

# 河川流量観測の新時代

## 第4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

2014年2月



## 目 次

巻頭言「映像を活用した河川流速・流量の非接触画像計測の進展」

藤田一郎

電波流速計による洪水流量観測—河川砂防技術基準への反論と2つの事例紹介— 1  
山口高志

ADCPの反射強度による洪水時の浮遊砂量推定と水中採水による浮遊砂濃度の鉛直  
分布計測 10  
岡田将治, 萬矢敦啓, 橘田隆史

超音波式流砂計による河川流送物質の観測—流速と懸濁物質に比例する信号(SSI)の  
同時測定による観測法の紹介— 17  
岩熊眞起, 河嶋ちか子, 岡本幸久, 菅野修平

ドップラー水象レーダーの開発製作と河川観測への適用性研究 23  
幸弘美, 斎藤秀晴, 丸茂義典, 若杉佳功, 山口高志

非接触型流速計による河川の流量観測 29  
岩見洋一, 萬矢敦啓, 本永良樹, 藤田一郎

河川流量観測の高度化に対する観測実務者からの視点 39  
橋場雅弘, 甲斐達也, 津田哲也, 土田宏一

大陸河川におけるADCPを用いた流況・流量・河床高観測の注意点と観測結果の一  
例 48  
萬矢敦啓, 本永良樹, 岩見洋一

タイ国Chao Phraya川感潮域におけるADCPを用いた流速観測 57  
笹川幸寛, 手計太一



## 映像を活用した河川流速・流量の非接触画像計測の進展

神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

藤田一郎

最近になってにわかに河川の画像計測が注目されるようになってきた。この2、3年の話である。きっかけはいろいろ考えられるが、一級河川で発生した大きな洪水でピーク流量の計測を逃してしまったケースが相次いだこともひとつの要因と思われる。例えば、2011年の新潟・福島豪雨や2012年の九州北部豪雨災害において起こった欠測事例がそうである。このようなピーク流量の欠測は、様々な要因によって流量の浮子観測を実施できなかったために生じたようである。例えば、観測サイトへのアクセスが洪水による交通規制で制限されたこと、浮子を投入する橋そのものが水没したこと、危険で作業現場に近づけなかったこと、あるいは激しい流れや洗掘などの影響で水位計が破損・流失したことなどがその要因と思われる。これらの事例は、中規模程度の洪水では問題にならなかった流量観測における基本的な問題点を浮き彫りにしたとも言える。すなわち、風雨の激しい荒れた気象状況においては、人手に頼る浮子観測は実施するのが難しくなるという点である。

このような現状において河川の画像情報が注目されるようになったのは、上述のようなシビアな気象状況においてもいわゆる河川監視カメラ(CCTV)には映像が残されている場合があり、その利活用についての議論が進んだためである。一般的に、河川のCCTVは自由に動かせる雲台や高性能の望遠機能のために、プライバシーの問題から敢えて録画機能をはずしている場合もあると聞が、洪水流を捉えた映像には様々な情報が含まれており、これを動画として記録しておくことは河川防災の観点からも重要である。このような意識は一般化しつつあり、平成24年の九州北部豪雨災害の調査報告においても、「今後の既往最大規模の河川災害への対応についての提言」の中で、『水位や映像のデータは、原因究明の際は航空機のフライトレコーダー、ボイスレコーダーに匹敵するほど貴重なデータといえる。「欠測でした」では済まされない。担当部局の緊張感をもった対応をお願いしたい。』と映像記録に対する期待と同時に厳しいコメントが出されている。

映像情報の利点はその圧倒的な情報量にあるといえるが、まず、素朴に考えても水面変動の様子や流木の発生状況などは映像を見るだけですぐに把握できる。さらに重要なのは、画像処理や画像解析の手法を駆使すれば、流れの速度情報を引き出せる可能性が高いこと

である。その目的で開発し、国内外でも知られている手法に LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)がある。洪水時に水面に発生する面的な凹凸分布（以降では水面波紋と呼ぶ）が表面流速で移流するとみなし、粒子画像に対する流速計測手法である PIV を河川工学の分野に導入したのがこの手法である。PIV は主に機械工学の流体計測の分野で発展した手法であるが、筆者は可視化情報学会の会員でもあり、この学会の設立以前から流体計測分野の研究者との交流があつて画像計測を使った初期の実験的研究（藤田ら 1988, 藤田・河村 1990 など）を行っていたことが LSPIV の開発のベースになっている。ただし、以前は PIV ではなく相関法と呼んでいた。また、LSPIV と名付けたのは、アイオワ大学水理研究所(IIHR)の Marian Muste 博士たちとの共同研究からである（Fujita, Muste & Kruger, 1998）。

水面波紋の表面流への追従性は、LSPIV だけでなく電波流速計や UHF レーダーなどでも利用されている水面の特性であるが、このことを直感的に感じたのは 1992 年頃、長良川で発生した洪水の調査中に何気なく流木や浮遊物を観察していたときのことであり、PIV の河川工学への可能性の広がりを感じて興奮したのを鮮明に記憶している。PIV の河川工学への応用で難しいのは、トレーサー注入やレーザー光照射など流れの可視化を完全制御できる実験室での計測とは異なり、空間スケールの全く異なる自然環境が相手である点である。そのため、河川流は河岸や橋上から斜めに観察するしか方法がなく、斜め画像から流れの情報を引き出す工夫をせざるを得なかったわけであるが、結果的には前述の CCTV と同様の画像を対象としていたことになる。筆者がこのような試みを発表したのが 1994 年（藤田・河村）なのでそれからすでに二十年になる。河川の映像情報の重要性はその当時から折に触れて発信・発言してきたが、最近になってこのことが再認識され、理解が深まったのは提唱したものとしてうれしく感じている。

ただし、映像による河川流の計測には課題も多く残されている。その一つは、夜間における観測である。現在、使われている河川監視カメラは高い性能を有するが、夜間になると受光量を確保するために 1 秒当たりのコマ数が激減する。動画解析には 1 秒当たり 10 コマ程度は必要なため投光器などで光量を確保するか、遠赤外線カメラ(サーマルカメラ)のような投光器を必要としない機器の導入が重要となる。ただ、遠赤外線カメラは河川洪水観測における実績が少ないため、さまざまな気象条件下で観測を試み経験を積み上げることが大切である。水面波紋の追従性に関しても、風の影響を受けることは十分に考えられる。風速による補正法もいくつか提案されているが、風速と流れの同時計測の実績をあげて精

度の高いものにしなければならない。河川の撮影アングルについても河川幅が非常に大きい場合(例えば、幅 200m 以上)には俯角が小さくなり、カメラから遠ざかるにつれて画像計測精度が低くなる。この点を解消するための新たな手法として、STIV(Space Time Image Velocimetry)を考案しているが(Fujita et al., 2007)、この手法にも限界はある。画像と水面上の座標を対応付けるために現地には標定点を設置するが、座標間の変換精度を高める工夫もまだ残されている。また、表面流速分布から流量を推定するためには、鉛直平均流速に換算する変換係数を決めなければならないが、その設定方法についても方法論は定まっていない。

このように、まだまだ解決すべき課題もあるが、ピーク流量の欠測といった事態を避けるための方策としては、映像による計測が浮子法を補完する最善の手法と考えている。最後に今、問題と思っているのは、洪水氾濫の頻度がより高い二級河川を主体とする中小河川における観測についてである。中小河川では流量などの水文データ収集が行われていることはまれであるだけでなく、河道のデータがない場合も多い。小流域で出水が早いために従来法での流量観測が基本的に難しいことや経済面での問題も要因かもしれないが、まさにこのような中小河川にこそ映像による画像計測を適用すべきではないだろうか考える。住民への情報提供としてウェブカメラで動画を配信している河川もあるが、洪水時にはアクセスが集中して不安定になる場合も多く画像の質もあまりよくない。データ収集や画像計測に対する担当者の意識もあまり高いとは言えない面がある。このあたりのハードルを下げ、画像計測を普及していくためにも、より簡便な方法で流量観測を行える計測システムの開発を進めていかなければならないと考えている。



# 電波流速計による洪水流量観測 —河川砂防技術基準への反論と2つの事例紹介—

## A DISCUSSION ABOUT FLOODFLOW MEASUREMENT BY RADIO CURRENT METER OF TECHNICAL STANDARD OF RIVER AND SABO ENGINEERING, MLITT, AND INTRODUCTION OF TWO FIELD STUDY RESULTS USING RADIO CURRENT METER.

山口 高志<sup>1</sup>  
Takayuki YAMAGUCHI

<sup>1</sup>名誉会員 工博 (〒277-0863千葉県柏市豊四季645-14)

In the Technical Standard about river and Sabo engineering of Ministry of L.I.T.and T, which direction must be chosen, upsteam or downstream of the bridge, is not shown about the installation of radio current meters. Upstream must be clearly chosen.

In addition, average velocity correction factor must be given as  $f=0.85$ . The installation of radio current meter not be delayed because of field study (f) using by ADCP.

In A river, relationship between flood-flow discharge by floats and radio current meter, is improved by the correction of data with error.

In B river, the reason why the abnormal relationship between H and V have existed during long term(7years or more) is clearly shown due to riverbed degradation in the upstream of the K. weir.

**Key Words :** Floodflow discharge ,radio current meter.

### 1. はじめに

わが国における河川の洪水流量観測を概観すれば、戦前からおよそ70年余り浮子法のみで頼ってきた。その間多くの試みがなされてきたが、浮子法をけおとせるまでには到っていない。

浮子法も多くの欠陥を有しており、多くの方の指摘がなされているが(1,2)、筆者は、とりわけ (1) 浮子投下のため橋梁下流を利用しながら、橋脚による後流域を無視していることによるデータの過大化傾向、(2) 人力にたよっているため、遅延による初期データの不足、ひいては大出水時の撤退が最大の欠点と考えている(1~3)。

論を戻して、しかしこの20年余りについていえば、浮子の上記の欠陥を補うべく、電波流速計に代表される非接触法、接触ではあるが水深方向の流向流速分布が観測可能なADCPなどを用いた洪水流速観測が、多くの研究者によって多くの現場で実施され、格段の発展をとげたのであった(4,5,6,7,8,9)。なかでも特筆すべきことは、木下良作氏のADCP発展への寄与(4, など)、1999年あたり

から、6~7年続けられた土木研究所による非接触4手法に関する現地試験などが挙げられよう(10,11)。筆者も電波流速計の普及には努力を盡して来たが(12,13)、最近では手計太一氏らによる「河川流量観測の新時代」(1~3巻)の刊行も見逃せない(7~9)。

非接触法とりわけ電波流速計は、表面流速のみしか測れないが、橋脚後流域を避けて擾乱の少ない上流側を選び、無人で、加えて少ない台数で出水初期からデータを採取し続けるものである。アメリカでも、最近非接触法が試みられているが、論文発表時点でいえば約10年、日本が進んでいる(14)。

これに対して、ADCPは本来アメリカで海洋用に開発されたものではあるが、河川にも適用されその有効性が認められ、例えば、橋上を一往復して2データとってその差を数パーセント以内にしようというすぐれものである。ただし、接触型(例えば三胴式ボート(トリマラン)を利用)であるため、急流速時あるいはゴミの衝突などのため、3~4m/s超になると測定不能となる。

多くの方の努力がみのり、また河川局もこれを認め、非接触法およびADCPが「水文観測」平成8年版、続い

平成14年版にも「新しい洪水観測手法」として紹介され、その採用が勧められた。

しかしながら、2012年度制定された河川砂防技術基準での非接触法の後退ぶりは見事なものであった。「表面流速しかとれない」という特徴が前面に出され、流速分布が採取可能なADCPには、実に4頁がさかされているのに対して、非接触型法にはわずか1.5頁ということであった。加えて、その中にADCPによるフィルターが2か所も入ることになっている。

また、電波流速計の設置箇所について「水文観測」では、橋脚下流の後流域をさけて橋梁上流と明示されているのに対して、まったく設置位置に関する記述がないのである。

筆者も1990年頃から、電波流速計に関わり始め、爾来20有余年そのデータに関わってきた。その長所・短所についてもそれなりの蓄積をもっているつもりである。ここでは章をあらためて反論しておきたい。

この他に電波流速計は、もうひとつメリットがある。すなわち出水期間中データを取り続ける結果、洪水波形による $H \sim V_{si}$ 関係のループの違いや、観測地点における水理変化、とりわけ河床変化（高水敷の場合は粗度変化など）も推定できることがわかってきている(13)。

次いで3. では、電波流速計本来の機能である洪水流量観測に関連して既発表のデータ(10)に一部ミスが認められたので、その修正結果について、4. では、吉野川での電波流速計設置地点で、横断変化があまりないのに、異様な $H - V_s$ の変化を示したので、その検討結果について紹介したい。

## 2. 河川砂防技術基準(2012)に対する反論

「はじめに」でも触れたように、河川砂防技術基準(2012)に対して以下の二点について反論しておきたい。

### 2.1 電波流速計(非接触型)の設置箇所は、橋上流側の明示を!

電波流速計を非接触型方式の代表としておきながら、設置箇所の明示がないのは、観測方法の説明としては不完全なことであり、明確な片手落ちといえる。

前にも触れたが、「水文観測」でも橋脚後流域を避けて上流と明示している。後流域の影響の大きさを示す好例として、木下良作氏(1)の図をあえて掲げさせていただくが(図-2.1)、第二測線まで続くその影響の激しさに比して、上流側のじょう乱の少なさに目がひかれる。

ほかに筆者も、上流からピアーに斜めに当たった場合の後流域の範囲の広さについて報告している(9)。

このようにピアーが大きな粗度としての影響のある下流で、流量を測ろうとすれば設置すべき電波流速計の必

要台数は、相当数にのぼると考えられる。

余談かもしれないが、設置ヶ所の明示がなかった理由を類推すれば、流速補正係数 $f$ をはかるためのADCPが下流でしか観測できないこと(観測地点のわずかな不一致)に起因しているのかとも考えられるが、これはささやかなことであろう。

### 2.2 流速補正係数 $f$ についての討論

端的に言って流速補正係数は、開水路流速鉛直分布平均の $f = 0.85$ でスタートし、その後ADCP等で微修正という形をとるべきである、というのが筆者の意見である。

これまでの表面流速に対する補正係数には、木下良作氏の0.83(平水時?) (1)、二瓶氏の0.88(16)など、またデータ数は少ないが、十勝水路での0.85(8)などがある。また、アメリカの論文(14)も $f = 0.85$ を提案している。

これらの値を採用したとしても、 $f = 0.85$ とした場合との誤差は、5%以内であり、浮子などの比ではあるまい。まして、橋上流側の場合は、 $f = 0.85$ である可能性は高い。

ほかに傍証的ではあるが、土木研究所が既設置の電波流速計算出流量値( $f = 1.0$ )と、浮子による流量とを比較した結果(11)でも、両者はほぼ一致するとしている(次章図-3.1)。これは、浮子流量が10~20%過大であるという通説から推算しても、 $f = 0.85$ の裏付けとなると考える。

これについては、次章でも土研の結果の一部修正を行って、浮子流量と電波流量との関係の改善を行った。

もう一点、筆者がもっとも懸念するのは、電波流速計設置にあたって、人力によるADCPによるフィルターが2か所にわたってかかることである。あえて文章の紹介を行えば、「測線の設定に当たっては、ADCPや浮子測法等による現地観測結果などにより、洪水時の横断方向流速分布を事前に把握した上で、それぞれの区分流量が

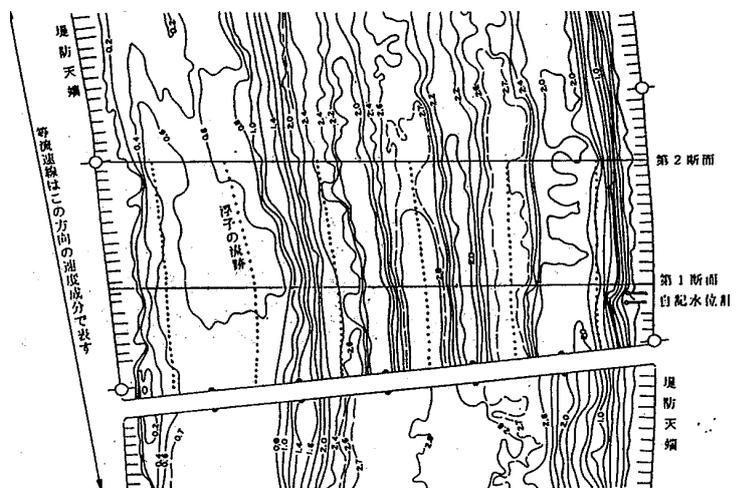


図-2.1 航測による橋付近の表面流速分布図  
(長良川墨俣、木下良作氏より)

ほぼ均一になるよう設定する」，これはまだまともである．あと一文，「流速分布補正係数は，ADCPによる様々な規模の洪水時の鉛直方向並びに横断方向の流量分布に関する観測結果から算出した値を用いること」，書いてあることは文字通り正しいことではあるが，しかし実際の問題としては，「様々な規模の洪水」を「人力のADCPではかる」ことは，10年かかってできるかできないかのことである．「人力の浮子」から脱却できたと思ったら，また「人力のADCP」に逆戻り，これが正直，私の実感である．次回改訂では，ご配慮いただきたい．

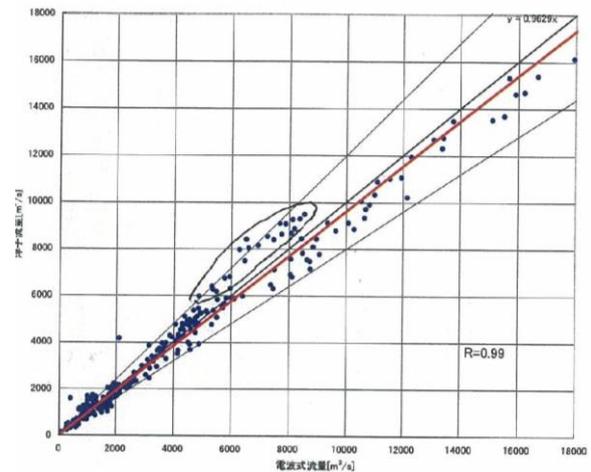


図-31 全観測データ（流量）による相関図

### 3. 電波流速計流量と浮子流量との比較の一部修正

土木研究所は，2008年に電波流速計を評価する一法として浮子による流量（浮子流量）および既設置の電波流速計が観測した流量（電波流量）のデータを蒐集し（筆者も相当部分協力），個々の河川別，出水別および全データについて比較を行っている(10)．

図-3.1は，全データに対するものである．この図から，流速補正係数は  $f = 1.0$  の電波流量 (X) と浮子流量 (Y) が全体としてはほぼ一致することがわかる ( $Y = 0.96X$ ) ．

ここではじめに示したように，もし浮子の流量が真の流量より過大で，しかもそれが10～20%程度とするならば，流速補正係数は  $f = 0.85$  程度でおおよそよいことになる．

少し横道にそれたが，筆者が本論で試みたことは，図-3.1中，全体の傾向から大きくはずれた楕円形に囲まれたデータの修正である．この一群のデータは，筆者が

2年前に指摘した誤観測データ(8)がそのまま使われているので修正を試みることにした．

誤測の原因は，設置された10台の電波流速計のうちの測点6がピアーに近接して設置されていたのであるが，たまたま10年来ともいべき  $Q = 10,000 \text{ m}^3/\text{s}$  クラスの出水(2007.4)があり，その後半に流下したゴミがピアーにかかり，その後流域内に電波の照射域が入ったためと考えられる．久しぶりの大きい出水時の大量のゴミが流下，そしてピアーへの付着はよく知られていることで，筆者も何度か知見している．

実際に測点6と近接測点7の水位 (H) ～表面流速 ( $V_{si}$ ) 図を示す (図-3.2～3) ．図中には前年の(2006.7)の出水のそれも併記してあるが，測点6の低減部分での異常な減速がみとめられよう．

さて，このデータの修正方法であるが，測点6をはさむ測点5および測点7の平均をもってあてることとした．両測点は，測点6からそれぞれ35m，31mはなれている

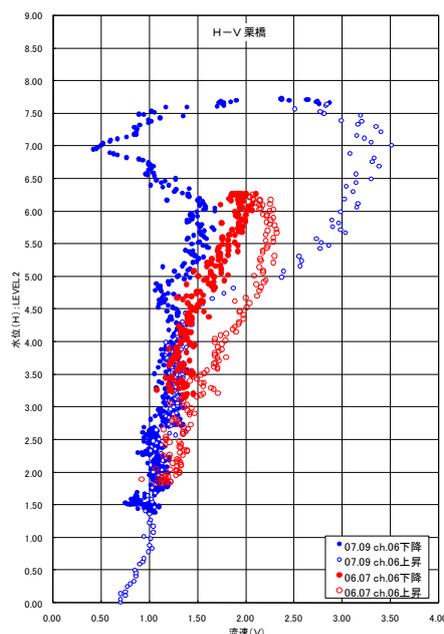


図-3.2 H-Vs6

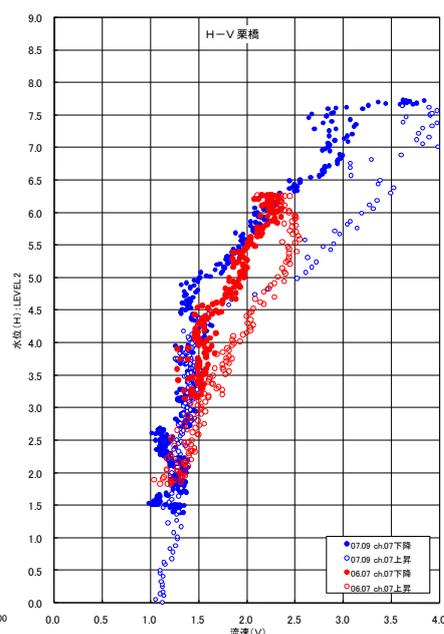


図-3.3 H-Vs7

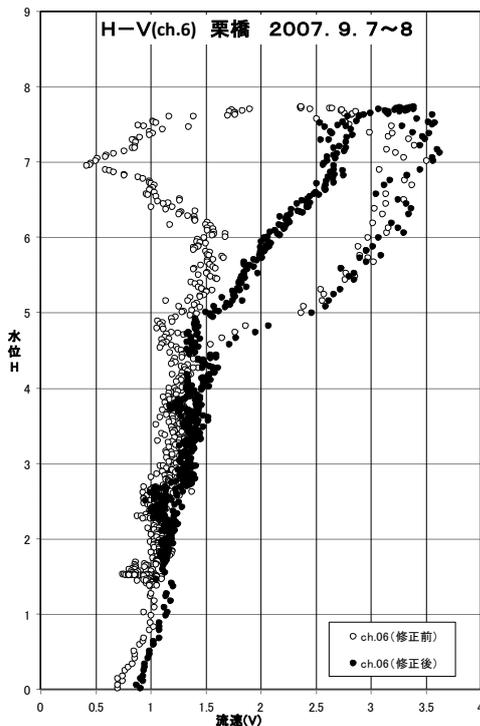


図-3.4 H-Vs6 修正前と修正後

ので不安もあったが、変化の少ない橋上流側であったため予想外にうまくいった。修正前および修正後のH-Vsi関係を図-3.4に示す。立ち上がり部で両データがほとんど一致している。

修正後のH-Vs6を用いて、算出した全流量と修正前のそれと、浮子流量との関係図を図-3.5に示す。浮子流量のデータの大半が低減部であったことも原因して、ほとんどの電波流量の増加となった(200~700m<sup>3</sup>/s, 5%強)。

参考までに文献(10)の2006年の7月出水の流量相関式は、 $Y=1.0816x$ 、図-3.5中の修正後のそれとほぼ一致する。

以上の修正計算により、図-3.1の相関図の集中度の改善を見ることができた。なお発展させて電波流速計の流速補正係数fの“暫定0.85, 漸時ADCPによる修正”を提案しておきたい。

#### 4. 阿波中央橋における異様なH-Vs関係の解釈

##### 4.1. H-Vsi関係の変化から読みとれる副産物(パイプロダクト)

電波流速計は、複数台以上橋上流などに設置されて、設置地点付近の流速をはかるため、本来の全断面流量の算出以外に、測定地点の水理状況を示してくれる。

多くの地点での観測結果を通して、これまで得られた知見はおおよそ以下のようにまとめることができよう。

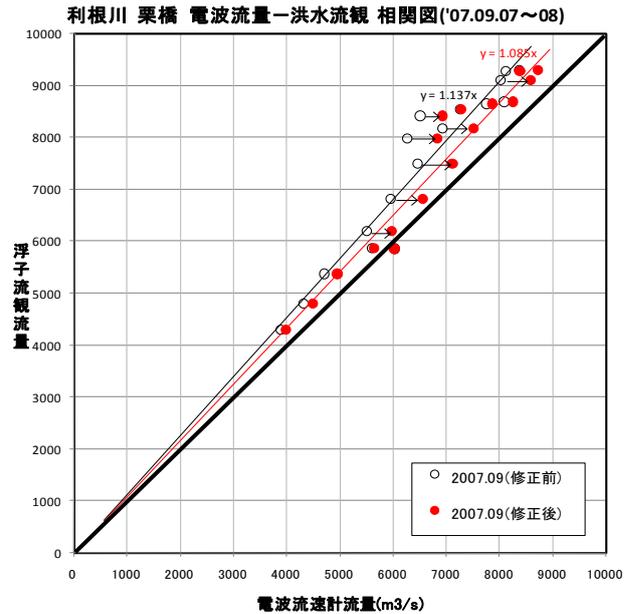


図-3.5 流量相関図(修正前と修正後)

- ひとつの洪水波が通過すると、H-Vsi関係は急流河川では上り下り重なり、ほぼ直線になるのに対し、緩流河川では反時計まわりのループ状を示し、これは緩流になるほどループは大きくなる。1つの地点でのループの大きさも、出水がシャープであるか、でないかで幅が異なる。加えて出水波形の微妙な変化にもH-Vsi関係はシャープに対応して変化する。例えば図-3.3。
- 電波流速計設置地点の河床が低下したり、粗度が低下したりして、出水中に流速増加要因が加わると、時計まわりのループがあらわれたりする。時計まわりループは、本来の反時計まわりのループ特性にうちかってあらわれるわけだから、類形として上り下り重なったり、変形として8の字ループなどもよくあらわれる。

H23年(2011)に、吉野川には久しぶりに3~4の出水があり、なかでも9.21の出水は電波流速計で測った流量では、12000m<sup>3</sup>/sに達する出水であつたので、この際、大出水があつたH16, H17(2004, 2005)それぞれ4出水、1出水のデータも含めて検討してみることにした。

異様なH-Vs関係について先に触れると、低水路河道内の4基の電波流速計について、多くの出水で各点で河床低下などはないのに、時計まわりループ(以後逆ループと呼ぶ)ないしそれに類するH-Vsi関係が多く認められた。これはあまり通常ではないことなので、その原因について種々検討を行つて見た。

#### 4.2. 結果の概要

阿波中央橋のおかれている境界条件を示すべく、観測点の横断図(含む電波流速計配置地点)と、付近空中写真(図-4.1~2)を示す。図-4.2に示すように、中央橋下流約1kmに取水堰柿原堰があり、この堰は最も左岸部に開口部(約200m)があり、出水時、水流は堰全幅(約1km)にわたって自由落下あるいは潜りの堰の形態をとると思われる。

ただし筆者は、堰形状について上記のように思いこんでいたが、確認した結果、最左岸0mでTP.12.9m、300mでTP.12.7m最右岸800mでTP.13.9mといった左岸側が低い構造の堰であった。

次いで、図-4.1に示す電波流速計6基のうち、左岸高水敷のch.1は、H-Vs関係が時計まわりループを示し、ほぼすべて高水敷の河床低下と対応すること、また、右岸ch.6はワンド上にあり、大出水時のみ上流から流水が

あるが、ほとんど河床変化がないこと理由から検討から外し、対象は低水路のch.2~ch.5の4点とする。なお、ch.2~3が相対に左岸側、ch.4がほぼ中央、右岸側はch.5ということも指摘しておきたい。

ほかに、H-Vsi関係を明瞭にするため、データ処理として5点移動平均を行って、H-Vsi図を作成した。漸く、結果の紹介に入る。

相対に大きい8出水、2004年4出水、2005年1出水、2011年3出水を選び、各地点のH-Vsi図、4×8=32枚を作成したが、すべてを示すことはできないので、概観し、4つのループパターン(F1~F4)に分類することができた。それを表-4.1にまとめた。表中には最大流量(Qmax)および地点最大流速(Vmax)、加えて左右岸水位差も付記してある。また、F1~F4の例も図-4.3~6に示す。

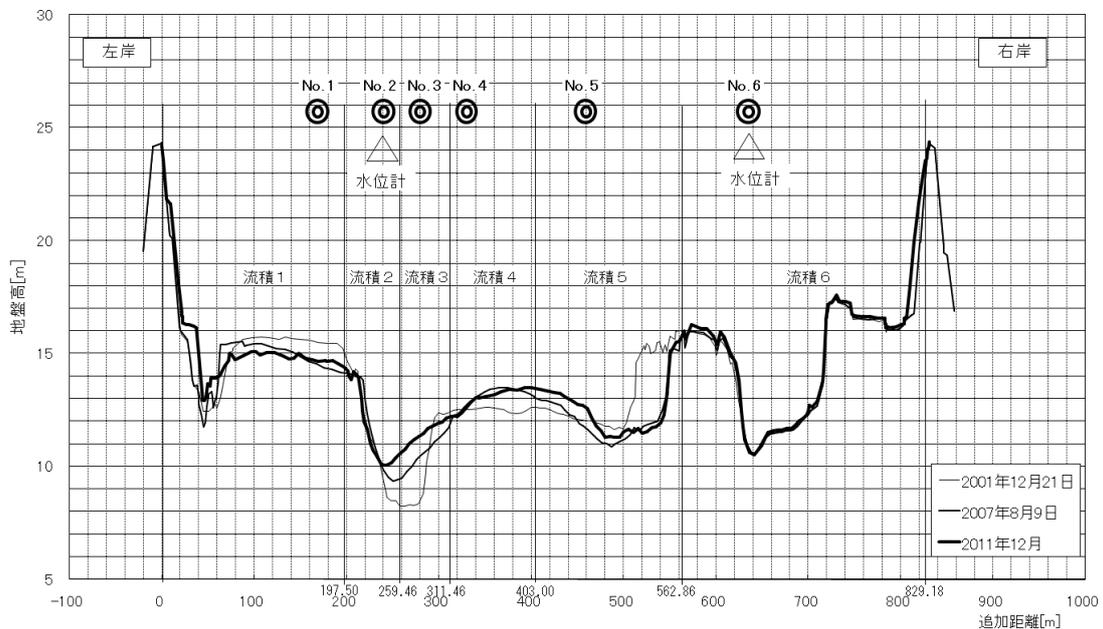


図-4.1 阿波中央橋上流15mの横断と電波流速計及び水位計設置位置図



図-4.2 阿波中央橋付近空中写真(2002.5)

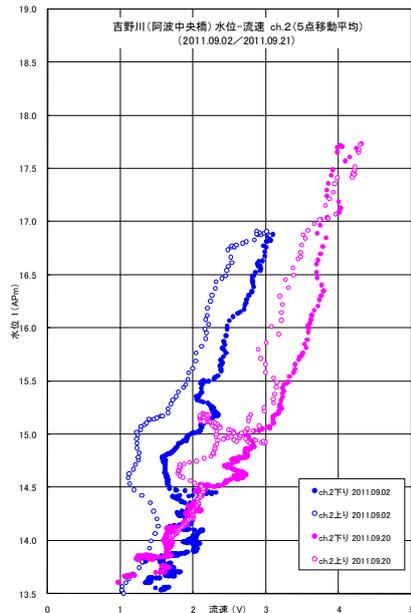


図-4.3 H-Vs F1の例

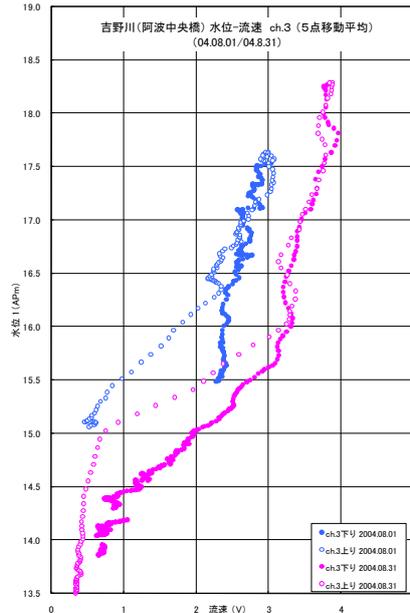


図-4.4 H-Vs F2の例

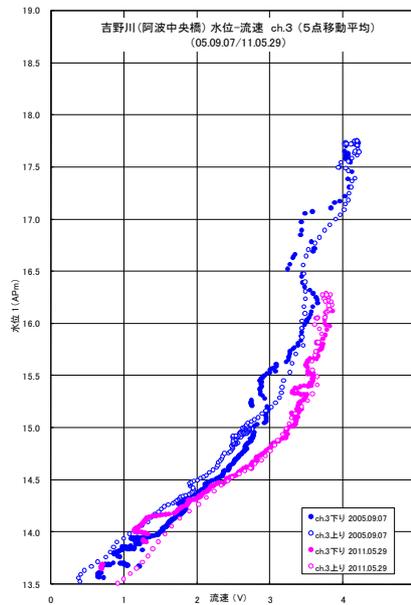


図-4.5 H-Vs F3の例

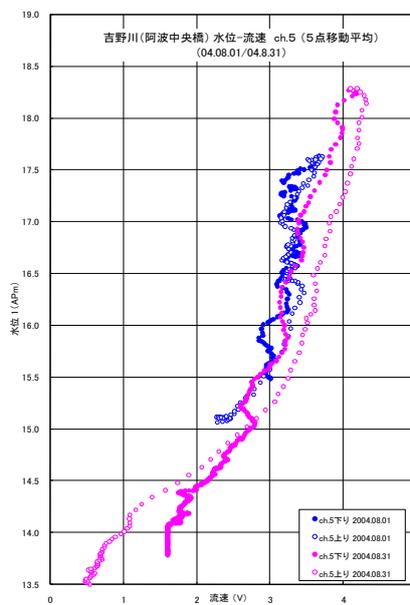


図-4.6 H-Vs F4およびF3の例

さて、問題の所在であるが、上述ループパターンのうち、通常のパターンF4（反時計まわり）が3 1例中わずか4しかなく、他（F1～F3）は、始めに述べたように河床低下あるいは粗度低下といった何らかの変化がなければならぬ。ところが観測断面あるいは洪水流観用断面（第一及および第二）にはそのような変化は生起していない。加えて1km下流には、堰という支配断面があり、常識的には水面形も流量に応じて相対に固定されたものとなるはずである。

