

植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析

Numerical Calculation on Depth-Averaged Flow Field in a Straight Stream with Vegetation Zone

清水義彦*・辻本哲郎**

By Yoshihiko SHIMIZU and Tetsuro TSUJIMOTO

The flow with vegetation zone is rather two-dimensional, and depth-averaged analysis is available. Particularly in order to analyze the flow properties in transitional reach from the entrance of the reach with vegetation zone to the equilibrium, numerical analysis with 1-equation turbulence model is developed. Once the newly introduced parameter is evaluated by comparing the calculated result with the data of the equilibrium reach, its value is still available for analyzing the transitional reach. The present method is available to predict the flow with vegetation zone for close-to-nature river improvement.

Keywords: *depth-averaged flow analysis, flow with vegetation zone, 1 equation turbulence model, numerical analysis, river environments*

1. まえがき

河川環境をより自然なすがたで整備しようという機運が高まってきている最近、植生帯を伴う流れや土砂輸送、地形変化の問題がクローズアップされている。流れの構造の把握^{1)・2)・3)}に引き続いて浮遊砂の輸送・堆積^{4)・5)・6)}、掃流土砂の横断方向フラックスによる縦筋の形成、混合砂の分級縦筋⁷⁾など興味深い現象が研究対象となっている。さらに積極的に植生を用いた「多自然型河川工法」を展開していこうとするなら、植生帯による流れや横断混合を積極的に制御することが考えられ、植生帯を伴う流れの予測は工学的にも重要な課題となってきた。ところでこれまでの研究のほとんどは植生帯を伴う流れの充分発達した平衡場の議論であり、平衡に至るまでの遷移過程を研究したもの⁸⁾は少ない。植生帯を伴う区間への流入部では流量の主流部へのシフト、植生帯部での空間的減速、主流部の加速と流れの空間的变化が複雑でそれに伴ってさまざまなタイプの流砂・河床変動が出現すると考えられ、こうした遷移過程での流れの把握は重要である。本研究では、著者らが植生（疎な離散の障害物）を伴う流れの計算において提案している空間平均された均質な場として近似し、抗力にかかわる運動量の吸い込みとその仕事量に相当する分の乱れエネルギーの増加^{9)・10)}を一方程式モデルで考慮した取り扱いを、植生帯を伴う流れの平面2次元解析に適用、主として植生帯を伴う流れの遷移過程に着目した検討を行った。著者らはこれまで等流区間の解析でk-εモデル、

* 正会員 工博 Visiting Researcher, HIW, ETH-Zurich (群馬大学助手, 工学部建設工学科)

(〒365 桐生市天神町1-5-1)

** 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)

代数応力モデルの適用を図ってきたが、ここでは遷移区間を扱うということで乱流モデルは一段レベルダウンさせた1方程式モデルで扱った。灘岡・八木¹¹⁾が水平大規模渦を計算する際、彼らの言うSDS乱れをこうしたモデルで扱っているが、ここでは植生帯を伴う流れに誘起される組織的変動も含めて1レベルのモデルで扱う。

2. 流れの基礎式

開水路の路床上に植生粗度が一定幅で縦断方向（流下方向）に帯状に存在する場合を想定する。植生が非水没の場合、流れ場は十分に2次的で^{3), 10)}、水深スケールでの構造は平均化し流下方向(x)、水路横断方向(z)だけの变化を考えればよい平面2次元流としての取り扱いが有効である。

植生を含む流れ場を空間平均した流れの基礎式を平面2次元のフレーム書くと以下のようである。

$$\frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial z}(hW) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h U^2 - \rho h v_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h W U - \rho h v_t \frac{\partial U}{\partial z} \right) \\ &= -\rho g h \frac{\partial(h+Z_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h v_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h v_t \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \rho \left(C_f + \frac{1}{2} C_D \lambda h \right) U \sqrt{U^2 + W^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h W U - \rho h v_t \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h W^2 - \rho h v_t \frac{\partial W}{\partial z} \right) \\ &= -\rho g h \frac{\partial(h+Z_b)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h v_t \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h v_t \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \rho \left(C_f + \frac{1}{2} C_D \lambda h \right) W \sqrt{U^2 + W^2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、(U,W): 流下・横断方向の平均流速（水深平均）、h: 水深、 ρ : 水の密度、 Z_b : 基準面からの路床高、 C_f : 路床の摩擦抵抗係数、 C_D : 植生要素の抗力係数（水深平均流速を代表流速として定義）、 λ : 植生密生度（流体の単位体積当たりの植生要素による遮蔽面積（流れに対する投影面積）で定義）、また v_t : 渦動粘性係数（水深平均）である。

