

連続断面撮影法による大規模乱流構造の可視化とその解析 (2)

Visualization and Processing of Series of Flow Patterns in Horizontal Cross-sections (2)

京都大学防災研究所 正員 宇 民 正
京都大学防災研究所 正員 上 野 鉄 男

1. はじめに

流れの可視化法のもたらす情報は数限りない。しかし可視化法を流れの時空間的な変化特性の解明に役立てるには従来いろいろな制約があった。著者ら^{1),2)}は、連続断面撮影法の導入により、可視化法を三次元乱流構造の定量的な解析に役立てることを提案した。この方法は水平断面内で乱流が凍結されているという仮定に基くものである。本論では、上記撮影手法に若干の改良を加え、その結果を乱流構造の時空間相関解析に適用した。これは、具体的にいえば、固定点計測法によるとすれば、横断方向に4 mm間隔で50本の流速計を並べ、そのようなセットを6ヶ所に同時に設置し計測する場合に匹敵する。これにより、乱流構造の時空間的な変化特性が明らかにされた。また、水平断面内凍結乱流の仮定の制約とその改良の方向づけが明らかにされた。

2. 実験方法と実験条件

連続断面撮影による流れの可視化法を適用した。すなわち、図1に示されるように、流れの1つの水平断面を照明することによりその断面内の流れをトレーサー法により撮影し、次の瞬間には照明される断面を沿直方向に平行移動させて次の撮影を行う、という様にして次々と時間的に連続して撮影を行った。撮影を行ないながら、照明装置と撮影装置を搭載した台車を流下方向に平均流速に近い速度で移動させ、同じ乱流構造を追いつづけるようにした。照明光線の位置、その移動距離、移動方向、撮影の時間間隔はパーソナル・コンピューターにより制御されており、それらは任意の値に設定されうるので、たとえば図2の(a)とか(b)とかのようなモードでその位置が変化する照明の下での撮影が行なえる。本図で z は水路床からの高さ、 t は経過時間である。

本論文では、図2(b)のモードで照明光線の位置を時空間的に移動させた。すなわち、光線が上層側に位置する時は水路床から7.8 ~ 10.8 mmの間の3 mmの厚さの薄い空間を照明しており、下層側に位置する時は2.5 ~ 5.5 mmの間の薄い空間を照らしているようにした。そして、照明光線は0.2秒毎に上層から下層へあるいは下層から上層へと瞬時に移動するようにした。カメラのシャッターは、照明光線の移動時間に同調して開閉し、その開放時間は0.16 ~ 0.17秒である。測定の対象とした流れは、巾40 cm、底勾配1/1,000の一樣な水路における乱流状態の流れで、流量は1053 cm³/s、測定範囲での平均的な水深は4.0 cmに設定した。断面平均流速は8.53 cm/s、Re数は2600、まさつ速度は1.0 cm/sである。

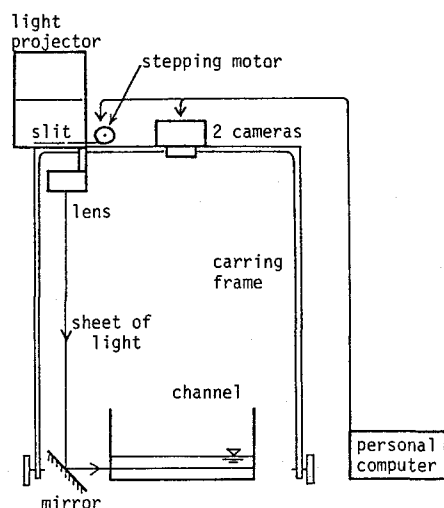


図1 実験装置の概要

3. 解析の範囲

得られた図2(b)のモードの連続写真撮影結果のうち、ここでは8コマの写真をとり出して解析し、その結果を検討する。解析は、各写真画面のうち水路中央線と右岸側壁面に囲まれた20 cm × 30 cmの領域について行なった。これら8つの解析範囲の時空間的な位置関係は表1のようである。本表に示されるように、偶数

