

直線・蛇行水路乱流の組織構造の特徴

Characteristic of coherent structure of turbulent flow in straight-meandering open channel

渡辺勝利*, 佐賀孝徳**, 大成博文***, 斎藤 隆****

by Katsutoshi WATANABE, Takanori SAGA, Hirofumi OHNARI and Takashi SAITOU

Characteristic of coherent structure of turbulent flow in straight-meandering open channel is investigated using flow visualization techniques and two-components laser-Doppler anemometry. Flow visualization indicates that characteristic coherent structures are formed near the bottom wall, side wall and water surface with channel meandering. It is clear that vortical structure on the bottom wall incline toward concave wall at the meandering portion. Velocity measurements indicate the presence of remarkable disproportion of the transverse profiles of mean velocity (U, W), turbulent intensity (u', w') and Reynolds stress ($-\overline{uw}$) at meandering portion. It seems that these coherent structures contribute to remarkable disproportion of the turbulent structure.

Keywords: coherent structure, straight-meandering open channel, flow visualization

1. はじめに

著者らはこれまでに蛇行水路乱流の組織構造に関する系統的な究明を進めてきた。その結果、この流れ場固有の組織構造の存在とそれらの時空間特性が詳察され、それらが蛇行水路乱流の瞬間2次流れの形成に重要な役割を果たしていることが明らかにされた^{1)~4)}。

蛇行水路乱流固有の組織構造はいずれも大規模なスケールを有するが、それらがいかなる過程を経て形成されるのかはいまだ不明であり、その究明は重要な課題として残されている。著者らは、その課題の解明には、遠心力効果を受けない素過程の流れ場にその効果のみを加え、そこに形成される組織構造の特徴を調べることが重要と考える。この視点にもとづいて、蛇行水路の上流に直線水路が連結された水路を使用し、その底壁近傍に形成された組織構造の特徴の一部が検討された⁵⁾。しかし、それは十分なものではなく、本流れ場に形成された組織構造の総合的な理解には、さらに、底壁近傍以外の組織構造の特性や流れ場の流速分布特性を明らかにすることが必要である。

そこで本研究では、以上を踏まえながら、直線・蛇行水路乱流に形成された組織構造の特徴、平均流特性および乱れの特性量が調べられ、両者の相互関係についても若干の考察がなされた。

* 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助手 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

** 正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (同上)

*** 正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (同上)

**** 正会員 工博 山口大学教授 社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

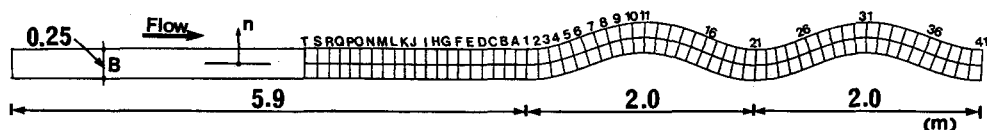


図-1 実験水路概略

2. 実験装置および方法

実験には、図-1に示されるような直線水路（長さ 5.9m，幅(B)25cm，深さ10cm）と蛇行水路（長さ4m，幅25cm，深さ10cm）を連結させた直線・蛇行水路が用いられた。なお，蛇行水路の線形には，1 波長2m，最大偏角 20° のsine-generated カーブが採用された。流速計測には，最大出力5W，ファイバー型の2成分レーザー流速計が用いられた。流れの可視化には，トレーサーに蛍光染料水溶液（比重 1.005），照明にブラックライトを使用した平面視法および実体視法，同トレーサーと照明にハロゲンスリットを用いた横断面視法がそれぞれ採用された。これらの可視化法の詳細については文献1）に詳述されているため省略する。レイノルズ数 ($Re=U_m \cdot H/\nu$ U_m : 断面平均流速， H : 水深， ν : 水の動粘性係数) は2700，水深は断面1において6.8cmに設定された。

