

大規模水制群内の水平渦

Characteristics of Large Eddies among Groynes .

松岡 保 正 *

By Yasumasa MATSUOKA

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

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

In time of flood, streamwise vortices released from low side of the impermeable groyne rise and flush humus mud on a river bed.

Keywords : Groyne, Large eddy, Life cycle, Humus mud

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、もともとは支川の合流部を護るための杭出し水制、木工沈床等からなっており、下流側は深い淵となっていた。ところが大型の不透過水制となった現在は、その上下流部に大規模水平渦が出来て、特に下流側には3 m以上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。

本研究は、実河川の大規模水制群内における種々の渦が果たしている役割を、治水と環境の両側面から再評価するため、二、三の水理学的特性を明らかにしようとするものである。

* 正会員 長野工業高等専門学校助教授 環境都市工学科

(〒381 長野市大字徳間 716)

2. 水制群と観測地点の概要

図1に河道の等深線図と主要な水制群を示す。観測地点付近の河道は右岸寄りに大きく湾曲しており、不透過水制群の位置は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、これら右岸沿いの不透過水制を上流側からA、B、C、D、Eとする。

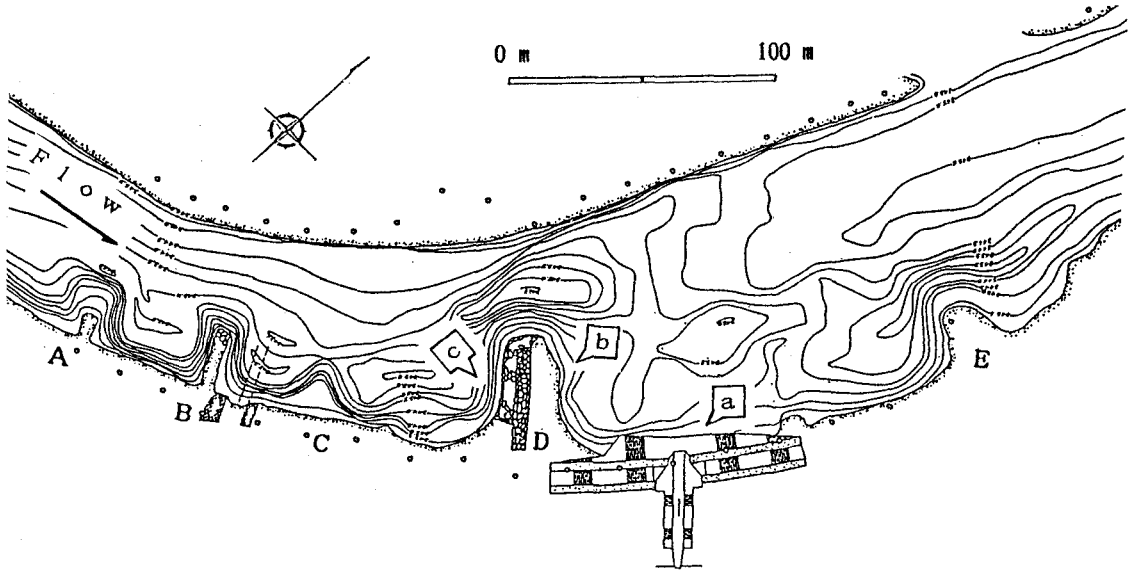


図1 現地等深線図

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やカワシオグサ等の水草は沈床し、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水制上下流程顕著には観測されない。先端部から剥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1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水制左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。本研究における観測としては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

乱れの解析が目的ではないため、計器は、取扱いが最も容易な東邦電探の発電式プロベ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、

時間刻み等のの参考に用いた。

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ボート上から、3 mおきに水面下50 cm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10 m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50 cm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40 m、下流側約60 m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ーロープに吊り下げて観測した。延長ケーブルの制約もあり、先端から25 mまで1 m毎に水面下1 m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、直交方向平均流速 $w=0$ として、座標軸を回転して行った。

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測を行った。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によった地点において、目視によるエビモの流向と水位変化の同時観測も行った。

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2に、先端から6 m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。速度ベクトルはかなり流心に向いている。平均流速の大きさの割には、砂礫河床上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

