

# 閉管路における粗度急変流れの乱流構造の応答特性

## Response of Turbulent Structures to Abruptly Changed Roughness in Closed-Channel Flows

中川博次\*・瀬津家久\*\*・門田章宏\*\*\*・戸田孝史\*\*\*\*

By Hiroji NAKAGAWA, Ichisa NEZU, Akihiro KADOTA and Takashi TODA

It is very important in Hydraulic Engineering to investigate the response of velocity distribution and wall shear stress to abrupt changes of wall roughness in closed channels as well as in open channels. We (1991, IAHR Congress) have first revealed the overshooting property of shear stress and turbulence in the case of smooth to rough changes in *open-channel* flows. In the present study accurate LDA measurements over abruptly changed roughness have been conducted in asymmetric *closed-channel* flows. Of particular significance is a very large overshooting of shear stress in the case of smooth to rough changes. It was also stressed that the eddy-viscosity model is not valid and a refined stress model should be developed for computation.

**Keywords:** Abrupt change of roughness, Response of velocity,

Overshooting property, Eddy-viscosity model, Closed Channels.

### 1. はじめに

実河川においては、河床勾配が大きな場合やダム、堰などの河川構造物によって流れが急激に変化する場合に起こる局所洗掘を防止するために護床工が設けられることが多い。この護床工と自然河床との結合部では、河床粗度が滑面から粗面へ、また逆に粗面から滑面へと急変することになり、流速分布や底面せん断応力などの流れの構造が大きく変化する。この種の流れに関する研究としては、風洞を用いた境界層流を対象に、機械工学、航空工学の分野で数多く行われている。Smits・Wood(1985)<sup>1)</sup>は、これらの一連の研究成果に関する優れたレビューを行っている。一方、開水路流れを対象とした研究例として、村本ら(1989)<sup>2)</sup>は、2成分ホット・フィルム流速計を用いて開水路粗度急変流の乱流計測を行っている。瀬津ら(1990<sup>3)</sup>, 91<sup>4)</sup>)は、レーザ流速計を用いて開水路粗度急変流の乱流構造を計測し、底面せん断応力のオーバーシュート特性を初めて指摘した。Nezuら(1993)<sup>5)</sup>は、これらのオーバーシュート特性を $k$ - $\epsilon$ モデルを使ってある程度再現することに成功したが、よりリファインされた数値計算モデルを粗度急変流に適用するためには、さらに詳細かつ広範囲な実験データベース

\* 正会員 工博 京都大学教授 環境地球工学教室

(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 環境地球工学教室

\*\*\* 学生会員 京都大学大学院 土木工学専攻

\*\*\*\* 学生会員 京都大学大学院 環境地球工学専攻

が必要である。

ところで、粗度急変流ではないが、Hanjalic・Lauder(1972)<sup>6)</sup>は、下底面が一樣滑面、天井面が一樣粗面で構成された閉管路の乱流計測を行った。その結果、滑面および粗面ともにその近傍では壁法則が成立するが、Reynolds応力がゼロとなる地点と最大流速点とが一致せず、Reynolds応力を流速勾配で関係づける渦動粘性モデル( $k$ - $\epsilon$ モデルが代表例)の欠点が初めて指摘され、応力モデルを開発する動機となっている。最近では、Parthasarathy・Muste(1994)<sup>7)</sup>が、水工学の面から同様な閉管路非対称流を計測している。

本研究は、レーザ流速計を用いて閉管路における粗度急変流を計測し、その乱流構造について開水路粗度急変流と比較・検討したものである。特に、①せん断応力および乱れのオーバーシュート特性、②上述の渦動粘性モデルの欠陥性に焦点をあてて、乱流応答性を検討する。

