3 ウロコ床粗度上の流れの組織構造

徳山高専 佐賀孝徳、大成博文[○]、渡辺勝利、山口大学 斎藤 隆

Organized structure formed on Uroko-roughness bed in turbulent channel flow

Takanori SAGA*, Hirofumi OHNARI*, Kathutoshi WATANABE* and Takashi SAITOU**

Organized structure formed on Uroko-roughness bed in turbulent channel flow is investigated using two flow visualization techniques which are a fluorescent dye injection method and a aluminium dust method. The result indicates that a staircase structure of wall streamwise vortex and a oscillation of the structure play a important role to form parallel spiral flow on Uroko-roughness bed in turbulent channel flow.

1. はじめに

洪水時の河川乱流の重要な特徴のひとつとして並列らせん流¹⁾の存在が知られている。この流れは、流れ方向を軸として水深規模のスケールで回転運動を示す流れであり、その存在は洪水流の航空写真上の縦筋模様から見出された¹⁾。一方、この並列らせん流は実験水路内の流れにおいても観察され、「ウロコ床」と呼ばれる3次元粗度上の流れで最も安定的にそれが形成されること、さらにはウロコ床粗度の幾何学的スケールと水深の相対的な関係がその形成に重要な役割を果たすことが明らかされている¹⁾。ところが、並列らせん流の詳細な内部構造やその形成機構については、いまだ不明な点が少なくなく、その説明が洪水流の本質的理解や制御の問題に極めて重要であることが示唆されている²⁾。

本研究の目的は、これらの未解明点を明らかにするために、ウロコ床粗度上に形成された組織構造の特徴を明らかにすることにある。本研究の方法には、蛍光染料注入法、アルミ粉法、光切断法などの可視化法が用いられた。その結果、並列らせん流の内部構造や形成機構に関する2, 3の重要な知見が得られた。

2. 実験方法

実験には、幅60cm、長さ10m、深さ15cm アクリル製開水路が用いられた。ウロコ床には木下¹⁾と同タイプのものが採用された。各ウロコ片のサイズは縦横9cm、厚さ1cmで、こ

* Tokuyama College of Technology ;3538, Takajo, Kume, Tokuyama, Yamaguchi, 745, Japan

** Faculty of Engineering ;Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755 Japan

のウロコ片が水路の床に約500枚(幅60cm,長さ6m)ほど固定されて敷き詰められた。実験は、まず比較的高水深で行われ、ウロコ床粗度上で並列らせん流が形成されにくい水理条件(木下¹⁾によれば、「混乱がひどい」と表現されている領域)が選択された。これは、並列らせん流を構成する流体運動の素過程を究明するためであり、水深を一定にして($H=7.5$ cm)流れのレイノルズ数を4種類変える実験および流量一定で水深を4種類変える実験の2通りが行われた(表1)。可視化法には蛍光染料注入による断面視法³⁾や平面視法、さらにはアルミ粉法による平面視法が用いられた。照明には、ハロゲンスリット光および蛍光ランプがそれぞれ用いられた。また撮影には、主にビデオテレビカメラが用いられ、可視化画像が時間的に連続して収録された。図1に断面視法の実験装置の概略を示す。

表1 実験条件

CASE	Re	H(cm)	$bn^{1/3}/H$
A-1	800	7.5	0.4
A-2	1000	7.5	0.4
A-3	2000	7.5	0.4
A-4	4000	7.5	0.4
B-1	4000	3.0	1.0
B-2	4000	5.0	0.6
B-3	4000	10.0	0.25

図1 実験装置の概略

3. ウロコ床粗度上の流れの組織構造

(1) 平面形象の特徴

図2には、蛍光染料注入法による平面視の結果の一例が示されている。流れ方向は左から右であり、各ウロコ片の稜線が白く塗られている。この写真より、ウロコ片の中央部と稜線直下流部の両方に染料の集中している様子が明らかである。また、ウロコ床中央部の粗度近くで発生した筋状のstreakが、幾重にも縄を編むように重なって写し出されているのも明らかである。このstreakの重なり部分は、周囲の染料の存在していない領域と比較して相対的に流れ方向速度成分が遅く、水深方向には上昇流成分が生じている部分と考えられる。また、このstreakの重なり数は、レイノルズ数を増すにしたがって増加するようであり、図3のレイノルズ数1000の場合に、そのstreak数がほぼ一本であるのとは対称的である。さらにこのstreakは、壁から離れて水表面に向かうにしたがって発達しているようであり、横方向のスケールも大規模化するという特徴も有している。

