

複断面蛇行流の秩序構造に関する研究

—直線複断面蛇行流路—

渡辺 勝利*・大成 博文*・佐賀 孝徳*・斎藤 隆**

The Coherent Structure of The Turbulent Meandering Flow with Flood Plain

Katsutoshi WATANABE, Hirofumi OHNARI
Takanori SAGA and Takashi SAITOU

Abstract

The coherent structure of the turbulent meandering flow with flood plain are investigated using a novel visualization technique that utilizes fluorescent dye excited by a sheet of halogen light and black lamp.

Some of new aspects of reversional spiral flow in corner region, especially with respect to pattern of existence, structure, behavior and formation are inferred from this experiment. The results indicate that a lot of various coherent structures are formed in the turbulent meandering flow with flood plain. The coherent structures are characterized by the interaction between main flow and the local flow influenced by some boundary conditions of the turbulent meandering flow with flood plain.

1. 緒論

わが国の沖積河川の大半は複断面蛇行線形を有する河川であり、これらの河川の洪水時の流況は非常に複雑であることが知られている。この流れは、防災対策上、非常に重要な流れであり水工学的見地から早急に解明されねばならない課題を多く有している。

すでに、複断面蛇行流に関する研究は、木下^{1)~3)}によって本格的に開始されている。木下は、天塩川、石狩川等の大規模河川における河道改修事業のための現地調査を行うとともに、防災上有利な河道線形の選定のため、さまざまな流路形状を持つ複断面蛇行流に関する実験を行い、同時にいくつかの重要な課題の所在を明らかにした^{1)~2)}。また、最近、森ら⁴⁾は、数値解析の立場から、複断面蛇行流の三次元的流況を計算し、木下

の実験結果²⁾とかなりの一致を示す結果を明らかにしている。

本研究は、これらの優れた研究成果に啓示されたものであり、複断面蛇行流という極めて複雑な境界条件を有する壁乱流場において、その秩序構造に関する若干の解明が流体力学的見地から試みられた。本実験には、水表面直接注入法および横断面視法の2つの可視化法が用いられた。その結果、複断面蛇行流内の秩序構造に関するいくつかの重要な解明がなされた。

2. 実験装置および実験方法

実験には、図—1に示されるような長さ10m、幅60cmの開水路の中に、長さ9mの蛇行低水路が設置された複断面蛇行水路模型が使用された。本模型水路では、実河川の堤防に相当する水路側壁が直線とされたことから、本水路を「直線複断面蛇行水路」と呼ぶことにした。蛇行模型には厚さ20mmの亚克力樹脂板が使用され、蛇行形には1蛇行波長200cm、最大偏角20度の条

