

扇状地河川における表面流況に及ぼす 伏流の影響と水域生息環境

THE EFFECTS ON SUBSURFACE FLOW TO SURFACE FLOW PROFILE AND HABITATES IN FLUVIAL FAN

郝慶¹・鷺見哲也²・荻田章仁³・辻本哲郎⁴

Xi Qing, Tetsuya SUMI, Akihito OGITA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 Ms. Eng. 名古屋大学工学研究科 博士課程後期課程 社会基盤工学専攻

²正会員 博(工) 名古屋大学講師 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町1)

³学生会員 名古屋大学工学研究科 博士課程前期課程 社会基盤工学専攻

⁴正会員 博(工) 名古屋大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻

In Japan, at the upstream end of a fluvial fan, the water is led from the river to irrigation and the instream flow discharge is remarkably decreased. Therefore, we have to face the problem that how much instream water is necessary at environmental point of view. In a fluvial fan river, when we focus on reach scale process, some surface flow penetrates into the sand bar, which leads to water surface drop at riffle area. As for the process in segment scale, the river water leaks to the fluvial fan in upstream area and returns to the river in downstream area. In this paper, the exchange process of surface flow and sub-surface flow is investigated, (i) between thalweg and sand bar in reach scale (ii) between instream and the fluvial fan in segment scale. Both laboratory experiments and numerical simulations are conducted. On one hand, in the experiment, the piezometric heads are measured in both the bar areas and fluvial fan area. On the other hand, 2D horizontal numerical calculation is conducted. Finally, significance to estimate the critical flow discharge that keeps instream flow continuous is shown.

Key Words : Flume experiment, water interaction, subsurface water, fluvial fan, pool-riffle

1. はじめに

扇状地区間を持つ河川計画および河川管理における問題の一つに、各断面での必要流量の設定とそれによる、上流部、つまり山地河川区間と扇状地区間の境界において確保されるべき流量（代表地点での正常流量）の設定がある。扇状地区間では一般に周辺地下水への流失が、そして下流低平地区間（自然堤防帯など）における復帰が起こる。原田ら¹⁾は野洲川扇状地における調査および解析を行い、周辺地下水への供給による表流水流量の低下と下流区間での復帰の特性を明確に表している。このように、流失から復帰に切り替わる付近の河川区域における流量最小となるのであり、上流からの水利流量を除いた河川への供給流量からどの程度減るのかの伏没量を予測できなければならない²⁾。

こうしたセグメントスケールでの問題とともに、地下水透水性の高い区間で瀬・淵を持つリーチにおいては、瀬の部分で流水の一部が砂州をバイパスするために表流水の流量が極端に減少し、供給流量によっては瀬切れす

るなど、水域の生態系にとって条件が悪化する場合がある。Ahmedら³⁾は、交互砂州にみたてた砂河床の水路実験と数値計算によって、瀬の周辺部分にあたる砂州の上流部において砂州内をショートカットする流れが強くなることを示した。その研究では砂州内部での流れを見ていたため、表流水の下での伏流水を扱っておらず、表流水流量の低下量は評価出来ていない。

こうした2つのスケール共に、河川流量の少なくなる部分において河川計画・管理の上で供給流量との関係を明らかにするためには、(1) 周辺地下水帯・伏流水の挙動と表流水との相互作用の現象の特性と、(2) 伏没量、つまり逆に言えば、表流水の流量が最小となる横断面での、周辺地下水での流下量の量的な特性、それを支配する要因と、それらの関係を明らかにすることにより、容易に正常流量の決定を行うことができる。

本研究では、比較的単純な条件において、実験を主として数値計算を行い、上記の扇状地のリーチスケール、および砂州を代表とするリーチスケールにおける、伏流水（地下水）の平面挙動とその流下方向の総流量（＝供給流量－表流水流量）の特性を捉え、さらに表流水流量