そろそろ原因の紹介に入ろう。

筆者は、4時期（1998、2002、2005、2007）の空中写真から、柿原堰から上流部での砂州移動に気付いていた。

一例を示しておこう（図-4.7、2002～2005）。なおこの砂州移動は、相応規模の出水がないと顕著にはあらわれない。なお砂州長の規模は、500mから1km程度である。

そのような眼で、柿原堰から中央橋までの前述空中写真4枚（図-4.8）を比較いただくと、柿原堰上流、とくに左岸部分の砂州（あるいは島）が小さくなっていくのが読み取れる。他に対照的に右岸側への堆積も認められる。

これは、砂州の移動、それも砂州の山部分の移動ではないか？そう考えれば、堰地点の水位は、支配断面故に変わらなくても、堰から中央橋に至る1kmの区間での河

表-4.1 H-Vsi 関係のパターン分け

出水日	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	左右岸 水位差
Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)	(m)
04.8.1 7,800	F4 2.4	F2 3.0	F4 2.9	F3 *3.7	0.2
04.8.31 12,300	F1 2.9	F2 3.9	F4 3.5	F4 *4.3	0.35
04.9.30 8,800	F1 3.4	F2 *4.3	F1 3.9	F2 3.8	0.7
04.10.20 14,500	F3 4.3	F3 4.9	F3 *5.0	欠測	0.9
05.9.7 12,500	F2 3.7	F3 *4.2	F2 *4.2	F2 3.9	0.65
11.5.29 6,700	F3 3.4	F3 *3.8	F3 3.5	F3 3.2	0.2
11.09.0.2 6,900	F1 3.0	F2 *3.6	F3 3.5	F2 2.9	0.3
11.9.21 12,800	F2 4.3	F3 *4.4	F2 3.4	F2 3.8	0.5

\*: 4地点の max

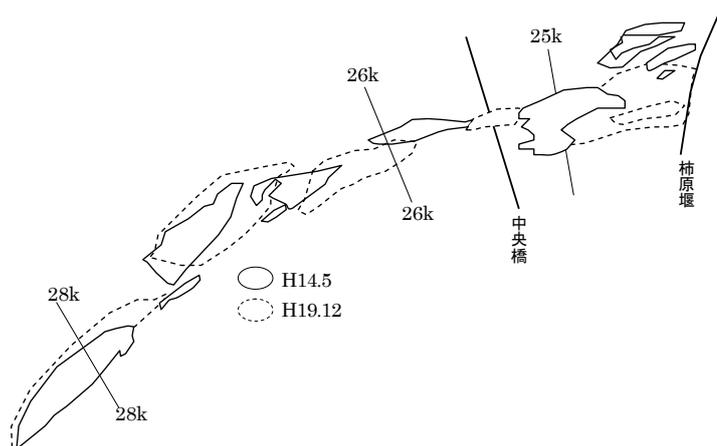
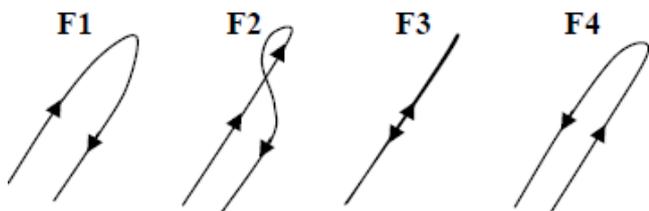


図-4.7 砂州の移動図 (2002と2007)

床低下があれば、一出水期間中に中央橋の水位低下、ひいてはF1~F3の逆ループパターンが起きたのではなかろうか。

推論の確認のために、堰上流24.5kmと25kmの横断変化図(03.2, 05.4, 06.4, 11.12)を作成した(図-4.9~10, 堰位置は24.1~2km付近)。両断面とも左岸側で、

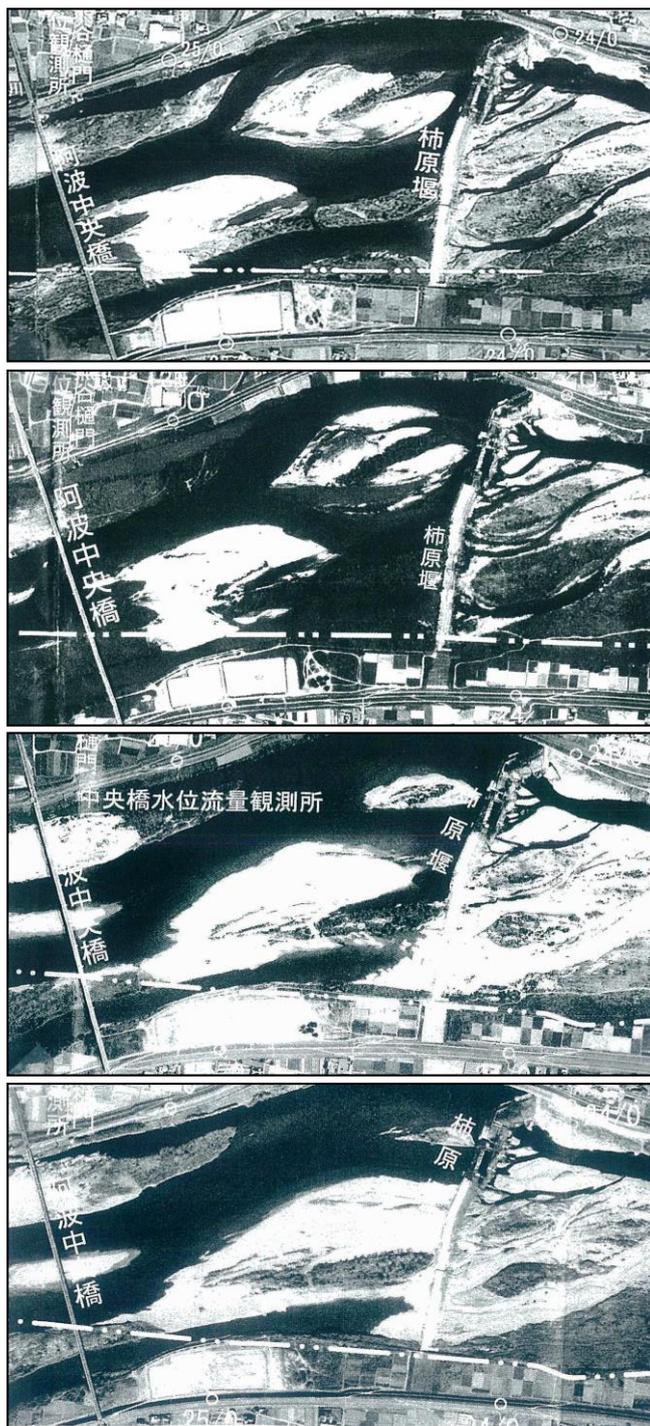


図-4.8 柿原堰から阿波中央橋の空中写真 (上から98, 02, 05, 07)

04年の4出水があった03.2~05.4に大きな河床低下, 05年の1出水をはさむ06.4~11.12でも少し低下が認められ、主として左岸側での河床低下が確認された。加えて、その規模の大小から判断すると、表-4.1中に出水のQmaxが示してあるが、Qmaxが10,000m<sup>3</sup>/s(?)を超えないと大量の土砂移動が期待できないことも推測される。

他に、24.5km断面では、右岸側低水路での顕著な堆積が認められるが、これは堰高の右岸側1m高の形状の反

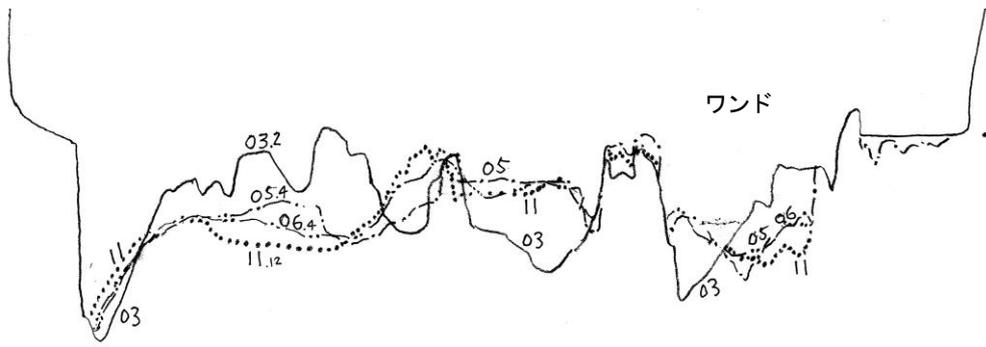


図-4.9 堰上流24.5km横断比較図

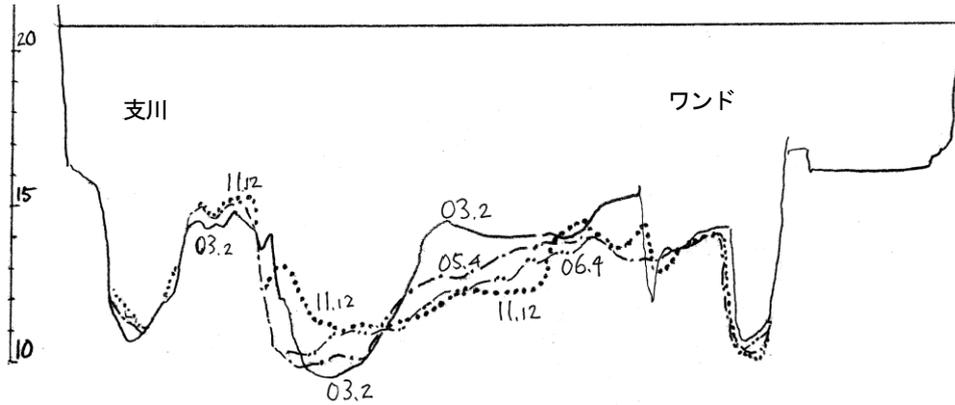


図-4.10 堰上流25.0km横断比較図  
(03.2, 05.4, 06.4, 11.12)

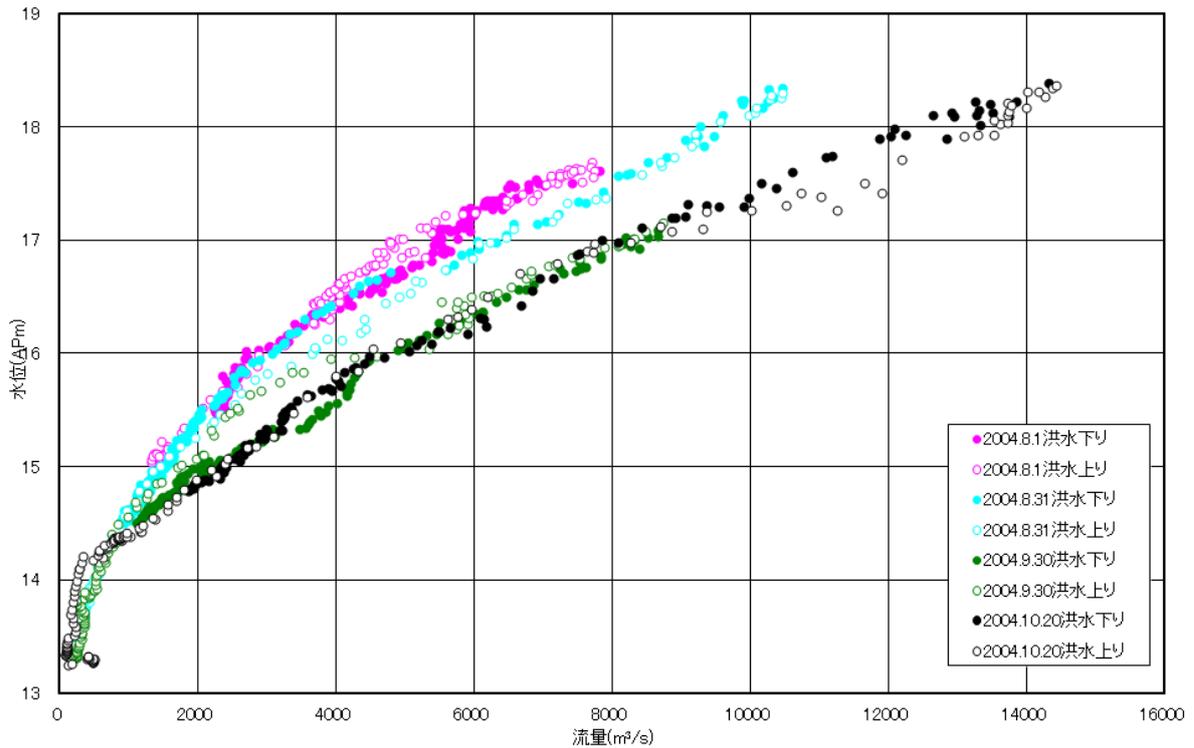


図-4.11 H~Q変化図, 阿波中央橋 (04の4出水)

映もあって、表-4.1中の「最大流速位置の右岸から左岸への移行」あるいは、「2004年4出水における洪水規模によらない阿波中央橋左右岸水位差の漸増」という現象を裏付けているものといつてよさそう。

なお、H~Q関係にも、流量の増加が認められている。

一例を示しておく(図-4.11)。

ループパターンについては、正確なことはわからなかったが、以下の2点、本来パターンのF4が初期2出水のみ4か所(砂洲の山の終り?)、次に「F1とF2は、同パターンと見做してもよいのではないか。そしてF3は、

F1=F2とF4の中間形状，例えば出水がシャープであれば，本来F1=F2のものがF4パターンに引きずられてF3になりうる」と考えれば，いくぶん整理できたようにも思える（F1=F2の表は省略）．ちなみにF3のみの出水が2つあり，いずれもハイドロはシャープであった．

最後に，では「現在は砂州の谷か？，これから徐々にF4型があらわれるか」であるが，橋下流の第一および第二測線には堆積傾向のきざしが見えるものの（図省略），断定できるほどではなく今後の観測を待ちたい．

#### 4.3 まとめ

異様といえる時計まわりが支配的なH-Vsiパターンもどうやら，取水堰上流の砂州の山の消滅が原因らしい，ということになった．堰ではなく通常の河道だったら，通過した砂州の山のバックでそうはならなかったかもしれないが，それは観測事例が少なく，なんともいえない．例えば砂州が重畳する安倍川とか，近く的那賀川で確かめたいことであろう．

### 5. 長期観測の重要性

吉野川阿波中央橋に電波流速計が設置されてはや13年が経つ．4章でふれたように，砂州の移動にも10年かかってまだその移動が完了したか不明ということ．たまたま堰があって顕在化したのかもしれないが，長期それも相当に長期の継続観測が必要なことがわかる．

同様なことは，利根川の八斗島にもいえる．電波流速計を設置した橋が廃橋となり，期間は7年間であったが，大規模な砂州の流下があり，H-Vsi関係の大きな変化を，数回の出水にわたって経験した．

川の変化は少ない，一時期のみで判断せず，長期間設置し，変化を十分に監視してこそ，技術の進歩があるのではないか．

### 6. あとがき

より正確な洪水流量が知りたいは，建設省の時代からの河川技術者のなかなか果たせない夢だった．電波流速計は，現場に設置されるようになって以降，相応の技術レベルに達し，これから流量データが洪水の始めから終りまで，オンラインで出されるようになるかと思われた矢先，より正確な，しかし人力によるADCPの出現によって，その普及は数歩も後退したように筆者には感じられる．

「流速」という新しい水理量を親しく眺めて，技術者の洞察力が養われるのである．

あと10～20年後に，どうすれば正しかったのかがわかるであろう．

謝辞：国交省利根川上流河川事務所および徳島河川国道事務所の調査課の方々には，種々データの提供をいただいた．感謝の意を表したい．また論文の作成に関しては，(株)東京建設コンサルタントの河口尚子氏の絶大な協力を得た．同よう感謝を申し上げる．

#### 参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定，水工学シリーズ68-12．1968，航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345，PP1～19．
- 2) 酒井雄弘，二瓶泰雄：ADCPデータに基づく大河川洪水流の更正係数に関する検討，水工学論文集，Vol.51，pp.1081～86，2007．
- 3) 山口高志：洪水流速および流量観測 —その1—水水学会誌，pp.625～635，No.6，Vol.15，2002．
- 4) 木下良作：河川流量と流れの構造 —ADCPによる観測報告—土木研究所での講演会 2002など．
- 5) 山口高志：洪水流速および流量観測 —その2—水水学会誌No.4，Vol.16，2003．
- 6) 山田正：Commom MP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.1，2010
- 7-9) 水水学会研究グループ「河川流量観測 高精度化研究会編：河川流量観測の新時代，Vol.1～3．2010～2012．
- 10) 土木研究所：流量調査手法に関する検討業務（河川情報センター，2008）
- 11) 土木研究所，メーカー他による共同研究：非接触型流速計測法の開発，土木研究所共同研究報告，No.291，2003他
- 12) 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-28，1994．
- 13) 山口高志：電波流速計のこれまで—川の中が見える—，河川観測技術研究所，2008．
- 14) Costa,J.E.et al：Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods,W.R.R, Vol.42，2006

(2014. 2. 10受付)

# ADCPの反射強度による洪水水中の浮遊砂量推定と 水中採水による浮遊砂濃度の鉛直分布計測

ESTIMATION OF THE AMOUNT OF SUSPENDED SEDIMENT USING ACOUSTIC  
BACKSCATTER AND VERTICAL DISTRIBUTION MEASUREMENT OF  
SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION BY UNDERWATER SAMPLING

岡田将治<sup>1</sup>・萬矢敦啓<sup>2</sup>・橘田隆史<sup>3</sup>

Shoji OKADA, Atsuhiko YOROZUYA and Takashi KITSUDA

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 准教授 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

<sup>2</sup>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 (〒305-8156 つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>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)

In order to develop the estimation method of suspended sediment volume using Acoustic Backscatter, authors carried out flood observation using ADCP and water sampling in Shimanto River. Observation results have revealed that authors' proposed method is effective under small grain conditions. Also we improved water sampler to measure the depth of sampling point with high accuracy, and then examined availability of measuring vertical distribution of suspended sediment concentration during flood in Hiji River. As a result, we succeeded in obtaining underwater samples within 3m depth.

**Key Words:** *Acoustic Backscatter Turbidity (ABT), Suspended sediment concentration, Underwater sampling*

## 1. 序論

近年, ADCPを用いた河川の流況観測が多く実施されるとともに, ADCPによる洪水観測技術やデータ処理, 計測精度の評価手法等に関する検討が行われ, 流量観測に関する基礎的な技術はほぼ確立されてきたといえる。そして, ADCPを用いた観測技術の次のステップとして, 多くの研究者および実務者の興味は, 流況と掃流砂量, あるいは浮遊砂量の同時計測技術の確立に移りつつある。

ADCPの反射強度から濁度および浮遊砂濃度を推定する技術について, 著者ら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および吸収損失, 懸濁物質による吸収, 超音波の拡散・距離減衰等の影響を考慮した後方散乱の算出手法<sup>1,2)</sup>により, 平水時の濁度が150ppm程度までの条件下において精度よく推定できることを確認している。

しかし, 洪水水中の高濁度条件下においては, 懸濁物質による吸収, 浮遊砂の粒径等の影響により超音波の減衰が大きく, ADCPのデータが取得できない場合や取得できてもデータの品質が低下することから, 検討事例はこれまでほとんど報告されていない。二瓶ら<sup>3)</sup>は江戸川に

おいてH-ADCPで計測された第80層目と第3層目の反射強度比を指標とした濁度推定手法を提案し, 濁度が120[FTU]までの条件下において有効性を確認しているが, 河川によっては洪水水中に濁度が1000[FTU]を超えるような場合もあり, 汎用性の点で課題が残る。

そこで, 本研究ではADCPを用いた洪水時における流況および浮遊砂量の同時計測技術の構築のための基礎検討として, はじめに四万十川の洪水水中の高濁度条件下において, ADCP橋上操作艇を横断方向に曳航させて計測した流速および反射強度の横断面分布と採水した試料の濁度測定, SS試験を行って著者らが提案する反射強度から濁度を推定する手法の適用性について検証した結果<sup>4)</sup>を示す。つぎに, そこから技術的課題として挙げられた洪水水中の浮遊砂濃度の鉛直分布を把握するための水面下の採水手法を検討するために, 市販の水中採水器を改良して流れに対する横方向の安定性および採水地点の深度の計測精度を向上させ, 2013年10月の肱川洪水時に適用した。さらに, 採水試料から得られた浮遊砂濃度の鉛直分布とRouseの浮遊砂濃度分布式と比較するとともに, 洪水水中の採水手法の技術的課題について示す。

## 2. ADCPによる観測および採水データを用いた浮遊砂フラックスの算出方法

図-1に本研究で用いた現地観測データに基づいて浮遊砂フラックスを算出するまでの流れを示す。まず、現地観測においてADCP橋上操作艇により流速および反射強度の横断面分布を計測する。その際、ADCPで水深も計測できることから横断面形状および断面流量も得られる。また、採水を行い、持ち帰って試料の粒径分布、濁度およびSSを計測し、濁度-SS濃度換算式を作る。つぎに、著者ら<sup>1)</sup>が提案するADCPで計測された反射強度から超音波濁度(ABT: Acoustic backscatter turbidity, 以下ABTと示す)を計算する。そのアルゴリズムを以下に示す。散乱強度 $EI$ は、ソナー方程式から式(1)で表される。

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

ここに、 $EI$ : 散乱強度(dB),  $SL$ : 発射強度(dB),  $SV$ : 粒子の後方散乱,  $\alpha_w$ : 水の吸収係数(dB/m),  $r$ : トランスデューサーからの距離(m)である。また、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)で算出している。

$$\log M(r) = S\{dB + 2R(\alpha_w + \alpha_s)\} + K_s \quad (2)$$

$M(r)$ : トランスデューサーからの距離における懸濁態濃度,  $S$ : 後方散乱係数,  $dB$ : 拡散補正後の後方散乱強度,  $\alpha_s$ : 粒子の吸収係数,  $K_s$ : トランスデューサー一定数である。各項の詳細については著者らの文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

この式を用いて鉛直濁度分布に一致させるように各変数を決定し、超音波濁度(ABT)を求める。濁度-SS換算式にABTを代入することで、浮遊砂濃度が算出され、さらにADCPによって計測された横断面内の各計測グリッドの面積、流速を乗ずることによって浮遊砂フラックスが得られる。

## 3. 四万十川における2011年洪水時の現地観測

### (1) 四万十川の2011年洪水の観測概要

図-2に現地観測を実施した渡川大橋付近の平面図、ADCP橋上操作艇による観測範囲、採水地点を示す。四万十川の河口から8.4kmに位置する不破地区渡川大橋を対象として、2011年7月19日に台風6号による洪水期間中に現地観測を実施した。四万十川流域では2011年7月18日夜半から7月19日の夜までの約2日間の総降雨量が上流域の船戸で826.5mm、梶原516mm、大正493mm、中流域の江川崎で388.5mm、窪川491mmを記録した。

この時間帯には浮子による流量観測が実施されており、約8500m<sup>3</sup>/sであった。ADCPを用いた洪水観測は、翌20日5時から13時までに定点観測を4回、曳航観測を8回

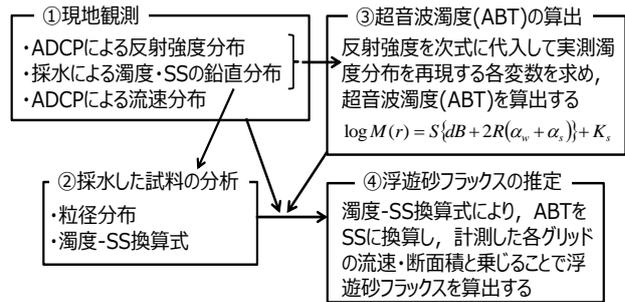


図-1 現地観測データを用いた浮遊砂フラックスの算出フロー



図-2 四万十川渡川大橋付近の平面図と観測体制

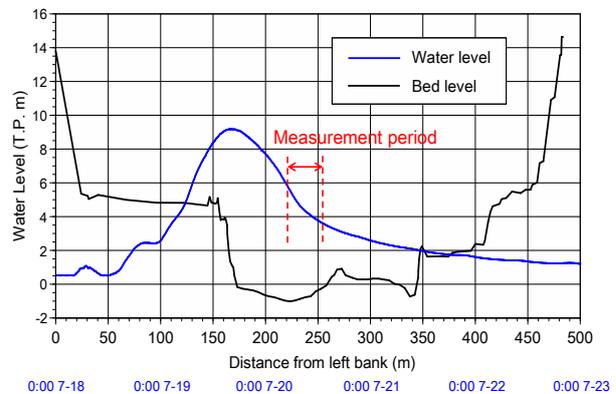


図-2 渡川大橋の横断面図と2011年7月洪水の水位ハイドログラフ

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 (ハイスピードサンプリングモード)
計測層厚	0.25m
計測層数	50層
アンサンブルタイム	3.14秒
ウォーターピング数	3ピング(サブ2ピング)
ボトムトラック機能	有り (3ピング)
偏差流速	7.53cm/s

(CaseM1 ~ CaseM8)実施しており、その間の水位は5.82m(5:00)から3.67m(13:00)であった。

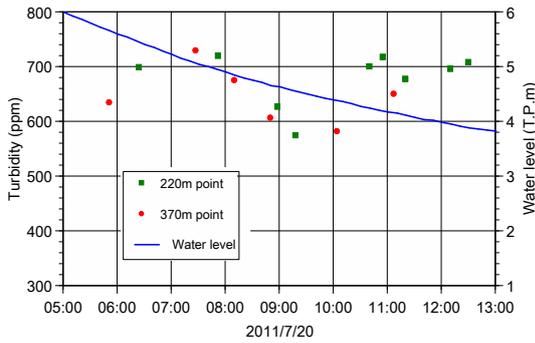


図-3 ADCP観測期間の濁度の時間変化

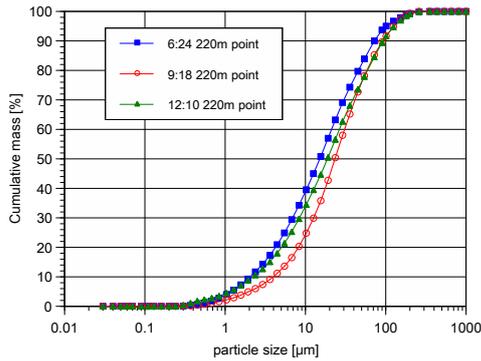


図-4 ADCP観測期間中の浮遊砂の粒度分布

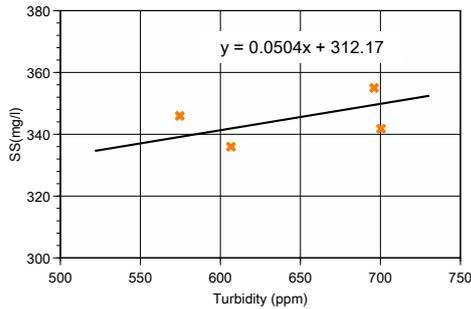
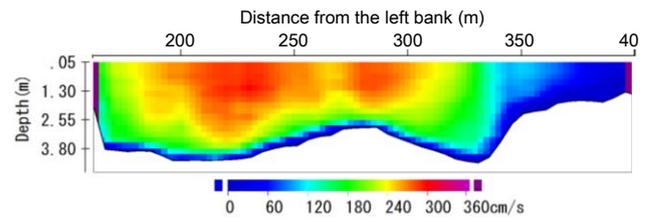
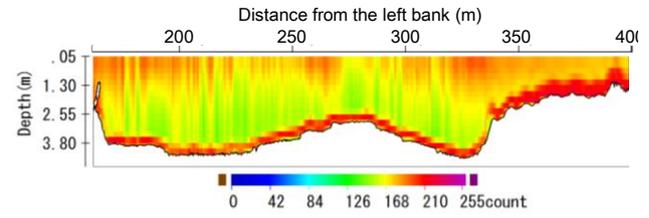


図-5 濁度のSSの関係

表-1に洪水観測を行った際のADCPの設定条件を示す。

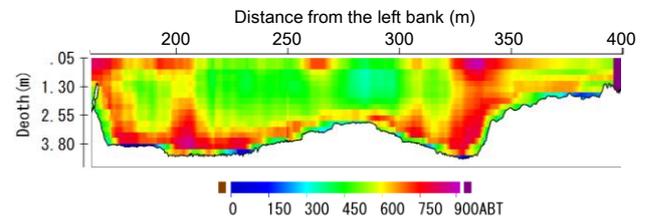


(a) 流速

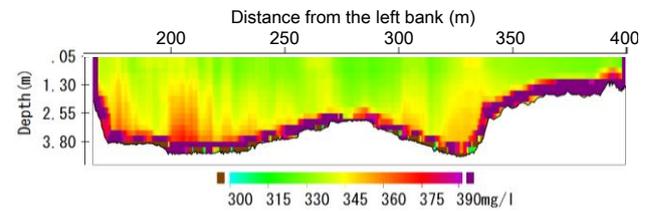


(b) 反射強度

図-6 CaseM7(11:41-11:53)における流速, 反射強度の横断分布



(a) ABT



(b) SS

図-7 採水データに基づいて著者らの推定手法から得られた CaseM7(11:41-11:53)におけるABTとSSの横断分布

観測には近年の洪水流観測で一般的に使用される1200kHzタイプのWorkhorse ADCPを用いて、Mode12(ハイスピードサンプリングモード)を使用した。計測層厚は0.25m、計測層数は50層として、超音波の発射回数を設定した結果、偏差流速は7.53cm/sであった。標準タイプの橋上操作艇に各時刻におけるボートの位置と速度ベクトルを高精度に把握するための小型RTK-GPSを搭載し、計測データを陸上局に無線でリアルタイムに送信する計測システムを用いた。採水作業は、曳航観測時に図-2の220m地点(濤すじ部)と370m地点(右岸低水路と高水敷の間の小段)においてバケツによる表面流のみを行い、研究室に持ち帰った後、濁度計測(JFEアドバンテック(株): INFINITY-Turbi)、SS試験および粒度分布測定((株)島津製作所: SALD-2200)を実施した。

(2) 観測結果および浮遊砂フラックス推定結果の考察

図-3に各時刻に採水した試料の濁度を示す。ここで用いた濁度計は、中濃度用と高濃度用の2種類のセンサー

で濁度を計測しており、図の縦軸は高濃度用センサーの計測値である。なお、中濃度用センサーでは800～1300[FTU]の範囲のデータが取得できている。観測期間中に水位が約2m低下しているが、濁度は580～720[ppm]の範囲であった。図-4に観測時間帯の序盤、中盤、終盤に採水した試料の粒度分布を示す。時間帯による分布の違いは見られず、 $d_{50}$ が20 $\mu\text{m}$ 程度で、90%以上が100 $\mu\text{m}$ 以下の微細な成分であることから、大部分がウォッシュロード成分と考えられる。

図-5に濁度とSS試験結果との関係を示す。濁度の上下限値の試料を用いて実施したSS試験から浮遊砂濃度は340～360[mg/l]であり、これらの結果から濁度とSSの関係式を作成した。濁度計で計測した濁度の値に対してSSの値がほぼ同じ値をとっているため、今後サンプル数を増やして関係式の妥当性を検証する必要があるが、ここでは計測値がある範囲でのみ有効とする。

反射強度からABTの算出例として、図-6にADCPで計測されたCaseM7(11:41-11:53)における (a)流速、(b)反射強度の横断面分布を示す。流速は低水路の滞り部において3.5m/s程度となっている。ADCPでは反射強度を0から255の256段階で受信され、表面付近は大きく、河床に近いほど小さくなる傾向がみられる。

ここで得られた反射強度、220m地点において採水で得られた水表面付近の濁度、代表粒径、水温および塩分(洪水中はゼロとする)データをキャリブレーションデータとして、後方散乱係数、粒子による拡散係数、水および粒子の吸収係数、トランスデューサー定数を算出する。つぎに得られた式を断面全体に適用することによって、ABT分布を推定した。

図-7(a)に推定したABTの断面分布、(b)に図-5の濁度-SS関係式を用いて得られたSSの断面分布を示す。推定したABTの断面分布で興味深いのは、河床移動が生じていると考えられる220m付近、低水路から水深が大きく変化する区間においてABT推定値が大きくなっている点である。これは図-6(a)に示した流速分布からもわかるように、低水路の高流速域と小段の低流速域の境界部に一致する。図-6 (b)より、浮遊砂濃度は河床近傍を除いておよそ330～360mg/lの範囲と推定された。図-5の関係式の計測値がある範囲付近であること、また、大部分がウォッシュロード成分であることからSSの鉛直方向変化が小さいことからこの結果は概ね妥当といえる。各グリッドのSS値がわかれば、グリッドの断面積および図-6(a)の流速値を乗じることによって、浮遊砂量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ が推定できる。四万十川で実施したCaseM1～CaseM8の浮遊砂量 $Q_s$ を推定した結果を一般的な指標でみるために、図-8に示す全国の一級河川で実施した浮遊砂観測結果<sup>5)</sup>の範囲にプロットした。その結果、河川流量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$ とウォッシュロードの量 $Q_s[\text{m}^3/\text{s}]$ との関係式の  $Q_s = (4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6})Q^2$  に対して、ADCPで観測した流量と本手法で推定された浮遊砂量の関係式は、 $Q_s = 5.1 \times 10^{-8} Q^2$  であり、

