

低水路沿い樹木群の密度変化による 流れの混合と発達過程

MIXING STRUCTURE & FLOW DEVELOPMENT ACCOMPANING THE CHANGE IN THE DENSITY OF VEGETATION ALONG A COMPOUND MAIN CHANNEL BANKS

福岡捷二¹・渡邊明英²・高次渉³・坂本博紀³

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE,
Wataru TAKATSUGU and Hiroki SAKAMOTO

¹フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第四類 (〒739-8526東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (同上)

³学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期(同上)

In general, when vegetation has grown along the main channel banks and its density varies in the downstream direction, a change in the flow field is observed. In this study the change in the mechanism of mixing is instigated in a laboratory flume when vegetation density is changed abruptly. Three-dimensional instantaneous velocities and longitudinal water surface profile were measured for the analysis. As the result, the change in the main velocity flow field and the turbulent mixing structure were instigated. Also, We considered the distance necessary for complete development of these processes.

Key Words : Reynolds stress, vegetation, open compound channel, large horizontal eddy, change flow field

1. 序論

複断面河道では低水路河岸に樹木群の繁茂が多くみられるが、洪水時には流水抵抗をもたらす、河道の洪水流下能力を低下させるという治水上の問題を持っている。したがって治水や環境管理のためには水際樹木群のある複断面河道の流れ特性を十分に把握し、それを適切に管理に反映することが重要である。

樹木群が繁茂している複断面河道では樹木群領域での流速が主流域に比べて非常に遅く、横断方向に大きな速度勾配を生じる。このため周期的な水平混合を伴った強い大規模平面渦が発生し、流水抵抗が大きくなる^{1) 2) 3)}。

樹木群のある複断面河道については、福岡・藤田ら⁴⁾の境界混合係数を用いた準二次元解析法があり、これは実際の河道計画に用いられている。平面二次元やそれに準ずる解析については灘岡・八木⁵⁾、福岡・渡辺ら⁶⁾の研究があり、特に福岡らは利根川の実洪水においても樹木群による流れ場の大規模平面渦と平面流況の再現ができることを示している。さらに、三次元解析法も開発されており、これらの解析法は目的に応じて使い分けられる段階にある。

しかし、樹木群はその密度と繁茂形態が流下方向に変化するのが一般的で、この場合、流れ構造が三次元的になる。しかし、樹木群のある三次元的な流れ場の発達過

程についての研究は十分に行われていない。駒井ら⁷⁾は低水路沿い樹木群密度が流下方向に急増する場合の平均流及びレイノルズ応力の構造を調べ縦断的な変化過程を検討した。本研究では、駒井ら⁷⁾の研究を発展させ樹木群密度が流下方向に急変する場合について流れ場の三次元構造とその変化過程及び、平均流の発達に要する流下距離について検討を行う。

2. 実験方法・実験条件

実験水路の断面図を図-1、平面図を図-2に示す。全長28m、全幅0.8m、低水路幅0.5m、高水敷幅0.3m、高水敷高さ5.7cmの片側複断面直線水路である。樹木群模型は幅3.5cmで、低水路河岸に縦断的に連続配置している。

実験ケースを表-1に示す。図-2に示した樹木群①と樹木群②に用いる樹木群模型を入れ替えることにより、樹木群密度が流下方向に変化する場合について実験を行った。樹木群密度が変化する場合、密度変化位置は $x_c=12.2\text{m}$ の断面である。樹木群模型の透過速度は、 $v=KI_c^{1/2}$ で定義される透過係数 K で表すことができる。ここに、 v : 樹木群内の流速、 I_c : エネルギー勾配である。粗な樹木群模型の K は 1.74m/s 、密な樹木群模型は 0.45m/s である。

