

側岸に植生帯を有する流れの遷移特性について

Hydraulic Characteristics of Flow in Transitional Reach of
a Stream with Vegetation Zone along Side Wall

岡田敏治*, 辻本哲郎**, 泉 倫光***, 本橋 健*, 辻 亜紀子****

By Toshiharu OKADA, Tetsuro TSUJIMOTO, Norimitsu IZUMI, Ken MOTOHASHI, Akiko TSUJI

In a stream with vegetation zone, active transverse mixing appears between main course and vegetation zone, which brings about suspended sediment flux toward the vegetation zone and one can expect to remove suspended sediment from the main flow water. When such a vegetation zone or an artificial permeable medium is designed to set along a side wall of a river, the flow properties under equilibrium but also in the transitional reach should be clarified; nevertheless the latter has not been well investigated yet. Hence, in this study, systematic experiments are conducted in a laboratory, and empirical formulae to represent the transitional properties of flow characteristics are proposed.
Keywords: flow with vegetation zone, transverse mixing, transitional properties, sediment flux, systematic experiments

1. はじめに

近年、自然に近い状態のまま河川環境を整備・管理しようとする方向が模索されており、河川に生育する植生を有効に活用するため植生水利が活発に研究されるようになってきている。特に、側岸部に存在する植生には、増水時にその周辺領域の流れを減勢する水制効果および主流部の速い流れとの相互作用により運動量、物質の横断混合を促進する効果を有することが確認されている¹⁾。著者ら²⁾は、植生を有効に利用した河川環境管理方策の1つとして、この特性を積極的に利用した溪流などでの植生を用いた濁質軽減対策(図1)の有用性を検討し、ある一定の効果が得られることを確認している。しかし、植生帯を有する流れにおいて、活発な横断混合が発生するのは流れが十分に発達した平衡領域であり、流れの遷移領域では、むしろ植生帯

* 正会員 工修 (株)日水コン大阪支所システム開発部
(〒532 大阪市淀川区西宮原2-1-3 SORA新大阪21)

** 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 土木建設工学専攻

****正会員 (株)日水コン 本社 水道事業部
(〒163-11 東京都新宿区新宿6-22-1 新宿スクエアタワー)

の流量が主流部へ移動する流量シフトが卓越する³⁾。実際に河川で上記の横断混合を利用した濁質除去を行っていかうとする場合、平衡領域の特性だけではなく遷移領域の特性を知ることが必要となるにも関わらず、平衡領域の研究に比べて遷移領域に関する研究は少なく、その特性は十分に把握されてはいない。本研究では、植生流れにおける水理特性量の遷移領域での変化過程およびその変化特性に及ぼす植生帯の透過係数、水理条件の効果を検討するために、透過係数の異なる数種類の植生モデルを配した水路において、水路全断面の流速を測定することによって実験を行った。実験で得られた結果から、遷移領域における特性量(特に、横断混合の強度を評価できる横断方向乱れ強度に着目する)の流下方向変化から流量シフト、混合発達などの領域特性を抽出・整理し、各領域での変化過程の容易な評価方法を提案する。また、実験水路に比べて水路諸元の大きい水路(灌漑水路)に疑似植生施設を設置し、Reynolds数が1~2オーダー大きい植生流れを再現させ、室内実験で調べられたような横断混合などの植生流れが出現するかを検証した。