一方程式モデルを採用するとし、乱れエネルギー k （水深平均）についての輸送式は次のように書ける。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h U k - \rho h \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h W k - \rho h \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_k + P_{kv} + h C_{Rk} (F_x U + F_z W) - \rho h C_\epsilon \epsilon \quad (4)$$

ここで P_k : 乱れエネルギーの生成率（単位面積当たり）で、

$$P_k = \rho h v_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

のように速度勾配と関係づけられる。実際の流れは路床摩擦があるため鉛直方向の速度勾配に関係する乱れエネルギーの生成があるはずだが、平面流解析ではこれが表せないで、この分を P_{kv} と表し、次のように摩擦速度 u_* に関係づけたモデル（Rastogi & Rodi¹²⁾）を採用する。

$$P_{kv} = \rho C_k u_*^2 \quad ; \quad C_k = 1/\sqrt{C_f} \quad (6)$$

モデル定数 C_k についてはRastogi & Rodi¹²⁾にならって決められるものとした。

式(4)ではこうした乱れエネルギーの生成項に加え植生粗度に作用する抗力(F_x, F_z)の反力のなす仕事は乱れエネルギーに変換された後散逸するものと考え、これを乱れエネルギーの付加的な生成とみなしている。ここで導入されたモデル定数 C_{Rk} は著者ら^{9), 10)}の他の乱流モデルによる解析で用いられたものと本質的に変わらない（ $C_{Rk}=1.0$ とした）。なお植生粗度に作用する抗力の反力は水の単位体積当たり次のように表される。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D \lambda U \sqrt{U^2 + W^2}; \quad F_z = \frac{1}{2} \rho C_D \lambda W \sqrt{U^2 + W^2} \quad (7)$$

一方、モデル定数 C_ϵ には標準値を用いる（ $C_\epsilon=1.0$ ）。

1方程式モデルでは渦動粘性係数は、次のように乱れエネルギー k のみから評価される。

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon}; \quad \epsilon = \frac{C_{ed} k^{3/2}}{L} \quad (8)$$

ここに ε : 乱れエネルギーの散逸率, L : 乱れの長さスケール, C_μ, C_{ed} : 乱流モデル定数で通常用いられている標準値とする ($C_\mu=0.09, C_{ed}=0.17$). ここで乱れの長さスケール L を評価しなければならず, 水深に規定されるものと考えて,

$$L = \alpha h$$

とおく. α はモデル定数であり, その数値については計測結果に対する再現計算により同定されることになる. 灘岡・八木¹¹⁾は彼らの言うSDS乱れについて上記のような一方程式モデルを用い(大規模渦は非定常直接計算をする) α を決定している. 植生帯周辺に誘起される組織的変動域は水平的広がりを持つものとは言え, 変動量相互の相関を調べた実験結果³⁾などから現象は水深に規定されたものと考えてのが妥当である.

基礎式をコントロールボリューム内で積分したのち, スタッガード格子を用いて離散化し, SIMPLE法より圧力場(水深)と流速場を求める. 植生帯内では式(8)で定義される形状抵抗を与え, 植生帯外ではそれをゼロとする. 境界条件として上流端で流入流量, 下流端で水位を与える. また, 側壁の流速境界条件はスリッパ条件を課し壁関数法を適用した. また, そこでの乱れエネルギーの設定には局所平衡の条件を用いている.