実験は全てのケースについて流量を 23.0l/s 、水路勾配

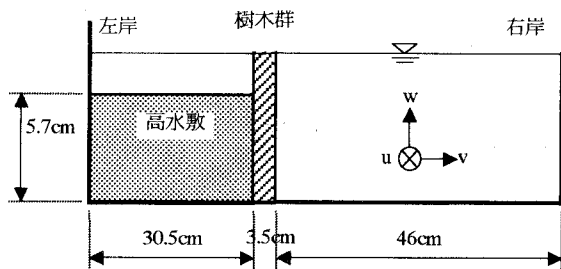


図-1 実験水路の断面図

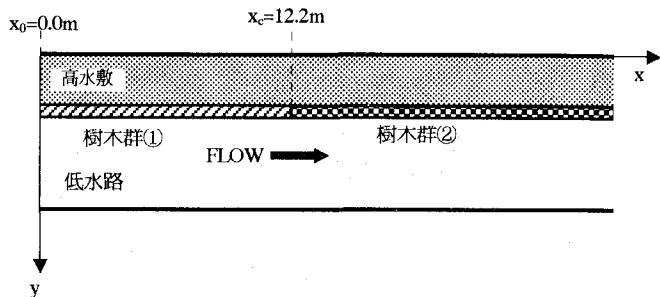


図-2 実験水路の断面図

表-1 実験ケース

実験	樹木群①	樹木群②	流量	水路配
実験D	密		23 ℓ/s	1/50
実験N	樹木群なし			
実験ND	樹木群なし	密		
実験SD	粗	密		
実験DS	密	粗		
実験DN	密	樹木群なし	28 ℓ/s	
実験D2	密	樹木群なし	30 ℓ/s	
実験D3	密	樹木群なし	30 ℓ/s	

D:Dense, S:Spruce, N:Nothing

を1/550で行い、実験DNについては流量を23.0ℓ/s, 28.0 ℓ/s, 30.0 ℓ/s, に変化させて実験を行った。また、下流部においてほぼ等流状態となるように下流端の堰高を調節している。本実験条件下では、水深は9.9~6.5cmとなり水路の全区間において樹木群模型は水没しない状態に保たれている。

実験ではポイントゲージを用いて縦断水位を測定した。流速はLDV (レーザー流速計, サンプル周波数100Hz) とI型電磁流速計 (サンプル周波数20Hz) を用いて測定した。

3. 実験結果

(1) 樹木群密度の縦断変化が水位分布に及ぼす影響

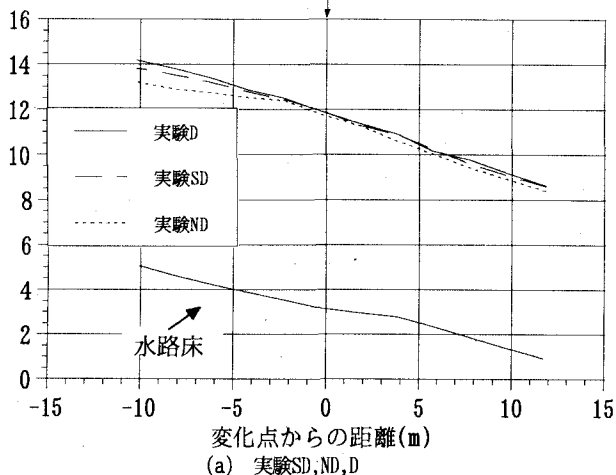
(a) 樹木群密度が縦断的に急増する流れ (実験ND, SD, D)

図-3(a)に実験ND, SD, Dの縦断水位を示す。比較のため流量は全ケース23.0 ℓ/sに統一してある。樹木群密度の異なる上流部では水位勾配が実験ND, SD, Dの順に小さく、樹木群の抵抗は小さくなる。しかし、樹木群密度の変化に伴う水位の変化は緩やかである。これは下流部での水位上昇が上流に伝わっているためである。このように縦断的に樹木群密度が急増する場合、下流部の樹木群密度が上流部の水位に大きな影響を及ぼす。

(b) 樹木群密度が縦断的に急減する場合 (実験DN, DS, D)

密な樹木群の下流側に粗な樹木群がある場合と樹木群がない場合について、樹木群密度と抵抗特性の変化の大きさ関係を明らかにするため、実験DN, DS, Dの比較

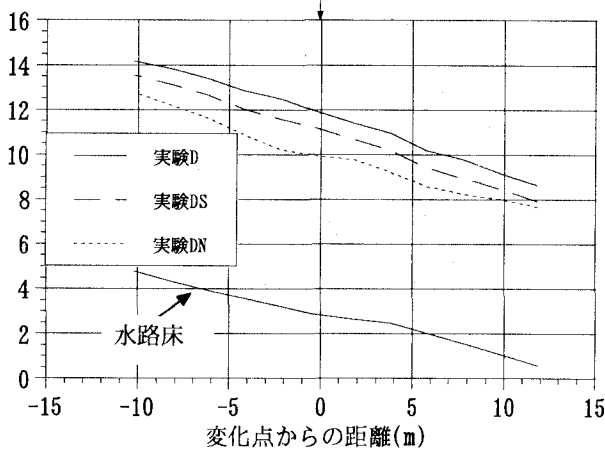
樹木群密度の変化点



変化点からの距離(m)

(a) 実験SD, ND, D

樹木群密度の変化点



変化点からの距離(m)