表 1 各写真の解析範囲

section No.	height of light (mm)	time of photograph (sec)	analysis region x (cm)
232	2.5 ~ 5.5	0.0 ~ 0.2	0.00 ~ 30.00
233	7.8 ~ 10.8	0.2 ~ 0.4	1.61 ~ 31.61
234	2.5 ~ 5.5	0.4 ~ 0.6	2.48 ~ 32.48
235	7.8 ~ 10.8	0.6 ~ 0.8	4.09 ~ 34.09
236	2.5 ~ 5.5	0.8 ~ 1.0	4.96 ~ 34.96
237	7.8 ~ 10.8	1.0 ~ 1.2	6.57 ~ 36.57

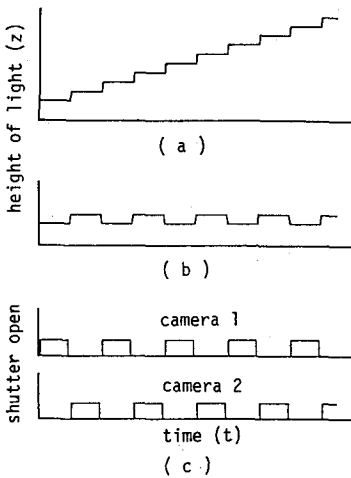


図 2 (a),(b);スリット光線のシフトする様式
(c) ; カメラのシャッターのタイミング

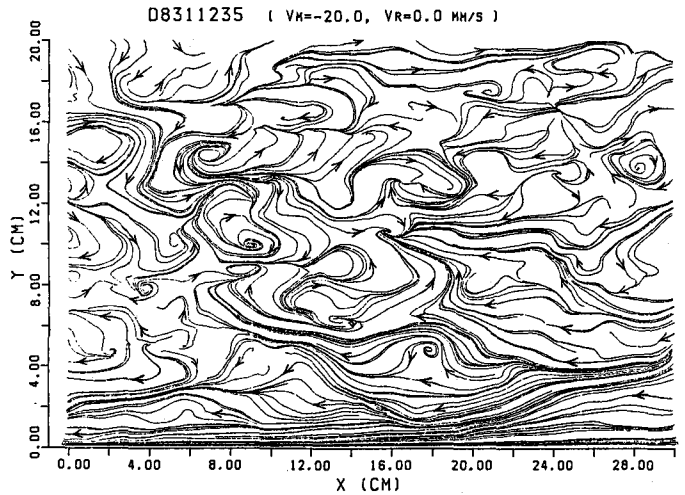


図 3 No.235断面の流線のパターン

番号の解析断面は下層側の断面を、そして奇数番号の解析断面は上層側を示しており、その平均的な高さは各々4.0mm および9.3mm である。これはそれぞれバッファー層(0.5 ~ 7.0 mm)の中程およびその外側に相当する。本表の末欄に示されている解析の範囲は、フィルムに移しこまれた流れの場の中で実際に解析対象領域として採用した領域を水路に沿う流下方向座標xで表示したものである。その上層3断面相互間は、その断面高さにおける平均流速(8.175cm /s) × 時間間隔(0.4s) = 2.48cmだけ流下方向に隔てられており、下層の各断面はその直後の上層断面から台車速度(8.05cm) × 時間間隔(0.2s) = 1.61cm だけ上流方向に隔てられている。

4. 流速ベクトルの分布

前報¹⁾と同じ手法により、写真に写しこまれたトレーサの軌跡の両端の位置座標を数値化し、次いで計算機を用いて、内挿法により、解析断面において4mm 間隔で組まれた正方格子の各点における流速ベクトルを求めた。以後の解析の基礎資料となるこれら流速ベクトルの状況を把握するため、これらから平均流下方向流速を差し引いた上で各ベクトルに包絡する曲線すなわち流線を計算により求めた。その一例として、No

