

# 「新たなステージ」に対応した 河川流量観測の提案

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

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

<sup>1</sup>～<sup>4</sup> 非会員 株式会社福田水文センター（〒001-0024北海道札幌市北区北24条西15丁目）

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

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

## 1. はじめに

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2. 「新たなステージ」での降水量と水位上昇

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

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

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

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

いかに、急激な水位上昇量に対応した観測ができるかが重要になる。

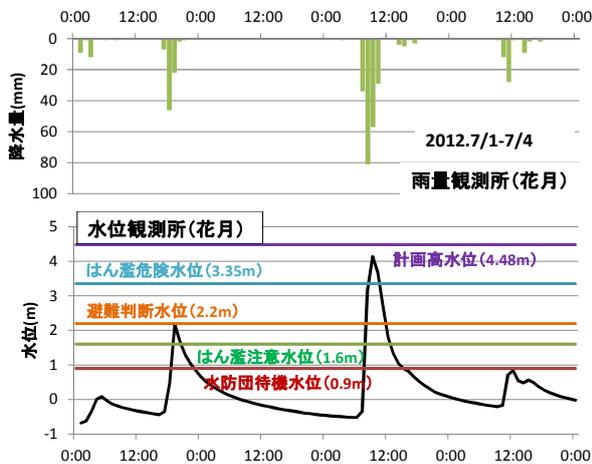


図-1 花月観測所（花月川/筑後川水系）

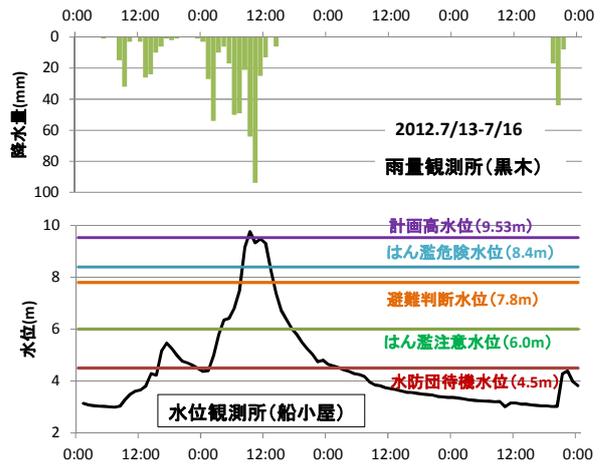


図-2 船小屋観測所（矢部川/筑後川水系）

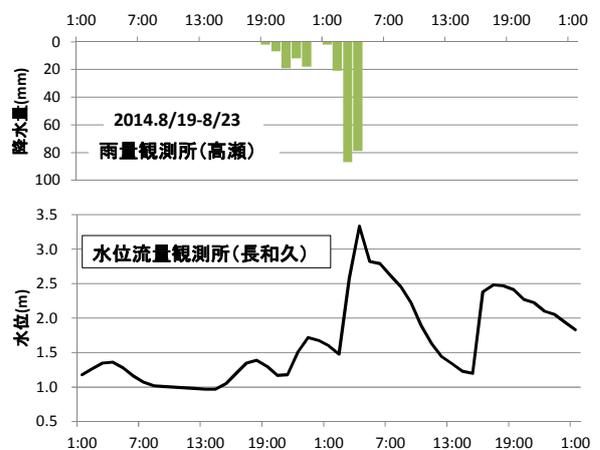


図-3 長和久観測所（太田川/太田川水系）

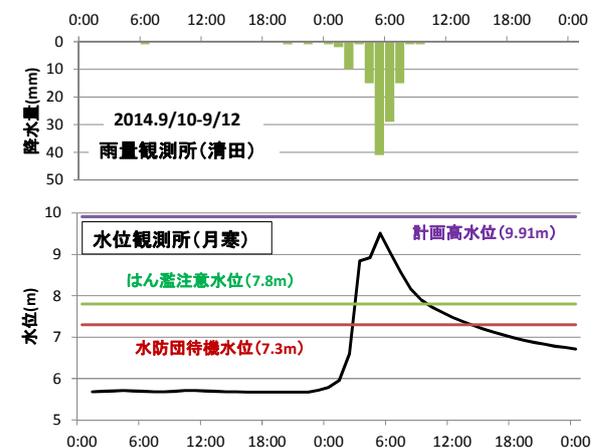


図-4 月寒観測所（月寒川/石狩川水系）

### 3. 高水流量観測の現状

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

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

