

開水路流れにおける大規模乱流構造に関する実験的研究

Experimental Study on the Large Scale Structure
of Turbulence in Open Channel Flows

中央大学 理工学部 正員 大 橋 正 和
中央大学 理工学部 正員 林 泰 造
中央大学 理工学部 正員 青 野 利 夫
㈱ I.N.A.新土木研究所 正員 小 谷 裕 司

1. はじめに

自由水面をもった実際河川や直線状開水路において流下方向に回転軸を有し、水路横断方向に並列した軸をもつ縦渦と呼ばれる大規模な乱流構造が存在することは多くの研究者により報告されている。この縦渦の研究は、移動床流れにおける浮遊砂等の輸送問題や流れの三次元流況等の水工学における重要な研究課題である。一方、近年の乱流計測技術の進歩とともに縦渦は開水路におけるバースティング等の乱れの発生機構との関係、すなわちコヒーレントな乱流構造の一つとして考えられている。最近、多くの研究者²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾がこの視点から可視化実験や各種流速計による流速測定を行っているが、それらの実験的研究の多くが、予想される縦渦の間隔に格子状や直線上の栈や溝を施設した状態で行われている。

筆者らは、前報⁶⁾において平坦床における縦渦構造の存在およびその時間平均値的構造をかなり明らかにした。本研究においては、これに引き続き、一様な砂粒粗度を有する平坦床上の2次元および3次元流速測定を行って低速域と高速域における回転スペクトルを計算し、乱れの発生発達過程等の縦渦の微細構造をさらに明確に把握せんとするものである。

2. 実験装置と実験方法

本実験に用いた水路は、全長16.5m(測定長12.0m)、横幅69cm、高さ30cmの循環式可変勾配水路(図-1)である。水路床には平均粒径2.7mmの砂粒を一様に貼りつけてあり計測位置は、測定長の中央部で下流端から6.0mの位置である。2方向流速測定にはエンドフローX型ホットフィルムプローブ、3方向流速測定には3次元ホットフィルムプローブ(写真-1)(TSI社製)を用い、水路中央から横方向水路半幅の範囲を1cm間隔、鉛直方向には水深に応じて12測点から14測点の合計約420測点の流速測定を行った。

流速計の出力はデータレコーダ(TEAC社製)に記録しMelcom 70/35型ミニコンピュータにより1/500秒毎か、デジタルデータレコーダ(TEAC社製)により1/200秒毎のサンプリングで各測点30秒間のデータをA/D変換し、中央大学電子計算機センターFacom M-170 Fを用いて各種統計処理を行った。本実験における水理条件と諸量は表-1に示す。

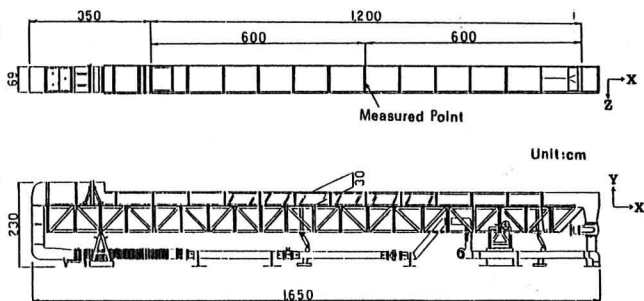


図-1 実験装置

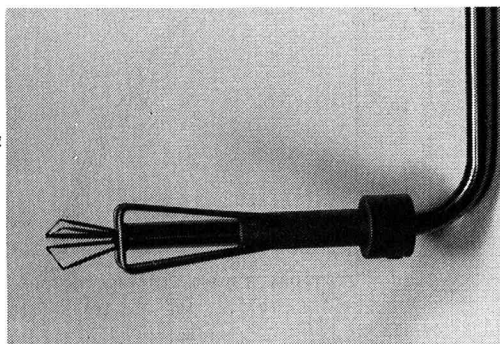


写真-1 3次元ホットフィルムプローブ

3. 実験結果

本実験 Run-1 における流下方向平均流速 $\bar{U}$ の等流速線図を示したのが図-2 であり、図の左端が水路中央、右端が右岸側壁面である。これから、 $Z = 9$ cm, 18 cm, 27 cm, 31 cm すなわち $Z/H = 1.27, 2.54, 3.81, 4.37$ の近辺において顕著な 3 次元性が見られる。側壁近傍の $Z/H = 4.37$ を除いて、他の 3 点は、縦渦のそれぞれ低速、高速、および低速域に相当すると考えられる。

