

網状流路の時空間的な変動特性

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION CHARACTERISTICS OF BRAIDED STREAMS

竹林 洋史¹・江頭 進治²・岡部 健士³
Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA and Takeshi OKABE

¹正会員 博士(工学) 徳島大学助手 工学部建設工学科(〒770-8502 徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科(〒770-8502 徳島市南常三島町 2-1)

Temporal and spatial variation characteristics of braided streams between straight confining walls are studied by means of flume experiments and numerical simulations. Results are summarized as follows. (1) The number of streams produced in a straight channel depends on the width-depth ratio; the number of streams increases with the width-depth ratio. (2) The geometry of streams shows self-similar characteristics which suggests the possibility that the streams promote restoration of natural riverine ecosystem. (3) Small-scale bed geometry significantly affects the formation of large-scale bed geometry. In addition, stabilization mechanism of bars is discussed focusing on unsteadiness of flow and growth of vegetation. The results suggest that decrease of maximum water discharge promotes bar stabilization.

Key words: braided streams, width-depth ratio, self-similar characteristics, unsteady flow, bar stabilization

1. はじめに

河川環境に対する関心の高まりとともに、河道の治水機能を保持し、さらに多様な生態系を保存・創生するような河川整備が必要となっている。生態系の多様性を保存・創生するには、動植物の生息空間の多様性も保存・創生することが重要である。これは、多様な種が生息することを促すとともに、一つの種の生息環境も生活ステージによって異なるためである。

ところで、河道内に複数の流路を有する網状流路は、瀬と淵や浮洲など多様な物理環境を形成する。また、流路間の流れの相互作用により、河道内の物理環境が時空間的に変動すると考えられ、多様な水辺空間を創生することが期待される。しかし、近年、日本の多くの川では、砂州の固定化および陸地化が発生するとともに流路の本数が減少している。図1は、1948年と1990年に撮影された木津川の航空写真である。図のように、木津川はかつて網状流路であったが、近年では、砂州の固定化および陸地化が発生しており、流路本数が1本になっていることがわかる。砂州の固定化および陸地化は、河道の物理

環境が単調化していることを示す。つまり、砂州の陸地化により、河道内で最も動植物の生産量が多い陸水の遷移域が減少しているとともに、水辺の動植物生息空間が陸上の動植物生息空間に変化している。また、流路の幅/水深が減少しているため、瀬と淵が不明瞭となるとともに、流路内の砂州の形成も抑制されている。このような現象のメカニズムを明らかにするには、網状流路の諸特性に関する知見

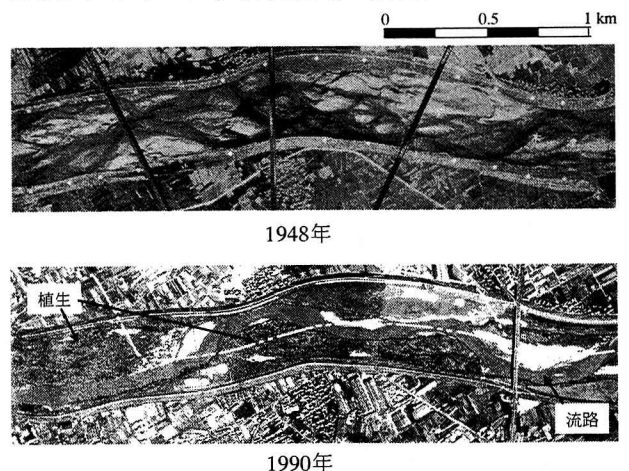


図1 木津川の河相の変化(淀川との合流点から2~5km)

