

交互砂州および網状流路への種子定着特性と流路変動特性の検討

久加朋子¹

Tomoko KYUKA

¹ 北海道大学大学院工学研究院 博士研究員

要 旨

本報では、河道内樹木の種子が裸地砂州へと新規侵入する際の種子定着特性を明らかにすることを目的に、2種類の水路実験を実施した。これより、交互砂州および網状流路における種子定着特性の違いを把握した。ならびに、平面2次元解析モデルに植生侵入モデルを追加し、実験結果との比較を実施した（ただし、モデル化の部分は2年目にもまたがるテーマであるため、本報では簡易な報告にとどめるものとする）。水路実験の結果、交互砂州では流水によって輸送される種子は流量減衰期のみ定着し、その定着箇所は砂州前縁部に局所的に集中した。一方、網状流路では、流水によって輸送される種子は浮州や高水敷上に時空間的に広く分散して定着し、砂州上に縦断方向にライン状の植生パッチを形成した。これは、網状流路では定常給水条件下であっても、浮州形成や流路移動に伴って流路内の流れが非定常となるため、流路の消長に伴い出水中であっても種子が定着するような水際が形成されるためである。植生分布の違いは流路本数の減少に明瞭な影響を与えた。砂州上に広域的に植生が繁茂する場合、流路本数が減り、流れの集中に伴う流路幅拡張と流路の蛇行化が生じた。一方、流れで種子を散布した場合、植生は流路本数減少と蛇行化には働かず、むしろ小スケール流路の増加に伴い流路を複雑化させた。これは、浮州上に縦断方向にライン状に形成された植生パッチの場合、局所的に流れが遮られたとしても、流路は比較的容易に側方に移動することができるためと考えられる。

《キーワード：種子定着特性；流路変動；交互砂州；網状流路；樹木侵入モデル》

1. はじめに

河道内樹林化は、近年、全国各地の河川にて確認される現象である。河道内の樹木は多様な動植物に生息空間を提供すると考えられる一方で、河川管理面では、河積の減少に伴う洪水時の災害リスクの増大、砂州の固定化と流路本数の減少、それに伴う河床低下などが問題視されている。たとえば、北海道内を流れる札内川においても、もともとは網状河川であったが、1997年ダム供用開始前後から低水路内に樹木が侵入し始め、次第に流路本数の減少と低水路幅の縮小が生じ、それに伴う流路の蛇行化傾向が報告されている。

植生と流路変動の間の関係性に注目した現地調査、水路実験、数値解析はこれまでに多数報告されている¹⁾。これらの報告では、植生の主な影響として、1) 植生は網状流路の流路本数を減らすこと、2) 植生は河岸浸食の速度を遅くすること、3) 植生は流路の横方向移動を励起すること（蛇行流路の形成）、4) 植生は蛇行の発達と流路のショートカットを促すこと等が知られている。また、近年では植物の成長や死滅まで考慮した植生動的モデルを扱った報告もいくらか存在する⁴⁾⁵⁾。しかしながら、これらの報告では、樹林化後の流路変動特性についてはある程度明らかにされているものの、低水路内の樹林化プロセスそのものについては十分に明らかとされていない。

なかでも、植生侵入の第一段階と考えられる裸地砂州への植生侵入に関する検討は少なく、初期の植生分布の違いがその後の流路変動に及ぼす影響については未解明な部分も多い。数少ない検討⁶⁾⁷⁾として、Van Dike et al.⁶⁾ は、水路内に網状流路を形成し、砂州上にマメ科植物の alfalfa 種子を一様に散布した場合と流水によって散布した場合について、その後の流路変動の違いを報告している。彼らの報告では、植生が均一に分布する場合、河岸が安定し、流路を蛇行させる作用が強く働く。一方、植生が局所的に分布する場合、砂州の一部のみ安定性が増し、植生上流部に土砂が堆積するなどから、蛇行流路ではなく Island Braiding（砂州上に安定した植生域を有するような複数流路からなる河川）が形成されると示唆されている。ただし、彼らの報告は種子の定着特性までは考察されておらず、植生定着と流路変動特性との関係性については不明確である。一方、内田ほか⁷⁾ は、交互砂州への種子定着特性および流路変動の関係性までを検討し、種子は砂州前縁に局所的に定着し、砂州の河床上昇をもたらすことを報告している。しかしながら、実際の河川では実験水路のような交互砂州が形成されるような場は少なく、さらに上述した札内川のように川幅が広く、流路の分岐する網状河川となると、種子定着特性とそれに伴う流路変動は、上述の交互砂州の場合と相当異なるものになると考えられる。また、既往2文献で用いられている alfalfa は種子サイズ、比重が大きいため水路内では掃流形態にて輸送されることから、ヤナギなど浮遊形態で輸送される種子の定着特性をどの程度再現しているかについても疑問が残る。

