

## 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、前田俊一、川村里実

### 【要旨】

多自然河岸保護工の環境保全・復元効果を適切に評価し、その効果を長く維持するためには、中長期的な河道地形や植生の変化をある程度予測した上で、工種の選定や施設配置計画等の妥当性を確認する必要がある。本研究では、多自然河岸保護工に関する追跡調査を行い、河道地形や植生の中長期的な変化に対する機能の持続性等を検証した結果、「多自然」という観点から当初期待した効果を発揮していない事例や、流下能力上問題があると思われる樹木の密集繁茂事例等が認められた。このため、河道地形や植生の中長期的な変化等に関連した問題点を整理し、多自然河岸保護工を計画・設計する際の留意事項（案）をとりまとめた。

また、河岸の侵食特性を把握するため、(1) 蛇行流路の発達に伴う河岸侵食メカニズムの解明と、(2) 植生の被覆効果や植生の消長を考慮した河床変動解析モデルの開発を行った。(1)については、音更川の堤防被災をもたらした蛇行発達は、河道の湾曲形状に起因した固定砂州の発達をトリガーに、蛇行波形が洪水時に河岸侵食を伴いながら下流側へと伝搬する過程で生じたものであることがわかった。(2)については、札内川における植生動態を当該モデルで計算したところ、良好な再現結果を得るとともに、年最大規模の洪水流量の減少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。

キーワード：河岸保護工、河道地形変化、蛇行発達、植生消長、数値解析

### 1. はじめに

「河川が本来有している生物の良好な成育環境に配慮し、あわせて美しい自然景観を保全あるいは創出する事業の実施」と定義された「多自然型川づくり」が1990年に始まり、1997年には河川法が改正され、「河川環境の整備と保全」が河川法の目的として明確になった。その後、2006年には、「多自然型川づくり」は、「河川全体の自然の営みを視野に入れ、地域の暮らしや歴史・文化との調和にも配慮し、河川が本来有している生物の生息・生育・繁殖環境、並びに多様な河川風景を保全あるいは創出するために、河川の管理を行うこと」と定義される「多自然川づくり」へと発展してきた。<sup>1)</sup> 本研究では、多自然（型）川づくりの思想に基づいて施工された河岸保護工を多自然河岸保護工と呼ぶこととするが、多自然河岸保護工の環境保全・復元効果は持続的なものでなければならない。多自然河岸保護工の周辺では、洪水による外力を受けつつ、河道地形の変化や植生の生長・衰退等の様々変化が中長期にわたって進むが、これに対して既存の追跡調査は施工後5年程度の期間をフォローしている場合が多く、仮にその時点で良好な評価結果が得られたとして

も、環境保全・復元効果がその後も持続するとは限らず、必要に応じてフォローしていく必要がある。そこで、第2章では、施工後5年の評価に加えて、現時点（施工後5年の評価から更に約10年が経過）での評価も行った上で、多自然河岸保護工の機能を持続的に維持するための計画・設計事項に関する留意事項（案）をとりまとめている。

一方で、河岸保護工の設置されていない自然河岸の侵食特性を把握することは、上記の河道地形の変化を予測する上で極めて重要であり、これまで多くの研究者によって侵食特性の様々な研究がなされてきたが、本研究では特にこれまであまり研究されていない①低水路内での砂州の発達機構を考慮した蛇行流路の発達に伴う河岸侵食のメカニズムの解明を第3章で、②河道内植生の消長や植生被覆と河道の相互作用を考慮した河道地形の変化を第4章で取り扱っている。これらについては、研究フィールドとしている北海道の河川で近年顕在化した問題を題材にしてケース・スタディ的に取り組んでいるが、特に、②では、近年の河川管理上の大きな問題として全国的に注目されている河道内の樹林化問題の現象解明に役立つツールを開発して

いる。

## 2. 多自然河岸保護工の機能評価

多自然河岸保護工は治水効果のみならず、環境保全・復元効果を発揮することを目的に施工されており、その効果は持続的なものでなければならない。河岸保護工は主に河道地形の変化が人間にとって好ましくない方向に進んでいる場合に施工されるため、施工箇所周辺は基本的には河道地形が長年動的平衡を保っているような場所ではない上に、河岸保護工の設置自体に河道地形の変化をもたらす側面もある。また、多自然河岸保護工は覆土等を行うことにより植生の回復を目指す場合が多いが、河岸保護工施工箇所の植生は生長したり衰退するなど、経年的に変化していく。このようなことから、多自然河岸保護工の環境保全・復元効果を長く維持するためには、施工後の周辺の河道地形や植生等の中長期的な変化をある程度予測した上で工種や施設配置を決定することが有効な方法の一つであろう。このような予測を行うことで、土砂の堆積や洗掘等により多自然河岸保護工の環境保全・復元効果の低減を防ぐことや、植生が繁茂しすぎて樹木管理のための費用がかさむようなことを避けることが可能な場合もあると思われる。例えば、図-2.1 は、水衝部対策として災害復旧工事で護岸を設置しつつ、河岸部の水面下に多孔質な空間を創出しようとした事例であるが、その後、砂州の移動で水衝部が移動した事例で、現在では陸地化してしまっている。図-2.2 は、河床低下等が原因と思われるが、魚巣ブロックが機能を果たさなくなってしまった事例、図-2.3 は低水路河岸に樹木が繁茂しすぎて低水路の河積確保に影響を及ぼしていると思われる事例である。

また、施工数年後にいったん評価を行った多自然河岸保護工についても、その後の河道地形の変化や植生の生長・衰退等により状況が変化している可能性があるため、期待した効果がその後も持続しているのか、また問題が発生していないかどうかを確認するために必要に応じてモニタリングを行い、必要があれば問題点を解消したり、新規の類似工事にフィードバックしていく必要がある。

そこで、本研究では、多自然河岸保護工に関する既存の施工事例調査の結果や最近の空撮写真等から、問題点を抽出・整理し、多自然河岸保護工の機能を持続的に維持するための計画・設計事項に関する留意事項（案）をとりまとめている。本研究の特徴は、施工後5年の評価に加えて、更にそれから概ね10年後の評価

も行っており、2段階のより長期的なスパンでの評価という点にある。



図-2.1 低水護岸の割石の干上がり



図-2.2 魚巣ブロックの干上がり



図-2.3 河道内樹木の過繁茂

### 2.1 既往の研究

多自然河岸保護工の研究は行政的な側面が非常に強いいため、ここでは個別の研究内容よりも、個別の研究成果を数多く反映させている国土交通省の技術基準や指針等の内容を中心にして最近の動きを押さえることとする。

国土交通省では2006年に「多自然川づくり基本指針」<sup>2)</sup>を定めており、基本方針の中で護岸については、「水理特性、背後地の地形・地質、土地利用などを十分踏まえた上で、必要最小限の設置区間とし、生物の生息・生育・繁殖環境と多様な河川景観の保全・創出

に配慮した適切な工法とすること。」と記載されている。また、この指針に基づき、中小河川を対象に多自然川づくりに関する基礎的事項をとりまとめた『多自然川づくりポイントブック』<sup>3)</sup>が発刊されており、このポイントブックでは河道計画・設計のプロセスにおいて、護岸は2割勾配にこだわらず、滞筋が自由に動くことのできる広い河床幅を確保することや、湾曲部の外岸側の護岸を立てて根固工を深い位置に設置して淵を保全すること等のポイントが示されている。その後、2008年に国土交通省が関係機関に対して「中小河川に関する河道計画の技術基準について」<sup>4)</sup>を通知したことを受けて発刊された『多自然川づくりポイントブックII』<sup>5)</sup>や、2010年の同技術基準の改定<sup>6)</sup>を受けて発刊された『多自然川づくりポイントブックIII』<sup>7)</sup>では、用地に制約のある場合には河床幅を広く確保するために河岸の法勾配を5分程度に立てること、粗度係数を現況よりも小さくするような護岸形式・素材を安易に選定しないこと、護岸は河岸の背後に控えて設置し、その前に土砂、礫等の自然素材の河岸が形成されるように検討すること、護岸が露出する場合には、護岸の素材が周囲と調和した明度・彩度・テクスチャーを有し、護岸の法肩・水際線等の境界が目立たず周囲と調和するように工夫するとともに生物の生息・生育空間・移動経路として、空隙・透水性・保水性を確保すること等が記載されている。

この他に国土交通省の地方整備局等でも管轄地域の多自然川づくりの事前・事後調査の結果を活用して問題点の抽出や改善策の検討を行っている。例えば、国土交通省北海道開発局では多自然川づくりの事例を保全対象（植生・魚類・鳥類、人（利用）等）ごとに分類した上で評価・分析等を行っている。その中では、植生の回復に力を入れた結果、現状で植生が繁茂しすぎているといった問題点等が抽出され、今後の植生管理のあり方等の検討がなされている。<sup>8),9),10)</sup>

既往の研究では、中長期的な河道地形の変化に着目したものや、多自然河岸保護工の施工箇所を数年～10年おきに複数回評価しているものはあまり無いようである。

## 2.2 多自然河岸保護工の施工事例調査

国土交通省北海道開発局が過年度に実施した多自然（型）川づくりの実施状況調査・追跡調査の資料を活用して工法別の問題点の抽出を行うこととした。実施状況調査は、前年度に完成した工事を対象に、工事の内容や工実施箇所の河道特性等を整理したものであり、その後の追跡調査の基礎データとなるものである。

また、追跡調査は施工後5年間の各年の河川環境や生物の生息状況等の工事後の変化を、写真撮影と目視観察により大まかに把握するとともに、施工後の主な洪水履歴や施工後の維持管理について整理したものである。本研究では、1999・2000年度に北海道内で実施された直轄工事の内、河岸保護工に該当する工種で上記の実施状況調査・追跡調査が行われた79事例を調査対象とした。ただし、一連区間を同様の工法で上記の両年度にわたり実施、すなわち複数の工事で実施しているものも含まれていたため、対象工事数は実質的には76事例である。この時期を対象にした理由は、①多自然川づくりが開始されて10年程度が経過し、当初の試行錯誤の段階から脱して一定程度のレベルに達していると思われること、②追跡調査で施工5年後の評価がなされていること、③現時点で追跡調査実施から更に10年近くが経過し、その後の状況の変化が現在顕在化している可能性があること等である。

全ての施工事例を工法やセグメントで分類した上で整理を行った結果、施工事例はセグメント1が24事例、セグメント2-1が15事例、セグメント2-2が27事例となった（計66事例 図-2.4）。したがって、セグメントMやセグメント3については本研究の対象外となる。なお、セグメント区分を行うための十分なデータの無い2条7号区間等の小支川や旧川等の流水の影響を受けない箇所での工事の10事例については、セグメントによる分類の対象外としている。

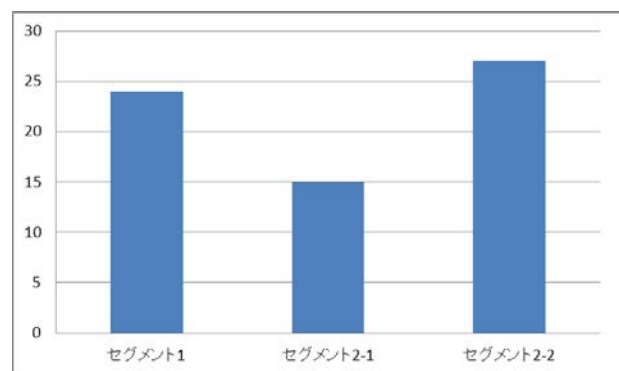


図-2.4 セグメント区分による事例数

また、導入目的工法別に、セグメント別に分類した結果を図-2.5に示す。対象が多自然河岸保護工であり、コンクリート製品+α（例：コンクリートの護岸+覆土+張芝）となっている事例が多いことから、コンクリート・鋼材系、土系、植生系の順に採用件数が多い状況となっている。

さらに、各工法が何の保全・復元を目的に採用されたのかを整理した結果を表-2.1に示す。陸上植物の保

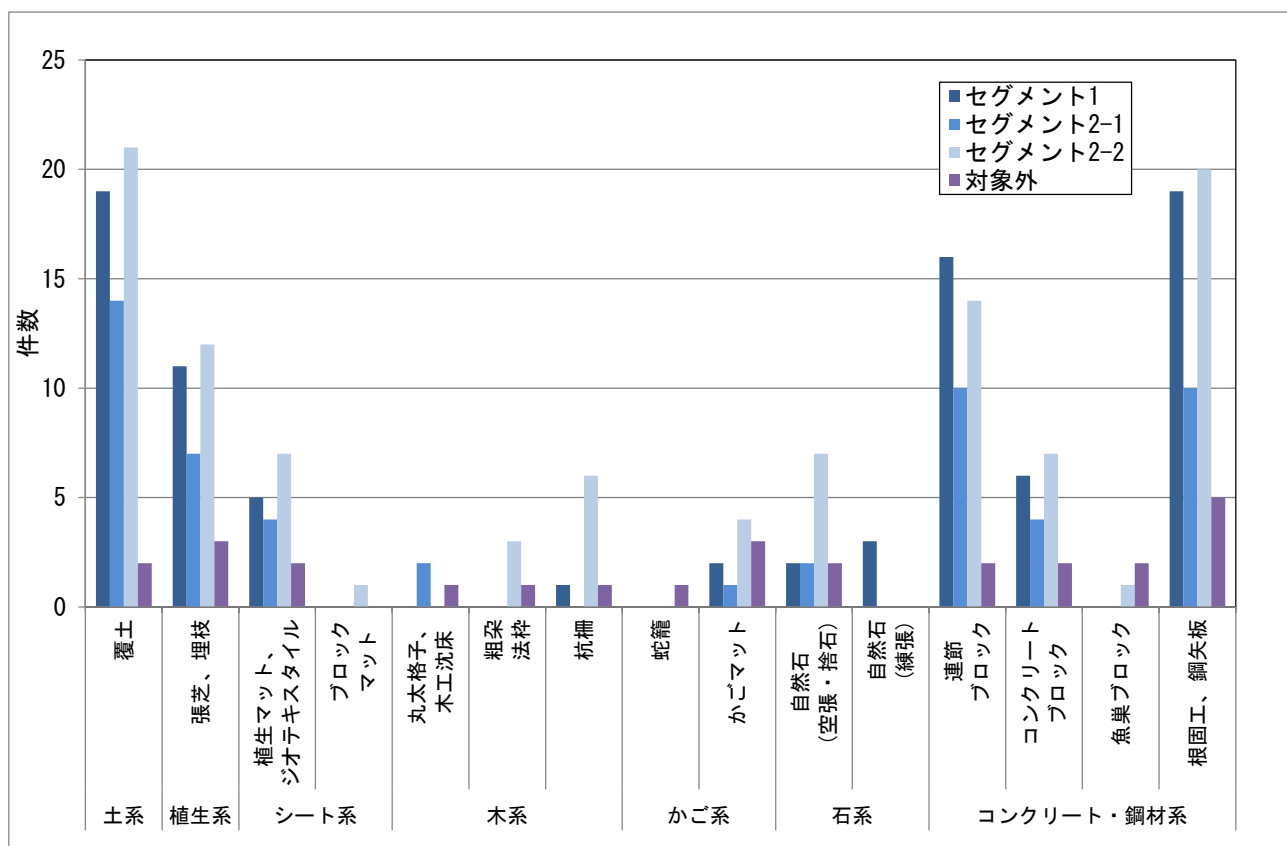


図-2.5 工法別セグメント別分類

表-2.1 保全・復元目的別分類

対象生物・利用	工事工種事例	導入目的の記述との対応	件数 (複数目的あり)
陸上植物	覆土、張芝、埋枝、植生マット、植生シート	河岸植生の復元、自然景観の復元、張芝による景観向上、魚付林（ヤナギ類）としての河畔林の機能向上、護岸に覆土し、周辺との調和を図る	69件
水生植物	消波杭	水生植物域(ヨシ、マコモ)を復元する	1件
魚類	捨石、カゴマット、雑割石、袋詰玉石	水際の多孔質な空間の創出、魚類の生息環境の復元、魚類の保護	16件
	魚巢ブロック	魚類の保全	3件
	水制工、枠工(根固ブロック、巨石、木工沈床)	水衝部の保護、河岸の保護、魚類の保護、多孔質空間による底生生物の生息空間の創出	13件
移動経路	多段式床固工、魚道	魚類の保全、魚類の往来を確保する	5件
親水性	緩傾斜護岸、柵工によるテラス	景観・親水施設、水辺のふれあい空間の創出	2件

全・復元を目的に採用された工法が圧倒的に多く、次いで魚類の多いことがわかる。

以降、追跡調査の結果に関して考察を進めるが、事例毎の詳細な設計条件の把握は行っておらず、追跡調査から概ね10年後の状況把握については、基本的には空撮写真や横断面のみで行い、一部の例外を除き現地調査を実施しているわけではない。したがって、以降で述べる問題点やその原因等の精度には自ずと限界があることに留意されたい。

### 2.2.1 施工後5年の追跡調査

施工後5年の追跡調査の全体的な傾向としては、各々の工事が目指した河岸・水際保護、植生復元、魚類保全といった保全・復元の目標は概ね達成されていると評価できる。特に多自然河岸保護工の構造上の要となる法覆工、基礎工、根固工等の主要部材の被災は1件も発生しておらず、外力に対する主要部材の構造的安定性は確保されていた、すなわち河岸保護工としての効果は十分発揮されていたと判断される。以下に気が付いた事柄の内、主なものを記す。

#### 1) 覆土及び植生工等

表-2.1にあるように、対象として陸上植物の保全・復元を目的とした工法を採用している事例が69事例(69/76)と、対象事例の約9割を占めているが、この評価は図-2.6のとおりである。

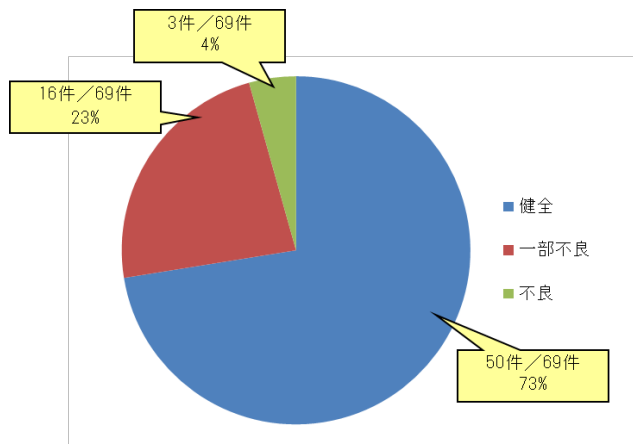


図-2.6 施工後5年の陸上植物の回復状況

50事例で植生の回復が順調に進んでいることが確認され、これは全事例の7割強を占めることから、当初の目的は概ね達成されたと評価できるであろう。ただし、上記69事例からセグメント区分の対象外の事例を除き、セグメント別に整理すると図-2.7になり、セグメント1とセグメント2では目標達成度に差の出ていることがわかる。セグメント1で植生の回復が順調に進んでいない事例が多い主な理由としては、覆土流出の事例の割合の高いことがあげられる。これらの69

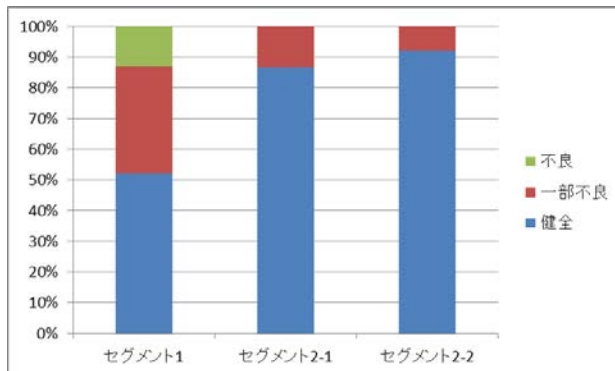


図-2.7 セグメント別の施工後5年の陸上植物の回復状況

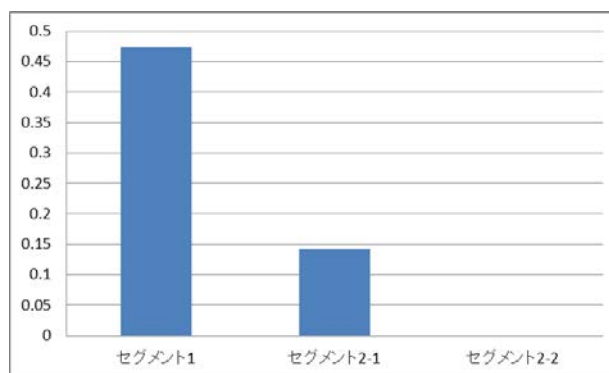


図-2.8 セグメント別の覆土流出割合

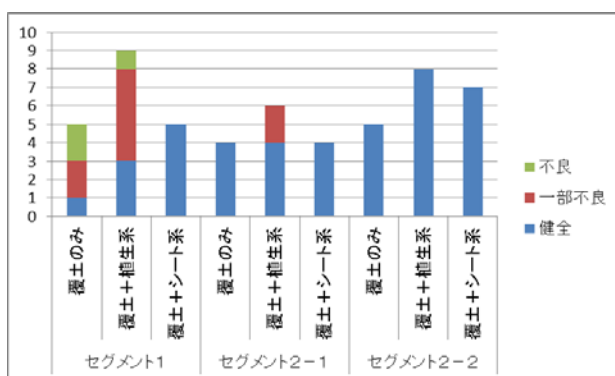


図-2.9 セグメント別及び併用工法の有無による覆土流出割合

事例の内、覆土工を採用していた54事例について、流出の程度までは考慮していないが、覆土の流出が明確に確認された事例は、セグメント1が9事例(9/19)、セグメント2-1では2事例(2/14)、セグメント2-2では0事例(0/21)であり、従来から言われているように急流区間ほど覆土流出のリスクが大きいことを裏付ける結果となった(図-2.8)。また、これらの覆土の全施工事例の内、護岸の上に覆土のみを実施していたものは、どのセグメントについても1/4程度であり、残りの約3/4は1事例を除き、覆土の上に張芝や埋枝等の植生系や、ジオテキスタイルや植生マット等のシー

ト系の工種を併用していた。そこで、セグメント毎に、覆土の施工事例を覆土のみ実施した事例と、覆土に植生系やシート系の工種を併用した事例とに分けた上で整理した結果が図-2.9である。なお、植生系とシート系の両方を使用している事例については、工種の耐流速性を考慮して使用場所を分けていたものと思われるが、外力の大きい部分にシート系、外力の小さい部分に植生系を使用していたため、このような事例は「覆土+シート系」に分類してある。図-2.9から、セグメント1では、護岸の上に覆土のみを実施した場合は、健全な事例の少ないことがわかる。ちなみに、健全な事例の護岸はカゴマットであり、後述のように植生が洪水で流出しやすかった可能性も考えられる。また、覆土に植生系の工種を併用した場合もセグメント1では、覆土のみ実施した事例ほどではないが、健全な事例の割合が低い。その一方で、セグメント2の区間では、覆土のみ実施した場合も覆土に他工種を併用した場合も健全な事例割合が高い。このような評価の差が生じた主な原因は前述のように両セグメントにおける覆土の流出割合の差である。なお、覆土の流出した事例は比較的少数の特定の河川に集中しており、施工後5年間にそれらの河川で比較的規模の大きな出水の発生したことが推測されるが、それらの河川のセグメント1の区間においても植生系やシート系を併用した事例では覆土が流出していないものが幾つもあった。また、シート系の工種を併用したものについては、セグメント1を含めた全ての事例で覆土の流出が確認されず極めて優秀な成績となった。その理由としては、覆土のみや張芝よりもジオテキスタイル等のシート系の工種の耐流速性が優れていることが考えられる。なお、ジオテキスタイル等のシート系河岸保護工を恒久護岸として使用する場合には、転石の少ない箇所を用いる等の適用条件があるので注意されたい。

このように覆土の流出実態が明らかとなったが、出水による覆土のある程度の流出はやむを得ないものとして施工されているため、覆土の流出はすぐさま問題とは言い難いが、もし高水敷整備がまちづくりと一体になって進める計画となっている等の理由で、覆土の流出が水辺利用や景観上の問題になるような箇所であれば、そのような区間の施工では覆土の流出防止対策が必要であろう。また、掃流力の大きくなる護岸の水際よりも下の部分には覆土を行わないで、上部のみ覆土を行った場合には覆土の流出した事例がほとんど無かったことから、覆土流出のリスクを低減するためには、護岸の下部は寄せ石を行うなどの手法が考えられ

るが、このような手法は既に多くの箇所で行われている。



図-2.10 覆土流出後の連節ブロックの隙間からの植生生育（セグメント2-1）

次に、施工事例の中には出水によりほとんど全ての覆土が流出してしまった事例もあるが、そのような場合でも図-2.10に示すように、接続ブロックでは主にブロック間に隙間があるためその隙間に残存していたと思われる覆土から植生が少しずつ生育している様子が見られた（ただし、図-2.10では、ブロック表面の深い凹部から生えている植生もある）。護岸に適度に湿った土で満たされた空隙・隙間のあることは植生の生育にとって重要なことであるが、このようなブロックの空隙・隙間から生えてきた植生は、ブロックによって根が守られるため、洪水時に比較的流出しにくい。その一方で、出水時には植生周辺の流速低下で土砂のトラップも期待できることから、法覆工上で植生基盤の再生が促進されると考えられる。このため、植生がいったん生育し出すと、正のフィードバックが働くことが考えられることから、仮に同じ条件下であれば、隙間のある接続ブロックの方が、隙間の無い間詰めされたタイプの法枠ブロックよりも、覆土流出後の植生の回復速度は大きいと思われる。ただし、その差がどの程度なのかは現時点では不明である。接続ブロックの護岸は屈撓性があるために、吸い出しを受けた際の粘り強さが間詰めタイプの法枠ブロックよりも優れていることから、河岸保護工としては接続ブロックの採用が現在圧倒的に多いと思われるが、覆土がかなり流出してしまった場合の植生回復という点から見ても、接続ブロックの方が間詰めタイプの法枠ブロックよりも優れていると思われる。また、接続ブロックの四辺に若干の隙間を空けて設置する通常タイプのものよりも、隙間を多くすることを目的にデザインされたタイ

プのものの方が、そのような機能が低いと思われる。

## 2) かご系構造物

かごマット等のかご系構造物は、魚類の生息空間として水中に設置し、多孔質空間として機能することを期待している事例が多かったが、十分なモニタリング調査が実施されていない事例が多かった。元々、追跡調査は写真撮影と目視観察による大まかな状況把握が目的であったため、詳細な調査が実施されなかったことは当然であるが、例えば、多孔質空間が土砂で埋まってしまうこと等も考えられるため、必要に応じて期待通りの機能が発揮されているかどうかを追跡調査で検証する必要があると思われる。

## 3) 木系構造物

粗朶や杭柵等の木系構造物は、コンクリートブロックに比べて流水や転石に対する耐力が劣っているが、セグメント1の区間でコンクリート護岸の施工と同時に護岸前面に設置された木製枠工（水制）が出水で被災・流出した事例があった。外力の大きさを十分考慮することが必要である。

## 4) 魚巣ブロック

図-2.2 で干上がってしまった魚巣ブロックの事例を示したが、調査事例の中には、魚巣ブロックの中に土砂が堆積して機能していないものや、漂筋の移動で魚巣ブロック前面が陸化してしまったものが見られた。このような問題の報告は既に幾つかあり、例えば、定期的な土砂の除去を行う等の堆積が過度に進まないような対策を取るなり、土砂堆積や河床低下等により一部が機能しなくなっても残りが機能するように、設置箇所の水理条件を多様化しておく等の工夫が必要である。図-2.11 は大型魚を対象にしたものであるが、このような異形ブロックを組み合わせたタイプのものは景観上の問題があり得るものの、比較的土砂堆積や河床変動には強いと思われる。なお、魚巣ブロックは最近あまり設置されていないようであるが、元来代償措置的なものであるため、まずは魚巣ブロック無しで多様な水理環境を河道内に保全・復元することを目指すべきである。



図-2.11 異形ブロックによる魚巣構造体の事例  
(今回の調査の対象外)

## 2.2.2 追跡調査から更に概ね10年後の調査

上述のように、いったん評価を行った多自然河岸保護工についても、その後の河道地形の変化や植生の生長・衰退等により状況が変化している可能性があるため、主に空撮写真を用いて、施工後5年の評価から更に概ね10年後の評価を行った。概要は以下のとおりである。

### 1) 覆土及び植生工等

施工後間もなく覆土が流出した事例を含めて、覆土を行った事例において、その後の空撮写真から判断して河岸植生は比較的順調に回復・成長しており、植生の復元・景観という観点から見れば、約9割の事例で問題無しであった。ただし、覆土が流出した事例等では、依然として接続ブロックが広い面積で明瞭に確認できるものもあったが、そのような事例でも、施工後5年の評価時点よりも著しく植生が回復していた。したがって、法覆土の勾配が2割以上の緩勾配であれば、条件がよほど悪くない限りは、採用工種の違いを問わず、また、覆土が施工後間もなく流出したかどうかにかかわらず、施工後十数年で河岸植生は十分に、もし



図-2.12 覆土の流出した低水護岸  
(セグメント2-1)



図-2.13 覆土流出箇所の植生の繁茂状況

くは相当程度回復するものと考えられる（今回の調査対象の法覆工は全て2割以上の緩勾配である）。

図-2.12 は、過去の施工事例調査の資料に不備があったために最終的に調査対象事例には含めることができなかったが、施工後間もなく覆土が流出した事例で、例外的に現地調査を行った箇所である。この箇所は、2000年度に低水護岸が施工され、翌年度の夏水で施工区間の下流部の覆土がほぼ全て流出した一方で、そこよりも上流側の覆土には目立った流出が無かったという場所である。図-2.13 は、同じ場所の2015年初冬の状態である。覆土流出箇所は一見すると覆土が流出しなかった施工区間と遜色ないほどに樹木が成長していた。ただし、現在でも覆土流出箇所では接続ブロック上の堆積土砂の厚さが薄い傾向で、目を凝らして見ると接続ブロックがわずかに露出している所もあるなど、微視的には覆土流出の影響が残存していた。

一方で、水際植生の回復のために埋枝や粗朶覆工等を実施した箇所では、樹木が過剰繁茂して、流下能力に悪影響を及ぼしかねない箇所が見られた。例えば、図-2.14,15 は、河岸保護工として伝統工法である杭柵工（水際）と粗朶法覆工（法面全体）が実施された箇所であり、図-2.14 が施工完了直後の状況、図-2.15 が施工後5年の状況である。粗朶法覆工からヤナギ類が繁茂し、豊かな河畔林が形成されているが、現在では施工箇所の背後の樹林とともに施工箇所周辺の高水敷や河岸の大半が樹林で覆われている。

現在では河川整備計画や維持管理計画等に河道内の樹木管理を明確に記載し、適切に樹木伐採等を実施している河川が大半とは思われるが、埋枝や粗朶覆工等を実施して積極的に河畔林の再生を目指す場合には、厳密には、将来の河畔林の繁茂を想定した上で流下能力のチェックを行う必要がある。その上で、将来の樹木管理に要する費用等を考慮し、例えば、埋枝等の範囲を河岸の法面全体というような広いものとはしないで、水際の狭い範囲に限定する等、河道流下断面の確保を適切に行う必要がある。低水路幅の狭い中小河川では、両河岸の樹木が繁茂して低水路の大半が樹木で覆われてしまっているような状況を目にすることがあるが、少なくとも、低水路幅の狭い河川では、河岸部の流下能力に占める割合が大きくなるため、そのような河川では積極的な埋枝等を行わない、もしくは、川幅の広い区間に限定して行う等の工夫が必要であろう。

## 2) かご系構造物等の空隙・隙間のある構造物

かごマット等のかご系構造物では、充填材の礫径が大きいと、細粒土砂を捕捉しにくく、植生基盤として

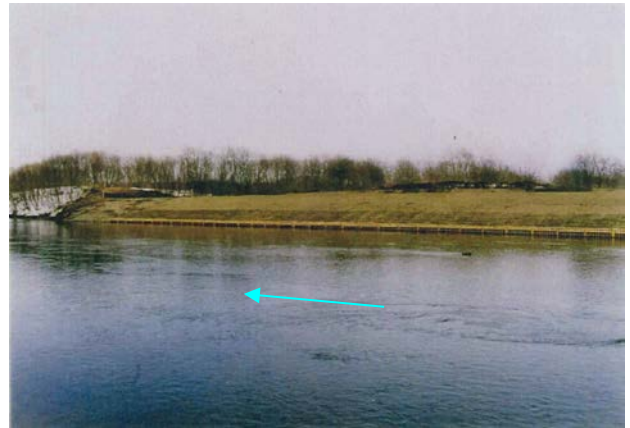


図-2.14 粗朶法覆工の施工完了直後の状況  
(セグメント2-2)



図-2.15 粗朶法覆工の施工後5年の状況



図-2.16 植生が回復しないかごマット護岸  
(多自然型川づくりレビュー委員会資料<sup>11)</sup>)

は条件が良くないため、図-2.16 に示すように、多自然型かわづくりレビュー委員会でも問題のある事例として取り上げられている。このため、かごマット護岸には植生が回復しやすいように覆土（土砂の充填）を行うことが基本となっているが、植生基盤が整ったかごマットにヤナギ類が侵入してくると、結果として、かごマットが樹木の根系を流水の攪乱から守る形になるため、ヤナギ類が洪水で流出しにくくなり、密集繁



## 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

茂する可能性がより高くなる。かごマット上での植生の繁茂は植物の根の緊縛効果によって覆土を流出させにくくする効果がある一方で、特に上記のように中小河川では、樹木繁茂による河道断面の阻害の影響が大きくなるので注意が必要である。今回調査した事例の中には、かごマット付近から多数のヤナギが生えている箇所が複数あったが、中小河川の事例では、樹木伐採を適宜行っているため、河積阻害の問題は顕在化していないようであった（図-2.17）。



図-2.17 水際のかごマット（赤線の部分）付近から生えているヤナギ類（セグメント2-2 初冬）

このような構造物の空隙・隙間に植生が侵入して洪水で植生が流出しにくくなり、密集繁茂する可能性がより高くなることは、程度の差こそあれ、隙間の多いタイプの接続ブロックのようなコンクリートブロックにもあてはまることである。コンクリート系構造物の施工5年後の評価のところでは、隙間の多いタイプの接続ブロックは隙間の少ないもしくは隙間の無いタイプのブロックよりも、覆土流出後の護岸、もしくは覆土が実施されなかった護岸での植生の回復速度が大きくなる可能性を記載したが、隙間の多いタイプの接続ブロックは、中長期的な観点から見れば、河道内樹木の密集繁茂を招く可能性もあることから、このようなことを念頭に入れて樹木管理を適切に行っていく必要がある。

また、根固工にも様々な種類があるが、これも隙間の比較的多い構造物である。施工完了時の根固工は通常水面下に没しているが、何らかの原因で周辺の河床が下がり護岸基礎工直近の根固工が水上に現れて土砂堆積が根固工のところで進むと、その部分も法覆工のかごマットや隙間の多いタイプの接続ブロックと同様に、ヤナギ類の生育基盤になりやすい（図-2.18）。特

に低水路幅の狭い河川で水上に出た根固工の上にヤナギ類が繁茂すると、著しい河積阻害が生じることとなる。この場合、流下断面確保のために単純に根固工に繁茂したヤナギ類を幹から伐採しても再繁茂することが多いため、樹木管理の手法としてはあまり有効とは言えない。このため、根固工に堆積した土砂を除去し根固工をいったん取り除いた上で、ヤナギ類を抜根し、根固工の再設置（必要に応じ護岸の継ぎ足し）を行うことが考えられるが、非常に手間がかかることになる。根固工を設置せずに護岸基礎工の根入れを深くする方法も護岸の洗掘対策の選択肢としては十分あり得るので、河道条件によっては、経済比較を行った上で、そのような手法を選択することも一つの手である。



図-2.18 陸化した根固工に繁茂した樹木（セグメント1 今回の調査対象外の箇所）

### 3) 木系構造物

施工後5年の調査では、あまり顕在化していなかったと推定されるが、更に年数が経過した結果、常に水面下に没していない木系構造物の腐食が進行して崩壊しているものが見られた。「美しい山河を守る災害復旧基本方針（2014年3月）」でも、例えば木工沈床や粗朶沈床については、「木材は腐食を考慮して、常に水面下に埋没させる」<sup>12)</sup>と記載されているが、施工当時は、木系構造物が本格的に再導入されて年数があまり経過していなかったことから、腐食が原因の木系構造物の破壊があまり顕在化していなかったために、水面よりも上の部分でも木系構造物が設置されたものと思われる。特に伝統工法を採用する場合は、木系構造物が使われることが多いが、木系構造物の一部がどうしても常時水没しない場合には、そのような部分をコンクリート構造物に変更するような工夫が必要である（例：木工沈床を設置する場合に、常時水没しない部分では改良沈床（コンクリート沈床）に変更する）。なお、連柴柵

工の木杭のように、ヤナギが生育するまでもてばよいというような設計思想の木系構造物や、想定耐用年数に応じた腐朽対策を実施した木系構造物については、水面よりも上で用いても問題無いことは言うまでもない。

#### 4) 河道地形の変化

出水後の河岸侵食形状に合わせて（引き込み）護岸を施工したところ、護岸前面に土砂堆積が進んで大きな砂州が形成された結果、滞筋が対岸に移動して対岸の侵食対策も行う必要が生じた箇所が複数あった（図-2.19）。図-2.20～23はその1事例で、1999年度に施工された低水護岸である。図-2.21,22を見ると、砂州は施工後まもなく発生していたものの、護岸前面が主流部となっていたために、対岸の侵食は問題にはなっていないと推定される。その後、砂州が護岸

前面でも著しく発達し、主流部が対岸側に移動して対岸の河岸が侵食されたために、対岸にも河岸保護工を施工することになったものと考えられる（図-2.23）。出水で河岸侵食が生じた場合、侵食後の河岸形状に合わせて護岸を施工すると、低水路幅が過大となり護岸前面に土砂堆積が進む可能性があることから、そのよ

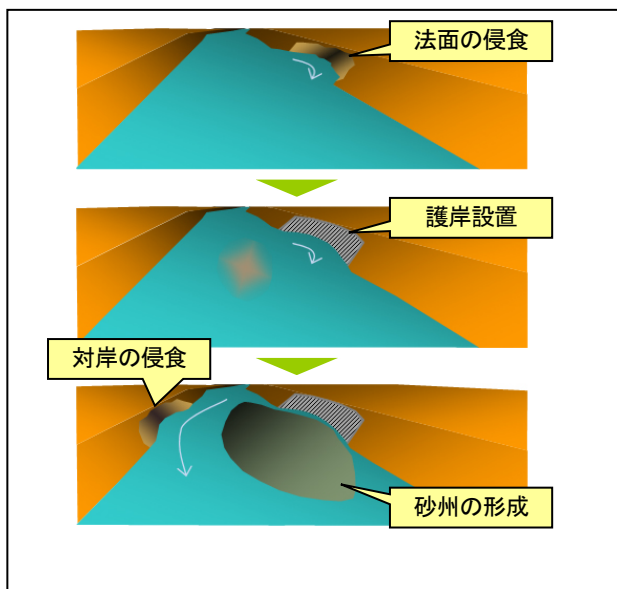


図-2.19 引込み護岸前面の砂州堆積と対岸侵食



図-2.21 施工後約2年の砂州の発達状況



図-2.22 施工後約3年の砂州の発達状況

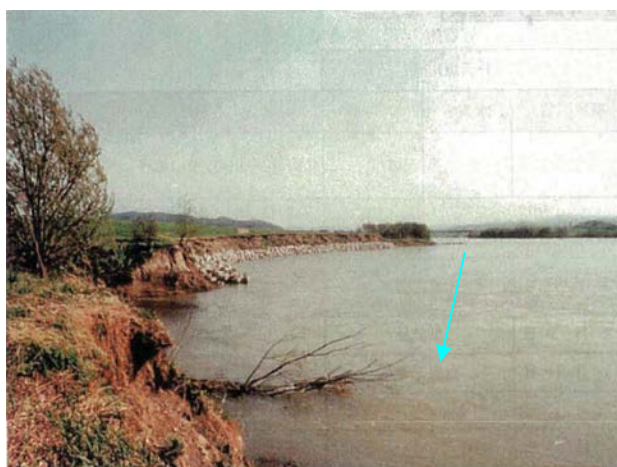


図-2.20 護岸施工前の河岸侵食状況  
(セグメント 2-1)



