案して、失敗談を含めた観測事例集作成を試みることにした。ただし、河川名を正確に記すことは、差し障りがあるので仮名にすることとする。

2. 流速計の設置位置についての事例

始めに断わっておきたいが各例ほぼ共通に、H（水位）～Vs（表面流速）関係の図例が示される。流速観測は、いわば水理学の世界なのでHとVsの関係に異常がないかはたえず、監視する必要がある。すなわち異常があればそれは水面勾配（I）、粗度（n）、河床（Z）などのいずれかが、あるいはその複数が変化した結果であり、また同ようもし設置に失敗があれば、やはりH-Vs関係になんらかの異常が認められるものである。

(1) 流速急変の例（A川の場合）

言葉で示すより、直接H-Vs関係で見てください（図-1.1~4）。これはA川、a橋の横断方向2点のH-Vs関係を示したものであるが、ch.2のそれが順調にVsを増大しているのに対して、ch.1は始めはch.2より大きかったにもかかわらず、その後流速の増大は鈍るが、 $H=2.8m$ で急増、 $Vs=3m/s$ から $Vs=6.5m/s$ に急変した。なお、同ような観測は3例あったので、うち2例を例示した。

A川は急流河川で、河床勾配は1/30~1/50程度と考えられ、流速も7m/sに達している。水理的には、 $H=2.8m$ までは流れが地形の影響を受け、ch.1が流れのカゲになっていたものが直進流に変わり、ch.1、ch.2とも同等

の流速になったものと考えられる。

問題の処理方法としては、このままでは流量に不連続が発生するので、流速計の台数を増加して不連続の影響を小さくするか、あるいは設置橋梁の変更もやむを得ない。ただしこのような河川では容易に好観測点があるとは限らないので、十分な予備調査が必要であろう。

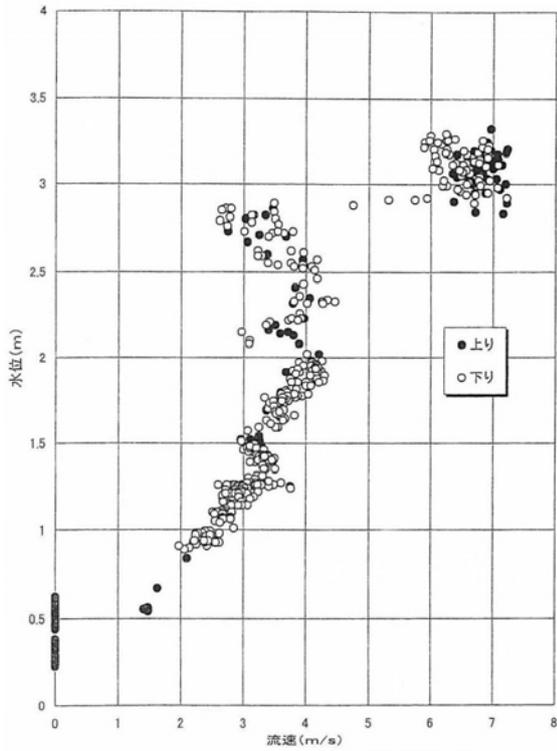


図-1.1 H-Vs ch.1 ('01.9.10~13)

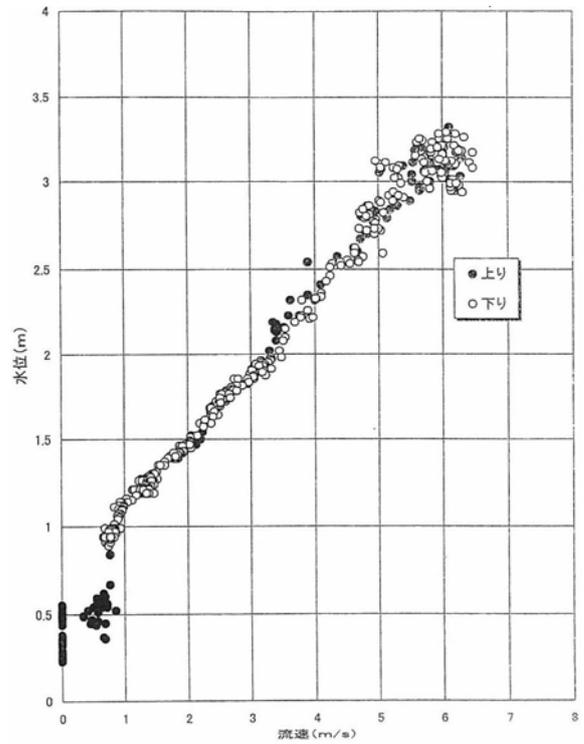


図-1.2 H-Vs ch.2 ('01.9.10~13)

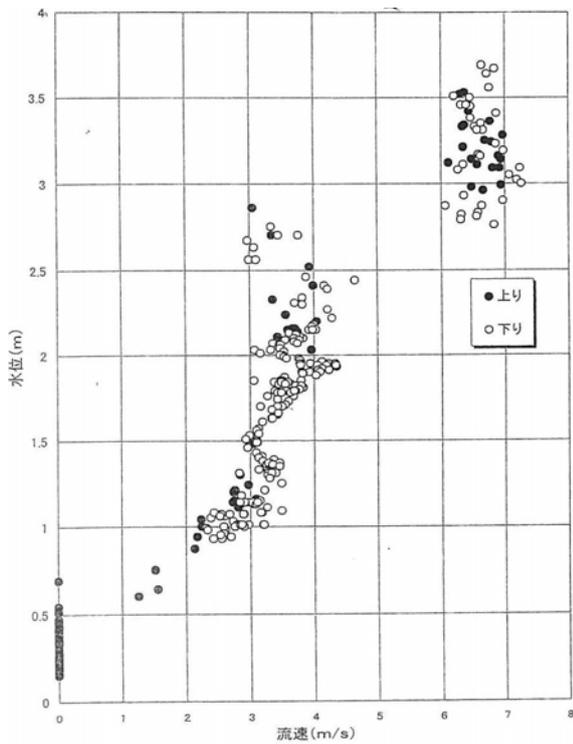


図-1.3 H-Vs ch.1 ('01.8.21~24)

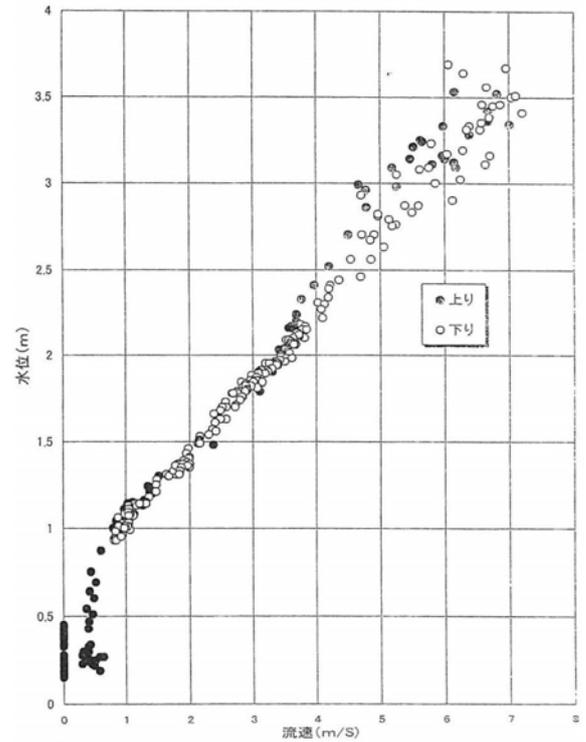


図-1.4 H-Vs ch.2 ('01.8.21~24)

(2)ピア近傍に設置した場合 (B川b橋)

同よう始めに問題のch.6とその両側ch.5, ch.7のH-Vs関係を紹介しよう (図-2.1~3) . なお, ch.6とch.7は同径間内, ch.5は左岸側の径間で, 主流は相対に右岸側, ch.7が流速最大地点である. なお図には, 前年の出水データも併記してある.

一見してch.6のデータに異常, 特に洪水の下り部分に異常があることに気付かれよう.

早速, 原因について調べてみたところ, ch.6はピアそば2mに設置されていることがわかった.

まず始めに考えたのは, 流れがピア上流側にぶつかり, 流れがはくりする. そのはくり領域を測定したかであったが, 電波流速計は流れ方向ピア中央桁下に設置され (ピア長約6m), そこから45°程度の俯角で水面放射しているため, 概ねピア前面を把握している.

次に原因として流下してくるゴミがピアにかかり, せき上げる現象を考える.

出水時流下するごみの特性として, 以下のようなことが知られている. (a) その年の第1の出水はゴミが多い. (b) 大出水は, 大量のゴミを伴う. (c) ゴミは流速で流れるので, 洪水波より遅くなる. (d) 大出水時は, ゴミはより遅くなる.

あらためて図を眺めてみると, 出水の立ち上がり部分は, 3地点とも大差なく図-2-2の流速の減少はピーク後に生起していることがわかる.

以上を勘案すると, 上記流速の減少はピアにかかったゴミによるせき上げた部分を観測したものと推定される. あとさきになったが, 本出水は6年来のもの (加えて6年前より大きい) で, ゴミが大量に出たことは筆者も仄聞していた. 原因の1つは, 等間隔も保持しようとした結果のようであるが, やはりピア近傍の設置は避けたいものである.

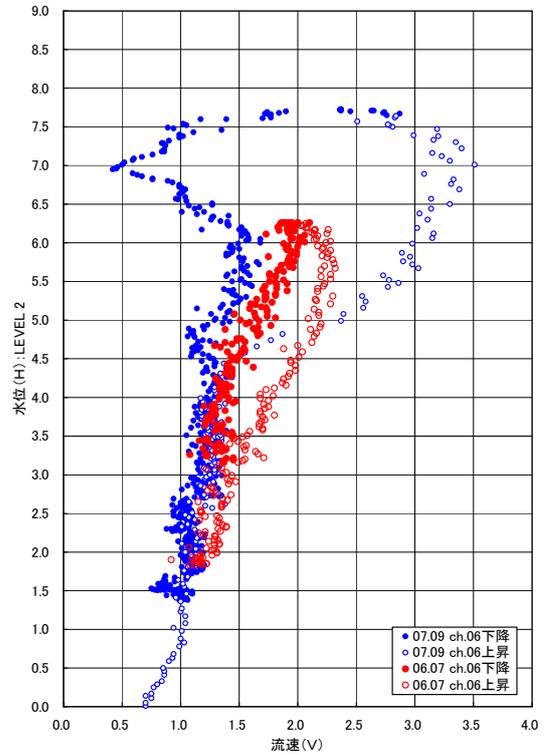


図-2.2 H-Vs ch.6

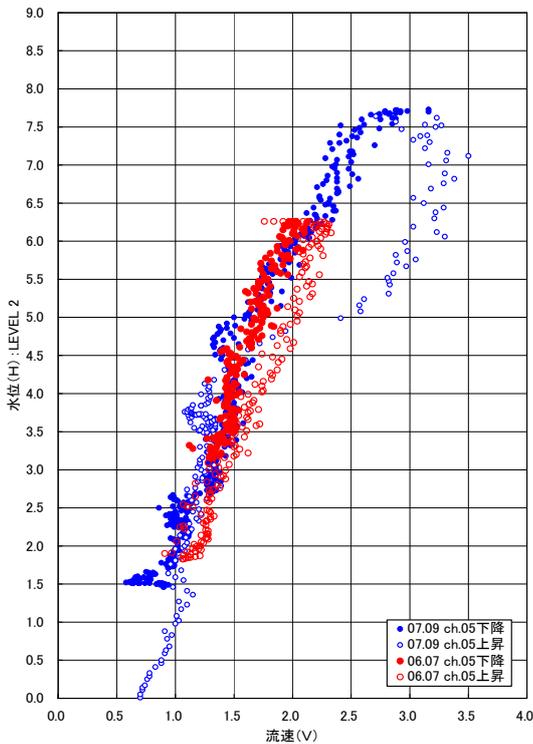


図-2.1 H-Vs ch.5

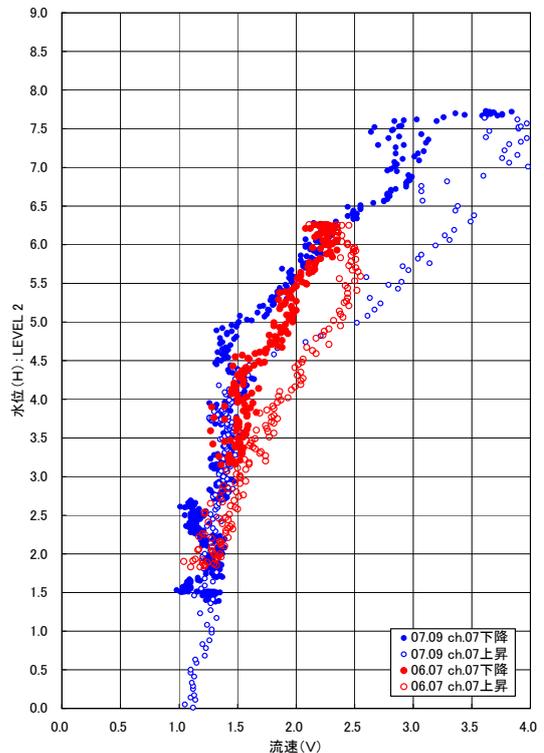


図-2.3 H-Vs ch.7

3. バックを受ける地点での設置 2例

本来流量観測地点は、下流からバックを受けるような地点に設置されるべきではないのであるが、置かれている地理的な条件、あるいは、その重要性からやむを得ず設置されることもある。

a) C川c橋の場合

これもグラフの例示から入ろう。ただし、例示する2出水がピーク水位が同じでありながら、洪水波形を大きく異にする結果、受けるバックの影響を端的に異にしたのである(図-3.1~2, 図-4.1~2)。

図から説明すれば、図-3.1ではほぼ $V_s < 1.5\text{m/s}$ でピークに達しているのに対し、図-3.2では V_s は $H=5\text{m}$ まで急上昇し、 $H=7\text{m}$ 付近で $V_{s\text{max}}=2.3\text{m/s}$ にも達し、ループがまるでスフィンクスの横顔のように大きい。したがって、当然のことながら $H\sim Q$ カーブにもループに大きな差ができています(図-4.1~2)。

参考までに水位(H)のハイドログラフでは、8月出水は $H=5\text{m}$ 以上の期間は、3日強、9月出水は2日強であり、また、最も影響の大きいピークまでの立ち上がり時間は、それぞれ1日強、10時間であった。

さて、このせき上げの河道条件であるが、c橋付近の(河幅は200m、河床勾配1/3,000)であるのに対し、直下流から10kmにわたり1/10,000の河道であった(遊水地区間)。

すなわち水理的には、ドッシリと重い出水は、立ち上がり部で河道の貯留をみたまながら、バックをきかせて流下し、シャープな出水はあまり十分な河道貯留なしで流下したものと考えられる。

このような地点では、流速、流量の常時観測、流量年表化が望まれよう。

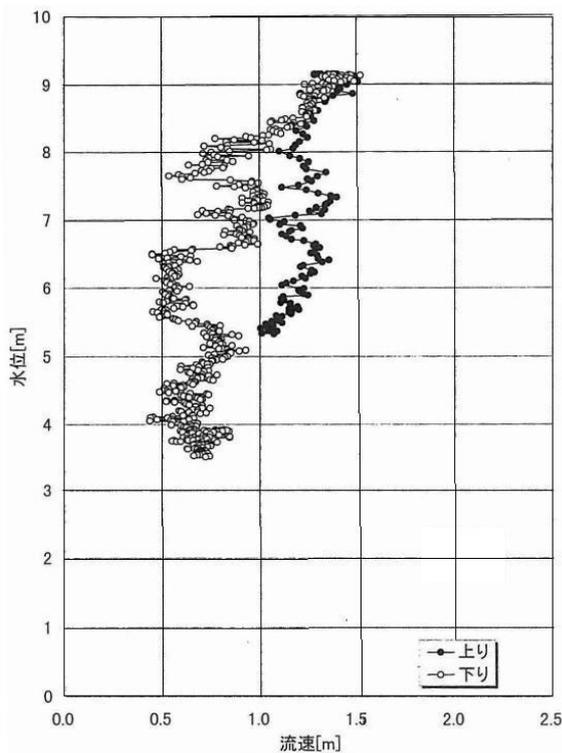


図-3.1 H-Vs ch.5 ('98.8.30~9.3)

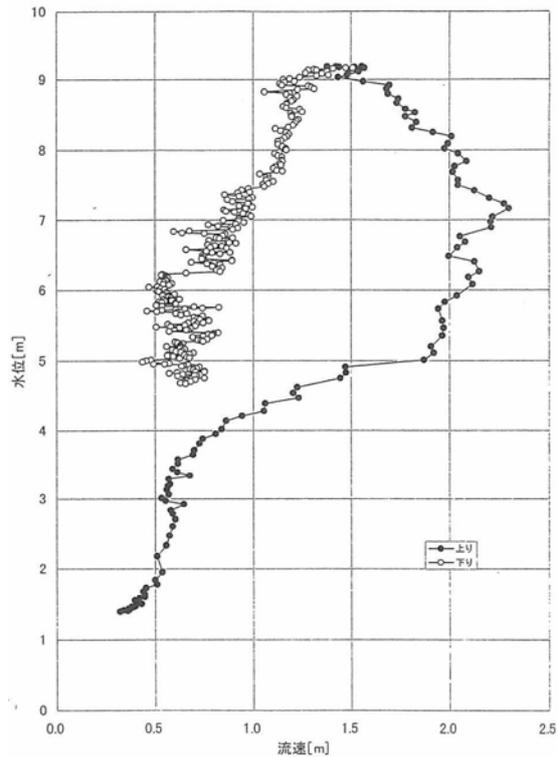


図-3.2 H-Vs ch.5 ('98.9.16~9.18)

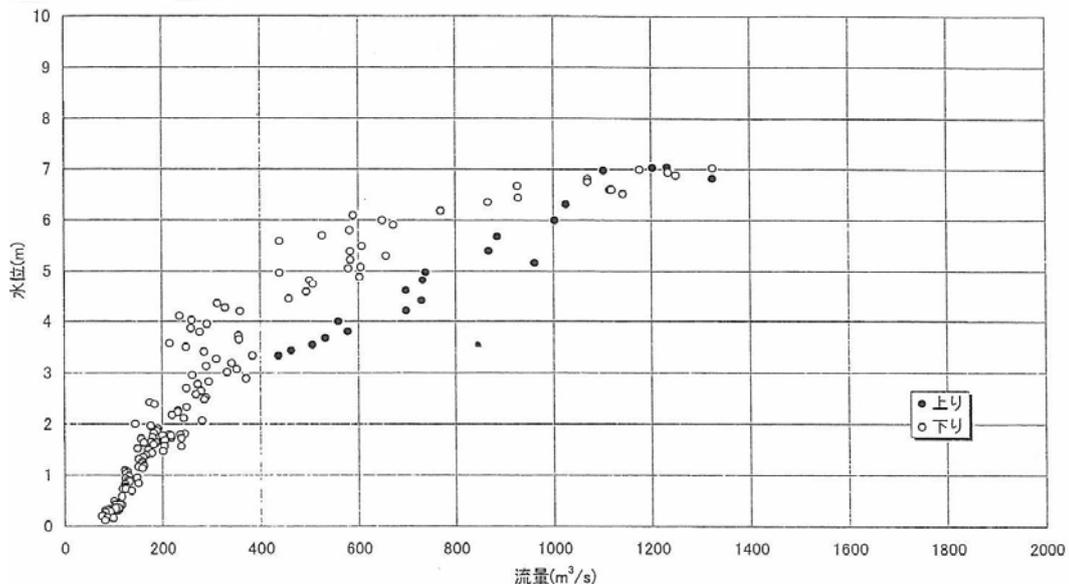


図-4.1 H~Q ('98.8.30~9.3)

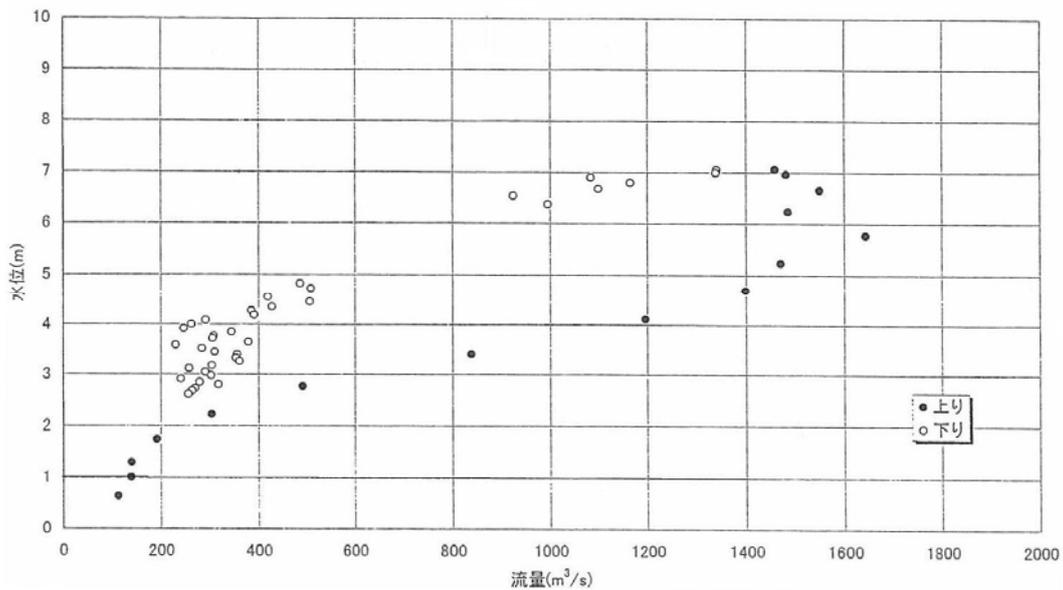


図-4.2 H~Q ('98.9.15~18)

b) D川d橋の場合

ここでも本題から先に入って見よう。三葉のH~Vsの組図に見られるように、水位H=4.0m付近までは上りのVsが下りのVsより低いという共通した結果（そしてH=4m から上は通常見られるループになる）を得た。

当初、原因がつかめず悩まされたが、どうやら700mも下流の取水堰による堰上げが原因らしいことがわかった。

H=4.0mでは、D川からの流出が優り、ほぼ等流状態になったものと判断され、それより上では通常見られる順ループとなる。

少し詳しく地形について触れると、d橋は三本の川、D川、E川、F川が西から東へ平行して流れる地点に、横断してかけられているが、D川とE川の両川はその700m下流で合流し、その直下流に取水堰（角泉堰）がある。そのためd橋地点は、通常ほとんど水面勾配なしの状態である。そして降雨があると、内水河川ではあるが流域の小さいE川の方が先に出水し、結果的にD川は出水初期に堰き上げられ、流速がていげん部より遅いということになったようである。

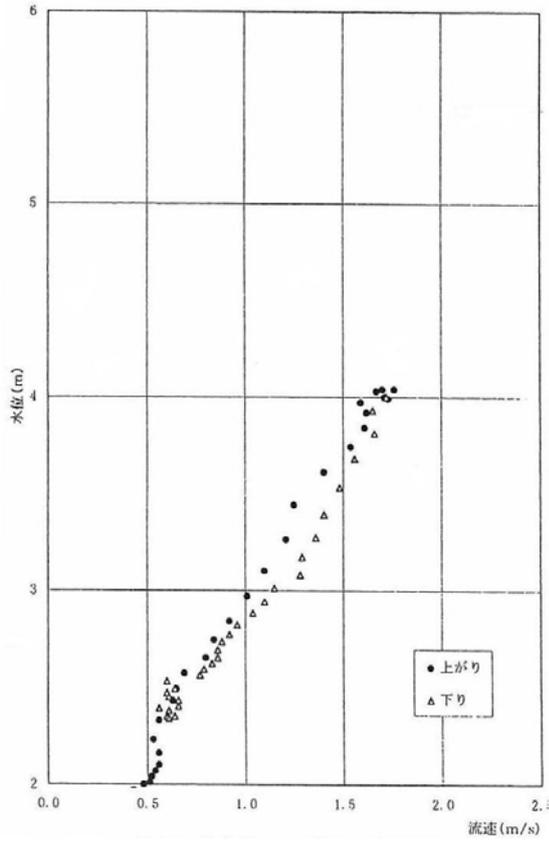


図-5.1 H-Vs ch.1 ('95.9.16~18)

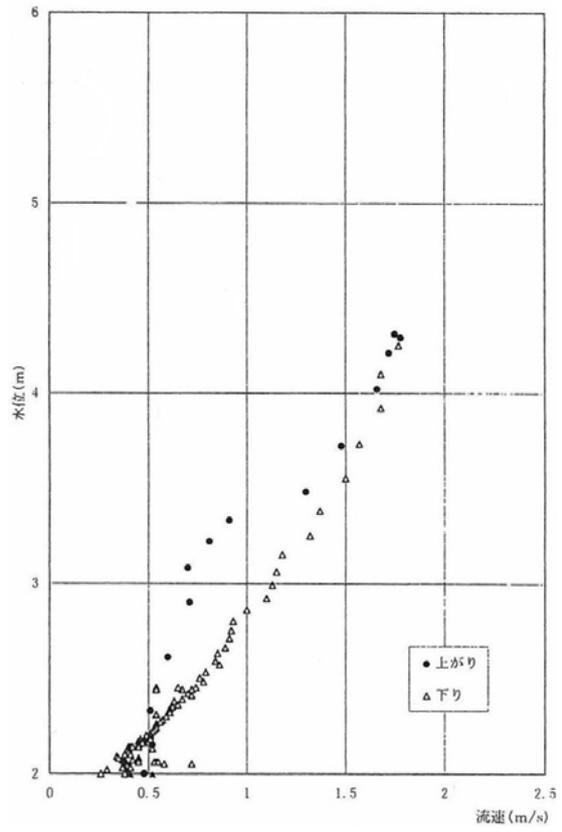


図-5.3 H-Vs ch.1 ('97.6.20~6.24)

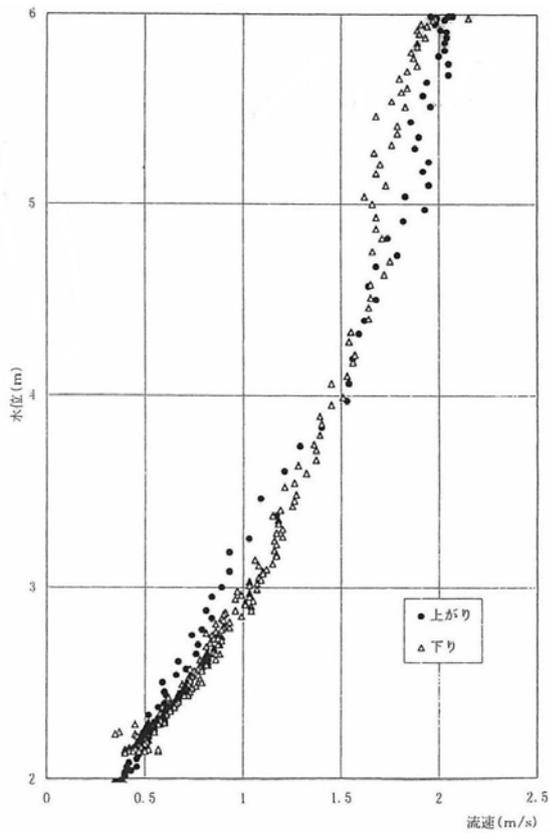


図-5.2 H-Vs ch.1 ('96.9.22~25)

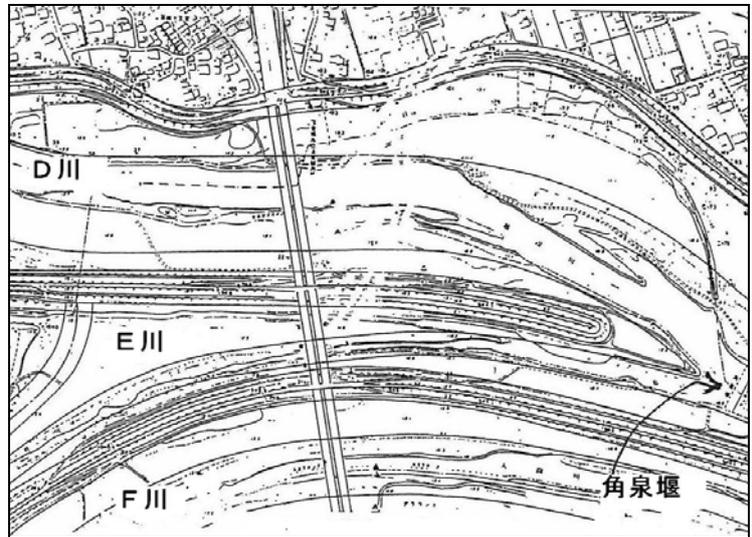


図-6 D川付近平面図

4. 流速及びH-Vs関係の再現性(B川e橋の場合)

まず2つのH-Vs図を示す(図-7.1~2)。ch.8の位置は低水路最右岸側に設置されたものである。図-7.2の出水は $6,000\text{m}^3/\text{s}$ が24時間も継続したもので、新設ピアの影響を長々と受け続けて右岸側低水路河岸が30mも削られたためH-Vsも下りでは、流速は 1m/s も増加している。

ただし、注目していただきたいのは、その点ではなく本出水1年前の出水(図-7.1)の上りと下りの経路、および図-7.2の出水の上りの経路である。三者が酷似していることに気付かれよう。

冒頭にも触れたように、河床等の環境条件に変化がなければH-Vs関係は、変化しないことを示したものと考えられる。すなわち、1年前の出水規模では河床は動かず、それ以上の出水規模で河岸が侵食されたのであろう。低水路のすみっこでの結果であるが、あまりに再現性がよかったのであえて紹介した。蛇足ながら、図-7.2の下りの着点があまり変わらないのは、おきたのが側岸侵食で、水深があまり変化しなかったためと考えられる。

