

3. 「たまり」の平水時・洪水時の物理環境

(1) はじめに

たまり (Backwater, Abandoned channel, 島谷¹⁾による) は、河川空間における多様な habitat の中の一つであり、洪水時の水理的状況や低減時の本川との連続性は、魚類や爬虫類などの避難場所・産卵場としての利用空間として位置づけられる。谷田²⁾をはじめ、その重要性について着目し始めており、水質や底生生物の調査が行われてきている。平水時の静穏な環境は爬虫類・底生生物の生息場を生み出しており、藻類による酸素供給は、普段の伏流水との間の緩やかな水交換によって周辺伏流水の水質環境に変化を与えるとともに、それが間隙内生物の生息空間を広くせしめているとみられる。鷺見ら³⁾は、木津川中流域砂州に形成されたたまりについてその様態による分類を行った上で、裸地上の二次流路跡のたまりと周辺伏流水挙動と水交換が密接に関係する、本章ではそのようなたまりの生態系における重要性に着目し、これまでに注目されていない砂州上に分布するたまりの物理環境の平水時・洪水時の姿を調査して示す方法を記し、生物の生息条件との結びつきを明らかにする為の準備を可能とすることを目的とする。河川の自然生態系保全の為には、生物・生態と河川水理学のそれぞれを専門集団間の連携が必要であるが、前者は各種生物がどういう生活史でどういう場に棲むのか、後者はそれぞれの habitat が平時・洪水時にどのような物理場になるのか、という事を互いに示してゆかねばならず、本章での研究はその後者にあたるものである。具体的には、(1) たまりの平水時の水交換機構や交換量の推定、および(2) 洪水時の流量の変化に伴う、たまりと二次流路の状態(表流水との連続性・交換性、流速)について現地調査・数値解析を用いて推定し、その手法を提示する。

(2) 対象砂州域とたまりの概要

対象砂州の概要

本研究の調査対象地域は、淀川水系の三川合流点から 12.0km 上流付近の左岸砂州(長さ約 1km, 幅約 300m)である(図-3.1)。木津川は砂河川であり、20km 付近までの平均河床勾配は 1/1150 程度、流域面積は 4km 上流の飯岡地点で 1,559km²である。計画高水流量は 6,100m³/s で、平均流況(飯岡観測所)は表-3.1 の通りである。現在の対象砂州には、砂州を縦断する二次流路が定常的に存在しており、その河床は 1995 年から 2000 年の洪水によって 12.0km 付近において最大約 1m 低下した。また砂州上流側に存在する植生帯は 2~3m の比高を持つ微高地となっており、その左岸側の植生際にはいくつかのたまりが確認されている。

植生際たまりの特徴

本研究では対象砂州域にある植生帯の植生際に存在するたまりを対象とし、鷺見ら³⁾によるたまりの分類のうちの一つ(Type-3)である。洪水時に植生帯マウンドの側崖を流れる二次流路上(以後、植生際二次流路と呼ぶ)に存在するものである。それぞれ上流側のものか

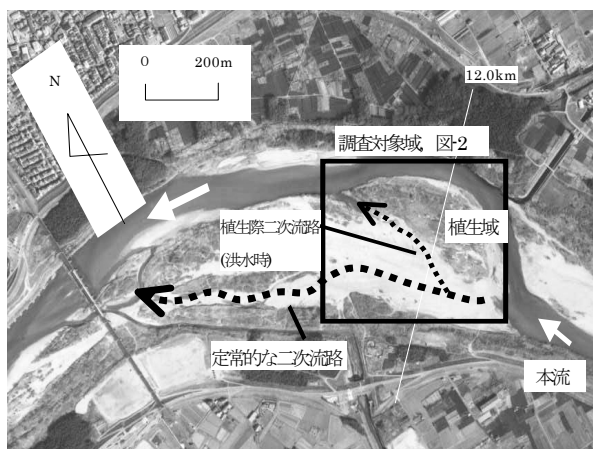


図-3.1 研究対象砂州



図-3.3 たまり C

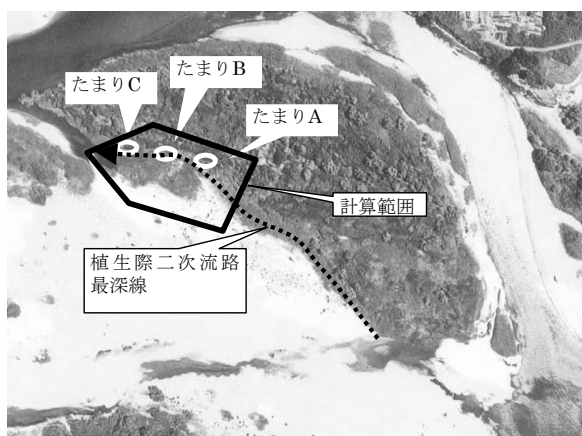


図-3.2 研究対象区域とたまり

表-3.1 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)

