

わんどの形成過程に関する一考察 —死水域の速度分布—

A STUDY ON A HISTORY OF BED TOPOGRAPHY
IN AN EMBAYMENT OF AN OPEN CHANNEL FLOW

武藤 裕 則¹・馬場 康 之¹・藤田 一 郎²・綾 史 郎³

MUTO Yasunori, BABA Yasuyuki, FUJITA Ichiro and AYA Shiro

¹正会員 京都大学助手 防災研究所附属災害観測実験センター（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）

²正会員 神戸大学助教授 都市安全研究センター（〒657-8501 神戸市灘区六甲台 1-1）

³正会員 大阪工業大学教授 工学部土木工学科（〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1）

Today an embayment in a river, or “wando”, is known to possess a precious closed ecosystem within it, and should be preserved and passed onto the next generation in a good condition. It is recognised as one of ideal forms of civil engineering structures, as harmony of nature and human art after long years time. A simple, artificial groyne field have been changed mainly due to sediment deposition to a complex, nature-friendly embayment. This paper deals with mutual relationship between flow structure and sediment movement in a groyne field. Some field measurements, as well as laboratory model tests, were carried out in a recently constructed groyne field in a river, in order to confirm the existence of a typical flow pattern that stimulates bed change of the field. The results are expected to show a first step towards a new design policy of dykes and groynes, with more stressing on the ecological point of view.

Key Words : embayment (wando), groyne field, bed topography, flow structure, sediment movement, field measurement

1. はじめに

わんどとは一般に、水制周辺部に土砂が堆積し入り江状となった部分を指す。わんどは、多様な生物種を包含する貴重な河川生態空間として認識されているが、それはわんどの地形の多様性に因るところが大きい。しかしながら、水制という人工構造物に由来することから考えて、もともとそのような多様な構造を有していたわけではなく、長年にわたる流れと土砂輸送の履歴がそのような空間を作り出したものと推測される。近年、河川工法の見直しに伴って、水制や人工わんどが各地で新たに採用されているが、それらの環境面における合理的設計法を考える上でも、水制による死水域やわんどの水理を検討しておくことは重要と思われる。

本研究では、まず水制の設置から既に多年が経過してわんどとなった箇所を対象とし、その形成過程、とりわけ水制による土砂の捕捉と水制間への堆積の過程について考察する。次に、最近新たに水制が設置された箇所を対象として現地観測及び室内実験を行い、水制間への土砂堆積と密接に関連する特徴的な流れの構造について検討する。その上で、良好な水域環境の創出を目指したこれからの水制・わんどの設計指針に関して若干の考察を加える。

2. わんどの形成過程：これまでの研究レビューによる推測

わんどが多様な生物種を育み良好な水域環境を有するに至った理由として、物理環境的な側面からは

①流速低減効果による静穏域の形成、②半閉鎖的水域の形成に伴う水質・水温の安定化、③浸透流による水質浄化作用、などがあげられてきた¹⁾。これらの点はいずれも生物の生息にとって重要ではあるが、これらの条件を有する水域がおしなべて多種多様な生物種に恵まれるとは限らない。すなわち、水域の物理環境的側面は生物生息のための必要条件に過ぎない(十分条件たり得ない)と言えるが、このことはこれまでの工学的アプローチのみで環境問題を取り扱うことの困難さを示している。さりとて、工学的アプローチが全く無力ということではなく、生物学や生態学による知見が物理環境的な指標に新たな意義を与える例も多い。わんどの例で言えば、浅水域や緩傾斜などによって水深に多様性を有することが、生物種の棲み分けのみならず1つの種のライフ・サイクルにとっても重要であることが指摘され^{2),3)}、わんど内の土砂動態を解明することに新たな意義を付与している。

