直線部から弯曲部への水流の遷移

立命館大学　理工学部　正会員　小沢　功一

1．はじめに　流れが直線部から弯曲部へ入った当初の断面において，主流速度の横断方向への分布は自由渦型であるとされている[1]。しかし詳しく実験値を検討してみると確かに内岸側で流速が速く外岸側に行くにしたがって遅くなる分布をしているが，必ずしも曲率半径に反比例はしていない。すなわち内岸側では自由渦型より遅い流速となり外岸側では逆にそれより速い流速となっている[2]。

この自由渦型分布に必ずしも一致しない原因としては実際の水流においては壁面摩擦が存在するし，二次流等にも関連する形状損失も起るであろうしまた弯曲部直前の直線部における流速が横断方向に分布している事なども考えられる。

そこで直線部の流速分布の状況を実験的に検討し，弯曲部における流速分布にどのように影響しているのかを数値計算して求め，弯曲部の実験値と比較して考察を行なった。

2．基礎式　幅の広い水路において直線部と弯曲部との境界に近いそれぞれの位置のエネルギーの関係はつぎのようになる。

$$\frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_m^2}{2g} + \Delta h \qquad \cdots\cdots(1)$$

ここにv_0，v_mはそれぞれ直線部および弯曲部における鉛直方向に平均した速度，Δhは弯曲部に入った流れの自由表面の上昇高である。この場合２点間の距離は短いからエネルギー損失は無視できるとしている。

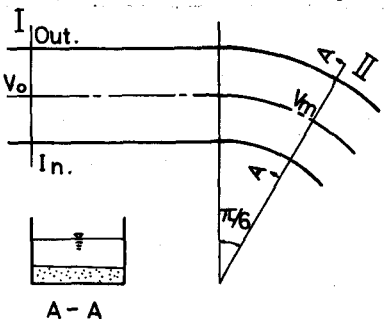

図-1　対象断面位置

式(1)を曲率半径rについて微分し，自由表面の横断勾配I_rは$I_r = v_m^2 / gr$とすると

$$\frac{d(v_m^2)}{dr} + 2\frac{v_m^2}{r} - \frac{d(v_0^2)}{dr} = 0 \qquad \cdots\cdots(2)$$

となる。

式(2)はv_m^2に関して１次の線型微分方程式になっているから積分するとv_mはつぎのようになる。

$$v_m = \frac{1}{r}\sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr}dr + C_1} \qquad \cdots\cdots(3)$$

ここにC_1は積分定数であり，これは直線部と弯曲部とにおける連続の条件から決めることができる。

すなわち

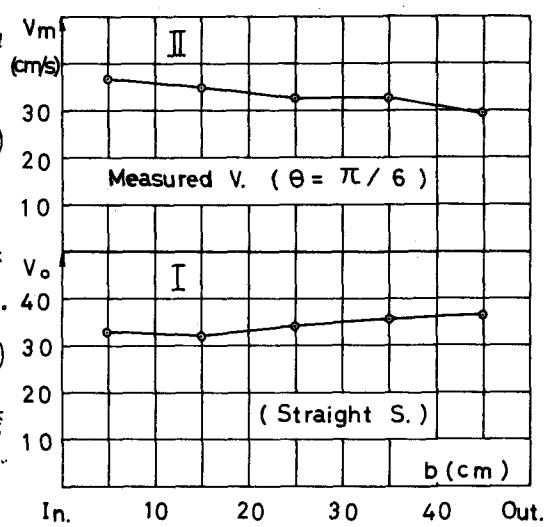

図-2　主流速度の横断分布の変化

Koichi　OZAWA

$$\int_{r_{in}}^{r_{out}} v_0 h\, dr = \int_{r_{in}}^{r_{out}} \frac{h}{r}\sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr}dr + C_1}\, dr \quad (4)$$

から得られる。ここに r_{in}, r_{out} はそれぞれ内岸，外岸の曲率半径，h は水深である。

弯曲部直前の直線部における流速 v_0 が横断方向に一様であるならば式(3)から明らかなように弯曲部での流速分布は下に反比例する自由渦型になる。

3．実験結果および考察　実験は単一の180度の弯曲部の前後に直線部が接続している幅が50cm，水路中心の曲率半径が1mの水路に，中央粒径が0.72mmの砂を入れて移動床にして行なった。

