

洪水時における樹木内流速現地観測

A FIELD OBSERVATION OF FLOW VELOCITY IN TREES DURING A FLOOD

油川 曜佑¹・渡邊 康玄²・石田 洋一³・五十嵐 拓⁴
玉館 敦³・鈴木 信幸³・三田村 一弘³

Yousuke ABURAKAWA, Yasuharu WATANABE, Youichi ISHIDA, Taku IGARASI
Atushi TAMADATE, Nobuyuki SUZUKI and Kazuhiro MITAMURA

¹ 正会員 修士(地球環境科学)(株)北開水工コンサルタント(〒080-0314 北海道河東郡音更町共栄台西11丁目1番)

² 正会員 博士(工学)(独)北海道開発土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

³ 非会員 (株)北開水工コンサルタント(〒080-0314 北海道河東郡音更町共栄台西11丁目1番)

⁴ 非会員 北海道開発局帯広開発建設部治水課(〒080-8585 北海道帯広市西4条南8丁目)

We measured the cross-sectional flow velocities in the tree zone of the Otofuke River during a flood caused by Typhoon Etau in August 2003 and tried to clarify the flow conditions at that time. It was confirmed that the obtained flow pattern of cross sectional distribution sufficiently reproduced behavior of the flow velocity in the tree zone.

The calculated average flow velocity in the tree zone was about 0.12 - 0.27 m/s, which was 1/15th that of the main stream, whose average velocity was 3 m/s without trees. Discharge from the vegetated section accounted for about 6% of total section. And it has become necessary to examine the existing methods of measuring tree density.

Key Words: field observation, the flow velocity in tree zone, ADP, tree density, the Otofuke river

1. はじめに

河道計画策定にあたっては、第一に現況河道流下能力を把握し計画流量を安全に流下させるための河積確保を行う必要がある。そのためには、洪水時の水位上昇要因の一つとなる河道内樹木の影響を明らかにしなければならない。

近年の観測技術の発達に伴い洪水観測における様々な手法が提案され、有用な知見の生産ならびに情報の集積が図られている^{1)~5)}。しかしながら樹木群内における流速観測に関しては、円柱を樹木とみなすなどの理想的な条件のもと実施された簡易模型実験での検討が多く、実河川では観測に適した場所の選定に困難を有するなどの理由からその報告例は極めて少ない。そのため実測データが不足しており未だかつて不明な点が多いことから実測値に基づく現象の解明や分析が課題になるものと考えられる。

そこで本研究では、写真-1に示す2003年8月に発生した台風10号により引き起こされた北海道十勝地方を



写真-1 音更川洪水時の様子

流下する音更川での洪水を対象に、河道内に植生する樹木を必要最低限伐採することで計測装置を設置できるスペースを確保し樹木群内における鉛直方向流速観測を行った。また、浮子観測による樹木外流速との比較を行うことでそれらに基づく流況特性の把握を試みた。

