

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

FLOW AND BED TOPOGRAPHY CAUSED BY A SERIES OF VEGETATION ZONES
ARRANGED ALTERNATELY ALONG THE CHANNEL SIDES

関根正人¹・浦塚健史²

Masato SEKINE and Takeshi URATSUKA

¹ 正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科

Flow and bed evolution caused by a series of alternately arranged vegetation zones along the channel sides were investigated experimentally in the present paper. Because of the rise of water surface elevation just upstream the vegetation zone due to a sudden increase of local flow resistance, a secondary current is generated in the direction departing from the zone. And the locus of maximum velocity line is found to meander between each vegetation zone and its opposite side wall. The bed topography caused by this current in a movable channel is seen that a pair of both a deeply scoured portion and a deposited sand bar emerge in accordance with a generated flow field.

Key Words: vegetation zone, secondary flow, bed topography, sand bar

1. 序論

近年, 環境に配慮した河川整備の必要性から, 関連する調査研究が急速に展開され, その研究の対象範囲は多方面に及んでいる. 本研究で対象とする「植生」については, 90年代に入ってから「河道内の植生が流れに与える影響」を理解することを目的とした一連の研究が精力的に進められてきた(たとえば^{1)~5)}. その結果として, (1) 植生による流速の低減効果と抵抗増加に伴う水位上昇, (2) 植生による浮遊土砂の捕捉効果, などが理解されるとともに, (3) これを予測する数値解析手法の開発, がなされてきた. このように植生が流れに及ぼす影響についてはかなり明確に理解されるに到っている. これに比べて, 本来の目的である「多様性に富んだ自然に近い河道を創造しよう」とする上で重要となる移動床の問題については, 一部議論がなされている^{2), 4)}ものの, 未だ十分とは言えないように見受けられる. すなわち, 植生の存在によって流れ場がその特性を大きく変えるのに伴って, 河道形状自体

も自律的に変化していくことが予想されるが, こうした「流れ場の変化に対する河道の応答」についての議論は今後の課題として残されてきた. こうした中で, 最近, 建設省土木研究所河川研究室がその報告⁶⁾の中で, 河道改修の際に植生が持つ効果を積極的に活用するような川づくりを考えていってはどうか, との考え方を明らかにしている. これは, 単に植生があると流れはどのように変わるか, というに留まらず, 新たな河道の創造に積極的に植生の機能を利用しようというものである. こうした考えを実現する意味からも, 上述の「河道の応答」についての理解が必要ではないかと考える.

このような考えから, 著者らは, 「移動床流路において生じる植生の影響」を土砂水理学的に理解することを目的として基礎的な研究を進めてきている^{7)~9)}. まず最初に, 水路両側岸部に対称に植生群落が繁茂する場合を想定した水路実験を行い, そこで生起する動的安定流路形状について検討するとともに, ウォッシュロードとして輸送される可能性のある微細土砂の

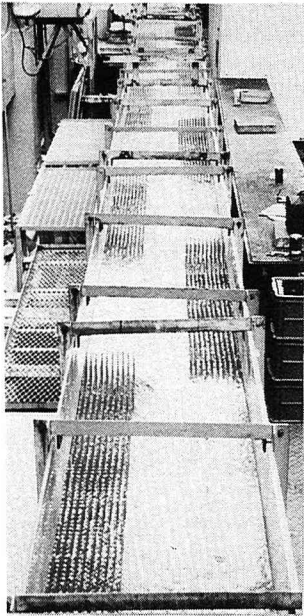


写真-1 実験水路の全景
(流れは上から下)