わんど内の土砂動態、ないしはわんどの形成過程を考える上で、近年の河川における土砂生産・輸送状況の変化に留意する必要がある。これは、一言で言えば砂利採取やダムや護岸・床止め等の整備に伴う土砂生産・輸送量の減少と河床低下傾向であるが、このことがわんどを取り巻く水理学的な条件を激変し、非水域化・陸地化や植生の繁茂・固定化に大きく影響している⁴⁾。このことは、今後のわんどの環境変化を予測する上で極めて重要な視点であるが、本論文では時間経過的にはもう少し前段の状態、あるいは水理条件の異なる場所としても良いが、いずれにせよわんどが常時水域であり主として流れによって土砂動態が規定されている状況を対象とする。これは、本研究の目的が1つには元来人工構造物であった水制が現在のような自然環境と調和のとれた存在となった来歴の流れと土砂輸送の関係の面から明らかにすること、もう1つはそこで明らかとなった流れと土砂輸送の構造を踏まえて今後の水制の設計指針を模索することだからである。

現在わんどとして知られる箇所においても、水制設置当初の河床形状についてはその詳細は今日のそれに比して今一つ明らかでない。水制の設置を計画・設計した当時のオランダ人技術者の技術力は、言うまでもなく当時のものとしては相当に高かったようであり、水衝部の保護と低水路の維持という目的にてらした場合、今日の目から見てもほぼ妥当なものであると言える⁵⁾。しかしながら、水制の土砂補足能力、言い換えれば水制空間のわんど化を正確に見積もっていたとは言いがたく、当初からそのような機能を期待していた節はない。また、粗朶沈床によって水制を構築していること⁵⁾や当時の絵図⁶⁾から見て、原則として非越流状態を想定し

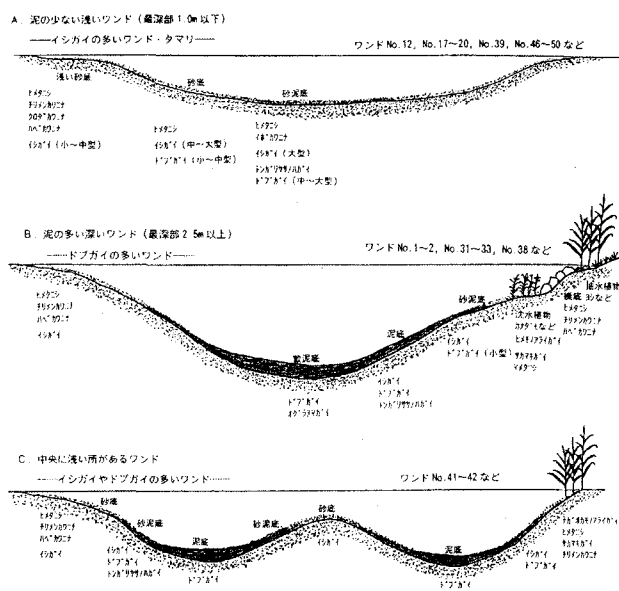


図-1 1970 年代前半における淀川の代表的なわんどの地形(紀平⁸⁾)

ているものと考えられ、洪水時に水没(越流状態)することは水制の設置後実際に経験し異常現象として認知していたものと思われるが、その際の流れの構造、ひいては土砂動態特性の変化を考慮したとは考えにくい。つまり、低水路の土砂流送能力の向上は大きな問題であったが、水制空間への土砂堆積にはあまり注意が払われて来なかったようであり、明治初年~戦争前後までの水制空間のわんど化を検証できるようなデータは、その初期の条件も含めて今のところ見当たらない。このことは、秋草ら⁷⁾が「水制自体として、水制域外から域内に土砂を誘致する機能はない」と結論づけたことからもうかがえる。結局のところ、わんどの形成過程については、現在(もしくは河床低下傾向が顕著になる前)のわんど地形と、これまでの水制周辺部における流れや河床変動の実験・観測結果から、仮説もまじえてある程度推測せざるを得ない。