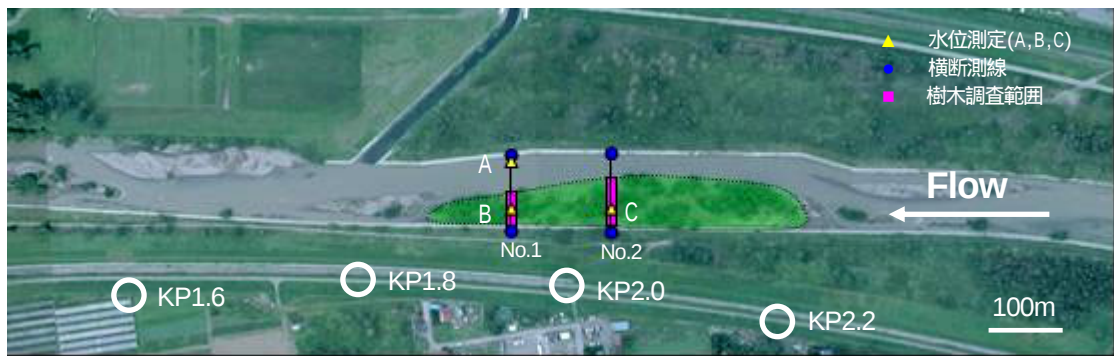


図-1 調査地範囲の平面図

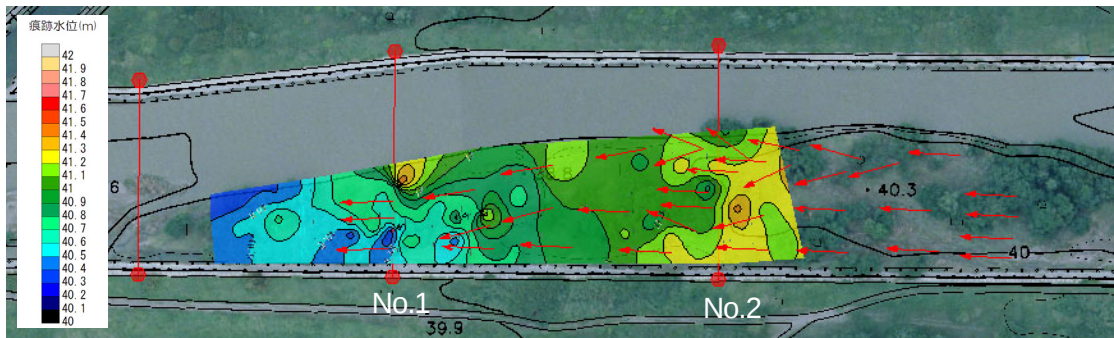


図-2 痕跡水位コンターおよび流向

2. 現地観測の概要

(1) 調査区間の概要

調査河川とした音更川は北海道十勝地方を流れる1級河川十勝川の一次支川であり流域面積 740.3km²、流路延長 93.5km の1級河川である。

洪水時の流速測定を実施した箇所は図-1に示すように音更川下流 (KP 1.8～2.4km) の左岸に位置しており、エゾノキヌヤナギを主とする一斉林が砂州上に発生している。このため流水による阻害影響が大きいと考えられ現地観測場所として適していると判断された。しかしながら、一帯内を調査することは困難であるため No.1, No.2を横断測線として設定した。なお両区間の距離の差は132mである。

(2) 樹木および草本類調査

測線を中心に幅5m(上流側2m、下流側3m)の帯状区を設けその区間に生育する樹木および草本類の調査を行った。

各測線の植生区分はNo.1がエゾノキヌヤナギ・オノエヤナギ群落、またNo.2がクサヨシ群落、エゾノキヌヤナギ・オノエヤナギ群落に区分された。

樹種としては、エゾノキヌヤナギ・イヌコリヤナギ・オノエヤナギ・ネコヤナギの4種であったが、エゾノキヌヤナギが大半を占めた。また、各群落内にはオオヨモギ・クサヨシ・エゾイラクサ・ミゾソバ・ヨシ・オギ・オオイタドリ・ナガハグサなどの下草が見られた。それぞれの測線上における帯状区樹木調査から得られた結果を表-1に示した。

表-1 樹木調査結果

測線	低水路幅(m)	樹林帯幅(m)	平均樹径(cm)	平均樹高(m)	本数(本)	樹木密度(1/m)
No.1	69	26	6.5	7	69	0.035
No.2	72	31	11.4	8	32	0.028

(3) 洪水痕跡調査

洪水後、樹木群内の水面形把握や流水流向などを把握するため、痕跡調査と下草倒伏調査を行った。図-2に痕跡水位コンターと下草倒伏方向からの流向を図示した。樹木群内の水面形は、上流から下流に向かって低下するが、水位の変化が大きく、特に樹木密度の高い No.1 測線より下流のコンターが全体に密となった。また、No.1 測線主流部境界などのように閉じたコンターが局所的に見られ、こうした場所では部分的な水位の上昇があったと考えられる。一方、コンター図に示した樹木群内の流向を見ると、傾向的には上流から下流へ流れるが、No.2 測線主流部境界付近では、樹木群から主流部へ向かう流れが見られた。また、No.1 測線上流では左岸部の樹木外へ向かう流れも確認された。

