

河川流量観測の新時代

第5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

2015年2月

巻頭言

水文観測と水理解析のコラボレーション ～水文観測の「変極点」にあたって～

国土交通省水管理・国土保全局河川計画課河川情報企画室長
藤巻 浩之

この度は全く思いがけなく、日頃から大変お世話になっている富山県立大学の手計先生から本稿執筆のご依頼を頂戴しました。本書に寄稿されている先生方の足下に到底及ばない小職ではありますが、本省で河川管理者による水文観測の取りまとめを仰せつかっているという役目柄と生来の向う見ず気質で即座にお受けしてしまいました。後悔先に立たず、甚だ拙い文章であることは承知しております。何卒ご容赦ください。

冒頭から私事で誠に恐縮ですが、平成3年に入省した小職は、九州内の河川事務所の調査課に配属されました。見習い同然の小職には、見るもの聞くもの全てが大変新鮮な日々を過ごしましたが、終日雨が一滴も降っていないはずの日も、大型台風直撃され飛ばされそうな日も、毎朝9時の事務所屋上での雨量普通観測が日課であったことを昨日のことのように覚えています。当時は日記計やテレメータに加え、普通観測もまだ盛んで、長年にわたるご自身の仕事に強い信念と誇りをお持ちの観測員の方々から教えていただいたそれぞれの川の特徴や観察眼は、職場の上司からのものとは違った角度からではありましたが、何も知らない小職にとっては貴重な教えだったと今でも思っています。

今更申すまでもありませんが、河川管理者による水文観測の成果は、河川の計画策定、工事実施、維持管理、危機管理等の最も基礎的なデータとして、古いものでは百年以上にわたり活用されてきた一方、昨今は様々な面から、ひとつの変極点に来ていると改めて感じます。

今となっては遠い遠い昔話のように聞こえる方々もいらっしゃるかもしれませんが、昭和60年頃には、水文観測を担当する調査課に30人近くの職員を抱える直轄の河川事務所もあったそうです。昨今は河川事務所だけでなく、水文観測業務を受注される民間の測量会社も人員が削減され、特に洪水時の流量観測について、十分な体制が確保しづらいところもあるようです。

特に、国に比べ管理延長が長い一方、予算が十分に確保できていない都道府県が効率的な観測を如何に行うことができるか、簡易的な方法を含め、国として対応策を練り、その結果を都道府県にご紹介する必要があると考えています。

また、時間雨量100mmを越すような豪雨、それに伴う河川水位の急上昇が毎年のように全国のどこかで発生しており、そのような急激な現象変化を的確に捉えることの重要性が、特に危機管理面からも増してきていると痛感します。全国の市町村長の中には、避難勧告

を発令・解除されるにあたり、近くの観測所水位の現況及び予測データや、それに基づく直轄の河川事務所からのアドバイスに重きを置いておられる方々が決して少なくないと仄聞しています。

翻って、観測技術について考えますと、雨量については、気象庁によるアメダス、国土交通省によるXRRAINの整備に加え、携帯電話、電力、鉄道等に関連した民間会社による観測網の充実が図られているところです。

また、河川の水位や流速についても、ADCPやカメラ画像等を用いた解析技術の向上により、より正確で連続的な観測が可能になってきており、従来からの水位計や浮子による観測に加え、各観測所がそれぞれ有する固有の特徴によっては、それらの新技術の導入を一層進めることが肝要です。

一方、水理解析においては、洪水予測や河床変動計算等に関する精度向上が目覚ましいところですが、今後とも一層の解析技術向上が求められており、そのために必要な水文データを河川管理者としてどのように観測すべきか、改めて研究者の方々と一緒に検討することが非常に重要であると考えます。

水理解析の精度が向上することにより、元来が離散的な「点」のデータでしかない観測所水位が、縦断的・横断的な水面形という「線」データで補完されることにより、時空間的に連続した情報となり得る可能性を大いに秘めていると考えます。すなわち、水文観測結果を水理解析に活用するだけでなく、水理解析結果を水文観測にフィードバックすることによる、両者のコラボレーションを大いに期待しているところです。

それらを踏まえ、水管理・国土保全局としては、水文観測や水理解析に高いご見識を有する、その道の大家から新進気鋭の若手の方々のご指導をいただきつつ、水文観測に関する精度の向上、高度化、効率化を図るとともに、水理解析技術の向上と、そのために必要となる水文観測方法等に関する全般的な検討に昨年秋に着手したところです。

長年にわたり全国各地で実施され（ある意味「職人技」です）、河川の様々な分野に広く活用されているからこそ、水文観測のあり方や具体的な手法等に関し、新たな方向性や結論を導くことは生半可なことではないと自覚していますが、今後の河川管理の充実や河川工学等の発展の礎に少しでもなればとの思いから、甚だ微力ながら取り組んでいるところです。

ここまで書いてきた私どもの取り組みについては、本稿に目をお通しいただいた皆さま方からのお力添えが無ければ、何とも進みようがありません。

皆さま方からのご指導・ご鞭撻を心より期待しつつ、拙稿を閉じさせていただきます。

ありがとうございました。

目 次

巻頭言

「水文観測と水理解析のコラボレーション ～水文観測の「変極点」にあたって～」 藤巻浩之	
水文データの利活用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
中尾忠彦	
吉野川2地点間の流量の連続性の検討—疎な配置の電波流速計による—	8
山口高志, 中島洋一	
現場のための新しい水位-流量関係の構築に向けた基礎的研究	14
工藤俊, 萬矢敦啓, 小関博司, 岩見洋一	
超音波式流砂計による河川流送物質の観測(第2報)—クラウド端末センサーによる モニタリング—	22
岩熊眞起, 河嶋ちか子, 丸茂義典, 斎藤秀晴, 山口高志	
「新たなステージ」に対応した河川流量観測の提案	28
橋場雅弘, 甲斐達也, 津田哲也, 土田宏一	
スマートフォンを用いた LSPIV 観測システムの開発	38
椿涼太, 藤田一郎, Kwonkyu Yu, Marian Muste	
新しい流速計の検定方法について	43
萬矢敦啓, 橋田隆史, 墳原学, 菅野順一, 岩見洋一	
手取川下流部における河道設計に向けた取り組み～平成25年7月洪水観測とその再 現計算～	51
谷口和哉, 能澤祐明, 川上拓, 秋田麗子	
市販ソフトを用いた画像解析技術による河川流量算出に関する検討	58
本永良樹, 山本泰督, 栗城稔	
タイ国 Chao Phraya 川流域における計量科学魚探を用いた河床形状及びダム湖形状 の観測と ADCP を用いた流速観測	64
道谷健太郎, 笹川幸寛, 手計太一	

水文データの利活用

中尾忠彦¹

1 財団法人河川情報センター 河川情報研究所長

国土交通省は全国の一級水系の流域を中心に、降水量・水位・流量・水質・地下水等の観測を行い、成果をリアルタイムに公開する一方、「全国水文水質データベース」として既往のデータを公開している。同データベースの構築以来データ登録が続けられており、いっそうの整備を期待したい事項もあるが、蓄積されたデータを用いて日常の河川管理や地球温暖化など長期的な対応を行う基礎とすることができると考えられる。河川流量の年間変動、位況・流況の経年変化にあらわれた河道と流域の変化、年代別流量の比較による温暖化影響の検出などを試みた。雄物川では4月の月流量が以前に比べて減っていることが示唆されたが、水循環の変化は生活・産業と直結し、文化にもかかわることであるので、ふり向けうる資源の制約を受けながらも、その状況をとらえるよう、観測体制を維持・整備する必要がある。

Key Words :水文観測, 水文・水質データベース, 温暖化, 利根川, 雄物川.

1. 国土交通省による水文観測の現況

水循環システムへのインプットとして、気象観測とも重なるであろうが、水の量的な把握として降水量が重要である。またアウトプットとして多様なものが考えられるが、日本における水循環の中心としては河川の流水であり、その水位・流量を観測することが水循環の現況把握の圧倒的に重要な作業である。

1. 1. データの存在状況

日本では各種の機関が水文観測を実施している。これら水文観測の状況¹⁾をとりまとめると表-1のようになる。

表-1 統一河川情報システムが取り扱っている観測の諸元

	水管理・ 国土保全局	道路局	気象庁	都道府県	水資源 機構等	計
Cバンドレ ーダ	26		20			46
XバンドM プレーダ	38					38
地上雨量計	2,406	1,180	1,289	5,027	233	10,135
水位計	2,309			4,532	74	6,915
水質等	1,579	188	86	566	299	2,718
計	6,358	1,368	1,395	10,125	606	19,852

統一河川情報システムはオンライン・リアルタイ

ムで観測されている各機関のデータを横断的に取り扱っているシステムである。これらデータのうち水管理・国土保全局が観測しているものについては、データロガーや自記記録計から読み取った値も含めて水文水質データベース²⁾に登録されている。その観測所数は表-2のようである。

表-2 水文水質データベースに登録されている観測項目

観測項目	観測所数
雨量	2,646
水位	2,082
水質・底質	1,142
地下水位・水質	277
ダム・堰	111
海象	40
積雪深	124
合計	6,422

水文水質データベースは現時点において水管理・国土保全局のもとで観測されているデータが登録してある。若干の重複はあるが、

水水 DB 観測所 = 統一河川情報システムが扱っている観測所

－水管理・国土保全局以外の観測所

＋水管理・国土保全局の自記記録観測所

と考えてよい。とりわけ大きな違いは水文水質デ

データベースには、地下水の水位・水質も登録されていることである。

カオスの性質が顕著にあらわれる気象システムから降水として水循環システムに引き継がれるので、水流量も変動が激しいものであり、洪水制御を行いまた治水調整を行うためには統一河川情報システムのようなオンライン・リアルタイムの情報システムが必要とされるが、長期的なトレンドを把握し、過去の変動の中で今この瞬間の状況がいかにか位置付けられるかを知るためには水文水質データベースのようなデータベースシステムが欠かせない。

1. 2. 観測所の地理的分布

統一河川情報システムで取り扱っている観測所の地理的分布を見ると図1～4のようである。これらの図は、2014年10月5日から6日にかけて台風18号の降雨があったときの累加雨量を示している。

図-1には気象庁の雨量観測所を示す。気象庁のアメダス観測所は国全体の気象の現況を把握し、数値予報システムに入力するのに適するよう、できるだけ均等な間隔で配置されていることが見てとれる。

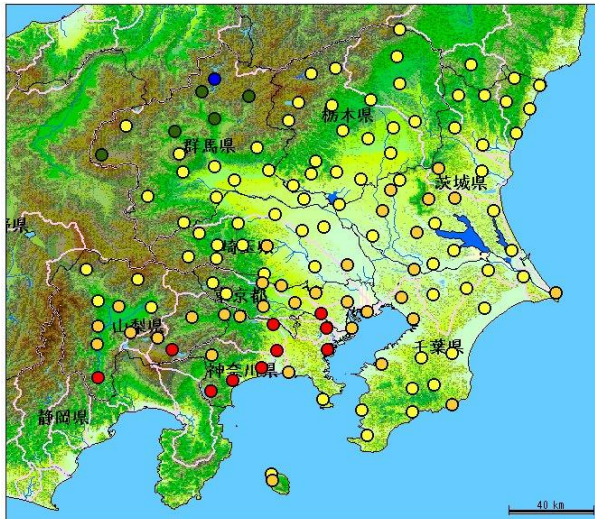


図-1 気象庁の雨量観測所

図-2には水管理・国土保全局が所管する観測所を示す。この図から、基本的には一級水系の流域の中に限られるが、山地にもかなりの密度で配置されていることがわかる。

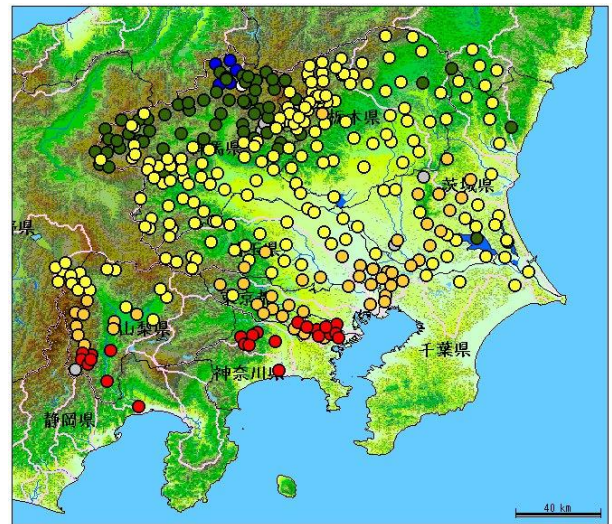


図-2 国河川の雨量観測所

図-3は道路局所管の観測所であって、適時に道路を閉鎖して交通の安全を確保しなければならないという目的のもとに配置されていることがよくわかる。

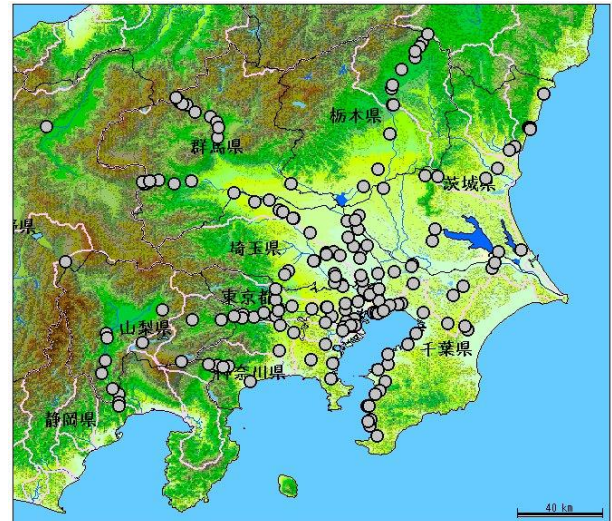


図-3 国道路の雨量観測所

図-4は都道府県など自治体の観測所であって、近年この数は大幅に増加したものであり、特に人が居住する都市部において非常に高い密度で観測されていることがわかる。

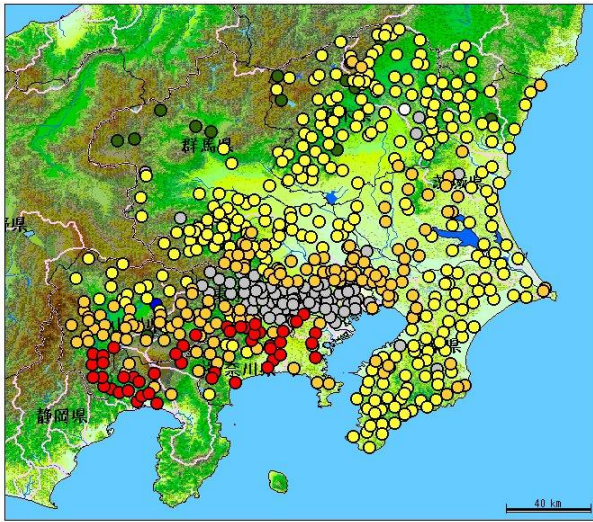


図-4 都県の雨量観測所

これらのほか、電力会社は古くから独自の観測を行っており、NTTや鉄道会社・道路会社、さらには民間の気象サービス会社も独自の観測を行い、データ提供も行っているが、地上雨量の大勢は統一河川情報システムで把握できると考えられる。

これらの図から、流域を単位とする水循環を把握するためにはこれらを総合すべきことが明かであるが、中でも「水源地」として、洪水時についても、また平水時においても、河川の流れの源となっている山地に多くの観測所を配置している水管理・国土保全局の観測所の重要性が示されていると思われる。

1. 3. データのデータベース化

水文水質データベースは河川事務所等で観測業務を進めるために必要なデータを全て格納した「水系別水文水質データベース」と、インターネットを通じて観測結果を公開するとともに、河川管理担当組織の部内においても誤操作によってデータを破壊してしまう恐れなくデータを使用するための「全国水文水質データベース」からなっている。

全国水文水質データベース（以下、「水々DB」という）で公開されているデータは図-5のように生データとそれを整理した統計データがある。観測開始以来のデータがまだ全部は登録されていない観測所が多いことが残念であるが、かなり長期間にわたって登録されている観測所もある。

水文水質観測所情報

観測所名	榑川(つばきかわ)
観測項目	水位流量
観測所記号	302081282209020
水系名	榑物川
河川名	榑物川
所在地	秋田県秋田市雄和榑川字方權29-5
緯度経度	北緯 39度36分53秒 東経 140度09分26秒
最新の零点高	T.P. 0.000m
零点高履歴	T.P. 0.000m 1918/07/16 1:00~

位置図 観測所詳細請求

水位月表検索 水位年表検索 水位表検索 任意期間水位検索 0.1m刻み水位 川の防災情報
流量月表検索 流量年表検索 流量表検索 任意期間流量検索

日流量データ登録状況 ● データ登録有り

年代	年(年代の+部)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
193*										
194*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
195*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
196*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
197*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
198*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
199*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
200*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
201*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

図-5 水文水質データベースの登録データ

現在の水々DBには、水管理・国土保全局の観測データが登録されている。登録されている観測所と登録期間についていっそうの拡充が望まれる。

登録観測所については、気象庁が観測したデータは別途データベース化されて公開されている。しかし、都道府県については、少なくとも水々DBには登録されていない。自治体としての情報取り扱い方針もあると思われる、また、観測所が増えるごとに名称・所在地・緯度経度標高といった観測所諸元、メタデータの管理が膨大なものになるが、体制整備が望まれるところである。

水管理・国土保全局のデータについても、水々DBの観測所詳細諸元によると観測開始がそれなりに古いものもあるが、歴史あるデータがほとんど登録されていない。

たとえば、高橋裕³⁾によれば、筑後川流域の「小国試験地が森林測候所と呼ばれていた時から1953年大洪水までの39年の時間雨量を継続するには、人知れぬ苦労があったようである。戦争中には試験地閉鎖の話さえあり、極度の予算不足のため雨量計を暖めるための炭を買うのにも困っ」ても観測を続けた上野巳熊氏がおられた。また現在も筑後川の基準点である瀬の下観測所の量水番は「明治18年以来の水位記録はすべて大切に保存して」いたという。「より驚いたことは、365日24時間水位が明治18年以来観測、記録、保存されていたことである。洪水時だけではない。河川敷に自費で観測小屋を建て、そこに寝泊まりして1時間ごとに量水標を読み、記録したという。」その後、筑後川工事事務所の「調査課長となられた野島虎治さんはこの話を聞くと、直ちに全記録を量水番から借りてコピーした」そうである。これらは日本の文化遺産として偉業を顕彰するとともに、そのようにして得られたデータを活用するため、データベースに登録するべきものであろう。

貴重なデータが失われるのを防ぎ、後人が損傷を心配することなく利用できるように、データベースを拡充することが必要であると思われる。

データベースの整備が十分に行われないうちは、データの活用が日常業務にあまり必要とされないという事情もあるかもしれない。当センター情報普及推進部では、目の前で起きつつある洪水に類似した例を過去データに求め、危機管理に活かすシステムを構築して発表している。水々DBのデータを河川の水管理に活かす試みの若干を次章に示す。

1. 4. 水情報国土

水情報国土⁴⁾は「水に関するあらゆる情報を収集整備し、国民がそれを共有し、活用することによって実現された、安全で多様な文化を持つ国土」と定義され、その構築に向けてハード（光ファイバーネットワーク、監視カメラ（CCTV）等）、ソフト（河川GIS、水情報国土データ管理センター等）の整備が進められている。水情報国土データ管理センターは、河川の特性和その変化を知るために関係するデータを網羅して登録し、河川管理担当組織だけでなく、国民全体で共有しようとするものである。

水情報国土ポータルサイトでは、これらのデータベースを横断的に検索してデータが入手できる。

水情報国土データ管理センターでデータが公開されると、河川管理者以外の方がデータにアクセスして河川管理者が提案する事業計画などを検証することもできる。事業の担当者としては一手間も二手間も増えることかもしれないが、そのようなことがないと事業を実施する段階で異論が続出して進まなくなる、そういう時代になっていると思われる。

水情報国土形成の一環として CommonMP のプロジェクトが進んでいる。CommonMP というのは、各種の解析技法を共通のデータで検証し、共通の表示で比較することが一つの目標になっているプラットフォームである。現在は標準的なコンポーネントを一通りそろえて、水文水質データベースから取り込んだデータを用いて流域の流出、河道の流下までを計算できるようになっているが、今後は各段階で標準以外のコンポーネント、新開発の解析技法で計算して比較できるように、大学等でコンポーネントを開発していただけたらと期待している。

2. 水文水質データベースのデータを活用した河川管理

水文水質データベースにもかなりのデータが蓄積されてきているので、それを日常の河川管理に活かすため、データの解析を試みた。

2. 1. 半旬流量の年間変動

雄物川⁵⁾の基準点椿川観測所について、半旬流量の年間変動を調べた。

日流量、半旬流量、月流量について75年間の推移をグラフ化した。

図-6に正味66年間について、半旬ごとの平均流量、半旬流量の標準偏差、平均±標準偏差の年間変動を示す。



図-6 椿川観測所半旬流量の年間変動

椿川観測所では、4月第3半旬の66年間平均流量が580 m³/sに上っており、水量豊かな川である。比流量は0.144 m³/s/km²である。

4月第3半旬の大きなピークのあと7月第4半旬の山があるが、変動が大きくて「平均-偏差」が負になる年もある。日本海側、河口から13.3 kmの地点で逆流はないが、空つゆなどもある不安定な流況であることを示している。

第3の山は11月第6半旬にくる。標準偏差もあまり大きくない安定したピークである。

日々の変化が激しい日本の河川でも、ある程度の期間で見ると大きな傾向が現れる。それを可能にするだけのデータは蓄積されていると思われる。日々の流量が過去の流量変動の中でどのような位置づけにあるかを見ることによって、きめ細かい水管理を行うことができる。たとえば、流量が極端に減少したときなどは、過去に類似した年を求めてそのときの状況を知って対応に活かすことが考えられる。

図-7は、12月第1半旬の流量の分布を示したものである。2014年12月5日の流量を2012年の日水位年表・日流量年表から推定すると380 m³/sとなり、この時期として大きく、満々と流れていることが想像できる。

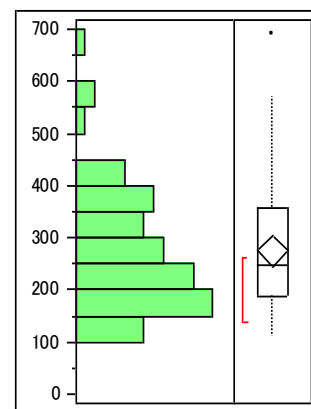


図-7 椿川観測所12月第1半旬流量の分布

このような位置づけと、河川の利用を含む河川の状態を対照させて観察することが、環境を含めた河川管理に重要となろう。

なお、より異常な事態として、洪水時に生じつつある水文状況から過去の類似洪水、ひいては被害の状況を検索できるアプリケーションが開発されて

おり、今後のデータ蓄積が望まれる。

2. 2. 位況表・流況表から見る河道と流域の変化

河川の水位は流量よりも直感的に状況を示す量として重要である。毎日の平均水位を年間の最高水位から最低水位まで並べて年ごとの豊水位・平水位・低水位・渴水位を求める。これらは降水状況によっても変わるものであるが、その経年変化、とりわけ低水位の推移を見ると河床の浸食・堆積の状況が示される。一般河川の水位はそれより下流の河道の状況を反映するので、ある河道区間全体としての洪水流下能力が現れる。そのため、水文水質データベースでは、これら豊・平・低・渴水位と年最高水位・最低水位の値とその生起時刻を位況表としてまとめている。また対応して流量についても、流況表が登録されている。

利根川栗橋観測所について、これら位況の推移を見ると図-8 のようである。

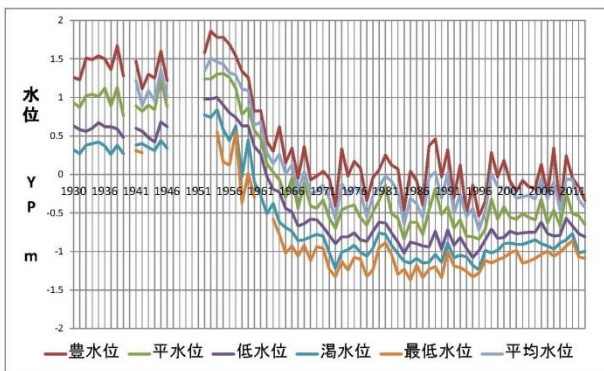


図-8 利根川栗橋の位況

図から、第二次大戦前の低水位は現在よりも1.5 m程度高かったこと、戦争後の1950年代前半にはさらに0.5 m程度上昇していることがわかる。そのころ毎年のように来襲した台風と大洪水によって河床が上昇したのではないかと推測されるが、経緯の詳細は不明である。その後1950年代後半からの低下は激しく、ほぼ15年くらいの中に1.5 m程度低下している。河川改修の進捗とともに、戦後の復興と高度経済成長のために河床材料がコンクリート骨材として採取されたこと、加えて地下水の揚水による地盤沈下も要因としてであると推測される。

1995年以降には低水位が上昇しているようである。これが河床の上昇によるものとするならば洪水流下能力の低下が懸念される。流況を図-10に示すが、図によれば2000年代に渴水流量・最小流量が増大している状況がうかがえる。これから、水位の上昇は流量の増大によるものであると推測され、豊かに水が流れるという河川景観に近づいて、好ましい方向のようである。

このように、水文水質データベースは長期の観点から河川管理の方針を考える基本資料になっていると言える。

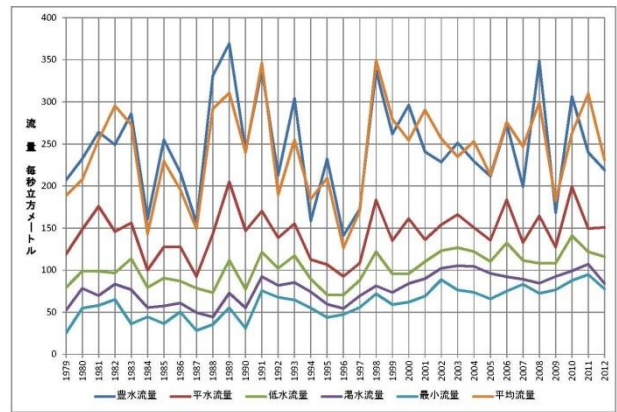


図-9 栗橋の流況

2. 3. 月平均流量の推移に見る温暖化の影響

雄物川水系の椿川観測所のデータから温暖化の影響が現れているかどうか調べた。

図-10に6つの期間、すなわち1938-43、1952-57、1966-71、1980-85、1994-99、2006-12について平均した月流量の年間変動を示す。これによると、1985年以前と1994年以降の間には4月の平均流量において明らかな差があるように見える。すなわち1994年以降には4月の流量が減っている。

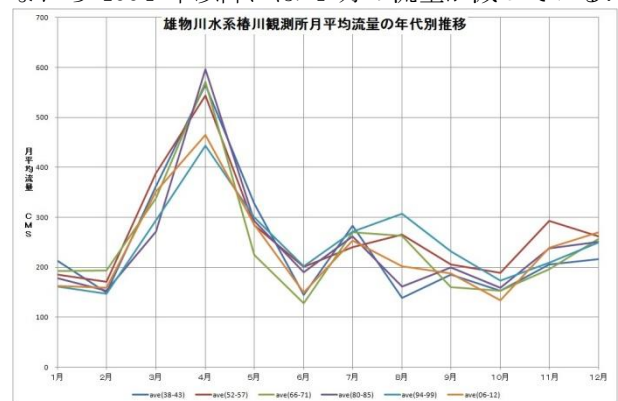


図-10 椿川観測所月平均流量の年代別推移

これが統計的に有意なものであるかどうかを調べるため、66個年について4月の流量の推移を見ると図-11のようになる。図-11には回帰直線を記入してある。

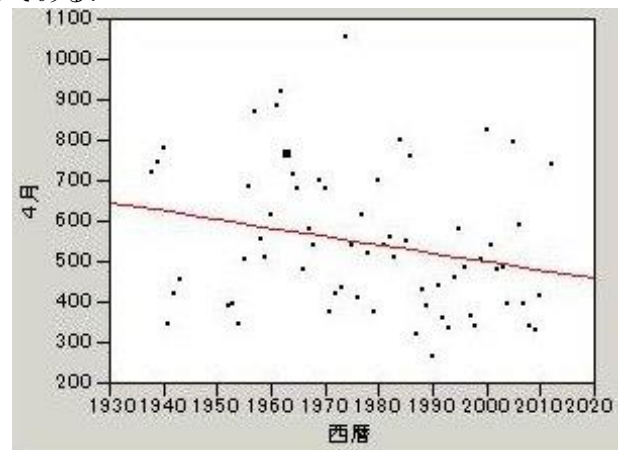


図-11 椿川観測所4月平均流量、年ごとの変化

回帰直線式は、

4月の平均流量 = 4657 - 2.07 * 西暦年

となり、係数-2.07のt値は-2.00、P値は0.0499であって、5%の危険度で有意である、言い換えれば、95%の確かさで、4月の流量に減少のトレンドが見られる。

ただし、ほかの月については統計的に有意な傾向が見られなかった。

IPCCが95%確かだというのと意味合いが異なるかもしれないが、統計的には図-11の程度の変動が「有意」ということになる。3月及び5月についても同様に解析したが、有意な傾向が現れなかった。また、融雪期の最大流量がいつ発生するかということについても特段の傾向が現れなかった。日本海側の他の水系では融雪が早まる傾向が現れているとのことである⁶⁾が、温暖化の影響も気温はともかく水循環については年平均といったような単純な解析では検出できない段階であるとも考えられる。

温暖化の防止についてはIPCCによる累次の報告があり、気候変動枠組み条約などの努力もされているが、すでに排出された温室効果ガスの効果や、開発途上国の生活を向上させるためにはエネルギー消費量も増えざるを得ないことから、当面温暖化は継続するものとして、その影響を早期に検出し、対応するということが平行して行わなければならないであろう。

観測を地道に続けてデータを蓄積しながら、年々の変動に対応して、水管理・環境管理を行ってゆく必要がある。

3. 21世紀の水管理に向けて

温暖化についてIPCC報告書及び若干の啓蒙書によって考察してみると、今後温暖化の影響が水の分野で顕在化してくる可能性が高いように思われる。水循環基本法が成立・施行されるなど、水循環・水

環境について関心が高まってきているが、何の施策を行うにしても現況の把握が重要である。

平地に降る雨も国民生活の上で重要であることは言うまでもないけれども、水循環の観点からは山地に降る雨が重要である。そしてアウトプット、中間変数としては河川流量が重要である。このように考えると、水源地である山地にも多くの雨量計を配置し、河川の流量を測っている国土交通省の観測網は非常に重要である。公共予算の削減という大きな制約があり、そのもとでは、観測精度を維持しながらも、省力化・省資源化を図る必要がある。

本文に取り上げることができなかったが、衛星・レーダといった、間接的であっても広い範囲をカバーし、面的な広がりを持った情報を与えるリモートセンシング技術については、省力化という点でも期待するところが大きい。

また、年ごとの流量変動がいかに大幅なものか、その一端を雄物川で見ることができたが、水管理の現場においては流量変動があるのが河川であり、自然なのだという前提に立って、いかなる変動が好ましいのかという問題についても研究を重ねるべきである。

図-1から図-4までは国土交通省「川の防災情報」の画面を用いた。また、図-7と図-11は、統計ソフトJMP version 5を用いて作成した。

参考文献

- 1) 中尾忠彦：水文観測の現況と展望：水文・水資源学会 河川流量観測の新時代vol.1, 2010.
- 2) 国土交通省：水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 3) 高橋 裕：社会を映す川, 鹿島出版会, 2009.
- 4) 国土交通省：水情報国土データ管理センター, <http://www5.river.go.jp/>
- 5) 国土交通省河川局：雄物川水系河川整備基本方針, 2008.
- 6) 山田正中央大学教授の教示による

(2015.2.13受付)

HYDROLOGICAL MONITORING SCHEME IN THE AGES OF GLOBAL WARMING

NAKAO, Tadahiko

The Water Management and National Land Conservation Bureau, Japan is operating a nationwide hydrological observation network to get vital data for achievement of sound hydrological process. The Hydrological and Water Quality Database has been compiled and maintained to share the data with the general public. The author has shown a way to take advantage of the database for daily and long-term water/river management. Using the data he has also made a preliminary analysis of daily discharge at the Tsubakigawa Station of the Omono River located in the North-Eastern Region of Japan, where snowfall is most important source of irrigation water. There, discharge in April has shown statistically significant decline during last 66 years.

吉野川 2 地点間の流量の連続性の検討 —疎な配置の電波流速計による—

FLOW DISCHARGE CONTINUITY BETWEEN 2POINTS
ALONG THE YOSHINO R.BY POORLY INSTALLED
RADIO CURRENT METERS.

山口 高志¹・中島 洋一²

Takayuki YAMAGUCHI, Yoichi NAKAJIMA

¹水文水資源学会 名誉会員 (〒277-0863 千葉県柏市豊四季645-14)

²(株)横河電子機器 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-23-13)

Flow discharge continuity between 2points along the Yoshino R. had been well observed, but after 2005 the discontinuity had occurred.

In the report, investigating the retocty data of radio- current meters and floods of 2 points, discussing the causes of the disconinuity, countermeasnres, adding radio current meters and deciding stagnant areas , are proposed.

Key Words : Floodflow discharge ,radio current meter.

1. はじめに

1.1 電波流速計の現状

電波流速計は、1985年あたりから、河川への適用性の検討が始められ(1~4、5)、徐々にその有効性が認められ、1989年には現地に設置され、2000年頃には20余ヶ所に達した。その特徴について、まずメリットから触れれば、照射した地点の表面流速を水面に非接触で、ほぼ確実に採取し、オンラインで流量データを提供できることが大きいメリットであろう。浮子にしても、すぐれものの ADCPも人力に頼らざるをえず、時間もかかり、また接触機器であるため危険もあり、なかなかオンラインというわけにはいかない。

加えて橋上流側に設置、観測するため、流速の横断分布に相対に急変はなく、ピークによる後流の影響の大きい下流に比べて、設置台数も相対に少なく、また水深方向補正係数 f も0.85に近いものと考えられる。

デメリットをいえば、上述表面流速のみ、一点の流速という点などが挙げられ、同じ表面流速ながら同時多点という画像処理法に対してひけめが見られ、加えて同法はカメラの解像度向上などで性能をアップしているようであるが、追跡物(浮遊物、白波?)の確認手法のソフトなどで、実用今一步のようにも感じられる。

他に雨による欠測、緩流(出水の下り、平水)には弱い点などもデメリットに挙げられよう。比較が本論の趣旨ではないので、これ以上は触れない。なお参考までに

アメリカでも、電波流速計流速計の利用が始められている(6)。

また、最近冗費節約ということで、停止している電波流速計が増加し、故障後未修理などを加えると、稼働している電波流速計は2,3カ所になっている。なお、それに代わって可搬式電波流速計がその簡便さから普及し始めている。

1.2 吉野川 2 地点間の流量の連続 (これまで)

吉野川での電波流速計の設置は、上下流 2 地点間の流量の連続の達成を目的に上流の瀬詰大橋 (36k) および下流阿波中央橋 (25k) に設置された。ただし単年度で設置されたため予算の制約により、これまで既設置のものに比べると、1 台の電波流速計の担当幅は飛びぬけて大きかった。

設置後の2004年、この年は日本上陸台風が10を数えた年であったが、4つの出水が吉野川をおそい(1つは計画高水規模)、多くの貴重な結果を残した(7,8)。

その後筆者は、これまで全国に設置された電波流速計が観測したデータから得られた知見を、2008年に12頁のパンフ(8)に、そしてその増補版として2014年に20頁の小冊子にまとめた(9)。その中に、吉野川 2 地点間の流量の連続について、2008年版には2004年の4大出水で成功したとし、その後2014年度版では2005年の出水で無残にも不成功に終わったとし、その因をあまり詳細な検討も加えずに、台数が少ない故以に帰していた。そ

してその後、上流の瀬詰大橋の機器の更新（2011～13停止）もあって、2地点間の流量連続に関する検討は休止していた。

しかし2014年の出水を機に再び検討を行ったところ、筆者のまったくの不注意による結論であることが判明したので、ここに報告する。

2. 2地点観測流量の連続

2.1 瀬詰大橋のデータ検討（1回目のトライアル）

2014年8月に続けて2出水があり、いずれも10,000m³/s (Qmax) を越え、瀬詰大橋の電波流速計も更新されたこともあり、そのデータから眺め始めた。

型通り、H～Vsiから眺めたところ、まずch.1（最左岸）のH～Vsiが在来とは大きく変化していることに気付いた。それを示す前に、ハイドログラフ t-Vsiを見ていただこう（図-2.1）。図示の通り、他地点とはことなり、始めから終わりまで高流速を保っている。

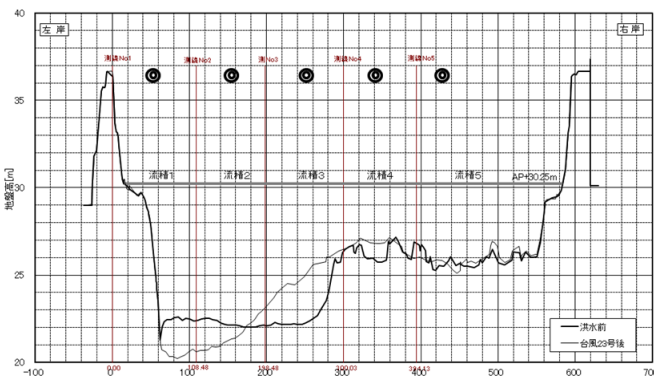


図-2.3 横断面（瀬詰大橋、4出水前後）

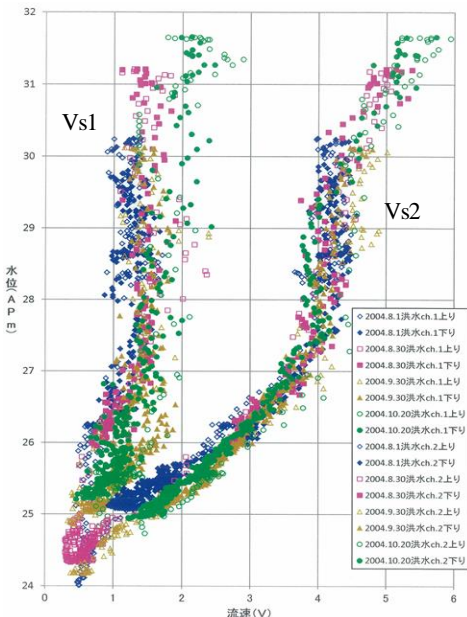


図-2.2 H～Vs1～2
（瀬詰大橋、2004、4出水）

この現象に少しこだわって、2004年 H～Vs1を図-2.2（Vs2も併記）に、その時の急激な横断変化を図-2.3に、2005.9、2011.5、2014年の3出水を図-2.4（断面変化 図-2.5）に示す。

まず、図-2.2、断面の激変があったにもかかわらず、断面最大流速 Vs2 は高値安定、Vs1は微増あるものの、低い値安定である。それが、2005年に急増（逆ループ含み）、その後はH=26～27m付近でのふくらみが目立っている。

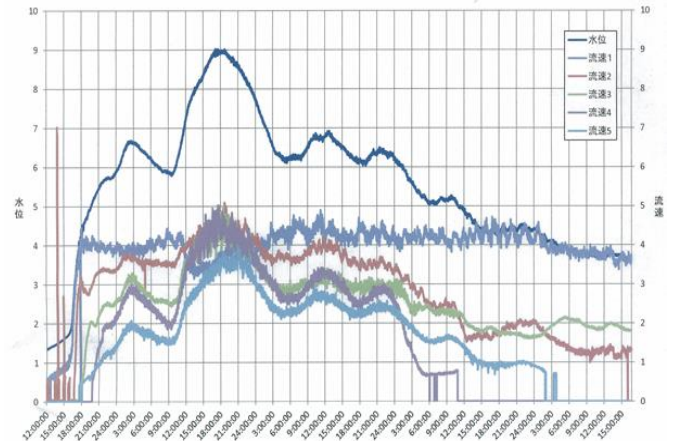


図-2.1 H、Vsiのハイドログラフ

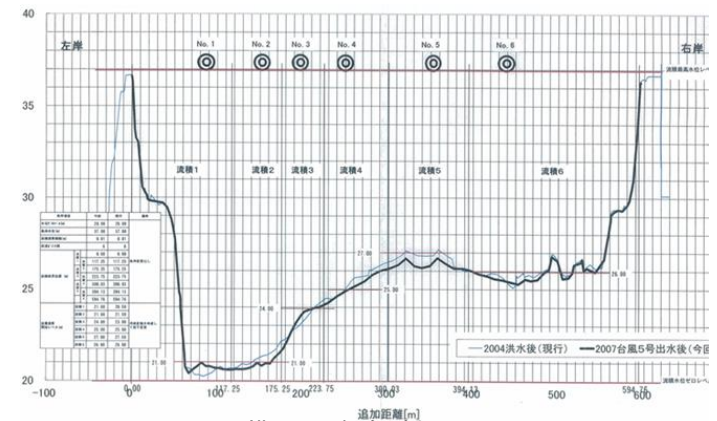


図-2.5 横断面（瀬詰大橋、2004、2007）

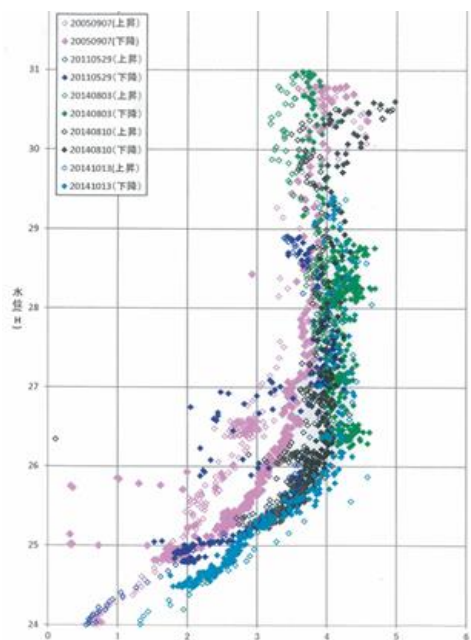


図-2.4 H～Vs1
（瀬詰大橋 2005,2011,2014（5出水）

ここでは、2地点間の流量の連続というテーマとは離れるが、原因について少しだけ考察を加えておこう。

とにかく断面変化に対応しない流速の変化（増加）があったのであるから、上流側の流れの変化に原因があると考えられる。ここで上流の空中写真を紹介する（図-2-6～7）。この地点は、主流が右岸よりから左岸よりに変化する地点であるが、その地点が下流に向かって徐々に前進していることが読みとれ、左右岸をへだてている砂州高を下げ、左岸寄り流量を増加させ、Vs1を増加させたと推量される。なお、堤防法線形状も、見逃せない点である。