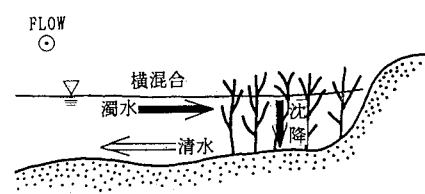


図1. 植生による濁質除去の概念図

2. 実験方法・実験条件

実験は、長さ12m、幅40cmの可変勾配式直線水路(水路床および側壁はアクリル樹脂板)で行った。植生モデルには直径(D)2mm、高さ(K)8cmの塩化ビニール製の円柱を採用し、幅16.8cmの植生帯を流下方向に7m区間設置した。植生モデルは正方形格子状に配置し、配置間隔(S)はそれぞれ14mm(CASE RH), 28mm(CASE RM), 42mm(CASE RL)の3種類とした。この植生モデルを図2に示す。それぞれの植生モデルについて透水試験を行ったところ、透過係数は植生密生度の密なものから129, 290, 486cm/sであった。これより、植生モデルの密生度を表す単位体積あたりの遮蔽面積 λ と抗力係数 C_D の積 $C_D \lambda$ (以後植生密生度と呼ぶ)を求めると⁴⁾、0.130, 0.023, 0.008cm⁻¹となる。これら植生条件を表1にまとめる。路床勾配(i_b)を1/1000~4/1000の4通り、水深(H)を約4cmと6cmの2通り、植生密生度($C_D \lambda$)は3通りに変化させた24通りの実験条件を設定し、植生帯流入部から4.0~6.0mの区間でほぼ等流となるように下流端の堰を調節して実験を行った。流速は2成分(流下方向、横断方向)同時測定が可能なI型プローブ(直径8mm、高さ3cmの円筒型)を付けた小型電磁流速計を約半水深の位置に設置し、1測線当たり横断方向に11点これを流下方向に13測線にわたって測定した(各点20Hz, 1024個サンプリング)。

この測点の配置図を図3に示す。水深は、

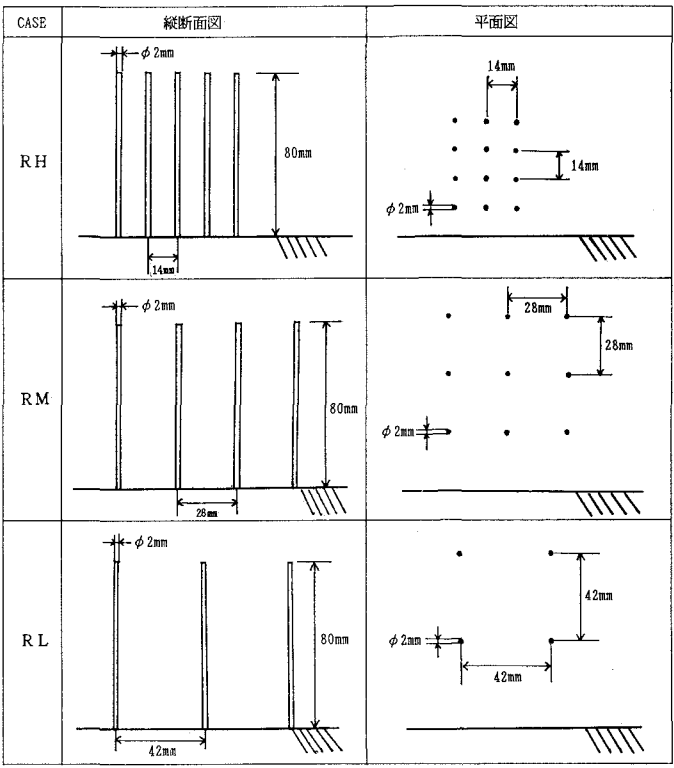


図2 植生モデル諸元

1測線横断方向に3点(-8, 0, 11cm),これを
流下方向13測線にわたって測定した。

表 1. 植生条件表

単位: cm, s

RUN	D	S	K_s	λ	$C_D \lambda$
RH	0.2	1.4	123	0.102	0.130
RM	0.2	2.8	290	0.026	0.023
RL	0.2	4.2	486	0.011	0.008

