

淀川楠葉復元ワンド群の水理環境

CHARACTERISTICS OF FLOW AND RIVERBED EVOLUTION AT KUZUHA EMBAYMENT RECONSTRUCTED, THE YODO RIVER

鍛冶塩太¹・綾 史郎²・武藤裕則³・馬場康之⁴・

中西 章⁵・出口 恭⁶・藤田一郎⁷・竜門俊次⁸

Shiota KAJI, Shirou AYA, Yasunori MUTO, Yasuyuki BABA,
Akira NAKANISHI, Takashi DEGUTI, Ichiro FUJITA and Syunji RYUMON

¹学生員 大阪工業大学大学院 工学研究科都市デザイン工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

²正会員 博(工) 大阪工業大学工学部 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

³正会員 Ph. D. 京都大学防災研究所 流域災害研究センター (〒612-8235 伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁴正会員 博(工) 京都大学防災研究所 流域災害研究センター (〒612-8235 伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁵正会員 河川環境管理財団大阪研究所 (〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前1-6-4)

⁶学生員 修(工) 神戸大学大学院 自然科学研究科博士後期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台1-1)

⁷正会員 学博 神戸大学工学部 建設工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台1-1)

⁸非会員 前国土交通省淀川河川事務所河川環境課 (〒573-1191 大阪府枚方市新町2-2-10)

This paper presents the results of the field measurements for the flows and the evolutions of the riverbed at Kuzuha embayment reconstructed at 34km, the Yodo River by March 2003. The 2-D velocity distributions at multi layers, and the surface velocity distributions were measured by ADCP and LSPIV, respectively, during the floods in May 2003, and the results of the both measurements showed the invasion of the main stream flow to the embayment, and the generation of the circulating flows at the inner part of the embayment. The distributions of the aggradation and degradation of the embayment-bed were also presented, and the mechanism of evolutions of the embayment-bed were discussed by using these results and two different types of the particle size-distributions of the embayment-bed materials

Key Words : *embayment, flow behavior, sedimentation, rehabilitation, river-ecosystem*

1. はじめに

淀川本川には1960年代には785ものワンド・タマリ群が存在し、多様な生物の生息場となっていた。淀川33km付近左岸には城北ワンド群に次ぐ規模の楠葉ワンド群が存在し、36種類もの魚類をはじめとする多様な生物相を誇っていたが、水制工の除去に伴い破壊されたり、水位低下により干出し、1980年代後半にはすべて失われた。残された城北ワンド群も淀川下流の湛水域化等による生態学的な劣化が近年顕著になり、水文環境の比較的良好な楠葉地区にワンド群の再建が望まれていた。楠葉復元ワンド群は旧楠葉ワンド群跡を含む高水敷の33.4kmから33.6km付近に2002年6月に1号ワンドが、2003年3月に2号ワンドが再生復元されたものである。その後、淀川本川

の出水に伴いワンド群は冠水し、本川内の土砂を含んだ流れがワンド群内を貫流し、ワンド群内の地形も河床低下や河床上昇の変形を受けている。

この間、生態学的調査とともに冠水時の流れや底質、河床変動等の非生物環境の調査が行われて来た。すなわち、流速分布の観測が2002年7月11日、2003年8月20日、2004年5月10日、14日、24日に行われた。ワンドの河床高さは各ワンド完成後の出来型検査測定のほか、2004年7月8日、2005年1月21日に横断(深淺)測量が行われ、底質調査として2003年夏から秋にセディメントトラップを用いたウォッシュロードの堆積量調査、柱状コアの採取調査等が行われた。本論文ではそれらの成果の一部を報告し、ワンド群内の流速分布の特性と土砂の堆積・洗掘との関係を明らかにすることにより、楠葉ワンド群の今後の管理や新しいワンドの設計に資するものである。

