

緩やかに蛇行する低水路を持つ複断面開水路 流れに関する実験的検討

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLOW IN COMPOUND SINUOUS CHANNELS

石垣泰輔¹・武藤裕則²

Taisuke ISHIGAKI and Yasunori MUTO

¹正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所附属災害観測実験研究センター
(〒612 京都市伏見区横大路下三栖)

²正会員 Ph.D. 京都大学助手 同上

A new series of experiments was conducted to study the flow structure in a compound sinuous channel. The experimental channel modelled the most typical Japanese compound river, and whose crossover angle was 30° and sinuosity s was 1.11. Flow visualisation both on the water surface and in the water body was carried out as well as velocity and depth fluctuations were measured.

The results show similar internal structure of the flow to that in meandering channels in overbank conditions. A helicoidal motion of the flow is directly reflected to the fluctuation of the water surface. Auto-correlation factors calculated from the fluctuation clearly shows the periodic motion of the flow and its depth dependency. This periodic motion is mainly brought by that of the secondary flow induced and developed through the crossover region.

Key Words : compound channel, sinuous channel, turbulent flow, secondary flow, visualisation

1. はじめに

著者らは従来、低水路が蛇行した複断面開水路流れを対象とした実験的検討を行ってきた¹⁾。そこでは、光ファイバ・レーザ・ドップラ流速計 (FLDA) を用いた詳細な速度計測を行い、低水路内の二次流の発生・発達機構について明らかにするとともに、乱れ計測結果に基づき低水路・高水数間の流体の相互干渉および流体交換現象について考察した。その結果、これらの特徴的な流れの構造は、断面内での流れの非一様性をもたらす水路の幾何形状に大きく依存し、またそのような構造の表れ方は水深によっても異なることが知れた²⁾。低水路が蛇行した複断面水路の場合には、下層流れと上層流れの干渉過程を決定する低水路と高水数の縦断線形の相対的關係が大きく寄与し、したがってそれらの流れが大きな角度を持って干渉し合う交差部付近においてもっとも特徴的な構造が見られることがわかっている。

しかしながら、従来の著者らの研究では、上記した特徴的構造を明確に把握することに主眼を置いたため、そのような構造がより顕著に表れるような形態で蛇行水路の幾何形状を設定した。その結果、実験で用いた蛇行水路の幾何的条件は、必ずしも実河川のそれを模倣したものとはなっていない。とりわ

け、蛇行水路の平面形状を決定する最も重要なパラメータといわれる蛇行度 s に関しては、日本の場合 1.000 から 1.040 程度に集中するという報告もあり³⁾、著者らが対象とした 1.093~1.571 という蛇行度はこれに比してかなり大きい。また、このうちもっとも小さい蛇行度となる $s=1.093$ における流れの構造については、実験結果が示されているものの⁴⁾、その詳細な検討はなされていない。これらのことは、上述した著者らの既報⁴⁾での成果の再検討も含めて、緩やかに蛇行する低水路を持つ複断面流れに関する研究の必要性を示唆している。

そこで本研究では、はじめに既報⁴⁾に示した FLDA による速度計測結果を用い、低水路蛇行度の変化が流れの構造に与える影響について検討した。ここでは特に、蛇行度の小さな水路における複断面流れと蛇行度が大きな場合との構造上の類似点・相違点を指摘するとともに、そのような相違をもたらす原因についても考察している。次に、日本における実河川の平面形状を検討し、代表的な河道の形状に基づき蛇行水路を設計し直し、新たな実験を行った。実験項目としては、流れの概要を把握するための表面および内部流況の可視化と、構造を規定する代表スケールを同定することを目的とした速度および水位変動計測を行った。

