

柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究

辻本哲郎¹・北村忠紀²

¹正会員 工博 名古屋大学助教授 工学研究科地圈環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 博(工学) Visiting Researcher, CCHE, The University of Mississippi

河床が柔軟な植生粗度に覆われた2次元等流場を対象として、植生の変形、揺動が流れに及ぼす影響について、模型実験および数値解析を通して検討を行っている。まず、植生モデルを用いた水路実験から、流れの抵抗は、植生の変形効果によって減少すること、組織的な揺動の効果によって増加することを確認している。次に、植生の変形効果のモデル化を行い、変形の効果のみ考慮した場合の、種々の密生度、剛性を有する植生粗度を伴う流れの抵抗則、河床に作用するせん断応力の見積もり方法を提案し、さらに組織的な揺動の効果についての定性的な考察を行っている。最後に、こうした検討結果を利用して、実植生の抵抗則、河床に作用するせん断応力の評価を行っている。

Key Words: vegetation, flexible roughness, hydraulic resistance, deformation, waving, $k-\epsilon$ model

1. 緒論

ヨシなど河辺に生える草本類には、その構造が柔軟なために流れに対して変形したり揺動したりするものが多い。柔軟な植生が流水に対してどの程度傾き、それによりどの程度直立している場合と流れの抵抗が違うのか、また揺動することで流れがどのように影響を受け、流れの抵抗が変化するのかといった問題は、治水を考慮しつつ河川植生を保全していく上でも興味を持たれる点である。

植生の変形や揺動とそれを伴う流れは、流れと植物体の相互作用により決定されるものと考えられる。すなわち、植生の変形や揺動をもたらすのは流れであるが、その結果生じる変形や揺動は流れ場を変化させ、こうした相互作用の結果、ちょうど植生の変形や揺動と流れ場がバランスするようにそれらが決定されるものと考えられる。本研究は、河床が直立性の柔軟な植生に覆われた2次元等流場を対象として、流れと柔軟な植生の相互作用に着目した模型実験と数値解析による検討を行い、直立性の柔軟な植生粗度を伴う流れの特性及び流れの抵抗特性についての知見を得ようとするものである。

直立性の柔軟な植生層の粗度としての特徴をあげると次のようである。

- 1) 群として透水層を形成する。
- 2) 流れに対して変形し、植生粗度層厚さが変化するとともに、流れから受ける流体力が変化する。
- 3) 振動・揺動し、条件によっては流れとの相互作用により組織的に揺動する。

1) の効果について、清水ら¹⁾は流れによって変形しない剛な植生粗度層モデルを伴う流れ場の乱流計測を行い、こうした流れ場が植生粗度層境界のせん断で特徴づけられることを示すとともに、そのモデリングを行っている。さらに清水ら²⁾は植生による形状抵抗項を運動量式に、植生の存在による付加的な乱れエネルギーとその逸散を乱れエネルギーとその逸散率の輸送方程式に、それぞれ付加するモデルを提案し、いくつかの異なる密生度を有する植生粗度層内外の平均流場を再現している。

2) の効果について、Kouwen^{3), 4)}は、種々の剛性、密生度の異なる植生モデルを用いた水路実験から、植生の変形量と流れ場の関係を整理して植生の変形量を支配するパラメータを抽出し、実験式を提案している。しかしながら、彼らの用いたパラメータは無次元量ではなく、必ずしも一般的な特性が抽出されてはいない。室田・福原⁵⁾は、植生の変形を片持ち梁の有限変形としてモデル化し、さらに流れ場については混合距離モデルを用いて、両者をカップリングした計算から平均流場、植生の変形量を求め、実測値と良好な一致を得ている。しかし、彼らの計算では実験的に得られた混合距離分布を用いており、予測計算にまでは至っていない。

3) の効果について、福原⁶⁾は柔軟な植生モデルを用いた水路実験において乱流計測を行っており、植生の揺動状態による乱流構造の変化を見出すとともに、大規模かつ組織だった植生の揺動現象を観察し、流れ構造と植生の組織的な揺動とが密接な関係にあるとしている。池田ら^{7), 8)}、日野ら⁹⁾は、それぞれ流れの可視化、流れに対する植生の

応答解析、LESによる数値解析を行い、植生粗度層を伴う流れでは植生粗度層境界付近で主流速分布が変曲点を持つために流れが不安定となって組織的な渦が生じ、それが下流へ流される際に柔軟な植生を押し倒すために植生の揺動が生じるとしている。しかしながら植生の揺動自体が流れ場に及ぼす影響に関する知見は未だ十分に得られていない。

本論文では、まず流れによって変形、揺動しない剛な植生粗度を伴う流れに関する既往の研究を参考に、その特徴をまとめている。次に、2種類の剛性、密生度の異なる直立性の柔軟な植生モデルを用いた水路実験での流れの計測から、植生の変形、揺動が流れ場に与える影響について検討している。植生の変形効果については、室田・福原⁷⁾が行った植生の変形モデルと流れ場のモデルをカップリングする手法を踏襲して、そのモデル化を行っている。流れのモデルとしては、剛な植生粗度層を伴う流れについてその有効性が示された清水ら²⁾のk-eモデルを用いることにより、種々の条件による系統的な検討を行っている。植生の組織的揺動の効果については、組織的な揺動が植生粗度層の空間的非均質性を生じさせることに着目し、その効果について考察している。さらに、本研究の成果を応用して、ヨシ、セイタカアワダチソウの密生度、剛性の現地調査から、これらの植生を伴う流れの抵抗則、河床に作用するせん断応力の評価を行っている。

2. 剛な植生粗度を伴う流れに関する知見の整理

(1) 剛な植生粗度を伴う流れの特徴

清水ら¹⁾は、流れによって変形、揺動しない剛な円柱群によって植生粗度を模擬した水路実験を行うことにより、剛な植生粗度を伴う流れの構造について検討している。彼らは、次の2種類の密生度の異なる植生モデルを用いている。model R：植生密生度 $C_D \lambda = 0.1 \text{cm}^{-1}$ ；model A：植生密生度 $C_D \lambda = 0.0375 \text{cm}^{-1}$ ；ここで、 C_D ：植生の抗力係数、 λ ：水流の単位体積あたり植生粗度要素の遮蔽面積である。

図-1は、清水¹⁾の実験の実験条件表から流速係数 U_0/u_{*0} （ここで、 $u_{*0} = (gh_i)^{1/2}$ 、 g ：重力加速度、 h ：水深、 i_0 ：水路勾配）を求め、水路勾配 i_0 ごとに相対水深 h/l_0 （ここで、 l_0 ：植生長）による変化を示したものである。図より、流速係数は相対水深によって変化するが、水路勾配にはよらないことがわかる。

図-2は、平均流速 U 、Reynolds応力 $-\bar{uv}$ の水深方向分布の計測結果例を示したものである。図より、植生粗度層境界付近で平均流速分布が変曲点を持つこと、またReynolds応力が最大値をとることから、流れ場は植生粗度層境界付近でのせん断で特徴づけられる場であることがわかる。図中、Reynolds応力分布には、重力の流れ方向成分によって決まる全せん断応力 ($\rho g h_i (1-y/h)$ ：ここで、 ρ ：水

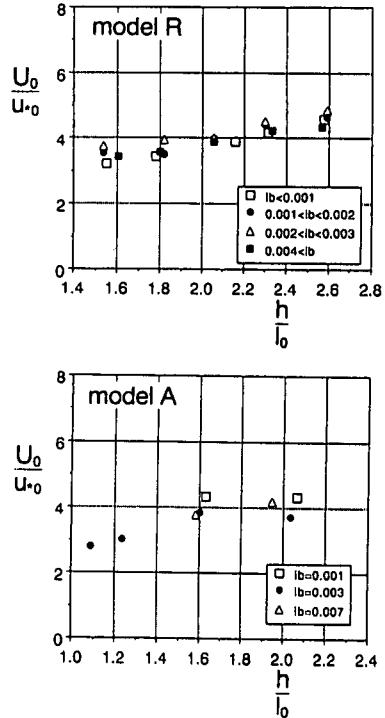


図-1 剛な植生粗度を伴う流れの流速係数
(清水ら¹⁾をもとに作成)

の密度、 y ：水深方向座標である) が併示されている。植生粗度層内では、全せん断応力が Reynolds 応力だけでなく植生の形状抵抗によっても受け持たれるために Reynolds 応力は全せん断応力よりも小さく、河床に向かって指數関数的に減衰し、このため河床に働く実質的なせん断応力が小さくなっている。砂面侵食防止効果を有することを示している。なお、植生粗度の形状抵抗が作用しない表面流においては Reynolds 応力は全せん断応力の3角形分布にほぼ一致している。

(2) 植生による形状抵抗を考慮した k-e モデル

清水ら²⁾は植生による形状抵抗効果を運動量式のみならず、乱れエネルギーとその逸散率の輸送式にも考慮した k-e 乱流モデルによって剛な植生粗度を伴う流れの平均流構造を再現している。鉛直 2 次元等流における基礎式は以下のようである。ただし、ここでは代表流速として断面平均流速 U_0 、代表長さとして水深 h を用いて無次元化して表示している。

$$\frac{\partial}{\partial y^*} \left[\left(v_T^* + \frac{1}{R_e} \right) \frac{\partial U^*}{\partial y^*} \right] - \frac{\partial P^*}{\partial x^*} - F_X^* = 0 \quad (1)$$

