

樹冠抵抗の相違が高木群落内の流速分布と その下流における遷移に与える影響に関する 実験的研究

田中 徹¹・池田 裕一²・岡崎 祐也³

¹学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科 学際先端システム学専攻
(〒321-0944 栃木県宇都宮市東峰町3018-3-206)
E-mail:mt096631@cc.utsunomiya-u.ac.jp

²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 栃木県宇都宮市陽東七丁目1-2)
E-mail:ikedai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

³学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科 学際先端システム学専攻

河道内の植生は、生態系の場合として重要な役割を果たしているが、治水上の障害となることも知られている。特に高木群落は流水抵抗が大きく、その維持管理には注意が必要である。

本研究では、樹冠の抵抗が異なる2種類の植生模型を用いて実験を行い、流況への影響を検討した。

実験の結果、樹冠抵抗が大きい場合は、群落内では樹冠部でかなり遅く、幹部ではかなり速い流速分布をとるようであり、群落の下流では、樹冠部背後で一旦減速した後、全体として開水路の一般的な流速分布に回復する。樹冠抵抗が小さい場合は大きい場合と比べて、幹部と樹冠部との流速差は小さい。また、群落のすぐ下流で樹冠部背後の流速は減速しないことが分かった。

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る。特に河道内の植生は、河川景観の構成要素だけでなく、生態系の場合としても重要な役割を果たしており、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。その一方で、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¹⁾²⁾。

河道植生の中でも流水抵抗の大きな本木類には、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、特に高木群落は、草本・低木群落に比べて流水抵抗が大きく、その維持管理には注意が必要である。たとえば、下刈りや枝打ちをすることで出水時のリスクを極力抑えながら、高木群落の伐採を控えて景観や生態系の保全を図ることも可能といえる。しかし、こうした高木群落ならではのきめ細かな環境管理が、群落およびその周辺の流れ場に与える影響を系統的に検証した

例はあまりない。

岡部ら³⁾は、灌木状および高木状の抵抗体を実験水路に設置し、流速や乱れの鉛直分布を検討している。そのなかで、抵抗特性の非一様性から生じる *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。

池田・岩松⁴⁾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用いて、一樣な群落内、群落の上流端周辺および下流端周辺の3つのケースにおいて流況を実験的に検討している。その結果、二層構造を持つ高木群落内では、幹部では非常に速い流れになり、樹冠部では非常に遅い流れとなること、群落を抜けた直後では大きな渦運動が起こるといった高木群落が流況に与える影響の基本構造をとらえている。しかし、幹に対して樹冠抵抗が非常に大きい模型での実験であったので、さらに様々な条件下での検討が要請されるところである。