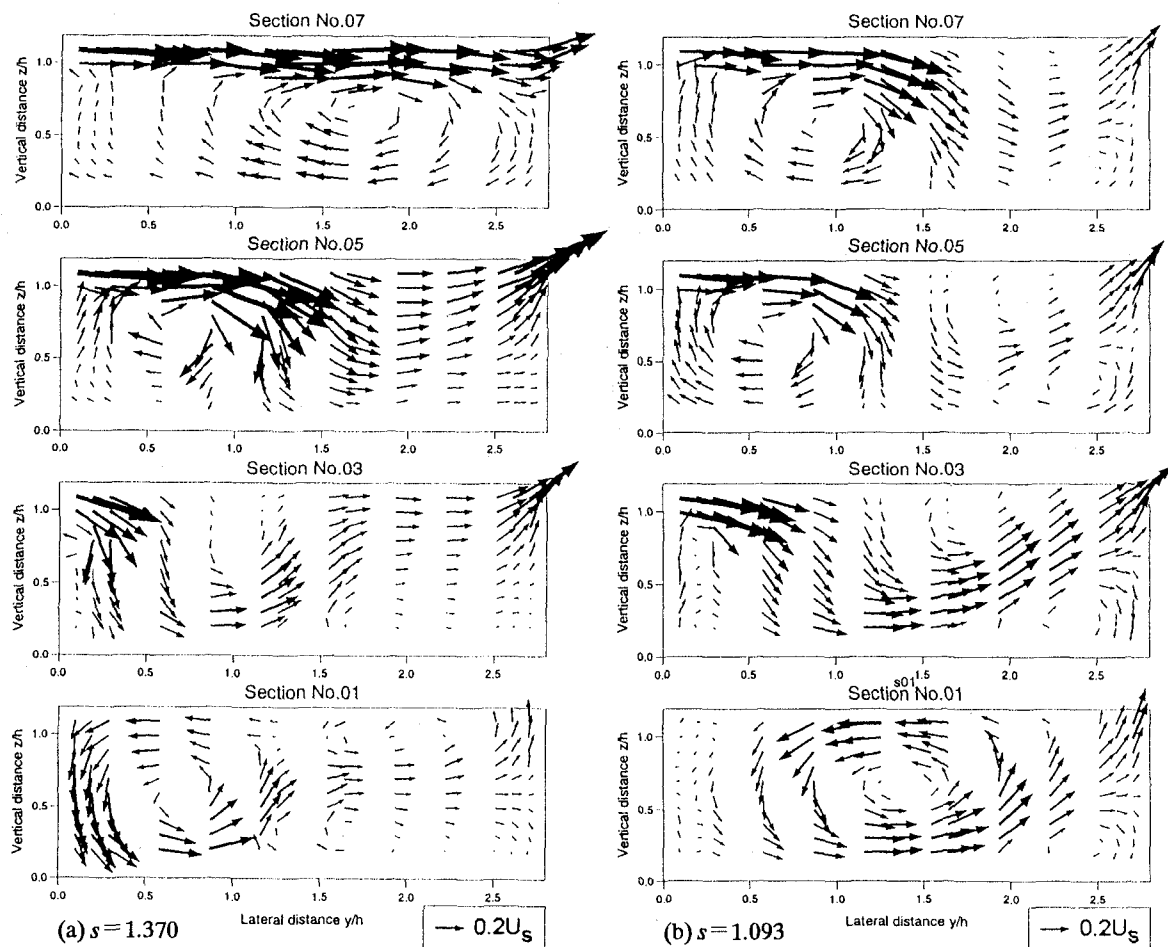


図-1 断面内二次流ベクトル($Dr=0.15$)

