

技術研究開発テーマ名	矢田川低水路における砂州の挙動・環境機能の解明と自然河岸形成に向けた技術・環境面からの検討	
研究代表者		
氏名	所属・役職	
溝口 敦子	名城大学理工学部・准教授	
共同研究者		
氏名	所属・役職	
鷺見 哲也	大同大学工学部 准教授	
谷口 義則	名城大学理工学部 准教授	
音田 慎一郎	京都大学大学院工学研究科 助教	
<p>背景・課題</p> <p>本研究課題で対象とする矢田川は、かつて土砂流出量が多い天井川であったため、破堤氾濫が相次ぎ、河道付替えや掘削、低水護岸の整備など治水事業が積極的に進められた。その結果、現在は愛知県下で比較的治水安全度が高い河川となっている。しかし、治水を目的とした整備が進むにつれ、河道内の環境は大きく変化してきた。矢田川下流域の河道は、ほぼ一定の低水路幅でコンクリート護岸が整備され、浸食を受けない高水敷は都市公園などとして利用されている。低水路内の河床には、砂州が形成されているが、砂州波高は低いため、頻繁に水没する環境となっている。そのため、低水路内には植物の進入がほとんどみられない。こうした背景を持ち、かつ、名古屋市街地を流れている矢田川下流域に対し、庄内川河川事務所は、低水路護岸を自然河岸に戻して応答性の高い河道を復元することにより、周辺市街地に至近な自然としてのポテンシャルを高めていく意向をもっている。</p> <p>そこで、現在、低水路コンクリート護岸を有する矢田川下流域の河道において、治水機能を保持した上での環境改善を目指し研究を行うこととした。そのために、本課題では、低水路内の「砂州」の形成、変化とその機能について着目する。一般的に、低水路内の砂州はその進行と変動により河岸の侵食を促すため、その挙動により高水敷が削られ河岸が堤防に達する危険性があるため、治水上の問題となる。一方で、平水時には砂州上に流路が形成されるため、砂州は平水時の瀬淵環境を支配する側面を持ち、流路内に生息場を持つ生物の生息環境に大きな影響を及ぼす。あわせて、砂州形状により平水時の水際特性や陸域の粒度環境などが決定され、水辺を利用する生物や植物に影響を与える。こうした砂州を取り巻く環境のうち、本課題では、低水路幅と砂州形状の特性・変動の特徴、および、砂州形状によって決まる伏流水と表流水との水交換環境と水温環境の特徴を通じて魚類生息環境について検討する。特に、自然河岸形成に向け、現在の代表区間における複断面河道の砂州の決定要因、挙動と環境機能を明確にし、拡幅を許した場合に創出されるだろう環境や治水上の問題について検討した。</p> <p>技術研究開発の目的</p> <p>本課題は、現在低水路幅を規定しているコンクリート護岸を自然河岸にすることを念頭におき実施した。そのため、複断面河道における砂州環境の形成状況を把握するとともに、自然河岸の形成が治水安全度の低下を招かないのか、および環境の向上につながるのかを明確にすることを目的とした。</p> <p>特に、砂州物理環境が規定する平水時の水路環境、平水時の水路が規定する表流水と伏流水との水交換環境と水温場の形成、水温を介した夏場の魚類生息環境の特徴をつかむことで、自然河岸形</p>		

成の意義を環境面から明確にする。一方で、矢田川における自然河岸形成について、現在の砂州挙動と仮に自然河岸とした時の変化を検討することで治水上の問題を検討する。

## 技術研究開発の内容・成果

### はじめに

上述したように、本研究で対象とした矢田川下流部は、コンクリート護岸を持つ複断面河道である。高水敷の幅は非常に広く、現在、都市公園やグラウンドなどで利用されている。また、平水時低水路内には砂州が陸化して現れており、冬場などは低水路内に平水時の流路が蛇行している状態となる部分が多い。研究開始当初、こうした河道において実際に部分的でもコンクリート護岸を撤去し自然河岸を形成する現地実験を期待していたが、治水上の問題に加え河川整備や公園管理上の問題等で河川管理上の折り合いがつかず、実施期間中の実現はかなわなかった。そのため、低水路幅の異なる二区間をピックアップし調査することで自然河岸形成が環境改善につながるか否かを探るとともに、数値解析等を用いて護岸の撤去の可能性を探るべく、研究を執り行なうことになった。

本共同研究の特徴は、特に、河川に形成される砂州を媒介として、物理環境および伏流・水温環境、生態環境の視点から研究を実施したことである。物理環境からは、これまで実施されていなかった複断面河道における砂州の形状および変化の特徴を低水路幅と関連付け調べた。低水路幅に大きく支配される砂州形状の特徴は、低水時の流路の特徴を変化させ、この流路の特徴によって影響を受ける表流水と伏流水との水交換環境は表流水の水温環境を形成する。こうした観点から砂州の特徴と伏流挙動を結び付けつつ、水温形成について研究を実施した。また、河川生態環境の視点から、魚類の生息環境を物理環境とともに調査し、夏場の水温分布に大きく支配される魚類に着目し研究を実施した。こうした研究を通じて、治水・環境機能を有した河道の創出を目指してきた。

本研究の初年度にあたる 2009 年は 12 月ごろから開始となり短期間であった。そのため、特に、矢田川下流域の代表的河道特性を持つ天神橋区間における砂州の動態と低水時の流路特性を中心とした物理環境に関する検討、伏流水環境、魚類生息環境に関する予備調査を実施した。

続いて、二年目の 2010 年度には、護岸撤去の現地実験が難しいことが分かってきたため、自然河岸形成にむけた技術的課題を念頭におきながら、まずは、実施可能である項目について検討することとした。特に、初年度に予備調査を実施していた、コンクリート低水護岸で規定された低水路を有する矢田川下流域の代表的区間ともいえる天神橋区間において、砂州の特徴とその変動状況および伏流水挙動・魚類生息状況の調査を実施するとともに、片側に護岸がなく低水路幅が他の部分より広い宮前橋区間について同様な調査を実施し、両区間の比較研究を執り行った。この比較研究は、自然河岸形成前後の状態を想定している。ここでは、特に、それぞれの河道の下記の特徴を明らかにすることに努めた。

表流水、砂州伏流水、高水敷地下水の 3 者の水交換・流動の把握：高水敷を含めた地下水位の平面分布の計測など様々な現地調査を行うことによって、表流水流れの特徴、表流水と伏流水、高水敷地下水との水交換環境などを把握し、両区間の違いについても併せて考察する。

砂州形状と魚類生息環境：特徴が異なる砂州を抽出し、流れや水温分布などの物理環境と魚類生息状況を調べる。これにより、同一河川内の砂州の形状特性の違いによる魚類生息状況を把握する。

三年目、最終年度にあたる 2011 年度には、課題とされた低水路護岸の撤去に伴う治水安全性に関する検討、および、部分撤去の可能性の検討、2010 年に得られた魚類の水温依存性の確認実験、出水により変化した砂州地形での伏流挙動の現地調査などを行った。それらとともに、これまでの成果の取りまとめを行った。

上記の三年間にわたる研究のまとめとして、ここでは、以下をピックアップして記述する。まず、よりよい環境の創出を目指して、現地調査を用いて複断面河道における砂州の決定要因、砂州の変動状況など砂州の物理環境を追究した研究結果について述べる。次に、様々な特徴を持つ砂州上に形成される伏流水挙動とその挙動によって支配される河川の水温環境に関する現地調査や検討結果を報告する。続いて、低水路幅が異なる河道区間における魚類生息環境調査の結果と、魚の水温選好性の裏付けとして実施した室内実験結果などを報告する。最後に治水上安全、かつ、よりよい環境の創出を目指し、低水護岸の撤去時の砂州の変動や部分撤去の可能性に関する検討について述べる。