紀平⁸⁾は、1970 年代前半における淀川のわんどの地形について、図-1 に示す3タイプにおよそ分類されるとしている。わんどの形成過程を考える上でこの図から読みとれる重要なことは、1つのわんど内においても多様な水深を有し岸から順に浅水部・傾斜部・深水部が存在することに加え、大半のわんどは中央付近に最も深い領域を有することである。言い換えれば、タイプCのように中央部に浅水部を有するわんどは少ないということである。河床の初期形状は先述のように不明であるが、仮に2本の水制に挟まれた区間(以下水制域と呼ぶ)についてはほぼ水平であったとすれば、中央部に洗掘を促す流れ、水制および河岸沿いの部分(以下周辺部と略す)に

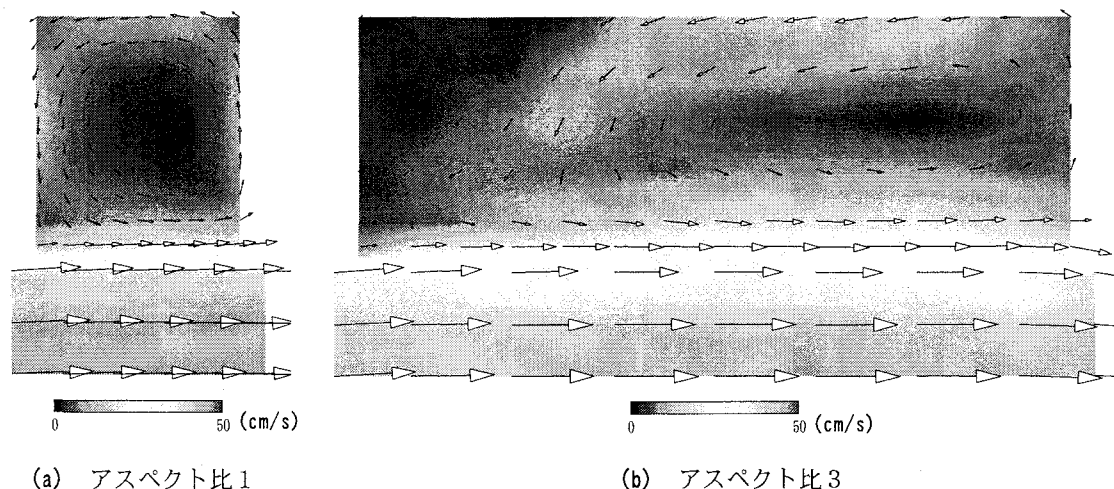


図-2 非越流状態の単一わんど内の速度分布：計測断面は半水深（Muto et al.¹⁰⁾）

堆積を促す流れの存在（両者の同時存在の可能性を含む）を示唆する。

一方、水制周辺部の流れに関しては、これまで主として実験的検討が続けられ、非越流状態と越流状態とでは流れの構造が全く異なることが指摘されている^{9), 10)}。水制域のアスペクト比が5程度以下の場合、非越流時には水制域のかんりの部分を占める循環流の存在が認められる¹¹⁾。図-2は計測された速度分布の一例である（実験条件については文献10）を参照）が、この循環流は外縁部の速度が最も大きく中心部付近の速度はほぼ零である。今、河床に働くせん断力が単純に水深平均流速の二乗に比例するとすれば¹²⁾、水制域内では循環流の外縁部に沿って最も大きな河床せん断力が働くこととなり、循環流の中心部となる中央部の土砂はほとんど移動しないこととなる。もっとも、水制域内の速度は最大でも水制域外主流部の10～25%程度であるので¹⁰⁾、循環流外縁部であっても土砂の移動が見られない可能性も考えられる。これらのことは掃流砂を中心に考えた場合であるが、浮遊砂の場合、木村ら¹³⁾の実験によれば主流部から水制域内へ取り込まれた砂はフルード数によって異なった堆積パターンを見せるが、いずれの場合でも中央部付近に堆積する。以上のことから、仮に非越流状態の流れのみしか経験していないとすれば、図-1に示したようにわんどの地形が中央付近で最深となることの説明がつき難く、越流状態の履歴も存在したことをうかがわせると共に、越流状態の流れがわんど地形の形成に大きく寄与していることが推測される。