2地点間の流量の連続の問題に話を戻して、あらためて図-2.5の横断図（流速計担当幅）を眺めると、ほとんどの水位で最大流量を示したVs1の担当断面が妥当でないのに気付く。

つまり、2004年当時のように、Vs1が低流速である場合は、高水敷上堤防まで、その流速で代表させても誤差が小さかったが、断面最大流速が最左岸にあらわれては、影響が大きすぎることになる。

ここでは1つの試算としてその影響の大きさを確かめるべく、 $\Delta Q1=Vs1 \Delta A1$ の1/2および1/3を減じて下流阿波中央流量（-時間早め）ハイドロと比べてみた。

相対に一致度のよい例（図-2.8）、少し悪い例（図-2.9）を示す（1/2 $\Delta Q1$ 減は省略）。ピークは流下して低減すること、低減部の不一致は、一律1/3 $\Delta Q1$ 減らしたためでもあり、当初の不一致の主因は、Vs1の扱いにあったと考えられる。

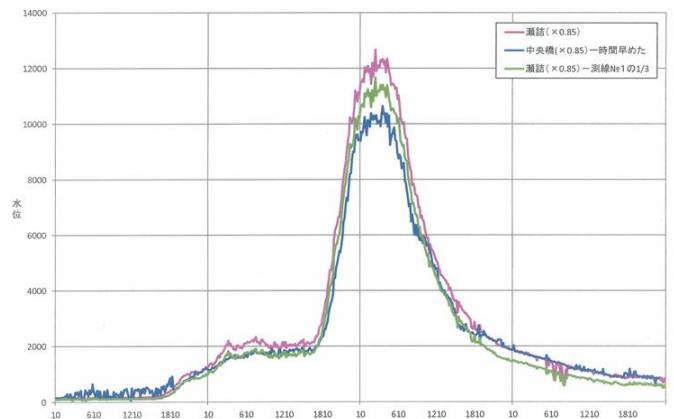


図-2.8 流量ハイドログラフ
(瀬詰、中央(1時間ずらし) 2005.9)

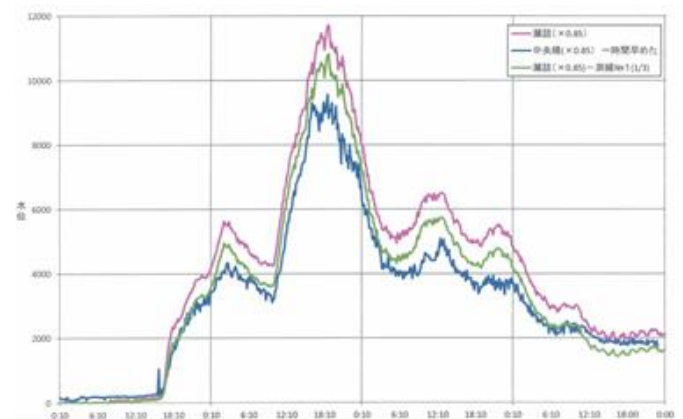


図-2.9 流量ハイドログラフ
(瀬詰、中央(1時間ずらし) 2014.8)

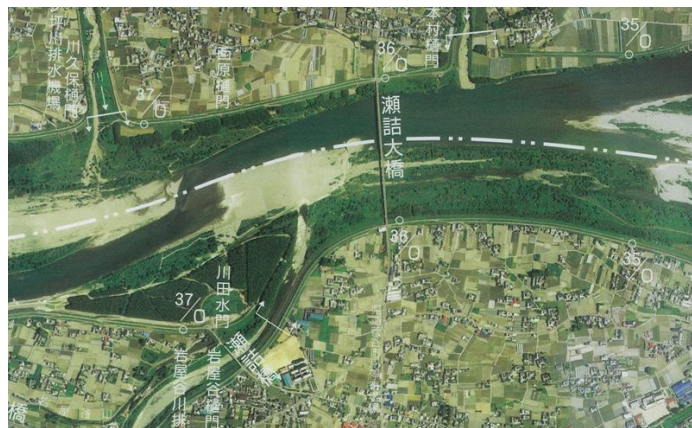


図-2.6 空中写真（瀬詰大橋、2002.5）



図-2.7 空中写真（瀬詰大橋、2012.10）

2.2 2回目のトライアル

2014年11月徳島河川国道事務所に、とりあえずここまでの報告に行き、

- i. 阿波中央橋については、前報告後(10)それほど変化がないこと (図省略)。
- ii. 瀬詰大橋については、ch.1のVs1の急変を含めた流況の変化があったこと。とりわけ測器配置上、両端部どちらかに最大流速が出ると、堤防沿いの緩流速部までその影響が出て、流量の過大評価につながる、ましてそれが低水路に設置されている場合、影響が大きいこと。
- iii. 電波流速計の追加についての検討は別途、イ) 洪水流観時、可搬式電波流速計での懸案地点(複数以上)の補足観測、あるいは、ロ) 過去の浮子観測データを用いて横断分布を作成し(因みに浮子は電波流速計の倍、投下されている)、その追加の必要性の検討

などを提案した。その後、現地踏査を行い、あらためて死水域、瀬、河状の変ぼうなども観察した。

本報告では、提案した2014出水の浮子によって下流側流速分布を検討し、現状での流量算出の改善法の検討および流速計追加の必要性の高い場所の指摘などを行って見る。

2014年8月の2出水の浮子観測データを用いて、瀬詰大橋および阿波中央橋下流の流速分布を調べてみた。

$Q_{max}=12,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度ではあったが、流量3段階についてのそれぞれの地点の流速分布を図-2-10～11に示す。

まず、瀬詰大橋については、前にも指摘したように低水路左岸側(No.2、No.3)は、流量低下にともなう流速低下があまり見られず、左岸偏流は同様に認められた。また、両岸No.1、およびNo.10、No.11は、 $Q=12,000\text{m}^3/\text{s}$ までは流速0であった。左岸側高水敷部分40～50mおよび右岸堤防から約100mは死水域と考えるのも一法と思われた。

もう一点、No.6の地点(高水敷と低水路のさかい付近)の流速の低下が見られる。上流からの左岸への偏流と直進流のさかいと思われ、これはch.4がカバーしていると考えられる。

阿波中央橋については、電波流速計が一台のみの左岸高水敷、設置のない右岸側高水敷、およびワンド右の堤防までの区間が興味深い。例えば、No.3とNo.4は当然相関が高く、 $V3=0.9V4$ 程度であったが、No.2とNo.4は全く相関がなく、No.2は恐らく直上樋門からの、あるいは派川からの流量と相関すると考えられる(図-2-12.1～4)。

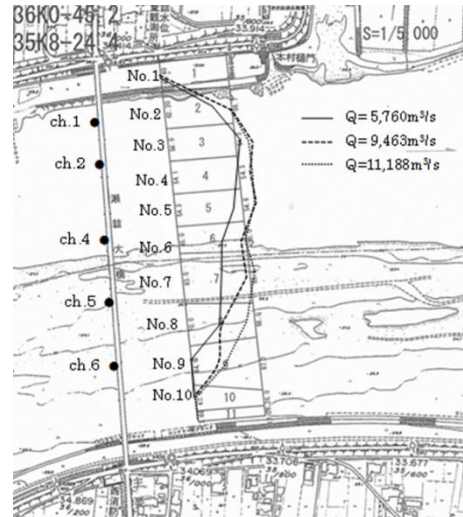


図-2.10 浮子による流速分布図
(瀬詰大橋、2014.8月、2出水)

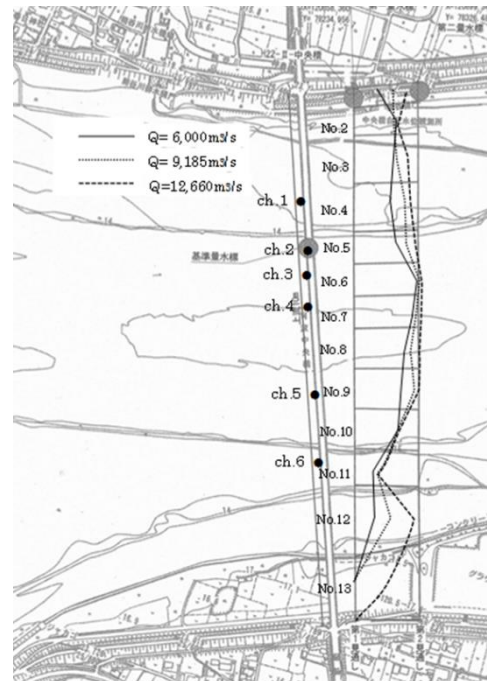


図-2.11 浮子による流速分布図
(阿波中央橋、2014.8月、2出水)

右岸高水敷の流速(No.11)は、全体としてワンド水位が本川水位より高いことから、No.12と相関が高いと思われたが、それほどでもなく、またNo.10ともあまりなかった。強いて言えば、両者の6割程度の流速であった。電波流速計が必要な地点といえよう。

最右岸部は、 $H=5.1\text{m}$ までは流速0で、それを越えるとワンド流速(No.12)の6割を示した。

以上の検討結果より、それぞれ2地点での流量計算法を以下のように変更することにした。なお、阿波中央橋の横断を図-2.13に示す。変更点①～④は、すべて流量減となるものである。

	case1	case2	case3
瀬詰大橋	在来通り	①最左岸 0~40m (40m) 死水域	③右岸より高水敷 550~610m Vs6の60%とするH \geq 3.8m
		②最右岸 500~600m (100m) 死水域	
阿波中央橋	在来通り	④最右岸 720~830m 死水域	Vs6の60% H \geq 5.1m

結果を図-2.8~9と同じ出水に対応して、図-2.14~15に示す。前回とほぼ同よう、一方で好結果、一方で差が大きいという結果になった。

地点毎の効果についていえば、在来計算に比べ、ピーク流量 瀬詰11,700→10,500m³/s、中央 9,500→9,200m³/s (2014.8.2~5出水) というように、瀬詰1000m³/s減に対し、中央300m³/s減と、差が減少する方向であることがわかる (case 3がまだ計算未了で紹介できないが、これは同よう差が縮まる方向である)。

以上、十分といえる検討ではなかったが、上流 $\Sigma Q >$ 下流 ΣQ の原因の解明に一步前進したのではないかと考えている。

今後電波流速計の増補、そのための出水時調査などを提案して参りたい。

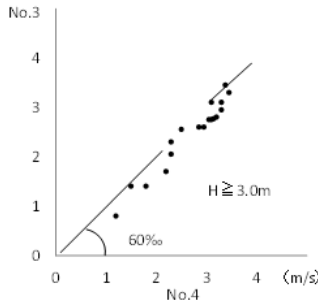


図-2.12.1 浮子流速相関図

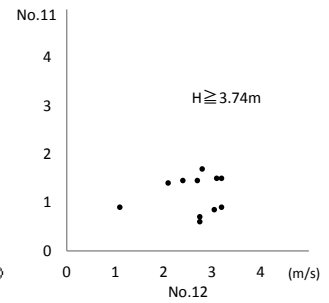


図-2.12.2 浮子流速相関図

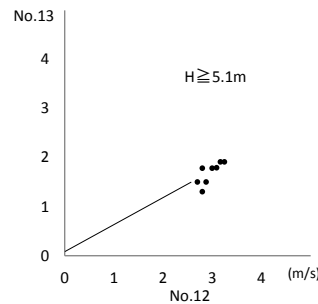


図-2.12.3 浮子流速相関図

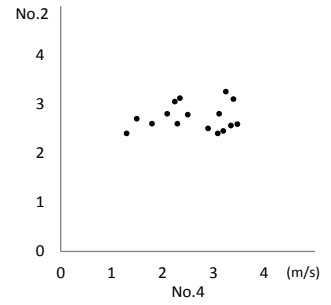


図-2.12.4 浮子流速相関図

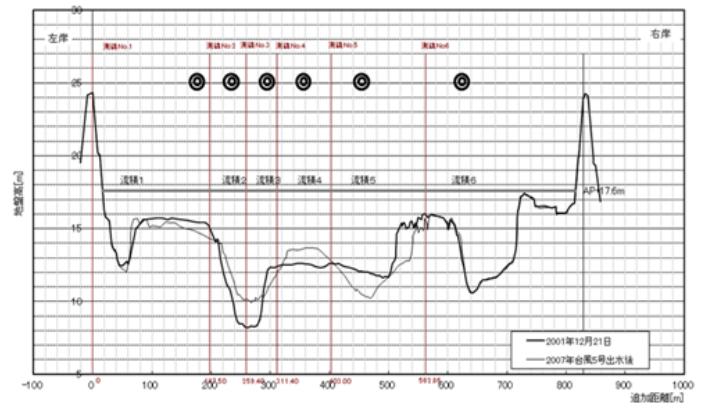


図-2.13 阿波中央橋横断面

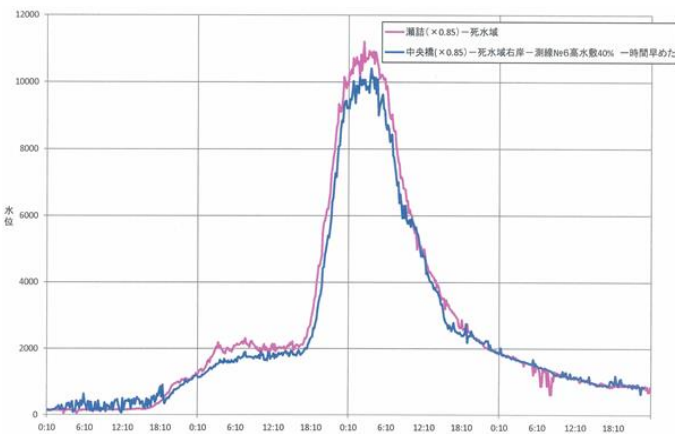


図-2.14 流量ハイドログラフ
(瀬詰、中央(1時間ずらし)2005.9)

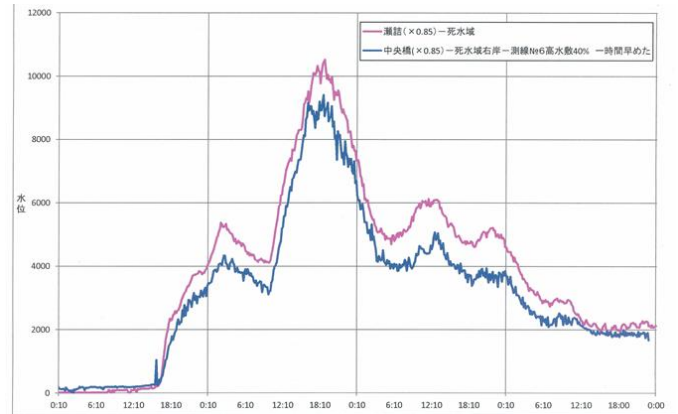


図-2.15 流量ハイドログラフ
(瀬詰、中央(1時間ずらし)2014.8)

あとがき

現地データを使って技術論文を書くことは、ほんとに難しい。水理量を含めて、データが少ないからである。

しかし今回は、電波流速計が2地点で14年間にわたって、データを取り続けていたから（一部中断）、おどろくほどの河道の変化を見ることが出来たし、不十分ながら2地点間の流量の連続に希望が見えて来た。

今後両地点の河道がどのように変化していくのか、楽しみである、と同時に「継続」のむずかしさというものをあらためて感じさせる。

謝辞：国交省徳島河川国道事務所からは、データの提供、貴重なアドバイス等を受けた。ここに記して感謝の意を表したい。

また図の作成を含め論文の作成には、河口尚子氏の（東京建設コンサルタント）多大な応援をいただいた。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- 1～4.河川情報センター；河川情報研究所報告、1～5号 1989～1992.
5. 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.
6. Costa,J.E.et al；Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods,W.R.R, Vol.42, 2006
7. 山口高志；表面流速の変化が読んだ河道水理、水水学会研究発表会、2006.
8. 山口高志；電波流速計のこれまで 2008.7.
9. 山口高志；電波流速計のこれまで 増補版 2014.6.
10. 山口高志；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—河川流量観測の新時代 第4巻 2014.2.

(2015. 2. 13受付)

現場のための新しい水位-流量関係の構築に向けた基礎的研究

STUDY ON CONSTRUCTION OF NEW DEPTH-DISCHARGE RELATION FOR RIVER ADMINISTRATION

工藤俊¹・萬矢敦啓²・小関博司¹・岩見洋一¹
Shun Kudo, Atsuhiko Yorozuya, Hiroshi Koseki and Yoichi Iwami

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所ICHARM (〒305-0031 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 Ph.D. 独立行政法人土木研究所ICHARM (〒305-0031 茨城県つくば市南原1-6)

A depth-discharge rating curve is based on the simple assumption that discharge increases in a simple increasing function as depth increases. However, this assumption is sometimes not valid, for example, when bed roughness changes during flood due to development of micro-scale bed form.

To take the changes of the roughness during flood into consideration, authors focused on the relation between hydraulic resistance and micro-scale bed form, then tried to construct $\tau_* - \tau_*'$ relation proposed by Kishi-Kuroki. $\tau_* - \tau_*'$ relation was constructed precisely at the observation sites whose measured floods were relatively small, whereas there was a difficulty of constructing $\tau_* - \tau_*'$ relation at the observation sites whose floods were large scale. As a result, it is confirmed that the method employing $\tau_* - \tau_*'$ relation is capable to estimate velocity and discharge especially in the case of relatively small floods.

Key Words : *depth-discharge relation, hydraulic resistance, dimensionless total share stress, dimensionless grain share stress, field observation*

1. はじめに

流量の連続データを取得する際には連続観測された水位を用いてこれを流量に変換している。水位を流量に変換する際にはH-Q式が広く使用されており、この方法はこれまで河川流量の測定、ひいては河川管理に大きく貢献してきた。その大きな理由としてH-Q式は水位と流量の観測結果から近似曲線を作成するごく単純な手法であることが挙げられる。しかしながら単純である故に前提となる条件が崩れることもあり、一つのH-Q式では説明できない水位-流量関係も存在し、同一の観測地点でありながら複数のH-Q式を使い分けている地点も多数存在する。特に洪水時は水位と流量は一対一に対応しないことが知られており、その理由の一つとして小規模河床波の発達による流体抵抗の変化が挙げられる。小規模河床波と流体抵抗の関係についてはこれまで主に以下の研究が進められてきた。Simons et al.¹⁾は計測データから各河床形態とフルード数、摩擦損失係数などの水理量の関係を議論している。Engelund²⁾は無次元掃流力(以下、 τ_*)と無次元有効掃流力(以下、 τ_*')の間には一義的

な関係があるとして $\tau_* - \tau_*'$ 関係を定式化した。岸・黒木³⁾はEngelundの理論を踏まえた上で、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の説明変数として相対水深を導入して各河床形態における $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を提案した。また、山本⁴⁾は流れの抵抗と無次元掃流力の関係に着目して流速係数と無次元掃流力と相対水深の関係図を示した。一方、数値計算を用いた研究として、例えば、山口ら⁵⁾、泉ら⁶⁾は線形及び弱非線形安定解析を行い、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の二価性の理論的説明を行っている。さらに、実スケール河床波の観測を行った研究としては柿沼ら⁷⁾による十勝川の千代田実験水路における実験的研究などが挙げられる。しかしながら、洪水時の実河川の観測データを用いて小規模河床波と流体抵抗の関係について検討を行った研究は少ない。

そこで本研究では、平成14年～平成18年の5年間の全国の洪水時の浮子観測結果から6観測地点の観測結果を用いて、観測地点ごとに岸・黒木により提案された $\tau_* - \tau_*'$ 関係の適用性を検証する。その上で $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いて、観測された水深から流速を算出する手法(以下、本手法)を試行し、新しい水位-流量関係の構築を行う。最後に実測流量、H-Q式による換算流量、本手法による計算流量を比較し検証する。

2. 小規模河床波と流体抵抗の関係

図-1は流量及び勾配の変化に対する小規模河床波の変化を图示したものであり、洪水規模が大きくなるにつれて小規模河床波が(a)Rippleから(h)Chutes and poolsへと変化するを示す。最も規模の小さい河床形態は(a)Rippleであるが、洪水規模の増加に伴い小規模河床波も発達し(c)Dunesを形成するようになる。さらに洪水規模が増加するとDuneが崩壊して(e)Plane bedとなり、その後水面と河床波が同位相となる(f)Antiduneが形成される。これよりさらに洪水規模が大きくなると(h)Chutes and poolsと呼ばれる河床形態になることを説明した図である。

また、図-2はEngelundが示した図で τ_* と τ_*' の関係を調べたものであり、 τ_* の増加に伴う $\tau_* - \tau_*'$ 関係の変化を示している。図中の曲線が $\tau_* = \tau_*'$ の直線よりも離れるほど τ_* に占める τ_*' の割合が小さく、 τ_*' (形状抵抗分) が大きいことを示す。ここで、図-1及び図-2を用いて小規模河床波と流体抵抗の関係を詳細に説明する。図-1における(a)Rippleから(f)Antidunesへの変化に対応して

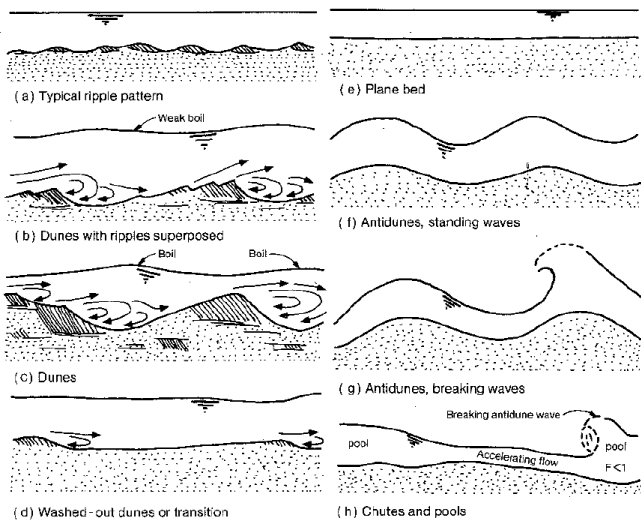


図-1 小規模河床波の発達過程
(Chang, 1988³⁾ より転載)

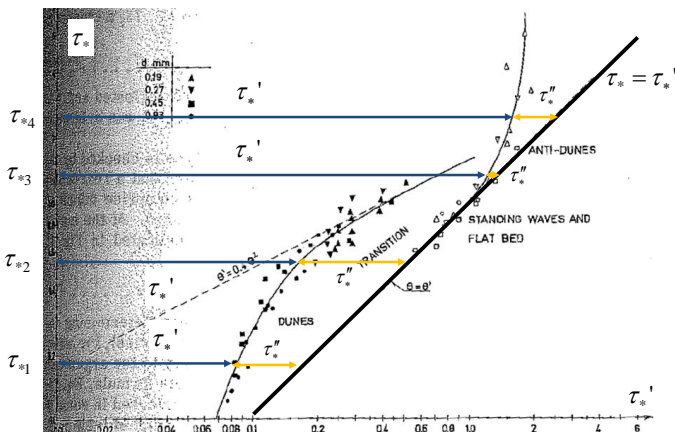


図-2 Engelundが示した $\tau_* - \tau_*'$ 関係
(Engelund, 1967²⁾ に加筆したもの)

図-2では τ_* が τ_{*1} から τ_{*4} へと変化していく。具体的には、洪水規模の増加に伴い小規模河床波は(a)Rippleから(c)Dunesへと発達していくが、これは形状抵抗の増加、すなわち τ_*' が増加していくことにつながり、図-2では τ_{*1} から τ_{*2} への変化に相当する。さらに洪水規模が大きくなると河床波が消失し(e)Plane bedへ遷移する。この遷移の過程が τ_*'' の減少で表され、図-2では τ_{*2} から τ_{*3} への変化に相当する。その後小規模河床波は再び発達し、(f)Antidunesを形成し、再び τ_*' が増加に転じる。これを表すのが τ_{*3} から τ_{*4} への変化である。

Engelundが示した $\tau_* - \tau_*'$ 関係には相対水深が考慮されておらず、後に岸・黒木がこれを更新するが、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係を定式化したことが小規模河床波と流体抵抗の関係を定量的に議論する上で非常に重要である。

3. 手法

本研究では河床高は変化しない、つまり、同一の水位では同一の水深を持つとの仮定のもと、水深を入力して流速を算出することで水位-流量関係を構築するが、その過程で小規模河床波の発達による流体抵抗の変化を考慮することが本手法の特徴である。具体的な手順を図-3に示す。水深、粒径、勾配を入力し、途中で τ_* から τ_*' を計算することで小規模河床波による流体抵抗を考慮した流速を出力している。ここで、図中の $\tau_*' = f(\tau_*, R/d)$ について、本研究では岸・黒木が導いた $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を用いる。これを以下に示す。

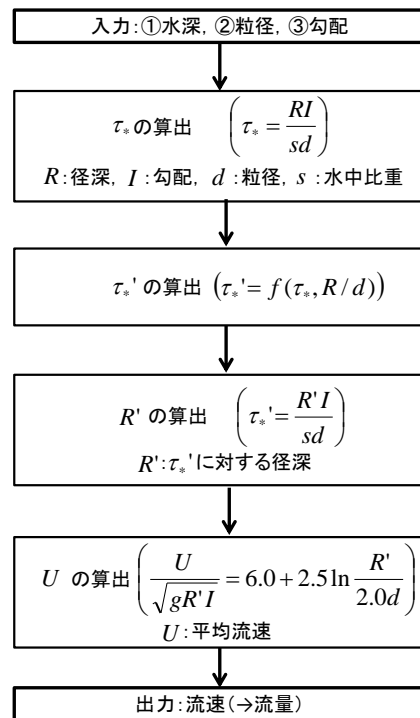


図-3 本手法の手順

$$\text{Dune I:} \quad \tau_*' = 0.21\tau_*^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{Dune II:} \quad \tau_*' = 1.49\left(\frac{R}{d}\right)^{-1/4}\tau_* \quad (2)$$

$$\text{Transition I:} \quad \tau_*' = 6.5 \times 10^7 \left(\frac{R}{d}\right)^{-5/2}\tau_*^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{Flat:} \quad \tau_*' = \tau_* \quad (4)$$

$$\text{Antidune:} \quad \tau_*' = 0.264\left(\frac{R}{d}\right)^{1/5}\tau_*^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 R は径深、 d は粒径である。

また、Transitionが発生し始める τ_* 、Antiduneが発生し始める τ_* はそれぞれ以下の式で表される。

$$\text{Transitionが発生し始める}\tau_*:\tau_* = 0.02\left(\frac{R}{d}\right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{Antiduneが発生し始める}\tau_*:\tau_* = 0.07\left(\frac{R}{d}\right)^{2/5} \quad (7)$$

図-3の τ_*' の算出において式(1)～式(5)の内どれを使用するか判別する際は式(6)、式(7)を用いる。すなわち、 τ_* の値が式(6)で計算される値より小さい場合はDune I、 τ_* の値が式(7)で計算される値より大きい場合はAntiduneとする。Dune II, Flat, Transition Iに関わる判別は図-4の説明とともに後述する。

岸・黒木は初めに河床形態と水理量の関係を分析して式(6)及び式(7)を導き、これを踏まえた上で $\tau_* - \tau_*'$ をプロットして式(1)～式(5)を導出した。なお、これらは主に実験結果に基づいている。

また、本手法で重要な点は以下の2点である。

- 1) $\tau_* = \tau_*' + \tau_*''$ が成立すると仮定している。つまり、 τ_* (全抵抗分) は τ_*' (表面抵抗分) と τ_*'' (形状抵抗分) の重ね合わせであるとの仮定を置いている。本手法ではこの仮定のもと岸・黒木により提案された $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を用いて小規模河床波による流体抵抗を推定している。
- 2) 流速の鉛直分布は対数則で表されると仮定している。この仮定のもと、 R' (τ_*' に対する径深) を介して平均流速を算出する。

4. $\tau_* - \tau_*'$ 関係の適用性

(1) 使用した観測地点と洪水規模

今回使用した6観測地点の諸元を表-1に示す。各観測地点の特徴としてセグメント、河床勾配、計画高水流量、今回使用したデータの内の最大流量及びフルード数の範

表-1 各観測地点諸元

観測地点	セグメント	河床勾配	計画高水流量	今回使用したデータの最大流量	今回使用したデータのフルード数の範囲
観測地点A	2	1/1490	5,700	2,406	0.25~0.35
観測地点B	2	1/500	16,500	9,770	0.50~0.80
観測地点C	2	1/1250	9,000	6,049	0.30~0.40
観測地点D	1	1/110	5,000	1,228	0.20~1.20
観測地点E	2	1/470	2,800	781	0.40~0.90
観測地点F	2	1/1700	7,800	7,512	0.40~2.20

※山本⁴⁾を参考に、河床勾配によりセグメント1(1/60-1/400)、セグメント2(1/400-1/5000)、セグメント3(1/5000-水平)に従って分類

を指示している。洪水規模の指標としてフルード数をもとに分類すると、観測地点Aと観測地点Cは最大のフルード数が0.5以下、観測地点Bと観測地点Eは最大のフルード数が1.0以下、観測地点Dと観測地点Fは最大のフルード数が1.0以上である。

(2) 粒径の推定手法

$\tau_* - \tau_*'$ 関係を適用するにあたっては粒径の設定が課題となる。本永ら⁹⁾は移動土砂の粒径を採用することで $\tau_* - \tau_*'$ 関係を物理的な根拠を示しながら説明している。移動土砂の粒径が洪水中の無次元掃流力を支配している一例が示された知見は貴重かつ重要であるが、洪水観測の際に移動土砂を計測することは一般的に困難である。そこで、本研究では河床の粗度係数に着目する。マンニングの流速公式から逆算される粗度係数(以下、逆算粗度)は流体抵抗に関する様々な要因を内包しているが、観測データから逆算される逆算粗度と $\tau_* - \tau_*'$ 関係から計算される粗度係数(以下、計算粗度)に矛盾がない時に、計算に使用した粒径は $\tau_* - \tau_*'$ 関係を説明するのに適したものであると考える。具体的には、計算粗度が逆算粗度を再現できるような粒径を推定する。計算粗度は以下の式を連立して解くことにより求める。

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (8)$$

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = 7.66 \left(\frac{R}{2d}\right)^{1/6} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*}\right)^{2/3}, R'/2d \leq 500 \quad (9-1)$$

$$\frac{U}{\sqrt{gRI}} = 11.59 \left(\frac{R}{2d}\right)^{1/10} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*}\right)^{2/5}, R'/2d \geq 500 \quad (9-2)$$

式(9)は図-3中の流速に関する式を指数近似したものである。上式を連立して算出した計算粗度と逆算粗度を比較するが、計算粗度算出に用いる式(8)はマンニングの流速公式そのものである。つまり、上記手法は本質的には実測流速と式(9)で求められる計算流速を比較していることと等価である。

(3) 粒径の推定

洪水観測データを用いて観測地点ごとに粒径の推定を行う。上述の通り計算粗度と逆算粗度の再現性を指標にするが、具体的な指標としてはRMSEと相関係数を用いる。RMSEは計算粗度と逆算粗度の値そのものの整合性の指標として、相関係数は粗度係数の増加及び減少と

いった洪水中の粗度の変化を適切に捉えているかの指標として用いる。両式を以下に示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (n_{cal} - n_{obs})^2}{N}} \quad (10)$$

$$\text{相関係数} = \frac{\sum (n_{cal} - \overline{n_{cal}})(n_{obs} - \overline{n_{obs}})}{\sqrt{\left\{ \sum (n_{cal} - \overline{n_{cal}})^2 \right\} \left\{ \sum (n_{obs} - \overline{n_{obs}})^2 \right\}}} \quad (11)$$

ここで、 n_{cal} は計算粗度、 n_{obs} は逆算粗度、 $\overline{n_{cal}}$ は計算粗度の平均値、 $\overline{n_{obs}}$ は逆算粗度の平均値、 N はデータ数である。例えば、RMSEが小さく相関係数が負の値であれば、計算粗度と逆算粗度の値は全体的に近いが、洪水中の粗度の増加・減少は逆の傾向であることを表す。

本研究では粒径0.1 mmから500 mmまで0.1 mmごとに5,000通りの粒径を想定し、それぞれの粒径におけるRMSE、相関係数を計算し、RMSEが小さくかつ相関係数が1に近い粒径を選定した。それぞれの観測地点で推定された粒径、その時の粗度係数のRMSE及び相関係数を表-2に示す。平成22年に実施された観測地点D付近における河床材料調査によると、表層の50%粒径は約109 mmであるのに対し、本研究による推定粒径は13.4 mmであり比較すると小さい値となっている。この結果は、50%粒径ではなく洪水中の移動土砂の粒径を採用した本永らの成果とも整合している。

(4) 粗度の推定精度及び $\tau_* - \tau_*'$ 関係の検証

各観測地点における粗度の推定精度に着目する。観測地点Dを除く5地点のRMSEの値に着目すると、 $10^{-3} \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ のオーダーである。一般的には河道の粗度係数は $10^{-2} \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ のオーダーであることから、RMSEが十分小さく粗度係数が良好に再現されていることがわかる。また、相関係数に着目すると、観測地点Dと観測地点F以外の4地点は相関係数が良好な値を示しているが、上記2地点は0.5程度であり比較的低い値となっている。この2地点は双方とも表-1で示した通り最大フルード数が1.0を超えるような地点であり、洪水規模が大きい場合は粒径の推定だけでは粗度を整合させることが困難であることが示唆されている。

ここで、それぞれの観測地点で推定された粒径を用いて計算した $\tau_* - \tau_*'$ 関係及び粗度係数の変化を図-4に示す。観測地点ごとに岸・黒木の理論を示す実線の形状が

表-2 各観測地点において推定された粒径・粗度係数のRMSE及び相関係数

	粒径(mm)	RMSE ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)	相関係数
観測地点A	11.1	0.0015	0.88
観測地点B	98.8	0.0026	0.68
観測地点C	24.3	0.0024	0.74
観測地点D	13.4	0.0223	0.47
観測地点E	2.4	0.0033	0.76
観測地点F	0.5	0.0043	0.52

異なるが、これは相対水深の違いによるものである。なお、1回の観測データごとに相対水深の値は異なるが、図に示した実線は全データ平均の相対水深に対するものである。また、観測地点Aの図にDune I~Antiduneを記入しているが、これは各実線に対応する河床形態を表す。 τ_* が式(6)よりも大きくなるとDune IからDune IIまたはTransition Iに移行する。なお、岸・黒木によるとTransition IIでは τ_* と τ_*' は独立に変化するとされており定式化されていない。そのため本研究では、 τ_* が式(7)で示される値を超えた時にDune IIからAntiduneに移行すると仮定している。また、Transition IとFlatの閾値は式(3)と式(4)を連立して解くことで求まる。また、図の点線は $\tau_* = \tau_*'$ を示すラインであるが、この点線と実線が離れているほど τ_* (全抵抗)と τ_*' (表面抵抗)の差、つまり τ_*'' (形状抵抗)が大きく、小規模河床波が発達していることを表す。以下ではそれぞれの観測地点の結果について考察する。なお、粗度は $n - \tau_*'$ としてプロットしており、右縦軸に示している。

a) 観測地点A

計算粗度は逆算粗度を非常に精度良く再現していることがわかる。 $\tau_* - \tau_*'$ 関係についても岸・黒木が提案したDune IIにおける理論と良く整合していることが読み取れる。表-2のRMSE、相関係数の値からも観測地点Aが最も精度良く粗度係数を推定できていることがわかる。

b) 観測地点B

観測地点Aと同様に計算粗度は逆算粗度を良好に再現していることがわかる。ただし、 τ_*' が大きい時に逆算粗度が増加から減少に転じているのに対し、計算粗度は減少していない。この理由は $\tau_* - \tau_*'$ 関係から説明でき、河床形態がDune IのままTransitionに移行しないためである。また、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係に着目すると $\tau_* - \tau_*'$ が実線と点線の交点よりも左下にプロットされている。実線と点線の交点の τ_* は小規模河床波が発生し始める時の τ_* であるため、これより小さい時は理論的には小規模河床波が発達しないことになる。これは小規模河床波の変化によると考えられる逆算粗度の変化と矛盾する。表-1に示したフルード数の範囲からも小規模河床波の発達には十分な洪水規模だったと推察される。今回はRMSEと相関係数から機械的に粒径の選定を行い98.8 mmとなったが、この矛盾を解決するためには粒径の設定方法だけではなく他の要因も合わせて精査する必要があると考える。

c) 観測地点C

τ_*' が小さい時には計算粗度が過少となるものの、全体として粗度が良く再現されている。ただし、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係に着目すると、実線とプロットの傾きが異なり、実線の勾配がプロットの勾配よりも急であることがわかる。 τ_*' が小さくなるにつれて実線とプロットが離れるが、これが上記の粗度係数の誤差につながっていると考えられる。

d) 観測地点D

τ_* がDune Iの領域を超えるが、観測地点DについてはDune IIを経由すると仮定している。粗度に着目すると、

上記で考察した3地点とは異なり計算粗度と逆算粗度が乖離している。具体的には計算粗度が全体として過少であり表-2からも観測地点DのRMSEが特に大きいことが読み取れる。粗度変化については、粗度が減少傾向にあることは再現できている。しかしながら、逆算粗度が終始減少し続けていることから河床形態はTransitionであることが推察されるが、それに対して計算粗度は途中から増加に転じており、これは τ_* がAntiduneの領域に入っ

ているためである。今回仮定した $\tau_* - \tau_*'$ 関係ではDune IIから直接Antiduneに変化するが、Transition IIの $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を与える必要性が示唆されている。

e) 観測地点E

観測地点EではTransition Iを経由すると仮定している。 τ_*' が大きい時に逆算粗度が増加に転じているのに対して計算粗度は底打ちになり増加しないという傾向はあるものの、 τ_*' が小さい範囲では計算粗度は逆算粗度を良

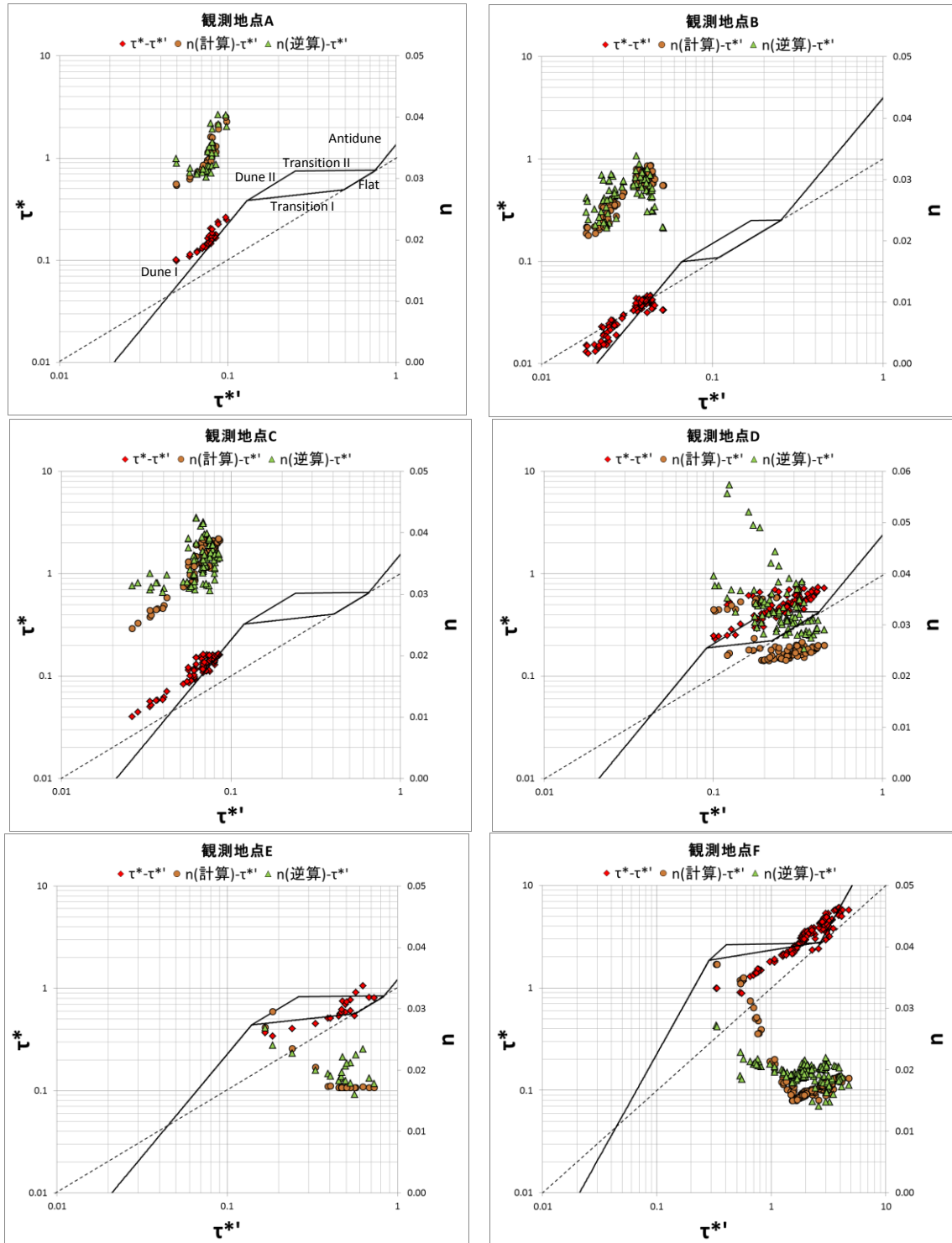


図-4 $\tau_* - \tau_*'$ 関係及び粗度係数

く再現している。 $\tau_* - \tau_*'$ のプロットに着目すると、 τ_* の増加とともに τ_* と τ_*' の差が小さくなるが、 $\tau_* = \tau_*'$ に到達する前に再び τ_* と τ_*' の差が増加に転じる。一方で実線は $\tau_* = \tau_*'$ まで到達すると仮定しているため、この違いが粗度変化の違いに表れている。

f) 観測地点F

観測地点FではTransition Iを経由すると仮定している。粗度の変化を見ると粗度が減少している様子が再現されているが、 τ_*' が小さい時に計算粗度が過大であり τ_*' が大きい時は過少であることが見受けられる。 $\tau_* - \tau_*'$ 関係から説明するには、実線とプロットの同一の τ_* に対する τ_*' の値に着目すればよい。すなわち、同一の τ_* に対して実線の τ_*' の方がプロットの τ_*' よりも小さいときは流体抵抗を大きく評価しているため計算粗度が過大になり、逆に実線の方がプロットよりも大きいときは計算粗度が過少になる。