一般に縦渦の様な速度ベクトルの変動が時間的に回転していると考えられる流体運動下では乱流場の各方向成分別の流速成分を調べるばかりでなく、速度ベクトルによる時系列をそのまま取り扱うことのできる回転スペクトルを計算することにより、より多くの情報が得られるものと考え、2 方向の流速成分により回転スペクトルを計算した。回転スペクトルは、ベクトル時系列を実部と虚部の流速成分に分解し角周波数 ϕ の反時計回りの円運動と、時計回りの円運動を合成し、楕円運動として考え、その運動の周波数別の性質を調べようとするスペクトルである。そのために、反時計回り

表-1 水 理 条 件

	RUN-1	RUN-2
水深 H (cm)	7.09	9.50
アスペクト比 B/H	9.86	7.26
断面平均流速 U_m (cm)	15.40	15.00
摩擦速度 (cm/S) $U_m = gHS$	0.99	1.20
水面勾配 S	1/7000	1/6500
レイノルズ数 $Re = U_m H / \nu$	7187	12367
フルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gH}$	0.186	0.155
砂粒レイノルズ数 KsU^*/ν	17.8	28.2

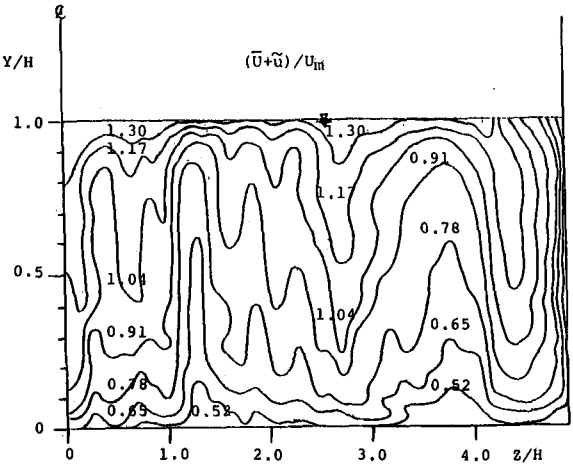


図-2 流下方向平均流速 $\bar{U}/U_m$ の等流速線図

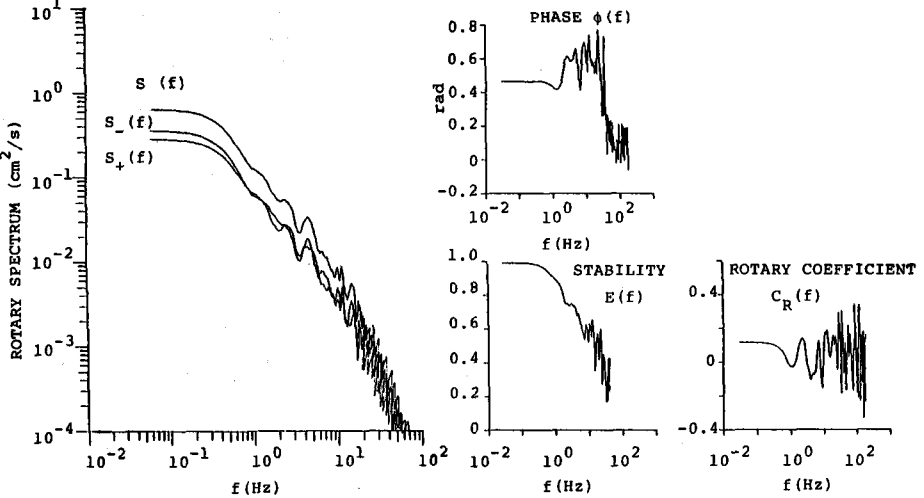


図-3 回転スペクトル (Run-1) ($Z/H = 1.27, Y/H = 0.71$)

スペクトル $S_+(f)$ と時計回りスペクトル $S_-(f)$ を求めそれより全スペクトル

$$S_t(f) = S_+(f) + S_-(f)$$

を計算し、同時に回転スペクトルの楕円運動の平均長軸方向 ϕ_f (水平軸 X より反時計方向を正) と回転主軸方向の安定度 E_f および全エネルギーの反時計方向回り、時計方向回りへの分配比を表わす回転係数

$$C_R = (S_-(f) - S_+(f)) / S_t(f)$$

を求めた。

図-3 は、Run-1 における低速域 ($Z/H = 1.27$, $Y/H = 0.71$) における回転スペクトルの出力例で、左の図が回転スペクトル、右の3つの図は、それぞれフーリエ成分ベクトル和が描く楕円軌道の平均長軸方向 ϕ_f (PHASE) と平均主軸方向の安定度 E_f (STABILITY) および全エネルギーの時計方向(-)または反時計方向(+)への分配比を表わす回転係数 C_R (ROTARY COEFFICIENT) である。これら3つの情報から回転運動の各周波数成分別の詳細がわかる。