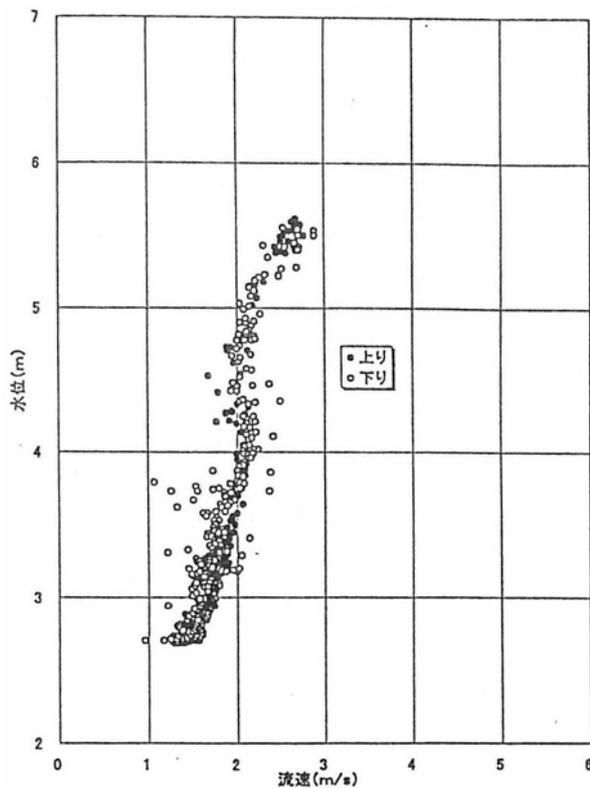


図-7.1 H-Vs ch.8 ('00.9.12~17)

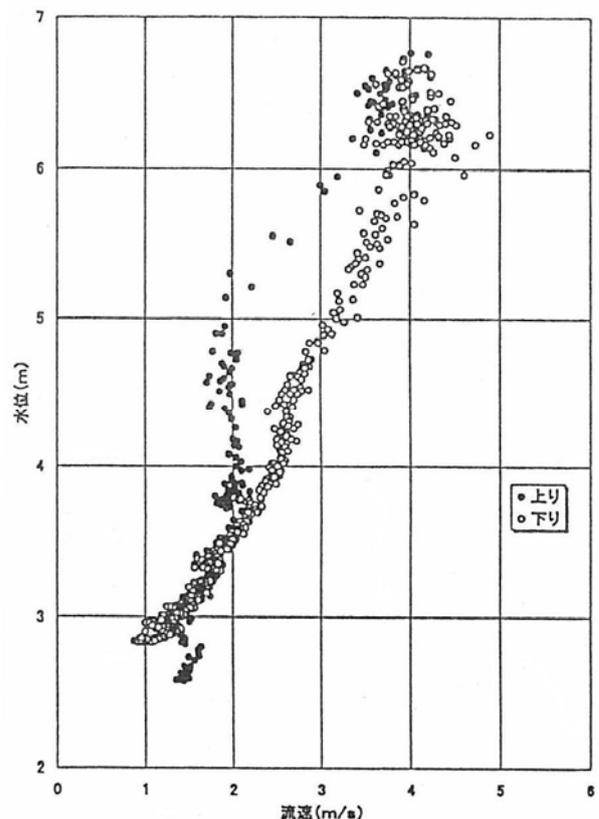


図-7.2 H-Vs ch.8 ('01.9.9~16)

5. おわりに

データとしては少し古いが、特異なもの、設置位置に問題があって発表されていないものなどを前報同よう、H-Vs関係を主として紹介させていただいた。

とりわけ2.のデータの不連続などは、例えばダム流入河川流量の把握などでは、その設置にあたって留意されることが望ましい。

河川の洪水は、まさに自然のかたまりのようなものであり、その観測にあたっては方法の選択、場所・位置の選定、予備調査等細心の注意が必要な事を、20年携って今更ながら痛感している。

以上の他に、最新のデータとして弯曲部下流でのほんらん危険水位をこえた出水のH-Vs図横断、高水敷のH-Vsの逆ループ数例などもあったが、重複も考え割愛した。

謝辞：本稿作成には、河口尚子氏（東京建設コンサルタント）の手を労らわした。感謝の意を表したい。

また、本稿作成のチャンスを与えていただいた河川流量観測高度化研究会の皆様にもお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 水文環境研究室：電波流速計の観測データと一次解析他— 川の中の洪水が見える— 東京電機大学理工学部 建設工学科 1998.4
- 2) 山口高志：電波流速計がはかったH-Vs関係の変化から何が読めるか 東京電機大学 建設環境工学科 2003.3
- 3) 山口高志・中島洋一：H-Vs関係の変化から水理現象を読みとる 洪水流量観測の新時代／水文水資源学会 河川流量観測高度化委 2010.8

(2011. 7. 31受付)

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

QUALITY-ASSURANCE PLAN FOR DISCHARGE MEASUREMENTS USING ADCP IN JAPANESE RIVERS

岡田 将治¹, 萬矢 敦啓², 橘田 隆史³
Shoji OKADA, Atsuhiko YOROZUYA and Takashi KITSUDA

¹正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

²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)

³正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18ハイドロ第一ビル)

The authors have been developing an accuracy-evaluation method for flood flow observation with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Several field measurements were conducted under severe ADCP measurement conditions characterized by high velocity and highly-frequent water-surface vibration. This paper described main factors influencing measurement accuracy related to velocity/water-depth measurements and reviewed previous observation results. To finalize the development of the accuracy-evaluation methods using "Deviation Discharge Ratio", the authors conducted field measurements under severe conditions with highly sophisticated devices and verified the method with high-quality data sets. Finally it was applied to previous flood observation results obtained in the Shimanto River. .

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, Quality- Assurance Plan, Deviation Velocity, Deviation Discharge Ratio*

1. 序論

近年、洪水流観測技術を大きく向上させるADCPに代表される計測機器の開発やそれらを活用した研究も多く報告されるようになってきたことから、条件さえ整えば洪水時においても詳細な流速分布や河床形状の計測が可能になってきた。これらの計測技術が進展していく過程においては、計測したデータの品質管理手法についても当然検討しておく必要があるが、わが国で観測の対象となる高速で、かつ水面が大きく変動する洪水流の観測精度評価については、その難しさから十分な検討がなされてこなかった。しかし、近年の日本国内におけるADCP観測技術へのニーズは、河川の断面流量計測にとどまらず、浮遊土砂量の推定や河床変動の同時計測等まで広がっており、ADCPを用いた流量観測手法をいち早く進めてきたUSGS(U.S. Geological Survey)が提案する手法¹⁾をそのまま採用するのではなく、河川の流況特性や今後の観測者のニーズに対応できる日本独自の評価手法

の確立が必要となる。筆者らは、これまでADCPを用いた計測手法やデータ処理技術の検討に併せて、計測精度評価法についても検討を進めてきている。特に、ADCPを搭載したボートの移動観測で得られた流量の精度評価指標として、単位移動距離あたりの流速計測値に含まれる計測誤差の標準偏差を偏差流速と定義²⁾し、流速場および断面流量の計測精度をそれぞれ偏差流速比、偏差流量比と提案している。しかしながら、これらの評価指標を適用するには、各地点における水深および流速が高い精度で確実に計測できていることが前提条件となる。

本稿では、ADCPを用いて計測した流量データの品質管理手法について、はじめにUSGSが提案しているQA(Quality-Assurance) Planを概説する。つぎに、日本の河川の洪水観測に適用する場合の課題を挙げ、各課題について筆者らが検討してきた成果をまとめる。最後に、四万十川における2009年台風9号出水中の5000m³/sおよび4000m³/s規模の洪水流観測結果を用いて、著者らが提案する偏差流速比および偏差流量比を適用した計測精度の検証事例を示す。

2. USGSのQA(Quality-Assurance) Planの特徴

USGSでは、2005年にADCPで計測したデータに関する品質保証についてとりまとめた技術レポート¹⁾を発行している。このレポートには、単に計測された流量データに関する事項だけではなく、データの品質を確保するための計測地点の選定方法、適切な計測システムの構成、機器の設定、移動床テストの必要性に関する診断方法、ADCPの設定方法、ADCPで計測された流量データの収集と考察方法や機器テスト等についても詳細に記載されている。その中から特筆すべき事項についていくつか挙げると、移動床テスト(Moving-Bed Test)は、ADCPのボトムトラッキング機能では河床変動が顕著な場合に流速値の計測精度が低下する課題に対して事前に実施する。河道内の定点にADCPを静止させ、ボトムトラッキング機能を用いて10分間計測する。河床が移動している場合には、ADCPを静止した状態でも上流方向に移動している様に算出される。10分間に移動した距離を1秒間あたりの平均流速に換算することにより、河床が移動するによる流量算定誤差を評価する。この結果から、移動床速度が断面平均流速の1%を超える場合にはこの方法を使用することとしているが、DGPSを高い精度で使用できない地点があることやADCPの内蔵磁気コンパスとGPSの方位のズレが換算流量に大きく影響する等の課題が挙げられている。そこで、Mueller³⁾は、DGPSを使用しない4種類の計測方法を検討し、その中でも固定した始点から河川を横断し、対岸に着いたら始点に戻る往復観測を行い、ボトムトラッキング機能で算出された航跡の終点と始点の距離と航行時間から河床の移動速度を求め、流量を補正する方法(Loop Correction Method)が最も実用的であることを示している。また、ADCPで計測された流量の品質管理については、USGS独自の“5%ルール”と呼ばれる手法が示されている。これは、まず2往復分(4回分)の計測値の平均し、各計測値の相対誤差が5%以内であれば、その値を計測流量として採用し、5%を超える場合にはさらに2往復計測を行い、合計8回分のデータを平均して計測流量とするものである。この手法は非常に明確であり、米国だけでなく世界中に広まっていることから、一般的にADCPを用いた断面流量計測では、往復した計測値の相対誤差5%以内を目標値とする場合が多い。アメリカの河川の洪水流を想定すれば、USGSが掲げるすべての注意事項を順守すれば問題なくクリアできると考えられる。しかし、この手法が日本の河川の洪水流観測にそのまま適用可能であるかについては疑問が残る。次章では、筆者らが日本の河川におけるADCP流量観測データの品質管理手法の構築に向けた課題として、検討を行ってきた成果についてまとめ、ADCPを用いた流量計測技術の現状を示す。

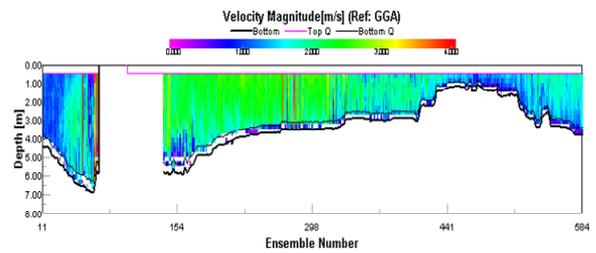


図-1 データ欠測が多いADCP流況観測事例⁶⁾

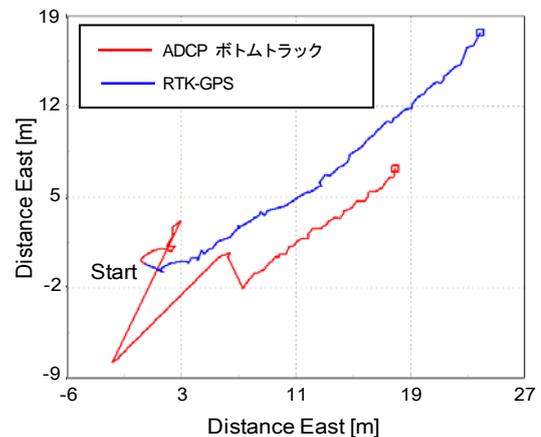


図-2 ADCPのボトムトラッキング機能とRTK-GPSによる航跡の比較

3. 日本のADCP流量観測にUSGSの品質管理手法を適用する場合の課題とそれら検討事例

アメリカと日本の河川の洪水流の違いを考えた場合、まず思いつくのは、流速の大きさと水面の変動である。これはUSGSが指摘する河床変動が生じる場合の課題とも重なる点である。最近の観測事例では、ボートの移動速度をRTK-GPSによる高精度な測位データから求め、流水と河床の速度を算出する方法が一般的となっているため、データさえ取得ができればMuellerが提案する手法を用いる必要性はなくなっている。

ADCPを搭載するボートの揺動・跳躍が顕著に生じる場合には、データの取得率が低下し、流況が激しい区間では、図-1に示すようにデータ欠測が生じることもあるため、この課題への対策が重要と認識されている。また、図-2のように河床が移動してない場合でも、ADCPのボトムトラッキングだけでは正確な航跡を取得できない状況が起こる。この事例からもADCPの洪水流計測にRTK-GPSを併用することが有効であるといえる。さらに、データが取得できた場合でも、水面変動が大きく、ボートが揺動する場合には、ADCPでは水深の傾斜角補正を行っていないこと、傾斜角補正を行っている流速についても、ADCPに内蔵されている傾斜センサーが旧式の液面感知タイプで短い揺動周期に対して追従できない可能性があることから、ADCPの計測精度低下を指摘した⁴⁾。

著者ら⁵⁾は、大型水槽を用いて静水中でADCP搭載

ボートを種々の周期で揺動させ、傾斜角および水深の計測特性を検証している。その結果、厳しい洪水流観測を想定した条件(揺動振幅 ± 15 度が定常的に続く)において、ボートの揺動周期が1~2秒程度まで短くなると、ADCPの内部傾斜センサーが追従できず、傾斜角を過小評価(周期1秒では約1/2)すること、ボートの傾斜角(ADCPの計測値)15度を閾値とすれば、傾斜による補正を行わずに単純にADCPの4つのビーム長さを平均値して水深とする場合でも、計測精度5%以内を十分確保できることを明らかにした。さらに、現地河川において高速流の流量観測を行った結果、高精度のMEMS傾斜センサーを用いて揺動による流速計測値の補正を行っても、図-3に示すように断面積分した流量値に補正前との有意な差が見られなかった。この結果は、傾斜角補正法を用いて流速値に与える影響を調べた結果⁹⁾と一致するものである。すなわち、ADCP搭載ボートの傾斜角はロール角が0度で、ピッチ角が ± 5 度であれば、実際の流速よりも0.37%小さく出力され、ピッチ角が ± 10 度でも、1.52%小さく出力される程度である。ADCPの計測特性として、経験的にデータ欠損が生じない傾斜角15度以内では流速は実際の値よりも最大5%程度小さく出力される一方、水深は実際の値よりも最大5%程度大きく出力されることが要因であり、傾斜角補正を行うことによって、各地点の傾斜角および水深に応じて補正前の単位幅流量が大きくなるアンサンブルと小さくなるアンサンブルが混在し、横断方向に断面積分して流量換算すると有意な差がみられなくなる。この計測で得られた結果は、洪水観測の精度評価において重要な知見となった。

この検討成果を発展させる形で、急流河川の高流速場においても適用可能な揺動を最小限に抑えてデータ欠損が生じにくく、かつ流下物に対して衝突や絡まりにくい橋上操作艇の仕様についての検討も行っている⁶⁾。さらに、ADCPに内蔵された磁気コンパスが河道内に設置されたH鋼や矢板護岸などの鋼構造物による磁場や観測船に搭載された金物等の影響を受けて方位情報に誤差が生じ、流量値の精度低下が生じる課題に対して、外部のGPSコンパスを利用することで、磁場という不確実な要素の影響を完全に排除し、安定した観測データを取得できるようにした⁷⁾。

上記の研究成果によって、日本の洪水流特性である高流速で、かつ水面変動が大きい流れに対しても、データを高い精度で確実に取得する技術についてはほぼ確立されたといえる。その上で、取得したデータの品質管理には、著者らが提案する単位移動距離あたりにADCPの流速計測値に含まれる誤差流速の標準偏差で表される偏差流速(Deviation Velocity)を用いる。この偏差流速を断面全体で積分したものを偏差流量と定義し、断面流量の精度評価指標として、偏差流量と計測した断面流量値の比である偏差流量比を用いる⁸⁾。著者らがこれまでにADCPを用いた洪水流量観測を行った経験から、橋上を

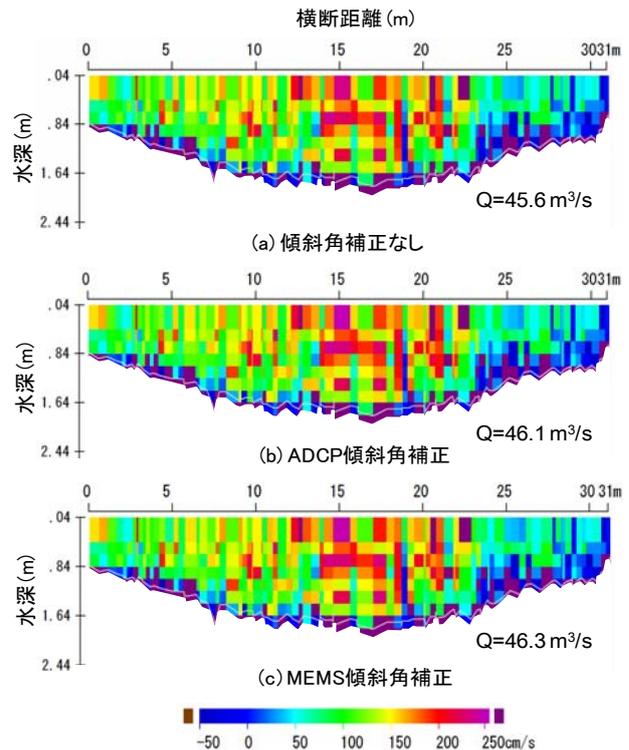


図-3 ADCPおよびMEMSセンサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速分布の比較

計測しながら横断移動する速度は、0.5~0.75m/s程度であり、水面幅が400mの河川では往復2回分の計測を行うのに途中の作業を含めて20分から30分を要する。USGSの流量観測ルールに従えば、2往復4回分のデータを取得するのに40分から1時間を要し、往復の流量の相対誤差が5%を超えれば、さらに2往復分のデータを取得する必要がある。アメリカの河川に比べて非定常性が強い日本の河川では、1時間の中に水位が変化し、流況が変わることも一般的であり、2往復分のデータの相対誤差が5%を超えることも予想されることから、この手法をそのまま適用することは難しい。一方、筆者らが提案する手法では、基本は浮子観測と同様に、1時間ごとに往復2回分のデータを取得することとしているが、不慮の事態で片道1回分の計測データしか得られない場合であっても偏差流量比を算出することが可能であり、洪水観測の実状に即した精度評価手法といえる。次章では、四万十川において5000m³/s級の洪水流量データを用いて、偏差流量比を算出し、精度評価を行った結果を示す。

4. 四万十川における2009年台風9号洪水観測データの計測精度評価

2009年に現地観測を行った四万十川の洪水流に適用し、流量観測精度について考察する。図-4に四万十川具同地点における2009年台風9号出水時のほぼピーク時の状況を、図-5に橋上操作艇による曳航計測状況を示す。ピーク時には高水敷も2m程度冠水しており、複断面流れの状



図-4 2009年台風9号による出水状況(ピーク水位)



図-5 橋上操作艇による曳航計測状況

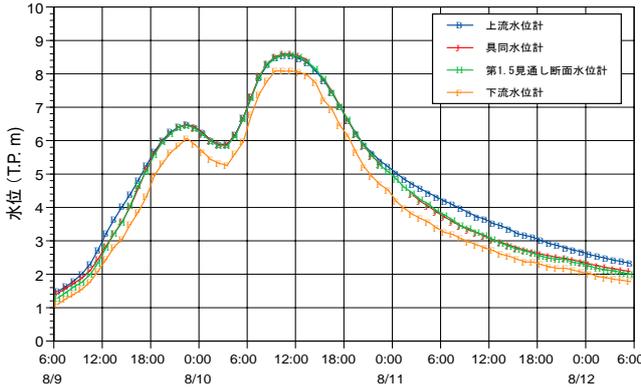


図-6 2009年8月9日～12日における具同地点上下流の水位ハイドログラフと観測期間

況であった。図-6に2009年8月9日～12日における具同地点上下流の水位ハイドログラフを示す。四万十川流域では、8月6～7日にかけて累計100mm程度の降雨があり、8日に一旦収まったものの、日本の南で台風9号が発生し、その影響を受けて9～10日朝にかけて累計450mm程度のまとまった降雨により、水位が上昇した。

水位は図-4に示す通称赤鉄橋と言われる四万十川橋に国土交通省が設置した具同水位観測所において計測しているが、上下流区間の流況を把握する目的で橋から上流側350m地点、下流側100m(浮子観測区間の中間地点)および250mの地点に簡易水位計を計3台設置している。

洪水流観測は、2名の観測者がロープに繋いだADCP専用ボートを四万十川橋上から約50m下流の最深河床断面付近を横断方向に約450m(ピーク時)曳航させて行っている。本観測では1回(片道分)の計測時間をおよそ10～12分間(横断移動速度0.6～0.75m/s程度)とし、単位移動距離あたりのADCPの超音波の発射回数を多くして偏差流速を小さく抑え、横断面内の平均的な流況場を計測している。これについては、往復計測を行った際の断面流速分布がほぼ同様になることから確認している。一方、1回の流量計測に時間を要してしまうことから、断面流量としては往復計測を行った際の平均値を採用している。2009年8月10日の洪水期間中に計16回(8往復分)のデータを得ることができた。洪水流量としては四万十川では中規模クラスであるが、ADCPで橋上観測を行った公表データとしては、これまでで最大級であることを特筆し

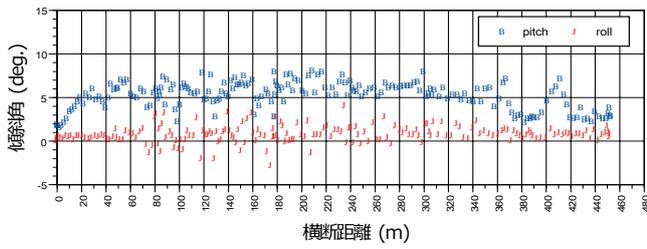
表-1 四万十川現地観測におけるADCPの計測設定条件

Workhorse ADCP 1200kHz	
計測モード	Mode12
計測層厚	0.30m
計測層数	1-3往復目：70層 4-8往復目：65層
アンサンブルタイム	70層：3.31秒 65層：3.14秒
ウォーターピング数	5ピング (サブ3ピング)
ボトムトラック機能	有り (5ピング)
固定観測における偏差流速	3.28cm/s

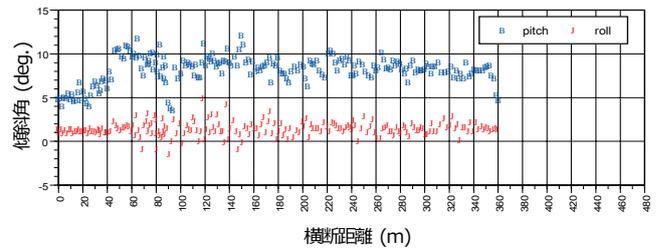
ておく。この観測では、ADCPが計測したデータを無線で岸に設置した専用PCに送信し、リアルタイムに流速分布、断面流量が把握することができる現在最も良く用いられている手法を採用している。表-1にADCPの計測設定条件を示す。水位に応じて計測層数とアンサンブルタイムを変更して観測を行っており、固定観測における偏差流速は3.28cm/sである。

図-7にADCPで計測した流量5095m³/sおよび3992m³/s時の(a)傾斜角、(b)流速分布、(c)偏差流速分布、偏差流量および偏差流量比、(d)偏差流速比分布を示す。横軸は観測開始点(右岸水際)からの横断距離を表している。

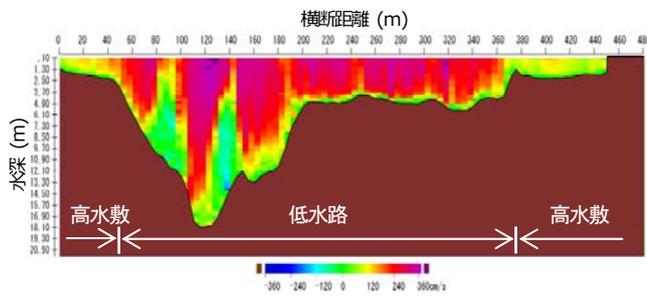
図-7(a)の傾斜角と図-7(b)の流速分布を併せてみると、低水路区間の流速が2m/sを超える流れ場では、ピッチ角が定常的に7度～10度となっており、ロール角は濡筋部(横断距離40m～360m付近)において揺動がみられる。この区間では表面付近の流速が毎秒3.5mを超える地点もあり、さらに橋脚および床固工の後流による周期的な渦が発生し、横断方向に移動させる際にボートの揺動振幅が±3度程度になっている。また、橋脚および床固工の影響により低流速域が確認でき、どちらの流量規模においても同様な流速分布が形成されている。この地点では近年局所的洗掘が進んでいることから、著者らの研究グループ⁹⁾では本観測結果を用いて3次元流況解析を行って詳細な流れ場を明らかにし、洗掘対策や洪水時の浮子を用いた流量観測精度向上のための基礎資料としている。つぎに、著者らが計測精度評価指標として提案する偏差



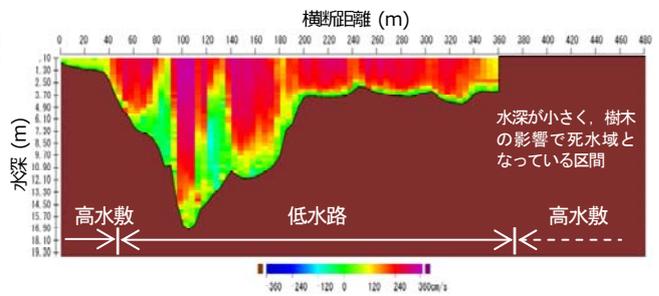
(a) ADCPの傾斜角 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



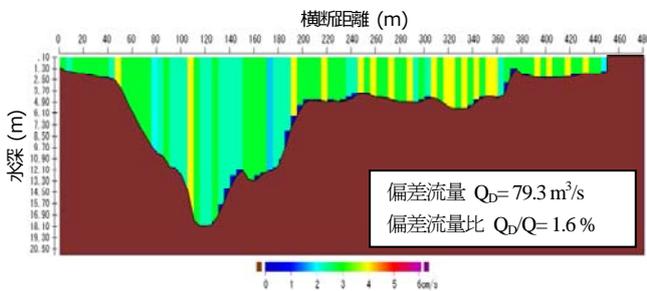
(a) ADCPの傾斜角 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)



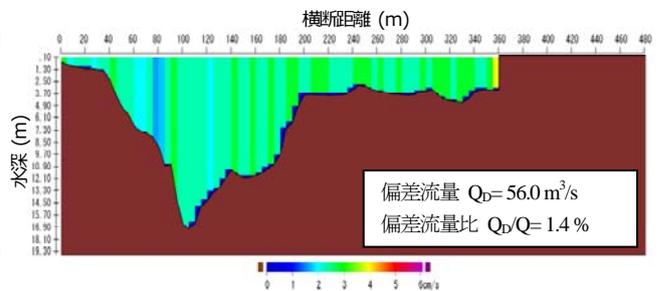
(b) 流下軸方向の流速分布 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



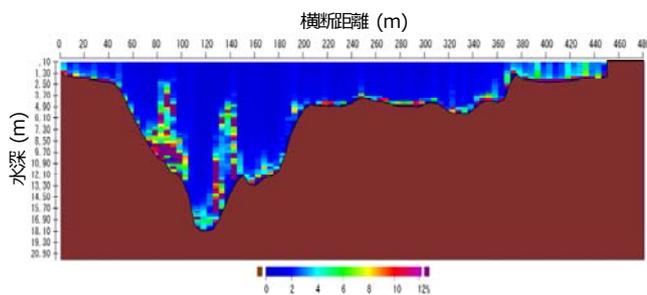
(b) 流下軸方向の流速分布 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)



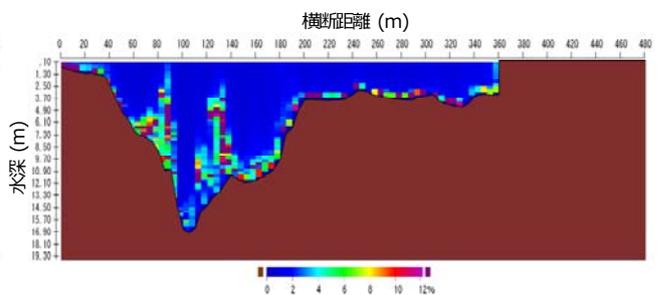
(c) 偏差流速分布 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



(c) 偏差流速分布 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)



(d) 偏差流速比分布 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



(d) 偏差流速比分布 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)

図-7 ADCPで観測した傾斜角，流速分布，断面流量，偏差流速および偏差流速比分布

流速をボートの単位移動距離(本観測では5mに設定)あたりのピング(超音波発射)数から、横断分布にしたものが図-7(c)である。ボートを移動させる速度によって、偏差流速は異なるものの、流速計測値に含まれる誤差の標準偏差は1cm/s~4cm/sである。この偏差流速を断面積分したものが偏差流量 Q_D であり、計測された断面流量 Q との比が偏差流量比である。流量が $5095\text{m}^3/\text{s}$ の場合、偏差流量 Q_D は $79.9\text{m}^3/\text{s}$ であり、偏差流量比は1.6%である。同様に流量が $3992\text{m}^3/\text{s}$ の場合には偏差流量 Q_D は $56.0\text{m}^3/\text{s}$ であり、偏差流量比は1.4%となる。したがって、本観測で得られた断面流量値に含まれる誤差分はわずか1.5%程度である。つぎに、図-7(d)に示す各グリッドの流速値と偏差流速の比をみると、全断面を通して1~2%である

が、構造物の後流の影響を受ける領域では流速が小さい分、偏差流速比は12%程度まで大きくなっている。偏差流速比を断面全体で平均すれば、前述の偏差流量比と基本的に同じであるが、計測した各グリッドの計測精度を評価できる指標として有効である。なお、偏差流速を算出する際の単位移動距離を2.5mとして計算した結果、流量 $5095\text{m}^3/\text{s}$ に対して偏差流量は $105.1\text{m}^3/\text{s}$ (偏差流量比:2.1%)、流量 $3992\text{m}^3/\text{s}$ に対して偏差流量は $79.4\text{m}^3/\text{s}$ (偏差流量比:2.0%)と偏差流量比は若干大きくなった。これは単位移動距離を小さくするほど、その区間における超音波の発射回数(ピング数)が小さくなるため、偏差流速が大きくなるためである。単位移動距離の取り方の目安としては、横断平均移動速度にADCPの計測設定条件であ

る1アンサンブルタイムを乗じて得られる距離を提案しておく。筆者らの経験上からもこの値は2.5～5m程度となり、この間の値であれば、単位移動距離の取り方を変えても上述の通り偏差流量比は2%程度で有意な差はみられていない。

5. 結論

本研究では、日本の河川の洪水流特性を考慮したADCP流量観測データの品質管理手法について考察するため、ADCPの計測値に影響を及ぼす要因に関する検討成果をまとめ、著者らが提案する評価指標を四万十川の洪水流量観測結果に適用した。わが国特有の高流速で、水面変動が大きい洪水流の観測を行う際には、河床変動による計測精度の低下およびボートの跳躍や計測適用範囲を超える揺動によるデータ欠損を最小限に抑えるためにADCPにRTK-GPSの併用が有効である。ADCP搭載ボートの揺動がADCPの水深および流速値に及ぼす影響は小さく、厳しい条件の洪水流計測においても傾斜角を15度以下に抑え、確実にデータを取得することができれば、各地点における単位幅流量の計測精度は最大でも5%以下に収まる。これらの成果から、高流速でも適用可能な橋上操作艇の仕様を検討し、外部GPSコンパス等の計測機器システムが構築され、確実にデータを取得するための技術はほぼ確立できた。計測データの品質管理については、ADCPの計測設定条件から算出される偏差流速を定義し、断面流量の計測精度評価指標としては、偏差流速を断面積分して得られる偏差流量と断面流量との比を偏差流量比として提案した。四万十川においてADCPを用いた洪水流観測では5000m³/s規模の洪水流量計測に成功した。さらに、著者らが提案するADCPの機器性能上の精度である偏差流速を適用した結果、単位移動距離を5mとした場合、ADCPで計測された断面流量に含まれる誤差流量の比を表わす偏差流量比は、5095 m³/sで1.6%、3992 m³/sで1.4%であった。木下¹⁰⁾が静水中においてADCPの計測精度検証を行った後、日本における洪水流の計測精度検証は困難と考えられてきたが、高精度の計測機器や通信システム等を用いた詳細な実験および現地観測を通じて、これらの計測特性を明らかにした点は今後の洪水流観測において極めて重要な知見となった。この成果により、著者らがこれまでに行ってきたADCPを用いた洪水流観測に係わる基礎的な観測技術、データ処理法および計測精度評価法がほぼ確立できたといえる。ADCPを用いた観測技術は、断面流量を計測する目的から今後さらに応用的なものへ発展が期待されている。特にADCPを用いた流況と河床変動の同時計測技術や浮遊砂濃度の推定技術の構築は、著者ら^{11),12)}の検討に限らず、国内外で精力的に進められており、これまで十分に計測されてこなかった実河川における洪水時の土砂移動現象

を解明していく可能性を持っている。

謝辞：四万十川の現地観測に関しては、国土交通省河川技術研究開発公募(地域課題分野)「ADCP観測および流況解析に基づいた浮子流観データの検証と河川計画への反映に関する研究」の一環として行った。国土交通省中村河川国道事務所には、資料提供や現地観測に際してご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, U.S.G.S. Scientific Investigation Report 2005-5183.
- 2) 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, pp.919-924, 2008.
- 3) David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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, 水文・水資源学会河川流量観測高度化研究会, 河川流量観測の新時代, 第2巻, 2011.
- 8) 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.
- 9) 門田章宏, 岡田将治: ADCPを用いた洪水流観測に基づいた橋脚構造物周辺の三次元流況解析, 水工学論文集, 第55巻, 2011.
- 10) 木下良作: ADCPと無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について, 農業土木学会平成15年度応用水理研究部会特別講演録, 2003.
- 11) 萬矢敦啓, 岡田将治, 江島敬三, 菅野裕也, 深見和彦: ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定方法, 水工学論文集, 第54巻, pp.1093-1098, 2010.
- 12) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集, 第12巻, pp.133-138, 2006.