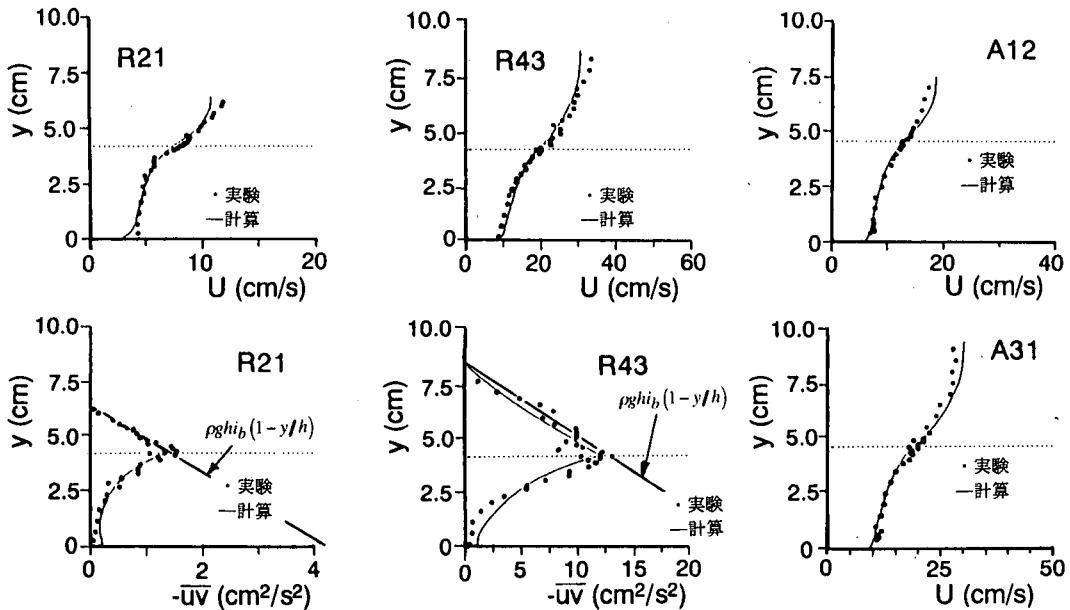


図-2 剛な植生粗度を伴う流れの平均流速, Reynolds 応力分布 (清水ら¹⁾をもとに作成)

$$\frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{v_T^*}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial y^*} \right) + P_k^* + F_X^* U^* - \epsilon^* = 0 \quad (2)$$

$$F_X^* = \frac{1}{2} \frac{C^*}{l_0} U^{*2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{v_T^*}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon^*}{\partial y^*} \right) + \frac{\epsilon^*}{k^*} \left\{ C_1 \left(P_k^* + C_V \epsilon F_X^* U^* \right) - C_2 \epsilon^* \right\} = 0 \quad (3)$$

$$P_k^* = v_T^* \left(\frac{\partial U^*}{\partial y^*} \right)^2 \quad (4)$$

$$v_T^* = C_\mu \frac{k^{*2}}{\epsilon^*} \quad (5)$$

ここで, $x^* = x/h$, $y^* = y/h$, $U^* = U/U_0$, $V^* = V/U_0$, x , y : それぞれ流下方向, 水深方向座標, U , V : それぞれ流下方向, 水深方向の平均流速, $P^* = P/(\rho U_0^2)$, P : 圧力 (ここでは, 開水路流れにおける重力項を含んだものとして定義している), ρ : 水の密度, $k^* = k/U_0^2$, k : 乱れエネルギー, $\epsilon^* = \epsilon h/U_0^3$, ϵ : 乱れエネルギーの逸散率, P_k^* : 無次元乱れエネルギーの生成率, $v_T^* = v/(U_0 h)$, v_T : 湍動粘性係数, $R_e^* = U_0 h/v$, v : 動粘性係数である。

植生による形状抵抗は、河床から垂直に立った円柱的粗度を想定した場合、円柱に垂直な方向に流体力が作用する (円柱に作用する摩擦抵抗が無視できるもの) として次のように与える。

ここで, $C^* = C_D l_0$, C_D : 植生の抗力係数, λ : 水流の単位体積あたり植生粗度要素の遮蔽面積, l_0 : 植生長である。

式(3)の乱れエネルギーの輸送式の右辺第4項が植生粗度の存在による付加的な乱れエネルギーを表している。清水ら²⁾の原論文では、この項にも係数を付加しているが、ここでは、次の理由によりその係数を1.0として省略した。すなわち、植生による形状抵抗と速度の乗算によって表される単位時間単位体積あたりの平均流のエネルギー損失は、植生の存在が付加的な乱れを生じさせ、それがいったんすべて乱れエネルギーに変換された後、逸散することにより生じるものとみなした。

モデル定数には、植生の形状抵抗に関わる C_{ve} 以外のものについては標準 $k-\epsilon$ モデルの推奨値¹⁰⁾ を用いる。すなわち、 $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\alpha_t = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ を用いる。 C_{ve} については平均流速と Reynolds 応力の実測値を再現できるように定めるものとする。

図-2に、上記のモデルによる計算結果を併示した。ここで、境界条件、数値計算方法については、清水ら²⁾と同様である。また、植生の形状抵抗に関わる係数については $C_{ve} = 1.3$ としている。図より、清水ら¹⁾の実験条件の範囲では、植生生度や水理条件が異なっても植生の形状抵抗に関わる係数を変えることなく、計算結果は実測値を概ね表現できている。

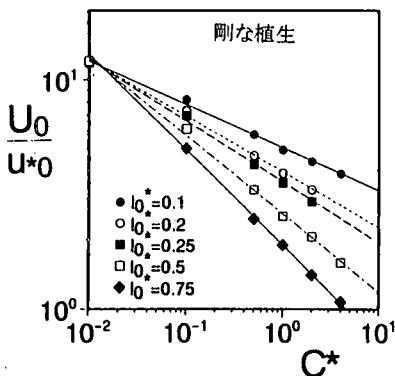


図-3 剛な植生粗度を伴う流れの抵抗則

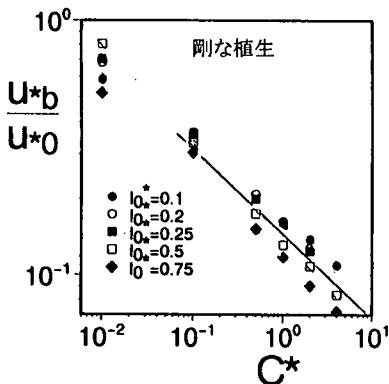


図-4 剛な植生粗度を伴う流れの河床せん断応力

(3) 抵抗則と河床に作用するせん断応力

ここでは、上記のモデルを用いて条件を系統的に変化させた計算を行い、剛な植生粗度を伴う流れの抵抗則、河床に作用するせん断応力に関して整理しておく。

図-3は、無次元植生密度 $C^* = C_p \lambda l_0$ 、相対粗度長 $l_0^* = l_0/h$ を様々に変化させて計算した結果から、流速係数 U_0/u_{*0} ($u_{*0} = (ghI_c)^{1/2}$ 、 I_c : エネルギー勾配であり、 u_{*0} は Reynolds 応力の計算結果の外挿値から求められる) を求め、 l_0^* をパラメータとし、無次元植生密度 C^* に対して示したものである。この結果より、剛な植生粗度を伴う流れの抵抗則は近似的に次式のように予測される。

$$\frac{U_0}{u_{*0}} = \alpha_1 C^{* m_1} \quad (0.01 \leq C^* \leq 4.0) \quad (7)$$

$$\alpha_1 = 1.46 - 1.55 \ln l_0^* \quad (0.1 \leq l_0^* \leq 0.75) \quad (8)$$

$$m_1 = -0.17 - 0.34 l_0^* \quad (0.1 \leq l_0^* \leq 0.75) \quad (9)$$

同様に、底面せん断応力を Reynolds 応力の計算結果の底面付近の値から外挿して求め、全せん断応力との比の平方根 u_b/u_{*0} を求めた結果を示したのが図-4である。図より、

植生密度が大きい場合 ($C^* > 0.1$ 程度の場合) には、本計算結果の範囲では、 u_b/u_{*0} は相対水深 l_0^* によらず、ほぼ植生密度 C^* によって決まるといえる(図-4の縦軸は対数軸であることに注意)。植生密度が小さくなると、相対水深 l_0^* による違いが激しくなるが、相対水深による系統的な変化とはならない。これは、 u_b/u_{*0} が、流れの全体的な抵抗と植生による形状抵抗の微妙なバランスで決まるためである。植生密度 C^* がある程度大きいと、植生による形状抵抗効果が顕著となるために l_0^* によるばらつきが小さくなるものと考えられる。ここでは、植生密度 C^* が大きい場合について、次式を近似式として提案しておく。

$$\frac{u_b}{u_{*0}} = \alpha_2 C^{* m_2} \quad (0.1 \leq C^* \leq 4.0, 0.1 \leq l_0^* \leq 0.75) \quad (10)$$

ここで、 $\alpha_2 = 0.15$ 、 $m_2 = -0.35$ が適当である。

3. 植生粗度の変形や揺動が流れ場に及ぼす影響に関する実験的検討

(1) 実験方法

柔軟な植生モデルとしては、次の2種類のものを用いる。1) モデルF1として、OHP用透明シートを幅 $D=0.15\text{cm}$ 、長さ $l_0=5.0\text{cm}$ の短冊状に切り、中心間隔 $s=2\text{cm}$ の正方格子状に設置したもの ($\lambda=D/s^2=0.0375\text{cm}^{-1}$ 、曲げ剛性 $EI=650\text{dyne}\cdot\text{cm}^2$)、ならびに、2) モデルF2として、直径 $D=0.026\text{cm}$ 、長さ $l_0=10.4\text{cm}$ 、曲げ剛性 $EI=1100\text{dyne}\cdot\text{cm}^2$ の塩化ビニール性モノフィラメントを流下方向に $s_1=0.16\text{cm}$ 、横断方向に $s_2=0.3\text{cm}$ の間隔で設置したもの ($\lambda=0.54\text{cm}^{-1}$) を用いた。

