

樹 木 と 水 理

Hydraulics with Vegetation

渡 邊 康 玄

Yasuharu WATANABE

1 はじめに

近年、水辺環境としてのうるおいやゆとり、あるいは水とのふれあい等を河川に望む声が高まっている。これまでの河川事業においても周辺環境への配慮はなされていたが、より積極的な配慮が望まれている。この社会の要請に応える一つの方法として河川の洪水敷に植栽あるいはすでに生えている樹木を残した河道計画を立案する方向に動きつつある。

従来の河道計画において樹木等の植生は、河道断面の減少や流木による災害発生の可能性の増加等の理由から河道内から極力排除され、流れや河床変動について植生の影響はないものとして計画立案されてきた。このため、河道内植生の河道に与える影響は未解明な部分が多く、河川環境(植生)を配慮した河道計画立案のためには、樹木等が存在する場の流れや河床変動の把握および植生そのものの耐流水性の把握を行うことが必要不可欠なものとなっている。

植生と一言に言っても、高さ10mを越える巨木から可撓性の芝等に至るまで様々なものが存在し、その水理特性についても千差万別である。ここでは、流水に対して比較的大きな影響を与える樹木および水深規模に成長する水草に焦点を当てていくこととする。

植生の存在する河道の流れに関する水理学的知見のレビューについては、1991年度(第27回)水工学に関する夏期研修会において、「植生を伴う流れの水理」(辻本哲朗)¹⁾に詳細に行われている。そこで、それ以降に発表された論文を中心に、河道計画に樹木等を取り込む場合の検討手法およびその一助となる考え方について、できる限り具体的な事項を用いて述べることとする。

2 河道内樹木の流水への影響

流れの中に樹木群が存在する場合、樹木には流速の2乗に比例する力が働く。このため、流れには流速の2乗に比例する抗力が抵抗として働くことになる。すなわち流れに働く抗力は、流速の大きい表面付近で大きく、流速の小さい底面付近で小さく働く。従って、樹木群の存在する場の流速は、水深方向に一様化し樹木群が存在しない場合の流速分布と大きく異なることが想定される。また、樹木群の存在する箇所としない箇所においても水深平均流速が大きく異なることとなり、樹木群の境界において複雑な流れを呈することになる。この節では、樹木群が存在する場合の特異な流速分布について述べるとともに、流水中の樹木の抵抗係数の考え方について説明を加える。

2-1 樹木群内の流速分布

図-1に示す様な一様幅一様勾配とした最も単純な流れの場における樹木群内の流速分布を実験的に調べると、図-2の様な分布形が得られ、樹木群が無い場合の流速分布と比較して大きく異なり、樹木群内で水深方向に一様化することが判る²⁾。ここで、 a ; 無次元樹木群密度($= \bar{d}h/(\bar{s}_x\bar{s}_y)$)、 h_t ; 樹木の無次元高さ($= \bar{h}_t/\bar{h}$)、 $\bar{d}$; 樹木の直径、 $\bar{h}$; 水深、 $\bar{s}_x$, $\bar{s}_y$; 樹木の縦横断方向間隔、 $\bar{h}_t$; 樹木群の高さ(樹木群の高さが水深を越える場合は水深)である。

樹木群内の流速分布を求める方法は、 $k-\epsilon$ モデルを用いた清水ら³⁾の方法、混合長理論に基づく湯城ら⁴⁾の方法、渦動粘性係数を用いた渡邊ら⁵⁾の方法等がある。渡邊ら⁶⁾は、式(1)、(2)で表される定常等流の鉛直2次元の運動方程式を摂動法により解き、樹木群内の流速分布を式(3)、(4)として定式化している。

$$-\bar{g}\frac{\partial \bar{H}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\epsilon}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) = 0 \quad ; \quad \text{樹木群外} \quad (1)$$

$$-\bar{g}\frac{\partial \bar{H}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\epsilon}\frac{\partial \bar{u}_t}{\partial z}) - \frac{\bar{a}}{2}C_d\bar{u}^2 = 0 \quad ; \quad \text{樹木群内} \quad (2)$$

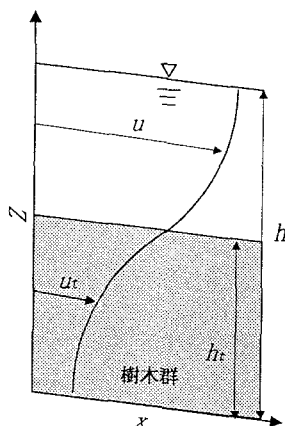
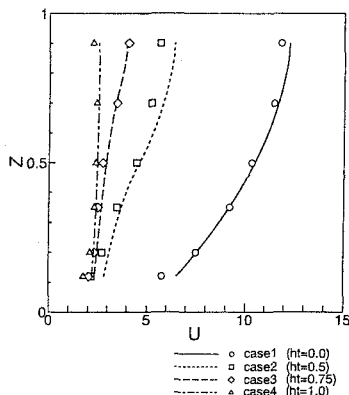
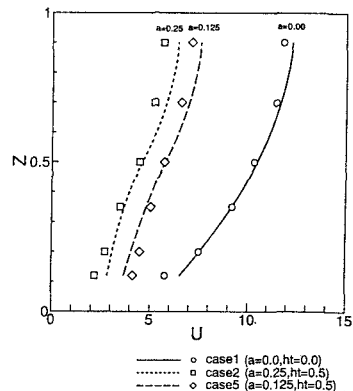


図-1 座標系および記号の定義



(樹木の高さを変化させた場合)



(樹木の密度を変化させた場合)

図-2 樹木群内の流速分布

$$u = \frac{1}{\epsilon} z \left(1 - \frac{1}{2} z\right) + c_2 \quad (3)$$

$$u_t = \sqrt{\frac{2}{A}} \left[1 + \frac{2}{\chi^2} \{c_0 \exp(\chi z) + c_1 \exp(-\chi z)\}\right] \quad (4)$$

ここで、 $\bar{g}$:重力加速度、 $\bar{H}$:水位、 $\bar{x}$:流下方向座標軸、 $\bar{z}$:水深方向座標軸、 $\bar{u}$:樹木群外流速、 $\bar{u}_t$:樹木群内流速、 $\bar{\epsilon}$:渦動粘性係数($=\kappa/6\bar{u}_* \bar{h}$)、 κ :カルマン定数、 $\bar{u}_*$:摩擦速度、 $\bar{a}$:樹木密度($=\bar{d}/(\bar{s}_x \bar{s}_y)$)、 C_d :樹木の抵抗係数である。なお、 $\bar{\cdot}$ の付いた変数は有次元を、付いていない変数は無次元をそれぞれ表している。また、各記号は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} A &= aC_d, \quad \epsilon = \frac{\kappa}{6}, \quad \chi = \left(\frac{2A}{\epsilon^2}\right)^{1/4} \\ c_0 &= \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \\ c_1 &= c_0 \exp(2\chi h_t) - \frac{\chi^3}{4} (1 - h_t) \exp(\chi h_t) \\ c_2 &= \sqrt{\frac{2}{A}} \left[1 + \frac{2}{\chi^2} \{c_0 \exp(\chi h_t) + c_1 \exp(-\chi h_t)\} + \frac{\chi^2}{4} h_t (h_t - 2)\right] \\ \alpha &= 16C_b \{\exp(2\chi h_t) + 1\}^2 \\ \beta &= 8\chi [C_b \chi \{\chi(h_t - 1) \exp(\chi h_t) + 2\} \{\exp(2\chi h_t) + 1\} + A \{\exp(2\chi h_t) - 1\}] \\ \gamma &= \chi^4 [C_b \{\chi(h_t - 1) \exp(\chi h_t) + 2\}^2 + 2A(h_t - 1) \exp(\chi h_t)] \end{aligned}$$

式(3)、(4)を用いて得た流速解を図-2に併記したが、流速解は、実験結果と良く一致しており、樹木群が流れに与える影響の特性すなわち、樹木群の高さが高くなるにつれあるいは樹木群の密度が高くなるにつれて、平均流速が小さくなり鉛直方向に一様化する傾向を十分に表現している。

2-2 樹木の抵抗係数

樹木の抵抗を考える場合、抵抗係数の見積もりが問題となる。この項では、円柱として仮定が可能な樹木の幹の抵抗係数と円柱として仮定できない樹幹の抵抗係数に分けて述べる。

一般に、無限に広がる流れの中の円柱の抵抗係数は、図-3に示される値をとる。

福岡ら⁷⁾は、実際の竹林の標準的な諸元を参考に、1/10スケール程度を想定した水理実験を行い、図-4に示す千鳥に配置した直径6mmの樹木群(円柱群)の抵抗係数を求めた。その結果、多少のばらつきはあるものの、密度の違いや水路勾配によらず抵抗係数は1.2程度の値になることを示した。一方、板倉ら⁸⁾は、樹木群の配列に着目し樹木が正則配列の場合と千鳥配列の場合の抵抗係数を $(l/h)(d/s)^{0.1}$ なるパラメータを導入し

