

大規模水制群内の流動特性

松岡 保正

(平成6年9月30日 受理)

Flow Behaviours of Rivers at the area containing large super dikes

Yasmasa MATSUOKA

This study reports the result of velocity measurements among super dikes in River Chikuma.

Two large vortices contribute to flowing in, settling and heaping of suspended particles. The upside vortex of the impermeable super dike has a characteristic life cycle. It has a negative correlation with fluctuation of a water level.

In time of flood, streamwise vortices released from lowside of the impermeable super dike rise and flush humus mud on a river bed.

1. ま え が き

河岸の侵食防止対策としては通常、柳等の植栽や並杭等の比較的簡単なものから大型の不透過水制の建設、大量の水制ブロックの敷設、コンクリート護岸化といったものまで、現地の状況や予算に応じた対策がとられる。

長野市松代町清野地区の千曲川右岸には、他に類を見ないほど大規模な水制群が存在する。河道中央までせりだしている大きなものから、常時でも水没している小さなものまでを含め、5箇所の不透過水制の間に杭出し水制が設けられ、水はね及び堆積作用に寄与している。

このうち最大の不透過水制は、もともと支川の合流部を護るための杭出し水制であり、下流側は深い淵となっていた。ところが現在はそこに3 m以上もの厚さに腐泥が堆積し、常時メタンガスを発生させていて、川としては特異な環境を創出している。

本研究では、こうした水制群によって生成される様々な渦の特性を現地観測により明らかにする。出水時については、ビデオによる水面観察と模型実験を行い、大型水制群の水性植物については水性生物の棲息環境への係わりかたを明らかにする。

2. 河道と水制群の概要

2. 1 江戸時代における瀬替え¹⁾²⁾³⁾

寛保2年(1742年)8月1日のいわゆる「寛保戌の大満水」は、松代城の本丸までもが床上浸水するほどの規模であった。このため、城下はもとより城内も1 m以上泥土が堆積し、また石垣がはらんだり崩れたりしたため大がかりな復旧工事を余儀なくされた。

時代が戦主体から経済主体になってきていた事もあり、瀬替え案の中には篠ノ井塩崎地区から御厨を通り青木島へ抜ける思い切ったものも有った。しかし、天領や費用その他の問題

で最終的には、時の執政原八郎五郎により延享年間に旧河道から約700m西に移動した、ほぼ現在の河道位置へ瀬替えが行われた。

新河道は、当時の旧河道左岸側の後背湿地という立地条件から、両岸が厚く堆積した花ドロと呼ばれるシルト質の沈泥で構成されており、また西方からは川中島の扇状地が押し出しているため、特に右岸側に侵食の大きな負担がかかる事となった。

2. 2 水制群と観測地点の概要

図2に河道の等深線図と主要な水制群を示す。河道中の・印は杭出し水制を表す。水制群の位置は図1のX地点で、曲率最大地点にあたる。その核心部に位置するのが最大の亀腹水制（通称弁慶水制）である。便宜上、これらの不透過水制を上流側から、A、B、C、D、Eとする。