参考として浮子の測線数は、表-1に示す標準法と緊急法の規定がある。

表-1 浮子による流速測線数

<標準法>

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

<緊急法>

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

#### (1) 水面幅と浮子投下測線数

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

#### (2) 観測時間と浮子投下測線数・水面幅

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

#### (3) 浮子投下測線数と観測人数

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

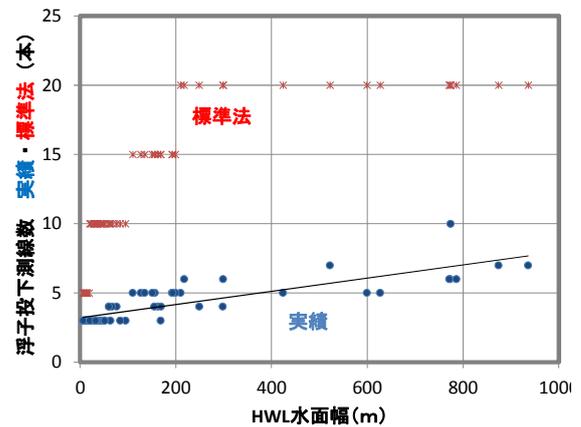


図-5 水面幅と浮子測線数

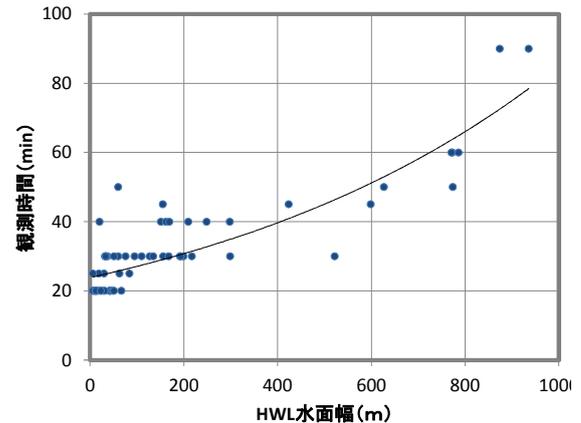


図-6 水面幅と観測時間

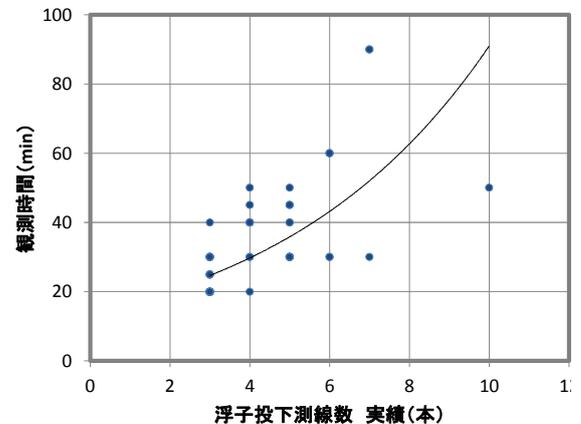


図-7 浮子測線数と観測時間

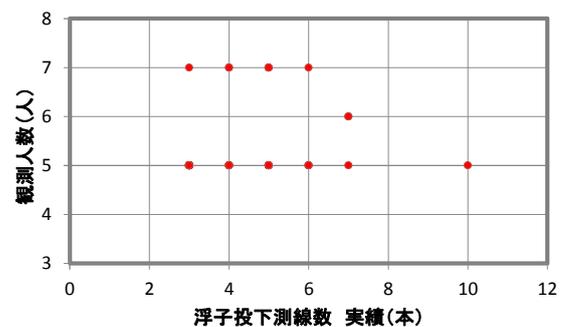


図-8 浮子測線数と観測人数

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

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

#### 4. 「新たなステージ」に向けた観測の課題

##### (1) 河川砂防技術基準調査編での高水流量観測の考え方

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

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

##### (2) 水位上昇量と観測時間の課題

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

