

非定常滑面開水路流内層の特性

INNER LAYER CHARACTERISTICS OF UNSTEADY SMOOTH OPEN CHANNEL FLOWS

瀬津家久¹・鬼束幸樹²・倉田昌明³

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA and Masa-aki KURATA

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 博(工) 京都大学大学院助手 工学研究科環境地球工学専攻

³学生員 京都大学大学院生 工学研究科環境地球工学専攻

The inner layer and the outer layer of the unsteady smooth open channel flow were measured accurately with a two-component laser Doppler anemometer. Friction velocities evaluated from both the linear formula in the viscous sublayer and the log-law are in good agreement with each other. Mean stream velocity profile and the turbulent intensity distributions can be expressed well by using of van Driest's damping function. Van Driest damping factor decreases in the rising stage and increases in the falling stage. An integral constant of the log-law changes complexity.

Key Words : unsteadiness, viscous sublayer, turbulence, Reynolds stress, van Driest damping factor

1. はじめに

地域住民に深刻な被害をもたらす災害の一つに、洪水が挙げられる。洪水は、一見したところ緩やかに水深が増加し、そして減少するといった挙動を示すため、古来より準定常的な構造をしていると仮定され、解析されてきた。

ところが、林・大島¹⁾はHot-film流速計を用いた室内実験によって、増水期の方が減水期よりも乱れが強くなることを示し、洪水流の内部構造が定常流の構造とは異なることを明らかにした。また、長谷川²⁾は石狩川における洪水流を実測することによって、増水期の方が減水期よりも浮遊砂濃度が高いことを示した。この理由として長谷川は、増水期における乱れの増加を上げており、林・大島の結果を裏付けるものとなった。瀬津ら³⁾は前方散乱型3ビームレーザ流速計を用いて非定常開水路流を詳細に計測し、主流速分布がlog-wake則で表現できること、wake関数に含まれるwake strength parameter Π が水深のピーク時よりも早い時間に発生すること、非定常性の強弱に関わらず Π の最大値は0.35程度をとることなどを示した。Tu & Graf⁴⁾は粗面上における非定常開水路流を小型プロベラ流速計で測定し、底面付近の平均主流速よりも水面付近の平均主流速の方が早い時間にピーク値に達することを明らかにした。

ところで、開水路流に関わらず、境界層流、管路流のような壁面乱流における、乱れの発生、発達、消滅は、粘性底層、バッファ領域およびlog則領

域で構成される内層で主として生じている。壁面乱流の乱流構造を理解する上で、内層の構造を解明することは必要不可欠である。2次元開水路等流の内層の構造に関しては、Nezu & Rodi⁵⁾によって詳細に解明されており、Reynolds数を用いることによって普遍表示されることが明らかにされた。一方、非定常開水路流に関しては、粘性底層およびバッファ領域を除いた対数則領域およびwake領域の特性は先述した研究によって明らかにされているものの、底面近傍における特性は明らかにされていない。最近、瀬津ら⁶⁾は後方散乱型4ビームレーザ流速計を駆使し、非定常開水路流れの底面近傍の測定に成功した。その結果、Karman定数はほぼ普遍定数で0.41を示すこと、粘性底層から算出される摩擦速度とlog則から算出される摩擦速度とがほぼ一致すること、van Driestのダンピング関数を導入した混合距離を用いることで主流速分布が表現できること、また、van Driestのダンピング係数が単調増水(水深が線形的に増加する状態)の場合には減少し、単調減水(水深が線形的に減少する状態)の場合には増加することなどを明らかにした。ただし、瀬津ら⁶⁾の研究は単調増水および単調減水を対象として行ったものであり、実河川に見られる洪水のような増水および減水が連続的に生じる流れは対象としていない。

本研究は、増水および減水が連続的に生じる非定常開水路流を対象とし、その内層、特に粘性底層およびバッファ領域について詳細に計測を行い、その乱流構造を解明するものである。

2. 理論的考察

本章では、2次元開水路等流の平均流速分布、乱れ強度分布およびReynolds応力分布などの理論式または経験式を示し、加えて、それらの非定常流への適合性について考察する。

