

|            |  |  |  |
|------------|--|--|--|
| 技術研究開発テーマ名 | ADCP 観測および流況解析に基づいた浮子流観データの検証と河川計画への反映 |  |  |
| 研究代表者      |  |  |  |
| 氏名         | 所属・役職                                  |  |  |
| 岡田将治       | 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科・准教授             |  |  |
| 共同研究者      |  |  |  |
| 氏名         | 所属・役職                                  |  |  |
| 門田章宏       | 大学院理工学研究科 生産環境工学専攻                     |  |  |

#### 背景・課題

河道計画や維持管理を行ううえで、流量は最も重要な指標であるため、洪水中の流況や河床変動計測の高精度化が望まれている。各河川の基準地点の洪水流量観測は橋上からの浮子法が一般的であるが、複断面および橋脚等の河川構造物の後流の影響、洪水中の河床変動が把握できない等の理由から、その計測精度の評価が課題とされている。

四万十川の具同基準地点では、「水文観測業務規程等」に基づいて洪水時の浮子流量観測を実施しているが、近年 H-Q 関係式に変化が生じている。原因としては、橋梁下流部の局所洗掘および橋脚・床固工による後流の影響等が考えられる。さらに流出率が 1.0 を上回っている洪水が多くなってきていることから、基本方針策定時においても雨量観測並びに流量観測の精度向上が今後の課題として指摘されている。

#### 技術研究開発の目的

前章で示した流量観測における十分な精度の確保、向上のために、本研究では、近年、国内外問わず、研究者や実務者が多く使用ようになってきた ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler：超音波ドップラー流速計) を四万十川の洪水流観測に適用し、ADCP 観測データの精度評価手法の基礎技術を確立するとともに、洪水中に ADCP 橋上観測から得られたデータに基づいて橋脚、床止め工等の河川構造物を含めた模型水理実験および流況解析により、浮子流観データの精度検証を行う。

これらの結果から、横断面形、橋脚等の河川構造物、樹木群等が流況区間の流況に及ぼす影響を定量的に把握することにより、「浮子法でも十分な計測精度を有する断面」、「浮子法の計測精度を向上させる観測法」あるいは「浮子観測が難しい断面」の評価法を提案する。

#### 技術研究開発の内容・成果

##### 1. 2009 年度および 2010 年度の検討内容と成果

##### (1)洪水時の浮子流量観測および定期横断測量データの整理

図-1 に示す具同地点の流況区間における昭和 57 年以降の定期横断測量結果、橋梁下流部の洗掘深および浮子流観データを整理することにより、これらの経年変化と流況特性の関連性を検討する。

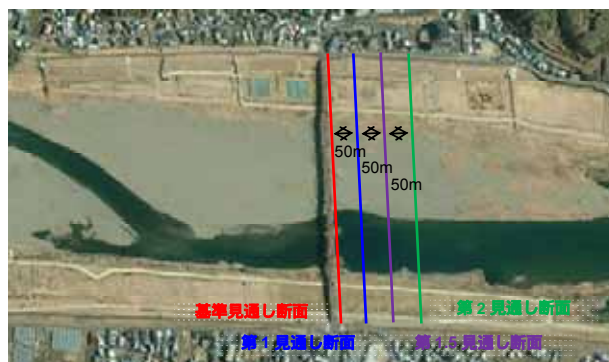


図-1 四万十川具同地点付近の航空写真と見通し断面の位置

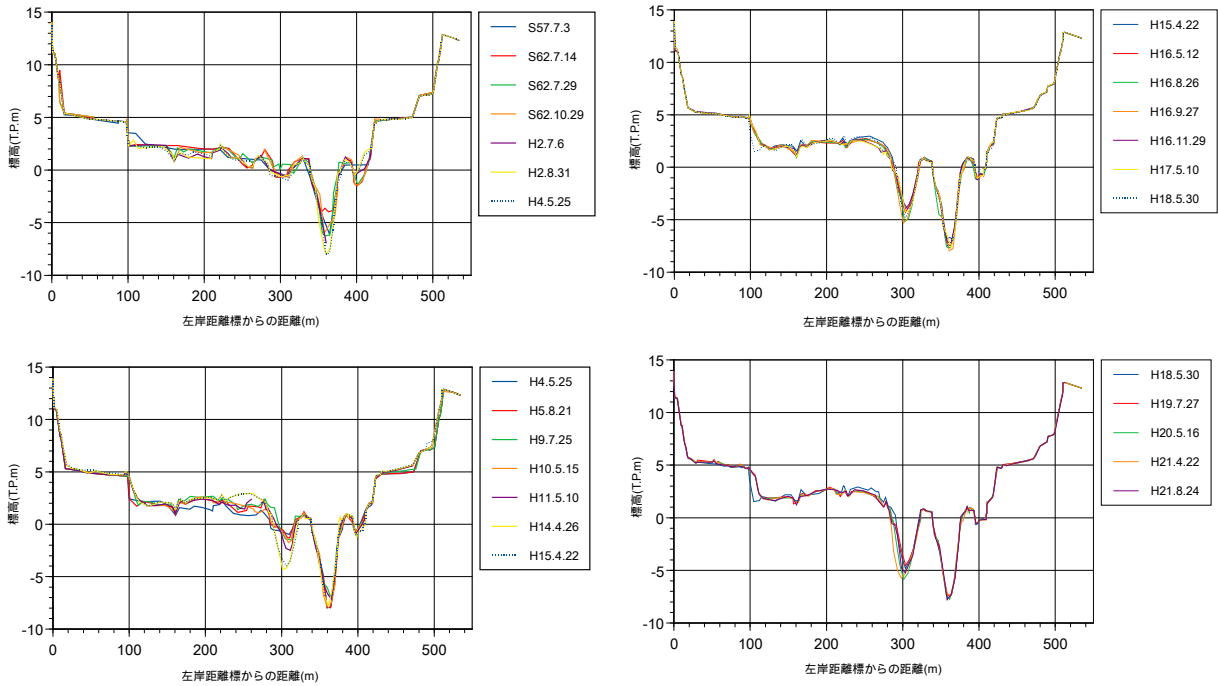


図-2 基準見通し断面における横断河床形状の経年変化(S57年～H21年)