3. 洪水時観測

(1) 流速観測施設の設置

流速観測は No.1 の横断測線上で実施した。流速計は図-3 に示したように低水路左右岸に H 鋼を敷設しこれを固定柱としてワイヤーを展張しこれに流速計移動用のロープを懸架した。流速計の横断方向への移動はロープ操作で行い、流水部への浸漬は展張ワイヤーを緩めることで調整した。流速計の移動を容易にするために低水路

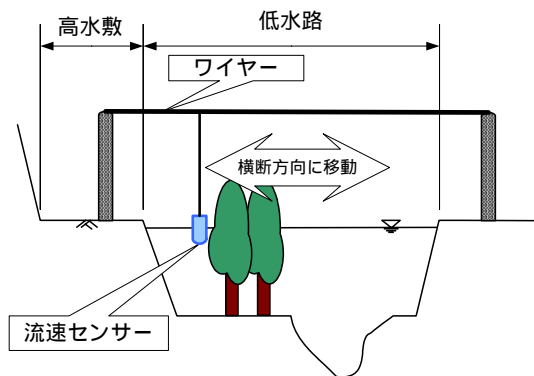


図-3 樹木間流速調査方法

から高い部分の枝を伐採した。写真-2 に実際の様子を
示した。

樹木内流速の測定には水面から河床までの流速分布
を一定水深間隔で測定できる多層式超音波流速計
Aqua.dopp.Profiler(以下、ADP)を用いた。水深方向の
測定間隔を0.10mとし、測定時間を2分以上取り、これ
を平均して鉛直流速分布を求めている。ADP は喫水を深
くすることにより傾斜の割合が大きくなり流速観測精度
が低下することから、水深 10cm 程度にまで先端を浸漬
させることで流水による抵抗の影響をできるだけ小さく
し、錘をつけることで傾斜角度を安定させた。また、計
測時において機器が上下左右に揺れた場合、それらの付
加的速度も含んで測定されることになるが、本洪水時に
おける顕著な揺れは確認されていない。

測定箇所に関しては図-4 に示すように樹木群内は左
岸より横断方向に 4m 間隔で設定した ~ の測点を
ADP で行い、右岸主流部は洪水時の流速が 3m/s 以上と
なることから ~ の測点上を浮子観測とした。

水位観測については、圧力式自記水位計を用い、保護
管に挿入し水位測定間隔を 10 分とした。また、設置場
所は No.1 および No.2 の測線左岸側樹木内、また No.1
の測線右岸側護岸側壁とし、洪水による水位の連続的の
変化を計測するものとした。流速測定・水位観測につい
ては平成 15 年 8 月 10 日に行った。

(2) 水位観測結果

観測した洪水は、2003 年 8 月に発生した台風 10 号に
伴う出水であるが、本調査区の約 5km 上流に位置する音
更観測所では警戒水位を超過し、調査区では図-5 に示
す水位が記録された。

No.1における水位変化は、8月10日5時頃より左岸樹木
群に水が付き始め、6時には低水路満杯となり高水敷上
まで冠水したことが確認された。ピーク水位は、No.1右
岸40.7m、No.1左岸40.7m、No.2左岸41.1mとなり、両測
線における水位差は40cm程度であるが、これは樹木群の
存在による水位の堰上げの影響によるものと思われる。
このとき、手前の主流部の水面は波立っているのに対し、
樹木群内では緩やかに流下している様子が目視で確認さ

