

## II-232 直線開水路流れの縦渦とその低周波変動について

京都大学 工学部 正員 祢津家久

京都大学 工学部 正員 中川博次

### 1. まえがき

水深に比べ水路幅が十分大きな直線状の開水路流れには流下方向に軸をもち、互いに反回転する水深規模の2次流すなわち縦渦が水路横断方向に並列して存在することが古くから知られ<sup>1)</sup>、木下による実河川の航測結果から<sup>2)</sup>この並列した縦渦が自由水面上にボイルや高速部・低速部を形成し、一方河床面には洗掘部と堆積部が水路横断方向に生じていわゆる縦筋(sand ribbon)が発生すると報告され、直線開水路流れの3次元流況を引き起こす原因として注目され、これに関する理論的・実験的研究が最近精力的に行われている。また、この縦渦は組織立った乱流の一種と考えられ、乱れエネルギー・レイノルズ数の発生・維持機構であるバースティング現象と酷似した運動特性を示すことから、開水路流れの乱流構造を解明する上で看過できず、両者の関連性が著著らによって検討されている。<sup>3)</sup>このように、縦渦の解明は基礎水理学はもちろん河川工学上からも重要であるが、小規模な実験水路では縦渦の強度は小さく、またかなり低周波変動を示すことから、この実測例は少なく、縦渦の構造やその発生機構さらにはバースティング現象との関連性には不明な点が多い。<sup>4)</sup>本報告は、縦渦の変動周期はバースティングの発生周期より1オーダー以上低周波であり、両者を同一視できないという結論を実証する目的で、<sup>3)</sup>縦渦と流下方向に敷いた縦棒粗度によって引き起こし、この乱流特性を検討したものである。

**2. 理論的検討** 主流方向をx軸、水深方向をy軸、水路横断方向をz軸にとり、それぞれに対する平均流速成分を $U, V, W$ 、乱れ成分を $u, v, w$ とすれば、x方向の渦度 $\xi = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}$ の方程式は次式で与えられる。

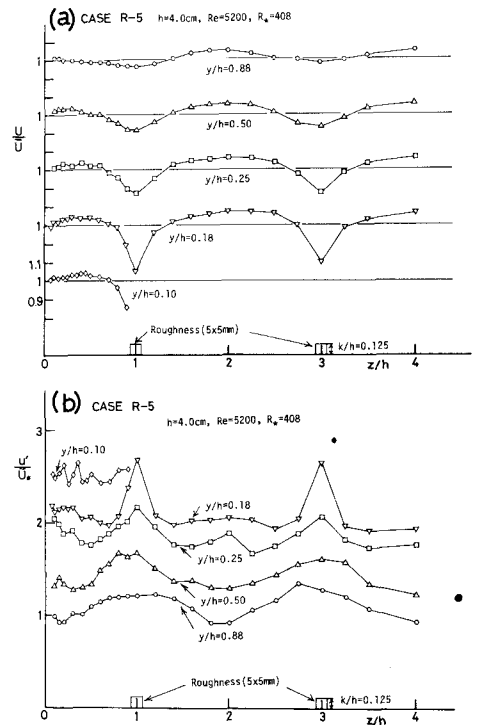
$$\underbrace{\left(V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z}\right) \xi}_{\text{①}} = \underbrace{\frac{\partial^2 (\bar{v}^2 - \bar{w}^2)}{\partial y \partial z}}_{\text{②}} + \underbrace{\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \bar{v} \bar{w}}_{\text{③}} \quad (1)$$

隅角部の2次流の発生機構としてBrundstättらは<sup>5)</sup>① $\approx$ ③、一方Gussnerらは<sup>6)</sup>①+② $\approx 0$ と式(1)を相反する形に近似し、解析しているが、③の式が他の渦度成分の式より高次の微小項ゆえ式(1)を実験的に検討することは水流では精度上困難で、式(1)による縦渦の発生機構の説明は依然不十分である。一方、乱れエネルギー $\bar{q}^2 = \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2$ の式は、粘性項及び拡散項を無視すると、

$$\underbrace{\left(V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z}\right) \frac{\bar{q}^2}{2}}_{\approx P} = \underbrace{-\bar{u} \bar{v} \frac{\partial U}{\partial y} - \bar{u} \bar{w} \frac{\partial U}{\partial z}}_{\approx P} - \epsilon \quad (2)$$