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

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

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

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

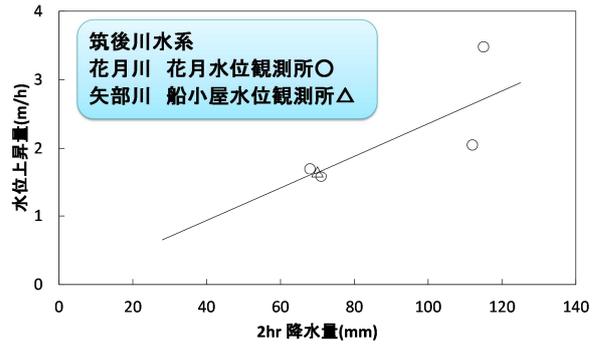


図-9 降水量と水位上昇量（花月川・矢部川）

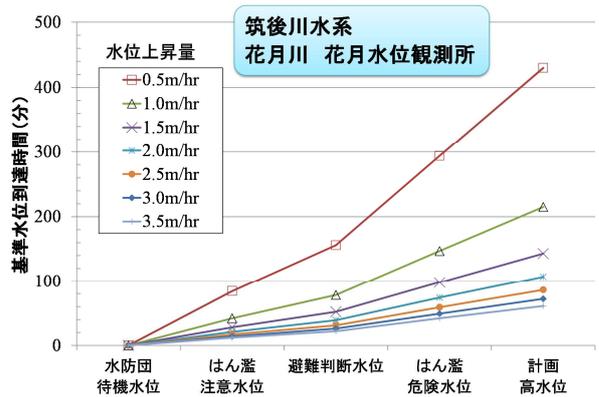


図-10 基準水位到達時間（花月川花月）

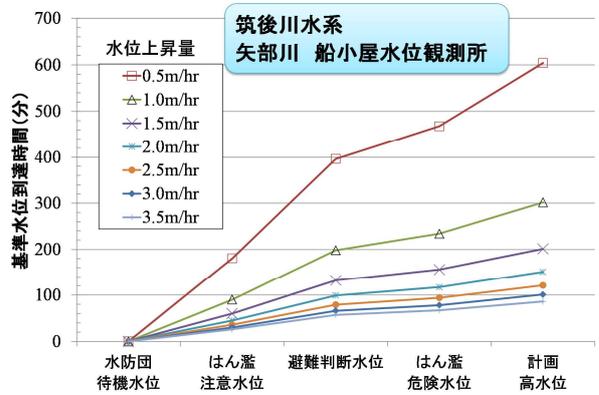


図-11 基準水位到達時間（矢部川船小屋）

##### (3) 迅速な初動体制の確立

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

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

#### (4) 熟練技術者の減少に対応した観測手法の標準化

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

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

## 5. 「新たなステージ」に適用した観測方法

### (1) 「新たなステージ」に適用した観測方法の高度化

現行の流量観測技術は、昭和29年の国土調査法水位及び流量調査作業規定準則（総理府令第75号）で定義されて以来約60年間継承されている。浮子を投下してその流下速度を測定するというシンプルな手法ながら現在まで適用され続けているのは、出水時など想定を超えたあらゆる条件下でも対応できる許容能力が高いことが評価されているからと思われる。しかし、浮子観測には観測の迅速性、省力化、見通し員の安全性などに脆弱性があると指摘されている<sup>2)</sup>。特に、「新たなステージ」では、迅速性がポイントになるため、豊富な観測人員を確保できない限り、現行法での観測には限界があると言わざる

