

小型電磁流速計による野外流路での乱流測定 Turbulent Measurement by Eletromagnetic Anemometer in Rivers and Channels

辻本哲郎*・北村忠紀**・岡田敏治***・王子義徳***

By Tetsuro TSUJIMOTO, Tadanori KITAMURA, Toshiharu OKADA and Yoshinori OUJI

Field measurements of turbulent velocity were carried out in rivers and channels with electromagnetic anemometers. A set of two probes of the instruments could detect the three components of flow velocity simultaneously, and thus the turbulent characteristics of flows which were almost one order larger in scale than laboratory flumes could be measured. The following flows were investigated: (1) uniform flows: (a) with sufficient submergence, (b) with small relative submergence, (c) over vegetated bed; (2) flow with abrupt change of bed roughness; and (3) flow in a stream with vegetated region (transverse velocity profile was discussed). The obtained data are compared with those previously obtained in the laboratories, and discussed.

Keywords : field measurements, turbulence measurements, flow with small relative submergence, transient process of Reynolds stress, flow in vegetated channel

1. まえがき

著者らはとくに相対水深の小さい礫床(1,2)の流れや植生を伴う流れ(3,4), 粗度変化を伴う流れ(5)についてその乱流構造について小規模な実験水路での計測をもとに研究を進めてきたが, 今回2成分同時計測が可能な小型電磁流速計を用いて野外水路・実河川で乱流計測を行なった。対象とするのは, (1) 相対水深の大きい流れ(コンクリート水路), (2) 相対水深の大きい礫床上的流れ, (3) 一様な植生に覆われた河床上的流れで, なるべく2次元定常等流と見做せるもの, さらに, (4) 粗度が縦断方向に急変しているところでの流れ, (5) 縦断方向に一様な河川区間で横断面の一部に植生が繁茂しているところでの流れで, こうした目的から測定箇所を選定した。選定された水路・河川は水路幅 1.4~12m, 水深 20~80cm程度のスケールで, 著者らが実験室で扱っている現象より1オーダー大きいものとなっている。

実河川で乱流測定を行なう試みは測定器具の苦勞を伴う古くから行なわれてきたが, 最近では小型の電磁流速計や超音波流速計の開発により比較的容易になりいくつかの貴重な測定結果がすでに発表されている(瀬良・神田(6), 松岡(7))が, 計測結果に含まれる河川流れの境界条件が十分に特定されていないようである。本研究ではこの点に配慮し, 流れに影響する境界条件が卓越的に特定できるものを選んで測定を行なった。

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

** 学生会員 金沢大学大学院 工学研究科修士課程土木建設工学専攻

(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

*** 学生会員 金沢大学工学部 工学部土木建設工学科

(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

2. 測定方法

流速測定には小型電磁流速計 (KENEK VM201) を用いた。較正は室内水路で自走台車を用いて行なった。小型電磁流速計のプロープは直径 8mm、長さ3cmの円柱形で、この円柱を上方から流れに垂直に設置できる I 型と、流れに平行に設置できる L 型の 2 本を採用した。I 型では流速の流下方向 (x) ・横断方向 (z) の 2 成分が、L 型では流下方向と鉛直方向 (y) の 2 成分が同時計測される。検知部は直径8mmの円柱型プロープの中央外周に沿って 90度離れているが、今回測定対象の流れのスケールでは同一点での 2 成分同時測定と見做すことができよう。したがって各方向成分の平均流速、乱れ強度のみならず、2 成分の相関で定義される Reynolds 応力も測られる点で意義がある。2 本のプロープには既製の金属製ロッドが付属しているが、水深の大きいところでの測定を考慮しプロープ部から約40cmより上方を直径2.0cm長さ約2.0mのプラスチック製のパイプ (外壁に目盛を刻んである) の先端に挿入し、出力コードを上方にぬいた。これを金属製の足場にセットし、河川の中でほぼ流れを乱さず流速計を設置し、しかも上下方向に正確に昇降できるようにした (写真 1)。流速計の出力は現場においてデジタルレコーダー (TEAC DR-F1) でフロッピーに記録した。流速計自体 0.05秒での平均値を出力することから 20Hz で、1024または 2048個採取した。電源は、乗用車の直流電源 (12V) を 直流交流変換器 (Daisy SL130-12) によって交流 (100V) に変換して用いた。本論文に記載の測定ケースは表 1 にまとめている。測定中、流量がほとんど変わらないことを、測定断面より 3m 程度上流、側岸寄りでの水位観察によって確認した。

