

開水路流れにおける大規模乱流特性について

On the coherent structure of turbulent shear flows in open channels

中央大学理工学部 正会員 林 泰造

中央大学理工学部 正会員 大橋 正和

中央大学大学院 学生員 ○南橋 丈二

1. まえがき

開水路流れにおける縦渦等の大規模乱流構造が水工学上重要視され多くの研究報告を集め、計測技術の進歩に伴いその構造は徐々に明らかにされて来ている。筆者らはこれまでの研究^{1,2)}において平坦床直線水路での乱流計測により縦渦の存在およびその長時間平均的構造をかなり明らかにしてきた。本研究においては、これに引き続き平坦床上の2次元流速の多点同時計測を行い、縦渦の時空間構造を検討した。本報は、そのような研究の報告である。

2. 実験装置および計測方法

本実験水路に用いた水路は、写真-1に示すように全長16.5m(測定長12.0m)、水路幅0.69m、側壁高0.30mの循環式可変勾配水路で、底面上には平均粒径1.0mm(水理学的完全粗面)の粒を一樣に貼りつけてある(写真-2)。計測位置は、前報^{1,2)}同様下流端から6.0mの位置とし、この位置における水路断面内の多数点(図-1)において測定を行った。測定には、2本のエンドフローX型ホットフィルムプローブ(TSI社製)を用い(写真-3)壁面からの高さ y を同じくして一方のプローブは常に水路軸線上($z=0$)

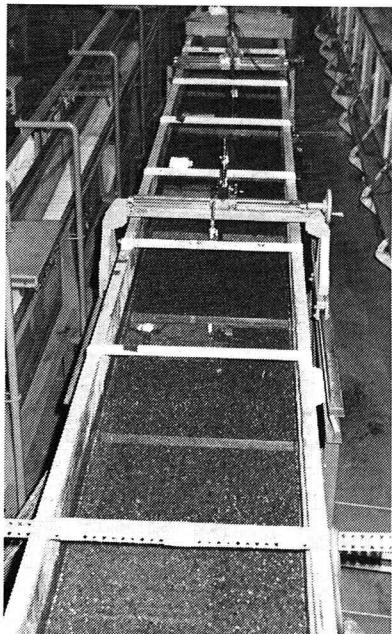


写真-1 実験水路



写真-2 底面に貼りつけた礫

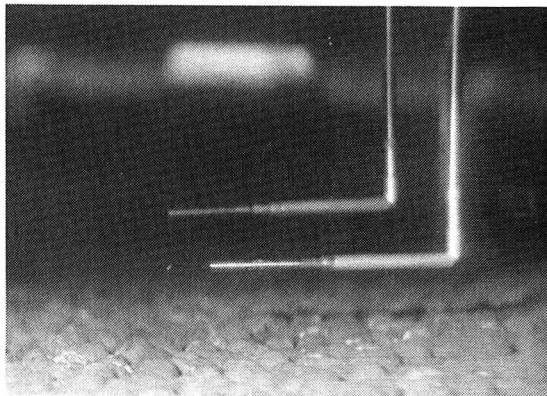


写真-3 同時計測のための2本のX型熱膜プローブ

におき、もう一方のプローブを横方向（ z 方向）に移動させて、2 本のプローブによる同時計測を行った。

3. 乱れの変動流速の分離法

前報までの方法と同じく有限項で打ち切りの Fourier 級数をあてはめることにより乱れの組織成分 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ を乱れ成分 u' , v' と分離して次のように考える。

$$U = \langle U \rangle + \tilde{u} + u'$$

$$V = \tilde{v} + v'$$

ただし、 $\langle U \rangle$ ：底面からの高さ y を同じくする全測点における U の全測定値の平均、 $\tilde{u}$ ：各測点における U の 2 次流成分、 u' ：乱流変動量、 $\tilde{v}$ および v' も同様。

4. 実験結果

(a) 2 点間の同時流速記録

図-2 は底面からの高さを同じくした固定プローブと移動プローブによる同時流速変動記録であり、固定プローブの位置は $z/H=0$, $y/H=0.3$ である。これらの図で実線は $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ を示し、それからの偏りが u' , v' を示す。これら 2 測点間の間隔は $z/H=2.25$ であるが、両測点における $\tilde{u}$ の曲線形状を比較すると相関性がなお顕著であることが注目される。

表-1 水 理 条 件			
断面平均流速 U_m	22.4 cm/s	水深 H	0.6 cm
平均底面摩擦速度 U_*	1.03 cm/s	水深比 B	0.9 cm
エネルギー勾配 S	1/7,900	B/H	0.0
$Re = U_m H / \nu$	13,500	砂粒径 k_s	1.0 mm
$Pr = U_m / \sqrt{g H}$	0.244	$k_s U_* / \nu$	79.4
		H / k_s	7.8