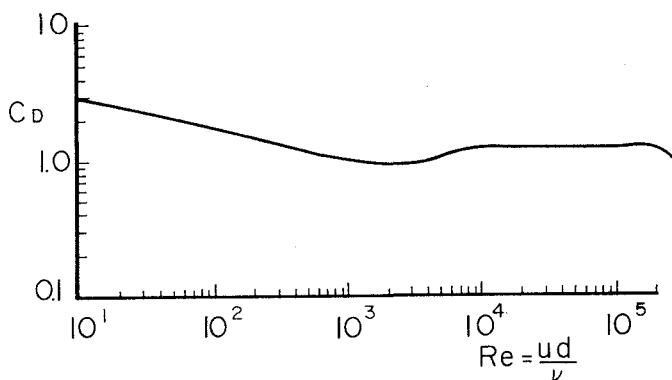


図-3 単一円柱の抵抗係数

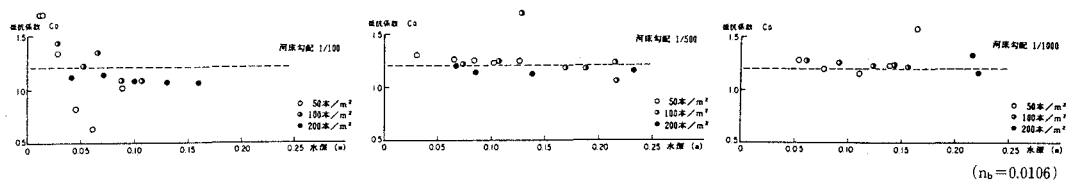


図-4 抵抗係数と水深の関係

て実験的に示した。図-5にその結果を示す。実験の範囲は、図中の記号を用いて $l/h = 0.17 \sim 1.23$ および $d/s = 0.11 \sim 0.44$ である。この場合、 $(l/h)(d/s)^{0.1} \leq 1.0$ においては樹木の配置に関係なく $C_D = 1.2$ 程度の値となっている。

樹木の樹幹部は、複雑な形状であることから、単純に円柱等の抵抗係数を用いることはできない。福岡ら⁹⁾は、実物の樹木(竹)の抵抗係数を測定し、 $(\text{樹木の密生度}\lambda) = (\text{葉を無視した樹木の実質体積})/(\text{樹木の影を受ける流水部分の体積})$ を用いて図-6の結果を得ている。密生度が高くなるにつれて抵抗係数が低下しているが、このことは枝間の相互作用によるものであり、ある枝が上流部に存在する枝の後流域に入ってしまう等の

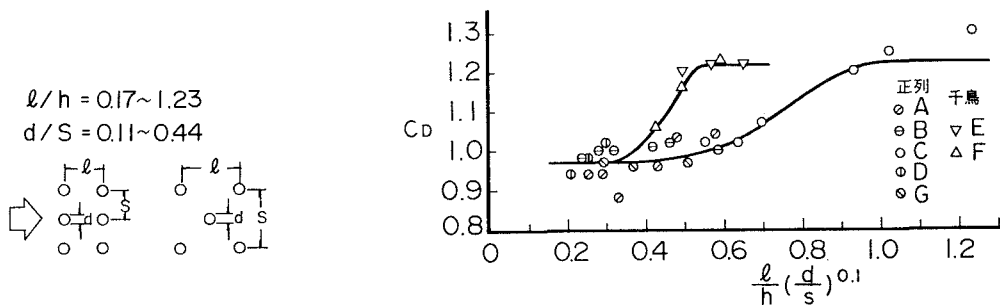


図-5 樹木群の配列の違いによる抵抗係数

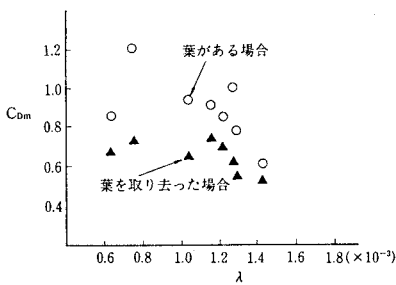


図-6 樹木の密度 λ と抵抗係数 C_d との関係

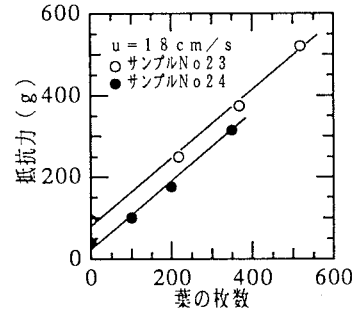


図-7 カワヤナギの葉の枚数と抵抗力との関係

影響によるものである。さらに、 $4,000 \leq Re \leq 10,000$ の範囲で抵抗係数は Re (代表長さ; 枝の平均直径)によらずほぼ一定となることを確認している。

図-6の各点のばらつきは、各試料毎に葉の数が異なることである⁹⁾が、石川ら¹⁰⁾は、カワヤナギを用いて、図-7に示す葉の抵抗力和葉の枚数の関係を明らかにし、木部および葉の一枚一枚の抵抗が線形重ね合わせにより表現できると推察している。

樹幹部の抵抗係数に関してある程度の水理学的知見は見いだされてきているが、現状では樹幹部の抵抗係数に関する研究は多くなく、このため対象となる樹木の枝葉の状況や密度を検討しその都度決定する必要がある。

2-3 横断方向混合

樹木群内外では、大きな流速差が生じこれらの中で周期的な運動量交換が生じる。この現象は、流速および水位の周期的変動を伴い、樹木群内への浮遊砂の堆積等を生む。辻本ら¹¹⁾は水面変動と流速変動との関係を調べ、複断面河道における横断混合と異なり、明確なセル構造の形成が無く水深全体にわたって流入出が繰り返され移流する現象に支配されていることを示した。一方、池田ら¹²⁾は線形不安定解析および実験により、周期渦が主流の流速分布が変曲点を持つことによる不安定性により発生することを示した。また、渡辺ら¹³⁾は卓越する平面渦と流速分布の発達において非線形性が重要であることを指摘し、非線形安定解析により卓越波長の見積もりを行っている。

3 樹木群が存在する河道の流況計算

河道内に樹木が存在する場合の流況を把握する場合、前節で述べたような現象あるいはその影響を取り込んだ計算を行う必要がある。清水ら¹⁴⁾は、平面2次元の乱流モデル(1方程式モデル)を用い流れの遷移過程に着目した検討を行っている。また、棚津ら¹⁵⁾は、3次元の乱流モデルにより直線複断面河道の検討を行っている。ここでは、現地河川への適用を考え、「河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)」¹⁶⁾に掲載されている福岡ら¹⁷⁾のモデル、および北海道の1級河川に適用されている渡邊ら¹⁸⁾のモデルについて述べる。

3-1 不等流計算

福岡ら¹⁷⁾は、樹木群の範囲を死水域として扱い、さらに樹木群内の遅い流れが周辺部の速い流れと激しく混合することにより速い流れが減速する現象を樹木群の境界に作用する剪断力を付加することにより、不等流計算に樹木群の影響を取り込んでいる。図-8にその計算手順を示した。この方法は、図-9に示すように、河道横断面形状や樹木群の繁茂状況、粗度の状況等から横断面形状をいくつかの断面に分割し、式(5)、(6)を用いて各分割断面の平均流速を求め、さらに流れ方向の運動方程式(7)より縦断水位を求める方法である。

$$\frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} + \frac{\sum_j' (\tau_{j'} S_{wj'})}{\rho g} + \frac{\sum_j (\tau_j S_{wj})}{\rho g} = A_i I_b \quad (5)$$

ここで、 u_i : 流速、 n_i : マニングの粗度係数、 R_i : 径深、 A_i : 死水域を除いた河積、 S_{bi} : 潤辺、 τ_j : 死水域とした樹木群境界に作用する剪断力、 $S_{wj}; \tau_j$ が作用する潤辺長、 $\tau_{j'}$: 分割断面境界に作用する剪断力(樹木群境界を除く)、

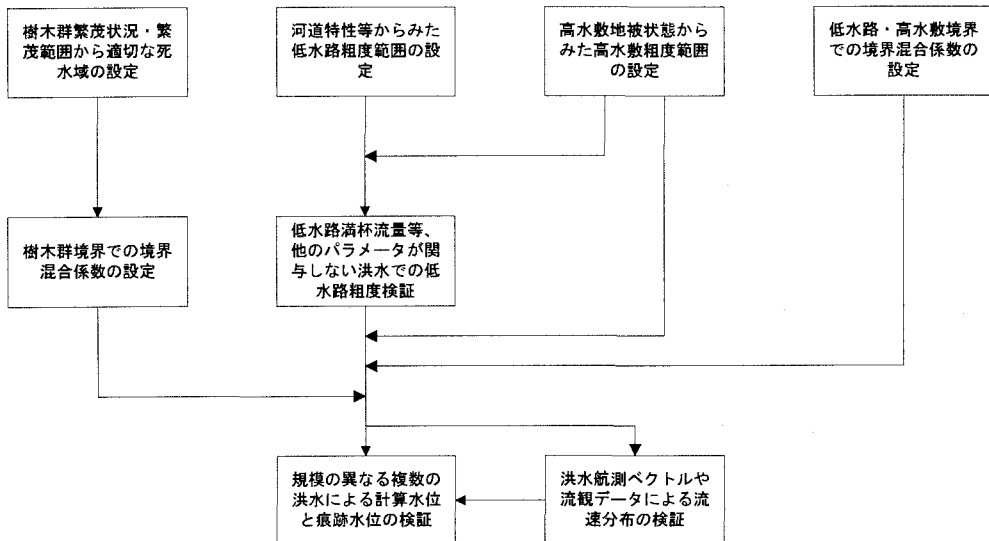


図-8 樹木群を考慮した不等流計算の計算手順

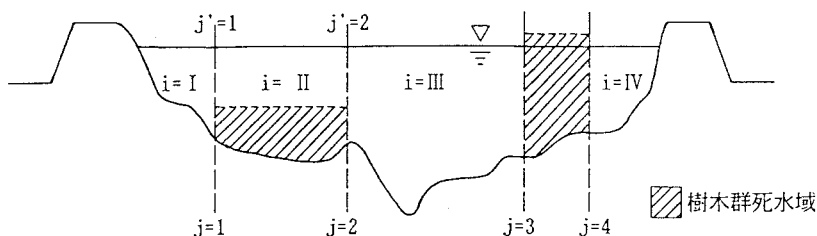


図-9 断面分割の例

$S_{wj}; \tau_j$ が作用する潤辺長、 I_b ; 河床勾配である。なお、添え字 i は分割された断面の諸量を示し、 j は樹木群と樹木群以外との境界面における諸量、 j' は樹木群以外と樹木群以外との境界面における諸量を表す。