そこで本研究では、樹冠抵抗の異なる2種類の樹冠模

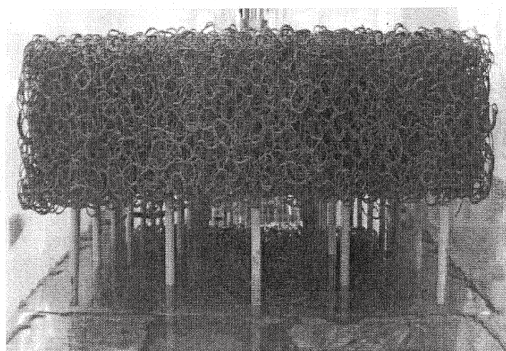


写真-1 植生模型 A

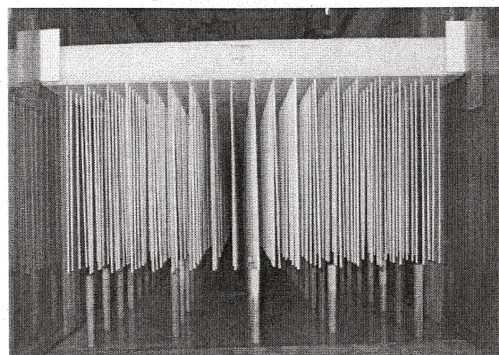


写真-2 植生模型 B

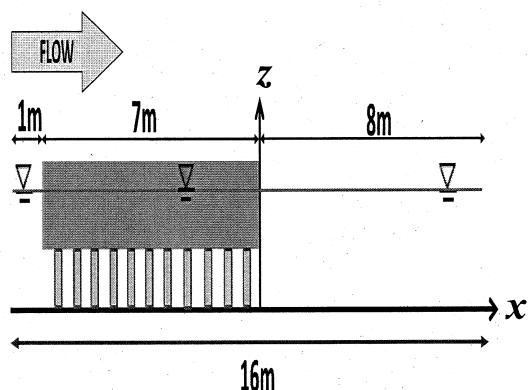


図-1 植生模型配置図

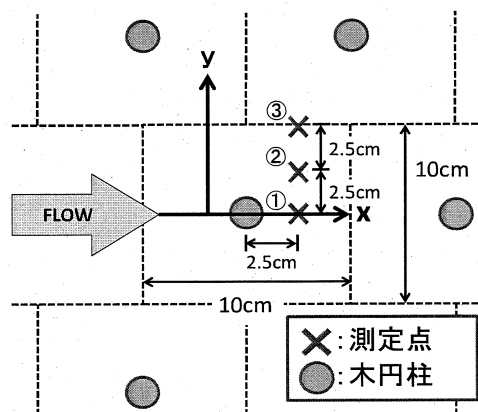


図-2 植生模型配置図

表-1 実験条件

ケース名	河床勾配	流量 (cm ³ /s)	水深 (cm)	群落内代表流速 (cm/s)		群落外代表流速 (cm/s)
				幹部	樹冠部	
A1	1/1100	8738	14.06	25.296	4.476	13.377
B1	1/1100	8586	14.13	16.580	10.697	13.112

型を用いて実験を行い、群落内およびその下流の流れ場の基本特性を把握することにした。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置と植生模型

実験には、全長16m、水路幅50cmの直線水路を用いた。水路上流部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。高木群落の模型は、樹冠部と幹部に分けて製作した。幹部は直径1cm、高さ6cmの木製円柱を100本/m²で千鳥状に配置した。樹冠部は2種あり、ひとつは写真-1に示すよ

うな幅50cm、高さ10cmのプラスチック製透水管材（以後模型Aと呼ぶ）である。もうひとつは写真-2に示すような幅50cmのスタイロフォームに2.5cm間隔で竹串を刺すことで高さ15cmの樹冠模型（以後模型Bと呼ぶ）を作成した。

植生模型の配置を図-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。縦断方向には上流端より1m地点から8m地点にわたって設置し、上流端0m地点から1m地点および上流端から8m地点から16m地点までを植生を設置しない非植生域とした。また、群落下流端から流下方向にx軸、横断方向にy軸、水路床から鉛直上方にz軸をとることにする。

表-2 相似性の検討

	井上・池田 ⁵⁾		岡部 ³⁾		池田・岩松 ⁴⁾		本研究		
	疎な群落	密な群落	幹部	樹冠	幹部	樹冠	幹部	樹冠	
								模型A	模型B
代表水深(m)	5.0		0.06		0.14		0.14		
代表流速(m/s)	4.4		0.45		0.42		0.54		
フルード数	0.63		0.59		0.36		0.46		
透過係数(m/s)	120.1	17.5	8.40	7.45	4.43	0.38	4.295	0.457	2.095
固有浸透流速(m/s)	4.54	0.66	0.37	0.33	0.14	0.012	0.13	0.011	0.063
無次元固有浸透流速	1.032	0.150	0.827	0.733	0.333	0.0286	0.241	0.0204	0.116
樹冠に対する幹部の透過係数の比	6.9		1.5		11.7		—	9.4	2.1