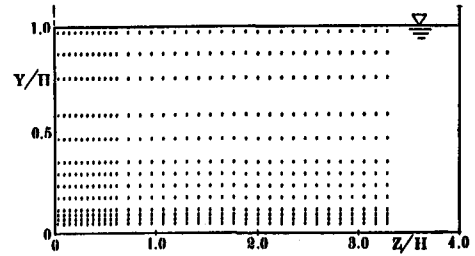


図-1 計測ポイント

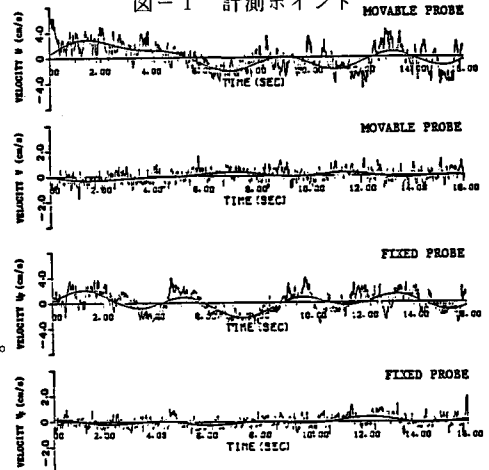


図-2 多点同時流速変動記録

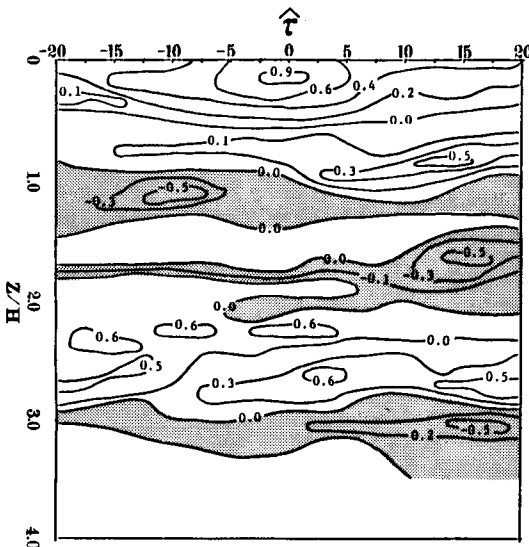


図-3 時空間相互相関の等値線図 ($y/H=0.3$)

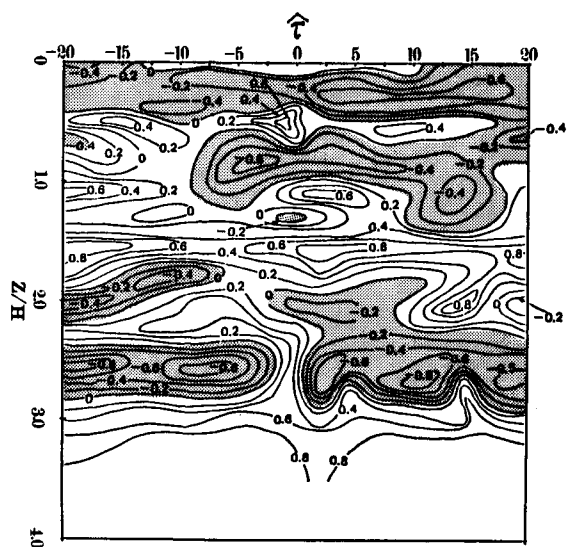
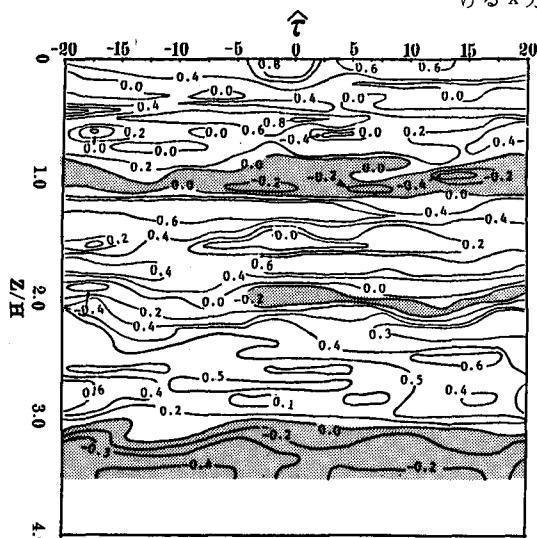


