

砂礫州の地形特性とその土壌特性が 伏流水流動に与える影響

THE ANALYSIS OF SUBSURFACE FLOW CHARACTERISES BY GRAVEL BAR SHAPES AND THE SOIL PROPERTY

長井翔太郎¹・尾花まき子²・知花武佳³

Shotaro NAGAI, Makiko OBANA, Takeyoshi CHIBANA

¹学生会員 東京大学工学部 社会基盤学科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 特任助教 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Subsurface water flow in a gravel bar is closely related to the river environment and stream ecological system. In this study, we investigated the characteristics of subsurface water flow focusing on a gravel bar which has various heterogeneous effects, such as water permeability and porosity of gravels, and bar shapes. The results of field observation and indoor experiments suggest that the way of the subsurface water flow is formed by the heterogeneous effects of the gravel determined the bar formation processes during flood stages. And it was clarified that the subsurface water flow have typical characteristics, especially the topical flow behavior are included in the wider flow formed by riffle-pool structure in the reach scale. And they are directly affected by the characteristics of each river.

Key Words : subsurface water, gravel bar, gravel structure, the Asa River, the Nakatsu River

1. はじめに

河川の水・物質輸送・変換過程において、表流水が砂州に浸透した後浸出し、再び表流水に復帰する伏流過程や河床間隙への浸み込みは、それらの河道内に占める割合が高いことから、特に河川水質形成過程へ与える影響は無視しえないものである¹⁾。本研究で対象とする河川中流域に形成される砂州-波長分のリーチスケールに着目すると、その砂州の下を流れる伏流水は、瀬にあたる砂州上流水際部から表流水が浸透し、淵にあたる砂州下流水際部から表流水に復帰する現象が、現地観測と数値解析により明らかになっている^{2), 3)}。伏流水は、表流水に比べ非常に遅い速度で流下する⁴⁾ことから、表流水が砂州を伏流する過程で、降雨や出水による鉛直浸透による影響を受けながら伏流水の水質が形成される⁴⁾ことや、その流下過程での土壌微生物作用による有機物や無機態窒素の酸化分解が確認され^{5), 6)}、河川水の水質保全へ寄与することが注目されている。このように、伏流水には、瀬淵構造にも現れる砂州形状と、砂州を流下する過程での土壌環境特性が直接的にその流動特性（流速や流動時間）と水質形成過程に影響を及ぼすことが示唆されている。しかしながら、これらの既往研究は、砂河

川の砂州を対象とした観測や、粒度を均一だと仮定した数値解析に限られており、不均一な粒度で構成される砂礫州の伏流水の流動についてはいまだ不明瞭な点が多い。そこで、本研究では、混合砂礫により形成された不均質な砂礫州を有する2河川に着目し、砂州の地形特性やその土壌特性が伏流水の流動に与える影響を解明し、各河川での伏流水の流動特性を把握することを目的とする。

2. 現地観測の概要

(1) 対象河川・対象砂州の概要

本研究では、典型的な砂礫州を有し河道特性も同規模の多摩川水系浅川と、相模川水系中津川の2河川を対象に、その中流域に存在する砂礫州にて現地観測を行った。

浅川は、東京都八王子市および日野市を流れる流路延長30.15km、流域面積156.1km²、平均河床勾配1/140～1/100の一級河川であり、多摩川の支流の一つである。流域の地質は、山地部は小仏層群によって構成されており、主に中生代の堆積岩から成る。現地観測の対象とした砂州は、多摩川合流部より2.8km上流に位置する砂州であり、その区間の平均河床勾配は1/250程度である。その概形を図-1に示す。砂州上流端左岸際と砂州下流端