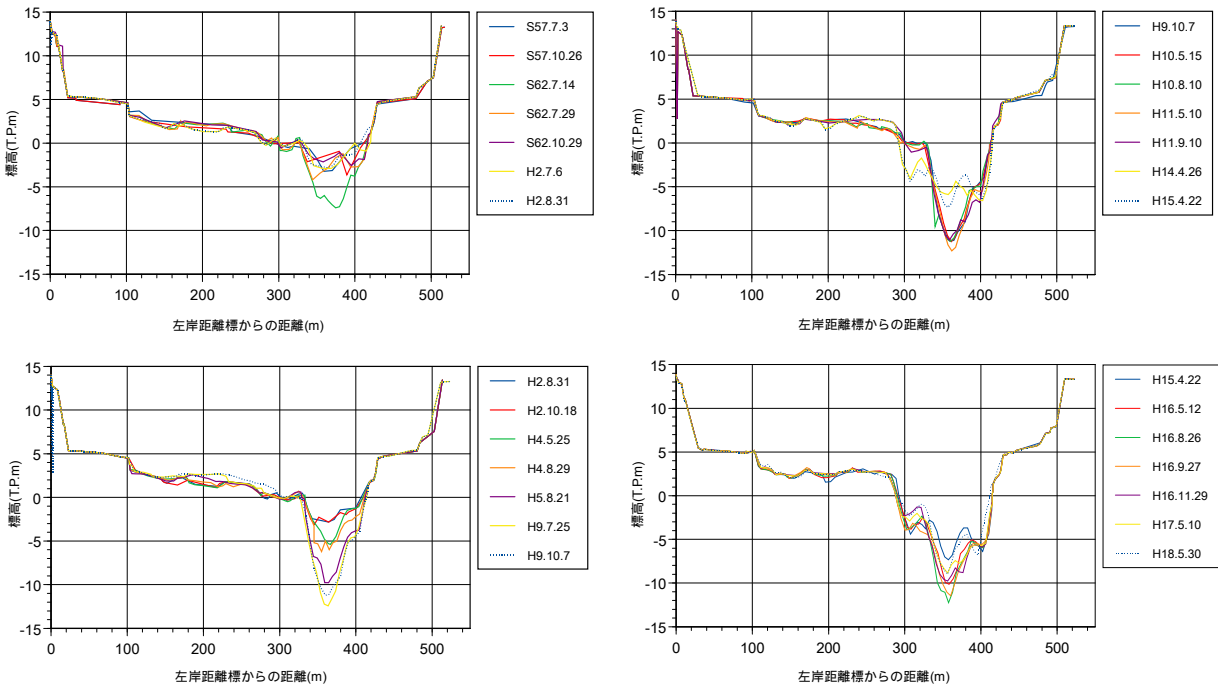


図-3 第1見通し断面における横断河床形状の経年変化(S57年～H18年)

図-2 に基準見通し断面における横断河床形状経年変化を示す。現況の河床形状のように、左岸から300m付近と360m付近に生じている2箇所の深掘れは、平成4年以前は360m付近の1箇所のみであり、洗掘深は平成2年以降大きな変化は見られず、最深河床高は-8m程度である。300m付近の深掘れは、平成4年以降徐々に進行し、平成11年で最深河床高が-2m程度であったものが、平成14年には-4m程度まで低下し、平成16年に-5mまで、平成21年現在、-6m程度となっている。

図-3 に第1見通し断面における横断河床形状経年変化を示す。昭和57年10月から昭和62年の間に大きな出水は記録されていないが、澁筋部中央では約6mの河床低下が生じている。その直後の7月16日にピーク流量3727m<sup>3</sup>/sの小規模出水後の測量結果では、昭和57年と同程度の河床高に戻っている。

その後、平成2年までは大きな変化は見られていない。平成5年8月の出水後に最深河床高が-5mから-10mまで大きく低下し、平成9年7月洪水でさらに2m低下し、その平成11年まで同様な状況であったが、平成14年洪水で最深部が約6m上昇し、平成15年から16年にかけて再度低下し、平成16年10月の大規模洪水(Q=10125m<sup>3</sup>/s)の以降は若干上昇している。平成18年には最深部が-7m程度であったが、平成21年現在は-12m程度となっている。

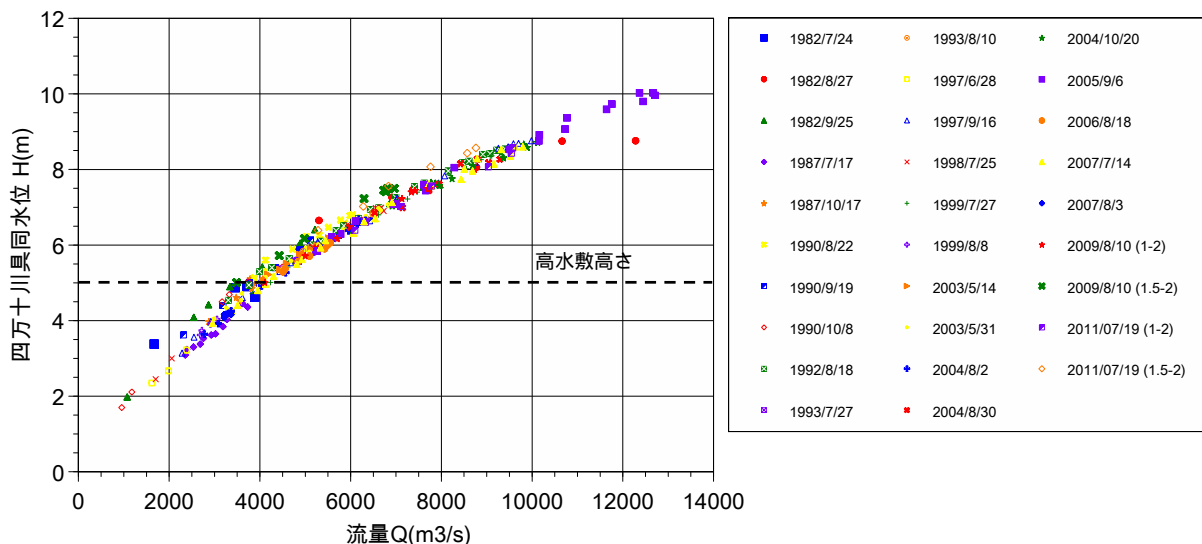


図-4 1982(昭和57)年から2011年(平成23年)までに実施された浮子流観により作成された水位 - 流量関係図

図-4は浮子流観で得られた水位と流量の関係をプロットしたものである。図から、概ねひとつの曲線上に集中していることがわかる。また、具同地点では同地点の水位標で約5mが高水敷の高さとなっており、この関係図においても、約5mの高さにおいて変曲点になっていることがわかる。