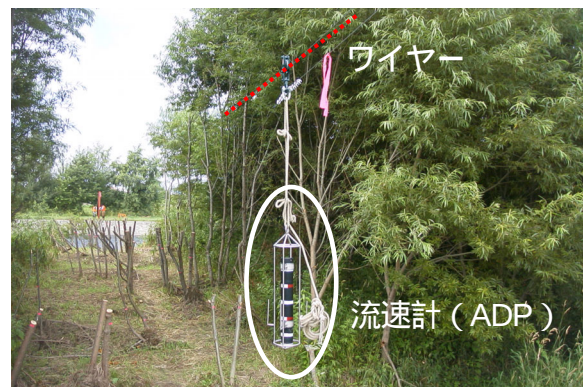


写真-2 樹木間に設置した流速計測器

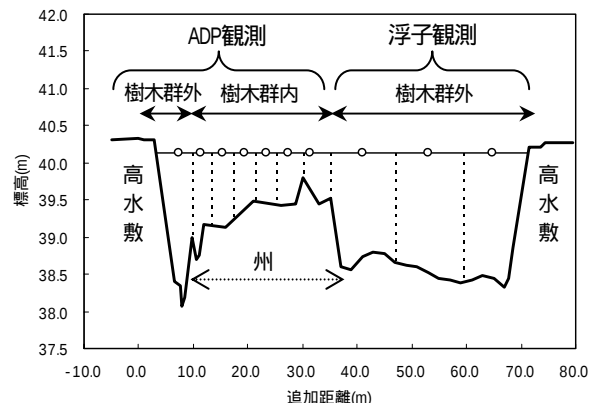


図-4 樹木間流速測定断面図

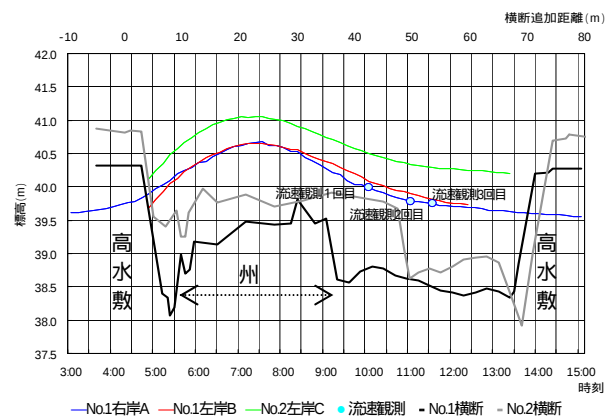


図-5 洪水時における水位変化



写真-3 樹木に付着したゴミなどの堆積物

れた。左右岸の水位を比較すると、水位上昇時では、ほ
ぼ同じ変化となっているが、水位減少時には右岸の水位

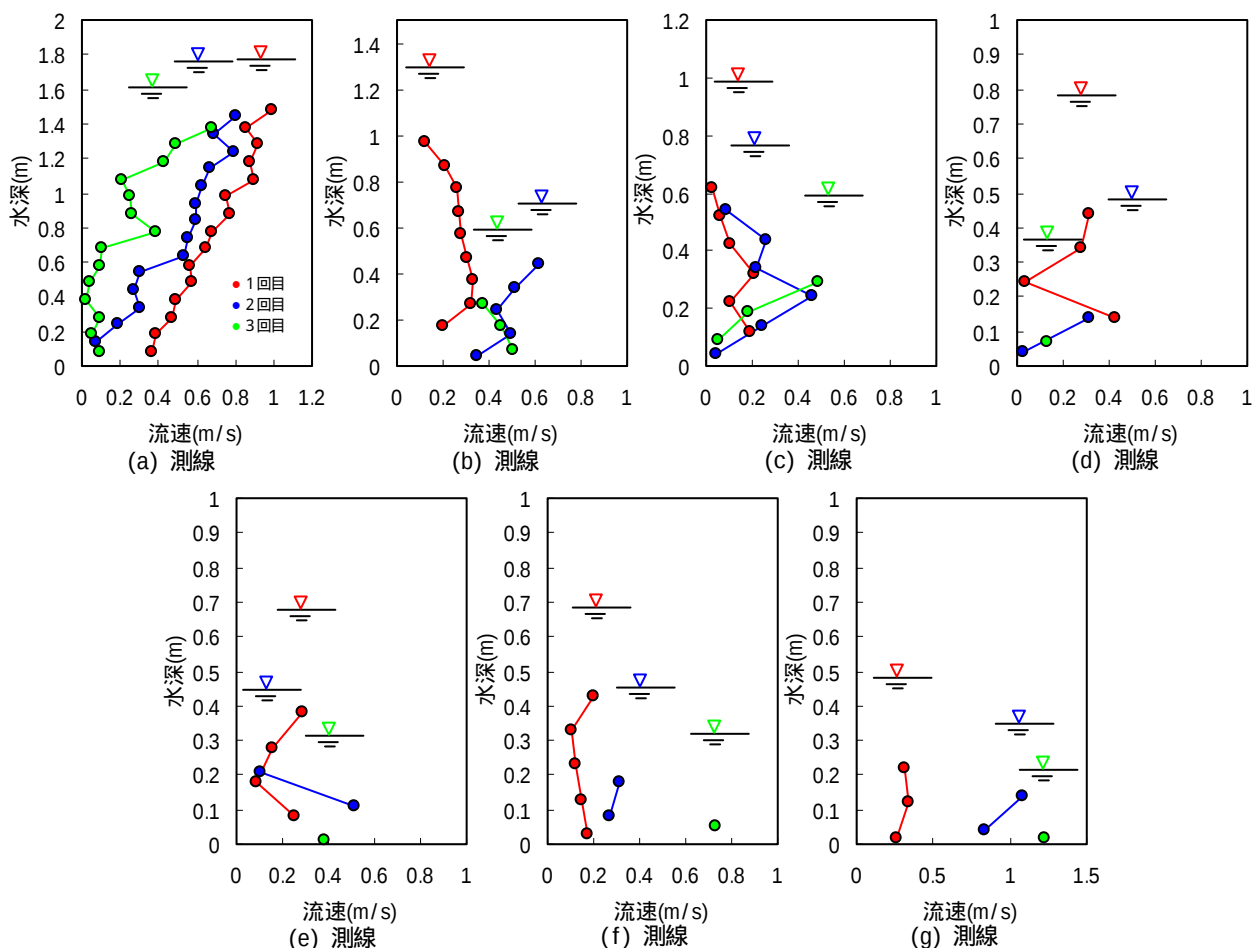


図-6 ADP観測により得られた鉛直流速分布図

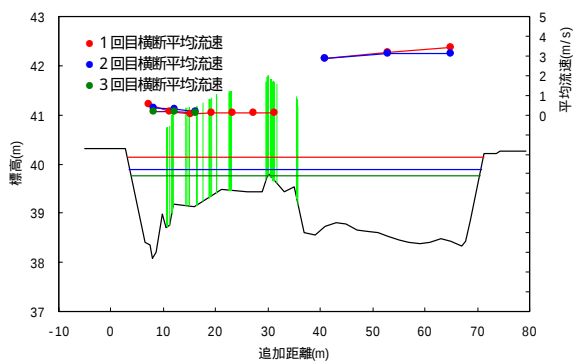


図-7 横断平均流速図

低下が早くなっていることに気づく。このことは樹木の有無による流下能力の違いが現れたものとして考えることができる。

(3) 樹木内流速測定結果

a) 鉛直方向流速測定結果

流速観測は、No.1において左岸樹木群をADP、右岸主流部を浮子により観測を行った。観測は、水位下降期の8月10日10時、11時、11時30分の計3回実施した。ここで1回目、2回目、3回目とそれぞれ表記することとする。ただし、3回目の右岸主流部の浮子観測は欠測となった。測線は河床が下草のみの箇所において、また測線～

表-2 各測線における水深および平均流速

観測方法	測線No	1回目		2回目		3回目	
		水深(m)	平均流速(m/s)	水深(m)	平均流速(m/s)	水深(m)	平均流速(m/s)
ADP観測		1.77	0.684	1.76	0.505	1.62	0.217
		1.31	0.267	0.72	0.481	0.59	0.444
		0.99	0.118	0.75	0.248	0.61	0.225
		0.77	0.226	0.48	-	0.34	-
		0.67	0.171	0.44	-	0.31	-
		0.69	0.140	0.45	-	0.32	-
		0.48	0.315	0.34	-	0.22	-
		1.40	2.850	1.12	2.850	1.03	-
浮子観測		1.61	3.210	1.37	3.120	1.24	-
		1.70	3.450	1.46	3.110	1.33	-