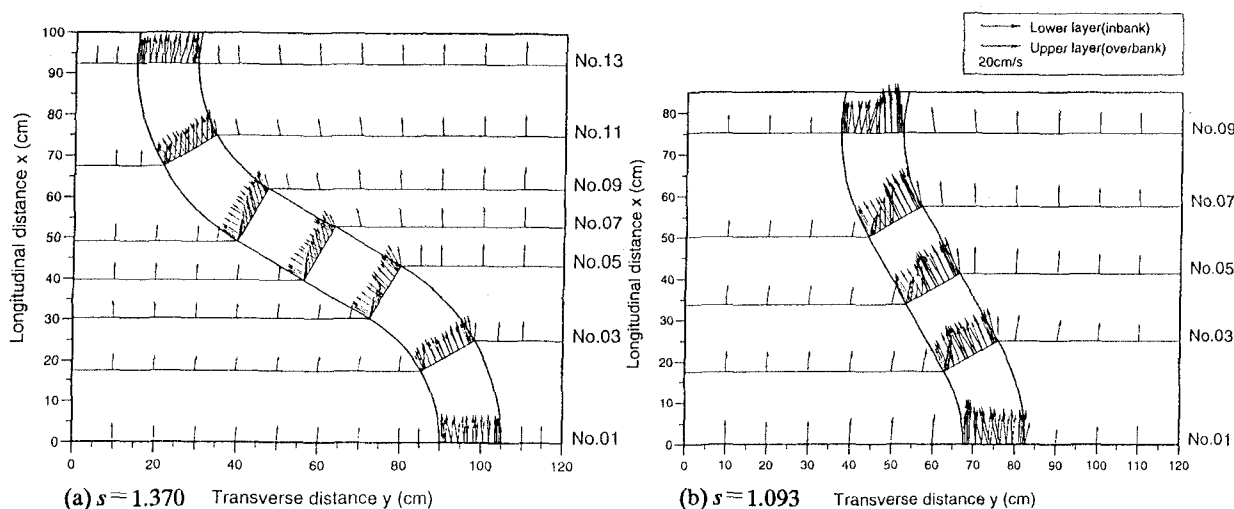


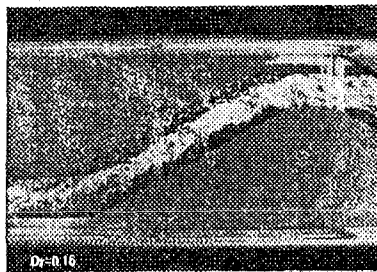
図-2 上・下層平均流速分布($Dr=0.15$)

2. 低水路蛇行度と流れの構造の関係

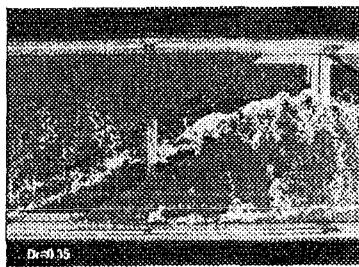
本章では、緩やかな蛇行低水路を持つ複断面流れの構造に関する検討の前段階として、従来内部構造に関する詳細な検討を行ってきた中程度の蛇行度の低水路を持つ複断面流れとの比較を、FLDA による速度計測結果に基づき行う。対象とした蛇行度は s

$=1.093$ および 1.370 である。水利条件は、従来の方法にならい相対水深 $Dr=(H-h)/H$ 、ここに H :低水路内水深、 h :高水数高さ、により整理されている。その他詳細な実験装置ならびに方法、実験条件に関しては他を参照されたい^{1),5)}。

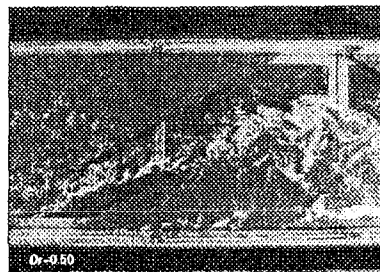
図-1 は、両水路における二次流ベクトルの計測結果を湾曲頂部(Sec. 1)から交差部の途中(Sec. 7)にか



Dr=0.15



Dr=0.35



Dr=0.50

写真-1 相対水深の増加に伴う水面流況の変化

けて示したものである。水理条件は $Dr=0.15$ である。これより、湾曲頂部において卓越する反時計回りの渦が続く断面では水面方向へ上昇するとともに消滅し、同時に上層流れの低水路への流れ込みに伴い左岸側壁近傍に時計回りの渦が形成され、下流側断面に向かうにつれ発達していく様子は共通に見て取れる。すなわち二次流の発生・発達および減衰の機構は、蛇行度によらず同一と見なすことができる。

