

定常開水路における加速・減速流の乱流構造に関する実験的研究

Experimental Study on Turbulent Structures in Accelerating and Decelerating Open-Channel Flows

祢津家久^{*}・門田章宏^{**}・戸田孝史^{***}

By Iehisa Nezu, Akihiro Kadota, Takashi Toda

It is very important to examine the effects of pressure gradient on the turbulent structures. In the present study, accurate FLDA measurements over wavy bed have been conducted in open-channel flows. The pressure gradient parameter p^+ obtained in this study was compared with that of air duct flows. The friction velocity was accurately determined even in the pressure-gradient flows with 'viscous-sublayer' formula, i.e., $U^+=y^+$. On the other hand, the velocity profiles of inner region have deviated largely from the universal velocity profile, i.e., $U^+=1/\kappa \ln y^+ + As$, which dose exist in zero-pressure gradient flows. The distributions of turbulence intensities and Reynolds stress near the wall gradually changed form universal distributions.

Keywords: wavy bed, pressure-gradient parameter, mean-velocity profiles

1. はじめに

加速・減速流つまり、圧力勾配を有する流れ場においては、定常等流時と比較して乱流統計量の分布特性が大きく異なり、それらを評価・解明することは非常に重要である。圧力勾配流れは、ガスタービンなどの種々の熱流体機械において数多く存在することから、この種の研究は古くより機械工学の分野において盛んに行われてきた。また最近では、 $k-\epsilon$ モデルに代表される乱流モデルを用いた数値計算の精度向上を目的として、剥離流れをも統一的に予測する壁法則を導入しようという試みもなされている。Nagano ら(1993)¹⁾は、逆圧力勾配乱流境界層において hot-wire を用いて壁面領域を詳細に計測し、ゼロ圧力勾配乱流境界層と比較・検討を行っている。その結果、比較的強い圧力勾配下でも粘性底層では流速分布は直線分布を示すが、内層では標準型対数則分布 ($\kappa=0.41$, $As=5.0$) より分布形が下方にそれることが指摘された。その他では、三宅・中島(1994)²⁾や佐野(1992)³⁾が、管路壁面が連続的に波状もしくは山形に変化した管内乱流実験によって、また数値計算では Spalart & Watmuff(1993)⁴⁾が DNS を用いて、圧力勾配の乱流統計量に対する影響を検討している。しかしながら、これら最近の研究においても、単一の圧力勾配下と周期的に圧力勾配が変化する

^{*} 正会員 工博 京都大学助教授 環境地球工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

^{**} 学生会員 工修 京都大学大学院 土木工学専攻博士課程

^{***} 学生会員 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

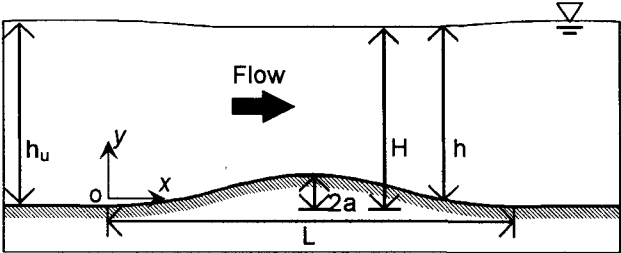
る乱流場の境界条件の違いなどによって、研究者間で異なる結果が得られており、単純に圧力勾配の影響が評価されているか判断するのは難しいといえる。

一方、水工学の分野においては、Song(1995)⁵⁾によって、平衡状態の圧力勾配流れの計測が行われている例はあるが、機械工学の分野と比較すると、粘性底層を含めた底面の極近傍を計測したものは皆無であり、これまで圧力勾配下の対数則の妥当性などは検討されていない。本研究は、定常開水路流を対象に、レーザー流速計を用いて粘性底層からバッファー層付近を中心に詳細な計測を行い、圧力勾配下における乱流構造を実験的に考察し、これまで乱流境界層などで議論されてきた圧力勾配の影響と比較・検討したものである。

