

側岸部植生密度の変化が 開水路横断方向運動量輸送に及ぼす影響

EFFECT OF THE CHANGE OF BANK VEGETATION DENSITY ON MOMENTUM TRANSPORT IN OPEN CHANNEL

中矢哲郎¹・池田駿介²・戸田祐嗣³

Tetsuo NAKAYA, Syunsuke IKEDA and Yuji TODA

¹正会員 修士(農) 独立行政法人 農業工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1-6)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

³正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

A laboratory experiment was performed to know the relationship between the exchange of fluid momentum generated by organized horizontal vortices at the boundary of bank vegetation and the main channel. It was found that the lateral momentum transport takes a peak value at a certain vegetation density which is much larger than the density of actual reed field.

A series of numerical computations employing SDS&2DH turbulence model was performed by varying the vegetation density to identify the effect of the density on the lateral momentum transport. The model can predict the temporary-averaged flow field and the Reynolds stress at the boundary of bank vegetation fairly well.

By using the results of the experiments and the computation, a semi-empirical equation for relating the vegetation density and the lateral momentum transport was proposed.

Key Words : vegetation, turbulent shear flow, horizontal vortex, Reynolds stress, SDS&2DH model

1. はじめに

ヨシやマコモなどの抽水植物群が水路側岸に存在する流れ場には, 大規模水平渦が発生し植生帯域への浮遊砂堆積を促進することが知られている。これまでにこの大規模渦に関する研究は, 発生要因に関する研究や数値計算上における現象の再現(例えば池田ら¹⁾, 2), 3), 4) 福岡ら⁵⁾, 木村・細田⁶⁾) に焦点があてられてきた。今後は植生の有する浮遊砂を堆積させる機能を利用して, 湿原やため池, 水田への浮遊土砂やそれに混入する栄養塩の堆積を抑制することに応用する研究が望まれる。現地に植生帯を植栽した際の浮遊砂捕捉効果の概念は図-1 に示す通りである。