水路床に沿って流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上向きに y 軸を定義し、 x 軸および y 軸方向それぞれの時間平均流速を U および V とし、乱れ強さを u' および v' とする。完全に発達した2次元開水路流のせん断応力 τ の分布は、 x 軸方向の運動方程式を变形することで次式のように示される。

$$\frac{\tau}{\rho U_*^2} = \frac{-\overline{uv}}{U_*^2} + \frac{dU^+}{dy^+} = 1 - \frac{y^+}{R_*} \quad (1)$$

ここに、 ρ は密度、 U_* は摩擦速度、 $-\overline{uv}$ はReynolds応力、 $U^+ = U/U_*$ は無次元平均流速、 $y^+ = yU_*/\nu$ は無次元座標、 ν は動粘性係数、 $R_* = hU_*/\nu$ はReynolds数、 h は水深である。さて、式(1)におけるReynolds応力をPrandtlの混合距離仮説を用いて消去すると、

$$\frac{dU^+}{dy^+} = \frac{2(1-\xi)}{1 + \sqrt{1 + 4\ell^{+2}(1-\xi)}} \quad (2)$$

となる。ここに、 $\xi = y/h$ で、 ℓ^+ は次式で示される。

$$\ell^+ = \kappa y^+ \Gamma \quad (3)$$

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{B}\right) \quad (4)$$

Γ は van Driest のダンピング関数で、 B はダンピング係数である。等流の場合は、 $B=26$ となることがNezu & Rodi⁵⁾によって示されている。

粘性底層 ($0 < y^+ \leq 5$) では、 $dU^+/dy^+ \gg -\overline{uv}/U_*^2$ となるので、式(2)は次式に変形できる。

$$U^+ = y^+ \quad (5)$$

一方、バッファ層を越えると、 $-\overline{uv}/U_*^2 \gg dU^+/dy^+$ となるので、式(2)は次式となる。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A \quad (6)$$

等流においては、Reynolds数およびFroude数に関わらず、 $\kappa = 0.41$ $A = 5.3$ の普遍定数を示すことがNezu & Rodi⁵⁾によって明らかにされた。 $R_* > 500$ の開水路等流における流速分布は、水面付近でlog則からずれを生じるためlog-wake則⁵⁾が用いられるが、 $R_* < 500$ では全水深にわたり式(6)でほぼ表現できる。

乱れ強度分布に関しては、以下のような半経験式が橋津⁷⁾によって提案され、

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \quad (7)$$

$$\frac{v'}{U_*} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \quad (8)$$

Nezu & Rodi⁵⁾によって、基準値 $D_u = 2.26$ 、 $D_v = 1.23$ 、

表-1 実験条件

	Q (ℓ/s)	h (cm)	Fr	Re $\times 10^3$
Base	1.2	7.2	0.05	3.0
Peak	3.6	8.5	0.12	9.0

$\lambda_u = 0.88$ 、 $\lambda_v = 0.67$ が実験的に求められた。また、壁面付近の内部変数によって支配されている領域においては、乱れ強度 u'/U_* は次式に従うことが明らかにされている⁵⁾。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp\left(-\lambda_u \frac{y^+}{R_*}\right) \Gamma + Cy^+(1-\Gamma) \quad (9)$$

等流では、ダンピング係数 B' は10をとり、 C は0.3をとる。さらに、粘性底層では、右辺第1項よりも、右辺第2項の方が支配項となり、

$$\frac{u'}{U_*} = Cy^+ \quad (10)$$

で示される。一方、単調増水する非定常流においては、 C は増水期の途中で最大値をとり、単調減水では、減水期の途中で最小値をとることが門田⁸⁾によって示されている。

3. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、長さ10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配水路である。流量制御は電磁流量計とインバータ・モータの回転数を同期・制御することによって行った。瞬間流速の測定には4ビーム後方散乱型ファイバーレーザー流速計を用い、水深の測定には容量式波高計を用いた。

非定常流の流量変化は増水期につづいて連続的に減水期が生じる三角波とし、ベース水深からピーク水深まで変化する時間 T_d を60sとした。実験条件を表-1に示す。ここに、 Q は流量、 $Fr = v/\sqrt{gh}$ はFroude数、 $Re = vh/\nu$ はReynolds数、 v は断面平均流速、 g は重力加速度である。

