

樹木粗度を有する交互砂州地形の相当粗度

EQUIVALENT MANNING'S ROUGHNESS COEFFICIENT OF VEGETATED ALTERNATIVE BAR

米谷駿一¹・道奥康治²・神田佳一³・入江良幸⁴・坂本知奈美⁴
Shunichi KOMETANI, Kohji MICHIOKU, Keiichi KANDA,
Yoshiyuki IRIE and Chinami SAKAMOTO

¹学生会員 学士(工) 神戸大学大学院工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²フェロー会員 工博 法政大学デザイン工学部(〒102-8160 東京都千代田区富士見2-17-1)

³正会員 工博 明石工業高等専門学校(〒674-8501 明石市魚住町西岡679-3)

⁴非会員 明石工業高等専門学校(同上)

Recently, many river channels tend to be densely vegetated due to regime shifts in hydrological, fluvial and ecological processes and it is a critical engineering issue to evaluate conveyance capacity of vegetated channels. Although drag force coefficient is popularly used in evaluating drag force of vegetation, it is not always a convenient parameter in determining high water level, HWL, for a design flood. In this study, an equivalent Manning's coefficient n_v , which corresponds to drag force of overgrown vegetation in alternative bars, was theoretically evaluated by the two-dimensional two-layer (2D2L) hydrodynamic model. It was found that n_v monotonically increases with increasing discharge as long as vegetation emerged. On the other hand, n_v slightly decrease with discharge after vegetation submerged. Findings is to provide useful information for flood management of vegetated river channel.

Key Words : Manning roughness coefficient, vegetated channel, alternative bar

1. 序章

今日、人為制御がなされた多くの河川において水文・土砂過程・生態系のレジームシフトが樹林化を誘起し、流水の疎通障害や生態系の劣化が進行している。出水時には、山腹だけではなく河川敷からも流木が生産されて橋梁・井堰などの横断工作物に滞留・蓄積し、水位上昇や越水氾濫をもたらす。河道内樹林は治水安全度を低下させるだけではなく、河川生態系のハビタットやコリドーを提供するなど、様々なエコロジカル・サービス機能を有している。そのため、治水面だけでなく環境面からも河道内樹林の適正な管理が重要となっている。

高水管理において計画高水位HWLを一次元不等流解析により求める上では、抗力係数よりマンニングの粗度係数により樹林粗度を記述できれば便利である。一般に粗度係数は河道潤辺の状況や実績洪水の痕跡などから推定されるが、不確定要素があり治水計画では安全側に評価される傾向にある。しかし、維持管理において樹木伐採を効率的・省力的に進めるためには、できるだけ実態に応じた粗度係数を用いて河道の疎通能力を管理することが望ましい。特に、樹林の疎通障害が厳しい区間では、

水位をHWL以下に維持するために樹林粗度の高精度な評価が必要である。

今日、様々な平面二次元流モデルが用いられているが、その多くは浅水流モデル(一層モデル)であり樹林の抗力抵抗は水深平均流速を用いて表される。しかし、計画高水規模の出水では、多くの樹木が水没し、流れが樹林帯上部の高速流と樹林帯内部の低速流の二層に分かれる。「高速-低速」層間の鉛直せん断層、あるいは「樹林帯-主流」間に発達する水平せん断層には質量・運動量交換が発生し、流水抵抗の一部を担う。そこで、樹林帯周辺に発生する内部せん断力を適切に記述するために、著者らは樹木高さで流れを二層に分割して樹林帯内外の越流・透過流構造を考慮した二次元二層流(2D2L)モデルを開発した。2D2Lモデルは捨石水制や捨石堰の透過性構造物が設置された開水路流¹⁾、実河川の樹林化区間における洪水流²⁾、樹木模型を配した実験水路の流れ³⁾などに適用され、流れの再現性が確認されている。樹林帯が冠水するような計画規模の出水では、2D2Lモデルのような水理解析によって樹林帯の抵抗を評価し、樹林部の相当粗度係数 n_v を求めることが望ましい。