## 矢田川概要と対象区間の物理的特徴

### (1)対象区間の特徴

ここでは、矢田川下流域のうち、図-1 に示すような代表的な低水路幅を有する天神橋 三階橋区間（庄内川合流点から 4km 付近．以下、天神橋区間とする）と、他の区間と異なる低水路幅を有する宮前橋-矢田川橋区間（合流点から 6.4km 付近．以下、宮前橋区間とする）を対象として、砂州の特徴をとらえる．

対象区間である天神橋区間と宮前橋区間は、低水路幅が表-1 のように大きく異なる．そのため、同一出水によって低水路内の河床が受ける影響は異なると予測される．矢田川下流域における流況は表-2 のようになっており、低水路満杯流量の推定値から考えると、両区間とも年に数回は高水敷がつかれる条件となっていると言える．また、図-2 に示すように各区間は低水流路満杯流量以下では交互砂州の形成領域に入り、かつ、宮前橋区間についてはそれ以上の流量においても形成領域となっている．



(a) 天神橋区間



(b) 宮前橋区間

図-1 対象区間の様子（2011年1月撮影）

表-1 対象区間の概要

対象区間	川幅 (m)	低水路幅 (m)	低水路高さ (m)	勾配	低水路満杯流量 (m <sup>3</sup> /s)	河床材料 (m)	波高 (m)	波長 (m)
天神橋区間	150	36	1.85	1/700	160	0.02	1.0	400
宮前橋区間	185	55	1.55	1/700	220	0.02	1.9	450

### (2) 複断面河道における交互砂州形状

日本の河川では、平均年最大流量程度で河道内地形が規定されていると言われているが、複断面河道に形成される砂州の特徴の決定要因は現在のところ明確になっていない．そこで、対象区間の砂州形状について検討した．

各対象区間の河道条件は、低水路幅が異なるため、実際に形成されている交互砂州の波高等大きさが異なる（表-1）．形成されている交互砂州波高について、池田の波高予測式<sup>1)</sup>を用いてしらべたところ（図-3）、おおよそ低水路満杯流量程度で形成される砂州波高となっていることが分かった．波長についても初期卓越砂州を予測する際の理論解析で得られる値と同程度であり、年に数回以上低水路満杯となる矢田川下流域では、多くの出水の影響を受け徐々に変化しつつも低水路満杯流量程度で低水路内の砂州形状が決定されていると言える<sup>2)</sup>．

### (3) 対象区間における交互砂州の変動特性

交互砂州の変動状況として、地形測量により地形の変化を、杭と鉄製リングを用いた洗掘深調査により土砂の入れ替わり状況を調べた．2008年度からの調査により、天神橋区間は年最大流量程度以下でも砂州が進行し、場が変化していくことが確認されている<sup>2)</sup>．しかし、低水路幅だけでなく形成されている砂州の波高が小さい天神橋区間に比べ、宮前橋区間は波高・低水路幅ともに大きく、同じ出水でも低水路内の河床が全体的に乱されにくいことが予測された．そこで、図-4 に示す2010/10/4 と 10/9 の出水を対象に、河床変動状況と洗掘深調査を行った結果を図-5 に示す．図-5 より天神橋区間では、高水敷高さ以下の小さな出水（10/4）においても変動が確認され、洗掘深がほとんどの場所で数センチあることがわかる．つまり、全体的な河床材料の入れ替わりが確認できる．

一方、宮前橋区間は、低水路満杯近くまで水位が上昇した出水（10/9）においても、限定された場所ではしか河床高の変化および洗掘が確認されず、年間を通じた測量結果からも場がほとんど変化しないことが分かった。なお、ここでは、平水時の流路際と瀬の上流部付近に限定された河床変動が起きている。

### 低水路の特徴と伏流環境および水温環境

#### (1) 交互砂州上に形成される低水路の特徴

上述した特徴を持つ交互砂州に対し、各区間の水深コンターは図-6 のようになる。低水路内の交互砂州が異なるために、平水時の流路中央付近の流路に沿った水位、河床高の変化は図-7 のようになり、異なる流路特性、つまり、異なる瀬淵構造を持つことがわかる。ここでは、同一河川内で平水流量がほぼ同じであるため、宮前橋区間のほうが規模の大きな砂州ができ平水時の流路方向に凹凸ができることで、明確な瀬淵構造ができていのにに対し、天神橋区間は流路方向の凹凸が小さいため、2010年11月の時点では瀬淵構造が見られない。

瀬淵構造が明瞭であるか否かは、流路沿いの水深、流速の関係にも表れる。図-8 に、後述する瀬淵等代表的な箇所を設置した魚類生息状況の調査地点における平均流速と水深の関係を示すと、両区間のプロットされる領域に差が出るのがわかる。宮前橋区間は水深が20cm程度で流速が大きい場所が存在し、かつ、水深が30cm以上で流速が緩やかな場所が存在するのに対し、天神橋区間は、水深が大きく流速が緩やかな場所が少ないのが分かる。つまり、宮前橋区間には平水時に明瞭な瀬と淵が存在していると言える。

表-2 矢田川瀬古地点の流況

年	最高水位	平水位	最大流量	平水流量
	単位：m		単位：m <sup>3</sup> /s	
2006年	11.12	8.80	346.19	2.50
2007年	10.64	8.78	218.12	1.98
2008年	12.09	8.79	652.60	2.24
2009年	11.75	8.78	406.19	2.35

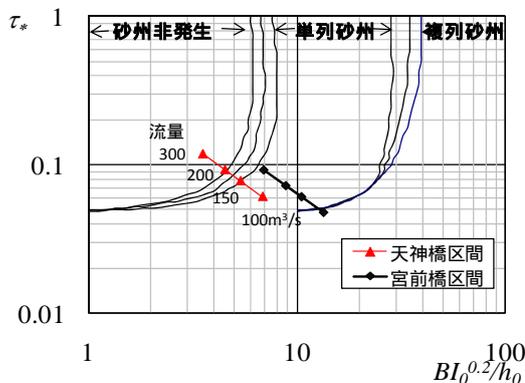


図-2 対象区間における各流量条件時の中規模河床形態領域区分図へのプロット

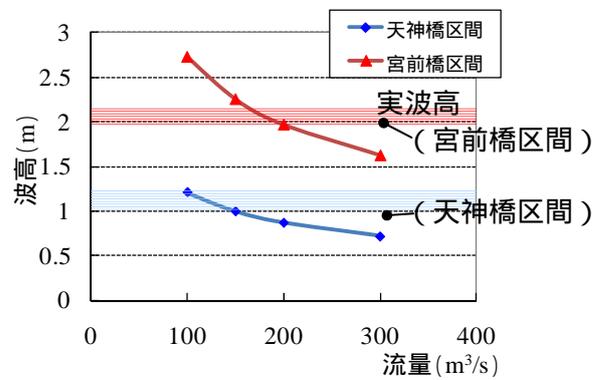
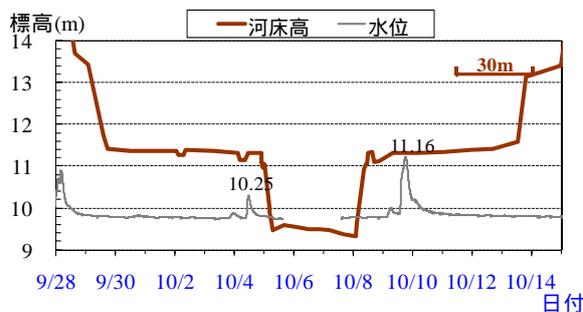
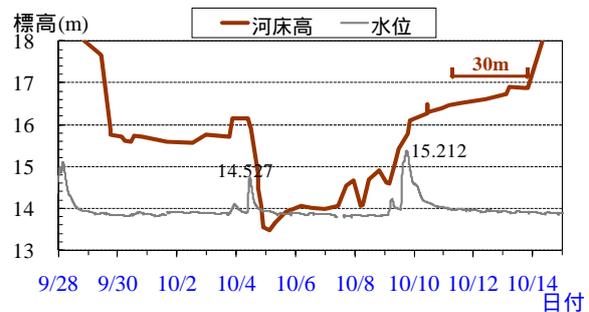


