

## 8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：船木淳悟、永多朋紀、川村里実

### 【要旨】

近年、河畔林の樹林化が全国各地で顕在化し、河川環境は数十年前とは大きく異なる様相を呈している。十勝川水系札内川は古くは網状河道の特性を有していたが、1980年代頃から植生が徐々に侵入・定着し始め、流路形態は年々単列化の傾向を高めている。このような河川環境の変化要因として、ダム等の洪水調節に起因した河床攪乱強度の低下や、河川整備に伴う川幅縮小など様々な影響が考えられるが、樹林化の支配的な要因は十分解明されていない。本研究では過去の河道変遷過程を時系列で整理し、河道変化と植生消長との関わりを定性的に評価、さらに1970年代前後に生じた河床低下要因を明らかにするため、数値解析を用いて様々な外的要因を組み合わせた試行計算を行い、各要因の影響度を定量的に評価することを試みた。さらに、土砂水理学的なアプローチから植生侵入が河道形成過程に及ぼす影響を定量的に評価し、植生の各成長段階に応じた地上部と地下部の抵抗を考慮した「植生被覆・消長モデル」を構築し、樹林化のメカニズムとその要因に関する分析を行った。その結果、1960年代以前の河畔林面積は一定の平衡状態で維持されていたが、1990年代以降に生じた洪水規模や発生頻度の大幅な減少が、植生域拡大の一因となった可能性が示唆された。また、河床低下要因の分析から、砂利採取が1970年代前後に生じた河床低下の主たる要因で、その影響は全低下量の8割以上にも達するものと推定された。植生消長モデルを札内川に適用したところ、経年的な植生動態について良好な再現性が得られた。

キーワード：札内川、河道変化、植生消長、数値解析

### 1. 序論

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（図-1）、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が、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（図-2）。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、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

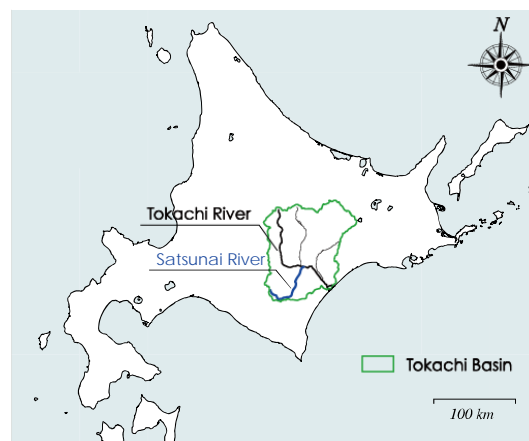


図-1 位置図（十勝川流域札内川）

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と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、



図-2 河川環境の変化（札内川上流域）

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。

本研究では、上記目的を達成するための準備段階として、まずは樹林化によって河川環境に著しい変化が見られる札内川をモデルケースに、過去の水理

水流量、河道地形、河畔林等の変遷過程を時系列で整理し、その経年比較から河道変化と植生動態との関わりを定性的に把握することとした。また、砂利採取や河川改修工事などの人為的作用が河道変遷過程に及ぼした影響を定量的に評価するため、1次元河床変動解析を用いて様々な外的要因を組み合わせた試行計算を行い、河道変化の主要因分析を試みた。札内川では各観測所における水理水流量（水位・流量・雨量等）の連続観測に加え、流域全体を対象とした河道断面の計測や航空写真の撮影などが継続的に実施されてきており、過去50年以上にも亘る膨大なデータの蓄積があるため、以降ではこれらのデータを使用することとした。

## 2. 河川環境の変化

### 2.1 水理水流量の変遷

#### 2.1.1 降水量の経年変化

図-3 は札内川上下流域の雨量観測所における年間・月間の積算降水量の変化である。年間降水量の経年変化を回帰直線の傾きで表すと、過去36年間の上流域の降水量はわずかな減少傾向にあるが（ $-1.8 \text{ mm/year}$ ）、この長期変動傾向（以下、トレンド）の統計的な有意性を Mann-Kendall 検定から評価すると、有意水準5%（信頼度95%）で帰無仮説が採択され、増加・減少を示す明確なトレンドは認められなかった。これは下流域の帯広観測所に関しても同様である。一方、両観測所の年間降水量の変化を Kendall 順位相関係数から評価すると、両者の時系列変化には強い相関があり（ $\tau=0.62$ ）、上下流域の降雨パターンには一定の類似性が認められる。以上のことから、札内川流域の年間降水量に関しては過去70年間に亘って増加減少を示す明確なトレンドは認められず、図からも明らかなように長期的な傾向はほぼ一定で、年毎に現れる増減はある種の偶然性に左右された不規則な変動成分であると考えられる。

#### 2.1.2 洪水規模と発生頻度の変化

図-4 左段に上札内観測所の時刻流量とダム流入量の変化を時系列で示す。図中各プロットはピーク流量が  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ （融雪期の平均年最大規模）を超える洪水を表し、右段に示すグラフはこの超過洪水を年毎に積算した洪水発生頻度の変化である。なお、上札内観測所の流量観測は1979年以降であるため、それ以前の年代に関しては戸蔭別川と札内川下流域の流量データから簡易的に推定した値を用いた。流量  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  を超える洪水の年間発生頻度は、札内川

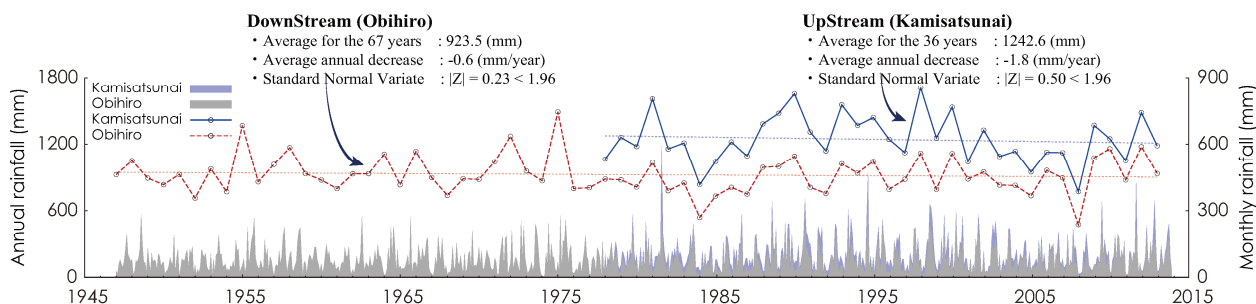


図-3 年積算および月積算降水量（下流域：帯広観測所，上流域：上札内観測所）

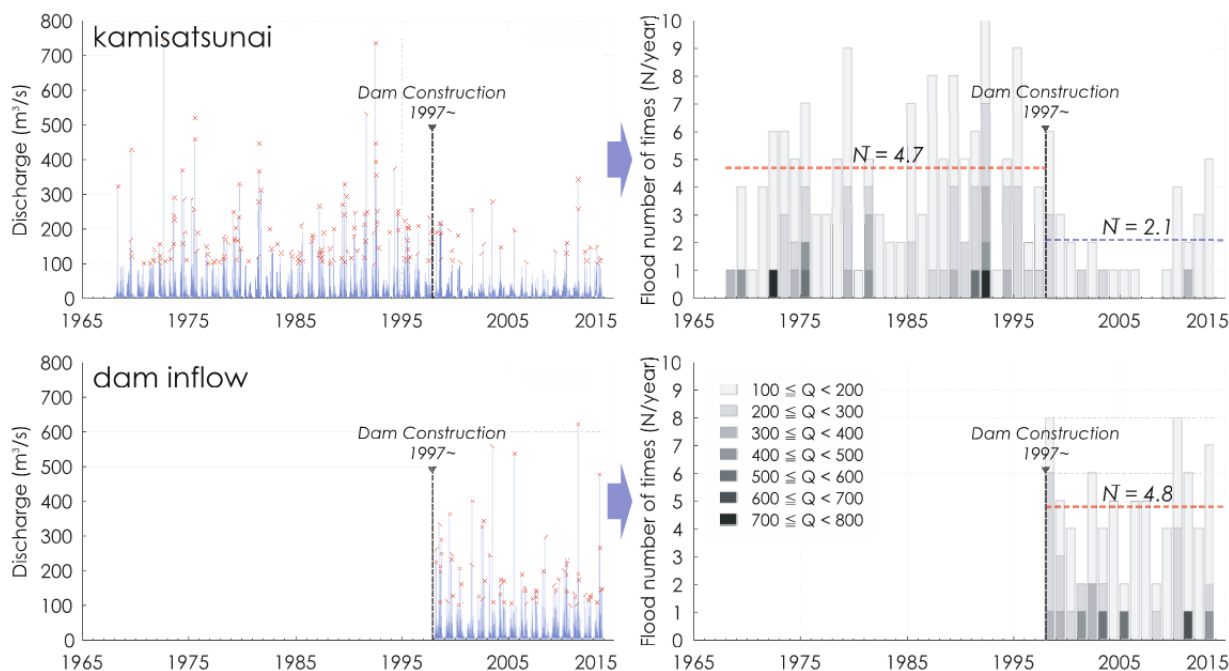


図-4 流量変化と年間洪水発生頻度（上段：上札内観測所，下段：札内川ダム流入量）

ダムの供用が開始された 1997 年頃を境に大きく変化し、前後期間の平均値で比較すると半分以下にまで減少している (4.7→2.1 回/年)。一方、ダム流入量から推定される潜在的な洪水発生頻度は年間 5 回程度で推移しており、ダム供用前後でほとんど変化していない。このことから、当該期間に生じた洪水発生頻度の変化は、洪水調節に伴う流況の平滑化に起因したものであることがわかる。また、ピーク流量が  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ （上流域の平均年最大規模）を超える規模の洪水は、1995～2010 年までの約 16 年間観測されていないことから、この間、大規模洪水がもたらす河床攪乱とそれに伴う植生域の拡大抑制効果が著しくて低下していたものと推定される。2.3 節にて詳細を述べるが、植生域の変遷過程には期間毎に明瞭なトレンドがあり、特に 1990～2010 年までの間は、

植生域の拡大とともに樹林化が特に進行した期間であった。上述の通り、洪水規模やその発生頻度は 1997 年頃を境に大幅に減少しており、この洪水攪乱強度の変化と植生動態との間には強い因果関係が類推される。一方、降水量に関しては記録に残る限り明確なトレンドが認められず、植生動態との直接的な因果関係は今回の分析からは十分判断できない。

## 2.2 河道変遷

### 2.2.1 各観測所の水位・河道断面形状の変化

1960 年代から近年までの各観測所の時刻水位と年平均水位、最深河床高、および観測所近傍の観測井で取得された地下水位（伏流水）の時系列変化を図-5 左段に示す。最深河床高は、1970 年代に上流域の上札内観測所で約 1 m、下流域の第 2 大川橋観測所、南帯橋観測所で約 2 m 低下しており、水位は河

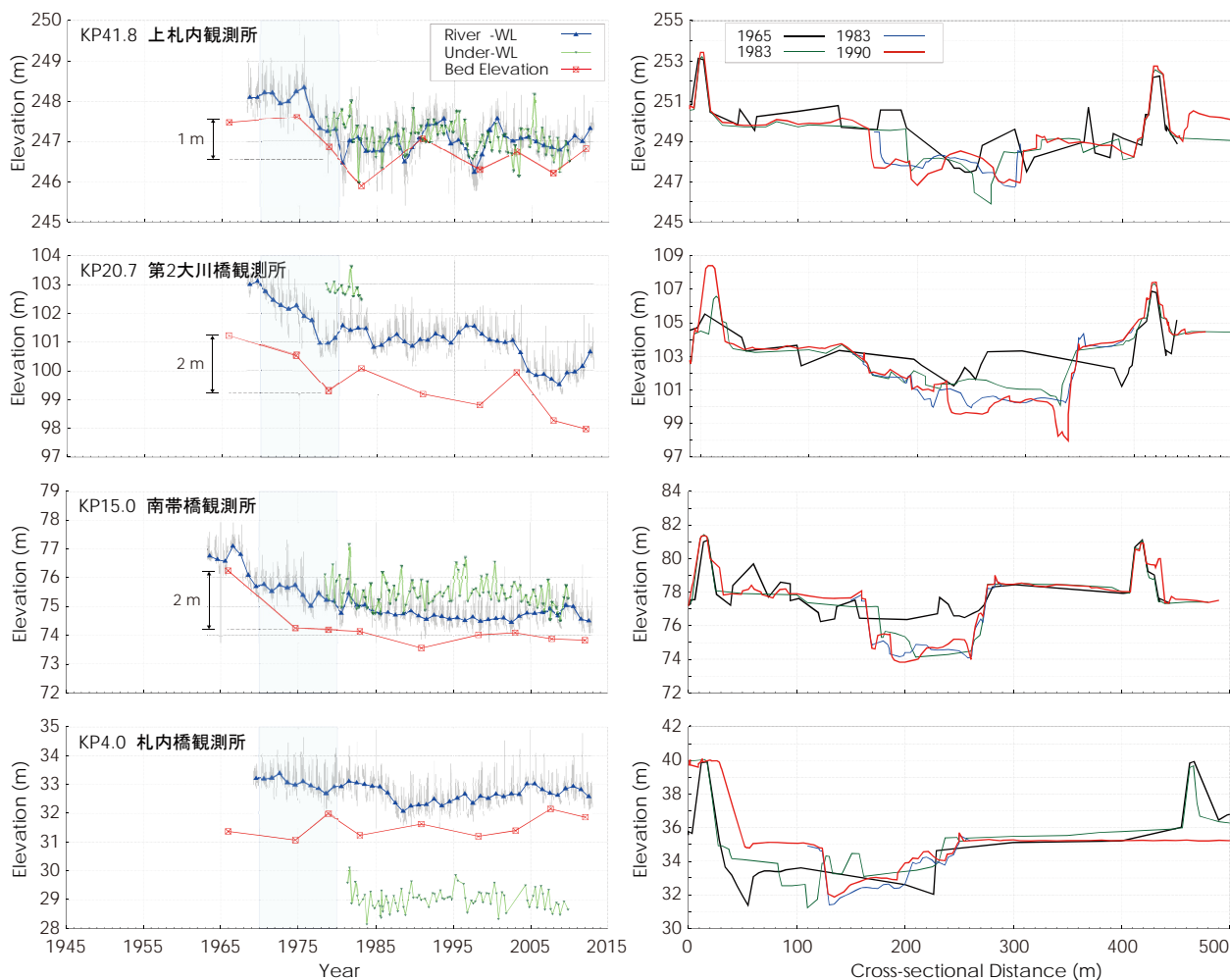


図-5 水位・河床高の経年変化（左段：水位・河床高の時系列，右段：河道断面の重ね合わせ

床高と連動するように、複数の観測所ではほぼ同時期に明瞭且つ不可逆的な低下傾向を示している。地下水位の観測開始は1970年代後半で、それ以前の変動は捉えられていないが、河川水位との連動性を鑑みれば、当該期間に河道内の地下水位も相応に低下したものと推察される。ただし、札内橋観測所は十勝川との合流点付近に位置し、本川からの堰上げ背水の影響を受けるため、他の観測所とは異なる傾向を示している。

