

砂州上の植物群落の拡大に伴う河床変動 についての基礎的実験

池田裕一¹・塚田野絵²

¹正会員 博士(工学) 宇都宮大学大学院 助教授 工学研究科 (〒321-8585栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

²学生会員 宇都宮大学大学院博士前期課程 工学研究科 (同上)

自然のサイクルを考えた上での河川改修が求められているが、それには植生・流れ・地形を1つのシステムととらえ、その働きを明確にする必要がある。本研究では、これまで明示的に取り上げられてこなかった、砂州上の植物群落の拡大に伴う河床変動について、室内実験により検討した。現象をとらえるために水路に擬似植生帯を配置し、実河川の状況を反映できるような実験条件を設定した。今回の実験条件では、河床形状が河床波的に大きく時間変動し、従来報告されているような一つの安定平衡の形状に漸近していく様子はまったく見られなかった。また、群落の拡大に伴い、河床変動も大きくなることがわかった。人間のマネジメントに応答する上記のシステムは複雑なものになることが予想されるので、様々な条件下でのシステムの検討が不可欠である。

Key Words : vegetation, alternate bars, river bed shape, sand waves, similarity law

1. はじめに

近年、ダムや堰などによる流量の制御や河川改修、砂利採取など、人工的な河道整備を行った結果、大域的な河床低下や、河道内の植生域の拡大が進行するなどし、本来の自然サイクルが崩れてきている。そこで、河川本来の自然を復元するようなマネジメント手法が要請されている。それには、植生・流れ・地形が相互に作用しあうことから、これらを1つのシステムとしてとらえ、人間のマネジメントに対して、このシステムがどのように応答するのか詳細に検討する必要がある。これについては過去に多くの研究があり、現地調査を始め、植生を水路に配置した室内実験や数値シミュレーションも数多く行われている^{1), 2), 3)}。しかし、実際の河川の状況を考慮に入れている研究は少なく、植生が流れや地形に及ぼす影響は捉え切れていないといえる。すなわち、砂州や砂堆などの各種河床形態の発生と植生による流れの変化との連携作用や、地形変化に伴う植生繁茂領域の変化など、不明な点は多く残されている。そこで、現象を明らかにするためにも、実河川の植物群落や出水状況を考慮した実証的研究が必要である。特に砂州上に繁茂する植物群落のパターンは多様であり、それに伴う流れや地形の変化も複雑にな

ると予想される。砂州全域で植生が繁茂することはまれであり、出水ごとに様相を変え、次の出水までは植物群落は拡大していくものと考えられる。

本研究は、砂州上で植物群落が拡大していくことに注目し、それぞれの段階が河床変動・形態にどのような影響を与えるのかを、移動床実験により若干の検討を行ったものである。

2. 実験方法および実験条件

(1) 実験概要

実験には、全長 4m、幅 10cm の直線水路を用いた。河床材料として、中央粒径 0.38mm の川砂を用いた。これを勾配 1/100 となるように厚さ 4cm ほど平坦に敷き詰め、初期河床とした。水路には擬似植生を配置し、流量、植物群落長をそれぞれ変化させ、全部で 15 パターン行った(表-1 参照)。

通水時間は、60 分間とし、ある程度現象が安定したところで停水した。今回の実験では動的平衡状態ではなく、全体としては不安定な時の変動が継続して見られた現象の違いに着目している。排水後にポイントゲージによる河床高の測定と全体の変動の様子を見るため、写真撮影を行った。また、通水中、

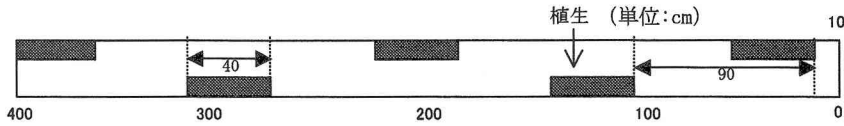


図-1 植生長 40cm の配置

表-1 実験条件

流量(cm^3/s)	200, 300, 400
植物群落長(cm)	5, 10, 20, 40, 80
初期河床勾配	1/100
フルード数	0.703~0.774
水深(cm)	0.88~1.49
幅水深比	8.8~14.9

表-2 植生の相似則

	本実験値	関根ら ²⁾	福岡・渡辺 ⁶⁾
水深 $h(\text{m})$	0.01	0.08	5.50
代表流速 $u_o(\text{m/s})$	0.14	0.50	3.25
フルード数 Fr	0.45	0.56	0.44
透過係数 $k(\text{m/s})$	0.38	1.12	18.26
固有浸透流速 $u_w(\text{m/s})$	0.03	0.10	0.30
u_w/u_o	0.24	0.20	0.09



