

# 非接触型流速計による河川の流量観測

## WATER DISCHARGE MEASUREMENT IN RIVERS WITH NON-CONTACT CURRENT METER

岩見洋一<sup>1</sup>・萬矢敦啓<sup>2</sup>・本永良樹<sup>1</sup>・藤田一郎<sup>3</sup>

Yoichi IWAMI, Atsuhiko YOROZUYA, Yoshiki MOTONAGA and Ichiro FUJITA

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所ICCHARM 工修 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>独立行政法人土木研究所ICCHARM Ph.D. (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>神戸大学大学院工学研究科教授 学術博 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

This paper reports the recent development of water discharge measurement techniques in rivers, focusing on non-contact current meters, especially a radio current meter and STIV method. The authors have developed these techniques and disseminated them internally through JSCE and internationally through International Organization for Standardization, ISO. This paper was originally submitted to ISO, and rewritten to Japanese Engineers. In addition, the main component is including the important knowledge about the water discharge measurement by non-contact current meters as well as ADCP measurement.

**Key Words :** *Non-contact current meter, radio current meter, STIV, ADCP, ISO*

### 1. はじめに

日本の河川は、大陸河川と比較すると河床勾配が大きく、流路延長が短いことから急流河川に位置づけられる。それ故に日本国内における流量観測の難しさは、速い流速と高濁度、大きな河床変動を伴うこと、さらに出水を読むことの難しさである。一方で、実測流量値は、河道計画上の基礎データとなること、質の高い水位流量関係を把握するための必須データであることから、河道計画及び河道管理上、計測すべき優先度の高いデータである。日本国においてはこのような認識が流量観測業務の発注者から受注者に至るまで広く浸透しているため、あらゆる事象での計測結果が蓄積し、また新しい計測技術の開発が高く評価される。これらは日本国の貴重な財産であり、今後の河川工学の発展に大きく貢献することが期待される。

新しい流量観測機器は二つのグループに分けられる。一つは河川構造物として半永久的に設置される固定設置型の機器であり、もう一つは観測者の関心に基づきどこへでも持ち運べて計測できる可搬式の機器である。近年、日本土木学会 (Japan Society of Civil Engineers, JSCE) において、複数の固定設置型観測システムが研究されている。例えば、電波式流速計(山口他<sup>1)</sup>、萬矢他<sup>2)</sup>、超音波

流速計(木下他<sup>3)</sup>、中川他<sup>4)</sup>、川西他<sup>5,6)</sup>、H-ADCP(岡田他<sup>7)</sup>、二瓶他<sup>8)</sup>そして画像解析手法(藤田他<sup>9-13)</sup>などがある。電波式流速計などで計測する表面流速については、風の影響に対する補正に関する研究がなされてきた(本永他<sup>14)</sup>、柏田他<sup>15)</sup>。またこれらの固定設置型の機器の特徴は自動観測、面的な流況の観測、高いサンプリング周波数での計測が可能なこと、等である。また可搬式の流速計に関しては、橋上操作艇(リバーボート)およびGPSや音響測深器、GPSコンパスなどの周辺機器の開発・改良により、橋上操作艇に搭載したADCPによる横断観測が我が国の厳しい河川状況においても実用化されるようになってきた<sup>16,17,18)</sup>。このような技術の発展を背景として、これまで実観測では計測が困難と思われる事象を説明できるようになってきた。それらは例えば洪水時の河床変動、河床粗度係数の変化、掃流砂の時間変化等である。

これらの技術を研究し開発するために、日本土木学会内の水理水文委員会内に設置された流量観測検討小委員会が流量観測ワークショップを開催した。加えて、土木研究所の技術的な支援の下、国土交通省のいくつかの河川事務所が、先行的に電波式流速計、STIV (Space-Time Image Velocimetry)、ADCPの曳航観測に関する調査・研究を行い、大規模な河床変動を伴う規模の洪水及び強風を伴う気象条件等、あらゆる条件における観測事例を

蓄積した。

これらの技術，計測結果は，河川砂防技術基準等の国内における基準作りに使用するとどまらず，International Organization for Standardization (ISO)へ反映させることが，日本の国益となる．現に，土木研究所はISOの分科会であるTC113 (Hydrometry)のSC1 (velocity area method)の日本代表であり，これらの日本のデータ及び技術を反映させ始めている．例えば，SC1 ISO1070ではSlope-Area methodが議論されており，これは水位から流量を換算する際に水面勾配の効果を考慮して算出する手法である．しかし，概念的，理論的な考察はあるが，あらゆる流況での適用性を議論することは容易ではない．著者等のISOでの役割は，日本で計測したデータを基に，これらの精度評価をすることである．また，SC1では非接触型流量観測手法に関して基準化するための議論が始まり，著者等の役割は国際基準のファーストドラフトを作成することである．

本報告は，非接触型流量観測手法の議論のためにISOに提出した技術レポート<sup>19)</sup>の日本語による解説と，非接触型流量観測手法を完成させるための今後の議論を紹介する．なお，ここで使用したデータは，土木学会流量観測検討小委員会が開催した流量観測ワークショップにおける観測結果，および，土木研究所の技術的な支援を受け，河川事務所が実施した観測結果を用いている．

## 2. 観測手法の種類

技術的に原理の異なる3つの観測システムが流況に応じて選択される．流況として，1)水面の振動の激しい速い流れ，2)様々な擾乱を含む流速2~3m/sの流れ，3)感潮域の流れ，などである．1)の流況については，非接触型の電波式流速計が適切である．河川横断方向に水位が一定でなくても，電波式流速計は適切な値を得ることができる．この機器の設置台数は川幅に応じて決まる．2)の流況については，川の片岸からビデオカメラ一台で横断全体の観測ができる場合には，ビデオカメラで撮影した画像を使用するSTIV (Space-Time Image Velocimetry)が適切である．川幅が約150mより広ければ，反対側の岸からもう一台のカメラにより撮影することが必要となる．STIVはLSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)とは異なり，流速測定の精度は画像のピクセル・サイズには依存しない．STIVは電波式流速計のように水表面の波を必要とするものであるが，ルールに従って配置的に投下された浮子と組み合わせることで波がなくても観測を可能とする．3)の流況については，非常に遅い流速も含め，最も広い流速範囲を計測できるH-ADCPが最適である．他の技術とは違い，H-ADCPは水面の波は必要としないが，トランスデューサーが水面下に十分沈むだけの水深が必要となる．

