

植生を伴う流れの水理

Hydraulics of Flow with Vegetation in Open Channels

辻 本 哲 郎

Tetsuro TSUJIMOTO

1. まえがき

最近になって、河川に治水・利水に加えて親水機能も求めるようになり、各地で河川的环境というものがどうあるべきかの議論が活発化している。一級河川ではほとんどすべてについて河川環境管理基本計画が策定され、中小河川の中にも「ふるさとの川モデル事業」を初めとし、親水を意識した事業が進行しつつある。これらのなかで河道内のゾーニングを見ると、用語の違いは別として(i)整備ゾーンと(ii)自然ゾーンに大別できる。前者では河川敷などを整備し、“都市”公園化するもので、河川敷の凹凸や植生も整理され洪水疎通の面とのトレードオフは一般に小さい。これに対し、後者では生物の生息環境にも配慮し、また親水機能としては“自然学習”ゾーンなどと呼んで、河道内の植生などをなるべく残した“自然”に近いものが志向されている。植生や自然のままの河の形は洪水疎通の面からは必ずしも好ましくなく、「環境」に配慮の少なかった過去では、こうした「自然の形・状態」での水理特性についての知識の不十分さから、安全側の設計として過度の植生撤去、流路の直線化などが行なわれてきたようである。淀川での葦(蔭)原の焼却、“わんど”の撤去などへの住民の反対が新聞記事で取り上げられたのも、もう10年以上の前である。とにもかくにも、こうしたものを、よほど洪水疎通障害でないかぎり工夫して残そうという努力がされるようになったのは、賢明な選択であると思う。

2. 植生を伴う流れの水理学的問題

河川が植生と共存するためには植生と流れの相互作用を明らかにしておくことが重要であり、それが水理学の役目である。植生を伴う流れの水理学的問題としては、治水面から(1)洪水疎通障害の程度は？ もっと積極的に(2)植生の水制作用は期待できるのか？(最近植生を利用した多自然型(近自然型)河川工法⁴⁰⁾などという言葉も聞かれる)、また、植生域を河道に残すとすれば、(3)流送土砂の挙動とそれによる河床変動は(流路変動を含めて)どうなるか？ 環境面からは、(4)植生の自浄作用はどんなメカニズムなのか？ どれほど期待できるのか？ などが挙げられる。これらの基本は植生域の流れと非植生域の流れの間での運動量・物質(さらにはエネルギー)の交換・混合現象ということが出来る。

植生を伴う流れについての従来の研究を見ると、日本では余り例がないがアメリカ合衆国など外国では堤防にspillwayを設け、洪水流をfloodwayに導く方法が採用されることがよくあり、こうしたfloodwayのライニングに芝などの植生を用いたことから植生上の流れが研究されてきたのがわかる(Kouwénら²⁹⁾³¹⁾, Petryk & Bosmajian⁴⁵⁾, Chen³⁾, Temple⁵⁴⁾)。こうした場合ではいわゆる平均流速公式をもとにした1次元解析の立場がほとんどである。また高水敷、flood plainは植生の繁茂する場合が多く、洪水時のこうした流れの解析のための研究も行なわれてきた。大規模なfloodway、なかには本川の中にも樹木が残されている例も実際には少なくなく、洪水時のこれらの抵抗も研究対象となってきた。いずれも植生の疎通障害程度を評価しようとするものである。これらでは、植生域の平面分布が重要な要素となる。問題が複雑なせいか、抵抗評価に限定されてきたためか、扱いは

例えばヤナギのかん木群は縦断方向に細長いもの)。これは、横断面地盤高さ分布、冠水頻度分布と相関するものであらうと思われるが、より詳細かつ広範囲の調査が待たれる。

3. 2 河道内植生はどのような「性質」で代表されるか？

河川内の植物には様々な種類がある。それらをその形状に着目してパターン化すると、(1) 背の高い竹などの直立性樹木（幹部分が卓越）、(2) かん木（枝・葉が賑やかでこんもりしたかたちのもの）(3) 葦などのように茎・（細長い）葉とも直立であるが流れによって変形・振動・揺動するもの、(4) 葉が平たく、それが流れにたなびくもの、(5) 藻のように細長い植物が路床近傍で（髪の毛のように）たなびくものなどに区分されよう。

(1)や変形の少ない(3)のタイプの植生は比較的扱い易い。水没していない条件でしかも充分水深があって底面摩擦が無視できれば、円柱群（直径 D 、中心間隔 s 、抗力係数 C_D ）モデルを用いると、植生層内流速 u_s は、抗力と流れの駆動力（重力）の釣り合いから次のように表される。

$$u_s = \sqrt{\frac{2g i_b s^2}{C_D D}} = K_s \sqrt{i_b} \quad (1)$$

ここに、 g ：重力加速度、 ρ ：水の密度、 i_b ：路床勾配である。上式をその第3式のように書くとき、 K_s は「透過係数」と呼ばれ、固有浸透流速が動水勾配の平方根に比例するその比例定数を表す（植生層の場合一般に透水性の小さい場合のダルシー則のように u_s と動水勾配は比例関係になく、また植生密度の高いものはむしろ非透水部分と見なされることが多い）。個々の植物の直径や間隔、抗力係数がわかっていれば透過係数 K_s が推定される。もっとも植生群落を円柱群で代表できても間隔が狭い場合の干渉効果のため、抗力係数は一様流中の値とは若干異なる（Li & Shen^{32), 48)}）。植生の密生構造は一般には様々であるが、何らかの方法で透過係数が推定されれば、「透過係数の等しい超多孔体」で植生層をモデル化できる（水没して表面流が存在する場合も、透過係数と平均流速（あるいは摩擦速度）の比が1つの相似規準となる）。もっとも、(1), (3)の種類の植生でも水平方向の透過係数は等しいが鉛直方向のそれはずっと大きい異方性を有していることに注意しなければならない状況もある。

(1), (3)以外のタイプの植生層のモデル化は難しい。そこで便宜的にこれらも「透過係数の等しい超多孔体」でモデル化することにし、それからのずれを後から考慮することとしよう。ずれの中身としては、(i) 非均質性（植生密度が空間的に分布することによるもの）、(ii) 異方性の相違、(iii) 変形特性（単なる変形のほか、振動や揺動）が挙げられる。また縦断方向に並んだかん木の揺動とそれによるセイシュの効果（石川・田中²⁰⁾）、散在する水没したかん木からの組織渦の効果も指摘されている（玉井⁵¹⁾）。

3. 3 植生の存在しかたのモデル

植生を伴う流れを扱うのに、流れに対する植生の存在しかたは、(A) 路床が全面均質な植生層に覆われている場合、(B) 河道内で植生域が偏在する場合に大きく分けられる。偏在の基本的パターンとしては縦断方向に長い一様な植生帯（(a) 堤防際に植生帯のある場合と(b) 流路の中心付近に植生帯が続くもの）、散在する植生域に大別できよう。一方、水深と植生高さとの関係から(A) 植生が水没していない場合、(イ) 植生が水没している場合に分けられる。もちろん、現実にはもっと複雑なパターンが存在しようが近似的にこれらの組み合わせで論じられるであらうと考えられる。

4. 植生に覆われた路床上の流れ

まず最初に、剛な直立型植生で代表されるような「振動・揺動の無い均質な透水層」でモデル化できる植生層が路床を覆っている場合の鉛直2次元流れを対象とする。以下では路床から上向きに y 軸をとる。

1 次元的であるものが多く、経験的に様々な植生状態の水路でのManningの粗度係数を整理したり(Chow⁴⁾)、せいぜい抵抗係数の評価に平均流速分布を介在させている程度にとどまってきた。

これに対し、農学(農業気象)の分野では、穀物群落(樹林を含む場合もある)内外の空気流(canopy flowと呼ぶ)が研究対象であるが、かなり詳しい乱流構造にまで手が延びている(例えば、Thom & Raupachのreview⁵⁾を参照)。これは、平均化された流れの抵抗などより、群落内の乱れ構造に支配される炭酸ガス、温度を含む乱流移動現象についての知識が必要とされたからであろう。河川の植生についても、こうした場での乱流構造について研究が進められれば、運動量輸送の観点から抵抗の予測や水制機能の評価を合理的に行なえることになろうし、流送土砂と河床変動の問題(濁度の問題を含む)のみならずこれから次々とわきあがってくるであろう環境問題²⁵⁾の解決に大きな貢献をするものと期待される。水理学の分野でもはやくから乱流構造に注目したものとしては、日野・歌原¹⁹⁾の先駆的研究、室田・福原^{33)・36)}の系統的な研究があげられる。

河川工学上、植生の疎通障害評価が最も大きな問題であることは当然であり、実際的な問題に対処する立場から植生の水理について系統的に検討されその成果がまとめられた福岡・藤田¹²⁾の研究は高く評価されまた充分利便性に高い。しかし1次元解析ではほとんどまかなえる通常の河川の問題にも、最近の高度な乱流・移動床水理の発達に支えられた水理学がしなやかなアドバイスができるように、植生水理にもこうしたきめこまかさを今から準備しておくことが望まれよう。

3. 植生とは？

3. 1 どんな植生がどんなところで繁茂しているか？

河川ではどんな「植生」の状態だろうか。図1は手取川三反田川原の植生図(川原²⁴⁾による)である。植物の群落が河川縦断方向に延びており、横断方向に種類を変えているのが特徴である(た

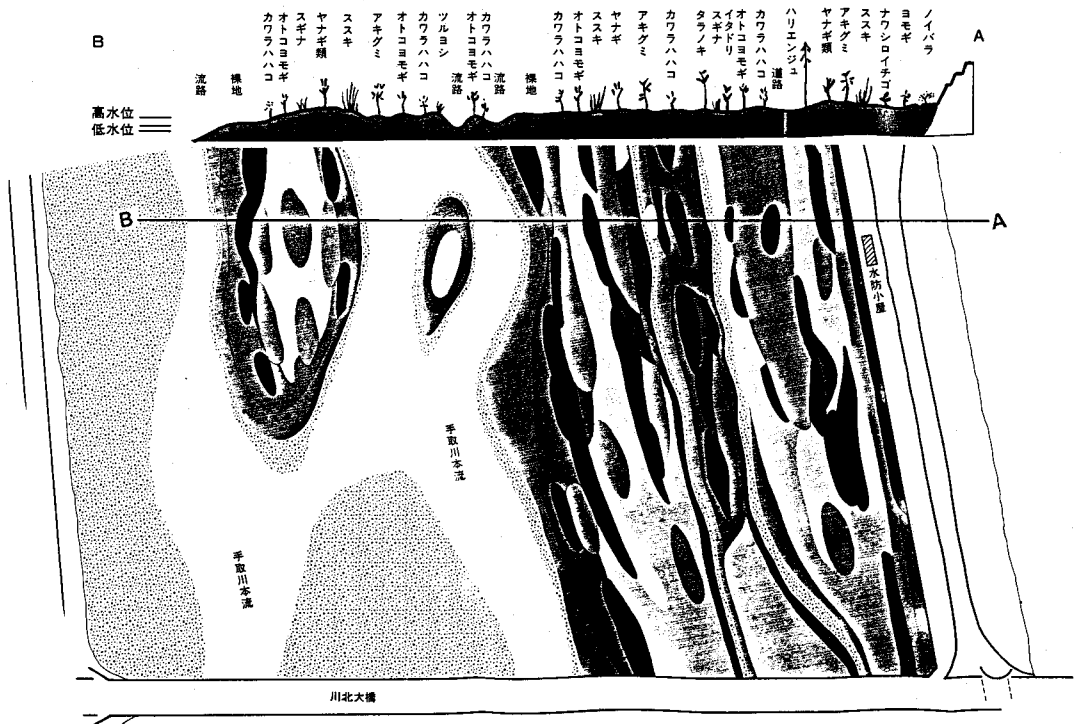


図1 手取川三反田川原の植生図(川原²⁴⁾による)

4. 1 剛な植生で覆われた路床上の流れの特徴

(a) 水深が植生高さより小さい (水没しない) 場合

藤岡・福岡¹²⁾,¹³⁾は秋草¹⁾の水制の研究に倣い, 1次元化された力の釣り合い式から, 植生層流れに対するManningの粗度係数を次のように導いた.

$$\rho g H i_b = \frac{\rho g U^2 n_b^2}{H^{1/3}} + \frac{1}{2} C_D \rho \lambda H U^2 = \frac{\rho g U^2 n_t^2}{H^{1/3}} \quad (2)$$

$$n_t = \sqrt{n_b^2 + \frac{C_D \lambda H^4}{2g}} \quad (3)$$

ここに, H : 水深 (ここでは $H < K$, K : 植生高さ), U : 1次元化された流速, n_b , n_t は河床底面粗度をあらわすManningの粗度係数, 植生効果を含む粗度係数である.