図-4 は、低速域、高速域における回転スペクトルの高さ方向の変化を示した図で、各スペクトルの上の線が全スペクトル $S_t(f)$ 下部の2本が時計方向スペクトル $S_-(f)$ と反時計方向スペクトル $S_+(f)$ である。この図より底面付近では 2 Hz および 6 Hz 付近に顕著なピークが存在するが、水面に近づくにつれてそのピークが高周波側に移行している。また、スペクトルの傾きも底面付近では、 $-5/3$ 乗に従う領域は 2 Hz から 10 Hz 付近であり、より高周波側では -3 乗の傾きをもっているが、測点が水面に近づくにつれて $-5/3$ 乗に従う領域がより高周波側に拡大しているのがわかる。高速域 $Z/H = 2.54$ における回転スペクトルでは、低速域と同様に底面付近の測点で 2 Hz および 6 Hz 付近にピークが見られるが、測点が水面に近づくにつれて顕著なピークは見られなくなる。またスペクトルの傾きは低速域と同様に $-5/3$ 乗に従う領域が広がっている。

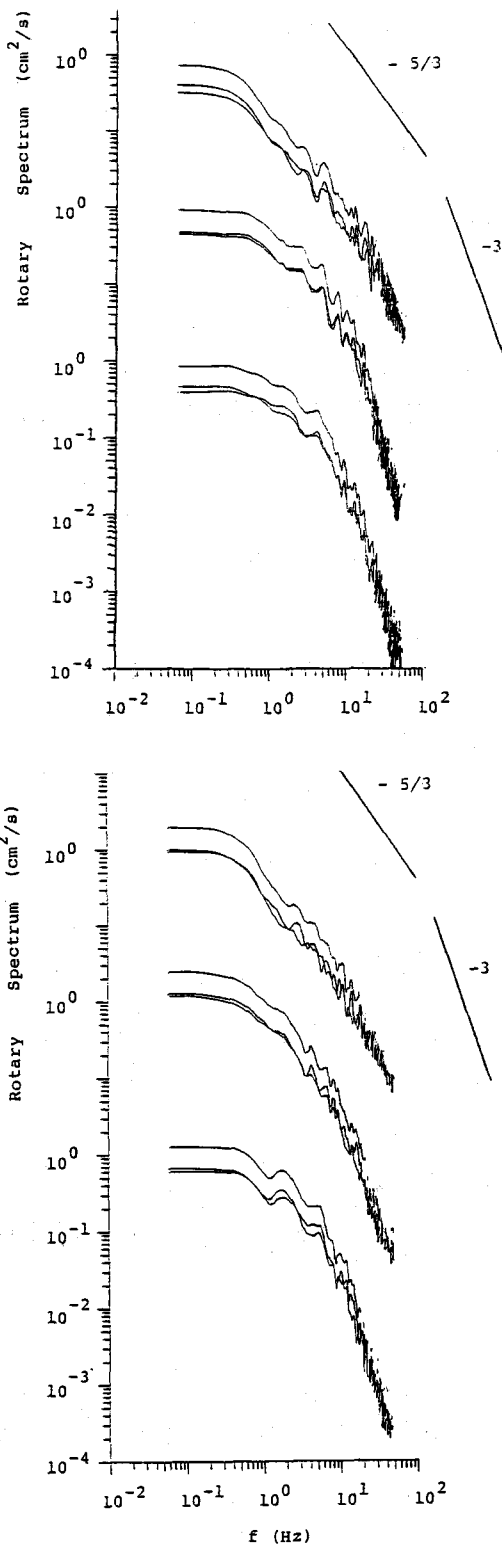


図-4 回転スペクトル (Run-1)(上) 低速域, (下) 高速域

図-5は、Run-2における、横断方向の平均流速 W の等流速線図で、壁面近傍では、小規模な閉じた渦のペアが数多く見られ、これらは、壁面領域 (Wall Region) におけるバースティング等の組織的な乱流構造によるものと考えられる。また、それより上方の外部領域では、ほぼ等間隔に大規模な渦構造、すなわち縦渦が認められる。図-6は、 $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{W}$ の水路横断方向の分布を示したもので、 $\bar{U}$ と $\bar{V}$ が逆位相になっており、 $\bar{U}$ と $\bar{W}$ は若干の位相のズレはあるもののほぼ同位相の傾向を示している。また、 $\bar{V}$ と $\bar{W}$ は、逆位相となっていることがわかる。これは、縦渦の上昇部では、下方から平均流速の遅い流体塊が上方に輸送されるため、周囲の部分より遅くなるためと考えられる。図-7は、 UV 、 UW 、 VW の回転スペクトルと各成分別スペクトルである。回転スペクトルは、 UV より UW の勾配がきつく低周波数側より-3乗則に従う領域が認められる。 VW の回転スペクトルは、前2者より勾配がゆるやかである。これら、回転スペクトルの勾配の物理的意味については、今後検討したいと考えている。

