

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560510

 研究課題名（和文） 河川における大小の渦形成と流速変動の精密な現地計測による
実態解明とその応用

 研究課題名（英文） Clarification of Vortex Formations and Velocity Fluctuations in
Rivers by Detailed Measurement and Their Applications

研究代表者

藤田 裕一郎 (FUJITA YUICHIRO)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号：90027285

研究成果の概要（和文）： 大小の渦が複雑に発生していて河川における水難危険箇所にもなっている河道彎曲部において、超音波を利用した3方向流速の時間連続測定計や空間分布計などを用いた移動観測と定点観測とを併行実施し、また、一部関連の水路実験も行った。それらから、このような渦の形成場では河床が極めて激しく変化していることを詳細に示し、河床深部に向かって落ち込み、隔壁状の凸部で湧き上がり、それを越えて再び落ち込むという流れの実態を明らかにするとともに、流速・流向変動の時空間規模や周期性を把握した。

研究成果の概要（英文）： At a river bend known as a danger spot of water accidents where small to large sized vortices appear complicatedly, moving observations and fixed point observations were carried out in parallel with an acoustic Doppler type of 3D velocity meter and those of current profilers. Additional experiments also were conducted. As the results, very sharp changes in riverbed topography are shown minutely and flows are clarified as plunge into deep part, well up along wall-like riverbed hump and plunge into again. Spatial-temporal scales and frequency properties of velocity fluctuations and changes in current directions are evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、水工学

キーワード：水理学・河川水理学・乱流現象・自然現象観測・ADCP・水難事故

1. 研究開始当初の背景

河川における様々な渦の形成については古くから興味を持たれ、例えば、洪水時に生じる低水路内と高水敷上の流速差に起因する大規模なせん断渦は、流水抵抗や高水敷への微細土砂供給と関連して、航空写真や水路実験によって現象把握が進められ、数値シミュレーションの進歩と並行して、研究成果の

実際の応用が図られている。

一方、音響ドップラー流向流速分布計（以下、ADCP；なおこれは、Teledyne RD Instruments社の商品名）を用いた測定は、早くから内湾・河口域の潮汐流等の観測に用いられ、近年では、全球測位システム（以下、

GPS)の普及によって測定位置が容易に求められることなどから、これらを組み合わせた広域面計測が実用化されつつある、また、水平照射型のH-ADCP計測が数値解析と組み合わせられて流量観測等の日常の業務にも供される機運にある。

このように、河川におけるADCP使用の一般化に伴い、研究面でも河川流れの3次元測定データに興味を持たれつつあるが、ADCPによって得られるデータは測定原理上、時間・空間分解能などかなり限定されたものであり、また、移動計測も河川乱流の周期から見ると瞬間値といえるものであることから、複数のADCPを用いて移動観測と定点での連続観測とを平行させた計測やプローブ型の流速計を併用するなどして、その測定精度を明確にすることが望まれている。

ADCPは、現在、より浅水場での測定が可能となり、浅瀬もある河川中流域での大規模な渦運動の実態解明に適用できうるような状況となっているが、このような場における流れそのものの研究に適用された例はほとんどない。

一方、河床の凹凸に起因するような小規模渦については、固定点にプローブ型流速計を置いて乱流計測が試みられた事例はあるものの、広域場の水理特性を把握した上でマイクロハビタットに着目した綿密測定の実例は見られず、そのような測定は河川環境研究においても切望されている。

以上のような測定を実施するためには、河川の現地計測を実験室レベルの手法と精度で実施できるように培ってきた流れの綿密な実測の経験の集積が必要であり、研究代表者らのグループはそれを備えている。

2. 研究の目的

本研究では、河川の現地計測を実験室レベルの精度で実施するために培ってきた流れの綿密な実測手法を活かして、最近汎用化の進んでいるADCPの時空間分解能と精度を現地計測から明確にするとともに、変化に富んだ河道における大規模渦から石礫床の凹凸による小規模渦までの、河川における大小様々な規模の3次元渦運動やそれによる流速変動の実態を高精度で把握する。

