

東京工業大学大学院 学生員 江口秀二

東京工業大学工学部 正員 福岡捷二

東京工業大学大学院 学生員 金 舜範

1. はじめに 本研究は、一様湾曲に蛇行が重なった長方形断面を有する非対称蛇行水路での主流と二次流を実験的に調べ、流れの機構を解明することを目的とする。

## 2. 実験装置及び実験条件

表1 実験条件と水路の諸元

|       |           |       |        |
|-------|-----------|-------|--------|
| 流量    | 6.57 L/s  | 水路床勾配 | 1/800  |
| 平均水深  | 5.20 cm   | 水路幅   | 30 cm  |
| 平均流速  | 42.1 cm/s | 蛇行長   | 300 cm |
| フルード数 | 0.60      | 最大偏角  | 30度    |

実験水路は、13個のBendからなる滑面固定床水路で、図1はBend6からBend9までを示している。実験条件及び実験

水路の諸元を表1に、水路平面形状を図2に示す。用いた水路の中心軸と一様湾曲との偏角は、(1)式のsine generated curveで表わされ、この時の曲率は(2)式で表現される。

$$\theta = \theta_0 \cos \frac{2\pi S}{L} \quad \dots (1)$$

$$\frac{1}{r} = - \left\{ \frac{2\pi \theta_0}{L} \sin \frac{2\pi S}{L} - \frac{1}{r_0} \cos \left( \theta_0 \cos \frac{2\pi S}{L} \right) \right\} \quad \dots (2)$$

ここで曲率の小さい湾曲部を小湾曲部、大きい湾曲部を大湾曲部と呼ぶ。座標軸は、水路中心軸の接線方向にS軸、法線方向にn軸、鉛直方向にZ軸と選び、それぞれ方向の流速をu, v, wとする。一波長ごとに流れの特性が繰り返されていることを確認した上で、上流端より10.5m～13.5mのBend8～9を測定区間とした。主流と二次流については、一波長内で縦断方向に10断面、横断方向に7断面、鉛直方向に6断面で測定された。

3. 実験結果と考察 図3は、一波長内の $\frac{n}{B/2} = -\frac{2}{3}$ ,  $\frac{2}{3}$ の位置での縦断水位変化を示す。水面勾配は、小湾曲部と大湾曲部の中間付近で最大、湾曲頂点で最小となっており、このことは主流の加速減速と密接に関連している。図4は、水深平均された主流速の横断分布の流下方向変化を示す。小湾曲部では、内岸で速く外岸で遅い湾曲流れに特有の流速分布をもち、大湾曲部では、前半で双山の流速分布、後半で水路中央に最大流速を有する分布をもち、流下方向に著しく変化している。図5は、横断面内の7箇所所で測定されたvの分布を、流下方向の代表的な6断面で示す。wはu, vを用いて連続式より求める。図4に、vとwから描かれた断面内の二次流を示す。ここで、大湾曲部で生じる二次流は実線で、小湾曲部で生じる二次流は点線で示されている。大湾曲部の後半で断面全体にまで発達した強い二次流は( $\frac{n}{L} = 1\%$ )、小湾曲部で減衰はするが消滅す

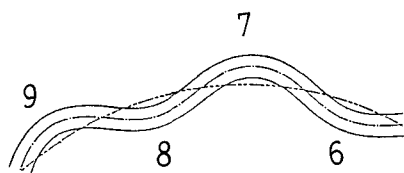


図1 実験水路の全体図(Bend6～Bend9)

