

河川流量観測の新時代

第3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

2012年9月

「河川流量観測の新時代」第3巻の発刊にあたって

本年度も無事に第3巻を発刊することができました。大変お忙しいなか、多くの研究論文が投稿されました。心より御礼申し上げます。

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

本巻の刊行にあたっても例年同様に、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。

さて、本論文集を編集、発行している「河川流量観測高精度化研究会」は、2011年度をもって、水文・水資源学会 研究グループから”卒業”という形をとらせていただきました。来年度以降の母体についてはまだ結論が出ていませんが、本論文集の発行は継続していきたいと思っています。引き続きご支援、ご協力をお願い申し上げます。

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

目 次

河川流量観測の国際基準・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
中尾忠彦	
流水が斜め上流からあたる場合の橋梁ピア後流域特性—電波流速計の橋梁設置は 上流?or 下流—・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
山口高志, 新里邦生, 斉藤秀晴	
無人自動流量観測システムの確立とその課題・・・・・・・・	1 5
萬矢敦啓, 本永良樹, 深見和彦	
感潮域における河川流量連続モニタリング・・・・・・・・	2 3
橋場雅弘, 林克恭	
結氷河川における流量推定式と音響測定機器を用いた現地観測・・・・・・・・	3 1
橋場雅弘, 吉川泰弘	
各種河川流速観測手法に関する基礎的検討・・・・・・・・	4 1
江蔵拓, 笹川幸寛, 手計太一	
一般座標の格子構成が有する打切り誤差の理論的評価とその最適化手法・・・・・・・・	4 9
安田浩保, 星野剛	
本格的な実用期を迎えた電波流速計『固定電波流速計&RYUKAN』・・・・・・・・	5 5
宮村恵里也, 中島洋一, 吉村淳也	

河川流量観測の国際基準

INTERNATIONAL STANDARDS FOR DISCHARGE MEASUREMENT OF RIVERS

中尾 忠彦¹
Tadahiko NAKAO

¹正会員 工博 財団法人 河川情報センター (〒102-8474 東京都千代田区麹町1-3)

World Meteorological Organization (WMO), a specialized organization under United Nation in charge of coordination of national meteorological services, constitute a regulation for hydrological service named " Technical Regulations Volume III Hydrology" as well as "Guideline for Hydrological Practice." International Standardization Organization (ISO) has constituted many International Standards concerning discharge measurement in open channels to enhance international trade.

Japan has its own technological standard based on its history of water resources development works. The author shows that Japanese practice is basically conforming to those international standards. He points out that acoustic Doppler technology may be very powerful to help us understand the flow structure and mitigate uncertainty in flow measurement.

Key Words : WMO, ISO, discharge measurement in rivers, ADP, float coefficient

1. はじめに

河川の流量観測は、国民の貴重な財産である河川の状態を把握する重要な業務であり、Costaら¹⁾が「河川流の定量的な把握は経済的・社会的そして政治的な安全のために欠かせない。"Quantification of streamflow is essential for economic, social, and political security."」と述べているとおりである。このため、水文観測は各国で国の定常業務として行われており、わが国では国土交通省が「水文観測業務規程²⁾」のもとに実施しており、その技術的な裏付けとして「河川砂防技術基準³⁾」が制定され、実際的なマニュアルとして「水文観測⁴⁾」が発行されている。なお、電気事業法に基づく発電水力調査のための水文観測が行われ、マニュアル⁵⁾も発行されている。

流量観測については、国内の基準にくわえて世界気象機関(WMO)や国際標準化機構(ISO)も基準を定めている。わが国の研究者による新しい手法も、国際的な基準に位置づけられるのが、研究成果を広く世界に活用してもらうためにも望ましいことであると考えられる。また、国際化の時代にあつて国内の基準が国際的な基準に照らしてどのようなものなのか、知っておくことも必要であろう。

以下では、WMOとISOの基準の概要を述べ、若干

の観点からわが国の基準との比較を試みる。

2. 世界気象機関の基準

(1) 世界気象機関の概要

世界気象機関^{6,7)}(World Meteorological Organization, WMO)は、国際連合の専門機関の一つで、気象業務の国際的な標準化と改善および調整、並びに各加盟国間・地域間における気象情報・資料の効率的な交換の奨励をおもな業務としている。世界の183の国と6の地域が参加している(ウィキペディア)。総会のもとに基本システム、測器と観測法、大気科学、航空気象、農業気象、気候学、海洋学と海洋気象の各分野別委員会と並んで水文委員会(Commission for Hydrology, CHy)が設置されている。

水文委員会は、基本的な水文観測網、水資源の評価、洪水予報と洪水被害、気候変動への適応に関する問題の解決に当たり、技術の交流と人材開発を推進している。WMOは政府間の組織であり、日本からは気象庁長官が常任代表(Permanent representative)となっている。水文に関わる業務を気象部局以外の組織が担当している国があり、そのような国は常任代表に対する水文顧問(Hydrological adviser)を任命しており、わが国もその一

つである。

(2) WMOが定めている基準

WMOは各種の基準とガイド、マニュアルを制定し、出版している⁸⁾。技術的に重要なものは、Technical Regulationであり、I. General meteorological standards and recommended practices, II. Meteorological service for international navigation, そしてIII. Hydrology⁹⁾から成っている。これらは総会の議決を経たものであり、加盟国が義務的に守るべき事項と、守ることが望ましい勧告事項とが含まれている。ただし、水文分野は、"Volume III of the Technical Regulations presents recommended practices and procedures in hydrology."とあって、勧告事項のみが述べられている。

WMOはより具体的に観測方法を説明した"Guide to Hydrological Practices"¹⁰⁾ (以下「ガイド」) を定めている。従来ガイドは冊子であったが、2008年の新版からはインターネットで無料でpdfをダウンロードできるようになった。これは内容を常に最新のものにできるように、という趣旨であると説明されている。確かに1994年の第5版¹¹⁾には超音波ドップラーによる流速計のことが目次にも索引にもなく、本文にも見当たらなかった。

ガイドのほかに"Manual on Stream Gauging"¹²⁾という「マニュアル」や、"Manual on Flood Forecasting and Warning"も発行されていて、同じサイトからpdfを入手することができる。

3. 国際標準化機構の基準

(1) 国際標準化機構の概要

国際標準化機構^{13),14)} (International Organization for Standardization, ISO) は、電気分野を除く工業分野の国際的な標準である国際規格を策定するための組織である。本部はスイスのジュネーブにあって、スイス民法による非営利法人という位置づけである。非政府組織であるが、各国から一つの機関だけが参加できることになっていて、日本の場合、工業標準化法に基づいて経済産業省の審議会として設置されている日本工業標準調査会 (JISC) が参加しており、各国とも同様である。

ISOは主要な産業分野ごとに技術委員会(Technical Committee, TC)をおいて標準化を進めている。TCはTC1 (ネジ) からTC229 (ナノテクノロジー) までであるが、TC113が、Measurement of Liquid Flow in Open Channels (開水路における流量測定) を担当している。Liquid flowというと、水以外の液体も対象としていると誤解されかねないので、単に"Flow in Open Channel"と呼ぶことになった。

TCはさらにSC (Sub Committee, 小委員会) に分かれており、TC113には現在6つのSCがある。また必要に応じてWG (Working Group, 作業部会) を置いている。TCおよびSCへの参加にはPメンバー (Participant), Oメンバー (Observer) という区分があり、それぞれにPメンバー、Oメンバーとして議論する。Oメンバーでも発言は自由であり、表決に参加できないだけである。

TC113のPメンバーは18、Oメンバーも18であるが、同数なのは偶然であり、他のTCではまた異なった数になっている。合わせて36のメンバーがいることになるが、最近6回の総会に1回でも出席した国は11であり、そのうち欠かさず出席した国はアルファベット順に中国、インド、日本、スイス、UK、USAの6カ国である。

JISCは分野によっては別の組織を国内審議団体としてISOへの対応を委任している。TC113については、JISCから土木学会に委任されている。土木学会は水工学委員会の下に「ISO/TC113国内検討委員会」をおいて対応している。

以下にISO/TC113の構成を示す。番号のあとのP、Oというのはわが国が参加している資格を示している。

- ・TC113 : P
- ・SC1 : P, Velocity Area Method (流速面積法, 一番中心の小委員会)
- ・SC2 : P, Notches, Weirs and Flumes (せき及びフリームポンプ関係の企業に関わりが深い)
- ・SC3 : O, Glossary of Terms (用語)
- ・SC5 : P, Flow Measuring Instruments and Equipment (流量測定用機器および装置)
- ・SC6 : O, Sediment Flow (流送土砂)
- ・SC8 : O, Ground Water (地下水)

欠番は、かつて設置されていたが廃止されたもので、SC4はDilution Methodsだった。

(2) ISOが定めている基準

ISOは、IS (International Standard, 国際規格), TS (Technical Specification, 技術仕様書), TR (Technical Report, 技術報告書) を発行している。このうちISは、単にISOと呼ばれる。

たとえば、開水路の流量測定の基本となる流速面積法の基準は、"ISO 748:2007 Measurement of liquid flow in open channels - Velocity-area methods"であり、まだISになっていないADPの基準は"ISO/TS 24154:2005 Hydrometry - Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers"というタイトルである。

TC113は2012年9月現在で72件の基準を定めている。そのうち主なものは以下のようである。いずれもISOのサイト¹⁵⁾からオンラインでpdfを購入す

ることができる。

- ・ ISO 748:2007 流速面積法による開水路の流量測定(CHF150, 約¥13,000で販売)
- ・ ISO 772:2011 用語集 (CHF192, 約¥16,500で販売, 以下価格を省略)
- ・ ISO 1088:2007 流速計を用いた流速面積法における不確定性を評価するためのデータ収集・処理方法
- ・ ISO 1438:2008 薄刃堰による開水路の流量測定
- ・ ISO 2537:2007 回転式流速計の仕様
- ・ ISO 3454:2008 直接音響測深と懸架装置
- ・ ISO 3455:2007 直線水槽における流速計検定
- ・ ISO 4366:2007 水深計測用音響測深機
- ・ ISO 4373:2008 水位計測機器
- ・ ISO 4375:2000 流量観測用のケーブルシステム
- ・ ISO 6420:1984 水文観測船の位置決め機器
- ・ ISO/TR 11328:1994 結氷下の流速測定
- ・ ISO 11655:1995 水文測器の性能規定法
- ・ ISO/TS 24154:2005 ADPによる河川の流速流量測定
- ・ ISO/TS 24155:2007 水文データ伝送システム
 - システム要件の規定
- ・ (CEN/318 Hydrometry Committee 水文計測における不確定性評価ガイド)

(3) ISO/TC 113における基準の審議

TC 113は、おおむね1年半ごとに全体会議を各国持ち回りで開いている。会期は1週間で、初日に全体会議を、以後各SCの会合、WGの会合を行い、最後に全体会議に各SC、WGの議事を報告して締めくくる。実際には参加者はほぼ同じで、SC1の会合になるとSC1の議長(Chairperson)と幹事(Secretary)が議長・幹事席に着き、SC5になるとまた入れ替わる。

ISOでは電子式の投票によっても重要な意思決定がされる。

ISOの国際基準ISは5年ごと、TS以下は3年ごとに定期見直し(Systematic Review)があり、継続するか、修正するか、廃棄するか、投票が行われる。投票の都度、その基準が国内基準としてそのまま使われているか、参考にされているか、使われていない場合その理由、などの質問にも答えることになっている。

修正意見としてたとえば、大河川で観測船の位置を決めるのに六分儀で角度を測るという規定があったので、現時点においてはGPSで行うのを本則にすべきだとわが国から意見を出したことがある。ちなみに六分儀を使うというのは、ガンジス川など洪水期の水面幅が何キロメートルもある河川を想定しているようであったが、インドの代表が「インドでももう六分儀など使っていません。」と会合で発言したことがあった。

新規にISやTSを制定するよう提言することもできる。わが国からは、観測データのテレメータ伝送に関する

TSを提案し、審議・投票を経てTSになった。現在はさらにISに格上げするよう提案し、手続きをとっているところである。国際基準にするまでにはかなりの時間を要する。テレメータの基準をTSとして発行させるまでの経過が参考になろう。

- ・ 2001年1月、ISO/TC 113北京総会においてISO 6419 (水文データ伝送システム) が陳腐化を理由に廃止され、SC 5において新しい基準を策定することとなった。原案は中国が作成することとなった。
- ・ 2001年9月、ニューオーリンズ総会で日本に原案作成への協力を要請された。
- ・ 2002年3月、ロンドンにおいてSC 5の会合が開かれ、日本はWG (Working Draft, 作業原案) を提出しておおむね了承された。中国は欠席。アメリカの意見を入れて修正。
- ・ 2002年9月、ベルン総会に中国が独自の原案を提出したので、アメリカを座長に、中国・日本でWGを設けて検討することとなる。
- ・ 2004年5月、つくば総会において、日本案をベースに最終調整を行い、のべ10時間以上の討論の結果、合意に達し、CD (Committee Draft, 委員会原案) への登録が認められた。
- ・ 2004年7月、合意案が正式にCDとして登録された。
- ・ 2005年12月、プネ (インド) 総会においてDT S (Draft Technical Specification, 技術仕様書案) として投票にかけることが承認された。
- ・ 2007年5月、投票を経て、ISO/TSとして発行された。

現在このTSをISに昇格させるよう手続きを進めている。TSはTC 113内部の投票でよいが、ISとするにはさらにISO加盟国全体の投票が必要である。

日本の技術をISの中に取り込んでもらうのに成功しても、うっかりしているうちに定期見直しで外されてしまった、という例がある。ISなりTSに採択された後も担当分野の動向を見ている必要がある。

4. WMOとISOの関係

WMOは国家間の組織であるから、ISOは参加していないが、ISO/TC 113にはWMOがオブザーバーとして参加している。ただし、2004年以降6回の総会でISOから参加したのは2009年のバーミンガムと2012年のベルン総会と2回だけである。

WMOのガイドの改定に当たって、6名で構成する見直し委員会、第1巻の改定原案執筆者11、査読者10、第2巻の原案執筆者20、査読者18の合計65名、重複を除くと58名の専門家の名前が挙げられている。一方、2004年5月から2012年5月まで6回のISO/TC 113総会に1回でも出席した人は11の国で

少なくとも83名に及んでいる。これらWMO 58名、ISO 83名の中で両方に名が出ているのは2名だけである。

これからすると、WMOとISOとは独立に活動しているように見える。しかし、WMOのガイドには参考文献としてISOの基準を多数掲げ、ISO/TC 113を長年にわたってリードしたR.W. Herschyが編集した、ISO基準の解説書とも言うべ"Hydrometry"¹⁶⁾をしばしば引用している。また、本文にもISO基準を引用して記述している部分が目につく。特に流量測定を扱う第1巻第5章にはほとんどページごとに引用がある。

ガイド以外の刊行物についてみると、WMOのManual on Stream Gaugingは元の版の著者がR.W. HerschyとUSGSのS.E. Rantzであり、Rantzはアメリカ地質調査所USGSの流量観測のマニュアル1983年版¹⁷⁾の著者でもある。USGSはISO/TC 113のアメリカ代表として議論をリードしている。このように、両者の間に人的関係がないわけではない。マニュアルの内容を見ても、浮子についての説明など、細部までよく似ている。

互いに相手の基準に注意を払っているのは確かである。WMOガイドの第5版では浮子による場合、投下本数を15本から35本と、実河川における流速分布の複雑さを考えるとそうなるのではあろうけれども、およそ実際とかけ離れた記述であった。ガイドの第6版では"The number of segments should be not less than three, but where possible a minimum of five should be used."となって「水文観測」の「緊急やむをえない場合」よりも少ないくらいになっている。これはISOの基準ISO 748:2005の規定(7.2.3 Measuring procedure)を参考にしたと推測される。

5. 国際基準からみたわが国の流量観測実務

わが国に近代河川工学が導入され、流量観測が行われるようになってからも1世紀以上の時間が経過し、わが国の河川の状況に合わせた手法を開発して流量観測を行ってきている。一方で、外国ではどうしているのか、という視点も必要であると思われる。以下では、1) 流速の時間変動に関わる測定精度の問題、2) 水深方向の流速分布に関わる問題、3) 浮子観測の問題について国際基準との比較を試みる。

(1) 流速の時間変動に関わる測定精度の問題

木下良作¹⁸⁾は、阿賀野川の洪水に際してADCPを1点に固定して水深方向の流速分布が時間とともにどのように変化するか観測している。このような観測はADCPを用いないでは行えないものであった。木下はもっと

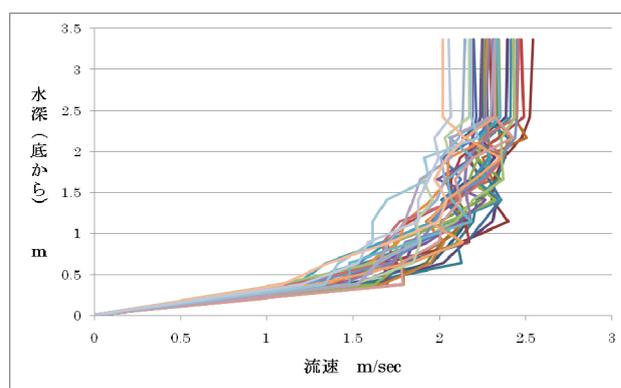


図-1 水深方向の流速分布, 1秒ごと

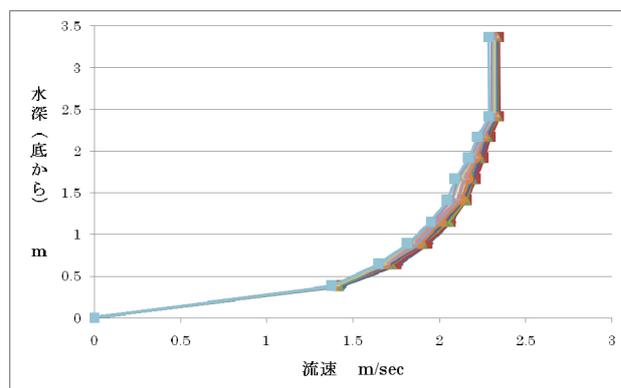


図-2 水深方向の流速分布, 20秒間の平均値

短い時間間隔での観測をしているとのことであるが、1秒ごとに流速軸の原点をずらして、流速分布の線が重ならないように整理している。木下の図から流速の値を読み取って1秒ごと31回の観測結果を、原点を同じにして重ね書きした結果を図-1に示す。

古くから用いられてきている回転式流速計は、ある程度以上の時間をかけないと測定ができないものである。しかも、プロペラが回転することによって発するブザー音を聞いていけば、おのずと流速には時間変動があることが実感できる。しかし、近年多く用いられている電磁式流速計は、瞬時に流速値が表示されるので、ともすれば直ちに流速値を読んで、次の観測点に移る可能性もある。そのようなときには観測の不確定性も大きくなる。

図-2は、20秒間の平均値を求めて表示したものである。この流速分布から、河床では流速が0、表面では最も浅い点での観測値と同じ、と仮定して台形公式で流量を求めた。その結果、1秒ごとの観測では流量の変動係数が0.048(データ数31)であったが、20秒の平均では変動係数が0.013(データ数12)となって、20秒間の平均をとると安定した結果が得られる。また31秒間の平均値と比較すると20秒間の平均値は±2%の範囲に入っている。

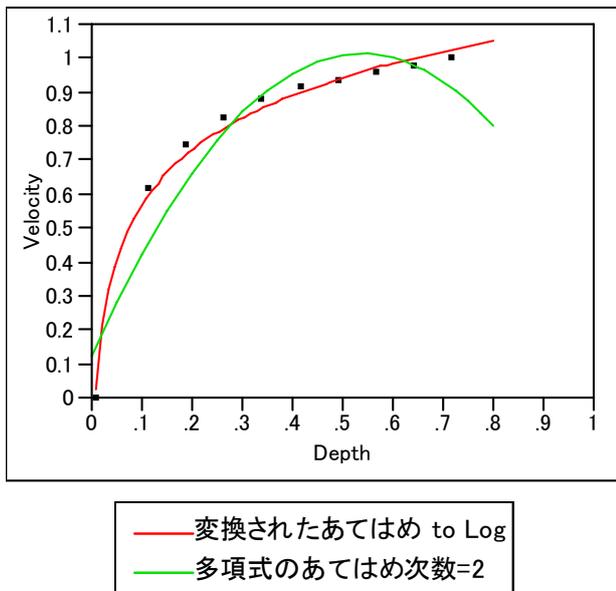


図-3 阿賀野川での流速分布に対する曲線の当てはめ

WMOのガイド (5.3.2.3.2) では、少なくとも30秒以上の時間をかけて測定することと規定している。

日本の河川では、低水時でも時間変化が大きいときがあり、長時間かけて観測していると水位が変化することがある。このようなときには、流量も変化しているのだろうと推測される。わが国のマニュアル「水文観測」(p.122)では少なくとも20秒以上とするものと規定されている。

この問題について木下良作は、15秒間の平均を取れば安定するとしている。

これらを考え合わせると、20秒間以上の平均値をとるというわが国の基準は妥当なものであり、今後ともその励行を図るべきであろう。

(2) 水深方向の流速分布に関わる問題

a) 木下の観測データと外国の典型的な水深方向流速分布とされるものとの比較

木下のデータから水深方向の流速分布を連続31秒間の平均値として求め、曲線の当てはめを行ったところ図-3が得られた。二次曲線の仮定では合わないようで、対数分布の仮定によるときわめて良くあう。ここで、対数分布と仮定し河床での流速が0とすると発散するので、底から0.1%のところの流速を0として計算している。

米国地質調査所USGSの流量観測のマニュアル1983年版はRantzほかの執筆によるもので"Typical vertical velocity curve"を掲げている(Figure 88.)が、これはHulsing, Smith, and Cobbの1966年論文によるという。この図はWMOの新版マニュアルにも引用されている(Figure 1.5.63.)。この、典型的な水深方向の流速分布とされているものについても同様に曲線の当てはめを行ったところ、対数分布と考えてよいことがわかった。

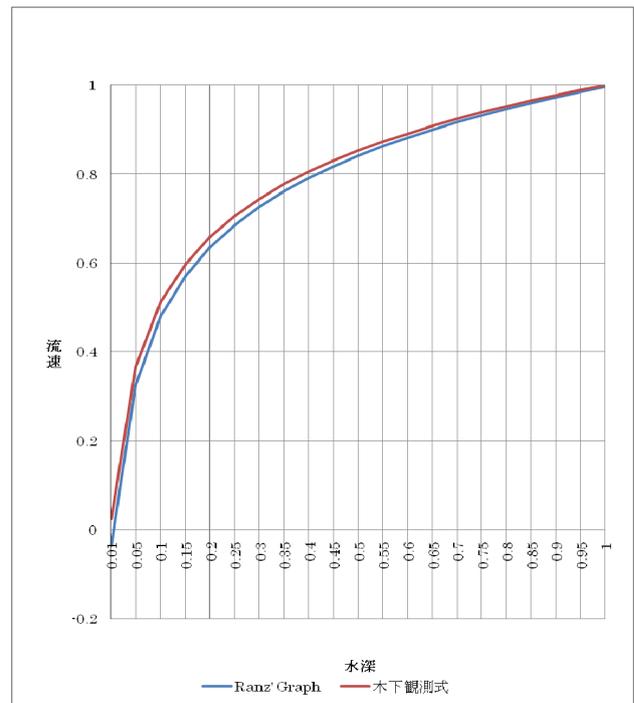


図-4 水深方向の流速分布の形状比較

木下のデータと、外国で典型的な水深方向の流速分布とされているものを、水深の最大値を1、流速の最大値を1としてスケールを合わせて重ね書きすると図-4となり、両者はほとんど一致する。

b) 水深方向の流速分布から導かれる流速公式の再検討
流速計を用いて流量を観測するときには、観測に要する時間の制約があり、2点法とか、1点法という、水深方向の流速測定水深数を減らす方法が一般的である。

木下の観測値で河床を0、表面を1として水深の自然対数を取って回帰分析を行うと次の式となる。

$$\text{流速} = 1.107 + 0.234 * \text{Ln}(\text{水深})$$

水深について河床から表面まで積分すると単位幅の流量0.874が得られるので、流量が1になるように補正する。

$$\text{流速} = 1.266 + 0.268 * \text{Ln}(\text{水深}) \quad (1)$$

2点法は、表面から測って2割水深の流速と8割水深の流速を平均すれば当該鉛直断面の平均流速が求められるとするものである。(1)式に代入すると、2割水深では1.206、8割水深では0.834、平均は1.020となる。2点法によれば2%程度の誤差で平均流速を求めることができることになる。

1点法は、6割水深の流速値が平均流速になるとするものである。(1)式を用いて、1.020となり、同様に2%程度の誤差で平均流速を求めることができることになる。

(1)式によれば、表面での流速は1.266となって、その逆数0.79が表面浮子の更正係数となる。表面浮子の



図－5 流速計吊り下げ装置の傾きを測定する

更正係数としてWMOのガイドは数値を挙げていないが、マニュアル(p. I. 8-3)では0.85を"A coefficient of about 0.85 is commonly used to convert surface velocity to mean velocity."として挙げており、わが国のマニュアル「水文観測」でも同様に0.85としている。一方、USGSの2010年版マニュアル¹⁹⁾では0.85 - 0.88としている。ISOの基準(ISO 748:2005)では、0.84から0.90であり、水路が滑らかであれば大きく、粗ければ小さいが、この範囲を外れることもある、としている。また、オランダのBoiten²⁰⁾は河道の粗度nによって異なるとして、 $n=0.012 - 0.016$ に対する0.90から $n=0.029 - 0.037$ に対する0.78までの値を示している。

ここでは表面浮子の更正係数について調べたが、浮子の更正係数についてなお研究しなければならないことがある。「水文観測」にも、「本書では将来の研究によってこれらの事情の明らかになるまで、いちおう簡易なものとして更正係数を定め、流量に余り影響を及ぼさぬ範囲で実用性を増すこととした。」とある。

「将来」の研究とは、ADCPという手段が出てきた「今」において無いであろう。

c) 流速計吊り下げロープの角度

流速計が水流の圧力で押し流されるので、単純にロープを繰り出した長さを用いて流速計の深さを求めると誤差が生じる。WMOのガイド(Figure 1.5.2およびTable 1.5.1)では、吊り下げロープが鉛直からどれだけ傾いているかを測って補正しなければならないとある。実際にベルンのスイス連邦水文研究所の観測所では図－5に示す写真のようにロープ、実際には竿の傾きを分度器で測っている。

ボートの上から吊り下げるものとして、支点から水面までの距離を1.0 m、水深を3.0 mとして8割の2.4 mまで3.4 mのロープを繰り出す。ロープの傾きが14度であったとしてガイドの式(5.3)から実際の深さを求めると2.34 mとなる。水深との比は0.80ではなく、

0.78となる。木下の観測から求めた上の式(1)に0.22(=1.0 - 0.78)を代入すると0.860で8割水深の流速0.834に比して3%大きくなる。2割水深の流速については、1%未満の差となる。2点法で平均すると補正した場合に比較して1.3%大きい流速が得られる。

「水文観測」にはこの補正が示されていないが、わが国では低水流量観測の場合、支持棒に流速計を取り付けて測るのが一般的であり、この補正が問題になることはないだろうと推測される。

6. 結論

河川の流量観測についてWMOとISOがそれぞれ定めている基準を紹介した。

いずれも近年改定が行われており、その主要な目的は超音波ドップラー流速測定装置への対応である。

WMOも基準やガイドを電子版にして迅速な改定をする方針であるとしているが、基準をオーソライズする総会、ガイドをオーソライズする水文委員会がいずれも4年に1回の開催であることから、どの程度すみやかに改定を進めてゆくか、未知数のところがある。他方、ISOは多数に分かれた基準ごとに定期見直しを行うので新しい技術を取り入れやすいと考えられる。

WMOとISO/TC113両者の関係は、ISO基準に取り入れられればWMO基準にも取り入れられる、また逆も成り立つという関係であると推察される。

河川の中の流速分布について不明なことが多いが、超音波ドップラー流速測定装置はそれを解明するための強力な手段である。今回は木下の観測値1例だけを材料に考察したが、多様な河川、測定条件の箇所において観測例を蓄積して浮子の更正係数など、重要な問題に取り組む必要がある。

WMOやISO、さらにはUSGSなど国際的な、あるいは外国の基準やマニュアルには参考にすべきことが多い。しかし、若干の例について考察したところでは、わが国のマニュアル「水文観測」に準拠して観測業務を行っていれば大きな問題は無いようである。

謝辞：木下良作氏には阿賀野川での貴重な観測データの使用を認めていただいた。実際のデータを扱うことによって各種の基準の意味がよりよく理解できたように思われる。ここに記して謝意を表します。

統計計算ソフトとして、SAS社のJMP 5.1を使用した。

付録

本文では事実関係を客観的に記述するように努めたが、補注として、以下には個人的な感想も含めてまとめた。

WMOの基準でVolume III. Hydrologyの内容はすべて勧告事項になっている。気象分野では毎日世界の観測値

を集めて天気予報をしているので、観測法やデータフォーマットなどを合わせておかなければいけないのに対して、水文分野では国際河川を除いてそれほどの事情がないからであろう。しかしながら、水文分野の基準も総会で議決されたものであり、できるだけこの規定に合うように努力する義務があると考えられる。

I SOは民間組織として、基準類の売り上げが重要な収入源になっているからであろうが、基準としてのカバーを除けば正味数ページの基準が数千円とはいささか高価な感じがする。企業が「I SO準拠」と標榜したり、契約書の付属文書とするのでなければ、R. W. Herschy 編著 "Hydrometry"を購入するのがよい。Herschy は2012年に亡くなったが、2010年ポートランド総会まで出席し、最後の仕事はISO :2011 Vocabulary and symbolsの改定であった。

I SOの定期見直し投票で、国内基準の状況を質問しているのは、国内基準をI SOに合わせるよう、一種の圧力をかけているものと理解される。I SOとして当然のことであろう。

WMOマニュアル2010年版の浮子についての説明は"Surface floats may be almost anything that floats, such as wooden disks, bottles partly filled or oranges."とある。一方、Rantzのマニュアルでは"Surface floats are used in those situations, and they may be almost any distinguishable article that floats, such as wooden disks; bottles partly filled with either water, soil, or stones; or oranges."となっていて、オレンジというユーモアまでそっくりである。ちなみにUSGSの流量観測マニュアル2010年版では"Surface floats may be almost anything that floats, such as wooden disks, partly filled bottles, oranges, or pumpkins."とカボチャを付け加えている。

新技術を取り入れてもらうという点では、I SOの方がすでにメンバーとなっていて手続きが明らかになっている。WMOにはラポーチャーという制度があって、ラポーチャーに指名されると各国に問い合わせ担当分野の動向を取りまとめて報告していた。水文委員会のたびに日本からもラポーチャーを出すべく、候補者を立てたり、報告書作成を支援する国内グループを組織していたものであった。現在そのような経路が途絶えているものとすれば、何らかの手段を講じる必要があるだろう。

I SOの議長、幹事を務めるには相当の語学力、業務能力が必要である。また、一メンバーとして活動するとしても、国内の組織的なバックアップが必要であると感じている。後生に期待しているところである。

水深方向の流速分布の形状について、Rantz のマニュアルの段階では表面の流速はプロットしてなくて曲線を水面まで伸ばしただけになっている(Figure 88.)。WMOの新版マニュアルでもこれを踏襲している(Figure 1.5.63.)。

これに対してUSGSの2010年版マニュアルでは表面にはっきりと点がプロットしてある(Figure 12.)。特段の説明がないが、表面の流速まで含めてこれが"typical"であるという観測の積み重ねがされたのかもしれない。

参考文献

- 1) J. E. Costa et al. "Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods", WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 42, W07422, doi:10.1029/2005WR004430, 2006.
- 2) 国土交通省：水文観測業務規程、2002.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 調査編、2012.
- 4) 独立行政法人土木研究所編著：平成14年度版 水文観測、2002.
- 5) (社) 電力土木技術協会編：発電水力流量測定調査の手引き (2001年版) , 2000.
- 6) <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%96%E7%95%8C%E6%B0%97%E8%B1%A1%E6%A9%9F%E9%96%A2>
- 7) http://www.wmo.int/pages/about/index_en.html
- 8) <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications.php>
- 9) World Meteorological Organization: Technical Regulations Volume III Hydrology, 2006.
- 10) World Meteorological Organization: Guide to Hydrological Practices Volume I, Sixth edition, 2008.
- 11) World Meteorological Organization: Guide to Hydrological Practices, Fifth edition, 1994.
- 12) World Meteorological Organization: Manual on Stream Gauging Volume I. Fieldwork, WMO-No. 1044, 2010.
- 13) <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E6%A8%99%E6%BA%96%E5%8C%96%E6%A9%9F%E6%A7%8B>
- 14) <http://www.iso.org/iso/home.html>
- 15) http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=51678&published=on&includes=true
- 16) R. W. Herschy ed.: "Hydrometry", 1999.
- 17) S. E. Rantz et al.: Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge, USGS, 1982.
- 18) 木下良作「ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について」, 河川環境管理財団講演会講演記録, 2006.
- 19) D. Phil Turnipseed and Vernon B. Sauerthe: Discharge Measurements at Gaging Stations, Techniques and Methods 3.A.8, United States Geological Survey, 2010.
- 20) Wubbo Boiten: Hydrometry, IHE Delft Lecture Note Series, 2000.