(2)実験条件と実験方法

本研究では群落の下流端周辺の状況について検討する。実験条件を表-1に示す。ここで水深は群落下流端での値を示し、幹・樹冠における群落内代表流速は群落下流端でのそれぞれの領域の平均速度である。群落外流速は群落下流端より4m下流における平均速度を示したものである。

各ケースにおいて流速測定には電磁流速計を用いた。計測地点は、樹木1本の影響領域を10cm四方とした上で、図-2のように樹木の後方(①)、隣接している樹木との境界(③)およびその中間(②)の3地点において、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、植生模型の存在しない区間に対しても同様に3点測定を行った。なお、本研究では下流における流速分布に着目するため、下流端周辺および下流側の計8地点(群落下流端を $x=0\text{m}$ として、 $x=-3.0$ 、 -1.0 、 0 、 0.1 、 0.5 、 1.0 、 2.0 、 4.0m)において流速分布を計測した。

(3)相似性の検討

表-2は、池田・岩松⁴⁾にならい、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。このうち岡部³⁾、池田・岩松は室内実験であり、井上・池田⁵⁾は鬼怒川での現地データを扱ったものである。池田・岩松は、現地での現象との相似性を検討しており、それと比較することで、本研究の実験条件の位置付けを把握することとする。なお、より詳しい諸元や定義、計算式等に関しては池田・岩松を参考にされたい。

表-2より、本研究におけるフルード数は、池田・岩松や井上・池田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。樹冠に対する幹部の比は、模型Aでは9.4、模型Bでは2.1という値となったが、福岡⁹⁾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2~12倍程

度大きくなる。このことを考慮すれば、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

図-3~8は流速およびレイノルズ応力の測定結果を示したものである。

図-3・4は群落内($x=-3\text{m}$)における流速のx方向成分 u の鉛直分布である。また、図-5・6は群落内から群落外下流域で平衡状態に達するまで($x=-3\text{m}\sim 4\text{m}$)の流速分布の遷移をまとめたもので、流速の値は横断方向3点の平均である。そして、図-7・8は同様に3点平均したレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の遷移をまとめたものである。

以下にそれぞれの実験ケースから得られた結果と考察を述べていく。

(1) 樹冠抵抗の大きい模型(ケースA1)

図-3より、群落内においては、鉛直方向については $z=6\text{cm}$ 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。また、横断方向については幹部では木円柱から離れていくに従って流速が速くなっていくことが分かる。これは木円柱を避けて流れる水が隣の領域内の流れと合流することで速くなっていると考えられる。その一方で、樹冠部ではいずれもほぼ同程度の流速となっており、これは模型Aの透過係数が位置によらず一様に等しいためだと考えられる。

図-5より、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($x=0.1\text{m}$)では、水面付近で逆流に近い流れ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

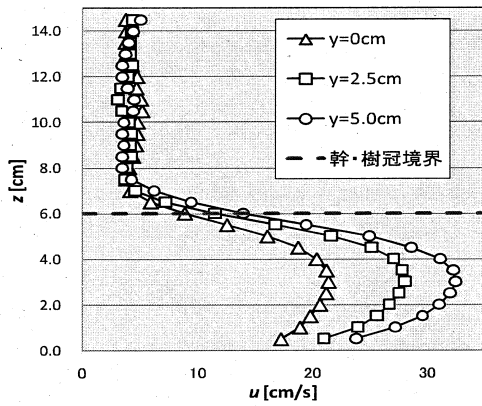


図-3 $x=-3\text{m}$ 地点の流速分布 (模型 A)