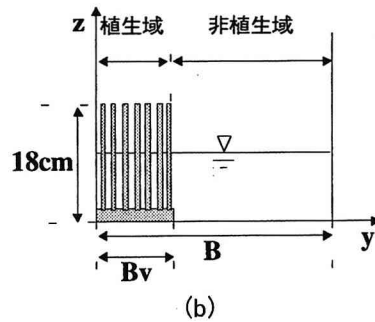
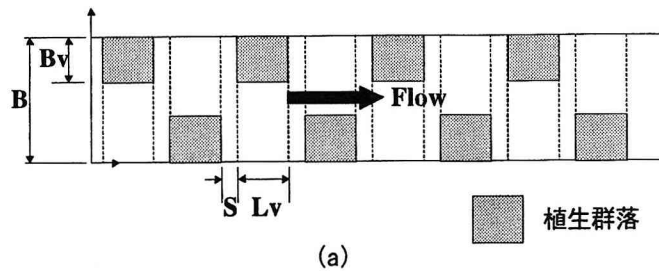


図-1 植生群落の設置位置：
(a) 平面図、(b) 横断面図

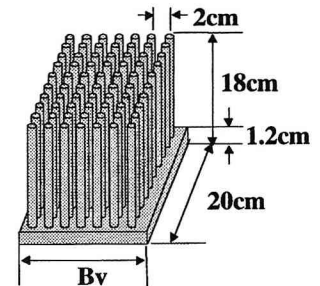


図-2 植生群落模型
の基本要素

表-1 実験条件

	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
	Run F1	Run M1	Run F2	Run M2	Run F3	Run M3	Run F4	Run M4	Run F5	Run M5
水路幅 B (cm)	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
植生群落長 Lv (cm)	60	70	100	140	100	140	100	140	100	140
植生群落幅 Bv (cm)	14	20	14	20	14	20	14	20	14	20
植生群落間隔 S (cm)	0	0	0	0	50	70	25	35	-25	-35
水路床勾配	1/110	1/145	1/100	1/125	1/100	1/133	1/100	1/116	1/100	1/116
水面勾配	1/110	1/115	1/120	1/135	1/177	1/132	1/170	1/118	1/105	1/120
流量 (l/s)	10	15	10	10	10	10.1	10	10	10	8.6
平均水深 (cm)	9.3	7.7	9.1	7.2	8.6	5.8	9.5	6	10.9	5.5
平均無次元掃流力		0.117		0.092		0.076		0.088		0.079

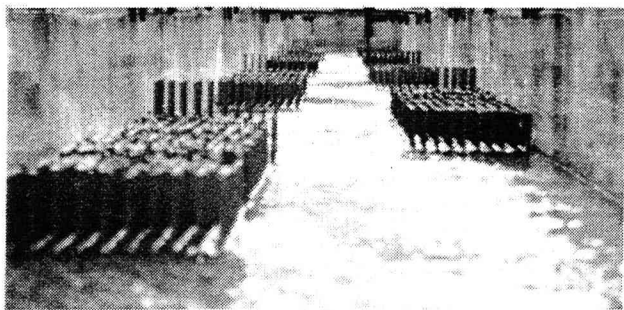
堆積特性について報告した⁷⁾。次に、実河川に繁茂する植生群落は左右両岸に対称に存在することは稀であることを考慮して、より現実に近い第一歩として、植生群落は左右交互に周期的に存在する場合を想定して、そこに生じる流れ場についての実験的検討を行なった^{8), 9)}。本論文は、これらの結果を踏まえて、流れ場の特性とそれに対する応答としての河床変動特性とを明らかにすることを目的とする。

なお、本研究では、主に、低水路河岸に繁茂する植生群落が流れおよび河道に与える影響を明らかにすることを目的としており、高水敷上に存在する植生についてはその対象外としている。

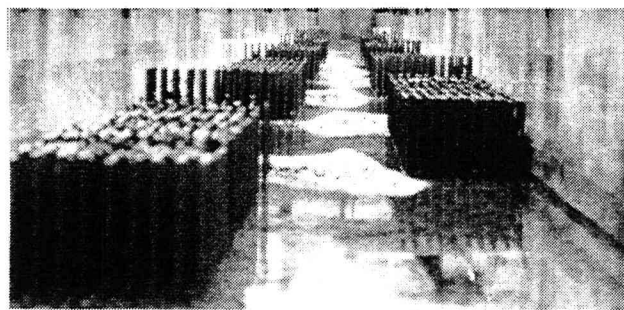
2. 実験概要

まず写真-1に実験で用いた可変勾配水路の全景を示す。写真-1に見られるように長方形断面水路の側壁付近に交互に植生群落を設置した。設置方法は図-1および表-1に概略を示す。植生群落は図-2に示

