

洪水時における砂州上の樹林帯内の流速分布観測

Field observation on flow distribution during flood in riparian forest

(株)北開水工コンサルタント ○ 正員 油川曜佑 (Yousuke Aburakawa)
北見工業大学社会環境系 正員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)

1. はじめに

河道内における樹木は、河道の景観や多様な生息環境を形成する上で、重要な位置を占めている。その一方、洪水時には樹木は流水に対する抵抗要素となるため流下阻害や水位の上昇をもたらす。近年、地球温暖化の影響により台風や集中豪雨が多発して大規模な出水が発生しており、H29年7月九州北部豪雨やR元年東日本台風などでは大量の流木が流出し、洪水被害を拡大させた大きな原因となっている。そのため、治水と環境の両面から、河道内樹木管理を適切に行っていく必要があり、これまで全国の河川において、様々な視点から洪水時における河道内樹木が流水へ与える影響について検証がされてきた。

北海道十勝川水系においても音更川などで超音波流速計を用いた樹林帯内流速調査や水位計測などが実施され、調査方法の有効性や樹林帯内における流量割合や流速分布の構造などに関する有用な知見が得られてきた¹⁾。しかし、現象をより詳細に把握し、河道内樹木を適切に管理していくための河道計画を策定していくには、更なる解析が望まれる。

本研究では、H19年9月猿別川洪水時に樹林帯内流速等の把握を目的に実施した観測データを用いて樹林帯内流速理論式による再現計算や河道平面形状や河道内樹木群の平面的な分布を考慮できる平面2次元数値解析モデルによる流況解析を行い、洪水流に対する樹木群の影響について検討する。

2. 調査区間の概要

猿別川は十勝川の支川であり流域面積443.5km²、流路延長53.7kmをもつ一級河川である。

H19年当時、猿別川のKP2.8~KP3.0の低水路右岸側の砂州上にヤナギ類を主とする一斉林が繁茂し樹林帯を形成していた。この樹林の規模は、延長約30m、幅約14mであり、幅は低水路幅に対して約24%を占め

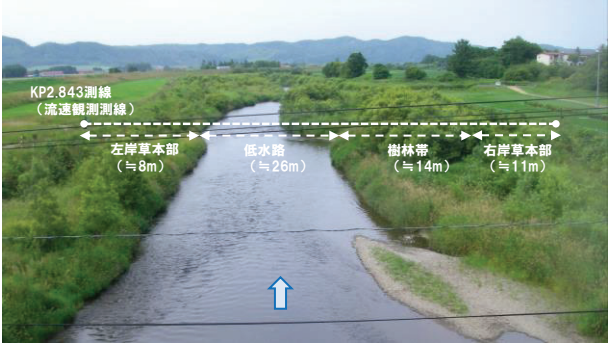


写真1 調査地点状況 (H19年8月)

表1 樹木調査

河川名	調査測線	樹林帯幅 (m)	調査面積 (m ²)	平均樹径 (cm)	本数 (本)	樹高 (m)	枝下長さ (m)	樹木密度 (本/m ²)
猿別川	KP2.843 (樹木内)	14	70	2.8	187	4.0	2.1	2.67

ていた。そこで、この区間を含む KP2.8~KP3.0 の概ね 700m の区間を調査区間と定め、出水時の流況観測を実施した。なお、樹林帯の状況として、KP2.843 測線から 5m 上流までの調査範囲 70m²に約 190 本の樹木が確認された。また、砂州上の右岸草本部ではクサヨシ等の草本類の他、低木 (樹径: 約 0.5cm, 樹高: 約 1.0m) も繁茂していた。