一方, 鉛直2次元等流の基礎式は次のとおりである.

$$g i + \frac{d\tau}{dy} - \frac{1}{2} C_D \rho u^2 \lambda = 0 \quad (4)$$

ここで, u : 局所流速, τ : Reynolds応力, $\lambda = D/s^2$ (単位体積あたり植生の流れへの投影面積) である. 植生密度が極めて小さい場合を除き, 路床付近を除いて上式の第2項は無視される (渡邊・北條・清水⁵⁹⁾は上式の第2項を残し, 渦動粘性係数を与え摂動法で流速分布を求めている). このとき, 式(2)は式(1)で表される固有浸透流速 (一様分布) を与える. 図2に中川・辻本・清水⁴¹⁾による流速分布 $u(y)$, 乱れ強度分布, $u'_{rms}(y)$, Reynolds応力分布 $-\overline{u'v'}(y)$ の測定例を $H > K$ の場合と併せて示したが, 乱れ強度は非ゼロでも Reynolds応力はゼロである (流速変動がinactiveである).

いずれにせよ, この場合の流速あるいは抵抗則は $C_D \lambda$ で支配される. 一般の樹木などの場合でも, これが見積られれば同じように扱える. 一般の樹木では個々の枝が整列しておらずまた枝の結合部では特に間隔が狭いなど干渉作用 (Li & Shen^{32), 48)} が期待される. そのため, 葉を取り去った後の抗力係数も単独円柱の一樣流中での値 (1.5程度) より小さ目となっている¹²⁾. 葉は通常流れにみずからたなびき抵抗を受けにくい, 摩擦抵抗分は考慮する必要がある. 一般には, 幹や枝の形状抵抗が支配的だが (福岡・藤田¹²⁾), 植物によっては葉の摩擦抵抗が支配的なものもある (日野・歌原¹⁴⁾). なお, 枝振り, 葉の付き具合で鉛直方向に密生度が違う場合は, 高さ方向に固有浸透流速が異なることになる.

(b) 水深が植生高さより大きい (水没する) 場合

1次元解析のアプローチでは, 植生層内流れ, 表面流の両方にManningの粗度係数を与える. 福岡・藤田¹²⁾は, 前者は式(3)で与えられるが, 後者は植生上面の凹凸, 植生・表面流の間の運動量交換に支配されるので容易には決め得ないとしている.

実測された流速分布を見ると (図2に中川・辻本・清水⁴¹⁾による流速分布 $u(y)$, 乱れ強度 $u'_{rms}(y)$, Reynolds応力分布 $-\overline{u'v'}(y)$ の測定例を $H < K$ の場合と併せて示してある), 表面流の速い流速によって植生層内にも強いせん断乱流領域が現われていること (Reynolds応力も出現) が示され, 表面流

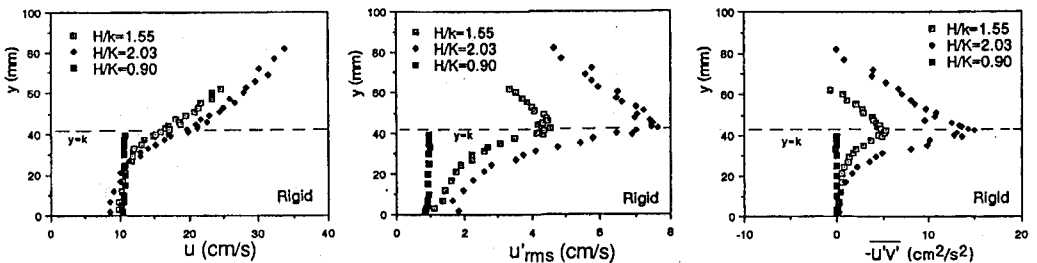


図2 剛な直立性植生のある路床上の流速, 乱れ強度, Reynolds応力分布

と植生層内流れの間に強い運動量混合が認められる。植生層内の「誘導流速」，「誘導Reynolds応力」とも指数関数的な変化を呈している。このような特徴はcanopy flowにおいても指摘されている（Inoue¹⁶⁾，Inoue & Uchijima¹⁸⁾，Thom & Raupach⁵⁵⁾）が，河川の植生を伴う流れでは，従来の研究では，Kosorin²⁸⁾，中川ら⁴¹⁾の研究を除いて植生層内のこの誘導流速は無視されることが多かった（例えばChen³⁾，Kouwen, Unny & Hill³¹⁾，Christensen⁵⁾，Temple⁵⁴⁾ら）。一方，室田・福原³⁵⁾の研究では逆に密度度が極めて小さく，図2の流速分布に特徴的な界面近傍での変曲点が認められていない（4.4で述べるように清水ら⁵⁰⁾が植生密度による流速分布形の変化を数値計算で示している）。

4. 2 剛な植生で覆われた路床上の流れの構造

(a) 表面流の構造

表面流については，厚さが一定でしかも規則正しく作られた植生層上でReynolds応力が三角形分布する（図2参照，ただし界面形状が不規則であったり波状であったりすれば植生の影響が表面流域にも及ぶことが日野・歌原¹⁴⁾，室田・福原^{33), 34)}の実験や中川ら^{38), 40)}の相対水深の小さい礫床流れについての実験から推測される）ことから，対数則型の流速分布の成立が期待される（表面流と植生層内流の相互作用は，後者には誘導Reynolds応力，誘導流速のかたちで極めて顕著に現われるが，前者へのあからさまな効果は見られない）。例えばKouwen, Unny & Hill³¹⁾は植生層のない場合との混合距離分布の相違には頓着せず，実験的に次式を提案した。

$$\frac{u}{u_{*0}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{K} + c'; \quad c' \equiv \frac{u_k}{u_{*0}} \quad (5)$$

ここに， u_{*0} ：路床底面で定義された摩擦速度（ $u_{*0} = \sqrt{gH i_b}$ ）， κ ：Karman定数である。この水深にわたる積分から，次の抵抗則を導いている。

$$\frac{U}{u_{*0}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{H}{\chi} + C_K \quad \chi = K \exp(1 - \kappa c') \left(1 - \frac{K}{H}\right); \quad C_K \equiv \frac{1}{u_{*0} H_0} \int_0^K u dy \quad (6)$$

Kouwenら³¹⁾によると $c' = u_k/u_{*0}$ ， C_K は（一定の植生に対する彼らの実験範囲では）概ね一定であるとしているが，根拠に欠けるしむしろ疑わしい（植生内の流れ特性に言及しないと決まらない）。

Christensen⁵⁾も，表面流の混合距離を，植生頂部よりわずか下方に仮想原点をおき，そこで混合距離が有限の値 l_0 をとるとし，またそこでの流速を u_k とした流速分布を提案している。 l_0 ， u_k とも，等価砂粗度の等しい砂礫粗度の流速分布と河床から充分離れたところで一致する条件から決めているが，等価砂粗度自体が未知数である。なお植生内流量は全く無視している。

図2に示されたように流速分布が植生層内流れと滑らかに接続することを考えると，混合距離が表面流の下端で非ゼロであることは明らかである。開水路流れではReynolds応力の三角形分布と対数則の両方の成立を考慮し，植生のない場合を $l = \kappa y' \sqrt{1 - y'/H}$ （ $y' = y - H$ ）とすると，植生のある場合の混合距離の分布は次のように表されよう。

$$l = (\kappa y' + l_0) \sqrt{1 - \frac{y'}{h}} \quad (7)$$

ここで， $u_{*k} = \sqrt{g(H - K) i_b}$ である。このとき，次の流速分布が得られる。

$$\frac{u}{u_{*k}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\kappa y'}{l_0} + 1 \right) + \frac{u_k}{u_{*k}} \quad (8)$$

図3に示すように， l_0 ， u_k を実験値によって与えれば式(8)は表面流の流速分布を良く表す。ただしポイントは， l_0 ， u_k を植生層内流れとの関連でどう決めるかである。

従来の研究では，浸透流量は全流量に比べ小さいこと

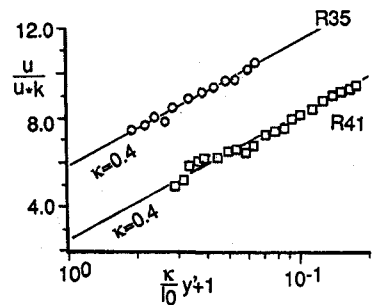


図3 表面流流速の対数則表示

から、植生層内流れを詳しく議論しないものが多かったが、表面流のパラメータである l_0 、 u_k は植生層内流れの構造抜きには評価できない。

(b) 表面流を伴う植生層内流れの構造

植生層上に表面流が存在する場合の植生層の境界に近い層でのせん断乱流場の出現は、表面流を伴う疎な透水層内流れでChu & Gelhar⁹⁾によって説明された機構に原則的には因っているものと考えられる。すなわち、表面流の固有の圧力変動の透水層内への伝播の際に出現した速度変動の位相差がもたらす誘導Reynolds応力（透水層の表面で最大値をとり指数関数的に減衰する分布形をもつ）による運動量混合の結果で、圧力変動強度ひいては表面流が透水層頂部で持つせん断力と相関している。Chu & Gelharの議論を直接適用するには植生層の透水係数は高すぎて誘導流速についての線形近似に無理が出てくるが、ここでは、定性的に同じような機構から説明される誘導Reynolds応力が次のような指数関数的分布をするとの仮定を出発点に議論することとしよう。

$$\tau(y) = \tau_k \exp \alpha y' \quad (9)$$

ここに、 τ_k は、植生頂部でのReynolds応力（ ρu_k^2 ）、 α ：パラメータで運動量混合が及ぶ深さスケールの逆数である。図4に示すように α は h_i/K （ $h=H-K, h_i \sim \tau_k$ ）に対してやや減少傾向を示す。すなわち表面流の強さが増すと運動量の染み込み深さが増加する。

式(4)に上式を代入すると、植生層内流速分布が次のように求められる。

$$u(y') = u_s \sqrt{1 + \frac{2\alpha}{C_D \lambda} \left(\frac{u_k}{u_s} \right)^2 \exp \alpha y'} = u_s \sqrt{1 + \alpha h \cdot \exp \alpha y'} \quad (10)$$

これは水理実験結果（中川ら⁴¹⁾）やcanopy flow⁵⁵⁾の計測で提案された誘導流速の指数型近似とほぼ一致しており、また実験結果を良く表している（図5）。なお、このとき、界面での流速 u_k が次のように、 u_s と α で決定される。

$$u_k = u_s \sqrt{1 + \alpha h} \quad (11)$$

界面での速度勾配を $\beta(u_k - u_s)$ （誘導流速を指数関数で表したときの界面での速度勾配、 β は誘導流速が出現する深さスケールの逆数）と書くと、 α と β の関係が次のように決められる。

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \left(1 + \frac{u_s}{u_k} \right) = \frac{\alpha}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha h}} \right) \quad (12)$$