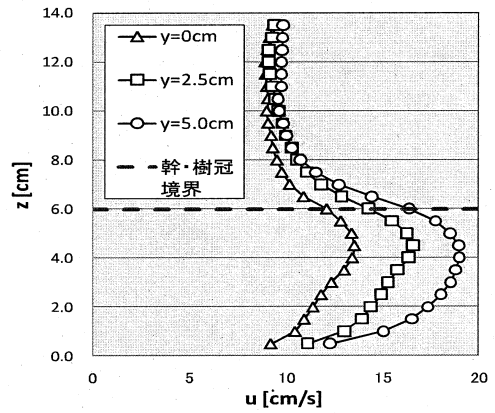


図-4 $x=-3\text{m}$ 地点の流速分布 (模型 B)

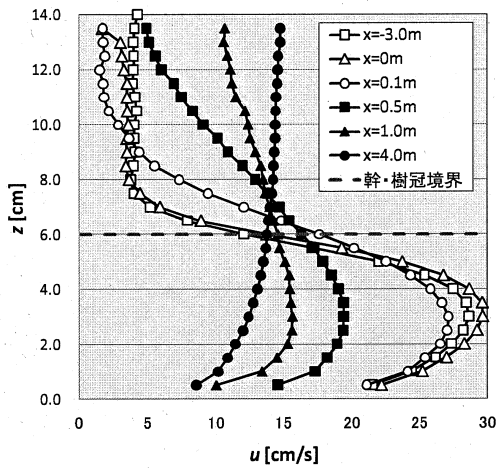


図-5 流速分布の遷移 (模型 A)

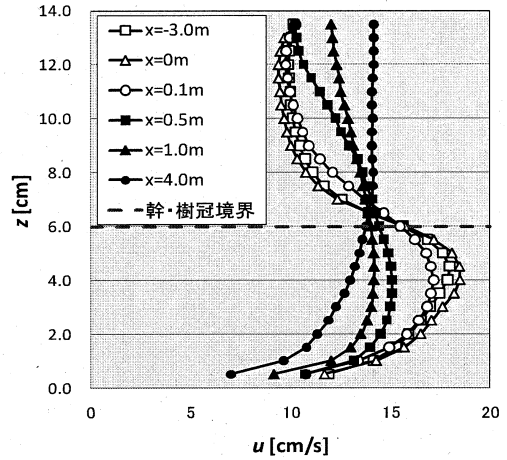


図-6 流速分布の遷移 (模型 B)

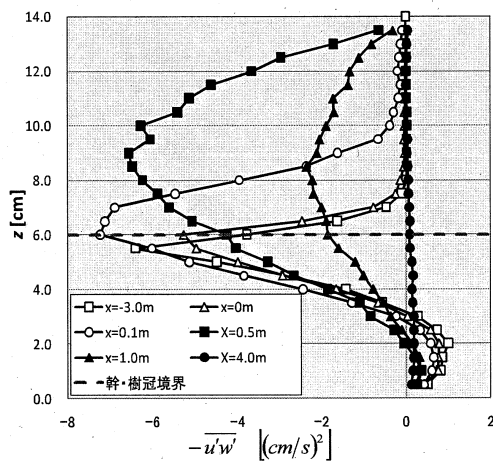


図-7 レイノルズ応力の遷移 (模型 A)

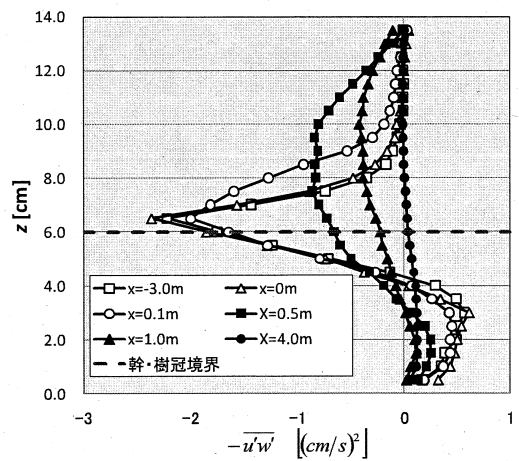


図-8 レイノルズ応力の遷移 (模型 B)