## 2. 実験方法および水理条件

実験では、長さ10 m、幅40 cmの水路にアクリル製の蓋をして矩形断面の閉管路としたものを使用した。この水路の下流部あるいは上流部に、図-1に示したように一樣粗度( $k_s = 12\text{ mm}$ )のガラスビーズを敷き詰め、滑面から粗面あるいは粗面から滑面に底面路床が急変する流れを2成分レーザ流速計を用いて計測した。この粗面は、いわゆるNikuradseの粗面で、座標原点として、ビーズ頂部から約 $k_s/4$ だけ下げた点をとれば粗面上でも対数則が成立することが知られており<sup>3), 8)</sup>、本研究もそれに従った。管路高さは $2r = 6\text{ cm}$ の一定とし、粗面から滑面、滑面から粗面の場合ともそれぞれ流量 $Q = 2.8, 8.4, 10.0\text{ (l/s)}$ の3通りずつの計6ケースの実験を行った。この水理条件で、粗面はいずれも $k_s^+ > 70$ の完全粗面であった。粗度急変点( $x = 0$ )は、水路上流端から約7 mに設置し、計測区間は $x = -15\text{ cm}$ から $x = 162\text{ cm}$ までの17断面で、各計測断面は鉛直軸 $y$ 方向に約14~19点トラバースして乱流計測を行った。

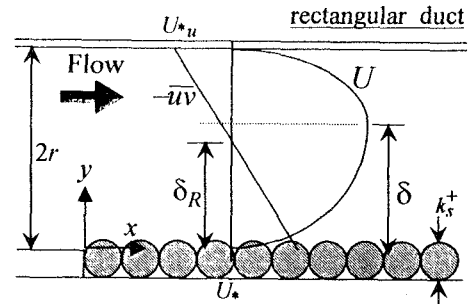


図-1 流れの模式図

## 3. 実験結果とその考察

### 3. 1 平均流速分布の変化特性

図-2は、粗度急変前の最上流断面における最大流速点の高さ $\delta_1$ によって $y$ 軸を無次元化して、平均流速 $U$ を $y/\delta_1$ の片対数表示したもので、断面ごとに垂直にずらして表示している。図-2(a)の粗面から滑面のケースについては、 $x < 0$ の粗面側では流速分布は片対数で直線分布しており、対数則が成立している。 $x > 0$ の滑面に移行すると、底面付近の流速が加速され、流速分布は折れ曲がったような分布形になり直線部分が2つ現れる。この2直線の交点は内部境界層厚 $\delta_i$ と定義でき<sup>3)</sup>、流下方向に内部境界層が発達する様子がわかる。また、内部境界層が発達して最大流速点の高さ $\delta$ まで及ぶには、流下方向に管路中央軸までの高さ $r$ の20倍以上必要であることがわかる。

一方、図-2(b)の滑面から粗面のケースでは、 $x < 0$ の滑面側では同様に流速分布は片対数で直線分布するが、 $x > 0$ の完全粗面に移行すると、粗度の影響で底面付近の流速は減速され、流速分布は下向きに折れ曲がった分布形を示す。この影響は、 $x/r = 1.0$ 付近で特に顕著になり、流下方向に進むに従って水深方向上側まで及び、内部境界層が発達する様子が確認できる。内部境界層が最大流速点の高さ $\delta$ に及ぶまでの流下方向距離 $x$ は、 $r$ の10倍程度で粗面から滑面の場合より内部境界層の発達

激であり、粗度急変の応答特性が大きい。さらに、滑面から粗面のケースで注目されるのは、減速されて下に折れ曲がった流速分布が、流下方向に進むと再び底面近傍から上向きに折れ曲がり始める現象である。これは、粗度急変点から減速されて遷移状態にある流速が、再び落ちてき出すのに時間的、距離的な差があるために生じるものと考えられ、粗面から滑面のケースでは見られない現象である。この現象は、開水路においても観察されている。

最大流速点高さ $\delta$ については、全ケースで、粗面から滑面への急変流では $\delta$ は流下方向に減少し、滑面から粗面への急変流では逆に増加する傾向にあった。