各観測所地点における過去48年間の河道断面の変化を図-5右段に示す。河道断面が大きく変化し始めた時期には各観測所間で数年のタイムラグがあるが、概ね1965~1970年代にかけての変化が最も顕著で、現況の低水路内を中心に鉛直下方に河道断面が拡大している。当該時期は、河道の安定化と河川利用を目的とした河川改修工事や、主に骨材資源の確保を目的とした砂利採取が流域各所で行われており、

中でも橋梁に隣接した観測所周辺では、高水敷・低水護岸・水制工の整備に伴う複断面化によって、冠水頻度の異なる領域が明瞭に分かれる「二極化」の傾向が現れている。

### 2.2.2 河床高及び川幅縦断形の変化

札内川では、十勝川合流点の上流24.8 km付近にて流域最大の支川である戸蔦別川が合流しており、この地点を境に上下流で流況・河道特性が大きく変化する。次はこの地点を境界とした上下流域それぞれの河道縦横断形についてその経年変化を整理する。

最深河床高と平均河床高および川幅（水面幅）の縦断線形を図-6に示す。図中、河床高は1965年を基準とした各年代の比高差を表しており、点線は流域内に設置された4つの観測所と上下流域の境界となる戸蔦別川合流点の位置を示す。川幅と平均河床高は、それぞれ平均年最大流量流下時の水面幅と水面下の河床高を横断方向に平均化した値である。な

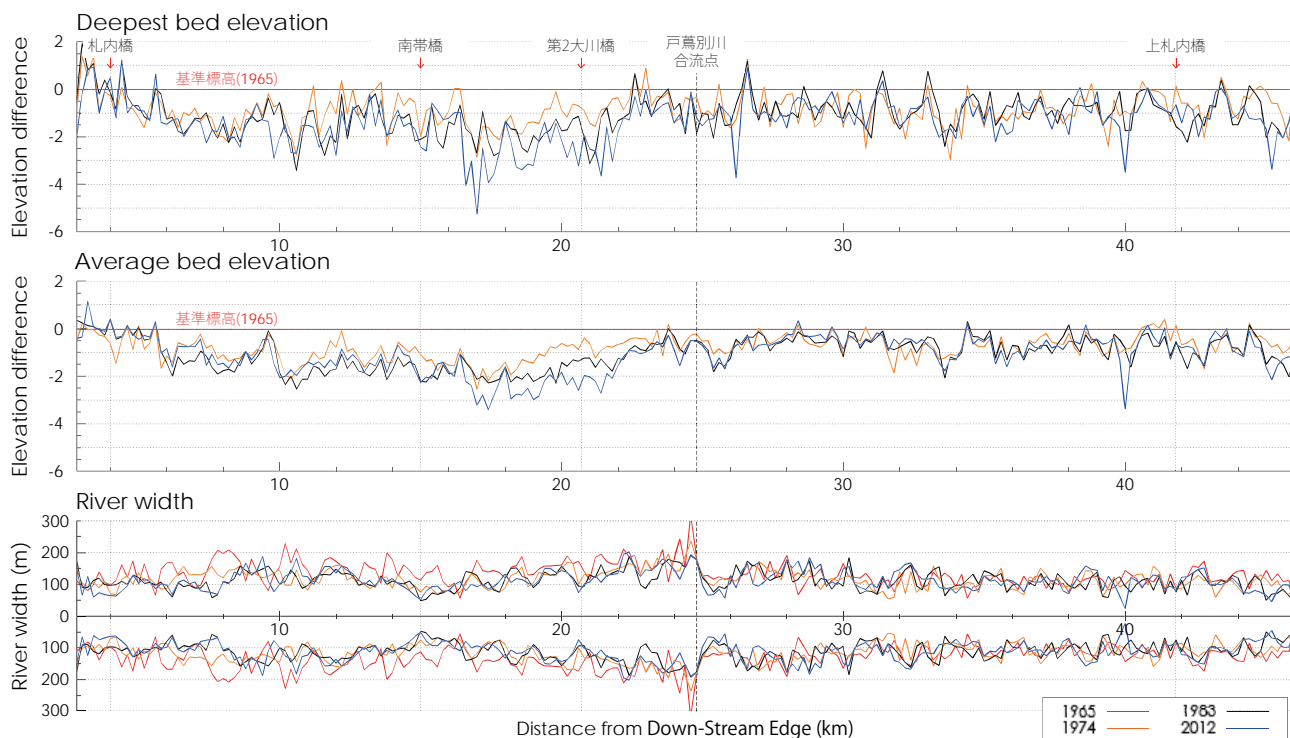


図-6 河床縦断面形と川幅縦断面形の経年変化

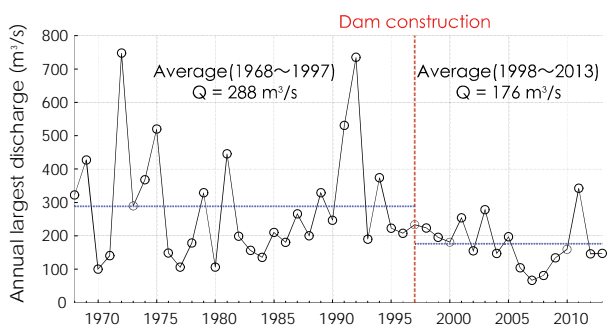


図-7 年最大流量の経年変化（上札内観測所）

お、図-7 に示すように平均年最大流量は札内川ダムの建設前後で約 40%低下し、年最大流量の変動幅にも平滑化の傾向が見られるが、ここでは同一流量条件下での経年比較を行うため、札内川ダム建設前の約 30 年間（1968～1997 年）の平均値を用いて算定することとし、上流域には  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  を、下流域には  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  を与えた。過去 48 年間の平均河床高は、1965～1983 年までの 18 年間の変化が最も急激且つ大規模で、縦断平均では上下流域で  $0.7\sim 1.3\text{m}$  の河床低下が生じていた。一方、1983 年以降の約 30 年間の変化は非常に緩慢で、上下流域ともに目立った変化は見られない。川幅の縦断面形は、河床高同様に 1970 年代以前の変化が最も大規模であるが、1980 年代以

降で見ると、局所的な増減はあるものの川幅縦断面形に特筆すべき変化は生じていない。

### 2.2.3 河道断面形の変化

砂州などの河床形態に現れる河道特性は主に川幅と流量に支配され、札内川のように堤々間が広く急峻な河床勾配を有する河道では川幅水深比が高くなり、複列～多列状の流路が分岐合流を繰り返す複雑な流路網が形成される。流路の位置やその形態は、毎年生起する年最大規模の洪水や融雪出水によって縦横断方向に時々刻々と変化するため、横断面は非常に複雑で河岸の位置を明瞭に判別できない場合も多く、各年代の横断面から支配的な川幅を見極め、流域全体の河道特性やその変化を読み取ることは非常に困難である。

本研究では、このような横断面の形状変化を端的に捉えるため、水位ごとに川幅を集約した線形を求め、複雑な形状を有する横断面を極力単純化する。具体的には、直近の低水路河岸高を基準に標高  $0.1\text{m}$  間隔で各横断面の解放水面幅（非陸域）を水平方向に積算し、流水が流れ得る領域を集約した単純な断面形を求める（図-8）。さらにこれらを縦断方向に平均化し上下流域の平均的な断面形を算出する（図-9）。これにより、多列状の流路は一本の流路に集約されるため、横断方向の複雑な流路変化は評価できない

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

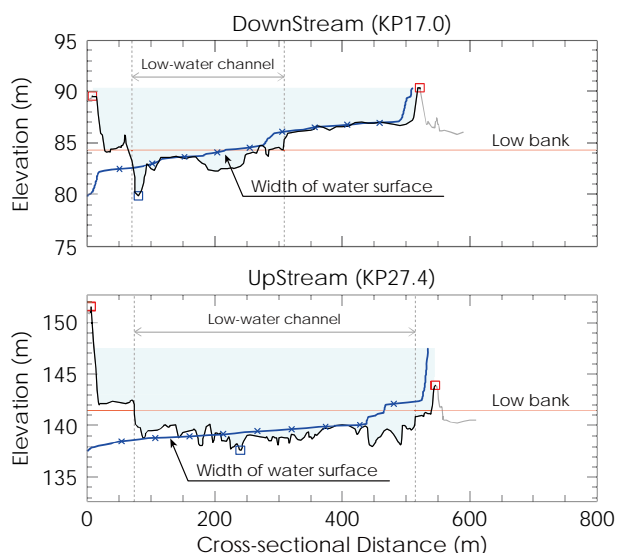


図-8 解放水面幅の算定例 (2012年計測)

が、大まかな河道形状の変化を端的に表すことができる。図-9の実線は上記より得られた各年代の平均断面形を流域毎に整理したもので、図中、点で例示した解放水面幅の値を標高別に平均化した曲線である(赤:1965年、青:2012年)。縦軸の標高0mが、低水路と高水敷の境界となる低水路河岸高に相当し(基準標高)、右下図はこれらの曲線を左右対称形で表した仮想断面である。1965年から1974年の変化を見ると、上下流域の河道断面はその形状をほぼ維持したまま鉛直下方へと平行移動しており、河床高が河道内全域で一様に低下したことを示している。一方、1980年代以降の変化は上下流域ともに非常に緩慢で上流域に関してはほとんど変化が見られない。

2.2.4 横断方向の波数の変化

図-9右側の縦長グラフは流路本数(横断方向の波数)の鉛直分布で、1960~1970年代に横断方向の波数が最大となる標高は河床位とともに低下し、波数の最大値は近年増加傾向にある。このことは、複列~多列状の地形的特性は現在も河道内に多く残されていることを示している。つまり、航空写真などからは、流路形態は年々単列化に向かって遷移しつつあるような印象を受けるが、これは、樹林化による影響と思われる。ただし、横断勾配の急峻化によって中小規模以下の洪水は特定の流路に集中し易くなっており、主流路の位置は年々固定化される傾向にある。

2.2.5 河道変遷のまとめ(河床高・水位・川幅)

札内川上下流域における河床高、水位、水面幅の

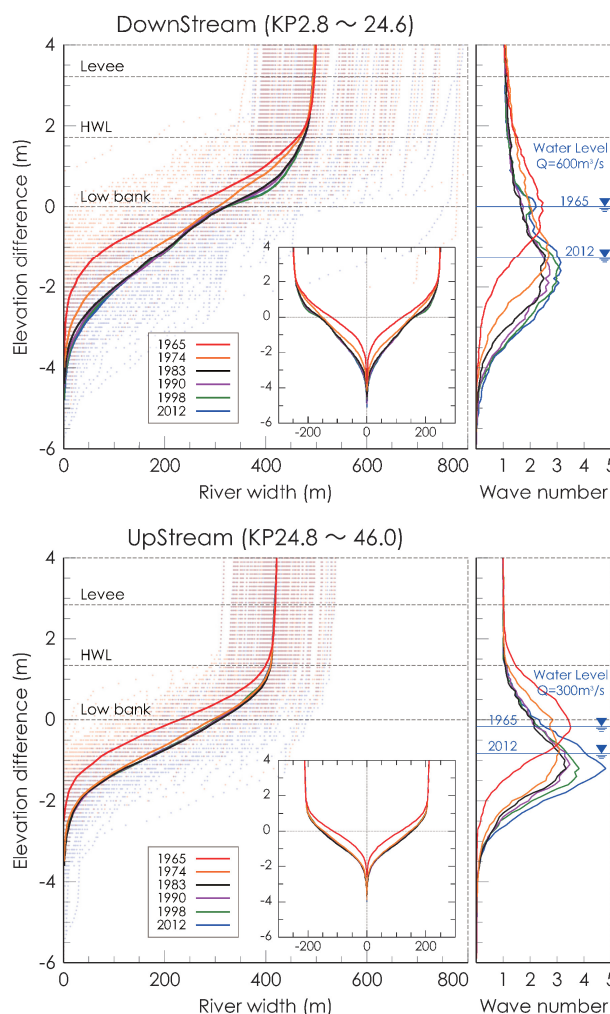


図-9 平均断面形と鉛直方向の波数分布

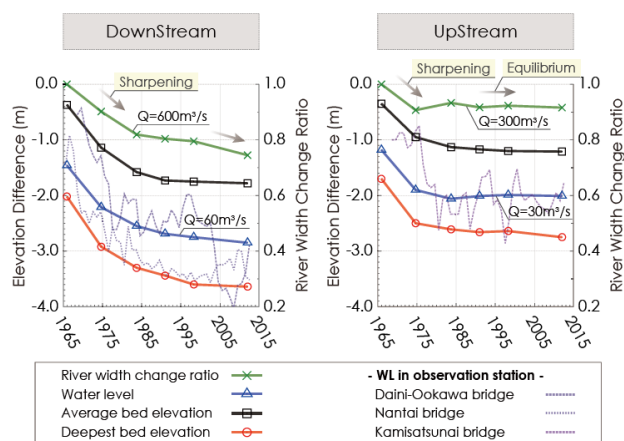


図-10 上下流域の河床高・水位・川幅(変化率)