著者らは2D2Lモデルを樹木粗度を有する直線複断面開水路に適用し、 n_v の樹林・水理条件への依存性を明ら

かした⁴⁾。 n_v を実用に供するためには、より広範な河川地形・樹林・水理条件へと解析対象を拡張し、 n_v の普遍的な水理特性を見出すことが必要である。

一般に中下流部では交互砂州上に樹林が発達することが多いため、本研究では樹林帯が左右岸交互に配置された河道の相当粗度を検討する。このように平面二次元的な樹林の配置では、流れの構造が不均一であり、厳密には粗度係数が二次元的に変化する。しかし、縦断水面形を求めるための一次元解析で必要な情報は、樹林帯域の空間平均的な相当粗度係数である。本研究では、樹木粗度を配した交互砂州モデルを模型開水路に設置し、樹林平均の相当粗度係数 n_v を求めるための水理模型実験を実施した。2D2Lモデルによって水深・流速分布や n_v を求め、実験結果との比較からモデルの妥当性を検証する。次に、様々な交互砂州地形、樹林、水理条件に対して2D2Lモデル解析を実施し、流れの構造や n_v の特性を明らかにする。さらに、交互砂州と同じ断面諸元・樹林化潤辺を有する直線複断面開水路について n_v を比較し、樹林帯の平面配置が n_v に及ぼす影響について考察する。

2. 水理実験による2D2Lモデルの検証

(1) 実験の概要

2D2Lモデルの適用性を確認するために水理模型実験を実施した。樹林の交互配置効果に焦点を絞るために実験では単断面開水路（幅1m，水路長8m，水路勾配1/1000）の長さ6.856mの区間に、表-1の諸元を持つ樹木模型（木製円柱）を図-1のように4.5波長分交互配置した。以上の条件の下に流量 $Q_0=8.10\sim 35.87\text{ l/s}$ の範囲で等流状態を作り、流速・水深の計測に加えて断面全体の粗度係数 N_1 を逆算した。

(2) 本解析と水理実験との比較

水理実験における横断面内の粗度係数 N_1 を流量 Q_0 と等流水深 h_0 からマンニングの等流公式（式(1)）より逆算した。

$$N_1 = \frac{R^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot A}{Q} \quad (1)$$

ここで、 A : 流水断面積、 I : 水路勾配、 R : 径深である。

また、2D2Lモデルによる Q_0 と h_0 の解析結果からも N_1 を逆算し、実験値との比較を図-2に示す。図中の実線は2D2Lモデルによる解析値を、プロットは実験値を示している。図-2をみると、実験値に表れている h_0 の増加率の傾向を2D2Lモデルでは表現できている。また、樹木冠水後 ($h_0 \geq h_v=6\text{ cm}$) における N_1 の減少傾向も2D2Lモデルと実験で概ね一致している。以上の結果から、樹林が交互配置された開水路流の水理特性が2D2Lモデルによって再現されることが確認された。

表-1 実験条件

樹径 d (cm)	樹高 h_v (cm)	樹木間隔 ΔS (cm)	樹木密度 N (本/cm ²)	密生度 λ_{veg} (cm ⁻¹)
1.2	6	10.95	0.00834	0.01

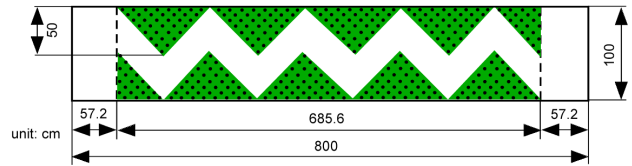


図-1 実験水路の諸元と樹木配置

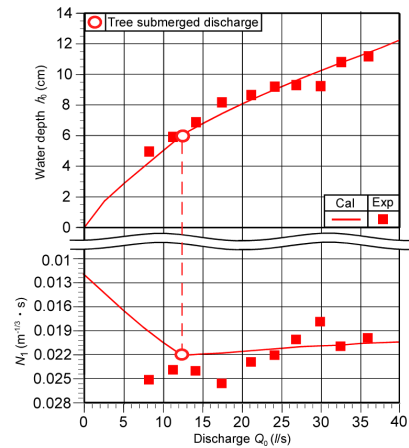


図-2 実験、解析における $[Q_0 \text{ vs. } h_0]$ 、 $[Q_0 \text{ vs. } N_1]$ の関係

3. 相当粗度係数 n_v

(1) 相当粗度係数 n_v の定義

交互配列の樹木粗度を有する図-3(a)のような複断面開水路を考える。抗力係数 C_D を用いると樹林の流水抵抗力 F_V は次式のように記述される。

$$F_V = \frac{1}{2} C_D \rho \lambda_{\text{veg}} U_1^2 h_v \quad (2)$$

ここで、 U_1 : 樹林帯内流速（下層流速）、 h_v : 樹木高さ、 λ_{veg} : 密生度（単位体積当たりの樹木の投影面積）である。

樹径 d 、樹木間隔 ΔS 、樹木密度 N を用いて密生度 λ_{veg} が次式で定義される。

$$\lambda_{\text{veg}} = dh_v / \Delta S^2 h_v = d / \Delta S^2 = d \times N \quad (3)$$