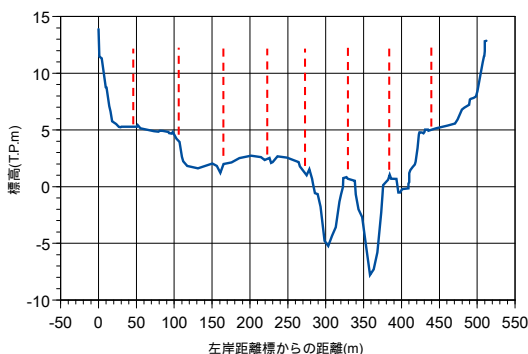


図-5 基準断面における浮子流観区分断面

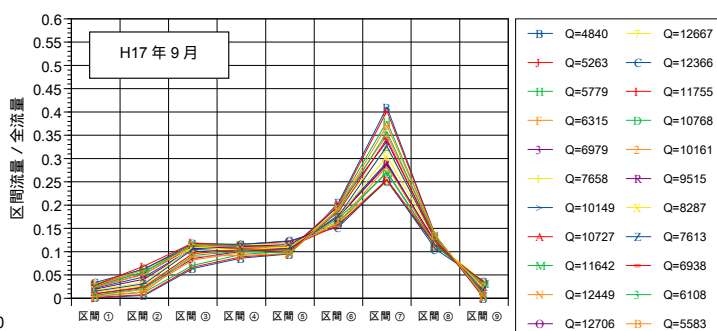


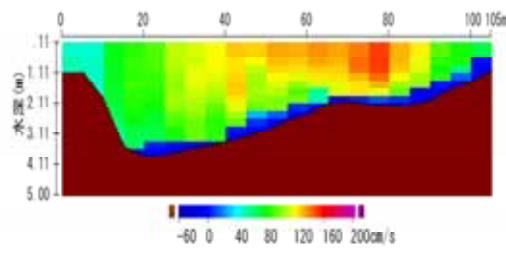
図-6 2005(H17)年洪水における各区分断面の流量割合

図-5に四万十川橋直下流の基準見通し断面における浮子流観の区分断面図を示す。具同地点では、四万十川橋の橋脚が低水路内に5箇所、高水敷上に3箇所あることから、各橋脚間を浮子流観の区分断面として、合計9断面設定されている。図-6に洪水時の各区分断面の流量比を示す。具同地点における流況の特徴として、区間を流下する割合が55%から30%程度の間で変動しており、区間については20%前後であることがわかる。また、区間の深掘れが進行し始めた平成4年以降においても、各区間の流量配分に有意な差が見られなかった。

## (2) ADCPの洪水流況計測精度に関する検討

ADCP観測データの精度評価手法の基礎技術の確立を目的として、移動観測における計測データの精度評価法を提案した。固定観測で一般に用いられている計測精度の“線”的な考え方を“面”的に拡張し、単位移動距離あたりの計測精度と始点から終点までの計測断面全体の平均的な計測精度を算出することが重要となる。ここに、移動観測における計測精度を表す指標として、図-7に示すように、単位移動距離あたりの流速計測値が含む誤差流速の標準偏差を偏差流速(Deviation Velocity)、偏差流速を断面全体

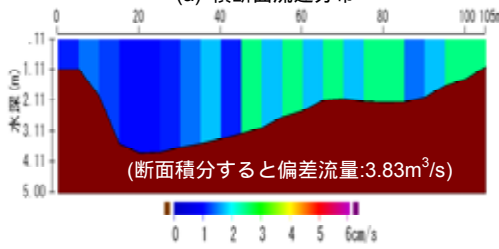
で積分したものを偏差流量と定義する。流れ場の精度評価には、各グリッドにおける偏差流速と流速計測値の比である偏差流速比を、断面流量の精度評価には、偏差流量と計測した断面流量値の比である偏差流量比を提案する。



(a) 横断面流速分布

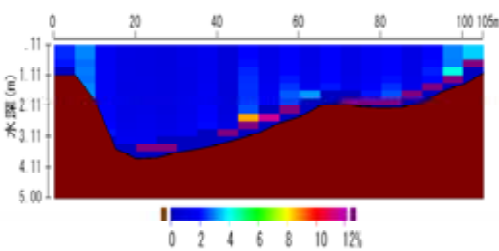
各グリッドの計測精度：  
偏差流速比 (3) = (2) / (1)

断面流量の計測精度：  
偏差流量比  
= (b)の断面積分値 / (a)の計測流量



(b) 単位移動距離あたりの  
流速計測誤差の標準偏差コンター

横断 5m 間隔の偏差流速を算出  
断面積分により、偏差流量を算出  
→ ADCP の性能上の流量誤差



(c) 各グリッドの偏差流速比  
= 偏差流速 / 流速

・実測流速と偏差流速の比を算出  
・各グリッドの計測精度を評価  
→ 計測精度の評価項目として利用

図-7 偏差流速，偏差流量および偏差流速比の定義

### (3) ADCP と浮子を用いた洪水観測結果の比較

2009年8月台風9号出水時に ADCP を用いた流量観測を行い、具同地点の流況特性を明らかにするとともに、浮子観測法との比較を行って観測手法の問題点を考察する。図-8 に観測状況を示す。



図-8 2009年台風9号出水時における ADCP 搭載ボートおよび浮子による洪水観測状況

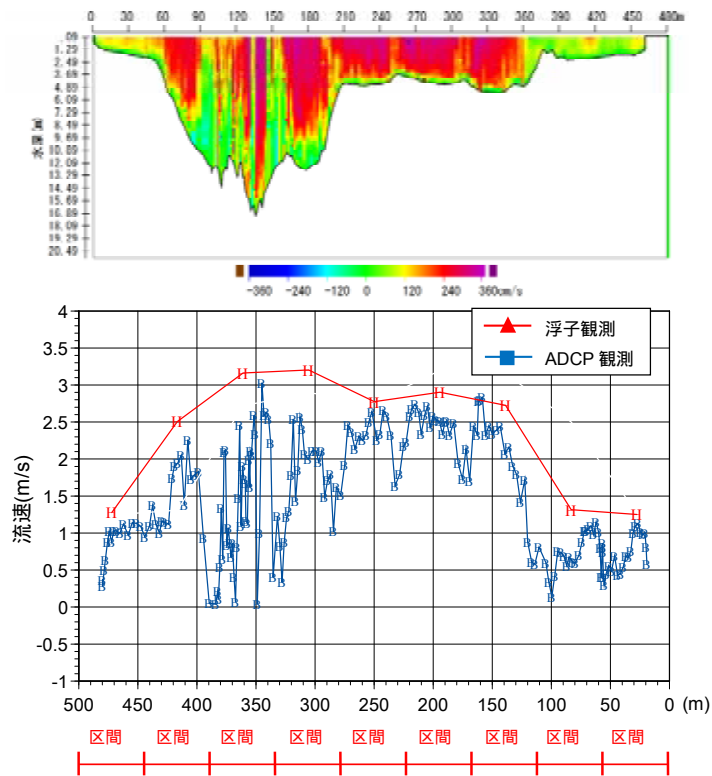


図-9 ほぼ同時刻に計測された ADCP 観測による水深平均流速と浮子観測による各区間断面の更正流速（計測時刻は ADCP 13:23，浮子 13:24）

ADCP と浮子観測で得られた流量値に差が生じた原因を考察するために、図-9 に浮子の各区間の更正流速と ADCP で計測した各地点の水深平均流速値を比較する。区間 1、および 2 において、浮子の更正流速と ADCP の水深平均流速の値の差が大きいことがわかる。また、これらの区間の断面積は、全断面積に占める割合が大きいため、この流速値の差が流量差になっているものと考えられる。また、橋脚や床止め工による後流の影響が想定される具同地点においては、浮子観測で得られる更正速度は、浮子が流速の大きい箇所を流下した可能性が高く、区間断面を代表する値とはなっていない。ADCP 観測によって、後流による渦が水面付近だけでなく、水深が大きいところまで同様に生じていることが明らかとなった。また、このときの偏差流量比を求めた結果、1.6%であり、ADCP で観測された流量は高い精度を有していることがわかった。