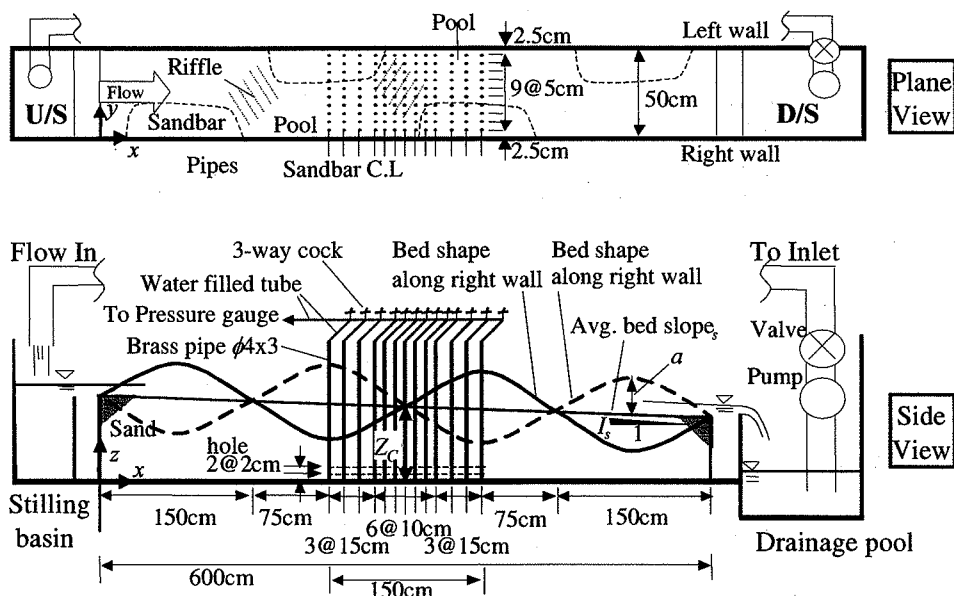


Fig. 1 Experiment setup for reach scale analysis

Table 1 Experimental conditions for reach scale analysis

Bed condition		Run No.					
I_s	a (cm)	Discharge, Q (cm ³ /s)					
1/100	4.2	case1-1	case1-2	case1-3	case1-4	case1-5	case1-6
		1624	899	504	346	114	60.7
	6.3	case2-1	case2-2	case2-3	case2-4	case2-5	case2-6
		1611	886	516	348	123	60.7
	8.4	case3-1	case3-2	case3-3	case3-4	case3-5	case3-6
		1624	900	500	350	180	100
1/200	4.2	case4-1	case4-2	case4-3	case4-4	case4-5	case4-6
		1400	903	505	358	88	45
	6.3	case5-1	case5-2	case5-3	case5-4	case5-5	case5-6
		1479	884	510	347	86	40
	8.4	case6-1	case6-2	case6-3	case6-4	case6-5	case6-6
		1051	884	508	356	106	50

の最小値, つまり伏流水総流量の最大値フラックスの諸条件との関係の評価を行った。

2. リーチスケールでの実験

(1) 実験装置と実験条件

Ahmedら³⁾が行った実験を参考に, 交互砂州を模したリーチスケールでの実験を行った (Fig.1)。水平な底を持つ長さ6m, 幅 $B=50$ cmの水路に平均粒径2.1mmの均一砂を敷き, 水路縦断中央での層厚 $z_c=15$ cmとし, 平均勾配 I_s (1/200または1/100) を加えた平面に, 模擬的な河床地形を形成するための三角関数による高低の分布 (振幅 $a=4.2, 6.3$ および 8.4 cm, 縦断波長 $\lambda=300$ cm, 横断波長 $2B$) を加えた, 次式の高さ $z_b(x, y)$ で河床を整形した。

$$z_b(x, y) = z_c - (x - z_c)I_s + a \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \frac{\pi y}{B} \quad (1)$$

瀬となる部分には, 移動床とならないように網を埋め込む工夫を施した。給水は上流端から一定流量の水を流し, 循環させた。流量は, 一つの河床で6ケース行う事とし, 第5ケースが伏没する時の最大流量となるようにし, 第6ケースはその半分程度, 第1~4ケースはそれより多い流量とした。このRun No.をCase1-1などとしたが, その条件 (河床と流量) についてはTable 1の通りであった。

