

# 開水路粗度急変流れの流速分布及び河床せん断応力の応答特性

Response of Velocity Profile and Bed Shear Stress to Abruptly Changed Roughness in Open-Channel Flows

京都大学工学部 禰津家久、中川博次 [I. Nezu and H. Nakagawa]  
 京都大学大学院 瀬谷和彦、鈴木康弘 [K. Seya and Y. Suzuki]

## 【Summary】

It is very important in Hydraulic Engineering as well as in Fluid Mechanics to reveal the response of velocity profiles and bed shear stress to abrupt change of bed roughness in open channel flows. In the present study, accurate velocity measurements over abruptly changed k-type roughness elements were conducted in open channel flows by making use of two-component laser Doppler anemometer. An inner boundary layer develops from the boundary point ( $x=0$ ) between smooth and rough beds. The velocity and turbulence distributions in the inner boundary layer rapidly respond to abruptly changed roughness. Of particular significance is that the bed shear stress overshoots immediately downstream of the abrupt roughness change. This finding is very important to construct bed protection works in rivers.

This finding is very important to construct bed protection works in rivers.

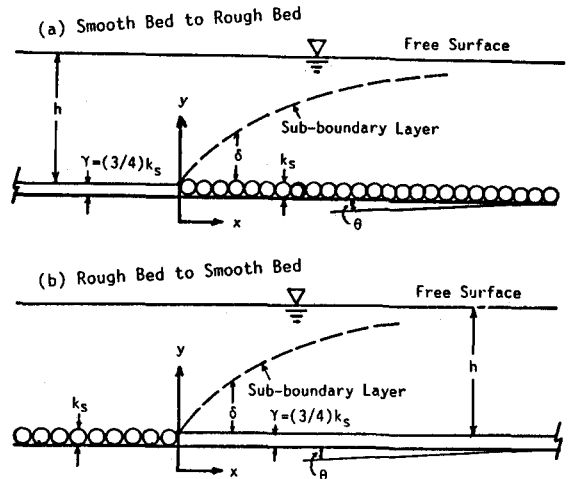
Keywords: Bed Shear Stress, Roughness Change, Open Channel Turbulence, Velocity Response.

### 1. まえがき

河川工学においては、河床の粗度が急変する流れが重要となることが多い。自然河川の河床は砂粒で構成されているが、河床勾配が大きい河川では流れによる洗掘のため起こる河床低下を防止するために、河床にコンクリート張りやアスファルト張りの床固め工法を施工することが多い。このような流れでは、図・1に示すように、河床は滑面から粗面に、また逆に粗面から滑面へと急変し、粗度急変点 ( $x=0$ ) から内部境界層が発達する。この種の流れの乱流計測例としては、風洞を用いた境界層流で粗度急変流れを扱った Antonia & Luxton (1971<sup>1)</sup>、72<sup>2)</sup> の実験が有名である。彼らは、粗度要素として主流に直角に溝を切った棧型粗度 (d-型粗面という) を用いて、粗度急変に伴う流速分布の応答特性を検討した。最近、Smits & Wood(1985)<sup>3)</sup> は、境界層流れを対象としてこれまでに多くの研究者によって得られた研究成果を査読し、粗度急変が境界層流れに及ぼす応答特性に関する優れたレビューを行っている。しかし、開水路流れを対象にした系統的な研究はほとんどなく、特に、図・1のような一様粒径粗度を用いた基本的な乱流構造の解明は、現在でもほとんど不明と言ってもよい。わずかな研究例として、村重ら (1986)<sup>4)</sup> は、風洞あるいは水路の底面にガラスビーズを張り付けて粗度急変に伴う平均流速分布の変化を調べ、底面せん断応力の変化を評価した。

ごく最近、神田・村本ら (1989)<sup>5)</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れの乱流構造を初めて計測した。その結果、フルード数が大きくなると粗度急変点で水深が変化し、乱流構造がかなり複雑になることが示唆された。

本研究は、粗度急変に伴う乱流構造の変化特性、特に流速分布及び河床せん断応力の応答特性を系統的に検討したものである。粗度急変点で水深変化がほとんど起きないフルード数  $Fr$  が 0.4 以下のケース