#### (4)GPS 測深機を用いた河床形状計測

浮子流観を行っている具同地点(四万十川橋)の上下流区間において、図-10 に示すトータルステーションおよび GPS を接続した測深機を用いた詳細な河床形状計測を行い、図-11 に示すような四万十川橋周辺の河床形状が得られた。



図-10 トータルステーションによる砂州形状測量・魚群探知機による河床形状計測状況

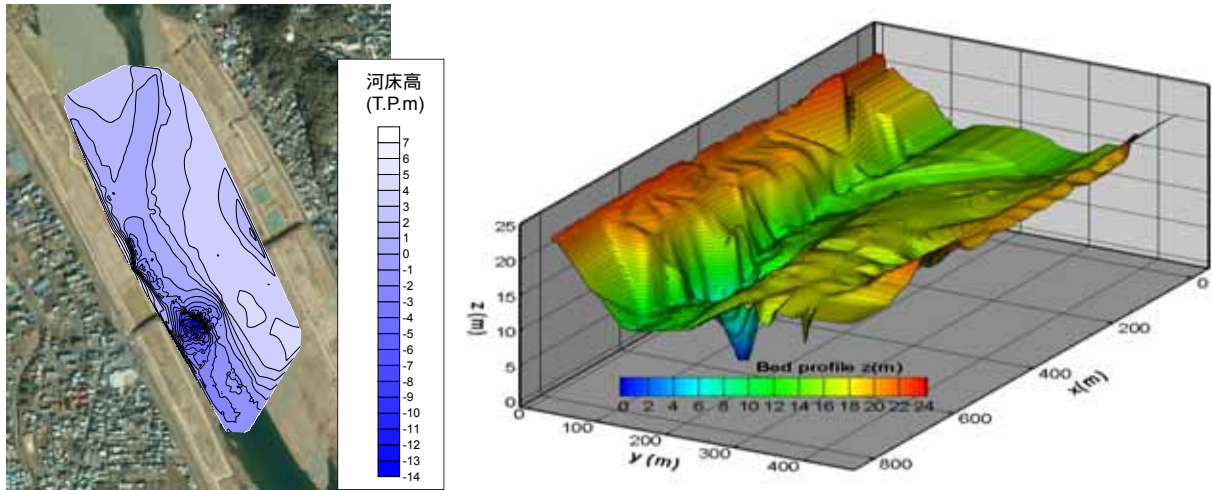


図-11 TS 測量および測深機データから生成した四万十川橋周辺の河床形状

(5) 観測結果に基づいた 3 次元流況解析

(4)において計測された河床形状および洪水時の ADCP 橋上観測から得られたデータに基づいた 3 次元流況解析を行うことにより、浮子観測区間における流量  $3000 \sim 5000 \text{ m}^3/\text{s}$  規模の出水時における流況特性を明らかにする。図-12 に三次元流況解析を行った領域と橋脚直下流の洗掘孔の位置を示す。

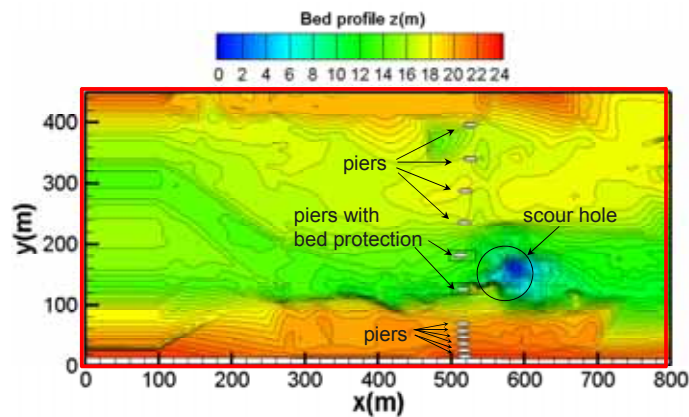


図-12 三次元流況解析を行った領域と洗掘孔の位置

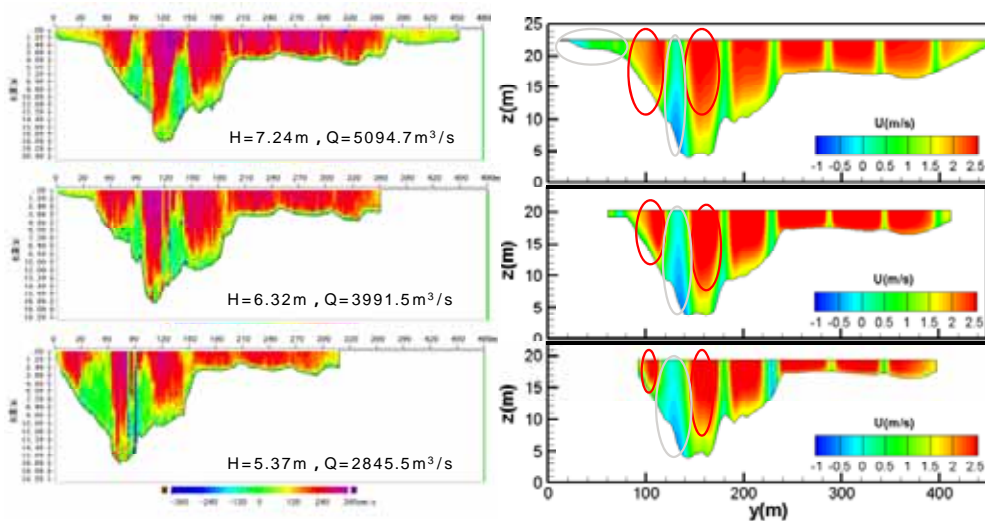


図-13 ADCP で計測した横断面流速分布(左)と解析結果(右)