(2012. 9. 17受付)

流水が斜め上流からあたる場合の 橋梁ピア—後流域特性

—電波流速計の橋梁設置は上流?or下流—

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF BRIDGEPIER-WAKE WITH SKEW FLOW FROM UPSTREAM

山口 高志¹・新里 邦生²・斉藤 秀晴³
Takayuki YAMAGUCHI, Kunio NIIZATO, Hideharu SAITO

¹名誉会員 工博 (株)東京建設コンサルタント(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

²(株)東建エンジニアリング(〒330-0841 さいたま市大宮区東町1丁目36-1)

³正会員 ph.D (株)東建エンジニアリング(〒330-0841 さいたま市大宮区東町1丁目36-1)

In the case of Bridgepier-Wake with skew flow from upstream;

- 1.the shape of the pier wake zone and cross sectional surface velocity distributions downstream(field observation),
 - 2.an example of a mammoth sand dune generated in a pier –wake zone(field observation),
- are introduced and discussed.

Key Words : Bridge pier wake.

1. はじめに (問題の背景)

洪水流量観測は、主に橋梁下流を利用して行う浮子による方法が、ほぼ70年にわたって実施されて来た。長きにわたって用いられて来ただけに、その問題点も多く指摘されて来た。

ここでそのすべてを議論するつもりはないが、その中でも問題とされているのが橋ピア—下流の後流域である。浮子は、橋上より下流側に投下されるが、後流域では当然浮子が滞留してしまうことが多いため、投下が除外されている。そのため、「浮子がピア—のせき上げにより増速された部分に投下されるため、観測流量が過大になる。」とする論者の意見(1)になっている。

長良川墨俣での空中写真を用いたカメロン法による橋下流全面流速分布の図では、浮子の助走距離60mに測定区間100mを加えた160mをこえて、後流域が伸びていた(1)。もちろん、河川が急流になるほど乱流拡散により後流域長は、減少する。

著者の一人は、この20年余にわたって、直轄河川20ヶ所あまりの電波流速計の設置とデータの解析に関わってきた(2)。目的は、困難を伴う洪水流量観測を、無人で非接触型で、オンラインで、しかも確実にデータを取得できるシステムが必要と思ったからである。そして電波流

速計の設置は、上述のように後流域を有する下流側を避けて、流速分布変化の少ない橋梁上流側を選び、実際に設置・実施されて来た。

ところで、最近の国交省の調査技術基準の改定に伴い、浮子法に伍して、非接触型法も採用されることになり、電波流速計もその代表選手に選ばれた。それに伴い下流案が浮上してきたようである。その主たる理由は、相対に新しい観測機器、鉛直方向流速分布計(ADCP;このあとADCPと略称)の観測が事実上、橋下流でのみ、実施可能だからである。詳述はさけるが、ADCPはボート等を用いて行うため、非接触はかなえられないが、鉛直方向流速分布および河床面が測定できるというスグレ者であるため、表面流速のみ測定の電波流速計測定値を流量に変換するのに有効なのである。当然のことながら、ADCPは人力によることの欠点、流速が4m/s超になると機器の安定が困難となり、測定不能となるなどの欠点を有する。

電波流速計の設置は、橋梁下流側の後流域をさけて上流側かは、これからの論点となると思われる。

ピア—後流域に関するもう一つの視点は、斜張橋などの採用に伴うピア—の巨大化である。確かに斜張橋になると、低水路内のピア—数は減少するが、ピア—の巨大化は避けられず、またそのピア—の後流域は大きなもの

になる。さらに、これに流れが斜めに当たると与えられるじょう乱規模は大きなものになる。

例えば、高水法線と低水法線が異なるような地点にピアアが、低水路内に設けられると、ピアア法線は高水法線に一致するように決められるため、洪水によっては大きなじょう乱を発生し続けることになる。

本論では、流水が斜め上流からピアアにあたった場合の水理の理解を深めるべく

- 2.ピアア下流流速分布の現地観測 1例
- 3.高水法線と低水路法線が異なる地点に設置された斜張橋ピアア下流の巨大砂州発生の実例を紹介する。

2. 信濃川小千谷 旭橋の場合 (2012年4月)

信濃川そして魚野川の融雪出水は、経験的に4月10日頃にピークを迎えることが多い。今年もそれを狙って計測器のテストを兼ねて、現地調査を実施した。水位は、思ったほどではなかったが、左岸から数えて第3ピアアの後流域の拡がりの大きさにおどろき、電波流速計により表面流速横断分布を観測することにした。

観測時の水位は、 $H=44.5\text{m}$ (指定水位は $H=45.5\text{m}$, 小千谷量水標), 俯角 45° , 水面よりの器高 12m (観測横断は橋より下流 12m となる), また測点は、欄干支柱間隔を利用して 1.5m おき, 範囲はピアア間主流から主流までの31点 (No.44~No.74), 1点あたり測定時間1分とした (図-1)。

なお他に、 $H=44.4\text{m}$ 時に行った横断観測 (測定時間20秒)があったので、比較のため、および第2ピアア後流域との比較のためを含めてこれも紹介する (図-2)。



図-1 表面流速横断分布 (橋下流12m, 計測時間1分)

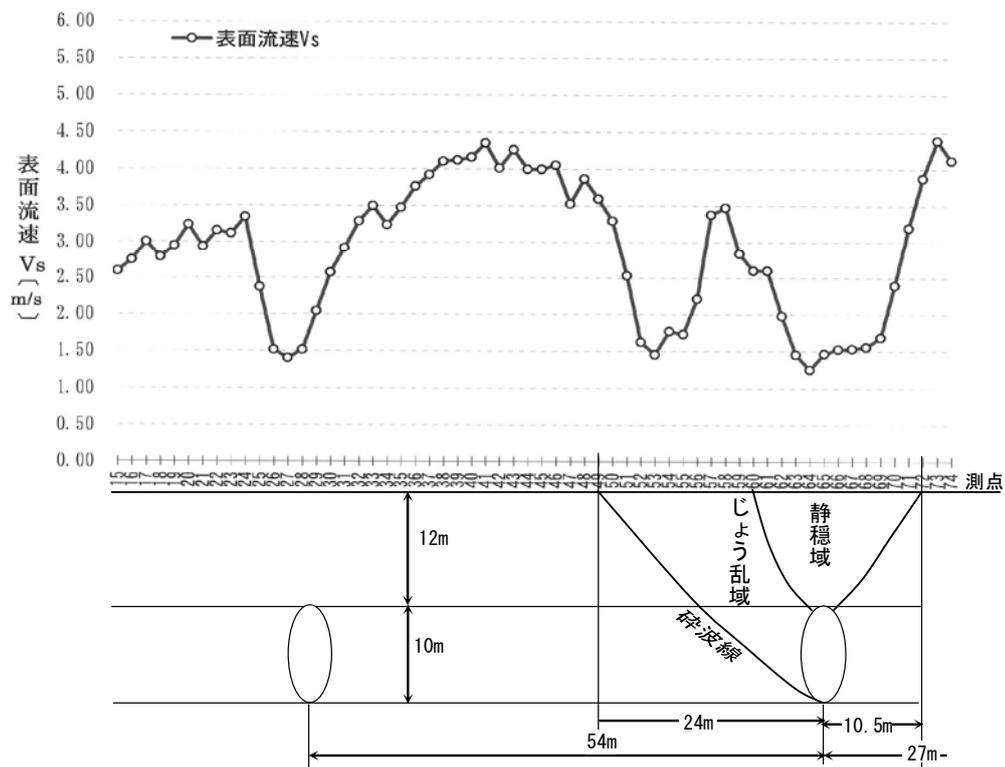


図-2 表面流速横断分布, ピアアを含む平面図

まず図-1の平均表面流速分布からは、ピア上流端と下流端にそれぞれピアがあるように見えるような二つの低流速の谷間、そして、ピアによるせき上げにともなう下降流が両側から集中したような中央の流束部分が認められる。乱れ強度については、後述する。

次いで図-2、この図には第2ピアの後流域との比較を含めて、平面図を併記してある。まず図-2右側の流速分布図は、水位の差が10cmと小さいこともあって、図-1とほとんど差はない。

両図を見ながら、橋から下流12m地点での、後流域中について、数字をひろってみると、ピアから右側の巾(65~72) $7 \times 1.5 = 10.5\text{m}$ 、左側の巾(49~65) $16 \times 1.5 = 24\text{m}$ 、全巾約35m、これはピア巾4m(推定)ピア長10mに比して、異常に大きい巾といえる。また、左側の巾(24m)は、ピアのスパン54mに対して40%に達している。

他に図-2左側のほぼ直進流を受けたと思われる第2ピア後流域巾(24~32) $8 \times 1.5 = 12\text{m}$ と比べても、第3ピアの後流域の巾の大きさが際立つ。



写真-1 ピア後流域全体



写真-2 ピア直下

後流域の状況について、視覚的な理解を深めるべく、写真を3葉紹介する。写真-1は橋上左から全容を、写真-2は、ピアを含めた直下の状態を示す。写真中にも記してあるが、ピア下流静穏域や、やや静穏域(中央流速域)、砕波線(写真-1)、ピア、手前の湧昇流?(写真-2)が認められる。

写真-3は、下流左側からの後流域の遠写である。



写真-3 下流左岸域からの遠写



図-3 鉛直方向流速+表面流速, 横断分布図

参考までに、乱流強度 (V_s の標準偏差) (図-1), ほか受信データの微弱ではあるが V_z 成分のようなもの(図-3)を示した。後者の方が想定したような変化を示し、乱流強度は、高速域(主流)でも上昇した部分があった。

流れがピアーに斜めに入射すると、下流に意外に広く影響が拡がることを紹介した。上流からの流れは河道内の条件によって、当然のことながら、変幻自在であり留意しておかねばならないことであろう。

流量観測への影響について考察してみると、浮子法の場合は、助走距離(60m)などがあり、急流河川などでは相対に影響が少ないと思われるが、やはり浮子が滞留する危険性は残る。電波流速計の場合には、ほぼ電波の照射が行われる範囲に相当するため、例えばH- V_s 関係

にも異常となって現れたり、代表性に疑義を生じる可能性もあろう。

本章は単に、一観測例の紹介にすぎないが、電波流速計による下流観測への一つの警鐘としてご覧いただきたい。

3. 利根川A地点の場合(2001年9月洪水)

ここでは1つの長時間出水により、ピアー後流域に巨大砂州が出現した例について、生じた現象の説明から先に入っていこう。

まず図-4、付近平面図である。中央にスパンの短い



図-4 利根川A地点付近平面図



写真-4 A地点下流より 2002.10

旧橋，並んでスパンの大きい新橋（斜張橋，当時ピアのみ），その下流に実線の枠取り（中州，現況河岸など）は，付近出張所長さんが出水後地形を記入されたものである．実際に著者の一人も，現地踏査してこれを確認しており，加えて旧橋上流右岸も破線で示すように削られていた．

あらためて本図を見て，右岸高水敷の40～50m後退と，ピア後流域下流域の長さ500m巾約100mの巨大砂州の発生におどろかされる．

視覚的な理解を深めるため，1年後の同地点の斜め写真を紹介しておく（写真-4）．砂州全体の形状から見て，上流右岸沿いを流れた主流が，下流では直進するとともに，右岸から左岸へ越えたイメージも強い．また，ピア直下流の砂州形状も特徴的である．

どのような要因が働いて，上述のような結果が起きたについて，順次ふれていこう．

まず，出水であるが図-5に示すように，2001年9月10日～9月12日（H13）までのピークが24時間におよぶ長時間出水であったこと，そしてその流量（6,000～7,000m³/s）が図-6の横断面図に示すように，ちょうど低水路バンクフルに相当するものであったことがわかる．

あらためて図-4などを見ながら考えると，上流左岸方向から流入した水流は，右岸高水敷を削りながら低水路法線方向に流下，新橋地点では高水法線と平行に設置されたピア（6m×30m）にもはねられ，新橋下流でも右岸高水敷を削りながら流下したものと考えられる．

ピア本来の後流域は，これほど巨大とは考えにくく，たまたま右岸等を削った砂が，補給源の役割を果たし，長時間の出水ともあいまって巨大砂州の出現になったものと考えられる．

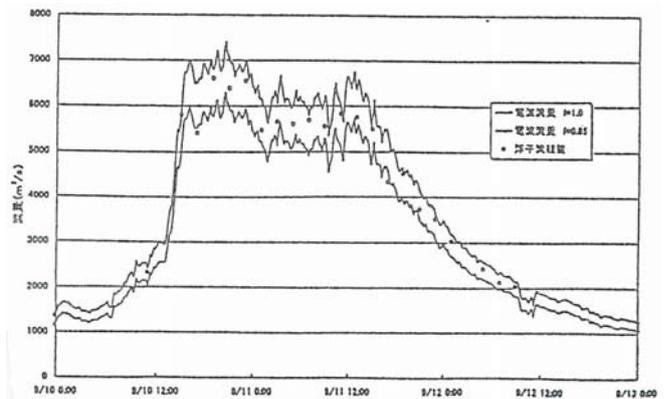


図-5 流量ハイドログラフ (A地点, 01.9.10～13)

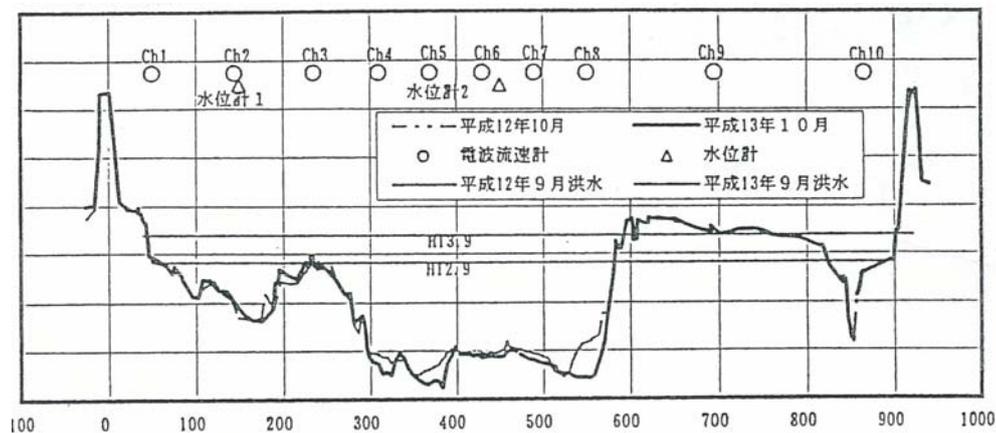


図-6 旧橋上流15mの横断面図と最高水位（付電波流速計配置）

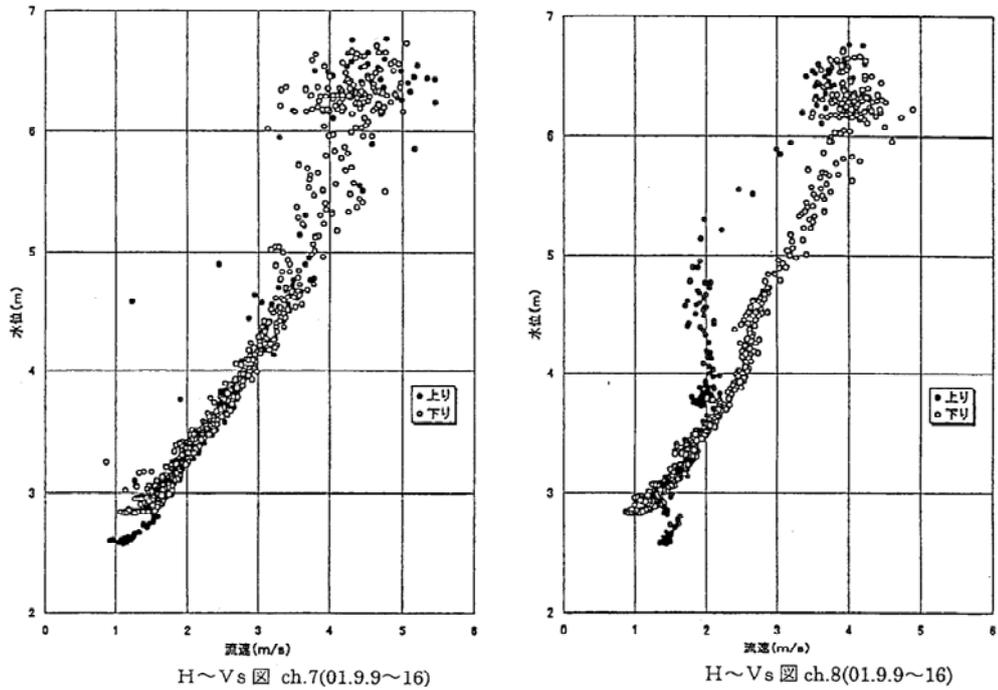


図-7 電波流速計 H~Vs図

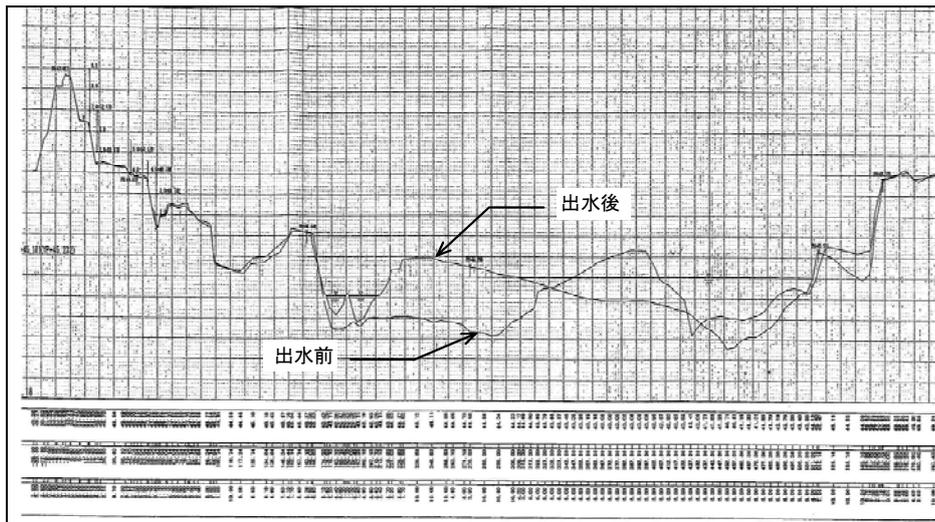


図-8 横断変化図 (高水第一断面, 09.7出水前後)

なお、参考までに当時旧橋には、10基の電波流速計が設置されており、観測を行っていた。例示するch.7は、低水路右岸広いスパンのところ、ch.8は狭スパン一番目に設置されていたが(図-7)、最大流速は、それぞれ5m/s、4.5m/s、またch.8は立ち上りと、低減時の形状は時計まわりのループ、つまり河床低下を示していた。

繰り返しになるが、長時間にわたる低水路一杯の流れ、低水路法線の方向とピア一法線の不一致、補給砂源の存在など、多くの要因が重なって、巨大砂州が発生したといえるのだろう。

このピア一後流域の砂州消長について興味があったので、その後もときおり、訪れていた(旧橋の撤去に伴い電波流速計は栗橋に移設)。

まず2007(H19)は、栗橋で $Q_{MAX}=10,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模の出水があり、橋直下の左岸への流路は埋塞、右岸主流化が進行した。H19出水前後の横断(高水第一断面)を図-8に示す。

その後、2009年、2012年と訪れていたが、今回事務所を訪れ、2011年10月(H23)の斜め写真(写真-5)を見て、その変化におどろいた。写真-4と見比べていただくとわかるが、利根川本川の直進傾向が進行し、中央スパン上流左岸の砂州の相当部分が流失し、中央ピア一法線ともほぼ一致する新しい低水路が形成されていた。ピア一の後にけしつぶのような後流域砂州がある。

なお、今後の推移を見まもっていきたい。



写真-5 A地点下流より 2011.10

4. まとめ

内容評価としては、起った現象の紹介にすぎないかもしれないが、2.の小千谷のケースでは、ピアーから相当はなれたところでも後流域になりうることを知ったし、電波流速計が通常橋下流10~20mの範囲を回っていることを考え合わせると、下流側でも測定する際のその配置決定の困難さを知らせてくれる。当面、流速分布変化の少ない橋上流側測定方式を支持せざるをえない。

3.については、これから多く見られる可能性の高い巨大ピアーの設置に関して、十分な配慮が必要なことを教えてくれる。というのも、低水法線と高水法線がことなるところはいくらでもあるから。

ある元道路屋さんが、著者の一人にしてくれた。「河川は土木の本流、その流れに棹さず鉄道・道路の橋脚は、乱流の源」と。

なお、この調査は1地点10年間追跡する楽しみも、同時に教えてくれた。

発展：A地点の低水路計画の検討が始まるという。どう考えるかを考えているうちに、面白いことに気が付いた。

「移動床模型実験」、それは3.で触れた巨大砂州の再現実験である。例えばこの砂州、高さ1mとして $500\text{m} \times 100\text{m} \times (1/2) = 2万5千\text{m}^3$ の砂州形成の再現が、今の模型実験技術でどの程度できるのか、興味あるトライではないだろうか。もちろん再現できるまでやる。

そして、再現できたとして、次の課題がもしピアーがなかったらどうなったかも、面白い。これを実施するには、相当の予算がかかる。例えば模型縮尺1/80を想定しても、模型製作だけで1,000万円超であるから。しかし実現したいことではある。

謝辞：国交省利根川上流および信濃川河川事務所から、種々情報の提供を受けた。また瀬尾尚子さん（東京建設コンサルタント）には、論文作成の、現地観測とデータ整理では中沢嘉一君（東建エンジニアリング）の手を患わせた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題、土木学会論文集、No.345、P.1~19、1991。
- 2) 山口高志：洪水流速および流量観測—その1—、および—その2— 水文水資源学会誌 Vol.15、No.6（2002）およびVol.16、No.4（2003）など。

(2012. 8. 31受付)

無人自動流量観測システムの確立とその課題

Establishment of automatic water-discharge measurement system and subjects

萬矢敦啓¹・本永良樹²・深見和彦²

Atsuhiro YOROZUYA, Yoshiki MOTONAGA and Kazuhiko FUKAMI

¹正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Many devices with different principles, such as electro-magnetic, acoustic, and video-image, have been introduced as a fixed water discharge measurement system. Recently, development of each technique as well as parallel observation between the techniques and others make recognize them as fully developed one, which is good enough to apply them as industrial usage. On the other hand, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) initially developed as a marine measurement have been also applied by many river engineers to river discharge measurement. After peripheral devices, such as the high speed river boat, data transferring system, GPS, and etc, developed as well as incorporated to ADCP, conductivity of the measurement system significantly improved. Thereafter, the system experienced the water discharge measurement with many difficult conditions, characterized by high unsteadiness, loose boundary, and, above all, rough water surface. Since importance of automatic discharge measurement system have elevated recently, it has been expected to establish the system. The authors in this paper will explain about establishment of the one with major components, such as the fixed type velocimeter, determination of velocity index, as well as riverbed elevation changing during flooding. Additionally, some preliminary studies associated with the components will be introduced with suggesting further study for completion of the system. Finally, based on the knowledge as well as the technique, which has already developed, the authors introduced the complete procedures starting with preoperational observation, actual observation, determination of the values, and finally storage of the values.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, automatic discharge measurement, index velocity, river bed monitoring*

1. はじめに

河川水流量を計測するための手法として電波¹⁾²⁾³⁾⁴⁾, 超音波⁵⁾⁶⁾, 画像⁷⁾⁸⁾等の, 異なる原理を用いた計測技術が提案されてきた. それぞれ単独の技術的な進歩のみならず他の計測機器との比較観測が実施される中で, これらが実用に資する技術であることが認知されてきた⁴⁾⁸⁾. 一方, 海洋計測技術として開発されたTeledyne RDI社 (以下, TRDI社) のADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)が河川計測技術として適用され始めた⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾. 近年では日本国内においても使用実績が増え, また周辺機器が充実してきたこともあり¹²⁾¹³⁾, 急流河川においても観測実績が積み重ねられてきている¹⁴⁾. これに加え, 誤差評価手法の確立, 計測機器の誤差に関する検討などを経て, ADCPに対する理解が深まりつつある¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾.

我が国における高水流観測では主に浮子測法が用いられている. 浮子測法は既に50年以上の実績があり, 技術の向上と水文データの蓄積が実施されてきた. その一方で

出水時の観測態勢の構築に時間を要するため, 出水時における水位の上昇期あるいはピーク流量を取り逃す可能性があること等の課題も残っている.

また, 浮子測法を含めた従来の流量観測手法では, 高水・低水時の流量観測データを基にHQ曲線を作成し, 水位計により自動計測された水位をHQ式に代入して流量に換算している. この方法で求める流量は算出値であり, 実際に観測されたデータではない.

このような課題に対し, 先述したような観測技術の発展状況を踏まえれば, 今後期待されることは無人自動流量観測手法の確立である. ここでは設置型流速計を用いて河川水の一部を自動計測し, 流速補正係数, 及び河床高・水位から算出する河積をかけ合わせ, 流量値を算出するものである. 本論文では著者らが提案する自動流量観測手法に関する技術的な提案と今後の課題に関して議論を進めたい. なお将来的には流量値を得るための一つの手法として二瓶らの提案するDIEX法⁹⁾を用いて算出することも考えられるが, ここでは流量値の算出に必須となる計測方法に関して重点を置き, もっとも単純な区分

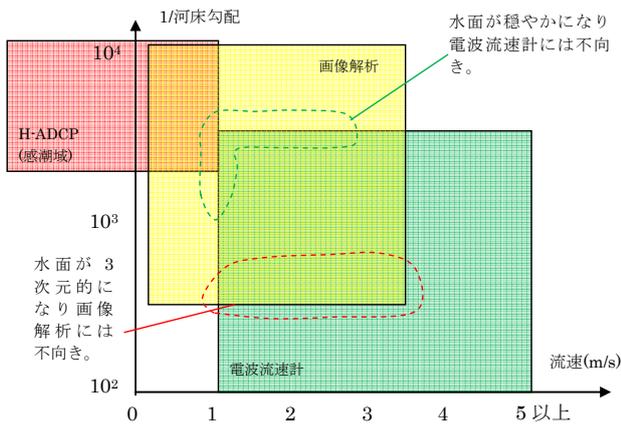


図-1 設置型流速計の適用範囲

求積法を用いることにする。

2. 無人自動流量観測手法の構成要素

無人自動流量観測手法を確立するにあたり、以下の4つの項目に関して独立して議論をすすめる必要がある。それらは (1)設置型流速計を用いた流速計測、(2)流速補正係数の算定、(3)洪水時の河床高の計測、(4)橋上操作艇に搭載したADCPを用いた基準流量値の算出である。以下それらの項目に関して詳細に説明する。

(1) 設置型流速計の確立

図-1は設置型流速計の適用範囲に関する概念図である。横軸が流速、縦軸が1/河床勾配である。電波式流速計及び画像解析は主に河川表面に現れる波紋を見ることになる。日本の多くの河川は洪水中に波紋や流木などのトレーサに適したものが存在することから、多くの場合これらの流速計測は適切な手法となる。しかしながら小中規模の出水や、河床勾配が低い下流の流量観測地点では

稀に波紋が発生しない場合もある。そのような場合にはこれらの手法は不向きとなる。また感潮域では塩水の侵入形態に応じて鉛直方向の流速分布が大きく異なるため、後述するように流速補正係数の決定が非常に困難になる。そのため、表面流速を計測する手法は不適切であるため、H-ADCPのような観測手法が必須となる。

図-1に示すような流況特性（あるいは河道特性）に応じた選択肢を用意しておく必要がある。土木研究所は、国土交通省とともに流量観測技術の高度化プロジェクトを立ち上げ、国内の流況の異なる幾つかの河川を対象として高度化して、高度化手法の候補となり得る機器・手法の観測特性を明らかにするための流量観測実験を実施している。

(2) 流速補正係数

ここで示す流速補正係数は、設置型流速計が計測した流速値から鉛直方向平均流速を算出するための係数である。国外の文献ではvelocity indexと標記されることが多い。Muste(2008)が指摘するように0.85を使用する場合は一般的である¹⁹⁾。これは流速分布が対数則に代表されるような流速分布を持つことを前提にしている。しかしながら河床波を伴う流れではその相対的な位置に応じて流速分布が大きく異なることが指摘されている²⁰⁾。例えば河床波のcrest(頂点付近)の流速分布は河床付近の流速が相対的に早くなり、流速が立つ。また河床波のtrough(谷)の流速分布は河床付近では非常に遅いもしくは逆向きの流れが存在することから、流速が広く分布することになる。この結果、流速補正係数にも大きく影響を及ぼし、例えば前者は1.0に近い値を示し、後者は例えば0.85よりも小さい値を示す。近年の研究では、Ceyda(2006)が数値計算と実験により流速補正係数に関する丁寧な検討を実施している²¹⁾。実河川における観測結果に関して、Yorozuya et al (2012)は河床波が通過した時の鉛直方向流速分布をADCPにより計測し、流速補正係数が

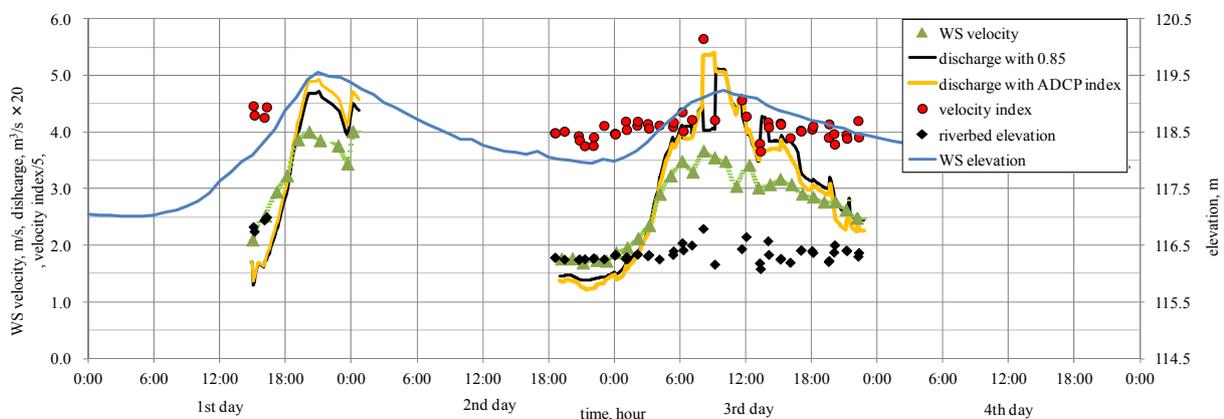


図-2 河床変動、水位、表面流速、ADCPによる流速補正係数、および流速補正係数0.85で求められた流量とADCPによる流量の時系列²²⁾

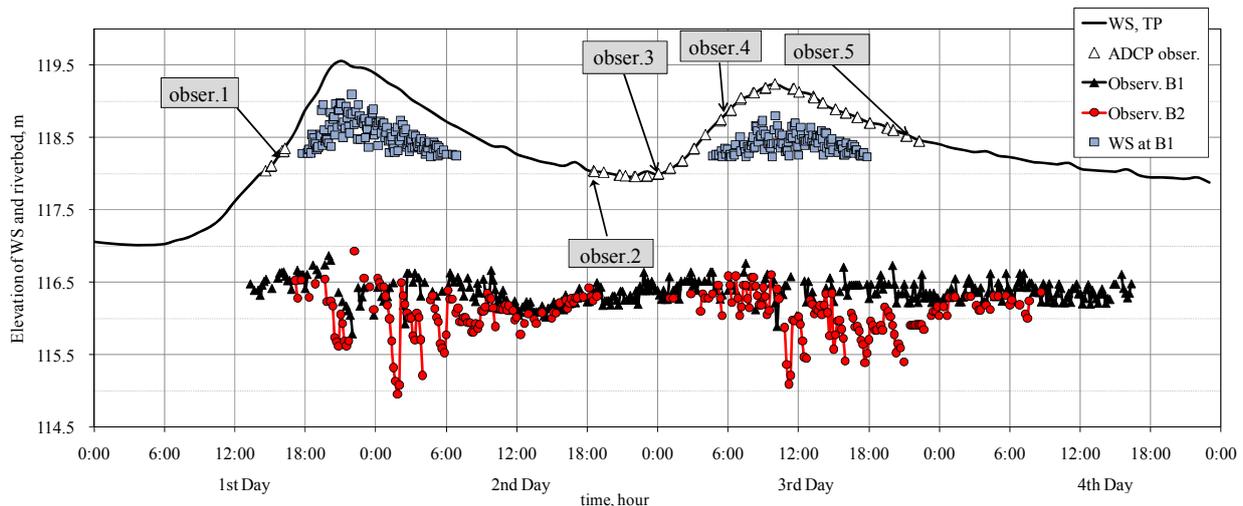


図-3 河床高、水位、ADCP観測時刻の時系列²²⁾

河床波の影響を強く受け、変動している事を示した²²⁾。ここではその一例を図-2を用いて紹介する。

図-2は電波式流速計を用いた表面流速、橋上操作艇に搭載したADCPを用いた河床高、鉛直方向流速分布から換算した流速補正係数、水位、流速補正係数を0.85として換算した流量値、ADCPから換算した流速補正係数を用いて換算した流量値の時系列を示したものである。この観測地点は100m程度の幅を持ち、これを8つの区分に分割している。ここで示す値はその中の一区分の平均値である。またADCPによる観測は●が示す時刻で、電波式流速計による観測は▲が示す時刻に実施された。

水位の時系列が示すように、ここでは通常的水位よりも2.5m程度の水位上昇を伴う小規模の洪水波が通過した時の現象を示したものである。河道全体としては1,000m³/s規模の流量値であった。1日目はあまり多くのデータが計測されていないことからあまり有意な議論は難しい。2日目の18:00以降について議論を進める。まず水位と河床高の変化(◆)を比較すると、2日目18:00から3日目5:00に至るまでほとんど河床高の変化は見られない。その後、水位がさらに上昇すると、河床の堆積傾向が始まる。さらに水位が上昇するに従い河床に堆積が見られるが、水位がピークを迎える頃、河床高は大きく振動を始める。水位は下降するが、河床高の振動はしばらく続くことになる。次に電波式流速計から得られた表面流速値(▲)に着目する。流速値は水位が上昇するに従い早くなる。前述のように河床高が振動すると同時に▲も同様な振動を始める。◆と▲は完全に独立した計測手法であるにも関わらず同じような傾向を持つ。