2D2Lモデルでは、 F_V が二層流下層の樹林帯内流速 U_1 によって表現される¹⁾²⁾³⁾。ここでは、水面が河床と同一の縦断勾配を有する等流状態を考える。

次に、図-3(a)と同じ水路形状で壁面粗度を配した開水路を図-3(b)のように仮定し、図-3(a)と同じ等流状態の水面勾配を実現するための相当粗度 n_v を求める。この時、次式の相当壁面せん断力 τ_v が図-3(a)の開水路系に介在する全ての流水抵抗と等価な効果をもたらすと考える。

$$\tau_v = \frac{\rho g n_v^2 U^2}{R^{1/3}} \quad (4)$$

壁面粗度水路では、式(4)により浅水流（一層流）の水深平均流速 U を用いて τ_v が記述される。

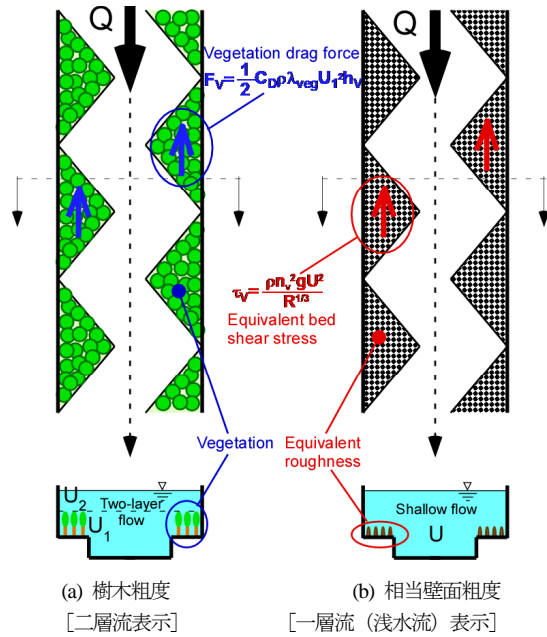


図-3 樹木粗度と相当壁面粗度を有する複断面開水路

表-2 水理・河道条件

流量: Q (m^3/s)	200~4,000	
河床勾配: I_0	1/1,000	
マニングの粗度係数: n ($m^{-1/3} \cdot s$)	低水路	0.028
	高水敷	0.055
	樹林床	0.031
河道形状 (m)	低水路幅	80.0
	低水路水深	1.0
	高水敷幅	100

表-3 樹木条件

CASE	樹径 d (m)	樹高 h (m)	樹木密度 N (m^2)	密生度 λ_{veg} (m^{-1})
0	0.1	4	0.1	0.01
1a	0.05	4	0.1	0.005
1b	0.2			0.02
2a	0.1	3	0.1	0.01
2b		5		
3a	0.1	4	0.3	0.03
3b			0.5	0.05

n_v の具体的な算定手順は以下のようである(計算フローの詳細は前報⁴⁾を参照)。

- ①図-3(a)の樹木粗度水路を対象に、ある流量 Q に対する2D2Lモデル解析を実施し、区間内の水面勾配 I_1 が河床勾配 I_0 に一致するような下流端水深 h_1 すなわち等流水深 h_0 をNewton法により求める。
- ②同じ水路形状の壁面粗度水路(図-3(b))を対象として浅水流解析(2D2Lモデルによる一層流解析)を実施し、①と同じ(h_0, I_1)を与える粗度係数 n_v をNewton法により求める。

以上のようにして得られた n_v は、樹冠での鉛直せん断力 τ_v 、「樹林-主流境界」間の水平せん断力 τ_h 、樹林床の壁面せん断力 τ_0 、樹木の抗力 F_v 、さらには複断面による内部抵抗や樹木の交互配置などの地形的影響も含めた動力学効果が組み込まれた集中パラメータとみなせる。

