

漸拡開水路流の水面形について

九州工業大学工学部 学生員 ○岡本 実 学生員 松岡定和
九州工業大学大学院 学生員 鬼束幸樹 正 員 浦 勝

1. 目的

水路幅が流下方向に拡がる開水路常流において、水深が増加し逆圧力勾配となる。石原ら¹⁾によると拡がり角度が16°~20°で側壁付近に剥離が生じ、さらに、60°を超えると剥離領域の特性が角度に依存せず急拡流となる。急拡流のように剥離が生じると、エネルギー損失は摩擦損失より形状損失が支配的となる。剥離を生じない拡幅流れでは両者は同オーダーになると考えられるが、形状損失を予測することは難しく、従って水理特性を予測することは困難である。しかし、流れを理解する第1段階として高精度でなくとも流れの大略をつかむことは重要である。本報告ではこの剥離を生じない拡幅流れを「漸拡流」とよび、形状損失が無視できるかどうかを水面形の実測値と予測値の比較で検討する。流速分布予測の可能性も検討する。

2. 基礎式

定常な一次元漸変流の水深 h の変化を規定する式は、流下方向に x 軸をとり、流量 Q 、水路幅 B 、径深 R 、水路床勾配 $\sin\Theta$ 、粗度係数 n 、エネルギー補正係数 α 、重力加速度 g とすると、次式となる。

$$\frac{dh}{dx} = \left(\sin\Theta - n^2 R^{-\frac{4}{3}} \left(\frac{Q}{Bh} \right)^2 + \frac{\alpha Q^2}{g B^3 h^2} \frac{dB}{dx} \right) / \left(\cos\Theta - \frac{\alpha Q^2}{g B^2 h^3} \right) \tag{1}$$

3. 実験条件

図-1に実験に用いた水路を示す。全長2050cm、幅60cm、高さ60cmの可変勾配水路で、底面はステンレス製で側壁はアクリル製である。そこで、アクリル板を用いて400<X<600cmにB=19.6cmの助走部を、600<X<900cmに水路幅がB=19.6cmから60.0cmに直線的に拡がる漸拡部を作製した。

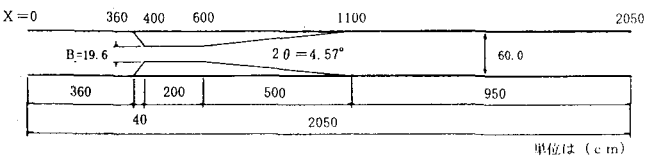


図-1 水路平面図

表-1 実験条件

	Lseries	Cseries	Sseries
1	Q=9300 h=18.0	Q=9300 h=13.5	Q=9300 h=13.5
2	Q=9300 h=13.5	Q=3200 h=12.0	Q=4600 h=13.5
3	Q=9300 h=10.0	Q=4800 h=8.0	Q=4600 h=6.0
4	Q=9300 h=6.0	Q=4800 h=6.0	Q(cc/s) h(cm)

水路床勾配を全て1/10000とし水面形測定(Lシリーズ)、水路中央流速分布測定(Cシリーズ)、及び横断面内流速分布測定(Sシリーズ)を行った。水面形測定にはレベルとポイントゲージを用いてほぼ水路全区間を、流速測定にはX型Hot-film流速計を用いて主に漸拡部付近を測定した。表-1に流量Q(cc/s)及び下流端水深h(cm)を示す。

4. 実験結果及び考察

4.1 エネルギー補正係数の検討 式(1)を解く上で問題となるのが、粗度係数 n とエネルギー補正係数 α である。 n は漸拡部、一様断面部共に $n=0.011$ とした。 α はSシリーズの測定結果より漸拡部で最大 $\alpha=1.2$ 、平均 $\alpha=1.1$ 程度であったので、漸拡部 $\alpha=1.1$ その他の区間 $\alpha=1.0$ とする場合と全区間 $\alpha=1.0$ とする場合

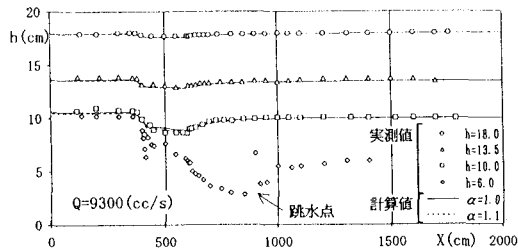


図-2 Q=9300cc/sの実測及び予測水面形

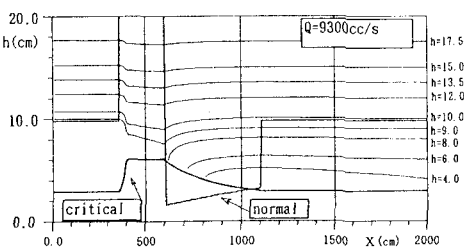


図-3 Q=9300cc/sの跳水予測

合の水面形を4次のRunge-Kutta法を用いて計算した。結果と、実測値を図-2に示す。全区間 $\alpha=1.0$ としても実測値と良好な一致が見られるため以下 $\alpha=1.0$ とする。