次に流速補正係数と流量値に関して議論を進める。河床変動が生じない時は流速補正係数は0.75~0.85で落ち着いているが、3日目の6時以降河床変動が生じ始めると0.73~1.1の間で変動する。流量補正係数が0.85前後で落ち着いている時は、流速補正係数0.85で求めた流量とADCPによる流量はほぼ一致するが、流速補正係数が変

動すると2つの流量が異なってくる。例えば、流速補正係数が1.13の時は24%、0.73の時は16%の流量差が生じている。このことから、河床変動が大きい場合は、流速補正係数の変化を適切に把握することが必要であることがわかる。より精度の高い流量の連続自動観測実現に向けて、この時々刻々の流速補正係数の変化を流量の算出に取り込むことが将来的には求められる。

既往の研究から同一の河床形態(砂漣、砂堆、反砂堆等々)における流速補正係数と無次元掃流力との関係には傾向が見られることが判明している²³⁾。河床形態に応じた流速補正係数の平均的な値が調べられているが、それらは現段階では実験から得られた知見であること、また実際には河床の変動に合わせて流速補正係数が変動していることが示されたため、固定設置型流速計による自動計測に合わせてしばらくは定期的にADCP観測を行い、流速補正係数と無次元掃流力の関係についてデータを蓄積する必要がある。

(3) 洪水時の河床高の計測

従来の浮子測法等では出水前後の基準断面における横断測量を実施し、河積の大きい方の断面形状を採用している。実際には出水の段階に応じて河床が変動していることが認知されているが、定量的な変化の議論がそれほど多くはないため一般化することは難しい。ここでは出水時の河床変動に関する先行的な研究事例²²⁾を以下に示す。

図-3は河床高、水位、ADCP観測時刻の時系列を示す。これらは図-2で議論した洪水波と同じイベントである。ここで示す河床高は二地点；B1及びB2において音響測深機を用いて計測したものである。この音響測深機は観測に用いている橋梁の上流側の河道内に架設したH綱に設置している。

まず最初の出水について、観測地点B1に注目する。ここでは水位の立ち上がり時付近からピーク時付近まで

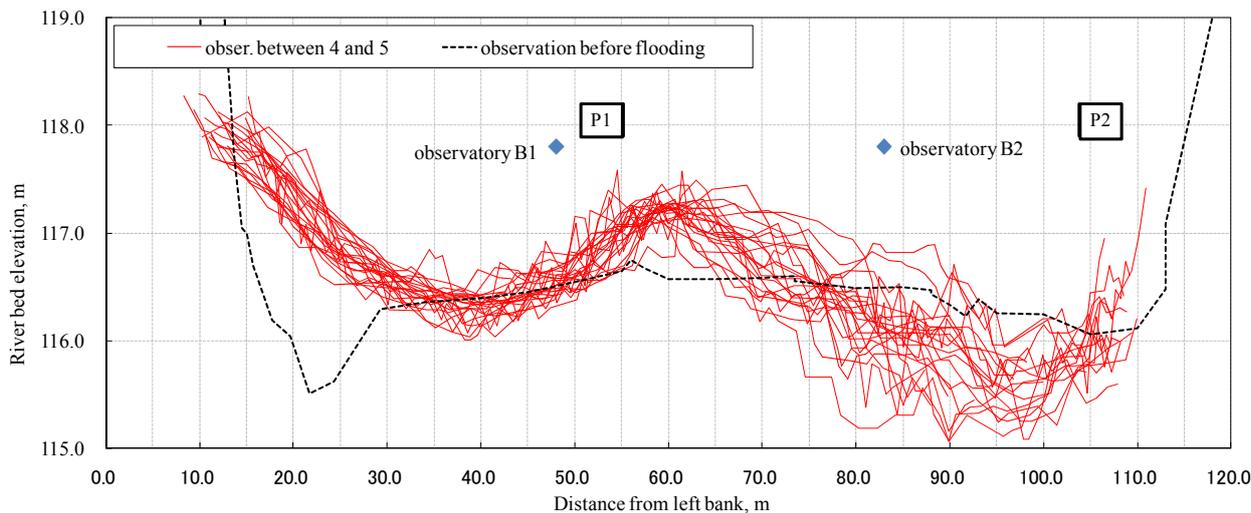


図-4 ADCP を用いた横断観測により得られた河床高の横断分布²⁾

河床高は堆積し続けている。ピーク後、水位の低下に伴い河床高も低下するが、1m程度の振動を伴っている。観測2日目の12:00以降、土砂堆積が続き12時間ぐらいで約50cm堆積する。2度目の出水時にも、河床高変動は最初の出水時の同じような傾向を示す。最終的に河床高は最初の値に戻っている。観測地点B2について見ると、水位と河床高の関係は観測地点B1と似たような傾向を示している。若干の違いとしては、B2における河床高変動の振幅がB1におけるそれよりも大きいということである。両方に共通の特徴は最低河床高が現れるのが流量ピーク時ではなく、ピークから数時間後であることである。

次に図-4は図-3に示すobser.4及びobser.5の期間中に実施したADCP横断観測による河床高分布データを重ねたものである。また洪水前に計測された定期横断の観測結果も同様にここに示す。また横断面における観測地点B1、B2を示してある。2度の出水期間中において、観測地点B1を含む左岸側では河床高が約0.5mの範囲で振動しており、逆に観測地点B2を含む右岸側では河床高が約1.5mの範囲で振動している。ここで図-4に示す橋上操作艇に搭載したADCPの観測結果は、橋梁の下流における観測結果であり、H網に設置した音響測深機は同橋梁の上流における観測結果を示すため、直接的な比較はあ



図-5 ADCP 及び周辺機器を搭載した橋上操作艇

まり意味をなさないが、両者が河床の振動幅に関して同様の結果を示している事から、図-3で示す河床高自動観測から得られた観測結果の値の信頼性を確認することができる。

これらの図が示すように音響測深機を斜めに設置した河床高自動計測は有意な結果を出すことがよくわかる。今後の課題はこれらの値の示す意味や、河床高が大きく変化したときの代表性である。またこれはH網を使用しているが、橋脚の背後に設置することも可能である。

(4) 橋上操作艇に搭載したADCPを用いた基準流量値、流速補正係数および河床高の算出

ADCP横断観測により基準流量値を求めるとともに、その観測結果を利用して、流速補正係数および出水中の河床変動を算定する。

ADCP横断観測による基準流量値は、無人自動流量観測システムによる観測流量の精度検証のためのデータとして用いる。

ADCPはボートに搭載して横断観測を実施することで、河床高、鉛直及び横断方向流速を計測することから水理学的な仮定を必要とせずに河川水流量を算出することのできる唯一の計測手法であることが一般的に認知されている。しかしながらADCP単体で流量観測を完成させることは難しく、複数の周辺機器を組み合わせることでこれが可能になる。図-5はADCP及び周辺機器を搭載した橋上操作艇である。この橋上操作艇は6m/s程度の流速においても計測実績がある。さらにVRS-RTK-GPS、音響測深機、データ転送装置、さらには橋で操作する台車等を組み合わせることで流量観測が安全にかつ精度の高い計測結果を得ることが可能となる。詳細は他の参考文献に譲る¹⁴⁾。

3. 無人自動流量観測システム

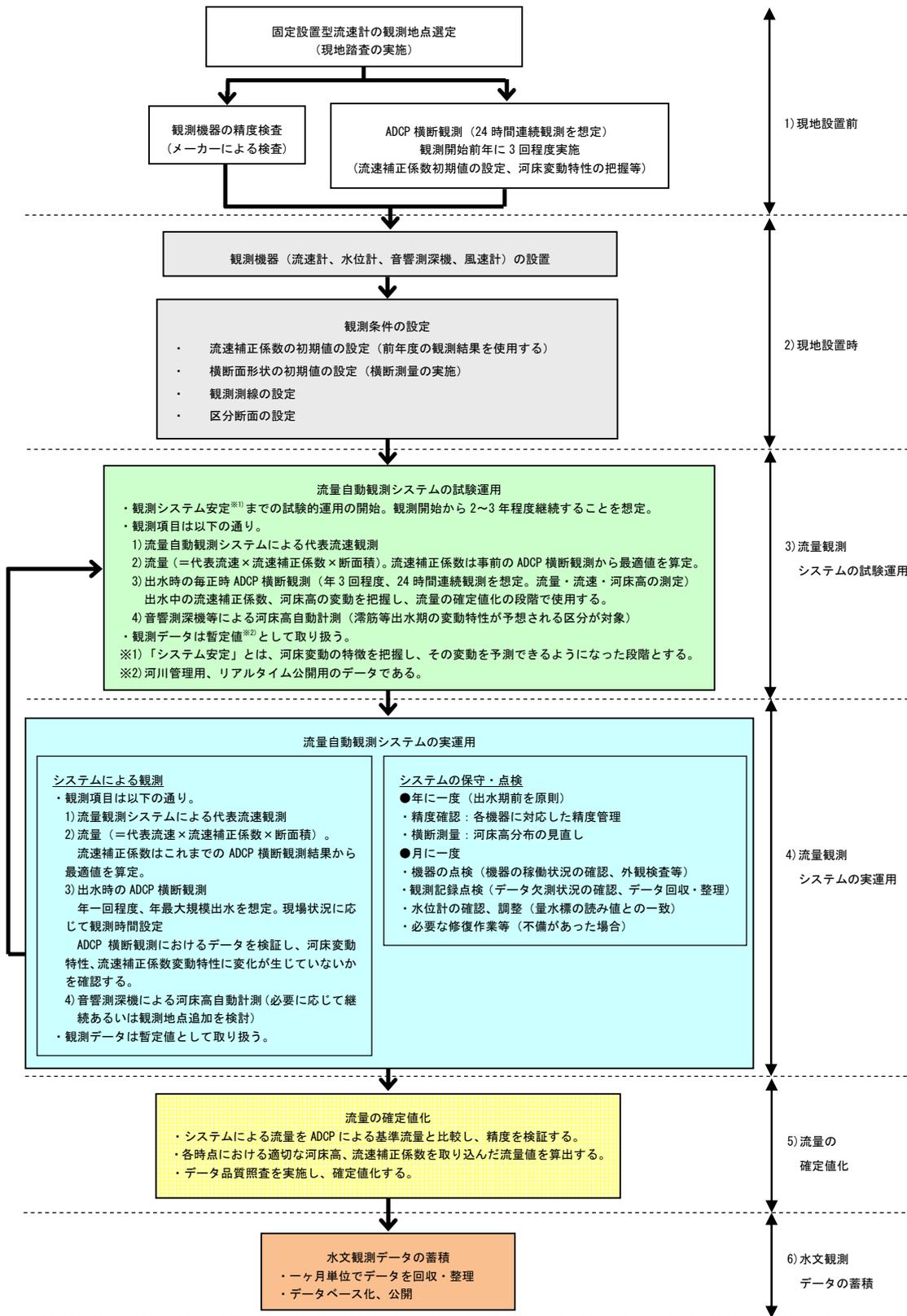


図-6 固定設置型流速計の設置前からデータ蓄積までのフロー

二章では無人自動流量観測システムにおいて必要となる項目のそれぞれの計測方法に関して議論をした。この章ではそれらを組み合わせて完成させる無人自動流量観測システムの概要に関して説明する。この無人自動流量観測システムは、無人及び自動で流量観測を実施できる

技術であること、高い精度で流量を計測できる技術であることが前提条件となる。以下それらの将来を説明する。固定設置型流速計で計測できるのは河川の代表流速 (例: 電波流速計であれば河川表面流速) である。流量を求める際には測定した代表流速に流速補正係数を乗じ

て流量測定断面における断面平均流速を求め、それに流量測定断面の河積を乗じる。そのため、流量観測システムの中で予め流速補正係数、河積を定めることが必要である。

流速補正係数については、原則としてADCPにより得られた流速の鉛直方向分布から算出する。一方、河積については年に一度、出水期前（5月下旬～6月上旬頃）に、流量測定断面において河床横断測量を実施することを原則とする。水位と河積の関係を用いて、水位から河積を求めため、水位計は流量測定断面内に設置することを原則とする。また水位計の観測データ出力の時間間隔は固定設置型流速計と同期させる。

さらに、「河川では出水中は河床が変動している」という前提に立ち、固定設置型流速計を用いた流量自動観測システムとは別に、ADCP横断観測あるいは音響測深機による自動観測により河床変動を常時把握する。

使用する固定設置型流速計が非接触型である場合、表面流速は台風時等の強風時には、風向・風速の影響を大きく受ける場合がある。このため、風向・風速計を設置し、風向風速の影響を考慮して表面流速を補正する。

これらのことを加味した上で流量観測システムの設置から運用に至るまでのフローを図-6に示し、同図の右の1～6の項目に従い、詳細を説明する。

1) 現地設置前

固定設置型流速計による流量自動観測所を設置するに当たっては、設置予定地点について現地踏査を実施し、流量観測が精度良く実施できる地点・断面であるか確認する。その際には国土交通省河川砂防技術基準等を参考にしながら、加えて固定設置型流速計の特徴等も考慮して判断する。例えば電波流速計であれば電波を遮蔽する障害物（植生等）がないか等を確認する。

設置する固定設置型流速計について、流速計センサーそのものの精度をあらかじめ検証しておく。これについては、メーカーにおいて出荷時に精度検査を実施し、その結果を成績表として添付させるものとする。

流量自動観測システムの運用開始に当たり、流速補正係数の初期値を設定するとともに、河床変動特性を予めある程度把握しておく必要がある。

そのため、固定設置型流速計による流量観測を開始する前年にADCPによる横断観測を3回程度の出水について実施する。これは24時間連続観測を想定している。この結果を基に、流量自動観測開始時の流速補正係数の初期値を設定する。また、このADCP横断観測結果から、当該河川における出水中の河床および流速補正係数の変動特性について把握する。

2) 現地設置時

観測地点に精度検査が済んだ流速計とともに、自記水位計、（非接触型であれば）風向・風速計を現地に設置

する。さらに、流量測定断面内において滞筋等出水中の河床変動が顕著であること推定される区分においては音響測深機などを利用した河床変動自動測定装置を設置する。

自記水位計は流速計で測定している断面の水位が分かる地点に設置する。自記水位計と併せて量水標も設置する。自記水位計と量水標の零点高は揃える。また、流量測定断面の河床高横断測量を行い、水位と河積の関係を求める。

風向・風速計は橋梁中央付近に設置すること（橋梁中央付近に設置することが困難である場合には、風向・風速が障害物等による影響を受けない観測地点近傍に設置しても良い。）等に留意する。設置する風向・風速計は気象業務法に定められた検定を受けたものとする。

流速補正係数の初期値は、先述の通り、観測開始前年度に実施したADCP横断観測結果を基に設定することを原則とするが、観測開始前年にADCP横断観測が十分に実施できなかった場合、観測開始後に自動流量観測システム内にて実施される出水期のADCP横断観測データを基に早期に設定する。その間、流速補正係数が決定するまでは、電波流速計や画像処理方式について一般的に使用される更正係数である0.85を暫定的に利用してもよい。この数字は水文学の分野において一般的に受け入れられている数字である¹⁹⁾。

流量測定断面における河床高横断測量結果から観測測線（電波流速計であれば横断方向のどの地点にセンサーを設置するかなど）を決定する。この時、観測開始前年に実施したADCP横断観測結果があれば、そのデータも参考とする。各観測測線が受け持つ区分断面を決定する。流速補正係数、河道形状の初期値はシステムに入力しておく。

3) 流量観測システムの試験運用

固定設置型流速計により、設定した各区分断面ごとに代表流速を連続的に観測する。この時、非接触型流速計の場合には、風の影響の補正を実施する。

観測された代表流速は予め入力された流速補正係数を用いて各区分断面における断面平均流速に換算される。さらにこの断面平均流速は、水位-河積の関係を用いて水位から求まる各区分断面積に乗じて区分流量が求まる。これを積分して断面流量が求まる。代表流速から断面流量が求まる過程は全て自動化され、リアルタイムで行われるものとする。ただし、この時点での流量値は暫定値である。リアルタイム流量として公開する場合には、このデータを公開する。（後述する流量の確定値化の段階で河床高変動や流速補正係数変動の状況に応じて流量値の確定化を実施する。）

「河川では出水中は河床が変動している」という前提に立ち、固定設置型流速計を用いた流量観測システムとは別に、並行して、毎出水時におけるADCP横断観測

(毎正時の24時間連続観測を年3回程度実施することを想定)を実施する。必ずピーク流量を観測するものとする。このADCP横断観測結果を基に出水中の河床変動、流速補正係数変動を把握する。これらの観測データは「4)流量観測システムの実運用」および「5)流量の確定値化」の段階で使用する。

このように毎出水時に毎正時のADCP横断観測を実施している限り、流量観測の自動化とはならない。そのためADCP横断観測結果から当該観測地点における河床および流速補正係数の変動特性を把握し、無人自動流量観測に随時反映させることに努めなければならない。例えば河床変動に関して、無人自動流量観測システムの試験運用段階において、毎正時ADCP横断観測による河床高横断分布変動データと音響測深機による河床変動データとの比較・解析から当該流量観測所における河床変動特性が把握できれば、音響測深機による自動計測で河床変動をリアルタイムで把握でき、ADCP横断観測回数を減らせる可能性がある。(あるいはADCP横断観測の必要性がなくなる可能性もある。その場合でも音響測深機による河床変動モニタリングは実施する。)

音響測深機は、始めは、「1)現地設置前」の段階で実施したADCP横断観測の結果を基に滞筋等出水期の河床変動が予想される区分断面を対象として設置する。音響測深機についてはADCP横断観測結果との比較・検討を基にして必要に応じて設置地点の追加等を行う。

無人自動流量観測の試験運用の段階においては、このように観測開始後もADCP横断観測データを積み重ねることで、流量観測システムの省力化、自動化を進める。

ADCP横断観測結果と音響測深機による河床高変動データの比較・検討結果から、音響測深機により観測断面内の河床高変動が概ね推定できるようになった場合を「システム安定」状況とし、この状況に達した段階で次の「4)流量観測システムの実運用」の段階へ進むものとする。「システム安定」状況に至るまで、観測開始から2~3年程度かかることを予想している。

4) 流量観測システムの実運用

システム安定状況に達した後のシステムの運用について述べる。

引き続き固定設置型流速計により代表流速を求め、システムに入力された流速補正係数および河床高から断面流量を算出する。この段階での流量データは暫定値である。

この段階では、河床変動は概ね音響測深機により自動計測できるようになっている。

ADCP横断観測は、河床変動特性や流速補正係数の変動に変化が生じていないか等を確認する目的で、年一回程度、年最大規模出水を対象として実施する。観測時間等は本段階に至るまでのADCP横断観測結果に基づいて判断する。これらの観測データは「5)流量の確定値化」

の段階で使用する。ADCP横断観測結果におけるデータ検証を行い、河床変動特性等が変化していると判断されれば、必要に応じて「3)流量観測システムの試験運用」の段階へ戻る必要が生じる場合もある。

観測とは別に、システムの保守・点検を定期的を実施する。年に一度、各機器の精度確認と観測断面の横断流量を実施する。これは出水期前に行うことを原則とする。その他、機器の点検(機器の稼働状況の確認、外観検査等)、観測記録点検(データ欠測状況の確認、データ回収・整理)、水位計の確認、調整(量水標の読み値との一致)などを月に一度の頻度で実施する。点検の結果、観測機器等に不備が見つければ、早急に修復等の処置を取ることとする。

5) 流量の確定値化

「4)流量観測システムの実運用」および「5)流量観測システムの実運用」の各段階での流量データは暫定値という取扱いであった。

本段階において、ここまで流量自動観測システムによる流速・流量観測と並行して実施してきたADCP横断観測あるいは音響測深機による河床高自動計測の結果を基にして、流量データの確定値化を実施する。

具体的には、ADCP横断観測結果あるいは音響測深機による河床高自動計測結果から求まる各時点における適切な流速補正係数、河床高を取り込んだ流量値を算出する。

流量観測システムによる流量値をADCP横断観測によって測定された基準流量値と比較し、システムの観測精度を検証する。

その後、流量値に対してデータの品質照査を実施し、確定値化する。品質照査方法については本稿とは別にまとめる予定である。

6) 水文観測データの蓄積

確定値化した流量データは、水文データとしてデータベース化し、公開する。

4. まとめ

著者らは本報告の中で無人自動流量観測手法の確立とその課題を議論した。以下ここから得られた知見をまとめる。

1) 無人自動流量観測システムにおいて代表流速を測定するために使用する設置型流速計については、各機器の特徴と対象とする河川の状況を比較・検討し、適切なものを選定する必要があることを示した。

2) 流速補正係数は河床変動に応じて平均値から-0.1~+0.3程度の変動があることを示し、それが観測流量値に影響を与えることを示した。それにより河床変動が大き

い場合には流速補正係数の変化を適切に把握する必要があることを示した。

3) 出水中には河床高が大きく変動している場合があることを示した。それにより出水中の河床変動を測定し、観測流量値に反映させることの重要性を示した。

4) ADCP横断観測あるいは音響測深機による河床高自動計測により、出水中の流速補正係数、河床高の変動を把握する方法を示した。

5) 無人自動流量観測システムについて、機器設置場所の選定から最終的なデータ蓄積・公開までの流れをフロー図にまとめて提示した。

謝辞：本報告で説明したいいくつかの項目は、土木研究所が過去数年間にわたり国土交通省及び同国土技術政策総合研究所とともに連携して推進してきた流量観測高度化プロジェクトから得られたデータを使用している。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山口高志・新里邦生：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497/II-28, pp.41-50, 1994.
- 2) 独立行政法人土木研究所，財団法人土木研究センター，アジア航測株式会社，小糸工業株式会社，株式会社拓和，株式会社東京建設コンサルタント，横河電子機器株式会社：共同研究「非接触型流速計測法の開発」共同研究報告書，土木研究所共同研究報告書，No.291，2003
- 3) 深見和彦ら：ドップラー式非接触型流速計（電波・超音波）を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～，河川技術論文集，Vol.14，pp.307-312，2008.
- 4) 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦：非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，土木学会河川技術論文集，第16巻，pp.53-58，2010
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 金木誠・寺川陽・吉谷純一・松浦達郎：超音波ドップラー流

速プロファイラーの河川流量観測への応用に関する研究報告書，土木研究所資料，3719号，2000.3.

- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 菅野裕也・萬矢敦啓・深見和彦：外部コンパスを併用したADCP観測に関する提案，土木学会河川技術論文集，第17巻，pp.35-40，2011.
- 14) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・深見和彦：日本におけるADCPを用いた高水流量観測手法，河川流量観測の新時代，pp.34-41，2011.
- 15) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦：ADCPを用いた洪水流観測の計測精度評価に関する総合的検討，水工学論文集，第55巻，pp.1183-1188，2011.
- 16) 橋田隆史，岡田将治，新井励，下田力，出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察，河川技術論文集，第14巻，pp.295-300，2008.6.
- 17) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史：日本におけるADCPを用いた流量観測データの品質管理手法の考察，河川流量観測の新時代，pp.28-33，2011.
- 18) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史：ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp.1087-1092，2010.
- 19) Marian Muste et al., 2008; Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resour. Res., 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950
- 20) 例えば吉川 秀夫：流砂の水理学，丸善，ISBN-10: 4621030086, ISBN-13: 978-4621030080, 1985.
- 21) Ceyda Polatel: Large-scale roughness effect of free-surface and bulk flow characteristics in open channel flows. Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa. 2006.
- 22) Atsuhiko Yorozuya, Kazuhiko Fukami: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, Proceeding of Third International Symposium on Shallow Flows, Iowa City, Iowa USA, 2012.
- 23) 山本晃一：構造沖積河川学，山海堂，ISBN-10:4381017366, ISBN-13:978-4381017369，2004.

(2012. 8. 31受付)

感潮域における河川流量連続モニタリング

OBSERVATION OF CONTINUOUS RIVER DISCHARGE MONITORING IN TIDALLY AFFECTED AREA

橋場 雅弘¹・林 克恭²
Masahiro HASHIBA and Katsuyasu HAYASHI

¹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)
²非会員 工修 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)

The H-Q equation is used to estimate the river discharge from level of river. Certainly, this provides acceptably accurate estimates in the upper reaches of rivers. In tidally affected area, however, its accuracy is fatally degraded. We observed the vertical distribution of the flow velocity using bed-mounted ADCP. We calculated the Discharge-Index from surface water to the riverbed. Next, we calculated the discharge from the correlation equation of the observed discharge and the Discharge-Index. As a result, the discharge using Vertical Discharge-Index was high accuracy. In addition, bed-mounted ADCP has been found to be effective in the natural river which was irregular cross-section, driftwood and river bank erosion. From the results of the study, we developed a continuous river discharge of real-time monitoring system in tidally affected area.

Key Words : Tidally affected area, discharge, Discharge-Index, ADCP, Real-Time monitoring

1. はじめに

河川の流量は、治水・利水とともに河川環境を考慮した河川計画及び河川管理を行う上で重要な基礎資料である。近年は集中豪雨による局地的な洪水の発生や、異常渇水による利水障害などが問題になっており、今後、気候変動に伴って予測されるさまざまな現象への適応策を立てる上で、流量を高精度にモニタリングすることが求められている。

河川下流部は資産・産業・人口が集中する地域が多く、防災面でも利水面でも重要な地域が多い。しかし、河川下流部は感潮域になっていることが多く、水位が潮汐の影響を受けることが知られている。図-1に示すように感潮域では、潮汐によって下流から水位が上昇すると、背水影響を受けるため流速が遅くなり、流量は減少する。逆に、下げ潮で水位が低下すると、流速が早くなり、流量が増加するという現象が日常的に発生する。

従来使われてきた水位流量曲線式 (H-Q式) は、水位と流量の関係が比例関係であることを前提としているため、感潮域では、正確な流量を算出できないという課題を抱えている。今年度改訂された河川砂防基準調査編 (2012) では、流量の連続データの算出にあたっ

て、感潮域のような条件では水位流量曲線を水位のみの一価関数として表現できないことから、水位流量曲線を用いず、このような水理条件下でも利用可能な固定式流量観測手法を活用することが望ましいとされている。

ここでは、河床固定したADCPを用いた感潮域における流量連続モニタリングの手法の紹介と、この手法を用いて構築したリアルタイム流量モニタリングのシステムについて報告する。

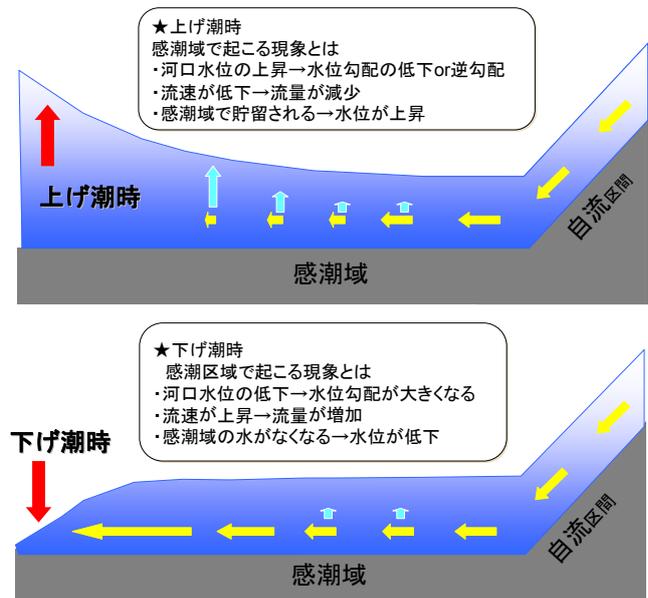


図-1 感潮域の水理現象

2. 現状の課題と解決方法

(1) 感潮域における流量観測の課題

感潮域の課題を表-1に示す。感潮域では自流区間にはみられない複雑な水理構造がある。一つは潮汐による背水影響、もう一つは塩水遡上である。潮汐による背水影響は低水流量の精度低下を引き起こすため、農業用水や工業用水、水道利用などの利水に影響する正常流量の管理が難しくなる。精度低下の原因は水位と流量が比例関係にならないためであるが、感潮域で水位に影響を及ぼす要因は、自流の流量や潮汐変動だけでなく、風向風速や気圧などにも起因することや、その発生順序によって水位変動のパターンが異なることがさらに複雑にしている。¹²⁾

塩水遡上による塩水の侵入は樋門から農業用水路に侵入すると農作物に深刻なダメージを与え、工業用水や上水道では機能が一時停止してしまう事態となる。しかし、塩水は通常、渇水時に下層から侵入するため、洪水時のような気象条件の変化などが指標にならず、常設の塩分監視装置などがなければ判定は困難である。塩水遡上は上げ潮時に発生し、背水影響で流速が低下するのだが、河川水位は上昇するため、H-Q式で管理すると水位上昇を流量の増加という誤った判定をしてしまう。また、塩水が遡上すると弱混合の場合は侵入する層が逆流となることから、流速の変化をリアルタイムで観測できるシステムが必要である。

(1) 石狩川下流の特徴

具体例として、石狩川の石狩大橋地点(図-2)における取組みを紹介する。石狩大橋は石狩川の治水上の基準地点であり、基本高水のピーク流量(18000m³/sec)を基準として治水対策が行われている。同時に、流水の正常な機能を維持するため必要な流量を設定する基準点として、正常流量(103m³/sec)が定められており、低水管理が重要な観測所と位置づけられている。

石狩大橋は河口から26.6kmに位置するが、石狩川の下流は、図-3に横軸が河口からの距離、縦軸に平均水位を示すが、水位勾配が非常に緩やかである。石狩大橋の豊水位(1年を通じて95日はこれより低下しない水位)では、過去20年で1.0m以下となっており、日常的に潮汐の影響を受ける観測所であることが、低水流量の精度に大きな課題になっている。

(2) 感潮域における観測流量とH-Q式連続流量

はじめに、プライス式流速計などで測定される観測流量と、水位流量曲線式(H-Q式)で得られる連続流量を

表-1 感潮域の課題

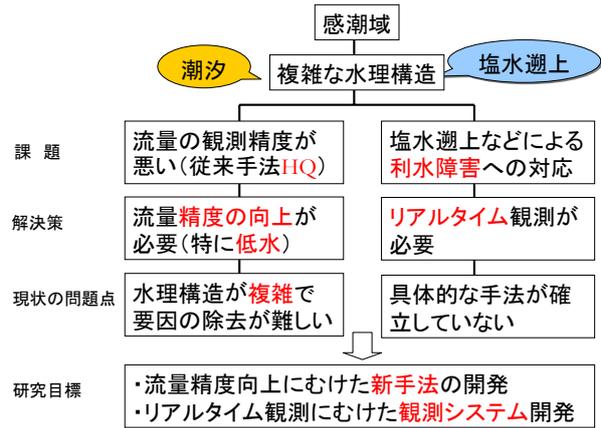


図-2 観測地点

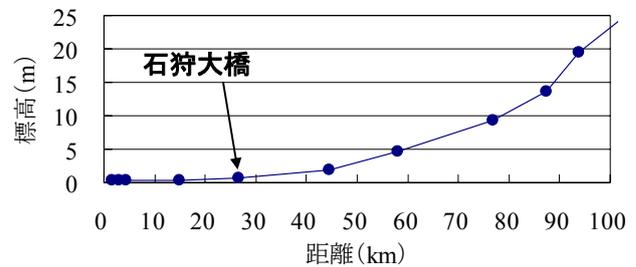


図-3 石狩川下流平均水位縦断面図

区別しておきたい。観測流量は、潮汐背水下の流れ場では、水位が上昇しても流速が遅くなるため、プロペラは回らないことから、流量は小さく観測される。これに対し、連続流量は、観測流量と観測水位から最小自乗法で得られた水位流量曲線式(H-Q式)に、水位観測所の時刻水位を入れて算出された流量で、これをまとめたものが流量資料の成果として整理保存される。図-4に2007年7月12日~13日の石狩大橋に実施した大潮時の水位・流量測定結果を示す。ここでは、プライス式の流速計を用いた流量観測と、ADCPを搭載したボートで河川を左岸から右岸に横断して算出した流量を併記する。ADCPはTeledyne RD Instruments社の1200kHzを用い、ハイスピード測定モード12、メインピング5、サブピング6、層厚0.25m、ボトムトラッキングBM5で観測し、ボートの移動速度は1m/sec以下とした。図-4より、石狩大橋の水位

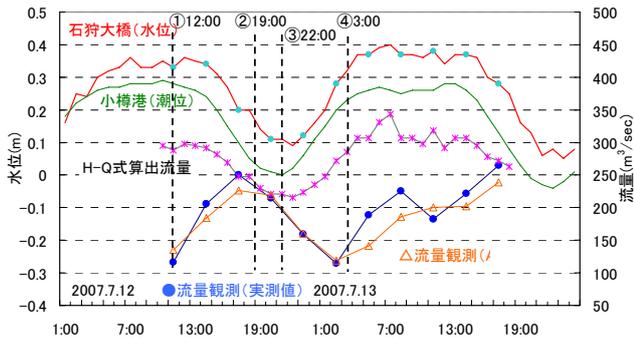


図-4 大潮時の流量観測 (石狩大橋)

