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

THE SETTLING PATTERN OF VEGETATION SEEDS
ON ALTERNATE BARE SANDBARS AND THE EFFECT OF
CORRESPONDING VEGETATION ON RIVER BED MORPHOLOGY

内田典子¹・久加朋子²・木村一郎³・清水康行⁴

Noriko UCHIDA, Tomoko KYUKA, Ichiro KIMURA and Yasuyuki SHIMIZU

¹学生会員 学士（工学）東北大学大学院工学研究科（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06）

²正会員 博士（工学）北海道大学大学院工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

³正会員 工博 北海道大学大学院工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

⁴フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

The objective of this study is to observe the characteristics of lotic seeds distribution on bare sandbars, and to confirm the differences of bed morphology change without vegetation and with vegetation patches on sandbars by means of laboratory experiments and numerical analysis. In the experiments, after sandbars were formed, enough amounts of alfalfa seeds were supplied from the inlet section of the flume. The result of experimental flume tests showed that alfalfa seeds, transported by flow, were settled at the front edge of sandbars during the recession stage of the discharge. This is because, the flow at most downstream areas of sandbars and the front edge of sandbars decreased earlier than that of middle area of sandbars during decreasing of discharge, as shown with the numerical results. This flow causes the specific seeds deposition areas. Those results imply that invading vegetation has specific settling characteristics and make vegetation patches on sandbars.

Key Words: seed settling pattern, vegetation distribution, bare sandbar, riverbed morphology

1. はじめに

植生の河川への侵入は全国的に認められる現象であり、河積の減少に伴う洪水時の災害リスクの増大や、流路の固定化による氾濫原の減少が問題視されている。北海道においても、多数の河川において樹林化の進行が報告されており、中でも札内川、豊平川、真駒内川のような市街地内を流れる河川では樹林化対策にかなりの時間と人件費が割かれている。図-1に北海道・豊平川への植生侵入のようすを示す。このような北海道で問題となる植生の大半は、裸地へと先駆的に侵入するヤナギ類である。

植生が河床変動に与える影響に注目した実験や数値解析はこれまでに多数報告されている^{1), 2), 3)}など。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⁾。しかしながら、こ

図-1 北海道札幌市内を流れる豊平川（KP15.0付近）への植生侵入の様子、左）平成12年、右）平成17年、札幌開発建設部河川計画課の許可を経て掲載

れらの報告では裸地砂州への植生侵入の第一段階である種子の定着特性までは考慮されておらず、種子の定着箇所の違いに伴う植生分布の違いがその後の河床変動特性に与える影響については殆ど分かっていない。流水で輸送される種子の局所的な定着と、それがもたらす植生分布の違いが河床変動に与える影響を検討した報告は非常に限られている。数少ない報告として、Van Dike et al.⁵⁾は、高水敷に均等に種子を播いた場合と流水によって種

子散布した場合の河床変動を実験から比較している。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、砂州の一部でのみ河岸の安定性が増し、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）が形成されること等、興味深い知見が指摘されている。しかしながら、Van Dike et al.⁵⁾ の報告においても種子の定着特性自体までは言及されてはおらず、現時点において砂州形状や増水時の水理条件等の違いが種子の定着特性に及ぼす影響、あるいはその違いが後の河床変動に与える影響についてはよく分かっていない。

そこで本研究では、流水にて輸送される種子の定着特性とその後の河床変動特性について水路実験と数値解析から検討した。将来的に現象を数値モデルへ反映させることができるように、水路実験では幅の狭い直線水路を利用した単純な条件での実験を実施した。その後、砂州上の流れ状況を数値解析にて再現し、種子が局所的に堆積する要因について考察すると共に、植生分布の違いが異なる河床変動をもたらす可能性について検討した。

2. 実験方法

実験には全長3.6m、幅0.15m、勾配1/100の長方形矩形水路を用いた。水路内の河床材料は粒径0.78mmの一樣砂とし、水路上流端より32cmの位置から水路下流端の砂止め堰まで水路底から5cmの高さで敷きつめた。水路下流端には、出来る限り等流水深を確保するため、木製の柵を設置した。