図-2.23 護岸施工後の対岸の侵食状況  
(2013年撮影)

うな場合は、兩岸の法線形状を検討して、安定した低水路幅になるように護岸の位置を決定すべきである。

また、調査した事例の中には、現在多くの河川で管理上の問題となっている、いわゆる「二極化（比高の拡大）」が河岸保護工の施工箇所が発生している可能性のあるものが幾つか見られた。図-2.24 はその 1 事例で、1999 年度に施工された低水護岸である。二極化の可能性のある箇所の特徴としては、以下のものが上げられ、これらの全てもしくは大半を満たす事例が幾つか見られたということである。

- ① 滯筋が河岸保護工側に寄っている（空撮写真、河道断面図から判断）
- ② 滯筋の洗掘が進んでいるため、周辺よりも水面幅が狭くなっている（空撮写真から判断）
- ③ 対岸の砂州の樹林化が進行している（空撮写真から判断）
- ④ 滯筋の河床低下傾向、砂州の堆積傾向が見られる（河道断面の重ね合わせ図から判断）

実際に、護岸等の河川構造物の設置が原因で二極化が進んだとの報告<sup>13)</sup>も既に幾つかあるため、調査事例の中にそのような事例が含まれている可能性は否定できないが、二極化の原因は考えられているだけでも非常に多くある<sup>14)</sup>ことや、二極化していない護岸施工箇所も多数あること、詳細な調査を行っていないことなどから、二極化の可能性のある場所が、河岸保護工の設置によってそうなったのかは現時点では不明であり、その解明は今後の課題である。

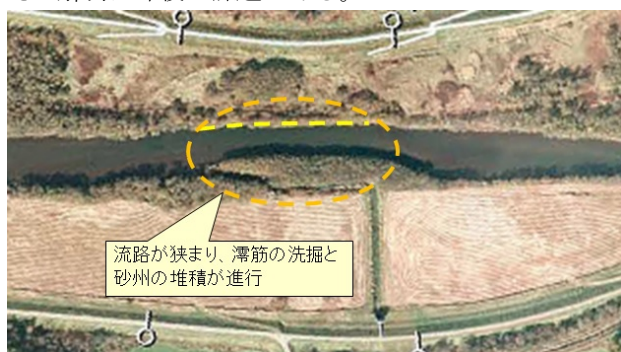


図-2.24 低水護岸設置箇所で二極化が発生している可能性のある箇所（セグメント 2-1）

### 2.2.3 多自然河岸保護工の機能を持続的に維持するための計画・設計事項に関する留意事項（案）

2.2.2 で記載した問題点等を整理し、「多自然河岸保護工の機能を持続的に維持するための計画・設計事項に関する留意事項（案）」をとりまとめた。以下に概要を記す。なお、2.2.2 で記載しなかった事柄も記載してある。

#### 1) 植生の回復（覆土及び植生工等）

- 河床勾配が急になるほど覆土の流出するリスクが高まる。セグメント 1 では、程度の差こそあれ、覆土の流出する可能性がかなりある。
- 空隙や隙間の多い法覆工は、空隙や隙間の無いもしくは少ないものよりも、覆土がかなり流出してしまった場合に植生の回復するスピードが早まる可能性がある。
- 覆土が流出した場合も含めて、法覆工が 2 割以上の緩勾配であれば、条件がよほど悪くない限りは、施工後十数年で河岸植生は十分に、もしくは相当程度回復する。
- 埋枝や粗朶覆工等を実施して積極的に河畔林の再生を目指す場合には、将来の河畔林の繁茂を想定した上で流下能力のチェックを行う必要がある。流下能力不足が予測される場合は、埋枝等の範囲を水際の狭い範囲に限定する等の工夫が必要である。
- 特に、低水路幅の狭い河川（主に中小河川）では、埋枝等の実施による樹木繁茂が原因で流下能力上の問題が将来発生する可能性が比較的高いことから、積極的な埋枝等を行わない、もしくは、川幅の広い区間に限定して行う等の工夫が必要である。
- 空隙や隙間の多い法覆工や河床低下等が原因で水上に現れた根固工など、河岸保護工の種類によっては、河岸保護工が生育した樹木の根系を流水の攪乱から守るため、樹木が洪水で流出しにくくなり、密集繁茂する可能性が高まる。このため、適切な樹木管理の計画を立案し、適宜伐採等を実施することや、将来の樹木繁茂を考慮して河岸保護工の選択を行うことが重要である。

#### 2) 魚類の生息環境の保全・創出

- 瀬や淵等の多様な水理環境の保全・復元を第一に目指し、それが不十分ならざるを得ない場合に魚巢ブロック等の代償措置を検討する。河床低下や河床上昇、滯筋の移動等の河床変動やブロック内の土砂堆積により魚巢ブロックの機能が低下する可能性のある場合は、その対策を予め検討しておく。また、必要に応じて施設点検やモニタリング調査を行い、機能低下が生じていないかを確認する。
- 急勾配河川の床止に全幅魚道を設置する場合には、魚道部分では流れが減勢されにくいために、魚道の直下流の洗掘により落差が生じ、魚類の遡上障害が発生する場合があるので、将来の洗掘深を想定した十分な根入れ深さの魚道を設置する等の対策を検討する（図-2.25）。

○魚類の生息場創出のために異形ブロックや袋詰根固、カゴマット等を水中に設置して多孔質空間として機能させることを期待する場合には、多孔質空間が土砂堆積で消失してしまう可能性も考慮し、必要に応じて土砂堆積の状況を確認する。

### 3) 親水環境の創出

○階段護岸等の親水施設の河岸際は洗掘を受ける可能性があることを考慮し、利用者の安全性確保のための対策が必要である (図-2.26)。

○親水のために部分的に護岸を引き込んだり、切り下げると、その分だけ低水路の河積が増えて土砂堆積を招く可能性があるため、護岸はできるだけ上下流の河岸に沿って配置する (図-2.27,28)。

○延長の長い連続した階段護岸を設置するなど、広範囲で親水性を求めると河岸の自然環境が損なわれるため、親水施設は延長を短くして間隔を空けて配置するなど、自然環境と親水性のバランスをとる (図-2.29)。

### 4) 木系構造物

○木系構造物を採用する場合はコンクリート構造物よりも流水や転石等に対する耐力が劣っていることを前提に使用する場所を検討し、強固な防護が必要な箇所での使用は避ける。

○常時水没しない木系構造物は、腐食するまでの短期間の使用を前提に考えたり、想定耐用年数に応じた腐朽対策を行う必要がある。それ以外の木系構造物は常に水面下に埋没させることとし、水没しない部分はコンクリート構造物に変更する等の工夫が必要である。

### 5) 護岸法線

○出水で河岸侵食が生じた場合に、侵食後の河岸形状に合わせて護岸を施工すると、低水路幅が過大となり護岸前面に土砂堆積が進んで大きな砂州が発生し、滞筋が対岸に移動して対岸まで護岸を施工する必要が生じる可能性があることから、兩岸の法線形状を検討して、安定した低水路幅になるように護岸の位置を決定する。

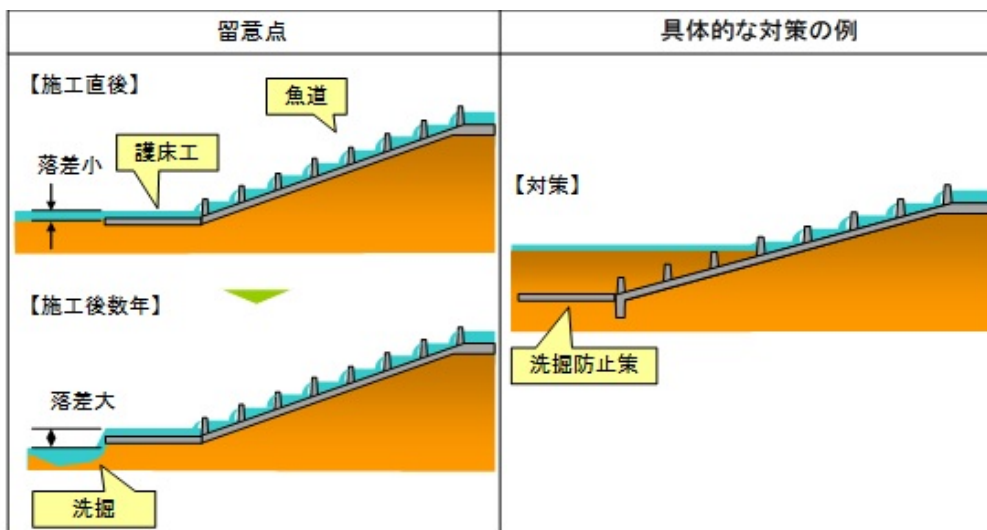


図-2.25 魚道下流端の洗掘対策

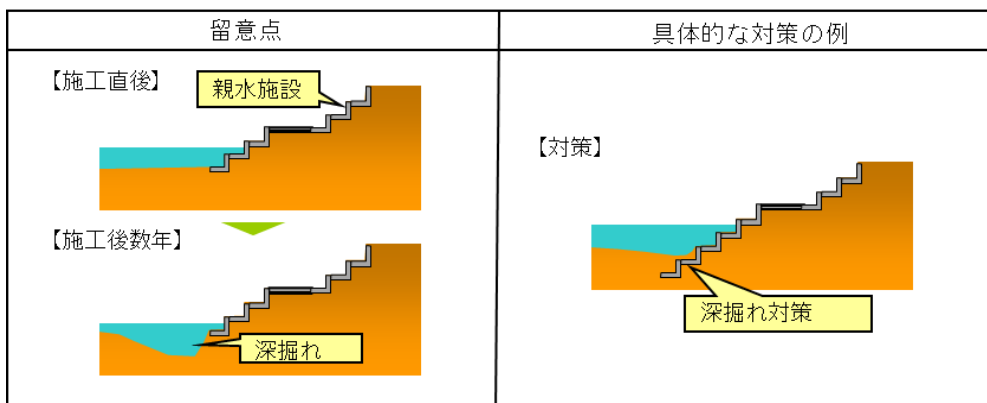


図-2.26 親水施設の留意点 (1)

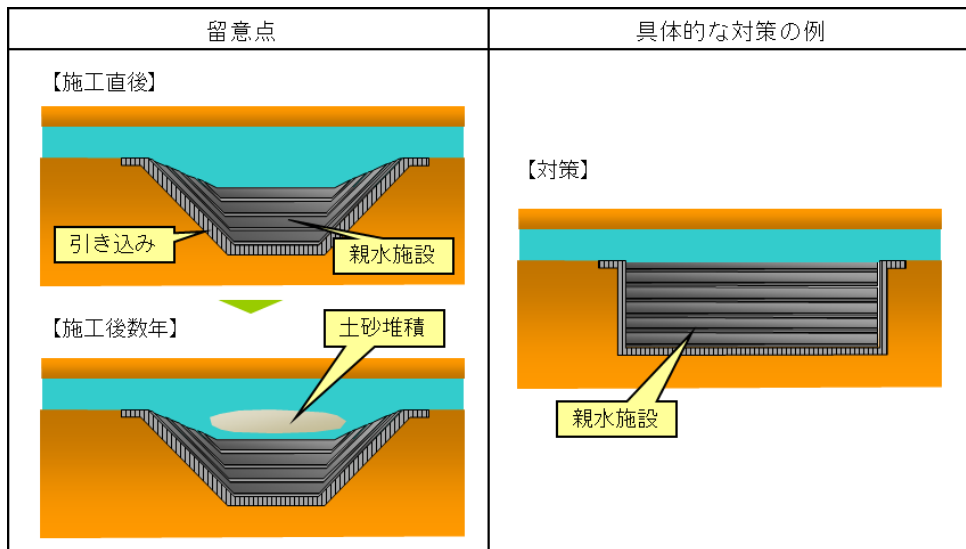


図-2.27 親水施設の留意点(2)

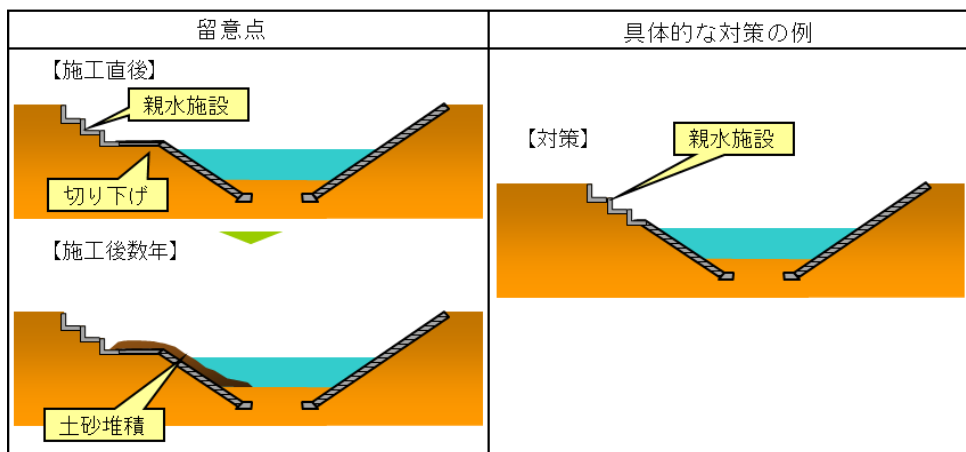


図-2.28 親水施設の留意点(3)

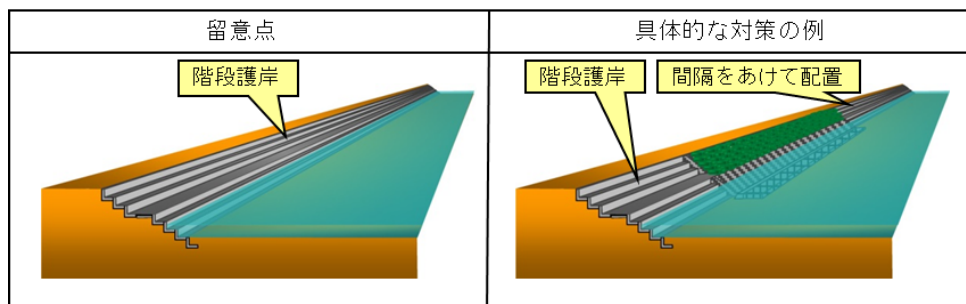


図-2.29 親水施設の留意点(4)

### 3. 蛇行流路発達に伴う河岸侵食のメカニズムの解明

2011年9月上旬に台風や前線の停滞に伴う記録的な降雨が北海道内の各地で発生し、十勝川水系音更川流域では、1989年(平成元年)以降第2位の規模となるピーク流量および最高水位が観測された。この豪雨によって、音更川中流 KP18.2 左岸側では、堤防の一部流出が発生するなど流域各所で大規模な低水路河岸の侵食が確認される事態となった。元来、急勾配河川である音更川は、出水時の流速が非常に速く土砂の移動も活発であり、流路が変動しやすいといった特性を持つが、今回の堤防の被災は、低水路内を流れる流路が徐々に蛇行を発達させ、低水路河岸を侵食し、やがて堤防へと達したものと推察された。本章では、まず初めに流路が河岸侵食を伴って蛇行を発達させるメカニズムの解明に向けて、音更川で発生した当該事例を対象に、侵食箇所周辺の土質データの収集と侵食状況の概略的な把握を行った。次に、出水前後の河道変遷状況を整理し、蛇行流路の平面形状の変化や、洪水ごとの流量ハイドロ曲線の違いなどから、蛇行発達の原因について定性的な考察を行った。

#### 3.1 既往の研究

これまで行われてきた砂州に関する研究としては、渡邊らによる弱非線形安定解析を用いた砂州のモード解析<sup>15)</sup>があり、直線水路内における砂州の移動・発達やモード減少過程については多くの有益な知見が得られている。しかし、河岸の平面形状が侵食によって大きく時間変化するような場合に生じる砂州形態の変化については、研究事例は少なく現象の理解が十分であるとは言えない。蛇行に関する研究としては、清水らによる数値解析モデルを用いた自由蛇行に関する研究<sup>16)</sup>が挙げられる。この研究では、河床低下によって斜面が一定の限界角度を越えた際に河岸が自然崩落するものし、限界角度を保つように河岸を後退させるという斜面崩落モデルを用いることで河岸侵食現象を良好に再現している。また、河岸侵食の進行とともに蛇行頂部内岸側の砂州は樹林化によって陸地化するものと仮定し、逐次計算領域から棄却することで、流路が初期の河道幅を維持したまま蛇行発達するプロセスを再現している。迂曲流路に関する既往研究では、Parker and Johannesson や Lanzoni and Seminara, Shimizu らのグループによって多くの知見が提示されており、迂曲流路の発達は、側岸侵食と湾曲部内岸側の固定砂州の埋め戻しによって生じ、一定の川幅を維持した状態のまま、流路の迂曲化が進行することなどが示されている。しかし、洪水の際、蛇

行流路のみならず砂州を含めた低水路内全域で河道が変化するような場合は、側岸侵食によって川幅が時間的かつ縦断的に変化する中で生じる単列交互砂州等の発達過程を予測する必要があるが、既往研究で行われている数値解析を用いた河床形態特性の分析や砂州の安定解析は、側岸を固定した状態の直線水路を対象としている場合が多く、側岸侵食が生じる条件下での研究例は非常に少なく、十分な知見が得られていない。

#### 3.2 急流河川における蛇行発達事例

##### 3.2.1 河道地形変化の概要

2011年9月1日から7日にかけて、台風や前線の停滞に伴う記録的な降雨が道内各地でもたらされた。十勝川水系音更川流域では、特に9月5日正午から7日未明にかけて非常に強い雨が長時間に亘って降り続き、降り始めからの総雨量は音更川上流のナイタイ雨量観測所で383mmを記録するなど、年間平均降水量の約40%にも相当する雨量を、このわずか6日間で降らせる記録的な豪雨であった。図-3.1に道内各地の雨量計で計測された当該期間の総雨量を示す。

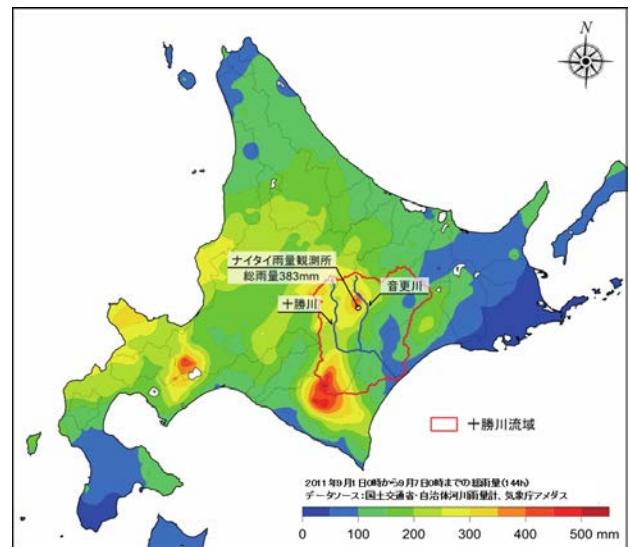


図-3.1 2011年9月1日～9月7日までの総雨量

この豪雨によって、音更川下流 KP9.1 に位置する音更水位流量観測所では、9月6日未明、1989年(平成元年)以降第2位の規模となるピーク流量  $548\text{m}^3/\text{s}$  及び最高水位 73.22m が観測され、翌9月7日未明には図-3.2の赤丸で示す KP18.2 付近左岸側において堤防の一部流出が確認される事態となった。図-3.3はこのときの現地状況を撮影したものである。このような緊急事態を受け、現地では侵食箇所周辺に根固めブロックを投入する応急対策が実施され、これにより堤防の侵食拡大は食い止められた。図-3.4は根固めブロック投入後の現地状況であるが、堤防が大きく侵食

## 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

され非常に危険な状態であったことがわかる。また、その後の調査から、堤防の一部流出にまでに至ったケースは当箇所のみであったが、低水路河岸の大規模な侵食は流域各所で確認された。



図-3.2 被災箇所（音更川 KP18.2 付近左岸側）



図-3.3 堤防流出状況（9月7日 午前）



図-3.4 応急対策後の現地状況（9月9日 15:30）

このような大規模な河岸侵食をもたらした当該出水は、ピーク時の流況が記録的なものであったことに加え、河道内を低水路満杯流量規模で流れている時間

が非常に長く続いたことが大きな特徴として挙げられる。元々音更川は河床勾配 1/150~1/200 程度の急勾配河川であるため、非常に流速が速く土砂の移動も活発であり、流路が変動し易いといった特性を持つ。今回の堤防流出に至るまでの過程は十分明らかにはなっていないが、現場の状況から、少なくとも高水敷高を大きく越える流れによって堤防が直接侵食されたのではなく、低水路内を流れる流路が次第に蛇行を発達させ、徐々に低水路河岸を侵食し、やがて堤防へと達して堤体の侵食が始まったものと推察される。すなわち、音更川のような急勾配河川では、たとえ低水路内を流れるような流量規模の出水であっても、その継続時間が非常に長い場合には、何らかの要因によって低水路内を流れる流路が徐々に蛇行度を高め、蛇行波形の波長・振幅の増大を伴い、やがては堤防を侵食する規模にまで発達する可能性があることを当該事例は示唆している。



図-3.5 出水前後の流路線形と護岸箇所（撮影 2009. 9）

図-3.5 は 2009 年に撮影された被災箇所周辺の斜め写真で、これに出水後の流路線形と既設護岸の位置を重ね合わせたものである。この図から、出水前は護岸によって守られていた蛇行頂部（水衝部）の位置が、当該出水で下流側に大きく移動し、護岸の無い箇所で蛇行振幅を増大させたことがわかる。しかし、出水時このような急激な蛇行の発達がいつ・どこで・どのような形で起きるかを平常時の河道状況から予測することは難しく、低水路河岸の侵食対策としては、現象の後追いとして既に現出した水衝部の位置を適宜保護していくしかないのが現状である。今回の堤防流出箇所に関しては、早朝に発見されたこともあり迅速な応急対策が可能であったが、夜間など場合によっては発見が遅れて最悪の事態に至るようなケースも十分に想定され得る。今後このような事態を未然に防止するため

には、低水路内を流れる流路が蛇行を発達させるメカニズムとその要因の解明が不可欠であり、これによつてはじめて今回のようなケースに対応した適切な予防措置を講ずることが可能になる。本節では、流路が河岸侵食を伴って蛇行を発達させるメカニズムの解明に向け、まずその準備段階として、今後、詳細な解析を行っていく際に必要となる侵食箇所周辺の土質データ（堤体・高水敷・河床材料）の収集と侵食状況の概略的な把握、および出水前後の航空写真の比較などから河道平面形状（水みち）の変化に関する簡易的な考察を行う。

### 3.2.2 現地調査

#### 1) 調査箇所

出水後、侵食箇所周辺がどのような状況にあるのかをよく把握する必要があることから、今回最も侵食を受けた KP18.2 左岸付近において、露出した堤体および高水敷の侵食面から試料を採取し土質調査を実施することとした。なお、堤体に関しては築堤履歴などから土層構成を推定し、推定された各層に対して調査を実施した。また、航空写真の比較や現地踏査などから、

今回の出水によって流路の位置はダイナミックに変化し、新しく水みちや砂州となった箇所が多く存在することがわかっている。蛇行の発達に伴う流路と砂州の形成は、土砂の移動を伴って一体となって進行すると考えられるため、両者が形成される過程で粒度分布特性にどのような違いが生じるのかを知ることは重要である。よつて、今回、最大侵食箇所の前面とその直上流に形成された砂州と流路を対象にそれぞれ河床材料調査を実施することとした。各調査箇所を図-3.6 に示す。

#### 2) 河道断面形状の変化 (KP18.2)

最大侵食箇所直下に相当する KP18.2 の河道断面形状の変化を図-3.7 に示す。実線が出水後の 2011 年 10 月に計測された断面形状で、破線が出水前の 2009 年 12 月に計測されたものである。先に述べたように、前回調査時は流路となっていた箇所に大量の土砂が堆積して砂州となる一方（図中赤塗）、高水敷であった箇所が洗掘・侵食を受けて新たな流路が形成されたことがわかる（図中青塗）。河床材料調査は、この新たに形成された砂州と流路を対象に、横断方向に等間隔とな

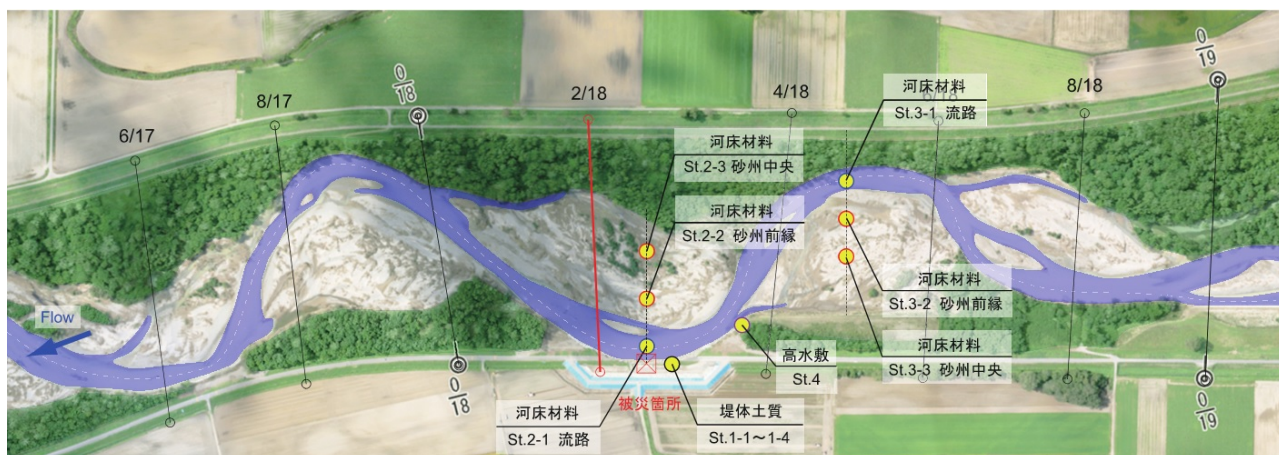


図-3.6 堤体土質・河床材料調査実施箇所（2011年9月26・27日実施）※撮影2011年9月16日

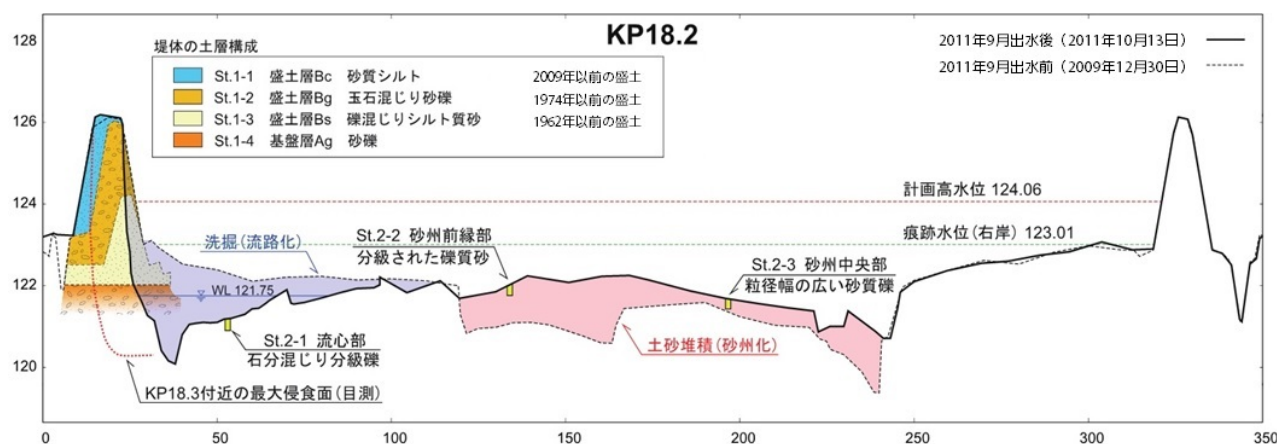


図-3.7 出水前後の断面形状変化 (KP18.2) と河床材料調査実施箇所、および築堤履歴



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

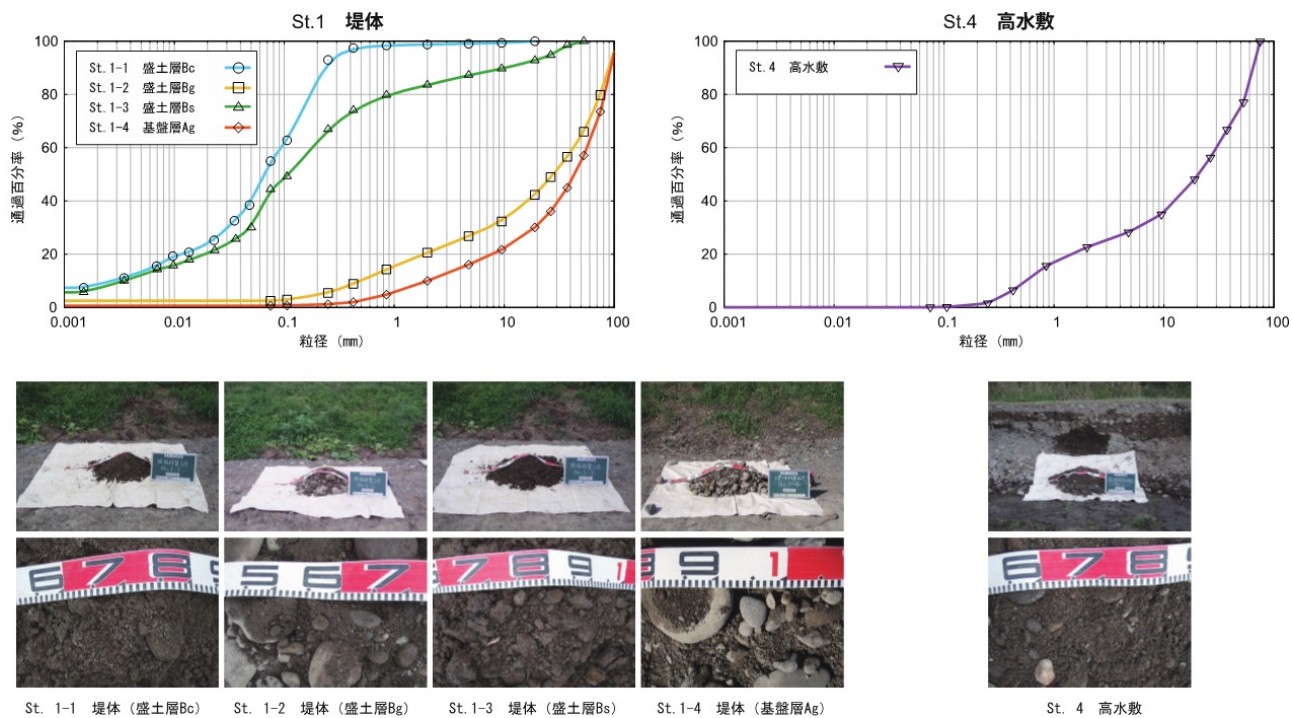


図-3.8 堤体・高水敷土質調査結果

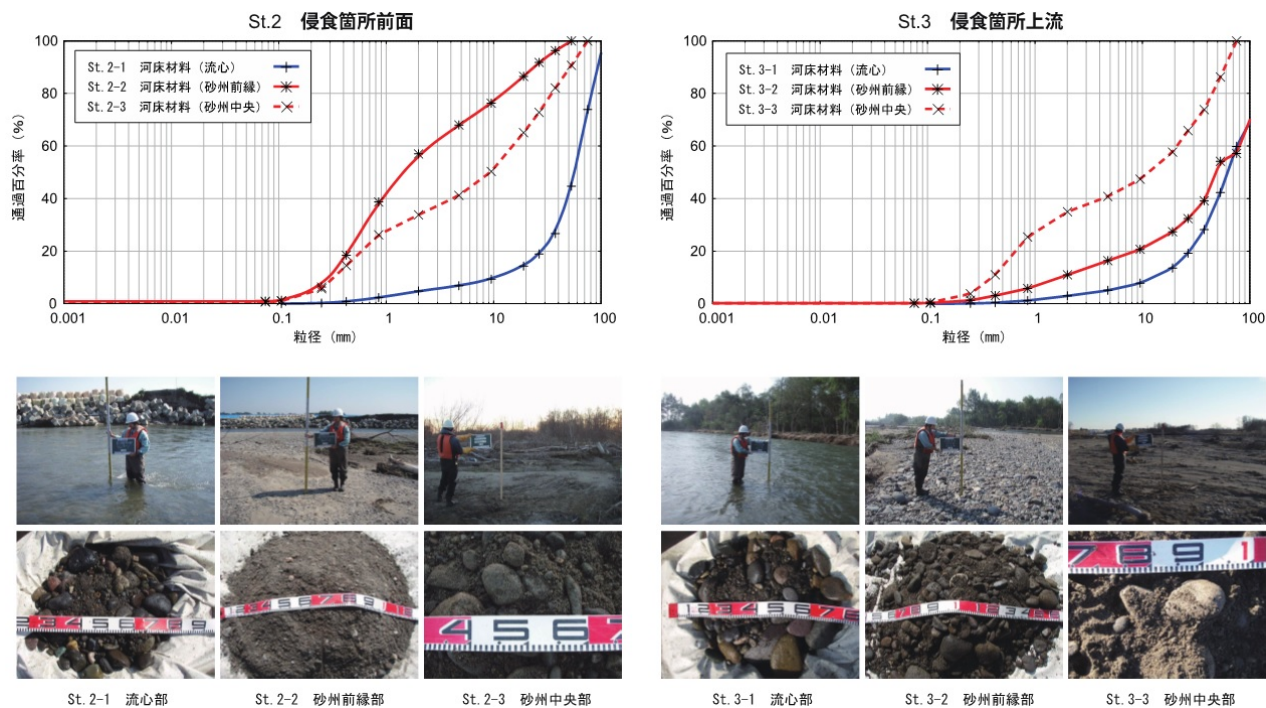


図-3.9 河床材料調査結果

るような調査ポイントを3点設けて実施することとした(St.2)。また、侵食箇所上流の砂州と流路についても同様とした(St.3)。

3) 堤体土質調査 (St. 1)

堤体土質調査の結果を図-3.8 左に示す。調査箇所は試料採取の容易さを考慮し、KP18.2 直上流の最大侵食箇所を対象とした。築堤履歴などから土層構成は

計4層から成るものと推定し、露出した侵食面から各層の試料を採取して粒度試験を実施した。図から明らかのように各層の土質は2種類に大別され、流路内の河床材料と非常に近い粒度分布を持った砂礫質土と、砂州上の河床材料よりもさらに粒径の細かな成分を多く含むシルト質砂(又は砂質シルト)によって構成されていることがわかった。この結果と過去の築堤

履歴とを照らし合わせ、現在の堤防がいつ・どのような土質材料によって形作られてきたかを図-3.7の左岸築堤上に示す。堤体内の赤破線は、KP18.2直上流の最大侵食面である。この図から、現在の築堤は砂礫質の基盤層の上に1955年（昭和30年）代に築造されたシルト質砂の堤防があり、この上に現在の堤防の基礎となる1965年（昭和40年）代に施工された砂礫質の盛土がある。さらにその後、拡幅盛土として砂質シルトが腹付けされたことがわかる。

同図中の緑破線で示す痕跡水位の状況から、出水期間中、当箇所（KP18.2）において主に流水にさらされていた土層は、1955年（昭和30年）年代に築造された盛土層のシルト質砂で、その後、洗掘の進行と水位の低下とともに徐々に基盤層である砂礫質土が洗い出されていったものと推察される。また、侵食面は各層の境界で極端に大きな変化点を持たないことから、下層の侵食によって支持力を失った上層が自然崩落する形で徐々に垂直に近い侵食面が形成されていったものと考えられる。なお、最上層の砂質シルト層は今回直接流水にさらされることが無かったため、被覆植生や粘性の影響によりややオーバーハングした形で残されていた。

#### 4) 河床材料調査 (St. 2, St. 3)

河床材料調査の結果を図-3.9に示す。侵食箇所前面のSt.2をみると、赤線が当該出水で新たに砂州となった箇所の粒度分布で、実線が砂州前縁部、破線が砂州中央部を示している。同じく青線で示す流路内の粒度分布は、流水の分級作用によって細粒分はほとんど洗い出されて礫分が主体となっているのに比べ、出水期に砂州上に堆積した土砂は粒径の細かな成分を比較的多く含む礫質砂(or 砂質礫)であったことがわかる。一方、侵食箇所上流のSt.3をみると、砂州前縁部の粒度分布だけが下流のSt.2と比べてかなり粗粒化していることがわかる。これは出水中に現在の砂州前縁付近が主流路に近い流況であったことを示しており、水面下で高流速となっていた期間に分級が進んだ結果であると考えられる。出水期、St.3より上流では、KP19.4付近で生じた自然短絡の影響により約1km以上にも亘って砂州の形成は見られず、流れはかなり直線的であったものと推察される。一方St.2は今回最も河岸侵食が進行した箇所、大きく湾曲した流路内では横断方向の流速分布がSt.3に比べるとかなり外岸側に偏っていた可能性がある。以上より、2つの砂州上に現れた粒度分布の違いは、出水中における横断方向の流速分布や流路となっていた範囲やその期間

の違いによってもたらされたものと推察された。

#### 5) 高水敷土質調査 (St. 4)

次に高水敷の土質調査結果を図-3.8の右に示す。当試料は被災箇所の直上流に位置する高水敷の侵食面中程から採取したもので、粒度分布は砂州中央部の河床材料と非常に近く、基盤層よりもやや細粒分を多く含んだ砂質礫であった。当箇所周辺の高水敷は、出水期、河岸侵食が堤体に到達するまでの間、一定の防御壁の役割を果たしていたものと考えられる。実際に、2010年8月時点の航空写真からは、被災箇所周辺に40～50m幅の高水敷が残されていたことが確認できる。河岸侵食が進行した詳細な時間経過はわかっていないが、流量が急激に増加し始めたのが9月5日夕刻で、堤防の流出が発見されたのが7日未明であることから、この間わずか1日半程度で40～50m幅の高水敷と堤防の侵食が一気に進行したことになる。河岸侵食とそれに伴う蛇行の発達、流水による外力の大きさやその継続時間のほか、外力を受ける側である高水敷や堤体の土質にも左右される。すなわち、被災箇所周辺の高水敷が粘着力を有しない砂質礫であったことも、今回の急激な河岸侵食進行の一因になったものと考えられる。以上の土質調査結果を簡単にまとめると、音更川流域の河道は、一部堤防を除くその大半が砂質礫(砂礫質)の土砂によって構成されており、流水に対する抵抗力が比較的弱く、河岸侵食やそれに伴う流路の蛇行が発達しやすい条件を備えていたものと推察された。