図-4 時空間相互相関の等値線図
($y/H=0.05$)

図-5 時空間相互相関の等値線
($y/H=0.97$)



れ時間 τ ごとに算出し、 τ を H/U_m で無次元化した $\hat{\tau}=\tau/H/U_m$ について示したものである。陰影を施した部分はこの相関が負となる部分を示す。この図から、横断方向に十分離れた位置でも強い相関性が水深のほぼ2倍のスケールで現れており、縦渦の顕著な時空間的配列特性が認められる。また時間の経過に伴い大略 $H/2$ 程度ごとに交互に相関のピークが発生している。また、 $z/H \approx 2.25$ 、 $\hat{\tau} \approx -2.0$ 付近に水深スケールで強い正の相関が下流に向かって細く帯を成して続いている。このことは手前で発生した強い上昇流がその高速域を維持しながらも下流に上昇歴を残していると言える。これらのことは縦渦の空間的変動特性を捉えており、その挙動は流れ方向に准規則性を持つものであることを物語っている。

図-4は $y/H=0.05$ の高さにおける $\tilde{u}_F$ と $\tilde{u}$ の時空間相互相関に示し、また、図-5は $y/H=0.97$ の高さにおける $\tilde{u}_F$ と $\tilde{u}$ の時空間相互相関 $R\tilde{u}_F\tilde{u}$ を示したものである。

前報^{1,2)}(水理学的過渡粗面)の従渦構造ではバースト現象の影響による底面付近の微細構造が問題となったがここでは、底面は水理学的完全粗面であるため、バーストよりも、むしろ

(b) 二次流成分の時空間相関特性

図-3は $y/H=0.3$ の高さで、それぞれ固定点と移動点におけるx方向二次流成分 $\tilde{u}_F$ と $\tilde{u}$ の時空間相互相関 $R\tilde{u}_F\tilde{u}$ を各選

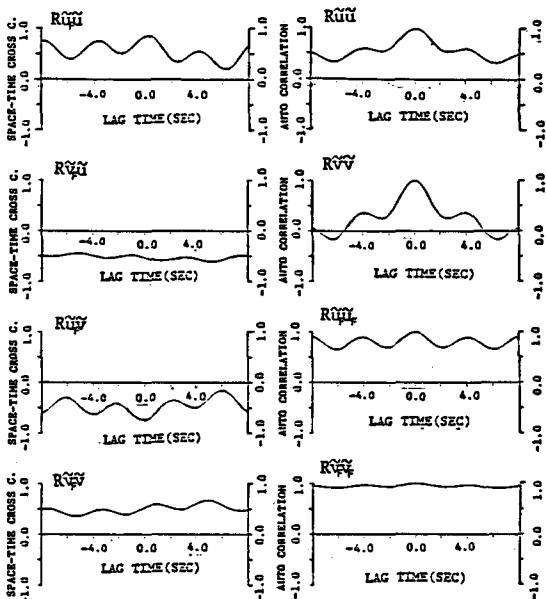


図-6 二次流成分の時空間相関図

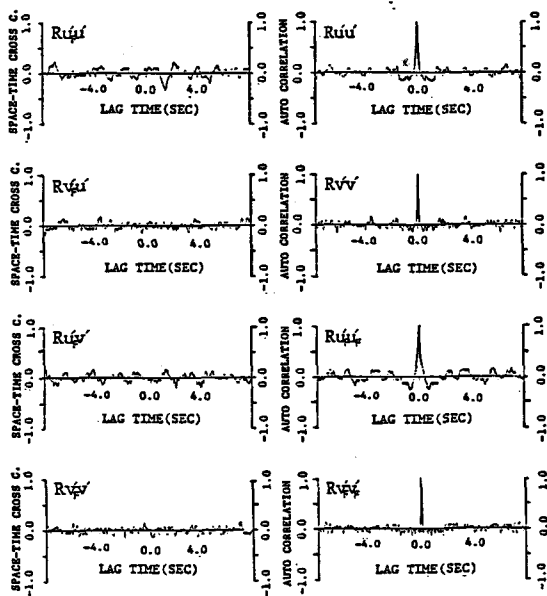


図-7 乱れ成分の時空間相関

ろランダムに発生する剥離渦の方が乱れを供給するものとなって底面の極く近く $y/H=0.05$ まで上方の縦渦の影響が及んでいるのはそのためであると考えられる。

図-4で $z/H \approx 0.25$ 付近に認められる $R\tilde{u}_F\tilde{u}$ の負の相関は剥離渦による影響と思われるが、それ以外では $y/H=0.3$ (図-3) におけると同様に水深の2倍程度のスケールでの相関を示し、縦渦が底面まで及んでいることが認めらる。