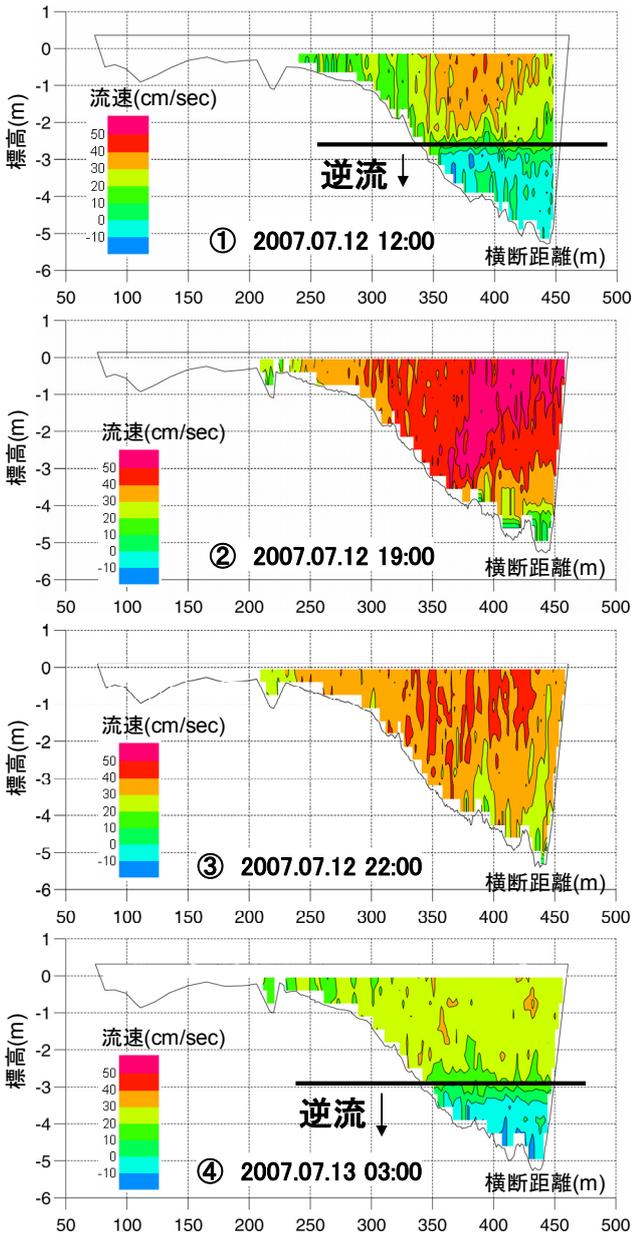


図-5 横断面流速分布

は河口付近の小樽港の潮位と約1hr遅れで連動しており、潮汐影響が明瞭に現れている。ブライス式での観測流量とADCP曳船による流量は概ね合致しているが、水位とは全く異なる変動を示す。観測流量の最大値は水位の下降時に、観測流量の最小値は水位の上昇時に発生してい

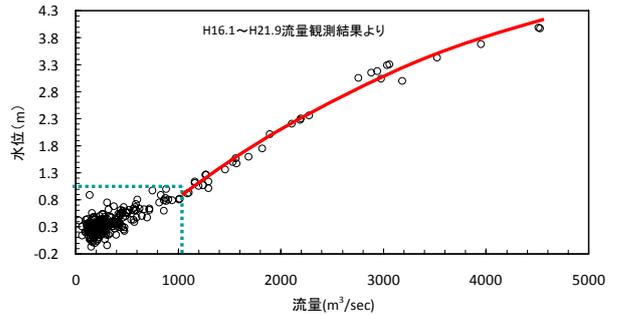


図-6 水位流量曲線式 (H-Q式)

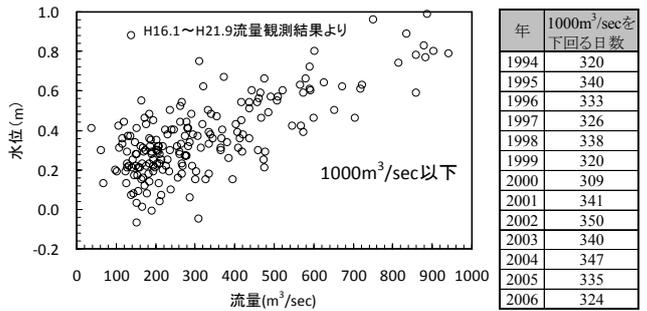


図-7 水位と流量の関係 (1000m³/sec) 以下

る。これは潮汐変動による水位勾配の変化に起因している。ところが、水位流量曲線式 (H-Q式) によって算出された連続流量は水位の変動と連動するため、観測流量とは乖離した結果になっている。

図-4の①満潮、②下げ潮、③干潮、④上げ潮に対するADCPによる流速の横断面分布を図-5に示す。①満潮と④上げ潮時には標高-3.0m付近に逆流の層が発生し、塩水の遡上が見られる。満潮時には0.4m/sec以上の順流の層が上層にあるが、上げ潮時は上層でも流速が0.2m/sec程度と停滞した状態に近い。逆に、②下げ潮と③干潮では逆流の層はみられず塩水は侵入していない。特に下げ潮では全層で0.5m/sec以上の流速が発生している。よって、最も流速が速いのは下げ潮時で、最も遅いのは上げ潮時となり、観測流量の最大最小と合致する。

これより、H-Q式連続流量は乖離するが、観測流量は概ね正確な流量を観測していることが推察できる。

(2) 感潮域における水位流量曲線の脆弱性

平成16年～平成21年の観測流量と水位をプロットすると図-6に示すとおり、1000m³/sec以上では相関がみられるが、1000m³/sec以下では大きくばらつく結果になる。図-7は流量1000m³/sec以下を拡大したもので、同じ水位でも400m³/sec以上の流量差が生じている。従来法では、これより最小自乗法によって水位流量曲線を作成するため、低水流量では、作成された式には相当の誤差が含まれる。また、観測流量が正しい値を測定したとしても、水位と流量が比例関係であることを前提としたH-Q式で管理する以上、上げ潮時には実際の流量は小さいが、水

位が上昇するため大きな流量として整理保存されるのが現状である。石狩大橋では、年間の約330日が1000m³/sec以下となるため、低水流量の精度向上は重要な課題である。

(3) 感潮域における流量算出の指標

既往の流量観測データ（平成16年～平成21年）から、水位、観測流量、断面平均流速の相関を図-8に示す。

水位と流量にはばらつきがみられ、相関関係はみられなかったが、断面平均流速と流量は一義的な関係がみられた。これより、感潮域では流量の支配因子が水位ではなく、流速であることが推察できる。また、前述したADCP曳船観測での断面流速分布から、感潮域では塩水遡上などによって上層と下層で2層流になることがわかったため、流速の鉛直分布が重要な指標になることが示唆された。そこで、水位の代わりに、流速の時系列データを取得して流量を算出する方法を試みた。

3. 河床設置ADCPによる流量算出

(1) ADCPの設置箇所

感潮域での流速鉛直分布を時系列で得るためには、水深方向に多点の流向流速データが必要である。そこで、非接触で多層の流向流速を得ることができるADCPを観測機器として選定した。設置する箇所の条件は、図-9に示すように、過去10カ年で全流量と区分流量の相関係数の最も高い箇所、かつ河床変動の少ない箇所とした。全流量と区分流量は既往の流量観測計算書から抽出し、河床変動については、既往の横断測量結果の重ね合わせで、最も変動の少ない箇所を選定した。

(2) ADCPの設定

ADCPはTeledyne RD Instruments社の1200kHzを用い、ハイスピード測定モード12、メインピング10、サブピング6、層厚0.25m、時間間隔10分とした。ハイスピード測定モードを使用した理由は、精度の確保と電力の消費量である。ハイスピード測定モードは、1メインピングに対して複数のサブピングを同時発射することによって、短時間で通常モードから多数のピングを発射するものと同一精度が得られる。今回は測定誤差1.76cm/secとした。通常モード1で60ピング、層厚0.25mで40層、10分インターバル測定の場合の電力消費量は365日で607.55Whである。しかし、同精度をハイスピード測定モード12で行うと、219.23Whと約1/3の消費電力である。ADCPセンテネルのバッテリーは標準で400Wh程度のため、設置後1年以上は稼働可能である。これは、河床設置の場合、

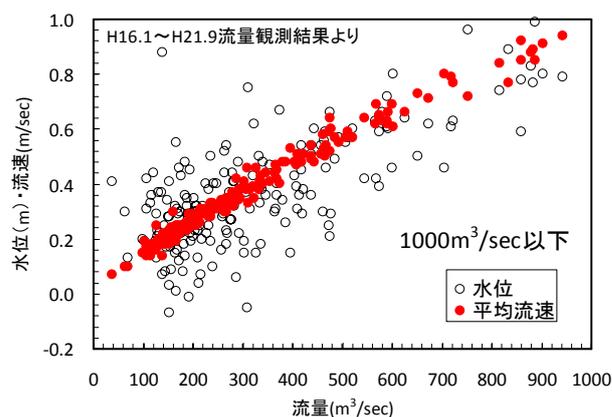


図-8 平均流速と流量の関係

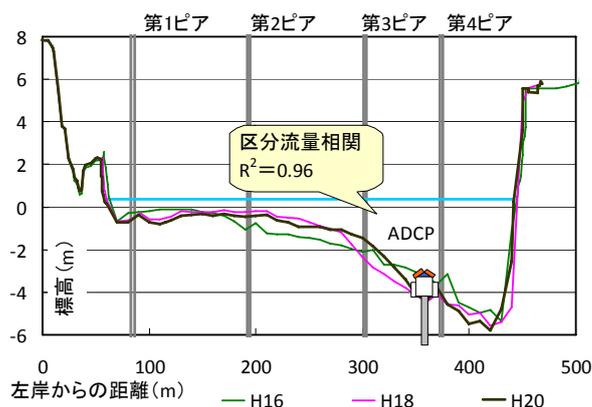


図-9 ADCP設置箇所の選定

表-2 ADCP流量観測施設の種類の種類

型式	自動昇降式 河岸水平設置	河床鉛直設置
概要	自動昇降・首振り式 水平方向(H-ADCP)	鉛直方向 (ADCP)
河川名	鶴見川	大橋川
所轄	京浜河川事務所	出雲河川事務所
設置箇所	河口より5.9km	河口より26.6km
断面適用	矩形護岸	不整形(自然河川)
設置箇所	河岸	河床

メンテナンスが潜水作業になることから、維持管理コストを考えると有利な設定である。

(3) 河床設置の選択

国内外のADCPを用いた流量観測施設はH-ADCP（水平方向）が一般的であるが、表-2に示す国内の既設2カ所は、河岸から全断面を照射できる矩形に近い形状で、出水時には隣接する湖や海の緩衝効果で直接的な影響が少ないと考えられる。これに対し、石狩大橋は流心が右岸に偏った不整形な断面の自然河川であることや、出水で河岸浸食や流木が発生しやすく、河岸への施設設置はリスクが大きい。よって、河床に設置することで、出水時に想定される外力から直接的なダメージを受けにくい

と想定し、河床設置にアドバンテージがあると判断した。

(4) 流量算出方法

河床に設置したADCPにより、鉛直方向に多層の流速を測定し、インデックス流量を算出した。図-10より、水面直下のデータは乱れがあるため、カットし、第2層のデータを補完した。また、ADCPの直上第1層のデータで河床までを補完した。

インデックス流量は式(1)となる。

$$q = \sum_{i=1}^n h_i \cdot V(x)_i \quad (1)$$

h_i : 水深幅[m], $V(x)_i$: 点流速[m/sec]

流量算出に使用する点流速 $V(x)$ は、横断面に直交した流下軸方向の流速に補正した流速を使用する。

得られたインデックス流量 q とプライス式流速計による観測流量 Q の相関式 (q - Q 式) を図-11に示す。これより10分インターバルで得られたインデックス流量 q から連続流量を算出する。ここで流量 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ を境界に式が2つに分岐される。これは水位に置き換えると約 1.0m であるが、図-9の横断形状には変化点はみられない。しかし、図-6より、 H - Q 式による水位と流量の関係が成立するのが $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 以上であることから、 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の潮汐影響を受けるI式と潮汐影響を受けず自流となるII式の分岐点は妥当性があると推察できる。

図-11のインデックス流量と観測流量の図は、既往の流量管理図に類似する。流量管理図は流量観測毎に図上にプロットし、観測流量の妥当性を確認する。そこで、出水後の河床変動によって横断面形状が変化した場合、プロットされる点の傾向が変化するため、式に分岐点となる。これと同様に、図-11はADCPの「線」断面が全流量との一定の相関が維持されているかを定期的に検証することが可能で、横断面の変化などで、インデックス流量と観測流量の傾向が変化した場合、 H - Q 式同様に、 q - Q 式を立て直すことによって精度管理が可能になる。

(5) データ精度の検証

現在、リアルタイム流量の算出に使われている洪水予報システム水位流量曲線式 (H - Q 式) の流量と河床設置ADCPの流量の精度を、観測流量を基準として比較 ($H21$. 1月~9月) した結果を図-12, 13に示す。

H - Q 流量は $500\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の低水部分を中心に大きくばらつきがみられる。 $1000\text{m}^3/\text{sec}$ 以上では95%信頼限界内に収まるが、 $3000\text{m}^3/\text{sec}$ を超える流量では再びはずれている。これに対し、ADCP流量は低水から高水まで95%

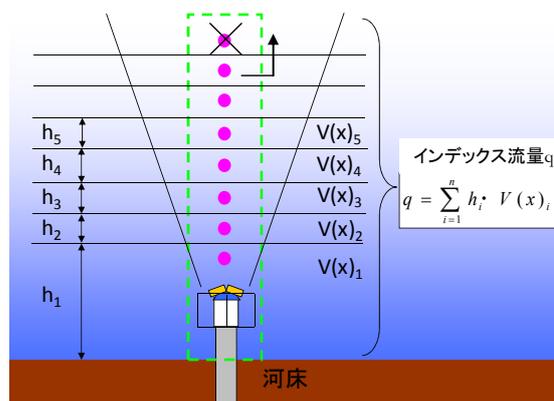


図-10 インデックス流量の算出

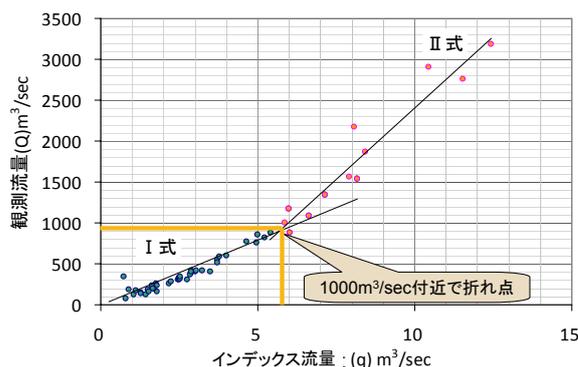


図-11 q - Q 式の算出

信頼限界内に収まっており、どの規模の流量でも精度よく測定されているのがわかる。

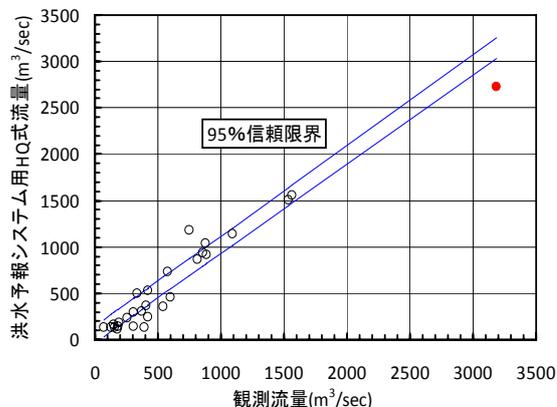


図-12 流量精度 (H - Q 式)

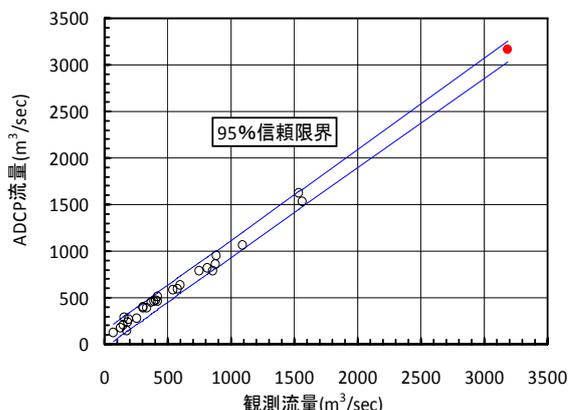


図-13 流量精度 (ADCP)

当初、ADCPは出水時などの高水への適用が懸念されており、高水流量はH-Q式との結合によって算出することも検討されていたが⁴⁾、3000m³/secを超える高水にも十分な精度があることが確認できたため、ADCPで低水から高水まで十分測定が可能であるという新たな知見が得られたことになる。なお、石狩川では超音波障害になりやすい濁度1000以上になりにくいことも適用できた要因と推察できる。

高水適用については今後、データを重ねて検証していく必要はあるものの、石狩大橋の年間の標準的な出水規模（最大流量の平均（H14～H20）：約2700m³/sec）では、一年を通して精度の高い流量をリアルタイム配信できることが確認できた。

4. リアルタイム流量配信システムの構築

ADCPを用いたリアルタイム流量観測システムの概要を以下に示す。

(1) 機器のシステム配置

システム構成は図-14に示すように、石狩大橋の橋梁の上流側、右岸流心部河床にADCPを設置した。ADCP内には水圧センサーを配置し、リアルタイムの水位を流速・流量とともに測定することとした。

観測機器を固定するために、河床にステンレス管を打ち込み、図-15のADCPと送信用のモデムを入れたステンレス籠で流下物などの衝撃から機器を保護した。

水中は水中音響モデムでの水中無線通信とした。通信の信頼性は有線接続の方が高いが、設置箇所が流心部にあたるため、施工性と出水時の河床変動による断線リスクを考慮し、水中音響モデムを使った無線方式を採用した。受信用のモデムは橋脚側面の水中に設置しており、橋脚上まで有線接続とした。

橋脚上のインターフェイス接続箱内でデータは光に変換され、光ケーブルによって橋梁から局舎まで伝送される。光ファイバを選択した理由は、橋上の多い交通量によるノイズや通信障害などに強いことと、多量のデータを速く、安定して伝送できる能力があるからである。

また、通信は石狩大橋既設の塩分監視装置を利用し、可能な限り既存施設の有効利用と施工コストの削減を図った。

システムの概要を図-16に示す。ADCPで観測したデータは橋脚下の光ファイバを経由して石狩大橋局舎内のADCPサーバに伝送される。

サーバはデータ保守とトラブルを防ぐため、ハードディスクの5台による同期と、サーバ電源の冗長化を行っている。現在約4カ年連続稼働しているがサーバにトラブルは発生していない。

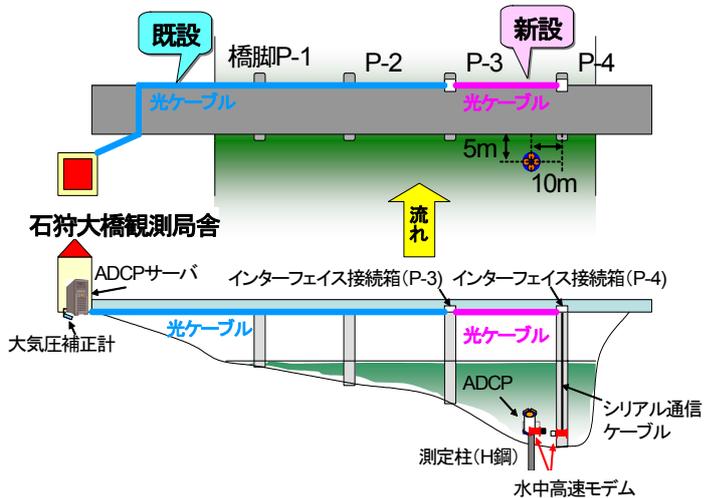


図-14 観測施設概要

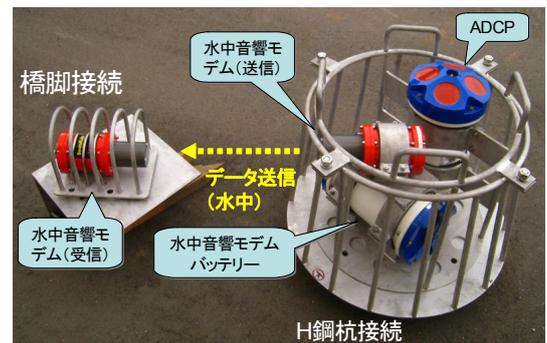


図-15 水中設置機器

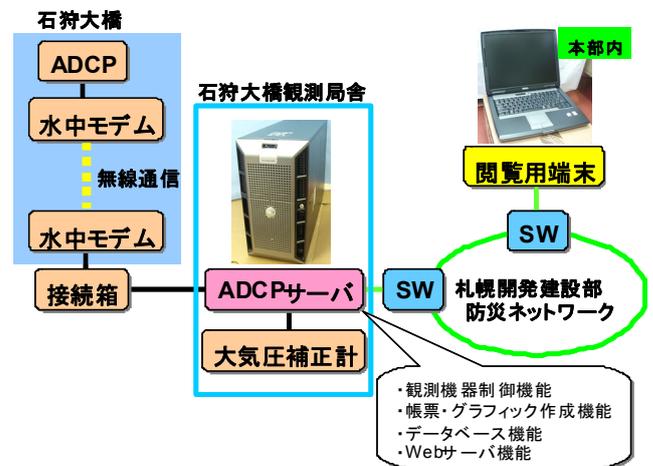


図-16 システム概要

サーバではADCPから送られる流向流速データおよび圧力センサーと大気圧補正計のデータから流量を算出し、データベースに保存されると同時に帳票作成とグラフィック処理が行われる。このようにして得られた情報はWebサーバ機能を使って、札幌開発建設部防災ネットワーク内に配信される。アクセス方法は簡単で、ネットワーク内の端末機であれば、WebブラウザにURLを入れるだけで、複数台でも同時に表示が可能^{ため}、閲覧用に専用のソフトウェアを入れる必要がなく、機器の交換などにも柔軟に対応できるシステムとした。

(2) 情報管理システム

局舎内のサーバからWeb配信される情報管理システムは防災ネットワーク上の端末から閲覧可能で、主にグラフィック、帳票、ダウンロードの3機能があり、画面上、流速等の状況が一目で判るように工夫し作成した。

図-17はホーム画面で、4つの大きなメニューが表示される。システムの更新情報やq-Q式の更新、メンテナンス時などがインフォメーションの中で表示される。

図-18の流速コンターグラフィックでは横軸が時間軸で、水位、流量、流速分布コンターの3要素を時系列で表示できる。また、時間軸、縦軸ともに切り替えが可能で、1日～1ヶ月、低水～計画高水まで表示できる。

図-19の水位・流量帳票はADCPで観測した水位と算出された流量の帳票を10分ごと、1時間ごとに切り替えて表示できる。図-20では、水深標高別に流速が帳票形式で時系列の表示が可能になっている。図-21では、水位・流量・水深別流速の10分データを月ごとにテキスト(CSV形式)でダウンロードでき、汎用されている表計算ソフトなどで簡単にデータを利用可能である。

この情報管理システムは、図-22に示すとおり、潮汐影響による水位の日変動やそれに伴う流量変動の把握が可能で、潮汐背水による流速の鉛直変化や、塩水遡上による逆流など、感潮区域特有の現象がビジュアル的に把握できるようになっている。



図-17 ホーム画面

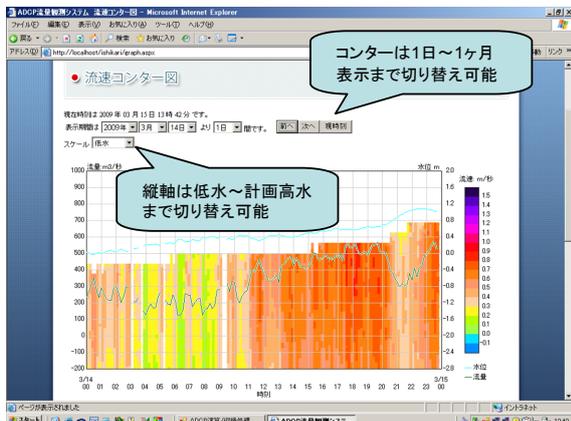


図-18 流速コンター図

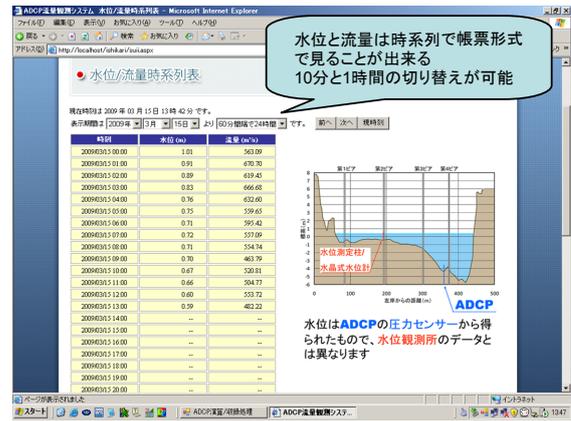


図-19 水位流量データ

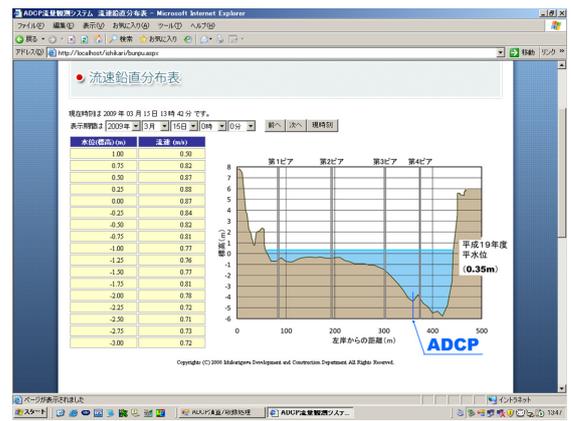


図-20 鉛直流速データ

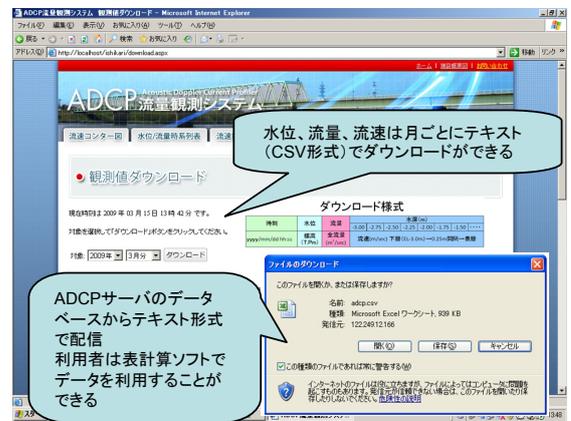


図-21 データダウンロード

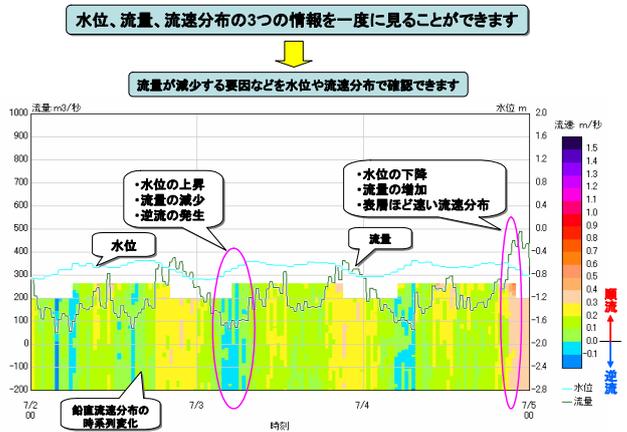


図-22 グラフィックの見方

5. 観測システムの課題と対策

本システムは平成20年に試験運転が開始され、平成21年から現在まで4年程度稼働している。その中で発生したトラブルやその対応策などを記述する。

(1) 河床変動などによる欠測

河床設置型のリスクとして考えられるのは河床変動による流出、埋没である。平成22年の5月の融雪出水時（流量規模3000m³/sec）に一時大きな河床変動が発生し、河床に設置していたADCPが3ヶ月近く埋没した。リアルタイムでデータは配信されているため、埋没時期は事務所内で判定できたが、水位が高い状態が続き、潜水での掘り出し作業を安全に行うことができなかつたため、埋没期間が長期化してしまった。これ以降は、大きな河床変動はみられていないが、河床設置型の最大の課題は、河床変動と河床設置という維持管理の難しさである。多少の河床変動については、q-Q式の修正によって管理が可能であるが、想定外の変動もあり得るので今後とも注視していかなければならない。

また、河床設置では、ADCP架台をパイプ単管で河床から立ち上げ、河床とADCP架台の間にできるだけ隙間を作り、架台が抵抗になって局所的な洗掘などが起こらないような構造にする必要がある。

(2) 維持管理

河床設置型機器のメンテナンスは潜水土による水中作業が必要である。この点で河岸に設置するH-ADCP等に比べて保守点検作業に負担がかかる。そこで、現地作業の負担を少なくするため、ADCPは消費電力のオプションモード（WM12）を使用し、潜水メンテナンスの回数を極力少なくしているが、前述したようにトラブルが発生しても、潜水して安全に作業ができる状態にならないと復旧できないため、放置期間が長くなるのが課題である。システム障害時の保守対策として、機器単体のメモリにも記録しており、データの連続性が確保できるような二重化対策を行っているが、ADCP本体にトラブルが生じた場合は対処できないのが現状である。今後も土砂や流木などによる障害の影響等の検討を行っていくと同時に、流れ場における、抵抗の少ない設置架台の設計に取り組む必要がある。

6. まとめ

従来の観測手法である水位流量曲線式（H-Q式）による流量管理では、感潮域における精度が低い。このよう

な地点での流量観測手法として、ADCPを用いて流速観測を行い流量算出するリアルタイム流量観測手法の有効性が確認された。これは河床から水表面までのインデックス流量と観測流量の相関式によって流量を算出する方法で、USGSのIndex Velocity Method⁶⁾と類似する。Index Velocity Methodは、測定した多層の流速と平均流速の相関式から連続した平均流速を算出し、水位一断面積の関係から流量を算出するものであるが、本手法は感潮域でのあいまいな水位をインデックス流量と観測流量の相関式の中に内在させているものといえる。また、手法はサンプルで単純であることから、感潮区域以外でも背水影響のある河川の合流点付近や正逆の流速が発生しやすい遊水地などの管理にも応用活用できると考えられる。

また、河床設置型のADCPを用いることにより断面が不整形で河岸浸食や流木が懸念される自然河川でのリアルタイム流量システムの適用性と課題を明らかにした。

しかし、現在のところ従来法（H-Q式）以外は水文資料として蓄積が認められていないことから、本手法で算出した流量を、再びH-Q式流量に戻して水文資料成果としているのが現状である。今後、新しい手法を適用していくためには、観測手法や精度管理手法などの標準化に向けて、関係機関などとの協議を重ねていくことが望まれる。

謝辞：本研究は北海道開発局札幌開発建設部より資料提供のご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 横尾啓介, 吉田静男, 荒川範彦: 河口二層流に与える風の影響, 土木学会, 海岸工学講演会論文集, 第51巻, pp361-365, 2004.
- 2) 横尾啓介, 吉田静男, 西田修三, 荒川範彦: 感潮域における河川水位決定要因の定量的評価, 土木学会, 水工学論文集, 第47巻, pp.961-996, 2003.
- 3) 横尾啓介, 吉田静男, 岡田幸七, 野村佐和美: 感潮域におけるADCPを用いた河川流量の推定, 土木学会, 水工学論文集, 第52巻, pp.931-936, 2008.
- 4) 野村佐和美 山崎猛 佐々木誠: 感潮区域における流量観測-石狩大橋地点でのADCPリアルタイム観測-, 平成19年度北海道開発局技術研究発表会, 技術一般(技5治) 2007.
- 5) 大田見 定・天野 直哉・舘ヶ沢 恵: 感潮区域における流量観測手法について—石狩大橋地点でのリアルタイム流量観測—, 平成22年度国土交通省国土技術研究会, 自由課題(イノベーション部門), 2010.
- 6) Catherine A. Ruhl, Michael R. Simpson: Computation of Discharge Using the Index-Velocity Method in Tidally Affected Areas, Scientific Investigations Report 2005-5004, U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey, 2005.

(2012. 9. 10受付)

結氷河川における流量推定式と音響測定機器を用いた現地観測

DEVELOPMENT OF THE DISCHARGE FORMULA AND FIELD OBSERVATION USING ACOUSTIC INSTRUMENTS FOR ICE COVERED RIVER

橋場 雅弘¹・吉川 泰弘²

Masahiro HASHIBA and Yasuhiro YOSHIKAWA

¹非会員 株式会社 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

²非会員 工博 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062- 8602 札幌市豊平区平岸1 条3 丁目)

Flow discharge at the period of a frozen river is the important data for a long term full-year plan of water resources plan. There is a problem in safety at the ice-covered river observation and accuracy of flow discharge. We developed a formula for estimating flow discharge of ice-covered river using the water level and ice covered area. We succeed to observe field data on the behavior of river ice and hydraulic phenomena during ice-covered period collected using acoustic instruments of SWIP(Shallow Water Ice Profiler), ADCP and Echo-Sounder.