*徳山工業高等専門学校土木建築工学科

**山口大学工学部建設工学科

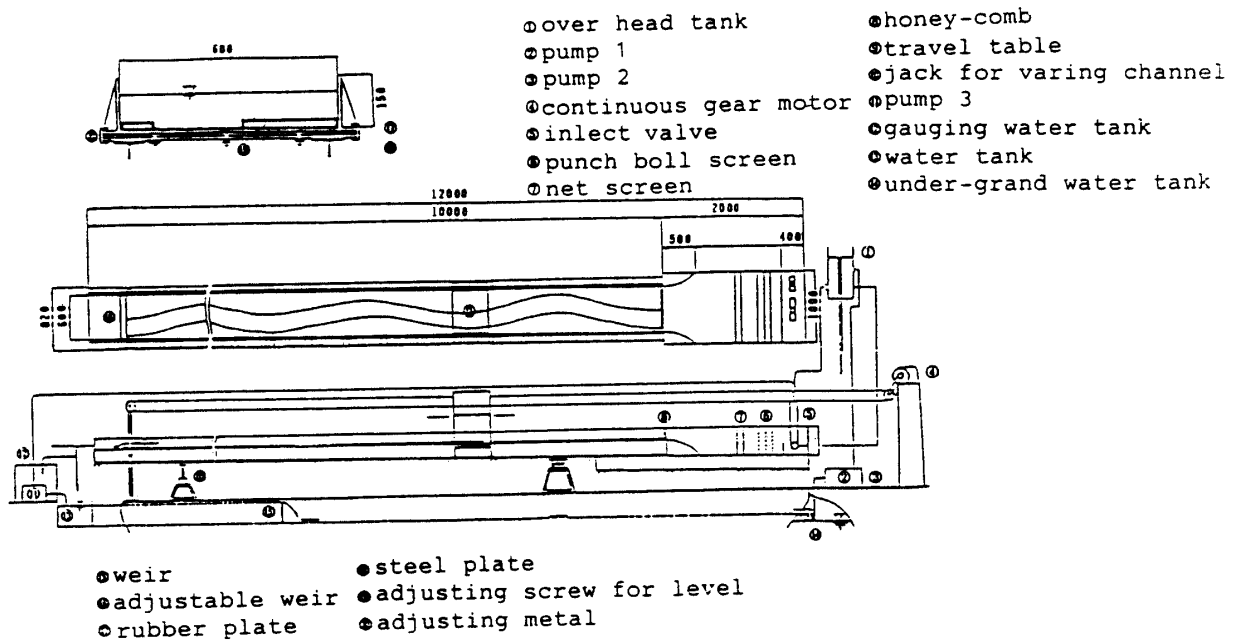


Fig.1 Experimental apparatus

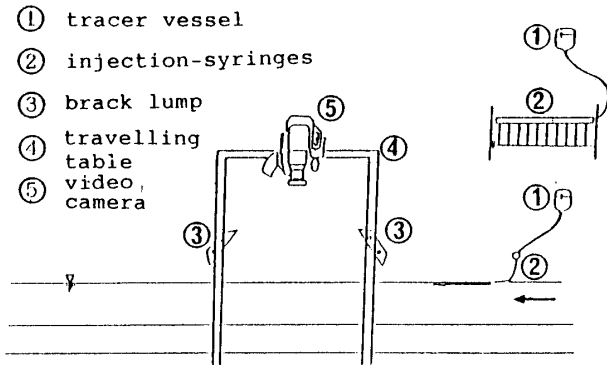


Fig.2 Apparatus of Visualizing the flow pattern at Water Surface

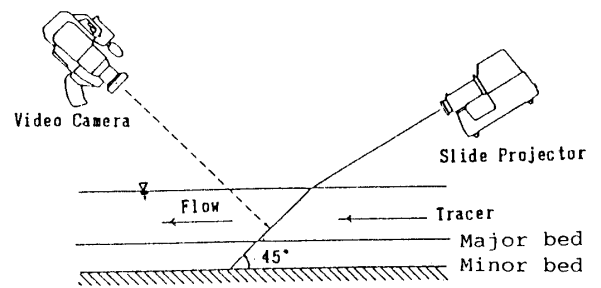


Fig.3 Method of Visualizing the flow pattern in Cross Section

件の sine-generated 曲線が用いられた。なお、低水路幅 b は 25cm, 高水敷高さ h は 2 cm であり, $b/B=0.42$, $h/H=0.53, 0.33$ である。(ただし, B は水路全幅, H は低水路水深である。)

可視化実験には、水表面および横断面可視化の 2 つが採用された。それらの手法の概要が、図-2 および図-3 に示されている。トレーサーには、蛍光染料(フルオレセインナトリウム) 水溶液 (比重 1.005) が用いられた。水表面可視化では、10本の細長い注射針を取り付けた注入器から、水表面付近にトレーサーが静かに注入され、それが流下とともに水表面で一様になるような工夫がなされた。照明にはブラックライト (50

W, 20本) が用いられ、これによって、鮮明に浮かび上がった水表面可視化の形象が、移動台車に取り付けられたビデオカメラにより連続的に撮影された。横断面流況の可視化には、ハロゲンランプで作られたスリット面が、壁面に対し上流方向に 45度の傾きをもって水表面上から挿入され、それに垂直な方向からビデオカメラ撮影がなされた。

3. 実験結果

3.1 水表面流況

図-4 に、水表面流況を表す可視化写真が示されている。この微小時間間隔を有する 2 枚の組写真を実体

視すると、カメロン効果によって流速の大小に応じた高低差が観察され、複断面蛇行流における複雑な水表面流況が容易に明かとなり得る。

これより、最も速い主流線が流れ方向に向かって中央よりやや左岸側に位置し、逆に低水路の右岸側では低水路の湾曲によって生じた死水域とも呼べるような低流速の領域が存在することが明かである。また、高水敷上では、左岸側の高水敷に乗り上げた部分で比較的速く、それが流下とともにより低速となり、低水路に流れが落ちる部分で最も急激な実体視上の勾配を示している。もう一つの注目点は、主流線に対して斜め

方向にトレーサーがいくつも交差するかのよう存在していることであり、この部分で横断方向に実体視上の高低差が生じている。このことは横方向に間欠的に発生する水平渦がいくつも明瞭に目視された。また、全体的にトレーサーが存在する部分が比較的速い部分であり、トレーサーの無い部分は相対的により低速流体が低壁面近くから上昇して水表面に到達し、トレーサーを押しのけたものと思われる。