一方、二次流の発達程度に着目した場合、 $s=1.370$ の場合には Sec. 7 に到達したときには発達中のセルによって低水路のほぼ全断面が占められている。これに対し $s=1.093$ では、同様の機構により発達したセルが Sec. 7 に至っても低水路左岸側の半分程度を占めるにすぎず、またその強さもセル中のベクトルの大きさから判定する限り若干小さい。このことは、上層流れが低水路内の下層流れと干渉する際に、蛇行度によってその及ぼす影響範囲が異なることを示している。同様のことは、上・下層界面においてせん断層が形成される様子にも見られる。

このような上・下層間における実際の干渉過程の差異と、それに伴う二次流・せん断層の形成結果の違いをもたらす原因としては、交差部における両層流れ間の交差角と、下層流れの上層流れに対する相対的卓越性をあげることができるが、そのことを示したのが図-2 である。前者に関しては、交差部において上・下層両流れが出会ったとき、その交差角が小さければ両者の融合までに要する時間および距離、すなわち相互干渉過程、は短くて済むことを指すが、しかしながら二次流やせん断層の起動力は劣ることとなる。また後者については、低水路の蛇行度が小さければ下層流れの疎通に対する抵抗が小さくなるためその他の条件が同じであれば勢いが増し、そのことが上層流れを下層流れに沿うような形で取り込みやすくする。このため前者の場合と同様に、相互干渉過程は短くて済む。なお、この両者の影響はともに、最終的にはパラメータとして低水路蛇行度に帰着させることができる。

なお、特筆すべき構造上の特徴として、二次流の発達程度と流体交換現象の関係をあげることができる。これは、図-1 および 2 を見ればわかるように、流体交換、特に低水路から高水数への乗り上げは、二次流セルが低水路全断面にわたって発達していない範囲で顕著に観察される。このことはすなわち、セルがそのような発達には到達しない $s=1.093$ の場

合には交差部全域にわたって乗り上げが見られることから、低水路蛇行度が緩やかなほど流体交換が活発に起こっていることを示している。

以上のことより、蛇行低水路を持つ複断面流れの構造上の特徴は、蛇行度が緩やかになった場合でもそれ以外と同様に、上層流れと下層流れの交差とそれに伴う相互干渉にその機構を求めることができる。しかし、その結果実際に表れる現象は、地形的特徴によりもたらされる両流れの相対的な卓越関係とそれらの干渉過程により、若干異なったものとなることが指摘される。

3. 緩やかに蛇行した低水路を持つ複断面流れの構造

前章の結果より、水路の平面形状が流れの構造を支配する重要な要素であることが知れ、平面形状と流れの構造との関係を検討する必要性が指摘される。また、一級河川には、直線化された河道内を低水路が緩やかに蛇行あるいは屈曲している河道形状が多く見られることから、低水路の蛇行度が小さな複断面流れの構造を検討する必要性も高い。本章では、これらの点を考慮して新たに設計し直した、緩やかに蛇行する低水路を持つ複断面水路を用い、そのでの流れについて検討を行う。

(1) 複断面水路の形状と実験条件

写真-1 に示すように、長さ 16m、幅 1m の直線水路内に高さ 50mm の木製高水数を設置し、低水路が緩やかに蛇行した複断面水路を作成した。低水路の平面形状の決定にあたっては、前章での検討結果に基づき、流れの構造の決定にも最も大きく寄与するパラメータとして屈曲角を選び、木津川等の主要な河川の屈曲角と砂州の移動限界を考慮して 30 度とした。また蛇行長が低水路幅の 10~12 倍程度を目標に、11.38 とした。この結果蛇行度は $s=1.11$ となり、福岡ら³⁾が示した日本における代表的な蛇行度 1.000~1.040 よりやや大きい。しかしながら Brice⁶⁾の分類によれば、福岡らが対象とした河川は大半が直線水路 $s<1.05$ となるため、本研究では緩蛇行水路 $1.05<s<1.30$ に分類されるこの値を採用した。なお、本実験に用いた水路の蛇行度と屈曲角は、Yalin⁷⁾が引用した実河川の屈曲角と蛇行度との関係を示すデータと一致しており、その妥当性が認