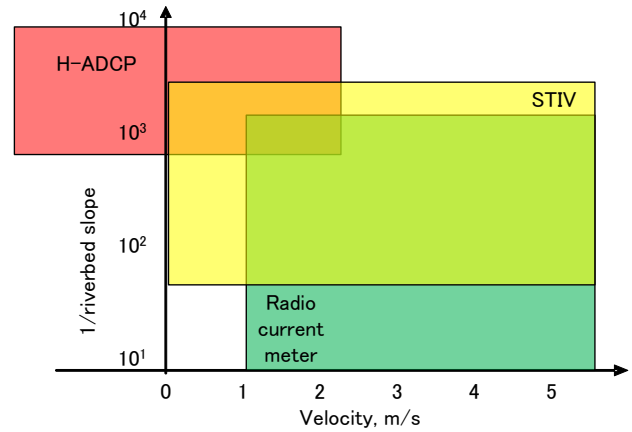


図-1 流況と観測機器の関係

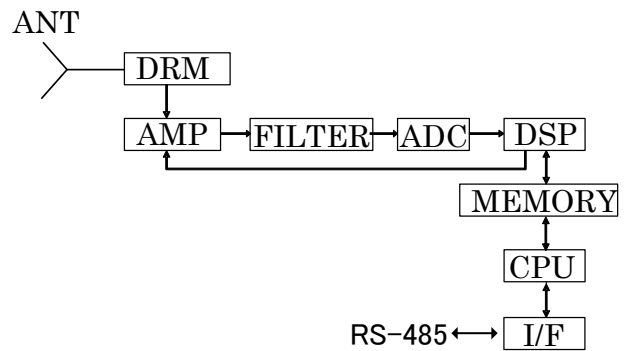


図-2 電波式流速計の機能ブロック図

議論を明確にするために，図-1に流況と機器との関係を示す．図の縦軸は河床勾配であり，これは水表面振動の程度を示す指標である．一方，横軸は流速である．両軸に示した流れに関するこれらの指標は独立変数ではないが，本論文において機器の適用範囲に関する議論を明確にする上で役立つ．本報告では，STIVや電波式流速計のような非接触型流速計について議論する．

## 3. 観測手法の原理

### (1) 電波式流速計

電波式流速計は非接触型の観測機器であり，ドップラー効果を技術的原理として利用している．電波式流速計は河川表面に向けてマイクロ波を送受信している．送信波と受信波の周波数の差は，角度補正係数を乗ずることで河川表面流速に変換される．電波式流速計は河川表面に何らかの波紋がある時に流速を計測できるが，河川表明がさざ波すらない真っ平らな状態であれば，受信信号の強度が十分でないため計測ができなくなる．河川表面からの受信信号は様々なスケールの渦に起因する複雑な特徴を有しており，電波式流速計には以下に述べるようにデジタルデータ処理技術が必要となる．図-2は電波式流速計の機能ブロック図である．各ブロックは，ANT：

アンテナ, DRM: ドップラーレーダモジュール (マイクロ波の発信, 送信波と受信波の混合検波を行う), AMP: 交流信号増幅器 (DSPからの設定により利得の調整が可能), FILTER: フィルタ回路 (計測対象の信号のみを通過させる. 流速0.5m/s~20.0m/sの測定範囲に対して, 周波数14Hz~1400Hzの通過範囲を持つ. また, A/Dのためのアンチエイリアスフィルタの機能も兼ねる) である. ADCはドップラー信号を取り込むためのA/D変換機を意味する. DSPはADCの制御, FFT演算, ドップラースペクトルの積算, ピークサーチ処理を行う. MEMORYはS-RAMであり, DSPとCPUの双方からアクセス可能である. IFは例えばRS-485などを介して外部装置とやり取りするインターフェースである. ピークサーチ処理は基本的にそれぞれの観測値にFFT演算を施し周波数のピーク位置を探し出し, ピーク周波数の平均を計算する. この平均処理過程において, 河川における水表面流速に対応するものとは認識されなかった周波数は除外される.

(2) Space-Time Image Velocimetry (STIV)

STIV (Space-Time Image Velocimetry) はビデオ画像から河川表面流速を測定する画像処理技術の一つであり, 非接触型観測機器に分類される. 流速測定を実施するためには, ビデオ画像は川の近く, 例えば河川堤防上あるいは橋上などから撮影されること, さらに水路幅全体と両岸が画像内に収まるカメラアングルが望ましい. また標定点は両岸に異なる標高で分布していることが望ましい. 最低でも6点の標定点を用いて, 写像変換処理を実施する. 写像変換処理後, STIV 画像処理が開始される. 図-3はビデオ画像から抽出した河川, 標定点, そして検査線が映っている画像例である. 検査線は河川流下軸に平行に配置される. また, 検査線数は任意に設定できる. 図-4は図-3に幾何補正を施した画像である. この図から分かる通り, 検査線は河川に沿って平行であり, かつ空間的に等間隔で配置されている. STIVでは各検査線上におけるある一点を時間ごとに追跡する. 図-5はSTI (Space-Time Image) の概念図である. 図-5の上部の線は検査線を表している. この線は図-5に示すように時間軸を持つ二次元の画像に拡張される. T=n秒時にA点にあったものが, 検査線に沿ってT=n+1秒時にはB点へ, T=n+2秒時にはC点へ移動したとする. 2次元の図面では, 検査線に沿ったそれぞれの点は時間軸における「r」の付いた点に対応している. つまりAはA'に対応している. それゆえ, A点から始まる検査線は2次元の図面における赤線になる. 他の点が検査線上で選択されれば, 2次元の図面上で他の線が現れる. 全ての点が選択されれば, 図-6に示すSTI (Space Time Image) が作成される. この図に示されている

