

II-135 滑面薄層流の流速分布特性

群馬大学大学院 学生員 根岸邦明
 群馬大学工学部 正 員 富永晃宏
 群馬大学大学院 学生員 藤川智仁

1. まえがき 降雨などによって起こる路面や傾斜面上での流れは、水深の小さな薄層流であり、この流れによって、排水や土壌侵食などの問題が生じてくる。薄層流に関する研究は現在までその例が少ないが、岩垣^{1), 2)} などによって行なわれている。本研究は薄層流の体系的な解明のための基礎的実験として、レーザー・ドップラー流速計を用いた高精度の計測を行ない、滑面開水路における薄層流の平均流速分布特性を明らかにしたものである。

2. 実験装置および方法 実験水路は長さ4m、幅20cmで、勾配可変型の透明アクリル製矩形断面開水路である。実験条件は、表1に示すように水路床勾配を1/500, 1/250, 1/100, 1/50, 1/25と変化させ、それぞれについて水深を約3mm~15mmまで4~5通り変化させた。流速計にはファイバー・レーザー・ドップラー流速計を用い、各実験ケースについて計測点を最小0.1mm間隔で約20点~30点ほどとり、主流速成分を高精度で詳細に計測した。

3. 実験結果および考察

(1) 主流速分布 図1に主流速Uの鉛直分布を示す。図中の破線は層流の流速分布理論式、同じく点線は乱流の流速分布理論式(すなわち対数則)を表わしている。流速分布は、壁面から粘性底層、バッファー層を経て対数則領域へと移行する従来の壁法則に従う。しかし、乱流域の流速分布は従来の対数則に対して平行なずれを生じていることがわかる。このずれは水路床勾配が大きいものほど、また同一勾配でも水深の大きいものほど大きくなる傾向にある。図2, 図3に対数則のカルマン定数κと積分定数Aの一回帰の結果をそれぞれ示す。κはフルード数Frによらず、福澤³⁾の提案した開水路での値κ=0.412にほぼ一致するが、Aは同じくA=5.29に一致せず、Frが大きくなるほど小さくなる傾向にあり、またFrだけではなく水深hや水路床勾配Iによる複合的な影響があるものと考えられる。

(2) 対数則分布と混合距離分布の関係 乱流域の流速分布は壁面近く、すなわち粘性底層と密接な関係があると考えられる。薄層流の場合、乱流域が底面近くまで及び、粘性底層厚さを低減させ、そのために混合距離lが増大して、その結果、流速分布が変化したと考えられる。このような観点から、対数則と混合距離について考察することにする。混合距離lの分布式として、次の式を用いる。

$$l = \kappa y \Gamma \sqrt{1 - \xi} \quad ; \quad \Gamma \equiv 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (1)$$

ここに、 $\xi = y/h$, $y^+ = U_* y/\nu$, Γ はvan Driest⁴⁾の提案した減衰関数、Bは同じく減衰係数で、従来B=2.6とされている。運動方程式にPrandtlの混合距離理論を用いて次式が得られる。

$$\frac{\tau}{\rho} \equiv l^2 \left(\frac{dU}{dy}\right)^2 + \nu \frac{dU}{dy} = U_*^2 (1 - \xi) \quad (2)$$

これをさらに変形すると次式となる。

$$\frac{dU^+}{d\xi} = \frac{2R_* (1 - \xi)}{1 + \sqrt{1 + 4l^{*2} (1 - \xi)}} \quad (3)$$

ここに、 $U^+ = U/U_*$, $R_* = U_* h/\nu$, $l^+ = U_* l/\nu$ 、である。

式(1)において減衰係数Bを変化させたときの混合距離分布の変化を図4に示す。また、図5は図4のBの変化に対応した流速分布の変化を表わしたもので、式(1)を式(3)に代入して数値積分することにより求めることができる。この2つの図より、Bの変化によって混合距離分布は底面近くで微小な変化を示すだけであるが、流速分布は乱流域で特に大きな変化を示すことがわかる。

(3) 実験結果によるBの決定とその傾向 実測の流速分布に計算値が一致するようにBを求めることができる。図1に最適なBを決定して得られた計算値を実測値と比較したが、両者はよく一致している。また、図6は流速実測値を用いて式(2)より求められる混合距離分布と(2)の混合距離分布の計算値を比較したものである。混合距離分布も実測値と計算値は全体的に一致していると言える。従って実験における流速分布の変化は混合距離分布の変化として

表1 実験条件

実験 CASE	水路床 勾配 I	水深 h (cm)	フルード 数 Fr	レイノルズ 数 Re	摩擦速度 U* (cm/s)
NT07	1/500	1.53	0.67	3392	1.71
NT08	"	1.09	0.62	1917	1.54
NT09	"	0.81	0.57	1113	1.22
NT10	"	0.53	0.51	528	0.94
NT12	1/250	1.63	0.93	5105	2.52
NT13	"	1.12	0.86	2669	2.16
NT14	"	0.89	0.88	1975	1.97
NT15	"	0.53	0.94	979	1.42
NT16	"	0.33	0.84	328	1.19
NT17	1/100	1.39	1.55	6722	3.69
NT18	"	1.12	1.53	4864	3.35
NT19	"	0.81	1.45	2921	2.84
NT20	"	0.59	1.36	1706	2.42
NT21	"	0.36	1.27	817	1.93
NT22	1/50	1.11	2.13	6832	4.66
NT23	"	0.90	2.06	4702	4.20
NT24	"	0.60	1.94	2529	3.44
NT25	"	0.37	1.80	1124	2.69
NT26	1/25	0.95	3.05	7382	6.11
NT27	"	0.80	3.01	5610	5.60
NT28	"	0.55	2.87	3139	4.65
NT29	"	0.35	2.56	1412	3.70