を得る必要がある。

網状流路の形成機構は、複列砂州との関連で議論されることが多い。これは、洪水時に形成された複列砂州上に、少流量が流れている状態を網状流路と考えているためである^{2), 3)}。しかし、平坦初期河床上に定常的に給砂と給水を行っても浮州が現れ、網状化した流路が形成される条件が存在する^{4), 5), 6)}。これらの水理条件は、複列砂州の形成水理条件であり、河床に最初に現れる河床形態も多列を含む複列砂州であるが、砂州の横断方向のモードが時間的に減少し、ついには浮州が形成される。つまり、複列砂州の形成領域には、浮州が現れ、網状化した流路を形成する水理条件が存在するようである⁷⁾。

網状流路の形成機構に関する研究は、現象の複雑さのため現地調査⁸⁾や実験的検討が主である。このような状況の中で、数値シミュレーションにより流路を再現しようとする試みもなされている^{9), 10), 11)}。里深・高橋⁹⁾は流路形成の素過程に着目した簡易なモデルによって、流路網パターンの複雑性を再現しており、流砂量予測等において有効と考えられる。Murray and Paola¹⁰⁾はセルラーオートマタにより、流路網パターンを再現している。しかし、これらの予測モデルは、流路形成の個々の素過程を実験式および確率的な方法により取り扱っており、これらの力学的な裏付けが必要と思われる。これに対して、道上・藤田・日下部¹¹⁾は、流れおよび流砂の支配方程式を直接数値計算することにより、流路網の再現を試みている。道上・藤田・日下部¹¹⁾による計算では、流路は再現されているが、流路の変動過程が再現されていないため、流路網の時空間的な変動特性を議論するに至っていない。

このような観点に基づき、本論文では、まず、川幅/水深をパラメータとして、網状流路の流路本数について数値解析により検討する。次に、網状流路によって形成される場の多様性について浮州の自己相似性に着目して検討を行う。さらに、洪水ピーク流量の減少および植生繁茂が砂州の固定化に与える影響について数値解析により検討を行う。

2. 実験方法と解析方法

(1) 実験方法

実験に用いた水路は、長さ 15 m の直線矩形水路である。河床および給砂材料は、粒径がほぼ均一な一様砂である。実験に用いた水理条件を、表 1 に示

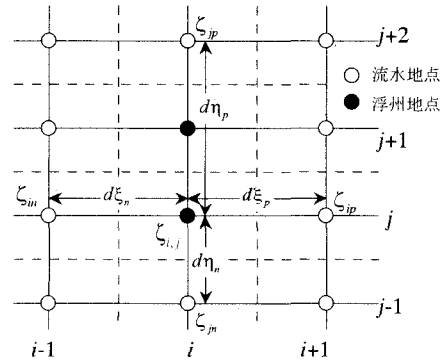


図 2 浮州地点の水位計算に用いる各変数

す。Case 1～Case 4 のうち、水路実験を行ったのは Case 2 と Case 3 である。これらの条件は、無次元掃流力を 0.041 に維持し、川幅/水深を大きく変化させている。村本・藤田¹²⁾の砂州の形成領域区分図によると、Case 2 と Case 3 の水理条件は、複列砂州の形成水理条件にある。

実験では、まず、10 cm 厚さで砂を敷き詰め、河床表面を敷きならして平坦河床としている。給水は、表 1 に示した流量を一定に与え、給砂は、上流域の河床位を初期河床位に保つように行っている。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っている。

(2) 数値解析法

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、係数値は Engelund¹³⁾と同様の 7.0 を用いている。流砂量は 芦田・道上式¹⁴⁾により算出し、芦田・江頭・劉¹⁵⁾と同様に、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ている。局所的な河床勾配は、永瀬・道上・檜谷¹⁶⁾の研究を参考に、安息角よりも小さくなるように補正している。流路が形成されると、計算領域に流水の無い浮州が形成される。本解析では、水深が河床材料の平均粒径以下となったとき、浮州が発生したと判定し、流水の計算は行わない。ただし、水位については、図 2 に示すように、縦横断の 4 方向それぞれにおいて最も近い流水地点を検索し、これらの水位から線形内挿して仮想水位を求め、仮想水位が河床位と河床材料の平均粒径の和よりも高くなったときに、浮州の消滅と判定している。

$$\zeta_{i,j} = \frac{\zeta_{ip}/d\xi_p + \zeta_{in}/d\xi_n + \zeta_{im}/d\xi_m + \zeta_{ijn}/d\xi_n}{1/d\xi_p + 1/d\xi_n + 1/d\xi_m + 1/d\xi_n} \tag{1}$$