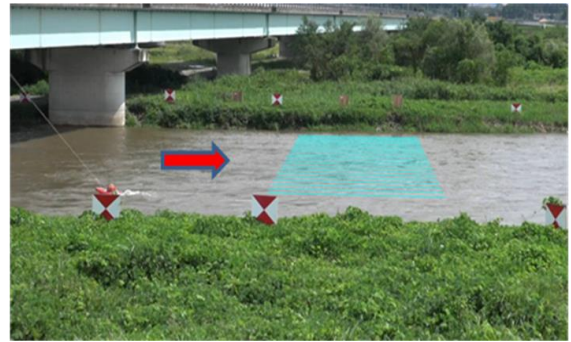


図-3 ビデオカメラで撮影された流れ, 標定点および検査線の例

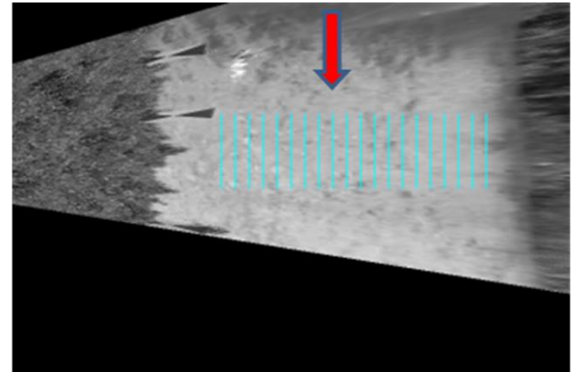


図-4 幾何補正を施した図-3の画像

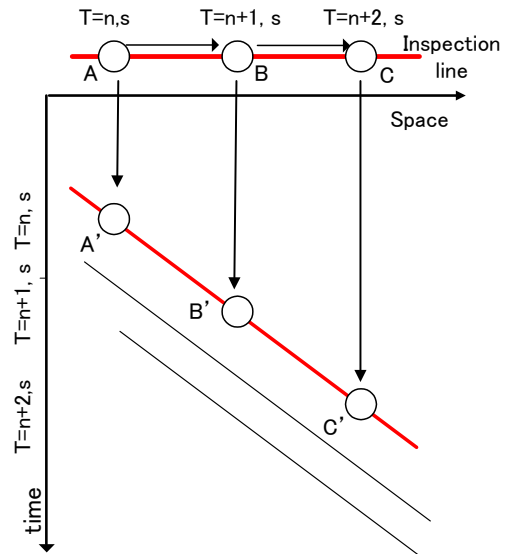


図-5 STI 概念図

ように,  $\phi$ は検査線の長さを表す  $L$  と検査線上を対象物が通過するのに要した時間を表す  $S$  から成る. それゆえ, 流速  $U$ は概念的には次式のように決定される.

$$U = f(L/S), \quad L/S = \tan \phi = n_L/n_S$$

ここに,  $n_L, n_S$  はSTI領域における $L$ と $S$ のピクセル数を表している. 両軸の次元が異なっているため, 実際の



流速Uは次のように定義される。

$$U = \frac{S_x \cdot n_L}{S_t \cdot n_s} = \frac{S_x}{S_t} \tan \phi$$

ここに、 $S_x$  [m/pixel]：空間の単位スケール、 $S_t$  [sec/pixel]：時間の単位スケールである。図-6において、検査線を通しているのは波紋と思われる。波紋が何もなければ、STIは真っ白になり、流速が決定できない。一方、流木あるいは浮子が検査線上を通過する場合、非常に明瞭な線が形成される。STIVにより得られる流速は時間平均値である。実際、平均時間は対象物が検査線上を通過するのに要した時間または解析者の意図したSTIの長さ依存する。流れの非定常性が非常に強い場合、単一のSTI内で角度 $\phi$ は一定ではなくなる。STIつまり図-6を基に、単一の線が人の判断で決定されるが、これはヒューマンエラーを含む可能性がある。このエラーを除去するために、高速フーリエ変換（FFT）の適用が有益である可能性がある。

図-7はSTIソフトの画面上に現れる小ウィンドウ内の方向ベクトルを表している。このベクトルを用いて、バンドパスフィルターを含むFFT解析を実施し、平均ベクトルを決定する。言い換えれば、FFTにより平均勾配が決定される。追加的な事項として、カメラレンズ上の雨滴によりSTIが乱される可能性がある。このエラーを除去するために、STIVは異なるオプションを有するが、それは藤田らの論文<sup>10,11)</sup>を参考としてもらいたい。

#### 4. 機器の仕様

##### (1) 非接触型電波式流速計

2種類の非接触型電波式流速計が市販されている。一つは固定設置式の流速計であり、もう一つは可搬式の流速計である。これらの仕様を表-1にまとめる。機器の設置数は川幅に依存する。川幅に対応する機器設置数については表-2を参照されたい。

##### (2) STIV

STIVは、使用するビデオカメラに依存するため、詳細な仕様というものはない。通常のビデオカメラによるSTIVでは川幅100~200m内に設置した検査線を対象として最大10m/sまで流速を測定できる。遠赤外線カメラを用いれば昼夜関係なくSTIV計測が可能となる。

