

粗度後流の渦区域について

立命館大学理工学部 正 員 大同 淳之

立命館大学大学院 楊 永荻

立命館大学大学院 学生員○田中 耕司

1. まえがき 壁面の乱れは、乱流構造に影響を与える重要な要素である。壁面の乱れの解明は、流れの抵抗特性、エネルギー損失機構および土砂の輸送過程などの問題を解明する鍵である。従来の研究は、後流構造についての数多く研究が行われてきた。しかし、粗度下流部の流れの中は変化が急激かつ複雑であり、完全に内部の構造を究明するに至っていない。

本研究では粗度後流の渦区域の尺度から乱流構造に及ぼす影響が把握できると考えた。粗度後流の渦区域の構造を明かにするために、水路床上に置いた円柱が主流に及ぼす影響をモデル化し、実験と比較検討する。

2. 実験方法および結果 実験に用いた水路は、長さ13

m 幅30cmの勾配可変式水路で水路勾配1/8000に設定した。水路床中央部に粗度として円柱を流れに対して垂直な方向に設置した。円柱の直径は、 $\phi=0.4 \cdot 1.0 \cdot 1.5$ cmの三種類である。粗度から下流方向での流れの変化の大きい場所では1~2.5cmの間隔で流速を測定し、さらに粗度からの影響のない地点での流速を測定した。流速の測定には直径3mmの超小型プロベラ式流速計を用いた。さらにインクでの局所的な可視化で、粗度を越える流れの分離点を確認した。そして流速分布と可視化によって上層流の底面への再付着点までの長さを測定した。実験条件をTable. 1に示した。ただし、 $Re_s = \frac{U_s k}{\nu}$ である。

実験によりつぎのような定性的な結果がわかった。

(1) 粗度を越えて流れるときに、その時の Re_s により分離流が形成されて、粗度後流に規模異同の分離渦を生じる。分離点の位置は、流れの外部変数 Re_s により変化し、分離区域の領域も大きくなっていく。上層流の再付着点での分離渦の長さは、 Re_s が大きくなれば、長くなることがわかった。

(2) 分離渦の変化の過程には、二つの境界点が存在することがわかった。下臨界レイノルズ数 Re_{s1} と上臨界レイノルズ数 Re_{s2} が存在し、ある Re_s が、下臨界レイノルズ数以下の時は、分離渦を生じず、それ以上の時は、分離渦が生じる。そして Re_s が上臨界レイノルズ数以上になれば分離渦は安定した長さになることがわかった。

(3) 粗度背後の渦区域は、逆流になる。そして上層流

Table.1 実験条件

Run	H/k	U/U*	Re*	Re	Fr
k1-1	12.45	18.10	42	9494	0.07
k1-2	5.75	17.40	74	7372	0.20
k1-3	10.05	17.90	47	8908	0.09
k1-4	10.25	20.47	118	24665	0.25
k1-5	16.05	18.08	33	9534	0.05
k1-6	10.55	20.67	123	26771	0.26
k1-7	10.25	16.21	28	4726	0.05
k1-8	8.37	19.78	113	18648	0.26
k1-9	8.90	16.84	51	5971	0.11
k1-10	8.75	19.27	90	15214	0.20
k1-11	9.40	19.16	81	14533	0.17
k1-12	20.90	18.89	25	10049	0.04
k1-13	7.40	17.24	54	6941	0.12
k1-14	7.70	18.18	71	9950	0.16
k1-15	20.25	18.13	20	7201	0.03
k1-16	19.65	17.39	15	5122	0.02
k04-1	43.50	18.05	11	9038	0.04
k04-2	50.13	18.63	10	9032	0.03
k04-3	32.88	18.66	15	8980	0.07
k04-4	21.80	18.66	22	8989	0.12
k04-5	8.75	18.66	49	8880	0.41
k15-1	6.90	18.82	98	12771	0.13
k15-2	8.19	20.33	141	23405	0.18
k15-3	6.37	20.43	187	24283	0.28
k15-4	8.90	18.60	70	11670	0.08
k15-5	5.67	18.03	91	9331	0.13
k15-6	7.38	18.32	78	10512	0.10



Fig.1 渦区域の変化

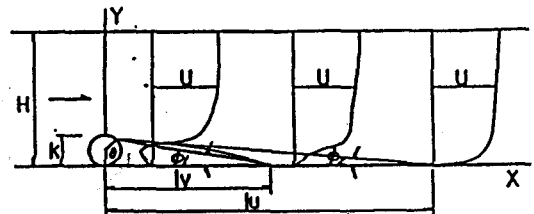


Fig.2 粗度背後の後流領域

の底面への再付着点より下流では、粗度が流速分布に影響を及ぼす範囲が存在する。さらにそれより下流の方では、流速分布がせん断流に復元することがわかった。

3.理論的検討 粗度後流の渦区域の形状は、Fig.2 に示したようにモデル化される。分離角 θ で lv (渦区域の長さ)と lu (粗度が流れの流速分布に影響を及ぼす範囲の長さ)は次式で表される。