写真-1 斜め後方への洗掘

15 分毎に 100cm^3 程給砂した。

(2) 砂州地形に関する配慮

本研究では砂州上に繁茂する植生の作用について検討するため、今回の実験では砂州と植生配置は以下のように設定した。まず、交互砂州の長さ λ は水路幅の 9 倍であるとされている²⁾ことから、この水路で形成される砂州の長さは 90cm となる。図-1 のように砂州の上流部から 90cm 間隔で、左右にそれぞれの Run における植生の長さを配置することとした。植生帯の幅は、流れを考慮して水路幅の 1/3 程度となるように決めた。

砂州形成のパラメーターである幅水深比が 10 以上となるように、水深は 1cm を基準とした。

(3) 植生帯に関する力学的相似

擬似植生帯として用いたのは、プラスチック製透水材 (名称ヘチマロン、透過係数 $k=0.38\text{m/s}$) である。ヘチマロンを使用するにあたって、植生帯を配した水路の力学的相似則について検討した。

非植生域では、一般の相似則のようにフルード則を考えればよいだろう。これは、

$$F_{rp} = \frac{u_{op}}{\sqrt{gH_{op}}} = \frac{u_{om}}{\sqrt{gH_{om}}} = F_{rm}$$

と表される。ただし、 u_o : 代表流速、 g : 重力加速度、 H_o : 代表水深であり、添字 p は実物での値、添字 m は模型での値を意味する。

植生域では、流れが植生の抵抗を受けるため、代表流速としては植生の抗力を考慮したものとなる。

これには固有浸透流速³⁾を用いるのが適当であろう。

固有浸透流速は

$$u_w = \sqrt{\frac{2gi_o}{C_D\lambda}} = ki_o^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

で表される。ここに i_o : 河床勾配、 C_D : 抗力係数、 λ : 面積密度、 k : 透過係数である。

ここで、植生が水没しない場合の平面 2 次元流れにおける植生域での定常流れの運動方程式

$$gHi_o + \frac{d}{dy} \left(\varepsilon H \frac{du}{dy} \right) - \frac{1}{2} (f_1 + C_D\lambda H) u^2 = 0 \quad (2)$$

を考える。ただし y : 水路横断方向座標、 ε : 横断方向の渦動粘性係数、 f : 底面の摩擦損失係数、 u : 流速、 H : 水深である。式(2)において、左辺第 1 項は重力項、第 2 項はレイノルズ応力項、第 3 項は河床摩擦及び植生の抵抗である。ここで第 2 項は水路幅が水深に比べて十分に広ければ、全体に対する寄与の度合いは小さいと考えられる。さらに一般には、 $f_1 \ll C_D\lambda H$ なので、式(3)はオーダー的には、

$$gHi_o - \frac{1}{2} C_D\lambda H_o u_w^2 = 0 \quad (3)$$

となる。よって、実物と模型との間に相似が成り立つためには、式(3)の第 1 項と第 2 項の比が等しくなければならない。結果として、固有浸透流速と代表流速の比

$$\frac{u_{wp}}{u_{op}} = \frac{u_{wm}}{u_{om}} \quad (4)$$

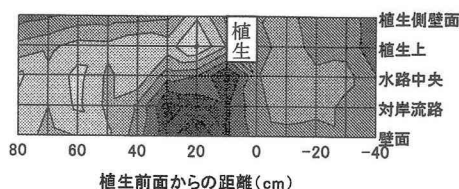


図-2 位相平均の等高線図(植生長 10cm)

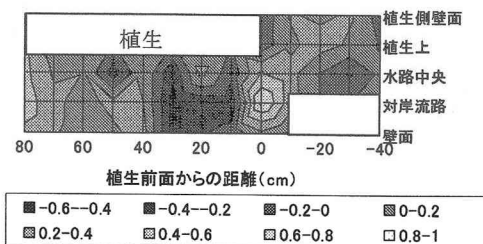


図-3 位相平均の等高線図(植生長 80cm)

の形になり、植生を有する水路ではフルード則と式(4)の両面から検討する必要がある。実スケールとして福岡・渡辺の論文⁶⁾より利根川-値を比較する。室内実験値として関根²⁾の論文の値を比較する。結果を表-2に表す。フルード数、 u_w/u_o 両方とも、それぞれ近い値をとっており、相似を満たしているといえる。