(b) 実験DS, DN, D

図-3 縦断水位

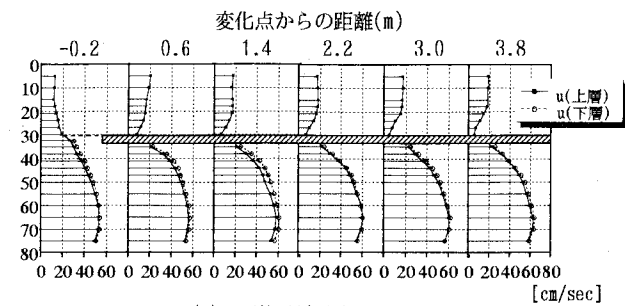
を行う。(b)に実験DN, DS, Dの縦断水位を示す。

実験DNでは樹木群の変化点付近における水位が低下する。これは実験DSに比べ変化点での樹木群の密度変化が大きく、樹木群がなくなることによる河積の変化が水面形に与えた影響が大きいためである。

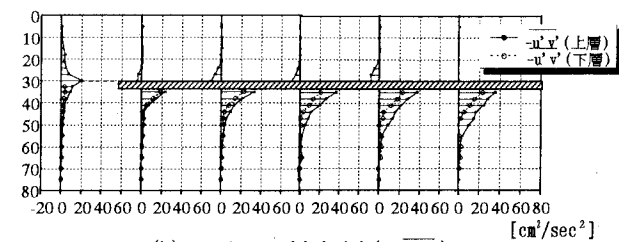
(2) 樹木群急変位置下流平均流と乱れの三次元構造の変化過程

(a) 実験NDにおける流れ構造の縦断変化

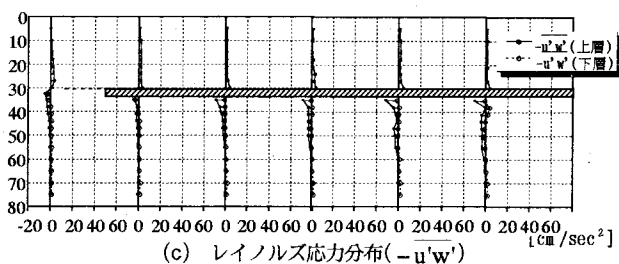
図-4(a), (b), (c)にそれぞれ平均流速分布 (\bar{u}), レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$), ($-\overline{u'w'}$) を示す。複断面流れでは流れ場の特性が高水敷高さを境に異なるため、ここでは上層と下層に分けて鉛直平均した値を用い



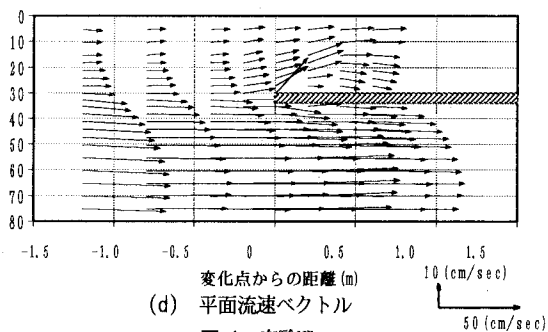
(a) 平均流速分布



(b) レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$)



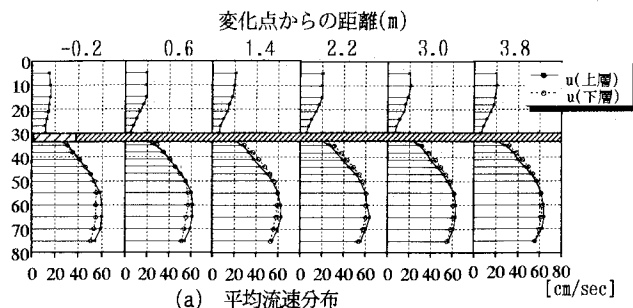
(c) レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'w'}$)