図-3 各流量時の平衡波高予測値



(a) 天神橋区間



(b) 宮前橋区間

図-4 代表断面図と調査対象出水前後の水位変化

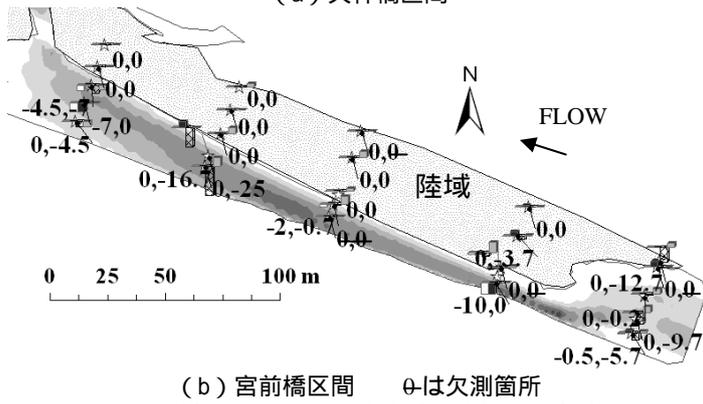
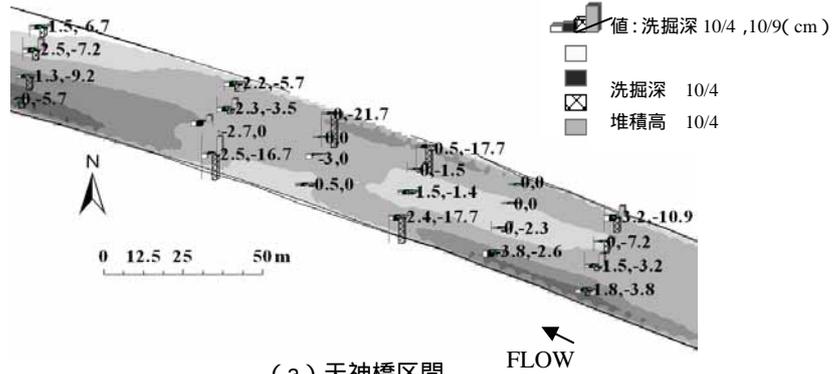


図-5 対象区間における出水時の洗掘深調査結果

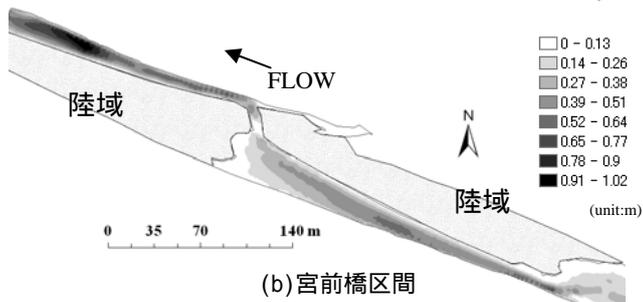
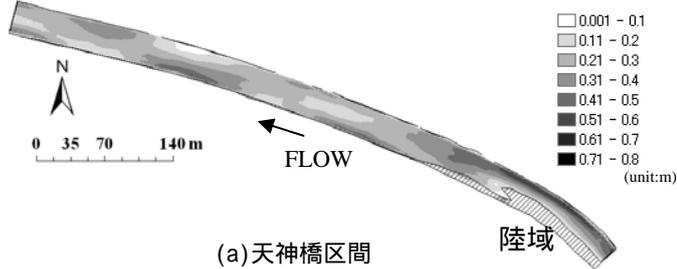


図-6 対象区間の水深コンター（2010年11月）

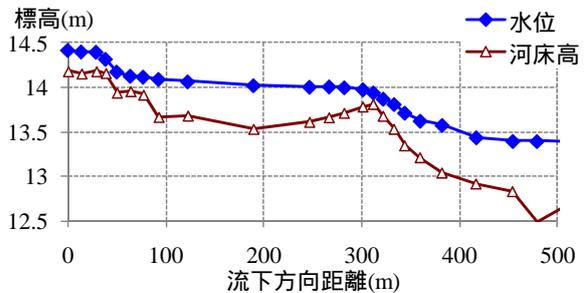
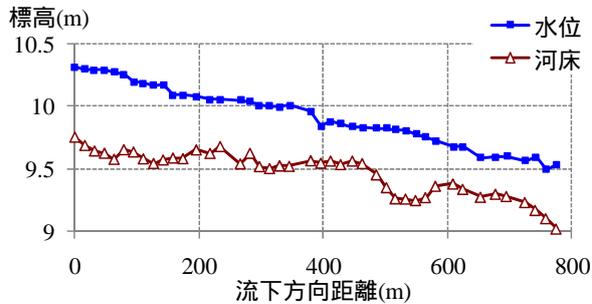


図-7 平水時の流下方向水面，河床高変化

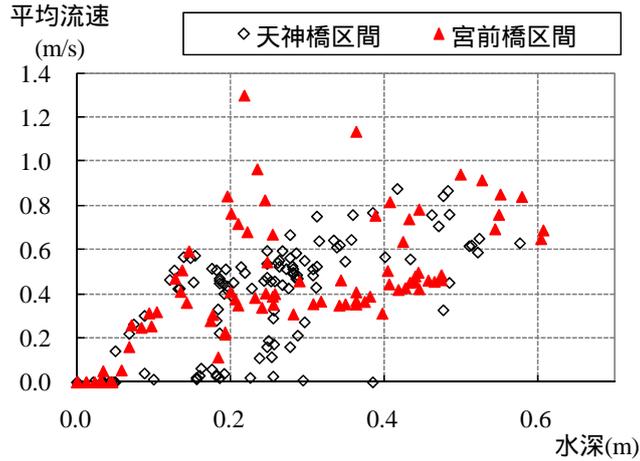


図-8 各区間における流速-水深分布

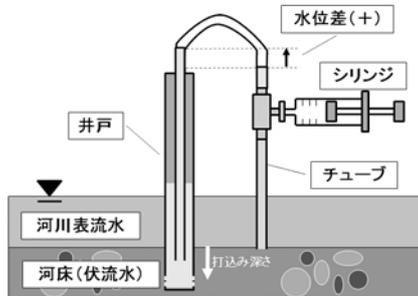


図-9 表流水伏流水の差圧の計測方法概要

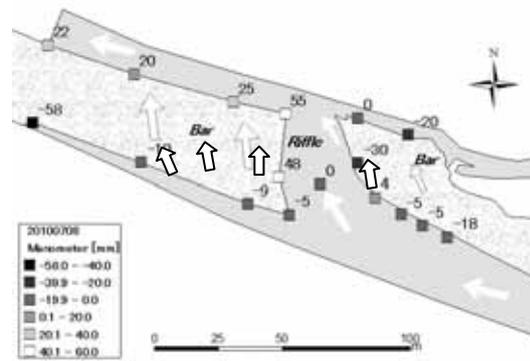


図-10 宮前橋区間における表流水と伏流水の差圧

## (2) 各区間における伏流環境

上述した砂州形状および平水時の流路の特徴により、表流水位の縦断変化が異なり、表流水と伏流水の水交換特性も異なることが予測される。そこで、鷲見が開発した計測方法<sup>3)</sup>により(図-9)、河床面付近と河床下20cmの伏流水間の差圧を計り、砂州水際付近を中心に鉛直浸透のポテンシャルを調べた。