越流時の流れとしては、水制を超えた流れがある程度の距離を流下して河床に再付着するとすれば、再付着点周辺では洗掘が顕著となり、先述したわんどの地形の形成と辻褄が合う。実際に複断面河道の

一部を切り欠きわんどモデルとした実験^{9), 10)}では、そのような段落ち流れと類似の構造が確認されている。一方、越流型水制群を対象とした移動床室内実験^{14), 15)}では、洗掘は水制周辺部で特に顕著であり、水制域は微少ではあるがむしろ堆積傾向となっており、異なった流れの構造の存在を示唆している。最近富永・井嶋¹⁶⁾は、越流型水制周辺部の速度分布を詳細に計測し、水制域のほぼ全域を占める鉛直循環流の存在を示した。この鉛直循環流は、下流側水制に沿ってかなりの速度で下降し、河床に到達した後速度を落としつつ河床付近を上流へ向かう構造となっているが、このことは先述の移動床実験の結果をうまく説明する。一方崇田ら¹⁷⁾は、透過水制による土砂堆積機能について現地観測によって検討した結果、水制の存在による流速抑制効果と出水後の wash load による埋め戻しによって、水制周辺部は上流部・背後域共に室内実験結果とは異なり堆積傾向にあることを指摘している。

このように、水制周辺部の流れの構造とそこから推測される土砂動態によってわんどの形成過程が説明できない部分が依然残されており、特に越流時（洪水時）の流れと土砂の様相をもう少し詳しく知る必要があるようである。越流時に関する知見はこれまでその大半が室内実験で得られており、以下の点で現地との相違が見られる場合もあるので、そのような相違が影響を及ぼすかどうかも含めて、実験結果の現地への適用に今少しの精査が必要かも知れない。すなわち、①水制設置時の河床の状況（河床の初期条件）、②水制自体の構造（粗粒沈床による水制は透過性で緩傾斜こう配を有するが、実験では大半が不透過・直立の模型を用いている）、③頭部水制の存在、④相似則、などである。