諸項目の計測は河床縦断の波長の1/4とし, 瀬の部分を含む $x=225 \sim 375$ cmで行った。項目としては, 表面流の範囲, 表面水位分布, および浸透層底部付近のピエゾ水頭分布である。本来の目的からは, 表面流の流量の縦断分布を捉えるべきであるが, 実験スケールでこの分布を精度よく捉えるのは難しいため, ピエゾ水頭から伏流水の横断面通過流量を算定し, 供給流量から差し引くことで表流水流量を推定した。ピエゾ水頭は, Fig.1のように, 底から2cmと4cmの所に穴をあけた内径3mmの真鍮パイプを横断に5cm間隔で10点, 縦断に13断面 (10cmまたは15cm間隔), 計130地点に設置し, 上端にビニールチューブを接続して, これら130本を三方コックで結合して水で内部を満たし, 感度が0.1mm以下の圧力センサに接続した。三方コックの切替によって, 所定の地点のピエゾ水頭を計測できるようにし, これを130地点に対して切替と記録を繰り返し, ピエゾ水頭分布を得た。

計測されるピエゾ水頭は, 各地点において下端付近4cmまでの平均を現しているが, ここでは, Dupuit-Forchheimerの仮定を適用し, 各地点でのピエゾ水頭は鉛直方向に一定と仮定した。これにより, 砂層中の単位幅当たりの流下方向の流量フラックスはDarcy則により以下の様に表せる。ただし, 基準面を水路底高にとる。

$$q_{ssfx}(x, y) = -D(x, y) \cdot k \frac{\partial h_{ssf}(x, y)}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、 $h_{SSF}(x,y)$ は水路底からのピエゾ水頭、 k は透水係数で、カラム実験から4.96cm/sを得ている。 $D(x,y)$ は帯水層の厚さで、非冠水部ではピエゾ水頭そのもの、冠水部では砂層厚さをとる。これを離散化して、 x 方向の計測断面間中央の断面での浸透流の総流量は、右岸側から j 番目の真鍮パイプ ($y=2.5, 7.5, \dots, 47.5$ cm) でのピエゾ水頭 $h_{SSFj}(x)$ を用いて表すと、次式となる。

$$Q_{SSF}(x) = \sum_{j=1}^{N_j} q_{SSFj}(x) \Delta y \quad (3)$$

$$= \sum_{j=1}^{N_j} D_j(x) k \left\{ h_{SSFj}(x - \frac{\Delta x}{2}) - h_{SSFj}(x + \frac{\Delta x}{2}) \right\} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

ここに、 Δy は横断のグリッド幅で5cm、 Δx は縦断グリッド幅で10cmまたは15cmをとる。これを12断面で評価し、供給流量から差し引いた値を表流水の流量と見なした。

(2) 数値計算の方法

実験は定常状態であるが、計算は準定常（連続式は非定常、流量フラックスは抵抗則）とし、初期に適当な水位分布を与えた後、定常状態になるまで計算を継続した。表流水の解法としては、連続式に有限体積法を用いて離散化し、セル境界でのフラックスにはManning則を用いた。そのエネルギー勾配には水面勾配を用い、境界での代表水理量には風上側を用いた。

浸透流についても同じグリッド上で有限体積法を用いた。グリッド中心点でのピエゾ水頭は、非冠水部では、水収支により決まるものとした一方、冠水部ではDupuit-Forchheimerの仮定に準じて表流水のピエゾ水頭と一致させ、流量フラックスの発散（負で収束）が表流水の底面からの水供給（負で損失）に寄与するものとし、これが表流水と伏流水の直接の水交換として表した。Ahmedら³⁾は、冠水部での浸透流を考慮せず、表流水域と砂州域とに平面的に分割し、その間の交換を捉えたため、冠水部の伏流水の流下流量を評価できていないために表流水の増減を表せていないことに注意する。

境界条件は下流端で実験時水位、左右側で不透過条件、上流端では平均単位幅流量を、その他では不透過条件を与えた。計算結果は $x=225 \sim 375$ cmの範囲を見た。