D水制上流側と下流側には常に大規模水平渦が存在する。下流側の大規模水平渦に取り込まれたエビモヤカワシオグサ等の水草は

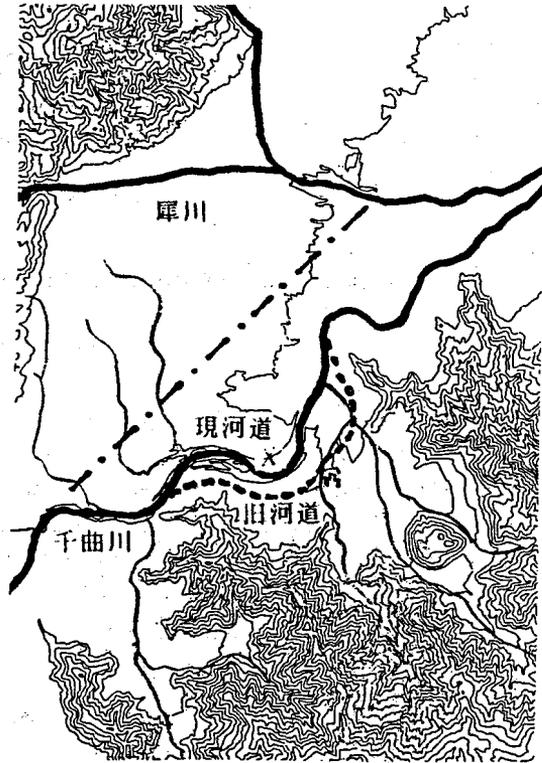


図1 旧河道と現河道

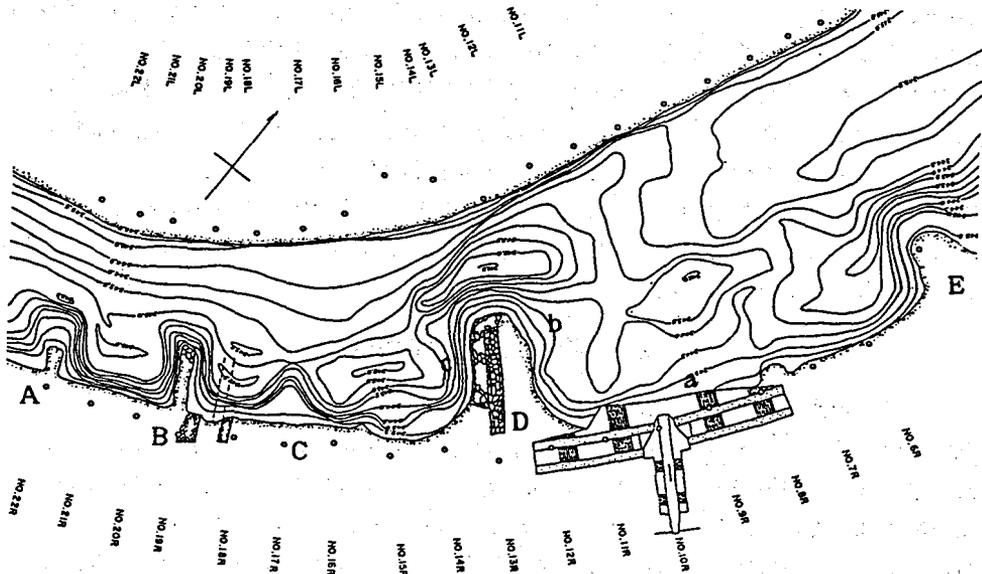


図2 現地等深線図

沈床し、それらの腐泥化したものが厚く堆積している。そのため、水温の高い時期には水面にメタンガスの発生が観察される。

C水制は通常水中に没しており、その上を上流側へ向かう緩やかな流れが吹送流気味に存在する。エビモが繁殖しており、周期的な流れの様子を良く反映している。

B水制の上下流の水平渦はD水制上下流程頭著には観測されない。先端部から剝離し放出されるカルマン渦については5水制中最も明瞭な形で観測される。

D水制先端部の深掘れ位置からE水制に向かう中間地点やや右岸寄りに、杭出し水制の小集団が有る。量の割には、主流の一部が分かれて水平渦に流入するのに大きく寄与している。

平成4年11月に河道中央部(図2では左岸沿い一帯)を残し、左岸側に新たに水路を掘削した。A水制左岸、D水制左岸下流等で本川とつないだため、それまで常時には流れていなかったD水制岸下流にも流れるようになった。長期的にはD水制対岸下流の河床がかなり変化するものと予想される。

3. 現地観測

現地観測は、その目的に応じて計器や方法を変えて行った。河道全体の時間平均的全体像を捉える為のもの、主流中の大規模乱れやレイノルズ応力等を捉える為のもの、大規模水平渦の特性を明らかにする為のものに大別される。

3.1 水制群内の流れの全体像の観測

計器は、乱れの解析が目的ではないため、取扱いが最も容易な東邦電探の発電式プロペラ流速計を使用した。紙面の都合上生データの掲載は省くが、数値計算における各種パラメータの修正やメッシュのサイズ、時間刻み等の参考に用いた⁴⁾。

流れの横断方向については、それぞれA水制、B水制、D水制の先端から対岸にロープを張りゴムポート上から、3mおきに水面下50cmの位置の流速を測定した。D水制の対岸には岸沿いに中規模の水平渦が存在しており、そのため岸から中央寄り10m程度までは上流へ向かって流れている。