上記の考察より、観測地点A、観測地点B、観測地点C、観測地点Eについては粗度変化の再現性に若干の課題が残されている地点も存在するが、全体としては良好に再現できている。ただし、観測地点Bについてはより深い検討が必要である。一方、洪水規模が特に大きい観測地点Dと観測地点Fについては再現性に課題が残る結果となった。課題が残されている地点については、粒径だけでなく他の要因についても精査する必要がある。例えば、すでに述べた通り岸・黒木は実験結果のプロットに基づいて式(1)～式(5)を導出しているが、現場の観測データに基づいてこれを再考する必要性も考えられる。

5. 流速及び流量の検証

図-3に示した手法を適用して流速及び流量を算出し、実測値と比較する。流速の計算結果について、6観測地点のうち、観測地点Aと観測地点Dの結果を図-5に示す。観測地点Aについては良好に推定できているのに対して、観測地点Dについては計算流速が過大である。図-4において観測地点Dで計算粗度が過少に推定されたことが流

速値の過大な推定につながっている。次に図-6に6観測地点における流量の推定結果を示す。実測流量、H-Q式により推定された流量（以下、H-Q流量）、本手法により計算された流量（以下、計算流量）を比較する。ここで、H-Q式は $H = aQ^{1/2} + b$ を仮定し、本研究で使ったデータのみに対して最小二乗法を適用して係数 a 、 b を求めることで近似曲線を作成しH-Q式とした。計算流量については、本手法を用いて算出された流速に観測された流積を乗じることで計算流量としている。図-6に着目すると、観測地点Aと観測地点CはH-Q流量、計算流量ともに実測流量を良好に再現していることがわかる。観測地点Bについて、実測流量は複数回変曲している。H-Q流量は2次曲線で表されるためこれを再現できないのに対し、計算流量はこの変曲を良好に再現していることがわかる。H-Q流量と違い、流量を直接算出する訳ではなく粗度の変化を反映しながら水理学的な理論に則って流速を算出した成果であるといえる。ただし、流量が特に大きい時には計算流量に1,800 m³/s程度の誤差が生じており、これは図-4において τ_*' が大きい時に計算粗度が過大になっており、流速が過少になるためである。観測地点Dについて、H-Q流量、計算流量ともに実測流量の再現性が他の観測地点に比べて低下する。そもそも水位-実測流量のプロットがかなりばらついており、この理由としては、観測地点Dは河床変動が激しい地点であることが大きな理由として考えられる。このような観測地点では時々刻々と変化する河床高を適切に推定しながら流量値を算出する必要がある。例えば、図-3の手順を逆にたどり、流速を観測して水深を推定し流量値を得る手法が考えられる。観測地点Eについて、流量が比較的小さい時は良好に推定できているが、流量規模が大きくなるにつれて計算流量が過大になる。図-4で示された通り τ_*' が大きい時に計算粗度が過少になるため流速が過大になり流量値の誤差につながっている。観測地点Fについて、概ね良好であるが若干計算流量が過大である。これについても図-4の結果を見ると、 τ_*' が大きい時に計算粗度が過少であるために流量が過大になっている。

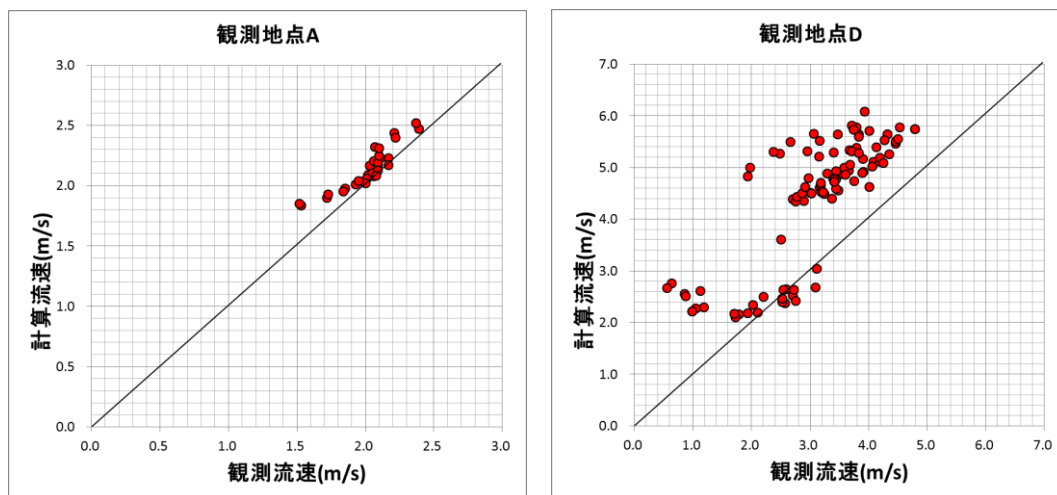


図-5 流速の推定精度

以上の考察より、観測地点A、観測地点B、観測地点Cについては本手法により流量を精度良く推定できることが示された。また、観測地点E、観測地点Fについては流量が大きい時にさらに過大になる傾向が見られた。図-4と合わせて考えると、 τ_* が大きい時に粗度を過少に推定すると流量値を過大に推定することがわかる。また、観測地点Dは河床変動の影響を大きく受けていることが考えられる。萬矢ら¹⁰⁾によると、河床変動が激しい地点では河床高の変化を考慮して算出した流量値と考慮しない流量値は大きく異なることが報告されている。このよ

うな観測地点では河床高の変化を考慮した流量値を得る手法を確立することが重要である。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 6観測地点において $\tau_* - \tau_{*c}$ 関係から計算される粗度係数に着目して粒径を推定した。推定された粒径は河床材料調査による平均粒径よりも小さくなったが、これは本永らによる検討とも整合する。

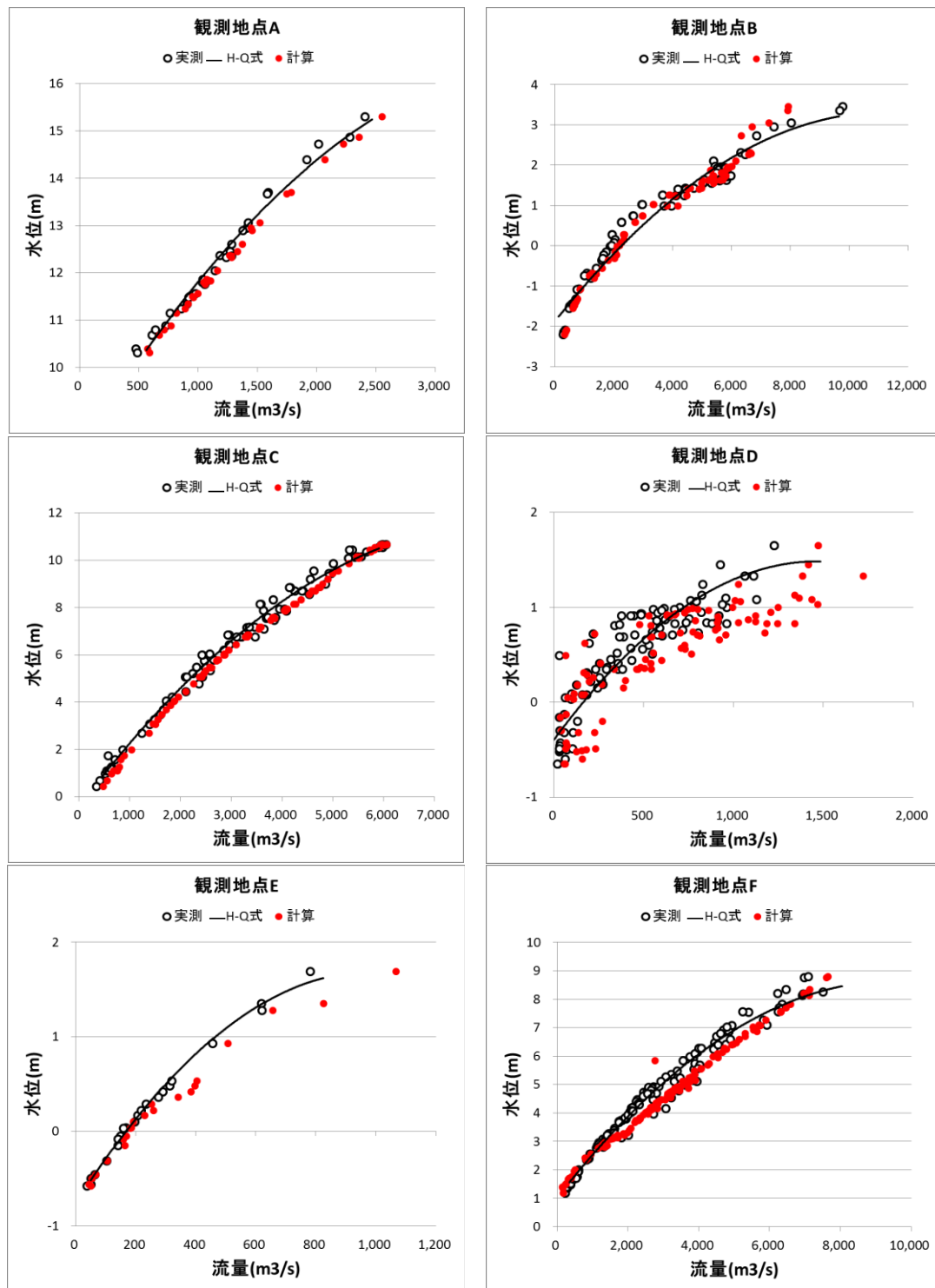


図-6 流量の推定精度

- 2) 推定された粒径を用いて粗度係数及び $\tau_* - \tau_*'$ 関係を検証した結果, 比較的小規模な洪水に関しては計算粗度は逆算粗度を概ね良好に再現できることが示された. 比較的大規模な洪水に関してはさらに検討を進める必要があり, $\tau_* - \tau_*'$ 関係式について再考する必要性が示唆された.
 - 3) 本手法で計算された流量が実測流量を良好に再現できる例を確認した. 特に水位-流量関係が変曲し H-Q式ではうまく再現できない観測地点でも本手法を用いることで良好に再現できる例が示された.
 今後は比較的大規模な洪水のデータに対しても本手法を適用できるように $\tau_* - \tau_*'$ 関係の検証を進めていく必要がある. 具体的には, 観測データの $\tau_* - \tau_*'$ プロットを考慮しながら岸・黒木が提案している式の係数を再検討することや, Transition IIに対して $\tau_* - \tau_*'$ 関係を与える方策を検討していきたい.
- 謝辞:** 本研究を実施す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頂いた. ここに記して謝意を表す.
- 参考文献**
- 1) Simons, D. B. and Richardson, E.V.: Forms of bed roughness in alluvial channels, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 87, No.3, pp. 87-105, 1961
 - 2) Engelund, F.: Closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY-4, pp. 287-296, 1967
 - 3) 岸力, 黒木幹男: 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1972
 - 4) 山本晃一: 構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, 2004
 - 5) 山口里実, 泉典洋: デューン-平坦床遷移過程にみられる亜臨界分岐現象, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.75-94, 2003
 - 6) 泉典洋, 山口里実: デューン-平坦床遷移再考, 土木学会論文集B, Vol.62 No.4, pp.360-375, 2006
 - 7) 柿沼孝治, 井上卓也, 赤堀良介, 武田淳史: 千代田実験水路の移動床抵抗に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.69, No.4, I_1087-I_1092, 2013
 - 8) Chang, H.H: Fluvial Processes in River Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1988
 - 9) Yoshiki Motonaga, Atsuhiko Yorozyua and Yoichi Iwami: Direct measurement of river-bed form resistance in rivers with sand waves, River Flow 2014, pp. 273-278, 2014
 - 10) A. Yorozyua, Y. Motonaga, Y. Iwami, T. Furuyama, and K. Ogiwara: Water Discharge Measurement with aDcp in High Speed Flow with High Sediment Concentration, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp. 21-24, 2014

(2015. 2. 13受付)

超音波式流砂計による河川流送物質の観測 (第2報)

—クラウド端末センサーによるモニタリング—

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

岩熊眞起¹・河嶋ちか子²・丸茂義典³・斎藤秀晴⁴・山口高志⁵

Maki IWAKUMA, Chikako KAWASHIMA, Yoshinori MARUMO,
Hideharu SAITHO, Takayuki YAMAGUCHI

- 1 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)
- 2 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)
- 3 正会員 工修 東建エンジニアリング 本社事業部 (〒330-0841埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)
- 4 正会員 Ph.D 東建エンジニアリング RDセンター (〒330-0841埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)
- 5 名誉会員 工博 山口高志 (〒277-0863千葉県柏市豊四季645-14)

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. We improved this measurement device to the power saving of, created the cloud terminal sensor by adding a communication device. Several results of experiments are introduced and a few technical problems are discussed.

Key Words : *Super-Sonic Wave, SSI, suspended solid, continuous observation method, cloud terminal sensor, maintenance-free*

1. はじめに

自然環境のモニタリングとして、連続観測による時系列データベースを作成し、関連付加データとの統合を行い、現象の解明、傾向の把握、新しい情報の創造、状態の監視等に役立てる手法がある。自然が卓越している河川空間においても、基本的要素である水位、流速、流量(水量輸送)の連続観測がなされ、情報加工高度化や迅速化が進められている。

筆者らの主題は、流送物質(質量輸送)の連続観測手法の開発である。流送物質の観測は、目的に応じて、調査期間を限定して実施されていることが多く、基礎的要素としての長期的な変化を把握する観測事例は少ない。流送物質を水位、流速と同じようなレベルで連続観測が出来るようにすることを目指すとともに、WEBベースモニタリングシステムへの連結を進めている。流送物質の流下を連続的に頼る解析は困難で難しく、より多くの地点の観測が必要であり。サーバーと通信回線網の利用、長期間メンテナンスフリー化等による低コスト化も重要な課題である。

本報告は、昨年度の第一報「河川流量観測新時代, 第4巻: 超音波流砂計による河川流送物資の観測」の続報である。第二報は、前報で紹介した超音波式流砂量計をクラウド端末センサーに改良して、長期間ノンメンテナンスで作動させるモニタリングを行った報告である。

使用した超音波式流砂計の基本機能・性能は、第一報での記載と同様である。省電源化への改良と通信器を付加して、クラウド端末センサーとしたセンシング装置である。当然であるがクラウド端末センサーはクラウド(サーバー)に通信回線網を介してつながっている。

クラウド端末センサーは、観測クラウド(サーバー)の子局で、通信回線網と常時接続の通信器を搭載したセンシング装置である。計測通信の制御、データベース作成、蓄積データの解析等の同時的処理を行う観測モニタリングシステムの構築を行っている。ここでモニタリングとは、「安全性の保持、状態の劣化度、施設の強度、水質濃度等が、施策目標として設定した範囲や基準を維持達成しているかを観察、観測、監視すること」ともいわれている。筆者らはモニタリングをそのようにも捉えて、河川モニタリングとしている。

河川モニタリングを進める場合に、センシング装置の機能、性能、精度等も重要であるが、それに加えて、以下の要件を満足することも必要である。その要件は、観測データはリアルタイムで入手可能、太陽電池等の独立電源作動、長期間メンテナンスフリー、小型軽量化、耐候性の保持等である。なるべく多くの地点の観測データがあることが、連続的に頼らない現象の解明、流出予測モデル等との連結利用が出来るレベルのものになると考えている。

2. クラウド端末センサー

(1) 観測（サーバー）とクラウド端末センサー

観測クラウド（サーバー）の基本構成は図-1に示すものである。端末センサーとは常時接続の通信回線網で接続されている。降雨データ等は関連付加情報である。

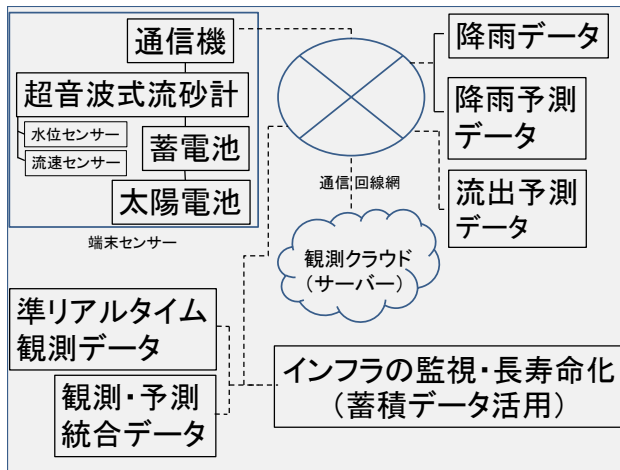


図-1 観測クラウド(サーバー)の構成(例)

(2) センシング機器の概要

端末センサーは第一報でも紹介したが、以下に要訳を再掲する。

a) 超音波式流砂計（水位・流速・SSI計）

本機器は水位、流速と合わせてSSI（懸濁物質指数：Suspended Solid Index）の出力を持つ。超音波式の流速センサー（耐水深100mの水没式センサー）、圧力式の水圧センサー及び計測通信器より構成される。

計測通信器は最少インターバル1分で作動する。水位、流速、反射信号強度および3種のSSIの合計6項目が出力される。小型蓄電池と太陽電池からなる独立電源器で長期間作動する。30～60秒遅れの準リアルタイムでWEBサイトで閲覧が可能である。

b) 機器の出力内容

観測により得られるのは6項目のデータである。水位（H：m）、流速（V：m/sec）とあわせてドップラー反射信号強度（S：mV）が出力される。センサーが河床への土砂堆積等で土中にある状態の場合Sは10mV以下となり、堆積土砂の湿潤密度に反比例の関係で変動する。セ

ンサーが空中に出てしまった場合は、Sは0mVになる。

あわせて水中の乾燥密度に概ね比例的に変化するSSIが3項目出力される。このSSI（無次元相対値出力）を流送物質量算定に必要な濃度への変換には、観測地点毎のキャリブレーションの作成が必要である。SSIは流速の影響を除去した出力値であり、基本的には濃度の観測である。流送物質量の算定には次式（2a）のqbの算定が必要である。

$$qb = [V] \cdot [C] \cdot [h] \quad (2a)$$

但し [qb]：単位幅当たり流送物質量 (g/m²・sec)

[V]：流速 (m/sec)

[C]：流送物質濃度(g/m³) C = f (SSI)

[h]：流砂層の厚さ (m)

c) SSI値の精度と流送物質の濃度との相関

SSIがどの程度の信頼性、再現性および精度で、採取試料を分析して得られる乾燥密度、懸濁物濃度との比例関係が保持されているかは重要な課題である。74～2000μmの砂を用いた流速1m/secの水路及び沈降筒試験では5000～9000g/m³程度までの濃度で再現性のある比例的関係は確認できている。流送物質の特性は当該地点の地形毎に、そして流下形態とその物質特性により大きく異なり、比例関係の式形も異なる。当該現場での採水・採砂を行い、乾燥密度（C：g/m³）との関係図の作成が必要である。



図-2 超音波式流速センサー（左）
計測通信器（右）

3. 観測期間と地点

河川モニタリングは、一年間ノンメンテナンスで作動させることによる適用性検討を目的に、一般的な都市域小河川において以下の内容で行った。

(1) 期間及び地点

観測の期間 2013年秋設置、開始

内報告期間 2013年12月1日～2014年11月30日

観測の河川 都市域小河川（兩岸堤防はRC護岸）

内報告地点 2地点（HAL地点 NIL地点）

(2) センサーの設置水深

センサーの保持は、RC護岸に単管パイプを取り付けて、その先端部に水位センサーと流速センサーを取り付けた。センサーの設置地点の水深は約0.3mであり、平水時水深の底（河床）から1/3の約0.1mの位置で観測した。

(3) 観測間隔

端末センサーの時計はクラウド(サーバー)から、計測毎に修正して正確なものとし、10分毎(40秒間計測平均値)の観測間隔の正確性を保持した。

(4) データベース作成項目

水位(H : m), 流速(V : m/sec), 信号強度(S : mV), SSI1, SSI2, SSI3(無次元), 電源器蓄電池電圧(E : mV)を端末センサー観測値として時系列データベースを作成した。雨量は近接域の気象庁データを付加した。

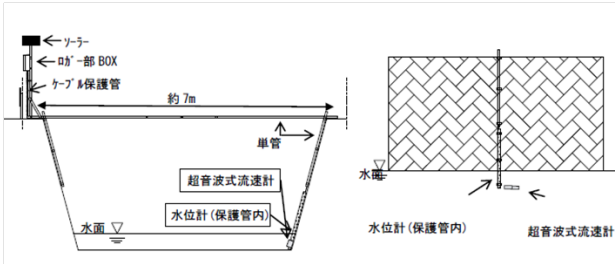


図-3 超音波流速センサー取り付け方法図

(5) 観測データベースの加工、解析

観測データベースからは多様な情報が得られる。準リアルタイムでの取り扱いとなる観測データとクラウドに収録される蓄積データに分けられる。蓄積データの活用は経月、経年変化の傾向の把握、特異な変化の出現探知、瞬間的な目視監視では見えない事柄の精密監視等が可能となる。表-1は河川管理に関連した利活用方途の例である。

表-1 観測・蓄積データ利活用のフレーム

データ・情報の利活用区分	考えられる利活用例
準リアルタイム情報の活用	* 水位・流速の常時リアルタイム把握
	* 流送土砂量の常時リアルタイム把握
	* 流出予測モデルのチェック、モデルの実用化
	* H-V関係変化からの出水特性の監視
蓄積情報の活用	* 河床高変動(堆積・洗掘)のモニタリング
	* 流出特性、流域変化のモニタリング
	* 流域自然(降雨等)変化のモニタリング
	* 土砂動態変化のモニタリング
	* 汚濁負荷堆積、流出のモニタリング
	* 河川管理施設損傷等のモニタリング(漏水等)

4. 観測データベースの紹介

(1) 一年間の連続観測結果

2013年12月1日から2014年11月30日までの一年間の全データ経時変化図が図-4である。細かくて判別が難しいが、上段が12月1日から5月31日の期間、下段が6月1日から11月30日までの期間のデータである。データベースは、任意の項目、期間のデータ抽出および自在の加工、編集あるいは自動解析が可能である。以下にその事例を示す。いずれも自動解析、準リアルタイムでの表示が可能であ

る。蓄積データの解析による事象の診断等は別の機会に報告する。

(2) 降雨による出水時の観測

流域の降雨による出水の観測結果が図-5である。上段から雨量、水位、流速、信号強度、SSIである。流域が小さいため、降雨による出水(水位、流速の増加)の時間遅れは小さい。降雨パターンにより出水規模が異なる。流域からのウオッシュロードや汚濁負荷の流入及び河床材料の移動等による流送物質濃度(SSI)の変動も見えてくる。

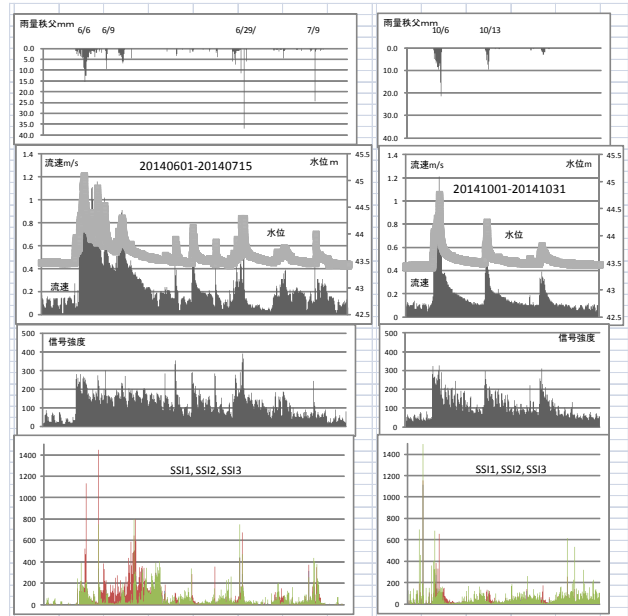


図-5 降雨による出水のデータ

左図 梅雨時期 (6/1~7/14)

右図 台風時期 (10/1~10/31)

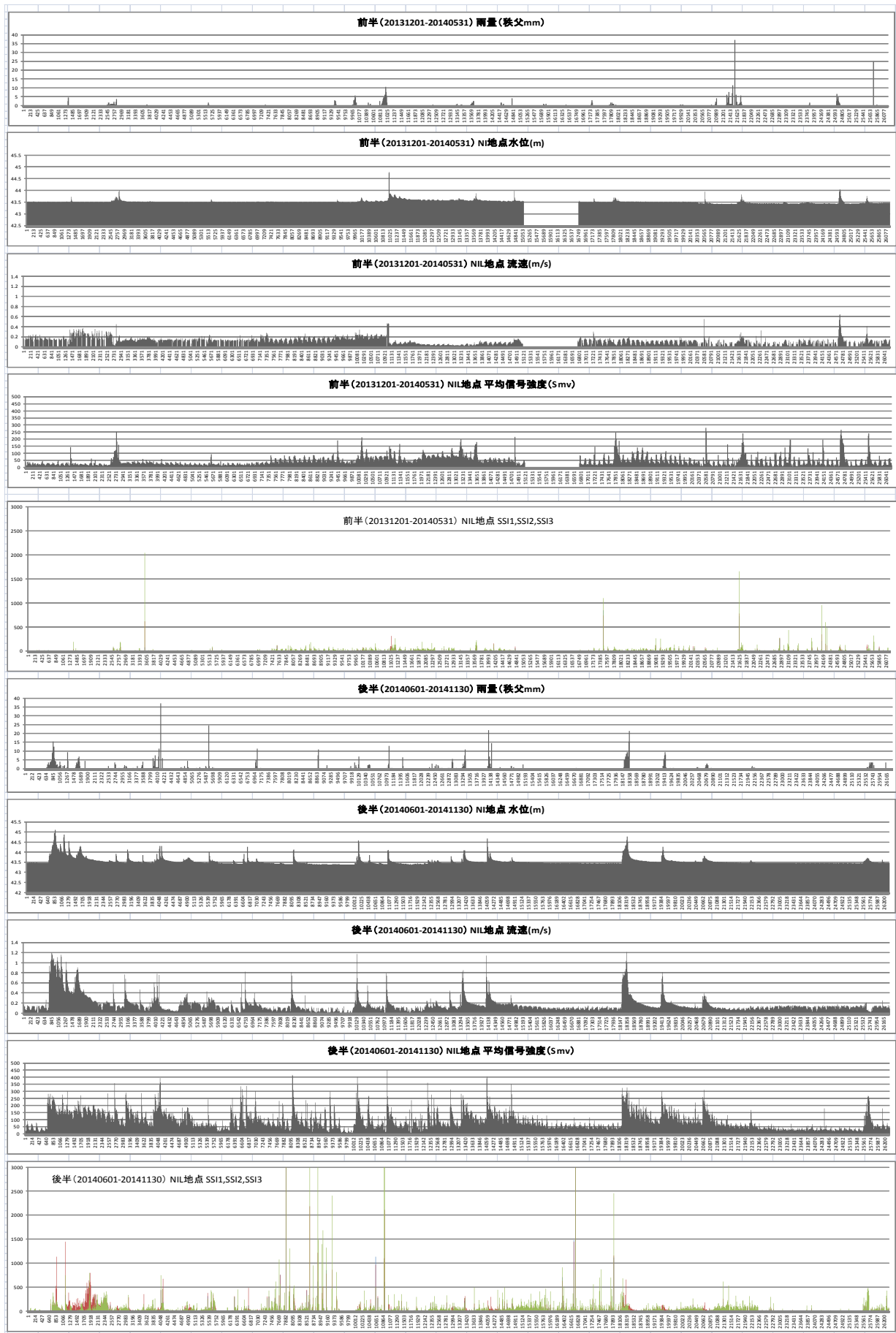


図-4 年間経時変化

(3) 出水時の水位 (H) と流速 (V) の関係

6月から10月の期間の5回の出水時の水位と流速の関係を示したものが図-6,図-7である。図は同じ出水を左側が水位上昇期, 右側が水位下降期として示してある。水位と流速の関係が乱れない出水と, 6/6~6/7の事例のように水位と流速の関係がバラつく出水があることも見えてくる。前項もそうであるが, 準リアルタイムでの状態の見える化は進歩である。

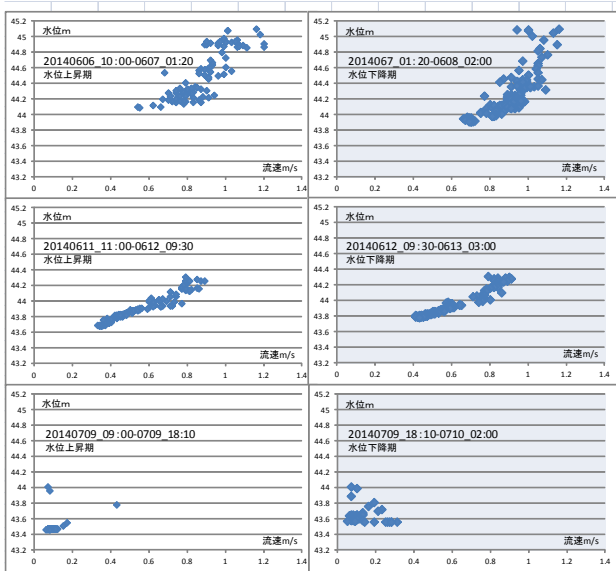


図-6 水位-流速関係図 (6/1~7/14期間の3出水)

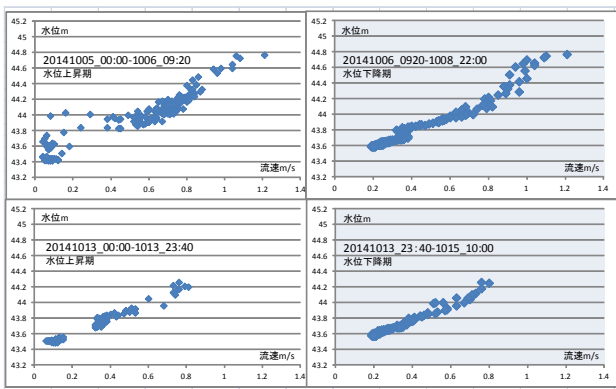


図-7 水位-流速関係図 (10/1~10/31期間の2出水)

(4) 水位の変動

図-8は一年間の水位の変動である, グラフのひげ状の変化は出水による水位の上昇である。それ以外の時期は無降雨時の平水時の流況であり水深は20~30cmである。

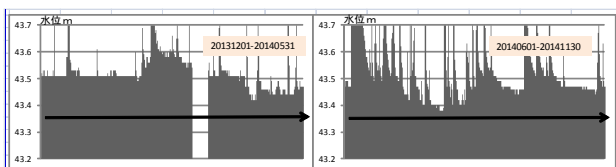


図-8 一年間の水位変動

図の太線は設置時の河床高である。右図の一部の期間

は流水部水深が数cm以下になってしまい, この期間は河床低下で水位が下がっている (左図空白は欠測)。

(5) センサーの埋没による信号変化

信号強度Sが8~10mV以下になる場合が出現した (センサーが空中に露出した時は0mVになる)。Sが連続して10mV前後以下となる場合は, 河床土砂の移動, 堆積によりセンサーが土中埋まってしまった場合である。

Sが10mV以下の反射信号Sの低下は, 湿潤密度 (Pc) に反比例して低下する。図-9は信号強度が10mv以下の状態が続いた期間 (9月8日~11月30日) の推定湿潤密度の経時変化図である。

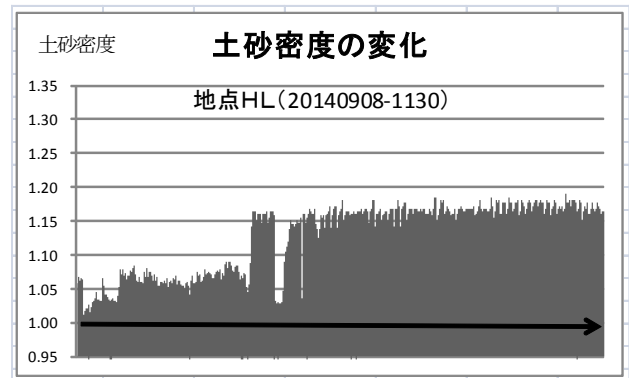


図-9 埋没時の反射信号強度からの土砂密度の推定図

(6) 流送物質濃度の推定

流送物質濃度変化が信号強度Sを変化させる。信号強度Sは流送物質濃度以外の要因により変動する。センサーの汚れに起因する影響も大きく, 長期間ノンメンテナンスで作動させるには不利な与条件となる。超音波反射信号の信号強度と流送物質濃度との比例関係は, 比較的低濃度の場合を除き実用的なキャリブレーションの作成は困難である場合が多い。筆者らは, そうした点をふまえて, 一定時間 (40秒) の信号強度のばらつき特性を解析して算定するSSIを出力している。観測場所, 期間によっては, 信号強度SとSSIに一定の関係がみられる場合もある。今回の観測場所では図-10に示すように漠然とした関係しか得られなかった。

SとSSIに良好の相関がみられる場合は, 次式 (3a) で計測濃度換算式を作成する事となる。SとSSIの相関性が低い場合は, nを0として取り扱い, SSIのみで計測濃度を換算算定する。

$$[CK] = (SSI)^m \cdot (S)^n \quad (3a)$$

但し, $m > n, m, n < 1$

CK : 流送物質の計測濃度 (-)

計測濃度 (CK) は, 当該現場ごとに採取して分析して得られる乾燥密度 (C) とのキャリブレーション作成を行って流送物質濃度に換算することが必要である。

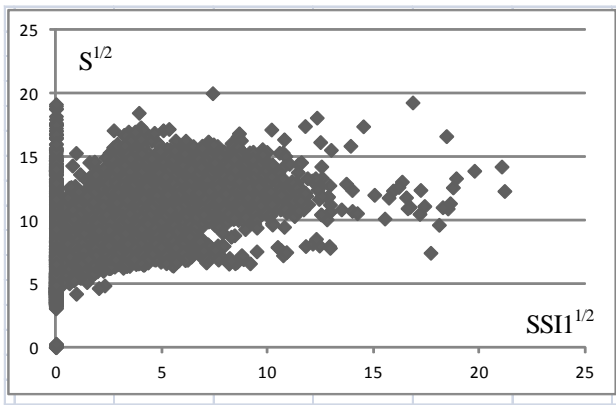


図-10 信号強度(S)とSSI1との相関図
(6/1~7/14全データ)

(7) 流送物質量の推定

図-11は、流速と流送物質の濃度を表すSSIの関係を示したものである。流速が大きくなることによる掃流力の増加が流送物質を増加させることがわかる。

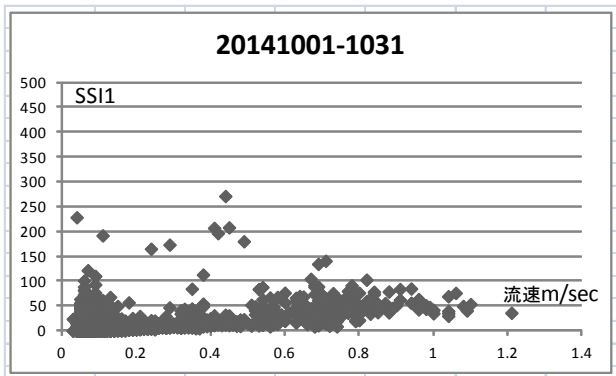


図-11 流速の増加によるSSI1の増加
台風時期 (10/1~10/31)

図-12は、SSIと採取した土砂の乾燥密度(C)との関係について別河川でのキャリブレーション作成事例を示したものである。この図は、端末センサーを取り付けた地

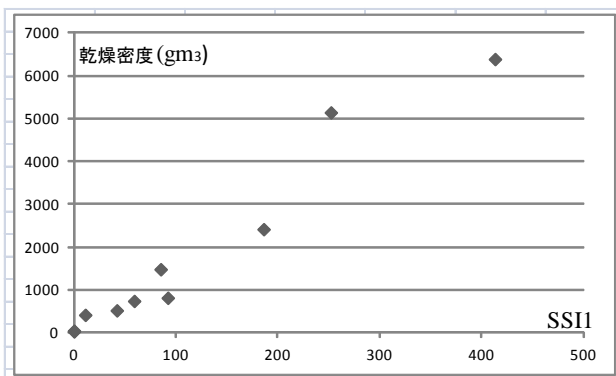


図-12 SSI1と採取資料の乾燥密度関係図(例)
(別途河川調査資料)

点ごとに必要な非常に重要なデータである。この図における土砂濃度は、砂分のみを対象としており、74 μ を除いた砂分の乾燥密度(C:g/m³)を分析している。

この相関図をもとにして、計測濃度から水中の乾燥密度に換算をして流送物質の濃度を求め、その値に流速(V)と流送物質がながれている水深(h)を乗じて流送物質量を算定することとなる。式(2a)のとおり。

5. まとめと今後の課題

クラウド端末装置としての、水位、流速、SSIを連続観測するセンシング装置を開発製作した。この装置を用いて河川のモニタリングの観測データベースの作成を行ない以下の知見を得た。

- ・一年間ノンメンテナンスで作動させる事が出来た。超音波センサーに泥などが付着したが正常に作動した。通信回線ノイズに起因すると考えられ停止が難敵である。
- ・10分毎に観測されたデータは、すべて30~60秒以内の準リアルタイムでWEB閲覧可能な状態ができた。
- ・小型の独立電源(13Wの太陽電池とDC12V・12AHの蓄電池)で、電力不足の出現は皆無であった。
- ・端末センサーは、長期間のノンメンテナンスに加えて廉価であることも必要である。通信回線料、機器損料の低コスト化は目処がたった。但し、土砂濃度を実測してのキャリブレーション作成は、調査、分析費用等が必要である。
- ・水位(水深)と流速は実用的精度で観測データが得られる。この観測値から流量(全幅流量)の推定は、過年度流観野帳の解析等で出来るものと考えられる。
- ・降雨の流出予測モデルのチェック、検証等に使用可能な実用的精度の観測データも得られる。
- ・出水毎のH-V関係図が、出水規模の判別等に実用性のあるレベルでの出力として得られた。
- ・同様に流送物質と流速の関係図も得られた。流送物質の変動を観測できることより、河床土砂挙動の見える化に一步前進であると考えている。
- ・今後の取り組んでゆく課題としては、センサーを横断方向、水深方向に多点取り付けての観測にむけて、近接域に設置したセンサーの干渉の排除、キャリブレーション作成実験手法の確立等の開発が必要である。具体的利用として、流心部H鋼等にセンサーを取り付けての観測も必要であると考えている。

謝辞：この度の試行的な河川モニタリングの実施に当たっては、多くの方のご協力をいただきました。誌上をお借りいたしましてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会編：浮流砂の濃度分布、水理公式集(平成11年度)、第2編河川編、4.1.5,1999

(2015.2.10受付)

「新たなステージ」に対応した 河川流量観測の提案

A SUGGESTION OF RIVER DISCHARGE OBSERVATION
CORRESPONDING TO THE “NEW STAGE”

橋場 雅弘¹・甲斐 達也¹・津田 哲也¹・土田宏一¹
Masahiro HASHIBA, Tatsuya KAI, Tetsuya TSUDA, Koichi TSUCHIDA

¹～⁴ 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）

In recent years, the rainfall has been tendency to localize and centralize. These changes in weather we predicted to enter the "new stage". The authors showed the recent flood situation of the actual rivers as assumed of the "new stage". According to the recent floods, it has been characteristic tendency which the water level rising fast. Thus, the quickly observation was the most important issue to the "new stage". It was required the observation accuracy should be constant in spite of the skilled observer or not. So, it was important to standardize the observation method. The authors showed the discharge calculating method in the high runoff using Space-Time-Image-Velocimetry (STIV) and Dynamic Interpolation and Extrapolation (DIEX) method was the most effective to the quickly observation and manpower saving. This method showed that it was possible to observe at less than one minute and at less than 2 observers. The ADCP, Radio current meter, Float and STIV had the advantage performance to fit the each field environment. We proposed to select these methods by the hydraulic character at the gauging station.