モデルF1の実験については、長さ 12m 、幅 40cm の可変勾配直線水路において、5mの長さにわたって水路全幅に植生モデルを設置して、さらに、モデルF2の実験は、長さ 12m 、幅 33cm の可変勾配直線水路において、5.4mの長さにわたって水路全幅に植生モデルを設置して行われた。水路に所定の流量の水流が導かれた後、植生モデル設置区間下流端から上流に向かって約 3m 程度の区間の水深がほぼ等しくなるように水路下流端の堰を調節し、その水深がほぼ等しい区間の流れを疑似等流状態とみなした。

水路勾配 i を $1/1000 \sim 1/64$ 、水深 h を植生高さを超える程度から植生高さの2倍程度までそれぞれ変化させて疑似等流場を作り、それぞれの流れについて、植生モデル設置区間下流端より 1.5m 上流の位置において、植生の変形・揺動状態を水路側方より観察するとともに、次の計測を行った。1) 流れによって変形・揺動する植生粗度要素の先端部の高さの最高値 l_u と最低値 l_d をポイントゲージにより計測し、平均植生高さ $l_m = (l_u + l_d)/2$ 、揺れ幅 $\Delta l = (l_u - l_d)$ を求める。2) 代表的なケースについて、モデルF1の実験については直径 3mm の超小型プロペラ流速計(篠塚製作所製: SV-3)によって、モデルF2の実験については、2成分ホットフィル

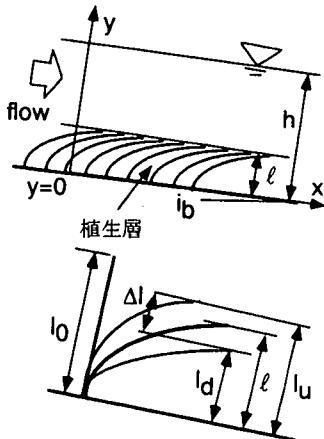


図-5 記号の説明図

表-1 実験条件表

RUN	U_0 (cm/s)	h (cm)	h_i	l (cm)	Δl (cm)	waving
F1-1	9.5	7.70	1/1000	4.18	0.62	I
F1-2	13.1	9.73	1/1000	4.19	0.89	I
F1-3	15.7	11.14	1/1000	3.90	1.31	I
F1-4	18.4	6.54	3/1000	3.30	0.91	I
F1-5	29.2	8.79	3/1000	2.90	1.10	I
F1-6	38.5	10.34	3/1000	2.65	1.14	I
F1-7	45.2	7.67	7/1000	2.38	1.13	I
F1-8	48.4	8.26	7/1000	2.45	0.92	I
F2-1	12.6	16.09	1/1000	10.29	0.12	I
F2-2	14.6	18.20	1/1000	10.13	0.18	I
F2-3	19.9	20.89	1/1000	10.17	0.18	I
F2-4	15.3	15.23	1/300	10.11	0.23	III
F2-5	22.3	18.08	1/300	9.90	0.41	III
F2-6	27.6	20.30	1/300	9.62	0.66	III
F2-7	24.5	15.16	1/100	9.45	0.82	II
F2-8	26.9	18.12	1/100	9.01	1.16	II
F2-9	32.7	20.48	1/100	8.59	1.59	II

ム流速計(Kanomax社製)によって、それぞれ流速測定を行う。植生粗度層内の流速測定にあたり、モデルF1の実験については、植生粗度間の空隙において計測を行った。モデルF2の実験については、流下方向、横断方向それぞれ5cmの空隙を設け、その空隙において計測を行った。空隙を設けたことの流れへの影響が考えられるが、空隙をはさむ前後左右の位置における植生粗度層上の流れの計測結果と空隙部における植生粗度層上の流れの計測結果にはほとんど差がないことを確認しており、空隙を設けたことの影響は小さいものと考えられる。また、横断方向に位置を変えた流れの計測結果(側壁までの距離が最大で7.5cm)にはほとんど差がないことを確認しており、側壁の影響は近似的には無視できるものと考える。

各計測器からの出力は、プロペラ流速計については20Hz, 1024個、ホットフィルム流速計については200Hz, 8192個のサンプリングとし、データレコーダー(TEAC社製: DR-F1)によって、フロッピーディスクに記録された後、必要な統計処理が施された。図-5に記号の説明を示す。また、流速測定を行ったケースについての水理条件を表-1に示す。

(2) 植生の変形、揺動状態と流れの抵抗特性

図-6は、平均植生高さ l_o と揺れ幅 Δl を流れの強さを表す無次元パラメータ h_i/l_o に対して示したものである。図より、 h_i/l_o が増せば、平均植生高さは減少し、また、揺れ幅が大きくなることがわかる。モデルF1の実験では、条件により平均植生高さがもとの植生長さの半分程度になるケースもあり、植生の変形が顕著であるのに対し、モデルF2の実験では、植生高さは最低でももとの植生長さの9割程度である。このことから、モデルF1の実験は植生の変形効果が顕著に現れる実験として特徴づけられ、さらにモデルF2の実験は変形効果がさほど顕著ではない実験として特徴づ

けられる。

植生の揺動状態を水路側方より目視により観察すると、モデルF1の実験では、いずれの条件でも、個々の植生の揺動は、時折、流下方向に連続して揺動するような動きを見せた。しかしながら、植生の配置間隔がかなり大きいためか(流下方向に2cm間隔)、風の強い日に田圃でみられる、水の波のような稲穂の表面が連続したうねりのように見える揺動には見えなかった。これに対して、モデルF2の実験では、条件により、植生粗度要素の間隔が狭いこともあり、植生の揺動が連続したうねりのように見えるケースがあった(写真-1参照)。そこで、モデルF2の実験での植生の揺動状態を次のように区別した。I) 植生の揺動は見られるが大きなうねりのようには見えない場合。II) 植生の揺動が大きなうねりのようには見える場合。III) I)とII)のどちらかあいまいな場合。図-7は水理条件による揺動状態の違いを示したもので、水深が大きいほど、水路勾配が大きいほど、すなわち h_i/l_o が増すほど、植生の揺動はII)の大きなうねりのよう見える。なお、モデルF1の実験では、いずれの条件でもI)の状態であると判断された。

このような大きなうねりのよう見える植生の揺動が出現したケースについて、水路側方からのビデオ撮影によって揺動の性質を調べると、揺動の周期はほぼ0.5~1.0s程度、揺動の波速は植生粗度層境界付近の主流速程度であった。ただし、揺動の大きさにはばらつきが多く、条件による揺動の周期や波速の相違を議論するのに十分な精度の測定をするのは困難であった。また、揺動は3次元性を有しており、横断方向には均一ではない。

図-8は流速係数 U_0/u_{*0} ($u_{*0} = (gh_i)^{1/2}$) の相対水深 h/l_o による変化を路床勾配 i_b をパラメータとして示したものである。図より、変形、揺動する植生の場合には、路床勾配によって流速係数が大きく変化することがわかる。しかも、モデルF1の実験では、路床勾配が大きいほど流速係数は大

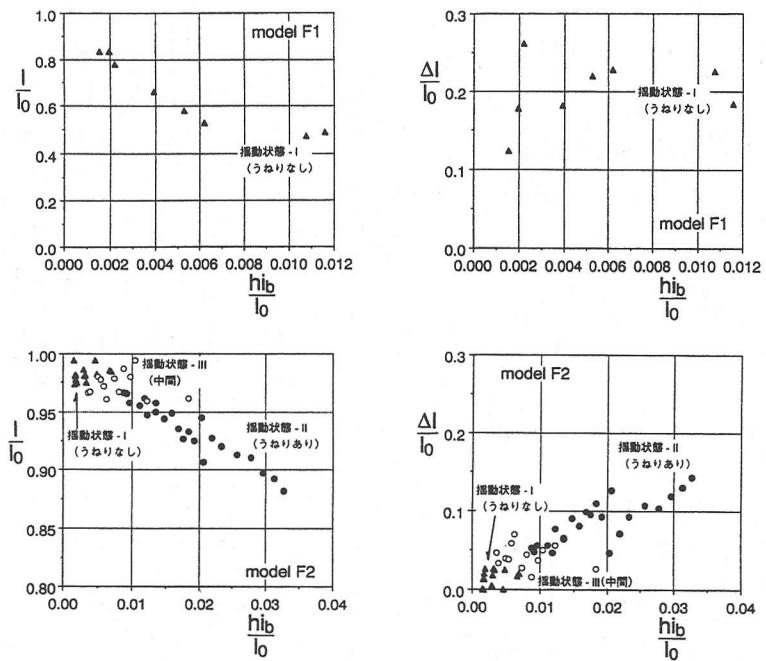


図-6 h_{ib}/I_0 と植生の変形、振動の関係



写真-1 大きなうねりのように見える植生の振動

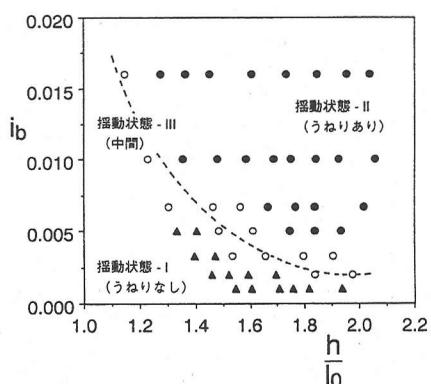


図-7 水理条件による植生の振動状態区分

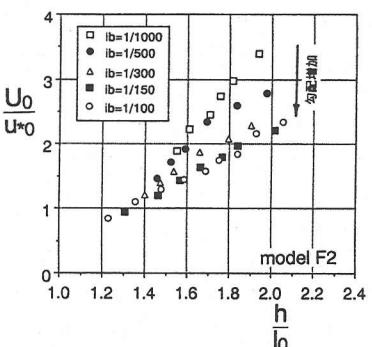
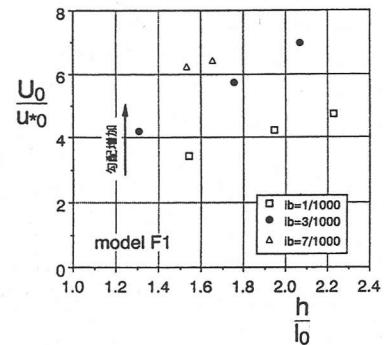