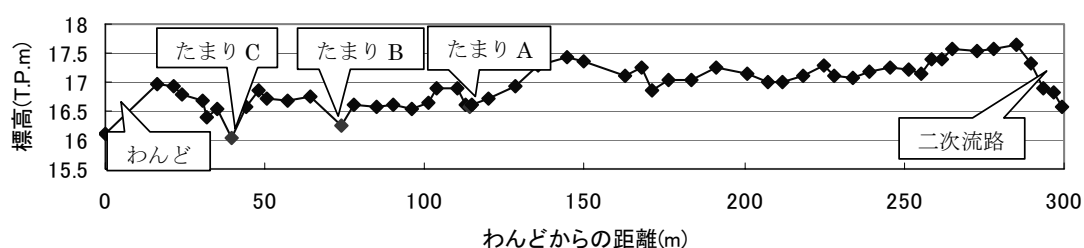


図-3.4 植生際二次流路の縦断地形

らたまり A, たまり B, たまり Cとした (図-3.2). それぞれの特徴として, たまり A は降雨の後など比較的伏流水位が高いときには水が存在しているが伏流水位低下とともに水は消滅していく. ヤナギの際に存在し, 大きさは約 $1\text{m} \times 0.8\text{m}$ である. たまり B は恒久的に水が存在し, 大きさは約 $3\text{m} \times 1\text{m}$ である. たまり C (図-3.3) についても恒常的に水が存在し植生際に存在するたまりの中では約 $5\text{m} \times 2\text{m}$ とやや大きい. わんどに近く, アカガエ

ルの生息・産卵や、幾つかの魚類の生息が確認されている。いずれのたまりにおいても藻類の繁茂が確認でき、酸素濃度が高いとみられる。

本研究で対象としているたまりを含めた植生際は本川水位が上昇したとき、まず本川とわんどがつながり表流水との連続が起こる。その後、恒常的な二次流路からも流入し植生際二次流路となり、そしてその流路上にあるたまりは攪乱を受けるとともに本川との水交換が行われると考えられる。本川にいる魚類等の生物は流路がつながったときに遡上し、たまりを生息場(避難場、産卵場)として利用すると考えられる。

たまり付近の地形を調べるために植生際二次流路に沿った測量を行った(図-3.4)ところ、たまりは植生際二次流路上の凹部に形成されている。たまりがわんど側から冠水する過程があるとすると、たまり間の鞍部を乗り越えてあるいは浸透によって下流側に位置するものから順に冠水していくことがわかる。

(3) 平水時のたまりと伏流水との関係について

本節ではたまりの一年の中で物理環境の変化する中で、まずは平水時に行われる水交換に焦点を置く。平水時のたまりの水交換(図-3.5)は伏流による交換が卓越していると考えられるため、定常状態における伏流水の数値計算を行い、伏流水面分布とたまりの水交換量を推定した。たまり交換流量の現地計測については、原田ら⁵⁾のトレーサ直接投入の方法があるが、これは生息場を攪乱することになるので、今回は適用していない。ここでは、比較的弱い攪乱で推定できる方法を示す。

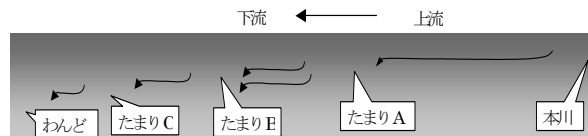


図-3.5 平水時のたまりの水交換

計算手法と条件

本研究では Dupuit の仮定及び等方均質な帯水層(下端不透水層上面は水平)という仮定のもとで成立する次の式(3.1)の平面二次元不圧地下水流動の支配方程式⁴⁾を、差分法(スタaggerド格子)によって数値的に解く。

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = 0 \quad (3.1)$$

$$q_x = -hk \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -hk \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.2)$$

