

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20560476

研究課題名（和文）

河川における生態環境改善策としての凹み空間の流れ構造とその維持機構

研究課題名（英文）

Flow structures and preservation mechanism in concavity zones for improving ecological environment in rivers

研究代表者

富永晃宏（AKIHIRO TOMINAGA）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60135530

研究成果の概要（和文）：

河川の生態環境を改善するための凹み空間として様々な形態を取り上げて、それらの境界条件が流れと土砂輸送及び水交換にどのような影響を与えるかについて、現地観測と実験及び数値計算によって検討した。河川側岸部の凹みであるわんどについては、その形成過程と流量特性に応じた流れ構造の特徴と土砂堆積機構が明らかにされ、透過水制や巨石を用いた淵の造成や河道多様性の創出において考慮すべき事項が示された。

研究成果の概要（英文）：

Various configurations were considered as concavity spaces for improving ecological environment in rivers. The effects of their boundary conditions on flow behaviors and sediment transport were investigated by field observations, laboratory experiments and numerical simulations. As to the riverside embayments, flow characteristics and sand deposition mechanism were clarified with respect to the configuration process of embayments and flow stage. The important points were indicated for creating pools and river course diversity by using permeable groynes and boulders.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：水工水理学，河道形態，河川環境，わんど，瀬・淵

## 1. 研究開始当初の背景

河川内の生物の環境改善の目的で、水制等を利用したわんどや瀬・淵の造成や、高水敷の掘削による冠水頻度の高い中水敷の造成が行われている。研究代表者はこのような境界条件における開水路流れの実験的研究を

長年継続的に実施しており、様々な境界条件に対する流れ構造の応答特性について研究し、河床変動や土砂堆積に及ぼすこれら境界条件の影響を明らかにしてきた。今回は、これら基礎的研究の積み重ねの上に、環境改善を支援する河道構造の現実的な対応を目指す

した新たな実験と現地観測を実施したものである。検討すべき現実的な対応として考えられるのは、これらの河道構造によって想定した物理環境の維持機構を明らかにし、河川における凹みを利用した生物生息環境の改善方策に対する指針を与えることが望まれる。国内外において、生物生息環境と流れの研究は活発であり、環境改善を支援する構造物に対する関心は高いが、まだ十分にまとまった成果は得られていない状況である。

## 2. 研究の目的

河川の形は治水、利水目的のために改変されてきたが、今後は生態環境に配慮した改善が必要とされている。いわゆる「多自然型川づくり」はこうした目的のために始められ、成果を上げているが、生物の生息環境と流れの関係はまだ十分に理解されていない。その中で魚類を中心とする水生生物のハビタット改善策として有望なのが、河岸の凹部と瀬・淵構造である。日本固有の魚類にとって、わんどや淵が重要な生息空間であり、これらの消滅が種の存続を危うくしてきた。この反省のもとに、人工的にわんどを形成したり、淵を造成したりする試みが行われている。これらが作り出す流れ環境が生物にとって有益であることは理解されているが、流量変動と土砂輸送を伴う河川において常に安定的に存続させることは困難を伴う。本研究はここに焦点を当て、河川における流量変化が凹み空間の流れ構造と土砂堆積に及ぼす影響について明らかにし、これら河川の環境改善策の設計に対する指針を示そうとするものである。

## 3. 研究の方法

河川環境に重要な役割を果たす凹み空間というキーワードの元に様々な境界条件を設定して研究を行った。これまであまり研究されていない複断面河川におけるわんどに着目し、高水敷上の水制が形成するわんど、高水敷を掘削して創出したわんど、実河川のわんど閉塞対策について検討するとともに、開口部が閉鎖的なわんどの水交換機能について検討した。次に、多様性の創出を目指した河川工法として、水制を用いた場合と巨石を用いた場合について、その多様性創出効果と抵抗特性について検討した。

### (1) 高水敷に設置されたわんどの流れと土砂堆積に関する研究

まず、高水敷上に設置された水制によって形成されるわんどを対象とし、水制周辺の流れ構造や土砂の輸送機構を把握するため、水制を有する複断面河道の流れ構造について実験的研究を行った。PIV計測法を用い、複断面や水制周辺の3次元流れ構造を解析するとともに、水制周辺の浮遊砂の局所的堆積