した基本要素を1つのユニットとして、これを組み合わせることで群落の長さあるいは幅を変えられるようになっている。植生としては剛性が大きく全く揺動を起こさないものを対象とすることにして、直径 5 mm の木製円柱を厚さ 12 mm のベニヤ板に差し込んで固定したものを用いることにした。また、ここでは灌木のような非水没型の植生を対象としており、水路横断面が図-1(b)に示すような状態となるように水理条件を設定している。実験は、2通りの群落長をもつ植生を対象に行なわれ、その各々の条件に対して流速場の特性を調べる目的で行う固定床実験 (Run F1～F5) と、それに対応する移動床実験 (Run M1～M5) とが行われた。測定上の制約から、固定床実験と移動床実験とを同一の水路で行うことができないため、ここでは、水路幅と植生群落幅の比、および植生群落幅と植生群落長の比が概ね一致するように配慮して植生群落模型を設置した。なお、水理条件については両実験間で厳密に相似則が満足されているわけではないが、本研究の範囲内では両者を概ね関連づけて考えることができ



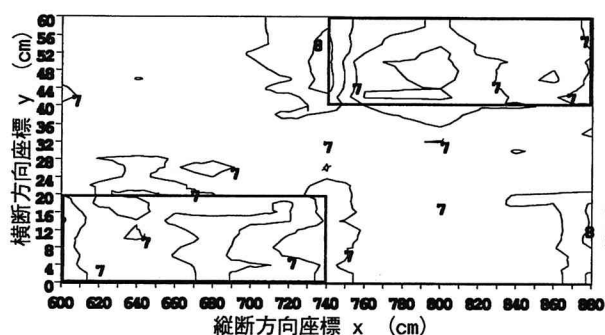
(a)



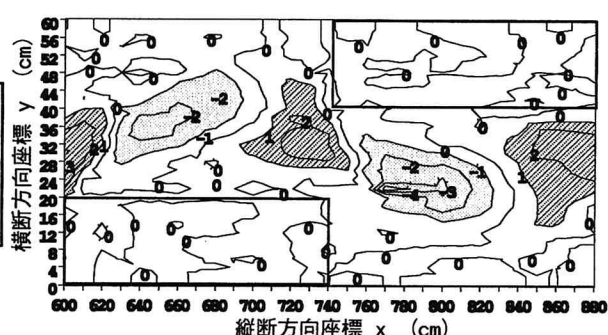
(b)

写真-2 下流側から見た流況ならびに水路床形状 (Run M2) :

(a) 流況, (b) 水路床形状



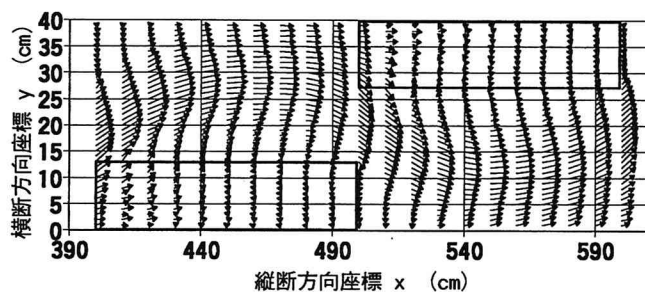
(a)



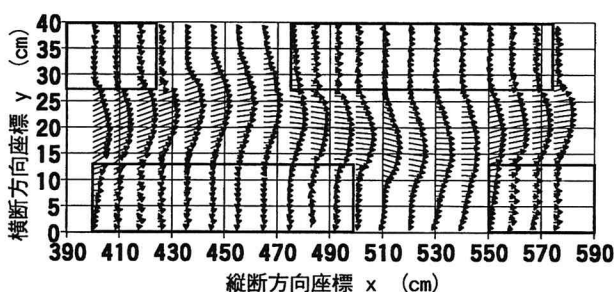
(b)