表 1 測定地点及び測定条件表

Case	水路名及び地点	水路幅 (cm)	水深 (cm)	平均流速 (cm/s)	路床の状況その他
ST 3	金浦用水	150	66	48.9	コンクリート床
ST 4	金浦用水	150	66	50.0	コンクリート床
SO 2	金浦用水	140	38	58.0	粒径3cmの礫床
OY 2	大野庄用水	267	22	81.2	粒径7cm程度の礫による石張り
ST 7	犀川 (大桑)	1190	80	35.2	粒径10-20cmの礫床
ST 1	金浦用水	143	28	70.7	密な植生
SO 3	金浦用水	127	31	54.9	密な植生
HK 1	東金沢灌漑用水	123	26	61.2	疎な植生
HK 2	東金沢灌漑用水	129	26	64.2	疎な植生
RS 1	犀川 (上菊)	700	約40	88	粒径15cmの礫から石張へ遷移
RS 2	犀川 (上菊)	900	約60	130	(同上、小出水時)
SR 1	辰巳用水 (涌渡)	200	18	50	コンクリート床から粒径3cmの礫床
TV 1	犀川 (法島)	750	約40	---	粒径15cmの礫床、右岸に植生繁茂帯
TV 2	犀川 (法島)	950	約65	---	(同上、小出水時)

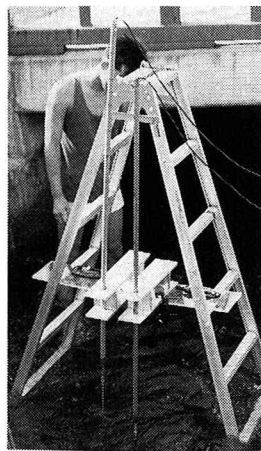


写真 1 電磁流速計の設置

3. 2 次元等流についての結果

3. 1 相対水深の大きい流れ

図 1 には、相対水深の小さいコンクリート水路のほぼ等流状態での測定結果 (平均流速分布、Reynolds 応力分布) を示す。Reynolds 応力分布は極めて良好に三角形分布を示し、その底面外挿値から摩擦速度 (u_*) を推定することができる。この摩擦速度を用いて、平均流速分布、Reynolds 応力分布、乱れ強度分布を無次元化して示したものを図 2 に示した。等価砂粗度は 1mm 以下と予想され、水理学的完全滑面ではないが、 h/d (h : 水深、 d : 河床材料粒径または粗度高さ) が 10^3 以上の相対水深の十分大きな流れである。水深全体にわたって対数則が成立し、乱れ強度に

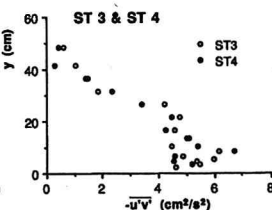
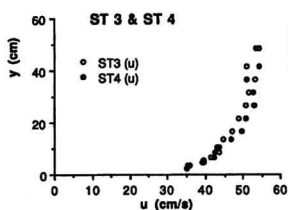


図 1 流速分布及び Reynolds 応力分布

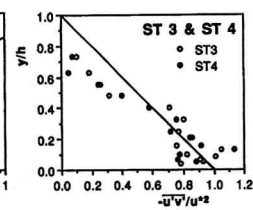
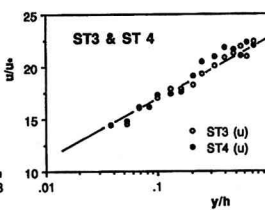