界面で速度勾配とReynolds応力がわかったのでそこでの混合距離は $l_0 = u_k / [\beta(u_k - u_s)]$ によって定められる。図6は実測された流速、Reynolds応力のスプライン近似から求めた混合距離の分布と、上記によって推定された l_0 を用い、表面流では式(8)、植生層内では誘導流速を指数関数近似して得られる次式を用いて計算されたものであり、良い一致が見られている。

$$\frac{u - u_s}{u_k - u_s} = \exp \beta y' \quad (13)$$

図6によると、混合距離は植生層内で（も表面流でも）界面から離れるにつれて増加しており、植

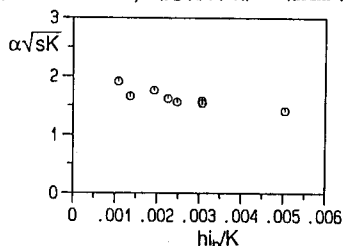


図4 α と h_i/K の関係

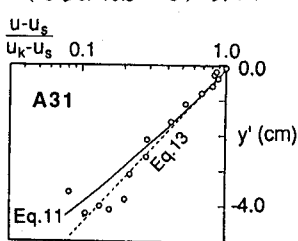


図5 植生層内流速分布

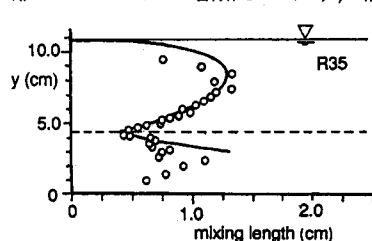


図6 混合距離分布

生層を伴う流れがその界面でのせん断に支配されていることがわかる。

u_b, l_0 が推定されると、これは表面流の境界条件を規定し、表面流の流速分布が決定される。すなわち、植生層内外の流れ構造のキーは α の決定機構に集約され、ここに今後の研究が絞られる。

4. 3 柔軟な植生で覆われた路床上の流れの特徴

(a) 変形し振動・揺動する植物群上の流れ

葦などの水性植物群では流れによる変形形態 (streamlined, shingling, combed²⁹⁾ などと呼ばれる変形や振動、また waving, 「穂波」と呼ばれる組織的揺動, prone²⁹⁾ と呼ばれる倒伏状態、さらにその状態での揺動) の把握とその効果の評価 (変形による透水能の変化や透水性の非均質化、振動・揺動による付加的な運動量混合効果) が必要である。

前述のように canopy flow では多くの実験、観測^{7), 16), 18), 53), 55)} がされており、一方河川水理学の分野でも Kouwen & Unny³⁰⁾ が変形に着目して、また室田・福原³⁵⁾ が詳細な乱流計測を試みている。

流れによる変形については、一様な曲げ剛さ EI (flexural rigidity, E: Young 係数, I: 断面 2 次モーメント) をもつ長さ K_0 の棒と考えると、微小変形を仮定すると、以下の 3 本の式から流れの中の植物の高さ K が求められる (室田・福原³⁵⁾)。

$$M(y) = EI \frac{d^2 \delta}{dy^2} \left\{ 1 + \left(\frac{d\delta}{dy} \right)^2 \right\}^{3/2} \quad (14)$$

$$M(y) = \frac{1}{2} \rho \int_y^K C_D \lambda \{u(y)\}^2 dy \quad (15)$$

$$K_0 = \int_0^K \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta}{dy} \right)^2} dy \quad (16)$$

ここで、 $M(y)$: 高さ y での曲げモーメント、 δ : 植物の変形量 (抗力の作用方向) である。これらの式から陽に K/K_0 と流れの強さ (例えば底面せん断応力 ρu_{*0}^2 の関係) を導くことは出来ない。上式を参考に次元解析的な検討を行なうと、 K/K_0 は $\rho u_{*0}^2 K_0^4 / (C_m EI)$ (と H_i/K_0 , C_m : 無次元植生密度) の関数であることが期待される。Kouwen らは EI と C_m の知られた材料を用いた実験から K/K_0 と $\rho u_{*0}^2 K_0^4 / (C_m EI)$ の関係を定式化³⁰⁾、さらに次のように修正して用いることを提案している³¹⁾。

$$\frac{K}{K_0} = 0.14 \left\{ \left(\frac{C_m EI}{\rho u_{*0}^2} \right)^{0.25} / K_0 \right\}^{1.59} \quad (17)$$

ただし、上式が $K/K_0 > 1$ を与えるときは $K=K_0$ (変形しない) とする。上式の比例定数の普遍性は判断できないが、例えば図 7 は OHP 用透明シートを短冊状にしたものを模擬植物 ($D=1.5\text{mm}$, $K_0=5.0\text{cm}$, $s=2\text{cm}$) とした場合の実測⁴²⁾ から $\Delta=K/K_0$ と H_i/K の関係をプロットしたもので、式(17)で K_0 , EI, C_m を一定とした時の関係 $\Delta=(K/K_0) \sim (H_i/K)^{-0.25}$ がほぼ認められる。

このような変形によって植物は流れに対して傾き抗力の流下方向成分は小さくなることが期待される。すなわち、 θ を流れに対する植物の角度 (直立の場合 $\theta=90^\circ$) とすると、式(4)は、

$$g_i + \frac{dt}{dy} - \frac{1}{2} C_D \rho u^2 \lambda \sin \theta = 0 \quad (18)$$

のように書き直せる。植物の変形を下端での回転でモデル化し y 方向に θ が一定とすると、 $\sin \theta = \Delta$ となり、上記のように変形を考慮すると抵抗力係数を一定としても実測の固有浸透流速から計算される透過係数 ($K_s = u/\sqrt{i_b}$) が流れの強さ (H_i/K) とともに増加する特性が説明される⁴²⁾ (図 8 参照)。すなわち変形を考慮した透過定数は次のようである。

$$K_s = \sqrt{2gs^2/(C_D D \Delta)} \quad (19)$$

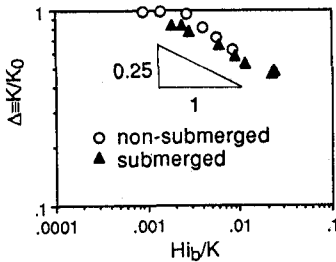


図7 Δ と hi_b/K の関係

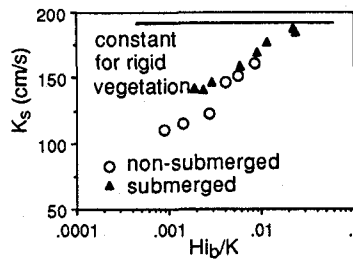


図8 透過係数と hi_b/K の関係

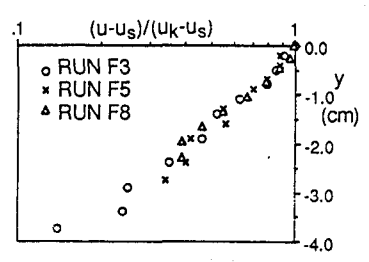


図9 柔軟な植生の層内流速分布

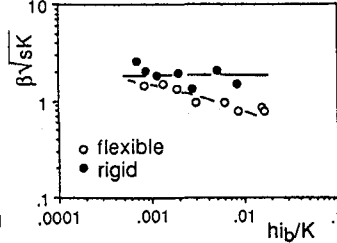
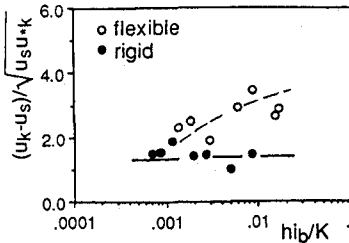


図10 植生頂部流速及びパラメータ β と hi_b/K の関係

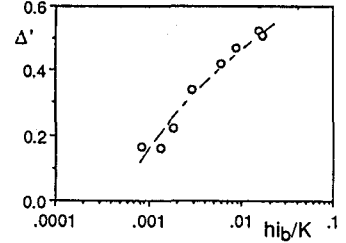


図11 柔軟な植生の揺れ幅と hi_b/K の関係

植生層の上に表面流領域が存在する場合 ($H>K$) では、剛な植生の場合と同様、表面流の速い流速によって植生層にせん断流領域が現われ、流速分布は図9に示すようにやはり近似的に式(13)で良く表される。すなわち、 u_s に加えて u_k 、 β で特徴づけられる。 $(u_k-u_s)/\sqrt{u_s u_k}$ 、 $\beta/\sqrt{sK}$ と hi_b/K の関係を図10a及び10bに示した⁴²⁾ (剛な植生の場合も併示した)。この結果によると、 u_k 、 hi_b/K の等しい条件では、柔軟な植生の方が剛な植生に比べ u_k が大きく、 β が小さい傾向が認められる。すなわち、柔軟な植生では表面流からの運動量混合が大きく、(表面流が速いほど) 植生層内では流れやすさが増すことがわかる。柔軟な植生と剛な植生との差は hi_b/K が大きいほど顕著となる。すでに変形の効果は考慮してあるから、こうした差を生む原因として植生の「揺れ」の運動量交換への寄与を考えるのが妥当と思われる⁴²⁾。

振動程度を表す指標として $\Delta'=\delta K/K$ (δK : 植生の揺れ幅を鉛直方向に測ったもの) を定義し、先に述べたOHPシートの植生モデルでのビデオ解析による実測結果を、表面流のせん断力の無次元量 hi_b/K に対してプロットしたのが図11⁴²⁾である。 Δ' は hi_b/K の増加関数となっており、柔軟な植生層内外の流れでの u_k 、 β の hi_b/K に対する系統的变化はこのような揺れによるものと推測される。なお、揺れについては個々の植物単位の振動のほか、組織的な変形によって植生包絡面が波状になりしかも下流に伝播するcanopy flowで「穂波」^{7), 16), 55)}と呼ばれる現象に近いものも観察されている³⁵⁾。

剛な植生の場合、式(18)の抗力項とReynolds応力項の和を求めると、図12⁴²⁾に示すように外力項(三角形分布)と一致している。ところが u_k 、 hi_b/K が同じ条件でも、柔軟な植生の場合の流速分布は前章で述べたように変化している(速くなっている)。ところで、やはり先述のChu-Gelhar機構でReynolds応力が誘導されたのなら(u_k 、 hi_b/K が等しいから) Reynolds応力分布に差は期待されない。これらを式(18)に与えると、せん断力の合計が図12のように表面流での三角形分布の外挿よりはみだす⁴²⁾。

この三角形分布からはみだし分は植生の揺動が植生内で流れに付加的に供給しているエネルギーに相当するが、このようなエネルギー授受機構を的確に表

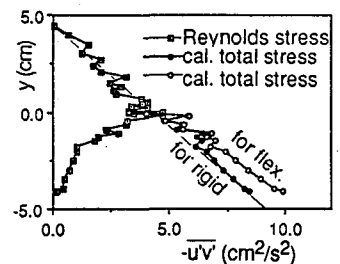


図12 Reynolds応力分布の構成

現することが望まれている。

その他、「穂波」の発生機構、統計構造と輸送現象での役割についての研究が期待されるし、また倒伏機構も明らかにされたい課題²⁹⁾と言える（農業工学でも稲等の倒伏が重要な問題であることからその機構が研究されている⁵³⁾。河川工学的にも増水期と減水期での抵抗のヒステシスループの問題などが出てくる）。Kouwen & Li²⁹⁾は、植生上の流れの抵抗が倒伏（prone）状態となることで急変することを指摘、倒伏限界を経験的に提案している。

(b) たなびくようにゆらぐ水草を伴う流れ

室田・福原^{33), 34)}は図13aに示すような河床から生えてたなびくような水草を路床に縫い付けた糸でモデル化し、その上の乱流計測を行なっている。

さらに、その後（室田・福原・村越³⁰⁾）ある高さから糸が

たなびくようにしたモデルでの実験を行なっている。また日野・歌原¹⁴⁾は、図13bのように、茎の部分は無視できるほどだが、水中のいろいろな高さでたなびく水草をビニールの帯状体でモデル化して流れ構造の変化を調べている。これらは一般的な表現からすると、先に述べた葦や「すすき」のような植生（比較的弾性変形・振動するもの）に比べ格段に柔軟なものである。