そこで本研究では、現地調査および水路実験より、交互砂州および網状流路において流れで輸送される種子の定着特性を把握すると共に、植生分布の違いが網状流路の流路変動特性に及ぼす影響について検討した。ならびに、平面2次元河床変動モデルへと樹木侵入モデルを追加し、実験結果との比較を試みた。

2. 実験方法、条件

(1) 交互砂州

交互砂州形成には図-1 に示す北大所有の循環型長方形矩形水路（全長 10、幅 0.2m、勾配 0.02）を利用した。

表-1 実験ケースと実験水理条件

(交互砂州形成)

ケース	流量 (m ³ /s)	初期平均 水深 (m)	通水時間 (hour)	粒子 散布法	粒子 サイズ(mm)	粒子 着色
Case 1	0.00034	0.011	0.5	流水散布	1.09	青
					0.92	黄
					0.65	ピンク

(網状流路形成)

ケース		流量 (m ³ /s)	初期平均 水深 (m)	無次元 掃流力 τ^*	通水時間 (hour)	種子 散布	種子散布 タイミング
Case A	1	0.00276	0.014	0.111	8.5	全面散布	実験終了後
	2	0.00276	-	-	1.5	-	-
Case B	1	0.00276	0.014	0.111	8.5	流水散布	通水 4.0 時間～
	2	0.00276	-	-	1.5	-	-



図-1 実験水路, 左) 交互砂州形成, 右) 網状流路形成

水路内の河床材料は粒径 0.780mm の一様砂とし、一定流量 ($Q=0.00034 \text{ m}^3/\text{sec}$) を 30 分間通水して交互砂州を形成した後、流量を減衰させながら水路上流端から比重が同じでサイズの異なるポリスチレンビーズ (比重 1.0, サイズ: 1.09mm, 0.92mm, 0.65mm) を供給し、その定着場所を把握した。ポリスチレンビーズは蛍光塗料で着床し、通水中の輸送状況をビデオ撮影すると共に、通水終了後、定着位置を写真にて記録した。

(2) 網状流路

網状流路形成には図-1 に示す国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所所有の循環型長方形矩形水路 (全長 26 m, 幅 3 m, 勾配 0.01) を利用した。水路内の河床材料は粒径 0.765 mm の一様砂とし、初期河床を低水路幅 45 cm, 低水路河岸 2cm となるように整形し、通水が続けることで網状流路が形成される条件とした。水路上下流端には固定堰をそれぞれ設け、上下流端の初期河床が浸食されないようにした。実験中は、水路上流端の固定床と移動床の接続部が河床上昇および河床低下しない程度に、河床材料と同じ粒径の土砂を常に給砂し続けた。

表-1 の下段に実験ケースおよび実験水理条件を示す。表-1 に示す実験ケース横の数字は、順に通水 1 回目、2 回目を意味する。実験流量は、全てのケースで定常給水条件を与えた（ただし、実験終了時の減水期を除く）。この初期条件は、黒木・岸⁸⁾によると、単列砂州形成条件に該当する。これらを札内川の流量規模に換算すると、札内川の 20 年確率程度の出水に相当する。なお、本実験は札内川を想定したものであり、初期通水ケースは山口・渡邊⁹⁾の実験と同条件としている。種子は事前実験結果より、既往研究で用いられることの多い alfalfa ではなく、ベントグラス（西洋芝ベントグラス ペンクロス、タキイ種苗株式会社）を用いることとした。

Case A および Case B は、いずれも 8.5 時間通水して実験水理条件に応じた網状流路を形成するが、種子の散布方法を異ならせたものである。Case A-1 では、実験終了後、河道全面に種子を散布した。この際、種子をできる限り一様に散布するため、850 μm の目合のフルイを用いて種子散布を行った（発芽後のベントグラス平均密度は札内川規模で換算すると約 5.6 本 / m^2 であった）。一方、Case B-1 では、水路上流端から常時供給する給砂材料に種子を一定割合で混ぜて供給した。これは、ヤナギ等のように流水を利用して種子散布を行う樹木を想定したものである。種子と給砂材料の配合率は、蛍光塗料着色種子、非着色種子、および給砂材料の重量比を 1 : 1 : 80 とした。蛍光塗料着色種子と非着色種子を混ぜた理由は、種子を流砂調査用蛍光塗料（シンヒロイ株式会社）で着色すると発芽率が低下するためである。Case B-1 では、種子散布を通水 4.0 時間後～通水終了まで実施した。この際、各時間帯における種子定着箇所がある程度目視で分かるよう、90 分ごとに青色、ピンク色、黄色に着色した種子を順に用いた。実験終了時は、流量を 30 分かけて線形にゆっくり減水させるようにした。種子定着箇所は、実験終了後にブラックライトを水路上面から照射した状態で写真撮影することで確認した。実験終了後の河床形状は、3D レーザースキャナ（STONEX 社製モデル X300）を用いて計測した。実験終了後、砂州上のベントグラス生育および低水路内での種子発芽を抑制するため、少ない流量を水路内に常に供給し続けた。

