

単断面蛇行流の三次元流況
Three Dimensional Structures of Turbulent Meandering Flow

徳山高専 正員 渡辺 勝利
徳山高専 正員 大成 博文
徳山高専 正員 佐賀 孝徳
山口大学 正員 斎藤 隆

1. はじめに

緩流河道では砂州の形成とは無関係の河道蛇行現象が顕著に存在し、その河道流水の詳細な三次元流況の解明が、河川工学的に極めて重要であるとされている。

すでに、単断面蛇行流の三次元流況に関する本格的観察が木下¹⁾によって試みられている。彼は、水面、水中、水底のそれぞれの可視化に三つトレーサーと実体視法を適用し、いくつかの重要な知見を得ている。なかでも、(1)河岸に生じる水平渦、(2)底面における粒子のレーン変更、(3)渦域と主流の位相のずれ、(4)二次流の構造的性などに関する観察結果が重要と思われる。

本研究では、これらの知見を踏まえながら、蛇行流の三次元流況をより詳細に、実体視法、断面視法などを用いて解明することが試みられた。

2. 実験水路および流れの可視化法

実験には、図-1示されるような長さ 8 m、幅 25 cm、高さ 10 cm の総アクリル製蛇行水路が用いられた。蛇行線形には1波長 200 cm、最大偏角 20度の sine-generated curve が採用された。水路の勾配 $S(1/1000)$ 、水深 $H(6.8\text{cm})$ 、レイノルズ数 $Re(=Um \cdot H/\nu)(2700)$ などの水理条件が設定された。ここで、無次元数 $B \cdot S/H$ は(ここに、 B : 水路幅) 3.7×10^{-3} であり、それは木下¹⁾の実験値のほぼ半数に相当する。

流れの可視化には、図-2に示されるような3つの方法が、流れが十分発達したと思われる領域(図-1の21~41地点)において適用された。

まず、蛍光染料水溶液(比重 1.005)をトレーサーとして、その平面実体視が図-2に示されるような方法で行われた。カメラから水路床までの距離は 75cm、カメラ間距離は 20cm である。この実体視は、カメラを固定して2地点(No. 27, 31)で行われ、さらにその後には、流れとともにカメラを移動させながら撮影が行われた。これらの方法によって、蛇行流における組織運動の3次元構造に関する

