

開水路粗度急変流における平均流構造に関する実験的研究

京都大学工学部 正員 中川 博次
大阪府庁 正員 川島 伸哉
京都大学大学院 学生員 鈴木 康弘

京都大学工学部 正員 禰津 家久
京都大学大学院 学生員 瀬谷 和彦

1. まえがき 開水路乱流場において底面粗度を急変させると、急変後、流れは新たな粗度に対応して遷移していく。本研究では、粗面から滑面へ粗度が急変する場合に、その粗度急変点から発達する境界層の内部機構を平均流及び乱れ特性から解明しようとした。

2. 実験方法 実験水路は長さ10m、幅40cmの勾配可変水路である。粗度急変点は水路上流端から約5mの位置に設けた。粗度としては粒径が0.4cm、1.2cmのビー玉を用いた。原点は粒径の1/4だけ下方にずらした点にとった。また、それぞれの粗度に対し、水深 $h=6\text{cm}$ に保ちながらフルード数が0.2、0.4の流れについてそれぞれ調べた。計測区間長は、粗度急変点の50cm上流側から175cm下流側まで225cmであり、計測断面数は約16で、特に粗度急変部付近は密に計測した。なお、計測にあたってはレーザー流速計を用いた。

3. 実験結果及び考察 粗度急変後の計測断面における流速分布を片対数表示すると図1のような折れ線となる。この「折点」より下方にある部分（本研究では内部境界層とよぶ）は、新たな粗度の影響が及んでいるが、一方、「折点」より上方にある部分（本研究では外部境界層とよぶ）は、急変後も急変前とほとんど分布状態が変わらず、Townsend¹⁾のいうself-preserving性が保持されていることがわかる。また、流下方向に流れがすすむにつれて「折点」が徐々に上がっていく（図2）これは、流れが底面から徐々に新たな粗度に対して応答していくことを示す。流速分布図で、この部分がLog則に従うものとしてカルマン定数 $\kappa=0.41^{2)}$ を用い、このグラフの勾配から摩擦速度 U_* を便宜上求め、更に底面せん断応力が $\tau=\rho U_*^2$ より求められる。そこで、最も上流側の計測断面における底面せん断応力を τ_1 とし、 τ_1 を用いて無次元化した底面せん断応力分布を図3に示す。なお、 U_{*1} を最上流側計測断面における摩擦速度とし、 $K's_1=Ks_1 U_{*1}/\nu$ とした。図3から、 $K's_1$ が大きいものは粗度急変直後の底面せん断応力が急減し、 $K's_1$ が小さくなるにつれてその変化が滑らかになっている。次に、同様にしてレイノルズ応力分布、乱れ強度分布より内部境界層を求める。レイノルズ応力分布については粗度急変前に直線分布していたものが、急変後、底面より徐々に内側に折れだし、上層より下層に向かって減少あるいは一様になっている（図4）これは、急変後、底面せん断応力が減少し、これに引きずられたためと思われる。また、レイノルズ応力分布についても、「折点」より上方では分布状態にほぼ変化がみられず、self-preserving性が認められる。そして、この場合も「折点」より下方にあたる部分を内部境界層とすることができる。次に、乱れ強度分布については、粗度急変後、底面より徐々に下方へ折れだし、滑面に対する応答が見られる（図5）この場合についても「折点」より上方にself-preserving性が見られ、「折点」より下方にあたる部分を内部境界層とすることができる。このように、流速分布、レイノルズ応力分布、乱れ強度分布よりそれぞれ内部境界層を定義することができる（図6）内部境界層の発達については、いずれの場合にせよ、 $K's_1$ がおおきいものほど遷移区間が長くなる傾向が認められる。つまりこれは、乱れの大きい流れのほうが滑面に対する応答が遅くなることを示している。次に、これらの内部境界層分布線を延長してそれぞれ得られる遷移区間長を表2に示す。これより、同じ実験ケースでも流速分布により求められる遷移区間長（ L_u ）のほうが、レイノルズ応力分布（ L_r ）や乱れ強度分布（ L_w' 、 L_w'' ）より求められる遷移区間

Hiroji NAKAGAWA, Iehisa NEZU, Nobuya KAWASIMA, Kazuhiko SEYA, Yasuhiro SUZUKI

長に比べ大きな値をとっている。

4. あとがき 本研究では、計測区間が短く完全な内部境界層の発達が認められない場合があった。今後、計測区間を長くとり、また、滑面から粗面へ粗度急変するケースや、さらに、不完全粗面などを含めたケースなどについても実験を執り行い、これらを比較検討する必要がある。

