

高木群落の鉛直構造による流速分布の遷移に関する基礎的研究

Velocity Profile Variation by Vertical Structure of Arboreal Vegetation in Rivers

池田裕一*・岩松優二郎**

Hirokazu IKEDA and Yujiro IWAMATSU

*正会員 工博 宇都宮大学大学院准教授 工学研究科 学際先端システム学専攻 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

**学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Experimental study was performed on flow structure variation with arboreal vegetation composed of stem and crown. The stem part was formed with circular cylinders (1cm diameter, 7cm height) arranged at 10cm intervals on the channel bed. The crown part was modeled with coarse-meshed material, which was set on the top of the stem part. It is found that the difference of discharge and depth does not cause velocity difference in the crown, but it causes difference in the stem part. This is because of the difference of flow resistance. In the upstream end of the vegetation, the velocity profile is immediately shifted from that of the log-law to that of equilibrium state in vegetation, which generates remarkable downward flow. In the downstream end of the vegetation, a separation zone is formed behind the crown, which generates reverse flow along the water surface and increases Reynolds stress remarkably.

Key Words : arboreal vegetation, stem, crown, velocity profile, Reynolds stress

1. はじめに

近年、環境に配慮した河川整備を行うことはもはや当然のことであり、生態系保全や河川景観の観点から、河道およびその周辺の植生を保全する動きが進んでいる。一方で、植生による流水抵抗は河川の流れや土砂輸送に多大な影響を及ぼし、河川地形の形成にも大きな役割を果たしていることもよく知られている。それゆえにこれまで、現地調査や室内実験、数値シミュレーション等により、植生水利に関する研究成果が数多く報告されてきた¹⁾²⁾。しかしそのほとんどが、植生を鉛直方向に一樣な抵抗体あるいは直立円柱として扱うにとどまっている。

河道植生の中でも流水抵抗の大きな木本類には、根元から枝分かれしている灌木類や樹冠と幹部が明確な高木類などがあり、抵抗特性はもはや一樣であるとはいえない。今後、高精度できめ細かな河道の整備や維持管理を進めていくには、こうした抵抗特性の非一樣性を考慮していく必要がある。とはいえ、この種の研究は緒についたばかりである。

たとえば岡部ら^{3)~6)}は、灌木状および高木状の抵抗体を実験水路に設置して、流速や乱れの鉛直分布を検討し、掃流砂量や浮遊砂量をも調べている。そのなか

で、抵抗特性の非一樣性から生じる *dispersive flux* の影響を考慮することにより、数値解析の適合性を高めることができることを示している。ただし、このような検討は現段階では、樹木 1 本の周りの空間平均流速が横断方向および縦断方向に一樣な場合に限られている。今後はもっと複雑な場合での流況を検討し、流れ構造への理解を深めるとともに、その結果を実務へ活用していくべきであろう。

たとえば高木群落の上流端周辺や下流端周辺では、流れの鉛直分布が縦断方向に大きく変化するので、その遷移過程を検討することは重要である。この種の研究は高木群落については行われていないが、流れの速い幹部と遅い樹冠部との相互作用という観点からすると、平面 2 次元流における自由せん断層⁷⁾⁸⁾や水没植生上の流れ⁹⁾の遷移過程と類似のものと考えられることができる。

しかし、前者は自由せん断層の幅に対して水路幅が大きく、自由せん断層の両側の流速は主として底面摩擦と植生抵抗により決まる。これに対して高木群落の場合は、幹・樹冠境界でのせん断層の厚さに比べて水深がさほど大きくないので、幹部の流れには河床摩擦と植生抵抗だけでなく、幹・樹冠境界せん断層が及ぼす影響は少なくないと考えられる。

また後者については、ある流量を流す場合、抵抗の

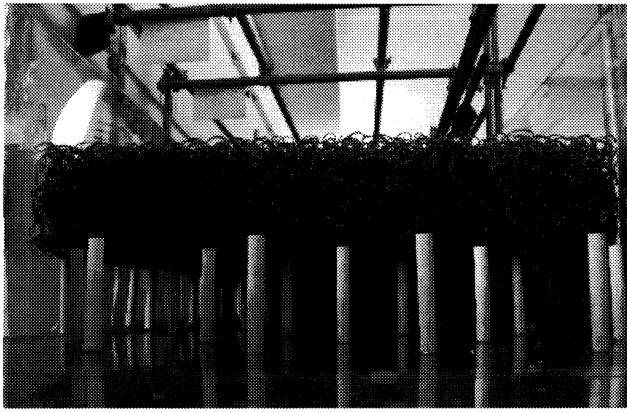


写真-1 植生模型

大きな下層の植生層で流しきれない分を、上層の自由表面流で流すことができるように水深と流速の両方が決まるものといえる。これに対して高木群落の場合、上層に抵抗の大きな樹冠が配置されており、抵抗の小さい幹部の高さはあらかじめ固定されている。したがって、高木が水没しない限り、ある流量を流すためには、下層の流速の寄与が極めて大きいと推測できる。

以上のように、高木群落の上流端や下流端の周辺の流れは、平面2次元流や水没植生上の流れから類推できる部分もあるが、状況の異なる点もあり、それを実証的に検討した例はほとんど見られない。そこで本研究では、樹冠と幹部とで抵抗特性が大きく異なる高木群落の模型を実験水路に設置し、一様な群落内だけでなく、群落の上流端周辺および下流端周辺における流況を実験的に検討する。そして流れ場の鉛直構造が状況に応じてどのように遷移していくか、考察を加えることにする。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置と植生模型