変化を図-10に時系列でまとめる。図中、右軸には1965年を基準とした水面幅の変化率を、左軸には平均河床高、最深河床高、実測水位、計算水位を低水路河岸高を基準とした比高差で示す。破線で示す各

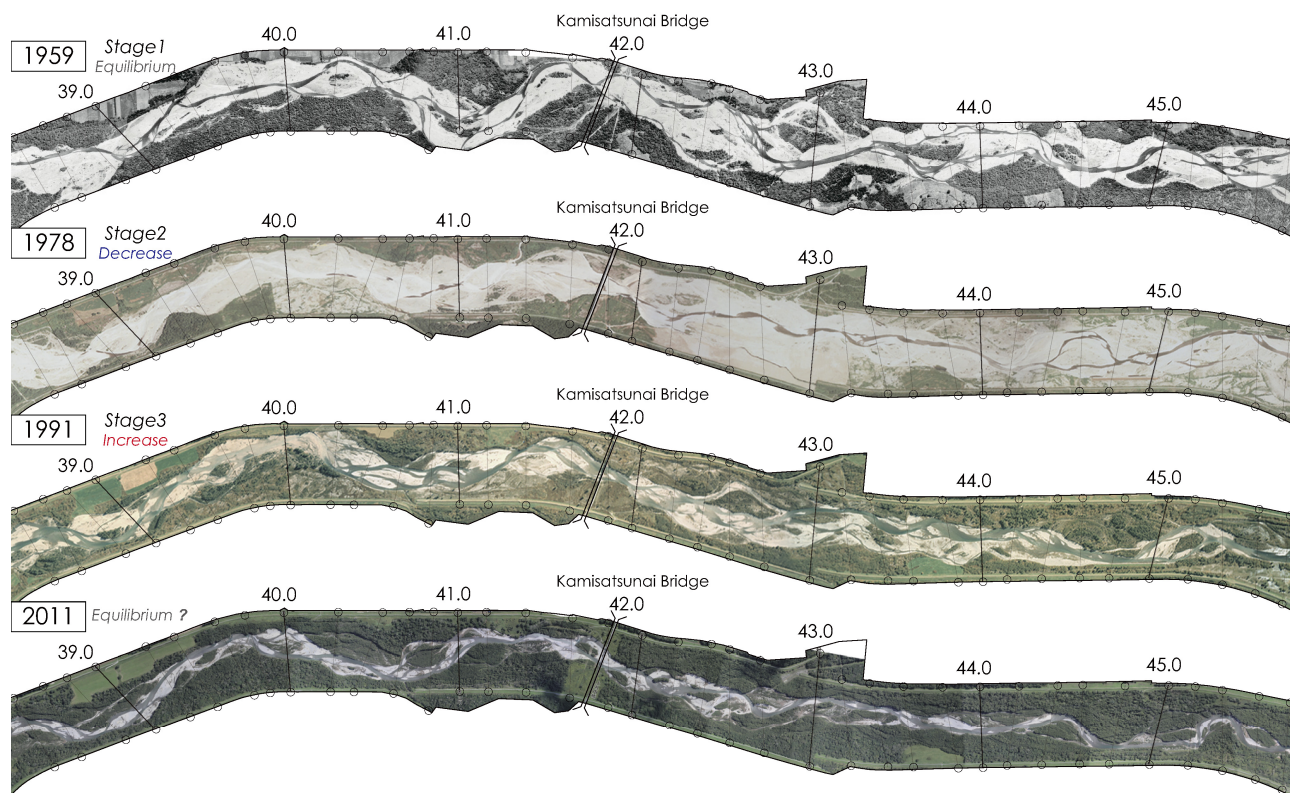


図-11 航空写真（代表的な年代・区間を抜粋）

観測所の実測水位は固定点の観測値であるため、計算水位に比べるとバラツキはあるが、長期的な傾向は概ね一致し河床低下との連動性が認められる。河床高と水位の経年変化を見ると、1965～1983年の18年間で上下流域の最深河床高は0.9～1.3m、平均河床高は0.7～1.3m、水位は0.9～1.1m低下。一方、1980年代以降の35年間は上流域にはほぼ変化が無く、下流域は最深河床高と水位で最大0.3m、平均河床高で最大0.2mの低下が見られるが、この低下傾向は比較的緩やかに推移している。水面幅の変化率に見られる負の勾配は、河道断面形状の変化（横断勾配の急峻化）に伴う水面幅の縮小を意味しており、1965～1970年代に上下流域の水面幅はともに10～20%縮小、1980年代以降は下流域でのみさらに10%程度縮小し、特に戸蔭別川合流点下流側の一部区間を中心にこの傾向は現在も断続的に進行している。

以上、1970年代前後に生じた河床低下は治水面に対しては絶大な効果をもたらしたが、河道断面形状の変化に伴う水面幅の縮小は、冠水頻度の低下や洪水攪乱面積の縮小をもたらし、植生の侵入・定着を促進するなど、植生域拡大の一因となった可能性が考えられる。

## 2.3 河道内植生域の変遷

札内川の横断測量は1960年代から実施されているが、測線間隔200mの空間解像度では多列流路が形成された河道の平面特性を十分に捉えられないことや、過去の植生状況を知る上では現存する航空写真が唯一の手掛かりとなることから、本章では過去65年間(1947--2011)に撮影された航空写真(図-11)をもとに、画像解析を用いて植生域や流路の変遷過程を整理する。なお、1960年代以前の航空写真は全てグレースケール画像であり、近年のカラー画像に比べると得られる情報量は限られ、画像解析による判読の精度も劣るが、人為的改変の影響が少ない自然河川本来の河道と植生域の変遷過程を知る上では、これらは非常に重要な情報を提示する。

### 2.3.1 分析手法

解析範囲は札内川上流域 KP26.0～47.0 の河川敷地内(約5,200 ha)とし、画像解像度は1,200 dpiで、単位画素当りの面積は約0.18 m<sup>2</sup> (0.42×0.42 m)である。航空写真から土地被覆状況を判読する際は、主観や恣意性を極力排除する必要があるため、画像解析の手法と手順は以下のように統一し、各年代の画像を一括処理する。

解析にはESRI社のArcGISを用い、クラスタ分析

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

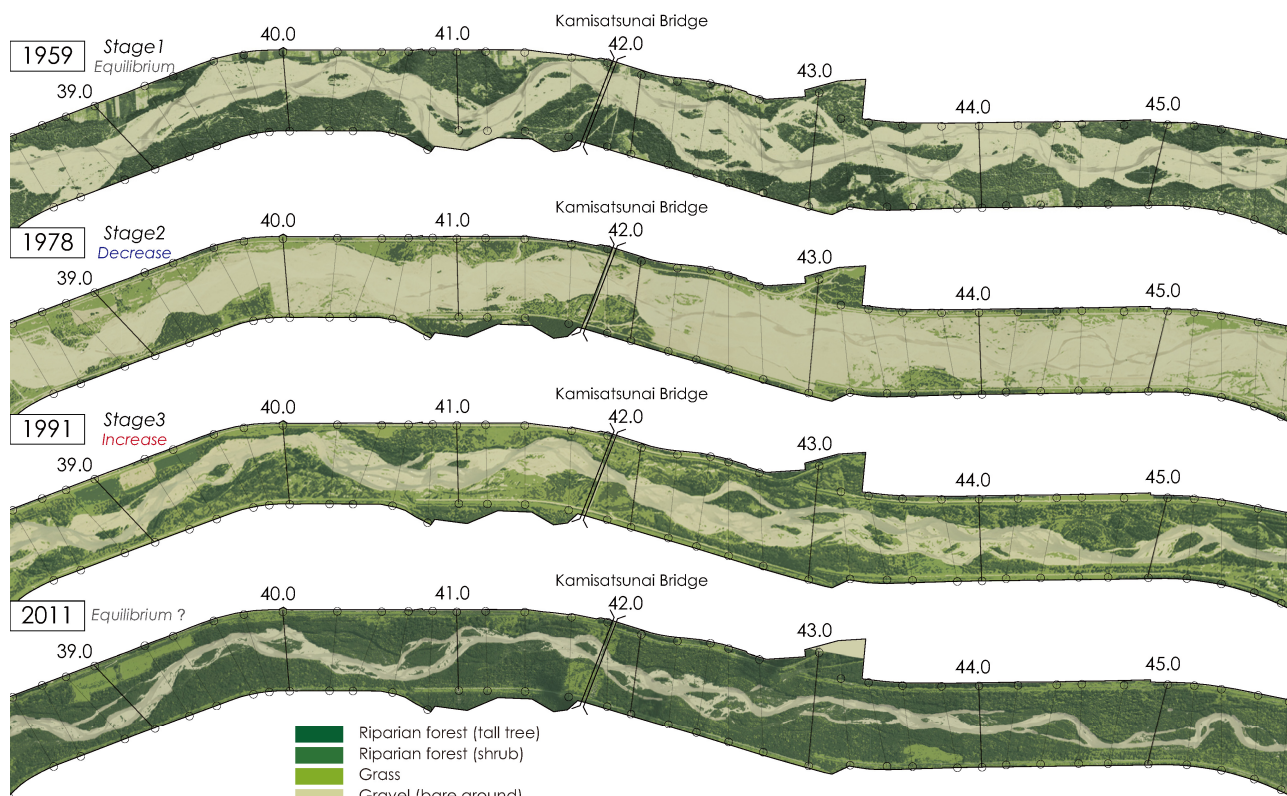


図-12 画像解析による土地被覆分類（代表的な年代・区間を抜粋）

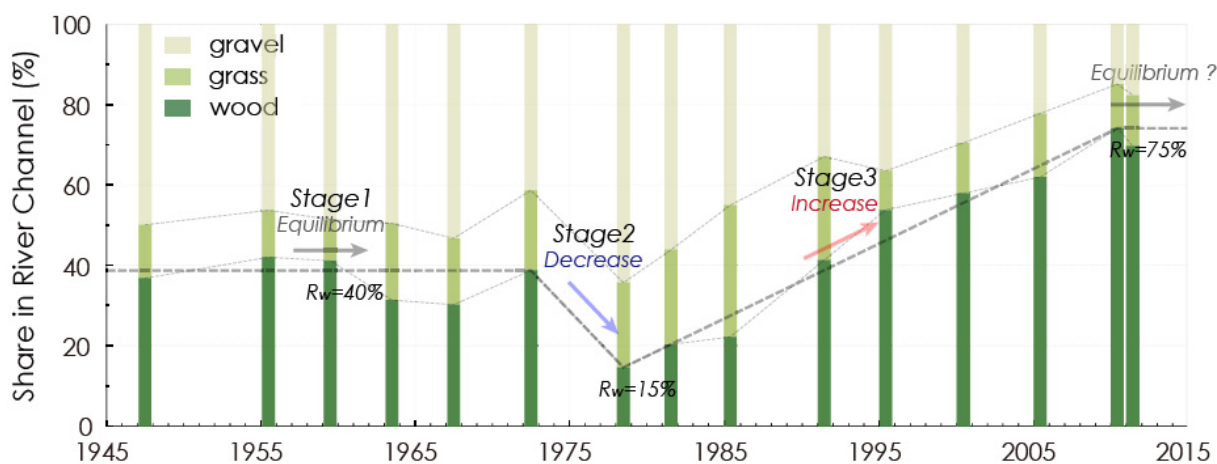


図-13 礫河原・草地・河畔林の河道内占有率（札内川上流域）

と最尤法分類により、各年代の画像がピクセル単位で保持する色調情報（RGB 値、1670 万階調）とその空間分布をもとに、類似した属性情報を持つピクセルを 15 階層程度のグループへと分類する（クラスタ化）。また、クラスタ化した画像と実際の航空写真とを比較し、各グループと河道内構成要素との対応関係から、これらをさらに河畔林（粗・密）、草地、礫河原、水面域の 5 つのグループへと再分類する。ただし、水面域の範囲は撮影時の流況に大きく依存

し経年比較が難しいため、ここでは水面域は礫河原に含まれるものとして扱う。上記手法から得られた各年代の土地被覆状況（一部）を図-12 に示す。なお、画像解析は元画像の色調や解像度などの品質が解析精度にも大きく影響するため、解析結果を解釈する上での留意点を以下に補足する。