(2011. 7. 31受付)

日本におけるADCPを用いた高水流量観測手法

Method of water discharge measurement during flood
using Acoustic Doppler Current Profiler in Japan

萬矢敦啓¹・岡田将治²・橘田隆史³・深見和彦⁴

Atsuhiko YOROZUYA, Shoji OKADA, Takashi KITSUDA 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 博士(工学) 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18ハイドロ第一ビル)

⁴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 current meters, float-type measurements, non-contact current meters, have been used to conduct discharge measurement. Among them, acoustic Doppler devices with a profiling technique loaded on boats are the only tool capable of water discharge measurement without any hydraulic assumption. In 1981, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) were developed by RD Instruments Inc. initially for marine measurement, but have been also applied by many river engineers to river discharge measurement. Since the beginning of the 2000s, the United States Geological Survey (USGS) has developed criteria for Quality Assurance (QA) as well as guidelines associated with ADCP measurement. However, they are not easily applicable to flood flows, for example, in Japanese rivers, characterized by high unsteadiness, loose boundary, and, above all, rough water surface. Therefore, we have developed an ADCP measurement system as well as concept of QA which are suitable for measuring in Japan. Finally, we compiled them as the water discharge measurement method using ADCP in Japanese rivers.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, discharge measurement, Quality Assurance, peripheral devices*

1. はじめに

河川の流水を計測するための手法として、異なる複数の計測原理が提案されてきている。例えば電波¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、音響⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾、画像⁹⁾技術等である。これらの手法の多くは河道内の流速の一部を計測するものであり、流速計測手法として、また連続無人観測として実用に資する技術として認知されている。その中でも、ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)をボートに搭載する横断観測が、水理学的な仮定を必要とせずに、流量値を算出することができる唯一の計測手法である。ADCPはTeledyne RDI社(以下、TRDI社)により1980年代初頭に開発され、当初は海洋計測として使用された。その後河川計測にも使用され始め、例えば2000年になると、米国地質調査所(USGS)は計測データの品質管理手法¹⁰⁾、計測手法のガイドライン¹¹⁾を提案している。しかしながらこれらの手法は主に大陸河川における計測手法であり、日本に代表されるような急勾配河川で適用することは容易ではない。その理由として例えば流量値の強い非定常性、河床面積

動速度の非定常性及び横断的な分布状況等が挙げられるが、その中で最も難しい問題は洪水時の河川水の高流速と水面の振動状況である。

日本におけるADCPを用いた観測は、金木ら¹²⁾によるもの、木下¹³⁾による洪水観測を皮切りに、徐々に観測事例が増えてきた。ADCPを用いた横断観測を成功させるための必須項目は、ADCPを搭載する船艇である。現に、木下はラジコンボートを中心にして多くの船艇の開発を行った¹³⁾。日本でも使用されてきたリバーボートは当初、USGSらの検討により設計されている¹⁴⁾。一方、著者らは、橋梁の上から作業員がロープを用いて船艇を操作する方法を前提とした橋上操作艇の開発を進めてきた。そこでは水面変動の激しい流況の中で上記のリバーボートを含めて4つの橋上操作艇を用いて、揺動の少ないボートの提案を行った¹⁵⁾。その後、同橋上操作艇を用いた、日本の河川特有の難しい条件での計測成功事例が報告されてきている¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。

ADCPを用いた観測は前述の橋上操作艇の他、多くの周辺機器を組み合わせることで初めて可能となる。それ故に、それぞれの周辺機器の使い方及び選択によっては十

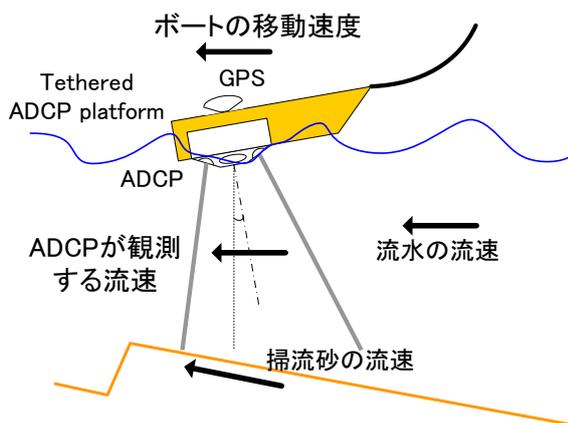


図-1 移動計測の概念図

分に高い精度の計測が出来ない場合も生じる。また計測のためのコマンドに関しても多くの選択肢があることから、精度に影響を及ぼす場合も出てくる¹⁸⁾。

そのような問題意識のもとで、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) や国内の多くの研究者・技術者が、国土交通省等と連携しながら、流量観測技術の高度化の取り組みを進めてきた。著者らは、それらに関連したADCPの横断観測に関する既往の技術論文及び報告書等を基に、日本の河川に代表される急流河川におけるADCPを用いた標準的な流量観測手法を提示することを本報告で試みる。具体的にはデータ欠損の少ない観測を遂行するためのADCP観測に必要な周辺機器¹⁵⁾²⁰⁾²¹⁾、高い品質の観測結果を得るためのコマンド設定、橋上操作艇の操作方法、精度の定量評価¹⁸⁾¹⁹⁾である。本報告では周辺機器の選択に関して特に重点的に説明することとし、データの品質管理に関する詳細は岡田らの論文²²⁾を参考にされたい。また著書らは、これらの議論をまとめるためにADCPを用いた高水流量観測マニュアルの作成を試みている。最後にその概要を紹介する。

2. ADCP観測に必要な周辺機器

ADCPを用いた流況及び流量観測を行うにあたり、安全であること、安定した計測であること、計測値の信頼性が高いことが求められるが、そのためには複数の周辺機器が必要となる。具体的には、(1)GPS、(2)橋上操作艇、(3)データ転送装置、(4)外部コンパスである。この章ではそれらの必要性を説明する。

(1) GPS

図-1はADCPによる移動計測に関する概念図である。ADCPに限らず、観測船（ここでは橋上操作艇）に搭載した計測機を移動させて計測する場合、一般的に次の式のようなになる。

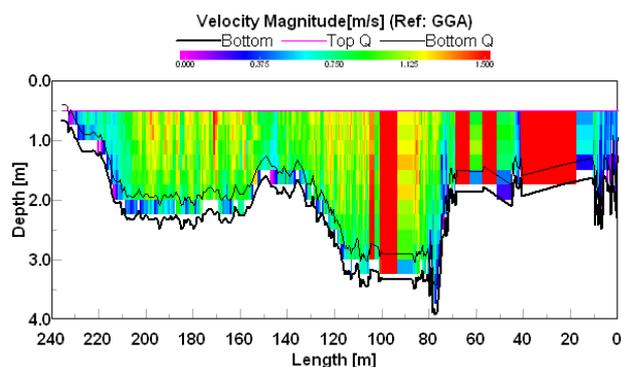


図-2 絶対流速分布と河床形状¹⁹⁾

$$\vec{V}_{abs} = \vec{V}_{non-reference} + \vec{V}_{boat} \quad (1)$$

式(1)の左辺が計測結果として必要な流速（図-1の流水の流速）、右辺第一項がADCPの出力結果（図-1のADCPが観測する流速）、右辺第二項が観測船の移動速度（図-1のボートの移動速度、すなわちADCP本体の移動速度）となる。式(1)が示すように、流水の流速の計測精度を向上させるには、ADCPの計測精度もさることながら観測船の移動速度に対する精度を上げる必要がある。観測船の移動速度を計測するために、WH-ADCPはボトムトラック機能を内蔵している。それが出力する速度は対地速度と呼ばれており、河床が移動しないという条件において、これを観測船の移動速度と考えることができ、またこの計測精度も高い。しかしながら、河床が移動する場合はその限りではないばかりか、逆にそれを掃流砂の速度とし、掃流砂量として換算する手法も提案されている²³⁾²⁴⁾。このような条件では高い精度を持つGPSを併用し、そこで得られる位置情報の時間差分から観測船の移動速度を算出する必要が生じる。RTK-GPSを使用するには、GPS端末が二台、その両方でデータの交換をするための無線機が必要で、全体のシステムを構成するためには、ADCP本体以上の価格が必要である。また、橋上操作艇を用いる際の水面状況の激しさ、観測準備などの手間、トラブルシューティング等を考えると、観測機器全体を含んだシステムの構成は単純であることが望ましい。近年はVRS-RTK-GPSが日本国内で使用可能となり、RTK-GPSの半分以下の価格でありながら、GPS機器単体で高精度の観測が可能になっている。これらを用いることで観測船の移動速度を正しく計測することができる。RTK-GPSの位置情報の精度は数cmでありその差分から移動速度を求めると、オーダーで数cm/s程度となる。また最近では、VTG(Vector track an Speed over the Ground)を取得できるGPSが比較的安価に購入できるようになってきた。この情報は衛星とGPS本体のデータ通信に使用している電波のドップラー効果による周波数変化を活用し、GPS本体の移動速度を算出するものである。位置情報とは独立して移動速度を算出している点に特長がある。



図-3 著者らが作成したトリマラン型橋上操作艇¹⁵⁾



図-4 市販の高流速低揺動型曳航ボート

RTK-GPSを用いて高い計測精度を確保するためにはRTKモードで計測することが必須となる。しかしながら計測条件が悪化すると例えばNMEAフォーマットであれば、GPS quality indicatorが「4」から「5」となり、観測船の移動速度の算出に大きな誤差をもたらす、突発的に大きな流速値を算出したりすることがある。その事例を図-2に示す。このようなことが起きた時は、二つの選択肢があり、一つはこれらのデータを採用しないこと、VTG情報を用いて補正することなどである。しかしながら実際には、GPSの計測精度が落ちることで発生するこのような流速値の誤差に関しては、後者の補正方法でかなり補正できることがわかっており、後者の方法で積極的に補正することが推奨される。まこれらの詳細は参考文献を参考²⁰⁾にされたい。

(2) 橋上操作艇

揺れにくい船艇を用意することは、確実な計測を行う上で必須項目となる。これまで著者らは複数の機会を経て、市販のトリマラン型の橋上操作艇や著者らの作成してきたモノハル型の橋上操作艇などを試行してきたが、最終的には図-3及び図-4が示すトリマラン型の橋上操作艇のデータ取得率が最も高い事がわかった¹⁵⁾。

すなわち、橋上操作艇を高流速に対応できるトリマラン型とすることで過去に著者らが作成したモノハル型と比較するとデータ取得率が飛躍的に向上した。特に水面が波立つような状況の中で、モノハル型はその波の震動を船艇全面で受けるため、揺れが激しく、時に跳躍をし、ADCPのデータ取得率が極端に低下した。WH-ADCPは傾きが15度以上になると、データを欠損とするように設計されているためである。ADCPそのものはプロファイラ技術であり、大きく傾いたときにデータ欠損とする

表-1 図-4と同等の橋上操作艇を用いた観測結果の成功事例

計測場所	観測された最大流速	観測者
千代田実験水路	6 m/s	北海道開発局 帯広開発建設部
利根川大正橋	5.5 m/s	株式会社水文環境
黒部川	4 m/s	富山県立大学
黒部川新川黒部橋	3.5 m/s	土木研究所



図-5 黒部川新川黒部橋における観測事例（写真中央は高流速低揺動型曳航ボート、ここでの最大の表面流速は3.5 m/s程度、周囲の水面状況は白波が立ち大きく振動している）

設定は妥当とも言える。したがって、水面が揺れたとしても船は揺れない船艇にすることが理想的な対処法である。実際に図-3及び図-4の高流速に対応できるトリマラン型橋上操作艇は、同じ実験条件において、揺れが極端に軽減された。撮影したビデオから、水面の波がメインハルとサイドハルの間から抜けている様子が明確に確認され、波の震動の影響が低減されていることが要因であると推定された。なお、トリマラン型の場合、モノハル型に比較すると水面に浮遊している流下物に絡まりやすいのではないかと、という懸念がある。図-3で示すような流下物よけのゲージの搭載も選択肢の一つとして考えられるが、実際のゲージの効果については残念ながら確認できていない。今後の課題は、このゲージによる流下物よけの効果、ゲージの流体抵抗による余分な揺れの発生状況の確認等である。しかしながらこれまでの流量観測の事例では、トリマランに流下物が引っ掛かるような事例は紹介されていない。洪水中には葦のような草が固まりとなって流れていることが良くあるが、トリマラン型

の橋上操作艇はそれらの上をそのまま越えており、多くは問題となっていない。

図-3のトリマランと図-4の高流速低揺動型曳航ボートを比較すると図-4のボートは耐揺動に対する性能に関しては同等又はそれ以上であることを確認した。また図-4の写真右上にはADCPを含めたその他の周辺機器をまとめたユニットが示されているが、これは観測現場の作業を熟知した技術者が単純化したものである。このようなユニットを含めた橋上操作艇を用いることは、観測の準備の時間を短縮し、初期設定を的確に行うことができ、確実に観測を実施する上でメリットは大きい。

図-4の高流速低揺動型曳航ボートが日本の市場に流通し、すでに複数の高流速条件下で計測が行われている。表-1は著者らの観測結果も含めて図-4の橋上操作艇及び同等の船艇を用いた、高流速条件下での計測成功事例に関して、著者らが写真等情報提供を受けたものを示している。これを見ると、かなり厳しい流速条件下で計測が成功していることが理解できる。また定量的な流速値は不明であるが、海外にもそのような厳しい流況条件下での観測成功例が複数あるようである。これらの一部は、例えばインターネット動画サイトのYoutubeにおいて、「High Speed Riverboat」と検索すると、「Oceanscience High Speed Riverboat」として図-4と同じ色、黄色の船艇等複数の画像を閲覧することができるが、これらは基本的には同じ船艇である。これらの映像によってはかなり厳しい流況におけるボートの挙動を見ることが出来る。また図-5に著者らが黒部川新川黒部橋で計測したときの観測状況を示す。このときの表面流速はそれほど速くはないものの、水面には白波が立ち、大きく振動している。このときのフルード数は0.7程度であったが、橋上操作艇は安定していた。

(3) データ転送装置

観測を成功させる上でデータ転送装置の役割は大きい。WH-ADCPで観測を行う上で、データ転送装置は三つの役割を担う。それらは1) 観測が確実に実行されていることを確認すること、2) WH-ADCPとGPS、音響測深機等を同期させること、3) 流況や河床高をオンラインでモニタリングすることである。

最も重要なのは一つ目の項目である。本報告のADCPを用いた流量観測は複数の電子機器に依存しているため、何らかの原因で不具合が発生する可能性がある。個々の機材のみならず、ケーブルやバッテリーに至るまで、すべての構成要素が完全になって初めて正しい観測が可能になるため、観測を実行する技術者はデータの取得状況を常に観察する必要がある。観測の開始時のみならず、橋上操作艇を橋からおろして水面に着水するとき、観測中に橋上操作艇が転覆したときなど、特に橋上操作艇が大きな衝撃を受けた時、何らかの原因でデータ転送が切れる場合がある。そのようなときは直ちに橋上操作艇を



図-6 ラジコンボートの一例

引き上げ、原因を解明し修正し、再度、観測を実行しなければならない。それゆえ、データの転送状況、観測の実行状況を常に確認する必要がある。

二つ目の項目は例えばRD社が配布しているWinRiverを用いて三つのデータを同期させることである。これを行うことで観測中における大雑把な流量の算出が簡単になり、データの後処理も簡単になる。

最後の項目は、現場の流況、河床高を把握することで、ADCPで観測すべき領域の決定に役立つ。

(4) 外部コンパス

ADCPは自らの方位情報を得るために内部に磁気コンパスを有している。ここから得られる情報によりADCPの向き、流向などが算出されているため、曳航観測には重要な周辺機器の一つである。しかしながら河道内に設置されたH鋼や矢板護岸、水管橋などの鋼構造物による磁場は観測結果に大きな影響を与えることが知られている。また前述のようにADCPの観測船には複数の周辺機器を搭載する必要があり、十分に注意を払っていても、わずかでも方位情報に誤差を生じさせるような磁気が存在することがあれば、流量値にも影響が及ぶ。この問題は特にラジコンボートの設計に大きな影響を与えた。例えば図-6は著者が過去に試作したラジコンボートの一例である。ここではラジコンエンジンが強い磁場になること、ADCPのトランスデューサ表面を常に水没させておく必要があることから、ADCP本体をラジコンボートの船尾に搭載する必要が生じ、一方で、船体全体として極端に大きくならないこと等の制約から、結果として図-6に示すような船艇が試作された。この船の特徴は写真が示すように船尾にGPSのアンテナを設置しその下にADCPが搭載してあること、また船艇の中央より前のネット内にガソリンエンジンを搭載していること、エンジンの後方に赤い筒のような構造があるがこの中心にファンがあることである。この船は船首方向に重心があること、エンジンによる推進力が中央付近から発生することから、エンジンで加速すると船首が水面に突入する

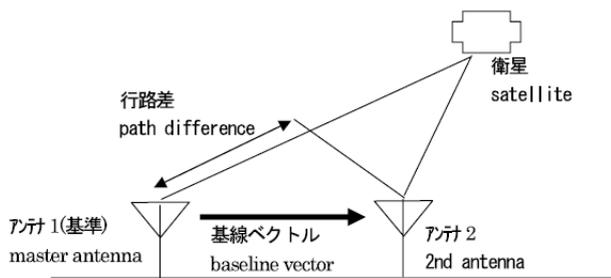


図-7 GPSコンパスの方位計算原理²⁶⁾

ような構造であり、残念ながらADCPを用いた洪水観測には不向きなラジコンボートとなってしまった。これらの問題を回避しつつラジコンボートを設計するためには、船艇が大きなものにならなくてはならない。また橋上操作艇本体についても、後述する外部コンパスが何らかの理由により故障した場合のことを考えて、磁気フリーの環境を用意しておくことが推奨されるべきである。

このように内部コンパスに関わる問題は既に認知されており、例えば、ADCPの開発会社であるTRDI社は、コンパスキャリブレーションを行うことをマニュアル²⁵⁾に明記している。しかし、そこに示された手法は日本の河川での適用はほぼ不可能に近い、河道内の鋼構造物などによる環境磁場には対処できない、という問題がある。磁場の影響を受けない外部コンパスとしては、大型船でADCP観測を行う際に利用されている光ジャイロやレーザージャイロと呼ばれるものがあるが、数百万円と高額である。一方、比較的安価なものとして、電子コンパスがあるが、これは半導体式の磁気コンパスであり、電子部品ではあるものの、結局磁場の影響を受けてしまう。このため著者は、価格も比較的安価で、近年海洋観測での使用実績が多くなってきているGPSコンパス²⁶⁾を使用した。GPSコンパスは、2つのGPS受信機を用いて、それらの相対的な位置関係からリアルタイムに方位を求めるものである。ADCPの橋上操作艇の場合、船首方向もしくは船首と直角方向に2つのアンテナを配置することが可能であるが、本研究では橋上操作艇のサイドハルを利用して2つのアンテナを装着させた。方位計測原理は図-7に示すとおり、まずアンテナ1(基準)からアンテナ2への基線ベクトルを算出させる。これは、衛星-アンテナ1間、衛星-アンテナ2間の両ベクトルの差、すなわち行路差をGPS電波の位相差から算出している。ここで衛星-アンテナ1間、衛星-アンテナ2間の両ベクトルの差から得られる両アンテナ間を結ぶベクトルを基線ベクトルとし、これを船首方位を決定するための目的量とする。衛星の位置に関してはGPSから得られるが、船の揺動による基線ベクトルの方向は未知である。ここでアンテナの方向を複数変化させながら幾つかの行路差を計算し、測定で求めた行路差と、計算で求めた行路差を比較し、誤差が最も小さくなる基線ベクトルを求めることで、真の基線ベクトルの方位を推定する。この計算を毎秒行え

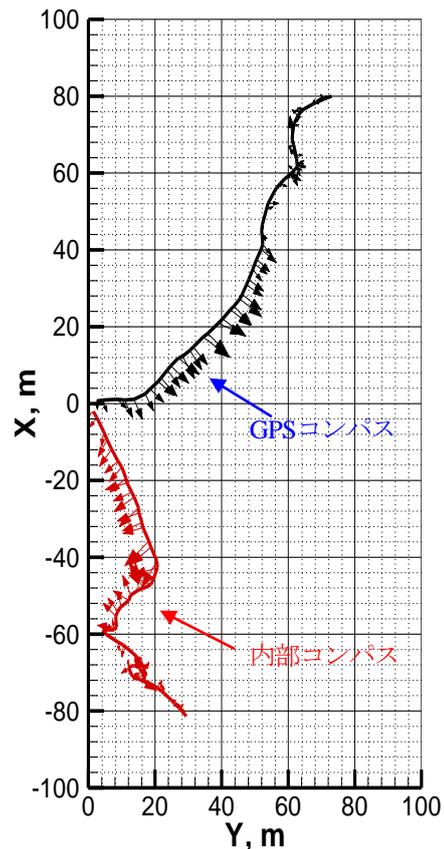


図-8 磁石を搭載した状態での観測結果
(流況及びボトムトラック航跡)

ば、リアルタイムで船首方位を得ることができる。

方位計測自体は一つのGPS衛星からの信号をベースにするが、最初に自器の位置を特定する必要があるため、通常のDGPSと同様に衛星を6個以上補足しなければならず、この衛星状態が悪いと方位も計測することができない。

また基線ベクトルはGPSアンテナの配置状況に依存することからミスアライメントを想定し、正しいアライメントの確認とその修正方法を議論しておく必要がある。大型船舶の船底にADCPを艀装しているケースでは、一定距離を直線的に航走させ、GPSによる航跡とボトムトラックによる航跡の偏角からGPSコンパスのミスアライメントを導く手法が用いられている。GPSコンパスの装着時にはこの様なキャリブレーションを事前に実施しておくことが必要である。ただしこのとき河床が移動していない場において行わなくてはならない。

なお、ここで用いるGPSの位置情報の精度はDGPS程度であり、水平方向の精度は1m程度である。このことからここで用いるGPS情報をADCPの位置情報として使用するには精度が粗すぎ、2.(1)で述べたような高精度のGPS情報はいずれにせよ別に必要である。

一方、内部コンパスの方位精度は $\pm 2^\circ$ 程度とされているが、GPSコンパスの方位精度は $\pm 1^\circ$ 以内であり、より精度が高い。内部コンパスに関しては特にメーカー

表-2 観測時の流量値一覧

条件	測線	流量 (m³/s)			
		GPS コンパス		内部磁気コンパス	
		観測流量	往復流量差/ 誤差%	観測流量	往復流量差/ 誤差%
磁石無	1回目往路	86.5	0.8	90.3	2.90
	1回目復路	85.7	0.93 %	87.4	3.26 %
	2回目往路	87.2	1.0	91.1	4.30
	2回目復路	86.2	1.15 %	86.8	4.83 %
	3回目往路	88.5	2.0	87.6	3.70
	3回目復路	86.5	2.29 %	91.3	4.14 %
磁石有	1回目往路	79.3	1.1	62.6	69.40
	1回目復路	80.4	1.38 %	-6.8	248.8 %
	2回目往路	82.3	2.4	66.7	75.20
	2回目復路	79.9	2.96 %	-8.5	258.4 %

表-3 ADCP観測マニュアルの目次

1	総説
2	観測機器の構成
3	洪水流量観測方法
4	精度管理
5	安全対策
6	観測データの処理と流量算出
A. 1.	ADCP のテクニカルマニュアル
A. 2.	ADCP コマンドマニュアル
A. 3.	ADCP を用いた高水流量観測仕様書例
A. 4.	ADCP を用いた高水流量観測積算基準案
A. 5.	用語集

であるのに対して、内部磁気コンパスは3~5%程度であり、GPSコンパスを用いることで往復による流量差が少なくなることがわかる。他方、磁石を搭載した場合、内部磁気コンパスを用いた流量値は異常な値を示している一方で、GPSコンパスはその影響を受けず、磁石を搭載しない場合の流量値とほぼ同じ値が得られている。内部コンパスを用いた実際のADCP観測において、観測船のエンジンや、他の観測機材の中に磁場を発生させる物体が含まれていた場合などには、このような状況に陥ることは十分に考えられ、GPSコンパスの現場観測における効果は非常に大きいと期待される。

(5) 周辺機器に関するまとめ

ここまで4つの周辺機器に関して必要性を述べてきた。これらを組み合わせた結果として、全体的なシステム構成は図-9に示すようになる。これらは、ADCP本体、橋上操作艇、外部コンパス (GPS コンパス) , GPS (RTK-GPS) , データ転送装置 (RemoADCP) である。河口部での流況調査や低水流量観測等の場合、必ずしも橋上操作艇を使用する必要はなく、有人船を用いた方が高い観測効率が期待できる。しかしながら洪水観測の多くの場合は2章で紹介した周辺機器すべてを使用することを提案したい。

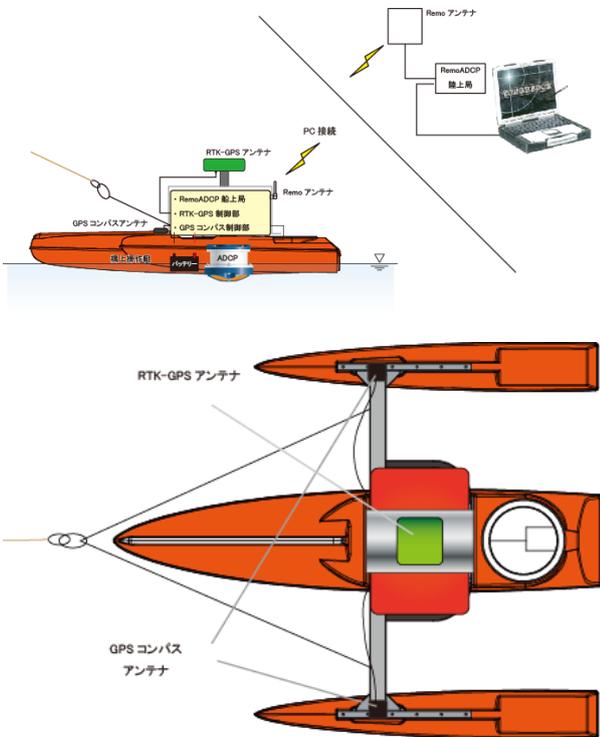


図-9 観測機材構成

のカタログなどには標記されていないため不明確ではあるが、Davidら²⁷⁾によると、船の加速度から起因する内部コンパスの追従の遅れが、流速計測値に対して少なからず影響を与えることを示唆していることを付記する。

以下に外部コンパスの適用事例を示す。図-8は観測船に意図的に強い磁気を持つ磁石を搭載した場合の観測結果の一例を示す。GPS外部コンパスを用いた場合が、現場における状況を正しく示しており、内部コンパスを用いた結果は計測状況を全く反映しない結果となった。

次に、著者らが観測した複数の横断観測により得られた流量値を表-2に示す。磁石を搭載しない状態における流量値は、GPSコンパスによる往復流量誤差が1~3%程度

3. ADCPを用いた高水流量観測マニュアル (案)

著者らは、周辺機器の説明と使用方法、高い品質の観測結果を得るためのコマンド設定、橋上操作艇の操作方法、精度の定量評価に関して説明を行うために、ADCPを用いた高水流量観測マニュアル (案) の作成を試みた。ここにその概要を説明する。