図・1 粗度急変流れの模式図

を対象として、図・1に示すように滑面から粗面あるいは逆に粗面から滑面に河床が急変する流れを2成分レーザ流速計を用いて高精度に計測した。これら的高精度な実験値をデータベースにして、粗度急変流に適用される $k-\epsilon$ モデルなどの数値計算手法を開発することが本研究の今後のプロジェクトの1つであるが、そのためには粗度急変点( $x=0$ )を挟んで前後の河床の座標原点( $y=0$ )を一致させておくことがキーポイントとなる。一樣粒径 $k_s$ の砂粒で稠密に構成された粗面(いわゆるNikuradseの粗面で、 $k$ 型粗面ということがある)の座標原点として、ピーズの頂部から約 $k_s/4$ だけ下げた点にとれば、粗面上でも対数則が成立することが知られているから<sup>6)</sup>、本研究では滑面の高さ $\gamma$ を図・1に示すように $\gamma=(3/4)k_s$ になるように設置し、滑面および粗面で対数則がともに成立するように座標原点を一致させた。

## 2. 実験方法及び計測方法

粗度急変流れの乱流構造を系統的に解明するために、滑面( $k_{s1}^+ = k_s U_* / \nu < 5$ 、ここで $U_*$ は摩擦速度)、不完全粗面( $5 < k_{s1}^+ < 70$ )及び完全粗面( $k_{s1}^+ > 70$ )を水路底面に作った。実験水路は、長さ10m、幅40cm、深さ50cmの可変勾配型循環水路であり、流量はコンピューターで自動制御され、最大30ℓ/sまで任意に設定できる。粗度粒径 $k_s$ として、4mm径と12mm径のガラスピーズが使われた。粗度急変点( $x=0$ )は、水路上流端から6.5m下流に設置され、 $x < 0$ の上流及び $x > 0$ の下流にはそれぞれ異なる壁面粗度 $k_{s1}^+$ 及び $k_{s2}^+$ が一樣に設置された。水深 $h$ は、ほぼ6cmと一定に設定され、フルード数を $Fr = 0.2$ と $0.4$ の2種類変化させた。流速成分( $u, v$ )を前方散乱型2成分レーザ流速計で高精度に計測した。計測区間は、 $x = -50$ cmから175cmまでの16断面で、各計測断面で鉛直軸 $y$ 方向に16-20点トラバースして、流速分布を求めた。1測点当りの計測時間は、50秒で、200Hzのサンプリングで、10000個A-D変換され、磁気テープに記録後、京都大学大型計算センターで各種の統計処理が行われた。

## 3. 平均流速分布の変化特性

図・2は、滑面 $k_{s1}^+ = 0$ から完全粗面 $k_{s2}^+ = 385$ に急変した場合の平均流速 $U(y)$ を片対数表示した一例である。 $x < 0$ の上流は滑面であり、対数則がよく成立している。開水路の対数則分布のカルマン定数 $\kappa$ は、 $\kappa = 0.41$ であることが明らかにされており<sup>7)</sup>、流速勾配の実験値からこの $\kappa$ の値を使って摩擦速度 $U_*$ を求めた。図・2には、 $U^+ = U/U_*$ を $y^+ = U_* y / \nu$ に対してプロットしてある。 $x > 0$ で完全粗面に移行すると、河床粗度のために流速は次第に減速されることがわかる。この減速は、 $x$ が大きくなると次第に水面側に及び、 $U_*$ で無次元表示された対数則分布から下方にずれて来る。これは、急変した粗度の影響が河床から次第に現れるためであり、内部境界層が発達することがよくわかる。上述の $x < 0$ の滑面で成立する対数則分布からずれる内部境界層内の流速分布は別の対数則に従う。すなわち、この減速した分布が $\kappa = 0.41$ の対数則に従うように摩擦速度 $U_*$ を評価すると、 $U_*$ が粗度急変に応答した摩擦速度であるから、 $\tau = \rho U_*^2$ が河床せん断応力となる。滑面から粗面に急変すると、あきらかに $U_*$ は大きくなる。したがって、摩擦速度 $U_*$ は、上流の乱流特性が下流に移流される(流れの履歴特性(Flow History)という)のを評価する特性速度スケールであり、一方、 $U_*$ は急変粗度の影響が現れる内部境界層内の乱流特性を支配する特性速度スケールとなる。