2. 実験方法および水理条件

実験では、長さ 10m、幅 40cm の水路の上流端より約 7m の地点に、正弦波状に変化させた路床 1 波分を設置して計測を行った (図-1)。正弦波は、波長 $L=40\text{cm}$ の固定で振幅 $a=0.5, 1.0\text{cm}$ ($2a=1.0, 2.0\text{cm}$) の 2 種類とし、流量 $Q=2.0, 3.0(\text{l/s})$ の 2 種類の計 4 ケースの計測を行った。圧力勾配のみの影響を評価する目的から、流れの周期性や上流の流れの履歴などをできるだけ排除するために、正弦波 1 波のみの局所的なモデルを採用した。計測には、4 ビーム後方散乱型 2 成分ファイバーレーザー流速計 (DANTEC 社製) を使用した。この流速計は、レーザー光の ON, OFF, シフト光の位相制御、バイアス制御など、計測時に必要な全ての設定がコンピュータ支援で行われ、ドップラー信号が相関法によって処理されている。計測点は、横断面水路中央において、正弦波上流端を原点として、流下方向に 12 断面、それぞれの断面について底面極近傍で計測点が密になるように鉛直方向に 70 点の、計 840 点とした。水深は正弦波の上流側において $h_u=8\text{cm}$ とし、各ケースともポイントゲージを使用して計測断面の水面形を計測した。

なお、本実験ケースにおいて、 $2a=2.0\text{cm}$ のケース(S2B, S3B)では、 $x/L=0.7$ 付近で剥離が発生していた。



Case	L(cm)	2a(cm)	Q(l/s)	hu(cm)	Re	Fr	U _τ (cm/s)
S2A	40.0	1.0	2.0	8.0	5000	0.077	0.341
S3A		1.0	3.0		7500	0.116	0.497
S2B		2.0	2.0		5000	0.086	0.355
S3B		2.0	3.0		7500	0.129	0.518

L: wave length, 2a: wave height, Q: water discharge, hu: flow depth at upstream, Re: Reynolds number, Fr: Froude number, U_τ: friction velocity at x=0

3. 実験結果とその考察

図-1 座標系および水理条件

3. 1 平均流特性

図-2 に圧力勾配パラメータ p^+ の流下方向変化を示す。 p^+ は、圧力勾配の大きさを表す指標として乱流境界層の解析で用いられており、次式で定義される。

$$p^+ = (\nu / \rho U_\tau^2) / (dp / dx) \tag{1}$$

$p^+ > 0$ で減速流 (逆圧力勾配), $p^+ < 0$ で加速流 (順圧力勾配) を示す。乱流境界層におけるゼロ圧力勾配流れが開水路流では等流に対応することから、本実験ケースでは $dp / dx = \rho g \cos \theta \cdot dh / dx$ とした。摩擦速度 U_τ は、粘性底層領域の速度分布の直線分布より評価した。また、図-2 には三宅・中島(1994)のデータおよび本実験 2 ケースの水面形 H を併示してある。三宅・中島(1994)の行った波状流路内乱流においては、 p^+ は管路高さとはほぼ同位相で、加速流、減速流が連続的に現れている。本実験の開水路流においても同様に $x/L < 0.5$

の加速域で負の値、 $x/L>0.5$ の減速域で正の値を取るが、相対的に減速域でより大きな値になる傾向がある。また、正弦波路床の勾配が同じケース (S2A と S3A, S2B と S3B) で比較すると、Froude 数の小さいケース (S2A, S2B) でより p^+ は大きくなる。

図-3 に平均流速分布を示す。比較のため、図-3(a) に三宅・中島(1994)による波状流路内乱流のデータを示してある。摩擦速度 U_* の評価法としては、先述したように Nagano ら(1993)によって、圧力勾配下においても粘性底層領域における直線分布式が成立することが指摘されており、本実験でも同様の傾向が見られたのでそれに従った。なお、実際是三宅・中島(1994)の計測区間は本実験とは半位相ずれているが、比較し易いようにプロットし直してある。本実験では、 $x/L=0.0$ の初期断面では内層において対数則が成立し、 $x/L=0.3$ の加速流領域では粘性底層を除いて初期断面より分布形が下方にそれ、 $x/L>0.5$ の減速流領域では逆に上方に大きくそれる。一方、三宅・中島(1994)のケースでは、流速分布が全体に標準型対数則より上方に分布しており、管路壁面を周期的に変化させた影響が出ていると考えられる。さらに、圧力勾配の変化に対して流速分布形の変化が本実験の傾向と違うことから、上流側断面の加速、減速の効果が位相遅れを伴って計測断面に現れているものと予想される。