.235の断面におけるものを図3に示す。本図において、上流向き（左向き）の流線は、平均流速より流速がおそいことを意味している。

同じ断面の流速ベクトルの主流流下方向成分 u の分布を図4に、横断方向成分 v の分布を図5に示す。本図でも u は、もとの流速から平均流速分を差し引かれた上で示されている。したがって、 u が負の領域は、平均流速よりおそい流速の領域を意味しているが、その様な領域が流下方向に長く続いており、しかも横断方向には高速領域と交互に現われていることがわかる。このことから、Klineらのいう低速渦の領域はバッファ層を越えて更に続いていることが解る。一方、 v の分布は上記の低速渦の領域と無関係の様相を示していることが注目される。

5. 2次元相関解析

6つの解析断面内の流下方向流速成分 u 、横断方向流速成分 v ならびにそれらから計算される渦度 ROT の各値の断面相互間の相関関係を調べることにより流れの時空間的な変化特性を検討した。

i) 相互相関係数の計算

第 m 断面における流下方向流速 $U_m(x, y)$ と第 n 断面における流下方向流速 $U_n(x, y)$ との同じ y の値における相互相関係数を $R_{Umn}(x, y)$ とし、同様にして横断方向流速についての相互相関係数 $R_{Vmn}(x, y)$ 、そして渦度についての相互相関係数を $R_{ROTmn}(x, y)$ とし、これら各相互相関係数を計算し、その値の平面的な分布を等値線で表現した。

ii) 同じ高さにある2断面間の相関特性

図6は共に上層側に位置するNo.233断面とNo.235断面間の u の相互相関係数 $R_{U233,235}$ を示したものであり、一方図7は共に下層側に位置するNo.232断面とNo.234断面の間の u の相互相関係数 $R_{U232,234}$ を示したものである。これらの図において太い実線は相関係数が0.0の等値線を示す。これら各断面間の時間的なずれは0.4sであるが、相関係数が0.6よりも大きな値をもつ領域がかなり広い範囲にわたって分布しており、2