図-8 流速係数

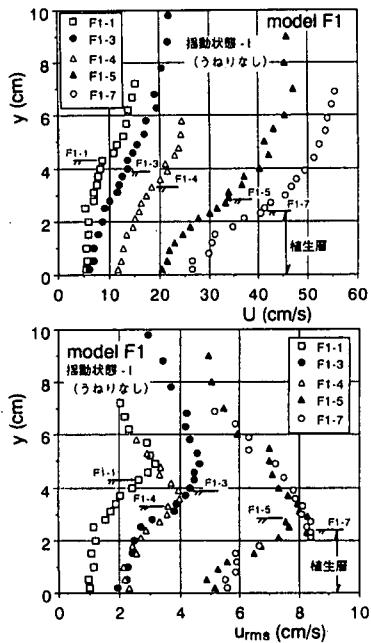


図-9 平均流速、流速変動強度分布（モデルF1）

きく、すなわち流れの抵抗が小さくなる傾向にあるのに対して、モデルF2の実験では、路床勾配が大きいほど流速係数は小さくなるという逆の傾向を示している。

この理由は次のように推定される。モデルF1の実験では、路床勾配が大きく hi_b/l_0 が大きくなると、植生が大きく変形し、粗度高さが減少するとともに植生が主流に対して大きく傾く。このような効果によって、流れに対する抵抗要素が実質上減ることになるため、流れの抵抗が減少するものと考えられる。モデルF2の実験では、植生の変形は顕著でないために変形による流れの抵抗の低減効果はほとんどない。逆に、 hi_b/l_0 が大きくなると流れの抵抗が増加する傾向にあるのは、植生の揺動に起因しているものと推定される。特に、モデルF1でも植生の揺動は見られるが、顕著には流れの抵抗の増加をもたらしているとは判断できないことから、モデルF2の実験の hi_b/l_0 が大きい場合に見られた大きなうねりのような植生の揺動が流れの抵抗の増加に大きく関わっているものと推定される。

(3) 変形効果と流れ構造

図-9は、モデルF1の実験について、プロペラ流速計によって計測された平均流速 U 、流速変動強度 u_{rms} の水深方向分布を示したものである。図より、いずれの条件でも平均流速は平均植生高さ程度の位置で変曲点を持つような分布となり、さらにこの位置で流速変動強度が最大となっている。このような基本的特徴は剛な植生粗度の場合¹⁾と変わらないものである。

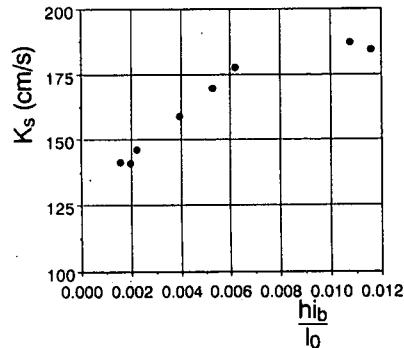


図-10 透過係数（モデルF1）

植生粗度層内では、平均流速は植生粗度層境界から離れると植生粗度層上の表面流の影響が及ばず一定流速に近づく傾向にあり、これは固有浸透流速 U_s と定義される¹⁾。固有浸透流速 U_s は植生粗度層の透過係数 K_s と路床勾配 i_b によって次のように決まる量である。

$$U_s = K_s \sqrt{i_b} \quad (11)$$

流速分布の実測値の外挿から固有浸透流速 U_s を求め、透過係数 K_s を逆算すると図-10のように、流れの強さを表す無次元パラメータ hi_b/l_0 が増せば、ある値まで増加することがわかる。剛な植生の場合には透過係数は条件によらずほぼ一定である¹⁾のに対し、今の場合、条件により透過係数が変化するのは、植生粗度要素が変形して主流に対して傾くことにより、流れに及ぼす抗力が減少するためと考えられる。それによって見かけ上、植生密度が減少したのと同様な効果が出現する。このことが抵抗軽減の理由であると考えられる。

(4) 揺動効果と流れ構造

モデルF2の実験において、ホットフィルム流速計によって実測された平均流速、Reynolds応力の水深方向分布は図-11に示すようである（Reynolds応力は河床での全せん断応力を表す u_{rs} により基準化されている）。図より、平均流速は揺動状態によらず、いずれも平均的な植生高さ程度の位置で変曲点を有することがわかり、この点では剛な植生粗度を有する場合やモデルF1の実験と同様の特徴を示している。しかしながら、Reynolds応力は大きなうねりのような植生の揺動が見られるケースでは、植生粗度上の表面流において植生の形状抵抗の及ばない領域でさえもせん断応力の3角形分布より欠損しており、剛な植生粗度を伴う場合の特徴と異なっている。このようなReynolds応力の欠損は、路床に倒伏して揺動する水草や粗礫を伴う流れでも見られ^{11),12)}、その理由が何らかの付加的な運動量輸送の存在のためだと考えられているものの、いまだ様々な議論が

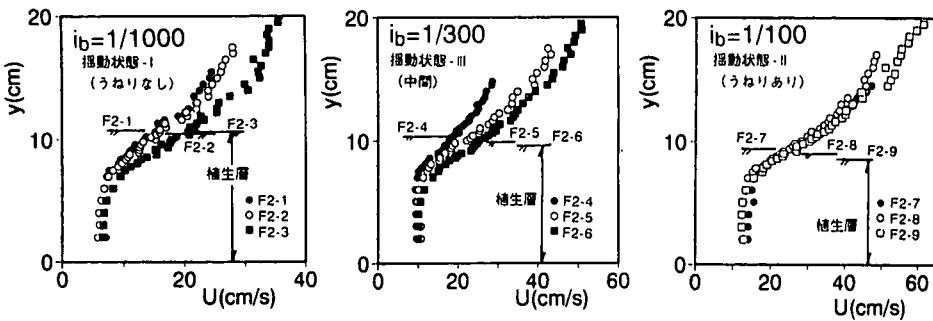


図-11(a) 平均流速分布 (モデルF2)

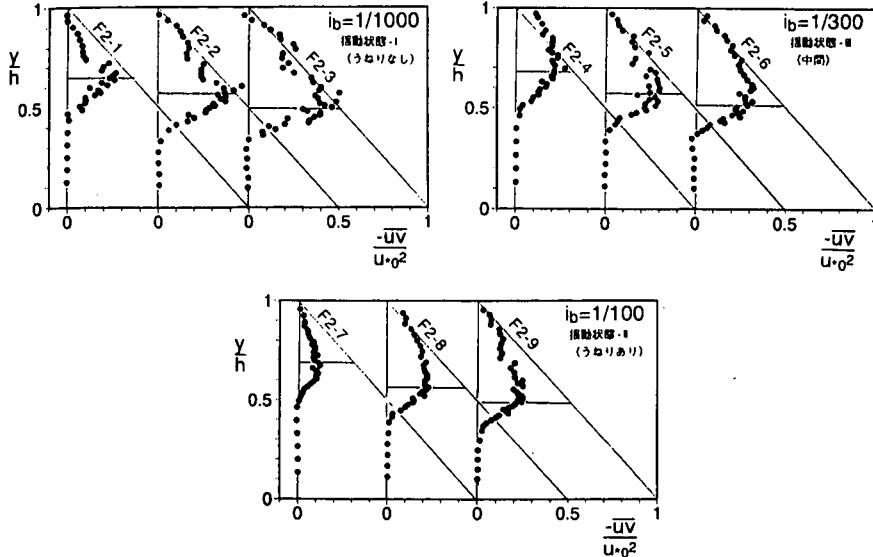


図-11(b) 基準化された Reynolds 応力分布 (モデルF2)

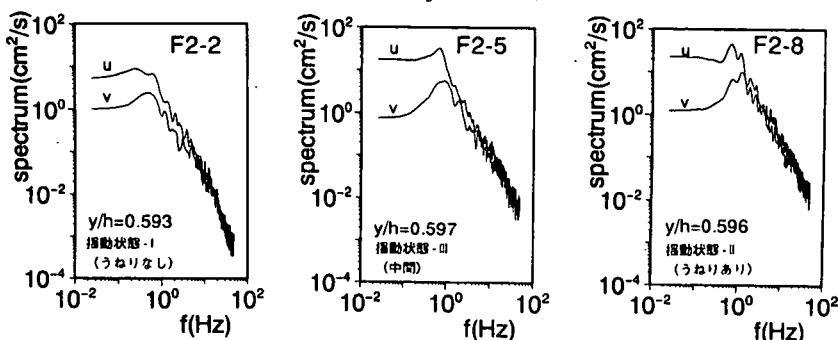


図-12 植生粗度層境界付近の流速変動のスペクトル (モデルF2)

