

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

Fundamental Study on Flow Fields with Meandering

Vegetated Zones on Alternate Sandbars

池田裕一*・鈴木倫久**・須賀堯三***・河森克至****

By Hirokazu IKEDA and Norihisa SUZUKI and Kyozo SUGA and Katsusi KAWAMORI

Laboratory experiments were performed to study the effects of meandering vegetation zone along alternate sandbars. It is shown that the flow structure consists of horizontal free shear layer along vegetated zone and secondary currents in meandering flow. Momentum transfer due to turbulence and that due to secondary currents were compared, which indicates importance of the latter.

KEYWORDS: sandbar, vegetation, free shear layer,
secondary current

1. はじめに

これまでの植生に関する流れ場の研究は数多く行われており、例えば水路床に植生が生えている時の穂波現象¹⁾や側岸部に植生を配置したときに発生する渦²⁾などが知られている。その他にもこのほぼ周期的に発生する渦の構造を位相平均を用いることで解明しようとした例もある³⁾。しかし、これらの場合では、断面形状や植生配置は流下方向に一定であり、これは河川の下流部に見られるパターンである。これに対して河川の中流部では河道内に砂州が形成され、その上に植生が繁茂する場合がよく見られる。このような場所では、流下に伴って断面形状が変化し、また植生の繁茂パターンも下流部とは異なるものと思われ、これまでの研究では見られない、流れのパターンが現れると考えられる。

著者らは河川中流部で経年的に現地調査を行っており、それによって得られた繁茂パターン⁴⁾のうち、特に著しく変化する砂州周縁部に帯状に生える植生が年を経るごとにその分布域を広げ、ヤナギなどの耐性の強いものが生え始めており、植生のある流れ場を考える場合、これを無視することはできない。そこで本研

* 正会員 工博 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (〒321 宇都宮市石井町2753)

** 学生会員 宇都宮大学大学院

*** 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科

**** 正会員 宇都宮大学技術官 工学部建設学科

究では、単列交互砂州の砂州周縁部に植生が繁茂しているときの流れについて室内実験を行い、若干の考察を加えることにする。

2. 砂州上の植生分布の特徴

著者らは多数の河川の中流部を視察することにより、特に砂州が形成されている地点の植生の基本的なパターンを以下の5つに分類した^{4) 5)}。

- ①砂州周縁部の水際に帯状に分布
 - ②水際から大群落を形成するもの
 - ③土手際から大群落を形成するもの
 - ④裸地に点在するもの
 - ⑤増水時の漂着物を元に生えるもの
- その後、この植生の分布パターンをさらに検討するために、砂州上の植生分布状況を具体的に調査した。

図1・2は那珂川水系荒川的那珂川合流点より上流約29kmの地点（栃木県喜連川町中坪地区）の植生分布図である。図1は1992年、図2はそれから1年後の植生分布の様子である。この地点では上に示した5つのパターンが顕著に現れている。特に、砂州周縁部に帯状に繁茂する植生が大きな変化を見せており、1992年にはアメリカセンダングサやオオイヌタデなどの一年草しか生えていなかったが、1年後、多年草であるツルヨシなどが生え、またヤナギなども生え始めている。今年（1995年）になって現地調査を行ったところ、このヤナギが成長し、分布幅を広げ、高さが3mを越すものさえる。

また、岡部ら⁶⁾による現地調査においても、砂州周縁部にヤナギ林が形成されているという報告があり、この砂州周縁部に帯状に生える水際植生が増水時の流れに影響を及ぼすことが予想される。

3. 実験装置および方法

以上、調査から得られた結果より、砂州周縁部に生える水際植生に着目し、単列交互砂州に繁茂しているときの流れについて室内実験を行うことにした。ただし、植生と河床地形の両方を考えると複雑になるので、今回は河床を平坦床にして、植生のみの効果に着目した。