3. 洪水概要

図1に調査箇所近傍の KP3.0 付近に位置する止若観測所の調査対象とした H19年9月出水時の水位ハイドロおよび中里雨量観測所のハイドログラフを示した。

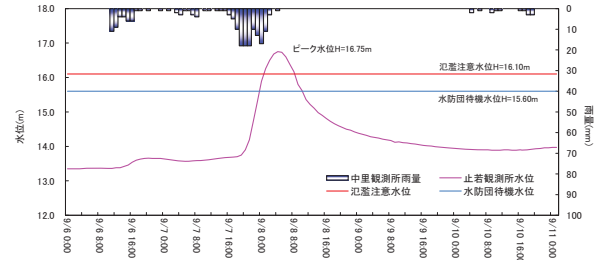


図1 H19年9月洪水ハイドロ
(水文・水質DBより抽出)

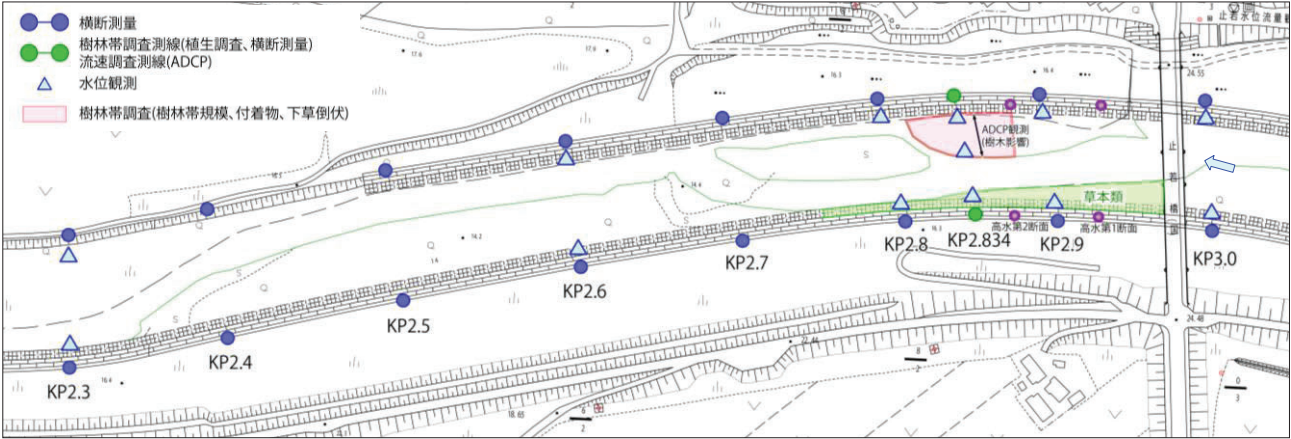


図2 調査位置図



写真2 調査箇所における樹木繁茂状況 (左: 航空写真 右: 右岸からの状況)



写真3 樹林帯内流速観測測線 (KP2.843 測線) における樹木状況

写真4 付着物堆積状況

水位は平常時の水位である 13.75m 程度から徐々に上昇し始め、9月8日4時頃にはん濫注意水位を 0.65m 超過する最大ピーク水位 16.75m を記録した。

本出水により低水路は概ね満水状態となり調査区間の樹林帯が冠水し樹林帯内の流速観測が可能となった。

4. 主な調査概要

(1) 水位観測

KP3.0 左右岸, KP2.9 左右岸, KP2.843 左右岸・樹林内2か所, KP2.8 左右岸, KP2.6 左右岸, KP2.3 左右岸に圧力式水位計を設置し, 10分間隔で水位を計測した。

(2) 樹林帯内流速調査

KP2.843 測線上右岸高水敷から 30m 離れた樹林帯内の地盤 (地盤高 $H=14.57\text{m}$) に ADCP 超音波流速計を設置し樹林帯内の流速観測を連続的に実施した。

ADCP は水位が上昇し樹林帯部へ冠水すれば観測が可能となるよう出水前に設置した。流速観測は水深方向の測定間隔を 0.10m とし, また, 測定は1秒毎に連続的に計測し1分毎に平均して流速の値とした。

