

植生を伴う開水路流れの構造に関する研究

Open Channel Flow with Water Plants

京都大学工学部 中川 博次 Hiroji NAKAGAWA
金沢大学工学部 辻本 哲郎 Tetsuro TSUJIMOTO
愛媛大学工学部 清水 義彦 Yoshihiko SHIMIZU

The properties of flow in vegetated channels are investigated through laboratory experiments. The water plants are simulated by a group of cylinder with the same height, and the turbulence measurements are conducted. The equilibrium velocity in the vegetated region of water depth is determined by the bed slope, the concentration and the diameter of plants. The free surface flow over the vegetation is faster than the equilibrium velocity for the inside of vegetated region, and some mechanism plays a role of momentum exchange to accelerate the flow in the vegetated region near the interface with the free-surface flow region. In order to clarify this mechanism are inspected the mixing length, the correlation coefficient of the turbulence motion, the spectral characteristics of velocity fluctuation and so on.

Keywords: *Vegetated channel, open channel flow, turbulence, velocity distribution*

1. 序 論

実河川の河床や河川敷には葦や灌木などの植生群落がしばしば見られる。洪水の疎通能力阻害といったマイナス面に加え、植生による水衝・洗掘抑制（堆積促進）、植生による自浄作用の促進、植生による様々な生態棲息場の保全、親しみやすい水辺環境の醸成などプラス面の積極的評価のために、近年、植生の絡む水理現象の解明が強く望まれている。本研究ではこうした点に鑑み、植生上の流れの構造についての基礎的知見を得ようとしたものである。すなわち高さのそろった円柱が等しいスペーシングで配列された植生群モデルを実験水路に用意し（水流にたいしてほとんど変形しない剛（rigid）なタイプと、変形し、振動・揺動する柔軟（flexible）なタイプを比較した）、その上に2次元等流を導き、流速分布、乱れの統計特性量を測定に基づいて検討する。

2. 実験方法と実験結果の概要

実験は長さ12m、幅0.5mの可変勾配直線水路に、植生モデルを配置しその上に2次元等流を導いて、水路中央においてホットフィルム流速計および一部、直径3mmの小型プロベラ流速計を用いて、流速測定を行なった。植生モデルについては、ほとんど変形のない直径0.1mmのポリスチレン樹脂製円柱を使ったケースと、水流に対して顕著に変形し、振動・揺動する直径0.035mmの塩化ビニール製円柱を用いたケースに大別され、それぞれの実験番号にR、Fを用いて区別した。いずれの植生モデルも流下方向・横断方向とも1cm間隔（s）で1本づつアクリル樹脂製板に植えつけこれを水路床に敷いた。1本の植生の高さ（k）はR、Fケースでそれぞれ4.2cm、5.6cmである。水路勾配、水深（路床から水面までの高さをH、植生頂部から水面までの高さをh、 $h=H-k$ ）を変えて実験を行なった。実験条件の概要は次のとおりである。エネルギー勾配 $I=1/80\sim 1/1000$ 、 $H/k=0.90\sim 2.50$ 、Froude数 $Fr=0.08\sim 0.4$ である。また u_* は植生頂部で定義されるものとし、Reynolds応力の実測値より求めた $(u_* \sqrt{gh})$ 。流速測定においてはホットフィルムでは200Hzで45秒間、プロベラ流速計では50Hzで45秒間の測定を行ない、統計処理した。

実験で得られた時間平均流速（ u ）、乱れ強度（ u'_{rms} 、 v'_{rms} ）およびReynolds応力（ $-\overline{u'v'}$ で表示）の分布例を図1(a)～(h)に示す。図より、植生内部での流れは表面流との境界面近傍から離れると水路勾配（正確にはエネルギー勾配）に応じて一定の流速値（固有浸透流速と呼び u_s と記す）を示す。図2は u_s とエネルギー勾配の関係を示すもので u_s はエネルギー勾配の平方根に比例し、いわゆる 非Darcy則の領域であることがわかる。すなわち “透過係数”