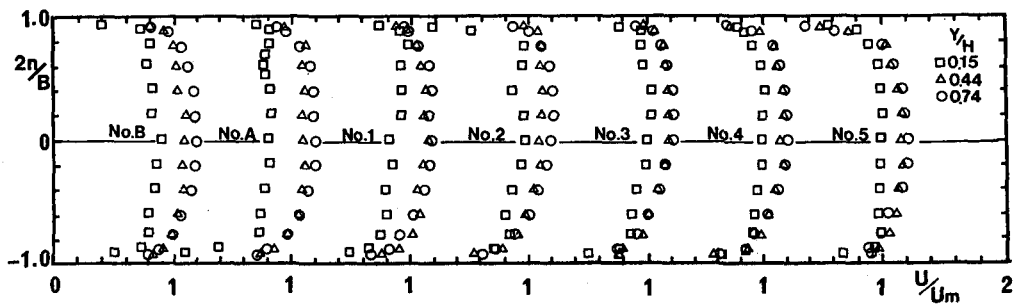
3. 実験結果および考察

(1) 流速分布

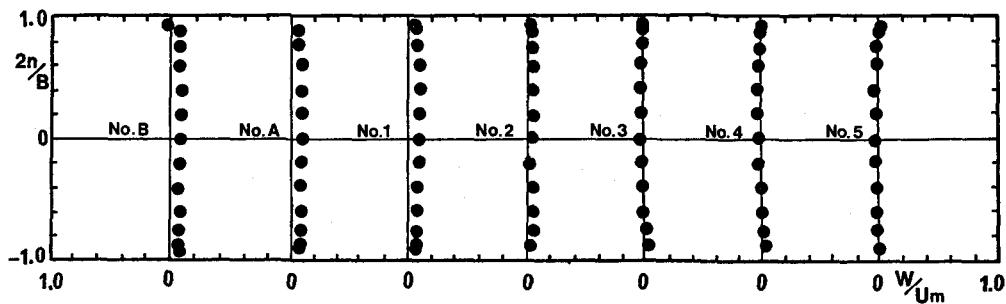
図-2には，断面Bから断面5における流速計測の結果が示されている。同図 (a)には，各断面の底壁付近 ($Y/H=0.15$)，半水深付近 ($Y/H=0.44$) および水面付近 ($Y/H=0.74$) における主流の横断方向分布が示されている。この図より，平均流速の横断方向分布が，水路の蛇行に伴って対称となる過程が明らかである。断面Bでは，いずれの高さにおいても水路中心線 ($2n/B=0$) に対して対称な分布形状を呈している。蛇行部との境界から10cm上流の断面Aでは，すでに底壁付近において凸岸側壁付近が高速化，凹岸側付近では低速化していることが明らかである。この平均流速の横断方向分布の非対称性は，蛇行部では断面1から3の分布形状が示すように，水面および半水深付近にまで及んでいる。断面4，5では，下流の湾曲の影響を受けるため凸岸側壁付近の低速化傾向が認められる。

同図 (b), (c), (d)には，それぞれ各断面の水面付近における横方向平均流速 ($\bar{w}$)，主流および横断方向流速の乱れ強度 (u'/u_τ , w'/u_τ) およびレイノルズ応力 ($-\overline{uw}/u_\tau^2$) の横断方向分布を示している。なお，横断方向流速は凸岸方向を正としている。同図 (b)から，断面Bから2までは正であり，すなわち凸岸方向の流れ成分がわずかに存在し，それ以後はきわめてわずかであるが凹岸方向の流れ成分の存在が示されている。次に同図(c)の乱れ強度の分布の特徴について述べる。 u' は，直線部，蛇行部とも両側壁付近で大きな値を示している。しかし，その分布は，直線部では水路中心線に対してほぼ対称であるが，蛇行部では非対称となることが明らかである。一方， w' の分布は，直線部では横断方向にほぼ一様であるが，蛇行部ではやや凹岸側が大きくなる傾向を示している。蛇行部において乱れ強度の分布が非対称となる傾向は，断面1から3において顕著であり，そこでの乱れ強度は凹岸側で大きく凸岸側で小さい。また，本実験の結果は，断面2の分布に併記された Moserら⁶⁾のDNSによる湾曲チャンネル流の計算結果と一致している。同図 (d)に示されたレイノルズ応力の分布も乱れ強度のそれと同様に，直線部では水路中心線に対してほぼ対称な形状を呈するが，蛇行部では凹岸側にその値が顕しく大きく，凸岸側で小さいという傾向が明瞭に認められる。また，本実験の結果は，図中に併記した Moserら⁶⁾の計算結果ともその傾向が一致している。