従来の研究成果より、単列交互砂州の波長 λ は水路幅 B の4～17倍程度の値となることが知られており⁷⁾、また連続湾曲水路においては波長 $\lambda = 7 \sim 11 B$ 。（ B_0 ：みお部の幅）という結果が得られている⁸⁾。そこで今回の実験には、これらを考慮に入れて、長さ16m、水路幅50cmの水路に、透過係数38cm/sの模擬植生を写真1

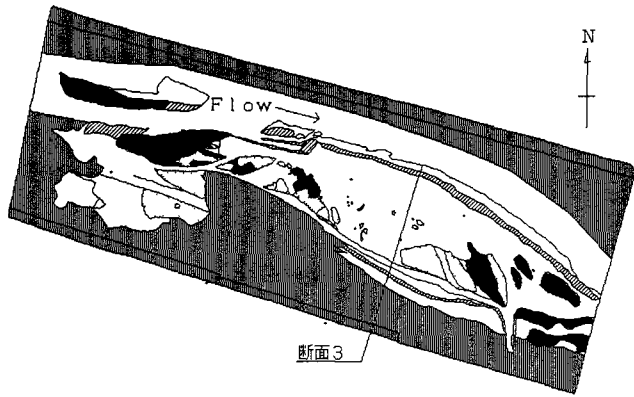


図-1 植生分布図（中坪地区 1992年）

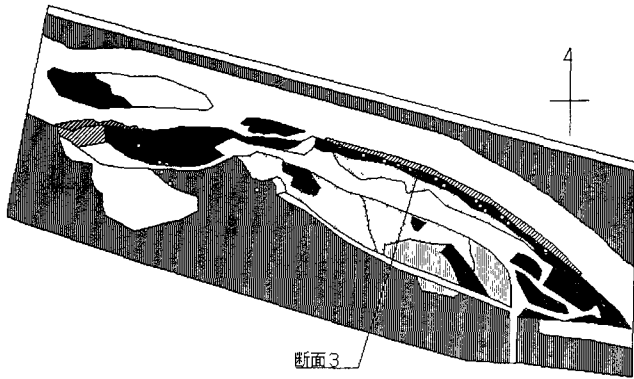


図-2 植生分布図（中坪地区 1993年）

- | | |
|---------------------|----------|
| □ セイタカアワダチソウ | ■ マツヨイグサ |
| ▨ アメリカセンダングサ・オオイヌタデ | ▨ ヒメジュオン |
| ■ ツルヨシ | ○ ヤナギ |
| ■ ススキ・ヨシ・ツルヨシ | |

のようにみお部の幅 B_o を21cmとし、植生幅10cm、波長2mとなるよう周期的に配置した。また利根川での観測例⁹⁾と今回の実験において、平均流速と透過係数のそれぞれを用いたフルード数がそれほど変わらないように、表1に示すとおり実験条件を決めた。流速測定には電磁流速計を用い、図3に示すように半波長を5断面に分け、各断面の主流速と断面流況を調べた。