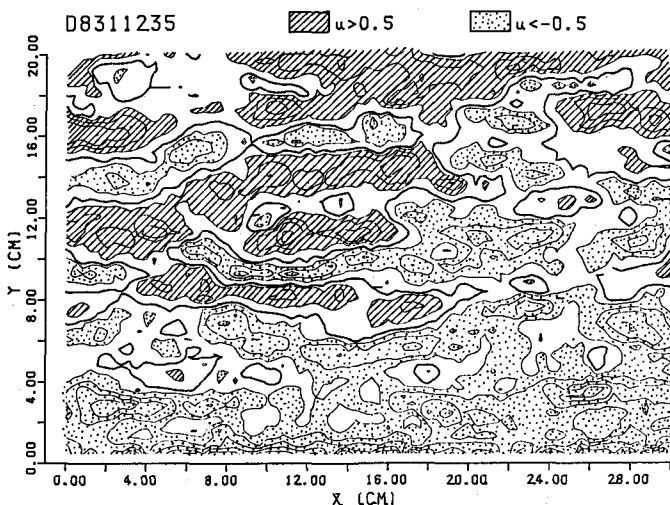


図4 No.235断面における流下方向流速成分 u の分布

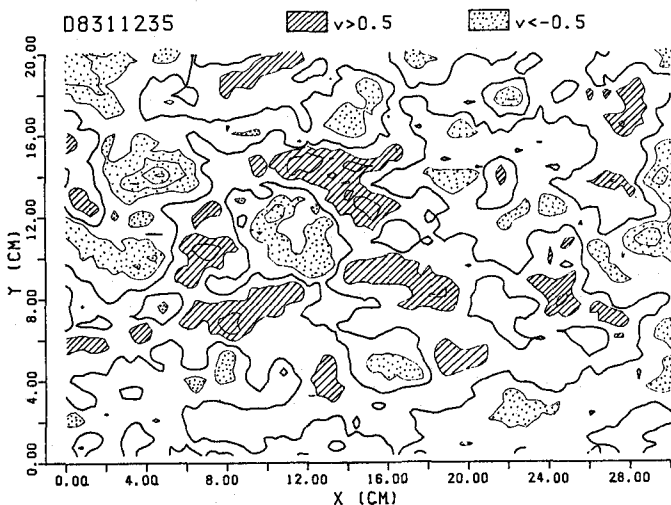


図5 No.235断面における横断方向流速成分 v の分布

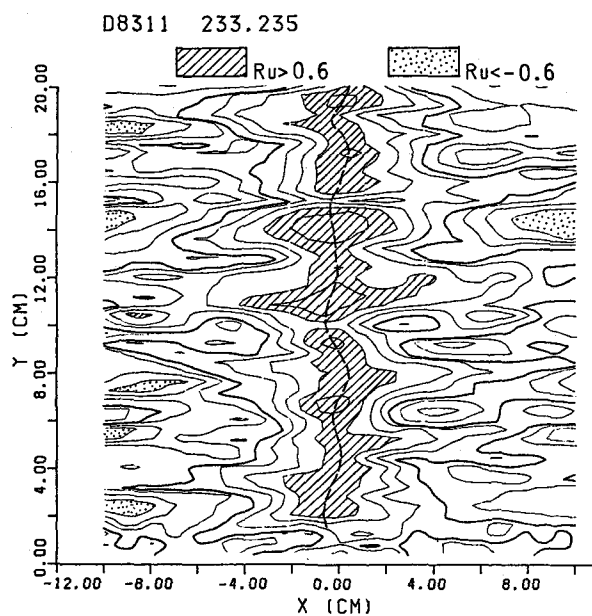


図6 No.233断面とNo.235断面間のuの相互相関係数

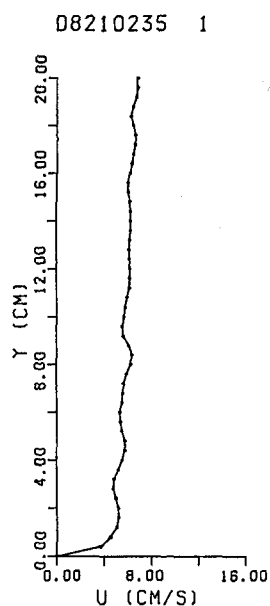


図8 No.235断面のU(y)の分布

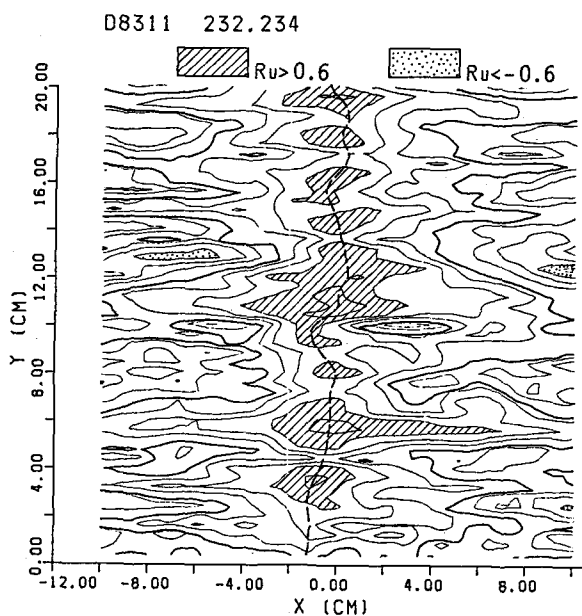


図7 No.232断面とNo.234断面間のuの相互相関係数

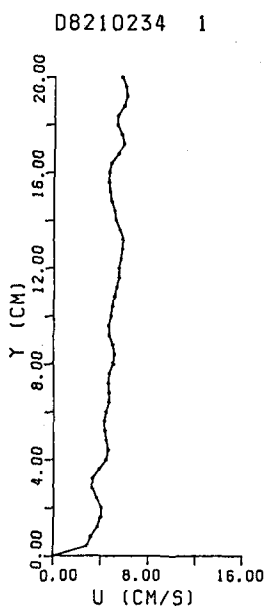


図9 No.234断面のU(y)の分布

断面間の相関はかなりよいことがわかる。

つぎに図8と図9はそれぞれ、No. 235断面およびNo. 234断面において流下方向流速成分を流下方向に平均した値 $U(y)$ の横断方向分布を示したものである。図8と図7において、相互相関係数の値の分布のピークの位置を破線で示してあるが、これらの曲線の変化の模様とそれぞれ図8、図9の平均化された流下方向流速分布曲線の模様とは、全体として壁面に近づくほど左へよっていることにおいても、また局所的な凹凸の配置においてもよく似ていることがわかる。