

河道内樹木群流れの横断混合に及ぼす 高水敷高さの影響

INFLUENCE OF FLOOD-PLAIN HEIGHT ON LATERAL MIXING OF THE FLOW AROUND RIVER VEGETATION

富永晃宏¹・長尾正志²

Akihiro TOMINAGA and Masashi NAGAO

¹正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

The large-scale horizontal vortex structure plays an important role for the lateral mixing of the flow along the vegetated zone in rivers. In this study, the influences of the height of flood plains with vegetation were investigated. When the flood-plain height is small, large-scale horizontal vortices appear and they produce a large turbulence over wide area in the main flow region. With an increase of the flood-plain height, the regularity of the vortex becomes weak and the turbulence is notable only in the narrow area near the interfacial region between trees and the main flow. The large-scale vortex structures are reasonably simulated by the unsteady 2-D numerical calculation.

Key Words : river vegetation, flood plain, compound channel, lateral mixing, horizontal shear flow, organized vortex, 2D numerical analysis

1. 序論

樹木群のある河川では、洪水時に樹木群の付近に大規模な平面渦が現れ、平面渦の流下に伴う流速、水位の周期的な変動が生じることが明らかにされている¹⁾。この大規模渦は流れの抵抗に支配的であり、樹木群内への浮遊砂の堆積等にも寄与しているものと考えられる。大規模平面渦は樹木群内の低速流と外部の高速流との横断方向での主流の大きな流速差による変曲点不安定性により発生することが一般的に認められている^{2), 3)}。一方、複断面流れでは横断方向の水深の変化により横断方向流速差が発生し、高水敷水深の小さい場合に同様の大規模平面渦が発生する⁴⁾。横断方向流速差がある値を超えると周期がかなり規則的な平面渦が発生すると考えられる。この横断方向せん断を与える要因として、樹木群の偏在による形状抵抗の差、高水敷による水深差および底面粗度の急変による底面摩擦力の差の3通りが考えられる。実際の河道で樹木群は低水路床より高いところにある場合が多いため、これらの要因が複合的に作用している。複断面開水路の高水敷に樹木群がある場合の流れ特性については、樹木群配置の

影響を調べた実験⁵⁾や、浮遊砂堆積について調べた研究⁶⁾があるが、高水敷高さを系統的に変化させた研究はみられない。そこで、本研究では高水敷上の樹木群の密生度とともに高水敷高さを変化させて、樹木群の立地標高が横断混合へ及ぼす影響を実験的に検討した。高水敷は横断方向流速差は与えるが、同時に横断方向の混合の鉛直スケールを減少させる効果があり、本研究はこの効果を検討したものといえる。また、横断方向1次元の数値計算による渦動粘性係数の検討および非定常の二次元数値解析による大規模平面渦の再現計算を試みた。

2. 実験方法

実験には幅0.6m、高さ0.3m、長さ13mの勾配可変型水路を用い、水路左岸に水路上流端より3mから8mまでの5m区間に幅20cmの高水敷および樹木群領域を設定した。高水敷高さは0cm、2cm、4cmの3種類を設定し、ケース名をそれぞれ0、2、4と表すことにする。また、樹木群模型として、直径2mm、長さ15cmの竹串を用い、図-1に示すような3種類の密度で配置した。樹木群模型の密度パラメータを $\beta =$

