

## 15.5 河道形成機構の解明と流木による橋梁閉鎖対策等への応用に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地河川チーム、寒地技術推進室

研究担当者：赤堀 良介、村上 泰啓、永多 朋紀、唐澤 圭、  
佐藤 徳人、野村 栄正

### 【要旨】

急流河川の多い日本では、洪水時にしばしば大量の流木が発生し、被害を拡大させる要因になっている。流木は降雨によって山地崩壊や河岸決壊が発生することによって河道に流出し、河道を流下しながら橋梁などの河道内構造物に集積して河道を閉塞させるなどの被害をもたらす。また、海域まで流下した流木は漁業被害や航行被害を引き起こすため、流木が被害をおよぼす前に捕捉・処理することは河川管理および河道設計において重要な事柄のひとつである。本研究では、橋脚周辺の流木集積機構の解明を目的として橋梁周辺における流木の挙動監視調査を行った結果、出水時に水位がピークに達する前の洪水初期に最も流木の流下量が多くなる傾向を把握した。また、河畔林の流木補足機能に着目し、実験水路において河畔林粗密および河畔林設置個所の違いによる流木流下実験を行った結果、粗密の比較では河畔林が密な場合に最も流木堆積傾向が強まるが、河畔林設置位置の違いからは、植生が流れ場に及ぼす渦度の分布の変化が流木の集中箇所に影響を与えることが確認された。また流木の流下機構や治水計画に大きく影響を与える河道の形成機構に関し、対策の遅れている中小河川を有する谷底平野の地形的な成り立ちと、近年問題化している流路固定を引き起こす水みちの形成に着目し、それぞれ地形情報に対する 2 重フーリエ解析や室内実験を用いて検討を行った。この結果、谷底平野の地形が、谷全体に広がる大規模な出水と通常の出水の両者の影響を受けて形成されていること、水みちの形成にあたっては、洪水減水期のハイドログラフの形状が大きく影響することが確認された。

キーワード：流木、挙動監視、砂州、堆積、水路実験、PTV、谷底地形、流路形成、水みち

### 1. はじめに

河川区域には多くの樹木が存在している。これら樹木は、これまで洪水の流下を阻害し、流木化して洪水被害を拡大させるなどとして治水上問題視されてきたが、近年では生態的機能、景観的機能の有効性からその存在意義が見直されている。また、河畔林による流木の捕捉機能や、超過洪水対応としての水防林など、治水上の機能の有効性も示唆されている<sup>1)</sup>。

洪水時の流木被害については、

- ・橋梁などの河道内構造物に堆積することにより河道を閉塞させ、流下能力の低減を招く。
- ・氾濫水と一緒に流下し被害を拡大させる。
- ・河床に堆積して舟運の妨げになる。
- ・海域まで流下し漁業、舟運の障害となる。

などがあげられる。図-15.5.1 は胆振日高地方で 2003 年 9 月に起きた洪水で沙流川ダムに流入し集積した流木の様子である。この時発生した記録的な豪雨により、沙流川ダムでは通常 1 年間に処理する流木の 50 倍に相当する約 5 万 m<sup>3</sup> もの流木が貯水池内に滞留した。また、

ダム上流域では多くの橋梁が被災した<sup>2)</sup>。図-15.5.2 は 2003 年 9 月洪水後の沙流川の支川額平川の貫気別橋の被災状況である。多量の流木が集積し、橋脚が傾倒していることが解る。このような事例から、流木の流下を抑制することは、洪水被害の軽減に大きく寄与することが期待できる。

洪水後の河道内には大量の流木が堆積している。ダムや橋梁などの構造物に堆積したものは収集処分されるが、砂州や高水敷上、低水路内に堆積したものは放置されるのがほとんどである。流木化した樹木の多くは、過去洪水で発生したものが再流木化したものであるという報告<sup>1)</sup>もあることから、この放置されている流木を撤去することで流木被害を軽減することができると考えられる。また、河口域まで流下し塩分を含んだ流木はチップ等に再利用することができず、焼却するにもダイオキシンが発生してしまうため、処分がより困難になるという報告もある<sup>1)</sup>。よって下流まで流下する前に捕捉することも重要である。

以上のように、適切な流木管理を行うためには、ま

ず洪水時の流木の挙動や構造物周辺および砂州・高水敷上への流木堆積状況を把握することが重要である。本研究では、橋脚への流木集積機構を解明することを目的に、橋脚に監視カメラを設置し、出水時の橋脚周辺への流木集積状況の調査を行った。また、流木を効率よく処理するためには、堆積箇所を特定することが必要である。そこで、砂州や高水敷上に堆積した流木に着目し、流木を捕捉しやすい河道形状や植生分布について検討した。

また、流木災害と水災害に対する効率的対策を考慮する際には、流木の挙動に大きく影響を与える河道の成り立ちについて、その形成機構を把握する必要がある。たとえば、近年多発する局地的な豪雨により日本の各地の谷底平地内を流れる河川で狭い谷底面全体を水没させるような状況が各地で起こっている。谷底平地を流れる中小河川の多くは、治水計画が大河川と比較して遅れている。そのため治水対策、減災対策（土地利用対策など）を効果的に推進するためにも、地形形成のプロセスやメカニズムを明確にすることが求められる。

さらに流木の発生と堆積に大きく影響を与える河道内の樹林化については、水みちと砂州や高水敷との比高差が生じることにより進行することが示されているが<sup>1)</sup>、その要因となる水みちの形成過程そのものに関しては未解明な部分が多い。この点に関し、災害の対策にあたっては現象の詳細な把握が必須である。このような問題に対し、本研究では、厚別川の流れる谷底平野の地形に着目し、2重フーリエ解析などを行うことで、河道を形成してきた要因を探り、洪水時に潜在的な危険性を有する箇所に関して検討を行った。また洪水ピークからの減水期のハイドログラフを水理実験により複数パターンで模擬することで、水みちの固定化が進行する状況の把握を試みた。

以上より、本研究の目的を以下にまとめる。

1) 流木の発生・流下・堆積のメカニズムを把握し、河道内構造物のあり方や堆積防止策などの河道内構造物の管理手法を検討する。また、河畔林の流失防止・河畔林による流木捕捉など、流木災害対策のための河畔林のあり方について検討する。特に、積雪寒冷地における河畔林立地の特性を考慮して、河畔林の流木化の機構解明と防止策案の検討を行う。以上を踏まえて、現地への適用性を検討する。



図-15.5.1 2003年8月沙流川出水時の二風谷ダム



図-15.5.2 2003年8月沙流川出水時における額平川貫気別橋

2) 既往の土砂水理学の知見を用いて、地形的成因や潜在的な水害の危険性などの研究を行い、現在の地形の成り立ちと洪水時におけるその地形の特性を把握する手法を検討する。

## 2. 橋梁周辺における流木の挙動監視調査

### 2.1 調査概要

観測地点は、橋脚に集積する流木の映像を効率よく収録するため、中小規模河川で橋脚が河道中央部に位置しており、過去の洪水で流木集積の実績がある箇所とした。調査はH17～H19 鶴川水系パンケシュル川更生橋、H19～H21 沙流川平和橋、H21～H22 尻別川留産橋、H22 額平川のアブシトエナイ橋で行った。現地観測機器は、パンケシュル川更生橋、沙流川平和橋、尻別川留産橋の観測において、図-15.5.3 に示す現地観測基地（監視カメラ、投光器、流速センサー、水位計）と遠隔監視用の札幌基地を、インターネットを介してネ

ットワーク化している。これらの機器で得られた情報はウェブ上で配信され、随時状況確認および遠隔による操作が可能であり、出水時には遅滞なく対応できるようなシステムとなっている。アブシトエナイ橋に関しては商用電源の確保が困難であるなど、同システムの構築が困難であったため、スタンドアロンの運用が可能で可搬型の観測システムを新たに構築した。その際の機器の配置図を図-15.5.4 に示す。これは、金属製の架台に監視カメラ、夜間撮影用の投光器、非接触型流速計を配置したものであり、機器類は車両内に設置された移動基地に接続され、観測情報の集積を行う。また、後述する2010年8月の出水に関しては、可搬型システムの準備期間であったため、便宜的に民生品のビデオカメラを利用した機器配置で観測を行った。