$$Q = \sum_i (u_i A_i) \quad (6)$$

ここで、 Q ; 流量である。

$$\begin{aligned} & \left(H + \frac{1}{A} \sum \frac{u_i^2 A_i}{2g} \right)_2 - \left(H + \frac{1}{A} \sum \frac{u_i^2 A_i}{2g} \right)_1 \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{A} \sum \frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} \right)_1 + \left(\frac{1}{A} \sum \frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} \right)_2 + \left(\frac{\sum \tau_j S_{wj}}{\rho g A} \right)_1 + \left(\frac{\sum \tau_j S_{wj}}{\rho g A} \right)_2 \right\} \Delta x \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 H ; 水位、 $A = \sum_i A_i$ であり、添え字1, 2はそれぞれ下流側断面および上流側断面の諸量を表す。

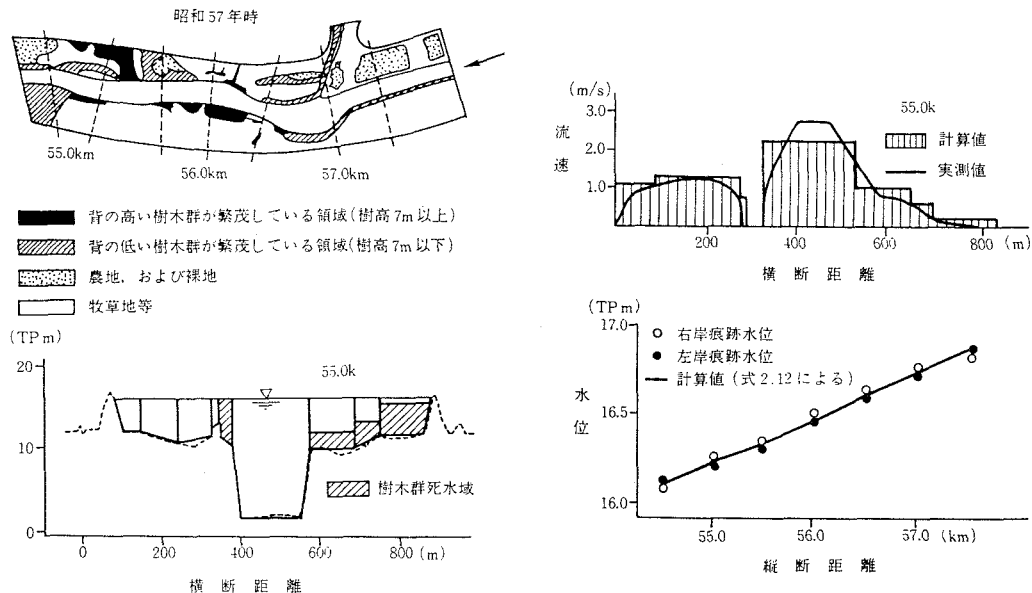


図-10 樹木群を考慮した流れの1次元計算

上記方法により求められた流速分布および水位縦断の一例(石狩川¹⁷⁾)を、図-10に示す。この手法により、かなりの程度で樹木群を含む河道の流れを推定可能と思われる。しかし、樹木群の配置が縦断方向に大きく変化する場合や湾曲部、急拡・急縮部などでは、1次元的な解析では精度の良い推定ができない場合もある¹⁶⁾。この様な箇所の流速分布が問題となる場合には、必要に応じて流れの2次元や3次元解析を行うことが望ましい¹⁶⁾。

3-2 2次元浅水流モデル

基礎方程式は、2次元浅水流モデルの基礎式¹⁹⁾に樹木の抗力を取り込んだ式(8),(9),(10)式とする。

$$\begin{aligned} \langle \bar{u} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{s}} + \langle \bar{v} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{n}} + \frac{\langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle}{\bar{r}} \\ = -g \frac{\partial (\bar{h} + \bar{z})}{\partial \bar{s}} - \frac{\bar{\tau}_s}{\bar{\rho} \bar{h}} + 2 \frac{\partial}{\partial \bar{s}} \left(\bar{\varepsilon} \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{s}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{n}} \left(\bar{\varepsilon} \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{s}} \right) - \frac{\bar{a}'}{2} C_d \langle \bar{u} \rangle \sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \langle \bar{u} \rangle \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{s}} + \langle \bar{v} \rangle \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{n}} + \frac{\langle \bar{u} \rangle^2}{\bar{r}} \\ = -g \frac{\partial (\bar{h} + \bar{z})}{\partial \bar{n}} - \frac{\bar{\tau}_n}{\bar{\rho} \bar{h}} + \frac{\partial}{\partial \bar{s}} \left(\bar{\varepsilon} \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{s}} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial \bar{n}} \left(\bar{\varepsilon} \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{s}} \right) - \frac{\bar{a}'}{2} C_d \langle \bar{v} \rangle \sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\langle \bar{u} \rangle \bar{h})}{\partial \bar{s}} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial (\bar{r} \langle \bar{u} \rangle \bar{h})}{\partial \bar{n}} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $\bar{s}, \bar{n}$: 河道縦断方向および横断方向の軸、 $\bar{h}$: 水深、 $\bar{z}$: 河床高、 $\langle \bar{u} \rangle, \langle \bar{v} \rangle$: $\bar{s}, \bar{n}$ 軸方向の水深平均流速、 $\bar{r}$: 河道曲率半径、 $\bar{\tau}_s, \bar{\tau}_n$: $\bar{s}, \bar{n}$ 軸方向の河床剪断力である。なお、 $\bar{\tau}_s, \bar{\tau}_n$ は、マニングの粗度係数を用いる場合式(11), (12)で与える。その際、樹木群内では水深方向に流速分布が一様化することから、式(11), (12)の $\bar{n}_m$ の代わりに、この影響を考慮した式(13)で表される $\bar{n}_m$ を用いる。

$$\frac{\bar{\tau}_s}{\bar{\rho} \bar{h}} = \frac{\bar{g} \bar{n}_m^2}{\bar{h}^{4/3}} \langle \bar{u} \rangle \sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2} \quad (11)$$

$$\frac{\bar{\tau}_n}{\bar{\rho} \bar{h}} = \frac{\bar{g} \bar{n}_m^2}{\bar{h}^{4/3}} \langle \bar{v} \rangle \sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \bar{v} \rangle^2} \quad (12)$$

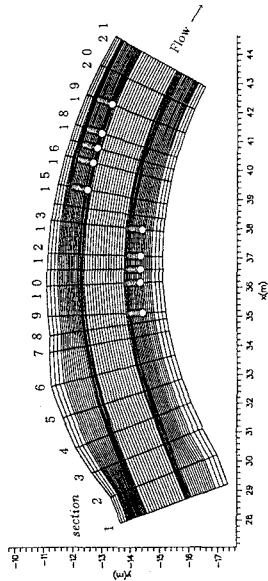


図-11 計算格子

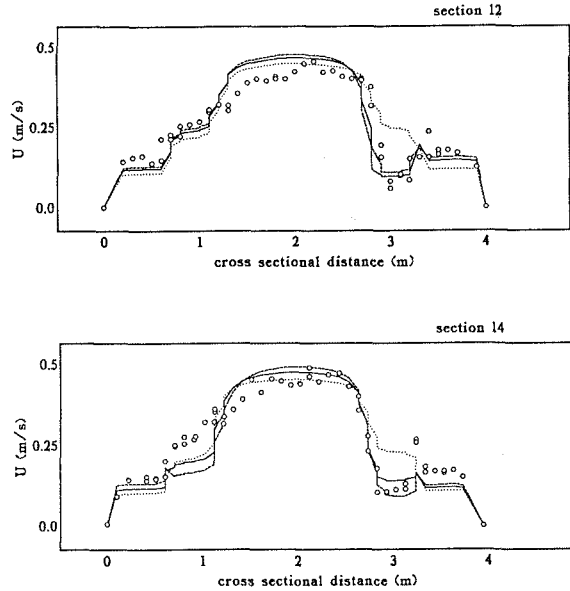


図-12 縦横断方向流速の実験値と計算値の比較

$$\frac{\tilde{n}_m}{\tilde{n}_{m0}} = \left(\frac{2\sqrt{C_b}}{3\epsilon} + 1 \right) \left\{ 1 + \frac{2}{\chi^2} (c_0 + c_1) \right\} \left[h_t + \frac{2}{\chi^3} [c_0 \{ \exp(h_t \chi) - 1 \} - c_1 \{ \exp(-h_t \chi) - 1 \}] + \sqrt{\frac{A}{2}} \left[\frac{1}{2\epsilon} \left\{ \frac{2}{3} - h_t^2 \left(1 - \frac{h_t}{3} \right) \right\} + c_2 (1 - h_t) \right] \right]^{-1} \quad (13)$$