今回用いた航空写真は、歪み補正を行った複数の垂直写真を 1 枚の画像に合成したもので、撮影時の気象条件や撮影時期・高度・角度などの違いが、撮



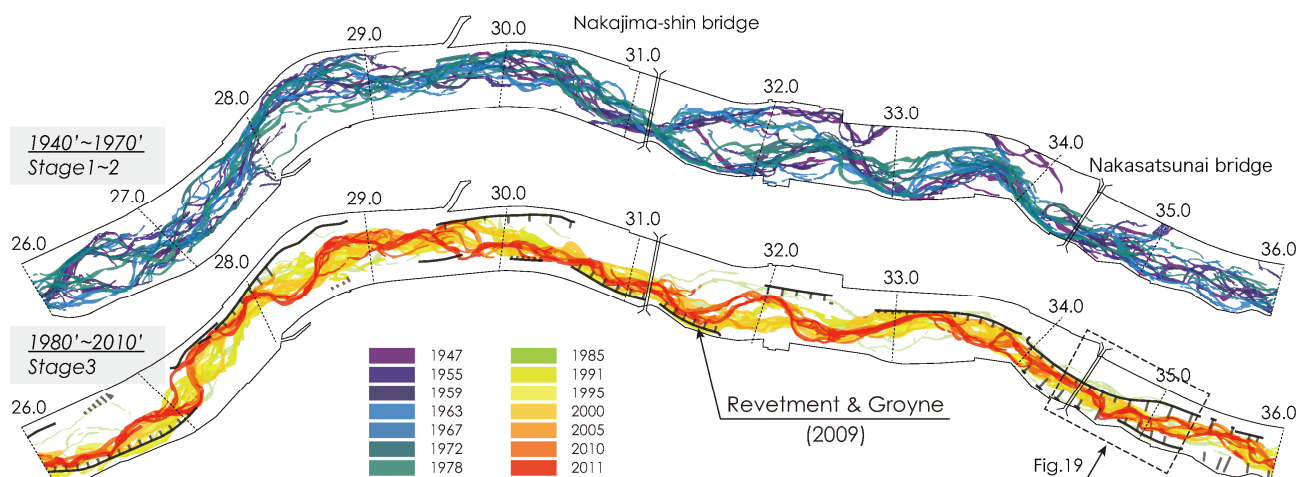


図-14 主流路の変遷過程（流路の固定化）

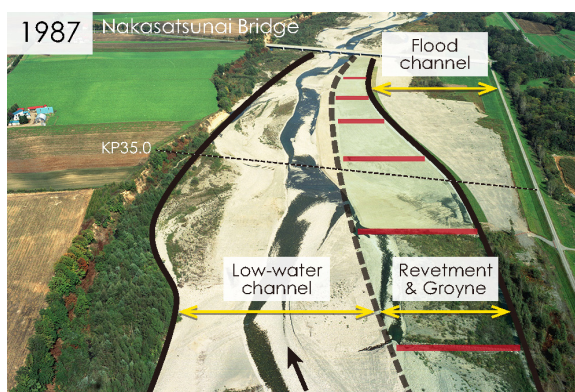


図-15 連続水制による流路変動幅の縮小

影区間毎に色調の違いとして顕著に現れる場合がある。区間によって色調が極端に異なる場合は、各区間を分割して処理するが、モザイク写真特有のこのような偶然誤差は完全には除去できないため、撮影された年代や場所によって元画像の色調にはある程度のバラツキが残る。以上のことは、解析結果に決定的な違いをもたらすほどの影響は無いが、今回の解析手法や手順では河畔林の粗密状況までを明確に判読することは困難であると思われたため、以下に示す河道内占有率の算定では、粗密状況による分類は行わず河畔林全体として評価する。

画像解析から得られた各年代の河畔林、草地、礫河原の河道内占有率 $R_w$ の変化を図-13に時系列で示す。図中点線は、1947～2011年までの65年間に見られた河道内植生域の長期変動傾向（トレンド）である。図から、当該期間に見られるトレンドは概ね3つの期間に分けて考えることができ（Stage1～3）、

各期間には増加・減少・平衡の3つの状態で表される一貫した傾向がある。ここで特に注目すべき点は、1970年代前後にこの3つのトレンドが短期間に入れ替わる局面が存在すること（平衡→減少→増加）、さらに、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 $R_w=40\%$ 程度の平衡状態を維持していたことである。植生動態と水理水流量の変化および河道変遷との因果関係について期間毎に以下述べる。

### 2.3.2 Stage1 ～1960年代以前の平衡状態～

1960年代以前の河道内は人為的改変の影響が少なく、自然状態に近い河川環境が多く残されており、数年間隔で発生する大規模洪水時には、河道内全域で激しい流路変動が生じ、広範囲に及ぶ植生域の破壊と流出をもたらした（図-14、上段）。また、年5回程度の頻度で生起する中小規模洪水は（図-4）、低水路内を断続的に攪乱し、稚幼樹の侵入と定着を抑制する効果をもたらすなど、植生域の自然拡大と洪水による拡大抑制効果が均衡し、河畔林の河道内占有率は $R_w=40\%$ 程度の平衡状態を維持していたものと推察される。

### 2.3.3 Stage2 ～1970年代の植生域縮小～

流路変動に起因した洪水被害を防ぐため、札内川では1970年代から大規模な河川改修工事が行われた。工事では高水敷の造成や河道の直線化と併せて、低水路内に数多くの護岸・水制工が整備され、主流路の位置を固定化し洪水時の流路変動を抑えることで河道の安定化が図られた。一方、当該期間における植生分布を見ると、低水路や高水敷上に繁茂していた樹木が一斉に消失するなど、1960年代までとは

状況が大きく異なり、河道整備の進捗とともに河川環境には劇的な変化が生じていた（図-12）。このような植生域の縮小要因としては、直近の大規模洪水

で新たな植生生育基盤の形成が促され、これが年々河道内全域に拡大したものと考えられる。

### 2.3.5 洪水攪乱による植生域の縮小

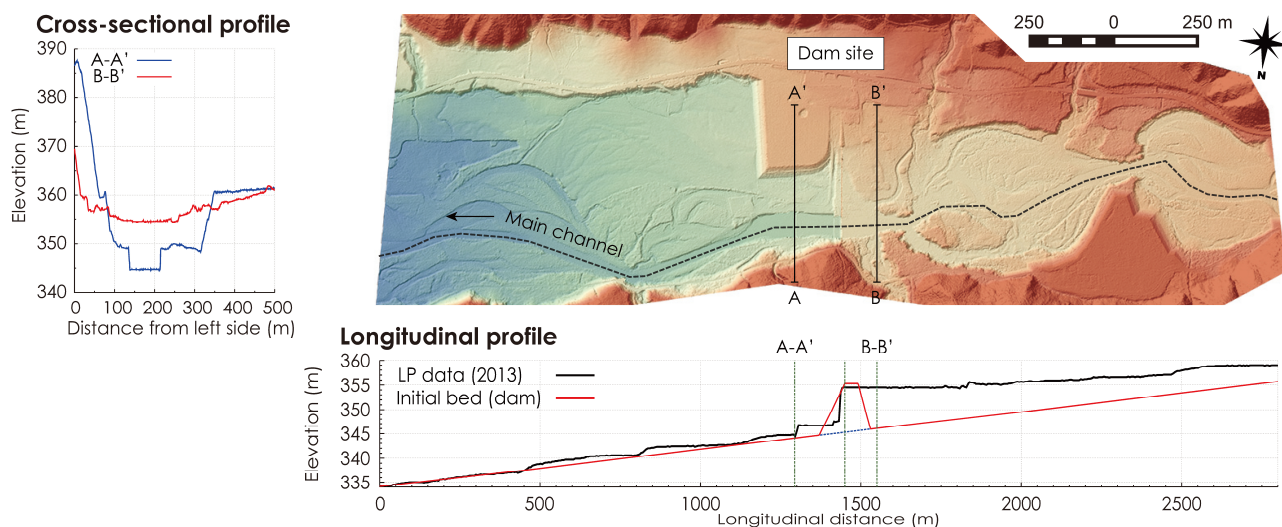


図-16 第1号砂防堰堤周辺の現況河道状況（2013年、LP測量）

（1972年）による流出や、砂利採取・河川改修に伴う伐採など様々な影響が考えられるが、既述の通り、1970年代前後に上下流域の河床高は流域全体で平均1.0m程度急激に低下しており、この河床低下に伴う植生生育基盤の消失と、植生域の一時的な縮小の間には強い因果関係が推定される。

### 2.3.4 Stage3 ～1980年代以降の植生域拡大～

護岸と水制工を組み合わせた河岸保護は1980年代以降も積極的に採用され、2000年代初期には、流域全体の水制工設置数は累計450基を超える規模となる。突き出し型の連続水制が配置された区間では、洪水時の河床攪乱が抑制されるため、細粒分を多く含んだ土砂が経年的に堆積し、やがて強固な植生生育基盤を形成することとなる（図-15）。図-14から、1980年代以降の主流路の変遷過程を見ると、流路の変動幅は年々縮小傾向にあり、主流路の位置はほぼ固定化された状態で、洪水攪乱強度の低い領域が河道内全域に広がっていたことがわかる。また、当該期間における洪水規模とその発生頻度は、1997年の札内川ダムの供用開始以降、洪水調節の影響によって大幅に減少し、上流域の上札内観測所では300m<sup>3</sup>/sを超える洪水は16年間観測されておらず、100m<sup>3</sup>/sを超える洪水の発生頻度も半分以下にまで減少していた（図-4）。以上のことから、1980年代以降の植生域拡大過程は、経年的な流路変動幅の縮小とそれに伴う流路の固定化、さらに洪水外力の規模やその発生頻度の減少によって、河道内の非攪乱領域

2011年9月、札内川上流域では1994年以来、約16年ぶりにピーク流量が300m<sup>3</sup>/sを超える大規模な洪水が発生した。この洪水では、流路変動に伴う側岸侵食や派川沿いに生じた河床面の侵食により、低水路内に繁茂した河畔林の一部が流出するなど、洪水攪乱による植生域の拡大抑制効果を示す現象が流域各所で確認された。当該洪水がもたらした植生域の縮小効果は、河道内全域に占める割合としては4パーセント程度に留まるが（図-13）、樹林化が顕著に進行した河道内においても一定規模を超える洪水外力により、高木化した樹木は流出し稚幼樹の生育基盤となる礫河原が新たに創出され得ることが実証された。近年、河畔林の河道内占有率は $R_w=75\%$ 程度の値で推移しているが、これが現況の外的インパクトに応じた平衡状態を示すものであるかは現時点では判断できない。植生動態の平衡状態を知ることはその維持管理を行う上で重要となるため、今後も継続的な観測と経過分析が必要である。

## 3. 河床低下要因の分析

1970年代前後に流域全体の河床高が一様に1m程度低下したことは、当該期間に植生生育基盤の大部分が河道内から消失したことを意味し、これがStage2で見られた植生域の大幅な縮小をもたらした可能性がある。本章では、このような河床低下がもたらされた主たる要因を明らかにするため、まずは、河床低下との関連が推定される砂防堰堤と砂利

採取に関して、その背景や生起時期等を含めた概要を以下に整理し、次に数値解析を用いて河床低下との因果関係やその影響度に関する物理的な検証を行う。また、これらの要因が河道内植生域の縮小過程（図-13、Stage2）に及ぼした影響についても併せて考察を行う。

### 3.1 砂防堰堤の概要

札内川ダム（KP59.0）の下流6km付近（KP53.0）に位置する札内川第1号砂防堰堤（以下、砂防ダム）は、1954年・1955年の土砂災害を契機に、十勝川直轄砂防事業の一環として計画されたもので、山地からの土砂流入に起因した河床高の上昇とそれに伴う洪水氾濫を防ぐことを目的に1972年に事業が着手された。図-16はLP測量から得られた砂防ダムの上下流2km区間の現況河道状況で、上段はダム堤体前後の横断形と河床高平面図、下段は主流線沿いの河床標高とダム堤体を含む建設当時の河床縦断形である。砂防ダムの上流区間は山地からの流入土砂が経年的に堆積するため、竣工から約40年を経た現在にはほぼ満砂に近い状態にあるが、河床高が急激に変化した1965～1983年間は未満砂（計画堆砂量の20%程度）の状態にあり、ダム下流側への土砂供給はほぼ遮断された状態にあったと推定される。砂防ダムと河床低下の生起時期には一定の重複期間があるが、河床低下は様々な要因が複合的に作用した結果であるため、両者の直接的な因果関係については、後述する数値解析にて詳細な検証を行う。