3. 実験結果および考察

(1) 植生による現象

15 パターンの実験で共通に見られたのは、写真-1に示すような植生の前方から斜め後方への洗掘である。これは、流れが植生によって曲げられる際に勢いが強くなり、砂が掃流され出来るものと考えられる。

図-2、図-3は、河床変動量の位相平均をとって等高線にしたものである。流れ方向での植生群落の始まりを $x=0$ としており、 y 軸として、植生を基準に5地点定めている。色が濃いほど洗掘を示し、数値は初期河床高からの差である。図-2より、植生後方の対岸壁面に流れが勢いよくあたり、そこで洗掘が生じていることがわかる。この斜め後方への洗掘がきっかけとなり、河床波(後述)が形成されるとも考えられる。

植生の背面には堆積域が生じている。植生域内では流速が落とされるが、植生長が短い場合、植生域内で十分に速度が落ちずに流砂され、主流は曲げられて斜めになるため、植生の背面では流れの勢いが

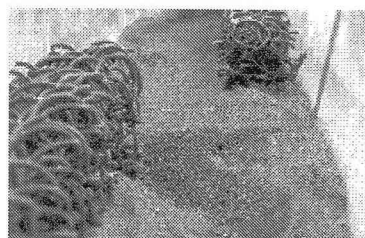


写真-2 植生間の堆積



写真-3 河床波の様子

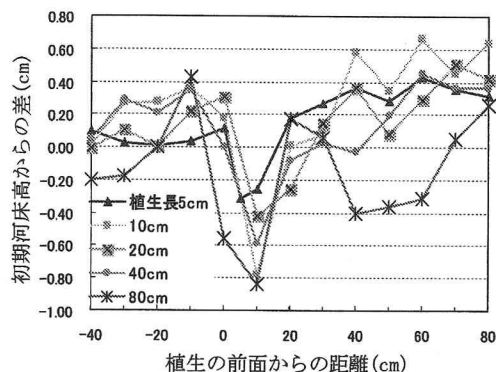
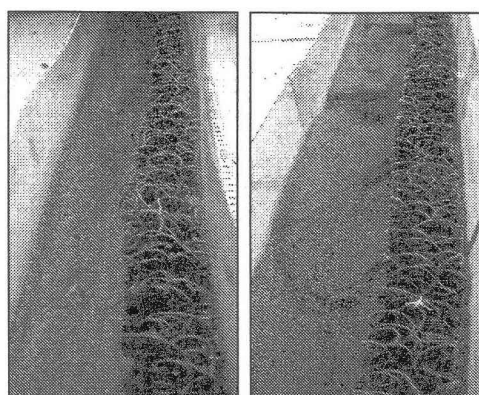


図-4 水路中央における河床の縦断変化

弱まり、背面に砂が堆積するといえる。また、植生を避けて通る流れが掃流した砂は、植生域と非植生域の間に堆積している。写真-2は植生長 80cm の河床の様子を写したもののだが、これより、群落間に堆積が生じていることがわかる。図-3より、群落間の堆積とその下流での洗掘が読み取れる。過去の研究²⁾では植生によって滞筋が蛇行する流れが生成され、群落間が短い時、これによって洗掘域と砂州域が形成されると報告されているが、本実験からも同様な現象が見られている。しかしこの砂州域というのは、一般に言う交互砂州とは意味合いが多少異なるため、単なる堆積域とした方がよいだろう。図-2からも植生の前方では全体的に堆積しており、その他のパターンでもこの傾向は見られた。これより、洗掘によって上流側の堆積域は形成され、群落間隔が近づくほど、その堆積が顕著になることがいえる。