Key Words : new stage, high runoff, time and manpower saving, standardize, STIV, DIEX

1. はじめに

近年の雨の降り方は明らかに変化している。時間雨量50 mmの短時間強雨の発生件数が30年前の1.4倍程度に増加し、日降水量100mm以上の発生日数も増加している。また、度重なる短時間強雨に加え台風などが連続して来襲するといった現象が全国各地でみられている。これによって、今まで想定していない規模の水害リスクが高まっており、実際に各地で大きな被害をもたらしている。

記憶に新しいところでは、平成23年8月の紀伊半島和歌山県の新宮川水系熊野川流域では台風12号によって、広い範囲で総雨量が1,000mmを超え、時間雨量10mm/h以上の降雨が48時間継続した。この豪雨により、紀伊半島を中心に、死者82名、行方不明者16名、全壊379棟、半壊3,159棟、床上浸水5,500棟、床下浸水16,594棟という甚大な被害が発生した。

また、平成24年7月に連続して2度にわたって九州北部に甚大な水災害をもたらした雨は、阿蘇地方で3時間雨量が315mmを記録し、矢部川では越水はしなかったものの、5時間以上にわたっては氾濫危険水位以上の状態が続いた。これによって、パイピング現象に起因した堤防決壊が発生し、死者31名、行方不明者3名、全壊280棟、

半壊1,918棟、床上浸水2,691棟、床下浸水7,844棟という甚大な被害が発生した。

平成26年8月の広島市で発生したバックビルディング現象では3時間雨量が217mmを記録し、土石流が発生したことで、死者74名、全壊133棟、半壊174棟という甚大な被害が発生した。

国土交通省は2015年1月に、「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」¹⁾を発表し、近年の雨の降り方が局地化、集中化、激甚化している状況から、「新たなステージ」に入ったととらえた。そこで、今までとは異なる認識と危機感をもって防災・減災対策に取り組んでいく必要性を示している。「新たなステージ」では、最大クラスの外力では河川施設などのハード面では対処できないことを認識すべきとしている。そこで、個人、企業、自治体、国らが人命と社会経済への壊滅的なダメージを最小限に抑えるために、主体的かつ連携して対応することを目標としている。具体的な施策については、今後検討を進めるとしているが、ポイントは、情報提供の在り方が、従来の避難勧告などの行動指南型から、状況情報の提供といった情報提供型に変わっていることである。こうした情報には、住民の避難場所や避難ルートを書いたハザードマップがあるが、ほとんどが100～200年確率程度を想定しており、最大クラスの外力である

「新たなステージ」には未対応である。よって、今後は、「新たなステージ」に対応した内外水の氾濫解析や浸透流解析、洪水予測モデルの再構築が求められる。一方で、予測モデルの精度を上げるには、解析手法及び計算資源の最適化と実測値との整合性を見極めることが必要である。河川砂防技術基準調査編（H26.4）では、新たな高水流量観測手法が推奨されているが、観測所の特性を考慮した観測手法と観測所環境の最適化の課題が解消されていない現状がある。

本論文では、近年の水害事例から「新たなステージ」で予見される実河川の現地状況を示すとともに、今後必要となる要件を抽出する。また、適用できる流量観測方法について考察した。

2. 「新たなステージ」での降水量と水位上昇

平成24年の九州北部筑後川水系花月川と矢部川で、計画高水位付近まで水位上昇した事例を図-1～図-2に示す。図-3には平成26年8月の広島市太田川水系太田川の事例を、図-4には平成26年9月に発生した北海道札幌市の石狩川水系月寒川での事例を示す。なお、これらは、水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) の公開情報より抽出した。

図-1に示す花月川の花月観測所では、7月3日7時～10時に累計201mmの集中した雨が降り続き、7月3日7時～8時の1時間に3.5mの水位上昇量を記録している。これは、水防団待機水位(0.9m)よりも以下の水位から、わずか1時間で、はん濫危険水位付近(3.35m)まで上昇したことになる。図-2に示す矢部川の船小屋観測所では、7月2日6時から断続的に時間雨量50mm以上の降雨が発生し、7時～8時の1時間で水位が1.65m上昇し、はん濫危険水位(8.4m)を超過した。その後も降雨は弱まらず、9時の段階で計画高水位(9.53m)を超過して、堤防決壊につながった。図-3に示す太田川長和久観測所では、8月20日3時の時間雨量87mmの発生後、水位上昇量は1m/hを超え、

急激な水位上昇をみせる。図-4に示す月寒川月寒観測所では、9月11日2時に時間雨量が10mmを超えると、1時間で2mを超える水位上昇が発生し、水防団待機水位(7.3m)以下から一気にはんらん注意水位(7.8m)を超える水位に到達した。

このように、短時間強雨を要因とする水位上昇は、急激で大きな災害につながる危険性が高いことがわかる。

いかに、急激な水位上昇量に対応した観測ができるかが重要になる。

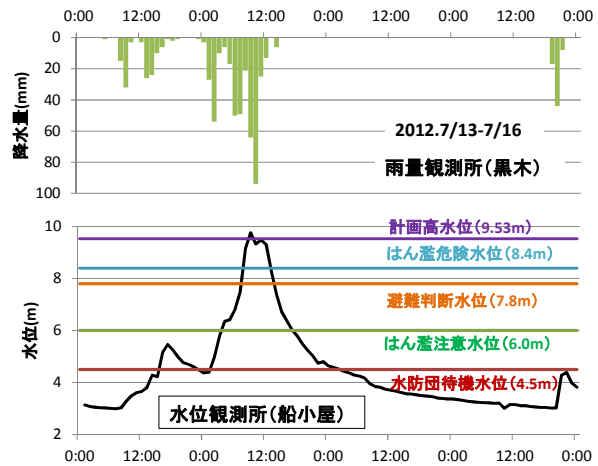


図-2 船小屋観測所 (矢部川/筑後川水系)

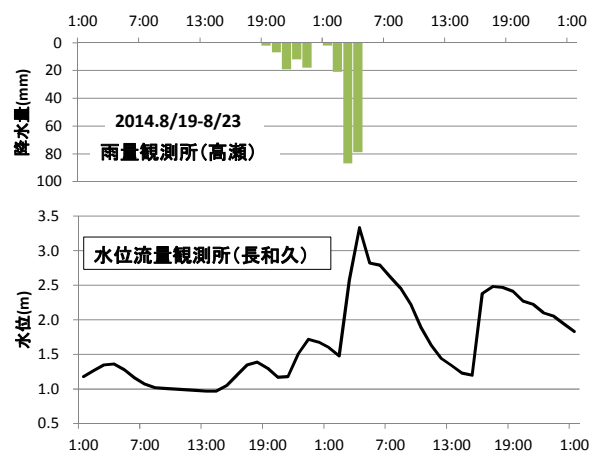


図-3 長和久観測所 (太田川/太田川水系)

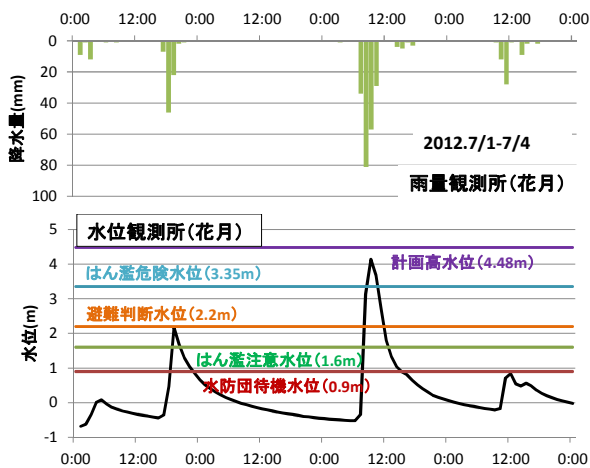


図-1 花月観測所 (花月川/筑後川水系)

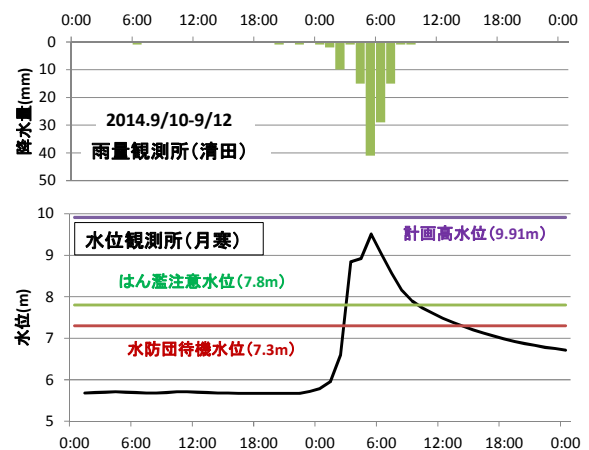


図-4 月寒観測所 (月寒川/石狩川水系)

3. 高水流量観測の現状

前章で降雨特性による急激な水位上昇について示したが、ここでは、現行の高水流量観測（浮子法）での適用性を述べる。

北海道石狩川水系での既往観測結果をもとに、実河川での観測時間と浮子測線数の関係を示す。

参考として浮子の測線数は、表-1に示す標準法と緊急法の規定がある。

表-1 浮子による流速測線数

<標準法>

水面幅	20m未満	20～100m 未満	100～ 200m未満	200m以上
測線数	5	10	15	20

<緊急法>

水面幅	50m 未満	50～ 100m 未満	100～ 200m 未満	200～ 400m 未満	400～ 700m 未満	700m 以上
測線数	3	4	5	6	7	8

(1) 水面幅と浮子投下測線数

図-5に水面幅と浮子投下測線数を示す。水面幅に応じた標準法の測線数と実績の測線数を同時にプロットしている。これより、実績では、標準法での実施は行われておらず、すべて緊急法である。水面幅と実績測線数は概ね比例関係にあるが、実績では多くても10測線までである。水位上昇に合わせた観測が求められる高水時には、標準法の浮子本数は現実的ではないことがうかがえる。

(2) 観測時間と浮子投下測線数・水面幅

図-6には水面幅と観測時間を、図-7には浮子測線数と観測時間を示す。高水流量観測の観測時間は、観測開始時の水位測定から浮子による観測、そして終了時の水位測定となる。なお、実際には準備工や後片付け、現地内での時間を考慮すると2倍以上の時間が必要となることを考慮しなくてはならない。浮子の投下測線数は最小で左岸、中央、右岸の3測線となり、水面幅の小さな河川はこれに相当する。図-6、図-7より、最小の3測線であっても観測時間は実績で20分かかることが示されている。また、観測時間は水面幅が大きいくほど、浮子投下測線数が大きいくほど指数的に増加する傾向がみられる。これは、水面幅が大きくなり、高水敷に水が付いた場合は、浮子の流下速度が遅くなることや、往復距離が長くなることの影響していると推察される。

(3) 浮子投下測線数と観測人数

高水流量観測にかかる観測人数と浮子投下測線数との関係を図-8に示す。高水流量観測には、浮子投下員（橋上）1名、見通し員（第1）1名、見通し員（第2）2名、

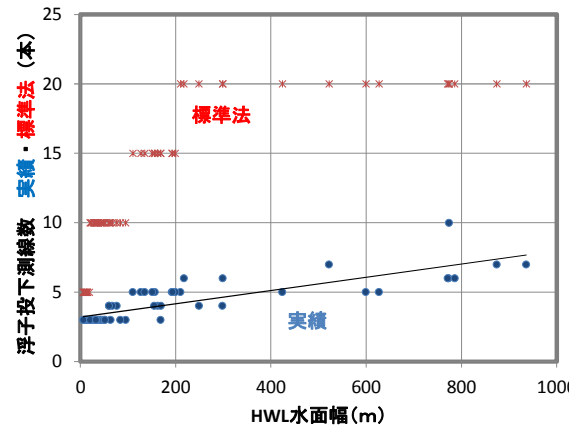


図-5 水面幅と浮子測線数

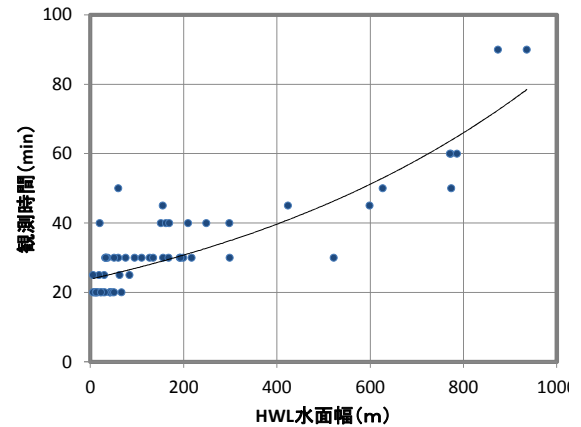


図-6 水面幅と観測時間

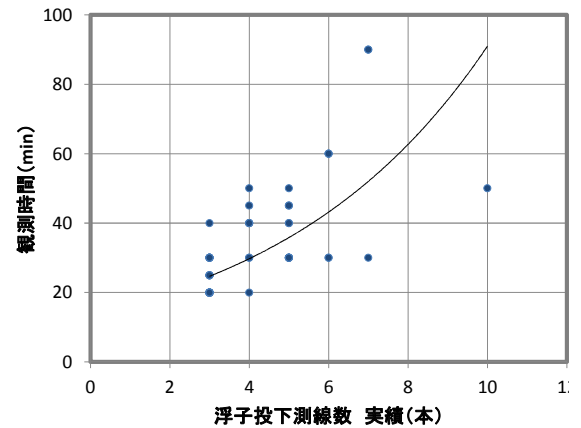


図-7 浮子測線数と観測時間

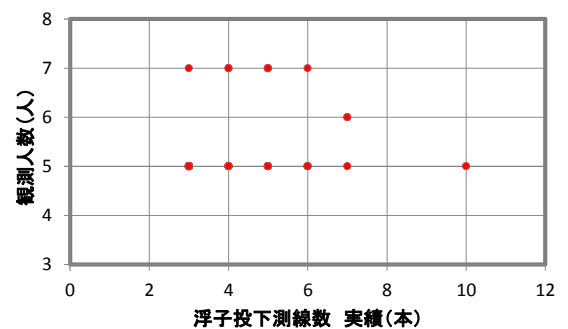


図-8 浮子測線数と観測人数

班長（橋上）1名の合計5名が基準となる。図-8をみると、測線数が最小の3本であっても10本であっても原則として観測人数は大きく変わらない。橋上に歩道などの空間が無い場合は、交通誘導員を配置する必要があるため、さらに2名ほど多くなる場合がある。以上より、従来法による高水流量観測では5名以下の省力化は困難である。

この結果から、複数の観測所で同時にピークを迎えるような場合、観測人数を十分に確保できない可能性がある。現状として、確保できずに少ない人数での観測や観測の見合わせが発生していると推察する。

4. 「新たなステージ」に向けた観測の課題

(1) 河川砂防技術基準調査編での高水流量観測の考え方

河川砂防技術基準調査編（H26.4）の“4.4.6精度確保のための留意事項”の必須項目として、①洪水時の観測は急激な増減水を伴うため、緊急かつ迅速に行う必要がある。②急激な水位上昇などにより、標準法による浮子観測が困難な場合は、緊急法による浮子観測を行い、データをより多く取得することを優先することと記載されている。

また、“4.4.2観測回数”では、高水流量観測ではピーク流量の取得はもとより、水位の上昇期のみならず下降期にも行うことを標準とするとされている。これより、高水流量観測では、1回の観測解像度よりもハイドロデータの取得が優先され、観測の「迅速化」は最も重要な課題といえる。

(2) 水位上昇量と観測時間の課題

急激な水位上昇に対して、現行法での対応がどの程度の有効性があるかを検証する。

平成24年7月に大きな災害となった筑後川水系の花月川と矢部川を例として示す。図-9に、出水時の最大水位上昇量と2時間積算雨量を示している。これによると、2時間で60mm以上の降水量があった場合、当2河川では最大1.5m/h以上の水位上昇が発生することを示している。

また、花月川花月水位観測所では、最大1.5m/hの水位上昇が続くと、図-10のように水防団待機水位超過から1時間以内で避難判断水位を超過する計算になる。現実には、花月では図-11に示すように、1時間以内にはん濫危険水位付近までの上昇が記録されている。

矢部川船小屋水位観測所では、最大1.5m/hの水位上昇が続くとすると、図-11のように、水防団待機水位超過から避難判断水位まで約2時間、はん濫危険水位までは2.5時間で到達することが予測される。

この2河川の事例を、「新たなステージ」の降雨と水位上昇の関係とした場合、現行法での20～40分/回の観測時間では、水位上昇に対処できない場合があると見られる。

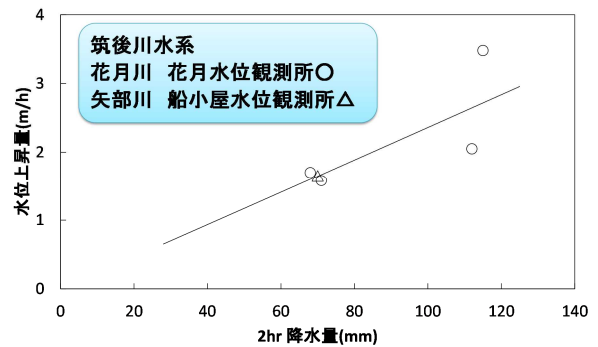


図-9 降水量と水位上昇量（花月川・矢部川）

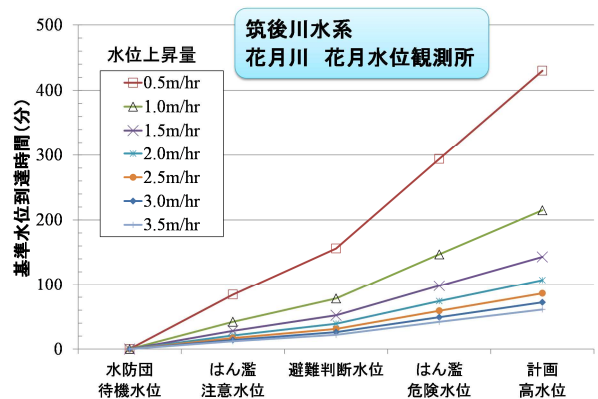


図-10 基準水位到達時間（花月川花月）

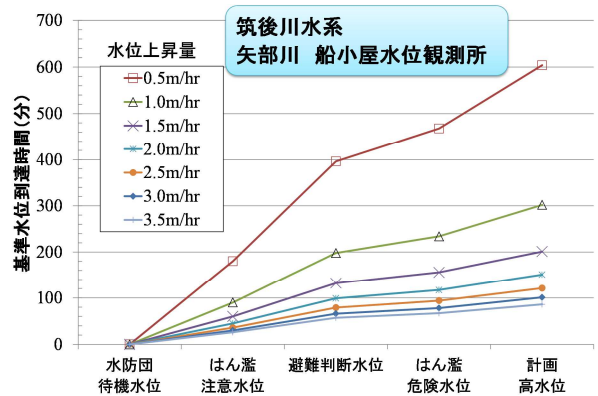


図-11 基準水位到達時間（矢部川船小屋）

(3) 迅速な初動体制の確立

迅速な観測を求められる中で、一番重要なのは初動である。現場管理者は事前に河川管理者との情報交換によって、出水が予想される場合は、すみやかに出水体制を組み、人員の確保と出動態勢の準備を行う。予想される水位ピークでの観測ができるように、河川情報をもとに、現場到着時間を逆算して出動する。以前は、各水位観測所に電話応答が設置されており、電話をかけると現在の水位を音声で知らせてくれるシステムが一般的であった。しかし、回線が1本のため、洪水時は常に話中で情報が得られにくいことがあった。現在はスマート

フォンの普及と河川情報の高度化によって、現場でもWeb上で河川防災情報を閲覧できるため、雨雲の動きや支川や上下流の水位情報も入手できるようになり、初動に対する情報は大きく整備されたと思われる。今後、XバンドMPレーダーなど高精度な雨量データの提供にも期待できるが、レーダーにかからない局所的な強雨をどのようにとらえるかが課題である。また民間気象会社などで会員からの情報提供により地域の気象情報をより細かく表示するものが見られているが、このような市民からの情報を活かせる情報システムも効果的ではないかと思われる。

(4) 熟練技術者の減少に対応した観測手法の標準化

現在、観測の現場では観測技術者の不足が憂慮されている。特に高水流量観測の場合は、河川の流況や観測環境が平常時と異なり、危険度も高いため、マニュアル化した作業で終結できないことが多い。そこでは、技術者の臨機応変な対応力が問われる。しかし、こうした対応力の習得には、大規模な高水流量観測の経験が必要である。北海道では昭和56年8月に石狩川を襲った災害があり、ここを経験しているか否かで、技術者の経験値が違うと言われる。堤防があふれて、見通し断面は消失し、浮子の在庫も底をついた時に、流れてくる流木などを浮子代わりに想定し、橋の上流端と下流端で見通して流速を測定したなど、さまざまな逸話がある。なんとしても流量を捉えてやろうという当時の技術者の意識と対応能力の高さには敬意を表したい。

今後想定される「新たなステージ」では、今までの想定を超えた出水が発生することも予見されるが、広範囲に出水が発生した場合、必ずしも熟練者がいるとは限らない。そこで、対応策としては、熟練者でも初心者でも同じような精度で観測ができるような観測手法を取り入れるべきと考える。いわば観測手法の標準化が今後の課題になる。

5. 「新たなステージ」に適用した観測方法

(1) 「新たなステージ」に適用した観測方法の高度化

現行の流量観測技術は、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）で定義されて以来約60年間継承されている。浮子を投下してその流下速度を測定するというシンプルな手法ながら現在まで適用され続けているのは、出水時など想定を超えたあらゆる条件下でも対応できる許容能力が高いことが評価されているからと思われる。しかし、浮子観測には観測の迅速性、省力化、見通し員の安全性などに脆弱性があると指摘されている²⁾。特に、「新たなステージ」では、迅速性がポイントになるため、豊富な観測人員を確保できない限り、現行法での観測には限界があると言わざる

を得ない。そこで、今後、「新たなステージ」で期待される3種類の観測方法について述べる。

a) ADCP (ADCP 搭載ボート)

木下³⁾は、当時海域での潮流観測等に用いられていたADCPを河川流量観測へ適用を試みた。ラジコンボートにADCPを搭載して、横断観測を行い、並列らせん流の発生など新たな水理現象を示している。また、喜澤⁴⁾はADCPの橋上操作船による高水流量観測への適用と感潮域などの低水観測への適用の有効性を示している。これは、萬矢⁵⁾のADCP搭載ボートを用いた橋上操作の研究成果により進化形となり、現在われわれが実務で使える形になっている。また、ADCPを用いた流量観測技術は、ここ数年で大きな進歩をもたらし、現在はADCPのデータを基準とすることで、新しい技術の提案が多く行われてきた。

ADCPによる観測手法は標準化に向けて進展しており、実河川での適用が可能となっている。ただし、初期投資が高い（ADCP搭載ボートで700万程度）ため、出水時などで使用する場合の保険適用の可否などの課題がある。また、ADCP搭載ボートの他にラジコンボートなど観測形態は増えているが、いずれも操作の習熟が必要である。

b) 電波流速計

山口⁶⁾は人力観測での高水流量観測の脆弱性を指摘し、自動観測を目的として、電波流速計を河川流量観測に投入した。現在は、携帯観測機器が出たことで、電波式の利用は身近になった⁷⁾。電波の最も良い点は、操作が簡単のため、観測をする場合に、現場の熟練度による差が出にくいことである。これは、「新たなステージ」で懸念される熟練者の人員不足を補うものとして有効であると考えられる。

課題としては、河面が鏡状で水面波紋が小さくなるとデータの取得できないことである。水深の浅い河川であれば出水時は波立ちやすいため使用可能だが、水深の深い河川の場合、流速は速いが水面波紋がほとんど表れてこない場合がある。販売元には、感度調節できる機能の追加を期待したい。また、大学・研究機関、コンサルタントには電波流速計の適用範囲に関する調査解析を期待したい。

c) 画像解析

藤田⁸⁾⁹⁾が開発した、Space-Time-Image-Velocimetry (STIV) によって、カメラ動画の画像解析で表面流速を把握することが容易になった。最も優れた点は、観測時間の短さである。山本¹⁰⁾の検証によると、水面幅約140mの河川で10秒以上の観測時間があれば良好な結果が得られるとされている。これは昼間の事例であるが、筆者らの夜間雨天時の劣悪な条件下でも20秒程度で結果が得られている。これは、現在提案されているど

の観測手法よりも短時間である。また、観測測線数も動画があれば自由に増減できることから汎用性が高い。

しかし、課題としては、電波と同様に水面波紋が小さい場合は流速の算出が難しくなる。また、水面幅が大きい場合、カメラより遠方の解像度が小さくなるため、精度が確保できない。これはカメラの俯角に問題があるため、藤田ら¹¹⁾の研究を参照していただきたい。画像解析を進める理由のもう一つの重要な点は、測定結果を残すことができることである。浮子観測や電波、ADCP ではその機器で測定した値のみが保存されるため、得られた流速を別の解析法で検証することはできない。しかし、画像解析は、全く処理されていない動画を残すため、解析手法が更新された場合に、再検証が可能である。他の手法よりも再現性ある点が推奨する理由でもある。

(2) 新技術による観測時間の迅速化・省力化

現行の浮子観測は、水面幅が 100m の場合、緊急法で約 30～40 分の観測時間が必要である。また、必要人員は 5 名となっている。

a) ADCP 搭載ボート

図-12 に示す ADCP 搭載ボートについては、観測所 1 箇所での連続観測であれば、橋上を左岸から右岸まで徒歩で移動する時間 (1m/秒) × 水面幅とすると、水面幅 100m では 10 分程度で 1 観測が終了することになる。高解像度のメッシュ流速を取得しながら、リアルタイムの河床高が測定し、これだけ短時間でデータを取得するのは有用性が高い。観測条件が良ければ ADCP での観測が精度的にも望ましいと考えられる。ただし、観測には ADCP 搭載ボートの河道内への進水と観測後の陸揚げ作業、ボートを牽引する橋などの構造物が必要となり、さらに管制 PC との通信設定などに時間を要する場合があります。観測所の条件によっては準備・後片付けの時間を含めて考える必要がある。ここは、迅速化としては不利な点である。

また、必要人員は「流量観測の高度化マニュアル (高水流量観測編) ver.1.0」¹²⁾ に橋上操作 2 名、PC 操作 1 名、安全管理 1 名の最低 4 名と記されている。

b) 電波流速計

2014 年 4 月に魚野川根小屋橋において、図-13 に示す横河電子機器 (株) RYUKAN を用いて、電波流速計の有効な観測時間を得るために観測した結果を図-14 に示す。現場状況は水面波紋が明瞭で風の影響はほとんど無い状態であった。電波流速計は橋の上流に向けて、俯角 40°、1 秒間隔で流速を計測し、10 秒、20 秒、30 秒、40 秒、50 秒の各計測の平均流速と 60 秒計測の平均流速との相対誤差を比較した。計測不能領域といわれる流速 0.5m/sec 付近ではばらつきが生じるが、そのほかの流速



図-12 ADCP搭載ボートの観測状況

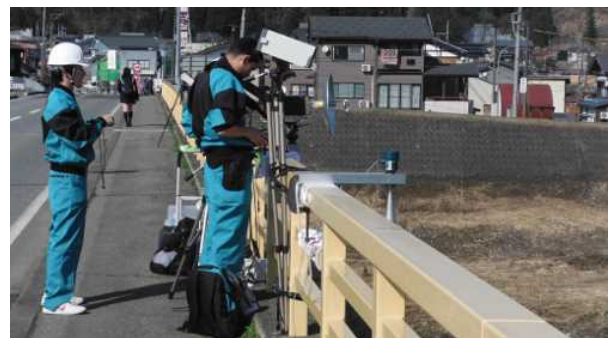


図-13 電波での観測状況

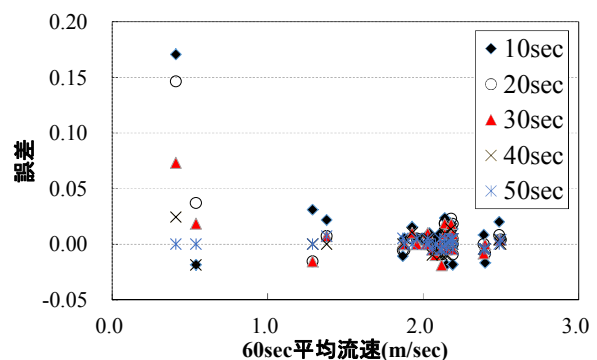


図-14 電波流速計の適正な測定時間



図-15 画像での観測状況

帯では観測時間の長短にかかわらず誤差 0.05 (5%) 以内で安定した精度を示している。この結果をもとに測点毎に約 10~20 秒程度の観測時間が必要と仮定する。水面幅 100m の場合、現行の高水流量観測の緊急法と同じ 5 測点で移動時間を考えて 1 測点 2 分とすると、1 回の観測に要する時間は 10 分程度と推定できる。これは、現行の高水流量観測の 1/3 程度の時間となる。作業は橋上になるため、必要人員は機器操作 1 名、安全管理 1 名の 2 名で可能と思われる。

c) 画像解析

画像解析では、**図-15** に示すように別途幾何補正のための評定点測定が必要となるが、水面幅にかかわらず撮影測点は 1 点でよい。よって、1 回につき 20 秒程度の動画撮影で終了する。必要人員は、カメラ操作 1 名、安全管理 1 名の 2 名で十分可能である。

図-16 より、観測の迅速度を比較すると、最も迅速なのは画像解析である。カメラ画像に河川全体が写るため、浮子や電波のように移動することは無く、カメラを 1 箇所に設置して 1 分以内の測定時間で終結する。これは、「新たなステージ」の急激な水位上昇に対して大きな優位性をもつと考える。ADCP 搭載ボートと電波（緊急法）は、川幅 100m とすると、測定時間は、ほぼ同じ時間と考えられる。ただし、ADCP 搭載ボートによる観測には観測前の準備作業時間を加算する必要がある。いずれにしても、この 3 つの新たな手法は、現行の高水流量観測に比べて、短時間で観測ができる能力が備わっていることがわかる。次に、**図-17** に省力度の評価を示す。最も人員がかからないのは、電波と画像解析である。いずれも橋上または堤防上で操作するため観測の安全度は高く、機器も小さいため、2 名程度の人員で観測が可能である。これは、ADCP の 4 名、浮子の 5 名に比べると、必要人員が半分の省力化になる。

(3) 熟練度を問わない観測手法（標準化）

熟練技術者の高齢化による人員不足は、今後、「新たなステージ」に向けて、さらに深刻な問題になることが想定される。また、実際の出水時には異なる観測所で同時に観測を行うことが多いため、熟練技術者がいたとしてもすべての現場を網羅することは不可能である。そこで、新技術には熟練度の有無にかかわらず、だれでも同一精度の測定が可能になる標準化された方法を望みたい。**図-18** に現地観測での評価を示す。これより、画像解析と電波が熟練度を最も必要としない観測として上げられる。画像解析は画角に注意するだけでよく、あとはカメラの性能頼りになる。電波も決められた橋上の測線で河川に計測器を向けて、一定時間の値をメモリに記録するだけで良い。

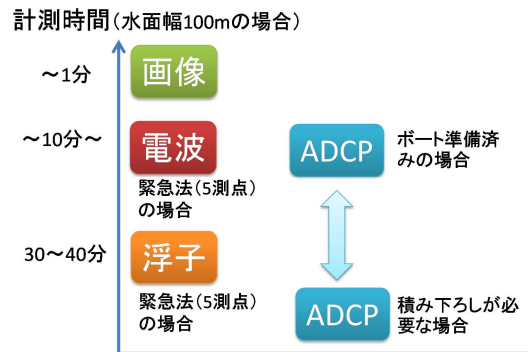


図-16 迅速度の評価



図-17 省力度の評価

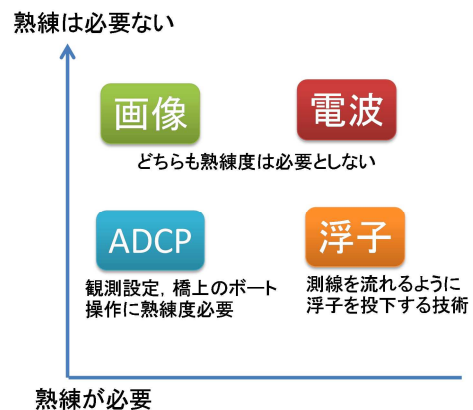


図-18 観測手法の標準化の評価（現地観測）

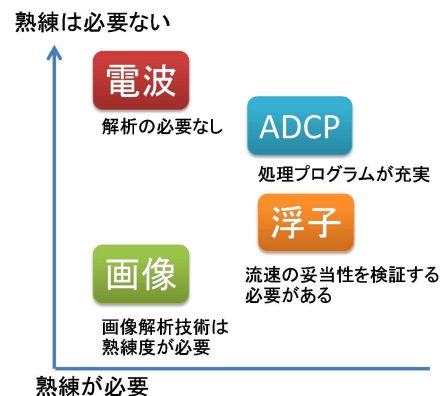


図-19 観測手法の標準化の評価（データ解析）

浮子観測は水位によって流れが変わるため、橋上の同じ位置で浮子を投げても流下測線に入らないことが多々ある。その観測所の流れの特性をわかっているか否かで、精度に偏りが大きく発生する可能性がある。浮子には熟練度が重要な理由の一つである。

ADCP 搭載ボートはまず、設定条件を作成する場合に熟練度が要求される。出水時観測の場合はデータの欠落などが発生しやすいため、多くの実績のある大学、研究所などの助言が必要である。また、橋上操作は流速が大きく流下物が流れている河の中でボートを浮かべるため、安全性の面で熟練度が要求される。

データ解析（流速算出）では、現地観測と異なる傾向がみられる。図-19をみると、最も熟練度が不要なのは電波である。電波は取得データがすでに流速変換されているため、そのままデータを使うことができる。

ついで ADCP と浮子が上げられる。Teledyne RD Instruments 社の ADCP は処理プログラム（WinRiver II Teledyne RD Instruments 社）やアプリケーション（Visual ADCP Tools（株）ハイドロシステム開発）が充実しているため、単純に流量算出などを求める場合は熟練度を問わない。さらに、観測による大量の情報には、さまざまなデータが含まれているため、データの取捨選択が必要となる。浮子は現地観測とつながっているが、浮子が測線をトレースして流下していたか、途中でよどみなどに引っかかっているか、橋脚後流の影響がないかなど、流下速度の妥当性を検証する必要がある。ここに熟練が必要になってくる。一方、現地観測では、迅速度、省力度、標準化で圧倒的な優位を保っていた画像解析であるが、流速を算出する場合は、簡単ではない。現在、STIV の専用アプリケーション（KU-STIV（株）ビーシステム）が市販されてかなり操作性がよくなったものの、検査線設定や夜間・雨天などの劣悪な条件下での画像補正などで、差異が出る場合があることから、現在のところ、ある程度の熟練度が必要である。

(4) 流量算出での力学的空間内外挿法（DIEX）の有効性

流量を算出するには、現行法では、浮子の投下測線数によって観測断面（第1・第2）を分割して区分流積を求め、そこに浮子の長さに応じた流下速度を更生係数で補正したものを乗じて、区分流量を求め、これらを加積して流量となる。迅速な観測をするためには、測点数を少なくするのが望ましいが、同時に、少ない測点に大きく分割した流積を乗じるため、測点での流速精度が流量を大きく支配することになる。

そこで、二瓶ら¹³⁾は図-20に示す、力学的空間内外挿法（Dynamic Interpolation and Extrapolation）DIEX法を開発し、運動方程式を簡略化した式を用いて、付加項の中で誤差を収束する手法によって、少ない測点を面的に内

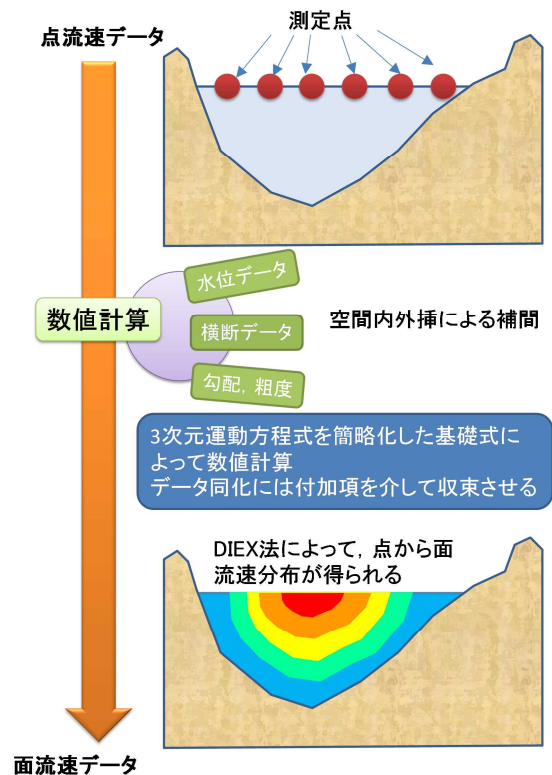


図-20 DIEX法の概要

外挿することに成功している。また、柏田ら¹⁴⁾は、DIEX法を改良し、内外挿する範囲を低水路、高水敷などに分けて、それぞれの補間方法を3次スプラインや線形などから適合するものを選択する方法を開発した。結果として不自然な付加項の横断分布を解消し、流量算出精度を向上させる効果が得られている。

DIEX法は運動方程式を基礎としているため、流速横断分布の乱れは小さい。ADCP搭載ボートによる横断方向の測定ではやや乱れの混じった流速分布になるのが一般的だが、この空間誤差は流量としてまとめた時に相殺されるものが多く、DIEX法はADCPのデータを空間平均した値と類似する結果が得られると考えるとわかりやすい。この手法が「新たなステージ」に適用できると考えた理由は、測点数が少なくても、空間補完することでADCPの高解像度で得られた流量と近似する値が得られるからである。この評価については柏田らにより^{15) 16)}多くの既往研究で示されているため参照されたい。本論文では実際の現地観測結果から、DIEX法の流量算出精度の有効性を検証した。以下に示す。

(5) 現地観測での流量算出

a) 現地観測

2014年5月8日に石狩川中流部の橋本町水位流量観測所で実施したICHARMとの合同観測の事例を紹介する。

現地は、融雪出水時で、水位は20.16から20.00mと下降に向かっており、川幅は約120m程度という条件下であった。観測は、10:00から16:00まで、概ね1時間毎に6回行った。観測内容は、浮子の緊急法（6測線）と、ADCP橋上操作船による断面の曳航観測を行った。同時に、プライス流速計を浮子と同じ6測線で表面のみ測定、画像解析STIV、電波を浮子と同じ6測線で測定した。なお、ADCPはTeledyne RD Instruments社1200kHzを用い、電波は横河電子工業（株）のRYUKANを、画像解析用のカメラはCANON EOS 6Dの動画モード（フルハイビジョン29.97fps）を用いた。

b) 各手法による流速測定結果

図-21に各手法による流速比較を示す。なお、ここで示す流速は測定値であり、更生係数などは乗じていない。ADCP流速を真値と仮定して横軸に配置し、それに対する各手法の流速を縦軸に配置した。電波はADCPに比べて小さな流速になった。これは、図-22のように、石狩川の水面波紋が小さかったため、電波流速計がとらえきれなかったため良好な値を算出できなかったものと考えられる。他の手法はADCPに比べて大きな流速を示す傾向がみられた。

c) 各手法による流量算出結果

ADCPは水深方向に0.25m毎の間隔で、約1秒に1アンサンブルデータを取得する設定で行っている。橋上では概ね1m/secのスピードで移動しているため、約1.0×0.25mのメッシュで流速データが得られていることになる。これを積算して流量を算出している。なお、データ取得できない表層付近は表面下第1層の流速を与え、下層付近はNoSlip補正、左右岸の水際は直前の流速を用いて三角形断面で補完している。浮子は現行法である区分求積法を用いている。浮子投下測線数で6分割した第1断面と第2断面の平均区分断面積に、それぞれの浮子の長さに応じた更生係数を流下速度に乗じて流量を算出している。プライス式と画像解析STIVは表面流速計測のため、表面浮子と同じ更生係数0.85を流速に乗じて、第1断面を6分割した区分求積法によって算出した。また、STIVについては、6測線の流速を用いて、DIEX法による空間内外挿した流量を算出した。

図-23にADCP流量を真値と仮定して、横軸に配置し、それに対する各手法の流量を縦軸に配置した。なお、電波については、流速がとらえきれなかったため、流量算出はしていない。これによると、浮子はADCPに比べて最大20%程度多く算出された。これは、速い流速帯に浮子が寄っていく傾向が原因と推察される。プライスでは約8~11%、STIV区分求積法では1~7%程度大きい値を示した。この原因は、第一に、ADCPはリアルタイムの河床高を測定できるが、それ以外は既往の横断データである点、第二に、区分求積法によって、区分断面に表面

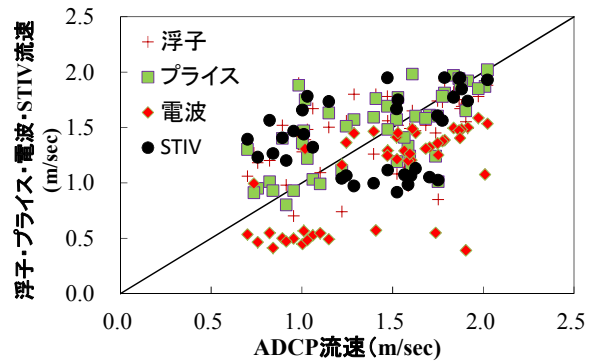


図-21 各手法による流速算出（石狩川）

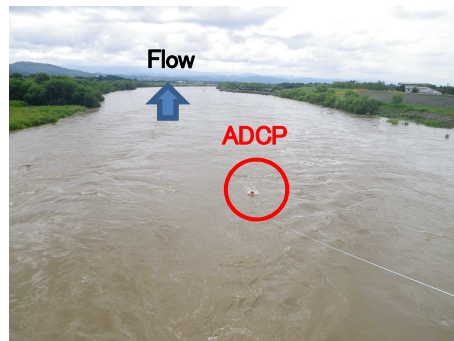


図-22 流速測定時の水面波紋状況（石狩川）

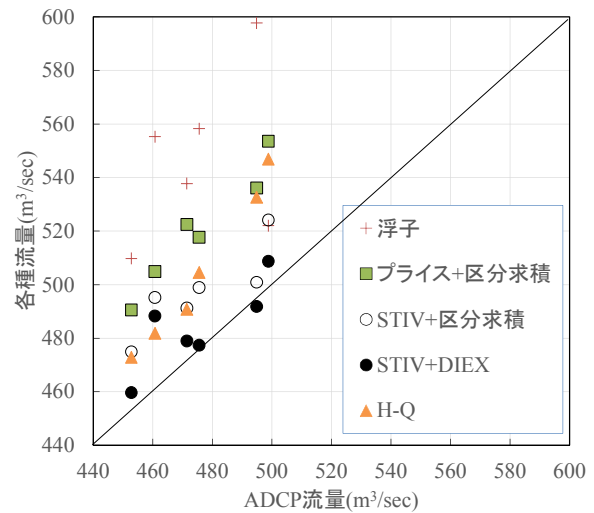


図-23 各手法による流量比較（石狩川）

流速を乗じているため、河床方向や河岸方向の流速の減衰を考慮していないことが大きく出る原因と推察される。

これらは更生係数または流速補正係数によって補正されなければならないが、風や水面勾配、河床変動など様々な要因を考慮しなければならず、更生係数の標準化は難しい作業であると思われる。しかし、STIV+DIEX法の流量は、ADCPとの誤差は1~5%、平均2%であり、ADCPに最も近似した流量を示した。なお、電波では流速を感知しにくい条件であったため、良好なデータが得られなかったが、水面揺動の大きな状態であれば、DIEX法を用いることでSTIVと同様、少ない測線で

ADCPに近い流量精度が得られる可能性がある。

以上より、DIEX法との組み合わせにより少ない流速測点数で流量結果が得られることは、現地作業や解析作業の負荷軽減に効果があると推察できる。

d) 新技術による観測方法の今後の課題

新技術による観測手法である、ADCP、電波、画像解析STIVはいずれも、従来の浮子観測に比べて迅速化や省力化に適合した手法であるといえる。しかし、水位上昇量などの現場の観測条件や橋、堤防などの観測環境によって、安全性や精度などの面から適する場合と適さない場合がある。よって、現場への適性を見極めた上で、どの観測が適しているかを選択する必要がある。そのため、今後、さまざまな観測条件での同時観測を試行して、それぞれの優位性と弱点を明確化する必要がある。そこで、各方法の優位性が発揮できる各観測条件を整理して、現行の観測所への実装を踏まえた適合性を評価する作業が必要である。

(7) 「新たなステージ」に適用した観測所の整理

現行の観測所が「新たなステージ」に対応できる状況であるかを、早急に精査する必要がある。

第一に、河川計画などに順じて重点的に流量観測が必要な観測所の選定を行い、第二に、その観測所が新たな観測手法に適合できるかを、現地の観測環境を踏まえて選定する必要がある。新しい観測手法が適用できるかどうかは、橋梁の高さや、歩道の有無、トラスなどの障害物の有無、堤防と水面の高低差や川幅といった観測所の環境条件を整理する必要がある。また、水位上昇量や出水時の水面波紋の状況なども手法選定のポイントになる。全国の観測所で実施されることを望む。

6. まとめと課題

- ・ 「新たなステージ」では、水位上昇量が大きくなる中での観測が想定される。
- ・ 「新たなステージ」に対応できる流量観測技術として、迅速で省力、標準化した手法が望ましい。
- ・ 現地観測で最も迅速、省力なのは画像解析STIV+DIEX法による流量算出である。
- ・ 画像や電波などの少ない測点での観測値での流量算出にはDIEX法による空間補間が有効である。
- ・ ADCP、画像解析STIV、電波について、それぞれの優位性が発揮できる観測条件を整理し、現行の観測所への実装を踏まえた適合性の評価が必要である。
- ・ 出水時流量が重要な観測所の抽出と、観測所環境の精査から「新たなステージ」に適合する観測手法の選定を行う必要がある。
- ・ 今回、新しい観測手法を用いた流量比較の一例を紹

介した。今後は、多様な特性の観測所で観測を行い、データを蓄積・評価していく予定である。

謝辞：国土交通省北海道開発局札幌開発建設部には、現地観測実施に際して、多大な便宜をはかって頂きました。ここに記して謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・保全局：新たなステージに対応した防災・減災のあり方，2015.
- 2) 橋場雅弘・甲斐達也・津田哲也・土田宏一：河川流量観測の高度化に対する観測実務者からの視点，河川流量観測の新時代，第4巻，2014.
- 3) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11，No.5，pp.460-471，1998.
- 4) 喜澤一史・井出康郎：河川流量観測における新計測法の提案について，河川技術論文集，485-490，2001.
- 5) 萬矢敦啓・菅野裕也・深見和彦：河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点，河川流量観測の新時代，第1巻，2010.
- 6) 山口高志：流量監視システムの提案，財団法人河川情報センター 河川情報研究所報告，第2号，1988.
- 7) 宮村恵理也・中島洋一・吉村淳也：本格的な実用期を迎えた電波流速計『固定電波流速計&RYUKAN』，河川流量観測の新時代，第3巻，2012.
- 8) 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.
- 9) 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，I_703-I_708，2013.
- 10) 山本 泰督・本永 良樹・栗城 稔：KU-STIVを用いた流量観測の検証，河川情報シンポジウム講演集，2014.
- 11) 藤田一郎・北田真規・霜野充・橋田隆史・萬矢敦啓・本永 良樹：複数アングルの画像計測とラジコンボート搭載型ADCPによる融雪洪水流の空間計測，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.613-618，2014.
- 12) 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：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編）Ver.1.0.
- 13) 二瓶泰雄・木水啓：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案，土木学会論文集，No.803/II-73，pp.155-160，2005.
- 14) 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.
- 15) 島本重寿・藤田一郎・萬矢敦啓・柏田仁・浜口憲一郎・山崎祐介：画像処理型流速測定法を用いた流量観測技術の実用化に向けた検討，河川技術論文集，第20巻，2014.
- 16) 柏田仁・二瓶泰雄・山下武宣・山崎祐介・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，2012.

