

礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究

STUDY ON DYNAMICS OF RIVER CHANNEL AND VEGETATION IN GRAVEL BED RIVER

永多 朋紀¹・渡邊 康玄²・清水 康行³・井上 卓也⁴・船木 淳悟⁴

Tomonori NAGATA, Yasuharu WATANABE, Yasuyuki SHIMIZU, Takuya INOUE, Jungo FUNAKI

¹ 正会員 北海道開発局 旭川開発建設部 (〒 096-0016 名寄市西 6 条南 9 丁目)² 正会員 北見工業大学 社会環境工学科 (〒 090-8507 北見市公園町 165 番地)³ 正会員 北海道大学工学研究科 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)⁴ 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

In this study, we developed the vegetation prevalence model. This model takes into account the existence/non-existence of vegetation and the resistance of willows above ground and their root systems to flowing water and sediment transport at different tree growth stages. The growth increment regarding various parts of a willow tree is estimated on the basis of the tree age. In the model, willows' resistance to flowing water and sediment transport is varied with time to simulate each growth stage. The vegetation prevalence model was incorporated into a riverbed evolution analysis model for analyzing the mechanism and the contributing factors of thick and extensive vegetation growth.

Key Words: tree growth, root systems, sediment transport inhibitory effect, vegetation dynamics

1. はじめに

近年, 河畔林の樹林化が全国各地で顕在化しており, 河川環境は数十年前とは大きく異なる状態へと遷移しつつある。十勝川水系札内川は, 古くは網状河道の特性を有し, 広大な礫河原上には多列状に分岐合流を繰り返す複雑な流路網が形成されていた。しかし, 1980年代頃を境に先駆種であるヤナギ林が河道内へと徐々に侵入・定着し始め, これと呼応するように主流路の位置は年々固定化し, 流路形態は単列化の傾向を高めている¹²⁾。植生域の拡大に伴って過度に進行した樹林化は洪水時の流下阻害要因となるほか, 流路の固定化は流況を単調化し, 水生生物の生息環境を悪化させる恐れがあるため, 治水面のみならず河川生態系に及ぼす影響も懸念される。河川環境にこのような劇的な変化をもたらされた要因としては, ダム等の洪水調節に起因した冠水頻度の低下や洪水攪乱面積の縮小, または, 高水敷や低水護岸・水制工等の整備に伴う川幅縮小など様々な影響が考えられるが, 樹林化に至るプロセスやその支配的な要因は未だ十分に解明されておらず, 現状評価や将来予測に基づく具体的な対策を講ずることが難しいのが現状である。

過去の航空写真から札内川の河道変遷過程を見ると, 流路の単列化と植生の樹林化は同時並行的に進行しており, 河道変化と植生動態の間には密接な関係性が類推される。通常, 植生が侵入した砂州や高水敷の河床面は草本や樹木の根で被覆されるため, 植生域は非植生域に比べると洪水時も河道変化が生じ難い条件下にあることは容易に推察できる。つまり, 植生の侵入は河道形成過程に重要な役割を果たしているものと考え

られるが, 既往の研究では植生は流水抵抗としてのみ取り扱われる場合が多く, 植生地下部の根系がもたらす土砂緊縛力が土砂輸送そのものに対する抵抗として作用する点はほとんど考慮されていない。これは, 植生地下部の根系は複雑な分布特性を有しており, その被覆効果を定量的に評価することが困難であることや, 一洪水期間を対象とする通常の洪水解析では, 河道変化と植生生長の時間スケールの違いから, 植生の生長を考慮する必要が無いためである。しかし, 数十年の期間を経て生じるような河道変化に対しては, 植生地下部の根系がもたらす抵抗は無視できないほどの影響を持つ可能性があるため, 今後, 流路の固定化や樹林化などの諸問題に対して適切な対策を講ずるには, 河道変化と植生消長の相互作用を支配する物理的機構の解明とともに, 植生侵入が河道形成過程に及ぼす影響を定量的に評価することが求められる。

著者らは過去の研究¹⁾において, 短繊維を樹木の根系に見立てた移動床水理模型実験を行い, 繊維状の物質が河床材料に混入した際の流砂量の変化を計測することで, 植生地下部の根系がもたらす土砂移動抑制効果を定量的に評価することを試みた。実験結果から, 流砂量は短繊維と珪砂の混合率に応じて大きく変化することや, 短繊維混合率と流砂量低減率との関係をモデル化した流砂量式を用いることで, 実験結果を良好に再現できることを確認した。本研究では, 河道内の土砂輸送量を支配する要素として, 植生地下部に広がる根系の役割に着目し, 根系による土砂緊縛効果を繊維状の物質がもたらす砂粒子の移動抑制効果と捉え, 植生域における河床面の耐侵食性を上記モデルを用いて評価することとした。また, 過去の樹木調査結果⁴⁾⁵⁾⁶⁾