このように植生を現地に植栽する場合, 流れを規

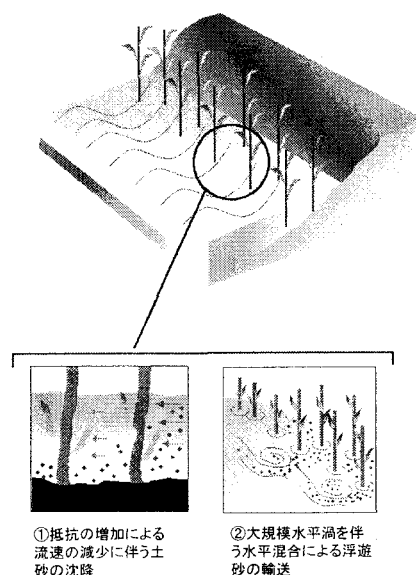


図-1 植生の浮遊砂捕捉効果

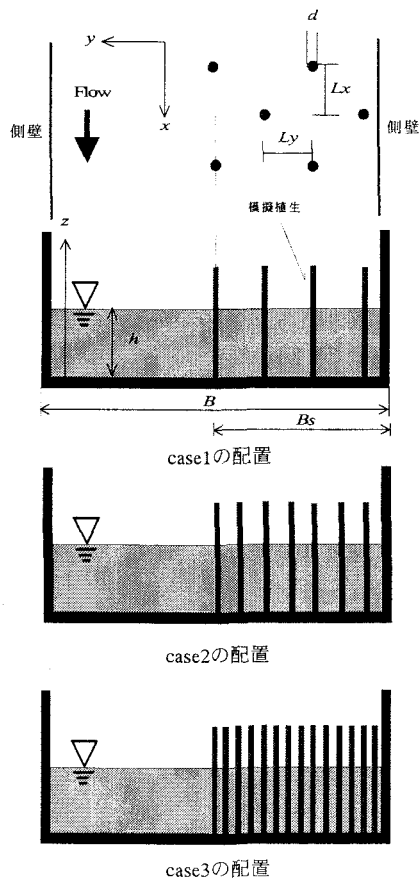


図-2 実験水路の概要と記号の定義

定する重要なパラメータの一つは植生の密生度(以下に植生密度と称す)であるが、この植生密度を系統的に変化させた水理模型実験は十分に行われておらず、植生密度と流れや土砂輸送との関係は明らかにされていない。この関係が明らかになればヨシの密生度として知られている 100~200 本/m² が流れと浮遊砂輸送に及ぼす影響も明らかになることが期待できる。

このような背景に基づき、植生による流れおよび浮遊砂輸送の制御を現地へ適用するための第一歩として、植生密度と運動量輸送の関係を水理模型実験により明らかにする。さらに大規模渦の再現性が高く現場への適用が期待される SDS&2DH モデルを用いた数値シミュレーションにより流速場、乱流統計量の再現性について検討を行う。これらの結果より植生密度と運動量輸送の関係を表す算定式を提案する。

2. 実験概要

(1) 実験装置及び実験方法

実験水路は東京工業大学の長さ 15m、幅 40cm の

表-1 実験条件

計算 ケース	水路床 勾配	水路幅 B (m)	平均水深 h (cm)	植生幅 B_s (m)	植生設置 間隔 L_x, L_y (m)	植生 直径 d (m)	植生密度 λ (m ⁻¹)
case1	0.001	0.39	0.04	0.2	0.06	0.01	0.69
case2	0.001	0.39	0.04	0.2	0.03	0.01	2.78
case3	0.001	0.39	0.04	0.2	0.015	0.01	11.11

表-2 計算条件

植生設置 間隔 (m)	植生密度 λ $d/(L_x \cdot L_y)$	実験 ケース	計算領域 (cm)		計算格子幅 (cm)		時間 ステップ Δt	境界条件
			x 方向	y 方向	Δx	Δy		
0.008	39.06		400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.015	11.11	case3	400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.03	2.78	case2	400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.041	1.49		400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.06	0.69	case1	400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.09	0.31		400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.11	0.21		400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.15	0.11		400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界
0.3	0.03		400	39	1.0	1.0	0.0005	周期境界

循環式可変勾配水路を用いた。実験水路の概要、記号の定義を図-2 に示す。単断面の直線水路片側に木製円柱を千鳥状に設置することで写真-1 に示すような側岸に植生帯を有する開水路を表現した。流下方向には植生帯が十分長く繁茂し疑似等流が仮定できることを想定した。植生密度は木製円柱間隔を変化させることにより調整した。植生密度 λ は (流下方向への抵抗体の投影面積) / (抵抗体が占める空間の体積) より、 $\lambda = d/L_x L_y$ で与えられる。ここで d , L_x , L_y の定義は図-2 に示す通りである。

測定は、まず流量、下流堰高を調整し設定した等流水深になるようにし、流れが平衡に達したと判断される最上流端から 7m 付近の断面で横断方向に 1cm 間隔で 6 割水深点の流速計測を行った。

流速の測定には 2 成分アルゴン・レーザー流速計 (TSI 社製) を用いた。レーザー光を水路上方より通過させるため水面変動の影響を受けないように、3mm 厚の亚克力板を表面張力で水に接するように設置した。壁面付近の流況はピトー管またはプロペラ流速計により測定した。大規模渦の通過に伴う水面変動の測定には容量式波高計を用いた。水深、流速共に 100Hz で 8192 データを採取した。



写真-1 対象とする流れ場

(2) 実験条件

実験条件を表-1 に示す。植生密度を低密度から高密度に系統的に変化させ、その他の水理条件は一定とした case1 から case3 を設定した。

3. 数値シミュレーションの概要

(1) モデルの選定

計算モデルとしては浅水流の乱流モデルとして灘岡・八木ら⁸⁾により開発された SDS&2DH モデル (subdepth-scale & 2-D horizontal) を用いた。このモデルの利点として、(1)これまでの平面渦の解析に多く用いられてきた経験的 0 方程式モデルに比較すると乱流構造がシンプルにかつ合理的に説明できる、(2) 乱れの生産項を発生要因毎にモデル化するため改良が比較的容易である、(3)平面二次元モデルの枠内で計算するため実用的である、などが挙げられる。