表-1に実験の水理条件を示す。本実験における水理条件は、黒木・岸⁶⁾ による交互砂州の形成条件に該当するように設定した。実験は全てのケースにて流量（0.27 l/s）を定常給水条件として与え、実験終盤に種子を散布する場合のみ実験ケースごとに異なる流量を与えるものとした。種子には既往検討での利用実績が多いアルファルファ種子（長辺：1.0~1.2mm程度、比重：1.1~1.2程度）を用いた。給砂材料は河床材料と同一とし、事前に測定した平衡掃流砂量に近い量を水路上流域から連続的に与え続けた。

表-2に実験ケースを示す。Case 1およびCase 2の初期河床である交互砂州は、実験開始前に平坦に均した河床に30分間の通水を行うことで作成した。Case 1では、交互砂州形成後に定常給水のままで種子を散布し、種子の定着位置を確認した。一方、Case 2では交互砂州形成後の裸地砂州において、図-2に示す流量減水条件のもとで種子を散布し、植生の定着位置をCase 1と比較した。図-2に示す流量減水条件は、30秒程度で水路上流端から与えた種子が水路下流端まで十分到達するため、ポンプを

表-1 実験の水理条件

実験条件	
流量 Q (m ³ /s)	0.00027
水路幅 B (m)	0.15
水路勾配 I	0.01
河床材料の平均粒径 d_m (mm)	0.78
等流水深 H_0 (cm)	0.8
無次元限界掃流力 τ^*	0.08
$BI^{0.2}/H_0$	5.5

表-2 実験ケース

ケース	種子散布	流量 (m ³ /s)	実験開始時の植生の有無
Case 1	有	0.00027	なし
Case 2		0.00027~0	
Case 3	無	0.00027	あり
Case 4		0.00027	
Case 5	有	0.00027~0

図-2 種子散布位時 (Case 1, Case 2, Case 3) の流量

2台使用して1台ずつ止めたものである。種子の散布は水路上流端から行うものとし、十分な量として30秒に2gずつ（計6g）アルファルファの種子を散布した。

次いで、河床変動応答実験としてCase 3およびCase 4を実施した。Case 3ではCase 1終了後に通水を再開し、30分経過後の砂州の移動と波高の変化等を確認した。Case 4は、Case 2終了後に定着した種子が発芽後十分に成長した5日後に通水を再開し、砂州の移動、波長、波高等の変化をCase 3と比較した。さらにCase 5では、Case 4終了後、図-2に示す流量減水条件のもとで種子を散布し、植生が既に存在する砂州への種子の新規定着位置を確認し、Case 2と比較した。

3. 実験結果と考察

(1) 裸地砂州へのアルファルファ種子の定着特性

水路上流から2つ目に位置する砂州を測定箇所として用いた。対象とした交互砂州の波長は約1.5m、波高は約0.7cmであった。

図-3にCase 1, Case 2およびCase 5終了時の河床と種子の堆積の様子を示す。図-3 (a) より、定常洪水条件において種子を散布した場合、ほぼすべての種子は下流端まで流下し、砂州上に種子が定着しなかった。これは、

図-3 裸地砂州への種子定着状況の比較

- a) Case 1
- b) Case 2 (赤矢印で示す黄土色の点が種子である),
- c) Case 5 (植生周りの黄土色の点が種子である)

Case 1の定常給水条件の場合、砂州はすべて冠水状態となり、砂州上を流れる水の流速が速いために種子が定着しにくい状況が作られたと考えられる。一方、図-3 (b)より、流量減水条件において流水にて運ばれる種子の存在を考慮した場合、散布した種子は砂州上に均等に定着するのではなく、砂州前縁部にのみ集中的に定着した。これは、図-4に示すように砂州前縁部は横断方向の河床位高が急に変化するため、減水中に種子が堆積しやすい状況が創出されるためと考えられる。

さらに、図-3 (c)より、植生の存在する砂州に種子を散布したCase 5では、種子はCase 2と同様に砂州全体に均等に定着せず、植生の集中する砂州前縁部にのみ集中して種子が定着する様子が確認された。以上のことから、今回対象としたような流路幅の制限された水路内に形成されるような交互砂州では、流水性の植物の種子は砂州前縁に集中して定着する可能性が高いこと、および後から定着する種子も先に砂州上で成長している同一種と同じく砂州前縁に定着する可能性が高いことが推察される。