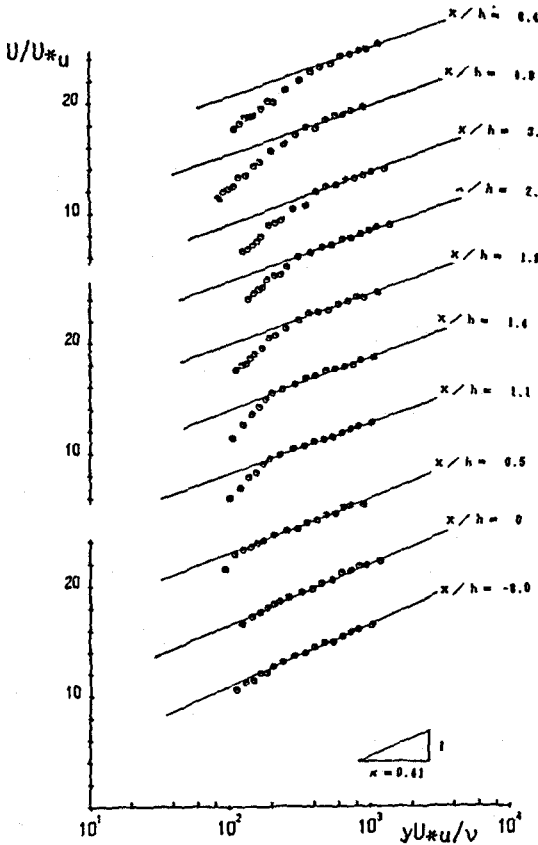
図・3は、完全粗面 $k_{s1}^+ = 172$ から滑面 $k_{s2}^+ = 0$ に急変した場合の平均流速分布の変化特性を示す一例である。 $x < 0$ の完全粗面では予測通りに対数則分布が良好に成立するが、 $x > 0$ の滑面に移行すると、図・2とは逆に、流速が加速される。この加速された流速分布も、図・3の片対数表示ではやはり直線分布となり、滑面に呼応した対数則分布が成立することがわかる。すなわち、この対数則分布から $\kappa = 0.41$ を使って摩擦速度 $U_*$ が良好に評価される。したがって、流れの履歴を表す $U_*$ で支配された対数則分布と急変粗度(この場合は滑面)の影響を特徴づける $U_*$ で支配された対数則分布の2種類の流速分布が成立し、両者の交点が内部境界層の厚さ $\delta$ と明解に定義できる。

以上の特性は、他のすべての実験ケースでも同様に得られ、滑面から粗面へ、あるいは逆に粗面から滑面へ急変する開水路流れの乱流構造に関する一般的な特性であると結論される。

Smooth to Completely Rough Beds

$$k_{S1}^+ = 0, k_{S2}^+ = 385$$

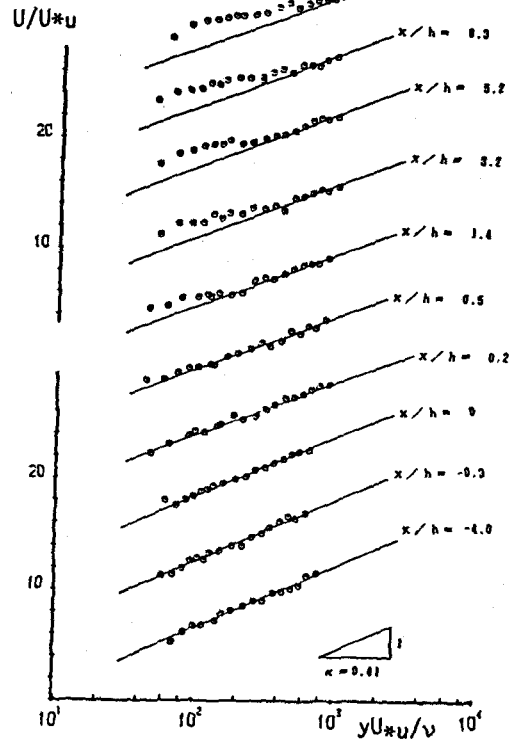
$$Re = 18400, Fr = 0.4$$



Completely Rough to Smooth Beds

$$k_{S1}^+ = 172, k_{S2}^+ = 0$$

$$Re = 9200, Fr = 0.2$$



図・2 滑面から完全粗面への急変流の平均流速分布の変化特性  
 $x < 0$  の滑面で対数則分布によく従う。  $x = 0$  から河床の流速は減速し、別の対数則分布に変化する。