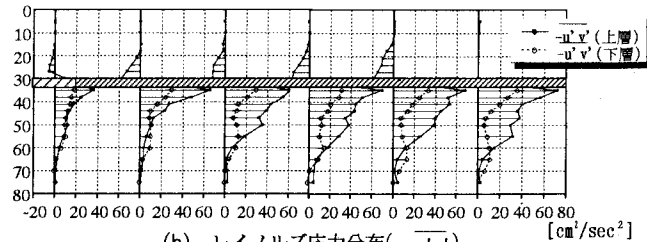
(d) 平面流速ベクトル

図-4 実験ND

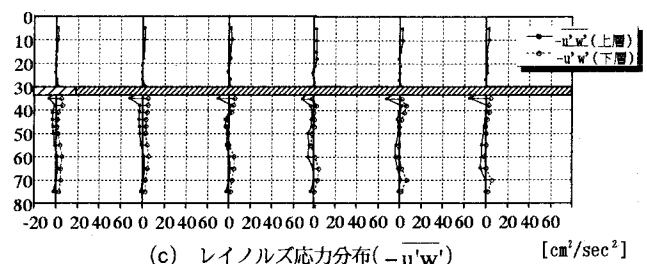
ている。流れ場の変化によって流速分布は高水敷・低水路の境界付近で変曲点をもつ流速分布から、樹木群によって減速される分布に変化する。変化点から1.4mの断面では、低水路上層の流れが減速しているが、2.2mより下流では上下層の差は小さくなり、また流速分布の縦断変化も小さく流れはほぼ安定している。レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$) は、樹木群より上流部の断面では上層でのみ値を持つ。これは上層では低水路流れと高水敷流れの混合が生じているためである。流下に伴い低水路側の樹木群近傍におけるレイノルズ応力 ($-\overline{u'v'}$) が上層・下層ともに増大し、高水敷側のレイノルズ応力 ($-\overline{u'v'}$) は負の値に変化している。ここでは上層・下層ともに樹木群による抵抗が強く作用することで樹木群周辺の流れが大きく減速されており、樹木群周辺の混合機構は鉛直方向に一様化されているといえる。また、上層では樹木群内外の流れの混合に加え、樹木群を介した低水路と高水敷の流れの混合が発生するため、下層よりも大きな $-\overline{u'v'}$ が生じている。



(a) 平均流速分布



(b) レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$)



(c) レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'w'}$)

図-5 実験SD

$-\overline{u'w'}$ は変化点付近では樹木群付近の値が小さいが、流下に従って大きくなる。これは大規模平面渦の発達に伴う鉛直方向の流速差の発生に起因するものである。

樹木群がない流れから樹木群のある流れへの発達過程では、樹木群上流端部分で抵抗が急激に作用し流れの混合機構は大きく変化する。また、高水敷流れが樹木群上流端部分に衝突し流行が大きく曲げられることにより高水敷側に高速流が生じる。大規模平面渦は流下とともに発達し、上層の水平混合が卓越する流れとなる。それに伴い低水路内で上下層の流速差が生じる事よって鉛直混合が生じている。

(b) 実験SDにおける流れ構造の縦断変化

図-5(a), (b), (c) に実験SDの平均流速分布 (\bar{u})、レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$)、($-\overline{u'w'}$) を示す。実験SDでは、上流部に粗な樹木群があり、高水敷流れは樹木群付近で減速されているため、実験NDのような流れ構造の大きな変化はない。しかしながら、樹木群密度が増大することにより、樹木群内外の流速差は大きくなり、大規模平面渦の発達とともに、レイノルズ応力 ($-\overline{u'v'}$) は増大する。

(c) 実験DNにおける流れ構造の縦断変化

図-6(a), (b), (c) に実験DNの平均流速分布 (\bar{u})、レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$)、($-\overline{u'w'}$) の縦断変化を示す。流速分布は境界部で減速される流れから、高水敷流れが低水路流れによって加速される流速分布に変化する。 $-\overline{u'v'}$ 、 $-\overline{u'w'}$ を比較すると $-\overline{u'v'}$ が十分に大きいこと