4. 開水路諸元と水理条件

(1) 対象とする複断面開水路

n_v の実河川への適用を視野に入れ、図-4のように高水敷上全域に樹木粗度を有する交互砂州地形の複断面開水路を想定し、2D2Lモデルによる等流解析を実施した。河幅 B と交互砂州の波長 λ_B については、村本・藤田が提案した単列交互砂州の特性を参考に設定した⁵⁾。直線複断面水路との比較を想定して、横断面の低水路諸元(低水路深さ: $h_m=1m$)と樹林潤辺長を流下方向に一定とした。低水路満杯流量は $Q_0=100m^3/s$ である。水路・樹木条件は著者らが研究フィールドとする加古川河口距離23.0~24.4km区間の諸元²⁾を勘案して、表-2、表-3のように設定した。樹木条件についてはCASE0を基準ケースとし、樹径 d 、樹高 h_v 、樹木密度 N をそれぞれ変化させた7ケースを設定する。

(2) 等流状態の確認

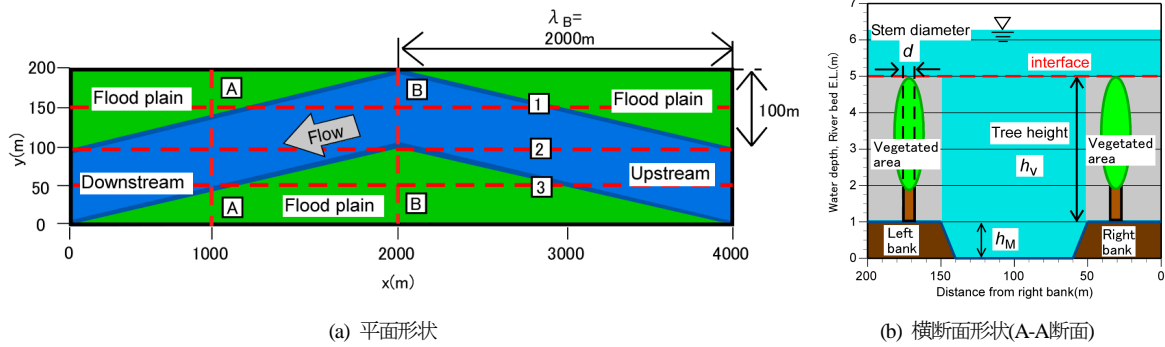
対象とする流れは平面二次元構造を有し厳密には等流ではない。しかし、ここでは樹木の粗度係数評価を目指していることから、一次元流へ帰帰して水理特性を論じる必要がある。そこで、区間内の水面勾配 I_1 が概ね一定で河床勾配 I_0 にほぼ等しい場合に「等流状態」と定義し、これを満足する樹林帯の空間平均粗度係数を相当粗度係数 n_v と定義する。

「等流状態」の達成度を確認するために図-5に縦断水面形の解析例(表-3のCASE0: $Q=4,000m^3/s$ の場合)を示す。図の実線はそれぞれ図-5における縦断面1,2,3における水位の縦断分布を示す。図-5(b)は図-5(a)の赤四角部の拡大図である。断面2の水面には微小な定常波が「低水路-高水敷」境界の隅角部に発生するが、動水勾配への影響はほとんどない。このように、水深が横断方向にほぼ不変で河床勾配とほぼ一致する縦断水面勾配が得られており、「等流状態」の解が得られたと考える。

5. 相当粗度係数 n_v の解析

(1) 流れの構造

CASE0で $Q_0=4,000m^3/s$ の場合について、二つの横断面(図-4(a)のA-A, B-B断面)における流速分布を図-6に示す。ここで、 q_i : 二層界面での連行速度(鉛直上向きを正とする)である。連行は上下層間の流速せん断によって発生する。 q_i は鉛直方向の交換速度であり連続式から算定される¹⁾。二層界面は樹冠頂部の高さで横断方向に様に設定される。図-6(a)を見ると、全層平均流速 U は樹林帯部で小さく低水路で大きいことから、高水敷-低水路間の速度せん断構造を確認できる。さらに、上層流速 U_2 と下層流速 U_1 を比較すると、いずれの横断面位置



(a) 平面形状
 (b) 横断面形状(A-A断面)

図4 解析対象の水路平面地形と諸元の定義

においても U_1 が小さく、樹林帯の減速効果が低水路部にまで行き渡っていることが分かる。下層と上層の横方向流速成分(V_1, V_2)を見ると、下層では樹林床から低水路に向かう流れ、上層ではその逆方向の流れが確認される。また、連行速度 q_t を見ると樹林帯のほぼ全域で鉛直上向き、低水路では鉛直下向きとなっている。図-6(b)でも同様の傾向が見られ、樹林帯内外の質量・運動量交換特性が確認される。2D2Lは層平均モデルではあるが、断面内二次流の特性もある程度表現している。