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)	河床勾配	砂の平均粒径 (mm)	水深 (mm)	川幅/水深	無次元掃流力
Case 1	数値解析	0.38	0.2	1/100	1.095	65	31	0.041
Case 2	実験・数値解析	0.76	0.4	1/100	1.095	65	62	0.041
Case 3	実験・数値解析	1.90	1.0	1/100	1.095	65	155	0.041
Case 4	数値解析	3.80	2.0	1/100	1.095	65	310	0.041

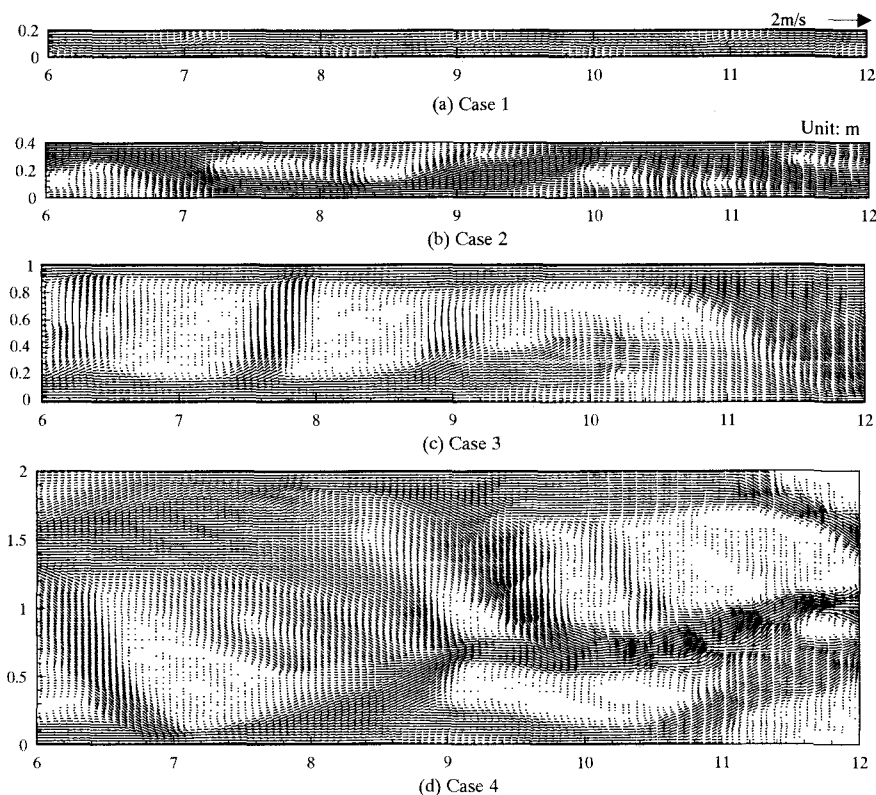
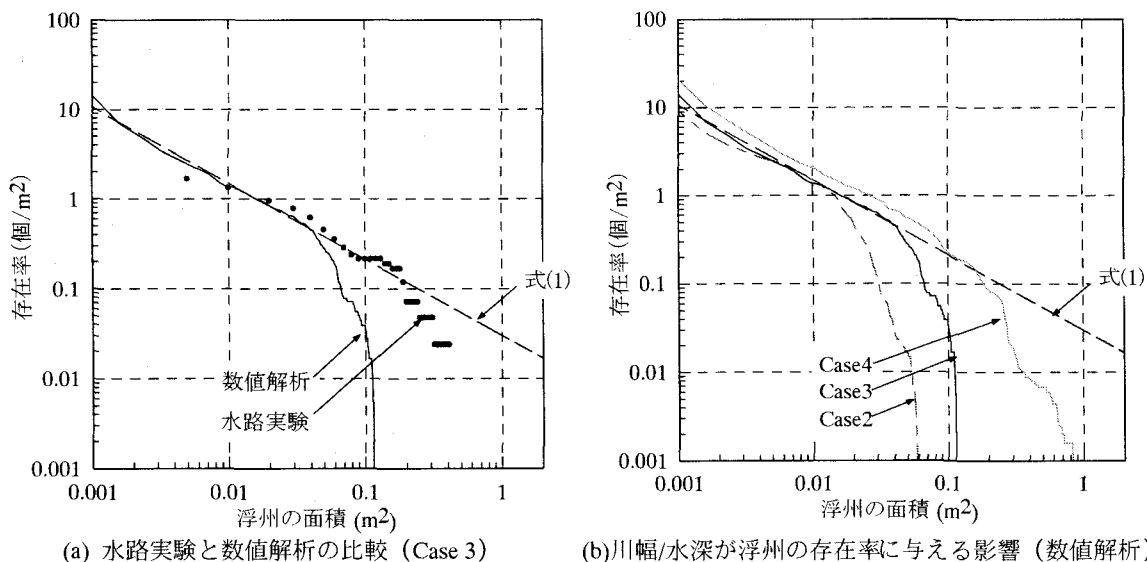