状況を調べた。次に、高水敷掘削型わんどにおける高水時を対象とし、わんど周辺の3次元流れ構造をPIV法を用いて実験的に明らかにした。さらに流れの3次元数値計算を行い、その流れ場における3次元流れ構造の再現を試みた。さらに、高水敷掘削型わんどの形状について段落ち、段上がりの角度を変化させた場合について土砂堆積形状及びPIV実験により3次元流れ構造を実験的に明らかにした。

### (2) 実河川のわんどの土砂堆積とその抑制対策に関する研究

愛知県の矢田川では高水敷を掘削して人工わんどが新たに建設され、建設後わんど開口部付近に大規模な砂礫の堆積が発生したことから、人工わんど周辺の河床変動の様子や河床材料の変化、流れ構造を現地観測により調査し、現地形状を再現した実験および数値計算を実施し、わんどにおける掃流砂問題について検討した。また、掃流砂および浮遊砂のわんど内への進入を抑制する方法についての基礎的な知見を得るために、低水路とわんどの境界に遮蔽物を設置して、掃流砂および浮遊砂を考慮した混合砂実験により土砂堆積抑制効果の違いを検討した。

### (3) 閉鎖的なわんどの流れ構造と水交換に関する研究

主流域と細い連絡水路で接続するようなわんど形状について検討した。閉鎖的なわんどの開口部形状をより細かく変化させ、染料を用いた水交換速度の実験に加えて、レーザーシート光を用いたPIV解析により流れ構造の解析を行うとともに、水深平均の2次元数値計算を行い、流れ構造の再現を行った。さらに、わんど開口部の土砂堆積による閉塞過程にあるわんどについて、開口部遮蔽の長さや奥行きと位置を変化させた実験を行い、詳細な流れ構造の変化過程と水交換機構について検討した。

### (4) 透過型水制を用いた河道多様性創出に関する研究

現地でのかごマットを用いた透過型水制周辺の河床形状及び平水時の流速を計測するとともに、かごマットを想定した透過型水制模型を設置した室内実験を行い、水制周辺の流れ構造と洗掘の関係について検討した。さらに、水制が、土砂の洗掘・堆積を促す点で、河川に多様性をもたらす手法として再評価されていることから、河道多様性の創出として河床の蛇行と瀬・淵の創出に着目し、実験水路の両岸に交互に設置した透過型水制によって形成される蛇行形状について検討した。

### (5) 巨石群を用いた河道多様性創出に関する研究

河川に巨石を投入することで、流れに多様性を持たせ、水生生物の生息環境を創出しよ

うという試みに対して、開水路底面に置かれた巨石周辺の詳細な流れ構造を PIV により検討した。また、実際に移動床において球及び半球を設置した実験により、巨石による淵の形成と抗力の変化について検討した。さらに、実際に都市河川に配置された巨石群を模擬して、その配置形態が流れの抵抗特性に及ぼす影響を検討した。

#### 4. 研究成果

(1) 複断面水路の高水敷に設置された水制により形成された凹部に関して、水制が水没しない条件と水没する条件について実験を行い、それぞれにおける流れ構造とこれに対応した砂堆積形状が明らかにされた。特に高水敷上の水制は低水路内の流れに大きな影響を与え3次元的な2次流を形成し、土砂の巻上げを活発にすることが示された。水制長さを短くした場合においても低水路への影響が認められ、この結果をもとに、現地河道に現れた旧水制群の撤去が行われた。

高水敷掘削型のわんどの凹みの形状を種々変化させ、高水敷越流時の3次元的な流れ構造を明らかにするとともに、浮遊砂輸送実験を行い、わんどへの堆積特性を調べた結果、高水敷を横切る凹み境界線の角度が凹みに流れ込む流れの形態を大きく変化させることが示された(図-1)。わんど内の土砂堆積形態は、この設置角度の影響を大きく受けた3次元流れ構造である、再付着流れと2次流構造により支配されることが明らかとなった。このような流れ構造は3次元の乱流モデルを用いた数値計算によっておおよそ再現できることが示された。