### 3.2.3 河道地形変化の概要

#### 1) 河道平面形状の変化

出水前後を含めた過去の河道変遷状況を端的に捉えるため、航空写真などから流路・河畔林・低水護岸等の位置と範囲を判読し模式図として整理した。さらにこれらを年代ごとに比較し、音更川の蛇行特性や河道状況の変化について考察を行った。比較対象とした年代は、大規模改修前に相当する1963年とその約40年後の2000年、さらに当該出水前後の平成2010・2011年の計4箇年分とし、範囲は今回の被災箇所を含むKP14.0～21.0の河道内(現在の堤々間)を対象とした。写真判読により模式化した河道状況を図-3.10に示す。図中の塗色・線種の区分は凡例に示す通りである。なお、写真判読の精度は撮影された季節や天候のほか、データ自体の品質(解像度、カラーモード)にも大きく左右され、特に戦後米軍によって撮影された1963年の航空写真には判読精度上の問題が多く含まれているため、ここでは参考程度に示すものとし、

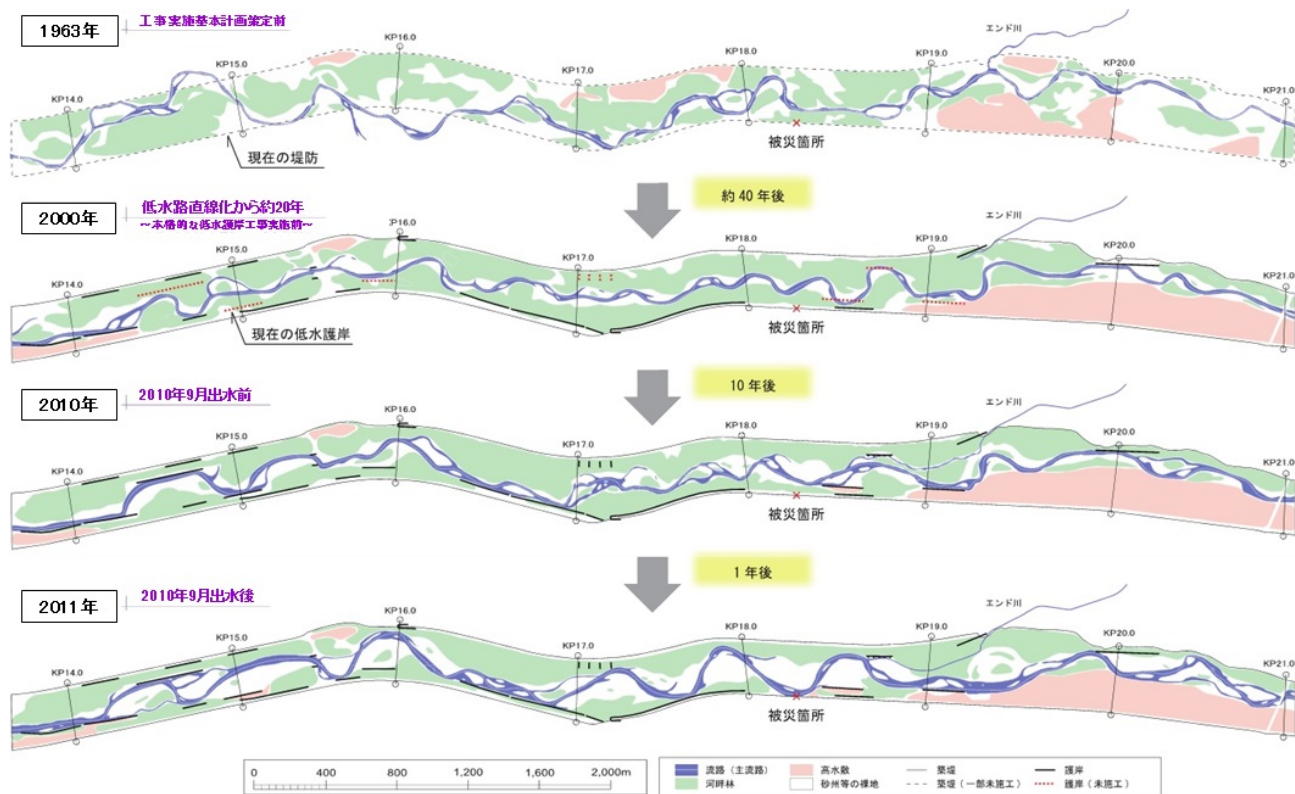


図-3.10 過去の河道変遷状況 (KP14.0~21.0)

以下では、比較的確度の高い結果が得られた出水前後の期間を中心にその変化をみることにする。

図-3.10 に示す 2010・2011 年の流路線形を比較すると、今回の出水で蛇行が大きく発達し、振幅・波長とともに増大した様子が見てとれる。中でも被災箇所の上流 1km 区間 (KP17.0~19.0) の変化が特に顕著で、出水前後で流路の位置が全く異なっていることがわかる。音更川が本来持つ蛇行特性 (ここでは低水路内を蛇行する流路を指す) を評価するには、護岸や水制工など、蛇行発達を阻害・抑制するような人為的な要素は極力排除して考えることが望ましい。図中黒太線は低水・高水護岸の位置を示しているが、護岸の設置状況は時期や場所によって大きく異なっており、流路形成に及ぼす影響の度合いも異なるため、区間全体を一律に評価することはできない。特に、蛇行頂部がコの字形に潰れるような変化を見せる KP14.0~15.0 付近などは、護岸の影響が強く現れており、自然状態の蛇行特性を評価するには適さない区間である。一方、被災箇所の上流 1km 区間 (KP17.0~19.0) は、出水後の波形が比較きれいに揃っており、護岸の影響もほとんど受けておらず、自然状態に近い蛇行発達過程を示していたものと考えられる。よって、次はこの 2km 区間の流路変化に着目する。

被災箇所の上流では、出水前の時点で、低水護岸が

千鳥状に 3 列配置されていたのが確認できる。この護岸配置と出水前後の流路変化から、今回の出水では、蛇行波形の位相が下流側にずれるような変化と、横断方向に振幅が増大する変化とが複合的に進行したことで、この既設護岸の切れ間を縫うような形で蛇行流路が形成されたものと考えられる。一般的に、低水護岸は現出した蛇行湾曲部外岸側の水衝部を中心に敷設されることが多いため、今回のように一洪水で蛇行波形の位相や波長が大きく変化する場合、想定外の箇所での蛇行流路の振幅が増大する可能性があると言える。また、KP19.4 付近では自然短絡 (ショートカット) が生じており、この影響が下流側の蛇行発達を誘発又は促進した可能性も十分考えられる。

## 2) 河畔林面積と主流路延長の変化

図-3.10 をもとに算出した河畔林等の各要素の面積と主流路延長の変化を図-3.11 に示す。なお、これらの値は、洪水や河川改修などの影響を受けて数年間隔で大きな変動を繰り返していたものと考えられるが、今回の解析で得られるのは 4 箇年分の点データのみであるため、1963 年から 2010 年までの変化を詳細に追うことはできない。また、既に述べたように、航空写真の判読結果には撮影時期やデータの品質などの影響も内含されているため、ここでは、特に大きな変化が見られた部分について述べる。図から当該出水前

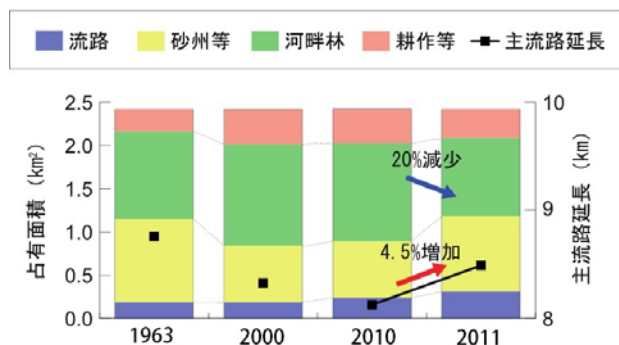


図-3.11 河畔林等の面積と主流路延長の変化

後を比較すると、河畔林の面積は約 20% 減少し、主流路延長は約 4.5% (7km 区間全体で 360m) 増加したことがわかった。図-3.10 を見ると、河畔林が消失した箇所は、流路の位置が大きく変化した区間の低水路内に集中していることがわかる。これは、蛇行流路の位相 (波長) や振幅が変化する過程で、砂州や高水敷上に繁茂していた河畔林の多くが流出又は埋没したことに起因するものと考えられる。また、蛇行流路が正弦波で近似できるものと仮定すると、蛇行波形は、波長  $\lambda$  (波数  $f$ )・振幅  $\omega$ ・位相  $\phi$  の 3 つの要素の組合せとして説明できる。この 3 つの要素のうち主流路延長が増加するような変化は、波長の減少 (波数の増加) か振幅の増加のみである。今回の出水では、波長は逆に増加しているため (波数は減少)、主流路延長が増加した理由は蛇行振幅が増加したためであると言える。この主流路延長の増加もまた、今回の蛇行発達の大きな特徴の一つである。

### 3) 低水路河岸と流路線形の変化

今回の被災事例は、低水路内を蛇行する流路がその振幅を増大させる過程で発生した可能性が高いことから、過去の流路が低水路内をどのような線形で流れていたかを把握することとした。主流路の位置は先の航空写真判読から得られたものを用い (2011 年、2010 年、2000 年、1963 年)、低水路河岸の位置は各年、直近の横断測量データから推定した (2011 年、2009 年、2001 年、1974 年)。また、両データは低水路の中心を基準とした左右岸への距離として整理を行った。その理由を以下に述べる。音更川の河床形態は、概ね 1 波長内に 2 つの砂州を有する単列交互砂州の状態にある。一般的に、単列交互砂州上を蛇行して流れる流路の平面形状は周期波で近似できる場合が多い、流路の線形が周期波であれば、ある基準軸を河道内に設定することで、蛇行特性はその軸を中心とした周期振動で表されるはずである。さらに、今回の出水は、ピーク時を除けば、ほぼ低水路内で収まる流量規模で流れて

いたことから、低水路法線が流れ場に対して支配的であったものと考えられる。以上の 2 点から、解析では低水路の中心を基準軸と定め、蛇行特性の把握を試みた。また、このような処理を経ることで、副次的に河道や低水路自体が湾曲している影響も取り除くことができるため、流路本来の蛇行特性をより正確に評価することが可能になる。

上記処理過程の一部を図-3.12 に、低水路河岸の位置と流路線形を年代ごとに重ね合わせた結果を図-3.13 に示す。図中横軸は低水路中心線の追加距離を表し、縦軸はこれを基準とした左右岸への離れである。なお、1963 年の流路線形は、現存する横断データの中でも最も古い 1974 年の低水路河岸の位置と重ね合わせてはいるが、それでも年代のずれは大きく、KP14.0~17.0 の区間では、流路の位置が低水路から大きくはずれるような結果となった。これは、1965 年 (昭和 40 年) 代後半から行われた大規模な河川改修工事により、両年代を挟んで河道状況が大きく変化していたことに起因している。1963 年当時の河道状況は、当時の精度の低い写真から推定する以外に方法が無いのが現状であるが、少なくとも自然状態に近い当時の蛇行流路は、KP14.0~17.0 の区間で、現在の蛇行帯とは大きく異なる位置を流れていたことがわかる。

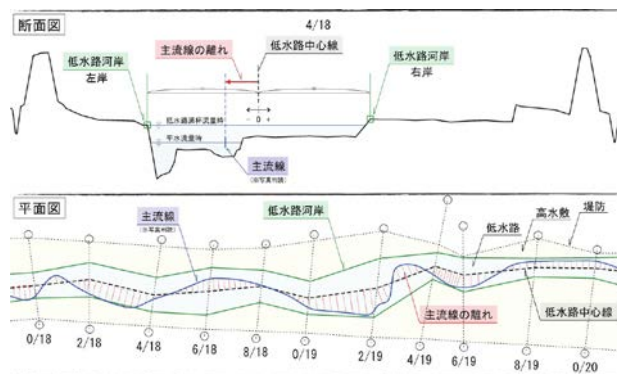


図-3.12 低水路中心線を基準とした整理手法

#### (1) 流路線形の変化 (2000 年~2010 年)

図-3.13 に示す 2000 年から 2010 年までの蛇行波形の変化を見ると、全体的に波長が伸び、波数が減少したことがわかる。このような波形の変化は、過去の洪水履歴と深く関わっているものと考えられ、実際この 10 年間では、2003 年に記録した 725m<sup>3</sup>/s の戦後最大流量をはじめ、数回に亘る大規模な洪水を受けていた。波長の伸び (波数の減少) は、当該洪水でも確認された現象であることから、大規模な洪水に共通した流路変化パターンの一つであると推察される。また、蛇行頂部がコの字形に潰れたような変化を示すのは、

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

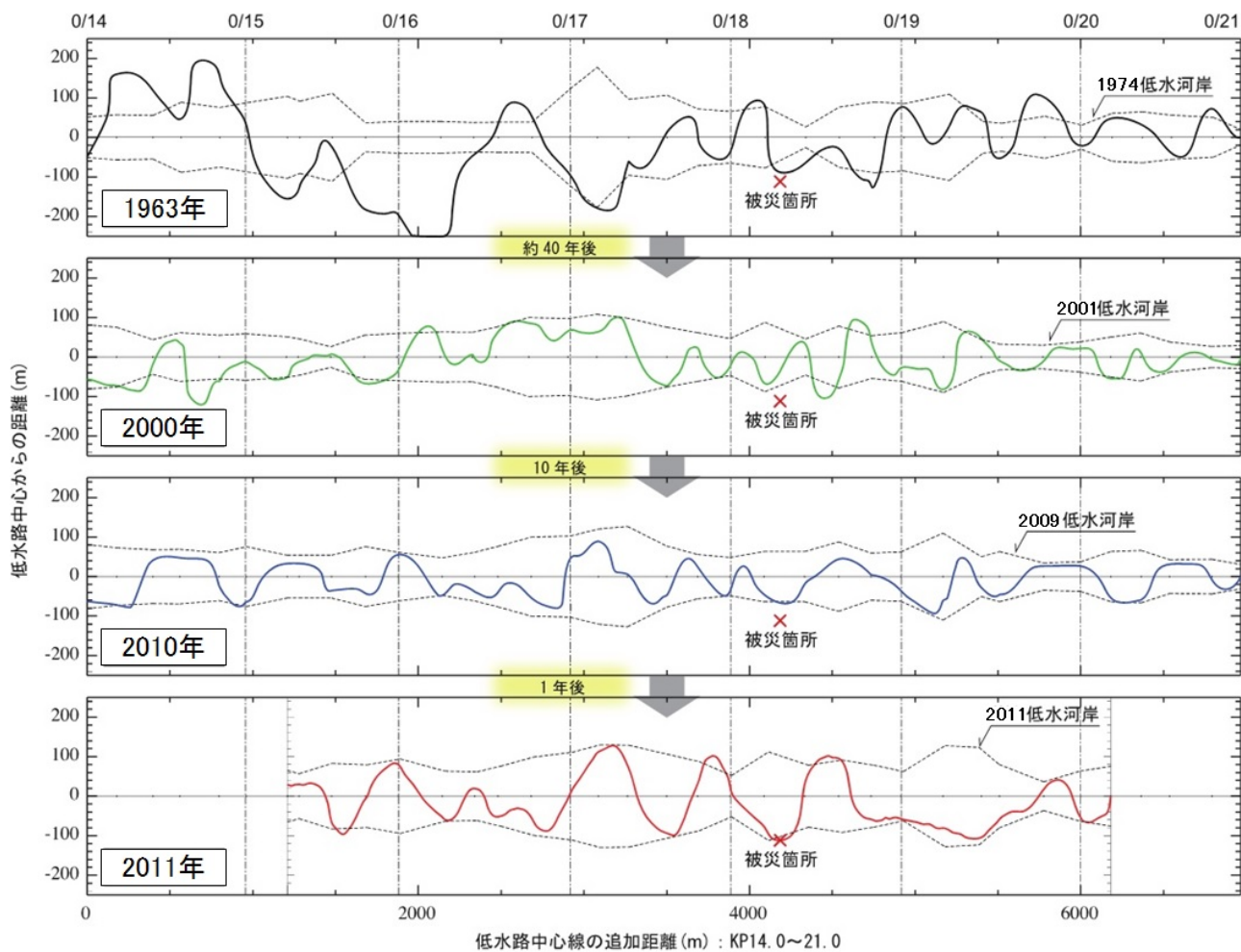


図-3.13 低水路河岸と流路線形の変遷

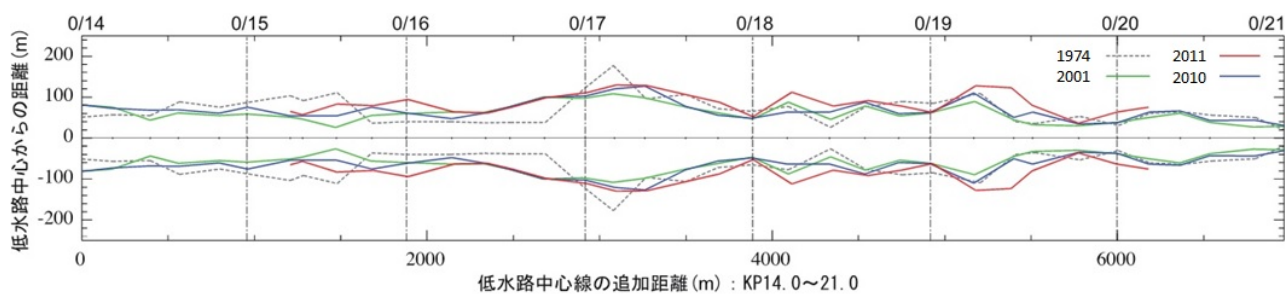


図-3.14 低水路幅の変遷

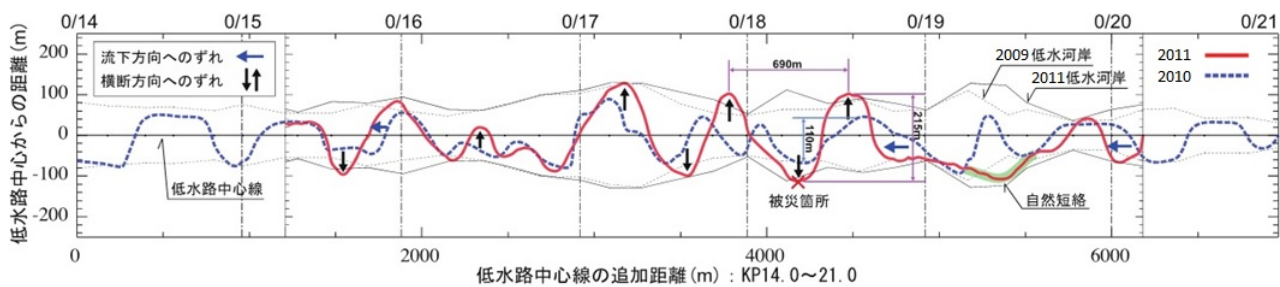


図-3.15 出水前後の流路変化

護岸や高水敷などの外的要因により、蛇行振幅の自然発達が抑制された結果であると考えられる。図-3.10

(2000年)の太破線で示す低水護岸は、この10年間に発生した河岸侵食箇所を対象に敷設されてきたもので、このような低水護岸等の人為的影響が、近年、蛇行波形にも強く現れるようになってきたことがわかる。

蛇行振幅の変化を見ると、この期間ではそれほど大きな変化は見受けられない。2013年の洪水は、今回のピーク流量を大きく越える値を観測していたにも関わらず、蛇行振幅にそれほど大きな変化が現れなかったことは注目すべき点である。以上のことから、当該出水前までは、音更川本来の蛇行特性(蛇行振幅)は護岸等によってかなり抑制された状態にあったと考えられる。また、そのような状態が維持されていたのは、一洪水で起きる蛇行振幅の増大が比較的小さく、侵食が進む過程で河岸保護工事を行うことのできる時間的余裕があったためと推察される。次に、低水路幅の変遷を図-3.14に、出水前後の蛇行波形を重ね合わせた流路変化の様子を図-3.15に示す。

### (2) 低水路幅の変化 (2000年～2011年)

図-3.14より低水路幅の変化を見ると、2001年から2010年までの9年間では、護岸の敷設や砂州の高水敷化などにより一部縮小した箇所も見られるが、全体的にはやや広がる傾向にあったように見受けられる。出水前後の変化を図-3.15と併せて見ると、蛇行振幅の増大が顕著に現れた箇所を中心に低水路幅が大きく拡大した様子が見てとれる。ただし、KP19.4付近の拡幅は、自然短絡によって新たな流路が形成されたことによるものである。また、河岸線の位置に全く変化が無い箇所は、護岸が敷設されているか、山付きとなっている場合が多い。

### (3) 流路線形の変化 (2010年～2011年)

出水前後の蛇行波形の変化について図-3.15を見ると、被災箇所周辺(KP17.0～19.0)における蛇行振幅の増大が特に顕著で、出水前後で比較すると約2倍程度にまで増幅していたことがわかる(110m → 215m)。一回の洪水でこれほど大きな蛇行発達を遂げるような場合、応急対策を講ずる間もなく侵食が堤体に及ぶ可能性があり、防災上の観点からも看過できない問題である。

#### 3.2.4 蛇行発達要因の定性的分析

当該出水が、過去に例を見ないほどの蛇行振幅の増大をもたらした要因は、外力の源となる流量規模の大きさに深い関わりがあるものと考えられる。図-3.16は、

既往最大流量を記録した2003年の洪水と今回の洪水の流量ハイドロを重ね合わせたもので、各洪水のピーク流量の時刻を基準とした前後2日間の変化を示している。図から、2003年の洪水はピーク前後の波形勾配が鋭く切り立っており、ピークを境に流量が急激に増減したことがわかる。一方、2011年の洪水はピーク付近を除けば、比較的流量の増減が緩慢であり、且つ大きな流量がかなり長い間継続していたことがわかる。このような流量ハイドロの違いが、2つの洪水前後で見られた流路変化の違いとなって現れた可能性が高い。

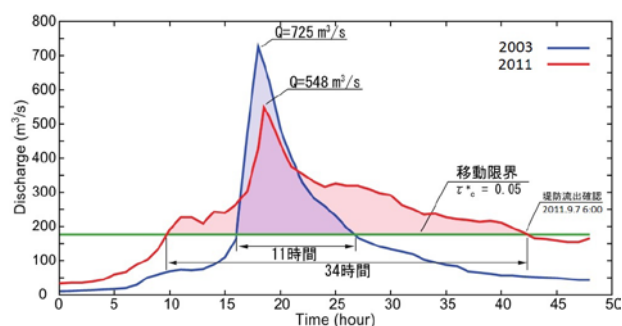


図-3.16 流量ハイドロの比較  
(2003年洪水、2011年洪水)

簡略的には、流路変化は河床(水面下の表層)を形成する土粒子の移動によってもたらされる。土粒子には粒径に応じた閾値(移動限界)があり、これを越える河床剪断力が流水から作用することで移動を開始する。したがって蛇行流路が発達する過程では、この移動限界を越える外力(掃流力)が、常に流水から河床へと作用し続けるような流量条件が必要となる。以上のことから、ここではこの2つの洪水を対象に、土粒子の移動限界を越えるような流れがそれぞれどの程度継続したかを簡易的に試算することとした。

計算は、両洪水ともに、低水路幅  $B=100\text{m}$ 、河床勾配  $I=1/164$  の広矩形断面を等流状態で流れていたものと仮定し、粒径は St.2 の河床材料調査の結果から流心部の  $d_{60} = 64\text{mm}$  を与え、粗度は計画粗度の  $n=0.035$  として行った。結果は図中緑線で示すように、流量  $Q = 180\text{m}^3/\text{s}$  程度が移動限界(無次元限界掃流力  $\tau^* = 0.05$ )に相当し、それを越えるような流れが継続した時間は、2003年は11時間、2011年は34時間であった。両者を比較するとその継続期間には約3倍の違いがあり、今回の洪水がいかに流路変動を引き起こし易い流量条件下にあったかがわかる。また、各継続期間内の外力の規模(総流砂量)は図中の塗色面積から概ね比較することが可能で、今回のような大きな流路変動がもたらされたのは、ピーク流量の大き

さだけではなく、土砂の移動限界を越える流量がかつて無いほど長時間に亘って継続したことによるものと推察された。

### 3.2.5 まとめ

本節では、流路が河岸侵食を伴って蛇行を発達させるメカニズムの解明に向けた準備段階として、今後詳細な解析を行う上で必要となる侵食箇所周辺の土質データの収集と侵食状況の概略的な把握、および出水前後の河道変遷状況について整理し、蛇行流路発達の要因について定性的な考察を行った。その結果、音更川のような急勾配河川では、たとえ低水路内で収まるような流量規模であっても、その継続時間によっては蛇行流路の振幅は大きく増大し、一洪水期間のうちに、それが堤防を侵食するまでに発達する可能性があることがわかった。また、そのような蛇行発達は、土砂の移動限界を越える流量が長時間にわたって継続することに起因するものと推察された。

### 3.3 砂州地形に誘発された蛇行発達

前節において、堤防流出の直接的な原因は、低水路内に形成された流路の蛇行発達過程で生じた河岸侵食であることが明らかとなった。しかし、これほど大規模な蛇行発達現象は過去にも例が無く、その発達メカニズムや支配的要因は十分に解明されていない。今後、適切かつ有効な予防措置を講ずるにあたっては、これらの解明は喫緊の課題である。

当該洪水の最大の特徴は、低水路満杯規模の流量が長時間にわたって継続したことにある（平均年最大流量 155m<sup>3</sup>/s で約 40 時間）。このことは、出水中の河道変化が低水路内を流れる流水の作用に支配されていたことを意味しており、「砂州の発達機構」との関連が示唆される。一方、出水後の流路線形は、低水路河岸の侵食によって堤々間を大きく蛇曲する単列状の流路が形成されており、「蛇行流路の発達機構」との関連も同時に示唆される。すなわち、当該洪水で生じた蛇行発達は、低水路内で起きる砂州の発達機構と、蛇行流路の発達機構との相互影響下で生じた可能性があり、実際に、当該洪水中には、蛇行流路のみならず砂州を含めた低水路内全域で河道が変化している。

蛇行流路の発達に関する既往の研究としては、3.1 に記載したように、斜面崩落モデルを用いることで河岸侵食現象を良好に再現した清水らの自由蛇行に関する研究<sup>16)</sup>がある。そこで、本節では、河岸侵食を伴う蛇行流路の発達と、低水路幅が時間的かつ縦断的に変化する中で生じる砂州の移動・発達との相互作用を考慮するために、計算領域全体に斜面崩落モデル<sup>17)</sup>を

適用して、低水路河岸の侵食を伴う蛇行流路の発達機構の解明とその支配的要因の分析を試みる。検討に際し、まず、定常流量下の模型実験を行い、その結果から解析モデルの適正化を行う。次に、実験結果と解析結果とを比較し、現象の再現性を検証するとともに定常流量下の蛇行発達特性を整理する。さらに、当該洪水の流量ハイドロを与えた数値実験を行い、非常流量下の蛇行発達特性と砂州地形がもたらす効果について分析を行う。

#### 3.3.1 模型実験

解析モデルの再現性を検証するため、定常流を対象とした縮率  $s=1/100$  の移動床水理模型実験を行った。実験水路の施設概要を図-3.17 に、初期河床として与えた砂州地形パターンを図-3.18 に、実験条件と当該条件下における砂州形態区分を表-3.1、図-3.19 に示す。

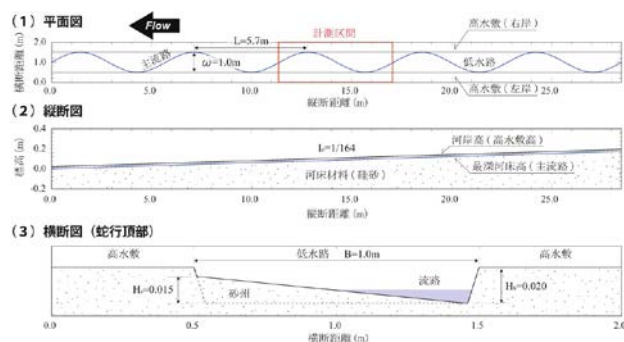


図-3.17 実験水路 (s=1/100)

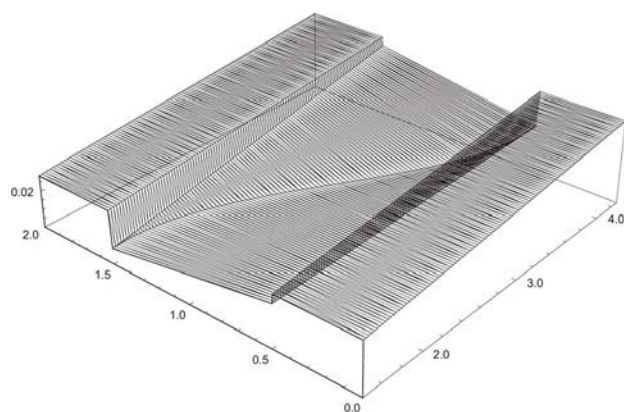


図-3.18 初期河床形状 (1/4 波長分)

表-3.1 実験水路 (s=1/100)

実験番号	流量 (L/s)	粒径 (mm)	通水時間 (h)
CASE1	2.0	0.5	6
CASE2	3.0	0.5	6

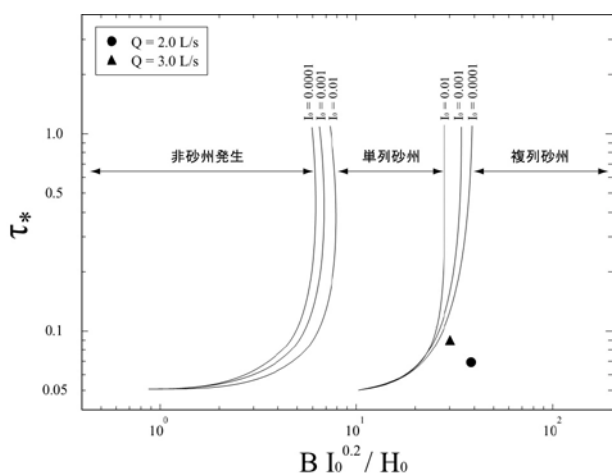


図-3.19 砂州発生領域区分図

### 1) 実験条件

実験施設上の制約から模型の縮率を 1/100 とし、フルード則より各種実験条件を設定した。蛇行流路の平面形は、2011 年 9 月洪水前の航空写真をもとに、被災箇所周辺の流路線形を、波長  $L=5.7\text{m}$ 、振幅  $\omega=1.0\text{m}$  の周期波で近似し、最深河床部を図-3.17 上段に示すような線形とした。また、蛇行頂部の横断形は、2009 年の測量結果から、低水路幅  $B=1.0\text{m}$ 、砂州波高  $H_s=0.015\text{m}$ 、河岸高  $H_b=0.02\text{m}$  とし、図-3.18 に示すような単列交互砂州状の単純な地形を与えた。実験ケース間の違いは流量のみで、各流量における砂州形態区分は、いずれも複列砂州の発生領域に区分される(図-3.19)。また、河床材料の粒径は、2011 年の現地調査結果をもとに流心部の  $d_{60}$  の平均値から  $d=0.5\text{mm}$  とした。

### 2) 実験結果と考察

実験では、図-3.17 上段の赤枠で示す範囲を計測区間とし、河床高、水深、表面流速を測定した。図-3.20 はこの計測区間における河床高および河岸線の時系列変化で、黒矢印は表面流速を示している。図から、両ケースとも砂州地形に沿った流れが徐々に河岸を侵食し、蛇行を発達させていく様子が見てとれる。図-3.21 は蛇行特性の時間変化を示しており、この図から、蛇行発達過程は、流量に応じた規模・速度で進行してい

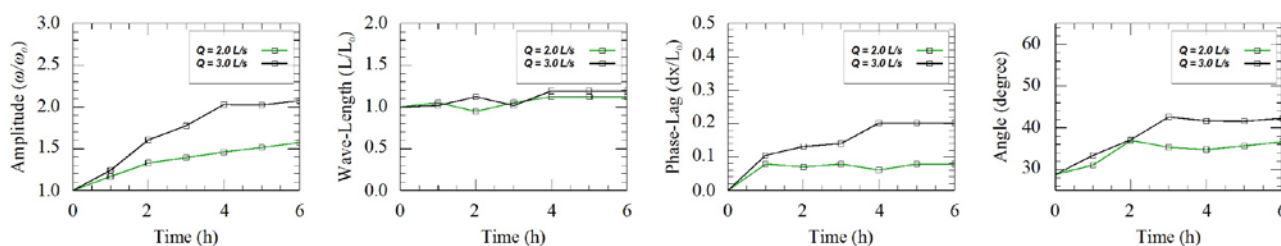


図-3.21 蛇行特性の時間変化(左から、蛇行振幅、蛇行波長、位相、蛇行角)

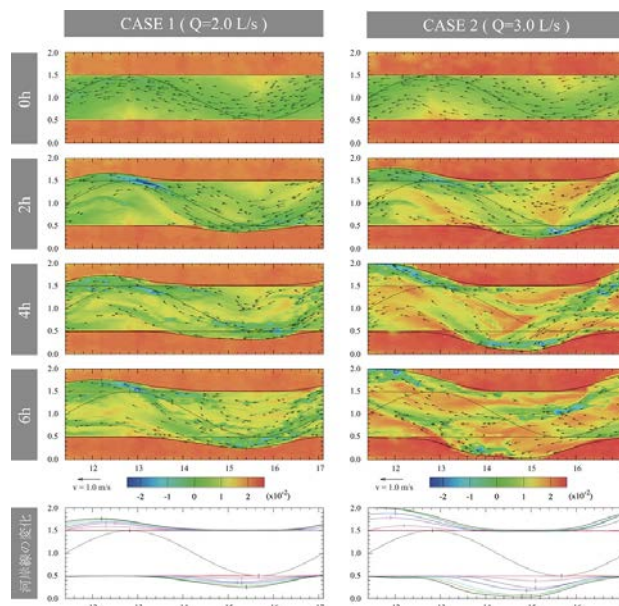


図-3.20 計測区間の河床高・河岸線の時系列変化

くことがわかる。ただし、時間経過を見ると、通水初期の段階では比較的波形の整った単列状の蛇行波形が維持されているが、通水開始から 4 時間以上が経過すると、砂州上を走る流れが徐々に卓越し、流路が複列化していく様子が確認できる。流路の複列化は、水衝部の位置を容易に変化させるほか、流水のエネルギーを水路内に分散させるため、通水前半で見られたような単列状の蛇行発達は、通水後半ではある程度抑制されていた可能性がある。実験経過から、今回確認されたこのような流路の複列化は水路上流側の砂州地形の乱れに起因するものと推察された。このことから、次は計測区間を含む水路全体の流路形成過程を確認する。

図-3.22 に示す写真は、水路全体を 2 時間毎に撮影したもので、図中の青塗り箇所および黒矢印はともに主流路の平面線形を示している。実験では、水路上流端の河床高を動的平衡に保つように給砂管理を行っており、上流端では常に流下方向に対して平行かつ直線的な流れが形成される。CASE1、2 の上流端付近の流路変化を見ると、上流端で生じた直線的な流れによって、通水初期とは異なる蛇行特性(蛇行波長・蛇行



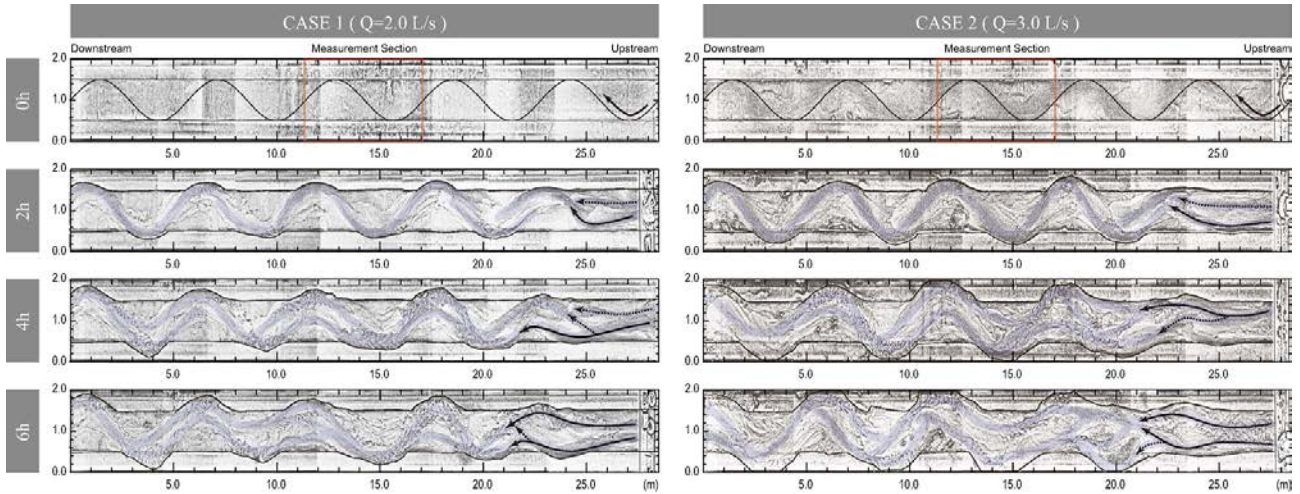


図-3.22 実験結果（水路全体・アスペクト比 2:1）

振幅)を持った流路が形成されており、これが時間経過とともに水路下流側へと伝播していった様子が見てとれる。上流側の乱れが下流側へ伝播するには一定の時間を要するため、CASE1 の 6 時間後の河岸平面形状にも現れているように、乱れの影響が少ない下流側ほど初期の砂州地形の影響を強く受け、河岸侵食がより進行する結果となった。実験水路の上下流端 1 波長分は助走区間の位置づけであるが、当実験は流路の変動が非常に大きいため、図-3.20 で示したように、複列化の影響（蛇行発達の抑制）は少なからず計測区間にも及んでいたものと推察される。

以上、この実験結果から、低水路内に形成された単列交互砂州が、蛇行流路の発達をもたらす一つの要因と成り得ることが確認された。ただし、上流側で生じた砂州地形の乱れとそれに伴う流路の複列化によって、通水後半では、単列状の蛇行発達がある程度抑制されていた可能性があるため、実験結果の取扱いに際しては、この点に留意する必要がある。

### 3.3.2 数値実験

実験結果から、初期河床に単列状の砂州地形を与えた場合であっても、上流側の河床に乱れが生じた場合、その影響が徐々に下流側へと伝播し、蛇行の発達が抑制されることが示唆された。複列化した流れは、不規則に分岐合流を繰り返しながら水衝部を変化させるため、解析上、このような複雑な流路変化を正確に予測し、河岸侵食量を定量的に評価することは非常に困難である。よって、ここで行う数値解析では、このような乱れの影響を極力無くすため、上下流端の境界を無限遠に仮定できる周期境界条件を用いる。初期河床には実験と同じ砂州地形を与え、流量規模の違いが蛇行発達にどのような影響を及ぼすかを検証する。

### 1) 解析モデル（水理河床変動）

本研究で行う解析は、北海道河川財団より無償提供されている「iRIC」<sup>17)</sup> と、そのソルバー「Nays2D ver4.0」<sup>17)</sup> を用いる。当解析モデルが扱う流れの支配方程式は、以下に示す非定常平面二次元浅水流方程式と連続の式である。実際の計算では下式を一般座標系に変換した式が用いられるが、詳細については文献を参照されたい。なお、移流項の差分には CIP 法を、乱流場の計算にはゼロ方程式モデルを用いた。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

ここで、 $x, y$  : 直交座標系座標軸、 $u, v$  : 各座標軸方向流速、 $t$  : 時間、 $h$  : 水深、 $H$  : 水位、 $g$  : 重力加速度、 $\rho$  : 流体の密度、 $\tau_x, \tau_y$  :  $x, y$  方向の剪断応力、 $D$  : 粘性力である。式中の粘性項・拡散項は次式で与えられる。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3.4)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (3.5)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (3.6)$$