Key Words: Ice-Covered River, Discharge Formula, ADCP, SWIP

1. はじめに

積雪寒冷地の河川では、冬期の気温の低下や降雪によって、河道内に河氷が形成される。河川内に氷が形成される河川を結氷河川という。この結氷期間は、北海道では12月下旬から4月上旬の約100日である。図-1に一般的な結氷時の河川横断面を示す。横断面の上面に積雪(Snow)、その下に硬い氷板(Ice sheet)、さらにその下に軟らかい晶氷(Frazil)が存在する。

結氷河川の流量については、年間の濁水流量を記録することが多く、年間を通した長期的な水資源計画を策定する際には重要な資料となる。また、今後、気候変動により冬期間の流量が増減する場合には、今よりも増して河川結氷時の流量を精度よく推定することが望まれている。一方、結氷時の流量観測は、吹雪などの気象条件の変化や、河川表面が氷で覆われている現場条件など、観測自体に危険性が伴うことから、観測者にとって厳しい条件である。また、河川結氷時は、河氷の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係(H-Q式)が成り立たず、河川結氷時の流量を連続的に推定する手法は、河氷が流水へ与える影響を考慮していない従来の手法はあるものの推定精度が低いという課題がある。

本報告では、現在の結氷河川における流量観測の現

状と課題及び現場で求められている知見について示し、河川結氷時における新しい流量推定式を紹介するとともに、ADCPを用いた河川結氷時の流れと河氷の変動の連続モニタリングについて紹介する。

2. 流量観測の現状と課題

(1) 観測の時間

結氷時の流量観測の時間について、除雪および観測穴を開けるための解氷作業の時間が、流量観測に係る時間以上にかかっているのが現状である。流速の測定時間は、非結氷時(氷がない状態の時)と同様にしてはいるが、晶氷が流下する場合には、流速が時々刻々と変化するので、測定時間が長い事により観測精度を悪

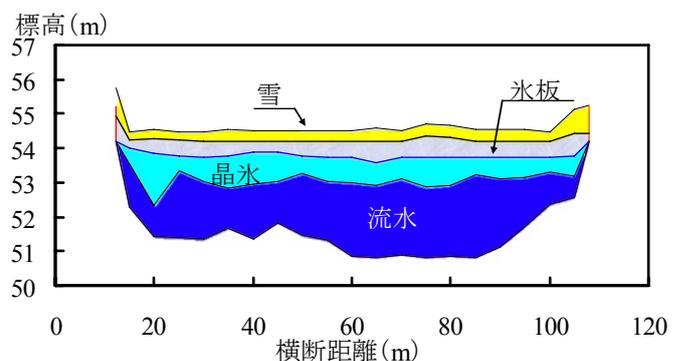


図-1 結氷時の河川横断面

くしている可能性がある。感潮域やダムを有する場合も同様であり、結氷時の観測時間についての検討が必要となっている。

(2) 観測の安全性

河水が河川の全面を覆う完全結氷時の流量観測では、総計4名のパーティで、氷の上を徒歩によって作業を実施する。水深測定用の測点、水深と流速測定用の測点では、氷上から氷開削用のノミを用いて0.2~0.5m四方の穴を開け、開削した穴に、測深ロットおよび流速計を入れて測定する。河水が河川を部分的に覆う部分結氷時では、通常は約5名のパーティが必要であるが、氷の状況によっては、作業が著しく困難になる場合がある。結氷していない開水部分は、船を用いて作業を実施し、結氷部分は、氷を少しずつ割りながら安全を確認し、氷の上を徒歩によって作業を行う。結氷直後の写真を図-2に示す。観測の安全性については、観測断面の横断方向、縦断方向の氷の厚さには、ばらつきがあり氷上からではその厚さは確認できないため、必ず先発隊が、ポールやピンを持って安全に作業できるかどうか確認を行う。万が一、氷が割れて氷下に転落して流された場合は、開水路と異なり、浮上する方法がなく、きわめて危険な状態となる。

また、結氷初期と解氷期は流量変化が大きいので、密な流量観測が望まれるが、危険を伴うため現在の観測手法では難しい状況となっている。

(3) 観測の断面

結氷時は、氷板や晶氷により流積が変化する。このため、流速分布が複雑となる場合や流量が偏在する場合があり、観測精度を向上させるために、結氷時の観測断面では密に測線を設けている。氷板や晶氷の発生、流下、堆積の現象は、現在、十分には解明されていないため、結氷時の流量の精度を向上させるためにも現象の解明が望まれている。

(4) 測定方法

結氷時には、流水断面が河水で狭められることから、河水厚を正確に測定する必要がある。現状では、図-3に示す、L字型の河水測定用定規によって手の感触で判断し測定している。軟らかい晶氷の場合は、非常に感触が伝わりにくく、観測には相当の熟練が必要である。一方で、測定の困難さから値の信頼性に懸念がある。晶氷は流積および流量に大きな影響を与えるため、測定方法の確立が望まれている。

流速の測定にはプロペラ流速計を用いている。プロペラは零下となる空气中で凍結するため、常に凍結防止を行う必要がある。河水底面から河床までの水深の2割・8割の点流速を測定しており、その妥当性は既往研究¹⁾により検証されている。

(5) 観測データの整理

観測結果の妥当性を判断する精度管理手法が確立されておらず、現行では、精度管理図、上下流の逆転の有無、前回との比較により実施している。

しかし、図-4に示すとおり、河川結氷時は、河水の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係(H-Q式)が成り立たないため、開水路と同じ流量算出方法では精度が確保できない。そこで、結氷期間の適切な流量を算出するため、結氷補正が行われている。結氷補正方法としては、北海道開発局方式(Eye-Method法)が標準の結氷補正方法として用いられている。これは実測流量をH-Q式に代入して、結氷影響を受けない逆算水位を求め、観測日間は直線変化として比例配布した水位(あるいは12時水位との水位差)を結氷補正值とするものである。しかし、ダム放流など利水影響を受けて人為的な流量変化が発生している地点は、この方法では妥当な流量を求められないため、各河川の特性に応じた独自の結氷補正方法で行われている。また、水位変動が大きい期間は時刻流量を算出せずに、日流量の1データとして表記しており、流量年表へ反映するために、結氷補正を行い連続流量を算出しているが、補正の妥当性が確保されていないという課題もある。



図-2 河川結氷直後の流量観測測線(天塩川恩根内)

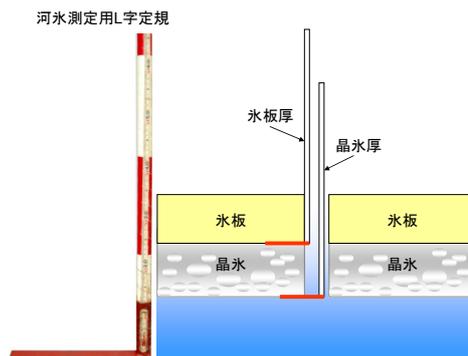


図-3 河水の計測

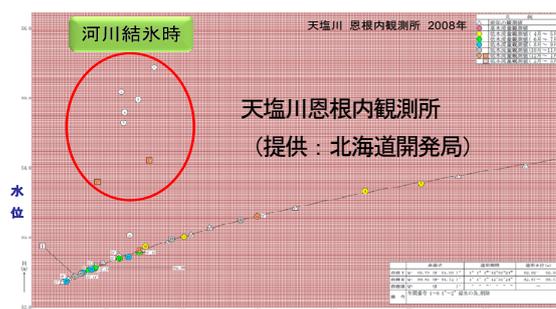


図-4 寒冷地河川における水位と流量の関係

3. 河川結氷時の流量推定式

河川結氷時は河水の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係（H-Q 式）は成り立たない。また、河川結氷時の流量は複合的な影響を受けて一義的に決まらないため、これらの影響を考慮した河川結氷時の流量推定式(1)が開発されている。この式の導出過程については、吉川らの既往研究²⁾を参照して頂きたい。

ここでは本推定式の具体的な意味と活用方法について述べる。

$$Q = C B_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}} \quad (1)$$

ここで、流量 Q [m³/s]、 C [m^{3/4}/s]、川幅 B_w [m]、流水面積 A_o [m²]である。河川結氷時の横断概念図を図-4に示す。図中において、積雪面積 A_s [m²]、水位 H [m]、喫水 d [m]である。

(1) C 値

C値の物理的意味は、河氷底面が流水により融解されて滑らかになることによる粗度の減少の程度を表している。なお、本推定式は、河床の変動は無視し河床の粗度は一定と考えて、その影響はC値に織り込まれていると仮定している。C値は小さいほど河氷の影響によって流れにくくなるため、流量は小さくなる。

(2) 川幅 B_w

本推定式の川幅 B_w は、定期流量観測で得られる流量測定図における区間距離の合計であり、横断面内において河川水が存在する左岸側の測線から右岸側の測線までの距離である。

(3) 流水面積 A_o

本推定式の流水面積 A_o は、流量測定図における区分断面面積の合計であり、河川水が流れる面積である。なお、晶氷面積 A_f [m²]は流量測定図の晶氷（モロミ）面積の合計であり、氷板面積 A_i [m²]は流量測定図の水面上氷面積と水面下氷面積の合計であり、積雪面積 A_s [m²]は、流量測定図の雪面積の合計である。

4. 河川結氷時の流量推定手法

流量推定に必要な入力データは、月3回の間隔で定期的実施されている流量観測から得られる流量、積雪面積、氷板面積、晶氷面積、川幅、水位とし、連続的な水位データは、水位流量観測所の水位データおよび、国土交通省の水文水質データベースから得られる1時間毎のデータとした。

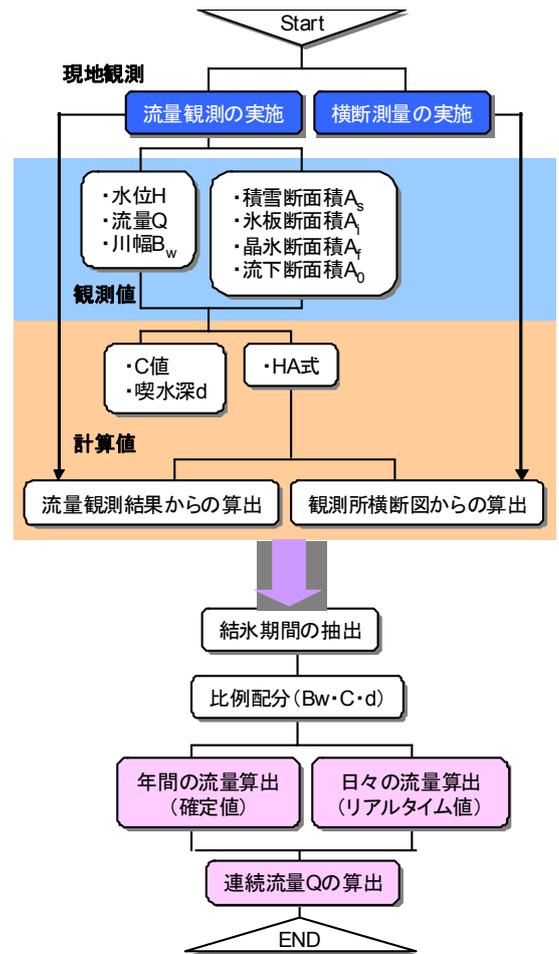


図-5 流量推定フロー

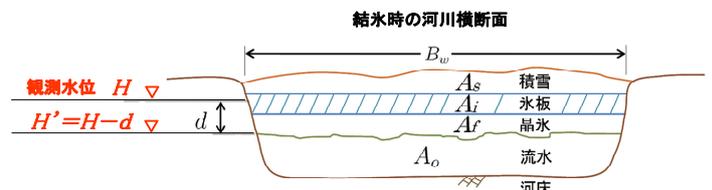


図-6 河氷面積と流水面積

(1) 流量推定手法の手順

本流量推定手法の実際の手順を図-5に示す。

- 1) 開水時のHA 式（水位 H と流積 A の関係式）を横断測量データから導出する。
- 2) 結氷時の定期観測データから、喫水 d 、 C 値、川幅 B_w を得る。観測を実施していない日の d 、 C 、 B_w は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補完により求める。（図-9、図-10）
- 3) 図-6に示す結氷時の連続水位 H から喫水 d を差し引いた値 H' を HA 式に代入して A_o を求めて、式(1)に C 、 B_w 、 A_o を代入して結氷時の流量 Q を推定する。

・HA 式と喫水 d の導出について

HA 式の導出は、開水時の横断測量データを用いて、
 図-7に示す水位 H' と流水面積 A_o の関係式(2)を導く。
 河川結氷時の水位 H を式(3)に代入して、相当水位 H'
 を求め、この H' を HA 式に代入し A_o を算出する
 (図-8)。なお、河川結氷時の水位 H' は河水底面の
 横断面平均標高となり、喫水 d は式(4)より算出³⁾した。

$$A_o = f(H') \quad (2)$$

$$H' = H - d \quad (3)$$

$$d = \frac{\rho_s A_s + \rho_i A_i + \rho_f A_f}{\rho_w B_w} \quad (4)$$

ここで、 ρ [kg/m³]は密度であり、水の密度 $\rho_w = 1000.00$ 、
 雪の密度 $\rho_s = 100.00$ 、氷の密度 $\rho_i = 917.40$ 、
 晶氷の密度 $\rho_f = 950.38$ とした³⁾。

・C 値の算出について

定期観測データの流量 Q 、川幅 B_w 、流水面積 A_o を
 式(5)に代入して C 値を算出する。

$$C = \frac{Q}{B_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}}} \quad (5)$$

(2) 本手法の利点と欠点

本手法は結氷時のみの観測データを用いており、
 流量の推定手法が明確となっているため、推定流量と観
 測流量が一致しない場合においては、その原因につい
 ての考察が可能であることである。

また、精度的にも図-11に示すように、従来手法と比
 べて推定精度が高い。従来法との比較は吉川らの既往
 論文²⁾を参考にしてほしい。

本手法は各河川の現場条件に応じて、本流量推定式
 の係数を設定しさえすれば、より精度の高い流量を推
 定可能であり、コストをかけずに結氷する河川の管理
 技術の向上を図ることが可能である。

本手法の欠点としては、河床変動を考慮していない
 ため、その影響を見積れないこと、喫水 d を式(4)を
 用いて算出する際の積雪密度、氷板密度、晶氷密度は、
 本研究では定数として与えているが、地点および時間
 によって、その値が異なることが予見されるため、各
 値の与え方については検討が必要であることである。

なお、吉川らは熱収支モデルを基にした実用的な氷
 板厚計算式を開発⁶⁾しており、気温から喫水 d を予測す
 ることが可能である。本研究は、河川結氷時を対象と
 しているため、開水時から結氷時の初期結氷期間
 (Freeze-up period)、結氷時から解氷時の解氷期間 (Break-

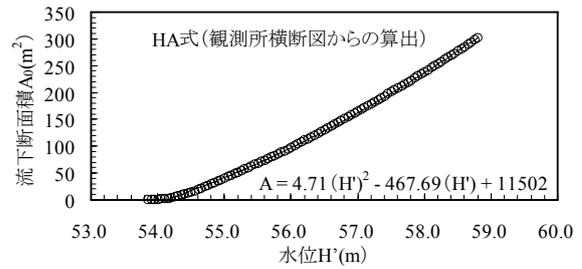


図-7 H-A図

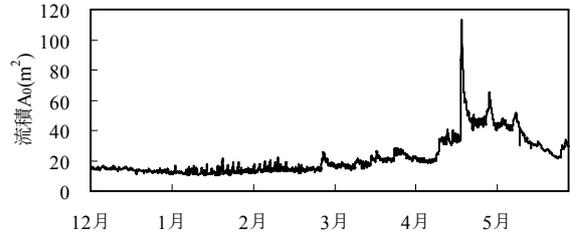


図-8 流積の時系列変化

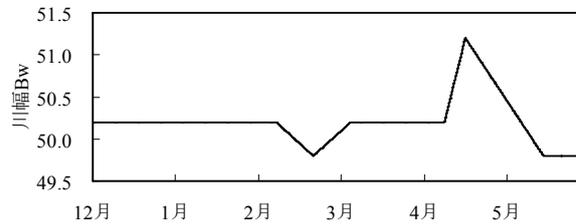


図-9 川幅Bwの時系列変化

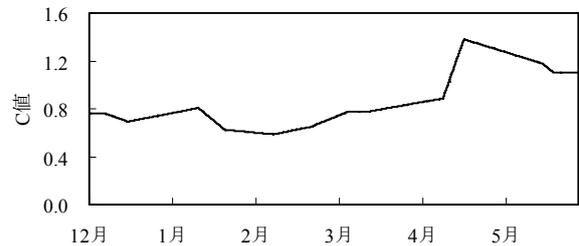


図-10 C値の時系列変化

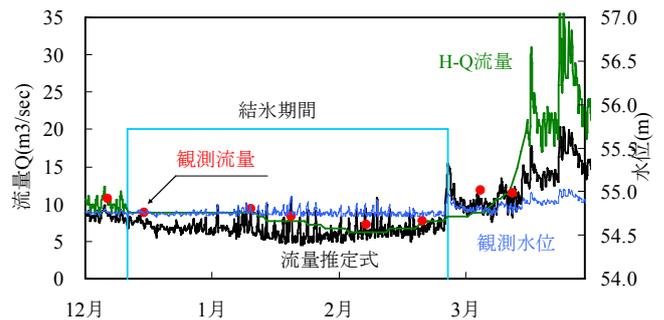


図-11 推定流量

up period)の流量を推定するためには、さらに検討を要
 する。この課題の解決のためには、新たな現地観測お
 よび観測データの解析を行う必要がある。また、本検
 討は、1河川、1シーズンを対象としているため、本
 手法の汎用性、有効性、適用条件を明らかにするため
 には、本手法を広く他の現場へ適用し検討を重ねる必
 要がある。

5. 現地観測機器の河水測定精度検証

現在の河川結氷時の流量観測は、月3回の間隔で実施しており、河水に穴を開けて水深や河氷厚、流速を測定する時系列的に断続的な観測である。近年の観測機器の発達によって、今まで不可能であった河氷下の流れや河氷厚の連続観測が可能になっている。

結氷時の観測は河床に機器を設置して、河氷底面方向に流向流速や河氷底面高を連続的に測定する必要がある。ここではまず、現地観測で使用する機器の河氷底面高の測定精度試験を、大型水槽を用いて実施した。

(1) 観測機器

河氷底面を測定する非接触機器は、SWIP、ADCP、音響測深機の図-12に示す3つの機器を選定した。SWIP(Shallow Water Ice Profiler, 546kHz, ASL Environmental Sciences社 546kHz)は、河床から水面方向に超音波を放射して、後方散乱強度から河氷底面や晶氷の集積などを測定する観測機器である。ADCP (Teledyne RD Instruments社 1200kHz)は、ドップラースフト量から流向流速を測定する機器であるが、目標からの距離と相対速度を計測するボトムトラッキング機能を有しており、河床から河氷底面に当てることで河氷底面高を測定しようとするものである。同時に、ADCPは設定層別の後方散乱強度の変化点から密度差を推定することができる。音響測深機(精密小型音響測深機, PS-20R型 200kHz, (株)カイジョー)は、通常、受信面を水面から河床に向けて音波を発信させて水深を測定する機器であるが、受信面を水面方向に向けて設置し、河氷底面を測定しようとするものである。

(2) 実験装置の構造

実験に用いた水槽の概要を図-13に示す。水槽の大きさは、実験に用いる氷板、晶氷の厚さ、計測機器の移動深度、ADCPの照射角 20° の音波が直接測壁面に当たらない間口サイズなどを考慮して高さ2.44m×幅2.00m×奥行き2.18m、容量 10.65m^3 とした。

①構造

使用材料は前面20mm厚の塩化ビニール板を使用し、水槽内の観察を容易にし、超音波の異常反響を防止するため、底面と側面には金属ではなく、木製の2.4cm厚の耐水ベニヤ合板を使用した。漏水対策として透明塩化ビニールシートを内貼りにし、水槽の外周は角材(105mm×105mm)で枠組みをして補強した。

②昇降装置

試験に使用するSWIP、ADCP及び音響測深機は水槽内の左右壁面のガイドレール沿いに電動ウインチで任意の水深に移動停止することが可能な架台に設置した。実験時には、電動ウインチにより規定深度に昇降移動



図-12 観測機器

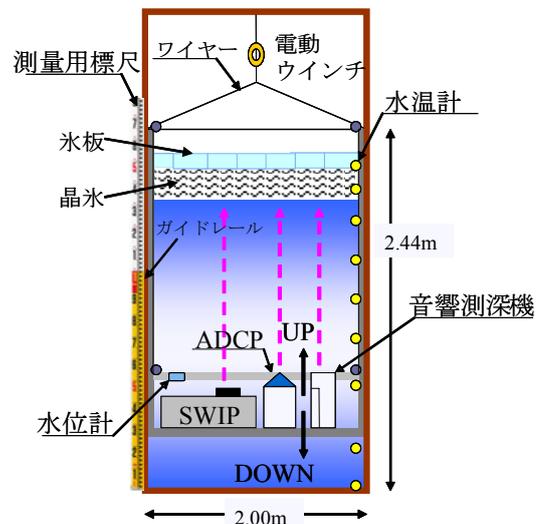


図-13 実験水槽概要

表-1 実験材料と作成方法

No	実験材料	作成方法
1	水	水道水をそのまま使用
2	氷板	50×30×15cmの板状の氷を数詰めて使用(密度: $0.966\text{g}/\text{cm}^3$)
3	晶氷	自然堆積している雪を使用(晶氷低密度: $0.375\text{g}/\text{cm}^3$)
4	氷板+晶氷	上記板状の氷(氷板)+自然堆積している雪(晶氷低密度)
5	氷板+晶氷(高密度)+晶氷(低密度)	上記板状の氷(氷板)+30×54×30cm箱に圧雪し重量が35kg以上になったものを使用(晶氷高密度: $0.492\text{g}/\text{cm}^3$)+自然堆積している雪(晶氷低密度)

して測定を行った。また、架台に水位計（株）ノースワンKADEC21-MIZU 精度 $\pm 2\text{cm} : 0.1\%F.S/20\text{m}$ ）を設置して、目視の機器深度の検証用とした。

③水槽内の実験環境管理

実験開始前には水槽内の水温を実河川に近づけるために、砕氷を投入して 4°C 以下とした。また、水槽水温は、超小型メモリー水温計（JFEアレック（株）MDS-MkV/T 精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ）を用いて、鉛直方向に底面から0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.75m, 1.0m, 1.25m, 1.5m, 2.0m, 2.4mの間隔で9個設置して実験環境の管理を行った。

(3) 実験条件

①実験材料

実験材料は、表-1に示すように、水、氷板、晶氷（低密度、高密度）を組み合わせた5条件で行った。

氷板は縦 $50\times$ 横 $30\times$ 厚 15cm の板状の氷を水面に隙間なく並べて設置した。晶氷（低密度）は自然堆積している雪を整形や圧縮せずに、水面下に約 40cm の厚さで設置した。氷板+晶氷は、上層に 15cm 厚の板状の氷を、下層に 40cm 厚の晶氷（低密度）の2層とした。氷板+晶氷（高密度）+晶氷（低密度）では、上層に 15cm 厚の板状氷を、中層に 40cm 厚の晶氷（高密度）を、下層に 40cm 厚の晶氷（低密度）を設置し、3層構造とした。なお、高密度の晶氷は $34\times 50\times 30\text{cm}$ の容器に雪を入れて締め固め、重量が 35kg 以上になったものを使用した。

②実験方法

機器の測定は、昇降装置を用いて、水深 $0\sim 2.0\text{m}$ の範囲を 0.2m 間隔で行った。SWIPは観測間隔を 1sec とし、 60 ピング、解像度（Gain） 1 で得た。ADCPの測定値は、高解像度のハイレゾリューションモード（WM8）、層厚 5cm 、ピング数 30 の設定で取得し、ボトムトラッキング（BM5）は 30 ピングで、ADCP後方散乱強度は、水深方向に 5cm 毎に水深 30db 以上の差を生じた層を境界として得た。音響測深機は後方散乱強度の自記紙を読み取り、水槽内の水温を用いて補正を行った。直接計測値は、水面、氷板の底面、晶氷の底面を測量用標尺によって目視で直接計測した。

(4) 実験結果

水槽内の水温は 1.3°C 程度で維持され、鉛直水温差、実験時間内における水温変化はなかった。また、昇降架台の水位計によると、平均 0.20m 毎の移動において、誤差の最大値は $\pm 0.02\text{m}$ であった。実験結果において、横軸に直接の測定値を取り、縦軸に各機器の測定値を取って、条件毎に図化したものを図-14に示す。水の場合は、SWIPと音響測深機が水面の直接計測値と一致するが、ADCPボトムトラッキングとADCP後方散乱強度は水面をとらえることができなかった。氷板はいずれの観測機器も直接計測値と一致しており、河氷底面が平坦な氷板の場合は、測定精度が高いことを示し

た。晶氷及び氷板+晶氷の場合はADCPボトムトラッキングとADCP後方散乱強度が直接計測値と一致しているのに対し、SWIPは 0.11m 程度、音響測深機は 0.25m 程度の誤差が生じていた。この原因として、最下層の晶氷（低密度）は自然堆積している雪を整形せずに使用しているため、晶氷底面に凹凸が生じ、直接計測している側壁付近とSWIPなどが測定している水槽中心付近の晶氷底面高に差が生じていた可能性が示唆される。ADCPはビーム角が 20° で拡がるため、直接測定する側壁付近に近い点を測定したことから直接計測値と一致したと推察される。また、晶氷と水の境界層付近の密度差や底面の凹凸による超音波散乱・吸収などが誤差要因になる可能性もあるが、現時点では不明である。しかし、いずれの機器も水深変化に対する測定値の差異は一定であり、標準偏差が各観測機器で $0.03\sim 0.04\text{m}$ 程度と小さいことから、測定精度は高いことが確認できた。河水や晶氷の密度の違いに関しては、各機器の測定値はどの密度でも河水最下層の底面を測定しており、晶氷密度の違いによる測定値の明確な差はみられなかった。また、超音波機器は送受信面と目標との距離が近いと受信できなくなる可能性があるが、本実験では最小 0.2m から測定が可能であることが示された。

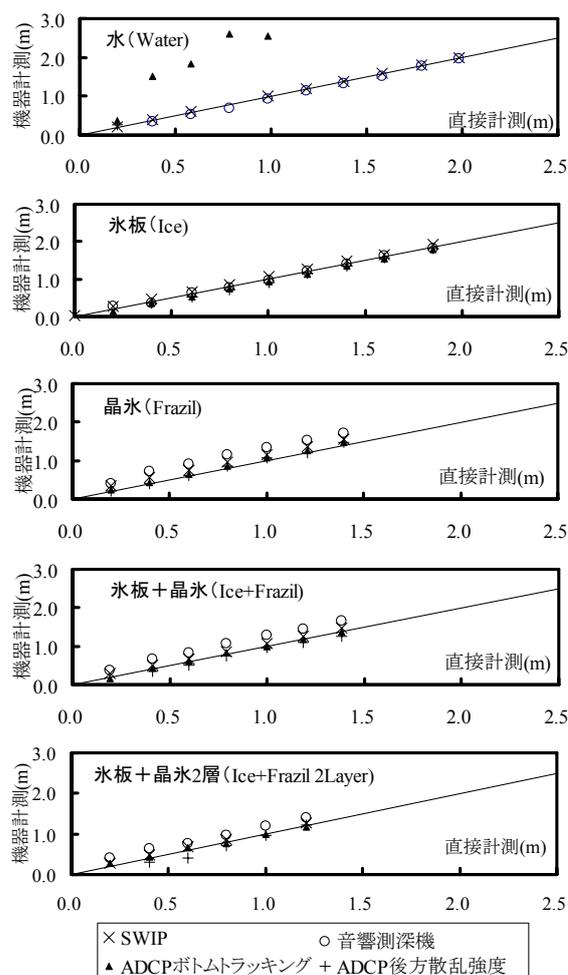


図-14 水槽実験検証結果

6. 河川結氷時の現地観測

水槽実験で各観測機器の特性と精度が確認できたことから、実河川における現地観測を行った。

北海道北部に位置する天塩川（流路延長256km、流域面積5,590km²）において、河口から111.70kmに位置する恩根内観測所で河川結氷時の現地観測を実施した。観測期間は、2010年12月から2011年2月である。

(1) 観測方法

河床にはADCP（Teledyne RD Instruments社）の1200kHzを図-15のように河床に上向きに設置して、10分インターバル、モード8のハイレゾリューションモード、30ピング/アンサンブル、水深0.1m間隔で測定した。結氷下の流水断面は、氷の発達とともに有効断面が変動する可能性があるため、できるだけ層厚を小さくする必要があることから、層厚0.1m以下の測定が可能なハイレゾリューションモードを使用した。ハイレゾリューションモードは高解像度で精度が高いが、高流速や流れの乱れに敏感で、測定不能になる場合がある。現地の流速は平常時でも1m/secを超えることや、結氷時の流れ河氷と河床に挟まれ、それぞれの凹凸形状によって乱れが生じやすいことから、ハイレゾリューションモードの中でも適応流速の範囲が1~2m/secまでと許容範囲が広いモード8を使用した。モード8は0.1m間隔で測定した場合、単ピング精度が5cm/sec以上であるが、1アンサンブルで発射するピング数を30ピングにまとめることで、誤差を1cm/sec以下（±0.94cm/sec）とした。

河氷底面高は、ADCPボトムトラッキング機能を用いて、河床から河氷底面までの距離を測定して求めた。測定はボトムトラッキングモード5で30ピング/アンサンブルで取得し、4つの送受信面で得られた平均値を用いた。ただし、ADCPから発射されたビームは20°の角度で拡がるため、直上の河氷底面はとらえられないことから、ビームが河氷に到達した面の4端の平均値とした。水槽実験結果によると、ボトムトラッキングは河氷の

最下層を構成する晶氷（Frazil）の底面をとらえることが示されており、水位とADCPのボトムトラッキングを併用することで、水面下の河氷厚の時系列変化が観測可能となった。

(2) 観測結果

恩根内観測所から15km上流に位置する美深（気象庁アメダス）の降雪量と気温、恩根内観測所のADCPによる鉛直流速の時系列変化とADCPボトムトラッキングによる河氷底面高と水位の変化を図-16に示す。

結氷初期の現象として、2011年1月5日5時に-20℃以下の気温となり、同日12時から急激に水位が上昇した。10hr後には1.0m、48hr後には2.0m以上の水位上昇がみられた。これは、-20℃以下の低温下で水表面から凍り始めた晶氷や氷片が上流から流下して集積し、河積が狭められたことによる水位上昇である。結氷直後から水面下の河氷厚は1.2m程度で一定の厚さを維持して推移している。これは、結氷後10日間の気温が-10℃以下で推移したため、滞留した晶氷や氷片が氷化して安定したと推察できる。この間の水位は、上流の岩尾内ダムの放流によって規則的に0.1~0.2m程度変動しており、河氷も連動して動いている。

流速は、1月後半から2月にかけて河氷底面と河床の流速（10cm間隔）

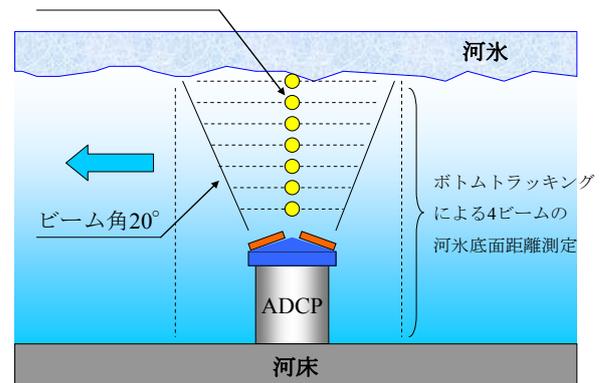


図-15 ADCPの河床設置

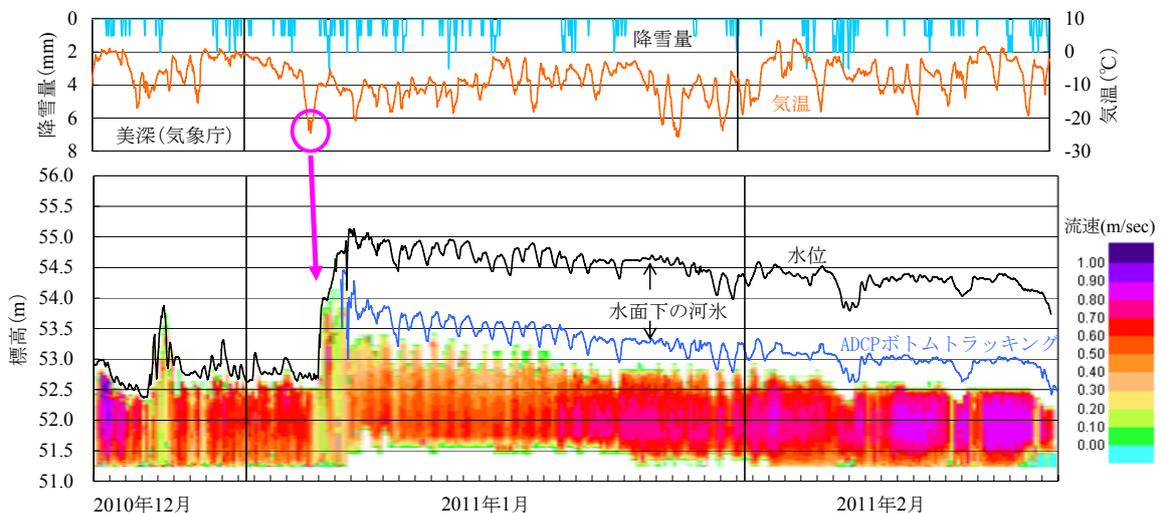


図-16 河氷および河氷下の流速分布時系列変化

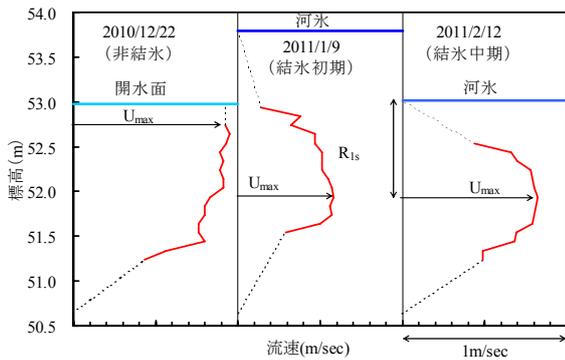


図-17 河氷下の流速分布

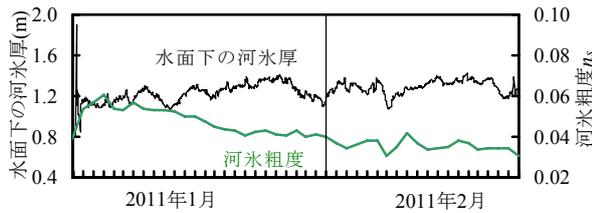


図-18 河氷粗度と水面下の河氷厚の時系列変化

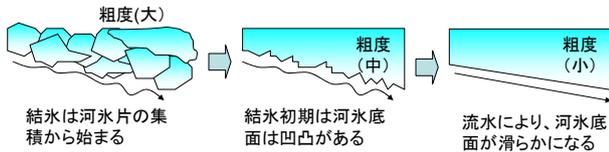


図-19 河氷粗度の変化概要

中間付近に早い流速分布が断続的に発生している。図-17にADCPにより得られた流速鉛直分布を示す。ADCPは河床付近と河氷付近が超音波の干渉により不感帯になるが、結氷前は水面付近に最大流速 U_{max} が発生し、結氷後は河氷と河床の中間付近に最大流速 U_{max} が発生する管路流に似た流速鉛直分布が観測された。

