

給水・給砂の非定常性と植生の繁茂を考慮した 砂州及び流路の形成水理条件

FORMATIVE CONDITION OF BARS AND STREAMS WITH VEGETATION
GROWTH UNDER UNSTEADY WATER AND SEDIMENT SUPPLY CONDITION

竹林 洋史¹・江頭 進治²・岡部 健士³・寺岡 充夫⁴

Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA, Takeshi OKABE and Mitsuo TERAOKA

¹正会員 博士（工学） 徳島大学助教授 工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1）

³フェロー会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）

⁴学生会員 学士（工学） 徳島大学工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）

Braided streams and alternate bars under unsteady water and sediment supply conditions were reproduced via flume tests and numerical analysis, and the effects of the unsteady characteristics of water and sediment supply on the geometric characteristics of streams and bars are discussed. The results show that sediment deposits in smaller channels at higher locations during floods and bed at riffles is eroded during low flows. These phenomena force water to flow into larger streams. As a result, the bed elevation in streams decreases. Furthermore, the presence of vegetation enhances sediment deposition at higher locations and contributes to a decrease in the number of streams. These results also indicate that the unsteady condition of water and sediment supply and vegetation growth in rivers are absolutely essential for formation of single thread meandering channels.

Key words: *alternate bar, braided stream, unsteady hydraulic condition, vegetation, flume test*

1. はじめに

中規模河床形態の形成水理条件に関する研究は、線形場を対象とした河床面不安定解析をはじめ^{1), 2), 3)}、現地データに基づいた次元解析など⁴⁾幅広い手法により多くの研究がなされている。これらの研究成果により、中規模河床形態の形成水理条件に対して幅・水深比が重要なパラメータとなることが見出されており、幅・水深比が小さい方から大きい方に向かって、平坦、交互砂州、複列（多列）砂州と変化する。これらの研究成果は、河床形態の発生水理条件や河道内に陸域が発生しない条件における適用性は明らかであるが、完全発達した動的平衡状態の地形や河道内に陸域が形成される条件等への適用性については不明な点が多い。さらに、実河川では給水と給砂の条件は非定常であり、植生も繁茂するため、実河川へ適用する上でも不明な点が多い。

河床面の不安定解析による領域区分図は、交互砂州=蛇行流路、複列砂州・多列砂州=網状流路の仮

定のもと、交互砂州発生領域を蛇行流路形成領域とよく同一視される。これは、初期河床形状として交互砂州、初期河道形状として浸食性河岸を有する直線河道を想定した場合、交互砂州上の交交流れによって、側岸が交互に浸食されて緩蛇行流路が形成されることが見出されているためと考えられる^{5), 6)}。しかし、中規模河床形態の領域区分図のもととなっている河床面不安定解析は、固定側岸を有する直線河道を扱っており、蛇行流路や網状流路の解析を行っているわけではない。さらに、給水と給砂の条件は定常で河床全体は流水で覆われている状態を対象としているため、解析区間内に陸域が形成されるような流路が形成される条件は扱っていない。

一方、実河川や水路実験のデータに基づいた領域区分図では、幅・水深比が比較的小さい領域での網状流路は、交互砂州との判別が難しいため⁷⁾、これらを同一視している可能性は否定できない。

このような背景のもと、本研究では、非粘着性材料により河床が構成される場を対象として、水路実

表1 水路実験および数値解析に用いた水理条件

		流量 (l/s)	川幅 (m)	植生	水深 (mm)	川幅/水深	無次元掃流力
Case 1	実験・数値解析	2.50	1.5	無し	63	239	0.039
Case 2	実験・数値解析	1.25, 3.75	1.5	無し	41, 80	363, 188	0.026, 0.050
Case 3	数値解析	2.50	1.5	有り	63	239	0.039
Case 4	数値解析	1.25, 3.75	1.5	有り	41, 80	363, 188	0.026, 0.050
Case 5	数値解析	1.25, 3.75	1.0	有り	53, 102	190, 98	0.033, 0.064
Case 6	数値解析	2.50	0.55	有り	115	48	0.072
Case 7	数値解析	1.33	0.8	有り	63	128	0.039
Case 8	数値解析	0.43	0.26	有り	63	42	0.039
Case 9	数値解析	1.25, 3.75	0.55	無し	76, 146	73, 38	0.047, 0.091
Case 10	数値解析	1.25, 3.75	0.55	有り	76, 146	73, 38	0.047, 0.091