表-1 に示す Case A-2 および Case B-2 は、植生分布が異なる場合における流路変動を比較するものである。両ケースは、1 回目の通水から 12 日経過後に実施した。2 回目の通水時間は、水路内に既に流路形態が存在することから各々 90 分程度とした。これは、札内川の規模に換算すると洪水が約 15 時間継続したことに相当する。

(3) 事前実験による実験用種子の選定

既往報告では、水路実験にて河道内樹木や草本を考慮する方法として、棒状の構造物がよく利用されてきた。一方、近年では実際の植生として alfalfa（モヤシの種子）を利用した水路実験事例も増え、植生による流水抵抗のみでなく、植生の密生度や消長まで考慮した河床・流路変動特性なども検討され始めている¹⁾。しかしながら、alfalfa 種子を水路実験スケールにて植生として扱うには、以下の 2 つの課題が存在する。1 つは、種子サイズが実験スケールの水深や河床材料に比べて相対的に大きく、種子が掃流状態で輸送されることである。もう一つは、成長速度が速く、発芽数日後には根の長さが実験スケールの砂州波高を超えるため、実験では河岸浸食を過度に抑制する可能性が懸念されることである。そこで、本実験では事前に alfalfa（比重約 1.1）、クレソン（比重約 1.0）、ベントグラス（別名：西洋芝、比重約 1.0）について、種子サイズと成長速度を比較し（図-2）、本実験に用いる種子を alfalfa ではなく、種子比重が 1.0 に近く（ゆっくり沈降する）、根茎長の成長速度が比較



図-2 左) 種子サイズの比較と発芽 9 日後の様子, 右) 発芽後の成長速度の比較

的遅いベントグラス種子を用いることとした。

3. 実験結果

(1) 交互砂州

図-3 に, 交互砂州形成後, 蛍光塗料で着床したサイズの異なるポリスチレンビーズの定着場所を示す. 図-3-b より, 出水中はいずれのサイズのポリスチレンビーズも砂州上に定着しなかったことが分かる. 一方, 図-3-c より, ポリスチレンビーズは流量が減衰し始めると砂州前縁部に局所的に定着し始め, 実験終了時 (図-3-d) には砂州前縁部の 2 か所に集中的に定着したことが分かる. したがって, 交互砂州への粒子 (種子) 定着特性は, 粒子の比重が同じ場合, 粒子サイズによる影響を受けにくいことが分かる.