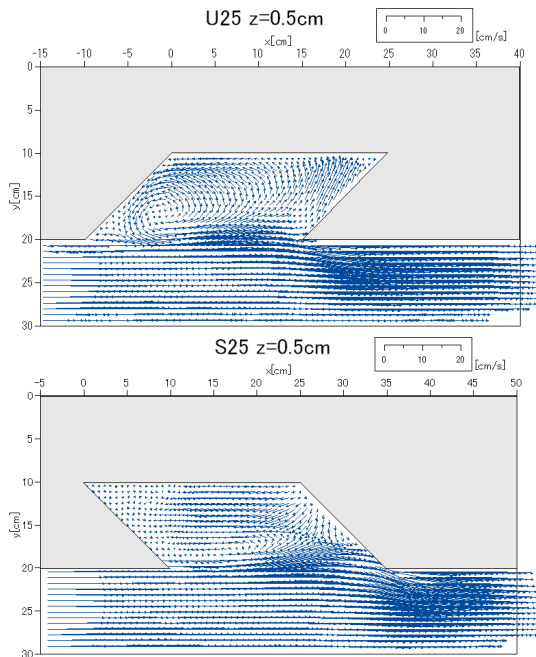


図-1 底面近傍流速ベクトルに及ぼす高水敷わんど角度の影響

(2) 矢田川に設置された人工わんど周辺の河床変動メカニズムについて現地観測・実験室での模型実験および数値計算による解析を行った。まず現地で測量を行い土砂堆積形状と堆積量を明らかにし、出水との関係について考察した。この観測結果をもとに、数値シミュレーションと実験により流れ構造と土砂堆積の再現を行い、そのメカニズムを明らかにした。その結果入口近傍の置き石工が重要な役割を果たすこと(図-2)、いったん堆積すると埋没するまで進行することが示された。

わんどの土砂堆積抑制に関して、代表2粒径を用いた流砂実験によって検討し、掃流砂の抑制にはわんど開口部のかさ上げが効果的であるが、平水時の水交換を維持するためには下流部を開放するかまたは杭群のような断続的開口部を有するものが効果的であった。後者の場合、比較的粗い杭密度の場合でもわんど内土砂堆積は抑制され、水交換も維持できることが示された。

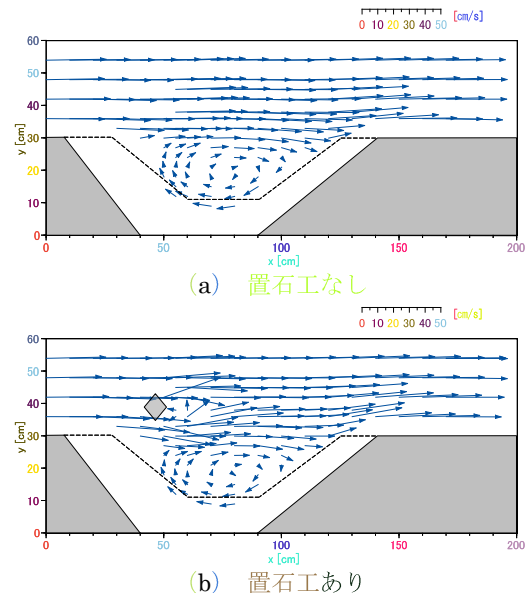


図-2 置き石工の有無による流速ベクトルの比較

(3) 閉鎖的わんどとして、わんど開口部の形状がわんど内の渦の形成に与える影響を調べた。その結果、入口領域の奥行き・幅比が1.5以上で開口渦が形成され、これが間欠的にわんど内へ侵入することによって渦が形成されることがわかった。このような間欠的に形成される渦の流速は直接形成される場合に比べて小さくなり、水交換速度はわんど内渦の流速におおむね比例するが、渦構造の形態により影響されることが示された(図-3)。このことは水深平均の数値シミュレーションによりある程度までは再現できることが示されたが、精度の課題がありさらに非定常な組織渦構造の再現と3次元効果の組み込みが必要と考えられる。