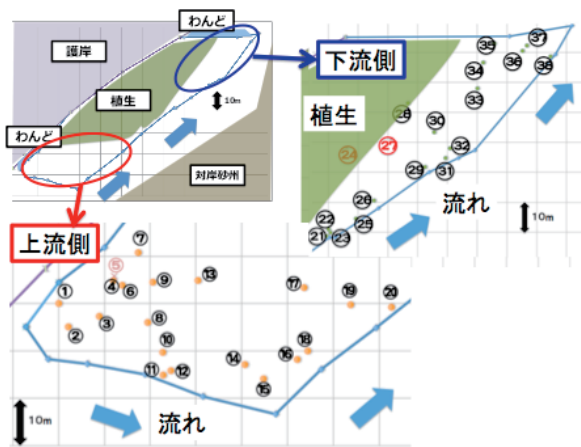


図-1 浅川の対象砂州と観測井

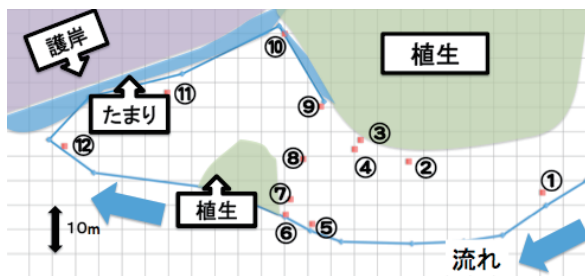


図-2 中津川の対象砂州の下流側

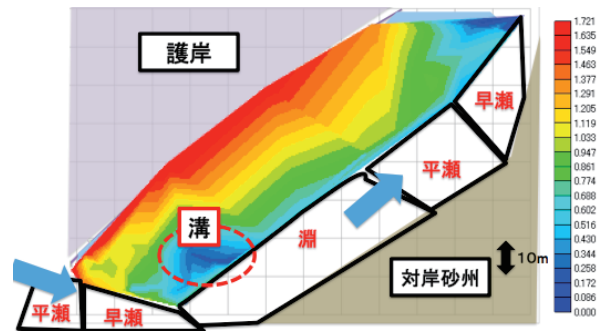


図-3 浅川対象砂州の地形と瀬淵構造(単位はm)



図-4 浅川砂州上流側に存在した洪水が通った跡の溝

付近にわんどが存在していた。砂州の中央部一帯を占有する植生域は、比高が高く観測井を設けることが困難と判断したため、本研究ではこの植生域を境に、上流側と下流側の2つに分けて、それぞれで調査を行った。

一方、中津川は、神奈川を流れる流路延長32.8km、流域面積143.4km²、平均河床勾配1/160程度の一級河川であり、相模川水系の支流である。流域の地質は、凝灰岩・凝灰角礫岩を中心とした新第三紀の火成岩から成る。現地観測の対象とした砂州は、相模川合流部より5.2km上流に位置する砂州であり、その区間の平均河床勾配は1/425程度である。この砂州の中央部付近の植生域も、比高が高く観測井を設けるのが困難と判断したため、本研究では図-2に示すように対象砂州の下流側のみを対象とした。護岸沿い・植生域の近くには本流と連続したわんどが存在していた。

(2) 観測内容

現地観測は、2012年10月から2013年1月にかけての平水時に実施した。浅川砂州に37箇所、中津川砂州に12箇所の観測井を設けた(図-1, 2参照)うえで、地形測量、伏流水位分布調査、伏流水温計測を行ったほか、各砂州の特徴的な場の表層と下層(飽和層)の土壌を採取した。室内実験では、採取した土砂を各土質試験に供し、粒度分布や有機物含有量、透水係数や間隙率を計測した。

3. 地形特性から見た伏流水の流動・流向の把握

(1) 砂州の地形特性

図-3に、浅川の対象砂州での地形測量により得られた砂州の地表面の標高コンター図と滞筋の瀬淵構造との関係性を併せて図示する。この図における比高の高さは、砂州最下端の水際の水位を0としている。この図により、砂州全体を概観すると、高水敷から水際にかけて徐々に比高が減少している様子が見てとれるほか、図-1と併せて見ると、植生部と裸地部の境界には比高差が生まれていることが分かる。特に、砂州の上流側部分では、図-4に示すように増水時には早瀬状になっていたと思われる溝が存在し、それが図-3によっても確認できる(上流側の等高線が密になっている部分)。砂州中央部植生域は、他の地点よりも比高が高く、その砂州中央部と下流側の境界部は50cm程度の崖となっており、砂州下流側の比高が一気に低くなっていることが見てとれる。また、下流側は砂州最下端のわんどに向かって比高が下がっており、過去にこの向きに水が流れていた跡が表層で見つかった。