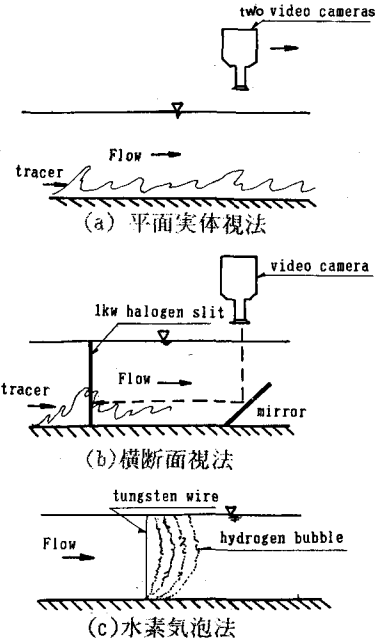


図-2 流れの可視化法

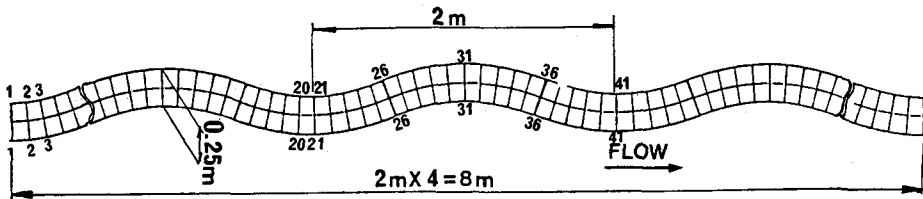


図-1 実験水路概要

る静および動実体画像データが大量に収録された。なお、照明にはブラックライト（40ワット，10本）が使用された。次に，地点 21 から 41 までの 10 断面において，図-2 (b) に示されるような横断面可視化が行われた。この場合もトレーサーに蛍光染料が用られ，断面視用のスリットには 1 KW のハロゲンランプが使用された。撮影は，スリット面の組織構造に影響しないと思われる位置にまで下げられた小型の鏡（8cm×8cm，下流方向に 45 度傾斜）を通して行われた。本実験法の詳細は文献 2) に詳しくあり，ここでは省略する。また，図-2 (c) には，水素気泡法の概略が示されている。陰極線は水深方向に張られ，それが横および流れ方向に動かされた。気泡はパルスで 0.1 秒毎に発生させられ，それが連続的にテレビカメラによって撮影された。各点の平均流速は，この瞬間的な気泡間隔を読み取ってその平均値から求められた。流れ方向の流速分布を計測するのに，水素気泡法以外の方法が採用されなかった理由は，本流れ場が極めて複雑な流向を持つために，通常の検出部を持つ流速計では常に流れの方向に沿って検出部を導入することが非常に難しいからである。

3. 平均流速分布

図-2 (c) に示された方法によって各点の平均流速が求められた。サンプリング間隔は 0.1 秒で，読み取り個数は 100 とされた。図-3 に横断面方向の平均流速分布特性が水深方向の 3 断面 ($z/H=0.2, 0.5, 0.8$) において比較されている。まず，地点 21 の「曲頂部」¹⁾ では，水路中央から右岸側で速く，逆に左岸側で壁に近づくほど特に遅い極端な横断面方向不均一性が存在している。しかも，左岸側のある領域では，流れの方向の流速の遅速が通常の場合と逆転して，壁近くで速く，水表面近くで遅い結果を示している。次に地点 26 の「変曲部」²⁾ では，曲頂部と比べて横断面方向流速分布が比較的平坦である。しかし，左岸近くでは，流速が減少し，しかも水深方向に底壁近くで速く，水表面付近で遅いという曲頂部左岸側の流況と同様の流れが形成されている。これがさらに流下して地点 31 になると，丁度，地点 21 と左右が逆の横断面方向特性を示している。この逆転は地点 21 と 36 においても同様に存在している。以上をまとめると，蛇行流は極めて顕著な横断面方向不均一性が生じ，その高速部では水深方向にあまり速度差がなく，逆に低速部では，水深方向に速度の遅速が逆転する現象が出現して，蛇行流内に極めて複雑な 3 次元流況が存在していることが示唆される。