すなわち、これまで河道・河床形状と流れ場を把握してきた長良川の2、3地点を候補に、1台のADCPとGPSや自動追尾型光波測距儀とを用いた移動観測、および、固定点でのもう1台のADCPによる計測と、プローブ型流速計である、高精度マイクロ3次元音響ドップラー流速計(Micro-ADV; SonTek社製)や3次元電磁流速計による計測とを組み合わせ、種々の流量段階について両計測を並行して、長良川などの変化に富んだ河道区間における流れ場の全体的特徴と固

定点での時間的変動特性とを同時に明らかにする。

これらによって、河川の3次元流れ特性と河道平面形状や河床凹凸との関係を見出し、河川における乱流現象解明に資する。

それとともに、これらのデータを現有の流れ解析ソフトや既存のフリーソフト等の数値シミュレーションの河川スケールの検証データとして提供し、数値モデルの開発・改善に役立てさせるようとするものである。

さらに、現地での高流速の出現特性を明らかにして、遊泳者が思わぬ高速流にさらされる危険性を明示し、水難事故軽減のための情報としても活用することや、石礫床周辺の小規模渦など流れ特性と水流の混合や微細土砂の挙動との関係に考察に反映させ、それらから石礫床のマイクロハビタット機能の解明にも繋げたいと考えている。

3. 研究の方法

初めに、河道・河床形状と流れ場を把握してきた長良川の2、3地点を候補として、より浅水域の測定可能な新機種ADCPとGPSあるいは自動追尾型光波測距儀(トータルステーション)を組み合わせた観測システムを用いて、種々の流量段階について全体的な流れ場を詳細に測定する。

この流速場の空間的測定と平行して実施する現有ADCPを用いた時間的連続観測では、その設置・固定方法について検討を加え、設置点におけるADCPの超音波の照射角度からサイドローブによる水面および側岸からの影響を排除できるよう、自由に照射方向や設置水深を変化させうる固定装置を工夫する。また、3次元超音波ドップラー流速計等のプローブ計測も併用して、ADCPの時間分解能等について検討を加える。

この時間的連続観測ではビデオカメラを併用して大規模渦の周期的変化を記録するが、この場合、撮影に最適な河岸位置を選定し、撮影が不安無くかつ、できるだけ高所から実施できるようにして、渦の立体視や画像解析による表面流速場の測定も可能となるような高精度画像の入手を検討する。

ADCPのデータや河床データを空間内挿するに当たっては、(財)北海道河川防災研究センター等が提供するRIC-NAYSの適用を検討する。

また、流れ場全体の測定ではADCPで河床形状も同時に把握できるが、空間分解能に問題があるので、個別ビーム計測の検討やレーザ用魚群探知機の併用によって検証データを得て、使用ビームの選定方法等、空間分解能を補う方法の確立を図り、その結果から、浅水流モデルによる数値シミュレーションに用いる河床形状を得る。

一方、時間的連続観測については、大規模

渦の運動を把握するために、長時間データのスペクトル解析を実施し、画像記録と合わせて検討し、同時に、流速ベクトルの変動状況の把握を進め、底面から湧き上がってくるような様相を示す渦の3次元構造や河道形状との関係を明らかにする。これらから、水難危険個所に内在する複雑な河床地形と流れの様相との関係を分かりやすく示す方法についても考察を加える。

石礫床のマイクロハビタット機能については、2次元アクチュエータも組み込んだ実測装置の改造・再設計して流速の精密な3次元計測を可能とする装置を製作して大小の実験水路において試用し、石礫床が果たす河川環境機能評価にも繋げていけるよう、流れ計測にも力を注ぐ。