験及び平面二次元河床変動解析の結果に基づいて、給水・給砂の非定常性と植生の繁茂が河床・流路形態の決定機構に与える影響を示すとともに、従来の中規模河床形態の形成領域区分図上に蛇行流路の形成水理条件を示す場合は、幅・水深比が比較的大きい条件となることを示す。

なお、著者らは、これまで主として定常的な給水・給砂の条件において植生繁茂が砂州の動態に与える影響を数値解析によって検討してきた⁸⁾。本研究では、実河川への適用を想定し、非定常的な給水・給砂の条件において植生の繁茂が砂州の動態に与える影響を検討するとともに、非定常場における網状流路の形成実験を行い、その動態把握に努める。

2. 実験方法と数値解析法

(1) 実験方法

実験に用いた水路は、長さ 7.5 m の直線矩形水路である。河床勾配は 1/100、河床および給砂材料は平均粒径 1mm のほぼ均一な粒径の砂である。実験と数値解析に用いた水理条件を表 1 に示す。さらに、これらの条件を黒木・岸の中規模河床形態の形成領域区分図¹⁾上に図 1 として示す。実験を行ったのは、Case 1 と Case 2 であり、給水・給砂の非定常性が網状流路形状に与える影響を検討したものである。これらの二つの条件の違いは、給水・給砂の方法のみである。Case 2 の非定常条件では、給水流量を 1.25l/s と 3.75l/s をそれぞれ 30 分ずつ交互に変化させている。給水周期は、1 周期で河床・流路形態が完全に変化してしまわない程度に短い。そのため、河床形態はそれぞれの流量に対応した河床形態とは大きく異なるため、比較に用いた定常場の条件には、平均流量が同一となる条件を用いた。給砂は、上流端の初期河床位が低下しないように与える。図 1 によると、Case 1 の水理条件、Case 2 の大流量と小流量の水理条件全てが複列砂州の形成水理条件にある。ここで、小流量時の掃流力は限界掃流力以下であるが、河床形態が形成されて流れが集中すると土砂は移動する。

初期河床形状は、河床表面を敷きならして平坦と

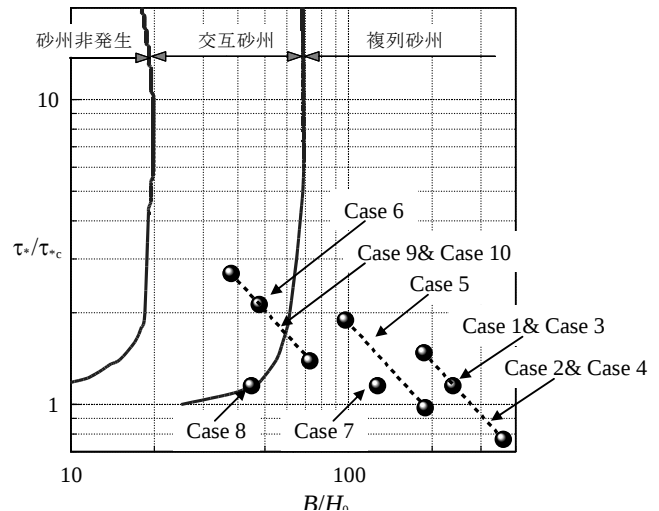


図1 黒木・岸の中規模河床形態の形成領域区分図¹⁾上における本研究の実験及び数値解析条件（縦軸は、限界無次元掃流力を 0.034 として基準化している）

している。通水中は、流況を把握するため、1 時間ごとに水路上方および水路下流端から写真撮影を行い、河床形態に変化が見られなくなった 6 時間後の河床形状を測定した。