ここに、 h は水平不透水層上面を基準(現地のコアボーリング調査により、T.P.0mと仮定)とした伏流水位、 k は透水係数である。 q_x 、 q_y は単位幅当たりの流量で、(3.1)式の解を用いて得る。図-3.2に示す解析範囲においてまず1格子を3.125m×3.125m(以後、計算A)として全体的な伏流水面分布の傾向を把握した。境界条件はこの境界上に敷設した簡易井戸(約3m深、ストレーナ式)、の水位を観測して用いた。

そして次に、計算領域として各たまり周辺の局所的な範囲(18m×18m)をとり、境界

条件を境界上水位に計算Aの結果を用いて、1格子 $1\text{m} \times 1\text{m}$ （以後、計算B）として同様の計算を行い、各たまりの伏流水との間の交換流量を算定した。交換水量の算定は、たまり周辺境界上を通過する量（式(2)を境界上で流入分あるいは流出分のみ積分）に、（たまり内部の平均水深）／（不透水層からのたまり水位）の率を乗じたものとした。透水係数はたまりB付近において鷺見ら³⁾の方法によるトレーサ実験を行い、その結果から算出された $k=0.113\text{cm/s}$ を用いた。

計算結果と考察

計算Aでは、次の2つのケースで数値計算を行い

- ・ Case1 : たまりを想定しないとき。
- ・ Case2 : たまりA,B,Cに一定の水位を内部境界条件として与えた時。水位はたまり境界を通過する流入・流出量が釣合う様決めた。

図-3.6にはCase2で得られた伏流水面分布を示す。これによりたまりの存在がたまり周辺に伏流水位のゆがみを生じさせていることが分かる。これは図-3.7に示す現地観測（20本の塩ビパイプによる簡易井戸を敷設）によって得られた伏流水面分布から見られる。また、この程度でたまり間の距離がある場合は、たまりが複数あることによる伏流水挙動への影響は殆どない、ということがわかる。距離が近い場合については、鷺見ら³⁾が裸地部の二次流路が低水時に干上がって取り残されたたまりと周辺伏流水の現地計測に基づいて議論している。たまりの大きさ、たまり間あるいは周辺表流水との距離および周辺伏流水全体の勾配の3者の量を用いたに基づいた理論的な議論を今後行うことによって、たまり間の影響の有無は推定しやすくなると考えられる。

計算Bによるたまりの推定交換流量について、表-3.2に示す。Case1での評価は、たまりの空間が砂層であると仮定した場合の計算を行い、その結果からその空間を通過する流量のみを算定することで得た。Case1に比べて、Case2の方が多く見積もられており、交換流

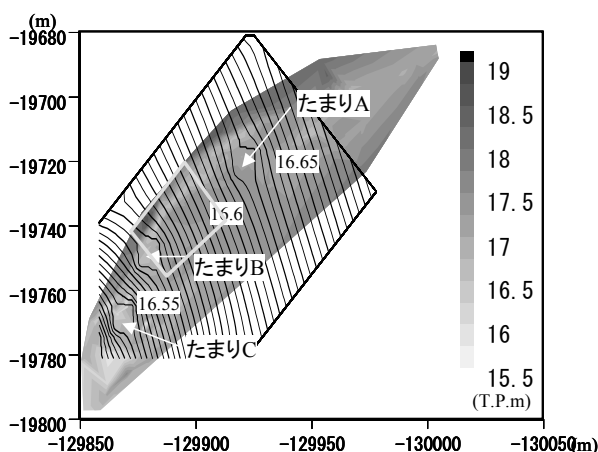


図-3.6 Case3における伏流水面分布

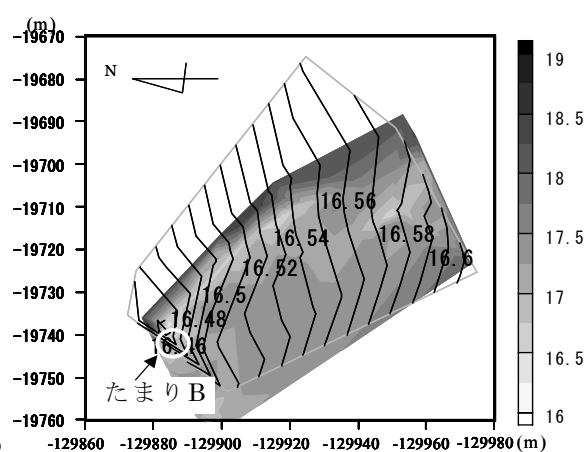


図-3.7 現地観測によって得られた伏流水面分布

表-3.2 たまりへの流出入量（計算 B）（単位：cm³/s）

| | たまり A | たまり B | たまり C |
|-------|-------|-------|-------|
| Case1 | 0.16 | 1.94 | 6.62 |
| Case2 | 0.18 | 2.24 | 9.53 |