を K として次のように表される。

$$u_s = K\sqrt{I} \quad (1)$$

なおこの固有浸透流速をもつ一定の流速域では、流速変動強度はほぼ一定で小さく、Reynolds応力は存在しない。

植生内でも表面流（植生上の流れ）との境界面に近づく、表面流の早い流速に引きずられた速度勾配を持つ領域が現われる。植生内の流れが非Darcy的であることは、その領域内に相関を持つ流速変動が産み出され、これがReynolds応力に相当する分、すなわち運動量交換を誘起することが期待され、実際表面流との境界面からReynolds応力の分布が植生層内にしみこんできている。植生上の表面流領域では、乱れの鉛直方向成分の分布が若干丸みを帯びているものの乱れ強度、Reynolds応力分布とも、通常の粗面乱流のそれと変わらず、同等の乱流構造を持つものと思われる。なお、図1を見るかぎりでは剛な植生と柔軟なそれとで流れの性状に大きな差は認められない。

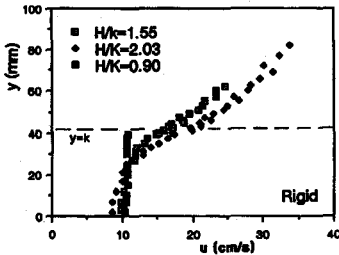


図1(a) 流速分布 (rigid)

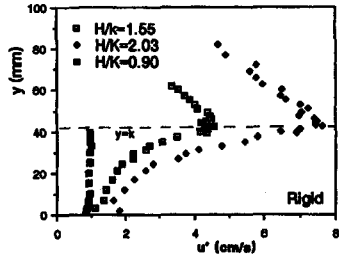


図1(b) 流下方向乱れ強度分布 (rigid)

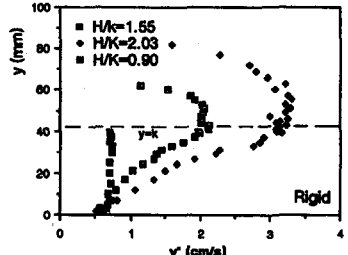


図1(c) 鉛直方向乱れ強度分布 (rigid)

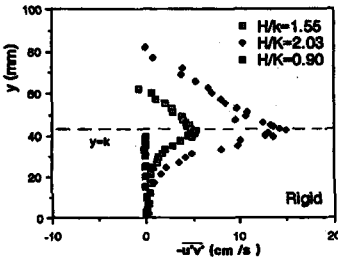


図1(d) Reynolds応力分布 (rigid)

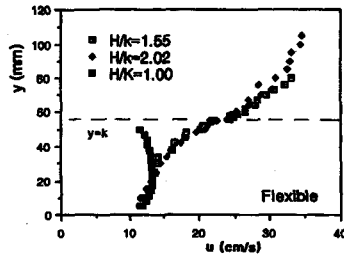


図1(e) 流速分布 (flexible)

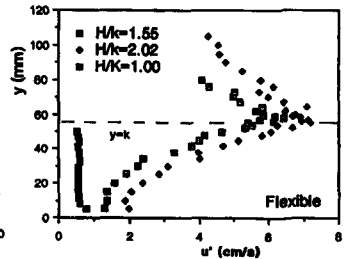


図1(f) 流下方向乱れ強度分布 (flexible)

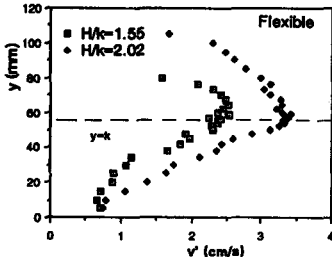


図1(g) 流下方向乱れ強度分布 (flexible)

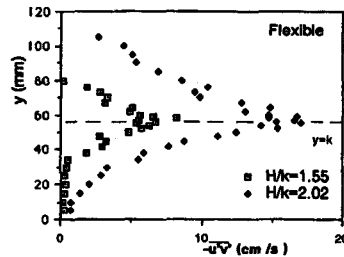


図1(h) Reynolds応力分布 (flexible)