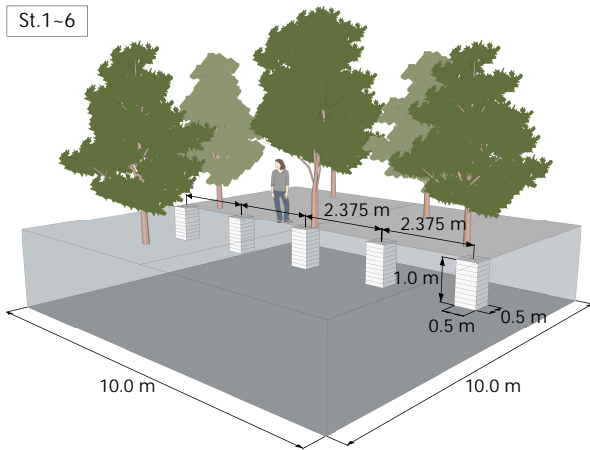


図-1 根量調査（50cm 四方，1 区画 5 箇所）

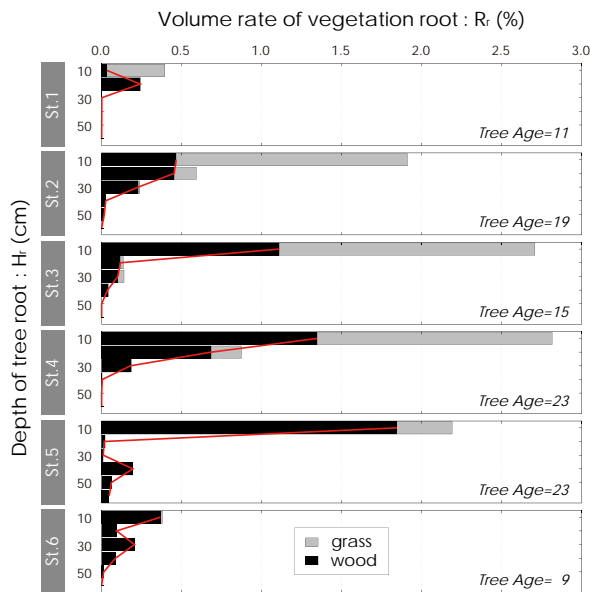


図-2 根系含有率の鉛直分布

からヤナギの各部位の生長式を求め、これを上記モデルとともに既存の平面 2 次元河床変動解析モデルへと組み込むことで、植生の地上部と地下部に作用する流水及び流砂に対する抵抗力を、植生の生長段階に応じて変化させる「植生消長モデル」を構築した。さらに、上記モデルを用いて、過去数十年間を想定した河道と植生域の長期変動解析を行い、近年河川環境に著しい変化が見られる札内川で、植生域の拡大とその樹林化がもたらされた主たる要因の解明を試みた。

2. 樹木調査

植生の侵入が河道形成過程に及ぼす影響を明らかにするため、まずは、札内川流域に広く分布する高木ヤナギ林を対象に、植生の地上部と地下部の生長特性に関する詳細な現地調査を行った。調査では、高水敷や低水路内の砂州や中州上に形成された河畔林を対象に、根系が有する鉛直方向への分布特性を把握するための根量調査と、水平方向への空間的広がりを見るための表土剥ぎ調査、さらに、樹種や樹齢のほか、樹木を構成する各部位の生長量を計測する立木調査も併せて行った。調査箇所は、既存の航空写真や横断測量データを基に、過去に極端な河道変化を受けておらず、且つ成

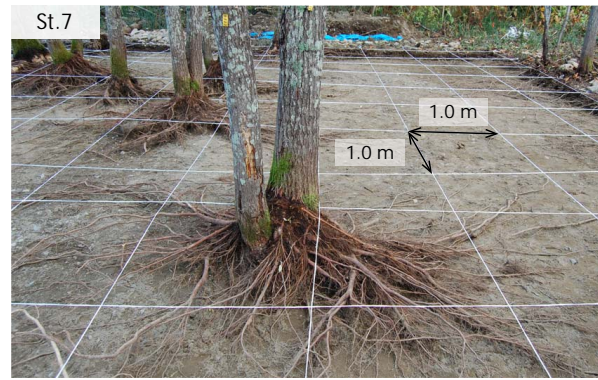


図-3 表土剥ぎ調査（札内川 KP46.6，10m 四方）

立年異なる樹林帯を計 6 箇所選定し、10m 四方の調査区画を現地に設定した（KP27.4，KP46.4～47.0）。

(1) 根系調査

a) 根量調査

根量調査では、調査区画内の横断測線上に 50cm 四方の調査フレームを計 5 箇所設置し、各フレーム内の土砂を深さ 10cm 単位で最大 10 層まで段階的に採取した。図-1 にその模式図を示す。室内にて、採取した試料に含まれる土砂をふるいや流水を用いて除去し、残留した有機物の中から木片、枝葉、枯死した流木や埋木などを丁寧に取り除き、草本と木本の根系のみを抽出した。抽出した根系は草本と木本に分けて各箇所・層毎に整理し、表乾状態と炉乾燥後（ $110^{\circ}\pm 5^{\circ}$ ，24 時間）の重量と体積を計測した。以降、表乾状態における根系の体積を「根量」と呼び、空隙を控除した単位体積当りの土壌内に含まれる土砂と根系の体積比率を「根系含有率」と呼ぶこととする。なお、河床材料の空隙率は一般的に用いられる値（ $\lambda=0.4$ ）とした。