ADCPを用いた高水流量観測マニュアルは二つで構成する。一つは主に河川管理者等の流量観測に関わる業務発注者に向けた簡易なマニュアルであり、もう一つは主に受注者等の技術者に向けたマニュアルであり、詳細な技術的な説明である。日本に流通している曳航型のAD-



図-10 モノハル型の橋上操作艇（著者らの試作ボート）

CPはTRDI社、ソソテック社の二社である。これらの二つには大きな違いがあるが、共通点も多い。また河川計測目的のADCPとしては、日本では現時点でTRDI社のものが多く利用されている。著者らが作成した二つのマニュアルのうち、前者に関しては両者の共通する項目を記述するように試みた。また後者に関しては、実際の運用で必須となる詳細な技術情報、またその解説を含んでいるため、TRDI社のADCPに関して説明している。表-3にADCP観測マニュアルの目次を示す。また付録には河川管理者が必要と思われる観測仕様書の作成例、観測の積算基準案を記載した。これにより予算申請から適正な価格での契約等、観測方法、観測結果の品質管理に至るまでADCP観測に関わる必要な情報を網羅した。

これらは土木研究所資料として公表する予定であり、土木研究所ICHARMのホームページからもダウンロードできるようにする予定である²⁹。

4. まとめ

著者らは本報告の中で、日本に代表される急流河川におけるADCPを用いた標準的な流量観測手法を提示することを試みた。ここでは主たる構成要素は二つあり、一つは周辺機器を駆使してデータ取得率・計測結果の質を向上させることである。もう一つは取得したデータの品質を評価することである。両者はお互いにフィードバックしなくてはならない。

このような新しい観測手法を今後確立していくために重要なことは、このような水理学的に仮定が少ない観測技術を用いた流量観測値が水文情報として継続的に取得・保存されていくことを目指すべきであることである。その観点からは、流況や洪水規模に応じて観測手法を変えることは望ましい状況ではない。例えばある流況まではADCPを用いて、それを超える流況では浮子測法を用いることにすると、一貫した精度管理が難しくなる。本報告で紹介した高流速低揺動型曳航ボートの性能の評価¹⁵をするまでは、このような選択を取らざるを得ない状況

は非常に多いと想定されていた。現に、著者らはかつて流速が6m/sを超える河道において、図-10のモノハル型の橋上操作艇を用いてADCP流量観測手法を試みた。写真は如何にも成功事例のように見えるが、このときのボートは大きく揺動し、かつ飛び跳ね、正常な計測結果を得られる状況ではなかった。この場所は本報告の表-1が示す利根川大正橋である。このような条件下では、発注者が苦勞して観測体制を整え、受注が観測準備を整え、橋上操作艇を水面に浮かべて計測を開始したとしても、データが全く取れないことが十分ありえる。しかし、その数年後、高流速低揺動型曳航ボートと同等の船艇を用いて、株式会社水文環境の井上氏は、ほぼ同じ流況におけるADCP横断観測を成功させた。これは技術の大きな進歩に他ならないと考えている。

また著者らはADCPに関する内部技術にもあらゆる視点から検証を行い、もし必要ならば周辺機器を使用することを提案してきた。その代表例が本報告でも紹介しマニュアルにも使用を義務づけた外部コンパスであり、その反対の例が傾斜計である。現況のWH-ADCPの内部傾斜計は液面検出タイプの静電容量変化型である。この内部傾斜計は、図-5や図-10で見られる水面状況においては、計測器の追従速度が遅くなり、それゆえに大きな誤差を生むことが想定された。これを検証するため、著者らはMEMS技術の加速度計を応用した高周波数の傾斜計を用いて、ADCPの揺動が流速値に与える誤差を検証した²⁹。幸いにしてその誤差はほとんどないことが実証されたため、ここでは別途の周辺機器を使用する必要はないと結論づけた。

今後期待されるものは、ここで提案した技術の普及である。ここで紹介したADCP観測のマニュアル（案）は技術の普及のために大きな役割を担うことが期待される。

謝辞：本文中の表-1に関して、寒地土木研究所寒地河川チーム島田研究員から、株式会社水文環境井上氏から、富山県立大学手計先生から貴重な情報を頂いた。また黒部川新川黒部橋における著者の観測においては、中央大学河川・水文研究室岡部技術員、学生、富山県立大学手計研究室の学生の協力を得た。また本報告で説明したいくつかの項目は、土木研究所が過去数年間にわたり国土交通省及び同国土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る。

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, pp53-58, 2010
 - 5) 中川一ら：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川での実地検証, 水工学論文集, 第50巻, pp. 709-714, 2006.
 - 6) 例えば川西澄ら：次世代超音波流速計による感潮域の流量と水温・塩分の連続モニタリング, 水工学論文集, 第53巻, pp. 1015-1020, 2009.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock, and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183
 - 11) Michael R. Simpson : Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, USGS Open-File Report 01-1, 2001.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) Michael S. Rehm, James A. Stewart and Scott E. Morlock : Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・三宅洋：十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp41-46, 2011.
 - 18) 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, pp1183-1188, 2011.
 - 19) 橋田隆史, 岡田将治, 新井勲, 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.
 - 20) 萬矢敦啓・菅野裕也・深見和彦：河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点, 河川流量観測の新時代, pp. 46-55, 2010.
 - 21) 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, pp35-40, 2011.
 - 22) 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, 2011. (投稿中)
 - 23) Rennie, C.D., Millar, R.G., and Church, M.A.: Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler. J. Hydraulic Engineering, 128(5):473-483, 2002.
 - 24) 例えば萬矢敦啓・岡田将治・菅野裕也・深見和彦・大平一典：実河川における掃流砂量の計測手法に関する一提案, 水工学論文集, 第55巻, pp1171-1176, 2011.
 - 25) RD instruments; WinRiver User Guide (www.adcp.com)
 - 26) 高良裕二・小川浩治・鈴木弘也・中村幹男・柏柳太郎：GPSコンパス, 日本無線技報No.47 ,pp40-43, 2005.
 - 27) David Gaeuman and Robert B. Jacobson, Aquatic Habitat Mapping with an Acoustic Doppler Current Profiler: Considerations for Data Quality, U.S.G.S. open-file report 2005-1163.
 - 28) ADCPを用いた高水観測マニュアル(案)のダウンロードサイト(予定)：http://www.icharm.pwri.go.jp/research/flow-measurements-Jap/index_j.html
 - 29) 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, pp1087-1092, 2010.

(2011. 7. 31受付)

ADCP取得データの“確からしさ”の検討

STUDY ON THE “CERTAINTY” OF THE DATA MEASURED BY ADCP

本永良樹¹
Yoshiki MOTONAGA

¹正会員 工修 (株) 水文環境 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町10-6 FTビル2F) .

In principle, the data measured by ADCP is derived under the assumption that each two velocity values at two different points gauged by different ultrasonic-wave beams from ADCP are equal. But this assumption is difficult to come into existence in the real flow. This study shows that ADCP actually uses the formula derived from this assumption to calculate the flow velocity without any revision, and that there can be an error of about 3% between actual velocity and velocity measured by ADCP in the flow with wake of pier. From this result, some doubt is showed about the “certainty” of ADCP data.

Key Words : *Discharge measurement, ADCP, Certainty of the data, wake of pier*

1. はじめに

我が国の河川流量の観測は、洪水時には浮子法が、平水時にはプライス式流速計や電磁流速計などの可搬式流速計を用いた方法が主流である。

これらの方法による継続的に実施される流量観測は昭和初期から始められており、長年に渡り膨大な量の流量データが蓄積されてきた。

しかしながらこれらの方法については問題点も言われてきた。例えば浮子法は、河川を横断方向にいくつかの区間に分割し、各区間に投下した浮子がある距離を流下する時間を計ることで当該区間の断面平均流速を求め、それを区間断面積に乗じて断面通過流量を求める方法である。各区間の断面流量を合計することで河川の断面通過流量を求めるが、投下した浮子が真っ直ぐに流下しないことがある、あるいは区間の分割が実際の横断流速分布に適した分割になっているのか、などの問題点が言われてきた。

そのため、浮子法等の従来の方法により流量観測が継続して行われる一方で、流量観測の高精度化、効率化の努力も続けられ、様々な流量観測技術が開発されてきた。これらは“新技術”と呼ばれるものであり、超音波流速計、電波流速計、PIV等の画像解析法、あるいは超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) などが開発されてきた。これらの技術には従来の浮子法や可搬式流速計による観測にはない利点がある。ADCP以外の技術の利点については、例えば電波流速計、画像解析法であれば非接触で

流量を測定できるため出水時の流量観測が安全である。超音波流速計、電波流速計は無人で連続した観測が実施できる。一方で問題点として、超音波流速計は河川兩岸に斜めに対峙して設置された一対の超音波送受波器を結ぶ測線上の平均流速しか測定できない、電波流速計、画像解析法は河川水面の流速しか測定できない、などが言われてきた。それに対しADCPは河道断面内の一部分のみでなく、断面内全域の3次元的な流速分布と水深を同時に測定することができるという特徴がある。ADCPは船艇に取り付け横断方向に移動させて流速分布観測を行うので無人での連続観測は出来ないが、断面内の流速分布が測れるのは他の技術には見られない優れた利点である。

このような優れた特徴を有する新技術については積極的な現場への試験的な導入を通じて技術の評価・改良が重ねられることが求められるものであり、実際にアカデミックの世界においてはこれらの新技術を利用した流量観測の効率化、高精度化の研究が盛んである。

しかしながら建設コンサルタントとして著者が見る限り、実際の河川管理の現場において、これらの新技術が浸透しているとは思えない。超音波流速計については、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所管内において霞ヶ浦、北浦および利根川を結ぶ水路網内に3台の超音波流速計を設置し、常陸川水門の開閉に伴う同水路網内の水の流れをモニタリングしているなど実用されている例も見られるが、多くの超音波流速計は稼働してはいるが、そのデータは利用されていないものが多いように見える。

電波流速計も設置されている地点はあるものの、データが利用されていないことも多く、著者の見てきた限り、中には既に動いていないものもあった。

ADCPは元々海洋分野で広く利用されていた機器であったが、河川分野で利用できるようになってから既に10年以上経過している。しかしながら他の流量観測との比較データ取得のために用いられる等、一部で試験的に用いられているのみで、実際の河川計画、河川管理のために継続的に行う流量観測業務の中で一般的に使用されるには至っていない。

このように現場での普及が進んでいるようには見えない新技術であるが、その理由の一つとして、その観測原理が理解しづらいということがあると思われる。浮子や可搬式流速計を用いて流量を測定する方法は、その観測原理が直感的に理解しやすい。しかしながら新技術で使用されている超音波、電波は目に見えるものではなく、それらがどのように流速、流量に結びついているのかわかりづらく、そのため新技術によるデータの“確からしさ”について現場にて確信が持たれていないものと考えられる。

観測されたデータに対して最終的な責任を負う立場の河川管理者としては、どのように流速が測られているのか、もっと言えば原理的に本当に正しい流速が測られていると言えるのかわからない機器を使用するには躊躇があるものと思われる。著者は建設コンサルタントとして、例えば河川感潮域におけるADCPを用いた流量観測や水理調査などの提案をいくつかの河川事務所で行ったことがあるが、著者のプレゼンテーションの未熟さも原因の一つであろうが、積極的に考えてくれる河川管理者にお会いしたことはあまり多くなく、ある事務所では「ADCPのようなわけのわからない機械を当事務所管内で使用する気は全くない」とまで言われたことがある。

しかしながら先述した通り“新技術”には従来の浮子法や可搬式流速計による方法にはない優れた利点があり、流量観測の高精度化、効率化に大きく寄与する可能性が高い。そこでこれらの実際の現場でのこれらの“新技術”の普及が進むように、それぞれの技術がどのように流速（流量）を測っているのかを明確にしていくとともに、測定原理について疑問がある場合にはそれらを一つ一つ解決していくことで、それらによるデータの“確からしさ”を示していくことが重要であると考えられる。

本論文の著者は新技術の中でも断面内の流速分布が測定できるADCPは今後の流量観測の精度向上、効率化を図る上で特に有益であると考えられる。よってADCPについて、これにより流速が測定される原理を説明するとともに、その原理に基づけば正しいと思われる流速が実際に測れているのかについて調べ、ADCPにより得られたデータの“確からしさ”について検証するものである。

2. ADCPの流速測定原理と疑問点

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) とは観測機器の一般名ではなく、米国のTeledyne RDI社が開発した超音波ドップラー流速分布計の商品名である。

ADCPには4つのトランスデューサー（超音波の送受波器）が配置されている。トランスデューサー面の向きは鉛直軸に対してそれぞれ20°の角度を持つ。河川の分野では小型無人船艇にADCPを取り付けて、トランスデューサー面を下に向けて水面に浮かべ、任意の横断断線を移動させながら連続的に流向・流速を計測する方法が一般的に採用されている。

それぞれのトランスデューサーから水中に向けて発射された超音波ビームは、水中のプランクトンや浮遊砂などの散乱体に当たって反射される。このとき散乱体が移動していれば、ドップラー効果によって反射波の周波数が変化する。この周波数の変化量を解析することによって、まずそれぞれの超音波ビーム軸向きの流速が求まる。この超音波ビーム軸向きの流速から水平方向、鉛直方向の流速を求めている。

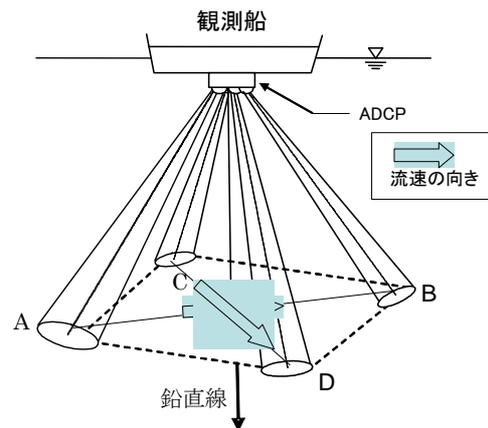


図-1 ADCPの概念図

対角線上に向かい合う一対の超音波ビーム軸向きの流速から、当該の対角線に沿う流速が求められる。

図-1に示すように、4つのトランスデューサーから発射される超音波ビームにより図中のA,B,C,D各点における超音波ビーム軸向きの流速が最初に求められ、次にA,B点における超音波ビーム軸向きの流速からA→B向きの流速、C,D点における超音波ビーム軸向きの流速からC→D向きの流速が求められている。ここで超音波ビーム軸向きの流速から水平方向、鉛直方向の流速が求まる原理について、例としてA→B向きの流速を用いて説明する。

図-2に示すように一対のトランスデューサーを考えた場合、図中のA,Bにおける超音波ビーム方向流速 V_A 、 V_B について、それぞれ超音波が反射されている錯乱体の速

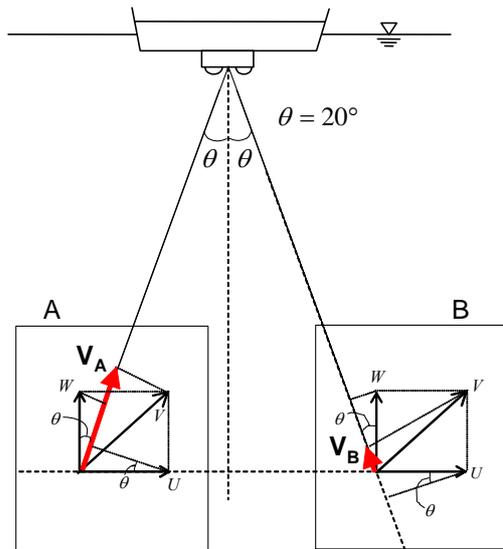


図-2 ADCPの流速原理に関する概念図

〔 図中、A、Bにおける流速 V が等しいという仮定に基づいて U, W が算出される。 〕

度 V が等しいとすれば、 V_A, V_B を用いて錯乱体の流下方向の移動速度 U と鉛直方向の移動速度 W は次式で表される。

$$U = \frac{V_A - V_B}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$W = \frac{V_A + V_B}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

このとき水中の散乱体が水流と同じ速度で動いていれば、 U と W は水流速度となる。

この2式は以下のように導かれる。

図中A,Bについて、それぞれ超音波ビーム方向の流速について考えると以下の2式が成立する。

$$A : V_A = W \cos 20^\circ + U \sin 20^\circ \quad (3)$$

$$B : V_B = W \cos 20^\circ - U \sin 20^\circ \quad (4)$$

この2式を連立させると(1),(2)が求まる。

ここで疑問になるのは以下の2点である。

疑問1

先述の通り、ADCPは米国Teledyne RDI社の商品であり、理論的には(1), (2)式から流速を求めているはずであるが、実際にはどのように流速を求めているかはブラックボックスである。

疑問2

(1), (2)式は、「異なる2本の超音波ビームが測定しているそれぞれの地点の流速ベクトルが一樣である」という仮定の下に成り立つが、二瓶ら¹⁾、木下²⁾、萬矢ら³⁾が指摘しているように、この仮定が実際に成立しているのか、ということである。例えば水面から3m潜った

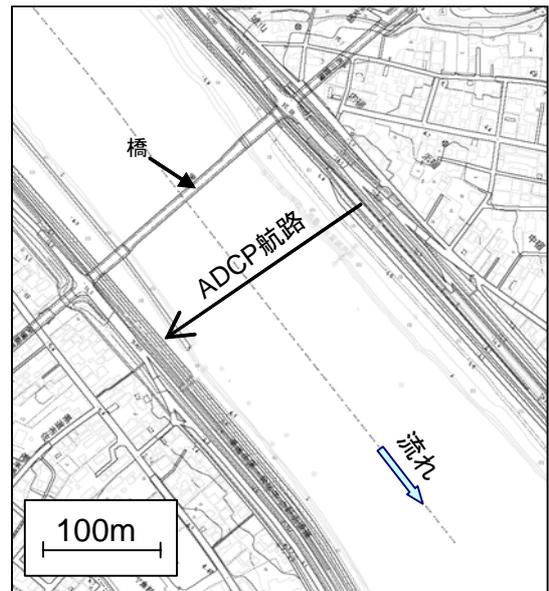


図-3 ADCPによる観測現場周辺図

深さにおいては、二つの超音波ビームが測定している地点間の距離は $2 \times 3 \times \tan 20^\circ = 2.18\text{m}$ であり、自然の河道流れにおいてこれだけ離れている地点の流速ベクトルが等しいとは考えにくい。

その他にもADCPに関する疑問点は存在するが、先述した通り、これらの疑問を一つずつ検討していくことがADCPという新技術への理解につながり、流量観測におけるADCPの一般的な利用につながると著者は考えている。上述した2つの疑問点について、以下で検討する。

3. 疑問1について

ADCPによる流速を測定する原理として(1), (2)式を導いた。しかしながらADCPは米国Teledyne RDI社の商品であり、(1), (2)式が実際に使用されているかはブラックボックスである。

3-1. 疑問1についての検討内容

「異なる2本の超音波ビームが測定しているそれぞれの地点の流速ベクトルが一樣である」という仮定の下に導いた(1),(2)式が実際にADCP内の流速計算に使用されているかを確認する。

実際に河川でADCPによる流速分布測定を行う。観測項目として断面内における流下方向流速分布、横断方向流速分布、および各超音波ビーム方向の流速分布を測定する。各超音波ビーム方向流速の測定結果を用いて、(1),(2)式から各アンサンブルごとに流下方向流速、横断方向流速を算出する。以降、この値を算出流速と呼ぶ。ADCPにより測定された各アンサンブルの流下方向流速、

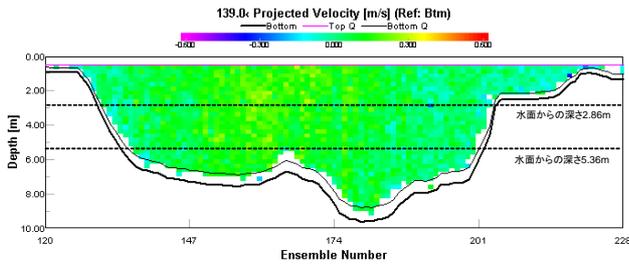


図-4 ADCPによる流下方向流速分布図

横断方向流速を、それぞれ算出流速と比較する。

ADCPにより出力される流速データは南北方向流速、東西方向流速である。ADCPデータの解析用ソフトであるWin Riverを用いて、河川の流下方向流速、横断方向流速に成分分解する。

ADCP観測は某河川の某地点にて実施した。観測地点周辺地図と観測断面位置を図-3に示す。このときADCPは各トランスデューサーから発射される超音波ビーム軸向きの流速もデータが取れるように設定した。

観測にはラジコンボートにADCPおよび音響測深器、VRS-RTK-GPS、データ送受信器を取り付け、遠隔操作でラジコンボートの船首の向きがなるべく流下方向に垂直になるようにして同地点を横断させた。

3-2. 疑問1についての検討結果

ラジコンボートによるADCP横断観測を実施したところ、図-4のような断面内の流速分布結果が得られた。(図には流下方向流速分布のみを掲載。)

図中に示した水面からの深さ2.86mと5.36mの位置におけるアンサンブル内の算出流速とADCPにより実際に得られた流速との比較を行った。その結果を図-5、図-6に示す。

流速を算出する際に、対になる二つの異なる超音波ビームにより測定されている2点間の距離は、深さ2.86mでは2.08m、深さ5.38mでは3.92mである。図-5、図-6からはいずれの深さにおけるデータに関しても、流下方向流速、横断方向流速ともに、ADCP流速値と算出流速値がほぼ全てのアンサンブルにおいて概ね等しい値を示していることが分かる。このことから、Teledyne RDI社製の商品であるADCP内部では流速を算出する際、(1)、(2)式を使用しており、異なる超音波ビームで測定している地点間の距離に関して補正等はしていないことがわかった。

図-5、図-6においては、各アンサンブルにおいて、ADCP流速と算出流速の流速値、隣り合うアンサンブル間での流速の変動(減っているか、増しているか)、変動幅の程度などが、流下方向流速、横断方向流速問わずにほぼ等しいと判断したが、厳密に見ると、ADCP流速と算出流速とわずかに差が生じている。これはADCP流速では流速の南北成分、東西成分がデータとして出力されるが、これをADCPデータの解析用ソフトWin Riverを

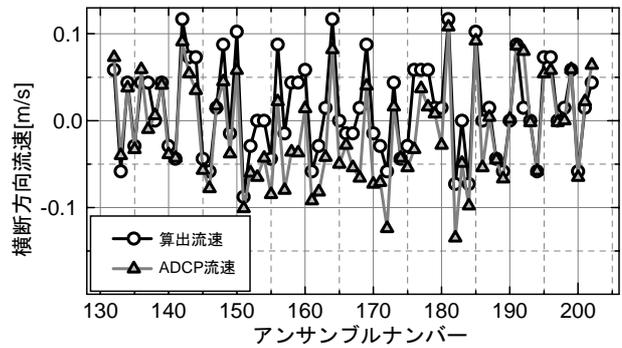
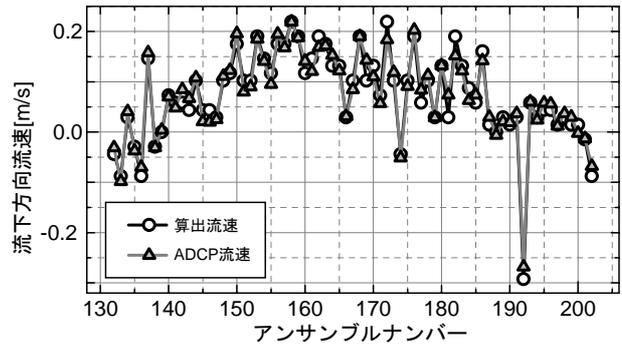


図-5 算出流速とADCP流速の比較(深さ2.86m)

超音波ビームにより測定されている2地点間の距離は2.08mである。

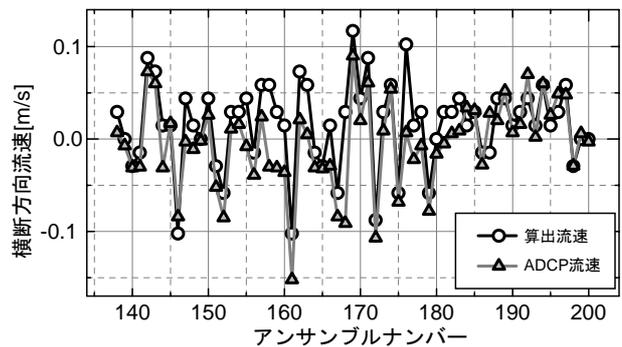
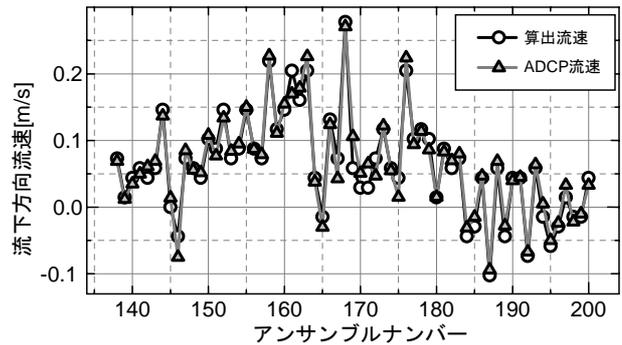


図-6 算出流速とADCP流速の比較(深さ5.38m)

超音波ビームにより測定されている2地点間の距離は3.92mである。

用いて河川の流下方向成分、横断方向成分に分解したため、南北軸と流下方向軸の成す角度の読み値のズレ等に起因して差が生じていると思われる。

4. 疑問2についての検討

河川においてADCPによる横断観測を実施した場合、ある位置における流下方向流速データは、その位置から流下方向に同距離の前後2地点における超音波ビーム方向流速を用いて算出された値である。このとき、この前後2地点における流速ベクトルが等しいという仮定の下にADCP内部では流速の計算がなされている。

この仮定が成立しない流れ場でADCPにより横断面内流速分布を測定した場合、実際の流れ場の状況を測定できているのが疑問である。

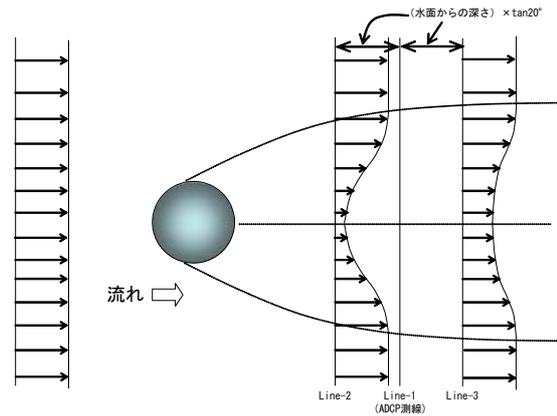


図-7 橋脚後流の概念図

(後流内部では流速分布が縦断方向に変化する。)

4-1. 疑問2についての検討内容

ここでは、縦断方向に流速ベクトルが変化する流れ場においてADCPを用いた横断面内流速分布を測定したとき、実際の流れ場とどの程度の誤差が生じるのかを検討する。この場合には、対象とする流れ場において空間的な流速分布が既知である必要があるが、これは現実には難しい。

そこで縦断方向に流下方向流速の横断分布が変化するある流れ場を設定して、その中でADCPによる横断観測を実施した場合、その結果と設定した流速分布との間にどの程度の差が生じるかを計算して検討する。実際の流れは鉛直方向に対数的な流速分布形状を有するが、ここでは検討を簡略化するために不等流であるし、鉛直方向には流速は一様分布であるとする。

縦断方向に流下方向流速の横断分布が変化する流れ場として多くの例が考えられる。一般的な河川における洪水流においても大規模水平渦やボイル等の2次元流れ、3次元流れの発生により、縦断方向に複雑に流速が変動しているのが普通であろう。これらの全ての場合について、ADCPを用いた断面内流速分布を測定した場合、実際の流れとの間に誤差が生じるのか、またどの程度の誤差が生じるのかを一般論として導くことは難しい。

本論文では流速の横断分布が縦断方向に向かって変化する流れ場の一例として橋脚後流を考える。図-7にその概念図を示す。図中に示したLine-1上をADCPが通過した場合、このライン上における流速は図中のLine-2、Line-3上における流速ベクトルから算出されることになる。Line-1とLine-2、Line-3間の距離は(水面からの深さ)×tan20°となる。橋脚後流内部において、Line-2上とLine-3上の流速分布は異なっており、ADCPでの流速測定において、「異なる2本の超音波ビームで測定しているそれぞれの地点での流速ベクトルが等しい」という仮定は明らかに成立していない。このとき(1),(2)式で示したADCPの流速算出方法で求まる流速分布と、実際に設定した流速分布がどの程度異なるかを調べる。

橋脚後流の流れ場として、無限大の幅を持つ矩形断面

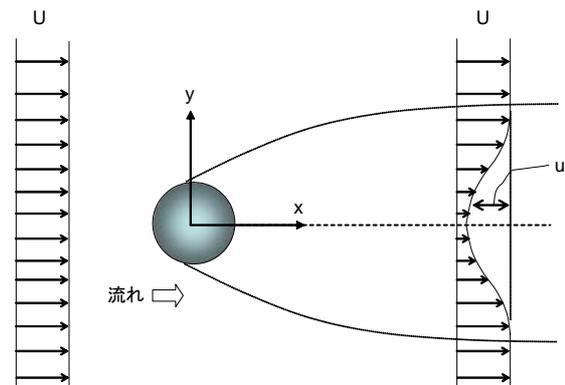


図-8 橋脚後流 座標の説明

水路の中心軸上に直径2mの円柱型の橋脚が立っている流れ場を考える。橋脚の上流側に一様流速を与える。水深は上流側の一様流速にかかわらず5mであるとした。

橋脚から5m流下した地点の横断面内流速分布を(1),(2)式から算出し、その結果を実際に想定した横断面内流速分布と比較する。

橋脚後流内の流速分布については、図-8に示すような座標軸において、池田⁴⁾による理論式から以下のように設定する。

$$\frac{u}{U} = \frac{C_D}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Ud}{\varepsilon_0}} \left(\frac{x}{d}\right)^{-1/2} \exp\left(-\frac{\eta^2}{4}\right) \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{U}{\varepsilon_0 x}} y \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 = 0.022 C_D \cdot d \cdot U \quad (7)$$