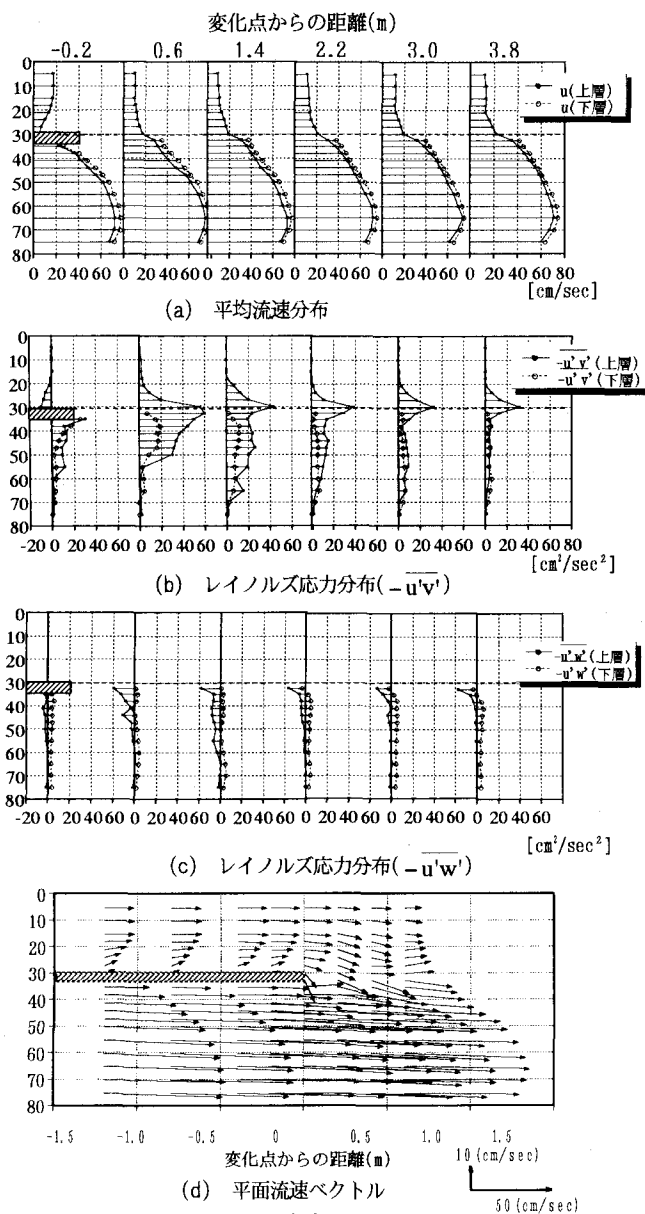


図-6 実験DN

から横断混合が卓越している。また $-\overline{u'v'}$ は上層で高い値を示すことから低水路流れと高水敷流れの混合は上層で活発に行われている事が分かる。

図-6(b), (c) に示すように、樹木群直下流部でレイノルズ応力は $-\overline{u'v'}$, $-\overline{u'w'}$ ともに樹木群がある範囲以上の値を示している。これは図-6(d) に示されているように、樹木群によって減速されていた高水敷流れが低水路側に急激に流入し、また樹木群の直下流部に樹木群内から非常に遅い流れが流出するため激しい混合が生じるためである。この激しい混合の影響が高水敷からの移流及び、大規模平面渦によって流下に従い横断方向に拡散していく。 $-\overline{u'v'}$ の縦断変化がこの混合機構を表している。流下に伴い境界部における水平混合は減衰し、混合機構は樹木群のない複断面流れの構造に漸変する。

(d) 実験DSにおける流れ構造の縦断変化

図-7(a), (b), (c) に実験DSの平均流速分布 (\bar{u}), レイノルズ応力分布 ($-\overline{u'v'}$), ($-\overline{u'w'}$) を示す、実

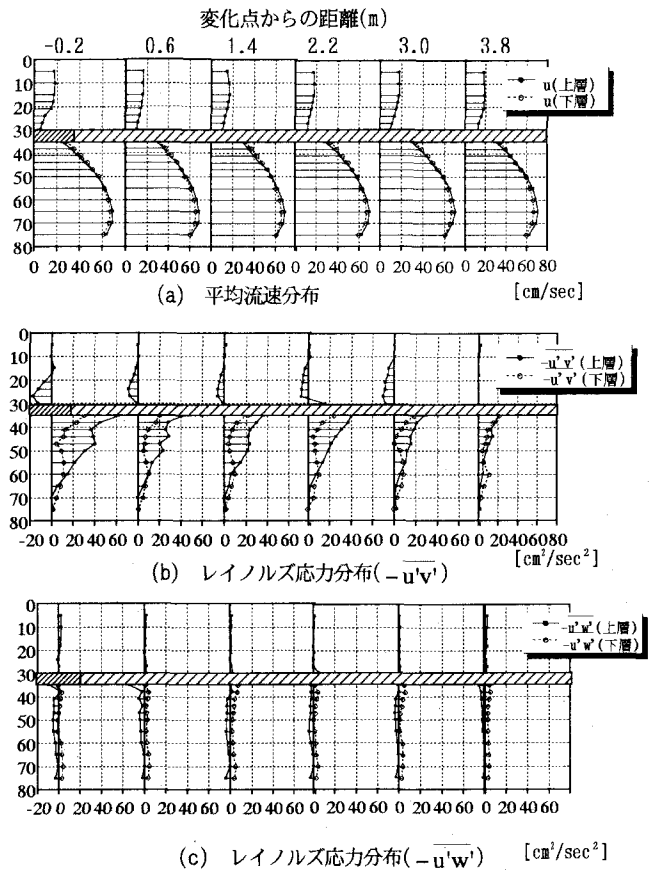


図-7 実験DS

験DSでは、下流部に粗な樹木群があるため、実験DNのような流れ構造の大きな変化はない。しかしながら、樹木群密度が減少し、樹木群内外の流速差は小さくなるため、大規模平面渦は弱くなり、レイノルズ応力 ($-\overline{u'v'}$) は減少する。また、実験DNとは異なり、粗な樹木群が下層の流れを減速するとともに、粗な樹木群により高水敷流れと低水路流れの流速差が緩和されるため、低水路側に流入する高水敷流れとの混合は相対的に小さくなる。

(e) 流れ場の三次元構造

4ケース(DN, DS, ND, SD)の混合の発達過程の模式図を図-8に示す。DS, SDの特徴は樹木群の透過性による大規模平面渦の発達・減衰が支配的で上層の大規模平面渦の規模によって上下層に流速差が生じる範囲が決まり、それに付随して鉛直混合が生じる。

