

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過程

GROWTH OF TURBULENT FLOW IN A COMPOUND OPEN CHANNEL
WHERE VEGETATION DENSITY CHANGES
IN THE DOWNSTREAM DIRECTION

駒井克昭¹・福岡捷二²・渡辺明英³・大本泰久⁴

Katsuaki KOMAI, Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, and Yasuhisa OMOTO

1 学生員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

2 フェロー会員 Ph. D. 工博 広島大学教授 工学部第4類 (建設系) (同上)

3 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第4類 (建設系) (同上)

4 正会員 日本工営株式会社 (〒980-0021 仙台市青葉区中央二丁目2番6号)

A turbulent velocity field was measured in a vegetated compound open channel flow where vegetation density changed abruptly from low to high and high to low in the downstream direction. The changing process of mean velocity, secondary currents and Reynolds stress fields were explained with three dimensional mixing structure caused by large horizontal eddies. As a result, three dimensional structure of turbulent flow, and relation between mean velocity field and turbulent structure were clarified experimentally in an open channel flow with abrupt change in the vegetation density in the downstream direction.

Key Words : compound open channel, vegetation, large horizontal eddy, Reynolds stress
secondary current

1. 序論

河道の水際には柳などの植生が育ちやすい。複断面河道では低水路河岸に連続的に繁茂した樹木群が多くみられる。樹木群の連続性と広がりには生態学的に重要な役割を果たすと認められているが、植生の繁茂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。したがって、河川の管理や洪水対策、環境保全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、それを反映することが重要である。

低水路河岸に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⁾。福岡・渡辺ら²⁾は、この流れ場の平面構造を明らかにしている。また、実河川では河道内の樹木群は多様な繁茂形態を有しており、それについての検討も必要である。辻本・北村ら³⁾、富永・長尾ら⁴⁾は樹木群密度や樹木群の配置が流れ場に及ぼす影響を検討している。

樹木群のある複断面河道の解析については、福岡・藤

田ら⁵⁾の境界混合係数を用いた準2次元解析法が実用化されている。平面2次元解析については灘岡・八木⁶⁾、福岡・渡辺ら²⁾の研究があり、福岡・渡辺ら⁷⁾は利根川の実洪水においても樹木群による大規模平面渦と流れ場の平面流況の再現ができることを示している。しかし、樹木群のある河道における大規模平面渦と平均流速場を3次元的に精度良く表現できる数値モデルは未だ開発されていない。著者ら⁸⁾はスペクトル法を用いた3次元数値モデルを用いて、樹木群のある直線複断面流れの解析を試みているが実験結果を説明できる段階には至っていない。

このように、樹木群を有する複断面河道の平面的な流れ場については実験的、解析的に明らかにされているが、流れ場の3次元構造は今なお十分明らかになっていない。また、実河川で一般的な河岸沿い流下方向に樹木群の繁茂条件が変化する場合について流れの構造の変化過程の解明は不十分である。このように、樹木群のある流れ場の3次元構造については今なお実験的にも解析的にも未解明な部分は多く残されている。

本論文では、低水路河岸に樹木群が繁茂する複断面河道流れの3次元構造とその変化過程を明らかにするため、

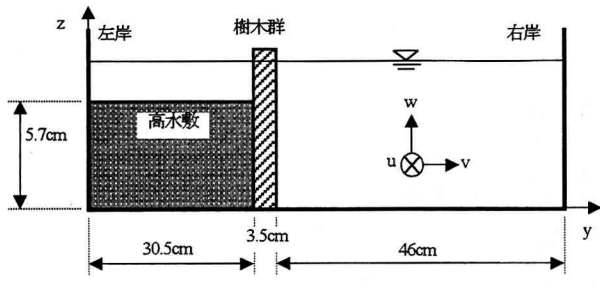


図-1 実験水路の断面図

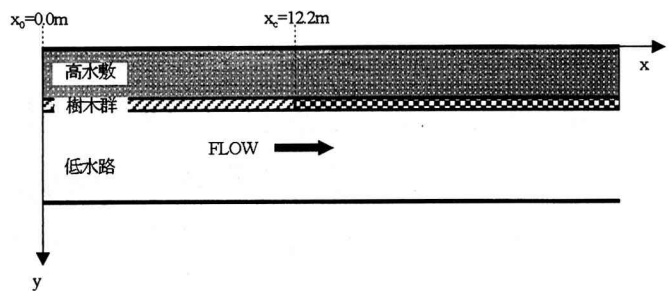


図-2 実験水路の平面図

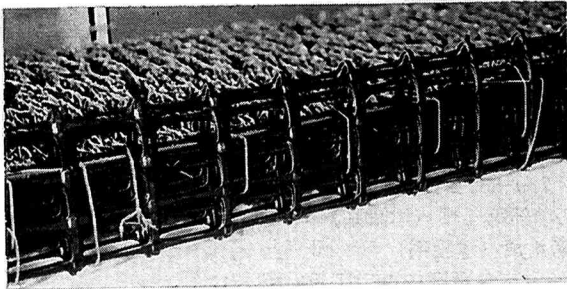


写真-1 粗な樹木群模型 (K=1.74m/s)