(3) 実験結果および考察

a) 伏流水・表流水位分布と流れの特性

標準的なケースについて、考察するためにCase2-4（平均勾配1/100、河床振幅6.4cm、流量348cc/s）について見ることで、現象の解釈を行うこととする。Fig.1, Fig.2, Fig.3, Fig.4およびFig.5はそれぞれ、このケースの河床高コンターの実測値、表流水位分布、砂層のピエゾ水頭コンター、および数値計算によるピエゾ水頭コンターである。表流水は瀬の部分で急激に水位低下しているが、ピエゾ水頭はかなり緩やかに変化していることがわかる。Ahmedらの実験では砂州部分での浸透ポテン

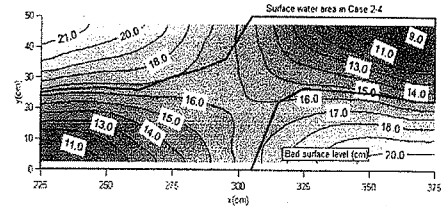


Fig.2 Bed shape contour in Case 2

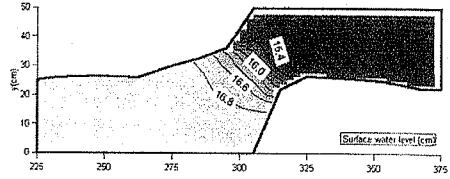


Fig.3 Surface water level contour in Case 2-4

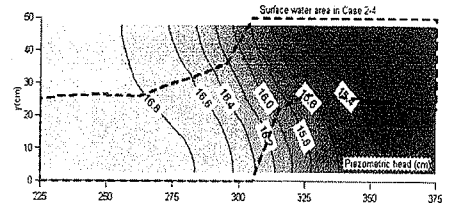


Fig.4 Subsurface piezometric head contour in Case 2-4 by experiment

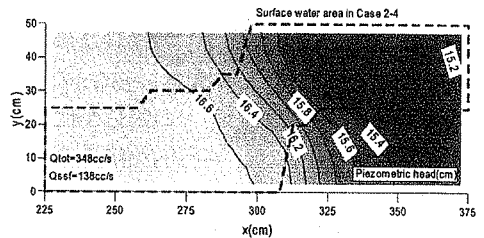


Fig.5 Subsurface piezometric head contour in Case 2-4 by numerical simulation

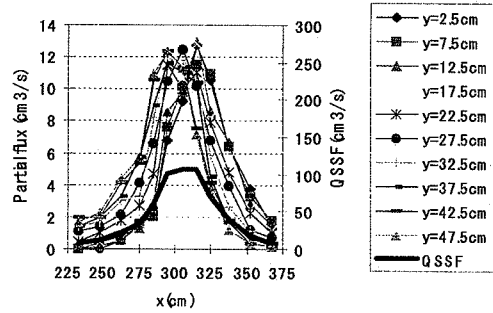


Fig.6 Longitudinal profile of $q_{SSFj}/\Delta y$ and Q_{SSF} in Case 2-4

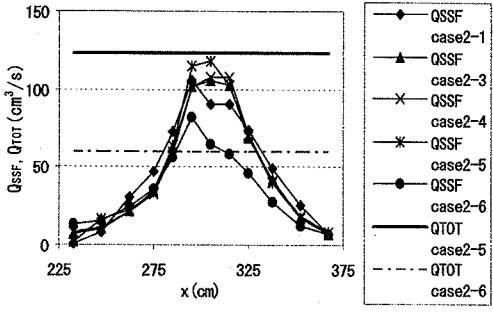


Fig.7 Longitudinal profile of Q_{SSF} in Case 2-1 to 2-6

シャル分布のみ捉えられていたが、本実験では冠水部も含めて捉えられている。また、数値計算によるピエゾ水頭分布は、冠水部において表流水とポテンシャルが共有されるため、ややきつい勾配となっているが、実験での特性を表しているといえる。