## 2.2 調査結果

出水時の流木流下状況については、監視カメラで撮影された画像から目視により流下する流木本数を観測した。H18年度の結果に関しては既往論文)に詳細を示す。

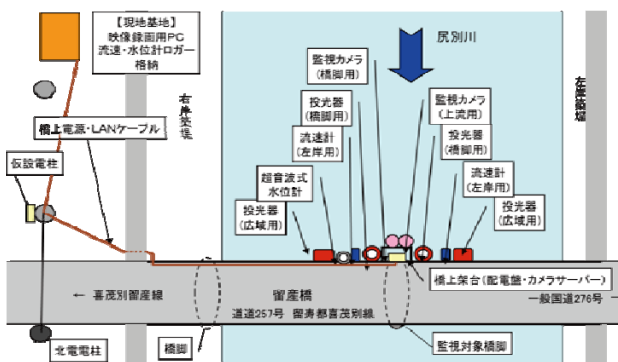


図-15.5.3 尻別川留産橋におけるインターネット型常時観測システムの機器設置状況

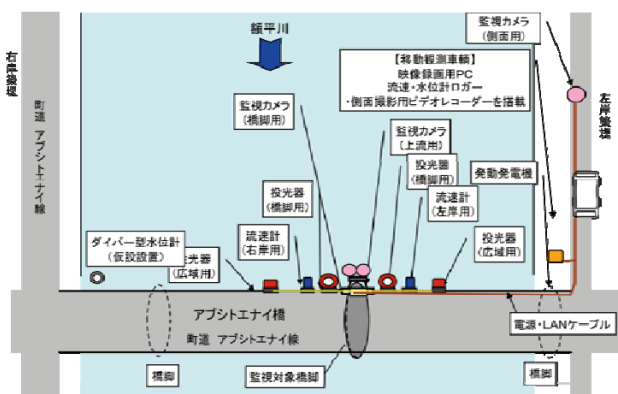


図-15.5.4 額平川アブシトエナイ橋における簡易型観測システムの機器設置状況

H19年9月出水の沙流川平和橋における流木流下本数と水位の経時変化を図-15.5.5 に示す。監視カメラは各調査地点に2台設置されているが、撮影範囲の違いなどにより、観察できる流木の数に違いが見られる。今回はより多くの流木を観察できた監視カメラの結果を示した。当地点の水位はH19年9月16日9時にピークを示したが、流木流下本数のピークはその前のH19年9月16日5時にきていることがわかる。これは、他の調査でも同様の傾向を示している<sup>3)</sup>。H19年5月のパンケシュル川更生橋の融雪出水時においても、水位がH19年5月2日16時にピークを示しているが、流木流下本数はその前のH19年5月2日13時に最も多くなっている(図-15.5.6)。

H20年度は大きな出水が無く、良好な観測結果を得ることができなかった。

H21年度に関しては、平和橋観測地点において7月19日22時をピークとする出水が確認されている。この際、対象橋梁で若干の流木の集積があったことが確認されたことから、監視カメラによるモニタリングを重ねて、現地での流木集積状況の調査を8月10日に実施した。集積した流木は、最大のもので長さ12.2m、樹径0.45mの根がついていない倒木で梢を右岸側に向け、橋脚の上流端を支点としてバランスを取った状態で引っかかり、このほかの集積流木は長さ1mから5m程度、樹径0.1m内外のものが橋脚部分に集積していた。表-15.5.1に現地での計測結果を示し、図-15.5.7に集積流木の概略のレイアウトを示した。図に示す①の流木は平成22年3月22日まで確認されており、観測期間中、大きな出水が無かったこともあるが、8か月以上もの長期にわたり、流木が橋脚部に残存する可能性を示した。出水時の流木流下数については、監視カメラで撮影された画像から目視により流下する流木の本数、長さ、位置などを計測した。H21年7月出水の沙流川平和橋における流木流下本数と水位の経時変化を図-15.5.8に示す。当地点の水位はH21年7月20日0時前後にピークを示したが、流木流下本数のピークはその数時間前に到達していることがわかる。このことから、流木は洪水初期に最も多く発生する傾向があると考えられる。これらの流木は、河岸周辺に堆積していたものが水位上昇に伴って洪水初期に再移動したものと考えられる。

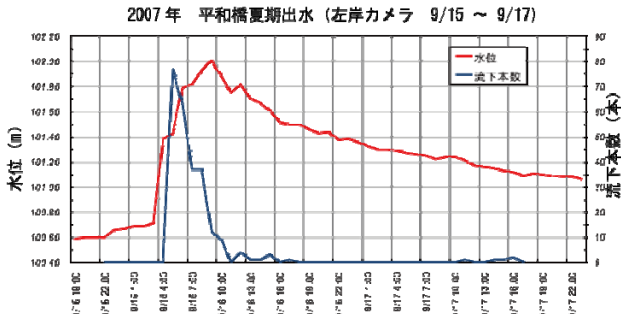


図-15.5.5 2007年9月出水時の平和橋における水位変化及び流木流下数変化

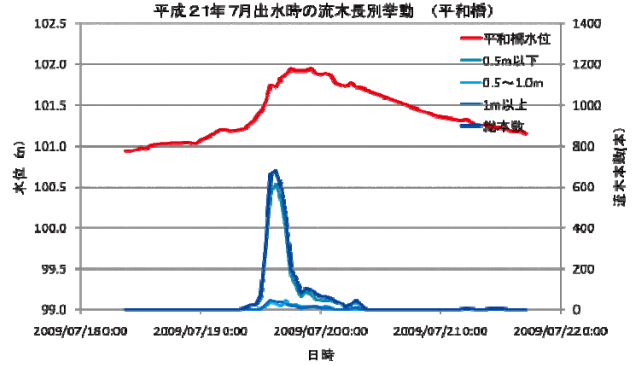


図-15.5.8 2009年7月出水時の平和橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

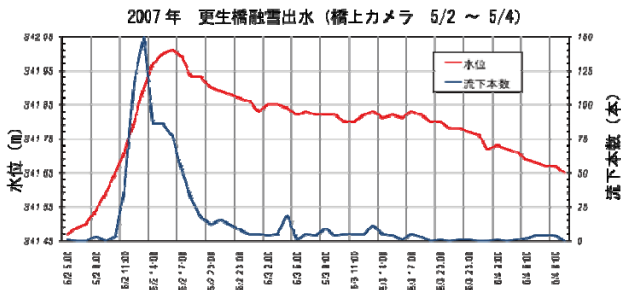


図-15.5.6 2007年5月出水時の更生橋における水位変化及び流木流下数変化

表-15.5.1 2009年7月出水時の平和橋観測地点における橋脚への流木集積状況

No.	位置	流木長	胸高周囲長	樹径	備考
①	ピア前面水平	12.2	1.20	0.45	根無倒木
②	ピア左岸側	4.7	0.33	0.11	根無倒木
③	ピア左岸側	3.5	0.12	0.04	根無倒木
④	ピア右岸側	1.3	-	0.04	根無倒木
⑤	ピア右岸側	1.6	-	0.10	根付き
⑥	ピア右岸側	1.4	-	0.02	折枝