4. 流れの可視化実験

回転スペクトル等、乱流計測から得られた結果をよりよく理解するために流れの可視化実験を行った。実験方法としては、水路底面に設置した厚さ1mm、幅40cmのスリット口と、高さを可変しながら設置できる2本の注射針より放出された比重1.002のミルクをトレーサーとした2ケースを行った。写真-2は、底面に設置したスリットより放出されたミルクの挙動を撮影したも

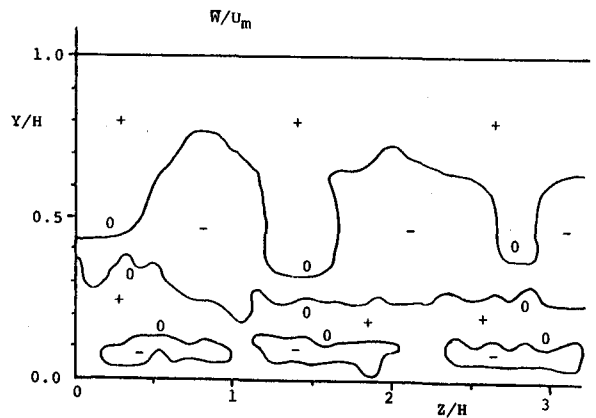


図-5 $\bar{W} / U_m$ の等流速線図

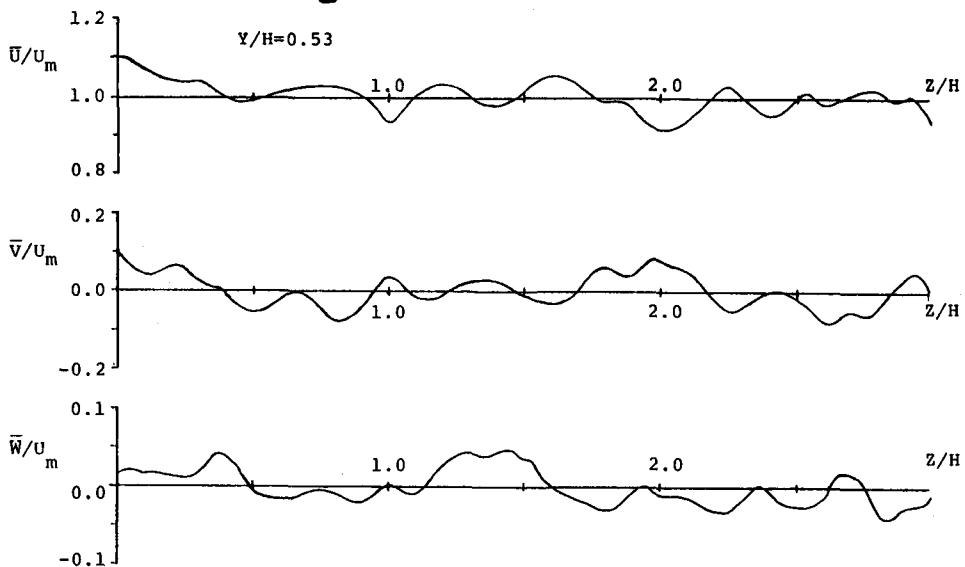


図-6 $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{W}$ の横断方向分布図

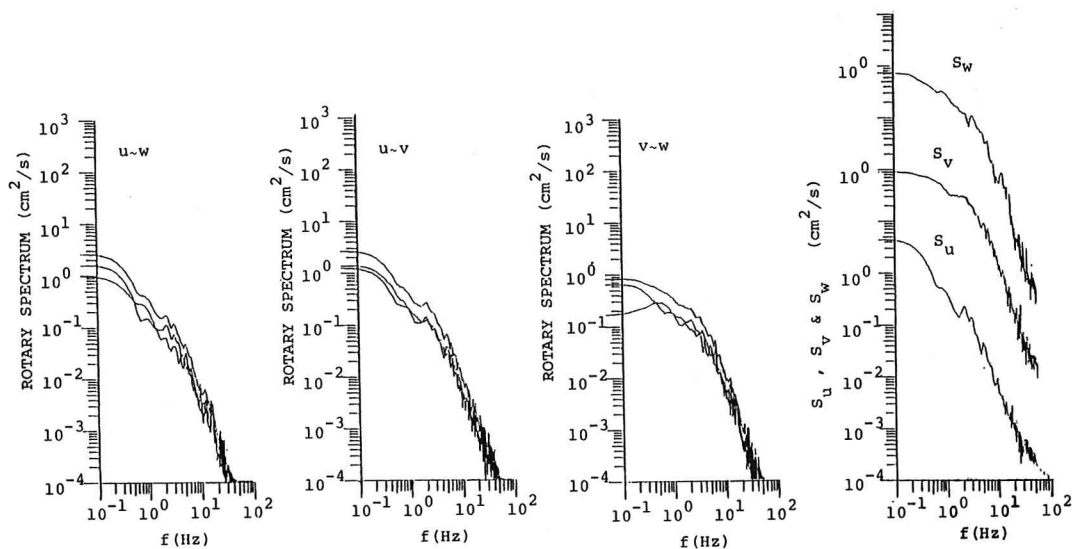


図-7 回転スペクトルと成分別スペクトル

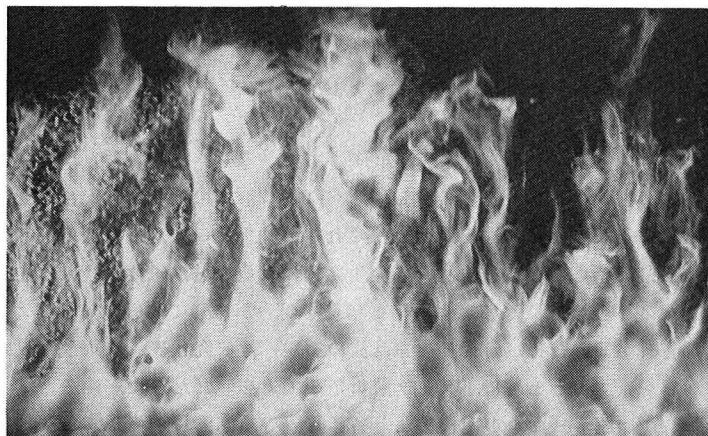


写真-2

底面付近の微細な乱れ
構造と低速域における
上昇乱れの合体

(流れ 下から上へ)



写真-3

上昇する渦管と渦輪

(流れ 左から右へ)



写真-4

水路高さ別の乱れの
相連と発達過程

(流れ 左から右へ)

ので底面付近の微細な乱れ構造，特にスイープの様子と，低速域における上昇乱れの合体する様子が見られる。特にこの合体しながら上昇する乱れは，低速域でしばしば観測され，発生する位置は水路横方向に特定の場所に限られる様である。また，写真-3は，開水路側方より，渦管の上昇と渦輪（矢印）が見られ，上昇流の存在する，低速域の方がこれら乱れの発生頻度は高いと考えられる。写真-4は，水路高さ別の乱れの発達過程を撮影した写真で，壁面に近い方が乱れが強いことが認められるが，縦渦の高速域と低速域との速度差および乱れの発達機構の違いを表わしている。

