

滑面及び粗面乱流の構造について

京都大学工学部 正員 中川博次 京都大学工学部 正員 祢津家久
京都大学工学部 正員 畠永晃宏 京都大学大学院 学生員 大石善啓

1. まえがき 開水路における2次流(並列らせん流)の問題は、河川における流砂輸送機構、物質拡散及び河床形態との関連において解明されるべき重要な問題と思われる。現在のところ2次流はどのようなメカニズムで発生するか、また2次流が存在すれば流れの構造がどのように変化するか等についてはよくわかっていない。直線開水路においては少なくとも、河床の横断方向の非一様性、例えば流下方向に発達する縦筋などが2次流の発達維持機構に重要な役割を果たしていると考えられる。ここでは横断方向の粗度の非一様性の効果に着目して、底面に粗面と滑面を交互に配列したときの乱流構造の変化を検討した。実験装置及び方法については本講演会の別報に示すものと同じであるが、本報告では2成分ホットワイヤを使用し、流下方向流速 $\bar{u}$ 及び鉛直方向流速 $\bar{v}$ を計測した。

2. 平均流速分布 平均流速 $\bar{U}$ のプロファイルを図-1, 2に示す。ケースB-3は粗度幅4cm, ケースB-5は $b=2\text{cm}$ の場合である。 D は管の高さ、 $\bar{U}_{\max}$ は $U_{\max}$ の断面平均であり、高さ y は滑面上を原点としている。ケースB-5では粗面上の流速が滑面より小さく、ケースB-3では全く逆に粗面上の方が大きい。このことから両者の流れの構造には大きな差があると考えられる。次に V のプロファイルを示したものが図-3, 4である。これから明らかにケースB-3では粗面上で下降($V<0$)、滑面上で上昇($V>0$)の存在が認められる。したがって下降部で高速、上昇部で低速となる2次流の特性と合致しており、ケースB-3では直径が粗度の間隔の規模の安定な流下方向渦(図-5に示す)が形成されていることが予想される。これは渦度方程式の検討から得られた結果(すなわち U_x の大きいところで下降、小さいところで上昇流が起る)²⁾と一致している。しかしケースB-5では粗面上で $V>0$ 、滑面上で $V<0$ となっており、ケースB-3とは逆回きの渦が考えられるが、 V の値も小さく安定な2次流が形成されているとは考えにくい。

3. 乱れ強度分布 図-6, 7に u', v' の分布を示す。

ケースB-5では u', v' ともに平坦河床の結果と同様に粗面上の値の方が滑面上より大きく y の増加とともに指数関数的に減少しているがケースB-3では $y/D=0.2$ を境に上と下で逆になり、 u', v' とも $y/D<0.2$ では当然のことながら粗面上の

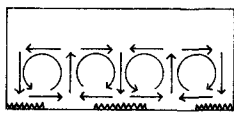


図-5 2次流の模式図

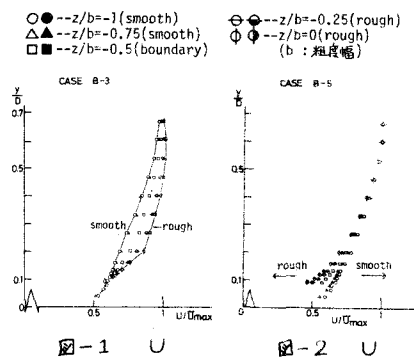


図-1 U

図-2 U

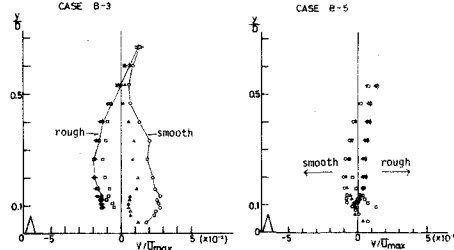


図-3 V

図-4 V

方が大きい、 $y/D > 0.2$ では滑面上の方が大きくなっている。全体の傾向としては粗面上では y の増加とともに急激に減少しているが、滑面上では y/D が0.4程度までほぼ一定そこからゆるやかに減少している。二次流が存在する場合、下部で乱れ強度が小さく、上部ではその逆であることが指摘されているが³⁾、今回の実験では粗面が滑面に比べて突出していたためか、粗度の影響が底面で強く現われたものと思われる。

