

砂州内の伏流挙動とたまりの水交換性に関する研究

ON THE SUB-SURFACE FLOW AND WATER EXCHANGE RATE THROUGH TEMPORARY PONDS ON A SANDBAR

鷺見哲也¹・鵜原宇一郎²・辻本哲郎³

Tetsuya SUMI, Uichirou EBARA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科地圏環境工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

²日本上下水道設計株式会社東部支社 (〒060-0003 札幌市中央区北三条西3-1)

³正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科地圏環境工学専攻

River sandbars in the middle segment play an important role for ecosystem. Especially, backwaters, secondary channel and temporary pond water on sandbars are recently recognized to be precious habitat as spawning grounds, shelters against flood, benthos habitat etc. On the recognition that its environment (water quality) depends on the subsurface flow, the sub-surface flow in a sandbar and exchange flow between subsurface water and temporary pond water are measured in this study. The research and analyses are based on a field measurement such as gradient analysis of subsurface flow, tracer experiments using NaCl solution as a tracer to understand the movement of sub-surface flow around temporary pond water and exchange flow rate of temporary pond water on a sandbar in the River Kizu.

Key Words : *Sub-surface flow in sandbar, temporary pond on sandbar, tracer test, hyporheic zone*

1. はじめに

砂州やその周辺に、大規模な洪水によって一時的に形成されるわんどやたまり(temporary pond water)、二次流路(secondary channel)といった水域は、出水時の魚類避難場所の提供、は虫類等の産卵場所、底生生物・間隙内生物の生息の場として、少なからぬ役割を果たしていると思われる。たまりに着目すると、特に間隙内生物にとって重要な物質・エネルギー循環は伏流水挙動に支配されている。よって、有機質、栄養塩等の物質輸送のそのものを考える前に、その移流を引き起こす周辺伏流水挙動の特性を捉えることが第一義的に重要である。近年、これら生物の場として伏流水・たまりといった空間に注目されてきており、研究の端緒に至っている¹⁾が、それらの物理環境を支配する伏流水挙動に関する地下水利的な研究はほぼ皆無であった。

本研究ではそういった背景から、砂河川である木津川中流砂州におけるたまりに着目し、たまりの水交換性について、それを支配する要因である周辺伏流水流動に関する調査し、議論を行う。そのために、まずはこれまで

殆ど知られていない砂州全体の伏流水の挙動について調査を行い、その上で、局所的挙動としてのたまり周辺伏流水流動調査およびたまりの水交換性に関する調査を行っている。そして、その結果が表流水、砂州全体伏流水および2次流路の挙動とどのように関連するのかについて議論する。本研究のたまりに関する調査は冬季平時に焦点を絞る。

2. 対象砂州全体の伏流水挙動の推定

(1) 対象砂州の概要

本研究の調査対象は、淀川水系木津川の三川合流点から12.0km付近の左岸の砂州(長さ約1km、幅約300m)である(図-2)。木津川は三川合流点から20km付近までの平均河床勾配は1/1150程度、計画高水流量は $6,100\text{m}^3/\text{s}$ で、既往最大は $6,410\text{m}^3/\text{s}$ (1969年9月、伊勢湾台風)であった。なお、飯岡観測所での1983から1996年までの流況は、表-1の通りで、年最大流量の平均値はおおよそ $1,800\text{m}^3/\text{s}$ となっている。