(2) $h_0 \sim Q_0, n_v \sim Q_0$ の関係に及ぼす樹林特性の影響

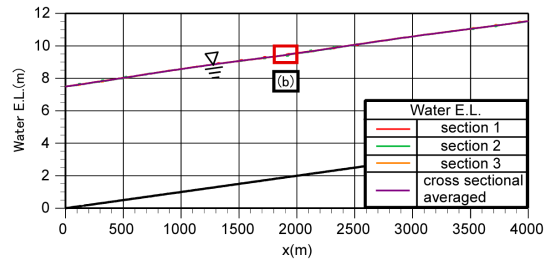
図-7には $h_0 \sim Q_0, n_v \sim Q_0$ の関係に及ぼす樹木特性 $[d, h_v, M]$ の影響を示す。曲線上の白丸は、各CASEにおいて樹木が完全に水没する場合の水深($h_0 = h_M + h_v$)をあらわす。いずれの場合においても樹木冠水前と比較して樹木冠水後は流量 Q_0 に対する水深 h_0 の増加率は減少する。冠水後は河積に占める樹林面積の比率が流量とともに減少し、樹林の流水障害効果が相対的に減少するためである。これは、直線複断面開水路の場合と同様の結果である⁴⁾。

(a) h_0 vs. Q_0

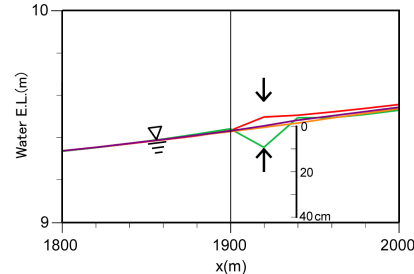
図-7(a),(c)は d および N の影響を個別にあらわしているが、実質的にはともに密度 λ_{veg} の影響をあらわす。いずれも樹木が冠水しない場合($h_0 < h_M + h_v$)には、疎通能力が樹木条件に大きく影響されることから、 h_0 の増加率は樹木特性毎に異なる。樹木冠水後($h_0 \geq h_M + h_v$)には、 Q_0 に対する h_0 の増加率は各CASEともほぼ同程度になっている。図-7(b)は、 h_v が h_0 に及ぼす影響を示す。樹木が冠水しない場合には、全CASEがほぼ同一曲線上を辿りながら h_0 が増加し、 h_v の小さいCASEから順次冠水し始めて、その後、 Q_0 に対する h_0 の増加率は減少する。

(b) n_v vs. Q_0

いずれのCASEにおいても $n_v = 0.031 \sim 0.20 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ の範囲に分布しており(ここで、 $n_v = n_0 = 0.031 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ は樹林床の粗度係数)、樹木化した高水敷でしばしば用いられるマンギングの粗度係数($0.03 \sim 0.20 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)⁶⁾と概ね対応している。樹木冠水前($h_0 < h_M + h_v$)においては、 h_0 とともに樹林の流水抵抗が増加し、 n_v は単調増加する。しかし、いずれの



