

1. はじめに： 乱流場の時空間構造の定量的検討法は、一般に、乱れ速度の多点同時計測による方法と、流れの可視化による方法とに大別される。前者はデータ処理が簡単で、定量的評価に適しているものの、広領域における特性を把握するには多数点における計測が必要で、条件はサンプリングによりある程度補正されるが現象が平均化され、卓越現象の特性を抽出し難いという欠点がある。後者は広領域の流況あるいは卓越現象を容易に把握でき、可視化による大規模乱流現象の解明に用いられてきている。ただし、複雑な乱流現象から卓越現象を抽出しようとする場合、研究者の主観に支配される要素も多く、普遍的特性の識別にはかなりの熟練と豊富な知識が要求される。本報告は、開水路流れにおける3方向の乱れ速度を対象とした多点同時計測を行ない、3方向軸に垂直な平面における空間相関特性について検討するとともに、従来可視化実験より得られている知見と総合して、乱れの発生・発達過程のモデル化を試みたものである。

2. 空間相関特性： 長さ13m、幅40cm、路床勾配1/1,000の滑面直線水路において、流量 $Q=6.35$ l/sec、水深 $H=4.0$ cm、フルード数 $Fr=0.62$ 、レイノルズ数 $Re=1.59 \times 10^5$ の流れを対象とし、2台の2次元用X型ホットワイヤ流速計を用いて乱れ速度の2点同時計測を行った。データ処理におけるサンプリング周波数は $f_s=160$ Hzより320 Hz、データ数 $N=500$ 、繰返し数 $N_r=5 \sim 25$ である。

図-1は、水路中心線上の半水深点で基準とし、流れ(x)方向(縦方向)、鉛直(y)方向および横(z)方向の乱れ速度 u 、 v 、 w の縦断面(xy平面)、横断面(yz平面)および水平断面(xz平面)における空間相関係数 R の計測結果を示したものである。次の事項が知られる。すなわち、縦断面上における R_{uu} および R_{ww} の等相関線はいずれもx方向に大きく広がり、下流側に傾いた長円形状となっているのに対し、 R_{vv} には傾きが見られず、y方向の広がりもやや卓越した長円形状となつてゐる。このように、 R_{uu} および R_{ww} と R_{vv} とを比較すると顕著な相関特性を示すことは、 u および w と v との発生機構に差異のあることを示すものとして注目される。また、横断面上の R はいずれも長円形状であるが、 R_{uu} および R_{vv} はy軸を長軸としているのに対し、 R_{ww} はz軸を長軸としている。さらに、水平断面上では、 R_{uu} および R_{vv} がx軸を長軸とする長円形状であり、 R_{ww} はほぼ円形状とみられる。

このように、空間相関特性は対象とする乱れ速度および平面の種類によってかなり複雑に変化しており、単純な乱流構造モデルによって説明づけることは困難である。したがって、以下においては主として縦断面上の空間相関特性に着目し、乱れの発生・発達過程のモデルについて検討することとする。

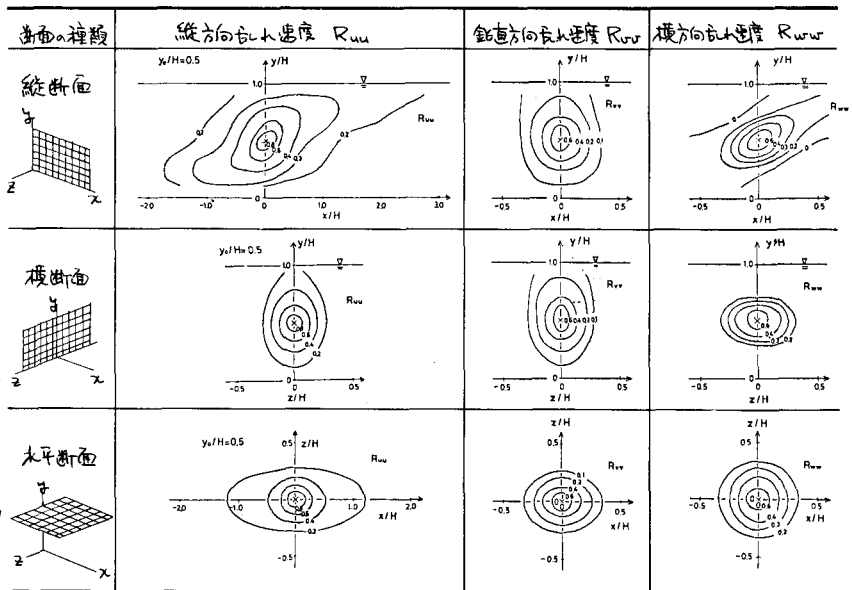
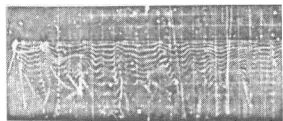