図-6(a)に示すように天神橋区間にはほとんど陸域がなく、かつ、周辺の広域地下水位や高水敷地下水位を調べ比較した際に地下水位が河川水位より低い結果となったため、全体で浸み込み傾向にあることがわかった。一方、宮前橋区間は、図-10の差圧の分布が示すように、砂州上流側は負値で表流水が河床に浸み込み、正となる下流側の砂州水際では伏流水が湧き出ている。図-7が示す瀬の上下流での大きな水位差は伏流水流動を規定し、低水路内、特に砂州水際付近の河床で表流水と伏流水の顕著な水交換を示した。これと既往の研究成果<sup>4)</sup>により図-10の砂州陸域上の矢印に示す伏流水水平流動を推測できる。

## (3) 伏流による水温環境の変化

夏期・秋期における表流水と河床下20cmの水温を水際付近で調べた。表流水温、および表流水と伏流水の温の差を図-11, 12に示す。瀬の上流側においてはこの水温差は殆どなく、図-10における表流水の浸み込み領域であり移流によって水温差が生じず、下流側での温度差の高い部分は図-10の湧き上がり部にあたり、砂州内部の地温により秋は温められ夏は冷やされた水の温度が示されている。つまり、これらの図から、宮前橋区間では水温変化の特徴が顕著に現れているといえ、砂州の下流側水際部において水際の浅い水域や河床の極近傍では湧き上がる伏流水の影響を受けることがわかった。

このように陸域が形成され低水路に明瞭な瀬淵構造を持つ交互砂州の河道では、瀬の上流部で砂州内に浸み込み砂州陸域中を伏流水として水平流動したのち復帰するという水交換現象がみられ、

一部の水際・河床付近の水温形成に影響を与えることがわかった。ただし、河川水温全体の形成については、2010年夏期には宮前橋区間の水温が天神橋区間の水温より低くなることが確認されているものの、両区間に流入している水の温度にもともと差がある。そのため、各区間の河川全体の水温環境の生成に伏流水がどの程度寄与しているかの評価が必要であり、今後、評価・検討する予定である。

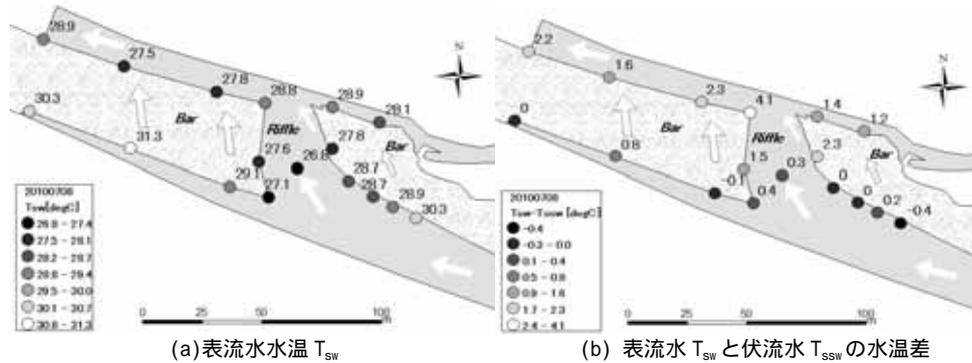


図-11 表流水・伏流水水温環境（夏期：2010.07.08）

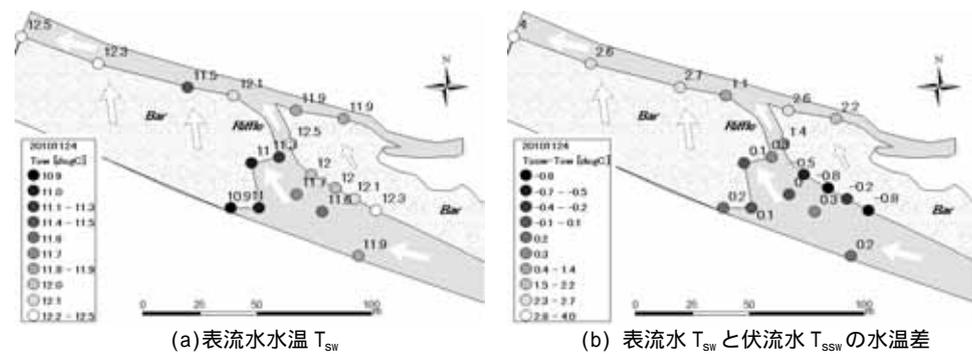


図-12 表流水・伏流水水温環境（秋期：2010.11.24）

## 矢田川における魚類の生息環境と水温の影響について

### (1) 魚類生息状況の調査概要

対象とした矢田川の天神橋区間と宮前橋区間において、夏期（2010/8/22-9/3）および秋期（2010/10/23-10/25）に魚類の生息状況を調査した。魚類は、各対象区間に、長さ10m×幅5mのコドラートを設定し、電気ショッカー、タモ網（目合い：2mm）及びサデ網（目合い：3mm）等を用いて採捕した。

各対象区間におけるコドラートは、魚類が温度ストレスを受けると推測される夏期に特に詳しく調査するため、天神橋区間に22地点、宮前橋区間に17地点設置し、秋期にはその中から地点を限定し、天神橋区間に13地点、宮前橋区間に10地点とした。

魚類生息状況の調査とともに、各コドラートにおいて、3カ所で底質の河床材料調査を、9カ所で水深と6割水深の流速を計測した。また、各コドラートにつき、Onset製の自記式水温計測口ガー（ティドピット2）を、河床に打ち込んだ杭の水面下に固定し、連続計測を行った。なお、夏期調査以降は多数の口ガーが出水等により消失したため、水温の解析は夏期に限定した。

### (2) 物理環境と魚類の生息状況

調査の結果、宮前橋区間で4魚種、計216個体（8月）、5魚種、計78個体（10月）、天神橋区間で13魚種、計194個体（8月）、12魚種、1甲殻類、1両生類、計334個体（10月）、両調査区間で計18種の水生生物が確認された。なお、優占種は、ヨシノボリ類（*Rhinogobius* sp.）およびオイカワ（*Zacco platypus*）であった。加えて、メダカ（*Oryzias latipes*）、シマドジョウ（*Cobitis biwae*）などの希少魚類<sup>5)</sup>も採捕された。

ここで、ヨシノボリ類とオイカワの個体数密度を図-13、14に示す。また、各コドラートの平均水温、水深および流速の代表値と個体数密度について整理したものを図-15～17に示す。なお、こ

これらの図のプロットの大きさは個体数密度に比例し、その値をプロット横に数値で示している。これらの図より、夏期は、両区間共に平均水温 29.9 以上の場所ではヨシノボリ類もオイカワの生息



図-13 夏期の表流水水温および魚類の生息状況 (8/22-9/3)



図-14 秋期の魚類の生息状況 (10/23-10/25)

密度が著しく低いことがわかる。逆に、夏期には各区間においてこれらの魚類が比較的流速が高い、低水温の環境を選好していることが明らかになった。

低水路幅が異なる天神橋区間と宮前橋区間の砂州はそれぞれ異なる特徴を有し、夏期の水温環境や水深・流速などの分布状況に大きな差が認められた。天神橋区間では宮前橋区間に比べて水温がほぼ一様に高く、水深・流速の変異が小さかった。夏期水温が比較的低く、水深・流速環境の変異が大きい宮前橋区間で、より多様な魚類が生息するものと予測されたが、夏期・秋期ともに魚類の多様性は天神橋区間でより高かった。ただし、この結果は、天神橋区間上流の湾曲部と砂州陸域の存在に起因する、局所的なワンド的地形および河畔植生の創出によるものと考えられた。すなわち、魚類の生息に重要とされる水中横方向の洗掘および陸上から水面に垂下する植物の陰などが隠れ家として機能し、局所的に多様な魚類が生息する結果となったものと推察される。この局所空間を解析から除外すれば、ほぼ予測通り、平均水温が低く、かつ、瀬淵構造が比較的明瞭な宮前橋区間で魚種数、個体数がともにより多い結果となった。