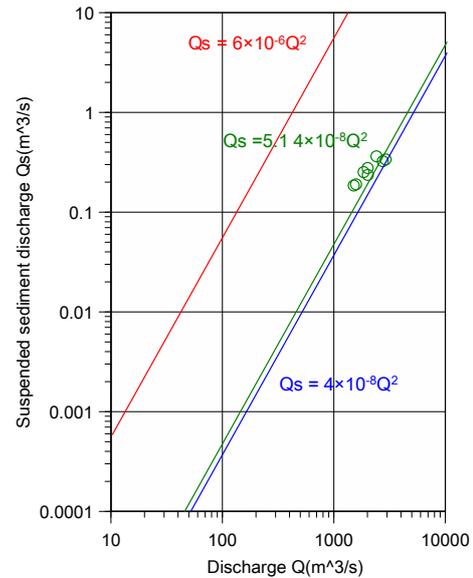


図-8 本手法で推定した浮遊土砂量とADCPで計測した流量との関係



図-9 改良した水中採水器

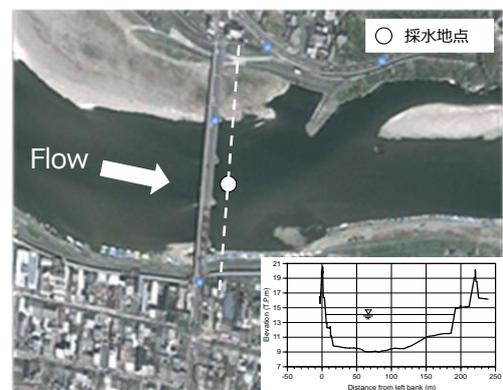


図-10 脇川橋付近の平面図と横断面図および採水地点の位置

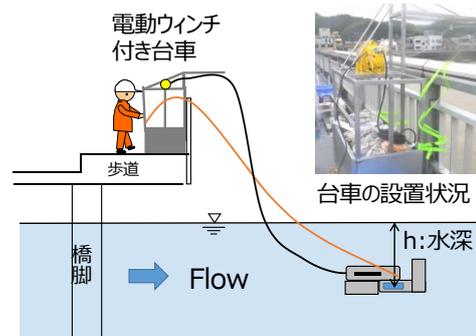


図-11 水中の採水方法のイメージ

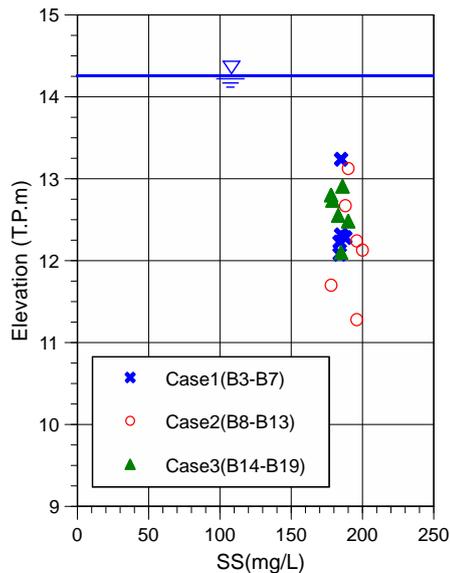


図-12 洪水中に実測したSS濃度の鉛直分布

一般的な値の範囲内であることがわかった。

以上より、570～700ppmの高濁度条件下においても、濁水中の粒径が比較的小さいウォッシュロード成分が大半を占める条件においては、著者らの推定手法が適用可能であることがわかった。しかし、この現地観測では採水を表面流のみで行っているため、濁水中の粒径がさらに大きく浮遊砂濃度に鉛直方向に分布する条件下においては、検証データが得られないため、本手法の有効性が確認できない。したがって、洪水中の各水深において採水が実施できる手法について実用化することが浮遊砂量推定技術の高度化に向けた課題となる。

#### 4. 水中採水器の改良と肱川における採水試験

##### (1) 水中採水器の改良

洪水中に浮遊砂濃度の鉛直分布を計測するために採水方法について検討を行った。図-9に本観測で用いた水中採水器を示す。水中における採水を行うために、ここでは洪水時に水面下の採水用に開発された東京計測(株)社製の河川水採取器FL-SSを用いた。この採水器は内径110mm、長さ490mmのステンレスパイプがスプリング開塞式になっており、後方のロープを引くことで前後の栓を閉めて約3000mlの水が採取できる。

洪水時に適用する前に、流速2m/s程度の流れ場において試験計測を実施し、その結果からつぎの2点の改良を行った。まず、流れに対して横断方向の安定性を向上させるために、尾翼を追加し、橋上からの操作性を向上させ、1回の採水作業に要する時間を短縮させることができた。2つめは採水を行った深度の計測精度の向上である。従来はワイヤーの長さからおよその深度を把握するしかなかったが、採水器側面に簡易圧力計を設置することにより、より正確な深度が計測可能となった。

図-10に肱川橋付近の平面図、横断面図および採水地

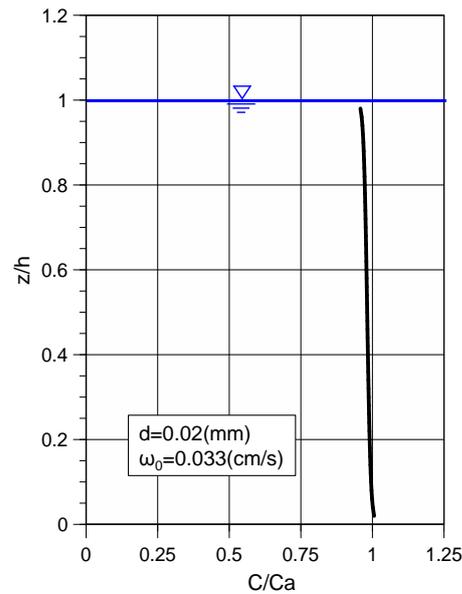


図-13 Rouseの式から得られた浮遊砂濃度鉛直分布

点を示す。肱川河口から18.6kmに位置する肱川橋を観測対象地点とした。この地点を選んだ理由は、肱川橋付近における河床材料の粒径 $d_{50}$ がおよそ8mmであり、四万十川不破地点( $d_{50}=20\text{mm}$ )よりも小さかったため、出水時に水面下の採水を行うことができればウォッシュロード成分だけでなく、浮遊砂となる粒径群も採取できると考えたためである。台風27号によって洪水状態となった2013年10月25日に採水を実施した。その時間帯の水位は13.62(T.P.m)(15:19)から14.29(T.P.m)(17:28)であった。その時の水面幅はおよそ190mで、水面勾配は1/2800、水深平均流速は2.3m/s程度、流心部における水深は5m程度であった。

図-11に本研究で実施した水中採水方法のイメージを示す。橋上の歩道に設置した電動ウィンチ付台車と採水器をワイヤーで繋ぎ、観測者が取得したい深度で後方にある開塞用のロープを引くことにより、水中の濁水を採取する。採水した(ロープを引いて栓を閉じた)時刻と簡易圧力計で記録される時刻、水温および圧力のデータから、採水した深度を正確に把握することができる。また、台車についても過去に実施された観測事例等を参考に、肱川の観測地点の状況を考慮して製作した。なお、この採水作業は、電動ウィンチを使用しているため、2名の観測員で実施が可能であり、1回の採水作業に要する時間は肱川の条件で4～5分間程度である。

採水は、10月25日13時38分から17時28分までに19回行い、これらの試料を時間帯ごとに3つのグループに分け、それぞれCase1(B3-7)、Case2(B8-13)、Case3(B14-19)として濁度、SSおよび粒径分布を計測した。濁度は日本工業規格 JIS K 0101に定められた分析法に従い、積分球式濁度計により測定した。SSは環境庁告示第59号付表8に定められた分析法に従ってGF/Cフィルターによるろ過を行い、測定した。また、粒度分布は四万十川の時の同様

にSALD-2200(株)島津製作所)を用いて計測を行った。

## (2) 洪水中に実測した浮遊砂濃度の鉛直分布とその考察

肱川橋中央部において15時19分に12.1(T.P. m)の高さで採水した試料の粒度分布を調べた結果、 $d_{50}$ の粒子径は20 $\mu\text{m}$ であり、他の深度で採取された試料についてもほぼ同様な結果であった。したがって、肱川で採水した濁水は、四万十川と同様に、そのほとんどがウォッシュロード成分であったことがわかる。

つぎに、図-12に肱川のSS濃度の鉛直分布を示す。4.6～5.3mの水深に対して、水面下1m～3mの範囲で採水を行い、SSは170～200mg/lで水深が大きいほどSSが大きくなる傾向が若干みられるものの、鉛直方向にほぼ一様となった。採水作業中に別の作業員が実施しているADCP橋上操作艇による曳航観測のリアルタイムデータから採水地点のおよその水深がわかるため、水面から河床面までの広い範囲で採水ができるようにワイヤーの長さを調節しながら行ったが、著者らが最も必要としたより深い河床付近のデータが取得できていなかった。水面下3mよりも深い地点での採水には試行錯誤による検討が必要である。これについては今後の技術的課題とする。

これらの結果と次式のRouseの浮遊砂濃度の鉛直分布式<sup>6)</sup>と比較する。

$$\frac{C}{C_a} = \left\{ \left( \frac{h-z}{z} \right) \left( \frac{a}{h-a} \right) \right\}^z \quad (1)$$

ここに、 $C$ ：浮遊砂濃度[mg/l]、 $C_a$ ：基準面濃度[mg/l]、 $h$ ：水深、 $z$ ：河床からの高さ、 $a$ ：基準面の高さ、 $Z = \omega_0 / \kappa u_*$ 、 $u_*$ ：摩擦速度、 $\kappa$ ：カルマン係数(=0.4)、 $\omega_0$ ：流砂の沈降速度である。一般に基準面の高さ $a$ は底面より0.05 $h$ で与えられる。また、沈降速度 $\omega_0$ は次式に示すRubeyの式<sup>9)</sup>から求められる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d + \frac{36\nu^2}{d^2} - \frac{6\nu}{d}} \quad (2)$$

ここに、 $d$ ：粒径、 $\sigma$ ：砂礫の密度、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度、 $\nu$ ：水の動粘性係数である。式(2)から粒径20 $\mu\text{m}$ に対する沈降速度を求めると、 $\omega_0$ は0.033cm/sとなり、基準高さに対する基準濃度で表したRouseの浮遊砂濃度鉛直分布が図-13である。横軸は基準濃度を表し、基準高さの $z=0.05h$ において $C/C_a=1$ となり、縦軸 $z/h$ は、0が河床面で1が水面を表す。図-13より粒径が20 $\mu\text{m}$ の場合は鉛直方向にほぼ一様な分布となり、図-12に示した実測結果と同様な傾向を示した。

## 5. 結論

ADCPを用いた洪水時における流況および浮遊砂量の同時計測技術の構築のための基礎検討として、四万十川および肱川で実施した観測から明らかになった点は以下のとおりである。

1) 四万十川における洪水観測時の表面流速は約3.5m/s

(水深平均流速は2.6m/s)、濁度は570～700[ppm]の高濁度条件下であったが、一般的な橋上操作艇を用いて、流速分布、水深および反射強度データを取得することができた。

- 2) 四万十川において水表面を採水した試料の粒径分布から、洪水時の浮遊砂の大部分がウォッシュロード成分であることを確認した。著者らが提案するADCPの反射強度から濁度を推定する手法を適用して、ABTおよびSSの断面分布、断面を通過する浮遊砂量を推定した結果、ADCPで計測した流量と推定した浮遊砂量の関係は、全国一級河川の観測結果の範囲内にあり、本手法が概ね妥当であることがわかった。
- 3) 洪水時の浮遊砂濃度の鉛直分布を計測するために、既存の水中採水器に改良を加え、計測中の採水器の安定性および採水深度の計測精度を向上させた。
- 4) 改良した水中採水器を肱川の洪水時に適用した結果、水深約5m、水深平均流速2.3m/sの流況において、水面下3mまでの採水を行うことができた。それよりも深い地点での採水については今後の技術的課題とした。
- 5) 肱川では、当初鉛直方向に分布が形成される粒径の河床砂が洪水中に捕捉できると想定して対象河川に選定したものの、結果として捕捉された河床材料粒径は四万十川と同じウォッシュロード成分の20 $\mu\text{m}$ であり、鉛直分布が一様となる条件であった。

今後、浮遊砂濃度の鉛直分布が形成される条件でデータを取得するために、採水場所や洪水規模等の採水時の条件を検討するとともに、3mよりも深い地点での採水方法を含め、採水作業を確実に短時間で実施できるように改良を行っていく予定である。

謝辞：四万十川および肱川の現地観測は、科学研究費補助金(基盤研究C)「ADCPを用いた洪水流況、河床速度、浮遊砂量の同時計測技術の開発と実洪水への適用」(課題番号：23560614)の一環として行った。国土交通省中村河川国道事務所および大洲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る。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 橋田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励：ADCPの超音波反射強度を利用した濁度計測技術について, 河川流量観測の新時代, 第2巻, pp.49-56, 2011.
- 3) 二瓶泰雄, 北川秀飛, 木水啓, 原田靖生：H-ADCP計測と数値解析を組み合わせた浮遊土砂輸送量計測システムの構築, 土木学会河川技術論文集, 第13巻, pp.225-230, 2007.
- 4) 岡田将治, 萬矢敦啓, 本永良樹, 橋田隆史：ADCPによる

洪水流況・掃流砂・浮遊砂量の同時計測技術構築のための基礎的検討, 土木学会水工学論文集, 第57巻, I\_751-I\_756, 2013.

5) 建設省河川局: 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編), 第14章流送土砂調査, pp.280-282, 1997.

6) 土木学会: 水理公式集(平成11年度版), 第2編河川編, 4.1.5 浮遊砂の濃度分布, pp.160.

(2014. 2. 10受付)

# 超音波式流砂計による河川流送物質の観測 —流速と懸濁物質に比例する信号 (SSI) の 同時測定による観測法の紹介—

SUSPENDED SOLIDS MEASUREMENT BY SUPER-SONIC WAVE,  
INTRODUCTION OF SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF VELOCITY, AND  
SIGNAL (SSI) PROPORTIONAL TO SUSPENDED SOLIDS.

岩熊眞起<sup>1</sup>・河嶋ちか子<sup>2</sup>・岡本幸久<sup>3</sup>・菅野修平<sup>4</sup>

Maki IWAKUMA, Chikako KAWASHIMA, Yukihiisa OKAMOTO, Syuhei KANNO

<sup>1</sup>正会員 東京建設コンサルタント環境分析センター (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

<sup>2</sup>非会員 東京建設コンサルタント環境分析センター (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

<sup>3</sup>正会員 東京建設コンサルタント環境モニタリング研究所 (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区

東町1-36-1)

<sup>4</sup>非会員 東建エンジニアリング調査観測部 (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

A signal, named SSI, is found to be proportional to suspended solids, which is introduced from signal reflected by super-sonic wave velocity meter. As the result, simultaneous velocity and suspended solids measurement will be realized in the fields. Several results of experiments are introduced and a few technical problems are discussed.

**Key Words :** Super-Sonic Wave, SSI, suspended solid, continuous observation method

## 1. はじめに

河川の流砂のみならず、開水路や非満管管路においてすら懸濁性流送物質の連続観測は難しく、洪水を含めた長期間の連続的観測のまとまったデータは少ない。国土交通省の水質自動監視装置（環境水質監視用）による濁度の観測では1時間ピッチの連続観測が行われているが、平水時水位における表層から2割水深の流水の採取であり、長い高水敷区間から堤防の上までの物質輸送力が考慮されていない細い管で輸送された試料の計測である。また計測している項目は濁度であるが、濁度計はその計測原理から、20~40 $\mu\text{m}$ 以下の微細粒子にのみ反応する機器である。河川流送土砂にはそれなりの比率で濁度計反応物質があると、濁度の値にべき乗の式形のキャリブレーションによる換算も散見されるが、ウオッシュロードの一部を計測して全体量を見ている状態であるとも考えられる。

一方では出水時の掃流砂量を現地で人力観測をしている。危険を伴い、大変な労力を必要とし、納得のいく観測成果を得ることは容易ではない。こうした困難度の高い観測に対して、より長時間、長期間の連続的観測データの収集が必要であるとされても、困難極まることであ

る。

筆者らは建設コンサルタントである。その立場から、河道の設計管理等に必要な河川の流砂量（掃流砂量、浮流砂量）の調査観測、湿地帯の保全、ダム貯水池流入負荷量、合流式下水道雨天時流出等のいわゆる懸濁性流送物質の調査、観測をおこなっている。これらの仕事の大半は、物質濃度（C）の分析測定が要（かなめ）である。この場合の物質濃度（C）は採取した試料を持ち帰り分析して測定することが一般的である。しかし、濃度（C）の分析測定は、現地での試料採取も、分析も、ともに労力と費用が掛かることから、現状では物質濃度（C）の観測、分析はデータ数が限られている中での仕事をとなっている。

一方では、水文観測機器の進歩と普及によって、これらの業務を行う場合、水位は自記水位計を設置して調査、観測をおこなうことが一般的になってきている。さらに、掃流力の計算、H-Q式の適用困難性、流量観測精度、感潮区間の順逆流がある等の事由から流速も自記観測する調査・観測も多くなってきており、流量（水位、流速）の連続観測データは多く得られるようになってきている。

このような背景から、流量（水位、流速）データ数と同量レベルの物質濃度（C）が得られれば、その値に流速を乗じて得られる流送物質（qb）のデータを多く得

ることができるようになる。qbのデータが水位、流速と同量数得られることにより、河川流砂量についてのより精緻な現象の解明、適合度の高い計算モデルの作成、検討事項の精度の向上等につながるものと考えられる。

筆者らは、この具体的解決手法として、(C)が出力される観測機器を開発した。あわせて、4種の懸濁性物質の分析(6種の懸濁物質濃度)によるキャリブレーション作成をおこなうという二つの技術を組合わせた手法による河川流送物質量の観測を進めている。

機器の開発を終え、昨年秋に数地点に設置したばかりであることより、流送物質量の観測としての報告が可能な水準のデータ収集には至っていない。よって本報告は、観測技術の紹介を中心にした第一報である。洪水時を含む通年の観測データが収集され次第、続報の報告を行う予定である。

## 2. 開発した機器と設置と使用方法

### (1) 観測機器開発の概要

河川、溪流、用水路、下水管路等の流速測定に広く用いられている長期間メンテナンスフリーで供用できる超音波式ドップラー流速計に改良を加える形で、開発をおこなった。超音波式流速計における懸濁物質濃度と反射信号強度の変化は比例して変化することはよく知られていることであるが、反射信号強度の変化のみでは適用範囲が非常に狭く限定される点をふまえ、「ばらつきノイズ」を基本にしたアルゴリズムによる、懸濁物質量に比例する信号を出力する観測機器として、製造メーカーと共同開発したものである。出力される懸濁物質量に比例する項目名称をSSI(懸濁物質指数: Suspended Solid Index)と呼称した。



図-1 観測機器及び水路底面への設置事例

### (2) キャリブレーション項目の多様化

もう一つは、SSI出力を流送物質量濃度(C)に換算するキャリブレーションの作成を工夫している事である。物質濃度項目を、環境基準項目のSS(環境基準では浮遊物質であるが本報告では懸濁物質と記載する)に限定せず2mm, 0.075mm, 0.022mmのふるいを使用して、分析を行う4種を設定、差し引の2種の項目を加えて合計6種のキャリブレーション項目を設定し、観測対象により選択して利用している。

機器出力のSSIは、感度を変えた出力として、SSI-1、

SSI-2, SSI-3の3つの項目があり、観測地点のSSIの変化特性及び懸濁物質分析値をふまえて、利用適合性の良い結果を選択使用することとしている。

採取土砂や採水試料が大量に確保できる地点においては、現場でも簡便に使用できる小型の沈降筒タイプのキャリブレーション実験装置を作成し、製品の付属装置として提供している。

### (3) 超音波式流砂計(流速・SSI計)の概要

開発した機器は、650Hzの超音波素子を内蔵させた耐水深100mの小型水没式のセンサーと計測記録器より構成されるドップラー流速計を基本としている。センサーにケーブルがついており、これを計測記録器に接続して使用する。センサーは、量水表保護のH鋼、護岸RC部、床固め等の河川施設、橋脚ピア一等を利用して流水の水利現象の変化を極力生じさせないように設置する。同一地点の水深方向の多段的複数個の設置も可能である。センサーのケーブル長は標準で25mであるが、ケーブル長はより長いものの利用も可能である。

計測記録器は最少インターバル1分で作動し、1次データとして、流速、ドップラー反射信号強度、3種のSSIの合計5項目が計測記録される。計測記録器は小型蓄電池で長期間作動する。また計測記録器に内蔵されている通信器の搭載により準リアルタイムでデータをWEBサイトで閲覧することが可能である。水位センサーを増設することで水位データも同時に観測される。

表-1 観測装置の仕様

事項	内容		
	流速	乾燥密度係数	水温
測定範囲	0.01~8 m/s	0.1~5000	0~50℃
精度	2%ofFS	5%ofFS	±0.3℃
分解能	0.01 m/s	0.1	0.1℃
校正方法	出荷時校正	なし	出荷時校正
測定原理	ドップラーシフト	反射強度変動解析	半導体抵抗変化
センサー材質	SUS 304		
センサー寸法	縦185mm,横50mm,高さ21.5mm 重量:3kg以内		
センサーケーブル	標準25m付(オプション:Max100mまで可)		
ロガー外形材質	ポリカーボネイト(防滴規格IP65)		
ロガー寸法	縦215mm,横177mm,高さ100mm 重量:1.5kg以内		
内蔵電池	なし		
外部電源端子	DC12V(Y端子接続のコネクター付ケーブル)		
消費電流	計測時120mA(待機時0.2mA以下)		
インターバル設定	最小インターバル1分		
データ記録	SDカード(読出はPC利用)		
符号出力	標準品なし(LRS232C出力増設可)		
データ通信機能	標準品なし(FOMA通信機埋設可)		

### (4) 機器出力の内容

観測により得られる1次データ(5項目)のうち河川工学の単位で出力されるのは流速(V:m/sec)のみである。ドップラー反射信号強度がS(mV)として出力され、これは相対値である。センサーが河床変動による堆積作用で土中埋まってしまった場合はSが10mV以下となる判別は可能である(センサーが空中にある場合Sは0mV近くになる)。残り3項目のSSIは無次元の相対置出力である。

このSSIで表される無次元相対置出力の流砂量、流送物質量の濃度への変換には観測地点毎のキャリブレーションが必要である。標準的に入手可能な豊浦の標準砂、硅砂、カオリン、石炭灰等を利用したキャリブレーション標準化の研究を継続して行っているが、観測地点毎の

分析値を利用したキャリブレーションが最適であると考えている。

本装置のSSI出力は流速の影響を除去した出力値となっており、基本的には物質濃度（C）の観測である。したがって次式でqbの算定が可能である。

$$qb=(V) \cdot fl(SSI) \cdot h \quad (1a)$$

但し qb：単位幅当たりの流送物質質量 (g/m・sec)

V：流速 (m/sec)

h：水深 (m)

### (5) SSIの精度と直線性

本装置の流速（V）は超音波のドップラーシフト量が流速に比例するとして、卓越周波数の計測をおこない流速を測定している。ドップラー反射信号強度は全広帯域受信強度の信号強度である。SSIはドップラー反射信号の周波数特性毎信号強度のばらつき度合いが、反射信号ゾーン内の懸濁物質濃度と比例的関係があるとして測定している。ばらつきノイズの計測であるため、一定時間の計測が必要であり標準計測時間を40秒間とっている。40秒の間に河川流況にはないような現象、たとえば人が数秒触っていた時に見られる著しい異常値が出現する場合には、誤差の発生が考えられる性質のものである。また、精度を低下させる原因物質として泡の発生がある。

SSI信号はどの程度の懸濁物質濃度まで比例関係があるのかは重要な課題である。流速1m/secの水路及び沈降筒試験では5000~9000g/m<sup>3</sup>程度までの濃度での比例的関係は確認できている。いずれにせよ流送物質の特性により比例関係は異なるものである。

より高濃度の掃流砂の流下の場合には信号強度の低下となり検知は可能である。掃流砂量へ濃度の換算はまだ検討中である。土質特性として空隙率が65~80%を切ると、超音波反射信号は大きく減少する。その反応を利用した掃流砂のキャリブレーション作成の検討は進めているところである。

表-2 SSI出力の特徴

項目名称	反応特性	主な観測内容物
SSI・1	低感度	掃流砂(浮流砂)
SSI・2	中感度	ウオッシュロード、浮泥
SSI・3	高感度	懸濁性有機物、浮泥

キャリブレーションの作成は観測地点での採砂・採水による分析試験値からの作成が基本であるが、流砂量公式等による計算値からの推定、および、当該地点で採取した流砂を用いての実験水路等での作成も考えられる。

## 3. SSIから流送物質濃度（C）の換算キャリブレーション

### (1) 観測地点での採水と分析

観測機器はインターバルを設定し連続作動している。したがってSSIが記録されている時間に現地で試料を採取して、分析測定を行えば、より現地状況に即したキャリブレーション解析用試料を得ることができる。

キャリブレーションは表-3に示した項目により懸濁物質の分析し、作成する。環境基準などでは懸濁物質（SS）は初めに2mmのフルイを通過させた試料の分析である。河川に懸濁している物質全体を考えると、フルイを通過させない全量での懸濁物質の分析が重要である。

74μmでカットした項目（C<sub>2</sub>）の分析を行うことにより、粘土・シルトを除いた砂分量のみの流砂を得ることができる。また、22μmでカットした項目（C<sub>3</sub>）の分析を行うことによって、ウオッシュロードのキャリブレーションを得ることができる。

表-3 キャリブレーション項目の一覧

項目	記号	内容	摘要	例 丁川河口 (g/m <sup>3</sup> ) 内容
フルイ通過なし 総懸濁物質質量 (全SS)	C <sub>1</sub>			2446
懸濁物質質量 (SS)	SS (C <sub>0</sub> )	環境基準項目	環境基準項目	2436
シルト・粘土	C <sub>2</sub>	濁度計に反応性がよい	74μm以下のSS	492
微細粒子	C <sub>3</sub>		22μm以下のSS	265
流砂量 (I)	C <sub>12</sub>	C <sub>12</sub> =C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub> シルト・粘土を除いた砂分量	74μm以上のSS	1954
流砂量 (II)	C <sub>13</sub>	C <sub>13</sub> =C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub> ウオッシュロード等を除いたSS	22μm以上のSS	2180

### (2) 沈降筒によるキャリブレーションの作成

キャリブレーション作成用の沈降筒はSSI計の標準付属品となっている。沈降筒は 内径130mm、高さ1720mm、有効水面までの高さ1700mmの円筒であり、中間部と下部に採水コックが付いている。また、上部には、砂などの物質を入れた容器を支持するふたが付いている。

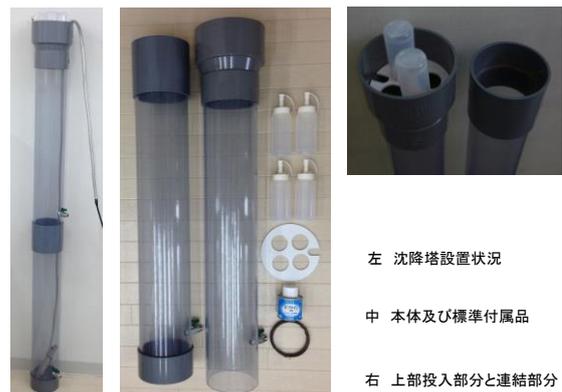


図-2 沈降筒

標準例としての実験は砂（粒径0.2~0.4mmが多く含まれる洗浄した天然砂「きらら」）を用い、1分間に既定流出量となるように先端をカットした容器に砂を充てんし投下した。

時間当たりの投下量から沈降筒内の流送物質濃度（C）を計算で求めた。また、採水試料の分析により懸

濁物質濃度 (SS) を求めた。

表-4 キャリブレーション実験結果の例

投入段階	流速	計算物質濃度	懸濁物質濃度	SSI1	SSI2	SSI3	信号強度 mV
	m/sec	mg/l	mg/l	無次元	無次元	無次元	
1	0.04	125	241	3.5	9.6	9.6	120.8
2	0.04	250	1890	14.6	37	37.8	123.9
3	0.05	375	1470	17.3	43.1	44.8	216.2
4	0.04	1500	6780	64.1	71.5	86.6	360.0
5	0.05	3000	8190	182.3	151.2	210.8	597.2

懸濁物質とSSIには図に示すように相関関係がみられ、これによりSSIから流送物質濃度の推定が可能であるといえる。

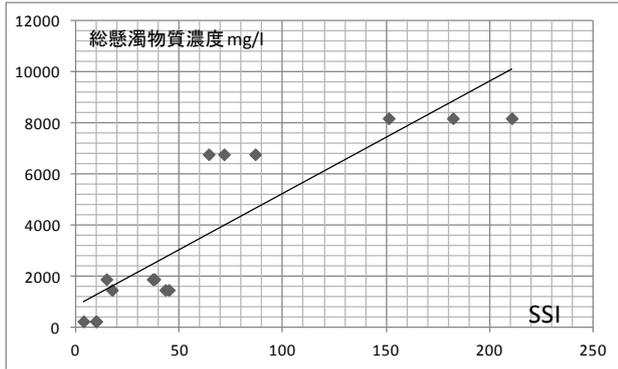


図-3 SSIと懸濁物質の関係

また、懸濁物質濃度に対して、沈降筒直径130mmを水深と仮定し、各段階の流速を基に、式(1a)によりqbの算出を行った。表-5がその結果である。

表-5 キャリブレーション実験によるqbの算出

投入段階	流速	SSI2	計算総懸濁物質質量	懸濁物質質量	qb
	m/sec	無次元	g/m <sup>3</sup>	mg/l	g/m <sup>2</sup> ・sec
1	0.04	9.6	578	241	3
2	0.04	37	2203	1890	11
3	0.05	43.1	2565	1470	17
4	0.04	71.5	4249	6780	22
5	0.05	151.2	8977	8190	58

注1) 総懸濁物質質量は表-3に示すC1

注2) 計算総懸濁物質質量はSSI2との相関式より算出

## 2. 河川等での試験観測事例

### (1) 平水時小河川における感度確認

清澄でかつ比較的浅い河川で、流送物質となる土砂や砂をわずかに投入し、SSIを観測したところ、図に示すような変化が得られた。観測機器のセンサーに近いところでの実験であるが、良好な感度で反応した。

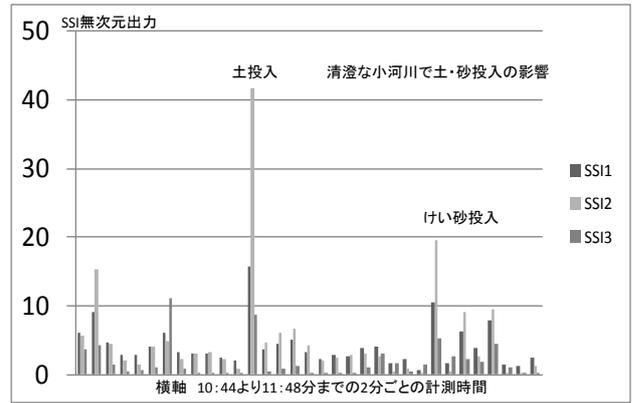


図-3 土・砂投入による感度確認試験

### (2) 泡の流下による影響確認

降雨後の比較的流速は大きく、大量の泡が変化して発生している状態で、SSIへの影響を観測した。泡の変化に対してSSIの変化は少なく、泡による妨害により流送物質として測定されてしまうことは少ないと考えられる。

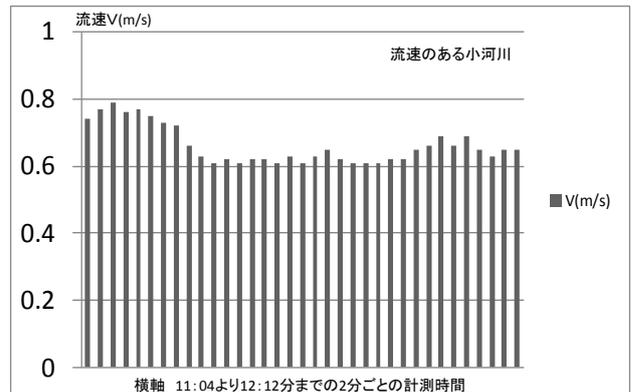


図-4 泡の流下による影響確認試験(流速)

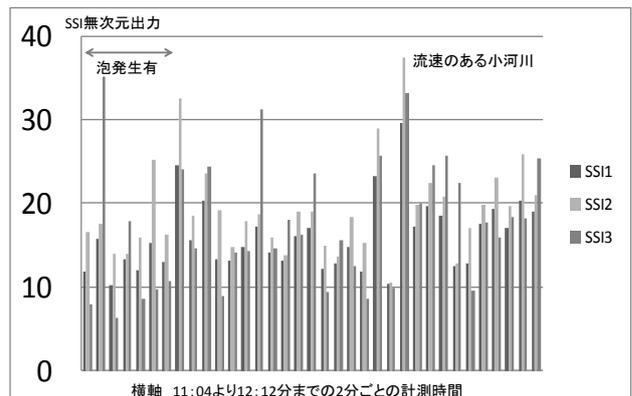


図-5 泡の流下による影響確認試験(SSI)

### (3) 流速変化の大きい樋門周辺での観測

本川が洪水流であり、樋門排水の出口で、流速の変化が大きい場所での観測である。樋門出口の河床底泥が湧昇し、SSIは当該河川のベースの20倍以上の値として観

測されている。実際に目視でもかなりの濁りある状況での観測である。

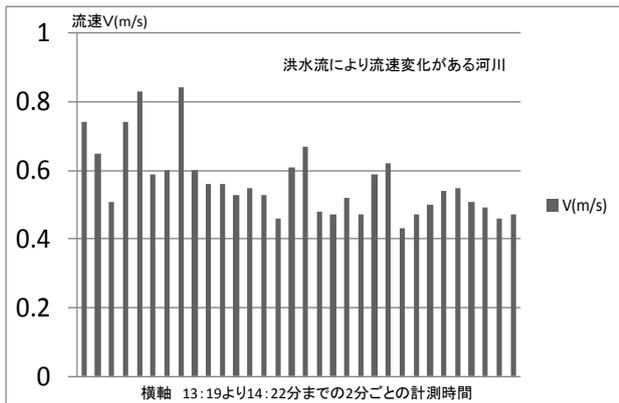


図-6 流速変化のある河川の確認試験(流速)

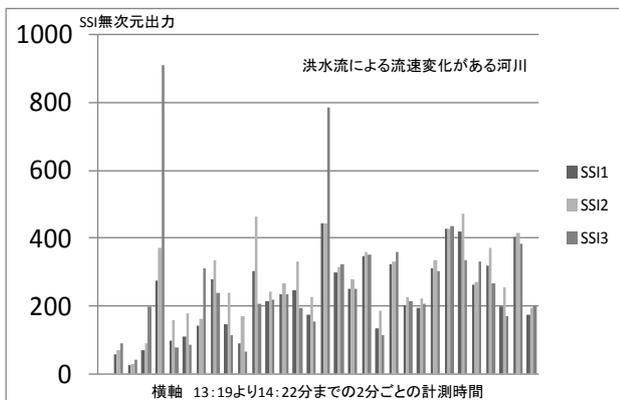


図-7 流速変化のある河川の確認試験(SSI)

#### (4) 都市排水路での安定性の確認

降雨がなく流況変化のない時期に、観測安定性の確認のため、小河川で一週間の連続観測した。SSI出力863データのうち、SSI値が20を超えるものは、SSI3は14、SSI2は8、SSI1は0であった。このピーク出現は、観測誤差の可能性があり、今後さらに実験を重ねてカットできるアルゴリズムの改良を進めている。