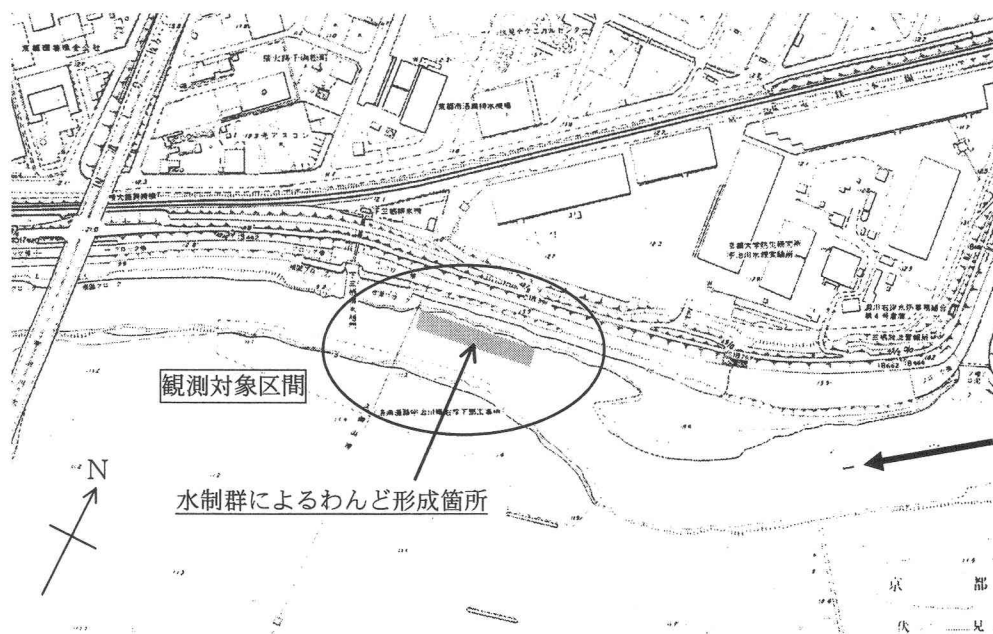


図-3 現地観測地点の概要（宇治川 42.5kp～43.3kp）

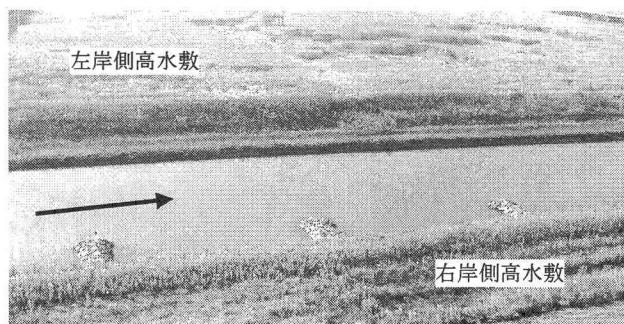


図-4 現地観測地点の概要（第2～第4水制）

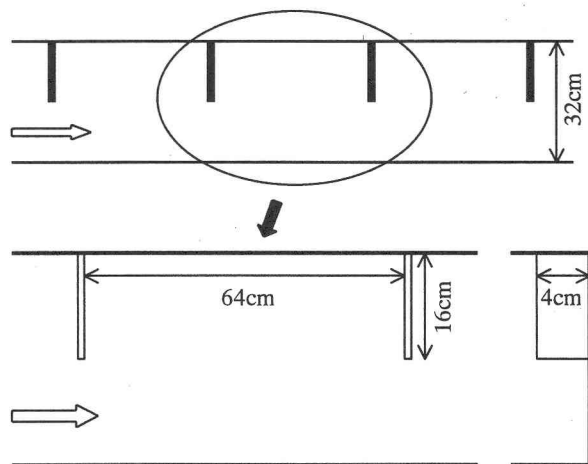


図-5 室内実験水路の概要

3. 非越流状態におけるわんど内の速度分布

わんどの形成過程，すなわち土砂動態は，時間的に変化する水理条件によってもたらされる様々な流れの構造と密接に関連するはずであるが，その関係は，前章で試みたような平水時（非越流状態）と洪水時（越流状態）を分けて考える単純な構図では説明が付き難い．実際の河川においては，平水時と洪水時は交互に絶え間なく生起しており，一方の終局条件が他方の初期条件となることを繰り返していると言える．したがって，非越流・越流のサイクルを複数含む長期に渡っての継続的な観測が望まれるところであるが，前章での検討結果から，特に洪水によるインパクトと，その後平水状態に戻った際に再度平衡状態に戻るまでの過程に着目すべきであろう．一方，設置後間もない水制がどのような過程で土砂を捕捉し洪水期に対する初期条件を呈するに至るかも興味深い．本章では，最近建設されまだ大きな出水を経験していない水制域を対象に，現地観測と室

内実験によって流れの構造を調べ，その結果推測される土砂動態について検討した．

観測は宇治川 42.8kp 付近（京都市伏見区）において行われた．観測地点は，図-3 に示すように緩やかな彎曲部に続く直線部であり，低水路右岸沿いに長さ 10m の石積水制が 40m の間隔で 4 基設置されている（図-4）．これらの水制は，上流側に建設中の橋梁の関連工事として 1999 年に建設され，その後大きな出水を経験していないことから，水制域の河床は水制の建設時からほとんど変わらないものと思われる．観測は，トレーサ（Vフォーム）を用いて表面流況を可視化し，観測地点の北側に隣接する京都大学宇治川水理実験所敷地内の気象観測鉄塔に取り付けたビデオカメラにより撮影した．観測時の流量は約 $115\text{m}^3/\text{s}$ ，水深は観測区間の平均で約 2.8m であった．表面流速分布は LSPIV 法^{18), 19)}により求めている．

