

開水路における境界層内の流速分布に関する研究

福井工業大学 工学部 大学院 奥村 卓史
 福井工業大学 工学部 正 員 松並 仁茂

1. まえがき

開水路水流の境界層問題を取り扱うにあたって、最も重要な流速分布は、従来、円管内の流れにおいて、境界層が十分発達した断面における流速分布式をそのまま用いていた¹⁾。開水路水流においては、自由水面があるので、あらゆる面で円管内の流れの場合より複雑で困難を伴うことが多い。最近、開水路水流の研究において、「乱流の組織構造」に関する研究²⁾が盛んに行われ注目されているが、ここでは、従来の流体力学にみられる立場にたって、開水路水流における境界層の問題を考究することを目的としている。それゆえ、まず、この研究を進めるための最初の課題である流速分布の特性を解明することから始めることにした。

ここでは、最初の試みとして、計測の容易な滑面の開水路における乱流の境界層内の鉛直断面の流速分布の実験的研究を行ない、適切な流速分布式を見出すための検討を行なうことにした。なお、ここでいう流速は時間的平均流速のことであり、流速分布はその分布のことである。

2. 滑面開水路の乱流境界層内における流速分布式

流速分布式については、管路流で有名な対数則とKármánの実験式ならびに Blasiusの 1/7乗則がある。これらの式の一つでも開水路水流の流速分布にたいしておよそ合致しておれば、そのまま使用しても相当良好な結果を得ることができると思われる。しかし、実際にはかなりの相違がみられるようであるので、十分な検討を行ない確認をしておく必要がある。

流速分布式は、円管内の流れの流速分布式の誘導方法を参考に、対数型の場合は Prandtlの理論（運動量の理論）として知られているせん断応力式、すなわち、 $\tau = \rho l^2 (du/dy)^2$ と水流内のせん断応力の分布式の2式から求める。水流内のせん断応力の分布は仮定する訳であるが、一般に、 $\tau = \tau_0 (1-y/\delta)^m$ 、 $m \geq 0$ とおく。一方、混合距離 l は、理論的なKármánの相似性の仮説による場合や、実験結果から、それに適合する実験式などによって表わす。ここでは、適切な流速分布式を得るため、 $m=0, 1/2, 1, 2$ の4通りと混合距離の7通りについて実験的考察を行う。表-1はこのうちの一部を示したものである。

3. 滑面開水路における流速分布の実験と考察

滑面の開水路は、幅20cm、高さ20cm、長さ105cmで、9mm厚さの透明なアクリル製の板で作った。開水路の流入口は流速分布が一定で安定した流れであることが望ましい。そのため、開水路の直上流部に0.5mm厚さのステンレス板を縦方向に2cm間隔に配置した長さ30cmの整流装置2台と開水路の流入口部に0.3mm厚さ