表-1 実験条件

流量	平均水深	勾配	Fr	Re
8400cm ³ /s	8.3 cm	1/500	0.22	9700

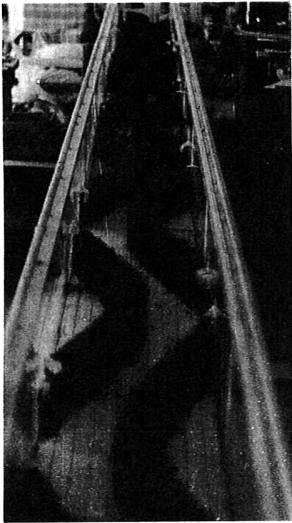


写真-1 植生配置の様子

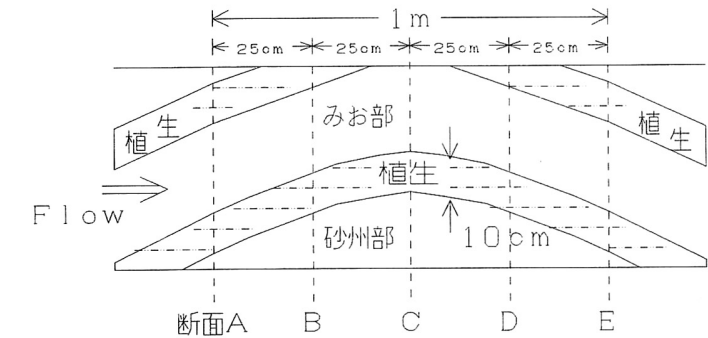


図-3 植生配置図

4. 平面流況

図4は水深平均した流速ベクトルを用いて、平面流況を示したものである。これを見ると、断面Aで右岸側の植生に接する部分で流速が最大となっている。従来の研究では、植生を流下方向に直線的に配置した場合には、図4の砂州部に見られるように、流れの遅い植生域から流れの速い非植生域の奥へと、緩やかな水平せん断層が形成されることが知られている。しかし、今回の場合は、

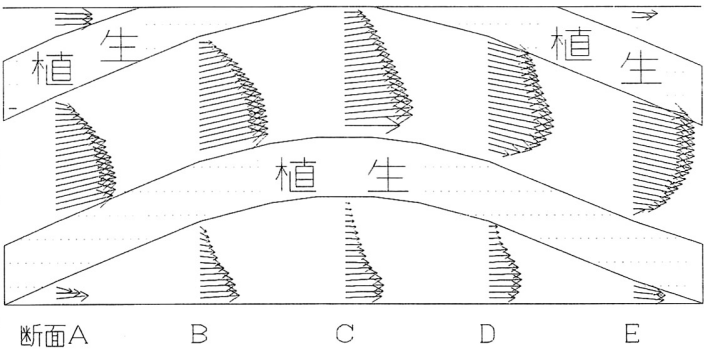


図-4 平面流況（水深平均流速）

断面Eの流速分布からもわかるように、断面Aのみお部では上流からの影響が残っており、水平せん断層が形成されるためには、植生が流下方向にある程度長い距離存在する必要があることがわかる。実際、断面C・D・Eと流下するにつれて、右岸側の植生付近が遅くなっており、水平せん断層が発達して、その厚みを増している。

写真2は断面Cの右岸側植生内からウオーターブルーを流したときの連続写真である。断面C・D付近から平面渦が発生し、渦の発生位置より左岸側に大きくせり出ている。その後大きく成長し、次の左岸側の植生に衝突し、消滅している。別の言い方をすると植生域と非植生域とのあいだにできた流速差によって水平せん断層ができ、渦の成長とともにこの水平せん断層の厚みが増しているとも言える。

図5は断面Dの右岸側植生の脇から2cmみお部側の位置（水平せん断層内）での水路方向流速 u と横断方向流速 v の時系列データをプロットしたものである。この図が示すように植生による低周波の乱れは大きいものであり、電磁流速計でも十分捉えることができることがわかった。また、 u の変動と v の変動はちょうど対応するかたちとなっており、変動周期は約2秒である。また、可視化を行ったところ渦の発生周期も約2秒程度であったことから、水平渦の発生周期とこの流速の変動周期は関係深いものであることがわかる。

この断面Dのみお部側の他に、断面Cの左岸側壁付近でも小さいながらも平面渦が発生しており、それを写真3に示す。これは上流に植生があるために、流速が低減されたよどみ部分とみお部を流れる主流速とで起こる流速差によるものであり、ここでも運動量交換が行われているものと思われる。