ここで、 $n$  : マニングの粗度係数、 $v_t$  : 拡散係数であ

る。河床変動量は以下の流砂の連続式から算出される。なお、実際の計算では流れ同様に一般座標系に変換した式が用いられる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{\partial q_b^x}{\partial x} + \frac{\partial q_b^y}{\partial y} \right] = 0 \quad (3.7)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $z_b$  : 河床高、 $q_b^x$ 、 $q_b^y$  :  $x$ 、 $y$  方向の単位幅掃流砂量、 $\lambda$  : 河床材料の空隙率である。

### 2) 河岸侵食モデル

本研究では、河岸侵食現象の再現に斜面崩落モデルを用いる。このモデルは、河床低下によって斜面が一定の限界角度を越えると河岸が自然崩落するものとし、限界角度を保つように河岸を後退させることで、間接的に河岸侵食現象を表現するものである。その際、土砂収支は崩落土砂を河床低下部に埋め戻すことで整合が図られる。斜面崩落モデルの概要を図-3.23 に示す。このように、当モデルは河岸侵食現象を物理的に解くものではないため、解析結果が計算格子に依存するという課題もあるが、蛇行発達をもたらす支配的要因を抽出し、大まかな現象の理解を図るという意味では、

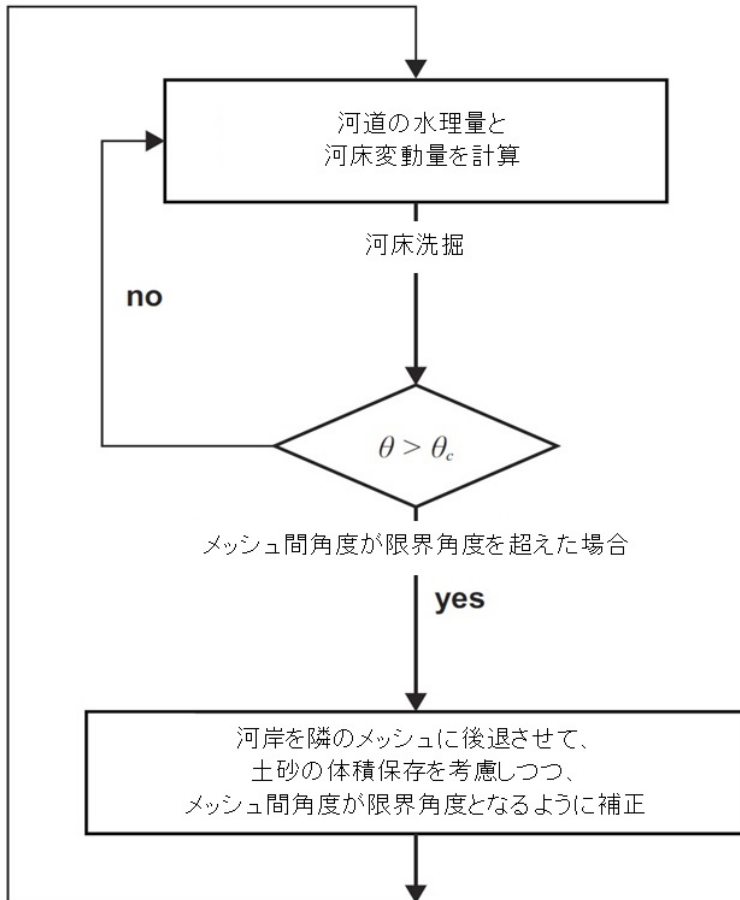


図-3.23 斜面崩落モデル

本モデルは十分適用可能であると判断した。斜面の限界角度を表す水中安息角は河岸侵食現象を再現する上で重要な定数の一つとなる。今回  $\theta = 20 \sim 30^\circ$  の範囲で試行計算を行い、その際の河岸侵食量を実験結果と比較した結果、 $\theta = 25^\circ$  前後で最も高い再現性が得られたことから、以降で行う解析では、斜面の限界角度を  $\theta = 25^\circ$  ( $\tan\theta = 0.466$ ) とした。

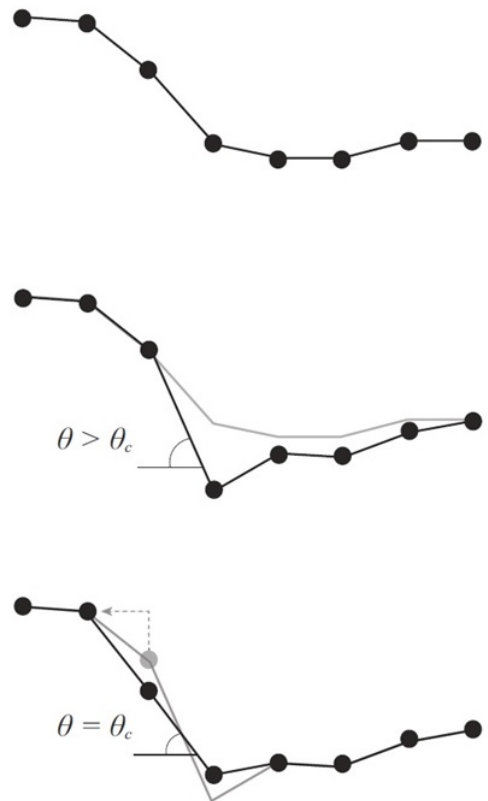
### 3) 解析モデルの適正化

解析では、単一粒径のもと、掃流砂のみを対象とし、流砂量式には芦田・道上の式を、無次元限界掃流力には岩垣の式を用いる。なお、ここで用いる流砂量式の定数は、実験で得られた流砂量の計測値をもとに下式のように調整した。

$$q_b = 13\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (3.8)$$

ここで、 $q_b$  : 流砂量、 $\tau_*$  : 無次元掃流力、 $\tau_{*c}$  : 無次元限界掃流力 (岩垣の式)、 $s_g$  : 砂粒の水中比重、 $g$  : 重力加速度、 $d$  : 河床材料の粒径である。

図-3.24 は、水路下流端における流砂量の時間変化



を示しており、実線で示す流砂量の計算値は、点で示す計測値を概ね良好に再現していることがわかる。ここで、流砂量の時間的な変化特性を以下に追記する。数値解析から得られた結果及び実験から得られた計測値は、ともに流砂量が時間経過とともに逓減する傾向を示した。これは、蛇行発達によって河床勾配が緩やかになることと、河岸侵食が低水路幅の増大をもたらすことに起因するものと考えられる。また、流砂量が時間的に大きく振動しているのは、形成された蛇行流路の位相変化に由来するもので、河床・河岸の変動量が大きい蛇行頂部下流側が下流端に到達した際、流砂量は急激に上昇し、蛇行波形の変曲点付近では逆に減少するためである。

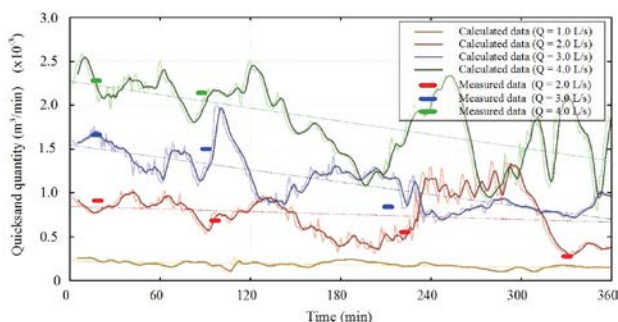


図-3.24 流砂量の時間変化

#### 4) 計算条件

粗度係数は、以下に示す Manning-Strickler による平坦河床の抵抗則から  $n=0.013$  とした。設定粗度の妥当性を検証するため、通水初期の水面形を解析値と実測値で比較した結果、初期水面形は概ね良好に再現されることを確認した。

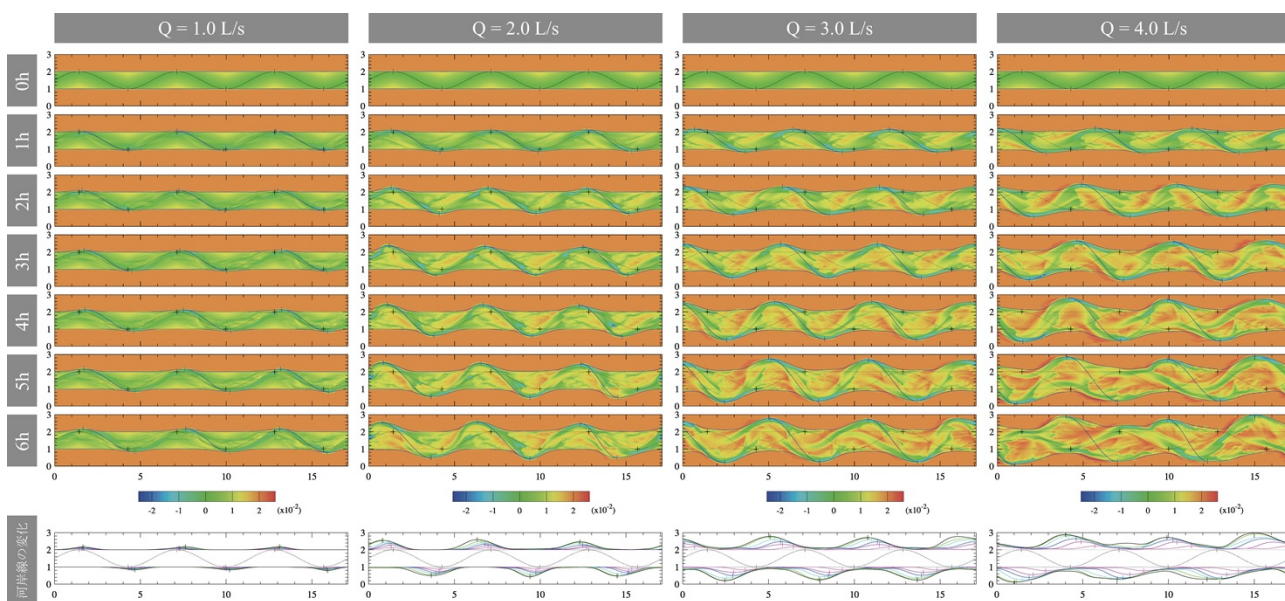


図-3.25 定常流の解析結果 (河床高および河岸線の変化)

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}}, \quad k_s = 2d \quad (3.9)$$

ここで、 $k_s$  : 相対粗度、 $d$  : 河床材料粒径である。

#### 5) 定常流量下の蛇行発達特性

以上で決定した計算条件のもと、 $Q=1.0\sim 4.0\text{L/s}$  の計 4 ケースについて河床変動解析を行った。結果を図-3.25 に示す。解析結果を見ると、蛇行流路が流量に応じた規模・速度で発達していく様子が見てとれ、そのプロセスは実験結果とも良く符合する。このことは、本解析モデルが砂州由来の蛇行発達現象に対して一定の再現性を有することを示している。解析結果から得られた蛇行特性 (蛇行振幅・蛇行波長・位相・蛇行角) の時間変化を図-3.26 に示す。6 時間通水後の最終的な蛇行振幅を見ると、実験から得られた計測値

(図-2.21) の約 1.20~1.25 倍の増幅率を示しており、その他の蛇行特性 (波長・位相・蛇行角) についても同様であるが、実験と比較すると若干蛇行発達の規模は過大に現れている。その理由について考察する。解析では、上流端の境界条件に周期境界条件を用いているため、蛇行波形が比較的整った状態で長時間維持されている。一方、実験では、上流側の乱れの影響が下流側へと伝播する様子が確認されており、蛇行発達を一定程度抑制していたものと考えられる。このような上流端の境界条件の違いが、両者の蛇行発達過程に大きな影響を及ぼしたものと推察される。また、解析上の問題として、周期境界条件のもとで現れる蛇行波形は整数以外の波数を持ち得ないことから、本来波長が

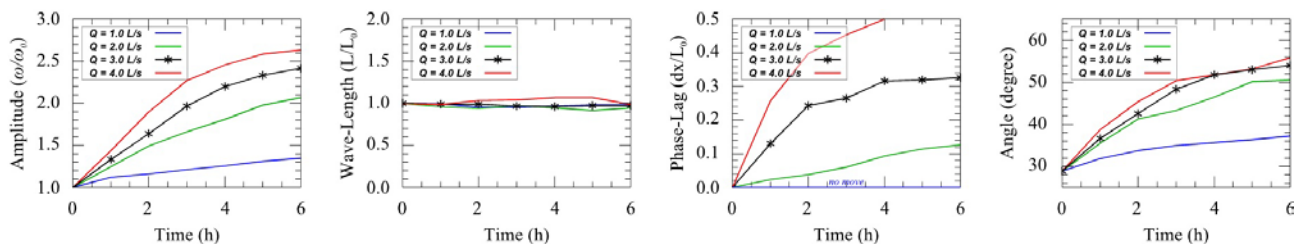


図-3.26 蛇行特性の時間変化（左から、蛇行振幅、蛇行波長、位相、蛇行角）

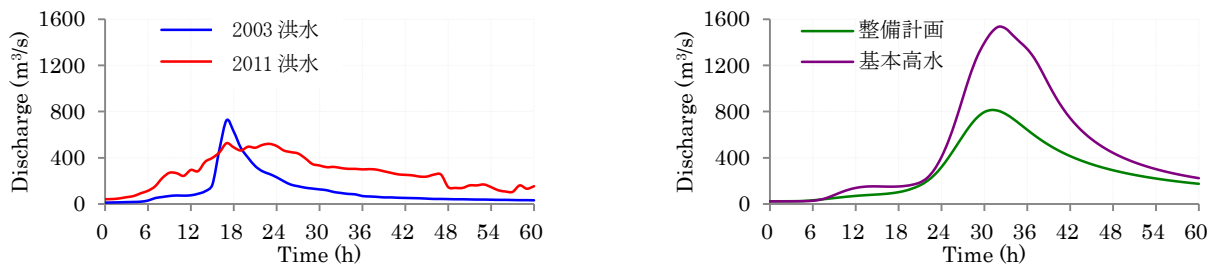


図-3.27 実績洪水(左)と計画洪水(右)

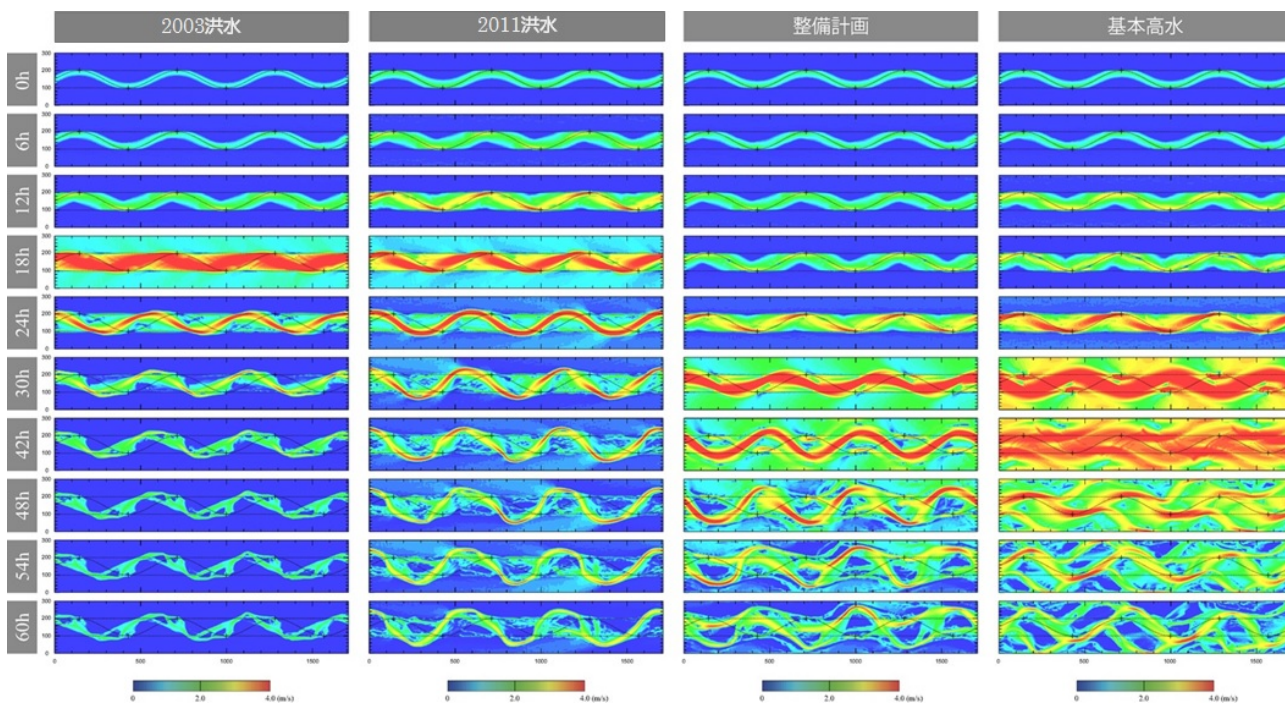


図-3.28 非定常流の解析結果（流速）

徐々に変化するような現象が起きるような場合でも、波数を維持しようとする作用が働いた結果、蛇行振幅が過大もしくは過小に評価されている可能性もある。

#### 6) 非定常流量下の蛇行発達特性

次に、非定常流量下における蛇行発達特性の分析を行う。計算条件は、流量以外は先の定常流解析と同様とし、流量条件には実績洪水と計画洪水の流量ハイドロを計4パターン与える(図-3.27)。解析結果を図-3.28に示す。なお、図中の表記は実スケール換算値を示しており、計算領域の左右端は、現地では堤防の

位置に相当する。解析結果から確認された、実績・計画洪水における蛇行発達特性を以下に列記する。

- (1) ピーク流量付近で位相が下流側へ遷移し、ピーク流量後に蛇行が発達する。
- (2) 2003年洪水では、ピーク流量後の減水期間が短いため蛇行発達が起きにくい。
- (3) 2011年洪水では、蛇行振幅は約2倍(100m→200m)に増幅する。
- (4) 整備計画流量規模では、蛇行振幅は約3倍(100m→300m)に増幅する。

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

(5) 基本高水流量では、河道内全域が攪乱され、複列状の流路が形成される。

7) 単列交互砂州の形成要因

ここで、初期河床として砂州地形を与えたことの妥当性について補足する。砂州の発達機構においては、低水路内で収まる規模の流量増加は河幅水深比の低下を意味する(図-3.19で左側へ遷移)。したがって、出水期の流量ハイドロを考えた場合、洪水期間中に、河床形態の特性が複列砂州と単列砂州の形成領域を行き来するような場合も想定される。音更川の河床形態は、平均年最大流量規模 ( $Q = 155\text{m}^3/\text{s}$ ) では、概ね複列砂州の形成領域にあるが、上記のことからも、比較的大規模な洪水を経て形成される河床形態は、これとは異なる特性を示す可能性がある。よって、ここでは、初期河床形状を平坦河床とし、ひと洪水を経て形成される河床形態の特性を検証する。計算はこれまでの解

析と同様に 1/100 スケールで行うこととし、初期河床形状は平坦河床で、計算領域全体に砂州の発達を促す粒径サイズの擾乱を与える。計算区間延長は、音更川の被災箇所上下流  $L=2\text{km}$  区間を想定した  $L=20\text{m}$  とし、流量条件には 2011 年 9 月洪水の流量ハイドロを与えた。

解析結果と流量ハイドロを図-3.29 に示す。得られた結果から、河道が形成されていく各段階を以下の 3 つの期間に分けて考えることとした。

- I 洪水初期：河床攪乱期間
- II 洪水中期：砂州形成期間
- III 洪水後期：蛇行発達期間

洪水初期の段階では、流量の増加に伴って河床が大きく攪乱され、やがて流れが一筋に収束していく様子が見てとれる。洪水中期の段階を時間毎に見てみると、 $\text{Time}=9000\sim 10800$  ( $Q=4.0\text{L}/\text{s}$  程度、 $0.50\text{h}$ ) では、

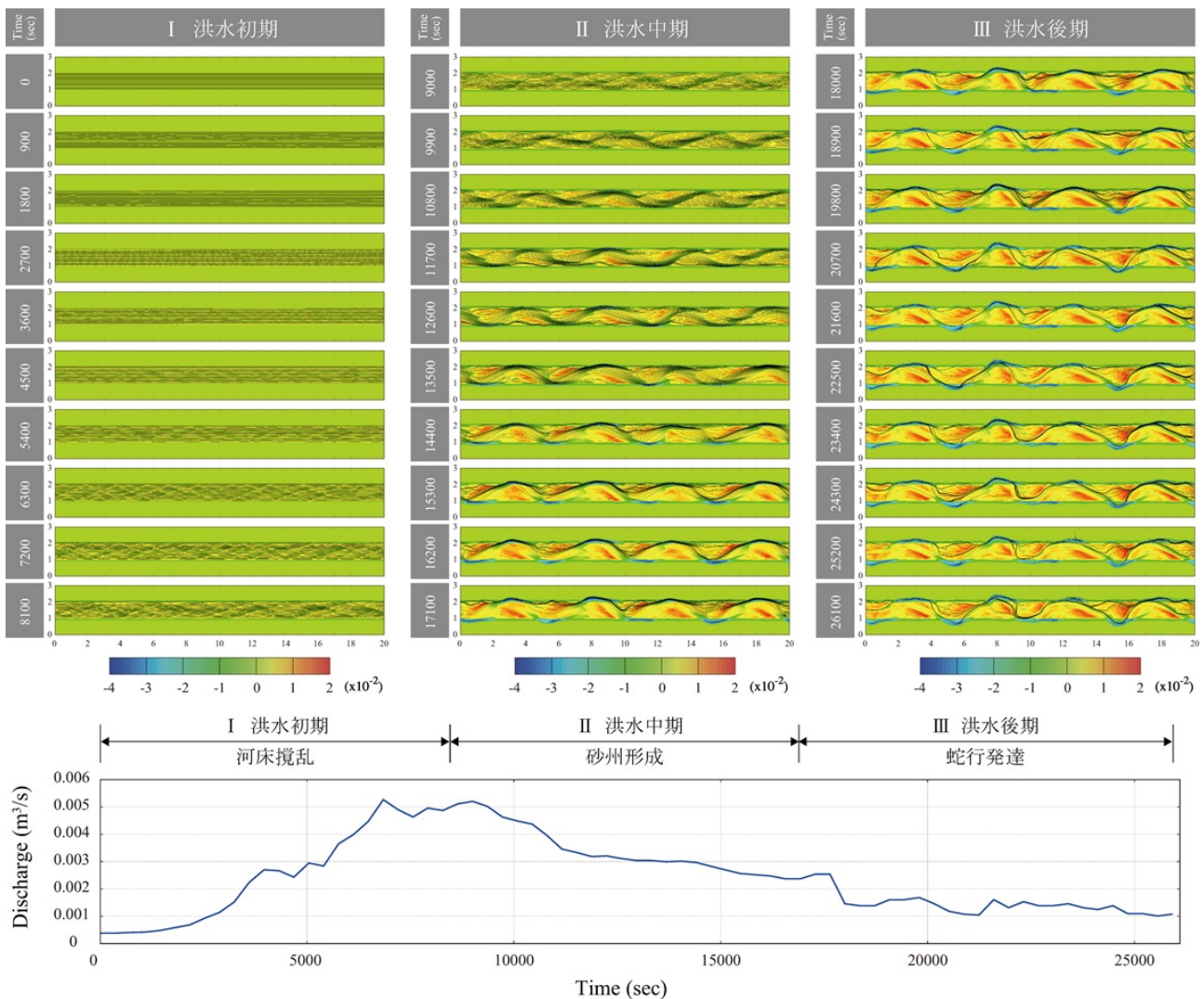


図-3.29 上段：非定常流の解析結果（河床高変化量および流線），下段：2011年9月洪水の流量ハイドログラフ

流れがさらに収束し、蛇行流路の波形が概ね定まっていく過程にあり、流量に応じて位相は大きく変化している。Time=11700~14400 (Q=3.0L/s 程度、0.75h) では、砂州が徐々に発達しはじめ、砂州波高の上昇に伴って水みちと浮洲部分が明瞭に分かれていくのがわかる。Time=15300~17100 (Q=2.0L/s 程度、0.50h) では、位相変化はほぼ停止し、等間隔で比較的整った単列交互砂州が形成される。このように、洪水初期から洪水中期にかけては、平坦河床から徐々に砂州が形成されていく途上段階にあり、この間は、河岸侵食を伴う蛇行発達とはほとんど生じていないことから、直線水路内における砂州の発達機構が河道形成を支配していたものと考えられる。洪水後期の段階では、洪水中期に形成された砂州地形に誘発され、蛇行流路が河岸侵食を伴いながら振幅を増大させる様子が見てとれる。しかし、既にこの段階では流量は Q=1.0L/s 程度まで低下しているため、砂州地形がもたらす蛇行発達規模および速度は、定常流の解析結果からも明らかのように、非常に緩慢且つ規模も小さいものとなった。この間、砂州の移動も若干見られるが、水みちはほぼ固定されており、概ね蛇行流路の発達機構が河道形成を支配しているものと考えられる。

本解析で大規模な蛇行発達が起きなかったのは、蛇行発達を誘発する十分な砂州が形成されるまでに、概ね洪水初期から洪水中期にかけて約 5 時間を要しており、十分な砂州が形成された時点では、既に流量はかなり低下していたことが大きな要因であると考えられる。そのため、今回の解析結果からは、流量の非定常性が砂州地形を要因とした蛇行発達にどのような影響を及ぼすかは確認することができなかつた。しかし、低水路内に形成された砂州地形が蛇行発達をもたらすためには、実験で与えた砂州地形のような、ある程度の波高を持った砂州が形成されている必要があり、且つ、ある程度の規模と継続時間を有した流量が必要であることがわかった。また、本研究において実験・解析などで初期河床形状として与えた砂州地形は、このような出水ピーク前後の砂州発達過程で形成されるものと捉えることができ、初期河床に砂州地形を与えて

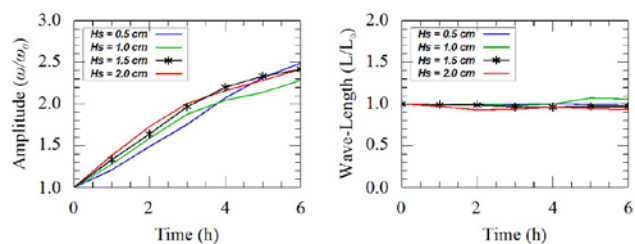


図-3.31 蛇行特性の時間変化 (左から、蛇行振幅、蛇行波長、位相、蛇行角)

検討を行った定常流下の蛇行発達特性は、洪水減水期に現れるような蛇行発達特性と位置づけることができる。また、解析結果から、音更川の被災箇所周辺の河道状況は、比較的大規模な洪水を受けると、単列交互砂州状の地形が形成される得ることがわかる。このことから、これまで初期河床形状として与えた単列交互砂州状の地形は、過去の大きな出水によって形成された河床履歴に相当するものと捉えることができる。

### 8) 砂州波高に対する感度分析

次に、砂州波高を変化させた複数パターンの河床形状に対する感度分析を行い、交互砂州状の地形的な起伏が蛇行発達現象に及ぼす影響を検証する。計算条件は、砂州波高以外は先の解析と同様とし、流量条件には Q=3.0L/s の定常流を 6 時間分与える。砂州波高は  $H_s = 0.5 \sim 2.0 \text{ cm}$  を 0.5cm 間隔で変化させた計 4 パターンの砂州地形とする (図-3.30)。[実スケール換算: Q = 300m<sup>3</sup>/s、60 時間、 $H_s = 0.5 \sim 2.0 \text{ m}$ ]。解析結果から得られた蛇行特性の時間変化を図-3.31 に、砂州波高  $H_s = 0.5, 1.5 \text{ cm}$  の蛇行発達過程を図-3.32 に示す。なお、図-3.31 は、初期振幅  $w_0$ 、もしくは初期波長  $L_0$  に対する増幅率を表している (蛇行角を除く)。蛇行振幅の時間変化を見ると、通水初期段階では、砂州波高に応じた変化を見せるが、通水後半では、いずれのケースも増幅率 2.5 倍程度へと収束していくことがわかる。これは、通水初期は砂州前縁に沿った流れが卓越し、低水路河岸の侵食を伴いながら蛇行を発達させるが、蛇行度がある程度高まると、河床勾配が相対的に緩やかになるため、水位が上昇し、低水路内における直線的な流れが卓越しはじめ、結果的に側岸方向へ向かう流れが弱まるためであると考えられる。

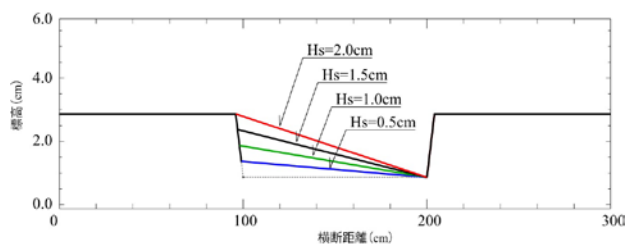
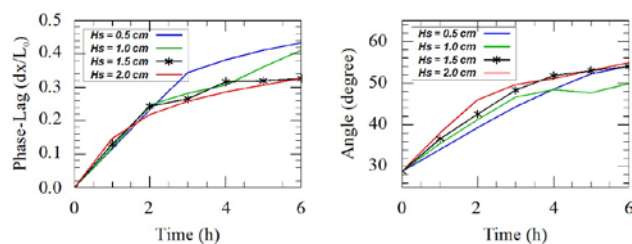


図-3.30 砂州波高条件



## 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

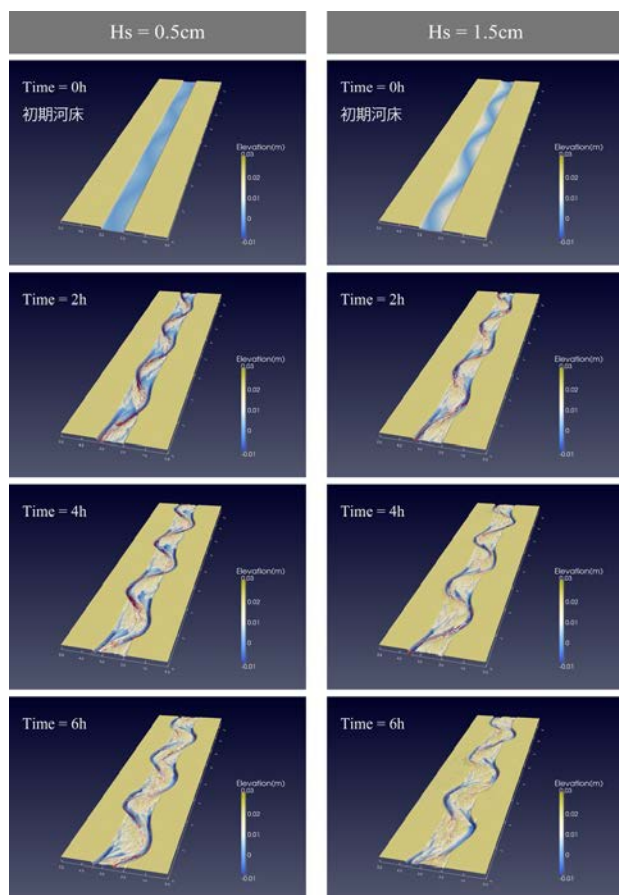


図-3.32 蛇行発達過程（赤線は流速ベクトル）

このことは、蛇行流路の振幅は流量規模に応じた一定の限界値を持つことを示唆しており、本解析では、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$  の外力のもとでは、流路の最大蛇行振幅は250m 付近に上限値があるものと推察された。すなわち、現況の低水路幅が100m であるとした場合、当該流量条件下では、左右岸に最大75m の高水敷侵食が生じることを意味している（実スケール換算値）。また、本解析では周期境界条件を用いているため、蛇行波長には大きな変化は見られない。一方、 $H_s=0.5$ 、 $1.5\text{cm}$  の2h 以降の位相変化には大きな違いが現れている。これは、砂州波高が低いほど、蛇行発達が相対的に緩やかに進行するため、直線的な流れの影響を強く受け、砂州の前進が比較的長時間に亘って継続するためであると考えられる。

### 3.3.3 まとめ

以上、蛇行発達を誘発する要因の一つとして、低水路内に形成された砂州地形がもたらす効果を、実験・解析を用いて検討を行った。結果及び課題を以下にまとめる。

#### 1) 流量規模に対する感度分析

##### (1) 定常流量（実験・解析）

- ・単列交互砂州に起因した蛇行発達は、流量規模と継続時間に応じて徐々にその蛇行度を高めていく。その際、河道内にはある程度発達した砂州地形が形成されている必要があり、出水前の河道状況（河道履歴）が大きく影響する。

##### (2) 非定常流量（解析）

- ・音更川の被災箇所周辺は、比較的大きな出水を受けると単列交互砂州を形成する河道条件下にある。
- ・非定常流に対しては、ピーク流量前後で位相が下流側へ遷移し、ピーク流量を越えてから蛇行が発達し始めるため、2003年洪水のように減水期間が短いハイドロでは蛇行発達は起きにくい。
- ・蛇行振幅の増幅率は、2011年洪水では約2倍、整備計画流量では約3倍となり、基本高水流量では河道内全域が攪乱され、複列状の流路が形成される。

##### 2) 砂州波高に対する感度分析

- ・蛇行発達速度は砂州波高に比例するが、蛇行振幅には流量規模に応じた一定の限界値がある。本解析では、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$  に対して最大蛇行振幅は250m 付近に上限値を持つものと推察された。
- ・砂州地形に起因した蛇行発達では、波長の変化はごくわずかで、位相変化は砂州波高に反比例する（砂州波高が高いほど、位相の変化は小さくなる）。

##### 3) 本節の課題

- ・平面二次元モデルでは、蛇行頂部外岸側で生じる鉛直方向の流速成分は考慮されておらず、河岸侵食量の評価には精度上の限界がある。
- ・斜面崩落モデルでは、側岸方向への侵食量は計算格子幅に依存するため、計算格子の取り方によって解析結果にも違いが生じる。
- ・周期境界条件を用いる場合、現れる蛇行波形は整数以外の波数を持ち得ないため、波長が徐々に変化するような現象に対しては、蛇行振幅が過大もしくは過小に評価される可能性がある。
- ・河道内植生と蛇行発達現象との関係を明らかにするためには、植生の流出や、根系による河床面の被覆効果（土砂緊縛効果）なども考慮する必要がある。

実河川では、河道内に残された過去の洪水履歴（砂州地形、流路跡、河道・河岸の平面形状等）や、砂州上に繁茂する樹木、護岸・水制工などの人工構造物など、様々な要素が洪水流を側岸方向に誘導するきつ

けとなり、蛇行発達現象に何らかの影響を与えているものと考えられる。以上のことを踏まえ、次節では、特に洪水前における河岸の平面形状に着目し、被災箇所周辺をケーススタディーとした包括的な検討を行い、主に数値解析を用いて音更川で起きた蛇行発達現象の支配的要因を明らかにする。

### 3.4 河岸平面形状に誘発された蛇行発達

蛇行流路の発達は、概略的には、洪水時の流れが河岸方向へ導かれることによって生じる。したがって、推定される要因としては、砂州や旧流路跡等による河床面の起伏や河岸の平面的な形状、さらに、河道内植生や既設構造物などの影響も考えられる。実際の河道変化は、これら様々な要素が複合的に作用した結果として現れるものであり、場所によってその特性は大きく異なるものと推察されるが、今後、具体的な対策を講ずる上では、蛇行発達現象に対してより支配的となる要素をある程度明らかにしておく必要がある。

前節では、推定される要因の一つとして、主に砂州

地形に着目した検討を行った。実験・解析の結果からは、単列交互砂州状の地形が蛇行流路を発達させる一因となり得ることが確認されたが、音更川の被災箇所周辺で起きた現象に関しては、砂州由来の蛇行発達では説明できない点がいくつか存在する。中でも最大の相違点は、出水前後における蛇行波長の変化である。被災箇所周辺では、蛇行流路の波数が減少するほどのダイナミックな変化が起きている。一方、砂州由来の蛇行発達過程では、これほど大きな波長変化は確認されておらず、単列交互砂州状の地形以外の要因がより支配的であった可能性が示唆される。砂州地形以外の要因として、最も有力なのは河岸の平面的な形状である。現地でも確認されているが、低水路河岸は、河岸高程度にまで発達した砂州によって形成されている場合があり、地形由来の要因としては両者に本質的な違いはない。このような規模にまで発達した砂州は、河岸に等しく、低水路満杯規模で流れる洪水流に対して、非常に強い拘束力を持って流れを湾曲させるものと推

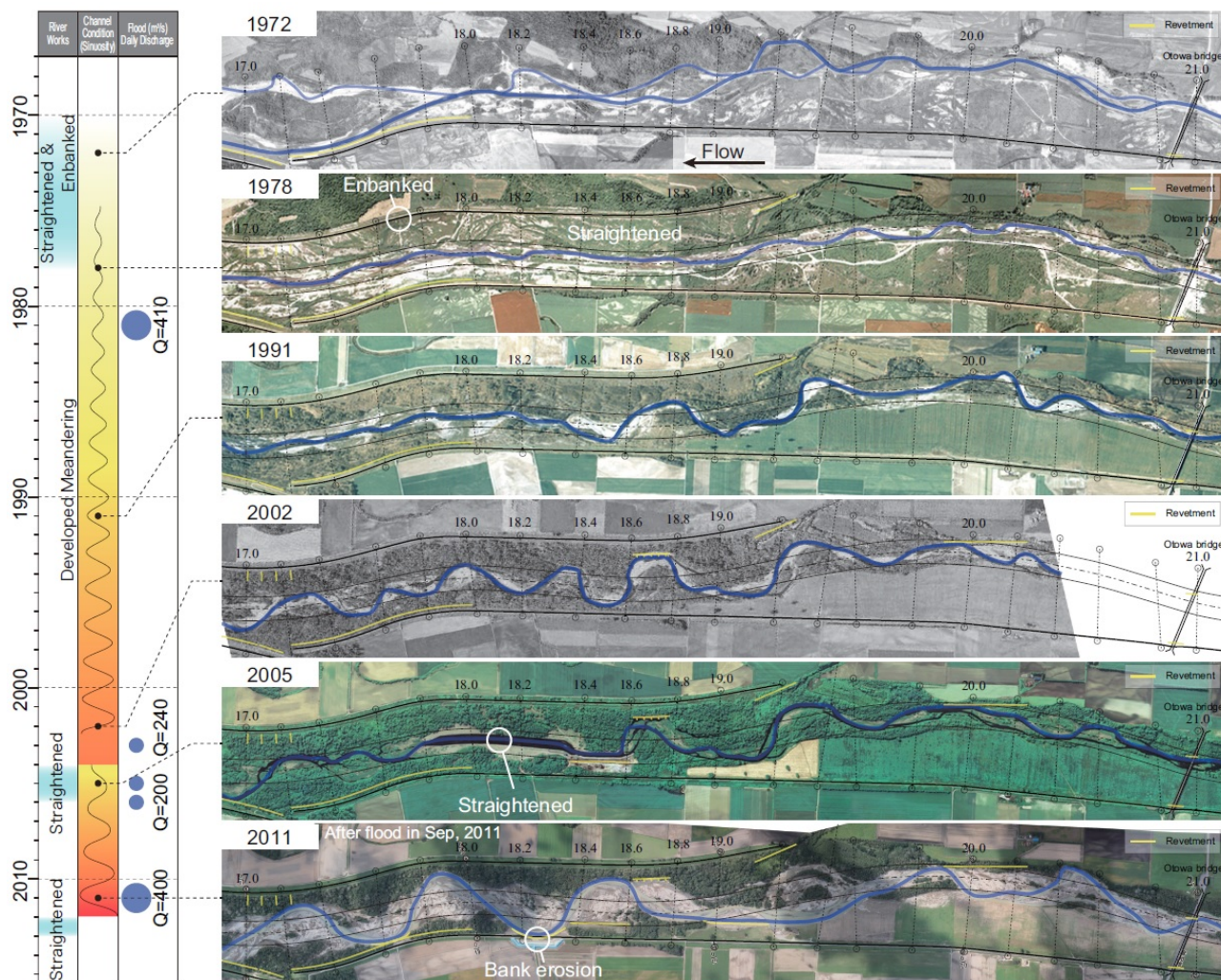


図-3.33 河道変遷履歴 (音更川 KP17.0~21.0)