2. 復元ワンド群の概要と水文環境

(1) 楠葉復元ワンド群の概要

図-1は2号ワンドが位置する距離標33.4kmにおける横断面(2001年12月測量)に2号ワンドの河床線を加えたものである。ワンド造成前には旧2号ワンドの最低河床高はOP+5.5m程度であり、ワンドと淀川を分離する縦工(頭部水制)の天端高さは9m程度であったが、本川の水位低下とともに1980年代に干出してしまったのは1.で述べた通りである。今回、頭部水制(越流堤)でOP+5.5mまで、最低河床高でOP+3.0mまで掘り下げ、1、2号ワンド併せて、長さ約300m、幅50~25mの上流側が短い台形様の形状の高水敷、旧ワンドを切り下げて、ワンドとしたものである(図-2、写真-1参照)。上流側斜面、左岸高水敷き側斜面および下流側斜面は各々1:10、1:5、1:10の勾配の土羽で仕上げられているが、河川側は古い水制工を建造した時に使われていたもので、今回のワンド掘削で産出した玉石を用いて段履し、OP+5.5mの天端高さに仕上げて越流堤とし、水位上昇時にワンドと本川が連結した水域となるような構造となっている。1号ワンドと2号ワンドの境界付近はやや高くして、水位低下時には1号ワンドと2号ワンドは分離するように設計された。2号ワンドには越流堤中央付近に幅5m程度の切り欠を設け、常時本川と2号ワンドがこの水路を通じて連結されるようになっている。なお、1号ワンドは水位低下時は孤立したワンドとなる。

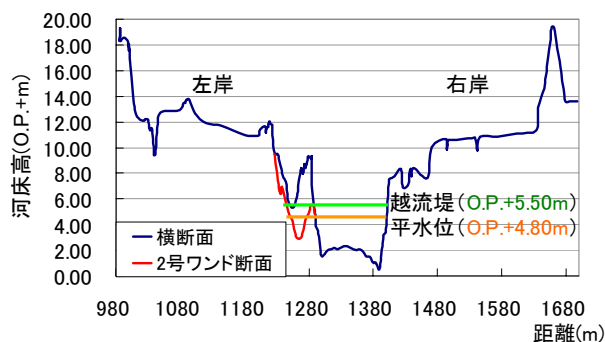


図-1 距離標33.4kmにおける横断面図。



写真-1 楠葉復元ワンド群(2003年11月20日)。(上流側から望む)

(2) 2003年から2005年の淀川の水文状況

図-3は2002年6月から2004年12月までの淀川高浜水位とこれより得られる換算流量の経時変化を示したものであり、表-1はこの間のワンド群の冠水状況を深淺測量が行われた日によって区分した3つの観測期間毎に示したものである。1号ワンドが完成して2号ワンドが完成するまでの第1期(2002年6月~2003年3月)にこの地点の平水位OP+4.8mを越えたのは全272日中25日であり、本川水位がOP+5.5mを越え、本川の流れが1号ワンドに流入したのは4回、合計わずか12日であった。2002年7月のものはこのうちの最大のものであって、高浜水位はOP+7.5mまで