3.2 水表面流速分布

水表面流況の可視化写真から速度ベクトルを作成し

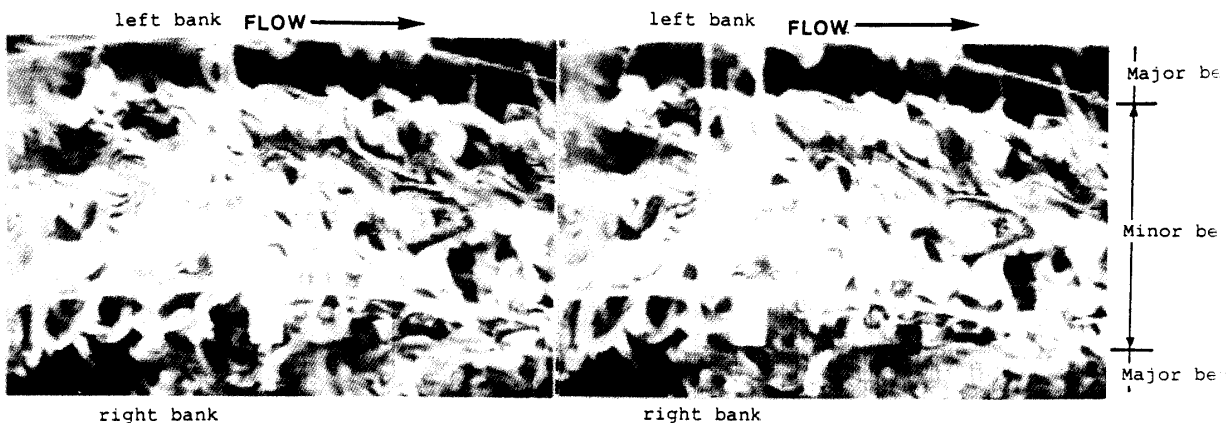


Fig.4 Flow pattern in Vicinity of Water Surface (Time Interval 0.43sec)

たものが図—5である。通常、速度ベクトルは、パンチ屑等を散布して微小時間当たりのパンチ屑の移動距離と方向から求められる。本研究では微小時間内の可視化の形象の移動距離と方向からそのまま速度ベクトルが求められ、実体視によって得られた速度分布との対応も検討された。この方法では水表面における可視

化の形象と流速分布を同時に明かにすることが可能であり、2点間の移動距離が読みにくいという困難はありながらも、可視化と流速の情報が同時に得られるという意味で非常に有効な手法と思われる。