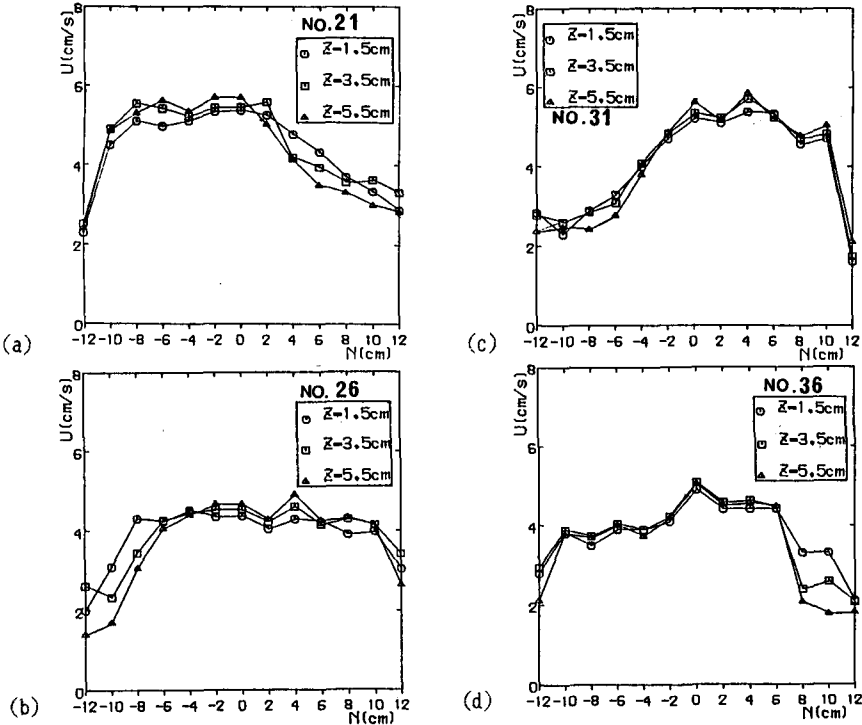


図-3 横断面方向の平均流速分布

4. 蛇行流の組織構造

(1) 平面実体視の結果

図-4には、平面実体視の一例が示されている。流れ方向は上から下であり、撮影地点はNo.30付近である。これらを実体視すると、丁度曲頂部左岸を通過する大規模な水平渦（矢印）の形成が明らかである。よく見るとこの水平渦は、その付け根付近（黒矢印）が壁近くにあり、それが流れ方向に傾斜してその先端は水表面付近にあることが明かである。一方、水路中央部と右岸付近では、底面付近の様子が可視化されており、左岸側とは実体視上の高低さにおいて顕著な差を示している。中央部の黒く映っている部分が最も高速の部分と思われ、この部分にはトレーサーが補給されないことから（あるいはされてもすぐに流れ去る）底面の粘性底層の一部にトレーサーが滞留して可視化されるのみとなっている。また、右岸付近には壁近くから巻き上げられたトレーサーも観察される。さらに、この実体視による動画像が2台のテレビの前に置かれた実体鏡から観察され、蛇行流のダイナミックな内部構造の存在が明らかとなった。