実験には、全長 7m、水路幅 50cm、高さ 30cm の塩ビ製の直線水路を用いた。水路の上流端には流入を滑らかにするためベルマウスを設置し、下流端には水深調節のための堰を設置した。

植生模型は高木の鉛直構造を考慮して樹冠部と幹部に分けて写真-1 に示すように製作した。まず幹部として、直径 1cm 長さ 7cm の木製円柱を 10cm 間隔で千鳥状に配置した。その上に樹冠部として、幅 50cm、高さ 10cm のプラスチック製透水材（商品名ヘチマロン）を取り付けた。この透水材には実験時に流速計を容易に差し込むことができるように、測定地点に切り込みを入れた。

2.2 実験条件と実験方法

本研究では、一様な群落内、群落の上流端周辺およ

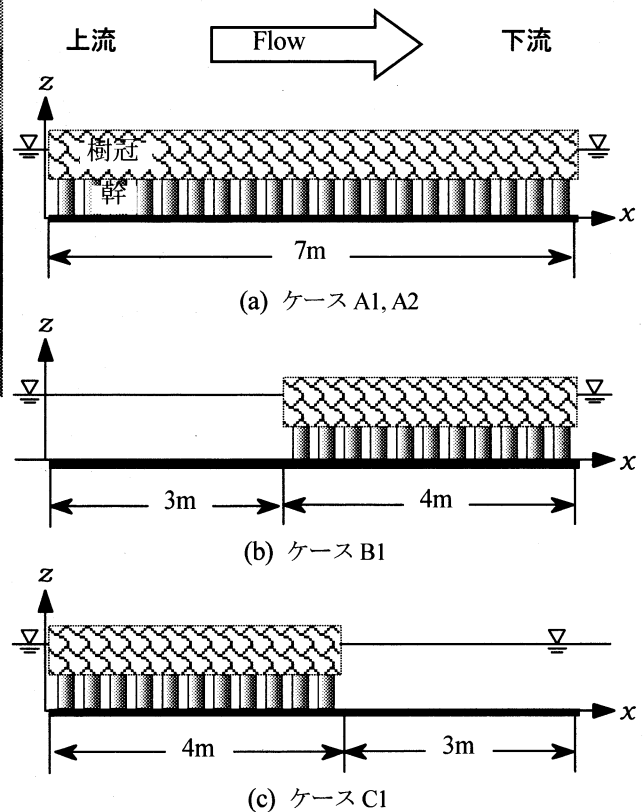


図-1 植生模型配置図

び下流端周辺の3通りの状況について検討する。その各ケースの植生模型の配置を図-1 に、実験条件を表-1 に示す。図-1 は水路の縦断面を模式的に示したもので、横断方向には水路全幅にわたり植生を配置した。また、上流端から流下方向に x 軸、水路床から鉛直上方に z 軸をとることにする。

ケース A1 と A2 では、高木模型を水路全体に設置し、流況が縦断方向に変化しない場合を検討する。2つのケースを比較して、流量や水深により流速分布がどのように異なるか検討する。実験に際しては、上流端より $x=4\sim 6\text{m}$ の区間で水深がほぼ一様となっているのを確かめてから、流速の鉛直分布を測定した。

ケース B1 は、植生を $x=3\sim 7\text{m}$ の区間に配置し、群落の上流端周辺の流況を調べるものである。またケース C1 は、植生を $x=0\sim 4\text{m}$ の区間に配置し、群落の下流端周辺の流況を調べるものである。ケース B1、C1 とともに流量・水深がケース A1 とほぼ同じになるようにした。水深は縦断方向にほとんど変化しなかったため、その平均値を表-1 に記した。

表-1 の幹・樹冠における代表流速は流速分布がほぼ平衡な地点での平均流速である。また非植生域の底面摩擦速度は、植生域から最も離れた測線すなわちケース B1 では上流側の $x=165\text{cm}$ 、ケース C1 では下流側の $x=535\text{cm}$ において、底面付近の流速分布に対数則を当てはめて求めたものである。

表-1 実験条件

ケース名	河床勾配	流量 (cm ³ /s)	水深 (cm)	平均流速 (cm/s)	非植生域の底面摩擦速度 (cm/s)	幹部の代表流速 (cm/s)	樹冠部の代表流速 (cm/s)
A1	1/1000	2270	14.42	3.15	—	5.70	0.895
A2	1/1000	1280	9.75	2.63	—	3.45	0.877
B1	1/1000	2260	14.02	3.22	0.199	5.54	0.856
C1	1/1000	2150	13.49	3.19	0.222	5.55	0.808

表-2 相似性の検討

	関根ら ¹¹⁾	福岡ら ¹²⁾	井上・池田 ¹³⁾		岡部ら ⁵⁾		本研究	
			疎な群落	密な群落	幹部	樹冠	幹部	樹冠
水路勾配	1/100	1/3700	1/700		1/510		1/1000	
代表水深(m)	0.0975	5.5	5.0		0.06		0.14	
代表流速(m/s)	0.26	2.41	4.4		0.45		0.42	
樹高(m)	0.18	---	---		0.035		0.17	
樹冠高(m)	---	---	---		0.01		0.07	
植生直径(m)	0.005	---	0.2	0.1	0.004	---	0.01	---
植生間隔(m)	0.02	---	8.58	1.25	0.12		0.1	
透過係数(m/s)	1.25	18.3	120.1	17.5	8.40	7.45	4.43	0.38
固有浸透流速(m/s)	0.13	0.30	4.54	0.66	0.37	0.33	0.14	0.012
フルード数	0.27	0.33	0.63		0.59		0.36	
無次元固有浸透流速	0.482	0.125	1.032	0.150	0.827	0.733	0.333	0.0286
樹冠に対する幹部の透過係数の比	---	---	6.9		1.5		11.7	
幹レイノルズ数	$6.3 \cdot 10^2$	---	$9.1 \cdot 10^5$	$6.6 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^3$	---	$1.4 \cdot 10^3$	---