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

#### a) ADCP (ADCP 搭載ボート)

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

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

#### b) 電波流速計

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

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

#### c) 画像解析

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

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

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

## (2) 新技術による観測時間の迅速化・省力化

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

### a) ADCP 搭載ボート

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

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

### b) 電波流速計

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



図-12 ADCP搭載ボートの観測状況



図-13 電波での観測状況

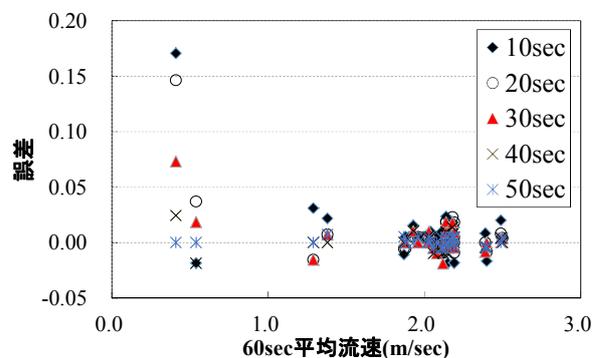


図-14 電波流速計の適正な測定時間



図-15 画像での観測状況

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

### c) 画像解析

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

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

### (3) 熟練度を問わない観測手法（標準化）

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

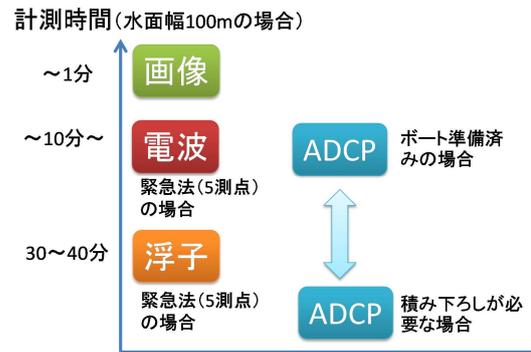


図-16 迅速度の評価



図-17 省力度の評価

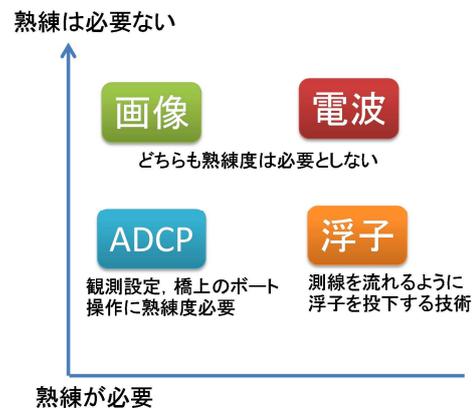


図-18 観測手法の標準化の評価（現地観測）

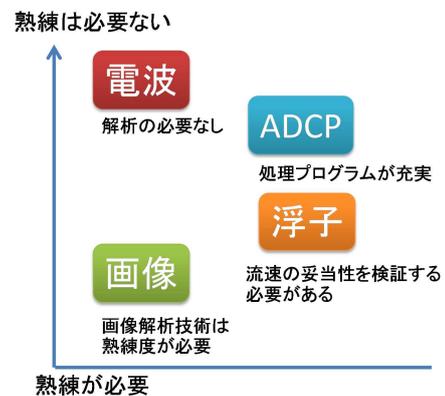


図-19 観測手法の標準化の評価（データ解析）

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

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

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

ついで ADCP と浮子が上げられる。Teledyne RD Instruments 社の ADCP は処理プログラム（WinRiver II Teledyne RD Instruments 社）やアプリケーション