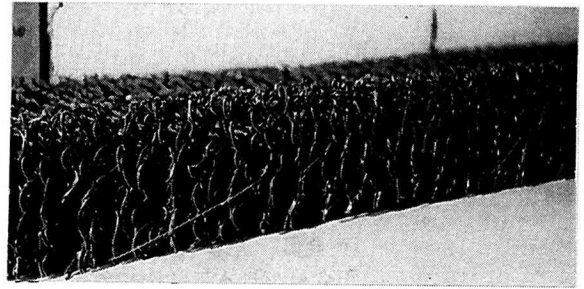


写真-2 密な樹木群模型 (K=0.45m/s)

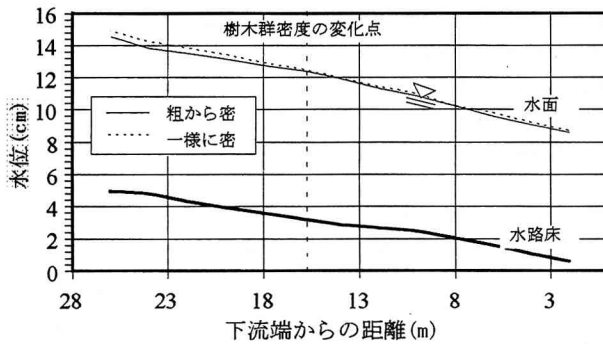


図-3 縦断水位

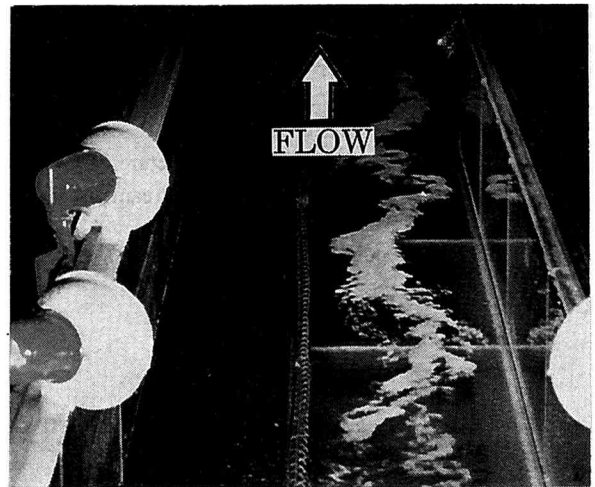


写真-3 流れの可視化の様子

樹木群密度が流下方向に「粗から密」に変化する場合と「密から粗」に変化する場合の2ケースについて実験的検討を行った。本文ではまず、「粗から密」の場合の流れ場の3次元構造とその変化過程について述べ、つぎに「密から粗」の場合の変化過程について前者との相違点を検討する。

2. 実験方法

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の片側複断面の直線水路である。水路勾配は1/500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して配置している。

実験は、樹木群密度が流下方向に粗から密に変化する場合(case1)と密から粗に変化する場合(case2)の2ケースを行った。樹木群密度は2ケースとも上流端から12.2mの断面で変化している。実験に用いた樹木群模型を写真-1, 2に示す。異なる2種類の樹木群模型の透過性

は、透過係数 K で表すことができる。透過係数 K は等流状態において $v=Ki_e^{1/2}$ で定義され、 v : 樹木群内の流速、 i_e : エネルギー勾配である。粗な樹木群模型では $K=1.74\text{m/s}$ 、密な樹木群模型では $K=0.45\text{m/s}$ である。

実験は流量を23.01/sとし、下流端から2.0mでの水深は7.8cmに保たれた。以上の条件で水深は9.2~8.2cm程度であり、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、LDV (レーザー流速計) を用いてサンプリング周波数100Hzで3次元流速変動を測定した。また、二次流はL型電磁流速計を用いてサンプリング周波数20Hzで測定した。水位変動は容量式波高計を用いてサンプリング周波数30Hzで測定した。