対象にした断面は図-1に示されているように直線部と弯曲部との境界から上流へ1m遡った断面Ⅰおよび下流へ弯曲角で$\pi/6$ rad.隔てた断面Ⅱとした。それらの断面で横断方向に10cm間隔に計5点の位置で鉛直方向に6，7点の主流速度を測った。

測定値を鉛直方向に平均した値についての横断方向への分布を示すと図-2のようである。直線部（断面Ⅰ）においては外岸方向へ速くなっていっているが弯曲部（断面Ⅱ）においては逆に外岸方向へ遅くなる分布になっている。

式(3)を差分形式にして数値計算すると表-1のようである。この場合側壁に最も近い位置での測定値が側壁間際まで続いていると仮定している。また積分定数 C_1 の値を連続式(4)を用いて試算法により数値計算すると $C_1 = 0.101$ となった。図-3には弯曲角が$\pi/6$の位置における横断方向の主流速度分布が測定値と計算値とを対比させて示されている。測定値は外岸側では自由渦型分布より大きく，内岸側ではそれより小さく表われている。式(3)による計算値の方が測定値に近いようである。精度が必ずしも良くない原因として考えられることは一つには側壁の影響を無視している点，二つには直線部の対象断面が直線部と弯曲部との境界から少し離れ過ぎている事等である。

表-1　主流速度の分布計算

（m, sec）

r	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
h	0.1380	0.1360	0.1415	0.1395	0.1430
V_0	0.3293	0.3198	0.3405	0.3555	0.3659
V_0^2	0.10844	0.10227	0.11594	0.12638	0.13388
ΔV_0^2		-0.00617	0.01367	0.01044	0.00750
$r^2\Delta V_0^2$		-0.004458	0.01234	0.01151	0.009919
$\Sigma r^2\Delta V_0^2$ (a)		-0.004458	0.007882	0.01939	0.02931
(a)m (b)	0.002229	0.001712	0.01364	0.02435	0.02931
$V_0 h$	0.04544	0.04349	0.04818	0.04959	0.05232
h/r (c)	0.1725	0.1511	0.1415	0.1268	0.1196
$V_0 h \Delta r$	0.004544	0.004349	0.004818	0.004959	0.005232
$\Sigma V_0 h \Delta r$	0.004544	0.008893	0.013711	0.018670	0.023902
(c)$\sqrt{(b)+C_1}\Delta r$	0.005421	0.004843	0.004791	0.004489	0.004317
V_m	0.3927	0.3561	0.3386	0.3219	0.3008

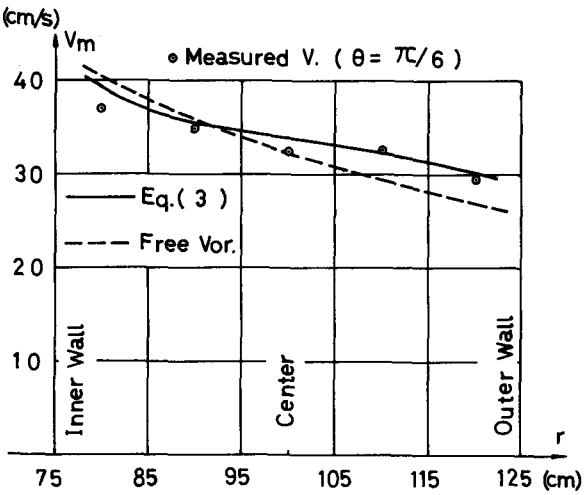

図-3　主流速度の横断分布（$\theta = \pi/6$）

4．おわりに　直線部から弯曲部へ入った当初の位置における主流速度の横断方向への分布は直線部の横断分布を考慮すると自由渦型分布とするより実際の流れに近くなるようである。参考文献　1) Velocity Distribution and the Boundary Layer at the Channel Bends, 2)開水路弯曲流の主流速度の流下方向への変化，等