St.1～6 の各調査区画で計測された根系の鉛直分布を図-2 に示す。図中、縦軸は根の深さで、横軸は計 5 箇所の調査フレームで計測された根系含有率を 10cm の層毎に平均化したものである。木本（wood）に関する調査結果を調査区画全体で平均すると、河床表層付近に相当する深さ 20cm 以浅の土壌内には、地下部に存在する根量の 80% 以上が集中しており、土砂との体積比 R_r では最大 0.5～2.0% 程度の根系が含まれていることがわかる。また、樹齢に関らず全ての箇所で、根系の最大到達深は 50cm よりも浅く、根系含有率の鉛直分布は深さに反比例した逆円錐型の分布特性を有している。

b) 表土剥ぎ調査

表土剥ぎ調査では、札内川上流域（KP46.6）の左岸高水敷上に 10m 四方の調査区画（St.7）を設定し、土壌内に広がる根系の位置を乱さぬよう、深さ 20cm 以浅の土砂を人力で丁寧に取り除き、河床表層を這うように発達した根系を段階的に露出させた。対象木は枯損木 2 本を含めた計 13 本である。調査の結果、推定樹齢 20 年程度の樹林帯の地下部では、樹幹を中心とした半径 3m 程度の根鉢が形成され、根系は各根鉢内での相互干渉を避けるように放射状に伸長するため、その密度は樹幹近傍が最も高く、円の外側へ行くほど低くなることがわかった。図-3 に調査の状況写真を示した。

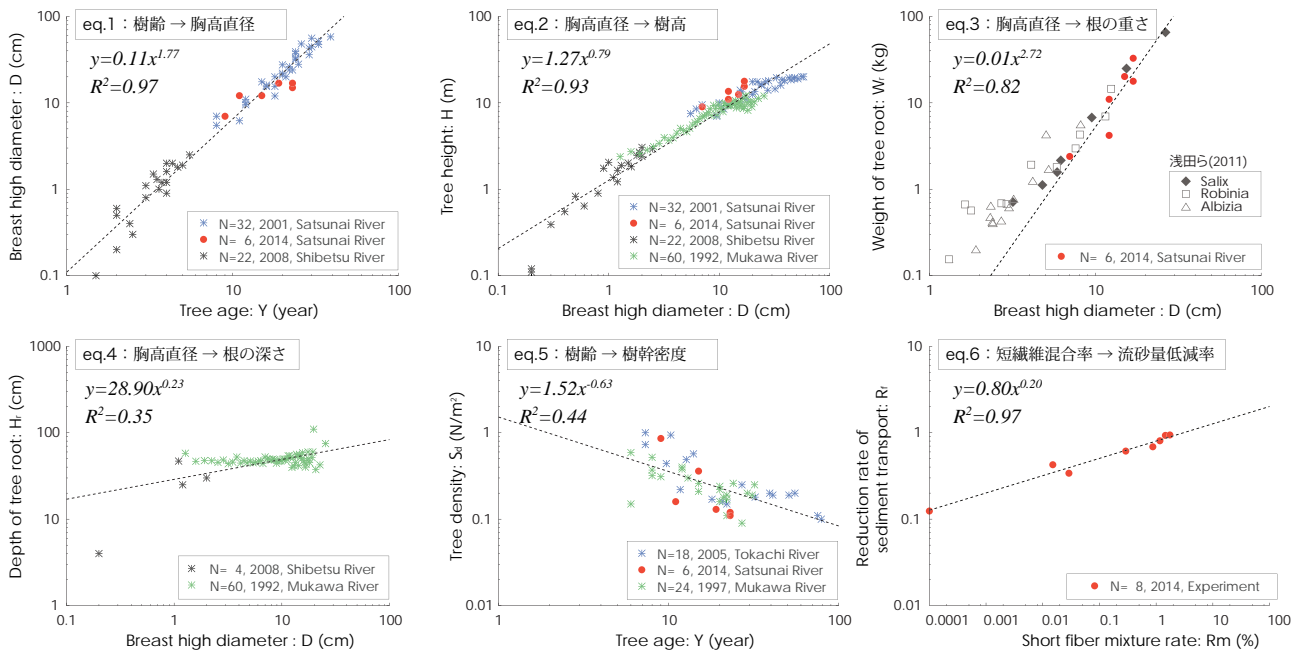


図-4 eq.1 ~ 5 : ヤナギの生長量に関する調査結果, eq.6 : 植生被覆効果に関する実験結果

c) 根系調査のまとめ

以上、ヤナギの根系に関する現地調査の結果、土壌内における根系の空間分布には一定の偏りが存在するものの、主にヤナギで構成された樹林帯の地下部では、広範囲に側根が張り巡らされており、また、それらは深さ 50cm 以下の比較的浅い領域に集中するなど、河床表層付近を這うように根系を発達させるヤナギの浅根性を裏付ける結果と言える。なお、根系の分布状況は、土質や地下水位などの生育環境の影響を強く受けるため、たとえ樹齢が同じであっても、分布状況は全く異なる場合もあることをここに付記する。