表-1 水理条件

水路幅 B(mm)	低水路幅 b(mm)	蛇行長 l(mm)	波長 λ (mm)	屈曲指数 $SI=l/\lambda$	路床勾配 I	相対水深 $Dr=(H-h)/H$	レイノルズ数 Re	フルード数 Fr
1000	300	3414	3068	1.11	1/1000	0~0.50	4100~17700	0.39~0.46

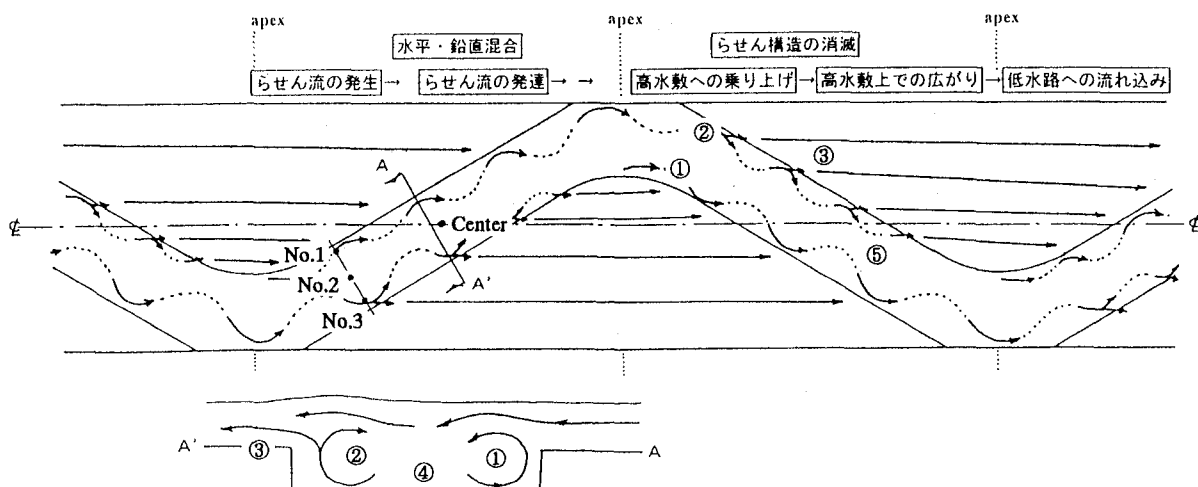


図-3 緩蛇行低水路を持つ複断面流れの構造の模式図

められた。さらに、低水路幅が狭い場合には対岸の影響があることから、なるべく広くするとともに、一級河川の計画断面形状のデータ⁸⁾をもとに低水路幅/河道幅比を0.3とした。

実験は、表-1に示す水理条件の下で、おが屑をトレーサとした水面流況の可視化、中立粒子トレーサ法による内部流況の可視化、電磁流速計による速度変動計測およびサーボ式水位計による水位変動計測を、全5波長の上流より3波長目の区間で行った。

(2) 流れの三次元構造

写真-1は、水面流況を鉛直上方より可視化した結果である。トレーサが集中する主流部に着目すると、低水路水深が増加する(Dr が大きくなる)につれて直線的に流れるようになり、流況の変化が見られる。これは蛇行度の大きな複断面流れと同様である。このような水深に依存した流況の特性は、従来の詳細な速度計測結果でも確認されている^{1), 5)}。

これらの表面流況に関する結果および中立粒子を用いた横断面内の流況観察を行った結果、①高水数上から低水路に流入する流れに誘引されて低水路湾曲頂部付近でらせん流が発生し、両者は混合しながららせん構造を発達させ左岸側に沿って流下する、②右岸の流体は、低水路中央へ輸送されるものと、わき上がる流れにより高水数上に広がるものがある、③高水数への乗り上げは間欠的に生ずる、④ Dr の小さな範囲では左岸側のらせん流と低水路への流入および右岸側の流出流のように独立した構造が存在する、⑤これら左右岸の独立した構造が干渉して水平渦を形成する、などが知れた。これらを模式的に示したものが図-3であり、図中の丸付番号は上述の観察結果に対応する。図より、湾曲頂部の下流部