ここにx,y: 橋脚中心を原点とした時の流下方向軸, 横断方向軸, u: 後流内の欠損流速, U: 後流外側の一様流速, C_D: 抗力係数, d: 橋脚幅, ε₀: 渦動粘性係数, である。本検討では洪水流を想定してU = 2.0m/s以上の流速を考えるので、レイノルズ数はRe ≥ 10⁶のオーダーとなり、よって抗力係数C_D=0.4とする。

なお、橋脚後流外側の一様流速Uについて、1.0 m/s ~ 5.0 m/sの範囲で変化させて流速分布を設定している。

4-2. 疑問2についての検討結果

式(5)~(7)により表現される橋脚後流を有する流れ場においては鉛直方向流速は設定されていない。またこの後流内部においては、ADCPで測定する場合における二つの異なる超音波ビームで測定される2地点の流速が一様ではない。

よってこのような流れ場においては、(3)、(4)式は

$$A : V_A = U_A \sin 20^\circ \quad (3)'$$

$$B : V_B = -U_B \sin 20^\circ \quad (4)'$$

となり、ADCPで測定した場合、(3)', (4)'式の結果が(1)、(2)式に代入されて流速U, W が求まる。

設定した流れ場において、橋脚から5m流下した位置の横断面での各深さにおける流下方向流速分布について、最初に設定した流速分布（以降、設定流速と呼ぶ。）と(3)', (4)'式で算出した流速（以降、算出流速と呼ぶ。）の比較を行った。深い位置ほど異なる2本の超音波ビームで測定している地点間距離が長くなっている。

図-9 にU=3.0m/s の場合における橋脚から5m流下した位置の横断面での各深さにおける設定流速と算出流速の比較を示す。

深くなるほど橋脚後流内部において設定流速と算出流速に差が生じている。特に中心軸上（**図-5** におけるy=0軸上）において流速差が大きい。

図-10 には設定流速と算出流速の差が最も大きくなる中心軸上（y=0）について、U= 1.0 ~ 5.0 m/s に変化させた時の、設定流速と算出流速の誤差率の深さ方向への変化を示す。誤差率は次式で定義する。

$$\text{誤差率}[\%] = \frac{\text{設定流速} - \text{算出流速}}{\text{設定流速}} \times 100 \quad (8)$$

深い位置ほど誤差率が大きくなり、水深4.81m（異なる2本の超音波ビームで測定している地点間距離3.5m）においては誤差率は3% になる。U = 1.0 ~ 5.0 m/s の範囲で変化させたが、各深さにおける誤差率に変化は生じなかった。

深いほど誤差率が大きくなるのは、ADCPで測定するとした場合、2本の異なる超音波ビームが測定している地点間の距離が深い位置ほど長くなり、それにより2点における流速の差が大きくなるため、「異なる超音波ビームで測定している2地点の流速ベクトルが等しい」という仮定が成立しなくなるからである。縦断方向に流速が変化しない橋脚後流外側の領域においては、深さによらず誤差率は0[%]であった。

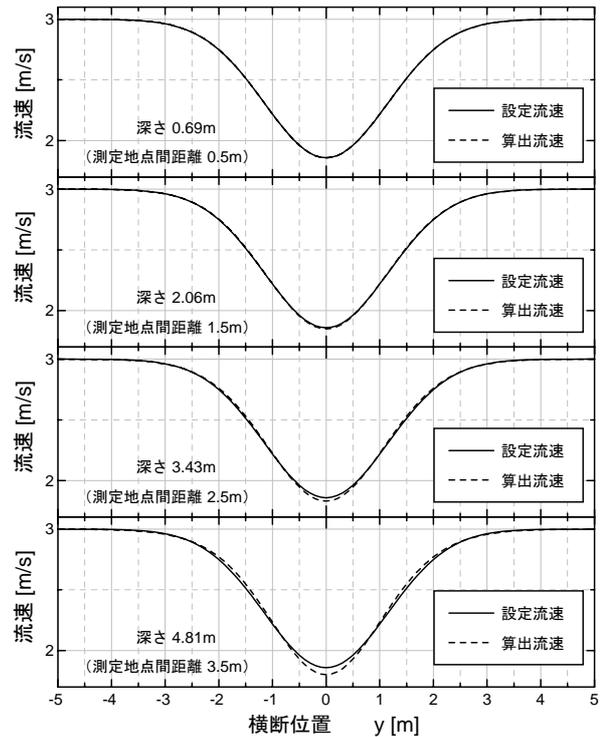


図-9 各深さにおける設定流速と算出流速の比較
(U = 3.0m/sの場合)

（深いほど設定流速と算出流速の差は大きく、中心軸（y=0）上では差が明確である。）

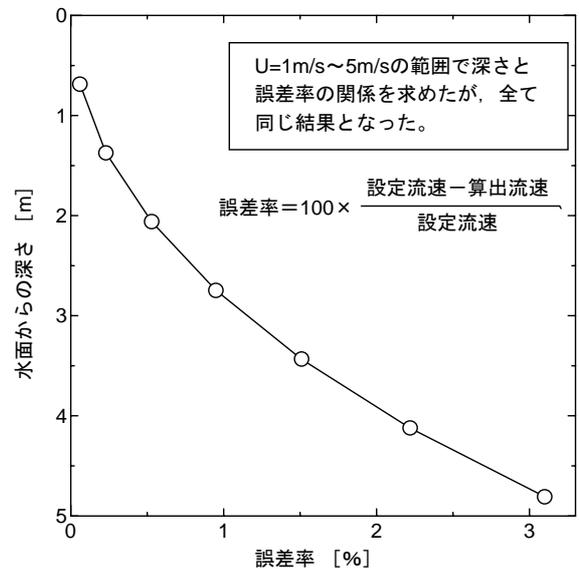


図-10 各深さにおける設定流速と算出流速の誤差率
(橋脚後流を有する流れ)

（中心軸（y=0）上の流速で考えている。深いほど誤差率は大きくなる。）

5. まとめ

本論文により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ADCPにより求められる流速は一对の超音波ビーム軸向きの流速をドップラー効果により測定し、その値を基に算出されている。その算出式として、ADCPの原理上導かれる算出式が実際に使用されており、深い位置で異なる2本の超音波ビームで測定している地点間の距離が長くなっても補正等は加えられていない。
- 2) 流速の横断分布が流下方向に変化する流れ場において、ADCPにより流速の横断分布を測定した場合、設定した流れ場の実際の流速とは異なる値を示す。またその誤差は深い位置ほど大きくなる。

本論文で設定した流れ場は橋脚後流を有する流れであり、流速の横断分布が縦断方向に向かって変化する領域が狭い範囲の流れであった。流速の横断分布が縦断方向に変化する流れ場の一例でしかない。先述した通り、現実の洪水時の河川流れは大規模水平渦やボイルなどの2次元、3次元構造を有することが普通であり、その流速は縦断方向により複雑に変化しているものと考えられる。その場合は本論文で導いた値よりも誤差率は相当に大きくなるであろう。

本論文の結果から言えることは、ADCPにより流速分布を測定したとき、実際の流速分布との間に誤差が生じる場合がある、ということである。この結果から、ADCPにより得られた流速の“確からしさ”について、今後もさらに検討を進めることが必要であると思われる。

参考文献

- 1) 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之: 超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, 土木学会論文集B, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008
- 2) 木下武雄: 流量観測の過去と未来, 河川流量観測の新時代, pp.13-18, 2010
- 3) 萬矢敦啓, 菅野裕也, 深見和彦: 河川実務者から見たADCPによる流量観測技術開発の論点, 河川流量観測の新時代, pp.46-55, 2010
- 4) 池田駿介: 詳述水理学, 技報堂出版, pp.240-244, 1999.

(2011. 7. 31受付)

ADCPの超音波反射強度を利用した 濁度計測技術について

TECHNOLOGY FOR TURBIDITY MEASUREMENT USING ACOUSTIC BACKSCATTER.

橘田隆史¹・横山洋²・橋場雅弘³・新井励⁴

Takashi KITSUDA, Hiroshi YOKOYAMA, Masahiro HASHIBA and Rei ARAI

¹非会員 農学修士 (株)ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18ハイドロ第一ビル)

²非会員 工学修士 (独)土木研究所寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³非会員 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目2-5)

⁴非会員 工学博士 大阪府立大学大学院 (〒599-8531 堺市中区学園町1丁目-1)

In this study, we report on the technique for the measurement of the Acoustic Backscatter Turbidity (ABT) with ADCP. We first describe the theory and mathematical model of sound propagation underwater in detail. Subsequently, we introduce a generic application with GUI to calibrate each parameter on this technique easily for everyone. Finally, applying this technique to the ADCP measurements in Dam and Ishikari River, we verify that this technique can accurately extract turbidity data from echo intensities measured by ADCP. Since the results of ABT calculation are in good agreement with field observations of turbidity meter, we confirmed this ABT technique is effective and robust for turbidity in depth profile. This technique is not only extremely useful and also superior to an optical instrument alone, because it enables an understanding of the vertical distribution of turbidity by a non-contact instrument.

Key Words : ADCP, ABT, 濁度計測, VisualADCPtools,

1. はじめに

本報では、ADCPの超音波反射強度を応用した濁度計測手法について、簡便にキャリブレーション係数を決定して濁度の算出ができるアプリケーションを開発したので、現地検証を行った結果と合わせて報告する。ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler : Teledyne RD Instrument社製)は超音波のドップラー効果を応用した流速計で、最大の特長は、①鉛直 (もしくは水平) 多層の流向流速プロファイルが計測できること、②航走断面の流速空間分布を計測できること、であろう。ADCPは海洋や沿岸域、河川・陸水域において、流況を計測するツールとして広く普及している。特に近年では、橋上操作艇を利用して河川の断面流量を観測する方法¹⁾が普及しつつあり、これまで実績の少なかった洪水観測においても活用され始めて来た。ここで、ADCPによる洪水流量観測に加えて、断面の濁度分布やSSのフラックスが同時に計測することが可能となれば、洪水時の土砂動態を把握する上で強力な観測手法となりうる。また、既に河川に長期設置されているADCPを利用して濁度を算出することができれば、新たな機器投資を行うことなく土砂モニタリングデータを取得することが可能となり、費用対効果は高い。

一方、ADCPの超音波反射強度から濁度を高精度に算出する方法については国内外でも多くの論文で報告されて

おり、その有効性は既に評価されている。しかし、現状では一部の研究者が自作の解析プログラムを用いて検証している段階であり、一般に活用できる状況には至っていない。そこで、ADCPユーザーが容易に濁度への変換を行うことの出来るアプリケーションを開発し、現地実証を行った。このアプリケーションは、VisualADCPtoolsというADCPデータ解析・ビューワーソフトのオプション機能として提供される。本報では、当該アプリケーションを導入するに際しての基本的な技術情報を整理するとともに、現地実証結果について報告するものである。

2. 超音波後方散乱濁度 (ABT) の概要

(1) 超音波後方散乱濁度 (ABT) の定義

一般的に現場での濁度計測手法としては、光の減衰量を計測する透過方式と、後方散乱強度を検出して濁度に変換する方式が存在するが、現在では後者が機種の多さや市場での普及率は圧倒的に多いため、本報では光学式濁度計としては後者について言及するものとする。

光学式濁度計はOptical Backscatter Sensor(OBS)と呼ばれることが多く、その計測値はOBSdataもしくは、Optical Backscatter Turbidity(OBT)と呼ばれている。一方、超音波で計測する濁度を、Acoustic Turbidity(AT)と表記するケースが散見されるが、光学式後方散乱方式で計測した濁度をOBTと表記するのであれば、超音波後方散乱

方式で計測した濁度は、Acoustic Backscatter Turbidity (ABT)と表現した方が対比しやすい。このため、本報では超音波後方散乱方式で計測した濁度をABTと表現する。なお、海外ではAcoustic Turbidity Profilerと呼ばれる超音波で濁度のプロファイルを計測する専用の機器も販売されているが、本報では計測機器としてはあくまでもADCPを利用することを前提としている。

ADCPで濁度を計測するメリットとしては、流況観測を行う際に、特別な機器を追加することなく濁度プロファイルの計測が出来ることである。また、ADCPと同様に鉛直（もしくは水平）のプロファイル計測や航走断面の濁度空間分布が計測できるため、シングルポイント式では取得することが困難であった多量の情報を得ることが可能となる。また、流速と同時に濁度が計測できるため、土砂フラックスの計測が可能となること、および過去に取得された膨大なADCP観測データを使って、濁度値を推定することが可能となればメリットは大きい。

(2) ADCPによる濁度計測の歴史

TRDI社は、Principles of Operation A Practical Primer (1996年)²⁾の中で、反射強度が水中懸濁物濃度と相関があることを示唆している。また、濁度絶対値への変換に際しては、水塊吸収、音響拡散、トランスミットパワー、散乱係数などを考慮することが必要であると述べている。これが、ADCPで濁度が計測出来るとされた最初の根拠であろう。現在では、TRDIが提供するWinRiverやWinADCPなどの標準ソフトに、散乱強度を算出する機能が実装されているが、これはあくまでも相対変化を見るに留まるものであり、また濁度値への変換はサポートされておらず、実用的ではない。P.D.Thorne³⁾らは1993年に超音波の反射強度から浮遊物質濃度を算出する基本式を発表しており、TRDI社のKent.Deines⁴⁾は、ADCPのトランスミット特性から後方散乱強度を算定する際の、機器特性に関する詳細な技術レポートをTRDIホームページ上で公表している。

海外では、英国DRL社および米国AquaVision社などがADCPデータを使った濁度算出ソフトを商用開発し、販売している。しかし、価格が高額なうえに操作が非常に煩雑で、使い易いものではない。国内では、稲垣⁵⁾、川西⁶⁾、横山⁷⁾、橋田⁸⁾、新井⁹⁾らが独自にアルゴリズムを試作し、その有効性を実証しているが、いずれも専用のプログラミング計算に依るものであり、広く一般に利用できるアプリケーションの普及が望まれていた。

(3) 汎用解析ソフトの開発

こうした背景をうけて、(株)ハイドロシステム開発ではVisualADCtoolsというADCPのデータ処理ソフトのオプション機能として、ABT計算機能を開発した。これは、新井らによって改良されたアルゴリズムを用いており、実測濁度とのキャリブレーションやデータ出力を簡便に行うことのできるユーティリティである。

ユーザーは、現地で濁度データを取得し、このソフト

でキャリブレーション係数を簡便に求めることが出来る。実測濁度とのキャリブレーションは、鉛直プロファイルと時系列データの双方に対応しており、これらを併用することで実測濁度との整合性を高めることが出来る。

2. ABTキャリブレーションソフトの概要

(1) ABTの算出方法

超音波が水中の懸濁物質に当たって反射する際に、懸濁物質濃度によって後方散乱 (Backscatter) が発生するが、これは、超音波が水中を通過する際に生じる水塊による発散損失と吸収損失、懸濁物質による吸収、超音波の拡散・距離減衰などの影響を、往復の伝播経路で受ける。また、濁質による発散損失は超音波伝播経路上の積分値として影響を受ける。ADCPはこれらの影響を受けた結果として反射強度 (Echo Intensity) が得られるが、この反射強度(count)は単純に信号強度を表した値であり、距離方向に大きく減衰する値となっている。Hay¹⁰⁾やThorneらはパルス長 τ の音波が水中に発射された際の、浮遊懸濁物質により散乱される強度と浮遊懸濁物質濃度Mとの関係式を解析的に求め、詳細な実験データの取得により実験式を確立した。これがいわゆるソナーの式と呼ばれる基本式であり、本報でもこれを用いている。また、ADCPではプロファイル計測が可能であるが、ある場所Pの散乱強度がADCPで反射強度として検出される際には、ADCPから場所Pまでの懸濁物質の総量の影響を往復経路で受けて減衰する。このため、ADCPの第一観測層から最初に濃度を算出し、それを用いて次の観測層の値を求める必要があるため、漸化式を用いている点が特長である。

(2) ABT計算アルゴリズム

ABTの計算アルゴリズムを以下に示す。

① 散乱強度 (EI) の伝搬損失

散乱強度EIはソナー方程式から、式(1)で表わされる。

$$EI = SL + SV + Const - 20 \log(R) - 2\alpha_w R \quad (1)$$

EI= 散乱強度 (dB), SL= 発射強度 (dB), SV= 粒子の後方散乱, α_w =水の吸収係数 (dB/m), R=トランスデューサーからの距離 (m)

② 懸濁態濃度 (M(r)) の算出

懸濁態濃度は、音響強度と懸濁態濃度の関係について、伝搬損失を考慮した式(2)で算出できる。

ここでは懸濁物質の影響とADCPトランスデューサーの感度調整パラメータも含まれる。

$$M(r) = (K \langle P_{rms} \rangle)^2 \frac{\langle a_s \rangle \rho_s}{\langle f \rangle^2} e^{4r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (2)$$

M(r)= r (トランスデューサーからの距離) における濃度, K=トランスデューサーに関する定数, P_{rms} =後方

散乱強度, a_s =粒径, ρ_s =粒子密度, $\langle f \rangle$ =粒子の関数,
 α_w =水の吸収係数, α_s =粒子の吸収係数

(2)式の両辺の対数をとると

$$\begin{aligned} \log_{10} M(r) &= 2 \log_{10} (K < P_{rms} > r) + \log_{10} (a_s \rho_s) \\ &\quad - 2 \log_{10} f + 4r(\alpha_w + \alpha_s) \log_{10} e \\ &= 2 \log_{10} \left(\frac{ra_s P_{rms}}{f} \right) + 4r(\alpha_w + \alpha_s) \log_{10} e \\ &\quad + \log_{10} (K^2 \rho_s) \\ &= S \left\{ \log_e \left(\frac{ra_s P_{rms}}{f} \right) + 2r(\alpha_w + \alpha_s) \right\} + K_s \\ (\because S &= 2 \log_{10} e, K_s = 2 \log_{10} (K^2 \rho_s) = const) \\ &= S \{ dB + 2r(\alpha_w + \alpha_s) \} + K_s \\ (\because dB &= \log_e \left(\frac{ra_s P_{rms}}{f} \right)) \end{aligned} \quad (3)$$

S = 後方散乱係数, dB =拡散補正後の後方散乱強度,
 α_w =水の吸収係数, α_s =粒子の吸収係数, K_s =トランス
 スデューサー定数

③水の吸収係数 (α_w)

水塊による音波の減衰吸収のメカニズムは, 水の粘性
 と熱伝導による作用と媒質中の分子による緩和作用があり,
 前者は無視できるレベルであるが, 化学的な緩和作用は,
 塩水に含まれる少量の塩類により起こる吸収を考慮する
 必要がある. ここではShukin and Marsh¹¹⁾および
 Liebemann¹²⁾の式を用いた.

$$\alpha_w = \frac{f}{91500} \left[\frac{1.86Sf_T f}{(f_T^2 + f^2)} + \frac{2.86f}{f_T} \right] \quad (4)$$

α_w =水の吸収係数, f =周波数 (MHz), f_T =緩和周波数
 (MHz), S =塩分 (ppt)

$$f_T = 21.9 \times 10^6 \left(6 - \frac{1520}{273+T} \right) \quad (5)$$

T =水温 (°C)

④粒子による減衰係数 (SAC)

粒子による音波の減衰係数 (SAC) は, 本手法により求
 められる粒子濃度 M と粒子による拡散および吸収という
 3つの現象を考慮する必要がある. すなわち, 音波は単位
 粒子による拡散 α_1 と吸収 α_2 の粒子の総和で表現するこ
 とが出来るため, 式(6)のように示される.

$$SAC = M(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (6)$$

a) 粒子による拡散係数 (α_1)

河川中に懸濁態物質が存在すると超音波散乱が生じる.

ここでは, 発生する超音波散乱がレイリー散乱であるこ
 とが条件である. レイリー散乱の条件は式(7)より,
 ADCPの発信周波数 (1200kHz (1.2MHz) など), 水中の音
 速 (1500m/sなど), 水中懸濁物質の粒径から $\alpha \ll 1$ とな
 れば適用範囲内であることがわかる.

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} = \frac{\pi D f}{V_s} \quad (7)$$

λ = 波長, f =周波数 (MHz), V_s =音速 (m/s)

$\alpha \ll 1$ レイリー散乱

$\alpha \approx 1$ ミー散乱

$\alpha \gg 1$ 幾何光学近似

この条件を満たした単位粒子による減衰係数 α_1 は
 Sheng and Hay¹³⁾の式(8)で示される.

$$\alpha_1 = \frac{K_\alpha}{\rho_s} k^4 a_s^3 \quad (8)$$

ρ_s = 粒子密度 (g/m³), K_α = 0.18 粒子の圧縮性
 や密度に関する定数

b) 粒子による吸収係数 (α_2)

粒子による吸収はUrick¹⁴⁾の式で求められる.

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{M_r k (\sigma - 1)^2}{2\rho_s} \left[\frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right] \\ \sigma &= \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{(2\beta a_s)} \right] \\ s &= \frac{9}{4\beta a_s} \left[1 + \frac{1}{\beta a_s} \right] \quad \beta = \left[\frac{kV_s}{s\nu_w} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

ρ_s =粒子密度, ρ_w =水密度, V_s =音速,
 ν_w =水中における粒子の運動速度

⑤近場補正

Rayleigh 散乱領域と呼ばれる近距離音場における散
 乱強度は, 音源からの直接波と輪郭波の干渉効果により
 大きく変動し, 実際の受信強度は球面拡散を想定したも
 のより小さくなることが知られている. この影響は
 Downing¹⁵⁾らにより詳細に調べられており, 実験的に求
 められた式(11)を用いることで, 近距離音場における懸
 濁物質の散乱強度を補正することが可能となる. ここで
 d は円形ピストン音源の(仮想)直径を表す.

$$\varphi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad (10)$$

$$z = \frac{\gamma}{\gamma_n} \quad \gamma_n = \frac{\pi d^2}{\tau}$$

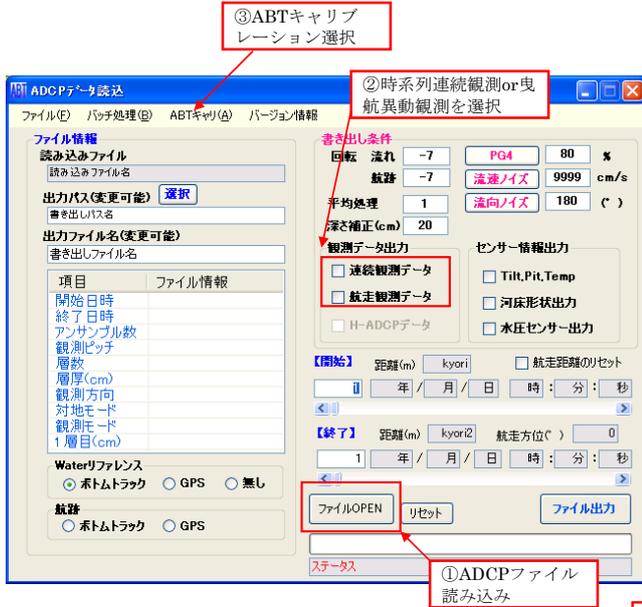


図-1 ADCPデータ読み込み画面

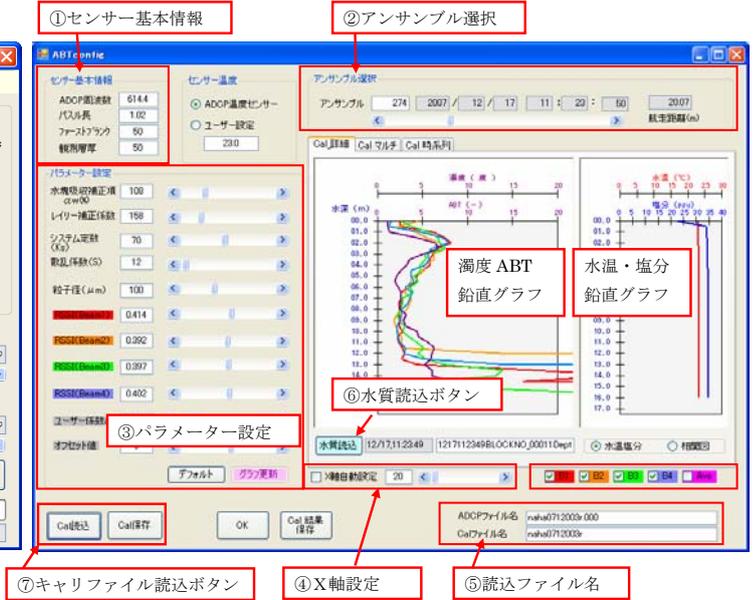


図-2 ABTキャリブレーション画面

(3) キャリブレーションデータの取得

ABTのキャリブレーションには水温、塩分、濁度の現地データが必要である。これらのデータは、鉛直プロフィールデータと定点での連続データにそれぞれ対応しており、両者を併用することで精度の高いキャリブレーションが可能となる。鉛直プロフィールデータの計測は、水温、塩分、濁度データを素早く計測出来る機種を使用すること効率的である。本研究では数タイプの多項目水質計で試験を行ったが、JFEアドバンテック社製のAAQシリーズがキャリブレーションデータの取得には最も適していた。この機種は、鉛直にセンサーを垂下させながら1秒ピッチでロギングさせ、かつ水深10cm毎のプロファイリングデータとして出力することができる。また、1秒1m程度の速度で降ろしながら計測させても非常に安定したデータを取得することができた。さらに、連続計測にも対応しており、1台でプロファイリング計測と連続計測の双方が可能であるため、効率的なデータ取得が可能である。

(4) アプリケーションの操作説明

操作方法は、最初に図-1に示す画面でADCPのバイナリーデータを読み込み、連続観測か航走観測かを選択する。図-2に示す画面では、キャリブレーション用の濁度・水温・塩分データを読み込むと、データの観測時間を自動認識し、最も近いADCP散乱強度データがグラフで示される。各種パラメータの設定は、スライダーを使用して、グラフ上の濁度データにABTをフィッティングさせる。この場合、パラメータ毎の感度を理論式などから把握しておく必要があるが、濁度ABT鉛直グラフを見ながら視覚的にキャリブレーションを行うことが可能である。図-3は3データ同時にキャリブレーションを行った画面で、図-4は濁度の連続データでキャリブレーションを行った画面である。

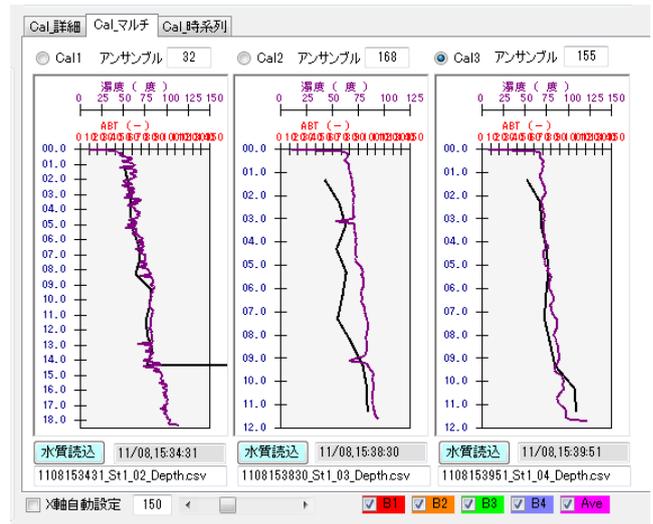


図-3 マルチキャリブレーション画面

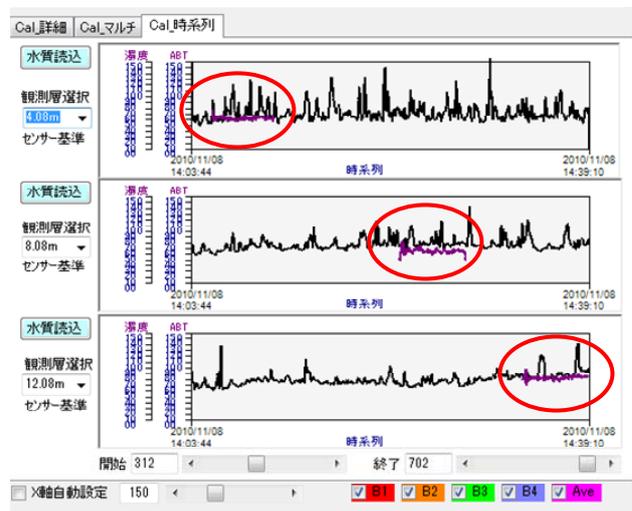


図-4 時系列キャリブレーション画面

3. 現地実証実験結果

(1) ダム貯水池

ダム貯水池内でABTの検証を行った結果を示す。ADCPはワークホース600kHzを用い、比較観測にはJFEアドバンテックのAAQシリーズを用いた。ADCPの設定は、層厚(Ws)1.0m, WPI0, WB1で計測を行った。

図-5は実測濁度と鉛直プロファイルと比較した図である。赤丸が実測濁度、グレーの線は濁度実測値の前後9アンサンブル分のABTをプットしたもので、青丸は9アンサンブル分のABTを平均したものである。アンサンブル単体ではABTのバラツキが大きい、変化の幅の中に濁度の実測値が概ね入っており、ABTの平均値と実測濁度は比較的良く合っていると見える。図-6は相関図を示したもので、傾きが概ね1に近い値となっており、濁度とABTがほぼ等価に算出されていることが分かる。図-7はABTの断面コンター図である。調査当日は降雨が見られ、貯水池の法面から濁水が流入し、水深15mあたりに滞留している様子が伺える。また、深部には高濁度水塊が存在しており、濁水長期化現象を裏付けている。なお、

コンター図の湖底付近に顕著に高い値がみられるが、これはビームの干渉によるものと思われるため、相関図からは棄却している。全体的なプロファイルは比較的良好に再現できているが、局所的な濁度変化はABTで表現しきれない状況が多かった。これは、ADCPのビームが比較的広い範囲の平均値を計測していることが原因と考えられる。また、ADCPの計測原理上、ボトム付近にはサイドローブとの干渉域が生じるが、ダム貯水池内のように水深変化が著しい場所においては、干渉域が拡大する傾向が見られる。この際、解析結果としては大きな値が出力されるが、ボトム付近のデータについては信頼性が低いと判断し、ノイズデータとして棄却する必要がある。

キャリブレーションの際、船上からはデータ転送装置(RemoADCP)を用いてリアルタイムに陸上へデータ転送を行い、陸上にてADCPのデータ取得とキャリブレーション操作を行うことが可能である。また、1度キャリブレーションを行えば、環境条件に大きな変動が無い限りは再度のキャリブレーションを行う必要は無く、ADCPの観測のみでABTを算出することが可能である。