(2) 数値解析法

解析に用いた基礎方程式は、既存の研究⁸⁾と同様である。流れの計算には、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測し、予測式中の二次流の強度に関する係数値は Engelund⁹⁾と同様の 7.0 を用いている。河床材料は一樣砂として扱い、流砂量は 芦田・道上式¹⁰⁾により算出し、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する¹¹⁾。局所的な河床勾配は、安息角よりも小さくなるように補正している¹²⁾。本解析では植生を考慮している。植生の侵入・成長・消滅および植生間の相互作用等に関する条件は、植生種や気象条件等により大きく異なり非常に複雑なため、数学モデルとしては十分に確立されていない。そこで、本研究では清水・辻本の研究¹³⁾を参考に、植生の流体抵抗の特性を考慮するとともに、植生の密生度の値を変化させ、植生の侵入・成長・消滅過程を考慮する。

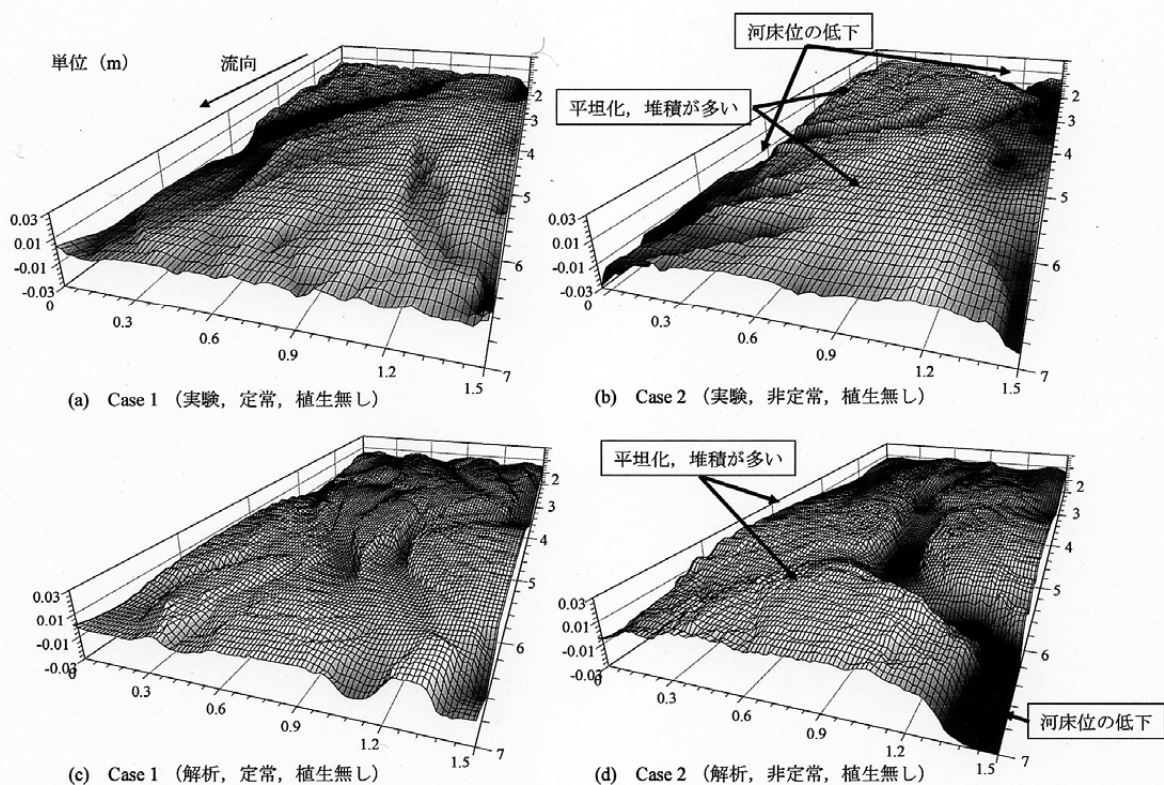


図2 河床形状 (Case 1 と Case 2 の水路実験及び数値解析)