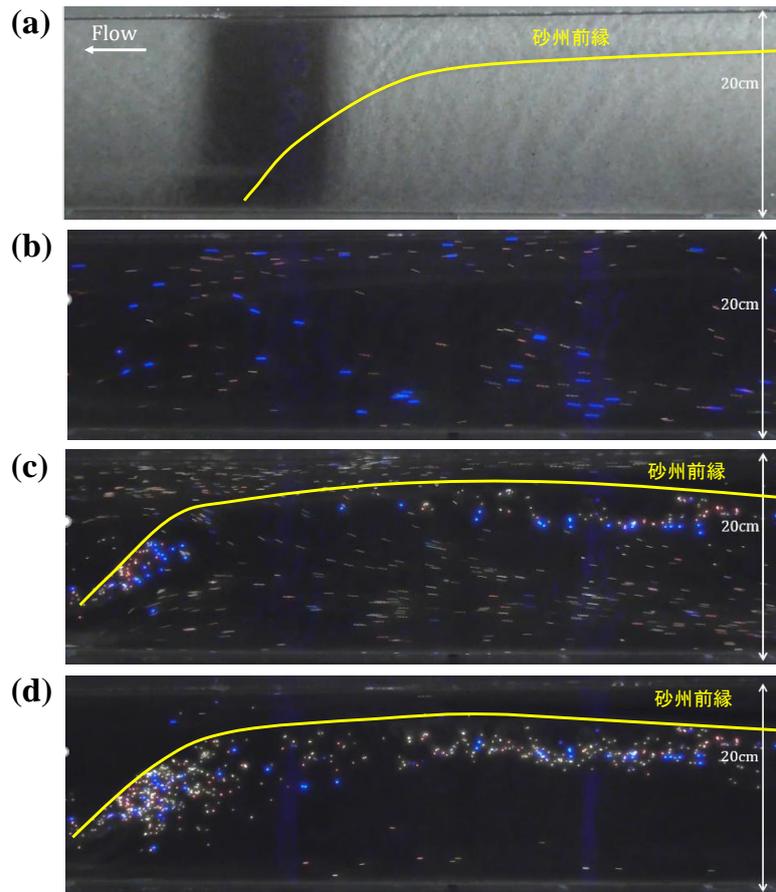


図-3 交互砂州への種子定着状況,

- a) 流量減衰前の砂州形成状況, b) 流量減衰前のビーズ輸送状況,
c) 減水中期のビーズ定着状況, d) 実験終了時のビーズ定着状況

(4) 網状流路

(a) 網状流路の形成 (Case A-1, Case B-1)

Case A-1 と Case B-1 では始めに単列砂州が形成され、その後、砂州の発達に伴い浮州が形成され、流路が網状化した。本実験では河岸浸食を許容しているため、時間経過とともに川幅・水深比が大きくなり、網状流路の形成条件に移行したと考えられる。

(b) 網状流路への種子定着箇所 (Case B-1)

図-4 に、Case B-1 終了時の河床変動量コンター図、流路中心部における流路の位置（流量を下げた状態で緑塗料で着色した水を通水）、種子定着箇所（ブラックライト照射下にて撮影）を示す。種子の色は、青色、赤色、黄色の順に実験時間に応じて異ならせたものである。図-4 より、流れによって輸送された種子は、網状流路の浮州