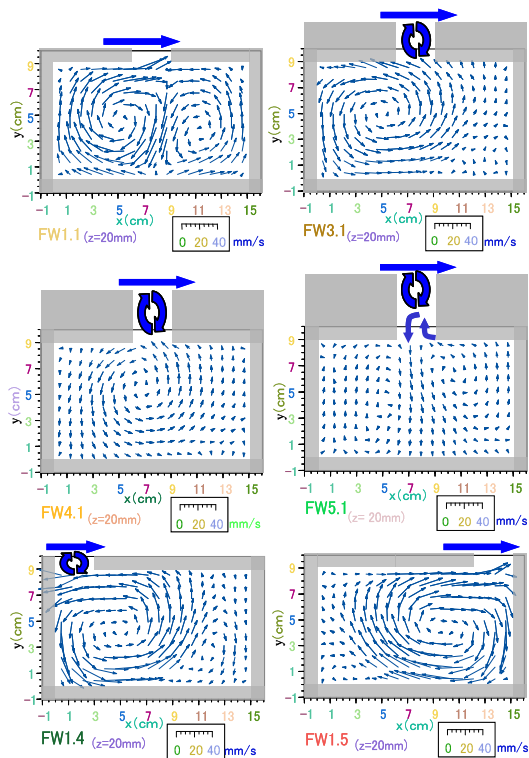


図-3 開口部長さと位置によるわんど内流れの変化

矢田川のわんどにおいては上流部の閉塞により水質の悪化が顕著となったことから、わんどの開口部形状がわんどの水交換に及ぼす影響について詳細に検討した。閉鎖性のわんどとして河川との境界部に堆積物を想定した障害物を設置し、その形状を変化させて、わんど内の流れ構造の変化および水交換効率の変化を検討した。この結果わんど開口部の閉塞状況に対応した流れパターンが明らかにされ、水交換にはレイノルズ応力とともに3次元的な移流機構が重要であることが示された。

また、2つの入口を持つ閉鎖的わんどでは、開口部遮蔽物の長さ、奥行き、わんどのアスペクト比の影響を系統的に検討し、上流側開口部から流入する渦のスケールは開口幅に依存して形成され、わんど内に2次的な渦構造を誘起するという特性が見られた。これに対し下流側開口部からの流入は側壁に沿ってわんど奥まで流入して大きな渦構造を形成する場合と、わんど奥まで流入できずに上流または下流の開口部から流出するパターンが現れることが示された。

(4) 河床の片側に淵を有する流れの構造を検討した。水路片側の水深が深くなることにより、淵部分にはく離渦が生じ、直線水路にこのような淵を造成しても土砂堆積によって維持できない可能性が高いことが示されたが、淵内に透過水制を設置することによりはく離渦を消滅させ淵内流速を大きくすることができた。

かごマット水制周辺の河床形状及び平水

時の流速の現地計測及び室内実験の結果、河床変動の実験結果は現地で形成された洗掘や水制間の堆積と同様の傾向がみられた。第1水制前面の土工ヤードの存在が第1水制の洗掘を軽減する効果が認められた。越流時と非越流時では洗掘のメカニズムと洗掘位置が異なることが指摘され、現地において考えると、出水時には第1水制先端において洗掘が発達するが、平水時にはヤード前が洗掘され第1水制先端は埋め戻しがなされることが予測された(図-4)。

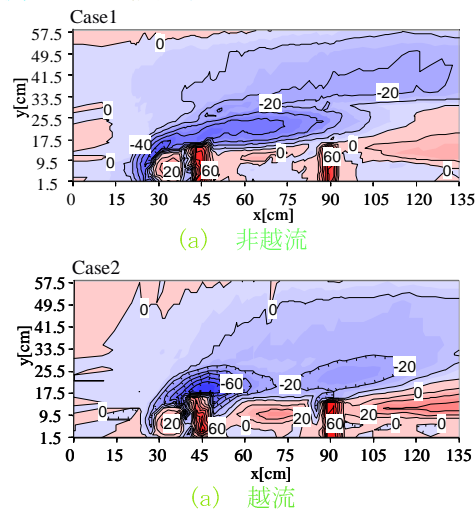


図-4 流量と水深による河床変動の違い

また、両岸に交互に透過水制群を適当な間隔で設置することによって、淵と瀬を有する蛇行形状が形成されることが示された(図-5)。水制周辺に大きな洗掘、背後に堆積が見られ、水制長が大きくなるほど、流量が大きくなるほど、その洗掘、堆積は顕著になり、同時に洗掘域、堆積域の伸びる方向の流下方向に対する角度が大きくなることが示された。傾斜度、蛇行度という多様な河道形態の評価方法を提案し、これにより評価した結果、偏流波長と水制間隔の関係が重要であることが示された(図-6)。