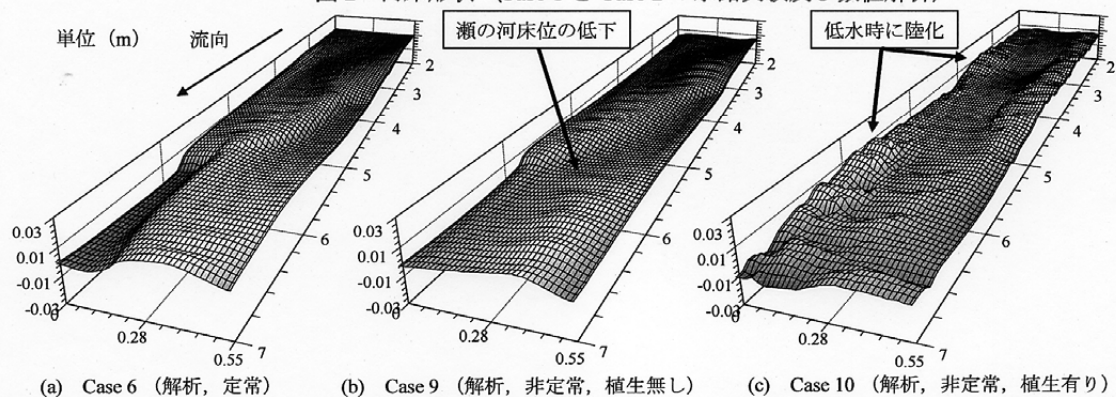


図3 河床形状 (Case 6, Case 9 と Case 10)

植生の密生度は、計算点が陸域となると、60 分で 0.05 となるように 0 から線形的に増加を始め、0.05 に達した後は、植生が消滅しない限り、0.05 の一定値とした。植生の消滅については、河床低下による消滅を想定し、植生侵入時よりも河床位が下がる と植生が送流すると見なして密生度を 0 とする。植生域内の流砂量は有効掃流力を用いて算出する。使用した植生モデルは木本類を対象としたものであるが、水路実験スケールを対象とした解析であるため、植生モデルに用いられた各値は植生の影響が明確となる値を選定しており、ある特定の植生を想定したものではない。実河川へ適用する場合は、それぞれの河川に繁茂している植生に対応した値を使用の方が望ましい。つまり、本植生モデルは、植生抵抗による流れの減速、減速に伴う土砂の堆積、陸域への植生の侵入、河床低下による植生の流送などの特徴的な現象の再現は可能であるが、現象を詳細

に再現する段階には至っていない。河道内に流路が形成されると、計算領域に表面流の無い浮州が形成される。本解析では、表面流と浸透流の両方を計算し、浮州域の土中の流れの解析も行う⁸⁾。

解析に用いた水理条件も表1と図1に示されている。河床勾配は 1/100、河床材料は粒径 1mm の一様砂として扱う。Case 1 と Case 2 は、実験と同一の条件である。Case 3 と Case 4 は、それぞれ、Case 1 と Case 2 と同一の水理条件であるが、植生の繁茂を考慮している。Case 5 は、非定常場を対象とした Case 4 と同一の給水条件であるが、幅を変化させたものである。Case 6 は Case 3 と同一の給水条件であるが、幅を変化させたものであり、複列砂州の形成水理条件に近い交互砂州の形成水理条件である。Case 7 と Case 8 は、定常場を対象とした Case 3 と同一の単位幅給水条件で、幅を変化させたものである。Case 9 と Case 10 は、Case 6 を非定常条件にし