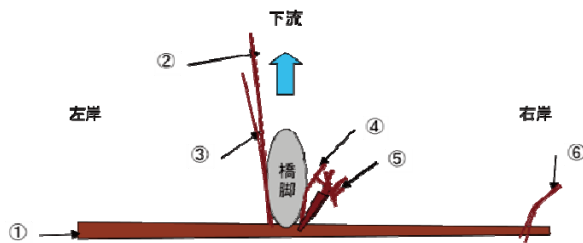


図-15.5.7 2009年7月出水時の平和橋観測地点における橋脚への流木集積状況略図

H22年度に関して、図-15.5.9と図-15.5.10は、留産橋観測地点での8月と12月の観測時における流木流下数の時間帯による変化を示したもの、図-15.5.11と図-15.5.12はアブシトエナイ橋観測地点での8月と9月の観測時における流木流下数変化を示したものである。図-15.5.11に関してはハンディのビデオカメラによる緊急の撮影のため十分な照明が用意出来ず、夜間の撮影範囲が昼間のものとは大きく異なった。このため、ここでは昼間部の結果のみ示している。これらの結果のうち、図-15.5.9、図-15.5.10、図-15.5.11は水防団待機水位以上の出水時のものであるのに対し図-15.5.12は平水時と水位が大きく変化していない状況での結果となる。図-15.5.9と図-15.5.11の結果に関しては、水位のピークが到達する以前に流木流下数のピークが生じていることが確認された。また図-15.5.10では流下数のピークは水位のピークの到達にわずかに遅れるが、水位ピーク到達以前に、期間中の流木数の大半が既に流下しているという点ではこれまでの結果と同様の傾向を示している、しかしながら、例えば図-15.5.9において、0.5-1.0mの長さを有する流木が先に流下数ピークを迎え、1.0-5.0mの長さを有する流木のピークがその後を追うといった傾向が見られるのに対し、図-15.5.10では12月3日18:00から21:00の間にどちらの長さの流木も急激に最大値を迎えるといった相違が見られる。河道内流木の再移動に関しては、その浮遊限界や移動限界が流木の直径と水深に依存すると考えられ<sup>4)</sup>、移動限界の低い小型の流木が水位の上昇に応じて先行して移動すると考えられるが、図-15.5.10内のピーク時間帯の傾向はそれとは異なり、単純な河道内の流木の再移動とは異なる現象が発生していたことが推測される（なお目視による観測では、斜面崩壊による流木化のような大規模な生産が生じた様子は見られなかった）。例えば、12月の出

水では数年に一度の頻度でしか冠水しない箇所からの流木の再移動等があったと考えられることから、洪水履歴の影響等も考慮の必要があると考えられる<sup>5)</sup>。

### 3. 流木の堆積と河道形状に関する模型実験

#### 3.1 砂州および高水敷の形状と流木捕捉の関連に対する検討

##### 3.1.1 実験概要

砂州や高水敷による流木の捕捉に着目し、実験水路による流木流下模型実験を行った。実験は砂州の縦横断勾配を変化させ、通水後砂州上に堆積した流木の状況を観察した。

実験水路は延長50m、水路幅0.9mの直線水路である。河道形状は複断面とし、線形は蛇行河川の平均的な形状であるサインカーブとした。波長は当実験水路を使用して行った砂州形成実験で得られている安定した交互砂州の平均的な波長である6mとした。また、低水路法面は2割とし、砂州上および低水路底面は木材を使用し、法面はモルタルを使用して制作した。

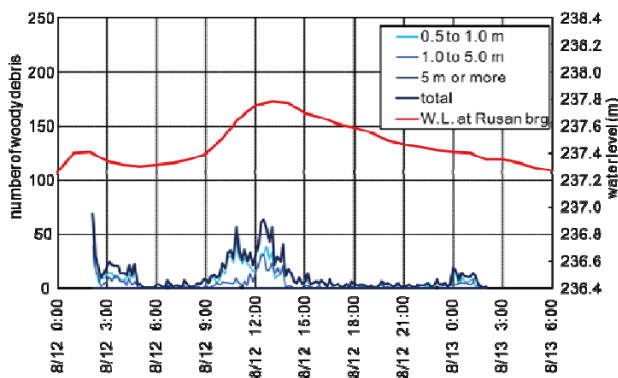


図-15.5.9 2010年8月出水時の留産橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

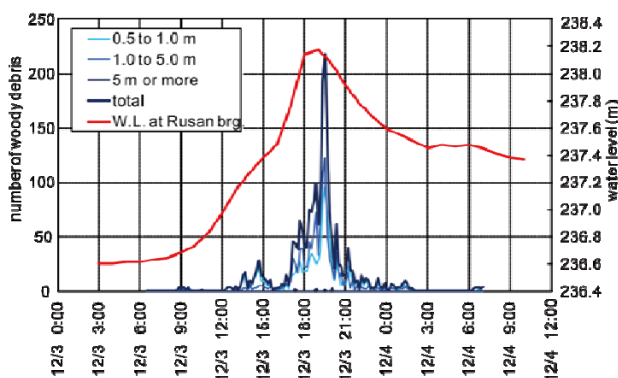


図-15.5.10 2010年12月出水時の留産橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

流下させる流木の模型は比重が約0.9の材料を使用し、長さ40mm、φ1mmに整形したものを実験対象砂州の上流から1本/秒の間隔で投入した。

実験ケースは4ケースとし(表-15.5.2)、主に砂州の縦断勾配に着目して設定した。砂州の上流側1/4の区間については上流から流下してくる流木が砂州上に乗上げる部分となるため、各ケース同条件とした。Case 1は砂州全体の縦断勾配を河床勾配と同勾配とし、Case 2は下流側3/4の区間をレベルとした。さらに、Case 3は下流側を1/200の逆勾配としている。また、Case 4は横断勾配ももたせている。実験に用いたヒドログラフを図-15.5.12に示す。砂州や高水敷上に流木が堆積するのは水位が減衰していく過程であることから洪水後半の流況を再現して実験を行った。

##### 3.1.2 実験結果

図-15.5.13に流木流下実験の結果を示す。河床コンター図に通水後砂州上に堆積した流木の位置を図示している。流木は、砂州上に散乱して堆積したものと、砂州と低水路の境界となる低水路肩の部分である水際部への集積に分けられる。

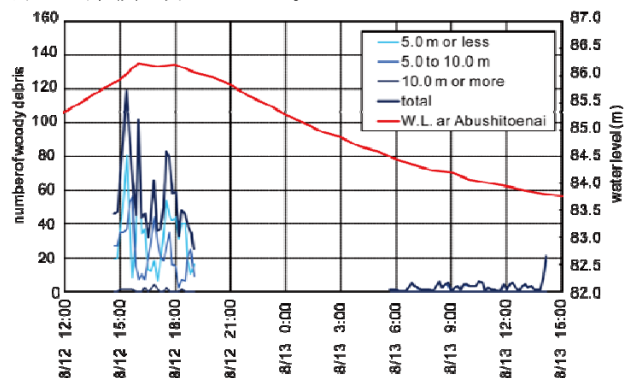


図-15.5.11 2010年8月出水時のアブシトエナイ橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

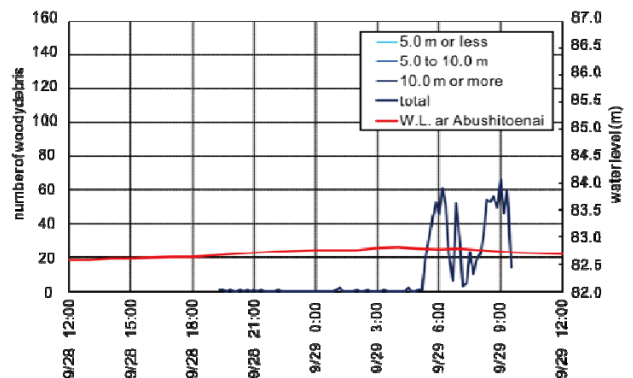


図-15.5.11 2010年9月出水時のアブシトエナイ橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

表-15.5.2 ケースごとの改造状況

case	河床勾配	砂州形状		備考
		縦断勾配	横断勾配	
1	1/80	1/80		砂州縦断勾配と河床勾配を同勾配とする
2		上流側1/4	1/80	流木が侵入する砂州の上流側1/4を順勾配、堆積する下流側3/4をLevelとする
		下流側3/4	Level	
3		上流側1/4	1/80	流木が侵入する砂州の上流側1/4を順勾配、堆積する下流側3/4を逆勾配とする
	下流側3/4	-1/200		
4		1/80	1/80	砂州縦断勾配と河床勾配を同勾配とし、横断勾配をつける。

