

射流中の突起を越える流れに関する実験的検討  
 Experimental investigation on supercritical flows passing over obstacle

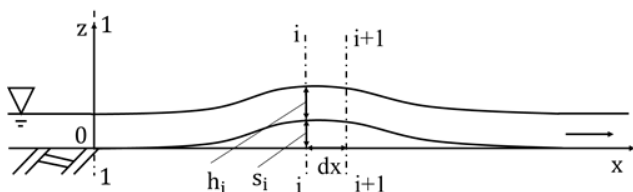
安田陽一<sup>1</sup> ○宮川拓也<sup>2</sup>  
 Youichi Yasuda<sup>1,\*</sup> Takuya Miyagawa<sup>2</sup>

Abstract: This experimental investigation presents water surface profile and validity for some assumption in applied one-dimensional equation for supercritical flows passing over obstacle. The experiments were conducted in the range of inflow Froude numbers  $Fr=2.0$  and  $2.5$ . The comparison with the measurement of water surface profile reveals that similar water surface profile can be obtained from one-dimensional equation applied to either ideal flow or gradually valid turbulent flow. Also, a difference from hydrostatic pressure is recognized by a curvature of streamline at upstream and downstream curves of obstacle. The water surface profile predicted from one-dimensional equation is similar to that obtained from measurement, even if the difference from hydrostatic pressure predicted from one-dimensional equation is longer than that from the measurements of bed pressure head and water surface profile.

1. まえがき

従来, **Figure 1** に示すような突起を越える射流の水面形を推定する方法<sup>[1][4]</sup>として流れを定流かつ流下方向に水路幅が変化しないものを対象に, 流れを理想流体, 圧力を静水圧分布と仮定したときに, 比エネルギーを  $x$  方向に微分すると水面形が解析的に推定される. しかし, 突起を越えるときに流線の曲がりの影響が無視できないため, 圧力は静水圧分布ではない. それほどの程度逸れているのかについては定量的に明らかにされていない. また, 流れは実際には理想流体ではない. したがって, 水面形を実験的に明らかにし, 圧力がどの程度静水圧分布から逸れているかを実験的, 解析的に検討する必要がある.

本研究では, 射流中の滑らかに接続された突起を越える流れにおいて, 突起曲面開始断面で射流の乱流境界層が発達中の断面とし, アスペクト比および射流中に形成される衝撃波の影響を最小限にした場合を対象とした. 突起高さを一定にしてフルード数を変化させたときの水面形を実測し, 圧力がどの程度静水圧から逸れているのかについて実験的, 解析的に検討することを目的とする.



**Figure 1.** Definition sketch on supercritical flow over obstacle

2. 解析方法

(1) 理想流体として適用した場合

突起を越える流れにおいて圧力が静水圧からどの程度逸れているかが不明であるため, 圧力補正係数を導入する. エネルギー方程式を用いて **Figure 1** に示す突起曲率開始断面(1 断面)と突起の任意の断面(i 断面)との間を検査部に体積積分することにより, 圧力補正係数  $k$  は(1)式のように示される. ただし, 突起の任意の断面における圧力を直線分布と仮定する. また, 任意断面の比エネルギーは(2)式で示される.

$$k_i = \frac{2}{h_i} \left( \frac{V_i^2}{2g} + h_i - \frac{V_i^2}{2g} - s_i - \frac{h_i}{2} \right) \quad (1)$$

$$E_i = \frac{V_i^2}{2g} + s_i + \frac{h_i}{2} (1 + k_i) \quad (2)$$

式中の添え字  $i$  は突起の任意の断面における物理量, 添え字  $1$  は突起曲面開始断面の物理量,  $E$  は比エネルギー,  $V$  は断面平均流速,  $h$  は水深,  $s$  は突起高さ,  $k$  は圧力補正係数,  $g$  は重力加速度である.

差分法を用いて圧力補正係数の値を推定する方法を以下に示す. 任意の微小区間(**Figure 1**)の  $i$  断面と  $i+1$  断面の間)を検査部にベルヌーイの定理を適用すると(3)式が得られる. $k_{n+1}$ と $k_n$ との関係について, (4)式で近似する.

$$\left( \frac{dk_i}{dx} \right) = 2 \frac{\left( \frac{Q^2}{gb^2h_i^3} - \frac{1}{2}(1 + k_i) \right) \left( \frac{dh_i}{dx} \right) - \left( \frac{ds_i}{dx} \right)}{h_i} \quad (3)$$

$$k_{n+1} = k_n + \left( \frac{dk_i}{dx} \right)_{x=i} dx \quad (4)$$

ここに,  $b$  は水路幅,  $Q$  は流量である.

