

吹送流中に存在する乱流構造の定量的計測
QUANTITATIVE ANALYSIS OF COHERENT STRUCTURES WITHIN A WIND DRIVEN CURRENT

東京工業大学大学院 小林智尚 T.Kobayashi
東京工業大学工学部 日野幹雄 M.Hino
東京工業大学工学部 福西 祐 Y.Fukunishi

1. はじめに

湖沼や貯水池などの閉鎖水域では、一般に水域に流入出する流量に比べて水域に貯留する流体の体積が大きいが、このような場合には水面上を吹く風が水域内の流れに対して支配的な要因となる。したがって湖沼などでの汚染物質拡散過程の問題をはじめ湖沼水の混合に起因する問題を解決するに当たっては、その水域上を吹く風により引き起こされる湖沼水中の現象、すなわち風波や吹送流による乱れの場を把握することが必要不可欠となる。しかしながら、風波に関する研究例^{1,2)}に比較して、吹送流の乱れに対する研究例は少なく、特に吹送流中にみられる乱流現象を乱流構造の面から考察した研究^{3,4)}はわずかしかない。また、吹送流中の乱流構造に関する日野らの研究^{3,4)}では吹送流でも特にせん断の強い水面付近の流れ（吹送せん断流）の中に存在する三次元的な乱流構造が可視化法により定性的に議論されている。本研究では、吹送せん断流中に存在する組織的な乱流構造のより詳細な考察を目的として、レーザー流速計と条件付抽出法とを用いた定量的計測をおこなった。

2. 実験装置

本研究ではFig. 1に示すアクリル樹脂製の風洞付水路を用いた。この水路は長さ4 m幅20 cm深さ約15 cmの水路部とその上の高さ約20 cmの風路とでできており、この風路部の左端に風洞の吹き出し口が接続されている。

また、吹送乱流中の組織的構造の定量的計測にはブロープ型レーザー流速計とビーム・スキャン型レーザー流速計⁵⁾の2台のレーザー流速計を用い、後で述べるように組織的構造を三次元的にとらえるため流下方向成分Uを空間的に異なった2点で同時に測定した（Fig. 2）。この測定で用いたビーム・スキャン型レーザー流速計（SLV）はほぼ瞬時に定量的な瞬間断面流速分布が測定できるが、本研究ではSLVの測定点移動がコンピューターから自由に制御できるという特性をいかして、いままで困難であったレーザー流速計による空間流速分布自動計測を行った。

3. 実験結果

(a) 流速変動

実験で用いた風洞付水槽の上流端より2 m、深さ16 mmの比較的せん断の強い点において測定された速度変動、およびそれより求められるReynolds応力変動($-u'v'$)をFig. 3に示す。ここで測定領域の座標は、流下方向、深さ方向、水路幅方向をそれぞれX, Y, Zとしている。この図からそのReynolds応力は時間的にはほぼ平均的に発生されるのではなく間欠的に現れる大きなピークを伴う時間に集中して発生していることがわかる。また、Reynolds応力が平均流のエネルギーから乱れのエネルギーを生成する作用を持つことを考えると、この大きなReynolds応力の発生を伴う現象が吹送流中の乱れの生成を支配していると

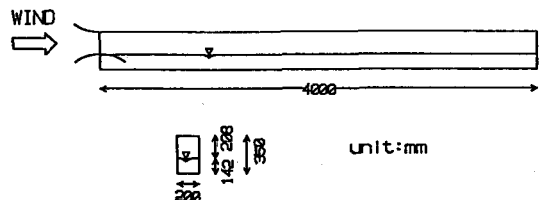


Fig. 1 風洞付水路

考えられる。また、この図からReynolds応力のピークと流速変動 u' の正のピークとがほぼ一致していることにも気が付く。これらより、大きな速度変動 u' が、吹送流中の乱れエネルギーの生成に大きく関与している現象を見つける目印になりうると考えられる。