(2015. 2. 13受付)

スマートフォンを用いたLSPIV観測システムの開発

DEVELOPMENT OF LSPIV SYSTEM UTILIZING SMARTPHONE

椿 涼太¹・藤田一郎²・Kwonkyu Yu³・Marian Muste⁴
Ryota TSUBAKI, Ichiro FUJITA, Kwonkyu YU and Marian MUSTE

¹ 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

² 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³ Department of Civil Engineering, Dong-eui University, Busan, Korea.

⁴ IHR-Hydroscience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, USA.

A mobile system for LSPIV (large-scale particle image velocimetry) measurement is developed. The system consists of commercially available smartphone device and LSPIV application software. The software utilizes a camera and other sensors embedded in the smartphone. The image captured by the camera is automatically ortho-rectified with support from positional information obtained by the sensors, then velocity distribution is estimated at every moment. The performance of the developed system is verified through a rotating image test. An acceptably small systematic error and substantial magnitude of instantaneous velocity error are confirmed, and countermeasure for this errors is pointed-out.

Key Words: LSPIV, smartphone, ortho-rectification.

1. はじめに

LSPIV (Large-scale particle image velocimetry)¹⁾は、非接触で河川表面流速分布を計測する手法であり、洪水時の河川の流速分布計測や、流量算定手法として利用されている^{2,3)}。また、室内での開水路実験の計測手法として利用される事例も少なくない^{例えば4)}。関連する技術として、実河川での流量計測に特化したSTIV (Space-time image velocimetry)の技術開発や検証も進みつつあり⁵⁾、河川管理における可視化計測手法の位置づけの再認識が進みつつある。

LSPIVやSTIVを実施し、定量的な結果を得るためには、画像上の座標を実空間での座標と対応させる必要がある。その対応付けには、写真測量で用いられて幾何補正とよばれる技術が用いられる。すなわち、実空間での座標が既知で、画像上で視認できる標定点を複数用いて、その位置関係から幾何補正に用いる座標変換式の同定を行う¹⁾³⁾。標定点の配置が不適切であったり、標定点の計測精度に不備があったりすると、その影響はLSPIVの計測結果におよび、結果として計測精度の低下をもたらすことになる。また、座標間の関係の同定において、収束計算のための適切な初期条件の設定や、収束計算方法

の調整が必要になる場合がある。幾何補正の精度を確保するためには、このようにいくつかの注意点があり、その対処法に習熟する必要があることが、LSPIVやSTIVを計測ツールとして利用し始める際の障害の一つとなっている⁶⁾。また、突発的な洪水観測の計測に際しては、事前に標定点を適切な配置で計測域の周辺に展開し、測量を行うこと⁷⁾が、事実上困難である場合も少なくない。

ところで、今日の比較的高機能なスマートフォンは、パーソナルコンピューターに準ずる汎用的なデータ処理機能と高い操作性をもっている。さらに、無線でのインターネット接続や、カメラや位置センサーなどの多数の計測デバイスを備えている。このようなスマートフォンの特長を生かし、河川環境計測の情報プラットフォーム^{例えば8)}や、流量計測ツール^{例えば9),10)}としてのスマートフォンの利用が進みつつある。観測での利用において、スマートフォンに内蔵された各種センサーを利用することで、観測の効率化・高度化・自動化などの付加価値を生むことが一つのポイントとなっている⁸⁾。

このような技術動向のもと、本研究では、LSPIVの実施ツールとしてスマートフォンを利用する。従来のLSPIV計測で課題となる幾何補正の煩雑さを、スマートフォンに内蔵されたカメラとセンサーを一体的に利用することで解消し、一台のスマートフォンをプラット

フォームとしたリアルタイム観測機能をもつシステムを構築する。

2. 観測システムの開発

(1) 利用するスマートフォンデバイス

本研究では、iPhoneをLSPIV実施のためのハードウェアとして利用する。これはiPhoneシリーズが、他のAndroidに代表されるスマートフォンと比較すると、モデルの数が相対的に少なく、計測機材としての性能をモデルごとに絞り込むことが可能なため計測機器として適すると判断した結果である。本研究では、iPhone 5sとiPhone 6 plusという二つのモデルを利用する。これらのモデルでは、位置・姿勢センサーとしてGPS、加速度センサー、ジャイロ、コンパスが内蔵されている。これらのセンサーの情報はMotion coprocessorという処理系において時々刻々と統合的に処理されて、デバイスの姿勢や動きが推定される。本研究では、推定された姿勢や方位の情報を利用することで、標定点を用いずに幾何補正を行う。なお、iPhone 6シリーズでは、上記のセンサーの他に気圧計が内蔵されており、相対的な標高の時間変化の検出に利用されているが、幾何補正で必要となる絶対的な標高の精度確保への展開については、現在では実装されていないようである。

(2) ソフトウェアの開発環境

可視化計測用ソフトウェアは、著者らがこれまで開発してきた、Delphi言語で記述されWindows OS用のLSPIVソフトウェアパッケージのコードを利用した。Embarcadero社により発売されている開発環境であるDelphi XEシリーズは、開発環境の本体はWindows OS上で実行するが、iPhoneで利用されるiOS上で実行可能なアプリケーションソフト（アプリ）を生成することが可能である。Delphi XEを利用してiOSアプリを実行するためには、図-1に示すように、Delphi XEを実行しているWindows PCと、MacOS上で起動したPAServerというリモート開発用のサーバーを介してiPhone実機にアプリを送り込むことになる。アプリの生成に際しては、MacOSの開発環境であるXCODEの支援も必要となる。このように機器・ソフトウェアの構成が複雑であり、それぞれのソフトウェアやOSのバージョンの相性により、iPhone実機でのアプリの実行に支障がでる場合もみられた。また、Delphiシリーズのこれまでの特徴は迅速なコンパイルと比較的速い実行速度であったが、iOSアプリの作成については、開発環境の構成が複雑なこともあり、実行までにやや時間がかかり、またWindows PCでの同様なコードの実行に比べると、デバイスの処理能力の制約もあり実行速度も比較的低下する。

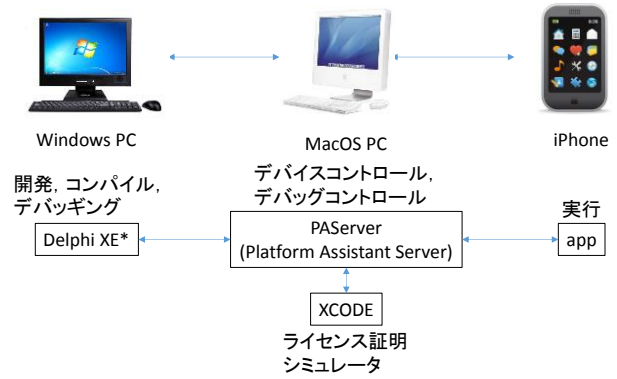


図-1 開発環境に用いた機器とソフトウェアの構成図。

(3) 幾何補正

幾何補正には、著者らがこれまで利用してきた¹¹⁾以下のカメラモデルを用いる。

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \delta_x, \\ y &= -c \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \delta_y \end{aligned} \quad (1)$$

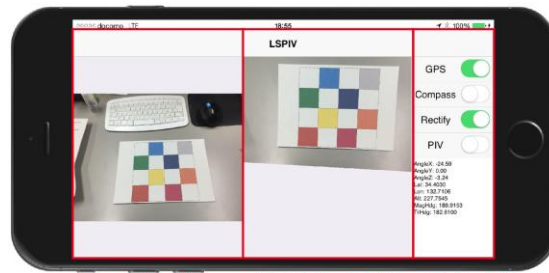
ここに、 (x, y) : 画像上の座標、 (X, Y, Z) : 実空間での座標、 (X_0, Y_0, Z_0) : カメラの投影中心、 c : 焦点距離、 a_{**} : 変換係数であり、以下の回転行列の積により定まる。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここに、 (ω, ϕ, κ) : 撮影方向の角度である。式(1)に含まれる (δ_x, δ_y) は、ピンホールモデルと実際の光学系の差であり、レンズひずみと称される。ここでは、基本的なひずみモデルである、

$$\begin{aligned} \delta_x &= d r^2 x \\ \delta_y &= d r^2 y \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

を用いた。係数 c および d は、光学系により定まる係数であり内部標定要素とよばれ、そのほかの撮影時の位置や姿勢などにかかわる外部標定要素と区別される。本研究では、内部標定要素は事前の室内でのキャリブレーション



カメラ画像 幾何補正画像 操作パネル

図-2 開発したアプリのGUI.

ンにより同定し、外部標定要素をスマートフォンに内蔵されたセンサー情報をもとに決定していくことで、標定点を利用しない幾何補正を実現する。

(4) PIV (Particle Image Velocimetry)

基本的なPIV手法である相互相関法を用いる。この方法では、基準となる時刻の画像上に配置された一定サイズのテンプレート (i, j) 内の輝度の分布と、次の時刻の画像における探査領域 $(i+x, j+y)$ 内の輝度分布との類似度を、相関係数

$$R_{x,y} = \frac{\sum_i \sum_j (I_{i,j} - \bar{I})(I'_{i+x,j+y} - \bar{I}')}{\sqrt{\sum_i \sum_j (I_{i,j} - \bar{I})^2} \sqrt{\sum_i \sum_j (I'_{i+x,j+y} - \bar{I}')^2}} \quad (3)$$

により算定する。この相関係数の最も高い位置 $(i+x, j+y)$ に、基準時刻での (i, j) のパターンが移動したと仮定し、画像間の経過時間からパターンの移動速度ベクトルを算定する。

(5) GUI (Graphical User Interface)

一般的にスマートフォンのカメラで取得される画像は縦横の幅が一定ではない。河川流をLSPIVで計測する場合、河岸から水面を撮影することが多く、水面を幅広く画像上でとらえるうえでは、画像の長辺を水平方向に、短辺を鉛直方向にとることが有利である。したがって、本研究では画像の長辺を水平方向に利用することとし、スマートフォンのデバイス自体も長辺が横向きとなる方向でGUIを設計した。具体的には、図-2に示すように、スクリーンを三分割し、カメラの撮影画像のプレビュー領域、幾何補正とPIV結果を表示する領域、操作や情報表示のためのツールボックスに区分した。

2. 実証試験

(1) 方法

図-2のスクリーン上に見える、平面上の4×4のブロック(一辺5 cm)の画像の25個の交点を用いて、内部標定

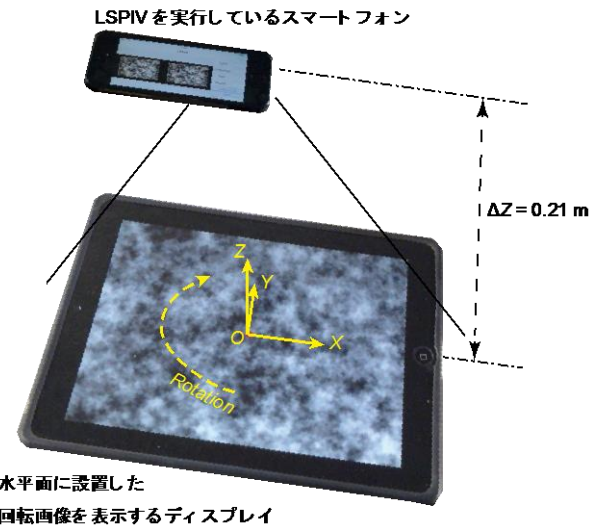


図-3 測定試験の実施方法.

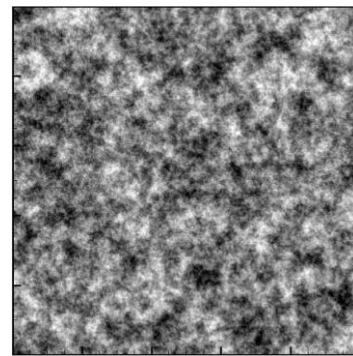


図-4 測定試験に用いたグレースケールのフラクタルパターン¹²⁾.

要素の同定を行った。本研究でLSPIV解析に利用する画像は、プレビュー用の中解像度のものであり、iPhone 5sは852×640ピクセル、iPhone 6 plusは1440×1080ピクセルの大きさである。次に、同定された内部標定要素を利用して、図-3に示すように、水平面上で回転するパターンの映像を用い、その映像の上部に設置したスマートフォンでLSPIVを実行した。パターンの回転は一回転90秒の一定速度で行い、PIVに適した複雑さを持ったパターンとして図-4に示すフラクタル模様¹²⁾を利用した。現在の機器構成では、デバイスの絶対的な標高の算定精度が

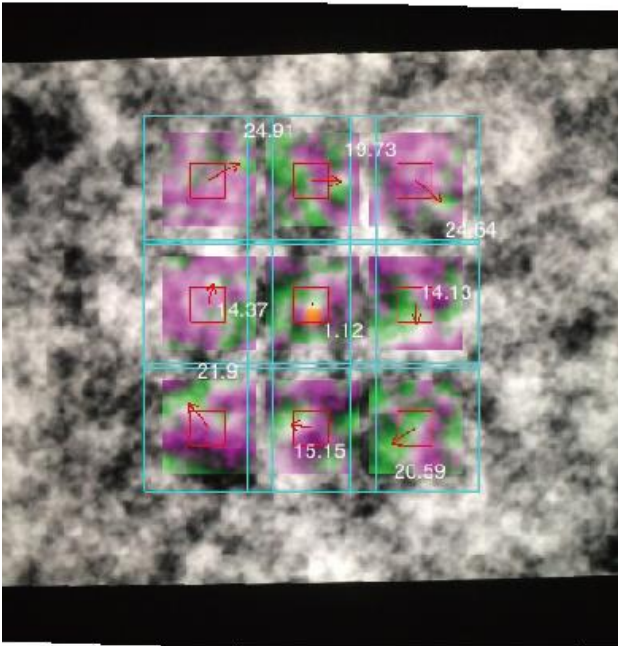


図-5 回転画像を対象にLSPIVを実行しているスマートフォンのスクリーンショットの例（赤枠はテンプレート、青枠は探査領域、赤矢印は流速を表す。）

メートルオーダー以上あり、外部情報なしで、撮影機材と計測対象面の高さの差を、室内実験で必要となるcm程度以下の精度で計測することはできない。本試験でも撮影機材と計測対象面の高さの差は与えず解析を行った。結果として得られた流速分布の空間スケールは不定であり、ここでは、試験結果をパターンの回転速度という時間スケールのみで規定される情報で分析していく。

流速分布は 24×24 ピクセルをテンプレートサイズとし、上下左右に32ピクセルずつ探査して、もっとも相関係数の高い位置関係をもとに速度分布を算出した。相関係数が小さいサンプルや、テンプレート内の輝度分布が平坦なサンプルなどの除去は行わず、すべての計測値を分析対象とした。

(2) 結果

図-5に計測途中のデバイスのプレビュー画像を示す。幾何補正された画像上に計測された流速分布が合成表示され、画像と速度の対応関係を視覚的に確認できるようになっている。

図-6に測定試験の結果を $x-v$ および $y-u$ プロットとして示す。回転パターンの移動では、回転中心からの距離と、円周方向の速度成分が角速度で規定されるため、図-6に示した近似曲線から測定の実験誤差を算定することができる。またパターンは一定速度で回転しているため、速度のばらつきは、計測のランダム誤差に対応する。本試験では $\omega = 0.0785 \text{ rad/s}$ であり、図-6に示す近似曲線の傾きと比較すると、計測値の角速度は2~4%ほど過小評

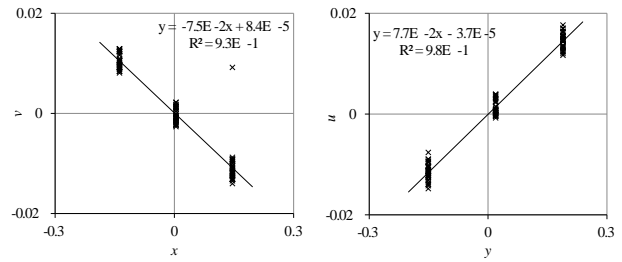


図-6 測定試験により得られた $x-v$ (左) および $y-u$ (右) プロット。

価していることがわかる。また、近似曲線からの値のばらつきを標準偏差として算定すると、速度オーダーの20%程度の大きさであった。本システムで用いたPIVアルゴリズム自体のランダム誤差はこの1/5程度の大きさであることから、速度のばらつきは、幾何補正に起因することが示唆される。具体的には、スマートフォン自体により算定されるデバイスの角度の推定値に含まれるシステム誤差およびランダム誤差による影響が大きいものと考えている。対処方法としては、事前キャリブレーションによるシステム誤差の補正と、時系列データの統計的処理によるランダム誤差の軽減が効果的と考えられる。

4. おわりに

スマートフォンをプラットフォームとしたLSPIV観測システムの開発を行った。水面との標高差をのぞく幾何補正作業がスマートフォンに内蔵されたカメラとセンサーシステムの情報を一体的に利用することで自動化された。構築された観測システムを用いて、回転パターンを用いた精度検証試験を実施した。その結果、観測システムにより得られた流速分布には3%程度のシステム誤差と、より顕著なランダム誤差が確認され、デバイス角度の推定誤差に起因することが示唆された。

今後、デバイス角度の推定誤差の定量評価と、誤差の軽減手法の開発を進める予定である。また、より実際的な検証試験を行っていくことで洪水観測への適用性や精度の確認を行っていく必要がある。現状では、解析速度が遅く、ソフトウェアのチューニングにより高速化も進める予定である。また、複数デバイスを用いた多点同時観測の実現による、データ補完や精度向上も進めていく所存である。

謝辞：本研究の一部は、河川整備基金、一般財団法人国土技術研究センターの研究開発助成（平成25年度）、科学研究費補助金による助成のもとに遂行されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 397-414, 1998.
- 2) Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, Vol. 44, W00D19, 2008.
- 3) Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B. and Hauet, A.: Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, pp. 301-312, 2011.
- 4) Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., Sumi, T., and Murasaki, M.: LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, pp. 263-276, 2011.
- 5) 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, *土木学会論文集B1 (水工学)*, Vol.67, No.4, p. I_1177-I_1182, 2011.
- 6) 藤田一郎: 映像を活用した河川流速・流量の非接触画像計測の進展, *河川流量観測の新時代*, Vol. 4, pp. i-iii, 2014.
- 7) 椿 涼太, 藤田一郎, 眞間修一, 竹村仁志, 金原健一: 既設ビデオカメラを用いた画像解析法による中小河川の流量観測のためのカメラ設定方法および解析方法に関する研究, *土木学会河川技術論文集*, Vol. 15, pp. 501-506, 2009.
- 8) Camp, R. J. and Wheaton, J. M.: Streamlining field data collection with mobile apps, *EOS*, Vol. 95, No. 49, pp. 453-454, 2014.
- 9) Lüthi, B., Philippe, T., and Peña-Haro, S.: Mobile device app for small open-channel flow Measurement, 7th Intl. Congress on Environmental Modelling and Software, San Diego, CA, USA. 2014.
- 10) Yu, K. and Cho, W.: Real-time surface image velocimeter using a smartphone, 19th IAHR-APD Congress, Hanoi, Vietnam, 2014.
- 11) Tsubaki, R. and Fujita, I.: Stereoscopic measurement of a fluctuating free surface with discontinuities, *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, pp. 1-9, 2005.
- 12) Tsubaki, R. and Kawawhara, Y.: The uncertainty of local flow parameters during inundation flow over complex topographies with elevation errors, *Journal of Hydrology*, Vol. 486, pp. 71-87, 2013.

(2015. 2. 13受付)

新しい流速計の検定方法について

Discussion about Calibration Examination of New Current Meter

萬矢敦啓¹・橘田隆史²・墳原学³・菅野順一⁴・岩見洋一⁵
Atsuhiko YOROZUYA, Takashi KITSUTA, Manabu TSUKAHARA,
Jyunichi KANNO and Yoichi IWAMI

¹Ph.D. 土研水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²修士(農学) 株式会社ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18)

³学士(工学) 横河電子機器株式会社 (〒257-8502 神奈川県秦野市曾屋500)

⁴学士(工学) 株式会社セレス流速計試験所 (〒201-0004 東京都狛江市岩戸北2-11-1)

⁵修士(工学) 土研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)

Calibration of the velocity measurement devices have been conducted in Japan since 1933. Price type current meters and others of these kinds have contributed to measure the low flow discharge, and have been subjected for the calibration. The calibration facilities were well designed to examine the current meters with a water tank, which can maintain still water, and a tow cart, which can control and monitor the speed. On the other hand, the measurement devices for the high flow discharge have, recently, developed with different principles, such as acoustic, Radar, and video-images. It is necessary to check and calibrate the devices for maintaining accuracy as well. However it is not simple to prepare the calibration facilities for examining the new devices, because of the different principals. For example, the acoustic type instrumentations require back-scatters with an appropriate signal-to-noise ratio in contaminated water, while Radio and video-images require water surface ripples. With applying the existing calibration facilities, this paper discusses the method to verify the accuracy of the recently-developed measurement devices, such as the acoustic, Radar, and video-images.

Key Words : Calibration, flow measurement, Acoustic Doppler Current Profiler, Rader, Video images

1. はじめに

日本国内における低水流量観測は、すべての流量観測地点において一年間に36回計測することを義務づけられている¹⁾。ここで計測される河川流量は河川管理者が治水、利水及び環境計画・管理を行う上で基礎的な資料であることから、高い精度の計測を継続する必要がある。現況で使用頻度の高いプライス式や、三栄式に代表される流速計は検定式の定数の経年変化が認められる。このため流速計の精度を保証するために、一年に一度の流速計の検定を義務づけている。このような背景から、独立行政法人土木研究所(以下土研)は昭和8年頃より流速計検定を実施してきた。現在日本国内における流速計の検定機関は、著者らが所属する土研と株式会社セレス流速計試験所(以下セレス)だけである。

洪水流量観測に関して、日本国内では浮子流量観測手法を採用してきた。この観測手法は大雑把に言えば、浮子を河川水に投げ込み観測所に応じた基準断面間を通過

する時間を計測し流速値を算出するものである²⁾。浮子観測はオイラー的な観測ではなく、ラグランジュ的な観測であること、また得られる流速は観測地点の河道形状、河道線形等に依存することから、計測器としての事前のキャリブレーションができない。

一方、近年、画像解析³⁾や超音波⁴⁾、電波技術⁶⁾等を応用した新しい流速計が開発され、実用に資する技術として河川砂防技術基準¹⁾や、論文等でも紹介されている。例えば、acoustic Doppler current profiler (aDcp)⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾¹¹⁾、電波式流速計¹²⁾¹³⁾、画像解析手法の一つであるSpace-Time Image Velocimetry (STIV)¹⁴⁾¹⁵⁾があげられる。本報では商品としてのADCPと区別するため、一般名としての超音波流速計をaDcpと表記する。また国外に目を向けると、ドイツ国のOTT社のAcoustic Digital Current Meter (ADC)や米国SonTek社のFlow Trackerなど、音響系の計測機器が普及してきた。これらはプライス等の点計測に変わる新しい技術として注目されている。またISO/TC113(国際標準の開水路における流量測定に関する分科会)のSC1(流速断面積法)では電波式流速計や画像解析を含

めた非接触型流速計を用いた流量観測手法に関して、国際基準として登録すべく議論を再開させた。今後はこのように新しい観測手法による計測手法が認知され、それぞれの計測結果が水文統計値として登録され始めることが想定される。それ故に計測手法の精度を保証するための計測機器の検定が必要となる。

本報告では、後述するAcoustic Workshopでの議論の内容と、新しい流速計の検定方法に関する実証実験について報告し、現在まで理解していること、今後の流速計検定方法のあり方に関して議論を進める。

2. 既往の流速計検定

プライス式や三栄式に代表されるような流速計の検定方法は、勾配ゼロの直線水路に水を満たし、静水を用意する。移動速度を操作及び管理できる台車に検定対象である流速計を吊るし、水路内の静水につけ、台車を特定の移動速度で動かす。台車の移動速度とこのときの流速計の計測速度が正しいことを確認することで、検定とする。一般的には流速計の持つ計測範囲を15段階にわけ、各段階の台車速度と流速値のずれを比較するものである。このような検定施設は、台車の移動速度の精度が無視できるほど小さいこと、水路内の静水がゼロの流速であることが検定に必要な環境である。

また日本国内の流速計の検定機関は土研とセレスの二者である。両検定施設の諸元は表-1を参照されたい。土研の検定水路は屋外にあること、セレスの検定水路は屋内にあることが特徴である。またセレスの水路は年に一度清掃を実施しているのに対して土研ではそのような作業は実施していない。

3. Acoustic Workshop

(1) 概説

Acoustic WorkshopはUSGS(United States Geological

表-1 検定施設諸元

		セレス	土研
水槽の諸元	幅, m	2.0	2.0
	深さ(有効水深), m	2.0 (1.8)	1.6(1.4)
	全長, m	155	220
	材質	コンクリート	
台車の諸元	長さ, m	3.5	4.0
	幅, m	2.5	3.0
	高さ, m	1.8	3.1
速度範囲		0.01~6.0m/s	
速度制御装置方法		ロータリーエンコーダー (分解能0.1mm)	
速度精度(対設定速度)		0.5%以下	1.0%以下

Survey) の研究者で、Mississippi州のStennis Space CenterのHydrologic Instrumentation Facilityに所属している、Janice Fulford及びKirk Thibodeauxが始めたWorkshopである。2013年3月のStennis Space Centerにおける会議では、米国のUSGS、カナダのEnvironmental Canada、ニュージーランドのNIWA(National Institute of Water and Atmospheric Research)、オランダのDELTARES、スイスのMETAS(Federal Institute of Metrology)、オーストラリア・クイーンズランド州のDNMR(Department of Natural Resources and Mines)、日本の土研から、それぞれの国及び地域で流速計の検定を担当している技術者が参加した。また計測器のメーカーとして、ドイツのOTT社、米国のTeledyne RDI社(以下TRDI社)、日本の(株)ハイドロシステム開発社の技術者が参加した。その他にも二ヶ月に一回程度の電話会議を実施している。本報告の著者の一人である萬矢はISOの国際会議で同席したKirk氏に声をかけられ、参加することになった。多かれ少なかれこのようにして参加者が増えているように見受けられる。これまでは一年に一回程度の打合せと二ヶ月に一回程度の電話会議を実施してきた。ここでは、音響系の計測機器に必要な検定水路の環境設定とaDcpの検定手法であるDistance Make Good testing (DMG)に関して議論した。対象となる計測機器はポイント型音響技術を用いたOTT社のADC、SonTek社のFlow Trackerと、多層型音響技術を用いたTRDI社及びSonTek社のaDcpである。これらの議論内容を各国で試行することが各国の代表者の宿題となっているが、日本はポイント型の計測機器が普及していないので、DMGに関してのみ関わることにしている。

(2) 音響系流速計の検定水路の環境設定

音響系の流速計は、対象とする水に音波を照射し、送・受信波から得られるドップラー効果を用いて流速値を得るもので、これらの流速計の検定を実施するためには、特に質の良い受信波を得るための環境を作る必要がある。ここでは検定に用いる水路内の水質に関して適切な環境に維持する必要がある。多くの場合はカオリン等の懸濁物質を散布し、あえて水質を汚くすることでS/N比を高くする。しかしながら、散布する懸濁物質の種類、濃度に関して未だコンセンサスが得られていない。またOTT社の報告によると検定水路のS/N比が均質でない場合、計測結果が不安定になることも報告された。このように流速値がS/N比に依存するような流速計を検定することは、これまでの検定方法が水路内の静水を用意すればよいのと比較すると、水路内の水質を適切に設定するという観点からかなり困難であることがわかる。このように水路の環境に依存する流速計の検定を実施することは非常に難しいといえる。

(3) Distance Made Good Testing (DMG)

DMGはUSGSのaDcpに関する検定手法である。USGS

では検定台車を動かし、そのときのボトムトラックが計測する距離と実際に動いた距離を比較することで精度検証としている。検定条件は計測距離が22.8m、加速度が0.02m/s²、最大速度を0.4m/sとしている。検定では最初にビーム1を検定水路の進行方向に向け、それぞれ進行方向に2回、逆方向に2回の計測する。その後45度トランスデューサを回転させ、その角度において同様に4回計測する。このように45度角度を変えて合計4回の計測を1セットとして、合計8方向の向きで実施する。なおこのような検討の際にはカオリンを用いた懸濁物質を使用している。TRDI社におけるaDcpの品質検査においてもこのような手法がとられている。

4. 新しい流速計の検定方法

(1) 検定対象となる流速計の計測原理

a) aDcp

aDcpは超音波ドップラー多層型流向・流速計で、3又は4つのビームからビーム方向の流速を計測し、三次元の流向・流速を算出するものである。洪水流量観測に頻繁に使用される種類のaDcpはボート等に搭載し、水面から河床を照射し、曳航しながら流速値を得るものである。それ故に、本体の計測性能の他に、ボートの移動速度、ピッチロールセンサーを用いた舟艇の傾き、方位磁石を用いた舟艇の向きなどが計測する流速値に効いてくる。これらのセンサーがすべて同期する条件でのみ正しい流速値が得られる。

上記全てのセンサーの同期状況を確認するためには、例えば実河川又は湖沼においては、ボートに搭載し流速値を得ることも一つのアイデアではあるが、対象となる水域の流速値がわからないため検定に使うことはできない。一方でUSGSはこのような方法で河床移動がないという前提でボトムトラックのフィールドによる検定方法を提案している。

b) 電波式流速計

電波式流速計は橋梁等からある俯角でセンサーを傾けて、流れに対して電波を照射し、その送受信波から算出されるドップラーシフトから水面の流速を算出するものである。解析するのに十分な受信波を得るために、流れの表面に凸凹が発生している必要がある。

c) 画像解析、STIV法

画像解析を用いる手法は映像又は写真を撮影するためのカメラを河岸等に設置し撮影をする。そのとき画角内に精度よく測量された6点以上の評定点を設置し、それを用いてあたかも上空から撮影したかのように幾何変換を実施する。幾何変換後の画像内に存在する移動物質を追跡することで流速値を得る。ここで画像内における座標値、画像の時間間隔から流速値を算出することになる。

物質の移動を検出する方法は複数あり、それぞれの違いにより手法が異なる。画像解析の一つであるSTIVは、設定した検査線上を動く物体がSpace and Time Imageの中で傾きを持って検出され、その傾き角度を流速として算出するものである。

(2) 検定方法の検討

aDcpに関しては3. で議論したように、検定方法が確立されていない。電波式流速計に関しては、実際の観測においても河川水の表面に凹凸がある場合の条件で計測が可能となる。実験水路の表面に波を起こし、その凹凸を利用して検定を実施するような試みが以前にはあったようであるが、検定時に発生すべき波の特徴である波高、波長、周期のあり方など、未知数が多い。たとえそのような基準があったとしても、基準通りの波を発生させることは容易ではない。これも3. で記述したS/N比と同様にタンクの環境に依存するものである。画像解析手法に関しては実河川の計測で波紋から流速を得る技術であるために、タンク内に波紋を発生させる必要があることから、これもまた同様に困難である。

これらの流速計の検定手法を議論する上で、前節の計測原理を考慮すると、三つの要素に分けると考えやすい。それらは① センサーの配置状況、② 計測手法、③ 流速値の算出方法であり、個別の流速計に対する検討項目を表-2にまとめた。以下それぞれの項目に関して議論を進める。

a) センサーの配置状況

aDcpに関して、超音波を発生するトランスデューサの設置角度がこれに該当し、DMGも同じ観点から考えられた手法である。例えばTRDI社のWH-ADCPは4つのトランスデューサを持ち、それぞれが鉛直方向から20度の角度を持つように配置されている。この角度が少しでもずれることがあれば、流速値の算出に大きな誤差が発生することになる。

電波式流速計に関して、同様に本体内部の角度センサーと実際のセンサーの照射方向である。電波式流速計に関してはaDcpのDMGに相当するものは存在しないが、このようなセンサーの設置角度の検討は必要となる。

画像解析に関して、幾何変換の精度がそれに当たる。評定点の設定、その測量結果、レンズのひずみなどが、影響するものと考えられるが、その最終的な結果が幾何変換の品質となる。

表-2 新しい流速計の検定方法

	aDcp及び電波式流速計	STIV
センサーの設置状況	センサーの設置角度	幾何変換の品質
計測方法	送受信波の品質	ビデオカメラの性能
流量値の算出方法	理論を含めた流量値の算出アルゴリズム	解析ソフトの性能

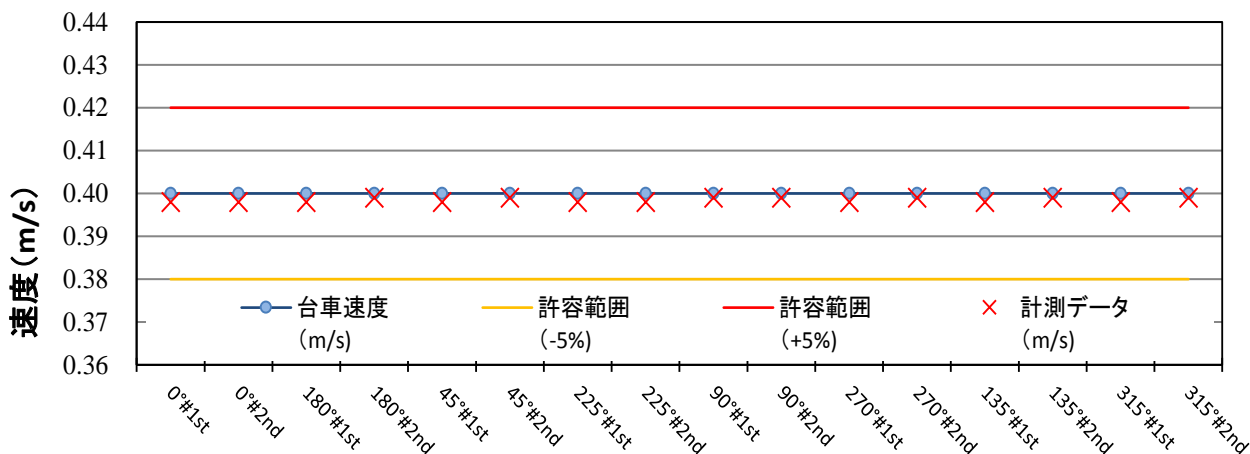


図-1 セレスにおけるRRのDMGテスト結果の一例

b) 計測方法

aDcpや電波式流速計のように超音波又は電波を発射する技術であれば、送受信した波の特性を検査する必要がある。現に、河川砂防技術基準¹⁾や流量観測高度化マニュアル¹⁶⁾ではそれを検定としている。

画像解析に関しては、使用するビデオカメラの性能調査が基本となる。例えば一般的な家庭用ビデオカメラは一秒に29.97枚の画像を取得している。画像技術は基本的にはこの数字を時間間隔、認識した動きを移動距離として流速を算出するために、フレームレートが不安定なカメラは、計測に使用することはできない。

c) 流速値の算出方法

aDcpや電波式流速計に関して、理論も含めた流速値のアルゴリズムがこれに該当する。これに関して要素の分離が難しいものがあるとすれば、aDcpの場合、ボトムトラックとウォータートラックは速度算出アルゴリズムが共通であるため、DMGがよければ流速に対する結果も正しいということもできるようである。また画像解析に関して、例えばソフトの性能がこれに該当する。

d) まとめ

以上、新しい流速計の検定方法を議論した。ここでは河川砂防技術基準やUSGSの手法等に基づき現況でできる手法とその考え方をまとめた。これらは各計測の要素を分解し、それぞれの項目において検定方法を検討したものである。しかしながら実際の観測においては流速値を算出するにあたって、これらの項目がすべて同期することで正しい計測を実施することになる。それを確認するための最も簡単な作業は、単純にセンサーを直接検定することに他ならない。それを実証するために次節ではこれまで著者らが実施した検討内容に関して記述する。

(2) aDcpの検定方法に関する検討

著者らは土研、セレスの検定施設を用いてaDcpの検定を試みた。ここでは前述のDMGを参考にし、若干改良をしながら以下の手法を検討した。① DMG, ②15段階ス

これは国内の標準的な手法を参考にした。また使用したaDcpはいずれもTRDI社のものであり、Workhorse ADCP (WH), RiverRay ADCP (RR), Stream Pro ADCP (SP)である。機器の詳細はメーカーのURLを参考にされたい。以下それぞれの手法の概略と結果を概説する。

a) Distance Made Good testing (DMG)

この手法は両検定施設共に、台車の流速計の速度管理はしているが距離の管理はしていない。そのためここでは、USGSの手法とは異なるが、台車の速度を0.4m/sの一定の速度とし、60秒程度の計測時間からボトムトラックが算出する移動速度が設定速度と等しければそれがDMGの検査を満たしているものとした。実際の検定の際には、台車が指定速度である0.4m/sになってから記録を開始し、60秒で計測を終了とした。

セレスの実験施設においてRRの検定結果の一例を図-1に示す。ここで横軸はトランスデューサ1を検定水路に向けた角度を0度としたときのそれぞれの回転角度、その角度に応じた検定番号を示す。また縦軸は流速を示す。ここでは台車の移動速度、±5%を基本とした許容範囲の上下限值、計測データを示す。これも含めたDMGの結果の概要を表-3に示す。

表-3 DMGの結果

(WH: Workhorse, RR: RiverRay, SP: StreamPro)

		セレス	土研
WH	計測平均, cm/s	40.1	40.1
	最大誤差, %	1.0	1.0
	平均誤差, %	0.3	0.3
	標準偏差, cm/s	0.18	0.17
RR	計測平均, cm/s	39.8	39.9
	最大誤差, %	-0.5	-0.5
	平均誤差, %	-0.5	-0.3
	標準偏差, cm/s	0.05	0.05
SP	計測平均, cm/s	40.2	40.2
	最大誤差, %	0.8	0.8
	平均誤差, %	0.5	0.5
	標準偏差, cm/s	0.07	0.07

表-3が示すように、DMGの結果、セレス、土研の両方の結果は十分に精度を満たしていることから、両方の実験水路はDMGの検査が可能であることが確認できた。

b) 15段階ステップ検定 (ウォータートラック)

ここでは台車速度を0.05m/s～2.5m/sの間で15段階に割り振り、検定を行った。一般的には、検定対象とする計測器の上限値を検定範囲とする。しかしaDcpの検定では台車速度が高速になると気泡の混入でデータ取得が困難になるため、本体を深く取り付ける必要があり、浅い検定水層ではそれが難しいため、台車速度の上限は2.5m/sとした。ただしaDcpはそれ以上の流速域においても原理的には線形性が成り立つとされており、流速2.5m/sまでの検量線の傾きが誤差範囲に収まっていれば、流速5m/sであっても精度は担保できる、という考えを前提にしている。

ここでは、トランスデューサ1を台車の進行方向に向け、センサーの吃水深度は40cm以上とした。またこのときの各機種の設定コマンドは表-4に示す通りである。ここでは、WHに関しては実観測同様に、台車速度が低速域の1m/s未満ではMode11 (ハイレゾリューションモード)、高速域の1m/s以上ではMode12 (ハイレートピンギングモード)を採用した。発信回数に関してはTRDI社製ソフトウェア「PlanADCP Ver. 2.06」を使用して、ターゲット速度の5%以内に標準偏差が入る発信回数を設定した。これによるとWHは低速域で10アンサンブル (約30秒)、高速域では10アンサンブル (約20秒)であった。またRRは低速域では100アンサンブル (約70秒)、高速域では60アンサンブル (約35秒)であった。またストリームプロは、各ステップに最低必要なアンサンブル数をあらかじめ設定しておき、そのアンサンブル数を越えるまでデータ取得させた。さらに平均流速の算出には水面や水路床の影響を受けない有効層のデータを用いた。ここでは設定層厚を10cm、10層以上として3～6層のデータを採用した。さらに検定結果の指標は現況の指標に準じて、速度に応じた相対誤差が5%以内に入る事とした。