NDの混合特性は流下に伴い樹木群によって周囲に大きな抵抗が働き、境界付近の混合が鉛直方向に一様化されることである。DNでは樹木群が消失した直後に生じる激しい混合が生じ、この混合域の拡散と大規模平面渦の減衰が同時に進行する。4ケースを比較すると、DS, SDは大規模平面渦の規模が変化し、流れ場は流下に従い平衡状態に漸変していくがDN, NDのような急激な流れ場の変化がある場合、変化点直下流部での混合が急変が拡散する過程が同時に進行する。

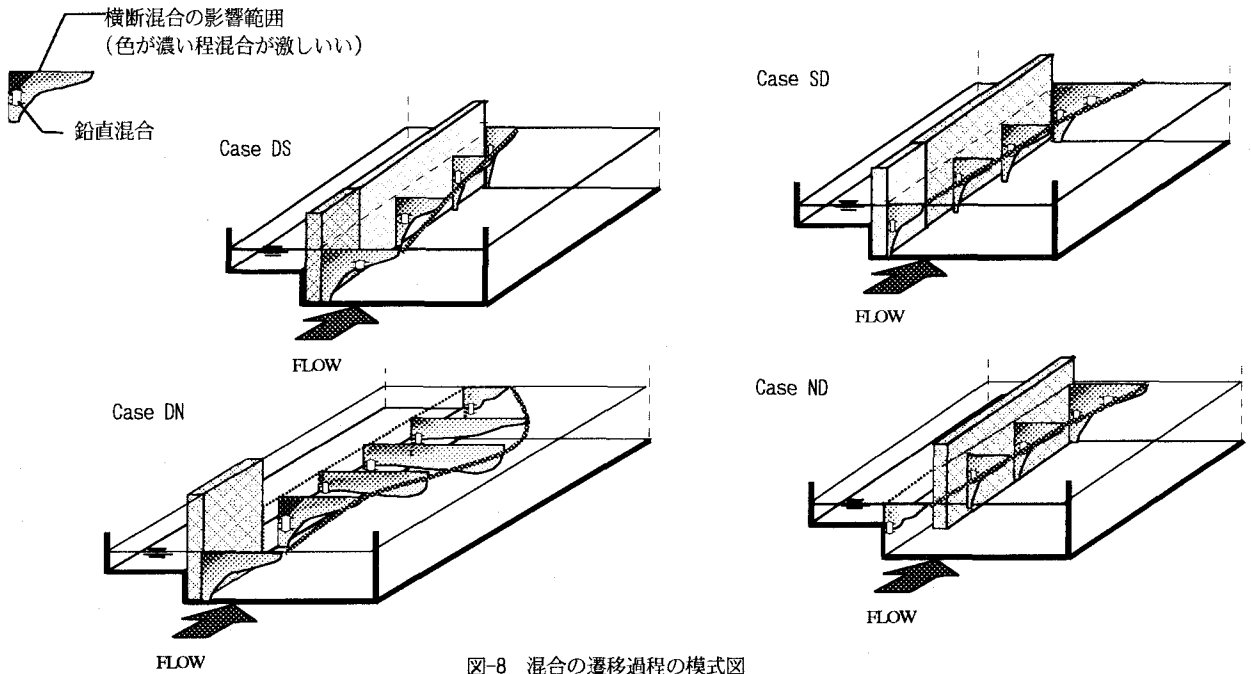


図-8 混合の遷移過程の模式図

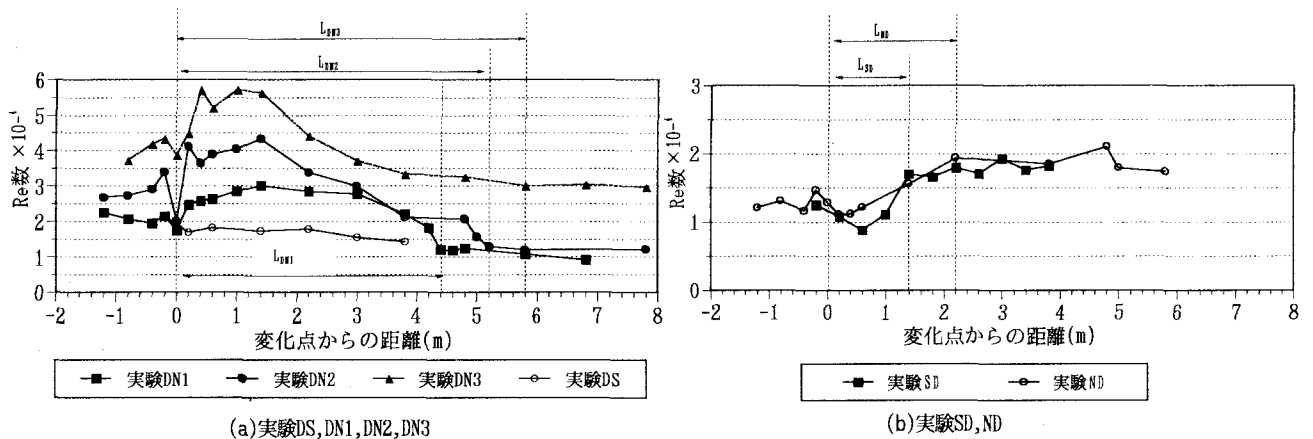


図-9 境界Re数 Re' の縦断変化

(4) 流れ場の発達に要する流下距離

平均流速場の発達に要する流下距離について検討する。流れ場の変化点から、混合が平衡状態に達するまでの距離 L を流れ場の遷移距離と考える。本実験における平均流速場の変化はレイノルズ応力分布 $(-\overline{u'v'})$ に顕著に現れ、特に高水敷と低水路の境界部あるいは樹木群境界の $-\overline{u'v'}$ は遷移に伴い大きく変化する。そこで代表速度に境界部上層に作用する $-\overline{u'v'}$ の平方根、代表長さとして低水路上層の $-\overline{u'v'}$ が生じている横断幅 B を用いてレイノルズ数 Re' を計算し、 Re' の縦断変化から平均流速場の発達を評価する。この Re' を本論文では便宜的に境界レイノルズ数とよぶ事にする。

図-9(a)に実験DS, DN1, DN2, DN3についての Re' の縦断変化を、図-9(b)に実験SD, NDのレイノルズ数 Re' の縦断変化を示す。流れ場の発達に要する流下距離 L は $L_{SD}=1.4m$, $L_{ND}=2.2m$, $L_{DN1}=4.4m$, $L_{DN2}=5.2m$, $L_{DN3}=5.8m$ となり、 L_{DS} については明確な遷移区間を定める事はできなかった。DN, NDのような急激な流れ場の

変化がある場合、平衡状態に達するまでの流下距離は長くなる。 L_{ND} , L_{DN1} を比較すると、どちらも流れ場の変化は大きいにも関わらず、後者は樹木群直下流部で生じる混合の影響が大きいいため遷移距離は長くなる。 L_{DN1} , L_{DN2} , L_{DN3} を比較すると、流量の増加に従い遷移距離は長くなる。これは本実験条件の範囲では流量の増加に伴い樹木群直下流部での混合が激しくなり、その影響が拡散するのにより長い流下距離を必要とするためである。

(5) 本実験における遷移距離の表現式の導出

樹木群が途切れてから、混合が平衡状態に達するまでの距離 L を流れ場の遷移距離と考える。遷移区間の運動方程式(2次元, x方向)を立てると次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = gi - \frac{1}{2h} Fu^2 + \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