(b)条件付抽出法

この現象の性質をとらえるために、大きな正の速度変動 u' を条件として用いる条件付抽出法によって速度変動の空間分布を計測した。具体的には、2台のレーザー流速計のうち検出用の流速計から得られる速度変動 u' があらかじめ設定してある条件を満足した瞬間に、空間的に離れたもう一台のサンプリング用の流速計でこの抽出された事象の計測を行った。この空間的に離れた2点での速度変動の計測の様子はFig. 2のようになる。2台のレーザー流速計のうち、検出用にはプローブ型レーザー流速計を、またサンプリング用にはビーム・スキャン型レーザー流速計を用い、どちらもU成分のみの測定を行った。

(c)波の発生していない場合

風速があまり大きくなく水表面に波が発生していないが流れは乱流となっている吹送流を対象に測定を行った。その測定結果をFig. 4、Fig. 5に示す。Fig. 4はXZ平面すなわち水平面での、またFig. 5はXY平面すなわち鉛直平面での速度変動 u' の分布である。ここで検出点は $(X, Y, Z) = (0, 1.45\delta, 0)$ にあり、 $Z=0$ の平面が対称面となる(δ : 排除厚さ)。Fig. 4から、どの深さYの水平面をとっても対称面($Z=0$)近く、とくに $Z=X=0$ 付近では正の速度変動が観測されるが、対称面から遠ざかる、つまりZ座標の値が増加する方向にみていくと観測される速度変動が正から負に移ってゆくのがわかる。またFig. 5から次の2つのことがわかる。1つは、対称面での図より、速度変動のピークが水面に近づくにしたがってXの正の方向すなわち流下方向にずれていること、もう1つは、Zが増加するとき、それぞれの水深Yでの速度変動が一樣に正から負に移ってゆくのではなく、水面付近から順に正から負に移ってゆく点である。

Fig. 6は、渦度の指標として du'/dz のコンター図を各水深ごとに求め、それらを順に重ねて示したものである。この図から du'/dz のピークが水面に近づくにしたがって流下方向にずれ、さらに du'/dz の強い部分もX軸方向に細長くなっていることがわかる。これは、吹送せん断流中の組織的構造が傾いており、かつそれが水面となす角度も水面に近づくにしたがって小さくなっていることを示している。これらの特徴は、固体壁面上の乱流境界層内に存在する組織的構造の特徴と一致している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。したがって、吹送せん断流中にも乱流境界層内の組織的構造と同じ構造が存在していると言える。