流速測定断面は、水路の上端から約8mの位置とし、測定点は底面から0.2mmの位置よりベースフロー水深 h_b 付近までの43点とした。また、水深の測定は流速測定断面よりもさらに10cm下流側で行った。

非定常流の実験を行う上で、その非定常性を示すパラメータを定義する必要がある。中川ら⁹⁾は次式で示される非定常パラメータ α を定義した。

$$\alpha = \frac{2}{v_b + v_p} \frac{h_p - h_b}{T_d} \quad (11)$$

実河川における α の一例として、山口・新里¹⁰⁾は1989年11月8日に広島県太田川水系古川の松原橋において $\alpha = 1.4 \times 10^{-4}$ を得た。ただし、実河川の洪水流の規模は様々であるので、かなり広範囲で α が変化する。そのため、本実験ではそれらを網羅させるために、山口・新里の観測値より強い非定常流れを形成させた。本実験における α は 2.94×10^{-3} であった。

4. 実験結果および考察

(1) 平均量と乱れ量の分離

洪水流のような非定常な流れにおいて、平均量と乱れ量を分離する代表的な方法には、以下のような方法がある。

- (a) 集合平均法
- (b) 移動平均法
- (c) 周波数領域法

(a)集合平均法は、同一波を繰り返し発生させてそれを算術平均する方法であり、(b)移動平均法は離散データに重み付け平均を施し、平滑値を求めてそれを平均量とする方法であり、(c)周波数領域法は最適項数で打ち切った有限項フーリエ級数を当てはめて、平均量と乱れ量とを分離する方法である。瀬津ら³⁾や門田⁸⁾は(a)~(c)の方法を比較検討し、(c)周波数領域法が最適な方法と結論づけた。また、この方法ではフーリエ項数の打ち切り項数 m が未知量として残されるが、Nezu & Nakagawa¹¹⁾は平均量が Burst 周期よりも3オーダー以上大きくとれるような $m=7$ が最適値であることを明らかにしている。本研究においても平均量と乱れ量の分離に、(c)周波数領域法を用い、 $m=7$ を採用する。

(2) 摩擦速度の評価およびlog則の適応範囲

開水路における代表的な摩擦速度の算出方法には、以下のような方法がある。

- (a) コントロールボリューム法
- (b) 式(1)のせん断応力の直線分布より
- (c) 式(6)のlog則より
- (d) 式(5)の粘性底層の流速分布より

方法(a)は運動量の釣り合い式から算出する理論式である。不等流の解析において頻繁に用いられるが、定常を前提としているため、非定常流の場合は使用できない。

方法(b)は等流の場合にのみ成立するもので、不等流および非定常流では理論的には成立しない。

方法(c)は運動方程式から導かれているものの、混合距離が壁面から直線的に変化し、かつ、せん断応力が壁面からの距離に関わらず一定という大胆な仮定を用いるために、物理的意味は曖昧である。しかし、等流のような平衡状態の流れでは、式(6)から算出される摩擦速度の値が妥当な値を示すことが実験的に確かめられている。非定常流においても、従来から近似的に用いられているが、その根拠は定かではない。また、その適用範囲についても等流の値を流用しており、十分には検討されていない。

方法(d)は運動方程式から導かれた理論式であるため、物理的意味もはっきりしており、信頼できる方法である。しかし、極めて底面付近を精密に測定しなければならず、従来の開水路流の解析で用いられることはほとんどなかった。本研究では、レーザードップラー流速計を駆使し、極めて底面付近の流速測定を行ったので、方法(d)を用いることができる。