図-3 水深および水路床高の変動量のコンター図 (Run M2) :

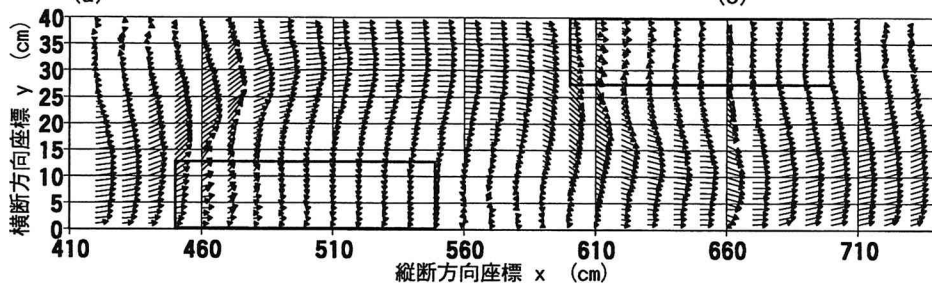
(a) 水深, (b) 水路床: 図中の数字は cm 単位



(a)



(b)



(c)

図-4 流速ベクトル図 ($z = 6$ (cm)) :

(a) Run F2, (b) Run F3, (c) Run F5

と判断している。また、移動床実験における水路床構成材料としては、均一粒径とみなすことのできる珪砂1号(平均粒径3.5 mm)を用いる。通水開始前の初期水路床は、この材料を厚さ6 cmにわたって敷き詰めた平坦床とした。固定床実験では、 $x - y$ およ

び $x - z$ 方向の二成分電磁流速計を用いた流速測定と、ポイントゲージを用いた水路床高および水面高の縦横断方向分布の測定とを行っている。移動床実験では、ポイントゲージによる水面高と水路床変動量の空間分布の測定に加えて、流況を写真ならびにビデオに

撮影した上で、その画像解析を行っている。実験の主な条件は表-1にまとめた通りである。

3. 流速場の特性

まず最初に、流れ場の構造から見ていくことにしよう。写真-2は下流端から見た通水中の水面の状況を撮影したものであり、Run M2 の場合の結果である。この写真から、植生群落を避けるように滞筋が蛇行した流れが生じていることがわかる。

このことを流速測定の結果に基づいて定量的に説明しよう。まず、図-3には、平衡状態における水深と水路床変動量のコンター図を示している。図-3(a)から、植生群落の前面において流れが堰上げられ水位が上昇していることがわかる。また、図-4には RUN F2, F3, F5の場合に得られた流速ベクトル図の一例を、比較のために並べて示している。このような流速の測定は、植生群落により生成される流れがほぼ十分発達していると判断された位置より下流側にあたる上流から4番目と5番目の植生群落区間を中心として行われ、水路床から1, 2, 4 および6 cm における面内の流速データを主にサンプリングした。このうち、図-4に示したベクトル図は、 $z = 6$ (cm) における結果である。なお、水路床に平行な面内の流速ベクトルは、計測された高さ毎に大きく変化するわけではなく、おおよそ図-4に示したもので流れの特性が代表されていると考えてよい。一方、横断面内の二次流ベクトルに関しては、植生群落前面の水面付近を中心にして上昇流が生じていること、それ以外の場所で下降流が生じ、これが底面に近づくにつれて減衰していくこと、などの基本的な性質が理解された。ただし、この流速の鉛直成分については疑問の点が多く、今後さらに検討する必要があると判断しており、別の機会に詳しく報告することにしたい。

ところで、滞筋が大きく蛇行するこのような流れが産み出される原因とは何であろうか。現時点では残念ながらメカニズムのすべてが理解されたとは言いがたい段階にあるが、素過程として重要と考えられる要因としては、次のようなことが挙げられよう。すなわち、(1) 植生群落内の流水抵抗が植生域の外側に比べて相対的に大きいため、流れは各植生群落の前面すなわち上流端付近で堰上げられ、局所的な水位上昇が生じること、(2) 透過性をもつ植生群落であるため、水位の高い植生群落前面付近から相対的に水位の低い植生域の外側の領域に向かって、植生を避ける、あるいは横切るような流れが生じること、(3) しかも、このような斜めの流れが、強制的に左右交互に繰り返し生じさせ