図 2 (a) 無次元化された流速分布及び Reynolds 応力分布

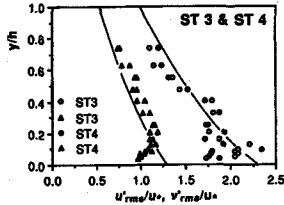


図2(b) 乱れ強度分布

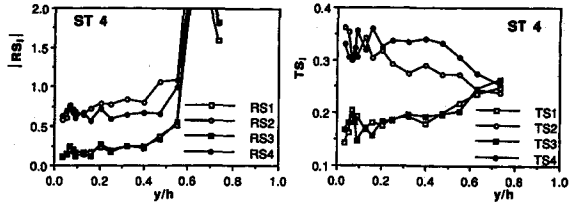


図3 Reynolds応力の4象限分割による検討

についての普遍表示(8)も良好に成立している。さらに図3には4象限分割法によって、ejection, sweep事象のReynolds応力への寄与率, 生起時間占有率を調べたもので、実験室内で詳しく調べられた特性(9)と良く一致している。すなわちejectionの貢献が大きく但し時間占有率は小さい(鋭いejection)という通常のburstingの性状である。

3.2 相対水深の小さい礫床上の流れ

図4に相対水深の小さい流れ(礫床または石張流路)での測定結果(平均流速分布, Reynolds応力分布)を示す。測定されたReynolds応力は底面近傍で減少する傾向を示すが、それより上方では三角形分布が認められその外挿によって摩擦速度を推定した。これを用いて無次元表示したものが図5で、実験室水路でroughness sublayerと呼んで指摘した特徴、すなわち路床近傍での流速分布の一樣化, 乱れ強度分布, Reynolds応力分布の欠損(1,2)が、野外流路でも確認された。図6では4象限分割法により路床近傍での乱流構造の変化を見た。いわゆるroughness sublayerでは、ejection事象にかわってsweep事象のReynolds応力への貢献が卓越してくる(ejectionが鋭く間歇的であるという通常のbursting構造は埋没する)という実験室でも指摘された事項(2)が野外規模でも認められた。