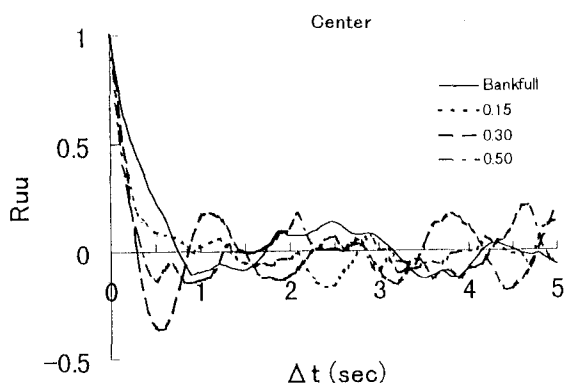


図-4 速度変動の自己相関係数

で形成されたらせん構造が高水数流れの流入によって加速・発達し、次の頂部で通常の単断面湾曲流(Bankfull流れ)で見られる遠心力による二次流とは逆回転を示し、その後、低水路からわき上がるように高水数に乗り上げながららせん構造が消滅して行く、という一連の過程が説明される。

なお、③の高水数への間欠的な乗り上げは、蛇行度の大きな場合に比してより明確に見られたことから、Ervin et al.⁹⁾により示された構造がより顕著に表れているものと考えられる。

(3) 水位変動特性と構造スケール

図-3に示したような構造が存在すれば、速度変動あるいは水面変動にも周期的な変化が見られると考え、図中に示した4点(No.1, 2, 3およびCenter)で速度および水位変動を計測し(サンプリング周波数10Hz),その自己相関係数を計算した。計測点No.1はらせん流の発生直後、No.3は発達したらせん流が