図-1 各種断面上における等空間相関曲線の特性

1) 路床面付近における渦の発生



2) 水面近くの渦



3) 渦の発生による水面の乱れ

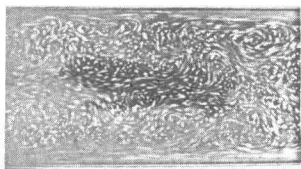


図-1 流の可視化実験例(長野)

TRIAL MODEL OF TURBULENT STRUCTURE

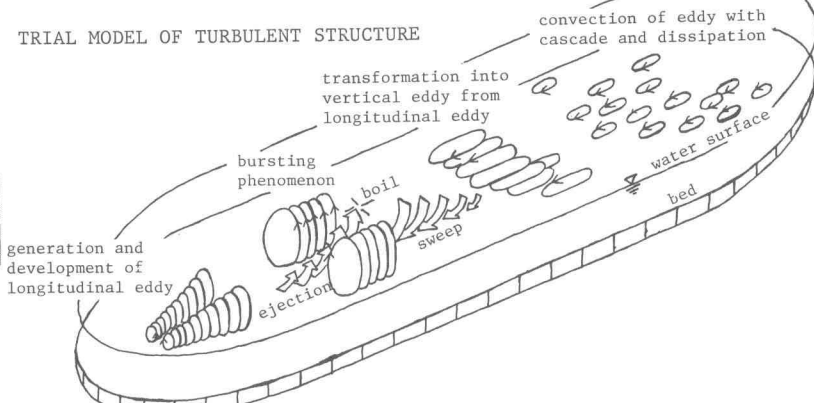


図-2 流の発生・発達過程のモデル化 (第1段階: 弱・縦渦の発生および発達, 第2段階: パースティン現象, 第3段階: 鉛直渦への変換, 第4段階: 渦底に伴う鉛直渦の発生および発達)

3 流の発生・発達過程のモデル: 最近における流の可視化技術の発展に伴い、流の発生・発達過程について多くの有用な知見が得られるようになった。写真-1は、流の可視化実験の一例として、中尾・上野²⁾によって撮影されたものを示したものであり、路床近傍には流の方向に正びる低速度および高速度の存在が認められ、これらがバーストと渦の発生へとつながっていくものと考えられる。また水面には鉛直軸回りの渦運動が数多く認められ、平均流とともに流下しつつ、変形・消散するものと考えられる。中尾・上野はこのような流の発生・発達過程を渦の集まりと変形という概念より説明がけようとし、1次渦、馬蹄渦、縦渦の3段階に分けたモデルを提案している。馬蹄渦の概念は、Theodorsen¹⁾によって提唱されて以来、流の発生・発達過程を説明するための主要概念として多くの研究者により用いられているが、その存在を直接的に確認することが困難なため不明の点も多い。また、横方向に正びる渦が上昇・変形していくという馬蹄渦の概念では、実験で示したRvの特性を説明し得ないように思われる。

このため、図-1および写真-2に示した空間相関特性と流況特性とを矛盾なく説明しようとするモデルとして、図-2に示されるようなモデル化を試みた。図-2のモデルによると、流の発生・発達過程は次のようになる。

1) 第1段階として縦軸回りに弱・渦が発生し、渦の発生部付近の上昇流により低速度が、渦の外縁付近の下降流により高速度が形成されるようになる。2) 渦が発達して水深全体にわたる縦渦となり、やはり強い上昇流(ejection)が発生し、水面にはバイルが見られるようになる。この縦渦には鉛直軸および横軸回りの渦運動も含まれるが、縦軸回りの運動が最も卓越していることを縦渦と呼ぶことにする。3) 上昇流が次第に発達するにつれ、縦渦からのエネルギー供給が不足となり、強い下降流(sweep)が発生し、縦軸回りの渦運動は弱くなり、鉛直軸回りの運動が卓越するようになる。4) 鉛直渦は平均流によって流下されつつ、慣性効果により、入ったスケーのものと合体し、粘性効果により消散されることになる。

以上のモデルを用いて図-1に示した空間相関特性を説明するところから始める。すなわち、鉛直方向の流の速度は主として縦渦に起因するため鉛直位置による位相差は生じないのに対し、横方向および横方向の流の速度は鉛直渦によっても規制されるため、流下に伴い鉛直位置による位相差が見られるようになる。

以上のモデルは、現象を極端に単純化して示したものであり、実際現象では、渦運動の本質、馬蹄渦の干渉などによりさらに複雑なものとなり、これらの点については今後さらに検討を続けるとともに、より完全なものへと改善していく予定である。なお、本報告では中尾・上野両氏の議論により多くの示唆を受けた。ここに記して謝意を表す。参考文献: 1) 今井幸彦: 河床近傍の渦, 1974, 2) 中尾上野: 流の可視化実験, 1977.