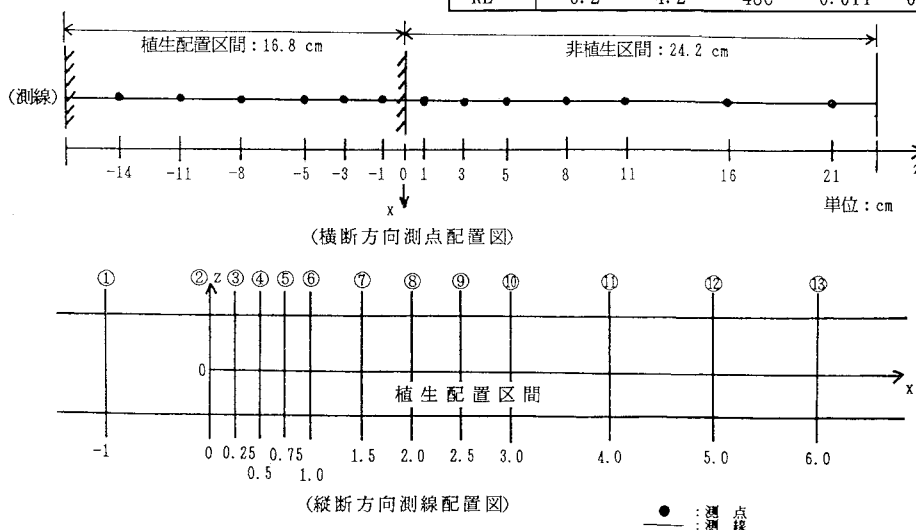


図 3 流速測定点配置図

3. 実験結果の概要

実測された水深(H), 主流速(u), 横断方向流速(w), Reynolds応力($-\overline{u'w'}$), 横断方向乱れ強度分布(w'_{rms})の流下方向変化を図4, 5に示す。ここで, 横断方向流速は主流速に比べて極めて小さいため実測値を用いず, 図6に示すように主流速分布の流下方向変化度から流量一定という条件のもとで連続式を用いて求める。水深は, 植生帯流入部で最大となり, 流下方向距離が進むにつれて徐々に減少していき約 4~6m付近ではほぼ一定(疑似等流)となっている。主流速分布は, 植生帯流入前の一定分布から流下方向距離が進むにつれて植生帯と非植生帯の流速差が顕著となり, 植生帯流入部より約2m下流でその分布形がほぼ安定し, 植生帯内流量の主流部への移動すなわち流量シフト現象がほぼ終了したことが伺える。このような現象は横断方向流速の流下方向変化からも判断できる。主流速分布から判断される流量シフト距離は約2m程度である。Reynolds応力分布は, 流れの充分発達した平衡領域では植生境界で極大値を持つ特性を有しているが, 図によると流量シフトが行われている区間(0~約 2m)は極めて小さな値を示しており, 流量シフトがほぼ終了した地点より下流では, 流下方向距離が進むにつれて徐々に極大値が発達していく傾向が伺える。横断方向乱れ強度もこれと同様の傾向を示すことが確認された。これらの結果から, Reynolds応力な