(2) 立木調査

立木調査では、調査区画内に繁茂する全ての樹木を対象に、樹高、胸高直径、樹種、本数を計測し、各樹林帯の樹幹密度を求めた。また、任意に選定した調査木を地際で切り離し、切断面の年輪判読から樹齢を推定するとともに、葉を取り除いた地上部と、極力根系を残すように根株周辺を掘り返して抜根した地下部の総重量を計測した。地上部と地下部の木片は、室内試験用のサンプルとして持ち帰り、炉乾燥後の重量と体積を計測し、材密度と根の乾燥重量を求めた。なお、今回調査した樹木の本数は計 174 本であるが、樹齢、重量、材密度等に関する調査は、St.1 ~ 6 の各調査区画内で平均的な生育状態にあるヤナギを各 1 本選定して行った。

樹木を構成する各部位のバランスは、その生長過程において非常に重要な要素となるため、樹種・樹齢に関らず樹木全般に共通した特性が見られる場合が多い⁷⁾。例えば、今回の調査結果では、ヤナギの地下部の重量は総重量の約 24% を占めるが、これは、ヒノキ、スギ、カラマツ等を対象に行われた苧住の調査結果⁷⁾ (25%) とほぼ一致した。このように、樹木の地上部と地下部を構成する各部位の生長量には相互に強い相関があり、一般的には、樹齢や胸高直径を介してその他の部位の生長量がある程度推定できる。

(3) 樹木調査結果の分析と植生長モデル

樹木が有するこのような特性をもとに、樹齢から各部位の生長量を推定する生長式を求めるため、札内川を対象とした上述の調査結果と、道内の複数河川を対象に行われた過去の調査結果とを併せて整理し、各変数間の単相関回帰分析を行った。ヤナギの樹齢や胸高直径と各部位の生長量に関する分析結果を図-4 に示す。図中 eq.1 ~ 5 に示す各点は、1992 ~ 2014 年に、鶴川、標津川、札内川、十勝川など、道東に位置する 4 つの河川で実施された現地調査結果⁴⁾⁵⁾⁶⁾ を整理したものである。

分析の結果、ヤナギの樹齢や胸高直径と、樹高や根の乾燥重量との間には非常に強い相関が認められるほか ($R^2 = 0.8 \sim 1.0$)、根の深さや樹幹密度に関しても、同様に一定の傾向が見てとれ ($R^2 = 0.3 \sim 0.5$)、これら樹木の生長量を表す諸変数間の相互関係は、ベキ関数型の生長式を用いて表すことが可能である。ヤナギの各部位の生長式と決定係数を図-4 に示す。これは一般的にアロメトリー関数と呼ばれ、浅枝ら⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾ はカワヤナギ、ニセアカシア等についても同様の関係が見られることを示しており、地下部の乾燥重量と胸高直径との関係を図中 eq.3 に例示した。札内川のヤナギ林とこれらの樹種とを比較すると、今回の調査結果は稚幼樹のデータが乏しいため全体の傾向はやや異なるが、成木に関してはほぼ一致する結果が得られている。なお、これら 5 つの生長式 (eq.1 ~ 5) を用いて、樹齢のみから植生地下部の根系含有率を算定するまでの一連の手法を図-5 に示し、以降では「植生長モデル」と呼ぶこととする。植生地下部の根系は土壌内で均質に分布しているものと仮定し、根系含有率は式 (1) より算定する。

$$R_r = \frac{W_r S_d}{(1 - \lambda) \rho_r H_r S_r^2} \quad (1)$$

ここで、 W_r は根の乾燥重量、 S_d は樹木密度、 ρ_r は根の材密度 (419 kg/m^3)、 H_r は根の深さ、 S_r は単位格子幅で、 λ は河床材料の空隙率 (0.4) である。

(1) 植生成長モデル (現地調査より)

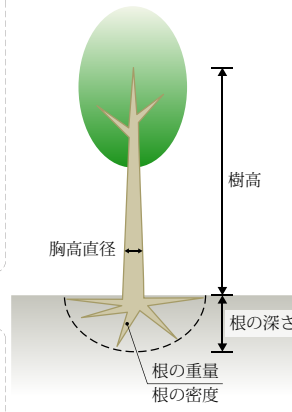
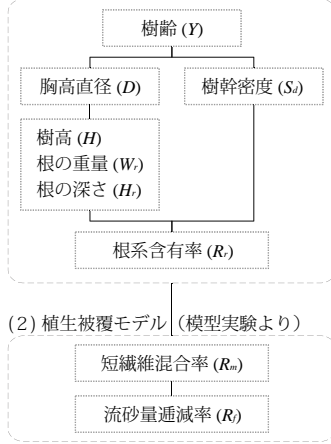