5. 調査結果

(1) 出水状況

写真3に, 流速の観測地点の出水による状況の変化を示す。洪水前は右岸草本部の下草が繁茂し対岸の様子はほとんど確認できない。洪水中には樹林帯内に流れが生じ, また, 右岸草本部は一部の低木を除けばそれらの下草は完全に倒伏していた。また, 写真4に示すように, 洪水後は樹林帯の樹木にゴミなどの付着物の堆積が確認されたため, 出水後に平均的な堆積の仕方をして30本程度を選定し, 写真計測により樹木1本あたりに堆積する概算面積を求めた。

その結果, 樹木1本あたりにおける付着物の高さは約 1.0m, 幅は約 0.2m, 面積は 0.16m^2 と概算された。調査区間の樹木の本数は190本程度であることから, ゴミの阻害面積は 30m^2 程度と推察された。

(2) 水位観測結果

図3に各測線における水位ハイドロを示した。また図中には樹林帯が位置する KP2.843 測線の横断面図を併記した。KP2.843 測線では樹林帯が位置する右岸よりも左岸水位の方が高く最大で7cm程度の水位差があっ

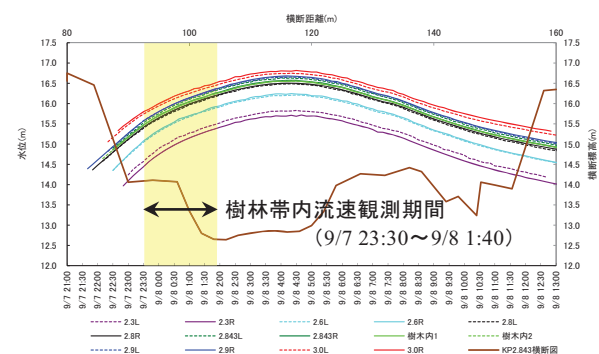


図3 各測線における水位ハイドロ

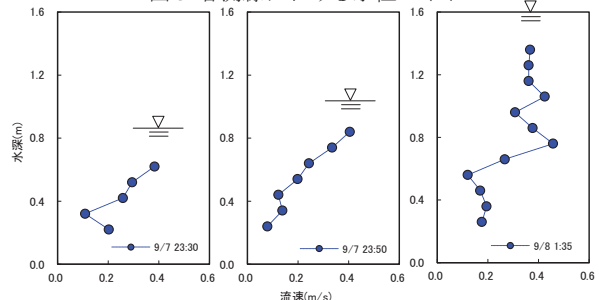


図4 各流速分布図事例

た。右岸側水位と樹林帯内水位は2箇所ともほぼ同じ水位を示した。また KP2.3 と KP3.0 では左右岸に水位差があり, KP2.3 では左岸が右岸よりも, KP3.0 では右岸が左岸よりも高く約 10cm の水位差があった。

洪水時における樹林帯内の水位は樹林帯の影響により主流部よりも小さくなるのがこれまで報告されており¹⁾, KP2.843 測線でも同様の傾向がみられた。

一方, KP2.3 と KP3.0 測線の水位差については, 両者は湾曲付近に位置しているため, 湾曲外岸となる KP3.0 右岸, KP2.3 左岸は湾曲内岸の KP3.0 左岸, KP2.3 右岸よりも水位が上昇したものと考えられる。

(3) 流速観測結果

ADCP による観測水深と樹林帯内の水位計測による実測水深が概ね一致し, 精度の高い流速が観測されたと考えられる9月7日23:30~9月8日1:40までの流速分布を5分毎に抽出した。この時間帯は, 10分で水深が約 0.8m から 1.6m に上昇するかなり水位上昇の激しい時間帯である。

図4に計測事例(9/7 23:30・9/7 23:50・9/8 1:35)を示した。一般に流れの中に剛体が存在する場合, その剛

表2 各調査時における樹林帯内流量率

河川	対象 洪水	樹林帯 面積 (m ²)	低水 路幅 (m)	樹林 幅 (m)	調査 面積 (m ²)	樹林 幅 (cm)	本 数	樹木 密度 (本/m ²)	樹林帯内 平均流速 (m/s)	樹林帯内河積 (m ²)	断面全 体流量 (m ³ /s)	樹林帯内 流量 (m ³ /s)	樹林帯内 流量率 (%)
音更川	H15.8	8,800	70	26	130	6.7	69	0.53	0.36	26.58	158	9.6	6.1
音更川	H17.9	8,800	70	26	130	8.9	68	0.52	0.70	58.25	223	18.9	8.5
猿別川	H19.9	420	59	14	70	2.8	187	2.67	0.30	27.33	361	8.2	2.3