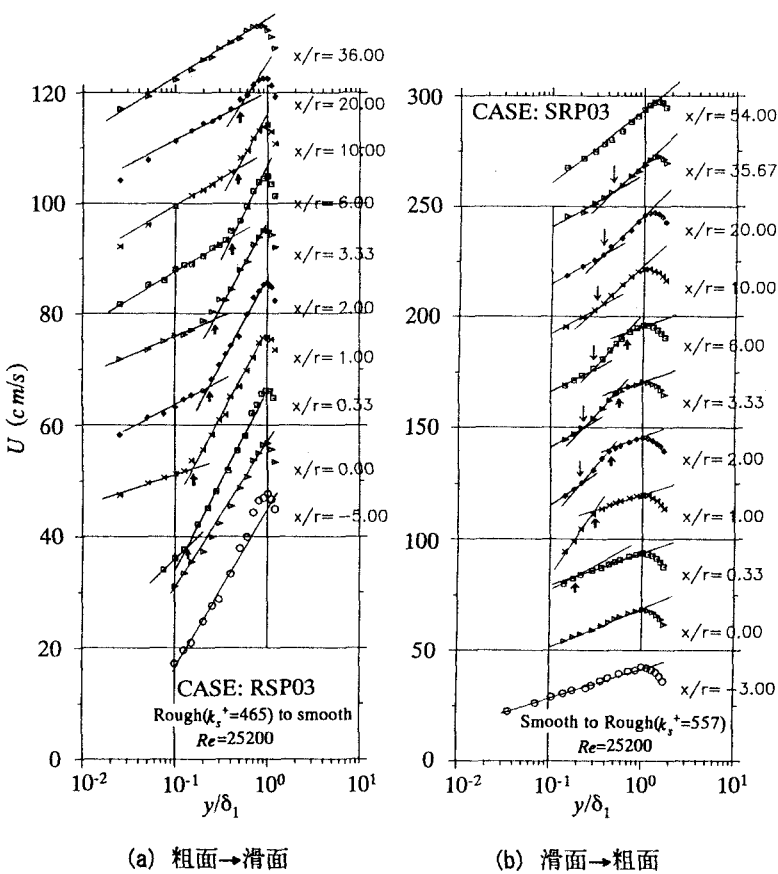


図-2 平均流速分布

### 3. 2 底面せん断応力の変化特性

図-2の平均流速分布から、粗度急変点から新たな粗度に応答して平均流速分布が折れ曲がり、新たな対数則分布を示すことがわかった。閉管路においても対数則分布のKarman定数 $\kappa=0.41$ の一定であることが知られており<sup>10)</sup>、底面近傍の流速分布に対数則を適用することによって、粗度急変に応答した摩擦速度 $U_\tau$ を求めることができる。図-3は対数則より得られた $U_\tau$ から計算された底面せん断応力 $\tau$ を、最上流断面における底面せん断応力 $\tau_1$ によって無次元化し、 $x/r$ に対して示したものである。図中には橋津ら(1990)<sup>3)</sup>の開水路粗度急変流における実験データも併示した。粗面から滑面への急変流では、