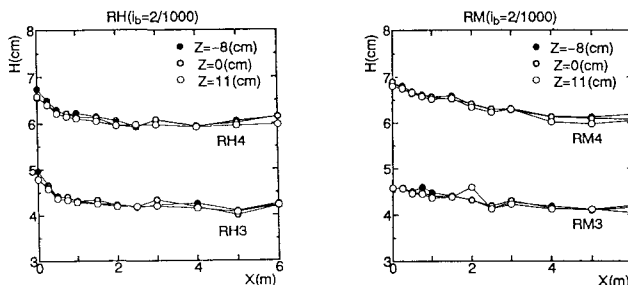


図 4 水深の流下方向変化図

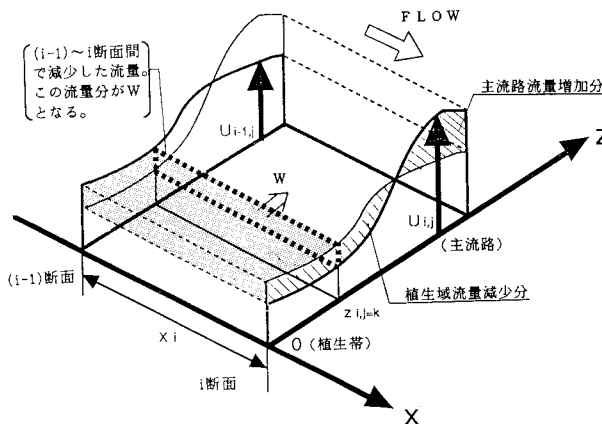


図 6 横断方向流速の算定定義図

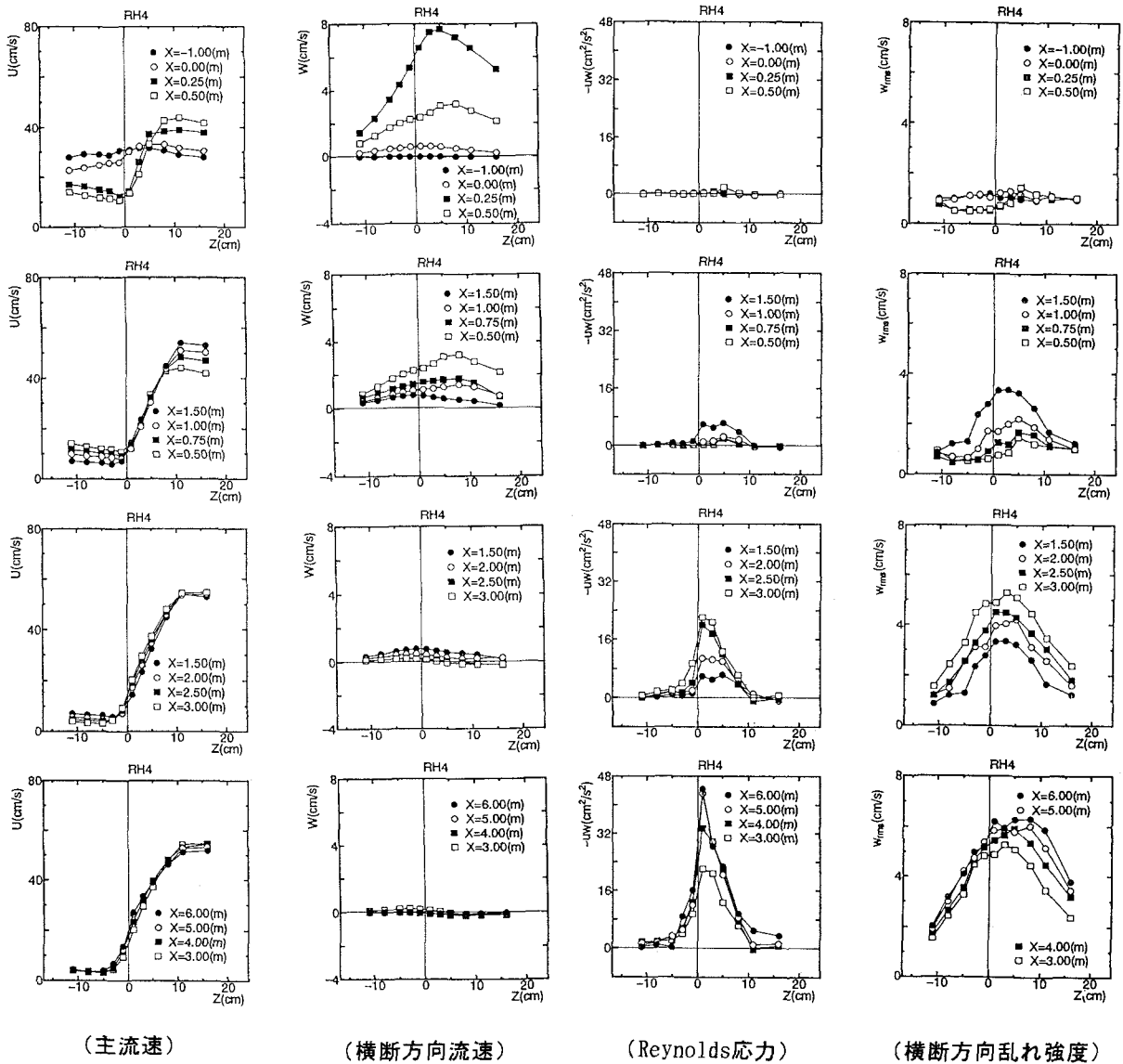


図5 各水理量の横断分布図

ど横断混合強度を表す水理量については、流量シフトが行われている区間では小さな値を示し、流量シフトが終了した地点より下流では徐々に発達する傾向が伺える。これより、遷移領域の変化特性をまとめると、図7に示すように流量シフト域、混合発達域により遷移領域が構成されている。