#### 5. 検証

非接触型電波式流速計やSTIVによる観測結果を検証するために、電磁流速計、プライス式流速計、橋上操作艇に搭載した aDcp (acoustic Doppler

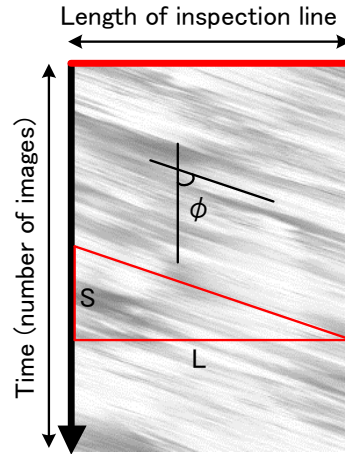


図-6 STI

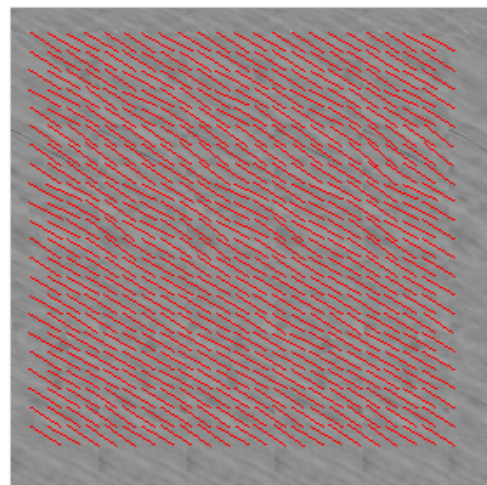


図-7 STI小ウィンドウ上の角度ベクトル

表-1 電波式流速計の仕様

	固定設置式	可搬式
周波数	10.525GHz±15MHz	MON 24.15GHz 7mW
計測範囲	0.5~20m/s	0.5~20m/s
精度	±2%, ±0.05m/s	±2%, ±0.05m/s
分解能	0.01m/s	0.01m/s
観測周期	Select from 1sec to 2min	Select from 1sec to 1min
角度	Depression : 20 ~ 45 degrees (40 degree is recommended)	Depression : 20 ~ 45 degrees (40 degree is recommended)
距離	1 ~ 20 m	1 ~ 20 m
使用環境	Temperature : -20 ~ 50 degrees	Temperature : -20 ~ 50 degrees
電源	DC48V, Max 0.12A	AA battery ×3 or DC 10.8 ~ 16.5V
半角値	10°	10°