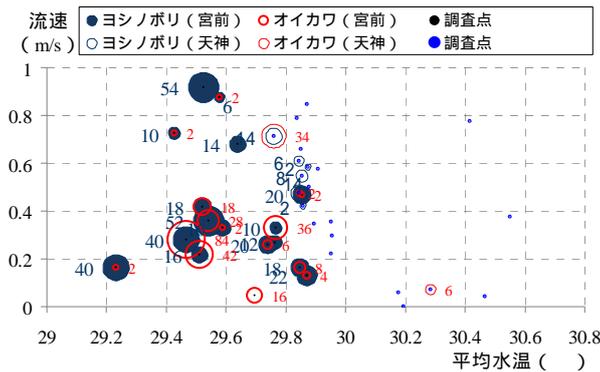


図-15 夏期の水温-流速-個体数密度の関係

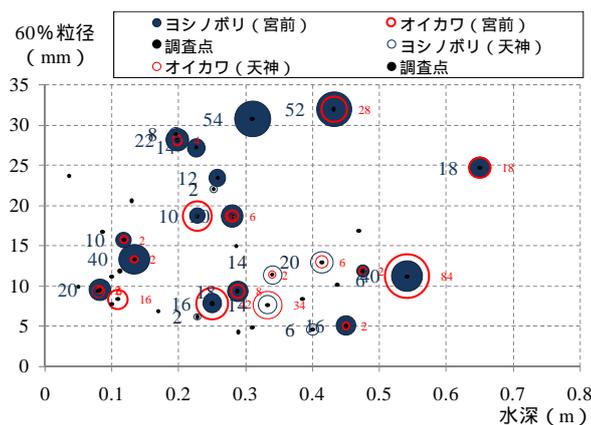


図-16 夏期の水深-粒径-個体数密度の関係

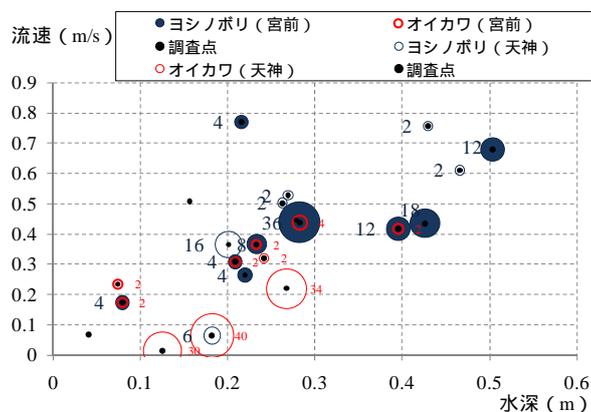


図-17 秋期の水深-流速-個体数密度の関係

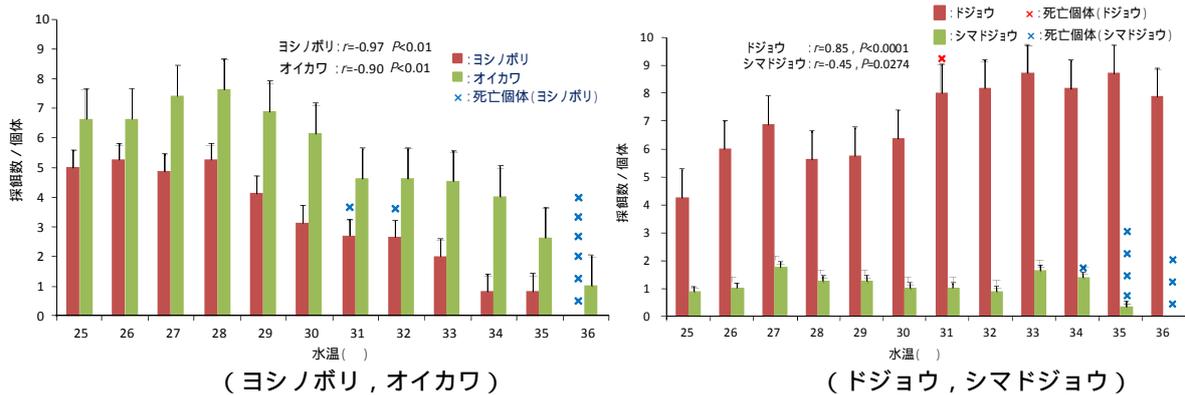


図-18 室内実験の平均採餌数 ( エラーバーは+1 標準誤差 )

#### (4) 温度生理実験

(3) で得られた現地調査結果を受け、魚類の温度生理実験を名城大学の研究室で 2011 年 10 月 25 日～12 月 12 日の期間行った。ガラス水槽 (17L, 幅 45cm, 奥行き 20cm, 高さ 22cm, グラステリアスリム 450, ジェックス株式会社) を 4 基用い、ろ過フィルター (EDENIC scelto V3, 株式会社スドー) を各水槽に取り付けた。各水槽には幅 10cm, 奥行き 20cm, 高さ 22cm の区画を発砲 PP シート (厚さ 5mm) で 4 つ設けた (合計 16 区画)。各区画に、矢田川で採捕された普通種のヨシノボリとオイカワ, ドジョウ, 及び希少種のシマドジョウを各種 1 匹ずつ (各種計 8 匹) を入れ、ヨシノボリ, オイカワを 10 月 25 日～11 月 11 日の期間, ドジョウ, シマドジョウを 11 月 25 日～12 月 12 日の期間行った。熱帯魚用ヒーターとサーモスタット (ホットパック 65W, ジェックス株式会社) を用いて 25 度で 1 週間馴らし, 期間中各被験個体に生き餌のアカムシ (アカムシユスリカ; *Propsilocerus akamusi*; 平均重量: 0.60g) を 1 尾与えた。実験は, アカムシを 1 尾各区画に投入し, 30 分ごとに残餌を確認し, 餌が見られなかった場合, アカムシ 1 尾を再び与えた。1 日 1 ずつ水槽内の水温を上げ, 各実験日において, 午前 11 時～午後 4 時の 5 時間に餌の有無を計 10 回確認し, 餌は最大 10 尾与え, 36 まで計 12 日間行った。水温と採餌量の関係を相関分析で解析し, 各魚種の平均採餌量をクラスカル・ウォリス検定により解析した。

図-18 に示すようにヨシノボリとオイカワは, 共に水温と平均採餌量の間を負の相関が見られ (ヨシノボリ:  $r=-0.97, P<0.01$ ; オイカワ:  $r=-0.90, P<0.01$ ), ドジョウでは反対に正の相関が認められた ( $r=0.85, P<0.01$ )。一方で, シマドジョウでは相関は認められなかった ( $r=-0.45, P=0.14$ )。さらに, ヨシノボリは, 31 及び 32 で 1 個体ずつ, 36 で残りの 6 個体全てが死亡したのに対し, オイカワは平均採餌量の減少は見られたものの, 全個体が生存した。また, ドジョウは 31 で 1 個体のみが死亡し残りが生存したのに対し, シマドジョウは 34 で 1 個体, 35 で 4 個体, 36 で残りの 3 個体が死亡した。

本実験の結果, ヨシノボリとオイカワは, 水温と平均採餌量との間を負の相関が見られ, ドジョウは正の相関が見られ, シマドジョウは相関が見られなかった。また, ヨシノボリ, シマドジョウは 36 で全ての実験個体が死亡し, ヨシノボリ, オイカワは高水温になるにつれ採餌量が減少した。以上のことから, 高水温が一部の魚類の採餌量に影響を与え, 死亡した 2 魚種の致死水温のラインは 36 であることが明らかとなった。ドジョウは高水温に強いため<sup>6)</sup>, ほとんどの個体が生存し, 採餌量はヨシノボリ, オイカワと違って減少しなかったと考えられる。36 で全ての個体が死亡したシマドジョウは, 実験開始の 25 でも平均採餌量は低かったことから, 本種は今回使用した餌のアカムシを好まなかったのか, 1 週間置いた馴らし期間はシマドジョウにとって短かったのではないかと, 25 の時点で水温の影響を受けていたということが推測された。