図-5 植生成長・被覆モデル

3. 植生動態解析

(1) 植生被覆モデル

著者らは過去の研究において、根系がもたらす土砂移動抑制効果を定量的に評価するため、珪砂と短繊維を攪拌混合した河床材料を用いて、定常流下の移動床水理模型実験を行っている¹⁾。実験の結果、河床材料に繊維状の物質が混入すると砂粒子の移動は抑制され、流砂量は珪砂と短繊維の混合率(体積比)に応じて変化し、短繊維混合率 R_m と流砂量低減率 R_f の関係は、図-4: eq.6 に示すように、ヤナギの生長式と同様に、ベキ関数を用いて表すことが可能である。なお、図-6 に概念図を示した短繊維の混合に伴う流砂量低減機構のモデルは、数値解析を用いてその再現性が検証されており¹⁾、以降では、これを「植生被覆モデル」と呼ぶ。

本研究では、この実験で用いた珪砂と短繊維の関係が、実河川における土砂(砂礫)とヤナギの根系との関係に置き換え得るものと仮定 ($R_r = R_m$) した。河床変動量の算定は、単一粒径のもと掃流砂のみを対象とし、流砂量式は芦田・道上の式に流砂量低減率 R を考慮した式(2)を用いる。上述の通り、流砂量低減率は流砂が生じる河床面と被覆層との位置関係によって変化するものと仮定し、式(3)から算定される。

$$\frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 17(1-R)\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{cases} R = 0 & E \geq L \\ R = R_f \exp\left(-\phi \frac{E}{L}\right) & L > E > 0 \\ R = R_f & E = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 q_b は流砂量、 s は砂粒の水中比重、 g は重力加速度、 d は河床材料の粒径、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力(岩垣の式)、 R は流砂量低減率、 R_f は被覆層の流砂量低減率、 E は移動層厚、 L は混合層厚で、 ϕ は低減係数である。なお、低減係数は、砂粒子の移動抑制効果が被覆層からの距離に応じてどのように減衰するかを表す係数で、ここでは、実験結果の再現性が最も高い $\phi=0.5$ を用いた¹⁾。また、混合層厚 L には粒径の数倍程度 ($2d$) を与える。

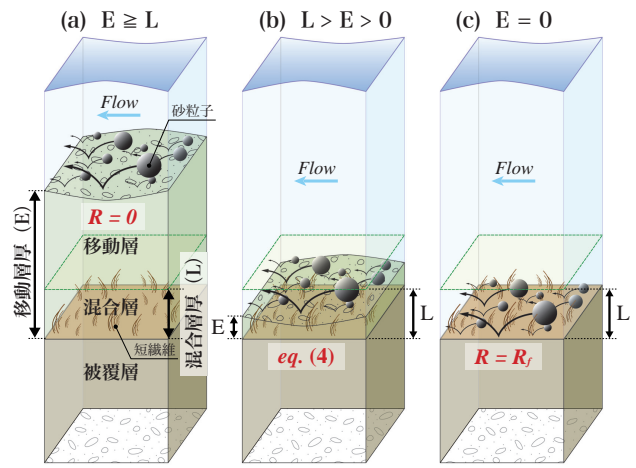


図-6 植生被覆モデルの概念図

以上、本研究では、図-5 に示すように、樹木の各部位の生長量を推定する植生成長モデルと、根系による河床面の被覆効果を評価する植生被覆モデルを用いて、樹齢から推定した根系含有率をもとに、植生地下部の根系がもたらす土砂移動抑制効果を、流砂量の低減率として定量的に評価する。

(2) 植生消長モデル

本研究で行う解析は「iRIC ver.2.2¹¹⁾」と、平面2次元河床変動解析モデル「Nays2d ver.4.0³⁾」に、樹木の生長量と根系がもたらす河床面の被覆効果を算定する上記2つのモデルを新たに組み込むことで、河道変化と植生抵抗(地上部・地下部)の相互作用を考慮した「植生消長モデル」を構築し、数十年の期間を経て生じるような河道と植生域の長期変動解析を行う。なお、植生域の地上部(樹幹)に作用する流水に対する抵抗は、植生生長モデルから推定された樹高、胸高直径、樹幹密度をもとに、式(4)を用いて算定する。

$$\begin{cases} \frac{F_x}{\rho} = \frac{1}{2} C_d S_d D h u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \frac{F_y}{\rho} = \frac{1}{2} C_d S_d D h v \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 F_x, F_y は植生の流水抵抗力、 C_d は植生の抵抗係数(0.7)、 ρ は水の密度、 S_d は樹幹密度、 D は胸高直径、 h は樹高と水深の低い方の値で、 u, v は x, y 方向の水深平均流速である。