図-1は主流速分布図である。ここに $T = t/T_d$ は無次

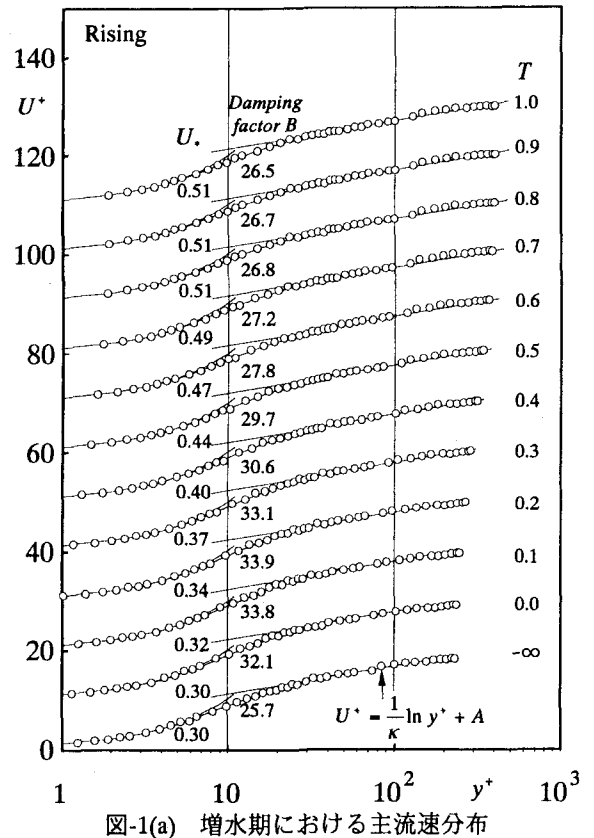


図-1(a) 増水期における主流速分布

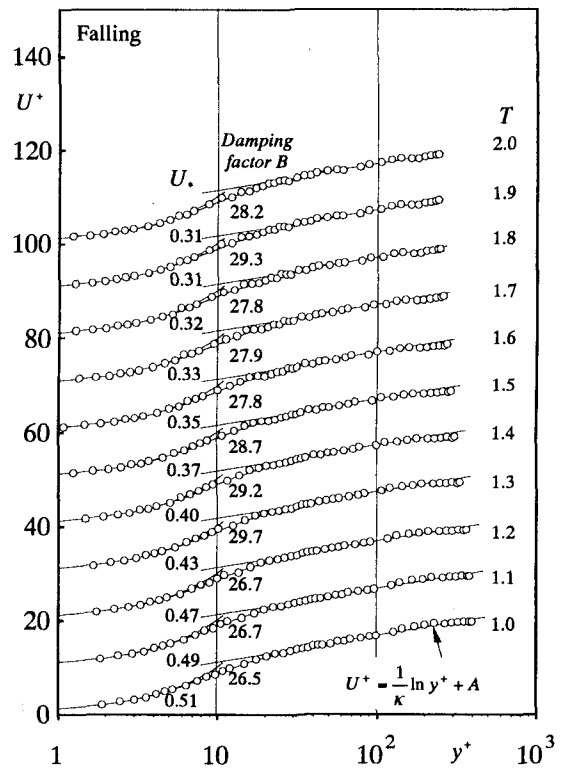


図-1(b) 減水期における主流速分布

元時間である。また、増水開始前の定常時の時間に関しては、 $T = -\infty$ と表記している。摩擦速度は、 $0 < y^+ \leq 5$ の主流速分布を式(5)に適合して求めた値を用いている。図-1より $0 < y^+ \leq 5$ では式(5)に、 $5 < y^+ \leq 40$