表-2 河川幅に対する機器設置数

川幅	50m以下	50-100m	100-200m	200-400m	400-800m	over 800m
数	3	4	5	6	7	8

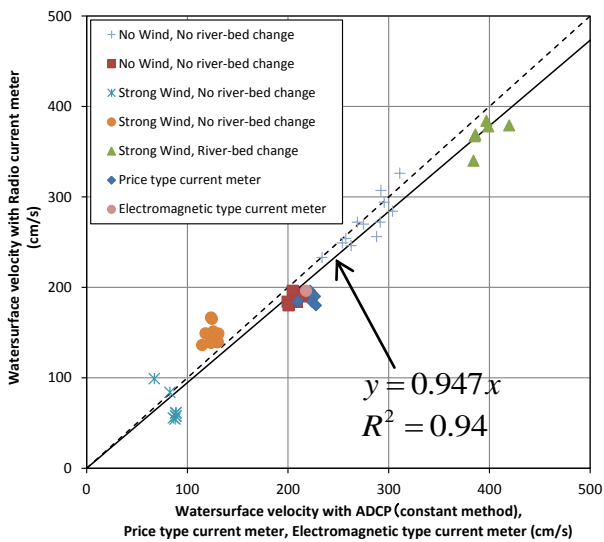


図-8 電波式流速計と他機器との相関（風補正なし）

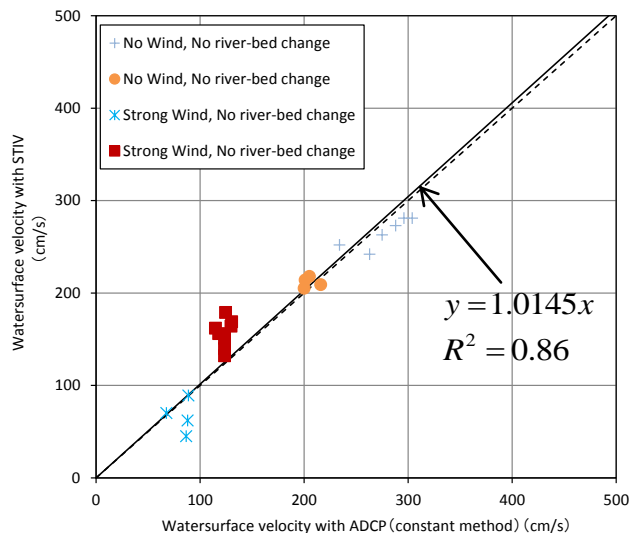


図-10 STIVとaDcpの相関（風補正なし）

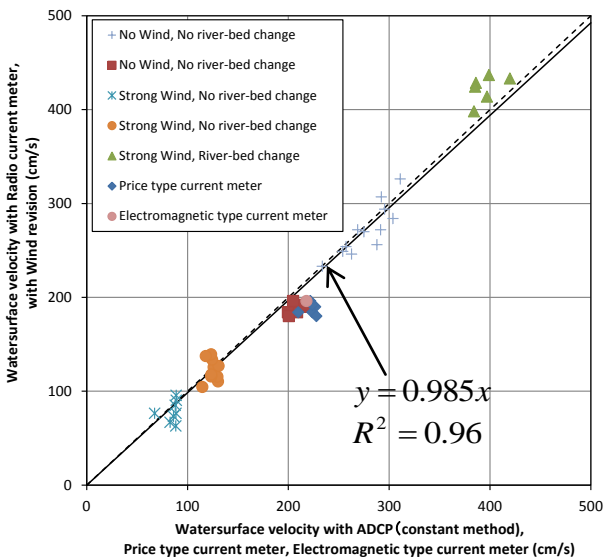


図-9 電波式流速計と他機器との相関（風補正済み）

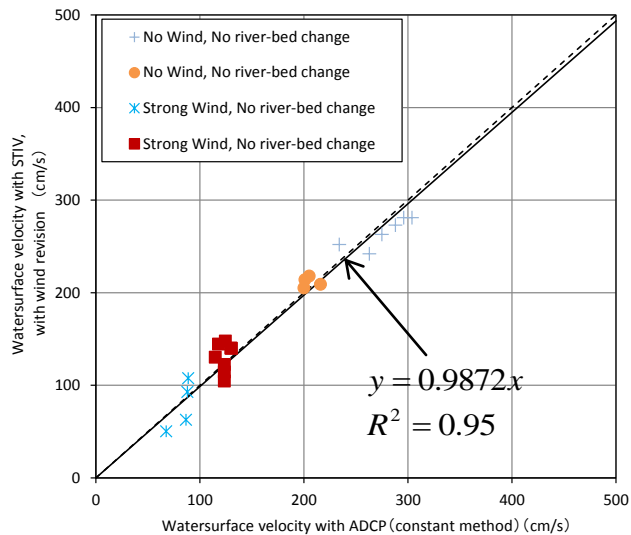


図-11 STIVとaDcpの相関（風補正済み）

current profiler) など他の観測機器を用いて水面付近の流速を計測した。これらの機器による観測を河床変動のある／なし、風のある／なし、など様々な条件下で実施した。aDcp 計測に関しては、流速鉛直分布を計測するために橋上操作艇を定点にとどめて、ある一定時間の観測を実施した。水面の流速を推定するために、constant 法を採用した。constant 法の詳細ならびに採用理由については本報告の 9. 補遺にまとめている。電磁流速計およびプライス式流速計については水面下 10~15cm のところを計測している。

## 6. 観測結果

### (1) 非接触型電波式流速計

図-8は様々な手法による観測結果の相関図である。横軸がaDcp、プライス式流速計、電磁流速計による流速である。一方、縦軸は電波式流速計による流速である。これらのデータは様々な河床変動条件、風条件における同時観測により得られたものである。これらのデータはほぼ図中45°の線に乗っており、概ね一致していることがわかる。実際、プロットしたデータに対して最小二乗法により得られる近似直線の勾配は0.946、 $R^2$ が0.94である。このように良好な一致が見られたが、45°の線から若干ずれているデータも見られる。例えば、図中▲で示したデータは河川流下方向に対する逆風が卓越し、かつ河床が変動している条件下での観測結果である。このような条件下における流速鉛直分布の一例を図-A4に示す。このように、水面付近の流速鉛直分布は強風により上流側へ向けて曲げられる。同様に●で示したデータは河川流下方向に対して順風が卓越している時のものである。このような場合の流速鉛直分布の例を図-A5に示す。水

面付近の流速鉛直分布が図-A4とは逆方向に曲げられている。このように、本報告の9.補遺にまとめたとおり、水面付近の流速は風の影響を強く受ける。本永ら<sup>14)</sup>は風の影響を除去するために、現地における観測結果を基にして次式を提案している。

$$U_{修正NCC} = U_{NCC} - 0.073 \times U_{WIND}$$

ここに、 $U_{NCC}$  は非接触型流速計（NCC：Non-Contact Current meter）により測定された表面流速、 $U_{WIND}$  は風速を表す。 $U_{修正NCC}$ は風補正を施した $U_{NCC}$ となる。図-9は図-8のデータに風補正を施した結果である。例えば、▲、●または\*で示されるデータは上記の式による風補正を施している。風補正の結果、近似直線式の勾配および $R^2$ に顕著な改善が見られた。

## (2) SITV

図-10はSITVとaDcpによる水面流速の比較である。横軸はaDcpによる流速を示す。一方、縦軸はSITVによる流速を示す。図-8、図-9同様、これらのデータは様々な河床変動条件、風況条件下におけるSITVとaDcpの同時観測の結果である。これらの観測結果はほぼ45°の線に乗っており、良好な相関を示している。実際には、若干45°の線から外れたデータもあるが、最小二乗法による近似直線の勾配は1.0145であり、 $R^2$ は0.86である。前の議論と同様に、図-11に示す通り風の影響を補正した。この図が示す通り、わずかではあるが改善が見られる。実際、近似直線の勾配は0.9872、 $R^2$ は0.95となった。

## 7. 考察

ここまで、本報告では非接触型流速計による手法およびその精度について議論してきた。非接触型流速計による観測値より流量値を得るために、断面積と流速補正係数の情報が必要である。

断面積については、水位と河床高という二つの要素を把握する必要がある。水位については、水位は河川横断方向に一定であるという仮定の下、単体の水位計により得ることができる。（実際には、現場での技術者の知見では河川の中央付近で水面が盛り上がっているとのことである。）一方、河床高は土砂移動が活発に生じている断面においては洪水中にほぼ変動する。このような断面において流量観測を実施する場合には、適切な流量値を得るために出水中にあっても河床断面形状の頻繁な観測が必要である。

流速補正係数とは鉛直平均流速を得るための係数である。通常、流れの状況に応じて変わる。流れが十分に整正で対数分布測が成り立つ場合、0.85が係数として適切な値となる。実際、Muste et al.<sup>20)</sup>は0.85という数字は水理学のアカデミックな場においては広く受け入れられてい

ると述べている。一方、出水中にaDcpにより実際に河川流れを観測した結果に基づき、Yorozuya and Fukami<sup>21)</sup>は、河床高変動がないあるいはわずかな場合には流速補正係数は $0.85 \pm 0.05$ になること、逆に河床変動が卓越する場合には1.1あるいは0.7という値も見られたことを示した。観測結果の一例を9.補遺において紹介する。これまで流速補正係数の決定に関する議論はほとんどなされてこなかったため、適切な係数を把握するための当該断面におけるaDcp観測が実施されるべきである。

## 8. 結論および今後の予定

本報告で議論した知見を以下に示す。

- 1) 非接触型流速計として、電波式流速計とSTIVという2つの手法について本報告にて説明した。
- 2)異なる河床変動条件、風条件下において、異なる機器による同時観測を実施した結果について検討した。
- 3)非接触型流速計による観測結果を、aDcp、プライス式流速計、電磁流速計などの他の機器による観測結果と比較した。
- 4)検証の目的で、異なる流況に対してaDcpによる河川表面流速の推定を導入した。
- 5)この検証においてはconstant法を選定した。
- 6)電波式流速計に関して、aDcpによる推定流速との相関を調べた結果、最小二乗法による直線近似式の勾配は0.946、 $R^2$ は0.943であった。
- 7)STIVに関して、同様にaDcpによる推定流速との相関を調べた結果、最小二乗法による直線近似式の勾配は0.946、 $R^2$ は0.86であった。
- 8)電波式流速計、STIVそれぞれに対して風補正を施した結果、図-9、図-11に見られるようにaDcpによる推定流速との相関に顕著な改善が見られた。
- 9)非接触型流速計による観測結果より流量を決定するため、断面積、流速補正係数が必要である。
- 10)流速補正係数は、特に河床変動が生じている場所においては、一定値にはならないようであり、適切な流速補正係数を見つけるためaDcp観測が実施されるべきである。
- 11)今後は図-1に示した固定設置型流速計に空間的な流速分布を計算できるDIEX法<sup>8)</sup>を併せて、日本の流量観測技術の更なるレベル向上に資することを目的とした検討を進めていく。