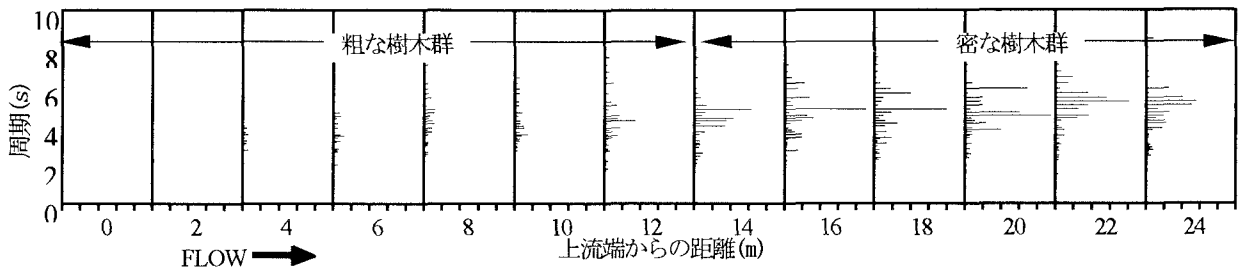


図-4 水位変動スペクトルの縦断変化

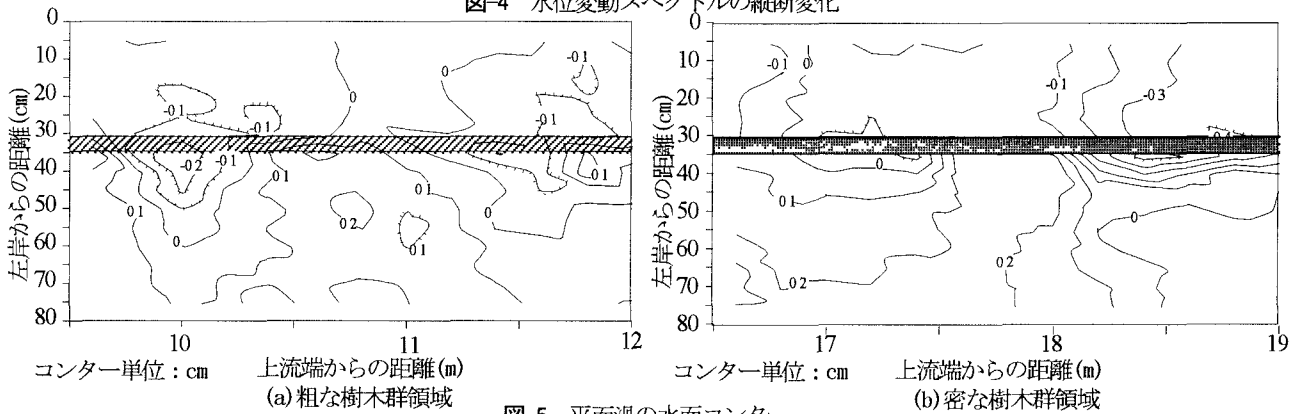


図-5 平面渦の水面コンター
密な樹木群

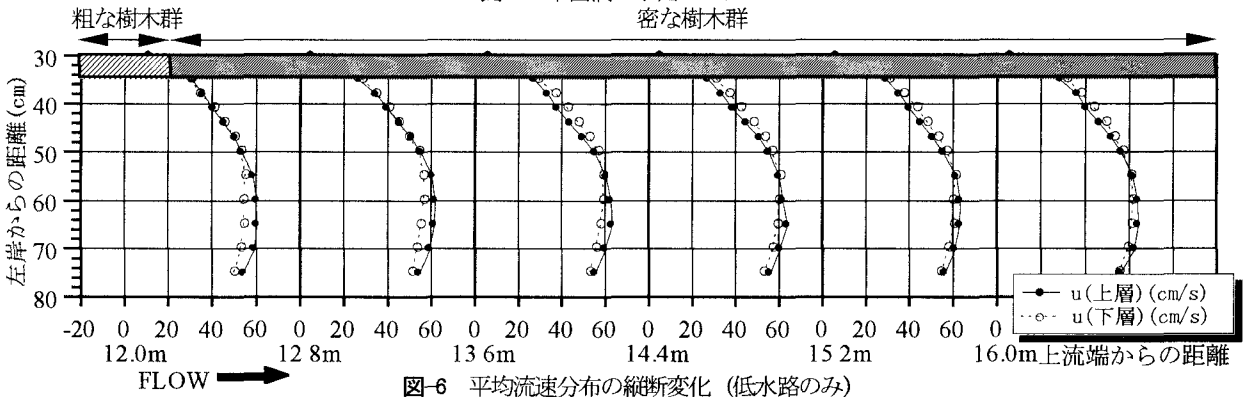


図-6 平均流速分布の縦断変化 (低水路のみ)