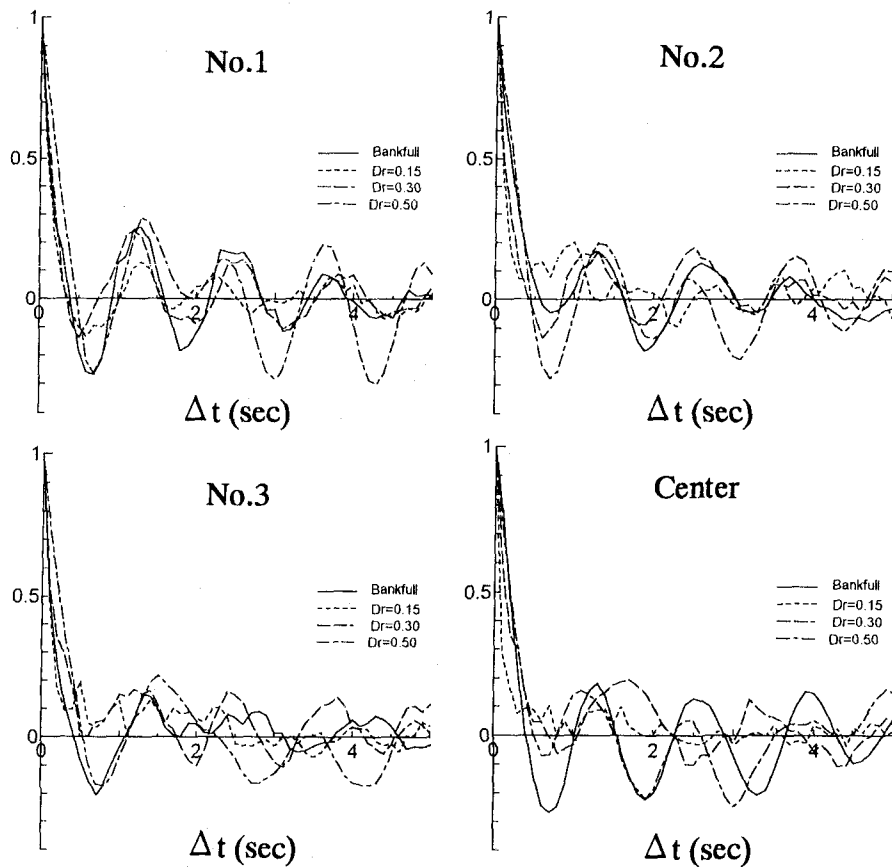


図-5 水位変動の自己相関係数（各計測点の位置は図-3 参照）

高水数に乗り上げる位置，No.2 はそれらの干渉する位置，Center は左右岸のらせん流と低水路への流れ込みが干渉する位置である．図-4 は，Center における速度の自己相関係数を示している．なお，速度および水位のいずれの結果でも変動の周期性を示す結果となったが，他の計測点での結果の比較より，水位の自己相関係数の方がより顕著な周期性が見られたため，以下では水位変動の計測結果を用いた検討を行う．水位変動に明確な周期性が表れるのは，速度変動が局所的な構造の影響を強く受けるのに対し，水位変動は水面に表れるボイルのようにマクロな構造の影響が圧力変化として表れるためと考えられる．詳細については，今後他の水路形状や水理条件の下で同様の計測を行い検討することとしたい．

図-5 は，4 点の水位変動の自己相関係数をまとめたものである．なお変動幅は例えば C 点の場合，Bankfull : 1.15mm, $Dr=0.15$: 0.85mm, $Dr=0.50$: 2.60mm である．図より，いずれのケースについても周期性が見られるが，前節に示した流れの構造に関する観察結果を考慮すると，このような周期性をもたらす構造は，単断面(Bankfull)時と複断面状態では異なるものと考えられる．図-3 に示した複断面状態におけるらせん流構造との関係で見ると，No.1 → Center → No.3 は，それぞれ，発生 → 発達 → 消滅過程に相当しており，構造の周期性とそのような構造に則した計測点間の関連が伺える．また，No.2 は左右両岸の構造が干渉する点であり，同様の周期で干

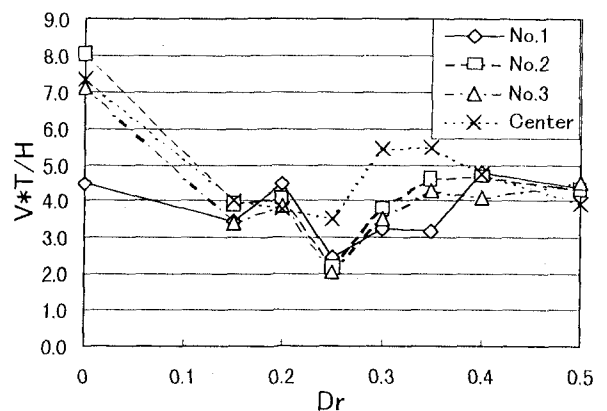


図-6 相対水深と無次元数 VT/H の関係

渉していることが分かる．一方，相対水深の増加に伴い，周期的 → 周期性が不明確 → 周期的という変化が見られる．流れの構造との関係から考察すると，このような周期性の変化の要因は，低水路蛇行の影響 → 混合による乱れ → 主流部の周期的挙動（流れ込み → 乗り上げ → 流れ込み）という過程で説明される．主流部の周期的挙動は， $Dr > 0.35$ の Center における計測結果が示しており， Dr が大きくなるにつれて流速が増大するため，周期が短くなっている．

次に，局所平均速度 V と自己相関係数の 2nd maximum で評価される変動周期 T の積で構造の長さスケールを評価した．なお，速度は，底面近傍と上下層の境界面の平均値を用いた．この構造スケ