あるようである。なお、こうした Reynolds 応力の欠損が比較的安定した定常的な縦渦構造による影響であることも考えられるため、横断方向に位置を変えた計測を行ったが、計測結果に顕著な違いはなく、こうした影響とは考えにくい。

図-12 は植生粗度層境界付近の流速変動のスペクトルを FFT 法¹³⁾により計算して示したものである。図より、流速変動のスペクトルは、揺動状態によらず 0.5~2.0 Hz 程度

でピークを持つが、大きなうねりのような揺動が見られる場合の方がよりピークがはっきりとするようである。また、これらは植生の揺動の周期にほぼ等しい。このことから、流れ構造の変化は植生の揺動との関係が強いといえる。

水路側方からの観察によると、植生の揺動が大きなうねりのように見られるケースでは、植生粗度層と表面流の境界が場所的にかなり不規則に変化し、図-13 に模式的に示されるように植生粗度層の空間的な不均質性が非常に大き

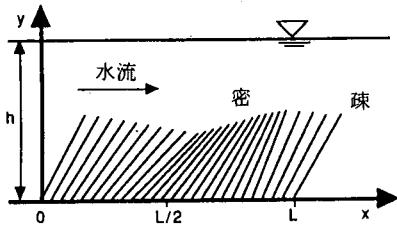


図-13 植生の組織的な揺動の概念図

くなる。しかも、この非均質性は植生密度が大きいほど大きくなる。このような植生粗度層の非均質性が流れに影響を及ぼすことにより付加的な運動量輸送が生じ、それが流れ構造や流れの抵抗の変化をもたらしているものと考えられないだろうか。

のことと実測された Reynolds 応力の欠損の理由に関して、著者らは現在次のように考えている。

今、実測された Reynolds 応力は、ある点における流速の時間的な変化をすべて捉えたものであるから、それはその点における流速変動によるすべての運動量輸送を表現しているはずで、平均流による運動量輸送がないかぎり、それはその点での全せん断応力に等しくなるはずである。ところが、実測された Reynolds 応力は欠損する。これは、こうした場における点計測データの単純な時間平均値が正しく運動量輸送を表現していないためであると考える他ないと思われる。

植生の揺動がない場合には、植生粗度層内流れと植生粗度層上流れの流速差に起因する流速変動が出現するが、こうした変動をもたらす要因としての場の特性は時空間的に変化しない。もちろん、組織的な変動が存在するようであるが、これは流れ自身が作り出したものであるから、流れを強制的に規制する要因とならない。したがって、ある点で点計測した値を時間平均したものは、アンサンブル平均とみなせる。

ところが、植生の揺動が激しくなり、それが植生粗度層の空間的な変化を大きくすると、流れを強制的に規制する要因が時空間的に変化するとともに、こうした場の変化に起因する流速変動が流速差に起因する流速変動に重畠されることになる。このとき、ある点で点計測した値は、場を強制的に規制する要因の状態ごとの条件付きの平均でなければアンサンブル平均とはみなせない、したがって、点計測したものを単純に時間平均したものは、もはやアンサンブル平均とはみなせない。例えば、流れの外部要因として強制的に圧力こう配が変化するような非定常流れ場がこれに類似している。したがって、本来、流れ場は、植生粗度層の状態の条件付きアンサンブル平均として定義される

Reynolds 方程式に基づいた解析を行うべきであろう。多くの非定常流れ場の研究では、流れを強制的に規制する要因を人為的にコントロールしているために、容易にアンサンブル平均を求められるのに対し、今の場合には、流れと植生の揺動の相互作用により流れを強制的に規制する要因が決まるために、条件付きのアンサンブル平均を求めるのは非常に困難である。

しかしながら、以上の考察によって、点計測の単純な時間平均による運動量輸送量が、トータルの運動量輸送に等しくない場合には、いわゆる乱れによる運動量輸送以外に何らかの附加的な運動量輸送が存在するということはいえそうであるし、ここでは、その要因を植生の揺動に伴う植生粗度層の非均質性によるものと推定した。植生の揺動自体は、流速の変動に起因するものであるから、今後はこうした場での非定常な流れ構造解析手法の援用が望まれる。

4. 変形する植生粗度を伴う流れのモデル

ここでは、植生の揺動の効果はとりあえず無視し、植生の変形効果のみに着目した流れのモデル化を行う。

(1) 流れのモデル

流れのモデルには、剛な植生粗度を伴う流れの平均流構造を良好に再現できる清水ら²⁾の植生による形状抵抗効果を考慮した $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いる(2節参照)。ただし、植生による形状抵抗は、植生が傾いて変形することを考慮する。植生に作用する流体力は植生に垂直な方向に働くものとし(摩擦抵抗を無視できるものとしている)、単位体積の水流に作用する植生による流下方向の形状抵抗を次のように与える。

$$F_x^* = \frac{1}{2} \frac{C^*}{l_0} U^{*2} \cos^2 \theta \quad (12)$$

ここで、 $C^* = C_D N_0$ 、 C_D : 植生の抗力係数、 λ : 単位体積あたりの水流に対する植生粗度要素の遮蔽面積、 l_0 : 植生長、 θ : 植生の傾き角(鉛直に立った状態を $\theta=0$ とする)である。

(2) 植生変形のモデル

植生の変形は室田・福原⁵⁾にならい、片持ち梁の有限変形としてモデル化する。ここでの仮定は、1)「平面保持の仮定」、すなわち、変形後も断面は中立軸に直交する、2) 植生に働く抗力による曲げのみが変形の要因とする、の2つである。すなわち、植生に働く摩擦抵抗や自重(浮力)の効果は、植生に働く抗力の効果に比べて小さいものとみなしした。

流れが十分に発達した等流場を想定し、水深方向平均流速が無視できるものとすると、変形した植生の水深方向の

単位長さあたりに働く力の流下方向成分 F_{vx} 、水深方向成分 F_{vy} 、曲げモーメント M は、図-14を参考になると次のように書ける。

$$F_{vx}^* = \frac{1}{2} \rho C_D D^* (U^{*2} \cos \theta) \cos \theta$$

$$= \frac{1}{2} C^* \frac{l_0^*}{\gamma} (U^{*2} \cos \theta) \cos \theta$$

$$F_{vy}^* = -\frac{1}{2} \rho C_D D^* (U^{*2} \cos \theta) \sin \theta$$

$$= -\frac{1}{2} C^* \frac{l_0^*}{\gamma} (U^{*2} \cos \theta) \sin \theta$$

$$\begin{aligned} M^*(y^*) &= \\ &\int_y^* [F_{vx}^*(\eta^*)(\eta^* - y^*) + F_{vy}^*(\eta^*)\{\delta^*(\eta^*) - \delta^*(y^*)\}] d\eta^* \end{aligned} \quad (15)$$

$$\delta^*(y^*) = \int_0^{y^*} \left(\frac{d\delta^*}{dy^*} \right) dy^* \quad (16)$$

ここで、 $D^* = D/h$ 、 $\delta^* = \delta/h$ 、 $I^* = l/h$ 、 $y^* = l_0^* N_0$ 、 D ：植生の直径、 δ ：植生の変位量、 N_0 ：単位面積当たりの植生の本数（ L^2 の次元を有する）である。曲げモーメント M と曲げ剛性 EI の間には、

$$\frac{M^*}{(EI)^*} = \frac{\frac{d^2 \delta^*}{dy^*}}{\left\{ 1 + \left(\frac{d\delta^*}{dy^*} \right)^2 \right\}^{3/2}} \quad (17)$$

が成り立つ。ここで、 $(EI)^* = (EI)/(pU_0^{*2}h^4)$ である。一方、植生長 l_0^* と変形した状態での植生高さ l の間には、

$$l_0^* = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta^*}{dy^*} \right)^2} dy^* \quad (18)$$

が成立しなければならない。これらを次の境界条件のもとに解く。

$$\frac{d\delta^*}{dy^*} - \delta^* = 0 \quad at \quad y^* = 0 \quad (19)$$

所定の流速場が与えられたとき、境界条件、式(19)のもと、式(13)～(17)をRunge-Kutta法で解く。式(18)を満たすように I^* を試行錯誤で与え、式(12)～(19)を同時に満たす解を求めれば、植生の変形状態が求められる。