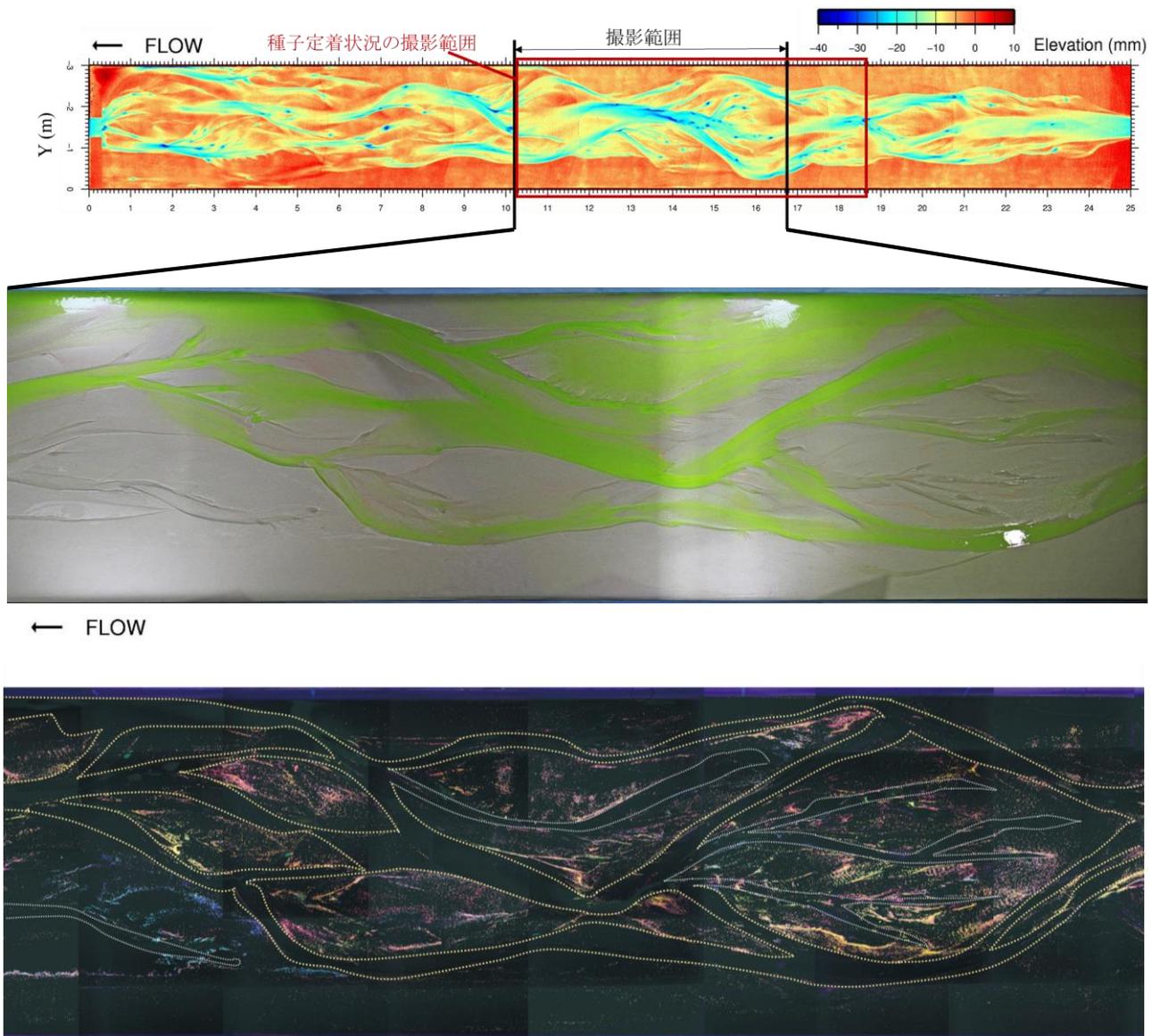


図-4 網状流路への種子定着状況、

上) 河床変動量コンター図と実験終了時の流路（緑塗料で着色した水を通水）

下) 実験終了時の種子定着箇所（ブラックライト照射下にて撮影）



図-5 ベントグラス定着状況 (CaseB-1 から 12 日経過後)



図-6 石狩川砂川遊水地付近の河道内砂州への樹木定着状況 (2016/7/1 撮影)

や高水敷上に広く分散して定着したことが分かる。この結果は、同じく網状流路を対象とした Van Dijk et al.⁶⁾ の既往報告と比較すると明らかに広範囲な定着であると言える。これは、彼らの報告では減水時にのみ種子を供給していたが、Case B-1 では洪水時も常に種子を供給し続けたためではないかと考えられる。実際、図-4 より定着した種子の色と場所を確認すると、実験前半や中盤に散布した青色、ピンク色の種子ほど実験終了時の低水路から離れた場所に存在しており、種子が砂州全体に渡って定着することに寄与したことが分かる。このような幅広い定着は、Case B-1 のように浮州形成とそれに伴う流路変動の活発な網状流路では、定常給水条件下であっても各流路内の流れが非定常となるため、流路切り替えや消滅に伴う流量減水時に種子が砂州上に取り残されるためである。このことは、図-5 に示す CaseB-1 から 12 日経過後のベントグラスの定着状況からも推察される。図-5 では、ベントグラスが砂州上に縦断方向のラインを形成して定着する様子が確認できる。これは、各流路内において流量減衰が生じた際における、種子が砂州上を輸送される最小水深の水際線だと考えられる。なお、このような縦断方向に一列に並ぶような樹木の侵入は実河川でも確認されており、たとえば網状流路河川とは異なるものの、石狩川 (図-6) においても河道内砂州上への特徴的な樹木侵入状況を確認することができる。

(c) 植生分布の違いに伴う網状流路の河床・流路変動特性 (Case A-2, Case B-2)

図-7 および図-8 に、Case A-2 と Case B-2 の開始前および終了時の河床変動量コンター図および水路上空から撮影した流路変動の様子を示す。図-7 および図-8 より、植生分布の違いは網状流路の流路本数の減少に明瞭な影響を与えたことが分かる。水路全体にベントグラス種子を散布した Case A-2 (図-7) では、低水路以外の浮州や高水敷にベントグラスが生育し (水没した種子や水分量の多すぎる場所では発芽しないため)、ここに2回目の出水を与えることで網状流路が蛇行化する様子が再現された。一方、砂州や浮州上に植生パッチが形成されていた Case B-2 では、Case A-2 と異なり流路本数の減少や流路の蛇行化は認められず、むしろ、図-8 に示すように流路形状が複雑化した。

植生密生度の高い Case A-2 の流路発達は次の通りである。始めに浮州上へ流れ込む流量が減少し、流れの集中による低水路幅の拡幅と、小スケールの流路消失に伴う流路本数の減少が確認された。その後、流路本数の減少により主流路はさらに拡幅し、明瞭な水衝部をもつ流れに変化し、蛇行が発達した。実験中の目視によると、流路本数の減少は、次の2タイプ確認された。1つは、二股流路 (bifurcation) の主流路側への土砂堆積 (plug bar 形成) に起因した流路切り替えによる流路消失である。本現象は長谷川ら¹⁰⁾の報告による交番現象に近い現象と考えられる (ただし、本実験では主流路の再切替までは認められなかった)。もう一つは、河岸浸食に伴い大量に生じた流木による小スケールの流路消失である。