図-2に土研検定施設を用いたWHの検定結果を示す。図は横軸が試験速度、縦軸が計測結果である。計測データは×で、許容範囲を±5%としてそれぞれ赤、黄色の直線で示してある。図が示すように、1.0m/s以下の流速においては、計測結果は大きく下回る。それ以上では5%以内の範囲内に入っている。これが示すものは、Mode11は完全に不合格であり、Mode12は合格という点である。なお、Mode11は低濁度環境においてS/N比が相対的に低下するというメーカー所見が得られている。また表-5はセレス、土研の他の結果を示す。これによると、相対誤差が5%を超える場合が多く、ウォータートラックに関しては全ての計測器が使用不可という結果となる。しかしながらこれは計測器の問題ではなくて、検定水路の水質の問題であり、これらの実験水路はウォータートラックの検定のための準備ができていない事を示している。

表-4 ADCPの設定コマンド

WH		SP	RR
Mode11	Mode12		
CR1	CR1	CR1	CR1
CF111110	CF111110	WN15	
BM5	BM5	WS10	
BP15	BP3		
BX24	BX24		
EA0	EA0		
EB0	EB0		
ED0	ED0		
ES0	ES0		
EX01111	EX01111		
EZ1111101	EZ1111101		
WA50	WA50		
WB0	WB0		
WD111100000	WD111100000		
WF10	WF10		
WM11	WM12		
WN15	WN15		
WP15	WP3		
WS10	WS10		
WZ5	WO20.0		
TE00:00:00.00	WV175		
TP00:00.00	TE00:00:00.00		
	TP00:00.00		

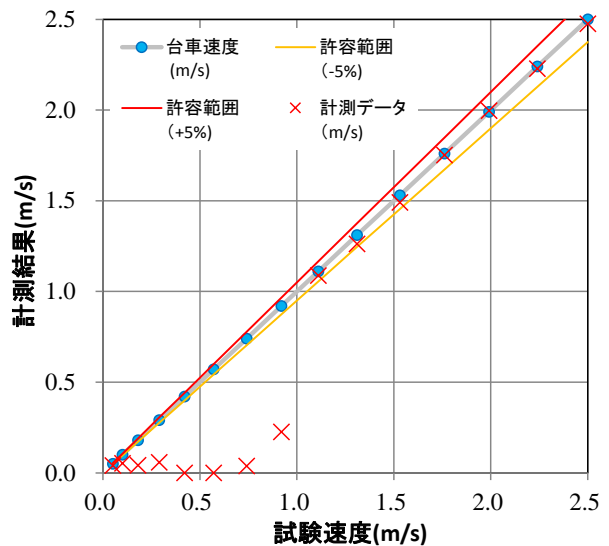


図-2 土研検定施設を用いたWHの15段階ステップ検定結果 (ウォータートラック)

表-5 15段階ステップ検定 (ウォータートラック)

	セレス		土研	
	相対誤差	可否	相対誤差	可否
WH	ほぼ全域で5%以上	×	半分以上で5%以上	×
RR	ほぼ全域で5%以上	×	半分以上で5%以上	×
SP	全域で5%以上	×	ほぼ全域で5%以上	×

c) 15段階ステップ検定 (ボトムトラック)

ここではウォータートラックと同様の計測を実施し、そのときに計測したボトムトラックの値を用いて、その速度の検定をした。図-3はセレス検定施設を用いたWHの15段階ステップ検定結果である。これが示すように、ボトムトラック速度は検査域全域にかけて5%以内の範

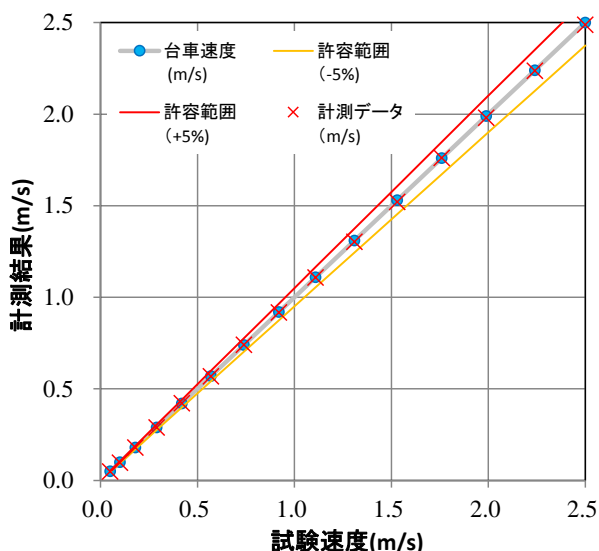


図-3 セレス検定施設を用いたWHの15段階ステップ検定結果 (ボトムトラック)

表-6 15段階ステップ検定 (ボトムトラック)

	セレス		土研	
	相対誤差	可否	相対誤差	可否
WH	全域で5%以内	○	全域で5%以内	○
RR	全域で5%以内	○	全域で5%以内	○
SP	全域で5%以内	△	全域で5%以内	△

圈内に入る結果となった。同様に他の結果を表-6に示す。ここでは全ての結果に対して相対誤差が5%以内に入った。なおSPに関してはボトムトラックが1.5m/s以上の範囲では値を算出しなかったが、これは単純にメーカーが設定したSPのボトムトラックの測定限界である。

(3) 電波式流速計の検定

著者らはセレスの検定施設を用いて横河電子機器の電波式流速計 (RYUKAN) の環境に依存しない検定方法の実験を試みた。水面に波を起さずに実験を実施する場合、水面からの受信波が少ないことが起因して、有意なデータを取得することが困難となる。これは実際の観測でも同じことが言える。また例えば微弱ながら受信波を取得して流速値を得たとしても、マルチパスの影響から、水面の外から反射したものを検出する可能性がある。現に、事前検討においては、検定施設の屋根から反射して受信した電波を元に、値を算出した例があった。

このような課題を克服するために本検討では次の二点に関して注意を払った。それらは水面からの反射波の増強とマルチパスを遮断することである。前者に関して、検定水路の一部にアルミシートを、また後者に関しては電波吸収体を用いた。図-4は実験時の装置の設定状況を、図-5が実際に用いたアルミシートを、また図-6が電波吸収体を示す。これは2250mm×600mm×750mmの型枠の底面以外に電波吸収材を取り付け、その内部に入れた流速計を完全に囲うものである。

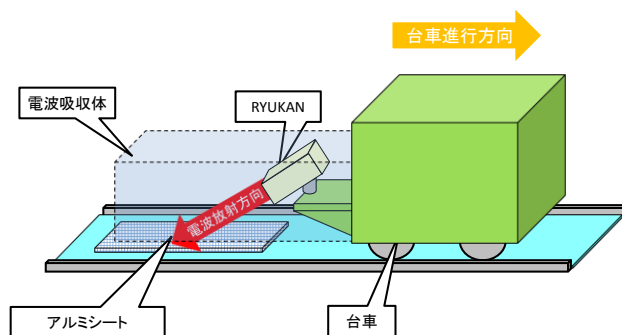


図-4 電波式流速計検定状況



図-5 実験に用いたアルミシート

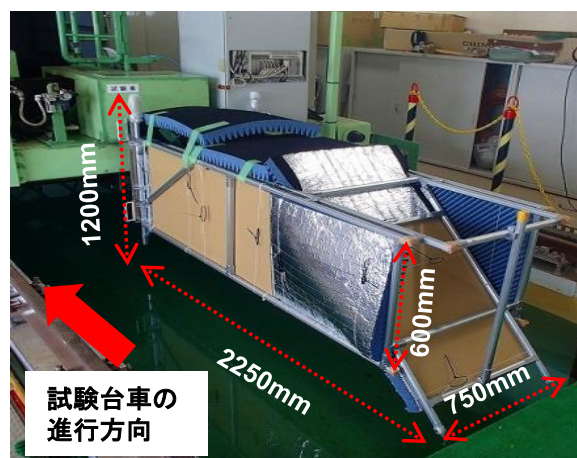


図-6 電波吸収体

図-7に計測結果の一例を示す。図が示すように、横軸は経過時刻、縦軸は受信波の周波数、コンターはそのときの反射強度である。このとき台車は3m/sで動かしている。またコンター図の下には、その経過時間毎のアルミシートの配置状況をポンチ絵で示す。RYUKANは本来、流速値を出力する計測器であるが、本計測のため反射データを出力するように改造した。図-7はそのときの反射データを、汎用解析ソフトを用い解析した結果である。この図で特に特徴的なのは、①5.5~13.5秒の間に台車の移動速度相当の周波数で高い反射強度を持つ観測結果が得られていること、②5.5, 9.5, 13.5秒付近に不連続

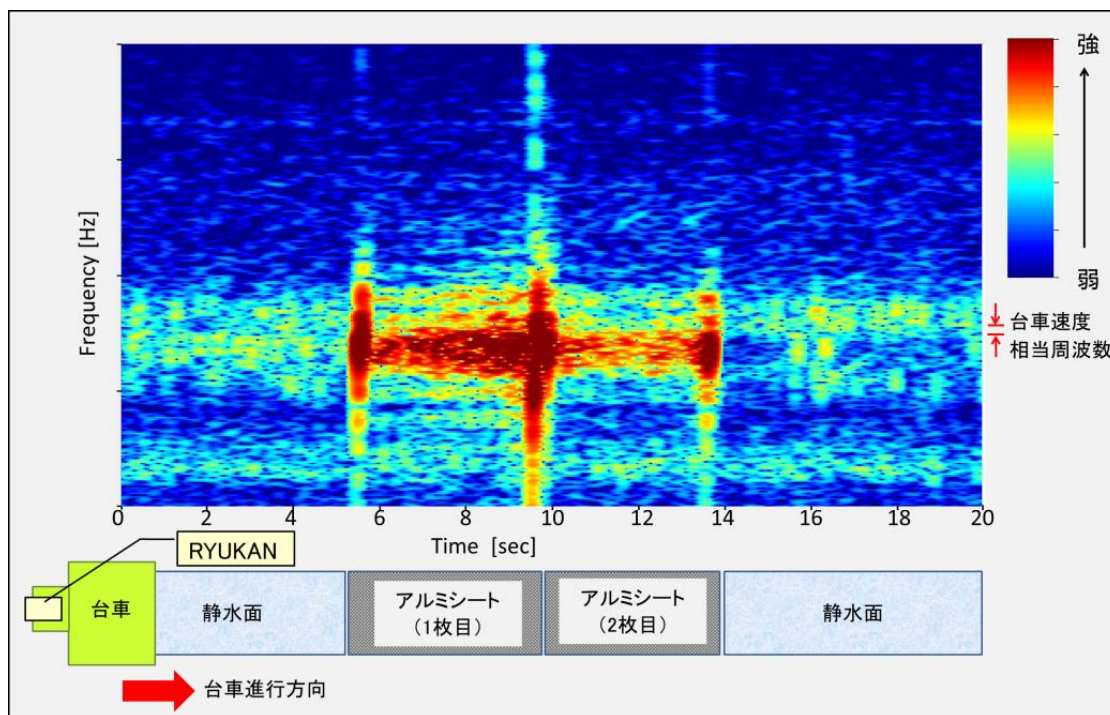


図-7 電波式流速計の計測状況

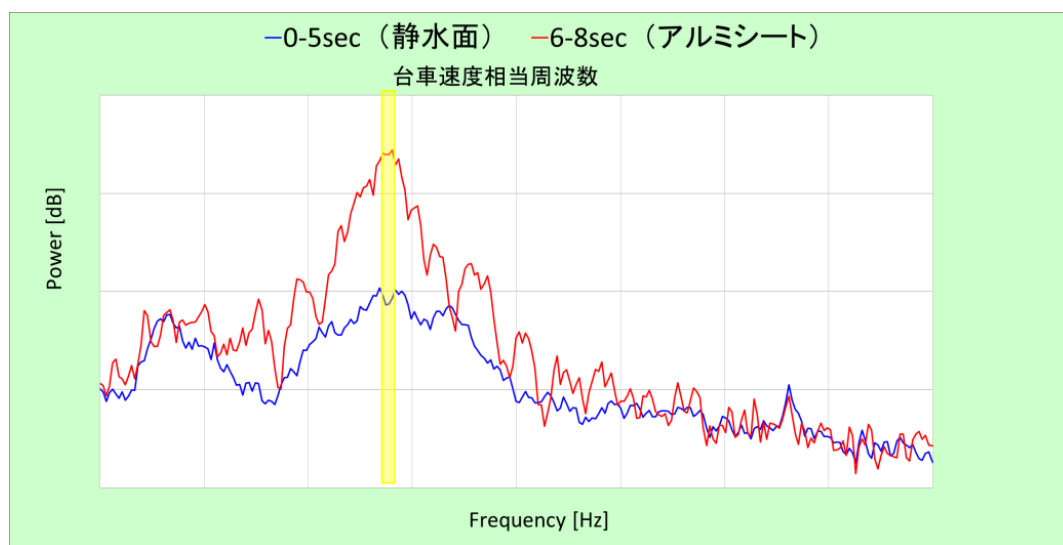


図-8 周波数と反射強度の関係

に強い反射強度を示す縦のラインが出ること、③0～5.5秒、13.5～20秒の間にはこのような強い反射強度を示す値が検出されていないことである。コンター図とポンチ絵を比較すると①に関して、この間に台車がアルミシートを通過したこと、また③の計測時はアルミシートが存在しなかったことがわかる。また②に関してはアルミシートの継目となる位置と対応している。これは継目の局所的な形状が影響しているようである。

図-8は周波数と反射強度の関係を示す。図-7で示した0～5秒における平均値を青で、6～8秒における平均値を赤で示した。赤は台車の移動速度相当の周波数に最大値

があることがわかる。一方、青は二つの最大値を持つこと、反射強度が流速値を検出するために十分大きくないことがあげられる。これらの結果から、アルミシートは検定用反射体として適切であることが理解できる。

(4) 画像解析の検定

著者らは画像解析の一つであるSTIVに関して検定手法を試行している。著者らは観測台車のレール上に検査線を設定し、そのラインの角度が算出する流速値と台車の移動速度が正しいことを想定して、試験的な検定を実施した。レールは強い明確な検査線を示したことから、か

なり有力な考え方であると思われたが、測量結果の精度があまりよくなく、幾何変換が正しく実施されなかったようで、優れた結果が得られなかった。今後も検討していく予定である。

5. 検定方法

4. の知見を受け、新しい流速計の検定方法のあり方として、それぞれの計測機器に対して以下のような手法が考えられる。

(1) aDcpに関して

4. で示したように、現段階で実用に資する検定方法は、①現況の砂防技術基準にあるような送受信電波の性能確認、②DMG、③15段階ステップ検定（ボトムトラック）である。②及び③に関しては計測機器の形状に依存するものであるため、物理的変化が伴わない限りは繰り返し実施する必要性は低い。前述のように、電波や音波式流速計に関しては、ある計測範囲の流速値が正しい場合は、他の流速も正しいとする線形性が担保されている。そのことを考慮すると①に関しては一年に一回の検定、②に関しては3～5年に一回の検定、③に関しては必須ではないがユーザの希望に応じて実施することが現実的である。なお、4. (1a)で述べたフィールドテストに関しては、最適な場所、船の曳航方法も含めて今後も議論を進める必要がある。

(2) 電波式流速計に関して

4. (3)で示した実験結果は、既往の検定手法と同様の手法で実施可能であることを示している。残っている議論は、①アルミシートを配置するか、それとも流速計のターゲットをレールやコンクリート面にするか、②流速計の設置角度をDMGにならない複数変化させる必要があるかである。

(3) 画像解析に関して

STIVに関しては、検定方法の方向が定まっている程度で、実際の手法は今後検討していかなくてはならない。

謝辞：本報告で議論した内容は、土木学会水工学委員会流量観測高度化研究小委員会の研究発表会において著者により話題提供をさせていただき、参加者から意見を頂いた内容が基礎となっている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準 調査編，2014年改定
- 2) 国土交通河川局省監修，土研編著，水文観測，全日本建設技術協会，2002年
- 3) 例えば藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み，水工学論文集，第38巻，pp.733-738，1994.
- 4) 金木誠・寺川陽・吉谷純一・松浦達郎：超音波ドップラー流速プロファイラーの河川流量観測への応用に関する研究報告書，土研資料，3719号，2000.3.
- 5) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11，No.5，pp.460-471，1998.
- 6) 山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28，pp.41-50，1994.
- 7) 岡田将治，森彰彦，海野修司，昆敏之，山田正：鶴見川感潮域におけるH-ADCP を用いた流量観測，河川技術論文集，Vol.11，pp.243-248，2005.
- 8) 二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリング，土木学会論文集B，Vol.64，No.4，pp.295-310，2007.
- 9) 岡田将治，橋田隆史，森本精郎，増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測，水工学論文集，第52巻，2008.
- 10) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦：高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案，土木学会河川技術論文集，第16巻，pp.59-64，2010.
- 11) 萬矢敦啓，菅野裕也，深見和彦：河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点，河川流量観測の新時代，pp.46-55，2010
- 12) 深見和彦ら：ドップラー式非接触型流速計（電波・超音波）を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～，河川技術論文集，Vol.14，pp.307-312，2008.
- 13) 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦：非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，土木学会河川技術論文集，第16巻，pp.53-58，2010
- 14) 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，53 巻，pp.1003-1008，2009.
- 15) 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.
- 16) ICHARM，流量観測高度化マニュアル，http://www.icharm.pwri.go.jp/ryukan/manual_1.0.pdf

(2015. 2. 13受付)

手取川下流部における河道設計に向けた取り組み ～平成25年7月洪水観測とその再現計算～

STUDY ON RIVER CHANNEL DESIGN FOR DOWNSTREAM OF TEDORI RIVER
EVALUATION AND DATA COLLECTION OF FLOOD IN JULY 2013

谷口和哉¹・能澤祐明¹・川上拓²・秋田麗子²

Kazuya TANIGUCHI, Hiroaki NOZAWA, Taku KAWAKAMI and Reiko AKITA

¹国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所（〒920-8648 金沢市西念4-23-5）

²日本工営株式会社 河川・水工部（〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2）

The existing 1D numerical model based on the traditional river channel design method was evaluated for the downstream of the Tedor river. It was found to be unsuitable since the river's complex topography significantly changes due to sand-bar flush at the river mouth. This study shows that 2D numerical model of non-uniform sediment transport can reproduce actual conditions with better accuracy.

In addition, this article describes additional field observation that was carried out since the existing data was not adequate to establish the 2D model introduced in this study. The field observation included new multi point gauging stations and aerial laser survey. Additional field data was obtained from the flood that occurred in July 2013 and was utilized for establishing initial condition of the numerical model and reviewing its outcomes. Such additional data was found to be very useful. Some issues regarding practical application of field observation are also discussed.

Key Words : 2D numerical model of non-uniform sediment transport, Flood observation, Multi point gauging station, Sand-bar at River mouth, Training Levee

1. はじめに

現在、河道改修方策を検討するための水理量は、「河道計画検討の手引き」¹⁾にあるように準二次元不等流計算モデルによって予測するのが実務上、一般的となっている。一方、学術分野ではより高次で高性能の水理解析モデルが開発されており、電算機性能の向上とインターネットの普及により、iRIC Project²⁾に代表されるとおり、多くのユーザーがこれらを利用しやすい環境が整いつつある。平成26年の「河川砂防技術基準 調査編」³⁾の改定においても、最新の技術的・学術的な内容が積極的に取り入れられた。今後は、河道設計においても、従来の計算手法にこだわらず、新たな計算技術を取り込んだ検討へと進展させていくことが重要と考える。

一級河川手取川では、河口部を含む下流域において整備計画目標流量に対する流下能力が不足し、早急な河道改修が必要となっている。しかしながら、導流堤によって流末が急激に縮小する複雑な平面形状を呈し、また、河口砂州が洪水時にフラッシュされるなど地形変化が顕著であることから、水理現象を一次元かつ定常の計算手法で取り扱うことが難しい。

このような背景のもと、手取川を管理する金沢河川国道事務所では、河道設計において現地の水理現象を的確に予測可能な計算手法を採用することを目指し、平面二次元河床変動解析モデルの構築を進めている。また、本モデルの開発に際して必要な検証データを取得するため、平成24年度から、水位や地形等の現地観測を開始したところである。

平成25年7月に発生した中規模洪水では、多地点の水位観測、洪水前後の地形計測などを実施した。この現地観測データと解析モデルによる同洪水の再現結果とを照らし合わせることで、解析モデルにおける改良点を見出し、水位や地形の再現精度を向上させることができた。また、現時点の解析モデルを用いて、設定河道に対する疎通能力や長期安定性の評価を実施している。

このような従来の河道設計の枠に収まらない河道設計手法は、全国的にも試行錯誤段階にあるため、実務レベルでの手順や手法、具体的な成果の事例、現実的な課題などを広く共有することには意義があると考えられる。このため、本稿では、手取川における解析モデルの開発や現地観測の実施状況、これらの課題について、具体的にその内容を報告するものである。

2. 対象エリアの概要

(1) 対象エリア

調査・検討対象エリアは一級水系手取川（流域面積809km²，幹線流路延長72km）のうち，河口から2.0km地点までの区間である（図-1）．本エリアでは，河川整備計画（平成18年12月策定）において，河道掘削による治水安全度の向上を計画している．

(2) 地形条件

対象エリアは，河口部ながらなお急流で，河床勾配1/410，平均粒径60mm，セグメント1に分類される．河口には，海域に向かって導流堤が2基（流心部：透過型，右岸部：不透過型）あり，これによって低水路幅を縮小させ，掃流力を上げることで河口閉塞を防止している．（図-2）

(3) 河口砂州の消長

流心部導流堤の端部付近には，河口砂州が形成されている．この河口砂州は，洪水時に消失することがたびたび確認されるものの，復元スピードが数箇月以内と速いこと，冬期風浪による堆積が著しいことから，直接測量が難しい．（図-4）

(4) 大改修後の再堆積

手取川の改修の歴史は古く（昭和9年直轄化），本エリアでも，特に戦後から昭和40年代までの間に，天井川の解消を目指して河道掘削を推し進めた（平均河床高にして1～2mに相当する規模）．

しかし，掘削を終えて以降，河床は堆積傾向に転じた．これまでの約40年間で，河床高はほぼ戦後のレベルまで回復し，これが流下能力不足の主要因となっている．（図-3）なお，掘削後の再堆積は，2km地点より上流側では生じておらず，本エリア特有の現象となっている．

3. 解析モデルの開発

(1) 解析モデルの概要

手取川下流部の平面的に複雑な地形条件，洪水中の大きな地形変化，地形変遷の経緯を踏まえ，現象予測に用いる解析モデルは，①平面二次元モデル，②非定常モデル，③河床変動解析モデルを基本とした．表-1に本解析モデルの概要を示す．

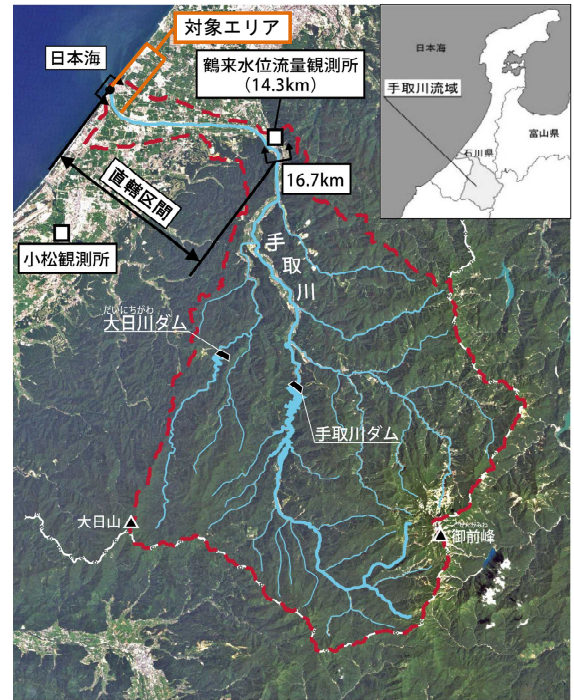


図-1 手取川流域位置図



図-2 手取川河口部の地形

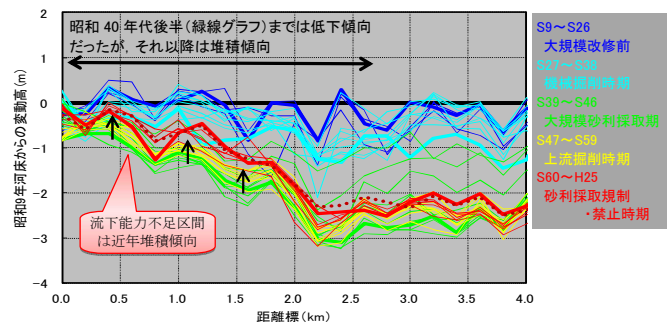


図-3 昭和9年を基準とした平均河床高の変化

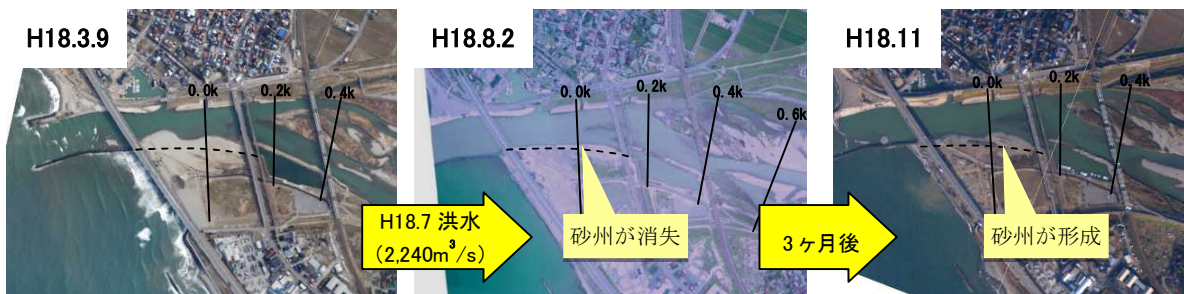


図-4 河口砂州の消長（平成18年7月洪水前後）

表-1 解析モデルの概要

項目	内容
基本モデル	平面二次元河床変動解析
流れの式	二次元浅水流方程式
座標系	一般座標系
流砂量式	芦田道上の式（掃流砂・浮遊砂）
粒径分割	混合粒径（10区分）

表-2 境界条件・初期条件の設定

項目	内容	
境界条件	上流端流量	鶴来地点の流量時系列
	下流端水位	金沢港潮位
	上流端給砂量	掃流砂：並行給砂 浮遊砂：採水結果に基づくQ~Qs式
初期条件	河床高	洪水前測量
	河床材料	河床材料調査
粗度係数	低水路	既往洪水の逆算粗度
	高水敷	支配的な被覆状況より設定
	樹木群	空中写真より範囲を確定 樹木群の平均的な透過粗度を設定

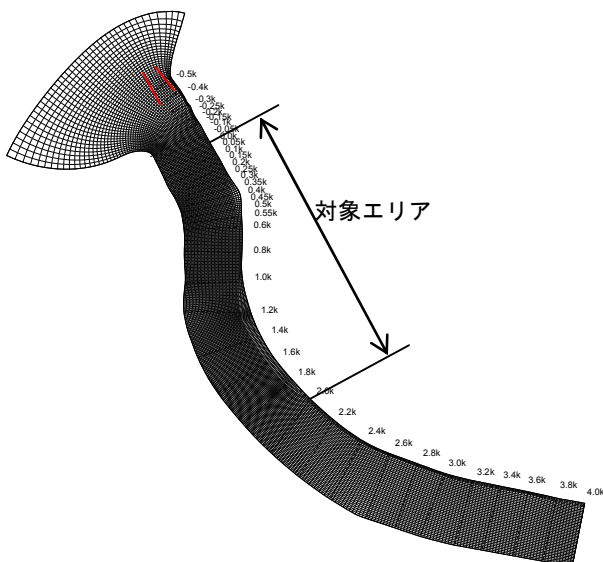


図-5 解析範囲及び構築メッシュ

(2) 解析範囲と構築メッシュ

対象エリア（0.0～2.0km区間）に対して、上下流に広く解析範囲を設定した。下流側は、導流堤の影響を考慮するため、海域約1kmまでの扇状の範囲とした。上流側は対象エリアより2km上流とした。解析メッシュは、対象エリアにおいて縦断方向20m、横断方向10m程度の解像度となるよう、図-5のとおり設定した。

(3) 境界条件と初期条件

境界条件、初期条件等については、表-2のとおり、各種調査・計測によって得られる情報をもとに設定した。

4. 現地観測体制

(1) 観測実施の目的

解析モデルの構築に際し、複数の既往洪水についてその再現計算を実施したところ、水位と地形については時間的・空間的に疎な実績データしかないため、適切な初期条件が設定できず、また再現結果に対する精度検証が十分に実施できなかった。

上記の課題を受けて、不足する現地情報を取得するため、平成24年度より新たに現地観測を開始した。

新たな現地観測では「密な水面形・河床形状の時間変化を捉える」ことを重点的な目標とした。

(2) 地形計測の概要

河床形状の把握に向けては、航空レーザ測量を採用することで空間精度を高めるとともに、洪水後直ちに実施することで時間精度の向上を図るものとした。

レーザ測量では計測できない水中については、従来どおり横断測量によって補完するものとした。ただし、その縦断距離間隔は10～50mとし、一般的な横断測量の間隔より小さく設定した。

(3) 水位多点観測の概要

水面形の把握に向けては、既往の水位観測所（3箇所）に加えて、観測地点を増設することで空間密度を高めるものとした。

水位計は、ロガー及びバッテリー内臓型の圧力式水位計（U20ウォーターレベルロガー、測定範囲0～9m、精度±0.5cm、Onset社）（図-6）とした。河口部であるため、チタン製素材を用いて海水に対応した。

観測地点は、対象エリアにある既往の観測地点3地点に、新たに9地点を加え、計12地点とした。また、大気圧補正のため、大気圧計を1基配置した。水位計の配置は図-9のとおり、左右岸の水位差や縦断水位が把握できるような配置とした。

水位計の固定にあたっては、護岸や根固などの構造物がある場合にはこれに固定し（図-6）、構造物がない場合には、河床に単管を1m以上貫入させて固定し、その内部に水位計を設置するなどの対処をとった。

設置工事後には、水位計センサー部の標高測量を実施し、計測する圧力値（水深）から水位を換算できるようにした。

水位計測間隔は10分ピッチとした。これにより、ロガーのデータ容量の制約から、3箇月に1回のデータ抽出が必要となる。また、現地状況の確認については1箇月に1回実施した。

なお、参考までにコストについて記すと、水位計の購入、設置工事、標高測量などを合わせて、1箇所あたり20万円前後であった。

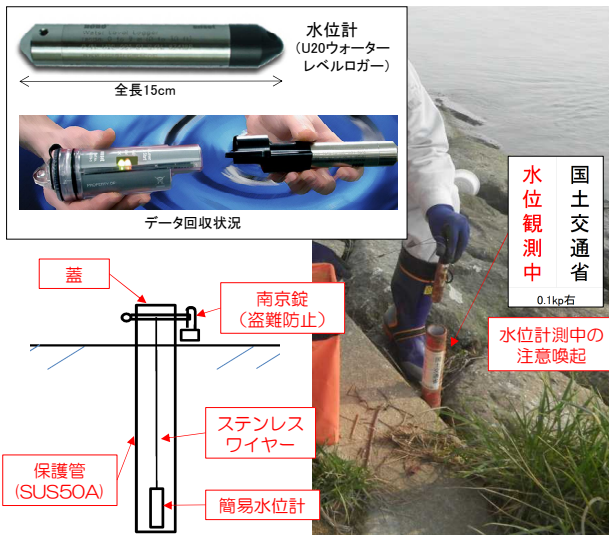


図-6 水位計の設置状況

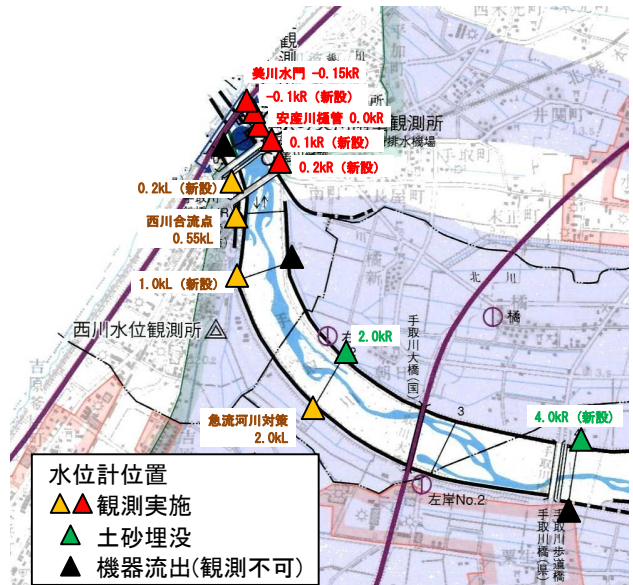


図-9 H25年7月洪水時の水位観測状況

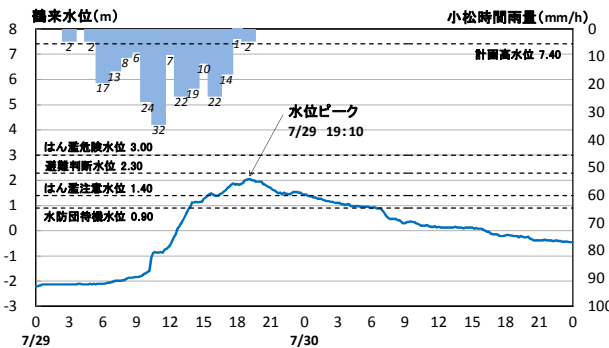


図-7 H25年7月洪水の雨量・水位時系列

表-3 洪水前後の調査項目・実施日一覧

調査項目	調査日	
	洪水前	洪水後
垂直写真撮影	6月17日	8月14日
航空レーザ測量	6月16～22日	8月10～11日
河川横断測量	平成24年12月	平成25年10月

(洪水発生；平成25年7月29日)

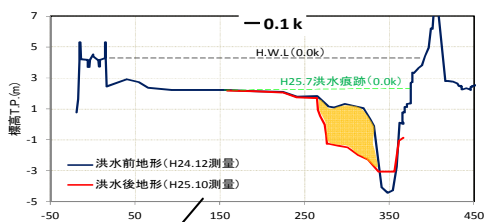


図-8 平成25年7月洪水前後の河口部の地形変化

5. 平成25年7月洪水の観測

新たな観測体制のもと、平成25年7月に中規模洪水が発生し、現地観測を実施した。以下、その概要を示す。

(1) 洪水の概要

平成25年7月29日未明より、梅雨前線の影響を受けて北陸地方を中心に強い雨が降り続けた。石川県小松市内では観測史上最多の雨量（24時間雨量199.5mm）を観測した。

手取川では、基準地点の鶴来（河口より14.3km、流域面積747.6km²）において、避難判断水位に迫る高い水位を記録した（図-7）。最大流量は約2,300m³/sであり、流量年超過確率は1/15相当、鶴来観測所における平均年最大流量1,100m³/sの2倍程度の洪水となった。

(2) 地形計測の結果

本洪水の直前に、直轄範囲全区間16.7kmの航空レーザ測量を実施したところであった。また、定期横断測量についても平成24年11月に実施していた。

本洪水の発生を受け、洪水による河道状況の変化を捉えるため、急遽、洪水後調査を実施した。実施内容は、洪水前調査と同じとした（表-3）。

本洪水では、河口砂州のフラッシュや滯筋の切り替えが生じたが、今回調査によってこの範囲や規模を明確に把握することができた（図-8）。

(3) 水位観測の結果

12箇所の水位観測地点のうち、8地点では良好な水位計測データを得ることができた。

しかしながら、2地点では計器が流出して発見できず、データが回収不能となった。また、他の2地点では計器が土砂に埋没し、データの回収はできたものの、土砂に埋没した時刻以降の計測データは使用できなかった（図-9）。

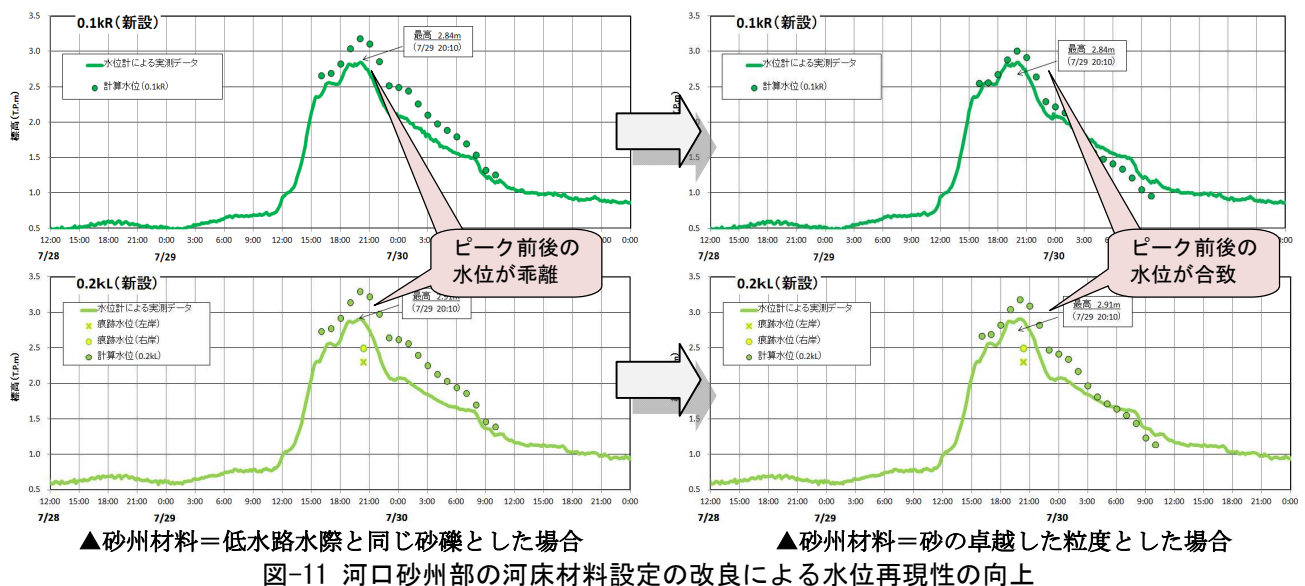
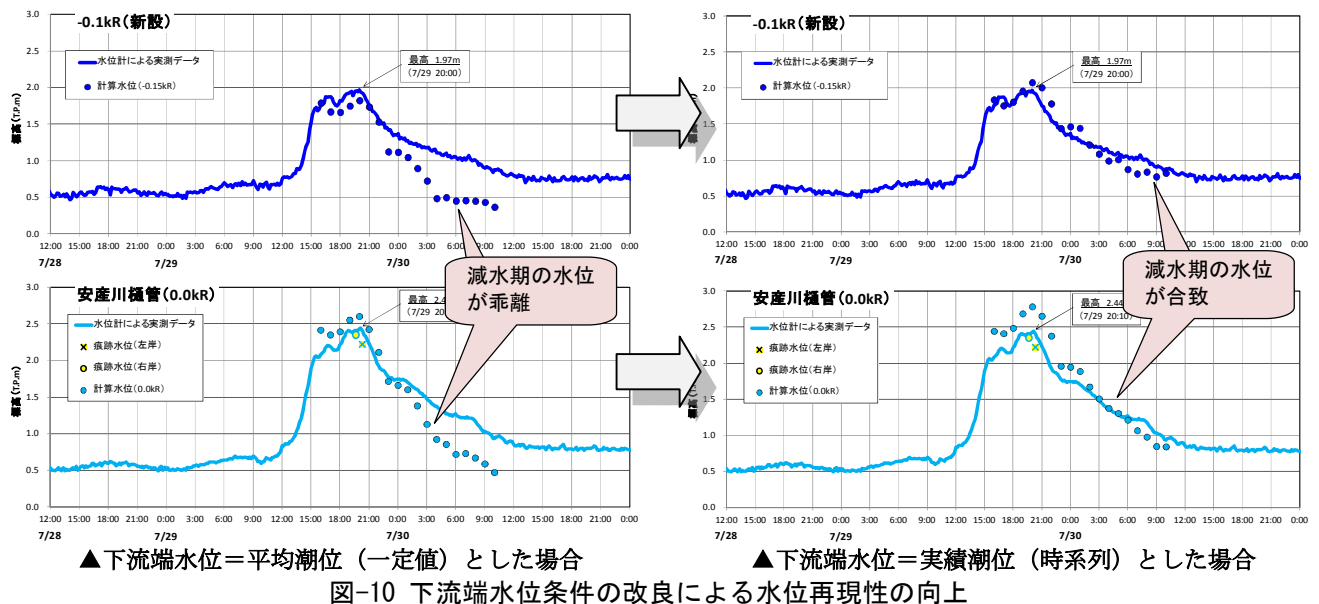
6. 観測データによる解析モデルの改良・検証

解析モデルによって平成25年7月洪水の再現計算を進める中で、計算結果が今回の観測値に近づくためにはいくつかの改良が必要であった。以下にそのうち2つについて具体例を示した上で、本洪水の再現計算結果を示す。

(1) 下流境界条件の改良

河口より1km沖合の下流端境界条件として、平均潮位（T.P.+0.4m）を与える定常条件としたところ、導流堤内～河口部において洪水減水期の水面形の予測精度が低かった。これを踏まえ、金沢港潮位時系列データを与えたところ、潮位の高かった実績が反映され、水位の再現性が向上した（図-10）。

これより、導流堤内～河口部には潮位影響が大きく及び、流れの非定常性が強いことから、下流端境界条件としては実績の時系列潮位データを用いた方がよいことが分かった。



(2) 初期河床材条件布の改良

河口砂州周辺のピーク時付近の水位は、実際より高く計算され、河口砂州のフラッシュが実現象に比べて生じにくい条件となっていることが推測された。

洪水後、現地ではフラッシュ後の砂州断面が観察されたが、それによると砂州下層は河床砂礫～石礫であるのに対し、上層は砂が主体となっていた（図-12）。一方、初期河床材料条件として参考としたデータは、低水路水際における砂礫主体の粒度分布（平成21年度河床材料調査）であり、砂州を表現するには粗粒分が多すぎる可能性が示唆された。