4. 計算結果と計測結果の比較

計算を行なうにあたって, 始めに式(10)で定義される乱れの長さスケール(L)の係数 α を決めなければならない. このため実験水路において充分発達した平衡域での主流速の流速分布, および横断方向のReynolds応力分布の計測値が計算値と対応するようにして α を同定する. 図1, 2は $\alpha=0.4$ として計算した主流速横断分布 $U(z)$ と横断方向レイノルズ応力分布 $-\overline{uw}(z)$ に計測値をプロットしたものである. 計測された実験ケースB1³⁾ ($\lambda=0.037\text{cm}^{-1}$, 小型電磁流速計による)では, 水路幅40cmのうち植生帯幅12cmをもつ直線水路の疑似等流区間において2成分の電磁流速計を用いて計測した(等流区間水深 $h_0=4.28\text{cm}$, 路床勾配 $i_b=0.00170$, 断面平均流速 $U_{ave}=27.6\text{cm/s}$). これらの図より計算された主流速横断分布は計測値の傾向を良く再現しており, 同時に横断方向Reynolds応力分布においても計測値の傾向とうまく対応している.

このようにして(平衡場で)決めた α の値を用いて, 次に植生帯の始まりから平衡に至る遷移区間について計算値と計測値を比較した. 計算に対応する実験ケース(Kyoto 3, $\lambda=0.01\text{cm}^{-1}$)は京都大学での実験で, 植生帯を水路半幅, 縦断方向に約8mにわたって設けた直線水路において下流端堰を調節し植生帯区間で疑似等流になるよう設定されている. 計測には2成分ホットフィルム流速計が用いられた. 図3は主流速横断分布の縦断方向変化について計測値と計算値を比較したもので(x は植生帯の始まりを原点とした縦断方向座標, $z=0\sim 20\text{cm}$ が植生帯), 急変流区間($x=1.0\text{m}$ までの区間に相当)での計測値にややばらつきがあるものの両者の対応は良好である(図3~5において折れ線で結んであるのが計算結果, 白ぬきプロットが実験値). また, 主流速分布から判断される遷移距離はほぼ3.0m程度である. 図4に横断方向のReynolds応力の計測値と計算値を比較した. 急変流区間, とくに $x=1.0\text{m}$ までのReynolds応力の計測値について計算値は過大評価している傾向がある. この傾向は著者らの鉛直2次元植生場の遷移場の計算⁷⁾においても同様に見られ, 定常計算による標準型 $k-\varepsilon$ モデルの問題を示唆している. しかし, $x=1.5\text{m}$ 以上での遷移区間では先に示した主流速分布と同様, Reynolds応力分布についても計算値と計測値の対応は良好である. また, 図5には