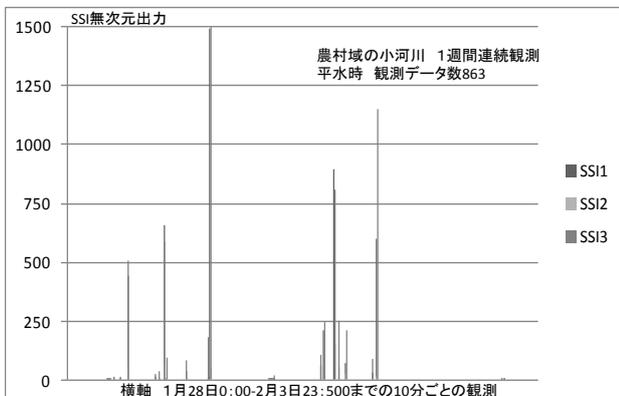


図-8 無降雨期間試験観測(1週間)

#### (5) 降雨による出水時の観測

川幅約数mの都市河川の降雨による出水時の流出時の観測である。降雨による出水に対して、水位、流速の変化が観測されている。ここでSSIも同様の変化が得られている。SSIと流送物質濃度との詳細なキャリブレーションの作成ができれば、qb(流送物質質量)の算定が可能となる。

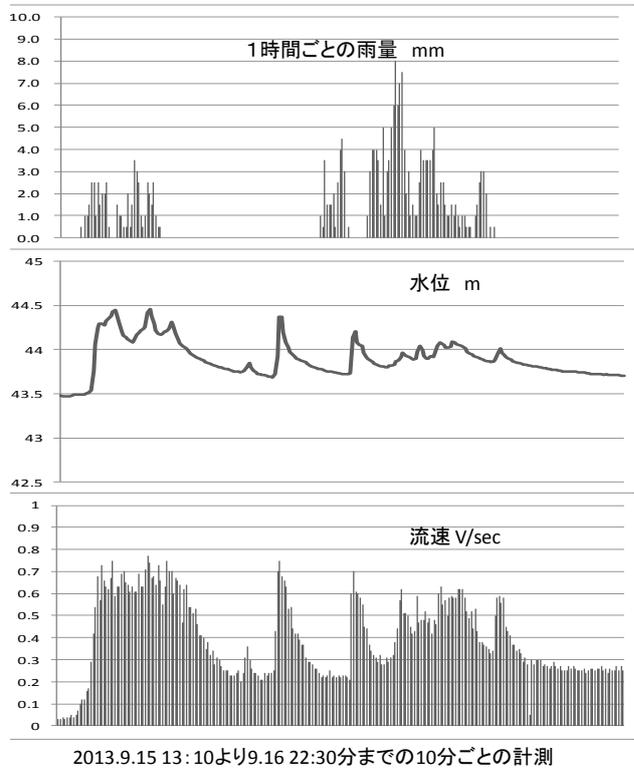


図-9 降雨時都市排水路の雨量・水位・流速

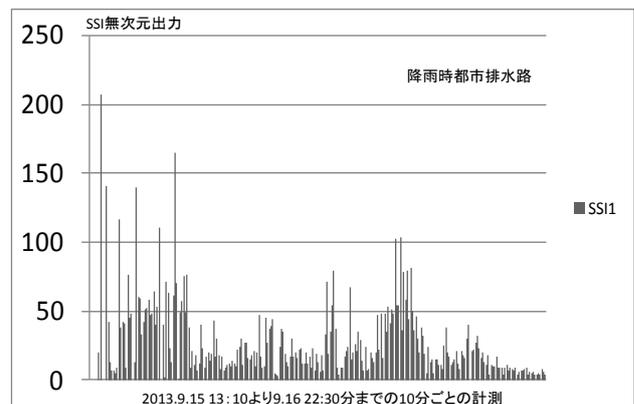


図-10 降雨時都市排水路の変化(SSI1)

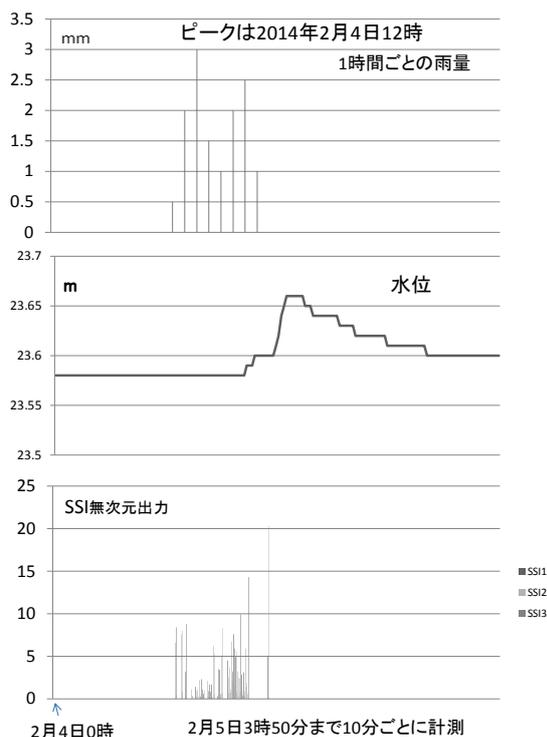


図-11 降雪時都市排水路の変化

## 5. まとめと今後の課題

超音波式流速計のドップラー信号を下に、ばらつきノイズから、流砂、粘土・シルト、懸濁性有機物、泡等の含有量に、比例的に変化する信号を取り出し、SSI (Suspend Solid Index) と呼称した。

このSSIは常に流速と同時に出力されるものであることより、SSI出力を持つ超音波式流速計を超音波式流砂計と命名した。この観測装置を用いて実験的な観測を行い次のような知見を得た。

- ・実河川においての実験観測ではSSIは土砂等懸濁物質に比例的に変動した。
- ・沈降筒で細砂を沈降させた場合ではSSIは沈降土砂と比例的に変動した。
- ・SSIは流速0.04～2.00m/secの範囲では流速の影響は小さい。流速1.0～2.0m/secにおいても懸濁物質のない河川ではSSIは最大10～25以内の値であった。
- ・泡立ちが著しい小河川の観測において懸濁物質のない河川ではSSIは20から30以内であった。
- ・SSIは懸濁物質の濃度 (C : g/m<sup>3</sup>) に比例的に変動する。

・SSIと懸濁物質濃度 (C : g/m<sup>3</sup>) の関係において、キャリブレーションとなる相関図の作成が可能である。これにより無次元のSSIは濃度 (C : g/m<sup>3</sup>) の単位に変換できる。

・懸濁物質濃度 (C : g/m<sup>3</sup>) , 流速 (V : m/sec) , 水深 (h : m) により流送物質量(qb : g/m/sec)が算定できる。

・当該現地ごとの試料を用いて、SSIと懸濁物質濃度の相関図からキャリブレーションを作成することにより、本装置を当該現地に設置し、流送物質量の連続観測が可能となる。

・連続的な流送物質量の測定が可能であることより、流砂量観測の高度化並びに観測精度の向上、計算モデルのチェックなどが可能となると考えられる。

・使用したセンサーは一点の観測である。水深方向に多点観測が可能な橋脚取付型センサーを開発中である (図-12)。



図-12 橋脚取付型センサー

本報告は開発した超音波式流砂計による観測事例紹介の第一報である。課題としては、高濃度の浮流砂、掃流れ砂への適用が可能かの検討が必要であり、今後、さらに実験を重ねて、これらの検討を進めていく。また、現地観測事例の蓄積が必要であることから、多くの関係者に使用していただけることを願っている。

謝辞：計測機器の開発、改良、沈降塔の設計・制作を行った東建エンジニアリング名古屋工場の方々にお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 曾山和弘, 大熊義史, 畠中泰彦, 浅野文典, 福岡捷二: 河川の掃流砂量の測定と掃流砂量観測技術・評価技術に関する研究, 河川技術論文集, Vol.17, pp.5-10, 2011.

(2014. 2. 10受付)

# ドップラー水象レーダーの開発製作と 河川観測への適用性研究

DEVELOPMENT OF ROTATING DOPPLER RADAR AND  
ITS APPLICABILITY, TESTS FOR RIVER FLOW OBSERVATION

幸弘美<sup>1</sup>・斎藤秀晴<sup>2</sup>・丸茂義典<sup>3</sup>・若杉佳功<sup>4</sup>・山口高志<sup>5</sup>

Hiromi YUKI, Hideharu SAITOH, Yoshinori MARUMO, Yoshinori WAKASUGI and Takayuki  
YAMAGUCHI

<sup>1</sup>正会員 工修 東京建設コンサルタント 環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D 東京建設コンサルタント 環境モニタリング研究所 (〒310-0803 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 東建エンジニアリング (〒170-0004 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

<sup>4</sup>農修 東建エンジニアリング名古屋支社 (〒460-0026 愛知県名古屋市中区伊勢山2-11-3)

<sup>5</sup>名誉会員 工博 (〒277-0863 千葉県柏市豊四季645-14)

Rotating Doppler Radar is developed, rotating, emitting micro-wave to water surface, receiving its reflection echo, and observing velocity distribution, etc.

Outputs of the radar are surface velocity, main flow direction, relative water level, etc. as each address (observation time and reflecting point).

Its applicability test were done in several river fields, and the results are introduced.

**Key Words :** Doppler Radar, micro-wave, surface velocity, main flow direction, relative water level

## 1. はじめに

マイクロ波電磁波を、水面向けて連続的に回転放射し、河川等の流況を観測するレーダーを開発製作した。雨を主な観測対象とする気象レーダーとの区別、ドップラーエコーが主な計測対象である事より、とりあえず「ドップラー水象レーダー」と呼称している。

洪水流観の高度化は勿論の事、それに加えて河道浸食、河床洗掘等による河道地形の変化あるいは横断方向の土砂輸送に大きく影響するとされている大規模組織渦発生起点域の水理現象の解明や計算モデルの作成等に供用可能な観測機器の高度化が要求されている。こうした背景のなか、洪水時等においても実用的かつ安全に使用が出来る事、多測点を同時的にかつ微細時間変化での観測が出来る事を、基本要件として、非接触観測の水象レーダーの開発製作をおこなった。

観測技術による防災力の向上、流量観測の自動化といった課題に、水象レーダーが十分な効果や精度を保持して実用化される為には、標識無線局としてのレーダーの製作、高い位置での回転精度を保証するローテーター、空中線出力が高い発信器等のハード

ウェアの整備に加えて、レーダーエコーと流況観測の関係に関する推定、仮説等の精度確認、再現性チェック等に多くの研究が必要である。またレーダーの実用化は、それなりの長い期間必要である。

それに対して、河川等の任意の地点で、さまざまな流れの場面で、簡便に利用できるレーダーも必要であると考えて、空中線出力を10mWとして、無線局開設の不要化、人力運搬での簡便な利用あるいは車の屋根への搭載が可能な小型軽量化、蓄電池電源で長時間作動化の調査用水象レーダーを製作した。

製作したものは、免許不要（無線局の開設不要）のいわゆる微弱電磁波を用いての、アンテナ回転タイプレーダーである。その為、観測有効範囲が決して充分広いとはいえず、降雨の影響除去も万全ではないが、製作した装置を用いて、実験水路での基礎実験を通じてレーダーエコー（ドップラーエコー）と流況観測との関係を求め、魚野川における合同流量観測を始めとした多くの実河川で試験観測をおこない、河川観測への適用性についての知見を得た。

以下、水象レーダーの性能紹介と適用性検討（その1）の報告である。

## 2. 調査用水象レーダーの構成

水象レーダーは、マイクロ波電磁波を水面に向けて回転放射し、帰ってくる電波を分析することで、水の流れの状態を推定、観測する装置である。原理的には、周波数24GHzのCW電磁波を俯角23°で放射し、流水面で反射、散乱するレーダーエコー（ドップラーエコー）の受信強度、卓越周波数等を計測して、表面流速等の流況を推定、観測する。

### (1) レーダー装置の構成

水象レーダーは、発信モジュール付パラボラアンテナ、データ転送器、ローテーター及び出力表示器（PC）の4種の個別品で構成される。発信モジュールは電波法という技術適合品である。個別品は、別々に梱包輸送が可能であり、現場での結線と組立による利用が可能である。ルーフキャリーのある自動車の屋根への搭載も可能である。

図-1、2がレーダー装置の構成図である。シングルアンテナタイプが標準装置である。面分布の観測が必要な場合は俯角を変えた3アンテナタイプとしての使用する。この場合において、発信モジュール毎の周波数の違いが、変化する周波数偏位量に比べてはるかに大きく、3台並列利用が可能である。

写真-1がその外観である。写真中のパラボラアンテナの径は50cmである。写真の回転棒に取付けているデータ転送器は、蓄電池と近距離信号伝送器を内蔵しており、出力表示器（PC）とは、無線で信号のやり取りがなされる。出力表示器（PC）は離れた場所、たとえば車の中で受信が可能である。

### (2) レーダー装置使用時の選択設定項目

水象レーダーは、アンテナを回転させて使用するのが一般的である。流量観測地点での20秒間平均流速の観測やボイル発生域等の特定地点の微細細時間での観測を行う場合は、アンテナ回転無しでの利用が可能である。俯角は自在に変更可能である。

アンテナ回転利用時で、ユーザーレベルでの観測条件の選択設定項目は、回転方向と回転スピードである。河岸からの観測も考慮して、時計回り回転と

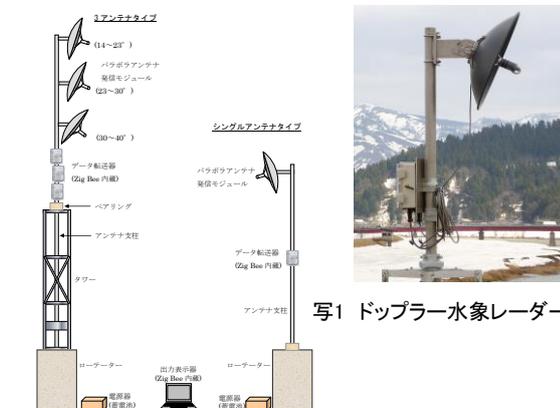


図1 ドップラー水象レーダー構成図

反時計回り回転が選択できる。回転速度は1回転が60～150秒の範囲で設定可能である。1回転6

0秒の回転速度での使用が標準である。ちなみに90秒で1回転の速度で使用すると、アンテナ位置を中心に約0.5度毎の観測密度なる。

### (3) 観測時のリアルタイム観測図の表示

レーダーを回転させながら出力表示器（PC）画面に出力されるのはリアルタイム観測図である。その表示内容は測点位置と、表面流速暫定値（偏角補正前値）である。アンテナを一回転毎にチェックする方位センサーの検知時刻をスタート時刻番地として、その後の回転経過から次のスタート時刻番地までの1回転分データが1単位データである。1単位データのない状態の出力で暫定値の表示である。

観測として流速が十分な精度を保持される有効な偏角範囲は、主流軸の±30～45°の範囲である。

リアルタイム観測図は、流れ方向角度を0°としてその±45°の範囲の出力となっている。

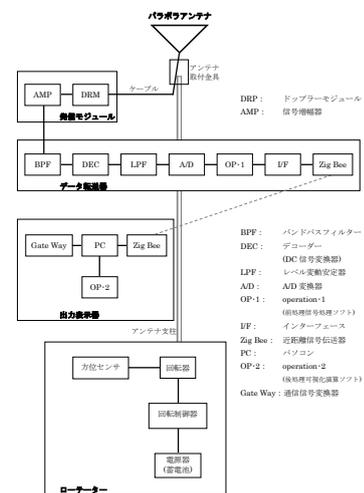


図2 ドップラー水象レーダーのパーツ構成図

## 3. レーダーエコーと流況観測の関係

水象レーダーは俯角をつけて、の電磁波の放射であり、流水面（あるいは地面、RC構造物等）にあたり、反射、散乱したものが、レーダーエコーとして受信している。このレーダーエコーが河川の流速や流況の現象とどのような関係あるかを推定し、キャリブレーションをおこない観測値に変換して出力している。

### (1) 測点位置の推定

測点位置は、指向性の高いパラボラアンテナ付発信器から放射する電波は直進するとして、俯角と偏角からの三角関数による算定をしている。俯角はアンテナの取り付け角度である。上流向き観測と下流向き観測では、放射電磁波の反射、散乱の特性に多少の違いがあり、各々にアンテナ設置俯角に対する補正係数が必要で、それを考慮して算定している。

偏角はローテーターについている方位チェックセ

ンサーの向きを橋と平行に置き（あるいは河岸に直角に置き）相対方位として設定し、ローテーターが定速度回転であることより、方位センサー検知時刻をスタート時刻番地として、角度（偏角）の算定している。相対方位として、方位チェッカーの向きを $-90^\circ$ としている。標準利用においては、1回転 $360^\circ$ を60秒で回転させており、レーダーエコーを約0.125秒毎に計測している。1データ毎の偏角は約 $0.75^\circ$ となる。

以上より横断方向（X軸）縦断方向（Y軸）とした観測測点がX、Y軸平面位置図として算定される。観測測点は円弧状の測点となる。円弧状の測点の半径は、アンテナと対水面間の距離（H）で決まり、上流向き観測では、 $3\sim 3.6$ （H）下流向き観測では $1.8\sim 2.4$ （H）である。

## (2) 水面である事の推定

俯角をつけての $360^\circ$ 全方位の電磁波放射であり。レーダーエコーは地面等の反射によるものもある。流水面の反射、散乱とそうではない場合の識別として、地面や電柱による反射の識別信号を3種出力している。それに対して流れのある水面は、さざ波等の鉛直方向変位があり、地面による反射とは異なる。その特性から算定される水面部識別信号も出力している。水面部識別信号については河岸と流水水面部が入り組んでいる場合、植生繁茂等により不明瞭の場合等は識別誤差の発生となる。ユーザーベースで5段階（通常は中央値の3の設定）に感度選択ができ、当該現場毎に変更をおこない使用する。

## (3) 卓越周波数計測からの表面流速の推定

本レーダーの基本計測内容はドップラーエコーであり、主流速観測のドップラー卓越周波数の計測を行っている。この卓越周波数は流下方向の流速に比例して変動する。電波式流速計もこの原理から表面流速を推定、換算をして観測出力としている。本レーダーも同様の算定を流速を算定している。

## (4) 対水面間距離の推定

レーダーエコーの広帯域信号強度を計測している。この信号強度は相対値電圧出力であるが、水面域の観測時は、反射物特性が常に広い水面からの反射、散乱のみであることより、対水面間距離と反比例関係になる。水面高との関係は、当該現場毎に式形と係数の設定が必要である。水位観測ではなく、目安の水面高(相対値)の観測である。

## (5) さざ波等の鉛直方向流れの推定

流水には鉛直方向の水の動きがあり、レーダーエコーはこの現象にも反応する。地面の反射とは異なる。この特性より鉛直方向流を推定している。鉛直方向流れは、さざ波と水面全体の湧昇下降の二つの現象があると仮定している。この現象に対するレーダーエコーの変化は、周波数偏位が非常に少ない領

域の変化として出現する。後者は周期が数秒である変化として出現する。

アンテナを固定しての観測時には有効な観測項目である。アンテナ回転時は横断方向観測であるが、時系列変化の観測でもあるとして、当該回転時有効観測値の平均値からの変動差としての表示している。

## (6) 主流角度の推定

上流向きの観測においては、卓越周波数（流速）、信号強度（対水面間距離）及び偏角をパラメータとする主流角度推定モデルを作成して、この値の最大値が主流角度であるとしている。モデルは精度向上の改良を進めている。主流角度は断面直交流速の算定に必要な観測項目である。

主流角度は、橋スキューがある場合は、流れは河道に沿って直角流れていても、スキューの角度が常に出力される性格の値である。下流向き観測では、現状モデルでは十分な精度での推定が困難である。

表1 水象レーダーの観測出力項目

観測出力項目	記号	単位	摘要
観測時刻			
偏角	Kθ	( $^\circ$ )	
測点位置(横断方向)	Xa	(m)	基点からの距離
測点位置(縦断方向)	Ya	(m)	基点からの距離
水面部識別値	SK	(-)	水面である判別値
表面流速	Vs	(m/sec)	
断面直交流速	Vx	(m/sec)	
水面高信号値	Sh	(mV) <sup>1/3</sup>	
波信号偏差値	Sm	(-)	平均値とその偏差
主流角度識別値	Sfa	(-)	最大値角度が主流角度

## 4. 水象レーダーの観測出力

水象レーダーの観測出力データは次のようである。

### (1) 観測時のリアルタイムで出力

レーダーを回転しながらリアルタイムで出力表示器（PC）の画面に見えるデータは、測点平面位置と表面流速（偏角補正前暫定値）出力から作成される図である。記録はされない。

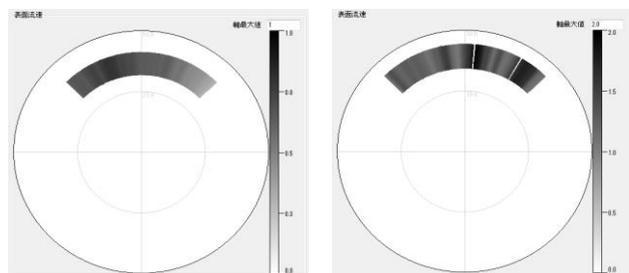


図3 リアルタイム出力例(愛岐大橋) 図4 リアルタイム出力例(根小屋橋)

### (2) 観測出力

観測出力は、1回転毎（標準利用では1分毎）の観測有効範囲のデータが、観測時刻と測点位置を番地としたデータベースとして作成される。観測有効範囲とは、偏角が $\pm 45^\circ$ 以内でかつ水面部識別の

観測がなされていた場合の回転角度範囲の出力である。その観測出力項目を表-1に示す。

その他のデータベース出力として、レーダー観測基点を河道中央部として360°全方位観測、多様な観測出力項目の研究、ビジュアルあるいは動画表現等の高度なソフト作成のための開発用の「アカデミックデータベース」出力がある。全パラメータ出力であり、一般の観測出力とは区別している。

## 5. 実河川での観測を通じての適用性のまとめ

製作した水象レーダーを用いて、融雪出水時の信濃川（旭橋）、魚野川（根小屋橋）及び平水時の木曾川（愛岐大橋）、矢作川（岩津大橋）、多摩川（日野橋）において、装置の改造、レーダーエコーの分析及び適用性検討を目的とした試験観測を行った。第一の課題はどの程度の距離まで放射電磁波が到達し、有効なレーダーエコーが受信できるかといった問題であり、橋から水面までの距離が大きい橋を選んで試験観測地点とした。



図5 愛岐大橋測線位置図

精度検証の流速の観測は、写-2に示す曳航式水深流速計（橋から下流の十数m測線での観測、観測範囲は表面から約0.5m水深までの平均流速の観測）及び橋上からゾンデを水中におろして使用する超音波式流速計（橋下流直下測線での観測、観測水深は表面から約0.25m水深で観測）を用いて行った。水象レーダーの観測は上流向け観測が基本であるのに対して、



写2 曳航式水深流速計

流速の検証観測はいずれも下流側での観測である。平水時の3地点観測は橋の上下流での差が目視であるが極力少ない地点を選定して観測を行った。

### (1) 平水時でも数十m範囲の観測が可能

矢作川（岩津大橋）の橋からの水面までの高さは約1.6m、木曾川（愛岐大橋）の橋から水面までの高さは約1.5.6mである。橋からアンテナまでの高さが約2mあり、対水面間距離は約1.8mの観測である。流速が0.3~0.4m/sで波がほとんどない岩津大橋地点の観測、流速が0.7~1.0m/sの愛岐大橋地点の観測においても、水象レーダーによる上流域の横断表面流速分布の観測が

可能であった、表面流速観測値は検証観測値と概ね一致した。レーダーエコーの受信強度も、観測限界レベルではなく、中レベルでの観測が可能であった。

レーダーエコーは、流速が早いほど、波があるほど反射、散乱が大きくなる。水象レーダーとしては遠くまでの距離の観測が可能になる。波の無い平水時でも、水面までの高さが約1.8mの地点で、円弧状測点半径が約5.4~6.5m（有効偏角を30°では横断観測巾は5.4~6.5m）の観測が出来た。

愛岐大橋は大型車両の交通による橋の大きな揺れがあり、橋のスパンの中央部での観測では、その影響により、その影響のばらつきがみられた。左岸より、右岸よりの観測では影響ほとんどなかった。

### (2) 幅広い河川では複数の観測基点が必要

融雪出水時の信濃川（旭橋）の下流域流水巾は約150m（上流は約100m）あり、橋の上から、アンテナから水面までの高さが約1.5mでの観測においては、水象レーダーの観測基点が1地点では全流水幅の横断観測が困難であった。上流向け観測では、観測基点を3地点に、下流向け観測では観測基点を7地点にして観測した。橋から水面までの高さが約8mの魚野川（根小屋橋）でも同様の問題があり、上流向け観測、下流向け観測のいずれも観測基点を4地点として観測した。出水時の観測であり、両地点ともレーダーエコーの受信強度は安定して高く、アンテナを高くすることで観測基点数を減らす観測が出来ると考えられる。流水巾の広い大きな河川の横断観測には工夫等が必要な課題であると考えている。

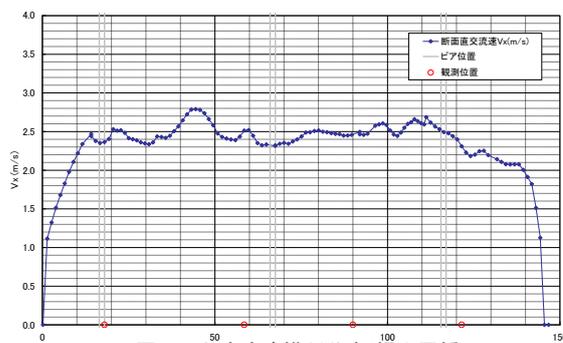


図6 上流流速横断分布(根小屋橋)

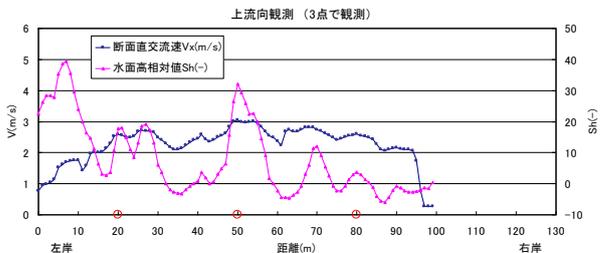


図7 横断流速分布(上流向)の観測結果(旭橋)

観測基点が複数になると同一測点に複数の観測結果の出現となり、その処理が必要であった。

(3) 測点毎1分毎データの蓄積と変化率の観測

水象レーダーは、横断方向80～120測点の1分毎のデータが集積される。その流速観測安定度チェックとして流速が0.7～1.0m/sの平水時愛岐大橋地点で流心、回転速度を72秒1回転として30回(36分)連続回転によるデータを収集し、測点毎の表面流速のばらつきを試験観測した。その変動係数は3～6%の範囲であり、平水時観測におけるレーダーでの表面流速観測値は、固定式の電波式流速計の変動係数と同水準であった。

レーダーは一般的に前回観測値(ここでは1分前データ)と比較の変化率としての出力が有効であり、こうした観測を可能とするものである。

(4) 1分毎データは水面高(相対値)も観測

水象レーダーは、表面流速と同時に相対値であるが、水面高(アンテナからの対水面間距離)も観測、蓄積される。H-V関係図観測などへの応用も考えられる。

(5) 1回転毎の主流角度等の観測

レーダーの1回転(60秒)毎のデータが出力される。その内容は主流角度、表面流速、相対水面高さ波度合い等の平均、偏差等の観測である。

(6) 橋梁ピアの後流域の観測

信濃川(旭橋)では、橋梁ピアに対して斜め上流から流れ、後流域の流速分布変化は、複雑であり、長く下流まで尾を引く状態になる。後流域のこうした状態の観測が可能であり、課題の対応が出来る。

(7) 河岸からの観測

水象レーダーは、かならずしも橋上からの観測では無く、橋の無い場所での観測が出来ることが特徴の一つである。信濃川、魚野川等の河岸から試験観測から、河岸からの観測は、十分なアンテナの高さが必要であることが明確になった。精度よく、流心までの観測をおこなうためには、河岸の水面に近接したところに、仮設のタワー等をたて、水面からの距離を10～20m以上にする事が必要である。川岸まで数十mの高水敷のある堤防の上からの観測は、微弱電波利用の調査用レーダーでの摘要は困難である。例であるが、魚野川根小屋橋の水位観測塔はロケーションがよく、ここに6～10mの高さのアンテナをつければ横断観測可能性が考えられる。

(8) 上流向き・下流向きの観測

水象レーダーを、1車線の幅の狭い橋、水位観測塔、木橋等を観測基点としての観測時は、レーダーの360°回転による、上流と下流の同時観測が可能である。一方巾の広い橋からの観測の場合は、上流向き観測か、下流向き観測課の選択が必要になる。この場合において、信濃川(旭橋)、多摩川(日野

橋)等では、橋の上流と下流では流水の中をはじめとして流況は全く異なり、別の河川を想像させる状態である。魚野川(根小屋橋)においても、上流と下流では流況が異なった。その他の河川においても、橋梁ピアの影響等で上流と下流では流況が大きく異なる地点が多く、観測値が一致しない。レーダーによる繰り返し観測行った結果、上流向き観測の方が統計可能資料になる率ははるかに高い。橋梁ピアが多く、河床は全面床固め工の多摩川(日野橋)の下流では、平水時でも全面的に乱れた流れで、1分毎繰り返しのレーダーによる流速分布観測においても、簡単な平均化算定も難しく、精度のよい横断流速分布観測は非常に困難であった。

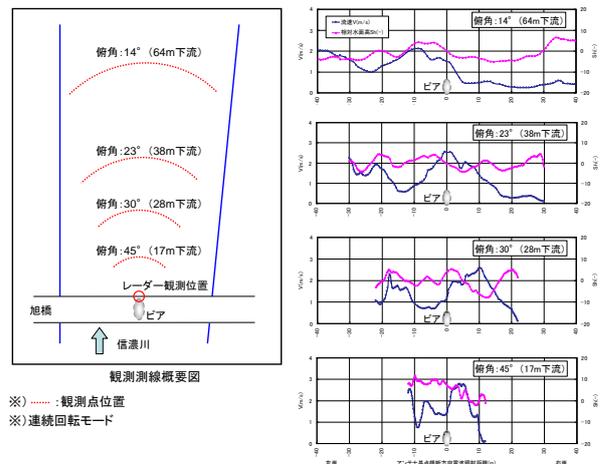


図8 橋脚後流域の観測結果(旭橋)

(9) 非回転の定点観測

アンテナを回転させないで、微細時間(0.2秒)毎の観測をすることで、図のような観測結果が得られる。河床の変動がないRC河床の流れと、河床が土砂の場合では、鉛直方向流の変化を含めた表面流速の詳細観測の特性の違い等の観測が可能になる。

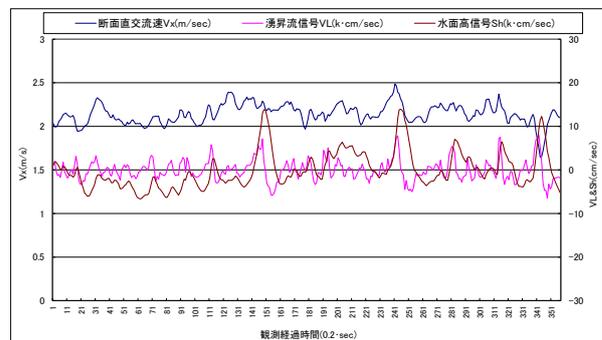


図9 3面張り水路での観測出力例(アンテナ非回転・俯角23°)

(10) まとめ

水象レーダーの適用性検討として、とりあえず性能紹介を中心としてのその要点を示した。本報告で十分な内容の報告となっていない、河川技術としての報告は、(その2、続報)としての報告準備を進

めている。

本研究は、ハードウェアの開発の面もあり、供用性の向上としての装置の改良改造、実用性の向上としての精度の向上、出力項目の多様化、利便性の向上としての車の屋根への搭載等も進めている。

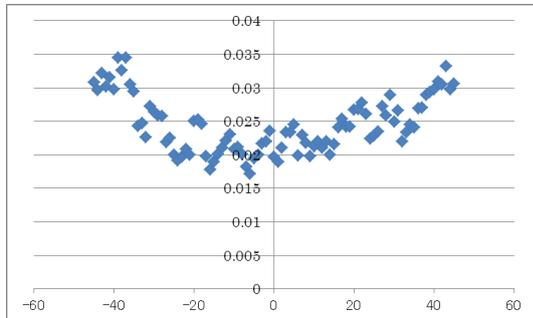


図10 観測点毎流速偏差(流速約1m)

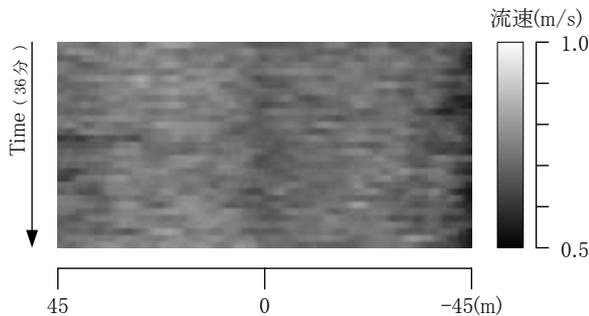


図11 表面流速変化(愛岐大橋)

## 6. 結論

微弱電波によるマイクロ波CW電磁波の回転放射タイプの調査用ドップラー水象レーダーを開発製作し、実河川における試験観測を通じて、河川の流れの観測への適用について、以下の様な知見、見解及び成果を得た。

### (1) 実用性と安全

作業性は簡便である。車の屋根にのせれば、極論であるが、一人でも観測作業が可能である。安全についても、橋の上あるいは河岸から、洪水流に非接触の供用であり、危険度は低い。蓄電池で長時間作動し、観測出力は、データベースとして汎用使用のPCに転送される。無線局の開設も不要であり、製品分類は汎用の水文観測機器レベルであり、充分実用的であり、かつ安全である。

### (2) 観測可能範囲について

微弱電波の利用のレーダーであり、観測可能範囲(距離)がもつとも懸念される事項であるが、アンテナと対水面間距離が15~20mの橋の上から、流速が小さく、波も少ない、平水時河川においても観測可能である多くの事例が得られた。出水により、流速がより大きく、波立ちのある場合は、レーダー

の観測範囲は広がる側の特性がある。

観測測点は、上流向け観測では、アンテナ対の高さからの対水面間距離(H)の3~3.6(H)の半径での円弧状測点となる。流下方向を0°として±30~45°の角度範囲が観測有効範囲である。

横断観測範囲巾は1~1.4(H)である。

### (3) 観測出力項目と精度

観測有効範囲の観測流速(偏角補正前)、表面流速、断面直交表面流速、相対水面高、水面部識別信号値がアンテナ方位角度0.5~0.75°の分布として、1回転速度毎(標準は60秒毎)に観測記録される。