5. あとがき

2方向および3方向の乱流計測より回転スペクトルを計算し，スペクトル形状の変化より発生した乱れの上方への伝播の状況と，各測点における渦の回転特性を調べた。これらの結果，一様な砂粒粗度をもった平坦床上でも縦渦と考えられる大規模乱流構造が存在し，乱れの発生発達には低速域が重要な役割をはたしていると考えられ，今後，乱れエネルギーの収支等のより微細な構造を明らかにしていきたいと考えている。

本研究の遂行に当っては，文部省科学研究費特定研究「複雑乱流の実験」（研究代表者 東工大日野幹雄教授）の補助をうけた。記して謝意を表するとともに，データ解析にご協力をいただいた，中央大学牧野京子，石原篤，増田卓郎，村上宏二，山田陽一，および南橋丈二，斉藤貫，寺田潤，丹羽修，六角浩司の諸氏に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 木下良作：写真測量，Vol.6，No.1，pp. 1～17，1967.
- 2) 中川博次・弥津家久・富永晃宏：京大防災研年報，第24号B-2，pp. 315～338，1981.
- 3) 黒木幹男・岸 力：土木学会論文集，No.312，pp. 83～92，1981.
- 4) 室田 明・福原輝幸：土木学会論文集，No.319，pp. 65～75，1982.
- 5) 今本博健・石垣泰輔：第28回水理講演会論文集，pp. 257～262，1984.
- 6) 林 泰造・大橋正和・小谷裕司：第28回水理講演会論文集，pp. 263～268，1984.
- 7) 日野幹雄：「スペクトル解析」，朝倉書店，1977.