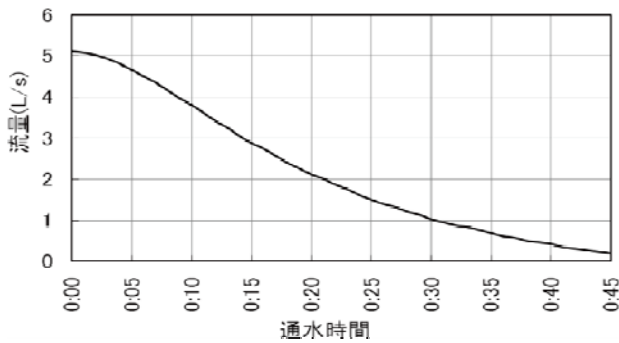


図-15.5.12 実験時流入流量ハイドログラフ

Case 1 では砂州縦断勾配を河床勾配と同勾配としているが、砂州全体に流木が散乱していることが解る。また、Case 2 の下流側を level にした場合、上流側で若干砂州上での散乱が見られるが多くは水際部に集積している。全体の流木堆積本数は今回のケース中最も多かった。Case 3 の下流側を逆勾配とした場合、砂州上での堆積は見られず砂州中央部から上流の水際部のみの集積となった。この3ケースの実験結果は、流木が砂州上に乗り上げる上流側 1/4 区間の勾配を同勾配としており、これら流木の堆積状況の相違は下流側の砂州縦断勾配の影響であると言える。順勾配である Case 1 では、砂州の下流まで流水があるのに対し、Case 2、Case 3 のように level、逆勾配となると砂州上へ進入した流水が早く低水路に戻ろうとするため、水際および上流側での堆積となったことが伺える。今後、さらに詳細な解析を行いこれらの現象の解明が必要である。また、Case 4 の横断勾配をもたせた場合には、上流側でのみ堆積した。これは低水路方向に横断勾配を持たせることで砂州から低水路への流水の戻りが促進されたことによると推察できる。

### 3.2 河畔林植生密度と流木捕捉関連の関連性に対する検討

#### 3.2.1 実験概要

流木流下実験は、砂州形成実験で形成した河道(固定化)を使用し、河畔林の樹林密度の違いによる流木堆積を比較する目的で行った。

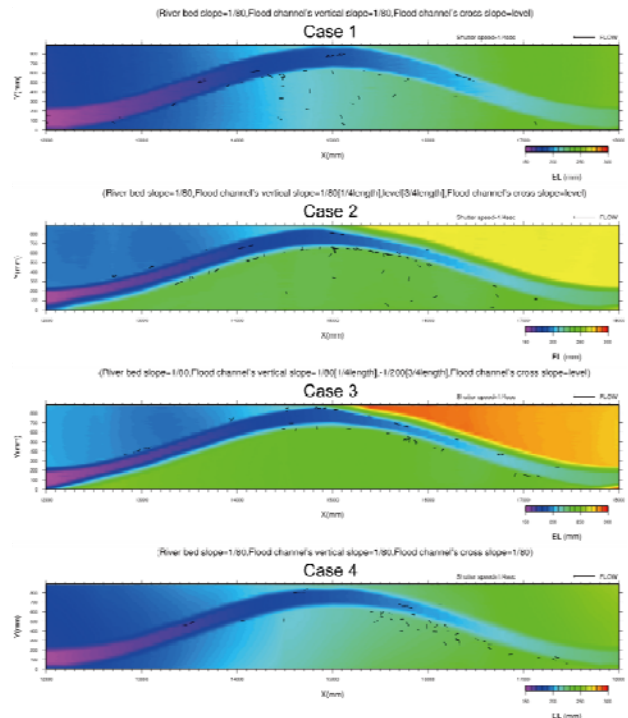


図-15.5.13 実験結果：高水敷勾配の差による流木捕捉状況の違い

実験水路は延長 50m、水路幅 0.9m の直線水路である。砂州形成実験と同様に時間～流量～バルブの関係から、スルースバルブを開閉し 1 分間隔で流量制御を行った。砂州形成実験で形成された河床に河畔林を設置し流木実験河道を製作した。

流木長や河畔林密度は、平成 15 年 8 月台風 10 号災害の厚別川流域での調査結果から、比重が約 0.9 の材料を使用し、長さ 40mm、φ1mm に整形したものを用いた。

調査河川の河道形状および実験水路形状から縮尺を 1/125 と想定し、実際の流木長は調査結果が 5～10m であったことから、実験水路形状を勘案し 40mm とした。河畔林密度は調査結果から 1 本/8.3m<sup>2</sup> であり、流木長を勘案し樹林間隔を 24mm とした。樹林間隔 24mm を密な河畔林とし、流木長より広い樹林間隔 48mm を疎な河畔林、および河畔林がない場合の 3 ケースで実験を行った。河畔林は太さ 2mm の針金により必要量製作し固定した河床に穴を開け設置した。併せて、流木判読の視認性を高くするため河床を墨汁により塗装した。流木実験ハイドロは、流木が河岸に堆積する現象を見るため、先行する砂州形成実験で用いた減水期ハイドロ Case 1 (図-15.5.14) を適用した。砂州や河畔林での流木が堆積する過程を把握するため、60 本/分の間隔で流木を流芯から投入し、ビデオカメラを用いて対象とする砂州 1 波長で流木流下状況を撮影した。

### 3. 2. 2 実験結果

図-15. 5. 15 に流木流下実験の流木堆積状況を示す。図の上から河畔林なし、河畔林有(密)、河畔林有(粗)の流木の集積状況を示す。流下本数に占める堆積本数の割合は以下の通りである。

- ・河畔林なし : 6 / 2700 本 (0.2%)
- ・河畔林(密) : 342 / 2700 本 (12.7%)
- ・河畔林(疎) : 28 / 2700 本 (1.0%)

河畔林なしの場合、流木は全量砂州上を通過してしまう。河畔林(密)の場合、通水開始時から上流側で捕捉する。また上流側河畔林を通過した場合でも砂州上を流下し下流側河畔林で捕捉されていた。河畔林(疎)の場合、河畔林(密)と同様の傾向であったが、下流側河畔林を通過する量も多かった。

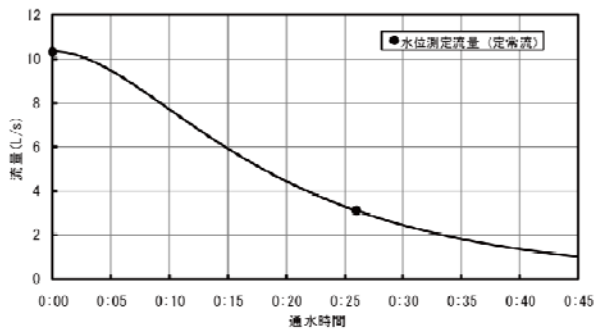


図-15. 5. 14 実験時減水期ハイドログラフ

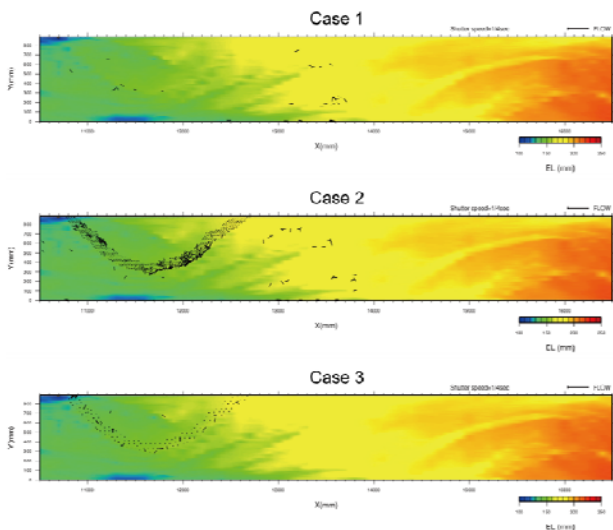


図-15. 5. 15 実験結果：河畔林植生密度の違いによる流木捕捉状況の差（上：河畔林なし、中：河畔林植生密、下：河畔林植生粗）

### 3. 3 河道内の流れ場の構造と流木集積機構の関連に対する検討

#### 3. 3. 1 実験概要

実験水路は可傾斜台上に設置された、長さ 30m、幅 1m の直線水路である。まず準備として河床に粒径 0.76mm の砂を敷き詰めて蛇行した低水路を事前に形成した。この水路に低水路満杯流量での予備通水（単列砂州の形成を目的とし既往実験の値を参照し、直線部勾配 1/150 に設定）によって河床に砂州を形成させた。この河床表面をセメントにより硬化させ固定床とし、本実験を行った。低水路からの初期河岸高は 15mm、低水路幅は 0.35m とし、平面形状に関しては波長 6m、振幅 0.5m の sin-curve としている。またいくつかのケースにおいて、高水敷の低水路前縁に直径 1mm の模擬植生を 24mm 間隔で千鳥状に設置した（表-15. 5. 3）。植生帯の横断方向幅は 0.16m 程度である。この際ケースごとに植生の設置位置を変えており、前縁全体にわたり植生を設置するケース（case2-1、case2-2）、上流側のみ設置するケース（case3-1）、下流側のみ設置するケース（case4-1）としている。計測範囲は下流端から 12.7m - 15.7m の半波長の範囲とし、レーザー砂面計による河床高と水面高の測定、および後述する流況撮影を行った。なお撮影範囲は計測範囲の上下流に 0.5m ほど余裕を持たせている。図-15. 5. 16 に予備通水後の測定範囲に置ける河床形状を示す。流況および流木流下状況の解析には PTV<sup>6)</sup> を用いた。水面流況を代表させる追跡粒子としては直径 3mm の発泡スチロール球を用い、流木の模型としては直径 1mm の木材を 40mm の長さで切り揃えた物を用いた。粒子と流木模型は観測区間の直上流からランダムに散布した。