図-11に模型実験の計算格子、図-12に実験結果と計算結果の比較の一例をそれぞれ示す。比較のため樹木が存在しない場合 (case B) および従来行われていた樹木の影響を粗度で換算する方法 (case C) についても併記している。section 12のように樹木群中央部における流れは、中水敷に存在する樹木群の影響により樹木が無い場合に比べ、中水敷で流れが遅くなりその影響で高水敷の流れが早くなっている。今回の計算法でもこの傾向を十分表現することができる。一方、section 14のような樹木群外でも樹木群の影響を受けている流れの不等流性の強い箇所では、実験値との適合性が悪く実験値に比べ、樹木の存在する中水敷の流速が樹木群の上流で小さく下流で大きくなっている。この理由としては、樹木群の影響範囲が不明であるため、樹木が存在する箇所のみ基礎式の右辺第5項を考慮し、その他の箇所ではこの項を省略しているためと考えられる。また、樹木による水深方向流速分布の変化に伴う粗度係数の変化の割合を等流状態で考えていることにも起因している。本手法の適用限界であると考えられるが、この手法は樹木の影響を試行錯誤的に決定しなくてもよく、概略の流れを把握することができる。

樹木群を含む流れは周期的な横断方向の混合や水位変動等が生起するがここで紹介した計算法には取り込まれていない。このような流れの支配的な場あるいは局所的な流れの場を議論する場合には、これらの現象を取り込んだモデルを考慮する必要があることは言うまでもない。

3-3 植生の盛衰のモデル化

植生は生き物であることから成長を続けており、流れの抵抗もその繁茂状況により大きく変化する。特に水性植物(水草)は常時水中に存在するため、河道内の流れを検討する場合このことを無視する事はできない。福岡ら²⁰⁾は、水草の繁茂する農業用水路の水位計算を行い樹木群が繁茂する河道と同様の計算法¹⁷⁾が適用可

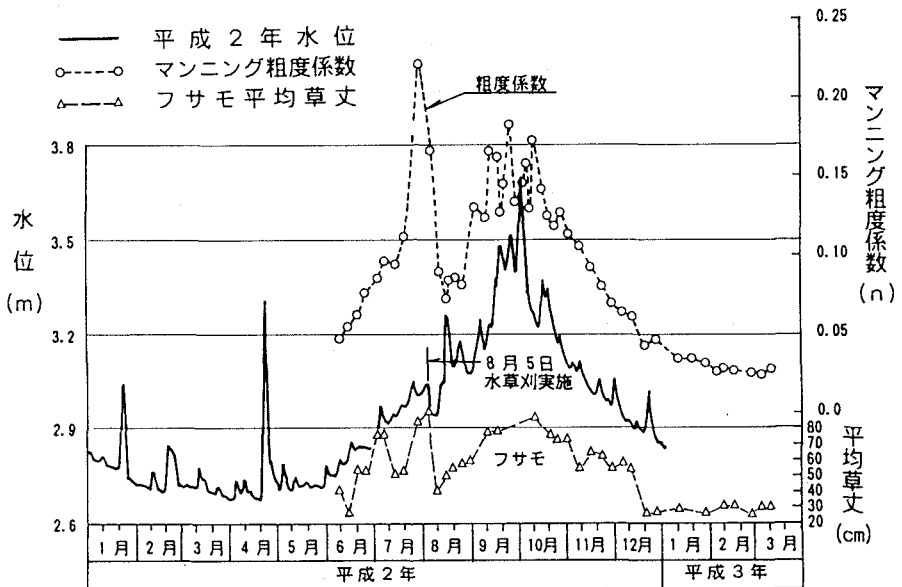


図-13 水位・草丈およびマンニングの粗度係数

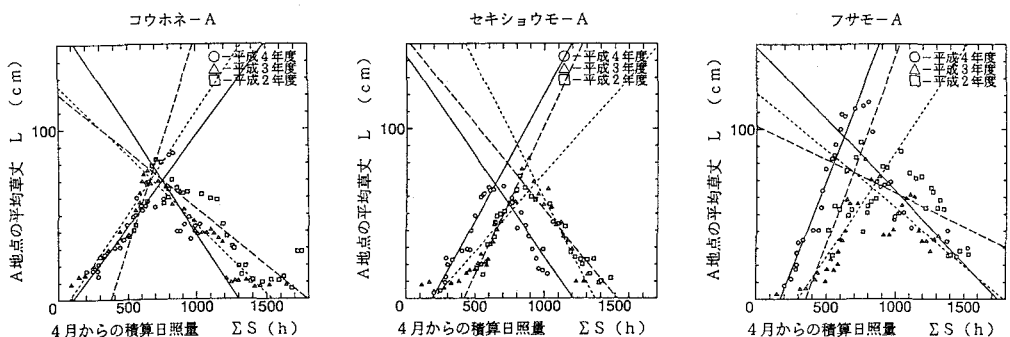


図-14 日照量 S と草丈との関係

能であること示した。神保ら²¹⁾は、安平川水系美々川植苗橋近傍の現地調査を行い、水位・流量・水面勾配・マンニングの粗度係数と水草の草丈の関係を把握している。図-13は、水位と草丈およびマンニングの粗度係数の関係を示したものである。草丈と粗度係数との対応はきわめて明瞭であり、水草の繁茂する河川においては水位～流量関係を把握する場合、水草の繁茂状況を捉えておく必要がある。

この結果を受け、長谷川ら²²⁾は、簡単に入手可能な変量と水草との相関を調べ水草(コウホネ・セキシヨウモ・フサモ)の成長・枯衰による抵抗変化のモデル化を試み、水位からの流量推定を行っている。流速分布は、式(2)における樹木密度 $\bar{a}$ の値として、(単位底面積上における水草の葉の面積の合計)/(水深)を用いて(神保ら²¹⁾は、水深方向の葉の存在確立密度を導入し水深方向に変化する値を用いている)摂動法により解き、流量 Q を式(14)として得ている。

$$Q = (-2.857a + 26.086) I^{1/2} B h^{3/2} \quad (14)$$

ここで、 $\bar{B}$:川幅、 $\bar{h}$:平均水深である。また、 a に関しては、日照量 S と草丈との関係を調査し図-14なる関係から表-1に示す各水草の1本当たりの葉面積を求め、式(15)によって与えている。

表-1 水草の葉面積のモデル化

コウホネ	成長期	$a_k = 0.06745(0.00108 \sum S - 0.113) - 0.01495$
コウホネ	枯衰期	$a_k = 0.06745(-0.00127 \sum S + 1.652) - 0.01495$
セキショウモ	成長期	$a_s = 0.03305(0.00149 \sum S - 0.283) - 0.00537$
セキショウモ	枯衰期	$a_s = 0.03305(-0.00118 \sum S + 1.429) - 0.00537$
フサモ	成長期	$a_f = 0.06577(0.00212 \sum S - 0.363) + 0.00750$
フサモ	枯衰期	$a_f = 0.06577(0.00085 \sum S + 1.483) + 0.00750$

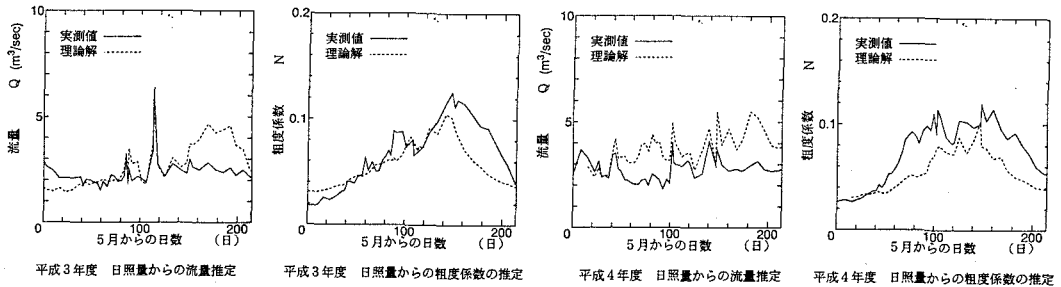


図-15 水草の存在する河道における日照量からの流量の推定結果

$$a = a_k n_k + 2a_s n_s + a_f n_f \quad (15)$$

ここで、 n_k 、 n_s 、 n_f はそれぞれコウホネ、セキショウモ、フサモの単位面積当たりの本数である。なお、葉の抵抗を考える場合、セキショウモの様に葉の表裏の抵抗を考慮して2倍する必要があるが、コウホネとフサモに関しては、葉の付き方から剥離域内の抵抗現象を考えて片面のみについて考えている。以上の結果から得られた推定流量およびマニングの粗度係数と実測の流量およびマニングの粗度係数の比較を図-15に示す。植物の成長を日照量のみで表現する等単純化を施しているにも関わらず、モデルの推定結果は良好なものとなっている。