(a) 全区間の水面形



(b) $x=1800 \sim 2000 \text{ m}$ の拡大図 (a)の赤四角部の拡大

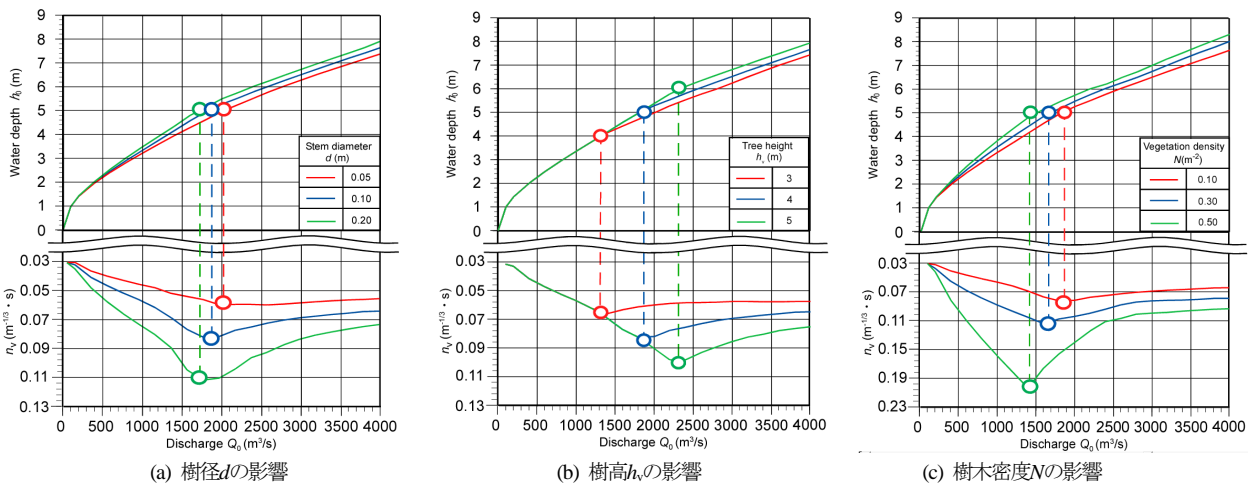
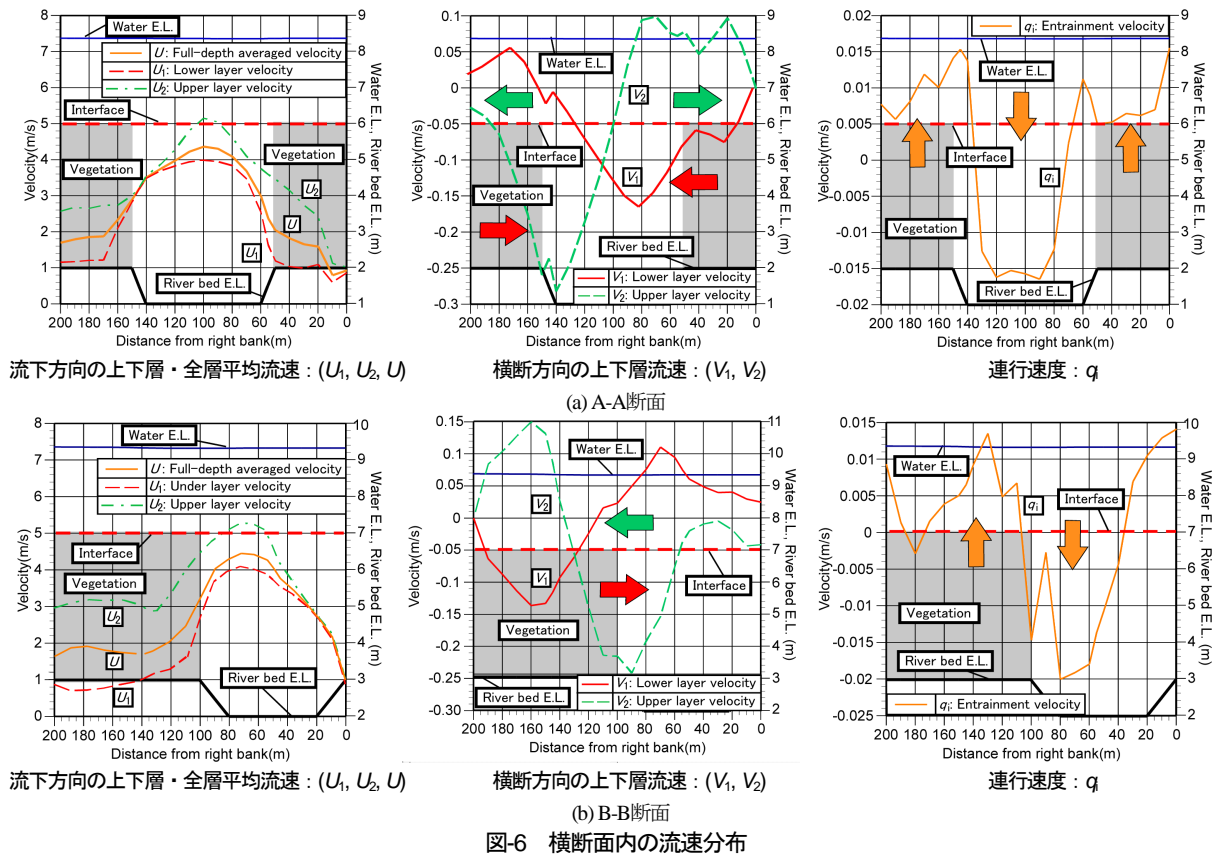
図5 縦断水面形の解析例