実験は計 16 ケースを行った。ここでは Froude 数の大きいケース (Fr: 約 0.8、直線水路全体の傾き: 1/230) の水量等の設定を表-15. 5. 3 に示す。流量が最小のときに低水路満杯となり、最大の時に高水敷上に 10mm 程度越流する。

PTV 解析には市販のアプリケーション (Ditect 社製、Dipp-Flow) を用いており、解析アルゴリズムとしては 2 値化相関解析を用いた。

#### 3. 3. 2 実験結果

図-15. 5. 17 は各ケースの流速の合成成分の絶対値をコンター図としたもの、図-15. 5. 18 は流木が通過する際の濃度（単位面積あたりの流木本数の移動平均）に関し、各時刻ごとデータが存在する領域のみ積算し、アンサンブル平均としたもの）を示したものである。

表-15.5.3 実験ケース

Case No.	Vegetation	Discharge (l/s)
1-1	Non	2.50
1-2	Non	1.88
1-3	Non	1.33
2-1	Full	2.50
2-2	Full	1.88
3-1	Upper-half	2.50
4-1	Lower-half	2.50

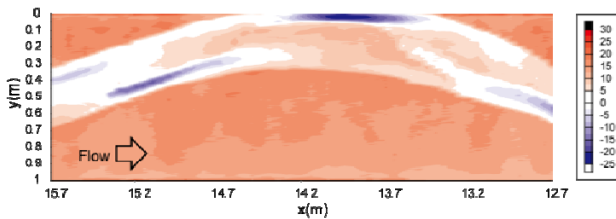


図-15.5.16 予備通水後の河床形状（計測区間の抜粋）

実験時の流下状況を目視する限りでは、流木は流速が最大となる領域をトレースするように集中しているよう見受けられたが、図-15.5.17 と図-15.5.18 の比較では、厳密には両者は一致しないことが分かる。ここで、平均流速の分布から得られた渦度の分布を図-15.5.19 に示す。この図-15.5.18 と図-15.5.19 の比較から、流木の濃度が高い領域は、渦度の大きい領域と排他的に存在しており、流木はせん断の強い領域を避けるように流路内で集中化していることが推測される。実際に、上流側の植生のために高水敷で一層の流速低下が生じ、主流域と強いせん断が生じている Case2-1 では、前縁上流部の植生による水刎ねの影響を受けない領域でも流木が低水路内に集中することで高水敷上にほとんど流下しておらず、流木の捕捉を目的とした植生の存在が、却って流木を捕捉域から遠ざける要因となっているように見受けられる。表-15.5.4 に示す流木の捕捉数で比較した場合も、植生が存在せず高水敷の地形的要因のみに捕捉効果を依存している Case1-1 の捕捉数に対し、植生を有する Case2-1 での捕捉数が同程度か寧ろ悪化していることが分かる。唯一、植生を高水敷の下流側にのみ設置した Case4-1 では、上流側での流木の低水路内への集中化を免れており、捕捉域としての高水敷への流木の導入がスムーズに行われている。捕捉数で比較した場合も、Case4-1 が最大の効果を示

している。

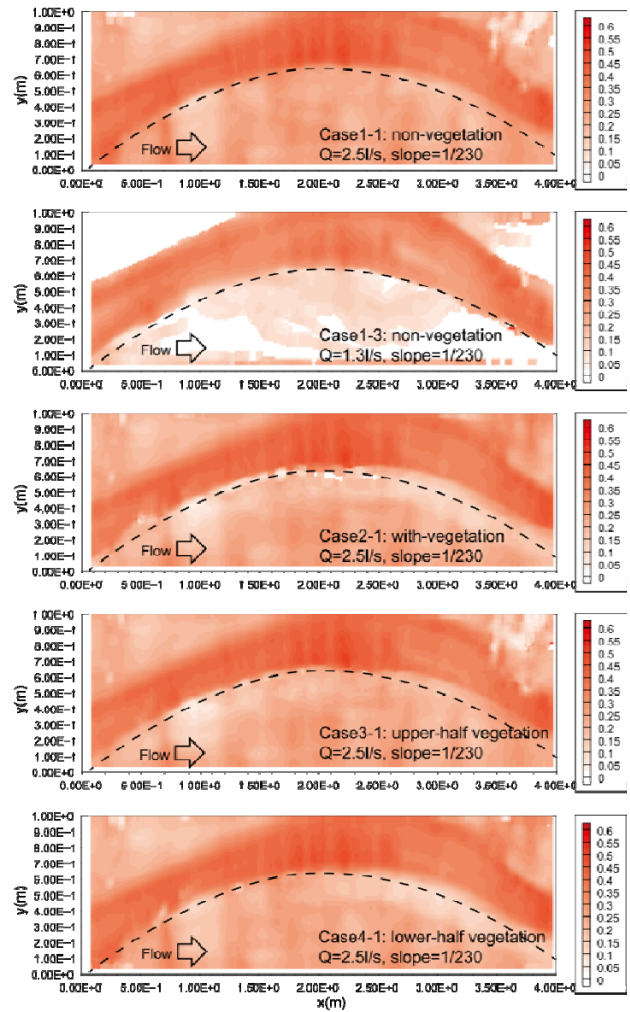


図-15.5.17 実験結果：観測対象領域内の流速の絶対値 (m/s)



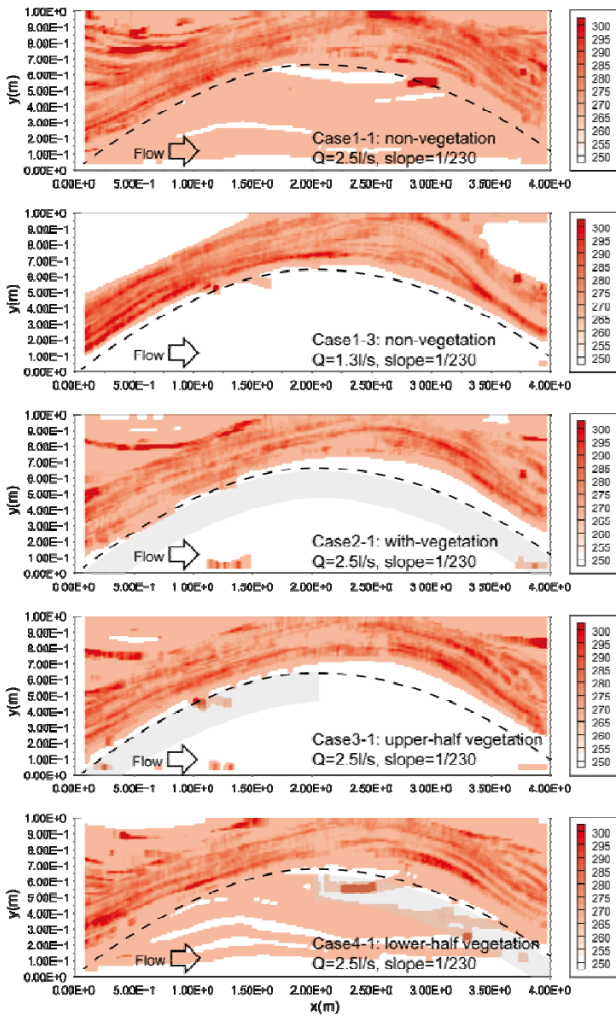


図-15.5.18 実験結果：流木流下時の濃度（単位面積あたりの流木本数の移動平均に関し、各時刻ごとデータが存在する領域のみ積算し、アンサンブル平均としたもの）、灰色部分は植生設置個所を示す