4 河道内樹木の流砂への影響

河道内樹木は生物であることから、その生育環境である高水敷における土砂移動の把握が、河道内樹木および河道の維持管理上非常に重要な事項の一つとなる。前節までに述べてきたように、樹木の存在により河道の流れは大きく変化する。このため流砂にも樹木の影響が大きいものと考えられ、この分野の研究も従来の知見を生かし研究が進められている。

4-1 浮遊砂濃度分布

河道内樹木が高水敷に主に存在しているため、樹木群内の土砂移動に関しては浮遊砂の把握が必要不可欠なものとなる。2-1 流速分布の項で述べたように、樹木群内において流速分布が樹木群がない場合のものと大きく異なっていることから、樹木群内の浮遊砂濃度分布についても樹木群が無いときは大きく異なることが考えられる。図-16は、住友ら²⁾による浮遊砂濃度測定結果である。樹木の存在しない場合の濃度分布では表現できないことが判る。

樹木群内における浮遊砂濃度分布の検討が泉ら²³⁾、清水ら²⁴⁾、渡邊ら⁶⁾によってなされている。ここでは、流速分布の検討にあわせて渡邊ら⁵⁾の方法について述べる。なお、記号等については、2-1と同じである。

一般に、wall turbulenceにおける混合距離は壁面からの距離に比例し、free turbulenceにおいては後流の幅に比例し断面内では一定値をとるといわれていることから、水深で無次元化された樹木群内($0 \leq z \leq h_t$)および樹木群外($h_t \leq z \leq 1$)の混合距離をそれぞれ式(16)、(17)の様仮定し浮遊砂濃度分布 C を解析的に求めて

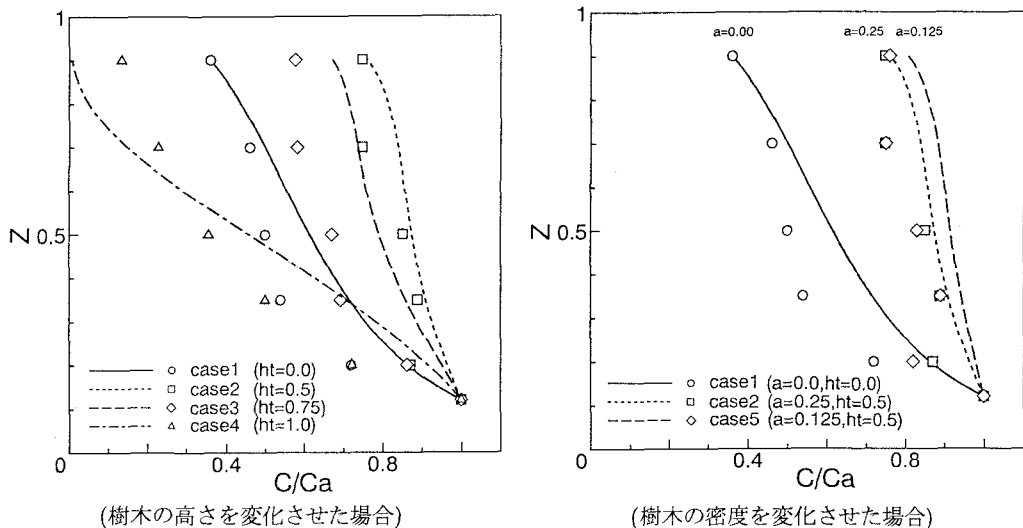


図-16 樹木群内の浮遊砂濃度分布

いる。基準点 ($z = a_v$) で基準点濃度 C_{a_v} となる境界条件を用いると浮遊砂濃度分布は、 $a_v \leq z \leq h_t$ のとき式 (18)、 $h_t \leq z \leq 1$ のとき式 (19) で表される。

$$l_t = \frac{\sqrt{\frac{2}{ac_d} + \frac{\kappa}{3ac_d}(c_0 + c_1)}}{\frac{\kappa\chi}{3ac_d}(c_0 - c_1)} \sqrt{c_b} \quad (16) \quad l = \{l_t + \kappa(z - h_t)\} \sqrt{\frac{1-z}{1-h_t}} \quad (17)$$

$$\frac{C}{C_{a_v}} = \begin{cases} \exp \left[-\frac{3aC_d w_f}{\kappa\chi l_t^2} \left[\frac{\ln \left\{ \frac{\sqrt{c_0} \exp(\chi z) - \sqrt{c_1}}{\sqrt{c_0} \exp(\chi z) + \sqrt{c_1}} \right\}}{2\sqrt{c_0 c_1} \chi} - \frac{\ln \left\{ \frac{\sqrt{c_0} \exp(\chi a_v) - \sqrt{c_1}}{\sqrt{c_0} \exp(\chi a_v) + \sqrt{c_1}} \right\}}{2\sqrt{c_0 c_1} \chi} \right] \right] & ; c_0 > 0, c_1 > 0 \\ \exp \left[-\frac{3aC_d w_f}{\kappa\chi l_t^2} \left[\frac{\tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{-c_0}{c_1}} \exp(\chi z) \right\}}{\sqrt{-c_0 c_1} \chi} - \frac{\tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{-c_0}{c_1}} \exp(\chi a_v) \right\}}{\sqrt{-c_0 c_1} \chi} \right] \right] & ; c_0 > 0, c_1 < 0 \\ \exp \left[-\frac{3aC_d w_f}{\kappa\chi l_t^2} \left[\frac{-\tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{-c_0}{c_1}} \exp(\chi z) \right\}}{\sqrt{-c_0 c_1} \chi} - \frac{-\tan^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{-c_0}{c_1}} \exp(\chi a_v) \right\}}{\sqrt{-c_0 c_1} \chi} \right] \right] & ; c_0 < 0, c_1 > 0 \\ \exp \left[-\frac{3aC_d w_f}{\kappa\chi l_t^2} \left[\frac{-\ln \left\{ \frac{\sqrt{-c_0} \exp \chi z - \sqrt{-c_1}}{\sqrt{-c_0} \exp \chi z + \sqrt{-c_1}} \right\}}{2\sqrt{c_0 c_1} \chi} - \frac{-\ln \left\{ \frac{\sqrt{-c_0} \exp \chi a_v - \sqrt{-c_1}}{\sqrt{-c_0} \exp \chi a_v + \sqrt{-c_1}} \right\}}{2\sqrt{c_0 c_1} \chi} \right] \right] & ; c_0 < 0, c_1 < 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{C}{C_{a_v}} = \frac{C_{h_t}}{C_{a_v}} \exp \left[\frac{w_f \kappa^2 (1 - h_t)}{3 \{ \kappa (1 - h_t) + l_t \}^3} \left\{ \ln \frac{1 - z}{\kappa (z - h_t) + l_t} - \ln \frac{1 - h_t}{l_t} \right\} + \frac{w_f \kappa}{6 \{ \kappa (1 - h_t) + l_t \}^2} \left\{ \frac{1 - h_t \kappa (1 - 2z + h_t) - l_t}{1 - z} - \frac{\kappa (1 - h_t) - l_t}{l_t} \right\} \right] \quad (19)$$

ここで、 C ; 浮遊砂濃度、 $\bar{w}_f$; 粒子の沈降速度、 $\bar{w}_f = w_f \bar{u}_*$ 、 $\bar{a}_v = a_v \bar{h}$ である。また、 C_{h_t} は $z = h_t$ における浮遊砂濃度であり、式 (13) において $z = h_t$ とした値である。

上記の計算結果を図-16に併記したが、最も河床に近い実験値 ($\bar{z} = 1.2\text{cm}$) を基準にしているため多少の差異は認められるが、濃度分布解は概ね実験値の傾向すなわち、樹木群の高さが高くなるにつれて濃度分布が水深方向に一様化し、樹木の高さが水深以上になると河床から水面に向かって濃度が急激に小さくなる傾向を良く表現している。

4-2 横断方向の土砂輸送

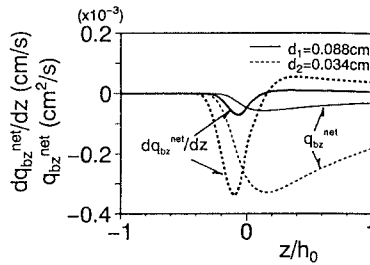


図-17 粒径別横断方向流砂量

樹木群を含む河道では、流れの横断の混合が生じこれに伴って、流砂も横断方向へ輸送される。

辻本ら²⁵⁾は、掃流砂が横断混合の低周波流速変動に応答して変化するものとして非平衡流砂量式²⁶⁾を導入し、平坦河床の場合の粒径別非平衡横断方向流砂量式を式(20)の様に定式化している。横断方向混合の一周期の流体運動によって収支された横断方向流砂量 q_{bzi}^{net} は、式(21)となる。

$$\begin{cases} q_{bzi+}(z) = \frac{A_3 d_i}{A_2} \int_0^\infty p_i(z-\xi) p_{si}(z-\xi) \exp\left[-\frac{\xi}{\Lambda_i \sin|\varphi_{i+}(z)|}\right] & (w' > 0) \\ q_{bzi-}(z) = -\frac{A_3 d_i}{A_2} \int_0^\infty p_i(z+\xi) p_{si}(z+\xi) \exp\left[-\frac{\xi}{\Lambda_i \sin|\varphi_{i-}(z)|}\right] & (w' < 0) \end{cases} \quad (20)$$

$$q_{bzi}^{net}(z) = [q_{bzi+}(z) + q_{bzi-}(z)]/2 \quad (21)$$

ここで、 z ; 平均水深で無次元化された横断方向の座標、 w' ; 低周波の横断方向流速変動、 A_3 , A_2 ; それぞれ砂の3次元、2次元形状係数、 p_i ; 河床表層に占める粒径 d_i の砂礫の体積含有率、 p_{si} ; 粒径 d_i の砂礫のpick-up rate、 Λ_i ; 粒径 d_i の砂礫粒子のstep lengthの確率密度関数の平均値、 φ_{i+} , φ_{i-} ; それぞれ $w' > 0$, $w' < 0$ の場合の流砂の方向角である。さらにこの結果を利用し、植生帯周辺部において分級縦筋が形成されることを報告している²⁷⁾。図-17は、計算された樹木群内外での粒径別横断方向流砂量の一例である($z < 0$; 樹木群内)が、樹木群内では、河床が細粒化する事を示している。