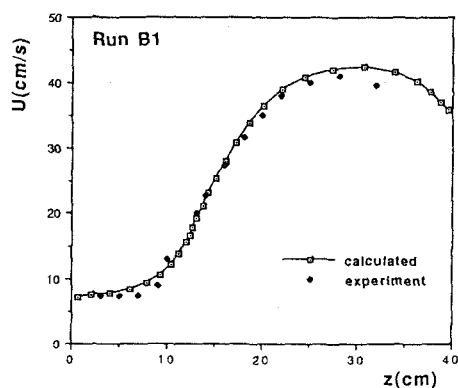


図1 平衡域での主流速分布

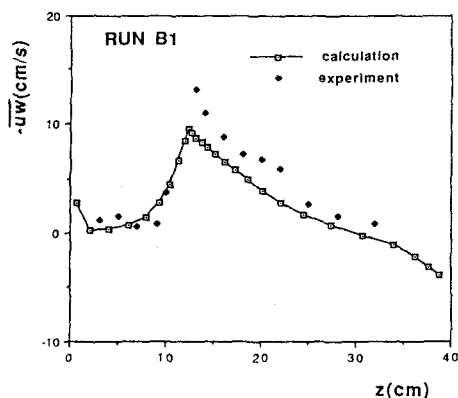


図2 平衡域でのReynolds応力分布

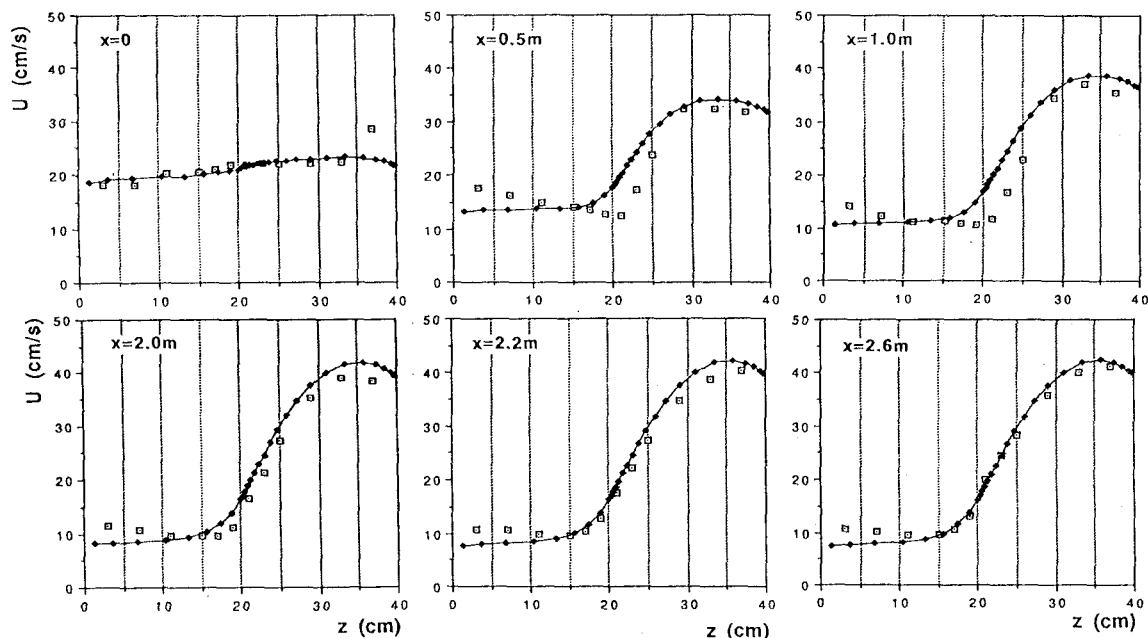


図3 遷移域での主流速分布の変化

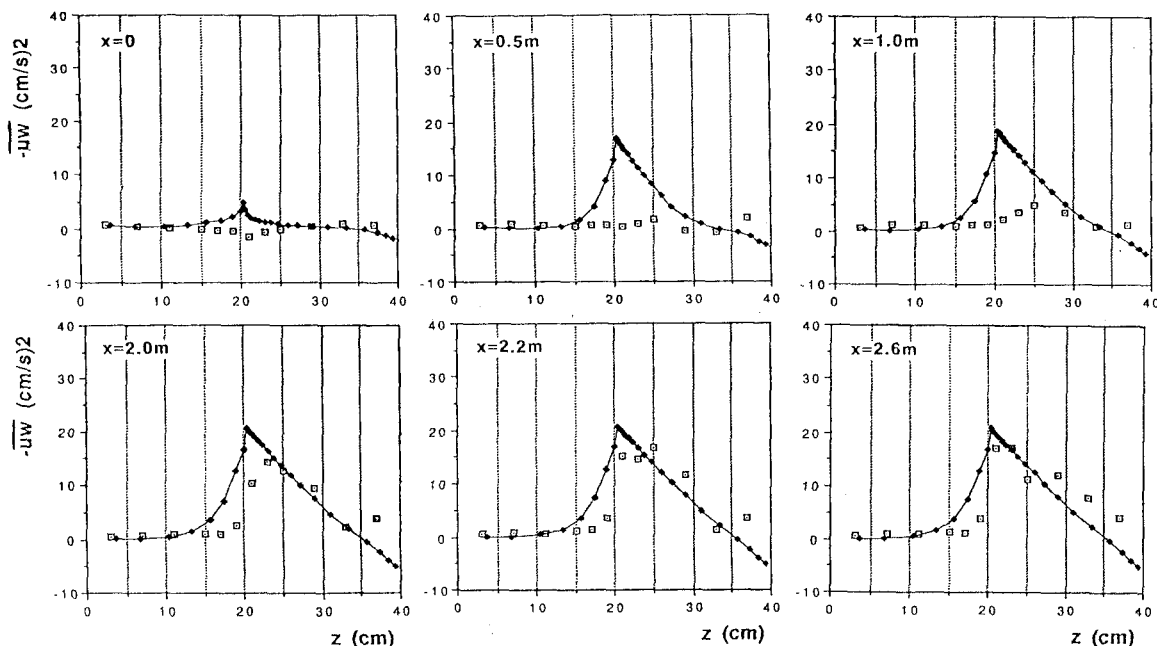


図4 遷移域でのReynolds応力分布の変化

$x=2.0\text{m}$ までの横断流速 (W) の分布を示した ($x>2.0\text{m}$ では W はほぼゼロ)。 $W>0$ の流速は植生帯内から外に向う流速成分を示し、非植生域への流量集中が認められる。しかも、横断流速成分は植生帯境界 ($z=20\text{cm}$) において断面内最大値をとることが計算から認められる。図6に植生帯境界での横断方向流速の流下方向変化について計算結果と実験結果を比較したが、両者の対応は良好と言える。なお図7には計算された水面形を示した。植生帯を伴う区間への流入前から水面上昇が見られ、植生帯を伴う区間の始まりの断面で水深が最大となりその後平衡域等流水深にむかって徐々に減少する。植生帯境界では水面上昇の減少が他の部分よりも遅れる特徴がある。