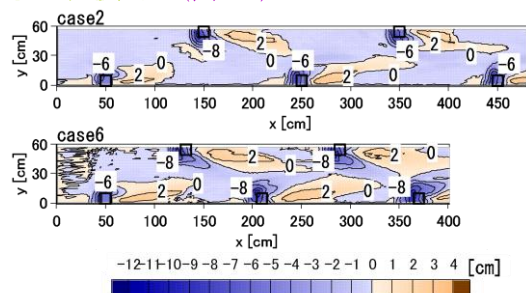


図-5 透過水制の両岸配置による河床形態の変化

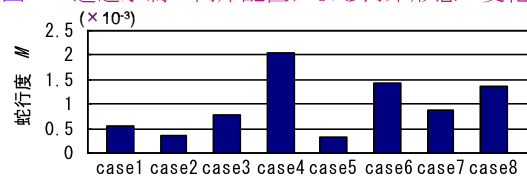


図-6 水制長と間隔による蛇行度の変化



(5) 巨石による淵の造成方法については、洗掘実験結果を再現できる数値計算法の検討を行った結果、構造物前面の横断方向の流砂量を大きく評価することで再現性が向上することが示された。実験により形成されたR型の淵は、非埋没の場合、巨石体積の2倍程度となり、半分埋没させた場合、2から4倍程度の体積となること、最深部は巨石径の0.65から0.75倍程度の深さとなることが示された。淵の領域は、水深、流量の違いをあまり受けておらず、また設置位置、埋没、非埋没といった設置方法の影響もそれほど大きく影響しないことが明らかとなった(図-7)。巨石を投入した直後で淵が形成されていない場合、平水時には相対水深が小さくなり、抗力係数  $C_d$  は1.0を超える高い値を示す。しかし、淵が形成された場合や、出水時などの相対水深が大きい場合は抗力係数  $C_d$  が小さくなり、この変化については、数値計算で予測することができた。

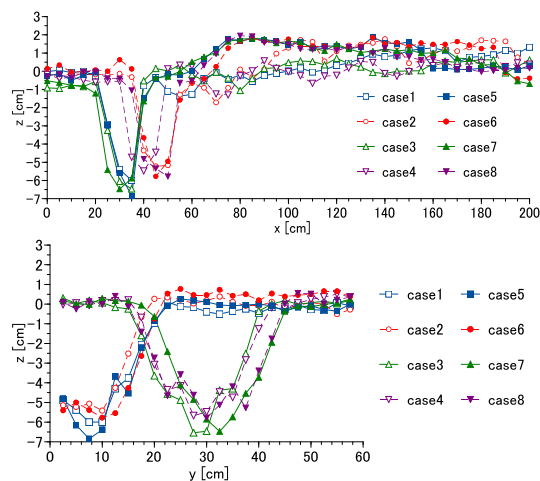


図-7 淵最深部の河床高(上:縦断分布,下横断分布)

また、巨石群の形状によるはく離流れの構造の変化、乱流構造の変化が示された。渦の後流では、カルマン渦の発散による中心に向かう流れがあるが、鉛直断面では、巨石前方の上端で上向きの偏流が起き、巨石後方では、横断方向に軸を持つ渦が見られる。渦の後方では強い下降流が発生している。巨石前方では流れの方向を変える偏流が見られ、偏流角度は立方体で最も大きく、続いて円柱、球の順であった。

次に、実際の都市河川の巨石群配置が流れの抵抗に及ぼす影響について、河床に相対的に大きな粗度を規則的に配置した実験によって、水深増加率および粗度係数の変化を調べた。数値計算による抵抗増加評価方法を提案するとともに、配置形態による抵抗の変化について縦横断の配置パラメータを用いて分析した。その結果、粗度による横断面遮蔽率が支配的であることが示唆された。

以上のような角度から広い意味での河道の凹み構造が流れと土砂輸送、水交換に与える影響を検討した。最も重点を置いたのは河道平面における凹み構造であるわんどであり、わんどの様々な形態について検討した。複断面河道に人工的に造成したわんどについてはこれまであまり研究されていなかった課題であり、こうしたわんどの形成過程に応じた流れの特性が明らかにされた点は、わんど造成方法の検討に対して有用である。また、わんどの維持機構について、埋没抑制の立場から検討するとともに、閉鎖的になったわんどの水交換機構について検討しており、これらの成果はわんどの管理方策の検討において有用である。

河道鉛直断面における凹み構造として、水制や巨石による淵の造成を検討し、連続的な瀬・淵の形成方法としての透過水制群の配置方法の指針が与えられた。また、巨石設置による抵抗の増加、洗掘形態の変化、渦構造の変化が明らかにされ、巨石群設置による河道多様性創出に関して有用な知見が得られた。