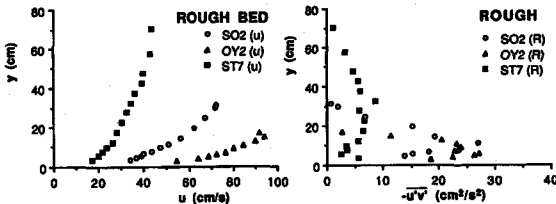


図4 流速分布及びReynolds応力分布

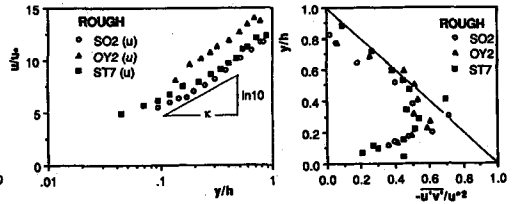


図5(a) 無次元化された流速分布及びReynolds応力分布

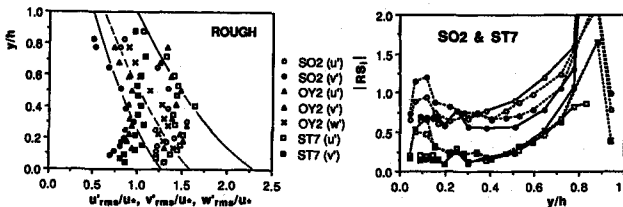


図5(b) 乱れ強度分布

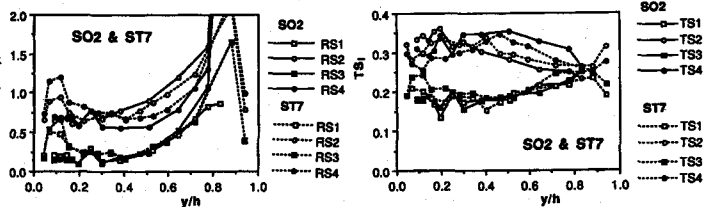


図6 Reynolds応力の4象限分割による検討

3.3 路床に植生が一樣に繁茂した水路の流れ

植生(長さ50cmぐらいの植物が下流にたなびいている)が河床を完全に覆っている(植生下の砂床が見えない)状態の水路(ST1, SO3)および植生が一樣ではあるが疎に存在する状態の水路(HK1, HK2)において流速測定を行った。植生の下は砂は0.3-0.6mm程度で、植生が無ければ十分相対水深の大きな流れである。いづれも、水深の10-20%程度まで植生がたなびき、植生高さを粗度高さとみなすと相対水深の小さな流れということになる。

図7に平均流速分布, Reynolds応力分布を示す。植生の影響を受けないところではReynolds応力分布は三角形分布するのでこの外挿により河床せん断応力を推定し、これに対する摩擦速度で無次元化された平均流速分布, 乱れ強