となり、この式はスカラー式である上に式(1)と比べて水流での実測も比較的容易で、縦渦の発生機構が説明できると考えられる。

**3. 実験・計測方法** 一様平滑面での縦渦はもしもこれが存在しても背後の乱れに影響されて発生位置がゆらぎ、点計測が困難になるから、本実験では $5 \times 5 \text{ mm}$ 断面の長さ6mの角柱粗度を水路横断方向に6本、水深 $h=4 \text{ cm}$ の2倍の間隔で敷いて縦渦を安定・固定化した。これは縦筋の峰に相当し、実際現象を模擬したものである。縦渦の $V, W$ は $U$ の数%であるから、X型のrot.filmを使っても余程計測条件が恵まれないと誤差内に収まり、また低周波変動を解析するに必要な長時間連続計測はほとんどできず、このことが水流での縦渦の計測を困難にしていた理由である。



図・1 (a) 横断方向への平均流速の変化  
(b) 横断方向への乱れ強度の変化

本実験では1成分 hot-film で2分間計測及び3mm径のプロペラ流速計で1分間の連続計測を行い、縦渦の基本的な特性を検討した。平均流速  $U_m = 13 \text{ cm/s}$  であり、詳しい水理条件等は文献3)を参照されたい。

**4. 実験結果** 図1に、平均流速  $U$  及び乱れ強度  $u' \equiv \sqrt{u'^2}$  の横断方向  $z$  への変化を示す。  $U$  及び  $u'$  は平均流速及び摩擦速度の  $z$  に関する平均値である。角柱粗度上では低速部かつ高乱れ、粗度間のなな凹部上では高速部かつ低乱れとなり、これらが木梁れの2倍で並列している。  $U$  と  $u'$  の相関は半水深で最大となり、 $z$  方向へのこれらの変化は縦渦の基本的な特性と考えられ、河床から自由水面まで高速・低速の帯が存在している。縦渦や縦筋の形成は摩擦速度  $u_*$  が  $z$  方向に波状変動するためと考えられるが、この正確な実測は困難である。  $U$  は対数則分布を示したから、  $U(y, z)/u_*(z) = K' \ln(y/h) + B(z)$  とおき、  $u_*$  を評価した結果が図2である。また、  $u'$  が  $u'(y, z)/u_*(z) = D \cdot \exp(-\lambda y/h)$  なる普遍関数分布に従うと仮定して得られた  $u_*$  の値を図2に併示した。式(1)で、①～⑦とした境界

厚での近似では高速部で境界厚さが減少することから  $u_*$  は最大となるが、図2の実測値は必ずしもそうならず、かえって粗度上(低速部)の方が大きい。このことは、平坦河床から縦筋が形成されても凹部がある深さに達すると  $u_*$  が減少し、かえって凸部が洗掘され、横断方向の凸凹は平衡状態に達すると推測される。次に、各測点でスペクトル解析(データ数8192個)が行われ、この周波数スペクトル分布  $S(f)$  には図4に示すように  $-5/3$  乗則領域が存在したから、Kolmogoroffの分布則を適用して逸散率  $\epsilon$  を求め、この結果を図3に示した。一方、発生率  $P$  の実測値は得られないが、  $P \approx -\overline{u' \partial u' / \partial y} \approx U'^3 / \kappa y$  ゆえ、  $P/\overline{\epsilon} \approx (U'/u_*)^3$  となり、図3に併示した。1つの縦渦内での断面平均は  $\overline{P} \approx \overline{\epsilon}$  であるから、図3より河床近くの低速部では  $P < \overline{\epsilon}$ 、高速部では  $P > \overline{\epsilon}$  となる。すなわち、  $W=0$  線上を考えると、  $V \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\overline{\epsilon}}{2}) = P - \overline{\epsilon}$ 、  $\frac{\partial}{\partial y} (\frac{\overline{\epsilon}}{2}) < 0$  ゆえ、低速部 ( $z/h = 1, 3$ ) で  $V > 0$ 、高速部 ( $z/h = 0, 2, 4$ ) で  $V < 0$  となり、図2のように縦渦の挙動が説明できる。図4は  $S(f)$  の結果の一例であり、プロペラ流速計による長時間計測結果も併示した。このプロペラは3mm径の超小型であるが、2 Hz 以上では減衰が大きく、  $f \leq 1 \text{ Hz}$  の低