#### 複断面河道における砂州挙動と自然河岸形成に向けた基礎的検討

##### (1) モデル流況を用いた砂州の挙動の解明と拡幅状況の検討

###### (a) 場の設定

ここでは, 周期境界条件を用いた砂州の数値解析<sup>7)</sup>により, 現象を検討する。現場の現象と照らし合わせるために実スケールの解析を実施する。

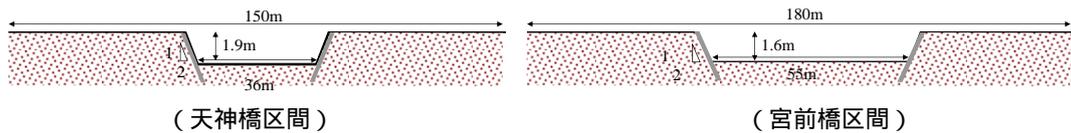


図-19 モデル断面

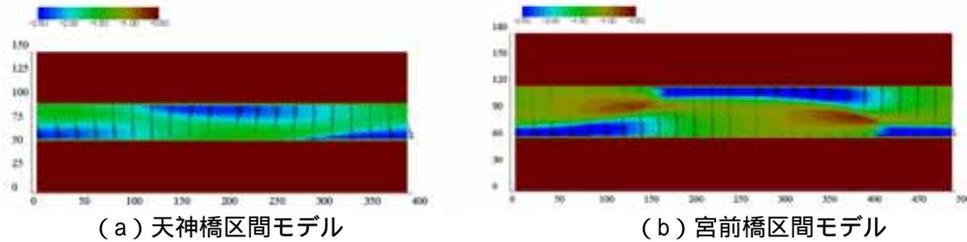


図-20 初期河床形状コンター (単位：m)

解析する場合は、矢田川下流域の代表的区間（天神橋区間）と局所的に低水路幅が異なる区間（宮前橋区間）を参考に単純化させた図-19の断面を用いて設定する。また、初期河床を形成させる前に、砂州の線形解析を実施し低水路満杯流量で形成される砂州波長のおおよその値を予測し、それを用いて計算領域長を決定した。これにより、計算領域長はそれぞれ400m、500mとしている。

上述したように矢田川では、低水路満杯流量程度で形成されるだろう砂州が形成されている。これを踏まえ、各区間の河道モデルに低水路満杯程度となる流量で砂州を形成させ、それを初期河床とした。計算で用いる初期河床形状は、図-20に示す一定流量で低水路内に形成された砂州を用いた。

#### (b) 流況のモデル化

矢田川下流域の流況を10分ごとに取得された水位データや流量年表などを参考にモデル化した。まず、大出水の特徴を知るため、年最大流量の経年変化を調べた。矢田川の瀬古観測所における流量年表から年最大流量を調べたところ、欠測年が非常に多く44年中15年分のデータのみが有効な状態であった。そこで、存在する日流量データの最大値と年最大流量の関係を見出し、日流量データの最大値から年最大流量を予測し、各流量の超過確率年を調べることにした。そのほか、流量年表と10分ごとに取得された水位データ（リアルタイムデータ）を用いて流況の特徴をとらえた。ここではシンプルに考え出水の流量波形はサインカーブを利用し、ピーク流量ごとの増水期および減衰期の時間について降雨までは考慮せずリアルタイムデータを参考に決めた。最終的に、基本流況は図-21とした。

#### (c) シミュレーション結果と考察の例

まず、各区間の河道モデルにおける基本流況ケース（図-21）を通じて、複断面河道における河道の変化について調べる。

基本流況の流量変化を受け両河道における水位は図-21のように変化する。このときの河床変動を調べると、天神橋区間はわずかであるが徐々に砂州が進行していく様子が見てとれた。一方、宮前橋区間の砂州は進行しているものの、きわめて遅いことが分かった。なお、宮前橋区間では、低水路際の深掘れ部が徐々に細長くなっており、少しずつ砂州形状が変化していることもわかった。

ここで、砂州の進行について詳しくみるため、砂州の前縁線下流端位置の時間変化を調べた結果を図-22に示す。この図は、左軸に流量、右軸に砂州移動量、横軸に出水時の時間のみをカウントしたものを示している。ちなみに、横軸は出水時間のみのカウントのため、26時間で1年としている。また、砂州移動量は、初期河床における砂州前縁線下流端位置を基準位置0として流量の変化とともに下流方向への移動距離を示している。この図によると、低水路幅が狭い天神橋区間の砂州の進行が早く、低水路幅の広い宮前橋区間の砂州の進行は顕著に遅いことが分かる。各出水での動きを詳しく見ると、天神橋区間では、ピーク流量が $200\text{m}^3/\text{s}$ となる出水時に砂州が進行し、中出水時には停滞していることがわかった。一方、宮前橋区間では、各出水時に進行、後退を繰り返していた。また、同じ流量であっても増水期と減水期で砂州の進行速度が異なることもわかる。これらの結果と砂州地形の変形をあわせて考えると、宮前橋区間は低水路幅が広いから、砂州が陸化しやすく砂州は進行が遅い分、出水のエネルギーは砂州の変形または平水時の流路形状の変形に使われていることが予測される。

次に、基本流況ケースと中出水の回数を年間 10 回とした流況ケースを比較し、中出水の役割について調べた。結果として、低水路幅によって、効果的なインパクトとなる出水の規模は異なるが、中小出水は、砂州形状に影響を与え、頻度が多いほど進行に影響を与えることがわかった。

また、ここで、規模の異なる出水を想定して河床変動を考える。このとき、図-22 における一年のうちの大出水を順序は考えず、偶数年に  $300\text{m}^3/\text{s}$ 、5 の倍数の年に  $500\text{m}^3/\text{s}$  のピーク流量を持つ出水を経験させた。こうした流況の特徴は砂州の進行を大きく変化させ、砂州形状の特徴や変形の頻度、一時的な形状にも関係してくるため、環境面を考える際にも重要な視点であるとわかった。

最後に、河岸を自然河岸として拡幅を許したときの河岸浸食について調べた。自由に浸食可能な自然河岸形成させるため低水護岸を撤去する際には、砂州の挙動により河岸が浸食され堤防が危険にさらされる可能性がある。既往の研究にあるように、川幅の拡幅は、砂州の進行と大きく関わりを持つ<sup>8)</sup>。特に、深掘れ部の移動と深く関連があるため、各河道区間で出水時の拡大幅がどの程度あるかを検討しておく必要がある。そこで、出水時の拡幅幅について基本流況ケースをベースとして検討した。

基本流況下では、河床コンターの変化から川幅拡大しながら砂州が進行していくことが見られた。また、両河道モデルともに川幅が拡大するために低水路護岸がある場合よりも砂州の進行は遅くなっていた。特に、天神橋区間河道モデルにおいては、砂州は川幅拡大とともに徐々に不明確になっていき、深掘れ部がそれほど深くなく移動も少ないため、初期河岸位置からの最大拡幅量を示す拡幅距離の最大値は宮前橋区間よりも小さな値を示す。一方で宮前橋区間モデルでは明瞭な砂州が形成されているために、深掘れ部の移動とともに河岸が大きく崩落し、拡幅距離の最大値は大きな値を示す。つまり、明瞭な砂州が形成されているほど、河岸位置が大きく変化する可能性がある。特に、ピーク流量が大きいほど河岸位置は大きく変化する。ただし、大きな出水の後には、河岸位置の変化は若干鈍くなる。

続いて、護岸撤去時の治水的安全性を検討するため、ピーク流量を変化させた流況ケースのうち 5 年目のピーク流量を  $1000\text{m}^3/\text{s}$  に変化させた。その結果、その後の変化は図-23 の結果となる。大出水は両河道モデルを大きく変化させ、最大河岸位置が 5m 以上増加するほどに川幅の拡幅も非常に大きな値をとることが分かった。しかし、最大流量の拡幅後、年最大流量程度の出水では拡幅しなくなることもわかる。