図-15は、対数則が成立する滑面開水路流中に1本だけ

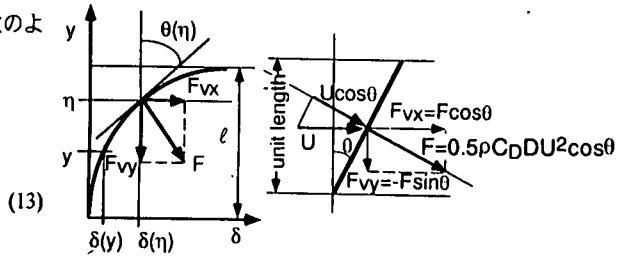


図-14 変形する植生粗度に働く流体力

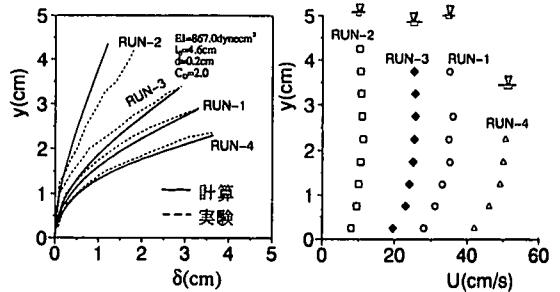


図-15 植生変形の計算値と実測値

植生粗度要素（OHP用透明シートを短冊状に切ったモデル）を設置したときの植生の変形の実測値と計算結果を比較したものである。OHP用透明シートは、 $EI = 8.67 \times 10^2$ dynecm²、 $l_0 = 4.5$ cm、 $D = 0.2$ cm であり、抗力係数は $C_d = 2.0$ としている（ここで、用いた植生モデルは平板形状をしているため、平板の抗力係数としてしばしば用いられる $C_d = 2.0$ を用いた）。図より、本解析モデルの妥当性が確認できる。

(3) 植生の変形と流れの強さの関係

室田・福原⁵⁾は流れのモデルとして、混合距離モデルを用い、植生の変形モデルとカップリングして解くことから、流れ場と植生の変形状態を同時に求めている。ここでもこれを踏襲し、流れのモデルと植生変形のモデルを解き、両者を同時に満足する解を求める。計算手順は次のようである。1) 植生の変形状態を適当に仮定し流れ場を解く、2) 得られた流速場を用いて植生の変形を計算、3) 得られた変形状態が1)で仮定した変形とほぼ等しければ計算を終了し、等しくなければ1)へ戻る。ここでは、植生高さの誤差が植生長の1%以下となることを収束条件として課した。

計算で与えるパラメータは、 $(EI)^*$ 、 γ 、 C^* 、 I^* の4つであり、これらを適当に与えて計算した結果のうち、流速分布および植生の変形状態とReynolds応力分布を示すと図-16のようになる。

植生の変形量を代表する量として植生高さ l_0 に着目すると、様々なパラメータを変化させた計算結果は、図-17に示されるように $yEI/(pU_0^{*2}l_0^4)$ という無次元パラメータに対

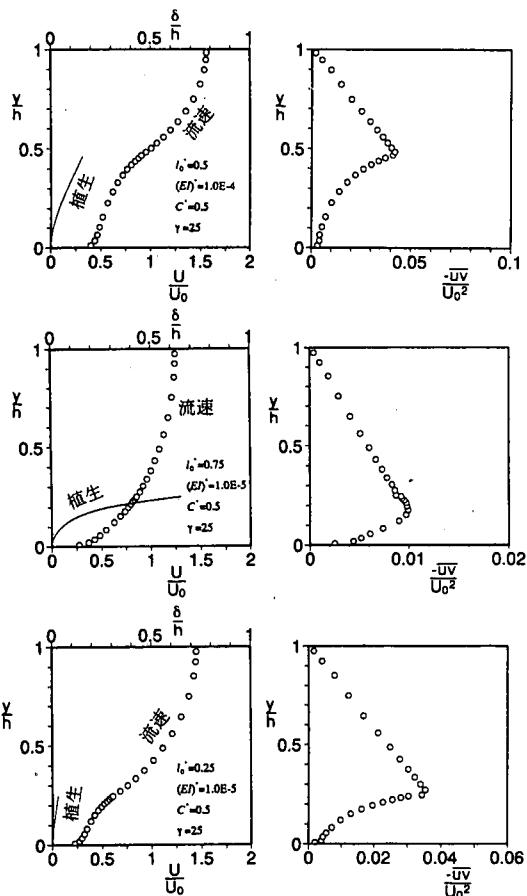


図-16 変形する植生粗度を伴う流れの計算例

してほぼ一意的に決まる。図には室田・福原⁵⁾による水路実験での実測値、3節のモデルF1の実測値も併示したが、計算値と実測値との対応は概ね良好である。計算値に対する U/l_0 と $\gamma EI/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ の関係は次のように近似できる。

$$\frac{l}{l_0} = 1 - 0.89 \exp \left(-4.66 \frac{\gamma EI}{\rho u_{*0}^2 l_0^4} \right) \quad (20)$$

$$\left(0.03 \leq \frac{\gamma EI}{\rho u_{*0}^2 l_0^4} \leq 2.0 \right)$$

なお、Kouwenら^{3), 4)}は様々な密生度、剛性を持つ植生モデルを用いた水理実験から、上式と同様な植生の変形と流れの強さを関係づける実験式を提案しているが、彼らが用いたパラメータは、ここで記号を用いて表現すれば $N_E I/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ であり、次元を有することから、やや一般性に欠けるものと思われる。

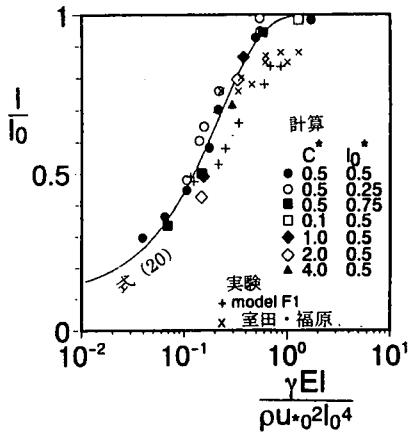


図-17 植生の変形量と流れの強さの関係

(4) 抵抗則と河床に作用するせん断応力

上述の計算結果を C^* , l_0^* 一定条件のもとで、流速係数 U/u_{*0} と $\gamma EI/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ の関係を表示したものが図-18の黒丸である。図には、植生の変形の影響として植生高さが減った効果のみを考慮し、式(20)から得られる U/l_0 から l^* を求め、 l_0^* を l^* に置き換える、剛な植生粗度を有する流れの抵抗予測式(7)～(9)から U/u_{*0} を求めたもの（方法(a)）を破線で併示した。これより、植生の変形の効果を単に植生高さが減ったと考えるだけでは不十分であり、植生が傾くことによる植生に働く流体力の減少効果も考慮しなければならないことがわかる。近似的に、植生が平均的に $\theta_e = \cos^{-1}(l/l_0)$ だけ傾き、それによって植生粗度層内の見かけの無次元密生度が、 $C_e^* = C^* \cos^2 \theta_e = C^* (l/l_0)^2$ に減少したものとみなし、 C^* を C_e^* に、 l_0^* を l^* にそれぞれ置き換えて、抵抗予測式(7)～(9)から U/u_{*0} を求めたもの（方法(b)）を実線で示すが、こうした近似によって変形効果を簡単に表現できる。図-19は3節のモデルF1の実験の実測値と上記の方法による計算結果とを比較したのであるが、その対応は概ね良好であり、上記の方法(b)によって変形する植生粗度を伴う流れの抵抗則を概ね評価することができる。

抵抗則と同様に、計算結果を C^* , l_0^* 一定条件のもとで、無次元河床せん断応力 u_{*0}/u_{*0} を $\gamma EI/(\rho u_{*0}^2 l_0^4)$ に対して表示したのが図-20である。図より、植生が傾くように変形することによって u_{*0}/u_{*0} が増加し、河床に作用するせん断応力が増加することがわかる。図には、抵抗則の場合と同様に、剛な植生粗度を伴う流れの無次元化された河床に作用するせん断応力を予測式(10)から、上記の方法(a)、方法(b)によって近似された結果をそれぞれ破線、実線で併示している。これより、河床に作用するせん断応力を検討する場合でも、植生の変形の効果を単に植生高さが減ったと考えるだけでは不十分であり、植生が傾くことによる植生に働く流体力の減少効果も考慮しなければならないことがわかる。

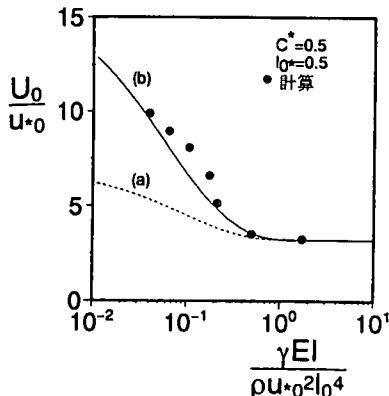


図-18 植生変形による流速係数の変化

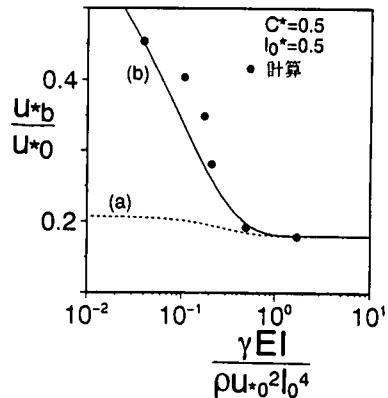


図-20 植生変形による河床せん断応力の変化

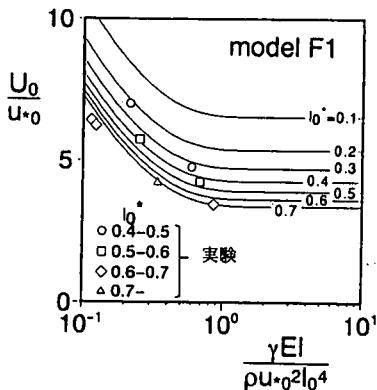


図-19 流速係数の計算値と実測値の比較

と同時に、方法(b)により植生が変形する場合の河床せん断応力を概ね評価できるようである。

ただし、ここでは、植生に作用する摩擦抵抗を考慮しておらず、植生の変形が大きくなった場合などにはそうした効果を取り込んだ解析を行う必要もある。

5. 植生の変形、揺動効果のまとめ

2節で示したように、剛な植生粗度を伴う流れでは、無次元植生密度 C^* 、相対植生長さ l_0^* が与えられれば、近似的に、抵抗則、河床に作用するせん断応力の評価ができる（式(7)-(10)）。