図3 水深平均流速ベクトル (10hr., Case 1~Case 4, 数値解析, ベクトル表示の無い領域が浮州)



(a) 水路実験と数値解析の比較 (Case 3)

(b) 川幅/水深が浮州の存在率に与える影響 (数値解析)

図4 浮州の面積とその面積以上の大きさを持つ浮州の存在率との関係

ここに、 ζ は水位であり、それぞれの添え字は、図2に示すように、格子上的における変数の位置を示す。

計算領域は、水路実験と同様に、固定側岸を有した直線矩形断面水路を想定したものである。初期河床形状は平坦床に粒径の $1/10$ スケールの振幅を有する微小擾乱を計算区間全体に与えたものである。擾乱の振幅を粒径の $1/100$ スケールにしたものや直方体型の擾乱を計算区間全体にランダムに配置したものなど、他の初期河床擾乱を用いた計算も行っているが、形成される最終河床形態および平均的な流路本数には影響はなかった。上流境界からの給水は、表1に示す流量を一定に与える。上流境界にお

ける流砂量は、境界における水理量をもとに、芦田・道上式により算出されたものを与えている。

計算条件を表1に示す。村本・藤田¹²⁾の砂州の形成領域区分図によると、Case 1の水理条件は、交互砂州の形成水理条件にあり、Case 2~Case 4の水理条件は、複列砂州の形成水理条件にある。

3. 流路本数と川幅/水深との関係

図3はCase 1~4における計算開始から10時間後の水深平均流速ベクトルの平面分布を示す。ここに、ベクトル表示の無い領域が浮州となっている領域

である．Case 2～Case 4 は浮州が発生し，流路が形成されたが，Case 1 のみ浮州は発生せず，交互砂州が形成された．計算区間内の流路本数は，川幅が広がるにつれ，増えているのがわかる．つまり，Case 2 (川幅/水深=62)では，流路本数はわずかに1～2本であるが，Case 4 (川幅/水深=310)では，複数の流路が形成されている．さらに，川幅が増えるにつれ，非常に多くのスケールを有した流路が形成されている．これは，分岐した流路がさらに分岐して流路を形成しているためであり，形成された網状流路は，自己相似性を有していることが期待される．網状流路が自己相似性を有しているということは，それが広範囲のスケールを持っていることを意味しており，流路を有する場合は，多様な水辺空間が形成されていると考えられる．ここでは，比較的取り扱いやすい浮州の面積とその存在率に着目して，網状流路の自己相似性の検討を行う．図4は，浮州の面積と浮州の存在率との関係を示したものである．ここで，浮州の存在率とは，当該面積以上の面積を有する浮州の単位面積あたりの数である．図4(a)は，Case 3における水路実験および数値解析の結果を示したものである．図中には，以下のベキ乗則も併記されている．