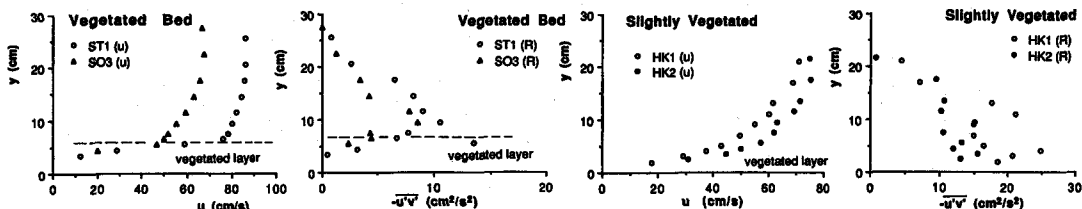


図7 植生上流の流速分布及びReynolds応力分布

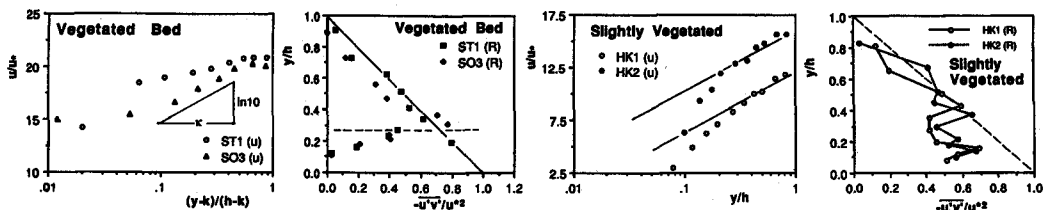


図8(a) 無次元化された植生上流の流速分布及びReynolds応力分布

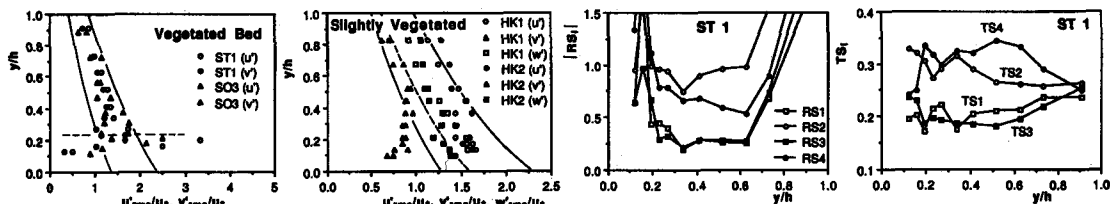


図8(b) 無次元化された植生上流の乱れ強度応力分布

図9 Reynolds応力の4象限分割による検討

度分布, Reynolds応力分布を 図8 に示す。密な植生の場合には 流速の対数表示を植生頂部を原点に補正して行なった(3)によると, 対数則の原点はさらに下方へ移動する必要がある)。疎なものについては砂床面を原点とした。乱れ強度は密な植生のある場合, 植生頂部で極大となる傾向を示し, 礫床のような欠損は顕著でない。Reynolds応力分布も植生より上方では欠損せず, 植生層内では指数型に近い減衰をするなど 実験室で調べられた傾向(3)と一致している。疎で柔軟な植生では, 植生頂部において 乱れ強度が顕著な極大を示すことはなく, 植生上方での乱れ強度, Reynolds応力の欠損もありそうである。図9 は 4 象限分割法により 表面流の境界近傍での乱流構造の変化を見たものである。礫床流れと異なり, 植生上方でのejectionとsweepの貢献度の逆転は見られず(roughness sublayerが出現していないことと対応), 境界面のごく近傍と植生層内では逆転する(植生層への下降流が間歇的に鋭く生じ, Reynolds応力への貢献が高い)という結果で, これも水路実験結果(3)と一致している。

4. 粗度急変部での乱流特性の縦断方向変化

厚川において礫床部分(粒径15cm程度)から石張固定床(粒径5-10cmの石が用いられているが, 流れへの突出高さは1cm程度)へと路床状態が変化したところ(RS1, RS2), 辰巳用水においてコンクリート床から 粒径3cmの砂礫路床へと変化したところで(SR1), 粗度変化点からの距離を変えて流速測定を行なった。図10に示すReynolds応力分布の縦断方向変化よりわかるように, 河床粗度の変化により底面せん断応力(あるいは摩擦速度, 変化前後の量にそれぞれ添字1, 2を付した)が急変したものと十分見做すことができ(overshooting(10)などは誤差の範囲内), Reynolds応力の新しい値への遷移は河床から離れるにしたがって遅い。また 図11には 変化後の摩擦速度によって無次元化した流速分布の変化を示す。粗度変化前の摩擦速度に対する対数則流速分布から 新しい摩擦速度に対応したそれへ, 底面から順次 対応して行く様子が認められる。また 粗度が急増する場合と急減する場合, Reynolds応力

分布、流速分布とも平衡状態からの形状ずれは正反対となる。

なお、著者らは底面せん断応力の変化への Reynolds 応力分布の緩和モデル(5)を提案しているが、そのモデル(次式、添字1,2はそれぞれ河床粗度急変前後の値を示す)による計算結果を図10, 11とに併示して比較した(流速分布は計算された Reynolds 応力分布に混合距離モデルを適用して求めた)。風洞実験で同定し室内実験結果(10)にも適用性が認められた指数関数型インパルス応答(5)をそのまま用いて観測結果を十分表現できる。

$$\tau_2(\eta, \xi) = (1-\eta)\rho u_*^2 \{ \exp(-\xi/\Lambda) + \beta^2 [1 - \exp(-\xi/\Lambda)] \}$$

$$\beta \equiv u_{*2}/u_{*1}; \quad \Lambda(\eta) = 20\eta(1+1.5\eta^3); \quad \xi \equiv x/h; \quad \eta \equiv y/h$$