図-18に水位と河氷底面高の差で算出した水面下の河氷厚と河氷粗度の時系列変化を示す。

なお、河氷粗度は結氷下では粗度は河氷と河床の合成値であるが、河氷底面の粗度 n_s の時系列変化を、Manning式を用いて式(6)に示す。

$$n_s = n_0 \frac{u_0}{u_s} \left(\frac{R_{1s}}{R} \right)^{2/3} \quad (6)$$

n_0 [無次元] : 合成粗度 (ADCPによる鉛直平均流速と自記水位計による恩根内観測所と下流の恩根内橋の水面勾配から算出), u_0 [m/sec] : ADCPの鉛直平均流速, u_s [m/sec] : 河氷底面から最大流速地点 (U_{max}) までの平均流速, R_{1s} [m] : 河氷底面から最大流速地点 (U_{max}) の径深 (≒距離), R [m] : 径深 (≒河氷底面から河床までの距離)

水面下の河氷厚は結氷直後から1.2m程度で変化は少なく、比較的安定して推移している。これに対し、河氷粗度は結氷直後に高いが、時間の経過とともに低下

傾向がみられた。水面下の河氷厚が変化せずに河氷粗度が時間経過とともに低下する要因は、図-19に示すように、結氷直後は河氷片の集積で河氷底面の凹凸が多いが、河氷底面を構成する晶氷は柔らかいことから、流水や河氷下に潜り込んだ氷片の滑走によって、河氷底面が研磨、融解されることに起因していると推察できる。

6. 河川解氷時の現地観測

対象河川は北海道北部に位置する天塩川の河口から30kmに位置する円山観測所で、観測期間は結氷後から解氷後までの2009年12月から2010年3月とした。

(1) 観測方法

観測機器は、晶氷の集積を観測するために河床にSWIP (ASL Environmental Sciences社 546kHz) を、河氷下の流況と河氷厚の変化および解氷時の河氷の移動速度を観測するためにADCP (Teledyne RD Instruments社 1200kHz) を、河氷底面高の測定に音響測深機 (株) カイジョー PS-20R) を設置した。また、量水標H型鋼の上に光波位相差検出式積雪深計 (新潟電機 (株)) を設置し、河氷上面である雪面高を得た。陸上部には風向風速計と気温計 (株) MCS) , 機器設置断面と上下流100m, 200m地点に自記式水位計 (光進電気工業 (株) MC-1100) と自記式水温計 (JFEアレック (株) COMPACT-CT) を設置した。

(2) 観測結果

図-20に降水量、風向風速、気温水温、SWIPによる河氷と晶氷コンター、ADCPによる河氷下の鉛直流速コンター、河氷移動速度を示す。SWIPの最大散乱強度の上面は、ADCPボトムトラッキング、音響測深機で得られた河氷底面高と一致しており、水位と同位相で変動している。図中の点枠内は、解氷初期を示し、2010年2月24日7時~25日15時の32時間で気温が-12.6°Cから+10.7°Cへと急上昇し、2月25日20時~26日6時に累計30mmの降雨が観測された後、水位の急激な上昇と流速の増加、河氷の移動が発生している。解氷初期 (2010年2月25日~3月5日) の詳細を図-21に示す。ここで、河氷厚は雪面高から河氷底面高までの厚さを示す。水位と流速は同時に上昇し始め、水位は5cm/hrで、流速は0.4m/secから0.8m/secへと上昇する。図-21①では、流速のピーク後に河氷が動き出し、河氷底面に晶氷等の集積がみられる。これは、上流から砕氷・晶氷が流下し、河氷底面に潜る現象と推察される。その後、流速は減少し、水位は1.3m程度上昇してピークとなる。流速と水位のピークは約24hrの時間差が生じている。これは、河氷の集積や氷詰まりによって、水位が上昇し、背水影響によって流速が減少する現象と推察できる。また、

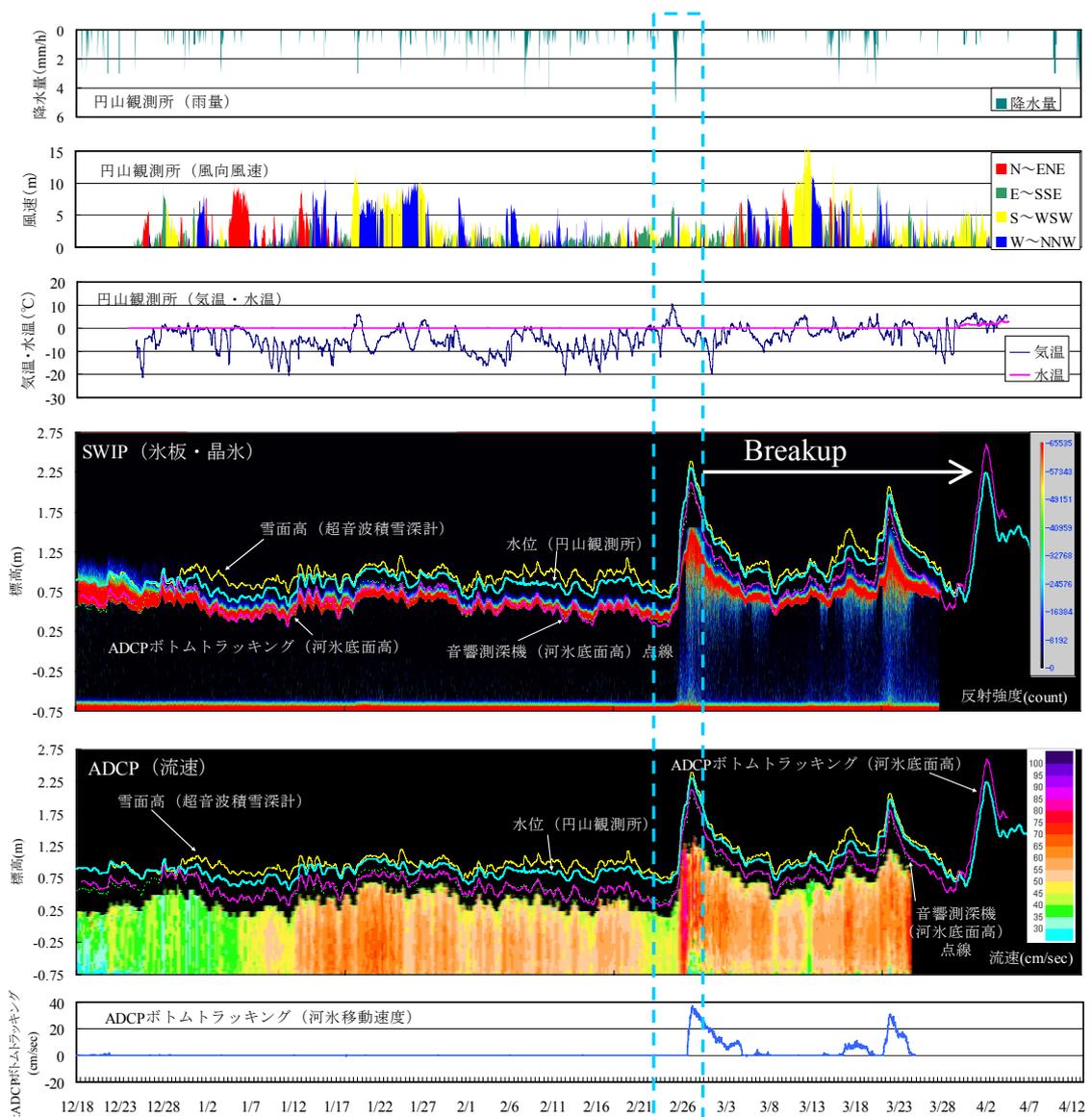


図-20 気象，河氷厚変動とSWIP散乱強度コンター，ADCP流速分布コンター，河氷移動速度

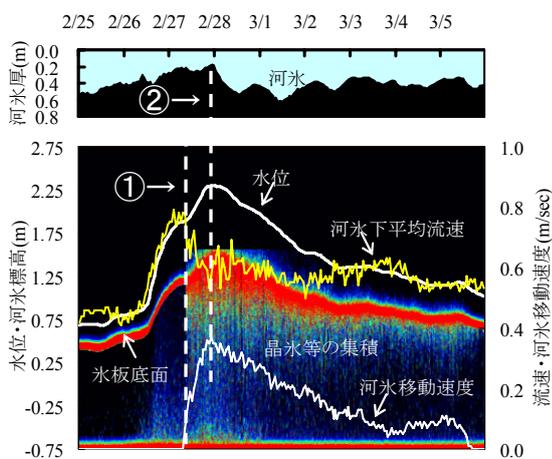


図-21 解氷時の河氷挙動と水理条件

図-21②では，河氷移動速度（最大0.4m/sec）のピークと水位ピークが合致し，河氷厚が最も薄くなることか

ら，流速，水位変化や，河氷底面と流下する砕氷・晶氷との接触により，河氷破壊が発生している現象と推察できる。

ADCPボトムトラッキングで得られた河氷の移動速度と水位およびADCPの有効水深の平均流速の関係を図-22，図-23に示す。河氷の移動速度は水位，流速と一義的な相関がみられた。河氷の移動速度と無次元掃流力との関係を見るために，Shen⁸⁾らにより研究された晶氷の移動量と無次元掃流力の関係を参考に，晶氷粒径 d を河氷厚と置き換えて検討を行った。Shen⁸⁾らによる式(7)，(8)に示す。

$$\Theta = \frac{U_*^2}{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)} \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{q_{ice}}{d \sqrt{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)}} \quad (8)$$

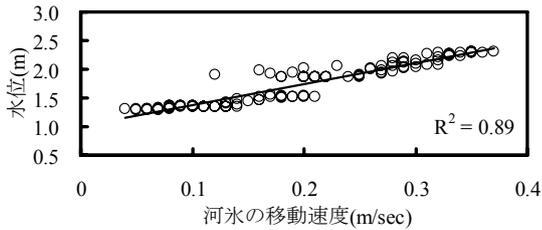


図-22 河氷の移動速度と水位の関係

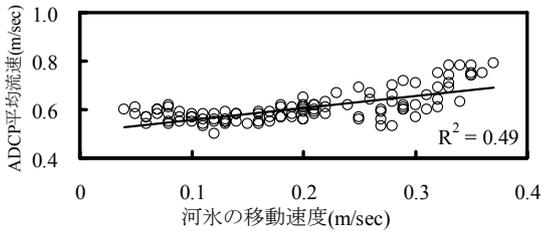


図-23 河氷の移動速度と流速の関係

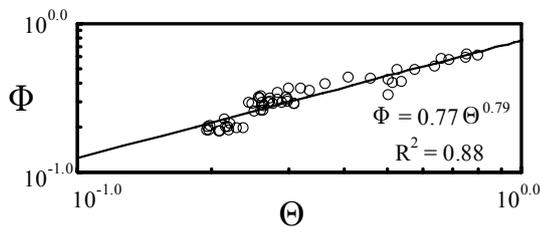


図-24 河氷の移動と掃流力の関係

U_s [m/sec]: 摩擦速度 ($U_s^2 = \sqrt{gRI}$), g : 重力加速度,
 d : [m]河氷厚, ρ [g/cm³]: 水の密度,
 ρ_{ice} [g/cm³]: 河氷の密度, R : 径深 (≒有効水深2),
 I : エネルギー勾配≒水位勾配である.

本検討では, ρ は1g/cm³, ρ_{ice} は2010年2月25日の実測値より0.8g/cm³とした. ここで, q_{ice} =河氷の移動速度 (V_{ice})×河氷厚(d)として, 式(8)に代入すると式(9)となる.

$$\Phi = \frac{V_{ice}}{\sqrt{(gd(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho}))}} \quad (9)$$

図-24より無次元河氷移動速度 Φ と無次元掃流力 Θ は相関が得られており, べき乗近似式で関連づけられる. これより, 解氷時の河氷の輸送能力は, 河床物質輸送と類似した概念での検討が可能であることを示している.

6. まとめ

河川結氷時の流量観測の現状と課題を整理した.

(2012.9.10受付)

連続的に流量を推定する式として, 新しい河川結氷時の流量推定式(結氷H-Q式)を示した. 本式は, 流水面積 A_o , 水面幅 B_w , C 値から連続的に流量を推定でき, 開水時の H-Q 式に依らず晶氷(モロミ)が滞留している地点においても適用可能であり, 現行の観測

資料のみで流量を推定することが可能である. 河川結氷時のみを対象としているものの, 渇水等による被害のない持続的発展が可能な水活用社会の実現に向けた社会的ニーズに応えた技術であり, コスト低減を考慮して現行の観測資料のみで流慮を推定することが可能であり, かつ従来手法と比べて推定精度が高いため, 今後の汎用性が期待される.

現地観測も河床設置のADCPやSWIPを利用することで, 河氷厚や河氷下の流速分布の連続観測が可能となった. これより, 結氷初期や解氷期に発生する上流から流下する河氷の詰まりによる急激な水位上昇や氷厚の変化, 晶氷の集積, 解氷時の氷の流下など, 特徴的な水理現象を把握することができた. 観測機器の高度化は, 今まで得られなかった多くの知見を得ることから, 現行の流量観測手法の検証および, 流量精度向上に向けた基礎資料として今後の活用が期待される.

謝辞: 本研究は北海道開発局旭川開発建設部より資料提供のご協力を頂きました. ここに記して謝意を表します.

7. 参考文献

- 1) 山下彰司, 井出康郎, 堺茂樹: 寒冷地河川の氷板下の流速分布の推定, 水工学論文集, 第40巻, pp.65-70, 1996.
- 2) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 平井 康幸: 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 土木学会, 水工学論文集, 第54巻, pp.1075-1080, 2010.
- 3) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 清治真人: 氷板下における晶氷厚の連続測定, 土木学会, 水工学論文集, 第53巻, pp.1027-1032, 2009.
- 4) 橋場雅弘・吉川泰弘・渡邊康玄: 結氷河川におけるSWIPを用いた河氷の晶氷厚の測定, 土木学会, 河川技術論文集, 第16巻, pp.271-276, 2010.
- 5) 橋場雅弘・吉川泰弘: 天塩川における河川解氷時の河氷の挙動に関する現地観測, 土木学会, 河川技術論文集, 第17巻, pp.365-370, 2011.
- 6) 吉川泰弘・渡邊康玄・早川博・平井康幸: 結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.1, 21-34, 2012
- 7) 橋場雅弘・吉川泰弘: 超音波測定機器を用いた河川結氷時の河氷底面形状の現地調査, 土木学会, 河川技術論文集, 第18巻, pp.149-154, 2012.
- 8) H.T.Shen・D.S.Wang: Undercover Transport and Accumulation of Frazil Granules, Journal of Hydraulic Engineering, vol.121, No.2, pp.184-194, 1995.

各種河川流速観測手法に関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON RIVER FLOW VELOCITY OBSERVATION TECHNIQUES

江蔵 拓¹・笹川 幸寛¹・手計 太一²
Taku EZO, 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 正会員 博(工) 富山県立大学講師 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

In this study, using existing river flow observation equipment and techniques, river flow data were compared in various river scales (Idagawa River, Zinzu River and Kurobe River) in Toyama. The following river flow observation equipment and technique were used for this study; ADCP, Price type current meter, Radio current meter and the float method. As a result, strong points and weak points of the above mentioned river flow observation equipment and technique were clarified. According to river condition, ability of each river flow observation equipment and technique was reported.

Key Words : ADCP, Radio current meter, float, Price type current meter, Idagawa River
Zinzu River, Kurobe River, Toyama Prefecture

1. はじめに

河川の流量や流速を知ることは、治水計画のみならず水資源計画の中で極めて重要である。洪水災害を未然に防ぐためには、過去の流量や流速のデータは必要不可欠である。適切な対策を行うためにも、長期間に渡る正確なデータの蓄積とその解析が必要である。しかし河川の流量観測を行う際、きめ細かな正確なデータを採取するのは容易ではない。

現在、洪水時の流量を計測するため、浮子観測¹⁾が広く用いられている。浮子観測は他の観測手法と比べ、安全且つ簡易的に行え、一定の精度を保って観測が可能である。また、河川に大量のごみや浮遊物があっても安全に計測出来る利点がある。しかしながら浮子観測は、更正係数の妥当性^{2), 3)}や浮子の投入した場所による誤差の違い、また僅かな計測区間の違いによる流速の差異など様々な問題点がある。昨今では最新の技術を利用した流量観測方法が提案されており、状況に応じた観測手法の選択の必要性が迫られている。近年では、既往の知見から状況に応じた各手法の評価がされている⁴⁾。

現業において、浮子観測だけを洪水流量観測の中心に採用するのではなく、時空間スケールや状況に応じた観測手法を採用すべきである。近年、流量観測手法の1つとして ADCP^{5), 6)}(Acoustic Doppler Current Profilers)を利

用した観測方法が研究されている。ADCPは、これまでの浮子観測では計測出来ない緻密な横断面の流速や、鉛直分布の流速の計測が可能である。他にもブライス式流速計や電波流速計^{7), 8)}を用いた流速観測手法があり、それぞれの機器固有の性質がある。電波流速計は非接触であるため観測中におけるトラブルが少なく、連続したデータの採取が可能であるが、ある一点の表面流速しか測定できない。また、波立たないと計測値が得られないため、河川表面の状態に依存する欠点がある。ブライス式流速計⁹⁾は、流れに対して水平面内に角度のずれが生じても大きな流速測定誤差を生じないといった利点があるが、ある一点の流速値しか得られない。

以上のように、いずれの機器、手法にも長所と短所があるため、浮子観測のみに依存するのではなく、それぞれの流速測定機器の適性を活かした流量観測を実施すべきである。そのためには、既存の機器や手法を詳細に比較し検討しなければならない。

そこで本研究では、富山県内の様々な河川スケール(井田川、黒部川、神通川)において、既存の流速測定機器や手法の比較検討を行った。本稿では、各種の流速測定機器の長所や短所を比較し、状況に応じた流速観測の手法の検討結果を報告する。

2. 観測手法

表-1 ADCPの計測設定条件.

	井田川観測 (1,2回目)	神通川観測	黒部川観測
計測モード	12	12	12
Mode 12 Sub-Pings	30	8	30
計測層厚	0.1m	0.1m	0.1m
計測層数	25	40	25
アンサンブルタイム		1.94 sec	
アンサンブル インターバル	10 sec		10 sec
ウォーターピング数	7	3	7
ボトムトラック数	on	on	on
ボトムピング数	7	3	7
固定観測における流速 誤差の標準偏差	2.15 cm/s	6.35 cm/s	2.15 cm/s
計測コーディネーション	アース コーディネート	アース コーディネート	アース コーディネート



写真-1 ADCP観測の様子.

本研究では河川流速観測を行うに当たって、4つの流速測定機器を使用した。観測機器は、(1)ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), (2)プライス式流速計, (3)電波流速計, (4)浮子(表面, 吃水 30cm, 吃水 50cm)を使用した。それぞれの機器の概要と設置方法, 人員配置や観測時に工夫した点を以下に示す。

(1) ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)

ADCP(超音波ドップラー多層流向流速計)は Teledyne RD Instruments 社製を使用した。ADCP は水中に超音波を発信し、そのドップラー効果を利用して流速を計測する機器である。これを2台使用した。ADCP を専用のボートに取り付け、1台は本体のメモリに記録する設定で橋の欄干からロープで吊るし定点を継続的に計測した。もう1台を遠隔で操作・記録できる設定で、橋上で観測者がロープを持ち横断することで河川の横断断面の流速を計測した。全ての場所でのこの方法を採用した。ADCPの計測条件を表-1に示し、観測風景を写真-1に示す。

(2) プライス式流速計



写真-2 本研究に使用したプライス式流速計.



写真-3 欄干に設置した電波流速計の様子.

プライス式流速計は神山製作所(株)製を使用した。設置方法は河川の6割水深の位置で測定した。20秒間のプロペラの回転数から計測された流速値を20秒ごとの平均流速値として記録した。本研究に使用したプライス式流速計の適用範囲は0.03~6.00m/sである。写真-1のように橋上からロープで吊るし、事前に測量した6割水深の位置で固定した状態で流速観測を行った。設置後の作業は、プライス式流速計の稼働の確認、また付属のデータロガーの性質上、20秒に1回、計測ボタンを押す必要がある。そのため、観測中の人員配置は1人で十分であった。

(3) 電波流速計

電波流速計は横河電子機器(株)製を使用した。電波流速計は河川の波の動きを電波でとらえ、表面流速を測定するものである。俯角は観測場所に応じて40°~45°として、1秒毎の流速を測定した。本研究に使用した電波流速計の照射距離の適用範囲は20m程度である。作業準備の手法は、写真-3のように電波流速計を橋の欄干に設置した。観測自体は自動に計測するので、設置時以外の人員配置は必要なかった。

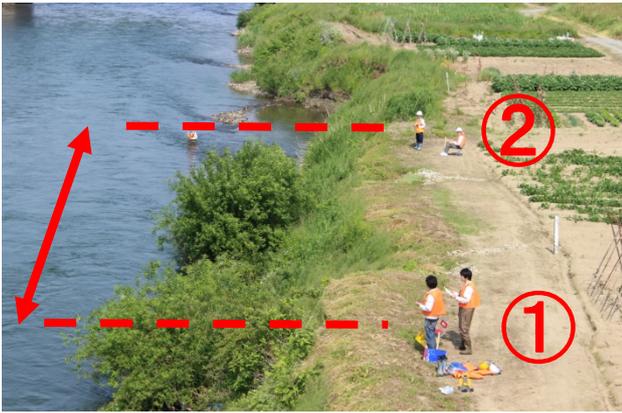


写真-4 浮子観測の様子.



写真-6 高田橋(井田川)の様子.



写真-5 神通峡(神通川)の様子.



写真-7 新川黒部橋(黒部川)の様子.

(4) 浮子

本研究では、表面、吃水 30cm、吃水 50cm の 3 種類の浮子を使用した。計測区間は場所に応じて 30~50m に設定し、その間に浮子が移動する時間を計測した。その様子を写真-4 に示す。また、大雨や台風時など無線でのコミュニケーションが困難な場合を想定し、3 種類の旗を製作し、無線と併用した。例えば表面の浮子を投下する時は赤色の旗で合図を送り、吃水 30cm の浮子を投下する時は黄色の旗で合図を送るという要領で行い、観測ミスの軽減に努めた。また、本観測においては、橋上から浮子投下要員、断面 1 を通過したと伝える観測者、断面 2 を通過した事を確認して時間を測る観測者、以上の 3 人の人員を必要とした。本研究は流速機器の比較を行う事を目的としているため、浮子は全て主流速付近に投下した。

3. 観測場所

富山県内の河川は国内屈指の急流河川である。本研究では、富山県内の 3 か所で計 4 回の観測を行った。1 回目と 2 回目は井田川の高田橋で観測を行い、3 回目は神通川の神通峡で観測を行い、4 回目は黒部川の新川黒

部橋で観測を行った。それぞれの河川と観測場所の概要を以下に示す。

(1) 神通川

神通川は、北陸地方の代表的な河川の 1 つであり、古くから氾濫が度々起きていた歴史ある一級河川である。神通川は源流を宮川として、県境で高原川と合流し、富山県内で神通川と名を変える。流域面積は 2720km²、流路延長は 120km、年平均流量は 183m³/s である。流域面積、年平均流量は、富山県第一である。また、神通川の河床勾配は、源流から小鳥川合流地点までの上流部が約 1/20~1/150、小鳥川合流地点から神三ダム地点までの中流部が約 1/150~1/250 であり、我が国屈指の急流河川である。神通川における観測の様子を写真-5 に示す。

神通川観測は、神通川中流域の神通峡という橋で行った。川底から橋の欄干までの高さは 30.40m である。川幅は 149.50m、水深は 3.50m であった。観測時の概算流量は 1570m³/s である。

(2) 井田川

井田川は、岐阜県及び富山県を流れる神通川水系左支川の一級河川である。岐阜県の白子峠を源とし、富山県富山市を横断して、神通川左岸に合流する。流域面積は 435.8km²、流路延長 44.9km である。井田川における観測

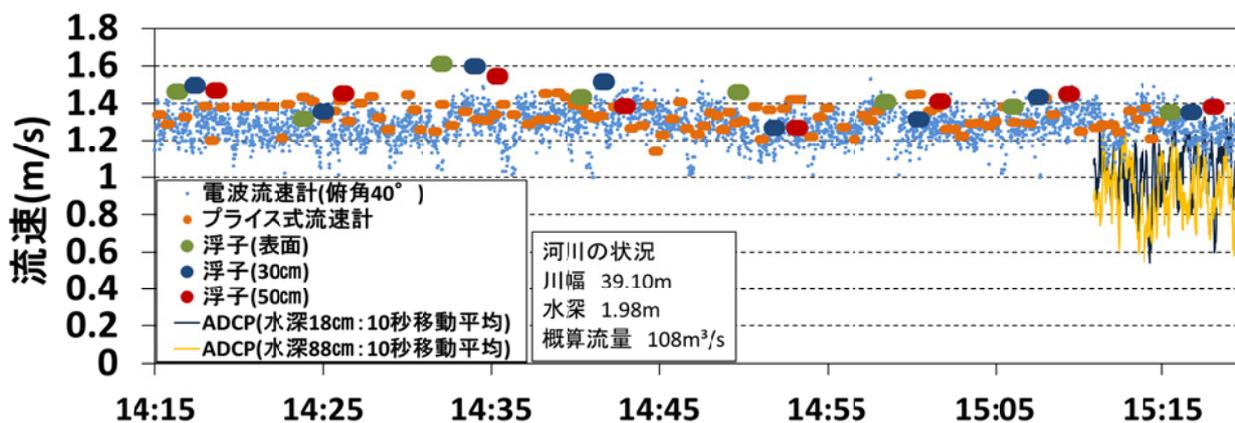


図-1 第1回目の井田川におけるADCP，プライス式流速計，電波流速計，浮子による流速値の経時変化。

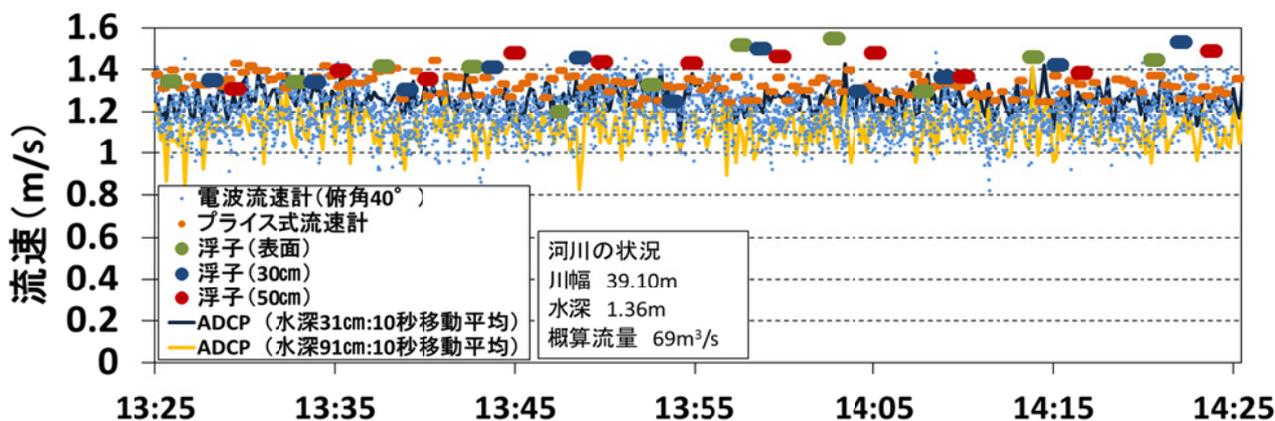


図-2 第2回目の井田川におけるADCP，プライス式流速計，電波流速計，浮子による流速値の経時変化。

の様子を写真-6に示す。

井田川観測は、富山市内に位置する高田橋で行った。川底から橋の欄干までの高さは 13.30m であった。川幅は 39.10m，第 1 回目の観測時の水深は 1.98m，第 2 回目の観測時の水深は 1.36m であった。第 1 回目の観測時の概算流量は 108m³/s，第 2 回目の観測時の概算流量は 69m³/s であった。

(3) 黒部川

黒部川は富山県東部に位置する一級河川水系の1つであり、河床勾配が1/5～1/119という我が国屈指の急流河川である。富山県と長野県の県境の鷲羽岳を源とし、立山連邦と後立山連邦の間を流れ富山県黒部市愛本に至り、その後は黒部川扇状地を流下する。流域面積は682km²，流路延長は85km，流域の土地利用は、97.1%が山地であり、その他が水田，畑地，宅地等に利用されている。黒部川における観測の様子を写真-7に示す。

黒部川観測は、黒部川下流域の新川黒部橋という橋で行った。川底から橋の欄干までの高さは、15.30m である。川幅は 22.80m，水深は 1.41m であった。観測時の新川黒部橋の概算流量は 122m³/s である。

4. 観測結果

図-1, 2, 3, 4 は 4 回実施した流速観測の結果である。また、図-5 は図-3 の拡大図である。

全体的な傾向として、井田川と黒部川では浮子の流速値は他の流速機器と比較して大きい傾向にある。

特に、黒部川における浮子観測では、得られた流速値の最大値と最小値の差が約 1m/s あった。この幅は他の流速測定機器と比較すると非常に大きい事が分かる。この要因の一つとして、黒部川の水面が大きく波立っていることが挙げられる。波の変動が激しい黒部川では、波の窪地に浮子が入り、河川の流れに乗っていない可能性がある。また、波の窪地に浮子が隠れるため、観測者が測り辛い状況であった。

電波流速計による計測結果は、1 回目の井田川観測の流速値は 1.2～1.4m/s，2 回目の井田川観測の流速値は 1～1.4m/s，黒部川観測の流速値は 3.2～3.8m/s であった。いずれの観測においても、比較的安定した流速値を示した。

プライス式流速計による計測結果は、1 回目の井田川観測の流速値は 1.2～1.5m/s，2 回目の井田川観測の流速値は 1.2～1.4m/s，神通川観測の流速値は 1～1.4m/s，黒

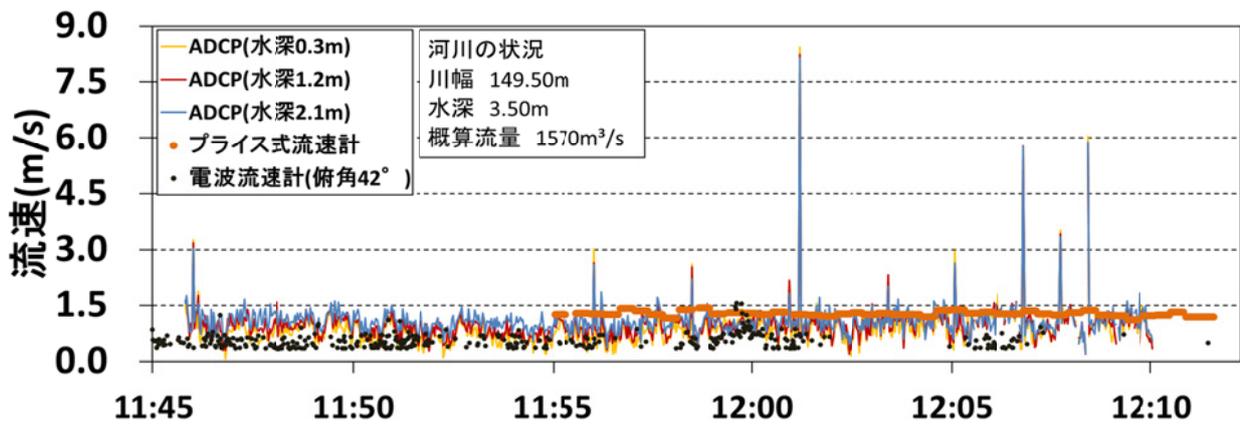


図-3 神通川におけるADCP, プライス式流速計, 電波流速計, 浮子による流速値の経時変化.