図-5に、中津川の対象砂州下流側の地表面の標高コンター図と滞筋の瀬淵構造との関係性を浅川と同様に示す。この砂州では、護岸と砂州との間から植生の際にかけてわんどが存在していた。砂州水際部分からわんどに向かって地表面を見てみると、砂州水際から砂州の内陸部にかけて比高が最も高くなり、その後わんどにかけて緩やか

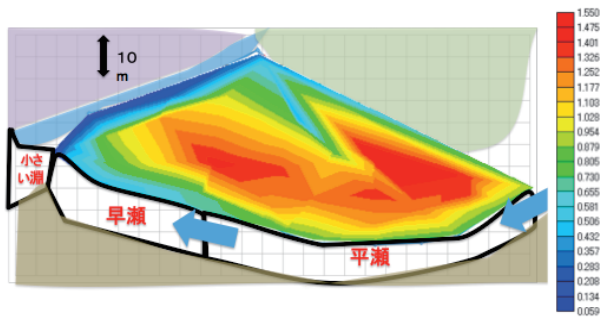


図-5 中津川対象砂州下流側の地形と瀬淵構造(単位はm)

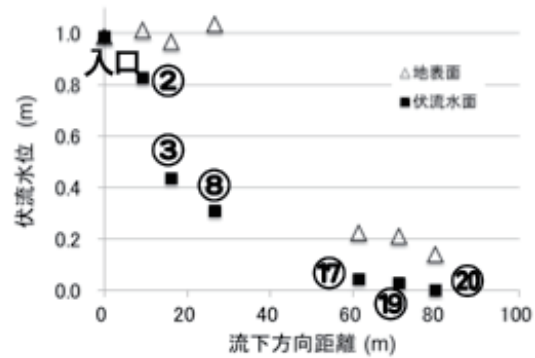


図-7 浅川砂州上流側の洪水跡に沿った伏流水位の縦断勾配

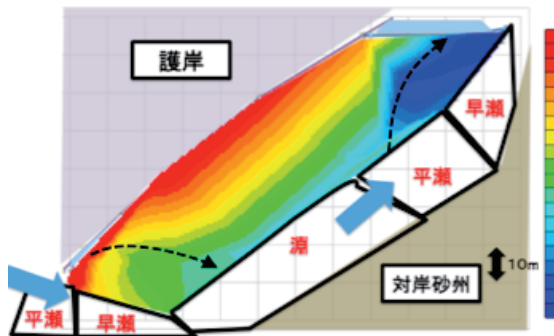


図-6 浅川砂州の伏流水位分布

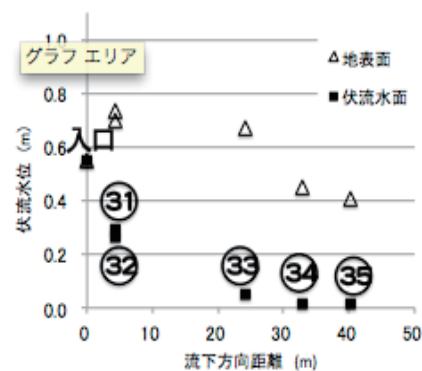


図-8 浅川砂州下流側の伏流水位の縦断勾配

に比高が減少するという蒲鉾型の砂州形状を有している様子が見てとれる。また、植生の生え際には局所的な洗掘跡が確認された。

(2) 砂州上流側での検討

各対象砂州に設けた観測井により得られた伏流水位分布をもとに、伏流水の勾配および流向を推定する。各砂州の伏流水位は、いずれも伏流水位の最も低い地点を基準点としたところからの高さを示し、砂州地表面は、その伏流水位から井戸の深さを足し合わせた値を示す。

まず、図-6に浅川砂州の伏流水位分布図を示す。本節では、その上流側のみ着目して議論を進める。この図から、伏流水は平瀬にあたる砂州上流側から浸出し、淵へかけて砂州上流側をショートカットするような流向になっていることが示唆される。伏流水位分布の上流側からの低減を様々な測線で検討したところ、図-6上流側の矢印の測線に沿った場合に、図-7に示すような伏流水の入口部から観測井②にかけてほぼ規則的に水位が低減する様子が確認され、平均的な水面勾配は1/93と最も急になっていた。また、この測線は、前節で述べた洪水時の早瀬跡とも一致しているほか、伏流水の入口部では、増水時に洪水が流れる向きに実際に表流水が浸み込んでいく様子が観察された。このことから、砂州上流側での伏流水の流れる向きは、図-6中矢印で示す方向であり、洪水時の水みち跡を中心に流れが卓越すると推察される。また、伏流水の水面勾配を検討したいずれの測線におい