全ケースにおいて流速測定には電磁流速計を用い、水路床から5mmごとにx方向およびz方向の流速成分（それぞれ u 、 w とする）を測定した。各測定点でのサンプリング周波数は100Hzで、1分間の測定結果を統計処理した。

また群落内では、1本の樹木周辺の流速場は基本的に不均一なので、1本の鉛直測線での測定結果のみをもって、その地点での代表的な鉛直分布とすることはできない。そこで、樹木1本の影響領域(10cm×10cm)において、ある決められた配置¹⁰⁾で鉛直測線4本を取り、各測線の同じ高さでの測定結果を重み付き平均することにより、空間平均値を求めることにした（詳細は参考文献10を参照のこと）。

2.3 相似性の検討

本研究において設定した実験条件および高木模型の諸元は、実際に現地で現れうるものと対応しているのか、チェックしておく必要がある。相似性を検討するパラメーターの一つとしてフルード数があげられる。これは重力に対する慣性力の比で、

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gH_0}} \quad (1)$$

と定義される。ここに g は重力加速度、 H_0 、 U_0 は代表水深および代表流速である。 U_0 は植生を考慮しない場合の H_0 に対応する等流流速と考える。

ただしこれだけでは植生の影響を考慮することができないので、もう一つのパラメーターとして、非植生域に対する植生域の代表流速の比を次式のように定義する（無次元固有浸透流速とよぶ）。

$$\chi = \frac{U_v}{U_0} \quad (2)$$

ここに U_v は植生抵抗と重力のみとの釣り合いから決まる流速（固有浸透流速²⁾）で、透過係数 k を用いて

$$U_v = k i_0^{1/2} \quad (3)$$

により求められる（ i_0 は河床勾配）。透過係数の値は、直径 d_v 、抗力係数が C_D の円柱が間隔 l で配置された場合であれば、

$$k = \sqrt{\frac{2gl^2}{C_D d_v}} \quad (4)$$

から計算し、その他の場合は実験や観測結果から式(3)などに合うように経験的に求めることになる。抗力係数 C_D の値を評価する際には、レイノルズ数

$$Re = \frac{d_v U_v}{\nu} \quad (5)$$

にも考慮する必要がある。ここに、 ν は動粘性係数である。

表-2 は、本研究における高木模型の諸元や水理条件を、既往の研究と比較したものである。このうち関根ら¹¹⁾、岡部ら⁵⁾は室内実験であり、前者は鉛直構造をもたない円柱を、後者は幹・樹冠構造を有する植生模型を用いている。また福岡ら¹²⁾は利根川において対象とする樹木群が鉛直構造をもたないものとして、解析を進めたものである。井上・池田¹³⁾は鬼怒川での現地データを扱ったものであり、「疎な群落」とは、幹が太くまばらに繁茂している群落で、「密な群落」とは、細くて比較的密集している群落である。両方とも葉がついていない状況での測定結果で、「密な群落」を樹冠部の参考値とするために掲げた。表-2 中の透過係数は、基本的には文献の値を引用したが、それが明記されていない場合は、流速分布から固有浸透流速を読み取り、式(3)から逆算した。幹レイノルズ数は、幹の直径とその固有浸透流速を用いて式(5)より求め、抗力係数や透過係数を評価する際の参考にした。

表-2 より、本研究におけるフルード数は、他の研究や現地のデータとそう変わらない範囲にあり、幹部の無次元固有浸透流速も同オーダーといえる。一方で、本研究における樹冠の無次元固有浸透流速は、井上・

池田の5分の1程度と同オーダーではあるが、岡部らの20分の1である。ただし岡部らの実験では、幹と樹冠との抵抗特性はさほど異なっておらず、これは幹と樹冠の抵抗特性の違いよりも、樹冠が傾斜した場合の流れの構造に着目したものとといえるので、これと本研究の樹冠部分を比較するのは適当とはいえない。また樹冠に対する幹部の比は、井上・池田が6.9であるのに対して、本研究はその約1.7倍の11.7であり、同オーダーと見なすことができる。井上・池田は葉がついていない場合のものであるが、福岡¹⁴⁾によると、葉がついている場合の樹木の抗力係数は、ついていないものに比べて1.2~2倍程度大きくなる。このことを考慮すれば、葉の有無にかかわらず、本研究の実験条件は、実際に現地で起こり得る範囲内のものであるといえる。

3. 実験結果および考察

3.1 等流状態 (ケース A1, A2)

ケース A1, A2 における流速の x 方向成分 u の鉛直分布を図-2 に示す。 $z=7\text{cm}$ 以上の樹冠部とそれ以下の幹部とで明らかな流速差が生じており、その間に自由せん断層が形成されていることがわかる。

樹冠部の流速は流量・水深によらず約 1cm/s に安定している。この値は、樹冠部の固有浸透流速に近い。一方で、幹部の流速はケースにより異なり、しかも幹部の固有浸透流速とも大きく異なる。すなわち、樹冠部では植生抵抗が大きく、おおよそ固有浸透流速をとるのに対して、幹部では植生抵抗がさほど大きくないので、水路床や樹冠部との摩擦抵抗などの影響が少なくないことがわかる。