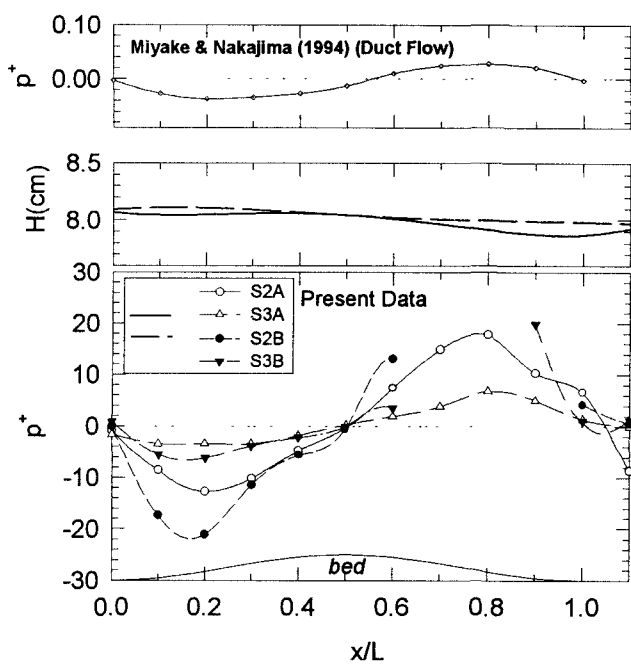
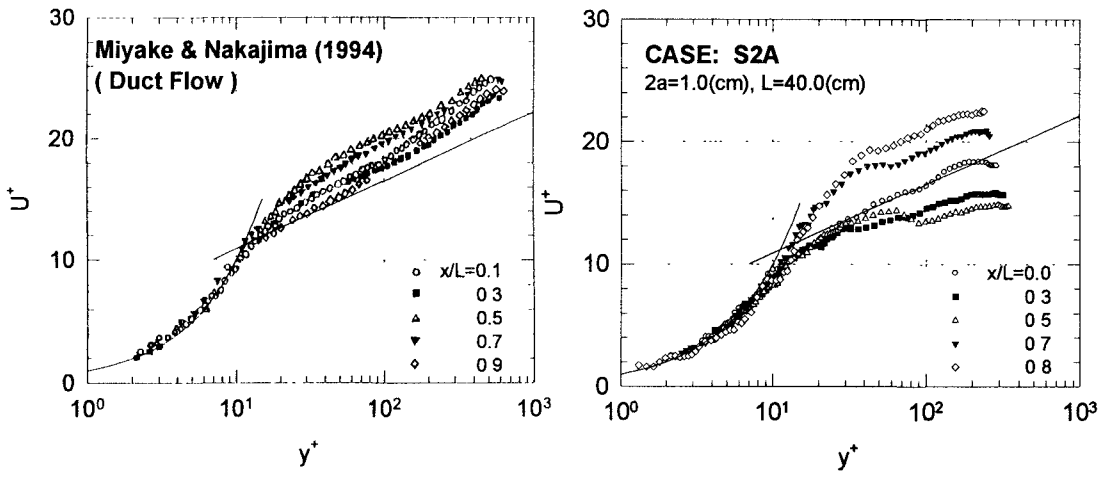


図-2 圧力勾配パラメータ p^+ の流下方向変化



(a) 管路流 (三宅・中島(1994)) (b) 開水路流

図-3 平均流速分布

平均流速分布において評価した摩擦速度 U_* の流下方向変化を図-4 に示す。各ケースとも初期断面の摩擦速度 U_{*0} によって無次元化してある。S2A のケースのみピーク位置と正弦波路床頂点位置が一致しているが、その他のケースはいずれも路床頂点より上流側断面において U_* はピーク値に達している。また 1 ケースのみ次式で表される Ludwig-Tillmann の境界層での実験公式より評価した U_* を併示した。

$$C_f = 2(U_* / U_{max})^2 = 0.256 \times 10^{-0.678H} \times Re_\theta^{-0.268} \quad (2)$$

ここで C_f は壁面摩擦係数、 $H=\delta^*/\theta$ 、 $Re_\theta=U_{max}\theta/\nu$ 、 δ^* =排除厚、 θ =運動量厚である。 $x/L>0.5$ の減速域でやや過大評価しているものの、定性的には平均流速分布から得られた U_* とよく一致している。