ここで、横断方向流速、横断方向乱れ強度およびReynolds応力の植生境界値($z=1\text{cm}$)の流下方向変化を図8に示すが、図より図7で示した遷移領域の捉え方の妥当性が確認できる。

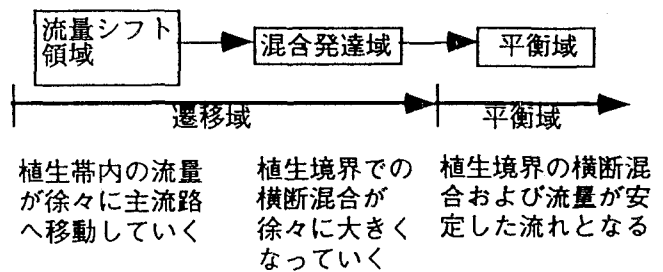


図7 遷移領域の変化特性

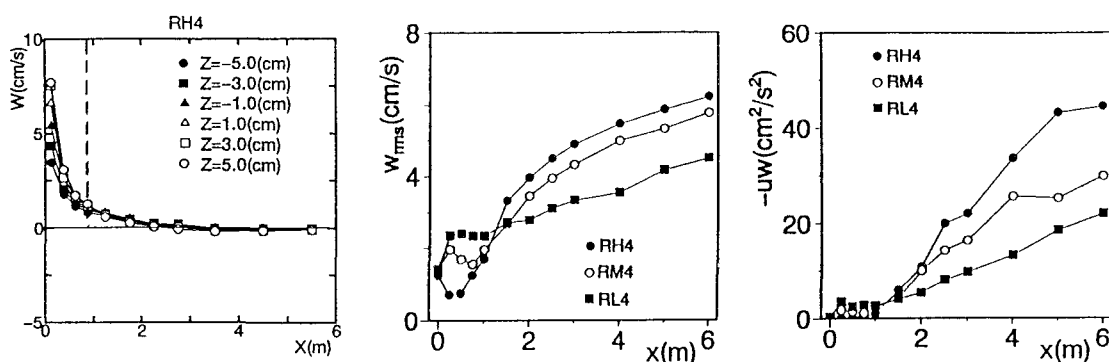


図8 植生境界での水理量の流下方向変化図

4. 流量シフト領域

遷移領域の流量シフト域における変化特性を整理するにあたり、流量シフトを代表する水理量として植生帯内流量(Q_s)に着目する。図8の横断方向流速の流下方向変化より、流量シフトは指数関数的に進行しているものと思われ、次式による指数関数近似を試みる。