室田ら^{33), 34)}の計測結果によると、路床に沿ってたなびく植生を有する流れの乱流構造の大きな特徴は図14に示すようにReynolds応力分布が三角形分布から欠損し、しかも欠損する領域が必ずしも植性が（瞬間的にでも）存在する領域（そこでは植物による抵抗分に対応してReynolds応力は欠損する）に限られないことである。植生のたなびき高さに対し充分大きい水深がある流れでも、Reynolds応力の欠損は水面近くまで及んでいる。室田ら^{33), 34)}は水生植物の揺動にかかわる付加応力項を適当に与えれば乱流構造が記述されとしているが、付加応力の発生機構は明らかにできていない（このようなReynolds応力の欠損は相対水深の極めて小さな流れでも最近注目されており^{38), 40)}、その説明、評価に苦慮している現状といつてよい）。植生のたなびき高さを水中のいろいろな高さに、あるいはいくつかの組み合わせで設定した日野・歌原¹⁴⁾の実験結果も、植生のたなびきがその幾何的領域を越えてReynolds応力分布を変形させていることを示唆しており、水草の揺動による付加応力の誘導機構の究明が残された課題となっている。

4. 4 植生で覆われた路床上の流れの数値計算

植生粗度をもつ流れの高次乱流モデルを利用した数値計算もcanopy flowの分野ではいくらか試みられている（Wilson & Shaw⁶⁰⁾, Inoue¹⁷⁾, Thom & Raupach⁵⁵⁾）。植生粗度のように複雑な形状をもつものは容易に差分格子網の中に取り込むことができないし、植生層内部のように透過性を有する粗度内の流れの解析は鉛直二次元解析では扱えないことから、粗度形状を差分格子に取り込むことはやめて、Reynolds方程式中に付加された形状抵抗項によって表現し、形状抵抗によって生成された乱流エネルギーや逸散率の増加は各々の輸送式中に、source termとして取り入れることが考えられる。このように形状抵抗項を考慮することはすでにWilson & Shaw⁶⁰⁾によって行なわれた。植生の効果を取り込んでk-εモデルを用いて開水路流れを扱う場合の基礎式は次のようである（清水・辻本・北村⁵⁰⁾）。まず平均流の輸送方程式及び連続式は、

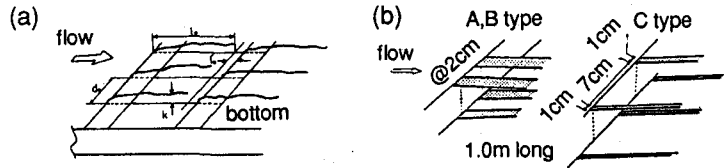


図13 室田・福原の植生モデル(a)と日野・歌原の植生モデル(b)

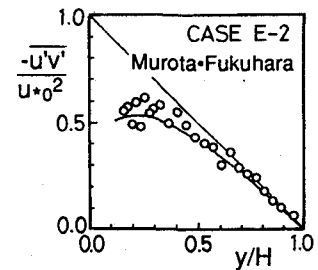


図14 たなびく植生の上の Reynolds応力分布

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g I_e - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} - F_x + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2(v+v_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v+v_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \quad (20)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} - F_y + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (v+v_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2(v+v_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right\} \quad (21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (22)$$

であり、これに次のように定式化された乱れエネルギー (k) の輸送方程式、乱れの逸散率 (ϵ) の輸送方程式が加えられる。

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \epsilon + C_{fk} (F_x u + F_y v) \quad (23)$$

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} + v \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} + v \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\epsilon}{k} [C_1 \{P_k + C_{fe} (F_x u + F_y v)\} - C_2 \epsilon] \quad (24)$$

ここに、 P_k は乱れエネルギーの生成項で、

$$P_k = v_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (25)$$

I_e : エネルギー勾配, v_t : 渦動粘性係数, v : 動粘性係数, p' : 静水圧からの偏差, F_x, F_y : 植生粗度による x, y 方向の単位質量あたりの形状抵抗で、抗力係数 C_{dx}, C_{dy} を用いて次のように与える。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{dx} \lambda u \sqrt{u^2 + v^2} \quad ; \quad F_y = \frac{1}{2} C_{dy} \lambda v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (26)$$

渦動粘性係数は次のように与えられるものである。

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (27)$$

なお、標準型 $k-\epsilon$ モデルの推奨値である $C_\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\alpha_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$ が用いられた。 C_{dx} は植生層内で円柱の抗力係数程度、植生層外で0 (C_{dy} は常に0) とされる。乱れエネルギーと逸散率の輸送式中における形状抵抗項にかかる係数 C_{fk} , C_{fe} が未定でこれらは等流実測値に合うように決められる (計算の詳細については文献参照⁵⁰)。

図15に清水・辻本・北村⁵⁰による計算結果の実験データとの比較が示された。流速, Reynolds応力, 乱れ強度分布とも良好に再現されており、しかも C_{fk} , C_{fe} の値は少なくとも検討範囲内で変える必要はなかった ($C_{fk}=0.07, C_{fe}=0.16$)。さらに清水ら⁵⁰は平均流速 U , 水深 H , 植生高さ K を共通とした条件で、植生の密生度 ($\lambda=D/s^2$) を変化させて乱流構造の計算を行なった。計算で得られた流速分布, Reynolds応力分布の植生密生度による変化を図16⁵⁰に、また流速係数 (U/u_{*0}) と密生度の関係を図17⁵⁰に示す。植生密生度を無限に小さくした場合は滑面流れとなるが、植生密生度の増加と共に、流速分布には変曲点が現われ、またReynolds応力分布は植生頂部から下方に向かって減衰する形が顕著となる。すなわち植生密生度が極端に小さい場合は、室田・福原³⁴が用いたよう

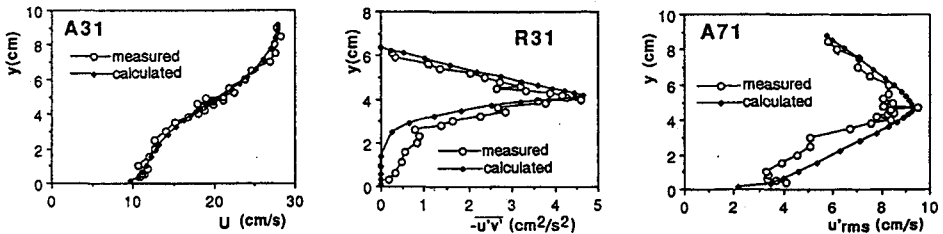


図15 数値計算された流速, Reynolds応力, 乱れ強度分布と実測値の比較

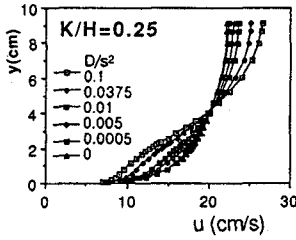


図16 密生度による流速, Reynolds応力分布の変化

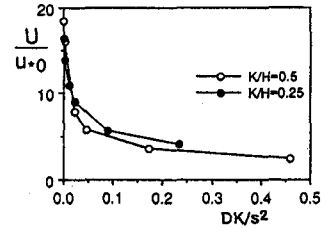
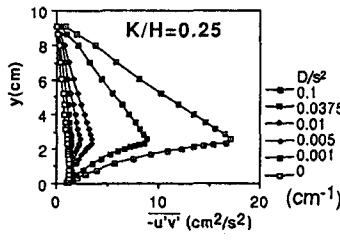


図17 密生度による抵抗変化

に表面流・植生内流れを通してべき乗型の流速分布が適用できるが（むしろ河床でのせん断に起因する流れ），そうでなければ，指数型の流速分布で近似的に植生内流れが表現できる（植生頂部でのせん断が卓越する流れ）。

図18は植生密度によるReynolds応力分布の変化を，高さを全水深 H で，Reynolds応力を τ_0 （表面流でのReynolds応力分布を路床に外挿した値）で無次元化して示したもので，Reynolds応力分布が密生度とともに三角形分布から植生層内で瘦せてくるのがわかる．さらに植生層内でのReynolds応力分布の低減率（ $\Omega(\eta) = \tau(\eta) / [\tau_0(1-\eta)]$ ； $\eta = y/H$, $\eta_k = K/H$ ）を定義して示したのが図19で，清水ら⁵⁰⁾は，植生層内では $\Omega(\eta)$ が次のように指数関数で近似できる（ $\eta > \eta_k$ では $\Omega(\eta) = 1.0$ ）としている．

$$\Omega(\eta) \equiv \frac{\tau(\eta)}{\tau_0(1-\eta)} = \exp\gamma(\eta - \eta_k) \quad (0 < \eta < \eta_k) \quad (28)$$

上式のパラメータ γ と植生の密生度（ $\lambda = D/s^2$ ）の関係は図20⁵⁰⁾となっている（図中の ψ_s は $\Omega(0) = \tau_0/\tau_0$ を表し， τ_0 ：河床近傍でのReynolds応力である）。

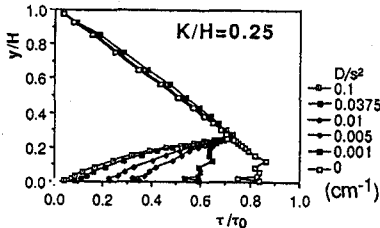


図18 標準化されたReynolds応力分布

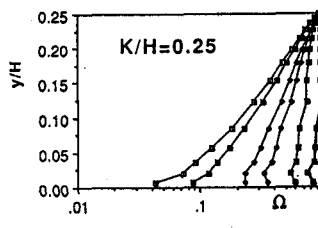


図19 植生層内Reynolds応力分布

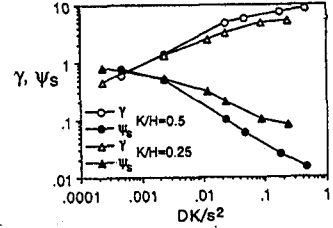


図20 パラメータ γ, ψ_s

さらに，植生のない区間から植生路床区間へ流入してきた流れが，植生粗度に支配された平衡な等流になるまでの遷移過程も上記の数値モデルで解析され，実験結果を良く説明することができる（図21参照）。

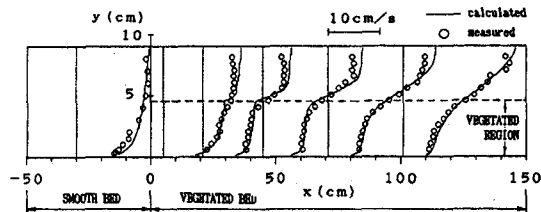


図21 植生上の遷移流れの流速分布の変化

5. 河道内に植生域を伴う開水路流れ

河道内では植生域は平面的に偏在することが多く，河道内流れへの影響は様々であるが，ここではいくつかの代表的パターン（3参照）の配置をした植生域を伴う流れについて考えよう。

5. 1 側岸寄りに植生帯を伴う流れ

長方形断面水路で側岸寄りに一様な植生（植生層が均質で，植生帯幅が一定）を伴って充分下流

の流れ, しかも水深が植生高さより小さい場合 (非水没) を考えよう. 植生域・非植生域の境界に沿って水路方向をx軸, 路床から鉛直上向きにy軸を, 水路横断方向にz軸 ($z=0$ が植生域・非植生域の境界, $z>0$ が非植生域, $z<0$ が植生域を表す) をとった. このような流れは, 路床の摩擦抵抗より, 植生域の遅い流れと非植生域の速い流れの干渉が支配的な水平せん断流として特徴づけられる.

(a) 境界混合係数の概念

植生域・非植生域にそれぞれManningの粗度係数を用いて1次元的に扱うと¹²⁾,

$$\frac{\rho g n_i^2 U_i^2 B_i}{H^{1/3}} - (-1)^i H \tau_s = \rho g H B_{ib} \quad (29)$$

のように基礎式が書ける. ここで, 添字 i は各領域を表し, $i=1$ は非植生域, $i=2$ は植生域を表すものとする. また, τ_s : 植生域・非植生域界面でのせん断応力である. τ_s が両域の干渉作用 (運動量混合) を表しており, これが評価されれば各領域の流量が計算される. 速度差のある流体間のせん断応力に対しては, しばしば次のような「境界混合係数」 f_m (山崎・石川・金丸⁵⁸⁾, 田中・石川・木村⁵⁹⁾, 福岡・藤田¹²⁾) が用いられる.

$$\tau_s = \rho f_m (U_1 - U_2)^2 \quad (30)$$

福岡・藤田¹²⁾は境界混合係数の意味を検討し, 植生域・非植生域界面での「交換速度」 V_m と両域の流速差の比に相当するとしているが, 平衡域に至るまでの遷移域ならともかく平衡域では「交換速度」は横断方向の速度変動強度みたいなもので平均値の議論では具体的に評価しにくいものである.