これに変形の効果が加わると、流れの強さと植生の変形がバランスするように、 III_0 と $\gamma EI / (\rho u_{0*}^2 l_0^4)$ の関係が決まる（式(20)）。したがって、変形の効果を考える場合には、 C^* 、 l_0^* の他に $\gamma EI / (\rho u_{0*}^2 l_0^4)$ というパラメータが重要となってくる。なお、式(20)から剛な植生は $EI \rightarrow \infty$ とすると $III_0 \rightarrow 1.0$ となり、変形を考えた場合の一つの極限となっている。植生の条件 $\gamma EI / l_0$ が与えられると、式(20)から u_{0*} の増加とともに III_0 は減少し、植生は大きく変形することになる。植

生の変形は植生高さを減少させると同時に、流れに対して傾くことで流れから受ける流体力を減少させ、その結果、抵抗は減少し、逆に河床に作用するせん断応力は増加する（図-18～20）。

しばしば、植生が河床砂礫の浸食防止効果を有する理由として、植生が河床に倒れ込んで砂礫を被覆するために浸食が防止されるといわれている。このときの、浸食防止効果には2種類のメカニズムが存在することに注意すべきである。第1に、本研究で示したように、植生の存在が河床せん断応力を抑制する効果、第2に、植生の存在が直接的に砂礫の移動を妨害する（例えば、植生が絡み合つてあたかもネットのような状態になって砂礫の移動を妨害する）効果である。第2の効果はある程度粒径の大きな砂礫に対してのみ有効であろう。ここで、注意したいのは、これまでの解析で示されたように、第1の効果は、植生が倒れるほど小さくなるということである。もちろん、解析で無視された植生に作用する摩擦抵抗の効果は存在するが、それは一般に形状抵抗の効果に比べて小さいものと考えられる。植生が倒れ込むことが必ずしも砂礫の浸食防止効果を上昇させることにはつながらない。

さて、もし植生の揺動の効果が無視し得るならば、以上の変形による効果のみで十分流れ場を評価することができるものと考えられる。しかしながら、実際には植生はある程度密度が大きく、揺動の振幅が大きくなると、揺動そのものが流れ場に及ぼす影響が無視できなくなるものと考えられる（3節）。こうした効果については、現時点ではよくわからない部分が多いが、とにかく揺動が流れに対して影響し、流れの抵抗を増加させる働きを持つようである。したがって、変形のみの効果を考えた図-18は図-21のように揺動の効果を考慮した修正が必要となるものと考えられる。図中の実線は植生の変形効果のみを考慮したときの抵抗を表し、破線が揺動の効果を考慮した場合の抵抗を表している。ここで、破線が何本も書かれているのは植生

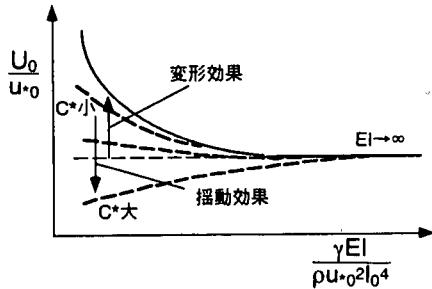


図-21 変形、振動に伴う流速係数の変化

の密生度による違いを予想してのものである。今後、図-21に示した破線（振動による抵抗の増加分）を定量的に評価するための実験・解析手法の開発が望まれる。特に、植生の振動は非定常な流れ構造と関係していると考えられることから、非定常な流れ構造の解析手法の活用が望まれる。

6. 実植生の抵抗則と河床せん断応力の推定

ここでは、河川敷の代表的な直立性草本類であるヨシ、セイタカアワダチソウの密生度、剛性の調査を行い、これらのデータと前節までに得られた知見をもとに、これらの植生を伴う流れの抵抗則や河床に作用するせん断応力の推定を試みる。ただし、植生の振動の効果については、現時点では不明な部分が多いため、変形の効果のみを考慮することとする。

(1) 実植生の剛性、密生度調査

a) 調査方法と調査地点

本研究で行った現地調査の手順は以下の通りである。
1) 相観により調査対象とする植生種が優先する群落を抽出する。2) 群落の任意の位置にコドラート（本調査では1m × 1m）を設定し、調査対象の植生種が何本存在するかを数え、密生度を得る。コドラートは異なる数カ所において設定し平均を取る。3) 群落内の任意の10個体を選び、以下の項目について調べる。

- ・植生高さ：コンベックスにより測定
- ・茎部の直径：植生高さの約半分の高さの茎部の直径をコンベックスにより測定
- ・曲げ剛性：図-22に示されるように、植生の頂部（葉の部分は除く）に、水平に荷重Wをかけ、変形した後の植生高さlを測定する。そして、荷重を徐々に変化させ、数段階の荷重に対するデータを得る。曲げ剛性に関しては、後述するように植生の根から先端部まで茎部の直径、剛性が一定であると仮定して、先端部に水平に荷重がかけられた片持ち梁の有限変形に関する理論式と比較することによって、曲げ剛性を推定する。

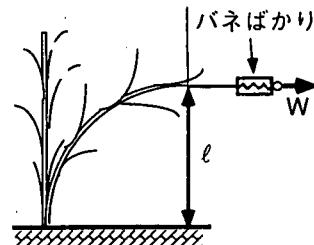


図-22 植生の曲げ剛性試験

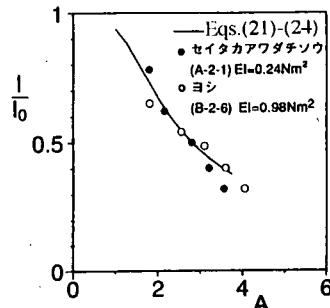


図-23 植生の曲げ剛性推定図

調査は、1994.8.9-8.11にかけて、桂川西大橋下流付近(A-1, A-2の2群落)及び木津川京阪橋梁付近(A-3, B-1, 2, 3の4群落)で行った。ヨシ、セイタカアワダチソウそれぞれについて、3群落を抽出して上記の調査を行っている。

b) 曲げ剛性推定法

曲げ剛性EIが全長にわたって一定であると仮定し、垂直に立った長さ l_0 の片持ち梁の先端に水平に荷重Wが加わった場合の有限変形の理論式は次のように書ける¹⁴⁾。

$$\frac{l}{l_0} = \frac{2B}{A} \cos \varphi_0 \quad (21)$$

$$A = \sqrt{\frac{Wl_0^3}{EI}} = F\left(B, \frac{\pi}{2}\right) - F(B, \varphi_0) \quad (22)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{2 \sin^2 \varphi_0}} \quad (23)$$

$$F(B, \varphi_0) = \int_0^{\varphi_0} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - B^2 \sin^2 \varphi}} \quad (24)$$

上述の理論式において、式(24)の積分を、 φ_0 を適当に与えて数值的に解くことにより式(22)を満たすような φ_0 を試行錯誤によって求める。これにより、 Wl_0 と A の関係が図-23の実線のように求められる。図には EI を最も理論値に

表-2 実植生の曲げ剛性、密生度調査結果

	$N_0 (\text{m}^{-2})$	$l_{\text{mean}} (\text{m})$	$l_{\text{max}} (\text{m})$	$D_{\text{mean}} (\text{m})$	$EI_{\text{mean}} (\text{Nm}^2)$	$EI_{\text{std}} (\text{Nm}^2)$
A-1	38.3	1.782	0.123	0.0067	0.0009	0.970
A-2	40.0	1.482	0.114	0.0062	0.0007	0.675
A-3	27.7	2.060	0.134	0.0085	0.0012	0.720
B-1	21.3	2.112	0.141	0.0088	0.0009	0.830
B-2	25.7	1.657	0.116	0.0071	0.0009	0.430
B-3	22.3	1.700	0.140	0.0081	0.0007	1.280

1994.8.9-8.11 A:セイタカアワダチソウ B:ヨシ

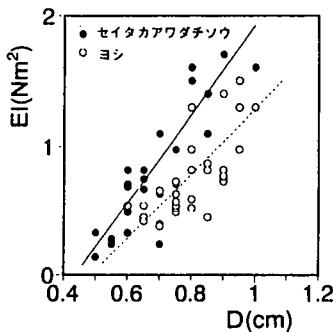


図-24 植生の直径と曲げ剛性の関係

適合するように与えた時の実測値を併示したが、これらの対応は良好である。この図より、最も理論値と実測値が合うように決められた EI が推定された曲げ剛性となる。

c) 調査結果と考察

調査における群落ごとの密生度 (N_0 : 単位面積当たりの植生本数), 植生長 l_0 , 直径 D , 曲げ剛性 EI の平均値と標準偏差を表-2に示す。密生度, 植生長, 直径, 曲げ剛性ともに群落によってばらつきが見られ、また、同一群落内でも個体差が見られる。図-24は植生の直径と曲げ剛性の関係を示したものであるが、ほぼ一意的な関係にあり、植生径が大きくなると増加する傾向がみられる。植生の剛性の個体差は、植生の材料特性ではなく幾何的性質にばらつきがあるためと考えられる。