Nagano ら(1993)は、逆圧力勾配流れにおいても Prandtl の混合距離モデルが成立し、van Driest の damping function が有効であると指摘した。運動方程式より次式が得られる。

$$\frac{dU^+}{dy^+} = \frac{2\tau^+}{1 + \sqrt{1 + 4l^{*2}\tau^+}} \quad (3)$$

壁面領域においては、混合距離 l^* は次式の van Driest の damping function Γ を用いて次式で与えられる。

$$l^* = \kappa y^+ \Gamma(y^+) \quad , \quad \Gamma(y^+) = 1 - \exp(-y^+ / B) \quad (4)$$

ここで、 B は van Driest の damping factor である。定常等流時では、 $\tau^+ = 1 - \xi$ ($\xi = y/h$) の三角形分布として、式(4)を用いて式(3)を積分することにより、いわゆる粘性底層内の直線分布式および対数則分布が得られ、この時 $B=26$ である。

$\tau = -\overline{uv} + \nu \cdot \partial U / \partial y$ に実験データを適用して求めたせん断応力分布を図-5 に示す。さらに、得られた τ^+ を式(3)に適用し、積分して実験データと一致するようにして決定した各断面の B の流下方向変化を図

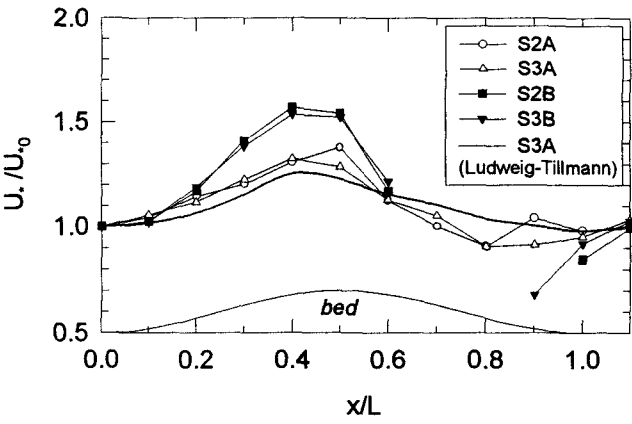


図-4 摩擦速度の流下方向変化

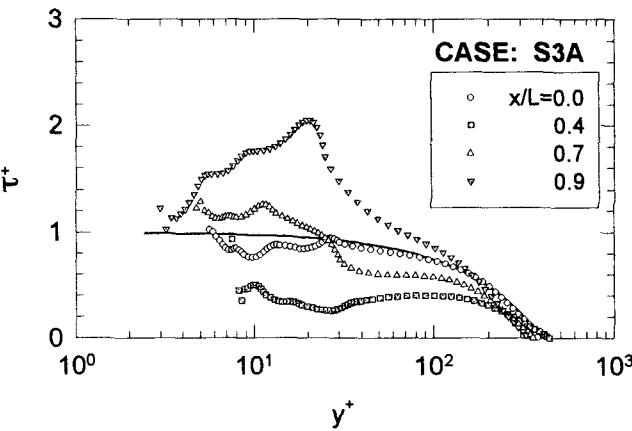


図-5 せん断応力分布

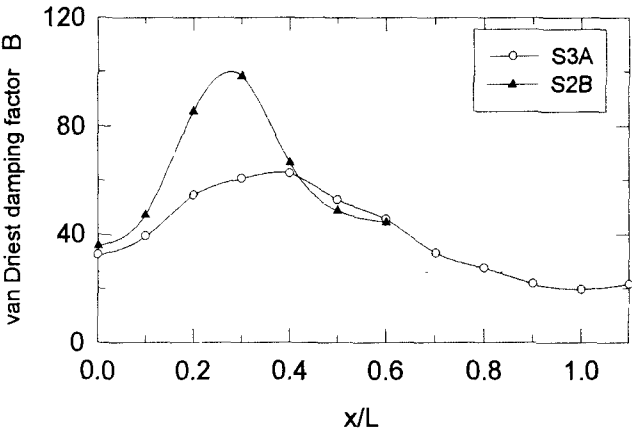


図-6 van Driest damping factor B

-6 に示した。図-5 中の実線は $\tau^+ = 1 - \xi$ の三角形分布で、 τ^+ は、実験データから得られる流速勾配がばらつくために底面の近傍で分布形が多少歪んでいるが、 $x/L=0.0$ の初期断面においてはほぼ実線に沿った分布形を示し、 $x/L>0.5$ の減速流領域では底面近傍で急激に増加し、 $y^+=20$ 付近で最大となっている。van Driest の damping factor B については、初期断面で約 $B=30$ 、正弦波路床頂部断面の上流側で最大となり、路床形状より位相が前にずれるのが特徴である。