u : 主流速, h : 水深, F : 摩擦損失係数; $F = 2gn^2/h^{1/3}$,
 ϵ : 渦動粘性係数

式(1)について、各点の水量を平衡状態の水量と偏差量に分けて

$$u(x, y) = u_{\infty}(y) + \tilde{u}(x, y), \quad h(x) = h_{\infty} + \tilde{h}, \quad \varepsilon(x) = \varepsilon_{\infty} + \tilde{\varepsilon}$$

と表現し以下の式を得る。

$$(u_{\infty} + \tilde{u}) \left(\frac{\partial^2 u_{\infty}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} \right) = g_i - \frac{F}{2(h_{\infty} + \tilde{h})} (u_{\infty}^2 + 2u_{\infty}\tilde{u} + \tilde{u}^2) \quad (2)$$

$$+ (\varepsilon_{\infty} + \tilde{\varepsilon}) \left(\frac{\partial^2 u_{\infty}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} \right)$$

式(2)を平衡状態となった流れ場の運動方程式と、平衡状態からの偏差に関する運動方程式に分けて考える。

$$u_{\infty} \gg \tilde{u}, \quad \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} \approx 0, \quad (h_{\infty} + \tilde{h}) \approx h_{\infty}$$

と近似する事で遷移領域における運動方程式を次のように単純化する。

$$u_{\infty} \cdot \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = -\frac{F}{h_{\infty}} u_{\infty} \cdot \tilde{u} + 2\varepsilon_{\infty} \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} \quad (3)$$

式(3)のx, yを遷移距離Lと平衡状態における混合の影響範囲の幅ΔYで無次元化し

$$\tilde{u} = X \left(\frac{x}{L} \right) \cdot Y \left(\frac{y}{\Delta Y} \right)$$