$$P(A) = \frac{C}{A^\alpha} \tag{2}$$

ここに， A は浮州の面積， $P(A)$ は面積 A より大きい浮州の存在率， α は限界指数， C は定数である．図によると，数値解析の結果は $A < 0.05 \text{ m}^2$ で水路実験結果とよく一致していることがわかる． $A > 0.05 \text{ m}^2$ における両結果の違いは，実験において浮州の確認作業時に細い流れを見逃し，浮州を実際よりも大きく計測したためと考えられる．この点についてはさらなる検討が必要である．しかし，水路実験と数値解析ともに，面積の増大とともに浮州の存在率が減少しており，式(2)に従っている領域が存在することがわかる．図4(b)は，川幅の違いが浮州の存在率に与える影響を示したものである．図に示すとおり，すべての条件で式(2)に従う領域が存在することがわかる．また，面積の広い浮州は，川幅の影響を受けてその発生が抑制されていると考えられるため，各条件の浮州の最大面積は，川幅が広がるにつれ大きくなっていることがわかる．これらの結果は，網状流路が自己相似性を有しており，河道内の物理環境が多様であることを示している．そのため，河道内の動植物の多様性を保存・創生する上でこれらの知見は非常に有用であると考えられる．

4. 網状流路の時間的な変動特性

図5は数値解析によって得られた Case 2 の水深平均流速ベクトルの時間変化である．図には，左岸か

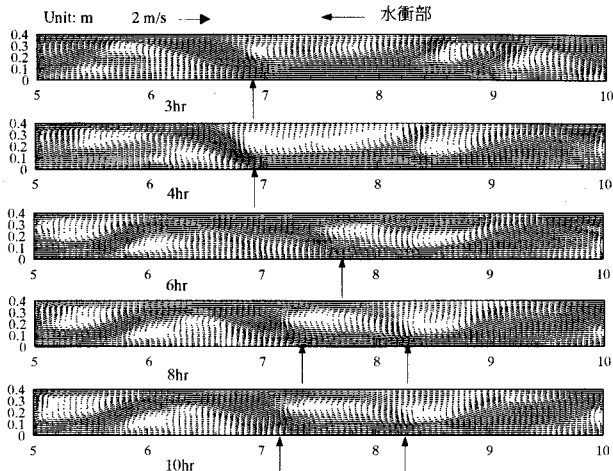


図5 水深平均流速ベクトルの時間変化 (Case 2, 数値解析)