体が受ける力は $F=1/2C_dAu^2$ (C_d :抵抗係数, A :剛体の投影面積, u :流速) で算定される。ゆえに流れの中の樹木には流速の2乗に比例する力が働く。そのため、流れには流速の2乗に比例する抗力が抵抗として働くことになる。つまり、流れに働く抗力は流速の大きい表面付近で大きく、流速の小さい底面付近で小さく働くため、樹林帯内の流速は、水深方向に一様化し樹林帯が存在しない場合の放物状の流速分布とは大きく異なると考えられている。

しかし、得られた樹林帯内流速分布は鉛直方向に一様化しておらず、いずれの時間帯でも表面付近よりも河床近傍の流速が低減する傾向が見られた。樹木には洪水後に高さ約1mの付着物が確認されており、洪水時にどの時点で付着物が堆積したかは不明だが、河床付近の流速は付着物堆積下で観測している可能性が考えられ、流速低減は付着物による遮断面積の増大によるものと推察される。なお、得られた樹林帯内流速分布から算定した平均流速は0.18m/s～0.30m/sとなった。

(2) 主流部流速と樹林帯内流速との関係

本調査では樹林帯内流速観測断面 (KP2.843 測線) における主流部の流速を直接計測していないが、ADCP 観測期間中に図2に示す調査箇所近傍の止若橋から浮子による高水流量観測が実施されており、その時の主流部の流速は約2.2m/sであった。

これより、樹林帯内流速は主流部の流速と比較し1/10～1/15程度まで減少していることになる。

(3) 断面全体と樹林帯内を通過する流量との関係

断面全体を通過する流量 (以降、断面全体流量) と樹林帯内を通過する流量 (以降、樹林帯内流量) の関係を把握する。断面全体流量は高水流量観測によるH-Q式から算定した。樹林帯内流量は樹林帯内流速を樹林帯内全体における流速と仮定し算定した。その結果、断面全体流量に対する樹林帯内流量率は1.8%～2.3%程度を推移した。

比較のため、表2にH15年8月・H17年9月音更川出水時に実施した調査結果を示す。音更川では樹林帯内流量は断面全体流量の6～8%程度を占め²⁾、猿別川と比較して樹林帯内流量率は高い。これは、猿別川は音更川と比較して樹林帯規模が小さいものの、樹木密度が大きいため洪水時に樹林帯内流速が小さくなる。さらに低水路幅に対する樹林幅も小さいため全体に対する樹林帯内流量が低くなったものと考えられる。

6. 樹林帯内流速理論式との比較

(1) 渦動粘性係数を用いた樹林帯内流速計算式

流速の観測された時間帯は水位の急激な上昇時であり、非定常性が強いと考えられるが、本検証では等流状態を想定し渦動粘性係数を用いた樹林帯内流速計算式³⁾を適用してその再現性を確認する。樹林帯内流速



写真5 洪水時における下草倒伏状況

計算式は式(1)で表され、河床の抵抗係数 C_b は式(2)から算定している。

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

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

式中の各ファクターを式(3)に示す。

$$\begin{cases} A = aC_d \\ c_0 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} & c_1 = c_0 \exp(2\chi h_i) - \frac{\chi^3}{4}(1-h_i) \exp(\chi h_i) \\ \chi = \left(\frac{2A}{K^2} \right)^{1/4} & \alpha = 16C_b \{ \exp(2\chi h_i) + 1 \}^2 \\ K = \frac{\kappa}{6} & \beta = 8\chi [C_b \chi \{ \chi(h_i - 1) \exp(\chi h_i) + 2 \} \\ & \quad \{ \exp(2\chi h_i) + 1 \} + A \{ \exp(2\chi h_i) - 1 \}] \\ & \gamma = \chi^4 [C_b \{ \chi(h_i - 1) \exp(\chi h_i) + 2 \}^2 + 2A(h_i - 1) \exp(\chi h_i)] \end{cases} \quad (3)$$