図2 蛍光染料注入法の平面視 (CASE A-4)

図3 蛍光染料注入法の平面視 (CASE A-2)

次に、図4に、レイノルズ数4000の場合のアルミ粉法における平面視の結果の一例が示されている。これには、図2と同様にウロコ片の中央部と稜線直下流部にその明示部分が存在しているのが明らかである。図2の蛍光染料注入法とこのアルミ粉法の比較可視化⁴⁾を行えば、トレサーの存在領域はほぼ同一であり、全体の形象においても同様の特徴を有するが、重要な相違点として、アルミ粉法においてアルミ粉の明示部から暗部に向かって細い曲線状の筋が見えるのに対し、染料法ではそれが容易には認めがたいことが存在することである。この曲線状の筋は、後述するように、ウロコ床上に形成された壁縦渦³⁾の輪郭の一部が可視化されたものであるが、これを、木下¹⁾は「銀髪のカール」と呼び、並列

矢印は「銀髪のカール」

図4 アルミ粉法の平面視 (CASE A-4)

矢印はウロコ前端部 スリット位置:5

図5 横断面視 (CASE A-1)

(a)

(a)

(b)

スリット位置:5

図6 横断面視 (CASE A-2)

(b)

スリット位置:4

図7 横断面視 (CASE A-3)

並列らせん流が形成される根拠のひとつにした。

(2) 横断面形象の特徴

上述の平面形象の特徴を構造的により詳しく調べるために横断面視の結果が詳察された。

図5～7には、それぞれレイノルズ数が800, 1000, 2000の場合の横断面視とそのスケッチの一例が示されている。これらより、ウロコのほぼ中央部において、壁縦渦が水深方向に階段状に並んで存在する構造が明

らかである。これを壁縦渦の「階段構造」と呼ぶが、その階段数は、レイノルズ数が増大することによって増える傾向にあり、それが800の場合で2階、1000の場合は3階、2000の場合は4階を呈するようである（ただし、図1に示されたウロコ片に対するスリット位置1の時には階段数がいずれもひとつ減る）。このように、レイノルズ数と階段構造には重要な相互関係があり、上記の法則性は、より高いレイノルズ数4000の場合においても認められた。これらの階段構造の発生頻度は、平滑面上の流れよりもかなり高いようであり、この階段構造は、ウロコ床粗度によって形成された秩序構造の重要な特徴のひとつであると思われ、また、図5において指摘された曲線状の筋は、壁縦渦の輪郭部の一部に相当すると思われるが、その部分が写真内に矢印で示されている。最近、著者らは壁縦渦と流速変動波形の相互関係を明らかにしており⁵⁾、それを踏まえると、この階段構造は水深規模の大規模な上昇流の形成に重要な役割を果たしていることが推測され得る。

もうひとつの重要な特徴は、上記の特徴を持つ階段構造がウロコ床粗度上で横方向に「揺動」を繰り返すことである。この揺動現象は、図8に示されたその周期の頻度分布特性からも明らかのように、一定の周期性を有しているが、一方でレイノルズ数と水深の変化にも依存するようである。

4. おわりに

並列らせん流の内部構造と形成機構を解明するために、ウロコ床粗度上の組織構造の特徴が解明され、(1) 並列らせん流の形成には、壁縦渦の階段構造と揺動現象が重要な役割を果たすこと、(2) 壁縦渦の階段構造の構造的な特徴は、レイノルズ数の変化に依存すること、(3) ウロコ床は組織構造の形成を制御していることが明らかにされた。

最後に、本実験にご協力いただいた山本康之氏に感謝します。また本研究の遂行において、文部省科学研究費（昭和62年度一般研究(C)）の援助を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 木下良作：石狩川開発研究部，1978.
- 2) 木下良作：土木学会論文集，第345号，1984.
- 3) 大成博文他：土木学会論文集，第363号，1984.
- 4) 大成博文他：流れの可視化，第12号，1984.
- 5) 佐賀孝徳他：土木学会論文集（掲載予定）。

図8 揺動周期