また福岡・藤田¹²⁾は (水深方向に平均化された) 流速の横断方向分布 $U(z)$ がわかっておれば, それから次のように τ_s が求められるとし, これより逆算された f_m の特性について議論している.

$$H \tau_s = \rho g \int_0^{\infty} \left[H_{ib} - \frac{n_1^2}{H^{1/3}} \{U(z)\}^2 \right] dz \quad (31) \quad \frac{f_m - f_{m0}}{f_{m\infty} - f_{m0}}$$

実験結果から, 境界混合係数が植生帯幅 (B_2) と非植生域で流速が低減効果を受ける幅 (B_e) に影響されることを図22¹²⁾のように調べ, 以下の実験式を提案している¹²⁾.

$$\frac{f_m - f_{m0}}{f_{m\infty} - f_{m0}} = 1 - \exp\left(-\frac{0.06 B_2}{B_e}\right) \quad (32)$$

ここで f_{m0} は $B_2=0$ のとき, $f_{m\infty}$ は $B_2=\infty$ の時の f_m の値である. f_{m0} は側壁の摩擦損失係数程度であり, 一方, $f_{m\infty}$ は植生域の透過係数に関係し, $K_s \rightarrow 0$ では f_{m0} に, $K_s \rightarrow \infty$ では自由せん断乱流での値 (0.03-0.04程度 (田中ら⁵⁹⁾) に漸近するようである (福岡・藤田¹²⁾). B_e は横断流速分布の議論なしには決められない.

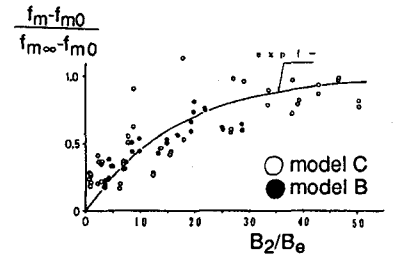


図22 境界混合係数

(d) 横断流速分布

上記のような1次元の取り扱いをするにしても, 境界混合係数や干渉幅の評価に水平せん断乱流の流速分布を考えないわけにゆかない. 水深方向に平均化された量で2次元水平せん断流として扱うと, 基礎式は次のようである.

$$\rho g H_{ib} - \frac{\rho}{2} f_1 U_i^2 + H \frac{d\tau}{dz} = 0 \quad (33)$$

ここでの τ は横断方向のReynolds応力 ($-\rho \overline{U'W'}$, ' は変動流速を表す) で, f_1 は, 各領域の抵抗係数である. f_1 は路床の摩擦抵抗係数であり, 一方 f_2 は植物の形状抵抗のみで代表させると,

$$f_2 = 2gH/K_s^2 \quad (34)$$

である. せん断の影響を受けない流速を U_0 とし, $\delta U_i = U_i - U_0$ とすると, 式(33)は,

$$-f_1 U_{i0} \delta U_i - \frac{f_1}{2} (\delta U_i)^2 + H \epsilon_{zi} \frac{d^2(\delta U_i)}{dz^2} = 0 \quad (35)$$

と書き直せる。ここで、 ϵ_z は横断方向の渦動粘性係数である。山崎ら⁵⁸⁾は ϵ_z を一定とし、また上式左辺第2項を無視して、次のような流速分布を得ている。

$$U_i(z) = (U_{i0} - U_k) \exp \left[-\sqrt{\frac{f_1 U_{i0}}{H \epsilon_{zi}}} z \right] \quad (36)$$

ここで U_k は、植生・非植生域境界での流速で、境界面での速度勾配 (dU/dz) の連続性から次のように定めることができる^{12), 58)}。

$$U_k = \frac{U_{10} \sqrt{f_1 U_{10}} + U_{20} \sqrt{f_2 U_{20}}}{\sqrt{f_1 U_{10}} + \sqrt{f_2 U_{20}}} \quad (37)$$

なお式(35)の第2項を省略しない場合について、山崎ら⁶⁰⁾は厳密解も解析的に得ているし、泉・池田・伊藤²¹⁾は摂動法で高次近似解を得ている。実験データとの対応などを見ると、渦動粘性係数をうまく評価できれば、平均流速分布は先の近似解(式(36))で精度的に充分であろう(図23参照¹²⁾)。

清水・中川・岩田⁴⁹⁾はこうした流れの計測を行ない、流速分布だけでなくReynolds応力も測定している(図24)。これより水平渦動粘性係数を求めると干渉域内で明らかな場所的变化が認められ、上記のような水平渦動粘性係数を一定とした取り扱いではその値の評価に詭弁の方法が余儀なくされる。例えば、山崎ら⁵⁸⁾は、渦動粘性係数を規定する速度スケールとして $U_{i0} - U_k$ 、長さスケールとして流速分布の $z=0$ での接線が U_{i0} と交わる間隔で与えられる B_{zy} とすることを提案した。すなわち、

$$\epsilon_z = \gamma_m B_{zy} (U_{10} - U_{20}) \quad (38)$$

である。ここで、 γ_m は係数で、このとき、界面でのせん断応力 τ_s は、 $[\rho \epsilon_z (dU/dz)]_{z=0}$ であるから、

$$\tau_s = \rho \gamma_m (U_{10} - U_{20})^2 \quad (39)$$

となり、 γ_m は先に導入した境界混合係数 f_m と同義のものであることがわかる¹²⁾。指数型の近似流速分布を適用して界面での速度勾配を評価することから、水平渦動粘性係数は次のように評価されている(福岡・藤田¹²⁾による表現を採用した)

$$\epsilon_z = \gamma_m^2 (U_{10} - U_{20})^2 \left(\frac{1}{\sqrt{f_1 U_{10}}} + \frac{1}{\sqrt{f_2 U_{20}}} \right)^2 H \quad (40)$$

図25には、 γ_m の値について山崎ら⁶⁰⁾のデータに加え、干渉幅を排除厚さで定義した泉ら²¹⁾、田中・石川・木村⁵⁶⁾(風洞)のものを示してあるが、 γ_m の値は0.015から0.04程度(先に示した福岡ら¹²⁾の f_m のデータと同オーダー)で U_{02}/U_k によって若干変化するようである。

一方、清水・中川・岩田⁴⁹⁾は干渉域内での渦動粘性係数の変化に着目、とくに非植生域側で、

$$\epsilon_{zi}(z) = \gamma_{si} U_i(z) \cdot H \quad (41)$$

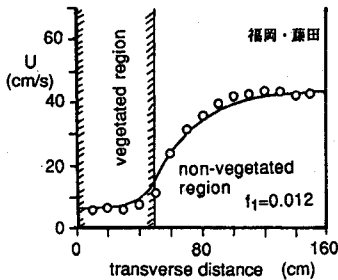


図23 横断方向流速分布と式(36)

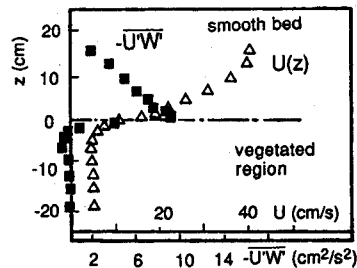


図24 流速・Reynolds応力の横断分布

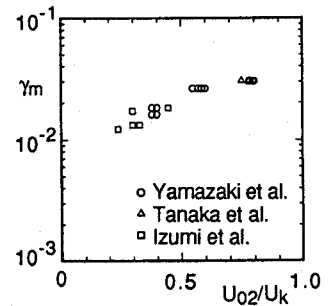


図25 γ_m と U_{02}/U_k の関係

の傾向があることを見いだした。上式を仮定すると、式(33)は、容易に解け、次のような流速分布が得られることになる。

$$U_i(z) = \sqrt{U_{i0}^2 - (U_{i0}^2 - U_k^2) \exp(A_i z)} \quad (42)$$

ここに、 $A_i^2 = (-1)^i 2f_i / (\gamma_a H^3)$ であり、界面での速度勾配の連続性から次のように γ_a の比が与えられる。

$$\frac{\gamma_{s2}}{\gamma_{s1}} = \frac{f_2(U_k^2 - U_{20}^2)^2}{f_1(U_{10}^2 - U_k^2)^2} \quad (43)$$

γ_a のうち、 γ_{s1} は非植生域で充分界面から離れたところで ε_a が鉛直 2 次元流れの渦動粘性係数程度 ($\kappa u_{*0} H/6$) となることから決定できよう。この研究は流速分布を系統的に記述するという面からは不十分ではあるが、アプローチとして注目したい（鉛直 2 次元問題と同様に、水平 2 次元問題でも Reynolds 応力分布、渦動粘性係数分布を含む乱流構造を明らかにするかたちのアプローチの進展が、今後我々が扱わねばなくなる乱流輸送現象の記述・予測に不可欠となるだろう）。

なお、側岸沿いの植生帯では土砂の堆積が著しく河床高さが非植生域より高い場合がよくあるし、また複断面水路で高水敷あるいは flood plain に植生が繁茂している例も多い。こうした状況での横断方向流速分布を取り扱ったものとしては、Pasche & Rouve⁴⁴⁾ や菅ら^{23), 47)} の研究がある。

(c) 植生・非植生域の混合と水面変動

開水路での混合現象では顕著な水面変動（水面波の下流への伝播）を伴う場合がある。福岡・藤田¹²⁾ は植生群落が水路縦断方向に延びているとき、このような顕著な水面変動の出現を報告しており、特に後述するように植生帯が水路中央に存在する場合にはこれに起因する混合過程を考慮した抵抗評価を試みている。また、石川・田中²⁰⁾ も水路中央に 1 列に存在する柔軟なかん木列が水面変動を伴うことを指摘し、考察を行なっている。

流路断面の 2 つの部分で明らかな流速差がある場合、運動量混合が起こるが、それは、速い流体塊と遅い流体塊の質量混合を素事象としていえると考えやすい。このような混合が可能なのは、1 つは、流れ場が縦断方向に一樣で同断面内で流量のやり取りがある場合で、このときは縦渦（縦断方向の軸を持つ 2 次流）が形成されている。他の 1 つは局所的、瞬間的には界面での横断方向流量は一方向的であるが、時間平均的には平衡している場合で、これが組織的に大規模に行なわれるには、こうした瞬間事象が移流されている状態が必要となる。

流路断面の 2 つの部分で明らかな流速差がある流れの代表例は複断面河道流れと植生帯を伴う流れである。前者の研究は後者に先行して盛んとなり多くの研究がされている（最近の水工学シリーズでは藤田⁹⁾ が取り纏めている）。複断面流れの運動量混合も上記の 2 つを素事象としているものと考えられるが、どちらかと言えば高水敷と低水路の境界近傍に縦渦的な構造を考えるアプローチが主体のようである。もっとも、断面平均速度で移動しながらのトレーサーによる流れの可視化からは大規模な水平渦構造が認められてもいる（玉井・河原⁵²⁾）。また最近、石垣・今本ら¹⁹⁾ の工夫を凝らして行なわれた複断面流れの鉛直断面での流れの可視化の結果は、こうした流れではいくつかの事象が重畳していることを示唆している。

北村・辻本^{26), 27)} は水路半断面を植生帯とする実験で下流へ伝播する水面波を捉え、その役割を考察した。流れが植生帯を伴って充分流下した後横断方向流速分布が縦断方向に変化しなくなった平衡状態で、流下方向流速の横断方向分布に加え、水面変動の横断方向分布、植生・非植生域の境界での横断方向流速が測定され、しかも縦・横断方向に測定位置を変えてのこれらの同時計測もいくつか行なわれた。図 26 にいくつかの量の測定された時系列の例を示す。これによって明かにされた事項をまとめると次のようである：平衡域では横断方向流速の変動が有意でしかも水面変動を伴う。水面変動は境界面 ($z=0$) 近傍で最も著しく、それから離れるに従って減衰するが、減衰は植生側