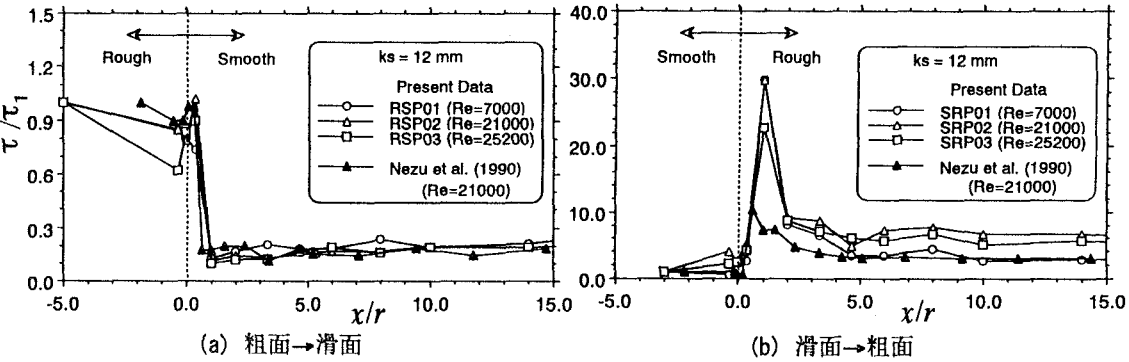


図-3 底面せん断応力の流下方向変化

$x < 0$ の粗度急変前は $\tau/\tau_1$ はほぼ1で、粗度急変後に急激に減少しその後はほとんど変化しない。これは開水路粗度急変流と同様である。一方、滑面から粗面への急変流では、粗度急変点直後にパルス的に $\tau/\tau_1$ が増加する、いわゆるオーバーシュートが観察される。特に注目される点は、その割合が開水路粗度急変流よりはるかに大きく、 $\tau/\tau_1$ は粗度急変前の20~30倍にもなっている。この現象は、閉管路では粗度急変しても水深が変化しないから、流れが極端に流れにくくなり、せん断応力が急増するためと説明できる。

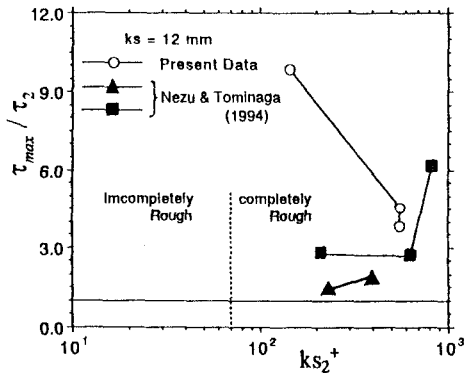


図-4 OverShoot  $\tau_{max}/\tau_2$  (滑面→粗面)

図-4は、滑面から粗面へのケースについて、オーバーシュートの最大底面せん断応力 $\tau_{max}$ を最下流側の2つの断面の底面せん断応力の平均値 $\tau_2$ によって無次元化したものを、下流側粗度 $ks_2^+$ に対してプロットしたものである。図中には、Nezu・Tominaga (1994)<sup>11)</sup>による開水路粗度急変流のデータも併示した。開水路粗度急変流では、 $ks_2^+$ が大きいほど $\tau_{max}/\tau_2$ も大きくなる傾向にあるが、本実験の閉管路では、 $ks_2^+$ が最も小さなケースで $\tau_{max}/\tau_2$ が非常に大きな値を示した。今回は実験ケースが限られており、この傾向が閉管路特有なものかを確定するには今後さらに $ks_2^+$ が小さなケースについて実験する必要がある。