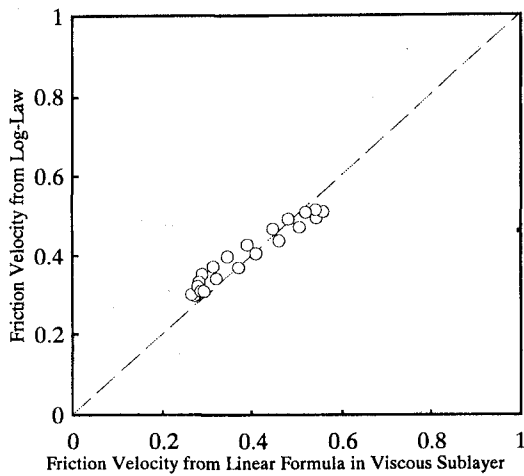


図-2 粘性底層及びlog則より評価した摩擦速度の比較

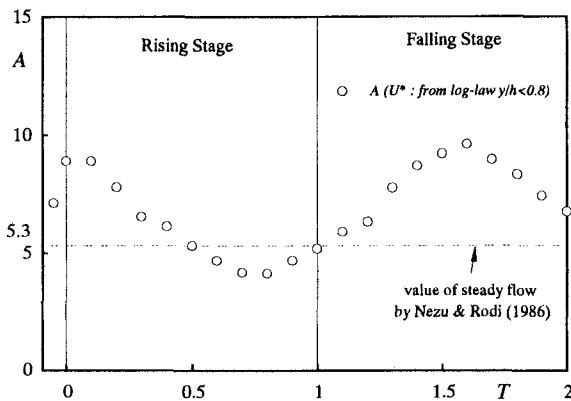


図-3 log則における積分定数の変化

では式(2)に、 $40 < y^+$ では式(6)に適合していることが分かる。外層においても主流速分布はlog則に従っているが、これは、Reynolds数が低いためである。Nezu & Rodi⁹⁾によって $Re \leq 7.5 \times 10^3$ の等流では $\Pi \approx 0$ となることが明らかにされているが、これは $\alpha \leq 2.94 \times 10^{-3}$ の非定常流にも適合できると思われる。そこで、本実験条件におけるlog則の成立範囲を $y/h \leq 0.8$ とする。

図-2にlog則および粘性底層より求められた摩擦速度の関係を示す。多少ループを描いており、非定常流においてlog則より求められた摩擦速度には幾分応答遅れが含まれているといえる。しかし、両者間の相関係数は0.95であり、かなり一致しているといえる。この結果より、 $\alpha = 2.94 \times 10^{-3}$ の非定常流においては、log則から求めた摩擦速度はかなりの精度があるといえる。

図-3はlog則における積分定数 A の変化を示したものである。 A は増水期では減少して水深のピーク時に最小値をとり、さらに減水期にかけて増加する。減水終了前に最大値をとり、再び等流の値へと減少していく。このような複雑な挙動はNezu *et al.*¹²⁾ の結果と一致する。

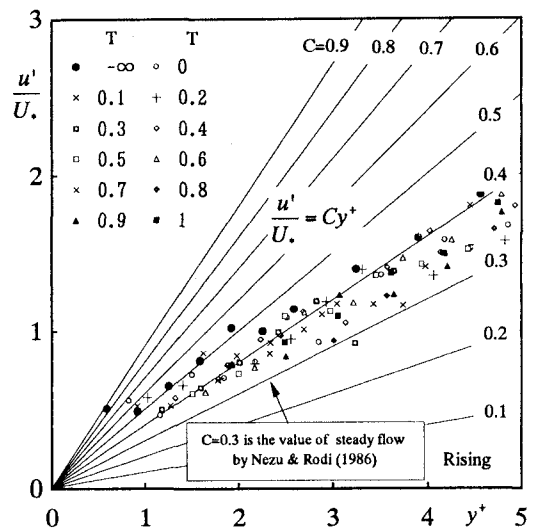


図-4(a) 増水期における粘性底層での乱れ強度分布

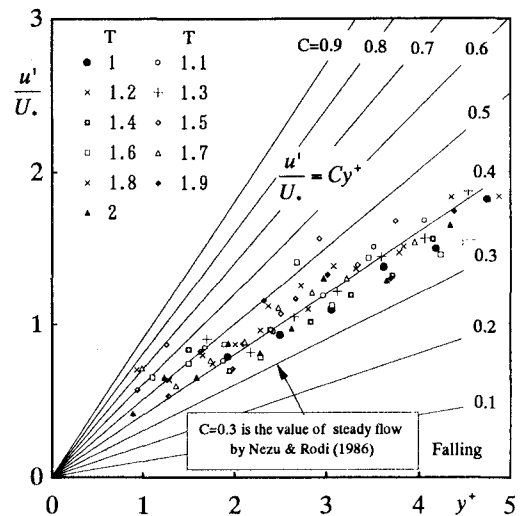


図-4(b) 減水期における粘性底層での乱れ強度分布

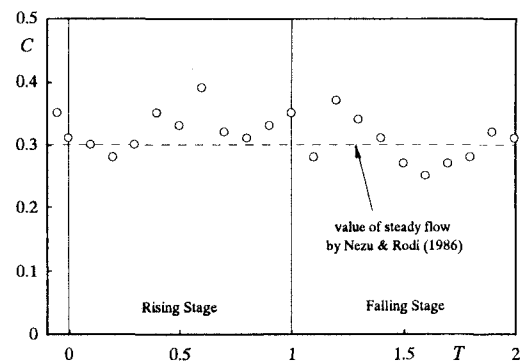


図-5 乱れ強度の勾配 C の変化

(3) 乱れ強度分布特性

図-4は粘性底層付近である $0 < y^+ \leq 5$ における乱れ強度分布 u'/U_* を示している。多少のばらつきはあるが、ほぼ線形な分布となっている。そこで、実測値を式(10)に当てはめて最小自乗法により C を求めた。