左：写真-4 $Q=200\text{cm}^3/\text{s}$
右：写真-5 $Q=400\text{cm}^3/\text{s}$

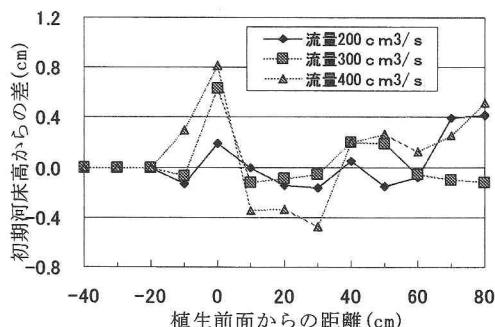


図-5 植生対岸流路における河床の縦断変化

(2) 河床形状の変化

通水中には河床波の形成が見られた。写真-3 のような水面が揺れるほどの河床波も見られた。これらは特に流量 $400\text{ cm}^3/\text{s}$ ではっきりと確認された。見られた河床波というのは、中規模河床波の砂州というよりは、小規模河床波である砂堆であった。写真からは反砂堆のようにも見えるが、フルード数が 0.8 以下である条件から、砂堆であるとする。実験からは 2.5 cm ほどの深い洗掘も見られたので、河床形状は単なる砂堆ではないと言える。排水後の河床形状では長さ 20 cm ほどの交互砂州のような形状も見られた。だが、今回の水路では 90 cm の砂州の形成を想定しているので、砂州ではなく砂堆として捉えることにする。この条件下で、長い水路を用いてしばらく通水したとすると、想定どおりの砂州が形成された可能性はあるだろう。また、小規模河床形態は、形が残りにくいものであることから、通水中には変化のあったものでも、排水後河床形状が消えたことも考えられる。砂堆として見られたこの現象が、現地での流れの中では砂州に変化していくのではないかと考える。流量が $200\text{ cm}^3/\text{s}$ の時には植生

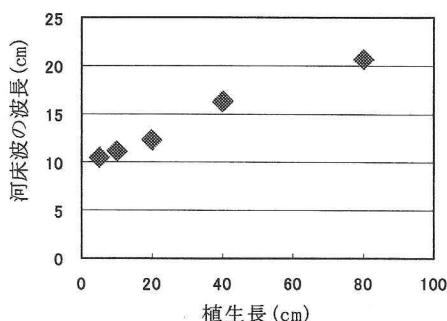


図-6 河床波の波長と植生長の関係

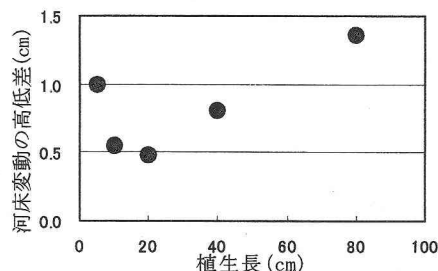


図-7 河床高と植生長の関係

長による変化はなく、はっきりとした河床形状は見られなかった。 $300\text{ cm}^3/\text{s}$ の時には植生長 $40, 80\text{ cm}$ の時に大きな河床変動が見られ、 $400\text{ cm}^3/\text{s}$ の時には植生長によらず、全てにおいてはっきりとした河床形状が見られた。しかし、植生長が長くなるにつれて、高低差のある形状となった。植生長・流量ともに変化させることで現象の境界が確かにあることが確認出来た。

また、植生前面の河床が掘れる現象も全てにおいてではないが、多く確認された。これは、流れが植生によって曲げられ、砂を掃流する際に植生前面の下部にある砂も一緒に掃流されるからだと考えられる。橋の橋脚で見られるような渦も発生していた。

(3) 条件による比較

群落長による比較を行う。植生前面を縦断距離 $x=0$ の基準位置とし、流量 $300\text{ cm}^3/\text{s}$ での河床の水路中央の縦断変化を図-4 に示す。植生前面から 10 cm のところで大きな洗掘が生じている。これは、前に述べたように、流れが植生により曲げられ、流下方向に砂が掃流されるからである。群落長による位置的な変化がないことから、この洗掘は水路幅と植生幅の関係によって決まるものといえる。群落長による変化として、長さが長くなるにつれて河床高の変動と波長が大きくなっていることがわかる。

次に流量による比較を行う。植生長 80 cm の河床

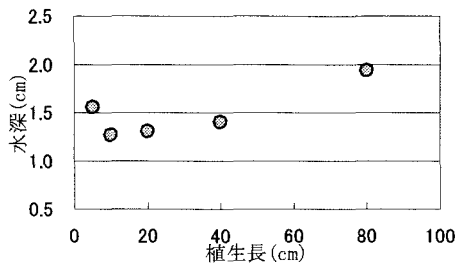


図-8 流量 $400\text{cm}^3/\text{s}$ の水深

の変化を写真-4, 写真-5 に示す。写真より、流量が増すと河床変動が大きくなり、形状がはっきりすることが分かる。写真-5 では深い掘れが確認できる。この掘れが出来ると、植生長、流量に限らず、河床はだんだんと起伏のついたものになってくる。この掘れが生じる原因として、植生によって流れのぶつかる場所が出来、そのうち渦を巻くようになり、掘れへと進化していくものと予想できる。この掘れは渦を巻きながら、少しずつ下流に流されながら埋め戻されていく現象も確認された。図-5 に植生長 80cm における植生対岸流路における河床の縦断変化を示す。植生長 80cm ではほぼ全域に渡って植生によって流路が狭められているため、水路中央ではなく、流路の中央で考えることにする。この図より、変動の大小はわかりづらいが、植生間の堆積 ($x=-10\sim10$ の値) が流量の増大と共に大きくなっていることがわかる。