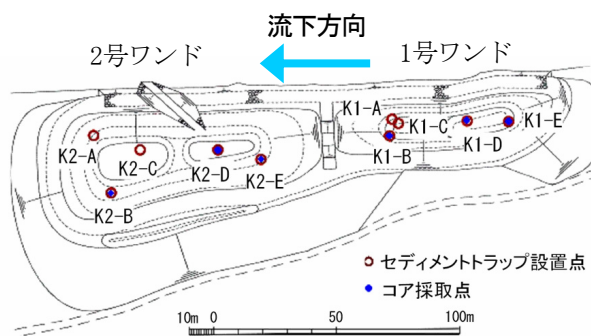


図-2 ワンド群の平面図とセディメントトラップ設置位置。

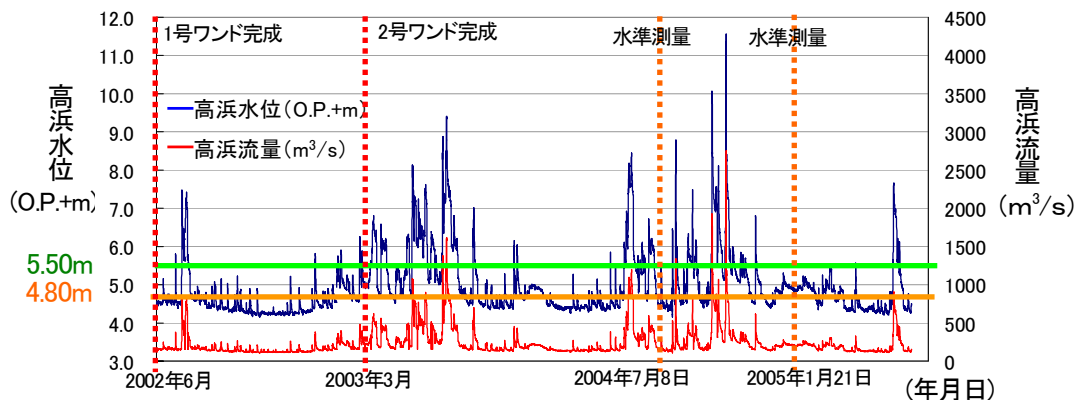


図-3 高浜水位流量の経時変化と観測日。

上昇した。第2期(2003年3月～2004年7月8日)は8回、全499日中104日間のワンドの冠水が生じた。第3期(2004年7月9日～2005年1月21日)には5つの台風の襲来があり、7回の冠水があり、全197日中51日間ワンドは冠水した。この内最大のものは23号台風によるものであって、最高水位は高浜でOP+ 11.5m、流量は2750m³/s(暫定)を記録し、左岸側高水敷上のゴルフ場がほぼ冠水し、2号ワンド下流本川側が2m前後侵食されるとともに、ワンド群周辺には洪水により流されてきた大量のゴミが集積したまま残され、現在に至っている。

表-1 ワンド群の冠水状況

期間	全日数	日数 (H> O.P.+5.50m)	日数 (H> O.P.+4.80m)
2002年6月1日～2003年3月1日	272日	12日	25日
2003年3月1日～2004年7月8日	499日	104日	273日
2004年7月8日～2005年1月21日	197日	51日	113日

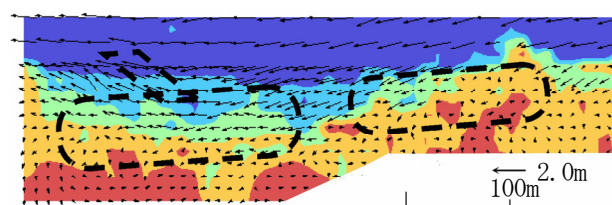
3. 冠水時の淀川とワンド内の流れの観測

(1) 走行観測用ADCPによる観測結果

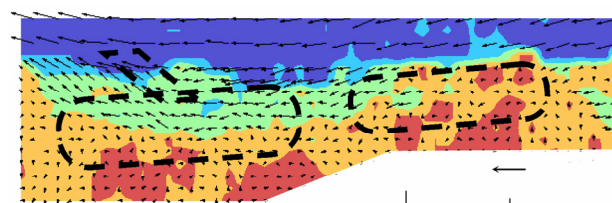
図-3に示される2004年5月10日から5月末にかけての規模出水時に走行型ADCPによる流速計測¹⁾を5月10日と14日に行った。この出水は瀬田川洗堰の操作による琵琶湖からの放流による水位上昇であり、流況はほぼ同じであるが、14日の方が流量が多かった。図-4は5月14日11時(流量646m³/s)から16時(589m³/s)における代表平面内における流速分布をベクトル図で示したものである。なお、主流方向流速を同時にコンターで表している。水面下0.61m(図-4(a))とそれよりさらに1m下層(図-4(b))とでは、流速の絶対値に多少の差異はあるものの、ベクトルの分布から描かれる流線パターンには両平面間に大きな違いはなく、2次元的な流れ場であると理解できる。

本川からの主流は1号ワンドにはあまり侵入せず、両ワンドの境界部あたりからワンド内に侵入する。2号ワンド内は最深部の位置する中央部周辺まで主流に洗われるが、ワンド下流端が近づくにつれて主流はワンドから抜け出ていく。この時、内部では特に開口部に沿って流れが形成されていることが図-4(b)からうかがえる。また、これらの主流に洗われない河岸寄りの部分では、流れはほぼ停滞しているか、あるいは弱い循環流が形成されているようであるが、図では2号ワンドの下流側に形成される反時計回りの循環流が特に目立っている。