この図からも明らかなように低水路上のベクトルの方向は、蛇行線形には完全に沿っていないが、低水路

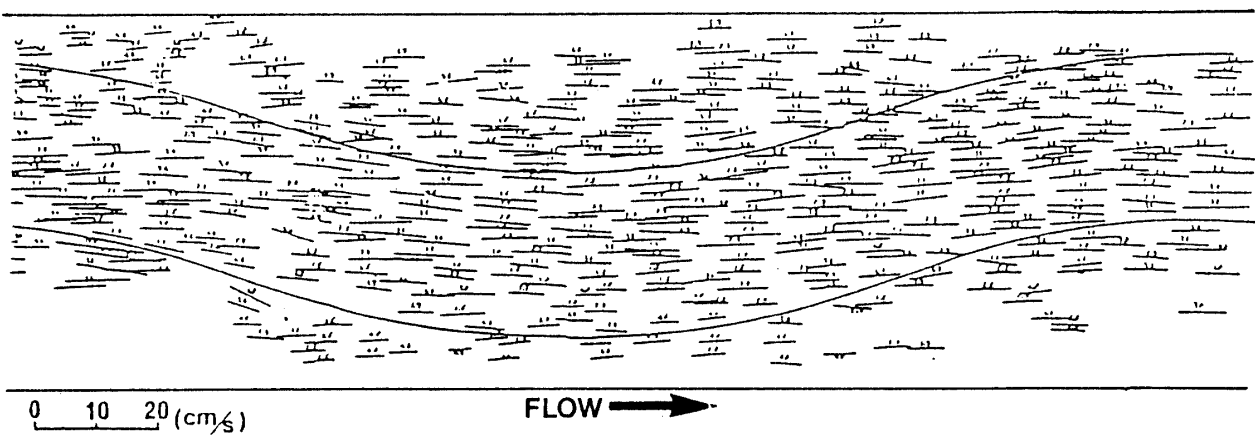


Fig.5 Distribution of Velocity Vector at Water Surface

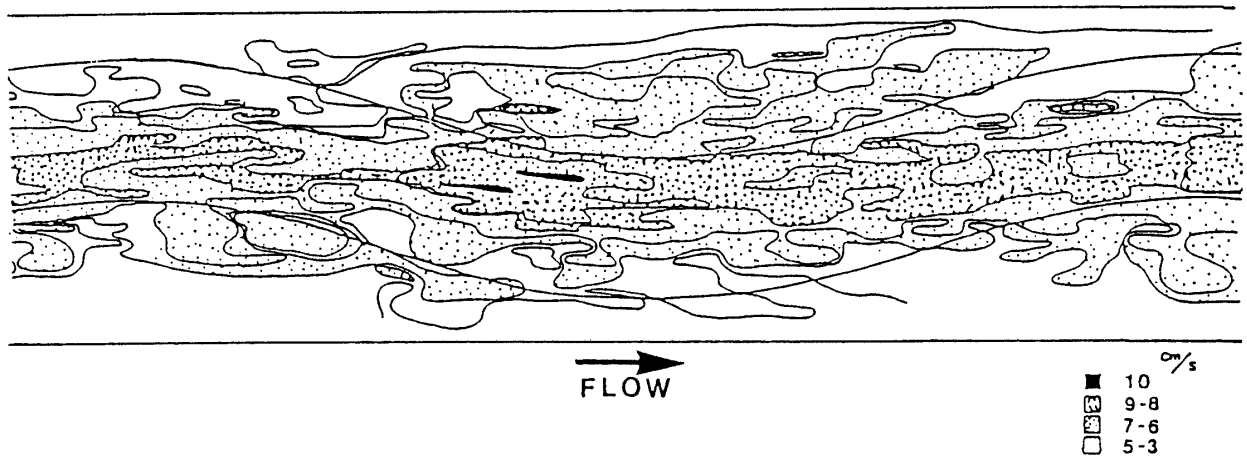


Fig.6 Distribution of equi-velocity line

の蛇行の曲率の大きい部分では幾分、蛇行の影響を受けて方向を変えている。そこで、水表面の流速分布を詳察するために、速度ベクトル図から、等流速分布図が図-6のように求められた。これより水表面において主流域を構成する領域が、水路のほぼ中央であることが明らかであり、さらには高水敷上、湾曲部での死

水域や左右の高水敷上の流れの速度差の存在も明らかである。また、図-7は、速度ベクトル図から求められた横断方向流速分布図であり、この図からも横方向や流れ方向に不均一な速度分布が存在していることが明らかである。

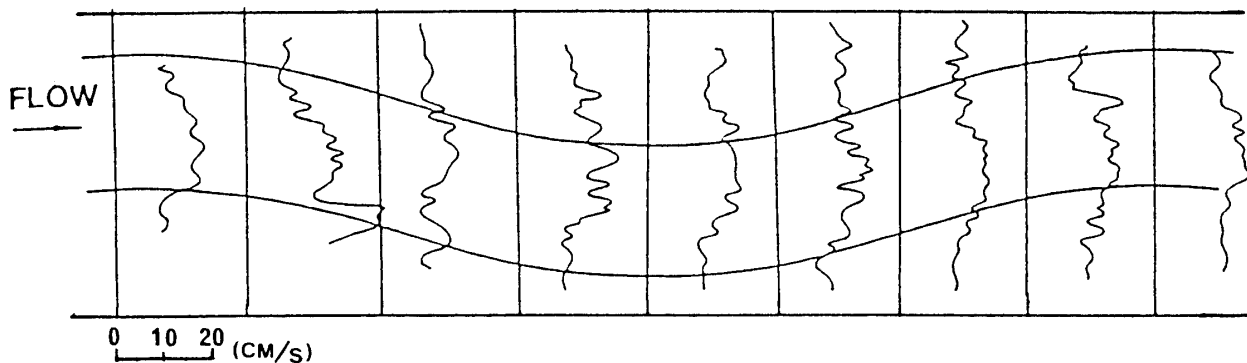


Fig.7 Velocity Distribution in a transversal line

3.3 内部構造

複断面蛇行流の内部構造を解明するために、横断面可視化が、図-8に示されるような8箇所の各地点で行われた。ここでは、それらの中から局所的に特徴的な流れが形成されていると思われる水衝部（例えば図-8のM点）と下降部（例えば図-8のC点）について

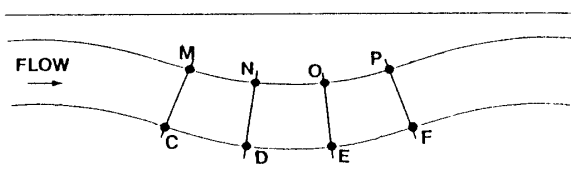


Fig.8 Position of Visualizing a Cross Section

て考察がなされた。その際、平滑壁面近傍で形成される壁縦渦⁹⁾が、このような複雑な境界条件下でどのように存在するかが注目された。図-9には水衝部(M点)における横断面視の一例が示されている。上下の写真二枚の写真はビデオテレビ画像から得られたものであり、それぞれの写真の下部には右に高水敷、左に低水路が見えている。水衝部の低水路河岸付近における秩序構造には二つの特徴がある。その一つは高水敷端上の渦形象が低水路側に頻りに落ち込むような挙動が存在することである。これは、高水敷上に乗上げる流れと低水路低壁に降下する流れとに分離せられ、高水敷上の流れの侵入に伴って、既に低水路側高水敷端上に存在していた流れが押し退けられるために誘起される現象と思われる。さらには、高水敷上の渦構造と低