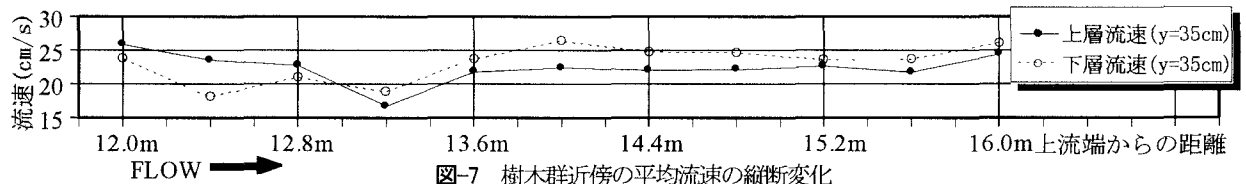


図-7 樹木群近傍の平均流速の縦断変化

3. 実験結果

(1) 粗から密に変化する場合の変化過程 (case1)

実験での縦断水位を図-3に示す。比較のために、密な樹木群を縦断的に一様に設置した実験ケースの値もプロットしている。この結果から、上流部の粗な樹木群領域では密なケースに比べて水位が低く、粗な樹木群領域は密な樹木群領域に比して流水抵抗が小さいことが分かる。

低水路河岸に樹木群のある直線的な複断面河道では流れ場が周期的に変動する大規模平面渦が発生する¹⁾²⁾³⁾。写真-3は実験水路にアルミ粉を流したときの写真である。平面渦により流れが蛇行している様子が可視化されている。このような大規模平面渦による水位変動のシグナル

をFFTによりスペクトル解析して求めた水位変動スペクトルの縦断変化を図-4に示す。図-4では上流の粗な樹木群領域で弱いスペクトルのピークがみられ、さらに樹木群密度が粗から密に変化する断面（上流端から12.2m）より下流において徐々に5sec~6sec周期のエネルギー Spektrum が卓越していく様子がとらえられている。このことより、密な樹木群領域では強い平面渦が発生し、流れ場の変動が大きくなることが分かる。また上流部の粗な樹木群領域で発生した弱い平面渦は、樹木群密度が変化してもすぐには変化せず、徐々に強い平面渦に遷移していくといえる。

粗な樹木群領域（上流端から9.5m-12.0m）と密な樹木群領域（上流端から16.5m-19.0m）の2区間において波高計を2台用いた水位変動の条件付きサンプリングを行い、条件付き抽出アンサンブル平均法により得られた平

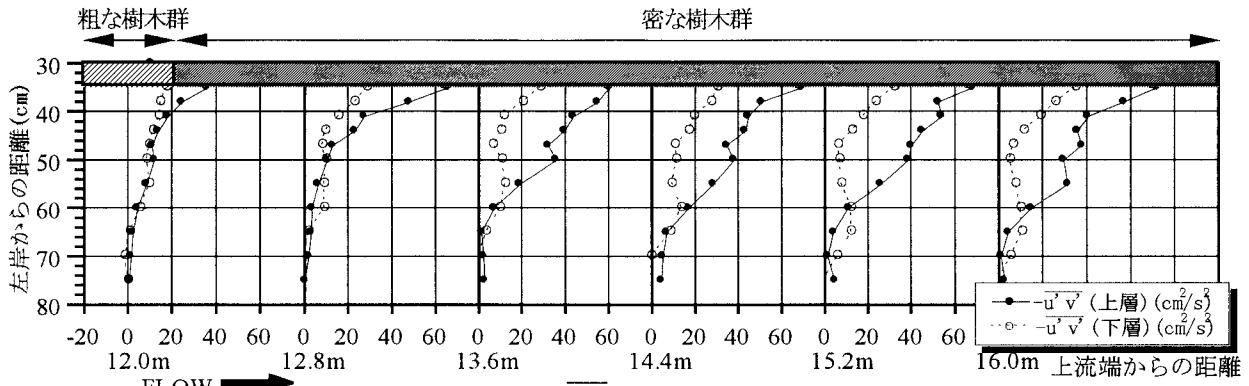


図-8 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ 分布の縦断変化 (低水路のみ)