室内実験では，長さ 8m，幅 32cm，勾配 1/800 の

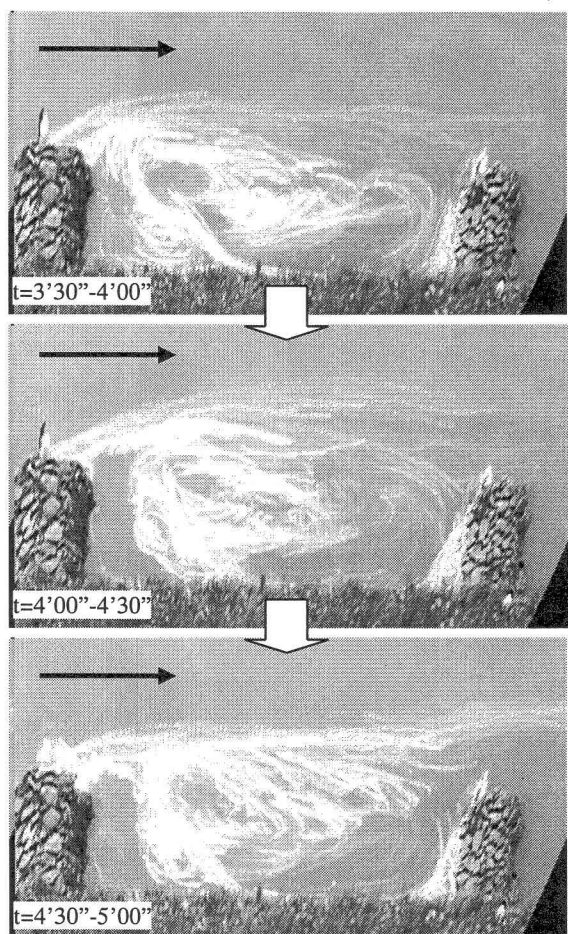


図-6 循環流の揺動（観測：第2-3水制間）

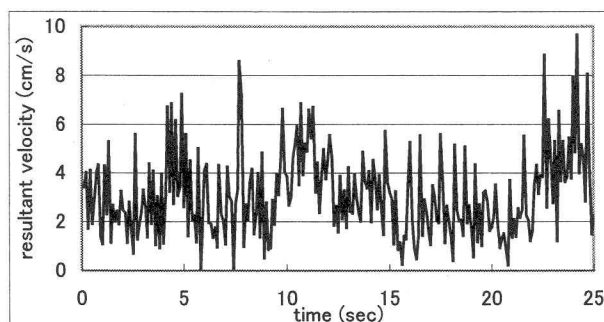


図-7 循環流中心部における速度変動（実験）

ガラス製直線水路内に、水制模型として長さ 16cm、高さ 4cm の塩ビ板を水制域のアスペクト比が現地と同じく 4 となるように水路片側に 4 箇所設置し（図-5）、水深 3.8cm の疑似等流状態で 2 成分電磁流速計による速度計測を行った。流量は 1.316 liter/s、フルード数 0.20、レイノルズ数 3320 である。

先述のように、平水時の流れによる河床材料の動きは、洪水による攪乱直後を除いては、それほど顕著ではないことが想像される。しかしながら、今回水制域における流れの構造を時間的および空間的に注意深く計測した結果、平水時にも土砂の動きを活性化させていると思われる特徴的な流れが間欠的もしくは部分的にはあるが捉えられた。以下では、