D水制上下流の大規模水平渦については渦の中心を貫いてロープを張り、水面下50cmにおけるロープ方向と直交方向の流速を測定した。水平渦の直径は上流側約40m、下流側約60mと推定される。下流側のこの渦の存在により、右岸から流入した支川の流れは大略45°程度上流側に振られている。

3.2 カルマン渦の観測

主流中の乱れとD水制先端部におけるカルマン渦の解析のため、複数の2成分電磁流速計を鋼管に固定し、横断方向に張ったワイヤ



写真1 吊り下げ用骨組み

ロープに吊り下げて観測した。これを写真1に示す。延長ケーブルの制約もあり、先端から25mまで1m毎に水面下1mにおける流れ方向と横断方向の流速変動を測定した。観測時間長は、1点20分とした。流速計の方向の修正は、AD変換後に解析用プログラム内で行った。

3. 3 大規模水平渦の観測

大規模水平渦については、鋼管製の骨組みに2成分電時流速計を固定して観測を行った。これを写真2に示す。初回の観測で非常に周期性の強い長周期の流速変動の存在が明らかになったため、2回目以降はセイシュを考慮して、容量式の波高計も加えて観測した。観測は図2中のa, b, cの3地点で行った。流速は渦の接線方向と鉛直方向について測定した。c地点の観測では流速計設置場から水制先端部よった地点で、エビモの流向と水位変化の観測も行った。

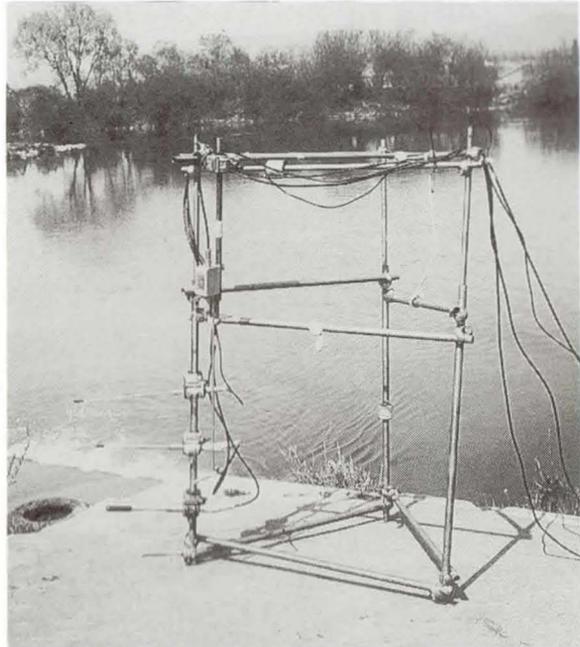


写真2 固定用骨組み

4. 解析結果と考察

4. 1 水制先端部の渦

水制先端部から放出されているのは、いわゆるカルマン渦と同種のものであり、平均流速と特徴的スケールに応じた一定の周期で放出される。ここでは、D水制先端部で得られた結果を報告する。

図3に、先端から6mにおける流れ方向流速変動 u' 、横断方向流速変動 v' 、 $-u'v'$ を示す。 $u=18.5\text{cm/sec}$ 、 $v=58.6\text{cm/sec}$ であり、速度ベクトルはかなり流心に向けられている。平均流速の大きさの割には、砂礫河床で通常観測されるレイノルズ応力をはるかに上回る値が観測されている。それが、先端部の深掘れに大きく寄与していることは間違いない。

こうした大きな $-u'v'$ に着目し、それに寄与しているのがカルマン渦であると仮定して渦の直径と移動速度を求めた。図4に直径を、図5に移動速度を示す。当然ながら常にそうした渦の中心が流速計を通過する訳では無い。速度変動記録に簡単な渦の移動のモデル⁵⁾を適用して抽出した。

これらの結果から、水制先端部からは直径15cm程度の強い水平渦が放出され、平均流速の5割程度の移動速度で流下して行くといえる。水制先端部では一種の縮流が起こっており、大きなレイノルズ応力の発生に寄与していると考えられる。