(2) 植生の有無に伴う河床変動

図-5にCase 3およびCase 4実施前後の河床高の縦断変化を示す。図-6にCase 4実施前後の河床高の横断変化を示す。図-5より、砂州上への植生の有無の違いによる河床変動を比較すると、砂州上に植生がなかったCase 3では図-5 (a)に示すように砂州が下流へと明瞭に伝播した。一方、図-5 (b)より、砂州前縁部に植生が繁茂していたCase 4ではCase 3と異なり砂州の前進が殆ど認められず、砂州前縁部の河床高が顕著に上昇していた。また図-6より、横断方向の河床高さも図-5 (b)に示す縦断方向の河床高さと同様に、砂州前縁部において河床が上昇したこ

とが分かる。これらは、植生が流れの抵抗として働くため、砂州前縁部にて掃流砂が捕捉されて河床が高くなったものである。

4. 数値解析

実験で確認された流水で輸送される種子の裸地砂州への定着特性と流況特性との関係性、および植生繁茂状況

図-4 Case 1の横断方向の河床位
(砂州の横断幅が最も広い箇所にて測定)

図-5 植生の有無に伴う河床位の縦断方向変化

a) Case 3, b) Case 4

図-6 Case 4における砂州の河床位の横断方向変化

の違いが河床変動計算に与える影響を検討するため、以下の解析を実施した。

(1) 数値解析法

流れの計算は水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。ただし、運動方程式には水中の植生の影響を以下のように抗力の形で考慮している。

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial(hu)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial(hu)}{\partial y} \right) + F_{vx} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial(hv)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial(hv)}{\partial y} \right) + F_{vy} \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 x 、 y は流下方向軸と横断方向軸、 h は水深、 u 、 v は水深平均流速の x 、 y 方向成分、 g は重力加速度、 H は水位、 τ_{bx} 、 τ_{by} はせん断力の x 、 y 方向成分、 ρ は水の密度である。 v_t は乱流拡散計数であり本計算では0方程式モデルを用いている。 F_x 、 F_y は植生の影響を表す抗力であり、本計算では以下の式より求めている。

$$\frac{F_{vx}}{\rho} = \frac{1}{2} C_d \lambda_v hu \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

$$\frac{F_{vy}}{\rho} = \frac{1}{2} C_d \lambda_v hv \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

ここに、 C_d は形状抗力係数、 λ_v は植生密度である。流れの計算の基礎式の差分にはMacCormackの陽的・2段階差分法を適用し、数値不安定性を抑制するためCausionモデルのTVD項を付加している。

河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測する。流線の曲率を求める際の係数値はEngelund⁷⁾と同様の7.0を用いている。流砂は掃流砂のみを考慮し、芦田・道上式⁸⁾に河床の局所的な勾配が流砂ベクトルに及ぼす影響を考慮した芦田・江頭・劉⁹⁾の方法を用いる。河床変動計算では、局所河床勾配が安息角以上になった場合、勾配の高い計算メッシュから砂を低いメッシュに落とし、局所勾配が安息角以上にならないように補正している。なお、本計算では植生繁茂に伴う安息角変化は不明瞭なため考慮せず、安息角を常に45度の一定値として扱っている。

(2) 解析条件

数値解析における計算領域は、水路実験と同じ全長さ3.6m、幅0.15m、勾配0.01の直線矩形水路とした。数値解析の初期河床は平坦床であるが、水路実験と同様に始めに30分間定常流を与え、水路内に交互砂州を形成させ、以下に述べる解析ケースの初期河床とした。

表-3に解析条件を示す。Case S1は、水路実験Case 1と

表-3 解析ケース

ケース	植生の有無	流量 (m³/s)	植生密度
Case S1	なし	0.0027	—
Case S2		0.0027 ~ 0.0	—
Case S3	なし	0.0027	—
Case S4	植生あり (砂州前縁部のみ繁茂)	0.0027	0.1
Case S5	植生あり (砂州上に均等に繁茂)	0.0027	0.02