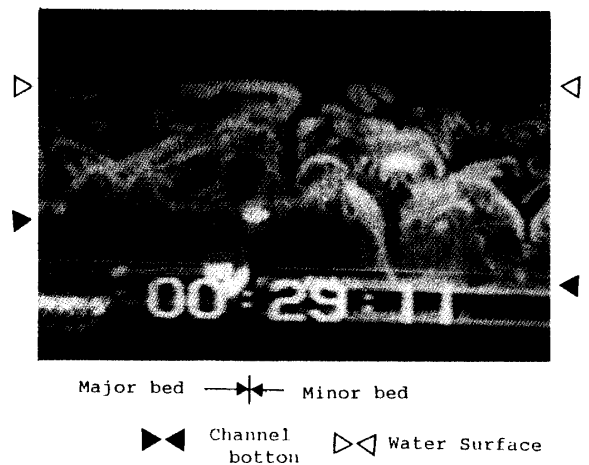
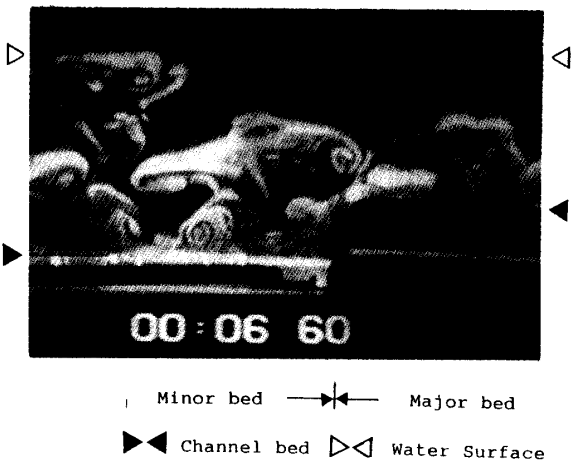
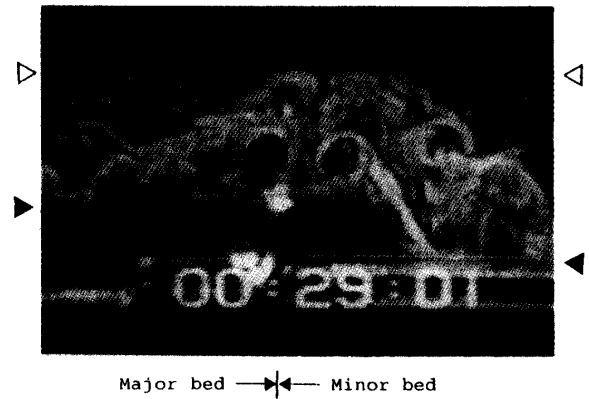
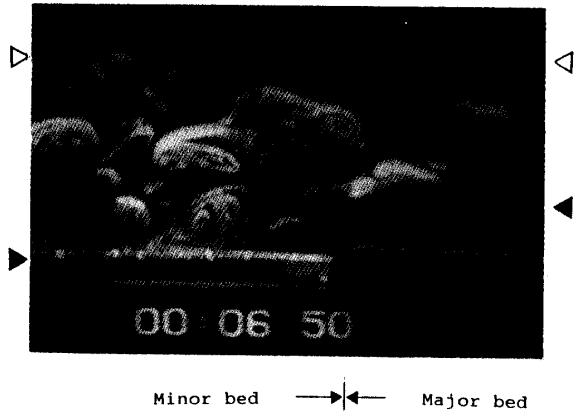


Fig.9 Flow pattern in cross section (Point M)

Fig.10 Flow pattern in cross section (Point C)

水路の渦構造の相互作用によって誘起される運動と思われる。2枚の写真には、高水敷端上で低水路側へ落ち込む寸前の挙動が認められ、それがその上の大規模な渦の構造の誘起する下降流によってより促進されているかのような2次流れの形成が示されているようである。二つめは、低水路隅角部に流れ込む2次流れの形成であるが、この流れはこの2つの写真からは認められない。一方、図-10には、下降部（C点）における断面視の一例が示されている。下降部は水衝部の下流側に位置し、高水敷上の流れが低水路の流れと合流する領域である。この領域に形成された個々の渦の断面形象は、水衝部のそれと比べてやや小規模であり、全体として穏やかな流れ呈しているようである。低水路河岸付近が黒く映っているのは、トレーサーが存在しないためであり、これは、より上流側にトレーサーの補給を伴わない隅角部固有の流れの形成を示唆している。この隅角部の流れの領域が比較的大きいのは、下降部における高水敷上からの流れがより河道の中心部に向けて流れ込むためと考えられ、この領域での河床の洗掘はより軽減されるものと思われる。洪水が発