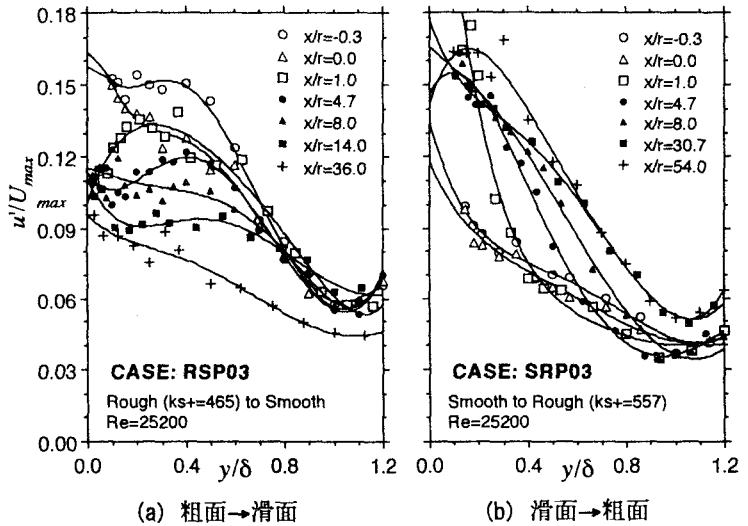


図-5 乱れ強度分布 $u'$

### 3. 3 乱れ強度分布の応答特性

図-5に乱れ強度 $u'$ 、図-6に乱れ強度 $v'$ の $y$ 方向分布をそれぞれ示す。 $u'$ 、 $v'$ ともにケース中の最大流速 $U_{max}$ で、 $y$ は各断面の最大流速点高さ $\delta$ によって無次元化されている。断面によってはかなりばらついているものの、図-5の $u'$ の分布については、(a)粗面から滑面への急変流では粗度急変点より底面近傍の $u'$ が小さくなり、

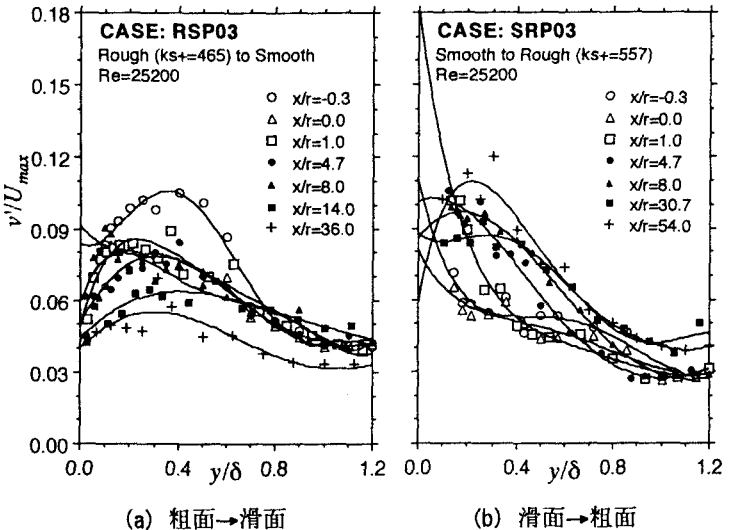


図-6 乱れ強度分布 $v'$

流下方向に進むにしたがってその影響が水深方向上側に及んでいる。逆に、(b)滑面から粗面への急変流では、粗度急変点より底面近傍の $u$ が大きくなる。この傾向は、図-6の $v$ の分布においても同様に見られる。滑面から粗面のケースでは、 $u'$ 、 $v'$ ともに $x/r=1.0$ の断面において底面近傍の値が非常に大きくなっており、底面せん断応力のオーバーシュートに非常によく対応している。