(2) 実在流体として適用した場合

1 : 日本大学・教員・土木 2 : 日本大学・学部・土木

実在流体として適用する場合の圧力補正係数を推定するために、平均流のエネルギー方程式を体積積分したものを  $i$  断面と  $i+1$  断面との間で適用することにより(5)式が得られる。ただし、以下の仮定を用いる。

- 1) 流速分布を指数則分布とし  $1/n$  乗則にしたがうものとする。
- 2) 乱流境界層は水面まで発達しているものとする。
- 3) 突起の任意の断面における圧力を直線分布とする。
- 4) 壁面は滑面とする。
- 5) 流れを二次元的とする。
- 6) 圧力を除く表面応力による仕事の総和を摩擦による損失とみなし、Darcy-Weisbach の式に従うものとする。

$$\left(\frac{dk_i}{dx}\right)_{x=i} = \frac{\left(\alpha \frac{Q^2}{gb^2h_i^3} - \gamma - Ck_i\right) \left(\frac{dh_i}{dx}\right)_{x=i} - \left(\frac{ds_i}{dx}\right)_{x=i} - f \frac{(b+2h_n)Q^2}{8gb^3h_n^3}}{Ch_i} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha = (n+1)^3/n^2(3+n)$ ,

$\gamma = (n+1)/(2n+1)$ ,  $C = n/(2n+1)$ ,  $f$  は摩擦抵抗係数( $1/\sqrt{f} = \log_{10}(Re\sqrt{f}) - 0.8$ ,  $Re$  はレイノルズ数:  $Re = (Vh)/\nu$ ,  $\nu$  は動粘性係数)である。

### 3. 実験

実験は長方形断面水平水路(長さ 15 m, 高さ 0.60 m, 水路幅 0.8 m)で行った。実験条件として流量を  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ , フルード数を  $Fr = 2.0, 2.5$ , レイノルズ数を  $Re = 8.58 \times 10^4$ , 突起曲面開始位置は流線の曲がりの影響を受ける直前の位置となるよう定めた。実験はポイントゲージで水深を測定した。水深の測定間隔は 5 cm 間隔で測定する。ピトー管の静圧管を用いて底面圧力を 10 cm ごとに測定した。ピトー管を使う際、ピトー管を突起の曲面に平行に設置した。

### 4. 実験結果のとりまとめ

突起を越える射流について、圧力がどの程度静水圧から逸れているかについて  $Fr = 2.0, 2.5$  の条件下検討した結果を、下記に要約して示す。

#### 1) 突起を越える射流中の圧力の検討結果

突起曲面開始位置から変曲点付近まで、下流面の変曲点付近から下流側の静水圧になるまでの圧力が静水圧より大きくなることが分かった。また、突起前後の変曲点の間では圧力が静水圧より小さくなることが分かった。水面形の実測値を(1)または(5)式に代入して推定した圧力補正係数と底面圧力および水面形を

実測した結果から評価した圧力補正係数を比較した結果、推定値との差異が生じた(Figure 2)。この点については、射流中の圧力分布及び流速分布の実験的検討からその差異の原因を検討する必要がある。

#### 2) 水面形の実測値と解析推定値と比較した結果、

Figure 3 に示されるように、検討範囲の流入フルード数であれば、実測値と推定値との差異は小さいことが分かった。今後、理想流体とし単純な仮定の中でもこの推定がどの程度適用できるのか検討する必要がある。

### 5. 参考文献

- [1] 大津岩夫, 安田陽一編, 水理学—Theory for Application—, 理工図書, 初版, 152-155, 2007.
- [2] Long, R. R., "Some aspects of the flow of stratified fluids II, Experiments with a two-fluid system." *Tellus*, 6, 97-115, 1954.
- [3] 日野幹雄, 明解水理学, 丸善出版, 30 版, 117-120, 1983.
- [4] 禰津家久, 富永晃宏, 水理学, 12 版, 222-225, 2000.

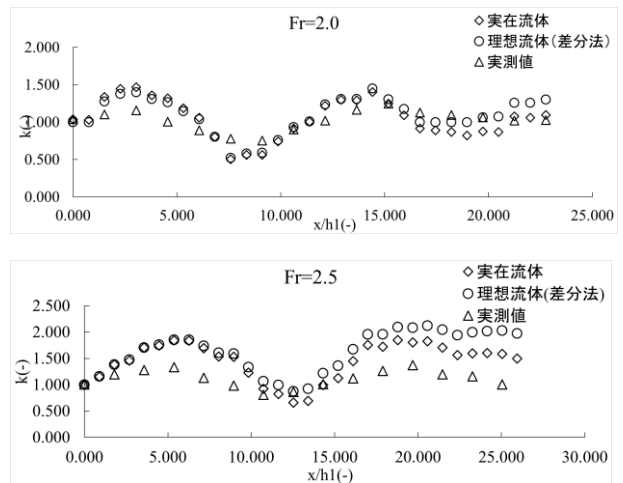


Figure 2. Change of pressure correction coefficient with longitudinal coordinate

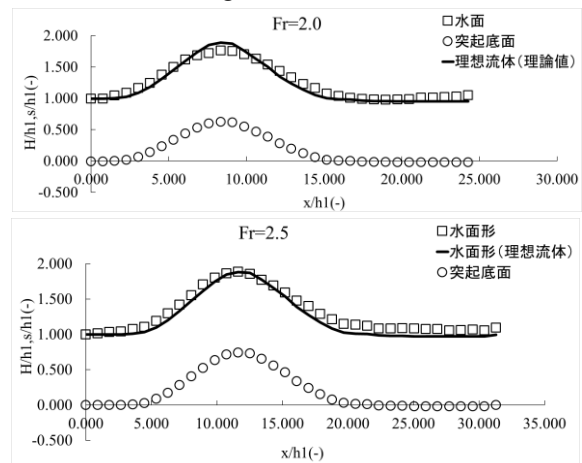


Figure 3. Comparison of water surface profiles between measurement and analytical results