生した実河川において複断面蛇行流の水衝部はその低水路河岸付近で著しく洗掘が起こる領域であり、逆に、下降部では土砂の堆積が促進される領域である。これらの問題と結び付く様な詳細な2次流れの機構の解明が、今後特に必要と思われる。

水衝部（M点）および下降部（C点）における渦の挙動を詳察するために、図-11、図-12にそれぞれ示された横断面形象のトレースが行われた。トレースは、ビデオテレビの連続画像が0.1秒間隔でハードコピー、さらには拡大コピーされた画像を原画として行われた。各トレースにおいて水表面の位置は◀印で、水路床の位置は▶印でそれぞれ表されている。まず、水衝部領域ではこの場合 $T=6.3$ 秒において、低水路河岸左上に大規模な渦(A)の断面形象が出現し、その左右に大規模な下降流の形成を誘起させようとしている。その後、0.1秒経過すると高水敷上から低水路に向けて斜めに下降しようとする流れがより明確となり、それが低水路床近くに形成された渦との相互作用で、その一部が壁面に到達するまでの下降流を引き起こさせている（ $T=6.6$ 秒）。 $T=6.8$ 秒ではより上からの大規模な高速流体

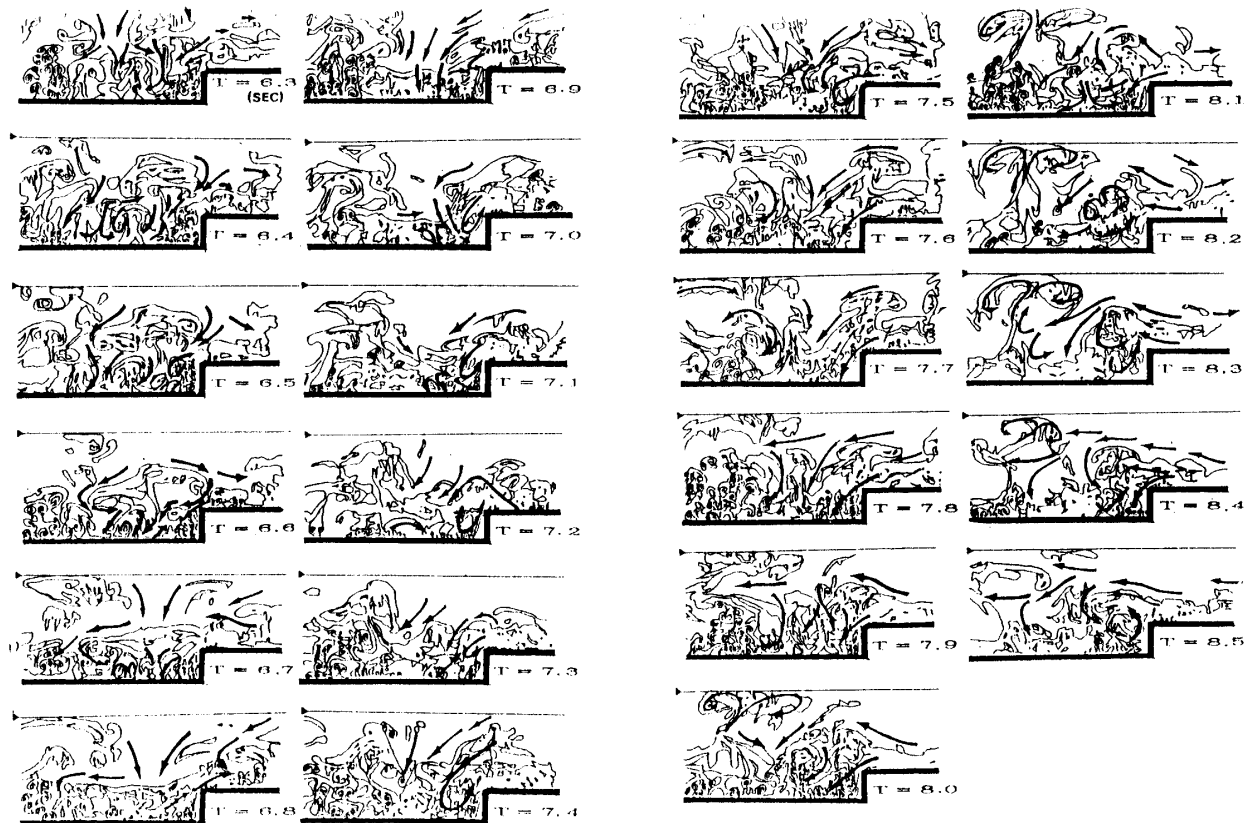


Fig.11 Change of the flow Pattern in Cross Section as the time Proceeds (Point M)