(2) 計算手法、初期条件、境界条件、計算条件

SDS&2DH モデルについての基礎方程式系等は既に発表されているので文献を参照されたい。^{1), 2), 3), 8)}

基礎方程式は有限差分法により離散化し、計算は、金子ら⁹⁾の潮流計算に用いられた ADI 法を植生を有する開水路流れに適用できるように修正したものを用いた。

初期条件は水面勾配 0 を与え、下流端の水位を微小速度で下げ、流れがほぼ定常等流になったところで、上流端の流速値に最大流速の 10% の擾乱を与えた。このとき上下流端境界には周期境界条件を与えた。壁面境界条件は基本的には slip 条件を採用するが、壁面の影響が無視できない場合は側壁の摩擦を表す関数より得られる値を壁面に近い第一格子点

に与えることで近似した。今回はダルシー・ワイズバッハの摩擦損失則を変形した次式を用いた。

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = \frac{1}{\sqrt{8}} \frac{U}{U_*} \quad (1)$$

ここで、摩擦損失係数 f_b にはブラジウスの実験公式である $f_b = 0.3164 R_e^{-1/4}$ を用いた。

計算条件は表-2 に示す。実験条件である case1 ~ case3 を行った後、幅広い植生密度のケースについて計算を行った。

4. 結果と考察

(1) 水深平均流速の実験値と計算値の比較

図-3 に横断方向の主流速分布の数値計算結果と実験結果の比較を示す。

計算における時間平均値は擾乱発生後、渦が流下方向に十分発達した計算開始後 150 秒から 200 秒の 50 秒間について平均した値を用いた。

実験値 (○), 計算値 (●) とともに、植生の境界近傍で流速の急激な低下がみられる。これは従来から知られているように大規模渦の発生に伴う横断

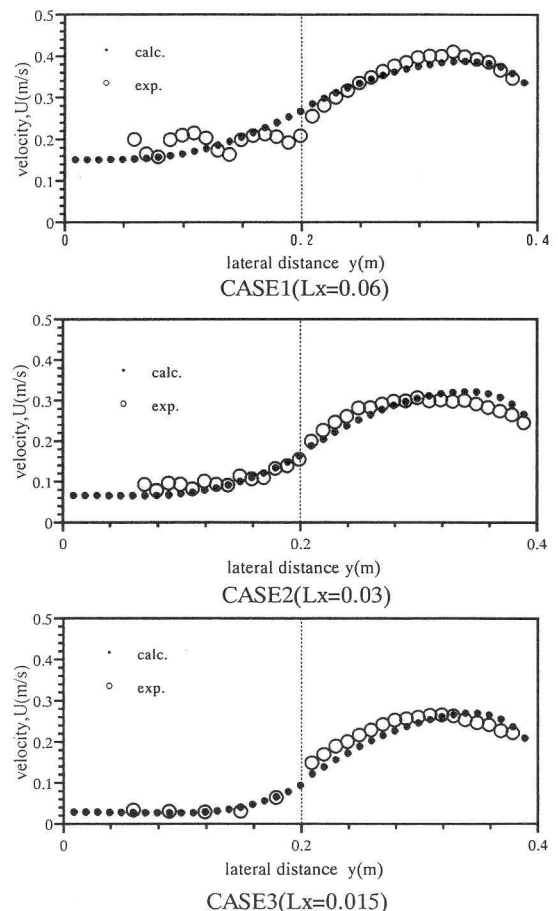


図-3 横断方向の時間・水深平均主流速分布

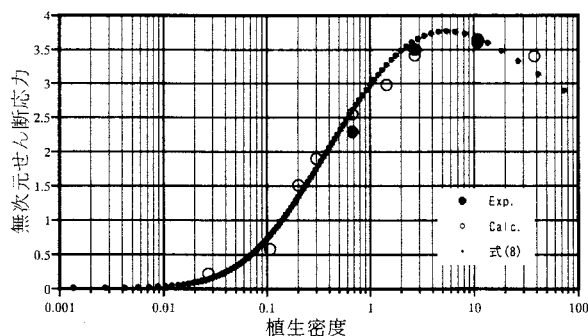


図-4 無次元せん断応力と植生密度の関係

混合の増加により抵抗が増加し植生帯境界付近の流速が減少していることを示している。

主流速の最大値は非植生領域の中心線よりやや壁面側に現れおり、このことを計算でも再現している。このように壁面にいたるまでの分布形を正確に再現していることがわかった。これらの結果より、植生の抵抗力の表示として従来から用いられてきた一本一本の抵抗力を空間的に平均した形で与える形式が、広範囲の植生密度に対し適用できることが明らかになった。

(2) 境界せん断応力と植生密度の関係