4. 2 大規模水平渦

a地点において得られた接線方向流速変動を図6に示す。観測位置における水深は65cm、

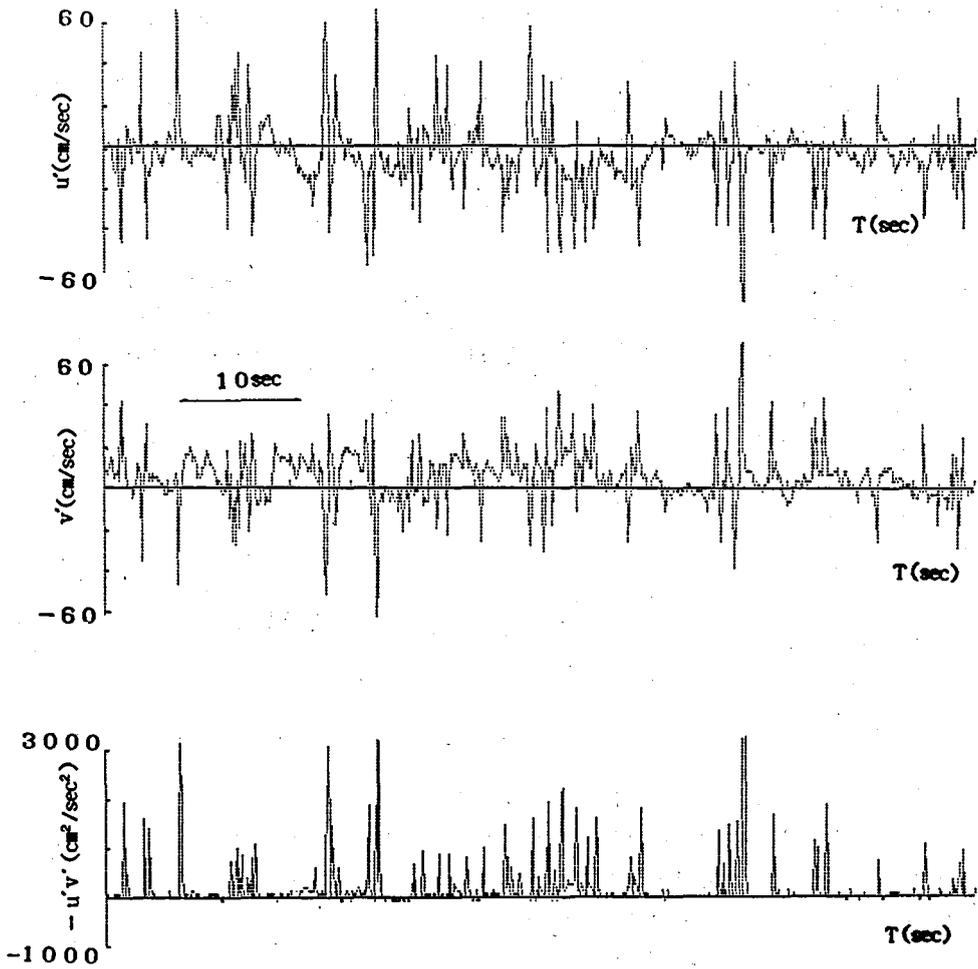


図3 D水制先端速度変動

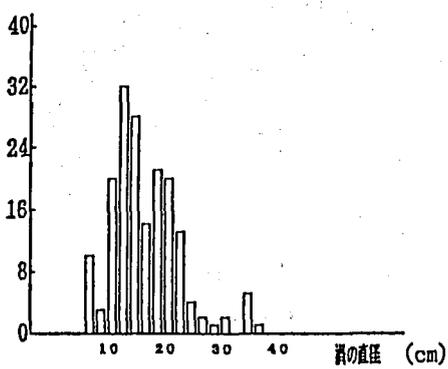


図4 渦の直径

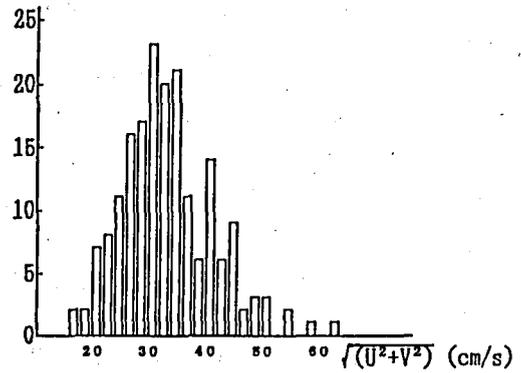


図5 渦の流下速度

流速計の河床からの高さは23cm, 45cm, 63cmである。 u の添え字は河床からの順番に対応している。河床が腐泥のため滑らかであり、流速も小さいため、一般的に礫床河川の河床近傍と水面近傍で観測されるような顕著な差はみられない。

u_2 のエネルギースペクトル密度を図7に示す。最初に8秒あたりにピークが現れ、減少した後50秒あたりから再び増加している。これは、渦内の鉛直最大乱子の周期が数秒程度であると考えられる事からすると、更に大スケールの乱れが存在することを示唆している。