(トレーサーが存在していない領域)塊が下降し低水路河岸付近の流体が高水敷上に一部乗上げるかのような挙動をみせているが、その後はすぐにまた低水路に落ち込む様な挙動を示している。また、 $T=7.0$ 秒からは、低水路河岸部隅角部から低水路に流れ込む流れが顕著となり、それが弱まると再びより上部から低水路の方に向かって斜めの方向の下降流を形成するパターンを示している。これらの一連のシステムは $T=7.5$ 秒以上においても繰り返されているように思われる。以上の事から水衝部における2次流れは様々な規模の渦運動によって誘起されるが、とくにより壁から離れた領域に形成され大規模な渦運動と壁近く形成された渦運動の相互作用によって誘起された下降流や隅角に向かう流れの形成が特徴であると言えよう。

図-12には、下降部(C点)において図-11と同様にトレーサーが行われたものである。前述の様に、この領域における個々の秩序構造のスケールは、水衝部と比較してより小さく、その挙動も複雑であり水衝部ほど2次流れの様子を明確にとらえることができないようである。しかし、ここで重要なことは、2次流れの方向を示した太実線の矢印がお互いに同じ方向を向く

のではなく、効に相向き合うことによって、特徴的な2次流れの形成を誘起させないようにしていると思われる。なかでも最も頻繁に2次流れの方向を相向き合わせている領域の一つが、低水路河岸直上の水表面付近である。この場合、両矢印が殆ど常に低壁面方向を向いているのは、高水敷から低水路に向かう、いわば下降流が形成されていることを示唆しているように思われる。もうひとつの特徴は高水敷からの下降流の一部が低水路壁面に到達する位置が、水衝部と比較してより水路中央側に移動することであり、その下降流の形成はいくつかの渦が集中して寄与していないことである。このことより、下降部における秩序構造の横断面形象の挙動が水衝部と比べてより穏やかなのはそこの個々の秩序構造が2次流れの形成の際にその規模や強さをより減じてしまうような運動するからではないかと思われる。

以上の結果を踏まえ直線複断面蛇行流におけるマクロな概念的モデルが図-13の様に表され得る。また、より、ミクロな観点からのモデル化も重要である。今後、より詳細に秩序構造を考察する事によって、それを可能にしてゆきたい。

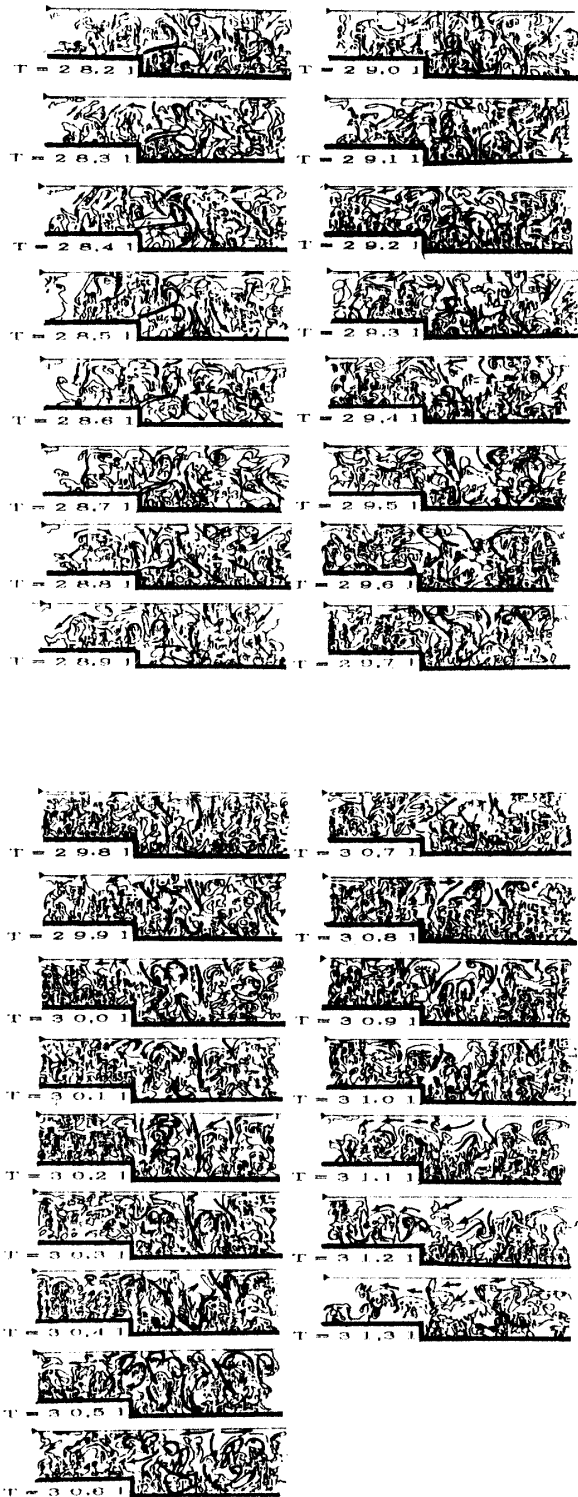


Fig.12 Change of the flow Pattern in Cross Section as the time Proceeds (Point C)