b) 浸透流量最大値・完全伏没流量と諸条件との関係

Fig.6は、Case2-4において一つの観測点が受け持つ横断面でのx方向の浸透流量 $q_{SSF}(x)$ Δy とその総和としての断面での総浸透流量 $Q_{SSF}(x)$ の縦断分布、Fig.7はいくつかのケースの総浸透流量 $Q_{SSF}(x)$ の縦断分布を表す。断面浸透流量は、瀬の部分に当たる $x=300\text{cm}$ 付近で最大となり、上流での伏没によっていることがわかる。この最大値は110cc/s程度であり、供給量の約1/3となった。Fig.7は、Case2-1～Case2-5までの $Q_{SSF}(x)$ の分布は殆ど変化しないことを示しており、Case2-5の供給流量 Q_{cr} を下回ると瀬切れし、供給流量とともに伏没量は低下する。この図では、Case2-5および2-6において、 $Q_{SSF}(x)$ の最大値がほぼ供給流量に等しいことから、今回のDupuit-Forchheimerの仮定を用いた浸透流量の推定は良好であることを示している。この図の最大値、についてすべての実験のケースについて整理したものがFig.8である。この図からも、各河床形状に対しCase*-5にあたる、下から2番目の流量、つまり瀬切れする流量 Q_{cr} より大きい供給流量では、最大浸透流量は殆ど変化しないことが明らかになり、この流量を知ることができれば、局所的な伏没の問題に対して対処できるということが言える。

c) 完全伏没流量と諸条件との関係

この流量 Q_{cr} を、河床の条件から推定するため、総浸透量を支配する諸量とこの流量との関係について整理した。まず、瀬の部分でのDarcy流速に注目した。いくつかの縦断面でのピエゾ水頭分布の例をFig.9に示すが、 $x=300\text{cm}$ 付近での勾配は横断にほぼそろっており、河床振幅が大きい方が急になることが、浸透流量の増大に反映している。この断面に発生するピエゾ水頭勾配の平均値と諸元との関係を以下の式で表せるかについて見るために、この勾配平均の実測値から河床勾配を引いた値 $I_{max}-I_s$ と、河床振幅－河床波長比 a/λ をFig.10にプロットしたところ、 $\beta=1.04$ の勾配に乗った。よって、この勾配の回帰式 I_{max}' を用いたDarcy流速の代表値 kl_{max}' を用い、浸透流断面を当該顔面でのピエゾ水頭の平均値（表流水水位の平均値に一致する） h_{ave} と水路幅 B の積を流水断面積との代表値として扱い、これらから浸透流量のマクロな推定式を以下の提案することとした。

$$\overline{Q_{cr}} = \alpha Q_{cr} = \alpha \cdot B \cdot h_{ave} \cdot k \cdot I_{max}' = \alpha \cdot B \cdot h_{ave} \cdot k \cdot (\beta \cdot \frac{a}{\lambda} + I_s) \quad (4)$$

この補正係数 α を除いた推定流量を横軸に、縦軸に実験からの推定流量を縦軸にとったものをFig.11にプロットしたとこと、ほぼ1の傾きの直線に載ることがわかり、このような単純な条件では、比較的容易に表流水の瀬切れの条件が得られることが、実験から明らかになった。