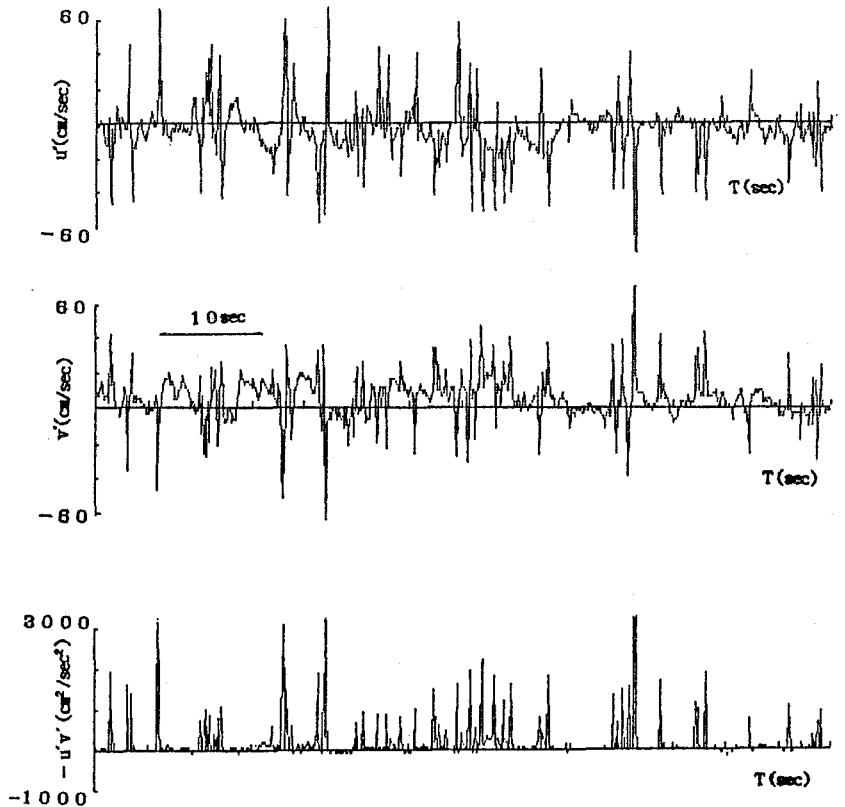


図2 D水制先端速度変動

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3に直径を、図4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¹⁾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5に示す。観測位置における水深は65cm、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_1 のエネルギースペクトル密度分布を参考にして、原変動に32秒のアナログフィルターをかけた後に3.2秒間隔でサンプリングした流速変動を図5のものと比べると、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判明した。長周期の変動周期は約1000秒程度であったが、更に幅広い周波数帯域での寄与をみるため、 u_1 のスペクトル密度を図6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わかる。