4. レイノルズ応力分布 図-8, 9にレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の分布を示す。ケースB-5では $y/D > 0.1 \sim 0.2$ ではほぼ直線分布となり、滑面から粗面へ順にせん断応力が大きくなっていることがわかる。しかし二次流の存在が予想されるケースB-3では、粗面・滑面とも直線分布からはずれ粗面上で凹型、滑面上で凸型の分布となっており、乱れ強度の分布と同じ傾向を示している。図-10はケースB-3の $-\overline{uv}$ の等値線である。 $y = 1.5 \text{ cm}$ ($y/D = 0.2$)を境に傾向がはっきり異なっていることがわかる。二次流が存在するとき、 x 方向のレイノルズ方程式は、

$$V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \frac{\partial(-\overline{uv})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{uw})}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (1)$$

となり、 $V, W, -\overline{uw}$ の項が無視できなくなる。これを適当な境界条件のもとに y で積分すると次式が得られる。

$$-\overline{uv} + \nu \frac{\partial U}{\partial y} = \left(-\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}\right) h \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \int_y^h \left(V \frac{\partial U}{\partial y}\right) dy + \int_y^h \frac{\partial(-\overline{uw})}{\partial z} dy \quad (2)$$

(h は最大流速点の高さ)

二次流のない場合のせん断応力の分布式である右辺第1項に、二次流がある場合は第2項及び第3項の効果が加わり、直線分布からずれることがわかる。したがって V 及び $-\overline{uw}$ の評価が二次流の構造の解明に不可欠と考えられる。今回は $-\overline{uw}$ が計測されておらず、また粗度近傍の影響が大きいことから定量的な評価まではできなかった。

5. あとがき 以上見てきたようにケースB-3においては流速、乱れ強度及びレイノルズ応力の分布に二次流の影響が強く現われており、このように粗度が横断方向に変化する流れにおいて、粗度の大きいところで下降、小さいところで上昇という二次流が発生することが示された。しかし、粗度幅を半分にしたケースB-5ではレイノルズ応力の直線分布からのずれがないことなどから二次流の存在は明確でなく、二次流においては、横断方向のスケールと鉛直方向のスケールの比が重要な条件となると考えられる。今後 $\overline{w}$ の計測も加えてこのような現象の説明を行っていきたい。

<参考文献> 1) 関西支部年譜, 中川・林・富永・若井, 1981, 2) Perkins, J.F.M. vol.44 1970, 3) Müller, Hydraulic Problem solved by stochastic methods, 1976 など

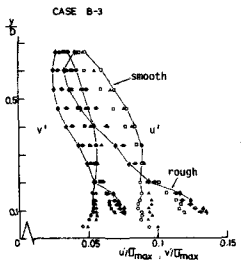


図-6 u', v'

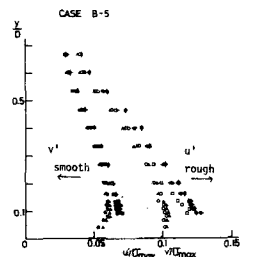


図-7 u', v'

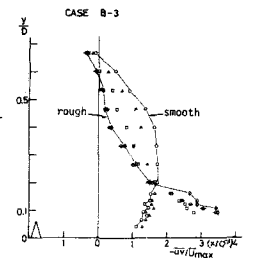


図-8 $-\overline{uv}$

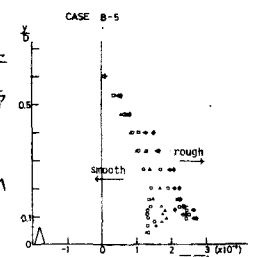


図-9 $-\overline{uv}$

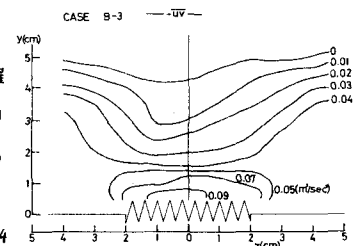


図-10 $-\overline{uv}$ の等値線