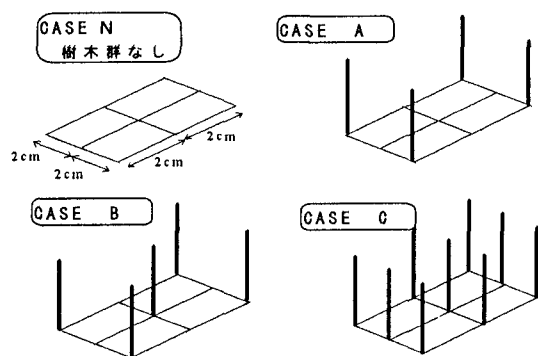


図-1 樹木群配置

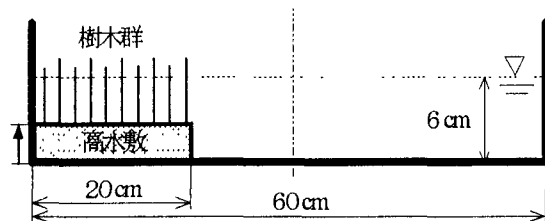


図-2 実験水路断面図

Nd/ab (N :縦長さ a , 横長さ b の平面内にある樹木本数, d :樹木直径, 単位1/cm)と表すと, $\beta=0.0125$ (ケースA), 0.025 (ケースB), 0.05 (ケースC)となる. また, 樹木群無しの場合をケースNとする. 水路断面形状は図-2のようである. 流量は $8000\text{cm}^3/\text{s}$ を流し, 水路勾配は $1/1000$ または $1/2000$ に設定して, 上流より6mの計測断面前後で水深がほぼ6cmとなるように下流の堰上げを調節した. 実験は高水敷高さ3通りと樹木群無しを含む樹木群密度4通りの組み合わせすべてについて合計12ケースを行った. 流速計測は径5mmの2成分I型電磁流速計(東京計測製)を用い, 流下方向成分 u と横断方向成分 v の計測を行った. 計測点としては, 鉛直方向に低水路底面から1.0cm, 2.7cm, 4.7cmの距離において横断方向分布を計測した. すべての点でサンプリング周波数100Hzで41秒間計測し, 流速時間変動の周期性を調べる代表点では20Hzで120秒間計測した. 水深変動は容量式波高計で計測し, また染料を用いた可視化実験も行った.

3. 実験結果

(1) 平均流速横断分布

水深平均主流速 U_m は低水路においては3点法による平均として, 高水敷上では2測点の平均または1測点の値で代表させた. U_m は樹木群内では $y < 15\text{cm}$ で, 主流域では $y=35\text{cm} \sim 55\text{cm}$ 区間で流速がほぼ横断方向に一定となり, 境界の混合の影響がない領域が確認された. この樹木群内の一定流速を U_1 , 低水路内の一定流速を U_2 とすると, 規格化された無次元流速 $(U_m - U_1)/(U_2 - U_1)$ の横断方向分布を高水敷高さごとに示したのが図-3である. また, 図-4は U_2 で無次元化された横断方向流速差 $\Delta u/U_2 = (U_2 - U_1)/U_2$ を