量の大きさについては、鷺見ら³⁾が定常的二次流路上のたまりへのトレーサ投入により得た流出入量 $Q=5.42(\text{cm}^3/\text{s})$ などと比べると、オーダーは同じであり、たまりの大きさや土壌の透水性の違いがあるものの、大きな違いは出なかった。たまりの体積を測量結果から見積もった結果、たまり C においては滞留時間（たまり体積を交換流量で除したもの）約 6.4 日でたまりの水が交換されるという推定結果が得られ、熱、酸素供給など水質形成に必要な情報が得られたと考えられる。無論、洪水による冠水を受ければ実質成分の交換は攪乱される。

以上よりたまり周辺の伏流水位のゆがみに伴うたまり交換流量への影響がわかるとともに、対象となったたまり間距離では、流量を割り増すほどの相互作用影響を認めるほどの広域のゆがみは生じていないことも分かった。このように、現地の簡易な調査と数値計算の利用は、（均一透水性の仮定があるものの）たまりと伏流水流動を同時に考えた上でたまりでの水の滞留・交換を記すことが出来、水質形成や生物の物理環境の提示に役立てることが出来る。

（４）洪水時のたまりの物理環境について

次に洪水時のたまりの物理環境や本川との表流水連続性について、現地調査と数値計算によって提示することを試みた。対象のたまりでは、流量の規模により次に示す二つのステージ（図-3.8、図-3.9）をのような異なった水の交換、攪乱が起きていると考えられる。

- ・ ステージ 1・・・洪水時に本川水位が上昇、あるいは低減する途中において、たまりと本川が連続するとき。静穏で容易に魚が本川と出入りできるため、避難場としての役割を果たす可能性が強い。爬虫類・両生類などの本川と往来する機会ともなる。
- ・ ステージ 2・・・さらに水位が上昇し、上流側二次流路からも流入が始まり、植生際二次流路となるときの。このステージでは比較的速い表流水の流れが生じ、本川表流水との直接的な水の交換が起こる。

では、これらの状況がどの程度の頻度で起こるのか、その冠水頻度を知ることとはたまりの生態・水質を考える上で一つの指標になる。本節では洪水時のたまりの水交換、冠水頻度について上記のステージ毎に考察し、生息場としての有用性についても考察を加える。

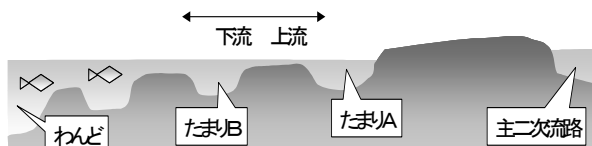


図-3.8 本川水位上昇、低減時の水交換

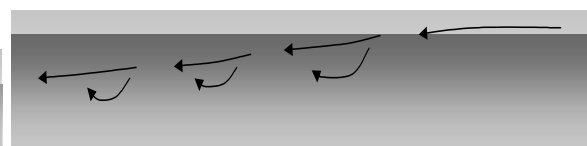


図-3.9 植生際二次流路連続時の水交換

ステージ1での物理環境について

たまりの洪水時の水位変動を見るためたまり A,B,C に水位計（自記式，ロガーをヤナギに固定）を設置し，経時変化を計測（図-3.10，飯岡での水位変化も併記）．たまり A,B が T.P.16.9m 付近で水位低減の遅れが生じていることが見られる．この時の飯岡の水位は T.P.20.8m（対応流量は $Q=122\text{m}^3/\text{s}$ ，既往の水位流量曲線より）である．たまり C についても同様に T.P.16.8m 付近（飯岡水位は T.P.20.7m， $Q=103\text{m}^3/\text{s}$ ）である．この水位低減の遅れが始まる水位は，たまりと本川との連続が途切れる，もしくはたまりと本川がつながる水位である．すなわちたまり A,B は $Q=122\text{m}^3/\text{s}$ 以上の洪水（たまり C は $Q=103\text{m}^3/\text{s}$ ）が来ると，下流側のわんどから本川表流水が流入し植生際をわんどが拡大した形となる（ステージ1）．図-3.11 の飯岡地点での水位変化（2000 年 1 月から 11 月）によると，T.P.20.8m を 8 回の洪水で越えており，本川との表流水の連続は年に数回起こることが期待され，生物の往来はこの程度の頻度で可能である事が示された．図-3.12 は現地測量によって得られた植生際地形の最深線上縦断面図であるが，鞍部の標高値と冠水するときの水位がほぼ一致していることが分かる．また，図-3.13 は同測量による地形コンターであり，T.P.16.9m においてわんどからたまり A まで表流水が連続する様子が見られる．