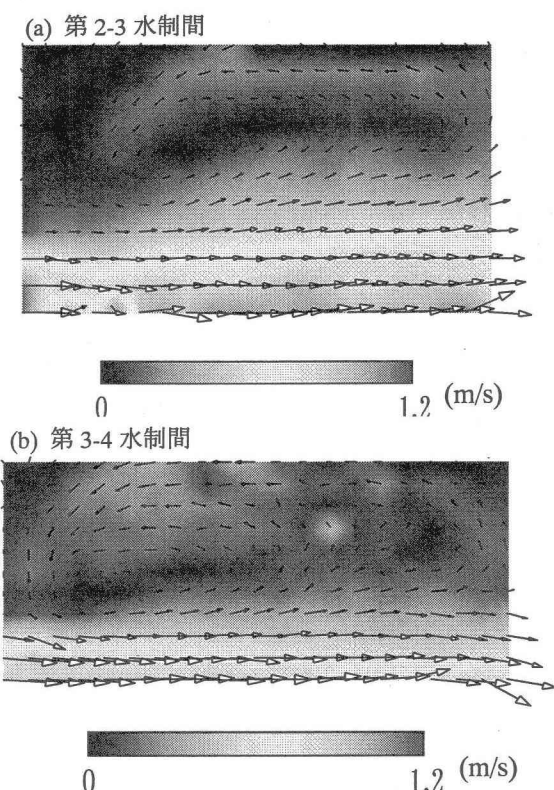


図-8 平均速度分布の水制域間の比較（観測）

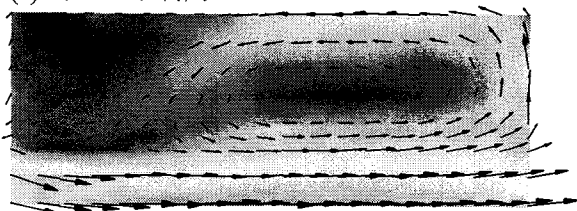
そのような特徴的な流れを示し、それによって誘起されると推測される土砂の動きについて検討する。

図-6は循環流が揺動している様子を捉えたものである。非越流時に卓越する循環流は、図-2に示したようになかなか安定して存在するものと考えられてきたが、実際の河川では図に示すように循環流のスケールや外縁速度、中心部の位置等にはかなりの変動が見られる。これは、上流側からの流れの微小な変化や河床形状の不規則性などによりもたらされているものと考えられる。また図-7は循環流中心部における合成速度 $\sqrt{u^2 + v^2}$ の変動を室内実験において計測

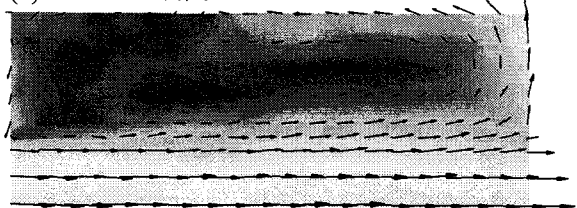
した結果であるが、図より循環流の中心部においても 6cm/s を超える大きな速度が間欠的に発生していることがわかる。この 6cm/s という値は、主流部速度約 30cm/s の 20%であり、循環流外縁部の平均速度に匹敵するものである。このような循環流の変動と循環流内部における間欠的な速度上昇は、河床の洗掘・堆積位置を不安定化し、また浮遊砂の運動も活性化させるものと考えられる。

次に図-8は、第2-3水制間と第3-4水制間の平均速度分布を比較したものである。今回対象とした地点のように水制群内の水制の数が少ない場合、各水制域は水制効果の遷移領域⁷⁾にとどまるため、図に示したような水制域間の相違が見られることとなる。このことは、水制域間の土砂移動とそのバランスを考える上で興味深い。図-9は室内実験の結果である

(a) 第 1-2 水制間



(b) 第 3-4 水制間



0 33 (cm/s)

図-9 平均速度分布の水制域間の比較 (実験)