乱れの移流速度が平均流速に匹敵することは既に固定点計測の結果から示されているが、⁴⁾本図は、移流速度の横断分布についても上記のことが成立つことを示している。

さらに図6において相関係数の値のとくに高い領域は横断方向にほぼ4cmの間隔で分布しており、これは水深のスケールに相当することが指摘される。一方図7では、相関係数のとくに高い領域はほぼ半水深に匹敵するスケールで分布している。また、これらの図において相関係数が正の領域は平均的には流下方向に10cm程度のスケールをもっているが、この値は水深の約2.5倍に当ることが注目される。ただ、相関係数の大きな所と平均的な流速 $U(y)$ の大小との相互関係については明確な傾向は認められなかった。

次に、図10は同じく下層断面No. 232とNo. 234の間の v についての相関係数を示したものである。本図に示されている移流速度の分布を示す曲線もやはり図9の平均流速分布の曲線とよく一致しており、先に u について述べたことが v についても成立することがわかる。ところが本図では相関係数の高い領域の横断方向の間隔はほぼ水深のスケールであり、この点では図7に示される u の相関特性と性格を異にしている。

図11は上層の断面No. 233とNo. 237の間の相関係数で、この場合の時間的なずれは0.8 sで、前の各図の場合のその2倍に相当する。この場合でも位相のずれの模様