四万十川直下流にある大きな洗掘孔，横列する橋脚やその周辺の床固工や河床粗度を考慮した三次元 k- 乱流解析による流況計算を行った．図-13 に ADCP で計測した横断面流速分布(左)と解析結果(右)を示す．流量  $5100\text{m}^3/\text{s}$  のケースでは，右岸側 6 本(P1～P6)の橋脚群による影響によって，流れが  $0\sim 1\text{m/s}$  の低流速にまで抑制されているのに対して，床固工のある二つの橋脚(P7,P8)の間で大きな逆流を伴った流速差が生じている．流量  $4000\text{m}^3/\text{s}$ ，流量  $2850\text{m}^3/\text{s}$  のケースでは，上流側からの偏流が直接，P7,P8 にある床固工への影響に大きく及ぼしており，その結果，橋脚間の流速が流量  $5100\text{m}^3/\text{s}$  のケースと比較して大きくなると考えられる．また，流量規模に応じて通水断面の形状も変化しており，この変化に応じて，流量規模の違いで橋脚間を流れる流速よりもむしろ橋脚群の背後で流れる逆流域の規模が大きくなるのが分かる．これらの傾向は ADCP 観測の結果にも表れており，床固工を伴った橋脚群周辺の三次元的な流れの傾向を捉えることが本解析で可能であることが確認できた．

## 2. 2011 年度の検討内容と成果

### (1) 模型水理実験による具同地点の流況特性の把握

水理模型実験では検討区間である具同地点の河床形状および橋脚を  $1/400$  スケールモデルで作成し，流れの可視化実験を行って PTV 解析結果と比較することにより，三次元流況解析( $5100\text{m}^3/\text{s}$  と  $9500\text{m}^3/\text{s}$ )の流況の再現性について検証することを目的とした．図-14 に四万十川具同地点上下流区間の詳細な測量結果に基づいて  $1/400$  に作成した河床モデルを示す．この河床モデルは断面を 400 個に分割して  $2.5\text{cm}$  間隔で河床の高さをプロットしていき，ゴムをカットして張り合わせることで作成している．図-15 に四万十川橋の橋脚モデルと橋脚周辺の根固めブロックモデルを示す．実際の橋脚が約  $4\text{m}$  であり，上にかかるにつれて細くなっているもので上端は約  $3\text{m}$  であったため，実験ではモデルの底の橋脚径は  $1\text{cm}$  とし，上端は  $0.75\text{cm}$  とした．また，右岸側から 1~6 番目の橋脚の間隔を約  $3\text{cm}$ ，7~8 番目の間隔は約  $13\text{cm}$  とした．橋脚部分の素材はステンレスを使用し，根固工部分にはゴムの破片で再現している．

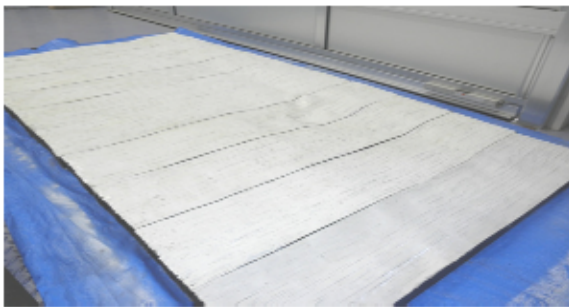


図-14 具同地点上下流区間の河床地形モデル



図-15 橋脚モデルに使用したゴム素材の根固め

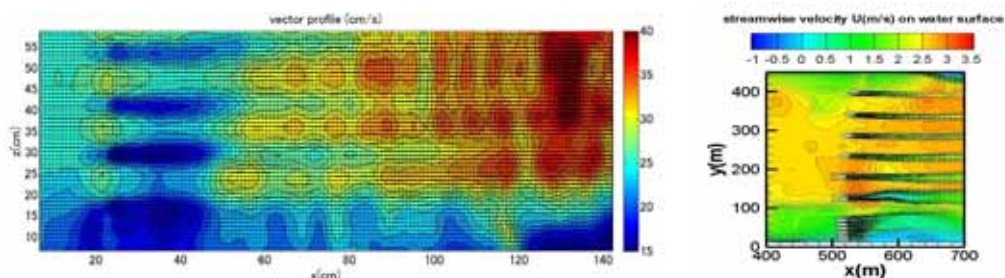


図-16 主流方向流速ベクトルの分布図( $Q=5000\text{m}^3/\text{s}$ ) (左)と解析結果( $Q=5100\text{m}^3/\text{s}$ )

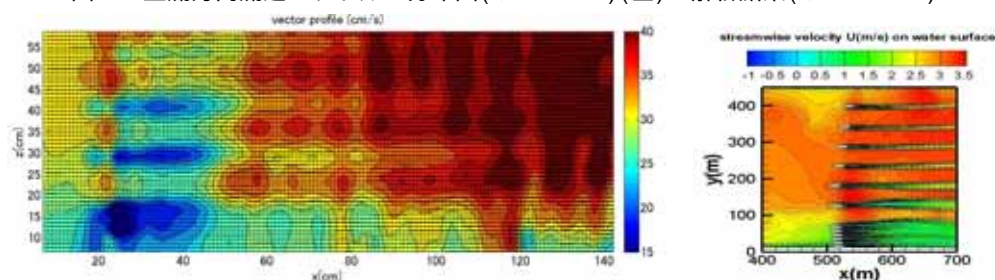


図-17 主流方向流速ベクトルの分布図( $Q=8000\text{m}^3/\text{s}$ ) (左)と解析結果( $Q=9500\text{m}^3/\text{s}$ )

図-17 および図-18 にそれぞれ主流方向流速ベクトルの分布図と解析結果の流跡線を示す．流況の特徴として、左岸の方が右岸よりも流速が大きくなっていることや橋脚と橋脚の間の流速が大きくなっていること、橋脚の後流の流速が小さくなっていること等、解析結果と傾向が一致している．PTV 解析結果から得られた流れの特徴を三次元流況解析によって概ね再現できていることを確認した．

(2) 四万十川の計画規模(計画高水流量 14000m<sup>3</sup>/s)に近い流量観測結果の考察

図-18 に観測実施体制を示す．2011 年度は、具同地点の約 1km 下流の不破地点の左岸堤防が完成したことから、洪水発生時には具同地点と同時に ADCP および浮子による洪水流量観測を実施することとした．四万十川流域では 7 月 18 日夜半から雨が降り始め、7 月 19 日の夜までの約 2 日間の総降雨量は船戸で 826.5mm、梶原で 516mm、大正で 493mm、江川崎で 388.5mm、窪川で 491 mmであった．図-19 に不破地点における見通し断面の横断面形状を示す．図から、具同地点の特徴とは異なり、縦断方向に断面形がほぼ一様であることがわかる．河道法線形も直線的であり、橋脚の数も少なく、出水時にも橋脚後流の影響が小さいことから流量観測には好ましい条件となっている．図-20 に具同および不破地点のピーク水位の時間帯の状況と水位ハイドログラフを示す．具同地点の水位のピークは 7 月 19 日の 17 時で水位標 8.5m、T.P.換算値で 9.73m であり、高水敷高さが具同水位標基準で約 5m であるため、約 24 時間複断面流れの状態であったことがわかる．浮子による流量観測はピーク水位を迎えた時間帯が開始し、水位が約 4m 低下した翌 20 日の 3 時頃までの計 6 回実施された．ADCP 観測は観測時の安全を考慮して、明け方の 5 時から 12 時の時間帯に具同で 7 回、不破で 8 回実施された．