周波解析にのみ適用可能である(hot-filmの結果と比較して、平均流速は3%以内で一致したが、乱れ強度は30%も小さかった)。図中の太い実線は赤津による理論曲線であり、hot-filmのデータと良好に一致している。この場合のバースティングの発生周期は  $T_0 U_{max}/h \approx 3$  とすると、  $T_0^{-1} \approx 2 \text{ Hz}$  である。この  $T_0^{-1}$  の位置は慣性小領域の下限にあり、乱れエネルギーを最も含む領域に相当する。一方、プロペラ流速計による  $S(f)$  には  $0.2 \text{ Hz}$  に1つのピークが存在し、他の計測点でも同様であった。このピークは比較的平坦であるが、縦渦の変動周期  $T_s$  である可能性があり、実際移動床の縦筋上での計測でも  $T_s U_{max}/h \approx 20$  となり、バースティング周期より1オクタード大きかった。南水路流水の縦渦を実測することは実験精度上困難なことから、今後2次元風洞を使って縦渦の構造を詳細に検討したい。

**参考文献** 1) Vannoni (1946), Trans. of ASCE, vol. 111, p. 67. 2) 木下 (1967), 写真測量, vol. 6, p. 1. 3) 中川・赤津 富永 (1981), 土木学会論議, 第313. 4) 赤津・中川 (1981), 水理論文集, p. 439. 5) Brundrett・Bains (1964), J.F.M. vol. 19, p. 375. 6) Gessner・Jones (1965), J.F.M., vol. 23, p. 629. 7) 赤津 (1977), 京都大学学位論文。

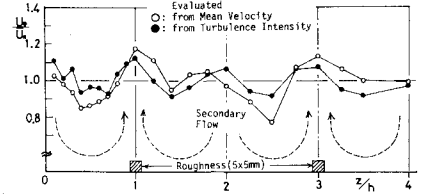


図2 摩擦速度の横断方向への変化

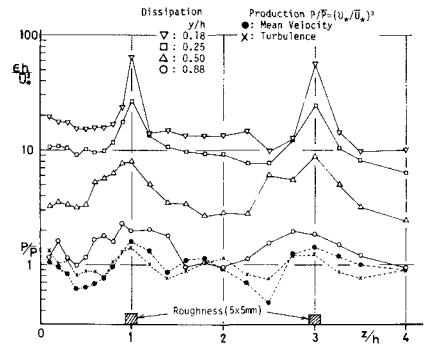


図3 発生率Pと逸散率εの変化特性

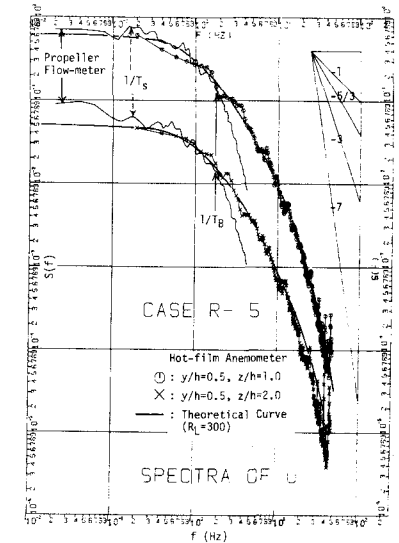


図4 周波数スペクトル分布の一例