図-6は固定点における $\tilde{u}_F$, $\tilde{v}_F$ の各々と、これと移動点における $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ の4種類の組合せの時空間構造を示す。両点の間隔がかなり大きいにも拘わらず顕著な相関が時間的には波うちながらも生じていることが認められる。

また、図-7は同様にして固定点における u'_F , v'_F の各々と移動点における u' , v' の各々の組合せの時空間相関を示す。これらは殆んど0であり2次流と乱れ成分との分離方法が適当なため乱れ速度の2点間隔がこれだけ大きくなると、2点間の乱れ速度の相関は殆んどなくなることが確かめられた。

(c) 流下方向平均流速とレイノルズ応力

図-8および図-9は前報と同様の方法による点計測の積み上げとして測定解析した。それぞれ流下方向平均流速 $\overline{U} + \tilde{u}$ とレイノルズ応力 $-\rho \overline{u'v'}$ を示す。前小節(b)で求めた時空間相関図をこれらと比べると、時

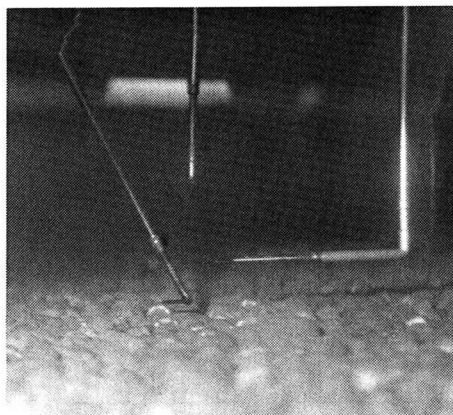


写真-4 多点同時計測（3本のプローブ）

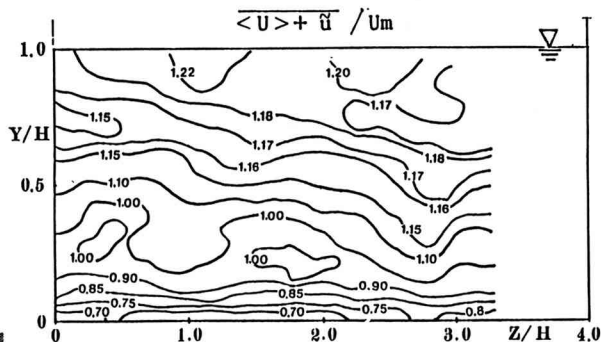


図-8 $(\overline{U} + \tilde{u}) / U_m$ の等値線図

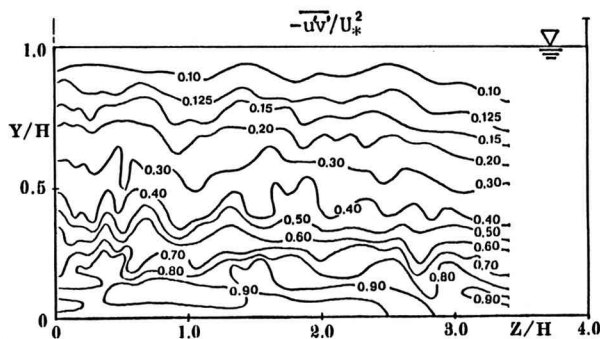


図-9 $-\overline{u'v'} / U_*^2$ の等値線図

空間相関図のもつ意義が明瞭に感ぜられる。

4. 結 び

流れの可視化の手法による開水路縦渦の Lagrange 的計測は木下³⁾、宇民・三村⁴⁾ 等によりなされてきたが、本研究においては一横断面内の多点同時計測により時空間相互相関を求める Euler 的計測方法により縦渦の時空間構造を定量的に詳細に研究した。今後はさらに3点（写真-4）の同時計測による時空間多重相関の解析を行い、縦渦の3次元構造を解明してゆく積りである。

本研究における実験遂行およびデータ解析に当っては、中央大学大学院学生 片岡義明、岩下善一郎、学部学生 青木秀、狩野雅幸、引田重夫、星明、矢萩正人の諸君の熱心な協力を得た、記して心からなる謝意

を表する。

5. 引用文献

- 1) 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.
- 2) 大橋正和・林 泰造・青野利夫・小谷裕司, 第29回水理講演会論文集, pp. 779-784, 1985.
- 3) 木下良作, 並列らせん流に関する実験的研究・石狩川開発建設部, 135p., 1977.
- 4) 宇民 正・上野鉄男, 大規模乱流構造の可視化と解析(2), 京大防災研年報, 26号 B-2, pp. 1-16, 1983.