(2) 底面付近の流況

図-5には、上述の平面視後底面近くに滞留したトレーサーが明瞭に映し出されている。また、同図(b)には、トレーサーが滞留した部分のスケッチが示されている。

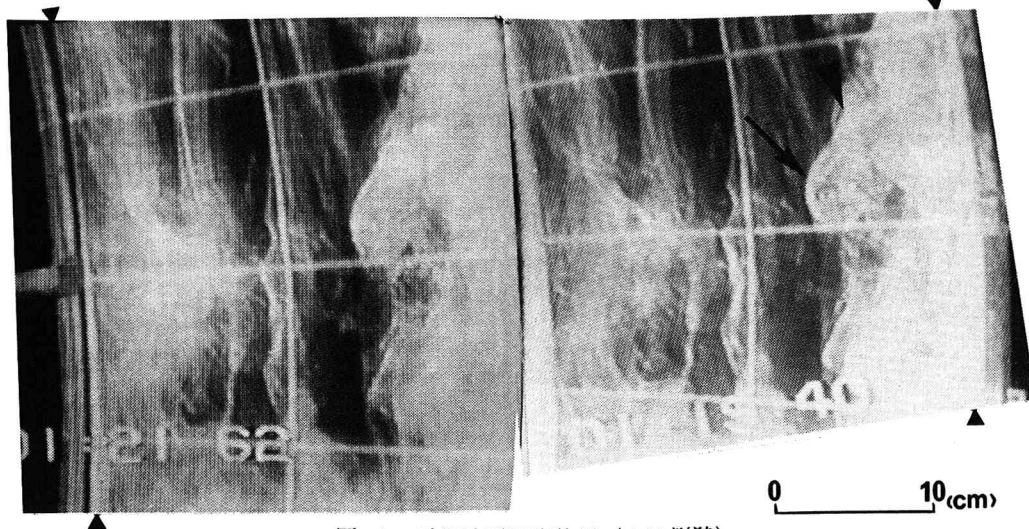


図-4 蛇行流平面実体視（▲は側壁）

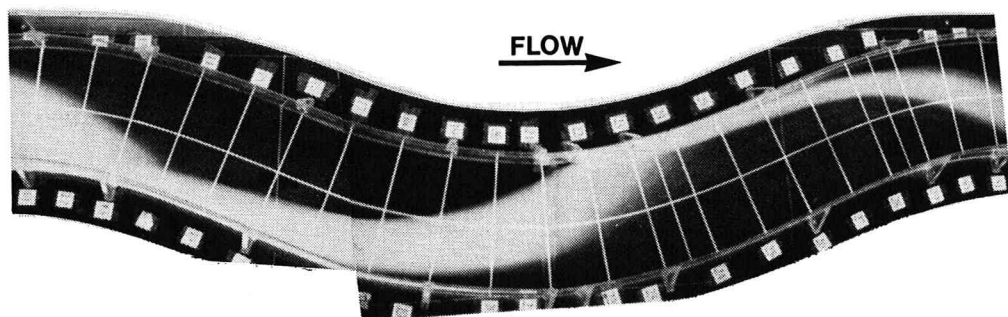
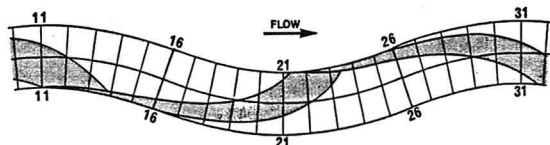


図-5(a) 蛍光ポスターカラー注入後の底面付近の形象



(b) 図-5(a)のスケッチ

には、トレーサーが滞留しこの場合、トレーサーには蛍光ポスターカラーが使用されているが、蛍光染料と比べてその比重が大きかったために底面付近に滞留したように思われる。

さて、この底面付近の形象において注目すべき点の第1は、その位相と蛇行線形の位相がまったく逆となっていることである。第2は、この形象が底面付近に形成されたさまざまな2次流れの反映の結果と考がえられることである。第3は、滑面平坦床上に形成された形象であるにもかかわらず、その輪郭が移動床上に形成された砂州の輪郭³⁾とよく類似していることである。第4は、木下¹⁾が指摘した底面での転動粒子の「レーン変更」がこの形象内で発生していると思われることである。これらは、いずれも底面付近の組織構造や