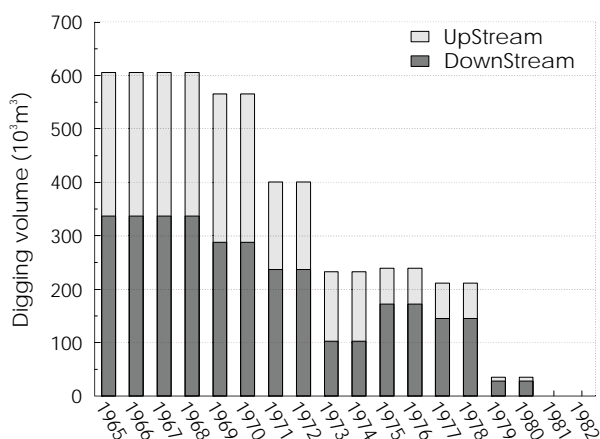


図-17 上下流域の年間砂利採取量

### 3.2 砂利採取の概要

札内川における河川砂利の採取は戦前から行われ

ており、採取量がピークを迎える1960年代には、毎年60～80万m<sup>3</sup>の規模にまで拡大する。その後、河川構造物に対する影響が問題化し、1970年代初頭に大幅な規制が行われると、それ以降は毎年20万m<sup>3</sup>の規模にまで減少し、1984年に河川砂利の採取は原則禁止となる。図-17は過去の文献<sup>1),2)</sup>から推定した年間砂利採取量の経年変化であるが、1965～1983年の上下流域の採取量は累計580万m<sup>3</sup>にも達する膨大な規模であった。仮に、この規模の土砂が河道内（L=45km、B=300m）から均等に採取されたものと仮定すると、低水路内の河床高が一律に0.4m低下するほどの大きなインパクトを持つ。既述の通り、当該期間の平均河床高は上流域で0.7m、下流域で1.3m程度低下しているが、この直接採取の影響のみで全低下量の30～60%程度を説明し得ることになる。砂利採取量の変化と前章で示した河道変遷（図-10）とを時系列で対比すると、大規模な砂利採取が行われた1965～1974年の間に河床高は急激に低下し、採取量が大幅に減少した1974年以降の河道変化は比較的緩やかに推移するなど、自明ではあるが河床低下と砂利採取との間には明確な因果関係が存在する。

### 3.3 計算モデル

本章では、札内川上流域で過去15年間に発生した実績洪水を対象に、川幅変化、砂防ダム、砂利採取の有無を各種組み合わせさせた試行計算を行い（表-1）、河床低下との因果関係が推定されるこれらの要因を個々に検証する。解析モデルは、非定常流を対象とした長期計算が可能で、且つダム下流で生じる粗粒化やそれに伴うArmoring現象をある程度再現し得ることが必要条件となることから、流れの解析には1次元不定流モデル、河床変動解析には竹林・江頭が提案する混合粒径（掃流砂層）モデル<sup>3),4),5)</sup>を採用する。本解析で用いた支配方程式を以下に示す。

表-1 計算条件

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
1. 川幅変化	○	×	○	○
2. 砂防ダム	○	○	×	○
3. 砂利採取	○	○	○	×

#### 3.3.1 流れの基礎式

1次元非定常流の連続式と運動方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial (Au^2)}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + I_f = 0 \quad (2)$$

ここに、 $t$ は時間、 $x$ は流下方向距離、 $A$ は流水断面面積、 $Q$ は流量、 $g$ は重力加速度、 $u$ は断面平均流速、 $H$ は水位で、エネルギー勾配  $I_f$  は等流・広矩形断面を仮定した Manning 則から、粗度係数を  $n=0.04$  (計画粗度) として求めた。なお、実際の計算は(2)式に分離解法を適用し、移流項には数値拡散を抑制する3次精度の CIP 法(Constrained Interpolation Profile Scheme)を、その他の外力項には2次精度の中央差分を用いて離散化した差分方程式を用いる。

### 3.3.2 流砂量式

河床変動は混合粒径下の掃流砂のみを対象とし、掃流砂量は粒径別に拡張された芦田・道上の式を用いる。

$$q_{bk} = f_{bk} 17 \tau_{*k}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*}\right) \sqrt{sgd_k^3} \quad (3)$$

ここに、 $q_{bk}$ 、 $d_k$ 、 $f_{bk}$ 、 $\tau_{*k}$ は粒径階 $k$ の単位幅掃流砂量、粒径、存在比率、無次元掃流力で、 $s$ は砂粒子の水中比重、 $u_*$ は摩擦速度である。粒径階 $k$ の無次元限界掃流力 $\tau_{*ck}$ と限界摩擦速度 $u_{*ck}$ は、砂粒子間の遮蔽効果を考慮した Egiazaroff・浅田の式<sup>6)</sup>を用いた。

$$\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = \left[ \frac{\log_{10} 23}{\log_{10}(21 d_k/d_m + 2)} \right]^2 \quad (4)$$

ここに、平均粒径 $d_m$ は各粒径階の粒径に存在比率を掛けた全体の線形和で表され、平均粒径の無次元限界掃流力 $\tau_{*cm}$ は、砂粒子の水中比重を $s=1.65$ 、動粘性係数を $\mu=0.01$  (20.3°C) とした際の標準的な値を岩垣の式から求めた。

$$d_m = \sum_{k=1}^n d_k f_{bk} \quad (5)$$

$$\begin{cases} d_m \geq 0.3030 \text{ cm}; u_{*cm}^2 = 80.9 d_m \\ 0.1180 \leq d_m \leq 0.3030 \text{ cm}; u_{*cm}^2 = 134.6 d_m^{31/22} \\ 0.0565 \leq d_m \leq 0.1180 \text{ cm}; u_{*cm}^2 = 55.0 d_m \\ 0.0065 \leq d_m \leq 0.0565 \text{ cm}; u_{*cm}^2 = 8.41 d_m^{11/32} \\ d_m \leq 0.0065 \text{ cm}; u_{*cm}^2 = 226.0 d_m \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau_{*cm} = \frac{u_{*cm}^2}{sgd_m} \quad (7)$$

### 3.3.3 全流砂と粒径別流砂の連続式

混合砂の河床変動では粒度分布を有限階層に分割し、各粒径階で生じた流砂量の総和から全流砂量を求め、その空間的な収支が河床高の時間変化に一致するものとして保存則が導かれる。全流砂の連続式は以下となる。

$$\frac{\partial (c_b E_b)}{\partial t} + (1 - \lambda) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left[ \frac{1}{B} \frac{\partial \sum_k (q_{bk} B)}{\partial x} \right] = 0 \quad (8)$$

ここに、 $c_b$ は掃流層内の土砂濃度、 $E_b$ は掃流層厚、 $\eta$ は河床高、 $B$ は川幅で、河床材料の空隙率 $\lambda$ には0.4を与えた。竹林・江頭によって提案された掃流砂層モデルは、河床面上に流砂が移動する極薄い層(掃流層)を仮定し、この掃流層内で流砂の交換現象を議論する点に大きな特徴がある。上式左辺第1項でこの掃流層厚 $E_b$ と掃流層内の土砂濃度 $c_b$ の時間変化が考慮されるが、本解析では、掃流層内の土砂濃度は元河床の1/2程度であると想定し $c_b=0.3$ の一定値を与える。また、江頭らによれば、掃流層厚は土砂濃度や局所勾配、水理諸量などから力学的に導かれ、次式のようなものである。

$$\frac{E_b}{d_m} = \frac{1}{c_b \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_{*m} \quad (9)$$

ここに、砂の内部摩擦角は土石流の解析で一般的に用いられる値を参考に $\phi = 30^\circ$ とし、流下方向の局所河床勾配 $\theta$ は3次スプライン補間による推定値を用いた。混合粒径下の解析では、粒度変化が生じる層厚の定義によって計算結果が大きく左右される。河床面以下で流砂の交換現象を議論する従来の交換層モデル<sup>7,8)</sup>では、交換層厚として最大粒径や平均粒径の2~4倍程度がよく用いられ、層厚の決定方法には一定の曖昧さが残されている。本解析で用いた掃流砂層モデルでは、流砂の運動特性から掃流層厚

を力学的に導くため、解析結果が一意的に定まるといふ大きな利点がある。

掃流層（河床面上）と交換層（河床表層）における粒径別流砂の連続式は、各層内における流砂の交換現象を考慮し、以下の保存則で表される。

$$\frac{\partial(c_b E_b f_{bk})}{\partial t} + (1 - \lambda) f_{bk}^* \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left[ \frac{1}{B} \frac{\partial(q_{bk} B)}{\partial x} \right] = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_d f_{dk}}{\partial t} - f_{dk}^* \frac{\partial E_d}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{cases} f_{bk}^* = f_{bk}; \frac{\partial \eta}{\partial t} \geq 0 \\ f_{bk}^* = f_{dk}; \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} f_{dk}^* = f_{bk}; \frac{\partial \eta}{\partial t} \geq 0 \\ f_{dk}^* = f_{dk}; \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \end{cases}$$

ここに、 $f_{dk}$ は交換層内における粒径階 $k$ の存在比率で、掃流層直下の交換層厚 $E_d$ は最大粒径の0.1mを与える。 $f_{bk}^*$ と $f_{dk}^*$ は $\partial \eta / \partial t$ の正負によって変化し、河床位が堆積傾向の場合は直前の計算時間（ $-\Delta t$ ）における掃流層内の粒度分布を、侵食傾向の場合は交換層内の粒度分布を与えることで、河床位の変化に応じて各層間で生じる流砂の交換現象が表現される。河床位と粒度分布、掃流層厚の計算点には $\Delta t = 2$ sの時間ズレが生じるが、これは実河川で起きる現象の速度に比べて十分に短い解析上も問題はないものと判断した。

### 3.4 計算条件

解析区間は、戸蔭別川合流点から第1号砂防堰堤上流までの延長33.2km（KP24.8～58.0）で、初期河床形状には1965年の平均河床高と川幅縦断形を、初期粒度分布には1977年に調査された現存する最古のデータ（図-18）を一律に与える。計算期間は、河道が急激に変化した1968～1983年の15年間とし、この間に発生した流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える主要洪水期間のみを計算対象とする（図-19、計1093時間=約46日間）。

川幅変化ありの条件では、現存する横断データから算出した川幅縦断形（図-6、KP24.8～46.0）を各年の計算開始時に反映させ、データが得られない直轄管理区間外（KP46.0～58.0）は、上流域の平均河床勾配 $I=1/130$ と各年代の縦断平均川幅を用いた。

砂防ダムありの条件では、図-16下段に示すダム堤体形状を1972年の計算開始時点で瞬時に河床高へと反映させる（固定床、粗度係数 $n=0.015$ ）。ダム

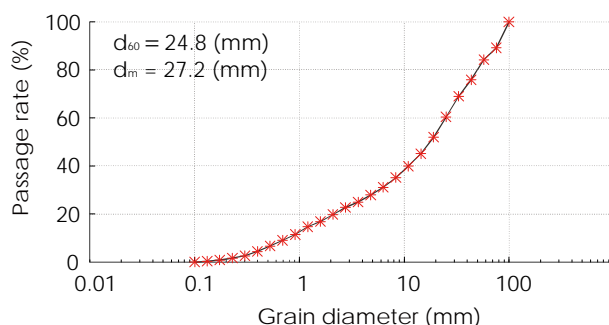


図-18 初期粒度分布（1977年、KP27.0）

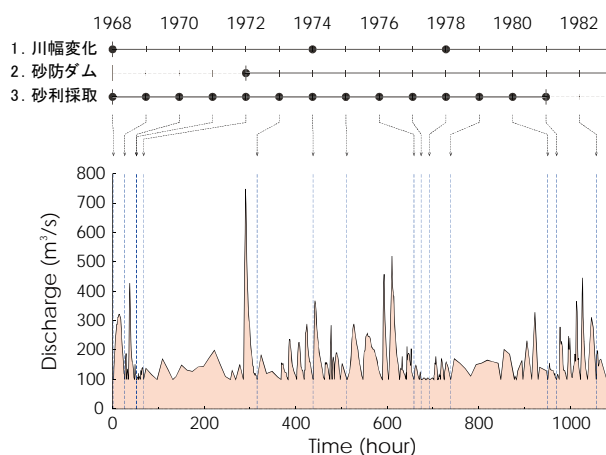


図-19 流量条件と外的要因の生起時期

上流側の堆砂量が堤体高以上に達した際は、上流側で発生した流砂を即座に下流側へと供給するが、当該期間における砂防ダムの堆砂量は、実測値・解析値ともに満砂には至っておらず、ダム下流側への土砂供給は常に遮断された状態にある（ダム堤体部： $q_b=0$ ）。また、本解析はダム下流域において掃流層が卓越する条件下で生じる現象（河床低下）に着目しているため、ダム上流域の堆砂過程についてはここでは言及しない。

砂利採取ありの条件では、砂利採取量（図-17）を縦断距離と川幅で除した平均掘削高を求め、これを各年毎の河床低下量として計算過程へ反映させる。また、砂利採取後は元河床が露出した状態になることを想定し、採取区間では粒度分布の初期化を行う。計算は流量データが存在する1968年を開始年とするが、初期河床のデータは1965年であり両者には約3年のズレがある。特に1965～1968年の砂利採取量は過去最大規模であるため、これが河床低下の大きな要因となっていた可能性がある。よって本解析では、1965～1967年の砂利採取量の合計値を1968年の計算開始時に反映させることとした。