ても、特に伏流水の入口部にあたる水際浸透部において急な水位の低減が見られた(図-7参照)。これについては、のちほど詳述する。

(3) 砂州下流側での検討

次に、浅川と中津川砂州の下流側における伏流水の動態に着目する。まず、図-6に示した浅川砂州下流側では、伏流水は上流側と同じように平瀬にあたる部分から浸透し、最も比高の低い高水敷寄りのわんど部にかけて、砂州下流側をショートカットするような流向であることが示唆される。この対象領域は、前節でも述べたように植生域境界部を境に比高が急激に低くなっている。過去からの航空写真と定期横断測量結果を見ると、この部分は過去には砂州は存在せず滞筋部であったことから、洪水時による上流からの土砂の堆積により形成された新しい陸域であり、小出水によりその境界部がさらに削り込まれ、比高差が増したものと推察される。上流側と同じく、伏流水の入口部から出口部にかけての水位の低減を様々な測線で検討したところ、図-6下流側の矢印の測線に沿った場合に、図-8に示すような伏流水の入口部からわんどにかけての測線にて水位が低減の様子が確認された。一方、高水敷から砂州水際へ向かう測線での検討によると、水位低減は逆勾配を示したため高水敷からの伏流水の浸透はないものと考えられる。

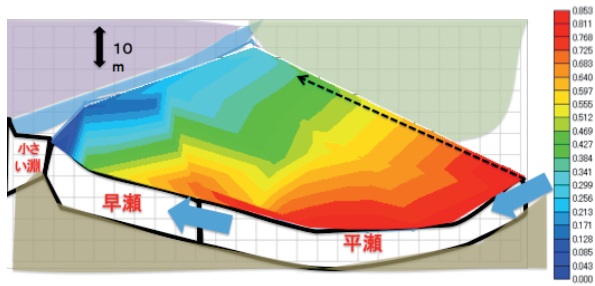


図-9 中津川砂州下流側の伏流水位分布

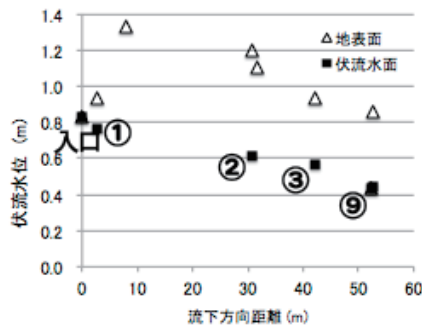


図-10 中津川砂州下流側の伏流水位の縦断勾配

中津川砂州下流側における伏流水位分布を図-9に示す。この図から伏流水は、平瀬にあたる砂州水際部から浸透し、高水敷沿いに形成されたわんどに向かい砂州をショートカットするような流れの向きであることが示唆される。特に、図中の矢印で示した平瀬上端からわんどにかけての測線の水面勾配が1/147と最も急で、図-10に示すように水位は徐々に低減している様子が見てとれた。この下流部分も浅川と同じく、洪水時の土砂堆積により形成された新しい陸域であり、以前の滞筋は現在の伏流水位が低減していた測線と一致する。

(4) 砂州上流側と下流側の比較

各砂州の上流側と下流側での検討により特定した伏流水の入口部と出口部の水位差から求めた伏流水面勾配を表-1に示す。これに、各砂州に一番近い瀬の河床勾配も併せて示す。これを見ると、砂州上流側の水みちの方が洪水時の強い流れが砂州自体を削り込んでできた水みちとなっているため、砂州下流側に比べて水面勾配が急になっている。また、砂州下流側の伏流水の水みちはもとの滞筋であったため、その水面勾配は現在の瀬の河床勾配と同程度になっている。

以上のことから、砂州の上流側では洪水時に砂州を削り込むような流れが作り出した明瞭な水みちが、また、下流側では洪水による上流からの土砂の堆積によって消失した旧流路水際は、それぞれの伏流水が流れやすい部分となることが示唆された。そのような砂州の形成メカニズムが、砂州上流側・下流側での伏流水面勾配の緩急を決めている。