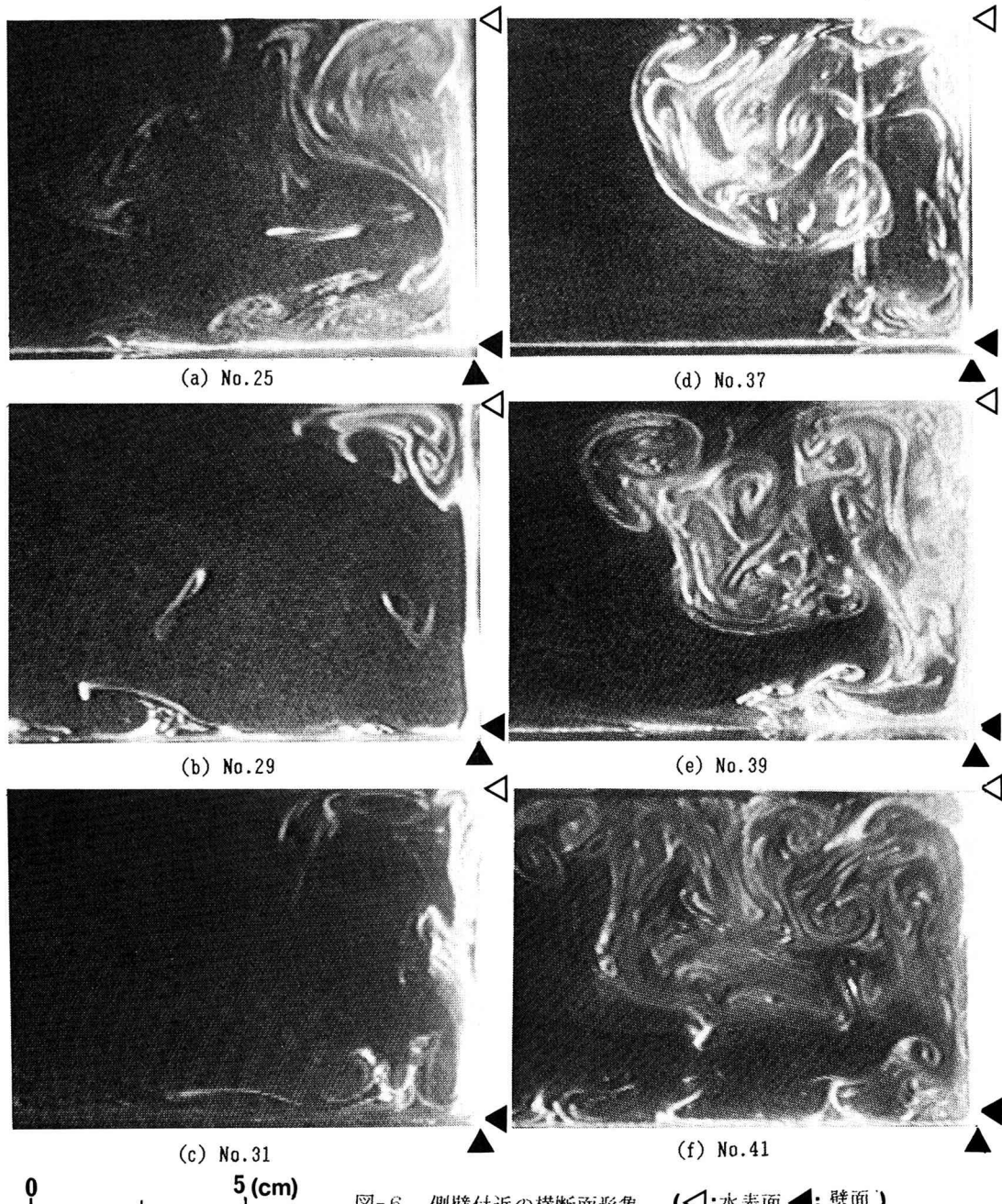


図-6 側壁付近の横断面形象 (◁; 水面 ◀; 側壁)

2次流の構造と深く関係していると思われる。

(3)横断面視の結果

図-6 には、6つの右岸側断面における横断面視の結果がそれぞれ示されている。これらの画像は、長時間撮影された画像データのなかから抽出された一例でしかなく、その意味から1枚の写真のみで非常に複雑な組織構造の横断面形象を説明することは不可能に近いことである。そこで、可能なかぎりビデオの連続画像の観察結果を加えながら、以下の考察を行う。

地点25断面：主流がこれから右岸凸部に衝突しようとする地点である。この場合、右岸側水表面付近には、たくさんの渦が形成されており、その集団自体が間欠的挙動を示している。また、底壁近くでは右岸側から水路中央部に向かう2次流れが形成されている。

地点29断面：ここでは比較的高速の流れが形成されていることから、トレーサーが注入されてもすぐに流下してしまう。底壁近くの2次流れの方向は、全断面と反対の右岸に向かう方向である。しかし、この挙動は比較的ゆっくりであり底壁にはトレーサーが比較的厚く滞留している。

地点31断面：この断面においてもトレーサーが注入されるとすぐに流下し、スリット断面にはなかなか反映されない。ここでの2次流れの特徴は、底壁付近であり、前断面より比較的速く右岸側に向かい、さらには右岸の隅角を通過して右岸側壁を逆上していることである。ただし、測壁を逆上する流れは、底壁から1/3水深程度のところで留まっている。また、実河川においては、隅角部での洗掘がこの2次流れの形成によって形成されるものと思われる。

地点37断面：地点31,35右岸測壁付近に形成された渦域の領域が徐々に増し、この地点ではさらに大きくなっている。しかも、この大規模な渦域は間欠的に発生しているようである。また、底面付近のトレーサーはあまり動かず、顕著な2次流れの形成には至っていない。