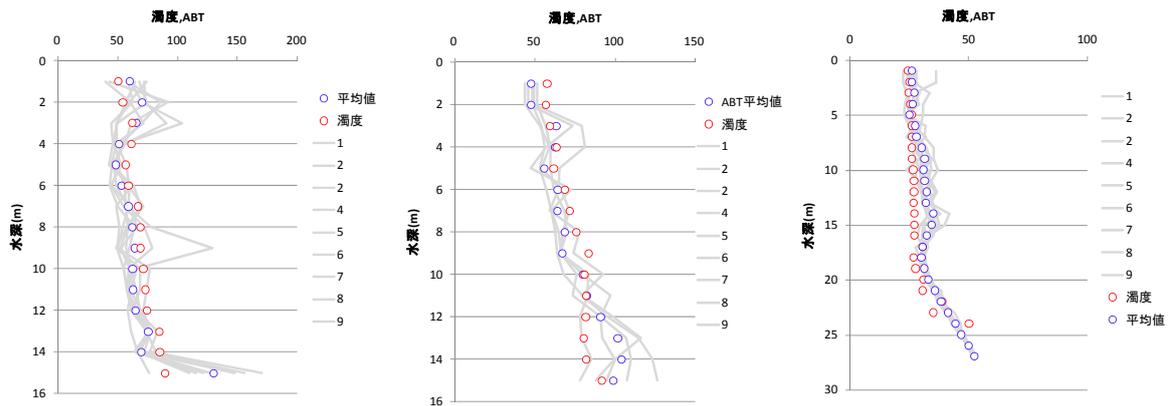


図-5 鉛直プロファイルの比較 (赤：実測値, 青：ABT_9データ平均)

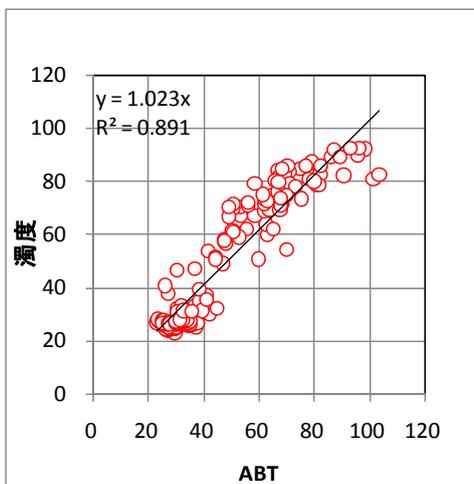


図-6 相関図

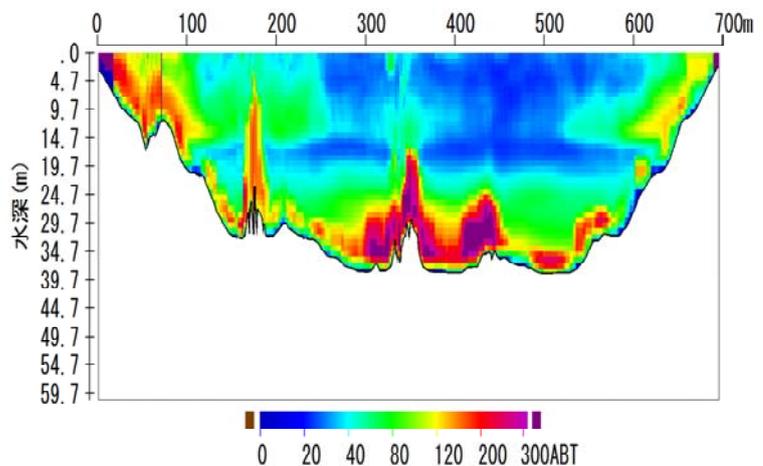


図-7 ABTの断面コンター図

(2) 石狩川での検証結果

2009年8月1日～8月31日の期間で石狩川石狩大橋観測所 (Kp26.5) に上向きに河床設置したADCPの散乱強度を用いて超音波濁度を算出した¹⁶⁾。当地点は期間内に塩水の遡上はなかったが、流況は常に潮汐影響を受ける感潮域である。

① 鉛直濁度の精度検証

実測値のある8月11日と8月31日の濁度鉛直分布を図-8で比較し、精度検証を行った。実測値の測定時刻(12時)前後の超音波濁度 (ABT) を併記している。いずれも濁度10度前後と小さいが、算出結果は良く再現できている。なお河床から1.0m程度はADCPの不感帯に該当し、計測不能領域である。

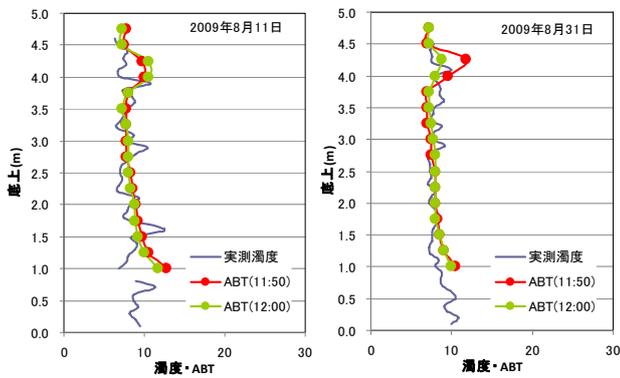


図-8 濁度鉛直分布精度検証

② 鉛直濁度分布の時系列変化

図-9に降水量、風向風速、潮位、ADCPによる流速(主流方向)と水位、流量、ADCPによる超音波濁度を示す。ほぼすべての時期及び深度において、濁度は10度前後で推移している。底面近傍の濁度が変化する期間は、8月15～17日及び8月21～25日にかけて2回みられたので、濁度変動と外的因子との関係を検討した。

① 8月15日～17日：

- 8月15日は風速5m/s以上で下流からの強風があり、それに応じて水位勾配が流速、流量が減少している。濁度も低下していることから、濁質の輸送量も減少する。
- 8月16日から17日にかけて、上げ潮時には水位が上昇する一方、流速・流量は減少している。この時、濁度も低下しており、濁質輸送量は小さくなる。一方、下げ潮時には水位が低下、流速・流量が増加すると同時に、濁度が上昇するため、輸送量も増加することとなる。

② 8月21日～25日：

- 8月21日及び24日は、20日の降雨による出水が影響したと思われる濁度上昇が、標高-2m以深からみられる。
- 出水により上昇した濁度は、流速の増加とともに、-2mよりも上層へ拡散する傾向がみられる。上層部濁度は次第に低下するが、河床付近の高濃度濁水は残存している。

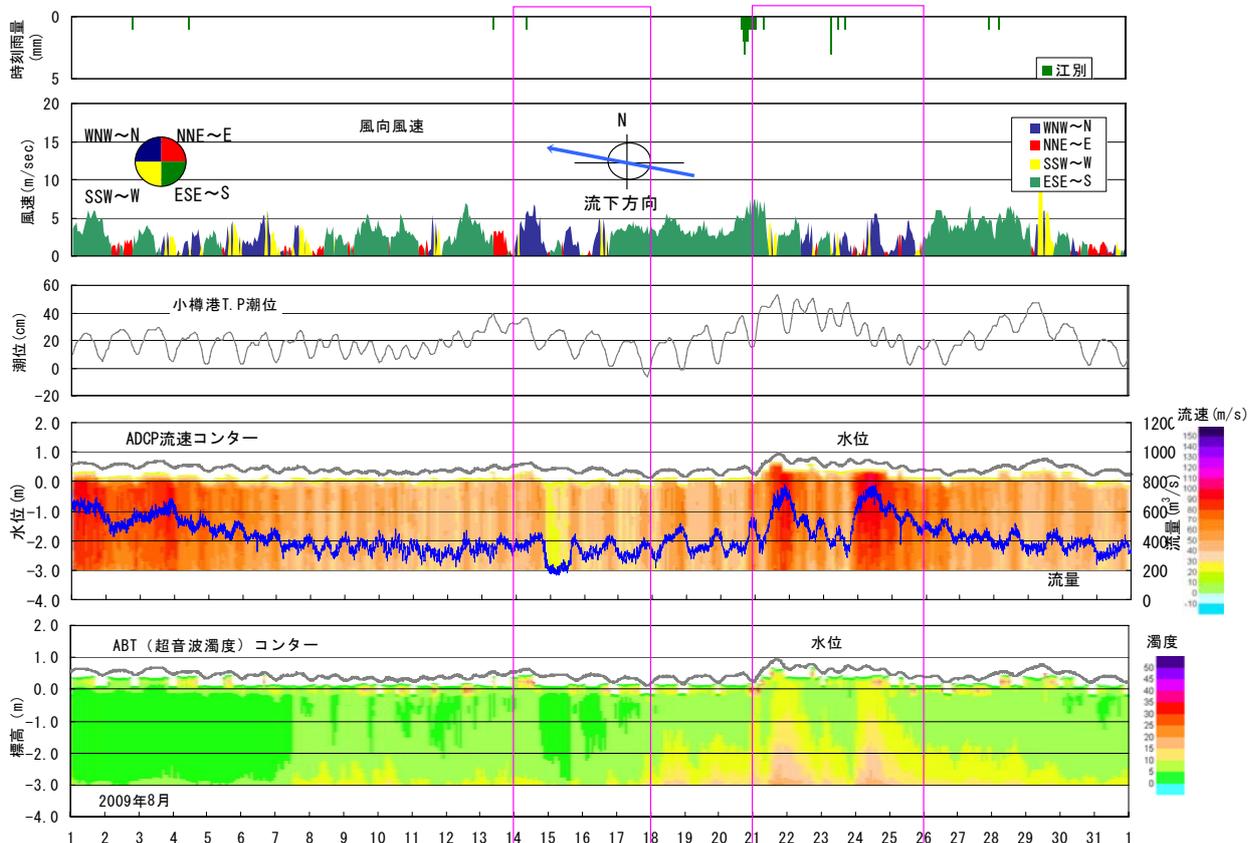


図-9 石狩川でのABTと気象・流況

4. ABT解析を行う場合の条件について

(1) 機器選定

TRDI社のワークホース ADCP については、2400, 1200, 600, 300kHzの各機種で試験観測を行い、概ね全ての周波数帯で良好な観測結果を得ることができた。また、管路設置型のV-ADCPおよびフェーズドアレー型のRiverRay600kHzについても良好な解析結果が得られ、ABT解析への適用が可能であることが確認できた。一方、海洋大深度向けの機種（150kHz, 75kHz, 38kHz）については未検証であり、今後は外洋での適用性についても検討を進める予定である。

(2) ABTに適した観測設定について

ABT解析に適した観測設定が存在することが確認された。WBコマンドは本来、計測レンジを30%ほど長くするためのコマンドであり、WB0はバンドワイズを狭くすることで最大計測レンジを1.3倍に延ばすことができるものである。一方、WB0で計測することで反射強度の感度が著しく高くなるという効果が確認された。図-10は、同じ場所でWB0とWB1の比較を行ったデータである。WB0とWB1を比較すると50countほどWB0が大きく計測される。また、WB0では濁りに対しての感度も向上し、濁りの小さな水域でも解像度を高めることが可能と考えられる。しかし、WB0ではバックグラウンドレベルが上昇するため、高濁度には逆に弱く、レンジオーバーによって解析不能となりやすい。このため、現場の状況に応じて適切に選定する必要がある。

層厚(WS)は可能な限り大きく設定した方が反射強度のばらつきが小さくなる。但し、ADCP観測はあくまでも流況計測が主目的であるため、適正な流況が計測できる範囲で調整されるべきである。

Ping数(WP)については、シングルピングでは非常にバラツキが大きくなり、値が安定しない。最低でも10ping(WP10)以上で設定するほうが望ましい。

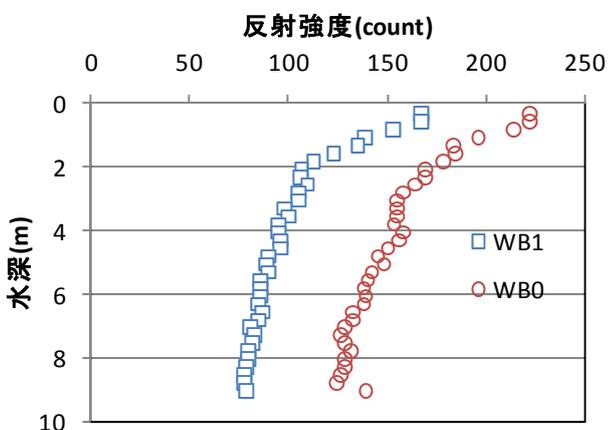


図-10 WB0とWB1の反射強度の違い

5. ABTの実用性についての評価

(1) 汎用アプリケーションの開発

ADCPの超音波濁度が有効であることは多くの論文から既知の事実であり、計算手法もほぼ確立されている。しかし、一般に利用できる簡便なユーザーインターフェースのアプリケーションが無かったため、本報では簡易アプリケーションのプロトタイプを用いてその有効性を評価した。

(2) アプリケーションの有効性

現地でのキャリブレーション方法の確立と合わせて、ADCPのバイナリーデータから簡便に実測濁度とのキャリブレーションを行い、ABTデータを出力できるアプリケーションを開発し、有効であることが示された。

キャリブレーションのための比較観測としては、鉛直プロファイル計測と連続計測の双方で比較することが有効であることが示された。

(3) ADCPで濁度計測を行うメリット

ADCPでの流況観測データに付随して濁度分布が計測出来れば、新たに機器を追加することなく多量の観測データが得られるため、非常に有効な手段である。濁度の空間的な分布を計測出来るため、これまでに無い調査手法として期待できる。ADCPのバイナリーデータを元に過去の観測データから濁度を算出することも可能となれば、埋もれた資産を活かすことが可能となる。流速と同時に計測出来ること、ADCPの空間解像度で濁度計測が可能であることから、河川断面の濁り分布や土砂フラックスの計算に有効である。

(4) ABT利用に際しての課題

精度はシングルポイント式の光学式濁度計には及ばないと考えるべきである。但し、光学式濁度計では計測困難な断面観測や鉛直プロファイルの連続観測などが可能であり、新たな観測手法としては非常に有効であると考えられる。断面観測の場合は、水温塩分や濁質成分、粒径分布などの環境条件が一様であると仮定して観測を行うことができる。しかし、連続観測では出水などのイベント時には環境条件が大きく変動するため、環境変化に追従できるモデルの開発が必要である。今後は新井が開発した光学式濁度計を初期値として用いる方法についてもアプリケーションに機能追加することが必要である。

H-ADCPによる観測では、浅い河川などではABT解析がうまく行かないことが多い。濁りの変化よりもむしろ水位変動に追従するような結果が多く、サイドローブが水面に干渉してコンタミネーションが生じている可能性も考えられる。ただし、十分に水深が深い場合はコンタミネーションの影響は無視できることが確認されている。今後はH-ADCPでの活用についても検証を進める。

6. まとめ

ADCPによる超音波濁度計測技術について、手法を確立し、汎用アプリケーションを開発したことで、より簡便にABTを算出することができるようになった。各現地観測においてその性能は評価され、実用性の向上を得た。

今後は、さまざまなフィールドでのABT適用を評価すると同時に、最新の研究と連携しながら、現場で使いやすいツールとしての技術として研磨していく必要がある。

謝辞：本研究では寒地土木研究所による石狩川観測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を称します。なお、鹿島建設(株)はADCPによる工事の濁り監視技術に関連して特許を取得しており、ここで紹介したシステムよりもさらに発展したシステムを活用している。本報は河川での利用に言及したものであるため、当該特許には抵触しないことを述べておきます。なお、本手法を工事の濁り監視用途に利用する際は、鹿島建設(株)の許可が必要となる。

参考文献

- 1) RD Instrumens : Principles of Operation: A Practical Primer 1996
- 2) 岡田将治 : ADCPを搭載した橋上操作艇による洪水流観測技術の進展, 河川流量観測の新時代,2010年9月
- 3) P.D.Thorone, S.C.Campbell : Backscattering by a suspension of spheres The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 92, Issue 2, 1992, pp.978-986
- 4) Kent L.Deines : Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, TRDI Report.
- 5) 稲垣聡, 山木克則, 田中章宏 : 工事海域の濁り監視と予測, 海岸工学論文集, 第49巻(2002)1496-1500

- 6) 川西澄, 水野博史 : 浅水感潮域における水中音響散乱体の変動特性, 水工学論文集, 第45巻, 2001, pp.1045-1050
- 7) 横山勝英, 藤田光一 : 多摩川感潮区域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, 2001, pp.937-942
- 8) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦 : ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集, 第12巻, 2006, pp.133-138
- 9) 新井励, 中谷直樹, 奥野武俊 : 海域モニタリングに適したADCPを用いた濁度の鉛直分布計測手法, 日本船舶海洋工学会論文集, (7), 2008, pp.23-30
- 10) J.Sheng, A.E.Hay : An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand, Journal of Acoustic Society of America, 83, 1988, pp.598-610
- 11) M.Shulkin and H.W.Marsh:Sound absorption in sea water, Journal of Acoustic Society of America, 34, 1962, pp.864-86
- 12) L.N.Liebermann:Origin of sound absorption in water and in sea water, Journal of Acoustic Society of America, 20, 1948, pp.868-873
- 13) J.Sheng, A.E.Hay : An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand, Journal of Acoustic Society of America, 83, 1988, pp.598-610
- 14) R.J.Urick:The absorption of sound in suspen-sions of irregular particles, Journal of Acoustic Society of America, 20(3), 1948, pp.283-289
- 15) A. Downing, P. D. Thorne and C. E. Vincent, "Backscattering from a suspension in the nearfield of a piston transducer", Journal of Acoustic Society of America,97, 1995, pp. 1614-1620
- 16) 横山洋, 橋場雅弘, 橋田隆史 : ADCPを用いた石狩川感潮域の濁度推定と変動メカニズム検討

(2011. 7. 31受付)

十勝川千代田実験水路における ADCP及び電波式流速計による流量観測

RIVER FLOW MEASUREMENT WITH ADCP AND RADIO CURRENT
METER AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL CHANNEL

稲垣 達弘¹・柿沼 孝治²・三宅 洋³

Tatsuhiko INAGAKI, Kouji KAKINUMA and Hiroshi MIYAKE

¹非会員 土木研究所寒地土木研究所 道東支所(〒085-0014 北海道釧路市末広町10-1)

²非会員 土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1-3)

³非会員 国土交通省北海道開発局 帯広開発建設部 治水課(〒085-8585 北海道帯広市西4条南8丁目)

The Chiyoda Experimental Channel is Japan's largest full-scale river research facility, and is capable of generating artificial flooding. Starting in 2007, the authors conducted preliminary experiments to determine its basic characteristics, and performed three-dimensional levee breach experiments in the channel using various types of observation instruments (an ADCP and a radio current meter) to evaluate river flow in detail. This report focuses on the limitations of such observation under the conditions of high velocity and turbidity. The authors also applied velocity correction to measurements taken with the radio current meter using the ratio of surface velocity to cross-sectional mean velocity, and examined a method for smooth switching of the sectional area of the stream before and after the experiments using friction speed values. The results showed that the calculated values for both the velocity correction and the cross section correction corresponded well with the actual measurements obtained using the ADCP.

Key Words: Chiyoda Experimental Channel, river flow measurement, ADCP, radio current meter

1. はじめに

河川の流量は、流水の移動速度である流速を計測し、これに流水の面積を乗じて求める方法が一般に用いられている。現行の流量観測手法には、平水時に河川内を徒歩または作業船で移動しながら可搬式流速計を用いて流速を計測し、同時にロッド等で水深を計り流水断面積を得る低水流量観測と、洪水時に橋上等から河川内に浮子を投下し、浮子が定められた区間を通過する時間を計測して流速を求め、事後に横断測量を実施して流水断面積を得る高水流量観測がある¹⁾。

これらの観測結果は水位-流量関係式(H-Q式)作成の基礎資料に用いられ、連続水位データから計算により連続流量データが作成される。しかし現行の流量観測手法には、①感潮域の河川流量を正確に観測できない、②大雨や強風の伴う荒天時や夜間における観測には危険が伴う、③有人観測であることから急激な洪水の立ち上がりやピークの観測に間に合わない、④中小洪水の観測デー

タが少ない、といった課題が残されており、省力かつ安全で確実な観測手法の確立が望まれている。

2004年の水文観測業務規程の全面改定²⁾を受け、前述の課題に対応する新しい流量観測手法として、ADCP、H-ADCP、超音波流速計、電波式流速計、画像解析等による河川流量観測の実地検証が全国各地で進められており^{3),4)}、流量観測は転換期を迎えようとしている。

2007年に運用を開始した千代田実験水路⁵⁾においても、水理特性の把握と実験中の詳細な流量モニタリングを目的として、数種類の計測機器を用いて流量観測を実施している^{6),7)}。実物大の水理実験施設である千代田実験水路では、任意の洪水流出パターンを自由に設定でき、予め計画した観測方法、人員体制、機械配置のもとに各種観測を行える特徴があり、実河川では難しい高密度な流量観測の実施を可能としている。

本稿では、2007年から2010年にかけて千代田実験水路で同時並行的に実施した流量観測の結果から、主にADCPと電波式流速計の計測特性及び適用に関する知見を報告する。また、観測の結果から高流速や高濁度の厳



図-1 千代田実験水路

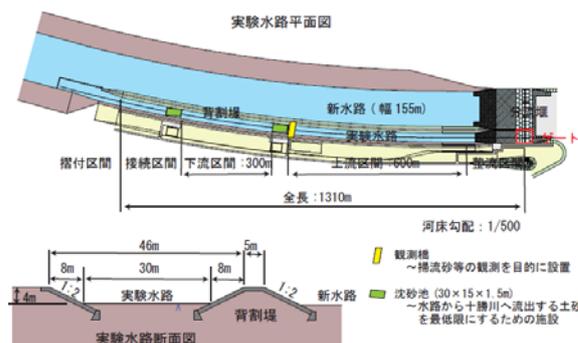


図-2 千代田実験水路の諸元

しい観測条件下でも安定的に観測が行えた電波式流速計について、流量算出精度の向上を目的とした流速補正手法と流水断面積の補正手法について検討を行ったので、その内容について紹介したい。

2. 流量観測の概要

(1) 千代田実験水路の概要

千代田実験水路(図-1, 図-2)は、堤防破壊のプロセス、河床変動などの土砂移動、河道内樹木の密度と洪水時の抵抗、多自然工法や樹木・植生などによる堤防や河岸の保護機能等を解明することを目的として、十勝川千代田新水路に設置された国内最大規模の実物大河川実験施設である。同水路は全長1,310m、水路幅30m、河床勾配1/500であり、水路上流の起伏式ゲートにより、150m³/s超を上限として流量をコントロールすることができ、①実物大の規模であり粒径等のスケールの影響を受けない、②精度の高い流量制御が可能、③充実した観測機器により現象の把握が可能、④実験水路の改変により実験条件を変更することが可能、等の特徴を有している⁵⁾。

これまで実施してきた実験は、北海道開発局と寒地土木研究所の共同実験研究として2007～2008年に水理特性の把握を目的とした試験通水⁸⁾、2009年以降は堤防の三次元越水破堤メカニズムの解明を目的とした縦断破堤実験^{9),10)}を実施中である。

(2) 実験ケース

千代田実験水路における試験通水及び破堤実験の実験ケースと水路断面図を表-1, 図-3に示す。なお表中の流量は通水前に設定した目標流量であり実測の観測流量ではない。Case1～4は実験水路の全断面を使用した試験通水⁸⁾である。河道幅は30mであり法勾配は左右岸ともに2割である。Case5～6は実験水路内に土堤を築き、その左岸側を河道、右岸側を氾濫域として破堤実験⁹⁾を行った。実験水路内に土堤と氾濫域のスペースを確保するため河道幅を4mに設定しており、法勾配は左右岸ともに2割である。Case7～8はより広い氾濫域を得るため実験水路右

表-1 実験ケース

Case	実施日	目標流量[m ³ /s]	流量変化	実験内容
1	2007.6.13	40,120	あり	試験通水
2	2007.6.25	45	なし(定常)	〃
3	2008.5.22	100	なし(定常)	〃
4	2008.6.25	75	なし	〃
5	2009.4.30	50	あり	水路内縦断破堤実験
6	2009.6.30	50	あり	〃
7	2010.4.27	70	あり	背割堤縦断破堤実験
8	2010.8.4	35	あり	〃

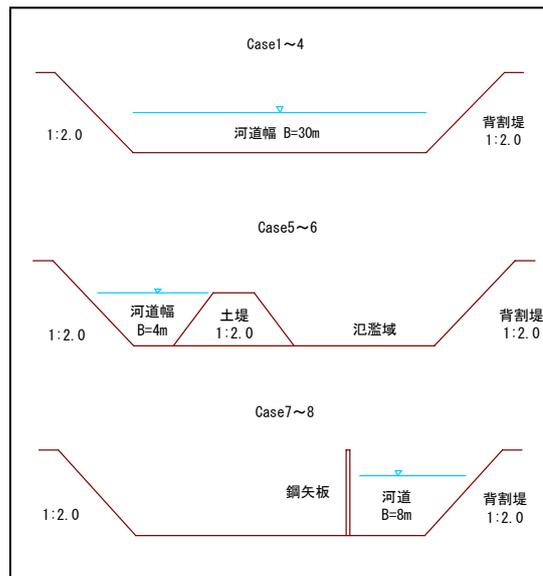


図-3 実験水路断面図

岸側の背割堤を破堤させることとし¹⁰⁾、破堤に必要な水位を確保するため実験水路内に自立式鋼矢板を縦断的に配置し河道幅を8mまで狭窄させた。法勾配は左岸側が鋼矢板の直立であり右岸側は2割である。

通水の方法については、Case1は初めに40m³/sを定常流で通水し、途中から120m³/sへと流量を増加させ再び定常流を維持した。Case2～4は目標流量を終始定常流で通水させた。Case5～8は破堤実験用に設定した目標流量まで徐々に通水量を増加させ、堤防の越流が始まり破堤幅が一定量に達した時点で通水を終了した。

表-2 計測機器概要

ADCP	RD Instruments社製 Workhorse 周波数 1200kHz
GPS	NAVCOM社製 SF-2030M
モード, 層厚	12(ハイスピードモード), 層厚10cm
ping数	3(Case1-2), 2(Case3-8)
ADCP観測艇	幅1.55m 長2.57m 高0.33m 重量88kg
電波式流速計(Case1-4)	横河電子機器社製 WJ-7651 周波数 10.525GHz
電波式流速計(Case5-8)	横河電子機器社製 WJ-7661 周波数 24.150GHz
濁度計	東邦電探社製 FN-52X

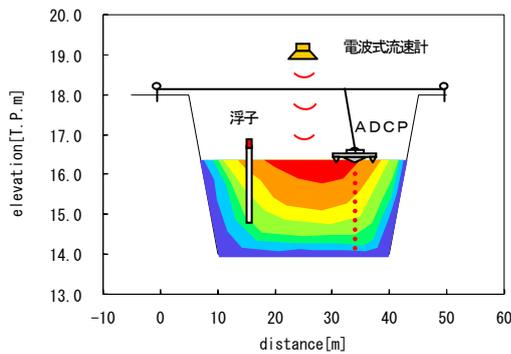


図-4 観測概要図

試験通水および破堤実験時には、実験中の水理挙動を精密に計測するため、従前手法による水位・流量観測に加え、ADCPや電波式流速計等を用いた詳細な流量観測を実施した。なお破堤実験であるCase5～8における流量観測は破堤部の上流側と下流側で実施したが、本検討では、特に記載しない限り破堤部上流側の計測データを使用している。実験による濁度影響を調べるため、実験水路出口部で表面水を採取しポータブル濁度計による濁度観測も行った。各計測機器の概要を表-2及び図-4に示す。

(3) 各手法の計測方法

a) ADCP観測

ADCP観測はADCP本体、GPS、測深器を観測艇に登載して水面に浮かべ、鉛直下方の流速分布と河床高を同時計測した。観測艇をワイヤで係留し水面上を横断移動させることで、流水断面全体の流速分布と河床形状を得た。観測施設は図-5に示すように両岸に設置した支柱間にワイヤを張り、支柱に取り付けたウインチを操作することでワイヤを巻き取り、観測艇の横断移動を行った。観測艇は図-6に示す白い無人艇であり、最近の市販されているADCP専用艇に比べると少し大ぶりで重量も重めであるが、2007年から2010年まで同じ観測艇を使用している。

b) 電波式流速計

電波式流速計は、Case1～4及びCase7～8は水路を横断する橋梁上に、Case5～6は水路左岸に設けた張り出し足場上に、1台の電波式流速計を上流向きに設置して河道中心部の表面流速を計測した。電波式流速計は、流向に

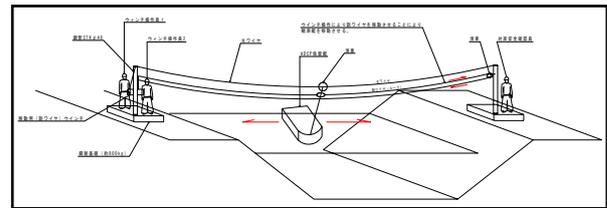


図-5 ADCP横断観測の概要



a) ADCP観測艇



b) 係留用支柱



c) ADCP本体



d) ADCP無線通信システム



e) 電波式流速計Case1-4



f) 電波式流速計Case5-8

図-6 観測状況および計測機器

対して俯角20～45度、偏角0～20度の範囲内で電波を照射し、その反射波を受信してドップラー周波数により表面流速が得られる。俯角と偏角の設定は、Case1～4及びCase7～8は俯角のみを設定し、Case5～6は俯角と偏角の両方を設定した。電波式流速計のデータ取得間隔は、Case1～4は1分間隔、Case5～8は1秒間隔に設定し、通水の開始から終了まで連続的に流速を計測した。

c) 浮子観測

浮子観測は横断方向に断面を分割し、水深に応じた標準浮子(表面浮子および喫水深0.5mと1.0mの竿浮子)を用いて実施した。断面分割数は、Case1～4は6分割、Case5～8は4分割とした。

(4) 計測データの整理方法

a) ADCP

ADCPで計測された流速にはADCP本体の移動速度である対地速度が含まれるため、これを除去する必要がある。対地速度の測定には、ボトムトラッキングとGPSによる手法がある。ボトムトラッキングは、河床から反射するエコーのドップラー効果を用いて対地速度を測定す