1回転毎に1データとしての出力データは、主流角度、および上記項目の平均値、偏差等が観測記録される。参考観測出力であるが流水水面巾も観測される。表面流速の観測精度は、固定式の電波式流速計の変動係数と同レベルである。

### (4) 降雨および其他要因による精度低下

2.4GHzの電磁波利用であり、降雨の影響を受ける。影響度は観測対象河川の流況(レーダーエコーの強さと)と降雨による電磁波の散乱、反射との競争として影響度であり、出現が異なる。電磁波発信モジュールに直接豪雨が当たる状態では、精度低下が大きい。風によるアンテナの揺れ、スパンの長い橋の低周波振動は、影響を受ける。風による表面流の影響は、流速が小さい場合は誤差原因になる。

## 謝辞

水象レーダー開発に、多大のお知恵をいただいた新里邦生氏に感謝を申し上げます。河川乱流観測の要点について御指導をいただいた木下良作博士に感謝を申し上げます。また長い期間、実験観測と装置開発に御協力いただいた中島さん、中澤さん、多田さん、牧野さん、飯田さんに誌面を借りて改めて感謝の意を表します。

## 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、No497/2-28 1994
- 2) 山口高志、斎藤秀晴、森修一、森田正人、岩本理恵：電波式流速計による河川脈動流の観測、水工学論文集 52巻、2008.2
- 3) 木下良作：河川流量と流れの構造、— ADCPによる観測報告— 土木研究所での講演会、2002
- 4) 山田正：Common MPプロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性、「河川流量観測新時代」Vol 1 2010
- 5) 山口高志、新里邦生、斎藤秀晴：流水がななめ上流からあたる場合の橋梁ピア後流域特性：「河川流量観測の新時代」Vol 3,201

(2014. 2. 10受付)

# 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ICHARM 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ICHARM 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．

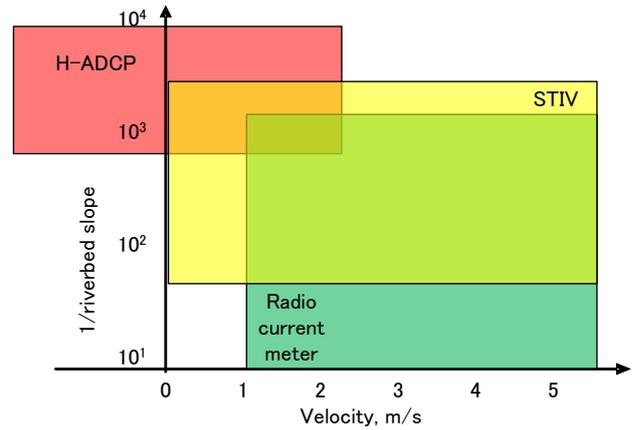


図-1 流況と観測機器の関係

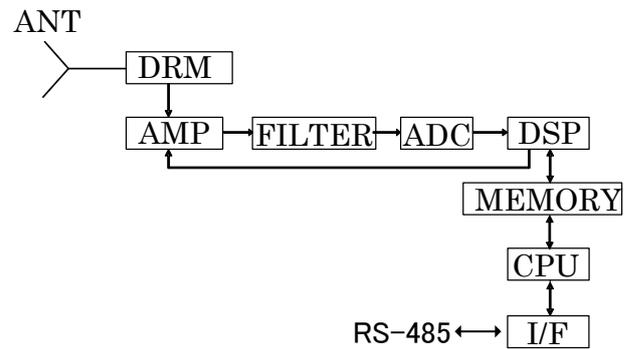


図-2 電波式流速計の機能ブロック図

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「 $t$ 」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

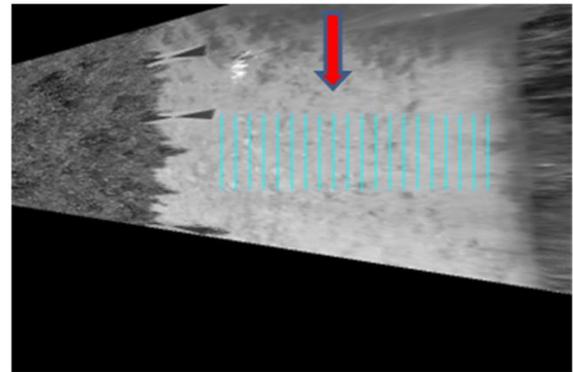


図-4 幾何補正を施した図-3の画像

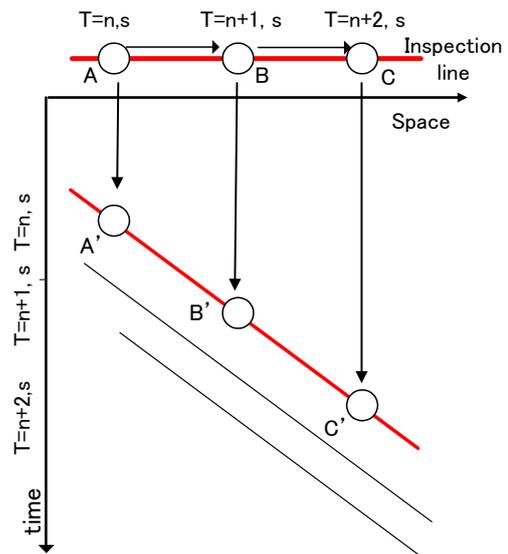


図-5 STI 概念図

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

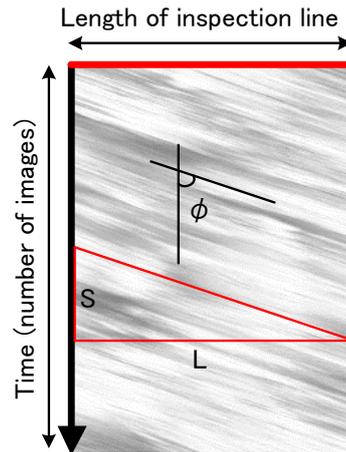


図-6 STI

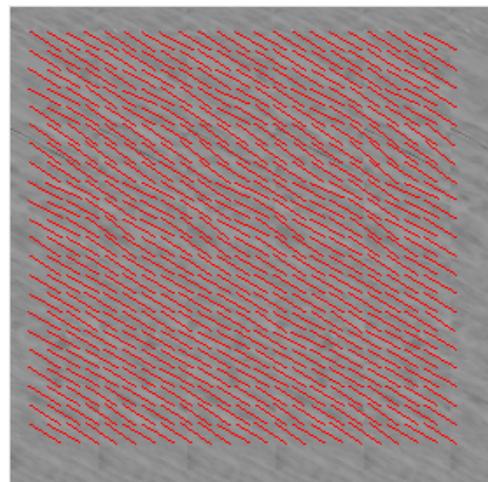


図-7 STI小ウィンドウ上の角度ベクトル

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

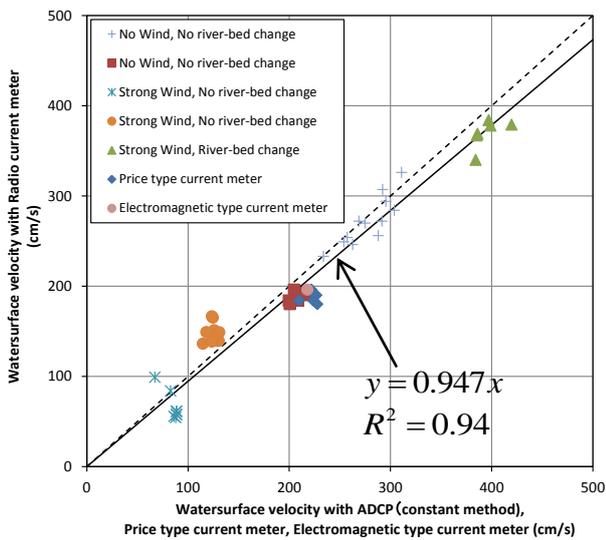


図-8 電波式流速計と他機器との相関（風補正なし）

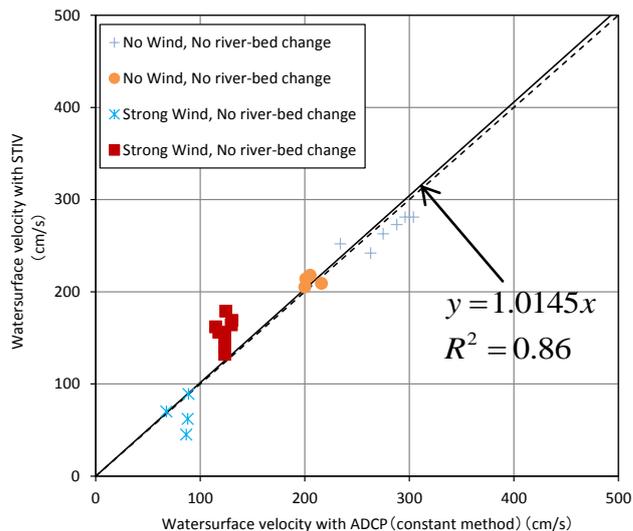


図-10 STIVとaDcpの相関（風補正なし）

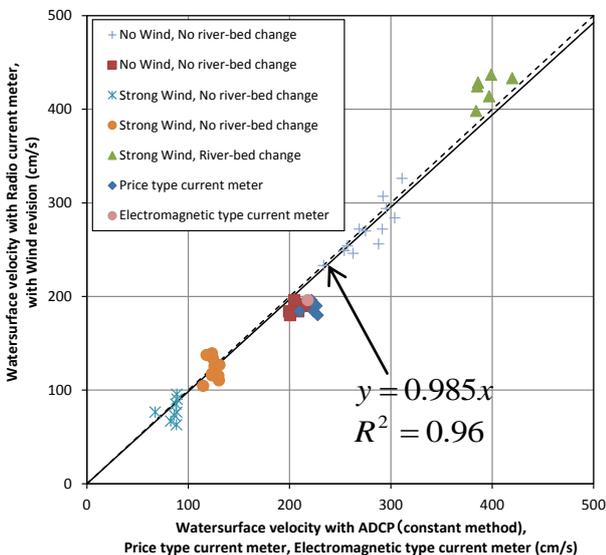


図-9 電波式流速計と他機器との相関（風補正済み）

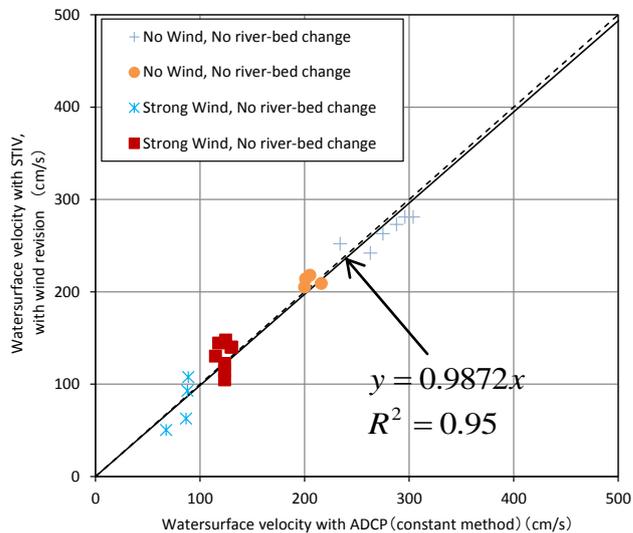


図-11 STIVとaDcpの相関（風補正済み）

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

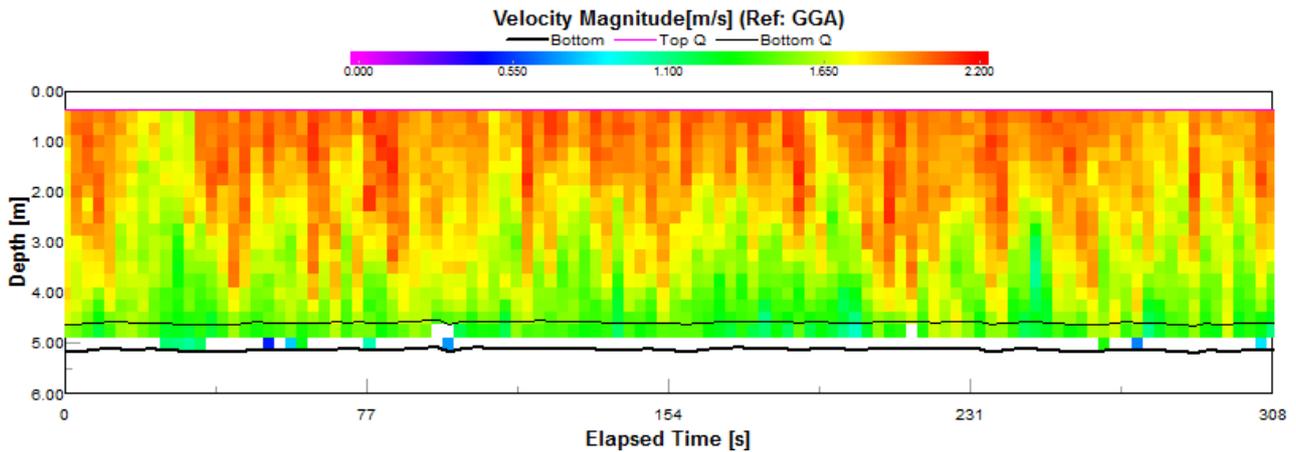


図-A1 aDcpによる流速絶対値の時系列図

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

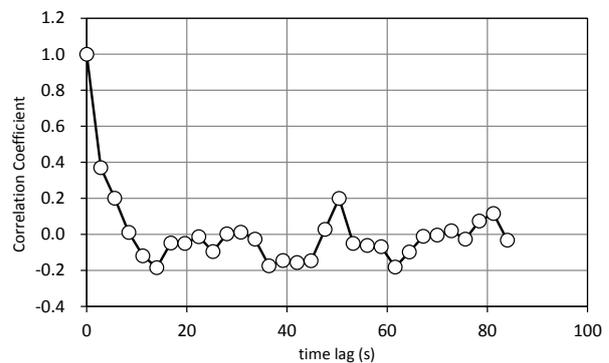


図-A2 相関係数

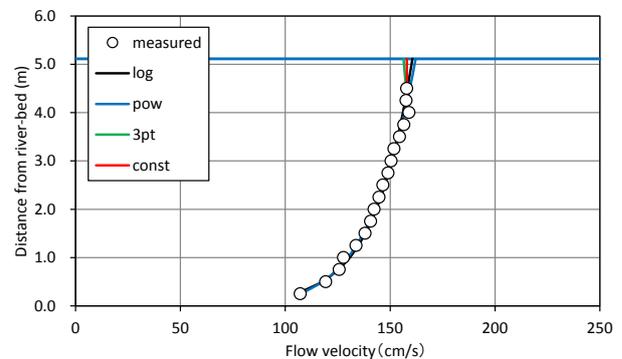


図-A3 aDcpによる流速鉛直分布（河床変動なし／風なし）

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

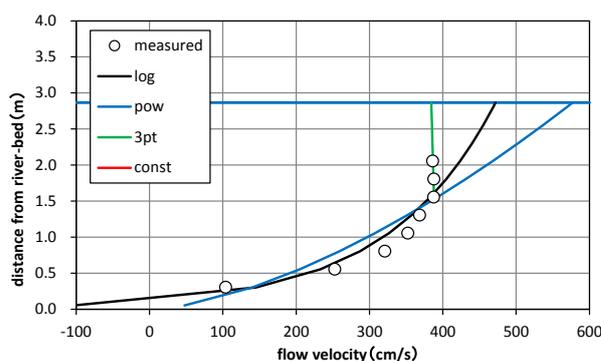


図-A4 aDcpによる流速鉛直分布（河床変動あり／風あり）

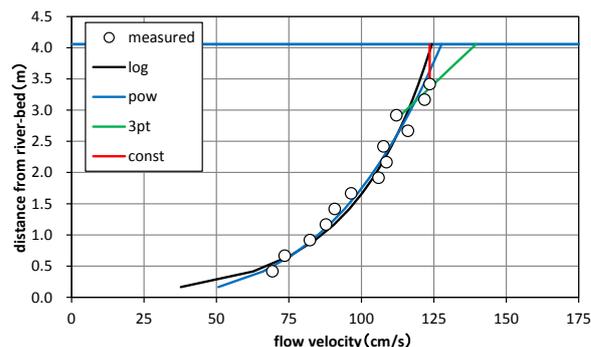


図-A5 aDcpによる流速鉛直分布（河床変動なし／風あり）

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。

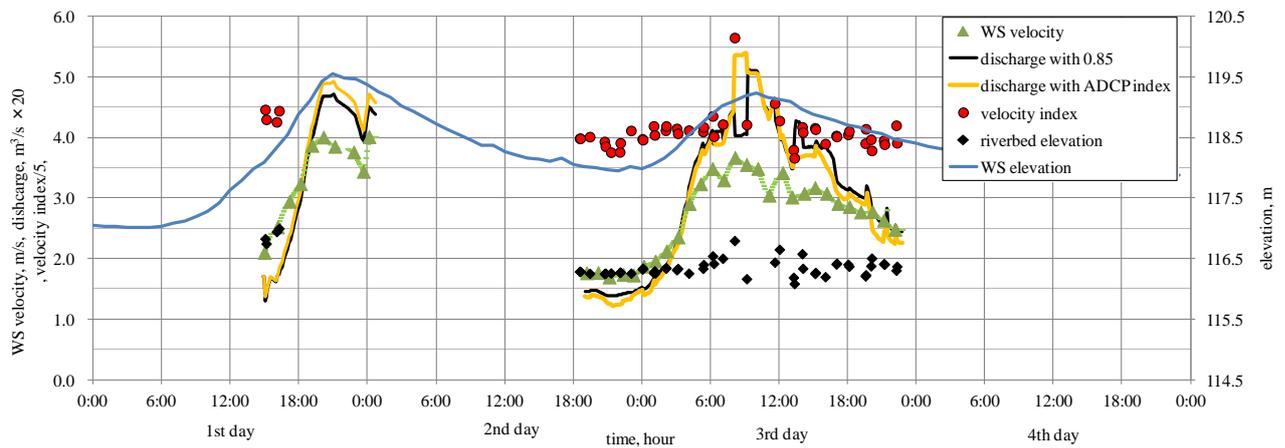


図-A6 河床高, 水位, 水面流速, aDcpによる流速補正係数, 流速補正係数0.85を用いた流量, aDcpによる流量それぞれの時系列図<sup>21)</sup>

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)

# 河川流量観測の高度化に対する 観測実務者からの視点

## A VIEW POINT OF FIELD OBSERVER ON THE UPGRADING OF RIVER DISCHARGE OBSERVATION

橋場 雅弘<sup>1</sup>・甲斐 達也<sup>1</sup>・津田 哲也<sup>1</sup>・土田 宏一<sup>1</sup>  
Masahiro HASHIBA, Tatsuya KAI, Tetsuya TSUDA and Koichi TSUCHIDA

<sup>1</sup>非会員 株式会社福田水文センター（〒001-0024北海道札幌市北区北24条西15丁目）

Safe and secure observation has been obviously needed in large scale flood. It has been clear that large scale flood discharge using float has some problem. Float is not necessarily a safe and reliable observation method. We tried to evaluate the advantages and disadvantages of the upgrading of river discharge observation. The upgrading discharge observation methods have each special feature. The typical method is Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP), Non-contact Current Meter, Space-Time Image Velocimetry(STIV). We tried to take a questionnaire to field observers what method if they want to use in large scale flood. Field observer wants to observe in a small group with a small amount of luggage because of flood observation is needed a short period of time.

**Key Words** :large scale flood, upgrading, ADCP, Non-contact Current meter, STIV, Questionnaire

### 1. はじめに

河川における流量観測は、昭和29年の国土調査法水位及び流量調査作業規定準則（総理府令第75号）で高水流量観測が定義され、これ以降の現在に至る約60年にわたって高水流量観測には浮子を用いた観測が行われてきた<sup>1)</sup>。

浮子法は、想定される水深において、適正な長さの浮子を橋などから投下し、その流下距離と流下時間を測定するというシンプルな手法である。

その精度については更正係数の課題も含めて多くの論文で取り上げられたにも関わらず、現在も全国の高水流量観測の中心的な手法として適用されている。

この理由として、浮子観測は、他の観測手法に比べて、安全かつ簡易的で、一定の精度を保って観測が可能と評価されてきたからである<sup>2)</sup>。その根拠は、洪水時の河川に大量の流下物がある状態であっても、安全性、確実性が高く、流下状況をとらえていると考えられてきたからである。

一方、河川流量観測は近年の観測機器の発展により、さまざまな観測手法が提案されてきた。これにより、全く新しい視点から精度の高い効率的な観測が可能になってきている。

河川流量観測の現在と未来について、図-1に二瓶<sup>3)</sup>が描いた流量観測のチャートを元に加筆した図を示す。現行法は、低水では可搬式（プライスなど）、高水では浮子を用いた単発観測結果から、水位流量曲線図によりH-Q式を作成し、水位観測所で連続測定している水位を代入して、連続流量を算出している。また高度化した観測手法として、実践レベルまで到達していると考えられる代表的なものとして、Acoustic Doppler Current Profiler：ADCP（超音波）、電波式（マイクロ波）、画像解析（Space-Time Image Velocimetry：STIV）があげられる。

本論文では、単発観測の現行法と高度化法に対象を絞り、筆者らの実河川での流量観測を実際に行っている経験をもとに、現行の観測の課題と高度化観測として提案されている様々な観測方法への現場的適応性において評価した結果を示すものである。

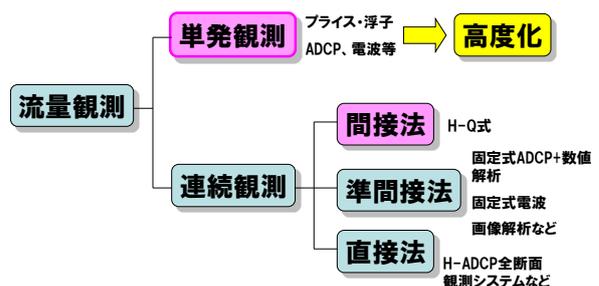


図-1 河川流量観測の現在と未来

## 2. 現場実務者から見た河川流量観測の必須事項

筆者らのような現場実務者にとって、必須の3本柱を図-2に示す。最も重要な項目は、「安全性」、「迅速性」、「確実性」である。

「安全性」については、いかなる現場でも筆頭に掲げられる項目であるが、高水流量観測を実施する場面では、大雨や暴風雨の状況下が多く、現場である河川は洪水中で、ニュースなどでは「河川には絶対に近づかないください」とアナウンスされる場面である。しかし、現場実務者はこうした状況の中、河川での観測を求められることから、安全に対する細心の注意が求められる。

「迅速性」については、高水流量観測時は、時々刻々と水位が変化していくため、1観測に時間が費やすと、観測中の水位変動が数メートルに達する場合もある。もし観測機器がどんなに性能がよくても、観測に時間がかかることで、水位変化が大きければ観測精度があるとは言えない。

「確実性」については、洪水という非日常の状況では、平常時では考えられないような現象が発生しやすい。流木やゴミが流下してきたり、大きな波のうねりが生じたり、そのような中でも、確実に観測ができ、データが得られることが必須条件である。一般的に、既往研究では観測精度が議論の中心になりやすいが、現場では、洪水の状況下でも、確実にデータを得られることが第一条件であり、精度の議論よりも上位と考えられる。

観測として重要な項目では、「精度」、「安定性」、「観測コスト」があげられる。

ここでは、前述の3本柱よりも下位に設定されるが、「精度」はデータの信頼性という面で重要であり、「安定性」は、前出の「確実性」と観測値の安定した「精度」を確保できることを表す。「観測コスト」は、観測にかかる人件費や材料費などの総額を、できるだけ抑制することが望まれる。

## 3. 高水流量観測における現行法の脆弱性

現行の高水流量観測（浮子法）の人員配置と概要を図-3に示す。橋上に班長、浮子投下員を配置し、場合によっては交通誘導員を付ける必要がある。橋から下流側に第1断面の見通員が浮子の通過を合図し、第2断面の見通員が通過時間を測定する。第2断面には流下速度を精査する副班長が配置され、観測には、最低でも5名が必要となる。

### (1) 確実性への脆弱性

観測所には第1断面、第2断面の視準ポールが立てられており、水位上昇時にも対応できるように、高水敷から

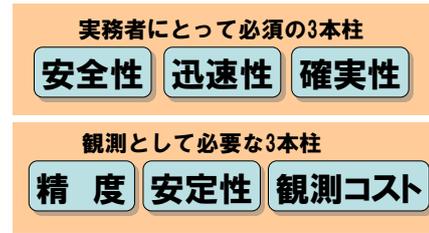


図-2 実務者からみた河川流量観測の必須事項

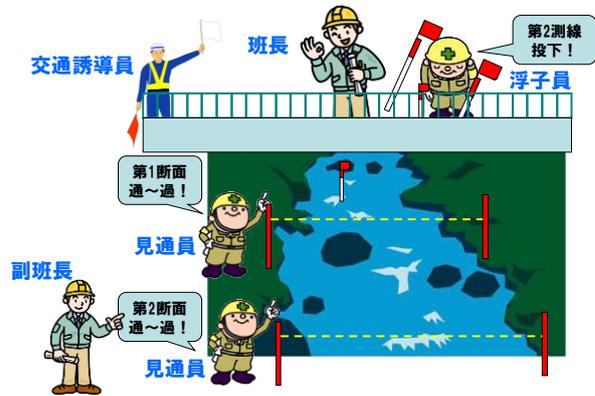


図-3 現行の高水流量観測



図-4 見通し障害への課題

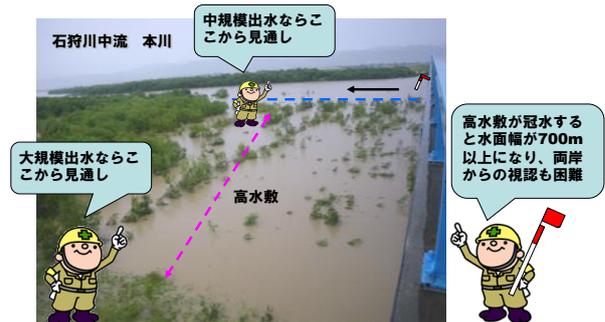


図-5 水面幅の増大による見通し障害

堤防にまで数本配置されている。しかし、図-4のように、周辺の樹木が伐採されず、堤防上からは全く河川が視認できない場合が、少なからず見られている。現場実務者にとって一番頭がいたいのは、浮子の視認性である。

大規模洪水になると高水敷に水が付き、通常よりも川幅が広がる。図-5のように700m以上の川幅になると、両岸からの視認も難しくなる。また、やっかいなのは、流木などが混在して流れてくるため、これらを分離して視

認する必要があることである。

ここで見通員にとって必要なのは、橋から浮子を投下した地点を視通できることである。

助走区間の見通しが良ければ、流下物が混在した状況や、浮子の揺動によって見えにくい場合でも、現地実務者であれば、どの程度の流速で流れてくれば、どのくらいの位置にいるであろうことは予測しながら見通しを行うことができる。

しかし、そうすると、助走区間から第1、第2断面の河岸部の樹木などを皆伐する必要がある。

河畔林の伐採は生物環境の保全には大きな影響となる。草索性猛禽類や、魚類の生息環境に河畔林が及ぼす影響は大きい。

こうした環境への配慮は近年重要視され、河川整備事業と環境保全という、トレードオフの関係を両立する方向性を見出すため、地域住民とのワークショップなどが河川管理上、河川計画上で避けられないものになっている。そのため、河川管理者としては、観測という一時的なものであれば、何とか環境負荷を抑えてできないだろうかと考えるのも無理はなく、負荷を抑えた観測方法が望まれる。

もう一つは、図-6に示すように、橋上から投下した浮子が既定測線に入らないことが多いことである。概ね高水流量観測が想定される観測所の橋上には、浮子投下箇所を設定しておくのだが、出水規模によって、流れ分布が変わることや、橋脚がある場合は橋脚後流の大きさが出水規模によって異なるため、浮子が流心に寄りに流下することや、死水域にはまり流下しないことなど、安定しないことがある。

このため、現場実務者は、現場毎の特性を熟知していないと、狙った測線に浮子を投下できないという問題が生じる。現場実務者の熟練度によっては、妥当な流下測線に入るまで、何度も浮子を投下しなくてはならず、余計な観測時間がかかる。

よって、観測実務者の熟練度で観測精度に違いが生じるという課題がある。

もう一つ、気象条件や日照条件によって見通しが利かなくなる場合である。ひとつは早朝と夕刻の日照が斜めになる場合、水面の照り返しで遠方が全く見えなくなる。この場合、両岸にて視認しなくてはならないが、見通員を両岸に付ける人員が確保できない場合は、観測時間が必要以上にかかってしまうという問題が生じる。

もう一つは、夜間に川霧が発生する場合である。この場合は、全く視認する手段がないため、霧が止まるのを待つしか方法はない。

これより、浮子観測が常に安定した確実な観測方法であるとはいえず、現場によっては脆弱な側面を含有することを認知する必要がある。

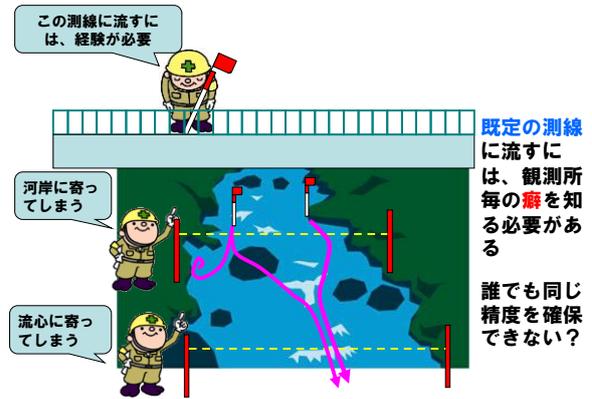


図-6 確実性への課題（浮子の流下）



図-7 見通し場の冠水による危険性



図-8 橋上の浮子投下作業の危険性

## (2) 安全性への脆弱性

浮子観測は橋上からの浮子の投下、河岸からの見通しで成り立っており、直接洪水の流れに観測機器を置くことはない。これより、安全性は担保されているように思われる。しかし、浮子観測は思われているほど安全な観測ではないことを筆者らの観測経験から述べていこうと思う。

図-7に示す見通員の危険性について述べる。前項で述べたが、川幅の増大によって、図-4、図-5のように、浮子の視認ができない場合は、第1、第2断面の見通員はできるだけ河道内に入らなければならない。橋上からは、見通しができないため、観測するためにはこれ以外手段がない。この場合、見通し箇所の水位上昇や、流れへの危険性はもちろんあるが、むしろ観測が終わった後、帰路につけない危険性がある。現地実務者は、視認方向である河道側に対する注意は十分にしているのだが、帰路の危険性に、あまり気を使わない傾向がある。実は、大規模

出水になった場合は、第1、第2断面上の移動経路の地形を把握しておく必要がある。これは筆者らの経験でもある。

図-8は橋上の浮子投下員への危険性について示す。浮子投下については、すべての橋が下流側に歩道が確保されているわけではないため、車道での作業になる場合がある。高水流量観測時は、雨天が多く気象条件が悪いため、車両からは視認しづらい。そのため、橋上での事故回避に相当の神経を使わなければならない。特に、気温差によって川霧が発生した場合は、視認条件が悪くなるため、十分な注意が必要である。

図-9は地域特性であるが、夜間の観測、動物の出没が観測に支障をきたす場合である。北海道ではヒグマが生息しているため、河川上流部では相当の注意が必要である。彼らは夜間に行動が活発になるため、夜間観測の場合、第1、第2断面の見通員との遭遇確率が高くなる。通常であれば、ハンター同行となるが、洪水時の不定期な出動に対応できない場合があるため、クマ出没中の場合は観測を断念せざるを得ない。

以上より、浮子観測の安全性には、大きな脆弱性があることを認識する必要がある。

### (3) 迅速性への脆弱性

浮子観測は、橋上から浮子を投下して、第1、第2断面の通過時間を測定するだけなので、短時間で終わると考えがちであるが、実際はそうではない。水面幅400m程度の河川では、緊急法でも1時間程度はかかってしまう。その原因は、浮子の投下から助走区間～第1断面～第2断面を通過する時間がかかることと、同時に複数測線を観測できないので、浮子1本ずつの測定になるためである。特に、大規模出水で高水敷などを流下させる場合や、死水域がある場合は、相当の時間がかかることを覚悟しなくてはならない。よって、標準法での浮子観測は、水位変動時の観測精度には相当のリスクがあると言わざるを得ない。いわば、空間的な精度を取るか、時間的な精度を取るかというトレードオフの関係が発生する。

### (4) 観測コストへの課題

浮子観測は図-6に示したとおり、5名の人員が必要で、橋上の浮子投下場所によっては、交通誘導員を付ける必要がある。さらに、川幅によっては左右岸に見通員を配置する必要がある。このように人的なコストが増大する。

浮子の材料費は最も長い4m浮子で3000円程度であるが、出水の規模や測線数によって、また見通し障害や、浮子の流下不良によるロスを含めると、決して安価な観測手法とはいえない。

### (5) 高度化観測に望むこと

浮子法は、観測所の整備状況や、浮子の見通しについて、大規模出水には対応できていない部分が多い。また、

### 地域特性：ヒグマ出没地帯のため、夜間は見通しに行くのが危険



図-9 動物出没による見通し場の危険性

- ・既存の流量観測所が大規模出水に対応できていない
- ・精度が標準化していない→観測者の技量（経験）
- ・人員が必要→班体制確保・観測コストに課題



- ・安全性確保・迅速化・省力化・高精度化

図-10 高水流量観測高度化への期待

現場実務者の技量や経験によって、浮子の流下精度が異なり、安定した観測が難しいと言える。また、1測線の浮子通過に時間がかかるため、迅速な観測ができないこと、1観測にかかる人員が最低5名以上必要のため、観測コストが圧縮できないことなど、多くの課題がある。

そこで、高度化観測には、図-10に示すように、安全で、迅速、人員が少なくても可能でコストが削減できる手法の確立を望むところである。

## 4. 流量観測手法の特性と課題

高度化手法の特性を簡単にまとめ、現行法とともに、その長所と短所を抽出した。（図-11～図-14）

### (1) 浮子法

#### 【長所】

- ・トラブルが少ない（手法がシンプル）（確実性）

#### 【短所】

- ・観測箇所によっては、緊急法でも水位変化に追いつかない場合がある（迅速性）
- ・見通しなど大規模出水に脆弱性あり（確実性）
- ・観測に人員がかかる（コスト）
- ・荷物が多い（浮子）
- ・断面変化はわからない（精度）
- ・観測員の熟練度による誤差が生じる（精度）