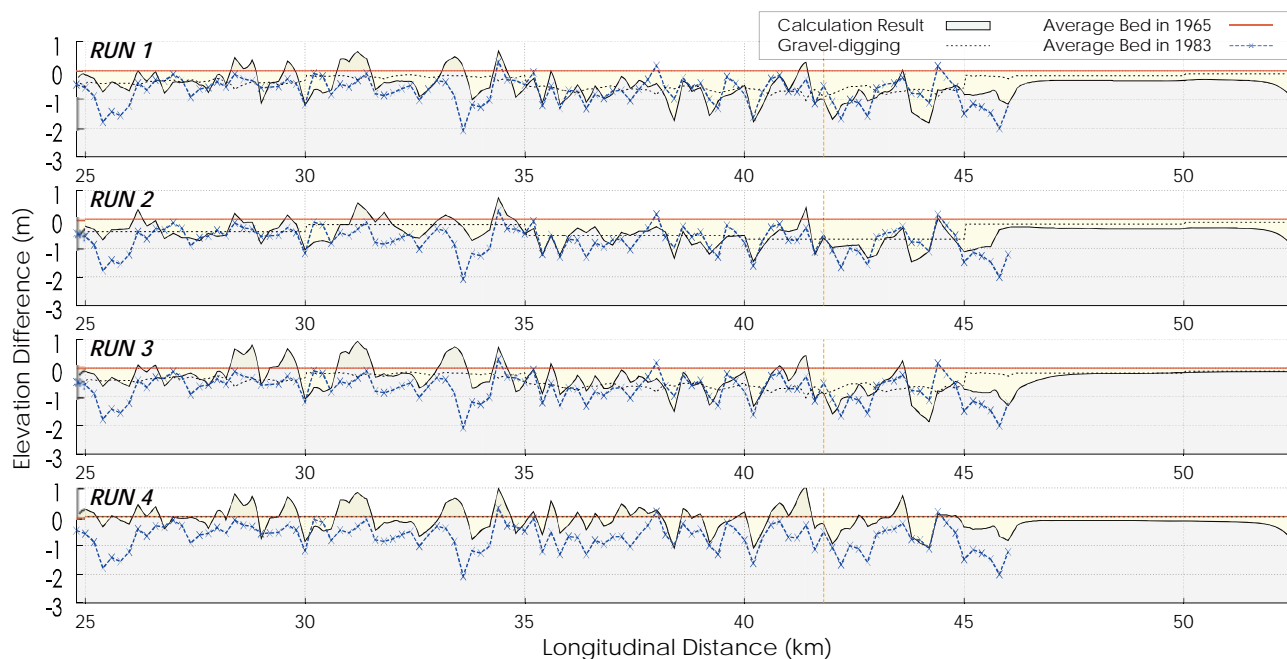


図-20 1983年の実測河床高と計算河床高 (RUN1~4)

以上、川幅変化、砂防ダム、砂利採取の影響を計算過程へ反映させるタイミングと、流量条件となる各年の実績洪水ハイドロを時系列で図-19に示す。

### 3.5 計算結果

各要因の有無を組み合わせたRUN1~RUN4(表-1)について、15年間(1968~1983年)の実績洪水を与えた際の解析結果を図-20に示す。図中縦軸は初期河床高(1965年)を基準とした比高差を表し、黒線が計算河床高、青点線が1983年の実測河床高である。図中横軸は縦断距離で左端が戸蔦別川合流点、右端が砂防堰堤直下、橙線は上札内観測所の位置を指す。

#### 3.5.1 川幅変化の影響

解析結果と1983年の実測値を比較すると、全ての要因を考慮したRUN1、川幅変化なしのRUN2では、いずれも河床高全体の低下傾向が概ね再現され、特にKP35.0の上流側は低下量のみならずその縦断形もほぼ一致している。今回解析に用いた砂利採取量のデータは5km毎の2ヶ年集計値であることや、川幅縦断形の算定に用いた横断データは計測間隔が約5年であることなど、データの時空間的な解像度は必ずしも十分とは言えないが、実現象の支配的要因は十分に捉えられているものと判断できる。ただし、KP35.0の下流側では、堆積・侵食量が過大もしくは過小に評価され、データの解像度(特に砂利採取量の空間的な偏り)が再現性に影響したと思われる

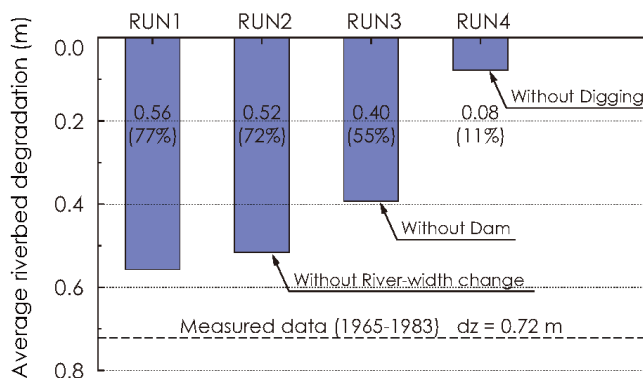


図-21 河床低下量(縦断平均)の実測値と計算値

る区間も一部存在する。

図-21に各ケースの河床低下量を縦断平均値で示す。図中点線は1965~1983年の実測値で、この18年間で上流域の河床高は0.72m低下した。括弧内の数字は実測値に対する解析値の比率であるが、全ての要因を考慮したRUN1の再現性は約80%に達し、低下量だけで見れば実現象の大部分は上記3つの要因から説明し得ることになる。河川改修等に伴う川幅縮小の影響はRUN1とRUN2の違いに現れており、低下量全体に占める割合としては5%程度に留まる。これは、経年的な川幅変化を十分に反映できていないことが影響した可能性もあるが、今回の解析結果からは川幅変化と河床低下との関連性はそれほど明確なものではない。

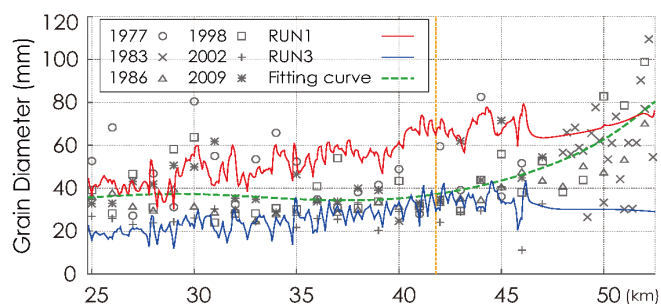


図-22 平均粒径の縦断分布

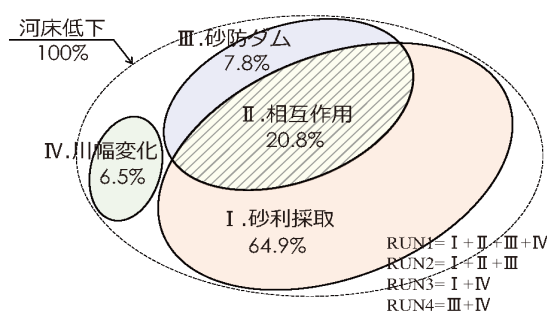


図-23 RUN1 の解析結果に占める各要因の内訳

### 3.5.2 砂防ダム直下の粗粒化と Armoring 現象

砂防ダムを考慮した条件では (RUN3 以外)、洪水時、流砂量が常に非平衡となるダム下流側で、河床表層に含まれる細かな粒径成分が流出し、粒度分布の粗粒化が進行する (図-22、RUN1)。粗粒化した河床面に最大粒径の移動限界を超えるような掃流力が生じると、河床表層と元河床との流砂の交換が活発化し、交換層と掃流層との間で細粒分の供給と流出が繰り返され河床高は徐々に低下する。河床面の粗粒化がある程度収束すると流砂の移動と交換が抑制され、やがて河床高は静的平衡状態へと漸近する。このような現象は Armoring と呼ばれ、河床低下の進行を抑制する効果をもたらす。解析結果では、ダム下流 1～2 km 区間で最大 1 m 程度の河床低下が見られるが、これは 1972 年の大規模洪水時に急速に進行したもので、それ以降はこの Armoring の効果によって河床高は静的平衡状態を維持している。

### 3.5.3 砂防ダムの影響

砂防ダムなし (RUN3) の条件では、上流端における平衡流砂量が常時下流側へと供給されるため、河床表層の粒度分布が縦断的に大きく変化することはなく、細粒分の流出による河床低下や河床面の粗粒化も生じない。このため、RUN3 の河床低下量は RUN1 に比べ約 20% 抑制されており (図-21)、砂防ダムと河床低下との間には一定の因果関係が認められる。ここで、平均粒径の縦断分布を図-22 に示す。図中、各プロットはダム建設以降に行われた各年代の調査結果で、点線は全データに対する近似曲線、実線は解析結果である。調査時期の違いなどから実測値にはかなりバラツキはあるが、全体的な傾向は、上流域ほど粒径が粗くダム下流 10 km 区間が特に顕著である。砂防ダムありの条件 (RUN1) では、ダム下流側で生じる粗粒化の影響は流域全体に及び、平均粒径の縦断形は下流側へ向かって緩やかに逓減

する線形を成す。一方、砂防ダムなしの条件 (RUN3) では、川幅縦断形に応じた局所的な増減は見られるが、通水前後で流域全体の粒度分布は大きく変化しない。RUN1 の解析結果と実測値とを比較すると、両者の整合性はそれほど高いとは言えないが、上下流端の粒径は一致し、下流から上流へ向かって粒径が粗くなる点は双方共通しており、砂防ダムによる粗粒化の影響を示す結果としてはある程度評価できる。

### 3.5.4 砂利採取の影響

砂利採取なし (RUN4) の条件では、他のケースとは明らかに状況が異なり、流域全体の河床高が一律に低下するような変化は生じていない (図-20)。河床縦断形には局所的な侵食と堆積による凹凸が見られるが、これは RUN1～3 と同様に、初期河床形状が各年の川幅縦断形に応じた平衡状態へと遷移する過程で生じた変化である。RUN1 と RUN4 の河床低下量の差には砂利採取の有無による違いが現れており、低下量全体の 66% が砂利採取に伴う影響であったことがわかる (図-21)。なお、この河床低下量の差は、単純に各年の砂利採取量を川幅で除した値ではなく、以下に述べる各要因間の相互作用による影響が含まれる。通常、河川砂利の採取は良質な砂利資源を効率的に得るため、低水路内に形成された既存の砂州や流路を対象に、河床面を薄く重機で浚うように段階的に採取される。そのため、採取区間では河床表層に形成された armor coat が除去され、細粒分を多く含んだ元河床が河床面に露出した状態となる。解析では、このような状況を勘案し、採取区間の粒度分布を一旦初期化するため、初期化された河床面では、流砂量の非平衡性に起因した新たな河床低下が生じ、これが計算期間内で経年的に繰り返されるといった相互作用が生じる。このように、RUN1 と RUN4 の差 ( $\Delta\eta=0.48$  m) には、砂利採取

による直接的な土砂消失量 ( $\Delta\eta = 0.34 \text{ m}$ ) に加え、各要因の相互作用による間接的な影響 ( $\Delta\eta = 0.14 \text{ m}$ ) が含まれる。

図-23 は RUN1 の解析結果に占める各要因の内訳を整理したもので、図中括弧内の数字は解析結果を真値として正規化した各要因の割合である (以下、寄与度)。各河床低下要因をこの寄与度から個々に見ると、砂利採取は低下量全体の約 65% を占め、他の要因と比べても突出して高い値を示す。また、砂防ダムとの相互作用を含めた「河道内土砂の直接採取」に伴う影響は全体の約 85% に達し、これが河床低下に対して支配的な影響を及ぼしていたことがわかる。一方、砂防ダム単体と川幅変化はともに 7~8% 程度で、河床低下に対する寄与度は上記の 1/10 以下に留まる。

### 3. 6 河床低下と植生域縮小の関係

札内川の河畔林を構成するヤナギ類は浅根性を有し、河床表層を這うように水平根を発達させる特性がある。土質や地下水位などの生育環境によっても異なるが、過去の調査事例<sup>10),11)</sup>ではヤナギ類の根の深さは 0.3~0.6m 程度である。既述の通り、札内川上流域では 1970 年代前後に平均河床高が 0.7m 程度低下していることから、この期間に、河床表層付近に形成されていた既存の植生生育基盤の多くが失われたものと考えられる。ただし、前節で述べた通り、当該期間に生じた河床低下は主に砂利採取に起因したものであることから、植生域の縮小をもたらした直接的な要因は、砂利採取時に行われた河畔林の伐採であったと考えられる。航空写真の画像解析の結果から、1970 年代に河畔林の河道内占有率は 40% から 15% にまで急激に低下したことがわかっており、これは河床低下が生じた時期とも整合する。

### 4. 植生被覆・消長モデル

近年顕在化する流路の固定化や樹林化などの諸問題に対して、河道変化と植生消長の相互作用を支配する物理的機構を解明し、それら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できれば、河道と植生の適切な維持管理に資する新たな知見を得ることが可能になると思われる。

本章では、河道内の土砂輸送量を支配する要素として、植生の有無やその生長度合いに応じた地上部と地下部に働く抵抗に着目し (図-13)、流水や流砂に対する植生抵抗を各生長段階に応じて時間的に変化させる「植生被覆・消長モデル」を構築すると

もに、この河床変動解析モデルを用いて河道と植生域の長期変動予測と樹林化の要因分析を行った。

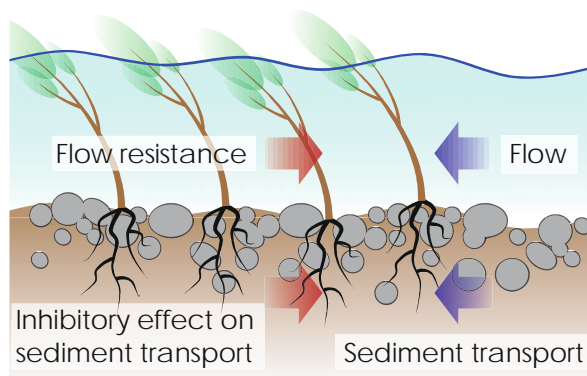


図-24 植生の地上部・地下部に働く抵抗力

### 4. 1 現地調査

まず、植生の地上部と地下部の生長特性を把握するため、札内川上流域のヤナギ林を対象に、成立年が異なる植生域を計 6 箇所選定し、各調査区画内 (10m×10m) において、代表木を対象とした「立木調査 (毎木調査)」と、50cm 四方の土壌内に含まれる根量を深さ 10cm 間隔で計測する「根系調査」を行った。また、河床表層付近の土砂を除去し表層付近を這う根系の空間的な広がりを見る「表土剥ぎ調査」も併せて実施した。立木調査の主な調査項目は、樹齢(Y)、樹高(H)、胸高直径(D)、材密度( $\rho_d$ )、樹幹密度( $S_d$ )、根の深さ( $H_r$ )、根の乾燥重量( $W_r$ )の計 7 項目で、根系調査と表土剥ぎ調査からは、植生地下部における根系の空間的な広がりを把握する。