すようになる。

$$\frac{lv}{k} = \frac{1}{2} \left(\sin \theta + \frac{1 - \cos \theta}{\tan \phi_1} \right) \dots (1) \quad \frac{lu}{k} = \frac{1}{2} \left(\sin \theta + \frac{1 - \cos \theta}{\tan \phi_2} \right) \dots (2)$$

(1) 分離角 θ について 実験結果から Re_τ が大きければ分離区域が大きくなって、分離角 θ も大きくなる。

一方ある Re_τ ($Re_{\tau 2}$)を越えたあと、渦区域が安定して、分離角 θ も一定になる。そこで、分離角 θ

の変化率は、 Re_τ が大きくなると小さくなっていくはずである。すなわち $\frac{d\theta}{dRe_\tau} = \frac{C}{Re_\tau} \dots (3)$ となり、

次の境界条件 $Re_\tau = Re_{\tau 1} \dots \theta = 0, Re_\tau = Re_{\tau 2} \dots \theta = \pi \dots (4)$

を(3)に代入すると、 $\frac{\theta}{\pi} = \log \frac{Re_\tau}{Re_{\tau 1}} / \log \frac{Re_{\tau 2}}{Re_{\tau 1}}$

となる。実験データによって $Re_{\tau 1} = 3.55, Re_{\tau 2} = 100$ と確認された。実験データとの比較はFig.3

のようになった。

(2) ϕ_1 と ϕ_2 について ϕ_1 と ϕ_2 の境界条件は、次のようになる。 $\theta = 0 \dots \phi_i = \frac{k}{2}, \theta = \pi \dots \phi_i = \phi_{i \min}$

($i=1,2$) 分離角 θ が大きくなると ϕ_1 と ϕ_2 が小さくなる。そこで、最も簡単な反比例の関係と仮定する。

$\phi_i = \frac{B}{A + \theta} \dots (5)$ ($i=1,2$)となり、(5)を代入すると $\phi_i = \phi_{i \min} / \left\{ 2 \frac{\phi_{i \min}}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) + \frac{\theta}{\pi} \right\}$ ($i=1,2$)

となる。さらに、実験データで計算を試みた結果 $\phi_{1 \min} = 7.6^\circ, \phi_{2 \min} = 4.6^\circ$ となった。

(3) 渦区域の長さ lv と流速分布の影響範囲の長さ lu の実験的比較 以上の結果を式(1)に代入すると

$$\frac{lu}{k} = \frac{1}{2} \left(\sin \theta + \frac{1 - \cos \theta}{\tan \left(\frac{\phi_{2 \min}}{2 \frac{\phi_{2 \min}}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) + \frac{\theta}{\pi}} \right)} \right) \dots (6)$$

$$\frac{lv}{k} = \frac{1}{2} \left(\sin \theta + \frac{1 - \cos \theta}{\tan \left(\frac{\phi_{1 \min}}{2 \frac{\phi_{1 \min}}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) + \frac{\theta}{\pi}} \right)} \right) \dots (7)$$

となる。この lv, lu と実験データとの比較は Fig.4に示す通りでよく一致していると思われる。

4.むすび 粗度後部の分離渦に着目して解析した結果、分離渦は $Re_\tau = 3.55$ から渦区域を生成し、 $Re_\tau = 100$ を越えたと安定した区域が生成されることが明かになった。理論解析を行って、この区域の長さをあらわす計算式を提案した。

(参考文献) 玉井他; 乱流における組織構造の役割, JSCE No.423, 1990.11

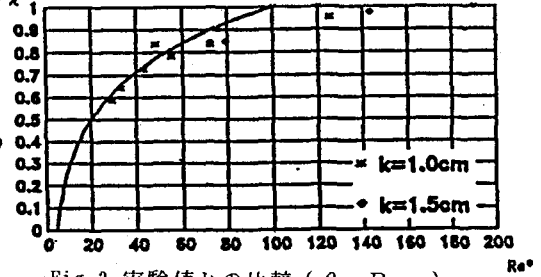


Fig.3 実験値との比較 ($\theta \sim Re_\tau$)

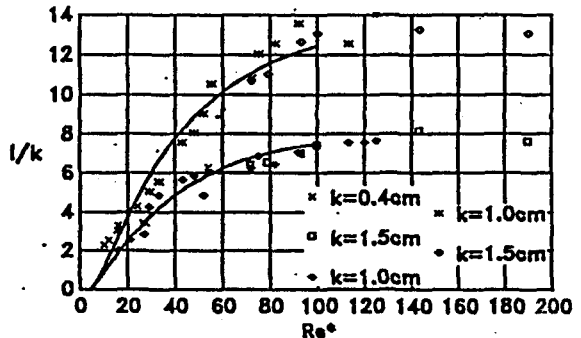


Fig.4 実験値と提案式との比較 (lv, lu)