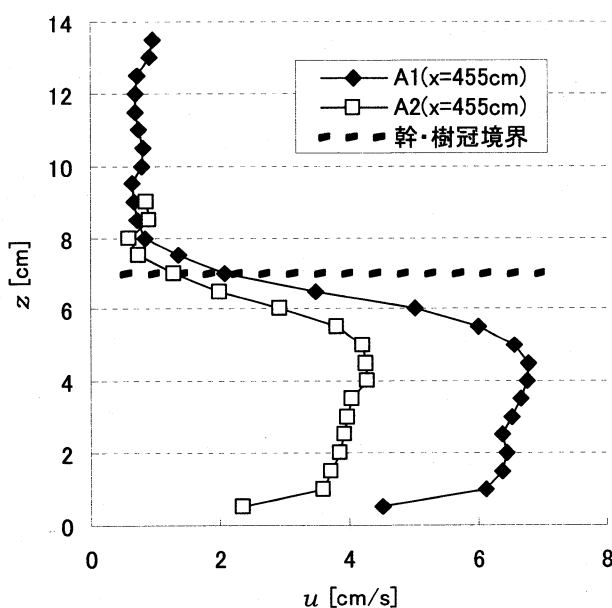


図-2 流下方向流速 (ケース A1, A2)

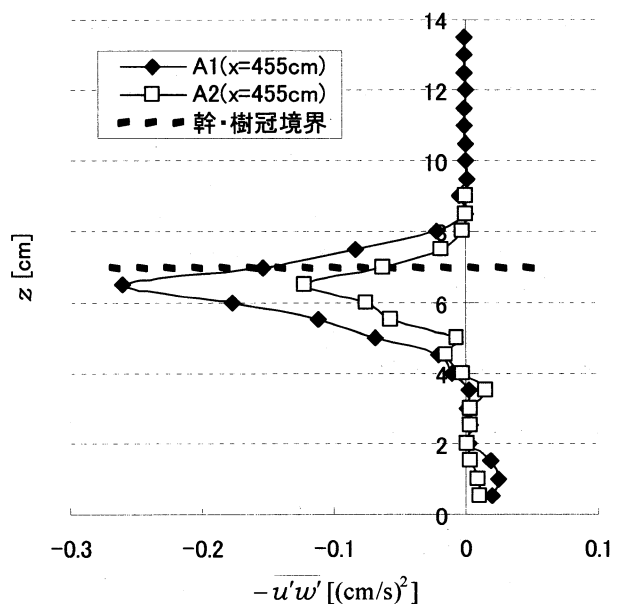


図-3 レイノルズ応力 (ケース A1, A2)

図-3 はレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の鉛直分布を示したものである。まず、底面付近での値をみると、ケース A1 でおおよそ 0.02 (cm/s)^2 である。ケース A1 と流量・水深が同程度のケース B1 における非植生域の底面摩擦速度の値から推測すると、ケース A1 の条件で植生がなければ、レイノルズ応力の値は 0.04 (cm/s)^2 程度であろう。植生がある場合での値は、その半分程度ながらも同オーダーである。このことから幹部の植生抵抗がさほど大きくないことがわかる。一方で樹冠部のレイノルズ応力はほぼゼロで、樹冠部の植生抵抗が極めて大きいことがわかる。

図-3 で特徴的なのは、樹冠と幹部との界面付近で大きな負のピークをとることで、その絶対値は底面での値の 10 倍を超えており、非植生域の底面摩擦速度と比べても 5 倍以上である。このことから樹冠と幹部との自由せん断層が流況に与える影響は極めて大きく、高木群落の鉛直構造を考慮して解析することが重要であることがわかる。

そこで、樹冠と幹部との界面抵抗係数 f_i を算出した結果を図-4 に示す。 f_i は次式により定義される。

$$-\overline{u'w'} \Big|_i = f_i |u_2 - u_1| (u_2 - u_1) \quad (6)$$

ここに u_1 、 u_2 はそれぞれ幹部・樹冠の代表流速、左辺は幹部・樹冠界面付近のレイノルズ応力のピーク値を意味する。石川¹⁴⁾の界面応力の理論式に池田¹⁵⁾の渦動粘性係数の式を適用すれば、開水路の横断方向に形成された自由せん断層の界面抵抗係数 f_i は u_2/u_1 の一意的関数となることがわかる。それを図-4 上に実線で示した。本研究では自由せん断層が鉛直方向に形成されているが、向きの違いはあっても、おおむね良好に説明できるものといえる。

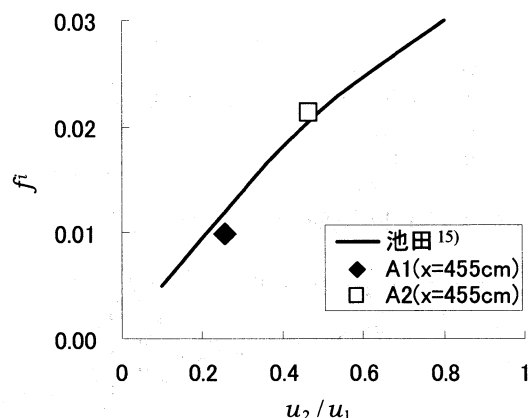


図-4 界面抵抗係数 (ケース A1, A2)

3.2 群落上流端周辺 (ケース B1)

図-5 と図-6 はそれぞれ非植生区間および植生区間における u の鉛直分布の縦断変化を示したものである。ただし比較しやすいように、 $x=300\text{cm}$ の測定結果は両方に載せた。