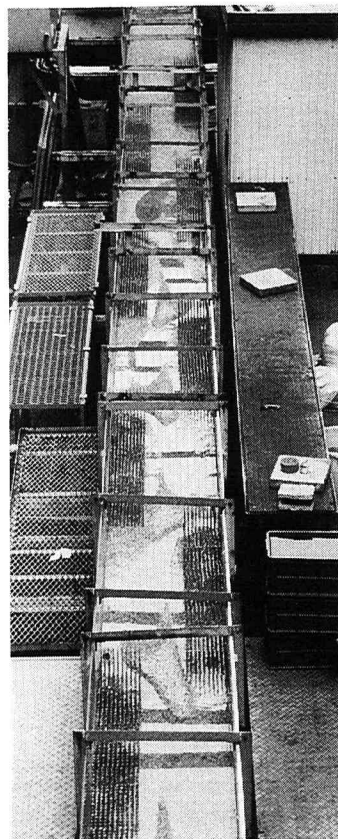


写真-3 下流側上方から見た河床形状 (Run M2)

られること、などである。

次に、図-4に示した一連の結果に基づいて、植生群落の配置の違いによって、生成される蛇行流れの性質にどのような違いが生じるか、について考えておこう。ここで、最も注目しておきたいのは、蛇行流の滞筋(各断面内の最大流速が生じる位置を連ねた線)の幾何学的形状に関する次のような点であろう。すなわち、(1) 蛇行流の滞筋の波長が植生群落長 L_v と植生群落間隔 S の和の2倍に等しいこと、(2) 植生群落間隔 S が正の大きな値になるほど滞筋の振幅が大きくなり、逆に負の大きな値になるほどこれが小さくなること(参考までに滞筋の振幅は図-4の(a), (b), (c)の順に20, 25, 10 cm程度と判断される)、(3) S がある値よりも大きな負の値になると、流れは左右を植生群落に挟まれた狭い範囲に押し込められ、両岸に対称に植生群落が存在する場合に生じる直線状の流れに漸近する可能性があること、などである。この結果を河岸の安定という観点から見ると、たとえば Run F3 のように植生群落間の距離が大きくなり、流れが河岸に当たり、いわゆる水衝部ができるような場合には、河岸浸食が引き起こされる可能性があり、治水上好ましくない。そこで、もし植生群落に水制のような役割を期待するのであれば、群落同士はあまり離れることなく存在することが望ましい。このことは、任意の密度

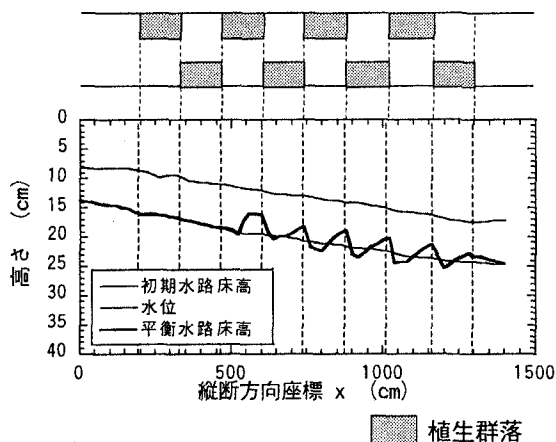


図-5 水路中心軸上の水位と水路床高の縦断方向変化 (Run M2)