一方、吹送流を特徴づけるもう一つの組織的な流れとして水槽幅の半分におよぶ規模の縦渦構造がある。

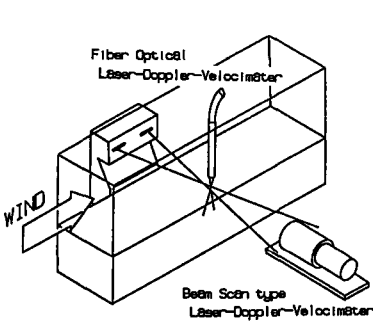


Fig. 2 計測装置

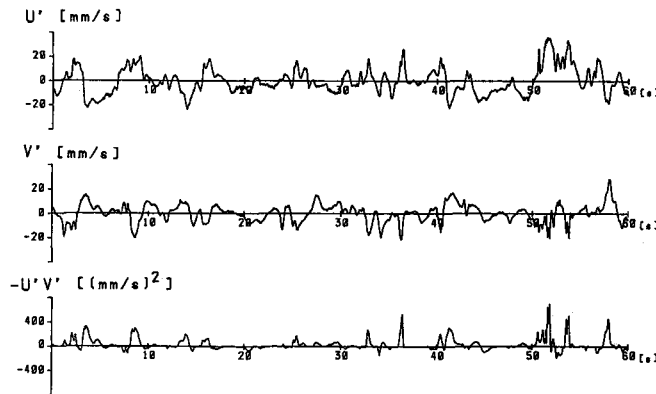


Fig. 3 速度変動とReynolds応力

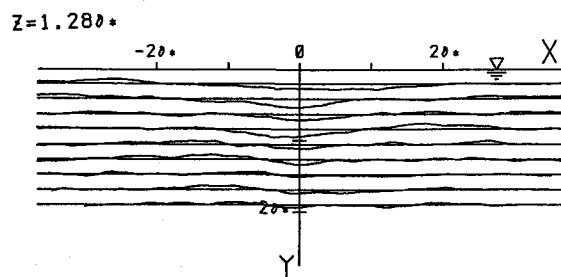
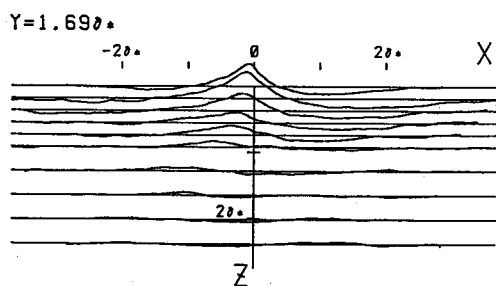
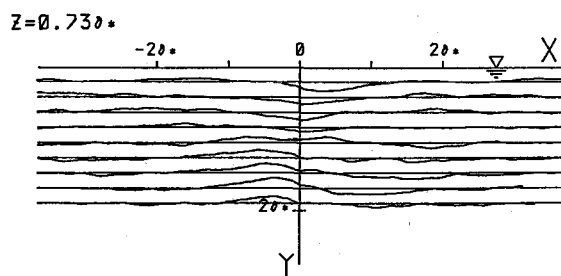
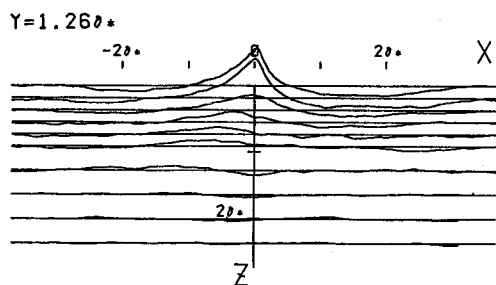
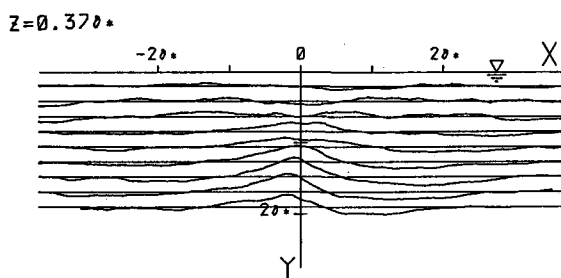
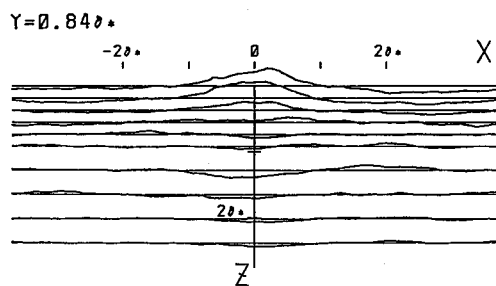
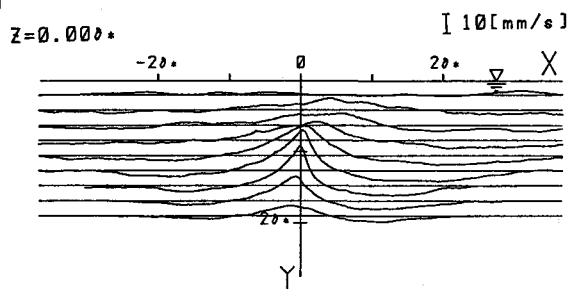
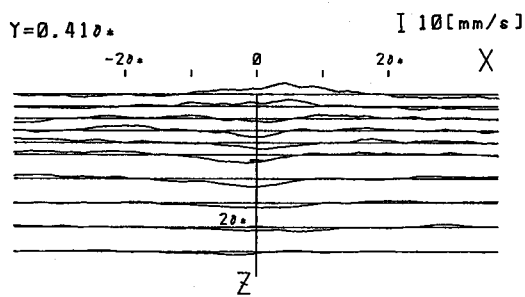