$$\frac{Q_s - Q_{s0}}{Q_{s0} - Q_{se}} = \exp \left\{ - \frac{(x/H)}{\Lambda_{Q_s}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 Q_{s0} : 植生帯内流入直後の植生帯内流量、 Q_{se} : 平衡領域における植生帯流量、 Λ_{Q_s} : 流量シフト領域長を表す無次元パラメータである。上式を実験値に適用した結果を図9に示すと、実験値と計算値が合致しており、流量シフト現象がほぼ指数関数的に行われることが示唆できる。また、この適用結果より無次元パラメータ Λ_{Q_s} も得られた。植生条件、水理条件の代表的なパラメータとして植生密度($C_D \lambda$)、水深(H)およびエネルギー勾配(I)が挙げられ、これらの積 $C_D \lambda H I$ が植生流れを規定する重要なパラメータと考えられる。 Λ_{Q_s} とこのパラメータ $C_D \lambda H I$ の関係をプロットした結果を図10に示すが、図より Λ_{Q_s} は $C_D \lambda H I$ に対して一意的な関係にあるものと判断され、その関係式は最小二乗法によって決められた次式が妥当である。

$$\Lambda_{Q_s} = 2.80 (C_D \lambda H I)^{-0.21} \quad (2)$$

この Λ_{Q_s} は流量シフト領域長を評価する無次元パラメータである。すなわち、遷移領域における流量シフト領域と混合発達域の境界位置は Λ_{Q_s} と H の積 $\Lambda_{Q_s} H$ で与えることができる。横断方向流速の縦断変化図に $\Lambda_{Q_s} H$ を併示したが、 $\Lambda_{Q_s} H$ を流量シフト領域長と判断することの妥当性を示唆している。

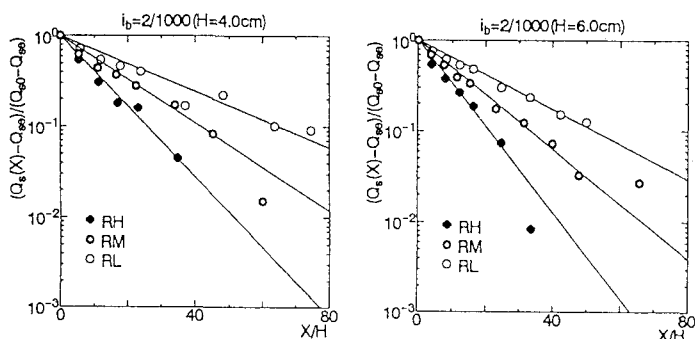


図9 植生帯内流量の指数関数近似図

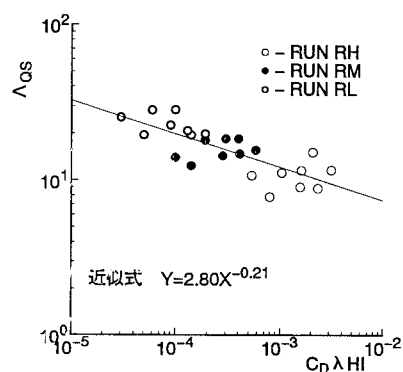


図10 $\Lambda_{Q_s} - C_D \lambda H I$ の関係図

5. 混合発達域

図 8に示した植生境界での横断方向乱れ強度、Reynolds応力の流下方向変化より、横断方向乱れ強度およびReynolds応力ともに流量シフト領域では一定値(Reynolds応力はほぼ零)を示し、流量シフト終了地点より下流では増加傾向を示すが、植生密生度が大きい方がより早く指数関数的に発達し、植生密生度が低い場合はやや遅れて線形的に増加する傾向を示している。また、実験ケースによっては水深が平衡域に達している流下方向距離6mの地点においても、横断方向乱れ強度、Reynolds応力がなお増加傾向を示すケースも存在しており、今回の測定結果から混合発達域における特性量の変化過程を容易に評価することは困難と思える。横断混合領域では、植生密生度により特性量の発達過程や強度が規定される傾向にあり、混合発達過程においても流量シフト領域同様、植生密生度から流れ場特性を同定する算定モデルの構築が期待される。