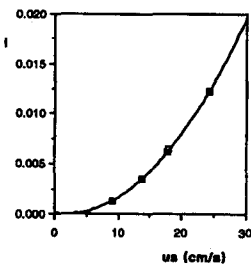


図2 透過係数の決定

3. 植生内の流れの構造

植生内の固有浸透流速域については、そこでの流体塊についての流下方向の力の釣り合い式から次式が書け、これは式(2)を導く。

$$\rho g I = (1/2) C_D \rho u_s^2 D / s^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ ：水の密度である。図2より決められた K より逆算される植生要素（円柱）の抗力係数 (C_D) は約1.5となり、一樣流中の円柱の抗力係数にほぼ一致した値となっている。すなわち植生モデルの直径 (D)、その配置間隔 (s)、水路勾配が与えられれば、固有浸透流速 u_s は決定される。

植生内の表面流との境界に近いところはいわゆるturbulent Couette的性質を有すると考えられるので、境界面での流速値 u_k を用いて、次のような流速分布で近似されよう。

$$(u-u_s)/(u_k-u_s) = \exp(\beta y) \quad (3)$$

ここで β は表面流の運動量が輸送されている深さスケールの逆数である。式 (3) の流速分布を実験データと比較した例が図3であり、ここで u_k は実測データを用いて整理してある。固有浸透流れの領域に近いところでは $u-u_s$ が小さくなって誤差が目立つが、概ね式 (3) の成立は認められる。さらに、この領域でのReynolds応力の変化もつぎのように指数関数で近似してみた。

$$-\overline{u'v'}/[-\overline{u'v'}(0)] = \exp(\alpha y) \quad (4)$$

実測データとの対応は図4に示すとおり良好である。ここでは α が影響領域の深さスケールの逆数である。

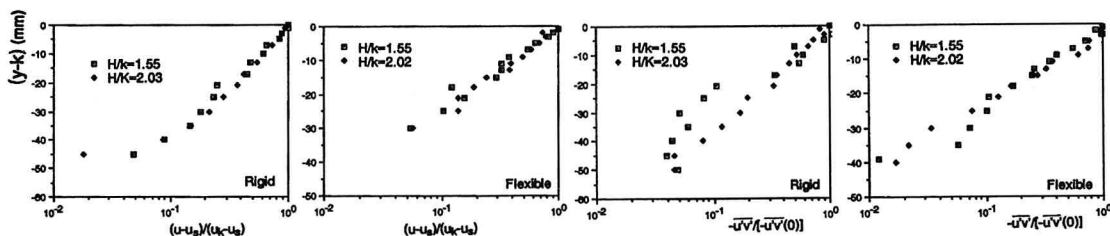


図3 植生内での流速の変化

図4 植生内でのReynolds応力の変化

α , β と $(h/k)I$ の関係を図5に示す。これによると、 α , β とも $(h/k)I$ に対して減少する傾向にある。これは、 $(h/k)I$ が植生頂部でのせん断応力に比例すること、またこれが植生頂部での圧力変動強度と比例していること、そして浸透層流れで表面流の運動量からの染み込み強さはそれに相関することに依存しているものと考えられる。こうした運動量輸送は比較的ゆっくりした周期的運動として染料をトレーサーとした可視化で確認された(写真1参照)。さらに流速変動のスペクトルにもこうした低周波成分の含まれることが確認された。図6はホットフィルム流速計の出力よりFFT法で得られた流速変動 (u', v') の周波数スペクトルの計算例で、(a) 固有浸透流速領域ではなだらかなスペクトル性状を呈するのに対し、(b) 表面流の影響域では1.0Hzあたりにピークを認めることができる。