図-18 2011 年度の洪水観測実施体制

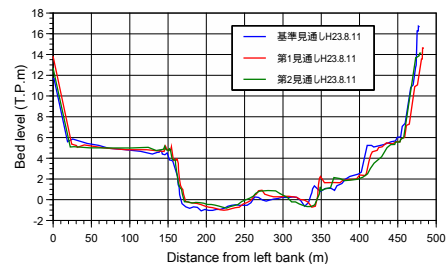


図-19 不破地点の見通し断面の横断面形状

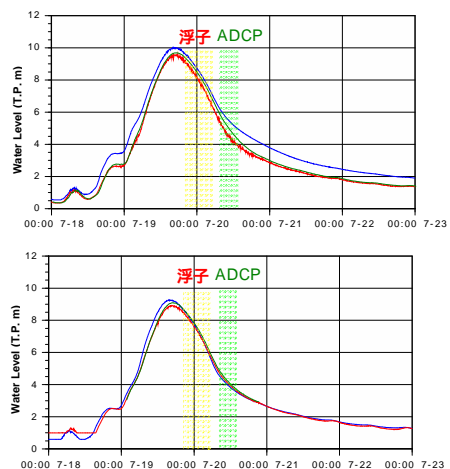


図-20 2011 年 7 月台風 6 号洪水の状況と水位ハイドログラフ(上が具同、下が不破)



図-21 に具同および不破地点において浮子によって観測された流量の時間変化を示す。具同地点については、従来から行われている第1見通し断面から第2見通し断面の100m区間の観測値と2007年以降の出水時に追加実施されている第1.5見通しから第2見通しまでの観測値をプロットしている。ここでポイントとなるのは、■の具同第1.5見通し～第2見通しの値と▲の不破の値が8500m<sup>3</sup>/sから5000m<sup>3</sup>/sの時間帯ではほぼ等しいことである。すなわち、流況が一般的な不破地点では浮子観測は実施しやすく精度をある程度確保できる可能性があり、その地点と距離が1km程度しか離れていない具同地点において同じ時間帯にほぼ同様な流量値であれば、具同地点の第1.5～第2見通し断面における浮子流観の計測精度も同等に高い可能性がある。また、第1～第2見通し断面で観測される流量値は第1.5～第2見通し断面のものに比べて系統的に1割程度大きくなっている。図-22 に具同地点において、図-23 に不破地点において ADCP で観測された流速ベクトルの横断分布を示す。両図の比較から、不破地点の流速分布は流量が変化しても低水路と高水敷の区間でほぼ一様となっていることがわかる。高水敷上にも樹木の繁茂は少ないため、水位が上昇しても同様な流れの傾向を示すと考えられる。

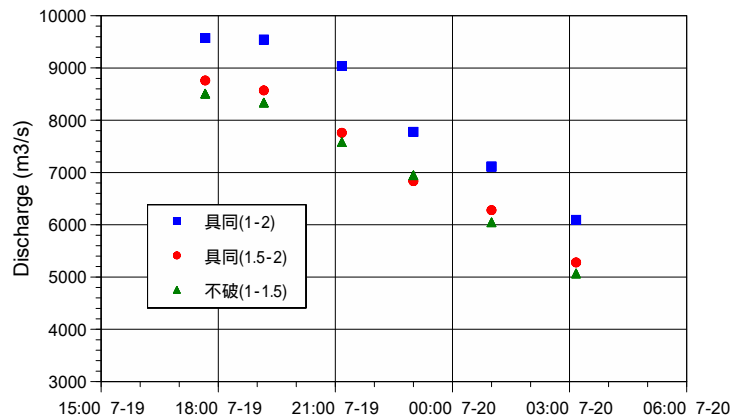


図-21 2011年7月台風6号洪水時に具同および不破地点で観測された流量値

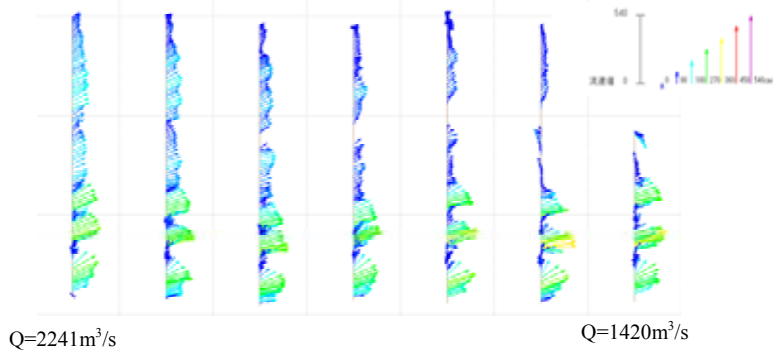


図-22 具同地点において ADCP により観測された水深平均流速ベクトルの横断分布

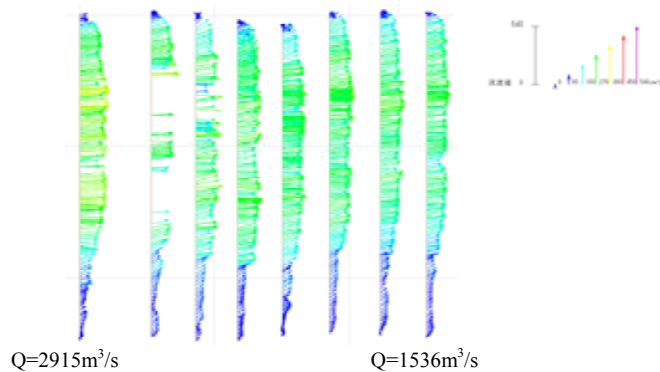


図-23 不破地点において ADCP により観測された水深平均流速ベクトルの横断分布

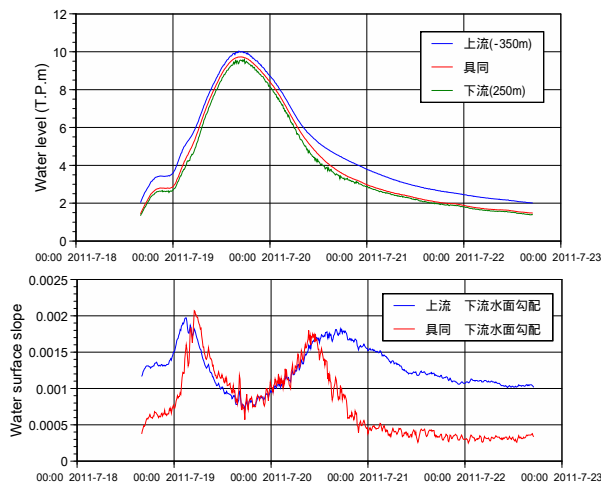


図-24 具同地点上下流のハイドログラフ(上)と水面勾配の時間変化(下)