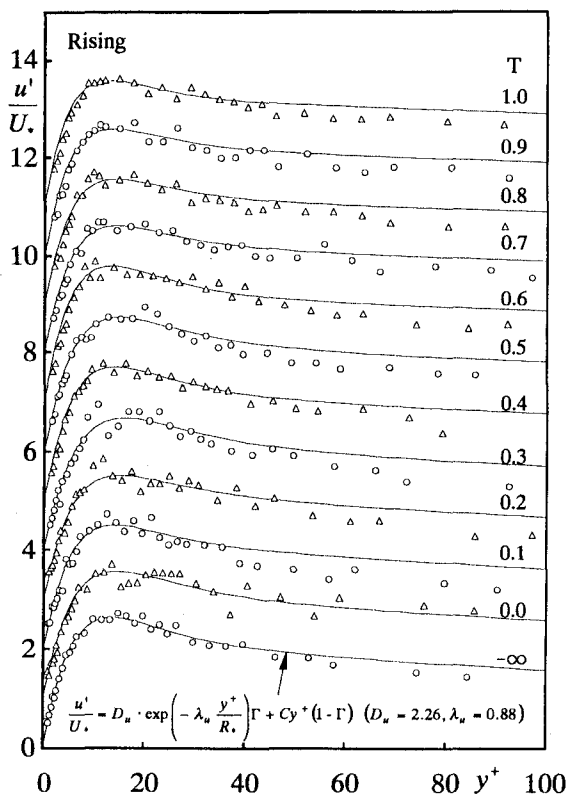


図-6(a) 増水期における乱れ強度分布

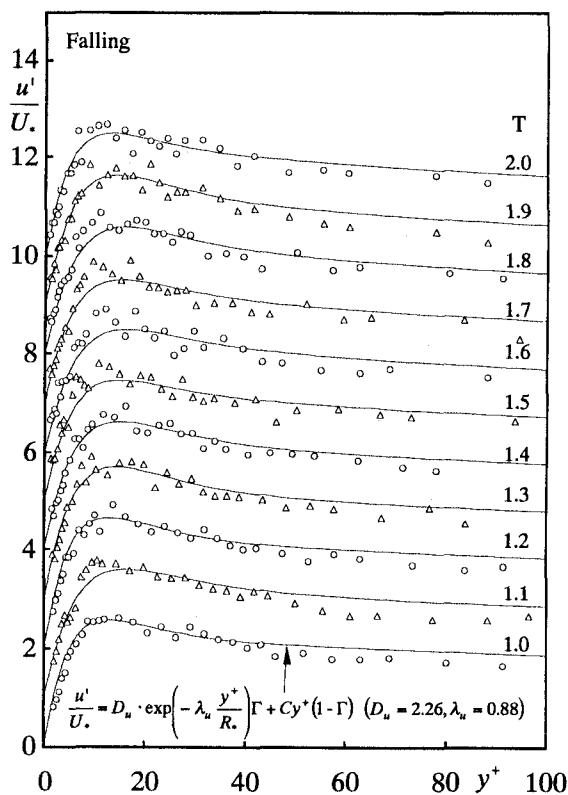


図-6(b) 減水期における乱れ強度分布

図-5はCの時系列を示している。多少のばらつきがあるため断定的なことはいえないが、Cは非定常

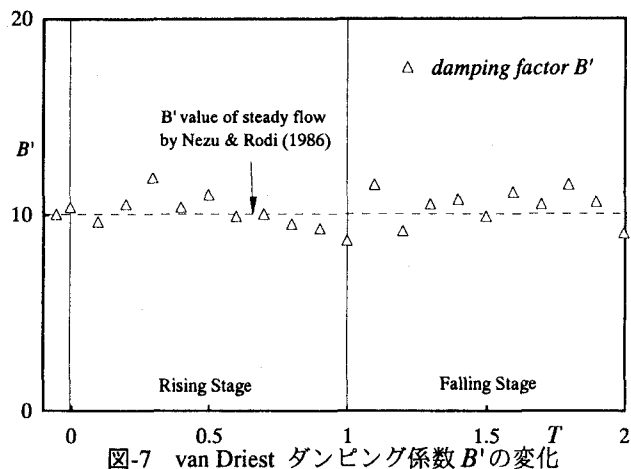


図-7 van Driest ダンピング係数 B' の変化

性の影響を受けず、等流での値0.3を示すようである。

図-6は内層表示された乱れ強度分布を示している。ダンピング係数 B' は $5 < y^+ \leq 40$ における実測値を式(10)に当てはめて、最小自乗法を用いて求めた。求めた B' による式(10)を図-6に曲線で示しているが、良好に実測値を表現しているといえる。開水路等流における乱れ強度 u'/U は $y^+ = 17$ 付近で最大値をとることがNezu & Rodiによって明らかにされているが、 $\alpha \leq 2.94 \times 10^{-3}$ の非定常流においても、ほぼ $y^+ = 17$ 付近で最大値を示すことが分かる。

図-7はダンピング係数 B' の時系列を示している。多少のばらつきが認められるが、定性的傾向として、 B' は非定常性の影響を受けず、開水路等流における値10を示すものと思われる。

(4) Reynolds応力分布特性

図-8は内層表示されたReynolds応力分布を示している。なお、図中の実線は式(1)より求めたReynolds応力分布である。実測値が良好に式(1)で表現できることが分かる。これは、底面付近における流速分布がvan Driestのダンピング関数を用いることで表記でき、さらに、Reynolds応力が式(1)によって表現できることを示す。理論的には、式(1)は等流の場合にのみ成立する式であるが、図-6より α が 2.94×10^{-3} より小さい範囲の非定常流においては近似的に用いることができるといえよう。

5. おわりに

非定常開水路流の粘性底層、バッファー層、log則領域およびwake領域を高精度に測定した結果、以下のような結論が得られた。

(1) $\alpha \leq 2.94 \times 10^{-3}$ の非定常流において、 $Re \leq 9.0 \times 10^3$ の範囲ではlog則の範囲を $40 \leq y^+ \leq 0.8R_u$ として良い。