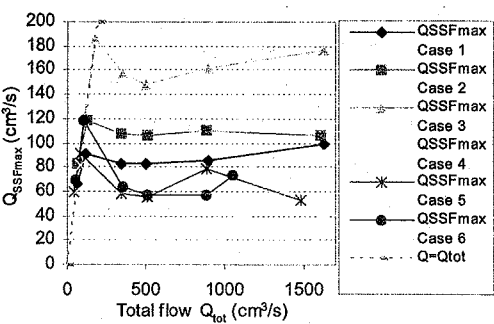


Fig.8 Q_{SSFmax} to total inflow Q_{tot} for reach scale

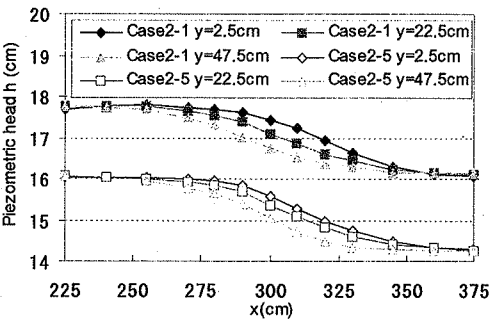


Fig. 9 Longitudinal profile of h in Case 2-1 and 2-5

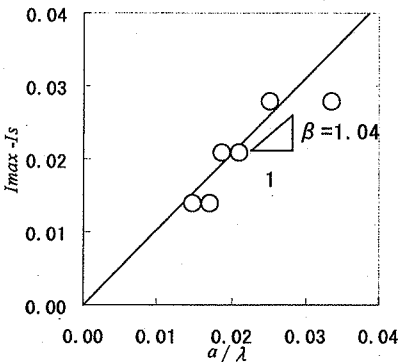


Fig. 10 Estimation of β

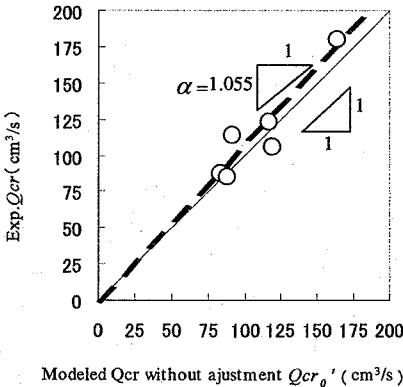


Fig. 11 Estimation of calculation function of critical discharge Q_{cr}

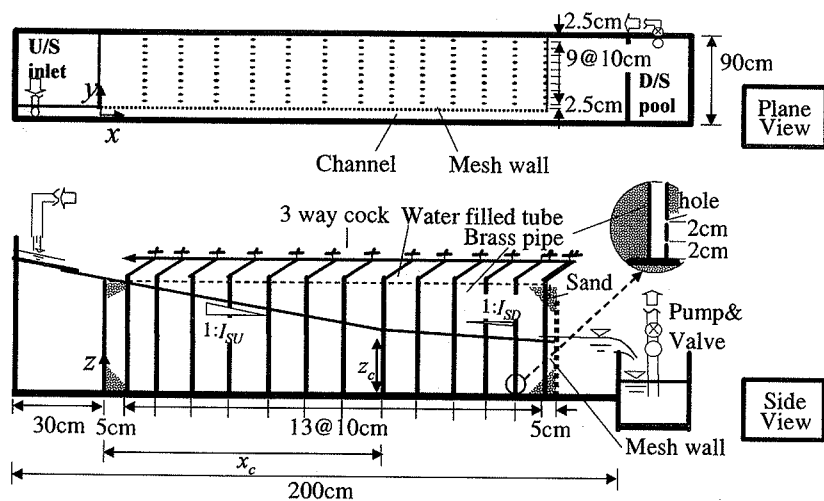


Fig. 12 Experiment setup for segment scale analysis

Table 2 Experiment conditions for segment scale

Bed condition in channel		Down-stream water level h_{DS} (cm)	Run No.	Discharge, Q_{cr} (cm ³ /s)	Max. discharge with no surface flow Q_{cr} (cm ³ /s)
I_{SU} / I_{SD}	z_c (cm) / x_c (cm)				
1/30 / 1/100	9.5	9	CaseA1-1~4	130~79.5	99.5
	/	9.6	CaseA2-1~4	130~60.6	79.5
1/50 / 1/100	80	10.2	CaseA3-1~4	120~61.0	80
	9.5	9.2	CaseB1-1~6	143~41	123
1/50 / 1/100	/	9.8	CaseB2-1~6	123~40	51
	80	10.2	CaseB3-1~5	102~31	41

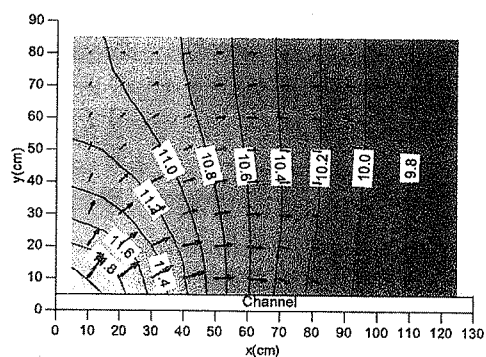


Fig.13 Water flux distribution by experiment (CaseA2-2)