植生内流れについても誘導流速 $(u-u_s)$ について混合距離モデルが適用されるとするなら式 (3) の流速分布と式 (4) のReynolds応力分布から、混合距離の分布が次のように表されることになる。

$$L = \{u_s/[(u_k-u_s)\beta] \} \cdot \exp[(\alpha/2-\beta)y] \quad (5)$$

植生内流れと表面流の境界面での混合距離 (L_0) は、次のようになる。

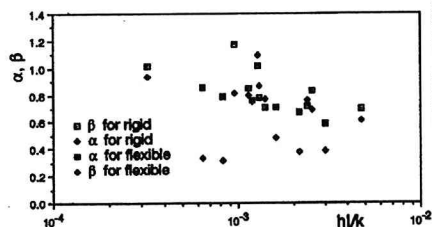


図5 植生内への表面流の影響深さスケール

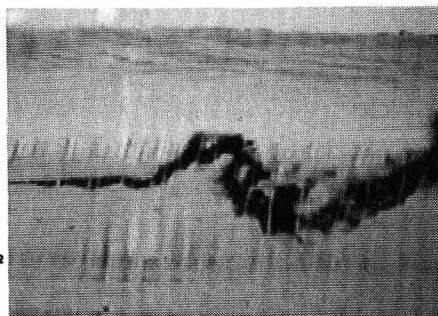


写真1 植生内流れと表面流の間の交換現象

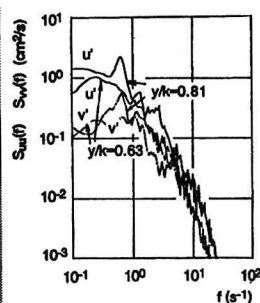


図6 植生内流れの変動流速のスペクトル

$$L_0 = u_* / [(u_k - u_s)\beta] \quad (6)$$

図7は植生と表面流域の境界面での混合距離の実測値と式(6)を比較したもので両者は良く一致している。

式(5)によると $\alpha/\beta > 2$ なら混合距離は深さとともに L_0 から減少, $\alpha/\beta < 2$ なら混合距離は深さとともに L_0 から増加することになる。また $\alpha/\beta = 2$ のときに限って, 混合距離は植生内で一定値をとる。図8に示す α/β の値はとくに剛な植生の場合ほぼ1.0であり, 式(5)で与えられる混合距離は植生内部では植生頂部より深さとともに増加する傾向があることを示している。図9には植生内流速分布のスプラインフィットによって求めた速度勾配から得られた混合距離の分布でデータのばらつきが大きいものの式(5)の特徴が認められる。

なお植生内での乱れの相関係数 (IT) の深さ方向分布は図10に示すようになっている。すなわち植生頂部でもっとも大きく, 植生の内部にはいるにつれ減少し, 固有浸透流速に至るところで消滅している。すなわち固有浸透流速域での流速変動強度は相関を持たず, 運動量交換には寄与しない。また流下・鉛直方向の乱れ強度の比 (K_{uv}) は, 植生頂部でやや大きい値をとるものの概ね開水路流れでの普遍値 (2.3/1.27) を保っている (図11参照)。