表-1 それぞれの対象砂州における伏流水面勾配

川		伏流水面勾配	瀬の河床勾配
浅川	上流側	1/93	1/68
	下流側	1/137	1/154
中津川	下流側	1/147	1/200

表-2 各砂州での土壌特性

川	範囲	水みち	粒径 D_{10} (mm)	透水係数 K (m/s)	間隙率 λ (%)	強熱減量 Li (%)
浅川	上流側	入口	0.34	4.55×10^{-3}	42.0	8.5
		出口	2.0	5.88×10^{-3}	45.3	5.1
	下流側	入口	0.20	3.01×10^{-3}	44.4	
		出口	0.39	8.46×10^{-3}	47.9	
中津川	下流側	入口	0.36	0.95×10^{-3}	43.8	9.7
		出口	0.36	5.90×10^{-3}	43.9	7.8

4. 水際部での土壌特性と伏流水位勾配変化

(1) 水際部での土壌特性

各砂州における伏流水の流動特性をより詳しく調べるために、表流水と伏流水の水交換が活発な伏流水の入口部（水際浸透部）と出口部付近の土壌について、土質試験を行いその特性を調べた。有機物含有量の指標として強熱減量試験、透水性の指標として透水試験と間隙率試験を伏流水入口部・出口部の土壌に供した。また土砂粒径の比較材料として、それぞれの地点における飽和層の土壌を採取し、土壌の透水性に影響するとされる D_{10} 粒径⁷⁾を比較した。それらの結果をまとめたものが表-2である。

この結果を見ると、いずれの砂州においても入口部の方が出口部よりも粒径が細かく透水係数や間隙率が小さく、また有機物含有量も多いことが確認されたことから、水を通しづらい土壌であることが推察される。砂河川砂州での既往研究でも水際浸透部での目詰まりによる透水性の低下が確認されている⁸⁾ことから、これには入口部での微細粒子や有機物の目詰まりが影響していると考えられ、今回対象とした比較的的空隙が大きい混合砂礫で構成される河床においてもこのような目詰まり現象が生じる可能性が示唆されている。実際に、現地の水際浸透部では藻類等の有機物が滞留している様子が観察された。

次に、河川間比較を行うと、浅川よりも中津川の方が有機物含有量が多く、透水係数や間隙率が小さいことから水を通しづらい土壌特性であることが分かる。特に、入口部での土壌粒径を比較すると、浅川上流側・下流側、

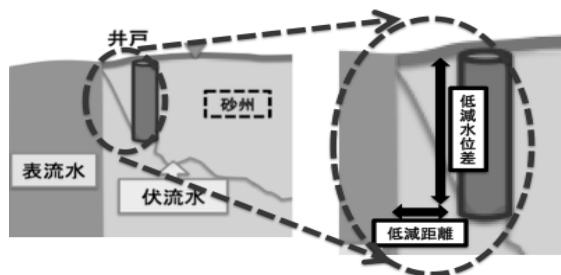


図-11 低減水位差と低減距離

表-3 水位低減勾配の入口部・それ以外の水際での比較

川	範囲	水みち	低減勾配	平均伏流水面勾配
浅川	上流側	入口	1/55	1/93
		水際	1/17	
	下流側	入口	1/71	1/137
		水際	1/10	
中津川	下流側	入口	1/39	1/147
		水際	1/10	

中津川下流側の D_{10} 粒径はほぼ同程度であるにも関わらず透水性が中津川で著しく低いことから、目詰まりを規定している要因は D_{10} 粒径クラスの土粒子に比してより小さくて細かな有機物だと推察される。中津川の有機物含有量が浅川より多くなった理由として、中津川が樹林化河道であることが一因として挙げられる。浅川は、攪乱が激しく砂州も変動するため植物が育ちにくい河道特性であるのに対して、中津川は、上流のダムによる攪乱頻度の減少と護岸工事により砂州の固定と樹林化が顕著に進んだ⁹⁾。このような背景から、中津川は現在河道の約8割が植生で覆われているため、落葉や堆積有機物の出水による流出などにより、河道への有機物の供給が活発であることが考えられる。