木津川中・下流は単列交互砂州であるが、対象砂州はその湾曲部内岸側に当たる左岸に位置する。本

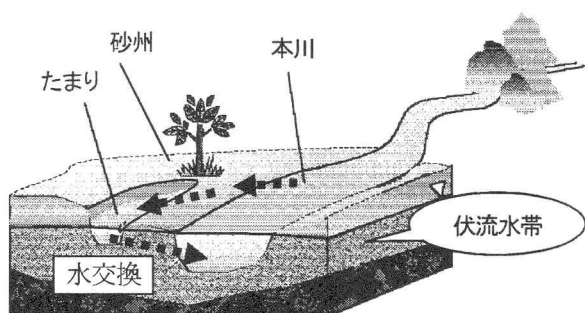


図-1 砂州の伏流とたまり

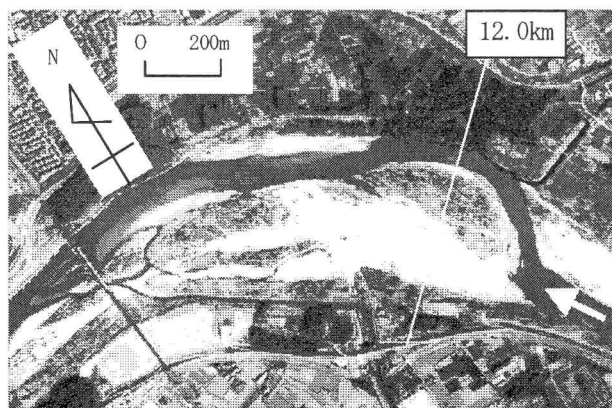


図-2 研究対象砂州

表-1 飯岡地点での流況

既往最大	年最大	豊水
6410.00	1798.71	41.09
平水	低水	渇水
23.61	16.51	10.76

※1983～1996年 平均値 (単位: m^3/s)

川際に2～3mの比高を持つ微高地を形成した植生域があり、その左岸側に裸地が広がっている。また、1997年及び1999年の洪水によって裸地部に2次流路が形成され、夏期の比較的本川水位が高い間には恒常的に流水が維持されるようになった。

(2) 砂州全体の伏流水挙動の特徴

さて、伏流水・たまりを生息環境とする生物にとって、直接的に重要となる物理的な環境は局所的に適していればよい。例えば、水質（水温、DO、pH、栄養塩類、有機質等）が、そこに棲む生物にとって適当かどうかが直接的要因となるが、それら物質・物理量の供給を大きく左右する伏流水やたまり内で流れの挙動が間接的には重要であり、それには局所的な要因と砂州全体要因とが含まれる。前者は透水性の空間分布やたまりの配置といった問題であり、後者は本川等の周辺水位や2次流路の配置といった周辺・内部境界条件と、砂州全体の透水性といった問題である。本節では後者について砂州全体の伏流水挙動について考察を行う。砂州全体における伏流水挙動について調査された例はこれまで殆どない。