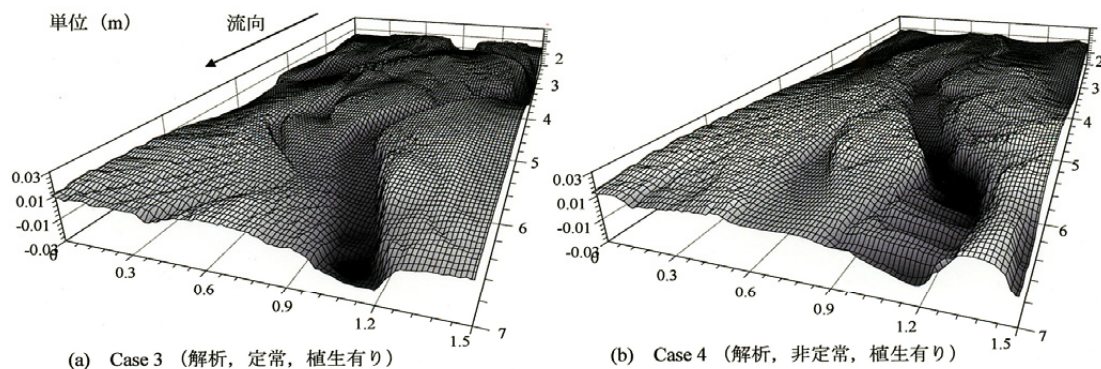


図4 河床形状 (Case 3 と Case 4)

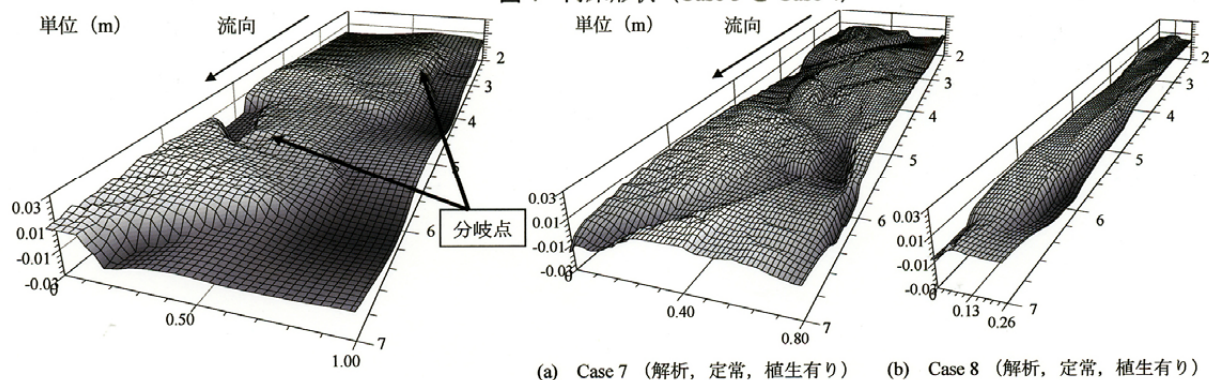


図5 河床形状 (Case 5)

図7 河床形状 (Case 7 と Case 8)

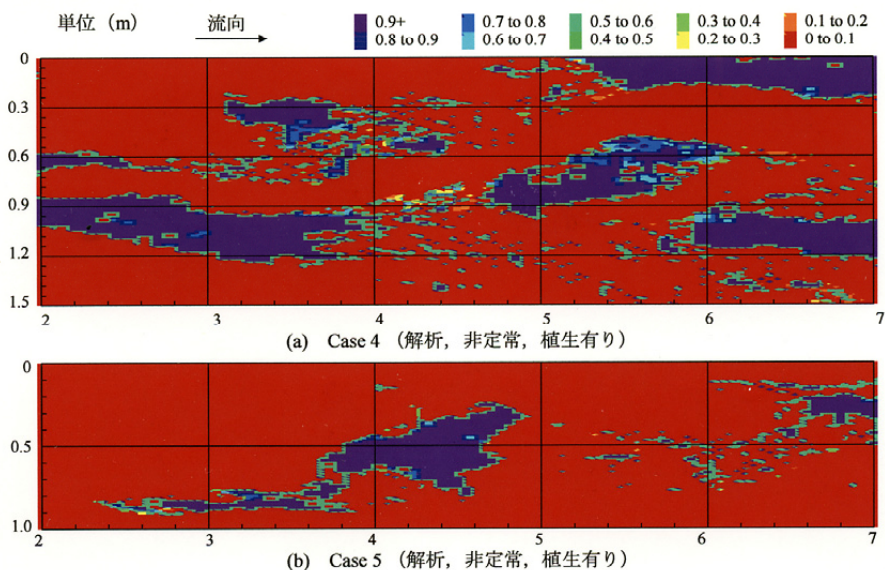


図6 植生成長度 (Case 4 と Case 5, 0 で植生無し, 1 で植生の完全成長)