で強いため、非植生側が大きな水面変動を伴っているといつてよい。水面変動や流速変動の時系列は比較的規則正しくまた低周波変動の卓越が示唆される。同一断面のいくつかの点での水面変動の同時計測は、水面変動が横断面内で同位相であることを示しているが、先に述べたように非植生側の振幅の方が大きいから、時間的に植生側・非植生側の水位差は交番する。これが境界面での横断方向流速の駆動となっていることは、水面変動と横断方向流速の位相がほぼ $\pi/2$ となっていることから確認される。これにより実際運動量交換されていることが、主流方向流速と横断方向流速の相関が例えば非植生側で負、植生側で正となっていることから推測される。また水面変動の時空間相関を見ると、規則正しい比較的低周波の水面変動がほとんど形も変えず下流へ伝播している（移流）していることがわかり、移流速度はほぼ断面平均流速に等しいことが指摘された。

こうした観察結果より、北村・辻本^{26), 27)}は非植生域・植生帯をそれぞれ1次元化し、相互作用は両水路に対する横流出入流速の変動及び境界面せん断応力 ($\tau_a, \tau_{a1}, \tau_{a2}$ は絶対値が等しく符号が反対) で表した興味深い解析を行なった。すなわち、それぞれの流路での流れに運動量則を適用し、水面形方程式 (dH/dx についての陽な表現, H : 水深) の形に整理した次式を得た。少なくとも平衡域では変動成分の貢献が大きいのので諸量に対し変動分 (' を付して表す) も考慮した。ただし規準化された変動量の高次項は無視した。

$$\frac{dH_i}{dx} = \frac{i_i I_{fbi} - I_{si} + \Gamma_i}{1 - U_i^2 / (gH_i)}; \quad \Gamma_i \equiv \frac{(-1)^i (W+W') U_i (2 - \psi_i)}{gB_i} \quad (44)$$

ここに、 $I_{fbi} = \tau_{bi} / (\rho g H_i)$, $I_{si} = \tau_{si} / (\rho g B_i)$ であり、 $(-1)^i (W+W') > 0$ のとき $\psi_i = 1$, $(-1)^i (W+W') < 0$ のとき、 $\psi_i = \gamma_w$, $\psi_2 = 1/\gamma_w$ ($\gamma_w = U_w/U_i$) である。この式は、横断方向流速 ($W+W'$) が与えられたときの諸量の関係を示す。平衡域では W の変動分のみが作用しているが、先述したような変動の移流性から、水面形方程式をこの移流速度での移動座標系表示とし、変動は縦断方向変動で表現している。平衡域では時間平均（移動座標系では縦断方向平均）して $dH/dx = 0$ である。ところで、 W' の平均はゼロであるが、これによってもたらされる横断方向運動量フラックスの平均はもはやゼロでなく、これによって付加抵抗分が出現する。そのため、各領域の断面平均流速 U_{ai} は、混合（付加抵抗）の影響のない場合の流速 U_{oi} と、次のように異なる²⁷⁾。

$$\frac{U_{ei}}{U_{oi}} = \sqrt{1 - \frac{(-1)^i U_{ei} [\psi_{ei} W']_{ave}}{gB_{ib}}} \quad (45)$$

ここに、 $[]_{ave}$ はこの移動座標系での縦断方向平均であり、実際には点計測されたものの時間平均である。なお（移動座標系で）局所的な横断方向運動量フラックスとその平均値の差は水面形状（縦断方向の波）を与える。これが平衡域での水面変動の出現を説明する。具体的に横断方向流速の変動を正弦波で近似するなどの定式化を行なうと、(U_{ai}/U_{oi}) や、水面変動の振幅、位相を定量的に評価できる。このアプローチは1次元解析という制約は有るものの、開水路特有の移流性の混合現象の本質的機構の理解に有用であると思われる。

(d) 側岸沿いの植生帯が水没する場合

水路内の植生帯が水没している場合の流れは極めて複雑な3次元構造を示しており、これをその

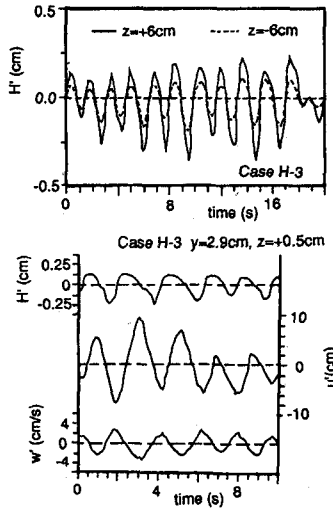


図26 水面変動及び流速変動

まま記述することは現時点では難しく今後の研究に待つところが多いが、植生層の透過係数が小さくまた植生高さが水深に比して小さいときには、3で性質が明らかにされた植生粗度上の流れ（1次元化した性質）と非植生粗度上の流れが隣り合う水平2次元せん断流としての扱いや、植生層を不浸透性とみなし複断面河道の高水敷と同等な扱いがされる。例えば、福岡・藤田¹²⁾は、(a)の取り扱いで式(29)に代えて次式を用いればよいとしている。

$$\frac{\rho g n_1^2 U_1^2 B_1}{H^{1/3}} + K \tau_s = \rho g H B_{1b} ; \quad \frac{\rho g n_2^2 U_2^2 B_2}{H^{1/3}} - K \tau_s = \rho g K B_{2b} \quad (46)$$

これによって計算された合成粗度係数は図27のように実験値と良く適合するとしている。

5. 2 水路中央に植生帯を伴う流れ

(a) 水路中央部の一様連続な非水没樹木群

福岡・藤田^{11),12)}は水路中央の樹木列のような比較的小さい幅で縦断方向に連続する植生帯の伴う流れについて検討を行なっている。図28はこの場合の代表的な横断流速分布であるが、植生帯の遅い流速に流速が低減を受ける領域は非植生部へかなり広がっていることが注目される。こうした混合が生じるのは、6. 1のケースにも増して水面変動を伴う運動量混合が「励起」されるからと考えられる。福岡ら¹¹⁾の実験ではほとんど揺動しない超多孔体が植生層として用いられたが、このとき図29に示すような明確な水面変動が出現し植生帯の両端で逆位相となっている。すなわち、植生帯を挟んで横断水面勾配が交番する。これが植生層を向きを交番して横断する流れを駆動することになり、植生層から流出してくる遅い流れは交互に非植生部水位を堰上げこの現象を励起する（自励現象）。こうした機構が運動量交換をつかさどることになる。こうした現象も5. 1(c)のようなブローチでの現象理解を進めることが可能であろう。詳細な機構の記述は今後に待つとし、福岡・藤田¹²⁾は簡単な機構の解釈と支配要素の考察から境界混合係数 f_m を整理した。すなわち、まず水位変動強度 Δh によって横断方向に $\Delta h/B_0$ (B_0 : 水路中央の植生帯幅)の動水勾配が生まれると考え、植生帯への横断方向流入流速 w は透過係数 K_s を用いて横断方向に1次元的に考えて求められる ($w_r = K_s \sqrt{\Delta h/B_0}$) とした。すなわち次の関係式を得た。

$$\frac{\Delta h}{H} = \left(\frac{w_r}{U} \right)^2 B_0 \frac{U^2}{H K_s^2} \quad (47)$$

ところで f_m は近似的に w_r/U であり、 $\Delta h/H$ はFroude数の関数でもあったと考えられることから、

$$f_m = \text{func} \left[Fr, \frac{K_s \sqrt{H}}{U \sqrt{B_0}} \right] \quad (48)$$

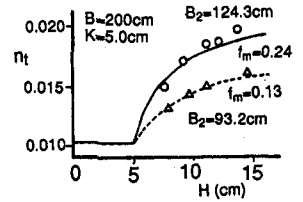


図27 合成粗度係数

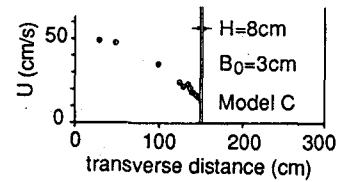


図28 横断流速分布

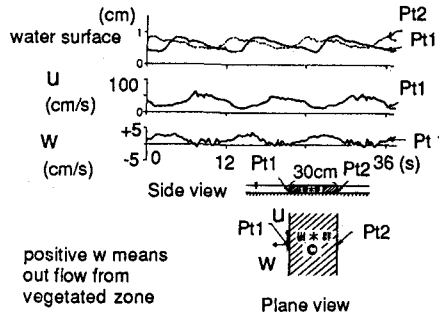


図29 植生帯をはさんでの水面変動

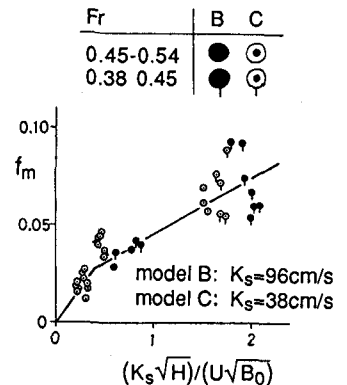


図30 境界混合係数

のように表された。福岡¹²⁾は実験データの整理から図30を得、 f_m が $(K/U)\sqrt{H/B_0}$ に対して系統的増加をすることを認めている（透過係数が大きいほど、植生帯幅が小さいほど境界混合係数が増す）。図に実線で表されるような実験式も提案されているが必ずしも普遍的なものではない。

なお、石川・田中²⁰⁾はこのように河道の真中で縦断方向に列をなす植生にかん木列を想定し、しかもその柔軟さに着目し、図31に示すような揺動が可能な植物モデルを水路に縦断方向に1列に並べて実験を行なった。このときも、顕著な水面変動が出現し運動量混合に貢献しているであろうことをその変動周期が流速変動のそれと一致していることなどより推測している。なお、彼らはこの水面変動を一種のセイシュ（静振）であり、混合現象をセイシュとの共振と見做している。一方、先の福岡・藤田¹¹⁾の実験の変動はセイシュの固有周期と一致せず、水路片側に植生が配置されたときに出現する水面変動とともに自動的現象であり、樹木群の揺動の有無で混合現象に本質的に違いがあるかないかは今後の課題である。

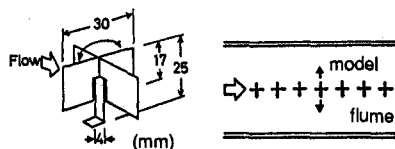


図31 揺動するかん木のモデル

(b) 水路中央部で水没した植生帯

河道中央部の植生帯が水没する場合を対象とした福岡・藤田¹²⁾の実験結果の例を合成粗度の変化で示すと、図32のように植生帯の幅によって異なる傾向の現われることがわかる。一般に植生帯が水没すると水の横断方向移動は容易になって、混合は促進され、境界混合係数がそしてその分流れの抵抗が増加する。これが水没後の抵抗増である。ところが、植生帯幅が小さいと植生域平均流速が水深の増加とともに非植生域流速によって加速され、植生・非植生域の速度差が小さくなって抵抗を減少させる作用が現われる。逆に言うと、植生幅が大きいと非植生域の流速の加速される領域の相対的割合が小さく後者の効果の出現が鈍い。上記の現象をモデル化して抵抗予測に結びつけようとした福岡・藤田¹²⁾の研究は興味深い、現象の機構という観点からは素事象のより詳細な実験的把握（計測）、抵抗予測という面からは充分な系統化が残されている。