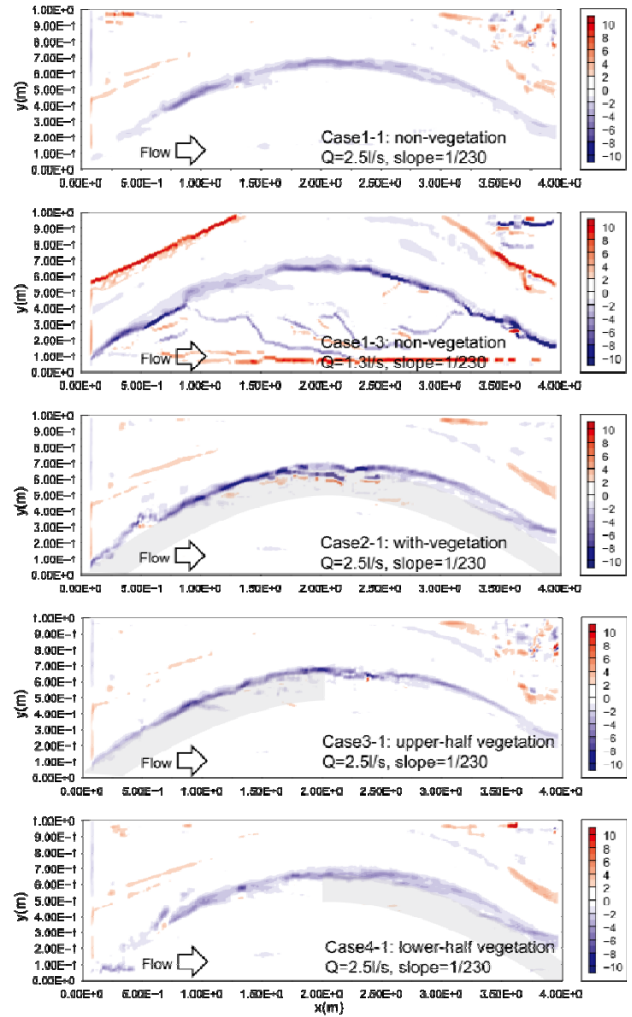


図-15.5.19 実験結果：追跡粒子によるPTV計測結果から得られたz軸まわり渦度の分布、灰色部分は植生設置個所を示す

表-15.5.4 植生設置位置の違いによる流木捕捉状況

Case	Catchment reg.		
	Vegetated	Non-vege.	Outflow
1-1	-	70	930
2-1	20	18	962
3-1	19	40	932
4-1	63	68	869

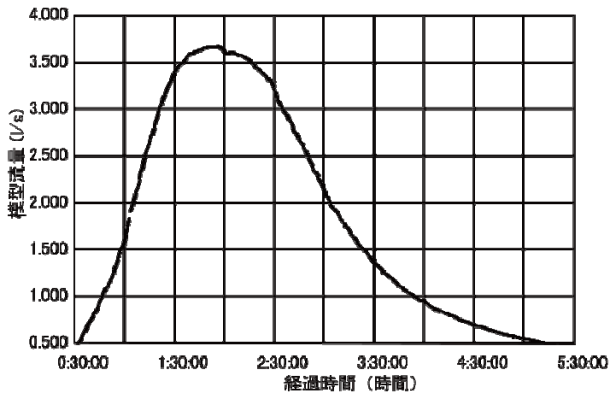


図-15.5.20 渚滑川での出水時を参考として与えられた、実験での流入ハイドログラフ

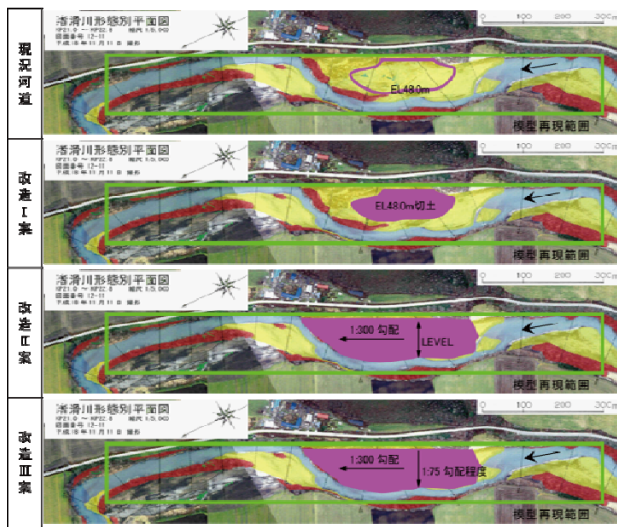


図-15.5.21 渚滑川に対する内岸砂州側での土地改造案

### 3.4 実河川をモデルとした模型河道を対象とした高水敷上での流木流下に対する検討

#### 3.4.1 実験概要

実際に流木災害に見舞われた実河川での流木流下とその堆積の状況、および蛇行部砂州に対する河道改造案の流木集積に対する影響を確認するため、渚滑川の1/175模型を作製し、流木流下実験を行った。模型は実験室内第3系統可傾斜水路に作成し、実際の洪水時のハイドログラフを模擬した流量の非定常流量を通水する(図-15.5.20)。河道改造案は図-15.5.21に示した3案とし、蛇行部内岸の砂州に対し、標高や勾配を変化させるものとする。

実験時の流木流下状況は、水路上空に設置されたカメラにより動画として撮影された。これを後処理することで流木群の軌跡を可視化し、上記項目に対する定性的な検討を試みた。

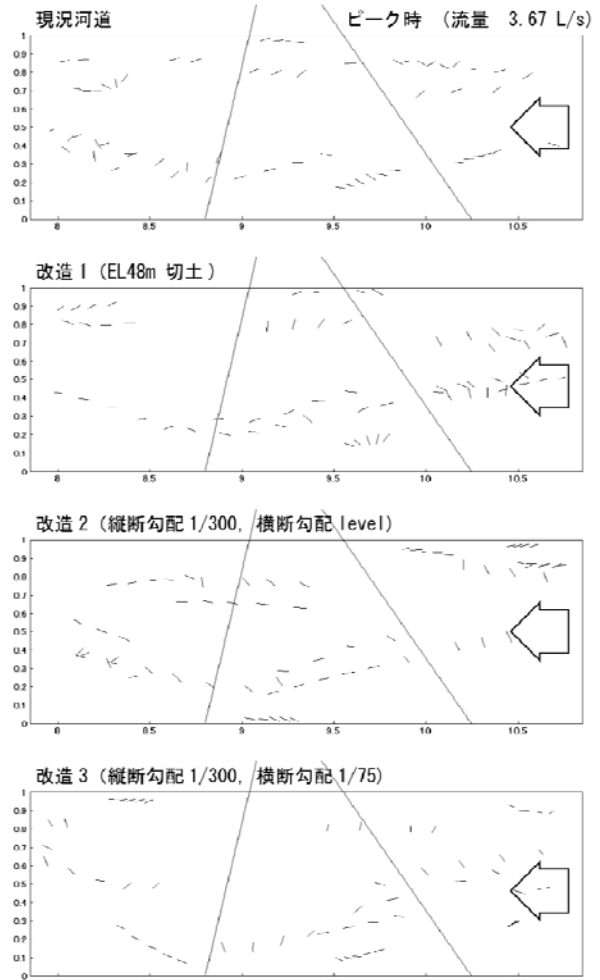


図-15.5.22 渚滑川模型での流木流下時の軌跡

#### 3.4.2 実験結果

現況河道および各改造案における、ピーク時の流木挙動に関して代表的な軌跡図を図-15.5.22に示す。表示された範囲は改造案の砂州の存在域に相当する。直線的に配置され図示された短い直線群が、各流木の軌跡を示し、間隔が密となる軌跡線では、流速が低下していることが推測され、流木の捕捉が期待できると予測される。

現況河道では砂州を越流する流れの右岸近傍で流木の速度低下が著しいほか、低水路左岸での流速低下も確認される。砂州標高を全体に切り下げる改造1案では右岸側の流測低下が抑制され、流木はスムーズに流下することから、堆積による水位の上昇などは生じない代わりに、捕捉の効果も期待できない。砂州部分で河床勾配と同程度の1/300の勾配をつけた改造2案では、砂州部分に到達する上流側で流木の速度低下が確認され、砂州上での流れそのものよりも、流木の流下状況に影響を与えている。砂州部分の横断方向に勾配