- ・ 最近のエコフロート浮子は、時間の経過で劣化するため買い置きができない（コスト）

## (2) プライス法

### 【長所】

- ・ 一定の観測時間で流れの揺動を踏まえた平均的な流速を取得できる（精度）

### 【短所】

- ・ 流速が速いと既定水深に入らない（確実性）
- ・ 橋上では速い流れに引っ張られる（精度）
- ・ 観測に時間がかかる（迅速性）
- ・ 流木などに引っかかる可能性あり（危険性）

## (3) ADCP（ボート搭載型 図-12参照）

### 【長所】

- ・ データ解像度が高く、メッシュ・リアルタイム河床高が取得できる（精度）
- ・ 工夫次第でいろいろなことがわかる可能性を秘めた機器→かなりのポテンシャルを秘めた機器

### 【短所】

- ・ 船の橋上操作に熟練が必要→特に河岸から流心への移動時の船の挙動に注意する必要がある（危険性）
- ・ 準備に時間がかかるが、設定後の観測は速い（迅速性）→観測員の技量が要求される
- ・ 荷物が多い→運搬車1台はボートで埋まる（コスト）

## (4) 電波式

### 【長所】

- ・ 操作がシンプルで誰でも操作できる（確実性）
- ・ 観測時間が速い（迅速性）
- ・ 観測者による差がない（精度）
- ・ 荷物が少ない（迅速性）

### 【短所】

- ・ 水面が波立っていないと観測できない（確実性）
- ・ 橋が高いと許容範囲を超えて観測できない（確実性）
- ・ 断面変化はわからない（精度）

## (5) 画像解析

### 【長所】

- ・ 場所を選ばずどこでも観測可能（確実性）
- ・ 平面流速分布が一度に取得できる（迅速性）

### 【短所】

- ・ 撮影には俯角が必要→平らに撮ると解像度が悪い→川幅の広い大河川では難しい（確実性）
- ・ 赤外線カメラのコントラストが難しい→昼なら通常のカメラ映像も取得しておく必要有り（確実性）
- ・ 断面変化はわからない（精度）



図-11 従来法の観測方法

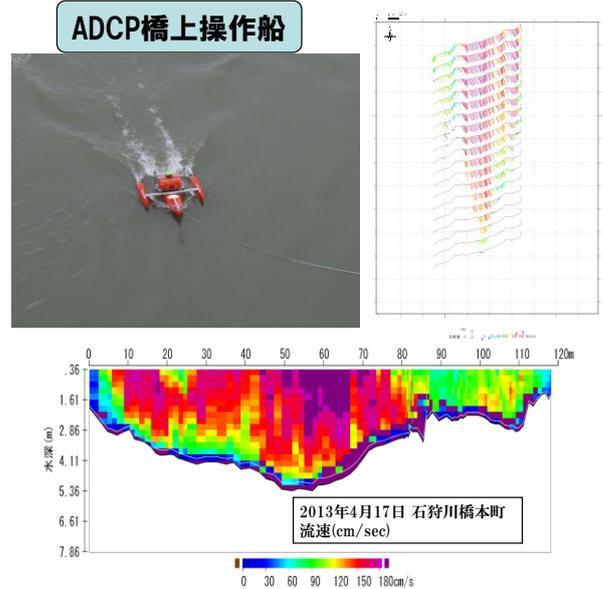


図-12 高度化した観測方法（ADCP）



図-13 高度化した観測方法（電波式）

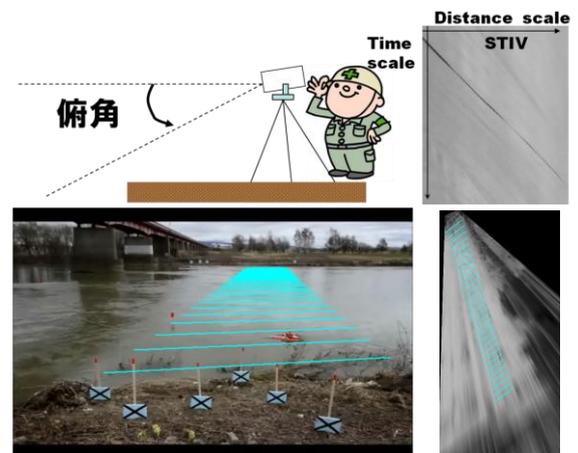


図-14 高度化した観測方法（画像解析）

## 5. 流量観測手法の観測精度

2013年5月2日～3日に、ICHARMとの合同観測で得られた、石狩川橋本町観測所の融雪流量観測結果を図-15に示す。ここで、表面流速のみを測定した電波、STIV、プライスの更正係数は0.85として流量を算出している。

ここでは、ADCP、プライス、STIVが合致した変動をしており、浮子が多めに、電波が少なめにしている。

この原因として、浮子は流心に寄って流れる傾向がみられたことと、電波は、河川表面の波が小さい鏡面状況であったため、表面波から反射波をとらえることができなかったためと考えられる。

図-16には、ADCPを真値とした場合の各手法の流量精度を示した。プライス4%、STIV 6%、浮子23%、電波式34%の誤差となった。ここでは、ADCPの精度とSTIVの分析解像度の高さは評価できる結果となった。プライスは、1点の計測時間がかかるが、表面流速の精度は高いことが示された。

ADCPはロープで橋上操作によって横断したが、図-12に示す高速流対応ボートを使用したため、抵抗がほとんどなく、流速2m/sec以上の流心部でも、操作に対する不安は全く感じられなかった。また、高速流下で生じる左右の揺れも小さく、観測精度や観測の容易性にこのボートが関与している部分大きいと評価できる。

画像解析STIVは、持ち運び自由なポータブルのPIVであり、三脚とカメラがあれば、どこでも設置可能で、自由度が高く現場への適用性に優れている。座標を持つ評定点を6箇所設置する必要があるが、あらかじめ河川構造物などに設定しておけば、大規模出水時にも容易に適応できる可能性がある。

また、この技術は現在観測所に設置しているCCTVなどの固定カメラからも流速を算出することが可能となる。

STIVが現場に適用すると考えた最も大きい要因は、解析方法である。STIVは、主流方向に設定した検査線上の輝度の時間変化を時空間でプロットし、そこに現れた縞パターンの勾配から検査線上の平均流速を求めるという手法である<sup>45)</sup>。これは、かなり表面波が乱れた洪水流であっても、手動で縞パターンを見極めることが可能である。筆者ら現場実務者にとって、実はこのアナログな部分が、現場で感じた状況とすり合わせができ、実際の流れをトレースしているという安心感につながる。

次に、前出では精度が悪かった電波式について、別の事例を紹介する。2011年4月に石狩川石狩大橋で試験的に行った浮子と電波式の同時観測結果を図-17に示す。人員は浮子では橋上2名+見通し3名の計5名、電波式は橋上2名の配置とした。浮子は緊急法（7測線）、電波式は通常法（16測線）で実施したにもかかわらず、電波式は浮子の1/2以下の時間で観測を終了することができた。

観測に使用した浮子は1～4mで既定の更正係数から流

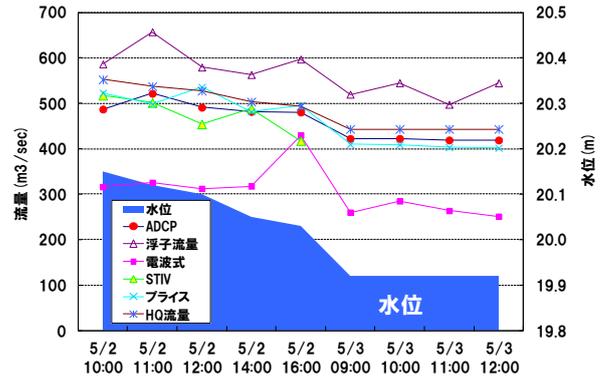


図-15 現行法と高度化手法の検証

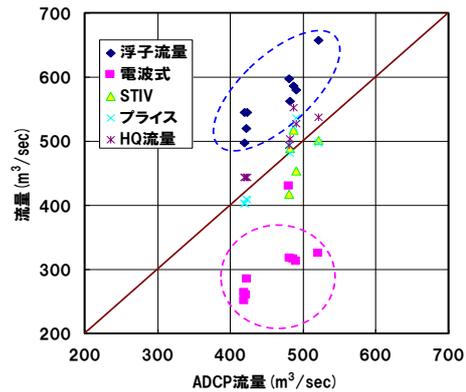


図-16 測定精度散布図

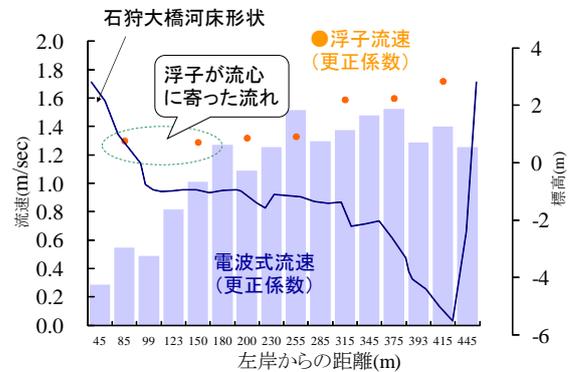


図-17 浮子と電波式の精度検証

速を算出し、電波式は表面浮子と同じ0.85の更正係数を使用した。図-17をみると、水深の浅い左岸側では、浮子が流心に寄って流下したため誤差が大きくなったが、右岸でも浮子の流速が大きくなる傾向がみられた。流量にすると誤差は17%程度浮子が多いという結果になった。電波式については、表面波が立ちにくい条件下を不得意とすることが示されたが、整合性については今後、さまざまな現場でのデータを蓄積していきながら、どの程度までの誤差を許容できるかを含めて検討する必要がある。しかし、迅速性と省人力については、今後の高水流量観測のフットワークとコスト削減に、相当寄与するものとして注目できる。

## 6. 現場実務者へのアンケート結果

実際に現場で流量観測に携わり、これら高度化観測の経験を持つ現場実務者への流量観測手法についての無記名アンケートを行った。実際には、これらすべての観測に携わったことのある観測員がほとんどいないことや、アンケートの時間上の都合から、弊社と関連会社での結果で示すことをご了承いただきたい。

「安全性」、「迅速性」、「確実性」、「精度」、「コスト」の5つを対象として、電波式、画像解析、浮子、ADCP、ブライスのどれが最も適するかを調査した。それぞれの図-18～22には答えた人数が示しており、アンケートにはそれを選んだ理由についても意見を書き込める様式とした。

### (1) 安全性

安全性では、図-18に示す電波と画像解析が最も多かった。理由としては、どちらも非接触で安全な場所で作業が可能であるとのことであった。逆に水面、水中に接触するADCPとブライスは低い結果になった。ここで興味深いのは、浮子が安全だと思っている観測員が少なかったことである。逆に危険と答えた人数の方が多かった。これは、観測員が前章で述べた危険性を経験することが要因と考えられる。

### (2) 迅速性

迅速性では、図-19に示す電波と浮子が高いという評価が多かった。やはり操作性がシンプルなものほど、迅速に作業が可能であるという意見である。逆にADCPは迅速性が低いとなっているが、これは、観測前の設定にかかる時間やトラブル発生時を憂慮する意見が多かった。現在のボート観測システムになってからは、格段と準備時間は縮減されているのだが、他の手法に比べて複雑な機器設定が必要だということで、このような評価になったものと推察できる。ここは、ある程度の訓練によって、観測員の技量を上げて解決できるものと考えられる。

### (3) 確実性

確実性では、図-20に示す浮子が高い評価を示した。これは、観測員が最も実施した回数が多いことが確実性や安心感につながっている。逆に確実性が低いのは画像解析であった。この理由として、実際にカメラで映像を撮っても、この映像の良否がすぐにわからないことが不安感を高めると回答している。その他の観測では結果がすぐに出るのでやり直しができるが、画像解析ではここが弱点になっている。しかし、STIV開発者である神戸大学藤田一郎教授は、解析結果のリアルタイム表示を開

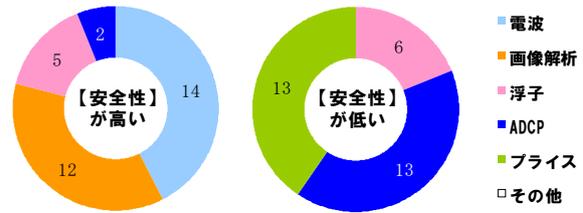


図-18 アンケート結果（安全性の評価）



図-19 アンケート結果（迅速性の評価）

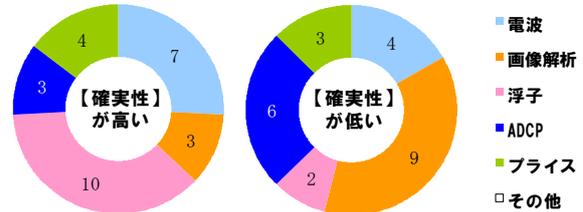


図-20 アンケート結果（確実性の評価）



図-21 アンケート結果（精度の評価）

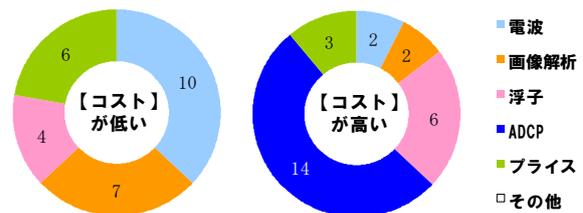


図-22 アンケート結果（コストの評価）

発中とのことで、この問題が解決される日が近いものと期待している。

### (4) 精度

精度では、図-21に示すADCPが最も高い評価で、ついでブライスであった。ADCPは操作は難しいが、精度は認めるという意見が多く、他の手法に比べて時空間的にとれるデータの解像度の高さが認められている。これに対して、精度が低いのは、画像解析、浮子、電波で

あった。これらに共通するのは、計測できるのは表面流速のみという点である。これらは、更正係数の研究が進み、表面流速で鉛直プロファイルを代表できるようになると変化するものと推察される。

### (5) コスト

コストでは、図-22 に示す電波が最も高い評価で、最も低いのが ADCP であった。ADCP はイニシャルコストが、他の手法よりも高いためコスト評価が低くなったが、電波に関しては高評価になっている。機器の価格的な妥当性もあると思われるが、観測人工が最大2名でよいことが最も大きいと推察される。また、ここでも浮子のコスト評価が良くない。やはり現場で人工がかかる観測ということが、現場実務者の認知しているところであると考えられる。

### (6) 総合評価

アンケート結果をまとめると、図-23 のようになり、安全性、迅速性、観測コストでは電波が、迅速性・確実性では浮子が、精度では ADCP と、それぞれの特色が分かれた結果となった。図-24 では、観測員が高水流量観測で選びたい手法について集計したが、電波が最も多く、ついで浮子と画像解析となった。ここでも、安全で操作性がよい軽快な手法が好まれる傾向がみられた。現場実務者としては、出水は時間との勝負なので、少人数 + 少量の荷物で勝負したいというニーズが高く、これに答えられる手法が好まれたものと考えられる。

図-25 に各手法の長所と短所をまとめたが、それぞれに長短が明確である。浮子は既往資料との繋ぎとして必要であり、電波については抜群の操作性と軽快性を持つが、データ取得の確実性が課題である。画像解析は、現場実務者が現場に行けない状況でも、監視カメラ等の分析で、大規模出水に対応できるポテンシャルを持つ。短所については対応中となっている。ADCP も軽快性が課題であるが、搭載機器のスリム化が進んでおり、今後、より軽快に発展するものと期待できる。

## 7. まとめと課題

### (1) まとめ

大規模出水では安全に安定した観測ができる手法が求められる。

現行の浮子による高水流量観測は、観測所の整備状況や観測精度への諸問題、安全性、迅速性やコストなどの課題がある。

高度化された観測は、安全性・迅速性・確実性の面で、従来の浮子観測の課題を補う有効な手法と考えられる。

今回対象となった、ADCP、電波式、画像解析 (STIV) については、それぞれに特性があり、長短を抽出したが、



図-23 アンケート結果 (総合評価)

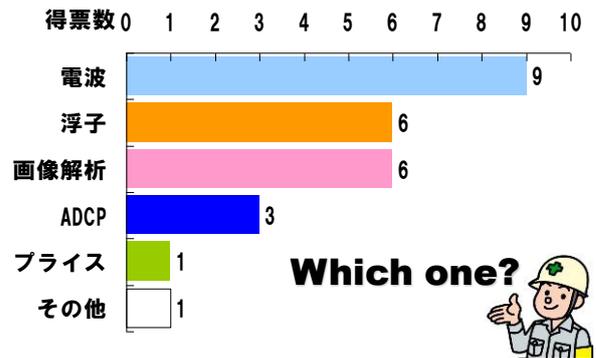


図-24 高水流量観測で選びたい手法

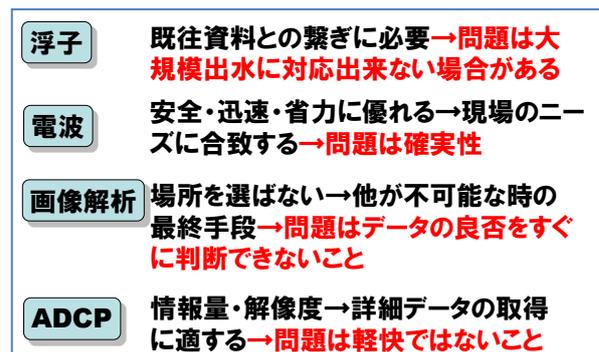


図-25 観測手法の長所と短所

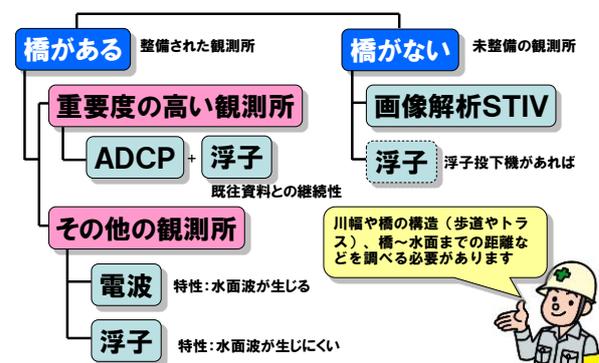


図-26 観測所に合わせた観測手法の提案

いずれも今後の発展が期待できる観測手法であり、現場実務者を含めて、さらなる技術研鑽を重ねて、現場で求められるニーズを踏まえた手法に研ぎ澄まされていくことを願う。

## (2) 課題

ここで、観測所に合わせた観測手法を図-26に提案する。流量観測所で橋のある箇所において、重要度の高い基準点やI種観測所では、精度が高いADCPを適用する。橋のある観測所で、重要度が低い観測所については電波式を提案する。

次に、橋のない観測所では、浮子投下機が用意されているか、ない場合は、通常岸から手投げで浮子を投下していることが多いと考えられるが、ここでは、STIVによる画像解析を適用させる。浮子観測については、いずれも過去資料との連携のため、併用することを原則とする。

また、今回は現場での観測データを取得することに焦点を当てたが、データから流量を算出するに当たって、空間統一された空間補正方法が必要だと考えられる。これには二瓶<sup>6)</sup>、柏田ら<sup>7)</sup>が推奨する力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and Extrapolation method : DIEX法)の有効性が論じられており、今後、現地データとの組み合わせを行って、より精度の高い現地観測を目指していくことが望まれている。

## 7. 参考文献

- 1) 木下武雄：流量観測の過去と未来，河川流量観測の新時代第1巻，2010.
- 2) 江藏拓・笹川幸寛・手計太一：各種河川流速観測手法に関する基礎的検討，河川流量観測の新時代第3巻，2012.
- 3) 二瓶泰雄：【特集】防災の水工学 河川流量のモニタリング，日本流体力学会，ながれ29，187-192，2010.  
中尾忠彦：水文観測の現況と展望，河川流量観測の新時代第1巻，2010.
- 4) 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計測，水工学論文集，第53巻，2009.
- 5) 藤田一郎・小阪純史・萬矢敦啓・本永良樹：遠赤外線カメラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，L\_703-I\_708，2013.
- 6) 二瓶泰雄：ADCPやH-ADCPによる河川流量観測，河川流量観測の新時代第1巻，2010.
- 7) 柏田仁・二瓶泰雄・高島栄二郎・山崎裕介・市山誠：力学的内外挿法(DIEX法)に基づく「点」から「面」流速データ推定法の構築，河川技術論文集，第17巻，2011.

(2014. 2. 10受付)

# 大陸河川におけるADCPを用いた流況・流量・河床高観測の注意点と観測結果の一例

## NEED TO KNOW HOW TO CONDUCT ADCP MEASUREMENT IN RIVERS OUTSIDE OF JAPAN AND PRELIMINARY RESULTS

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

Atsuhiko YOROZUYA, Yoshiki MOTONAGA and Yoichi IWAMI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>正会員 博士(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)

<sup>3</sup>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)

Authors conducted field measurement on Mekong River in Cambodia using acoustic Doppler current profiler (ADCP), and global positioning system (GPS) and etc, to understand riverbed profile, water discharge along different rivers, starting from Phnom Penh to Kampong Cham within 100km length in 8days boat trip. Though authors have experienced the measurements in Japan, it was a first measurement outside of Japan. Not only in ourselves, but also in our research community, there were not much information to conduct this kind of expedition. For example, a type of boat to travel, a better type of ADCP, deployment of ADCP on the boat, types of GPS, transportation of battery via airplane as well as charger, which ever related to measurements. Since ADCP measurement composed with many electronic devices, even one single electronic cord or expensive devices have to be in workable condition. To share information about our experience, authors report the methodology, the point needed to be consider, and preliminary results based on our observation.

**Key Words :** *Acoustic Doppler Current Profiler, flow/discharge and riverbed measurement, rivers in continents*

### 1. はじめに

水理学的に最も仮定の少ない流量観測手法の一つとして acoustic Doppler current profiler (ADCP) が日本国内でも頻繁に使用され、周辺機器との組み合わせを含めて技術的な知見が広まり、日本国内の急流河川においても計測事例が増えてきている<sup>1)2)</sup>。日本国内における計測の難しさは、早い流速と高濁度、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。それ故に、ADCP本体のみならず、適切な橋上操作艇、GPSの必要性等の周辺機器に頼らないと計測そのものを成功することができない。それ故に高い技術が育成された<sup>3)</sup>。また高濁度条件の河川で計測することで ADCP コマンドの選択の難しさ、データ整理に対する難しさもある。

一方、大陸に代表される河川の特徴は、出水期が数ヶ月にわたること、kmのオーダの川幅であること、流速が遅いこと、特に途上国においては流量観測に適した橋が少ないことなどがあげられる。このような環境の中で日本国内で普及している浮子流量観測や、プライス流速

計等を用いた流量観測を実施することはそれほど簡単ではない。しかしながら大きな出水を捉えることは、日本の河川に比べると容易である。

著者等は、国際河川であり、大陸河川の一つであるメコン川において ADCP を用いた流況・流量・河床高の計測を実施した。本観測の本来の目的は、メコン川の河床高を把握し、洪水時の河川本川の流量と氾濫流量を把握するための基礎データの取得である<sup>4)5)</sup>。このような観測を通して著者等が経験した技術的・実務的な観点から、観測技術及び手法、特に国外で計測するための注意点、計測結果の一例を第一処理データを用いた速報として報告する。

### 2. 観測領域概要

著者等の研究対象領域はカンボジア国のメコン川である。メコン川はチベット高原を源流として、中国、ミャンマー・ラオス国境、ラオス・タイ国境、カンボジア、ベトナムを経て南シナ海に流れ込む。同川はカンボジア国

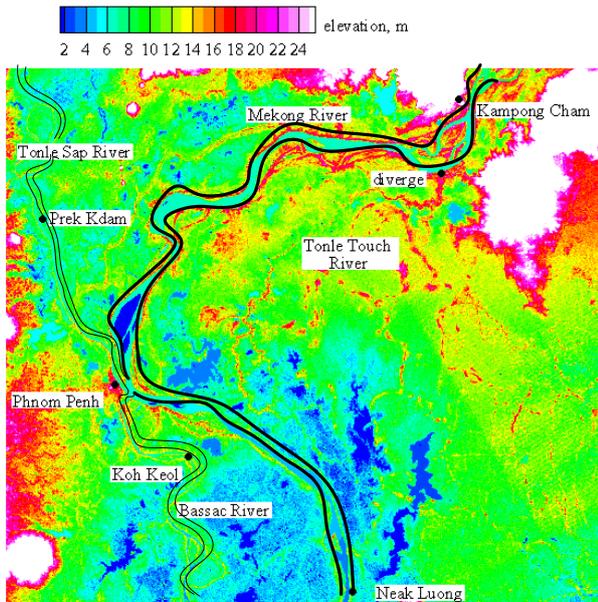


図-1 本研究対象領域とその近傍に配置されている水位計. 図は 100km × 90km

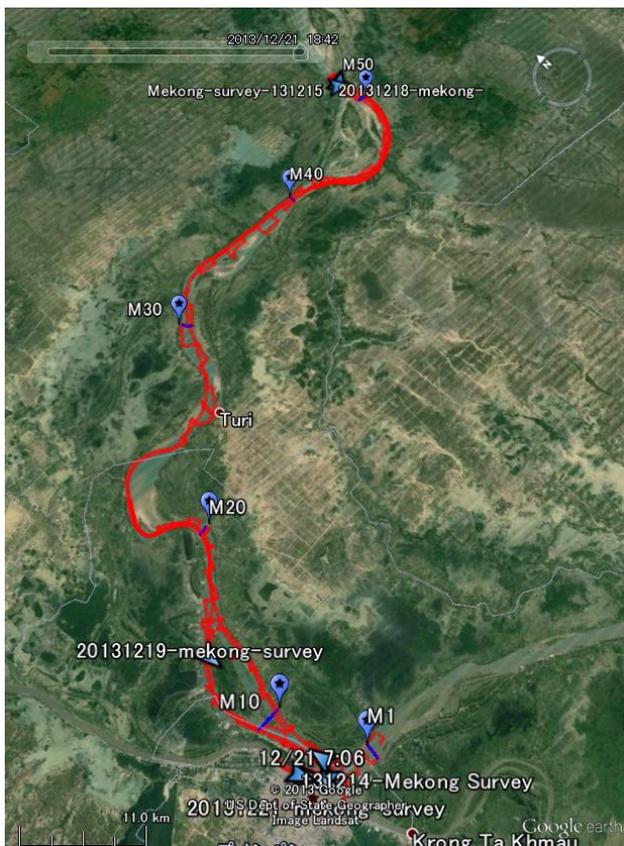


図-2 観測概要

の首都であるPhnom PenhでTonle Sap湖から流れるTonle Sap川と合流し、Bassac川と分流する。Tonle Sap湖は、出水期にはメコン川の水を貯留し、渇水期にはそれを徐々に流出する。その結果、Tonle Sap川は出水期にはメコン川からTonle Sap湖へ、渇水期にはTonle Sap湖か

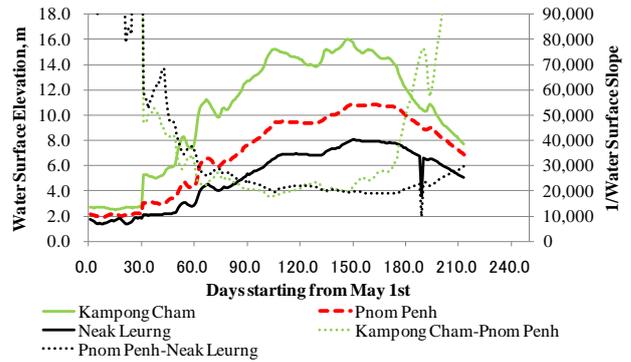


図-3 メコン川本川のハイドログラフ

らメコン川への流れとなる。図-1は本研究対象領域とその近傍に配置されている水位計の位置を示すが、それらはKampong Cham, Phnom Penh, Neak Luongに、Tonle Sap川にはPrek Kdamに、Bassac川には、Koh Keolである。

図-2は観測の全体像を示す。図-1と比較すると図-2は真北を向いていないが、プノンペンからカンボンチャムを拡大した図である。赤で示す経路が実際のボートパスである。両都市は約100km離れているが、この間に大きな都市がないため、両都市を拠点として観測を実施した。当初の目的を果たすため、2kmおき到一个の横断測量を実施している。具体的には河岸を船の出しうる最高速度で2km程度航行し、横断測量のために1m/s程度のゆっくりとした速度で曳航し、その後対岸を2km程度航行するという行程を繰り返す。結果56側線の河床高を得た。その他にも、カンボンチャム周辺、プノンペン近辺における特徴的な河道において、測量を実施した。ただし図-2のメコン川沿いの都市Turi下流の湾曲部では川幅が急に広くなり、水深が浅くなったことから横断測量は実施できなかった。またこの行程には、ボートの速度の問題から、プノンペンからカンボンチャムへ測量を伴わない移動日と、前日までの到達地点までの移動日を含む。天候による一日の延期を含め、12月14日からトータルで8日間の観測を実施した。

図-3は水位の時系列の一例として2011年のKampong Cham, Phnom Penh, Neak Luongにおける水位変化、その時の水面勾配を示す。Kampong Chamにおける水位は、低水時の2.67mから徐々に水位をあげ、9月25日最大の水位となる。このときの値は16.02m、9月22日から30日まで一週間の平均水位は15.74mであった。またPhnom Penhにおける水位は位相差が出るため、ピーク水位は10月10日で、その時の水位は10.86mとなる。また9月25日のNeak Leungにおける水位は7.84m、9月22日から30日まで一週間の平均水位は7.89mであった。このときの水面勾配は概ね1/20,000程度となる。ここであげたのは2011年の一例だが、プノンペンにおけるハイドロは毎年同様の傾向を示す。すなわち出水期は数ヶ月間続き、プノンペン近傍におけるピーク流量時の計測を意図するのならば、9月下旬から10月初旬が最適な期間である。

表-1 2013年12月の各地点における水位<sup>6)</sup>

date	WSE, m			1/slope	
	Kampong Cham	Phnom Penh	Prek Kdam	Cham-Phnom	Prek-Phnom
1	6.19	5.18	6.64	99,010	20,548
2	6.09	5.11	6.56	102,041	20,690
3	6.01	5.02	6.49	101,010	20,408
4	5.98	5.00	6.43	102,041	20,979
5	5.93	4.96	6.35	103,093	21,583
6	5.82	4.88	6.26	106,383	21,739
7	5.75	4.78	6.21	103,093	20,979
8	5.66	4.70	6.12	104,167	21,127
9	5.52	4.59	6.03	107,527	20,833
10	5.44	4.50	5.97	106,383	20,408
11	5.30	4.30	5.86	100,000	19,231
12	5.17	4.21	5.75	104,167	19,481
13	5.06	4.17	5.70	112,360	19,608
14	5.01	4.11	5.61	111,111	20,000
15	4.94	4.06	5.55	113,636	20,134
16	4.87	4.00	5.50	114,943	20,000

表1は2013年12月1日～16日までの、Kampong Cham, Phnom Penh, Prek Kdamにおける水位と、またそれぞれの水面勾配を示す。観測がスタートした14日から16日にかけて、Mekong川本川のKampong ChamとPhnom Penhでは90cm程度の水位変動が確認されている。またそのときの両地点における水位差は90cm程度である。両地点は100km程度離れているため、このときの水面勾配はおおよそ1/100,000となった。一方、Tone sap川沿いにあるPhnom PenhとPrek Kdamの水位差は1.5m程度、距離は約30kmあるので、水面勾配は1/20,000程度となる。

### 3. 手法

観測手法に関して、計測機器から使用したボート、運搬にかかわる注意事項等、著者等が重要と思われる点をここでは記述する。

#### (1) 曳航船

図-4は観測に用いた曳航船の写真である。写真からもわかるように上部階を持ち、簡易なトイレと動力用とは別に電源供給用発電機のエンジンを持つ。このような船は通常観光船として使われているもので、それを9日間レンタルした。コストはプノンペン又はカンボンチャム周辺の観測では一日190 USD (米ドル)、プノンペンからカンボンチャムのように長距離の走行が伴う場合は300 USDを基本とし、全体として、1,935 USDであった。またデータ保存用のPCやGPSに必要な電気はこの船から得た。曳航船の船尾に橋上操作艇をロープ及び竹で固定し観測を実施した。

この曳航船の吃水が深いようで、例えば河岸湾曲部の内側やバスック川では河岸には近づくことができなかった。平水時の観測では吃水の浅い漁船とこのような曳航船の両方を採用する必要がある。



図-4 観測船概要

#### (2) ADCPによる流況及び河床高計測

本観測に用いたADCPはTeledyne RD社のRiverRay ADCPを用いた。これはいわゆるオートフォーカス機能を持ち、水深、層厚、観測モードを流況、水深に応じて自動的に調整する機能を持つ。本観測のように、数メートルから数十メートルまで水深が大きく変化する河道で連続的な観測を実施するには最も適した機種である。その他の特徴として周波数が600kHzである。またphased array式を採用し音波を発信するトランスデューサが平面で、鉛直下向きに30度の角度で4つのビームを発信する。そのため20度の角度で音波を発するWH-ADCP1200kHzと比べると若干下層不感帯が大きくなる。さらに計測結果は後述のGPSと同期させ、内蔵型のブルートゥースで船上のPCと通信することができる。RiverRayの詳細はメーカーのホームページを参照されたい<sup>7)</sup>。

余談として、長時間に及ぶ観測において計測機器のトラブルの発生を防ぐため、観測システムは極力単純でかつ、頑丈あることが望ましい。現に、RiverRayの内蔵型のブルートゥースは観測の最後まで故障することなく安定的にデータ転送を実現した。しかしながらボート内に増設したその他の電気配線は故障が発生しデータ通信が不安定になった。今後は脆弱な電気配線が認められた場合、極力それを強化することが望ましい。

#### (3) 橋上操作艇

採用した橋上操作艇はRiverRayの船体である。これは国内で推奨しているハイスピードリバーボートと比較して全体的に船体が小さいが、このように流速の小さい河川においては十分安定したデータの取得が可能である。図-5は橋上操作艇を曳航している様子を示したものであるが、ADCPが曳航船のスクリューによる乱流を計測しないように、竹を用いて船から1m程度離れた位置で計測するようにした。このような現地における工夫をするためにも、予備のロープ、岩登り用のカラビナ、ノコギリ・ペンチの機能がついたマルチツール (例えばLeather