a) 伏流水を支配する環境について

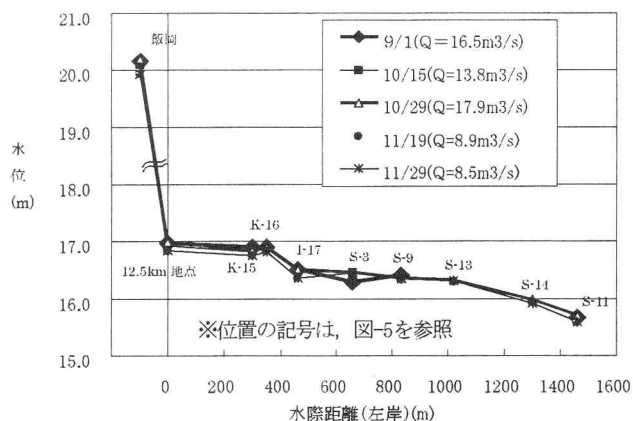


図-3 本川水際線の分布

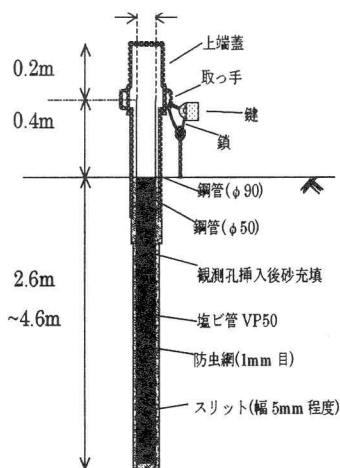


図-4 観測井戸の構造



図-5 観測井戸の配置

対象砂州はきわめて大きいことから、平面2次元的に伏流水流動を見ると、流れを支配するのは周辺及び内部の境界条件となる自由水面の水位と、内部の支配パラ

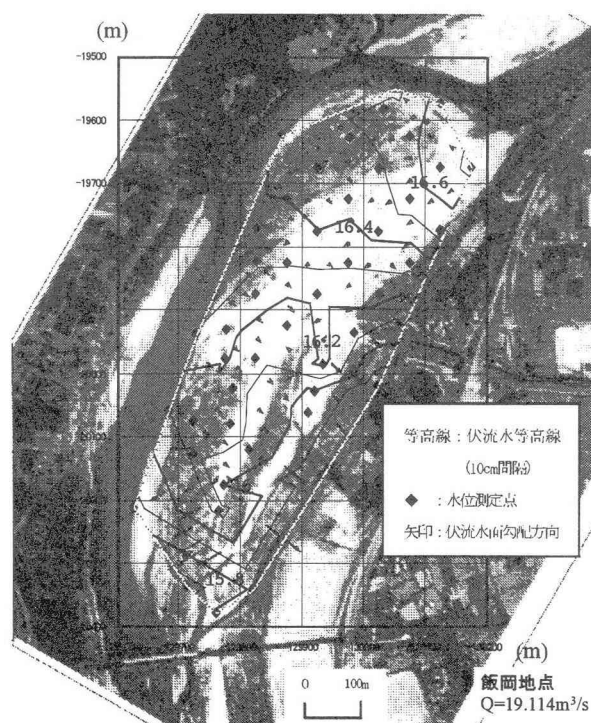


図-6 1999.6.5 伏流水面分布

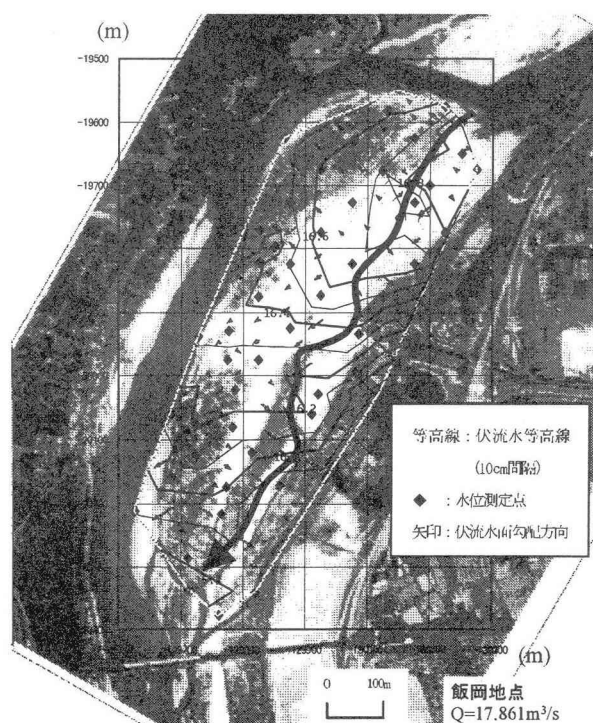


図-7 1999.10.29 伏流水面分布

メータとなる透水係数とがある。

境界条件について、まず本川水位について見てみると、砂州上流側には早瀬があり、およそ30cm程度の水位の落差があるのが特徴であり、後に述べるようにこの水位差が伏流水流動の駆動力となっている(図-3)。また、左岸堤防には神矢樋門があり、ここからの水路が下流端まで延びて本川へ連続している。この水路水面と本川とがこの砂州をほぼ囲んでいることから、これらの水位が砂州の伏流水の周辺境界条件として支配していると考えてよいことがわかる。さらに、2次流路が形成される夏期および、洪水中・低減時にはこの部分の水位が、内部境界条件としても伏流水挙動を支配するものとみられる。

なお、浸透層下端を示すデータとしては、3カ所のボーリング調査により、標高0m付近に粘土層があることがわかっており、砂礫層は15m程度で、砂州全体のスケールとの比から平面2次元の不圧地下水の取り扱いでよいことがわかる。砂礫層は1～数mmの粒径を持ったマサ起源の材料を多く含んでいるのが特徴である。