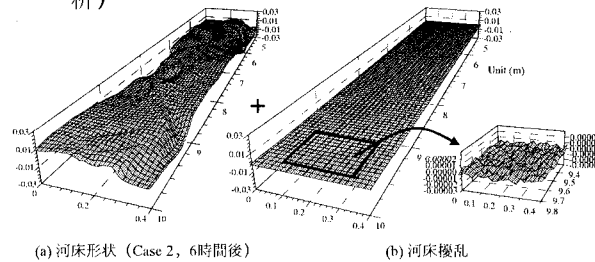


図6 Case 5 の初期 (6 時間後) 河床形状作成方法

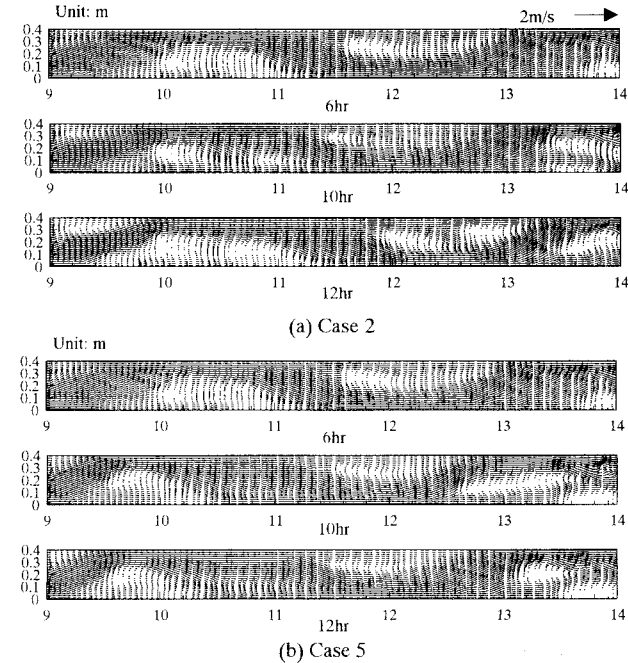


図7 微小な初期河床形状の違いがその後の河床形状に与える影響

ら右岸への流れの水衝部の位置を矢印で示している．これによると，水衝部の移動は間欠的であり，下流だけでなく上流にも移動していることがわかる．また，流路は時間とともに分岐・合流するため，流路長も時間的に変動している．一方，流れの変化が河床形状の変化に比べ非常に速やかな条件で，浮州を有しない一様砂河床の交互砂州では，波高，波長および伝播速度が時間的に変動しない状態が存在し，水衝部も連続的に伝播する．つまり，浮州を

有するか否かで時間的な変動特性は大きく異なる。浮州を有する場では、河床形状の変動過程がケイオティックであると考えられ、非周期な河床形状となり、様々なスケールの現象が発生する。一方、交互砂州では卓越したスケールが存在し、浮州を有する場に比べ単調な場となる。

一方、時間的な変動過程がケイオティックであるということは、現在の河床形状のわずかな違いが将来の河床形状に大きな違いをもたらすため、河床形状の将来予測を正確に行うことが非常に困難であることが予想される。この点について、Case 5としてさらに1ケースの数値解析を行い検討する。Case 5では、Case 2の計算開始から6時間の河床形状に図6に示すような河床材料の平均粒径の1/100スケールの振幅を有する擾乱を与え、その後の河床形状の時間変化を計算したものである。図7は、Case 2とCase 5の流速ベクトルの時間的な変化を比較したものである。図に示すように、10時間後および12時間後の浮州および流路形状は両者で異なり、わずかな河床形状の違いが将来の河床形状を大きく変化させることがわかる。これらの結果は、浮州を有するような場では、正確な河床形状の予測が非常に困難であることを示す。しかし、図4(b)からも予想されるように、現象が自己相似性を有しているとはいえ、局所洗掘深や局所流速のような物理量の最大スケールは制限されているため、物理量の変動範囲の予測は可能であり、これらの情報を得ることが、河道計画を立てる上で重要と考えられる。

5. 洪水ピーク流量の減少および砂州上の植生繁茂が流路の時空間的な変動特性に与える影響

砂州の固定化および植生繁茂による砂州の陸地化に関しては、多くの現地調査が行われており¹⁷⁾、そのメカニズムとしては、1) 上流域からの土砂供給の減少によるみお筋内の河床低下、2) 洪水ピーク流量の減少による砂州上の土砂移動の減少、3) 水制や根固め工などの河川構造物の設置などが考えられる。これらのうち、2)のメカニズムの一部については、定性的な把握であれば本解析モデルによっても比較的容易に行えるため、2)について数値解析により検討を行う。

表2に計算条件を示す。これらの条件は、Case 2の条件をもとにして作成されたものである。Case 6とCase 2の違いは植生の有無のみである。Case 7は定常計算の流量である0.76 l/sを中心に流量を線形的に増減させたものである。Case 8はCase 7よりピーク流量を約2/3にし、洪水継続時間を1.5倍にしたものである。木津川の最近60年間の年最大時間平均流量をみると、高山ダムが建設された1969以