4. 研究成果

(1) 河川における大小の渦形成と流速変動の精密な現地計測

河川における大小の渦の形成には、河道の幅、水深の規模といった縦断的变化、湾曲等の平面的变化、岩や巨石による局所的变化が関わっているため、これまでの水難事故発生箇所の水理特性に関する研究で、河床形状や流れ特性がある程度把握している写真1に示した千鳥橋上流部（岐阜市古津）を対象として、流れ場を詳細に測定した。



写真1 長良川千鳥橋空中写真

①現地調査方法

現地調査の方法は以下の通りである。

- ・移動観測： Riverboat と呼ばれるポリエチレン製ボート、あるいは、写真2のように、改良した釣り船用レジャーに ADCP 等を搭載し、それらを観測者が操作する観測補助ボートの船首に連結し、押し船型式で移動観測を行った。トータルステーションの反射プリズムを ADCP の真上にあたる部分に据え、トータルステーションでこのプリズムを自動追尾し、ADCP によるボトムトラックデータと併せて測定位置を記録した。

- ・定点観測： 河川の横断方向にロープを張り、そのロープに ADCP を搭載した定点観

測用ボートを固定し、ほぼ定点状態として一定時間の観測を行った。移動観測と同様に定点観測用ボートにもプリズムを据え、ADCP のボトムトラックとともに、トータルステーションで位置を記録して固定状況・揺動状況を把握した。なお、Riverboat は3体に分かれたトリマラン型式であるため、流れに対する指向性が強く、それが自由な移動観測の妨げになったので、発泡スチロールでこれら3浮体の間を丁寧に埋めて使用した。

- ・ビデオカメラ撮影： ADCP 観測と並行して、川の広範囲を撮影できる左岸側高所から、フルハイビジョン撮影可能なビデオカメラ（Panasonic 社製 HDC-TM750）を使用して水面状態や定点観測状況を撮影した。

ADCP によって得た水深データから把握した詳細な河床形状とビデオカメラ撮影によって得た水面状態の変動映像とを比較検討することで、渦運動の3次元流速変動の実態を高精度で把握し、河床地形と流れの様相の関係性に考察を加えることとした。



写真2 移動観測システム

時間・空間分解能については、原理上、測器が正対する方向に直交する面内の流れを一樣と見なしたデータ処理をしているために、その面内については時間、空間とも高い分解能が期待できず、かつ、それは測器からの距離が離れるに従って低下していく。このため、測定値におけるその誤差の適切な評価については、搬送超音波の照射方向とビーム角、流れのスケールに基づいて考察し、そこから逆に、適切な時間・空間補間の方法について検討する。

②河床凹凸を詳細把握

最初に、ADCP の個々の超音波ビームのエコーに着目して河床凹凸の詳細な把握を試みた。すなわち、ADCP では通常、4ビームから得られたデータを比較・平均処理して測定値が求められるが、それに加えて、図中に示すように個別ビームの信号値をビーム照射方向に併せて座標変換を行い、それぞれの河床の測定座標を求めた。

通常の4ビームによる水深の測定結果を図1に、個別ビームの場合の等深線図を図2に示す。単純に水深分布を見ても、0~15mまでと河川としては非常に値の幅が広く、河床形状が複雑に変化している様子が見える。とくに、横軸-50mの上流から下流に