同様に砂州全体が冠水する流量の定常流を与え、砂州上の流況特性を確認するものである。Case S2は、流量減少時の砂州上の流れ場を検討するものであり、90秒かけて流量が線形的に減少するハイドログラフを与えている。Case S3、Case S4、Case S5植生が河床変動に与える影響を比較するものである。解析対象区間は実験と同じく水路中央部付近に形成された砂州を対象とした。Case S3は植生なしの交互砂州、Case S4は実験結果と同じく植生を砂州前縁にのみ分布させるケース、Case S5は砂州全体に様に植生を分布させるケースである。ただし、Case S4とCase S5では砂州上の植生分布域が異なるものの、一つの砂州上における植生の総量が同じ値となるように植生密度を調整した。

5. 解析結果と考察

(1) 砂州上の流況特性

図-7は、数値解析の初期河床として得られた交互砂州の河床位を、水路右岸から2cm離れた縦断面において実験値と比較したものである。図-7によると、数値計算にて計算された交互砂州は水路実験よりもやや波高が低いものの河床の縦断変化特性は大まかに表現できており、ここでの解析に必要な精度が得られていると判断できる。図-8にCase S1の解析で得られた河床位および水深平均流速ベクトルを示す。図-8の赤矢印は、砂州上の水深平均流速ベクトルの主な移動方向を示している。図-8に示すとおり、砂州全体が水に浸かっている状況では、砂州上には比較的速い流れが形成されることがわかる。このため、水路実験のCase 1のように高水敷が水に浸かる間は、種子は上流から輸送された流れにのって下流へと運ばれ、種子は砂州上に堆積しない。図-9に非定常の流量減水条件を用いたCase S2の河床位コンター図および水

図-7 右岸から2cmの縦断面における河床位の縦断変化

図-8 河床位および水深平均流速ベクトル (Case S1)

水深平均流速を示す。また、図-10に縦断方向の河床位および流量減少に伴う水面形変化を、図-11に砂州の横断方向の河床高を示す。図-9より、本検討で対象とするような水路幅の固定された直線水路に形成される交互砂州上では、流量減水時、図-9 (b)に示すように砂州下流域から水深平均流速が低下することがわかる。これは、砂州上の流れは図-9 (b)の赤矢印で示されるように砂州の最下流域よりも上流側にて主流路に向かって流れ込むためである。このため、図-10に示すように砂州下流域では流量低下の早い段階から水位が低下し、上流から輸送されてきた種子、あるいは浮遊砂のような物質が堆積しやすい状況になるものと考えられる。次いで、流量がさらに減少すると図-9 (c)および図-9 (d)に示すように、水深平均流速は砂州前縁部において砂州中央部よりも先に低下する。これは、図-11および実験結果 (図-4) から示されたように、直線水路に形成される交互砂州の横断河床位は砂州中央部から砂州前縁に向かって高くなる

ためである。以上の流況特性より、本実験条件下では上流から輸送されてくる種子は流速の速い砂州中央部には堆積し難く、流量減少時に砂州下流域および砂州前縁部まで運ばれそこで堆積する、もしくは砂州中央部から主流路へと流れ、さらに下流へと輸送されることとなる。

(2) 植生分布の違いによる河床変動

図-12にCase S3, Case S4, およびCase S5の河床変動計算の結果を示す。図-12より植生の有無と植生繁茂状況の違いに対する河床変動を比較すると、砂州上に植生が存在しないCase S3では、図-12 (a)より計算終了時の砂州が計算開始時とほぼ同じ形を保って下流方向へと伝播している。その一方、図-12 (b)および図-12 (c)によると、砂州上に植生を有するCase S4およびCase S5では砂州の河床上昇が認められる。これは、植生によって砂州上の流れの抵抗が増し、植生近傍に掃流砂が捕捉されやすくなったためである。