### 4. 2 解析モデル

樹木を構成する各部位 (幹・根・枝葉等) の生長量には相互に強い相関があり、胸高直径などを介してその他の部位の生長量がある程度推定できることが知られている。今回の現地調査結果と過去に実施された道内河川の樹木調査結果とを併せ、各変数間の単相関回帰分析を行った結果、植生の樹齢(Y)、樹高(H)、胸高直径(D)、根の深さ( $H_r$ )、根の乾燥重量( $W_r$ )等は、次式に示すべき関数と表-2 の変数・係数の組み合わせによって、概ね良好に近似されることがわかった。

$$y = ax^b \quad (12)$$

変数 x,y と係数 a,b の組み合わせは表-2 の通り。



表-2 植生生長モデル (変数・係数一覧)

No	x	y	a	b	R <sup>2</sup>
1	Tree age (Y)	Breast high diameter (D)	0.11	1.77	0.97
2	Breast high diameter (D)	Tree height (H)	1.27	0.79	0.93
3	Breast high diameter (D)	Root weight (W <sub>r</sub> )	0.01	2.72	0.82
4	Breast high diameter (D)	Root depth (H <sub>r</sub> )	28.9	0.23	0.35
5	Tree age (Y)	Tree density (S <sub>d</sub> )	1.16	-0.54	0.32
6	Volume rate of tree root (R <sub>r</sub> )	Reduction rate of sediment transport (R <sub>f</sub> )	0.80	0.20	0.97

根系は地下で均質に分布するものと仮定し、根の土中体積比(R<sub>r</sub>)は下式より算定される。

$$R_r = \frac{W_r S_d}{(1 - \lambda)\rho_t H_r S_r^2} \quad (13)$$

ここで、W<sub>r</sub>は根の乾燥重量、S<sub>d</sub>は樹幹密度、ρ<sub>r</sub>は材密度、H<sub>r</sub>は根の深さ、S<sub>r</sub>は単位格子幅、λは空隙率(0.4)である。

なお、根系がもたらす土砂移動抑制効果(表中No.6)は、著者らが過去に行った短繊維混合珪砂を用いた移動床水理模型実験の結果(平成25年度プロジェクト研究報告書8.6を参照)から推定したものである。この実験からは、土砂に混入した繊維状の物質が砂粒子の移動を抑制し、単繊維の混合率に応じて流砂量が変化することがわかっている。ここでは、この実験で用いた短繊維がヤナギの根系に置き換えて得るものと仮定し、植生の根系がもたらす流砂量低減効果R<sub>f</sub>(河床面の被覆効果)を土壌内に含まれる根系の土中体積比R<sub>r</sub>から推定する。植生域における地上部と地下部の抵抗力は、植生生長モデルから推定された各部位の生長量をもとにそれぞれ下式から算定される。

植生域における地上部の流水抵抗は下式による。

$$\begin{cases} \frac{F_x}{\rho} = \frac{1}{2} C_d S_d D h u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \frac{F_y}{\rho} = \frac{1}{2} C_d S_d D h v \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (14)$$

ここで、F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>は植生による抵抗力、ρは水の密度、C<sub>d</sub>は植生の抵抗係数(0.7)、S<sub>d</sub>は樹幹密度、Dは胸高直径、hは植生高さで水深の小さい方、u, vはx, y方向の水深平均流速である。

流砂量式は芦田・道上の式に、根系による流砂量

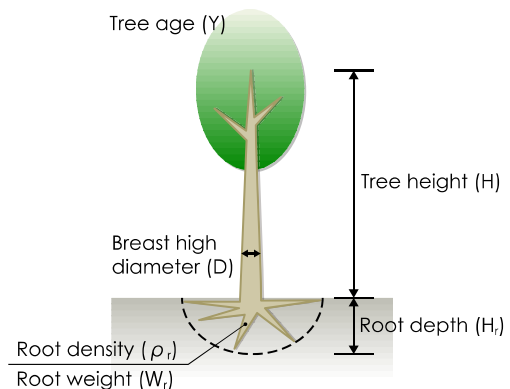


図-25 植生生長モデル (各部位の名称)

低減効果を考慮した下式を用いる。

$$\frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \left[ 1 - R_f \exp\left(-\phi \frac{E}{L}\right) \right] \tau_*^{1.5} \times \left( 1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left( 1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (15)$$

ここで、q<sub>b</sub>は流砂量、sは砂粒子の比重、gは重力加速度、dは粒径、R<sub>f</sub>は被覆層の流砂量低減率、φは低減係数(0.5)、Eは移動層厚、Lは混合層厚(2d)、τ<sub>\*</sub>は無次元掃流力、τ<sub>\*c</sub>は無次元限界掃流力、u<sub>\*</sub>は摩擦速度、u<sub>\*c</sub>は限界摩擦速度である。

#### 4.3 計算条件

解析は「iRIC」のソルバー「Nays2D ver4.0」を基本モデルとし、これに上述の植生被覆・消長モデルを組み込んだ平面2次元河床変動解析モデルを用いて河道と植生域の長期変動解析を行う。計算期間は、10年間に生じ得る変化を想定し、平均年最大流量(24時間)と平水流量(1時間)を組み合わせた25時間の通水を計10回繰り返す。洪水後の平水流量時には、水域を除く計算領域全体の樹齢を1年加算し、植生域の1年間の生長を表現する。流量条件には、

札内川ダム建設(1997)前後の2パターンの平均年最大流量を与え(ダム建設後CASE1:  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ 、ダム建設前CASE2:  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ )、洪水流量規模の変化が河道と植生域の動態にもたらした影響を検証する(図-26)。初期河道条件には、1970年代初期の札内川上流域の河道断面形状(流域平均断面)を用い、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 $n=0.029$ を与える(図-27)。

植生の流出条件は、洪水期間中に生じた河床低下や側岸侵食によって、河床位が根の深さ以上に侵食された際に植生生育基盤の破壊と植生域の流出が生じるものとし、対象セルの樹齢を初期化(樹齢=0)する。また、平水流量時に水域となる領域では、植生の生育が困難な状況下(根腐れ等)にあることを考慮し、同じく植生を消失(樹齢=0)させる。

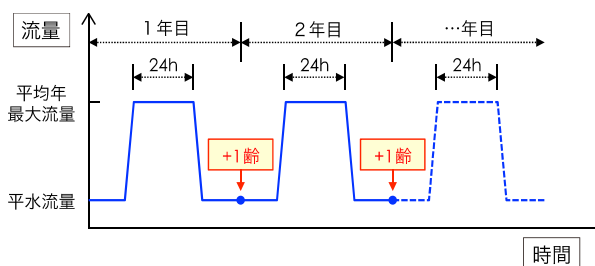


図-26 流量条件(計算時間: 250時間、10年間を想定した繰返計算)

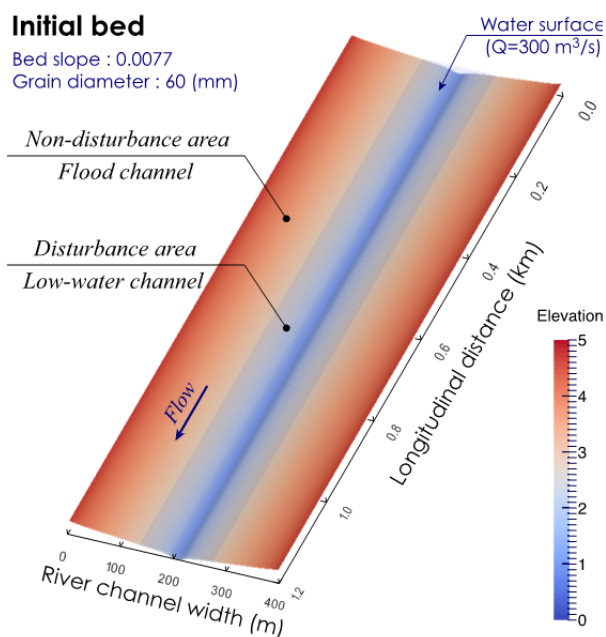


図-27 初期河道条件(攪乱領域と非攪乱領域)

#### 4.4 解析結果

以上の計算条件下で行った解析結果を図-28に示す。図はCASE1( $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ )とCASE2( $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$ )における植生域の分布と樹齢構成の経年変化を3年間隔で示しており、寒色から暖色への変化は樹齢の増加を意味する。河道と植生域の変遷過程を見ると、両ケースとも河床が攪乱を受ける領域(低水路)は、砂州形成や流路変動に伴う側岸侵食によって河道内で徐々に面積が拡大し、約10年程度の期間を経て流量規模に応じた平衡状態へと漸近していくことがわかる(低水路幅CASE1: 150m、CASE2: 250m)。また、低水路内では植生の生長と破壊が繰り返され、植生域と非植生域の面積は流量規模に応じた一定の均衡状態を維持しており、同一流量条件下では、樹齢0~1年の非植生域(礫河原に相当)が河道内に占める面積は経年的にはほとんど変化していない。つまり、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及ぼしている可能性を示唆する。

表-3 土地被覆分類の定義

土地被覆状況	樹齢	樹高
礫河原	0 齢~1 齢	0.0m~0.2m
草地	2 齢~3 齢	0.2m~1.0m
河畔林	4 齢以上	1.0m 以上

図-29は攪乱領域(低水路)における土地被覆状況の経年変化を示しており、ここに示す礫河原と草地以外の領域が河畔林に相当する(高水敷を含む)。したがって、10年経過後の河畔林の河道内占有率は、CASE1( $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ )が72.2%、CASE2( $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$ )が45.7%となり、これは、ダム建設前後に実際に観測されている河畔林の河道内占有率(図-13、ダム建設後: 75%、ダム建設前: 40%)とほぼ一致する。

以上、本章では植生の地上部と地下部の抵抗を考慮した植生被覆・消長モデルを構築し、10年間を想定した植生動態シミュレーションを行った。流量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、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、河床攪乱強度が低下したことで、特に稚幼樹の段階における植生生育基盤の破壊と流出が抑制され、植生の侵入・定着・生長を促進したものと推察された。