(3) 計算条件

解析区間は、現地において樹木調査を行った札内川上流域を対象とし、流量規模は、近年の融雪出水規模が小さくなった時期(1998~2013年)と、過去に融雪出水規模が大きかった時期(1968~1997年)の平均年最大流量を定常で与え、流量規模の違いが河道と植生域の動態にもたらした影響を検証する。以降、本解析では、前者をCASE1(150m³/s)、後者をCASE2(300m³/s)と呼ぶ。計算では、年1回の頻度で発生した平均年最大規模の洪水が、定常で24時間継続するものと仮定し、洪水前後に1時間の平水流量期間(30m³/s)を加えた

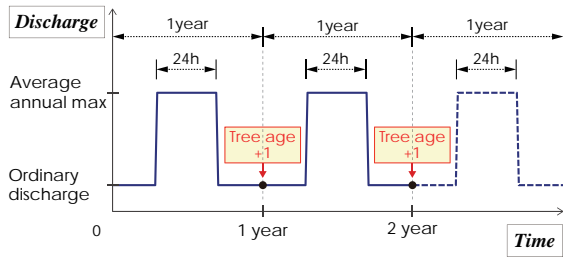


図-7 流量ハイドロパターン（繰返計算）

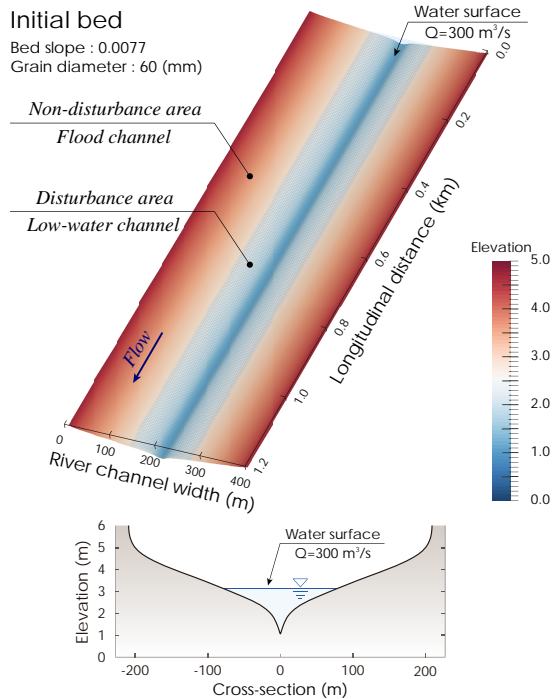


図-8 初期河道形状（札内川上流域，1974年の平均断面）

計 25 時間の通水をもって計算上の 1 年間と定義する。また、洪水後の平水流量時に、水域を除く計算領域全体の樹齢を 1 年加算することで、植生域における 1 年間の生長を表現することとし、図-7 に示す流量ハイドロパターンを計 30 回繰り返すことにより、30 年間に生じ得る河道と植生域の変化を推定する。

初期河道には、1970 年代初期の札内川上流域における河道断面形状（図-8）を与え、河床勾配は $I=1/130$ 、河床材料の粒径は $d_{60}=60\text{mm}$ の均一粒径とし、粗度係数には Manning-Strickler 式から $n=0.029$ を与えた。

植生の流失条件は、まず、洪水期間中に生じた河床低下や側岸侵食によって、植生域の河床高が根の深さ以上に侵食された場合、植生の生育基盤が破壊され樹木流出が起きるものとする。侵食深を判定する際の河床高は、植生が生長を開始した時点（樹齢=1）を基準とし、その後、河床低下量が植生生長モデルから推定された根の深さを上回った際に、該当する計算格子点の樹齢を初期化する（樹齢=0）。また、平水流量時に水面下となる領域では、植生の生育自体が困難であると推察されることから、根腐れ等の生育不良によって樹木は消失するものとし、上記同様に樹齢の初期化を行う。以上、植生の流出条件として、本解析では上記 2 つの状況を想定するものとし、倒伏による樹木の流出や、流出後の流木がもたらす影響などは考慮していない。