Fig. 4 水平面 (XZ面) 内での速度変動
(水表面に波のない場合、
 $U_{air}=4.5 [\text{m/s}]$)

Fig. 5 鉛直面 (XY面) 内での速度変動
(水表面に波のない場合、
 $U_{air}=4.5 [\text{m/s}]$)

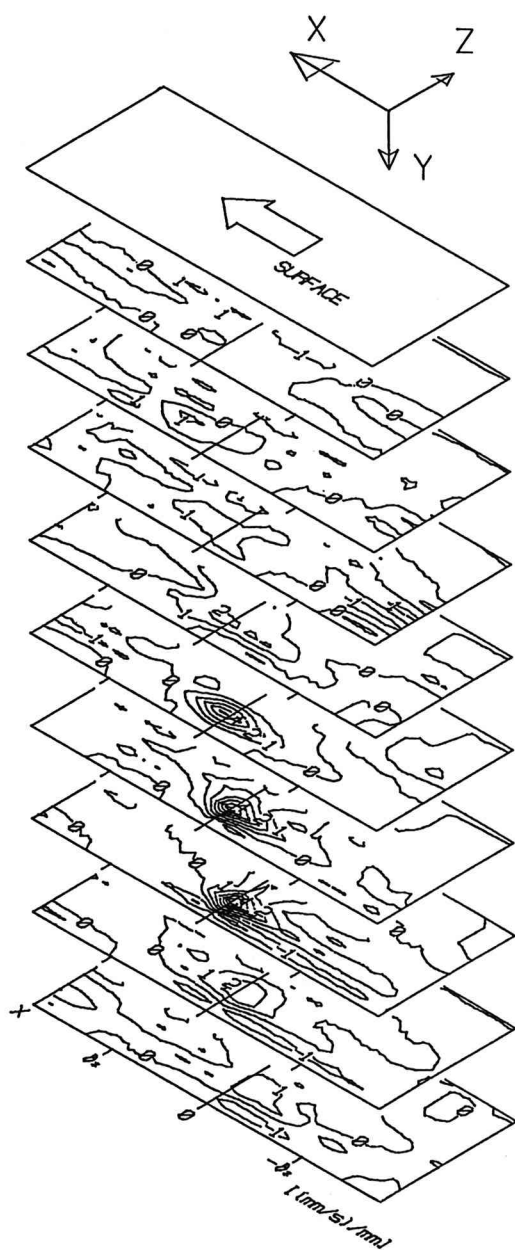


Fig. 6 du'/dz のContour Map
 (水表面に波のない場合、
 $U_{air} = 4.5 \text{ [m/s]}$)

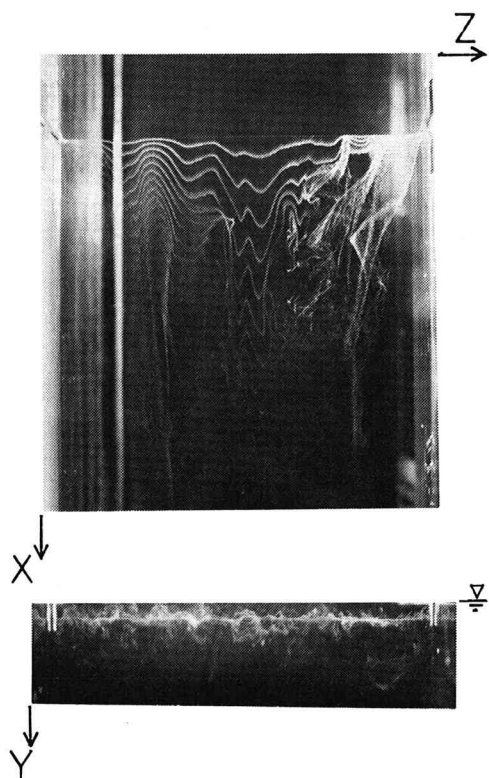


Fig. 7 吹送流内の縦渦構造
 ($Y = 5 \text{ [mm]}$ 、 $\delta T = 0.1 \text{ [s]}$)
 上: 水平面 (XZ面) 内
 下: 鉛直面 (YZ面) 内