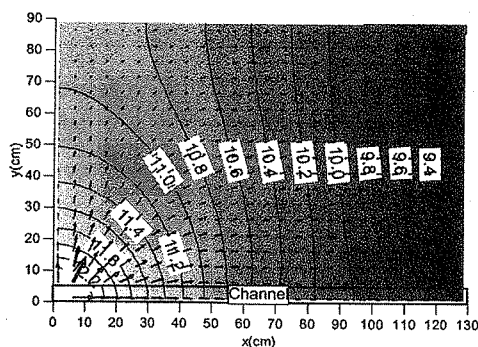


Fig.14 Water flux distribution by numerical simulation (CaseA2-2)

3. セグメントスケールでの実験

(1) 実験装置・実験方法

セグメントスケールでの状況を想定し、急勾配の河道と、上流端が山地などで不透過な下流に矩形に広がる堆積層との組み合わせを設定した実験装置をFig.12に示す。水路幅90cm、長さ $L=130$ cmにおいて、左右対称条件を想定して、河川中央を中心線とし、左岸側だけを見るものとしている。右岸側の水路部は平坦な幅5cmの矩形水路とし、水路部路床は移動床となるのを防ぐ5mmメッシュのステンレス網を浅く埋め込み、左岸側壁は透過可能な網を配置した。路床は $x=x_c$ において高さ z_c とし、その上下流側で異なる勾配 I_{SU} ($=1/30$ と $1/50$) および $I_{SD}=1/100$ とした。これは、扇状地区間と下流低平地でのそれを模擬したものであり、実河川の勾配より急であるのは、水路部での高低差を強調させることで浸透流へのリークなどの特性が実験時に現れやすいようにしている。 $y=5\sim 90$ cmの範囲は浸透部であり、扇状地と下流低平地に相当するが、氾濫原上への冠水を考慮しないことから、水路部から越水しないように砂の層厚は十分高く確保している。 $y=5$ cmから横断に10cm間隔で10本、縦断に $x=5$ cmから13横断の計130本のピエゾ水頭計測用の真鍮パイプを

配置し、前実験と同様に、三方活栓とビニールチューブによる圧力センサへの接続に水を満たし、130地点でのピエゾ水頭の計測を行った。水路部は水位（水深）の縦断分布のみを計測した。実験条件は、下流端条件を3つ設定し、流量は一つの河床・下流端条件で4~6ケース変化させ、そのうちの1ケースにおいては表流水がなくなる限界の流量を観察により設定して行った。この実験での材料は前の実験と同じ砂を用いたが、その透水係数は、表流水のない水平浸透流での計算結果と比較し再度求めた結果、4.33cm/secと推定されている。

数値計算による確認も行ったが、手法はリーチスケールと同じ方法で行った。

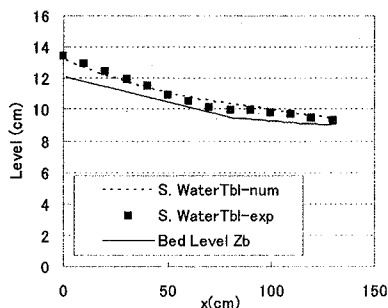


Fig. 15 The bed shape and water surface in case A2-2

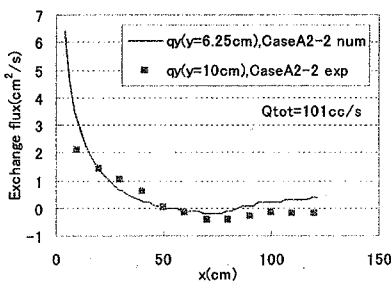


Fig. 16 The comparison of exchange flux calculation by experiment and numerical simulation