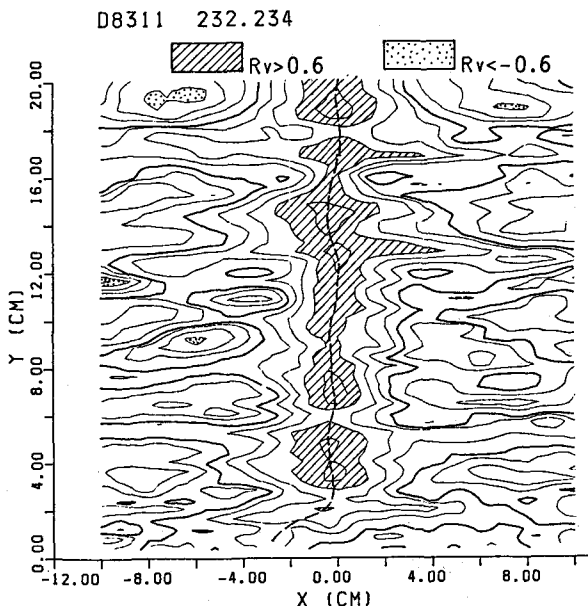


図10 No. 232断面とNo. 234断面間の v の相互相関係数

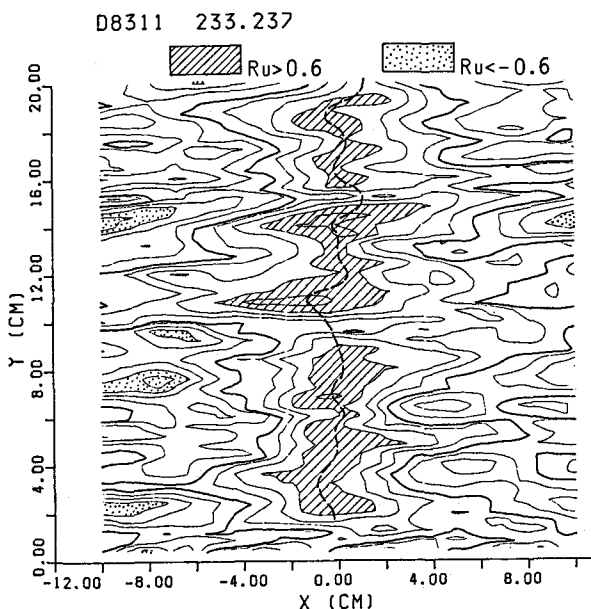


図11 No. 233断面とNo. 237断面間の u の相互相関係数

は図8の平均化された流速の変化の模様と若干の類似性を示している。しかし図6に示されている位相のずれの模様に比べると本図の方が流下距離が長いだけに位相のずれそのものが大きくなると同時にその変動も大きくなっていることが指摘される。

上の諸結果は、水平断面内凍結乱流の仮定は平均的かつ短時間にはよく成立していることを示している。さらに、移流速度として流下方向平均流速を用いるならば、水平断面内凍結乱流の仮定はかなり改善されるであろうことを示唆している。

iii) 上下2断面間の相関特性

図12は下層のNo.234断面と上層のNo.235断面の間の u の相互相関係数 $R_{u, 234, 235}$ を示したものであり、2断面間の時間的なずれは0.2s、水深方向の距離は5.3mmである。図から相関係数の高い値は x が0~4cmの辺りに分布しており、その横断方向分布の変化が激しくなっていることがわかる。そこで、相関係数の高い領域にA~Fの記号を付け、それらの中心部の座標から流下方向流速成分についての上下層間の位相のずれの距離および傾きを計算して表2に示した。

以上より、これらの2断面間では横断方向の全体にわたって相関が高いわけではなく、相関の高い部分もいろいろな傾きをもって分布しており、平均的には水平方向と15度の傾きをもっていることがわかる。

参考文献

- 1) 宇民 正、上野鉄男：連続断面撮影法による大規模乱流構造の可視化とその解析、第27回水理講演会論文集、1983、pp.573-578.
- 2) 宇民 正、上野鉄男：大規模乱流構造の可視化と解析(2)、京大防災研究所年報、第26号B-2、1983、pp.461-476.
- 3) Kline, S.J. et al.: The structure of turbulent boundary layer, Jour. Fl. Mech., Vol. 30, 1967, pp.741-773.
- 4) 今本博健、上野鉄男：開水路流れにおける乱れの空間構造について、京大防災研究所年報、第14号B、1971、pp.205-217.

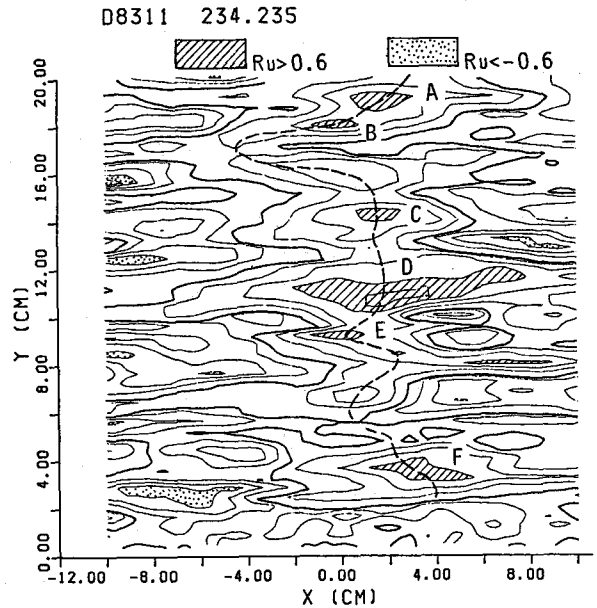


図12 No.234断面とNo.235断面間の u の相互相関係数

表2 上下層間の位相のずれ

	phase lag	angle
A	22 cm	13.5°
B	4	53.0
C	22	13.5
D	26	11.5
E	6	41.0
F	36	8.4
average	19.3	15.4