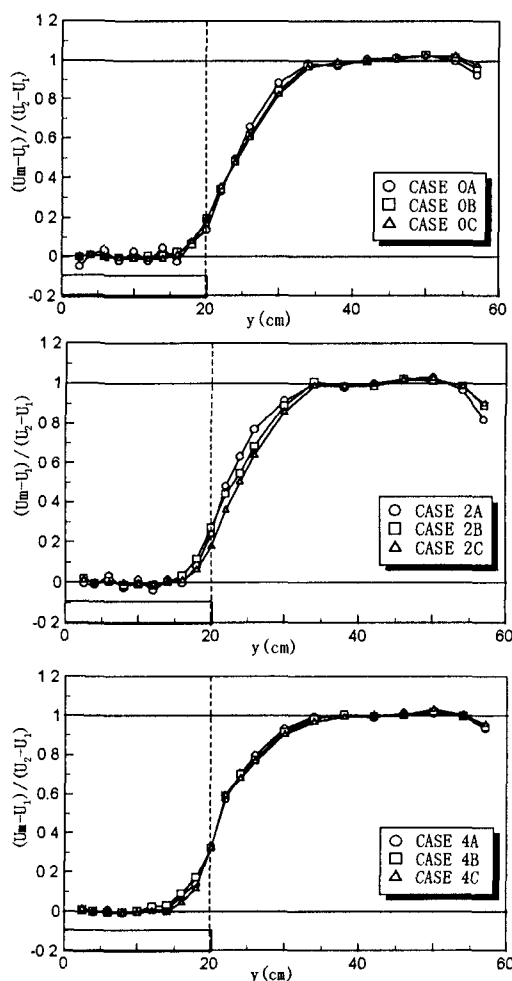


図-3 水深平均流速横断分布特性

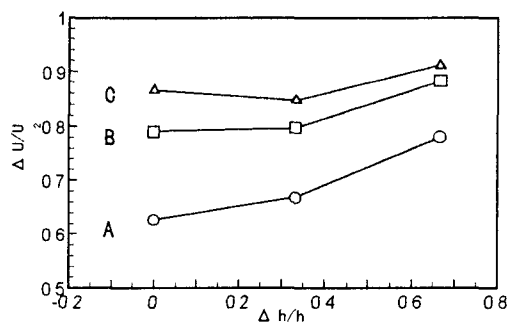


図-4 横断方向流速差

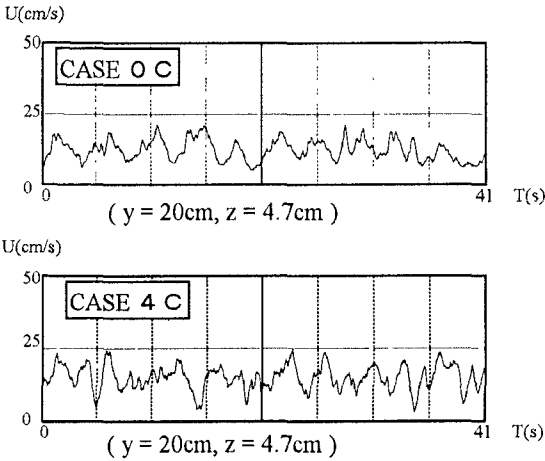
高水敷高さ $\Delta h/h$ と低水路水深の比 $\Delta h/h$ に対してプロットしたものである. 低水路側の U_2 からの減少分を流速欠損, 樹木群側の U_1 からの増加分を流速利得と呼ぶことにすると, 高水敷高さの増大とともに低水路の流速欠損が減少し, 樹木群側の流速利得が増大していることがわかる. 高水敷高さゼロのケースでは密度の増大とともにわずかながら低水路の流速欠損が増える傾向にある. 高水敷高さ2cmでは密度の増大とともに低水路の流速欠損が増す傾向がより明確になり, 高水敷高さ $\Delta h/h$ と密度の双方の効果が相互に影響しあって変化が大きくなったものと考えられる. 高水敷高さ4cmとなると, 樹木群境界の主流速横断分布はほぼ相似となり, 樹木群密度による

大きな変化は見られない。境界面の無次元流速の値は、高水敷高さゼロの場合で約0.19（ケースAのみ0.14），高水敷高さ4cmでは約0.3となっている。これより高水敷高さが低いほど樹木群の遅い流れが境界部に広く影響を与え、高水敷高さが大きくなると樹木群内への高速流の侵入が増大することがわかる。境界部の流体混合については、染料による可視化実験より大規模で周期的な水平渦構造が確認されており、この組織渦構造の生成の有無が水深平均流速の横断分布に影響しているものと考えられる。