今回のADCP計測では、計測層厚を25cmに設定しており、信号が2層以上にわたって戻ってこなくなる位置を河床と判定している。換言すれば、一つの計測地点において、最も遠い位置から戻ってくる信号は、少なくとも底面から25cm以内の計測結果ということになる。この、底面に最も近い点(<25cm)における流速の平面分布を示したのが図-5である。この図と図-4(a)に示したOP+6.39m平面における速度分布を比較すると、前述した主流がワ



(a) O. P. +6.39m.



(b) O. P. +5.39m.



図-4 平面流速分布(2004年5月14日)。

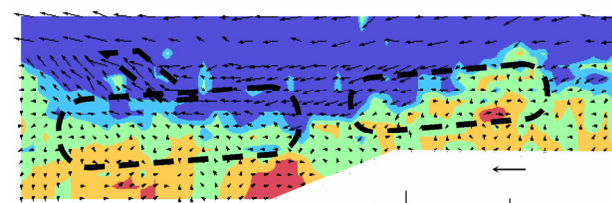


図-5 底面付近の流速分布(2004年5月14日)。

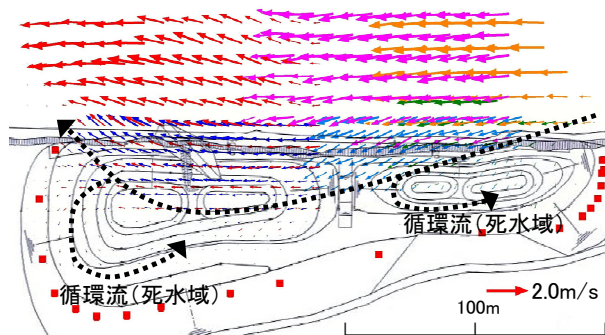


図-6 ワンド群の表面流速分布(2004年5月24日)。

ド内に侵入している部分では、底面近傍の流速の絶対値が20cm/sを越えていることがわかる。逆に、停滞域もしくは弱い循環流が存在する部分では、底面近傍の流速の絶対値は20cm/s以下である。

(2) LSPIV法による観測

ADCP観測に続いて2004年5月24日にLSPIV法²⁾を用いて

行われた淀川本川とワンド群の表面流速分布の観測結果をベクトル図として示したものの図-6である。(1)で示したADCPによる観測に続く琵琶湖の後期放流による出水の際のものであり、水位の条件は(1)におけるものに近いもの(高浜水位0.P.+6.86m)である。これまでのLSPIV観測は撮影俯角が浅い欠点があったが、この時は高所作業車を用いてビデオ撮影を行った結果、本川とワンド内とを広く解析することが出来た。淀川本川の表面流速は1.50~1.80m/sであり、ほぼワンド群と平行に流れている。本川水は1号ワンド中央付近の本川側から約10度前後の捻がり角でワンド内へ進入し、2号ワンドの下流端より50m程度上流で流向を本川向きに変え、流出して行く。1、2号ワンドとも高水敷側には二つ程度の反時計周りの循環流が見られ、大きな死水域が生じていることが分かる。なお、図中の赤い四角マークはビデオ撮影開始時においた標識点を示しているが、ほぼこの時のワンド水域の境界を示しているものとしてよい。以上の観測結果はADCPを用いた流速分布の観測結果(図-4)ともよく一致している。

4. ワンド群の河床地形の変化

(1) ワンドの堆積土砂の粒度特性

1号ワンド完成後、2002年7月に初の本格的な冠水があったが、2002年秋に行われた目視調査では死水域となっていたワンドの上流側、高水敷側上流域に粒径30 μ m程度のシルトの堆積が顕著に見られ、また、下流側は微細成分が洗い流されて、粗粒化した部分が生じていること³⁾も分かり、ワンドの堆積・洗掘が課題として浮上してきた。ワンド完成時に河床材料調査は行われなかったが、2003年秋にワンド内の数地点における表層材料の強熱減量後の粒度分析と柱状コア採取が行われた。前出の図-2にそれぞれの調査地点の位置を示している。