6. 野外実験結果概略

室内実験のみではなく、野外灌漑水路で疑似植生層を設置した流れの計測を行った。これにより、スケールの大きい流れでも横断混合等の植生水利特性が発生するかを検証した。実験に使用する野外水路として、金沢市内にある金浦用水(幅:1.5m, 深さ:1.0m, 直線区間:12m)を採用した。疑似植生層として直径6mm, 間隔10cmの格子状の金網を流下方向に10cm間隔で配置した鉄枠工(単体: 高さ50cm, 長さ: 150cm)を採用し(写真1参照), この鉄枠工を約15mの区間に設置した(写真2参照)。流速はI型プローブを付けた小型電磁流速計を用いて1測線当たり横断方向に14点, これを流下方向に5測線の測定を行った(各点20Hz, 2048個のサンプリング)。流速測定時の外観を写真3に示す。遷移実験は, 流速計を設置した測線より上流の鉄枠を取り除いてい

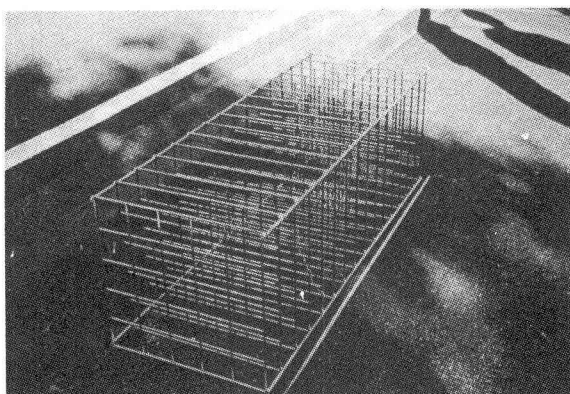


写真1 鉄枠工外観

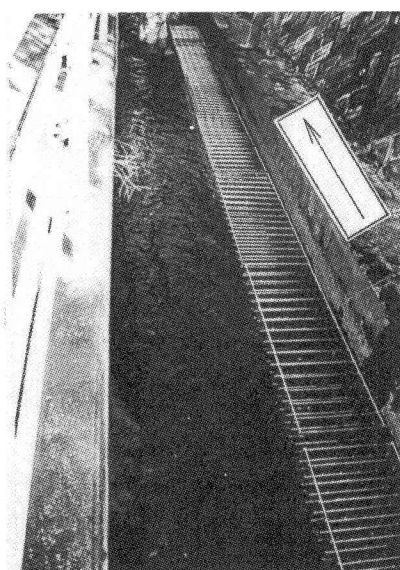


写真2 観測水路



写真3 流速測定方法

くことによって行った。実験によって測定された主流速，主流方向乱れ強度，横断方向乱れ強度，Reynolds 応力分布の流下方向変化を図11に示す。図より，室内実験同様，主流速分布の形状が徐々に変化し，Reynolds 応力等の横断混合も鉄枠工境界で徐々に発達していく傾向が確認できた。これより，Reynolds数の大きな流れ場すなわち実河川においても大規模な横断混合の発生が期待できることから，植生による濁質除去対策の実用性が検証されたことになる。