CASEでも、樹木冠水時($h_0 = h_M + h_v$)を極大として、冠水後は h_0 の増加とともに n_v が緩やかに減少する。すなわち、樹木の完全冠水時において樹木の流水抵抗が極大値をとり、その後、水深の増加とともに流水障害効果が相対的に減少するという抵抗特性が n_v に反映されている。これは、樹木冠水前においては水深とともに樹木抵抗が増加するため n_v が増加するのに対し、冠水後は全抵抗に対する樹木抵抗の割合が水深の増加とともに相対的に減少するためと考えられる。樹木が冠水した時に n_v が極大値をとることは、既往の実験的研究^{7,8)}でも確認されている特性であり、本解析の妥当性が確認される。より広範な条件で同様の解析を実施すれば、水量や樹木特性に対する n_v の依存関係が得られ、樹林化した河川の管理に資する粗度情報を得られる可能性がある。

6. n_v の特性

(1) 水路の平面形状、樹木粗度の影響

樹木粗度を有する交互砂州地形の開水路では、流水抵抗が、①壁面摩擦、②交互砂州の形状抵抗、③樹林の抗力からなると考えられる。①~③の抵抗成分を個別に評価するために以下の検討を行った。



まず、開水路の平面地形が粗度係数に及ぼす影響を評価するために、表-3のCASE0の樹木条件かつ図-4(b)の横断諸元を有する直線複断面開水路を設定し、交互砂州開水路の粗度係数と比較する。次に、同一断面諸元で樹木粗度がない交互砂州・直線複断面開水路のマニング粗度係数を求め、樹木の抵抗特性を検討する。

CASE1-Aを「交互砂州+樹木あり」、1-Bを「交互砂州+樹木なし」、2-Aを「直線複断面+樹木あり」、2-Bを「直線+樹木なし」とする。図-8は、これらのCASEにおける $h_0 \sim Q_0$ 、 $n_v \sim Q_0$ の関係をあらわす。なお、 $n_v \sim Q_0$ については、樹木粗度を有するCASE1-A、2-Aのみが対象である。

$h_0 \sim Q_0$ の関係を見ると、樹木が完全に冠水する $h_0=5$ m相

当の Q_0 はCASE1-A、2-A、1-B、2-Bの順に大きい。すなわち、交互砂州の形状抵抗と樹木粗度抵抗をともに含むCASE1-Aでは、4ケースの中で全抵抗力が最も大きいため、小さな流量（あるいは水深）でも樹木が冠水する。次に、CASE1-Bと2-Aは、それぞれ交互砂州の形状抵抗と樹木粗度抵抗のみが存在する場合であるが、CASE2-Aの方がCASE1-Bよりもわずかに h_0 が大きい。本解析の条件では、形状抵抗よりも樹木抵抗が卓越し疎通能力の減少に貢献していることをあらわす。

図-8下段の $n_v \sim Q_0$ の関係に着目すると、CASE1-A、2-Aは横断面内で同じ樹木諸元を有するにも関わらず、CASE1-Aの n_v の方が2-Aのそれよりも最大 $0.01\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ 程度大きい。交互砂州開水路（CASE1-A）においては、樹木

抵抗に加えて二次元地形や複断面に起因する流れの内部せん断効果が n_v に反映されていると推察される。

(2) n_v による合成粗度係数 N_2 の評価

一次元水面形解析では断面パラメータとしての粗度係数が必要である。ここでは、 n_v から合成粗度係数 N_2 を求めて逆算粗度係数 N_1 と比較し、 n_v を用いた一次元解析の可能性を検証する。一例として、CASE1-Aを対象にマンニングの等流公式から逆算された等流水深 h_0 見合いの逆算粗度係数 N_1 (式(1)) と、樹林帯の粗度 n_v やそれ以外の潤辺粗度 n_0 から井田法⁹⁾によって算出される合成粗度係数 N_2 を比較する。 N_2 は次式のように定義される。

$$N_2 = \frac{\sum (A_i \cdot R_i^{2/3})}{\sum (A_i \cdot R_i^{2/3} / n_i)} \quad (5)$$

ここで、 A_i : i 番目の断面要素の流水断面積、 n_i : (同) 潤辺粗度係数、 R_i : (同) 径深である。

図-9の N_1, N_2 を見ると、 n_v から推算された合成粗度係数 N_2 は N_1 を適切に表している。よって、樹林抗力、平面地形抵抗、水平・鉛直内部せん断力、林床の摩擦力など、全ての抵抗成分を集中化したパラメータ n_v を用いることにより、一次元解析が可能であることが確認された。