では樹木が存在する区間で測定されている。ここで、洪水直後の調査により、樹木群内では写真-3に示したようなゴミ等が樹木に付着している様子が確認された。デジタルカメラによる写真測量手法を用いこれらの断面障害状況を求めた結果、低水路満杯の樹木群河積 32.3m^2 に対して、ゴミ等の投影面積は 8.0m^2 程度となり25%を占めていた。ゴミ等の集積は空間的相違が見られるが、横断方向の平均的な流水の障害率は大きく変化しないものとし、今回対象とした区域では同一の値と仮定して検討を行った。

測定により得られた樹木内の鉛直流速分布を測線ごとに図-6(a)～(g)に示した。その結果、図-6(a)に示すよ

うに測線 における分布形はいずれの計測時においても他の測線の分布形と異なる傾向を示した。これは本測線における流速測定が樹木群外として下草のみが植生している状態のもとで行われたためである。一般に樹木などの構造物が存在しない流れにおいて、その流速分布は対数則に従うことが知られている。しかしながら計測測線上の近傍においては樹木が存在することにより、樹木群内外での活発な流れの干渉が起こる。そのため、それらの付加的抗力により周囲の流れが減速され、測線 の流速分布に影響が及んでいると考えられる⁶⁾。

一方、図-6(b)～(g)に示すように樹木群内流速として観測された測線 ～ では(c),(d)においては多少のばらつきが見られるものの、その分布形は(a)と比較して概ね鉛直方向に一樣になっていることが確認された。樹木群が流れに与える影響特性として流速分布は水深方向に対して一樣化する傾向があることから⁷⁾、得られた分布形は樹木内における流速の挙動を十分に再現しているものと考えられる。ただし測線 ～ においては図-5に示したように各測線上の水位が時間ごとに小さくなったため2回目、3回目の測定では水深方向にそれぞれ2点、1点でしか計測しておらずその傾向は不明である。

得られた分布形から求められた水深平均流速と水深の関係を表-2に、またそれらの横断分布を図-7に示した。このとき同時に計測横断に存在する樹木ならびにゴミなどの付着物の存在位置との関係を明らかにしている。その結果、樹木が存在しない本流部(測線 ～)の平均流速3m/sと比較し、樹木内平均流速(測線 ～)は0.12～0.27m/s程度と約1/15倍程度まで流速が減少していることが明らかとなった。各測線が支配する河積を表-3に、また得られた平均流速および河積から洪水において算定された流量を表-4に示した。これより樹木群内の流量は断面全体の6%程度であることがわかる。

b) 樹木内流速実測分布と理論分布式の比較

鉛直方向に関する実測樹木内流速と式(1)に示す渡邊⁸⁾らの等流を仮定した理論樹木内流速分布式 u_t との比較を行った。

$$u_t = \sqrt{\frac{2}{A} \left[1 + \frac{2}{\chi^2} \{ c_0 \exp(\chi z) + c_1 \exp(-\chi z) \} \right]} \quad (1)$$

ここで各パラメーターは

$$A = aC_d \quad \chi = \left(\frac{2A}{K^2} \right)^{1/4} \quad K = \frac{\kappa}{6}$$

$$c_0 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}$$

$$c_1 = c_0 \exp(2\chi h_t) - \frac{\chi^3}{4} (1 - h_t) \exp(\chi h_t)$$

$$\alpha = 16C_b \{ \exp(2\chi h_t) + 1 \}^2$$

$$\beta = 8\chi [C_b \chi \{ \chi(h_t - 1) \exp(\chi h_t) + 2 \} \{ \exp(2\chi h_t) + 1 \} + A \{ \exp(2\chi h_t) - 1 \}]$$

$$\gamma = \chi^4 [C_b \{ \chi(h_t - 1) \exp(\chi h_t) + 2 \}^2 + 2A(h_t - 1) \exp(\chi h_t)]$$

表-3 樹木群内外における河積比

調査回数	河積 (m ²)			
	全体	樹木内	樹木外	樹木内河積率 (%)
1回目	73.60	26.58	47.02	36.11
2回目	62.91	19.27	43.64	30.63
3回目	-	15.85	41.81	-

表-4 樹木群内外における流量比

調査回数	流量 (m ³ /s)			
	全体	樹木群	樹木外	樹木内流量率 (%)
1回目	157.79	9.38	148.41	5.94
2回目	-	-	131.85	-
3回目	-	-	-	-