これら砂礫層の透水係数の分布については、次に述べる調査井戸設置の際のコアサンプルを用いた調査(名城大原田助教授)によって、 $K=10^{-3} \sim 10^{-1} \text{cm/sec}$ の範囲に分布していることがわかった。サンプルは水平に約70m間隔であり、どの程度の空間連続性を持った分布をもっているのかについては明らかではない。

b) 砂州全体の伏流水挙動に関する調査

こういった背景をもった砂州における平水時の伏流水挙動について議論するため、左図全体に設置された観測井戸により、全域の伏流水面分布を測定し、流動の傾向

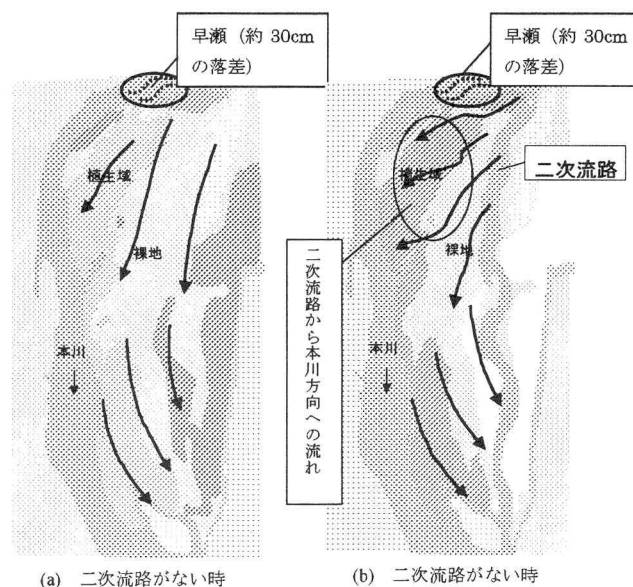


図-8 砂州全体の伏流水挙動の特徴

について検討を行った。

観測井戸は、図-4のように水が管を横断透過できる構造を持っており、砂州全体に概ね70m間隔で38本敷設されている(図-5)。砂州全体の伏流水調査は、平水時および洪水低減期に、1999年6月5日(推定流量19.1m³/s、図-6)、10月29日(17.9m³/s、図-7)および12月24日(6.9m³/s)計3回行った。1999年の6月及び8月の洪水時(約1,300m³/s)の洗掘によって裸地上に流路状の連続した窪みが形成されて、10月29日の調査時は2次流路の水面が維持されていた。調査時は井戸の水位だけでなく、本川表流水面および2次流路の水位も計測した。

図-6,7の両図は伏流水面分布と勾配ベクトルである。において、砂層の透水性の不均一による水面分布の局所性は、70m程度の間隔での計測では特に見られず、全体に滑らかな水面分布となっている。上流側は、早瀬での水面の落差によって上流端からの拡散的な水面分布となっている。下流側は緩やかに左岸側に傾斜しているが、これも本川と水路あるいは2次流路との水面差によるものである。調査毎の違いは、主に上流端にその特徴が現れている。6月5日の2次流路が連続していない時には、本川の蛇行が始まる部分から砂州内部に緩やかに同心円上の等高線を描くように拡散するような浸透を示唆しているが、10月29日の2次流路形成時には、2次流路に高い水面が貫入しておりその部分から右岸側本川方向に一樣に流動する傾向が見られる(図-8)。このことは、単に全体の流動形態が異なるというだけではなく、表流水から伏流し、再び表流水へ戻る距離が短くなり、かつ動水勾配が大きくなることにより砂州を通過する時間が短くなることから、伏流水の水質形成に対して大きく影響するものと考えられる。このように、2次流路の存否やその形態は伏流水流動全体のありかたや水質形成に影響要因となりうることは、注目すべき点としてあげられる。

3. 「たまり」の分類と分布について

前章で示された場と背景となる伏流場全体のなかで、「たまり」は、様々な形態で分布している。たまりとは、陸にできた小スケールの水面であるが、その分類は未だ確立されておらず、それはどういった側面から分類するのかによって異なってくるからである。例えば、

- ① 地形・位置・低質材料等の視点
 - ② 洪水によって形成された時の過程による違い
 - ③ 洪水後、水面の維持期間の長さ、恒常性たまりの水の起源(表流水、伏流水、雨水)
 - ④ 水交換性の高さ(滞留時間)
 - ⑤ 水質(水温、pH、栄養など)
- を挙げることができる。②～⑤は詳細な、あるいは継続