(2) 水際部での伏流水位勾配変化

第3章で述べたように、伏流水の入口にあたる水際浸透部にて、水際の表流水位とその直近の伏流水位をつなぐ勾配が、全体的な伏流水面勾配に比べると急になっていることが、特に浅川の砂州で確認された。本節では、その水際の水位低減勾配に着目し、水際浸透部における水位の落差を低減水位差、水際から水位の低減が確認された観測井までの距離を低減距離、そしてこの低減水位差を低減距離で除したものを低減勾配と定義し(図-11参照)、それらの特性を各砂州で比較する。

各砂州上流側と下流側における低減水位差と水位低減距離から求まる水位低減勾配を求めた結果を表-3に示す。また、その水位低減勾配との比較材料として、第3章で求めたそれぞれの砂州上流側と下流側における平均伏流水面勾配も併記した。第3章において伏流水が流れやすい水みちを示したが、その伏流水みち入口部をこの表で

入口と表記し、それ以外での伏流水が浸透する可能性のある水際表流水位と直近の伏流水位との勾配変化の平均をとった値を「水際」として表している。表-3を見ると、いずれの砂州においても水際浸透部での急激な水位低減は確認できた。これは、前節で示した有機物のような微細粒子の目詰まりによる影響と考えられる。低減勾配は、表流水が砂州の下に潜り込む伏流水の水みち入口部において、いずれも平均的な伏流水面勾配に比べてかなり急な勾配になっている。また、伏流水の水みち入口部以外の水際では、伏流水面勾配よりも低減勾配がすべて3倍以上急になっており、それらの水際ではシルトや微細粒子の目詰まりによって河川水は内部に浸透しづらいか、したとしても水みちを流れるものに比べて弱い流れであることが考えられ、表流水と伏流水の水交換は行われていない可能性が高いと推定されるが、これについては今後検証が必要である。

次に、平均伏流水面勾配がほぼ同程度の浅川と中津川の砂州下流側同士を比較すると、伏流水の水みち入口部以外での水際の平均水位低減勾配はほぼ同じだが、入口部においては中津川の方が水位低減は顕著である。ここでも中津川砂州の方が入口部で目詰まりが起りやすいことが示唆された。いずれの砂州においても、観測日から概ね35日以上は出水が発生していないため、間隙の微細粒子は豊富であることが推察される。洪水によって、間隙の微細粒子は流出され水位低減勾配にも変化が生じ、ひいては伏流する流量へも影響を与えることが推察されるため、それらは今後の課題である。

5. 浸透流速から見た伏流水の流動特性

砂州の伏流水流動には、瀬淵構造に規定される地形特性とその砂州の構成材料である土壌特性が直接的に影響を与えており、それらが砂州スケールに代表される大局的な流れを規定すると同時に、水際浸透部における土壌特性が局所的な水位低減を引き起こすことが見出されてきた。本章では、そのような場の不均質性が考慮可能な平面二次元の浸透流解析モデル“SUB-Nutran2D”⁶⁾を適用し、それにより算出される結果(浸透流速、流動時間)を用いて、各砂州での伏流水の流動特性を比較する。

(1) 解析条件

砂州内部の伏流水を不圧地下水流れとし、水平な下流難透水層上の伏流水流動に対して、Dupuit-Forchheimerの仮定が成立するものとして、浸透層に関して鉛直積分された次式を用いて流動解析を行った。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (1)$$

表-4 各砂州における伏流水の流動特性

川	範囲	水みちの 全距離(m)	平均浸透 流速(m/s)	平均流動 時間(s)
浅川	上流側	83.4	5.63×10^{-5}	1.48×10^6
	下流側	90.4	4.19×10^{-5}	2.16×10^6
中津川	下流側	52.3	1.81×10^{-5}	2.89×10^6

表-5 伏流水の水みちの入口部・出口部の浸透流速の比較

川	範囲	水み ち	水際 勾配	流速 (m/s)	出口/ 入口
浅川	上流 側	入口	1/55	8.24×10^{-5}	1.48
		出口	1/48	1.22×10^{-4}	
	下流 側	入口	1/71	4.23×10^{-5}	1.53
		出口	1/130	6.49×10^{-5}	
中津 川	下流 側	入口	1/39	2.40×10^{-5}	1.61
		出口	1/84	3.86×10^{-5}	