たものであり、大流量時は交互砂州の形成水理条件、少流量時は複列砂州の形成水理条件である。ただし、Case 9 では、植生の繁茂を考慮していない。

3. 給水・給砂の非定常性が河床・流路形態に与える影響

図2に複列砂州（流路⁷⁾）の形成水理条件で植生の影響を無視した定常給水・給砂条件（Case 1）と非定常給水・給砂条件（Case 2）の水路実験及び数値解析により得られた河床形状を示す。水路実験と数値解析で同一の河床形状が再現されているわ

けではないが、水路実験及び数値解析ともに、定常給水・給砂条件に比べて非定常給水・給砂条件では、平水時に陸域となる領域の河床位が高くなるとともに平坦化する傾向は再現されている。さらに、定常条件に比べて非定常条件では、流路内の河床位が低くなっていることが分かる。これらは、大流量時に河床位の高い位置に土砂が輸送・堆積して小スケールの流路を埋没させるとともに、小流量時に最深河床位を有する大スケールの流路に流れが集中して流路がさらに発達することによるものである。流路本数については、数値解析では、河床形状からも定常条件よりも非定常条件の方が流路本数が少

ないことが明確であるが、実験では、河床形状からは明確ではない。これについては、非定常条件で得られた河床を固定化し、定常給水を行って判断する必要がある。

図 3 に交互砂州の形成水理条件で植生の影響を無視した定常給水・給砂条件 (Case 6) と非定常給水・給砂条件 (Case 9) と植生の影響を考慮した非定常給水・給砂条件 (Case 10) の数値解析により得られた河床形状を示す。Case 10 については、4. で議論する。Case 6 では、植生の繁茂を考慮しても、陸域が形成されないため植生は成長しない。これらを比較すると、定常給水・給砂条件に比べて非定常給水・給砂条件では、既存の研究¹⁴⁾同様、砂州の波長が長くなっていることがわかる。また、非定常条件では、平水時に瀬から淵へかけての水面勾配が急となるため、瀬が浸食され、瀬の河床位が低くなっていることがわかる。

4. 植生の繁茂が河床・流路形態に与える影響

図 4 に複列砂州 (流路⁷⁾) の形成水理条件で植生の影響を考慮した定常給水・給砂条件 (Case 3) と非定常給水・給砂条件 (Case 4) の数値解析により得られた河床形状を示す。同一条件で植生の繁茂を考慮していない Case 1 及び Case 2 とそれぞれ比較すると、定常条件、非定常条件ともに、植生を考慮することにより、河床位の高い領域への土砂の堆積が促進されるとともに、流路内河床位が低くなっていることがわかる。さらに、流路本数が減少しており、非定常条件である Case 4 においては、分岐流路は残っているものの、ほぼ 1 本の蛇行流路が形成されていることがわかる。つまり、固定側岸を有する場では、植生の繁茂及び給水・給砂の非定常性を考慮することにより、蛇行流路の形成領域が幅・水深比の大きい条件に現れることがわかる。ここで注意すべき点は、幅の定義である。交互砂州の形成水理条件では、定常給水・給砂の条件では陸域が形成されないため、流路幅=対象としている解析領域の幅である。一方、複列砂州の形成水理条件では、定常給水・給砂の条件でも陸域が形成されるため、流路幅は、対象としている解析領域の幅と一致せず、網流幅もしくは氾濫原幅が対象としている解析領域の幅となっている。既存の河床面不安定解析では、解析区間内における陸域の扱いが困難であったため、陸域や氾濫原を有する場合は別手法によって取り扱われていた。そのため、陸化する砂州に対する知見が不足するとともに、既存の研究⁹⁾による知見のため、交互砂州の形成水理条件=蛇行流路の形成水理条件という概念が定着したものと考えられる。