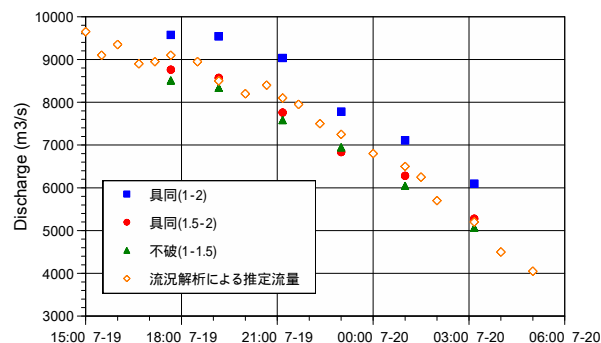


図-25 具同および不破地点の浮子流観結果と流況解析結果の比較

図-24 に具同地点における水面勾配の時間変化と図-13 で示した具同地点の流量  $5000\text{m}^3/\text{s}$  以下の洪水流況を再現できた河道条件を用いて各時刻の水面勾配に一致する流量を不等流計算から求めた結果を図-25 に示す。この図から、流量が各時刻において同程度となった具同第 1.5 ~ 第 2 見通し断面と不破第 1 ~ 1.5 見通し断面の値とほぼ同様となった。このことから、具同地点において完全に複断面流れとなる  $5000\text{m}^3/\text{s}$  から  $9000\text{m}^3/\text{s}$  規模までの流量については、浮子観測でも見通し断面の設定によって、十分な計測精度を有している可能性が高い。さらに、近年の計画規模に近い出水の 2004 年台風 23 号(最大流量:  $10186\text{m}^3/\text{s}$ )、2005 年台風 14 号(最大流量:  $12596\text{m}^3/\text{s}$ )についても、同様に痕跡水位からその時の流量を推定した結果、表-1 に示すように浮子観測で得られている流量値と大差がなく、興味深い結果となっている。

表-1 近年の四万十川大規模出水時の痕跡水位から推定した流量

|               | 最大流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 痕跡水位の勾配<br>(9 ~ 10km 区間の左右岸平均) | 推定流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 2004 年台風 23 号 | 10,186                        | 1/1333                         | 9,600                         |
| 2005 年台風 14 号 | 12,596                        | 1/1667                         | 11,300                        |

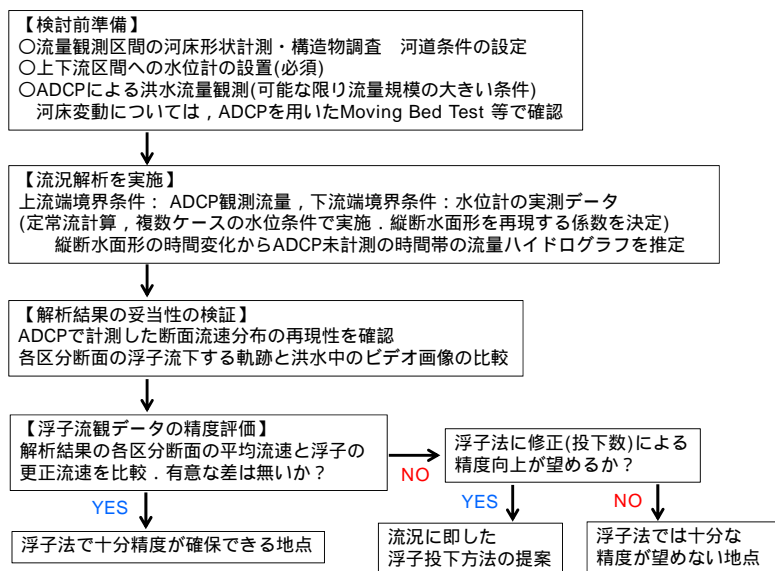


図-26 浮子流観データの精度評価検討フロー

### (3) 浮子流観データの精度評価手法の提案

前項(2)では、ADCPによる洪水観測結果と縦断水面形のデータを用いた流況解析と浮子によって得られた流量値を比較することにより、具同地点で複断面流れとなる  $5000 \text{ m}^3/\text{s}$  規模を閾値として、流量観測精度が変化している可能性を示した。この検討フローを図に示したのが図-26 である。つぎに、解析結果の妥当性を調べるために、流況解析から得られる各区断面の流量と浮子観測から得られる区分断面流量との比較を行う。図-27 および図-28 の右図に 2011 年出水時の浮子流観による各区断面の流量と同時刻の流量を前述の方法により推定した結果から得られる各区断面流量を示し、左図にはその時の水表面の流跡線を示す。これらの図より、区分断面 6 および 7 において、河床形状が縦断的に大きく変化する第 1 見通し～第 2 見通し区間の流量の差異が断面全体の流量差となっていることがわかる。また、解析結果から具同第 1.5 見通し～第 2 見通しの 50m 区間でも、さらに 50m 下流へ延長した第 2.5 見通しを仮に設定して観測を実施しても流量値にほとんど違いは見られないことがわかる。

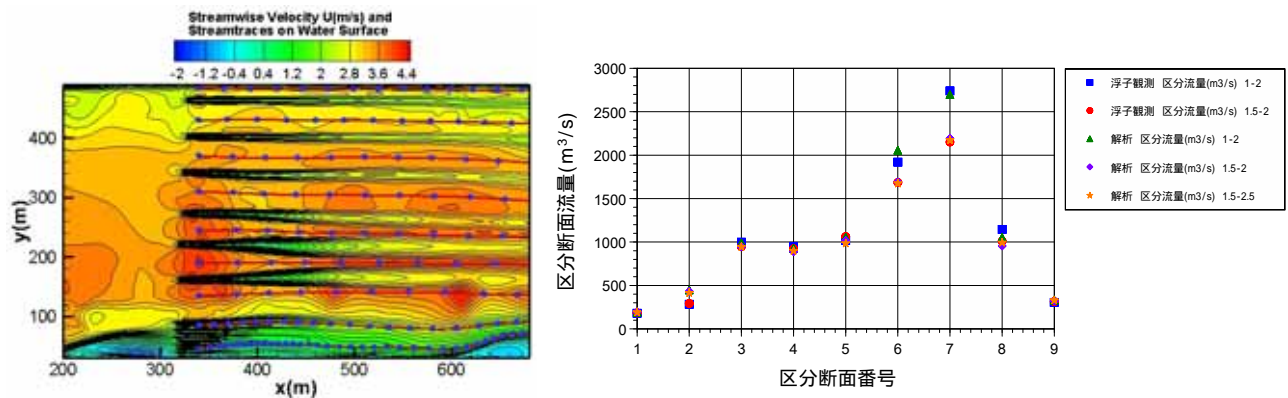


図-27 解析結果の流跡線(左)と浮子流観と解析結果の区分断面流量の比較(Q=8500m³/s)(右)