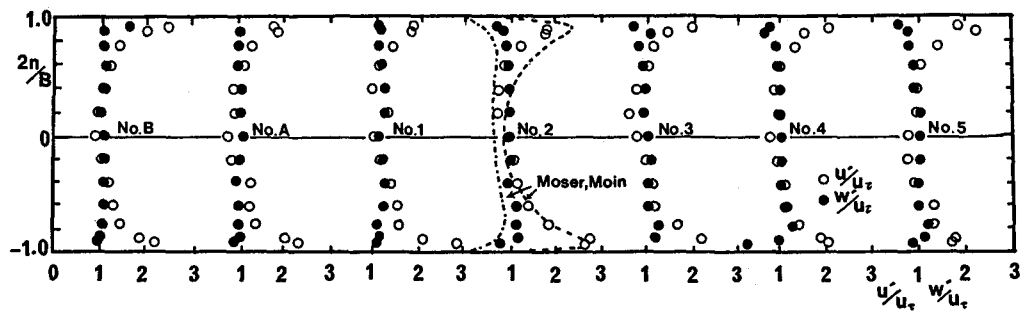
以上のように，直線から蛇行に水路線形が変化する流れ場においては，平均流速および乱れの統計量の横断方向分布に顕著な非対称性が出現することが明らかとなった。このような流れ場に形成された組織構造の



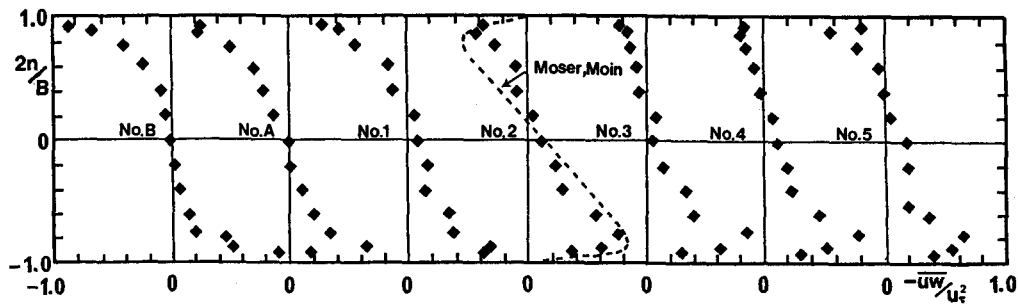
(a) 主流の横断方向分布



(b) 横断方向流速の横断方向分布 ($Y/H=0.74$)



(c) 乱れ強度 ($Y/H=0.74$)



(d) レイノルズ応力 ($Y/H=0.74$)