かけての極めて狭い範囲で 10m 以上の水深差が生じている。

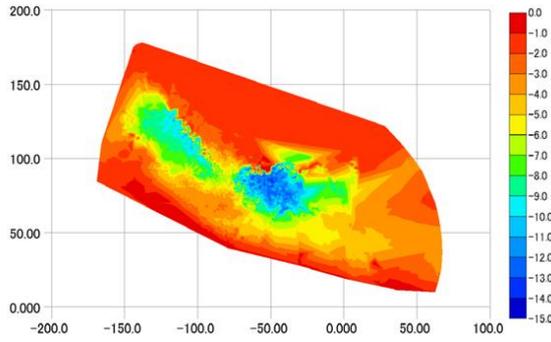


図1 4ビーム平均の等深線図

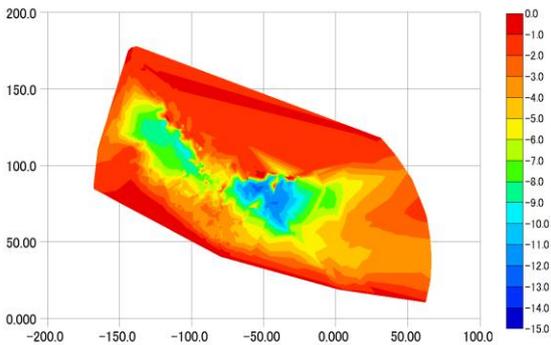


図2 個別ビームによる等深線図

両図を比較すると、通常の ADCP 計測で得られる河床形状はかなり平滑化されたものであることがわかる。例えば、図3に拡大して示しているように、個別ビームに着目することで解像度が向上し、高低差が 10m もあるような岩の隙間の深部も把握できている。

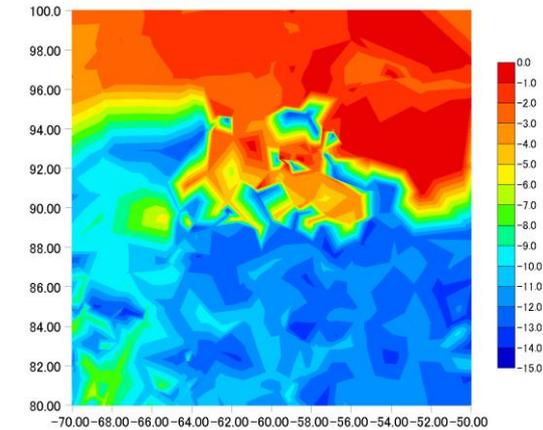


図3 個別ビームによる等深線拡大図

③ 定点観測による河床形状と流速変動

定点観測ボートによる水深分布を図4に示す。水深値にばらつきが見られ、非常に凹凸の激しい場所に設置したことが分かる。しかし、水深変化は同じ水深が同心円状に並んでおり、固定時には観測点の移動が複雑で僅かなため、ボトムトラック機能による個別ビームの位置の把握は困難になるものといえる。このボートの位置変動特性について、1秒

間隔で 4096 個計測した方向角の変動周期をパワースペクトルから推定すると、ピークが $f=0.0425\text{Hz}$ 付近の約 23.5 秒であった。この周期はビデオ画像記録の 60 倍速再生で把握された揺動周期とほぼ一致していた。

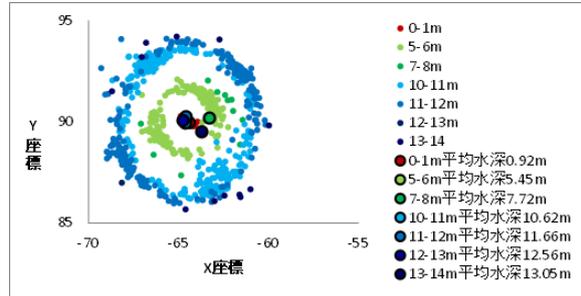


図4 定点測定時の等深線図

一方、流速変動の周期性を見るために、全流速に対して Fourier 解析を行った一例が図5のようであって、パワースペクトルは $f=0.00589\text{Hz}$ において最大値を示している。ここから、全流速ではおよそ 170s 周期で最も大きく変動していることが判明したが、これはボートの揺動周期よりも 8 倍近く長く、ロープ固定によって長周期の揺動が制約されている結果を表していると考えられる。

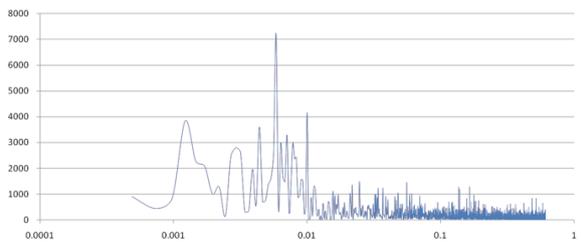


図5 全流速パワースペクトル(水深 1.80m)