参考文献 1) Townsend, A.A; The response of a turbulent boundary layer to abrupt change in surface condition, J.F.M. Vol. 22, 1965 2) I. Nezu and W. Rodi; Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, ASCE. Journal of hydraulic engineering, Vol. 112, 1986

表1 実験条件表

$K_s(\text{cm})$	Fr	Re	$U(\text{cm/s})$	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$I(\%)$	k_{eff}
1.2	0.4	18400	30.67	7360	20.70	388.8
1.2	0.2	9200	15.33	3680	8.17	171.6
0.4	0.4	18400	30.67	7360	12.70	102.8
0.4	0.2	9200	15.33	3680	3.18	40.0

表2 遷移区間長

CASE	L_u/h	L_R/h	L_v/h	L_{δ}^*/h
$Fr=0.4, k_{\text{eff}}=388.8$	3.4	2.0	1.5	1.0
$Fr=0.2, k_{\text{eff}}=171.6$	3.8	2.0	2.0	2.3
$Fr=0.4, k_{\text{eff}}=102.8$	4.4	3.5	4.5	3.8

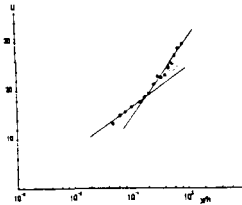


図1 流速分布

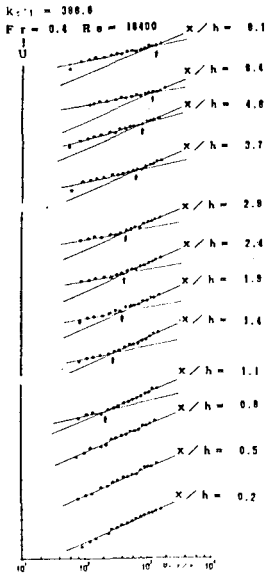


図2 流速分布の流下方向への変化

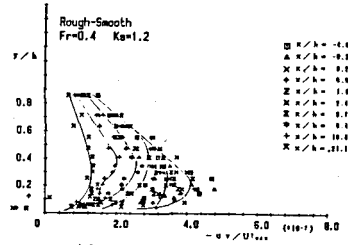


図4 レイノルズ応力分布

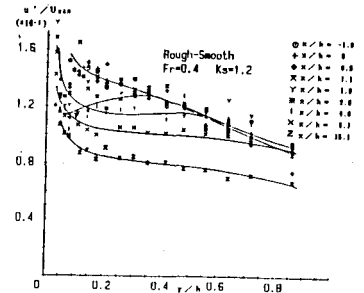


図5 乱れ強度分布

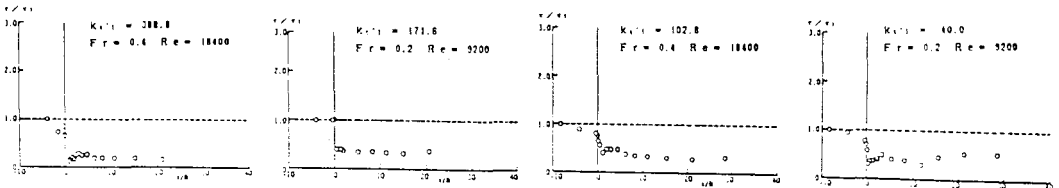


図3 底面せん断応力分布

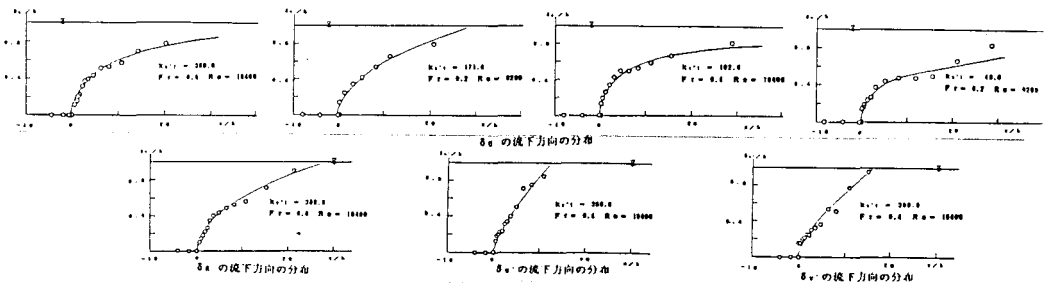


図6 内部境界層の発達