この結果を参考に、原変動に32秒のアナログフィルターをかけた後3.2秒間隔でサンプリングしたものを図8に示す。図6と比べると、長周期の水平渦は底から水面まで一体化して流動している事が良くわかる。長周期の変動は約1000秒程度であるが、更に幅広い周波数帯域での寄与をみるため、 u_1 のエネルギースペクトルを図9に示す。100秒, 200秒, 1300秒あたりにエネルギースペクトルのピークが存在する。

これらの結果から、大規模水平渦の強さは常に一定ではなく、特徴的な周期で消長を繰り返している事、長周期の水平渦は水面から底まで一体化して流動している事が明らかになった。

c地点の観測では、波高計による水位変化の観測も加えた。それは、最初からセイシュに着目していた訳ではなく、出水時に現地でビデオ撮影をしていた時、周期的にD水制を越流していた事実によるものである。

c地点での観測位置の水深は108cm、流速計の河床からの高さは50cm, 70cmである。a地点同様に原変動に32秒のフィルターをかけ、3.2秒間隔でサンプリングしたものを図10に示す。水位変動の周期性が明瞭に現れており、水位と流速とは負の相関を持っている。多少の位

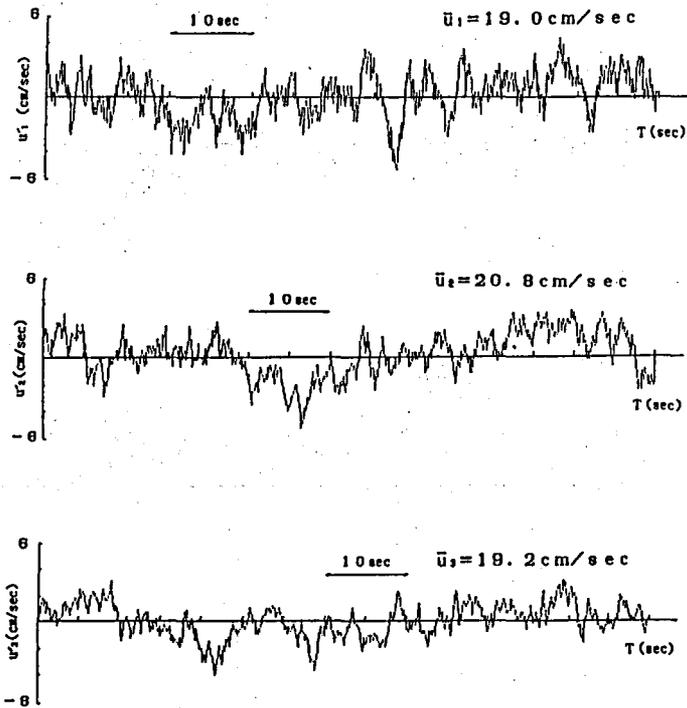


