

急勾配階段状流れの加速特性について

第一復建株式会社 正 員 ○成合功光*
熊本大学工学部 正 員 大本照憲**
熊本大学工学部 正 員 矢北孝一

1. はじめに

著者らは、急勾配階段状水路について、その内部構造の解明を目的に実験的検討を行い、1ステップ内の水面形、平均流特性、圧力特性について明らかにした。^{1), 2)}。本研究では、階段状水路流れの加速流について、水面および流速変動の特性を流下方向に着目して実験的検討を試みた。

2. 実験装置およびその方法

模型水路は、勾配を 1/10 に設定した長さ 6.0m 幅 40cm の可変勾配水路であり、総アクリル製である。また、ステップ高は 1.0cm (ステップ長さは 10cm, 図-1 参照) とした。流量は、目視観察により底面および水面にウロコ状のパターンが顕著に現れることが認められた $1.6 \ell/s$ (単位幅流量 $=40 \text{ cm}^2/\text{sec}$) に設定した。表-1 に実験条件を示す。流速の測定は、2 成分 (流下方向成分と鉛直方向成分) 同時計測が可能な X 型熱膜流速計を用いて測定した。水面形は超音波水位計により流速と同時計測を行った。計測は、サンプリング周波数 100Hz、1 測点のデータ個数を 4096 に設定して行った。また、階段状水路の流れは空気を連行した気液混相流であることから、気泡の影響により電圧が 0 付近を示したデータを取り除き統計処理した。測定位置は、流れ場が平衡状態に達した位置で底面から高さ 3mm の位置において測定した。また、表-1 の実験条件における水面形が横断方向に峰と谷をもつ流況となることから、横断方向において谷部にあたる $y=0 \text{ cm}$ および峰部にあたる $y=2 \text{ cm}$ において $x=3 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$ の区間を流下方向に 2mm 間隔で測定した。

3. 実験結果と考察

図-2 に $y=0 \text{ cm}$ および $y=2 \text{ cm}$ の水深の流下方向変化を示す。 $y=0 \text{ cm}$ では、流下に従って減少し、 $x/L=0.65$ 付近で極小値をとる。それより下流では増大した後、階段エッジ付近で急激に減少する。峰部にあたる $y=2.0 \text{ cm}$ では、 $x/L=0.75$ 付近で極大値をとり、それ以降は流下に従って減少し $y=0 \text{ cm}$ と同様に階段エッジ付近で急激に減少する。図-3 に水面変動の強さ $\sqrt{h'^2}$ の流下方向変化を示す。図より $y=0$ および 2 cm とも $x/L=0.4$ および $x/L=0.95$ 付近で極小値をとり、 $x/L=0.6$ 付近で極大値を示す。極大値での変動量は $x/L=0.3$ 以降の平均水深の約 10% に達した。図-4 に主流速の流下方向変化を示す。これをみると $y=0$ および 2 cm とも $x/L=0.4$ 付近までは急激な加速傾向を示し、その後は若干減少の傾向を示す。そして階段エッジ付近で再び加速している。階段エッジ付近では遠心力の影響があることが考えられる。また、谷部の主流速が峰部に比べ $x/L=0.4$ より下流では若干大きくなる傾向にあることがわかる。図-5 に主流速の乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ の流下方向変化を示す。これをみると $y=0$ および 2 cm とも流下に従って増大し、 $x/L=0.4$ 付近で極大値をとり、それ以降は一様に減少している。図-6 に鉛直方向の流速の乱れ強さ $\sqrt{w'^2}$ の流下方向変化を示す。図より鉛直方向成分は $y=0$ および 2 cm とも、計測の範囲内では極大値をもたずに一様に減少する傾向を示すことがわかる。図-7 はレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化である。これ

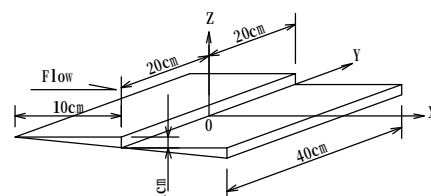


図-1 模型水路 (階段部分)