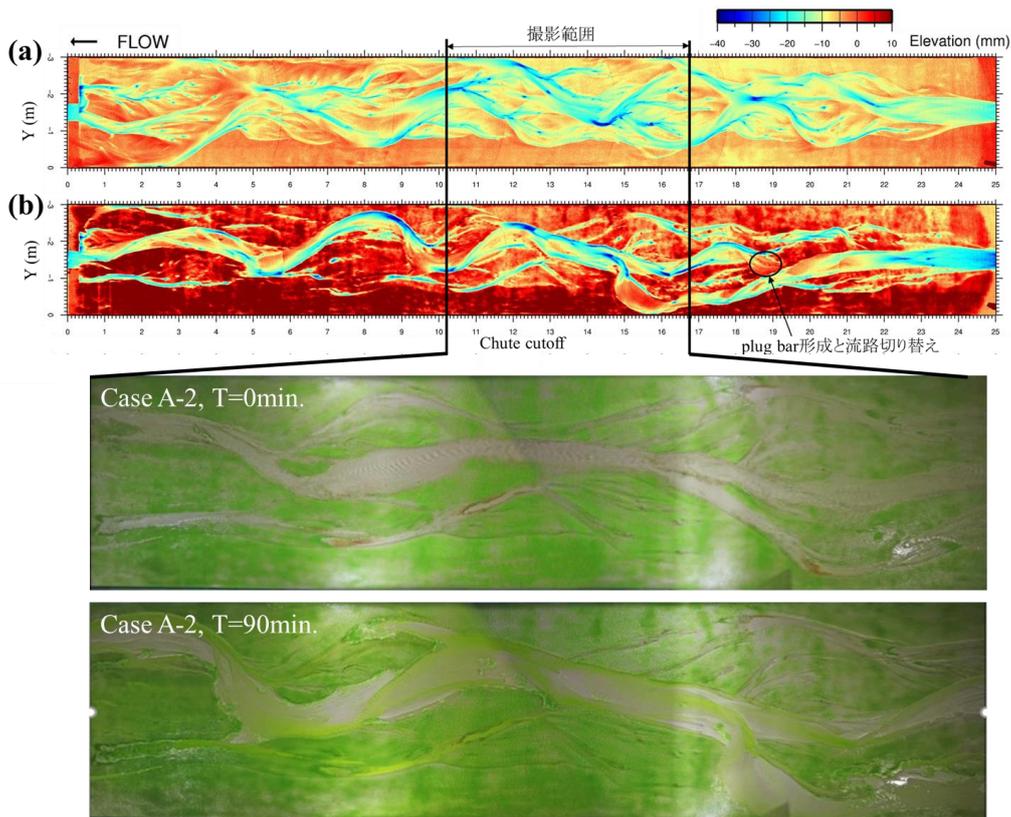


図-7 Case A-2 の河床変動量コンター図と流路変動状況, a) Case A-2 開始時, b) Case A-2 終了時

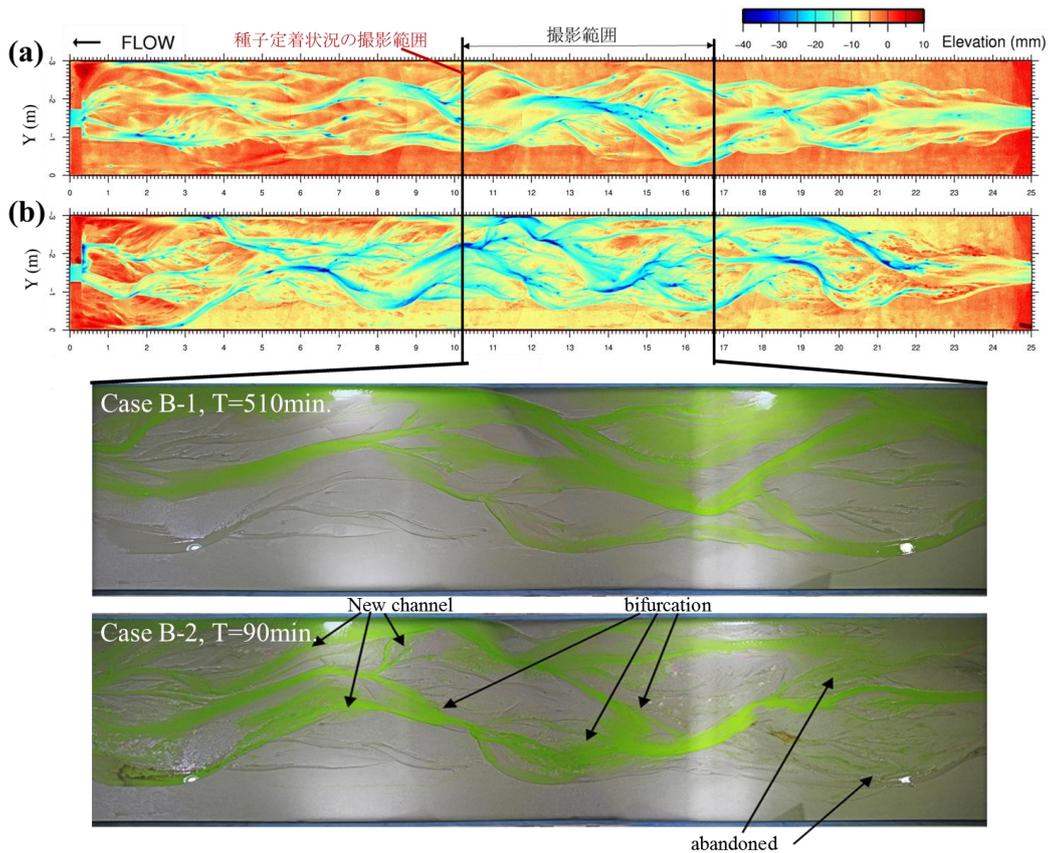


図-8 Case B-2 の河床変動量カウンター図と流路変動状況, a) Case B-1 終了時, b) Case B-2 終了時



図-9 交互砂州上の流れの様子

一方、砂州上に局所的な植生パッチが形成される Case B-2 では、Case A-2 と異なり、明瞭な流路本数の減少は認められず、むしろ、上述したとおり図-8 に示すように流路形状が複雑化した。また、Case A のような明瞭な流路切り替わりも認められず、流路は主に側方へと移動した。さらに流路の側方移動に伴い流路が旧流路跡に接続した場合は、Case A と異なり、二股流路を維持したまま主流路の交換のみが生じる様子も確認された(図-8 の bifurcatin)。この結果は、交互砂州を対象とした内田らの既往研究⁷⁾と異なるものであった。内田ら⁷⁾では、交互砂州の砂州前縁に局所的な植生パッチが形成されることで、砂州の明瞭な河床上昇が確認された。一方、本実験では植生の有無によって流路と砂州の比高差は殆ど変化しない状況が確認された(図-8)。これは、交互砂州の場合、砂州上の流れは図-9 (Case B-1 の実験初期)のように形成されるため、砂州前縁の植生パッチは流れを遮る障害物となる一方で、網状流路の場合、局所的な植生パッチによって流れが遮られたとしても流路は側方に移動することができるためである。