図-7は主な地点における強熱減量後の粒度分布を示したものであるが、主流侵入部に位置するK2-A、K2-DやK2-Cと停滞域に位置するK1-E、K2-EやK1-Dとでは明らかに粒径も成分比も異なっていることがわかる。また、柱状コアの外観とその層厚を調べた結果、停滞域(死水域)に位置する各点ではシルト、もしくはシルト混じり砂の成分が表面から30~40cmを占めるのに対し、唯一主流侵入部に位置するK2-Dではそれが5cmしかなかった。なお、前者の30~40cmというシルトを含む層が全て冠水時の堆積により形成されたとの断定はできないが、いずれにしてもK2-Dとの差異は明白であった。

(2) ワンド群の河床地形の変化

2003年6月22日には大阪工業大学によりセディメントトラップが設置され、同年10月6日に3個のセディメントトラップ回収されたが、この間59日間の冠水でいずれも回収時の湿状態で数層に分離できる55~114mm程度のシル

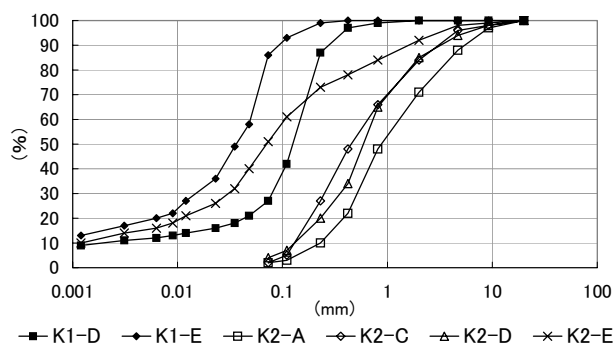


図-7 河床材料の粒度分布。

トの堆積が確認された。1号ワンド上流の本川側のものは堆積厚さ87mm、平均粒径64.2 μ m、1号ワンド、2号ワンドの高水敷側の二つは各々堆積厚さ114mm、55mm、平均粒径31.3 μ m、29.8 μ mといずれもウォッシュロードと考えられるが、高水敷側のほうが本川側のものに比べ、小さな粒径となっていた⁴⁾。さらに、河川環境管理団による2003年8月27日から12月18日までの図-2に示すセディメントトラップによる観測では127~175mmの堆積があった。

図-8(1)から(3)にワンド群の完成時の2003年4月から2005年1月までの河床標高の分布を示した。また、図-9は詳細な河床高さの計測がなされた2004年7月8日と2005年1月21日の河床高さの差よりこの間の6ヶ月間の河床標高の差の分布を示したものである。図-3に示したようにこの間の6ヶ月間には5つの台風の来襲があり、51日間のワンド冠水があり、ワンドの地形形状も激しい変化があったと推測される。

図-8より1号ワンドの最深部はワンド完成時には最低河床が0P+3.5mであったが、完成16ヵ月後には堆積が進行し、0P+3.9~4.1m程度に上昇した。また、1号ワンド上流端の斜面には最大60cm程度の堆積が一面に起こっている。一方、1号ワンドの本川側の越流堤のワンド側では侵食が進み、平水時の水面は本川側に移動したように見られる。

2号ワンドではこの2回の出水期を経過して、図-8ではあまり顕著でないが、図-9に見られるようにワンド中央部と高水敷側で堆積が進行する一方、本川側での洗掘が進行している。最低ワンド床高さについては、0P+3.0mから0P+2.7mと30cm程度の低下が見られた。河床高さの低下は1号ワンドと同様に本川側で著しく、平水時に水深1mを越える領域が22ヶ月で本川側に拡大した。一方、平水時のワンド形状は1号ワンドと2号ワンドの境界部分と2号ワンドの下流側斜面で堆積が進んだ結果、ややずんぐりとした形状になった。