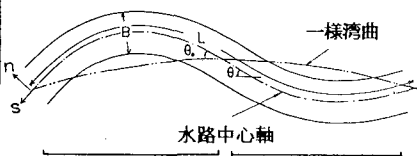


図2 実験水路の平面形状

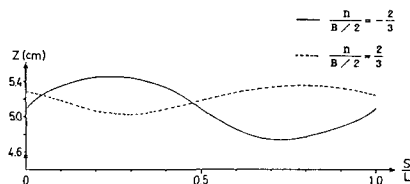


図3 縦断水面勾配

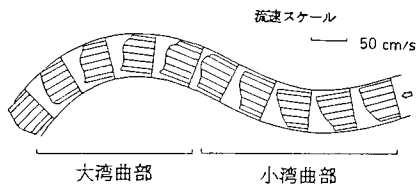


図4 水深平均主流速の横断方向分布

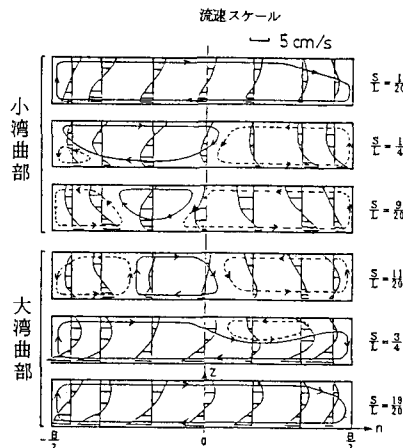


図5 横断面内の二次流

ることではなく、水路中央に残っている ( $\eta/\xi = \eta_0$ )。一方、小湾曲部は大湾曲部に比べて曲率が小さいため、小湾曲部で生じた二次流は、断面全体にまで発達することができず ( $\eta/\xi = \eta_0$ )、大湾曲部に入ると減衰し消滅する ( $\eta/\xi = 1/6 \sim 1/3$ )。主流の横断分布と二次流は次のように説明される。大湾曲部後半で十分に発達した二次流は、内岸の速い流れを外岸に、底面及び側壁付近の速い流れを内岸に輸送する。この断面内の輸送に、先に述べた縦断面水面勾配による加速、減速の影響が加わり、続く小湾曲部では内岸側が速い主流速分布となる。一方、小湾曲部後半で水路中心部まで達している二次流は、内岸の速い流れと水路中央付近にまで輸送する。その結果、従く大湾曲部前半では、内岸側は縦断面水面勾配が大きいことにより、水路中央付近は二次流による輸送のため流速が増大し、双山の流速分布となる。

4. 運動方程式の各項の大きさの評価 以上のような主流及び二次流の構造をさらに詳しく見るために、現象を支配する運動方程式中の各項の大きさを検討する。(3)、(4)式は、微小項と省略した場合のS方向とn方向の運動方程式、(5)式は連続式である。

$$\frac{r}{r+n} u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r+n} + \frac{r}{r+n} g \frac{\partial h}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \dots (3)$$

$$\frac{r}{r+n} u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r+n} + g \frac{\partial h}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \dots (4)$$

$$\frac{r}{r+n} \left( \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (5)$$

運動方程式の各項の大きさ、 $\eta/\xi = -2/3$ 、 $\eta/\xi$ の位置で比較する。そこで、主流速分布が水深平均流速分布(図3)とはほぼ同様である  $\eta/\xi = 2/5$  の位置での流速分布を用いて、流れの平均的な構造を調べる。この領域では、主流速の鉛直勾配及び  $w$  が小さいため、(3)、(4)式の  $\frac{\partial}{\partial z}$ 、 $w$  を含む項を省略できる。図6は、S方向運動方程式中の残りの4項の変化を示している。小湾曲部外岸から大湾曲部内岸にあたる  $\eta/\xi = -2/3$ 、 $\eta/\xi = 1/6 \sim 1/3$  では、 $u \frac{\partial u}{\partial s}$  が卓越している。これは、縦断面水面勾配が主流を加速していることを示す。また、小湾曲部内岸から大湾曲部外岸にあたる  $\eta/\xi = 2/3$ 、 $\eta/\xi = 1/6 \sim 1/3$  では、 $u \frac{\partial u}{\partial s}$ 、 $v \frac{\partial v}{\partial n}$ 、 $g \frac{\partial h}{\partial n}$  が卓越し、二次流による速い流れの輸送と縦断面水面勾配が主流を減速させることを示す。二次流が発達した湾曲部後半では慣性力  $\frac{u^2}{r+n}$  の値も大きく、無視し得ないことがわかる。これら4項の総和はほぼ零であり、この領域でのせん断抵抗は小さいと考えられる。図7は、n方向運動方程式中の各項の大きさの流下方向変化を表している。流れ全体にわたり、遠心力 ( $\frac{u^2}{r+n}$ ) と横断面水面勾配 ( $g \frac{\partial h}{\partial n}$ ) が卓越しほぼ釣り合い、不均衡分を慣性力 ( $v \frac{\partial v}{\partial n}$ ) が補う形となっている。この慣性項の大きさは、湾曲部を流下するに伴って大きくなり、これは二次流が発達していることを意味する。また、湾曲部出口付近では符号を変えており、二次流が減衰しはじめたことを示す。3節では、主として流速分布から見たされた情報(図4,5)を用いて、非対称蛇行流れの構造を推論した。ここでは、運動方程式中の慣性項と外力項について実験値を用いて考察を行ない、3節の流れの構造の推論を裏付けることができた。

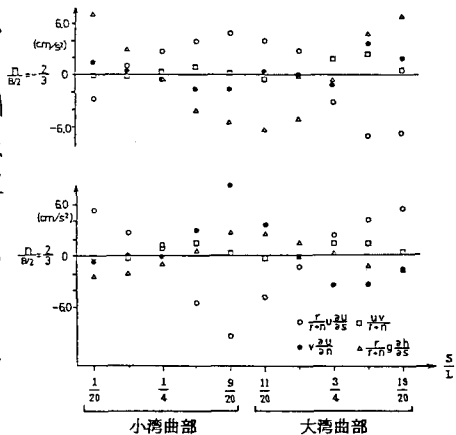


図6 S方向運動方程式中の各項の大きさの流下方向変化

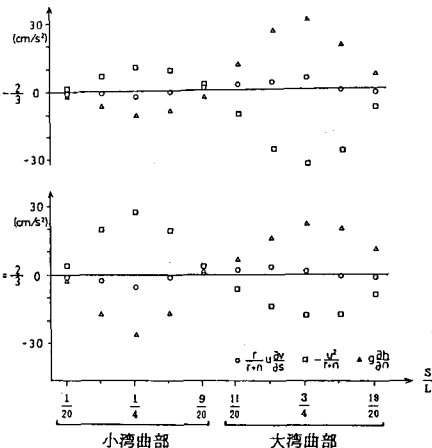


図7 n方向運動方程式中の各項の大きさの流下方向変化