となる。また、 a :無次元樹木密度($=\tilde{d}\tilde{h}/\tilde{s}\tilde{l}$)、 $\tilde{d}$:樹木の直径、 $\tilde{s}$:樹木の横断方向間隔、 $\tilde{l}$:樹木の縦断方向間隔、 h_t :樹木の無次元高さ($=\tilde{h}_t/\tilde{h}$)、 $\tilde{h}$:水深、 $\tilde{h}_t$:樹木群高さ(樹木群の高さが水深を超える場合は水深である)、 z :無次元水深($=\tilde{z}/\tilde{h}$)、 μ_t :無次元流速($=\tilde{u}_t/\tilde{u}_s$)、 $\tilde{u}_s$:摩擦速度($=\sqrt{g\tilde{h}i_w}$)、 C_d :樹木抵抗係数、 κ :カルマン定数、 C_b :河床の抵抗係数である。

本観測では下草が繁茂している測線上で計測された流速は樹木の影響を受けていると考えられるためマニングの抵抗式からの逆算では下草のみの抵抗を河床の抵抗係数 C_b として算定することはできない。

ここで、福岡らは洪水時にオギが倒伏している状態の下では粗度係数 $n=0.06$ を用いることとしている⁹⁾。2.(3)から、本洪水時では下草が倒伏している状態であったと予想される。このため本解析ではこれらの値を適用できると考えられる。ゆえに測線上における下草の状態が一樣であるものとし、式(2)から各測線上の河床の抵抗係数 C_b を推定した¹⁰⁾。

$$C_b = \frac{gn^2}{h^3} \quad (2)$$

これらの条件に従い実測平均流速と理論平均流速についての比較を行った。表-5に各測線において用いたパラメーターの諸元ならびに算定により得られた無次元実測流速、無次元理論流速の値を示した。ただし、樹木密度は洪水時に付着したと考えられるゴミなどの阻害面積も考慮している。その結果、特に測線 ～ において1.1～6.2倍程度、理論平均流速の方が実測平均流速よりも大きく算定された。実測値と理論値にこのような相違が生じた原因の一つに樹木抵抗が考えられる。このため、次に樹木密度の設定の仕方について考察を行った。

c) 樹木密度と流速との関係

3.(3)a)において本洪水では樹木内の流量が全体と比較し極めて小さいことが明らかとなった。このことから流水に対する阻害面積、つまり樹木密度がかなり大きいことが推測される。式(1)における樹木密度は樹木調査を実施したNo.1の帯状区を対象とし流水中に枝下のみに浸水しているものと考え算出している。しかしながら実際の洪水では観測箇所の上流部また下流部において樹冠

表-5 一定密度を用いた実測・理論無次元流速の比較

測線No	1回目					2回目					3回目				
	C_b	i_w	a	$\langle U \rangle_{exp}$	$\langle U \rangle_{theo}$	C_b	i_w	a	$\langle U \rangle_{exp}$	$\langle U \rangle_{theo}$	C_b	i_w	a	$\langle U \rangle_{exp}$	$\langle U \rangle_{theo}$
	0.0322	1/254	0.0839	1.189	3.865	0.0394	1/234	0.0756	2.772	3.784	0.0421	1/218	0.0744	3.262	3.536
	0.0354			0.605	3.763	0.0388			1.399	4.043	0.0416			1.627	3.840
	0.0385			1.310	3.754	-			-	-	-			-	-
	0.0403			1.067	3.367	-			-	-	-			-	-
	0.0399			0.860	3.618	-			-	-	-			-	-
	0.0451			2.313	3.413	-			-	-	-			-	-

部にまで浸水している様子が確認され、No.1測線において算定された樹木密度では河道内樹木による流水障害面積を代表値として表現できないと考えられる。すなわち、洪水時における流水障害を考慮する際はゴミの集積状況等も含め樹木群の場合、ある程度変化する箇所毎に樹木の調査を実施し、幹・枝・葉、全てを含めた総投影面積を用いることで樹木抵抗として評価する必要がある。表-6に実測と理論における平均流速を合致させることで得られた逆算樹木密度の値を示した。その結果、初期値よりも数倍～数十倍の値が示された。これらの値を用いた一例として測線に適用した理論分布を実測分布と比較し図-8(a),(b)に示した。