植生領域と非植生領域の境界におけるレイノルズ応力を、ここでは境界せん断応力と呼ぶことにする。この境界せん断応力は境界での運動量輸送効果を表し土砂の輸送を考える上で重要な水理量である。実験における境界せん断応力は 100Hz でサンプリングした 8192 個の各瞬間流速と平均流速の差を x, y 方向について求め、その積の時間平均として求めた。計算の上での境界せん断応力は大規模渦成分と、モデル化された水深スケール以下の乱れ成分を合計し次式のように算定した³⁾。

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = -\overline{u'v'} + \varepsilon_y \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2)$$

ここで $u' = \tilde{u} - u$, $v' = \tilde{v} - v$ で、 ε_y は横断方向渦動粘性係数、 $\tilde{u}$ は瞬間流速、 u は平均流速を示す。右辺第 1 項は大規模渦が引き起こす境界せん断応力を示し、浅水流解析により大規模渦の発生に伴う流速の変動成分 (u', v') を抽出し $u'v'$ の平均値として算出する。第 2 項はモデル化した水深以下のスケールの乱れによる境界せん断応力成分である。植生密度毎に得られた無次元境界せん断応力値の計算値と実験値をプロットしたのが、図-4 である。計算値は実験値を良く再現しており、実験できない広範囲のケースを補間しうる

表-3 現地における植生密度の例

(琵琶湖のデータは文献 11)、霞ヶ浦のデータは文献 12)を参照)

場所	植生の種類	密度(本/m ²)	密度 λ (m ⁻¹)
琵琶湖(株立ちのみられるヨシ群落内平均密度)	ヨシ	260	2.018
琵琶湖(株立ちのみられないヨシ群落内平均密度)	ヨシ	135.1	1.048
琵琶湖(株立ちを起こして孤立したヨシの密度)	ヨシ	656	5.091
霞ヶ浦(植生浄化施設内)	ヨシ	100~160	0.78~1.24

といえる。

図より高密度側でピークを有する分布になっていることがわかる。ピーク付近の密度は、表-3 に示す実際の植生の密生度として得られている値 $\lambda = 0.78 \sim 1.552$ (100~200 本/m²) よりかなり大きい値であることがわかった。

(3) 植生密度と境界せん断応力の関係の定式化

図-4 の関係より池田ら¹⁰⁾と同じように植生密度と境界せん断応力の定式化を行う。主流速 u の横断分布に関する解は次のように得られている。植生領域外では次式のように表すことができる。

$$u = u_{\infty} \left[1 - (1 - J) \exp(\sqrt{(2/\nu)\eta}) \right] \quad (3)$$

植生領域内では次式のように表すことができる。

$$u = u_{\infty} J \left[J + (1 - J) \exp(-\sqrt{(2/\nu)\eta}/J) \right] \quad (4)$$