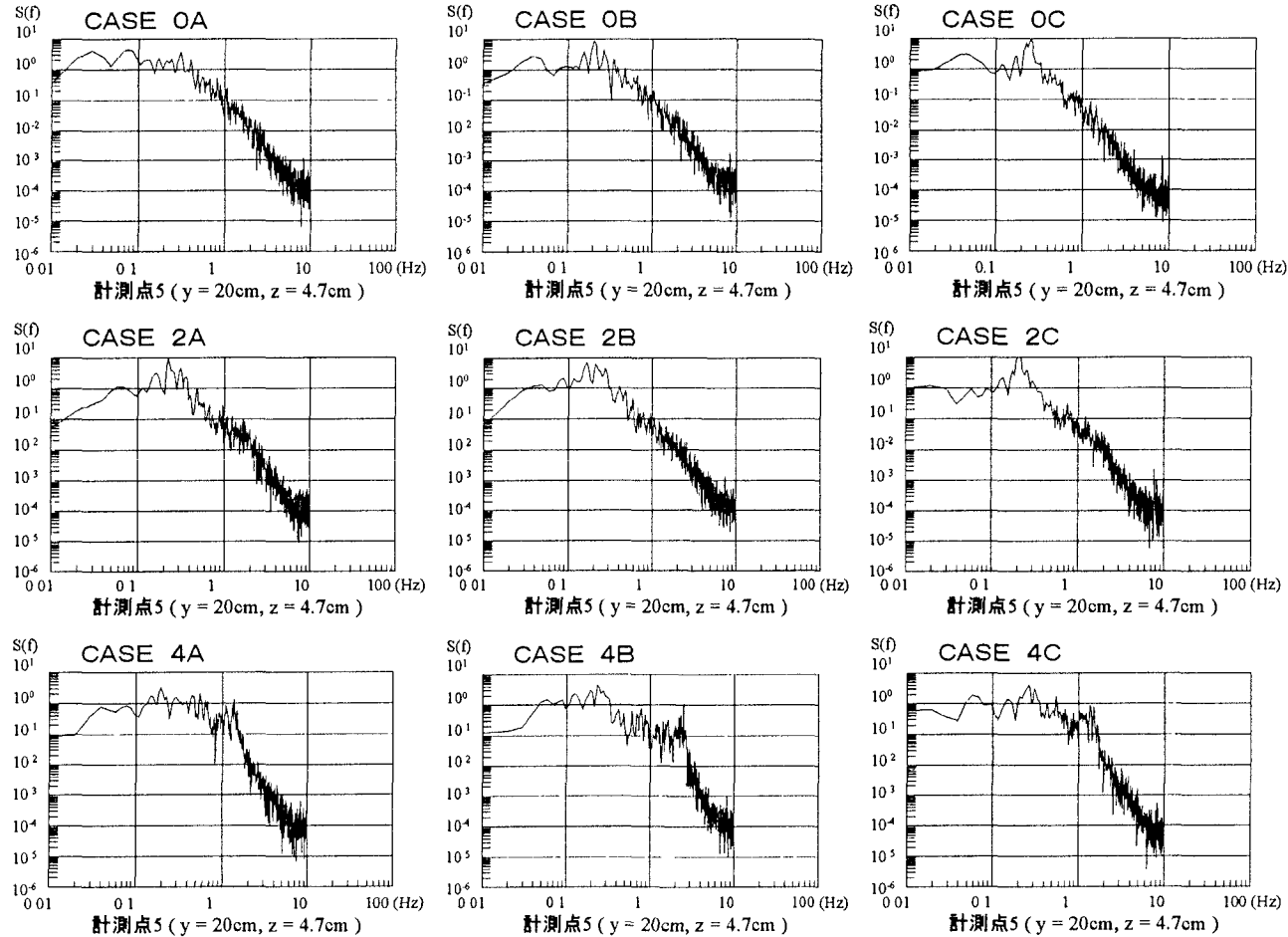
(2) 流速の時間変動

図－5はケース0Cと4Cの境界面(y=20cm)の流下方向流速uの時間変動である。高水敷高さゼロでは約4～5秒周期の規則的な流速変動が認められる。樹木群内および低水路中央付近まではほぼ同周期の明確な変動が見られた。この周期が可視化実験による樹木群内および境界部に生じた水平渦の周期とほぼ一致することから、水平渦の通過によって生じたものであると結論付けられる。高水敷高さが4cmでも大規模な変動が認められるが、規則性がやや崩れてきている。このような変動の規則性を明らかにするために、図－6に境界面におけるuのスペクトル密度分布を示す。この結果はサンプリング周波数20Hzで120秒間の計測によるものである。高水敷高

さゼロでは密生度が大きくなるにつれてピークが顕著となっている。高水敷高さ2cmではすべての密生度において顕著なピークが認められる。ピーク周波数はいずれのケースにおいても0.2Hzから0.25Hz付近にあり、大きな変化はない。高水敷高さ4cmになると、ピーク形状がフラットになり、低周波数から高周波数域にかけていくつかのピークを持つようである。このことから高水敷高さが大きい場合は、横断方向に水深が大きく異なることと3次元効果によりスペクトル周波数に現れる渦スケールの範囲が広