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

#### (4) 流量算出での力学的空間内外挿法（DIEX）の有効性

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

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

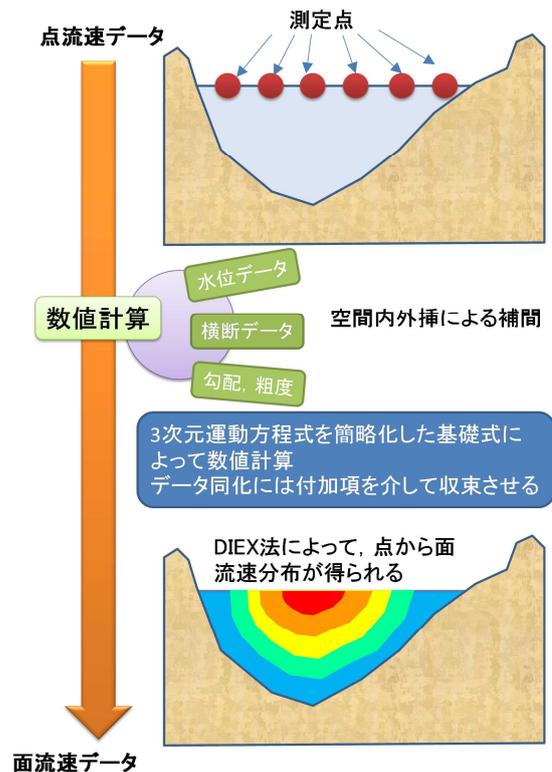


図-20 DIEX法の概要

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

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

#### (5) 現地観測での流量算出

##### a) 現地観測

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

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

### b) 各手法による流速測定結果

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

### c) 各手法による流量算出結果

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

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

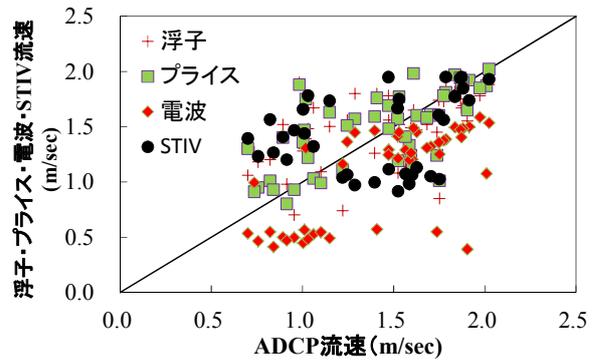


図-21 各手法による流速算出（石狩川）



図-22 流速測定時の水面波紋状況（石狩川）

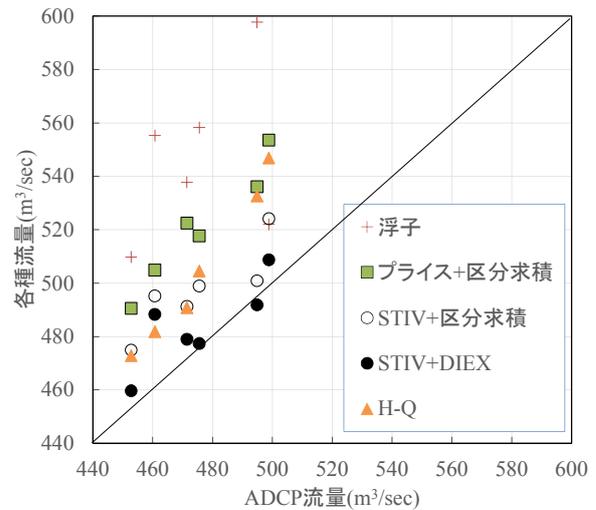


図-23 各手法による流量比較（石狩川）

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

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

ADCPに近い流量精度が得られる可能性がある。

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

#### d) 新技術による観測方法の今後の課題

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

#### (7) 「新たなステージ」に適用した観測所の整理

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

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

## 6. まとめと課題

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

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

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

## 7. 参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・保全局：新たなステージに対応した防災・減災のあり方，2015.
- 2) 橋場雅弘・甲斐達也・津田哲也・土田宏一：河川流量観測の高度化に対する観測実務者からの視点，河川流量観測の新時代，第4巻，2014.
- 3) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11，No.5，pp.460-471，1998.
- 4) 喜澤一史・井出康郎：河川流量観測における新計測法の提案について，河川技術論文集，485-490，2001.
- 5) 萬矢敦啓・菅野裕也・深見和彦：河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点，河川流量観測の新時代，第1巻，2010.
- 6) 山口高志：流量監視システムの提案，財団法人河川情報センター 河川情報研究所報告，第2号，1988.
- 7) 宮村恵理也・中島洋一・吉村淳也：本格的な実用期を迎えた電波流速計『固定電波流速計&RYUKAN』，河川流量観測の新時代，第3巻，2012.
- 8) 藤田一郎・安藤敬済・堤志帆・岡部健士：STIVによる劣悪な撮影条件での河川洪水計測，水工学論文集，第53巻，2009.
- 9) 藤田一郎・小阪純史・萬矢敦啓・本永良樹：遠赤外線カメラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，I\_703-I\_708，2013.
- 10) 山本 泰督・本永 良樹・栗城 稔：KU-STIVを用いた流量観測の検証，河川情報シンポジウム講演集，2014.
- 11) 藤田一郎・北田真規・霜野充・橋田隆史・萬矢敦啓・本永 良樹：複数アングルの画像計測とラジコンボート搭載型ADCPによる融雪洪水流の空間計測，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.613-618，2014.
- 12) 独立行政法人土木研究所・水災害リスクマネジメント国際センター：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編）Ver.1.0.
- 13) 二瓶泰雄・木水啓：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案，土木学会論文集，No.803/II-73，pp.155-160，2005.
- 14) 柏田仁・二瓶泰雄・高島栄二郎・山崎裕介・市山誠：力学的内外挿法（DIEX法）に基づく「点」から「面」流速データ推定法の構築，河川技術論文集，第17巻，2011.
- 15) 島本重寿・藤田一郎・萬矢敦啓・柏田仁・浜口憲一郎・山崎祐介：画像処理型流速測定法を用いた流量観測技術の実用化に向けた検討，河川技術論文集，第20巻，2014.
- 16) 柏田仁・二瓶泰雄・山下武宣・山崎祐介・市山誠：電波流速計による表層流速計測とDIEX法に基づく流量推定手法の提案，河川技術論文集，第18巻，2012.

(2015. 2. 13受付)