図-2 平均流速分布および乱れの統計量

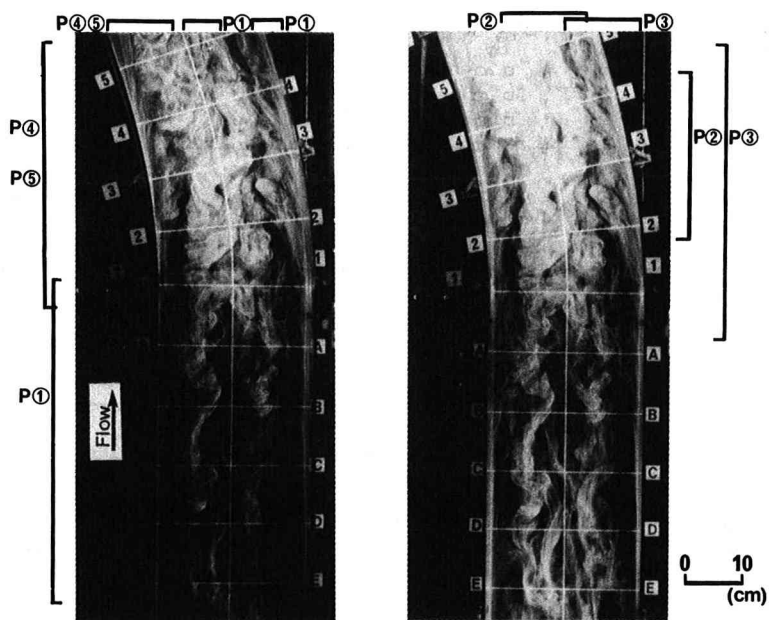


図-4 直線・蛇行水路乱流の組織構造の実体写真

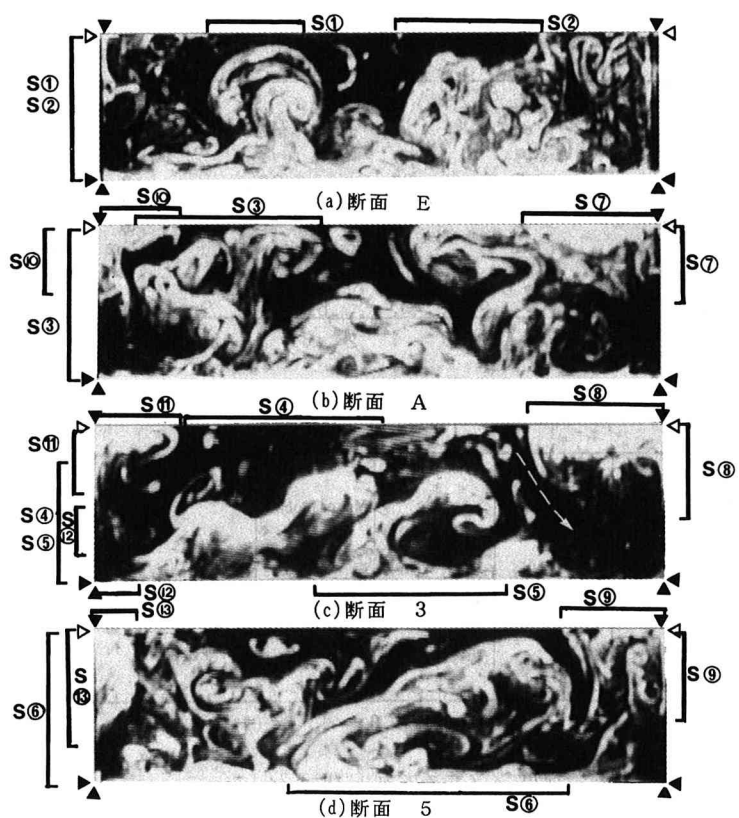
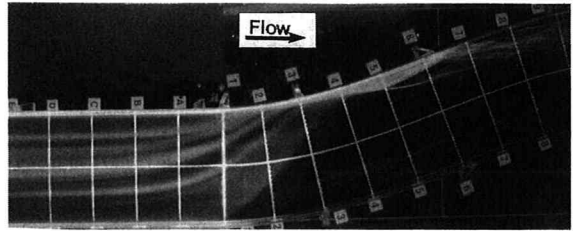


図-5 横断面視 (△: 水表面, ▲ 壁面) 0 5 (cm)

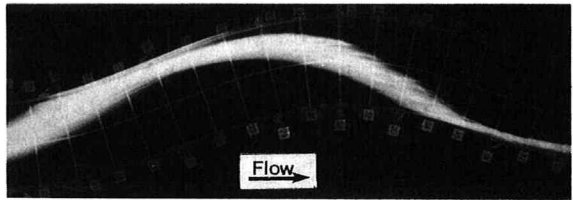
特徴を以下で考察する。

(2) 直線・蛇行水路乱流の組織構造

図-3 (a), (b)には、本水路乱流における直線部と蛇行部の境界領域の底壁面近傍に形成された組織構造と蛇行水路乱流の底壁面近傍に形成される「蛇行低速領域」²⁾の平面視がそれぞれ示されている。(b)において水路内の白く写された部分が「蛇行低速領域」であり、この特徴は、粘性底層内の流れが集中して形成され、その形成領域内では、相対的に低流速、低壁面せん断応力となることである。一方、(a)において白く示された部分は、注入されたトレーサーが滞留している領域を示している。その形象は凸岸方向に顕著に湾曲している。この組織構造と「蛇行低速領域」を比較すると凸岸方向に湾曲する類似性はあるが、その形成領域および曲率は前者の方が大きいことが明らかである。



(a) 直線・蛇行水路乱流の底壁近傍の組織構造



(b) 蛇行低速領域

図-3 直線・蛇行水路乱流の壁面近傍の組織構造と「蛇行低速領域」の比較

図-4には、直線・蛇行水路乱流に形成された組織構造の実体写真の一例が示されている。流れ方向は、下から上である。この特徴は、第1に直線部に2列の渦構造の連なる領域が形成されていることである(P①)。第2は、蛇行部を通過する渦構造の変形が引き起こされることである(P②)。第3は、水表面付近に、側壁に沿う流れ方向に長い組織構造が形成されていることである(P③、④)。第4は、凸岸側壁に太いstreakが形成されていることである(P⑤)。以下、上述の特徴に関して詳述する。その際、内部構造の特徴を考察するために、断面A、E、3、および5における横断面視の結果の一例を図5に示している。

まず、直線部にはP①に示されるように、渦構造が長く流下方向に連なっていることが認められる。この渦構造の連なりを詳しく観察すると、それは複数の小規模な渦構造によって構成されている。渦構造の横幅は水深程度であり、流れ方向には水深の3倍程度のスケールを有している。また、両者の間隔はほぼ水深の2倍程度である。この直線部における渦構造に対応すると考えられる横断面形象が、図5-(a)のS①およびS②また同図(b)のS③に示されている。これより、水深スケールを有する渦構造が複数の渦構造から構成されることがより一層明瞭である。