4. まとめ

今回の調査では、超音波流速計を用いて洪水時における実河川での樹木群内流速観測を行った。

計測されたデータは既往文献による分布傾向に従っているものと考えられ、今回初めて試みたADPを横断方向にスライドさせ計測していく方法は、洪水観測の一手法となりえることが期待された。しかしながら本観測手法の適用は今回が初めてであり、今後流速計測の精度上昇などを目的とした改良が望まれる。また、樹木間流速を決定する一つの大きな要因となる流水障害面積の測定方法に関しさらに検討を進める必要がある。

今後は、治水・環境の両面から河道内樹木の管理を行う上で観測を積み重ね実測データを蓄積し、これまでの実験水路や数値シミュレーションなどによる既往研究成果と比較・検討を行うことが必要と考えられる。

謝辞：本論文は北海道開発局帯広開発建設部治水課の承認により執筆することができた。ここに記し、関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下武雄，渡邊一夫：超音波流速計の洪水観測への応用，河川技術論文集，第9巻，pp.225-229，2003。
- 2) 佐藤慶太，二瓶泰雄，木水啓，飯田裕介：洪水流速観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用～江戸川を例にして～，水工学論文集，第46巻，pp.763-768，2005。
- 3) 小林範之，金目達弥，藤田一郎：PIVによる洪水時流量観測装置の開発，河川技術論文集，第8巻，pp.55-458，2002。

表-6 逆算から算定された無次元密度

測線No	1回目	2回目	3回目
	1.14	0.166	0.0935
	4.50	0.939	0.650
	0.919	-	-
	1.12	-	-
	2.17	-	-
	0.231	-	-

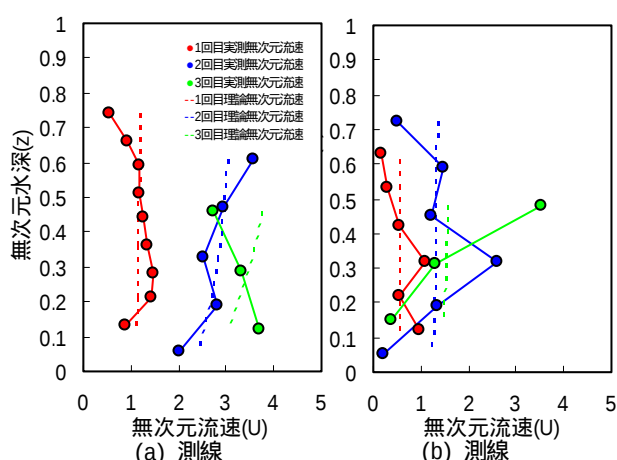


図-8 逆算密度を用いた実測・理論無次元化流速比較

- 4) 武藤裕則，北村耕一，馬場康之，中川一：ADCPを用いた水制域における流速分布計測，水工学論文集，第49巻，pp.37-642，2005。
- 5) 和田守弘，木倉宏成，有富正憲，森治嗣：超音波流速分布計測法を用いた河川流動計測，河川技術論文集，第9巻，pp.31-234，2003。
- 6) 福岡捷二，藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響，土木研究所報告，第180号-3，pp.1-64，1990。
- 7) 渡邊康玄：樹木と水利，土木学会水理委員会，水工学シリーズ95-A-9，pp.1-19，1995。
- 8) 渡邊康玄，平野道夫，井出康郎：樹木群内の流速水深方向分布と浮遊砂の濃度分布，北海道開発土木研究所月報，pp.271-276，1994。
- 9) 福岡捷二，渡邊明英，盛谷明弘，日比野忠史，大村靖人：オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性，第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，第41巻，pp.45-250，1997。
- 10) 渡邊康玄，北條紘次，清水康行：樹木の存在する河道の流況特性，水工学論文集，第35巻，pp.133-138，1991。

(2005.9.30受付)