(2) 主流速分布における積分定数Aは増水期では減少して水深のピーク時以前に最小値をとり、減水期にかけて増加する。さらに、減水終了前に最大値を

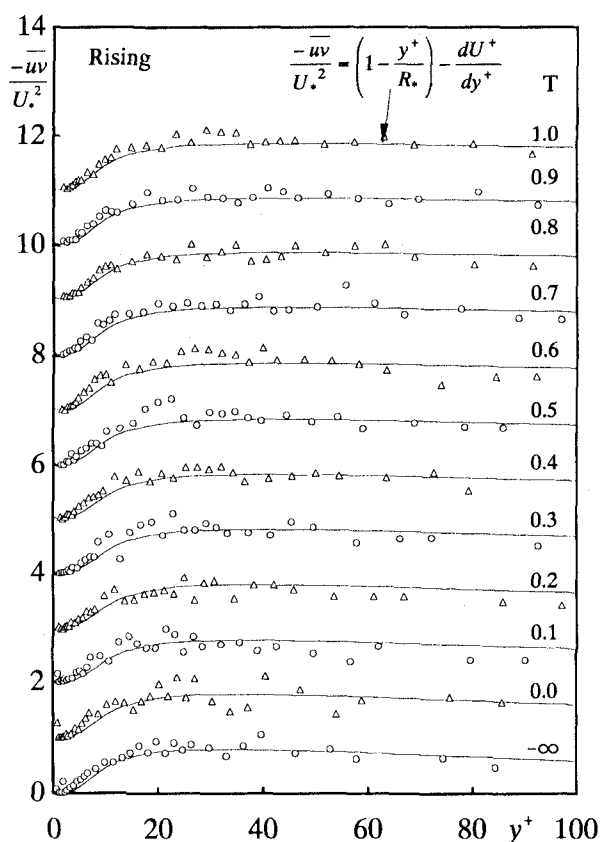


図-8(a) 増水期におけるReynolds応力分布

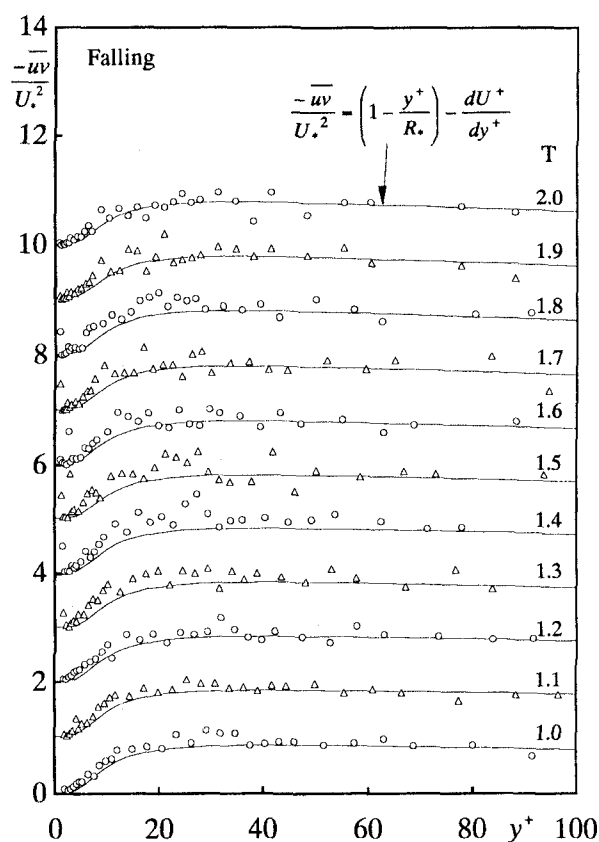


図-8(b) 減水期におけるReynolds応力分布

とり、再び等流の値へと減少していく。

(3) 粘性底層における乱れ強度分布の勾配 C は、非定常性の影響を受けず、ほぼ等流における値0.3を示す。

(4) 乱れ強度分布における van Driest のダンピング係数 B' も非定常性の影響を受けず、ほぼ等流における値10を示す。

なお、今回紙面の関係で高次のモーメントや2点間の相関などについては触れなかった。今後そのような解析を行い、さらに非定常流におけるburstの挙動なども解明する必要があると考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、(社)近畿建設協会による助成を受けた。ここに、謝意を表する。

参考文献

- 1) 林泰造, 大島正憲: Kinematic Wave としての非定常性が水流の乱れ構造に及ぼす影響の研究, 第32回水理講演会論文集, pp.607-612, 1988.
- 2) 長谷川和義: 石狩川における流速と浮遊砂濃度の同時計測, 種々のスケールにおける流れと流砂運動の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明, 科研費報告書(代表: 芦田和男), pp.484-485, 1989.
- 3) 瀬津家久, 門田章宏, 中川博次: 非定常開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.81-88, 1994.
- 4) Haizhou, Tu and Graf, W. H.: Friction in unsteady open-