第3期における最も大きな形状変化は図-9に示されるように2号ワンド本川側下流端で生じ、2m程度高さが低くなっている領域に見られる。これはこの付近の旧水制

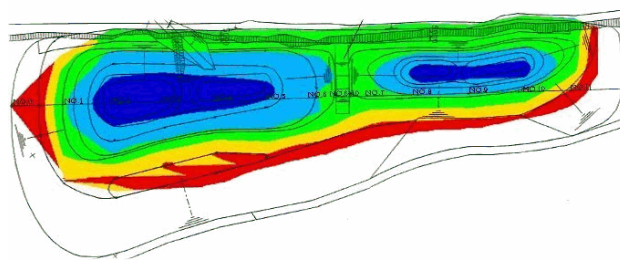
工跡を含む石積が23号台風による出水で破壊されたことによるものであり、OP+11m程度の高水位により本川水が2号ワンドを越えて、続く旧3号ワンドへ流入したこと、2号ワンドへ貫入した激しい流れが2号ワンド下流付近で本川側へ流出したことにより石積みを破壊したと推定される。

(3) ワンド群の河床変動と流速分布の関係

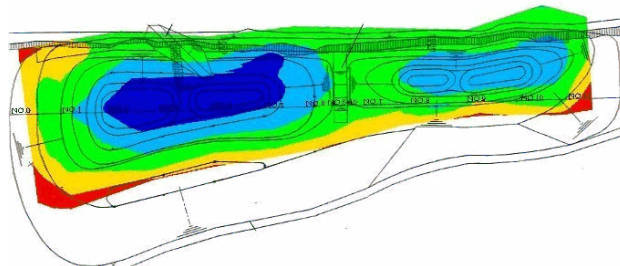
河床変動と流速分布の関係の検討にさきだち、流速と堆積土砂の粒径との関係を検討する。すなわち、河床もしくは流水中に存在する粒径0.1mmの粒子の移動限界および沈降限界流速を概算する。0.1mmの砂粒に対する限界摩擦速度を岩垣の式⁵⁾から求めると1.31cm/sとなる。この時、河床から25cm離れた点の流速は、対数則を仮定すると23.2cm/sとなる（ただし、河床材料の平均粒径 $d_m = 1\text{mm}$ とし、相当粗度 $k_s = 2.5d_m = 2.5\text{mm}$ としている）。

一方、流水中に存在する粒子についての浮遊卓越領域の摩擦速度は $u_* > 1.67w_f$ （ただし w_f ：粒子の沈降速度）で与えられる⁶⁾ことから、 $u_* < 1.67w_f$ で沈降を開始すると考える。 w_f をRubey⁷⁾の式より求めると0.84cm/sであり、したがって $u_* < 1.40\text{cm/s}$ で粒子は沈降を始めることになる。この時、河床から25cm離れた点の流速は、上記と同様の仮定により24.2cm/sと求まる。以上のことから粒径0.1mm以下のウォッシュロード成分もしくはシルト分が堆積するためには、底面近傍（ここでは25cm）の流速が20cm/s程度以下であることが重要であることがわかる。以上の概算結果は(1)、(2)の速度および河床材料の調査結果とほぼ符合している。