表2 数値解析に用いた水理条件		
	流量(l/s)	洪水継続時間(hr)
Case 6	0.76 (定常)	-
Case 7	0.06~1.46 (非定常)	1.0 (ピークまで0.25)
Case 8	0.06~1.00 (非定常)	1.5 (ピークまで0.375)

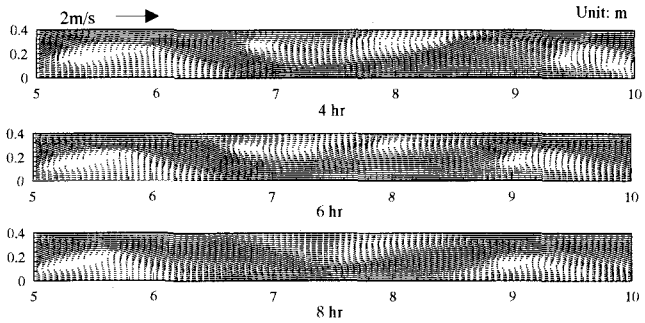
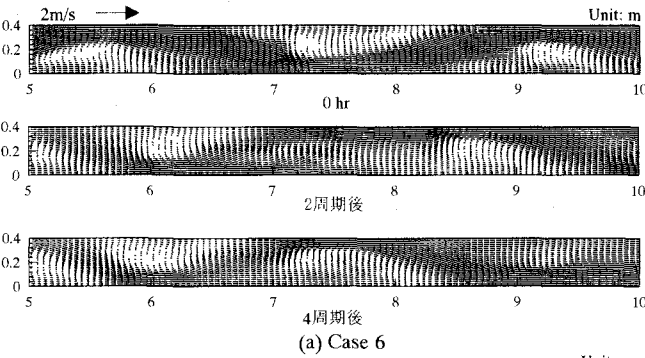
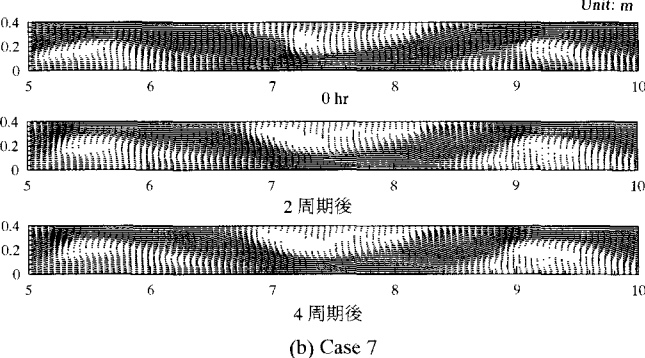


図8 Case 6 (植生有り, 定常流) による水深平均流速ベクトルの時間変化



(a) Case 6



(b) Case 7

図9 洪水ピーク流量の減少が砂州の固定化に与える影響降, 約2/3になっている⁷⁾。Case 7とCase 8の解析は、Case 6の計算15時間後を初期値とした。

植生の影響は、清水・辻本の研究¹⁸⁾を参考に流体抵抗としてのみ考慮されている。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \lambda C_D (u^2 + v^2) h \quad (3)$$

ここで、 ρ は水の密度、 C_D は効力係数で0.4、 u と v は流下および横断方向の水深平均流速、 h は水深である。 λ は植生の密生度であり、植生群落が線形的に成長すると仮定して以下のように与えた。

$$\lambda = 0.05 (t_d / T_f) \quad (4)$$

ここに、 t_d は計算地点が浮州となった累積時間であり、 T_f は植生群落が計算領域を完全に被う時間であ

り,ここでは Case 7 の洪水継続時間と等しい 1 時間としている。植生群落は浮州が形成されると成長を始め,無次元有効掃流力が 0.05 を越えるとフラッシュされるとした。また, λ の最大値は 0.05 とする。これらの値については,物理的な根拠はない。流砂量は有効掃流力を用いて算出した。