$x=165\text{cm}$ では一般的な開水路の流速分布であるが、群落に近づくにつれて、樹冠部の水面近くで流速が下がり始め、逆に幹部では中央部で流速が上がり始めているのがわかる。これは、植生区間による堰上げの影響が、流速分布にもこのような形で現れ、流れにくい樹冠から流れやすい幹部へ向かう流れが生じているためと考えられる。このような流速分布の遷移は、水平 2 次元流⁷⁾⁸⁾や水没植生⁹⁾における群落上流側では見られなかったもので、高木群落の上流側に特有の現象である。

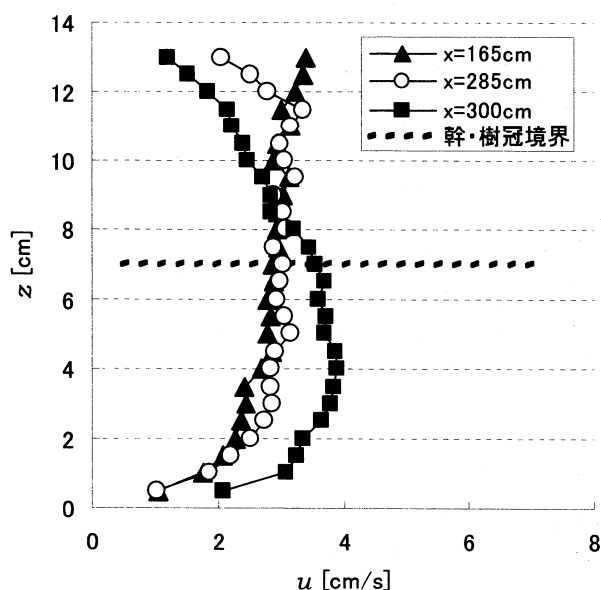


図-5 流下方向流速 (ケース B1 非植生区間)

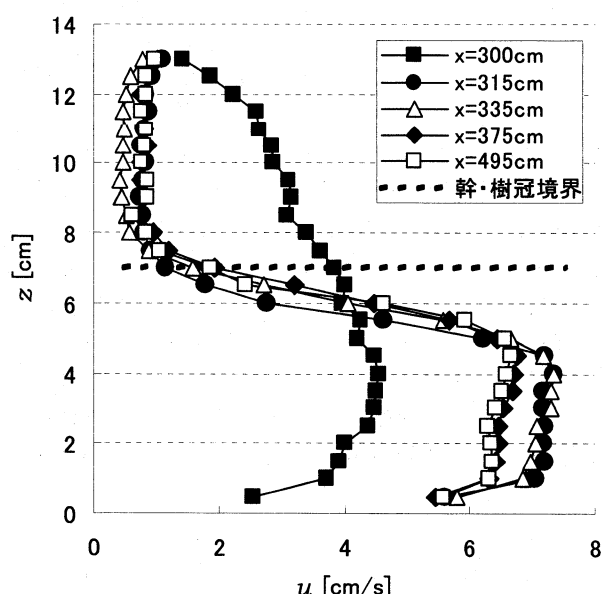


図-6 流下方向流速 (ケース B1 植生区間)

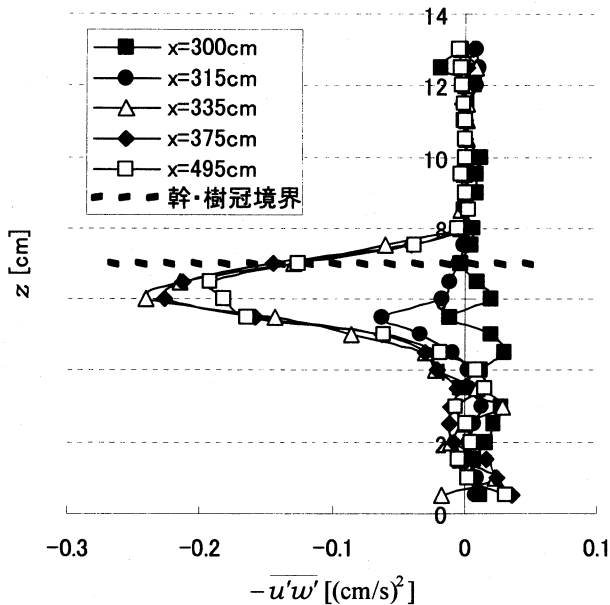


図-7 レイノルズ応力 (ケース B1 植生区間)

そして $x=300\text{cm}$ で植生区間に入ってから $x=315\text{cm}$ までの極めて短い間に、樹冠では一気に減速し、その分だけ幹部の流速が増大して、顕著な自由せん断層が形成される。その後、若干ながら、幹部の底面付近の流速が減少し、その分、樹冠の流速が増加している。また自由せん断層の位置が若干上昇し厚みも増している。 $x=375\text{cm}$ では $x=495\text{cm}$ と同様な流速分布であり、ほぼ平衡状態に達していると考えられる。このように群落上流端からの流速分布の遷移は単調ではなく、幹・樹冠境界の遷移と底面付近の変化の2種類があることがわかる。

実際、平面2次元流における自由せん断層の発達には、せん断層幅の7~8倍程度の流下距離が必要^{7,8)}であり、今回の場合それは25cm程度となる。すなわち $x=335\text{cm}$ までの流速分布の変化は自由せん断層の発達によるものであり、それ以降は底面せん断層によるものといえる。