図－5 主流速の時間変動特性



図－6 主流速uのスペクトル密度分布

がり規則性が崩れたものと考えられる。また、ケース0 Aでは U_m の横断方向の流速差が小さいために規則的な水平渦の発生に至らなかったものと考えられる。

図-7はケース0 Cにおける横断方向計測点1~7でのパターン解析の図である。これはバースティング現象の解析方法の一つであるパターン認識法を横断方向の混合現象に適用したものである。 $\partial u/\partial t$ を検出基準としてこの値が最小値をとってから次に最大値をとるまでを1サイクルとし、この1サイクルの継続時間で規格化した時間に対して、主流速 u と横断方向流速 v のアンサンブル平均をとり、1サイクル内の流速パターンを抽出する方法である。実線が u 、波線が v のパターンであり、 v は左岸から右岸への向きを正としている。 u 、 v ともに正弦波的な変動を示し、 u と v の位相が植生域内で約 $-\pi/2$ 、境界部で π のずれが、そして低水路内では $\pi/2$ のずれが生じていることがわかる。境界部では植生域内の遅い流れの外部への流出と植生域外の速い流れの植生域内への流入によって時間遅れなしに運動量輸送が行われている。植生域では u が最小値となる前後で v が最小値から最大値へ変化することから、植生域内への流れの流入の後、遅れて流下方向の流れが減速され、植生域からの流出の後、流下方向流速が加速されることを示している。この結果は植生内部から低水路内部にわたる大規模な水平渦が通過していることを裏付けている。また、境界部で水深の周期的時間変動が見られたのはケース0 B、2 B、0 C、2 Cのみであり、流速の時間変動と同じ約4~5sの周期であった。樹木群の密生度が小さいケースAおよび高水敷高さが4cmのケースでは水深の周期的な変動が見られなかった。したがって、水深変動は大規模渦構造がより安定している場合にのみ検出されるものと考えられる⁷⁾。

(3) 時間平均乱れ特性

図-8は、高水敷高さより上の範囲で平均した流下方向乱れ強度 u' の横断分布である。いずれのケースも境界面近傍でピークをとるが、高水敷高さが0cmおよび2cmでは境界部から低水路中央付近にかけて広範囲に大きな乱れを示すのに対し、4cmでは境界面近傍の狭い範囲のみで鋭いピークを持つ。高水敷高さ0cmではAとBはあまり大きな変化はないが、Cではほぼ相似な分布形を保ちながら全範囲で乱れが大きくなる。これは特にケース0 Cにおいて周期的大規模渦が認められたことと対応しているものと考えられる。高水敷高さ2cmでは低水路内でかなり乱れが増大するが、密生度による差は小さくなる。一方、樹木群内の乱れはケースA、Bでは高水敷高さゼロに比べて増大するがケースCでは逆に減少している。高水敷高さ4cmでは密生度による差は小さく、境界部近傍では2cmの場合と同程度の大きな値

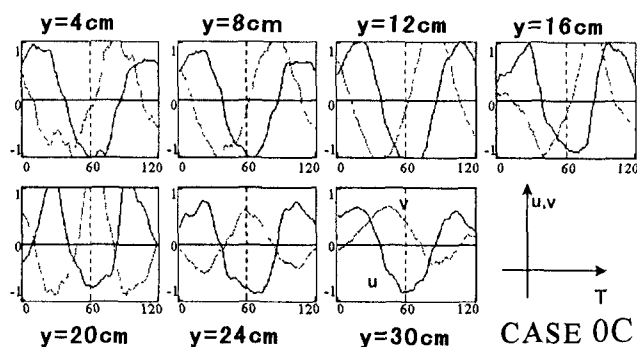


図-7 u 、 v 変動のパターン解析

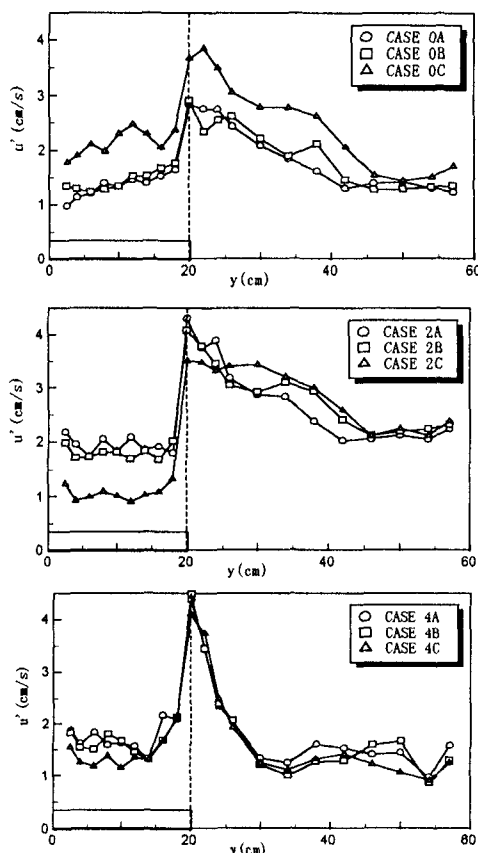


図-8 流下方向乱れ強度横断分布

をり、低水路内で急激に減少し低水路内は小さな乱れとなっている。これは、高水敷高さが小さい場合、水深スケールの深さを持つ水平渦の運動量輸送効果が広い範囲で流れの横断混合を生じさせているのに対し、高水敷高さが大きい場合、安定した大規模水平渦が発生していないためと考えられる。