で表すと、(式-3)は以下のように表現できる。

$$u_{\infty} \cdot \frac{1}{L} \cdot X' \cdot Y = 2\varepsilon_{\infty} \cdot \frac{1}{(\Delta Y)^2} \cdot X \cdot Y'' - \frac{F}{h_{\infty}} \cdot u_{\infty} \cdot X \cdot Y$$

このとき、ここでX, X', Y, Y', Y''はx, yについて一つに決まるため、次のような比例関係が成り立つ。

$$\frac{\varepsilon_{\infty}}{(\Delta Y)^2} \propto \frac{F \cdot u_{\infty}}{h_{\infty}}, \quad \frac{u_{\infty}}{L} \propto \frac{\varepsilon_{\infty}}{(\Delta Y)^2}, \quad \frac{u_{\infty}}{L} \propto \frac{F \cdot u_{\infty}}{h_{\infty}}$$

これより、次のような関係式が得られる。

$$L = \alpha \cdot \frac{h_{\infty}}{F} \quad (4)$$

遷移距離は(水深) / (摩擦損失係数) に比例し、比例定数αは大規模平面渦や樹木群の透過係数によるε(x), ΔY, 平衡状態の流速u_∞によって表される無次元量によって決まる係数である。流れ場の遷移の影響は低水路に顕著に現れるため、平衡状態における低水路の摩擦損失係数F_m、及び平均水深h_mを式(4)に代入し、境界Re数の縦断変化から求めた実測遷移距離Lに合致するよう比例定数αを定めた。本実験条件ではαは表-2に示す値を得た。ケースDNでは全ケースともαは0.33という値となり、本実験条件の範囲(相対水深0.18~0.33)では遷移距離は下流部平衡状態における[水深 / 摩擦損失係数]に比例関係にある。

表-2 本実験における(式-4)の各項の値

実験	hm	Fm	L	α
実験ND	8.4	0.0050	220	0.130
実験SD	8.43	0.0050	140	0.083
実験DN1	6.97	0.0052	440	0.328
実験DN2	8.01	0.0050	520	0.324
実験DN3	8.61	0.0049	580	0.330

4. 結論

本研究では樹木群密度の変化に伴う混合機構の変化過程、樹木群の直上部及び直下流部における変化過程を明らかにし、流れ場の遷移距離についての検討を行った。樹木群の直下流部では、高水敷流れの低水路への急激な流入によって、樹木群内外の混合を上回る大きな水平混合を生じる。また樹木群直下流部に生じる激しい混合の影響が大規模平面渦によって拡散されることが大きな特徴である。混合の発達過程は密度が増加する場合の発達過程同様に、大規模平面渦が発達する事により低水路層の流速分布が変化し、それに付随して鉛直混合が発達する。

以上のように、樹木群の透過性が縦断的に変化する場合、あるいは樹木群の上下流端で生じる流れ場の遷移領域では流れは三次元的に複雑であるうえ、強い非線形性を持つ現象である。そのため、様々な繁茂形態の樹木群を有する河道の予測を行うためには数値解析手法が有効である。駒井ら⁸⁾は三次元数値解析モデルを開発し、流れ場の解析を試みたが実験結果を説明できる段階には至っていない。異なる樹木群の透過性や水理条件を持つ河道の抵抗特性や遷移距離を予測するために高精度の三次元解析モデルの開発が次の課題である。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼすか道内樹木群の水理影響, 土木研究所報告第180号-3, 1990
- 2) 福岡捷二, 渡邊明英, 津森貴行: 樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造と解析, 土木学会論文No.491/II-27, pp41-51, 1944
- 3) 富永晃宏, 長尾正志, 劉建, 鈴木徹也: 洪水流の抵抗と流れの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, pp477-482, 1995
- 4) 福岡捷二, 藤田光一, 新井田浩: 樹木群を有する河道の洪水予測, 土木学会論文集, No447/II-19, pp17-24, 1992
- 5) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DHモデルを用いた開水路水平せん断流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.447/II-24, 1993
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 上坂恒夫, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群がある河道の洪水流構造-利根川新川通昭和56年8月洪水-土木学会論文集, No509/II-30, p88-97, 1995.2
- 7) 駒井克昭, 福岡捷二, 渡邊明英, 大本泰久: 流下方向に密度の変化する水際樹木群を有する複断面開水路乱流の発達機構, 水工学論文集, 第43巻, pp275-280, 1999
- 8) 駒井克昭, 福岡捷二, 渡邊明英, 大本泰久: 樹木群を有する複断面水路流れ構造と解析, 土木学会中国支部第50回研究発表会発表概要集, pp.217-218, 1999 (2000.10.2受付)