これらから，ステージ1の流量レンジや頻度を調べるには，現地水位計測と地形測量から推定でき，この様な情報と各生物の生活史を照らし合わせることにより，利用の可能性や態様を評価・推定できると考える．

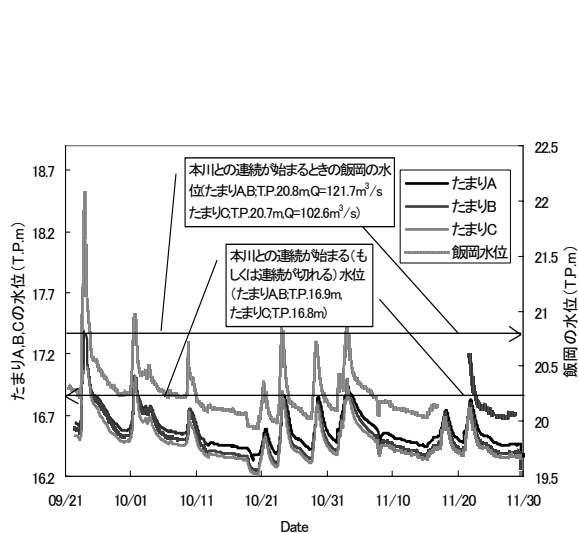


図-3.10 各たまりと飯岡の水位

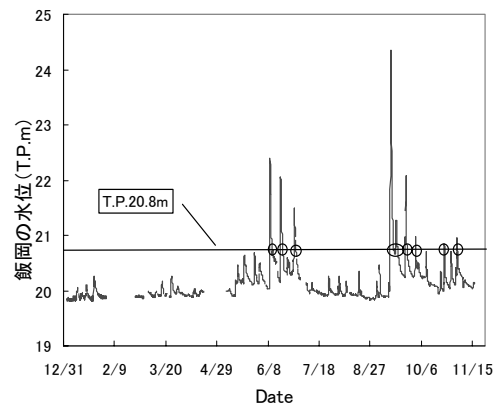


図-3.11 飯岡地点での水位(2000 年)

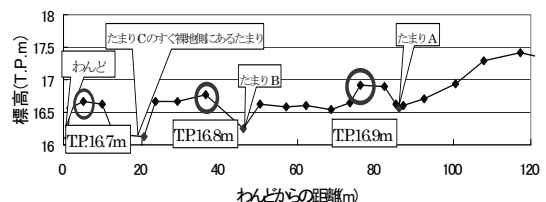


図-3.12 植生際たまり付近の縦断最深地形

ステージ2での物理環境について

二次流路上流側からの流入したステージにおける物理環境は、たまり付近の流速などで代表できると考えられる。ここでは表流水の数値計算によりそれを推定し、魚類等による避難場所等の利用可能性を評価する材料として示せるようにする。また同時に、植生際二次流路がつながる境界流量も算定する。

a) 計算手法と条件

図-3.14 に示す計算領域を設定し、計算は後藤ら⁶⁾の方法で行った。ステージ1を越える洪水では二次流路が二つ（定常的な二次流路と植生際二次流路）あるため、それぞれの下流端境界条件については、それぞれの二次流路下端に近い場所に設置された埋設井戸 w3-3, No.21 の井戸水位の記録（自記）と飯岡の洪水履歴との対応を調べ、本川流量から各2次流路末端の水位を与えられる様にした。もう一つの境界条件として与える上流端の流量は、本川から分派する二次流路への流量である。この分派流量と本川流量の対応付けについては、K-15 地点の現地水位（調査済み）と本川流量との対応付けを得た上で、分派流量をまず仮定して数値計算を行い、その結果の K-15 地点点水位から対応する本川流量を求めた。そしてそれに対応する下流境界条件を与え直して計算をやり直す、という繰り返しによって得られる結果を当該流量での計算結果とした。