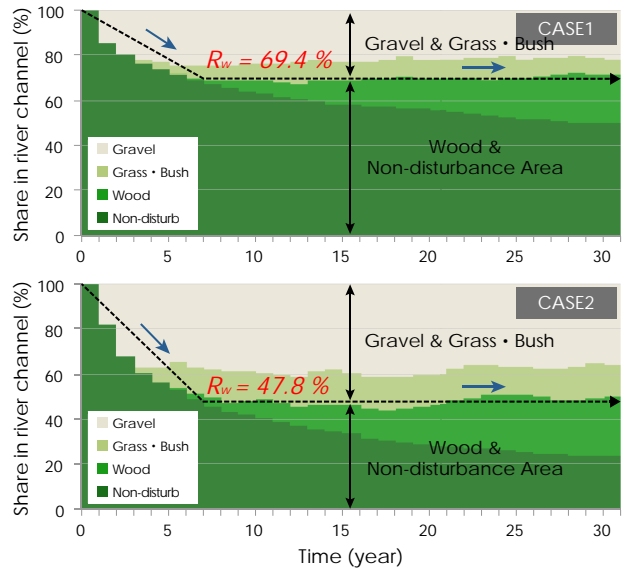


図-9 河畔林の河道内占有率の経年変化（計算結果）

(4) 計算結果

河道内における土地被覆状況の計算結果を図-9 に示す。本研究では、生長モデルから推定された樹齢と樹高の関係をもとに、樹高 0.2~1.0m（樹齢 2~4 年）を草地・低木林、樹高 1.0m（樹齢 4 年）以上を河畔林と定義し、計算期間内に一度も植生の流出・消失が生じない非攪乱領域（高水敷）は河畔林として扱う。計算結果を見ると、河畔林の河道内占有率 R_w は、両ケースとも概ね 7 年程度で平衡状態に達し、それ以降は、CASE1 は 70%程度、CASE2 は 50%程度で推移している。このことは、河畔林の面積が河道内に占める割合には、流量規模に応じたある一定の平衡状態が存在し、毎年生起する年最大規模の洪水が、河道内で維持され得る礫河原の面積に対して支配的な影響を持つ可能性を示唆している。過去の航空写真の画像解析結果²⁾から、札内川上流域における土地被覆状況は、1960 年代以前の自然状態に近い河川環境では、河畔林の河道内占有率は 40%程度の平衡状態を維持していたが、1980 年代頃を境に増加傾向へと転じ、融雪出水規模が低下した近年は 75%程度で推移している。これは植生動態の解析結果と概ね一致しており、その妥当性を裏付けるものと言える。

河道と植生域の変遷過程を図-10 に示す。図は CASE1 と CASE2 の計算結果を 5 年間隔で示しており、色の変化は樹齢の増加を意味する。河畔林の河道内占有率は 7 年程度で平衡状態に達することから、ここではその前後期間を含めた 15 年間の結果を示す。図から、両ケースとも、砂州形成や流路変動に伴う側岸侵食によって、河床が攪乱を受ける領域は年々拡大する傾向にあるが、計算開始から 5~10 年程度の期間を経ると、河道内では砂州や中州の発達によって、冠水頻度や河床攪乱強度の低い領域が生じ、新たな植生域が形成されるようになる。その後、植生の生長と破壊による生育地の更新が毎年繰り返される中で、植生域と非植生域が河道内に占める割合はやがて均衡状態となり、礫河原や河畔林の面積には経年的な変化がほとんど見られなくなる。