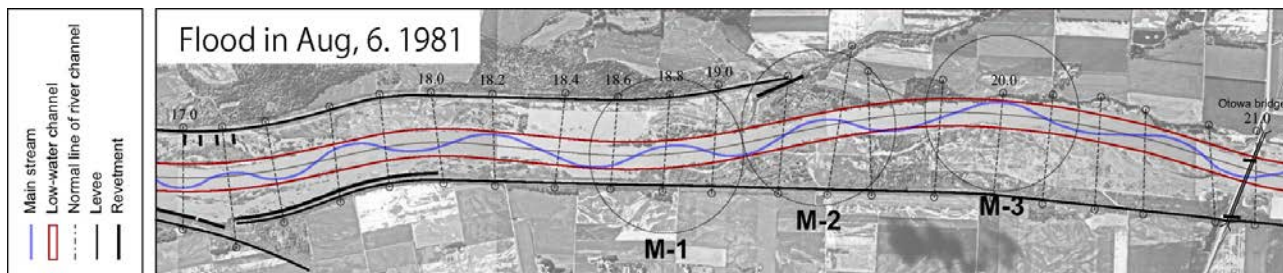


図-3.34 1981年洪水（流量低減期）における主流線と低水路河岸線

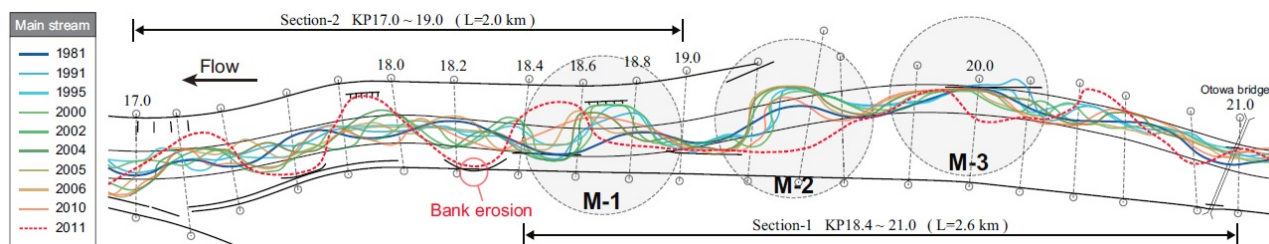


図-3.35 蛇行流路線形の変化（1981～2011年、KP17.0～21.0）

察される。以上のことから、本研究では、砂州地形と低水路河岸の平面形状の双方に着目し、数値解析を用いた各種検討を通じて、急激な蛇行発達をもたらした主たる要因の解明を試みる。

### 3.4.1 主流路の変遷過程

音更川の蛇行発達特性を把握するため、被災箇所を含めた KP17.0～21.0 の区間における河道形成過程を調べた。図-3.33 は、1970 年代後半から当該洪水後までの約 30 年間の河道状況を代表する特徴的な年代の航空写真を並べたものである。左の年表には、人為的な外力である河川改修工事と、自然由来の外力である主要洪水、さらにそれらの影響を受けた蛇行流路の発達状況のイメージを示している。当該区間では、1970 年代に大規模な低水路の直線化が行われており、この時期が現在の河道を形成する起点となっている。その後、1981 年に発生した既往最大規模の洪水によって、蛇行流路が大きく発達しはじめるきっかけがもたらされた。図-3.34 は、1981 年洪水の流量低減期の流況で、赤線が河道法線沿いの低水路河岸、青線が主流線を示している。このとき既に上流区間 (KP18.4～21.0) には 3 つの大きな蛇行流路が形成されており、図-3.33 に示すように、これらが約 30 年の期間を経て徐々に蛇行度を高めていったことがわかる（以降、下流から M-1・M-2・M-3 と呼ぶ）。また、2005 年の河道状況から、蛇行頂部が堤防に近接した KP18.6 の下流側では、再び低水路の直線化が行われたことがわかる。一方、その上流側は高水敷と段丘に囲まれているため、堤防防護上の安全性は確保されており、大規模な改修工事はこれまで行われていない。

したがって、2011 年の洪水前の河道状況は、KP18.6 付近を境に上下流で大きな違いが生じていたことになる。このような現地状況を鑑み、以降の解析では上下流区間を分けて検証することとし、上流側の KP18.4～21.0 を Section-1、下流側の KP17.0～19.0 を Section-2 と呼ぶ。なお、両区間に重複があるのは、M-1 の蛇行部が本解析の鍵となるため、これについては後述する。

#### 1) 流路変化

図-3.35 は、過去 30 年間、計 10 箇年分の航空写真から読み取った主流路の平面線形である。1981 年から 2010 年までの変化を見ると、KP18.6 の下流側では、流路が左右岸へ不規則な変化を繰り返していたことがわかる。一方、その上流側の M-1～3 は、蛇行波形の前傾化とともに位相は若干下流側へとシフトしているが、砂州の位置はほぼ固定された状態で一方に蛇行度を高めており、下流側とは明らかに異なる変化を示している。一般的に、単列交互砂州は、直線河道では流下方向へと移動するが、蛇行河道ではほぼ一定の位置にとどまる特性がある。木下ら<sup>18)</sup>の研究から、このような砂州の移動・停止状態は、水路の蛇行波長 (D)・水路幅 (B)・蛇行角 ( $\theta_0$ ) によって規定され、蛇行角には、砂州の移動を停止させる一定の限界角度が存在することがわかっている。図-3.35 から明らかに、上流区間の低水路法線は、KP20.0 付近を頂部に大きく湾曲した形状を成している。すなわち、上記知見によれば、このような低水路河岸の平面形状が、M-1～3 における固定砂州の発達を誘発した可能性が示唆される。また、2011 年の洪水後の変化を見

ると、M-1 の下流側には M-1 に等しい規模の新たな蛇行が 2 波長分形成され、M-2 では自然短絡が生じるなど、これまでとは、規模も形態も全く異なる変化を遂げていたことがわかる。

### 3.4.2 低水路法線の湾曲と固定砂州との関係

ここでは、まず Section-1 (KP18.4~21.0) を対象とした解析を行い、低水路法線の湾曲と M-1~3 の固定砂州の発達との関係について検証を行う。なお、以降では、前節までの検討との整合性を図るため 1/100 スケールで解析を行っているが、本稿での表記は現地との比較を容易にするため、実スケールに換算した値で示す。

#### 1) 計算条件 (Section-1)

Section-1 の初期河道条件として、低水路直線化後 (1981 年洪水前、図-3.36) の河道状況を次のように簡略化する。低水路の平面形状は、当該区間の低水路法線を図-3.37 に示す sine-generated-curve で近似し、図-3.34 の赤線で示す、蛇行角  $\theta = 13^\circ$ 、低水路幅  $B=100\text{m}$  の蛇行流路とする。横断形状は過去の測量データから河岸高 2.0m、法勾配 1:2 とし、河床面は平坦河床に粒径サイズの擾乱を与える。低水路の左右岸には河岸侵食を許容する 100m 幅の高水敷を設け、計算領域全てを移動床とする。河床縦断勾配は区間平均値の 1/164 を用いる。なお、音更川の現地には KP21.0 付近に橋梁 (音和橋) が設置されていることから、本解析ではこの地点を解析区間の上流端とし、これより上流側には、助走区間として湾曲形状を含まない直線河道を接続させる。



図-3.36 低水路河岸の平面状況 (1978 年)

#### 2) 解析結果 (Section-1)

図-3.38 は過去の主要洪水の流量ハイドロを比較したものである。Section-1 の解析では、定常流への応答に加え、1981 年の洪水によって形成される河床形

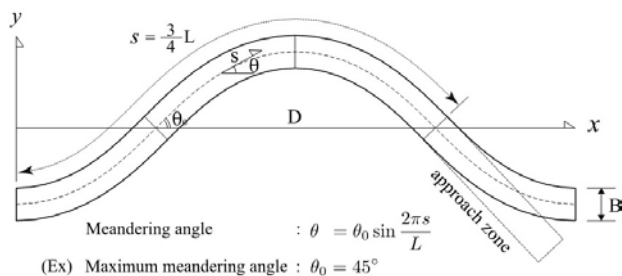


図-3.37 sine-generated-curve の定義

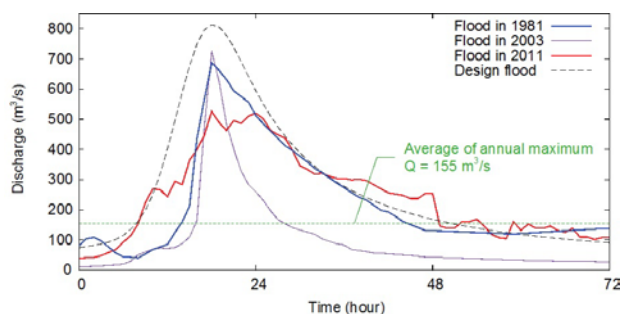


図-3.38 主要洪水の流量ハイドロ

態の特性を見る。図から、1981 年の洪水は整備計画流量 (1/60) に匹敵するほどの規模であったことがわかる。また、2011 年の洪水は、ピーク流量ではこれを下回るが、平均年最大流量の継続時間では、1981 年の洪水を上回っている。定常流で 3 日間通水した後の河床高平面図を図-3.39 に示す。図は一定勾配の河床高を基準とした際の比高差を表しており、以降の表記も全て同様とする。この結果から、本解析の河道条件下では、 $300\text{m}^3/\text{s}$  規模の流量が蛇行発達に対して支配的な流量であることが推察できる。また、ここで注目するのは、河道湾曲部下流側で形成された蛇行流路の位置とその間隔である。流量によって若干状況は異なるが、概ね波長 600m 程度の蛇行流路が、ほぼ等しい間隔で形成されている。これは、現地でも実際に確認されている M-1~3 に相当するもので、発生位置・間隔ともに良く符合する。次に、1981 年洪水の流量を 3 日間通水した後の河床高平面図を図-3.40 に示す。図中、青点線は 1981 年洪水の減水期における主流路の線形で、赤線は洪水後にあたる 1991 年の低水時のものである。解析結果を見ると、KP18.5~20.3 の 1.8km 区間に、波長 600m 程度の蛇行流路が 3 つ形成されている (M-1~3)。1981 年と 1991 年の実際の流路線形と比較すると、それらの発生位置や間隔は概ね一致している。以上の結果から、現地で形成された M-1~3 の蛇行部は、低水路法線の湾曲形状によって必然的にもたらされた固定砂州である可能性が示唆された。

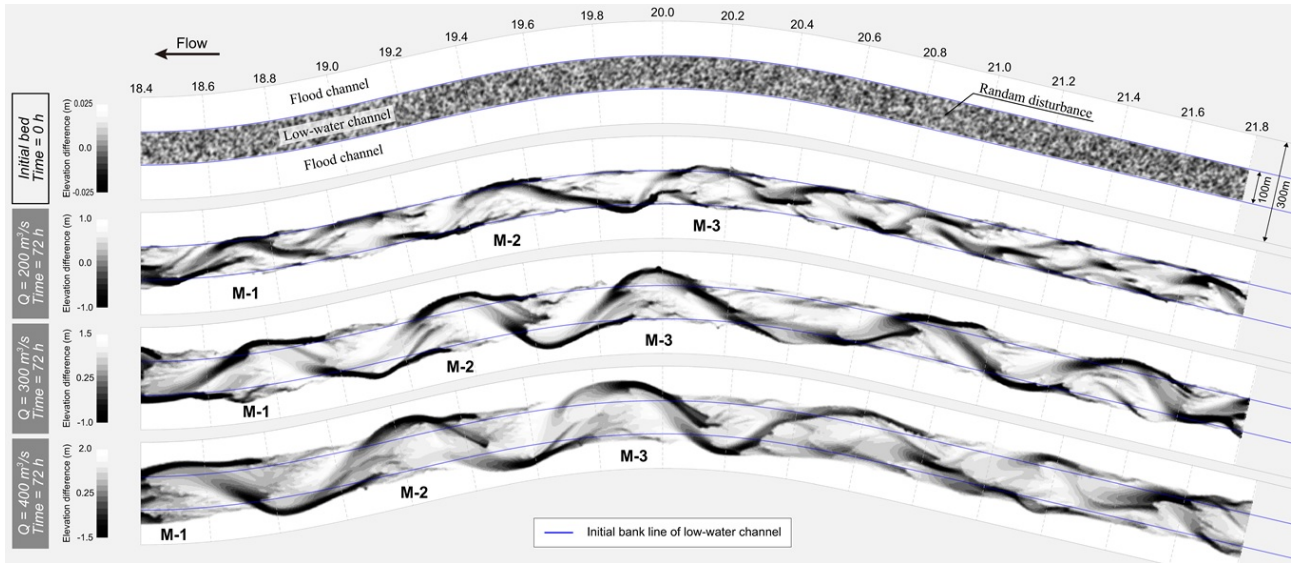


図-3.39 定常流の解析結果（河床高）

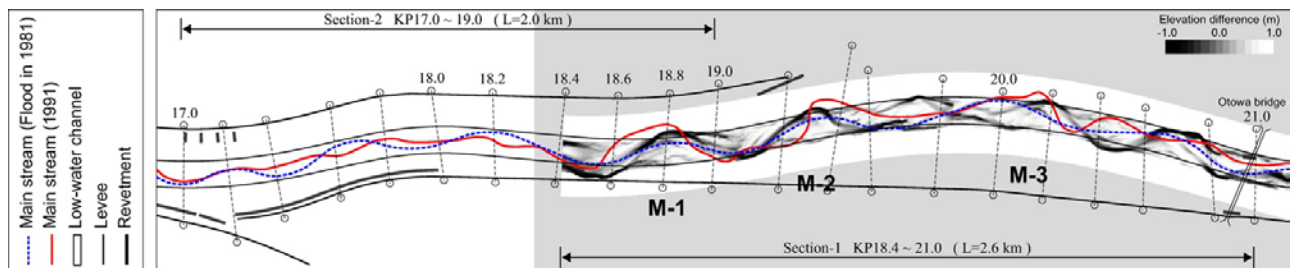


図-3.40 1981年洪水の解析結果（河床高）

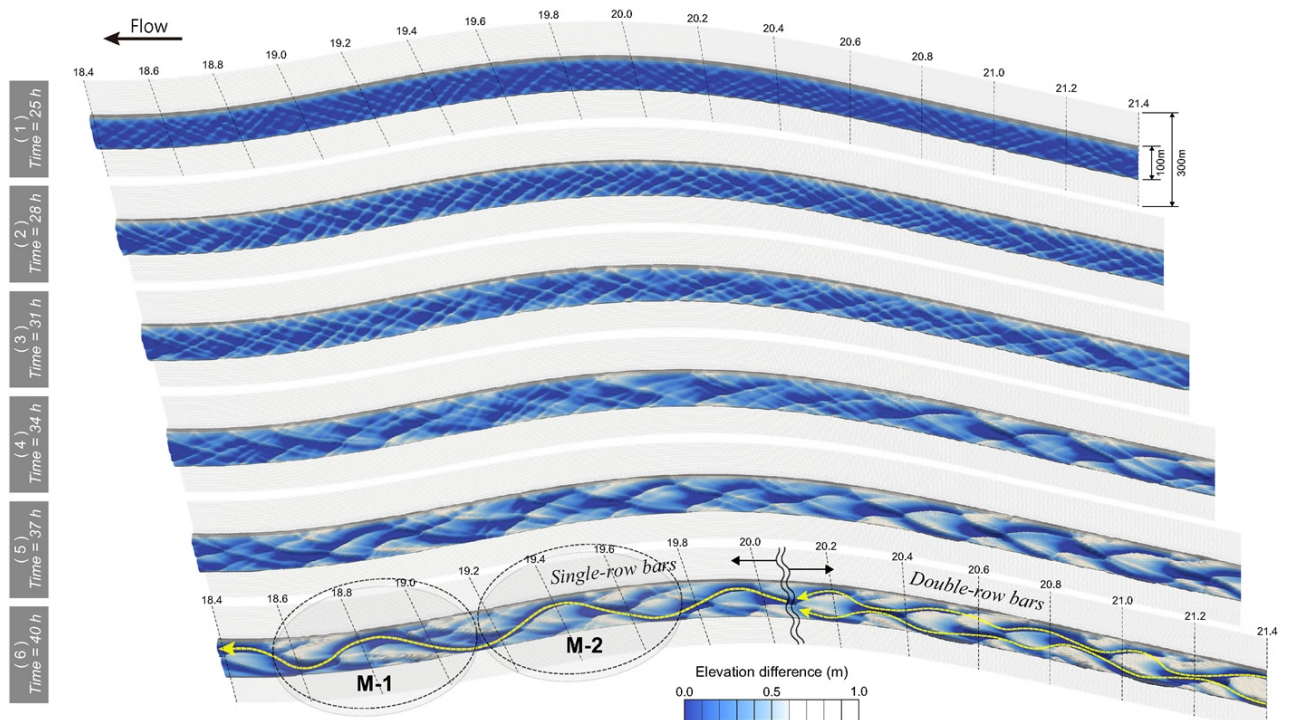


図-3.41 ピーク流量後の河道形成過程（1981年洪水、KP18.4～21.4）

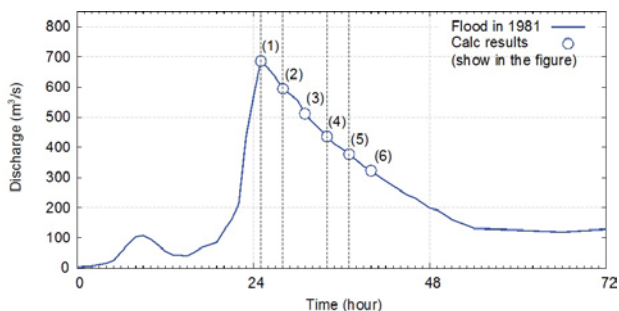


図-3.42 計算結果表示時刻 (1981 年洪水)

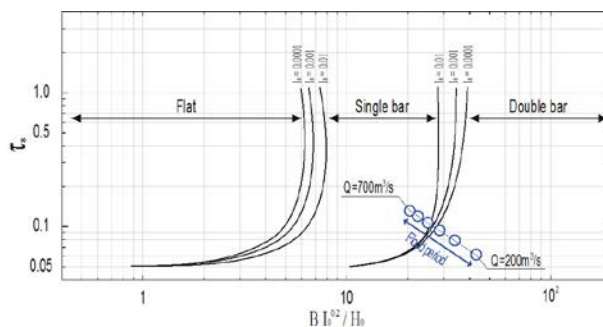


図-3.44 中規模河床形態区分 (1981 年洪水)

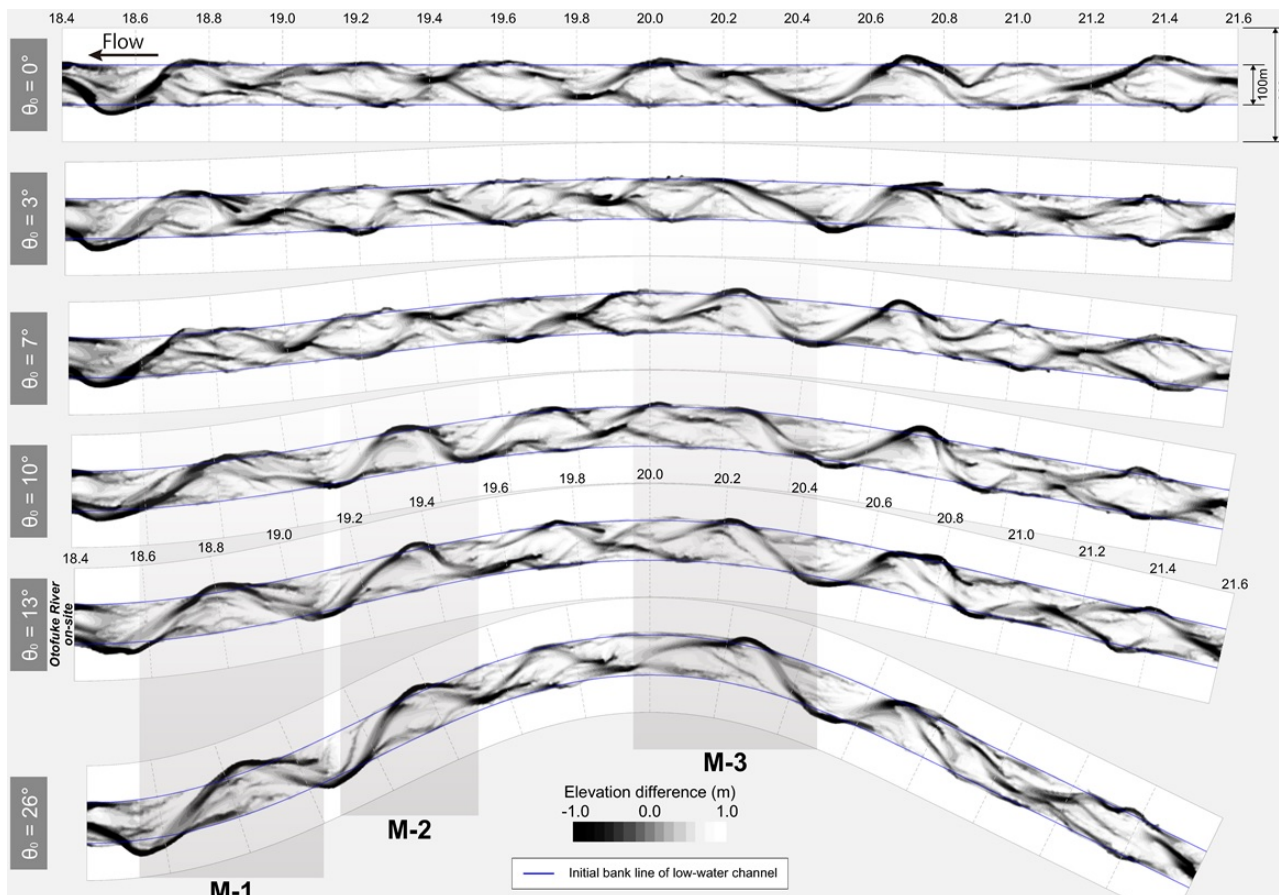


図-3.43 蛇行角の違いによる蛇行発達状況の変化 (1981 年洪水、KP18.4~21.6)

### 3) 1981 年洪水時の河道形成過程

次に、このような固定砂州が形成される要因について、洪水期の河床形態の遷移過程をもとに検証する。図-3.41 は、1981 年洪水の流量低減期における河道形成過程を示しており、各結果の表示時刻は図-3.42 の (1)~(6) に対応する。当該洪水時の河床形態の遷移過程は、概ね、ピーク流量を越えた時点から河床面に変化の兆しが現れ、それが時間経過とともに多列状態から複列状態へと遷移していくものである。ただし、(5)~(6) の期間を見ると、河道湾曲部周辺を境に、上下流区間で河床形態に明らかな違いが生じている。上流区間は複列状態が比較的維持されているのに比べ、

下流区間には既に単列化の傾向が強く現れている。これは、河道湾曲部周辺では、流下方向への砂州の移動が抑制されるため、直線河道に比べて砂州が発達しやすい条件下にあり、発達した砂州は、時間経過とともにやがて完全に停止し、流路の単列化を促進するためであると考えられる。また、本解析では、下流側の湾曲部で形成された M-1 の砂州が起点となり、やがて上流側の M-2 を形成し、それらが徐々に蛇行度を高めていく様子が確認された。すなわち、このような河道湾曲部で形成される固定砂州は、上流側の砂州の移動をも抑制するため、間接的にその影響は上流側へと波及していくものと推察される。

#### 4) 蛇行角が蛇行発達に及ぼす影響

既述のように、現地の低水路法線は蛇行角  $\theta = 13^\circ$  で湾曲した平面形状を成している。解析結果から、このような低水路の平面的な形状が、砂州の移動を抑制し、湾曲部周辺における固定砂州の発達を誘発した可能性が示唆された。このことから、次は、湾曲河道の蛇行角の違いが蛇行発達に及ぼす影響と、砂州の移動を停止させる限界角度について検証を行う。計算条件は、先の解析と同様とし、蛇行角のみを  $\theta = 0 \sim 26^\circ$  の間で変化させ、1981年洪水を3日間与えた後の蛇行発達状況をそれぞれ比較する。図-3.43に解析結果の一例を示す。なお、今回の計算条件は、図-3.44に示すように、ピーク流量付近では単列砂州の形成領域にあるため、直線水路であっても単列化の傾向は生じ得る。したがって、この解析結果から河道の湾曲による単列化の影響のみを取り出すことは難しいが、蛇行角  $\theta = 0^\circ$  の河道状況を基準に、蛇行流路の発達状況を比較することで、蛇行角の違いによる影響をある程度は評価できる。図から、全体的な傾向として、蛇行角が小さいほど河床形態は複列状態に近づき、蛇行角が大きくなるほど単列化の傾向がより強く現れる。特に、色掛けで示す M-1~3 の蛇行部は、蛇行角  $\theta = 10^\circ$  付近を境に明瞭な固定砂州が形成されることがわかる。

#### 3.4.3 河岸平面形状に起因した蛇行の伝播

以上、Section-1 の解析結果から、KP18.4~21.0 の

区間に形成された M-1~3 の蛇行部は、低水路法線の湾曲形状によって必然的にもたらされた固定砂州であると推察された。また、河道変遷履歴から、この区間は過去 30 年に亘って大規模な改修工事が行われておらず、これら 3 つの砂州は、1981 年の洪水以降、ほぼ固定された位置で年々蛇行度を高めていたことがわかった。低水路河岸高程度まで発達した砂州は、湾曲形状を成した低水路河岸に等しく、洪水流を側岸方向へと強く誘導し、蛇行流路の発達を促進するものと考えられる。すなわち、M-1 における砂州の発達は、その直下で発生した堤防被災 (KP18.2 付近) に対して、非常に大きな影響を及ぼしていたものと考えられる。以上のことから、次は、M-1 の砂州と被災箇所周辺を含めた Section-2 (KP17.0~19.0) を対象とした解析を行う。

#### 1) 固定砂州の発達と河岸平面形状 (Section-2)

まず、解析に供する河道条件をモデル化するため、2011 年の洪水前における M-1 の発達状況を確認する。図-3.45 及び図-3.46 は、2006 年の LP 測量データをもとにした Section-2 の河道状況で、図-3.45 左に鳥瞰図を、右に M-1 の横断面を、図-3.46 には河床高平面図を示す。M-1 の横断面を見ると、左岸側に形成された bar-1 は、赤点線で示す 1981 年当時の低水路を完全に埋め尽くすほどの規模にまで発達し、河岸高に等しい砂州波高を持った強固な固定砂州が形

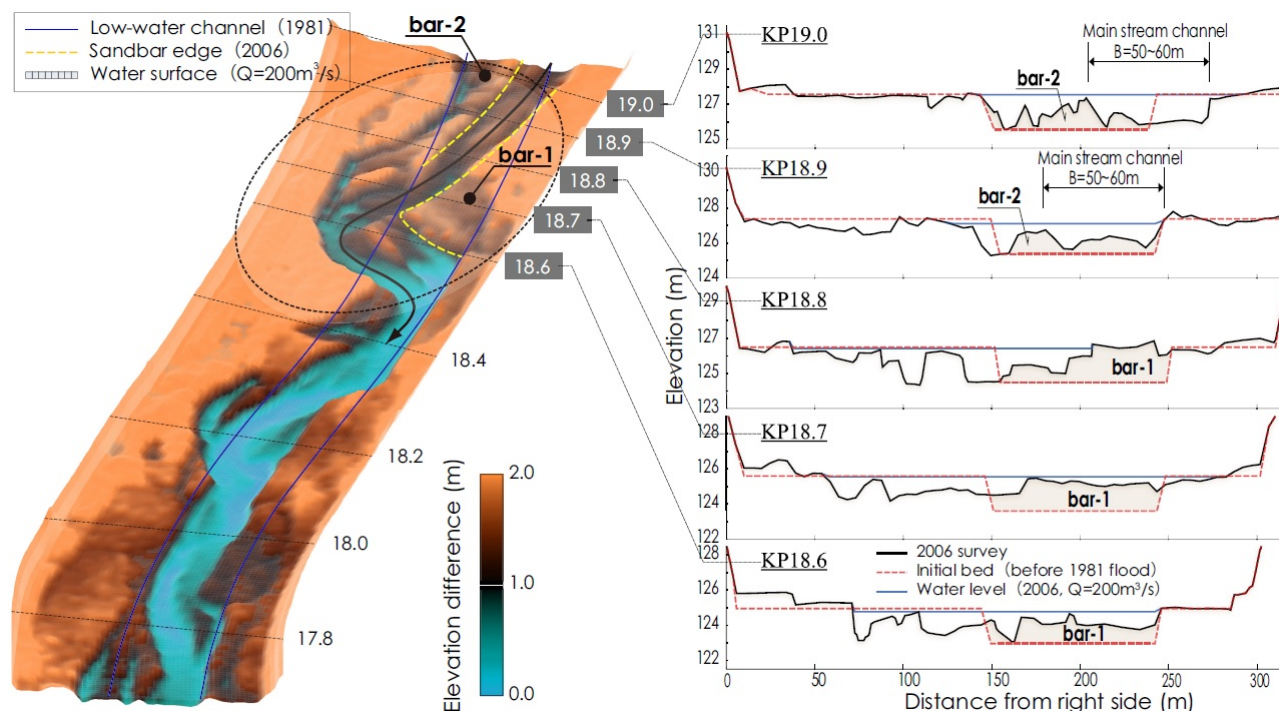


図-3.45 2011年洪水前の砂州発達状況 (M-1)

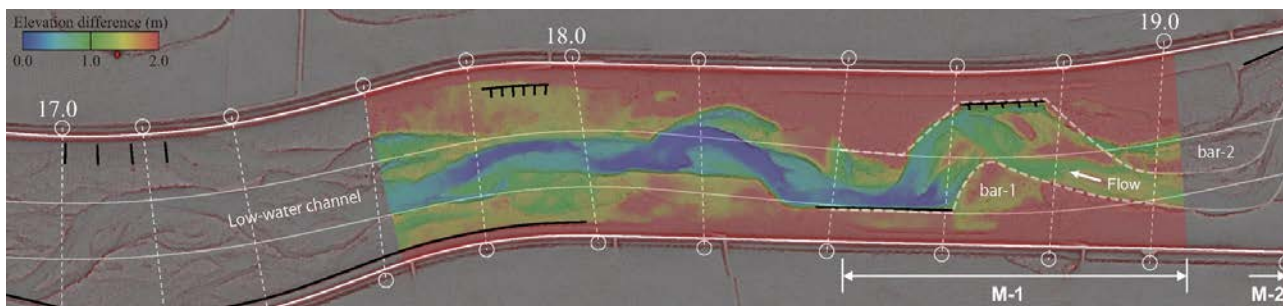


図-3.46 2011年洪水前の実測河床高 (LPデータ: 2006.5)

成されていたことがわかる。本解析では、蛇行発達現象の支配的要因を特定するため、現地の河道状況から主要なポイントのみを抽出し、極力単純化した地形モデルを与える。ポイントとなるのは、被災箇所上流側は、発達した固定砂州 M-1 の影響により低水路が大きく右岸側に湾曲していたこと、また、その下流側は、2005 年の改修工事の影響により直線的な河道状況が残されていたことである。以上より、解析区間の上流側には図-3.46 の点線で示すような蛇行部 (M-1) を模した河岸平面形を与え、下流側には低水路幅 100m の直線河道を接続させる。河岸平面形状の詳細は図-3.50 の最上段に示す。

2) 計算条件 (Section-2)

本解析では、図-3.47 に示す 2011 年の洪水を外力として与え、堤防被災をもたらした蛇行発達現象の支配的要因とその発達プロセスの解明を試みる。解析対象区間は KP17.0~19.0 の延長 2km とし、初期河床には上述の模式化した地形を与える。その他の計算条件は Section-1 と同様である。ここで、KP19.0 を解析区間の上流端とすることの妥当性について補足する。KP19.0 付近では、M-1、2 の固定砂州の影響により、洪水期間中も常に左岸側に寄った流れが維持されており、図-3.48 に示すように、横断方向への流路変化は

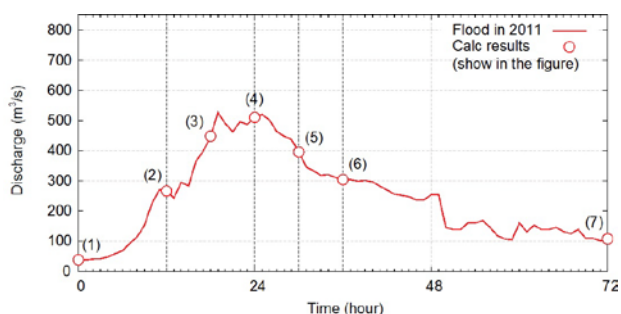


図-3.47 計算結果表示時刻 (2011年洪水)



図-3.48 自然短絡によって形成された新流路 (M-2)

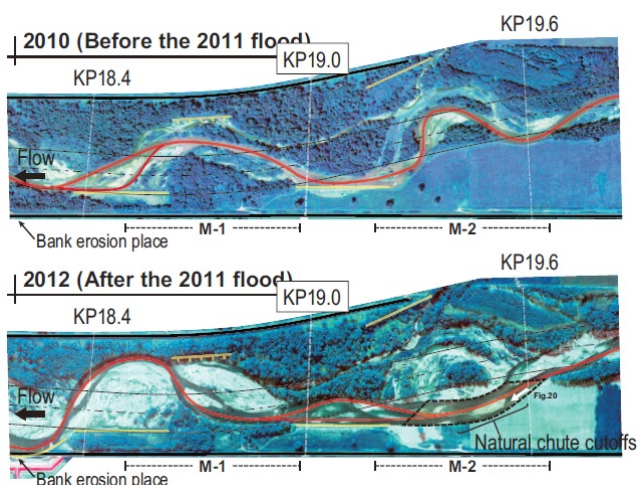
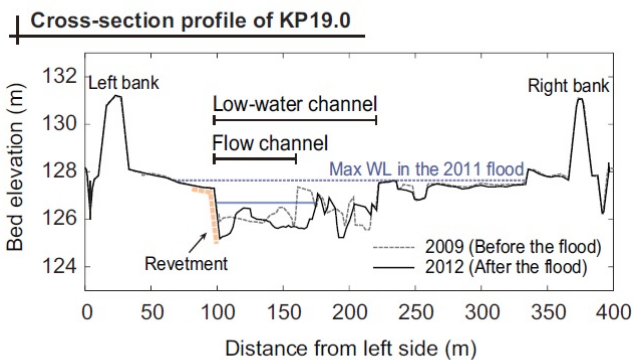


図-3.48 2011年洪水前後の蛇行流路の平面形状と KP19.0 付近の断面形状



生じていない。また、現地では、洪水期間中、蛇行部 M-2 は自然短絡しているが (図-3.49)、KP19.0 付近の河道断面形状には、出水前後でそれほど大きな変化は起きていない。以上のことから、本解析では、洪水時、KP19.0 の河道断面は動的平衡状態にあったものと仮定する。

### 3) 蛇行発達過程 (蛇行波形の伝播過程)

解析結果を図-3.50 に示す。なお、各結果の表示時刻は図-3.50 の (1)~(7) に対応する。解析結果から、増水期、流量が  $200\text{m}^3/\text{s}$  を越えたあたりから河道に大きな変化が現れはじめ、ピーク流量を挟んだ (2)~(6) の期間を経て、蛇行流路の概形が形成されていったことがわかる。(6)~(7) の変化から、その後は、ほぼ波長や位相の変化を伴わずに、蛇行振幅のみが増大していく様子が見てとれる。(2)~(6) の変化を、青線で示す流線に注目すると、M-1 の蛇行部では、河岸の

湾曲形状によって洪水流が強く拘束され、洪水期間中、常に蛇行した流れが維持された状態にある。当該洪水では、このような状態が長時間に亘って継続したことで、M-1 の蛇行波形が徐々に下流側へと伝播していき、最終的に波形の揃った蛇行流路が形成されるに至ったものと推察できる。また、この時、M-1 では、蛇行流が河岸を侵食しながら位相をやや下流側へと変化させたことで、結果的に水衝部の位置が既設護岸から外れたことも、今回の堤防被災に至る過程では大きな分岐点となった。図-3.50 最下段は、洪水後に実施した LP 測量のデータから得られた現地の河床形状である。解析結果の (7) の時点と比較すると、両者の蛇行特性 (蛇行波長、蛇行振幅) は概ね一致する。また、M-1 の位相ずれの状況や、形成された砂州上に残る流路の痕跡など、多くの類似点が認められ、本解析結果の妥当性を示すものと言える。