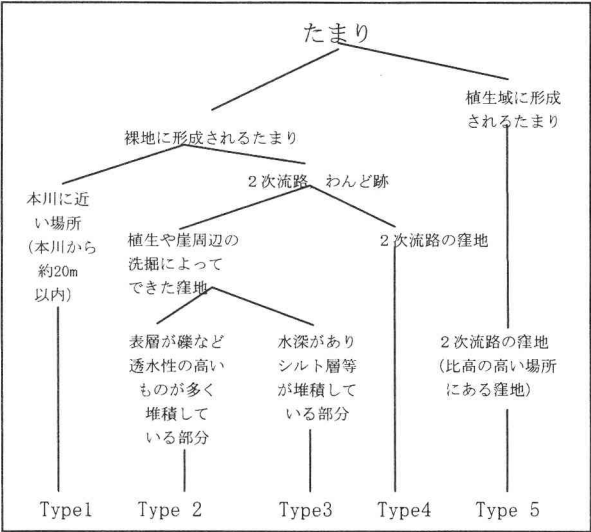


図-9 たまりの分類

表-2 たまりの分類毎の個数 (1999. 11. 29踏査)

Type1	Type2	Type3	Type4	Type5
11 (5)	11 (1)	8 (4)	13 (11)	17 (4)

※カッコ内は実際に水があったたまり

性のある調査が必要であるが、生物の環境という視点で見た場合これらの特性が重要である。本章では①による分類をまずは試み、たまり(あるいはたまりになる可能性のある窪み)の空間分布を調査し、次章においてその幾つかのタイプについて調査を行った。

分類は順に、①裸地上か植生域内であるか、裸地のものは②本川に近い、③そうでなければ植生域等の崖際の洗掘部か、平坦裸地上の2次流路窪みであるか、④崖際での底質材料の粗さ、といった視点で行った。図-9にその区分けを示すが、これらは水交換性、水質形成という点で次のように期待しているからである。Type1は本川との水交換が平水時は伏流水を通じて、洪水時は冠水することで行われる。Type2及び3は伏流水との水交換に依存するがその速度は底質材料が支配すると考えられる。Type4も同様であるが2次流路は礫質で形成されていることが殆どであるので速い水交換が期待される。Type5は高い比高に位置することが多く、雨水起源であることが推測される。実際には高い比高ながらも小水路状の微地形で、底質は数cmの礫によるアーモアコート上にシルトが薄く堆積し、透水性は非常に低いものとみられる。これらの特性については、別途調査を要する。

1999年11月29日における砂州全域においてたまりおよびたまりとなる可能性のある窪みの位置とType別分類の調査結果を図-10に示す。またこの時に確認されたType別の個数を表-2に示す。この時の流量は10m³/sを下回って少なかったが、Type4(2次流路跡)は大半が水面を

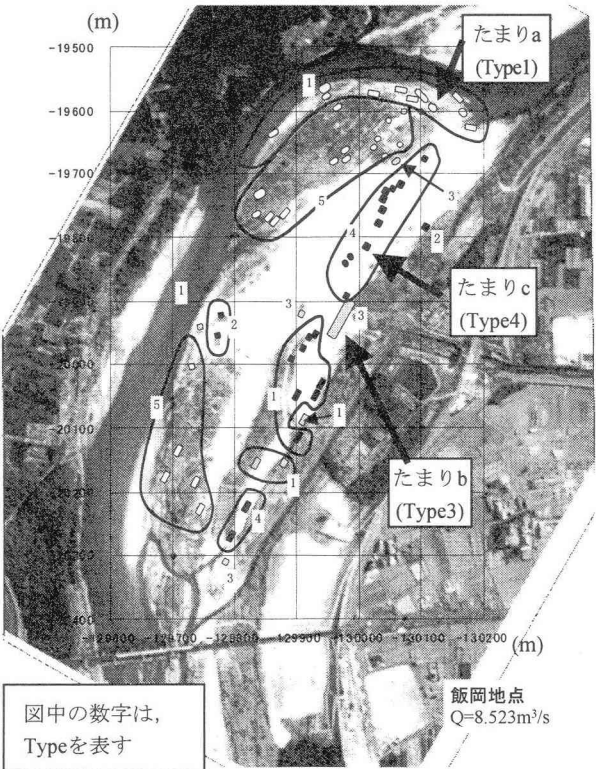


図-10 たまりのType別分類(1999.11.29)