る方法で、GPSは座標を測定して対地速度を求める方法である。河床が移動しているような状況の場合、ボトムトラッキングによる対地速度に河床の移動速度も含まれる場合がある。千代田実験水路では通水中の河床移動が確認されていることから⁸⁾、ADCP本体の移動速度はGPSにより除去した。また、ADCPは機器の特性により表層部と河床部が不感帯となり流速を取得できない。この不感帯は附属ソフト(Win River)を用いて水面部に第1層流速を付与、河床部に理論式:power curve fit¹¹⁾を適用して補間した。ADCPで計測した流速分布及び河床高から流量を算出し、流積で割り返して流水断面全体の平均流速(以下、断面平均流速と呼ぶ)を求めた。

b) 電波式流速計

電波式流速計の生データは情報が細かく流速の上下振動が激しい。このため生データを5分間移動平均により平滑化処理を行った。流水断面積は、自記水位計で観測した毎分水位と通水の前と後に実施した横断測量データを用い、通水前後2種類の流水断面積を算出した。

c) 浮子観測

計測した流速に浮子の更正係数を乗じて流量を算出し、流積で割り返して断面平均流速を求めた。

3. 各種計測手法の計測特性

観測の結果から各手法別における流速の計測精度と、高流速や高濁度の厳しい観測条件下で欠測や異常値が生じる境界条件を整理した。流速の比較検討に用いる流速値は、ADCPは断面平均流速、電波式流速計は表面流速である。図-7に流速の観測結果を示す。

(1) ADCPの計測特性

ADCPを小型艇に搭載し水面上に浮かせた状態で観測を行う際には、水面上の漂流物や水面の波立ちにより観測が困難になることがある。Case1～Case6までの観測では特にそのような現象は起きなかったが、Case7～8では観測地点下流の破堤開始に伴い4m/s程度の高流速が発生しADCPが計測不能となった。Case7は図-8に示すように鋼矢板による狭窄部から多量の気泡が発生し、気泡がADCP船艇の底部に入り込んだことで計測データが得られなかった。Case8は計測地点をCase7より下流に設定したため気泡の影響は避けられたが、高流速により水面が大きく波打ったことでADCPの横断移動が困難となり、安全のため観測を一時中断したほか、再開後の計測値にばらつきが目立った。発生した高流速下における状態では、水面の波立ちやうねりに対し、かろうじて観測が出来る状態であり、正常に観測出来る範囲を超えている状態が伺えた。



図-8 ADCP計測状況(左:Case7, 右:Case8)



図-9 濁水の発生状況

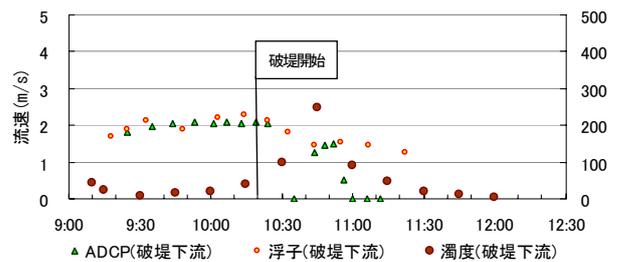


図-10 ADCP流速と濁度の関係(Case7破堤区間下流)

次に濁水の影響について特徴的な現象を紹介する。破堤実験では、破堤口からの氾濫流量を算定するために破堤部の下流側でも流量観測を行ったが、Case7では破堤の開始に伴い図-9のように濁水が発生し破堤部下流のADCP流速が異常値となった。図-10はCase7における破堤部下流の流速と濁度の関係を表したグラフであるが、破堤開始後に濁度が上昇し、以降のADCP流速は大きく乱れ異常値が目立つ。破堤後の濁度は最大でも300未満でありADCPが計測不能となる濁度としては小さいと考えられ、欠測の原因を濁水の影響と断定する根拠には乏しい。しかし破堤により生じる濁水は堤体材料が溶け出している状態であり、粒径の大きな土砂分が流下していたと推測され、それがADCPの音波を散乱させる要因として作用した可能性は考えられる。

ADCPの流速は、全てのケースにおいて概ね浮子流速と等しく、定常流時に観測を行ったCase1～4では、Case1の前半を除き両者の差は3%以内であった(図-11)。Case1の前半は、実際の通水量が目標流量より2割程度少なかったことから水深が60cm程度と浅く図-12のように流速データが十分に取得できていない。そのため流速の

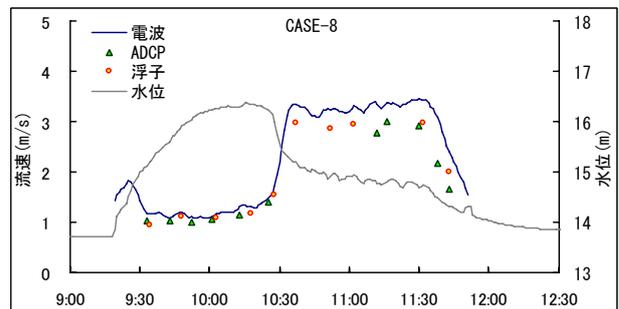
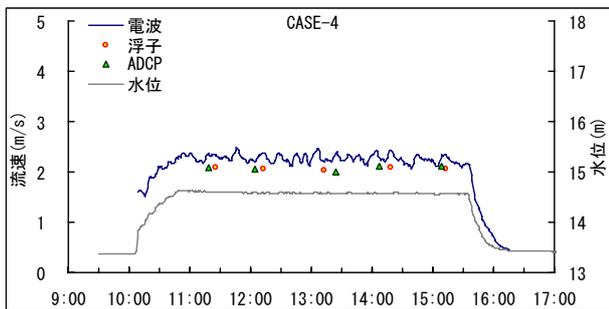
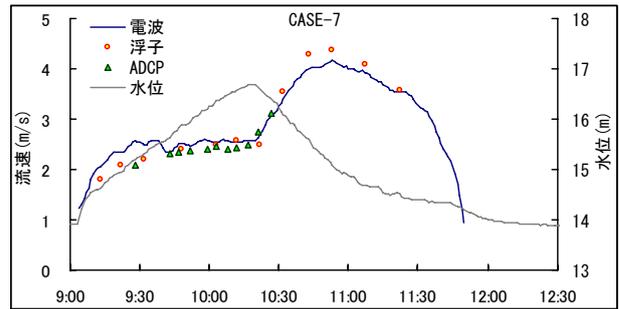
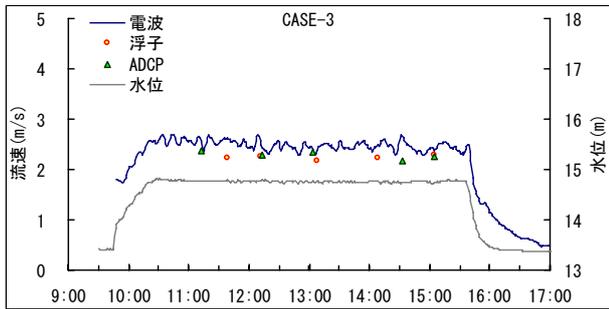
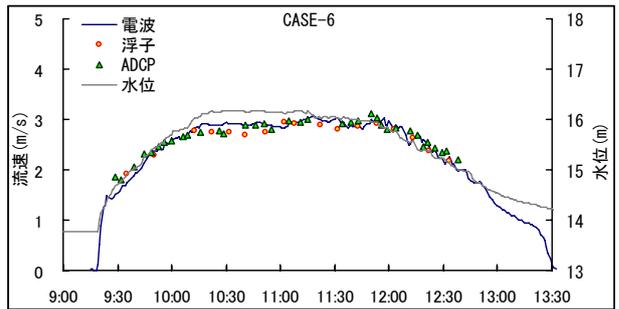
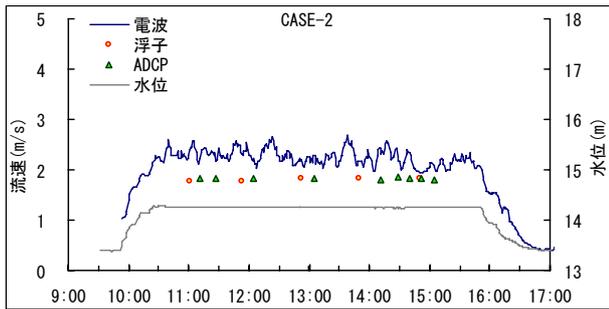
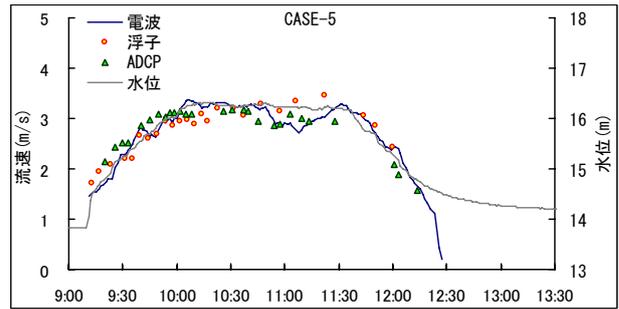
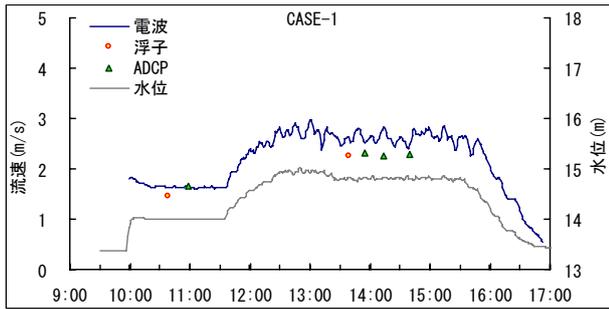


図-7 流速の観測結果(Case1~8)

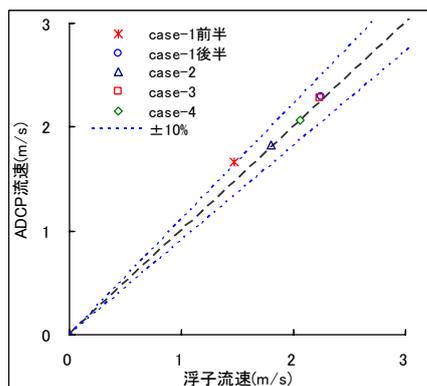


図-11 ADCPと浮子測法の流速比較(Case1~4)

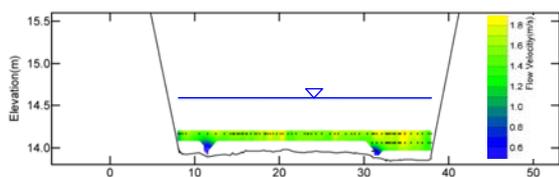


図-12 ADCPによる実測流速分布 (Case1 前半)

大部分を補間で求めており浮子との差が大きくなった。

(2) 電波式流速計の計測特性

電波式流速計による流速データの取得性能を見ると、電波式流速計は急激な流速増加や高濁度にも影響されず安定的に連続計測が可能であった。例外としてCase5~6では水面に波がたたない鏡面の状態が発生したため十分な反射波が得られず機器の反応が鈍ることがあった。このため図-13のようにADCPの下流に発生する波を利用して計測を行うことになった。

電波式流速計と同時刻のADCP流速の比較結果を図-14に示す。はじめにCase1~4, 7~8では、電波式流速計はADCPに対し概ね15%程度大きめの流速を観測している。これは表面流速と断面平均流速との差と考えられ、この傾向は既往の知見¹²⁾と一致する。次にCase5~6では、電波式流速計はADCPに対しほぼ等しいか、むしろ小さめの流速を観測している。この現象を電波式流速計の計測方法の違いから考察する。

Case5~6は河岸から張り出した計測用足場が河道中央部まで届かないため、図-15に示すように19.9°の偏角を付けて流心部へ斜めに電波を照射している。偏角に対する流速補正は機器の設定により自動的に行われるが、電波が流心を捉える水位は実験時の最高水位(水深2.5mに相当)に合わせており、それより低い水位では電波の照射エリアが徐々に流心からずれ、測岸部の遅い流速を捉えたことがADCP流速との関係を逆転させている。またADCPと電波式流速の差が小さい部分については、電波の照射エリア内に流心部以外の遅い流れも含まれたことが影響したものと考えられる。本ケースのように川幅が狭い観測サイトで偏角を設ける場合には、このような現象に留意する必要があることが明らかとなった。



図-13 電波式流速計とADCP(Case5)

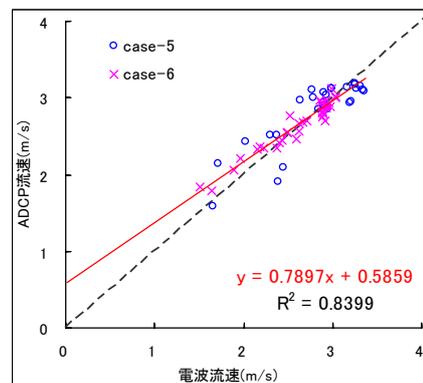
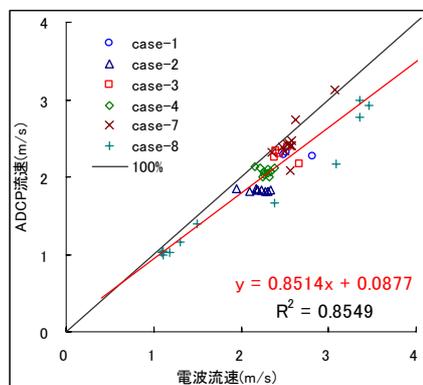


図-14 電波式流速計とADCPの流速比較
(上: Case1~4及びCase7~8, 下: Case5~6)

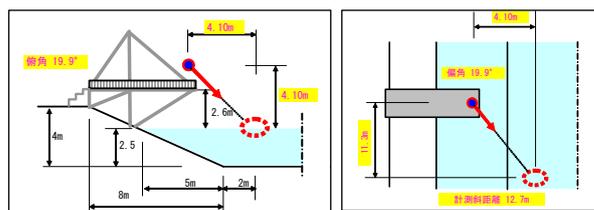


図-15 電波式流速計の俯角と偏角(Case5~6)

4. 電波式流速計の流速補正と流水断面積補正

上記の計測特性から、電波式流速計は悪条件下においてもデータの取得性能が高く、洪水時の流速モニタリング手法として優位性が高いことを確認した。しかし電波式流速計の流速を流量算出に用いる際には、表面流速を流水断面全体の流速へ補正する必要がある。また、流量算出に付与する流水断面積は、出水前後いずれかの横断

測量データから算出するのが一般的だが、出水前と出水後で横断形状が大きく異なる場合には、出水初期には前横断を、出水後期には後横断を適用することでより正確な流量の評価が可能になると考えられる。さらに前横断から後横断へ移行する過程を時系列で推定できれば、現実に近い流水断面積の再現が可能になると考えられる。以下に、電波式流速計の流速補正と、断面変化を考慮した流水断面積の付与手法について検討を行った。なお本稿では、浮子に比べ詳細な流速分布が計測でき、流水断面積についてもリアルタイムデータを有するADCPの計測値を真値として扱うこととする。

(1) 電波式流速計の流速補正

既往の知見¹²⁾によると実河川における電波式流速計の流速補正係数は、0.85～0.90程度に設定されており、表面浮子の更正係数0.85を適用する事例も多い。千代田実験水路のCase 1～4,7～8における断面平均流速と表面流速の比は、図-14の近似曲線が示すように0.85に近い値となり実河川の傾向と一致した。よって表面浮子の更正係数をそのまま適用しCase 1～4,7～8の流速補正を行った。計算結果を図-16に示す。流速補正により電波式流速計の流速はADCP流速に対して概ね±10%の範囲内に収めることができた。しかしながらCase7では高流速の部分で範囲を外れているデータがあり、本手法による課題が残された。

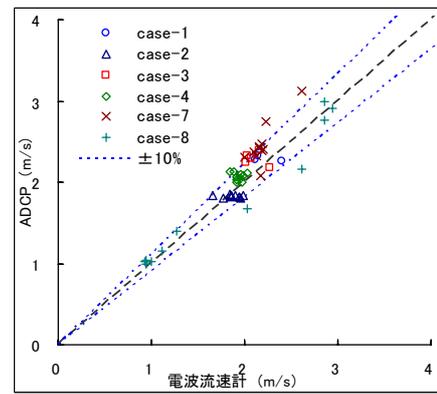


図-16 流速補正結果(Case1～4及びCase7～8)

(2) 摩擦速度を用いた流水断面積の補正

実験による通水の結果、特にCase6とCase7において顕著な断面変化が起こり、観測地点の横断形状は図-17のように通水前後で大きく変化した。Case6における断面変化は、主に河道の右岸法面にあたる破堤実験用の土堤の侵食とそれに伴う河床への土砂堆積として、Case7では河床の低下として生じた。通水前横断と通水後横断を使用してピーク水位時の流水断面積を求めると、両者にはCase6で+11.1%、Case7で+31.4%もの差が生じている。このことは、横断の選択によって流量に同様の差が生じることを意味しており、流量算出においては適切な流水断面積の付与が非常に重要となる。

ここでは電波式流速計による無人流量モニタリングを想定し、通水前後横断、連続流速、自記水位データを用いて河床変動を引き起こす物理的な力の発生状況を調べ、前横断が後横断へ徐々に変化する過程を横断形状ではなく、あくまでも流水断面積として時系列的に再現することを試みた。

横断形状の変化は流速の増加に伴い掃流力が増し、河床や河岸を形成する土粒子が移動したことにより生じたものと推測される。土粒子の移動は摩擦速度が限界摩擦速度を超過している時に発生し、移動量はその強さに依存すると仮定すれば、それらの数値から断面変化が生じた時間帯と変化量が推定できる。

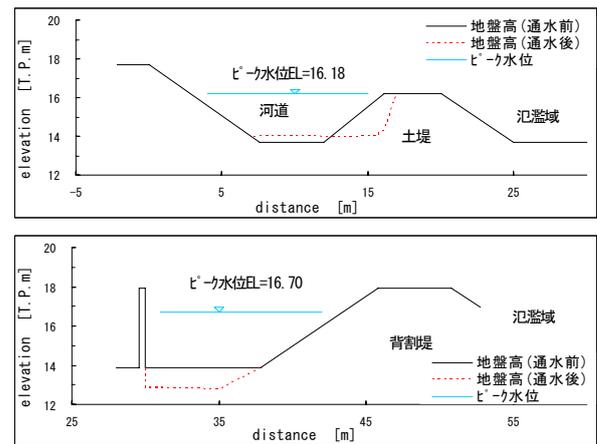


図-17 通水前後の横断図(上:Case6, 下:Case7)

表-3 千代田実験水路の水力パラメータ

粗度係数 n	土粒子密度 $\rho_s [g/cm^3]$	水中比重 s	河床粒径 $d_{50} [mm]$	土堤粒径 $d_{50} [mm]$
0.024	2.63	1.63	14.7	2.7

摩擦速度 $[u_*]$ 及び限界摩擦速度 $[u_{*c}]$ は式(1)、(2)により求めた。計算に用いるパラメータは表-3に示す2007年～2008年の試験通水より得られた千代田実験水路の実測値とした。また摩擦速度の計算に付与する流水勾配 $[I]$ は、連続流速が得られる電波式流速計の特性を利用して、式(3)によりエネルギー勾配 $[I_e]$ を算出し用いた。

$$u_* = \sqrt{gRI} \quad (1)$$

$$u_{*c} = \sqrt{0.05sgd} \quad (2)$$

$$I_e = \left(\frac{nV}{\frac{2}{h^3}} \right)^2 \quad (3)$$

表-4 ADCPの実測流水断面積に対する誤差の平均値

Case	通水前横断 使用断面積	通水後横断 使用断面積	提案手法 (推定断面積)
6	-7.3%	+5.2%	-1.2%
7	-8.2%	+30.7%	-2.8%

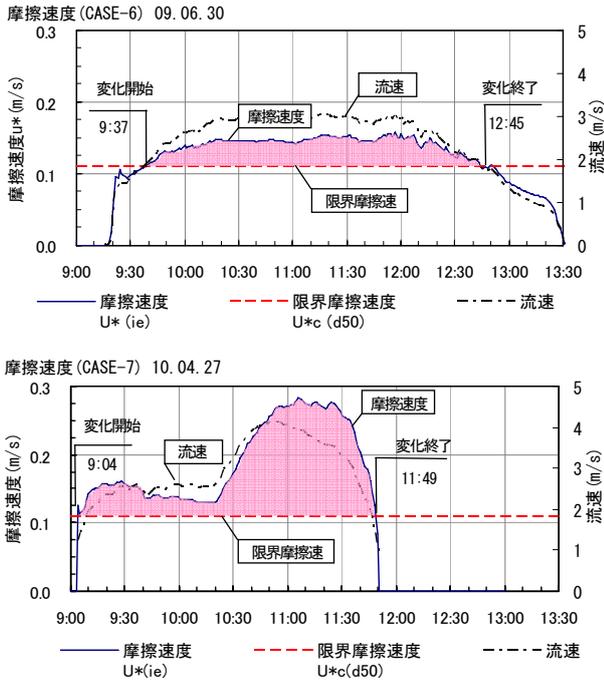


図-18 摩擦速度の時系列分布状況(上:Case6, 下:Case7)

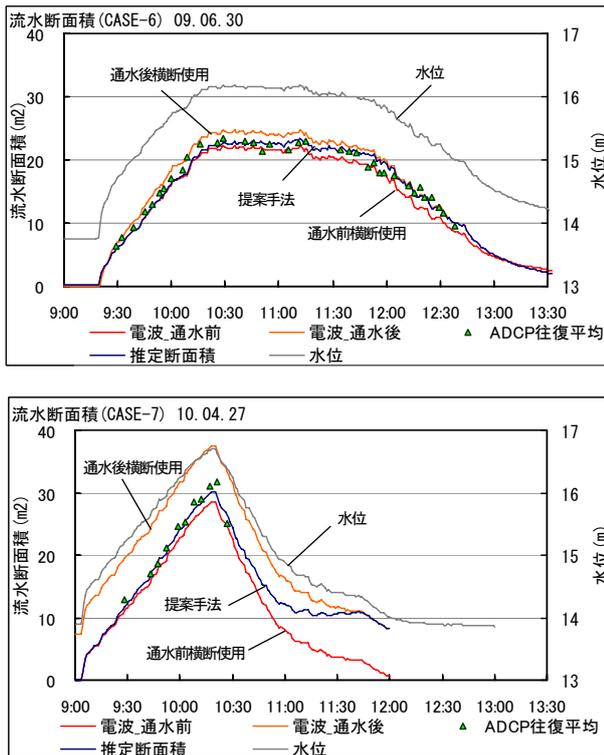


図-19 流水断面積の推定結果(上:Case6, 下:Case7)

図-18に、摩擦速度と限界摩擦速度の計算結果を示す。着色部は限界摩擦速度を超過する摩擦速度を現しており、摩擦速度が限界摩擦速度を超過している時間帯と摩擦速度の強さが分かる。特にCase7は堤防の破堤開始(10時20分頃)と共に流速が急激に増加し、摩擦速度が追従して大きくなっている。摩擦速度が限界摩擦速度を超過した

時刻に断面変化が始まり、限界摩擦速度を下回る時刻に全ての断面変化が終わると仮定し、超過量の累計(図-18における着色部全体に占める任意時刻までの超過量の割合)を前後の流水断面積に加重配分して推定流水断面積を計算した。

計算結果および通水前後横断から各々算出した流水断面積の比較を図-19に示す。本手法で推定した推定流水断面積は、通水の初期には前横断を使用しており、摩擦速度の増加に応じて徐々に後横断へと変化していく。この軌跡はADCPによる流水断面積の実測値とほぼ一致した。残念ながらCase7は後半のADCPが欠測しているが、ピーク水位付近の流水断面積をほぼ正確に評価している。

ADCPの流水断面積に対する誤差の平均値は、Case6が前横断使用=-7.3%、後横断使用=+5.2%、提案手法=-1.2%であり、Case7は前横断使用=-8.2%、後横断使用=+30.7%、提案手法=-2.8%となった(表-4)。なお、Case6の断面変化は右岸側土堤の侵食を原因としていることから、限界摩擦速度の算出に土堤の材料粒径を与えて試算をしてみたが、計算結果にほとんど違いは現れなかった。

ただし本手法は前横断から後横断への時間的な変化過程を推定したに過ぎず、実現象では掃流力が卓越する時間帯に大規模な洗掘が生じ掃流力の減衰と共に埋め戻しが行われることがある。このような状況下ではADCP等を用いた河床高のリアルタイム計測以外の方法で真の流水断面を把握することは極めて困難である。よって通水前後の横断だけでは推定できる流水断面積の精度に限界があるので注意が必要である。

5. おわりに

千代田実験水路におけるADCPと電波式流速計による流量観測の結果、計測特性に関しては、高流速や高濁度の厳しい観測条件下では、ADCPによる計測が困難となる状況が見られた。Case8では水面の波立ちによりADCPを搭載する観測艇の横断移動が困難になり観測を中断することになった。この要因の一つとして考えられるのは使用した観測艇が高流速に耐えられないことがある。よって高流速に対応可能な観測艇¹²⁾を導入することで適用範囲を拡大できる可能性がある。

濁水によるADCPの異常については関係の詳細を明ら

かにすることはできなかった。今回の観測においては破堤による粒径の大きな土砂分が影響したものと推測されるが、ADCPが計測不能となる境界条件等については今後の検証が必要である。

一方、電波式流速計は安定的に連続流速の取得に成功し、高水流量観測における優位性を確認できた。例外として水面の波が少ない状況で流速の計測が困難になる事がありADCPの後流を利用して計測を行ったが、この現象から、電波式流速計が不得意とする鏡面状の流れにおいても、何らかの方法で人工的に波を発生させることで計測が可能になることがわかった。

電波式流速計を用いた流量算出精度の向上を目的に、表面流速の補正手法と、通水前後横断から求めた2つの流水断面積をスムーズに擦り付ける手法を検討した。流速補正では電波式流速計の計測値にADCP流速との比から求めた補正係数(0.85)を乗じて概ね±10%の精度で断面平均流速を評価できることを確認した。流水断面積については、摩擦速度の時系列的な分布状況を基に、通水の初めから終わりまで実測の値に近い流水断面積を再現することができた。しかしながら、前述したADCPの欠測により高流速時の検証データが十分に得られていないことから、今後もデータの蓄積を図り両手法の検証を行うこととしたい。

参考文献

- 1) (社)全日本建設技術協会：水文観測，pp94-157,pp221-241, 2002.
- 2) 国土交通事務次官通達：水文観測業務規程の改訂について，国土交通省河川局水文観測業務規程関係集平成17年10月改訂版，pp1-12, 2005.
- 3) 水文・水資源学会研究グループ「河川流量観測高精度化研究会」編：河川流量観測の新時代，<http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/tebakari/newQobs/journal.htm>
- 4) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・石谷隆始：近年における流

量観測技術の高度化について～関連論文のレビュー，寒地土木研究所月報第691号，pp21-33, 2010.

- 5) 千代田新水路の概要及び千代田実験水路，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，
<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/index.html>
- 6) 大串正紀・東海秀義・川井淳一：千代田実験水路での各種観測を踏まえた実河川への適用の可能性について，平成21年度北海道開発技術研究発表会，2010.
- 7) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・三宅洋：十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測，河川技術論文集，第17巻，pp41-46, 2011.
- 8) 市原哲也・島田友典・渡邊康玄・辻珠希：十勝川千代田実験水路の水利特性及び河床形態，河川技術論文集，第15巻，PP243-248, 2009.
- 9) 島田友典・平井康幸・辻珠希：千代田実験水路における越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第54巻，pp811-816, 2010.
- 10) 島田友典・横山洋・平井康幸・三宅洋：千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第55巻，pp841-864, 2011.
- 11) Win River 操作手順書，株式会社SEA，pp31, 2005.
- 12) 深見和彦・今村仁紀・田代洋一・児玉勇人・中島洋一・後藤啓介：ドブプレ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，第14巻，pp307-312, 2008.
- 13) 岡田将治：ADCPを搭載した橋上操作艇による洪水流観測技術の進展，河川流量観測の新時代，pp34-45, 2010.

(2011. 7. 31受付)

ADCPを利用した水理・水文観測事例 —塩水楔と失水・得水量—

CASE STUDIES OF HYDRAULIC AND HYDROLOGIC OBSERVATION USING
THE ADCP —SALT WEDGE AND INFLUENT AND EFFLUENT DISCHARGE—

手計太一¹
Taichi TEBAKARI

¹正会員 博(工) 富山県立大学講師 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

This paper reports the example of the flow regime and discharges observation in the Uchikawa River and the Kurobe River using the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

The Uchikawa had been rich and varied river until 42 years ago. Water environment in the Uchikawa has been deteriorated caused by new port construction and well-drained paddy field development. Sanitization program for the Uchikawa has been carried out by national and local government. However, water environment in the Uchikawa did not reach to drastic improvement. In this study, flow regime in the Uchikawa was observed using the ADCP. As a result, the Uchikawa was effected by seawater regularly.

In order to estimated exchange between river discharge and groundwater, simultaneous measurement of river discharge was carried out using the ADCP in the Kurobe River in 2010 and 2011. In this paper, observation method and results were reported in detail.