表-1 実験条件

項 目	実験値
流量 $Q (\ell/s)$	1.6
限界水深 $h_c (\text{cm})$	1.18
限界流速 $v_c (\text{cm/s})$	34.0
水路勾配 I	1/10
フルード数 Fr	2.80
レイノルズ数 Re	4000
ステップ高 $D (\text{cm})$	1.0
ステップ長 $L (\text{cm})$	10.0

キーワード：急勾配階段状水路，乱流，乱れ特性

連絡先 *：〒812-0016 福岡市博多区博多駅南3丁目5-28 Tel:092-431-9181 Fax:092-431-0726

**：〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1 Tel:096-342-3543 Fax:096-342-3507

をみると、流下に従って増大し、 $y=0$ および $y=2\text{cm}$ とともに $x/L=0.4$ 付近で極大値を示す。その後 x 方向に指数関数的に減少し、 $x/L=0.7$ 付近から下流は負となる。ここで、主流方向の速度変動の強さ $\sqrt{u'^2}$ およびレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の収支式を表すと、以下の式(1)および(2)ようになる。

$$\frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{2}\overline{u'^2}\right) = -\overline{u'^2}\frac{\partial U}{\partial x} - \overline{u'v'}\frac{\partial U}{\partial y} - \overline{u'w'}\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\overline{u'}\partial p'}{\rho\partial x} + \nu\overline{u'\Delta u'} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{u'u'^2}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{v'u'^2}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{w'u'^2}\right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt}(-\overline{u'w'}) &= (\overline{u'^2})\frac{\partial W}{\partial x} - (-\overline{u'v'})\frac{\partial W}{\partial y} - (-\overline{u'w'})\frac{\partial W}{\partial z} - (-\overline{u'w'})\frac{\partial U}{\partial x} - (-\overline{v'w'})\frac{\partial U}{\partial y} + \overline{w'^2}\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{p'}{\rho}\left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x}\right) \\ &+ \left(\frac{\partial(\overline{u'^2w'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{u'v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{u'w'^2})}{\partial z} + \frac{\partial(\frac{p'u'}{\rho})}{\partial x} + \frac{\partial(\frac{p'w'}{\rho})}{\partial z}\right) + \nu\Delta(-\overline{u'w'}) + 2\nu\frac{\partial u'}{\partial x_k}\frac{\partial w'}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (2)$$

但し、 $\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 、 $k=1,2,3$

式(1)で、右辺第3項に着目すると、図-7から図-5における乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ の極大値の位置と $-\overline{u'w'}$ の極大値の位置がほぼ同じであり、 $x/L=0.4$ 以降では $-\overline{u'w'}$ が流下方向に減少するにつれて、 $\sqrt{u'^2}$ も減少していることから、式(1)の右辺第3項が $\sqrt{u'^2}$ の大きさを規定していると考えられる。式(2)では、右辺第6項に着目すると、図-6より、 $\sqrt{w'^2}$ が流下方向に減少するにつれて、 $x/L=0.4$ 以降では $-\overline{u'w'}$ も減少していることから、式(2)の右辺第6項が $-\overline{u'w'}$ の大きさを規定していると考えられる。図-8に、鉛直方向の流速成分のひずみ度 (Skewness) を示す。これをみると、 $x/L=0.5$ 付近で正の極大値が表れていることから、ここでは、平均値よりも大きな鉛直方向成分の流速が間欠的に表れていることが示唆され、図-4の極大値とほぼ整合することから、水面変動の強さが大きくなる要因となることが考えられる。

参考文献：1) 成合、大本、矢北、長屋：土木学会第54回年次学術講演会概要集、1999、pp.214-215、2) 大本、成合、矢北、長屋：水工学論文集第43巻、1999、pp.305-310