4. 二次元数値計算

組織渦構造を再現する数値計算としては、灘岡・八木のモデル⁸⁾や木村・細田の計算⁹⁾があるが、ここでは著者らが用いてきた簡易な水深平均のゼロ方程式モデルに樹木群の形状抵抗を組み入れた基礎式をSIMPLE法によって解く計算法¹⁰⁾を拡張して、組織渦の再現が可能かを検討した。樹木群の形状抵抗を考慮した2次元非定常流の基礎式は次のようである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UU) + \frac{\partial}{\partial y}(VU) = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} - F_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(VV) = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} - F_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

底面せん断応力は、マンニングの粗度係数を用いて、

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{b n^2}{\sqrt{h}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{b n^2}{\sqrt{h}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

とし、水深平均レイノルズ応力は、

$$\tau_{xx} = \rho \nu_i \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad \tau_{xy} = \rho \nu_i \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = \rho \nu_i \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (5)$$

と表す。 ν_i は水深平均の渦動粘性係数であり、

$$\nu_i = \nu_o u_* h \quad (6)$$

と表現した。水深平均された樹木群の抗力は、

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \beta_x \sqrt{U^2 + V^2} \cdot U, \quad F_y = \frac{1}{2} C_D \beta_y \sqrt{U^2 + V^2} \cdot V \quad (7)$$

と表され、 C_D は抗力係数、 β_x, β_y はそれぞれ x, y 方向の樹木群の密度パラメータである。これらをスタッガード格子を用いたコントロールボリューム法で離散化しSIMPLE法によって解く。従来のようにハイブリッド法を用いた計算では数値粘性がかなり効くため、非定常計算を行っても定常値に近づくだけで時間変動は現れない。しかし、この定常解を初期値として中心差分に切り替えて非定常計算を行うことにより、大規模な時間変動が周期的に現れるようになる¹¹⁾。水平渦の形成を伴う横断混合による横断分布、時間変動を求めた。各ケースとも渦動粘性係数パラメータ $\nu_o = 0.04$ とした。樹木群の抵抗係数 C_D は基本的に樹木群密度によらず0.8と一定とした。ただし、高水敷高さ4cmのときは樹木群内のレイノルズ数が著しく小さくなるため1.6とした。これらの係数値は流下方向流速の横断分布が実験値に一致するように定められたものである。メッシュサイズは基本として x 方向に2cm、 y 方向に1cmとし、さらに細かくした計算も行った。時間間隔は0.2sとし100秒間計算を行った。

図-9はケース0Cに対して計算された流速ベクトル図の一例である。渦を見やすくするために主流速 u から15cm/sを差し引いている。大規模な渦構造が発生し流下している様子がわかる。図-10はケース0B、2Bおよび4Bにあたる非定常計算された流下方向流速の長時間平均値 U の横断分布図である。渦動粘性係数を一律とした計算におい

て、かなり実験値に近い値を示しているが、低水路流速が若干過大評価となっている。高水敷高さが大きい場合、境界部での横断分布形状の傾きが実験結果に比べ大きくなった。これを実験結果に近づけるためには大きな渦動粘性係数を与える必要がある。これは高水敷高さが大きい場合に、組織的・大規模な横断混合が計算結果に現れなかったことが原因していると考えられる。図-11は流下方向流速 u の時間変動の図であり、実験ケース2B、2Cおよび4Bに対応するものである。この計算結果から、密生度が大きいほど振幅が大きく明確な周期変動となることがわかる。高水敷高さが4cmでは変動が減衰しほぼ定常解に収束してしまう結果となった。高水敷高さの増大とともに規則性が失われるという傾向は一致するが、スペクトルの広い範囲にわたる変動はこの計算では再現できないことがわかる。規則変動の現れたケースの変動周期は約6.6sとなり、実験での周期約4~5sに比べ長い周期となった。図-12はケース2Cにおける水深の時間変動の図である。水深においても u と同周期の規則的変動が現れている。樹木群密生度が大きいほど水深の時間変動の振幅が大きく、高水敷が高い場合は変動が消滅した。図-13はケース2Bに対応する計算の時刻 $t=33s$ における流下方向流速 u と横断方向流速 v のコンター図であ