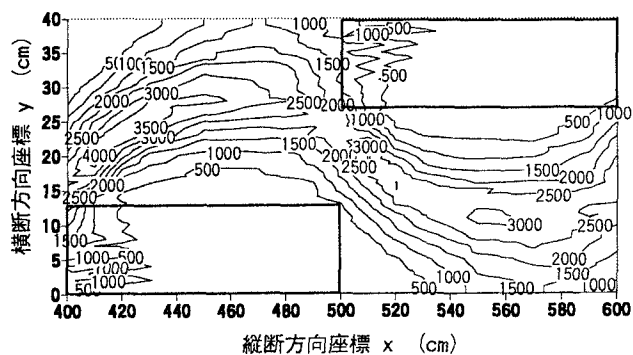


図-6 流速ベクトルの大きさの自乗の値のコンター図 (Run F2)：図中の数字は cm^2/s^2 単位

をもつ植生群落によって流れを制御しようとする場合に、工学的に最適な群落配置というものが存在することを意味している。

4. 河床変動

図-4のように植生群落を左右交互に周期的に配置すると、これらの群落を避けるように蛇行流が生成されることがわかった。ここでは、このような流れが移動床の場で生じた場合に引き起こされる河床への影響について検討する。前掲の写真-2(b)は、写真-2(a)に対応した位置において生じた水路床の変動状況を撮影した写真である。この写真は、通水終了後に排水している最中に撮影されたものである。また、写真-3はこれを水路上方から撮影したものである。これらの写真から、植生群落一対に対して二つの砂州が交互に形成されることが理解できよう。

また、実験時の観察ならびに実験時に撮影されたビデオ画像の解析を通じて、このような河床変動が生じていく過程を調べたところ、Run M2～M4に対して概ね次のようなことがわかってきた。(1) 各植生群落の前面内側から植生域の横外側に向かって斜め方向に浸食が始まり、この部分から下流に向けて洗掘が進行する。この部分は植生群落前面付近から群落を避けるような流れが生じる領域とほぼ一致する。(2) この洗掘域から運び出された土砂はその直下流に堆積し、砂州を形成する。(3) 洗掘域は時間の経過とともに下流側に拡大し、それに伴い砂州は下流に移動する。(4) この砂州は、やがては下流側の植生群落区間に進入し、その先端が下流側の洗掘域に到達するようになると、その先端部が浸食を受け、下流側に先端をもつ三角形の砂州へと変形し、移動を停止する。こうして河床は動的平衡状態に到達すると考えられる。

次に、河床に現れるこのような変動特徴を計測結果

に基づいて定量化した上でもう少し詳しく説明しよう。ただし、ここでは上記の平衡状態についてのみ議論し、そこに到る過程については省略する。まず、前出の図-3(b)に示した水路床変動量のコンター図を見ると、植生群落前面の水路中央側の角を起点として群落から斜めに離れる向きに「洗掘域」が生じること、その下流側に「砂州域」が形成していることがわかる。図中のグレーの領域は水路床が 1 cm 以上の浸食を受けた部分を、斜線をつけた領域は 1 cm 以上の堆積があった部分を、それぞれ表しており、これが「洗掘域」および「砂州域」に対応すると考えればわかりやすい。一方、このことを水路中心軸上の水位と水路床高さの縦断方向変化という観点から見ると、図-5のようになる。図中に平衡水路床高と示された結果が前出の図-3(b)に対応している。図よりわかるように、前出の洗掘域と砂州域とが、植生群落と同期しながら周期的に出現していることがわかる。

最後に、図-3(b)のような河床形状が生じる理由について、簡単に推論を試みておくことにする。ここでは、対応する固定床実験である Run F2 の測定結果から、流速ベクトルの大きさの自乗値 V_b^2 のコンター図を描き、これが底面せん断力分布と概ね対応していると仮定して考えていくことにする。まず、図-6を見ると、滞筋に沿って V_b^2 が相対的に大きな値をとるばかりでなく、これに沿って極値をとるように変動していることがわかる。さらに、この結果を図-3(b)と比較してみると、最大洗掘深が生じるのはこの値が極大値をとる位置のやや下流側にあたることもわかる。平坦河床におけるせん断力が仮に図-6のような分布をとるものとすれば、この極大値をとる位置の上流側で洗掘が、下流側で堆積が生じることは容易に理解される。また、洗掘が進めば流れが洗掘域に集中し、その結果としてこの洗掘域がさらに下流側に移動していくことも予想される。このことは、河床変動過程に関す