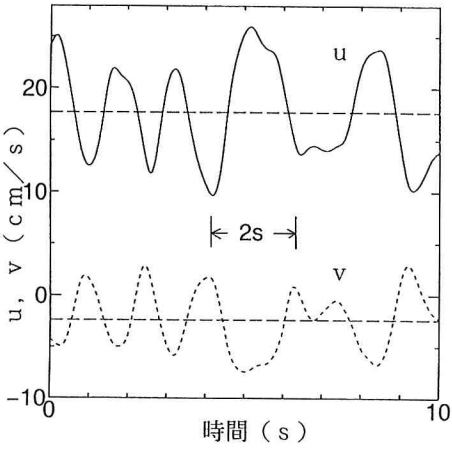


図-5 u 、 v の時系列データ

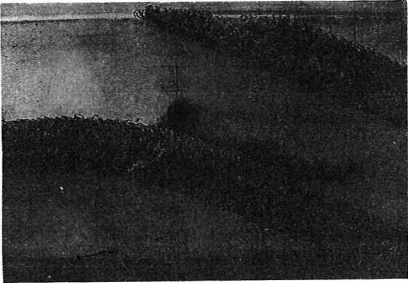


写真-2 (a) 平面渦の発生

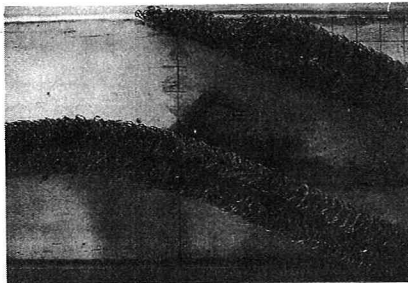


写真-2 (b) 平面渦の成長 (0.3秒後)



写真-3 側壁付近の平面渦

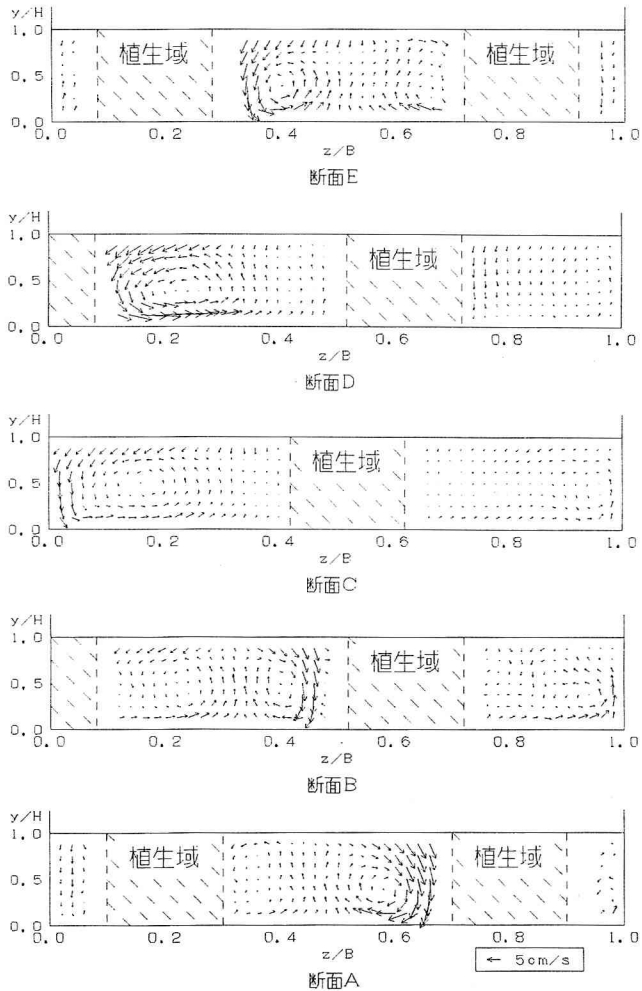


図-6 上流側から見た断面流況

5. 断面流況

図4を見るとさらに、先述の傾向とは逆に、左岸側の流速勾配は断面CからD・Eへと流下するにつれ、きつくなっているのがわかる。これは見方を変えると、流速分布のピーク位置が右岸側の植生の脇から、左岸側へ移動しているともいえる。こうした現象は連続湾曲水路における流れにおいても見られるものであり、砂州周縁部の植生によって主流速の方向が曲げられたために発生する2次流による影響を無視できないことを示している。