3. 2 乱れ特性量

図-7、図-8 にそれぞれ乱れ強度分布、Reynolds 応力分布の内部変数表示を示す。ともに $x/L=0.0, 0.4, 0.9$ の 3 断面のみで、図中の実線および点線は次の等流で成立する普遍分布式および三角形分布である⁹⁾。

$$u'/U_* = 2.30 \exp(-y/h) \tag{5}$$

$$v'/U_* = 1.27 \exp(-y/h) \tag{6}$$

$$-\overline{uv}/U_*^2 = 1 - y/h \tag{7}$$

図-8 の Reynolds 応力分布において、各断面とも Reynolds 応力が $y/h=0.8$ 付近でゼロとなるのは、本実験ケースではアスペクト比が 5 程度で、

2 次流の影響があったものと推測される。乱れ強度分布、Reynolds 応力分布とも $x/L=0.0$ の初期断面では普遍特性分布を示し、 $x/L=0.4$ の加速流区間、 $x/L=0.9$ の減速流区間において分布形が大きく変化している。

図-9 は、 $y/h=0.05, 0.40, 0.70$ の高さにおける乱れ強度分布の流下方向変化を、剥離が発生していないケース (S2A) と剥離が発生しているケース (S2B) について示す。 u' および v' は、初期断面の摩擦速度

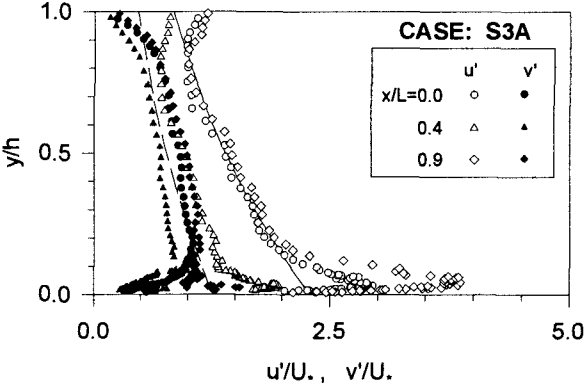


図-7 乱れ強度分布

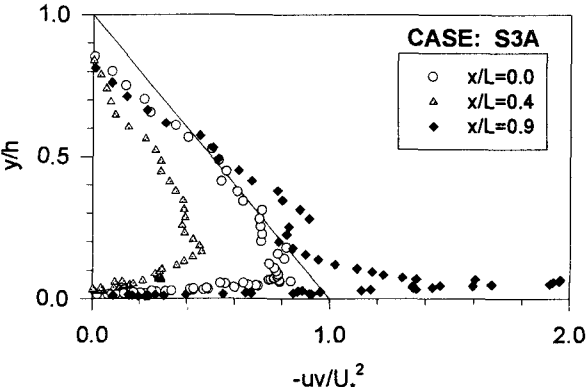
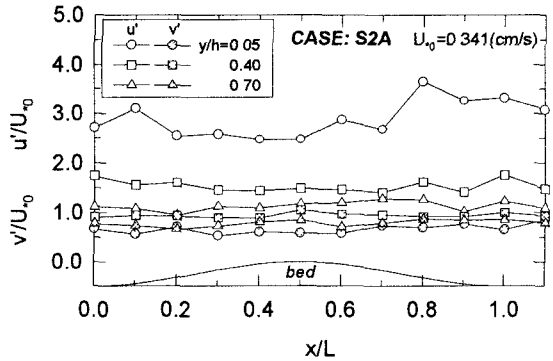
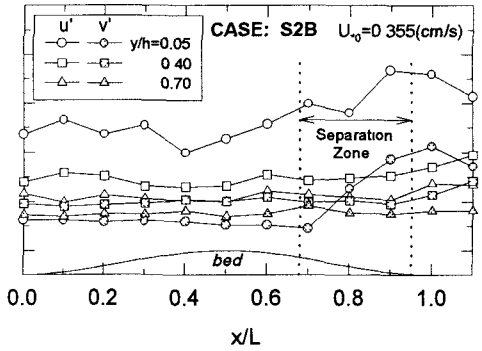