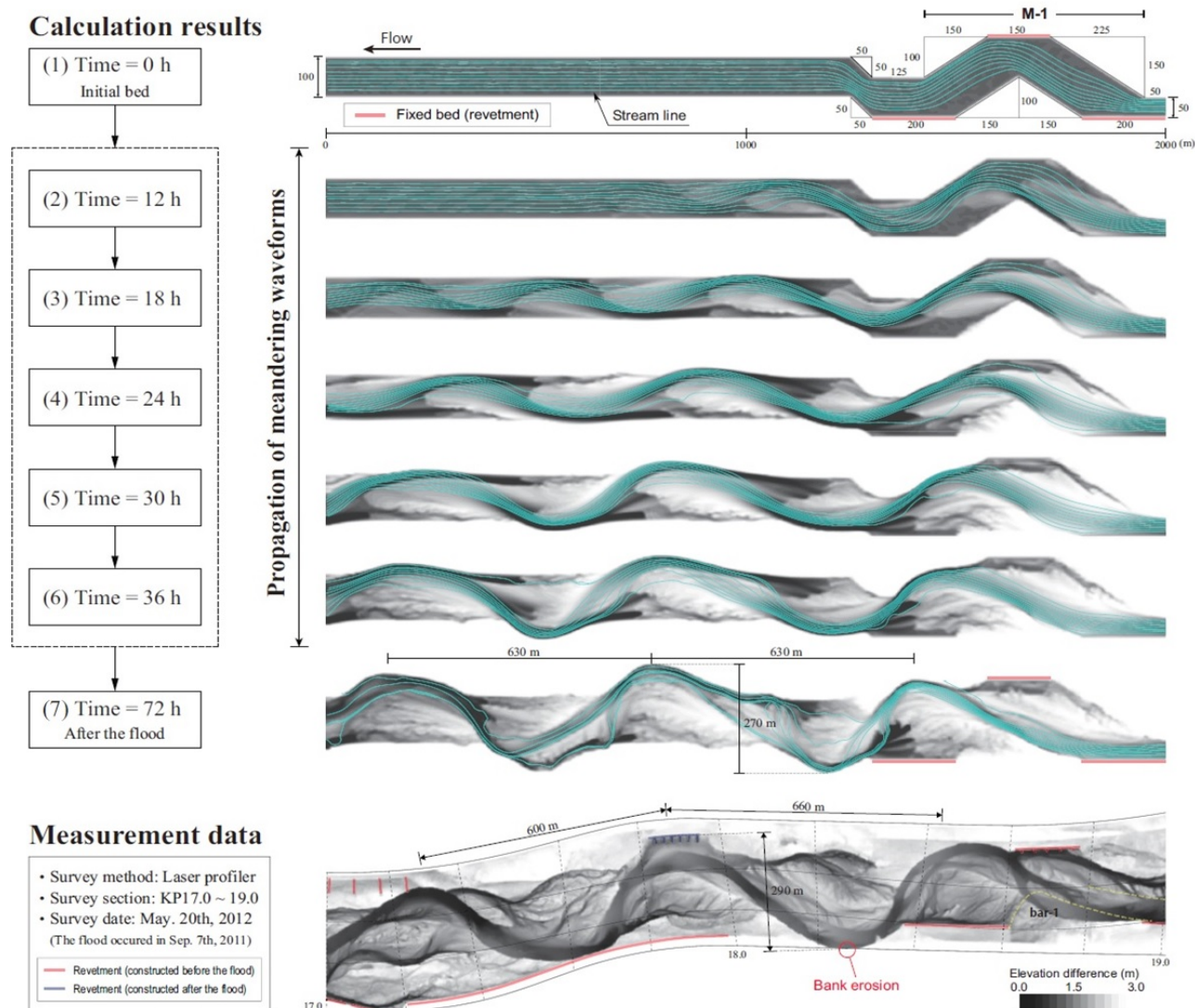


図-3.50 2011年洪水の解析結果 (河床高・流線) と洪水後の実測河床高

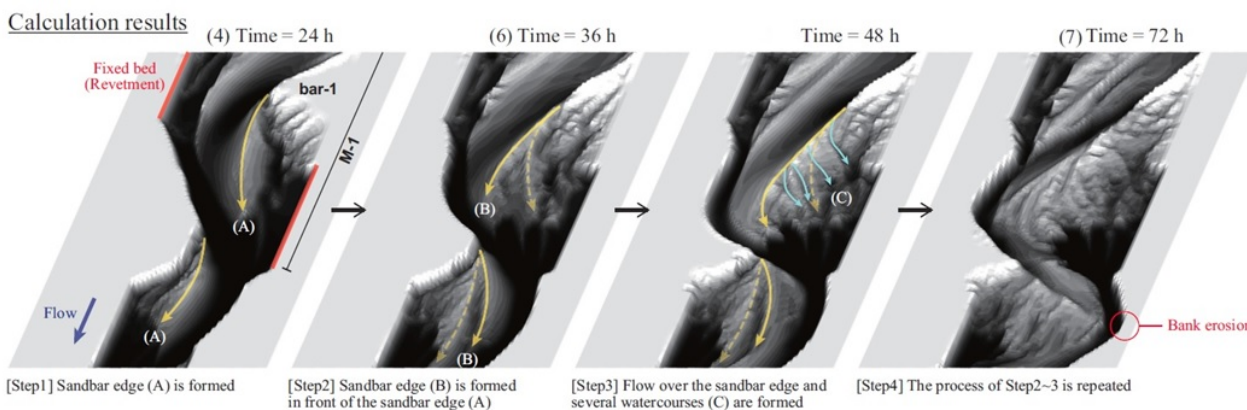


図-3.51 ピーク流量後の州発達過程（解析結果）

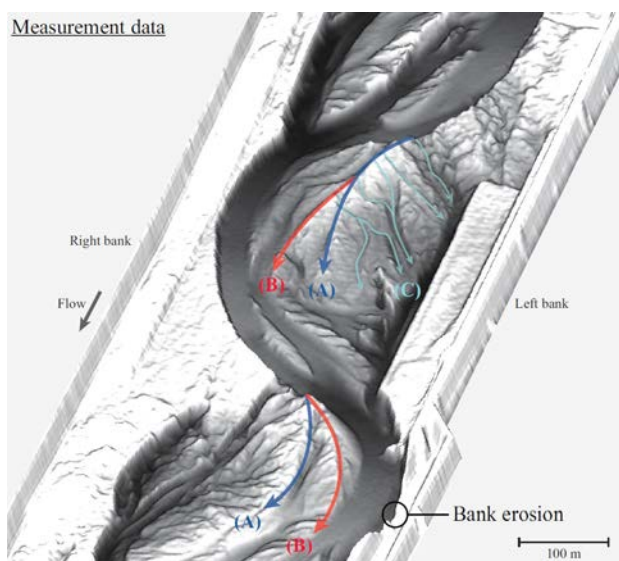
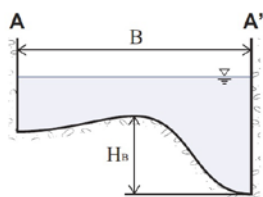


図-3.52 2011 洪水後の実際の河道状況

Cross-section profile



Plane view

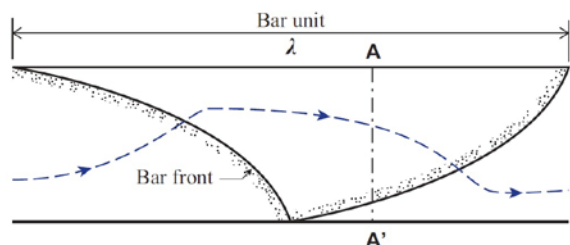


図-3.53 2011 洪水後の実際の河道状況

図-3.51 は、堤防被災箇所直上流部 (M-1) における砂州発達過程を示している。この解析結果から、現地に残された砂州前縁と流路の痕跡は、図に示す

Step1~4 の過程を経て形成されていったことがわかる。砂州形成過程で現れるこのような地形的特徴は、蛇行流路が側岸侵食を伴いながら横断方向へ急速にシフトした結果、砂州前縁が痕跡として断続的に残されていったものと考えられる。これは洪水後の蛇行湾曲部などで見られる「Scrolling Sandbar」と呼ばれる現象である。図-3.52 は、洪水直後に現地で実際に観測された地形であるが、砂州上に残された痕跡の特徴は解析結果と非常に酷似していることがわかる。

4) 砂州横断形状の変化

蛇行発達過程において、砂州の横断形状が時間的にどのように変化したかは、そのメカニズムを知る上で非常に重要なポイントである。ここで、単列交互砂州の横断形状を波高  $H_B$  と川幅  $B$  で表すこととし (図-3.53)、Section-1 と Section-2 の代表断面における砂州形状の時間変化を図-3.54 に示す。図中上段は、直線水路を対象とした単列交互砂州の平衡波高に関する実験結果<sup>19)</sup>を、次元解析から得られた式 (3.10) を用いて整理されたもので、単列交互砂州の平衡波高がとり得る領域を表しており (池田、1983)、これに、本解析から得られた Section-1 と Section-2 の結果を重ねたものである。図中上段の赤線と青線は、砂州波高の変化で、図中下段は、同じく砂州の横断勾配 ( $H_B/B$ ) の時系列変化を表している。

$$\frac{H_B}{D} = \left(\frac{B}{D}\right)^{-0.45} 9.34 \exp\left(2.53 \operatorname{erf}\left(\frac{\log_{10} \frac{B}{D} - 1.22}{0.594}\right)\right) \quad (3.10)$$

ここで、 $H_B$  : 砂州波高 (m)、 $D$  : 平均水深 (m)、 $B$  : 川幅 (m)、 $d$  : 河床材料の粒径 (m) である。

両セクションに共通して言えることは次の 2 点である。一つは、時間経過とともに砂州波高は増大するが、平衡波高に達した後はその状態を維持したまま遷



移する。もう一つは、砂州の横断勾配の時間変化は、砂州波高が平衡状態に達した時点で最大値をとり、この値をピークとした凸型の変化を迎える。この結果は、図-3.55 に模式図で示すように、概ね次のように解釈される。

- A. 砂州波高が十分に発達していない状態では、砂州の横断形状は鉛直方向への変化が卓越する [砂州発達過程]
- B. 砂州波高がある一定の平衡状態に達すると、砂州の横断勾配も同時にピークを迎える ( $H_B/B=0.020\sim 0.025$ )
- C. 砂州波高が平衡状態に達して以降は、平衡波高を維持したまま、横断方向への変化が卓越する [側岸侵食過程]

つまり、砂州横断形の発達を経て、蛇行平面形の発達をもたらされるという点において両者は共通する。一方、両セクションの最大の相違点は、砂州波高が平衡状態 (B) に達するタイミングの違いにある。洪水初期段階で平衡波高に達する Section-2 では、側岸侵食が長時間継続するため、Section-1 に比べて顕著な蛇

行発達が起きたものと解釈できる。付け加えると、この平衡波高に達するタイミングの違いは、河道内に残された過去の洪水履歴の有無によってもたらされており、これはつまり、解析で初期河床として与えた河岸平面形状の違いを意味している。M-1 のように低水路河岸高程度まで発達した固定砂州が低水路内に存在した場合、洪水時、強い蛇行流が発生するため、この蛇行流が砂州の発達速度 ( $H_B$  のピーク到達時間) を相対的に早めたものと考えられる。

### 3.4.4 まとめ

以上、本節では、砂州地形と低水路河岸の平面形状の双方に着目し、数値解析を用いた各種検討を通じて、2011年9月の蛇行発達をもたらした主たる要因の解明を試みた。その結果、KP18.4~21.0を対象とした解析結果から、低水路の湾曲形状が当該区間における固定砂州の形成を誘発したものと推察された。また、河道変遷履歴から、これらの固定砂州は約30年余りの期間を経て徐々に蛇行度を高め、やがてその波高は河岸高に達する規模にまで発達していたことがわかった。さらに、KP17.0~19.0を対象とした解析結果から、このような固定砂州が形づくる河岸平面形状 (湾

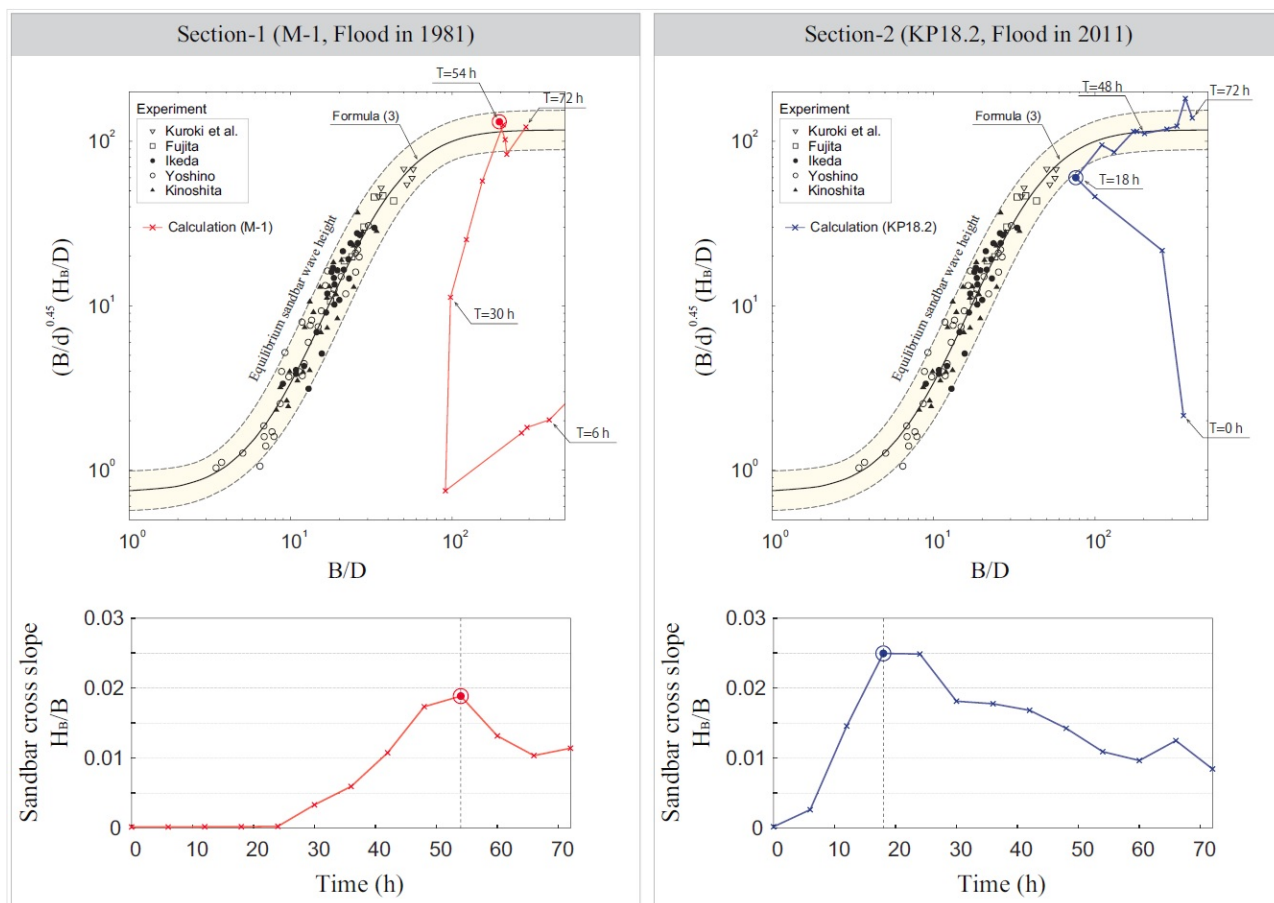


図-3.54 砂州波高の発達過程と砂州横断形状の時系列変化 (左: Section-1, 右: Section-2)

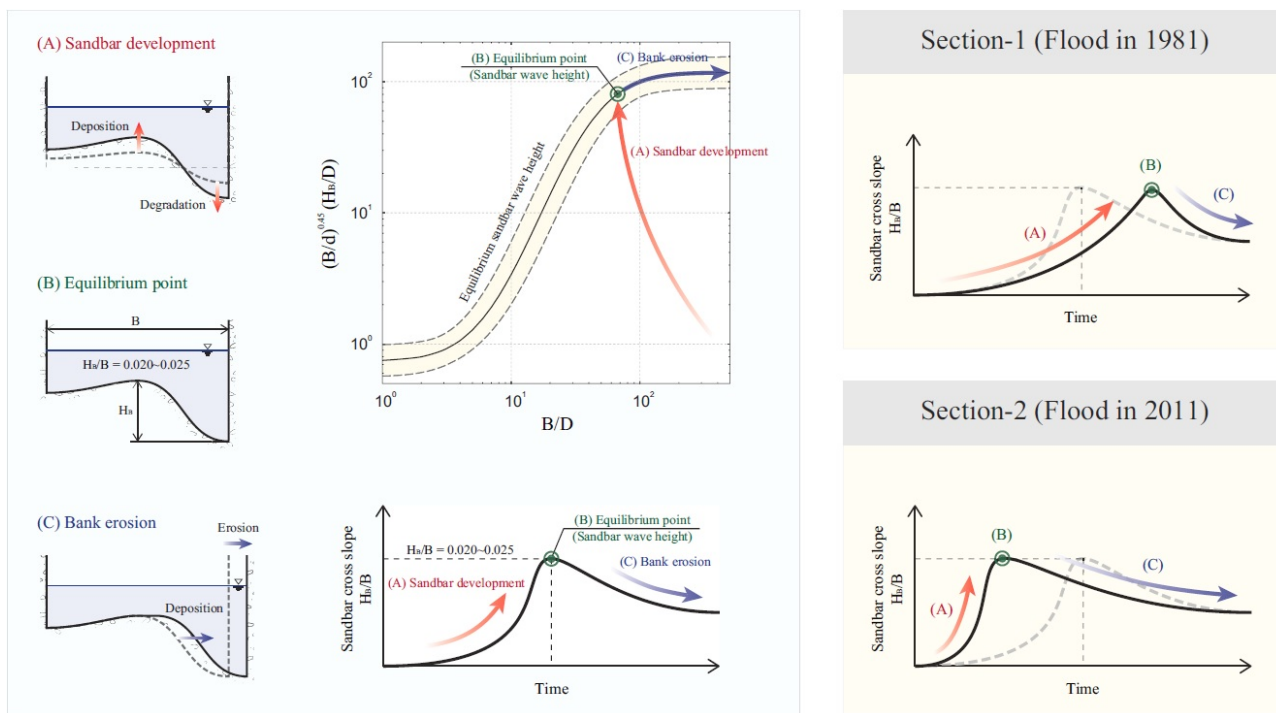


図-3.55 洪水期における単列交互砂州の横断形状の変化（模式図）

曲形状)によって、洪水時、蛇行した流れが長時間に亘って維持されることとなり、徐々にその波形が下流側へと伝播していくことで、最終的には、堤防に達するほどの大規模な蛇行発達をもたらされたものと推察された。当該被災をもたらした主要因を以下にまとめる。

1. 低水路の湾曲形状に起因した砂州の固定化
2. 数十年の期間を経て起きる固定砂州の発達
3. 河岸平面形状に起因した蛇行波形の伝播

洪水時の急激な蛇行発達を抑制するための応急対策としては、河岸保護が実施されていない区間を対象に、上記 2 に相当する危険箇所を特定し、発達した固定砂州の影響を弱める措置を講ずることが有効である。具体的には、砂州上部の切下げや砂州裏をショートカットする新水路の造成等の対策が考えられるが、これらの対策を実施する際には下流側へ与える影響も含めて十分な検証が必要である。

固定砂州が低水路河岸に匹敵するほどの規模にまで発達するには、数十年という非常に長い期間を要する。したがって、その間、砂州上にはヤナギ等の植生が侵入することで、洪水時の流速を低減させ、土砂堆積を促進するなど、植生が固定砂州の発達を促進している可能性がある。近年、河道内植生の樹林化が全国各地で顕在化しているように、今後、長期的な河道変化を

考える上では、植生侵入が河道変化にもたらす影響をある程度考慮する必要がある。

### 3.5 第3章の結論

以上、本章では、流路が河岸侵食を伴って蛇行を発達させるメカニズムの解明に向け、音更川の侵食箇所周辺の土質データの収集と侵食状況の概略的な把握、及び出水前後の河道変遷状況について整理し、蛇行流路発達の要因について定性的な考察を行った。その結果、音更川のような急流河川では、たとえ低水路内で収まるような流量規模であっても、その継続時間によっては蛇行流路の振幅は大きく増大し、一洪水期間のうちに、堤防を侵食するほどの規模にまで発達する可能性があることがわかった。

実河川では、砂州地形、流路跡、河岸の平面形状などの河道内に残された過去の洪水履歴が、洪水流を側岸方向に誘導するきっかけとなり、蛇行発達現象に多大な影響を及ぼすことから、蛇行発達を誘発する要因の一つとして、まずは、低水路内に形成された砂州地形がもたらす効果を、実験・解析を用いて検討を行った。その結果、単列交互砂州に起因した蛇行発達は、流量規模と継続時間に応じて徐々にその蛇行度を高めるが、その際、河道内にはある程度発達した砂州地形が形成されている必要があり、出水前の河道状況（河道履歴）が蛇行の発達規模やその速度に大きく影響す

ることがわかった。また、砂州波高に対する感度分析から、蛇行発達速度は砂州波高に比例するが、蛇行振幅には流量規模に応じた一定の限界値があり、本解析では、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$  に対して最大蛇行振幅は 250m 付近に上限値を持つものと推察された。

次に、砂州地形と低水路河岸の平面形状の双方に着目し、数値解析を用いた各種検討を通じて、2011 年 9 月の蛇行発達をもたらした主たる要因を分析した結果、低水路の湾曲形状が当該区間における固定砂州の形成を誘発し、湾曲部に形成された固定砂州は約 30 年余りの期間を経て徐々にその蛇行度を高め、洪水前の段階で、その波高は河岸高に達する規模にまで発達していたことがわかった。また、このような固定砂州が形づくる河岸平面形状（湾曲形状）によって、洪水時、蛇行した流れが長時間に亘って維持されたことで、徐々にその蛇行波形が下流側へと伝播し、やがて堤防に達するほどの大規模な蛇行発達をもたらされたことがわかった。

なお、本解析で用いた斜面崩落モデルは、河床低下によって斜面が一定の限界角度を越えると河岸が自然崩落するものとし、限界角度を保つように河岸を後退させることで、間接的に河岸侵食現象を表現するものであり、河岸侵食現象を物理的に解くものではないが、解析結果は現地で実際に起きた蛇行発達現象を良好に再現していることから、本解析モデルは礫床河川における砂州の形成過程や側岸侵食を伴う蛇行流路の発達過程に対して、十分な再現性を有することが確認された。

#### 4. 河道と植生の相互作用を考慮した河道地形の変化

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（図-4.1）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<sup>20)</sup>（図-4.2）。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は、2006 年以降に顕著となった融雪出水や夏期出水の減

少傾向<sup>20)</sup>に加えて、ダムの洪水調節による冠水頻度の低下や洪水攪乱面積の縮小、河川整備に伴う川幅縮小などの様々なものが考えられるが、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。

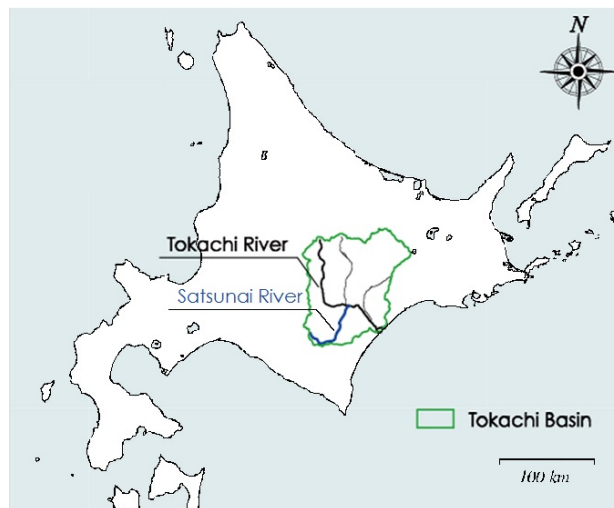


図-4.1 位置図（十勝川流域札内川）



図-4.2 河川環境の変化（札内川上流域）

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、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。

#### 4.1 既往の研究

植生地下部の影響に関する研究としては、関根ら<sup>21)</sup>によるエンバク、フッキソウを用いた人工降雨実験や、服部ら<sup>22)</sup>によるシバ、チガヤを用いた侵食実験が挙げられる。これらの研究では、根系の土砂緊縛力が斜面の耐侵食性を高めること、侵食抵抗力は地下部の根量に比例することが示されている。また、堀ら<sup>23), 24)</sup>は短繊維混合土砂の地盤補強効果に関する研究において、繊維を土砂に混入した際、土粒子はブロック状に拘束され、各ブロック間には繊維の張力に起因した架橋効果が生じ、全体の強度が高まることを述べている。短繊維と植生の根系ではその性状は異なるが、繊維状の物質が土砂に混入した際の緊縛効果という観点からは、植生地下部で生じる力学的機構との類似性が想起され

る。以上のことから、本研究では根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行い、繊維物質が土砂に混入した際の砂粒子の移動抑制効果を、流砂量の変化から定量的に評価し、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ることで、植生域における河床面の耐侵食性を評価することを試みる。

#### 4.2 実河川の河道変化と植生動態

本節では、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、過去の水理水文量、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。札内川では各観測所における水理水文量（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。

##### 4.2.1 水理水文量の変遷

###### 1) 降水量の経年変化

図-4.3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、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

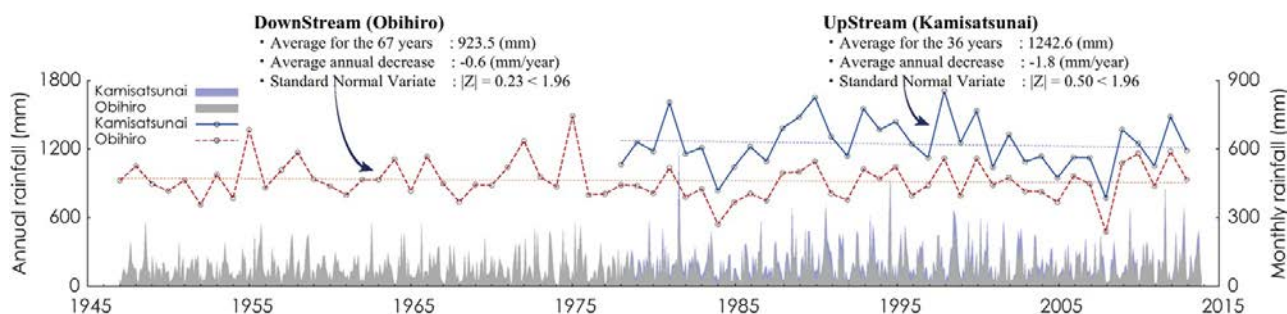


図-4.3 年積算及び月積算降水量（下流域：帯広観測所、上流域：上札内観測所）

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) 洪水規模と発生頻度の変化

年間降水量に比べて樹林化により関連が深いと思われる年最大流量や融雪期最大流量の変遷を見ると、近年の傾向は年間降水量とは異なる動きを示している。札内川ダム下流の札内川の上札内観測所では、ピーク流量が  $100\text{m}^3/\text{s}$ （融雪期の平均年最大規模）を超える洪水の年間発生頻度は、1998年の札内川ダムの共用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にまで減少（4.7 → 2.1 回/年）している。その要因としてダムの洪水調節による流況の平滑化が考えられる。ただし、ダム共用後以降に限っても細かく見ると更に傾向の変化が認められる。ダム共用から2005年までと2006年から2010年とを比べると、後者は前者に比べて平均年最大流量が半減し、融雪期最大流量も減少傾向となっている。この傾向は上流にダムの無い札内川の一次支川の戸蔦別川でも同様であり、要因として、冬期の日平均積雪深の減少等が考えられている<sup>20)</sup>。このように、近年の札内川における洪水流量の減少要因としては、ダムによる洪水調節だけではなく、札内川流域における平均積雪深の減少や、年最大流量の大きさに直接関係するような夏期から秋期にかけての大雨の規模の減少等も考えられることに留意する必要がある。

結果として、札内川上流域では、年最大流量が  $100\text{m}^3/\text{s}$  程度の年が2006年から2010年まで5年間続き、 $300\text{m}^3/\text{s}$ （1997年以前の上流域の平均年最大規模）を超える規模の洪水は、1995年から2010年まで約16年間観測されていない(図-4.4)。したがって、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。4.2.2節で詳細を述べるが、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1998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。

### 4.2.2 河道断面の変遷

札内川の各観測所における過去48年間の河道断面の変化を図-4.5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、

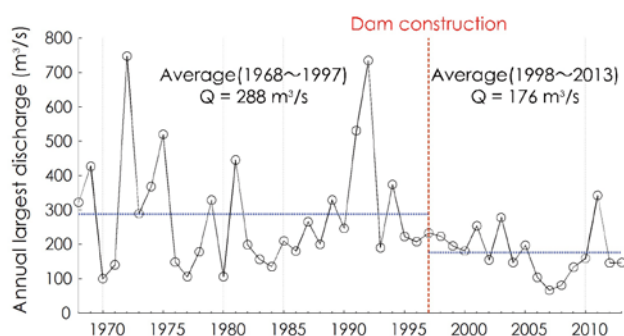


図-4.4 年最大流量の経年変化（上札内観測所）

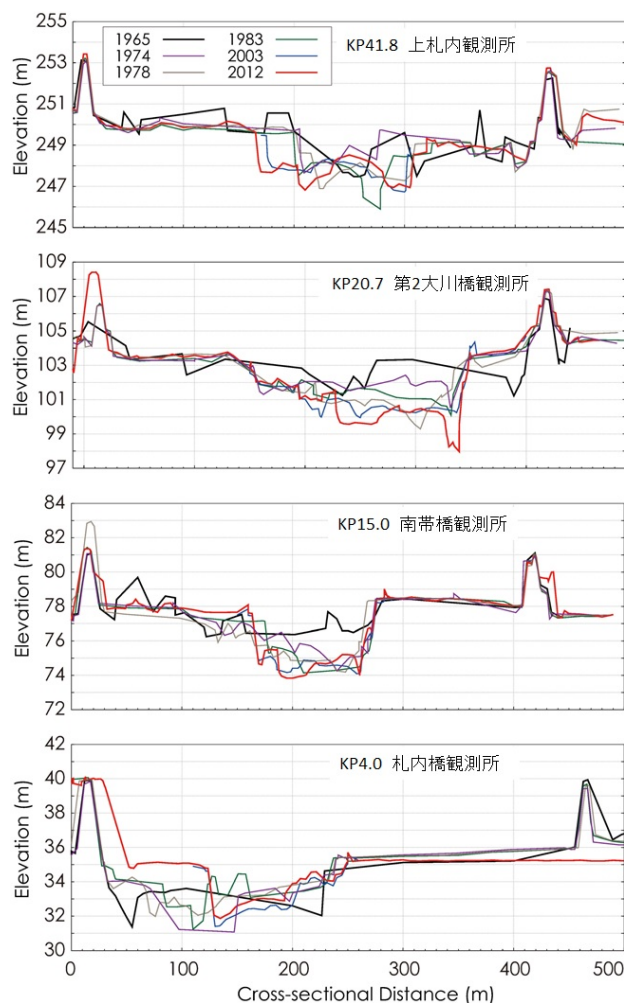


図-4.5 各観測所の河道断面形状の変化

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。この時期は、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。また、観測所周辺ほどではないにしても、河川整備に伴う川幅縮小の傾向は札内川の上流から下流まで現れており、図-4.6を見ると、1970年代

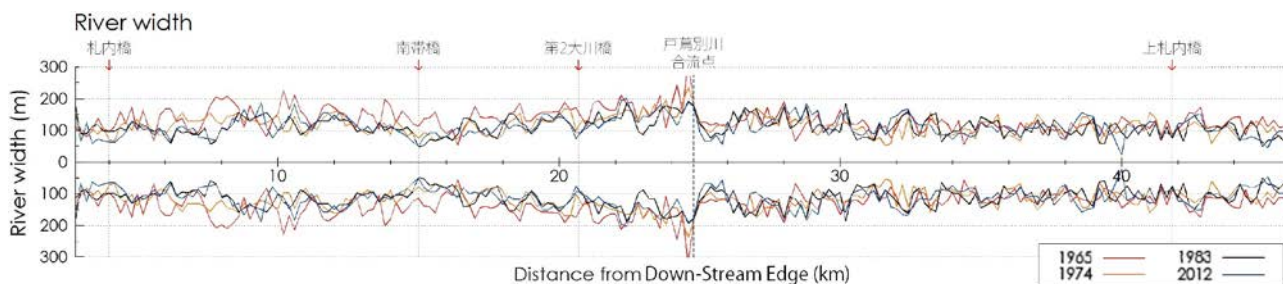


図-4.6 縦断的な川幅の経年変化

以前の変化が大きいが、1980年代以降では、局所的な増減はあるものの特筆すべき変化は生じていない。なお、図-4.6の川幅を算出するにあたっては、図-4.4に示すように、平均年最大流量が1997年頃を境に約40%低下しているが、ここでは同一流量条件下での経年比較を行うため、1997年以前の30年間(1968～1997年)の平均年最大流量を用いて算定することとし、上流域には300 m<sup>3</sup>/sを、下流域には600 m<sup>3</sup>/sを与えて、平均年最大流量流下時の水面幅を求めている。

以上、河川整備等による河道断面形状の変化は治水面に対しては絶大な効果をもたらしたが、これに伴う「二極化」によって、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。

#### 4.2.3 河道内植生の変遷

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、本節では過去65年間(1947-2011)に撮影された航空写真(図-4.7)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。

#### 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

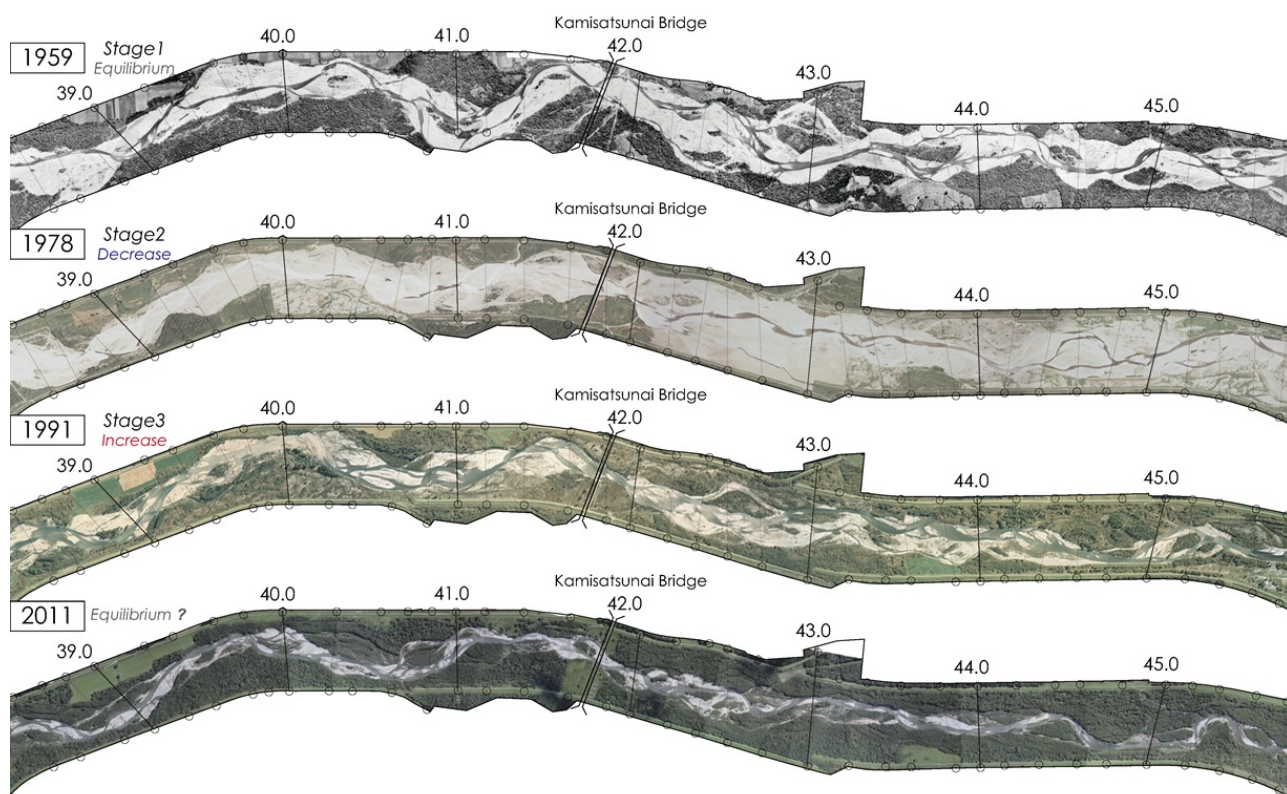


図-4.7 航空写真(代表的な年代・区間を抜粋)

内(約 5,200ha)とし、画像解像度は 1,200dpi で、単位画素当りの面積は約 0.18m<sup>2</sup> (0.42m×0.42m) 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、クラスター分析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、1,670 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 (クラスター化)。また、クラスター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、これらをさらに河岸林 (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を図-4.8 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岸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岸林全体として評価する。

## 2) 河道内占有率の変化

画像解析から得られた各年代の河岸林、草地、礫河原の河道内占有率  $R_w$  の変化を図-4.9 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 つの状態のいずれかで表される

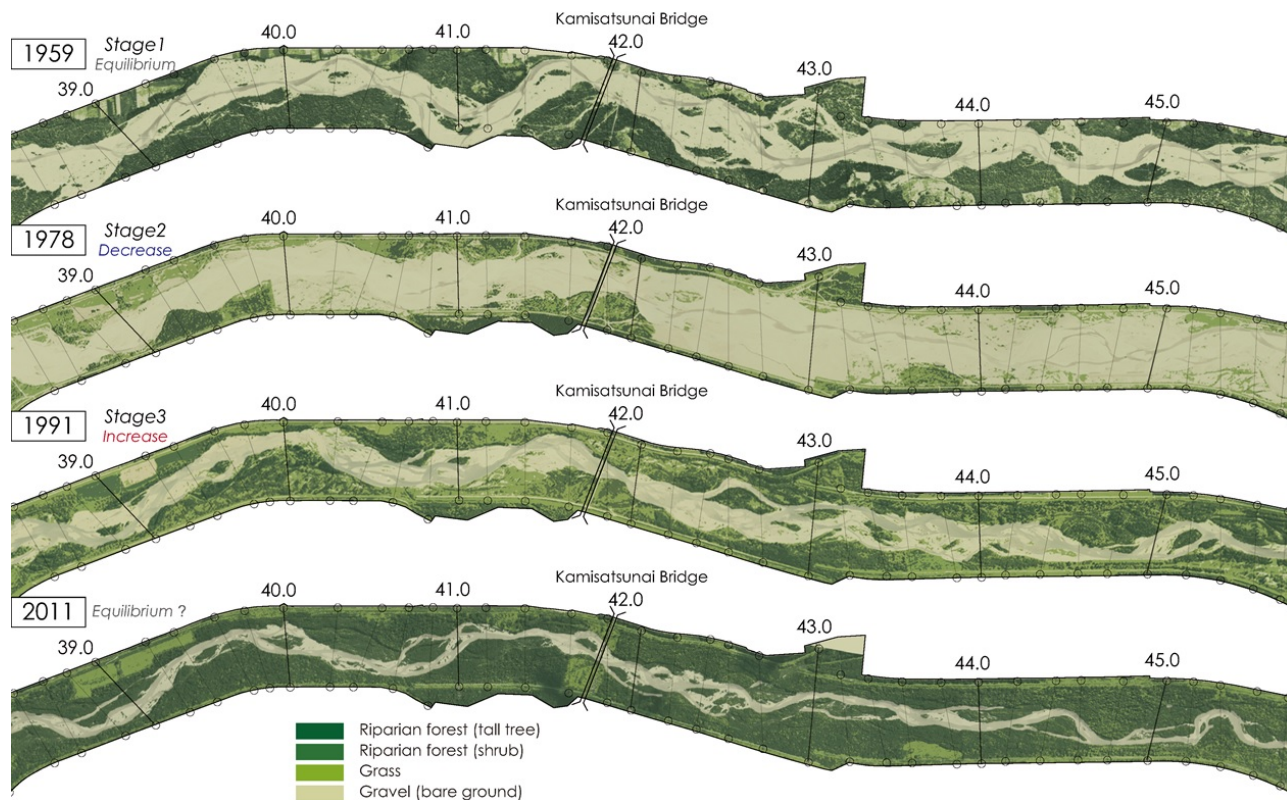


図-4.8 画像解析による土地被覆分類 (代表的な年代・区間を抜粋)

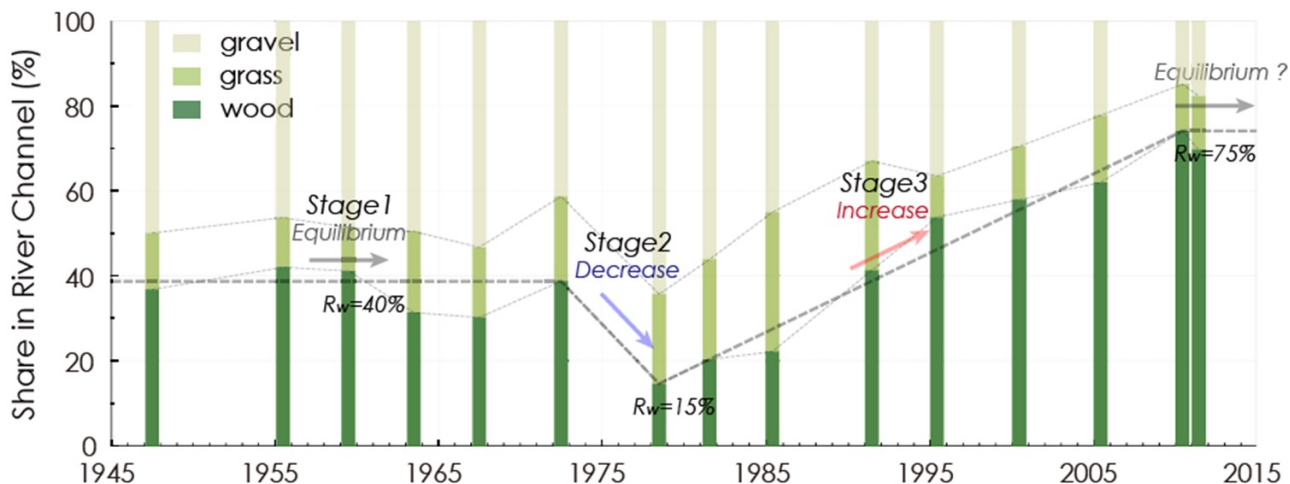


図-4.9 礫河原・草地・河畔林の河道内占有率（札内川上流域）

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。植生動態と水理水文量の変化さらには河道変遷との因果関係について期間毎に以下述べる。