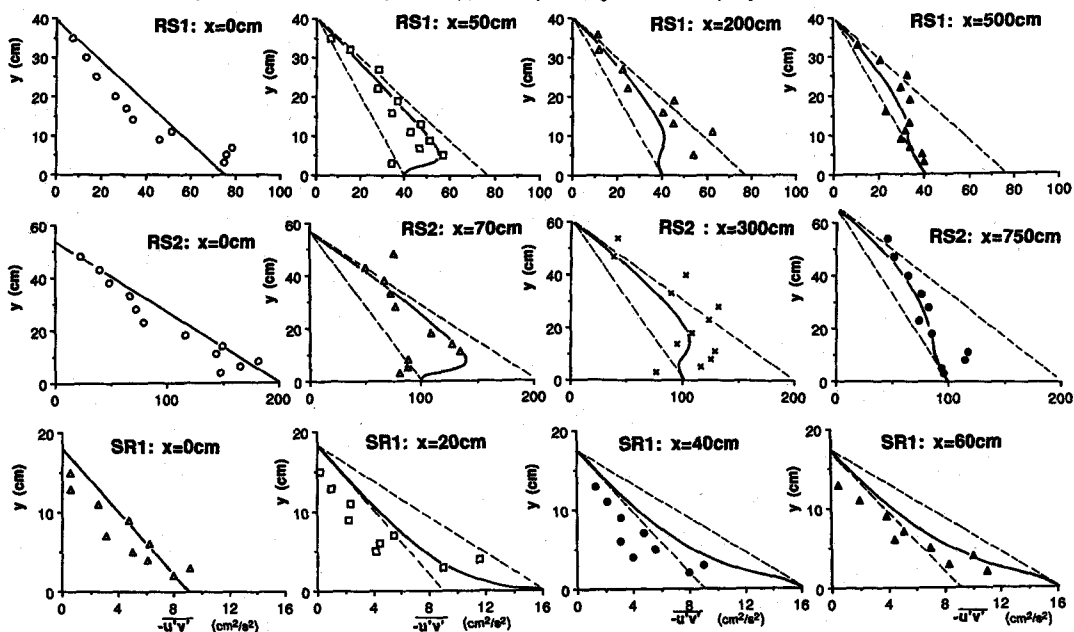


図10 粗度急変流れでのReynolds応力分布の縦断方向変化

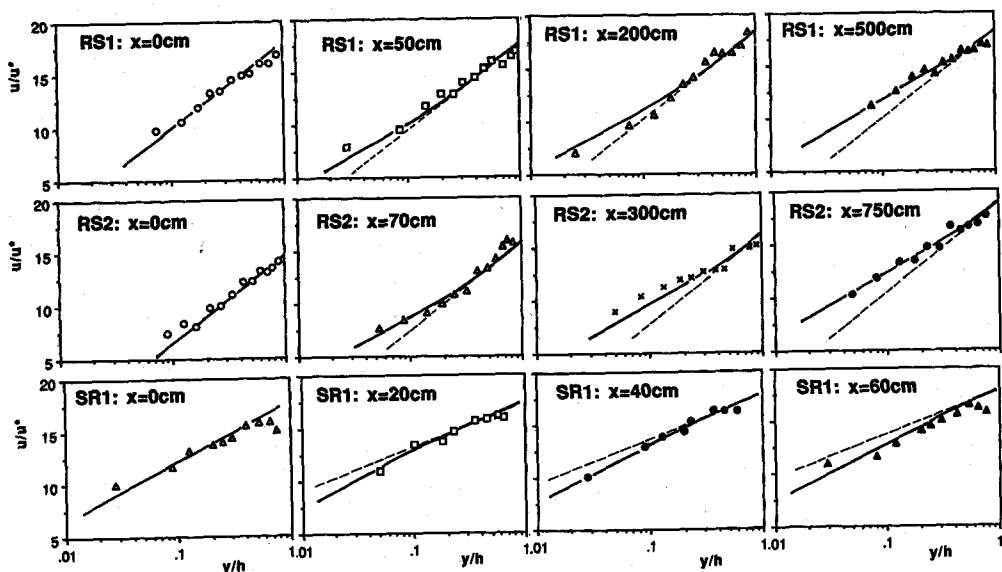


図11 粗度急変流れでの流速分布の縦断方向変化

5. 一様な水路横断面の片側に植生繁茂帯がある場合の流れ

犀川上菊橋上流部（法島）において写真2に示すように延長約80mにわたってほぼ一定幅で矩形断面に河道の一部が整正されている。左岸は

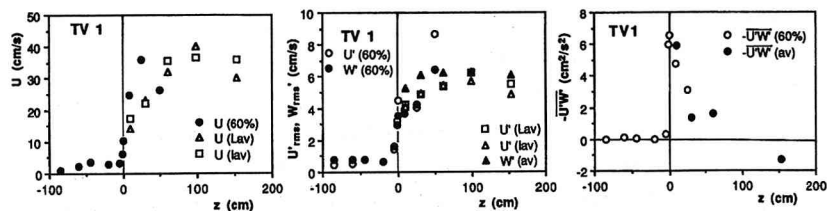


図1-2 流速，乱れ強度，Reynolds応力の横断方向分布

護岸で，右岸には植生繁茂帯があり，右岸の一部の植生帯（幅2m）は非植生帯と同じ水深となっている。測定断面において 植生帯からの距離を変えた数箇所での水深方向の流速分布の測定を行なった。さらにIプローブのみで植生帯内を含め60%水深の高さで流速の横断方向分布の測定を行なった。図1-2は水深平均された，または60%水深での流速，乱れ強度，Reynolds応力（乱れによる横断方向の運動量フラックス）の横断分布を示す。またこの断面では植生部・非植生部の混合現象に関連していると考えられる植生帯周辺で水面変動測定も行なった。水面変動測定は容量式波高計（KENEK CHT 4-10）を用いて行ない，同時計測された電磁流速計の出力と同様に統計処理した。図1-3に同時計測された水面変動と流速変動時系列を示すが，水面変動と流速変動における低周波成分の存在，両者の強い相関など，水路実験結果(4)と相似な傾向が認められた。



写真2 植生の伴う河道での流速測定（犀川）

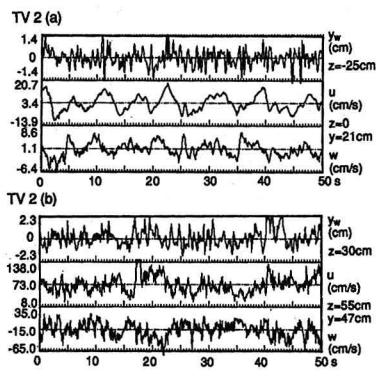


図1-3 植生近傍での流速，水面変動同時計測

6. あとがき

本研究では，これまで著者が実験室内で調べてきたいくつかの条件下での流れの乱流特性を，小型電磁流速計を用いて実河川に近いスケールで調べ，これまでの結果と比較・検討した。今後，ここで取り上げたいいくつかの流れパターンのそれぞれについてさらに実験との比較，乱流モデルとの関係など検討を深めて行きたい。