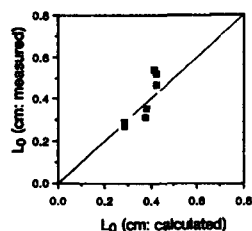


図7 植生頂部での混合距離

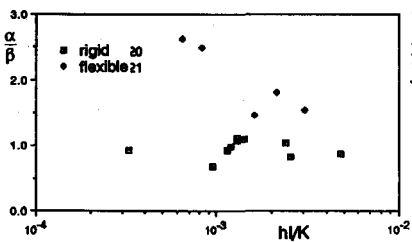


図8 α/β 値

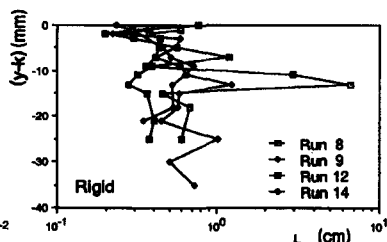


図9 植生内部の混合距離の分布

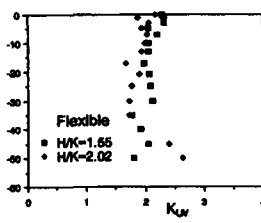
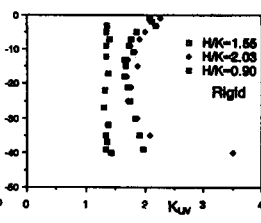
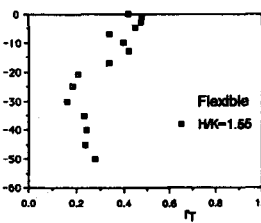
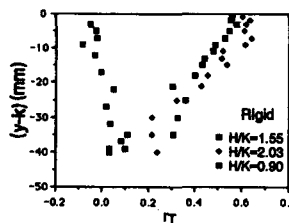


図10 植生内での変動速度の相関係数

図11 植生内での流下方向・鉛直方向の乱れ強度比

4. 植生上の流れの構造

植生上の流れについては第2章で述べたように乱れ強度・Reynolds応力分布が通常の開水路流れと変わらないことから, 次のような欠損則表示の対数則と比較してみた (図12)。

$$(u_{\max} - u) / u_* = -(1/\kappa) \ln[(y-k)/h] \quad (7)$$

ここに κ : Karman 定数である。図12によると, 植生近傍では速度勾配が対数則に比べて一様化する傾向が認められる。表面流域での乱れの相関係数 (IT) を調べると図13が得られ, また流下方向, 鉛直方向の乱れ強度の比 (K_{uv}) については図14が得られた。すなわち, 乱れの相関係数は植生との境界面近傍で通常の開水路乱流の値に比べ大きな絶対値をとり植生の先端で渦度が形成されているものと考えられる。また植生近くの表面流域では乱れの鉛直方向成分が相対的に大きくなり渦運動の等方化が示唆される。この領域の流速変動スペクトルは図15に示されるように浸透層内せん断乱流域と同程度の低周波数域でピークを持ち (図6参照), 組織的渦運動がこれからも類推される。なお植生との界面から十分離れたところではスペクトルに有意なピークは認められず, 良く知られた平衡形状を呈している。

植生内流れと同様, 流速分布のスプラインフィットによって混合距離を計算した例が図16に示される。先に式(6)で示した植生との境界面での混合距離の値が表面流の方からも確認され, 表面流は下方境界で (非ゼロの流

速のみならず) 非ゼロの混合距離を持っていることが特徴となっている。このことを考慮すると、表面流領域での混合距離の分布は、次のように表されよう。

$$L = (L_0 + ky)\sqrt{1-y/h} \tag{8}$$

すなわち混合距離がゼロとなるような河床の原点を植生内に L_0/k だけ入り込んだところを仮想的に考えることができるかも知れない。上記のような河床原点を考え、植生頂部での流速が与えられれば、流速分布は対数則表示でき、その水深にわたる積分によって抵抗則が知られることになる。

表面流の下方境界条件としての u_k についての実験値を検討してみると、次のようである。すなわち 今回の実験データについて言えば、図17に示すように u_k は h/k に対し減少傾向を示すが、一般的な傾向かどうかは判断できない。 u_k については経験的に決めてきた古典的な研究の立場からすれば、本研究で混合距離などの内容が明らかにされたので u_k を与えて抵抗則などの計算は可能となったものの、流れ構造の面からも u_k の決定機構を解明するのが望ましいと考えている。