このため、河口砂州部については、砂分の卓越する粒度分布（平成24年度環境調査）を与えたところ、水位の再現性が向上した。（図-11）

これより、河口砂州のフラッシュの予測においては、河床材料の土層構造が重要な因子となることが分かった。

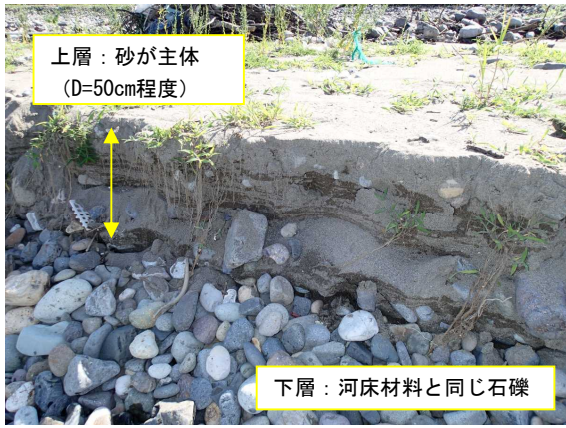


図-12 河口砂州の断面（上部に砂層が覆う）

(3) 洪水再現計算結果

以上のような改良を経て、平成25年7月洪水の水面形の時系列を概ね再現することが可能となった。

(図-13, 図-14)

河床変動については、河口砂州のフラッシュ範囲や全体的な河床変動量のオーダーが合致するが(図-15)、実際に生じた滞筋の切り替えや砂州の移動を予測するまでには至っていない。

流量ピーク時点の流速分布を見ると、導流堤～河口部において6m/s程度の高流速が発生しており、このような強い流れによって導流堤内の堆積土砂や河口砂州がフラッシュされている状況が分かる。(図-16)

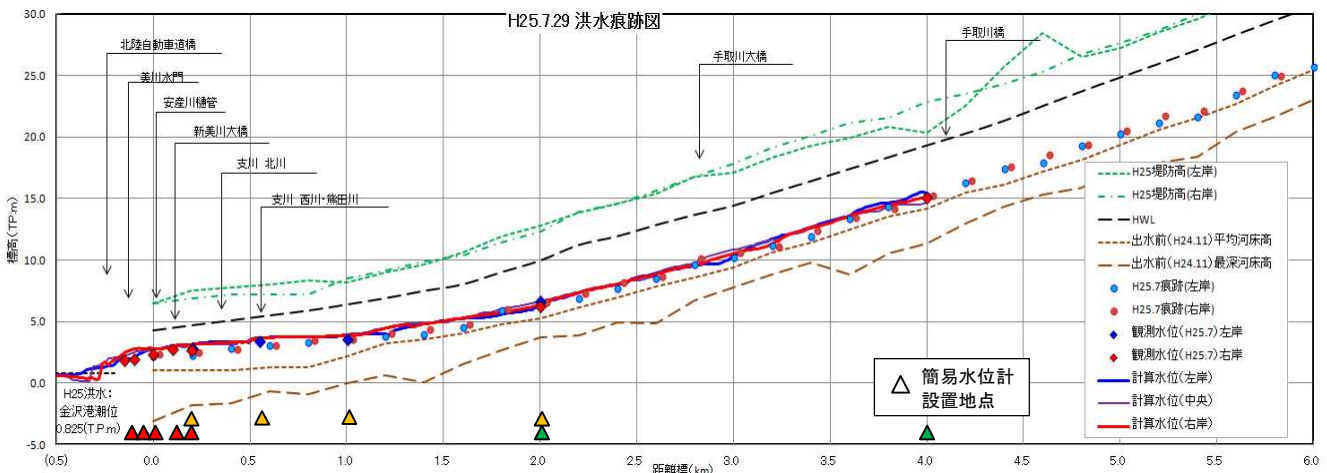


図-13 平成25年7月洪水における下流部の最高水位縦断面図（計算結果と実績値の比較）

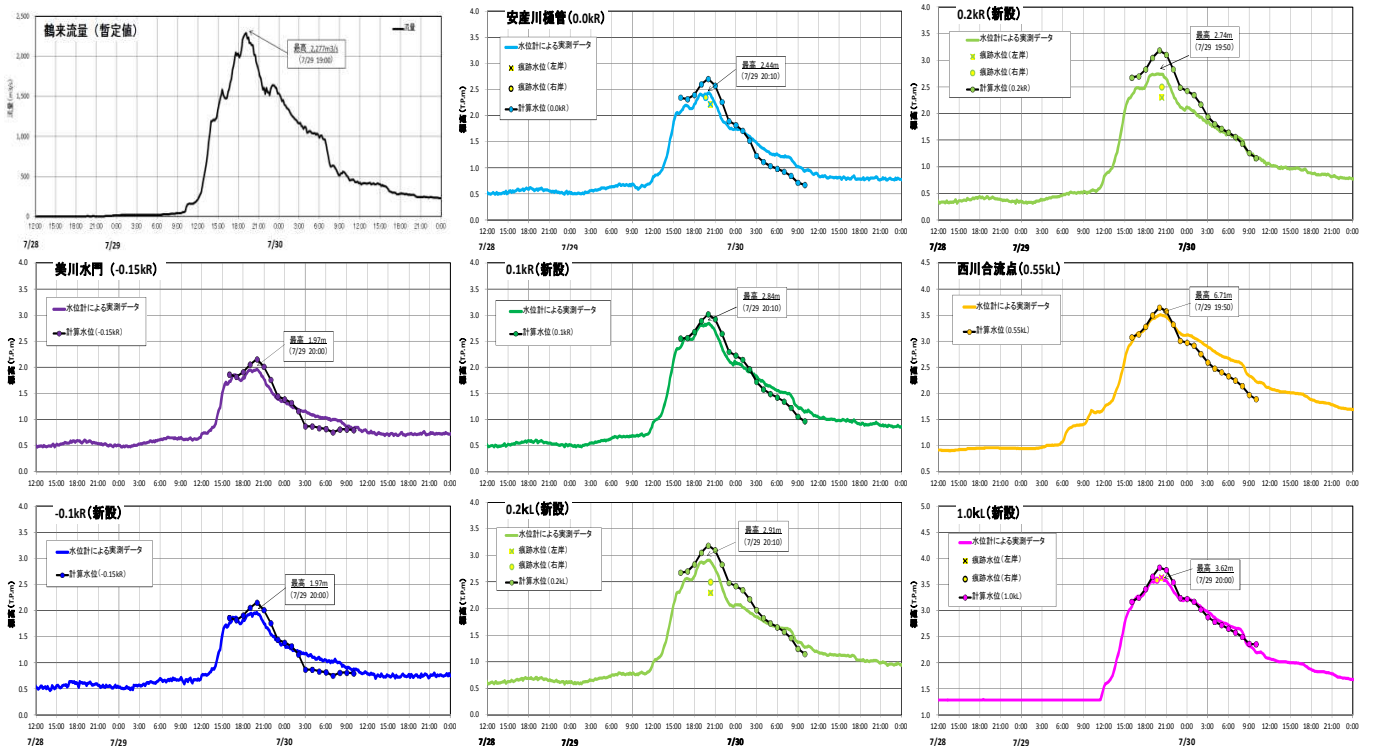


図-14 平成25年7月洪水における河口部近傍の水位時系列（計算結果と実績値の比較）

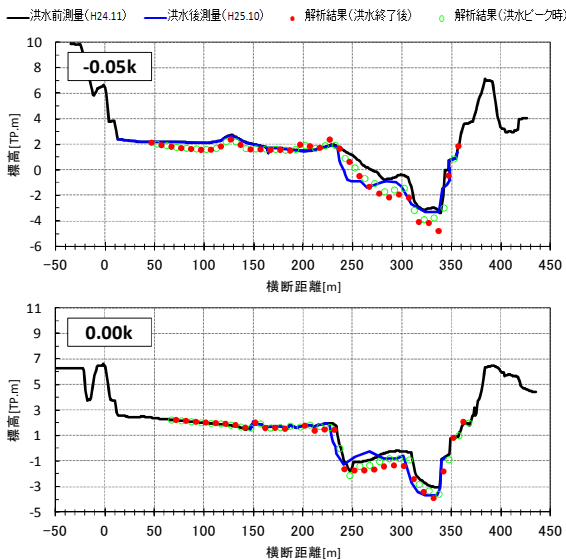


図-15 河口部の河床変動（計算結果と実績値）

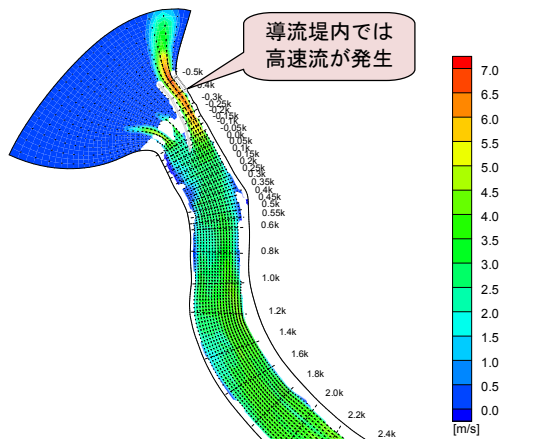


図-16 ピーク流量時の流速分布（計算結果）

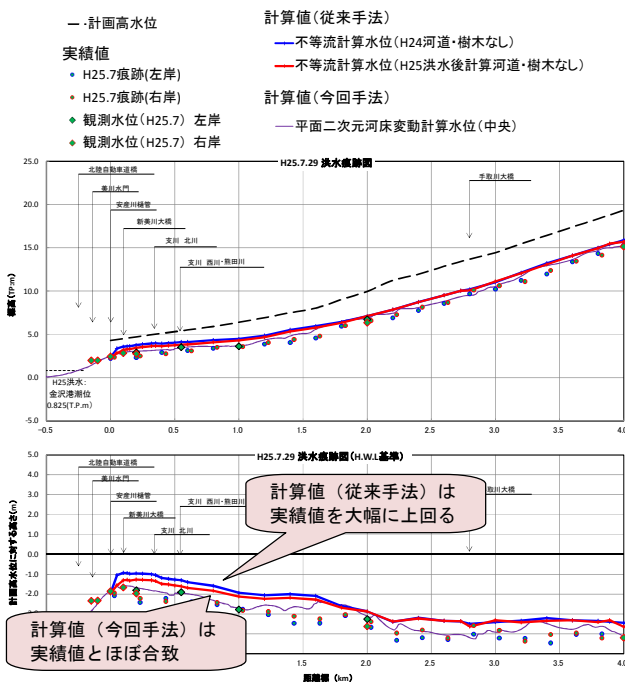


図-17 最高水位縦断面図（準二次元不等流計算による計算結果）

(4) 一次元モデルとの比較

準二次元不等流計算モデル（現行の河道設計において用いているモデル）によって同洪水のピーク流量流下時水位を予測したところ、図-17のとおり、実績に比べて最大約1m高い計算水位となった。特に、河口部における乖離が大きく、対象エリアにおける複雑な地形条件を一次元モデルで取り扱うことの困難さが明確となった。

7. おわりに

(1) 新たな河道設計手法の確立に向けて

本稿では、複雑な水理条件となる手取川河口部周辺においては、準二次元不等流計算による現象予測精度が低く、平面二次元河床変動解析モデルの方が実現象に合致することを示した。これより、従来の一次元計算に基づく河道設計手法に換えて、本計算手法を採用することの妥当性を示した。

一方、現段階では滞筋や砂州の移動現象が予測できないこと、流量確率1/15以上の洪水における再現性は検証できていないことなどから、予測値の不確実性を織り込んだ中で、計画論に反映する手法について今後検討を進めていく。

(2) 現地観測の有用性の確認

本稿では、従来の現地観測に比べて高密度な情報の得られる新たな現地観測（水位多点観測、航空レーザ測量など）を実施したことで、解析モデルの精度向上が可能となったことを具体的に示した。

(3) 現地観測における合理化の観点

本稿では、ロガー内蔵型のカプセル式水位計が、洪水中に流出・埋没し、観測不能となるケースが相次いだことを報告した。一方で、流出・埋没リスクのない非接触式計器を多地点に設置するには、労力・費用等の負担が大きく現実的ではない。

本調査の場合、解析モデルの精度検証に資するという目的に照らし合わせると、一部の観測不能は、特段大きな問題とならなかった。これを踏まえると、今後の水位観測においては、流出・埋没の生じにくい場所選定や固定方法の工夫改善を行うことは当然であるが、ある程度の観測不能リスクを前提として多点観測によって全体をカバーするという柔軟な発想に切り替えることも重要と考えている（計器を消耗品とみなすなど）。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，山海堂，2002
- 2) 清水康行他：http://i-ric.org/
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準 調査編，2015.4

(2015. 2. 13受付)

市販ソフトを用いた画像解析技術による 河川流量算出に関する検討

STUDY ABOUT THE CALCULATION OF RIVER FLOW DISCHARGE
BY IMAGE ANALYSIS METHOD USING THE MARKETED SOFTWARE

本永良樹¹・山本泰督²・栗城稔³

Yoshiki MOTONAGA, Taisuke YAMAMOTO and Minoru KURIKI

¹正会員 博 (工) (一財) 河川情報センター 河川情報研究所 (〒102-8474 東京都千代田麹町1-3)

²非会員 (一財) 河川情報センター 河川情報研究所 (同上)

³正会員 工学修士 (一財) 河川情報センター 河川情報研究所 (同上)

It has become easy to conduct the image analysis method about water surface velocity of river flow recently for good analysis software was marketed. The authors conducted the sensitivity analysis about river flow discharge calculated by STIV, one of the image analysis methods, using the released software, changing the number, length of inspection line and the movie time. As the result, the conditions to gain the analytical water discharge value by STIV which was close to the measured value by ADCP were shown. In addition, it was shown that it was difficult to apply the present STIV technique to the low water discharge measurement at small rivers.

Key Words : Image analysis method, STIV, marketed software, water discharge, sensitivity analysis

1. はじめに

我が国の高水時の流量観測は主に浮子測法が採用されてきた。出水時にピーク到達時間が早く、また流速が速く、流木等の流下物が多い我が国の河川において河川縦断方向に多数の地点で流量観測を実施する上で、使用する機材(棒浮子)が安価であり、技術的に容易でかつ比較的 safely に実施できる浮子測法は適した方法であった。また浮子測法は流量を算出する原理が直感的に理解しやすいことも長年にわたり主な手法として利用され続けている理由の一つであると思われる。一方で浮子測法については、これまでもいくつかの課題が挙げられてきた。投下した浮子が真っ直ぐに流れないあるいは滞留する場面がある、浮子の更正係数の適切さ、などの観測精度面の課題も重要であるが、より重要なのは、最も大切なピーク時の流量が計測できない場合がある、という観測態勢面での課題であると本稿の著者らは考える。ピーク流量が計測できない理由として、出水のピークに観測員の出勤が間に合わなかった、水位が上がり過ぎて危険な状況になったため観測員が現場から退避せざるをえなかった、あるいは現場に近づけなかったなどがある。近

年では出水の外力が増大し、河道内に設置した観測機器が破損してピーク流量が求められない事例もある。

ピーク流量の欠測への対応策として固定設置型流速計を用いた自動流量観測システムについて研究が進められている。これに関して、(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) は流量観測の高度化に関するマニュアル¹⁾を作成しており、その中で橋上操作艇搭載型ADCPによる流量観測を主たる方法とし、その主たる方法において欠測が生じた場合のデータ補完用として固定設置型流速計を用いた自動流量観測を並行して補助的に実施することを述べている。この自動流量観測システムの内容や実際の構築に向けて試行されてきた取組については本永²⁾がまとめたものがある。このシステムにおいて使用する固定設置型流速計としては、超音波流速計³⁾、H-ADCP⁴⁾、固定設置型の電波流速計⁵⁾などが挙げられる。自動流量観測システムはリアルタイムで流量を計測できるものであり、完成すれば浮子測法およびそれを基にして作成されるHQ曲線を用いた流量算出システムにとって替わる可能性も持っているが、固定設置型流速計として挙げられた機器に技術的な検討の余地が残されており、また各機器が高価なこともあって、我が国の観測所全体からみるとごく一部にて試行的

に実施されているのが現状である。現在も研究が重ねられており、今後十分実用に資するものになると推測されるが、ピーク流量の欠測という問題の逼迫性を考慮すると別途の対応が必要である。この課題に対して、流量観測地点における出水中の河川流れをビデオカメラで撮影し続け、浮子による観測が実施できなかった場合については撮影動画に対して後から画像解析を施し流量を算出して補完する手法が最も現実的であると本稿の著者らは考える。ビデオカメラとしては既設のCCTVカメラを利用することが島本ら⁶⁾により既に試みられている。同手法の有効性が明確に示されれば専用のCCTVカメラを設置することが考えられてもよい。画像解析技術については実河川において利用できるLSPIV⁷⁾、STIV⁸⁾⁻¹³⁾などの手法が開発されてきた。このような画像解析技術は、従来PC上で画像データを処理する高度な技術が必要であったため専門知識を持った一部の人にしか実施できなかったが、最近では河川流れを対象とした画像解析のソフトウェアが市販され、誰でも比較的容易に実施できるようになってきたため、今後河川管理において広く普及することが予想される。本稿においては画像解析技術による流量観測の普及に向けて、上述した市販の解析ソフトを利用した画像解析による流量観測を実際に行い、その過程において有益と思われた知見をまとめるものである。なお、同解析ソフトは撮影される画像に対してリアルタイムで流量を算出する段階には現時点では至っていないが、これが実現すればCCTVカメラを固定設置型流速計として用い、安全かつ確実な自動流量観測システムが構築される可能性があり、今後の発展に期待したい。

2. 研究の内容

先述したとおり画像解析についてはいくつかの技術が既に開発されている。これらはいずれも堤防天端上や橋梁上などからビデオカメラにより撮影した斜め画像に対し、真上から見たような画像に変換する幾何補正を最初に実施する。これにより画像内での物理長さを求めることができる。画像解析処理を実施する動画は天端上にビデオカメラを設置し、川を横から撮影することが良いとされる。幾何補正のために撮影画像内に三次元の物理座標 (X, Y, Z) が予め測定された複数の標定点が必要である。藤田ら¹³⁾によれば、標定点はビデオカメラ手前側の岸上に3点以上、対岸上に3点以上あることが必要である。画像内に映る標定点の画面上の二次元のCRT座標 (x, y) と測定した物理座標を連立する式を作成し、これを用いて撮影画像に幾何補正を施す(図-1)。

幾何補正した画像に対して画像解析を行い、表面流速分布を測定する。画像解析は河川表面の濃淡や波紋、流下物などをトレーサとして撮影した動画上で追いかけることが基本となる。これにより測定した河川表面流速に

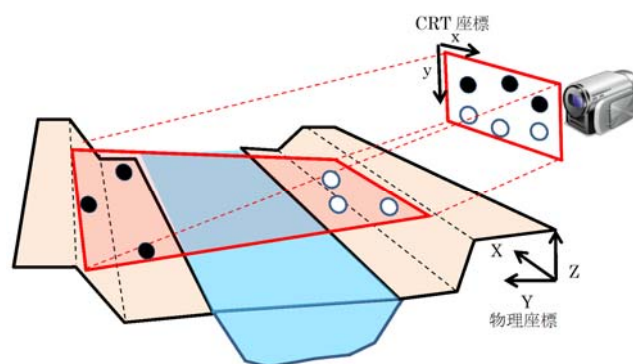


図-1 幾何補正イメージ



写真-2 魚野川におけるビデオ動画(静止画)

更正係数を乗じて断面平均流速を求め、河積に乗ずることと断面通過流量を求める。画像解析技術として、本稿ではSTIV (Space Time Image Velocimetry) を利用する。同手法の概要は、画像内の河川流れに沿って設置した検査線上における輝度の分布を時間軸方向に積み重ねることで、波紋等の移動による検査線上の輝度分布の変動を示すSTI画像を作成し、そのSTI画像内の模様の変換から検査線上の流速を算出する、というものである(STIVの詳細については、開発者である藤田ら⁸⁾⁻¹³⁾の一連の文献を参照)。STIVに関しては2014年に株式会社ビーシステムから同技術を用いた画像解析ソフト『KUSTIV』が発売された。この市販ソフトを用いることにより、ビデオカメラによる河川流れの撮影動画に対して、STIVを実施することが誰にでも容易になっており、今後実河川の管理等における実用が広がることが期待される。

STIVによる画像解析を実施する際、河川横断方向に複数の検査線を設置するが、この本数の設置は解析者に任されている。またSTI画像は横軸が検査線長さ、縦軸が動画時間であり、STIVによる河川表面流速の解析に当たり、検査線の物理長さや動画時間も解析者の判断で設定しなければならない。これらの条件の設定については河川流量の算出に当たり今後画像解析技術が普及するに伴い課題となることと思われるが、これまでに詳細に検討されたことはなかった。前述した市販の解析ソフトを用いれば、これらの項目についての設定条件を変更してSTIV解析を繰り返すことが容易にできる。そこで本

稿においては、検査線本数と物理長さ、そして動画時間の設定を変化させてSTIV解析を施し、その結果計算される断面通過流量に生じる誤差について感度分析を実施した。誤差は同時間帯に同地点にて実施した橋上操作艇搭載型ADCP横断観測により得られた断面通過流量との相対誤差として求めた。解析対象とする動画は2014年4月25日に信濃川水系魚野川に架かる根小屋橋（堀之内水位流量観測所における浮子投下地点）の直下流において、左岸天端上から川を横断方向に撮影したものである（図-2参照）。撮影時、魚野川は融雪出水期であり水面幅は約140mであった。同画像に対し流れに沿った検査線を横断方向に複数本設定し、STIV解析により各検査線の河川表面流速を求めた。各検査線が受け持つ区分断面を設定し、それぞれの区分断面において得られた河川表面流速に補正係数0.85を乗じて断面平均流速へ変換した。区分断面の断面積はADCP横断観測結果から作成した河床高横断方向分布図を基に水位に応じて計算した（図-3参照）。ADCP横断観測は複数回実施したが、観測期間中現地の断面形状は安定していたことが確認された。区分断面毎に断面平均流速と断面積を乗じて通過流量を求め、これを横断方向に積分して断面通過流量を求めた。

KU-STIVを用いてSTI画像から河川表面流速を算出するに当たっては輝度勾配テンソル法⁸⁾を用い、必要となるパラメータについては表-1に示す値（KU-STIVにおけるデフォルト値）を用いた。検査線数、検査線長さ、動画時間に関する感度分析はそれぞれ次のように実施した。

(1) 検査線数

撮影時の川幅（約140m）に対し標準法にて定められている15本を上限として検査線数を設定した。STIVの特徴として任意に検査線の設定ができることから測線数が同川幅に対して緊急法で定める5本以下の場合には河道断面形状に基づき適当と思われる位置に検査線を設定している。5本以上の場合には検査線を横断方向に等間隔で配置している。検査線数に関する感度分析を実施した際、検査線の長さは15.96m、動画時間は30秒とした。

(2) 検査線長さ

堤防天端上から横断方向に河川流れを撮影した場合、得られる斜め画像を真上から見たような画像に幾何補正すると当然カメラ手前側が最も縮むように補正される。幾何補正画像上のこの部分にどの程度の河川表面が収まっているかによって設定できる検査線の最大長さが決まる（図-4）。そのためカメラの設置位置や撮影アングルには注意を要する。今回魚野川を撮影した画像では、カメラ手前側のこの部分に設定できる検査線長さは21.51mであった。これを最長として検査線長さを設定した。検査線長さに関する感度分析を実施した際、検査線の本数は15本で横断方向に等間隔で設置している。動画時間は30秒とした。検査長さに関する各ケースについて

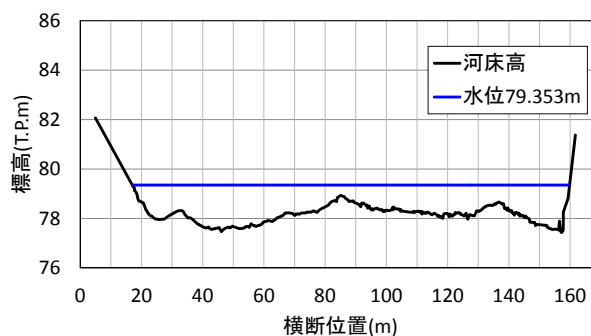


図-3 河床高横断方向分布（魚野川堀之内地点）
ADCPにより計測。水位は動画撮影時のものである。

表-1 輝度勾配テンソル法 各パラメータの設定値

項目	設定値
テンプレート設定	MX : 30
	LX : 10
	MT : 30
	LT : 10
角度ヒストグラム	CT : 0%
	範囲 : 70%

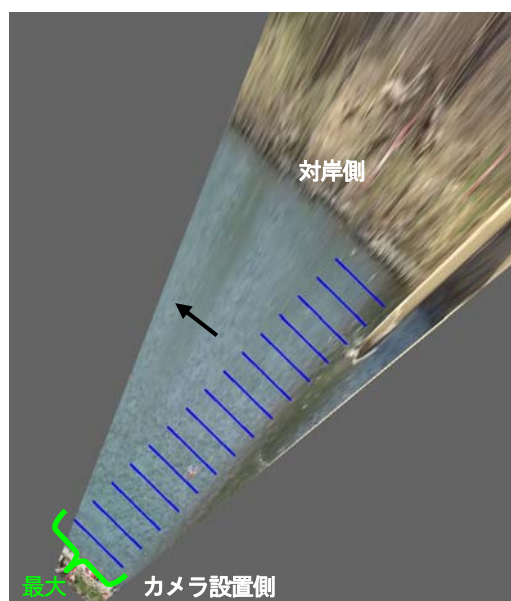


図-4 実際の幾何補正画像と検査線例

カメラ手前側の最も撮影範囲が狭い部分の河川流下距離よりも検査線を長く設定することはできない。

検査線の横断位置を河道内で任意に動かし、それによって同じ検査線長さでもどの程度解析流量結果にばらつきが生じるかについても調べた。

(3) 動画時間

今回解析に使用したKU-STIVでは、動画時間が長過ぎると解析に極度に時間を要する。KU-STIVの販売元である株式会社ビーシステムのホームページ¹⁴⁾では動画時

間は30秒程度とされている。これを上限として動画時間を設定した。将来的なりアルタイムでの利用を見据えて動画時間は最小で1secとした。撮影した動画ファイル内の解析に必要な時間部分を切り取る機能はKU-STIVに含まれている。

3. 研究結果と考察

STIV解析により求まる断面通過流量について、同時時間帯に同じ現場にて実施したADCP観測流量との相対誤差を求めた。この相対誤差に対して、検査線数、検査線長さ、動画時間に関して感度分析を実施した。その結果は以下の通りである。

(1) 検査線数

図-5は検査線本数とSTIV解析流量のADCP観測流量に対する相対誤差との関係図である。検査線数は1~15本の間で設定しているが、全てにおいてADCP観測流量との相対誤差が10%以内に収まっている。ADCP観測流量を真値と仮定した場合、10%の誤差はISO技術基準で示されている浮子の観測程度¹⁵⁾と同等である。緊急法以下の検査線本数でも相対誤差が10%以内に収まっているが、これは図-3に示した通り、観測を実施した魚野川堀之内地点では水深が比較的一様であることに起因すると考えられる。検査線本数を変えた時のSTIVによる解析流量はADCP観測流量よりも少なく算出される傾向が見られるが、これについては今後の検討課題としたい。

(2) 検査線長さ

図-6は検査線長さとして、それぞれの検査線長さにおけるSTIV解析流量のADCP観測流量に対する相対誤差との関係図である。検査線長さに関する全てのケースにおいて検査線は横断方向に等間隔で設置し、その位置を横断方向に数パターン移動させている。図-6から分かるように、検査線を長くするほどADCP観測流量との相対誤差は小さくなり、検査線位置を横断方向に移動させたことによるばらつきも小さくなっている。これは検査線を長くすることによって、輝度勾配テンソル法により求まるSTI画像上の模様角度がより平均化されるためと考えられる。ADCP観測流量を真値と仮定した場合、図-6からは検査線長さを15m以上に設定すれば誤差の少ない流量が求まることがわかる。検査線長さを変えた時のSTIVによる解析流量はADCP観測流量よりも少なく算出される傾向が見られるが、これについては今後の検討課題としたい。

(3) 動画時間

図-7は動画時間として、それぞれの動画時間におけるSTIV解析流量のADCP観測流量に対する相対誤差との関係

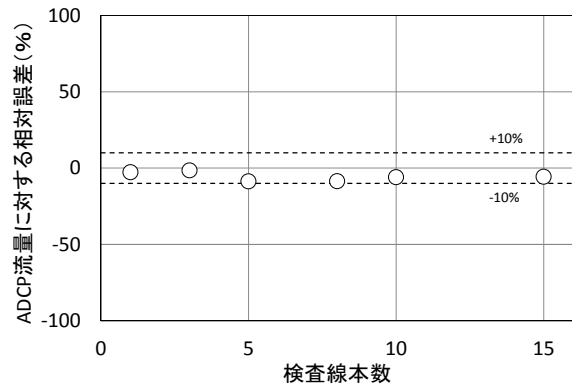


図-5 検査線本数とADCP流量に対する相対誤差の関係

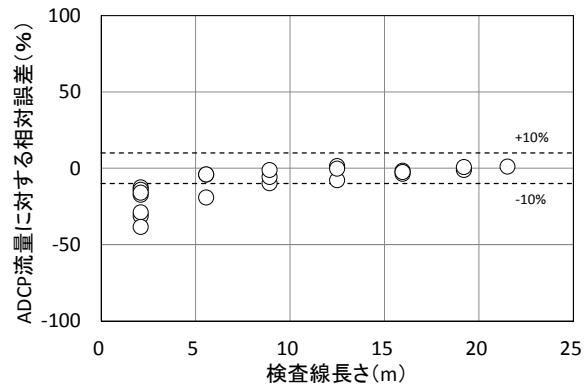


図-6 検査線長さとして、それぞれの検査線長さにおけるSTIV解析流量のADCP観測流量に対する相対誤差との関係

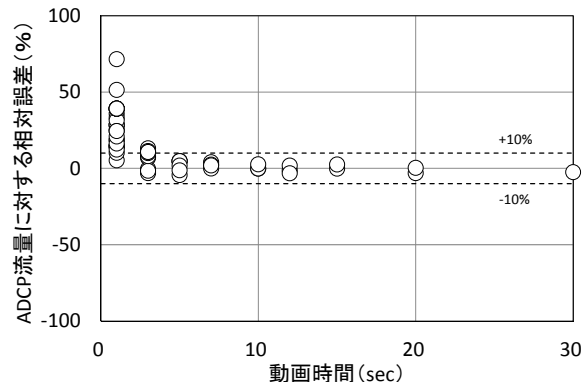


図-7 動画時間として、それぞれの動画時間におけるSTIV解析流量のADCP観測流量に対する相対誤差との関係

図-7より動画時間を短くすると相対誤差が大きくなる傾向が見られる。全体で30秒の動画を準備し、その中で必要な時間部分を任意に切り取って使用している。例えば動画時間1secの解析については30ケース分のデータがある。図-7より動画時間を短くすると相対誤差が大きくなる傾向が見られる。縦軸の設定上、図には収まっていないが動画時間1secの場合、最大で相対誤差が200%以上になるケースも見られた。これは明らかにノイズであると考えられる。動画時間が10秒程度より長くなると、相対誤差が小さくなる傾向が見られる。これらの結果は各解析の際に作成されるSTI画像の時間軸の長さによって起因していると考えられる。図-8に示すように、動画時間が短い場合は輝度勾配テンソル法により算出される勾配のサンプル数が極端に少なくなる場合があり、その少ない勾配の中か

らヒストグラムを用いた代表流速を算出しているためであると考えられる。

4. STIV解析の失敗例

本稿では出水時を対象とした画像解析による流量算出を主な対象として検討したが、著者らは将来的に画像解析技術を用いたリアルタイムでの自動流量観測を目指している。そのため、低水時を対象としたSTIV解析による流量観測も別途試みているので、ここで報告する。低水流観の対象としたのは多摩川水系野川である。野川は田園都市線二子玉川駅付近にて多摩川に合流する小河川であり、画像撮影時の水面幅は約30mであった。撮影時には現地における水深は約20cmと浅く、撮影現地の直上流に架かる橋上からADCPによる観測を実施したところ流速は30cm/s程度と極めて遅かった。図-9に撮影画像を示すが、撮影時の現場では微風による小さなさざ波が発生しているのみで、濃淡や波紋などは見られなかった。画像内に映っている6点の標定点およびビデオカメラの物理座標は、ビデオカメラ設置地点の近くに適当な原点(0, 0, 0)を設定し、そこを基準として3次元座標(X, Y, Z)を求めた。原理上当然のことであるが、この物理座標を用いても図-10に示すように幾何補正が実施できた。業務として実施する場合には標定点位置の再現性が求められるため国土地理院が設置した基準点などから座標を測る必要があるが、簡易的に画像解析を実施する場合はこのような座標設定で十分である。幾何補正を実施した動画上において、河道内の横断中心部に流れ方向に沿って検査線を設定し、その検査線について作成したSTIV画像を図-11に示すが、このように明確な模様の勾配は見られなかった。さざ波によるぼんやりとした模様は見られるが、これに対して輝度勾配テンソル法により表面流速を求めると-2m/sというADCPによる観測値と極端にかけ離れたデータが算出された。このように野川程度の小河川では低水時におけるSTIVによる流量観測は、現時点では難しいことが判明した。今後は様々な規模の河川にて低水時のSTIVによる流量観測を試み、どの程度のスケールの河川であれば画像解析による連続した自動流量観測が可能か検討したい。

5. まとめ

本稿では市販の画像解析ソフト『KU-STIV』を用いて融雪出水期の魚野川および低水時の野川を対象として設定条件を様々に変えたSTIV解析を実施し、その結果により断面通過流量を求めることを試みた。今回、得られた知見を以下にまとめる。

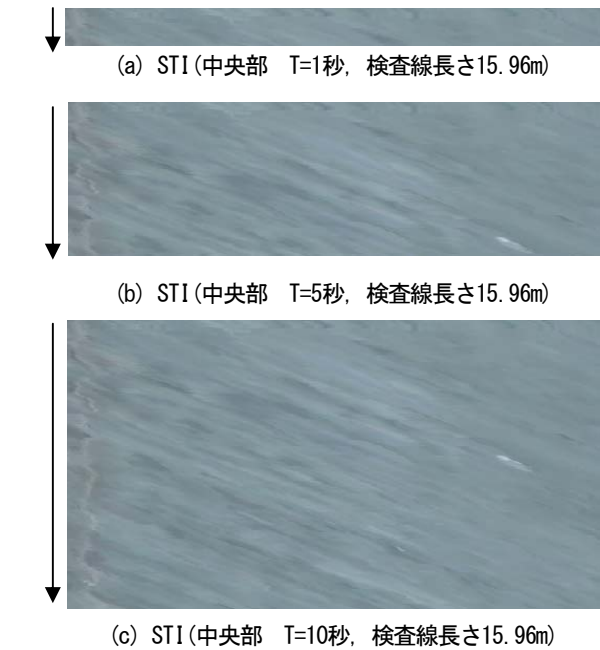


図-8 各動画時間におけるSTIV画像例



図-9 ビデオ画像（低水時の野川）

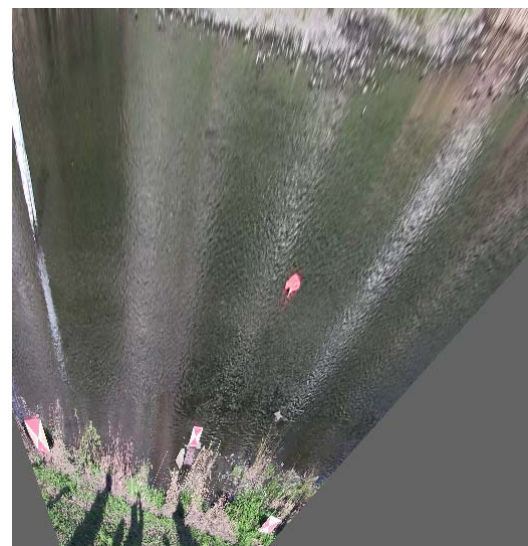


図-10 図-9に対する幾何補正画像

1) 市販の画像解析ソフト『KU-STIV』を用いることで、同一の動画時間で検査線の本数や長さを変える、あるいは同一の検査線本数または長さで動画時間を変える、など条件設定を変更した解析を繰り返し実施することが容

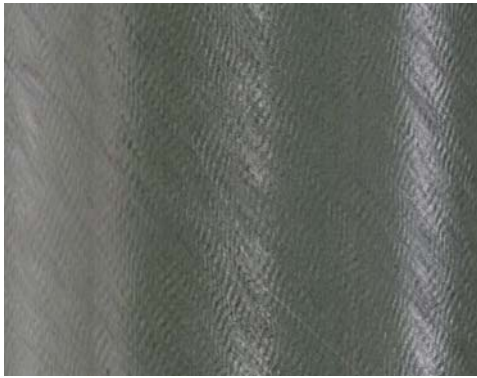


図-11 低水時野川におけるSTI画像例

易であることが示せた。

- 2) 融雪出水時の魚野川においては、緊急法で定められる以上の検査線を設定すれば解析流量が精度よく求まる。
- 3) 融雪出水時の魚野川においては、検査線長さを15m程度以上に設定すれば解析流量が精度よく求まる。またこの検査線長さであれば、検査線の横断位置がある程度移動しても最終的に得られる流量値に大きなばらつきは見られない。
- 4) 動画時間に関しては、10秒程度以上あれば解析流量が精度よく求まる。短くし過ぎると極端なノイズが含まれることが多くなる。
- 5) 多摩川水系野川程度の小河川ではSTIVによる低水流量の解析は難しいことを示した。

本稿における検討によって市販ソフト『KU-STIV』を用いたSTIV解析による河川流量算出の有効性が確認できた。この結果より、現況の浮子測法において欠測が生じた場合でも、既設のCCTVカメラなどで河川流れを撮影しておけば、洪水後に画像解析により欠測データを補完できることが示せた。今後は他河川または出水の規模や特徴の異なる様々な洪水を対象としたSTIV解析を実施し、より多くの知見を積み重ねていきたい。

謝辞：STIV解析により河川流量を算出するに当たり、神戸大学 藤田一郎教授から有益なご助言をいただいた。魚野川のビデオ撮影は土木学会流量観測高度化研究小委員会が主催する魚野川合同流量観測ワークショップの一環として実施した。魚野川のSTIV解析流量との比較に用いたADCPデータは同小委員会から提供されたものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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編：流量観測高度化マニュアル（高水流量観測編），Ver1.0，土木研究所，2014。
http://www.icharm.pwri.go.jp/ryokan/manual_1.0.pdf
- 2) 本永良樹：固定設置型流速計を用いた自動流量観測システムの構築，国土館大学審査学位論文，2014。

- 3) 木下武雄：超音波により連続的に観測された洪水・潮汐等の流量変化の不定流としての挙動，国立防災科学技術センター研究報告，第27号，pp.1-11，1982。
- 4) 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.245-248，2005。
- 5) 山口高志，新里邦生：電波式流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28，pp.41-50，1994。
- 6) 島本重寿，藤田一郎，萬矢敦啓，柏田仁，浜田憲一郎，山崎裕介：画像処理型流速測定法を用いた流量観測技術の実用化に向けた検討，河川技術論文集，第20巻，pp.37-42，2014。
- 7) 野村昌生，綾史郎，武藤裕則，藤田一郎：淀川水系におけるLSPIVの利用に関する研究-ITV画像の利用を目指して-，河川技術論文集，第8巻，pp.471-476，2002。
- 8) 藤田一郎，椿涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測，河川技術論文集，第9巻，pp.55-60，2003。
- 9) 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速，水工学論文集，第53巻，pp.1003-1008，2009。
- 10) 原浩気，藤田一郎：時空間画像を用いた河川表面流解析における二次元高速フーリエ変換の適用，水工学論文集，第54巻，pp.1105-1110，2010。
- 11) 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，土木学会論文集B1（水工学），Vol.67，No.4，pp.1177-1182，2011。
- 12) 藤田一郎，小坂純史，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），Vo.69，No.4，pp.703-708，2013。
- 13) 藤田一郎，北田真則，霜野充，橘田隆史，萬矢敦啓，本永良樹：複数アングルの画像計測とラジコンボート搭載型ADCPによる融雪洪水流の空間計測，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.613-618，2014。
- 14) 株式会社ビーシステム KU-STIV紹介のHP：
http://www.be-system.co.jp/navi_soft/soft_kustiv/kustiv.htm
- 15) 中尾忠彦：河川流量観測の国際基準，河川流量観測の新時代，第3巻，pp.1-7，2012。
- 16) 山本泰督，本永良樹，栗城稔：KU-STIVを用いた流量観測の検証，平成26年度河川情報シンポジウム講演集，一般財団法人河川情報センター，pp.8-1-8-6，2014。

(2015. 2. 13受付)

タイ国Chao Phraya川流域における 計量科学魚探を用いた河床形状及びダム湖形状 の観測とADCPを用いた流速観測

OBSERVATION OF RIVERBED FORMS AND DAM RESERVOIR BOTTOM
FORMS USING MEASUREMENT SCIENCE FISHFINDER, AND FLOW
VELOCITY OBSERVATION USING ADCP IN CHAO PHRAYA RIVER BASIN,
THAILAND

道谷健太郎¹・笹川幸寛²・手計太一³
Kentaro DOUTANI, Yukihiro SASAKAWA and Taichi TEBAKARI

¹学生員 富山県立大学 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

²学生員 学士 富山県立大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

³正会員 博(工) 富山県立大学准教授 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 observation using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) and observation of a riverbed forms and dam reservoir bottom forms using measurement science fishfinder were carried out in the Chao Phraya River, Thailand.