## 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11件)

- ①鄭載勳, 富永晃宏, 様々な形状を有する高水敷わんどの流れ構造と土砂堆積機構に関する研究, 水工学論文集, 査読有, 55巻, 2011, s\_1051-s\_1056
- ②Nugroho, E. O. and Tominaga, A., Experimental Investigation Of Flow In An Embayment With Two Entrances, 水工学論文集, 査読有, 55巻, 2011, s\_205-s\_210
- ③富永晃宏, 堀部扶実, 榊卓也, わんどの開口部遮蔽による土砂堆積抑制効果, 水工学論文集, 査読有, 55巻, 2011, s\_1057-s\_1062
- ④鄭載勳, 富永晃宏, 複断面河道に設けられたわんど周辺の3次元流れ構造, 応用力学論文集, 査読有, 13巻, 2010, 735-743
- ⑤Tominaga, A. & Jong, J., Effects of conjunction channel on water exchange in riverside embayment, Journal of Hydro-environment Research, 査読有, vol.4, 2010, 163-173
- ⑥Nugroho, E. O. and Tominaga, A., Turbulence Characteristics In An Embayment With Various Entrance Configurations, 水工学論文集, 査読有, 54巻, 2010, 181-186

- ⑦富永晃宏, 榊 卓也, 砂礫床河川に設置された人工わんど周辺の河床変動, 水工学論文集, 査読有, 54 巻, 2010, 93-798
- ⑧富永晃宏, 榊卓也, 川幅急変部を有する砂礫床河川における乱流計測と摩擦速度の評価, 応用力学論文集, 査読有, 12 巻, 2009, 673-680
- ⑨富永晃宏, ヌグロホ, E. O., 閉鎖的なわんどの水交換に及ぼす開口部形状の影響, 水工学論文集, 査読有, 53 巻, 2009, 895-900
- ⑩鄭 載勲, 富永晃宏, 高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造, 水工学論文集, 査読有, 53 巻, 2009, 913-918
- ⑪ A. Tominaga, N Hashimoto and J Liu, Experimental Study on Three-Dimensional Flow Structures in Straight River Channel with a Pool, Advances in Hydro-science and Hydraulic Engineering, 査読有, vol.8, 2008, 659-666

[学会発表] (計 14 件)

- ①末次宏基, 富永晃宏, 兩岸透過型水制によって創出される蛇行形状の評価, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会, 2011 年 3 月 4 日, 春日井市
- ②榊卓也, 富永晃宏, 開水路に設置された巨石に作用する流体力に関する一考察, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会, 2011 年 3 月 4 日, 春日井市
- ③浦山泰樹, 富永晃宏, 開口部の杭群がわんど内の水交換に及ぼす影響, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会, 2011 年 3 月 4 日, 春日井市
- ④塩田雄祐, 富永晃宏, 福永和馬, PHABSIM を用いた魚類生息環境に対する河川物理環境の評価, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会, 2011 年 3 月 4 日, 春日井市
- ⑤A. Tominaga & T. Sakaki, Evaluation of Bed Shear Stress from Velocity Measurements in Gravel-Bed River with Local Non-Uniformity, River Flow 2010, 2010.9.9, Braunschweig
- ⑥福永和馬, 笹井綾乃, 富永晃宏, 巨礫を有する河川における水位と粗度係数の変化特性, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 1 日, 札幌
- ⑦榊卓也, 伊藤佑介, 富永晃宏, 開水路底面における巨石まわりの流れ構造, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 1 日, 札幌
- ⑧富永晃宏, 榊卓也, 山本裕治, かごマットを用いた水制周辺の現地観測と河床変動特性, 第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 3 日, 札幌

- ⑨Nugroho E. O and Tominaga A., The Effect of Entrance Configuration in the Exchange Process along an Embayment, 33rd IAHR Congress, 2009.8.12, Vancouver
- ⑩Tominaga, A., Jong, J. and Sakaki, T., Sediment Transport Around an Artificial Embayment in a Straight Fluvial River, 33rd IAHR Congress, 2009.8.12, Vancouver
- ⑪榊 卓也, 富永晃宏, 鄭 載勲, 木村聡志, 直線河道のわんどにおける土砂堆積機構に関する研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2 日, 福岡
- ⑫福永和馬, 富永晃宏, 河川物理環境と魚類生息環境との関連およびその評価に関する研究土木学会第64回年次学術講演会, 2009年9月2日, 福岡
- ⑬A. Tominaga, and J. Jong, Effects of Conjunction Channel on Water Exchange in Riverside Embayment, 2nd International Symposium on Shallow Flows, 2008.12.10, HongKong
- ⑭松本大三, 木村聡志, 富永晃宏, 石川光雄, 瀬淵構造を有する直線河道における淵内堆砂特性に関する研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 11 日, 仙台

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

富永晃宏 (AKIHIRO TOMINAGA)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60135530