## 9. 補遺

### (1) aDcpによる水面流速の推定

aDcpは空間的な流速分布を測定する技術であり、流速を測ることができる範囲はトランスデューサーの大体

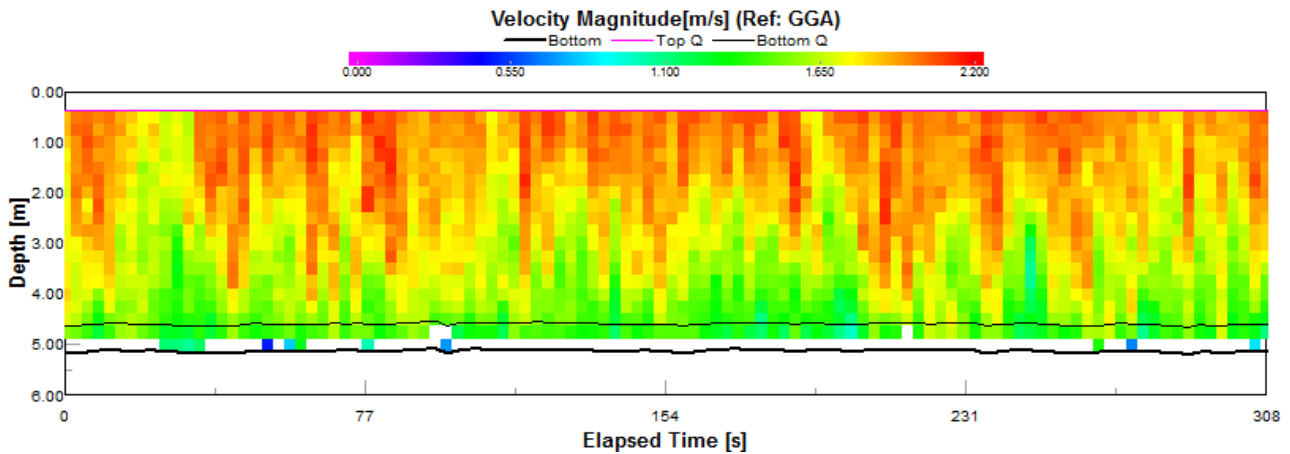


図-A1 aDcpによる流速絶対値の時系列図

50cm手前から設定に応じて20mから40m先までである。aDcpが河床に向けられた場合、サイドローブの干渉により河床から水深の約10%の範囲が計測できない。そのため、aDcpは図-A1に示すように河床付近の不感帯の中間付近の深さまでのデータしか得られない。この図は流速の絶対値をコンターで示しており、同様に水面位置を深さ0.00で、河床付近の不感帯、および河床高をそれぞれ青い細線と太い黒線で示している。この図のデータは約5分間の定点観測により得られたものである。上層不感帯内および水面の流速を推定するために、データ外挿が必要となる。

上層不感帯内のデータ外挿に関して、aDcpメーカーの一つであるTeledyne RD Instruments社が発行しているテクニカル・レポートによると、上層不感帯内における流量を計算するために3種類の異なる方法がある。3種類の方法とはpower法、constant法そして3points法である。それらに加えて、多くの研究者により対数分布測を適用する方法（以降、log法と呼ぶ）が提案されている。第一に、power法においては、ベキ乗則の流速鉛直分布形状を仮定して、計測データに最小二乗法を適用し、流速分布を決定する係数を推定する。その流速分布を用いて不感帯へデータを外挿する。第二に、constant法はデータ計測領域の最上層におけるデータが水表面まで一定であるという仮定に基づいている。第三に、3points法に関しては、データ計測領域の上層部の3データから決定される直線により外挿して水表面流速を推定する。最後に、log法はpower法に類似した方法であるが、異なる関数形を用いている。加えて、Fujita et al.<sup>13)</sup> はこれら4種類の方法により推定した水面流速の平均値をSTIV結果と比較し、aDcp横断観測結果を基に4手法平均により推定した水表面流速がSTIVによる観測結果と良好に一致することを示した。

図-A1に示すように、一般的な流速分布は乱流的な現象である。そのため、ある時間間隔で河床付近から水面付近まで流速が変動している。これはまだ明確ではないが、約50秒の時間間隔がこの変動周期の一つのようであ