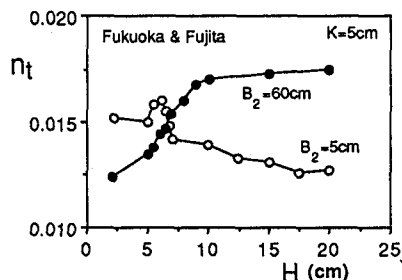


図32 水深による合成粗度係数の変化

5. 3 河道内に散在する植生部を伴う流れ

植生帯は確かに縦断方向に連続して繁茂する傾向が強いとは言うものの、色々なパターンで散在する場合もある。こうした例についての研究はまだ十分に行なわれていないし、検討するにしてもかなり多くのパターンが想定され一朝一夕に片付かない。散在する植生が流れに与える影響を最も基本的なものに抽象すると、(a) 植生・非植生域の縦断方向始点からの混合が平衡状態に至るまでの遷移過程と、(b) 植生域の下流部での流速回復過程あるいは死水域のスケールと死水域と主流部の間の混合過程の2つを挙げることができる。

(a) 植生帯を伴う流れの遷移過程

流れが一樣な幅、透過能をもつ植生帯を伴うようになってからその平衡状態に至る過程を扱う。植生・非植生域の透過能の差により、横断方向流れが生まれ、これによって流量の再配分が行なわれる（平衡状態になると、先に述べたように横断

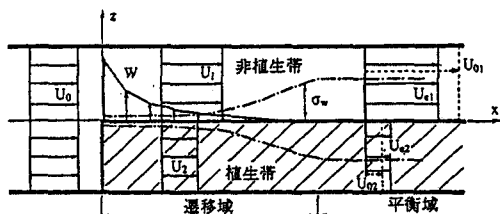


図33 植生帯を伴う流れの遷移過程

方向流速の変動は著しくしかも移流性の水面変動を伴うものであったが、実験によると遷移域では変動は極めて小さく、平衡域に入って急激に出現することが指摘されている²⁷⁾。図33に示すように、横断方向流速は平衡状態での流速差 ($\Delta U_0 = U_{01} - U_{02}$) がつくまで、両域の流速差 ($\Delta U(x) = U_1(x) - U_2(x)$) と平衡流速差との差 ($\Delta U_0 - \Delta U(x)$) にほぼ比例して縦断方向に減衰して行く。すなわち

$$\varepsilon_w = W / (|U_{01} - U_{02}| B_i) \quad (49)$$

と定義される ε_w を一定とすると、横断方向流速、各域の平均流速の縦断方向変化は、次のように導かれ、実験値の傾向を良く説明する。

$$U_i(x) = U_0 + (U_{01} - U_0) \{1 - \exp(-\varepsilon_w x)\}; \quad W(x) = W(0) \cdot \exp(-\varepsilon_w x) \quad (50)$$

ここで、 U_0 : 植生帯を伴った始点での流速、 $W(0) = \varepsilon_w (U_{01} - U_{02}) / 2$ である。上式は平衡域で卓越する横断方向流速の変動に起因する付加抵抗は考慮していないので、平衡域での流速は U_0 にならない。なお北村・辻本²⁷⁾は上記の ε_w は先に導いた横断方向流速を考慮した運動量式 (式(44)) で、遷移域でも $dH/dx=0$ とおいて、両域の境界でのせん断応力の釣り合いから決定できるとしている。

(b) 植生域下流の死水域

植生域が縦断方向に有限の場合、植生域を伴う区間を出た流れ、すなわち植生部下流の死水域について知ることが必要となる。流れを1次元化して考えると、この死水域でのエネルギー損失が断面急拡による損失として評価される。

例えば、芦田・荒木²⁾の方法が適用が考えられ、福岡・藤田¹²⁾は植生部流入時の急縮損失も併せ考え、実験での水位変化をこうした方法で十分な精度で予測できると報告している。断面急拡の場合の死水域の領域は、図34に示したような三角形で近似されるが、主流の広がり角度は 5° から 6° 程度 (芦田・荒木²⁾、福岡・藤田¹²⁾) で、鉛直2次元流の段落急拡や2次元噴流の 11° 程度に比べると小さい。死水域と主流域の界面ではせん断応力が作用するが、それは急拡によるエネルギー損失と対応しているはずである。福岡ら¹²⁾は流速差に伴うせん断力の評価に先に述べた境界混合係数を用い、これを逆算すると自由乱流のそれよりわずかに小さいだけで同オーダーである ($f_m = 0.02 \sim 0.03$) と報告している。

植生部が散在する例として枝や葉が茂ったかん木が挙げられる。玉井⁵¹⁾はこのとき植生部 (による圧力勾配の不均衡) が誘起するボイルのような組織渦の抵抗に占める役割に注目し、この組織渦生成のための慣性抵抗 F_d (1植生塊あたり抗力と同じ次元) を次式で評価できるとしている。

$$F_d = \frac{\rho \pi A_d^2 H U_d}{T_d} \quad (51)$$

ここに、 A_d : 組織渦塊の代表半径、 T_d : 組織渦の発生周期、 U_d : 樹木域の代表流速である。興味深い見解であるが詳細な構造の把握や定量的評価にはまだ今後の研究に待つところが多い。

6. 植生を伴う流れ場での流砂と河床変化

6. 1. 植生に覆われた路床上の浮遊砂

河床が植生に覆われると、河床近傍の Reynolds 応力は相当に減少し、それに支配される河床の砂の舞い上がりはかなり低減することが予想される。

ところで植生に覆われない平坦河床の底面濃度式はこれまでいくつか提案されているが、従来の実験値はほぼ次の経験式を示唆する (例えば中川・辻本³⁷⁾参照)

$$C_a = A_1 (u_* / v_p)^2 \quad (52)$$

ここで、 C_a : 底面濃度、 A_1 は経験定数で、 $A_1 = 0.002$ 程度、また v_p は砂の沈降速度である。平衡状

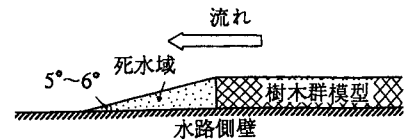


図34 植生域下流の死水域

態での砂の河床からの舞い上がり量は $C_s v_p$ で表される。ところで河床での砂の舞い上がりは河床近傍の Reynolds 応力に支配されるであろうから、植生に覆われている場合、底面濃度式の u_* には河床近傍の Reynolds 応力から計算したもの ($u_{*b} = \sqrt{\tau_b/\rho}$) を用いるべきである。こうした考えから清水ら⁵⁰⁾ は河床が植生に覆われると植生密度に応じた底面濃度の低減は $\psi_s = \Omega(0) = \tau_b/\tau_0$ で表されるとした (ψ_s と植生密度の関係は図20に併示されている)。

さらに、清水ら⁵⁰⁾ は乱れによる運動量輸送と浮遊砂輸送の間の相似性から、植生層内の Reynolds 応力の低減率 $\Omega(\eta)$ は、浮遊砂濃度フラックスの植生層内での変化に対しても適用できると考えた。

浮遊砂濃度フラックスは拡散係数を用いて濃度勾配と関係づけられ、浮遊砂の拡散係数を水深にわたって一定と仮定し (ϵ_{s0})，これを渦動粘性係数の水深にわたる平均値と同一視すると、植生に覆われない場合の平衡状態では、浮遊砂濃度分布、フラックス分布はとも指数型表示される。清水ら⁵⁰⁾ は Reynolds 応力の植生密度による低減率 $\Omega(\eta)$ を上記のように簡単化した指数型の分布に考慮して浮遊砂の乱流フラックスの植生密度による変化を求め、これから濃度分布の変化を計算した。無次元化された拡散係数 $\epsilon_{s0} = \epsilon_{s0}/(u_* H)$ を一定として、濃度フラックス、濃度分布が次のように解析的に求められている。

$$\frac{C(\eta)}{C_{a0}} = \begin{cases} \psi_s \{A [\exp\{-(E_0 - \gamma)\eta\} - 1] + 1\} & (0 < \eta < \eta_k) \\ \psi_s \{A [\exp\{-(E_0 - \gamma)\eta_k\} - 1\} + B [\exp(-E_0\eta) - \exp(-E_0\eta_k)] + 1\} & (\eta_k < \eta < 1.0) \end{cases} \quad (53)$$

$$A \equiv \frac{E_0}{\psi_s(E_0 - \gamma)}; \quad B \equiv \frac{1}{\psi_s}; \quad E_0 \equiv \frac{v_p h}{\epsilon_{s0}} = \frac{6}{\kappa} \left(\frac{v_p}{u_*} \right) \quad (54)$$

この計算例が図35に示されている。植生密度によっては、表面流は清水に保たれるが、浮遊砂分布が表面流に達すると急激に水深方向に拡散することが表されている。

6. 2 植生帯を伴う流路での浮遊砂の挙動と流路横断形状

速度差に起因する植生・非植生域の混合は運動量混合のみならず、浮遊砂の横断方向混合をももたらす。すなわち、浮遊砂の植生域への横断フラックスが生みだされ、非植生域では植生帯を伴わない流れよりも浮遊砂濃度が小さくなり、植生域では過剰な砂が堆積する。すなわち、側岸寄りの植生帯は河畔、河川敷の形成を促進することになるなど、流路横断形状を支配する。

縦断方向に変化のない平衡状態で、水深方向に平均化した横断方向に1次元問題と簡略化すると、浮遊砂濃度の横断分布 $C_h(z)$ を支配するのは次式となる。

$$\epsilon_{sz} \frac{d^2 C_h}{dz^2} = \frac{v_p^2}{\epsilon_{sy}} C_h - v_p C_a \quad (55)$$

ここで、 C_h ：水深方向に平均化された濃度、 C ：鉛直方向に分布を持つ濃度分布、 ϵ_{sy} 、 ϵ_{sz} ：水深方向に平均化された浮遊砂の鉛直方向及び横断方向の拡散係数である。上式右辺第1項は指数型濃度分布を仮定して乱れによる浮遊砂フラックスを水深平均したものである⁴³⁾。

泉・池田・伊藤²¹⁾ は、底面濃度を式(52)で評価し、 $z \rightarrow \pm\infty$ で $dC_h/dz = 0$ を境界条件として式(55)を摂動法で解き ($u_*(z)$ は水平せん断流れをやはり摂動法で解かれた流速の横断分布 $U(z)$ に一定の底面摩擦抵抗係数を仮定して与える)、横断方向濃度分布を求めた。この結果は実験結果を良く表しているようである (図36参照)。泉らによると摩擦速度にほとんど関係なく $\epsilon_{sy}/u_* H$ は 0.06~0.1 程度、 $\epsilon_{sz}/(u_* H)$ は 0.16~0.4 程度 (Fischer⁸⁾ によると植生を伴わない開水路流れでは実験室規模で 0.1~0.2 程度、野外流路で 0.25~0.7 程度) である。なお、こうした濃度の横断方向分布は非植生域から植生域への

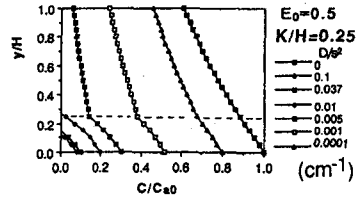


図35 植生路床上の浮遊砂濃度

浮遊砂の定常的な横断方向フラックスの存在を意味しており、式(55)が示すように各断面底面で鉛直方向フラックスの正味が非ゼロとなる。すなわち非植生域、植生域のそれぞれの境界近傍に洗掘、堆積が進行することがわかる(図37²¹⁾)。

池田・浅枝・須賀¹⁵⁾も、基本的に上記の方法で求められる浮遊砂フラックスとバランスするような掃流砂の横断方向成分が重力によってもたらされるほどに横

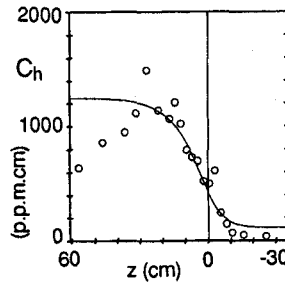


図36 浮遊砂濃度の横断分布

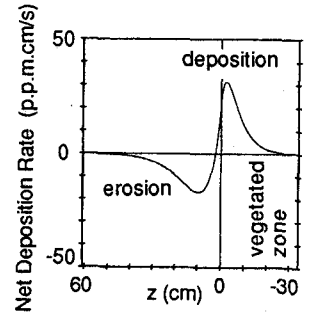


図37 浮遊砂の洗掘と堆積

断勾配がついた状態の動的平衡横断形状を想定して解析を行なっている。この結果、植生密度が高いほど浮遊砂フラックスが増加し、側岸斜面の形成が河川の内側に移動してくると考察している。