図6 接線方向流速変動

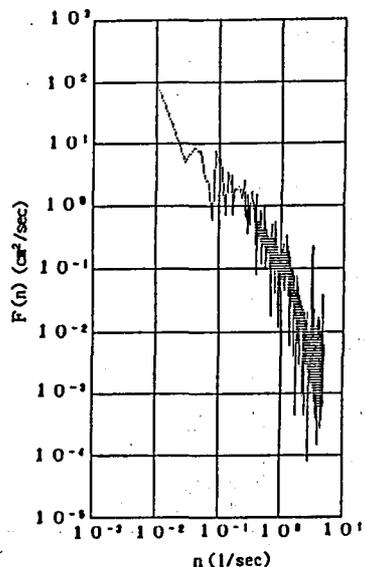


図7 エネルギースペクトル

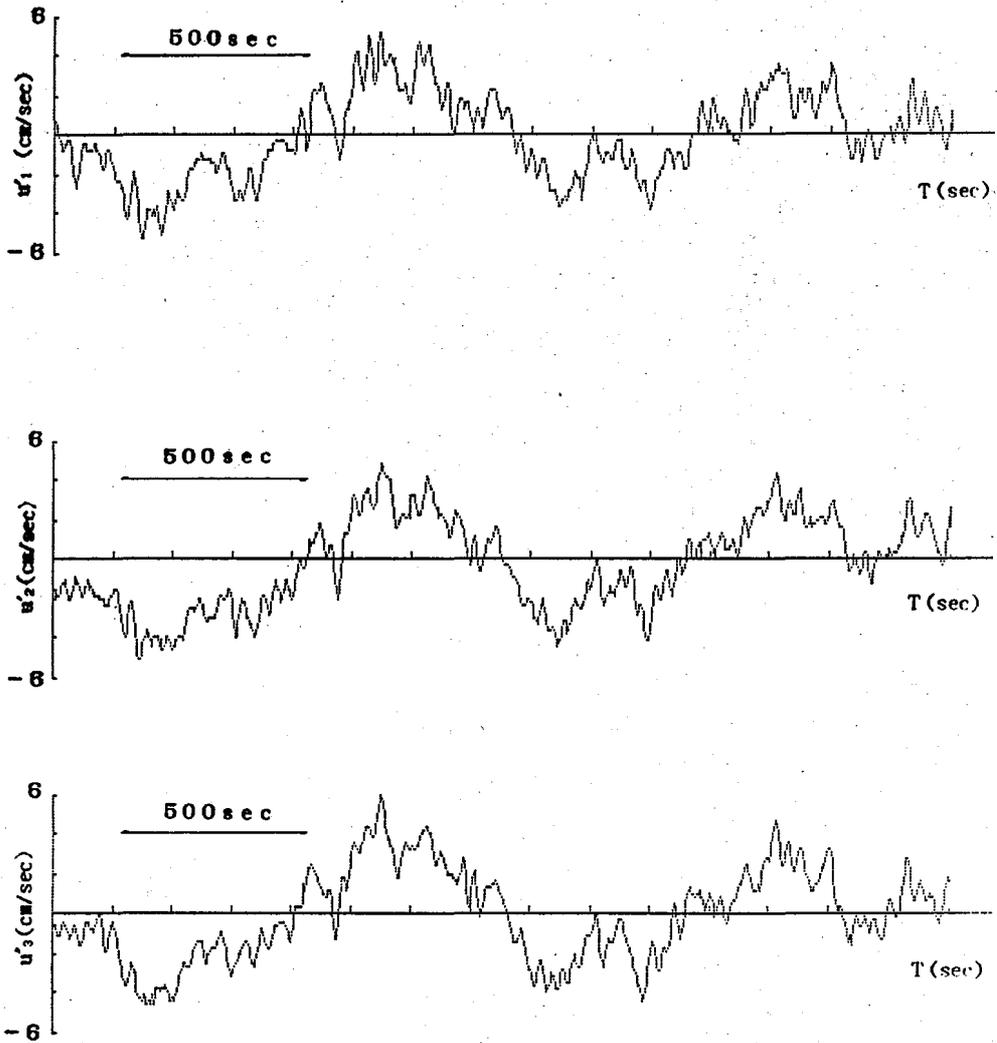


図8 a地点の長周期流速変動

相のずれは有るものの、水位が上昇するとき、流速は減少する。エビモの流向と水位観測の結果では、水位が上昇するときは主流が右岸寄りに渦の方へ食い込んできているものと推察される。渦がそのスケールを小さくし、弱まっているときには、主流のD水制への当りは強くなり、水制上流側の水位が上昇する。水制に深く当たると、流れから水制前面沿いに水平渦外周へ流れ込む量が増大し、水平渦へのエネルギー供給が増えて渦が勢力を回復するため、主流は再び中央へ押し戻される。その繰り返しを行っていると考えられる。

水位変動のエネルギースペクトルを分析すると、120秒あたりに最も大きなピークが存在している。平均水深を仮に2 mとして、 $T = 2L / \sqrt{gH}$ に $T = 120$ 秒を代入すると約265mとなる。 $H = 1$ m としても $L = 188$ m であり、B水制とC水制の距離の倍近い値となる。b地点での観測は、c地点で観測された周期性の極めて強い水位変動がセイシュに起因するも