を与えた改造3案では、砂州部分に越粒し流入する流木の数が制限される傾向に見受けられ、砂州での捕捉が期待できないと想像される。

上記の結果は限られた流木数から得られた定性的傾向であり、結論を得るにはさらなる実験結果の検討と、何らかの定量化手法が必要となるが、河道地形が流木流下状況に与える影響を確認できたと考えられる。

#### 4. 谷底平野の地形特性と現在の地形の成り立ち

##### 4.1 研究概要

厚別川における洪水氾濫と地形の特徴について2重フーリエ解析を用いた検討を行う。

対象とした北海道の厚別川は、流域面積 291km<sup>2</sup>、河道長 45km で、2003 年 8 月の豪雨により、既往最大規模の約 2200m<sup>3</sup>/s という河道の流下能力 1000m<sup>3</sup>/s を大幅に超える出水が生起し、洪水流は谷幅全体を覆うように流れた (図-15.5.23)。

堤内地も含めた谷地形を対象とした各流量の中規模河床形態<sup>7)</sup>を表すと図-15.5.24 となる。図-15.5.24 から 1000m<sup>3</sup>/s 程度までは単列砂州領域にあり、1000m<sup>3</sup>/s を超えると単列砂州領域から複列砂州領域へ遷移すると判断される。洪水時のピーク流量は、2200m<sup>3</sup>/s であることから、その時の氾濫流の水利条件は複列砂州領域になっていたことがわかる。図-15.5.25 は清水が行った厚別川の洪水流の平面2次元計算結果<sup>8)</sup>である。これからも複列の流れが生じていることが読み取れる。

##### 4.2 研究結果

谷全体が過去幾度と繰り返された洪水流により形成された地形であるとの仮説のもと、2重フーリエ解析を用いて、谷地形の形状解析を行った<sup>9)</sup>。つまり谷全体の氾濫現象において谷壁を流路側壁と考えた場合の形状特性について、実現象と実験結果との比較を行うものである。図-15.5.26 にその結果を示す。

図-15.5.27 は  $a_{22}/a_{11}$  の値について先行実験の結果と厚別川との比較を示した。ここで厚別川は谷規模の氾濫時の水量、谷規模の地形の特徴を示している。つまり実験で小流量時(0.5 l/s)に形成された流路が出水により水路幅いっぱい広がった状態との比較が必要である。地形学的に長い時間をかけて形成された厚別川の流路では、短時間の洪水に伴う変形が比較的小さかったことから、実際の氾濫現象に近い出水時(1.5 l/s)の水面幅、水深時についても併せて比較した。



図-15.5.23 2003年出水時の厚別川での流況

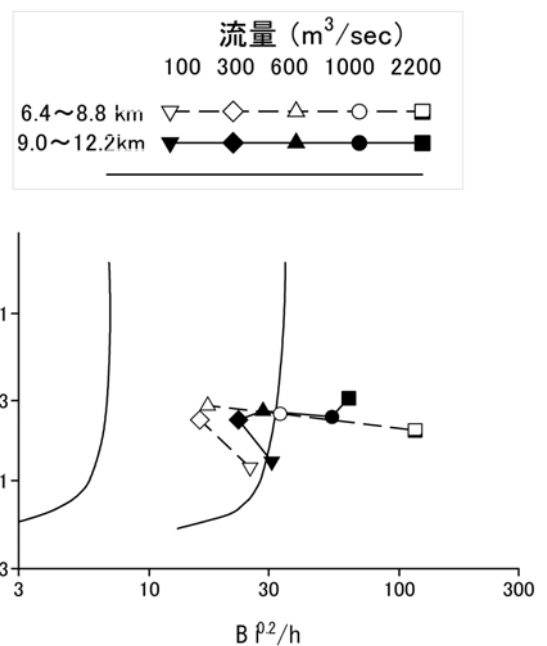


図-15.5.24 厚別川における砂州形状領域区分図の変遷



図-15.5.25 清水らによる厚別川出水時を対象とした数値計算 (白い線は仮想的な追跡粒子の軌跡を示す)

図-15.5.27 からは長谷川による単列砂州の実験や Case1 および Case3 の  $a_{22}/a_{11}$  が 0.1~0.4 と小さな値

をとる一方、case2 の  $\alpha_{22}/\alpha_{11}$  が 3.4 と大きな値をとる結果となった。厚別川の  $\alpha_{22}/\alpha_{11}$  は 0.5~1.4 であり、単列砂州や自由蛇行による地形と複列砂州による Case2 の実験結果の中間的な値をとることがわかる。以上から厚別川の谷底平地の地形は谷幅を基準として単列と複列の 2 つの砂州成分から成り、過去における幾度かの谷幅全幅を覆い尽くす大規模出水によって形成された単列砂州成分を持つ複列砂州によって形作られていると判断される。

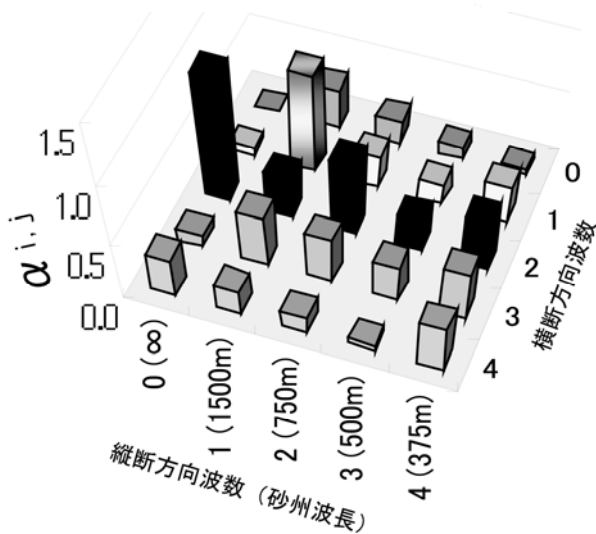


図-15.5.26 厚別川周辺の谷底平野を河道と仮定した場合に対する 2重フーリエ解析結果

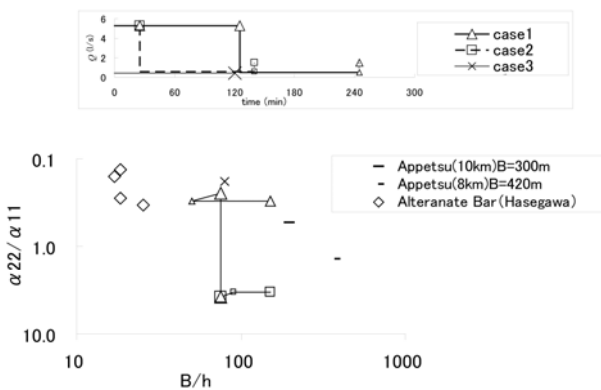


図-15.5.27  $\alpha_{22}/\alpha_{11}$  に関する厚別川と既往実験との比較

## 5. 洪水減水期ハイドログラフと砂州および水みち形成の関連に対する検討

### 5.1 実験概要

河道内の樹林化については、水みちと砂州や高水敷との比高差が生じることにより進行することが示されているが<sup>10)</sup>、その要因となる水みちの形成過程そのものに関しては未解明な部分が多い。本研究では水みち形成機構の解明を目的とし、砂州が形成された河道において、洪水減水期にどの様に水みちが形成されるのか、ハイドロ波形及び減水時間の違いに着目した水理実験を行い、水みちの発達状況について検討した。

実験は、延長 50m、幅 0.9m の直線水路を使用して行った。河床勾配は 1/80 とし、河床材料は 4 号珪砂 ( $d=0.764 \text{ mm}$ ) と 7 号珪砂 ( $d=0.154 \text{ mm}$ ) の割合を 5:1 とした混合砂を用いた。水路の上下流端には堰を設置しており、下流端の堰からの排砂量を定期的に計測し、同量を上流端から給砂した。測定区間は上下流端部の影響を考慮し、下流側より 12m から 27m の水路中央部 15m 区間としている。