したがって、Case B-2 では、通水1回目 (Case B-1) にて浮州形成に伴い流路分岐が促された現象と類似する状況が、砂州上の植生パッチによってもたらされたと考えられる。つまり、植生が局所的に縦断的なパッチを形成して存在する網状流路では、植生侵入によって局所的な砂

州安定性が高まる一方で、洪水時には局所的な植生パッチが新たな流路形成を促す面も存在する可能性が示された。これは、網状流路で確認される Island Braiding 現象⁶⁾の維持形成機構の一端を説明するものと考えられる。

4. 数値モデル

裸地砂州への樹木侵入と流路変動特性との関係性を検討するため、本検討ではまず、既存の平面2次元解析モデルに簡易な種子侵入モデルを追加し、出水時に形成される裸地砂州へ植生が侵入するプロセスを把握できるようにした。粒子は水路上流端から一定時間間隔で追加するものとし、Kringing法を用いた表層近傍流速の重みづけ平均流速分布を内挿することで、各タイムステップごとに粒子を移動させるものとした。粒子の比重は1.0に近いため、粒子の定着判断には流速が遅くなることによる移動停止に加え、水深が粒子径の1/10倍になった場所では粒子が河床にトラップされるものとして扱った。本機能より、粒子投入場所、粒子投入時刻、粒子投入継続時間、投入する粒子数などを設定し、出水中の粒子の移動経路を追跡することができる。なお、本モデル化の部分は、次年度以降の研究計画と重なるものであるため、図-10には交互砂州水路における種子定着特性の検討結果のみを示す。今後は粒子の質量、比重の違い、粒子停止条件の精査し、計算精度の向上および実河川への適用と予測精度の確認についてまとめることとしたい。