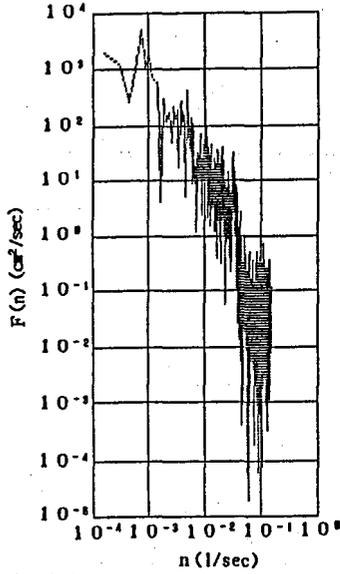


図9 エネルギースペクトル

のであるとするならば、D水制下流にも存在するはずであるとの観点から行った。対象とする渦はa地点での観測のものと同じである。位置としては、セイシュが存在する場合に水位変動が最も顕著に観測されるはずの地点を選定した。観測位置の水深は108cm、流速計の河床からの高さは50cm、70cmである。長周期変動をみるため、前述の2例同様に32秒のフィルターを通した後、3.2秒間隔でサンプリングしたものを、図11に示す。c地点程顕著ではないが、水位変動については70秒あたりと

100秒あたりにエネルギースペクトル密度のピークがみられた。流速変動のエネルギースペクトル密度については40秒、400秒、800秒あたりにピークがみられた。L=150m、H=1.6mとしてセイシュの周期Tを求めると約76秒となり、第1モードである可能性は高い。相関については、c地点の場合ほど明瞭には現れていない。

4. 3 その他の渦

流量変動は実河川には付きものであるが、流量が増える事により出現し重要な役割を果た

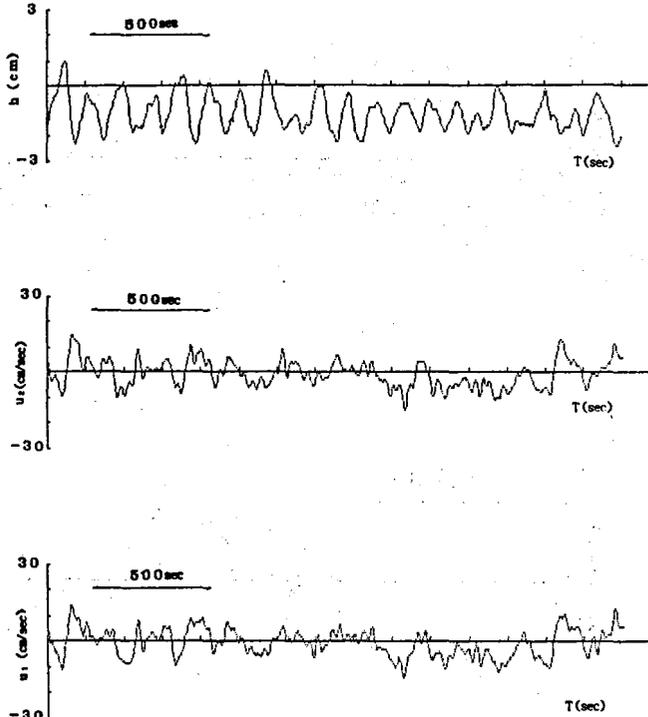


図10 c地点水位・速度変動

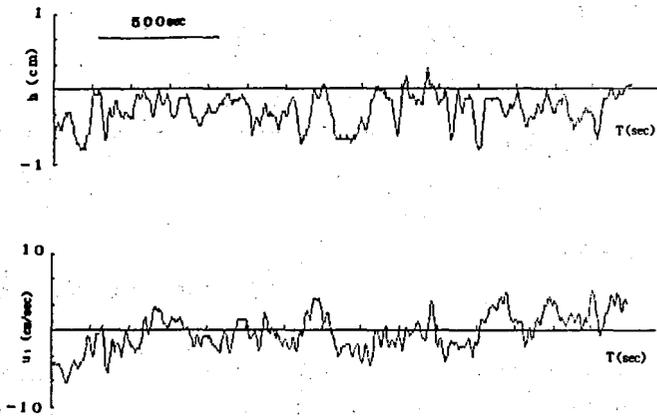


図11 b地点水位・速度変動

す渦が存在する。出水時は危険なため、通常の方法による流速計を用いた長時間観測は不可能に近い。ここでは、出水時に現地で行ったビデオ撮影を中心とした水面観察の結果と模型実験をもとに、2種類の渦について考察する。