次に、直線部において発達した大規模渦構造が、蛇行部まで流下した様子が断面1から3のP②に認められる。この大規模渦構造は複数の渦構造が複雑に絡み合っており、その先端部は水表面まで達している。このような大規模渦構造は、それが蛇行部を通過する際には以下の様な変形を受けることが連続撮影より明らかとなった。すなわち、その渦構造は先端部へいくほど凹岸方向への傾斜が顕著になることである。この渦構造の傾斜した様子を横断面形象から考察すると、図-5(c)のS④およびS⑤のような形象である。すなわち、直線部の渦構造の横断面形象と異なり渦対の凹岸側が大きく、また、凹岸の水表面方向に顕著に傾斜している。同図中の矢印は、この渦構造と後述の水表面付近の組織構造との相互作用によって誘起された瞬間2次流れの方向を示す。このような凹岸方向へ傾斜した渦構造は、水路中央部から凹岸部へ高速流体を輸送することに寄与しているように思われる。さらに、傾斜した渦構造は蛇行部を流下すると複合・合体し(d)のS⑥のように、より横方向に大規模な傾斜した渦構造となることが観察された。

直線部の断面Aから下流の両側壁の水表面付近には、P③、④に示されるような、側壁に沿う流れ方向に長い渦構造が形成されている。蛇行水路乱流においても、両側壁の水表面付近には、流れ方向の大規模なスケールを有し、水路横方向に顕著に発達する「水平渦」⁴⁾が形成される。水平渦と本水路の水表面付近の組

組織構造には、流れ方向の大規模なスケールを有するという類似性が認められるが、その横方向への発達には蛇行水路乱流のそれに比して緩やかであるように思われる。この組織構造に対応すると思われる横断面形象の一例が、図-5の(b)のS⑦、S⑩および(c)のS⑧、S⑪さらに、(d)のS⑨に示されている。蛇行部の凹岸側では、この水表面付近に形成された組織構造と上述の凹岸方向に傾斜した渦構造が接近することが観察された。この両者の接近により相互作用が顕著になり、上述のような瞬間2次流れが誘起されるものと思われる。また、凹岸部では凸岸部に比して乱れ強度やレイノルズ応力が大きいことが示されたが、その原因とこれらの組織構造との関係を明らかにすることが重要である。

最後に、P⑤には凸岸側壁の隅角からその側壁に沿う太いstreakの存在が認められる。これは断面1から5の側壁にわたって形成され、断面5では水表面に到達しているようである。図-5(c)のS⑫および(d)S⑬にはこの渦構造に対応すると思われる横断面形象が示されている。これより、この組織構造が流下するに伴い、その形成位置が水表面方向に移動し、そのスケールが増大していることが明らかである。以上の様な特徴は、蛇行水路乱流の凸岸壁に沿って形成される「大規模凸岸渦」¹⁾に類似しているように思われる。

4. おわりに

直線・蛇行水路乱流の組織構造と平均流特性、乱れの特性量について考察がなされた。その結果、直線・蛇行水路乱流には、蛇行水路乱流の素過程としてのいくつかの組織構造が形成されていることが明らかにされた。また、平均流速および乱れの統計量の横断方向分布には、顕著な不均一性が出現することが示された。さらに、両者の相互関係が考察され、凹岸近傍に乱れ強度、レイノルズ応力の最大値が生ずる原因に、凹岸方向へ顕著に傾斜した渦構造と凹岸側の水表面付近に形成された組織構造の相互作用が重要であることが示唆された。

今後、本水路に形成されたそれぞれの組織構造に関するより詳細な考察が必要である。

参考文献

- 1) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 蛇行流の組織構造に関する研究, 第20回乱流シンポジウム講演論文集, pp302~pp307, 1988.
- 2) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 蛇行流の平均流速分布特性と組織構造, 第21回乱流シンポジウム講演論文集, pp33~pp37, 1989.
- 3) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 水路アスペクト比の変化に伴う蛇行水路乱流の組織構造の特徴, 第22回乱流シンポジウム講演論文集, pp61~pp65, 1990.
- 4) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 蛇行水路乱流の水表面付近に形成された組織構造の時空間特性, 第23回乱流シンポジウム講演論文集, pp271~pp275, 1991.
- 5) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 直線・蛇行水路の流れに形成される組織構造の特徴, 土木学会第47回年次講演会講演概要集 第2部, pp262-263.
- 6) Moser, R.D., Moin, P.: The effects of curvature in wall-bounded turbulent flows, J. Fluid Mech., Vol. 175, pp479-510.