図 8 に Case 6 による水深平均流速ベクトルの時間変化を示す。Case 2 に比べ流路蛇行長に規則性ができてきているとともに,砂州の時間的な変動が抑制されていることがわかる。これは,植生内の土砂の移動が抑制されることにより,細い流路の発生や流れの分岐が抑制され,大きい掃流力を有する大スケールの流路に流れが集中したためと考えられる。

図 9 に非定常場を対象とした Case 7 と Case 8 の流速ベクトルの時間変化を示す。洪水ピーク流量の大きい Case 7 では,流路の平面位置が時間的に変動しているのがわかる。一方 Case 8 では,洪水ピーク流量が小さいため,砂州上に水が流れることが少なく,植生がよく繁茂するため砂州が固定化し,流路の平面位置が時間的に変動していないことがわかる。これらの結果は,砂州の固定化には,洪水ピーク流量の減少および植生の砂州への進入が非常に強く影響を与えていることを示す。

6. 結論

本論文では,まず,川幅/水深をパラメータとして,網状流路の流路本数について,数値解析により検討した。次に,網状流路によって形成される場の多様性について,浮州の自己相似性に着目して検討を行った。さらに,植生繁茂および洪水ピーク流量の減少が河床形状に与える影響について数値解析により検討を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 網状流路の流路本数は,川幅/水深が大きくなるにつれて増える。
- (2) 網状流路は自己相似性を有しており,多様な水辺空間を形成する。これは,河道内の動植物の多様性を保存・創生する上で有益な情報となると考えられる。
- (3) 網状流路の時間的な変動過程はケイオティックであり,浮州を有しない交互砂州とは変動過程が大きく異なる。
- (4) 洪水ピーク流量のカットおよび砂州への植生の進入は,砂州の固定化に非常に大きな役割果たしている。

謝辞: 本研究を進めるにあたり,実験及び資料解析において,立命館大学大学院の岩城氏(現:京都市)と立命館大学大学院の松葉氏にご助力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 須賀堯三: 河川における蛇行のモード変化, 第 37 回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-292, pp. 583-584, 1982.
- 2) Leopold, L.B. and Wolman, M.G.: River channel patterns - braided, meandering and straight, U.S.G.S. Prof. Paper 282-B, p. 85, 1957.
- 3) 木下良作: 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料第 36 号, p. 138, 1961 および参考編, p. 174, 1962.
- 4) 玉井信行, 長尾哲, 三国史雄: 直線水路における複列砂れき堆と網状流路の形成について, 第 22 回水理講演会論文集, pp.265-273, 1978.
- 5) 藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄: 網状流路の形成過程, 水工学論文集, 第 31 巻, pp.695-700, 1987.
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文: 網状流路における流砂量, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.391-396, 1991.
- 7) H. Takebayashi and S. Egashira: Formative Condition of Self-formed Stream in Straight Channels, Proceedings of 12th Congress of the APD-IAHR, pp.227-236, 2000.
- 8) 例えば, Thorne, C. R., Russell, A. P. G. and Alam, M. K.: Planform pattern and channel evolution of the Brahmaputra River, Bangladesh, Braided Rivers, The Geological Society, pp.257-276, 1993.
- 9) 里深好文, 高橋保: 網状流路のパターンおよび土砂輸送予測シミュレーション, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1111-1116, 1998.
- 10) Murray, A. B., and C. Paola: A cellular model of braided rivers, Nature, 371, pp.54-57, 1994.
- 11) 道上正規, 藤田正治, 日下部重幸: 水みちの発生・発達過程の実験とシミュレーション, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.613-618, 1995.
- 12) 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.
- 13) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 例えば, 清水義彦, 小葉竹重機, 岡田理志: ハリエンジュによる動的河道内樹林化について, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.1099-1104, 2001.
- 18) 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.

(2001. 10. 1 受付)