④ 改良した観測

以上のように、ADCPの個別ビームに着目して、変化に富んだ渦運動の背景に急激かつ複雑な水深変化が内在しているという実態の一端を明らかにしたが、20度斜め方向照射の個別ビームによる河床測定の精度は必ずしも十分ではなく、また、ADCP流速測定の時空間分解能は極めて低く、大規模渦から小規模渦に向かうエネルギーカスケードは十分には把握できていない。

このような観点から、移動観測では、レーザー用魚群探知機を利用して測点直下の河床高の正確な測定と、流水混合に関して、簡易CTD (YSI 社製) による水温分布の計測を試みた。また、定点観測では、プローブ型の Micro ADVを併用した計測を実施することで、ADCPでは捉えることのできない高周波数領域の把握を目指した。

それらの観測から、まず、移動観測では、図7のように、深掘れ部の中央に高さ数mの隔壁状の岩盤があって、それによって深掘れ部が2分されているという、正確な河床の凹凸状況明確にした。最初、上流から深掘れ部

に落ち込む高速の流れが形成されるが、それは、岩盤に当たって沸き上がるような流れになり、そこを過ぎると再び潜り込むような流れになるという、複雑な流れ場の形成を示唆している。このような流れであるため、水深が 10 数mと極めて深い部分でも水温分布は鉛直方向に一様であって流水混合が激しいことが確認された。

このような場であることが明確になったので、同図中に示したように、上記の Micro ADVを併用した定点観測を行う測線を 3 本設け、丸印の点で計測した。

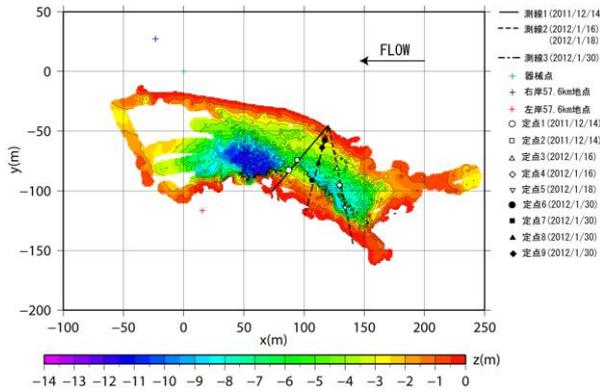


図 6 移動観測による等水深線、及び、定点観測の測線と測点の位置

まず、これら 3 測線に沿った流速ベクトルを水深 1.05 m について示すと図 7 のようであって、上で述べたような流れの状況を認めることができ、隔壁状の岩盤が逆流を生じていることも判る。

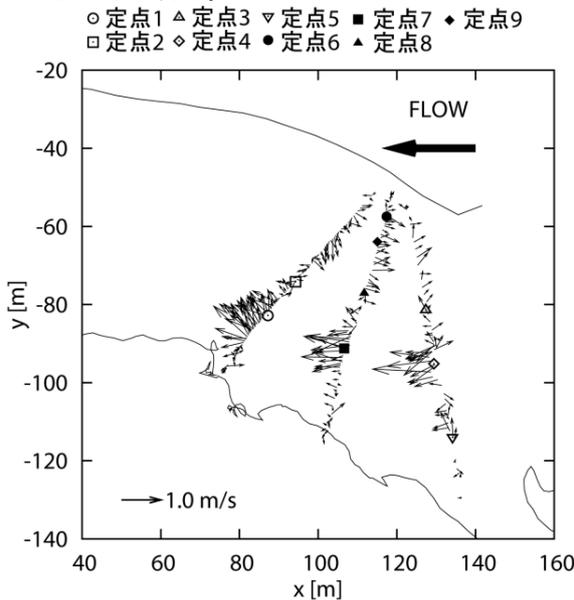


図 7 3 測線での流速ベクトル(水深 1.05m)