図-6 に全ての植生長で排水後に河床波が確認された流量 $400\text{cm}^3/\text{s}$ の河床波の波長と植生長の関係を示す。波長は植物群落の拡大に応じて長くなっていることがわかる。また、図-7 に河床変動の高低差と植生長の関係を示す。こちらは最小値をとるような傾向を示しているが、おおむね、植生長に応じて差が大きくなっていることがわかる。これらの原因として考えられることは、植生によって流路が狭められ、流量は変化しないので流速が増加し、値が大きくなるものと考えられる。砂堆の波長と波高は主に水深に関係しているとされており、波長は水深の 5~7 倍であるとの見方が一般的だが、Yalin⁹⁾ は摩擦速度によって若干の違いがあることを示している。今回の実験結果で得られた条件から Yalin の示す式で考えると、波長の差がわずか 0.1cm となってしまう、これでは誤差になってしまう。水深の測定値を図-8 に示すが、図-7 と同じような挙動を示しており、これらの現象は、植生によって流路幅が狭められ、摩擦速度が大きくなったというよりは、水深が変化したことによるといえる。なぜ水深がこの

ように変化するのは明らかにはなっていない。

4. 結論

本実験は、植生・流れ・地形というシステムの中で、植生による流れや地形の変化をとらえる目的で行われた。その結果得られた知見は、以下のようになる。

(1) 植物群落によって流れは曲げられ、斜め後方への洗掘が生じる。その洗掘によって堆積域も形成される。

(2) 動的平衡とはいえない砂堆とみられる河床波が形成された。深い掘れが生じるなど、単なる砂堆ではなく、現地での流れでは交互砂州が形成されるものとも考えられる。

(3) 河床波においては、群落長の長さに応じて河床形状の大きさも段階的に変化することがわかり、更に、流量が増大すると現象は一段と大きくなることがわかった。群落長、流量と相互に働きあい、個々の実験条件においてそれぞれ異なる河床形状が見られた。

以上より、植物群落の拡大と出水の規模により、河床形状は異なる現象を示すことがわかる。植生・流れ・地形システムを考慮して、自然本来の河川環境整備を行うためには様々な条件下での検討が必要であることがわかった。

参考文献

- 1) 例えば、杉尾哲，渡邊訓甫：北川における砂州の地形変化と植生域変化に関する検討，水工学論文集，第48巻，pp.985-990, 2004.
- 2) 例えば、関根正人，浦塚健史：側岸部に交互に繁茂する植生群落によって生成される流れと河床形状について，水工学論文集，第44巻，pp.813-818, 2000.
- 3) 例えば、関根正人，矢島英明：植生群落を伴う河道の流路変動予測に関する研究，水工学論文集，第48巻，p.1045-1050, 2004.
- 4) 池田俊介：単列交互砂州の波長と波高，第27回水理講演会論文集，pp.689-695, 1983.
- 5) 有田正光編著，池田裕一，中井正則，中村由行，道奥康治，村上和男：水圏の環境，pp.345-350, 電機大出版局，1998.
- 6) 福岡捷二，渡辺昭英，上坂恒雄，津森貴行：低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造—利根川新川通昭和56年8月洪水—，土木学会論文集No.509，II-30号，pp.79-88, 1995.
- 7) M.Selim Yalin: RIVERMECHANICS, pp.63-116, PERGA

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON INFLUENCE OF ENLARGEMENT OF VEGETATION ZONE ON RIVER-BED VARIATION

Hirokazu IKEDA and Noe TSUKADA

When we apply river restoration, we have to consider natural characteristics or behaviour of the river system. Especially, river flow, topography, and vegetation must be regarded as one-unified system. Therefore, it is necessary to clarify the response of the system against the human management. For example, the position and the scale of plant communities on sand-bars are very varied and complicated, therefore, change of the flow and topography around sand-bars will also become very much complicated with change of the vegetation zone. In this research, the effects of enlargement of a sand-bar-vegetation on the flow and the topography change were examined. As a result, it is shown that enlargement of vegetation zones makes significant changes to river bed topography, especially like river bed waving.