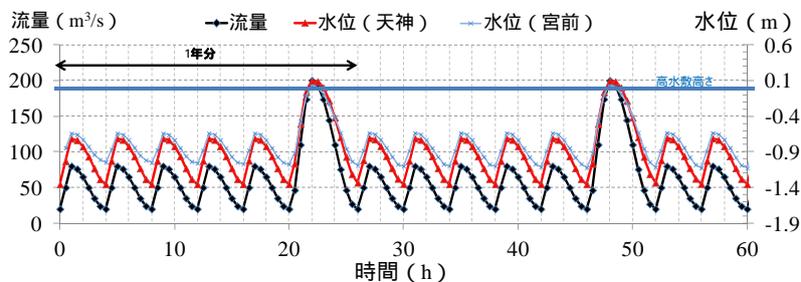


図-21 流量および平均水位の変化

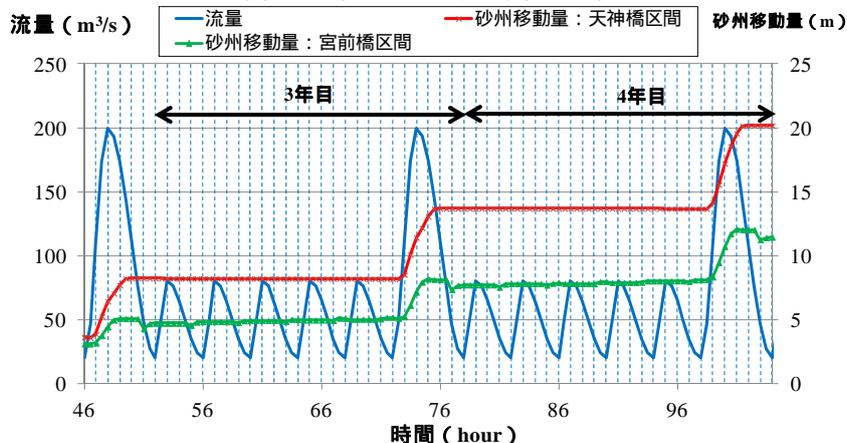


図-22 基本流況時の各区間における砂州前縁線移動状況

様々な流況で検討した結果を受け、設定流況にもよるが矢田川における河岸の拡幅は 10 年間で最大 10m 程度進むことがわかり、その他の解析からも河岸浸食はそれほど大きく進まないことがわかった。このことから、自然河岸形成の際には、どの程度の浸食を許すのか、どの位置から河岸浸食の抑制が必要となるのかを検討したうえで実施することが必要である。

上記の解析を参考し、本格的に低水護岸の撤去を考える際には、まず、モデル流況の設定を慎重に行った上で、実現象と照らし合わせながら検討を行う必要があると考える。

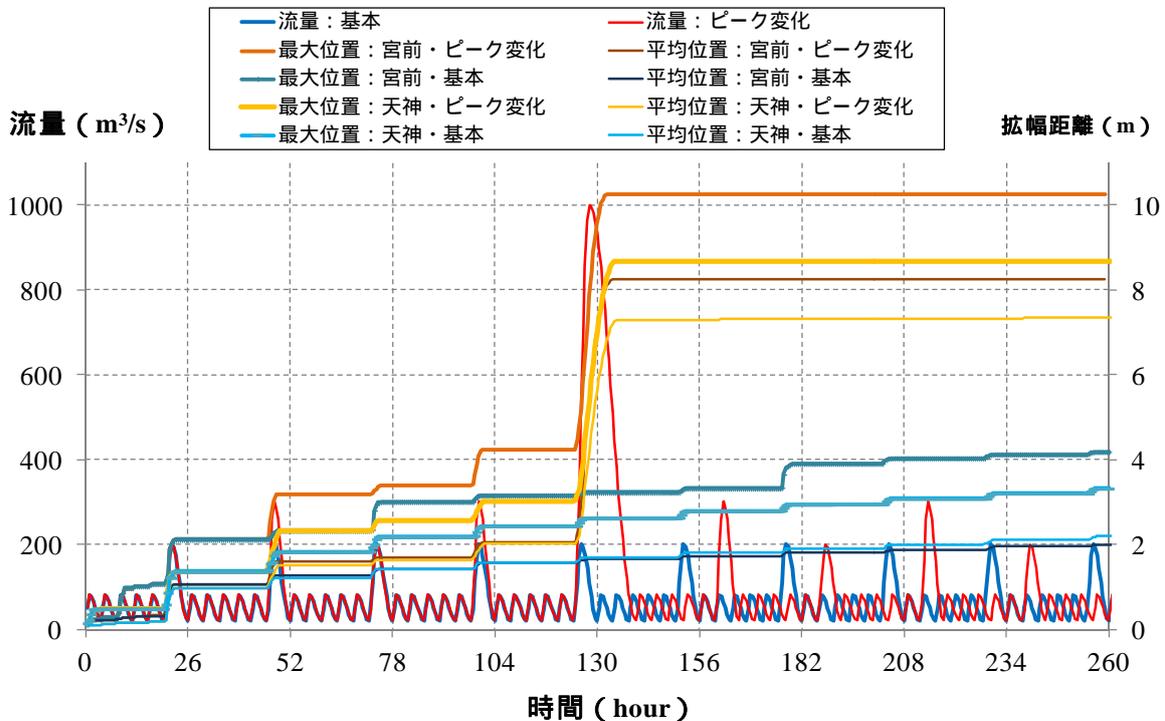


図-23 流況モデルと各区間における出水時の川幅拡幅状況

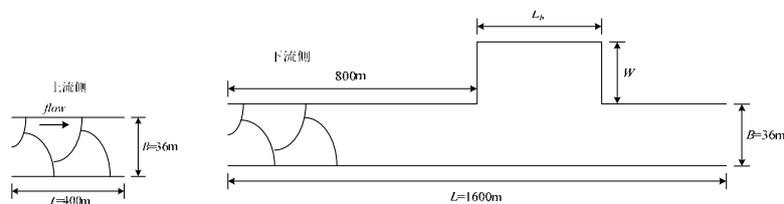


図-24 計算領域の概念図

表-3 計算条件

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
W (m)	18	36	18	36	18	36
$L_s$ (m)	400	400	200	200	100	100

(2) 部分的自然河岸形成時の流路拡幅と交互砂州の移動の数値解析的考察

矢田川では、現在あるコンクリート低水路護岸を自然河岸にすることで河川環境を改善し、かつ、治水上の安全性が確保されるような河川整備を行うことを目標に掲げている。部分的に自然護岸にすると、自然河岸部分が侵食され、流路が部分的に拡幅することが予想される。ここでは、図-24のような表-3 に示すケースで拡幅部を設定した場合において、上流から移動してくる交互砂州が部分的な拡幅部を通過するとき、どのような挙動を示すのか、また交互砂州の移動は維持されるのか、さらに拡幅部の河床変動は初期に比べて上昇するのか、低下するのかを数値実験を通して検討することで護岸撤去による河床変動特性を考察した。なお、ここでは、音田らによる手法を用いて検討を行う<sup>9)</sup>。

特に、低水路護岸を撤去した場合に考えられる、部分的に流路が拡幅した場合を対象とし、交互

砂州が部分的な拡幅部を通過するとき、どのような挙動を示すのかを数値実験を用いて考察した。その結果は図-25 のようになり、砂州波長と同程度の拡幅長さを有する場合には、拡幅部周辺での複雑な河床変動特性に伴って、全幅に渡り河床が応答することがわかった。一方、砂州の半波長程度の拡幅長さを有する場合には、拡幅部は土砂で埋まってしまい、砂州の進行が続く可能性を示した。