る前述の観察結果とも一致しており、図-3(b)に現れているような位置に洗掘・堆積が生じる理由の本質的なところはこれで捉えられているのではないかと考えている。

以上、植生群落の影響によって生み出された特徴的な河床形状について説明した。しかし、これはあくまでも Run M2～M4 において共通して見られた結果であって、植生群落長が短い Run M1 の場合や、群落が重なり合うように配置された Run M5 の場合には、蛇行流れの波長が短くなり、結果として植生群落一対半あるいは一対に対して1組の洗掘域と砂州域とが形成されるとの結果も得られている。これについては紙面の関係から別の機会に詳しく報告するが、Run M1 あるいは M5 のような植生の配置の場合には、流れは群落の設置間隔に応じて周期的に変動できるものの、河床の変動はそれに十分追従できないこともありうることを示唆するものである。このように植生群落の配置の仕方によっては、流れ場の空間的周期とその下に形成される河床上の凹凸のそれとが一致しないことも起こり得る。また、本研究で設定した水理条件は河床に砂漣・砂堆あるいは砂州が自ずと形成される条件ではないが、もしこのような条件が満足される場合には、いわゆる共鳴現象にも似た現象が起こり、さらに規模の大きな凹凸が河床上に現れるのではないかと予想される。このように、植生群落の配置方法によっては今後さらに検討していかなければならない数多くの問題が残されている。

5. 結論

本研究は、植生群落を低水路河岸に左右交互に残した場合あるいは杭群などを新たに設置した場合に生じる流れ場の特性と、それに伴い生じる河床の変動について、限られた条件の下ではあるが検討したものである。これにより、植生の存在によって、滞筋が蛇行する流れが生成されること、これに伴い洗掘域と砂州域とからなる特徴的な河床が形成されること、などが明らかにされた。最後に、多自然型川づくりという面から取ってこの結果の意義を探てみると、植生群落あるいは杭群を適切に配置することができれば浅瀬や淵などが存在する多様な空間を、移動床河川が本来持ち

合わせている自律調整機能を生かして創造していくことの可能性が示唆されたと見ることができよう。今後は、ここで検討したような流れに対する河床の応答を土砂水理学的に理解することを目指して、更なる検討を続けていく予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、早稲田大学理工学部学生の星野 誠君(現、(株)アイ・エヌ・エー)、猿橋崇央君(現、東京大学大学院)、北川直哉君および柳谷恭史君の協力を得た。また、早稲田大学流体実験室の職員諸氏には様々な支援を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告, 第180号, pp. 129～192, 1990.
- 2) 辻本哲郎, 北村忠紀: 植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程, 水工学論文集, 第40巻, pp. 1003～1008, 1996.
- 3) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集, No. 447, pp. 35～44, 1992.
- 4) 清水義彦, 小葉竹重機, 茂木宏一, 小松みわ子: 植生が繁茂した砂州周辺の土砂輸送に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp. 837～844, 1997.
- 5) 池田裕一, 鈴木倫久, 須賀堯三, 河村克志: 砂州周縁部に繁茂する植生が高水時の流れに与える効果に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第40巻, pp. 725～730, 1996.
- 6) 建設省土木研究所河川研究室: 洪水流を受けたときの多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料第3489号, pp. 445～503, 1997.
- 7) 関根正人, 原田彩子, 福田順一: 河道側岸部に繁茂する植生群落による微細土砂の堆積について, 土木学会第52回年次学術講演会, pp. 684～685, 1997.
- 8) 関根正人, 浦塚健史, 星野誠: 側岸部に交互に繁茂する植生群落が河道内の流れに及ぼす影響について, 土木学会第53回年次学術講演会, pp. 588～589, 1998.
- 9) 関根正人, 浦塚健史: 側岸部に交互に繁茂する植生群落が流れおよび河道に与える影響について, 土木学会第54回年次学術講演会, pp. 232～233, 1999.

(1999.9.30 受付)