が、一般にわんど群では最上流に位置する水制域に誘起される循環流が最も大きな流速を持ち、2番目(第2-3水制域)が最も弱く、3番目(第3-4水制域)以降は若干強くなるが2番目とあまり変わらない²⁰⁾。このことから、水制群の中では最上流に位置する水制域における土砂動態が最も活発であり、そこが下流側水制域に堆積する土砂の供給源となることが推測される。淀川におけるわんどの深度分布²¹⁾によれば、各わんどの深さはそのわんどの面積とも相関があるため、わんど群内における位置と深さの関係は必ずしも明確ではないが、同程度の面積のわんどが連続する場合、わんど群の最上流に位置するわんどが最も深い場合が多い。したがって、平水時のわんど群においては、最も強い循環流が誘起される最上流のわんどにおいて土砂が主に生産され、それが主流によって移流され下流側わんど内の比較的弱い循環流によって捕捉され堆積する、という土砂移動サイクルの存在がうかがわれる。

4. おわりに

生物学・生態学の知見によって水制という古来より頻用された構造物に新たな脚光が浴びせられている。本論文では、これまでの研究成果よりわんどの形成過程について推測するとともに、平水時の水制域における土砂動態について流れの観測および実験結果より考察した。しかしながら、環境面における要請に応えるためには、水制域における土砂動態について一層詳細なデータが必要とされている。著者らのグループは、今回対象とした試験地における観測ならびに実験を今後も続ける予定であるが、越流・

非越流状態のサイクルを何度か経験した上で、流れと土砂動態に関する継続的なデータを収集する必要がある。そこではまた、今回は実施できなかった河床変動の計測、および流れと河床動態の相互干渉の直接計測が課題となる。さらに水制の設計論を考えた場合、水制はわんど群・水制域と言った局所的な範囲における土砂動態をコントロールするものであるが、生態系保全の基礎としての河道地形の維持管理を検討するには、流域の様々なスケールにおける土砂移動プロセスを考慮する必要もあろう。

謝辞：現地観測では国土交通省淀川工事事務所のご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、谷田：わんどの機能と保全・創造～豊かな河川環境を目指して～(財団法人河川環境管理財団 大阪研究所 編)，pp.157-175, 1999.
- 2) 矢田：書名文献 1)に同じ，pp.95-103, 1999.
- 3) 長田：書名文献 1)に同じ，pp.104-111, 1999.
- 4) 篠田，水谷，松山，辻本：河川技術論文集，7，pp.333-338, 2001.
- 5) 上林：日本の川を甦らせた技師デ・レイケ，草思社，1999.
- 6) 内務省土木局：土木工要録，1881(山本：日本の水制，山海堂，p.90, 1996).
- 7) 秋草，吉川，坂上，芦田，土屋：水制に関する研究，土木研究所報告 107-6, 1960.
- 8) 紀平：書名文献 1)に同じ，pp.112-124, 1999.
- 9) 中川，河原，玉井：水工学論文集，39，pp.595-600, 1995.
- 10) Muto, Imamoto, Ishigaki: Proc. 12th APD-IAHR, Thailand, 2000.
- 11) 瀬津，鬼東，池谷，高橋：応用力学論文集，3，pp.813-820, 2000.
- 12) 土木学会編：水理公式集(平成 11 年版)，p.156, 1999.
- 13) 木村，細田，村本：水工学論文集，42，pp.1057-1062, 1998.
- 14) 福岡，西村，岡信，川口：水工学論文集，42，pp.997-1002, 1998.
- 15) 大本，平川：応用力学論文集，2，pp.665-672, 1999.
- 16) 富永，井嶋：水工学論文集，46，pp.475-480, 2002.
- 17) 崇田，清水，板倉：水工学論文集，40，pp.799-804, 1996.
- 18) 藤田，河村：水工学論文集，38，pp.733-738, 1994.
- 19) Fujita, Muste, Kruger: J. Hydr. Res., 36, 3, pp.397-414, 1998.
- 20) 池田，吉池，杉本：水工学論文集，43，pp.281-286, 1999.
- 21) 財団法人河川環境管理財団大阪研究所：書名文献 1)に同じ，pp.257-261, 1999.

(2002. 4. 15 受付)