これらの計測結果と移動観測の計測結果をまとめ、鉛直方向流速に着目して、その鉛直方向の 3 平面について示すと図 8 のようである。寒色で表現される下降流が上流域の中層で顕著である一方、暖色で表される上昇流

が低層の広い領域に形成されていることが示されていて、やはり、既述のような流れ場の特性と一致した傾向を見せている。

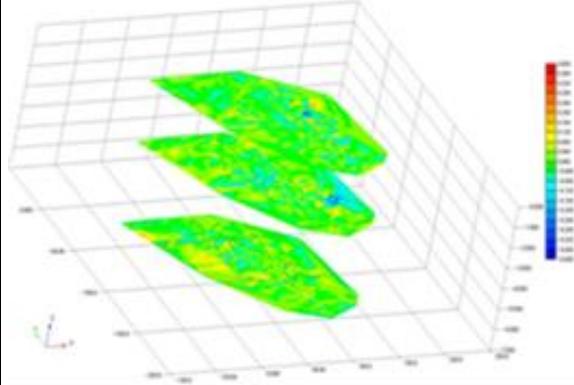


図 8 鉛直方向流速の空間変化

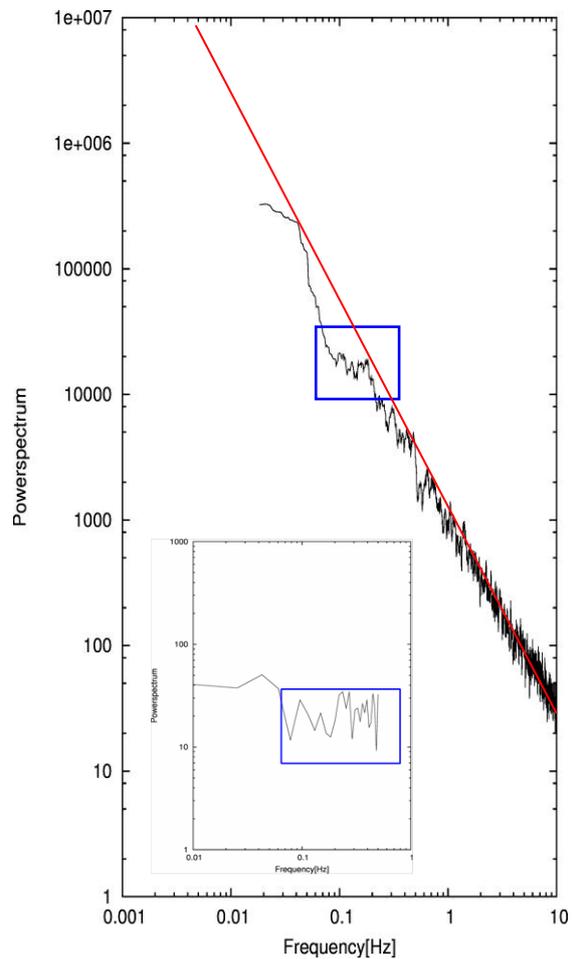


図 9 ADVとADCP(枠内)による全流速パワースペクトルの比較

つぎに、定点観測における ADCP で測定した流速のパワースペクトルを、同一水深について、低周波領域から高周波領域をカバーした Micro ADV によるパワースペクトルと比較した例を図 9 に示している。この図から判るように、低周波領域では両者の形状がよく一致しているが、ADCP の可測範囲ではコルモゴロフの $-5/3$ 乗則に沿う慣性小領