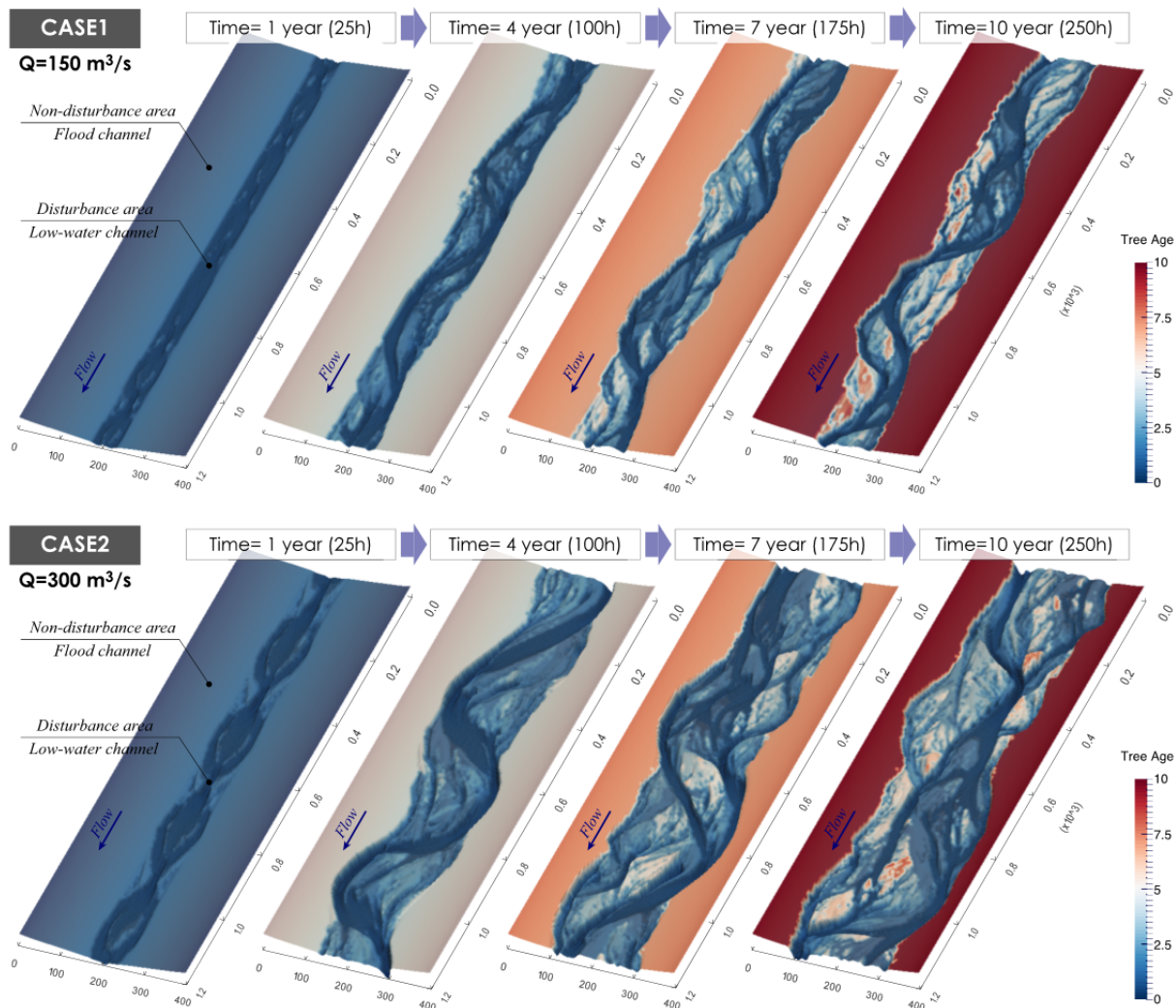


図-28 初期河道条件（攪乱領域と非攪乱領域）

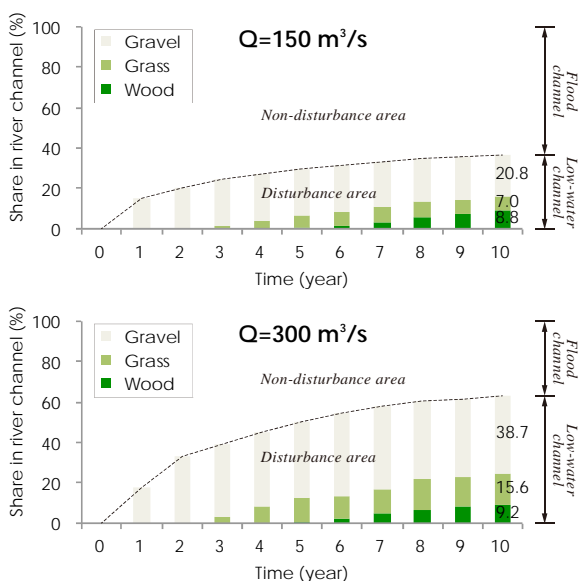


図-29 攪乱領域（低水路）における土地被覆状況の経年変化  
 （※礫河原・草地・河畔林の定義は表-3 に示す）

### 5. 結論

以上、本研究では河川環境が劇的に変化した札内川を対象に、過去の水理水流量、河道地形、河畔林等の変遷過程を時系列で整理し、河道変化と植生消長との関わりを定性的に評価した。また、1970年代前後に生じた河床低下の主たる要因を明らかにするため、川幅変化、砂防ダム、砂利採取の3つの外的要因を組み合わせた計4パターンを試行計算を行い、各要因が河床低下に及ぼした影響を定量的に評価することを試みた。さらに、河道変化の予測精度向上に向け、平成25年度に開発した植生の根系がもたらす土砂緊縛効果に関する数値解析モデルの実河川への適用を検討した。本研究で明らかとなった主な内容を以下に列記する。

- (1) 1947～2011年までの過去65年間の河畔林の変遷過程は主に3つの期間に分けて考えることができ、各期間の河畔林面積には増加・減少・

平衡で表される明瞭なトレンドが存在する。

- (2) 1960年代以前の比較的的自然状態に近い河川環境では、植生域の自然拡大と洪水攪乱による拡大抑制効果が均衡し、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。
- (3) 1970年代前後に流域全体の河床高・水位は平均で1m程度急速に低下し、これとほぼ同時期に河畔林の河道内占有率は15%程度に縮小したことから、河床低下に伴う植生生育基盤の消失と河畔林の一時的な縮小には強い因果関係が類推される。
- (4) 1970年代前後に生じた河道断面形状の変化に伴う水面幅の縮小や、1997年以降の札内川ダムによる洪水調節の影響により、洪水規模やその発生頻度は大幅に減少、河道内の非攪乱領域では新たな植生生育基盤が形成され、これが1980年代以降に生じた植生域拡大の一因となった可能性が示唆された。
- (5) 1次元河床変動解析を用いて河床低下の要因分析を行った結果、川幅変化、砂防ダム、砂利採取の3つの要因から低下量全体の約80%が再現され、河床縦断面形についても概ね良好な再現性が得られた。
- (6) RUN1の解析結果に占める各要因の寄与度で評価すると、砂利採取は低下量全体の約65%を占め、砂防ダムとの相互作用を含めるとその影響は全体の約85%にも達することから、これが1970年代前後に生じた河床低下の主たる要因であったものと考えられる。
- (7) 砂防ダムと川幅変化が河床低下に及ぼした直接的な影響はともに10%以下に留まる。上流域からの土砂供給が完全に遮断された状態であっても極端な河床低下が生じない理由は、流砂量の非平衡性によって河床表層から細粒分が流出し、河床面がある程度粗粒化すると、Armoring効果によって下層との流砂の交換が抑制され、やがて河床高は静的平衡状態へと漸近するためであると考えられる。
- (8) 植生被覆・消長モデルで札内川における経年的な植生動態を計算したところ、良好な再現結果を得ることができた。さらに、札内川の河道内植生の樹林化要因を分析して、毎年生起する年最大規模の洪水流量の減少が河道内植生の拡大に与える影響を定量的に評価するとともに、当該洪水流量による河床の攪乱が河道内で維

持され得る礫河原の面積に対して支配的な影響を及ぼしていることを示した。

近年顕在化する流路の固定化や樹林化などの諸問題に対して今後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を解明し、河畔林の拡大縮小過程やその平衡状態が維持されるメカニズムを明らかにする必要がある。これにより、河畔林の維持管理を行う上での目標設定がより明確なものとなり、自然河川が本来有する更新システムを最大限に活用した施策も可能になるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 北海道開発局他：河相と河道構造計画に関する研究（第1報），昭和56年度技術研究発表会，pp.624-645，1982.
- 2) 北海道開発局他：河相と河道構造計画に関する研究（第2報），昭和57年度技術研究発表会，pp.475-491，1983.
- 3) 北海道開発局他：河相と河道構造計画に関する研究（第3報），昭和58年度技術研究発表会，pp.553-572，1984.
- 4) 秋好輝美他：札内川の治水事業の進捗に伴う河床変動について，昭和57年度技術研究発表会，pp.565-577，1983.
- 5) Loc X. LUU, Shinji EGASHIRA, Hiroshi TAKEBAYASHI : Investigation of TAN CHAU Reach in Lower MEKONG, Annual Journal of Hydraulic Engineering, Vol.48, pp.1062-1062, 2004.
- 6) 江頭進治：河川における流砂問題と流砂力学の課題，ながれ，Vol.24, pp.581-592, 2005.
- 7) 江頭進治，芦田和男，高濱淳一郎，田野中新：連続体モデルに基づく流砂量式の誘導，水工学論文集，第35巻，pp.441-446, 1991.
- 8) 竹林洋史：河川中・下流域の河道地形，ながれ，Vol.24, pp.27-36, 2005.
- 9) 竹林洋史，中元達也，藤田正治：粘着性・非粘着性河床材料混在場における土砂輸送特性，京都大学防災研究所年報，第52号B, pp.637-645, 2009.
- 10) 浅田宏，石川晴雄：水流による河床砂礫の分級機構に関する研究（3），電力中央研究所技術第二研究所報告，第71015号，1972.
- 11) 浅田宏：山地河川の流砂量および河床変動の実

## 8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

- 用的計算手法, 土木学会論文報告集, 第 216 号, pp.37-46, 1973.
- 12) 平野宗夫: *Armoring* をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp.55-65, 1971.
  - 13) 芦田和男, 江頭進治, 高村裕平: 移動床のアーミング機構に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-2, pp.1-10, 1989.
  - 14) 芦田和男, 藤田正治, 向井健: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
  - 15) 芦田和男, 道上正規: 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 14 号 B, pp.1-15, 1971.
  - 16) 芦田和男, 藤田正治, 向井健: 河床砂礫の浮上量と浮遊砂量, 京都大学防災研究所年報, 第 28 号 B-2, pp.1-14, 1985.
  - 17) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 梅本正樹: 蛇行流路における *Sorting* 現象および平衡河床形状に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 33 号 B-2, pp.1-19, 1990.
  - 18) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 二層モデルによる複断面の流れおよび河床変動の数値解析, 京都大学防災研究所年報, 第 35 号 B-2, pp.1-22, 1992.
  - 19) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.383-390, 1991.
  - 20) 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.
  - 21) 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.
  - 22) 渡邊康玄, 三谷修司, 橋本識秀: 鶴川 1992 年 8 月洪水における河道内樹木の倒伏と流れ, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, pp.468-469, 1993.
  - 23) 渡邊康玄, 早川博, 清治真人: 安定解析に基づく川幅の自律形成機構, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.739-744, 2008.
  - 24) 三谷修司, 渡邊康玄: 平成 4 年 8 月洪水による河畔林の倒伏調査について, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, pp.464-465, 1993.
  - 25) 油川曜佑, 渡邊康玄, 阿部修也: 2003 年 8 月沙流川洪水時の河畔林倒伏状況と流れ, 北海道開発土木研究所月報, No.626, pp.2-15, 2005.
  - 26) 吉川泰弘, 渡邊康玄: 1 次元不定流混合粒径河床変動計算におけるマニングの粗度係数と交換層厚の検討, 寒地土木研究所月報, No.662, pp.11-20, 2008.
  - 27) 福岡捷二: 札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究, 一般財団法人 北海道河川財団 研究所紀要, XXIV, pp.123-164, 2013.
  - 28) 徐宗学, 竹内邦良, 石平博: 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.121-126, 2002.
  - 29) 小林健一郎, 宝馨, 中北英一: 全球気候モデル出力を用いた日本域の 100 年確率日降水量の将来予測, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.223-228, 2010.
  - 30) 西岡昌秋, 宝馨: Mann-Kendall 検定による水文時系列の傾向変動, 水文・水資源学会誌, 第 17 巻 4 号, pp.343-353, 2004.
  - 31) 中尾欣四郎, 石井吉之, 小泊重能: 札内川の伏没・復水機構, 北海道大学地球物理学研究報告, No.49, pp.139-150, 1987.
  - 32) 渡辺和好, 竹本成行: 札内川流域における浅層地下水挙動について, 寒地土木研究所月報, No.437, pp.9-15, 1989.
  - 33) 福田義昭, 清水康行: 低ダム群設置による河床変動計算について, 昭和 60 年度技術研究発表会, pp.964-973, 1986.
  - 34) 福田義昭, 清水康行: 低ダム群設置による河床変動計算について (第 2 報), 昭和 61 年度技術研究発表会, pp.579-584, 1987.
  - 35) 苅住昇: 樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1987.
  - 36) 苅住昇: 森林生産の場における根系の機構と機能 I 根系調査と根量推定の方法, 森林総合研究所研究報告, No.259, pp.1-99, 1974.
  - 37) 石川慎吾: 北海道地方の川辺に発達するヤナギ林について, 高知大学学術研究報告, 第 29 巻, pp.73-78, 1981.
  - 38) 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.
  - 39) 石井千万太郎: 流砂と河床変動, 水工学に関する

る夏期研修会講義集, pp.A.7.1-14, 1993.

- 40) 松澤逸巳, 松井愈, 近堂祐弘, 瀬川秀良, 田中実, 小久保公司: 帯広地域の地質, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅, 釧路(2)第 42 号, pp.1-82, 1981.
- 41) 砂防・地すべり技術センター: sabo, Vol.93, pp.3-7, 2008.
- 42) 北海道河川財団: iRIC、<http://i-ric.org/ja/>
- 43) 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、水工学論文集 Vol.47、643-648、2003.
- 44) 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、I\_973-I\_978、2014.
- 45) Noboru Karizumi : The Mechanism and Function of Tree Root in the Process of Forest Production (1) Method of investigation and estimation of the root biomass, Bull. Gov. For. Exp. Sta., 259, 1-99. 1974.
- 46) 阿部和時: 樹木根系が持つ斜面崩落防止機能の評価方法に関する研究、森林総研研報、Vol.373、105-181、1997.

## A STUDY ON THE MECHANISM OF BANK EROSION AND THE RESISTANCE CHARACTERISTICS, AND FUNCTIONAL EVALUATION OF RICH-IN-NATURE REVETMENT IN THE RIVER FOR SNOW COVERAGE AND COLD REGION

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : River Engineering Research Team

**Author** : FUNAKI Jungo

**Author** : NAGATA Tomonori

**Author** : KAWAMURA Satomi

**Abstract** : Riparian woods have grown thickly and extensively at many places across Japan, and the current river environment is substantially different from what it was several decades ago. The Satsunai River once had a braided channel and double-row bars covered with gravel. Currently, willows that began to invade and colonize the river channel several years ago cover the entire river channel area, and double-row bars are gradually being replaced by alternating bars. It is known that flood control by means of dams, reductions of river widths due to river improvement works, and other factors have led to thick and extensive growth of riparian woods, but the process and the dominant factors of such growth have not been fully elucidated. In this study, we arranged a past river channel change process in chronological order, and the relation with the vegetation change was estimated as a river channel change qualitatively. Furthermore, we performed the numerical analysis that put various external factors together to clarify the riverbed reduction factor that occurred around the 1970s, and evaluated an influence degree of each factor quantitatively. As a result, although the area of riparian forest before the 1960s was maintained in constant equilibrium, the possibility that a large decrease in flood scale and outbreak frequency that occurred after the 1990s contributed to the vegetation area expansion was suggested. In addition, it was estimated that the gravel digging around the 1970s' is main factor of the riverbed reduction, and the influence reached 80% of all reduction volume.

**Key words** : Satsunai River, Channel Changes, Vegetation Dynamics, Numerical Analysis