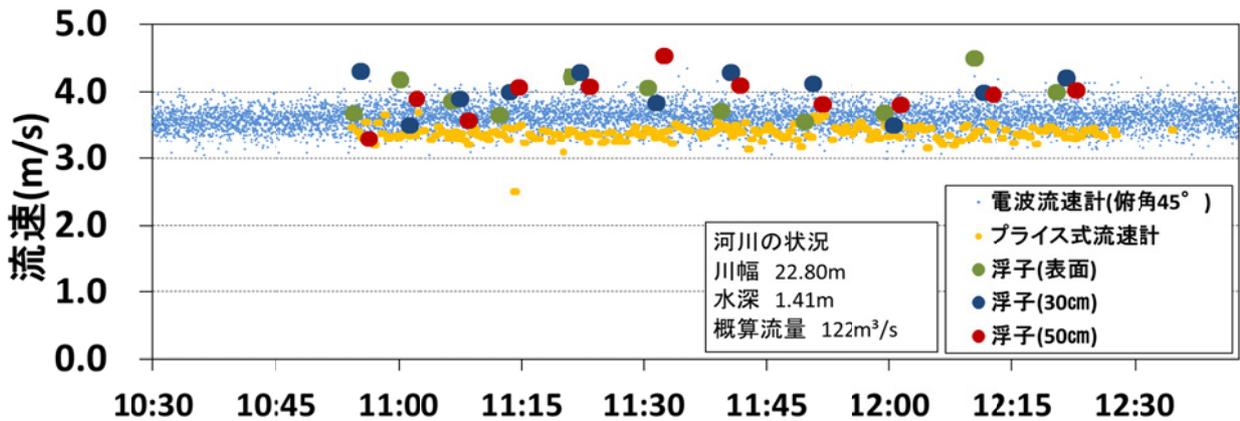


図-4 黒部川におけるADCP, プライス式流速計, 電波流速計, 浮子による流速値の経時変化.

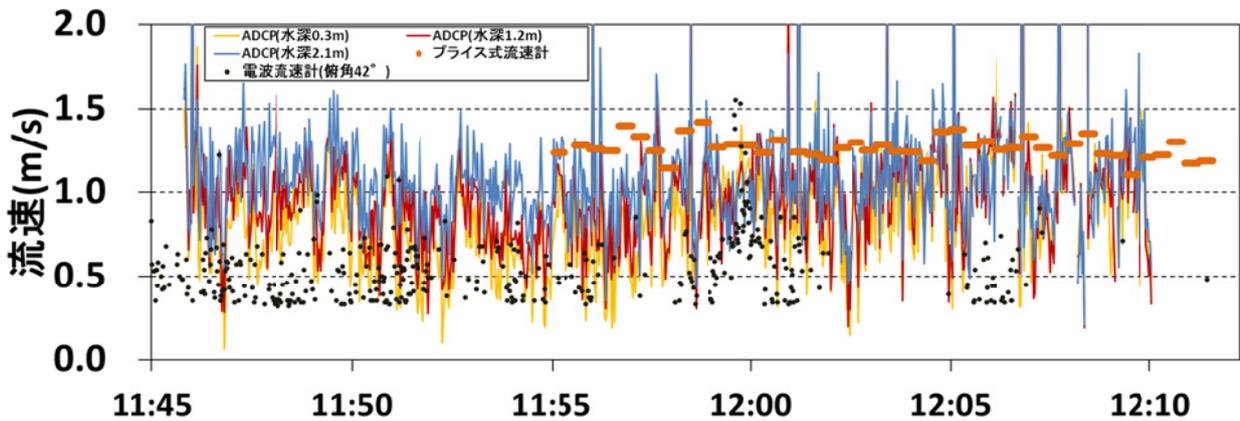


図-5 神通川観測におけるADCP, プライス式流速計, 電波流速計, 浮子による流速値の経時変化の拡大図.

部川観測の流速値は 3.2~3.6m/s であった. 同様に, 比較的安定した流速値を得ることができた.

ADCP による計測結果は 2 回目の井田川観測の流速値は 0.8~1.4m/s 程であった. 他の流速機器と比べデータの幅が大きい事が分かる. また ADCP による観測結果は, 代表流速として, 水深 31cm と 91cm の流速を比較すると, 水深 31cm の方が水深 91cm の位置よりも流速値が高い値を示した.

5. 考察

図-6 は浮子観測と電波流速計による流速値の比較である. それぞれを比較すると, 浮子による流速値の方が電波流速計による流速値より平均して約 13%大きい.

図-7 は浮子観測とプライス式流速計による流速値の比較である. 浮子による流速値の方がプライス式流速計による流速値より平均して約 9%大きい.

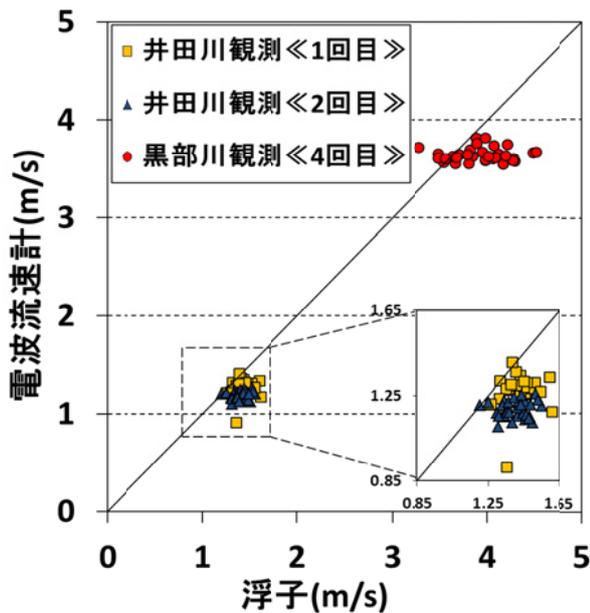


図-6 浮子による流速値と電波流速計による流速値の関係.

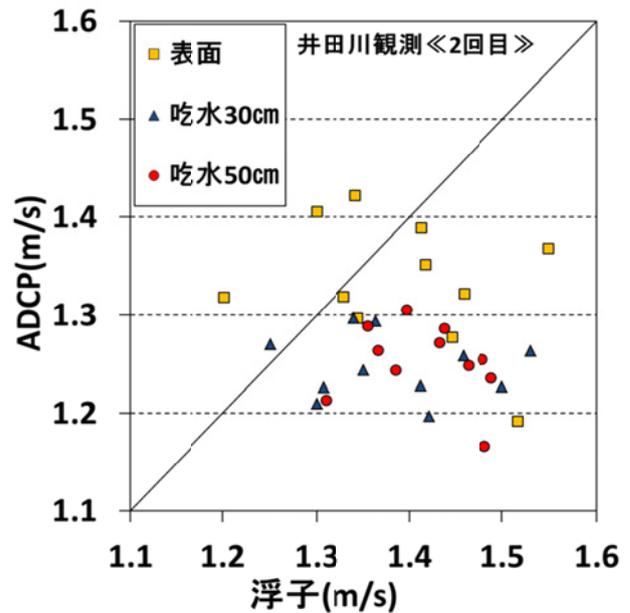


図-8 浮子による流速値とADCPによる流速値の関係.

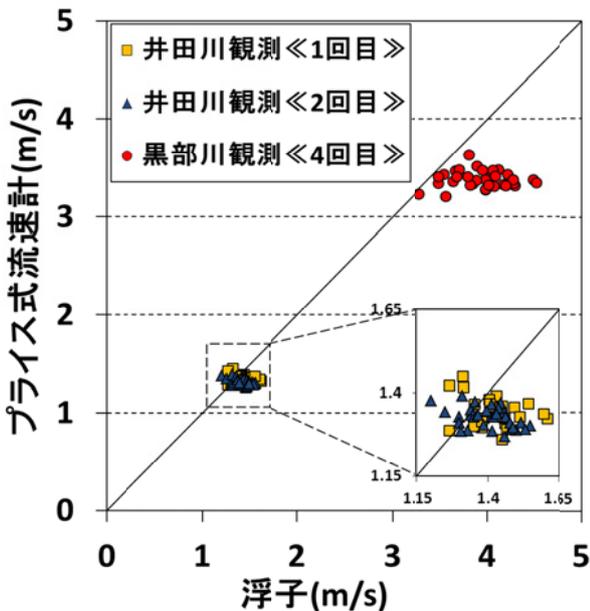


図-7 浮子による流速値とプライス式流速計による流速値の関係.

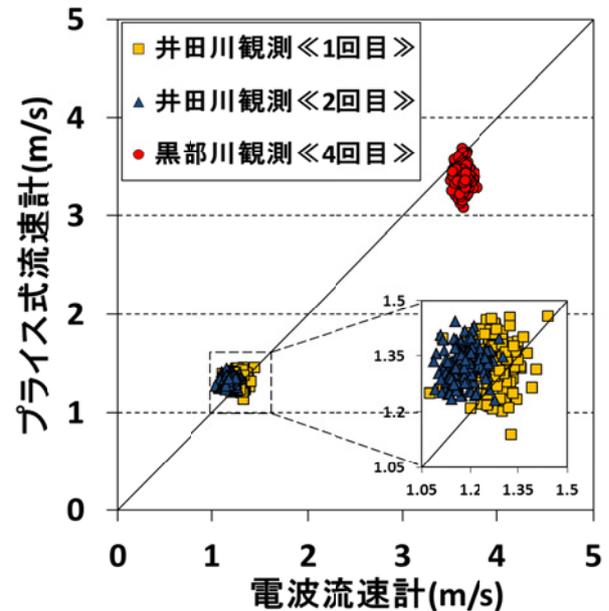


図-9 電波流速計による流速値とプライス式流速計による流速値の関係.

図-6, 図-7 より, 浮子観測は電波流速計とプライス式流速計のいずれと比較しても約 10%大きな流速値が観測された。

図-8 は浮子観測と ADCP による流速値の比較である。表面, 吃水 30cm, 吃水 50cm の水深別による定量的, 定性的な相違や傾向は認められない。また, 浮子による流速値の方が ADCP による流速値より平均して約 9%大きい。

図-9 は電波流速計とプライス式流速計による流速値の比較である。データの幅が狭い事から, どちらも安定した観測値が得られていることがわかる。しかし黒部川

観測において, 電波流速計とプライス式流速計を比べた場合は, プライス式流速計の方がデータの幅が約 2.1 倍広く, この点から考えても電波流速計が最も安定した流速値を示している事が分かる。しかし, 両者から得られる流速値の水深が異なるため, 単純に比較することはできない。

図-10 は ADCP とプライス式流速計による流速値の関係である。ADCP の流速値は, プライス式流速計を設置した 6 割水深と同じ位置のデータを利用した。この図から, プライス式流速計による流速値の方が ADCP による流速値より 17%程度大きい値を示している。

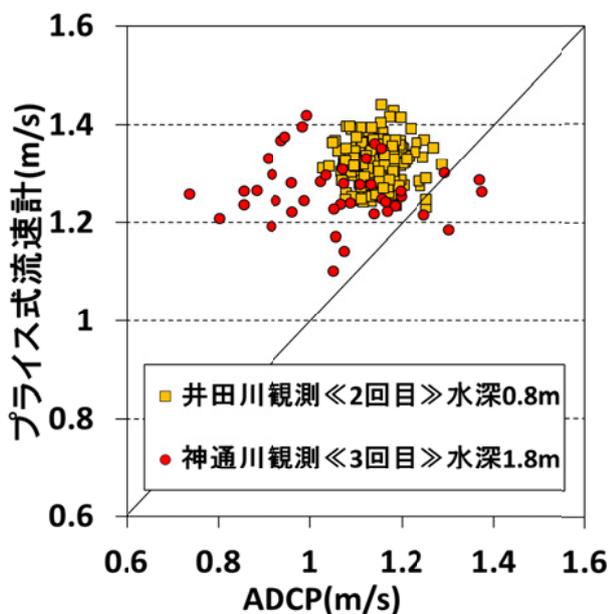


図-10 ADCPによる流速値とプライス式流速計による流速値の関係。

図-11はADCPと電波流速計による流速値の関係である。ADCPから得られる鉛直方向の流速成分から2次曲線を利用して表面流速を推定した。この図から、ADCPによる流速値の方が電波流速計による流速値よりも約11%大きい値を示している。

6. 流量観測における失敗談

1回目の井田川観測では、取り付け時と回収時の数分間のデータしか取得できなかった。これはADCPの設置時、ADCPとボートを欄干から下ろす際に、どこかにスイッチが接触したためだと考えられる。内臓メモリに記録する場合には、モニタリングできないため、気をつけなければならない。

神通川における小さな出水中の観測では、高濁度もしくは水中の気泡の影響が原因で観測データを取得することができなかった。ADCPを高濁度でも計測できる設定に変更したものの、計測することができなかったことから、主な原因は気泡の影響ではないかと推察される。また、樹木が1本丸々流れてきて、観測中のADCPのボートがそれに乗って横転するという事故も発生した。

黒部川では、流速が大きく、河床には大きな岩がたくさん点在していた。そのため黒部川のいたる所で水面が竜の背のようにならねっていたのでボートの揺動が大きくなり、継続的な計測データを取得することが難しかった。また、流速が大きく揺動が大きかったためボートの接続部が耐えられずアルミの部分に亀裂が入り曲がってしまうという事態も起きた。その様子を写真-8に示す。しかし、これは高流速用観測艇を導入することで改善で

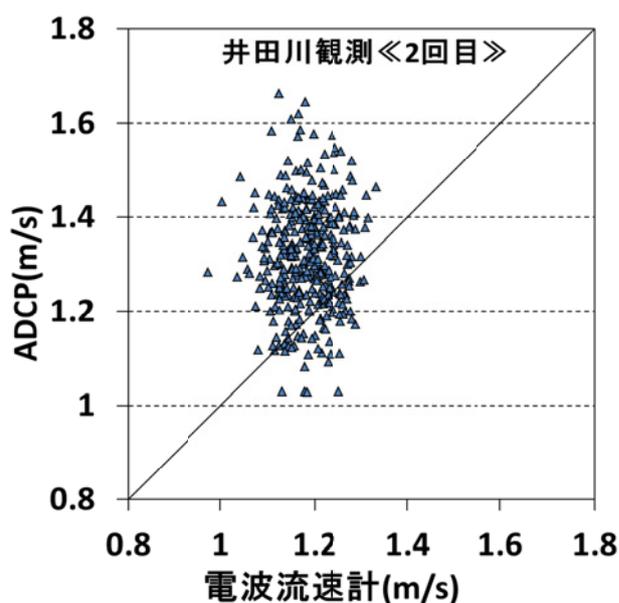


図-11 電波流速計による流速値とADCPによる流速値の関係。

きるであろう。

電波流速計の適用照射距離が20m程度のため、橋上までの高さが30mを超える神通峡では、正確なデータを取得する事は出来なかった。

プライス式流速計に関しては、流速が3m/sを超える状況で使用すると6割水深の位置を保つことが出来ず、河川表面付近まで上がってしまうため、表面流速を計測せざるを得ないのが実情である。また、洪水時は流木、草木やゴミなどが流れてきて、プロペラに絡まり、データを取得する事が出来なかった。その様子を写真-9に示す。他にも、流速が大きい時はプライス式流速計にかかる流体力が大きくなるので、配線が切れやすい事が多かった。このような点からプライス式流速計は、事前の準備が大変重要であった。

浮子観測では、前章で述べた通り、波のうねりが激しい場所では浮子を見失う事が多くあり、観測値に影響を与えていたと考えられる。

7. おわりに

既存の流速機器・観測手法を比較検討するため、様々な実河川スケールを対象に、各種機器・手法を同時に利用して、河川の流速観測を行った。

その結果、それぞれの観測機器・手法の長所・短所を明らかにすることができた。

ADCPは、鉛直方向の流速成分を時間分解能も細かく計測できる大きな利点がある。しかし、神通川では、洪水時の高濁度や気泡による欠測の問題が発生し、安定したデータの取得が出来なかった。流速が大きかった黒部



写真-8 亀裂が入りねじ曲がったADCPの様子。



写真-9 プライス式流速計に草木が絡みつく様子。

川ではADCPが波のうねりによってボートが大きく揺動してしまい、データのばらつきが生じた。黒部川のように流速が大きい場合は、高流速用の観測艇を導入する必要がある。

プライス式流速計は、安定して長時間観測することが出来ると評価できる。しかし、洪水時における流木、草木やゴミによる機器への障害によって、観測困難になる事や高流速時にプライス式流速計が表面付近まで上がってしまうという問題が生じた。

電波流速計は、本研究の中では最も安定的に連続したデータの取得が出来た。高濁度や高流速においても、問題なく観測でき、設置も容易なことから、洪水時の観測に適した方法だと考えられる。しかし、電波流速計の流速を流量算出に用いる時は、流水断面全体の流速への補正が必要である。今後、流速補正係数の検討が必要であろう。

浮子観測は、他の流速測定機器と比較すると、流速値が大きく、またデータのばらつきが大きいものの、危険な洪水時においても安全に観測できる。しかし、長年研究されている更正係数についてもさらなる検討が必要であろう。

今後も観測ケースを増やす事で、これまでの問題点をさらに検討し、時空間スケールや状況に応じた適切な河川流量観測手法を提案したい。

参考文献

1)安芸皎一：浮子特に竿浮子による観測流速の更正係数に就て，土木学会誌，Vol.18，No.1，pp.105-129，

1932.

- 2)二瓶泰雄，酒井雄弘：実河川洪水流における浮子の更正係数，土木学会論文集B，Vol.66，No.2，pp.104-118，2010.
- 3)原田靖生，二瓶泰雄，酒井雄弘，木水啓：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討，水工学論文集，第51巻，pp.1081-1086，2007.
- 4)深見和彦，今村仁紀，田代洋一，児玉勇人，中島洋一，後藤啓介：ド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，第14巻，pp.307-312，2008.
- 5)萬矢敦啓，岡田将治，橘田隆史，深見和彦：日本におけるADCPを用いた高水観測手法，河川流量観測の新時代，第2巻，pp.34-41，2011.
- 6)手計太一：ADCPを利用した水理・水文観測事例—塩水楔と失水・得水量—，河川流量観測の新時代，第2巻，pp.66-71，2011.
- 7)山口高志：電波流速計による洪水流速観測の失敗を含めた事例集，河川流量観測の新時代，第2巻，pp.20-27，2011.
- 8)稲垣達弘，柿沼孝治，三宅洋：十勝川千代田実験水路におけるADCP及び電波式流速計による流量観測，河川流量観測の新時代，第2巻，pp.57-65，2011.
- 9)独立行政法人 土木研究所編：水文観測，社団法人 全日本建設技術協会，1992.

(2012. 8. 31受付)

一般座標の格子構成が有する打切り誤差の理論的評価とその最適化手法

STUDY ON IMPORTANCE OF OPTIMIZED GRID STRUCTURE IN GENERAL COORDINATE SYSTEM

安田 浩保¹・星野 剛²

Hiroyasu YASUDA and Tsuyoshi HOSHINO

¹ 正会員 工博 新潟大学准教授 災害・復興科学研究所 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

² 学生員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

Numerical computation of river flows have been employed the general coordinate system to adjust a river plane form. An adjustment flexibility of the coordinate system is better but it is difficult to generate a grid system in order to compute stably because grid system is not determined uniquely. This study develops a new boundary fitting method introducing the hierarchical quad-tree grid system for computation of confluence and bifurcation in natural rivers. The numerical model with the quad-tree grid system apply to compute flow pattern in experiment flume and in natural river with bifurcation and confluence, the computed results agree with measured result of the flume and natural river well.

Key Words: *truncation error, metric, general curvilinear coordinate system, numerical grid generation*

1. はじめに

境界適合に一般座標を導入した河川の流況や河床変動の解析法は、格子構成の自由度の高さから解析対象の範囲の飛躍的な拡張に多大な貢献を果たしてきた。

この数値解析法は、精密な物理モデルと適切な格子構成が一对となつてはじめて性能が最大化される。物理モデルとしての研究はこれまでに高精度の差分スキームを導入したり高次の物理項を導入したりなどを中心に行われてきた。また、対になる格子の生成法はいくつか提案されてきた。しかし、物理モデルと格子生成法の交点である、格子構成の良否と解の応答特性については、数値解析の信頼性に根幹的な影響を及ぼすにもかかわらずほとんど研究されていない。両者の関心が十分に交わることなく現在に至り、学問的な空白域のままとなっている。

一般座標を導入した幾何学形状の境界適合においては無限の格子構成のパターンが原理的に存在する。これらのうち歪曲が大きな格子構成ではたとえ数値的な水理計算をどれだけ厳密に行っても水理の支配方程式を満たす解を得られない。これは、支配方程式の差分計算と同様、座標変換のメトリックスの差分計算もまた Taylor 展開に由来する打切り誤差を不可避のためである。直交格子では 0 となるメトリックスの絶対値は、格子の歪曲が大きくなるにしたがって増加する。したがって、一般座標による境界適合の効果がもっとも発

揮される複雑な幾何学形状ほどメトリックスは打切り誤差の影響を受け易い。そのうえ、メトリックスが大きいう、格子間隔の不規則性が大きな格子構成ならば、そこから得られる数値解には水理の支配方程式と格子構成に由来する 2 つの打切り誤差が混在し、その帰結としてクーラン数と無関係な計算不安定に見舞われたり、方程式を満足しない解を得ることになる。

メトリックスの打切り誤差は、高次の差分近似を導入するか、あるいは低次の差分近似でも正確に表せるようにメトリックスをできるだけ小さくしかも滑らかに連続分布させた格子構成ならば緩和ないしは解消できることは明白である。連続的に滑らかな格子の数学的な生成法は、Thompson ら¹⁾により体系化されたことはよく知られた事実である。しかし、彼らのものをはじめとする格子生成法が打切り誤差の緩和にいかなる効果をもたらすかは、少なくとも水工学においてこれまでに論じられたことはないようである。著者らは、このために、Thompson らなどの格子構成法が有効に活用されず、例えば河川の流況解析では格子構成の理論的条件から乖離した格子構成が散見される実状に繋がっていると考えている。

格子構成の打切り誤差がもたらす工学的な問題の本質は、境界適合を導入しなければ解けない複雑な形状の領域においてこそ顕在化するために理論的検証が困難なうえ、同じ水理条件を与えても格子構成ごとに解が異なつて一意に決定されないことである。

本研究では、一般座標の格子構成が内包する打切り誤差を定量的に算定するとともに、このような誤差の緩和に対して既存の格子生成法がもたらす効果について論じる。

2. メトリックスの打切り誤差

まず簡単のため1次元の座標変換

$$f_x = \frac{f_\xi}{x_\xi} \quad (1)$$

が行われたときの関数値 f の1階の微分の差分計算を考える。ここで、 x は物理面の座標、 ξ は計算面の座標である。計算面の離散間隔を1として (i, j) の中央差分を考えると

$$f_x = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (2)$$

なる差分式を得る。

この式を Taylor 展開と対比すると、明らかに f_x が近似的に計算されているだけで f_{xx} より高次の項を完全に無視した計算に等しいことが分かる。 f_{xx} より高次の項は、 f の勾配が大きかったり離散間隔が広く設定されている場合に重要な役割を果たし、このような条件のもとでは解析結果に対して打切り誤差として少なからずの役割を果たす。

ここで、 f_{i+1}, f_{i-1} を Taylor 展開したのちに式 (2) に代入すると打切り誤差として

$$T = -\frac{1}{2}x_{\xi\xi}f_{xx} - \frac{1}{6}x_{\xi\xi}^2f_{xxx} + O(\Delta\xi^4) \quad (3)$$

が得られる。右辺の第1項は格子間隔が不規則の場合に現れるものである。誤差を集中させる負の拡散項の形式となっているから格子間隔を不用意に増減させることが得策でないことが分かる。

2次元における1階の微係数の一般座標変換は周知のとおり

$$f_x = \frac{1}{J} [y_\eta f_\xi - y_\xi f_\eta] \quad (4)$$

$$f_y = \frac{1}{J} [-x_\eta f_\xi + x_\xi f_\eta] \quad (5)$$

のように与えられる。ここで、 x, y は物理面の座標、 ξ, η は計算面の座標、両者の間には $x = x(\xi, \eta), y = y(\xi, \eta)$ 、また $\xi = \xi(x, y), \eta = \eta(x, y)$ の対応関係があるものとする。 J は変換のヤコビアンで $x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ である。

f_η, f_ξ をそれぞれ Taylor 展開し、式 (4)、(5) に代入すると

$$\begin{aligned} T_x = \frac{1}{2J} & [(y_\xi x_\eta x_{\eta\eta} - y_\eta x_\xi x_{\xi\xi}) f_{xx} \\ & + (y_\xi y_\eta y_{\eta\eta} - y_\eta y_\xi y_{\xi\xi}) f_{yy} \\ & + \{y_\xi(x_\eta y_{\eta\eta} + y_\eta x_{\eta\eta}) \\ & - y_\eta(x_\xi y_{\xi\xi} + y_\xi x_{\xi\xi})\} f_{xy}] + O(\Delta\xi^3) \quad (6) \end{aligned}$$

表-1 メトリックスの幾何学的な意味

x_ξ, y_η	格子の存在。 $x_\xi, y_\eta \neq 0$ なら格子が成立。
$x_{\xi\xi}, y_{\eta\eta}$	格子の分布間隔の均一度。等間隔なら0。
x_η, y_ξ	格子の直交性。直交格子なら0。
$x_{\eta\eta}, y_{\xi\xi}$	格子分布の曲率。一様斜行なら0。
$x_{\xi\eta}, y_{\xi\eta}$	格子辺の平行性。平行格子なら0。

$$\begin{aligned} T_y = \frac{1}{2J} & [(-x_\xi x_\eta x_{\eta\eta} + x_\eta x_\xi x_{\xi\xi}) f_{xx} \\ & + (-x_\xi y_\eta y_{\eta\eta} + x_\eta y_\xi y_{\xi\xi}) f_{yy} \\ & + \{-x_\xi(x_\eta y_{\eta\eta} + y_\eta x_{\eta\eta}) \\ & + x_\eta(x_\xi y_{\xi\xi} + y_\xi x_{\xi\xi})\} f_{xy}] + O(\Delta\xi^3) \quad (7) \end{aligned}$$

が得られる¹⁾。ここで、 T_x, T_y はそれぞれ式 (4)、(5) が内包する打切り誤差である。

これらの打切り誤差は合計で10個のメトリックスから構成される。これらのそれぞれの幾何学的な意味は表-1にまとめたとおりで、 x_ξ, y_η を除き正方直交格子ならすべて0となることは自明である。例えば、 $x_{\xi\xi}, y_{\eta\eta}$ は計算点 (i, j) においては、

$$x_{\xi\xi} = x_{i+1,j} - 2x_{i,j} + x_{i-1,j} \quad (8)$$

と書けるから、等間隔の格子構成なら相殺される。

3. 格子構成の最適化手法

実河川の幾何学形状を一般座標により境界適合する場合、河道測量の際に設定された測線を基準にした格子構成が一般的な方法となっているようである。本章では、測量測線を基準として生成された格子構成のメトリックスの打切り誤差を抑制するように格子構成を最適化する手法について述べる。

(1) 楕円型偏微分方程式に基づく最適化手法

一般座標の計算格子は座標軸同士の交差角が大きく滑らかに変形する歪曲が小さい格子が定性的には望ましいとされている。本研究では、このような条件を満たすさまざまな格子生成法のうち、楕円型の偏微分方程式に基づく格子生成法を測量測線を基準とした格子構成の数学的な最適化手法として採用する。

Thompson ら²⁾ は楕円型の偏微分方程式を境界値問題として解くことで数学的に適当な格子を生成する手法を提案している。支配方程式は

$$\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = 0 \quad (9)$$

$$\alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = 0 \quad (10)$$

$$\alpha = x_\eta^2 + y_\eta^2 \quad (11)$$

$$\beta = x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta} \quad (12)$$

$$\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2 \quad (13)$$

である。

この方法では、係数を通して2本の偏微分方程式を結びつけられているため、 x と y が相互に作用し合う解が得られる。式(9)と(10)の楕円型の偏微分方程式は適当な初期条件を与えて収束計算を行うことで解が得られる。

本章の目的である数学的に最適化された格子構成を得るためには、初期条件に測線を基準として作られた格子構成の平面座標、境界条件に境界適合の対象となる格子端の座標を与えればよい。

(2) 境界条件の幾何学的な修正法

前項に示した楕円型の偏微分方程式に基づく格子生成法は境界値問題として解かれ、解析領域の内部の値のみが支配方程式に応じて決定される。前節の最適化手法が効果を発揮し、メトリックスが小さい格子構成を得るためには適切な境界条件が与えられている必要がある。

表-1に整理したように、 x_{ξ}, y_{η} 以外のいずれともができるだけ0に近ければ、いわゆる滑らかで座標軸の交差角が大きな歪曲が小さい格子構成が得られる。ここで、このような条件に近い格子構成として平行四辺形で構成されるものを考えると、式(6)は

$$T_x = -\frac{1}{2}x_{\xi\xi}f_{xx} + \frac{1}{2}(y_{\eta\eta}f_{yy} - x_{\xi\xi}f_{xy}) \cot \theta \quad (14)$$

と簡略化される。格子の分布間隔と直交性にかかわるメトリックスだけの式になり、 θ が 45° 以上なら非直交性がもたらす打切り誤差は大きくないことが分かる。つまり、格子構成においては特に格子の分布間隔に留意を払う必要がある。このためには、境界条件が境界線分上に座標値が等間隔に配置されることが要求される。

測線に基づく格子構成では境界上の座標値は不等間隔であることは容易に想像される。そこで、

$$L = n \times l \quad (15)$$

の関係を満たすように境界上の座標値を再配置する修正を導入する。ここで、 L は境界の全体長、 l は分割間隔長、 n は分割数である。この境界条件の修正により、格子の分布間隔が領域の全体で均一化されるように式(9)と(10)が解かれることが期待できる。

4. 水理の数値モデル

以下で実施した水理計算はiRICに同梱される平面2次元ソルバーであるNays2Dを用いた。このソルバーの基礎式を以下に示す。流れの支配方程式は、水深方向に積分された流速を用いる以下に示す浅水方程式

である。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (16)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (17)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_d u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (19)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = C_d v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (20)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right) \quad (21)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right) \quad (22)$$

式(2)(3)はデカルト座標系 (x, y) における2次元浅水方程式を表しており、また式(4)はデカルト座標系における流れの連続の式を表している。ここで、 u は x 方向流速、 v は y 方向流速、 h は水深、 H は水位、 g は重力加速度、 ρ は流体密度、 τ_x は x 方向底面剪断力、 τ_y は y 方向底面剪断力、 ν_t は動粘性係数を表す。ただし、以下に実施した数値計算では上式を一般座標系に変換したものを用いている。

5. 実河川における数値実験

本章では実河川の蛇行部を対象にして様々な一般座標の格子構成、そのメトリックスの打切り誤差の空間分布、さらにそのような格子を用いた際の解の安定性について論じる。

(1) 実験条件

実験の対象とした河川は新潟県三条市を貫流する五十嵐川とし、水理量には2011年の新潟福島豪雨の際の最大水位時の値を境界条件とした。

格子構成は全部で7つを準備した。図-1中の(a)が測量測線に基づく格子構成、(b)が流下方向軸と横断方向軸をできるだけ直交するように手作業で修正した格子構成、(c)が(a)に対して楕円型の偏微分方程式による最適化を実施した格子構成、(d)が境界上の座標値を等配分した上で楕円型最適化した格子構成、(e)が(a)の縦断方向の分割数を2倍にした格子構成である。このほかに(e)の楕円型最適化、(e)の境界上の座標値を等配分した上で楕円型最適化を施した格子構成も準備したが紙面の関係で掲載は割愛する。