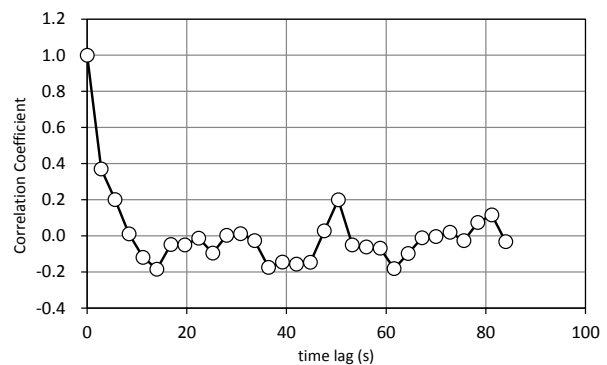


図-A2 相関係数

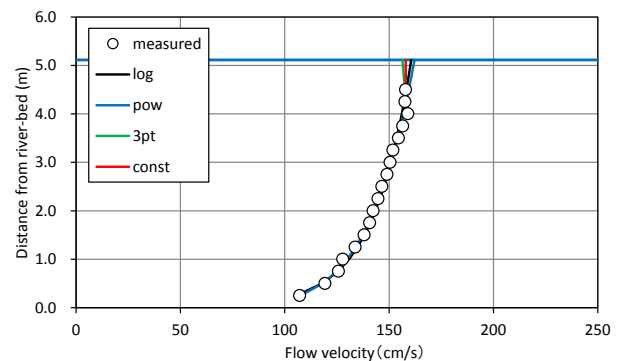


図-A3 aDcpによる流速鉛直分布（河床変動なし/風なし）

る。図-A2は同じ鉛直平均流速の時系列を並べ、2つのデータをずらしながら時間差を徐々に大きくして、相関係数の変化を調べたものである。この図が示す通り、時間差が52秒の時にピークが見られる。図-A1、図-A2の結果を基に考えると、流速鉛直分布は周期的に変化し、似たような分布形状に再び戻ることが仮定できる。更なる議論として、周期が最初に決定された。そして、この周期時間内で平均した流速鉛直分布が得られた。その結果、図-A3に示す結果が得られた。

図-A3は図-A1内の部分的な時間帯における平均した流速鉛直分布であり、これは図-A2の知見に基づいて得られた。図-A3は流速鉛直分布の観測データと水面における外挿流速を示している。このデータは風なし/河床変



動なしの条件下における結果である。これが示すように、log法とpower法による流速分布が観測値と良好に一致している。また、4種類の手法により推定されたそれぞれの流速がほぼ等しい。

図-A4、図-A5は異なる条件の流れに対して図-A3と同じ方法により描かれたものである。実際、図-A4は河床変動があり、河川流れに対して逆流向きの風速8.03m/sの風が吹いている時のデータである。実際のところ、水面付近の流速分布は風により曲げられている。また河床付近の流速は非常に小さい。他と比較して、この流速は非常に幅広く分布している。その他の情報として、この観測は局地的な河床波のトラフ部分周辺で実施された。それゆえ、河床付近の流速が非常に遅くなっている。流速分布が水面付近で曲げられていること、および広い範囲に分布していることにより、log法とpower法は一致しない。その結果、これら2つの方法により推定された水面の流速は3points法またはconstant法と比較して非常に速い。加えて、非接触型電波式流速計により得られた流速は369cm/secとなっており、これはconstant法または3points法に近い。

同様に、図-A5は河床変動がなく、河川流れに対して順流向きに風速3.46m/sの風が吹いている条件下での結果である。図中、log法、power法ともに観測値と良く一致している。3points法は他の方法と比べて比較的大きい値を示す。実際、非接触型電波式流速計は139cm/sを示し、これは3points法の結果と近い。

以下、この節の結論を示す。1) aDcp観測データから水面での流速値を推定する4つの手法を異なる流れ場、例えば河床変動のある／なし、風の影響のある／なしの条件下で実施した、2) 推定の精度は流れの状況によるため、一概にどの手法が良いか決定することはできない、3) 精度が良くない時は過剰に推定された結果が出る、4) 風が流速分布に繊細に効く。以上の結論と考察に基づいて、本報告ではconstant法を採用した。constant法は最善な方法とは言えないが、過剰に推定された誤差を消去するにはより安全である。

## (2) 流速補正係数

流速補正係数は鉛直平均流速を得るための係数である。この係数は流速鉛直分布によって変わる。河床波の発生を含め河床が時間的に変化する場合には、流速鉛直分布は河床波上の位置に依存する。そのため、河床波が発達し観測地点を通過する時間の中で係数もまた変化する。Yorozuya et al.<sup>21)</sup>は流速補正係数の時間的な変化の一例を示している。

図-A6は河床高、水位、電波式流速計による水面流速、aDcpにより得られた流速補正係数、流速補正係数0.85で計算された流量、そしてaDcpにより計測された流量の時系列図である。

この図が示すように、河床変動がない時には流速補正

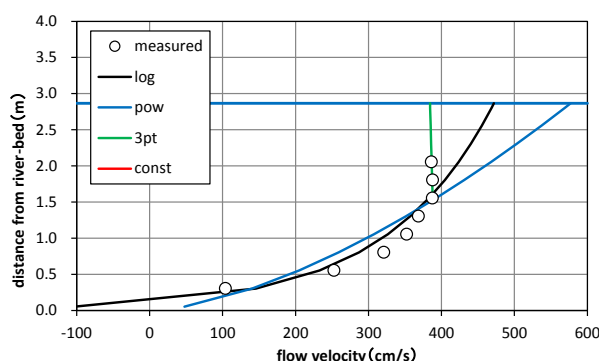


図-A4 aDcpによる流速鉛直分布（河床変動あり／風あり）

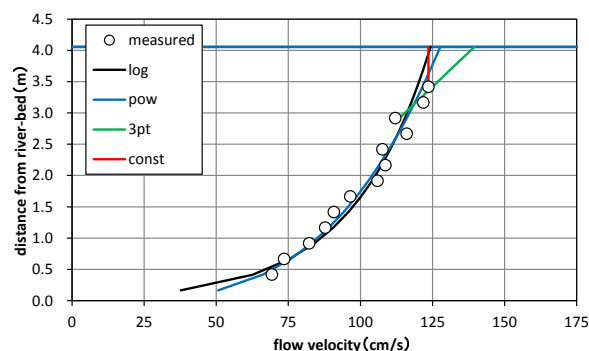


図-A5 aDcpによる流速鉛直分布（河床変動なし／風あり）

係数は0.75～0.85の数字を取る。河床変動が生じている観測三日目6:00～15:00において、流速補正係数は0.73～1.1の間で振動している。河床変動に伴うこれらの数字は他の研究と比べて若干大きい。例えば、Polatel<sup>22)</sup>は異なるタイプの粗面河床について実験及び数値計算を実施した。この研究において、粗面河床上において0.85～0.908の流速補正係数が得られた。一方、日野・宮永<sup>23)</sup>は河床波上の異なる位置、例えば、トラフ、クレスト、それらの中間領域、における流速鉛直分布をそれぞれ示している。これによるとクレスト上の流速分布はほぼ垂直であり、時折流速補正係数が1を示す場合がある。一方、トラフ部での流速鉛直分布は河床付近の逆流も含め幅広い分布形状を示しており、流速補正係数が0.8以下を示す場合もある。同様に、流速補正係数0.85を用いて算出した流量とaDcpによる観測流量は流速補正係数の違いに直接関係する。例えば、流速補正係数が約0.85であれば両者に大きな違いはないが、流速補正係数が1.13、0.73である場合、流量値にはそれぞれ24%および16%の違いが発生する。