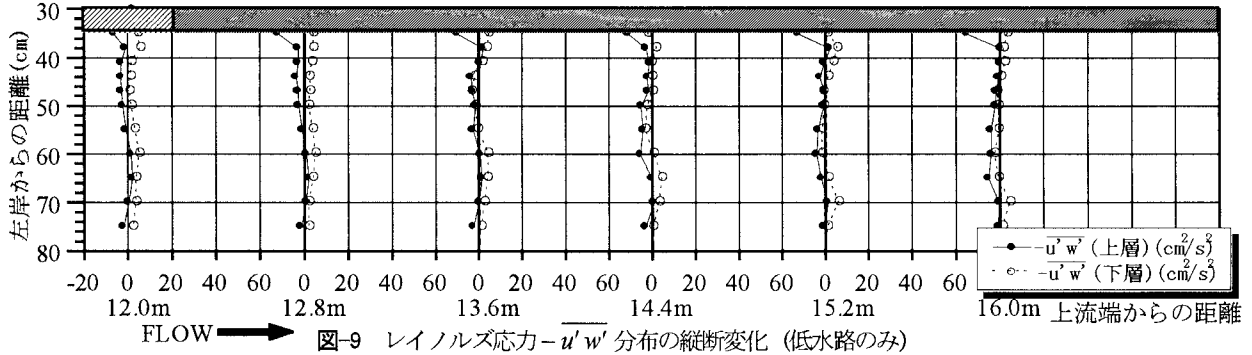


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布の縦断変化 (低水路のみ)

面渦の水面コンターを図-5に示す。粗な樹木群領域と比較して密な樹木群領域では平面渦による水面変動が高水敷にまで広がり、樹木群付近には大きな水面勾配が発生している。

図-6は低水路内の平均流速 u 、図-7は樹木群近傍の平均流速の縦断変化を示す。図-8, 9はそれぞれレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ 、 $-\overline{u'w'}$ の横断分布の縦断的な変化を示す。流れ場の特性は高水敷高さの上層と下層で異なるため、ここでは上層と下層で分けて鉛直平均した値を用いている。

図-6の平均流速分布では、各断面ともに樹木群付近の流速が小さく、樹木群の抵抗が周辺の流れを大きく減速している。特に下流部の密な樹木群領域では、下層の流れが上層より速くなっていることが特徴的である。

しかし、そのような流速分布は樹木群密度の変化直後にはみられず、樹木群密度の変化断面から1.6m下流（上流端から13.6m）より現れてくる。特に樹木群近傍の平均流速は樹木群密度の変化直後で大きく減速されていることが図-7から分かる。これは図-8の12.8mの断面でレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ が増大していることに対応する。減速された平均流速は2mほど下流した14.0mの断面でほぼ回復するが、樹木群密度の変化前後で上層と下層の流速の速さ関係は逆転しており、流れ場の鉛直構造が変化したことが分かる。これは平面渦による水平混合が上層で発達しやすく、下層では発達し得ないため、図-8のように上層において特に大きなレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ が生じるためである。

図-9に示すレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ 分布では、樹木群近傍において負の $-\overline{u'w'}$ が発生している。これは上層での水平混合により水面付近が減速された際、鉛直方向

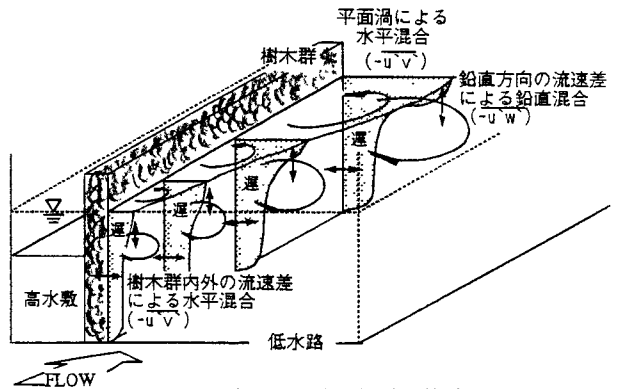


図-10 流れの3次元構造の模式図

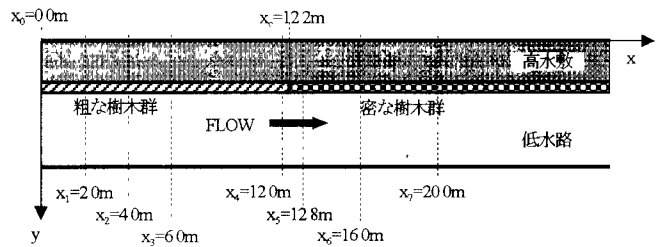


図-11 二次流の測定断面

に流速差が発生し、それに伴い運動量が鉛直方向に輸送されることを示している。密な樹木群領域では、樹木群近傍のみならず低水路中央付近にも負の $-\overline{u'w'}$ がみられ、平面渦の規模の増大により鉛直混合が活発になることを裏付けている。