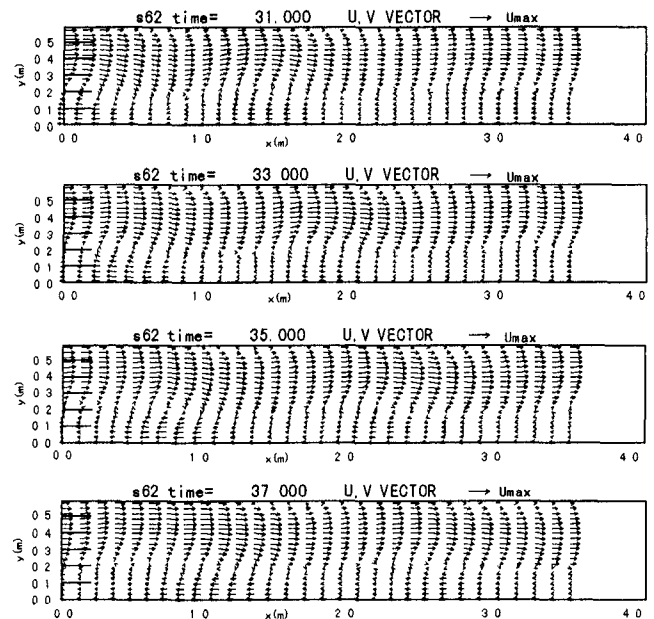


図-9 計算された流速ベクトルの時間変化 (0C)