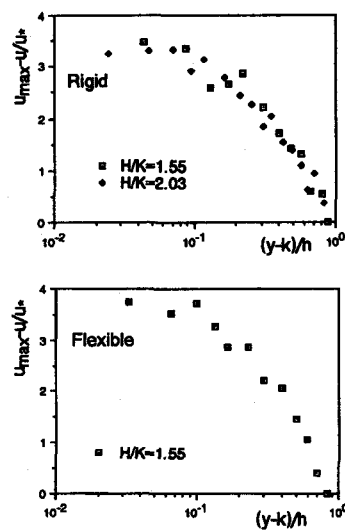


図 1 2 植生上流れの欠損則表示

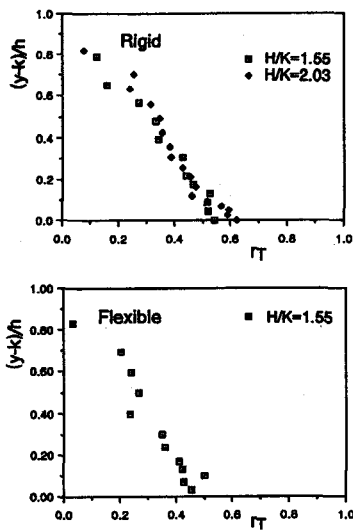


図 1 3 植生上流れの乱れの相関係数

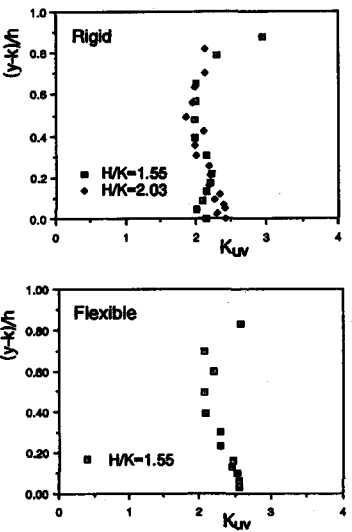


図 1 4 植生上流れの流下方向・鉛直方向の乱れ強度比

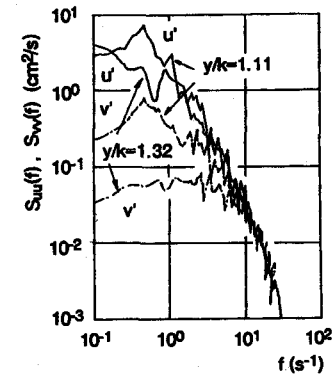


図 1 5 植生上流れの流速変動スペクトル

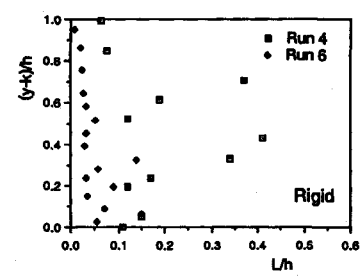


図 1 6 植生上流れ場での混合距離分布

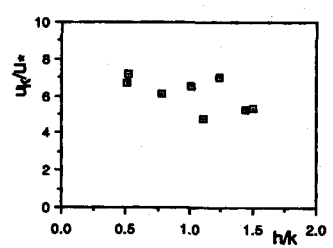


図 1 7 植生上流れの下方境界条件

5. あとがき

本研究では、近年注目を浴びている河道内植生についての水理学的基礎を明らかにすることを目的に、理想化・単純化された条件での実験的研究をもとに考察を行なった。とくに植生内流れと表面流の相互作用がこの問題のキーポイントであるにもかかわらず、その取り扱いが難しい。ここでも乱れ強度やReynolds応力の測定結果をもとに、植生群の頂部付近で興味深い過程の生じていることが類推された。とくに植生層への比較的低周波の流速変動を通した表面流からの運動量の持ち込みなどがいくつかの面から明らかにされたところが、本研究の成果であったと考える。しかしながら、結局は、植生層内と植生の上方の2層に分けて、あるいは植生内のみ、相互作用を押し込め、それぞれの独立した取り扱いになったことは否めない。また剛な植生と柔軟な植生を比較しながら実験値の検討を進めてきたが、期待したほどの相違が見いだせなかった。その原因の一つは同じ幾何特性を持つ剛な材料と柔軟な材料を見つけられなかったことにあり、今後工夫をしなければならない。