ここに、 h ：伏流水位、 λ ：有効間隙率、 k ：透水係数である。境界条件は、河川水域との境界部では平水時の河川水位を与え、砂州陸側との境界部においては、横断方向の水位勾配をゼロとした。解析で用いた透水係数や間隙率は、現地観測結果に基づいて水みち入口部・出口部では表-2の値を用い、内陸部についてはそれらの値を平均したものを空間分布させた。

(2) 解析結果

表-4に、各砂州の平均浸透流速および平均流動時間を示す。なお、解析結果は実測値の伏流水位分布と概ね同様の水位分布と流向であったことを確認している。

この結果から、浅川上流側と下流側を比較すると、上流側の方の流速が速くなっている。伏流水面勾配は上流側の方が1.5倍ほど急なため、この影響が大きいと考えられる。また、浅川と中津川の下流側同士を比べてみると、浅川の方が平均流速は速くなっている。この2河川の下流側同士では伏流水面勾配に大きな違いが見られないことから、砂州の透水性という土壌特性がこれらの伏流水の流速を規定する要因となることが示された。各砂州の平均流動時間は、浅川上流側では約17日、下流側では約25日、中津川では約33日となり、表流水の流れに比べて非常に緩やかな流れであることが分かる。

次に、伏流水の水みち入口部・出口部における局所的な浸透流速を表-5に示した。入口部と出口部の比較として、出口部の流速を入口部の流速で割った値も併せて示す。いずれの場合でも、水みち出口部の方が入口部よりも伏流水の浸透流速が約1.5倍速くなっていることが確認できる。また、浅川と中津川下流側では、河床勾配も

粒径もほぼ同程度であるのに対して流速に約3倍程度の違いが現れたことから、間隙の微細粒子による目詰まりの影響であることが推察でき、有機物に代表される微細粒子の供給が多い河道特性を有する河川では、砂州を伏流する流量が少ない可能性が示唆された。

6. まとめ

本研究により、砂礫州内を流れる伏流水の流動特性は、1) 瀬淵構造に規定される伏流入口部から出口部への水位差が駆動力となる砂州スケールでの流動と2) 伏流入口部での微細粒子（有機物含む）の目詰まりが引き起こす局所的な透水性の低下、という砂州スケールでの大局的な流れの中に局所的な挙動を含む事が確認された。特に、砂州スケールでの伏流水流動は、河道特性や洪水時の河床地形形成によってその流れの向きや流動が規定され、流れやすい部分（伏流水の水みち）が形成されやすいことが示唆された。また、砂州上流側と下流側では砂州形成メカニズムの違いが伏流水面勾配に影響を与えることが確認された。これらは、洪水履歴が河床に残存しやすい礫河川の特徴ともいえる。今後もこのような物理場とその規定要因をより詳細に把握することで、河川の物質循環特性の理解に繋げていきたい。

謝辞：本研究は、文部科学省「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE）環境情報分野」の支援のもとに実施されました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 楠田哲也：自然の浄化機構の強化と制御，技報堂出版，pp.89-95，1994.
- 2) 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，河川技術論文集，Vol.6，pp.89-94，2000.
- 3) Ahmed, A.M, T. Sumi and T. Tsujimoto : Subsurface water flow in a stream with alternate sandbars, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.45, pp.349-354, 2001.
- 4) 鷺見哲也，片貝武史，辻本哲郎：木津川の伏流環境と関連した水質特性，河川技術論文集，Vol.8，pp.185-190，2001.
- 5) 中島治美，鷺見哲也，辻本哲郎：木津川裸地における伏流水の水質特性，河川技術論文集，第10巻，pp.381-386，2004.
- 6) 尾花まき子，戸田祐嗣，辻本哲郎，野尻晃平：砂州植生の分布形状を考慮した伏流流動に伴う脱窒特性，水工学論文集，第55巻，pp.1363-1368，2011.
- 7) 中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会，p.189，2001.
- 8) 片貝武史，荻田章仁，鷺見哲也，辻本哲郎：水際河床間隙の目詰まりに関する実験的研究，水工学論文集，第50巻，pp.241-246，2006.
- 9) 原田大輔，知花武佳：ダムの洪水調節を受ける河川における護岸の形態と砂州構造との関係，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.69，No.4，I_1195-1200，2013.

(2013. 4. 4受付)