冠背後の領域 ($z=6\text{cm}$ 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⁴⁾。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。

その後、距離が進むにつれて一般開水路の流速分布に回復していき、 $x=4\text{m}$ 地点には平衡状態、つまり一般的な開水路の流速分布に達する。

図-7より、レイノルズ応力が群落内 ($x=-3\text{m}$) では、樹冠部ではほぼゼロの値をとっているが、幹・樹冠境界面では大きな負のピーク値をとり、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いことがわかる。樹冠部のレイノルズ応力がほぼゼロとなるのは、樹冠部の植生抵抗が極めて大きいためであり、底面付近では正の値をとるのは底面摩擦による影響である。

群落端 ($x=0\text{m}$) 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すようになる。

群落端より下流側では、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き、 $x=4\text{m}$ 地点で平衡状態に達していることがわかる。

(2) 樹冠抵抗の小さい模型 (ケースB1)

図-4より、ケースB1においてもケースA1と同様な流速分布の形をとっている。かつ、ケースA1と比べて幹・樹冠部での流速差はかなり小さい。

図-6より、群落下流端周辺における流速分布の遷移の形はケースA1とほぼ同じ形となっていることがわかる。しかし、ケースA1でみられたような樹冠背後の逆流に近い流れはみられなかった。群落下流端を抜けた直後にみられる大きな渦運動が発生しなかったか、影響が弱まったものと考えられる。

図-8より、レイノルズ応力が群落内・群落直後の点において幹・樹冠境界面で大きな負のピーク値をとることはケースA1と同様であるが、各点におけるレイノルズ応力の大きさはケースA1の半分以下の値を示していることがわかる。このことから、樹冠抵抗が幹部と比べて小さい場合、大きな流速差が生まれなためレイノルズ応力が大きく発達しないことがわかる。

レイノルズ応力の全体的な遷移をみたとき、群落直後にレイノルズ応力が消散していく距離はケースB1が明らかに短い、平衡状態に戻るまでの距離はケースA1と変わらないことがわかる。

また、ケースA1では群落下流端 ($x=0\text{m}$) よりも、そのすぐ下流 ($x=0.1\text{m}$) の方が大きいピークを示しているのに対して、ケースB1では、群落下流端より単調に減少している。このことから、ケースA1とケースB1

とで樹冠背後の渦運動の影響が異なることがわかる。

(3) ケースA1・B1の比較

樹冠抵抗の影響をせん断層の厚さ、幹・樹冠部の流速差、レイノルズ応力のピーク位置の遷移の3つの観点から比較したものを図-9～図-11に示す。

図-9より、せん断層の厚さは群落内ではほぼ同じであるが、群落下流端直後のせん断層の発達距離には違いがみられた。ケースA1では群落直後に一気にせん断層が発達しているが、これは群落背後の大きな渦による