ここに、 u_{∞} = 植生群から十分離れた地点における水深平均流速、 $J = 1/(1 + \chi)^{1/4}$, $\chi = C_D h \lambda / 2C_f$, C_D = 植生の抗力係数、 $C_f = (u_{\infty}/u_{*})^2$, u_{∞} = 植生域から十分離れた地点における摩擦速度、 $v = \varepsilon_y h / C_f u_{\infty} B^2$,

$\eta = y/B$, B = 植生も含めた水路幅、 y = 植生境界を原点にとり植生域方向を負としたときの横断方向の距離である。横断方向せん断応力 τ_y は次式で表す。

$$\tau_y = \rho \varepsilon_y \frac{du}{dy} \quad (5)$$

植生境界に生じる流れは底面によって規定される壁乱流と横断方向の流速差に基づく自由乱流によって構成される。今回は平面二次元流れとして扱っているので、自由乱流として扱うことが妥当と考えられる。よって ε_y は自由乱流の仮説から以下の $u \cdot h$ に比例する形式が導ける。

$$\varepsilon_y = \gamma^2 (1 - J)^2 (1 + J)^4 u_{\infty} h / 2C_f^{1.5} \quad (6)$$

比例定数 γ は今回の実験結果及び数値シミュレーションの結果より J の関数として次式のように一義的に定めた。

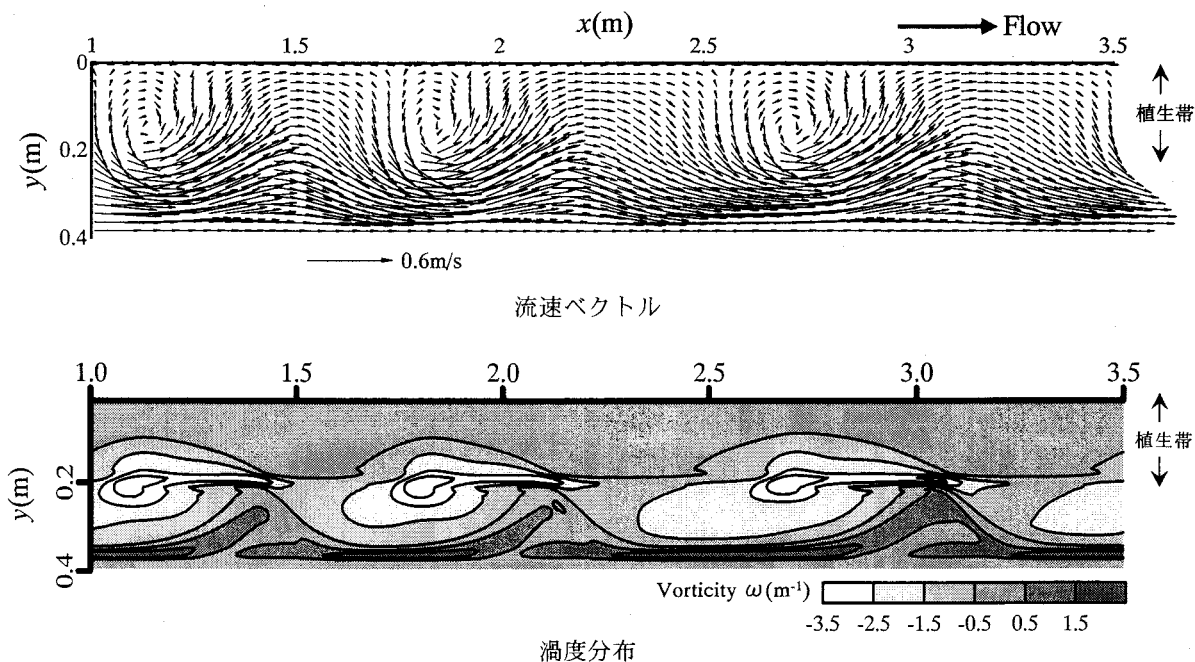


図-5 瞬間流速ベクトルと渦度の瞬間分布の計算結果 (case3)