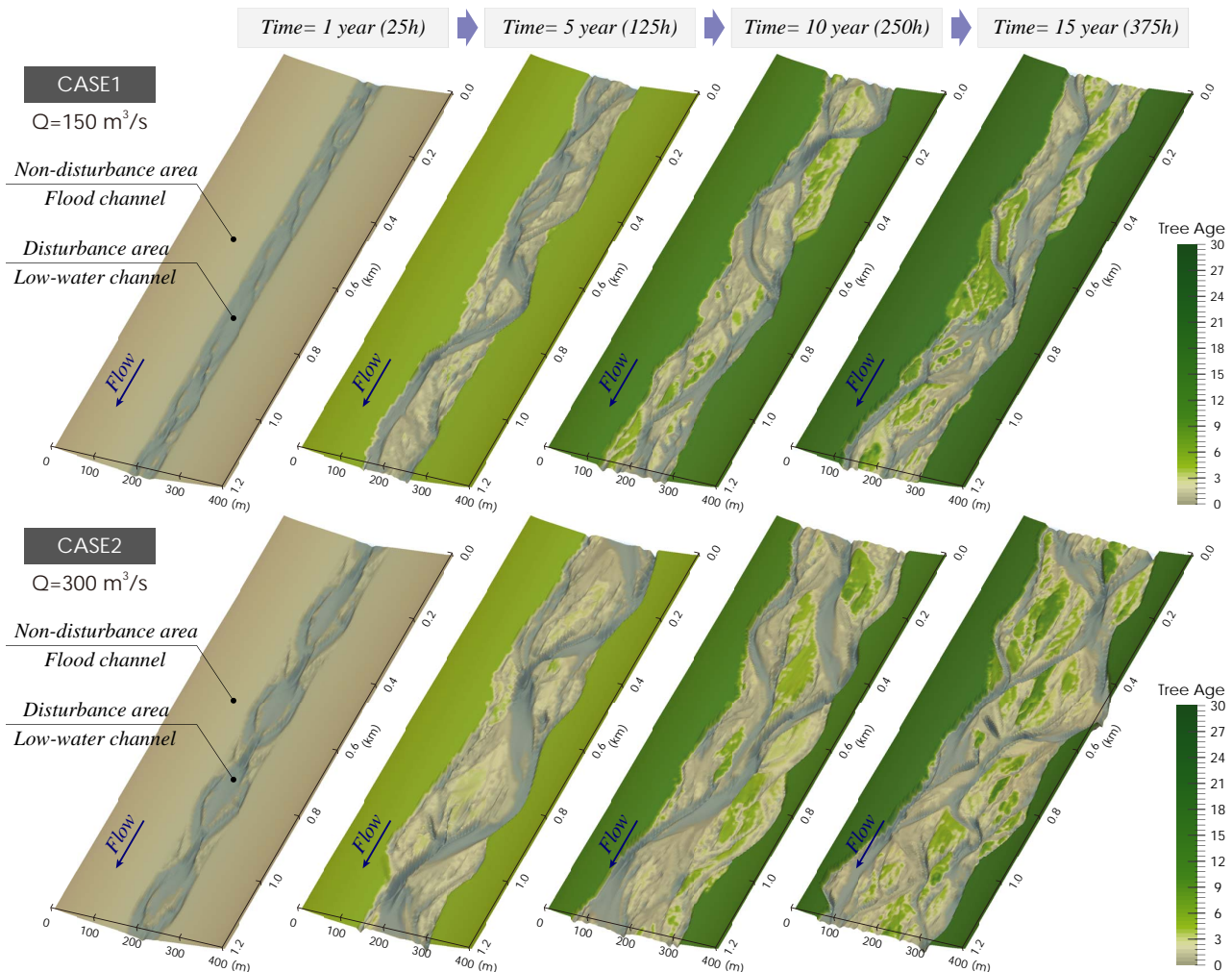


図-10 植生動態解析結果（上段：CASE1 $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ ，下段：CASE2 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ ）

4. おわりに

本研究では、植生の地上部と地下部の抵抗を考慮した植生消長モデルを構築し、過去30年間の変化を想定した植生動態解析を行った。融雪出水規模の違いが河道と植生域の変遷過程に及ぼす影響を検証した結果、CASE1 ($150\text{m}^3/\text{s}$)とCASE2 ($300\text{m}^3/\text{s}$)に見られる2つの平衡状態の違いから、河道内植生の樹林化と洪水流量規模の低下には強い因果関係が認められ、洪水時、河床が攪乱を受ける範囲やその頻度が低下することで、植生の定着と生長が促進され、河道内植生の樹林化をもたらす要因の一つと成り得ることが明らかとなった。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野「河川景観ネットワークの連結性と時空間変化（代表：中村太士）」、及び科研費「節腹連続河道の形成機構の解明（代表：渡邊康玄）」の助成を受けて行われた。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 永多朋紀, 渡邊康玄, 井上卓也, 安田浩保, 伊藤丹：河道内植生の根系がもたらす土砂緊縛効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.70 No.4, pp.973-978, 2014.
- 2) 永多朋紀, 渡邊康玄, 船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究 - Armoring 効果を考慮したダム下流域で生じる河床低下の要因分析 -, 寒地土木研

究所月報, No.744, pp.2-17, 2015.

- 3) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工論文集, 第47巻, pp.643-648, 2003.
- 4) 渡邊康玄, 市川嘉輝, 井出康郎：洪水時における河道内樹木の倒伏限界, 水工学論文集, 第40巻, pp.53-58, 1996.
- 5) 渡邊康玄, 三谷修司：鶴川 KP14.1～KP15.2における河道内植生の変遷と平成4年8月洪水による河道内樹木の倒伏状況調査, 寒地土木研究所月報, No.483, pp.55-69, 1993.
- 6) 傳甫潤也, 岡村俊邦, 堀岡和晃, 田代隆志：北海道自然堤防帯における河畔林の現状と管理方針の提案, 応用生態工学 14(1), pp.45-62, 2011.
- 7) 苅住昇：新装版 樹木根系図説 Illustrations of Tree Roots, 誠文堂新光社, 1979.
- 8) 浅枝隆, 中村祐太, 坂本健太郎, 関根秀明, 平生昭二：礫床河川の砂州や氾濫原の樹林化が栄養塩循環に与える影響と樹林化促進機構の可能性について, 水工論文集, 第55巻, pp.1369-1374, 2011.
- 9) 平生昭二, 浅枝隆, 坂本健太郎：アロメトリー関係を用いた河畔樹木の生長モデルの開発とその応用, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.67 No.4, pp.1375-1380, 2011.
- 10) 坂本健太郎, 渋谷嘉昭, 浅枝隆：樹林化が進行中の砂州内における樹木の生長特性に関する研究, 河川技術論文集, 第13巻, pp.207-212, 2007.
- 11) 北海道河川財団：iRIC ホームページ, <http://i-ric.org/ja/>, (参照 2015-09-30)。
- 12) 北海道開発局帯広開発建設部：札内川技術検討会資料, 2014, <http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/kakusyu/satsunai kentoukai/>, (参照 2015-09-30)。

(2015.9.30 受付)