実験に用いた流量を図-15.5.28 に示す。初期流量 (peakQ) は当実験水路で行った既往の基礎実験<sup>11)</sup>に基づき単列交互砂州が形成される規模とした。通水を開始してから形成される砂州の波長と波高を定期的に計測し、安定した単列交互砂州が形成された段階(t1)で減水を開始した。減水終了後の小流量(minimumQ)は、初期流量の 1/25 程度とした。減水期のハイドロ波形は以下の 3 ケースとし、減水時間は 45 分間(t1~t2)とした。

- case-1 ; 渡邊ら<sup>12)</sup>により示されている次式で与えられる波形を基本とし、低流量の通水時間が比較的長くなるパターン

$$D_0 = \left\{ \frac{\delta(\tau + \alpha)^2}{\tau^2 + \beta} - \gamma \right\}^{\frac{3}{2}}$$

ここで  $D_0$  : 初期水深  $h_0$  で無次元化した水深 ( $D_0 = h/h_0$ )、 $\tau$  : ハイドログラフの継続時間  $T$  で無次元化した時間 ( $\tau = t/T$ )、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  は定数である。

- case-2 ; 直線的に大流量から小流量に減水させたパターン
- case-3 ; case-1 に対して点対象に反転した波形であり、大流量の通水時間が比較的長くなるパターン

さらに、減水期終了後には河床が安定状態となるまで小流量を継続して 120 分間通水した(t2~t3)。

量の通水が十分ではなかったことによると推察される。

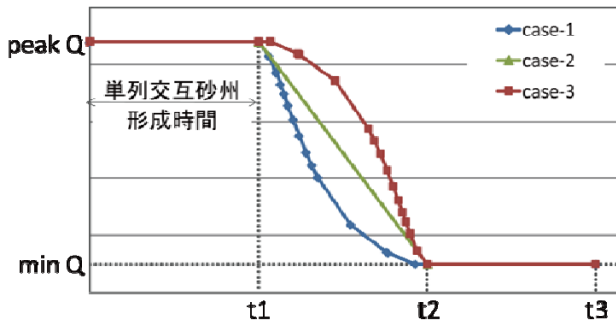


図-15.5.28 実験での各ケースのハイドログラフ

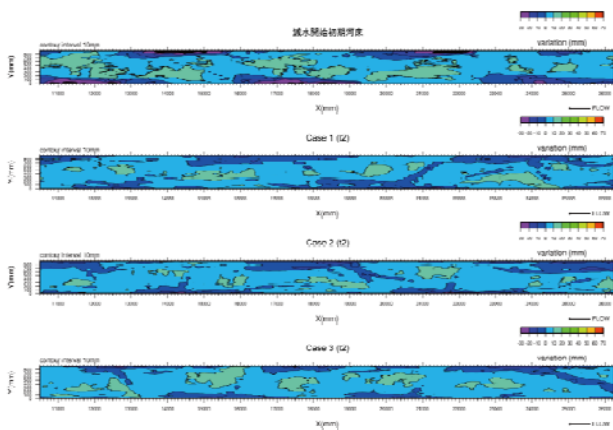


図-15.5.29 実験結果：時刻 (t2) における水路床形状を示すコンター図

## 5. 2 実験結果

図-15.5.29 は通水後の河床形状のコンター図を示している。減水開始初期河床は大流量を通水した後 (t1) の単列交互砂州の状況である。既往実験において同条件で通水した時に形成される単列交互砂州の平均的な値である波長約 6m、波高約 5 cm を基準として十分に砂州が発達したことを確認している。case-1 から case-3 の図は減水期終了後 (t2) の河床形状を示した。

減水開始初期河床では砂州前縁に深掘れ部が交互に見られ、単列交互砂州が形成されているが明確な水みちは見られない。これに対し、case-1 及び case-2 では、深掘れ部は浅くなっているが、砂州の前縁に沿って深掘れ部と深掘れ部の間に水みちが形成されていることが判る。水みちの形成状況については case-1 と case-2 で大きな差異は見受けられなかった。

今回の実験では、case-3 は case-1、case-2 と同様砂州前縁部の深掘れ部は浅くなっているが、水みちの形成がほとんど見られなかった。case-3 では比較的、大流量の通水時間が長く、小流量の通水時間が短い波形であることから、水みちの形成に影響をおよぼす小流

## 6. まとめ

橋梁周辺における流木の挙動監視調査の結果、洪水時に流下する流木は水位がピークに達する前の洪水初期に最も多くなる傾向をみる事ができた。橋脚への堆積機構の直接的な観測は、実施期間中に結果が得られなかったが、観測に際してのノウハウの蓄積が得られたことから、今後の効率や精度の向上も期待され、継続してモニタリングを行うことが望ましいと考えられる。

流木の堆積と河畔林に関する模型実験の結果、河畔林が密な場合に最も流木を捕捉し、流下本数の 10% 強を捕捉した。一方、河畔林が粗の場合は 1% 程度であり、河畔林の粗密による流木捕捉効果が明らかとなった。また河畔林設置位置の違いによる流木への影響に関しては、植生の存在が流れ場の渦度を強くする場合に、流下中の流木がそこから離れる挙動を示すことが確認された。これらの結果から、河畔林の伐採等の対策に関しては、流木が捕捉域となる砂州や植生上にスムーズに導入されるように、分布や密度に注意して行う必要があることが示唆される。

厚別川を例とした谷底平野の地形の成り立ちに関する解析結果からは、谷底平野とそこに有する河川に関して、谷全体に広がる大規模な出水と、通常の出水との両方の影響を受けた地形が存在することが示された。これは大規模出水時の河川が、通常の流路と大きく異なる流路を取り得ることを示すものであり、洪水対策に対する重要な知見となる。

流路の固定化をもたらす要因の一つである水みちの形成過程に関しては、水理実験の結果から、洪水時の減衰過程におけるハイドログラフの形状が重要な影響をもたらす、小流量での通水時間が長い場合に水みちの形成が見られることが確認された。このことから、流路の固定化の対策に当たっては、上流側治水施設での出水時のオペレーションが重要な役割を果たすことが示唆される。

## 参考文献

- 1) 財団法人 河川環境管理財団：河川整備基金自主研究事業 流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究、2009.2
- 2) 阿部修也、渡邊康玄、長谷川和義：2003 年台風 10 号出水における沙流川での橋梁被害、河川技術論文集、第

#### 15.5 河道形成機構の解明と流木による橋梁閉鎖対策等への応用に関する研究

- 11 巻、pp109-114、2005. 6
- 3) 佐藤徳人、渡邊康玄、白井博彰：橋梁周辺における流木の挙動監視調査、河川技術論文集、第 13 巻、pp409-414、2007. 6
  - 4) Braudrick, C. A., Grant, G.E.: When do logs move in rivers?, *Water Resources Research*, Vol.36, No.2, pp.571-583, 2000.
  - 5) Haga, H., Kumagai, T., Otsuki, K., Ogawa, S.: Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: An in situ field experiment of log transport and a field survey of coarse woody debris distribution, *Water Resources Research*, Vol.38, No.8, doi:10.1029/2001WR001123, 2002.
  - 6) 植村知正、山本富士夫、幸川光雄：2 値化相関法（粒子追跡法）の高速画像解析アルゴリズム-、可視化情報、Vol. 10、No. 38、pp. 58-64、1994.
  - 7) 黒木幹男、岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究、土木学会論文報告集、342 号、pp87-96、1984.
  - 8) 清水康行：厚別川における洪水氾濫流解析、平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査団報告書、土木学会水工学委員会、pp108-119、2004.
  - 9) 渡邊康玄、野上毅、安田浩保、長谷川和義：谷底平野における氾濫流の挙動を規定する地形の成因、土木学会、河川技術論文集、第 12 巻、pp.49-54、2006.
  - 10) 清水義彦、小葉竹重機、岡田理志：ハリエンジュによる動的河道内樹林化について、水工学論文集、第 45 巻、pp.1099-1104、2001.
  - 11) 渡邊康玄、桑村貴志：複列砂州のモード減少過程に関する水理実験、水工学論文集、第 48 巻、pp.997-1002、2004.
  - 12) 渡邊康玄、Tubino.M、Zelezzi.G：掃流砂により形成される交互砂州の非定常流下での挙動、北海道開発土木研究所月報、No.576、pp.4-12、2001.