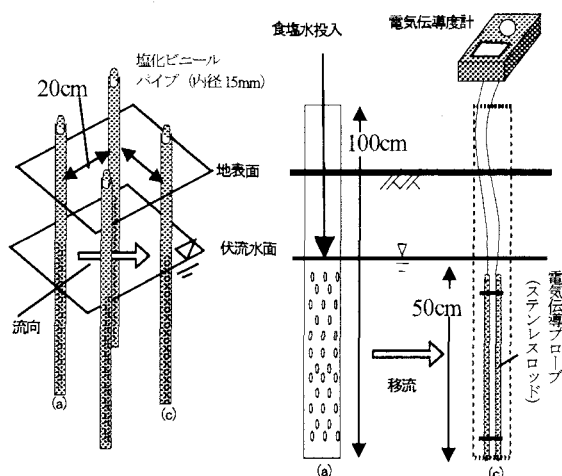


図-11 流向流速測定方法

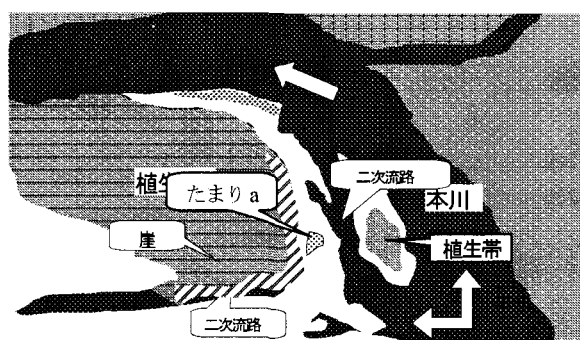


図-12 たまりa (Type1) 周辺概略図

維持しており、Type1 及び3 は約半数が水面を持っていた。次章のたまりの水交換性および周辺伏流水流動に関する調査はこれら3つのType (1,3,4) から各一地点を選定して行った (図-10)。

4. 低水時・洪水低減時のたまり周辺の伏流水挙動とたまりの水交換性

調査は、

- ① たまりの水交換性に関する調査
- ② 周辺伏流水面分布調査
- ③ 周辺伏流水流速調査 (トレーサ実験)

の3つを行った。①については、たまりの滞留時間についておよそその時間を得るとともに、その特性が他の調査結果とどのような関係を示すのか議論するためのものである。文献2)の方法を適用した。②については、観測パイプの打ち込み及び水面までの掘削・測量によった。③の伏流水流速調査は塩水をトレーサとするもので、伏流水面付近の流向・流速を得るものである。②及び③の調査によって周辺流動の有無および不均一性の抽出を期待するものである。

流向流速の調査は、次の方法によった (図-11)。長さ50cmだけ多数の穴をあけて透過構造とした塩ビパイプを、その部分が伏流水面下に没するよう、20cm間隔で正方に配列するように調査地点に打設する。そしてこの4

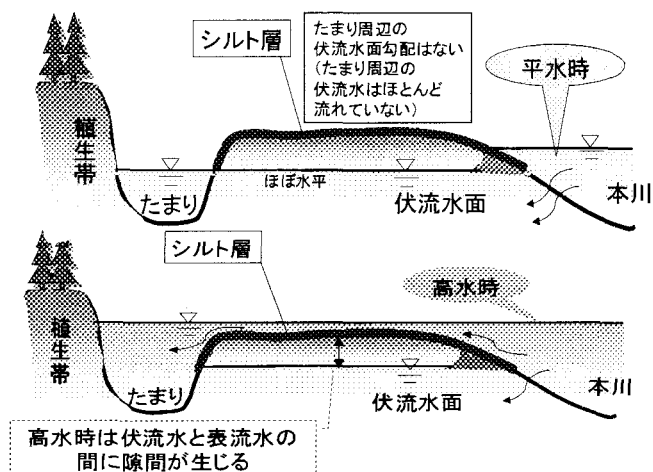


図-13 たまりa周辺伏流水と表流水挙動

本の中で、②の調査結果を基に伏流水の上流とみられるパイプに塩水を投入し、残り3本でその塩水の流達時刻を捉えるべく電気伝導センサによって伝導度のピーク時刻を測定することで、流向と間隙内実流速を測定することとした。