図-8 Reynolds 応力分布



(a) 剥離無し



(b) 剥離有り

図-9 乱れ強度の流下方向変化

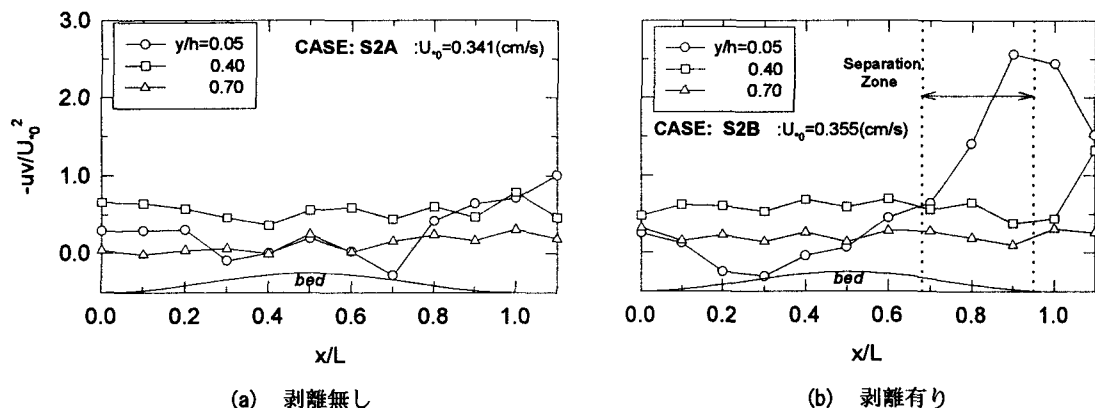


図-10 Reynolds 応力の流下方向変化

U_0 によって無次元化してある。両ケースとも $y/h=0.05$ の底面近くにおいて $x/L=0.5$ 付近から u' が大きくなるのがわかる。その他の鉛直方向中央、水面近くの u' および v' 全域は、本実験の場合はほとんど変化していない。ただし、剥離を伴う S2B において $x/L=0.7$ 付近で v' の値が 2 倍以上にはね上がっており、剥離が発生したことによる影響が底面付近の v' に最も効くことがわかる。

図-10 は、図-9 と同様に $y/h=0.05, 0.40, 0.70$ の高さにおける Reynolds 応力の流下方向変化を、剥離を伴わないケース (S2A) と剥離伴うケース (S2B) について示したものである。 $y/h=0.05$ の底面近くにおいて計測区間下流側の減速流域で Reynolds 応力 $-\overline{uv}$ がはね上がることは、 u' および v' の場合と同様であるが、乱れ強度分布が加速流域 ($x/L < 0.5$) では、いずれの高さにおいても流下方向にほとんど変化しなかったのに比べ、 $y/h=0.05$ の底面近くの Reynolds 応力 $-\overline{uv}$ は計測区間に入ると値が落ち込み、加速の効果が最も現れている。

4. おわりに

本研究は、定常開水路の乱流構造に及ぼす圧力勾配の影響を解明するために、単純化した正弦波上の加速流、減速流をレーザー流速計を用いて計測した。境界層流、管路流と比較して圧力勾配パラメータ p^* を決定したが、その妥当性については十分な議論はできていない。底面せん断応力や平均流特性、乱れ特性量については、比較的形狀の変化に追従して分布形が変化する結果が得られた。平均流速分布については、路床形状によって従来の管内乱流における結果とは大きな位相のずれがあり、今後さらに広範囲な圧力勾配流れを対象として比較・検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) Nagano, Y., Tagawa, M. and Tsuji, T. : Turbulent Shear Flows, Springer-Verlag, vol.8, pp.7-21, 1993.
- 2) 三宅裕, 中島正弘 : 日本機械学会論文集(B 編), 60 巻 570 号, pp.51-58, 1994.
- 3) 佐野正利 : 日本機械学会論文集(B 編), 58 巻 549 号, pp.38-43, 1992.
- 4) Spalart P R. and Watmuff, J H : J. Fluid Mech., vol 249, pp 337-373, 1993.
- 5) Song, T. : Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Switzerland, 1995.
- 6) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.