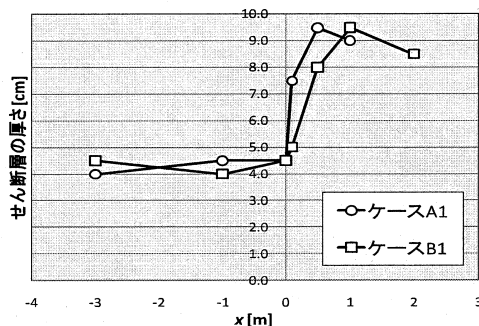


図-9 せん断層の厚さの遷移

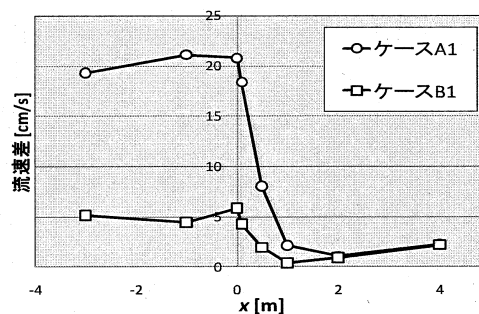


図-10 幹・樹冠部の流速差の遷移

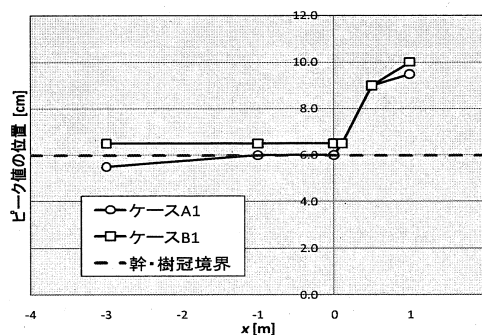


図-11 レイノルズ応力のピーク位置の遷移

影響だと考えられる。そのため、大きな渦の発生していないケースB1ではせん断層が徐々に発達している。

図-10より、流速差は群落を抜けるまでは樹冠抵抗が大きい方が大きい、 $x=2m$ 地点では等しい値をとっての流れが一般開水路の流速分布に回復するまでの距離はほぼ変わらないことがわかる。この要因としては、ケースA1では群落背後で大きな渦運動が起こったことで流れの混合が素早く起こり、逆にケースB1では大きな渦運動が起きていないため流れの混合がゆっくり進んだことが考えられる。

図-11より、ケースA1・B1のどちらも群落下流端を越えた直後にレイノルズ応力のピーク値の位置が上昇していくのがわかる。これは群落背後において、せん断層が水面まで発達していくことでレイノルズ応力による影響が広範囲にまで及んでいくことが要因である。

4. おわりに

本研究では、樹冠抵抗の異なる2種類の樹冠模型を用いて、群落内およびその下流の流れ場の基本特性について調べた。その結果得られた知見は以下の通りである。

- (1) 樹冠抵抗の大小に関わらず、群落内のせん断層の厚さには大きな差は生じないが、樹冠抵抗が大きくなると、群落背後で渦運動が起こるとせん断層は素早く発達する。
- (2) 樹冠抵抗が大きい場合には、樹冠部と幹部の流速差が大きくなることによって群落背後に渦運動が

起こり、逆流に近い流れになることで流れの混合が素早く起きる。樹冠抵抗が小さい場合には流速差が小さく渦運動が発生せず、流れの混合がゆっくり進む。結果的に一般開水路の流速分布に回復するまでの距離はほとんど変わらない。

- (3) レイノルズ応力は樹冠抵抗が大きいほど大きな負の値を示す。樹冠抵抗が大きいとピーク値はいったん増加してから減少し、樹冠抵抗が小さいと単調に減少する。ピーク位置の遷移は樹冠抵抗の大小に関わらず等しい。

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) 岡部ら：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.
- 4) 池田・岩松：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, 応用力学論文集, Vol.11, pp.807-815, 2008.
- 5) 井上・池田：風速測定による河道内高木群落の抵抗定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.
- 6) 福岡ら：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.

Experimental study on the effects of flow resistance of the crown part on velocity profile and its transition through behind a tall tree community.

Toru TANAKA, Hirokazu IKEDA and Yuichi OKAZAKI

Vegetation in rivers plays an important role not only in river ecosystem but also in flood control. Especially, the flow resistance of arboreal community is so large that careful maintenance must be necessary. In the present study, laboratory experiments were performed on the effect of the crown resistance on the flow structure with using two kinds of arboreal vegetation models

The Experimental results were as follows; When the crown resistance is large, the velocity in the crown part is very slow and that in the stem part is very fast. And the velocity behind the crown part in the downstream region was decelerated once and recovered to the general velocity profile in open channels. When the crown resistance is small, the flow velocity difference between the stem part and the crown part is smaller, and velocity deceleration behind the crown in the downstream was not observed. Commonly, the velocity fluctuation was very large behind the crown in the downstream of the community.