そこで、断面内の流況を調べると、図6のようになる。これは図4に示した水深方向に平均したベクトルからの偏差をとったものである。これを見ると連続湾曲水路でも見られるような2次流⁸⁾が形成されていることがわかる。断面Aでは上流からの影響で時計回りの2次流が存続し、右岸側植生の脇で強い下降流が生じている。そこから少し下流の断面Bにいくと、まだ時計回りの2次流が残っており、これに伴って反時計回りの2次流が形成されている。その後、流下するにつれてこれが発達し、断面Dで強い2次流を形成している。この反時計回りの2次流の水面付近の流れによって、大きな流下方向の運動量が右岸から左岸方向に輸送されるようになっており、これが主流速のピーク位置の移動に影響を及ぼしているものと思われる。

6. 乱れ・2次流による運動量輸送

上で述べてきた植生域と非植生域とで行われる運動量輸送と2次流による運動量輸送の効果がどの程度であるかを調べるために、まず流線方向 s とそれに垂直の方向 n に成分を分け、流線座標系に対する乱れ・2次流成分について比較することにする。

まず、流速を水深平均した流線方向成分 v_s とその垂直成分 v_n に分けて、それぞれの内訳を

$$v_s(x, y, z, t) = \bar{V}_s(x, y) + v_s'(x, y, z) + v_s''(x, y, z, t)$$

$$v_n(x, y, z, t) = \bar{V}_n(x, y) + v_n'(x, y, z) + v_n''(x, y, z, t)$$

のように考える¹⁰⁾。ただし、 $\bar{V}$ は時間平均流速を水深平均したもの、 v' は時間平均流速の水深平均流速 $\bar{V}$ からの偏差(2次流成分)、 v'' は時間平均からの偏差(乱れ成分)を示している。 n 方向についても同様である。ただし、水深平均流速 $\bar{V}_n$ はその定義から自ずとゼロになる。

こうすると、水深平均した流速場で、運動量輸送によって生ずる流線方向のせん断応力は、

$$\langle \bar{v}_s \bar{v}_n \rangle = \langle \bar{v}_s' \bar{v}_n' \rangle + \langle \bar{v}_s'' \bar{v}_n'' \rangle$$

のように表わされる。ただし、 $\bar{}$ は時間平均、 $\langle \rangle$ は水深平均を表す。式中、右辺第1項は2次流による運動量輸送を示し、第2項は乱れによる運動量輸送(レイノルズ応力)を示す。このように運動量輸送によって生じるせん断応力は2つに分けられるので、この2項のせん断応力の大きさを見積り、比較してみることにする。

図7はレイノルズ応力をコンターで表したものであり、特に断面Dの右岸側植生のみお部で大きな値を示している。この場所はちょうど、水平せん断層が発達し、平面渦が発生している

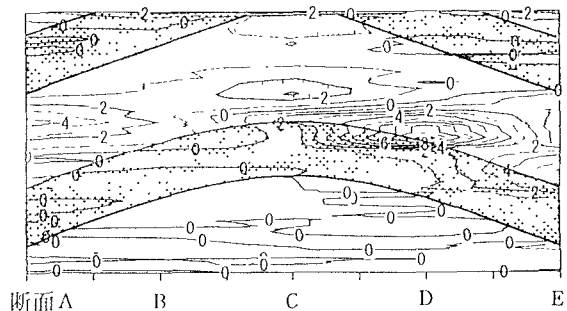


図-7 乱れによる運動量輸送(レイノルズ応力) (cm/s)²

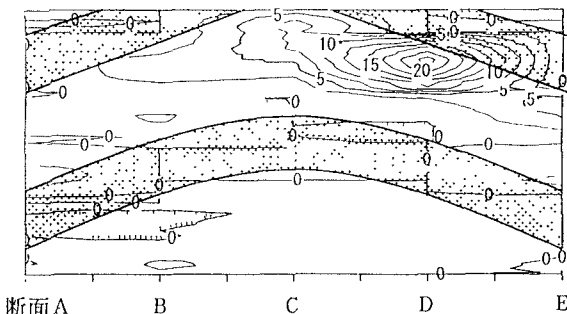


図-8 2次流による運動量輸送 (cm/s)²

ところである。また、断面Cの左岸側でも小さいながらもレイノルズ応力の値がでている。これは写真2のところで説明したとおりであり、この場所でも運動量輸送が行われていることがわかる。