Key Words : *Flow velocity, ADCP, Riverbed forms, Dam reservoir bottom forms , the Chao Phraya River, Thailand*

1. はじめに

音響測深機は河床形状、貯水池湖床の形状の観測方法として広く用いられている。

河床形状は時間とともに変動し、その変遷を知ることには河川管理上極めて重要である。特に出水時には河床が大きく変動するケースがあり、形状抵抗の変化は水位の変動に大きく影響する。

ダム貯水池への堆砂はダムの貯水容量を減らし、貯水池の持つ治水・利水の能力を低下させる。また土砂が貯水池でせき止められることで上流では河床の上昇、下流では河床の低下や河口部の海岸線の後退が起こる。貯水池の堆砂の状況を把握するための、音響測深機を用いた湖床の観測は日本で広く行われている。断面形状の測定のみならず、コンタースライス法によって堆砂量を算定することも可能である。

流量観測の手法として、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¹⁾。

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。2014年10月、タイ最大かつ社会・経済的に最重要であるChao Phraya川流域において、ADCPを利用した流況観測、計量科学魚探DT-X(Bio Sonic社製)を用いた河床形状ならびにダム湖形状の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、最近では海外において水理・水文観測を実施するプロジェクトが非常に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36,018 km²)、Wang川(流域面積11,708 km²)、Yom川(流域面積24,720 km²)、Nan川(流域面積34,557 km²)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18,200 km²)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310 km、標高差は約25.6 m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。

Chao Phraya川流域上流には2つの大規模ダム貯水池が存在する。Ping川上流に位置するBhumibolダムは総貯水量134.6 億m³の重力式コンクリートダムである。Nan川上流に位置するSirikitダムは総貯水量10.6 億m³のロックフィルダムである。これら貯水池の主な運用目的は、発電、灌漑、治水である。

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

流速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、ロープ、工具類である。河床の観測に用いた機材は、DT-X本体(トランスデューサ、サーフェスユニット)、GPS受信機、ケーブル・コード類、固定用のパイプと金具、ロープ、12Vバッテリー、携行型発電機、PC、工具類である。

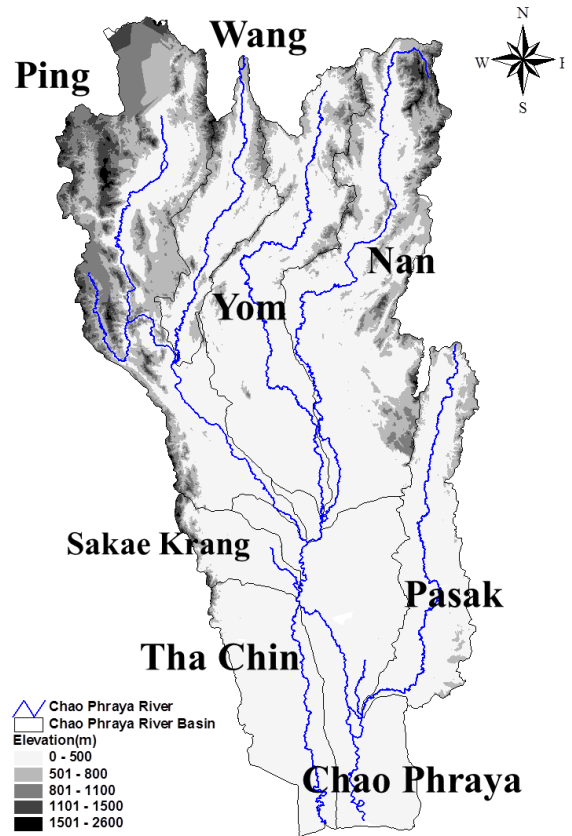


図-1 Chao Phraya川流域の地形図と河川網.

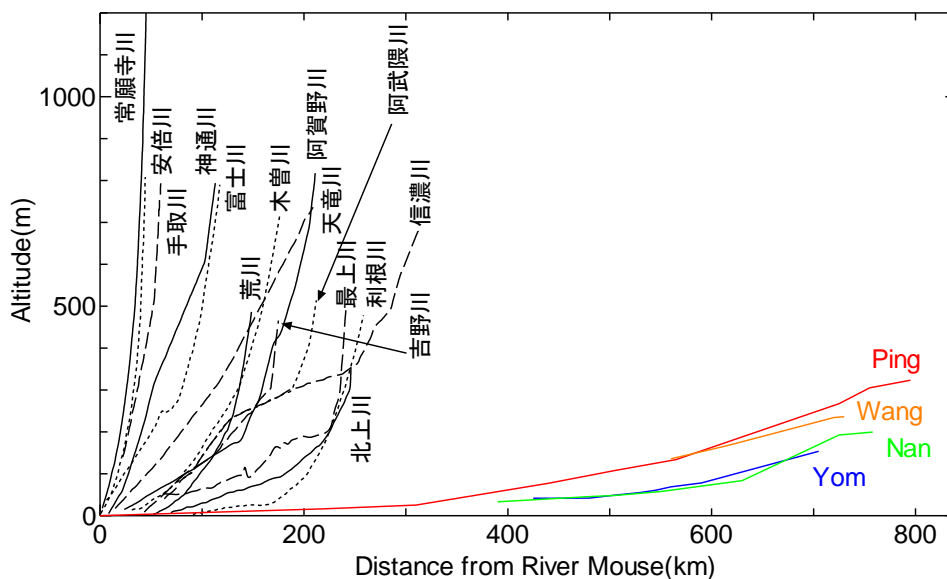


図-2 日本を代表する河川とChao Phraya川流域の縦断形状.

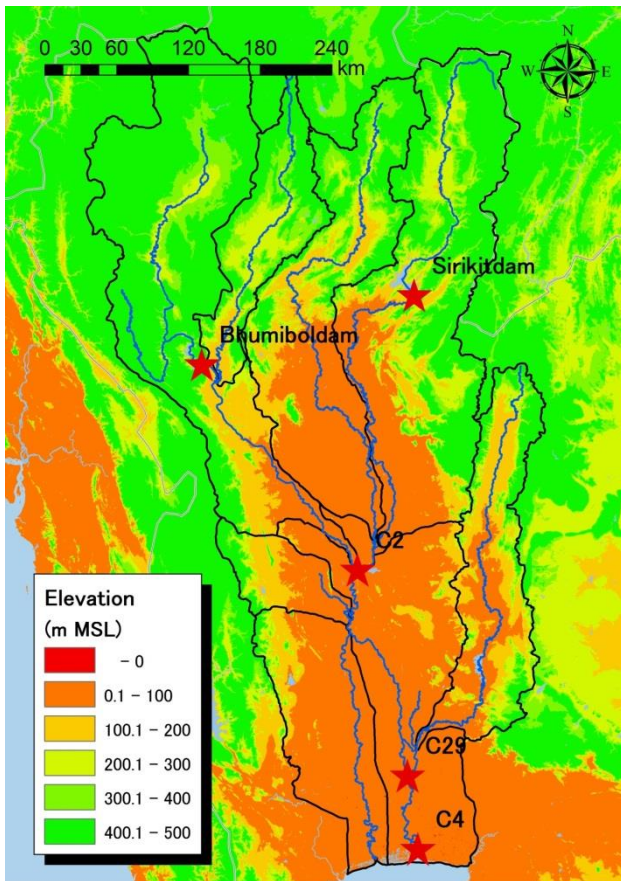


図-3 観測した5地点の位置図

表-1 観測箇所の詳細

観測箇所名	都市名, 県名	北緯	東経
C.4	Bangkok	13.59938	100.59518
C.2	Nakhon Sawan	15.7013	100.141
Bhumibolダム	Sam Ngao District, Tak	17.24823	98.96994
Sirikitダム	Tha Pla District, Uttaradit	17.76786	100.566
C.29	Ayutthaya	14.15242	100.5155

飛行機搭乗時、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。

昨年タイ国で行った調査¹⁾において、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。そのため、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。今回の調査においても12Vバッテリーのみを電源とし、100V電源が必要な場合は変圧器を用いてこれを補った。

(2) 観測場所

観測場所と位置の詳細を図-3と表-1に示す。Bhumibolダム貯水池、Sirikitダム貯水池ではADCPによる観測は行わずDT-Xによる湖床の観測のみを行った。その他の地点ではDT-XとADCPとを同時に用いて観測した。すべて船舶を用いた観測であり、船舶については、渡し船事業者や釣り人にレンタルして観測を行った。

表-2 DT-Xの設定と仕様

仕様	出力周波数	200kHz
	ビーム角	6°
BioSonics社製		
設定	底面の検出 Rising Edge threshold	-50dBから
	出力間隔	0.1秒
	観測水深	0~100m

表-3 ADCPの設定条件

C. 29観測所以外

計測モード	12
計測層厚	0.1 m
計測層数	170
アンサンブルタイム	6.23 sec
ウォーターピング数	3
サブピング数	8
ボトムトラック機能	on
ボトムピング数	3
固定観測における 流速誤差の標準偏差	6.35 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート

C. 29観測所

計測モード	12
計測層厚	1.0 m
計測層数	26
アンサンブルタイム	2.84 sec
ウォーターピング数	3
サブピング数	8
ボトムトラック機能	on
ボトムピング数	3
固定観測における 流速誤差の標準偏差	0.72 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート

4. 観測結果

本観測で利用したDT-Xの仕様と設定とを表-2に、ADCPの設定コマンドを表-3に示す。

2つの貯水池以外の3地点4観測日においては、DT-XとADCPによる観測を同じ船で同時に行った。これは現地での予備実験において、2つの機器同士がそれぞれの結果に干渉しないことが明らかになったためである。また、以下に示すADCP観測結果のA-A'~Z-Z', α - α' , β - β' はDT-X観測結果の地図上に示したA-A'~Z-Z', α - α' , β - β' と同じ観測断面を表している。DT-XとADCPの同時観測の結果得られた水深は、ほぼ一致していた。



写真-1 C.4観測所におけるボートを用いた観測の風景

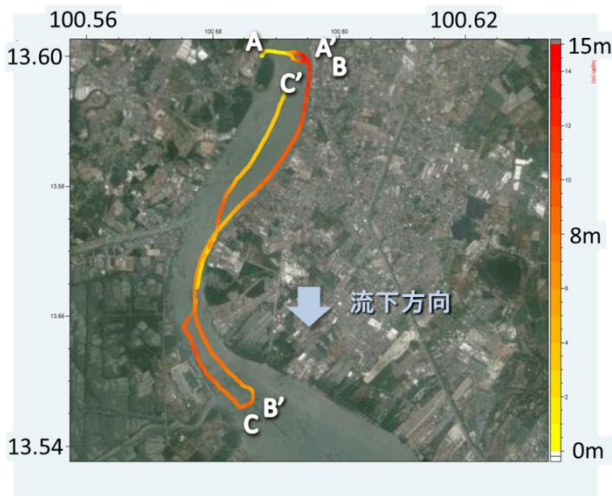


図-4 C.4観測所におけるDT-Xの河床深度の観測結果

(1) C.4観測所

写真-1は2014年10月11日にC.4観測所（Chao Phraya川河口）で行ったボートを使った観測の風景である。渡し船の個人事業者に船をレンタルした。

図-4はDT-Xの水深の観測結果である。図中の黄-赤色で示した曲線が測線であり、色が赤色に近いほど水深が大きい。水深の最も大きい地点は図中のA地点付近で、水深は13.4mであった。観測時の水位0.7mを利用して、観測データを換算すると最深河床は-12.7mである。図中の上半分においては左岸側、下半分においては右岸側の河床が低い傾向があり、蛇行による侵食の影響が見られる。

図-5はADCP観測結果である。ADCPの計測設定条件は表-3の通りである。以下の断面図では、流速の南方成分を負の値(青色)、北方成分を正の値(赤色)で示している。縦軸は水深、横軸は観測距離を表す。流速の範囲は-180~30 cm/sである。A-A'断面では左岸側に主流速が存在し、右岸よりも水深が約10mも深いことがわかる。また、右岸側や左岸の河床付近には逆流が確認できる。A-

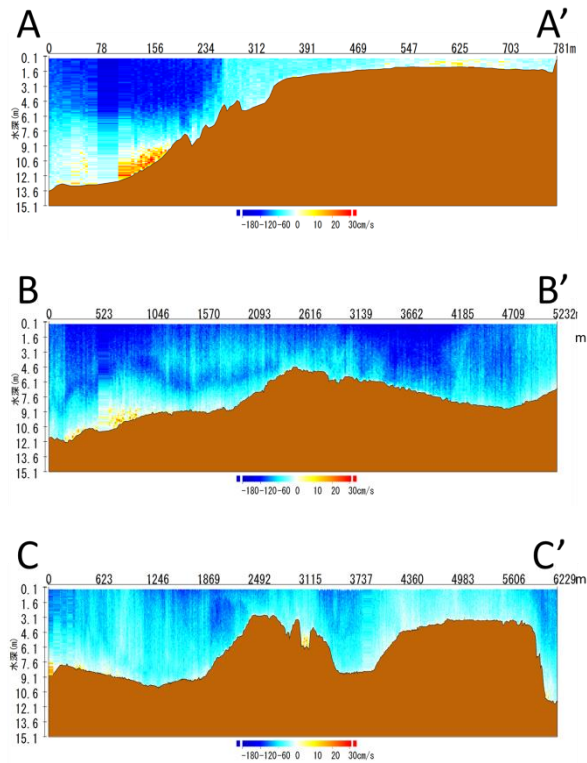


図-5 C.4観測所におけるADCPの横断・縦断面図



写真-2 C.2観測所におけるボートを用いた観測の風景

A'断面の流量は1314.2 m³/sである。B-B'は上流から下流、C-C'は下流から上流の河川縦断観測である。

(2) C.2観測所

写真-2は2014年10月12日に行ったC.2観測所における観測の風景である。C.2観測所は北西からPing川、北東からNan川が合流し、Chao Phraya川を形成する地点である。

図-6はC.2観測所におけるDT-Xによる水深の観測結果である。この観測所では2014年10月12日と15日の2回にわたり観測を行った。この図は2回の観測結果を一つにまとめたものである。水深の最も大きい地点は合流地点直下の中央部であった。そのうちPing川側は浅くNan川側が深い形状となっており、その境界部分が最も水深が

大きい地点（11.7 m）であった。観測時の水位19.6 mを利用して、観測データを換算すると最深河床は7.8 mである。

また図-7は同地点におけるDT-Xの観測結果を用いて描いた河床の形状図である。これは、観測時の水位のデータと観測で得られた水深から、河床の形状を標高で示したものである。青色が濃いほど標高が低く、水深は大きい事を示している。測線の間はNatural Neighbor法を用いて補完している。この図から、Ping川に比べNan川河床の標高が低く、合流後はNan川の延長上に標高の低い部分が広がっていることがわかる。

図-8はC.2観測所（Nakhon Sawan合流後）のADCP観測結果である。D-D'は左岸→右岸→左岸の観測結果である。観測開始地点から17～34 mの水深が浅くなる範囲が右岸側である。右岸側では逆流が発生している。C.2観測所でも主流部の対岸では逆流が発生していた。E-E'と

F-F', H-H'断面はすべて横断観測結果である。それぞれ流量は534.1 m³/s, 460.8 m³/s, 335.4 m³/sである。観測結果において、大きいものと小さいもの間で流量の差が約200 m³/sあった。これは、流速により横断時にボートが流されたことが影響しているのではないかと考えられる。また、G-G'は下流から上流への縦断観測である。

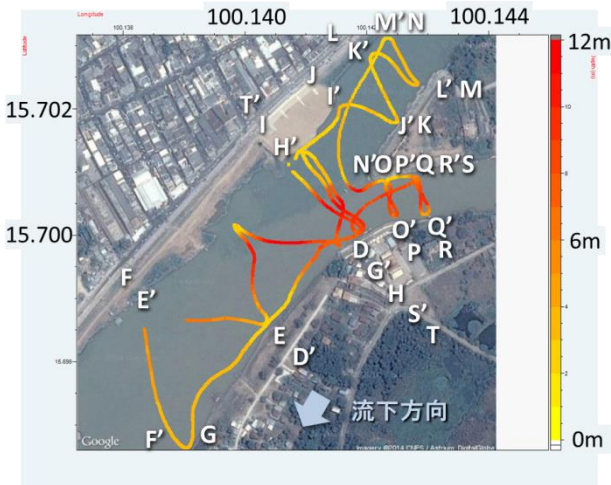


図-6 C.2観測所におけるDT-Xの水深観測結果

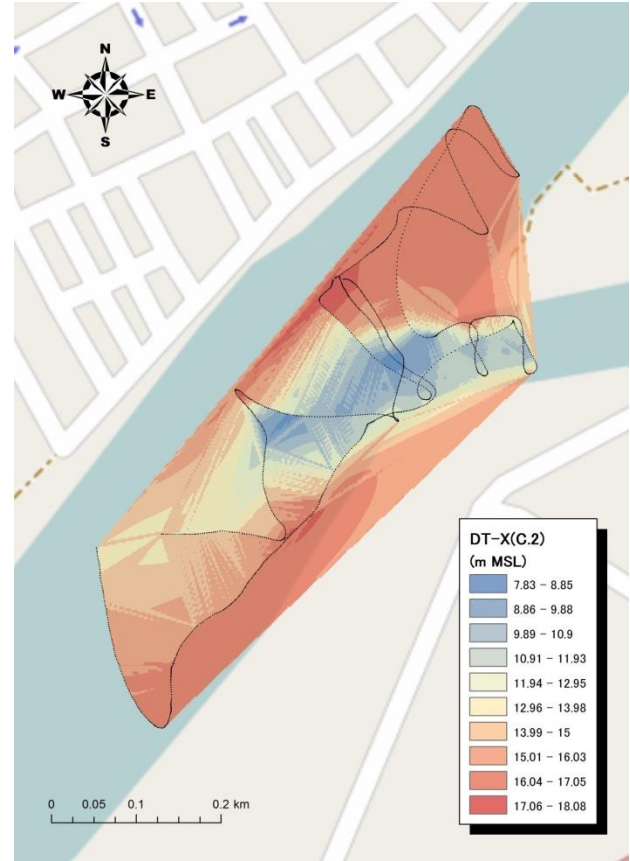


図-7 C.2観測所における河床形状図

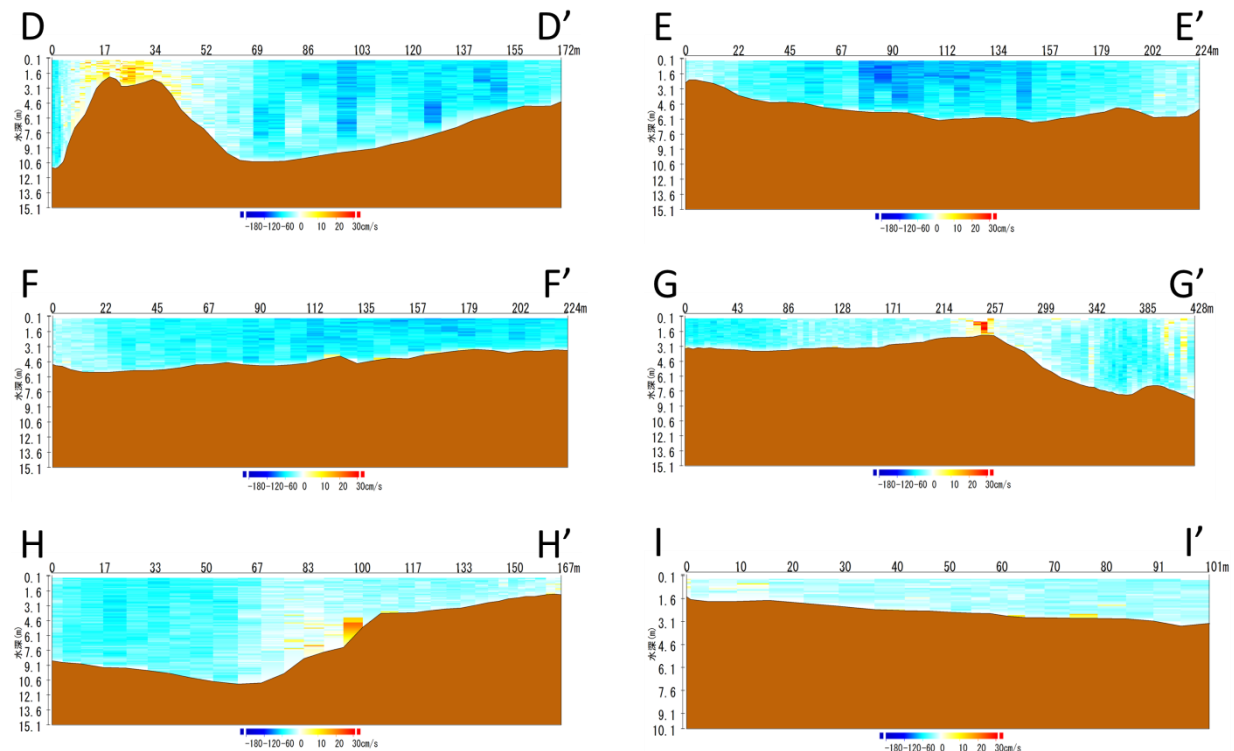


図-8 C.2観測所におけるADCPの横断・縦断図（断面D～I）

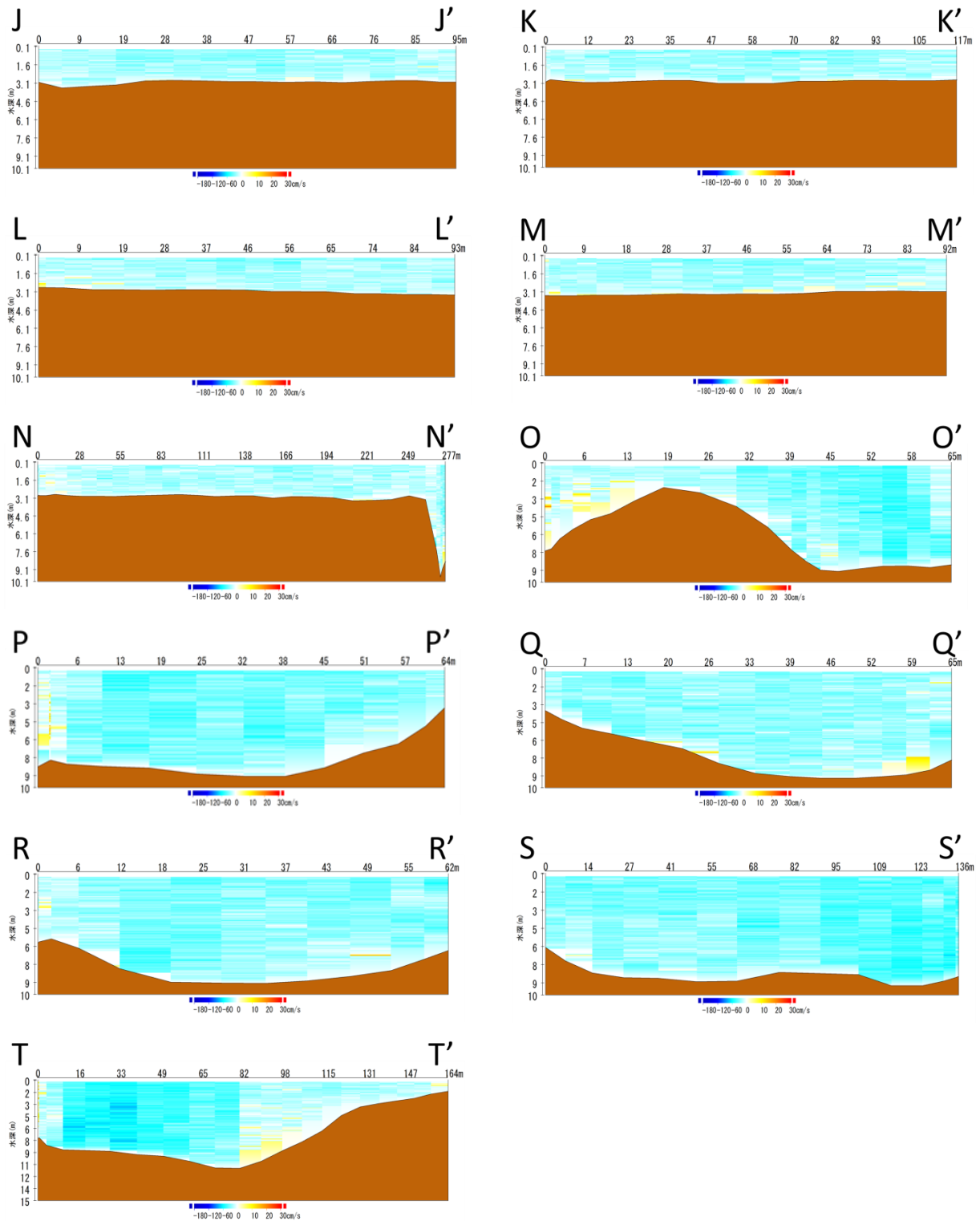


図-9 C.2観測所におけるADCPの横断・縦断面図（断面J～T）

図-9は2014年10月15日に行った、C.2観測所における2回目のADCP観測の結果である。一回目の観測では合流後の観測のみであったが、二回目は合流前のPing川、Nan川についても観測を行った。I-I'は船着き場からPing川右岸までの観測、J-J'～M-M'断面はPing川の横断観測の結果である。横断観測結果の流量はそれぞれ、49.8 m³/s、59.2 m³/s、43.3 m³/s、50.4 m³/sとなり、差は最大で15 m³/sとなった。次に、N-N'はPing川右岸からNan川右岸までの移動時の観測であり、O-O'～R-R'断面がNan川

の横断観測結果である。流量はそれぞれ、80.0 m³/s、129.0 m³/s、102.3 m³/s、106.9 m³/sであり、差は最大で49.0 m³/sである。O-O'断面観測の流量が小さくなったのは、観測開始が早く2河川合流部の逆流速を観測したためだと考えられる。S-S'はNan川右岸から合流後左岸の移動観測で、T-T'断面は合流後横断観測の結果である。この結果より、合流後の流量は355.5 m³/sであった。合流前2河川の流量観測結果の中で、それぞれ一番大きい値を合計すると188.2 m³/sである。合流前の2河川の流量



写真-3 Bhumibolダム貯水池における観測の風景



写真-4 Sirikitダム貯水池における観測の風景

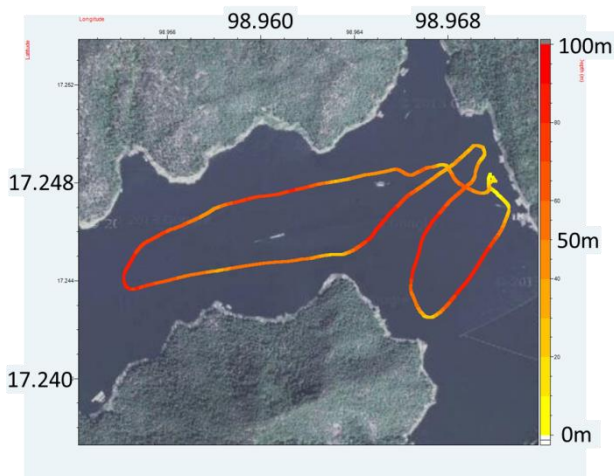


図-10 Bhumibolダム貯水池におけるDT-Xの水深観測結果

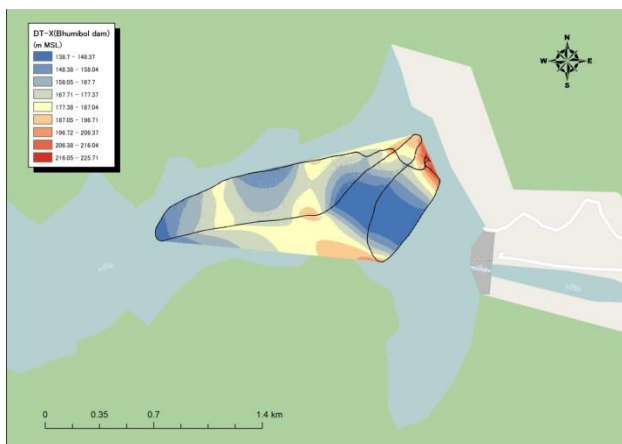


図-11 Bhumibolダム貯水池の形状図

の合計と合流後の流量の観測結果に $167.3 \text{ m}^3/\text{s}$ の差が生じた。これは、上流部においては、河川断面の全面を観測できていないために、過小評価されたと考えられる。また、下流に関しては流下方向に対して測線が斜めになってしまったため、実際よりも流量が過大評価された

可能性が考えられる。測線が傾いたのは、河川の流速が速く、ボートが流されたことによる。

(3) Bhumibolダム貯水池

写真-3は2014年10月13日に行ったBhumibolダム貯水池における観測の風景である。図-10はBhumibolダム貯水池におけるDT-Xの水深の観測結果である。岸から近い地点の水深は小さく、岸から離れた地点の水深は大きい傾向が見て取れる。水深は最も大きい地点で 89.0 m であった。観測時の水位 227.2 m を利用して、観測データを換算すると最深湖床は 138.2 m である。

図-11はBhumibolダム貯水池におけるDT-Xの観測結果を用いて描いたダム湖床の形状である。堤体付近の湖床は、標高 140 m 程度の平坦な部分を中心に、山側にかけてすり鉢状に形成されている事が見て取れる。図の左半分、谷の狭窄部に黄色く帯状に示された部分は、周りの部分よりも標高が高く表示されている。この部分は左岸と右岸に近い2測線の補完によって描かれているため帯状に標高が高く示されている。しかし、この帯状部の中央はかつて河道であった部分であり、岸からも離れていることから、実際中央部の標高はより低いと推察される。ダム湖の形状をおおまかに捉えるためであっても、今回の観測より多くの測線が必要であると考えられる。

(4) Sirikitダム貯水池

写真-4は2014年10月14日に行ったSirikitダム貯水池における観測の風景である。図-12はSirikitダム貯水池におけるDT-Xの水深の観測結果である。岸に近い地点の水深が小さく、貯水池の中央に近づくに連れ水深が大きくなる傾向が見られる。水深は最も大きい地点で 73.8 m であった。観測時の水位 145.6 m を利用して、観測データを換算すると最深湖床は 71.8 m である。

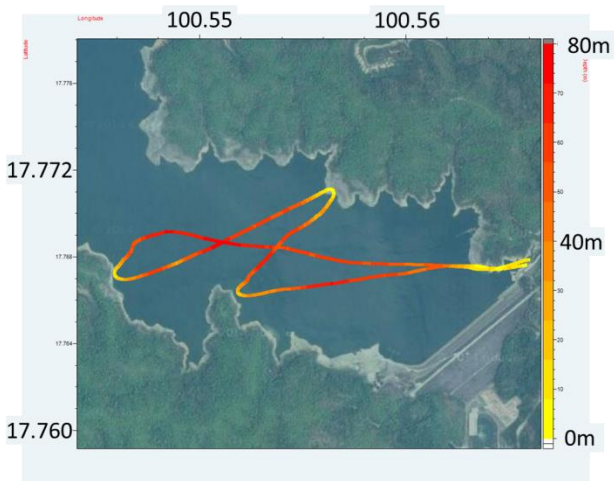


図-12 Sirikitダム貯水池におけるDT-Xの水深観測結果



写真-5 C.29観測所における観測の風景

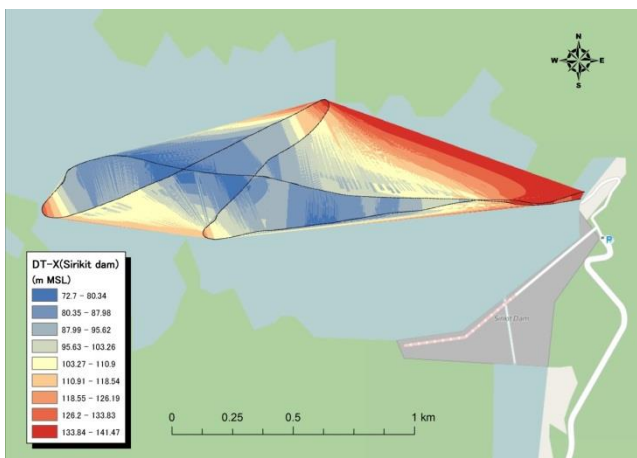


図-13 Sirikitダム貯水池の形状図

また図-13はSirikitダム貯水池におけるDT-Xの観測結果を用いて描いたダム湖床形状である。渓谷の中心に沿って標高の低い（標高72～89 m）部分が広がっている。しかし、Bhumibolダム貯水池と比べると標高の変化が連続的でないため、Sirikitダム貯水池の湖床は比較的起伏が大きいと考えられる。また、こちらの貯水池においても地図や航空写真から考えられる地形と補完部分の違いが大きく、ダム湖形状を捉えるためにはより多くの測線が必要であるといえる。

(5) C.29観測所

写真-5は2014年10月16日に行ったC.29観測所（Ayutthaya）における観測の風景である。C.29観測所は以下に示す図-14の航空写真からもわかるように、川幅が大きく変化する地点である

図-14はC.29観測所におけるDT-Xの水深の観測結果である。水深は最も大きい地点において22.2 mであった。観測時の水位0.9 mを利用して、観測データを換算すると最深河床は-21.3 mである。川幅の変化する前後で水深の変化が見られる。川幅の小さい上流部の水深が大きく、川幅の大きい下流部の水深が小さい傾向が見て取れる。

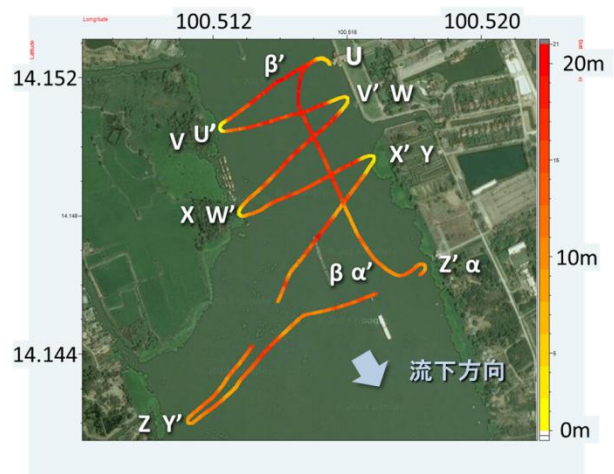


図-14 C.29観測所におけるDT-Xの水深観測結果

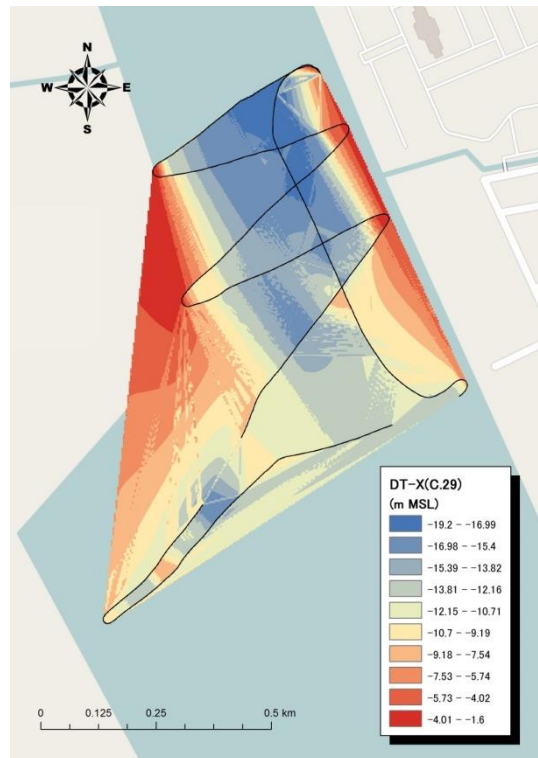


図-15 C.29観測所における河床形状図

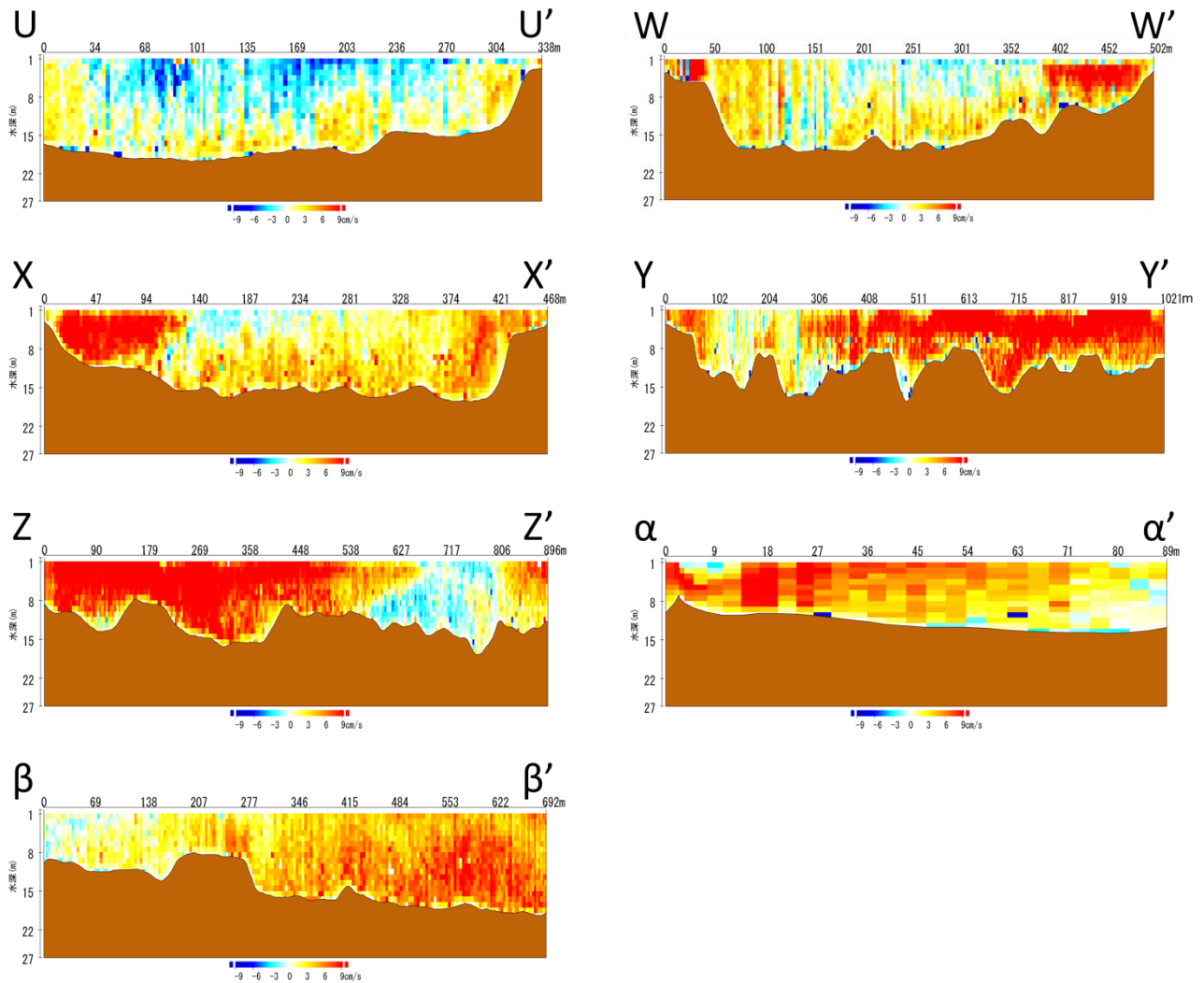


図-16 C.29観測所におけるADCPの横断・縦断面図

図-15は同地点におけるDT-Xの観測結果を用いて描いた河床形状の図である。C.29観測所の河床は標高-19～-4 mの範囲にあることがわかる。この図からも、川幅の小さい上流部の水深が大きく、川幅の大きい下流部の水深が小さい傾向が見て取れる。また、川幅変化後の下流を見ると、上流の延長にある左岸側の標高が低く、右岸側の標高が高いことがわかる。

図-16はC.29観測所のADCP観測結果である。C.29観測所のみADCPの計測設定条件は表-3の通りである。また、流速の範囲が-9～9 cm/sと非常に小さくなっている。U-U'～Z-Z'まで横断観測結果である。C.29観測所では横断断面の半分以上で赤系色の順流が発生していることがわかる。流量はそれぞれ、4.0 m³/s、-69.1 m³/s、-146.4 m³/s、-231.7 m³/s、-631.9 m³/s、-608.6 m³/sとなっている。この内負の値で表したのは、流量計算の結果遡上方向の流量が算出されたものである。C.29観測所は川幅が大きく変化する地点で、主流部は左岸側にあるが、その流速は非常に小さい。U-U'断面での流量は4.0 m³/sと流下方向に流れているが、その後下流側に移動するにつれて徐々に

逆流流量が大きくなり、Z-Z'断面では608.6 m³/sの逆流が発生している。このことから、観測日においてC.29観測所まで塩水遡上が発生していたと考えられる。また、α-α'は左岸から河川中央までの移動観測、β-β'は下流から上流の縦断観測である。赤色が強く出ているため、逆流が発生していることがわかる。

5. おわりに

今回の現地調査により、ADCPとDT-Xによる同時観測が可能であることが明らかになった。これにより、河川の流速観測と河床形状の観測が同時に行えるため、今回のような観測において効率を上げることができる。

DT-Xによる観測の結果、河川では河床形状の特徴をおおまかにはあるが捉えることができた。ダム貯水池においては湖床形状を図化したかったが、測線の少なさから詳細な形状は得ることができず、堆積状態を知るまでには至らなかった。しかしながら今回の方法で、リアルタイムの貯水池の水位と観測データによって湖床の標高が得られることがわかった。これにより、今後観測を続けて

いくことで、堆積状況の変化を知ることが可能である。

ADCPによる観測の結果、河口付近のみならず、C.29観測所（Ayutthaya）においても、河川の逆流が観測された。

今回の調査では、すべての地点で船舶をレンタルして行ったが、船速や方向の指示など、船の操作について指示を出すことに難儀した。今後同様の調査を行う場合、GPSによる現在地や、観測したい測線が地図上に表示されているものを、操舵手に見せながら指示を出すことで、観測がより効率的に行えると考える。

謝辞：観測に際して、株式会社ハイドロシステム開発の橋田隆史氏と疋田真氏に助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 笹川幸寛，手計太一：タイ国Chao Phraya川感潮域におけるADCPを用いた流速観測，河川流量観測の新時代第4巻,pp57-66,2013

(2015. 2. 13受付)

「河川流量観測の新時代」第5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。年度末の大変お忙しいなか、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、本巻は研究現場のみならず、行政の現場からもご投稿をいただきました。是非、味読していただけたら幸いです。

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。

本巻も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5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
◎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

母なる大地と命の水。
私たちは環境と共に歩みます。

環境分析

調査・測量

維持管理

建設
コンサルタント

Fukuda Hydrologic Centre
<http://www.f-suimon.co.jp>

50th
ANNIVERSARY

おかげさまで
創立50周年 (2015.8)

Creating **You** with Water & Environmental Resources

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26第5312号
- ・計量証明事業登録 第605号 (濃度)
第747号 (音圧レベル)
第847号 (振動加速度レベル)
- ・測量事業登録 (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 2003-1-1003
- ・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
- ・ISO 14001:2004 (NJE-032)
- ・ISO 9001:2008 (NJQ-277)



(株) 福田水文センター

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。