これはFig. 7に示すように、Fig. 6のせん断流中の組織的構造よりはるかに規模の大きいものである。われわれはこの縦渦構造が組織的構造に及ぼす影響について調べた。Fig. 8は、検出点を水路幅方向（Z方向）にずらしながら、前と同様な組織的構造の空間分布測定をおこなった結果のうち、対称面における流速変動分布を示したものである。この図において各断面のピークには多少ばらつきがあるものの、そのパターンはどれも同じである。したがって縦渦構造は組織的構造に対して、その規模に多少の影響を与える程度の作用はあっても、本質的な性質までは変化させないという結論を得た。

次に、この組織的構造の対称面における可視化を行った。その結果をFig. 9に示す。水面の位置に楕円形に見えるプローブ型レーザー流速計で組織的構造を検出し、検出と同時にトレーサーとしての水素気泡を6本の線から発生させ、0.1[s]のタイム・ラグをおいたのちの様子を示している。この写真からも、ほぼ対数分布をしている主流の上に、左下から右上までのななめの領域、これはFig. 6でみられる傾いた組織的構造に対応するが、この領域で組織的構造が誘導する速度によるトレーサーのパターンがみられる。

(d) 水表面に波がある場合

風速を少し上げて、水表面にごく初期の風波が存在する吹送流について同様な計測を行った。得られたXY平面での流速分布をFig. 10に示す。この図に目られる流れのパターンの特徴は、波による速度変動が検出点と同位相でのっている点である。これは、組織的構造による速度変動のピークのうち、波の影響による加速と一致したものが特に検出されやすくなったためと考えられる。しかし、この水表面に波がある場合にも、波のない場合と同じ特徴、すなわち、水表面に近づくにしたがって速度変動の生のピークが流下方向にずれている、対称面から離れるにしたがって速度変動が正から負に移ってゆく、という特徴がみられる。したがって、少なくとも発生ごく初期の微細な風波は、組織的構造にあまり影響を与えていないといえる。

4. おわりに

本研究では、吹送流による乱れ場を把握する手段の1つとして、その流れの中に存在する組織的構造の面から定量的な実験実験による考察を行った。その結果次のことが明らかにされた。

- 1) 吹送剪断流中には、固体壁面上の乱流境界層に見られる三次元の組織的構造と同じ構造が存在する。
- 2) 組織的構造と共に吹送せん断流中に存在するマクロな縦渦構造は、組織的構造にさほど影響を与えない。
- 3) 水面に微細な波が存在するような条件の下でも同じ組織的構造が存在する。

5. 参考文献

- 1) 吉川郁夫・川村 宏・奥田邦明・鳥羽良明(1985)：風波の存在する水面下の乱流構造の研究、第17回乱流シンポジウム、pp.76-80
- 2) 鳥羽良明(1986)：風波の相似則に関する物理的仮説、第18回乱流シンポジウム、pp.199-203
- 3) 日野幹雄・瀬岡和夫・須見徹太郎(1984)：吹送流の乱流構造の可視化、第12回流れの可視化シンポジウム、Vol.4, No14, pp.245-248
- 4) 日野幹雄・瀬岡和夫・須見徹太郎(1985)：吹送流の組織的渦構造の可視化、土木学会論文集、第357号/2-3, pp.75-80
- 5) 日野幹雄・小林智尚・村本龍夫(1987)：SLVと可視化法を併用した模型実験手法、第31回水理講演会論文集、pp.771-776
- 6) 福西 祐・佐藤 浩(1983)：乱流境界層間欠領域の構造、ながれ2, pp.272-278
- 7) 福西 祐・佐藤 浩(1984)：乱流境界層中の秩序運動と間欠領域との関係、ながれ3, pp.378-385
- 8) 小林智尚・福西 祐・日野幹雄(1987)：吹送剪断流中の三次元構造の実験的研究、第19回乱流シンポジウム