## 謝辞：

本報告をまとめるにあたり、国土交通省各河川事務所から貴重なデータを提供していただいた。また、各観測を実施するに当たり、横河電子機器株式会社から様々な便宜をいただいた。記して謝意を表す。



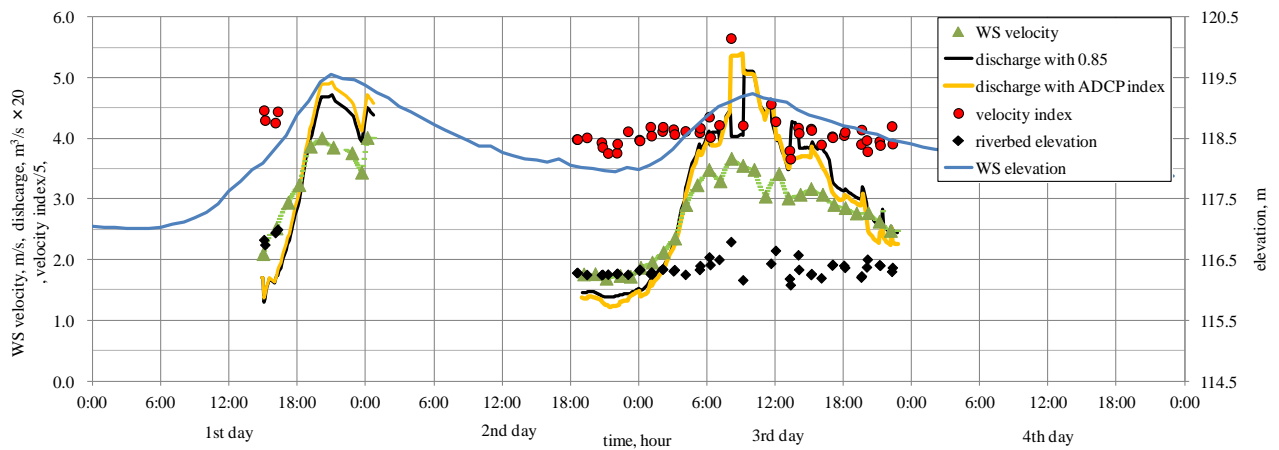


図-A6 河床高, 水位, 水面流速, aDcpによる流速補正係数, 流速補正係数0.85を用いた流量, aDcpによる流量それぞれの時系列図<sup>21)</sup>

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, pp.41-50, 1994.
- 2) 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, 河川技術論文集, 第16巻, pp.53-58, 2010.
- 3) 木下武雄, 渡辺一夫: 超音波流速計の洪水観測への応用, 河川技術論文集, Vol.9, pp.225-229, 2003.
- 4) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発, 水工学論文集, 第50巻, pp.709-714, 2006.
- 5) 川西澄, 大庭尚史, 金子新, 水野雅光: 感潮河川における音波の横断伝搬特性と次世代超音波流速計による横断平均流速の測定, 水工学論文集, 第52巻, pp.937-942, 2008.
- 6) 川西澄, Mahdi RAZAZ, 渡辺聡, 金子新, 阿部徹: 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, 第11巻, 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システムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.63 No.4, pp.295-310, 2007.
- 9) 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) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 11) 藤田一郎, 安藤敬済, 堤志帆, 岡部健士: STIV による劣悪な撮影条件での河川洪水流計測, 水工学論文集, 第53巻, pp.1003-1008, 2009.
- 12) 藤田一郎, 原浩気, 萬矢敦啓: 河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築, 水工学論文集, 第55巻, pp.1177-1182, 2011.
- 13) Fujita I., Hara H., Yorozuya A.: Evaluation of Imaging Technique Accuracy for Discharge Measurement and Development of Real Time System for Surface Flow Measurement, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 30(1), 15-28, 2012.
- 14) 本永良樹, 萬矢敦啓, 深見和彦: 河床変動及び強風を伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, L745-L750, 2013.
- 15) 柏田仁, 二瓶泰雄, 山下武宣, 山崎裕介, 市山誠: 電波流速計による表層流速計測と DIEX 法に基づく流量推定手法の提案, 河川技術論文集, 第18巻, pp.393-398, 2012.
- 16) 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.
- 17) 独立行政法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター著: 流量観測の高度化マニュアル (高水流量観測編) Ver1.0, 2013.  
[http://www.icharm.pwri.go.jp/ryukan/manual\\_1.0.pdf](http://www.icharm.pwri.go.jp/ryukan/manual_1.0.pdf)
- 18) 菅野裕也・萬矢敦啓・深見和彦: 外部コンパスを併用した ADCP 観測に関する提案, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp.35-40, 2011.
- 19) Atsuhiko Yorozuya, Yoshiki Motonaga, Ichiro Fujita, and Yoichi Iwami, Liquid flow measurement in Open channels with non-contact current meter, XXIX Plenary Meeting of ISO Technical Committee 113, Hydrometry, DOC. ISO/TC113/SC1 N847, Nov. 2013.
- 20) Marian Muste et al.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resour. Res., 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.
- 21) Atsuhiko Yorozuya and Kazuhiko Fukami: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, The Third International

Symposium on Shallow Flows(ISSF2012), Iowa City, U.S.A., 3-6 June, 2012. Abstract on pp.309-312; full paper in CD-ROM

- 22) Ceyda Polatel, 2006. Large-scale roughness effect of free-surface and bulk flow characteristics in open channel flows. Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa.

- 23) 日野幹雄, 宮永洋一: 波状境界をもつ二次元管路流の解析, 土木学会論文報告集, 第 264 号, pp.63-75,1977.

(2014. 2. 10受付)