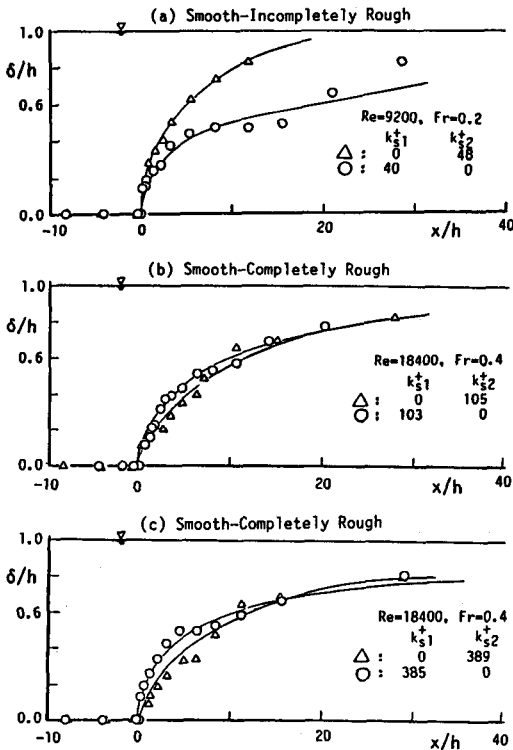
図・3 完全粗面から滑面への急変流の平均流速分布の変化特性  
 $x < 0$  の粗面で対数則分布によく従う。  $x = 0$  から河床の流速は加速し、別の対数則分布に変化する。

#### 4. 内部境界層の発達特性

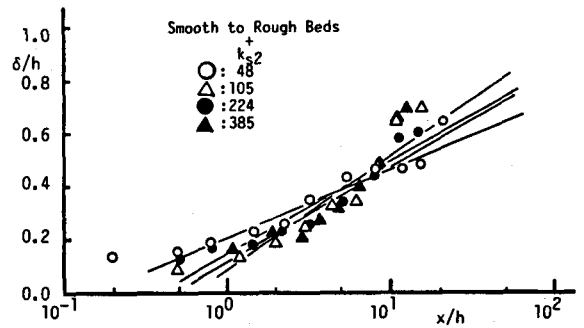
図・4は、内部境界層の厚さ $\delta$ を滑面から粗面に急変したケースの実験値を $\Delta$ で、また逆に粗面から滑面に急変したケースの実験値を $\circ$ でプロットしたものである。実験値には多少ばらつきがあるが、内部境界層の発達特性が以下のようにわかる。まず、粗度急変点 $x=0$ から内部境界層は急速に発達し、水面に漸近する。しかし、内部境界層が水面まで発達するには水深 $h$ の少なくとも30倍以上もかかることがわかり、上流の流れの履歴はかなり下流まで持続するものと考えられる。この特性は、河床断面が急変するステップ流でも見られ、再付着点から発達する内部境界層が水面まで成長するにはステップ高さの50倍以上もかかることが境界層流れでも<sup>8)</sup>、また開水路流れでも<sup>9)</sup>得られている。図・4で特に注目される点は、滑面-不完全粗面の急変流では、滑面から粗面への内部境界層の発達が粗面から滑面への場合より急激であるが、一方、滑面-完全粗面の急変流では両者の内部境界層の発達はほとんど一致することである。図・5は、滑面から粗面へ急変する場合の $\delta/h$ を $x/h$ の片対数表示したものである。同様に、図・6は、粗面から滑面へ急変する場合の $\delta/h$ の変化特性をプロットしたものである。実験値は多少バラついているが、両者ともほぼ直線で近似できる。

すなわち、
$$\delta/h = C \cdot (x/h)^n \quad (1)$$

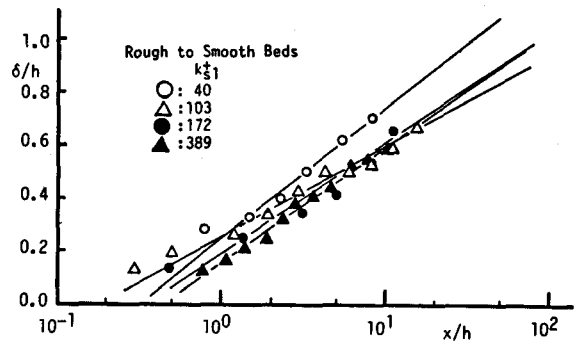
がほぼ成立することがわかる。図・5に示すように、滑面から粗面への急変流では、下流の粗度 $k_{s2}^+$ が大きくなると $n$ は若干増加し、内部境界層の発達は粗度が大きいほど速く応答する。一方、粗面から滑面への急変流では、 $n$ はほぼ一定であるが、上流の粗度が大きいほど内部境界層厚 $\delta$ の発達は遅く、流れの履歴効果が強いことがわかる。両者の急変流ともに、 $C$ と $n$ の概数は、 $C=0.15-0.25$ 、 $n=0.3-0.4$ である。通常の乱流境界層 $\delta$ の発達もベキ乗則に従うことがよく知られているが、滑面境界層では $n=0.8$ であるから、(1)式で表される内部境界層の発達は、通常の境界層より緩慢である。