説明できたわけである。このようにして全実験ケースについて決定されたBと摩擦速度 U_* の関係を図7に示す。Bは、勾配Iやフルード数Fr、水深hといった薄層流を特徴付けるパラメータに対してよりも、 U_* と最も相関が高く、一定の傾向があることが明らかである。薄層流の特徴は第一に水深hが小さいことであるが、hが大きくなるほど対数則からのずれが大きくなり、逆の相関を示している。従って、hの大きな流れについても検討が必要である。

4. あとがき 薄層流の流速分布は従来の対数則に対して平行なずれを示し、このずれは混合距離の仮定において減衰関数 Γ に現われる係数Bの変化によって説明できることがわかった。しかし、Bの変化の傾向に物理的な意味を見いだすことはできなかった。今後は、薄層流に限らず、水深の大きな流れについても検討を行ないたい。また、粗面における薄層流の研究も行ないたい。

(参考文献) 1) 石原, 岩垣, 合田; 土木学会論文集, 第6号, 1951. 2) 岩垣; 土木学会論文集, 第16号, 1953. 3) Iehisa Nezu, Wolfgang Rodi; Journal of Hydraulic Engineering, 1986. 4) van Driest, E.R.; J.Aeron, Science, vol.23, 1956.

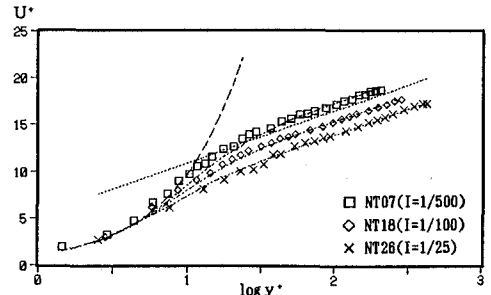


図1 主流速Uの分布

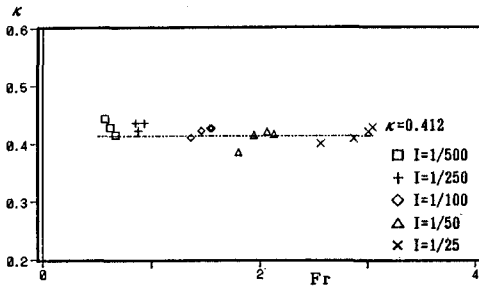


図2 カルマン定数 κ とフルード数Frの関係

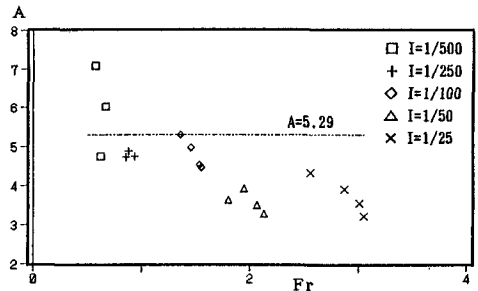


図3 積分定数Aとフルード数Frの関係

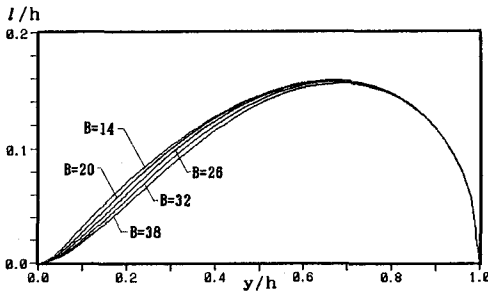


図4 減衰係数Bによる混合距離lの分布の変化

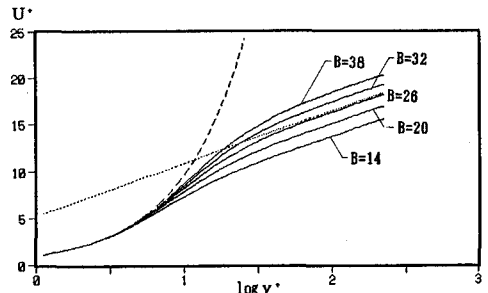


図5 減衰係数Bによる主流速Uの分布の変化

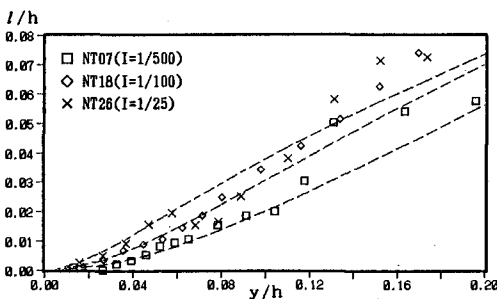


図6 混合距離分布の実測値と計算値との比較

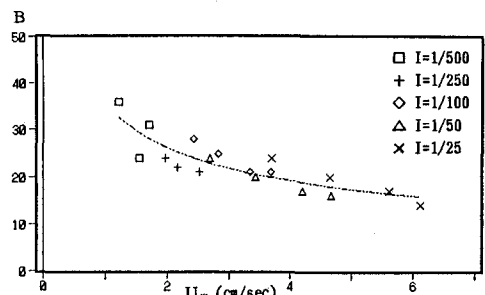


図7 減衰係数Bと摩擦速度 U_* の関係