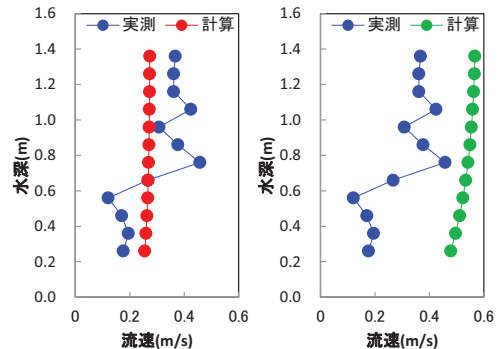
また、各記号は以下の通りである。

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_i : 樹木の無次元高さ ($=\tilde{h}_i/\tilde{h}$), $\tilde{h}$: 水深, $\tilde{h}_i$: 樹木群高さ (樹木群の高さが水深を超える場合は水深), z : 無次元水深 ($=\tilde{z}/\tilde{h}$), u_i : 無次元流速 ($=\tilde{u}_i/\tilde{u}_*$), $\tilde{u}_*$: 摩擦速度 ($=\sqrt{g\tilde{h}i_*}$), 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。なお、河床の抵抗係数 C_b 算定に使用する Manning 粗度については、福岡らは洪水時にオギ等の下草が倒伏している状態において粗度 $n=0.06$ を用いており⁴⁾、本洪水時では写真5に示すよう下草が倒伏している状態であるため同値を用いた。また、水面勾配は水位計の計測値から算定した。

(2) 実測流速分布と計算流速分布の比較

樹林帯内流速計算式を用いて各時間帯における流速分布を算定して、さらに平均流速を算定した。

上述したように樹林帯内流速は河床付近の流速が低減しており、付着物堆積下で実施した可能性が考えられる。そのため計算式のパラメーターに用いる樹木密


 図4 実測と計算流速分布図の比較
(左図: 付着物考慮 右図: 付着物未考慮)

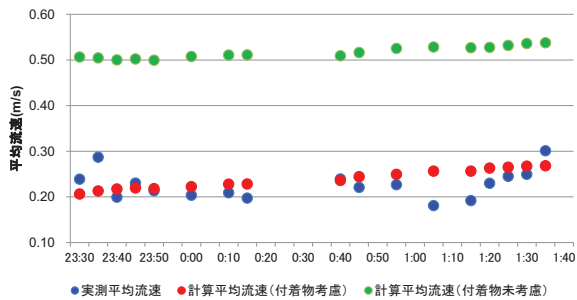


図5 実測と計算平均流速の比較

度は、付着物による阻害面積を考慮して算定した。参考として付着物を考慮しない樹木のための阻害面積の場合についても算定した。図4に9/8 1:35の分布を例に実測と付着物有無による計算流速分布を比較する。また、図5に時間ごとの実測と計算式の平均流速を示す。

その結果、計算式による流速分布は鉛直方向に様な形状を示しており、実測分布を完全に再現はできていないが、樹木密度に付着物を考慮した場合は、未考慮の場合よりも、実測分布に近づいている。平均流速は、実測平均流速 0.30m/s に対し、付着物考慮時は 0.27m/s とほぼ一致している。一方、未考慮時は 0.54m/s となり実測よりも概ね2倍程度大きく算定されている。

7. 平面2次元数値解析モデルによる流況解析

洪水時における樹林帯内の水理現象を平面的に把握するため平面2次元数値解析モデルにより流況解析を行った。計算はiRIC (ソルバー: Nays2DH) を用いた。

(1) 計算条件

計算区間は KP2.3～KP3.0 とし、洪水発生前の横断測量データを用いて計算格子を作成した。計算格子は1格子約 2m×2m とした。計算流量は、洪水時に実施された高水流量観測結果からHQ式を作成し、KP3.0地点で実施した10分間隔の水位計測値を用いて算定した。計算時間は9月7日23:30～9月8日1:40までとした。