(1) 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-4.10、上段）また、年5回程度の頻度で生起する  $100\text{m}^3/\text{s}$  を超える中小規模以上の洪水は、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流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) Stage2 ~1970年代の植生域縮小過程~

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、河川環境には劇的な変化が生じていた（図-4.8）。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（1972年）による流出や、河川整備や砂利採取に伴う伐採など様々な影響が考えられるが、既述のとおり、1970年代前後に河川整備等に伴い河道断面形状が急激に変化しており、このような河道地形の変化に伴う植生育基盤の消失と、植生域の一時的な縮小との間には強い因果関係が推定される。

(3) Stage3 ~1980年代以降の植生域拡大過程~

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った。突き出し型の連続水制が配置された区間では、洪水時

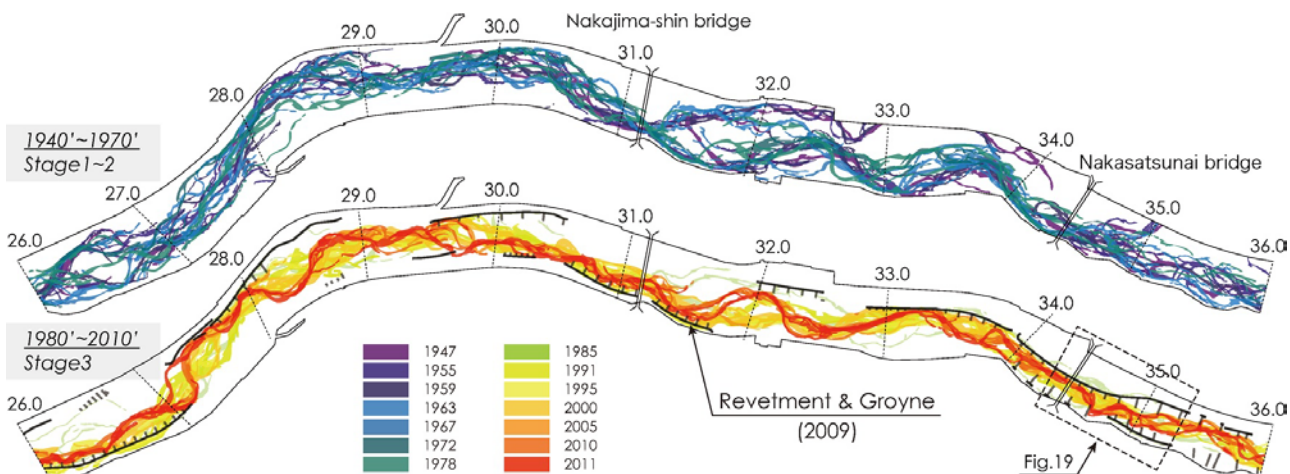


図-4.10 主流路の変遷過程（流路の固定化）



の河床攪乱が抑制されるため、河道の安定化が進んで洪水がスムーズに流下するようになったが、その一方で、細粒分を多く含んだ土砂が水制周辺に経年的に堆積し、強固な植生生育基盤が形成された(図-4.11)。図-4.10 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主流路以外の河道内のほぼ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、上述のように1997年以降大幅に減少し、上流域の上札内観測所では $300\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水は16年間観測されておらず、 $100\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水の発生頻度も半分以下にまで減少した。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、これが年々河道内のほぼ全域に拡大したものと考えられる。

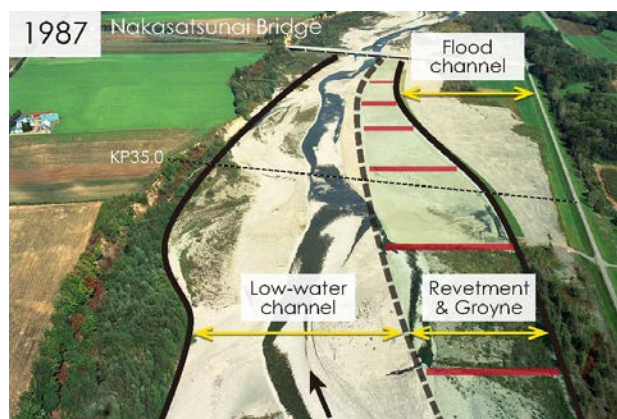


図-4.11 連続水制による流路変動幅の縮小

#### (4) 2011年9月の洪水攪乱による植生域の縮小

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 $300\text{m}^3/\text{s}$ 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-4.9)、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。

#### 4.2.4 まとめ

以上、本節では河川環境が劇的に変化した札内川を対象に、過去の水理水文量、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。本節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・平衡のいずれか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年代前後に河道地形が大きく変化し、これとほぼ同時期に河畔林の河道内占有率は15%程度にまで縮小したことから、河川整備等による河道断面形状の変化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) 概ね1970年代以降に生じた河道断面形状の変化に伴う水面幅の縮小や、1997年以降の洪水規模やその発生頻度の大幅な減少により、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。

#### 4.3 植生被覆モデルの開発

本章の冒頭部分で述べたように、近年における河道内の樹林化の要因としては、様々なものが考えられるが、樹林化に至るプロセスやその決定的な要因は未だ十分明らかではない。今後、流路の固定化や樹林化などの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。特に、数十年スパンでの河道地形の変化を考えた場合、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

## 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

のに対する抵抗として働く影響は無視できないほど大きい可能性があることから、本節では根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行い、繊維物質が土砂に混入した際の砂粒子の移動抑制効果を、流砂量の変化から定量的に評価する。ただし、植生の根系は複雑な生長・分布特性を有し、草本・木本による違いのみならず樹種や生育環境によっても大きく異なるため、短繊維による土砂緊縛効果の現地適用性には十分な検証が必要であるが、まずは当実験でその効果の概略を把握する。また、流砂量は侵食抵抗力と等価に比較できるものではないが、砂粒子が短繊維から受ける抵抗力を直接測定することは困難であるため、ここでは定量的に計測が可能な流砂量を用いてその効果を測ることとした。加えて、本研究では、実験経過をもとにした流砂量低減機構のモデル化及び数値解析を用いた実験結果の再現検証、さらに、河床面の被覆状況が上下流で面的に変化する場合の河床変動特性についても併せて検討を行った。

### 4.3.1 模型実験

#### 1) 実験方法

実験では、硅砂に繊維状の物質が混入した際の流砂量の低減効果を見るため、両者の混合割合を各種変化させた河床材料を用いて定常流下の流砂量を計測した。硅砂と混合する繊維の割合は、空隙を控除した体積比で議論するものとし、以降ではこれを「混合率： $r_m$ 」と呼ぶ。

給砂ありの条件では、混合率のみを変化させた CASE1～CASE8 の 8 ケースと、短繊維の有無を上下流に分けて面的な変化を与えた CASE9・CASE10 の 2 ケースを行った。当実験の移動床区間は、河床表層が植生地下部の根系によって緊縛された状態にある砂州上の植生域を想定しており、出水時は、砂州上に生じた

流れによって、植生域の上流側からは砂礫のみで構成された流砂が供給されることを考慮し、給砂は、全ケース短繊維なしの河床材料を用いて、上流端の河床高を動的平衡に保つよう実施した。また、上流からの土砂供給が無い場合との比較を行うため、CASE11～CASE13 の 3 ケースは給砂なしの条件で行った。

各ケースの混合率と流量条件を表-4.1 に、全ケース共通の水路条件と河床材料の粒度分布を表-4.2 及び図-4.12 に、実験時の通水状況を図-4.13 に示す。

本研究では、植生地下部の根系を模式化するにあたり、実験水路の規格や河床材料の粒径、現地植生の生長量を考慮し、縮率 1/50 の条件下でヤナギの根長・根径に近い条件となるポリプロピレン製の短繊維（製品名：Crack Buster、Microbuster）を植生の根に見立てて実験を行うこととした。硅砂と短繊維を混合する際は、繊維同士が絡まり合っただマになるのを防ぐため、短繊維と水を混ぜた状態の液体を作り、それをバケツに入れた硅砂に少しずつ足しながら、手動の攪拌機を用いて両者が均質に混ざり合う状態になるまで攪拌を行った。ポリプロピレンの比重は水より軽いため、攪拌の際は、硅砂と短繊維が分離することが無いよう水分量には十分留意して行った。均質に混ざり合った状態の河床材料と使用した短繊維の製品仕様を図-4.14 に示す。

実験は各ケース各流量に対して 1 時間の通水を行い、通水中は移動床部 (1m × 1m) の中央で水深・流速の計測を 30 分間隔で計 2 回、流砂量と空隙率の計測を 10 分間隔で計 6 回行った。流砂量は、水路下流端に設置した掃流砂捕捉用の籠を用いて 5 分間の流砂の総量を計測、実験後、水中体積と炉乾燥重量から空隙を控除した砂粒子体積を求め、これを流砂量の計測値とした。

表-4.1 実験条件

給砂条件	被覆条件	実験番号	短繊維混合率： $r_m$ (%)		流量条件 (L/s)：通水時間=1h					
			重量比	体積比	Q=2.8	Q=5.7	Q=11.3	Q=17.0	Q=22.6	
給砂あり	全面	CASE 1	-	-	○	○	○	○	-	
		CASE 2	0.005	0.015	-	-	○	○	○	
		CASE 3	0.01	0.029	-	-	○	○	○	
		CASE 4	0.1	0.291	-	-	○	○	○	
		CASE 5	0.3	0.874	-	-	○	○	○	
		CASE 6	0.4	1.165	-	-	○	○	○	
		CASE 7	0.5	1.456	-	-	○	○	○	
		CASE 8	0.6	1.747	-	-	○	○	○	
		下流側半面	CASE 9	0.5	1.456	-	-	-	○	-
		上流側半面	CASE 10	0.5	1.456	-	-	-	○	-
給砂なし	全面	CASE 11	0.1	0.291	○	○	○	○	-	
		CASE 12	0.5	1.456	-	○	○	○	○	
		CASE 13	1.0	2.912	-	○	○	○	○	

○：各ケースの設定流量

表-4.2 水路条件

item	value	unit
模型縮率	s	1/50
河床勾配	I	1/164
水路延長 (移動床部)	L	1.0 m
水路幅	B	1.0 m
河床材料の粒径	$d_{60}$	1.0 mm

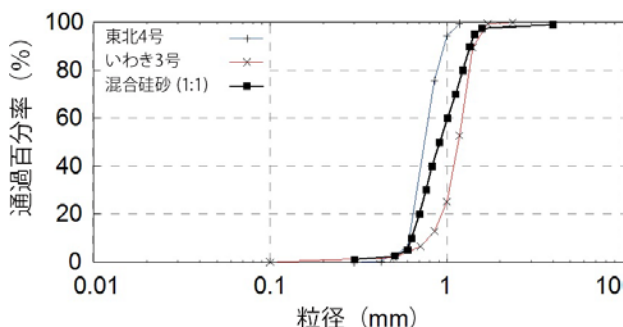


図-4.12 河床材料の粒度分布 (黒線)

## 2) 実験結果

短繊維の混合率を  $r_m=0.015\sim 1.747\%$  まで変化させた CASE2~CASE8 について、通水 1 時間の平均流砂量と混合率の関係を流量毎にプロットした結果を図-4.15 に示す。図から、短繊維の混合率が 0.1%を超えた付近から流砂量は徐々に減少し始め、1.0%を超えると砂粒子の移動が大幅に抑制されることがわかる。また  $Q=11.3, 17.0, 22.6$  (L/s) の 3 パターンの傾向を比較すると、流砂量が減少し始める混合率の値はいずれも 0.1%前後で、異なる流量条件下であっても同様の傾向が見られた。

ただし、 $Q=22.6$  では混合率が 1.0%を超えると、他の流量条件とは大きく異なる傾向を示している。当該ケースの経過を観察すると、通水中、河床面に大きな剪断力が加わった際、短繊維によって緊縛されていた河床表層 (以下、被覆層) が団塊状に剥離し、短繊維と砂粒子が水中で分離しながら流下していく様子が確認された。これは、混合率が増すと繊維同士が絡まり合った空間構造が形成され、砂粒子を団塊状に緊縛する特性が強くなるためであると考えられる (図-4.16)。被覆層が部分的に剥離した箇所は、やがて上流側から供給された短繊維を含まない河床材料へと置き換わるため、結果的に、流砂量が極端に低下することなく高止まりした状態で維持されたものと推察できる。

図-4.17 は、短繊維なし (CASE1) の流砂量を基準に、各ケースの流砂量計測値を低減率で示したもので

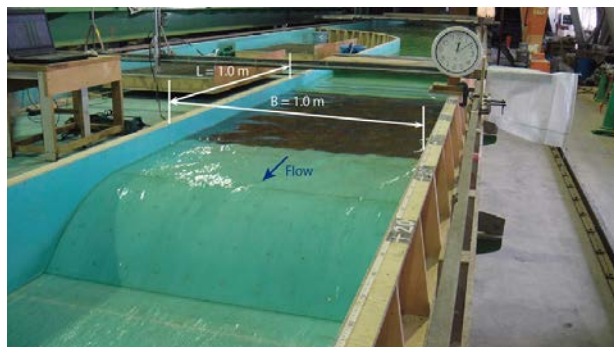


図-4.13 実験状況 (CASE12,  $Q=22.6$  (L/s))

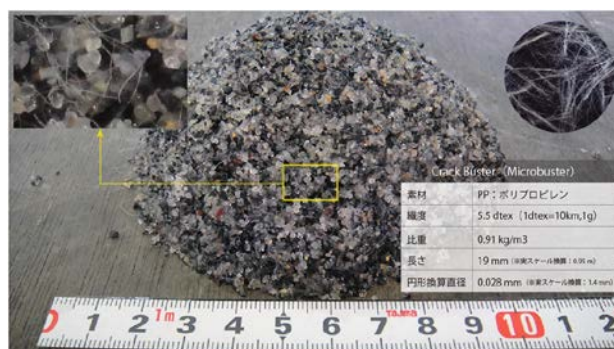


図-4.14 短繊維を混合した河床材料 ( $r_m=0.291\%$ )

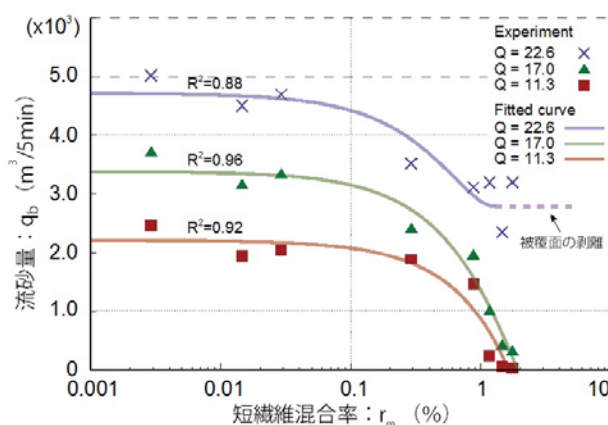


図-4.15 短繊維混合率  $r_m$  と流砂量  $q_b$  の関係



図-4.16 短繊維による砂粒子の緊縛状況 ( $r_m=1.456\%$ )

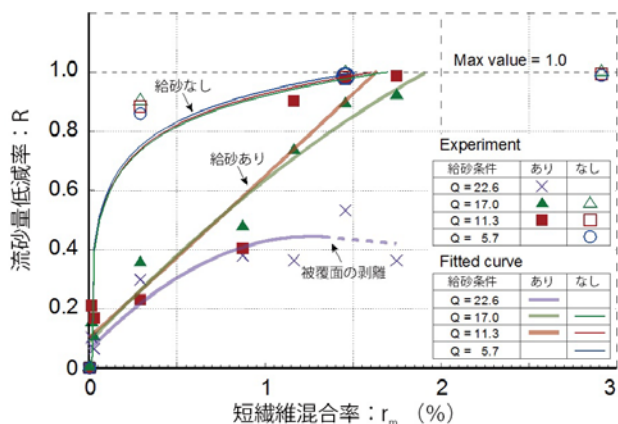


図-4.17 短繊維混合率  $r_m$  と流砂量低減率  $R$  の関係

ある。ただし、 $Q=22.6$  は基準となる実験データがないため、解析値で代用した。解析値の妥当性は後述する。

$Q=11.3, 17.0$  (CASE2~CASE8) の給砂ありの条件では、混合率 1.0 %で流砂量は約 60 %低下し、1.5 %を超えると砂粒子の移動はほぼ無くなる。一方、 $Q=5.7, 11.3, 17.0$  (CASE11~CASE13) の給砂なしの条件では、水路内を移動する砂粒子は被覆層からの流出成分のみで構成されるため、初期河床の表層に含まれた砂粒子がある程度流出すると、河床面は混合率を増した被覆層で覆われる。その結果、混合率が 0.3 %でも流砂量が約 90 %低下するなど、給砂ありの条件と比べ、短繊維による流砂量の低減効果はより顕著に現れている。

### 3) 考察 (短繊維混合に伴う流砂量の低減要因)

給砂ありの条件下における流砂量の計測値を見ると、通水開始から概ね 10~20 分で定常に達し、それ以降は混合率に応じた定常状態が維持されていた。流砂量が低下した状態のまま定常に至る理由として、本研究では以下のような推論を立てた。通水中、被覆層に含

まれる短繊維の多くは砂粒子が流出した後も河床表層に残されるため、被覆層と流水との境界には、河床面から露出した短繊維の影響が及ぶ薄い層 (以下、混合層) が形成される。砂粒子がこの混合層内を移動する過程では、常に混合率に応じた移動抑制効果を受けるため、流砂量が低下した状態のまま定常に至る。上記は、目視観察から得られた推論であるが、河床面から露出した状態の短繊維が流砂を捕捉する状況は確認されており、このような推論が成り立つ可能性は十分にある。

以上、実験結果から、河床材料に繊維状の物質が混入すると、その混合率に応じて流砂量が変化することがわかった。また、流砂量の多寡は、短繊維による河床面の被覆状況や砂粒子の移動抑制効果に強く支配されており、これらが短繊維の混合率に応じて変化することで、流砂量の計測値にも違いが生じたものと推察された。

### 4.3.2 数値実験

#### 1) 解析モデル

実験から得られた上記知見をもとに、短繊維によって流砂量が減少するメカニズムをモデル化し、数値解析を用いて実験結果の再現性を検証する。本研究で行う解析は、前章と同様に、北海道河川財団より無償配布されている「iRIC」<sup>17)</sup>と、そのソルバー「Nays2D ver4.0」<sup>17)</sup>を用いる。解析モデルの詳細はここでは省略するが、詳しくは文献<sup>17)</sup>を参照されたい。

解析では上記モデルを基本に、短繊維混合に伴う流砂量低減機構を以下のようにモデル化する。図-4.18 左段にモデル化の概念図を示す。まず、流水と接する河床面には、繊維状の物質が混入し砂粒子の移動が抑

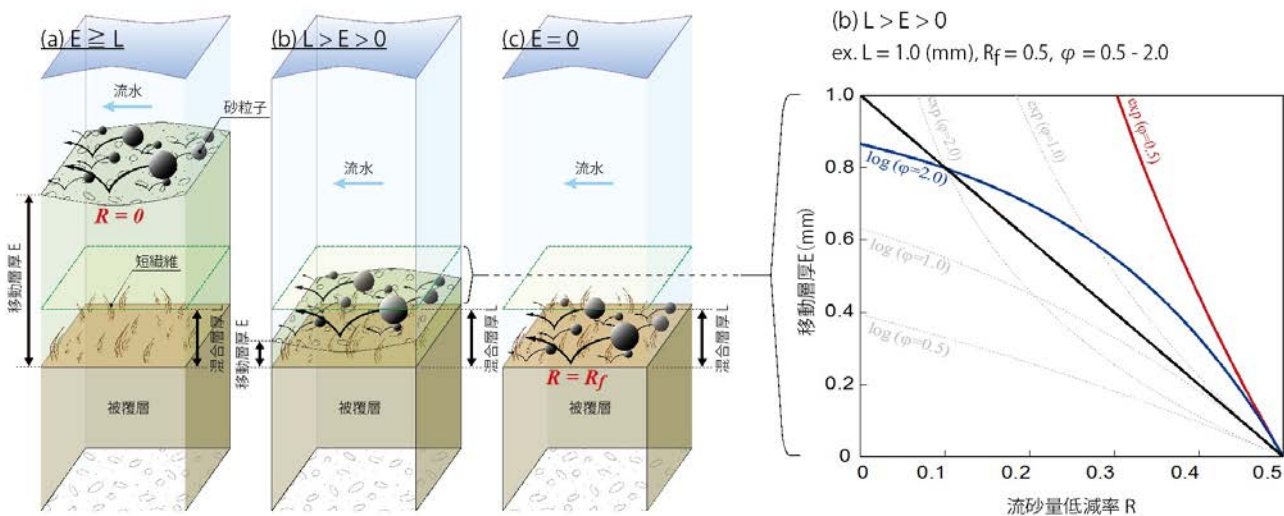


図-4.18 左図：植生被覆モデルの概念図、右図：混合層内における流砂量低減率の鉛直分布 (左図 (b) の場合に適用)

制された被覆層と、砂粒子のみで構成された移動層の状態があり、さらに、被覆層の鉛直上方には被覆層からの影響を強く受けた混合層が存在するものと仮定する。移動層厚  $E$  が混合層厚  $L$  以上の場合 ( $E \geq L$ 、図-4.18 左段 (a))、流水と接する河床面は砂粒子のみで構成された状態にあり、被覆層からの影響は及ばない。 $L > E$  の場合 (図-4.18 左段 (b))、流水と接する河床面には移動層厚に応じた被覆層からの低減効果が間接的に働くものと仮定する。 $E = 0$  の場合 (図-4.18 左段 (c))、流水と接する河床面は短繊維によって砂粒子が緊縛された状態にあるため、流砂量の低減効果が直接的に働く。

ただし、ここでいう混合層は被覆層からの低減効果が及ぶ範囲をイメージした概念であり、その影響範囲 (混合層厚) や、被覆層からの影響がどの様に混合層内に及ぶかを実際に知ることは困難である。実験時の状況を観察すると、河床面から露出した短繊維が掃流砂の移動過程に影響を及ぼす範囲は、被覆層の表面から数ミリ程度の厚さであると推察された。このことから、混合層厚  $L$  には粒径の数倍程度 ( $d$ ,  $2d$ ,  $4d$ ) を与える。

混合層内における流砂量の低減効果は、被覆層からの距離に比例して減衰するものと考えられることから、流砂量低減率  $R$  と移動層厚  $E$  の間にまずは単純な線形分布を仮定し、さらに凹形・凸形の変化を想定した指数形・対数形についても併せて検討を行う。混合層内における流砂量低減率の鉛直分布関数を式 (4.1)、(4.2)、(4.3) に、解析に用いた鉛直分布曲線の一例を図-4.18 右段に示す。なお、図はモデル化の概念図との直感的な対応を意図し、縦軸を移動層厚 (説明変数) として示している。

$$R = R_f \left(1 - \frac{E}{L}\right) \quad (4.1)$$

$$R = R_f \exp\left(-\varphi \frac{E}{L}\right) \quad (4.2)$$

$$R = R_f \left[1 + \frac{1}{\varphi} \ln\left(1 - \frac{E}{L}\right)\right] \quad (4.3)$$

ここに、 $R$  : 混合層内の流砂量低減率、 $R_f$  : 被覆層の流砂量低減率、 $E$  : 移動層厚、 $L$  : 混合層厚、 $\varphi$  : 低減係数である。 $\varphi$  は指数・対数関数の曲線の曲がり具合を表す係数であるが、ここでは混合層内における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。今回  $\varphi = 0.5, 1.0, 2.0$  の解析結果をそれぞれ比較検証した結果、 $\varphi = 0.5$  と式

(4.2)、 $\varphi = 2.0$  と式 (4.3) の組み合わせで高い再現性が得られたことから、次節ではこの両者の解析結果を示す (図-4.18 右段、赤線及び青線)。

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、流砂量式には芦田・道上の式を用いた。短繊維なしの条件下で解析値と計測値の整合性を検証した結果、本解析では両者が最も漸近した下式を採用する。

$$q_b = 9(1 - R)\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (4.4)$$

ここに、 $q_b$  : 流砂量、 $R$  : 混合層内の流砂量低減率、 $\tau_*$  : 無次元掃流力、 $\tau_{*c}$  : 無次元限界掃流力 (岩垣の式)、 $s_g$  : 砂粒の水中比重、 $g$  : 重力加速度、 $d$  : 河床材料の粒径である。

## 2) 実験結果の再現検証

図-4.19 は、CASE1 を対象に行った解析から流砂量・水深・流速の時系列を求め、これに実験結果を重ね合わせたものである。短繊維なしの条件下では、流量条件に関わらず十分な再現性を有することを確認した。

次に、河床材料に短繊維が混入し砂粒子の移動が抑制された条件下での再現性を検証する。解析では、混合層内における流砂量低減率  $R$  の鉛直分布に式 (4.11)~(4.13) を仮定し、前節で示した混合層厚 ( $L = d, 2d, 4d$ ) と低減係数 ( $\varphi = 0.5, 2.0$ ) をそれぞれ与え、被覆層の低減率  $R_f$  を  $0.0 \sim 0.9$  まで  $0.1$  間隔で変化させた際の流砂量の時間変化を求めた。CASE1~CASE8、 $Q = 17.0$  L/s の条件を対象に行った解析結果を図-4.20 に示す。図中、実線は解析値を、各プロットは実験から得られた計測値を示す。なお、実験の通水時間は 1 時間であるが、解析では定常状態を確認するため 3 時間の通水を行った。

低減率  $R$  に「線形」を仮定した場合 (図-4.20 上段)、通水初期に流砂量は急激に上昇、その後  $R_f = 0.0$  の解析結果へと漸近するとそのまま平衡状態に至る、流砂量が平衡状態に達した際の値 (以下、平衡値) や通水初期段階における時間変化はともに実験結果とは一致しない。

低減率  $R$  に「指数形」を仮定した場合 (図-4.20 中段)、 $\varphi = 0.5$  の条件下では、混合層厚に関わらず  $R_f$  の値に準じた平衡状態が保たれている。また、通水初期段階においては流砂量の時間遅れまでもが良好に再現されており、平衡値も実験結果とほぼ一致する。

低減率  $R$  に「対数形」を仮定した場合 (図-4.20 下

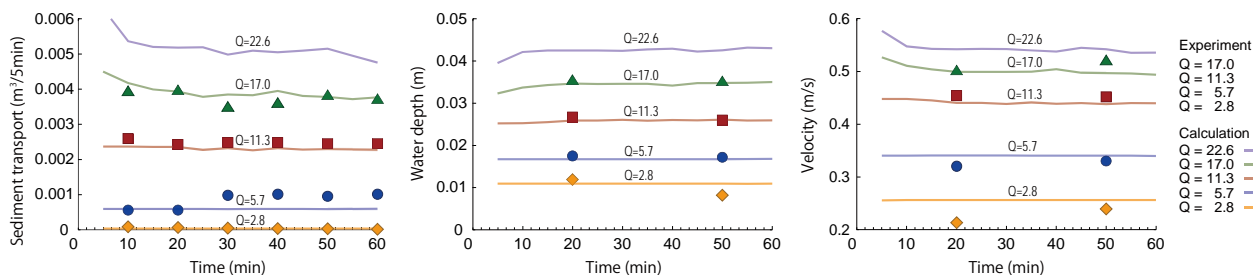


図-4.19 CASE1の計測値と解析値（左から流砂量・水深・流速）

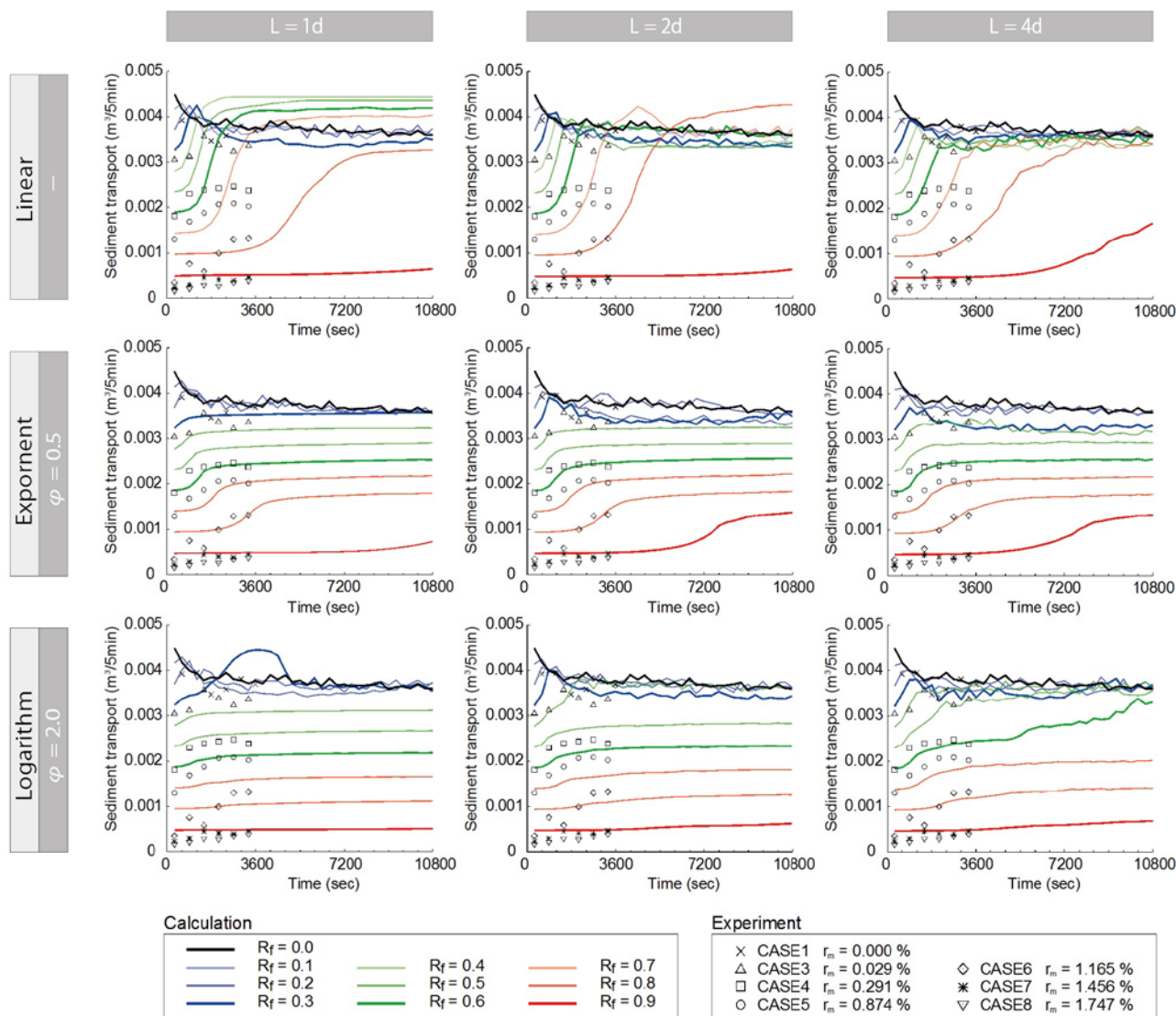


図-4.20 下流端流砂量の時間変化 (Q=17.0(L/s)、流砂量低減率Rの鉛直分布に線形、指数形、対数形を与えた場合)

段)、 $\varphi=2.0$  の条件下では、全体的な傾向は「指数形」 $\varphi=0.5$  の場合と類似し、概ね $R_f$ の値に準じた平衡状態が保たれている。しかし、通水初期段階における流砂量の時間遅れまでは十分に再現されていない。

以上、短繊維混合に伴う流砂量の低減効果は、低減率 $R$ の鉛直分布には指数形の式(4.2)を仮定し、低減係数には $\varphi=0.5$ 程度、混合層厚には $L=d\sim 4d$ 程度

を与えることで、実験結果を良好に再現し得ることがわかった。

### 3) 被覆層の上下流端境界における河床変動特性

次は、上下流に被覆層の有無による面的変化を与えたCASE9・CASE10の実験について、上記モデルを用いた再現検証を行う。この実験は、実河川においては植生域と非植生域との境界付近、すなわち、河床面の被

覆状況が異なる 2 つの領域が隣り合った状態で存在している場合の境界付近で生じる土砂収支の非平衡性が、河道形状に及ぼす影響について、その概略を把握する目的で行ったものである。

図-4.21 上段は実験水路の下流側に短繊維を混合した河床材料を配置し、1 時間通水した後の実測河床高である。コンター図が全体的に赤みを帯びているのは、初期河床高に比べ、実験後の河床高が全体的に上昇したことを示しており、縦断面図に示すように河床高は平均 3~4mm 程度上昇した。これは、上流側から供給された砂粒子が下流側の被覆層を通過する過程で、単繊維による移動抑制効果を受けて停滞するため、解析からも、下流側の河床高の上昇に伴って掃流力が低下し、下流側から上流側へ向かって堆積傾向がもたらされたことがわかった。縦断面図の赤線は河床高の解析結果であるが、再現性は概ね良好であり水路下流側を中心に水路全体が堆積傾向となることが十分再現されている。

図-4.21 下段は、先のケースとは逆に、実験水路の上流側に短繊維を混合した河床材料を配置し、1 時間通水した後の実測河床高である。コンター図が全体的に青みを帯びているのは、初期河床高に比べ、実験後の河床高が全体的に低下したことを示している。特に被覆層との境界から下流側が大きく侵食されており、上流側へもその影響が及んだ様子が見てとれる。縦断面図からは、境界部分が局所的に洗掘され、全体的には下流側へ向かって侵食の程度が大きくなっている。解析からも、まず境界付近から洗掘がはじまり、やがて下流側の河床高が低下、さらにその影響が徐々に上流

側へと及んだことがわかった。縦断面図の赤線で示す河床高の解析結果を見ると、侵食深は実測値に比べやや過大に現れているが、境界付近での局所的な洗掘や全体的な低下傾向は概ね良好に再現されている。

#### 4.3.3 まとめ

本節では、河道内の土砂輸送量を支配する要素として、植生の根系由来の抵抗力に着目し、根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行った。実験では、砂と短繊維の混合率のみを変化させ、河床材料に繊維状の物質が混入した際の流砂量の低減効果を計測した。実験結果から、流砂量は短繊維と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がわかった。

#### 4.4 植生消長モデルの開発

前節では、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。本節では、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<sup>15), 25), 26)</sup>からヤナギの各部位

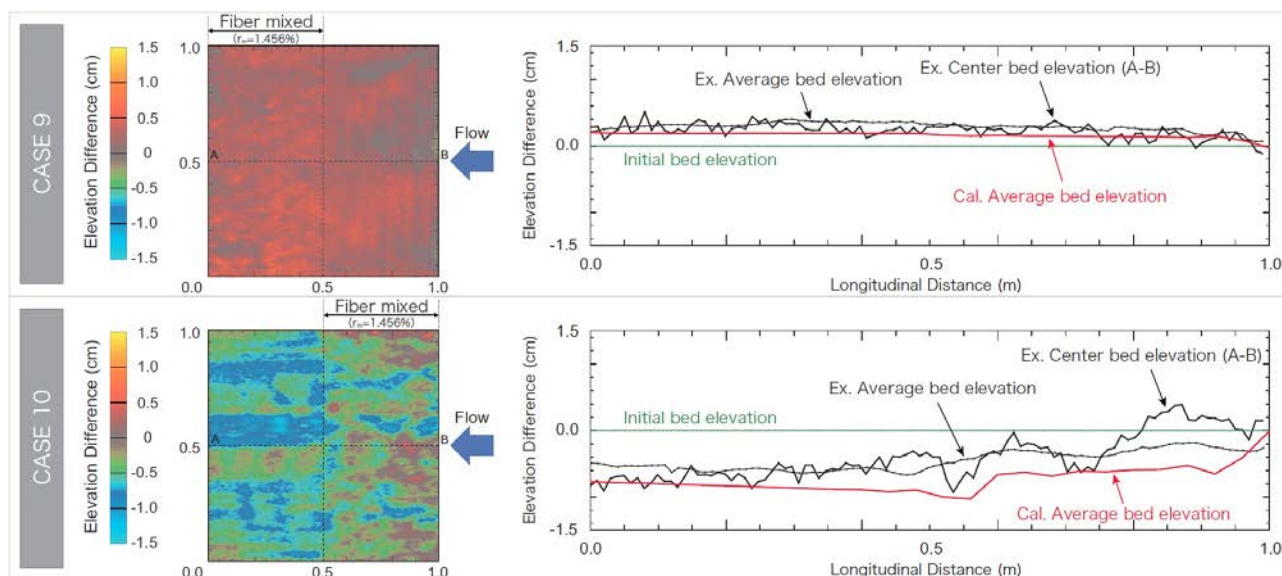


図-4.21 被覆層の有無が上下流で面的に変化する場合の河床変動特性（上段：CASE9，下段：CASE10）

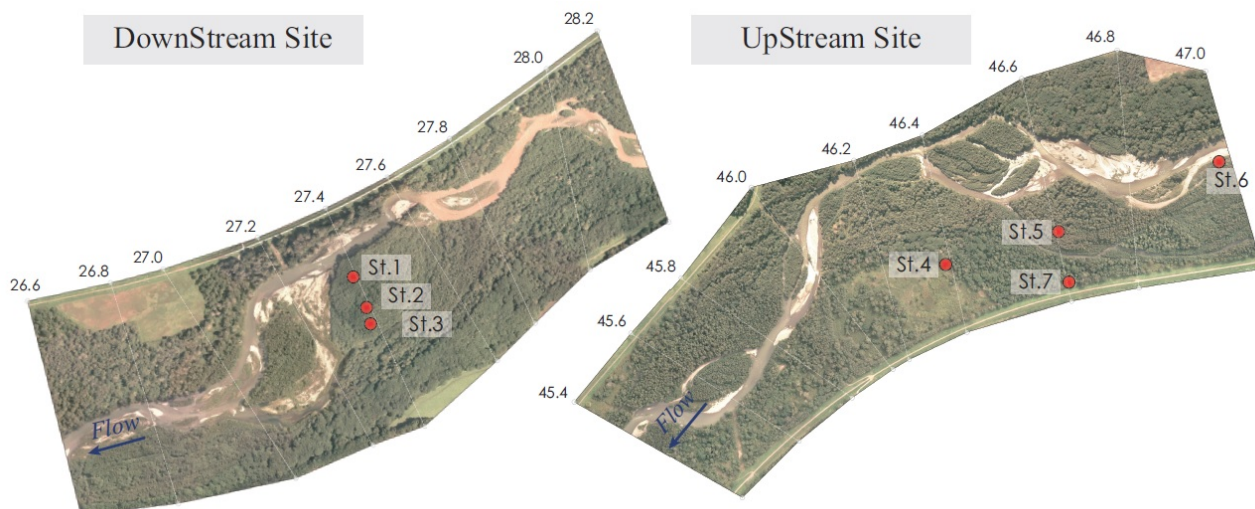


図-4.22 調査区画（立木調査・根量調査：St.1～6，表土剥ぎ調査：St.7）

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。

#### 4.4.1 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を 6 箇所（図-4.22 の St.1～6）で、また、水平方向への空間的広がりを見るための表土剥ぎ調査を 1 箇所（図-4.22 の St.7）で実施し、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 St.1～6 で併せて行った。根量調査及び立木調査では、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、かつ成立年が異なる樹林帯を選定し、10m 四方の調査区画を現地に設定した。