図 5 に Case 4 と同様に、複列砂州 (流路⁷⁾) の形成水理条件で植生の影響を考慮した非定常給

水・給砂条件であるが、川幅・水深比の小さい Case 5 の数値解析により得られた河床形状を示す。図 4 の Case 4 と比べると、Case 5 の方が幅・水深比が小さいにもかかわらず、主流路が分岐しており、主流路スケールの流路の本数が Case 4 よりも多いことがわかる。これは、河床面不安定解析から得られる既存の知見とは反対となっており、植生の影響を受けた結果である。図 6 に Case 4 と Case 5 より得られた植生成長度の平面分布を示す。植生の成長度は、0 で植生無し、1 で植生の完全成長としている。図 6 より、幅・水深比の小さい Case 5 では Case 4 に比べ、河道全体の面積に対して植生が繁茂する面積が狭くなっていることがわかる。これは、幅を狭めることにより、流水による砂州上の攪乱が増え、植生の繁茂が抑制された結果である。植生の繁茂が抑制されるため、流路が変動しやすくなり、流路の分岐も促進されたと考えられる。

図 7 に Case 3 と無次元掃流力が同一で、植生の影響を考慮した定常給水・給砂条件であるが、川幅・水深比が小さい Case 7 と Case 8 の数値解析結果により得られた河床形状を示す。Case 3 と Case 7 を比較すると、Case 3 では幅・水深比が大きいにも関わらず、主流路の本数は 1~2 本であり、Case 7 とほぼ同数であることがわかる。これは、Case 4 と Case 5 での議論と同様であり、幅・水深比が大きくなっても植生の繁茂により流路の分岐が抑制される可能性が大きくなるため、流路本数があまり増えないことを示す。さらに、Case 8 を見ると、側岸から側岸へ交互に流れるほぼ 1 本の流路が形成されている。つまり、流路が形成される条件では、河床面の不安定性と植生の抵抗特性のバランスにより、流路本数が決定されている。植生の抵抗特性が小さい時は、幅・水深比が大きくなるにつれて流路本数が増加して複雑な網状流路が形成されるが、植生の抵抗特性が大きい時は、幅・水深比のある値において流路本数が最大となり、幅・水深比の大きい領域では蛇行流路となると考えられる。

図 3 に交互砂州の形成水理条件で植生の影響を考慮した非定常給水・給砂条件 (Case 10) の数値解析により得られた河床形状を示す。左右の側岸に沿って交互に堆積が形成されているが、給水・給砂の非定常性と植生の繁茂を考慮することにより、一般によく知られる交互砂州とは全く異なる形状特性を有する地形が形成されていることがわかる。これは、給水・給砂の非定常性により、瀬が浸食されるとともに、平水時に河床位の高い領域に植生が繁茂し、植生が繁茂した領域のみで土砂が補足されて河床位が上がるとともに、河床位の低い領域に流れが集中して河床低下が発生した結果である。植生による河床位の低い領域への流れの集中は、砂州上の

河床位が水位より低い状態においても砂州上が陸化した状態と同様の流れ場を形成する。そのため、複列砂州の形成水理条件に近い交互砂州の形成水理条件では、実河川の現象は幅・水深比の大きい方へシフトすると考えられる。

なお、植生の機能の内、流砂量を減らす機能は、氾濫原における材料が粘性を有すれば同一の機能が期待できるため、粘性土があれば植生が繁茂しなくても蛇行流路が形成されることが期待できる¹⁵⁾。