図8は今度は、2次流による運動量輸送の強さをせん断応力で表したものであり、これを見ると断面Bの左岸側植生の付近から2次流が発生し、下流にいくにつれて発達し、断面Dの左岸側植生の脇で最も2次流の成分が強くなっている。連続湾曲水路においても、曲線の頂点を越えた後に2次流成分が大きくなるのがわかっており、この連続湾曲水路における流れとこの2次流成分は同様な構造となっていると思われる。

こうして見ると、植生境界に生じる渦の作用ばかりでなく、流れが蛇行することによって生じる2次流の作用によっても運動量輸送が行われていることがわかる。図7・8を見てもわかるとおり、この2つの応力のピーク位置は異なっているものの、断面Dにおいて、両方とも左岸側方向に主流を移動させる働きをしている。そこでの応力の大きさを比べてみると、乱れ成分の最大値は $8(\text{cm/s})^2$ であったのに対し、2次流成分の最大値は $20(\text{cm/s})^2$ であり乱れ成分に比べ2倍以上大きく、2次流成分の方が卓越していることがわかる。

7. 結論

以上、砂州周縁部に繁茂する植生が周期的に生えているときの流れの基本特性を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 植生が蛇行していても非植生域と植生域との流速差によって起こる水平面内乱流混合が存在する。
また、水平せん断層が発達し、平面渦が発生するためには流下方向にある程度植生が存在しなければならない。
- (2) 植生が蛇行しているために、それによって連続湾曲水路のような流れが生じ、2次流が発生することがわかった。
- (3) 乱れ（平面渦）による運動量輸送と2次流による運動量輸送の効果について調べたところ、これらの応力のピーク位置は同じ断面ではあるが異なる位置にあり、この2つの応力の値は同オーダーであった。また、この2つは同方向に主流を移動させる働きをしていることがわかった。

今回の実験では、(1)で述べた水平面内の乱流混合ばかりでなく、みお部の蛇行によって生じる2次流という2つの効果が流れに対して多大な影響を及ぼしているということがわかった。こうした現象は従来の植生を直線的に配置したときの研究成果では見られなかったものである。今後、植生の繁茂パターンや地形を考慮に入れた具体的な検討が必要といえる。

謝辞 本研究は（財）河川環境管理財団の河川美化・緑化研究助成（研究代表 須賀堯三）を受けて行われたものである。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 中川・辻本・清水：水工学論文集、第34巻、pp.475-480、1990.
- 2) 池田・太田・長谷川：土木学会論文集、No.443/II-18、pp.47-54、1992.
- 3) 石川・高橋・細井：水工学論文集、第37巻、pp.837-840、1993.
- 4) 池田・鈴木・河森・須賀：第49回年次学術講演会、2-A、pp.214-215、1994.
- 5) 池田・鈴木・河森・須賀：環境システム研究、Vol.22、pp.83-94、1994.
- 6) 林・岡部・板東・鎌田：第50回年次学術講演会、2-A、pp.224-225、1995.
- 7) 池田：第27回水理講演会論文集、pp.689-695、1983.
- 8) 玉井・池内・山崎：土木学会論文集、No.331、pp.83-94、1983.
- 9) 福岡・渡辺・上阪・津森：土木学会論文集、No.509/II-30、pp.79-88、1995.
- 10) 石川・鈴木・田中：土木学会論文集、No.375/II-6、pp.181-189、1986.