Key Words : ADCP, salt wedge, influent discharge, effluent discharge, Uchikawa River
Kurobe River, Toyama Prefecture

1. はじめに

近年になって、水理・水文観測においてADCPが活発に利用されている¹⁾。元々は海洋での利用が目的で開発されたが、2011年に浅水深用が開発され、河川や湖沼などにも利用されている。水深が浅く、流速が遅い水域でも観測ができるため、様々な用途に利用できる。

本稿では、上述の特徴を利用して、河川感潮域における流況観測、そして高速流の河川における流量観測を実施した結果を報告するものである。

2. 塩水楔

河川感潮域における塩水浸入は、治水、利水、環境のいずれにおいても複合的に様々な問題を引き起こしている。塩水浸入の混合形態については、古くから多くの研究が実施され、大きく3種類に分けられている。特に、塩水楔は潮位差の小さい日本海側の河川で多く観測されてい

る。それらの観測方法は主に縦断・横断方向に塩分濃度や流速を連続的に計測するものである。また、密度流に関する理論的研究、数値実験や実験室レベルでの研究についても、数多くの既往研究がある。しかしながら、実際の河川における塩水遡上において、細かい時間分解能でかつ連続的な物理諸量の観測事例は極めて少ないのが実情である。本稿は、超音波ドップラー多層流向流速計(ADCP)を用いて塩水浸入時の鉛直方向の流速分布を観測したいくつかの事例を報告するものである。

(1) 観測概要

本研究では、富山県東部に位置する庄川の右支川の一つである内川(射水市)を対象に観測を実施した。流路延長は2.2km、庄川の分岐点から奈呉ノ浦までの西内川は0.7km、富山新港から奈呉ノ浦までの東内川は1.5kmである。本研究では、西内川における塩水浸入を観測した。西内川には、浄化用水として庄川から合計2.9m³/sを導水している。ただし、9時から17時までの運用であり、その他の時間帯は自然流下させている。塩水が遡上するのは17時から翌日9時までの間であるため、本稿ではこ

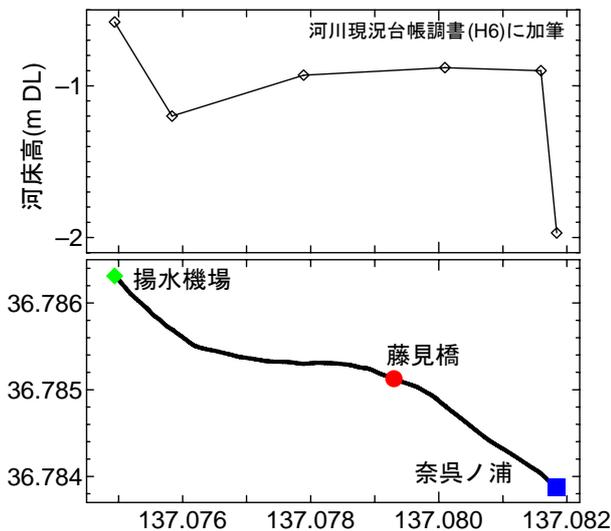


図-1 西内川の平面形状と河床高の縦断変化。

の時間帯の流速分布を示す

図-1に西内川の平面形状と河床高の縦断変化を示す。河口から流路延長267.1mに位置する「藤見橋」においてADCPを用いた鉛直方向の流速分布に関する定点観測を行った。また、図からもわかるように河床勾配は極めて緩勾配である。

表-1はADCPの計測設定条件である。本研究では、河川の流速を3次元で計測できる超音波ドップラー多層流向流速計(ADCP; Teledyne RD Instruments社製)を利用した。

写真-1は定点観測の設置風景である。写真のように、河川中央部にロープで係船し約3日間設置した。この日数は内部メモリーとバッテリーの容量に依存する。

(2) 観測結果

図-2はこれまでに観測を実施した14回の富山湾観測潮位である。2010年8月11日は年間で最も潮位が高い日であり、2月から3月は潮位が最も低い時期である。観測した中で最も潮位の高い2010年8月11日と最も低い2011年2月22日、そして上げ潮時のデータの一つである2010年6月21日の鉛直方向の流速分布の時系列を図-3に示す。図中の赤色系は順流、青色系は逆流(河口からの遡上)を示している。前述したように8月11日は年間最高の潮位があるため、庄川からの揚水を行っていない。そのため、表層塩分と低層塩分の比が大きく、強混合形態で遡上している。一方、他の2つについては、明瞭な楔状に塩水が遡上していることがわかる。これまでの観測においては、8月11日を除いた全ての観測で同様の流速分布が観測された。特に、上げ潮時には極めて明瞭な楔形状が認められる。さらに、塩水が浸入し始めてから約2時間後、順流と逆流を周期的に繰り返すような挙動が認められる。このような周期性は翌日9時まで続いている。

次に、図-4は水深22cm, 55cm, 85cmにおける流速の時系列である。水深22cmは上層の順流、85cmは下層の

表-1 ADCPの計測設定条件。

Workhorse ADCP 1200kHz			
計測モード	WM11	ウォーターピング数	3
計測層厚	0.05~0.03m	ボトムトラック機能	ON
計測層数	50	ボトムピング数	3
アンサンブルタイム	0.43~1.37s	固定観測における流速誤差の標準偏差	0.77cm/s



写真-1 藤見橋における定点観測の様子。

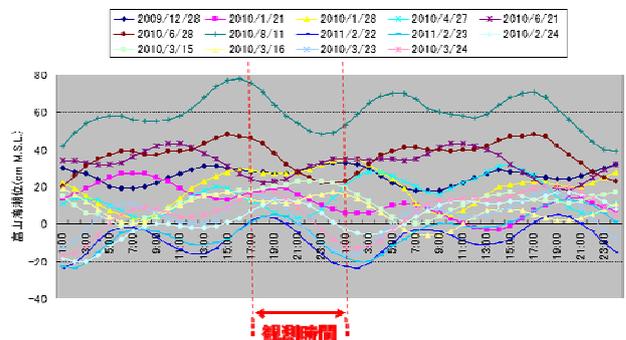


図-2 富山湾観測潮位。

逆流、そして55cmは界面付近を想定している。ここからもわかるように、19時以降はいずれの断面においても、全体的に周期性を持った流速変化をしている。塩水が遡上し始めてから5時間程度経過すると、いずれの断面も流速値は同程度になっている。図-5は長時間の観測を実施した8回の観測について、それぞれ水深50cmの流速の時系列である。前述したような周期特性は、振幅の大小はあるものの、いずれの観測においても認められる。図-4中の水深55cmにおける流速についてスペクトル解析を行った結果を図-6に示す。35.53分に顕著な周期性が認められた。

図-7は17時から9時まで1時間毎の流速の鉛直プロファイルである。17時の時点では、揚水の影響を受けている

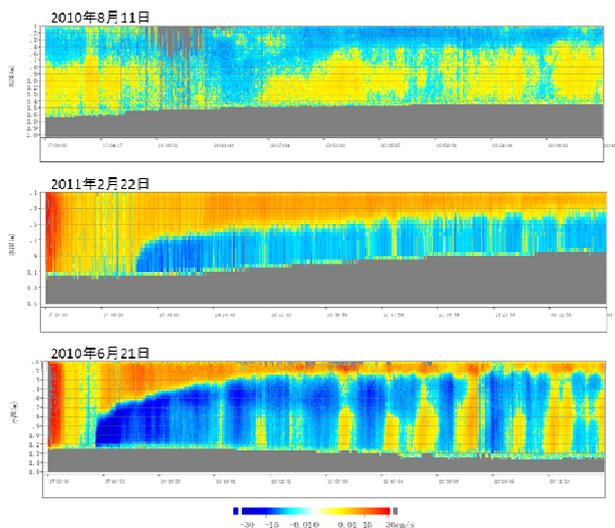


図-3 鉛直方向の流速分布の時系列。

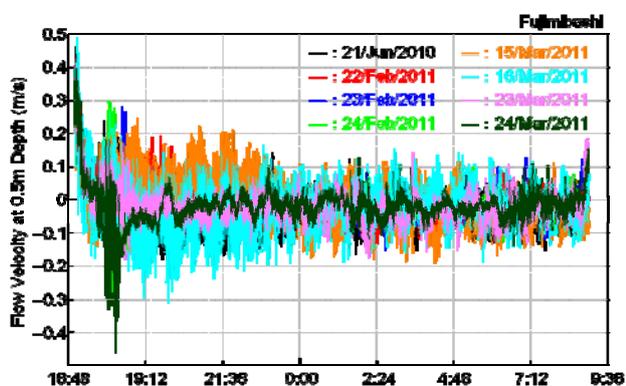


図-4 水深22cm, 55cm, 85cmにおける流速の時系列。

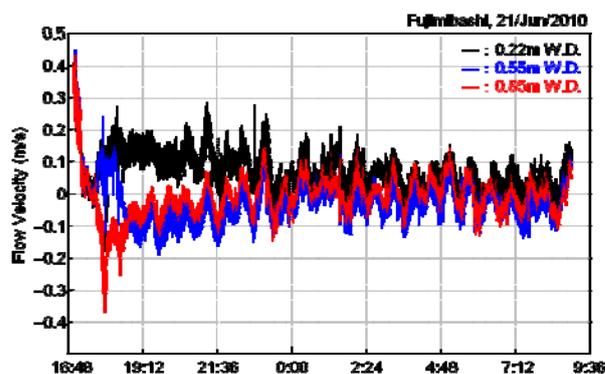


図-5 8回の観測について、水深50cmの流速の時系列。

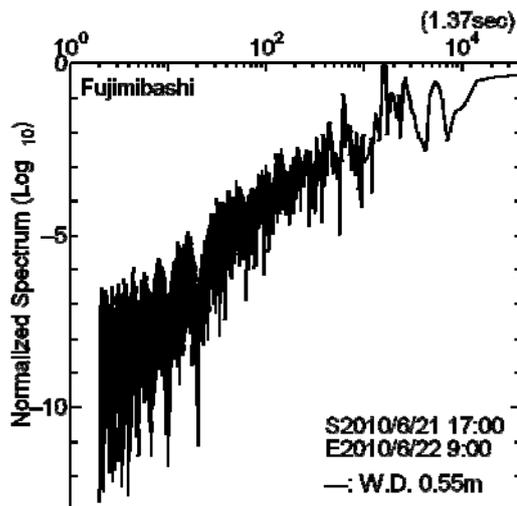


図-6 図-4中の水深55cmにおける流速についてのスペクトル強度。

ため全断面において順流である。18時に下層で最大0.27m/sの逆流が観測されており、塩水が遡上していることがわかる。塩水遡上の先端以降は、分布形状がゆるやかになり、逆流の最大流速は50cm付近に位置している。前述したように、周期的に流速分布が変化していることを反映して、流速値の変動はあるものの、表層付近と水深50cm付近と水深80cm付近の3箇所に変曲点を持つような流速分布形状をしている。

(3) まとめ

感潮河川における塩水の浸入形状をADCPを用いて観測した。その結果、時間分解能が小さくかつ連続的に塩水遡上中の鉛直方向の流速分布を捉えることができ、簡易的にも塩水浸入の混合形態を判別できる可能性が高い。本稿では、塩水楔が浸入中の鉛直方向の流速分布を明らかにし、さらに、塩水浸入時において周期的な流速変化があることがわかった。

3. 黒部川下流部における失水量と得水量

著者らのグループでは、黒部川の河川流量がどの程度黒部川扇状地地下水へ涵養されているかの定量評価を行うため、定期的に同時流量観測を実施している³⁾。ここでの「同時流量観測」とは、本当に同時刻に複数断面において同時にADCPを利用して流量観測をすることである。決して、河川の定常性を仮定して異なる時刻に順番に流量観測を実施することではない。

これまでに2010年6月8日、2010年9月21日、2011年7月3日の3回実施した。観測の概略については既報を参照されたい³⁾。本稿では、得られた観測流量データを報告するとともに、新たに発生した観測の課題について詳述する。

(1) 黒部川流域

図-8は本研究対象である黒部川水系と流域界である。本稿では黒部川扇状地も黒部川流域内として流域界を描いている。黒部川は北アルプスのほぼ中央に位置する鷲羽岳を源とし、3000m級の山々が連なる立山連峰と後立山連峰を流域にもつため、平均河床勾配が1/5~1/119と

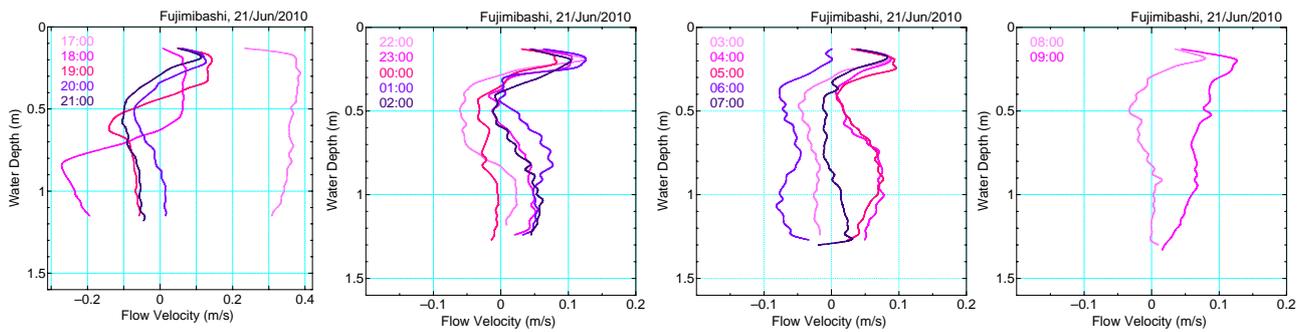


図-7 17時から9時まで1時間毎の流速の鉛直プロファイル。

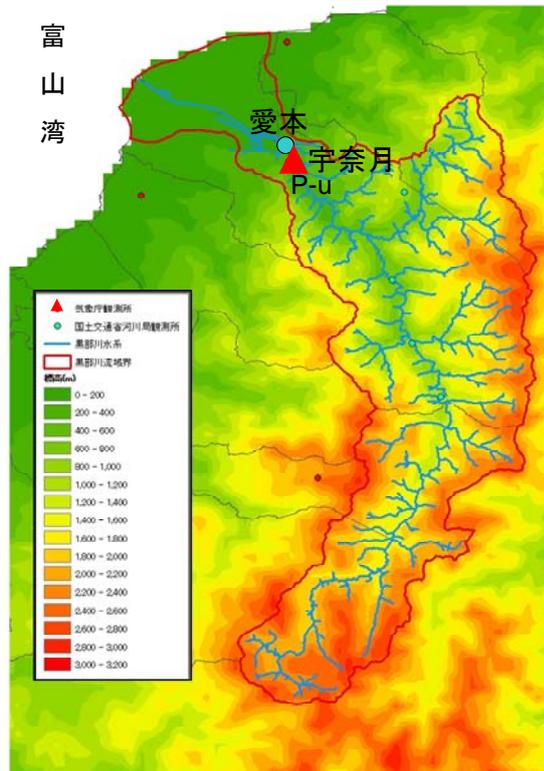


図-8 黒部川水系と流域界。

いう我が国屈指の急流河川の一つである。深い峡谷を流下し、黒部ダム、仙人ダム、小屋平ダムを経て宇奈月町に達する。宇奈月から下流の川幅は広くなり、大きく蛇行しながら愛本にいたる。愛本には1932年に建設された合口頭首工があり、両岸に広がる扇状地に向けて灌漑用水が取水されている。右岸に7用水、左岸に6用水を合口し、最大取水量は $75.4\text{m}^3/\text{s}$ である⁴⁾。

黒部川は宇奈月町愛本で山間地から平野部に抜け、そこから黒部市、入善町にかけて黒部川扇状地と呼ばれる美しい扇状地を形成している。この大扇状地を抜けると富山湾にいたる。黒部川の幹川流路延長は85km、そのうち83.5%を占める71kmは山地を流れ、残り14kmは平地を流下している。流域面積は 682km^2 、そのうち97.1%は山地である。

黒部川流域は全国有数の多雨多雪地域であり、流域の年平均降水量が非常に多く、平野部にある黒部市では約



図-9 黒部川における流量観測地点。

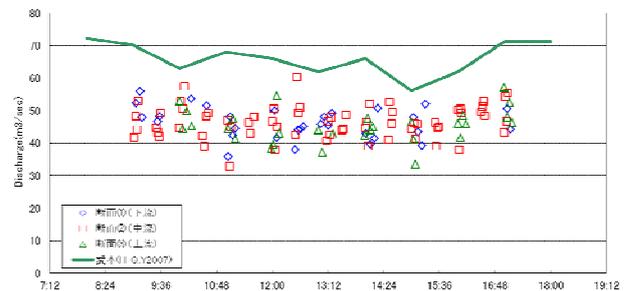


図-10 2010年6月8日の流量観測の結果。

2300mm、中流部にあたる宇奈月では約3500mm、上流部にある仙人谷観測所では約4000mmの降水量がある。

黒部川扇状地は山間部から抜け出た河川が河床の傾斜が緩やかになることによって、流れも緩やかになり、土砂が堆積して形成された地形である。黒部川の扇状地は上流の花崗岩地帯から流出してきた透水性の良い土砂を含むため、黒部川の水が伏流水となって地下水を涵養している。したがって、この扇状地では黒部川の伏流水を水源とした湧水がいたるところで湧き出ている。

黒部平野の地形は、扇状地東側の愛本新から金山にかけて旧扇状地からなる砂礫台地が分布し、その西端では崖を形成し新扇状地と接しており、この台地の東側には小川流域の平野がある⁵⁾。一方、扇状地の南側には下立から浦山にかかる部分と前沢周辺とに砂礫からなる洪積台地が分布しており、その背後にはかなり開析の進んだ高位の砂礫からなる洪積台地がある。

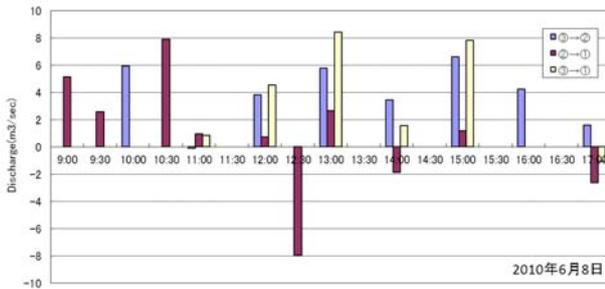


図-11 30分毎平均流量観測データの変化。

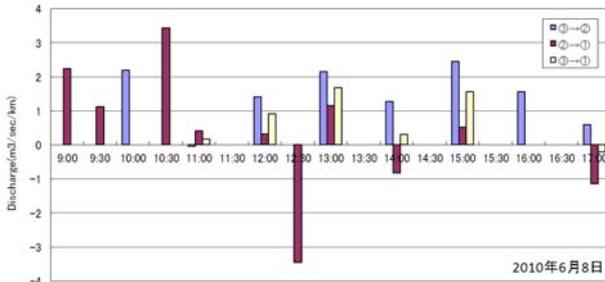


図-12 1kmあたりの失水量と得水量の変化。

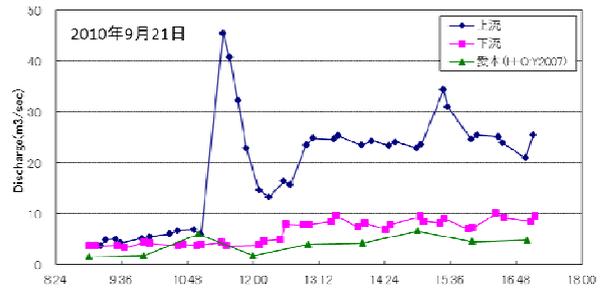


図-13 2010年9月21日の流量観測の結果。

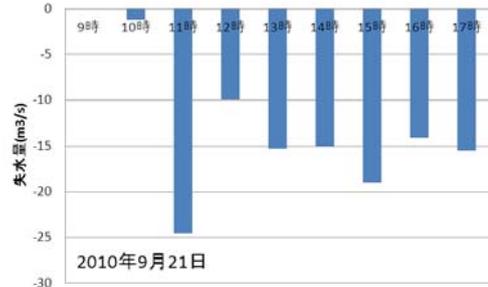


図-14 2010年9月21日の流量変化の時系列。

(2) 流量観測結果

図-9は同時流量観測を実施した観測断面を示している。図中の数字は河口からの距離を示している。断面①と断面②の間の距離は2.3km、断面②と断面③の間の距離は2.7kmである。それぞれの区間の流量変化を捉えようという試みである。いずれの地点においても、河床勾配は約1/90であり、非常に急峻である。

図-10は2010年6月8日に実施した同時流量観測の結果である。図中の太線は、国土交通省の愛本観測所における水位データから2007年のH-Q関係を利用して算出した流量の時系列である。愛本での流量は60~70m³/s程度であるのに対して、そこから約1.1km下流の断面③は40~50m³/s程度であり30~10m³/s程度が失水している計算になる。しかし、黒部川が極めて大きい透水性の河床であっても、この失水量は過大であろう。いずれかの流量観測結果が過大もしくは過小であったことが考えられる。これまでのところ、どちらが過大/過小であるのかを評価できていない。

次に、ADCPだけで流量観測を行った断面①、②、③の流量データに着目する。断面①の平均値は46.1m³/s、最大値55.9m³/s、最小値は35.8m³/s、断面②の平均値は46.6m³/s、最大値は60.4m³/s、最小値は33.0m³/s、断面③の平均値は45.3m³/s、最大値は57.2m³/s、最小値は33.6m³/sである。各断面の最大値と最小値の差は25.6~20.1m³/sである。半日の中でも、これだけ大きい流量の変動があるのは、扇状地性河川に依るものであろう。黒部川は扇頂部から河口に至るまで、河道内はいくつもの網状河川になっており、流量の算出が非常に難しい。本

研究では、河道内を一本の川道になっている箇所を選んで流量観測を行っているが、季節によっては観測には不適切な断面になることもある。

図-11は9時から30分毎に観測した2~4観測データ(1往復もしくは2往復したデータの平均値を時系列にしたものである。図中の縦軸のプラスは得水量、マイナスは失水量を意味している。全体的に、下流にしたがって得水している傾向にある。しかし、時間帯によっては、断面②から断面①の区間では失水している。一方、断面③から断面②にかけては観測時間を通して得水している。

図-12は図-11を1kmあたりの得水量/失水量に換算したグラフである。全体に、得水量、失水量ともに最大で約3m³/s/kmである。断面③から断面②の区間では平均すると1kmあたり1.5m³/sが得水している。既往研究によっても、黒部川は全域にわたって河川と地下水の交流が盛んであり、特に渇水期には極めて多くの河川水が地下水を涵養していることが報告されている⁹⁾。

図-13は2010年9月21日の流量観測データである。ここでも同様に愛本観測所における流量データは2007年のH-Q関係から算出したものである。この観測では、観測スタッフ数の問題から、断面③(上流)と断面①(下流)の2断面での観測を実施した。午前11時頃に大きな出水を観測しているが、これは上流ダムの放流に依るものである。愛本観測所のデータは1時間値であるため、この出水を反映できていない。出水前後の上流と下流の流量を比較すると、出水前は上流と下流の流量に大きな差はないものの、出水後はその差が非常に大きい。

図-14は図-13のデータを毎正時に平均して、上流と下流の流量変化を算出したものである。上流のダムからの

放流があったという特殊な事情はあるものの、全時間を通してこの区間では失水していることがわかる。最大で約25m³/sにも達し、1kmあたりに換算すると約5m³/sである。極めて大量の河川水が地下へ涵養されていることがわかる。

(3) 観測方法における新たな問題点

2011年7月3日に実施した同時流量観測では、大きな問題が発生した。当初、総勢15名のスタッフを揃え、前年と同様に各断面7名体制で臨んだ。しかしながら、想定以上の流量、流速を観測し、1断面に10名以上のスタッフが必要となった。その観測風景を写真-2に示す。片岸に6名が必要であった。この現場のように、橋桁等の河川横断構造物がない場合には、両岸から牽引しなければならない。川幅が広がると、牽引ロープが川の流れに巻き込まれ、極めて大きい流体力が掛り重たい負担になる。また、流速が早くなると、ADCPのボートの揺動が大きくなり、バッテリー接続部の接触不良でデータ欠測が発生した。

このように、観測機材の性能が高くても、それを使う状況が異常であると、その性能を活かすことができない。観測そのものの態勢づくりを強化しないとより精度の高い観測データは得られない。

4. 最後に

本稿では、著者らのグループが実施している内川における流況観測の結果の一部と黒部川における同時流量観測の結果の一部を報告した。いずれにおいても、まだ多くの解析が必要であり、検討、議論の余地がある。

一方、観測手法に着目すると、これまでにない観測結果が得られる方法を明示したとともに、新たな観測の問題点が得られた。今後、特に、新たに得られた問題点を克服し、新しい科学的発見に寄与したい。

謝辞：本研究の一部は、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業と科学研究費助成事業(若手研究B)の支援を受けた。また、観測においては、富山県立大学環境



写真-2 2011年7月3日の観測風景。

工学科と中央大学河川・水文研究室の学生諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 水文・水資源学会研究グループ「河川流量観測高精度化研究会」編: 河川流量観測の新時代, 93pp, 2010.
- 2) 小松利光, 孫双科, 安達貴浩, 松岡弘文, 大和則夫, 朝位孝二: 川内川河口部における塩水遡上について, 水工学論文集, 第40巻, pp.493-498, 1996.
- 3) 中村宏, 稲松敏夫: 神通川河口の塩水くさびについて, 第13回海岸工学講演会講演集, pp.295-301, 1966.
- 4) 手計太一: ADCPを利用した流況・流量観測事例～内川と黒部川～, 河川流量観測の新時代, 水文・水資源学会研究グループ「河川流量観測高精度化研究会」編, pp.56-65, 2010.
- 5) 富山県立大学工学部環境工学科編: 新富山の水環境, (有)TC出版プロジェクト, 2009.
- 6) 藤井昭二: 黒部川扇状地の形成と富山湾周辺部の埋没林について, 地球科学, 78, pp.11-20, 1965.
- 7) 根勇編著: 実例による新しい地下水調査法, 山海堂, 171pp, 1991.

(2011. 7. 31受付)

「河川流量観測の新時代」第2巻の発刊にあたって

昨年に発行した「河川流量観測の新時代」が私たちの想像以上にご好評いただきました。その前から第2巻を発行することは決まっていたものの、さらに良いものにしなければならぬと気が引き締まる思いで編集いたしました。

本巻では特に水理・水文モデル側から現地観測への注文・期待をいただきました。また、最新の観測技術の動向について、さらには実際の現地観測の結果など熱い研究論文が揃いました。執筆者各位には厚く御礼申し上げます。

3月11日の東日本大震災では、多くの水位計や潮位計が地震・津波によって破壊され、データを取得できなかったと報告されています。自然現象を測るには大きなリスクと伴うという貴重な課題を残したといっても過言ではないでしょう。自然現象を測るという行為は、まさに自然を知りたいという知的好奇心への満足とともに、その知識を社会へ還元する極めて重要な使命の一つです。災害に強い水位計や潮位計の開発は急務であり、今後の河川・海岸・港湾管理上の大きな課題の一つでしょう。

簡単に思われている低水流量観測においても、河川の構造によって、ちょっとした流量・流速の増加に人間は対応できません。先日、筆者は富山県内の某河川でそのような体験をし、痛い目に遭いました。自然現象を測る難しさを改めて痛感しました。このような経験を広く周知することによって、さらに高い水準の観測技術・研究開発に繋がって欲しいという思いで本書を編集しました。

本書の刊行にあたって、執筆者には次のようなお願いをしています。完成された研究・技術はきっとどこか立派な論文集に提出されているので、本書には、研究・開発過程における失敗談やボツネタを書いて欲しいとお願いしました。技術の発展には“失敗”研究さえも広く公開することが必要だと考えました。さらに、観測や測定に使用した機材や備品の品名や製造会社、必要な人員等の詳細も記載して欲しいとお願いしました。なぜなら、立派な論文集の研究論文においても、「本当に何を使って、どうやって観測したの？」と観測自体がブラックボックスになっていることがあるからです。また、「本当は計測したいのだが、最初の入口もわからないので困っている」、というご意見へ反映させたいと願いながら本書を編集しました。

予算に制約があったため、出版物は白黒印刷とせざるを得ませんでした。しかし、下記ウェブサイト論文をダウンロードできるようにしましたので、カラー図についてはここを参照してください。

<http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/tebakari/newQobs/journal.htm>

本研究会では、来年度に第3号（2012年8月）を発刊することを決定しました。ご執筆いただける方は是非とも本研究会にコンタクトを取っていただければ幸いです。本会はどのような分野の方々へも門戸を大きく開いています。

最後に、各執筆者におかれましては、大変お忙しい中を原稿料もなくご執筆いただきました。ここに記して重ね重ね深く感謝いたします。

水文・水資源学会 研究グループ
「河川流量観測高精度化研究会」
代表 手計太一

水文・水資源学会 研究グループ
「河川流量観測高精度化研究会」

岡田将治	高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科
加藤拓磨	国土技術政策総合研究所 河川研究部 水資源研究室
◎手計太一	富山県立大学 工学部 環境工学科
宮本守	(独)土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM)
安田浩保	新潟大学 災害復興科学研究所
萬矢敦啓	(独)土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM)

◎代表

新型 ADCP を中心とした複合計測システム

- ▶ 河川 / 湖沼の流量・流況・ボトム形状を同時に把握
- ▶ ADCP の反射強度データを用いて広範囲の濁度プロファイルを把握
- ▶ 小型ボートに搭載することにより、現場到着後即座に観測体制へ。

「遠隔操作装置：RemoADCP」
・計測データを陸上へ転送
・最大通信レンジ：1km（理論値）

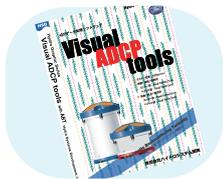
「GPS：各種接続可」
・RTK-GPS
・D-GPS
・GPS コンパス
・計測位置を正確に把握

「小型ボート：高速セーフティサーペイヤー」
・対応流速： $\sim 6\text{m/s}$
・船体内部に各種制御部格納可能

「流速計：RiverOvsriver」
・測定レンジ：0.25m ~ 40m
・ボトムの誤認が少ない 600kHz
・層厚自動切替
・層数自動切替
・測定モード自動切替
・強い濁度耐性

「音響測深機：HDS」
・測定レンジ：0.4 ~ 1500m
・測深精度：1.5%FS
・分解能：1cm
・テキスト（CSV）出力
・二次元 / 三次元図描画

アクセサリ



「Visual ADCP tools」

- ・ADCP 使用者の立場から視点で開発された ADCP データ処理ソフトウェア
- ・各種ノイズ除去、各種平均処理、スムージング、流量算出など充実した機能

「ABT tools」

- ・超音波濁度 ABT 算出ソフトウェア
- ・ADCP の反射強度から濁度プロファイルを算出



GPS コンパス「G-com（ジーコン）」

- ・小型ボートに装着するための軽量・コンパクト設計（市販最小サイズ）
- ・NMEA（HDT、GGA、VTG など）を最大 10Hz で出力可能
- ・途中で衛星電波が途切れても、MEMS により計測状態を維持（約 3 分間）
- ・測定精度 $\pm 1^\circ$ （アンテナスパンにより異なる）



 **TELEDYNE**
RD INSTRUMENTS
A Teledyne Technologies Company

米国 Teledyne RD Instruments 総部門 日本代理店

株式会社 ハイドロシステム開発

<http://www.hydro-sys.com/>

大阪本社

住所：大阪府大阪市西区本田3-2-18
ハイドロ第一ビル
TEL：06-6581-8156
FAX：06-6581-8104

東京支店

住所：東京都江戸川区西瑞江3-19-10
ウエルズ21 パート1 D号室
TEL：03-5664-8156
FAX：03-5664-8106

※本件事務所移転に伴い、
電話及び FAX 番号が変わりました。