以上より、樹木群密度が流下方向に粗から密に変化する場合、樹木群境界に生じるレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ は増大するが平均流速分布はすぐに変化せず、徐々に樹木群密度に応じた新たな平均流速分布へと遷移していく。この様子を図-10に模式図として表す。

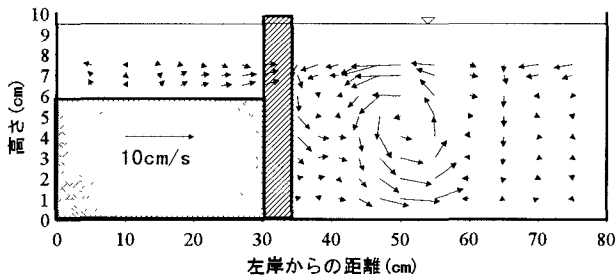


図-12 二次流ベクトル ($x_1=2.0\text{m}$)

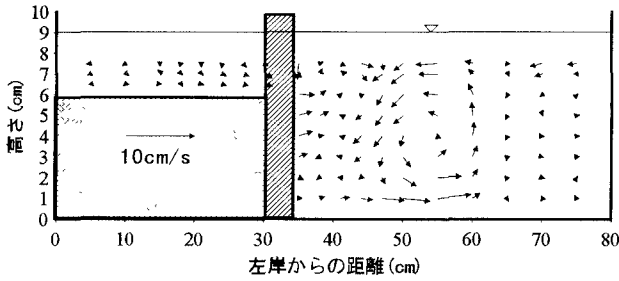


図-13 二次流ベクトル ($x_2=4.0\text{m}$)

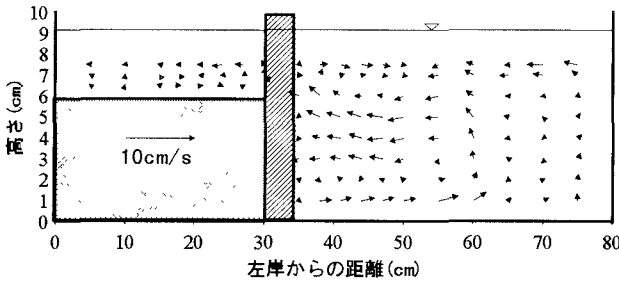


図-14 二次流ベクトル ($x_3=6.0\text{m}$)

次にcase1の二次流の縦断変化を述べる。図-11に二次流の測定断面を示した。

まず、上流端に最も近い $x_1=2.0\text{m}$ (図-12) では、高水敷と低水路の粗度の違いによる流量配分が未調整なため、高水敷から低水路への流入が起こる。それとともに、流入部の攪乱と樹木群による急激な抵抗により強い反時計回りの二次流セルが発生している。この断面では水位変動スペクトル (図-4) を見れば分かるように周期的な変動は見られず、平面渦は存在しない。

次の断面 $x_2=4.0\text{m}$ (図-13) では、樹木群周辺の水面付近で二次流セルが弱められている。

さらに流下した $x_3=6.0\text{m}$ (図-14) の断面では、左岸方向への流れとそれを上下から挟むように、右岸方向への弱い流れが水面付近と底面付近に発生している。これらの流れは、高水敷高さより上層では時計回り、下層では反時計回りの2つの横長な二次流セルを構成している。この断面では、水位変動スペクトル (図-4) は明確になりつつあり、平面渦は発達段階にある。

次に、粗な樹木群領域における最下流部 $x_4=12.0\text{m}$ (図-15) では、上述の2つの二次流セルに加え、低水路右岸寄りに二次流セルが発生している。この断面では、弱い変動ながらも粗な樹木群領域において十分発達した平面渦が現れることが水位変動スペクトル (図-4) から見て取れる。

$x_4=12.2\text{m}$ では、樹木群密度が粗から密に変化するため、

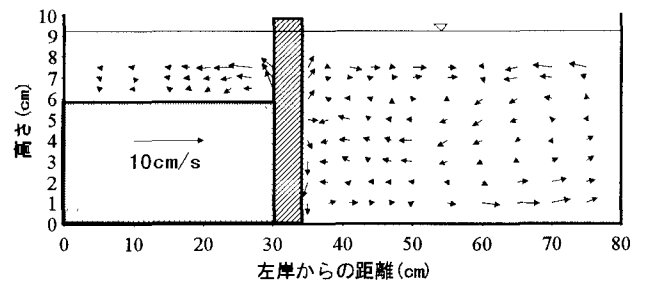


図-15 二次流ベクトル ($x_4=12.0\text{m}$)