$$\gamma = 0.013 \exp[-\exp(-20J^2)] \quad (7)$$

(5)式に(3)又は(4)式と(6), (7)式を代入し植生境界におけるせん断力 $\tau_{y=0}$ を求めると次式のようになる。

$$\tau_{y=0} = \frac{\gamma(1-J^2)^2}{C_f} \rho u^2_{\infty} \quad (8)$$

この式は C_f 及び J のみの関数となっており, J について極値を有する. この極値は運動量輸送(あるいは物質輸送)が最大となる密度があることを示している. (8)式をプロットしたのが図-4 の黒小点で表示したものである. 低密度から高密度にわたり広い範囲で実験結果, 数値解析結果を良く再現していることがわかる。

(4) 流れの瞬間構造からの検討

計算から得られる渦の特徴から, 運動量輸送が最大になる密度が生じる原因について考察する。

図-5 にピークが見られた付近の植生密度である case3 における瞬間流速ベクトルと渦度の平面分布を示す. 計算結果は渦が十分に発達した計算開始後 150s から 250s の中間の 175s 後のものである。

渦度のコンターを見ると大小の長径 60~80cm 程度の大規模渦が発生していることがわかる. 併せて流速ベクトルを見ると, 渦の流下に伴い, 植生帯側へ主流帯の高流速の流体が流れ込み, 植生帯から主

流帯へ低流速の流体が流出していることがわかる. さらに大きな密度のケースを計算したところ, 渦度の集積領域は非植生領域側によってゆき, 植生帯内部へ入りにくくなることが明らかになった. このことは流速比が 0 に近づくほど, 渦による移流は高密度の植生のため内部まで生じず, 結果的には運動量輸送効果の減少につながることが予想された。

(5) 現地への適用性に関する考察

本研究より得られた, 植生密度と境界せん断応力の関係の現地への適用を試みる. 現地においては水路側岸は複断面高水敷であったり, 一定の植生密度で繁茂しているとはかぎらない. よって植生密度を低流速部と高流速部との流速比に変換することで植生流れだけでなく, せん断乱流場全般に図-4 の関係を適用することが可能になる(例えば複断面水路の場合は高水敷部と低水敷部の流速比). 植生密度を流速比に換算する方法を以下に記す。

平衡状態において, 植生群内に十分入った地点における力の釣り合いは, 次式で表せる。

$$\rho g h I = \rho C_f u_{p\infty}^2 + \rho C_D \lambda h \frac{u_{p\infty}^2}{2} \quad (9)$$

ここで, $u_{p\infty}$ =植生群に十分入った地点における水深平均流速, I =底面勾配である. 植生群から十分離れた地点における力の釣り合いは, 次式で表せる。

$$\rho g h I = \rho C_f u_{\infty}^2 \quad (10)$$

(9), (10)式より流速比と植生密度の次の関係が得

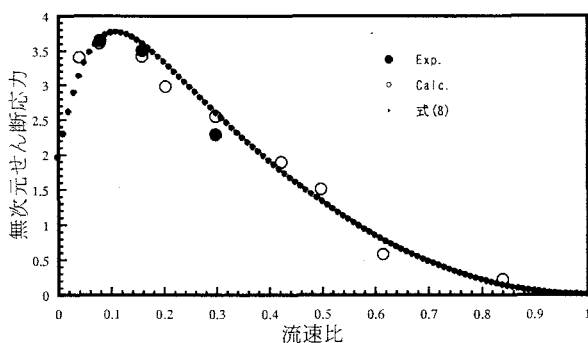


図-6 無次元せん断応力と流速比の関係

られる。

$$\frac{u_{p\infty}}{u_{\infty}} = \left(\frac{1}{1+\chi} \right)^{1/2} \quad (11)$$