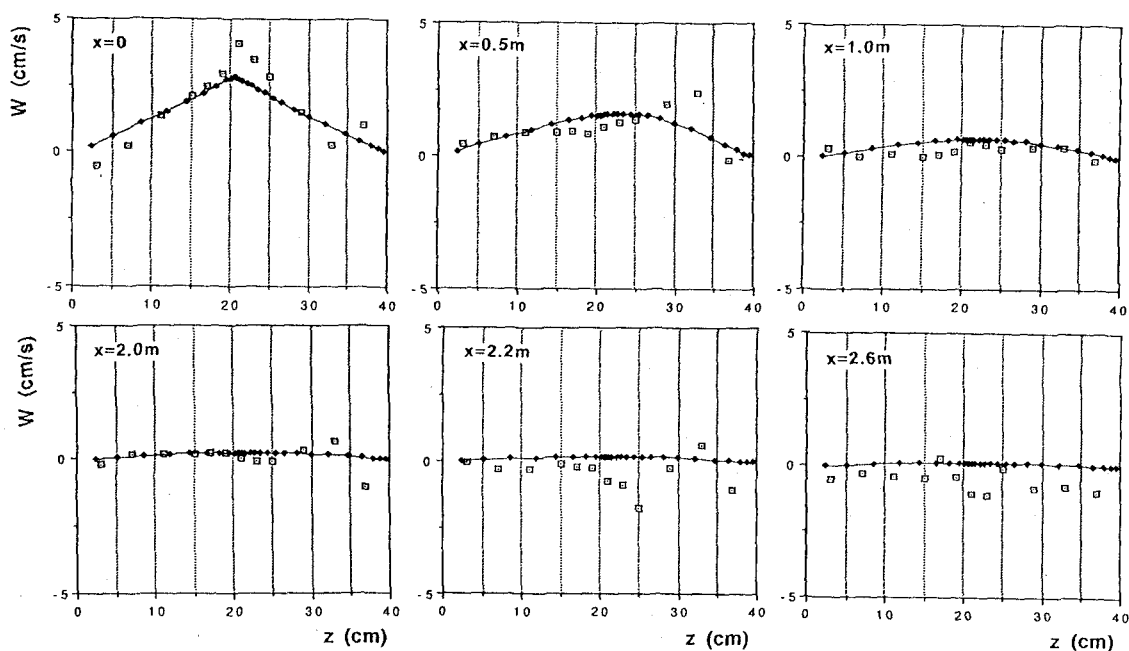


図5 遷移域での横断方向流速分布の変化

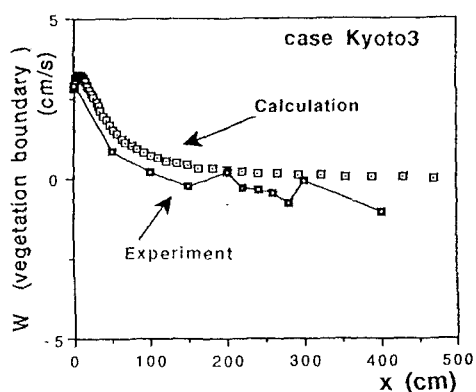


図6 植生帯境界での横断方向流速の縦断方向変化

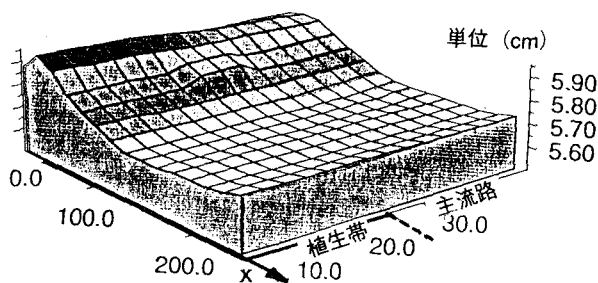


図7 植生帯を伴う流れの水面形

以上より、同定された α の値(0.4)をモデル定数とした本計算は平衡に至るまでの遷移区間の植生流れをほぼ再現できる有効な方法であることが示された。

4. 植生帯を伴う流れの遷移区間での特性

上記のように本論文で提案した方法で植生帯を伴う流路での植生帯を伴う区間への流入部から平衡域に至る過程での流れの変化特性を計算によって検討した。ここでは路床勾配一定($i_b=1/500$)の実験水路(幅40cm, 植生帯幅20cm)で下流端($x=5.0\text{m}$)での植生帯を伴う流れの平衡域での水深が一定($h_0=5\text{cm}$)になるよう流量を設定, 植生帯の密生度を数通りに変えて(表1参照)計算を実行した。図8は主流速 U ,