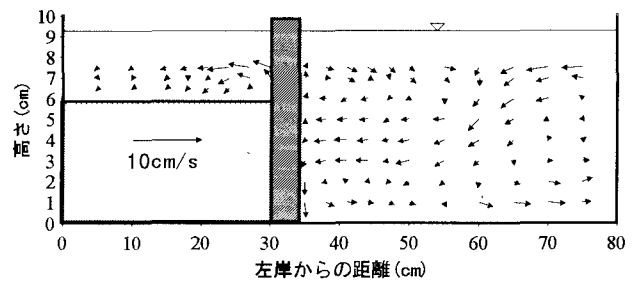


図-16 二次流ベクトル ($x_5=12.8\text{m}$)

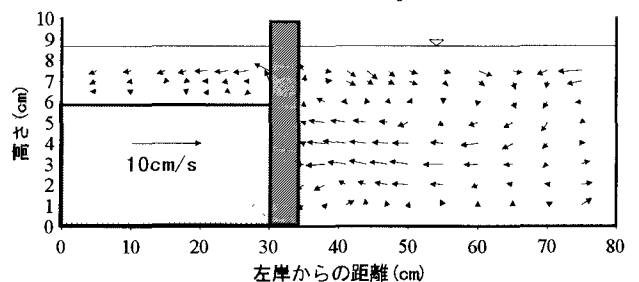


図-17 二次流ベクトル ($x_6=16.0\text{m}$)

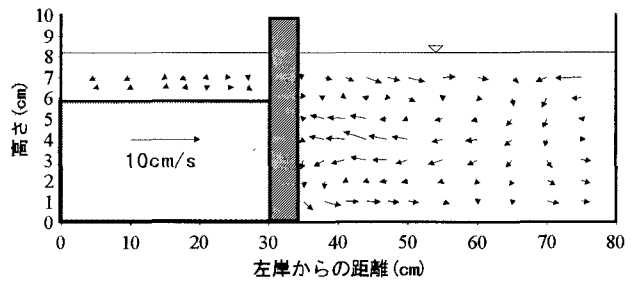


図-18 二次流ベクトル ($x_7=20.0\text{m}$)

それより下流では流れ場の遷移領域となる。

その樹木群密度の変化断面からわざわざに流下した $x_5=12.8\text{m}$ (図-16) では、低水路中央の下降流が若干強く表れているものの、粗な樹木群領域の二次流と似た特徴を示している。

密な樹木群領域で3.8m流下した $x_6=16.0\text{m}$ (図-17) では、樹木群周辺にあった水面付近の時計回りの二次流セルが拡大し、強く大きな二次流セルに発達している。このため、粗な樹木群領域で存在していた低水路右岸側にあった反時計回りの二次流セルが水路右岸隅に押しつぶされた格好になっている。

密な樹木群領域で十分流下した $x_7=20.0\text{m}$ (図-18) では、概ね $x_6=16.0\text{m}$ (図-17) と同様の二次流がみられ、水位変動スペクトル (図-4) から、流れ場は概ね変化しきっていると見える。

以上より、樹木群密度が流下方向に粗から密に変化する

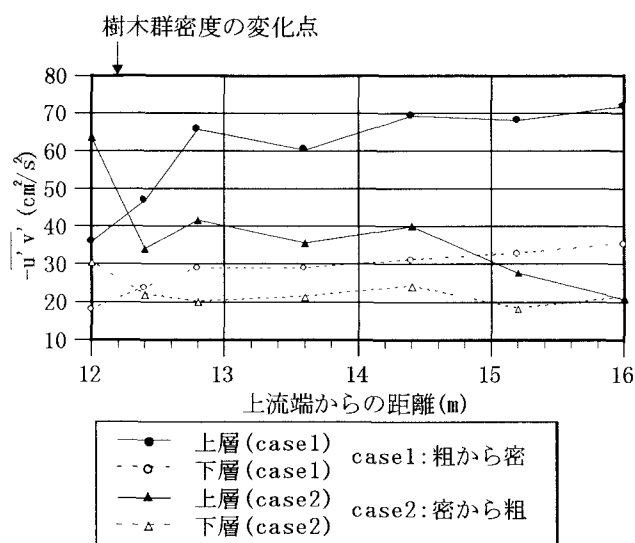


図-19 低水路側の樹木群境界面(y=35.0cm)に作用するレイノルズ応力 $-u'v'$ の縦断的な変化

ると、樹木群周辺の水面付近で現れる時計回りの二次流セルが大きくなることが分かる。この二次流セルの発達には、水面付近でのレイノルズ応力が流下に伴って増大することにより、平均流速が流下方向に変化していく(図-8) ことに関係している。つまり、この二次流セルは低水路河岸に樹木群がある複断面流れの特徴的なものであるといえる。