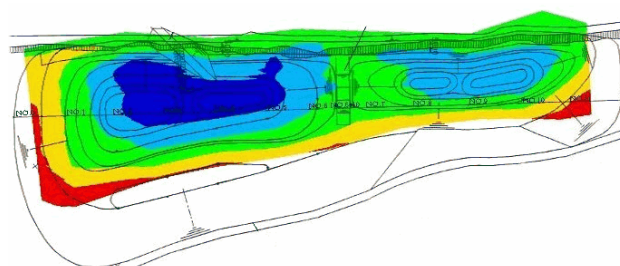
土砂の堆積厚さ・侵食深の分布を示した図-9に見られる堆積部分のうち1号ワンド本川側上流部、上流端斜面、2号ワンドの高水敷側、下流端斜面に存在する堆積領域は循環流の生じる死水域であることが流速分布を示した図-4、図-6から知れる。この死水域の堆積土砂の粒径は図-7に示されるように、平均粒径 $100\mu\text{m}$ 以下であり、死水域におけるウォッシュロードの沈降堆積が主要なものとなっていると考えられる。一方、図-9からは2号ワンドの中央部分も河床が上昇する堆積領域であるが、図-2中のK2-C、K2-D地点の粒径分布よりこの部分の平均粒径は1mm程度であることが知れる。この領域は図-4、図-6からは本川から侵入した流れが貫流する領域であり、水深も最も深く、表面で 1m/s 程度、河床上25cmの流速で 0.25m/s の生じている領域である。淀川本川34km付近の低水路における別途の河床材料調査による粒度分布はワンド内で得られた粒径分布にほぼ対応しており、本川の流れが侵入し、ワンド内を貫流することに起因する浮遊砂が堆積しているものと推定される。なお、この堆積領域の本川側は冠水時に本川水がワンド内に侵入し、貫流する流速が最も早くなる部分であるが、洗掘が卓越する河床低下領域となっているのは(2)で述べた通りである。



(1) 2003年4月 (2号ワンド完成時)。



(2) 2004年7月8日。



(3) 2005年1月21日。

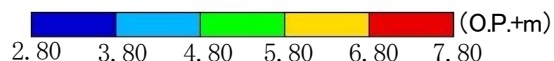


図-8 ワンドの河床高さの経年変化。

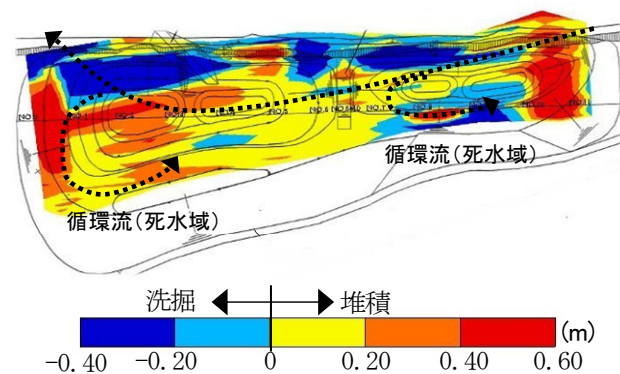


図-9 ワンド河床の上昇と低下。
(2004年7月8日～2005年1月21日)

このようなワンド内底質の領域区分は2005年1月の深浅測量時にポールによるサンウディングでも同様の結果が得られており、ほぼこの線より本川側が砂質の感触を得た領域であるのに対し、高水敷側は沈み込むようなシルト・粘土質の堆積を感じさせる領域であった。さらに、ワンド生物調査で曳き網を行った調査員によれば本川側

領域が足の沈み込みのない硬い底質を感じさせ水温も低い領域であるのに対し、高水敷側は足が泥の中に沈み、暖かい感触を得る領域であり、両者ははっきりと区別できる領域である。

5. 結論

楠葉に復元1号ワンドが2002年6月に完成し、2005年1月現在で30ヶ月、3出水期が経過した。この間、行われてきた流れや土砂の堆積、洗掘等の水理環境調査の主要な結果をまとめると以下のようなものである。

1) ワンド群が本川と連結する出水時には本川水が1号ワンド上中流部より10度前後の拡がりを持ってワンド群内に侵入し、ワンド最深部から本川側を貫流し、2号ワンド下流から本川へ流出する。この領域のうち1号ワンド、2号ワンドともに越流堤とワンド最深部に挟まれる領域はほぼ洗掘領域とすることが出来た。本川の流れの侵入は2号ワンドではワンド中央の最深部付近にまでおよび、この領域はワンド床が上昇する堆積領域であるが、堆積成分は本川低水路の河床構成材料と同種であった。

2) 本川からの流入水の影になる1号ワンド上流端斜面、1号ワンド中央最深部から高水敷き側斜面、1号ワンドと2号ワンドの境界部付近、2号ワンド最深部から高水敷き側斜面、2号ワンドの下流端斜面は主流水の貫流により2次的に形成される循環流が見られる死水域であり、堆積領域とすることができる。2号ワンド最深部付近を除いて堆積成分の50%粒径は100 μ m以下程度であり、ウォッシュロードの沈積がその主体とみなすことができる。