(2) 樹木条件

樹木の抵抗係数 $C_d=1.2$ を与えた。単位体積に占める植生の遮断面積は付着物堆積を考慮し、堆積幅などの結果等から清水らの式⁹⁾を用いて $As=0.38m^{-1}$ を与えた。

なお、樹林帯内流速計算式に用いた樹木密度は任意の水深時における抵抗値を予め算定しているが、本計算では流量を非定常で与えているため、時間ごとに抵抗値は変化する。また、参考として、付着物がない樹木のための遮断面積を用いた場合についても検証した。

(3) 計算結果

図6に計算事例として9/8 1:35における流速分布図を示した。また、図7に樹林帯内実測流速と計算流速を比較した。図中には測線近傍の主流部流速、および樹林帯内水位の実測値と計算値を併記した。

その結果、遮断面積に付着物の堆積を考慮した場合は樹林帯内における計算水位は実測よりも若干低いものの概ね再現した。また、樹林帯内流速は 0.29m/s～0.32m/s となり、0.02m/s～0.1m/s 程度計算値の方が高くなった。しかし、付着物の堆積を考慮せず樹木のみ

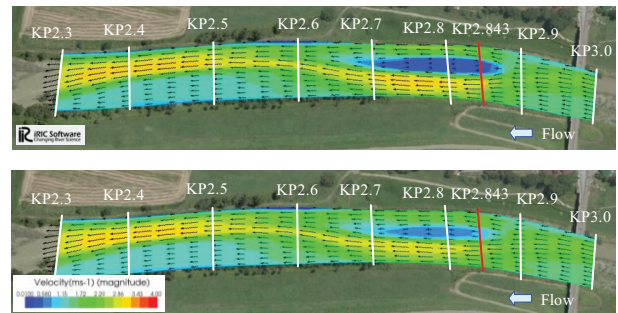
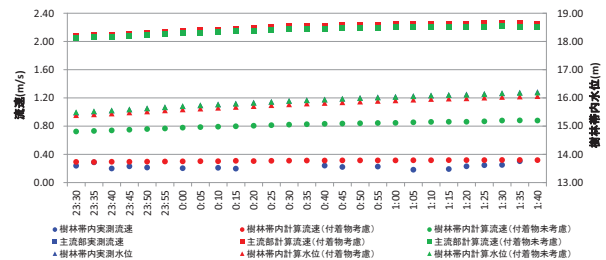
図6 付着物考慮有無における平面流速分布図
(上図: 考慮 下図: 未考慮)

図7 実測と計算平均流速の比較

とした場合は、流速は 0.72m/s～0.88m/s となり、0.5m/s～0.6m/s 程度高くなっていることを考えると、前者は後者よりも樹林帯内流速の再現性が高い。このことから流水抵抗をより正確に評価するには、ゴミなどの付着物の影響を考慮する必要があると考えられる。

8. まとめ

本報告では洪水時における樹林帯内流速結果について検証した。その結果、樹林帯内流速は主流部と比較し1/10～1/15程度まで減少するが、流速は発生していることから精度の高い流量を算定するには樹林帯内流量も考慮する必要がある。

また、樹林帯内流速計算および平面2次元流況解析により、洪水時における樹林帯内の水理現象をより正確に再現したり予測するには、樹木抵抗に加え、ゴミなどの付着物を考慮する必要があると考えられた。

謝辞: 本論文の執筆にあたり北海道開発局帯広開発建設部治水課にデータを提供頂いた。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) 油川曜佑, 渡邊康玄ら: 洪水時における樹木内現地観測, 水工学論文集, 第50巻, pp.89-94, 2006.
- 2) 五十嵐拓, 数田茂, 石谷隆始: 洪水時における樹林帯内流速調査方法とその測定結果について, 北海道開発局 H17 年度技術研究発表会, 技 51.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行: 樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第44巻, 2000.