4.2 跳水の予測 流量固定($Q=9300\text{cc/s}$)で、下流端水深を変化させて水面形を計算すると図-3に示すように跳水の予測ができる。下流端水深 $8.0 < h < 9.0\text{cm}$ で限界水深に交わり、跳水を起こしていることが分かる。さらに、この跳水予測計算を種々の流量で行うと、図-4に示す跳水予測図が得られる。点線で示す限界流目測値と実線の計算値が良好に一致していることが分かる。

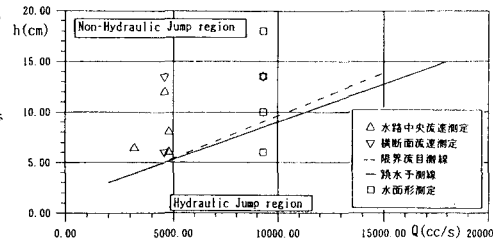


図-4 跳水予測曲線

4.3 流速分布予測の可能性 漸拡流のように流下方向に圧力の増加する逆圧力勾配の流れは図-5に示すように、内層($y/h \leq 0.2$)においてはLog則が成立し、外層($y/h > 0.2$)においてはColes²⁾が境界層流れにおいて提案した次式のLog-Wake則が成立する²⁾。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{yU_*}{\nu} \right) + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2h} \right) \quad (\kappa = 0.412, A = 5.29) \quad (2)$$

但し、 κ はKarman定数、 A は積分定数、 ν は動粘性係数、 U_* は摩擦速度、 y は鉛直座標で、 Π は外層におけるLog則からのずれを表す。Rotta³⁾は式(3.a~c)が成立する様な各断面の流速分布が相似形で、速度と長さスケールだけで決定される境界層流れを平衡境界層と呼んだ。

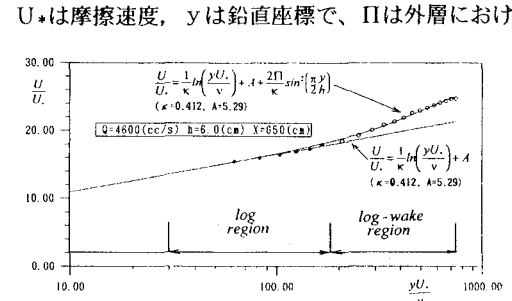


図-5 逆圧力勾配流れの流速分布

$$\frac{U}{U_{max}} = \text{const} \quad (3. a)$$

$$\beta = \frac{\delta_*}{\rho U_*^2} \frac{dp}{dx} = \text{const} \quad (3. b)$$

$$\frac{d(U_{max} \delta_* / U_*)}{dx} = \text{const} \quad (3. c)$$

但し、 U_{max} は最大流速、 δ_* は排除厚、 P は圧力である。White⁴⁾は平衡境界層において Π と無次元圧力勾配 β の関係が普遍関数表示できることを次式で示した。

$$\Pi = 0.8(\beta + 0.5)^{0.75} \quad (4)$$

漸拡流においても平衡境界層が近似的に成り立つ場合、式(4)が成立する⁵⁾。Cシリーズの実験では、すべてのケースで式(3.a~c)が成立せず、平衡境界層ではなかった。しかし、 Π と β の関係を示した図-6を見ると、黒で示した漸拡部入口付近を除けば式(4)がほぼ成り立つ。但し、図中の数字は漸拡部入口からの距離(cm)を示す。漸拡流の流速分布を予測するには式(1), (2), (4)を用いても方程式が一つ足りない。何らかの方法で Π , U_* , δ_* , U_{max} のいずれかを知れば漸拡流の流速分布が予測できる。

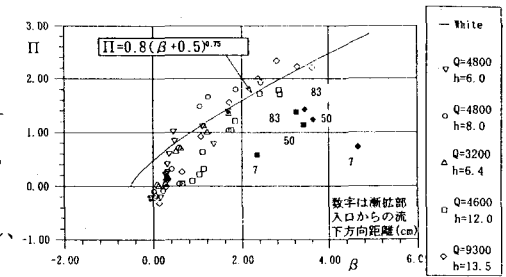


図-6 非平衡な漸拡流の Π と β の関係

5. 最後に

拡幅角度 $2\theta=4.57^\circ$ の漸拡流において、水面形を予測する上では、 $\alpha=1.0$ として形状損失を無視してよい事が分かった。今後、拡幅角度を変化させ、形状損失の無視できなくなる限界角度を知る必要がある。また、非平衡状態においてもWhiteの式(4)が成立する事が分かったので流速分布の予測の可能性が広がった。

参考文献 1) 石原・志方; 土論, 第128号, 1966; 2) D. Coles; JFM, Vol. 1, 1956; 3) J. C. Rotta; Turbulente Strömungen, 1972; 4) F. M. White; Viscous Fluid Flow, 1974; 5) 浦・秋山・川崎・鬼東; 水工学論文集, 1992