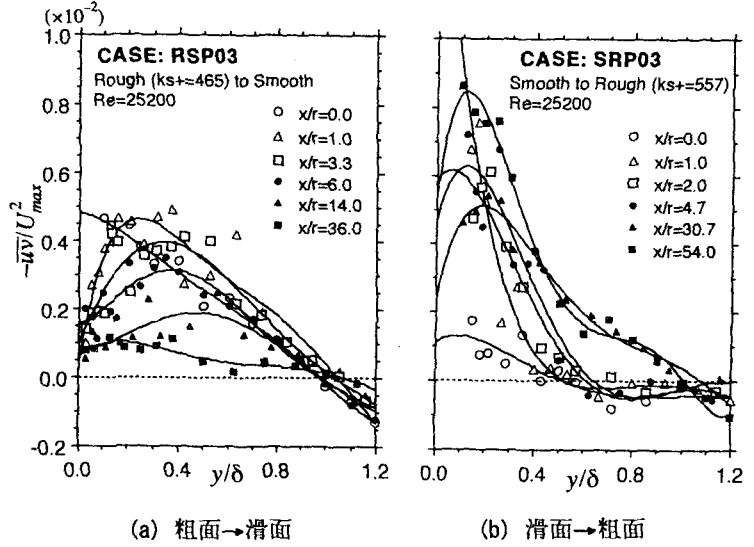


図-7 Reynolds応力分布

### 3. 4 Reynolds応力分布の応答特性

図-7にReynolds応力 $-uv$ の $y$ 方向分布を示す。 $-uv$ はケース中の最大流速 $U_{max}$ で、 $y$ は各断面の最大流速点高さ $\delta$ によってそれぞれ無次元化されている。図-7(a)の粗面から滑面のケースでは、粗度急変点直後から底面近傍の $-uv$ が小さくなり、流下方向に進むのに対応してその影響が水深方向上側まで伝わる様子がよくわかる。図-7(b)の滑面から粗面のケースでは、逆に粗度急変点より $-uv$ は大きな値をとる。特に $x/r=1.0$ の断面では、底面近傍で $-uv$ が非常に大きくなる。

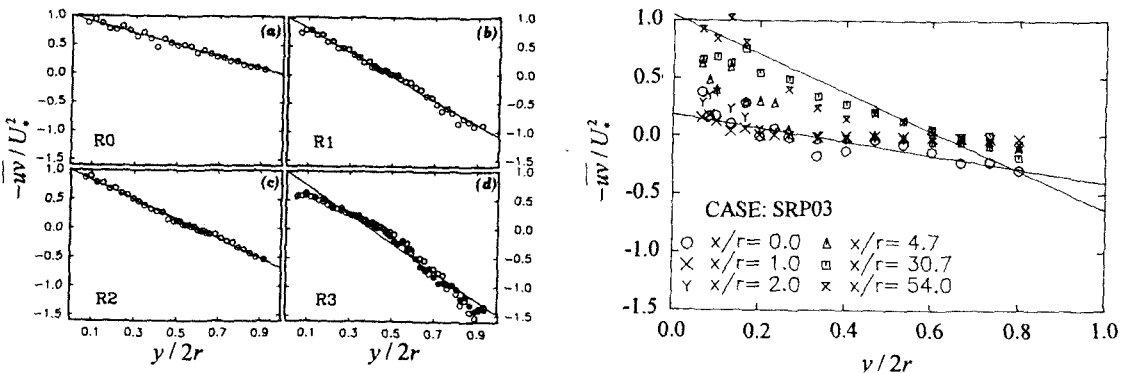
閉管路非対称流における運動方程式は次の式で与えられる。

$$-uv + \nu dU/dy = U_*^2 (1 - y/\delta_r) \quad (2)$$

ここで、 $\nu$ は動粘性係数、 $\delta_r$ は全せん断応力がゼロとなる高さで、図-1に示したように管路底面と天井面の摩擦速度をそれぞれ $U_{*b}$ 、 $U_{*t}$ とすると、

$$\delta_r/2r = U_*^2 / (U_{*b}^2 + U_{*t}^2) \quad (3)$$

で与えられる。式(2)は、開水路流における運動方程式の水深 $h$ を $\delta_r$ で置き換えたものに相当する。式(2)および(3)は対称流( $U_{*b}^2 = U_{*t}^2$ )と開水路流( $U_{*b}^2 = 0$ )を例外として、 $-uv = 0$ となる高さ $\delta_r$ と、 $dU/dy = 0$ つまり最大流速点 $\delta$ が必ずしも一致しなくてもよいことを示すものである。図-8(A)は、



(A) 閉管路非対称流 (Parthasarathyら(1994)?)