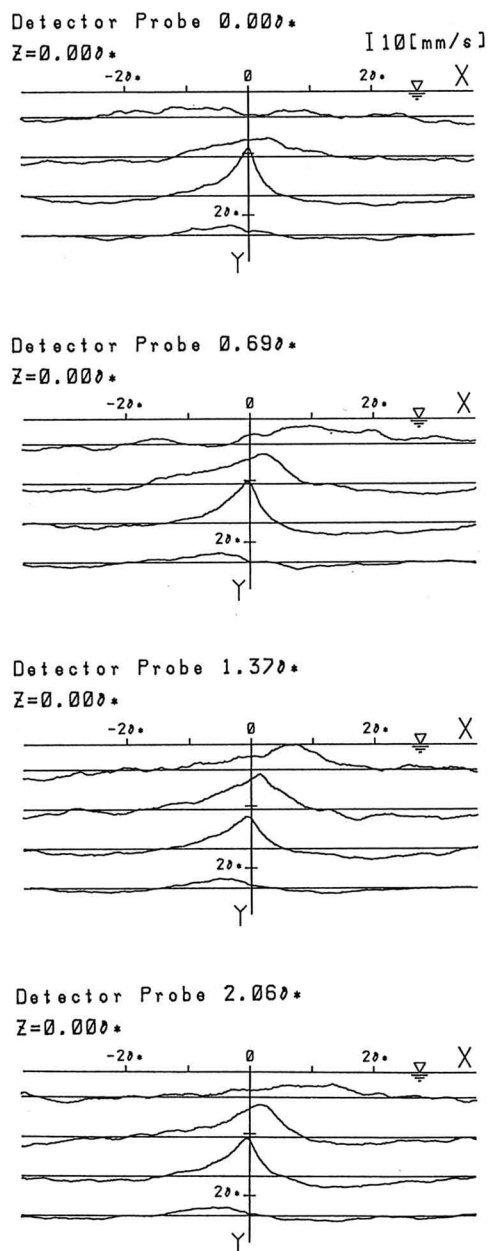


Fig. 8 縦渦構造による組織的構造への影響
(水路幅方向に異なる面での
対称面内速度変動、
水表面に波のない場合、
 $U_{air} = 4.5\text{ [m/s]}$)



Fig. 9 対称面 ($Z=0$) 内での組織的構造
($\delta T = 0.1\text{ [s]}$)

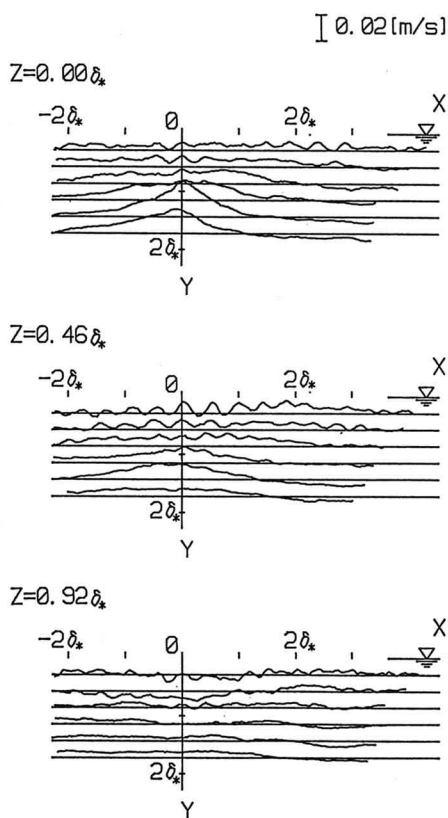


Fig. 10 鉛直面 (XY 面) 内での速度変動
(波が発生している場合、
 $U_{air} = 5.8\text{ [m/s]}$)