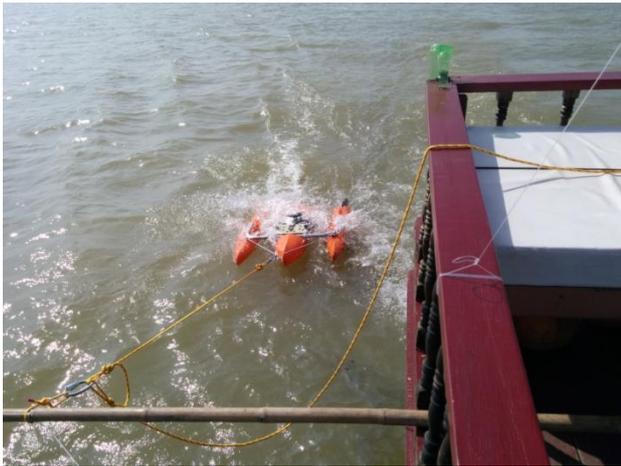


図-5 橋上操作艇を用いた ADCP の観測

Man) を携帯すると便利である。またこの船艇はゴルフバックのトラベルカバーに収納できることが利点である。輸送時に航空会社によっては橋上操作艇をゴルフバックとして登録することができる場合が多いからである。またここで使用した竹は、パサック川の砂州に作られた船着き場における簡易的な歩道をつくるための材料として使用していたものを拝借した。これが無かった場合の代替品を探すことはそれほど容易ではない。

#### (4) GPS

本観測ではADCPと同期させるためのGPSと、水面勾配を計測するためのGPSと二つのGPSを採用した。前者はNav Com社のStarFire対応SF2010及びSF3050である。このGPSの特徴は、地点情報及び補正情報の両者を衛星から取得するもので、基地局を必要とせず、形式としてはスタンドアロンタイプである。これから得られる精度は、Z方向でそれぞれ30cm/15cm程度となる。このように広範囲にわたり、かつ陸上部隊を用意しない観測の場合、このようなGPSを使用することは有意義である。

#### (5) バッテリー及びチャージャー

日本国内におけるADCP観測では12Vのシールドバッテリーを使用するのが一般的である。これらを国外の観測で準備する場合、複数の選択肢があるが、一つは航空機で運搬すること、現地調達することである。前者の場合、バッテリーによってはかなり制限されるが、それは使用している液体とバッテリーの容量である。ハイドロシステム開発社の疋田氏から紹介を受けたKung Long Batteries Industrial社のシールドバッテリーは航空機の運搬が可能である。またワット時定格量が100Wh以下である必要があるため、12V7.2Aのものを選択すべきである<sup>8)</sup>。後者の場合、ハイドロシステムの橋田氏のアドバイスを受けオートバイの販売店又はバッテリー専門店により同規格のバッテリーを購入した。しかしながらチャージャーの購入は実質できなかった。カンボジアで



図-6 位置情報を記録中の My tracks  
(アンドロイド端末のスクリーンキャプチャ)

購入できたものは、大型の高電圧タイプのもので、上記の小型バッテリーには負担が大きすぎるものばかりであった。また実際に購入しても悪い品質なものばかりで購入後すぐに壊れた。チャージャーそのものは航空機でも運搬が可能であるため、日本国内で購入できる充電器と変圧器を持ちこむことを薦める。

#### (6) アンドロイド端末

写真撮影、写真のジオタグ、船舶用ナビゲーションの目的で、シムフリーのアンドロイド端末 (LG社製 Nexus5) を採用した。アンドロイドは本体が持つGPSの他に、携帯電話のアンテナの情報と同期させるため高い精度の位置情報を提供する。また同端末で撮影した写真はアンドロイドの位置情報からジオタグをつけるため、観測終了後、撮影位置を高い精度で特定することができる。またアンドロイドのアプリケーションの一つである My tracksを用いることで、GPSデータの記録と、船舶用ナビゲーションの役割を果たす。図-6は位置情報を記録中の My Tracksの画面で、アンドロイド端末のスクリーンキャプチャである。緑のマーカが記録の開始点、赤の曲線が航跡、青の矢印が現在位置と進行方向を示す。また地図の拡大・縮小が自由であるため、ナビゲーションとして非常に重宝する。船舶用ナビゲーションとしては、例えば横断測量を実施するべき測線に近づいたら、対岸に目標地点を探す。バゴタ (仏塔) は地図に記載されている場合が多いため採用すべき目標となる。地図上で河道と想定すべき測線が直角になったところで、横断測量をスタートする。また必要な測線近傍に明確な目標物がない場合、運転手に対して目標を伝える必要はあるが、My tracks上で航跡と河道の角度を確認しながら測量を

施する。もし方向が河道に対して直行していない場合、目標の再設定などを繰り返し、微調整を繰り返す。測線が著しくずれる場合には、測量をやり直すことも必要になる。また同ソフトはkml, gpx, csv, tcx形式での保存が可能である。図-2はMy Tracksで計測したデータをkml形式で出力し、google earthで示したものである。

これらの機能を使用するためには現地のSIMカードを購入する必要があるが、今回は9日間の日程で数GBの通信容量を持つプリペイドのSIMカードを21 USDで購入した。余談になるが、現地のSIMカードを正しくアクティベートさせるためには、コンビニエンスストア等ではなく携帯電話又はデータ通信カードの販売店で購入することが望ましい。

### (7) 光波距離計

左右岸不感帯を記録するために、光波距離計を用いて曳航船から河岸までの距離を測定した。今回使用した距離計はTruPulse360で、角度計、方位磁石が装着しているため、斜距離、水平距離、方位角、二点間の高さ等を簡易に計測することができる。

### (8) その他

ADCP及びADCPの通信機能が故障した時のことを考え、音響測深器を持ち込んだ。これを用いる場合、直接データロガーのPCと接続することが必要となる。本観測で使用したPCは東芝のタブブックであるが、シリアルポートが一つであるため、複数のデータを直接接続するために、ハイドロシステム開発の橋田氏から紹介を受けたラトック社のUSB-シリアル変換アダプター「REX-USB60F」を採用した。前述の通りRiverRay及びそのBluetoothが最後まで安定していたため、不要ではあったが、このようなリスク管理は必須である。しかしながらボートの操作性、現場における作業効率を考えると、水面の観測機器と曳航船上のPCを直接接続することはあまりやりたくない。

また計測の許可はカンボジア国の政府機関から取得した。

## 4. 計測結果の速報

本観測で得られた結果として観測概要と、プノンペン近辺の流況に関して一次処理データを用いて速報的に記述する。

### (1) 概要

図-2に示したように、プノンペン下流を測線1として、カンボンチャムの直上流までの区間を、おおよそ約2kmピッチで計測を実施した。表2はそのときの計測結果の一例を示す。この観測では大きな砂州が存在するような場所においては分量が生じていること、その支川での水

表-2 各測線における計測結果の一例

sec #	Total Q	Meas. Q	Width	Total Area	Depth	error
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m	m <sup>2</sup>	m	%
M6	8316.1	6646.9	1136.4	18490.7	16.3	11.1
M7	8334.0	6860.8	1017.5	18762.5	18.4	11.3
M8	6699.2	5269.6	1039.1	19838.1	19.1	-10.5
M16	7960.2	6202.6	1879.1	17980.4	9.6	6.3
M17	7750.2	6025.3	1320.6	16582.0	12.6	3.5
M18	7664.3	6235.4	714.7	16420.4	23.0	2.4
M19	7459.2	6046.3	747.2	14873.3	19.9	-0.3
M20	7940.0	6373.1	1209.5	18099.9	15.0	6.1
M21	7205.0	5725.6	1039.1	17636.3	17.0	-3.7
M22	6564.4	5080.7	815.0	16985.0	20.8	-12.3
M23	6881.6	5463.0	617.2	17654.3	28.6	-8.1
M24	7686.9	6002.9	900.6	15233.8	16.9	2.7
M25	7159.3	5757.3	1375.3	15050.2	10.9	-4.4
M26	7607.1	5895.7	2164.9	15074.6	7.0	1.6
M28	7720.5	6034.6	1346.3	16521.7	12.3	3.1
M29	7224.9	5624.7	1686.9	14102.7	8.4	-3.5
M30	7934.2	6354.2	1184.8	15281.6	12.9	6.0
M31	7142.1	5839.0	828.1	13684.7	16.5	-4.6
M32	7202.7	5894.8	846.2	14018.0	16.6	-3.8
M33	8050.9	6614.1	1026.5	17483.5	17.0	7.6
M33c	8156.2	6139.2	1160.1	16755.2	14.4	9.0
M37	7486.1	5821.3	1585.9	12377.8	7.8	0.0
M38	7512.0	6054.0	1327.7	14699.5	11.1	0.4
M39	7770.2	6462.2	913.9	14883.1	16.3	3.8
M40	7285.2	6219.7	667.0	15687.0	23.5	-2.7
M41	7571.4	6008.0	1070.2	12477.0	11.7	1.2
M42	6591.9	5481.8	1174.6	17398.6	14.8	-11.9
M51	7779.8	6232.8	1465.8	15506.6	10.6	3.9
M52	7695.9	6301.9	975.9	18113.7	18.6	2.8
M53	6688.5	5429.9	695.7	17629.7	25.3	-10.6
M54	7231.3	5690.4	556.1	16187.8	29.1	-3.4
M55	6951.0	5604.5	899.3	17128.3	19.0	-7.1
M56	7790.2	6165.2	1079.4	15880.4	14.7	4.1
average	7485.2	5986.6	1105.0	16196.9	14.7	0.0

深が浅くて曳航船が入れなかったために全断面の計測ができない測線もあった。表1はそれらをのぞいたすべての測線における総流量; Total Q, ADCPによる計測流量; Meas. Q, 測線幅; Width, 河積; Total area, 平均水深 (Total area/Width); Depth, 平均からの流量誤差; Error, を示す。総流量は、ADCPによる計測流量、上層、下層、左右岸不感帯の推定流量を加算したものである。また川幅は計測断面の幅と左右岸の距離計測によるものを加算したものである。またerrorは各測線の平均値からの誤差を示す。

同区間は他の河川との合流もないこと、連続性が保たれていること、表-1で示したように水位の日変化が流量としては無視できるほど小さいこと前提に考えると、渇水時の平均流量は約7,500m<sup>3</sup>/s、誤差は最大で-12.3%となった。誤差は少し大きい数字であるが、本観測では、上述のように測線の取り方が厳密な直線ではないこと、往復の観測を実施していないことからこのような誤差を許した結果となったと思われる。横断測量を実施他断面において最大の川幅は2,165m、最小で556mとなり、大きく変化する。例えば図-7は測線M26 (line 6-M26) 近辺の平面図を示す。この測線では川幅が2,165mであるのに対して、2km下流の測線M25では1,375mに急縮する。それぞれの平均水深は、M26/M25でそれぞれ7.0m/10.9mとなった。またそれよりもさらに下流では2.5kmにまで



図-7 観測測線 M26 近辺のメコン川の平面形, 曳航船の航跡 (赤), 観測測線 (青)

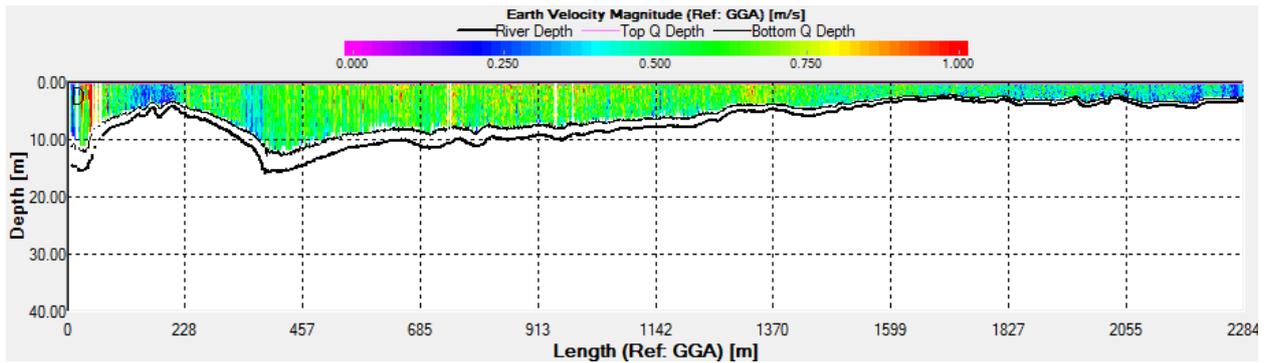


図-8 M26 における流速と計測断面 (横軸は左岸からの距離)

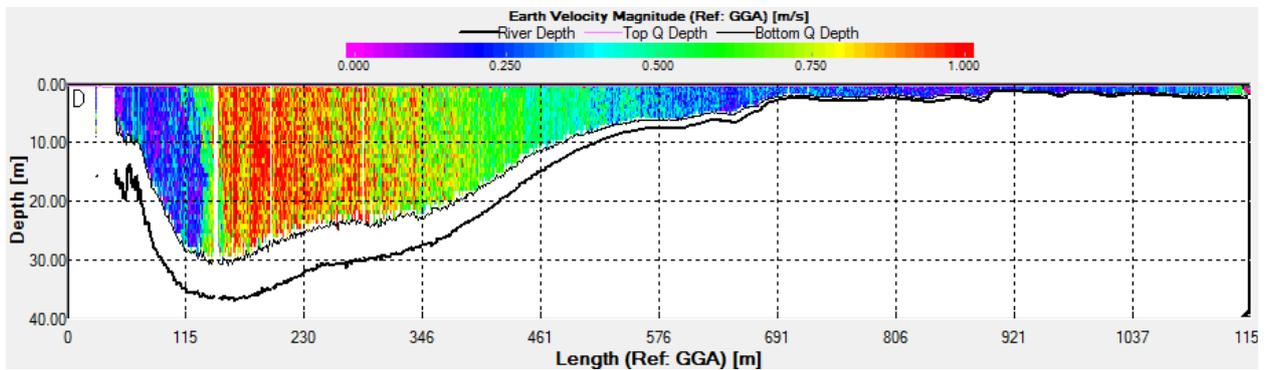


図-9 M25 における流速と計測断面 (横軸は左岸からの距離)

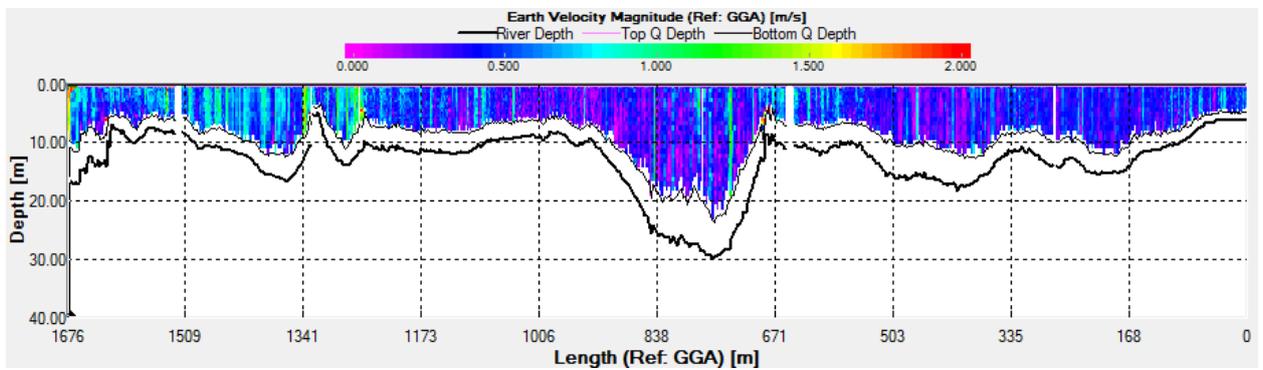


図 10 領域 A 近傍の河岸沿いの河床高の縦断変化



図11 河岸浸食の様子

広がり、曳航船の喫水深が深すぎることから計測を断念した。次にM26, M25のADCPによる計測結果を図-8, 図-9に示す。図-8が示すように、左岸から0m及び400m近傍の二か所に15.5m程度の最大水深を取り、右岸にかけて徐々に水深が浅くなる。これは図-7で平面的にみると明確だが、この位置は湾曲部の外側にあるために、このような地形となる。しかしながら、同測線の下流には砂州が存在し、これは湾曲部外側に存在する砂州で、この形成過程は簡単に説明することができない。次に図-9はM25におけるADCPによる計測結果を示す。左岸から150m近傍の水深は37m程度となり、右岸に向けては水深が浅くなる。M26に示したように右岸側は河道湾曲部の内側であり、M26と比較するとここでは水深がさらに浅くなり、そのために右岸側に流れがより集中している。上述のように、M26/M25の川幅比は1/0.63、平均水深比は7.9/10.9であるために大きな河床低下が想像できるが、このような流れの偏りとそれによる最大水深は実際に計測するまで想像もつかない事象である。また両測線の間であり、急縮部となる図中のArea Aでは非常に激しい河岸浸食が発達している。図-10はM26からM25へ移動する過程において、河岸を計測した結果である。河岸から10m程度の距離を保ちながら曳航したときのADCPの観測結果である。平均的には10m程度の水深を持ち、またこの河岸は全体的に浸食傾向を持つ。図が示すように突然30m程度の水深を持つ箇所も存在した。この近傍では局所的に大きな河岸浸食が認められた。図-11はこの近傍で撮影した写真である。ここでは河岸の勾配が大きい。また写真には農家の作業小屋とみられる家があるが、家の基礎が浸食により削られている。また斜面には段ができてはいるが、これはいろいろな水位に応じた河岸浸食が起きている事が原因である。この観測時でも新しい河岸浸食が見られた。このように河川水により攻撃をうける河岸におけるこのような河岸浸食は明確で、著者らの観測中にも随所にみられた光景である。

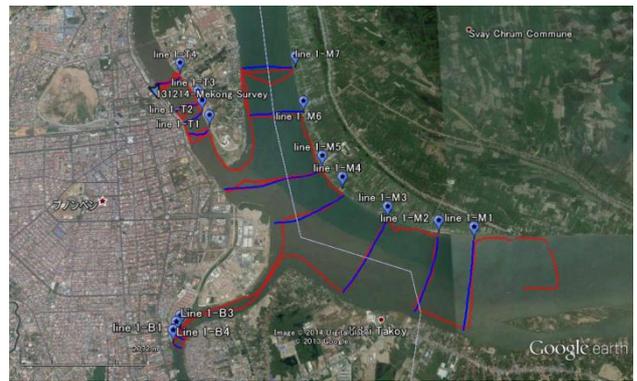


図-12 プノンペン近傍のメコン川システムの平面形、曳航船の航跡(赤)、観測測線(青)

表-2 プノンペン近傍の各測線における計測結果

section #	Total Q m <sup>3</sup> /s	Meas. Q m <sup>3</sup> /s	Width m	Total Area m <sup>2</sup>	Q/Area m/s
M1	12598.5	9543.4	1765.1	16191.7	0.8
M2	11651.8	8288.4	1620.8	17449.7	0.7
M3	13761.7	10381.9	1663.5	17046.7	0.8
B1	1262.0	864.9	227.5	2736.2	0.5
B2	1245.7	909.7	225.7	2680.4	0.5
B3	1074.4	768.2	208.9	2469.9	0.4
B4	1256.8	908.0	204.1	2476.8	0.5
M4	14823.9	11115.9	1501.9	20874.7	0.7
M5	14657.0	11219.4	1868.3	28909.9	0.5
M6	8316.1	6646.9	1136.4	18490.7	0.5
M7	8334.0	6860.8	1017.5	18762.5	0.4
T1	7485.8	5750.9	430.5	4684.6	1.6
T2	7428.8	5730.6	424.5	5084.0	1.5
T3	7366.9	5687.9	447.9	5044.3	1.5
T4	7365.1	5675.7	523.2	5480.3	1.3
averaged discharge in each river	d Mekong	12670.6	averaged discharge in each section	down	13880.4
	Bassac	1209.7		middle	14740.5
	m Mekong	14740.5		upper	15736.7
	u Mekong	8325.1		average	<b>14785.9</b>
	Tonle sap	7411.7			

## (2) プノンペン近傍の流況

図-12はプノンペン近傍のメコン川、トンレサップ川、バサック川の合流及び分流地点を示す。赤線は実際のボートの航跡を示す。その航跡から対応するものが青線及び断面番号である。表-2はそのときの流量値等である。

図-12が示すように、プノンペンから考えると、M1～3はメコン川本川の下流部、B1～4はバサック川、M4～5はメコン本川、M6～7はメコン川上流、T1～4はトンレサップ川になる。この季節のトンレサップ川は、図の上から下へ流れるため、メコン川上流とトンレサップ川の合計がメコン川本川の流量になる。また同様に、メコン川下流とバサック川の合計がメコン川の本川流量となる。この計測でメコン川の本川流量を示すのは、M4およびM5であるが、これらの平均から14,740.5m<sup>3</sup>/sである。メコン川下流は3つのセクションを平均すると12,670.6m<sup>3</sup>/s、バサック川は1209.7 m<sup>3</sup>/sでプノンペンの下流側では、合計で13,880.4 m<sup>3</sup>/sとなる。またプノンペン上流側では、メコン川本線が8325.1 m<sup>3</sup>/sに対して、トンレサップ川は7411.7 m<sup>3</sup>/sであった。メコン川本線が川幅1kmを超えていて、バサック川は500m以下であるにもか

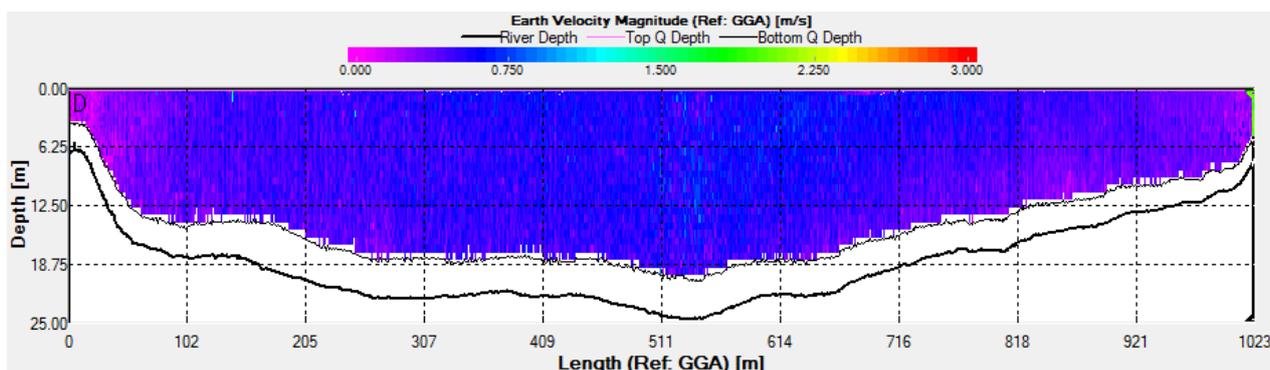


図-13 メコン川本川のM7におけるADCPの計測結果（左岸側からの距離）

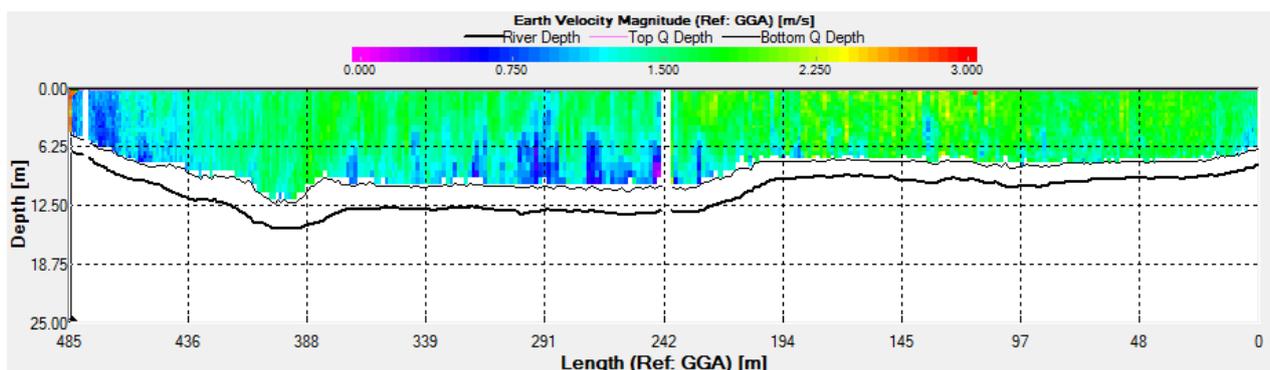


図-14 バサック川のT4におけるADCPの計測結果（右岸側からの距離）

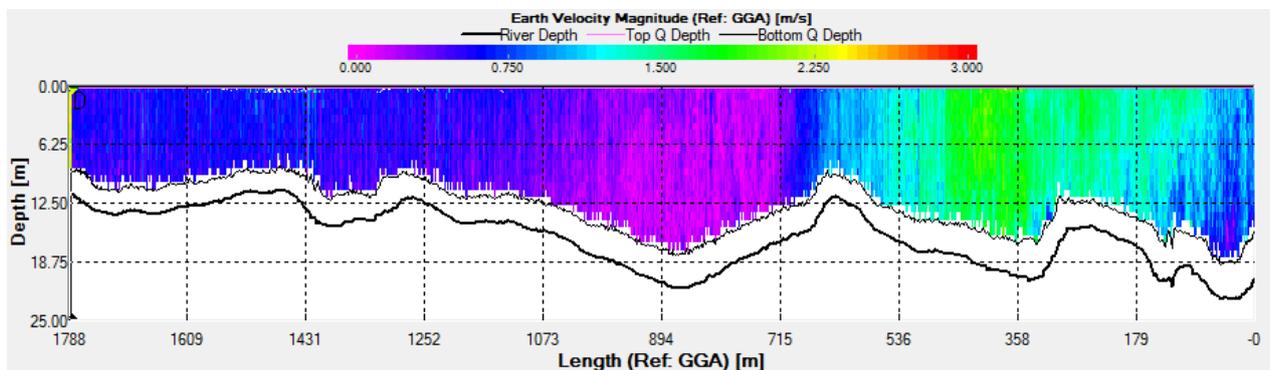


図-15 メコン川本川のM5におけるADCPの計測結果（右岸側からの距離）

かわらず、同程度の流量を持つことがわかる。メコン川本川であるM6およびM7の平均流速が0.5m/s程度に対して、トンレサップ川であるT1～4の平均流速はおおよそ1.5m/s程度である。

図-13はメコン川本川のM7におけるADCPによる計測結果を示す。この計測区間は上流約2.6kmに砂州があるが、河道の中央部が最も深い25m程度の水深をもち、お椀型をし、偏りが無い理想的な形の河道である。流速は上述のように河道全体にわたり0.4m/s程度の値を持つ。

次に図-14はバサック川のT4におけるADCPの観測結果を示す。水深はおおよそ10m程度でかなり浅いが、流速は2m/s程度の値を示す。M7のメコン川本川と比較すると、川幅が半分、水深が半分程度で流速が3倍程度の値を持つことになる。

最後に図-15はメコン川本川のM5におけるADCPの観測結果である。左岸側はメコン川本川からの流れ、右岸側はバサック川からの流れである。左岸側の流速はM7と、右岸側はT4と同程度の流速を持つ。また右岸側からの距離が約900mの周囲では流速がほぼゼロに近い。図-12、及び現地での観察によると、トンレサップ川の河川水はメコン川のそれと比較すると濁度が高く、M5の中央付近で濁度が大きく変わる箇所が見られた。

#### 4. まとめ

著者らは本報告の中で日本国外におけるADCP観測の注意点と観測の速報に関して雑感を述べた。以下ここか

ら得られた知見をまとめる。

- 1) 国外で必要な観測機材として、曳航船、使用した ADCP、橋上操作艇、GPS、バッテリー及び充電器、アンドロイド端末、光波距離計をあげ、それぞれの運搬方法、使用方法などを記述した。
- 2) 計測結果の一例として、カンポンチャムからメコン川の流量、断面変化を示した。特に川幅に応じた断面変化は大きく、平均水深が浅いところでは7mのところから、深いところでは30mにまで及ぶ。流れが偏り片方へ集中する場合には、大きな河床低下が見られる。
- 3) 湾曲部の流れは教科書どおりの形状を示した。すなわち湾曲部外側は水深が深く、内側は水深が浅い。さらにこの湾曲部の外側では大きな河岸浸食が見られた。このような河岸は、今回観測を実施したプノンペンからカンポンチャムにかけて随所に見られた。
- 4) 河岸浸食は湾曲部の外側に発生する局所洗掘によるものと、図-11で示したような平水時でも頻繁に起きうる段で構成されている。
- 5) プノンペン近辺におけるメコン川、トンレサップ川、パサク川の近辺において、異なる断面における流量観測を実施した。
- 6) 平水時の流量は、川幅が1km程度のメコン川と、500m程度のトンレサップ川がほぼ同程度の流量となっていた。
- 7) 表-1が示したように、トンレサップ川の水面勾配が1/20,000程度に対して、メコン川の勾配は1/100,000程度であった。

謝辞：本報告で使用したメコン川の水位データは、カンボジア国の政府機関である Ministry of Water

Resources and Meteorology, Department of Hydrology and River Works (DHRW)から提供を受けた。また計測の許可を、Kampong Cham province, Kanda provinceから受けた。ここに記して感謝の意を示す。

#### 参考文献

- 1) 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，河川流量観測の新時代，pp.34-41, 2011.
- 2) Atsuhiko Yorozuya, Kazuhiko Fukami: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, Proceeding of Third International Symposium on Shallow Flows, Iowa City, Iowa USA, 2012.
- 3) 土木研究所，流量観測高度化マニュアル，[http://www.icharm.pwri.go.jp/ryukan/manual\\_1.0.pdf](http://www.icharm.pwri.go.jp/ryukan/manual_1.0.pdf)
- 4) A. Yorozuya, H. Kamimera, T. Okazumi, Y. Iwami, and Y. Kwak (2013) Estimation of water surface elevation on inundated area using satellite based information. In Piantadosi, J., Anderssen, R.S. and Boland J. (eds) MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2013, pp. 2353-2359. ISBN: 978-0-9872143-3-1.
- 5) 萬矢敦啓・上米良秀行・岡積敏雄・郭栄珠：人工衛星データを用いた洪水氾濫水位の算出手法の検討～メコン川下流域を例として～，河川技術論文集,第19巻,pp341-344, 2013年6月
- 6) <http://www.dhrw-cam.org/hydrograph.php>
- 7) <http://www.rdinstruments.com/riverray.aspx>
- 8) <http://www.jal.com/ja/flight/safety/airport/baggage.html>

(2014. 2. 10受付)

# タイ国Chao Phraya川感潮域における ADCPを用いた流速観測

## FLOW VELOCITY OBSERVATION USING ADCP IN TIDAL AREA OF THE CHAO PHRAYA RIVER, THAILAND

笹川幸寛<sup>1</sup>・手計太一<sup>2</sup>

Yukihiro SASAKAWA and Taichi TEBAKARI

<sup>1</sup>学生員 学士 富山県立大学大学院 環境工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

<sup>2</sup>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 reported that flow velocity and river discharge observation using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) were carried out in tidal area of the Chao Phraya River, Thailand.

As a result of the observation, it is considered that the sea water was flowing backward until Anghong city which is located more than 50 km from Ayuttaya city. It is too difficult to observe using ADCP because the river was jammed with ships until 50 km from the river mouth in the daytime. It needs to be examined social and economic situations in the river.

**Key Words :** Flow velocity, ADCP, the Chao Phraya River, Thailand

### 1. はじめに

1982年に米国で開発されたADCP(超音波ドップラー多層流向流速計)は、欧米を中心に全世界で広く利用され、研究分野のみならず現業でも高く評価されている。我が国においても、平成24年6月に改定された「河川砂防基準 調査編」の中で、主要な流量観測手法の種類の一つとしてADCPによる手法が記載された。

開発途上国においても、利便性やコストを鑑み、ADCPを現業に利用する国・地域が広まっている。しかしながら、支援国によって高度な機器だけ提供され、附属する活用技術やノウハウなどの提供は軽視されているのが実情である。高度な機器を有効に利用し続けてもらうためには、活用技術やノウハウは継続的に支援する必要がある。

著者らのグループでは、10年以上にわたりタイ王立灌漑局に水文観測のアドバイスを行ってきた。2013年12月、タイ最大かつ社会・経済的に最重要であるChao Phraya川の感潮域において、ADCPを利用した流況観測を王立灌漑局と共同で実施したので本稿で報告する。

また、最近海外において水理・水文観測を実施するプロジェクトが多くなっているため、著者らのグループにおける問題点も合わせて報告する。

### 2. Chao Phraya川

図-1に示したのが、Chao Phraya川流域の地形図と河川網である。地形的には、北部の上流域は山岳地帯、中流域は氾濫原、下流域はデルタである。北部から流れるPing川(流域面積36,018km<sup>2</sup>)、Wang川(流域面積11,708km<sup>2</sup>)、Yom川(流域面積24,720km<sup>2</sup>)、Nan川(流域面積34,557km<sup>2</sup>)中流域に位置するNakhon Sawanで合流し、Chao Phraya川が始まる。さらに西側からSakae Krang川が流入し、そしてAyutthayaで東から流れるPasak川(流域面積18,200km<sup>2</sup>)と合流し、タイ湾へ流れ出る。一般に、上述した7つの河川を併せてChao Phraya川流域と呼ばれている。

ここで、日本を代表する河川とChao Phraya川流域の縦断形状を図-2に示す。例えばChao Phraya川に着目すると、上流端にあたるNakhon Sawanから河口までは約310km、標高差は約25.6mということから、縦断勾配は約1/12000となり、非常に緩やかであることがわかる。Chao Phraya川流域上流部(支川)縦断勾配と日本国内でも緩やかな勾配の河川の一つである信濃川(1/5000)比較しても、さらに緩やかであることがわかる。

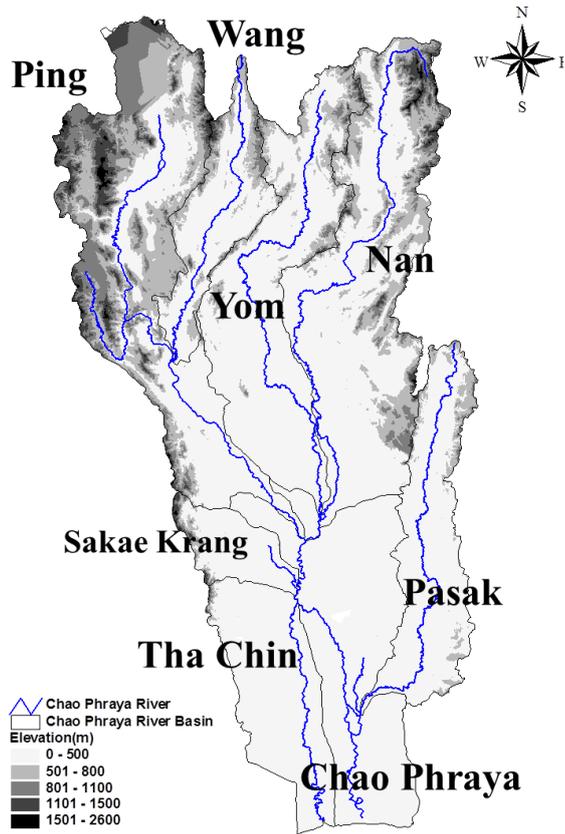


図-1 Chao Phraya川流域の地形図と河川網.