図・4 内部境界層の発達特性



図・5 滑面から粗面への急変流の内部境界層厚 $\delta$ に及ぼす粗度効果



図・6 粗面から滑面への急変流の内部境界層厚 $\delta$ に及ぼす粗度効果

### 5. 河床せん断応力の変化特性

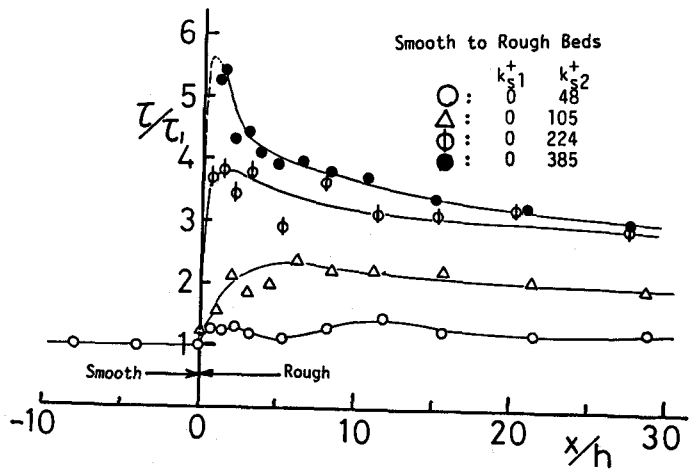
3. で得られた対数則分布から摩擦速度  $U_{*0}$  及び  $U_{*D}$  が良好に評価された。したがって、 $x < 0$  の粗度急変前の河床せん断応力  $\tau_U$  は、 $\tau_U = \rho U_{*0}^2$  と計算される。一方、 $x > 0$  の粗度急変後の河床せん断応力  $\tau_D$  は、 $\tau_D = \rho U_{*D}^2$  と計算される。図・7は、滑面から粗面への急変流れの河床せん断応力  $\tau$  を、十分上流 ( $x < 0$ ) の河床せん断応力  $\tau_1$  で無次元化して、 $\tau/\tau_1$  の実験値を図示したものである。滑面から不完全粗面への急変流れでは、 $\tau/\tau_1$  はほとんど1であり、河床せん断応力の増加は小さい。粗度要素  $k_s$  が大きくなり、完全粗面に急変すると  $\tau/\tau_1$  はかなり大きくなる。すなわち、粗度急変後の  $k_{s2}^+ = 105$  では、 $\tau$  の値は急変前の値  $\tau_1$  のほぼ2倍にも達する。 $k_{s2}^+ = 385$  とさらに粗度が大きくなると、 $\tau/\tau_1$  の値は3-5倍と増加する。ここで特に注目すべき点は、河床せん断応力が粗度急変点でパルス的に急増し、 $x > 0$  の下流に移行するとかえって漸減する特性が見られ、粗度急変点で河床せん断応力がオーバーシュートする点である。この特性は、境界層流れの粗度急変流でも報告されており<sup>3)</sup>、きわめて重要な特性であると考えられる。すなわち、滑面から完全粗面に移行する境界条件では、粗度急変直後河床せん断応力は最大となる。この特性を河川に適用すると、粗度急変点で掃流力が最大となるから、最も洗掘され易いことが本研究で示唆された意義は大きい。この知見は、河川工学上、きわめて重要な点であり、床固めや護岸施工などの水工設計では特に注意すべき事項といえる。

次に、図・8は、粗面から滑面に急変する流れの河床せん断応力の変化特性を示すものである。この場合も、粗度急変点で河床せん断応力はすぐに応答し、いわゆる遷移区間がない。図・7とは逆に、 $\tau$  は、下方にオーバーシュートする特性が見られる。このことは、河床が粗面から滑面に急変する流れでは、粗度急変点で堆積が起こり易いことを意味し、河川工学上、これも重要な特性であろう。