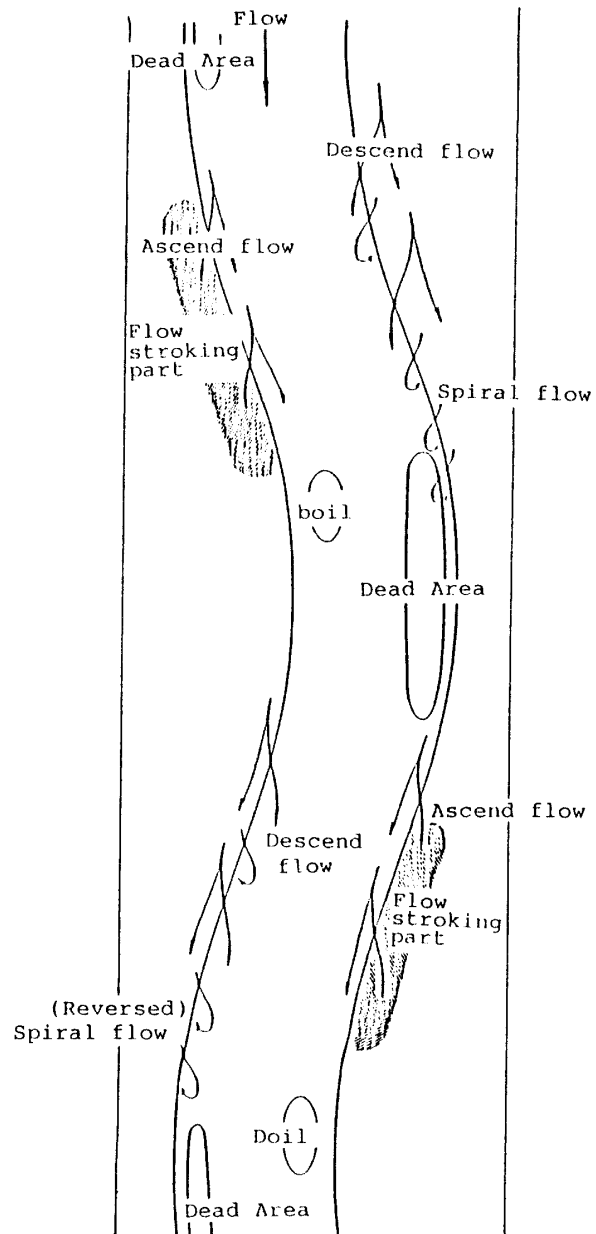


Fig.13 Model of Meandering flow with flood plain

4. 結論

直線複断面蛇行流の可視化実験が行われ、そこでの秩序構造に関するいくつかの特徴が考察された。本研究において得られた主要な結論は、以下に示すとおりである。

- (1) 水表面には、必ずしも蛇行流線形に従わない高速の主流部が存在し、高水敷上や湾曲部に形成される死水域の流れと複雑なせん断層を形成する。しかし、微視的には3方向に不均一で非常に複雑な流れが形成されている。

- (2) 水衝部では、高水敷河岸の浸食が進むような2次流れの形成が明らかとなった。この2次流れの特徴は、高水敷河岸付近の渦構造と低水路壁面から形成された渦構造がともに同じ方向に2次流れを形成してその規模や強さを拡大しようとするところにある。
- (3) 下降部では、高水敷からの流れがより中心に向かうために、結果的に高水敷河岸の隅角部流れの領域が拡大され、工学的には河岸での洗掘が軽減される流れが形成されるようである。またこの高水敷河岸付に形成された2次流れの特徴は、高水敷上の渦構造と低水路上の渦構造が互いにぶつかりあって、打ち消し合うところにあるようである。

謝 辞

本実験において協力していただいた本校60年度卒業研究生 斎藤毅君に感謝いたします。

参考文献

- (1) 木下良作：河川線形および河岸堆積に関する水理実験，昭和59年度石狩川開発建設部委託調査，1985
- (2) 木下良作：複断面水路の河道線形と低水路河岸周辺流況に関する実験的研究，1985
- (3) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集第345号，1984
- (4) 森 明巨，岸 力：蛇行河道三次元流の数値解析，北海道開発局委託研究，1984
- (5) 大成博文ほか：壁乱流における縦渦の可視化，第16回乱流シンポジウム講演論文集，PP222～256，1984

(昭和61年10月15日受理)