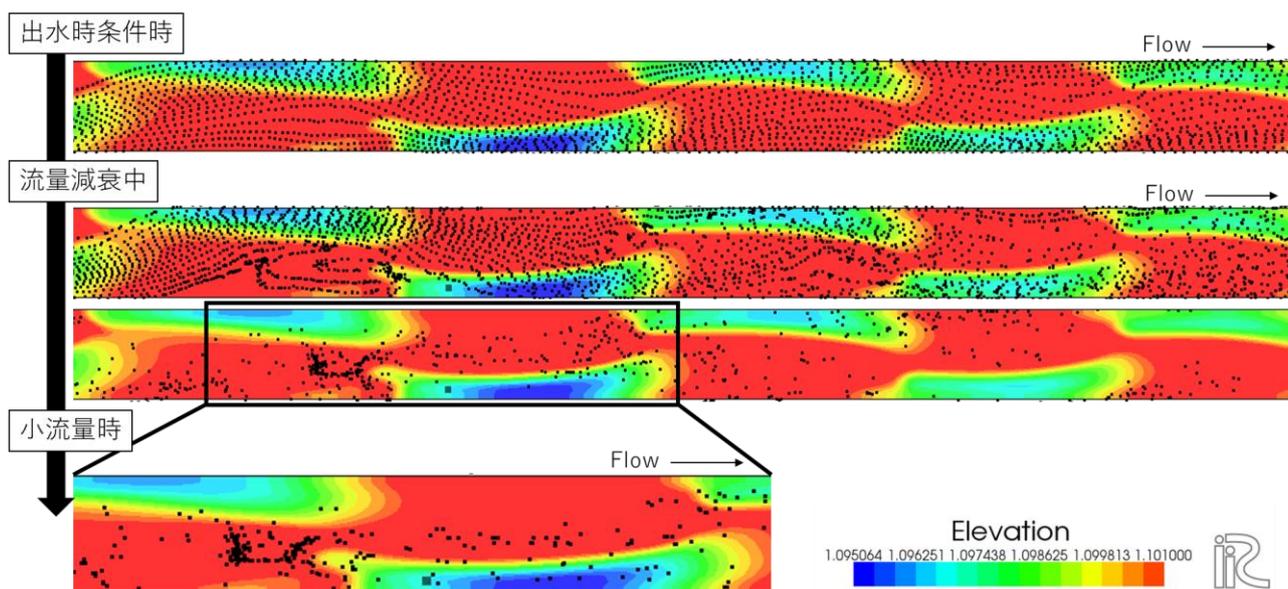


図-10 平面2次元解析モデルによる交互砂州上での粒子移動状況および定着状況、黒点：粒子を表す、計算結果の可視化には iRIC ソフトウェア ver. 3 を利用した。

謝辞

本実験は、寒地土木研究所の川村里実氏、北海道大学の渡邊健人氏の協力のもと実施された。また実験計画を構築するに際し、旭川開発建設部、室蘭開発建設部、および札幌開発建設部に石狩川、忠別川、沙流川、鶴川、豊平川、漁川等に関する樹木侵入状況に関する現地見学、および資料等を提供頂いた。ここに謝意を示す。なお、実河川に関する資料は次年度以降の検討に用いる予定である。

参考文献

- 1) Tal, M. and Paola, C.: Effects of vegetation on channel morphodynamics: Results and insights from laboratory experiments, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.35, pp. 1014-1028, 2010.
- 2) Jang, C. L., Shimizu, Y.: Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp.763-773, 2007.
- 3) 永多朋紀・渡邊康玄・清水康行・井上卓也・船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究, *水工学論文集*, Vol.60, pp.1081-1086, 2016.
- 4) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士：混合砂河床における網状流路の数値解析, *水工学論文集*, Vol.47, pp. 631-636, 2003.
- 5) Iwasaki T., Shimizu Y., Kimura I.: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, *Advanced in Water Resources*, Vol. 93, pp. 118-134, 2016.
- 6) Van Dike, W. M., Teske, R., Van de Lageweg, W. I. and Kleinhans, M. G.: Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics, *Water Resources Research*, Vol.49, pp. 7558-7584, 2013.
- 7) 内田典子・久加朋子・木村一郎・清水康行：裸地砂州への種子定着特性と植生分布が河床変動の応答に与える影響, *水工学論文集*, Vol. 60, pp. 1087-1092, 2016.
- 8) 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*, Vol.342, pp.87-96, 1984.
- 9) 山口里実・渡邊康玄：節腹連続河道形状の発達過程に関する実験, *水工学論文集*, Vol.60, pp.745-750, 2016.
- 10) 長谷川和義：山地河川における分岐部流路交番現象に関する抽出実験とその解析, *水工学論文集*, Vol.47, pp.679-684, 2003.
- 11) Constantine J. A., McLean S. R., and Dunne T.: A mechanism of chute cutoff along large meandering rivers with uniform floodplain topography, *Geological Society of America*, Vol.122, pp.855-869, 2010.