#### 4.4.2 根系調査

##### 1) 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-4.23 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

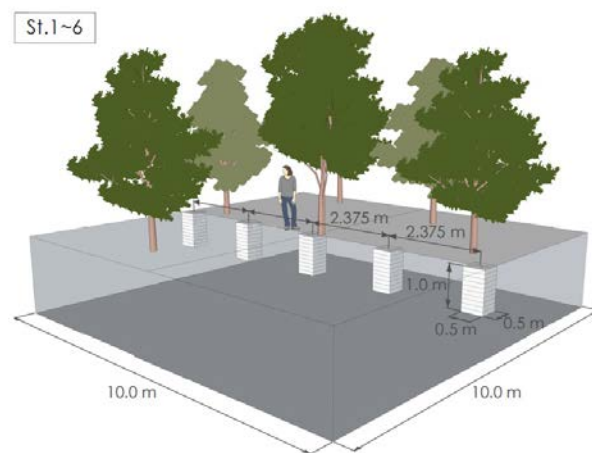


図-4.23 根量調査（50cm 四方，1 区画 5 箇所）

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-4.24 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、樹齢に関らず多くの箇所、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。

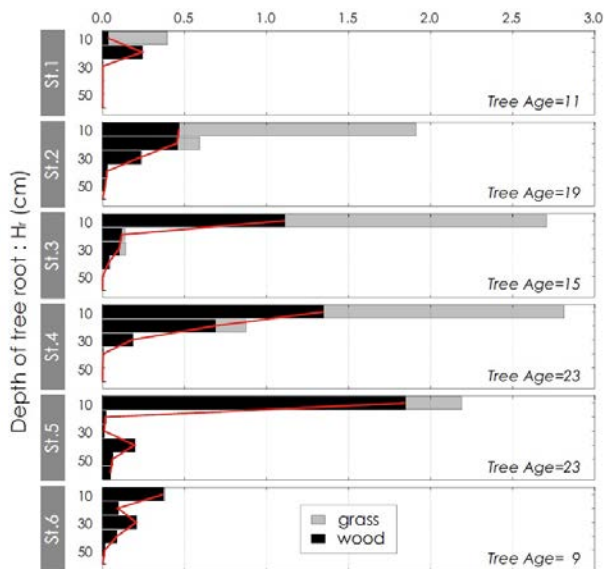


図-4.24 根系含有率の鉛直分布

## 2) 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、土壤内に広がる根系の位置を乱さぬよう、深さ 20cm 以下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。図-4.25 に調査の状況写真を、図-4.26 に露出させた根系の面的な広がりを模式図で示した。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。

## 3) 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、土壤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。

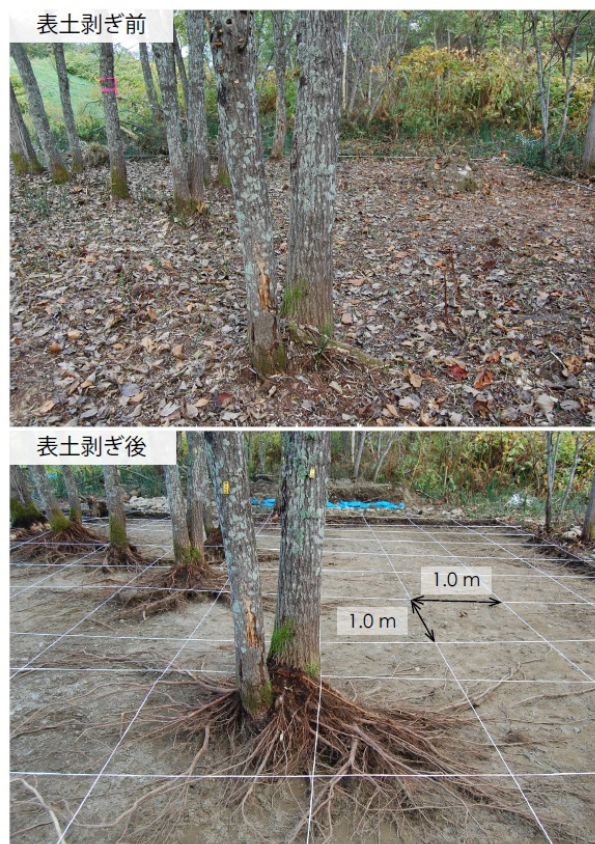


図-4.25 表土剥ぎ調査 (St.7, 札内川 KP46.6, 10m 四方)

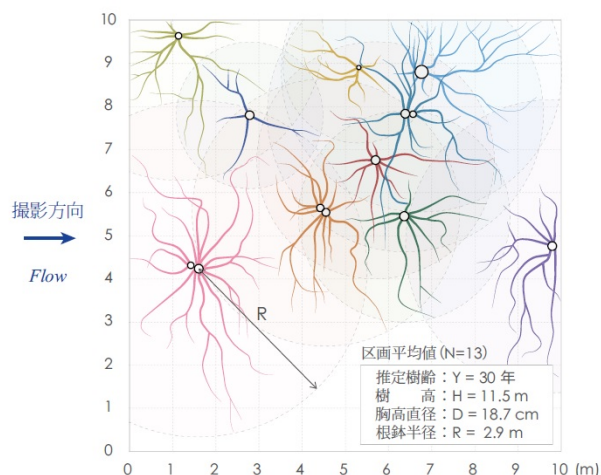


図-4.26 根系の平面分布 (表層 20cm, 10m 四方)

## 4.4.3 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。調査の結果、確認された計 174 本の樹木の中には、落葉高木のケヤマハンノキや、ノリウツギ、エゾニワトコといった低層木も僅かに見られたが、エゾヤナギ、オノエヤナギ、オオバヤナギ、ケショウヤナギなど計 8 種のヤナギが全体の約 97%を占めるなど、札内川上流域の現況河畔林はヤナギが極度に優占した単一林に近い樹種構成にあるものと推察された。このことから、樹齢、重量、材密度等に関する調査は、St. 1~6 の各調査区画内において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<sup>27)</sup>。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苅住の調査結果(25%)<sup>27)</sup>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。

#### 4.4.4 植生生長モデル

樹木が有するこのような特性をもとに、ヤナギの樹齢から各部位の生長量を推定する生長式を求めため、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-4.27 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<sup>15), 25), 26)</sup>を整理したものである。図中青点は、札内川を対象とした上述の立木調査結果であるが、他流域で観測された過去のデータとも概ね整合する結果が得られている。

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 ( $R=0.9\sim 1.0$ )、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 ( $R=0.6\sim 0.7$ )、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。ヤナギの生長式を式 (4.5) に、各変数と係数の組合せを表-4.3 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<sup>28), 29), 30)</sup>は、カワヤナギ、ニセアカシア、ネムノキに関しても同様の関係が見られること示している。地下部の乾燥重量と膝高直径に関する浅枝らの調査結果を図中 eq. 3 に例示する。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的な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。現地調査結果をもとにしたこれら 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-4.28 に示し、以降では

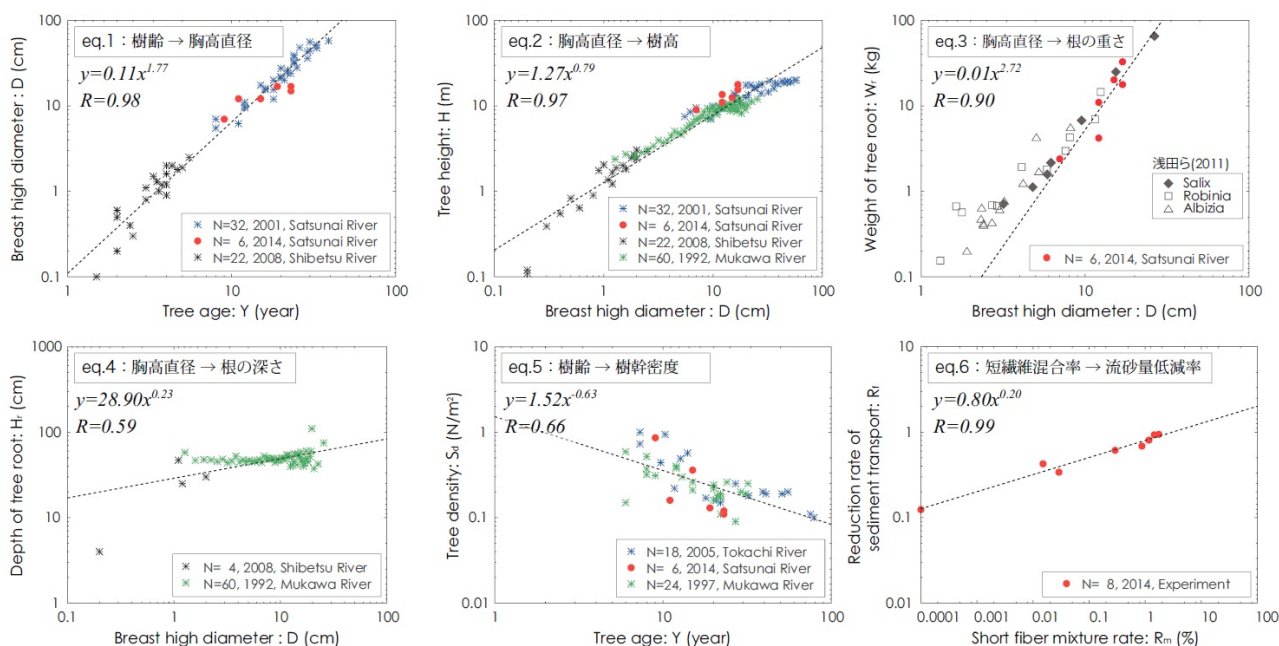


図-4.27 eq. 1~5: 立木調査結果, eq. 6: 植生被覆効果に関する実験結果

「植生生長モデル」と呼ぶこととする。

$$y = ax^b \quad (4.5)$$

なお、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 (4.6) より算定する。

$$R_r = \frac{W_r S_d}{(1 - \lambda)\rho_t H_r S_r^2} \quad (4.6)$$

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

表-4.3 ヤナギの生長係数

	x	y	a	b	R <sup>2</sup>
eq.1	樹齢 (Y)	胸高直径 (D)	0.11	1.77	0.98
eq.2	胸高直径 (D)	樹高 (H)	1.27	0.79	0.97
eq.3	胸高直径 (D)	根の乾燥重量 (W <sub>r</sub> )	0.01	2.72	0.90
eq.4	胸高直径 (D)	根の深さ (H <sub>r</sub> )	28.9	0.23	0.59
eq.5	樹齢 (Y)	樹幹密度 (S <sub>d</sub> )	1.52	-0.63	0.66
eq.6	短繊維混合率 (R <sub>m</sub> )	流砂量低減率 (R <sub>f</sub> )	0.80	0.20	0.99

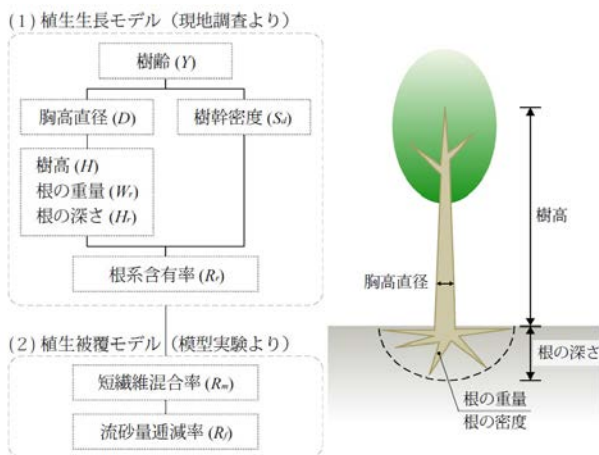


図-4.28 植生生長・被覆モデル

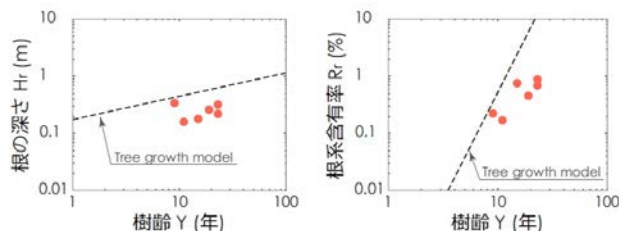


図-4.29 根茎の生長量の推定値と実測値

図-4.29 は樹木の生長に応じて変化する根の深さと根系含有率を表しており、点線は上記モデルによる推定値、赤点は St.1~6 の各調査区画内で計測された実

測値である。実測値は推定値に比べると全体的に低く出ているが、これは、根系調査では根の密度が極端に高くなる根株近傍を避け、樹幹から最低 1m 以上離れた位置で計測を行っているため、図-4.26 に示したように、根系分布の平面的な偏りがデータに現れたものと考えられる。

#### 4.4.5 植生被覆モデル

前節では、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た。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に応じて変化することや、短繊維混合率 $R_m$ と流砂量低減率 $R_f$ の関係は、ヤナギの生長式と同様にべき関数を用いて表されることがわかった (図-4.27 : eq.6)。なお、図-4.18 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、前節で示したように、数値解析を用いてその再現性が検証されており [32]、以降では、これを「植生被覆モデル」と呼ぶ。

本節では、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する ( $R_r = R_m$ )。河床変動量の算定は、単一粒径のもと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 (4.7) を用いる。流砂量低減率は、図-4.18 に示す通り、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 (4.8) から算定する。

$$\frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 17(1 - R)\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} R = 0 & E \geq L \\ R = R_f \exp\left(-\phi \frac{E}{L}\right) & L \geq E > 0 \\ R = R_f & E = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

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、 $\tau_*$ は無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ 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、 $\phi$ 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。また、混合層厚  $L$  には粒径の数倍程度 ( $2d$ ) を与える。

以上、本節では、ヤナギの各部位の生長量を推定す

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

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（図-4.28）。

4.4.6 植生消長モデル

本節で行う解析は、平面 2 次元河床変動解析モデルの「Nays2D Ver4.0」<sup>17)</sup>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、河道変化と植生の地上部と地下部に働く抵抗（図-4.30）と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、植生成長モデルから推定された樹高、胸高直径、樹幹密度などをもとに、式（4.9）を用いて算定する。

$$\begin{cases} \frac{F_x}{\rho} = \frac{1}{2} C_d S_d D h u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \frac{F_y}{\rho} = \frac{1}{2} C_d S_d D h v \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (4.9)$$

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）、 $\rho$ 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。

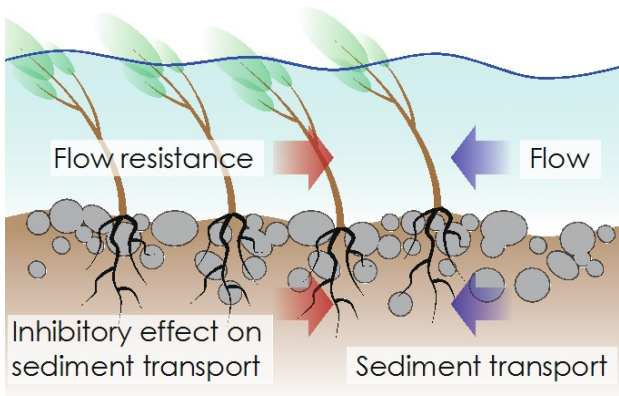


図-4.30 植生の地上部と地下部に働く抵抗力（模式図）

1) 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（150m<sup>3</sup>/s）、後者を CASE2（300m<sup>3</sup>/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（30m<sup>3</sup>/s）を加えた計 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-4.31 に示す

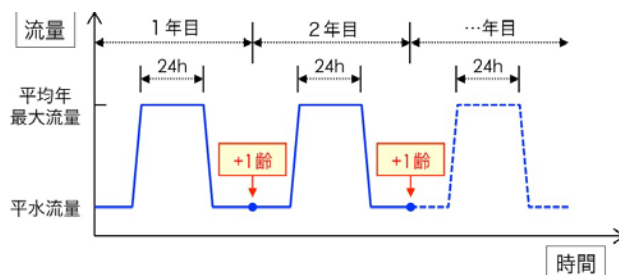


図-4.31 流量ハイドロパターン（繰返計算）

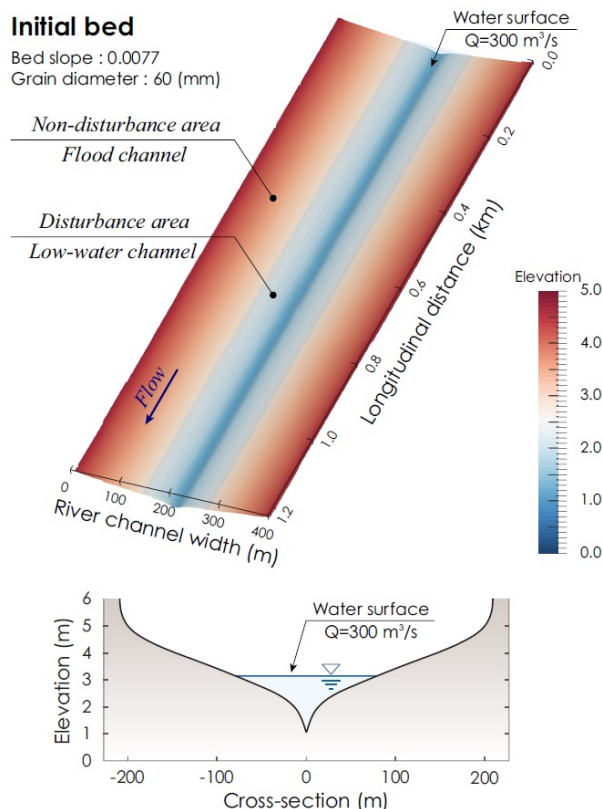


図-4.32 初期河道

（札内川上流域、1974 年の流域平均断面）

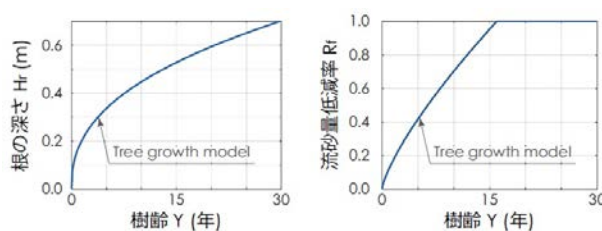


図-4.33 植生の生長に伴う計算条件の変化

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-4.32) を与えた。この形状は、複雑な形状を有する横断面を極力単純化するために、4.2.2 で説明した  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  の平均年最大流量を流した際の低水路河岸高を基準に、標高 0.1m 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、さらにこれらを縦断方向に平均して算出したものである。また、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)。なお、図-4.33 に示すように、樹齢 17 年を超える樹林帯では、根系がもたらす砂粒子の移動抑制効果によって、被覆層からの土砂流出が無くなるため ( $R_f=1$ )、植生の流出は側岸侵食によってのみ生じることとなる。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、本解析では、植生の流出条件として上記 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。

#### 4.4.7 植生動態解析

計算結果を図-4.34 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

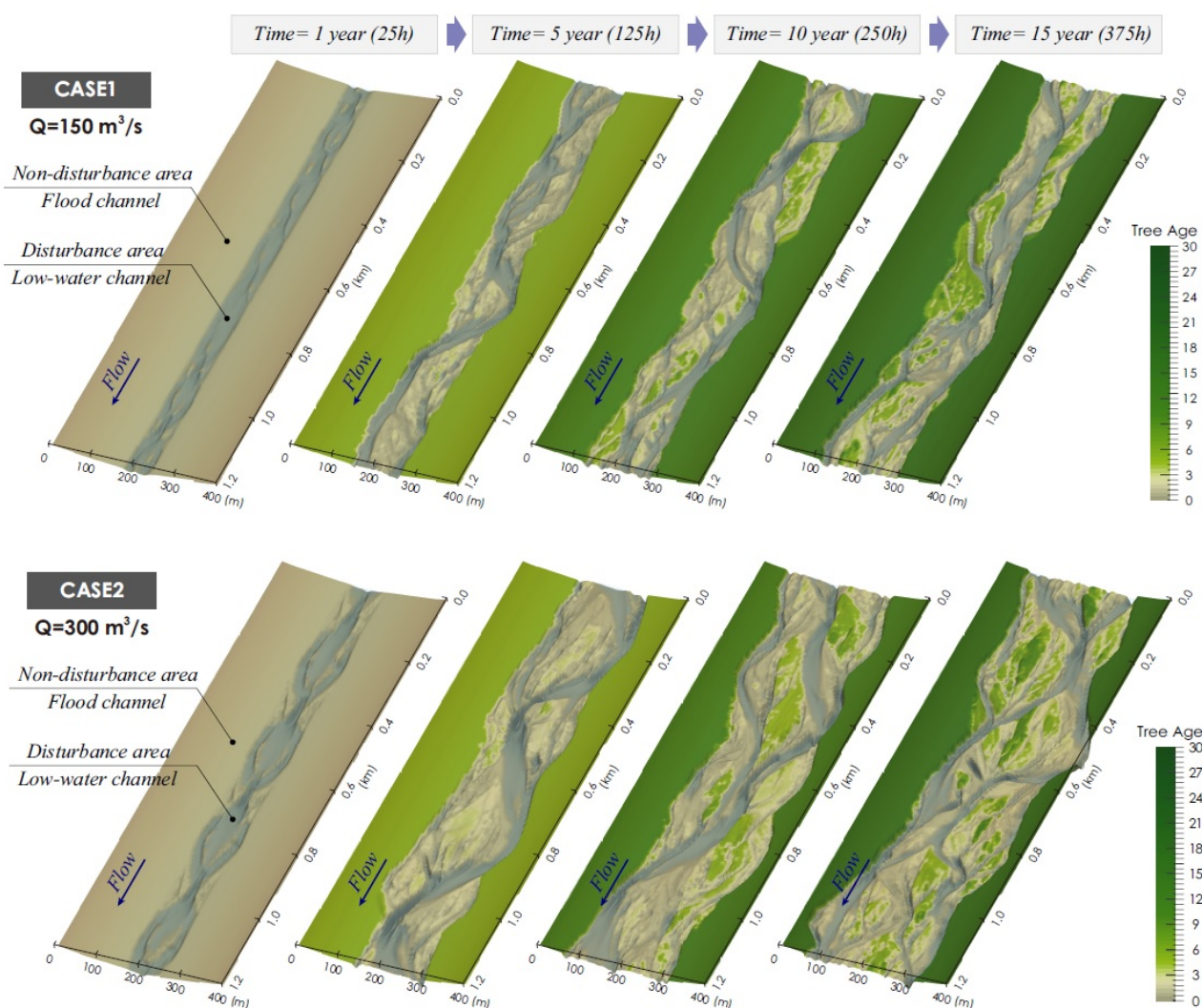


図-4.34 植生動態解析結果 (上段 : CASE1  $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ , 下段 : CASE2  $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ )

の増加を意味する。なお、計算の結果、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がわかっており(図-4.35)、ここではその前後期間を含めた15年間の結果を示す。河道と植生域の変遷過程を見ると、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。以降では、河床攪乱や冠水によって、計算期間内に一度でも植生の流出・消失が生じた領域を「攪乱領域」、それ以外の領域を「非攪乱領域」と呼ぶ。

河道内における土地被覆状況の変化を図-4.35に示す。本節では、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、攪乱領域における植生域の樹齢構成を表-4.4に示す3つの状態に分類した。なお、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。解析結果を見ると、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。

### 1) 札内川上流域における樹林化要因の分析

航空写真の画像解析から得られた札内川上流域の土地被覆状況の変遷は既に図-4.9に示したとおりである。既述の通り、図中点線は、1947~2011年までの過去65年間に見られた河畔林の長期変動傾向を示しており、Stage1~3に分類した各期間には増加・減少・平衡の3つの状態のいずれかで表される一貫した傾向が見られる。各ステージにおける代表的な河道状況を図-4.36に示す。ここで特に注目すべき点は、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年代頃を境に徐々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とで

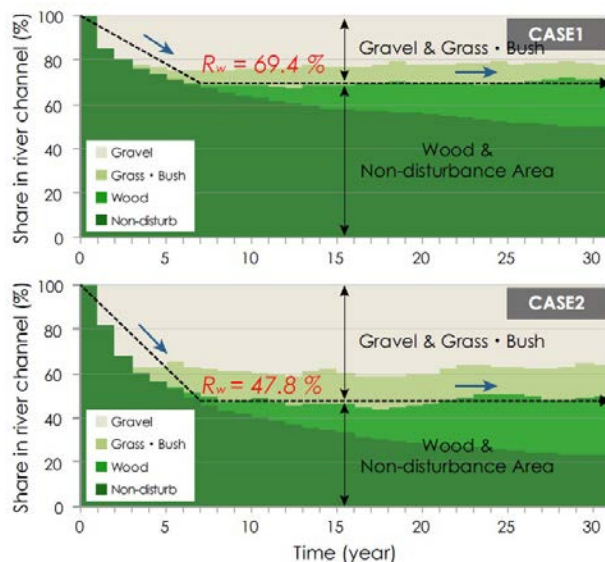


図-4.35 河畔林の河道内占有率の経年変化(計算結果)

表-4.4 土地被覆分類の定義

土地被覆分類	樹 齢	樹 高
礫河原	0 齢 ~ 2 齢	0.0 ~ 0.2 m
草地・低木林	2 齢 ~ 4 齢	0.2 ~ 1.0 m
河畔林	4 齢以上	1.0 m 以上

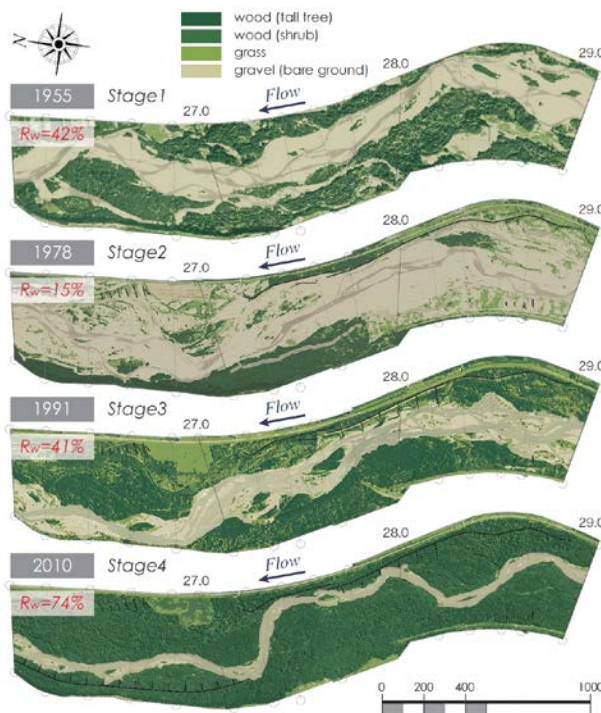


図-4.36 河道内植生域の変遷 (KP26.0~29.0)

ある。現地で観測されたこの2つの平衡状態は、前節で示した植生動態の解析結果と概ね一致することから、Stage3に見られる樹林化、すなわち河畔林の河道内占有率の増加は、Stage1に見られる40%程度の平衡状態

が、1990年代に生じた融雪出水規模の低下によって、Stage3 後に見られる 75%程度の新たな平衡状態へと遷移したものと考えられる。

## 2) 河畔林の樹齢構成

植生動態解析から得られた河畔林の樹齢構成の変化を図-4.37 に示す。図は、攪乱領域における河畔林の河道内占有率を樹齢毎に整理したもので、上段から下段に向かって解析結果を 10 年間隔で示している。図-4.34 に示すように、河道内に形成された多列状の流路は分岐合流を繰り返しながらその位置や形態を年々複雑に変化させるため、主流路の湾曲部外岸側で生じる側岸侵食とそれに伴う植生流出は、主流路の位置が変化するとともに河道内を縦横に移動しながら徐々に低水路内全域へと広がっていく。このため、河畔林は樹齢を重ねるほどその生存率は低下することとなり、図-4.37 に示すように樹齢構成は右肩下がりの線形を成す。

また、CASE1 では草本や樹齢 10 年以下の稚樹が河道内に占める割合が低く、河道内占有率は CASE2 に比べると比較的緩やかに通減している。これは、洪水流量規模の低下によって河床の攪乱強度が低下すると、河道内における植生域の更新が抑制され、世代交代が緩やかに進行することを示しており、CASE1 は CASE2 に比べ、河畔林の樹齢構成はやや硬直的であると言える。なお、ここで言う稚樹とは樹高 0.3m 以上で胸高直径 5cm 未満の樹木を指す。

### 4.4.8 まとめ

本節では、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 (150m<sup>3</sup>/s) と CASE2 (300m<sup>3</sup>/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。

## 4.5 第 4 章の結論

以上、本章では河川環境が劇的に変化した札内川を対象に、過去の水理水文量、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。その結果、1947~2011 年までの過去 65 年間の河畔林の変遷過程には、増加・減少・平衡の 3 つの状態のいずれかで表される明瞭なトレンドが存在し、1960 年代以前の比較的的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 (Stage1) を維持していた。しかし、1997 年以降の洪水規模やその発生頻度の大幅な減少により、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たことで、近年は  $R_w=75\%$  程度の新たな平衡状態に遷移したことがわかった。

また、河道内の土砂輸送量を支配する要素として、植生の根系由来の抵抗力に着目し、根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行った結果、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

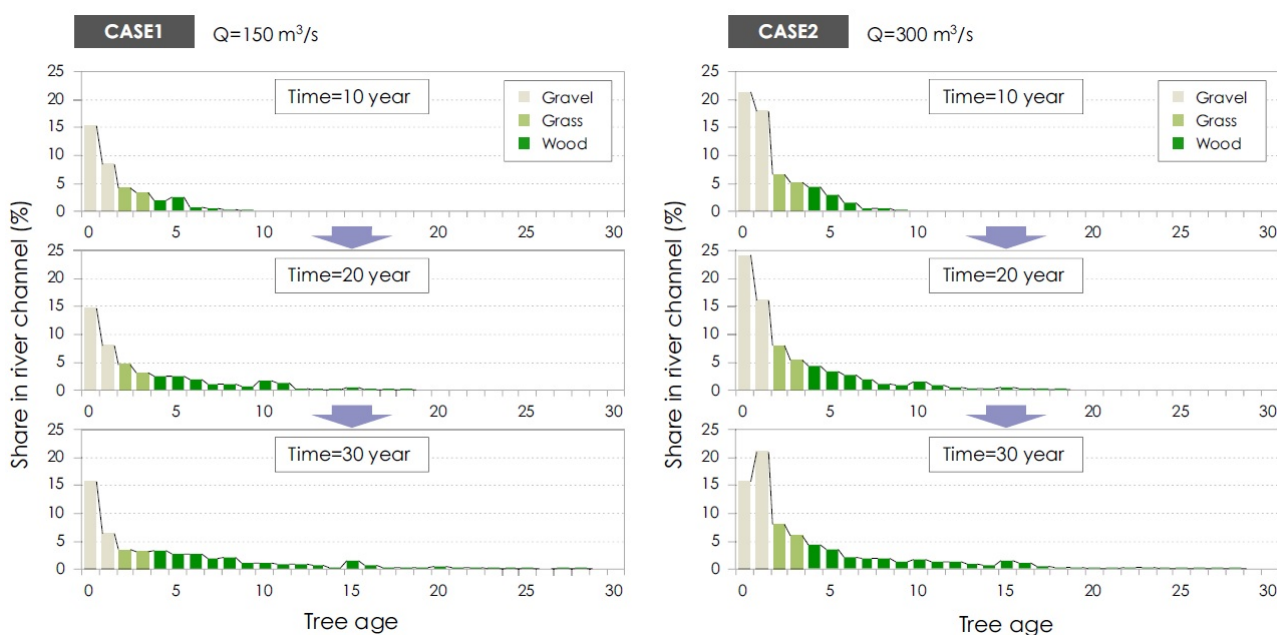


図-4.37 河畔林の樹齢構成の変化 (左図: CASE1, 右図: CASE2)

## 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

流砂量式を用いることで、繊維物質の混入に伴う砂粒子の移動抑制効果を良好に再現できることがわかった。

さらに、現地調査結果をもとにした植生成長モデルと、実験結果をもとにした植生被覆モデルを既存の平面 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。その結果、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、河床攪乱強度の低下が、稚樹段階における植生生育基盤の破壊を抑制し、植生の定着と生長を促進することで、樹林化がもたらされることがわかった。解析では、河畔林の河道内占有率  $R_w$  は、洪水流量  $300\text{m}^3/\text{s}$  では  $R_w=50\%$  程度、洪水流量  $150\text{m}^3/\text{s}$  では  $R_w=70\%$  程度の平衡状態に達することから、河畔林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することがわかった。また、この結果は、札内川で実際に観測された 2 つの平衡状態 (Stage1 : 40%・Stage3 後 : 75%) と概ね一致することから、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おり、札内川で 1980 年代以降に見られた樹林化は、洪水流量規模の低下によって、河畔林の河道内占有率が新たな平衡状態へと遷移したものである可能性が示唆された。

### 参考文献

- 1) 多自然型川づくりレビュー委員会：多自然川づくりへの展開 (これからの川づくりの目指すべき方向性と推進のための施策)、2006 年 5 月。  
[http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/past\\_shinngikai/s\\_hinngikai/nature-review/060531-teigen.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/s_hinngikai/nature-review/060531-teigen.pdf)
- 2) 国土交通省河川局：多自然川づくり基本指針、2006 年 10 月、<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/05/051013/02.pdf>
- 3) 多自然川づくり研究会：多自然川づくりポイントブック、2007 年 3 月
- 4) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について、2008 年 3 月、
- 5) 多自然川づくり研究会：多自然川づくりポイントブック II、2008 年 8 月
- 6) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について、2010 年 8 月、  
<http://www.mlit.go.jp/river/kankyo/main/kankyou/tashizen/pdf/gijyutsukijyun.pdf>
- 7) 多自然川づくり研究会：多自然川づくりポイントブック III、2011 年 10 月

- 8) 北海道開発局：多自然川づくりの取り組みに関する研究について ―これまでの整備と今後の展望―、第 50 回 (平成 18 年度) 北海道開発局技術研究発表会、2007 年 2 月
- 9) 北海道開発局：多自然川づくりの取り組みに関する研究について ―これまでの整備と今後の展望―、第 51 回 (平成 19 年度) 北海道開発局技術研究発表会、2008 年 2 月
- 10) 北海道開発局：多自然川づくりの取り組みに関する研究について ―これまでの整備と今後の展望―、第 52 回 (平成 20 年度) 北海道開発局技術研究発表会、2009 年 2 月
- 11) 国土交通省河川局：第 1 回「多自然型川づくり」レビュー委員会 資料-2、p.2、2005 年 9 月、  
[http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/past\\_shinngikai/s\\_hinngikai/nature-review/1st-shiryuu02.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/s_hinngikai/nature-review/1st-shiryuu02.pdf)
- 12) 国土交通省河川局：美しい山河を守る災害復旧基本方針、p.120、2014 年 3 月、  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/bousai/saigai/measures-saigai/pdf/10.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/measures-saigai/pdf/10.pdf)
- 13) 例えば、H25 全国多自然川づくり会議 発表事例概要：高知県、  
<http://www.mlit.go.jp/river/kankyo/main/kankyou/tashizen/pdf/30.pdf>
- 14) 戸田祐嗣：河川の樹林化原因に関する諸説のレビュー、土木学会 水工学委員会 環境水理部会研究集会 2014 in 岐阜、2014 年 5 月、  
[http://www.jsce.or.jp/committee/hydraulic/kankyosuiiri/\\_workshop/h26/docs/1/1-1.pdf](http://www.jsce.or.jp/committee/hydraulic/kankyosuiiri/_workshop/h26/docs/1/1-1.pdf)
- 15) 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.
- 16) 清水康行、渡邊康玄、鳥谷部寿人：直線および蛇行河川の安定河床形状に関する研究、土木学会論文集、No.509、pp.67-78、1995.
- 17) iRIC プロジェクト：<http://i-ric.org/ja/>
- 18) 木下良作、三輪式：砂レキ堆の位置が安定化する流路形状、新砂防、Vol.94、pp.12-17、1974.
- 19) 池田駿介：単列交互砂州の波長と波高、水理講演会論文集、No.27、pp.689-695、1983.
- 20) 北海道開発局帯広開発建設部：札内川技術検討会資料、  
[http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/kakusyu/satsunai\\_kentoukai/](http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/kakusyu/satsunai_kentoukai/)
- 21) 関根正人、鍋島康大：植生の根系と葉系が降雨による斜面浸食過程に及ぼす影響、水工学論文集、54、pp.655-660、



2010.

- 22) 服部敦：植生の抵抗特性ならびに粘性土の耐侵食性の評価とその河道設計技術への応用に関する研究、早稲田大学博士論文、1991.
- 23) 堀智之、山口智世、前田健一：短繊維補強斜面の流動抑制効果、地盤工学研究発表会発表講演集、45(1)、pp.511-512、2010.
- 24) 堀智之、山口智世、前田健一：粒子回転に着目した短繊維補強土の強度発現メカニズム、理論応用力学講演会講演論文集、59、pp.305-306、2010.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 荻住昇：新装版樹木根系図説 Illustrations of Tree Roots、誠文堂新光社、1979.
- 28) 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、水工学論文集、第55巻、pp.1369-1374、2011.
- 29) 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.
- 30) 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.

## STUDY ON EROSION RESISTANCE AND EROSION MECHANISMS OF RIVERBANKS, AND FUNCTIONAL ASSESMENT OF ECO-FRIENDLY RIVERBANK PROTECTION WORKS FOR RIVERS IN COLD, SNOWY REGIONS

**Budget :** Grants for operating expenses

General account

**Research Period :** FY2011-2015

**Research Team :** River Engineering Research Team

**Author :** FUNAKI Jungo

MAEDA Shunichi

KAWAMURA Satomi

**Abstract:** To properly assess the effectiveness of eco-friendly riverbank protection works in terms of environmental conservation and restoration, and to maintain the effectiveness of such riverbank protection works, it is necessary to verify the appropriateness of the selection of work types and layout plans for river facilities based on the appropriate prediction of mid- to long-term changes in river channel morphology and in vegetation. In this study, follow-up surveys were done for eco-friendly riverbank protection works and the sustainability of riverbank protection functions was examined with regard to mid- to long-term changes in channel forms and riparian vegetation. Some cases were found in which the works did not maintain their initially expected effectiveness as eco-friendly protection works, and other cases were found in which dense riparian trees were reducing the river discharge capacity. To address the above problems, the authors categorized the problems that related to the mid- to long-term changes in river channel morphology and riparian vegetation, and drafted a list of important considerations necessary for the planning and design of eco-friendly riverbank protection works.

To clarify the characteristics of riverbank erosion, the authors did the following: 1) clarified the riverbank erosion mechanism behind the development of meandering channels, and 2) developed a numerical riverbed evolution analysis model that considers the effect of vegetation cover in riverbank protection and the variation in vegetation growth. For item #1 above, the authors found that the development of meandering on the Otofuke River, which resulted in the failure of the riverbank during a flood, was first triggered by the development of point bars, which had formed because of the effect of the bend form. The meandering progressed in the process of downstream-ward propagation of meandering wave forms, which caused bank erosion. For item #2 above, the authors calculated the vegetation dynamics on the Satsunai River by using the numerical model. The model closely reproduced the vegetation dynamics. The analysis also found that reduction in the annual largest-scale flood discharge had a dominant influence on the combined area of gravel dry riverbed maintained in the river channel.

**Key words:** riverbank protection works, changes in river channel morphology, development of meanders, variation in the growth of vegetation, numerical analysis