季節によって植生長や密生度、剛性など、諸量に変化があると考えられるが、季節ごとの比較は未着手であり、他の植生種の調査と併せて今後の課題である。

(2) 抵抗則と河床に作用するせん断応力の推定

上記の調査から、ある植生種に対して、密生度、剛性等を一定として与えることには無理があるが、実植生の抵抗則の概略を見積るという観点から、ヨシ、セイタカアワダチソウの密生度、剛性等についてそれぞれ表-3のような代表値を設定し、抵抗則と河床に作用するせん断力を見積る。なお、流水中では葉は流れ方向にたなびくため、摩擦抵抗として働くものと考えられるが、ここでは葉の摩擦抵抗は茎部の形状抵抗(係数)の中に含めて考える。また、葉

表-3 設定する代表値

	$N_0 (\text{m}^{-2})$	$l_0 (\text{m})$	$D (\text{m})$	$EI (\text{Nm}^2)$	C^*	γ
セイタカアワダチソウ	35.3	1.775	0.00713	0.788	0.447	111.2
ヨシ	23.1	1.823	0.00800	0.847	0.337	76.8

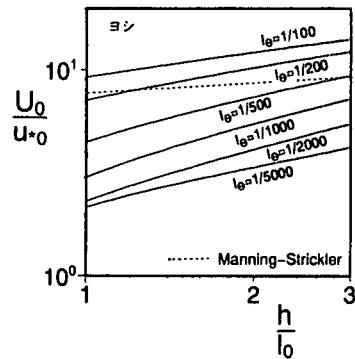


図-25 流速係数の推定値

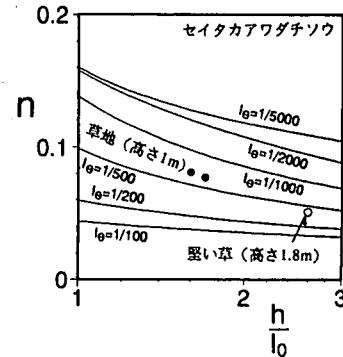


図-26 Manning の粗度係数の推定値

の鉛直分布についても無視している。これらは、今後の詳細な植生の構造調査と合わせて今後の課題である。

4節の方法(b)により、流速係数、河床に作用するせん断応力を求める。水深の変化に対する流速係数ならびにこれより逆算されたManningの粗度係数の変化をそれぞれ示したのが図-25、図-26である。図-25には植生長さを等価砂粗度とした場合のManning-Strickler式による流速係数を破線で併示した。図より、流速係数は通常の粗面乱流のように相対水深のみの関数とはならず、エネルギー勾配による変化が大きいこと、Manningの粗度係数は洪水痕跡から逆算された草地、堅い草の値¹⁵⁾と同程度となるものの、流速係数と同様にエネルギー勾配による変化が大きいことがわかる。なお、参考のためこのときの水深に対する植生高さの変化を図-27に示す。

河床での摩擦速度 u_* の水深に対する変化をエネルギー勾配ごとに示したのが図-29である。図には、砂粒径 d_s ごとの移動限界摩擦速度 u_* を破線で併示した。ここで、砂粒

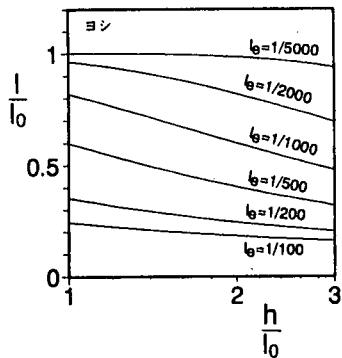


図-27 植生高さの減少率の推定値

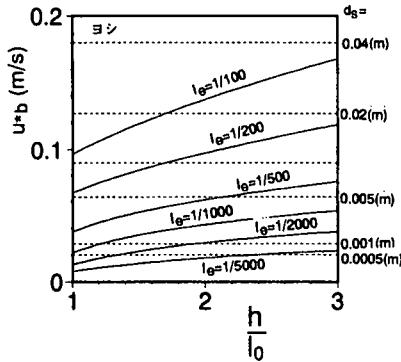


図-28 河床摩擦速度の推定値

Reynolds 数が十分大きいとし、無次元限界掃流力 $\tau_{c*} = u_{*c}^2 / ((\sigma/\rho - 1)gd)$ = 0.05 としている。この図より、勾配ごとに植生高さと比較してどの程度の水深でどの程度の砂粒径の砂が動き出すかが評価でき、植生粗度による砂面侵食防止効果の1つの目安を与えるであろう。

7. 結 論

本論文では、河床が柔軟な植生粗度に覆われた2次元等流場を対象として、植生の変形、揺動が流れに及ぼす影響を検討した。生きた植生という観点からみれば、植生には様々な形態があり、これらを一概に議論することは難しい。しかしながら、本研究では、直立しているが柔軟な構造を有する粗度として直立性の草本類を抽象化・一般化し、そうした粗度を伴う流れに対する理解を進められたものと考える。本論文で得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 植生モデルを用いた水路実験から、植生の変形、揺動効果について検討し、変形効果によって流れの抵抗が減少すること、組織的な揺動効果によって流れの抵抗が増加することを確認した。さらに、それらの要因に関して考察した。

(2) 植生の変形効果のモデル化を行い、植生が傾いて変形する場合の種々の密生度、剛性を有する植生粗度の抵抗則および河床に作用するせん断応力の評価法を提案した。

(3) 河川で一般的に見られるヨシおよびセイタカアワダチソウの剛性と密生度を調査し、それをもとに河床がこれらの植生で覆われた流れの抵抗則ならびに河床に作用するせん断応力の推定を行った。

謝辞：本研究を進めるにあたり、流れの数値解析に関する助言を頂いた群馬大学工学部清水義彦助教授、実験ならびに解析に熱心にご協力いただいた岡田敏治氏（当時・金沢大学大学院生、現・（株）日水コン）、長崎敏範氏（当時・金沢大学大学院生、現・富山県）および藤井康嗣氏（当時・京都大学大学院生、現・大阪府）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 清水義彦、辻本哲郎、中川博次、北村忠紀：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/I-15, pp.31-40, 1991.
- 2) 清水義彦、辻本哲郎、中川博次：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/I-19, pp.35-44, 1992.
- 3) Kouwen,N. and Unny,T.E.: Flexible roughness in open channel, Jour. of the Hydraul. Div., ASCE, Vol.99, HY5, pp.713-728, 1973.
- 4) Kouwen,N. and Unny,T.E. and Hill,H.M.: Flow retardance in vegetated channels, Jour. of the Irrig. and Drainage Div., ASCE, Vol.95, IR2, pp.329-342, 1969.
- 5) 室田 明、福原輝幸：直立性の植物を有する開水路の流れ構造について、水理講演会論文集、第28巻、pp.225-331, 1984.
- 6) 福原輝幸：開水路乱流の構造解析とその応用に関する研究、大阪大学学位論文、72p., 1983.
- 7) 池田駿介、金沢 稔、太田賢一：可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生、土木学会論文集、No.515/I-31, pp.33-43, 1995.
- 8) 池田駿介、館健一郎：スペクトル応答解析による穂波の成因に関する研究、土木学会論文集、No.539/I-35, pp.43-52, 1996.
- 9) 日野幹雄、神田 学、稻垣 聰：植生一大気境界面における大規模渦構造と運動量交換に関するLESモデルによる検討、土木学会論文集、No.461/I-22, pp.39-48, 1993.
- 10) Rodi, W. : Turbulence models and their application in hydraulics, 2nd ed., IAHR, p.29, 1984.
- 11) 室田 明、福原輝幸：水生植物を有する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.338, pp.97-103, 1983.
- 12) 中川博次、辻本哲郎、清水義彦：相対水深の小さい流れの構造に関する実験的研究、土木学会論文集、No.423, pp.73-81, 1990.
- 13) 日野幹雄：スペクトル解析、朝倉書店、300p., 1977.
- 14) 土木学会編：土木工学ハンドブック（上）、技報堂、p.165-166, 1974.

- 15) (財) リバーフロント整備センター編集, 建設省河川局治水課監修: 河道内の樹木の植樹・伐採のためのガイドライン(案), 山海堂, pp.47, 1994.
- 16) 中川博次, 辻本哲郎, 北村忠紀, 藤井康嗣: 流れによって変形する植生粗度の抵抗則, 水工学論文集, 第39巻, pp.465-470, 1995.
- 17) Tsujimoto, T., Okada, T. and Kitamura, T.: Turbulent flow over flexible vegetation-covered bed in open channel, *KHL-Comm.*, Kanazawa Univ., Vol.2, pp.31-39, 1990.
- 18) Tsujimoto, T., Kitamura, T., Fujii, Y. and Nakagawa, H.: Hydraulic resistance of flow with flexible vegetation in open channel, *Jour. of Hydroscience & Eng.*, JSCE, Vol.14, No.1, pp.47-56, 1996.

(1997.8.28 受付)

STUDY ON FLOW OVER FLEXIBLE VEGETATION-COVERED BED

Tetsuro TSUJIMOTO and Tadanori KITAMURA

Flow over flexible vegetation-covered bed was investigated by the flume experiment and the numerical analysis. The experimental results showed that deformation of plants reduces flow resistance and waving motion of plants increases flow resistance. The numerical model of which a k- ϵ turbulence model is coupled by a model of deformation of plants explained the reduction of the flow resistance caused by the deformation of plants. The model also clarified the relationship between flow condition and quantity of deformation. The waving motion causes heterogeneity of vegetation layer and it brings an additional momentum transfer. It is supposed that the additional momentum transfer is the cause of the increase of flow resistance. Finally, flow resistance and shear stress acting on a bed in some kinds of flood plain vegetation was estimated.