また、樹木群密度の変化断面の前後 $x_6=16.0\text{m}$ と $x_7=20.0\text{m}$ (図-17, 18)では二次流の大きな変化は見られない。

(2) 密から粗に変化する場合の変化過程(case2)

樹木群密度が流下方向に粗から密に変化する場合(case1)、樹木群領域と主流域の流速差が増大するため、平面渦は強くなる。それに対し、樹木群密度が密から粗に変化する場合(case2)、樹木群領域と主流域の流速差は減少するため、平面渦は弱くなる。

そこで両ケースの水平混合の強さを代表するものとして、低水路側の樹木群境界面(y=35.0cm)に作用するレイノルズ応力 $-u'v'$ の縦断変化を図-19に示す。プロットした値は、高水敷高さで上層・下層に分けて鉛直平均したレイノルズ応力 $-u'v'$ を示している。

図-19では、両ケースともに上層の $-u'v'$ の縦断変化は大きいが下層の変化は小さく、どちらのケースにおいても水平混合の強さの変化は水面付近に顕著に表れるといえる。これは、低水路河岸の樹木群によって水面付近での平面渦が卓越し、流れ場の3次元性が強まることに起因している。

縦断変化の大きい上層の $-u'v'$ を比較すると、case1では主に12.0~12.8mの区間で変化しているのに対し、case2では12.0~12.4mで集中して変化している。このようにcase2で $-u'v'$ の変化距離が短い原因としては、粗な樹木群は透過性が大きいため、流速差が解消されやすいことが挙げられる。

4. 結論

本研究では、低水路河岸に沿って連続的に樹木群が繁茂している複断面河道において、樹木群密度が流下方向に変化する水理模型実験を行い、流れ場の3次元構造とその変化過程を明らかにした。

低水路河岸に樹木群が繁茂する複断面河道では、強い大規模平面渦が発生することは従来から知られている。さらに本研究では、大規模平面渦が強まることにより、特に高水敷高さより上層での水平混合が卓越するため、水面付近での平均流が大きく減速されることを明らかにした。また、それに付随してレイノルズ応力 $-u'w'$ による鉛直混合が活発な流れ場となることも明らかにした。横断面内の流れとしては、樹木群周辺の水面付近において時計回りの二次流セルが発達することが特徴である。

また、樹木群境界に作用するレイノルズ応力 $-u'v'$ は樹木群密度の変化に素早く対応して変化するが、樹木群密度が流下方向に増大する場合に比べ減少する場合のほうが速やかに変化する。また、樹木群境界に作用するレイノルズ応力 $-u'v'$ の作用が流れ場全体に波及し、平均流速場が変化するには遷移区間を要する。

以上のように、樹木群の透過性が縦断的に変化する複断面河道流れは3次的に複雑である。また、非線形性の強い現象であり、様々な繁茂形態の樹木群を有する流れの予測を行うためにも数値解析的な手段が有効である。樹木群特性や水理条件の違いによる流れ場の遷移区間の長さや抵抗の評価が可能な精度の高い3次元数値モデルの開発が課題である。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告第180号-3, 1990.
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英, 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, 土木学会論文集No. 491/II-27, pp. 41-50, 1994.
- 3) 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.
- 4) 富永晃宏, 長尾正志, 劉建, 鈴木徹也: 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.
- 5) 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, pp. 17-24, 1992.
- 6) 難岡和夫, 八木宏: SDS&2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集No. 473/II-24, pp. 35-44, 1993.
- 7) 福岡捷二, 渡辺明英, 上坂恒雄, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造—利根川新川通昭和56年8月洪水—, 土木学会論文集No. 509/II-30, pp. 97-88, 1995. 2
- 8) 駒井克昭, 福岡捷二, 渡辺明英, 大本泰久: 樹木群を有する複断面開水路の流れ構造と解析, 土木学会中国支部第50回研究発表会発表概要集, pp. 217-218, 1998.

(1998. 9. 30受付)