3) この結果、30ヶ月を経て1号ワンドは平水時の水面積に大きな変化はないが、シルトの堆積が進み、全体的にやや浅くなるとともに本川側へ移動し、ワンドの四周の斜面も堆積が進んだ。

4) 2号ワンドは本川との境界である越流堤最深部とワンド中央の最深部との間で洗掘が進行し、平水時に水深1mを越える領域の面積が大きくなるとともに、2号ワンドが本川側に拡がり、水面積も広がった。2号ワンドの中央最深部および本川側の河床材料は砂質であるが、高水敷き側、下流端斜面はシルト質の堆積が進んだ。

5) 本川とワンド群の境界を構成する玉石で被覆された越流堤は洪水時の本川の速い流れの影響を最も受ける領域である。1号ワンド上流端と2号ワンド下流端の高水敷との接合部は損傷しやすく、本川およびワンドからの激しい流れがあたる2号ワンド下流は2004年10月の出水時に崩壊した（平水時の空中部分が崩壊したので、ワンドの生態学的機能に及ぼす影響はないものと考えられる）。

越流堤の1号ワンド上流部分では玉石上に土砂の堆積が進み、植生の侵入も一部見られる。また、目視観察では越流堤両岸が侵食され、竣工時に直線であったものが

蛇行しているように観察され、天端幅員や越流堤の法勾配の確保を考慮する必要が感じられた。

本研究により1、2号ワンドが建設時に比べ、かなりの変形を受けていることとその要因が示された。すなわち、洗掘・堆積や底質の分級等の様相や分布、それらと冠水時のワンド内の流れとの関係が不十分ではあるが明らかとなった。ワンド設計時には旧楠葉ワンド群を参照にその平面形状、越流堤高さ、最低河床高さ、斜面勾配等が考慮されたが、流れや底質、洗掘・堆積等の予測や詳細検討はされず、いわば、高水敷をワンドの形に掘り込んだだけの状態であったので、今回の報告はワンド造成後の成長を続けるワンドの姿の記録と考えている。このようなワンドの姿、変形が「ワンドの生態学的機能」にどのようなかわっているかは別途行われている生態学的調査結果と対比により検討されなければならないが、シルト質の堆積が進んだ、平水時に水上部分となる水際周辺のワンド斜面はヤナギタデ等の湿生植物の繁茂が著しい。

技術的な一つの目標として「多岐にわたる望ましい多くの機能を有するワンドを出来るだけ速やかに作ること」が上げられ、川がワンドをつくるのを出来るだけ手助けする技術的手段の確立が望まれている。楠葉復元ワンドの造成は「出水がワンドをどのように作っていくか観察する」という実験的な意味を有するワンド造成でもあったので、本結果を今後の順応的な管理に役立たせるとともに、このような観測を今後も続ける必要がある。

参考文献

- 1) 武藤裕則：ワンド及び水制域の環境水理、流水・土砂の管理と河川環境の保全・復元に関する研究、河川環境管理財団、pp. 156-175, 2004.
- 2) 野村昌生・綾 史郎・武藤裕則・藤田一郎：淀川水系におけるLSPIVの利用に関する研究、河川技術論文集、第8巻、pp. 471-476, 2000.
- 3) 廣田健次・綾 史郎・野村昌生・武藤裕則・中川 一・藤田一郎：淀川楠葉1号ワンドの水理環境、第58回土木学会年次学術講演会講演集、II-99, 2003.
- 4) 鍛冶塩太・綾 史郎・武藤裕則：淀川楠葉付近におけるワンドと砂州の研究、第59回土木学会年次学術講演会講演集、II-109, 2004.
- 5) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究、(I) 限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集、第41号、pp. 1-21, 1956.
- 6) 椿東一郎：水理学II、森北出版、1974.
- 7) Rubey, W.W.: Settling velocities of gravels, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol. 25, pp. 325-338, 1933.

(2005. 9. 30受付)