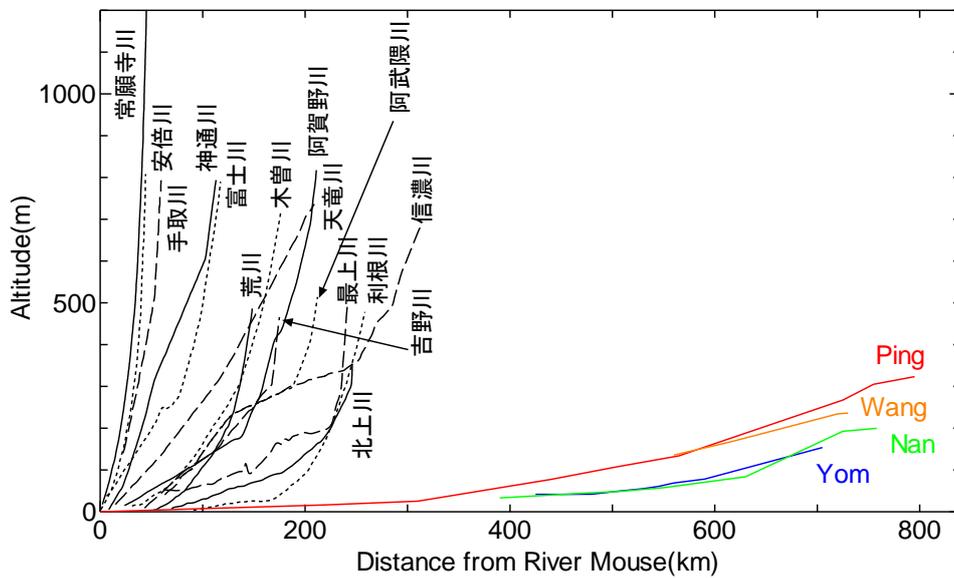


図-2 日本を代表する河川とChao Phraya川流域の縦断形状.

### 3. 観測概要

本章では、観測機材、観測場所について詳述するとともに、海外への機材搬送についても報告する。

#### (1) 観測機材

観測に用いた機材は、ADCP本体、ADCPを曳航するリバーボート、無線装備、12Vバッテリー、携行型発電機、PC、工具類である。利用した航空会社は、荷物の個数に応じて超過料金が発生するため、機材のパッケージに十分に注意が必要であった。

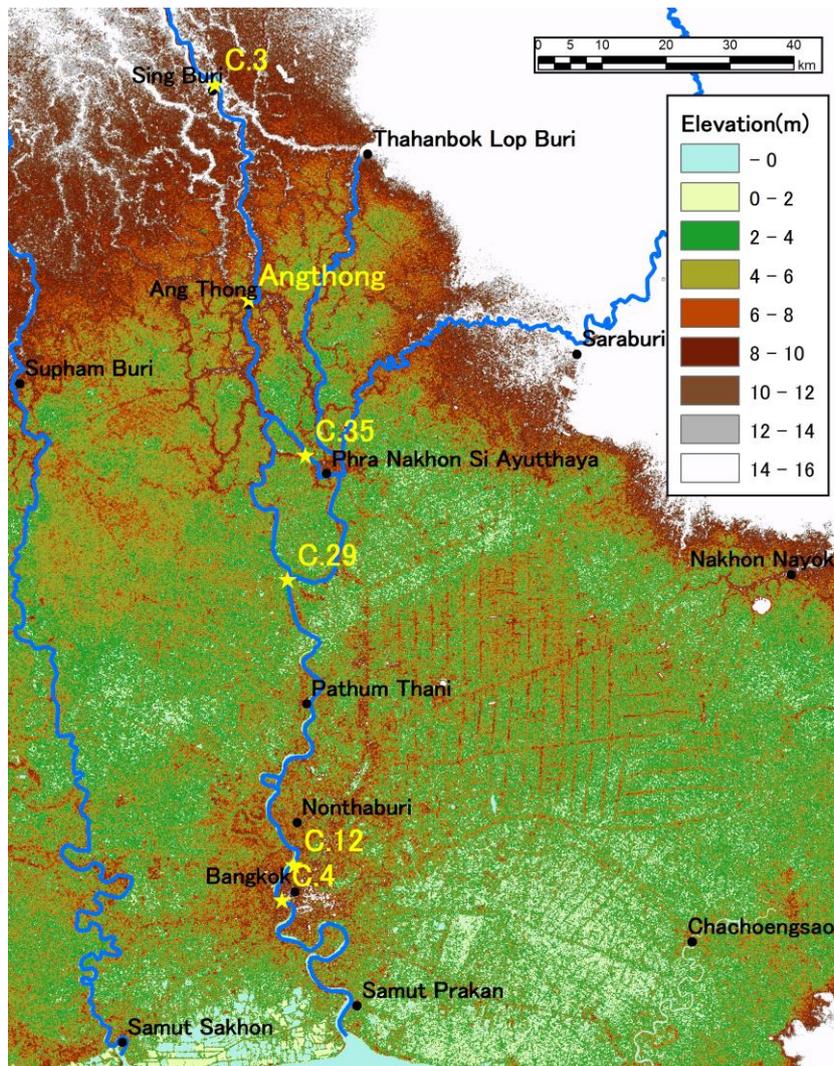


図-3 観測場所.

表-1 観測場所の詳細.

観測箇所名	都市名	北緯	東経	河口からの距離(km)
C.29	Ayuttaya	14-11-33	100-30-23	72
C.35	Ayuttaya	14-22-08	100-31-53	91
C.12	Bangkok	13-47-14	100-30-56	28
C.4	Bangkok	13-44-15	100-29-55	23
C.3	Singburi	14-53-44	100-24-14	151
Anghong	Anghong	14-35-25	100-27-06	117

また、バッテリーは預けることができないため、機内持ち込みをしなければならないが、空港のセキュリティチェックで説明する必要がある。

さらに、携行型発電機については、機内へ預けること、そして機内持ち込みも拒否された。航空会社の許可リス

トにない機材であったためである。

結局、12Vから100Vもしくは200Vに変換するための変圧器を現地で調達したが、そのために半日を要した。

## (2) 観測場所

表-2 本観測で利用したADCPの設定コマンド.

コマンドNo	Com1	Com2	Com3	Com4	Com5	Com6
計測モード	12	12	12	12	12	11
Sub-Pings	8	6	6	8	30	—
計測層厚	0.1 m	0.1 m	0.2 m	0.2 m	0.1 m	0.05 m
計測層数	170	170	60	50	25	80
アンサンプルタイム	6.23 s	5.13 s	2.56 s	2.55 s	0.101 s	1.21 s
ウォーターピン具数	3	3	3	3	7	3
ボトムトラック機能	on	on	on	on	on	on
ボトムピング数	3	3	3	3	7	3
固定観測における 流速誤差の標準偏差	6.35 cm/s	7.33 cm/s	5.44 cm/s	4.71 cm/s	2.15 cm/s	0.77 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート	アース コーディネート	アース コーディネート	アース コーディネート	アース コーディネート	アース コーディネート

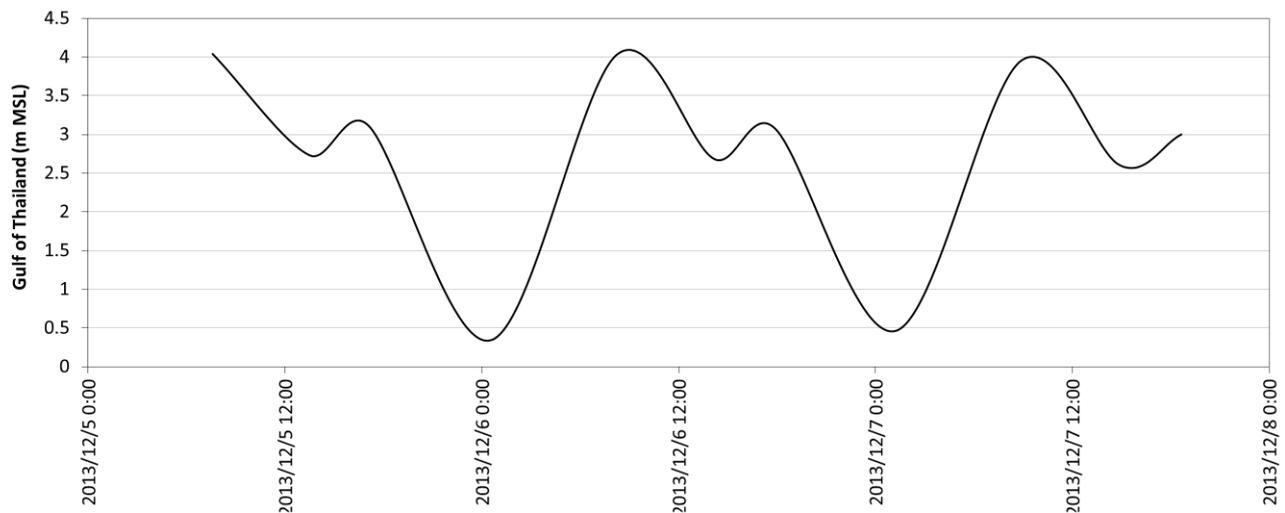


図-4 観測を実施した2013年12月5日から7日のタイ湾の観測潮位.

観測場所と位置の詳細を図-3と表-1に示す. 一般に, 河口から約100 km上流のAyuttaya付近までが感潮域だと知られているが, 科学的に定かでないため, さらに50 km上流のSingburiまで遡り観測を行った.

観測場所は, 安全に橋上操作もしくは船舶航行が可能な断面を選択した. 歩車分離されていない橋が多く, 橋上操作は限定的に実施した. 船舶については, 灌漑局の現地スタッフの個人所有のボートをその場でレンタルした. また, 渡し船事業者や釣り人にレンタルすることもあった.

#### 4. 観測結果

本観測で利用したADCPの設定コマンドを表-2に示す.

流況や移動観測, 定点観測によって設定を変更した. また, 観測を実施した12月5日から7日のタイ湾の観測潮位を図-4に示す.

##### (1) 流量観測 (橋上操作)

写真-1はC.35観測所下流の橋上でADCPを操作している風景である. 図-5はC.35観測所下流の橋上から操作して得られた観測結果である. 図中に示した値は流量, 負は逆流を意味している (以下, 他図においても同様). 往復2回の観測ともに概ね同様の流量値が得られた. 流速が小さく, 途中で橋脚があるため, 操作が難しかった.

##### (2) 流量観測 (ボート観測)

写真-2はC.29観測所におけるボート観測の風景である. 渡し船の個人事業者に船をレンタルした. 図-6はC.29観



写真-1 C.35観測所下流の橋上でADCPを操作する風景.

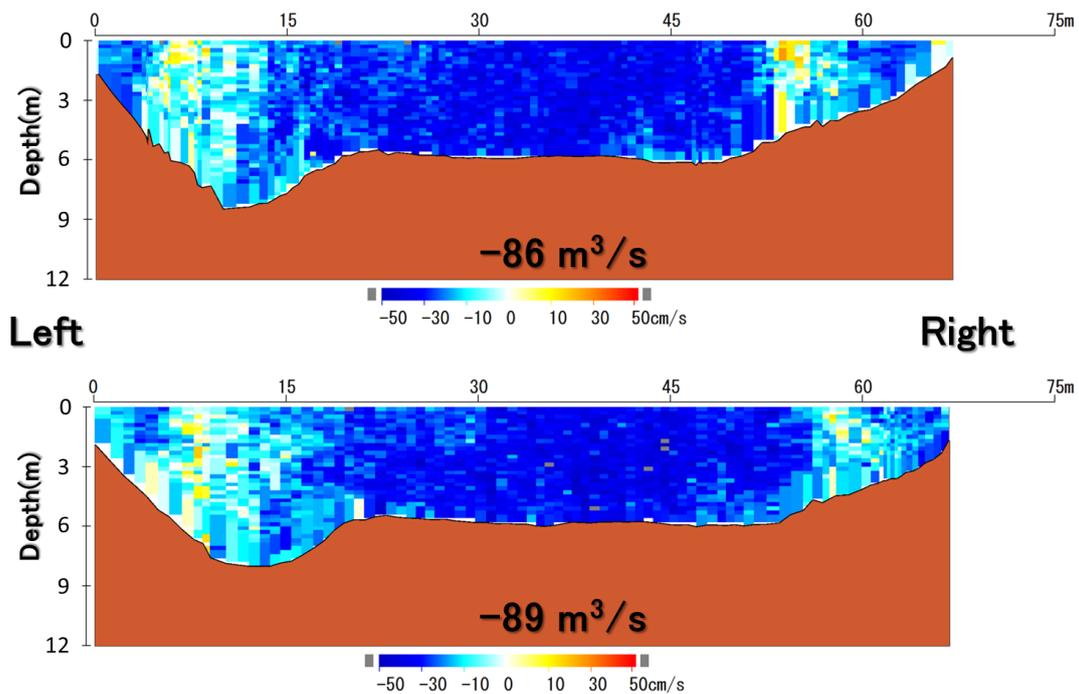


図-5 C.35観測所下流におけるADCPによる流量観測の結果(コマンド : Com3).

測所においてボート観測を実施した結果である。3回ともにコマンドを変えて観測を行った。いずれの結果ともに同様の流量値が得られた。

写真-3はC.3観測所におけるボート観測の風景である。図-7はC.3観測所においてボート観測を実施した結果である。4回の観測ともに流況は概ね同様の結果が得られた。しかし、流量値については最大約20%の誤差がある。

ボートの操作に因る影響であると考えられる。

写真-4はAnghong付近におけるボート観測の風景である。図-8はAnghong付近においてボート観測を実施した結果である。往復2回の観測の結果、流況、流量ともに同様の結果が得られており、概ね精度良く観測できたと考えられる。



写真-2 C. 29観測所におけるボートを用いた観測の風景.

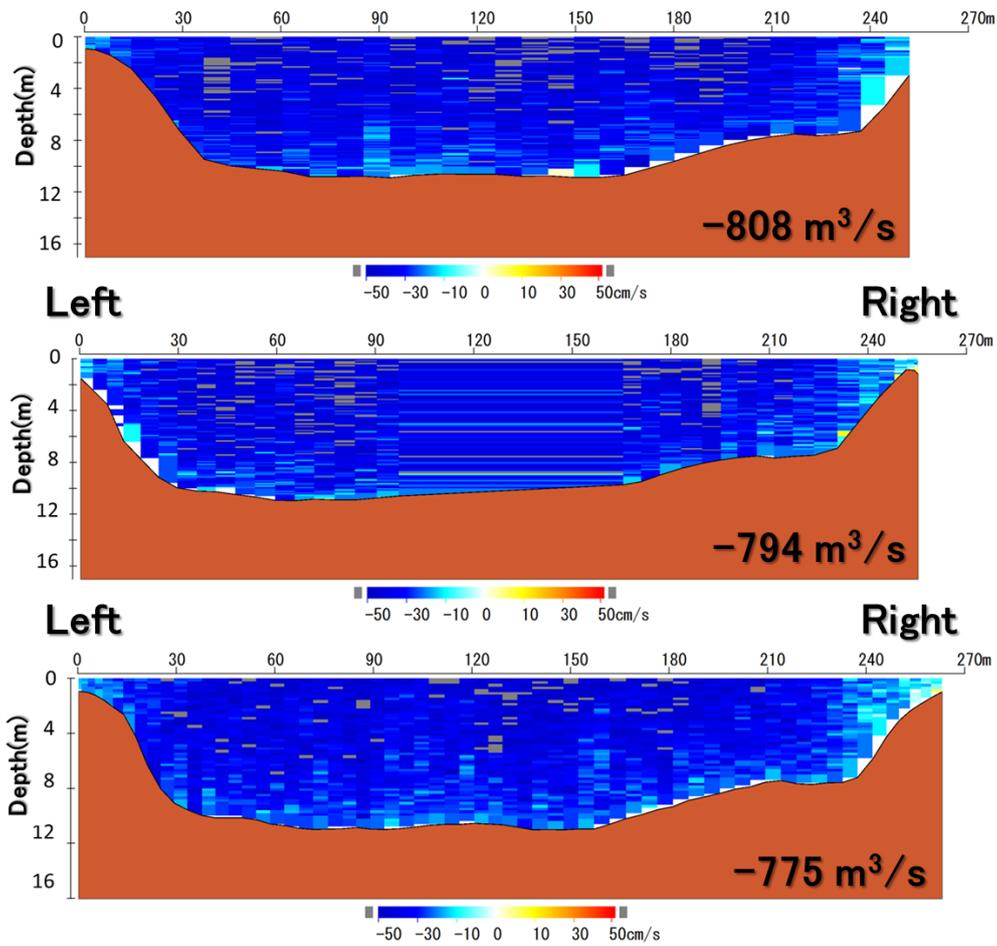


図-6 C. 29観測所におけるADCPによる流量観測の結果(コマンド上 : Com1, 中 : Com2, 下 : Com3).



写真-3 C. 3観測所におけるボート観測の風景.

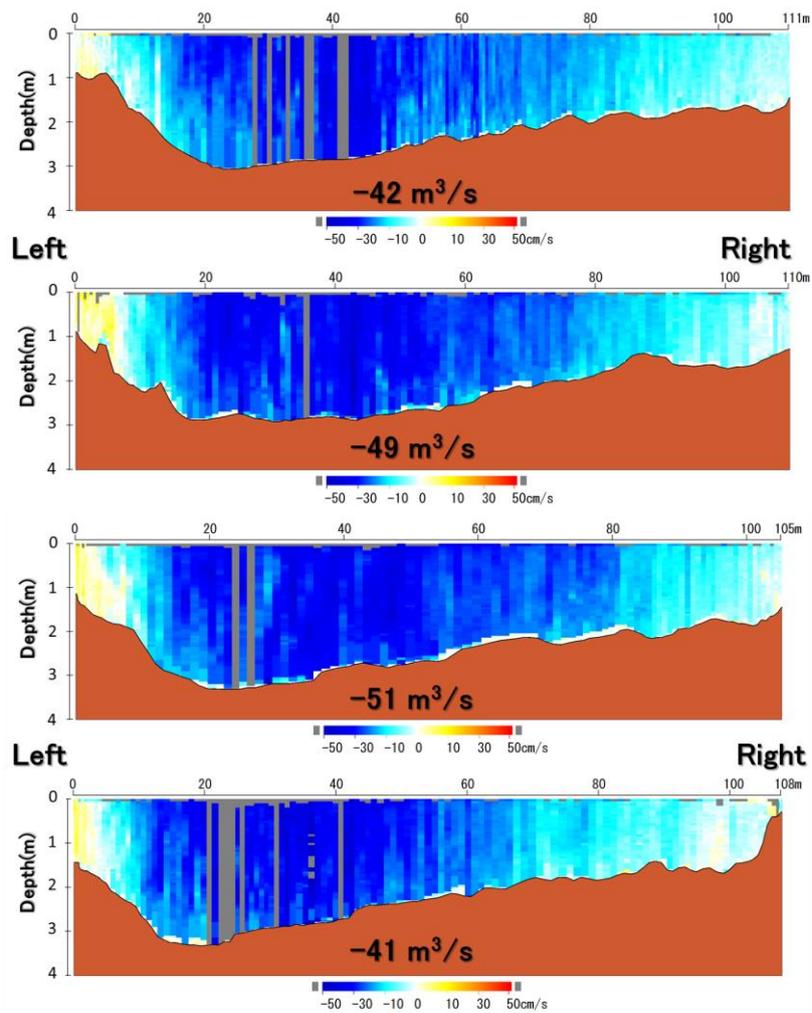


図-7 C. 3観測所におけるADCPによる流量観測の結果(コマンド: Com6).



写真-4 Angthongにおけるボート観測の風景.

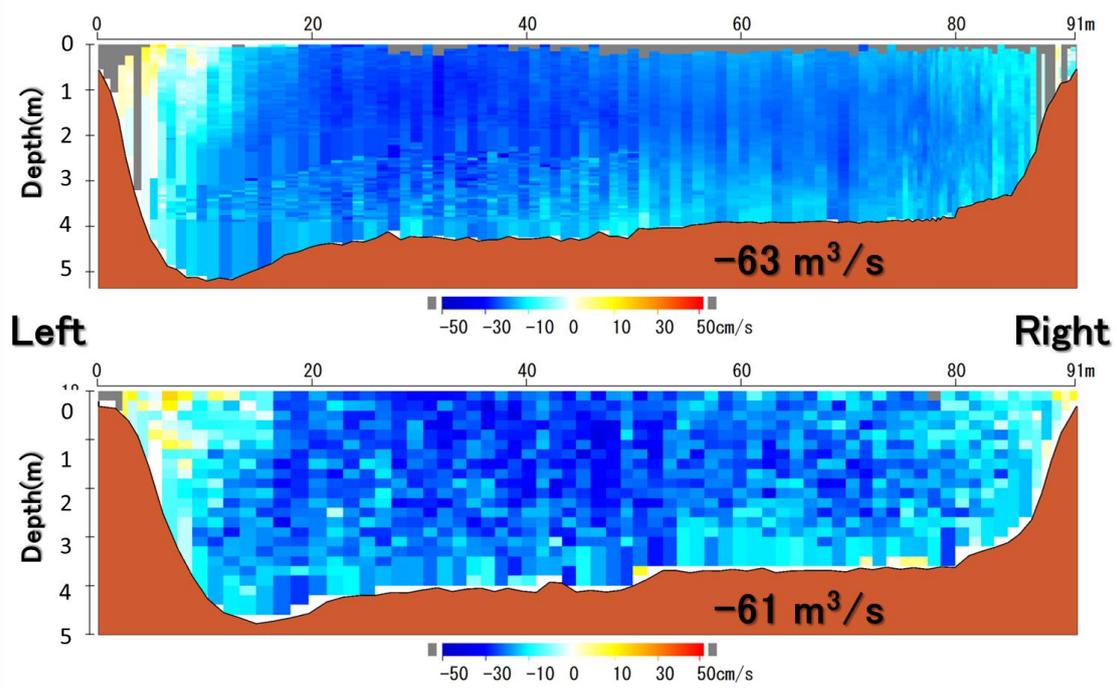


図-8 AngthongにおけるADCPIによる流量観測の結果(コマンド上 : Com6, 下 : Com4).

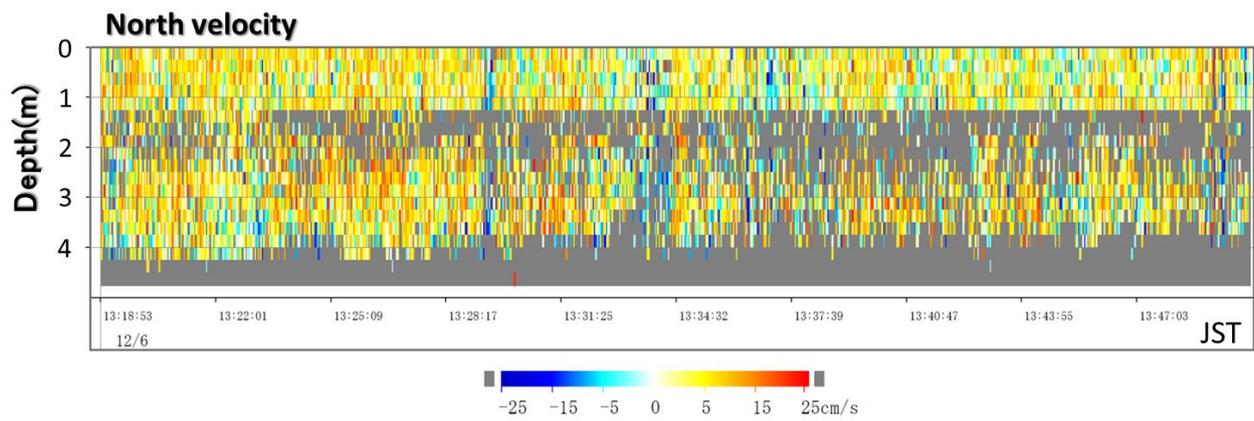


図-9 C. 12観測所におけるADCPIによる流量観測の結果(コマンド : Com4).

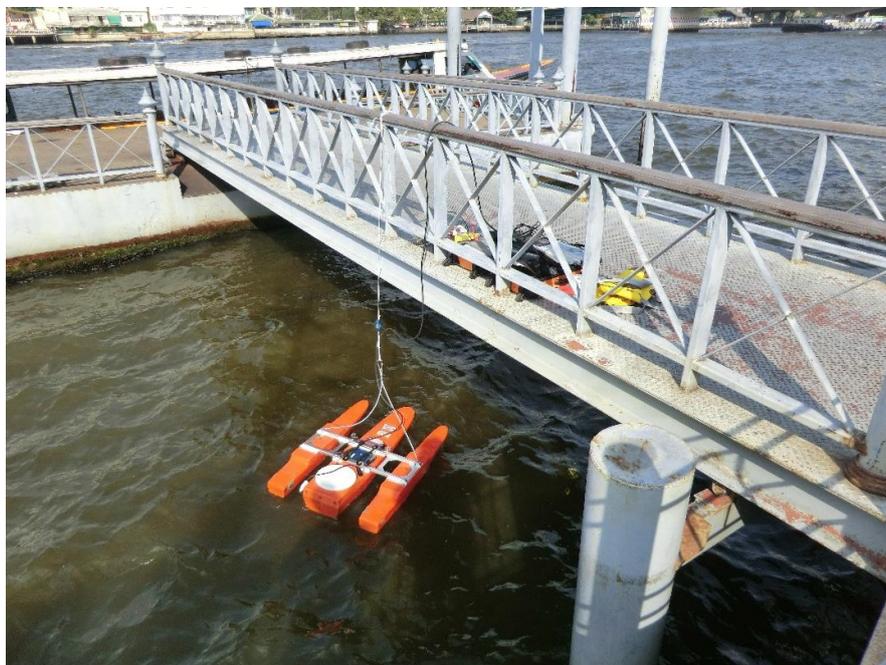


写真-5 C. 4観測所における定点観測の風景.

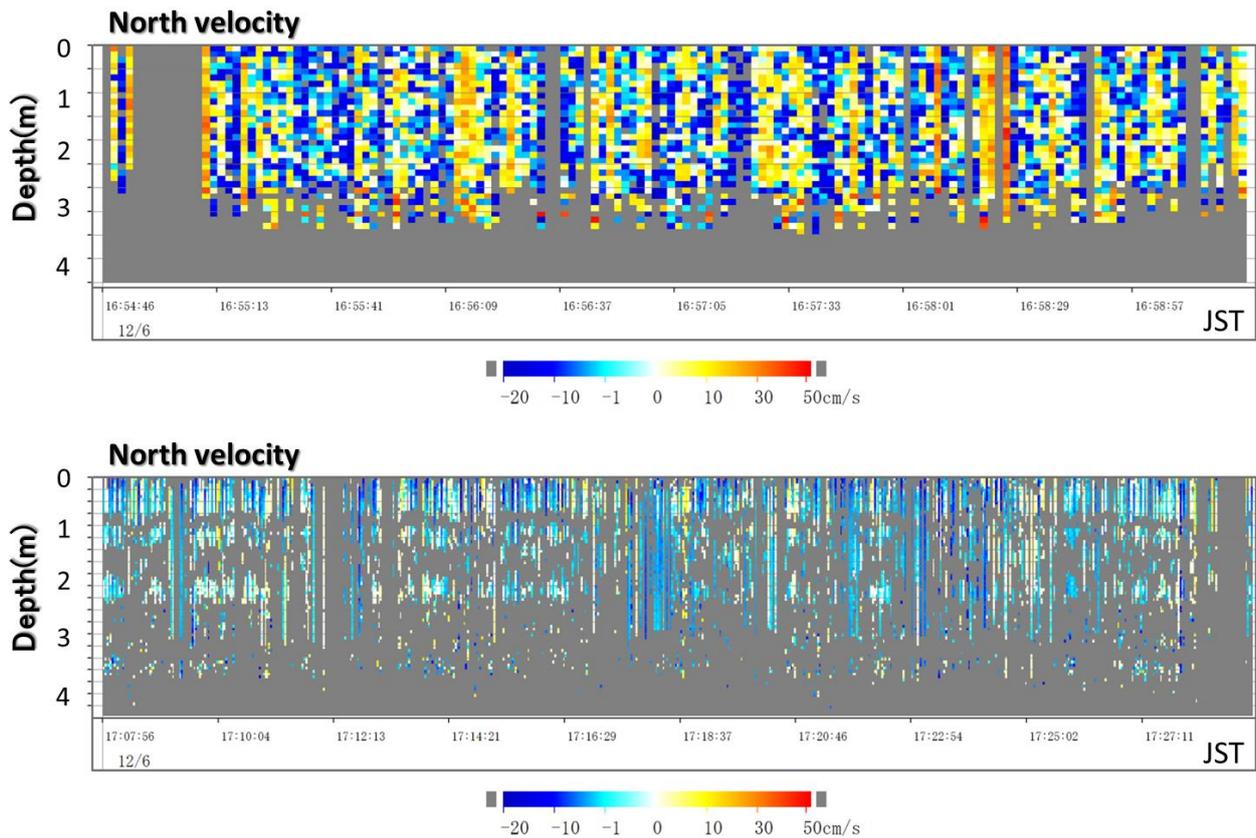


図-10 C.4観測におけるADCPによる定点流速観測の結果(コマンド上: Com5, 下: Com6)。

### (3) 定点観測

図-9はC.12観測所(灌漑局本部)における定点観測の結果(北方成分)である。北向きが正であるため、全体に逆流をしていることがわかる。水深2 m付近に灰色の欠測が多いのは、船舶の航行が多く水表面が波立ち、ADCPの揺動が大きいことが原因であると考えられる。

写真-5はC.4観測所における定点観測の風景である。Chaophraya Express Boatの船着き場に一定時間係留させてもらった。図-10はC.4観測における定点観測の結果(北方成分)である。北向きが正であるため、全体に逆流をしていることがわかる。上述したC.12観測所よりもさらに全層にわたって欠測が頻出している。商用船、観光船、公共交通船など極めて多くの船舶が航行しているため、水表面が波立ち、ADCPの揺動が大きいことが原因である。コマンド設定をいくつか試行したが、計測は困難であった。

## 5. おわりに

2013年12月、Chao Phraya川感潮域において、ADCPを利用して流況、流量観測を実施した。

その結果、経験的に示されてきた感潮域よりもさらに上流まで逆流していることが示唆された。

船舶航行の多い河口付近では、ADCPを横断させて流量を計測することのみならず、定点であっても観測が難しい。夜間の実施するなど社会・経済状況を考慮する必要がある。

**謝辞:** 観測に際して、橋田隆史氏(株式会社ハイドロシステム開発代表取締役)に助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 橋田隆史, 下田力, 疋田真, Hening Huang: ADCPによる河川洪水観測の先進技術と観測に際しての基礎的な技法について, 河川流量観測新時代, pp.19-24, 2010.
- 2) 手計太一: タイ王国・Chao Phraya川流域における社会変化と水循環の相互作用に関する研究, 中央大学博士論文, 197pp, 2006.
- 3) 吉川秀夫: 河川工学, 朝倉書店, p.93, 1966.

(2014. 2. 10受付)

## 「河川流量観測の新時代」第4巻の発刊にあたって

本年度も無事に第4巻を発刊することができました。大変お忙しいなか、多くの研究論文が投稿されました。心より御礼申し上げます。

論文集名「河川流量観測の新時代」に負けず劣らず、秀逸な研究成果が掲載されています。また、本巻はこれまでよりもさらに幅広い分野の方々からご投稿いただきました。是非、味読していただければ幸いです。

本巻の刊行にあたって例年同様に、執筆者には次のようなお願いをしました。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た。また、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。さらに、観測手法や観測技術の研究なら良いが、本来は観測結果を研究すべきにもかかわらず、観測することがいつのまにか目的になってしまっていることもある。観測で四苦八苦（混乱）することなく（四苦八苦するのは当たり前なのだが）、測ったデータをちゃんと議論しよう、という気持ちも込めて本巻を発刊した。

本巻は山口高志先生より多大な資金援助をいただき、発刊に至りました。研究会一同、心より御礼申し上げます。

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、下記ウェブサイトに論文をダウンロードできますので、カラー図表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>

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

## 謝 辞

「河川流量観測の新時代」第4巻を刊行するにあたり、山口高志先生（水文・水資源学会名誉会員、元東京電機大学教授）より多大な寄附をいただきました。ここに記して深謝申し上げます。

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」

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

私たちの暮らしを、  
「水」を通して見つめ直し  
より良い環境を創出します



※ 晩秋の駒ヶ岳

業務内容

- ・建設コンサルタント
- ・水文・環境調査
- ・環境分析・試験

登録・許認可

- ・建設コンサルタント登録 建21第5312号
- ・計量証明事業登録 第605号(濃度)
- ・測量事業登録 第(9)-9050号
- ・地質調査業登録 質25第1742号
- ・土壤汚染対策法に基づく指定調査機関登録 環2003-1-334
- ・作業環境測定機関登録 01-13号
- ・建築物飲料水水質検査事業登録 北海道57水第3号
- ・ISO14001:2004(NJE-032)
- ・ISO 9001:2008(NJQ-277)



(株) 福田水文センター

URL <http://www.f-suimon.co.jp/>

本社	〒001-0024	北海道札幌市北区北24条西15丁目2-5	TEL 011-736-2371, FAX 011-736-2393
旭川支店	〒071-8123	北海道上川郡旭川市末広東3条3丁目7-5	TEL 0166-53-8520, FAX 0166-53-8561
幌延事業所	〒098-3207	北海道天塩郡幌延町字宮園町12-3	TEL 01632-5-1302, FAX 01632-5-2507
東北営業所	〒980-0011	宮城県仙台市青葉区上杉1-6-10	TEL 022-224-1417, FAX 022-224-1140

# 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  
ウェルズ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。

流量観測手法の**高度化**を実現する

YOKOGAWA 

# RYUKAN<sup>®</sup>

ポータブル電波流速計

**その瞬間を逃がさない!**

抜群の機動性と操作性を兼ね備えたポータブル電波流速計の決定版



- ✓ 洪水ピーク時をとらえる
- ✓ 小型・軽量で設置や持ち運びが簡単
- ✓ ドップラー式で水面に非接触で測定
- ✓ 天候・場所・視程の影響を受けにくい
- ✓ 少人数による観測が可能

安全

安定

簡単

長年の実績と独自開発によるドップラー式電波流速計

特許出願中

横河電子機器株式会社