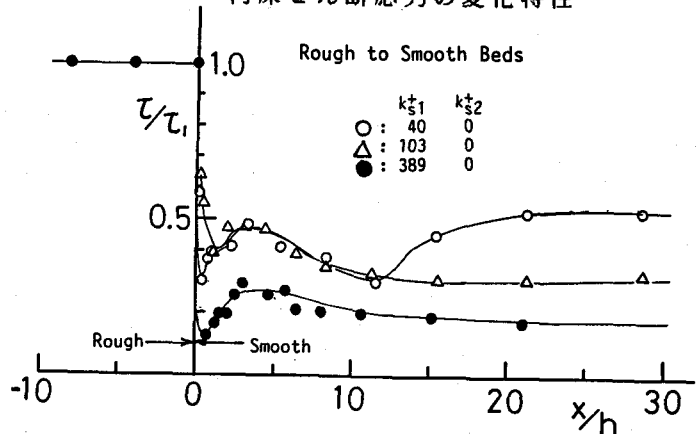
### 6. 乱れ特性

乱れ強度  $u'$ 、 $v'$  及びレイノルズ応力  $-\overline{uv}$  の分布が粗度急変流れで高精度に計測された。その詳細は、文献11) に載せてあり、参照されたい。一言でいうと、滑面から粗面に急変する流れの乱れ強度は、滑面で成立する指数則<sup>10)</sup> からずれて増加し、この増加が見られる領域が、内部境界層とほぼ一致したことである。

特に注目すべき点は、 $v'$  及び  $-\overline{uv}$  が、滑面から完全粗面に急変すると河床近傍でオーバーシュート特性が見られた点である。このことは、先述の河床せん断応力のオーバーシュート特性に鉛直方向の乱れ成分  $v$  が何らかの形で関与しているものと予想され、今後この点を詳細に検討したい。



図・7 滑面から粗面への急変流の河床せん断応力の変化特性



図・8 粗面から滑面への急変流の壁面せん断応力の変化特性

## 7. 結論

本研究は、開水路流れを対象にして、河床条件が滑面から粗面へ、また逆に粗面から滑面に急変したときの乱流構造を2成分レーザ流速計で高精度に計測し、粗度急変に伴う平均流速分布、壁面せん断応力分布及び内部境界層の発達特性を系統的に解明したものである。さらに、乱れ強度やレイノルズ応力分布の変化特性を検討した。粗度急変に対する乱流の応答は、河床近傍で急激に現れる。粗度要素が大きいと、この応答特性はより顕著となり、流下方向に対してオーバーシュートすると言いきわめて重要な結果が得られた。これらの知見は、河川の床固めや護岸を施工する上で看過できない重要な特性であり、河川工学上きわめて貴重な結果と考えられる。今後、これらの実験特性値を説明できる乱流モデルを開発していきたい。

最後に、本研究は、文部省科学研究費一般研究C (No. 63550372、研究代表者・京都大学助教授・禰津家久) の補助金を受けて行われたものであり、これに感謝する。

### 【参考文献】

- 1) Antonia, R.A. and R.E. Luxton (1971): The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness. Part 1. Smooth to Rough, *J. Fluid Mech.*, vol.48, pp.721-761.
- 2) Antonia, R.A. and R.E. Luxton (1972): The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness. Part 2. Rough to Smooth, *J. Fluid Mech.*, vol.53, pp.737-757.
- 3) Smits, A.J. and D.H. Wood (1985): The Response of Turbulent Boundary Layers to Sudden Perturbations, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, vol.17, pp.321-358.
- 4) 村重宏、松梨史郎、吉川秀夫 (1986): 粗度急変流内部の底面せん断力算定、土木学会論文集、No.369, pp.33-41.
- 5) 神田佳一、村本嘉雄、藤田裕一郎 (1989): 開水路底面粗度急変部の乱流構造、第33回水理講演会論文集、pp.499-504.
- 6) Reynolds, A.J. (1974): *Turbulent Flows in Engineering*, John Wiley & Sons.
- 7) Nezu, I. and W. Rodi (1986): Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.112, pp.335-355.
- 8) Bradshaw, P. and F.Y.F. Wong (1972): The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer, *J. Fluid Mech.*, vol.52, pp.113-135.
- 9) Nezu, I. and H. Nakagawa (1989): Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow and Coherent Vortex Shedding from Reattachment in Open-Channel Flows, *Turbulent Shear Flows 6*, Springer-Verlag, pp.313-337.
- 10) Nezu, I. and H. Nakagawa : *Open Channel Turbulence*, IAHR-Monograph, Balkema Publisher (to be published).
- 11) 禰津、中川、他 (1989): 底面粗度が急変する開水路流れの乱流構造、第5回流れの計測大阪シンポジウム、pp.73-84.