図-7は植生区間におけるレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の鉛直分布の縦断変化を示したものである。これを見ると $x=315\text{cm}$ では、流速分布にあらだけ顕著な変化を見せていながら、レイノルズ応力はさほどの変化を見せていない。これは、群落上流端での流速の変化が、樹冠と幹部との流水抵抗の相違によるもので、流れやすい幹部に流れが集中する際に下降流が生じ、これにより運動量が幹部に輸送されてきたものと考えられる。その後は群落上流端で形成された自由せん断層が発達して、 $x=495\text{cm}$ の平衡状態では、ケース A1 と同程度のピーク値を持つに至るのがわかる。

図-8は、樹冠と幹部との界面抵抗係数 f_i の縦断変化を示したものである。群落上流端ではすでに樹冠と幹部との流速差は顕著ではあるが、レイノルズ応力が発

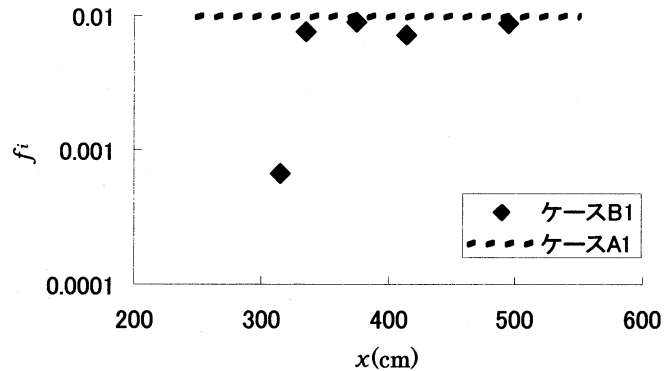


図-8 界面抵抗係数 (ケース B1)

現していないために f_i の値は極端に小さい。それより下流では、急速に増加して、ケース A1 で見られた値と同程度のレベルに漸近している。

3.3 群落下流端周辺 (ケース C1)

図-9~12にそれぞれ植生区間および非植生区間における流速 u およびレイノルズ応力の鉛直分布の縦断変化を示す。ただし比較しやすいように、 $x=400\text{cm}$ の測定結果は両方に載せた。

図-9を見ると、 $x=125\text{cm}$ で群落内を平衡状態で流れていた流れが群落下流端に近づくにつれ、樹冠部では流速が若干下がり、その分、幹部の流速が増加している。そして群落下流端からすぐ下流の地点 ($x=415\text{cm}$) では、水面付近で逆流が生じているのがわかる。

これは、群落端より下流では樹冠の大きな流水抵抗がなくなるために、樹冠背後の領域 ($z=7\text{cm}$ 以上) が幹部を通ってきた高速流の剥離域となり、これによって大きな渦運動が生じているためである。この渦運動によって逆流が発生し、その影響で群落下流端付近での樹冠の流速が低下したものと考えられる。写真-2に、この付近の可視化した流況を示す。水面付近までに達する大きな渦運動が確認できる。染料による可視化から、この剥離域は群落下流端 ($x=400\text{cm}$) から $x=450\text{cm}$ 付近まで伸びていた。これは樹冠水深(約5cm)のおよそ10倍に相当する。

また図-10を見ると、群落下流の流速分布は、なかなか一般的な開水路のそれには回復しない。今回の実験では完全に回復するところまで確認することができなかった。群落上流部の流速分布 (ケース A1) は、50cm

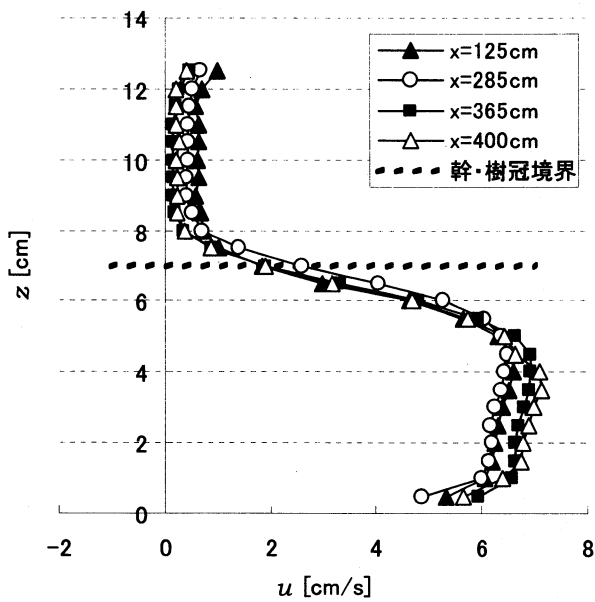


図-9 流下方向流速 (ケースC1 植生区間)

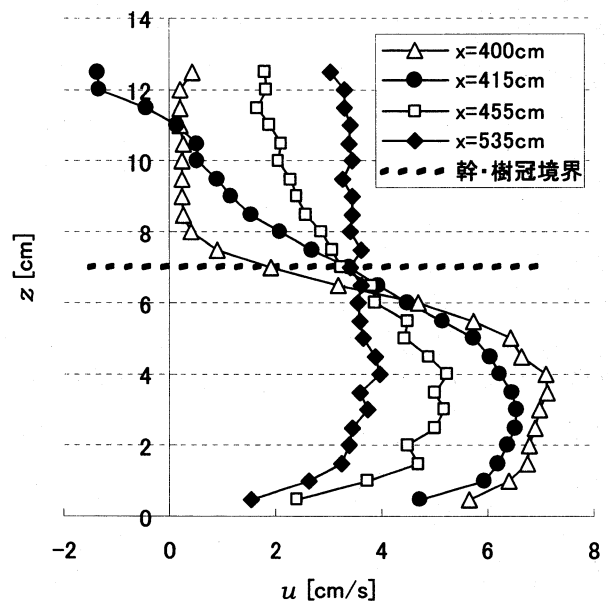


図-10 流下方向流速 (ケースC1 非植生区間)