流量が増えると流速の増大にともない、D水制上流の大規模水平渦と主流の間の上流側の中規模の水平渦が発生する。速度勾配の歪のたまり易い領域でそうした渦が生成される事は当然の結果である。河床近傍で生成される渦が、急速に速度の大きい領域へ移動するのに比べ、ここで生成された強い水平渦は流速の大きな流心方向へは進まず、大規模水平渦に取り込まれている。浮遊物を巻き込みながら、中規模渦自身も大規模渦に巻き込まれ、寿命を全うしている。中規模渦の寿命時間が大規模渦の周回に要する時間よりも長いと、弱体化しながら2周以上回る。こうした中規模渦は大規模渦の中心に来る事はなく、外縁を移動するため、中規模渦に運ばれている浮遊物は外縁に溜まる。

更に流量が増えて、B水制上を射流状態で完全越流するようになると、その後方から非常に強い剝離渦が生成される。この渦は横断方向の軸を持ち、基本的には河床近傍で生成される渦と同様の性格のものである。水制下流側には十分な水深が用意されているため、周囲を巻き込みながら十分に発達し、ゆっくりと流下する。発達した鉛直渦は水面では強いボイルとして観察される。この渦が河床に溜まった腐泥を巻き上げ、混合させ、下流に流送する。

D水制をはさんで上下流に存在する水平渦が、常時は同じように腐泥等の堆積に寄与しつつも、上流側は上記のような鉛直渦によるフラッシュにさらされる機会が多い。それが、上流側と下流側の腐泥堆積厚の大きな差となって現れているものと考えられる。

このことは、ワンド上流側の不透過水制の幾何学的特性を工夫する事により、人手を介さず定期的に河床に堆積した腐泥をフラッシュできる事を示唆している。

5. あとがき

実河川における大型水制群内の流れを測定し、大規模渦の諸特性を明らかにした。大型不透過水制間をワンドとして顕著なセイシュが存在するかを検討したが、細田⁶⁾等や玉井⁷⁾等のような結果には直結しなかった。水制上流部の渦の消長と水位変動は、主流の揺動に支配されており、それとセイシュとの関係については今後の研究課題として残った。

大型不透過水制下流側における浮遊物のトラップと腐泥の堆積については、河川環境をどう捉えるかで対策も異なる。水質が明治・大正期並で有れば死水域は無い方がよい。現在のように富栄養化が進行していると、流入させる汚染物質を減少させるだけではなく、既に存在している物質を除去する事も並行して行っていく必要がある。そうした意味では、治水にゆとりの有る河道では、水質改善の空間を用意し、そこで生産された植物を河道から刈り取るような形で河水の負担を軽減することも検討の価値がある。これは、親水空間の創出にもつながっている。本研究の対象としたワンドは大きなヒントを与えている。

本研究は、「水制工のもつ河川水理及び生物環境の創出効果に関する研究」として河川整備基金の助成を受けて行った共同研究のうち、水制群内の渦についてまとめたものである。研究を進めるにあたり有用な援助とご討議を頂いた、建設省北陸地方建設局建千曲川工事事務所熊谷清前所長をはじめ所のスタッフの方々、応用生態学研究所桜井善雄先生、信州大学工学部富所五郎教授に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 更級埴科地方誌刊行会：更級埴科地方誌，第三卷近世編上・下。
- 2) 建設省北陸地建信濃川工事事務所：信濃川の氾濫—江戸時代—。
- 3) 埴科郡誌。
- 4) 桜井善雄他：水制工の持つ河川水理及び生物環境の創出効果に関する研究報告書，1994。
- 5) 松岡保正：砂礫河床上の乱れ特性（第一報），長野高専紀要，第19号，PP. 97-104, 1988。
- 6) 細田 尚他：開水路急拡部の流れにおける渦の発生・発達に関する二，三の検討，水工学論文集，第37巻，PP463-468, 1993。
- 7) 玉井信行他：Experimental Investigation of Flow in Embayment, 水工学論文集，第37巻 PP503-510, 1993。