泉・池田²²⁾は側岸に樹木群があるとき、樹木の抗力分を差し引いて求めた底面せん断応力について静的平衡形状を論じ、樹木密度とともに側岸部勾配の増加することを示している。また樹木が側岸部に存在する場合の流速分布を換算した底面せん断応力分布から動的安定水深を得、さらに流路全体の運動量保存則から樹木密度とともに安定水深が増加、安定河幅が減少することを示した。

また、菅ら^{23), 47)}は、低水路から巻き上げられた浮遊砂の高水数への堆積過程に及ぼす高水数上の低水路寄りの樹木群の影響を実験的に調べている。この結果、樹木群が低水路からの浮遊砂輸送の増加する傾向を指摘しているが、浮遊・堆積機構を明かにするには至っていない。

7. あとがき

本文では、植生に関わる河川水理学的問題が今後多岐にわたって生じてくると予想されることに鑑み、水理学的に植生をどのように扱うかに焦点を当ててこれまでの研究で明らかにされたり、指摘された興味深い項目を紹介した。これまでの河川水理学の植生に絡む問題はほとんど流水抵抗に限られていたため、その取り扱い方についての紹介もしたが、この場合も、今後増大してくると思われる環境問題を初め多くの問題が植生・非植生域間の混合現象であるとの認識をもとにした「基本的な考え方」からどのような位置づけとなるかわかるよう配慮したつもりである。

具体的な問題としてはほとんどが流水抵抗で、それ以外に浮遊砂輸送やそれに伴う河床変動についての最近の研究にも言及したが、まだ研究の充分でない領域といえる。これに加えて、植生と流路形態の研究なども程なく手掛けられるだろうし、植生の環境や親水機能が水理学的背景をもって評価されることも大いに期待したい。

こうした展開のためには、本文で述べた河道での植生の実態把握とその空間幾何的、時間的(季節変動、経年変化)そして力学的抽象化が第一に必要なことはいうまでもない。こうした野外での植生調査^{24), 25)}に加えて、植生部を伴う実河川での乱流測定²⁷⁾、植生を意識した洪水流観測とその解析¹⁰⁾など、野外での研究活動の活発化がこの分野の研究の発展を支えるものと思う。

参考文献

- 1) 秋草 勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和男・土屋昭彦：水制に関する研究，土木研究所報告，第107号，1960。
- 2) 芦田和男・荒木民哉：開水路断面急拡部における水理に関する研究(1)－矩形水路急拡による損失水頭，土木研究所報告，第101号，1959。
- 3) Chen, C.: Flow retardance in broad shallow grassed channels, *Jour. Hydraul. Div., ASCE*, Vol.102, HY3, pp.307-322, 1976.
- 4) Chow, V.T.: *Open-Channel Hydraulics*, McGraw Hill., 1959.

- 5) Christensen, B.A. : Open channel and sheet flow over flexible roughness, *Proc. 21st IAHR Cong.*, Melbourne, Australia, pp.462-467, 1985.
- 6) Chu, Y. and L.W. Gelhar : Turbulent pipe flow with granular permeable boundaries, *Report*, Ralph Parsons Lab., M.I.T., No.148, 1972.
- 7) Finnigan, J.J. : Turbulence in waving wheat, I. Mean structure of honami, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.16, pp.181-211, 1979.
- 8) Fischer, H.B. : Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open-channel flow, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.5, pp.59-78, 1973.
- 9) 藤田正治 : 複断面水路の流れの諸問題, 水工学シリーズ, 89-A-9, 土木学会水理委員会, 17p., 1989.
- 10) 福岡捷二・浅野富夫・高橋 晃・藤田光一・渡辺明英・平林 桂・坂野 章ほか : 洞沼川における洪水流と河床変動の研究, 土木研究所報告, 第180号, pp35-128, 1990
- 11) 福岡捷二・藤田光一 : 洪水流の横断方向流速差がもたらす付加的抵抗の評価, 第33回水理講演会論文集, pp.301-306, 1989.
- 12) 福岡捷二・藤田光一 : 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告, 第180号, pp.129-192, 1990.
- 13) 福岡捷二・藤田光一・平林 桂・坂野 章 : 樹木群の流水抵抗について, 第31回水理講演会論文集, pp.335-340, 1987.
- 14) 日野幹雄・歌原英明 : 水草のある流れの水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第266号, pp.87-94, 1977.
- 15) 池田裕一・浅枝 隆・須賀亮三 : 円柱群が河床の形成に与える影響, 第33回水理講演会論文集, pp.325-330, 1989.
- 16) Inoue, E. : On the turbulent structure of airflow within crop canopies, *Jour. Meteorological Society of Japan*, Ser.2, Vol.41, pp.317-326, 1963.
- 17) Inoue, K. : A model study of microstructure of wind turbulence of plant canopy flow, *Bull. National Inst. Agricultural Science*, Ser.A, Vol.27, pp.69-89, 1981.
- 18) Inoue, K. and Z. Uchijima : Experimental study of microstructure of wind turbulence in rice and maize canopies, *Bull. National Inst. Agricultural Science*, Ser.A, Vol.26, pp.1-88, 1979.
- 19) 石垣泰輔・今本博健・武藤裕則・福本幸成 : 複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, II-151, pp.354-355, 1990.
- 20) 石川忠晴・田中昌宏 : 開水路流中のかん木の抵抗特性に関する研究, 第31回水理講演会論文集, pp.329-333, 1987.
- 21) 泉 典洋・池田駿介・伊藤力生 : 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, pp.313-318, 1989.
- 22) 泉 典洋・池田駿介 : 側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断河床形状, 土木学会論文集, 第411号/II-12, pp.151-160, 1989.
- 23) 菅 和利・玉井信行 : 浮遊砂堆積に及ぼす高水敷上の樹木群の影響について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, II-155, pp.362-363, 1990.
- 24) 川原捷彰 : 手取川の植物 / 第4報, 1988.
- 25) 北川 明・島谷幸宏・小栗幸雄 : 川辺の樹木に関するフィールドワーク, 第33回水理講演会論文集, pp.625-630, 1989.
- 26) 北村忠紀・辻本哲郎 : 植生域と非植生域の流れの干渉についての基礎的研究, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, II-98, pp.488-489, 1990.
- 27) 北村忠紀・辻本哲郎 : 横断面内に植生帯のある開水路流れの水理学的検討, 土木学会第46回年次学術講演会, 1991 (発表予定) .
- 28) Kosorin, K. : Turbulent shear stress and velocity distribution in vegetated zone of open channel, *Proc. 20th IAHR Cong.*, Moscow, USSR, Vol.4, pp.572-579, 1983.
- 29) Kouwen, N. and R.M. Li : Biomechanics of vegetative channel linings, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.106, HY6, pp.1085-1103, 1980.
- 30) Kouwen, N. and T.E. Unny : Flexible roughness in open channels, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.99, HY5, pp.713-728, 1973.
- 31) Kouwen, N., T.E. Unny and H.M. Hill : Flow retardance in vegetated channels, *Jour. Irr. & Drainage Div.*, ASCE, Vol.95, IR2, pp.329-342, 1969.
- 32) Li, R.M. and H.W. Shen : Effect of tall vegetation on flow and sediment, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.99, HY5, pp.713-728, 1973.

- 33) 室田 明・福原輝幸：柔軟な水草を有する流れの乱れ特性について，第27回水理講演会論文集，pp.585-590，1983.
- 34) 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，土木学会論文報告集，第338号，pp.97-103，1983.
- 35) 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，第28回水理講演会論文集，pp.225-231，1984.
- 36) 室田 明・福原輝幸・村越一也：水草を有する流れの抵抗特性，第29回水理講演会論文集，pp.839-844，1985.
- 37) 中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理，新体系土木工学，23，技報堂出版，350p.，1986.
- 38) 中川博次・辻本哲郎・清水義彦：粗度周辺の組織的流速変動場が相対水深の小さな流れの乱流構造に及ぼす影響，第33回水理講演会論文集，pp.487-492，1989.
- 39) Nakagawa, H., T. Tsujimoto and Y. Shimizu : Turbulent flow with small relative submergence, *Proc. Int. Workshop on Fluvial Hydraul. in Mountain Regions*, IAHR, Trent, Italy, pp.A19-A30, 1989.
- 40) 中川博次・辻本哲郎・清水義彦：相対水深の小さな流れの構造に関する実験的研究，土木学会論文集，第423号/II-14，pp.73-81，1990.
- 41) 中川博次・辻本哲郎・清水義彦：植生を伴う開水路流れの構造に関する研究，水工学論文集，第34巻，pp.475-480，1990.
- 42) 岡田敏治・北村忠紀・辻本哲郎：柔軟な植生に覆われた路床をもつ開水路流れの特性，土木学会第46回年次学術講演会，1991（発表予定）.
- 43) Parker, G. : Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed, 1, The sand-silt river, *Jour. Fluid Mech.*, Vol.89, pp.109-125, 1978.
- 44) Pasche, E. and G. Rouve : Overbank flow with vegetatively roughened flood plains, *Jour. Hydraul. Engrg.*, Vol.111, No.9, pp.1262-1278, 1985.
- 45) Petryk, S. and G. Bosmajian III : Analysis of flow through vegetation, *Jour. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol.101, HY7, pp.871-884, 1975.
- 46) リバーフロント整備センター編：まちと水辺に豊かな自然を／多自然型建設工法の理念と実際，山海堂，1990.
- 47) 佐野良久・野崎一郎・濱谷 拓・中井正則・菅 和利：高水敷に樹木を有する複断面直線水路の流れと浮遊砂の輸送について，水工学論文集，第35巻，pp.483-488，1991.
- 48) Shen, H.W. : Flow resistance over short simulated vegetation and various tall vegetation groupings on flow resistance and sediment yield, *Environmental Impact on Rivers*, edited by H.W. Shen, Chapt. 3, 51p., 1973.
- 49) 清水義彦・中川博次・岩田美幸：水路横断面内に植生群落を伴う流れの構造について，第45回土木学会年次学術講演会講演概要，II-153，pp.358-359，1990.
- 50) 清水義彦・辻本哲郎・北村忠紀：植生に覆われた砂床上流れの浮遊砂濃度分布，水工学論文集，第34巻，pp.475-480，1991.
- 51) 玉井信行：氾濫原での流量予測式とフィッツロイ横断路（西オーストラリア）での観測との比較，水工学論文集，第34巻，pp.299-304，1991.
- 52) 玉井信行・河原能久：複断面開水路流れの特性と抵抗則に関する研究，第25回水理講演会論文集，pp.113-118，1981.
- 53) 谷 信輝：耕地風に関する研究，農業技術研究所報告，A，第10巻，pp.1-100，1963.
- 54) Temple, D.M. : Velocity distribution coefficients for grass-lined channels, *Jour. Hydraul. Engrg.*, ASCE, Vol.112, No.3, pp.193-205, 1986.
- 55) Thom, A.S. and M.R. Raupach : Turbulence in and above plant canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.13, pp.97-129, 1981.
- 56) 田中昌宏・石川忠晴・木村 聡：平行平板間の乱流の水平混合特性について，第41回土木学会年次学術講演会講演概要，II-148，pp.295-296，1986.
- 57) 辻本哲郎・北村忠紀・岡田敏治・王子義徳：小型電磁流速計による野外流路での乱流測定，水工学論文集，第34巻，pp.333-338，1991.
- 58) 山崎真一・石川忠晴・金丸督司：開水路平面せん断流に関する実験的研究，第39回土木学会年次学術講演会講演概要，II-237，pp.473-474，1984.
- 59) 渡邊康玄・北條絳次・清水康行：樹木の存在する河道の流況特性，水工学論文集，第34巻，pp.471-476，1991.
- 60) Wilson, N.R. and R.H. Shaw : A higher order closure model for canopy flow, *Jour. Applied Meteorology*, Vol.16, pp.1197-1205, 1977.