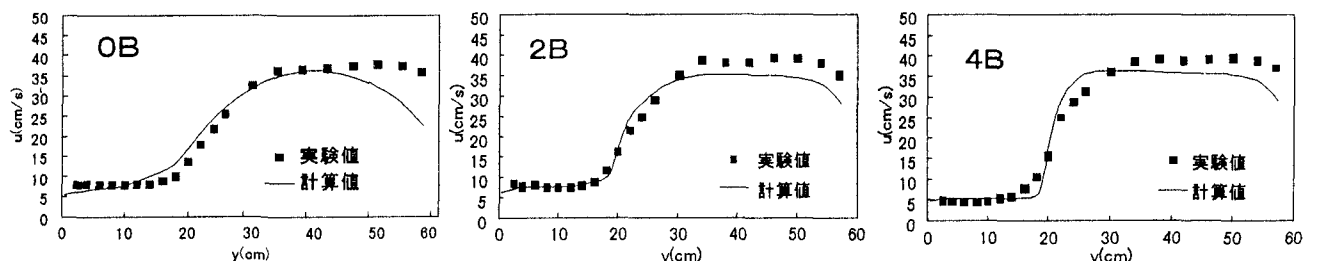


図-10 時間平均流速の横断分布

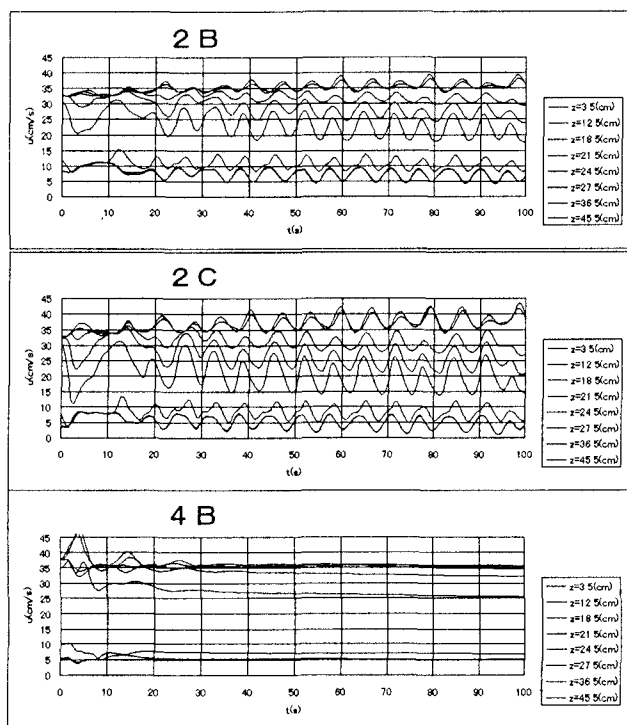


図-11 流下方向流速の時間変動

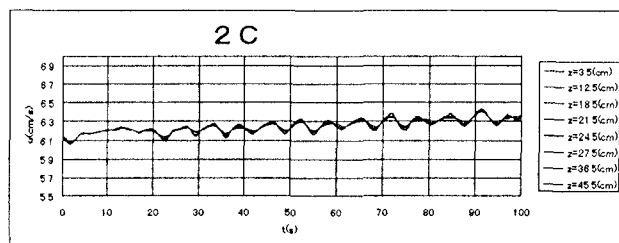


図-12 水深の時間変動

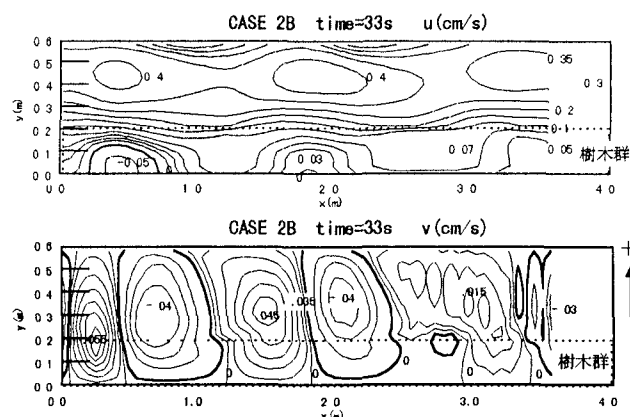


図-13 u, vの平面コンター図

る。植生域内および植生域外で u の速い領域と遅い領域が流下方向にほぼ一定間隔で交互に現れている。 v は u の植生内低速域の上流側で正、下流側で負になっており、境界部において時計周りの水平渦の存在が明確にわかる。

5. 結論

樹木群の密生度、高水敷高さの違いが横断混合に及ぼす影響を系統的に検討した。高水敷高さがある程度以下の場合、樹木群密生度に応じて横断方向流速差がある程度大きくなると規則的で大規模な水平渦が発生し、低水路内の非常に広範囲に大きな乱れが発生する。高水敷高さが大きい場合は、水深スケールの横断方向変化や3次元効果により大規模で規則的な水平渦の発達が抑制され、流れの横断混合が境界部の比較的狭い範囲に限られる。ただし、こうした大規模水平渦の発生限界については、これだけの実験条件では判断できず、より高精度の詳細な実験が必要となろう。二次元の非定常計算では、密生度によらず樹木群の抵抗係数を基本的に一律に与えて計算を行った結果、実験で確認された水平渦構造がおおむね再現された。密生度が大きくなるほど変動振幅が大きくなるが、高水敷高さが大きい場合は時間変動が小さくなり定常解に至ってしまった。時間変動の周期は実験結果に比べ長くなる点も含めて数値計算法は改良がさらに必要である。

最後に、本研究は文部省科学研究費基盤研究(A)(研究代表者：東工大・池田駿介教授)の補助を受

けたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二・渡辺明英・津森貴行：樹木群のある河道流れの水平混合とその卓越波数，水工学論文集，第38巻，pp.357-361, 1994.
- 2) 藤田光一・福岡捷二：洪水流における水平乱流混合，土木学会論文集，No.429/II-15, pp.27-36, 1991.
- 3) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：測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, pp.47-54, 1992.
- 4) 池田駿介・村山・空閑：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造，土木学会論文集，No.509/II-30, pp.131-142, 1995.
- 5) 富永晃宏・長尾・劉・鈴木：洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響，水工学論文集，第39巻，pp.477-482, 1995.
- 6) 佐野・野崎・濱谷・中井・管：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.
- 7) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究，土木学会論文集，No.491/II-27, pp.61-70, 1994.
- 8) 灘岡和夫・八木宏：浅い水域の水平混合現象に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用，土木学会論文集，No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 9) 木村一郎・細田尚・友近文志：開水路流れ混合層におけるせん断不安定波動の空間的増幅特性，土木学会論文集，No.509/II-30, pp.99-110, 1995.
- 10) 富永晃宏・長尾正志・庄建治朗，局所的樹木群を有する複断面水路を通過する洪水波の変形過程，水工学論文集，vol.41, pp.681-683, 1997.
- 11) 香月正司・中山顕共著，熱流動の数値シミュレーション，森北出版，1990.

(1997. 9. 30受付)