域を見いだせないことが示されている。この計測点では、0.5Hzよりも高周波の領域で慣性小領域の現われており、それは、丁度ADCPの可測限界辺りとなっている。

(2) 石礫床の水理特性について

大規模水路実験であっても詳細に石礫床上の水理現象を追跡しうる装置を試作し、より河川に近い条件で定量的測定を行うこと、例えば、流水を遮断しないで流量と流砂量の変化に対する河床面の応答状態を連続的に捉えることを目的に、(独)土木研究所自然共生研究センターの実験河川において、土砂の挙動と流水抵抗特性に関する実験を行い検討と考察を加えた。その結果、上流からの供給土砂量に応じて、石礫間の空隙変化によるばかりでなく、細粒土砂の存在量に応じて河床波の発達状況が異なることによっても大きく影響されることが判明した。

上記の大型実験に対して、アクリル製矩形断面開水路に石礫床を設けそこに細粒土砂を敷き均して、異なる流量を通水する基礎的な実験を実施した。そこから、石礫間に残存する細粒土砂量の状態に応じた流水抵抗の変化を把握し、そこに至る細粒土砂の挙動を定量的に評価するため、既往の有効掃流力の適用性を検討した。その結果、細粒土砂の移動が激しくない石礫床における流速分布は、一部ばらつきが見られるが、概ね乱流対数則に沿っており、また、乱れ強度分布もほぼ三角形形状であることから、対数則に基づいた有効掃流力算定式の適用が可能と判断できた。しかしながら、一部、有効掃流力が全掃流力を上回る結果も生じ、残存細粒分が多い場合にはその適用が困難であることなど、今後の課題も指摘した。

また、石礫床を棧型粗度で表現した木製台形断面水路においてもその水理特性、すなわち、抵抗特性や乱流特性について Micro-ADV や 3次元電磁流速計実験を行い、流速3成分の詳細測定に基づいて考察を加えた。その尾結果、レイノルズ応力の分布形状はほぼ三角形となっており、これを外挿することで底面せん断応力を評価することが可能であることなどが明らかにされた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 原田守啓、藤田裕一郎、水上精榮、萱場祐一、実験河川石礫床区間への土砂供給による河床状態と流水抵抗の変化に関する実験的研究、土木学会水工学論文集、査読有、第55巻、2011、S_763—768

[学会発表] (計6件)

- ① 岩田啓夢、下牧尚平、原田守啓、藤田裕一郎、河道直線区間における棧型粗度の流れ制御特性に関する実験的研究、平成25年度土木学会第68回年次学術講演会講演概要集、2013年9月、日大生産工学部(習志野市)
- ② 岩田啓夢、新見 潤、原田守啓、藤田裕一郎、台形断面河道における護岸粗度の水理特性に関する実験的研究、平成24年度土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、2012年9月、名古屋大学(名古屋市)
- ③ 澤田謙二、伊原一樹、藤田裕一郎、水上精榮、河道急変部の河床形状と流水特性に関する現地計測、平成24年度土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、2012年9月、名古屋大学(名古屋市)
- ④ Morihiko Harada, Yuichiro Fujita, An experimental study on flow resistance and boundary shear stress distribution in rectangular open channels with varying arrangement of roughness elements, Proc. 18th Congr., the Asia and Pacific Div., Internl. Assoc. for Hydro- Environment Engineering and Research (IAHR-APD2012)、2012年8月、済州島(韓国)
- ⑤ 澤田謙二、藤田裕一郎、阿藤博基、原田守啓、水難危険個所に内在する複雑な河床地形と流れの様相とに関する調査、平成23年度土木学会第66回年次学術講演会講演概要集、2011年9月、愛媛大学(松山市)
- ⑥ 藤田裕一郎、守矢清一、原田守啓、水上精榮、河川における大規模渦運動の実態解明に向けたADCP計測について、平成23年度土木学会第66回年次学術講演会講演概要集、2011年9月、愛媛大学(松山市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 裕一郎 (FUJITA YUICHIRO)
岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授
研究者番号：90027285

(2) 研究分担者

水上 精榮 (MIZUKAMI SEIEI)
岐阜大学・工学部・技術専門員
研究者番号：90377698