調査は図-12中の3回の期間にわたった。この中で2月1日は低減後の低水時であった。

(1) Type1 (たまりa, 本川脇)

このたまりは、図-12のように本川脇の砂州最上流端に位置するが、1月26,27日の低減時の調査では洪水時・低減時には本川表流水から冠水していた。この時、調査③による伏流水の流動は観測されなかった。またたまり周辺の伏流水は地表を流れる表流水とは、表面のシルト層とその下の空気層により隔離していた (図-13)。一方、2000年2月1日の低水時 ($Q=7.6\text{m}^3/\text{s}$) の流向流速調査でも、周辺の伏流水流動は全く見られず、①の調査によるたまりの水の交換も確認されなかった。このとき、表流水の水際では、伏流水面とは20cm以上の水面差を形成しており、速い浸みこみは観察されなかった。この部分の材料の透水係数はおよそ $3.6 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ で、平均粒径は3~4mm程度と大きい。均等係数D60/D10は8程度と広い分布となっていることが、低い透水性を持つ材料となっているようである。砂州上流端ではこのような材料が比較的広く分布しており、低水時の伏流水の供給を阻害しているものと見られる。そしてそれはたまりa周辺に対しても同じであり、このたまりへの水の供給は、洪水時の冠水によるものが主であることが言える。水際たまりは高い水交換が期待されたものの、それは周辺材料 (これは洪水時に形成されるものであるが) の分布に大きく左右されることが明らかになった。

(2) Type3 (たまりb, 崖際)

このたまりは崖際の2次流路上にあるが、上流の2次流路が袋小路状にたまったところからあふれて流下してきた先にあるものである (図-14)。よって洪水低減につれて、あふれて流下する水がなくなり、ついで上流の袋小路状の2次流路 (たまり) が消滅する。そのときにはこのたまりの水交換性は乏しいとみられるが、上流の2次流路にまだ水面がある間はこれからたまりbに向かっ

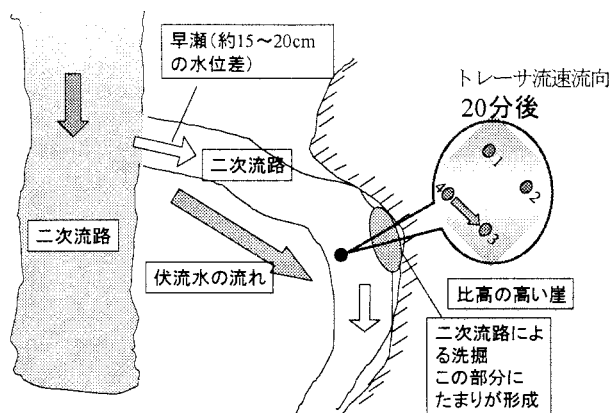


図-14 たまり b 周辺の流動の概念図

て極めて速い流れ（実流速で60cm/hr）があることが調査③によって明らかになった。これは、比較的近くに水位のこなるたまりがあることが速い伏流水挙動を引き起こすこと、さらにそれは上流側のたまりの水質が伏流水となることを示している。この測定では、一時的に形成される二つの水面の間の速い伏流場の透水係数は0.7cm/sと極めて高いことも明らかになった。この時のたまり交換性調査では滞留時間が20.3時間との結果となり、比較的速い循環であることがわかった。別の調査（河川生態学術研究）によるとこの領域での間隙内生物の生息が多数確認されている。