5. 結論

本研究では、非粘着性材料により河床が構成される場を対象として、水路実験及び平面二次元河床変動解析の結果に基づいて、給水・給砂の非定常性と植生の繁茂が河床・流路形態の決定機構に与える影響を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 水路実験及び数値解析ともに、複列砂州（流路⁷⁾）の形成水理条件では、定常条件に比べて非定常条件では、平水時に陸域となる領域の河床位が高くなるとともに平坦化する。さらに、定常条件に比べて非定常条件では、流路内の河床位が低くなる。これらは、大流量時に河床位の高い位置に土砂が輸送・堆積して小スケールの流路を埋没させるとともに、少流量時に河床位の低い大スケールの流路に流れが集中して流路がさらに発達することによるものである。
- (2) 交互砂州の形成水理条件では、定常条件に比べて非定常条件では、砂州の波長が長くなる。また、非定常条件では、低水時に瀬から淵へかけての水面勾配が急となり、瀬が浸食されて瀬の河床位が低くなる。
- (3) 定常条件、非定常条件ともに、植生の繁茂を考慮することにより、河床位の高い領域への土砂の堆積が促進されるとともに、流路内河床位が低くなる。さらに、流路本数が減少し、幅・水深比が大きい非定常条件では、ほぼ1本の蛇行流路が形成された。これは、固定側岸を有する場では、植生の繁茂及び給水・給砂の非定常性を考慮することにより、蛇行流路の形成領域が幅・水深比の大きい条件に現れることを示す。
- (4) 幅・水深比が大きくなっても植生の繁茂により流路の分岐が抑制される機会が増えるため、流路本数はあまり増えない。これは、流路の形成水理条件では、河床面の不安定性と植生抵抗のバランスにより流路本数が決定されており、植生抵抗が小さい時は幅・水深比が大きくなるにつれて流路本数が増加して複雑な網状流路が形成されるが、植生抵抗が大きい時は幅・水深比のある値において流路本数が最大となり、幅・水深比の大きい領

域では蛇行流路となることを示唆している。

- (5) 時間平均された水理条件が交互砂州の形成水理条件であっても、低水時の植生の繁茂により、一般によく知られる交互砂州とは全く異なる形状特性を有する地形が形成される。これは、複列砂州の形成水理条件に近い交互砂州の形成水理条件では、実河川の現象は幅・水深比の大きい方へシフトしていると考えられる。

謝辞：本研究の水路実験において、徳島大学大学院工学研究科(当時)の菅井氏にご助力頂いた。また、本研究は、平成17年度科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者：清水康行)、同若手研究(B)(研究代表者：竹林洋史)の助成を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文集, 第342号, pp. 87-96, 1984.
- 2) Parker, G.: On the cause and characteristic of meandering and braiding in rivers, J. Fluids Mech., vol.76, part3, pp.457-480, 1976.
- 3) Fredsøe, J.: Meandering and braiding of rivers, J. Fluids Mech., vol.84, part4, pp.609-624, 1978.
- 4) 村本嘉雄, 藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, pp.275-282, 1978.
- 5) 藤田裕一郎, 村本嘉雄：蛇行流路の形成過程に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第18号B, pp.551-564, 1975.
- 6) 木下良作：石狩川河道変遷調査, 本文および参考編, 科学技術庁資源局資料, 第36号, 1961.
- 7) 竹林洋史, 江頭進治：自己形成流路の形成過程と形成水理条件, 土木学会論文集, Vol. 677 No.II-55, pp. 75-86, 2001.
- 8) 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動態, 水工学論文集, 第47巻, pp. 631-636, 2003.
- 9) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- 10) 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, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 11) 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, 第35巻, pp.383-390, 1991.
- 12) 永瀬恭一, 道上正規, 檜谷治：狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.887-892, 1996.
- 13) 清水義彦, 辻本哲郎：植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析, 水工学論文集, 第39巻, pp.513-518, 1995.
- 14) 桑村貴志, 渡邊康玄：幅広水路における非定常流下での砂州形成実験, 水工学論文集, 第47巻, pp.625-630, 2003.
- 15) 芦田和男, 澤井健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(3)―一流路の3次元形状―, 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, 1977.

(2005. 9. 30 受付)