菅ら²⁸⁾は、横断方向の浮遊砂輸送の非定常過程について実験を行い、樹木群外で洗掘樹木群内で堆積の著しい箇所において底面付近の浮遊砂濃度の極大値を示し、浮遊砂の堆積位置が時間とともに樹木群奥側に移動することを示した。

しかしながら、一般に河道内樹木は高水敷に分布しており、低水路と高水敷の間に落差が存在することや河道の湾曲等による低水路内流れの高水敷への乗り上がり等が発生することなど、これらの影響をどのように組み込んでいくかが今後の課題となる。

5 樹木の流木化

前節までは樹木等が流れ等に与える影響を考えてきたが、河道計画あるいは河道維持を検討する場合、災害に結びつく流木の発生の有無を検討する必要がある。また、流木が発生した場合の挙動を理解することは災害防止上極めて重要な事項である。

5-1 樹木の倒伏限界

洪水時等に樹木が倒伏し流木となると、ある箇所に詰まって氾濫を引き起こしたり、橋脚等にひっかかり構造物に大きな流水抵抗がかかることによる破壊が発生する場合がある。このため、河道内の樹木が洪水時に流木化しない様配慮する必要がある、樹木の倒伏限界を把握することが重要となる。建設省¹⁰⁾では、河道内樹木の引き倒し試験を行い、倒伏限界モーメント図を作成している。その結果では、樹種による違いや土質による違いについては、明確な違いは確認されなかった。図-18は、この結果に、鵜川高水敷に分布するヤナギとケヤマハンノキについて渡邊ら²⁹⁾が実施した引き倒し試験の結果を加筆したものである。前節までで述べた手法により算出される樹木等に働く流水力と図-18を用いて、樹木等に関する河道計画・河道維持計画が検討できる。

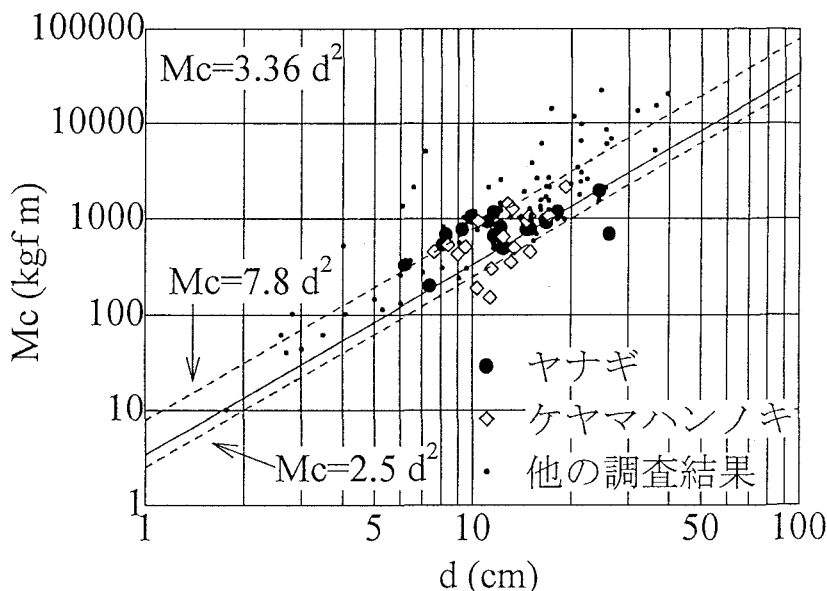


図-18 引き倒し試験による倒伏限界モーメント

渡邊ら²⁹⁾は、1992年8月に発生した鵜川洪水において大量の樹木が倒伏した地区で、洪水敷の含水率に着目し樹木の引き倒し試験を実施した。試験はある程度まとまった降雨後に実施され、図-18に示されるように建設省の行った結果¹⁶⁾の下限值 $M_c = 2.5d^2$ よりも低い値となった樹木が多数存在した。図-19の様に整理した結果含水率が樹木の倒伏限界値にある程度関係していることを示した。また、北海道開発局³⁰⁾では、樹木(円柱)が受ける力と平均流速との関係を調べ、樹木の固有振動数とカルマン渦の発生周波数とが一致した場合のみ横断方向の振動がみられ図-20に示す様に付加的な力が樹木にかかることを示している。さらに、林ら³¹⁾は、松の小枝を用いて、簡単な形状配置をした樹木においては共振領域が広がる Locking-in 現象が生じることを確認している。このことから、樹木の引き倒し試験の結果を用いる場合には、洪水時の状況を考慮する必要があると考えられる。

5-2 流木の挙動

流木は、河道内だけでなく山腹の崩壊や溪岸の浸食等によっても発生する。1993年に発生した洪水では、1991年の台風による風倒木が大量に流下し甚大な被害が生じた。流木による被害防止を検討する場合、流木の挙動を把握する必要がある。新井田ら³²⁾は、流木等の河道内への堆積状況を把握する目的で実河川を模した大型水路実験を行い、流木類の堆積の支配要因として低水路河岸付近の流況と高水敷植生の分布状況が重要であることを確認し、流れが低水路から高水敷あるいは高水敷から低水路へと急激に変化する箇所では堆積量が多くなっていることを示した。また、中川ら^{33,34)}は、流木群の流動について水理実験を行うとともに、数値シミュレーションによりその挙動を検討している。流れは、2次元非定常モデルを用い、樹木の運動についてはラグランジェの追跡法による決定論的位置と拡散変動量の確立論的位置とから樹木位置を決定している。図-21に示すようにこのモデルにより、流木の拡散係数等の決定を実験的に求める必要があるが樹木の流下現象を表現できる。

6 河道内樹木の現地調査

河道内樹木の水理学的研究は前節までに見てきたように近年活発に行われてきている。しかしこれらの多くは、実河川での観測に危険が伴うことや現象に種々の要因が複雑に絡んだ結果生起しており樹木の影響だけで決定されていないこと等の理由により室内レベルの実験による現象の把握やその理解にとどまっている。既往の知見の実河川への適用あるいはモデル化にあたっては、現地調査が必要不可欠であることは自明の理である。