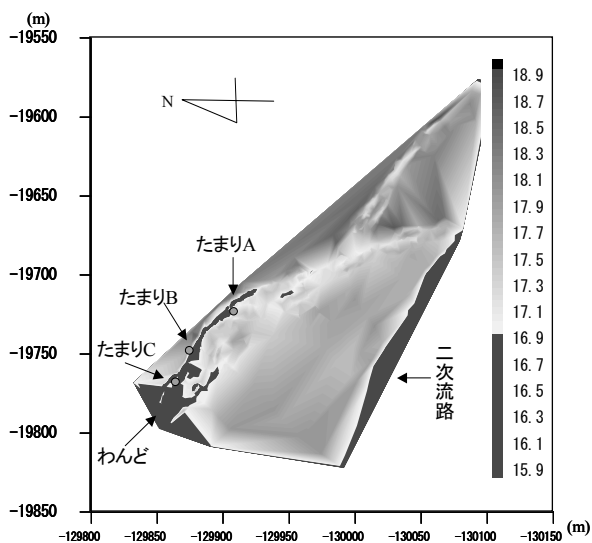


図-3.13 植生際地形コンター

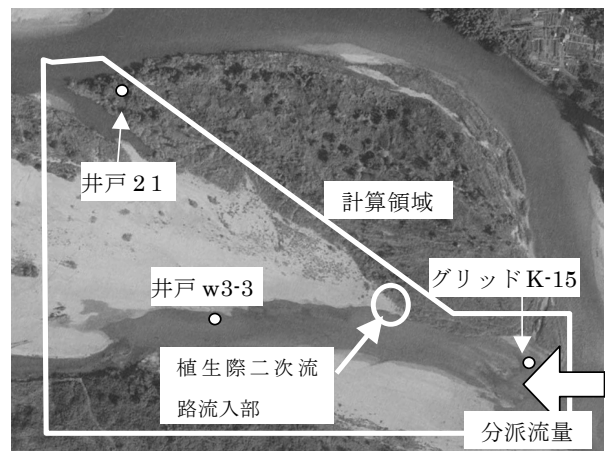


図-3.14 計算領域

b) 計算結果と考察

図-3.15, 3.16, 3.17 には3つの総流量条件での計算結果として単位幅流量ベクトル図を示す。植生際二次流路が完全に途切れる流量は、分派流量が $20\text{m}^3/\text{s}$ の時、対応する本川流量 $171\text{m}^3/\text{s}$ （飯岡水位 T.P.21.0m）であると推定された。図-3.11 より 2000 年は植生際は二次流路となった洪水は6回あり、たまり部が流れを持つ状況は年数回はあることがわかる。流量が増加するにつれて2つの二次流路間の裸地部に浸水していき、 $600\text{m}^3/\text{s}$ を越え