(3) Type4（たまり c、2 次流路上、図-15）

この地点では2次流路がある時（1月26日、このたまりまで本川から水面が連続）と、ないとき（2月1日）において、調査②及びを行った。前者の場合は周辺伏流水への供給の傾向を、そして後者の場合はほぼ流動なし、という結果（図-16）を示した。後者は、トレーサ実験③によっても示された。前者の場合のトレーサ実験においては、下流側のたまりとの水面差から、そちら側へ流速（実流速5.0cm/s、推定透水係数0.2cm/s）が認められた。ここでもたまり b と同様に近くに水位異なるたまりがある場合に、比較的速い伏流水流動がみられる、ということが言える。

5. まとめ

たまり周辺の伏流水挙動は一様ではなく、次のような要因に整理される。

- ・ 分級による伏流場の透水性の空間不均一性。特に砂州上流端付近の難透水性領域は、平時時のたまりへの水供給を大きく阻害している。
- ・ 2次流路の流れの有無が、それに連続する、或いは周辺のたまりへの水供給に影響する。
- ・ たまりが近くに複数存在しかつ、水位差を作る様な場合には付近に局所的に伏流水輸送があり、間隙内生物の活動が見込まれる。

生物の環境としての伏流水挙動の調査は、上記の点を考慮すると、砂州全体の伏流水挙動、2次流路

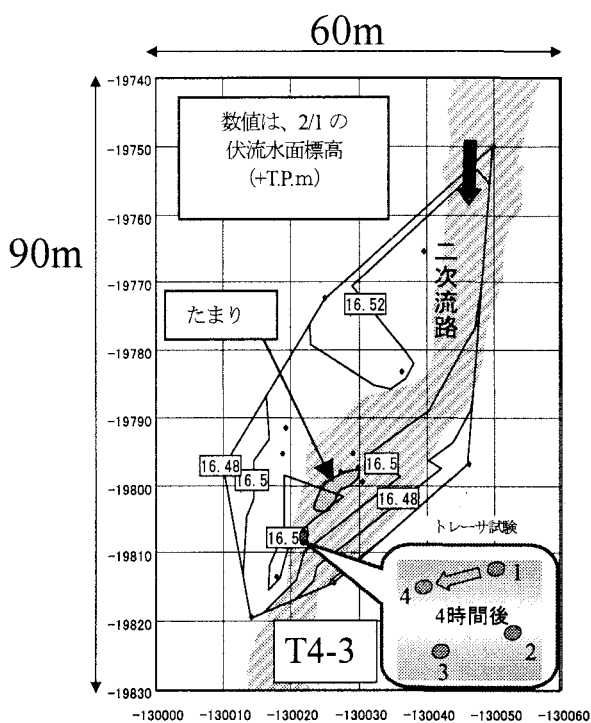


図-15 たまり c (Type4) の概略図

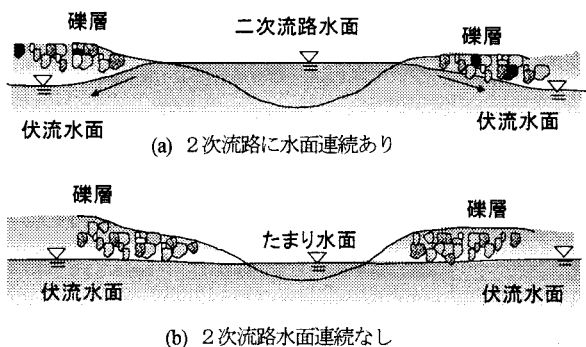


図-16 たまり c における横断方向の挙動

の存在と水供給の有無、そして地表微地形による複数のたまりの接近、という点が重要であることが本研究で明らかになった。今後は、洪水等の非正常性によりがたまりとその周辺の水流動にどのような特性を持つのかについて調査・検討を行っていく。

謝辞：本研究の一部は、河川生態学術研究会木津川グループの調査研究の一環として実施したものである。砂州伏流水調査用井戸の調査には、建設省淀川工事事務所に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 谷田一三：生態的循環と連続性から見た河川の自然復元、応用生態工学 2(1), pp.40-41, 1999
- 2) 原田守博・西村智樹・武井剛・太刀川恭子：砂州における溜まりや植生の立地環境特性と伏流水との係わり、河川技術に関する論文集、第5巻, pp.87-92., 1999

(2000. 4. 17受付)