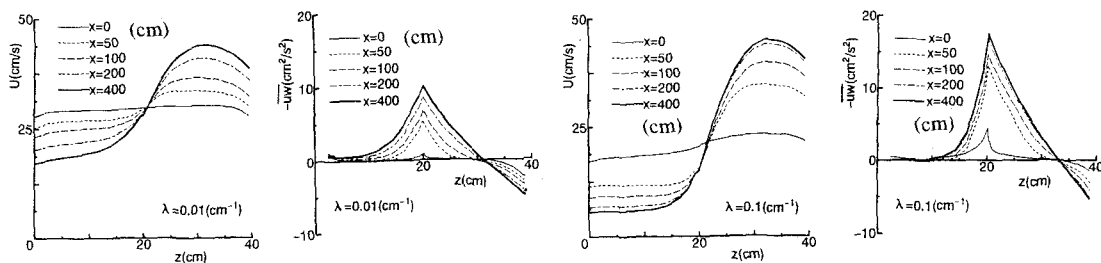


図8 主流流速及びReynolds応力の横断方向分布形の流下方向変化

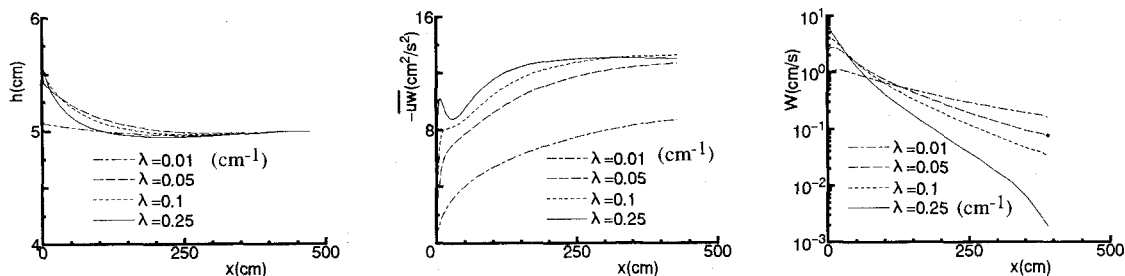


図9 植生帯境界での横断方向流速、Reynolds応力及び水深の流下方向変化

Reynolds応力 $\overline{-uw}$ の横断方向分布形の流下方向変化を示したもので、図9には植生帯境界での横断方向流速 W 、Reynolds応力 $\overline{-uw}$ 及び水深 h の流下方向変化を示したもので、植生密度 λ の違いによる遷移過程の変化（平衡域での水深、路床勾配一定の条件で）が示されている。図より、植生密度が大きいほど速やかに流量シフトが完了（その分、植生帯流入部での横断方向流速値は大きくなる）するとともに、植生域、非植生域間の混合現象もすばやく発達することがうかがえる。また密度 $\lambda=0.25\text{cm}^{-1}$ のケースでは、植生帯流入部でReynolds応力のオーバーシュート現象がみられるのが特徴である。

表1 計算条件

RUN	$\lambda (\text{cm}^{-1})$	$Q (\text{cm}^3/\text{s})$
1	0.01	6000
2	0.05	4800
3	0.10	4400
4	0.25	4000

5. あとがき

本研究では植生帯を伴う流れについてとくに植生帯を伴う区間に流入してから平衡域へ至る遷移過程を的確にしかもある程度簡便に記述することを目的に平面流解析の適用について検討した。乱流モデルとしては1方程式モデルを採用して簡略化し新たな数値定数を導入したが、平衡域の実験結果を用いて同定された値を用いて遷移域の平均流特性が充分記述できることが明らかになり、若干の予測計算で遷移過程の特性を調べた。なお植生帯を伴う流れには水面変動を伴う低周波変動が重畳しており³⁾、現象によってはこうした側面の適切なモデル化が必要になってくる⁷⁾ことは言うまでもなく、本解析で与えられる特性と組織的変動が支配する側面とのカップリングを今後考えねばならない。

本研究を進めるにあたって、実験や計算結果の整理について京都大学工学部北村忠紀助手、群馬大学大学院小山真史君、金沢大学大学院泉倫光君の協力を得た。本研究の一部は著者の一人（清水）がスイス連邦工科大学チューリッヒ校、水力学・水資源研究所（IHW, ETH-Zürich）滞在中（日本学術振興会派遣研究員）に行なったもので本研究に理解・助言をいただいたT. Dracos教授、A. Müller博士に謝意を表す。また、住友財団環境研究助成（代表：辻本）を受けたことを記して謝す。

参考文献

- 1) 福岡・藤田：洪水流に及ぼす河道樹木群の水理的影響，土木研究所報告，第36巻，pp.259-264，1992。
- 2) 池田・太田：側岸部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文集，No.443/II-18，1992。
- 3) 辻本・北村：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究，土木学会論文集，No.491/II-27，1993。
- 4) 泉・池田・伊藤：流水抵抗及び浮遊砂濃度に及ぼす植生の効果，第33回水理講演会論文集，1989。
- 5) 池田・太田・長谷川：側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響，土木学会論文集，No.447/III-19，1992。
- 6) Tsujimoto, T. and Shimizu, Y. : Flow and suspended sediment in a compound channel with vegetation, *Proc. 1st Int. Sym. Habitat Hydraul.*, Trondheim, Norway, 1994。
- 7) 辻本・北村・中川：側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級，土木学会論文集，No.527/II-33，1994。
- 8) Tsujimoto, T. : Mixing process in open channel with vegetated zone, *Proc. Int. Sym. Environ. Hydraul.*, Hong Kong, A.A. Balkema Pub., Vol.1, 1991。
- 9) 清水・辻本・中川：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No.447/II-19，1992。
- 10) 清水・辻本・中川：植生帯を伴う流れ場の数値計算，水工学論文集，第36巻，1992。
- 11) 灘岡・八木：SDS & 2DHモデルを用いた開水路水平せん断流の数値シミュレーション，土木学会論文集，No.473/II-24，1993。
- 12) Rastogi, A.K. and Rodi, W. : Predictions of heat and mass transfer in open channels, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.105, HY3, 1979。