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

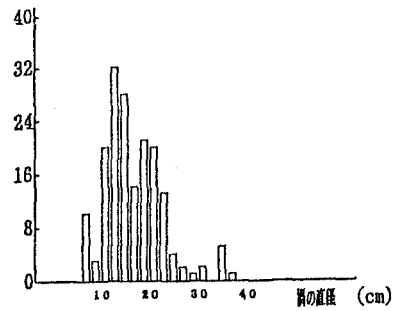


図3 渦の直径

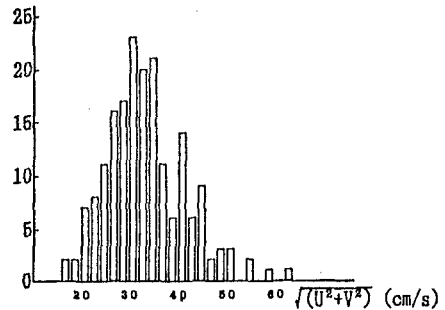


図4 渦の流下速度

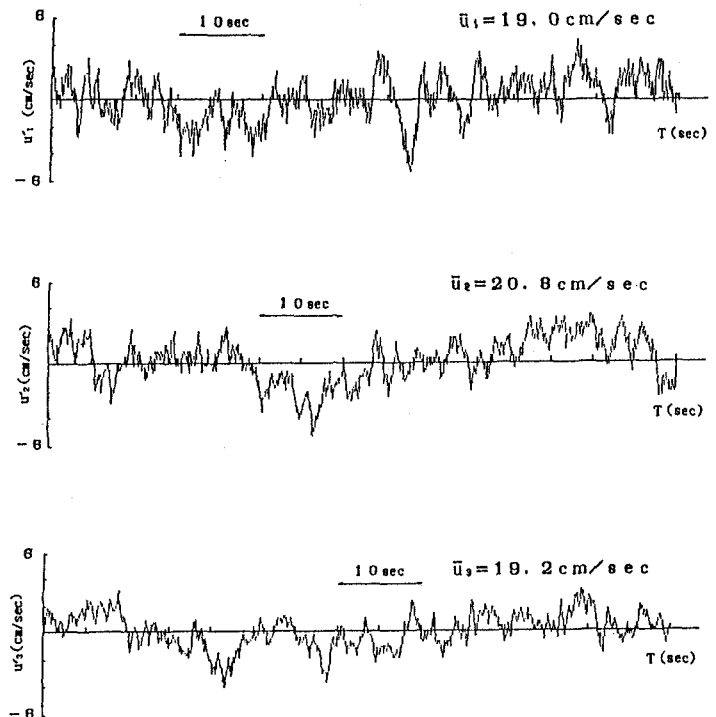


図5 接線方向流速変動

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それぞれ50cmと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7に示す。水位変動の周期性が明瞭に現れており、水位と流速とはほぼ負の相関を持っている。多少の位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2mとして、 $T = 2L / \sqrt{gH}$ に $T = 120$ 秒を代入すると約265mとなる。H=1mとしてもL=188m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一である。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8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地点ほど明瞭ではない。

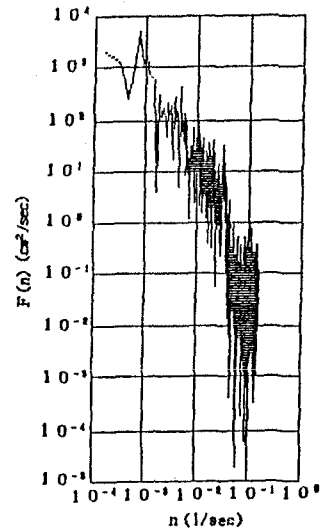


図6 エネルギースペクトル密度

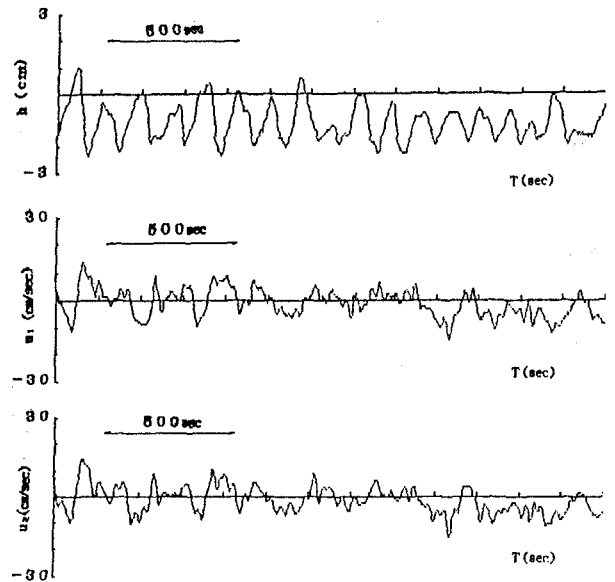


図7 c地点水位・速度変動

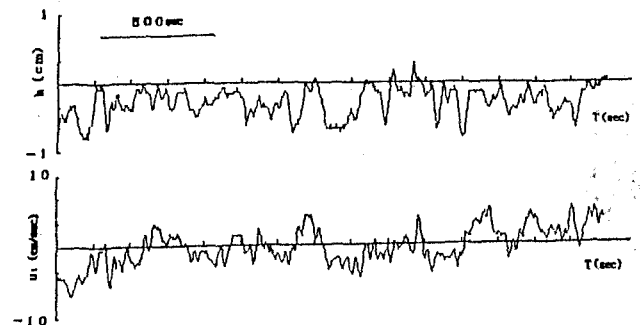


図8 b地点水位・速度変動

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 200t/sec 程度を超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に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剥離渦が生成される。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²⁾等や玉井³⁾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いる可能性が強く、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おり、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) 松岡保正: 砂礫河床上の乱れ, 第33回水理講演会論文集, pp. 481-486, 1989.
- 2) 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, PP. 463-468, 1993.
- 3) 玉井信行他: Experimental Investigation of Flow in Embayment, 水工学論文集, 第37巻, PP. 503-510, 1993.