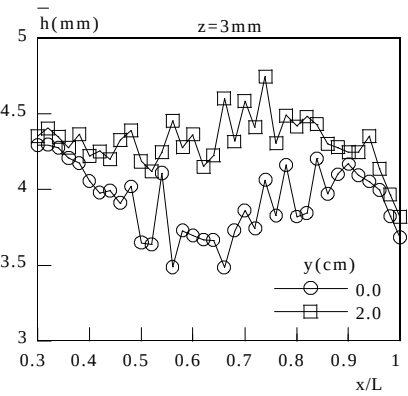


図-2 水深の流下方向変化

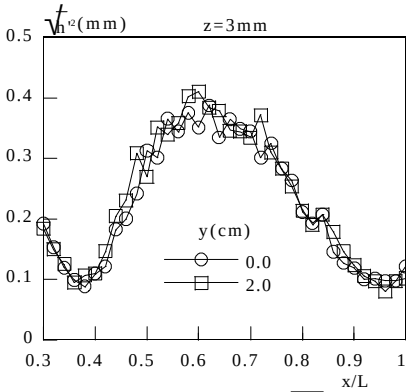


図-3 水面変動の強さ $\sqrt{h'^2}$ の流下方向変化

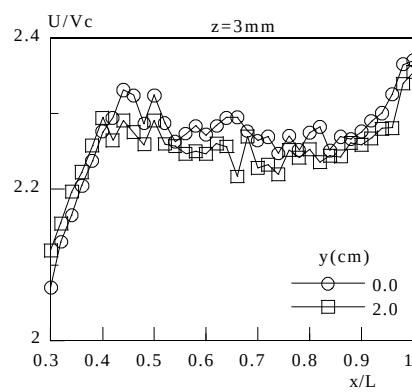


図-4 主流速の流下方向変化

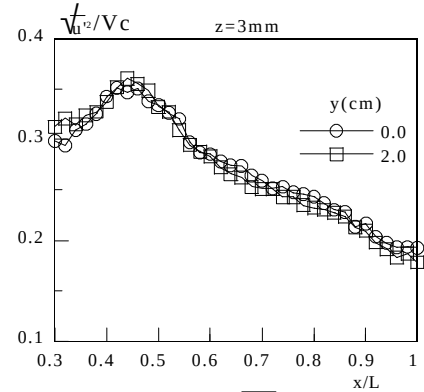


図-5 乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ の流下方向変化

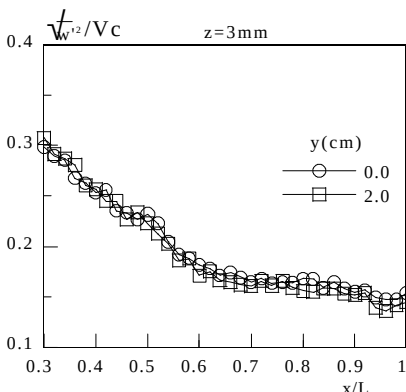


図-6 乱れ強さ $\sqrt{w'^2}$ の流下方向変化

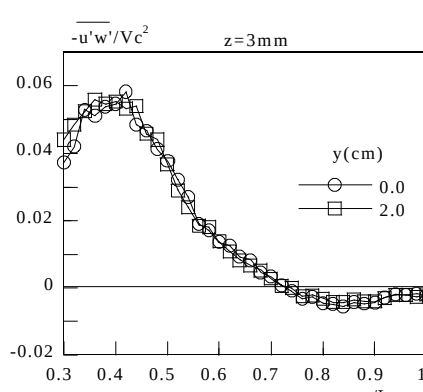


図-7 レイノルズ応力の流下方向変化

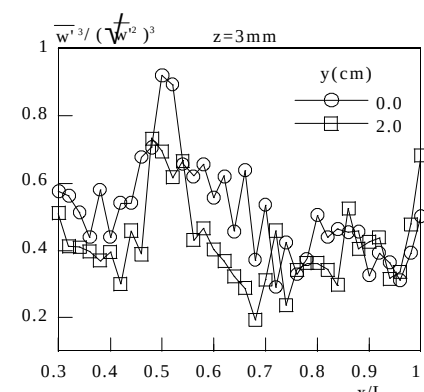


図-8 鉛直方向の流速成分のひずみ度