channel flow over gravel beds, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.31, pp.99-110, 1993.

- 5) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.112, No.5, May, pp.335-355, 1986.
- 6) 瀬津家久, 門田章宏, 中川博次: 開水路乱流の粘性底層および壁面領域に及ぼす非定常効果, 水工学論文集, 第39巻, pp.833-838, 1995.
- 7) 瀬津家久: 開水路流の乱流構造に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1977.
- 8) 門田章宏: 開水路流れの乱流特性に及ぼす圧力勾配の影響と組織渦構造に関する研究, 京都大学博士論文, 1997.
- 9) 中川博次, 瀬津家久, 石田吉宏, 門田章宏, 藤本英典: 管路及び開水路における非定常流れの乱流構造の相違について, 水工学論文集, 第37巻, pp.593-598, 1993.
- 10) 山口高志・新里邦生: 電波流速計による洪水流量観測, 土木学会論文集, No.497/II-28, pp.41-50, 1994.
- 11) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulent structure over dunes and its role on suspended sediments in steady and unsteady open-channel flows, *Proc. of Int. Symp. On Transport of Suspended Sediments and its Mathematical Modeling*, IAHR, Firenze, pp.165-189, 1991.
- 12) Nezu, I., Kadota, A. and Nakagawa, H.: Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123, No.9, pp.752-763, 1997.

(1997.9.30受付)