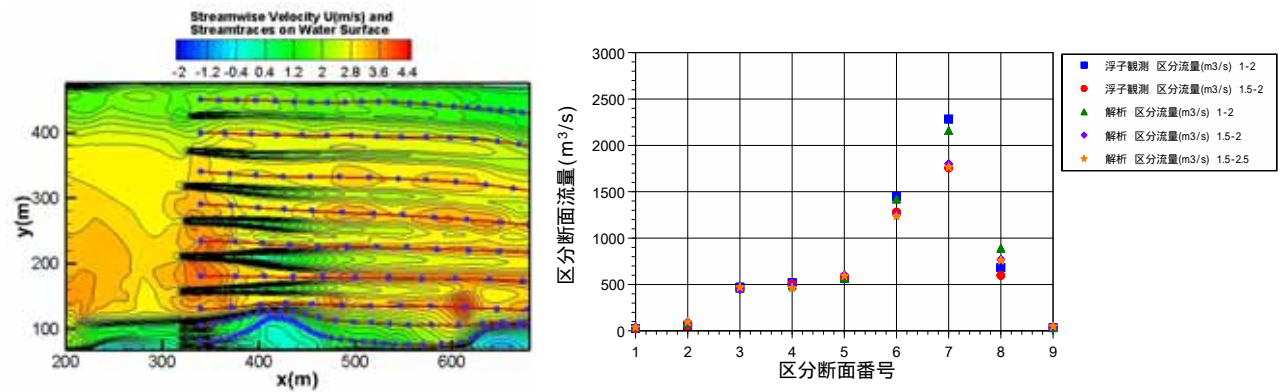


図-28 解析結果の流跡線(左)と浮子流観と解析結果の区分断面流量の比較(Q=5200m³/s)(右)

### (4) 2011 年度の研究成果のまとめ

$5000 \text{ m}^3/\text{s}$  規模の洪水流を再現した河道条件を用いて、2011 年洪水時( $5000 \text{ m}^3/\text{s}$  以上)の縦断水面形に合うように流量ハイドログラフを推算した結果、具同(第 1.5 見通し～第 2 見通し)および不破地点において浮子観測で得られた値と同程度となった。洪水時に計測された浮子流観データの精度評価手法として、縦断水面形の計測、ADCP による流量観測および流況解析による流観区間の流況特性の把握を柱とする検討フローを提案した。提案する浮子流観データの精度評価手法を、2011 年洪水時の具同地点において推算した流量  $8500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5200 \text{ m}^3/\text{s}$  の条件に適用した結果、縦断的に横断面形状が変化する第 1 見通し～第 2 見通しにおいて、深掘れ部がある区分断面 6 および 7 の浮子による計測値が断面流量を過大評価する原因であることが明らかとなった。観測精度確保の対策として、見通し断面を 50m 下流(第 1.5 見通し断面から計測開始)にすることを提案した。

### 今後の課題・展望

本研究は、ADCP と RTK-GPS を搭載したボートで洪水時の流量を観測し、その結果と縦断水面形データを用いて解析を行うことにより、これまで明らかにされていなかった詳細な洪水流況の把握とそれに関連して浮子を橋から投下して流下させることによって得られる流量の関連付けを試みたものである。研究代表者は洪水時の土砂水理現象の解明を目的として現地観測技術の高度化を、共同研究者は数値解析により構造物周辺の流れや河床変動を専門分野としている。本研究の成果は、専門分野の異なる研究者が共同して課題に取り組んだことによって得られたものであり、解決に向けて一歩前進と考える。ただし、本研究では洪水時の流量観測に河床変動を考慮していないため、今後の検討課題とする。

研究代表者が進めている ADCP を用いた洪水時の観測技術は着実に進展している。例えば、図-29 に示す 2 本の ADCP 搭載ボートの航跡は、本研究で不破地点において計測されたものである。測位精度の高い RTK-GPS で計測した航跡が実際のボートの航跡となっているが、ADCP の機能のひとつであるボトムトラック(ボートの速度と流れの速度を分解するために、河床が移動しないという仮定でボートの対地速度を求める機能)では、上流に移動するような航跡を描く。すなわち、各時刻の両者の移動速度(ベクトル)からその地点の河床移動速度の計測が可能となる。ADCP は水深方向の流速分布も同時に計測できることから、実河川の洪水時の流況と掃流砂量の同時計測技術への発展が期待できる。さらに、図-30 および図-31 に示すような ADCP の反射強度を利用して洪水時の浮遊砂濃度を推定する技術の開発も進んでおり、ふたつの技術を併せれば、ADCP1 台で洪水流況、掃流砂量および浮遊土砂量の同時に計測できるようになる。今後、本研究課題のように得意分野の異なる研究者同士が協働して課題に取り組むことにより、洪水時の土砂水理現象の解明に向けて観測技術と解析技術双方の高度化が期待できる。

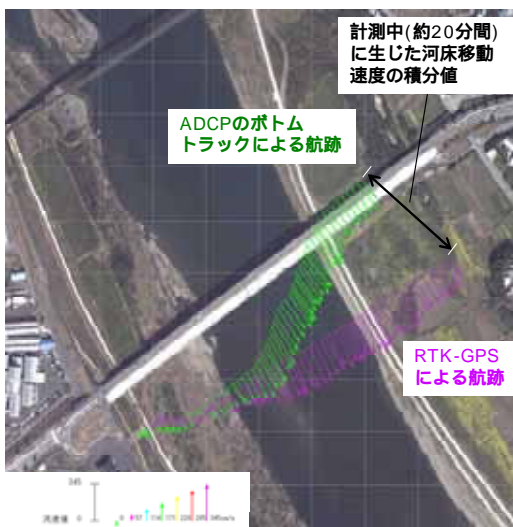


図-29 ADCP のボトムトラック機能による航跡と RTK-GPS による航跡の比較

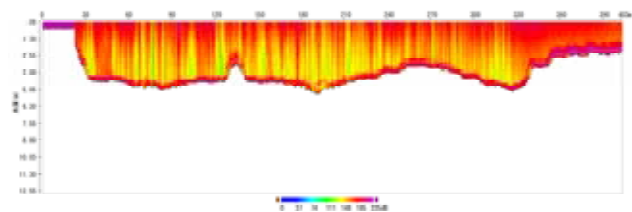


図-30 ADCP で計測した反射強度の横断面分布

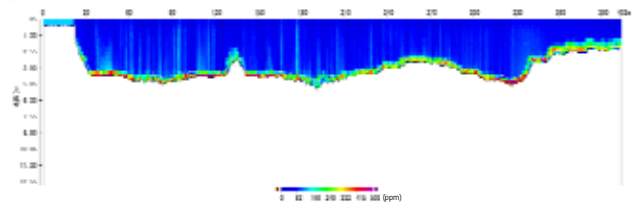


図-31 ADCP の反射強度から推定される浮遊砂濃度の横断面分布