

射流中の突起を越える流れにおける実験的検討

Experimental investigation on supercritical flow passing over obstacle

日本大学理工学部土木工学科
日本大学理工学部土木工学科

学生会員 ○ 宮川拓也
正会員 安田陽一

1. まえがき

従来、図-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^{1)~4)}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。それが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かについて実験的、解析的に検討することを目的とする。

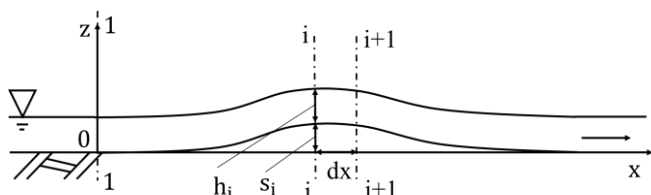


図-1 突起形状の定義図

2. 解析方法

(1) 理想流体とした適用した場合

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図-1 に示す突起曲面開始断面(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。

$$k_i = \frac{2}{h_i} \left(\frac{V_1^2}{2g} + h_1 - \frac{V_i^2}{2g} - s_i - \frac{h_i}{2} \right) \quad (1)$$

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

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(図-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

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。

$$\left(\frac{dk_i}{dx} \right)_{x=i} =$$

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

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 $: Re = (Vh)/\nu$ 、 ν 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 15m、高さ 0.60m、水路幅 0.8m)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 5cm 間隔で測定する。ピトー管の静圧管を用いて底面圧力を 10cm 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。

キーワード 理想流体 実在流体 静水圧 水面形 圧力補正係数

連絡先 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL.03-3529-0409 Email: csta16215@g.nihon-u.ac.

4. 実験結果

圧力補正係数の流下方向変化を図-2 に示す。k の解析については(1)～(5)式を用いた。突起曲面開始位置から変曲点付近まで、突起下流面の変曲点付近から下流側での圧力が静水圧になるまで圧力は静水圧より大きくなった。これは、下に凸となる流線の曲がりの影響によるものと推論される。また、突起前後の変曲点の間では圧力は静水圧より小さくなった。これは、上に凸となる流線の曲がりの影響によるものと推論される。水面形の実測値を(1)式に代入して推定された k の値が実測値(この場合、圧力は三角形分布するものとみなして底面圧力の値から算定した値)よりも大きいことが分かった。これは理想流体において流速分布による影響およびエネルギー損失を無視したため、圧力が大きくなったものと考えられる。水面形の実測値を(4),(5)式に代入して推定された k の値は実測した k の値より幾分か大きいことが分かった。これは解析において流速分布、圧力分布、摩擦抵抗係数の評価によるものと考えられる。図-3 は比エネルギーの流下方向変化を示し、実測値から算定した比エネルギーはエネルギー損失が生じることによって減少していくことが示されている。

水面形について図-4 に示す。図中実線は理想流体($k=1$)として算定したものである。 $Fr=2.0$ の場合の比較から、突起曲面開始位置から変曲点付近までの区間で理想流体の水深が実測の水深より小さいことが分かった。これは圧力が静水圧より大きくなったことによるものと考えられる。また、前後の変曲点の間で理想流体の水深が実測の水深より大きいことが分かった。これは圧力が静水圧より小さくなったことによるものと考えられる。突起下流面の変曲点から下流にかけて理想流体の水深が実測の水深より小さいことが分かった。これは衝突の影響を受けて流線の曲がりにより圧力が静水圧より大きくなったことによるものと考えられる。なお、全体的に見れば水面形は理想流体($k=1$)と仮定して得られた水面形との差異は小さい。すなわち、圧力を静水圧と仮定し、エネルギー損失を無視したとしてもその影響は小さいことが分かった。

5. 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 $Fr=2.0, 2.5$ の範囲で圧力補正係数、水面形を検討した結果、下記のようなことが分かった。

- 1) 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。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実測した圧力補正係数を比較した結果、理想流体とした場合、エネルギー損失、流速分布による影響を無視したため差異が生じた。また、実在流体とした場合、流速分布、圧力分布、摩擦抵抗係数の評価によって差異が生じた。
- 2) 水面形の実測値と理想流体($k=1$)と仮定して得られた水面形を比較したところ流線の曲がりの影響によって差異が生じた。この差異は小さく、圧力を静水圧と仮定し、エネルギー損失を無視したとしても

その影響は小さいことが分かった。

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.

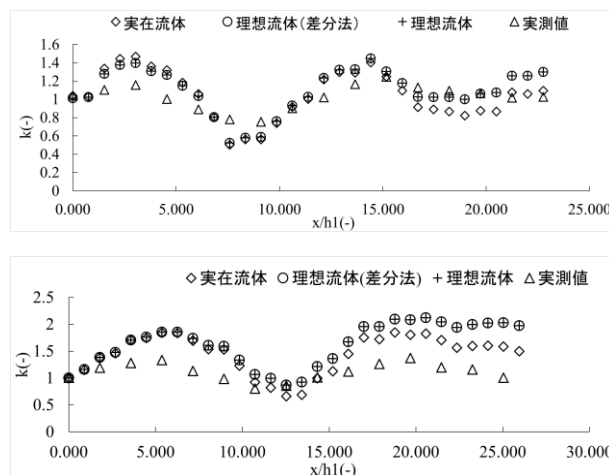


図-2 圧力補正係数の流下方向変化
(上図 : $Fr=2.0$, 下図 : $Fr=2.5$)

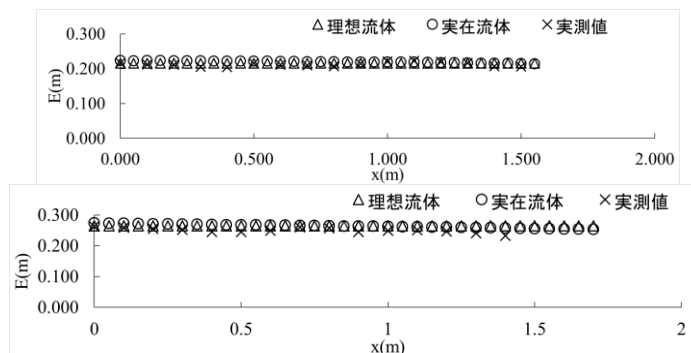


図-3 比エネルギーの流下方向変化
(上図 : $Fr=2.0$, 下図 : $Fr=2.5$)

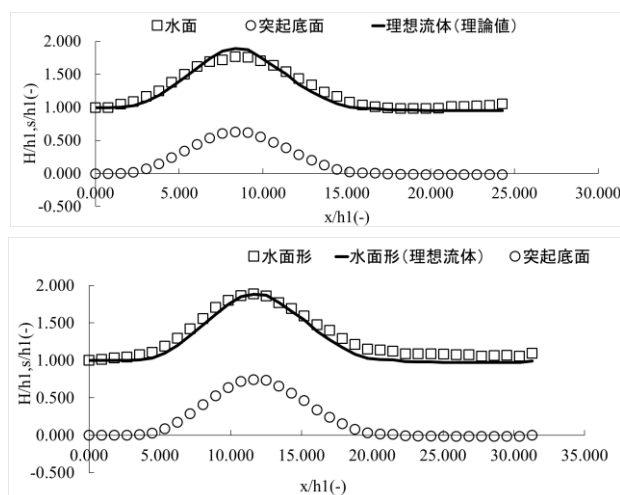


図-4 水深の流下方向変化
(上図 : $Fr=2.0$, 下図 : $Fr=2.5$)