(B) 閉管路粗度急変流

図-8 Reynolds応力分布における閉管路非対称流との比較

Parthasarathyら(1994)<sup>7)</sup>による十分に発達した閉管路非対称流を対象とした実験の $-\overline{uv}$ の $y$ 方向分布である。また、図-8(B)は本実験の滑面から粗面への急変流の $-\overline{uv}$ の $y$ 方向分布で、 $-\overline{uv}$ は各断面の管路底面の摩擦速度 $U_\tau$ で無次元化表示されている。図-8(A)は、管路底面の粗度を一定にして、天井面粗度を変化させたものである。図-8(B)中の実線は、粗度急変断面および最下流断面の $-\overline{uv}$ の分布形に最小二乗法を適用して求めたものである。本実験粗度急変流の $-\overline{uv} = 0$ となる高さ $\delta_R$ の流下方向変化を、

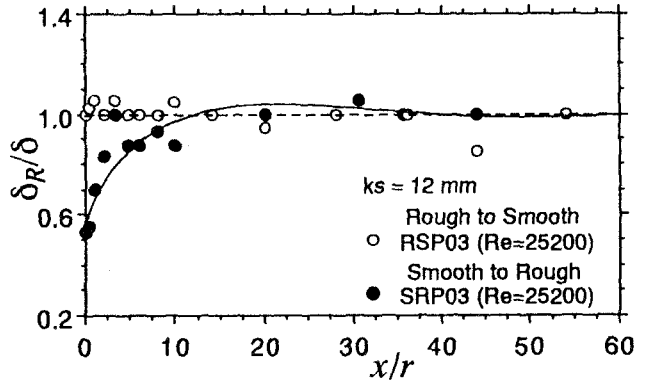


図-9  $\delta_R$ の流下方向変化

図-9に示す。 $\delta_R$ は $\delta$ によって無次元化されている。粗面から滑面への急変流の場合、 $\delta_R/\delta$ は全域でほぼ1であるが、滑面から粗面への急変流では、粗度急変点後に $\delta_R/\delta < 1$ となり、 $-\overline{uv} = 0$ となる高さ $\delta_R$ と最大流速点と一致しない。この不一致の特性は、せん断応力の非常に大きなオーバーシュート特性と関係がありそうである。滑面から粗面への粗度急変閉管路の数値計算では、 $-\overline{uv} = \nu_\tau dU/dy$ という渦動粘性モデルを導入した $k-\epsilon$ モデルやASMは適用できないことを意味し、 $-\overline{uv}$ 自身を未知変数とするいわゆる応力モデルが必要であることが本研究から結論づけられる。

#### 4. おわりに

本研究は、矩形断面の閉管路における粗度急変流れの乱流構造をレーザ流速計を用いて計測し、その平均流特性およびせん断応力の変化特性などを明らかにし、開水路粗度急変流れと比較したものである。本研究の最大の成果は、滑面から粗面に急変するとせん断応力のオーバーシュート特性が顕著で、しかも渦動粘性モデルが不適當である点である。今後、これらの特性を予測できる応力モデルを開発していきたい。

#### 参考文献

- 1) Smits, A. J. and Wood, D. H. : Ann. Rev. Fluid Mech., vol.17, pp.321-358, 1985.
- 2) 神田佳一, 村本嘉雄, 藤田裕一郎 : 第33回水理講演会論文集, pp.499-504, 1989.
- 3) 瀬津家久, 中川博次, 瀬谷和彦, 鈴木康弘 : 水工論文集, 第34巻, pp.505-510, 1990.
- 4) Nezu, I. and Nakagawa, H. : 24th Congress of IAHR, Madrid, vol.A, pp.233-242, 1991.
- 5) Nezu, I., Tominaga, A. and Nakagawa, H. : 5th Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, IAHR, Paris, pp.629-636, 1993.
- 6) Hanjalic, K. and Launder, B. E. : J. Fluid Mech., vol.51, pp.301-335, 1972.
- 7) Parthasarathy, R. N. and Muste, M. : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.120, pp.1000-1020, 1994.
- 8) Reynolds, A. J. : Turbulent Flows in Engineering, John Wiley & Sons., 1974.
- 9) 鈴木康弘 : 京都大学修士論文, 1991.
- 10) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-monograph, Balkema, 1993.
- 11) Nezu, I. and Tominaga, A. : Symp. on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, ASCE, Buffalo, pp.195-204, 1994.