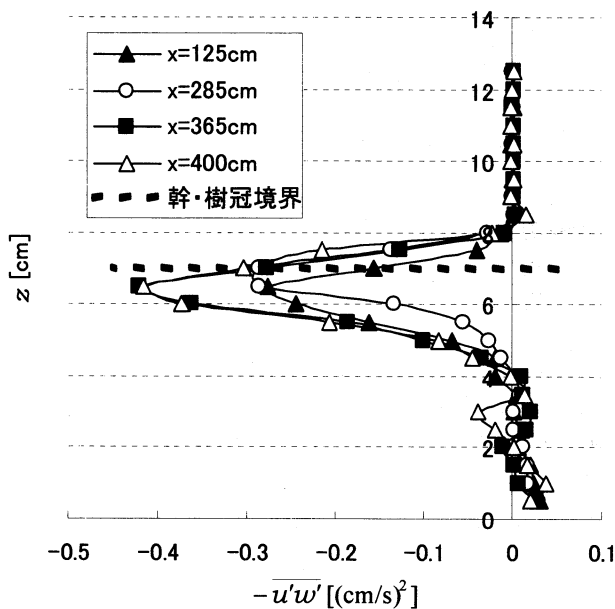


図-11 レイノルズ応力 (ケースC1 植生区間)

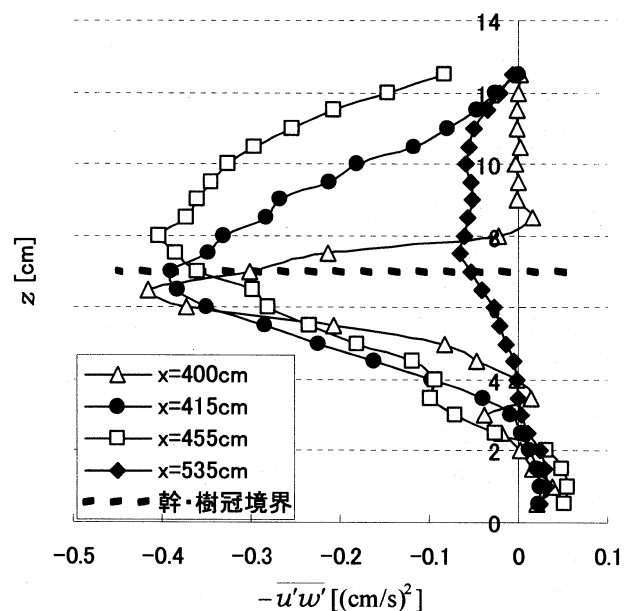


図-12 レイノルズ応力 (ケースC1 非植生区間)

もあれば遷移が完了したのに対して、群落下流部は1mでも足りない。平面2次元流における自由せん断層の消失には、せん断層幅の10~15倍程度の流下距離が必要であり⁷⁾、今回の場合それは40~60cm程度となる。本研究の結果によれば、鉛直2次元流の自由せん断層の消失には平面2次元流の2倍以上の流下距離が必要であることになる。これは、平面2次元流では群落の下流側でも流れ全体に底面摩擦が大きく影響しているのに対して、鉛直2次元流では群落の下流側では顕著な抵抗体がないため、流れを大きく変える要因がないためと考えられる。

レイノルズ応力もまた大きく変化する。図-11, 12に植生区間および非植生区間でのレイノルズ応力の鉛

直分布の縦断変化を示す。 $x=125\text{cm}$ での平衡状態ではケースA1とほぼ同じ分布であるが、群落下流端($x=400\text{cm}$)に近づくにつれ、その負のピーク値がより顕著になり、1.5倍以上にもなる。

群落端より下流になるとすぐに、樹冠背後の領域でも大きな乱れが生じて、負のピークから水面でのゼロ値まで直線的な変化を示している。

群落端より下流になると、特に樹冠下流部でレイノルズ応力がさらに増大した後、徐々に減少し、底面に近い部分から一般の開水路の分布へと回復していくのがわかる。ちなみに、 $x=415\text{cm}$ における底面付近の流速分布に対数則を当てはめて、底面での摩擦応力を求めたところ、底面付近のレイノルズ応力の測定値とお

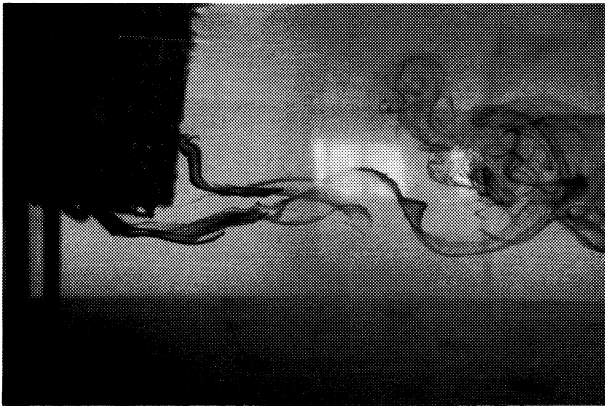


写真-2 群落下流端に発生した渦

およそ一致するものであった。

図-13 は群落内での樹冠と幹部との界面抵抗係数の縦断変化を示したものである。 f_i は縦断方向にほぼ一定で、A1 とおおよそ同じ値をとるのがわかる。レイノルズ応力自体は群落下流端に近づくにつれて増加するのに対して、樹冠の流速が若干低下し幹部の流速が若干増加するので、式(6)からわかるように、両者の変化が f_i の変化を抑えているものといえる。