(11)式により植生密度を流速比に換算し表示したのが図-6である。この関係を用いて現地で得られている流速データより境界での無次元せん断応力の算定を試みた。この試算には福岡ら¹³⁾によって測定された洪水時のヨシで覆われた側岸を有する用水路における表面流速の横断分布を用いた。この用水路はヨシを有する高水路と低水路からなる複断面水路である。低水路流速値と高水路の流速値より流速比を求め、無次元せん断応力を図-6より算定した。その結果、流速比は約0.34であり、これより無次元境界せん断応力は2.3と算定された。この値は実験におけるcase1近辺であり、大規模渦による浮遊砂等の物質の輸送が活発に行われていることが予想された。

5. まとめと今後の課題

側岸に水没した植生が存在する開水路流れ場を対象に、数値計算と水理模型実験により植生密度と運動量輸送の関係の検討を行った。境界せん断応力のピークは自然に繁茂する植生密度よりかなり高い密度で生ずることが明らかになった。この原因は渦形状と大きく関係することが数値シミュレーションより明らかになった。植生密度の変化に伴うSDS&2DHモデルの計算精度について検討したところ、実験値の主流速分布、植生境界におけるレイノルズ応力を高い精度で再現しており、広範囲の植生密度に対してモデルが適用できることが明らかになった。既往の植生密度と無次元せん断力の関係式中の比例定数を、今回の実験、数値計算より定式化し新たに提案した。

今後は移動床水理実験及び土砂堆積シミュレー

ションを実施し、植生密度と浮遊砂堆積速度の関係を明らかにする予定である。

謝辞: 本研究は筆頭者が独立行政法人農業工学研究所国内留学制度により東京工業大学に嘱任中になされた。お世話頂いた同大学の教職員、学生の方々、農業工学研究所河海工水理研究室、丹治肇室長、桐主任研究官に記して謝意を表します。

参考文献

- 1)池田駿介、空閑健、陳飛勇：両岸に植生帯を有する開水路流れに発生する大規模水平渦の安定性と運動量輸送，土木学会論文集，No.551/II-37，pp.63-73.1996
- 2)池田駿介、佐野貴之、福元正武、河村一弘：複断面開水路に生じる大規模組織渦と浮遊砂輸送，土木学会論文集，No.656/II-52，pp.135-144，2000.
- 3)池田駿介、杉本高、吉池智明：不透水制群を有する流れの水理特性に関する研究，土木学会論文集，No.656/II-52，pp.145-155.2000
- 4)池田駿介、太田賢一、長谷川洋：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-18，47-54,1992.
- 5)福岡捷二、渡辺明英、津森貴行：樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析，土木学会論文集，No.491/II-27，pp.41-50.1994
- 6)木村一郎、細田尚：側岸に死水域を有する開水路流れの非定常解析，ながれ，12，pp.399-408.1993
- 7)清水義彦、辻本哲郎、中川博次：直立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，pp.35-44,1992.
- 8)灘岡和夫、八木宏：浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用，土木学会論文集，No.473/II-24，pp.25-34.1993
- 9)金子安雄、堀江毅、村上和男：ADI法による潮流汚染拡散の数値計算，港湾技術研究所報告第，No.14(1)，pp.3-61,1975
- 10)池田駿介、太田賢一、長谷川洋：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/II-19，pp.47-54,1992.
- 11)鈴木紀雄、川島宗継、遠藤修一、板倉安正、木村保弘：琵琶湖におけるヨシ群落に関する研究，滋賀大学教育学部紀要，自然科学・教育学部，No.43，pp.19-41,1993.
- 12)竹倉新吉：霞ヶ浦の水質浄化対策，河川，539号，pp.37-44,1991.
- 13)福岡捷二、渡辺明英、柏木幸則、山縣聡：ヨシで覆われた河岸の洪水流による侵食と流路の変動過程，第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，No.4，pp.83-88

(2003.4.11受付)