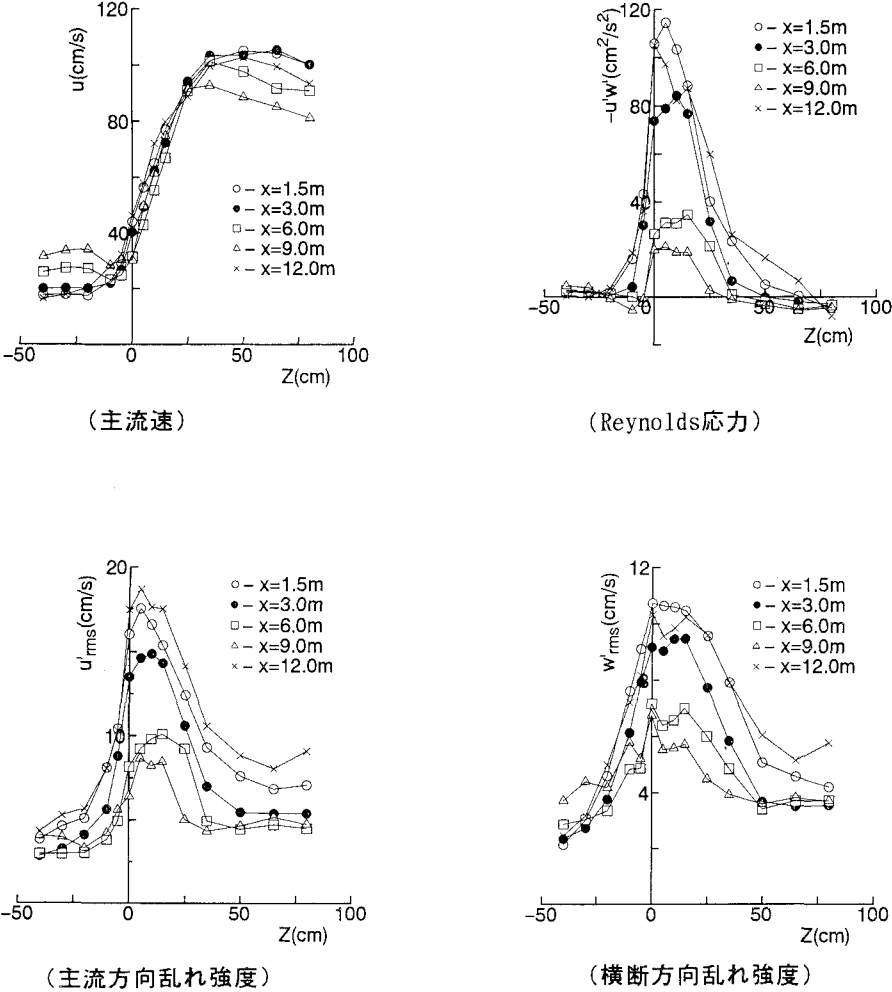


図 1 1 野 外 観 測 結 果

7. あとがき

本研究では，植生流れの遷移領域は流量シフト過程と横断混合発達過程の2つの過程が構成されることを確認するとともに，植生密度，水理条件を変化させた実験から流量シフト領域長を評価する無次元パラメータの同定方法を構築した。また，横断混合発達過程も植生密度により影響されることが示唆された。さらに野外水路による実験により，Reynolds数の大きな流れ場においても植生水理特性が顕著に出現することが確認された。今後は，横断混合発達過程について更に詳細な検討を加えていくとともに，平面2次流れの数値解析⁵⁾などを積極的に活用し，遷移領域の流れ構造を解明していくつもりである。また，野外実験を有効に活用し，室内実験では測定困難な濁質効果を観測する実験等を行い，植生による濁質除去対策工法の実行可能性を検討していく。本研究を遂行するにあたり，建設省金沢工事事務所調査第一課・清水晃課長，辻内昭係長，京都大学環境地球工学北村忠紀助手から助言を頂いた。記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 例えば, 福岡・藤田:洪水流の横断方向流速がもたらす付加的抵抗の評価,
第33回水理学講演会論文集, pp. 301-309, 1989.
- 2) 岡田・本橋・藏重・北村・辻本:植生帯による横断混合促進を利用した濁質の側方除去,
第49回年次講演会論文集, II-180, pp. 360-361, 1994.
- 3) 堀・中川・村上・島村:植生帯流入部での流れの遷移過程と平衡部での乱れ特性について,
第49回年次講演会論文集 II-186, pp. 372-373, 1994
- 4) 清水, 辻本, 中川, 北村:直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究,
土木学会論文集No. 438/II-17, pp. 31~40, 1991
- 5) 清水・辻本:植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析,
第39回水理学講演会論文集, pp. 513-518, 1995.