ルを、低水路水深 H で無次元化して相対水深 Dr について整理すると図-6 のようである。 Dr が小さい範囲で VT/H は一旦減少する。このスケールの縮小は、 Dr の小さな範囲で流体混合が激しいことの影響と考えられる。その後、 VT/H は Dr の増加に伴って大きくなり、 $Dr > 0.35$ では5前後となっている。 VT/H がストローハル数 ($St = fd/u$) の逆数であることを考えると、 St は0.2程度となる。この値は、物体の後流域に発生する渦がもつ St と同程度であるが、これに類似する構造としては、湾曲頂部の高水数先端部とその下流側の高水数壁面に沿って発生・発達するらせん構造が推測される。すなわち、この部分のらせん構造、あるいはその主体となる渦は、高水数上の流れが高水数から低水路へと移る際の境界形状の急変に伴って発生するが、そのような発生機構が物体背後に発生する渦と類似していることが指摘できる。したがって、対象としている周期変動は、湾曲頂部の下流部で発生する渦がその構造の主体であり、それらの渦が流下方向に引き延ばされてらせん流を形成するものと考えられる。

なお、この結果は、 Dr が0.50以下の範囲での実験結果に基づくものであり、 Dr が大きな範囲での検証はされていない。しかしながら、実際の計画河道断面が $Dr = 0.50$ 程度以下に設定されていることを考慮すれば、この結論を一般的なものとして適用しても問題はないと考える。

4. おわりに

本研究によって得られた主な成果を列挙すると以下のようである。

- 1) 蛇行低水路を持つ複断面流れの構造上の特徴は、蛇行度が緩やかになった場合でも上層流れと下層流れの交差とそれに伴う相互干渉にその機構を求めることができる。しかし実際に表れる現象は、地形的特徴によりもたらされる両流れの相対的な卓越関係とそれらの干渉過程により、若干異なったものとなる。
- 2) 日本における実河川の平面形状を検討し、代表的な河道の形状に基づき緩やかな蛇行低水路を持つ複断面水路を設計し直し、新たな実験を行った。その結果、蛇行度の大きな複断面流れと同様の構造も観察されたが、低水路から高水数への乗り上げがより顕著に見られる、相対水深

の小さな範囲では低水路の左右岸に独立した構造が存在する、などの新たな特徴が指摘された。

- 3) 速度および水位変動を計測し自己相関係数を計算した。その結果、速度変動の自己相関係数よりも水位変動の自己相関係数により強い周期性が見られた。これは、速度変動が局所的な構造の影響を強く受けるのに対し、水位変動は圧力変化によるマクロな構造の影響を反映するためと考えられるが、詳細は今後の検討に待つ。
- 4) 水位変動の自己相関係数は、図-3に示したらせん流構造の存在を強くうかがわせた。またその示す周期性の変化より、相対水深に伴って卓越する流れの構造が変化することを示唆している。
- 5) 流れの構造の長さスケールを、局所平均速度 V と変動周期 T で評価した。その結果、対象としている周期変動は、湾曲頂部の下流部で発生する渦がその構造の主体であることが確認された。

参考文献

- 1) 武藤裕則・塩野耕二・今本博健・石垣泰輔：複断面蛇行開水路流れの3次元構造について、水工学論文集，第40巻，pp.711-716，1996。
- 2) 武藤裕則・石垣泰輔：水深および幾何条件が複断面開水路流れに及ぼす影響について、土木学会第52回年講概要集第2部，pp.610-611，1997。
- 3) 福岡捷二・高橋宏尚・加村大輔：複断面蛇行河道の洪水流に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ—洪水流航空写真を用いた分析—，水工学論文集，第41巻，pp.971-976，1997。
- 4) 武藤裕則・今本博健・石垣泰輔・塩野耕二：複断面蛇行開水路流れの水理特性について(2)，京都大学防災研究所年報，第39号B-2，pp.543-558，1996。
- 5) Muto, Y. : *Turbulent flow in two-stage meandering channels*, Ph.D. Thesis, Bradford University, 1997。
- 6) Brice, J.C. : *Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska, U.S. geological survey professional paper*, 282B, 1964。
- 7) Yalin, M.S. : *River mechanics*, Pergamon Press, 1992。
- 8) 石垣泰輔：複断面開水路流れの3次元構造に関する研究，京都大学学位論文，1993。
- 9) Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.H.J. and Lorena, M. : Factors affecting on conveyance in meandering compound flows, *J. Hydr. Eng.*, Vol.119, No.12, pp.1383-1399, 1993。

(1997. 9. 30 受付)