参考文献

- 1) 中川・辻本・清水：相対水深の小さい開水路流れの構造に関する研究，土木学会論文集，423，pp.406-411，1990。
- 2) Nakagawa, Tsujimoto & Shimizu：Turbulent flow with small relative submergence, *Proc. Int. Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions*, Trent, Italy, pp.A19-A30, 1989。
- 3) 中川・辻本・清水：植生を伴う開水路流れの構造に関する研究，水工学論文集，34，pp.406-411，1990。
- 4) 北村・辻本：植生域と非植生域の流れの干渉についての基礎的研究，土木学会年講概要集，45，II-89，1990。
- 5) 辻本・Cardoso・斎藤：底面せん断応力が変化する開水路流れの特性，水工学論文集，34，pp.406-411，1990。
- 6) 瀬良・神田：超音波流速計による河川流の測定，水理講演会論文集，32，pp.353-358，1988。
- 7) 松岡：砂礫河床上の乱れ，水理講演会論文集，33，pp.481-486，1989。
- 8) 橋津：開水路乱流の乱れ強度に関する研究，土木学会論文報告集，261，pp.67-76，1977。
- 9) Nakagawa & Nezu：Prediction of contributions to the Reynolds stress from bursting events in open-channel flows, *J. Fluid Mech.*, 80-1，pp.99-128，1977。
- 10) 橋津・中川ら：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，水工学論文集，34，pp.406-411，1990。