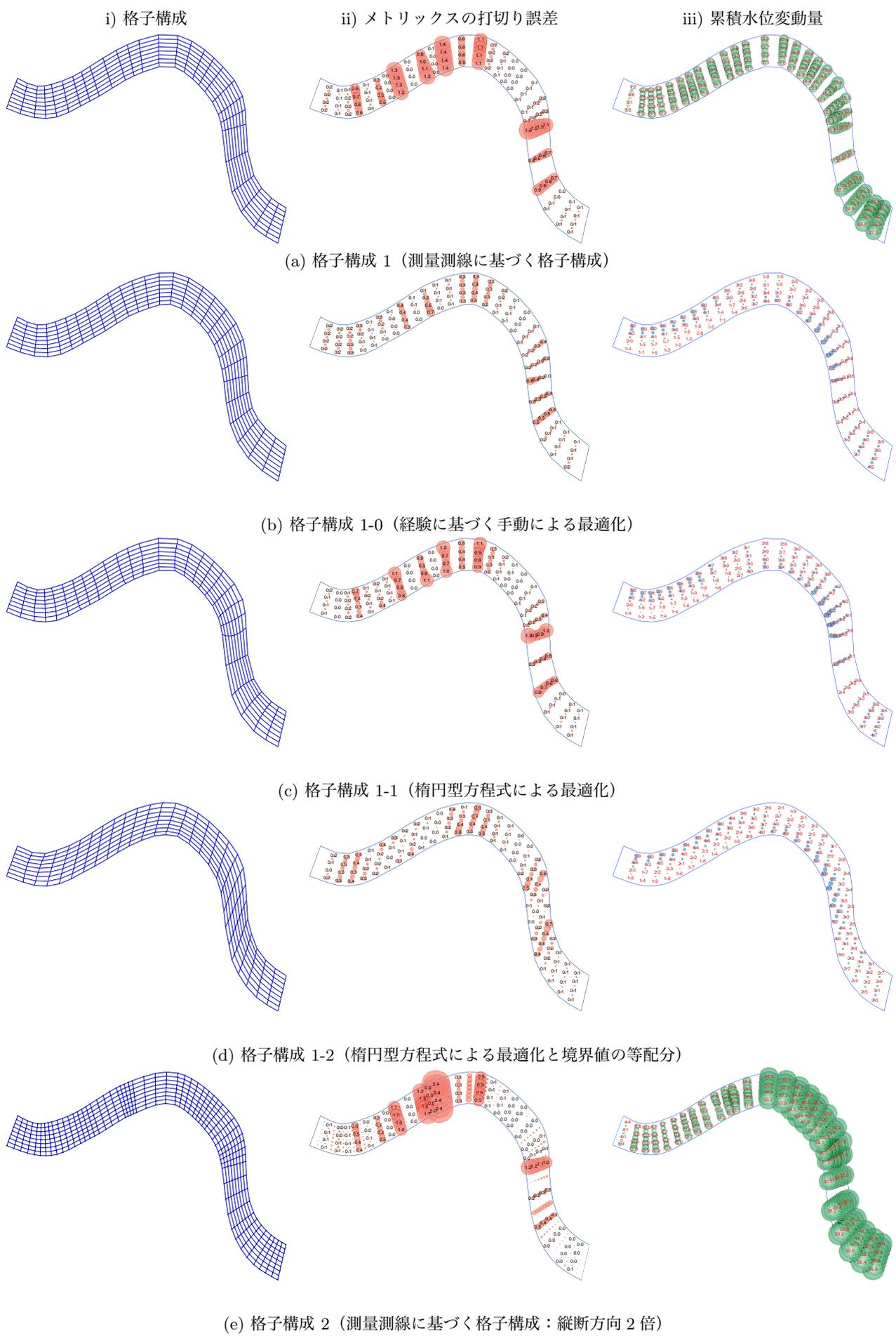


図-1 格子構成、メトリックスの打ち切り誤差、解の安定性

(2) 実験結果

a) メトリックの打切り誤差の空間分布

本研究では、 T_x, T_y の f_{xx}, f_{yy}, f_{xy} を定数扱いとした、

$$T_x = \frac{1}{2J} [(y_\xi x_\eta x_{\eta\eta} - y_\eta x_\xi x_{\xi\xi}) + (y_\xi y_\eta y_{\eta\eta} - y_\eta y_\xi y_{\xi\xi}) + \{y_\xi(x_\eta y_{\eta\eta} + y_\eta x_{\eta\eta}) - y_\eta(x_\xi y_{\xi\xi} + y_\xi x_{\xi\xi})\}] \quad (23)$$

$$T_y = \frac{1}{2J} [(-x_\xi x_\eta x_{\eta\eta} + x_\eta x_\xi x_{\xi\xi}) + (-x_\xi y_\eta y_{\eta\eta} + x_\eta y_\xi y_{\xi\xi}) + \{-x_\xi(x_\eta y_{\eta\eta} + y_\eta x_{\eta\eta}) + x_\eta(x_\xi y_{\xi\xi} + y_\xi x_{\xi\xi})\}] \quad (24)$$

これらの式から、メトリックの打切り誤差の空間分布を求めることを試みる。

5つの格子構成のそれぞれのメトリックスの打切り誤差の空間分布は図-1の各行の中央に示したとおりである。図中の数値と褐色に着色された円形により各格子点におけるメトリックスの打切り誤差の合計値 T_{xy} を示した。 T_{xy} は

$$T_{xy}(i, j) = \frac{1}{\Delta S} (T_x(i, j) + T_y(i, j)) \quad (25)$$

として求めた。ここで ΔS は計算領域内のすべての $\Delta x, \Delta y$ の平均値である。

図-1(a)の格子構成は縦断方向の格子の配置間隔が不規則で、式(8)から予見されるとおり、この様な格子点においてはメトリックスの打切り誤差がそれ以外の地点に比べて格段に大きくなっていることがよくわかる。同図(b)の格子構成は縦断方向の格子をできるだけ均一に配置したもので、計算格子の全体で打切り誤差が(a)と比べると格段に減少していることが分かる。同図(c)と(d)は(a)に対して数学的な格子生成法を応用して最適化を行ったものである。(c)は縦断方向の境界上の格子間隔は(a)と同じながらも計算格子の内部の格子間隔については変更が加えられ、その結果、(a)と比べると打切り誤差が減少していることが分かる。また(d)は格子の境界座標を等配置としたうえで最適化を行ったもので、格子全体で大幅に打切り誤差が減少していることが分かる。(e)は(a)の格子構成を基本として縦断方向の格子間隔を半分にしたものである。上記までの5つの格子構成の中でもっとも打切り誤差が大きい結果となった。

b) 打切り誤差と数値計算の安定性

5つの格子構成のそれぞれに最大水位時の水理量を与えて定常解を求める数値計算を行った。結果としては、数値計算を開始して直ちに定常解が得られる格子構成と計算終了時刻の3600秒の時点においても計算領域の全体の水理量が波動現象のように大きく変動を続けるものに大別される結果を得た。計算の安定性を図-1の

各行の右列に示した。図中の数値と褐色に着色された円形により各格子点における計算された水位変動量の累積とを示した。この水位変動量の累積値は、

$$\delta H(i, j) = \int \frac{H(i, j)}{H_0(i, j)} dt \quad (26)$$

として求めた。ここで H_0 は図-1(b)から得られた計算終了時刻の水位で、定常解として採用した。

図-1(a)から(e)の格子構成のうち定常解を得ることができたのは(b)、(c)、(d)で、計算終了時刻においても定常に達することがなかったのは(a)、(e)である。メトリックスの打切り誤差と累積水位変動量と結びつけるように図-1の全体を俯瞰すると、メトリックスの打切り誤差が大きい格子構成では累積水位変動量も大きく、定常解を得ることができないことがわかる。このうち(e)については計算格子の全体としては縦断方向に細分化されているものの、分割間隔が不連続となつて(a)と比べて打切り誤差と累積水位変動量の両者が大きくなっている。

以上までに得られた結果をまとめると、式(25)に示した打切り誤差の評価を用いれば、格子構成毎の計算の安定性を水理計算を実施することなくあらかじめ推定できることが分かる。

6. おわりに

一般座標は理論的には完璧に写像できることは周知の事実である。本論文で取り上げたメトリックスの打切り誤差は言うまでもなく数値解析に特有の問題である。

本研究を通し、適当な解を得るために一般座標による境界適合をしても格子構成が適当でなければ支配方程式を満足する解を得られないことが定量的に確認された。一般座標の格子構成は無数の自由度を原理的には有するが、数値計算においてはメトリックスの計算における打切り誤差を排除できない限りは数学的な拘束条件の下で生成された格子構成を採用することが望ましい。

現在、広く散見される実河川の格子構成である河道測量の横断測線を基準とした格子構成は一般座標有する本来の自由度を十分に発揮しているとは言えない。実河川の境界適合に一般座標を適用するならば、本研究で示したように、何らかの最適化を行い、一般座標が有する幅広い自由度を発揮させる必要がある。

また、メトリックスの打切り誤差を応用することで、格子構成毎の計算の安定性を水理計算を実施することなくあらかじめ理論的に推定できることを示した。

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

参考文献

- 1) Joe F. Thompson, Z.U.A. Warsi and C. Wayne Mastin, Numerical Grid Generation Foundations and Applications, www.hpc.msstate.edu/publications/gridbook/.
- 2) Thompson, J. F.; Mastin, C. W.; Thames, F. C., Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies, doi:10.1016/0021-9991(74)90114-4, *J Comput Phys*, pp. 299-319, 1974.

(2012.8.31 受付)

本格的な実用期を迎えた電波流速計 『固定電波流速計 & RYUKAN』

宮村恵里也¹・中島洋一¹・吉村淳也¹
Eriya MIYAMURA, Youichi NAKAJIMA and Atsuya YOSHIMURA

¹賛助会員 横河電子機器(株) (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-23-13)

WJ7661 type RYUKAN is a compact, lightweight, and mobile microwave Doppler-type non-contact current meter driven by the built-in batteries.
Flow velocity can be measured easily and remotely without touching flowing water, just by installing the main unit to the tripod and radiating radio waves to the measuring point.
The use of microwaves enables stable measurements insusceptible to weather conditions such as temperatures, wind, rain, and fog, as well as visibility hindrance, supporting a safer and more reliable river flow measurement.

Key Words : RYUKAN, ADCP

1. はじめに

今年の『河川砂防技術基準(調査編)』の改訂で新たに非接触型流速計測法の項目が追加され、標準手法として電波流速計の事例を中心として適用手法が記述された。

今後の高水流量観測は、日本で育まれた電波技術を用いた自動観測により、安全で経済的かつリアルタイムに状況把握する高度化の時代を迎えた。

河川の流量観測は、治水計画や洪水状況の把握など、河川の適正な管理に欠かせない重要な業務である。しかし、現在行われている観測手法については、確実性や観測する際の安全性において課題が指摘されている。

横河電子機器株式会社は、1986年にドップラー効果を使った橋梁固定式の電波流速計の開発し、非接触方式の流速測定の新分野で経験と実績を積んできた。

旧土木研究所(現国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所)、財団法人河川情報センターとの共同研究で誕生した固定型電波流速計が流量観測用として新潟県を流れる魚野川に設置されてから約20年が経過している。この間、検出機器においては信号処理のデジタル化、流速信号抽出技術の改良、流量演算システム開発などの技術的進歩により流速計としての信頼性を向上させる一方、実河川流観への適用については官民共同の計測法研究の実施により実用面での検証が大幅に進んだ。2012年3月現在で納品しているのは、固定型電波流速計が約60ヶ所、ポータブル電波流速計

RYUKANは100台を超え、多くの適応事例からいよいよ本格的な実用期を迎えた。

2. 流量観測の手法と問題点

河川計画に欠かせない河川流量は河川の断面積と流速から算出されている。河川の流速は、低水時には可搬式流速計を水中に入れて計測できるが、洪水時には流速が早く、また多量の流下物があるため計測器を入れることが事実上できない。そこで、棒浮子を投げ入れて浮子が一定区間を流下する時間を計測して流速を算出する、いわゆる浮子法が標準的な観測手法として用いられている(図1)。しかし浮子法は

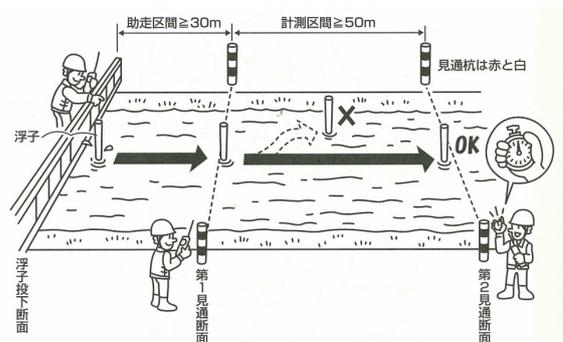


図1. 浮子流観
「絵で見る水文観測」から引用した(例)

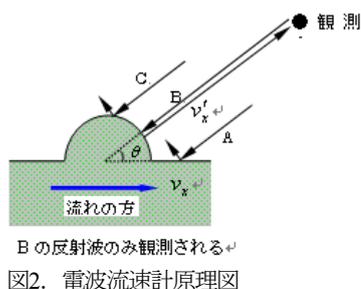
①人手による観測であることから流出の早い観測地点では観測者の到着が遅れ、洪水の立ち上がりやピーク観

測に間に合わない場合がある。

- ②連続的な観測ができないのでピーク流量が把握できないことがある。
- ③浮子が予定した測線から外れる、橋脚後流の影響を受けるなど測定精度が不正確な面がある。
- ④測定区間の平均流速計測であり、瞬時値が計測できない。
- ⑤観測には3人～5人程度の経験豊富な観測者の出動を必要とするので今後人材的、経済的困難も予測される。などの問題点も指摘されている。

3. 電波流速計の特長

電波式流速計はマイクロ波のドップラー効果を利用した非接触型の流速計で、河川の表面に一定周波数のマイクロ波を放射すると、その反射波の周波数は表面流速によるドップラーシフトを受ける。この周波数シフトを検出し河川の表面流速を計測するものである(図2、3)。



非接触測定であるため固定電波流速計の場合以下のように浮子法の問題点をカバーできる特長がある。

- ①低水域から洪水までの広い流速範囲一台の流速計で連続的に観測できる。
- ②特に洪水の立ち上がり、ピーク流速を逃すことなく正確に測定できる。
- ③区間の平均流速ではなく、測定ポイントの瞬時流速を測定できる。
- ④橋脚や測線変化の影響を受けず高精度測定が可能である。



図3. 固定電波流速計設置写真

- ⑤人手を必要としないので、悪天候下でも安全に自動観測ができる。

また流下距離の取れない短区間や湾曲部、植生のため浮子の投下できない高水敷部など浮子法では測定困難な流域での流量観測も可能である。

4. 独立行政法人土木研究所との共同研究(固定型電波流速計)

1) 研究の背景

1999年度から3年間にわたり土木研究所を基幹研究機関としてドップラー式流速計および画像処理式流速計を対象とした非接触型流速計の研究が行われた。近年の局地的異常気象の頻発傾向にともない、中小河川も含めて洪水災害も多発してきている。対策として合理的な治水計画の策定、よりの確な洪水予測、迅速な情報公開などが求められる中、流量観測の高度化が重要な課題となってきた。特に洪水時におけるタイムリーで高精度な流量観測の実施が急務となってきたことから、現行の浮子法に代わるものとして、洪水時の流速を自動計測可能な非接触型流速計測法の実用化研究を行うものです。当社もドップラー式流速計に属する電波流速計のメーカーとして、共同研究プロジェクトに参画した。

2) 実施内容と成果

研究は土木研究所の実験施設および実河川の実験フィールドを使用して行われ、電波流速計に関しては以下のような成果が得られた。

- ①実験水路でのトレーサ実験により表面流速の測定精度が検証された。
 - ②風洞実験により風の影響を確認し、定量的な補正実験式を確立した。
 - ③実河川(魚野川)での実験で表面流速と鉛直方向流速分布の関係を解明し、表面流速を平均流速に変換する更正係数を明らかにしました。
- そして全体的な成果として、電波流速計は
- ・浮子法と良好な相関を有している
 - ・浮子流観を代替できる測定精度を有している
 - ・洪水ハイドログラフを自動観測することが可能である
- ことが確認された。

3) フォローアップ研究

共同研究の完了後も本共同研究は財団法人土木研究センターに引き継がれ、2002年度から2007年度にかけて研究成果の検証を中心とする、フォローアップ研究が行われた。

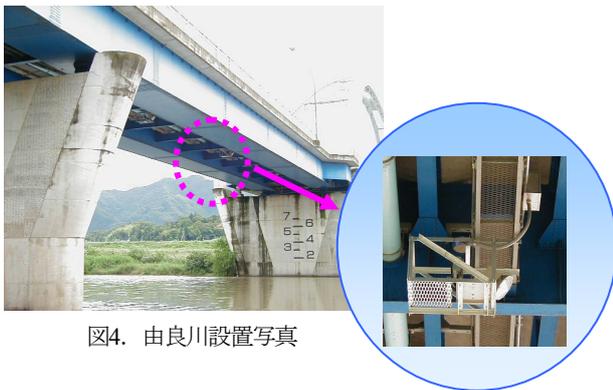


図4. 由良川設置写真

電波流速計については利根川上流（栗橋）、由良川（音無橋）を実験フィールドとして実施された（図4）。

特に由良川においては2006年7月に台風23号の大洪水を観測する機会があり、図5に示すように出水の完全なハイドログラフを記録することができた。

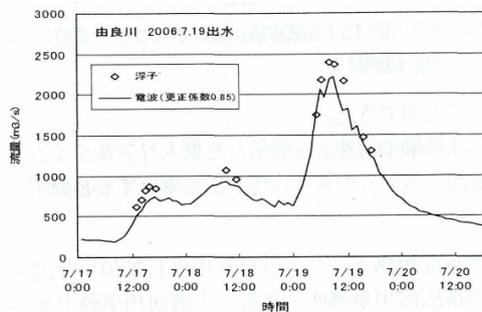


図5. 23号台風ハイドログラフ（由良川）

また同時に浮子流量観測を実施し、電波流速計（校正係数0.85）と浮子流量観測が高い相関関係にあることを確認することができた（図6）。

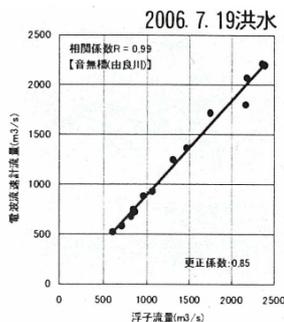


図6. 浮子との相関図（由良川）

このように共同研究の成果が実河川で検証できたことを受けて、電波流速計の設置基準、データ整理方法、データ確認を含む保守点検などについての運用マニュアル（案）をとりまとめ、フォローアップ研究を完了した。共同研究、フォローアップ研究の成果は文献2、3に詳述されているので参照願います。

4) 固定型電波流速計のまとめ

電波流速計が河川の流量観測用として、いよいよ本格

的な実用の時代に入った。当社の電波流速計を用いた流量観測システム（図7）はすでに全国の主要な流量観測所（約60ヶ所）で導入している。

また河川流観のほかにも砂防ダムにおける土石流の監視や流下速度の観測などに多く採用されている。今後運用マニュアルの制式化により一層の普及が進み、河川の流量観測の高度化や砂防分野の観測に貢献できるよう、メーカーとして一層の努力をしていきたいと考えている。

緊急時の流量観測対応や新規観測ポイントの調査、またこれから観測データの充実が望まれる中小河川の流量観測、砂防分野への適応など、幅広い用途にお役に立てることを願っている。

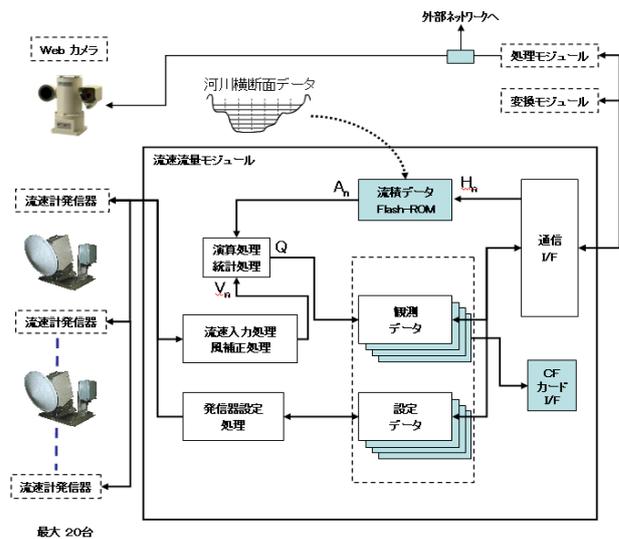


図7. 流量観測システム構成図

5. 『RYUKAN』の実績

1) 開発の経緯

RYUKANは、我が社が25年間培った固定式電波流速計の技術と経験をつぎ込み世界で初めて実用化に成功したポータブルタイプの非接触型流速計である。RYUKANは、固定式電波流速計の信頼性と長時間記録や連続測定などの特性をそのままに小型・軽量化に取り組み一人で持ち運べる形状を実現した。RYUKANの組み立てには、専門的な知識や経験を必要とせず、内蔵バッテリー方式と内蔵メモリーの採用によって電源のない山奥や、橋梁の上でも観測機単体で観測から表示、記録までを行う事が出来る。

流量観測の高度化が推進されてきている昨今、いよいよ研究分野で活躍している方式を広く活用してもらえよう、手頃なポータブル型の電波流速計 RYUKANを2008年11月に販売開始した。そして、改めて電波流速計の有効性を見る為、暴風雨時の“雨空展示会（弊社の独自名称）”を企画し結果をまとめた。



図8. RYUKAN本体と付属品

2) 『RYUKAN』の実観測 “雨空展示会”

2009年10月8日、日本に上陸した台風18号を、全国15箇所（宮崎県、福岡県、高知県、広島県、岡山県、三重県、神奈川県（3箇所）、群馬県（2箇所）、茨城県、秋田県、北海道（2箇所））で待ち受けた。

台風18号は、我々を恐れたのか、和歌山県より上陸し、近畿地方から北陸地方へ、更に東北地方へと包囲網を避けるかの様な進路をとった。その内5箇所で高水をキャッチし、従来の流量観測業務と並行してポータブル電波流速計RYUKANを使った展示会兼流量観測が行われた。

展示会は、大きく3つの特徴的な使い方で行われた。

- ① 定点連続観測。6測線分RYUKANを固定（簡易的に固定）し、連続観測する方法。
- ② 定点連続+移動間欠観測。RYUKAN 1台を低水路部にあたる測線に固定し、もう1台を三脚で立てながら浮子投下測線に合わせて観測する方法。
- ③ 今までに浮子観測（高水流観）のできない箇所（3箇所）に RYUKAN を設置し、三脚に立てて 3 測線分観測する方法。

今回は、関東地方整備局管内 下館河川事務所の黒子水位観測所で行った観測結果のまとめを紹介する。

3) 雨空展示会での浮子法との比較観測

黒子水位・流量観測所は、利根川支川小貝川の1種の水位・流量観測点で浮子流観と共にRYUKANを用いて比較観測した。

10月8日11:00から20:00までのRYUKAN（表面流速）のデータで、更正係数（0.85）を掛け算出した表である。一番上の曲線が水位のデータとなっている。水位データ下方の曲線は、測線12と13の流速データとなっており、流速データのグラフ内の点は浮子のデータとなっている。水位データの曲線とも綺麗に合った曲線となっている。

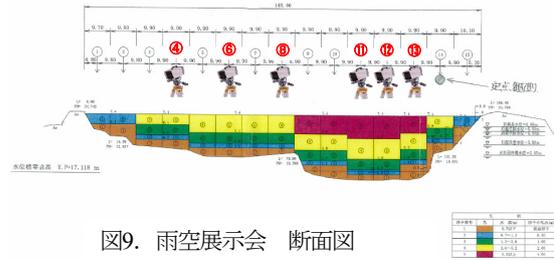


図9. 雨空展示会 断面図

RYUKANは、刻々と変化する河川流速を連続かつ詳細に捉え、測定データの妥当性を認識でき、浮子観測との傾向も見られ、良好な結果が得られた。

また、RYUKANは自動計測が可能であることから観測員を最小限に抑えることができ、消耗品も少ないことから、省人型・省コストの流量観測が実現できる。

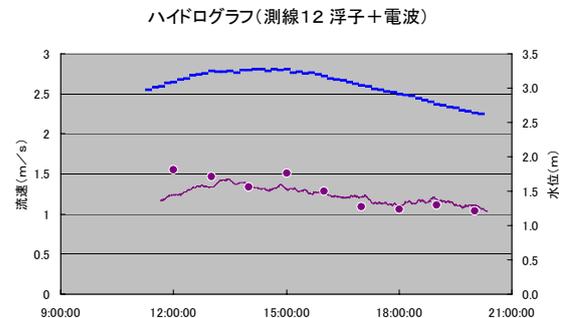


図10. RYUKANデータ（測線12）

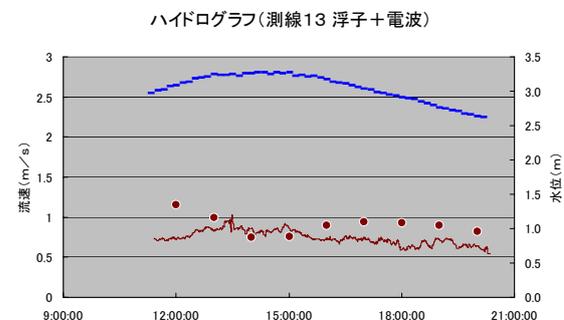


図11. RYUKANデータ（測線13）

さらに、複数台を同時に使用することで、水位上昇の大きい時間帯でも同時性の高い観測が可能であることから、更なる観測データの品質向上にも貢献できることを示せた。

省コスト・省人型

■ ランニングコスト(投下
浮子数と費用)

《電波流速計の場合》

浮子	単価	本数	金額
表面	¥1,000	5	¥5,000
0.5	¥1,130	2	¥2,260
1.0	¥1,330	20	¥26,600
2.0	¥1,530	31	¥47,430
1.0(ライト)	¥1,750	14	¥24,500
2.0(ライト)	¥1,950	9	¥17,550
合計		81	¥123,340

→ 単三乾電池6本/台
¥1,800(6台分)

■ 班の編成

《浮子観測の場合》

5人

《電波流速計の場合》

2人

図12. コスト面での比較

4) 主な流速計の比較表

最後に主な流速計の比較表を作成してみた。RYUKANは基本的に高水流観測として開発したが、仕様上、電波の反射が得られれば0.5m/sから計測できるので、低水時からRYUKANを用いて観測される事が多く見受けられる。水面上に波が立っていれば計測できるので、特に問題は無い。これを踏まえ、この比較表には、他に高水用の流速計が無いので、浮子・RYUKAN・ADCP・回転式流速計・電磁流速計とで比較した。

全体的なメリット・デメリット、費用面、データの安定性などを考慮すると、気になるのはイニシャルコストだけだと思われる。とはいえ、トータルコストや機器仕様等の全体的に評価すると、RYUKANで計測するのが一番皆さんのお役に立てると考える。

今後事業を進めて行く上で、活用できる機械ができたと自負している。

5. まとめ

電波流速計が国の定める標準手法として『河川砂防技術基準(調査編)』(第2章第4節:参照)に記載されたことは、25年以上取り組んできた我々として感慨無量であり、山口高志先生、土木研究所の深見上席研究員、萬矢研究員をはじめ電波流速計を題材とした研究に取り組んでくださった多くの研究者の方にこの場を借りてお礼を申し上げたい。

2008年11月にRYUKANを販売開始してから全国約200もの河川系の事務所へ伺いPRをした。約3年間で100台以上も活用される事ができた。そして、河川情報センターが開催している「河川情報取扱技術研修」でもRYUKANが新たな流速観測の手法の一つとして紹介されており、それ以外にも国土交通省をはじめ、多くの観測機関や海外の研究機関などでも活用されている。

今後は、高水流観の精度を上げるためにも、ADCPとのコラボレーションを取り、ADCPで流速分布実測値に

よる更正係数を再設定した上、RYUKANで表面流速を計測する。このような組合せ観測すべき観測点が全国に多数あると思われる、ADCP共々RYUKANや固定電波流速計が活用される事を期待する。

高水時での流量観測では、観測員の安全が第一である。危険を感じ作業員が撤収しても計測し続け、しかも安定したデータで、今までに計測できなかったような流速データでも計測できる流速計として、RYUKANは更なる飛躍を続けていく。国土交通省を始め、様々な研究機関からも期待されており、その期待に応えるべく、今後も日々努力していく。



■参考文献

- 文献1. 国土交通省中部地方整備局河川部監修、社団法人中部建設協会：絵でみる水文観測
- 文献2. 国土交通省河川局監修、独立行政法人土木研究所編著：水文観測(平成14年度版)社団法人全日本建設技術協会、2002
- 文献3. 独立行政法人土木研究所他：共同研究「非接触型流量計測法の開発」共同研究報告書、土木研究所共同研究報告書、No.291、2003
- 文献4. 深見他：ドップラー式非接触型流速計を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～河川技術論文集、第14巻、2008年6月
- 文献5. 弊社の季刊誌(WEATHAC VOL.14) 2008年
- 文献6. 国土交通省水管理・国土保全局監修、社団法人日本河川協会：河川砂防技術基準(調査編) 2012年

(2012. 8. 31受付)

主な流速計の種類と観測手法の比較

種類	浮子法	電波式流速計	A D C P	回転式流速計	電磁式流速計	
						
主な使用目的と機関	河川流量調査 (国土交通省)	発電水力流量調査 河川流量調査 (経済産業省) (国土交通省)	発電水力流量調査 河川流量調査 (経済産業省) (国土交通省)	発電水力流量調査 (経済産業省)	発電水力流量調査 河川流量調査 (経済産業省) (国土交通省)	
測定範囲	0.5m/s～	0.5m/s～20.0m/s	±20m/s	0.03m/s～3.5m/s	0.5m/s～4.0m/s	
精度		±(2%+0.05m/s)	±0.25%または±2.5mm/s @1200kHz	0.1m/s未満 誤差2.5%以下 0.1m/s以上 誤差1.5%以下	0～100cm(±2cm/s) 100～200cm(±4cm/s) 200～400cm(±8cm/s)	
測定原理	最も単純な流速測定方法であり、距離と時間の関係から、速度を算定する。計測時の水深に応じて、表面、30cm、50cm、1m、2m、4mの吃水長の浮子を使い分ける。	流水の水面に電波を照射し、ドップラー効果を利用して表面流速を求めめる装置である。	音波発信面から音波パルスを送り、水中の散乱体(プランクトンやちりなどの浮遊懸濁物)に向けて反射し、その反射パルス(エコー)の周波数変化(ドップラーシフト)を流速に変換することにより、流速を計測する。	プロペラの回転数から流速値を推算する。回転数と流速値は異なるため、各測器に対応した検定表を用いる。	電磁流速計は電磁誘導の法則により、電導体である水が磁界を横切って流れる時に発生する起電力を測定することにより、流速を計測する。	
特徴	分類		非接触型	接触型	接触型	
	主用途	中流速～高流速用	中流速～高流速用	微流速～高流速用	微流速～低流速用	低流速～中流速用
	メリット	・伝統的な手法で現在観測手法の一つとして主に用いられている。	・瞬時の流速を連続して計れる。 ・夜間でも測定可能 ・移動部分がないため故障が少ない。 ・暴風時でも故障が少ない。 ・簡易操作のため熟練は不要。	・流速適用範囲が広い。 ・移動部分がないため故障が少ない。 ・3次元の流向流層が計測できる。 ・1台で水中を多層計測できる。 ・ボトムトラッキング機能を組み込むことにより移動計測も可能。	・0.03m/sからの微流速を測定可能	・瞬時の流速を連続して計れる。 ・移動部分がないため故障が少ない。
デメリット	・河川に投下したままなので、環境問題の一因となる。(夜間のライト部) ・観測時の多くの人手が必要 ・水位がHigh Water Levelを越える際は危険が生じるので計測しない。 ・熟練が必要。	・水面に波が無いと測定不可能。 ・暴風時、橋梁に固定させない場合は三脚が動かぬように押さえる必要がある。	・気泡が大量に生じるところでは計測できない。 ・高濁度時に計測レンジが減少する。 ・熟練または販売店のサポートが必要。 ・高価	・計測時間が掛かる。 ・プロペラ軸方向の流速しか計れない。 ・高水時は危険なため計測不可能。 ・移動部のメンテナンスが困難 ・熟練が必要。	・高水時は危険なため計測不可能。 ・熟練が必要。	
主な機能	一体型	—	○	○	×	
	表示機能	—	○	×(PC接続で○)	○	
	演算機能	—	○	○	○	
	記録機能	—	○(USB本体記録)	○(PCMCIAメモリーカード)	×(表示直読)	○(本体記録)
	電源	不要	乾電池(単三電池×6本)	12VDCバッテリー×2個	乾電池(単三電池×4本)	充電式リチウム電池
観測時必要人数	5人～	2人 ※1	2人 ※1	4人～	4人～	
初回購入費	¥0	¥950,000	¥2,300,000	¥428,000	¥850,000	
維持費	校正費 ※2	¥0	¥0	¥0	¥350,000	¥750,000
	成績書取得	¥0	¥175,000	¥150,000	¥165,000	¥165,000
消耗品費 ※2	¥5,400,000	¥45,000	¥45,000	¥12,500	¥5,000	
人件費 ※4	¥4,700,000	¥1,800,000	¥1,800,000	¥3,100,000	¥3,100,000	
合計 ※5	¥10,100,000	¥2,970,000	¥4,895,000	¥4,055,500	¥4,870,000	
総合評価 ※6	○	◎	○	×	×	

- ※1 浮子流観と併用する場合は1人
- ※2 オーバーホール・検定費として5年分の概算費
- ※3 主に電池および浮子の購入として5年分の概算費
- ※4 “観測時必要人数”を目安として1観測当たり24時間で年3回と仮定し5年分の概算費
(浮子観測：測量技師・測量技師補・測量助手・普通作業員(2人) 計5人)
(電波流速計：測量助手・普通作業員 計2人)
- ※5 1観測当たり24時間で年3回と仮定し5年分としての浮子の概算費
- ※6 高水速観用としての総合評価

新型 ADCP を中心とした複合計測システム

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

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

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

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

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

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

アクセサリ



「Visual ADCP tools」

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

「ABT tools」

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



GPS コンパス「G-com（ジーコン）」

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



 **TELEDYNE**
RD INSTRUMENTS
A Teledyne Technologies Company

米国 Teledyne RD Instruments 総部門 日本代理店

株式会社 ハイドロシステム開発

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

大阪本社

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

東京支店

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

※本件事務所移転に伴い、
電話及び FAX 番号が変わりました。

私たちの暮らしを、
「水」を通して見つめ直し
より良い環境を創出します



※ 晩秋の駒ヶ岳

業務内容

- ・建設コンサルタント
- ・水文・環境調査
- ・環境分析・試験

登録・許認可

- ・建設コンサルタント登録 建 21 第 5312 号
- ・計量証明事業登録 第 605 号 (濃度)
- ・測量事業登録 (8)・9050 号
- ・地質調査業登録 質 20 第 1742 号
- ・土壤汚染対策法に基づく指定調査機関登録 環 2003-1-334
- ・作業環境測定機関登録 01-13 号
- ・建築物飲料水水質検査事業登録 北海道 57 水第 3 号
- ・ISO14001:2004 (NJE-032)
- ・ISO 9001:2008 (NJQ-277)



(株) 福田水文センター

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

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

流量観測手法の**高度化**を実現する

YOKOGAWA 

RYUKAN[®]

ポータブル電波流速計

その瞬間を逃がさない!

抜群の機動性と操作性を兼ね備えたポータブル電波流速計の決定版



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

安全

安定

簡単

長年の実績と独自開発によるドップラー式電波流速計

特許出願中

横河電子機器株式会社