7. 結論

樹林の相当粗度係数を算出し、樹木粗度が交互配置された開水路の疎通能力を評価した。本研究で得られた成果は以下のように要約される。

- i) 樹木が冠水しない条件では、水位とともに流水断面に占める樹林面積の比率が増加するため、 n_v は流量とともに単調増加する。
- ii) 樹木が冠水する条件では、 n_v の Q_0 への依存度が弱まり、 n_v は極大値をとった後 Q_0 の増加とともに緩やかに減少する。
- iii) 樹林が交互配置される場合には、樹木単体の抗力に加えて流れの二次元構造に起因する付加応力が働くため、同じ断面諸元を持つ直線複断面水路よりも n_v は大きくなる。
- iv) 合成粗度係数 N_2 は n_v を用いて的確に評価される。

本研究では、砂州上の樹木条件が均一の場合を対象に砂州全域平均の n_v を求めた。現実には樹木は均一ではない。また、仮に均一だとしても厳密には n_v は空間的に変化する。実河川への適用を念頭にして、 n_v の評価をさらに深化する予定である。

謝辞：本研究は、平成26 (2014)年度科学研究費基盤研究(B) (代表：道奥康治，課題番号：26289164) の助成の下、神戸大学工学研究科市民工学専攻大石哲教授のご指導を頂きながら実施された。記して謝意を表する。

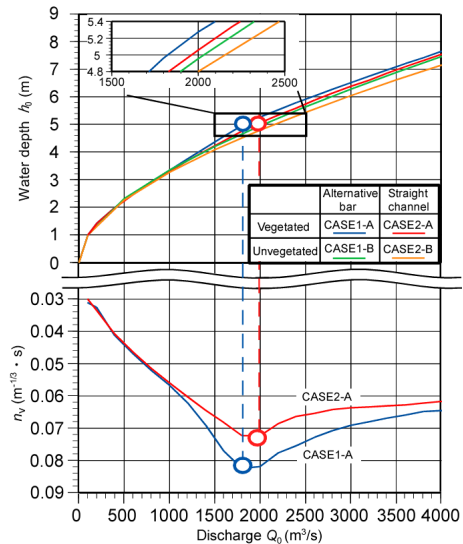


図-8 水路形状と樹木粗度の有無の h_0, n_v への影響

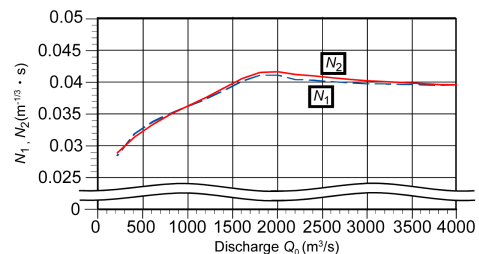


図-9 逆算粗度係数 N_1 と合成粗度係数 N_2 の比較

参考文献

- 1) 道奥康治・南條雅志・石垣泰輔・前野詩朗：捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.31-50，2005.
- 2) K.Michioku, Y.Ohchi, K.Aga, H.Miyamoto, K.Kanda: Strategy for ecohydraulic management of vegetated river channels, E-book: 9th International Symposium on Ecohydraulics, pp.4-9, 2012.
- 3) K.Michioku, T.Uotani, K.Kanda: Experimental and numerical study on hydrodynamics of riparian vegetation, Proc. 35th IAHR World Congress, pp.796-806, 2013.
- 4) 道奥康治・米谷駿一・魚谷拓矢・神田佳一・入江良幸・柳田昂希：複断面開水路における樹林の流水抵抗に関する相当粗度係数，土木学会論文集 B1 (水工学)，vol.70，pp.I_697-I_702, 2014.
- 5) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件，第22回水理講演会論文集，土木学会，pp.329-337.1978.
- 6) 水理委員会編：水理公式集，pp.89.1999.
- 7) Mitul Luhar, H. M. Nepf: A characterization of aquatic vegetative drag, Advances in Water Resources 51, pp.305-316, 2013.
- 8) Fu-Chun Wu, Hsieh Wen Shen, Yi-Ju Chou: Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation, Journal of Hydraulic Engineering, pp.934-942, 1999.
- 9) 井田至春：広中員水路の定常流一断面形の影響について一，土木学会論文集，第69号別冊，(3-2)，土木学会，1960.

(2014. 9. 30受付)