4. おわりに

本研究では、高木群落のように流水抵抗が鉛直構造を持つ場合の流況を、一様な群落内部、群落上流端周辺、群落下流端周辺の3通りについて調べた。その結果得られた知見は以下の通りである。

- (1) 高木群落の内部では、樹冠での遅い流れと幹部での速い流れとの間に顕著な自由せん断層が形成される。樹冠の流速は固有浸透流速にほぼ等しい。幹部の流速は、樹冠と幹部との界面抵抗の影響が大きい。
- (2) 高木群落の内部のレイノルズ応力は、樹冠・幹部界面付近で負の大きなピークをもつ。この界面抵抗は、両者の流速差の2乗に界面抵抗係数を乗ずることで定式化することが可能である。この係数の値は、開水路における横断方向の自由せん断層の抵抗係数とほぼ同じで、樹冠と幹部の流速比によって決まる。
- (3) 群落の上流側では、植生抵抗による堰上げの影響が流速分布にも現れ、群落に近づくにつれて、水面付近から減速が始まり、幹部の中央部分の流速が増加する。
- (4) 群落の上流端を通過した流れは、ただちに樹冠で大きく減速され、その分だけ幹部は速くなる。これにともなって群落上流端周辺には顕著な下降流が発生する。流下するに伴い、幹・樹冠境界の自由せん断層が速やかに発達し、その後、底面せん断層がゆっくりと発達して、平衡状態の流速分布

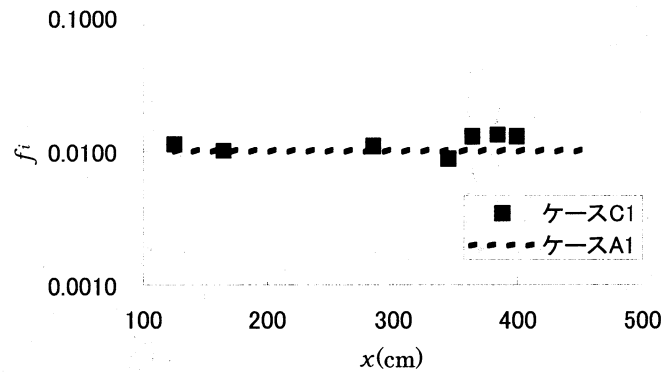


図-13 界面抵抗係数 (ケース C1)

に近づいていく。

- (5) 群落の上流端直後でのレイノルズ応力は、下降流による運動量輸送のため、さほど大きくはないが、下流にいくにつれてすみやかに増加する。上流端のごく近傍を除いて、界面抵抗係数は等流の場合と同じ値をとる。
- (6) 群落の下流端付近では、若干ながら樹冠での減速、幹部での加速が見られる。これは樹冠背後に生じる逆流域の影響による。
- (7) 群落端より下流では、樹冠の背後の領域が、幹部を通過してきた流れの剥離域となり、そこで大きな渦運動が生じる。剥離域の長さは樹冠水深の10倍程度にもなり、水面付近では逆流が生じる。
- (8) 群落の下流においては、樹冠背後の領域で大きなレイノルズ応力が発生する。ただし群落内における樹冠と幹部との界面抵抗係数は、等流の場合とほぼ同じ値をとる。
- (9) 群落端より下流側では、もとの開水路流れの流況に回復するには、群落上流端での遷移に比べて、極めて長い距離が必要となる。平面2次元流と比べても2倍以上の流下距離が必要となる。

参考文献

- 1) 河川環境管理財団・河川環境総合研究所編：河川の植生と河道特性, 1995.
- 2) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法—治水と環境の調和した川づくり, 森北出版, 2005.
- 3) 岡部健士, 湯城豊勝, 児島眞：植生を伴う河床上の掃流砂量に関する研究, 水工学論文集, 第41巻, p.851-856, 1997.
- 4) 井上貴之, 岡部健士, 濱井宣明, 湯城豊勝：樹木状の植生を伴う河床上の流れと掃流砂量に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.677-672, 1999.
- 5) 湯城豊勝, 岡部健士, 濱井宣明：樹木状植生を持つ河床上の流れの乱流構造とその数値解析法, 水工学論文集, 第45巻, pp.847-852, 2001.

- 6) 湯城豊勝, 岡部健士: 樹木状植生を持つ河床上における浮遊砂濃度の形成機構, 水工学論文集, 第46巻, pp.701-706, 2002.
- 7) 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.
- 8) Chen, F.Y. & Ikeda, S.: Developing turbulent flows in open channels with pile dikes, 第39回水理講演会論文集, pp.767-772, 1995.
- 9) 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, pp.35-44, 1992.
- 10) 春日屋伸昌: 流量測定, コロナ社, pp.123-133, 1990.
- 11) 関根正人, 浦塚健史: 側岸部に交互に繁茂する植生群落によって生成される流れと河床形状について, 水工学論文集, 第44巻, pp.813-818, 2000.
- 12) 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, 土木学会論文集, No.509, II-30, pp.79-88, 1995.
- 13) 井上慎一, 池田裕一: 風速測定による河道内高木群落の抵抗係数の推定に関する基礎的検討, 第33回関東支部技術研究発表会講演概要集 CD-ROM, 2006.
- 14) 石川忠晴: 拡散型非線形, 流体の非線形現象, 朝倉書店, pp.39-66, 1992.
- 15) 池田駿介: 詳述水理学, 技報堂出版, pp.266-281, 1999.

(2008年4月14日 受付)