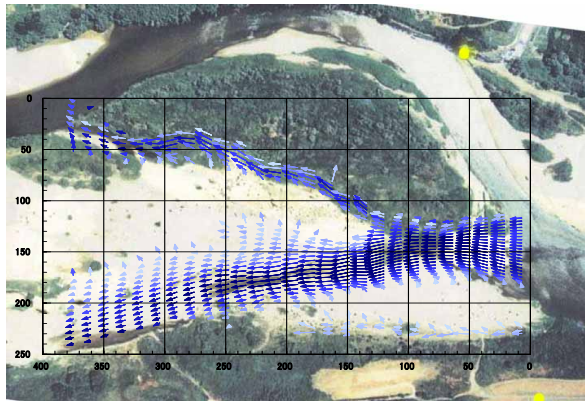


図-3.15 本川流量 188m³/s 時の
流量ベクトル

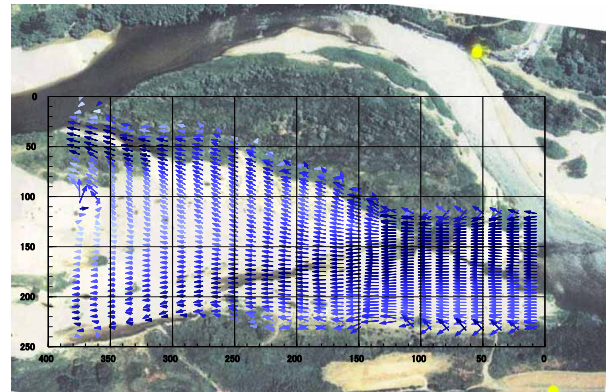


図-3.17 本川流量 639m³/s 時の
流量ベクトル

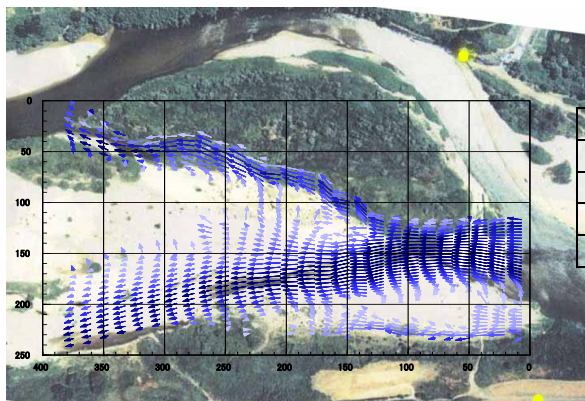


図-3.16 本川流量 262m³/s 時の
流量ベクトル

表-3.3 各流量時のたまり上の流速

| 分派流量(m³/s) | 26 | 50 | 200 |
|-----------------|------|------|------|
| 飯岡流量(m³/s) | 188 | 262 | 639 |
| たまり A 上の流速(m/s) | 0.83 | 0.90 | 0.96 |
| たまり B 上の流速(m/s) | 0.76 | 0.84 | 0.91 |
| たまり C 上の流速(m/s) | 0.90 | 0.89 | 1.03 |

ると完全に冠水している様子が見られる．表-3.3 には各総流量時に対するたまり上の流速を示す．水中生物の利用空間の視点で，木津川の代表魚種であるカワムツとカワヨシノボリのたまり上での行動を辻本ら⁷⁾により作成された定位評価関数により考察すると，たまり上での流速 0.75～1.03m/s は，成魚であれば問題なく二次流路に定位でき，たまりを利用できると考えられる．また実際は流れの抵抗となる植生が生えており局所的には流速はさらに遅くなると考えられるため，仔魚等も利用できると考えられる．このような調査法により，たまり，二次流路の魚類等の利用可能性について物理環境の側面から情報を提示できる．

(5) まとめ

本研究では，まず平水時のたまりの水交換について現地調査、数値計算により水交換の

有様を示し、水交換量を推定できることを示した。次に洪水時の水交換、物理環境に焦点を置き、やはり現地調査、数値計算により各本川流量における水交換の有様を示し、冠水流量・頻度や洪水時のたまり上の流速を求め、たまりや二次流路といった *habitat* の基礎情報を提供することが出来た。

たまり等の河道内の小水域について、河川水理学・地下水文学の専門からまた生物による物理的な利用可能性や利用頻度といった情報をこの様な形で提供できることを本論文では具体的に調査・提示することで示してきた。今後はこのような（あるいは状況によっては多少異なった）調査を異なった態様の多くのフィールドで重ねるとともに、これら物理場の情報と生物・生態学側の専門的情報との照合によって、これら河道内微地形を含む河道空間の生態系評価に資することが期待される。

参考文献

- 1) 島谷幸宏:「わんど」および「たまり」: (*backwater*), 応用生態工学, Vol.3, No.1. pp.139-140, 2000.
- 2) 谷田一三: 生態学的視点による河川の自然復元: 生態的循環と連続性について, 応用生態工学, Vol.2, No.1, pp.37-46, 1999.
- 3) 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, 第 6 巻, pp.89-94, 2000
- 4) Jacob Bear: *Dynamics of Fluids in Porous*, American Elsevier Publishing Company, Inc., 1972
- 5) 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関わり, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻, pp.87-92, 1999
- 6) 後藤孝臣・田中良樹・北村忠紀・辻本哲郎: 低堰堤堆積土砂のフラッシュに関する数値解析, 河川技術に関する論文集, 第 6 巻, pp.327-332, 2000
- 7) 辻本哲郎・田代喬・伊藤壮士: 生活圏の連結性に着目した魚類生息環境評価法の提案と河道内微地形の役割評価, 河川技術に関する論文集, 第 6 巻, pp.167-172, 2000.