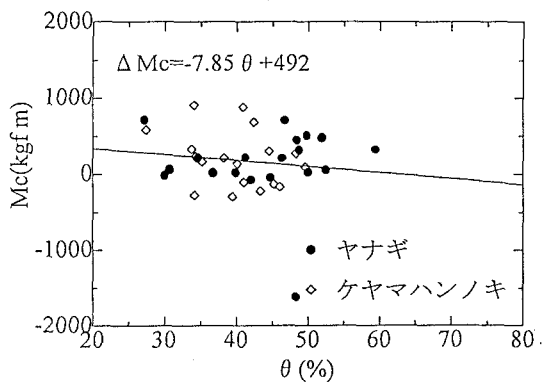


図-19 土中含水率の倒伏限界モーメントへの影響

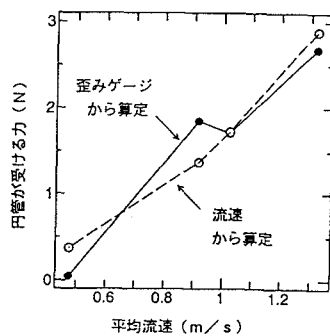


図-20 樹木が受ける力

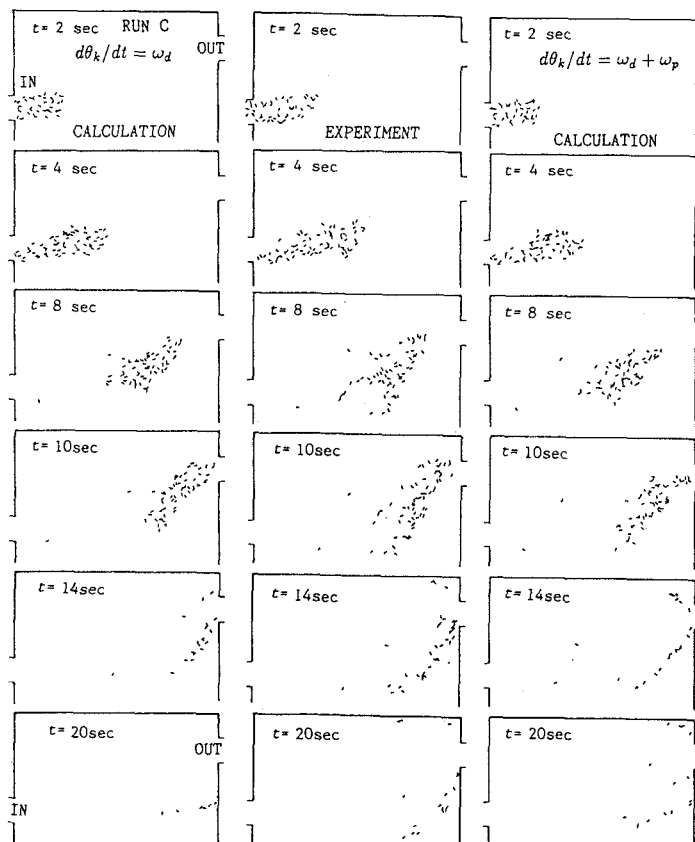


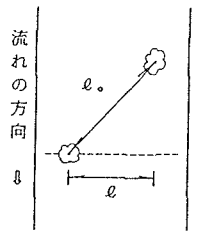
図-21 流木群の流動の計算結果と実験結果

表-2 平均胸高直径と立木密度の関係

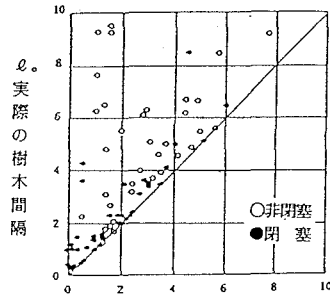
樹種	K	$\bar{a}$
スギ	5.501	$0.2156/\bar{d}^{0.605}$
ヒノキ	5.137	$0.0932/\bar{d}^{0.605}$
アカマツ	5.333	$0.1464/\bar{d}^{0.605}$
カラマツ	5.377	$0.1620/\bar{d}^{0.605}$

ℓ_0 :実際の樹木間隔

ℓ :流れに直角方向の樹木間隔



(高水数) (堤防)



ℓ 樹木間隔 (流れに対して直角方向) (m)

図-22 樹木間隔とゴミの閉塞

この節では、河道内樹木の実態を把握し河道内樹木に関する水理現象を把握する場合の基礎資料となる、河道内樹木の現地調査および洪水後樹木に残った痕跡による流況把握を目的とした調査について述べる。

6-1 河道内樹木に関する調査

河道内樹木の水理を検討する場合、樹木密度が重要なパラメータとなる。樹木には生育段階に応じて上限の立木密度が存在する。坂口³⁵⁾は、Reoneke L. H. が導いた式(22)で示される立木密度 $\bar{N}$ (1エーカー当たりの本数)と平均胸高直径 $\bar{d}_{in}$ (インチ)との関係を用いて、一般に河道内樹種とは異なるが、スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツについて K の値を求めている。表-2に各樹木の K の値を示した。いま、胸高直径 $\bar{d}$ (メートル)が0.05~0.20m程度の値をとるものとする、樹木密度 $\bar{a}$ は、0.2~1.3程度となる。一方、高橋³⁶⁾、中田³⁷⁾は鳴瀬川水系吉田川に繁茂するカワヤナギ、三谷³⁸⁾は、鶴川におけるケヤマハンノキとヤナギについて、形状および成長速度等を計測している。樹木は生き物であることから、このような樹木個体の形状や経年変化を把握することも重要なテーマであろう。河道内樹木についてこれらの関係が整理されれば河道計画や河道維持において有益な情報となるものと考えられる。

$$\log \bar{N} = -1.605 \log \bar{d}_{in} + \bar{K} \quad (22)$$

洪水時には様々なゴミが流下し、河道内樹木群に付着する。この現象は、樹木群の流れに対する抵抗を増加させ、樹木の倒伏や水位の上昇を招く。北川³⁹⁾は、1986年8月那珂川洪水において図-22に示す樹木間隔とゴミの閉塞の関係を調査し、樹木間隔が6m以上でほとんど閉塞しないことを報告している。

近年、河道内植生の調査^{40,41,42,43,44,45)}が活発に行われるようになってきている。植生の水理と植生の生態との有機的な結合のためには必要不可欠なものであり、この傾向は非常に望ましいものといえる。

岡村⁴⁶⁾は、北海道のほとんど人の手が加えられていない2河川(石狩川水系忠別川の支川カウナイ川、石狩川水系雨竜川の支川エビシオマップ川)について流路変動と河畔林の変遷の詳細な調査を行っている。宇多⁴⁷⁾および服部⁴⁸⁾は、このような目的で、利根川および鬼怒川において植物群落の分布と植種に関する調査を実施し、表-3のような河道特異的の植物群落の分布と冠水頻度の関係を示した。また、渡邊⁴⁹⁾は、鶴川の低水路護岸新設箇所において航空写真および現地踏査を行い、護岸敷設後の植生の変遷を調査している。図-23は低水路敷設後からの植生の変遷を見たものであるが、低水路護岸(連接ブロック)の敷設箇所では他

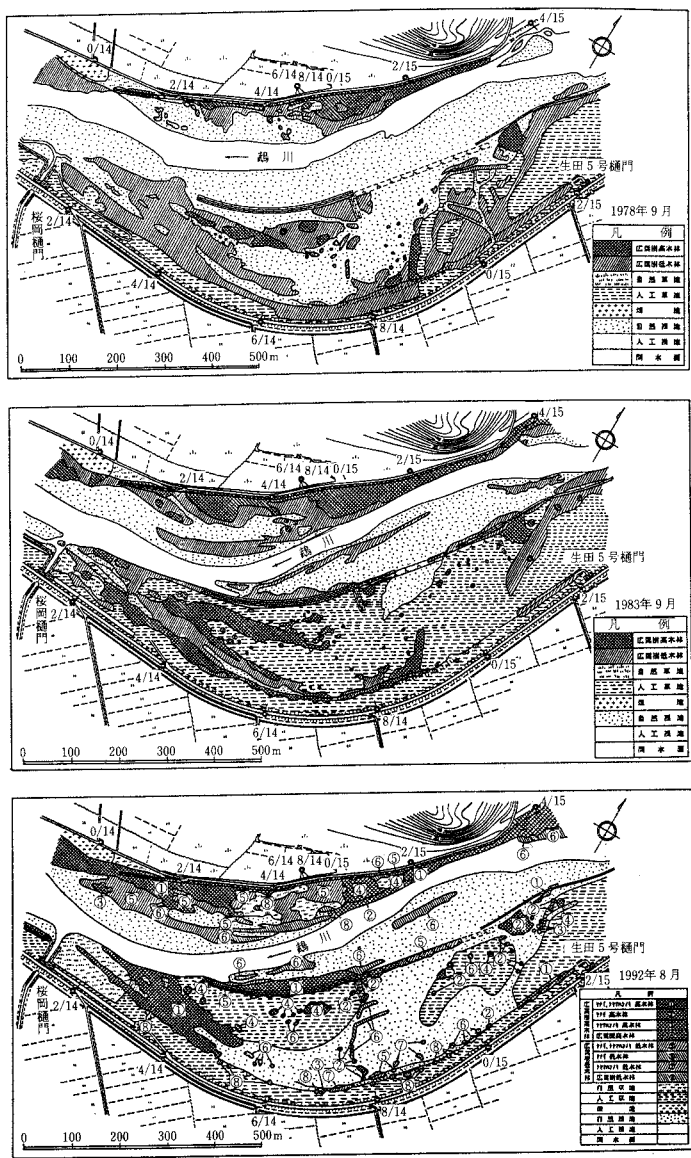


図-23 鷺川における植生変遷図

表-3 河道特性と植物群落の関係

	セグメント 1		セグメント 2		セグメント 3	
	鬼怒川 46.0km～101.5km区間	96.0km地点 55.0km地点	鬼怒川 0.0km～46.0km区間	32.0km地点 16.5km地点	利根川 0.0km～45.0km区間	27.0km地点 20.0km地点
河床勾配	1/600～1/190		1/2,130～1/1,320		逆勾配	
平均粒径	河床材料 約50mm 砂州上 中～大礫 砂州周縁部 粗砂		河床材料 約0.5mm テラス上 細砂		河床材料 約0.2mm 高水敷上 粘土～シルト	
低水路幅	250m～800m		100m～250m		350m～1,000m	
出水時の平均流速	平均年最大流量(1,700m³/s) 時で約2.5m/s～4.5m/s		平均年最大流量(1,700m³/s) 時で約1.5m/s～2.5m/s		既往洪水(4,500m³/s 1972.9. 18)時で約0.9m/s～1.6m/s	
各植物群落の冠水頻度	群 A	20～0.5 100～250	4～365	4～55	0.33～9	
	落 B	0.5～0.1 0.3～100	1～4	1～4		
	名 C	0.1 以下 0.3 以下	0.05～0.67	0.2以下		

注) 冠水頻度は、1回/年以上では日平均水位、それ以下では定時観測水位の年最大値によるものである。

の箇所と比較して植生の侵入が早くその後も安定して成長を続けていることを確認した。このことは、洪水履歴や土砂の安定と植物侵入の関係を示すものであり、河道内樹木を検討する場合の重要なテーマである。

河道内植生を調査することは非常に重要な事項であるにも関わらず、多大の労力が必要であり広範囲の調査を実施することは非常に困難である。このため、得られた情報を有効に使用しこの分野の研究がさらに進むことができるよう調査手法やデータの整理の方法等をデータベース化する必要があると思われる。