これらの結果は、低水護岸の部分撤去時の治水安全上の議論につながる。上記結果から考えると、部分的に護岸撤去を実施する場合、砂州半波長程度の護岸の部分撤去は、川幅拡大にはつながらず治水上の問題は出て来ないと予測できる。部分的にでも護岸を撤去する場合にこうした検討をさらに実施することで、治水上の安全性を保ちつつ、より効果的な自然河岸形成の実施につなげることができると思う。

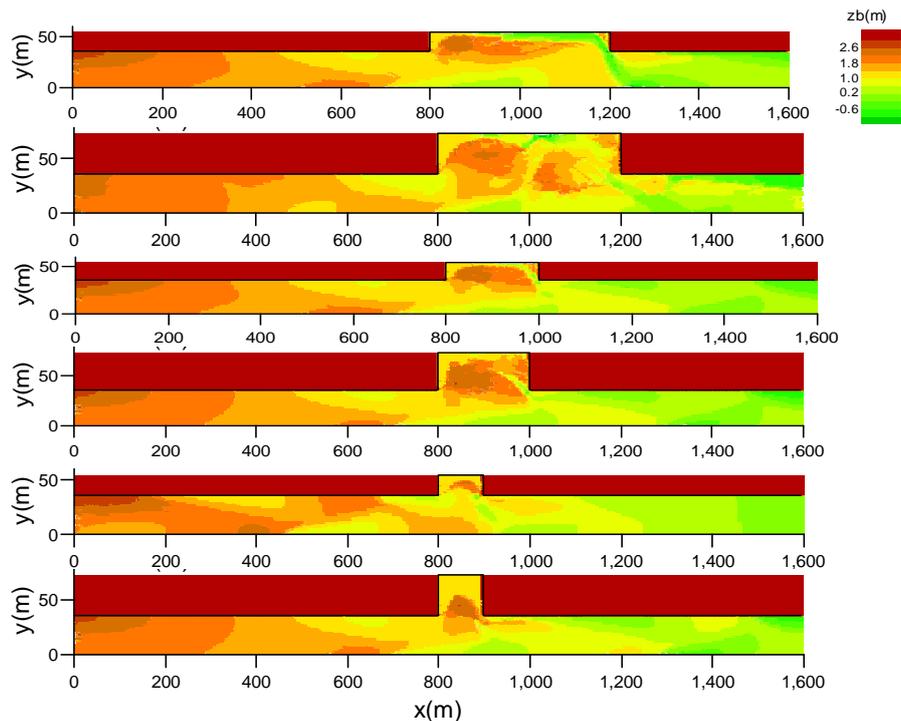


図-25 600 時間後の河床高コンターの時間変化 (上から順に Case1 ~ 6)

おわりに

ここでは、本研究の一部を抜粋し、概要を説明してきた。その他の検討も含め、本共同研究を通じて得られた主な成果として、次のことが挙げられる。

- ・ コンクリート低水護岸を有する矢田川では、低水路満杯程度の流量で規定される交互砂州が形成されていた。これは、低水路幅から算出する水理量を用いた砂州の領域区分図や数値解析からも予測でき、その特徴に応じて平水時の流路の特徴が決まっていた。また、低水路幅で河床材料の入れ替わり特性が決まるため、低水路幅の大きな宮前橋区間においては、平均年最大流量程度では河床材料の入れ替わりがほとんど確認されなかった。ただし、宮前橋区間も既往最大出水で砂州が大きく変動しており、ピーク流量の大きな出水後にはなだらかな砂州が形成されていたため、流況により幅を持って場が変動することが分かった。
- ・ 河床高の凹凸が小さな天神橋区間では、明確な表流水・伏流水交換が確認できず、周辺地下水が低いために全体として浸透流出の特徴を示した。凹凸の大きな砂州が形成されている宮前橋区間では、顕著な水交換環境が確認された。砂州下流側での伏流水の湧き出しは河床付近の局所的な水温環境に影響し、表流水全体の水温環境にそれほど影響を与えない。宮前橋区間の河床高の凹凸は出水によって変化するため水交換状況や河床水温への影響は変化することがわかった。
- ・ 魚類生息環境は、調査開始前に豊富な魚類層を予測した宮前橋区間より、天神橋区間で多くの魚種を確認した。ただし、天神橋区間では、局所的な植生カバー付近でのみ魚種が多く確認された。そのため、拡幅によって物理環境を変化させるより河岸に存在する植生の機能が重要となる可能性が示唆された。

- ・ 魚類生息調査により夏場にヨシノボリ類が低水温を好むことがわかり、温度生理実験によって少なくともヨシノボリ・オイカワは水温と平均採餌量との間に負の相関があることが確認された。これにより夏場の高水温化が進む都市河川における低水温環境の創出の重要性が浮き彫りになった。
- ・ 流況をモデル化し数値解析によって検討した結果、砂州の特徴を知る上での流況のモデル化の重要性や深掘れが進んだ砂州を有するほど河岸位置の変化が著しいことなどが分かった。この解析はある程度現地を再現しており、砂州の特徴の変化の追究や河岸防護方法の検討に有効である。
- ・ 砂州形成流量を一定で通水させた数値解析によって、低水護岸の部分撤去は半波長程度以下であれば治水上問題がない可能性があることが示された。

#### 今後の課題・展望

研究立ち上げ時予定していた護岸撤去現地実験はかなわなかったものの、自然河岸形成を如何にとらえるか、つまり、全面撤去して自然に任せることを自然河岸形成とするのか、河岸浸食を防衛しつつ自然な状態にすることを自然河岸形成とするのかなどを研究者間で議論しながら実施してきた。上述の結論にもあるように、川幅の拡大は必ずしも魚類生息環境にプラスに働かず、水際植生の存在のほうが有効に働くこともある。本研究の成果を踏まえると、例えば、凹凸の大きな砂州が形成されるよう低水路幅を流況にあわせて決めて河道設計し、かつ、低水路護岸を部分的に自然河岸とすることで、水際植生にあふれよりよい環境の創出も可能と考える。

また、治水面の技術検討は、数値解析のみの実施となった。その点で課題が残るが、河岸浸食モデルの現地レベルの有用性が確認されれば、今回の検討が有用な知見となると考える。

今後、本共同研究の成果を踏まえ、さらに研究を実施し知見を蓄積することで、治水上の安全を確保した上でのよりよい河川環境が創出できる河道設計技術の提案につながることを期待する。

#### 参考文献

- 1) 池田駿介：単列交互砂州の波長と波高，第27回水理講演会論文集，pp.689-695，1983。
- 2) 溝口敦子：低水護岸を有する矢田川低水路における交互砂州の変動特性，河川技術論文集，Vol. 16，土木学会，pp. 107-112，2010。
- 3) 山下理代，鷺見哲也：礫河床での鉛直水交換現象に関する研究，平成21年度土木学会全国大会研究発表会第64回年次学術講演会，pp.443-444，2009。
- 4) 鷺見哲也，穎原宇一郎，辻本哲郎：砂州内の伏流挙動とたまりの水交換性に関する研究，河川技術に関する論文集，土木学会，Vol.6，pp.89-95，2000。
- 5) 谷口義則：魚類・レッドデータブックなごや2010 - 2004年版補遺 - 。名古屋市。pp.99-121，2010。
- 6) 内山りゅう：ドジョウ・田んぼの生き物図鑑：92。株式会社山と溪谷社，2006。
- 7) 寺本敦子，辻本哲郎：砂州の形成過程に関する数値計算手法，応用力学論文集，第7巻，pp.975-982，土木学会，2003。
- 8) 寺本敦子，辻本哲郎：砂州を伴う河道の低水路河岸侵食に関する数値解析による研究，水工学論文集第47巻，土木学会，pp.649-654，2003。
- 9) 音田慎一郎，白井秀和，細田 尚，有光 剛，大江一也：急勾配湾曲水路の河床・河道変動に対する平衡・非平衡流砂モデルの適用性について，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.691-696，2010。