次いで、図-12 (b)および図-12 (c)の河床変動と比較すると、植生を砂州前縁にのみ集中させたCase S4では、植生を砂州全面に分布させたCase S5に比べて河床上昇の割合が少ないことがわかる。さらに、Case S4では砂州上に局所的な河床上昇の場合 (赤矢印で示す) が認められる。これは、Case S4では、植生によって流れの抵抗が砂州の一部のみで急激に上昇するため、上流から流れてきた掃流砂が局所的に堆積しやすくなるためである。なお、このような裸地砂州上に形成される局所的な植生繁茂に伴う局地的な河床上昇は、始めに述べた通りVan Dike et al.⁵⁾においても報告されている。彼らの報告では、このような植生に伴う局所的な河床上昇は網状河川が完全な蛇行河川へと移行することを妨げ、Island Braiding 形状をもたらすなど、植生が砂州全面に存在する場合と異なる河床変動を引き起こすことが指摘されている。本検討では側壁を固定させた条件で河床変動計算を行っているため、植生繁茂条件の違いが流路の蛇行形成に与える影響までを考察することは出来ないが、図-10よりCase S3, Case

図-9 流量減少時の水深平均流速ベクトル (Case S2), (b) ~ (d) で見られる $X=1.6\text{m}$ あたりの河床高変化は流量減少に伴う掃流砂の堆積によるものである。

図-10 右岸から2cmの縦断面における河床位と水面形変化 (Case S2)

図-11 横断面における河床位高さ (Case S2), 図中のXは上流端からの距離を示す。

S4, Case S5の主流路内の局所洗掘位置を比較すると, 局所洗掘域は砂州前縁の河床位が高くなるほど下流側へと移動することがわかる. このような河床変動特性の違いは, 側壁を侵食性河岸である水路実験や数値計算を行った場合, その後の河床変動に大きな違いを引き起こす要因となる可能性が推察される.

5. 結論

本研究では, 水路実験にて流水にて輸送される種子の裸地砂州上への定着特性および植生侵入後の河床変動特性について確認するとともに, 数値解析にて砂州上の流況特性を再現し, 種子の定着特性に違いがもたらされる要因を検討した. また, 植生繁茂の場所の違いが河床変動に与える影響についても非侵食性河岸を有する直線水路を対象とする検討を行った. 本研究で得られた成果をまとめると以下のようである.

- (1) 水路実験より, 流水で輸送される種子は流水減水時に裸地砂州へと定着すること, およびその定着位置は一樣ではなく, 砂州前縁に集中することを確認した. また, 砂州前縁にて植生が成長した後に水路上流から再度種子を供給した結果, 種子は裸地砂州の場合と同じく砂州前縁にのみ集中して堆積した. これは, 流水にて輸送される種子の定着特性は成長後の同一種の植生から受ける影響が小さいことを示すものである.
- (2) 数値解析によると, 砂州全体が水に浸かっている状況では砂州上に比較的速い流れが形成される. 一方, 流量が減少し始めると, まず砂州下流域にて水深平均流速が低下し, 次いで砂州前縁部の水深平均流速砂州中央部よりも先に低下する. これより, 上流から輸送されてくる種子は流速の速い砂州中央部には堆積し難く, 流量減少時に砂州下流域および砂州前縁部まで運ばれそこで堆積する, もしくは砂州中央部から主流路へと流され, さらに下流へと輸送されることとなる.
- (3) 数値解析による河床変動解析より, 植生の分布状況により異なる河床変動がもたらされることが示唆され

図-12 河床変動および水深平均流速ベクトル,
a) Case S3, 植生なし
b) Case S4, 砂州前縁にのみ植生
c) Case S5, 砂州全面に植生

た. 植生を砂州前縁にのみ存在させた場合, 砂州上に局所的な河床上昇域が形成された. 一方, 砂州全面に均等に植生を分布させた場合, 砂州前縁部の河床上昇が最も大きくなり, それに伴い主流路の局所洗掘域は, その他のケースに比べて下流側へと移動した.

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) 清水義彦, 岩見収二: 礫床河床の植生化による砂州・みお筋の形態変化について, *水工学論文集*, Vol.68, I-973-I-978, 2012.
- 4) 内田崇浩, 木村一郎, 川村里実, 清水康行: 植生の消長を考慮した水路における数値解析的研究, *水工学論文集*, Vol.59, pp. I-1147-I-1152, 2015.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, *Journal of Hydraulics Division. ASCE*, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- 8) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, Vol.206, pp.59-69, 1972.
- 9) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, *水工学論文集*, Vol.35, pp.383-390, 1991.

(2015.9.30受付)