地点39断面：大規模な渦域はさらに発達し、間欠的である。前断面と同様に2次流れに関する特徴は、底壁面付近において横方向に流体塊が侵入していることである。この流体塊が侵入する挙動は、反時計回り方向に大規模な（水深規模の）回転運動が形成されていることを示唆しているようである。ところが、ここで重要なことは、水表面付近の大規模な渦域と隅角部付近に形成された渦域とがスケールのかなり異なっていることである。地点33から37では、隅角部付近にトレーサーが滞留する領域が増えており、それらが図-5(b)に示されたような水路床付近に滞留したトレーサーの形象や位置とほぼ対応しているように思われる。

地点41断面：大規模な渦域の発生周期が、テレビ画像から読み取られ、図-7に示されるような頻度分布が得られた。これより、最頻性を与える周期は1.5秒前後であることが明らかである。また、この大規模な渦域は、たくさんの比較的小さい渦構造の複合によって構成されている。底壁面付近の2次流れは、右岸から水路中央に向かって形成されている。

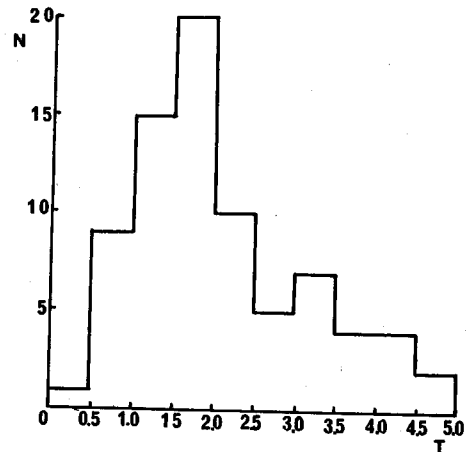


図-7 凹岸付近の水平渦の発生周期

5. まとめ

単断面蛇行流において、その平均流速分布特性や平面実体視、横断面視などの可視化の結果から、次のような組織構造に関する特性や重要な示唆が得られた。今後、これらの結果を踏まえながらより系統的な究明が必要である。

- (1) 水表面付近には大規模な水平渦が形成され、それは多数の比較的小規模の渦の複合から成り立っている。
- (2) 水表面付近の大規模な水平渦と底壁面2次流れや組織構造などの特性は大きく異なっている。
- (3) 水平渦の形成領域では、平均流速の横断勾配が顕著である。
- (4) 水平渦は、渦管が流れ方向に傾斜しながら、右岸側では反時計回りに回転して流下した時の水表面付近に形成される挙動のように思われる。
- (5) 底壁面に滞留したトレーサーの位相が蛇行線形と反対の位相を示した。水路床付近においても横方向の平均流速分布は不均一であり、それには蛇行流特有の2次流れの機構が影響しているように思われる。また、滞留したトレーサーの形象と壁近くの2次流れおよび組織構造との対応が明らかにされた。
- (6) 滑面平坦床上に滞留したトレーサーの形象が移動床上の砂州の輪郭とよく類似したことから、蛇行河道自身が砂州を形成させやすい流れの構造を保持している可能性を示唆している。

最後に、本研究に対する重要な示唆を与えて下さった木下良作先生に深く感謝いたします。また、実験およびデータ整理に多大な労力と時間を費やして下さいった本校卒業研究生原田敏行君、本校研究生松村謙造君に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 木下良作；緩流部河道の水流蛇行相似に関する検討業務報告書，石狩川開発建設部，1981。
- 2) 大成博文，佐賀孝徳，斎藤隆；開水路乱流内層の縦渦構造，土木学会論文集，第363号/II-4，pp.135～144，1985。
- 3) 福岡捷二，山坂昌成，竹内聡，古屋晃，永納栄一；湾曲流路の側岸侵食，第27回水理講演会論文集，pp 721～726，1983。