表-1 流速分布式（一部分）

No.	混合距離 l	$\frac{U_0-U}{U_*^2} \quad (\tau=\tau_0)$	$\frac{U_0-U}{U_*^2} \quad (\tau=\tau_0(1-\frac{y}{\delta})^2)$
1	$h\delta$	$\frac{1}{h} \log \frac{\delta}{h}$	$\frac{1}{h} \left(\log \frac{\delta}{h} + \frac{\delta}{h} - 1 \right)$
2	$h \frac{du}{dy} / \frac{d^2u}{dy^2}$	$\frac{1}{h} \log \frac{\delta}{h}$	
3	$h\delta \left\{ 1 - 1.1 \frac{y}{\delta} + 0.6 \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 - 0.15 \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \right\}$	$\frac{1}{h} \left\{ \log \left(2 \frac{\delta}{h} - 1 \right) - 1.31 \tan^{-1} 0.655 \left(\frac{y}{\delta} - 1 \right) \right\}$	$\frac{1}{h} \left\{ \log \frac{0.15 \left(\frac{\delta}{h} \right)^2 - 0.3 \frac{y}{\delta} + 0.5}{\frac{y}{\delta} (2 - \frac{y}{\delta})} + 1.05 \right\}$
4	$h\delta / \left(a + b \frac{y}{\delta} \right)$	$\frac{1}{h} \left\{ a \log \frac{\delta}{h} + b \left(1 - \frac{y}{\delta} \right) \right\}$	$\frac{1}{h} \left\{ a \log \frac{\delta}{h} + \frac{b}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 + (a-b) \frac{y}{\delta} - a + \frac{b}{2} \right\}$
5	$h\delta \sqrt{1 - \frac{y}{\delta}}$	$\frac{2}{3h} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{3}{2}}$	$\frac{2}{5h} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{5}{2}}$
6	$h\delta \sqrt{1 - \frac{y}{\delta}} \sqrt{\frac{y}{\delta}}$	$\frac{1}{h} \left\{ \sin^{-1} \left(1 - 2 \frac{y}{\delta} \right) + \frac{\pi}{2} \right\}$	$\frac{1}{h} \left\{ \tan^{-1} \frac{\delta}{y} - 1 - \sqrt{1 - \frac{y}{\delta}} \sqrt{\frac{y}{\delta}} \right\}$
7	$h\delta \sqrt{\frac{y}{\delta}}$	$\frac{2}{h} \left(1 - \sqrt{\frac{y}{\delta}} \right)$	$\frac{2}{h} \left\{ \frac{2}{3} - \sqrt{\frac{y}{\delta}} \left(1 - \frac{y}{3\delta} \right) \right\}$
指数則 $\frac{U}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{n}}$			

の銅板を1cm間隔に配置した長さ10cmの整流装置1台を設置して、ほぼ望ましい流れを得ることができた。

流速の測定に用いたピトー管は内径4mmと3mmの2種類であるが、その大部分の計測は4mm径で行ない、底面近傍のみ3mm径で計測した。マノメータは30度に傾斜したものをを用いたが、その読み取りの精度から、流速の精度は0.1cm/secとなったので、境界層の位置はこの精度をもって決定される。その結果、上部主流の流速のはば99.8%の流れのところとすることになった。このことは、従来の99%程度とは異なるものである。なお、実験は、勾配は1/5、1/10、1/1200の3通りであり、流量は2通りとした。

流速分布の実験結果と一致する流速分布式を見出すことは容易ではない。ここでは、流速分布のほか、排除厚 δ^* と運動量厚 θ および形状係数 $H = \delta^*/\theta$ の各要素についても検討し、安定した適切な値を示すものをもって適切な流速分布式とすることにしたが、このうちの流速分布について図-1に6例を示した。a図は対数則と実験結果の対比を示したものである。適切な k 値を選ぶことによって実験結果にかなり近づけることはできるが、特に、底面付近で大きな違いがあることが分かる。b図は、Karmanの相似性の仮説による流速分布式との対比であるが、良く一致しているといえる。c図は、表-1のNo.3に示す混合距離を Nikuradse の実験結果の式で表わしたときの流速分布式との対比であるが、良く一致している。d図は Nikuradse の実験結果の式をNo.4

にあるように、双曲線で表わしたときの対比であるが良く一致している。e図はNo.5の場合であるが、簡単な流速分布式のわりには良く一致しているといえる。f図は指数則の場合の対比であるが、好ましい結果を示すものはまったく見当たらなかった。特に、対数型の流速分布式のなかでは、 $m=2$ のグループが実験結果と良く一致することが明らかになった。なかでも、No.5とNo.7の2式はともに簡潔な式であるので、今後の研究に役立つものと思われる。

4. 結 言

開水路における乱流境界

図-1 流速分布式と実験結果

層の研究を進めるにあたって、最も基本的な開水路水流の適切な流速分布式を選定する必要がある。しかし、この要請に十分に答えてくれる分布式を見出すことは容易でないことが分かった。ここでは、実験結果に十分合致するものではないが、今後の研究に使用できる2・3の流速分布式を選定することができた。

参考文献

- 1) 岩佐義朗：水理学，朝倉書店，pp. 61～65，1997。
- 2) 玉井信行，他5名：乱流における組織構造の役割，土木学会論文集，委員会報告，第423号/II-14，1990。