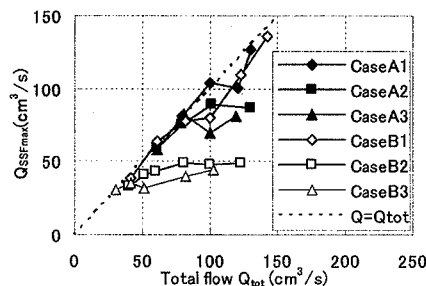


Fig. 17 Relationship between Q_{ssfmax} and Q_{tot} in experiment

(2) 実験結果と考察

a) 伏流水流況と表流水縦断分布の特性

Fig. 13およびFig. 14にピエゾ水頭と浸透流単位幅流量フラックスの分布を示す。実験でのフラックスの分布は計測点間の x 方向または y 方向勾配からDupuit-Forchheimerの仮定に基づいて求めた各向きを求め、計測点において、周辺の各成分の値を平均してベクトルとして得た。これらの図はCaseA2-2の条件で表流水が連続している条件であるが、Fig. 15に示した水路部水面形縦断からわかるように、水面勾配の変化点にあたる $x=60\text{cm}$ 付近を回りこむように流速ベクトルおよび水位コンターは描かれる。Fig. 16は同ケースにおいて水路左岸側付近の縦断面に沿った、水路側から y 方向に浸透する単位幅流量分布を現しているが、 $x=60\text{cm}$ 付近より上流側で水路側からの横断輸送があり、その下流で弱い戻り流れが形成されている。つまり、この地点付近で表流水は最小となる。実際の問題と比べると、扇状地から下流低平地につながるセグメント境界付近のやや上流地点で表流水流量は最小となり、このような地点での生態系の保全を維持する等の水理学的条件（水深、流速等）の検討およびそれから得られる環境流量の設定を最も厳しく見る必要があること、また、上流での横断流量の総和つまり地下水への涵養量の推定を合わせて、上流地点での維持流量と利水流量とを合わせた正常流量を考える必要がある。

b) 浸透流量最大値・完全伏没流量と諸条件との関係

前の実験と同様に、総浸透流量の縦断での最大値 Q_{ssfmax} と供給流量との関係をFig. 17に示す。図中の1対1の線に沿った点は、表流水がゼロとなる断面が現れたケースを表している。Table 2に示した様にCaseAは上流側水路勾配が1/30、CaseBは1/50の場合であり、A1からA3に向けて下流端水位が高く上下流の水位差が低くなってゆく。Fig. 17からは、各ケース（水路勾配、下流端水位）では、流量の低い所ではほぼ供給流量と最大浸透流流量が一致し、完全に伏没している断面を持つことがわかり、実際の現象では、河床勾配急変点上流付近から上流に向けてそのようになっていたことと対応している。完全な伏没となる流量、つまりこの1：1の線から離れる時の供給流量は、下流水位が高い方が低く、上流

勾配が急である方が大きくなる。全体の傾向として、伏没を回避するために必要な流量、つまり伏没を発生させる最大流量 Q_{cr} は上下流端の水位差が大きい方が大きくなる。 Q_{cr} また、縦断の相対水位差が小さい範囲では、その限界流量を上回ると、最大浸透流量の変化が小さいが、縦断の相対水位差が大きくなると、その後の流量も大きく上昇することが示唆されている。これらの傾向については、さらに大きな流量での応答についても今後照査する必要があるが、実現現象では、縦断勾配はもっと小さくなるため、伏没が解消されてから供給流量の増加に対する浸透流量の増加は小さいと考えることができる。

4. おわりに

セグメントスケールについては今後、伏没する流量 Q_{cr} と、そこから流量を増加させて Q_{ssfmax} の安定した値までの変化の検討の定式化ができれば、供給流量に応じた表流水流量を推定でき、環境流量に必要な供給流量を求めることができる。また、実験において矩形の堆積領域を考えたが、実際の扇状地等においては、諸条件を考慮した計算モデルを援用して同様の検討を行うことができる。リーチスケールでの局所的な問題については、本研究での成果をベースとした整理が可能であるが、詳細な水理量分布が問題になる場合については、数値計算との併用・比較によって局所的なバイパス流量を推定し、リーチとして必要な供給流量を考えることができる。

参考文献

- 1) 原田守博, 岡島和義, 山田達也: 野洲川扇状地における河川水と地下水との水交換に関する考察, 水工学論文集, 第48巻, pp.385-390, 2004.
- 2) 国土交通省河川局: 正常流量検討の手引き (案), 2001.
- 3) Ahmed, A. M. M. M., T. Sumi and T. Tsujimoto, Subsurface flow in a stream with alternate sandbars, Annual J. of Hydraulic Engg, JSCE, pp.349-355, 2001.

(2005. 4. 7 受付)