6-2 樹木による洪水調査

洪水時の状況を観測することは、河道計画や河道維持計画を立案する上で基礎となる極めて重要な事項である。洪水時の状況を把握する手法としては、航空写真や現地調査等が挙げられるが、航空写真は洪水発生が夜間の場合や上空の状況が悪い場合航空機を飛ばすことができない等の制約があり、また現地観測は面的な把握が困難である。洪水時の水位は最高水面の痕跡から、流線については草木や流砂の痕跡から把握する事ができる。しかし、流速については十分な情報を得ることはできない。渡邊ら^{50,51)}は、洪水後の樹木の倒伏に着目し、流速分布に1/7乗則を仮定し樹木を片持ち張りに見立てて、樹木の倒伏角から式(23)を用いて流速を算出することを試みている。結果は実際に検証されてはいないが、2次元流況計算⁵²⁾の結果から得られる周辺の流速と同程度の値を示し、ある程度の精度で流況を把握することができるとと思われる。他に洪水時の流況を知る手段が無い場合有効な方法である。

$$u = \sqrt{\frac{23}{112} \frac{\pi g E}{\omega C_d} \theta \left(\frac{D}{h}\right)^3} \quad (23)$$

7 おわりに

ここで取り上げた研究成果は、最近の水理学的研究を中心に述べるにとどまっており、また「樹木」についても植生の中のごく一部にすぎない。河川環境が社会的にクローズアップされ、今後益々河道内植生を対象とした研究が進んでいくと思われるが、河道内植生に関する研究の対象は、植物学の要素、水理学の要素あるいは植生に依存する昆虫あるいはそれを求める動物に至るまで極めて幅広い分野にわたっており、ここで述べた分野だけで完結するものではない。現在においても、各分野の研究者がその立場で研究を活発に続けており、一部は他分野間の研究者との共同研究も実施されている。今後さらに、他分野にまたがった研究が必要であると思われる。

本稿が、これから河道内植生に関する研究をしようとする際、あるいは河道計画・河道維持に携わる際の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 辻本哲郎; 植生を伴う流れの水理, 1991年度(第27回)水工学に関する夏期研修会講義集A コース, 1991年8月.
- 2) 住友裕明, 渡邊康玄, 井出康郎; 樹木群内の浮遊砂濃度分布に関する実験, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部, 1995年9月(投稿中)
- 3) 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/II-19, 1992年5月
- 4) 湯城豊勝, 岡部健士; 植生を持つ河床上の流れの抵抗則に関する基礎的研究, 水工学論文集第39巻, 1995年2月
- 5) 渡邊康玄, 石田享平, 井出康郎; 樹木群内の流速水深方向分布と浮遊砂濃度分布, 開発土木研究所月報No.502, 1995年3月
- 6) 渡邊康玄, 北條紘次, 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35巻, 1991年2月
- 7) 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-3, 1990年1月
- 8) 岸力, 板倉忠興, 森明巨, 黒木幹男; 高水敷の粗度に関する研究, 川の機能に関する基礎的研究(北海道大学委託研究報告昭和63年度), 1989年3月
- 9) 福岡捷二, 藤田光一, 平林桂; 樹木群の流水抵抗について, 第31回水理講演会論文集, 1987年2月
- 10) 石川忠晴, 高橋和明; 河道内灌木の流水抵抗特性について, 第42回応用力学連合講演会講演予稿集, 1993年1月
- 11) 辻本哲郎, 北村忠紀; 側岸に沿って植生群落のある流路での水面変動を伴う横断混合, 水工学論文集第36巻, 1992年2月
- 12) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋; 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集No.443/II-18, 1992年2月
- 13) 渡辺明英, 福岡捷二, 津森貴行; 樹木群のある河道の流れの水平混合とその卓越波数, 水工学論文集第38巻, 1994年2月
- 14) 清水義彦, 辻本哲郎; 植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析, 水工学論文集第39巻, 1995年2月
- 15) 柳津家久, Dan Naot, 中川博次; 植生を有する開水路流れの3次元流速分布に関する数値シミュレーション, 水工学論文集第39巻, 1995年2月
- 16) 建設省河川局治水課; 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 1993年10月
- 17) 福岡捷二, 藤田光一, 新井田浩; 樹木群を有する河道の洪水位予測, 土木学会論文集No.447/II-19, 1992年5月
- 18) 渡邊康玄, 清水康行; 樹木群が存在する河道の平面流況計算, 第42回応用力学連合講演会講演予稿集, 1993年1月
- 19) 清水康行, 板倉忠興; 河川における2次元流れと河床変動の計算, 北海道開発局土木試験所報告第85号, 1986年10月
- 20) 福岡捷二, 渡辺明英, 津森貴行; 水草が繁茂している用水路の流れ, 水工学論文集第37巻, 1993年2月
- 21) 神保正義, 羽山英人, 長谷川和義; 水草の成長サイクルに伴う流れの変化, 土木学会北海道支部論文報告集第48号, 1992年2月

- 22) 長谷川和義, 勝見哲史, 品川守; 水没植生の年成長にともなう水位-流量曲線の変化, 土木学会北海道支部論文報告集第50号, 1994年2月
- 23) 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, 1989年2月
- 24) 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35巻, 1991年2月
- 25) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次; 植生群落周辺の掃流砂運動と河川敷地形の形成, 水工学論文集第37巻, 1993年2月
- 26) 中川博次, 辻本哲郎; 移動床流れの水理, 技報堂出版, 1986
- 27) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次; 植生帯周辺での分級縦筋の形成, 水工学論文集第38巻, 1994年2月
- 28) 菅和利, 中井正則; 側岸に樹木群を伴う直線河道の浮遊砂輸送, 水工学論文集第38巻, 1994年2月
- 29) 渡邊康玄, 石田享平, 井出康郎; 河道内樹木の倒伏限界値における土中含水率の影響, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部, 1995年9月(投稿中)
- 30) 北海道開発局; 新しい河川の創造をめざして(河川部門指定課題), 第35回北海道開発局技術研究発表会講演概要集(3), 1992年2月
- 31) 林健二郎, 赤木俊仁, 藤間功司, 重村利幸; 水工学論文集第38巻, 1994年2月
- 32) 新井田浩, 福岡捷二; 低水路法線形と高水敷植生が流木類の堆積に及ぼす影響, 土木学会第47回年次学術講演会, 1992年9月
- 33) 中川一, 高橋保, 池口正晃; 洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究, 水工学論文集第37巻, 1993年2月
- 34) 中川一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹; 流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集第38巻, 1994年2月
- 35) 荻住昇; 樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1987
- 36) 高橋和明, 石川忠晴; 河道内に繁茂するカワヤナギの成長速度に関する研究, 土木学会第46回年次学術講演会, 1991年9月
- 37) 中田成俊, 高橋和明, 石川忠晴; 河道内に繁茂するカワヤナギの分岐特性に関する一考察, 土木学会第47回年次学術講演会, 1992年9月
- 38) 三谷修司, 渡邊康玄; 平成4年8月洪水による河畔林の倒伏状況について, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993年9月
- 39) 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, 1989年2月
- 40) 辻本哲郎, 岡田敏治, 村瀬尚; 扇状地河川の河原の植物群落と河道特性-手取川における調査-, 水工学論文集第37巻, 1993年2月
- 41) 池田裕一, 三浦哲也, 河森克至, 須賀堯三; 高水敷における植生群落の分布形状に関する野外調査, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993年9月
- 42) 井上茂之, 綾史郎, 雄倉幸昭; 城北ワンド付近における河道内植生, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994年9月
- 43) 久下敦, 砂田憲吾, 今井武雄; 河川植生の繁茂機会と河道特性に関する検討, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994年9月

- 44) 岡村俊邦, 後藤和明, 高田悟司, 田中幸洋; 溪流環境再生のための自然溪流の調査手法, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994年9月
- 45) 鈴木倫久, 池田裕一, 河森克至, 須賀亮三; 砂州上植生の分布パターンと経年変化に関する基礎的研究-那珂川水系荒川における現地調査を中心として-, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994年9月
- 46) 岡村俊邦, 中村太士; 自然河川の流路変動と河川環境に関する砂防学的研究, 「水理科学」別冊No185, (第32巻第6号), 1989年2月
- 47) 宇多高明, 藤田光一, 佐々木克也, 服部敦, 平舘治; 河道特性による植物群落の分類-利根川と鬼怒川を実例として-, 土木研究所資料第3249号,
- 48) 服部敦, 宇多高明, 藤田光一, 佐々木克也, 平舘治; 河道特性による植物群落の分類-利根川と鬼怒川を実例として-, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994年9月
- 49) 渡邊康玄, 三谷修司; 鵜川KP14.1~KP15.2における河道内植生の変遷と平成4年8月洪水による河道内樹木の倒伏状況調査, 北海道開発局開発土木研究所月報No.483, 1993年8月
- 50) 渡邊康玄, 三谷修司, 橋本識秀; 鵜川1992年8月洪水における河道内樹木の倒伏と流れ, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993年9月
- 51) Y. WATANABE, T. KYOSHI, Y. MURAKAMI, K. HASEGAWA; Bank erosion during the 1988-flood in the Rumoi River, Hydraulic Engineering Proceedings 1990 National Conference HY Div/ASCE, 1990, 3.
- 52) 渡邊康玄, 橋本識秀, 三谷修司; 鵜川平成4年8月洪水における河道内樹木の倒伏調査, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 1993年6月